

國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝暨景觀學系

碩士論文

Department of Horticulture and Landscape Architecture

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

萎凋初期光源與相對溼度對茶菁之影響

Effect of Light Sources and Relative Humidity  
during Early Withering Stage on Tea Fresh Leaves

郭創元

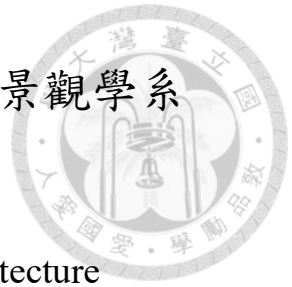
Chuang-Yuan Kuo

指導教授：陳右人 博士

Adivisor: Iou-Zen Chen, Ph. D

中華民國 111 年 1 月

January, 2022





## 致謝

這本碩士論文，無法代表我的碩士生涯，這裡的空間，也無法寫下兩年來遇到的事情。

首先感謝碩士期間曾給予我協助及建議的師長、親人、同學與朋友，更要感謝這段期間曾與我討論、爭辯、胡思亂想，甚或是胡言亂語的人。我一直覺得在學校，除了學習也要認真思考，就算在怎麼荒唐想法，就算是與事實不符的論述，就算是政治不正確的玩笑，都是不可輕忽的，因為每一個想法或動作都是值得思辨的。傾聽是最應該要好好學習的基本技能，能夠傾聽才能接收訊息，再來才是選擇，將訊息去蕪存菁。

這段期間的每一次機遇都不是偶然，每一次抉擇也都不是必然。常常回想每一回的選擇，我是否過於武斷，是否能不得罪別人，是否有機會做得更盡善盡美。事後的後悔和道歉，大概都是於事無補的，或許記取教訓才是比較有用的方法。

我很喜歡用「或許」一詞，因為世上的是非對錯可能只是一時的，沒人知道真理的盡頭在哪裡？在試圖追求學問的途中，太多的或許時常擾亂著我，科學問題到最後往往都變成了哲學的問題，沒有真正的解答，只有目前被較多人接受的解釋。

有時候，或許要散漫一些，才能從自由而無用的靈魂中，得到啟發；有時候，或許要堅持一點，才能從渾沌而無章的現實中，得到線索。這段期間一直在學習的東西是「包容的氣度」和「拒絕的勇氣」，但大概永遠都學不會。

總之，謝謝在這段時間幫助過我的大家，不管是在學業還是生活。

## 中文摘要

臺灣的部分發酵製作，通常在茶菁採摘後會先進行短暫的日光萎凋，此過程在茶業界與許多研究的結果，認為有助於部分發酵茶在香氣與滋味的表現，但在光質部分研究較少。本研究探討日光、紫外線與紅外線三種光源進行照射對茶菁的影響，並探究照光萎凋時相對溼度，是否會影響光源的效果。照光萎凋者再分為正常萎凋與高濕度萎凋，造成茶菁失水之差異。由於不同光源的照射，加上萎凋相對濕度不同，茶菁在處理結束時含水率已有差異，所以透過延長室內萎凋時間，在茶菁相近含水率時取樣比較。萎凋過程分為三階段，Stage 1 為萎凋初期，指照光萎凋結束；Stage 2 為萎凋中期，指將茶菁正常萎凋降至目標含水率；Stage 3 為萎凋結束，茶菁含水率降至殺菁前之目標含水率，最後製成毛茶樣品為 Stage 4。

萎凋初期以紫外光處理之茶菁，在 Stage 1 總多元酚類與兒茶素類含量較低，萎凋三階段 (Stage 1-3) 者總多元酚類與兒茶素類平均含量也較低。萎凋初期照光高濕度處理組，茶菁總游離胺基酸含量高於正常萎凋組。在三個階段比較萎凋初期的光源與相對溼度對茶菁內容物之差異，無一致的趨勢；而以萎凋階段為影響因子，較能看出茶菁內容物變動的趨勢。萎凋過程中茶菁總游離胺基酸、咖啡因與沒食子酸含量會隨萎凋延長而提升，總多元酚類與兒茶素類含量則是隨萎凋延長而下降。此外，當茶菁含水率降低，將導致茶菁細胞膜熱穩定性降低。萎凋初期光源與相對溼度處理，造成萎凋溫度不同，在 Stage 1 多元酚氧化酶活性與萎凋溫度間回歸關係佳  $Y = -0.339(X-35.612)^2 + 19.478$  ( $R^2 = 0.93, p < 0.001$ )，顯示在  $36.5^\circ\text{C}$ ，會有最高之多元酚氧化酶活性。

萎凋初期照光且高濕度萎凋之茶菁，在 Stage 3 與 Stage 4 揮發性化合物總相對豐度皆低於正常萎凋之處理；高濕度萎凋處理組茶菁之個別揮發性化合物相對豐度大多低於正常萎凋組者，而照光處理組茶菁之揮發性化合物相對豐度，大部分皆高於室內萎凋組，顯示不照光與照光時高濕度處理，均可能會降低茶菁揮發性物質之含量。

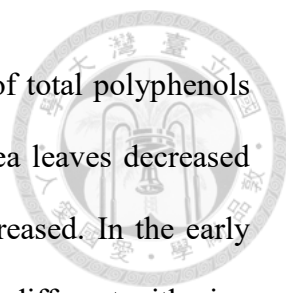
關鍵字：日光萎凋、茶菁內容物、揮發性有機化合物、多元酚氧化酶活性

## Abstract



The semi-fermented tea manufacturing process in Taiwan usually treat the tea leaves a short period of solar-withering after plucking. This step is believed to be helpful to the aroma and taste. This study explores the effect of three light sources including ultraviolet and infrared and solar radiation on tea leaves, and whether the relative humidity is an important factor during light-withering. Therefore, the experiment of light-withering is divided into normal withering and high-humidity withering. High-humidity withering provides the tea leaves a humid environment to reduce the water loss during light-withering. Due to the different light sources and relative humidity, the water contents of tea leaves at the end of the light-withering are different. By extending the indoor withering time, water content of tea leaves will decrease and it becomes possible to sample the tea leaves at similar water content level. The withering process is thus divided into three stages. Stage 1 (early withering): the end of light-withering, Stage 2 (middle withering): down to the target water content, and Stage 3 (end of withering): water content down to the target water content before panning, and the dry tea considered as Stage 4.

During the initial withering stage, tea leaves exposed to ultraviolet-A light in Stage 1 exhibited lower overall levels of polyphenols and catechins. Across all three withering stages (Stages 1-3), these compounds were consistently lower in the UVA-treated group. In the early withering stage, under high humidity conditions, the total free amino acid content in tea leaves was higher compared to the normal withering group. Comparing the differences in tea leaves content among the three stages with different light sources and relative humidity, no consistent trend emerged based on this two factors. However, considering the withering stage as a factor revealed clearer trends in tea leaves content changes. Throughout the withering process, the total free amino acid, caffeine, and gallic



acid contents increased with prolonged withering, while the levels of total polyphenols and catechins decreased. Additionally, as the moisture content of tea leaves decreased during withering, their cell membrane thermal stability (MTS) decreased. In the early withering stage, variations in light source and relative humidity led to different withering temperatures. The regression relationship between polyphenol oxidase activity (PPO) and withering temperature is good ( $Y = -0.339(X-35.612)^2 + 19.478$ ,  $R^2 = 0.93$ ,  $p < 0.001$ ) in Stage 1, indicating that the highest PPO activity occurs at around 36.5°C.

The total relative abundances of volatile compounds in Stage 3 and Stage 4 of the tea leaves with high-humidity treatment were lower than those with the normal withering treatment on the early stage of light-withering. In the high-humidity withering group, the relative abundance of individual volatile compounds was mostly lower than in the normal withering group, while the light-withering group exhibited higher relative abundance of volatile compounds compared to indoor-withering, suggesting that both non-light and light-withering group under high humidity conditions could potentially decrease the content of volatile compounds in tea leaves.

Key words : solar withering, tea content, membrane thermal stability, polyphenol oxidase activity, organic volatile compounds.

# 目錄



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 致謝.....                      | i   |
| 中文摘要.....                    | ii  |
| Abstract .....               | iii |
| 目錄.....                      | v   |
| 圖目錄.....                     | vii |
| 表目錄.....                     | 1   |
| 第一章、前言 .....                 | 4   |
| 第二章、文獻回顧.....                | 6   |
| 第一節、茶葉的化學組成 .....            | 6   |
| 一、茶葉的水溶性非揮發性化合物 .....        | 6   |
| 二、茶葉的揮發性化合物 .....            | 8   |
| 第二節、部分發酵茶製程與萎凋過程中茶菁的變化 ..... | 10  |
| 一、部分發酵茶的製程 .....             | 10  |
| 二、茶葉萎凋過程的化學變化 .....          | 12  |
| 第三章、材料與方法 .....              | 18  |
| 第一節、試驗材料與地點 .....            | 18  |
| 第二節、試驗設計 .....               | 18  |
| 一、試驗流程 .....                 | 18  |
| 二、試驗處理比較 .....               | 21  |
| 第三節、試驗分析方法 .....             | 22  |
| 一、樣品前處理與萃取 .....             | 22  |
| 二、茶湯內容物分析 .....              | 23  |
| 三、揮發性化合物分析 .....             | 24  |
| 四、細胞膜熱穩定性之測定 .....           | 25  |
| 五、多酚氧化酶活性測定 .....            | 25  |
| 六、統計分析 .....                 | 26  |
| 第四節、藥品與儀器 .....              | 26  |
| 一、總多元酚類測定 .....              | 26  |
| 二、總游離胺基酸含量測定 .....           | 26  |
| 三、兒茶素異構物、沒食子酸及咖啡因分析 .....    | 27  |
| 四、多酚氧化酶活性測定 .....            | 29  |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 五、揮發性化合物分析 .....                     | 29  |
| 第四章、結果與討論 .....                      | 31  |
| 第二節、萎凋初期光源與高濕度萎凋對茶菁內容物含量之影響 .....    | 31  |
| 一、總多元酚、兒茶素與沒食子酸 .....                | 31  |
| 二、總游離胺基酸 .....                       | 32  |
| 三、咖啡因 .....                          | 34  |
| 四、討論 .....                           | 35  |
| 第二節、萎凋初期光源、相對溼度與萎凋階段對茶菁之影響 .....     | 36  |
| 一、萎凋初期照光對茶菁內容物的影響 .....              | 36  |
| 二、萎凋階段對茶菁內容物的影響 .....                | 41  |
| 第三節、初期照光處理與萎凋茶菁含水率對茶菁細胞膜熱穩定性之影響 .... | 45  |
| 第四節、萎凋初期光源與相對溼度對茶菁多元酚氧化酶活性之影響 .....  | 48  |
| 第五節、萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶揮發性化合物之影響 ..... | 50  |
| 第五章、結論 .....                         | 57  |
| 圖 .....                              | 59  |
| 表 .....                              | 78  |
| 參考文獻 .....                           | 132 |
| 附錄 .....                             | 137 |

## 圖目錄



|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 圖 1. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (4/11 日試驗)..... | 59 |
| 圖 2. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (4/18 日試驗)..... | 60 |
| 圖 3. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (6/11 日試驗)..... | 61 |
| 圖 4. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (6/18 日試驗)..... | 62 |
| 圖 5. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (8/31 日試驗)..... | 63 |
| 圖 6. 初期萎凋照光對茶菁萎凋過程中細胞膜熱穩定性之影響 (7/29 日試驗)..... | 65 |
| 圖 7. 茶菁失重率與茶菁萎凋過程細胞膜熱穩定性之關係 (7/29 日試驗) .....  | 66 |
| 圖 8. 初期萎凋照光對茶菁萎凋過程中細胞膜熱穩定性之影響 (9/6 日試驗) 67    |    |
| 圖 9. 茶菁失重率與萎凋時間之曲線圖 (9/6 日試驗) .....           | 68 |
| 圖 10. 茶菁失重率與茶菁細胞膜熱穩定性之關係 (9/6 日試驗) .....      | 69 |
| 圖 11. 茶菁萎凋時間與茶菁細胞膜熱穩定性之關係 (9/6 日試驗).....      | 69 |
| 圖 12. 茶菁萎凋階段處理間茶菁細胞膜熱穩定性 (9/6 日試驗) .....      | 70 |
| 圖 13. 茶菁照光萎凋處理萎凋階段茶菁細胞膜熱穩定性 (9/6 日試驗) .....   | 70 |
| 圖 14. 茶菁含水率與多元酚氧化酶活性之關係 .....                 | 71 |
| 圖 15 初期照光萎凋溫度與多元酚氧化酶活性之關係 .....               | 71 |
| 圖 16. 茶菁與毛茶中檸檬烯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化 .72       |    |
| 圖 17. 茶菁與毛茶中順式-羅勒烯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變         |    |



|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 化 .....                                                  | 72  |
| 圖 18. 茶菁與毛茶中芳樟醇相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化                      | 73  |
| 圖 19. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 I 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下<br>之變化 .....      | 73  |
| 圖 20. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 II 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下<br>之變化 .....     | 74  |
| 圖 21. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 III 相對豐度在不同照光與相對溼度處理<br>下之變化 .....    | 74  |
| 圖 22. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 IV 相對豐度在不同照光與相對溼度處理<br>下之變化 .....     | 75  |
| 圖 23. 茶菁與毛茶中環檸檬醛相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化<br>.....            | 75  |
| 圖 24. 茶菁與毛茶中甲基庚烯酮相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變<br>化 .....          | 76  |
| 圖 25. 茶菁與毛茶中 $\beta$ -紫羅蘭酮相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變<br>化 ..... | 76  |
| 圖 26. 茶菁與毛茶中吲哚相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化 .....                 | 77  |
| 圖 27. 茶菁與毛茶中水楊酸甲酯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變<br>化 .....          | 77  |
| 附圖 1. 製茶試驗流程圖 .....                                      | 137 |

## 表目錄



|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 表 1. 試驗照光萎凋環境溫度 .....                            | 78 |
| 表 2. 萎凋初期照光萎凋茶菁失重比率 .....                        | 78 |
| 表 3. 萎凋階段茶菁含水率 .....                             | 79 |
| 表 4. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總多元酚含量之影響 .....              | 80 |
| 表 5. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總兒茶素含量之影響 .....              | 81 |
| 表 6. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁沒食子酸含量之影響 .....              | 82 |
| 表 7. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響<br>.....     | 83 |
| 表 8. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總兒茶素類含量之影<br>響 .....   | 84 |
| 表 9. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響<br>.....     | 85 |
| 表 10. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總多元酚含量              | 86 |
| 表 11. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總兒茶素含量              | 87 |
| 表 12. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點沒食子酸含量              | 88 |
| 表 13. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總游離胺基酸含量之影響 .....           | 89 |
| 表 14. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之<br>影響 ..... | 90 |
| 表 15. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總游離胺基酸含<br>量 .....  | 91 |
| 表 16. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁咖啡因含量之影響 .....              | 92 |
| 表 17. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響              | 93 |
| 表 18. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點咖啡因含量 .....         | 94 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 表 19. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響 .....          | 95  |
| 表 20. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響 .....   | 96  |
| 表 21. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總游離型兒茶素含量之影響 .....       | 97  |
| 表 22. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總游離兒茶素含量之影響 ..... | 98  |
| 表 23. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總酯型兒茶素含量之影響 .....        | 99  |
| 表 24. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總酯型兒茶素含量 .....    | 100 |
| 表 25. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總兒茶素含量之影響 .....          | 101 |
| 表 26. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總兒茶素含量之影響 .....   | 102 |
| 表 27. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響 .....          | 103 |
| 表 28. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響 .....   | 104 |
| 表 29. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之影響 .....        | 105 |
| 表 30. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之影響 ..... | 106 |
| 表 31. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響 .....           | 107 |
| 表 32. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響 .....    | 108 |
| 表 33. 初期萎凋照光處理與萎凋階段對茶菁多元分類氧化酶活性的影響 ...       | 109 |
| 表 34. 試驗茶菁與毛茶揮發性化合物表列 .....                  | 110 |
| 表 35. 日光萎凋與日光高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 .....  | 112 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 表 36. 紫外線萎凋與紫外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 ..... | 115 |
| 表 37. 紅外線萎凋與紅外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 ..... | 118 |
| 表 38. 室內萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 .....           | 121 |
| 表 39. 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶具香氣揮發性化合物相對豐度之影響 ..... | 124 |
| 表 40. 萎凋初期照光處理對茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度之影響 .....       | 128 |

## 第一章、前言



茶(*camellia sinensis*)為山茶科 (Theaceae)山茶屬 (*Camellia*)多年生常綠木本植物，是世界三大飲料作物之一 (吳, 1985)。透過不同的製茶工序，能將茶葉製作成不同風味的茶類。經濟栽培的茶樹多來自茶的兩個亞種，小葉種或稱中國種，及大葉種或稱阿薩姆種，前者原生地分布於華中至中南半島一帶，後者則位於印度姆阿薩姆省一帶。臺灣茶樹栽培品種以小葉種為主，行政院農委會農糧署資料顯示 2020 年臺灣茶樹種植面積為 12,266 公頃，主要茶區在南投縣，種植面積大約佔一半、嘉義縣次之 (農業統計年報, 2021)。

茶葉常見的分類方式有兩種，其一為中國式的分類方式，依據顏色與製程，將茶葉分為綠茶、黃茶、白茶、青茶、紅茶與黑茶六大茶類，國際上通用的茶葉分類法，則是依據多元酚類氧化程度即發酵度區分為，不發酵茶、部分發酵茶與全發酵茶 (吳, 1985)。，若將中國式的分類法對應於此，綠茶與黃茶為不發酵茶，白茶與青茶屬於部分發酵茶，紅茶則是全發酵茶的代表，黑茶利用微生物行後發酵，是另外一類。

臺灣目前主要產製的茶類為部分發酵茶，又以包種茶為大宗，可依據茶葉形態分為，條形包種茶與球形包種茶兩大類。部分發酵茶類在採摘茶菁後，習慣先進行日光萎凋，再進行室內萎凋與攪拌 (甘, 1987)。白茶與紅茶雖然也會進行萎凋，但傳統上沒有日光萎凋的步驟，也不會在萎凋時攪拌。部分發酵茶的眾多工序中，萎凋的過程對於茶葉風味影響甚大。日光萎凋是萎凋過程中最一開始的步驟，時間相對短暫的步驟，卻被認為是影響後續製程與茶葉品質的原因之一，許多試驗指出經日光萎凋工序之成茶，表現較僅進行室內萎凋的成茶出色。

日光輻射可大致分為可見光、紅外線與紫外線波段，日光萎凋時期，紅外線使茶菁產生的高溫，同時也會加速茶菁失水，造成缺水逆境，雖然紫外線在日光輻射中只占約 7%，一般無法使物體溫度提升，但紫外線也可能對茶菁產生逆境。短暫



日光萎凋可使茶菁快速失水，相同程度的失水茶菁室內萎凋則可能需要數小時，而日光萎凋造成茶菁失水是顯而易見的結果，但如果日光照射時降低茶菁失水，是否還會有相同的效果？若照光時處於高濕度環境，是否會影響紅外線與紫外線，對茶菁內容物與揮發性化合物的效應？為此，本研究將萎凋空間的相對濕度提高至90%，以減緩茶菁在照光時的失水。本研究在萎凋初期以不同光源與相對溼度進行處理，比較處理間對茶菁造成的影響，並且在萎凋過程分階段比較茶菁內容物與揮發性化合物在處理間的差異。

先前的日光萎凋相關研究之試驗流程，茶菁以不同日光萎凋時間處理後，移至室內進行靜置萎凋與攪拌，同步與未經日照的茶菁比較 (張, 1992; 蔡等, 2002)，雖在後續靜置萎凋與攪拌的試驗流程都一致，但可能忽略茶菁在日光萎凋快速失水後，在移入室內萎凋時茶菁含水率已有差異之因素，以萎凋時間為試驗流程的依據之下，在進行攪拌與進入殺菁時茶菁含水率基本上也不相同，未照的光室內萎凋處理，在萎凋過程中的含水率應為最高，導致相同萎凋時間施加攪拌的效果可能有差異，可能造成日光萎凋的茶菁揮發性化合物與內容物含量產生差異。本研究在萎凋初期以不同光源照射茶菁，並加入高濕度照光萎凋處理，在照光1小時後，各處理間茶菁失重率不相同，但透過控制茶菁靜置萎凋的時間，在茶菁萎凋至相近含水率基準下比較，或許能得知，初期一小時的照光與萎凋處理，是否足以影響長時間靜置萎凋過程中茶菁內容物與揮發性物質的變動，甚至將初期處理的效應延續至成茶。此外，也探討不同初期照光萎凋的處理與萎凋茶菁含水率，是否對茶菁細胞膜熱穩定性與多元酚氧化酶活性造成影響。

## 第二章、文獻回顧



### 第一節、茶葉的化學組成

茶葉中的化學成分非常多元。將茶葉烘乾後，纖維質佔乾重約 30%、蛋白質約 15%，多元酚類約 30%、碳水化合物約 7%、色素約 5%、胺基酸約 4%、咖啡因約 4%，灰分約 5%，揮發性成分約為 0.01% (Sanderson, 1972)。茶葉中的成分，依其揮發性可初步分為，揮發性化合物、水溶性的非揮發性化合物與水不溶的非揮發物質三大部分，其中揮發性化合物、水溶性的非揮發性化合物為重要的茶葉品質決定因子。

#### 一、茶葉的水溶性非揮發性化合物

影響茶湯滋味的化合物，是茶葉沖泡後易溶於水中的非揮發性化合物；其中與茶湯品質相關的化合物，主要可分為多元酚類、生物鹼、游離胺基酸、碳水化合物。多元酚類與苦澀味有關，其中兒茶素類氧化聚合而成的茶紅質與茶黃質也具有苦澀味，游離胺基酸與甘味和甜味有關，咖啡因則帶有苦；碳水化合物則是甜味的來源 (Chaturvedula and Prakash, 2011)。

##### (一) 多元酚類化合物

多元酚類為廣義的酚類物質。多元酚類是茶葉中含量最多的可溶性物質，約占乾重的 30%-40%。茶葉中的多元酚類包含黃烷醇 (Flavanols)、黃酮醇 (Flavonols) 及其配糖體、酚酸 (Phenolic acid) 與縮酚酸 (Deposides)、無色花青素類 (Leucoanthocyanins) 等化合物。茶葉中的多元酚類化合物，主要以苯丙胺酸為前驅物，進一步生和成黃烷醇、黃酮醇等物質 (甘, 1984)。

##### 1. 黃烷醇類 (Flavanols)

茶葉中的黃烷醇類主要為兒茶素類 (Catechins)，是茶葉中最主要的多元酚類物質，佔多元酚類總含量的 75%-80%，約為茶葉乾重的 15%-30% (甘, 1984)。兒茶



素類可分為游離型(Free catechins)與酯型兒茶素(Esterified catechins)兩大類。游離型兒茶素包含：兒茶素(Catechin, C)、沒食子兒茶素(Gallocatechin, GC)與兩者的鏡相異構物表兒茶素(Epicatechin, EC)、表沒食子兒茶素(Epigallocatechin, EGC)。酯型的兒茶素是在結構上吡喃環(C環)的三號位上連接沒食子醯基，酯型兒茶素包含：兒茶素沒食子酸酯(Catechin gallate, CG)、沒食子兒茶素沒食子酸酯(Gallocatechin gallate, GCG)、兒茶素沒食子酸酯(Epicatechin gallate, ECG)與表沒食子兒茶素沒食子酸酯(Epigallocatechin gallate, EGCG)。茶葉中兒茶素以EGCG、EGC、ECG、EC為主，其中又以EGCG與EGC含量較多(Lin et al., 2003)。兒茶素類經過酵素或非酵素的氧化聚合反應後，可形成中間的氧化產物或二聚體，或聚合成茶黃質(Theaflavin)與茶紅質(Thearubibins)(Peterson et al., 2005)。

## 2. 黃酮醇類 (Flavonols)

黃酮醇類為茶葉中類黃酮類(Flavonoic)含量第二多的類別，主要為山柰素(Kaempferol)、槲皮素(Quercetin)及楊梅素(Myricetin)，以配糖體的式存在(Peterson et al., 2005)。黃酮醇類是茶湯呈黃色的成分之一，也是澀味的因子(甘, 1984)。

## 3. 酚酸 (Phenilic)與縮酚酸 (Depsides)

此類物質大約佔茶葉乾重的5%。酚酸是一類含有酚環的有機酸，茶葉中的酚酸主要為沒食子酸(Gallic acid)、綠原酸(Chlorogenic acid)、茶沒食子酸(Theogallin)等(Sanderson, 1972)。茶沒食子酸只存在茶之中，其含量較同類化合物多。沒食子酸為兒茶素酯化的物質，酯型兒茶素在製茶過程中有可能會降解，將沒食子酸釋出(Tanaka et al., 2002)。

## 4. 無色花青素類 (Leucoanthocyanins)

無色花青素是花青素(Anthocyanins)及花色素苷(Anthocyanidins)的前驅物。茶葉中的無色花青素約佔乾物重2%-3%，以Leucocyanins和Leucodelphinins為主(甘, 1984)。





## (二) 植物鹼

茶葉中的生物鹼包含咖啡因 (Caffeine)、茶鹼 (Theophylline)、及可可鹼 (Theobromine)，其中又以咖啡因含量最多 (Ashihara and Crozier, 1999)，約佔乾重的 2%-5% (甘, 1984)。

## (三) 胺基酸

茶葉中具有二十餘種胺基酸，約佔乾重 4%，其中以茶胺酸 (Theanine,  $\gamma$ -glutamyl ethylamide) 的含量最多，約佔總胺基酸的 50% - 60%。游離胺基酸指單體形式的胺基酸，其未與多肽及蛋白質結合，茶湯中游離胺基酸含量與甘味有關，是茶構成茶湯滋味的主成分之一 (甘, 1984)。茶胺酸是茶樹主要運移型的胺基酸，被認為在根部合成，向生長的枝條運移，茶胺酸由麩胺酸 (Glutamic acid) 和乙胺 (Ethylamine) 透過茶胺酸合成酶 (Theanine synthetase) 產生，葉片中的茶胺酸在照射太陽或受熱時有可能會水解 (Vuong et al., 2011)。

## 二、茶葉的揮發性化合物

茶葉的揮發性有機化合物雖只佔茶葉乾重約 0.01%，但加工過程中揮發性化合物的組成與含量的變動十分複雜，會影響茶葉香氣的特性也與茶葉品質有關聯，目前在茶葉中已測得超過 600 種揮發性有機化合物 (Ho et al., 2015)。製茶過程中揮發性化合物生成機制，可以大致分為化合物的生合成、酵素催化的相關反應與高溫加工產生的反應 (甘, 1987)。形成茶葉香氣的有機揮發性物質可以分為四大類來源，其中三類分別是由脂質類、類胡蘿蔔素類與配醣體類作為前驅物所生成，另外一類則是在熱加工時，經由梅納反應所生成的產物 (Ho et al., 2015)。

### (一) 脂質類衍生揮發性化合物

茶葉中的不飽和脂肪酸是此類揮發性化合物的前驅物，例如  $\alpha$ -亞麻酸 ( $\alpha$ -Linolenic acid)、亞油酸 (Linoleic acid)、油酸 (Oleic acid)、棕櫚油酸 (Palmitoleic



acid)。不飽和脂肪酸的主要氧化降解途徑主要有二，及酵素性氧化與自由基氧化。酵素性氧化為脂氧化酶 (Lipoxygenase, LOX) 氧化脂質類前驅物，是形成脂質類衍生揮發性化合物的主要途徑。不飽和脂肪酸會被脂氧化酶氧化為氫過氧化物 (Hydroperoxides)，隨後被脂氫過氧化物裂解酶 (Hydroperoxide lyases, HPLs) 裂解為主鍊為六個碳的化合物，再透過醇脫氫酶 (Alcohol dehydrogenases) 將化合物反應為醛類或醇類；再者，細胞也會受到光與熱產生的自由基會與脂質類反應，造成光氧化、熱氧化而裂解 (Hatanaka, 1993)。脂質類衍生揮發性化合物主要是帶有青草味且較為刺鼻的氣味，是茶葉採摘後快速生成的化合物類型，此外，脂肪酸的降解也能產生結構有環狀的化合物氣味較芳香，例如茉莉酸甲酯 (Methyl jasmonate)、茉莉酮 (cis-Jasmone) 與茉莉內酯 (Jasmine lactones) (Ho et al., 2015; Yang et al., 2013)。

## (二) 類胡蘿蔔素類衍生揮發性化合物

類胡蘿蔔素類為植物的色素，存在於植物的葉綠體或色素體中，主要的功能為吸收光能，用於光合作用，並保護葉綠素不受光氧化損害 (Armstrong and Hearst, 1996)。此類揮發性化合物的形成機制可分為酵素性與非酵素性氧化降解。類胡蘿蔔素類酵素性的氧化透過 CCDs (Carotenoid cleavage dioxygenases) 將化合物雙鍵結構中加入雙氧後，切割成碳鍊較短的化合物，最後使相關的揮發性物質釋放。類胡蘿蔔素的氧化被認為與黃烷醇類氧化降解有關，也可能與脂質類氧化產生的自由基反應 (Kawakami and Kobayashi, 2001)。類胡蘿蔔素也會受到光照與熱降解，可能的途徑是先將化合物環氧化，再裂解雙鍵或環狀結構，形成直鍊或環狀的衍生物。β-胡蘿蔔素 (β-Carotene) 在高溫加熱下能形成 β-Ionone、5,6-Epoxy-beta-ionone、Dihydroactinidiolide、3,3-Dimethyl-2,7-octanedione 等化合物，此外在日光照射下也可能光氧化成類似的化合物 (Kawakami and Kobayashi, 2001)，推測在製茶過程中日光萎凋、殺菁、烘乾都可能使類胡蘿蔔素降解 (Ho et al., 2015)。



### (三) 糖苷類衍生揮發性化合物

糖苷是一類由糖基與苷元組成的化合物，非糖部分稱作苷元，糖基部分大多鍵結單糖或是雙糖，形成葡萄糖苷態 (Glucosides)與雙糖糖苷態 (Primeverosides)兩鍵結態，許多化合物能鍵結成糖苷的形式，使化合物更具親水性，且化學性質更穩定，容易在植物體中運輸與儲存 (Winterhalter and Skouroumounis, 1997)。許多糖苷類衍生揮發性化合物，在糖苷的型態下，是揮發性低且無氣味，當茶葉製造過程中茶葉片組織受到傷害，酵素水解糖苷鍵，使具有氣味的揮發性物質釋放，例如香葉醇 (Geraniol)、芳樟醇 (Linalool)、芳樟醇氧化物 (Linalool oxides)、苯甲醇 (Benzyl alcohol)、甲基水楊酸 (Methyl salicylate)、大馬士酮 ( $\beta$ -Damascenone)等 (Ho et al., 2015)。

## 第二節、部分發酵茶製程與萎凋過程中茶菁的變化

### 一、部分發酵茶的製程

臺灣生產的茶以部分發酵茶比例最高，是所有茶葉種類中製程最為複雜的茶類，製程中的發酵(多元酚類氧化)程度與滋味的差異組合，使部分發酵茶種類繁多，大致依據成茶發酵程度區分：文山包種茶(條形包種茶)、高山茶(球形包種茶)屬於輕度發酵；凍頂烏龍茶與鐵觀音為中度發酵，番莊茶、東方美人茶及紅烏龍則是發酵程度較高的茶類。部分發酵茶製程大致可分為萎凋、殺菁、揉捻和乾燥，又因不同茶類有更細微的製程差異。茶菁經過以上步驟後製成之乾茶，稱為粗製茶或毛茶。

#### (一) 萎凋

俗稱「走水」，萎凋目的為使茶菁失水，水分蒸發後細胞內水分膨壓減少，葉片的質地會變得較為柔軟 (甘, 1987)。正常茶葉的細胞中，多元酚類物質大部分儲存在液泡中，萎凋過程造成細胞器膜結構不穩定，使膜通透性增加，多元酚類釋出至細胞質中，讓酵素與反應物能接觸反應，引發茶葉內之生化反應 (Sanderson, 1968)，使茶葉滋味與氣味的相關化合物或其前驅物得以產生。此外，如未先進行



萎凋，茶菁因含水率過高不適合揉捻，揉捻時易造成可溶分之損失，且葉片無法緊結且容易呈片狀 (Sanderson, 1964)。

部分發酵茶之萎凋可分為「日光萎凋」和「室內萎凋」兩階段。茶菁採摘後，先進行日光萎凋，在適當的日光強度下曝曬，使葉片中的含水率降低。日光萎凋在製茶過程中是一個相對短暫的步驟，但日光輻射卻能加速茶菁失水。日光萎凋結束後，將茶菁移入室內靜置即室內萎凋。部分發酵茶在室內萎凋時，通常會伴隨攪拌，攪拌間的氣味變化是製茶操作的依據之一 (林, 2013)。一般來說，隨著萎凋時間加長，攪拌力道加重，製茶師利用靜置時間與攪拌的力度，調節茶菁的發酵程度 (林, 1956)。相較萎凋時，細胞內透過擴散的物質滲漏現象已發生，加上攪拌茶菁對茶菁造成更大程度的擾動，更能促進兒茶素類由茶葉細胞之液泡中滲漏出來，並活化多酚氧化酶活性，多元酚氧化酶在攪拌後活性會上升然後逐漸減少，以進行發酵作用 (陳, 1995)，攪拌也能造成機械性傷害，刺激逆境相關基因表現 (Cho et al., 2007)，甚至影響茶葉揮發性化合物含量的變化 (Kobayashi et al., 1985)。萎凋過程影響茶葉顏色、香氣與滋味之形成，為製作部分發酵茶的關鍵步驟。

## (二) 殺菁

主要目的是以高溫破壞茶葉內酵素的活性，停止萎凋的茶菁繼續行生化反應，另一方面以高溫使茶菁組織軟化 (林, 1956)。高溫炒菁時水分大量蒸發，也使揮發性高的具青草味化合物逸散，殺菁時茶菁會釋出大量的己烯醛 (Hexenal) 與葉醇 (Hexenol)，同時發現會使茶葉中  $\alpha$ -亞麻酸 ( $\alpha$ -Linolenic acid) 與亞油酸 (Linoleic acid) 含量降低 (Hatanaka, 1993)。炒菁後，茶菁組織較為柔軟，有利於後續茶葉的揉捻與塑形。

## (三) 揉捻

揉捻是藉由外力破壞茶菁，轉動並擠壓使茶葉細胞組織破壞，主要目的為將茶菁塑形，同時使茶葉汁液滲出，黏附於茶葉表面，在茶菁烘乾後茶汁即固著在表面，利於茶葉內容物在沖泡初期釋出於茶湯中 (甘, 1987)。另外，茶菁經過揉捻可以減

少體積，也便於包裝與儲運。臺灣目前的部分發酵茶的形狀，可以分為條索形、球形兩大類。條索形通常使用望月式揉捻機揉捻即可，球形茶則需要將望月式揉捻機處理過的茶菁，在初乾後置於布袋內，使用布球揉捻機進行布球揉捻，多次布球揉捻後使茶菁逐漸變成球形。

#### (四) 乾燥

乾燥是各種茶類製造都需要的步驟。將茶菁的含水率降至 3%-5%時，除茶葉重量下降外，體積也因為葉片收縮，較鮮葉體積少約 50%。烘乾時的高溫與茶葉低的含水量，可以將殺菁後茶葉殘存的酵素活性去除，將成茶的品質固定；部分揮發性物質在乾燥階段，將會揮發而損失 (甘,1987)。茶葉的乾燥又分為初乾與再乾兩階段。

## 二、茶葉萎凋過程的化學變化

部分發酵茶與紅茶類製程都有較長時間的萎凋。紅茶的萎凋過程較為單純，茶菁採收後不經日光萎凋，直接在室內靜置萎凋，使茶菁逐漸失水，待含水率降低至適合揉捻之前，基本上不進行攪拌。相較之下，部分發酵茶經過日光萎凋與攪拌的程序，對於還具有生物活性的茶菁，造成許多物理與生物性的影響，使內容物與揮發性化合物的變化更為複雜。茶葉萎凋的物理性變化為茶菁水分散失，使茶芽重量、體積減少，細胞內膨壓降低，導致茶芽軟化，生物性變化則是細胞與胞器膜的通透性提高，引發細胞內物質的生化反應，造成與茶葉滋味、氣味及顏色的相關成分變化。

#### (一) 室內萎凋

降低茶菁含水率是萎凋的重點，萎凋相較於其他茶葉製程，例如揉捻、殺菁或乾燥，是物理與化學變化較緩慢，且破壞性較小的流程，但也是相對耗時的步驟 (張,1991)。隨著萎凋時間延長，茶菁含水率持續下降，影響包括總多元酚類、總游離胺基酸、咖啡因、脂肪等成分之變化。



## 1. 蛋白質與胺基酸

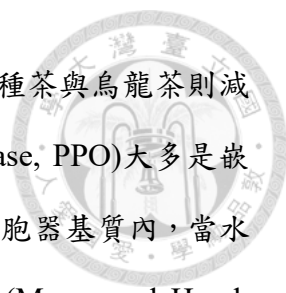
茶葉萎凋過程中，細胞中的蛋白酶 (Protease) 會將蛋白質分解成胺基酸，導致游離胺基酸含量增加 (Kalidass et al., 2019; Ye et al., 2018)。各別胺基酸含量則有不同的變化，茶胺酸及麩胺酸含量明顯減少，精胺酸少量減少，其餘胺基酸皆有增加 (張等, 1995)。茶胺酸含量減少的現象，可能是萎凋時茶胺酸水解成麩胺酸和乙基胺，或代謝成其他化合物所致 (Dev Chouhury et al, 1980)。茶胺酸被認為在茶樹根部合成，再運送至枝條運用，所以茶胺酸在茶葉萎凋過程中被分解較有可能 (Li et al., 2020)。另外，胺基酸也可能在萎凋過程中新合成，當植物葉片遇到傷害或缺水逆境時，相關基因的表現會上調，促使細胞合成胺基酸 (Araújo et al., 2011)，例如與芳香族相關的胺基酸，苯丙胺酸 (Phenylalanine)、色胺酸 (Tryptophan) 與酪胺酸 (Tyrosine) 的含量會增加，而成為植物二次代謝物的前驅物 (Li et al., 2020)。然而，Sanderson (1964) 進行萎凋試驗時，比較以聚乙烯之塑膠袋密封保持含水分之茶菁，發現未萎凋茶菁之游離胺基酸含量，也會隨著時間而上升，顯示胺基酸含量提升，未必與含水率有關。

## 2. 咖啡因

在部分發酵茶的研究指出，咖啡因含量在萎凋時變化不大，但有下降的趨勢 (張等, 1995)。而在紅茶萎凋的試驗中，茶葉的咖啡因含量在長時間萎凋過程中有增加的現象 (Kalidass et al., 2019; Sanderson, 1964; Ye et al., 2018)。Sanderson (1964) 指出，咖啡因含量在塑膠袋密封保持含水分之茶菁，也會隨放置時間提升，所以咖啡因生成可能與萎凋茶菁含水率無關。

## 3. 多元酚類與兒茶素

多元酚類物質在許多試驗中，會隨萎凋時間而下降，可能是多元酚類受酵素氧化聚合反應而減少，蔡等 (2002) 指出包種茶萎凋時間延長，多元酚氧化酶的活性會提高。紅茶萎凋雖未經攪拌，多酚氧化酶活性仍會隨萎凋時間而增加 (陳, 1995)；兒茶素類含量隨著製茶過程而減少，其中又以 EGCG 及 EGC 變化較為



顯著。其中綠茶與紅茶萎凋時，兒茶素類含量變化不大，而包種茶與烏龍茶則減少較多 (張等, 1995)。植物的多元酚氧化酶 (Polyphenol oxidase, PPO) 大多是嵌合在胞膜上，特別是在葉綠體中類囊體的膜上，或是可溶於在胞器基質內，當水果或蔬菜老化，細胞內的可溶性多元酚氧化酶的比例提高 (Mayer and Harel, 1979)。多元酚氧化酶通常以非活性狀態存在類囊體上，多元酚類的反應物則隔離在液胞中，當兩者的隔離被打破，物質接觸到多元酚氧化酶後，才表現出的活性。茶葉萎凋時可觀察到葉綠體內的類囊體結構改變 (Selvendran and King, 1976)。Suzuki (2003) 以顯微觀察染色的茶葉組織，顯示多元酚類化合物沒有出現於表皮細胞，而多分布於鄰近表皮層的葉肉細胞中。茶葉中兒茶素類的氧化作用，同時也會促進其他成分轉變，包括香氣前驅物的降解 (Sanderson and Grahmann, 1973)。

#### 4. 脂質與脂肪酸

不飽和脂肪酸在萎凋時減少，有助於紅茶的品質 (Tomlins and Mashigaidze, 1997)。植物青草味揮發性化合物 (Green leaf volatile, GLVs) 與葉片的機械性傷害與脫水有關，如將歐洲山楊 (*Populus tremula*) 葉片切割後，能快速產生順式-3-己醛 ((z)-3-Hexenal)，葉片脫水到一定程度後，順式-3-己醛的濃度甚至會高於切割後葉片所產生的量，若將葉柄插於水中則可減少其生成 (Fall et al., 1999)。茶菁萎凋失水後，脂氧化酶活性提高，使不飽和脂肪酸氧化，形成具青草味的揮發性化合物 (Takeo and Tsushida, 1980)。

#### (二) 日光萎凋

茶菁在日光萎凋的過程，被認為是處於多重逆境中，包括高溫、缺水、紫外線逆境，在室內靜置萎凋則主要是缺水逆境 (Cho et al., 2007; Gui et al., 2015; Zhu et al., 2019)。太陽輻射波段中，可見光約占 38.9%，紅外線約占 54.3%，紫外線約 6.8%；紫外線中又以 UV-A 波段為主 (Tanaka and Matsuo, 2011)。相較於靜置萎凋，

日光萎凋處理時間短暫，太陽輻射熱能使菁水分快速消散 (甘, 1987)。茶菁經日光萎凋失水後，多元酚氧化酶活性、呼吸作用率與乙烯生成率皆較未照光者高 (蔡等, 2002)。日光萎凋後茶菁內多元酚類含量、總兒茶素含量相對未經日光萎凋處理者減少較多 (Zhu et al., 2019)。日光萎凋時間長短，對包種茶成茶外觀與茶湯水色評分未達顯著差異，茶菁化學成分在各處理間也變化不大，然而茶菁未經日光萎凋或萎凋不足，普遍帶菁臭味，經日光萎凋後製成的包種茶，若要獲得良好香氣及滋味，日光萎凋時間與溫度需要調控得宜 (張等, 1995)。

Kobayashi (1985)認為日光萎凋是引發香氣形成的重要步驟之一，日光萎凋與攪拌，對部分發酵茶氣味的組成有正面的影響。日光照射可以促使茶菁內類胡蘿蔔素光氧化裂解，形成衍生的揮發性化合物 (Kawakami and Kobayashi, 2001)。日光萎凋後的茶菁，可測出較高含量的茉莉酸 (Jasmonic acid)與茉莉酸甲酯 (Methyl jasmonate)，顯示為茶菁的植物逆境反應。類黃酮類生合成途徑之基因，調控特定酶的表現量，日光萎凋組對比鮮葉與室內萎凋組，合成兒茶素的途徑受到抑制，反而在合成 p-coumarate CoA 後，相對促進往木質素生合成途徑 (Zhu et al., 2019)。

日光萎凋後茶菁內具花香、果香的揮發性化合物比例提升，包括萜類 (Terpenoids)相關香氣： $\alpha$ -法呢烯 ( $\alpha$ -Farnesene)、橙花叔醇 (Nerolidol)、芳樟醇 (Linalool)與糖苷相關香氣：苯甲醛 (Benzaldehyde)、苯甲醇 (Benzyl alcohol)、 $\beta$ -紫羅蘭酮 ( $\beta$ -ionone) (Zhu et al., 2019)。從基因表現的角度，茉莉酸和茉莉酸甲酯生合成途徑先被促進，而植體中茉莉酸相關衍生物濃度增加，萜類香氣之物質代謝途徑則被促進 (Zhu et al., 2019)。Kobayashi 等(1985)指出，隨日光萎凋時間延長，經部分發酵茶製茶流程後，成茶中苯甲醛 (Benzaldehyde)、苯甲醇 (Benzyl alcohol)、芳樟醇氧化物 (Linalool oxides)、 $\alpha$ -法呢烯 ( $\alpha$ -Farnesene)、橙花叔醇 (Nerolidol)含量增加。另外，青草味揮發性物質比例下降。葉醇為帶青草味的化合物，成茶雖不會因日光萎凋時間有含量有明顯的下降，但其酯化物含量則較高，而香葉醇 (Geraniol)在日光萎凋及攪拌後含量並沒有增加。茉莉酮 (Jasmone)、茉莉內酯 (Jasmine



lactone)、茉莉酸甲酯 (Methyl jasmonate)在延長日光萎凋時間處理後，並沒有明顯的上升，但攪拌茶菁則能夠提升這些化合物的含量，顯示日光萎凋與室內靜置時的攪拌，對於茶葉揮發性化合物的組成有不同的效果 (Kobayashi et al., 1985)。

### (三) 人工光源對萎凋茶菁的影響

日光萎凋除使茶菁快速失水，也具有上述所提及的作用，但常受到氣候的限制而無法正常進行日光萎凋，所以許多研究期望利用人工光源照射，取代日光萎凋的步驟。張 (1992)指出，茶菁以遠紅外線萎凋，與日光萎凋同樣具有使茶菁失水與活化多元酚氧化酶的作用，且兩者成茶品質無顯著差異。茶菁在日光萎凋後，多元酚氧化酶活性明顯升高，如用其他熱源替代，如紅外線或熱風等，亦有類似的效果 (陳, 1995)。茶菁以人工光源照光處理，可促進多元酚氧化酶、蛋白質氧化酶與  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性，在人工光源需要照光一段時間後，與未照光組酵素活性才較能觀察到差異，可能使香氣前驅物發生氧化降解(範等，2012)。以 UV-B 照射茶菁能促使  $\beta$ -葡萄糖苷酶和  $\beta$ -雙糖水解 ( $\beta$ -primeverosidase)相關的基因表達，使糖苷類的衍生揮發性化合物釋放 (Jang et al., 2010)。以 UV 照射茶菁 30 分鐘後與未照射組比較，發現能顯著降低葉肉細胞之膜熱穩定性，推測能引發葉肉細胞液胞內兒茶素與多元酚類的滲漏 (林等，2020)。另外 UV-B 照射茶菁，可使茶菁中的兒茶素含量下降 (林，2011)。

### (四) 萎凋溫度對茶菁的影響

溫度對於細胞膜的通透性有顯著的影響，低溫 (4 °C 或 10 °C)下，即使沒有水分散失，細胞膜的通透性也會增加，過冷或過熱的溫度 (-15 °C 或 40 °C)，細胞膜通透性也會提高 (Sanderson, 1968)。高溫能促進蛋白質水解，也會促進脂質的分解，有利於茶菁產生(z)-3-hexenol、(E)-2-hexenal、(E)-2-hexenol 等化合物 (張, 1992)。在紅茶萎凋期間，多元酚氧化酶活性逐漸增強，活性在 20°C-35°C間隨溫度上升而提高，達到 40 °C以上則下降 (Takeo, 1966)。包種茶製程中，室內萎凋溫度 25°C，

茶菁二氧化碳生成量與已烯生成量高於 20°C 的萎凋組，然萎凋至後期接近殺菁前，兩溫度處理間茶菁二氧化碳生成量，未達顯著差異。



### (五) 細胞膜熱穩定性

植物之細胞膜與細胞內的胞器膜具有選擇性滲透的能力，可使水與特定的溶質通過 (Simon, 1974)。細胞膜熱穩定性 (Membrane thermostability, MTS 或 Cell membrane thermostability, CMT) 為評估作物品種於高溫逆境，能快速便捷且敏感的指標，以葉圓片於水浴槽短暫加熱後，測定電解質滲漏，可計算出葉片之相對傷害值 (relative injury, RI) 以應用於耐熱品種的篩選 (王與葉, 2013)。高溫可使膜脂質成分變化或導致脂質與特定膜蛋白之間的作用，而改變膜的流動性和滲透性 (Niu and Xiang, 2018)，或容易造成細胞膜層結構的破裂 (王與葉, 2013)。紫外線的照射則可能造成脂膜的過氧化，以 UV-B 照射菠菜分離的類囊體膜，發現有自由基的生成 (Hideg and Vass, 1996)，小麥根部細胞照射 UV-C 後產生酯質過氧化的產物丙二醛，也可說明紫外線對膜產生的傷害 (Wright et al., 1981)，林 (2011) 以 UV 照射茶菁，使細胞膜熱穩定性顯著低於未照光組。Takeo (1980) 將茶芽的莖部插至水中，保持茶芽的水分能夠保持茶菁脂氧合酶 (Lipoxygenase) 較低的活性，當經過 8 小時的萎凋，鮮重降低 25% 時，脂氧合酶的活性提升高於 1 倍，顯示萎凋失水過程中，會提升脂氧合酶的活性，可能導致細胞膜的損傷。當萎凋逐漸失水胞膜的脂肪酸酵素性氧化與自由基氧化，產生大量的青草味揮發性物質，也是脂膜受到傷害的現象 (Hatanaka, 1993)。茶菁萎凋時逐漸失水，導致細胞膜通透性提高，增加細胞內物質的接觸機會，引發茶菁細胞內的生化反應 (Sanderson, 1964)。

### 第三章、材料與方法



#### 第一節、試驗材料與地點

本試驗以手採之‘臺茶十二號’(金萱)茶菁，做為製茶試驗材料，茶菁產地為新北市石碇區永安里，芽葉採摘標準為一心三至四葉。茶菁採摘後，立即將茶菁運至臺灣大學園藝暨景觀學系四號館進行試驗。

#### 第二節、試驗設計

##### 一、試驗流程

本試驗欲探討萎凋初期三種光源與兩種萎凋相對濕度對茶菁的影響。光源分為日光 (Solar)、紅外線 (Infrared)與紫外線 (Ultraviolet A)，室內萎凋茶菁為未照光的處理。照光萎凋時能為減緩茶菁失水，照光萎凋方式又分為正常萎凋 (Normal withering)與高濕度萎凋 (High-humidity withering)，正常萎凋環境相對溼度約介於60%至80%，高濕度萎凋則將環境相對濕度提升到90%以上。試驗處理可分為以下7種。

- 日光萎凋 (Solar withering, SW)
- 日光高濕度萎凋 (Solar withering with high-humidity, SWH)
- 紫外線萎凋 (Ultraviolet A withering, UVA)
- 紫外線高濕度萎凋 (UVA withering with high-humidity, UVAH)
- 紅外線萎凋 (Infrared withering, IR)
- 紅外線高濕度萎凋 (Infrared withering with high-humidity, IRH)
- 室內萎凋 (Indoor withering, IW)

每處理600 g茶菁，每200 g茶菁放入長寬分別為45 cm與35 cm之網狀塑膠籃中平均攤平(附圖2a)。日光萎凋環境選擇稍微有樹蔭遮蔽之處，以免日光輻射過強，日光照度約介於10000 Lux - 30000 Lux之間，UV-A強度約介於800-1100



( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )；紫外線處理以兩支的 UV-A 波段燈管(10W)照射，燈管安裝在塑膠板上 (附圖 2b)，照射時將之蓋於籃子口，燈管與茶菁的距離約介於 3 cm 至 5 cm (附圖 2d)，UV-A 能量約為 700 - 1000 ( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )，略低於樹蔭下日光萎凋 UV-A 強度；紅外線處理以紅外線燈泡(150W)，從距離茶菁上方 1 公尺處照射茶菁 (附圖 2e)，此照射距離萎凋溫度與日光萎凋較相近，以上為正常萎凋處理。高濕度萎凋處理則是將裝有茶菁的籃子，扣於相同大小且內部加水的實心籃子 (附圖 2c)，扣上的籃子與底層的水面有段距離，不會造成茶菁沾水。以工業用保鮮膜將籃子密封，即完成高濕度環境，再進行照光。日光高濕度萎凋 (SWH)與紅外線高濕度萎凋 (IRH)利用保鮮膜方式降低茶菁失水，紫外線高濕度萎凋 (UVAH)也將籃內加水，直接以裝有燈管之塑膠板蓋上，未使用工業用保鮮來提高環境相度濕度。由於利用保鮮膜密封，再進行照光，可能影響光源的效果，正常萎凋之日光萎凋 (SW)與紅外線萎凋 (IR)照光時，籃子口也利用包鮮膜包住，不過可以藉籃子側邊網孔正常通風。

萎凋初期照光處理後，長時間室內萎凋過程中的茶菁含水率也是本研究欲探討的重要因子之一，製茶試驗在 Stage 2 與 Stage 3 的取樣主要依據茶菁含水率。萎凋過程中的取樣，每次取 50 g 茶菁浸於液態氮中固定，再冰至  $-50^{\circ}\text{C}$  冰箱儲藏。

茶菁從茶園運至試驗地後，立刻進行茶菁取樣視為鮮葉樣品，再取茶菁秤鮮重，放入烘箱以  $105^{\circ}\text{C}$  烘乾秤乾重，以估算含水率。試驗前先記錄籃子重量，放入茶菁後萎凋過程中定時秤重，記錄茶菁失重，並換算萎凋時茶菁含水率。茶菁萎凋過程中，主要分為三個階段取樣，第四個階段為毛茶，取樣時機與流程如下(附圖 1)：

- **Stage 1 (萎凋初期)：**

以不同光源照射 1 小時，分為正常萎凋與高濕度萎凋，照光結束立即取樣，室內萎凋組取樣基準為茶菁失水最少之處理組。

- **Stage 2 (萎凋中期)：**

將日光照射之茶菁移至室內後，所有處理在同一空間進行正常萎凋。以照



光萎凋處理失水最多者，靜置約 1.5 至 2 小時含水率為取樣標準。

- **Stage 3 (萎凋結束)：**

前次取樣後，將茶菁聚集後輕微攪拌，重新攤平於籃中，隨後靜置萎凋失水至設定之含水率取樣。

- **Stage 4 (毛茶)：**

萎凋結束後立即高溫殺菁，隨後進行揉捻，再將茶菁以 80℃ 烘 2.5 小時烘乾為毛茶。

- **Stage 1.5：**

指高濕度萎凋處理多的取樣階段，介於 Stage 1 與 Stage 2 之間。高濕度照光萎凋處理由於在光照一小時結束時茶菁失水較少，照光結束時 Stage 1 取樣後，將裝有茶菁之籃子移出高濕度環境萎凋，隨後靜置一段時間使茶菁正常萎凋失水，比對相同光源之正常萎凋組於 Stage 1 之失重率取樣，為 Stage 1.5。

本研究製茶試驗皆在 2021 年進行，在 4/11 與 4/18 日之試驗，比較日光萎凋 (SW)、日光高濕度萎凋 (SWH)、紫外線萎凋 (UVA)、紫外線高濕度萎凋 (UVAH)、室內萎凋 (IW) 共五個處理。在 6/11 與 6/18 日之試驗，比較日光萎凋 (SW)、日光高濕度萎凋 (SWH)、紅外線萎凋 (IR)、紅外線高濕度萎凋 (IRH)、室內萎凋 (IW) 五個處理。8/31 日試驗則同時比較上述之七個處理。五次製茶試驗中，皆分析茶菁非揮發性化合物，分析項目包括總多元酚、總游離胺基酸、咖啡因、兒茶素類與沒食子酸。8/31 日試驗除茶菁內容物分析，也分析樣品之揮發性有機化合物。7/29 與 9/6 日試驗為細胞膜熱穩定性試驗，7/29 日試驗比較日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA)、紅外線萎凋 (IR)、室內萎凋 (IW) 處理，9/6 日試驗加入照光高濕度萎凋處理，共七個處理。9/6 日試驗同時以液態氮取樣固定茶菁，而後測定萎凋時茶菁之多元酚氧化酶活性。



## 二、試驗處理比較

### (一) 萎凋初期光源與高濕度萎凋對茶菁內容物之影響

大致可以分為三個方面討論。第一，萎凋初期利用不同光源照射，以單因子變方分析比較日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA)、紅外線萎凋 (IR)與室內萎凋 (IW) 內容物含量的差異，並且在不同階段分別比較之間的差異。Stage 1 處理間的含水率有差異，其餘階段茶菁含水率相近。可觀察初期照光萎凋對於茶菁造成的影響，是否會延續至茶菁萎凋結束時。第二，將照光高濕度萎凋處理加入，並將未照光之室內萎凋組 (IW)移除，以萎凋初期光源 (Light resource)與相對溼度 (Relative humidity)為兩因子，做複因子變方分析，分別比較萎凋前期處理在不同階段的差異。第三，Stage 1 照光萎凋後，將照光高濕度萎凋組之茶菁，正常萎凋一段時間後，含水率下降至與同光源正常照光萎凋處理 Stage 1 相近時取樣 (高濕度萎凋處理之 Stage 1.5)，室內萎凋組對照處正常萎凋含水率相近取樣，將三者以單因子變分析比較。

### (二) 萎凋初期光源、相對溼度與萎凋階段茶菁內容物之影響

萎凋過程中茶菁含水率持續降低，也是影響茶菁生化反應因素之一，將導致茶菁內容物含量的變化。以萎凋初期光源 (Light resource)與萎凋階段 (Withering stage)，為影響茶菁內容物含量的兩個因子，進行變方分析。另外，移除未照光的室內萎凋組 (IW)，加入照光高濕度萎凋處理，以萎凋初期光源 (Light resource)、相對溼度 (Relative humidity)與萎凋階段 (Withering stage)，為影響茶菁內容物含量的三因子，進行變方分析。

### (三) 初期萎凋處理對茶菁細胞膜熱穩定性與多元酚氧化酶活性在萎凋階段之差異

茶菁細胞膜熱穩定性的兩次試驗中，7/29 日試驗將日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA)、紅外線萎凋 (IR)與室內萎凋 (IW)處理，在 4 個萎凋階段分別以萎凋初

期光源做單因子變方分析比較。9/6 日試驗將日光萎凋 (SW)、日光高濕度萎凋 (SWH)、紫外線萎凋 (UVA)、紫外線高濕度萎凋 (UVAH)、紅外線萎凋 (IR)、紅外線高濕度萎凋 (IRH)與室內萎凋 (IW),在 4 個萎凋階段以單因子變方分析比較。9/6 日試驗之茶菁多元酚氧化酶活性數據,則以萎凋初期處理 (Withering treatment)與萎凋階段 (Withering stage)為兩因子做變方分析,另外再以單因子變方分析比較,相同萎凋階段不同初期照光處理之多元酚氧化活性差異,與相同初期照光處理在不同萎凋階段多元酚氧化酶活性的差異。

#### (四) 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁揮發性化合物之影響

分析樣品為 8/31 日試驗之茶樣,取樣階段分別為 Stage 1:照光結束茶菁;Stage 2:茶菁含水率約 69.7%時機點;Stage 3:茶菁含水率約 65%時機點(取樣完殺菁);Stage 4:毛茶。室內萎凋組 (IW)之 Stage 1:對應紫外線組 (UVA)含水率的取樣點,其 Stage 1.5 為萎凋高濕度處理組,對應正常萎凋組照光結束時含水率的樣品,Stage 1.5 為對應日光萎凋組 (SW)與紅外線萎凋 (IR)相近含水率的取樣點。

### 第三節、試驗分析方法

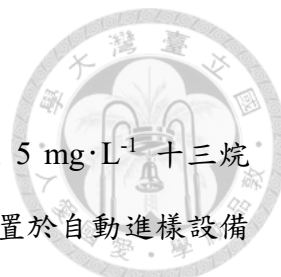
#### 一、樣品前處理與萃取

##### (1) 乾燥與磨粉

毛茶製成後放入乾燥箱保存備用。冷凍於-50℃冰箱之茶菁,以冷凍乾燥機乾燥 48 小時後,放入乾燥箱保存備用。乾燥之茶葉樣品以磨粉機磨成均質粉樣,裝於樣品盒中後,放置於乾燥箱保存。

##### (2) 非揮發性化合物萃取

秤取 0.5 g 粉樣於 50 mL 離心管,以約 40 mL 沸騰之去離子水沖泡,隨後放置於 90 °C 水浴鍋 20 分鐘加熱,取出離心管稍微降溫後,以 Advantec NO.2 號濾紙過濾,最後以定量瓶定量至 50 mL。萃取完成之茶湯保存於 4 °C 備用,作為茶湯內容物呈色測定法與高效液相層析儀分析之樣品。



### (3) 揮發性化合物分析萃取

秤取 0.5 g 粉末於 20 mL 樣品瓶中，以氣密針取 2 uL 之  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  十三烷 (Tridecane)，將針頭貼於瓶壁加入，旋緊氣密蓋後，將樣品瓶放置於自動進樣設備 (Multipurpose sampler) 之樣品盤中待測。樣品之揮發性化合物以頂空固相微萃取法 (Headspace solid-phase microextraction, HS-SPME) 萃取。萃取流程方式為，將 SPME 纖維伸入樣品瓶中，以  $60^\circ\text{C}$  加熱 20 分鐘，過程中攪拌器以 250 rpm 轉速搖晃樣品瓶，程序為搖晃 5 秒後，停止 3 秒，持續至萃取結束。揮發性化合物析將吸附於 SPME 萃取相纖維中。

## 二、茶湯內容物分析

### (1) 總多元酚：酒石酸亞鐵法

試管中加入 1 mL 待測液或沒食子酸標準液，依序加入 1 mL 酒石酸亞鐵溶液後，與 3 mL 磷酸緩衝液，總容量為 5 mL，加入反應液後均勻震盪後靜置 30 分鐘，吸取 200 uL 反應液於 96 孔盤，以分光光度計測定反應液波長 540 nm 吸光值，依據沒食子酸標準液製作檢量線，計算反應液對應的沒食子酸當量 (Gallic acid equivalent, GAE)，為樣品萃取液中總多元酚類含量。本試驗萃取之樣品須稀釋 5 倍，空白對照組待測液以去離子水替代。

### (2) 總游離胺基酸：茚三酮 (Ninhydrin) 法

首先秤取 0.15 g PVPP 於 50 mL 離心管，加入茶湯震盪 30 分鐘後，再使用 Advantec 1 號濾紙重力過濾獲得茶湯澄清液。加入 1 mL 茶湯或茶胺酸標準液於試管中，依序加入 0.5 mL 氯化亞錫、0.5 mL 茚三酮，空白對照組則以經 PVPP 處理之去離子水為測定液，溶液總量為 2 mL。溶液經震盪混合均勻後，以鋁箔紙封閉管口避免溶液蒸發，經  $100^\circ\text{C}$  水浴加熱 20 min，靜置冷卻至室溫後，加入 10 mL 之 50 % (V/V) 酒精，總容量為 12 mL。溶液震盪均勻後，測定波長 570 nm 之溶液吸光值，以茶胺酸標準液之吸光值製作檢量線，並計算對應的茶胺酸當量





(Theanine equivalent, TE)，為樣品總游離胺基酸的含量。

### (3).兒茶素類、咖啡因與沒食子酸含量分析

以高效液相層析 (High performance liquid chromatography, HPLC)分析萃取液中所含測定物之含量，先製備兒茶素類、咖啡因與沒食子酸濃度梯度之標準品，使用自動進樣器進樣，進樣量為 8  $\mu\text{L}$ 。移動相分為兩種，有機相為 100 %乙腈(移動相 A)與水相之 0.1 %甲酸溶液 (移動相 B)。液相層析溶劑梯度的分離，在幫浦流速為  $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ，管柱溫度控制於  $35^\circ\text{C}$ 之下沖提，程序如下。兩移動相初始比例為 A:B = 10:90 維持 12 分鐘後，溶液梯度線性變化至 30 分鐘 A:B = 20:80；30 分鐘至 35 分鐘由前梯度線性變動至 A:B = 22:78；35 分鐘至 40 分鐘，由前梯度線性變化為 A:B = 25:75；40 分鐘至 48 分鐘，由前梯度線性變動化至 A:B = 100:0，持續維持到 52 分鐘；最後 52 分鐘至 57 分鐘，則線性變換回與初始相同比例 A:B = 10:90。沖提過程中以紫外線偵測器進行化合物偵測，波長設定為 280 nm，獲得標準品滯留時間 (Retention time)與波峰面積 (Peak area)之圖譜後，計算化合物之檢量相。樣品萃取液先以  $0.45 \mu\text{m}$  之過濾膜 (Millipore)過濾至 Vial 瓶中，接著將之置於恆溫  $10^\circ\text{C}$ 的樣品盤中等待自動進樣分析，萃取液進樣量同為  $8 \mu\text{L}$ 。

### 三、揮發性化合物分析

以氣相層析儀串聯質譜儀 (Gas chromatography mass spectrometry, GC-MS)分析揮發性化合物。首先將在頂空吸附完成之 SPME 纖維伸入溫度為  $210^\circ\text{C}$ 進樣口，脫附揮發性化合物 150 秒後，採分流方式 (Split) (Total Flow =  $9 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Spetum purge flow =  $3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Split ratio = 5:1; pressure = 6.776 psi)。GC 設定之升溫梯度為，初始溫度  $35^\circ\text{C}$ 維持兩分鐘後，以  $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  速率升溫  $70^\circ\text{C}$ ，再以  $7^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  速率升溫至  $200^\circ\text{C}$ ，最後以  $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  速率升溫至  $250^\circ\text{C}$ 並維持兩分鐘。載流氣體為氦氣(99.999%)，進入管柱內流速為  $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。化合物分子以 70eV 之電子撞擊使之離子化，離子源溫度為  $230^\circ\text{C}$ ，質譜儀偵測條件為 50 至 350 原子量單位

(Atomic mass unit, amu)。質譜儀獲得揮發性化合物圖譜其中有化合物滯留時間 (Retention time)，以 Wiley 275 與 NIST11 質譜資料庫檢索比對化合物。辨識之化合物峰的積分面積為化合物之豐度 (Abundance)，並以內標準品十三烷 (Tridecane) 的豐度除以辨識之化合物的豐度，計算出化合物的相對豐度 (Relative abundance)。

#### 四、細胞膜熱穩定性之測定

將茶菁以去離子水沖洗後，選大小相近之第二葉以直徑 6 mm 之打洞機，避開主脈取葉圓片。將五片葉圓片置於試管中，加入 5 mL 去離子水，此時葉圓片不可黏附於管壁上，需漂浮於去離子水上，再利用鋁箔紙封口。每次取樣放置於室溫下靜置 24 小時後，以電導度計測定內有葉圓片試管內水之電導度 (Electronic conductivity, EC)，此值為  $T_i$ 。測定後將試管置於 100 °C 水浴鍋中，加熱 20 分鐘使細胞完全破壞，並於室溫靜置冷卻，再測試管內液體的 EC 值，此值為  $T_f$ 。依下列公式計算葉片細胞膜熱穩定性 (Membrane thermostability, MTS)

$$\text{公式：} \text{MTS (\%)} = 1 - (T_i / T_f) \times 100。$$

#### 五、多酚氧化酶活性測定

茶菁萎凋過程中取 15 g 茶菁以液態氮固定後，置入 -50°C 冰箱保存。取 5 g 葉片 (不含葉柄與葉脈) 置於研鉢中，加入液態氮研磨至細碎程度。以預冷之 -20°C 丙酮約 200 mL 反覆沖洗研磨粉末，並用以 Advantec NO.2 濾紙搭配布式漏斗抽氣過濾，將粉狀物質沖洗至接近白色的狀態，靜置於室溫使丙酮揮發，獲得葉片粗蛋白粉末，冰凍於 -20°C 備用。秤取 0.1 g 蛋白粉末於 15 mL 試管中，加入 5 mL 0.1M 磷酸緩衝液震盪 30 秒，置於冰上以速震盪 30 分鐘後，隨後放入於離心機在 4°C 下以 10000 rpm 離心 20 分鐘，結束後取上清液用於 PPO 活性測定。在石英 cuvette 加入 1 mL 0.1M (40°C) 磷酸緩衝液、1 mL 0.1M 鄰二苯酚與 1 mL 酵素液，立刻以分光光度測定 410 nm 波長之吸光值，每 15 秒測定一次，持續 3 分鐘。以每分鐘 0.01 OD 變化為一個活性單位 (U)。



## 六、統計分析

試驗數據與製表使用 Microsoft Office Excel 2016，資料統計分析以 Costat (Cohort software) 分析，試驗數據製圖使用 Sigmaplot (12.5)。

## 第四節、藥品與儀器

### 一、總多元酚類測定

1. 酒石酸鉀鈉 (Potassium sodium tartrate,  $C_4H_6KNa \cdot 4H_2O$ ) : Hayashi pure chemical Ind. (Osaka, Japan), 試藥級
2. 硫酸亞鐵 (Ferrous sulfate,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) : Hayashi pure chemical Ind. (Osaka, Japan), 試藥級。
3. 磷酸氫二鈉 (Disodium Hydrogen Phosphate,  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ ) : Nacalai Tesque (Kyoto, Japan), EP 等級。
4. 沒食子酸 (Gallic acid) ( $\geq 98\%$ ) : Fluka (Buchs, Switzerland), HPLC 等級

### 藥品製備

1. 酒石酸亞鐵溶液：稱取 0.100g  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  及 0.500g  $C_4H_6KNa \cdot 4H_2O$  以去離子水定量至 100mL。
2. 磷酸緩衝液 (pH=7.5)：稱取 19.306 g  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$  以去離子水定量至 1000 mL(A 液)；稱取 1.814 g  $KH_2PO_4$ ，以去離子水定量至 200 mL (B 液)，將 A 液與 B 液以 17：3 之比例混合後，調整溶液之 pH 值至 7.5。
3. 沒食子酸標準液：稱取 0.100 g 沒食子酸，以去離子水定量至 100 mL ( $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 作為沒食子酸標準母液，並配置成  $37.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $67.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  與  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  五個濃度之標準液，用於建立檢量線用。

### 二、總游離胺基酸含量測定

1. 茚三酮 (Ninhydrin) : Merck (Darmstadt, German), GR 等級
2. 醋酸鈉 (Sodium acetate trihydrate,  $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ ) : Merck (Darmstadt,



German) ACS ISO Reag 等級

3. 氯化亞錫 (Tin(II) chloride (98%)) : Alfa Aesar (Heysham England)
4. 乙醇(Ethanol (95%)) : Merck (Darmstadt, German) , Reag. Ph Eur 等級
5. 茶胺酸 (L-Theanine (98%)) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA) , HPLC 等級
6. 聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinylpolypyrrolidone, PVPP): Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA)

#### 藥品製備

1. 茛三酮試劑：秤取 3 g Ninhydrin , 以 95 %酒精定量至 100 mL。
2. 氯化亞錫試劑：秤取 0.100g  $\text{SnCl}_2$  加入 50 mL 醋酸緩衝溶液，攪拌均勻後於  $4^\circ\text{C}$  冷藏 12 小時後使用。
3. 50%酒精：取 95%乙醇水溶液 500mL，加入去離子水至 950 mL。
4. 醋酸緩衝液 (pH = 5.2)：秤取 19 g  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  完全溶解於 500 mL 去離子水後，加入約 36mL 冰醋酸，再以二次水定量至 1000 mL。
5. 茶胺酸標準液：秤取 0.01 g 茶胺酸以去離子水定量至 100 mL，作為  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之食子酸標準液，將其稀釋為  $6.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  五個濃度之標準液，用於建立檢量線。

### 三、兒茶素異構物、沒食子酸及咖啡因分析

1. 兒茶素 ((-)-Catechin, C) ( $\geq 97\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA) , HPLC 等級
2. 兒茶素沒食子酸酯 ((-)-Catechin gallate, CG) ( $\geq 98\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA) , HPLC 等級
3. 沒食子兒茶素 ((-)-Gallocatechin, GC) ( $\geq 98\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA) , HPLC 等級
4. 表兒茶素 ((-)-Epicatechin, EC) ( $\geq 98\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo. USA) ,



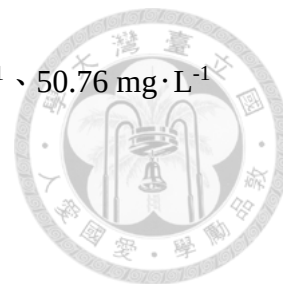
HPLC 等級.

5. 表沒食子兒茶素((-)-Epigallocatechin, EGC) ( $\geq 95\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA), HPLC 等級
6. 沒食子兒茶素沒食子酸酯((-)-Gallocatechin gallate, GCG) ( $\geq 98\%$ ) : Sigma-Aldrich (St Louis, Mo., USA), HPLC 等級.
7. 表兒茶素沒食子酸酯 ((-)-Epicatechin gallate, ECG) ( $\geq 98\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA), HPLC 等級.
8. 表沒食子兒茶素沒子酸酯 ((-)-Epigallocatechin gallate, EGCG) ( $\geq 95\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA), HPLC 等級
9. 沒食子酸 (Gallic acid, GA) ( $\geq 98\%$ )) : Fluka (Buchs, Switzerland), HPLC 等級
10. 咖啡因 (Caffeine) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA) ReagentPlus 等級
11. 甲醇 (Methanol) : Merck (Darmstadt, German) Reag. Ph Eur 等級
12. 乙腈 (Acetonitrile, ACN) : Merck (Darmstadt, German), HPLC 等級
13. 甲酸 Formic acid : Merck (Darmstadt, German), GR 等級

標準品製備濃度梯度：

1. GA :  $7.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $14.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $28.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $57.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $86.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
2. GC :  $4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $18.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $36.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $55.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
3. EGC :  $12.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $24.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $49.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $99.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $148.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
4. C :  $4.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $18.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $36.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $55.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
5. Caffeine :  $45.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $90.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $181.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $363.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $545.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
6. EC :  $6.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $12.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $25.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $51.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $77.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
7. EGCG :  $45.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $91.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $183.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $366.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $549.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
8. GCG :  $3.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $7.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $15.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $31.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $47.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
9. ECG :  $9.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $19.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $38.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $77.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $116.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

10. CG :  $4.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $8.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $16.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $33.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



#### 四、多元酚氧化酶活性測定

1. 磷酸氫二鈉 (Disodium Hydrogen Phosphate,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) : Nacalai Tesque (Kyoto, Japan), EP 等級。
2. 磷酸二氫鈉 (Sodium dihydrogen phosphate,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) : Riedel-de Haën (Seelze, Germany), GR 等級。
3. 鄰二苯酚 (Catechol,  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA), ReagentPlus 等級

#### 藥品製備：

1. 磷酸緩衝液 (0.1M, pH=6.3) : 秤取  $9.633 \text{ g Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  與  $11.404 \text{ g}$  加入約  $900 \text{ mL}$  去離子水，以鹽酸調整溶液之 pH 值至 6.3 後，將溶液定量製  $1 \text{ L}$ 。
2. 鄰二苯酚溶液 (0.1M) : 秤取  $1.101 \text{ g}$  Catechol，定量至  $100 \text{ mL}$ 。

#### 五、揮發性化合物分析

1. 正十三烷 (Tridecane) ( $\geq 99\%$ ) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA)
2. 正己烷 (Hexane) : Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo., USA)

#### 六、儀器與設備

1. 微量盤分光光度計 : Epoch 2, BioTek (VT., U.S.A.)
2. 固相微萃取裝置 (Solid Phase Microextraction, SPME) : Supelco (St. Louis, MO, USA). 萃取相材質 Divinylbenzene/Carboxen/polydimethylsiloxane (DVB/CAR/PDMS),  $50\mu\text{m}/30\mu\text{m}$ , Supelco (St. Louis, MO., USA)
3. 氣相層析儀 (Gas Chromatograph, GC) : Agilent 7890A, Agilent Technologies (CA., U.S.A.) ; 分離管柱為型號 : HP-5MS UI (Length  $30 \text{ m} \times \text{diam. } 0.25 \text{ mm} \times \text{film } 0.25$

um) , Aglient Technologies (CA., U.S.A.)

- 
4. 質譜儀 (Mass Spectrometry, MS) : Aglient 5975C, Aglient Technologies (CA., U.S.A.)
  5. 高效液相層析系統 (High performance liquid chromatography, HPLC) : PU-2089 幫浦系統串接 AS-2057 自動進樣儀，搭配紫外光偵測器 UV 2075，以 LC-NetII/ADC 處理器與電腦連接處理數據，搭載之層析管柱 Symmetry C18 (100A, 5 um, 4.6 mm×250 mm), Waters (MA., U.S.A.)
  6. 磨粉機 : RT02B，榮聰精密科技(臺中市，臺灣)
  7. 離心機 (Centrifuge) : Pro-Analytical. C4000，Centurion Scientific (WS., UK)
  8. 冷凍乾燥機 (Freeze dryer) : CT-5020D，泛群科技有限公司(高雄市，台灣)
  9. 紅外燈 (Infrared lamp) : PAR38 150W 125-130V，PHILIPS
  10. 紫外線燈管 : UVA 10W T8，SANKYO
  11. 紫外線儀 : Solarmeter 5.7，VIRTUAVIA (Grenoble., France)

## 第四章、結果與討論



### 第二節、萎凋初期光源與高濕度萎凋對茶菁內容物含量之影響

#### 一、總多元酚、兒茶素與沒食子酸

##### (一) 萎凋初期光源之影響

兒茶素類約佔茶菁中總多元酚類含量的 70% - 80% (甘, 1984)，在萎凋過程中會氧化聚合而減少 (Sanderson, 1964)。試驗結果顯示不同光源照射對茶菁總多元酚類含量之影響 (表 4)，在 4/11 日試驗 Stage 1 紫外線萎凋 (UVA) 之茶菁總多元酚類顯著低於日光萎凋 (SW) 與室內萎凋 (IW) 組，8/31 日試驗 Stage 3 紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁多元酚含量顯著低於其他處理；6/18 日試驗 Stage 3 日光萎凋組 (SW) 顯著高於紅外線萎凋 (IR) 與室內萎凋組 (IW)。其餘萎凋過程中的比較，初期萎凋光源的影響，皆未達顯著差異。

不同光源照射對茶菁總兒茶素含量的影響 (表 5)，4/11 日試驗紫外線萎凋組 (UVA) Stage 1 茶菁總兒茶素含量低於日光萎凋組 (SW)，但兩處理間未達顯著差異，而 Stage 3 紫外線萎凋組 (UVA) 則顯著低於其他組。室內萎凋組 (IW) 之茶菁雖未在萎凋初期照光，但在萎凋過程的三階段，不管是茶菁總多元酚與總兒茶素含量未必高於照光萎凋處理。

不同光源照射對茶菁沒食子酸含量的影響 (表 6)，雖在五次試驗中的不同萎凋階段，有較多次達顯著差異，但在萎凋過程中茶菁沒食子酸含量，在不同萎凋光源的表現不一致，例如 4/11 日試驗，Stage 1 日光萎凋 (SW) 與紫外線萎凋組 (UVA)，茶菁沒食子酸含量顯著高於室內萎凋組 (IW)，紫外線萎凋組 (UVA) 沒食子酸含量較日光萎凋組 (SW) 高，但 Stage 2 則是日光萎凋組 (SW) 顯著高於其餘處理。





## (二) 萎凋初期光源與相對溼度之影響

針對萎凋相對濕度對茶菁多元酚類含量的影響 (表 7)。4/11 與 4/18 日試驗 Stage 1，高濕度萎凋處理茶菁總多元酚含量顯著高於正常萎凋處理，而 6/11、6/18 與 8/31 日試驗 Stage 1 則是正常萎凋處理總多元酚類含量略高，但未達顯著差異。Stage 2 與 Stage 3 萎凋初期相對濕度為影響因子大多未達顯著差異。針對萎凋相對濕度對茶菁兒茶素類含量的影響 (表 8)，Stage 1 五次試驗中皆未達顯著差異，萎凋初期相對濕度對茶菁兒茶素含量的影響，幾次試驗中的 Stage 2 與 Stage 3 處理間有些達顯著差異，但與同次處理前後的 Stage 比較趨勢並未一致。針對萎凋相對濕度對茶菁沒食子酸含量的影響 (表 9)，4/11、6/18 與 8/31 日試驗萎凋初期相對濕度對萎凋三階段皆達顯著差異。三次試驗中僅 8/31 日試驗，正常萎凋處理 (Normal) 之茶菁沒食子酸含量在萎凋過程中，一致的高於高濕度萎凋處理 (High)。

## (三) 萎凋初期含水率相近點比較

由於萎凋初期光源與相對溼度的差異，在 1 小時的照光萎凋後，處理間茶菁的失水不同，需藉由延長照光高濕度萎凋組與室內萎凋組之靜置萎凋時間，在相近含水率時比較。茶菁總多元酚類的比較 (表 10)，在相近含水率時處理間大多皆未達顯著差異，僅日光 (Solar) 4/11 日試驗，室內萎凋組 (IW) 總多元酚含量顯著較低，還有紅外線組 (Infrared) 6/18 日試驗，高濕度萎凋組茶菁之總多元酚含量顯著低於正常萎凋組，兩結果在茶菁兒茶素含量的比較也有類似結果 (表 11)。茶菁沒食子酸含量的比較 (表 12)，雖較多次達顯著差異，但萎凋照光處理在數次試驗中，未有一致的結果。

## 二、總游離胺基酸

### (一) 萎凋初期光源之影響

比較以日光萎凋 (SW) 與紫外線萎凋 (UVA)，茶菁在不同萎凋階段總游離胺基



酸含量的影響 (表 13)，僅 4/18 日試驗 Stage 1 日光萎凋組 (SW)顯著高於紫外線萎凋組 (UVA)，與 8/31 日試驗 Stage 2 日光萎凋組 (SW)顯著高於紫外線萎凋組 (UVA)。比較以日光萎凋 (SW)與紅外線萎凋 (IR)的影響，6/11 日試驗，Stage 1 日光萎凋組 (SW)茶菁總游離胺基酸顯著高於紅外線萎凋組 (IR)，但 Stage 2 結果則是相反。6/18 日試驗，Stage 3 紅外線萎凋組 (IR)顯著高於日光萎凋組 (SW)。六月份的兩次試驗，室內萎凋組 (IW)總游離胺基酸的含量，與日光萎凋 (SW)和紅外線萎凋 (IR)相比的結果不相同，6/11 日試驗在萎凋過程中，室內萎凋組 (IW)茶菁總游離胺基酸含量皆較其餘兩組低，但 6/18 日試驗則較其餘兩組高。

## (二) 萎凋初期光源與相對溼度之影響

萎凋初期光源與高濕度萎凋對茶菁總游離胺基酸含量的影響 (表 14)，能發現在五次試驗中，僅 8/31 日試驗 Stage 1 正常萎凋處理茶菁總游離胺基酸含量較高濕度萎凋組高之外，其餘試驗 Stage 1 高濕度萎凋處理的含量皆高於正常萎凋處理，其中 4/11 與 4/18 日試驗達顯著差異。4/18 日試驗，Stage 2 與 Stage 3 高濕度萎凋處理也高於正常萎凋處理，但 4/11 日試驗，Stage 3 正常萎凋組茶菁總游離胺基酸含量則顯著高於高濕度萎凋處理。比較光源對茶菁總游離胺基酸的影響，日光萎凋 (SW)與紫外線萎凋 (UVA)，僅 4/18 日試驗 Stage 3 與 8/31 日試驗 Stage 3 紫外線萎凋組 (UVA)茶菁總游離胺基酸含量顯著高於日光萎凋組 (SW)。日光萎凋 (SW)與紅外線萎凋組 (IR)比較，6/11 日試驗 Stage 1 日光萎凋組 (SW)顯著高於紅外線萎凋組 (IR)，6/18 日試驗 Stage 2 紅外線萎凋組 (IR)顯著高於日光萎凋組 (SW)，8/31 日試驗，Stage 3 紅外線萎凋組 (IR)顯著高於日光萎凋組 (SW)。

## (三) 萎凋初期含水率相近點比較

初期照光萎凋後，不同處理茶菁含水率已有差異，透過靜置萎凋一段時間後，比較相同光源高濕度萎凋之茶菁總游離胺基酸含量的差異 (表 15)，雖僅有 4/11 日

光 (Solar)與 6/11 日紅外線 (Infrared)之高濕度萎凋處理，茶菁總游離胺基酸含量顯著高於正常萎凋組，不過仍可發現，照光高濕度萎凋組茶菁總游離胺基酸含量，大多較正常萎凋處理高。日光為光源處理之茶菁，高濕度萎凋茶菁總游離胺基酸含量五次皆為最高，而紫外線與紅外線處理之茶菁則各有兩次最高。

### 三、咖啡因

#### (一) 萎凋初期光源之影響

萎凋初期光源對茶菁咖啡因的影響 (表 16)，僅 6/18 日試驗 Stage 1 達顯著差異，紅外線萎凋組 (IR)顯著高於日光萎凋組 (SW)與室內萎凋組 (IR)。而萎凋過程雖在 4/11、4/18 與 6/11 日試驗 Stage 2 處理間達顯著差異，4 月份兩次試驗室內萎凋組 (IW)皆顯著低於其他組，但 6/11 日試驗則顯著高於其他處理。整體來看，初期照光對茶菁咖啡因在不同萎凋階段的影響，沒有一致的趨勢。

#### (二) 萎凋初期光源與相對溼度之影響

初期高濕度萎凋處理，Stage 1 處理間的比較，僅在 4/11 日高濕度萎凋處理茶菁咖啡因含量高於正常萎凋處理之茶菁 (表 17)。4/18、6/18 與 8/31 日試驗，Stage 3 初期萎凋相對濕度達顯著差異，4/18 與 6/18 日試驗，高濕度萎凋處理茶菁咖啡因含量顯著低於正常萎凋處理，8/31 日試驗高濕度萎凋處理則顯著高於正常萎凋處理。光源對茶菁咖啡因含量的影響，日光萎凋組 (SW)與紫外線萎凋組 (UVA)，僅 4/11 日試驗比較，Stage 2 紫外線萎凋組 (UVA)之茶菁咖啡因含量顯著高於日光萎凋組 (SW)茶菁；4/18 日試驗 Stage 3 紫外線萎凋組 (UVA)之茶菁咖啡因含量顯著低於日光萎凋組 (SW)。日光萎凋組 (SW)與紅外線萎凋組 (IR)比較，6/11 日試驗 Stage 2 日光萎凋組 (SW)顯著低於紅外線萎凋組 (IR)，6/18 日試驗 Stage 1 紅外線萎凋組 (IR)顯著低於日光萎凋組 (SW)。



### (三) 萎凋初期含水率相近點比較

五次試驗中日光萎凋、日光高濕度萎凋與室內萎凋之茶菁咖啡因含量皆未達顯著差異 (表 18)。紫外線照射的比較，4/11 日試驗達顯著差異，紅外線照射的比較，6/18 與 8/31 日試驗達顯著差異。

## 四、討論

整體而言，萎凋初期光源與相對濕度處理對茶菁內容物的影響，雖然萎凋初期光源不同，造成萎凋溫度與茶菁失水率不相同，使萎凋初期茶菁內容物含量上有差異，但藉延長靜置萎凋時間使茶菁失水，在 Stage 2 與 Stage 3 時處理間在相近含水率基準比較時，基本上較難看出一致的結果。可能原因是茶菁內容物的含量並非隨萎凋時間延長，茶菁內容物含量遞增或遞減，而是在萎凋過程中茶菁內容物含量呈現上下波動的現象，茶菁內容物隨萎凋階段的整體變化在下一節探討。另外，因為要使茶菁在 Stage 2 與 Stage 3 茶菁含水率相近時比較，不同處理間靜置萎凋的時間不相同，也可能造成茶菁內容物含量因萎凋時間延長，產生不同程度之生化反應，造成茶菁內容物含量的變動差異。最後，此節以初期萎凋光源與相對溼度為影響茶菁內容物之因子，在不同萎凋階段比較，茶菁在 Stage 2 與 Stage 3 處理間的含水率是相近的，Stage 1 雖含水率有較大的差異，但比起萎凋三階段的含水率差距是相對較小的 (表 3)，在處理間的比較許多都未達顯著差異，初期萎凋光源與相對溼度對茶菁內容物的差異，在三個萎凋階段趨勢也不一致，茶菁含水率可能為影響茶菁內容物的重要因子，在含水率差距較小時，處理間較難比較出較明確的差異，而萎凋初期光源與相對溼度的效應，也無法延續至萎凋後期。

此節以萎凋初期光源為影響茶菁內容物含量之因子的結果來看，紫外線萎凋 (UVA) 之茶菁能較能觀察出，茶菁總多元酚類與兒茶素類含量，在萎凋過程取樣大多較其他處理低。以光源與萎凋相對濕度為影響茶菁內容物含量的兩因子，能觀察到萎凋初期照光時高濕度萎凋處理，不可避免的會造成萎凋空間溫度提高 (表 1)，

使高濕度萎凋處理茶菁 Stage 1 之總游離胺基酸含量有四次高於正常萎凋處理，其中兩次達顯著高於正常萎凋處理。此外，照光高濕度萎凋處理後，再靜置萎凋至與正常萎凋相近含水率時，高濕度萎凋處理之茶菁總游離胺基酸含量大多高於正常萎凋處理，顯示萎凋初期溫度可能使茶菁總游離胺基酸含量增加，但隨靜置萎凋延長，茶菁含水率下降，最初照光高濕度萎凋之影響，則在處理間差異的趨勢不一致。

## 第二節、萎凋初期光源、相對溼度與萎凋階段對茶菁之影響

第一節萎凋初期光源與相對溼度的比較，在相同萎凋階段時，不同處理間茶菁內容物含量較難看出一致的趨勢，此節加入萎凋階段為影響因子，探討隨萎凋延長，茶菁含水率下降對茶菁內容物的影響。首先，討論萎凋初期光源與相對溼度處理之茶菁，於三個萎凋階段內容物含量的平均，比較是否萎凋初期照光的效應能影響整體萎凋過程中茶菁內容物的含量。接著，討論在三個萎凋階段的變化，此數據為平均不同處理在相同萎凋階段茶菁內容物含量。

### 一、萎凋初期照光對茶菁內容物的影響

#### (一) 總多元酚、兒茶素類與沒食子酸

以初期萎凋光源為影響茶菁萎凋內容物含量的因子。總多元酚類在紫外線照射下的影響 (表 19)，4/11 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總多元酚類含量顯著低於日光萎凋組 (SW)；8/31 日的試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總多元酚含量顯著低於紅外線萎凋 (IR) 與室內萎凋組 (IW)，雖紫外線萎凋組 (UVA) 含量低於日光萎凋組 (SW)，但未達顯著差異。4/18 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總多元酚類含量高於日光萎凋組 (SW)，但未達顯著差異。參照表 20，4/11 與 8/31 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 也顯著低於其餘處理。

從茶菁之游離型兒茶素類含量觀察 (表 21)，8/31 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA)，茶菁總游離型兒茶素含量顯著低於其餘處理，4/11 與 4/18 日試驗則略低於日光萎



凋組 (SW)，但未達顯著差異。參照表 22，4/11 與 4/18 日試驗紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總游離型兒茶素含量皆顯著低於日光萎凋組 (SW)，而 8/31 日試驗則為三種光源間最高。從茶菁酯型兒茶素類含量觀察 (表 23)，4/11 日試驗紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總酯型兒茶素含量顯著低於其餘處理。參照表 24，4/11 與 4/18 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總酯型兒茶素含量顯著低於日光萎凋組 (SW)。從茶菁之酯型兒茶素類含量觀察 (表 23)，4/11 日試驗紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總兒茶素含量顯著低於日光萎凋組 (SW)。參照表 24，4/11 與 4/18 日試驗紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁總兒茶素含量顯著低於日光萎凋組 (SW)，8/31 日試驗則顯著低於紅外線萎凋組 (IR)。

紅外線對於茶菁總多元酚含量的影響 (表 19)，在 6/11 日的試驗，日光萎凋組 (SW) 茶菁總多元酚含量顯著低於紅外線萎凋組 (IR)，8/31 日試驗中日光萎凋組 (SW) 含量也略低於紅外線組 (IR)，然而在 6/18 日的試驗中結果卻相反，但皆未達顯著差異。參照表 20 也有相似的結果，日光萎凋組 (SW) 之茶菁總多元酚類含量，在三次試驗中，有兩次顯著低於紅外線萎凋組 (IR)。在茶菁兒茶素類含量的比較 (表 21-26) 也有相似的結果。

另外，觀察照光萎凋相對濕度對茶菁總多元酚類的影響 (表 20)，6/11 與 6/18 日試驗中，高溼度萎凋處理茶菁總多元酚類含量顯著低於正常萎凋處理。照光萎凋相對濕度對茶菁總游離型兒茶素的影響 (表 22)，4/11、6/18 與 8/31 日試驗高溼度萎凋處理茶菁總游離型兒茶素含量顯著低於正常萎凋組。照光萎凋相對濕度對茶菁總酯型兒茶素的影響 (表 22)，4/11 與 6/18 日試驗高溼度萎凋處理茶菁總游離型兒茶素含量顯著低於正常萎凋組。照光萎凋相對濕度對茶菁總兒茶素的影響 (表 24)，僅 6/18 日試驗高溼度萎凋處理茶菁總兒茶素含量顯著低於正常萎凋組。



## (二) 總游離胺基酸

在五次試驗中萎凋初期光源皆對茶菁總游離胺基酸達顯著差異，萎凋初期光源與萎凋階段皆有交感 (表 29)，無法明確判斷何種光照處理能造成萎凋過程中總游離胺基酸含量的較一致的影響。若是以照光萎凋相對濕度的影響來看 (表 30)，只在 4/18 日試驗中，在高濕度萎凋組茶菁總游離胺基酸含量顯著高於正常萎凋組。在數次試驗中萎凋初期以日光、紫外線與紅外線萎凋 (表 29)，無法明確指出何種照光萎凋處理能提高茶菁萎凋過程中的茶菁總游離胺基酸含量，甚至未照光之室內萎凋 (IW) 在幾次中，總游離胺基酸含量也顯著高於照光處理。

## (三) 咖啡因

萎凋初期光源對於茶菁咖啡因的影響 (表 31)，其中 4/11 與 4/18 日試驗中，萎凋初期光源有達顯著差異，雖然在此兩次的室內萎凋組 (IW) 咖啡因含量皆為最低，但在其餘的試驗中咖啡因含量較無一致的結果。參照表 32，只有在 4/18 日試驗，紫外線萎凋組 (UVA) 茶菁咖啡因含量顯著低於日光萎凋組 (SW)，另外，僅此次試驗萎凋初期相對溼度達顯著差異。整體來說，萎凋初期照光與相對溼度對於茶菁咖啡因含量的影響不明確。

## (四) 討論

萎凋初期以紫外線照射處理之茶菁，茶菁的總多元酚與兒茶素類含量較其他處理低。多元酚類物質能在波長 290 nm-390 nm 有較強的吸收能力，在吸收到紫外線時可能會降解或被氧化，林 (2011) 以 UV-B 照射茶菁，能造成兒茶素類含量降低。多元酚類作為抗氧化物質，可能會降解或非酵素性氧化 (Hollosoy, 2002)，以 UV-B 照射後菠菜之類囊體膜檢測出自由基生成 (Hideg and Vass, 1996)，因此以紫外線照射可能導致植體多元酚類非酵素性氧化。受到紫外線刺激後，植物也可能在植體中累積多元酚類物質 (Ai et al., 2017; Hollósy, 2002)，例如蘋果採後照射 36 小時



UV-B 儲藏試驗，果皮類黃酮化合物含量減少，其中黃酮醇類含量顯著低於對照組，但後續儲藏試驗 (7 天、14 天與 21 天)，總多元酚與類黃酮類的含量則會提高，但儲藏時間再延長，類黃酮類的含量則會降低 (Assumpção et al., 2018)。Ai 等 (2017) 研究指出茶菁經 9 小時的照光萎凋後製成紅茶，再分析內容物的含量，雖試驗經紅茶發酵階段，不過發現以 UV-C (260nm) 照射組，總兒茶素含量顯著高於未照光組，而總多元酚含量也較高，雖然此實驗方式與本試驗不盡相同，但萎凋時期照射紫外線處理之茶菁，最後兒茶素類含量與多元酚含量較未照光組高。

照射紫外線可能會因為產生自由基，而消耗植體內多元酚類與兒茶素類，但也可能刺激這類物質的合成與累積。照射的強度與持續的時間，到後續取樣的時間，都有可能造成化合物在植體內含量的變動。日光輻射到達地面約有 54% 為紅外線，為日光主要的輻射熱來源 (Tanaka and Matsuo, 2011)。本試驗結果顯示紅外線與日光效果差異不大。張等 (1995) 的研究，也顯示遠紅外線萎凋茶葉的品質與日光萎凋差異不大。本試驗紫外線萎凋 (UVA) 與紅外線萎凋 (IR) 相比，其對茶菁多元酚類與兒茶素類含量影響較明顯，另外，室內萎凋組 (IW) 茶菁之總多元酚類與兒茶素類含量也值得探討，Zhu 等 (2019) 指出，經日光萎凋 45 分鐘的茶葉，總多元酚與總兒茶素類皆顯著低於 45 分鐘室內萎凋組，不過其試驗茶菁的含水率應該不同。本試驗室內萎凋組 (IW)，含水率在 Stage 2 與 Stage 3 與其他處理相近，室內萎凋組 (IW) 茶菁總多元酚與兒茶素含量未必較照光處理高，推測可能是室內萎凋組 (IW) 雖萎凋初期未受光源照射，但因為需靜置萎凋相對較長時間才能至目標含水率，使其總多元酚類氧化反應較多，不過在五次試驗中並沒有一致的結果。

此外，可以觀察到照光高溼度萎凋組，雖然減緩茶菁失水，但不可避免會造成萎凋環境溫度提高 (表 1)，雖只有在最初的 1 小時在處理間的溫度有差別，但後續靜置萎凋時，室內的溫度一致，然而可發現在最初高濕度萎凋處理，6/11 與 6/18 日試驗 (表 20)，萎凋三階段茶菁平均總多元酚含量，顯著低於正常萎凋組低，顯示初期萎凋時短暫的熱效應，有可能影響到後續萎凋內容物的變動。此結果可能的



原因為，6 月份兩次試驗室內之溫度 35°C 與 34.5°C，進行日光萎凋與紅外線照射萎凋溫度提高至 37°C 至 42°C，若再於高濕度環境照光萎凋，則環境溫度提升 3°C 至 5°C (表 1)，相比於 4 月份的兩次試驗，最高萎凋溫度為 33°C，可能更有利於茶菁兒茶素類氧化聚合，使減少茶菁總多元酚類與兒茶素類含量。

針對初期萎凋光源對於茶菁總游離胺基酸的影響，Ai 等 (2017)指出，紅茶萎凋時照射 9 小時 UV-C (260 nm)處理之茶菁，茶菁胺基酸的含量較低，由於胺基酸較強的吸收波段為 190 nm - 290 nm，可能與紫外線造成氧化降解有關。本試驗以 UV-A 照射，除因波長較長可能無法影響總游離胺基酸含量之外，也可能與照射時間長短有關，使本試驗紫外線萎凋對茶菁總游離胺基酸含量的影響，與其他光照處理差異不顯著。萎凋溫度也是影響游離胺基酸含量的因素之一，Ye 等 (2018)指出，萎凋溫度顯著影響茶菁總游離胺基酸含量，萎凋時間相同之下，25°C 萎凋環境之茶菁總胺基酸含量顯著高於 20°C 與 15°C 萎凋處理。本試驗中，處理間的溫度差異只有在前 1 小時有差距，各照光處理在萎凋階段的平均含量與未照光的室內萎凋組 (IW)比較，萎凋初期照光處理之茶菁總游離胺基酸含量，在五次試驗中僅在 4/11 與 6/11 日試驗顯著高於室內萎凋組 (IW)。張 (1992)指出高溫能促進茶菁蛋白質水解，另外植物葉片遇到缺水逆境會促使細胞合成胺基酸 (Araújo et al., 2011)，本試驗雖在一開始的照光萎凋組可能有溫度與光質效應，能加速茶菁蛋白質水解或刺激胺基酸合成，但室內萎凋組 (IW)由於失水較慢，在含水率相同基準取樣時萎凋時間最久，導致有更多時間將蛋白質水解成胺基酸，或使細胞合成胺基酸，造成茶菁總游離胺基酸含量較高。實際上萎凋前期短暫的溫度差異，是否足以影響後續長時間靜置萎凋變化值得探討，萎凋時間與茶菁含水率又有相關，使茶菁總游離胺基酸含量受多因子的影響。



## 二、萎凋階段對茶菁內容物的影響

萎凋階段的取樣是依據茶菁含水率，較後面的萎凋階段，代表茶菁含水率較低，也可作為影響茶菁內容物含量變動的壓力。

### (一) 總多元酚、兒茶素類與沒食子酸

萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總多元酚含量的影響 (表 19)，4/18、6/11 與 8/31 日在 Stage 3 茶菁總多元酚類含量為階段最低，其中 8/31 日達顯著差異。6/18 日試驗，Stage 3 茶菁總多元酚類含量則顯著高於 Stage 2。萎凋初期光源、相對濕度與萎凋階段對茶菁總多元酚含量的影響 (表 20)，4/11、4/18、6/11 與 8/31 日試驗在 Stage 3 茶菁總多元酚類含量最低，其中 4/18 與 8/31 日試驗達顯著差異，能觀察到茶菁總多元酚類含量，隨萎凋階段延後而遞減的現象。總游離型兒茶素含量之結果 (表 21)，4/18、6/11 與 8/31 日試驗茶菁在 Stage 3 總游離型兒茶素含量最低，其中 4/18 與 8/31 日試驗在 Stage 3 顯著最低。再參照表 22，除 4/11 日試驗外，其餘試驗在 Stage 3 茶菁總游離型胺基酸含量最低。總酯型兒茶素含量之結果 (表 23)，4/18、6/11 與 8/31 日試驗在 Stage 3 茶菁總酯型兒茶素含量最低，但未達顯著差異。總兒茶素含量之結果 (表 25)，除 6/11 日試驗外在 Stage 3 取樣者，總兒茶素類含量皆為最低，其中 4/11、4/18 與 6/18 日試驗達顯著差異。雖然在五次試驗中，茶菁總多元酚類與兒茶素類含量未必會隨萎凋階段延長而遞減，但仍可觀察到茶菁總多元酚與兒茶素類含量，會因為茶菁含水率下降而降低。

萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響 (表 27)，除 6/18 日試驗外，在其餘四次試驗中，沒食子酸含量隨萎凋過程延後而增加，五次試驗中以萎凋階段為因子皆對沒食子酸含量達顯著差異，但其中四次試驗與照光萎凋處理有交互。再參照表 28，4/18、6/11 與 8/31 日試驗在 Stage 3 茶菁沒食子酸含量顯著最高。



## (二) 總游離胺基酸

茶菁萎凋階段總游離胺基酸含量之影響 (表 29)，茶菁總游離胺基酸含量除 6/18 日試驗茶菁總游離胺基酸含量在 Stage 1 較 Stage 2 高之外，其含量隨著茶葉逐漸萎凋而增加，亦即在五次試驗中在 Stage 3 總游離胺基酸含量皆為最高，而且以萎凋階段為因子來看，總游離胺基酸的差異皆達顯著水準，不過五次試驗與萎凋初期光源有交感。再參照表 30，除 6/11 與 6/18 日試驗外，其餘試驗茶菁總游離胺基酸含量，皆隨萎凋階段延長而含量遞增，且皆達顯著差異。

## (三) 咖啡因

茶菁萎凋階段對咖啡因的含量之影響 (表 31)，4/11、4/18 與 6/18 日試驗，茶菁咖啡因含量隨萎凋階段而遞增，但 6/18 日試驗未達顯著差異。再參照表 32，在五次萎凋試驗在 Stage 3 茶菁咖啡因含量皆為最高，但僅 4/11 與 4/18 日試驗達顯著差異。茶菁隨萎凋延長，含水率降低，茶菁咖啡因含量會增加，但含量變動在 0.1% 左右，6/11、6/18 與 8/31 皆未達顯著差異。

## (四) 討論

兒茶素類為茶葉中最主要的多元酚類化合物 (甘, 1984)，在萎凋時的含量有可能會增減，還具生物活性的茶菁也可能在萎凋期間合成兒茶素類，此現象在 Ye 等 (2018) 綠茶長時間靜置萎凋中有發現。從圖 1 至圖 2 可見五次試驗中，八種兒茶素類化合物的含量在不同萎凋階段，茶菁兒茶素類含量並非隨萎凋遞減。以上結果顯示，雖然茶菁總多元酚含量雖非一致的隨萎凋時間遞減，但仍發現當茶葉萎凋，令含水率降低後，茶菁總多元酚與兒茶素類含量有減少的現象。當茶菁含水率下降，細胞內的生物膜通透性提高，導致存在於液胞內的多元酚類釋出至細胞質內，使多酚氧化酶與多元酚類作用 (Sanderson, 1968)，本試驗茶菁總多元酚含量與兒茶素類含量降低的現象與前人研究相符。

除此之外，萎凋過程中茶菁沒食子酸含量增加，造成此現象原因可能為，酯型兒茶素結構上的沒食子醯基，在萎凋過程中分解為游離型兒茶素與沒食子酸 (Qin et al., 2012)，也可能與 EGCG 和 GCG 降解有關 (Ölmez and Yilmaz, 2010)，此結果與綠茶長時間萎凋的研究相符 (Ye et al., 2018)。雖然沒食子酸含量增加的現象，可能與酯型兒茶素降解為游離型兒茶素與沒食子酸有關，但本試驗中茶菁游離型兒茶素含量在萎凋過程中，也呈現下降趨勢而非增加，應該與游離型兒茶素類也被氧化聚合有關，使茶菁游離型兒茶素含量降低。

本試驗茶菁總游離胺基酸含量隨萎凋延長，茶菁含水率降低而上升的結果，與紅茶萎凋 (Sanderson, 1964)或部分發酵茶萎凋 (張等, 1995)過程總游離胺基酸含量上升的現象相符。茶葉萎凋時細胞內蛋白質會分解成胺基酸，使游離胺基酸含量增加 (Kalidass et al., 2019)。其他植物的研究指出，油菜遇缺水逆境會累積游離胺基酸 (Good and Zaplachinski, 1994)，阿拉伯芥遭遇非生物逆境也可能合成胺基酸 (Hildebrandt, 2018)來對抗逆境，茶菁可能在萎凋時含水率降低或萎凋初期照光使茶菁產生逆境，促進合成胺基酸或累積胺基酸。然而，Sanderson (1964)進行萎凋試驗時，比較以聚乙烯之塑膠袋密封保持含水分之茶菁，發現以塑膠袋密封幾乎未失水的茶菁，其游離胺基酸含量也會隨著時間而上升，且變化趨勢相近，顯示胺基酸含量提升可能與茶菁含水率未有直接相關，但未以塑膠袋密封之正常萎凋茶菁，總游離胺基酸含量上升的速率較快。相較於萎凋階段的茶菁總多元酚含量減少比率，總游離胺基酸在 Stage 1 至 Stage3 含量增加的比率較高，且隨萎凋階段變化的趨勢較為明確。

本試驗中茶菁咖啡因含量隨著萎凋延長而增加，與紅茶長時間萎凋的試驗相符 (Sanderson, 1964)，但此結果與張等 (1995)提出綠茶、包種茶、烏龍茶與紅茶製程中，茶菁咖啡因含量變動不大，仍有含量下降的趨勢不相符。Ye 等(2018)指出綠茶長時間的萎凋試驗中，萎凋溫度對咖啡因含量無顯著影響，但萎凋時間對茶菁咖啡因有顯著影響。本驗中在 Stage 2 取樣後有輕微的攪拌，但不足以造成咖啡因含



量的變動，咖啡因含量隨萎凋時間而增加，與紅茶與綠茶長時間萎凋之結果較為相近。Roberts 與 Sanderson (1966) 以  $^{14}\text{C}$  標定的甘胺酸 (Glycine- $^{14}\text{C}$ )，將採摘之茶芽葉柄處吸入甘胺酸後，檢測萎凋茶菁中的咖啡因也出現放射性，推測咖啡因含量增加的現象可能與胺基酸代謝有關。製作紅茶萎凋時，茶菁茶胺酸減少量，與咖啡因增加量達高度相關 ( $R^2 = 0.87$ ) (Sari and Velioglu, 2013)。本試驗茶菁咖啡因含量在萎凋階段的含量變化量，相比總多元酚與總游離胺基酸來說較低，可說是相對穩定的化合物，且含量的變化量約在 0.1% 左右，但由於利用 HPLC 測定茶湯咖啡因含量精準，以萎凋階段為影響茶菁咖啡因含量的因子，在兩次試驗中達顯著差異。

平均各光照處理，在不同階段茶菁內容物的含量，茶菁含水率下降時對內容物的影響趨勢較為明確，萎凋初期光源與相對溼度的影響則較沒有一致趨勢。當不同萎凋初期光照與相對溼度處理後產生的差異，在靜置萎凋的過程逐漸被消除或是波動更大，在相同萎凋階段比較時，處理間茶菁含水率之差異，比起三階段的含水率差異來說相對較小，導致沒有一致的趨勢。整體來說，茶菁在長時間靜置萎凋，茶菁含水率下降的影響性，相較於萎凋初期光源與相對溼度的處理，對於茶菁內容物的變化較為明顯。當茶菁含水率下降使細胞電解質滲漏的程度產生差異，可能是影響茶菁內容物變化較為重要因子，在下一節以細胞膜熱穩定性代表細胞電解質滲漏的程度繼續討論。

### 第三節、初期照光處理與萎凋茶菁含水率對茶菁細胞膜熱穩定性之影響

日光萎凋過程中，缺水、高溫與紫外線都可能造成茶菁細胞膜熱穩定性下降的因子，本試驗在萎凋初期以不同光源與萎凋相對濕度處理，比較照射 1 小時日光、紫外線、紅外線與未照光的處理，對於後續萎凋過程中茶菁細胞熱穩定性的影響。以細胞膜熱穩定性的檢測方式，分析萎凋初期處理與室內萎凋失水造成細胞電解質滲漏 (Electrolyte leakage) 的差異。7/29 的試驗中比較日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA)、紅外線萎凋 (IR)，並加入未照光之室內萎凋組 (IW) 比較，照光完成後取樣為 Stage 1，靜置萎凋階段，依設定之含水率取樣三次，分別為 Stage 2、stage 3 與 stage 4 (表 3)。9/6 日試驗，加入日光高濕度萎凋 (SWH)、紫外線高濕度萎凋 (UVAH)、紅外線高濕度萎凋 (IRH)，共七種處理在萎凋階段測定茶菁細胞膜熱穩定性進行比較。

7/29 日萎凋茶菁細胞膜熱穩定性試驗 (圖 6)，萎凋初期處理間僅有在 Stage 2 達顯著差異，日光萎凋組 (SW) 顯著低於其他組，然而在 Stage 3，日光萎凋組 (SW) 細胞膜熱穩定性則高於其在 Stage 2 數值，從整體來看仍可看出細胞膜熱穩定性隨茶菁含水率含下降。將細胞膜熱穩定性與各處理間茶菁失重率，兩者之回歸關係 (圖 7)，呈斜率為負之一次方程式： $Y = -0.7398X + 54.3055$  ( $R^2 = 0.6075$ ,  $P < 0.0001$ )，可以看出茶菁萎凋失水後細胞膜熱穩定性降低。9/6 日試驗 (圖 8)，在 Stage 1 處理間茶菁細胞膜熱穩定性未達顯著差異，雖然照光 60 分鐘後，各處理茶菁失重雖有些許的差異 (圖 9)。後續的萎凋階段處理間皆達顯著差異，在 Stage 2 茶菁細胞膜熱穩定性最高與最低分別為，日光萎凋組 (SW) 與紅外線高濕度萎凋組 (IRH)，而在 Stage 3 紅外線高濕度萎凋組 (IRH) 卻高於日光萎凋組 (SW)，在 stage 4 紅外線高濕度萎凋組 (IRH) 甚至是處理間最高。雖然在後續萎凋階段處理間皆達顯著差異，但由於不同處理在萎凋階段細胞膜熱穩定性未有一致的表現，與 7/29 日試驗相同，試驗結果未能顯示萎凋初期光源與萎凋相對濕度，對茶菁細胞膜熱穩定性在萎凋過程中的影響。綜合 9/6 日試驗所有處理之茶菁失重率與細胞膜熱穩定性回歸關係

(圖 10)，為開口向下的二次曲線： $Y = -0.06(X - 6.719)^2 + 79.359$  ( $R^2 = 0.7349, P < 0.0001$ )，可看出細胞膜熱穩定性隨萎凋延長，茶菁失重率越高，亦即茶菁含水率下降，細胞膜熱穩定性將降低。當茶菁失重率低於 10%，茶菁細胞膜熱穩定性較為穩定 (圖 10)，而在失重率超過 10% 之後，細胞膜熱穩定性下降幅度較大。觀察茶菁萎凋失水與時間的關係 (圖 9)，將處理間的萎凋時間與茶菁失重率連線，幾乎所有處理皆呈現凹向上的曲線，顯示在萎凋後期茶菁失重速率減緩。以各處理萎凋時間與茶菁細胞膜熱穩定性之關係來看 (圖 11)，茶菁細胞膜熱穩定性隨萎凋時間遞減，兩者呈一次回歸關係： $Y = -0.0485X + 84.1927$  ( $R^2 = 0.6303, P < 0.0001$ )。

本研究茶菁細胞膜熱穩定性測定，挑選茶菁大小相近的第二片葉子，並避開葉片中肋取得葉圓片，但在取樣時樣品均質度不一，尤其在 Stage 3 及 Stage 4 茶菁含水率下降後，葉片膨壓減少使茶菁呈現較柔軟的狀態，更難選擇較一致的茶菁取樣，甚至出現茶菁失重率較低，而細胞膜熱穩定性較高的情形。兩次試驗中起始之茶菁細胞膜熱穩定性有些差距，但都未達顯著差異，7/29 日試驗之 Stage 1 茶菁細胞膜熱穩定性約為 50%，而 9/6 號試驗則約為 80%。此現象可能的原因是，兩次試驗採摘茶菁月份不同，採摘時芽葉的狀態也不盡相同，使兩次試驗茶菁電解質滲漏程度與高溫加熱至完全破壞葉圓片之電導度有差異，造成整體萎凋過程細胞膜熱穩定性數據有差距。林等 (2020) 指出，以 UV-A、UV-B 與 UV-C 處理之茶菁，30 分鐘後細胞膜熱穩定性均顯著低於靜置未照光的茶菁，然而本試驗結果在萎凋初期之處理，照光 1 小時後，Stage 1 取樣處理間細胞膜熱穩定性皆未達顯著差異，7/29 日試驗在 Stage 1 茶菁葉圓片取樣均質度較差，使處理標準差較大，處理間統計上未達顯著差異 (圖 6)；9/6 日試驗在 Stage 1 七個處理間細胞膜熱穩定性差異不大，但可看出室內萎凋組 (IW) 細胞膜熱穩定性較其他處理高。

從兩次試驗結果來看，萎凋初期的處理在後續萎凋過程中，並沒有一致的表現，所以無法說明萎凋初期不同光源與相對溼度的處理，是否對茶菁產生不同程度的傷害，而影響後續萎凋過程中的細胞膜滲漏的狀況。然而，透過回歸分析還是能觀

察出，當萎凋茶菁失重越多，細胞滲漏的情形較為嚴重，使浸泡葉圓片之去離子水電導度提升較高，茶菁細胞膜熱穩定性較低。9/6 日試驗可觀察到茶菁在萎凋初期，茶菁失重的速率較快，而在萎凋後期則較為緩慢。茶菁失重率與細胞膜熱穩定性做回歸關係為開口向下的二次曲線，而茶菁萎凋時間與細胞膜熱穩定性數據，則呈現斜率為負之一次方程式較為適合。

Sanderson (1964) 指出茶菁萎凋時逐漸失水，使細胞膜通透性提高，增加細胞內物質的接觸機會，引發茶菁細胞內的生化反應。本試驗也有相似的結果，整體來看，當茶菁失重率隨萎凋過程增加，細胞膜熱穩定性會持續降低，細胞電解質滲漏的程度會增加，茶菁含水率下降的壓力對茶菁細胞膜熱穩定性的影響，較萎凋初期的處理更為明確。前一節茶菁內容物含量的變化也顯示隨萎凋階段延長，茶菁含水率下降，其含量的變動趨勢較明確。以上結果均顯示茶菁萎凋過程中含水率差異，是萎凋過程中造成茶菁內容物與電解質滲漏的重要因子，電解質滲漏的程度增加，也促使細胞之生化反應。初期照光處理雖可使茶菁快速失水，減少室內萎凋的時間，但藉由增加室內萎凋時間使茶菁緩慢失水，也能到達相同的效果。

Kobayashi 等 (1985) 部分發酵茶與張 (1992) 包種茶的日光萎凋研究，在不同日光萎凋時間之下，將不同處理之茶菁進行室內萎凋，後續室內萎凋與攪拌時，以相同萎凋時間為攪拌茶菁依據，處理間茶菁含水率有差異存在，若以本試驗的結果來看，細胞膜熱穩定性與茶菁含水率高的相關性，在攪拌時不同含水率下，可能會影響攪拌對茶菁細胞內的生化反應。林 (1956) 指出包種茶與烏龍茶製造時，前兩次攪拌會使用較輕的手法，之後的攪拌力道需加重，如果萎凋茶菁水分含量尚多時，攪拌過度會阻礙蒸發，可能有損成茶的品質。若以本試驗結果來看，萎凋初期茶菁含水率較高時，茶菁細胞膨壓較高，狀態較為堅挺，且細胞膜熱穩定性較高，代表細胞電解質滲漏程度較低，反應基質與酵素被包膜隔離的程度高，此時較重度的攪拌可能也無法促進化合物反應，反而有負面的影響。茶菁細胞滲漏現象除了是茶菁含水率下降所造成，也可能受攪拌之機械性傷害，使細胞電解質滲漏程度上升。陳



(1995)指出攪拌作用能促進兒茶素類從茶葉細胞之液胞滲透出，可活化多元酚氧化酶活性，若是茶菁細胞膜熱穩定性有差異，可能令茶菁在攪拌後滲漏的程度不一，而影響非揮發性與揮發性化合物的變化，若是不同日光萎凋時間處理，室內萎凋茶菁於相近含水率進行攪拌或殺菁，其結果值得進一步試驗。

#### 第四節、萎凋初期光源與相對溼度對茶菁多元酚氧化酶活性之影響

多元酚氧化酶是引發茶葉多元酚氧化的重要酵素 (甘, 1984)，室內萎凋茶菁多元酚氧化酶活性隨萎凋延長逐漸提高，攪拌後能短暫提升多元酚類氧化酶活性 (陳, 1995; 蔡等, 2002)。初期的照光是否能影響後續萎凋過程的茶菁多元酚氧化酶活性在以下討論。

以萎凋初期處理與萎凋階段為影響多元酚氧化酶活性的兩因子，進行複因子變方分析 (表 33)，多元酚氧化酶活性在 Stage 3 顯著高於 Stage 2，而 Stage 3 與 Stage 1 則未達顯著差異。多元酚氧化酶活性與萎凋的溫度有關 (陳, 1995; Sanderson, 1966)，由於萎凋初期以日光、紫外線與紅外線照射，並分為正常萎凋與高濕度萎凋處理，造成茶菁萎凋環境的溫度差異 (表 1)，使多元酚氧化酶活性在 Stage 1 處理之多元酚氧化酶活性皆高於室內萎凋組 (IW)，而在經過一段時間的靜置萎凋後，多元酚氧化酶的活性在 Stage 2 較 Stage 1 低但未達顯著差異 (表 33)。從圖 12 與圖 13 可看出鮮葉 (FRESH)與未照光的室內萎凋 (IW)，在萎凋初期含量較低，將茶菁照光 1 小時後，應該是光源或溫度的效應，提升多元酚氧化酶活性。蔡等 (2002)指出包種茶隨萎凋時間延長，多元酚氧化酶活性提高，陳 (1995)也提到紅茶萎凋時間越常，多元酚氧化酶活性也會提高，不過由於本試驗萎凋初期照光與高相對濕度的處理，使茶菁多元酚氧化酶活性提高，在 Stage 1 茶菁含水率較高的狀態下，反而多元酚氧化酶活性較高，從含水率與多元酚氧化酶活性做散佈圖 (圖 14)，無法看出特定的趨勢，Stage 3 平均個處理多元酚氧化酶活性最高，Stage 1 次之，而 Stage 2 最低。因為初期光源與相對溼度的處理，使本試驗萎凋階段多

元酚氧化酶活性的趨勢，與先前茶菁萎凋多元酚氧化酶活性的結果較不相符。

圖 15 為初期照光萎凋溫度與多元酚氧化酶活性之回歸關係，可同時參照圖 12 的 Stage 1 單因子變方分析處理間的差異。未經光照的室內萎凋組 (IW) 多元酚氧化酶活性為處理間最低，其取樣時機為萎凋至對應紫外線萎凋組 (UVA) 光照結束時之含水率，萎凋溫度為 30°C 與其他處理相比較低 (表 1)。活性次低的為日光高濕度萎凋組 (SWH)，萎凋溫度為 40.5°C 是處理間最高，可能是環境溫度過高，且葉片在高濕度環境也較難利用蒸散方式降低葉溫，導致多元酚氧化酶的活性降低，然而陳 (1995) 指出，以遠紅外線萎凋之茶菁，在萎凋溫度為 40°C 時，多元酚氧化酶活性高於 35°C 與 45°C 處理。

複因子變方分析中照光萎凋處理間的比較 (表 33)，在紫外線高濕度萎凋組 (UVAH)，為處理間活性最高的處理，其次為紅外線萎凋 (IR) 與紅外線高濕度萎凋組 (IRH)，但三處理間未達顯著差異。處理間活性最低的為日光高濕度萎凋組 (SWH)，次低的為室內萎凋組 (IW) 與紫外線萎凋組 (UVA)。此試驗與茶菁內容物分析的試驗未同時進行，但將先前試驗茶菁萎凋總多元酚含量數據觀察，雖然初期紅外線萎凋 (IR) 與紅外線高濕度萎凋組 (IRH) 的多元酚氧化酶活性下，在萎凋過程的平均較高，但在表 19 中 8/31 日試驗複因子變方分析，紅外線萎凋組 (IR) 茶菁總多元酚含量顯著高於紫外線萎凋組 (UVA)，三因子變方分析中 (表 20)，8/31 日試驗紅外線萎凋組 (IR) 顯著高於日光萎凋組 (SW) 與紫外線萎凋組 (UVA)，理論上多元酚氧化酶在紅外線萎凋組 (IR) 酵素活性為處理間較高者，應造成總多元酚含量減少，然而在萎凋過程中茶菁多元酚含量較其他處理高，兩結果不太相符，但若是考慮到日光中的紫外線波段與照射紫外線的處理，可能在初期照光時造成多元酚類非酵素性的氧化，在萎凋初期先降低茶菁多元酚類的含量，導致在後續萎凋過程中，茶菁總多元酚類含量較低。另外，從統計分析探討，圖 12 與圖 13 可見紅外光 (IR) 與紅外光高濕度萎凋組 (IRH) 在 Stage 1 的多元酚氧化酶活性，高於其在 Stage 2 與 Stage 3 的活性，使複因子變方分析中，三階段的多元酚氧化酶活性平均

較高。Stage 1 可能僅表示 1 小時照光萎凋時期活性，而長時間靜置萎凋過程，在 Stage 2 與 Stage 3 的紅外線萎凋 (IR)與紅外線高濕度萎凋組 (IRH)酵素活性和紫外光萎凋 (UVA)與紫外光高濕度萎凋組 (UVAH)差異不顯著 (圖 12)，造成處理間總多元酚類酵素性氧化的差異不明顯。由於試驗取樣的設計，在取樣的時機點的多元酚氧化酶活性，以複因子變方分析，可能無法明確表示茶菁長時間萎凋過程中多元酚氧化酶平均活性的變化，初期照光使茶菁多元酚氧化酶活性提升較多，也未必能影響長時間靜置萎凋多元酚氧化酶的活性。

### 第五節、萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶揮發性化合物之影響

本試驗利用固相微萃取 (Solid phase microextraction, SPME)技術，搭配氣相層析儀串聯質譜儀 (GC-MS)分析萎凋過程中之茶菁，以及經殺菁、揉捻、烘乾後的毛茶樣品，共分析出 36 種可以辨識的化合物 (表 34)，以圖譜中化合物積分面積除以內標十三烷 (Tridecane)之積分面積，換算出相對豐度後，並計算不同揮發性化合物總類之百分比列於表末。日光萎凋 (SW)與日光高濕度萎凋 (SWH)、紫外線萎凋 (UVA)與紫外線高濕度萎凋 (UVAH)、紅外線萎凋 (IR)與紅外線高濕度萎凋 (IRH)及室內萎凋組 (IW)分別參照表 35、表 36、表 37 與表 38。

在茶菁與毛茶樣品中，揮發性化合物以萜類 (Terpenoids)、醛類 (Aldehydes)與醇類 (Alcohols)為主，在分別占總相對豐度約 50 % - 70 %、10 % - 30 %與 4 % - 10 %，占毛茶的化合物分別約 50 %- 60 %、10 %- 20 %、10 %-15 % (表 35-38)。在樣品中的萜類化合物主要是單萜 (Monoterpenes)類物質，包括檸檬烯 (Limonene)、順式-羅勒烯 (cis- $\beta$ -Ocimene)、芳樟醇 (Linalool)、芳樟醇氧化物 (Linalool oxides I, II, III and IV)、松油醇 ( $\alpha$ -Terpineol)、環檸檬醛 ( $\beta$ -Cyclocitral)、香葉醇 (Geraniol)與檸檬醛 (Citral)，其中又以芳樟醇及其氧化物在茶菁占最高的相對豐度，不過在殺菁、揉捻與烘乾，製成毛茶後，這類化合物也從茶樣中大量散失，參照表 35 至 38 揮發性化合物相對豐度變化，Stage 3 至 Stage 4，經過高溫殺菁與烘乾後芳樟醇



(Linalool)、芳樟醇氧化物 I (Linalool oxide I) 與芳樟醇氧化物 II (Linalool oxide II) 的相對豐度大幅降低。醛類化合物為相對豐度次之的化合物種類，在茶菁樣品中出現己醛 (Hexanal)、己烯醛 ((E)-2-Hexenal)、庚醛 (Heptanal)、己二烯醛 ((E,E)-2,4-Hexadienal)、苯甲醛 (Benzaldehyde)、苯乙醛 (Benzeneacetaldehyd)、壬醛 (Nonanal) 等，主要為結構含六至九碳的化合物 (表 34)，在炒菁、揉捻與烘乾後，醛類物質大量逸散，僅剩庚醛 (Heptanal)、苯甲醛 (Benzaldehyde)、苯乙醛 (Benzeneacetaldehyd) 與壬醛 (Nonanal) 可以辨識得出，具六碳的醛類如己醛 (Hexanal)、己烯醛 ((E)-2-Hexenal) 幾乎完全逸散，Stage 4 (毛茶) 則未辨識出 (表 35-38)。基本上大部分的揮發性化合物經過高溫殺菁與烘乾後，在毛茶中的相對豐度是降低的，但可發現檸檬烯 (Limonene)、順式-羅勒烯 (cis- $\beta$ -Ocimene) 在 Stage 4 相對豐度是上升的 (圖 16 與圖 17)，可能與 SPME 纖維吸附揮發性化合物有競爭性有關。Wright 等 (2007) 指出固相微萃取技術，具有化合物互相競爭萃取相的問題，並受萃取相的材料影響，使揮發性較差或樣品中較微量的化合物，較不易被偵測與定量。在冷凍乾燥之茶菁大量的醛類化合物與芳樟醇與其氧化物，競爭萃取相的吸附空間，茶菁揮發性化合物加總之相對豐度介於 400 至 800 間，然而在經過殺菁與乾燥後，總揮發性化合物減少之下，總相對豐度介於 50 至 80 間，這兩種化合物反而有更多機會被萃取相吸附，使其相對豐度在毛茶增加，但也無法代表兩者在毛茶的含量較茶菁中高。

加總茶菁可辨識揮發性化合物相對豐度，可看出初期不同萎凋處理茶菁總相對豐度的變化 (表 35-38)。在正常照光萎凋結束時，日光萎凋 (SW) 與紅外線萎凋組 (IR) 茶菁總揮發性化合物相對豐度較鮮葉低，紫外線萎凋組 (UVA) 則總相對豐度較鮮葉高。三種光照的高濕度處理組，日光高濕度萎凋 (SWH) 與紅外線高濕度萎凋組 (IRH)，與正常萎凋組相反，總相對豐度高於鮮葉與正常照光萎凋處理，推測是因為處理時為了保持高濕度，以保鮮膜將空間密封，水蒸氣與茶菁釋出的揮發性化合物，造成萎凋空間內較高的氣體分壓，使茶菁內部的揮發性化合物較不易釋出，



光照結束時立刻放入液態氮中冷凍固定，揮發性化合物將較大量的保留於茶菁內；Stage 1 取樣時打開保鮮膜後，能嗅聞到較濃郁的氣味，或許能說明在萎凋空間內，茶菁釋出揮發性化合物濃度較高後，揮發性化合物將較難從茶菁逸散出。紫外線高濕度萎凋組 (UVAH)雖也有高濕度環境，但為了將燈源靠近茶菁，將燈座安裝於塑膠板上，再簡易蓋於萎凋空間上，密封效果可能較不佳，未有像其他高濕度處理總相對豐度提升的現象。若是比較日光高濕度萎凋組 (SWC)與紅外線高濕度萎凋組 (IRH)，Stage 1 與 Stage 1.5 總相對豐度則可以觀察到茶菁從高濕度空間移出，進行正常萎凋一段時間至 Stage 1.5 取樣，揮發性化合物總相對豐度大幅下降。由於三組初期萎凋經過高濕度處理，在揮發性化合物含量較難與正常萎凋相比，不過，從整個萎凋過程中比較仍可看出與初期處理時可能造成的影響。初期正常萎凋組，日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA)與紅外線萎凋組 (IR)，三者於 Stage 3 揮發性化合物總相對豐度，達萎凋時的高峰。然而，日光高濕度萎凋組 (SWH)與紫外線高濕度萎凋 (UVAH)則在 Stage 2 有最高的相對豐度，在 Stage 3 取樣時總相對豐度則降低，紅外線高濕度組 (IRC)雖在 Stage 3 總相對豐度最高，但也低於相同階段的紅外線萎凋組 (IR)。另外，室內萎凋組 (IW)也在 Stage 2 有最高的總相度豐度，在 Stage 3 相對豐度為七個處理最低，可能是萎凋時間最久所致。若以室內萎凋為對照，日光高濕度萎凋組 (SWH)與紫外線高濕度萎凋組 (UVAH)揮發性化合物的總生成量變化與室內萎凋較接近，最高的總相對豐度可能出現在 Stage 2 附近，再萎凋至 Stage 3，則揮發性化合物逸散的量比生成量多，使總相對豐度降低。當然試驗若能有更多的取樣點，此推測能更具說服力。

殺菁前的取樣 (Stage 3)，在茶菁含水率相近的基準下，正常萎凋組的總相對豐度皆高於高濕度處理，經過殺菁、揉捻烘乾後製成毛茶 (Stage 4)，正常萎凋也同樣高於高濕度處理。以初期萎凋光源 (Light resource)與相對溼度 (Relative humidity)作為兩因子，對 Stage 3 與 Stage 4 茶樣中具氣味的揮發性化合物進行複因子變方分析 (表 39)，樣品中揮發性化合物相對豐度，初期正常萎凋 (Normal)的情況下，



Stage 3 與 Stage 4 大多數化合物相對豐度高於高濕度處理 (High)，不過許多複因子變方分析結果顯示兩因子間有交感，若以單因子變方分析做七種處理間的分析 (表 40)，仍可發現前期萎凋高濕度組，即便照射不同光源，多數揮發性化合物在 Stage 3 與 Stage 4 相對豐度低於正常萎凋組。前期照光萎凋時，如果茶菁處於高濕度環境中，使其失水較緩慢，此種處理將影響到照光的效應，即使初期高濕度的萎凋溫度較高。茶菁萎凋到後期，即殺菁前的揮發性化合物相對豐度較低，也會導致毛茶揮發性化合物相對豐度較低。以試驗較後期階段的結果來說，試驗前期高濕度處理可能降低光照的效果，推測是因為茶菁失水較少減緩逆境的反應，此結果或許能說明茶菁照光時的失水有其必要性。

萎凋結束時 (Stage 3)揮發性化合物總類比例與毛茶 (Stage 4)之萜類與醛類與酮類化合物佔比減少，而醇類、酯類、含氮化合物與其他類化合物佔比提高 (表 35-38)。在毛茶之中許多醛類未被偵測到，庚醛 (Heptanal)為試驗中還存在且具青草味的醛類化合物，其餘的醛類如苯甲醛 (Benzaldehyde)、苯乙醛 (Benzeneacetaldehyd)與壬醛 (Nonanal)，同時可能具有青草味、花香、甜香 (表 34)，或許能說明殺菁後單純具青草味的醛類化合物大幅消散，還保留在毛茶中的揮發性化合物，有較多具花香、甜香、果香的化合物，例如順式-羅勒烯 (cis- $\beta$ -Ocimene)、檸檬烯 (Limonene)、苯乙醇 (Phenylethyl Alcohol)、水楊酸甲酯 (Methyl salicylate)、芳樟醇 (Linalool)及其氧化物 (Linalool oxides)，在毛茶中有較高的相對豐度 (表 35-38)。不過，揮發性化合物的相對豐度無法直接代表其在茶菁中的含量，此外，人類嗅聞不同揮發性化合物的閾值 (Threshold value)也不同，雖揮發性化合物可能含量較少，但對人的閾值低，也可讓人感受到氣味，例如芳樟醇閾值為 6 ppb，而  $\beta$ -紫羅蘭酮僅需 0.007 ppb，約為芳樟醇的千分之一 (Ho et al, 2015)。

由於本試驗之製茶流程只經過初期的照光 1 小時，進入室內萎凋只在 Stage 2 取樣後輕微攪拌，應屬於極輕度發酵之部分發酵茶，由於不像一般部分發酵茶，在室內萎凋的過程，進行數次不同程度的攪拌，導致成茶的氣味比較偏向綠茶。

在部分發酵茶攪拌後大量生成的茉莉酮 (Jasmone)、茉莉內酯 (Jasmine lactone)、茉莉酸甲酯 (Methyl jasmonate)、橙花叔 (Nerolidol)、己酸己酯 (Hexyl hexanoate)、順-3-丁酸己酯 (cis-3-Hexenyl butanoate)等 (Ma et al., 2018), 本次試驗則沒有在 GC-MS 辨識出。

甘 (1984)指出日本綠茶 (煎茶)與台灣包種茶主要香氣成分的差異。包種茶比起綠茶在橙花叔醇、茉莉內酯、茉莉酸甲酯，吲哚 (Indole)與芳樟醇氧化物，含量佔比較多，而日本綠茶苯甲醇與芳樟醇含量比例則較包種茶高。此外，綠茶的吲哚、苯甲醇、橙花叔醇、 $\beta$ -紫羅蘭酮、芳樟醇含量高於紅茶，而芳樟醇氧化物與水楊酸甲酯則低於紅茶。Kobayashi 等(1985)研究中，未經日光萎凋與攪拌之成茶，芳樟醇較其他處理含量高，但芳樟醇氧化物含量低於其他處理，Ma 等(2018)指出，在攪拌後茶菁芳樟醇的豐度會減少。推測日光與萎凋與攪拌使茶葉發酵時，芳樟醇也會轉為芳樟醇氧化物。

觀察本試驗中芳樟醇與其氧化物的相對豐度變化 (圖 18-22)。參照圖 18 在照光萎凋後 (Stage 1)，芳樟醇的含量僅紅外線高濕度萎凋 (IRC)增加，其餘皆低於鮮葉 (Stage 0)，再觀察圖 19 與 20，芳樟醇氧化物 I 與 II 的相對豐度，除紫外線高濕度萎凋 (UVAC)與紅外線萎凋組 (IR)化合物相對豐度未上升，其餘照光萎凋處理皆為上升。日光萎凋 (SW)組雖然芳樟醇 (Linalool) 在 Stage 3 相對豐度顯著低於紫外線萎凋 (UVA)與紅外線萎凋組 (IR) (表 39-NO. 18)，但可以觀察其氧化物 (Linalool oxide I II III IV)相對豐度，雖未達顯著差異但皆高於其餘的照光處理 (表 39-NO.16, 17, 21, 22)，此外，芳樟醇和其氧化物 I 與 II 在正常萎凋的情況下，在 Stage 3 時相對豐度顯著高於高濕度處理組。

本試驗中辨識之揮發性化合物，以類胡蘿蔔素為前驅物的化合物 (Ho et al., 2015)，有環檸檬醛 ( $\beta$ -Cyclocitral) (圖 23)、甲基庚烯酮 (6-Methyl-5-hepten-2-one) (圖 24)、 $\beta$ -紫羅蘭酮 ( $\beta$ - Ionone) (圖 25)與芳樟醇 (Linalool)即其氧化物 (圖 18-22)。Ravichandran (2002)指出茶葉中  $\beta$ -Carotene、Lutein 與 Zeaxanthin 為較多之類胡蘿

圖 23) 萜類化合物，在紅茶萎凋過程中其含量會少量減少，而生成相關的揮發性化合物。在茶菁萎凋過程中，類胡蘿蔔素衍生物，綜合處理間的變化較無法看出相對豐度明顯的變動趨勢。在甲基庚烯酮 (圖 24)，能觀察到雖在 Stage 1 時處理間相對豐度皆較鮮葉低，但在 Stage 3 時，日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA) 與紅外線萎凋組 (IR) 其相對豐度為萎凋階段中最高，也較鮮葉之相對豐度高。參照表 39-NO.7，正常照光萎凋組茶菁之相對豐度顯著高於高濕度處理。茶菁中的類胡蘿蔔素類，也會受到光照與熱降解 (Kawakami and Kobayashi, 2001)，推測製茶過程中殺菁與烘乾都可能使類胡蘿蔔素降解，日光萎凋、紫外光也可能導致其降解而形成相關的揮發性化合物 (Ho et al., 2015)。

環檸檬醛 ( $\beta$ -Cyclocitral) (圖 23)、甲基庚烯酮 (6-Methyl-5-hepten-2-one) (圖 24)、 $\beta$ -紫羅蘭酮 ( $\beta$ - Ionone) (圖 25) 與芳樟醇 (Linalool) 即其氧化物 (圖 18-22) 之相對豐度變化圖，室內萎凋組 (IW) 雖未受光照與萎凋溫度的影響，此處理組在 Stage 1 茶菁的八種揮發性化合物相對豐度未必在處理間最低，不過參照表 40 (NO. 7, 16, 17, 18, 21, 22, 25, 29) 室內萎凋組 (IW) 在 Stage 3 八種揮發性化合物的相對豐度為皆為最低，其中芳樟醇氧化物 II (NO. 17)、芳樟醇 (NO. 18) 與環檸檬醛顯著低於其他處理，此結果可能也與室內萎凋組 (IW)，在 Stage 3 總相對豐度較為最低有關。

吲哚 (Indole) 照光萎凋出初期之相對豐度，除日光萎凋組 (SW) 外，其相對豐度先上升，而隨著萎凋延長其相對豐度逐漸降低 (圖 26)。甘 (1984) 指出，若綠茶在蒸菁前先菁進行輕微萎凋，反-2-己烯酯、順-3-己烯酯等酯類化合物的含量增加，而吲哚的含量則會減，與本試驗結果相仿，但本試驗中未辨識出相關之酯類化合物。

本試驗中 GC-MS 可辨識得之酯類化合物為水楊酸甲酯 (Methyl salicylate)，其萎凋過程中的變動 (圖 27)，在初期照光後，高濕度處理相對豐度皆較鮮葉高，日光萎凋 (SW) 與紅外線萎凋組 (IR) 則是相對豐度較鮮葉低，於 Stage 3 時正常萎凋之處理日光萎凋 (SW)、紫外線萎凋 (UVA) 與紅外線萎凋組 (IR) 皆為萎凋過程中最高之相對豐度。在 Stage 3 處理間之比較 (表 40-NO. 24)，只有日光萎凋 (SW) 與





紅外線高濕度萎凋組 (IRH)，化合物相對豐度與室內萎凋組 (IW) 未達顯著差異，其餘處理皆顯著高於室內萎凋組 (IW)。另外，紅外線萎凋 (IR)、紅外線高濕度萎凋組 (IRH) 與室內萎凋組 (IW) 在 Stage 4 未達顯著差異，其餘處理相對豐度皆高於三者。表 39 (NO.24) 中可看出水楊酸甲酯之相對豐度，在 Stage 3 紫外線組 (UVA) 顯著高於日光萎凋 (SW) 與紅外線萎凋組 (IR)，且在正常萎凋之相對豐度顯著高於高濕度處理。在 Stage 4 則是紅外線萎凋組 (IR) 顯著低於其於兩者，但正常萎凋之相對豐度則顯著低於高濕度處理。

萎凋過程茶菁揮發化合物的變動都不太相似，初期照光處理間也較直接看出差異，不過可以觀察到在照光時高濕度的環境，減緩茶菁失水，茶菁揮發性化合物含量總相對豐度，較正常萎凋組低。

## 第五章、結論



在萎凋初期照光結束後，萎凋過程中茶菁總游離胺基酸、咖啡因與沒食子酸隨萎凋延長，茶菁含水率降低而含量提升，茶菁總多元酚類含量與兒茶素類含量，則是隨萎凋延長而下降。初期以紫外線照射能發現，在萎凋過程中多元酚類與兒茶素類平均含量較低，在萎凋溫度低於紅外線與日光萎凋的情況下，可能更能說明紫外線對茶菁多元酚類與兒茶素的影響。在初期高濕度處理萎凋溫度提高，將使茶菁游離胺基酸含量較高，一般製茶日光萎凋短期的高溫，或許能促進茶菁總游離胺基酸的含量提升，不過結果顯示初期萎凋照光與短暫較高的萎凋溫度，對於後續茶菁萎凋過程總游離胺基酸、咖啡因與沒食子酸沒有明確的影響。綜合數次試驗結果，萎凋照光與高濕度處理在萎凋初期內容物產生的差異，在萎凋至殺菁前與製成毛茶後的表現並未一至，與未照光的室內萎凋組的差異也不明確。

觀察萎凋過程中茶菁與毛茶之揮發性化合物的相對豐度，可發現初期照光時進行高濕度萎凋茶菁，使茶菁降低失水的處理者，茶菁在 Stage 3 與 Stage 4 揮發性化合物總相對豐度低於正常萎凋之處理。比較個別揮發性化合物相對豐，多數經高濕度處理處的揮發性化合物相對豐度低於正常萎凋組，此結果或許能說明茶菁在照光時失水為重要的因子，高濕度的環境會降低光照對茶菁的效應。另外，室內萎凋組茶菁之揮發性化合物相對豐度，在 Stage 3 與 Stage 4 大部分皆低於照光處理組。

不同光源照射與萎凋方式，使萎凋環境的溫度不同，將造成多元酚氧化酶活性在光照結束時的差異，多元酚氧化酶的活性與萎凋溫度有高相關性  $R^2 = 0.93, p < 0.001$ 。隨萎凋延長茶菁含水率降低，將導致茶菁細胞膜熱穩定性降低，兩者相關性高，兩次試驗分別為  $R^2 = 0.63, p < 0.01$ ； $R^2 = 0.73, p < 0.01$ 。初期萎凋照光對於萎凋過程中細胞膜熱穩定性與多元酚氧化酶活性，較沒有明確的影響。

整體來說，延長萎凋時間導致茶菁含水率降低，對於茶菁內容物含量的變化較



為明確，照光與萎凋方式對於茶菁內容物含量的變化較不一致。茶菁揮發性化合物的含量，則會受初期萎凋照光與萎凋方式影響，雖然未能分辨出紫外線、紅外線與日光之造成之差異，但與未照光的室內萎凋組相比，揮發性化合物相對豐度較高。最後，照光萎凋時茶菁失水狀態，將會影響茶菁萎凋過程中揮發性化合物的生成。

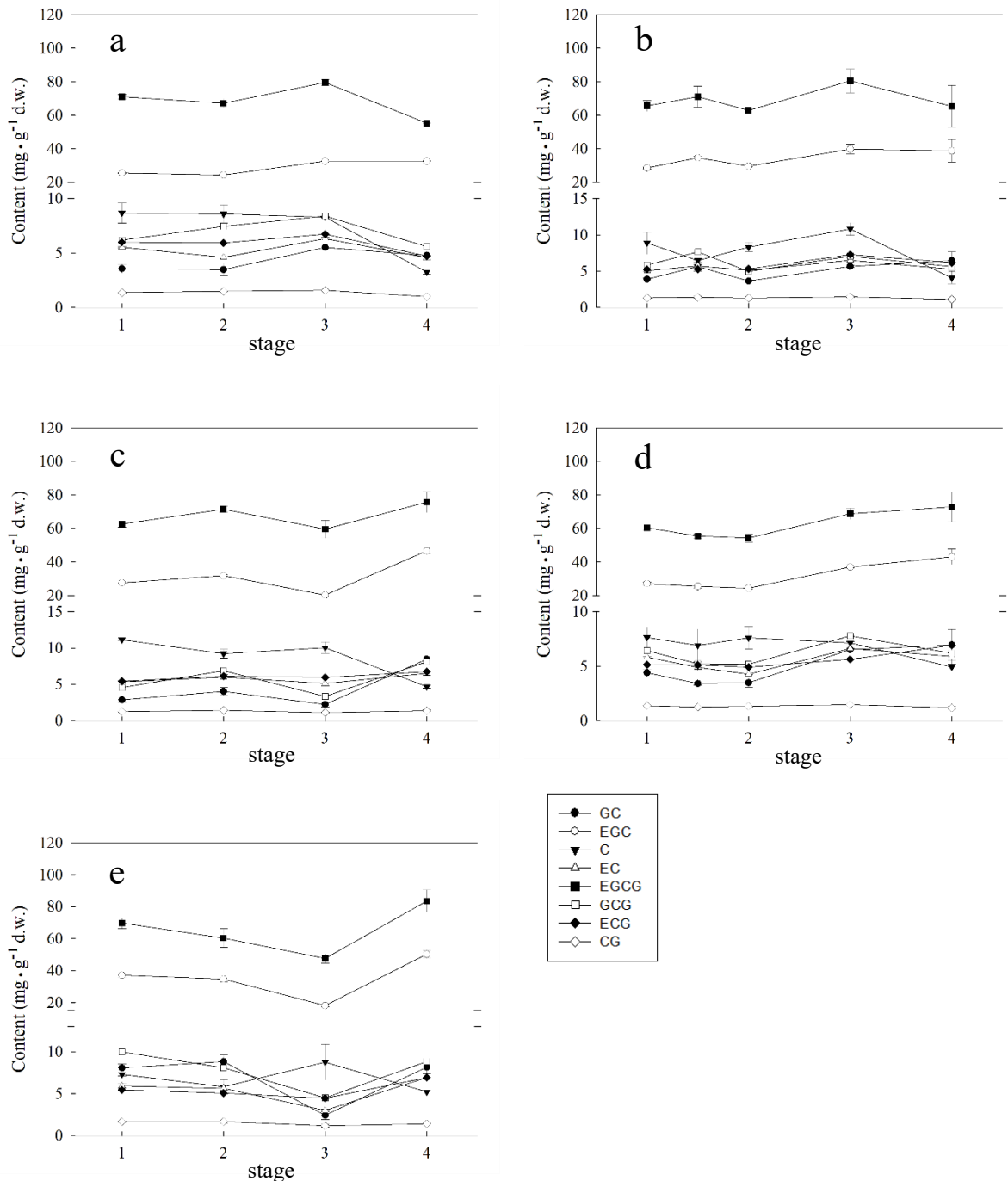


圖 1. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (4/11 日試驗)

Fig. 1. Change in the content of catechins in tea leaves under light source and humidity treatment

a: SW (solar withering); b: SWH (solar withering with high-humidity); c: UVA (ultraviolet a withering); d: UVAH (uva withering with high-humidity); e: IW (indoor withering). Withering stage; 1: end of 1hr lighting; 2: water content 74.9%; 3: water content 70%; 4: dry tea 1.5: high-humidity group compare same water content with normal. GC= gallic catechin, EGC= epigallocatechin, C= catechin, E= epicatechin, EGCG= epigallocatechin gallate, GCG= gallic catechin gallate, ECG= epicatechin gallate, CG= catechin gallate

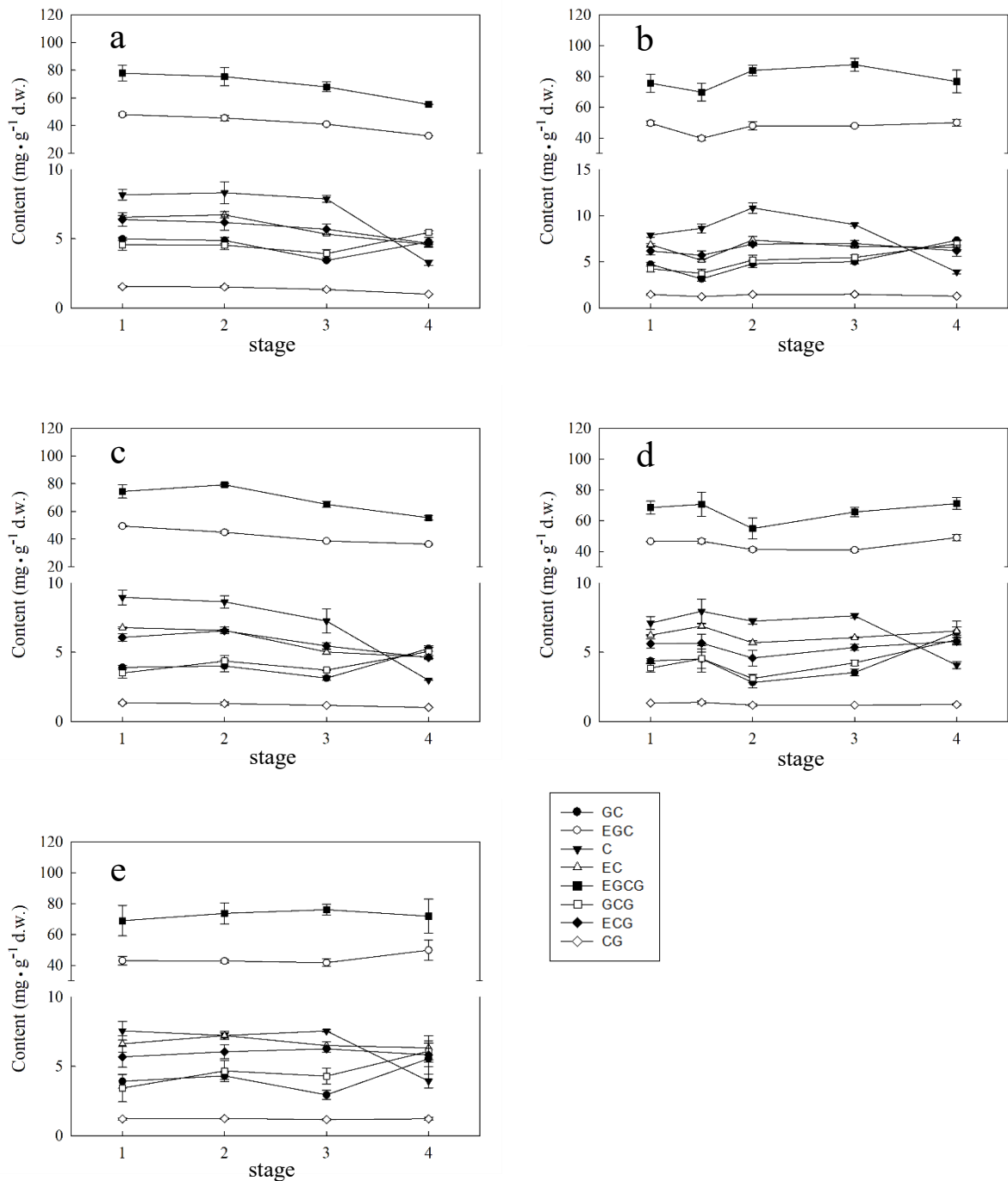


圖 2. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (4/18 日試驗)

Fig. 2. Change in the content of catechins in tea leaves under light source and humidity treatment

a: SW (solar withering); b: SWH (solar withering with high-humidity); c:UVA (ultraviolet a withering); d: UVAH (uva withering with high-humidity); e: IW (indoor withering).

Withering stage; 1: end of 1hr lighting; 2: water content 72.4%; 3: water content 70.0%; 4: dry tea 1.5:high-humidity group compare same water content with normal.

GC= galliccatechin, EGC= epigallocatechin, C= catechin, E= epicatechin, EGCG= epigallocatechin gallate, GCG= galliccatechin gallate, ECG= epicatechin gallate, CG= catechin gallate

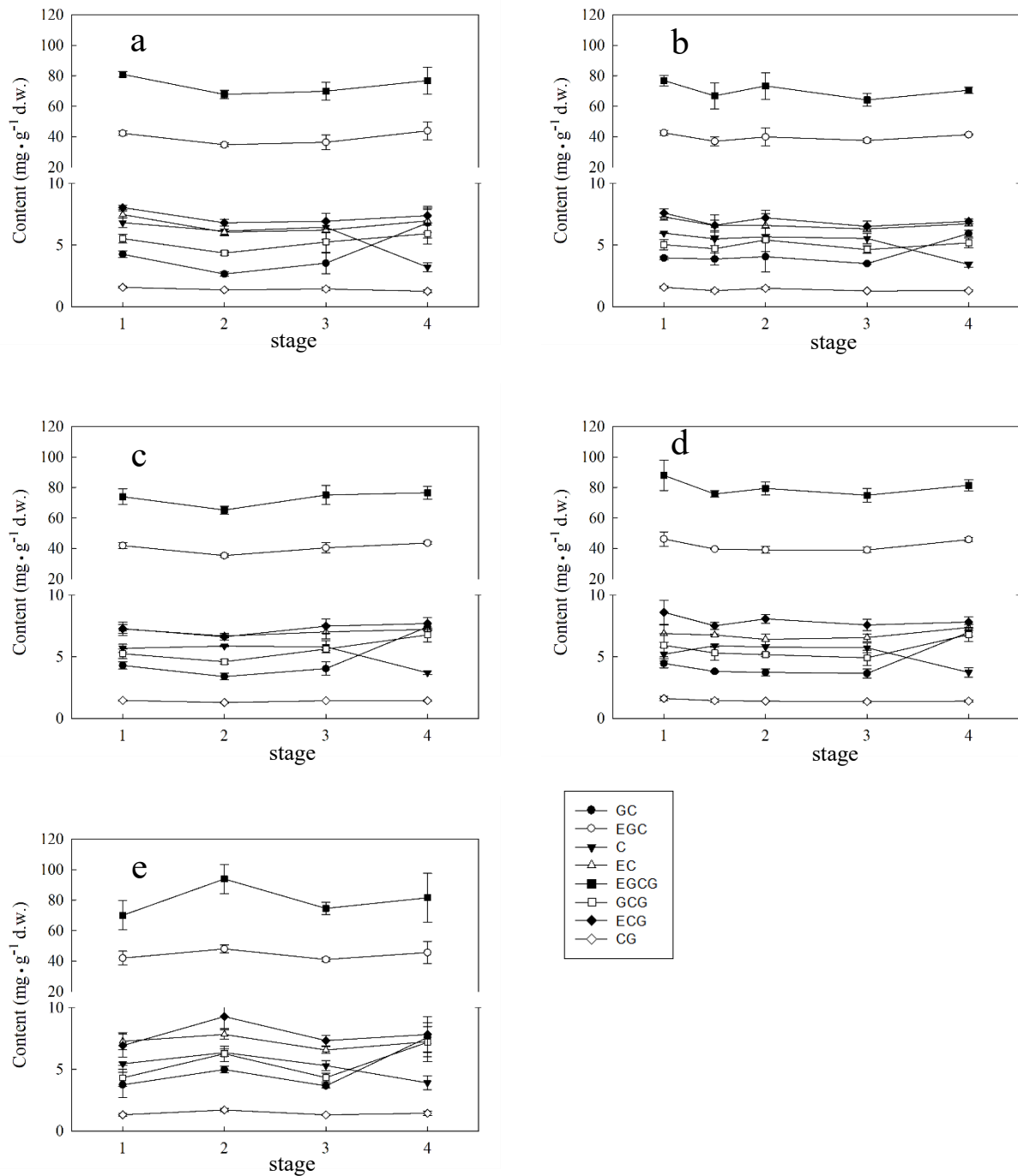


圖 3. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (6/11 日試驗)

Fig. 3. Change in the content of catechins in tea leaves under light source and humidity treatment

a: SW (solar withering); b: SWH (solar withering with high-humidity); c: IR (infrared withering); d: IRH (Infrared withering with high-humidity); e: IW (indoor withering).

Withering stage; 1: end of 1hr lighting; 2: water content 69.9%; 3: water content 68.0%; 4: dry tea 1.5:high-humidity group compare same water content with normal.

GC= galliccatechin, EGC= epigallocatechin, C= catechin, E= epicatechin, EGCG= epigallocatechin gallate, GCG= galliccatechin gallate, ECG= epicatechin gallate, CG= catechin gallate

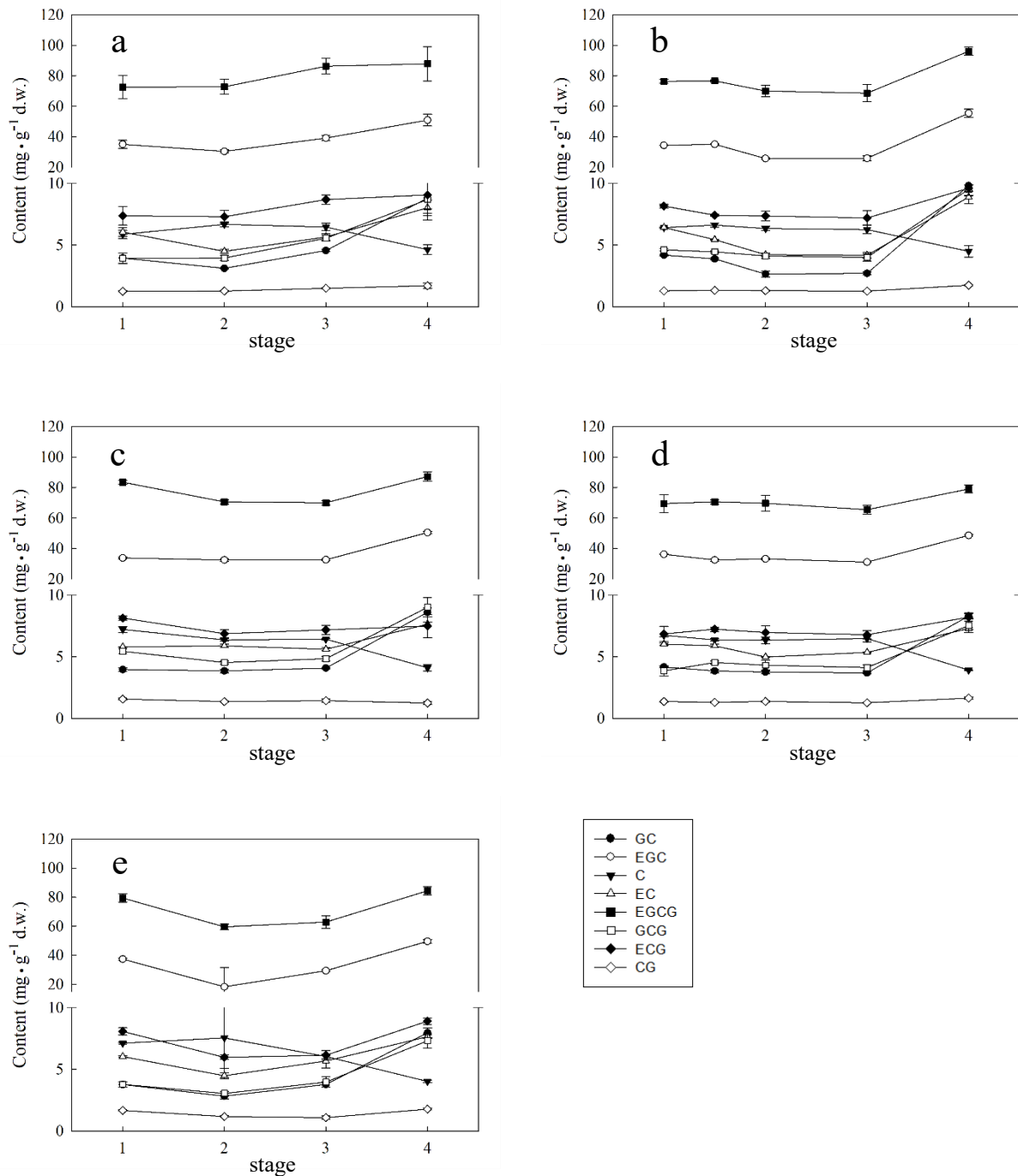


圖 4. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (6/18 日試驗)

Fig. 4. Change in the content of catechins in tea leaves under light source and humidity treatment

a: SW (solar withering); b: SWH (solar withering with high-humidity); c:IR (infrared withering); d: IRH (infrared withering with high-humidity); e: IW (indoor withering).

Withering stage; 1: end of 1hr lighting; 2: water content 69.5%; 3: water content 67.0%; 4: dry tea 1.5:high-humidity group compare same water content with normal.

GC= gallocatechin, EGC= epigallocatechin, C= catechin, E= epicatechin, EGCG= epigallocatechin gallate, GCG= gallocatechin gallate, ECG= epicatechin gallate, CG= catechin gallate

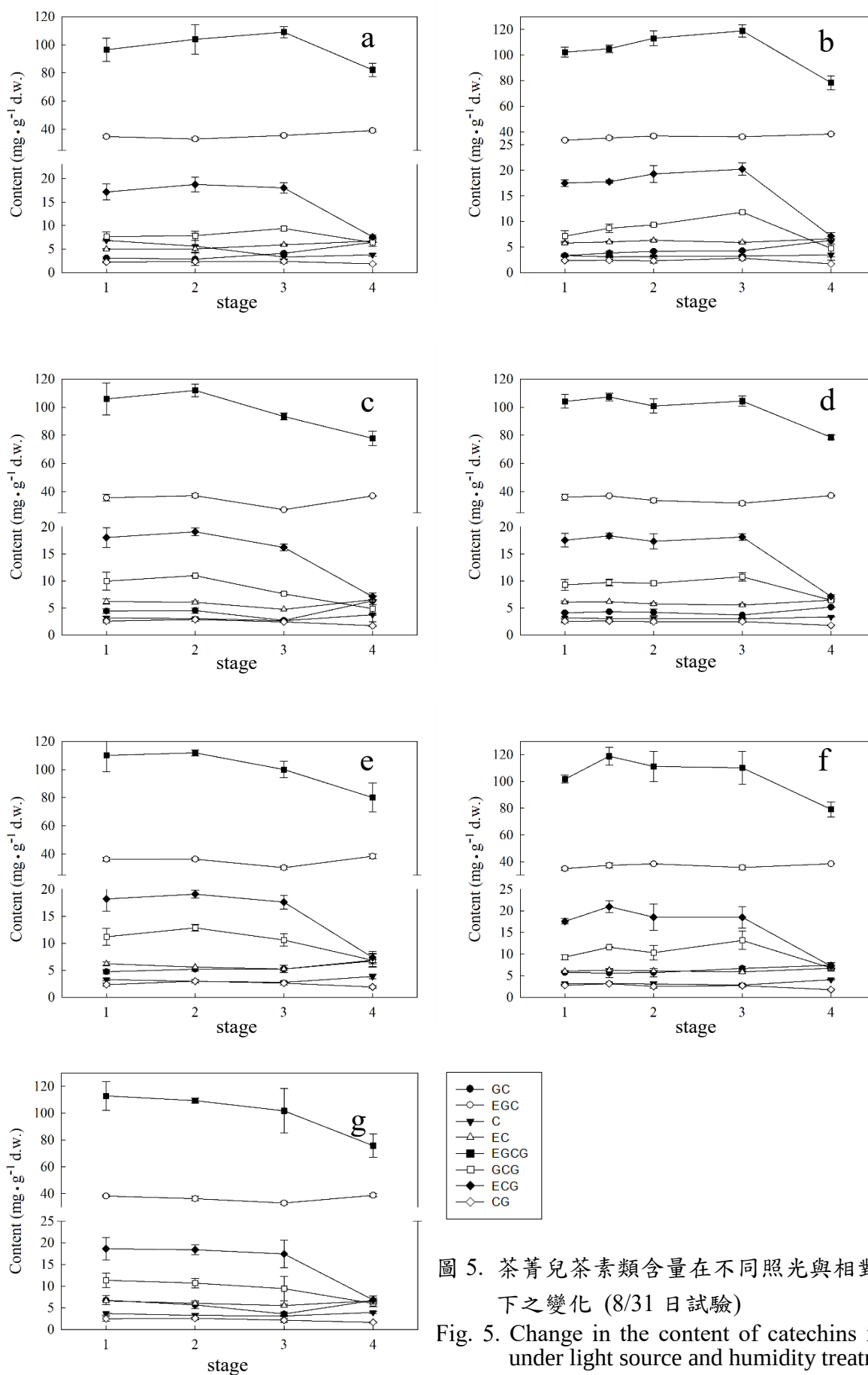


圖 5. 茶菁兒茶素類含量在不同照光與相對溼度處理下之變化 (8/31 日試驗)

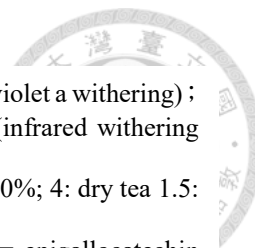
Fig. 5. Change in the content of catechins in tea leaves under light source and humidity treatment



a: SW (solar withering); b: SWH (solar withering with high-humidity); c:UVA (ultraviolet a withering) ;  
d: UVAH (uva withering with high-humidity); e: IR (infrared withering); f: IRH (infrared withering  
with high-humidity); g: IW (indoor withering)

Withering stage; 1:end of 1hr lighting; 2: water content 69.7%; 3: water content 65.0%; 4: dry tea 1.5:  
high-humidity group compare same water content with normal.

GC= galliccatechin, EGC= epigallocatechin, C= catechin, E= epicatechin, EGCG= epigallocatechin  
gallate, GCG= galliccatechin gallate, ECG= epicatechin gallate, CG= catechin gallate.



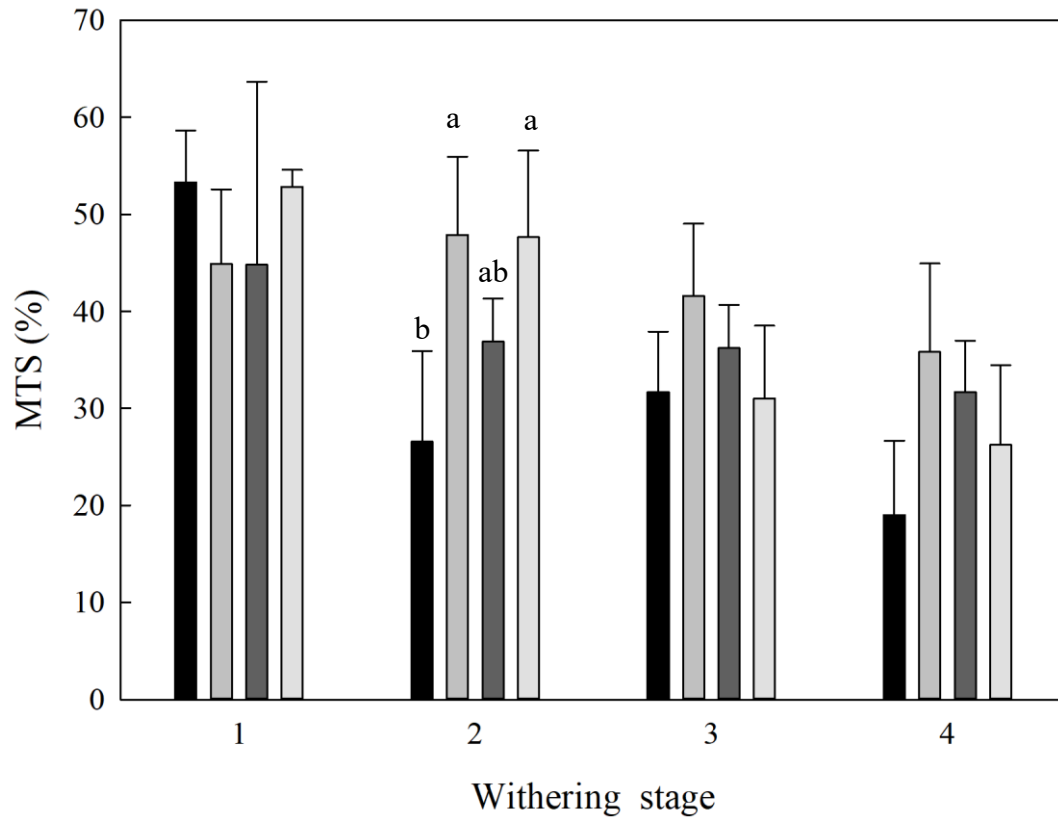


圖 6. 初期萎凋照光對茶菁萎凋過程中細胞膜熱穩定性之影響 (7/29 日試驗)

Fig. 6. The effect of initial withering with solar, uva and infrared on the membrane thermostability of tea leaves during withering.

SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

Withering stage: 1: end of lighting; 2: water content 69%; 3: water content 65%; 4: water content 60%.

UVA and IR treatment for 1 hr and solar withering for 30 min because of rain. stage 1 sampling of IW is that tea leaves weight loss similar with end of uva treatment at stage 1.

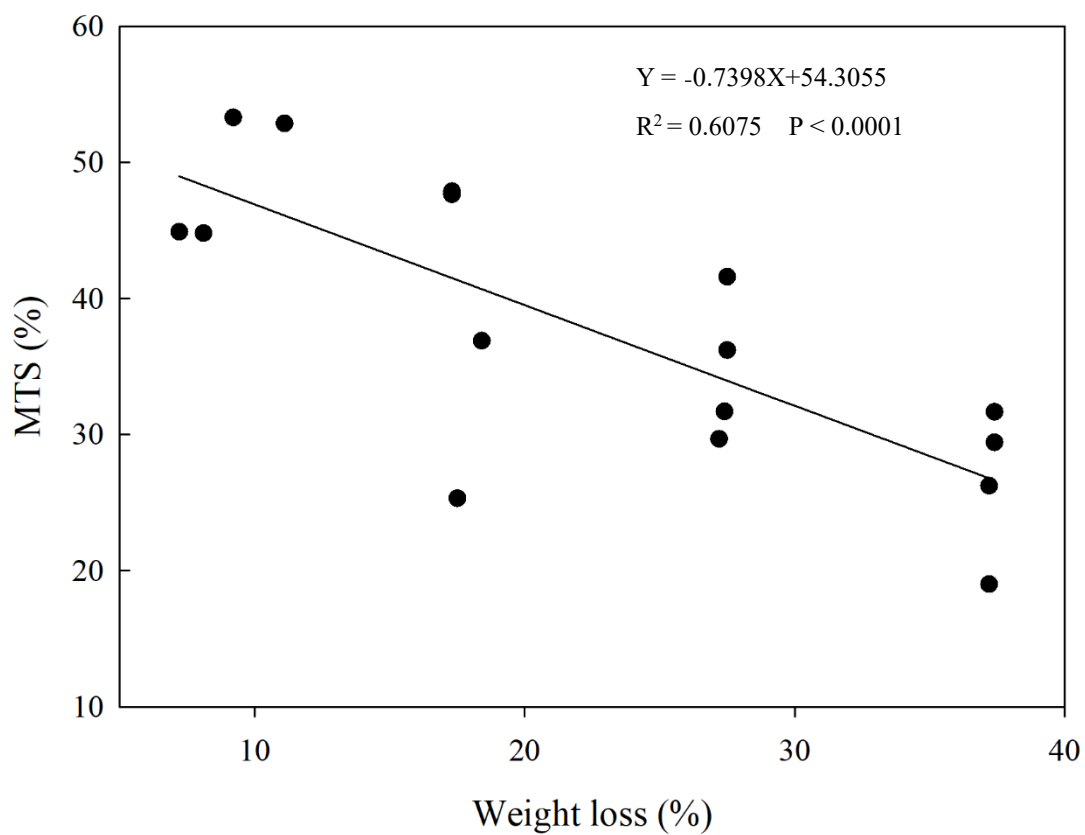


圖 7. 茶菁失重率與茶菁萎凋過程細胞膜熱穩定性之關係 (7/29 日試驗)

Fig. 7. Correlation between weight loss percentage and membrane thermostability of tea leaves

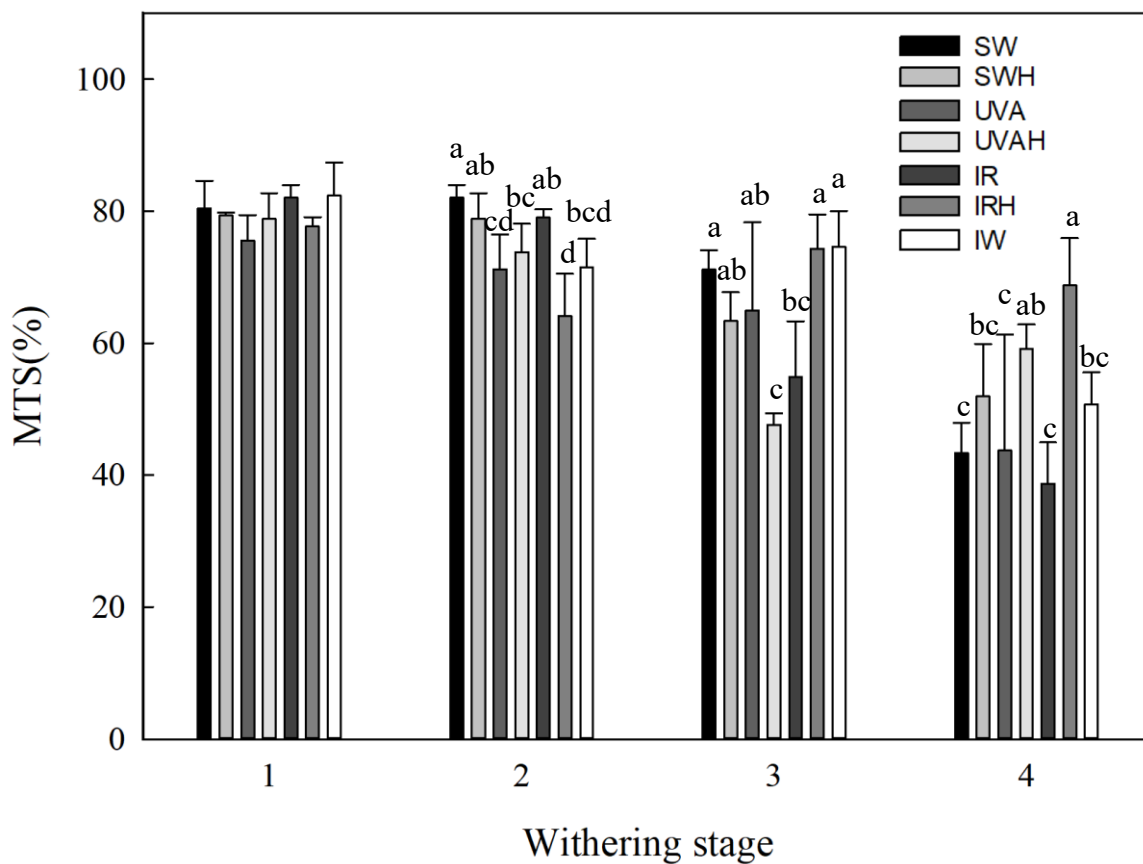


圖 8. 初期萎凋照光對茶菁萎凋過程中細胞膜熱穩定性之影響 (9/6 日試驗)

Fig. 8. The effect of initial withering with solar, uva and infrared on the membrane thermostability of tea leaves during withering.

SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity withering); UVA (ultraviolet a withering); UVAH (uva withering with high-humidity); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering). Withering stage: 1: end of lighting; 2: water content 68%; 3: water content 65%; 4: water content 62%. stage 1 sampling of IW is that tea leaves weight loss similar with end of uva treatment at stage 1.

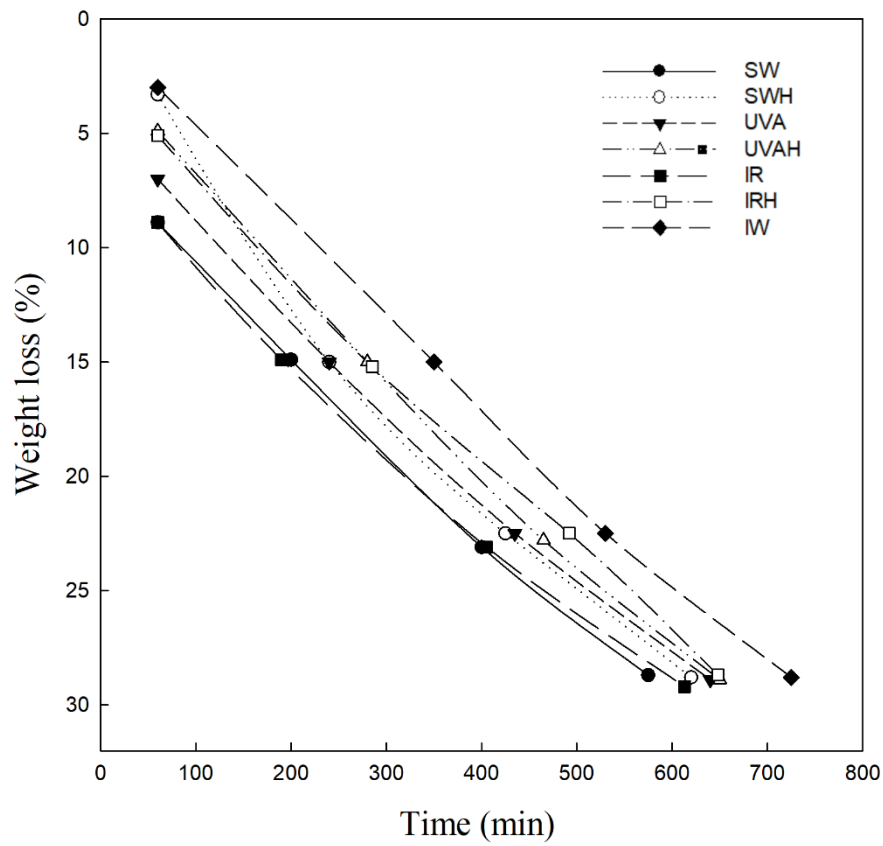


圖 9. 茶菁失重率與萎凋時間之曲線圖 (9/6 日試驗)

Fig. 9. The curve between weight loss percentage and withering time of tea leaves

SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity withering); UVA (ultraviolet a withering); UVAH (uva withering with high-humidity); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering)

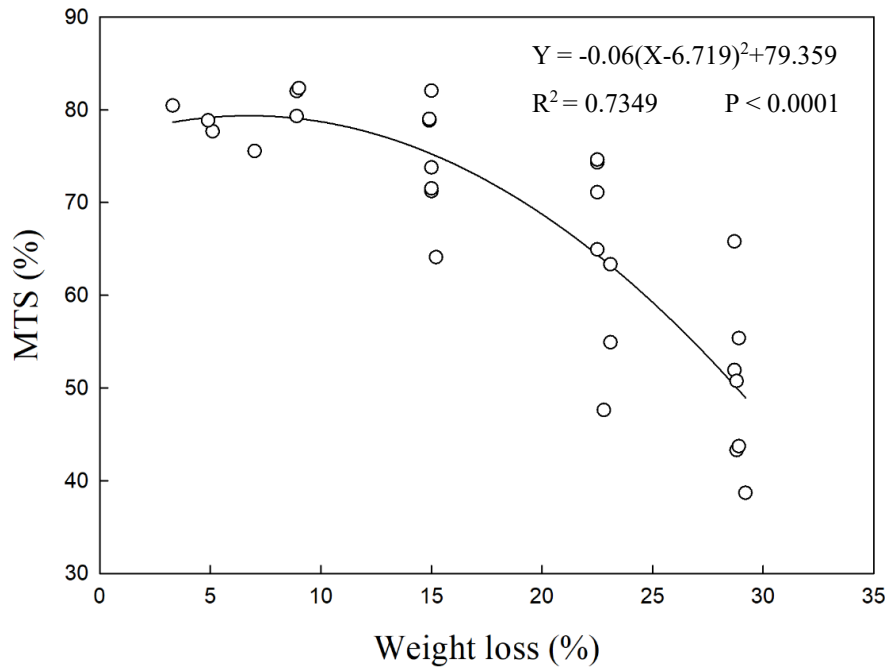


圖 10. 茶菁失重率與茶菁細胞膜熱穩定性之關係 (9/6 日試驗)

Fig. 10. Correlation between weight loss percentage and membrane thermostability of tea leaves

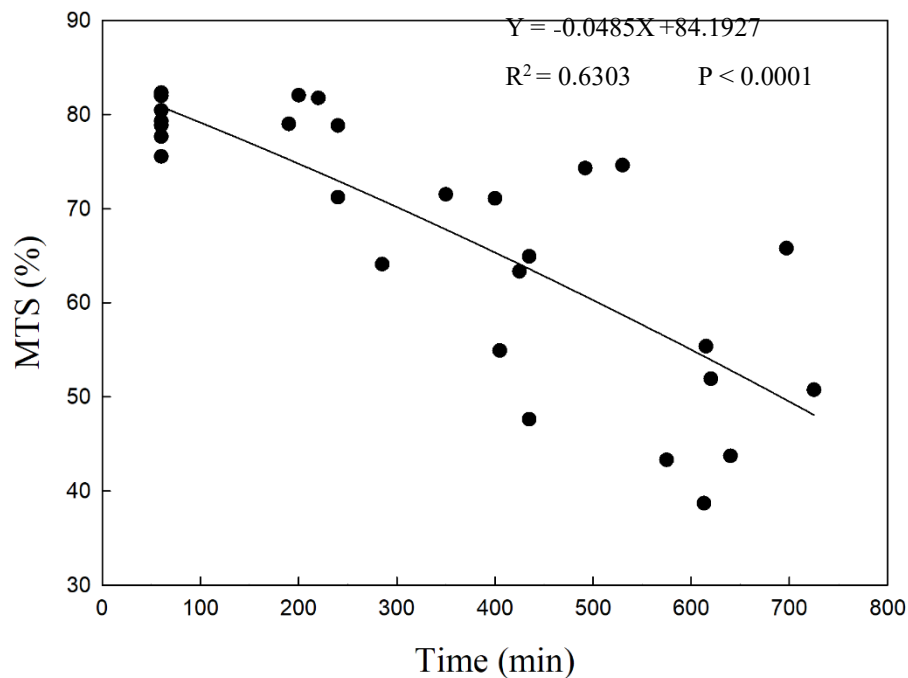


圖 11. 茶菁萎凋時間與茶菁細胞膜熱穩定性之關係 (9/6 日試驗)

Fig. 11. Correlation between withering time and membrane thermostability of tea leaves

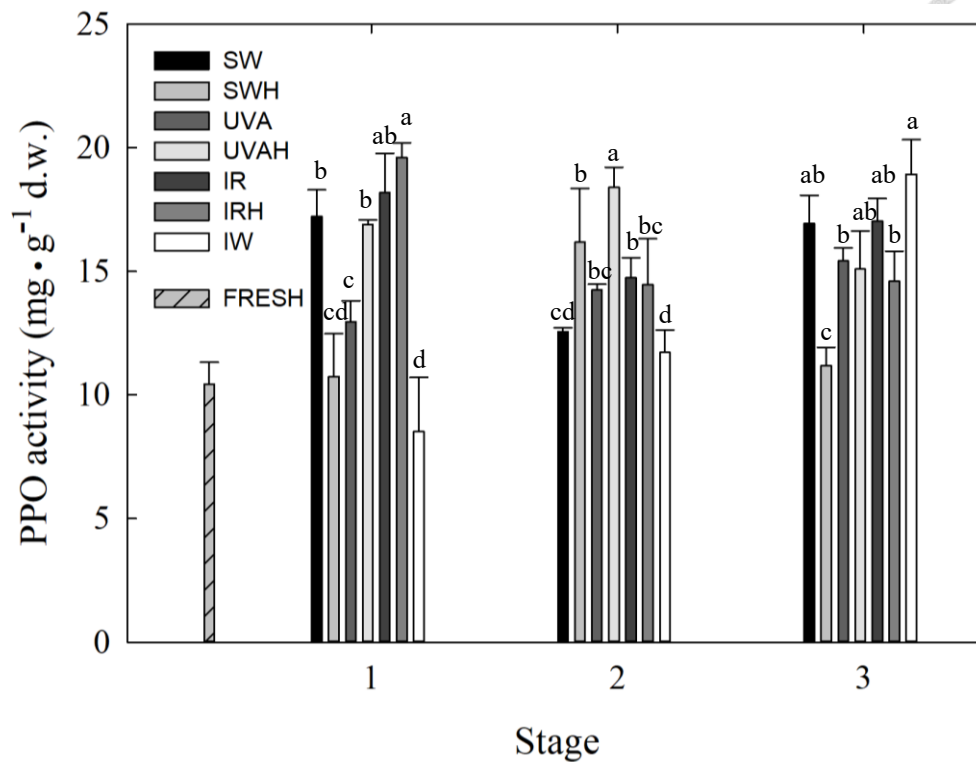


圖 12. 茶菁萎凋階段處理間茶菁細胞膜熱穩定性 (9/6 日試驗)

Fig. 12. The membrane thermostability of treated tea leaves at withering stages

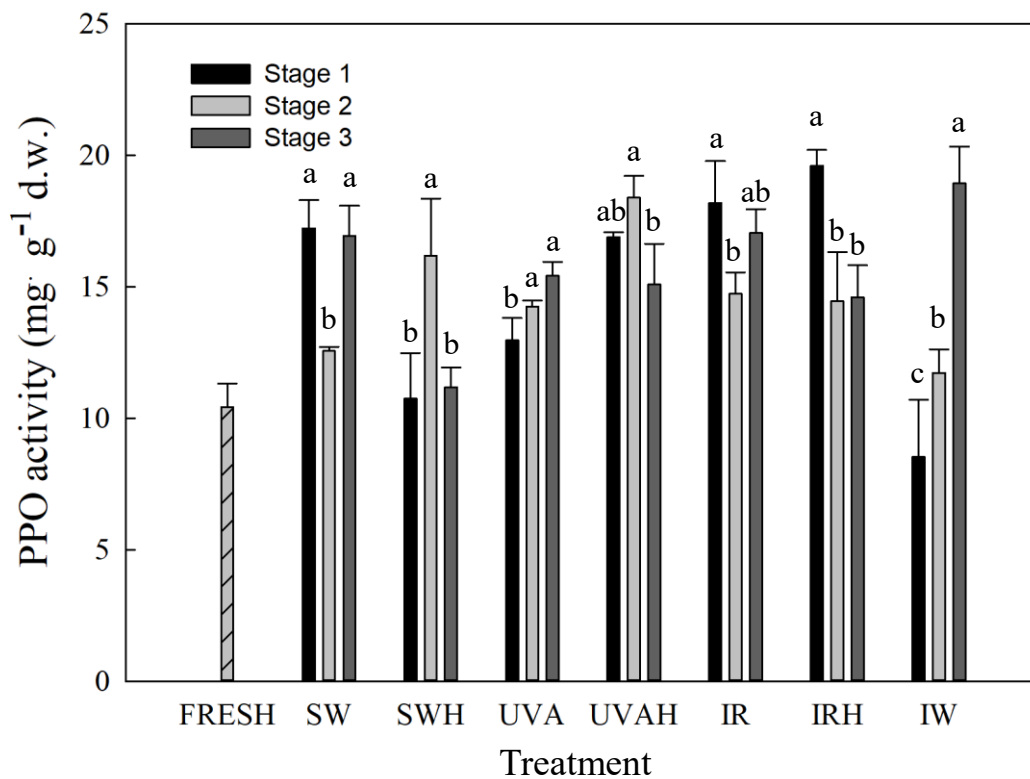


圖 13. 茶菁照光萎凋處理萎凋階段茶菁細胞膜熱穩定性 (9/6 日試驗)

Fig. 13. The membrane thermostability of each treatment at withering stages.

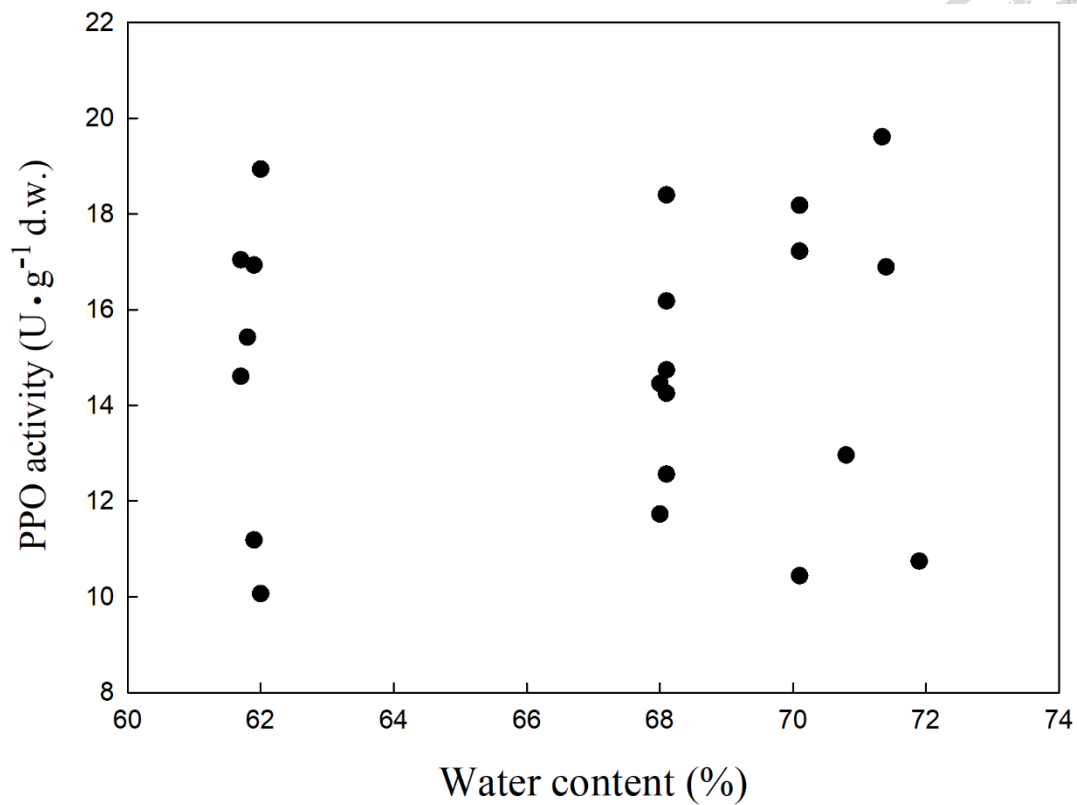


圖 14. 茶菁含水率與多元酚氧化酶活性之關係

Fig. 14. Correlation of the polyphenol oxidase (PPO) activity and tea leaves water content

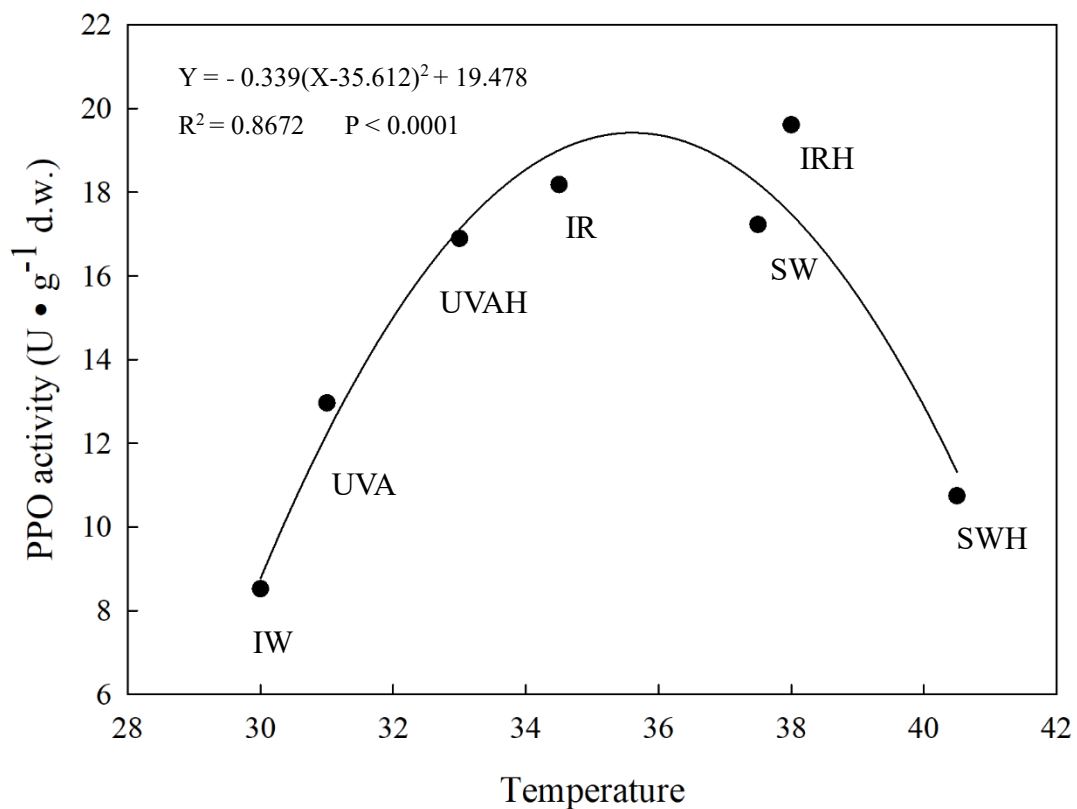


圖 15 初期照光萎凋溫度與多元酚氧化酶活性之關係

Fig. 15. Correlation of the polyphenol oxidase (PPO) activity and initial withering temperature



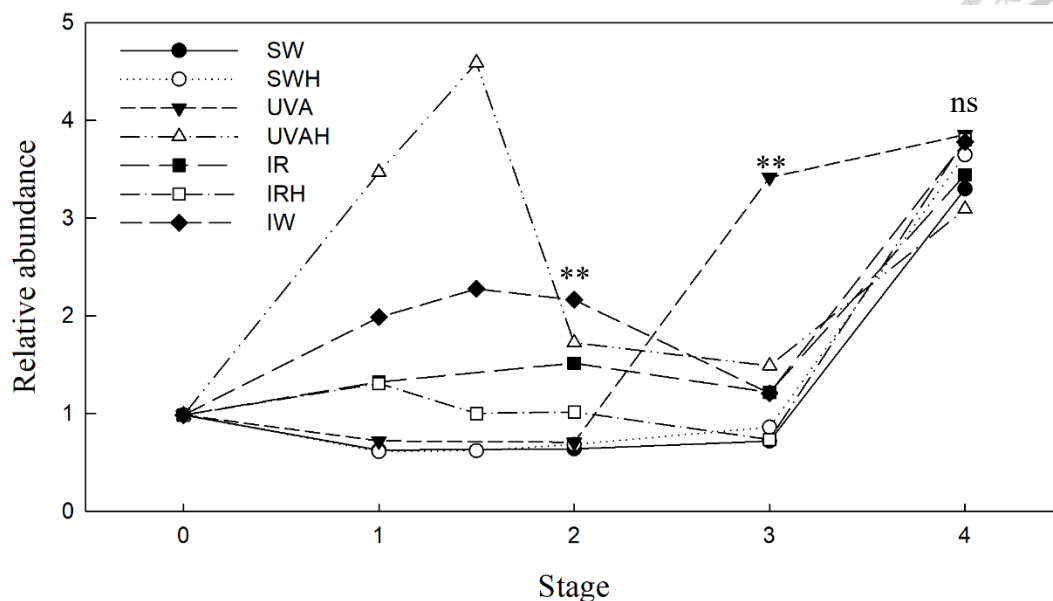


圖 16. 茶菁與毛茶中檸檬烯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 16. Change in the relative abundance of limonene in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

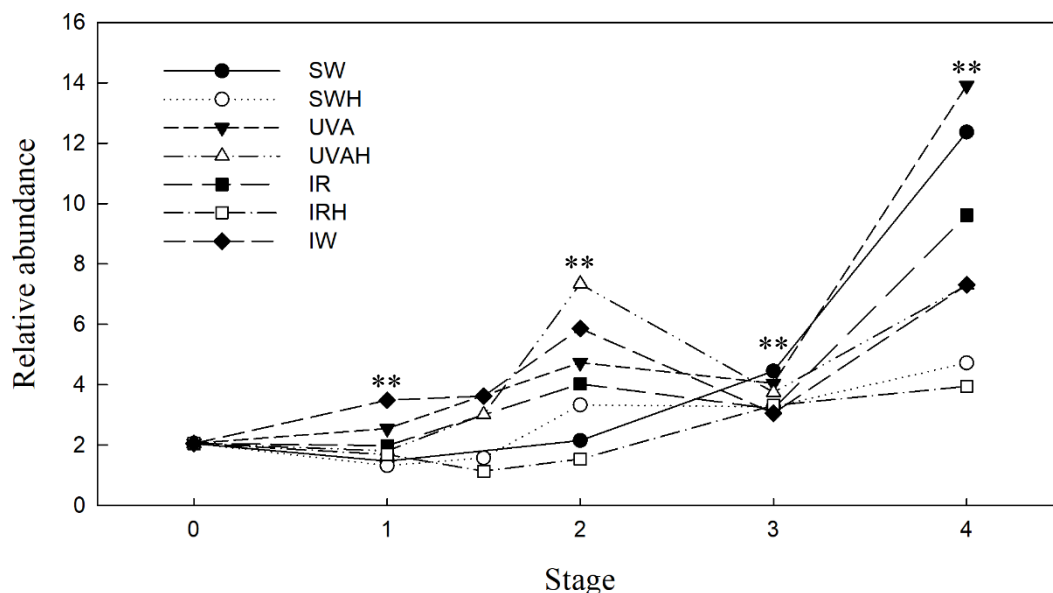


圖 17. 茶菁與毛茶中順式-羅勒烯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 17. Change in the relative abundance of cis-β-Ocimene in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

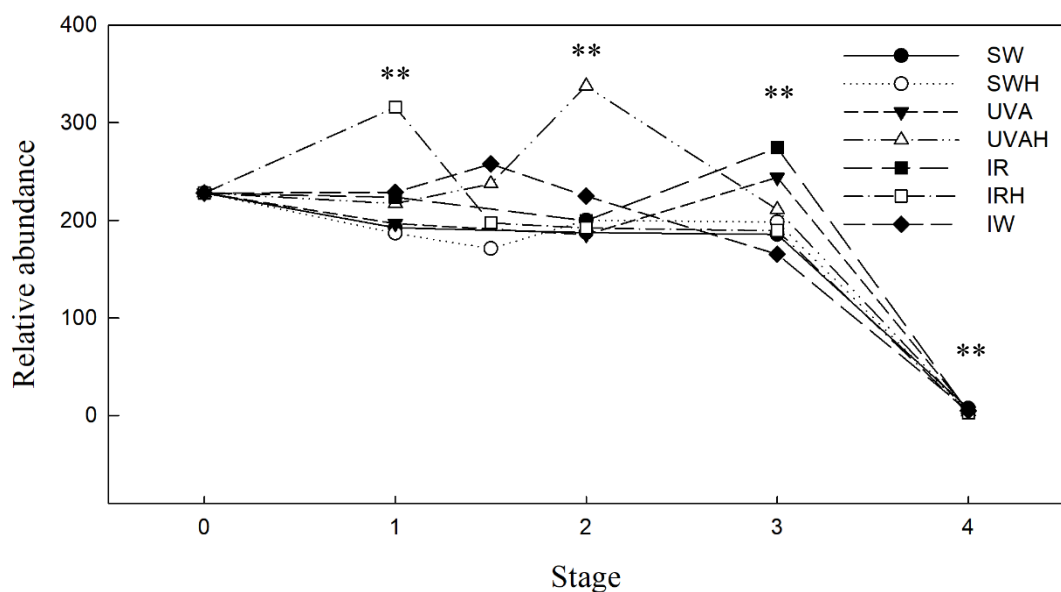


圖 18. 茶菁與毛茶中芳樟醇相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 18. Change in the relative abundance of linalool in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

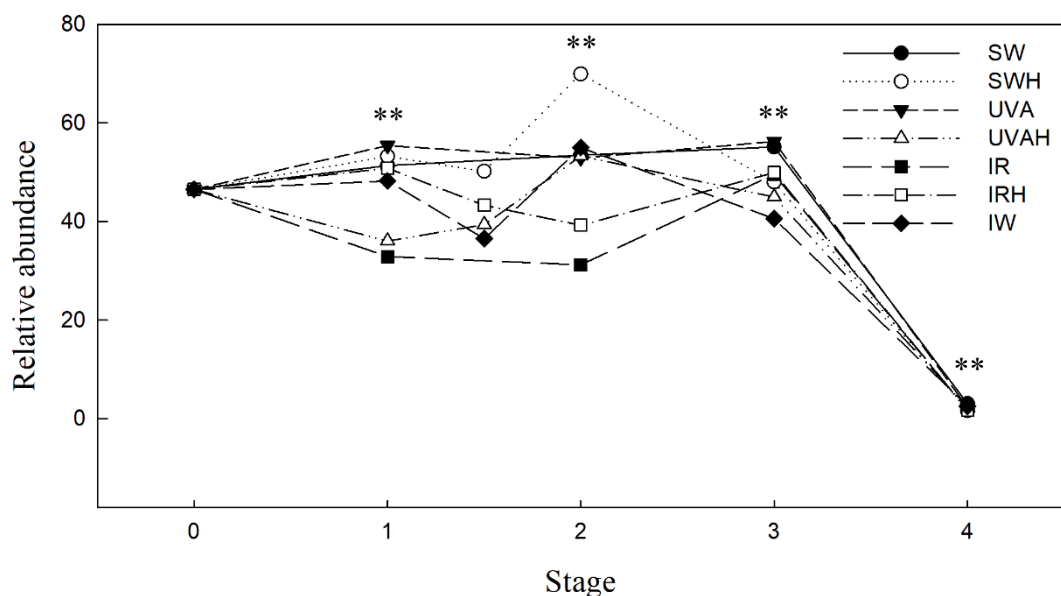


圖 19. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 I 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 19. Change in the relative abundance of linalool oxide I in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

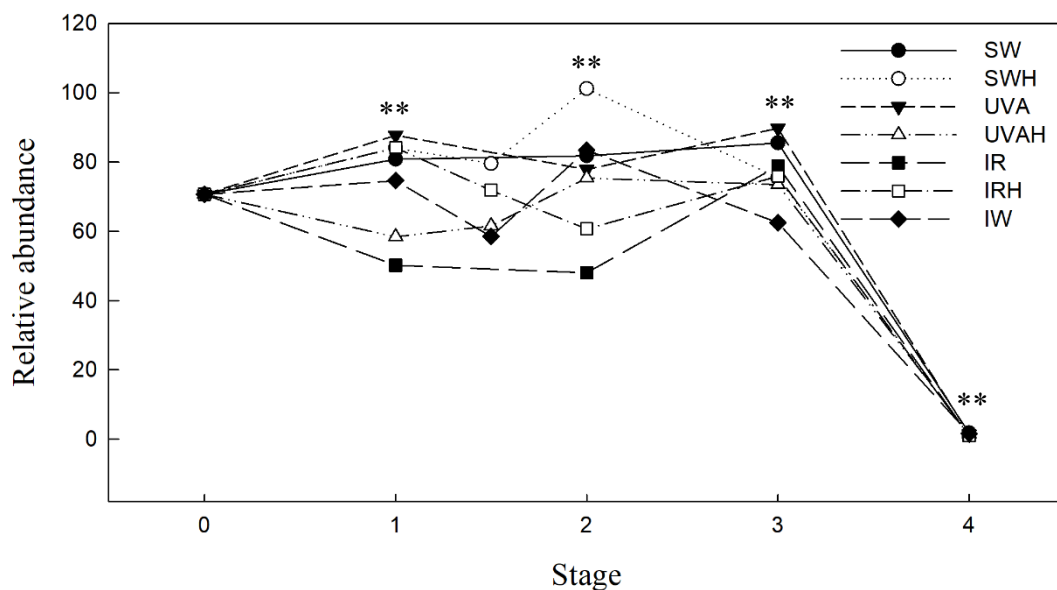


圖 20. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 II 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 20. Change in the relative abundance of linalool oxide II in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

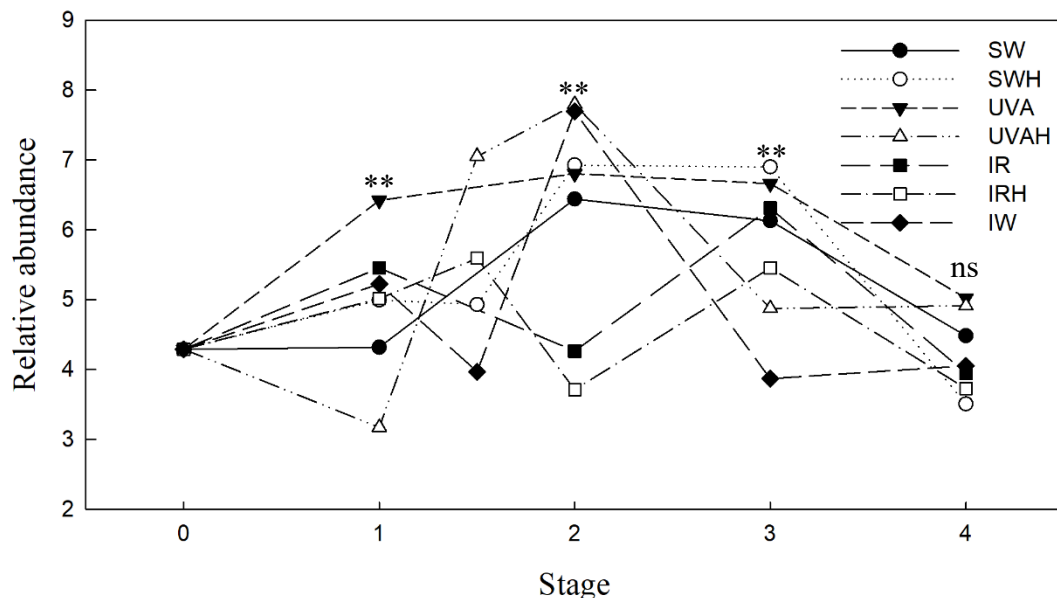


圖 21. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 III 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 21. Change in the relative abundance of linalool oxide III in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

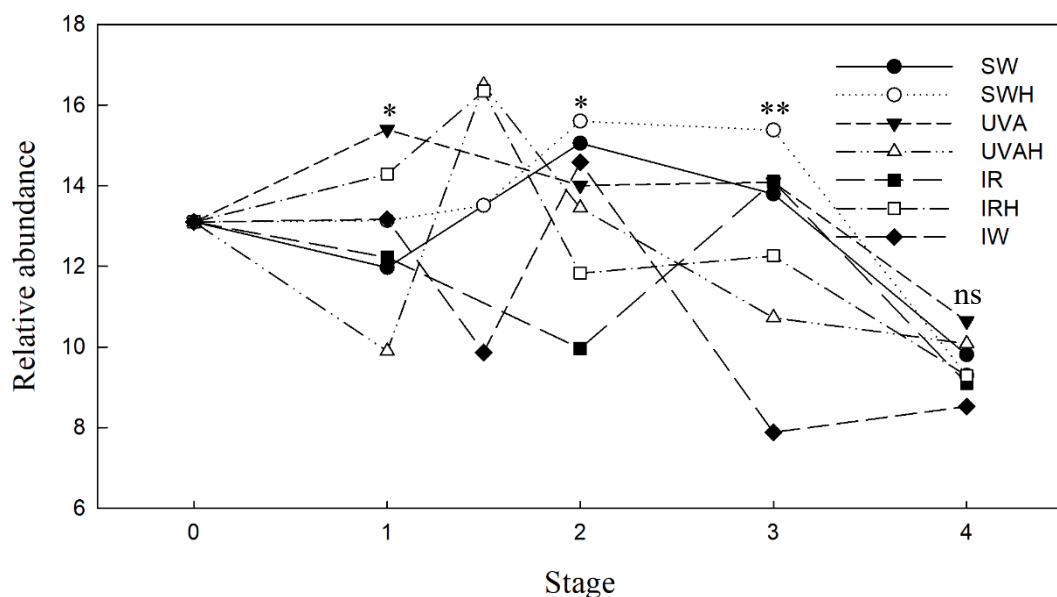


圖 22. 茶菁與毛茶中芳樟醇氧化物 IV 相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 22. Change in the relative abundance of linalool oxide IV in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

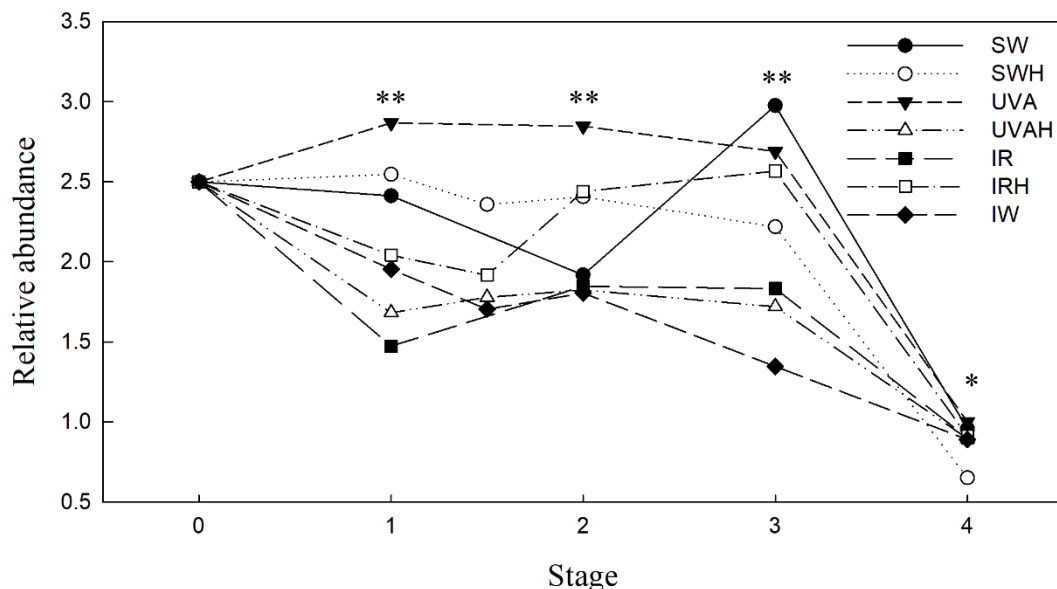


圖 23. 茶菁與毛茶中環檸檬醛相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig 23. Change in the relative abundance of  $\beta$ -Cyclocitral in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

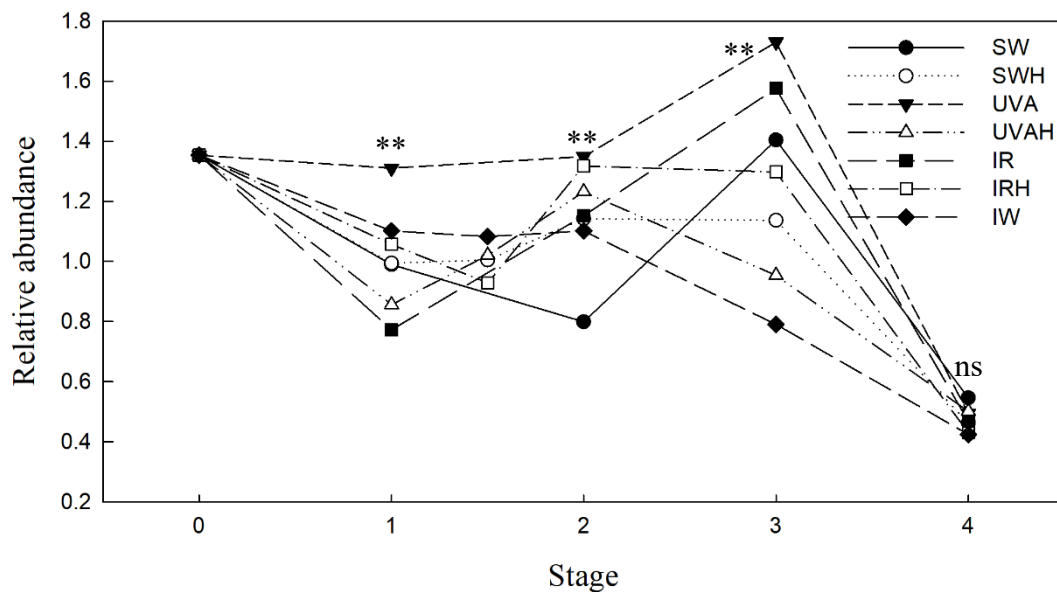


圖 24. 茶菁與毛茶中甲基庚烯酮相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 24. Change in the relative abundance of 6-methyl-5-hepten-2-one in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

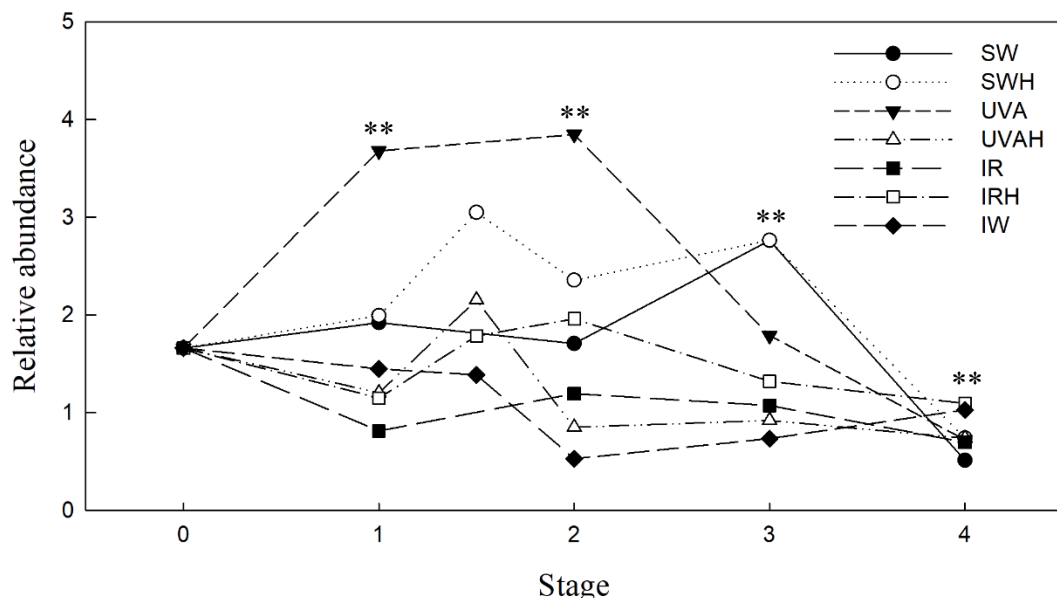


圖 25. 茶菁與毛茶中β-紫羅蘭酮相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 25. Change in the relative abundance of  $\beta$ -Ionone in tea leaves and dry tea at sampling stage

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

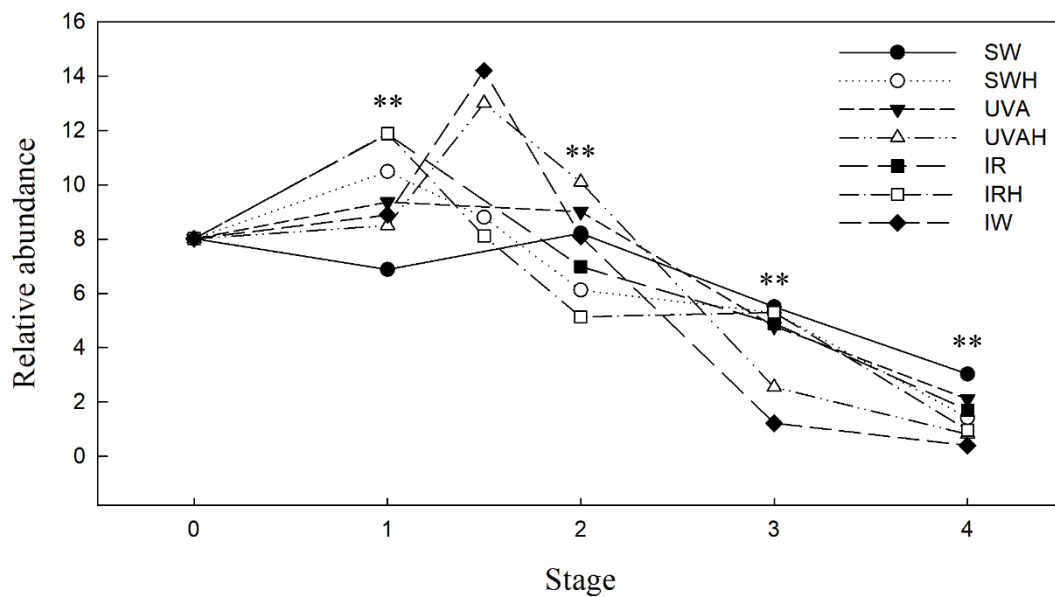


圖 26. 茶菁與毛茶中吲哚相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 26. Change in the relative abundance of indole in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

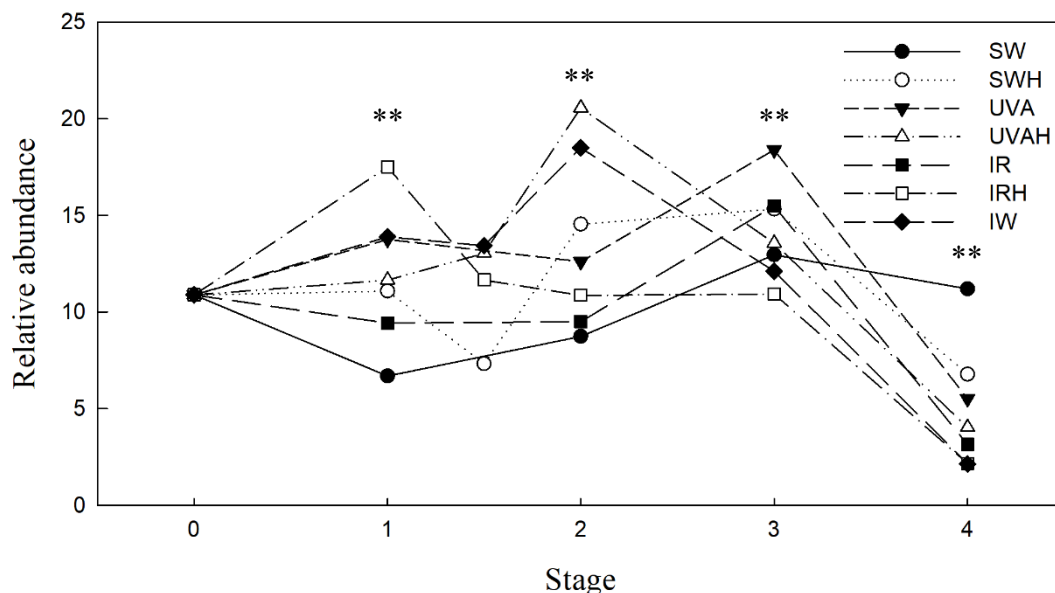


圖 27. 茶菁與毛茶中水楊酸甲酯相對豐度在不同照光與相對溼度處理下之變化

Fig. 27. Change in the relative abundance of methyl salicylate in tea leaves and dry tea under light source and humidity treatment

SW(solar withering); SWH(solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); d:UVAH (uva withering with high-humidity); IR(infrared withering); IRH(infrared withering with high-humidity); IW(indoor withering). Stage: 0: fresh leaves, 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal. Significant test by LSD. \* indicates  $p < 0.05$ ; \*\* indicates  $p < 0.01$ .

表



表 1. 試驗照光萎凋環境溫度

Table 1. The environmental temperature of light-withering.

| Treatment <sup>x</sup> | Withering temperature (°C) |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | Date of sampling (m/d)     |        |        |        |        |        |        |
|                        | 4/11                       | 4/18   | 6/11   | 6/18   | 7/29   | 8/31   | 9/6    |
| SW                     | 31.5°C                     | 29.0°C | 42.0°C | 37.0°C | 32.0°C | 36.5°C | 37.5°C |
| SWH                    | 33.0°C                     | 33.0°C | 47.0°C | 41.0°C | -      | 40.0°C | 40.5°C |
| UVA                    | 29.0°C                     | 26.0°C | -      | -      | 31.0°C | 32.0°C | 31.0°C |
| UVAH                   | 31.0°C                     | 31.0°C | -      | -      | -      | 37.0°C | 33.0°C |
| IR                     | -                          | -      | 39.0°C | 43.0°C | 32.0°C | 37.5°C | 34.5°C |
| IRH                    | -                          | -      | 43.0°C | 46.0°C | -      | 39.5°C | 38.0°C |
| IW                     | 26.0°C                     | 25.0°C | 35.0°C | 34.5°C | 30.0°C | 31.0°C | 30.0°C |

x: Lighting: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA (ultraviolet a); UVAH (uva withering with high-humidity); IR (infrared withering); IRH (infrared with high-humidity withering).

表 2. 萎凋初期照光萎凋茶菁失重比率

Table 2. The water loss percentage after initial light-withering

| Treatment <sup>x</sup> | Weight loss after light-withering (%) |      |       |      |       |      |      |
|------------------------|---------------------------------------|------|-------|------|-------|------|------|
|                        | Date of sampling (m/d)                |      |       |      |       |      |      |
|                        | 4/11                                  | 4/18 | 6/11  | 6/18 | 7/29  | 8/31 | 9/6  |
| SW                     | 7.0%                                  | 5.7% | 14.1% | 6.9% | 9.2%  | 8.0% | 9.0% |
| SWH                    | 2.8%                                  | 1.9% | 6.8%  | 3.5% | -     | 4.5% | 3.3% |
| UVA                    | 3.8%                                  | 3.0% | -     | -    | 7.2%  | 5.8% | 7.0% |
| UVAH                   | 2.0%                                  | 1.9% | -     | -    | -     | 3.2% | 3.6% |
| IR                     | -                                     | -    | 7.0%  | 6.6% | 11.1% | 8.5% | 8.9% |
| IRH                    | -                                     | -    | 4.3%  | 4.3% | -     | 6.2% | 5.1% |

x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity withering); UVA (ultraviolet a withering); UVAH (uva withering with high-humidity); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity).

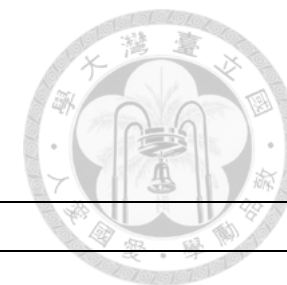


表 3. 萎凋階段茶菁含水率

Table 3. The water content of tea leaves during withering

| Withering stage      | Water content of tea leaves (%) |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                      | Date of sampling (m/d)          |              |              |              |              |              |              |
|                      | 4/11                            | 4/18         | 6/11         | 6/18         | 7/29         | 8/31         | 9/6          |
| Fresh leaves         | 77.2%                           | 74.6%        | 75.6%        | 73.6%        | 74.6%        | 74.2%        | 72.9%        |
| Stage 1 <sup>x</sup> | 75.4%- 76.7%                    | 73.1%- 74.1% | 71.6%- 74.5% | 71.7%- 72.7% | 71.4%- 72.6% | 71.9%- 73.5% | 70.1%- 71.9% |
| Stage 2              | 74.9%                           | 72.4%        | 69.9%        | 69.5%        | 69.0%        | 69.7%        | 68.0%        |
| Stage 3              | 70.0%                           | 70.0%        | 68.0%        | 67.0%        | 65.0%        | 65.0%        | 65.0%        |
| Stage 4              | -                               | -            | -            | -            | 60.0%        | -            | 62.0%        |

x: Stage 1- end of lighting. Because withering with solar, uva ,and infrared and with different relative humidity, the water content of tea leaves is different.



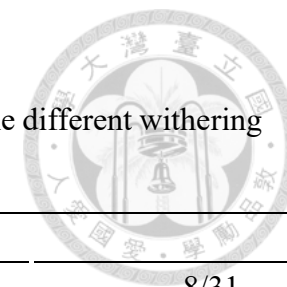


表 4. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總多元酚含量之影響

Table 4. The effect of light resource during early withering stage on the content of total polyphenol of the tea leaves at the different withering stage

| Treatment <sup>x</sup>                     | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |          |          |          |         |          |          |          |          |         |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|
|                                            | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11     |          |          | 6/18    |          |          | 8/31     |          |         |
|                                            | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1  | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3  |
| Total polyphenol (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |          |          |          |          |         |
| SW                                         | 82.95 a <sup>z</sup>           | 80.45 a | 82.62 a | 88.78 a | 88.56 a | 85.34 a | 106.76 a | 96.67 b  | 96.35 a  | 95.51 a | 92.08 ab | 103.35 a | 77.68 ab | 75.06 b  | 75.72 a |
| UVA                                        | 72.32 b                        | 80.27 a | 78.03 a | 90.11 a | 93.38 a | 87.07 a | -        | -        | -        | -       | -        | -        | 72.72 b  | 78.93 ab | 67.36 b |
| IR                                         | -                              | -       | -       | -       | -       | -       | 103.83 a | 98.21 a  | 106.87 a | 99.90 a | 95.05 a  | 90.07 b  | 80.94 a  | 80.15 ab | 75.97 a |
| IW                                         | 78.38 ab                       | 70.95 b | 71.11 a | 87.88 a | 87.84 a | 89.89 a | 94.39 a  | 106.22 a | 98.19 a  | 95.65 a | 84.63 b  | 92.28 b  | 76.14 ab | 82.57 a  | 73.55 a |
| Significant analysis                       | *                              | **      | ns      | ns      | ns      | ns      | ns       | ns       | ns       | ns      | ns       | *        | ns       | ns       | *       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

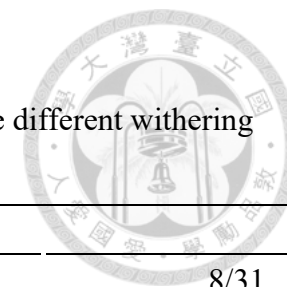


表 5. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總兒茶素含量之影響

Table 5. The effect of light resource during early withering stage on the content of total catechins of the tea leaves at the different withering stage

| Treatment <sup>x</sup>                            | Date of treatment (month/date) |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|                                                   | 4/11                           |           |          | 4/18     |          |          | 6/11     |          |          | 6/18     |          |          | 8/31     |           |           |
|                                                   | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2    | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2    | Stage3    |
| Total catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
| SW                                                | 128.09 b <sup>z</sup>          | 121.95 a  | 149.17 a | 158.06 a | 153.09 a | 136.61 b | 156.83 a | 129.94 b | 136.06 a | 136.00 a | 130.0 a  | 157.82a  | 173.26 a | 179.48 b  | 187.68 a  |
| UVA                                               | 120.83 b                       | 136.42 a  | 107.92 b | 154.36 a | 155.58 a | 129.49 b |          |          |          |          |          |          | 185.72 a | 196.81 a  | 156.81 b  |
| IR                                                |                                |           |          |          |          |          | 147.06 a | 129.06 b | 146.98 a | 149.65 a | 132.27 a | 132.04 b | 192.28 a | 196.81 a  | 174.28 ab |
| IW                                                | 145.28 a                       | 131.78 ab | 141.21 a | 140.36 a | 147.09 a | 146.46 a | 141.00 a | 178.25 a | 144.11 a | 147.26 a | 102.91 b | 118.94 c | 200.59 a | 192.28 ab | 176.03 ab |
| Significant analysis                              | **                             | ns        | **       | ns       | ns       | **       | ns       | **       | ns       | ns       | **       | **       | ns       | ns        | ns        |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

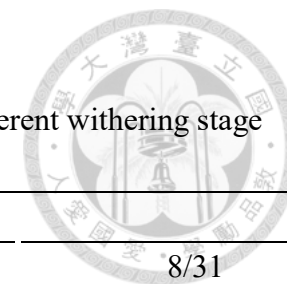


表 6. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁沒食子酸含量之影響

Table 6. The effect of light resource during early withering stage on the content of gallic acid of the tea leaves at the different withering stage

| Treatment <sup>x</sup>                        | Date of treatment (month/date) |         |         |         |          |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                               | 4/11                           |         |         | 4/18    |          |          | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |         |         |
|                                               | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2   | Stage3   | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  |
| Gallic acid content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |          |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SW                                            | 1.915 a <sup>z</sup>           | 2.361 a | 1.451 b | 1.038 a | 1.041 b  | 1.446 a  | 1.091 a | 1.542 a | 1.542 a | 1.119 a | 1.622 a | 1.328 a | 0.889 a | 0.994 a | 0.600 d |
| UVA                                           | 2.027 a                        | 1.309 c | 2.795 a | 1.058 a | 1.153 a  | 1.336 ab |         |         |         |         |         |         | 0.631 b | 0.654 b | 1.047 a |
| IR                                            |                                |         |         |         |          |          | 1.063 a | 1.138 b | 1.138 b | 1.415 a | 1.319 a | 1.373 b | 0.637 b | 0.650 b | 0.873 b |
| IW                                            | 1.536 b                        | 1.396 b | 1.485 b | 1.100 a | 1.098 ab | 1.187 b  | 1.023 a | 1.184 b | 1.183 b | 1.094 a | 1.692 b | 1.447 a | 0.612 b | 0.704 b | 0.767 c |
| Significant analysis                          | **                             | **      | **      | ns      | *        | ns       | ns      | **      | **      | ns      | **      | **      | **      | **      | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

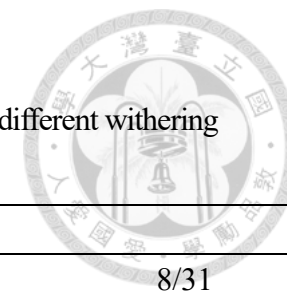


表 7. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響

Fig. 7. Effect of light resource and relative humidity during early withering stage on the total polyphenols content of tea leaves at different withering stages

| Treatment                                          | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
|                                                    | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11     |          |          | 6/18    |         |         | 8/31     |         |         |
|                                                    | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1   | Stage2  | Stage3  |
| Total polyphenol content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| Light resource <sup>w</sup>                        |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| SW                                                 | 85.34 a <sup>z</sup>           | 77.35 a | 81.68 a | 93.10 a | 89.06 a | 87.56 a | 102.80 a | 97.65 a  | 94.50 b  | 93.75 a | 91.87 a | 95.94 a | 79.30 a  | 75.60 b | 73.54 b |
| UVA                                                | 76.89 b                        | 78.25 a | 75.74 b | 90.68 a | 91.08 a | 85.58 a |          |          |          |         |         |         | 74.01 b  | 75.38 b | 70.25 c |
| IR                                                 |                                |         |         |         |         |         | 105.95 a | 99.49 a  | 104.00 a | 97.80 a | 92.77 a | 89.94 b | 77.86 ab | 80.85 a | 77.80 a |
| Relative humidity                                  |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| Normal                                             | 77.64 b                        | 80.36 a | 80.33 a | 89.45 b | 90.97 a | 86.20 a | 105.30 a | 96.94 a  | 101.61 a | 97.70 a | 93.56 a | 96.71 a | 77.11 a  | 78.05 a | 73.02 a |
| High                                               | 84.59 a                        | 75.24 b | 76.83 a | 94.33 a | 89.17 a | 86.94 a | 103.45 a | 100.20 a | 96.89 a  | 93.85 a | 91.08 a | 89.17 b | 77.01 a  | 76.51 a | 74.70 a |
| Significant analysis                               |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| Main effect <sup>x</sup>                           |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| L                                                  | **                             | ns      | *       | ns      | ns      | ns      | ns       | ns       | **       | ns      | ns      | *       | ns       | ns      | **      |
| RH                                                 | *                              | **      | ns      | *       | ns      | ns      | ns       | ns       | ns       | ns      | ns      | *       | ns       | ns      | ns      |
| Interaction                                        |                                |         |         |         |         |         |          |          |          |         |         |         |          |         |         |
| L x RH                                             | ns                             | ns      | ns      | ns      | ns      | *       | ns       | ns       | ns       | ns      | ns      | *       | ns       | ns      | **      |

w: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). x: L (Light resource); RH (Relative humidity) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

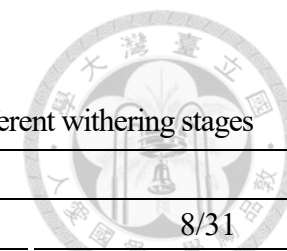


表 8. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總兒茶素類含量之影響

Fig 8. Effect of light resource and relative humidity during early withering stage on the total catechins content of tea leaves at different withering stages

| Treatment                                   | Date of treatment (month/date) |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                             | 4/11                           |          |          | 4/18     |          |          | 6/11     |          |          | 6/18     |          |          | 8/31     |          |          |
|                                             | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   | Stage1   | Stage2   | Stage3   |
| Total catechins (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Light resource <sup>w</sup>                 |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| SW                                          | 126.32 a <sup>z</sup>          | 121.70 a | 154.16 a | 157.30 a | 160.71 a | 153.37 a | 153.83 a | 136.80 a | 132.77 a | 138.90 a | 125.86 a | 138.97 a | 174.16 a | 186.90 a | 195.46 a |
| UVA                                         | 119.38 b                       | 121.21 a | 98.99 b  | 148.94 a | 138.14 b | 132.01 b | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 184.29 a | 186.23 a | 168.21 a |
| IR                                          | -                              | -        | -        | -        | -        | -        | 156.95 a | 139.09 a | 145.37 a | 142.19 a | 131.45 a | 128.14 b | 186.69 a | 196.37 a | 184.98 b |
| Relative humidity                           |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Normal                                      | 124.46 a                       | 129.18 a | 128.54 a | 156.21 a | 154.34 a | 133.05 b | 151.95 a | 129.50 b | 141.52 a | 142.82 a | 131.13 a | 144.93 a | 183.75 a | 190.61 a | 172.92 b |
| High                                        | 121.24 a                       | 113.72 b | 124.61 a | 150.03 a | 144.51 a | 152.33 a | 158.84 a | 146.38 a | 136.62 a | 138.27 a | 126.18 a | 122.18 b | 179.67 a | 189.05 a | 192.84 a |
| Significant analysis                        |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Main effect <sup>x</sup>                    |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| L                                           | *                              | ns       | **       | ns       | **       | **       | ns       | ns       | ns       | ns       | ns       | **       | ns       | ns       | **       |
| RH                                          | ns                             | **       | ns       | ns       | ns       | **       | ns       | *        | ns       | ns       | ns       | **       | ns       | ns       | **       |
| Interaction                                 |                                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| L x RH                                      | ns                             | **       | *        | ns       | **       | **       | ns       | ns       | ns       | *        | ns       | **       | ns       | ns       | ns       |

w: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). x: L (Light resource); RH (Relative humidity) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

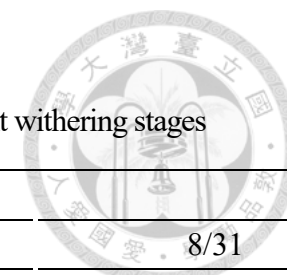


表 9. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響

Fig 9. Effect of light resource and relative humidity during early withering stage on the gallic acid content of tea leaves at different withering stages

| Treatment                             | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                       | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |         |         |
|                                       | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  |
| Gallic acid (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Light resource <sup>w</sup>           |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SW                                    | 1.878 a <sup>z</sup>           | 2.344 a | 1.420 b | 1.074 a | 1.156 a | 1.313 a | 1.065 a | 1.394 a | 1.449 a | 1.140 b | 1.853 a | 1.686 a | 0.800 a | 0.824 a | 0.679 c |
| UVA                                   | 1.884 a                        | 2.152 b | 3.026 a | 1.065 a | 1.138 a | 1.275 a |         |         |         |         |         |         | 0.639 b | 0.641 b | 0.931 a |
| IR                                    |                                |         |         |         |         |         | 1.071 a | 1.147 b | 1.414 a | 1.296 a | 1.421 b | 1.446 b | 0.639 b | 0.608 b | 0.785 b |
| Relative humidity                     |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Normal                                | 1.971 a                        | 1.835 b | 2.123 b | 1.048 a | 1.097 b | 1.391 a | 1.077 a | 1.340 a | 1.521 a | 1.267 a | 1.470 b | 1.782 a | 0.719 a | 0.766 a | 0.840 a |
| High                                  | 1.792 b                        | 2.661 a | 2.323 a | 1.091 a | 1.196 a | 1.197 b | 1.060 a | 1.201 b | 1.342 a | 1.169 b | 1.804 a | 1.350 b | 0.666 b | 0.616 b | 0.756 b |
| Significant analysis                  |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Main effect <sup>x</sup>              |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| L                                     | ns                             | **      | **      | ns      | ns      | ns      | ns      | **      | ns      | **      | **      | **      | **      | **      | **      |
| RH                                    | **                             | **      | *       | ns      | **      | *       | ns      | **      | ns      | **      | **      | **      | *       | **      | **      |
| Interaction                           |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| L x RH                                | ns                             | **      | **      | ns      | **      | ns      | ns      | **      | ns      | **      | **      | **      | **      | **      | **      |

w: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). x: L (Light resource); RH (Relative humidity) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

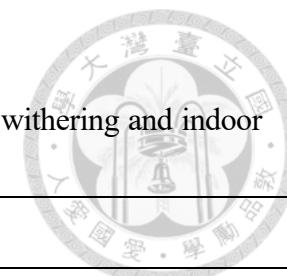


表 10. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總多元酚含量

Fig 10. The content of total polyphenol in tea leaves with similar water content between normal withering, high-humidity withering and indoor withering

| Treatment <sup>x</sup>                | Total polyphenol content (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |         |          |         |         |                                    |         |         |                                         |          |         |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------|------------------------------------|---------|---------|-----------------------------------------|----------|---------|
|                                       | Solar (Date of treatment, month/date)                |         |          |         |         | UVA(Date of treatment, month/date) |         |         | Infrared(Date of treatment, month/date) |          |         |
|                                       | 4/11                                                 | 4/18    | 6/11     | 6/18    | 8/31    | 4/11                               | 4/18    | 8/31    | 6/11                                    | 6/18     | 8/31    |
| Lighting                              | 82.95 a <sup>y</sup>                                 | 88.78 a | 106.76 a | 95.51 a | 77.68 a | 72.32 a                            | 90.11 a | 72.72 a | 103.83 a                                | 99.90 a  | 80.94 a |
| Lighting withering with high-humidity | 82.24 a                                              | 88.28 a | 102.63 a | 96.60 a | 73.31 a | 74.85 a                            | 87.51 a | 75.99 a | 102.64 a                                | 90.72 b  | 80.35 a |
| Indoor withering                      | 74.94 b                                              | 82.85 a | 96.13 a  | 95.95 a | 77.40 a | 78.38 a                            | 87.88 a | 76.14 a | 94.39 a                                 | 95.65 ab | 77.40 a |
| Significant analysis                  | *                                                    | ns      | ns       | ns      | ns      | ns                                 | ns      | ns      | ns                                      | *        | ns      |

x: Tea leaves with similar water content but different withering time. y: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

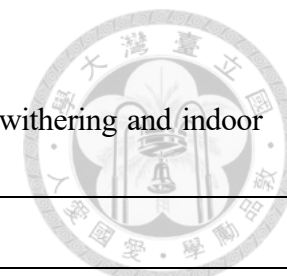


表 11. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總兒茶素含量

Fig 11. The content of total catechins in tea leaves with similar water content between normal withering, high-humidity withering and indoor withering

| Treatment <sup>x</sup>                | Total catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |          |           |          |          |                                     |          |          |                                          |          |           |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|-----------|----------|----------|-------------------------------------|----------|----------|------------------------------------------|----------|-----------|
|                                       | Solar (Date of treatment, month/date)             |          |           |          |          | UVA (Date of treatment, month/date) |          |          | Infrared (Date of treatment, month/date) |          |           |
|                                       | 4/11                                              | 4/18     | 6/11      | 6/18     | 8/31     | 4/11                                | 4/18     | 8/31     | 6/11                                     | 6/18     | 8/31      |
| Lighting                              | 128.09 a <sup>y</sup>                             | 158.06 a | 156.83 a  | 136.00 a | 173.26 a | 120.83 b                            | 154.36 a | 185.72 a | 147.06 a                                 | 149.65 a | 192.28 ab |
| Lighting withering with high-humidity | 137.58 a                                          | 137.18 b | 132.40 b  | 140.86 a | 177.49 a | 107.47 c                            | 148.15 a | 188.30 a | 146.07 a                                 | 122.39 b | 206.90 a  |
| Indoor withering                      | 113.35 b                                          | 139.25 b | 143.97 ab | 144.24 a | 173.26 a | 145.28 a                            | 140.36 a | 200.59 a | 141.00 a                                 | 147.26 a | 174.65 b  |
| Significant analysis                  | **                                                | *        | ns        | ns       | ns       | **                                  | ns       | ns       | ns                                       | **       | ns        |

x: Tea leaves with similar water content but different withering time. y: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.



表 12. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點沒食子酸含量

Fig 12. The content of gallic acid in tea leaves with similar water content between normal withering, high-humidity withering and indoor withering

| Treatment <sup>x</sup>                | Gallic acid content (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |                                     |         |          |                                          |         |          |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------------|---------|----------|------------------------------------------|---------|----------|
|                                       | Solar (Date of treatment, month/date)           |         |         |         |         | UVA (Date of treatment, month/date) |         |          | Infrared (Date of treatment, month/date) |         |          |
|                                       | 4/11                                            | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    | 4/11                                | 4/18    | 8/31     | 6/11                                     | 6/18    | 8/31     |
| Lighting                              | 1.915 a <sup>y</sup>                            | 1.038 c | 1.091 b | 1.119 a | 0.889 a | 2.027 b                             | 1.059 a | 0.631 a  | 1.063 a                                  | 1.415 a | 0.637 a  |
| Lighting withering with high-humidity | 1.507 a                                         | 1.433 a | 1.218 a | 1.234 a | 0.635 b | 2.981 a                             | 1.033 a | 0.555 b  | 1.151 a                                  | 1.363 b | 0.618 ab |
| Indoor withering                      | 4.014 a                                         | 1.15 b  | 1.312 a | 0.964 a | 0.566 c | 1.536 c                             | 1.100 a | 0.612 ab | 1.023 a                                  | 1.094 c | 0.566 b  |
| Significant analysis                  | ns                                              | **      | **      | ns      | **      | **                                  | ns      | ns       | ns                                       | **      | ns       |

x: Tea leaves with similar water content but different withering time. y: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

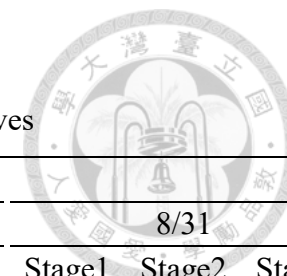


表 13. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁總游離胺基酸含量之影響

Table 13. The effect of light resource during early withering stage on the content of total free amino acids of the tea leaves

| Treatment                                                | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                          | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |         |         |
|                                                          | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  |
| Total free amino acids content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SW <sup>x</sup>                                          | 18.36 a <sup>z</sup>           | 20.51 a | 26.43 a | 15.74 a | 16.94 a | 18.13 a | 15.55 a | 15.11 b | 16.57 a | 11.06 a | 9.01 b  | 11.18 c | 21.14 a | 21.84 a | 22.48 b |
| UVA                                                      | 20.08 a                        | 21.41 a | 27.09 a | 12.59 b | 16.98 a | 20.61 a |         |         |         |         |         |         | 20.26 a | 20.13 b | 23.73 b |
| IR                                                       |                                |         |         |         |         |         | 10.95 b | 19.61 a | 16.18 a | 11.79 a | 10.45 b | 13.74 b | 22.09 a | 22.20 a | 26.00 a |
| IW                                                       | 19.77 a                        | 20.83 a | 20.51 b | 17.26 a | 19.96 a | 18.34 a | 6.75 c  | 10.48 c | 14.62 a | 13.43 a | 15.28 a | 15.79 a | 21.64 a | 21.81 a | 22.86 b |
| Significant analysis                                     | ns                             | ns      | **      | **      | ns      | ns      | **      | **      | ns      | ns      | **      | **      | ns      | **      | *       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 14. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之影響

Fig 14. Effects of light resource and relative humidity during early withering stage on the content of total free amino acids of tea leaves at different stages

| Treatment <sup>w</sup>                                     | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                            | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |         |         |
|                                                            | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  |
| Total free amino acids content (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Light resource                                             |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SW                                                         | 20.02 a <sup>z</sup>           | 21.26 a | 25.64 a | 16.06 a | 17.21 a | 18.32 b | 15.11 b | 15.40 a | 15.08 a | 10.86 a | 9.78 b  | 13.18 a | 20.48 a | 21.67 a | 22.41 b |
| UVA                                                        | 20.00 a                        | 22.69 a | 25.06 a | 14.91 a | 17.66 a | 21.48 a |         |         |         |         |         |         | 20.65 b | 21.33 a | 24.59 a |
| IR                                                         |                                |         |         |         |         |         | 11.63 a | 16.44 a | 15.53 a | 12.10 a | 11.07 a | 13.18 a | 21.86 a | 22.43 a | 25.20 a |
| Relative humidity                                          |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Normal                                                     | 19.22 b                        | 20.96 a | 26.76 a | 14.16 b | 16.96 b | 19.37 a | 13.25 a | 17.36 a | 15.59 a | 11.42 a | 9.73 b  | 13.89 a | 21.16 a | 21.39 a | 24.07 a |
| High                                                       | 20.81 a                        | 20.98 a | 23.94 b | 16.81 a | 17.91 a | 20.43 a | 13.49 a | 14.48 b | 15.02 a | 11.54 a | 11.12 a | 12.46 b | 20.84 a | 22.23 a | 24.06 a |
| Significant analysis                                       |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Main effect <sup>x</sup>                                   |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| L                                                          | ns                             | ns      | ns      | ns      | ns      | **      | **      | ns      | ns      | ns      | *       | ns      | ns      | ns      | **      |
| RH                                                         | **                             | ns      | *       | **      | *       | ns      | ns      | **      | ns      | ns      | *       | ns      | ns      | ns      | ns      |
| Interaction                                                |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| L x RH                                                     | **                             | ns      | ns      | *       | ns      | ns      | ns      | **      | ns      | ns      | ns      | *       | ns      | ns      | *       |

w: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). x: L (Light resource); RH (Relative humidity) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

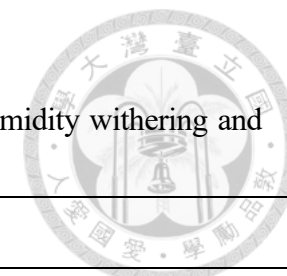


表 15. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點總游離胺基酸含量

Fig 15. The content of total free amino acids in tea leaves with similar water content between normal withering, high-humidity withering and indoor withering

| Treatment <sup>x</sup>                | Total free amino acids content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |                                     |         |          |                                          |         |          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------------|---------|----------|------------------------------------------|---------|----------|
|                                       | Solar (Date of treatment, month/date)                    |         |         |         |         | UVA (Date of treatment, month/date) |         |          | Infrared (Date of treatment, month/date) |         |          |
|                                       | 4/11                                                     | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    | 4/11                                | 4/18    | 8/31     | 6/11                                     | 6/18    | 8/31     |
| Lighting                              | 18.36 b <sup>y</sup>                                     | 18.91 a | 15.55 a | 11.06 a | 21.14 a | 20.08 a                             | 15.13 a | 20.26 ab | 10.95 b                                  | 11.79 a | 22.09 a  |
| Lighting withering with high-humidity | 20.36 a                                                  | 21.10 a | 15.60 a | 12.81 a | 22.19 a | 19.77 a                             | 16.40 a | 20.12 b  | 13.69 a                                  | 13.74 a | 21.49 ab |
| Indoor withering                      | 19.02 b                                                  | 16.87 a | 12.28 b | 12.50 a | 19.95 a | 18.48 a                             | 15.14 a | 21.63 a  | 6.75 c                                   | 13.43 a | 19.95 b  |
| Significant analysis                  | **                                                       | ns      | *       | ns      | ns      | ns                                  | ns      | ns       | **                                       | ns      | ns       |

x: Tea leaves with similar water content but different withering time. y: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.



表 16. 初期萎凋光源對不同萎凋階段茶菁咖啡因含量之影響

Table 16. The effect of light resource during early withering stage on the content of caffeine of the tea leaves at different withering stage

| Treatment                                  | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                            | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |         |         |
|                                            | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  |
| Caffeine content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SW <sup>x</sup>                            | 29.04 a <sup>z</sup>           | 29.87 a | 32.26 a | 28.51 a | 28.87 a | 28.90 a | 28.70 a | 26.76 b | 28.44 a | 27.89 b | 30.12 a | 32.00 a | 28.32 a | 29.68 a | 29.78 a |
| UVA                                        | 28.04 a                        | 29.73 a | 31.84 a | 28.90 a | 30.85 a | 29.40 a |         |         |         |         |         |         | 28.93 a | 30.45 a | 29.48 a |
| IR                                         |                                |         |         |         |         |         | 26.99 a | 27.82 b | 28.58 a | 31.78 a | 28.75 a | 29.62 b | 30.06 a | 30.74 a | 30.78 a |
| IW                                         | 28.53 a                        | 27.55 b | 29.76 a | 27.34 a | 27.53 b | 28.97 a | 26.73 a | 30.65 a | 27.46 a | 30.25 b | 28.39 a | 28.63 b | 30.38 a | 30.74 a | 29.45 a |
| Significant analysis                       | ns                             | **      | ns      | ns      | *       | ns      | ns      | **      | ns      | *       | ns      | *       | ns      | ns      | ns      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering) y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 17. 萎凋初期光源與相對溼度在不同萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響

Fig 17. Effects of light resource and relative humidity during early withering stage on the content of caffeine tea leaves at different withering stages

| Treatment <sup>w</sup>                       | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
|----------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
|                                              | 4/11                           |         |         | 4/18    |         |         | 6/11    |         |         | 6/18    |         |         | 8/31    |          |         |
|                                              | Stage1 <sup>y</sup>            | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2  | Stage3  | Stage1  | Stage2   | Stage3  |
| Caffeine content (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| Light resource                               |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| SW                                           | 29.11 a <sup>z</sup>           | 29.48 b | 32.34 a | 29.27 a | 30.37 a | 30.19 a | 27.14 a | 27.08 b | 27.79 a | 28.63 b | 30.03 a | 30.77 a | 28.75 a | 30.19 ab | 31.07 a |
| UVA                                          | 28.59 a                        | 30.26 a | 31.61 a | 28.12 a | 28.97 a | 29.65 b | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 29.45 a | 29.59 b  | 30.56 a |
| IR                                           | -                              | -       | -       | -       | -       | -       | 27.81 a | 28.83 a | 27.27 a | 30.26 a | 29.26 a | 29.26 a | 29.30 a | 30.71 a  | 31.24 a |
| Relative humidity                            |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| Normal                                       | 28.54 b                        | 29.80 a | 32.05 a | 28.70 a | 29.86 a | 30.69 a | 27.29 a | 28.02 a | 27.84 a | 29.83 a | 29.44 a | 30.81 a | 29.10 a | 30.29 a  | 30.02 b |
| High                                         | 29.16 a                        | 29.94 a | 31.90 a | 28.69 a | 29.48 a | 29.15 b | 27.66 a | 27.89 a | 27.21 a | 29.05 a | 29.86 a | 29.22 b | 29.23 a | 30.04 a  | 31.76 a |
| Significant analysis                         |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| Main effect <sup>x</sup>                     |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| L                                            | ns                             | **      | ns      | ns      | ns      | *       | ns      | *       | ns      | *       | ns      | ns      | ns      | ns       | ns      |
| RH                                           | **                             | ns      | ns      | ns      | ns      | **      | ns      | ns      | ns      | ns      | ns      | *       | ns      | ns       | **      |
| Interaction                                  |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
| L x RH                                       | ns                             | **      | ns      | *       | **      | **      | ns      | ns      | ns      | **      | ns      | ns      | ns      | *        | ns      |

w: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). x: L (Light resource); RH (Relative humidity). y: Stage. 1: end of lighting. Stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3). z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 18. 正常萎凋、高濕度萎凋與室內萎凋茶菁含水率相近點咖啡因含量

Fig 18. The content of caffeine in tea leaves with similar water content between normal withering, high-humidity withering and indoor withering

| Treatment <sup>x</sup>                | Caffeine content (mg · g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |                                     |         |         |                                          |         |          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------|---------|----------|
|                                       | Solar (Date of treatment, month/date)        |         |         |         |         | UVA (Date of treatment, month/date) |         |         | Infrared (Date of treatment, month/date) |         |          |
|                                       | 4/11                                         | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    | 4/11                                | 4/18    | 8/31    | 6/11                                     | 6/18    | 8/31     |
| Lighting                              | 29.04 a <sup>y</sup>                         | 28.51 a | 28.70 a | 27.87 a | 28.32 a | 28.04 b                             | 28.00 a | 28.93 a | 26.99 a                                  | 31.78 a | 30.06 ab |
| Lighting withering with high-humidity | 29.32 a                                      | 28.98 a | 26.44 a | 29.66 a | 29.16 a | 30.46 a                             | 27.89 a | 29.89 a | 27.98 a                                  | 29.20 c | 30.98 a  |
| Indoor withering                      | 29.43 a                                      | 28.52 a | 28.59 a | 28.55 a | 27.72 a | 28.53 b                             | 27.34 a | 30.38 a | 26.73 a                                  | 30.25 b | 27.72 b  |
| Significant analysis                  | ns                                           | ns      | ns      | ns      | ns      | *                                   | ns      | ns      | ns                                       | **      | *        |

x: Tea leaves with similar water content but different withering time. y: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 19. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響

Fig 19. The effect of light resource and withering stage on total polyphenol content of tea leaves

| Treatment                                          | Date of treatment (month/date) |         |          |          |          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------|----------|----------|----------|
|                                                    | 4/11                           | 4/18    | 6/11     | 6/18     | 8/31     |
| Total polyphenol content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |          |          |          |
| Light resource <sup>x</sup>                        |                                |         |          |          |          |
| SW                                                 | 82.01 a <sup>z</sup>           | 87.56 a | 99.93 ab | 96.98 a  | 76.15 ab |
| UVA                                                | 76.87 b                        | 90.19 a |          |          | 73.01 b  |
| IR                                                 | -                              | -       | 106.26 a | 95.01 ab | 79.03 a  |
| IW                                                 | 73.48 b                        | 88.54 a | 99.60 b  | 90.86 b  | 77.42 a  |
| Withering stage <sup>y</sup>                       |                                |         |          |          |          |
| 1                                                  | 77.89 a                        | 89.92 a | 101.66 a | 97.02 a  | 79.18 a  |
| 2                                                  | 77.22 a                        | 88.93 a | 103.25 a | 90.59 b  | 76.87 a  |
| 3                                                  | 77.25 a                        | 87.43 a | 100.87 a | 95.24 a  | 73.15 b  |
| Significant analysis                               |                                |         |          |          |          |
| Main effect                                        |                                |         |          |          |          |
| Light resource (L)                                 | **                             | ns      | ns       | *        | **       |
| Withering stage (S)                                | ns                             | ns      | ns       | *        | **       |
| Interaction                                        |                                |         |          |          |          |
| LxS                                                | ns                             | ns      | ns       | *        | ns       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2, 3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.



表 20. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總多元酚含量之影響

Fig 20. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total polyphenol content of tea leaves

| Treatment                                          | Date of treatment (month/date) |         |           |         |         |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------|-----------|---------|---------|
|                                                    | 4/11                           | 4/18    | 6/11      | 6/18    | 8/31    |
| Total polyphenol content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |           |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>                        |                                |         |           |         |         |
| SW                                                 | 81.46 a <sup>z</sup>           | 89.91 a | 98.32 b   | 93.85 a | 76.15 b |
| UVA                                                | 76.87 b                        | 89.11 a | -         | -       | 73.21 c |
| IR                                                 | -                              | -       | 102.68 a  | 93.51 a | 78.84 a |
| Relative humidity                                  |                                |         |           |         |         |
| Normal                                             | 79.44 a                        | 88.87 a | 103.91 a  | 95.99 a | 76.06 a |
| High                                               | 78.89 a                        | 90.14 a | 97.90 b   | 91.37 b | 76.07 a |
| Withering stage <sup>y</sup>                       |                                |         |           |         |         |
| 1                                                  | 81.11 a                        | 91.89 a | 102.80 a  | 95.78 a | 77.06 a |
| 2                                                  | 78.58 ab                       | 90.07 a | 100.82 ab | 92.32 a | 77.28 a |
| 3                                                  | 77.80 b                        | 86.57 b | 97.86 b   | 92.94 a | 73.86 b |
| Significant analysis                               |                                |         |           |         |         |
| Main effect                                        |                                |         |           |         |         |
| Light resource(L)                                  | **                             | ns      | *         | ns      | **      |
| Relative humidity (W)                              | ns                             | ns      | *         | **      | ns      |
| Withering stage (S)                                | ns                             | **      | ns        | ns      | **      |
| Interaction                                        |                                |         |           |         |         |
| L x W                                              | ns                             | **      | ns        | ns      | ns      |
| L x S                                              | **                             | ns      | ns        | *       | ns      |
| W x S                                              | **                             | *       | ns        | ns      | ns      |
| L x W x S                                          | ns                             | ns      | ns        | *       | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content(table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 21. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總游離型兒茶素含量之影響

Fig 21. The effect of light resource and withering stage on total free catechins content of tea leaves

| Treatment                                              | Date of treatment (month/date) |         |          |         |         |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------|---------|----------|---------|---------|
|                                                        | 4/11                           | 4/18    | 6/11     | 6/18    | 8/31    |
| Total free catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |          |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>                            |                                |         |          |         |         |
| SW                                                     | 45.75 b <sup>z</sup>           | 63.62 a | 54.33 b  | 50.48 a | 48.41 b |
| UVA                                                    | 45.27 b                        | 62.41 a | -        | -       | 45.76 c |
| IR                                                     | -                              | -       | 55.93 b  | 49.37 a | 48.00 b |
| IW                                                     | 56.87 a                        | 60.44 b | 60.74 a  | 44.11 b | 50.57 a |
| Withering stage <sup>y</sup>                           |                                |         |          |         |         |
| 1                                                      | 49.56 a                        | 65.95 a | 59.46 a  | 51.99 a | 51.21 a |
| 2                                                      | 49.05 a                        | 63.71 a | 56.05 ab | 42.15 b | 49.64 a |
| 3                                                      | 49.28 a                        | 56.81 b | 55.49 b  | 49.81 a | 43.70 b |
| Significant analysis                                   |                                |         |          |         |         |
| Main effect                                            |                                |         |          |         |         |
| Light resource (L)                                     | **                             | *       | **       | **      | **      |
| Withering stage (W)                                    | ns                             | **      | ns       | **      | **      |
| Interaction                                            |                                |         |          |         |         |
| LxW                                                    | ***                            | **      | *        | *       | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2, 3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 22. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總游離兒茶素含量之影響  
Fig 22. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total free catechins content of tea leaves

| Treatment                    | Date of treatment (month/date)                         |         |         |         |         |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                              | 4/11                                                   | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    |
|                              | Total free catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>  |                                                        |         |         |         |         |
| SW                           | 48.89 a <sup>z</sup>                                   | 66.57 a | 55.31 a | 46.81 b | 48.50 a |
| UVA                          | 46.31 b                                                | 61.11 b | -       | -       | 49.68 a |
| IR                           | -                                                      | -       | 56.77 a | 49.36 a | 46.21 b |
| Relative humidity            |                                                        |         |         |         |         |
| Normal                       | 49.70 a                                                | 63.02 b | 55.13 a | 49.92 a | 48.88 a |
| High                         | 45.51 b                                                | 64.66 a | 56.95 a | 46.25 b | 47.39 b |
| Withering stage <sup>y</sup> |                                                        |         |         |         |         |
| 1                            | 45.45 b                                                | 67.52 a | 60.62 a | 51.57 a | 49.10 a |
| 2                            | 44.69 b                                                | 64.38 b | 54.44 b | 47.55 b | 49.62 a |
| 3                            | 52.66 a                                                | 59.62 c | 53.06 b | 45.14 c | 45.68 b |
| Significant analysis         |                                                        |         |         |         |         |
| Main effect                  |                                                        |         |         |         |         |
| Light resource(L)            | **                                                     | **      | ns      | **      | **      |
| Relative humidity (W)        | **                                                     | *       | ns      | **      | **      |
| Withering stage (S)          | **                                                     | **      | **      | **      | **      |
| Interaction                  |                                                        |         |         |         |         |
| L x W                        | **                                                     | **      | ns      | **      | *       |
| L x S                        | **                                                     | **      | ns      | **      | **      |
| W x S                        | **                                                     | **      | ns      | **      | **      |
| L x W x S                    | **                                                     | ns      | ns      | **      | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 23. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總酯型兒茶素含量之影響

Fig 23. The effect of light resource and withering stage on total catechin gallates content of tea leaves

| Treatment                                         | Date of treatment (month/date) |          |         |         |           |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|---------|---------|-----------|
|                                                   | 4/11                           | 4/18     | 6/11    | 6/18    | 8/31      |
| Total catechin gallates (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |          |         |         |           |
| Light resource <sup>x</sup>                       |                                |          |         |         |           |
| SW                                                | 87.32 a <sup>z</sup>           | 85.63 a  | 86.62 b | 90.80 a | 131.73 a  |
| UVA                                               | 76.46 c                        | 84.20 a  | -       | -       | 133.60 a  |
| IR                                                | -                              | -        | 85.10 b | 88.61 a | 139.79 a  |
| IW                                                | 82.54 b                        | 84.06 a  | 93.71 a | 78.96 d | 139.07 a  |
| Withering stage <sup>y</sup>                      |                                |          |         |         |           |
| 1                                                 | 81.84 a                        | 84.97 a  | 88.32 a | 92.31 a | 136.75 ab |
| 2                                                 | 80.99 a                        | 88.21 ab | 89.71 a | 79.57 c | 141.39 a  |
| 3                                                 | 83.48 a                        | 80.71 b  | 86.89 a | 86.46 b | 130.00 b  |
| Significant analysis                              |                                |          |         |         |           |
| Main effect                                       |                                |          |         |         |           |
| Light resource (L)                                | **                             | ns       | *       | **      | ns        |
| Withering stage (S)                               | ns                             | ns       | ns      | **      | ns        |
| Interaction                                       |                                |          |         |         |           |
| LxS                                               | **                             | ns       | **      | **      | *         |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 24. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總酯型兒茶素含量

Fig 24. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total catechin gallates content of tea leaves

| Treatment                                         | Date of treatment (month/date) |         |         |          |           |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|----------|-----------|
|                                                   | 4/11                           | 4/18    | 6/11    | 6/18     | 8/31      |
| Total catechin gallates (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |          |           |
| Light resource <sup>x</sup>                       |                                |         |         |          |           |
| SW                                                | 85.17 a <sup>z</sup>           | 90.55 a | 85.82 b | 87.77 a  | 137.01 a  |
| UVA                                               | 75.40 b                        | 78.59 b | -       | -        | 133.35 a  |
| IR                                                | -                              | -       | 90.37 a | 84.56 a  | 139.66 a  |
| Relative humidity                                 |                                |         |         |          |           |
| Normal                                            | 81.88 a                        | 84.85 a | 85.86 b | 89.70 a  | 135.04 a  |
| High                                              | 78.69 b                        | 84.30 a | 90.33 a | 82.62 b  | 138.31 a  |
| Withering stage <sup>y</sup>                      |                                |         |         |          |           |
| 1                                                 | 77.40 b                        | 85.60 a | 94.77 a | 88.98 a  | 132.61 b  |
| 2                                                 | 76.76 b                        | 85.04 a | 84.89 b | 83.52 b  | 140.21 a  |
| 3                                                 | 86.69 a                        | 83.07 a | 84.63 b | 86.00 ab | 137.20 ab |
| Significant analysis                              |                                |         |         |          |           |
| Main effect                                       |                                |         |         |          |           |
| Light resource(L)                                 | **                             | **      | *       | ns       | ns        |
| Relative humidity (W)                             | *                              | ns      | *       | **       | ns        |
| Withering stage (S)                               | **                             | ns      | **      | *        | ns        |
| Interaction                                       |                                |         |         |          |           |
| L x W                                             | ns                             | **      | **      | ns       | ns        |
| L x S                                             | **                             | ns      | ns      | **       | *         |
| W x S                                             | **                             | **      | *       | *        | *         |
| L x W x S                                         | **                             | **      | ns      | **       | ns        |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content(table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 25. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總兒茶素含量之影響

Fig 25. The effect of light resource and withering stage on total catechins content of tea leaves



| Treatment                                         | Date of treatment (month/date) |          |          |          |          |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                                                   | 4/11                           | 4/18     | 6/11     | 6/18     | 8/31     |
| Total catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |          |          |          |          |
| Light resource <sup>x</sup>                       |                                |          |          |          |          |
| SW                                                | 133.67 a <sup>z</sup>          | 149.25 a | 140.95 b | 141.27 a | 180.14 a |
| UVA                                               | 121.72 b                       | 146.48 a | -        | -        | 179.36 a |
| IR                                                | -                              | -        | 141.03 b | 137.99 a | 187.79 a |
| IW                                                | 122.38 b                       | 144.64 a | 154.45 a | 123.03 b | 189.63 a |
| Withering stage <sup>y</sup>                      |                                |          |          |          |          |
| 1                                                 | 131.40 a                       | 151.92 a | 148.30 a | 144.30 a | 187.96 a |
| 2                                                 | 130.05 b                       | 150.92 a | 145.75 a | 136.27 b | 191.03 a |
| 3                                                 | 115.72 b                       | 137.52 b | 142.38 a | 121.73 c | 173.70 b |
| Significant analysis                              |                                |          |          |          |          |
| Main effect                                       |                                |          |          |          |          |
| Light resource (L)                                | **                             | ns       | *        | **       | ns       |
| Withering stage (S)                               | **                             | **       | ns       | **       | ns       |
| Interaction                                       |                                |          |          |          |          |
| LxS                                               | **                             | *        | **       | **       | ns       |

x: SW (solar withering ); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 26. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總兒茶素含量之影響

Fig 26. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total catechins content of tea leaves

| Treatment                                         | Date of treatment (month/date) |          |          |          |           |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
|                                                   | 4/11                           | 4/18     | 6/11     | 6/18     | 8/31      |
| Total catechins content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |          |          |          |           |
| Light resource <sup>x</sup>                       |                                |          |          |          |           |
| SW                                                | 134.06 a <sup>z</sup>          | 157.12 a | 147.14 a | 134.58 a | 185.51 ab |
| UVA                                               | 121.71 b                       | 139.70 b | -        | -        | 179.57 b  |
| IR                                                | -                              | -        | 141.13 a | 133.92 a | 189.35 a  |
| Relative humidity                                 |                                |          |          |          |           |
| Normal                                            | 128.38 a                       | 148.96 a | 140.98 a | 139.63 a | 182.43 a  |
| High                                              | 127.39 a                       | 147.87 a | 147.28 a | 128.87 b | 187.19 a  |
| Withering stage <sup>y</sup>                      |                                |          |          |          |           |
| 1                                                 | 122.85 b                       | 153.12 a | 155.39 a | 140.54 a | 181.71 b  |
| 2                                                 | 121.45 b                       | 149.46 a | 139.07 b | 128.65 b | 189.83 a  |
| 3                                                 | 139.36 a                       | 142.69 b | 137.94 b | 133.55 b | 182.88 ab |
| Significant analysis                              |                                |          |          |          |           |
| Main effect                                       |                                |          |          |          |           |
| Light resource(L)                                 | **                             | **       | ns       | ns       | *         |
| Relative humidity (W)                             | ns                             | ns       | ns       | **       | ns        |
| Withering stage (S)                               | **                             | **       | **       | **       | ns        |
| Interaction                                       |                                |          |          |          |           |
| L x W                                             | ns                             | **       | ns       | ns       | ns        |
| L x S                                             | **                             | *        | ns       | *        | **        |
| W x S                                             | **                             | **       | *        | **       | **        |
| L x W x S                                         | **                             | **       | ns       | **       | ns        |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2, 3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 27. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響

Fig 27. The effect of light resource and withering stage on gallic acid content of tea leaves

| Treatment                    | Date of treatment (month/date)                |         |         |         |         |
|------------------------------|-----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                              | 4/11                                          | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    |
|                              | Gallic acid content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>  |                                               |         |         |         |         |
| SW                           | 1.909 b <sup>z</sup>                          | 1.175 a | 1.403 a | 1.356 b | 0.828 a |
| UVA                          | 2.044 a                                       | 1.183 a | -       | -       | 0.778 b |
| IR                           | -                                             | -       | 1.222 b | 1.369 b | 0.720 c |
| IW                           | 2.063 a                                       | 1.128 a | 1.121 b | 1.411 a | 0.694 c |
| Withering stage <sup>y</sup> |                                               |         |         |         |         |
| 1                            | 1.826 b                                       | 1.065 b | 1.059 b | 1.209 c | 0.692 c |
| 2                            | 1.689 c                                       | 1.098 b | 1.288 a | 1.544 a | 0.750 b |
| 3                            | 2.501 a                                       | 1.322 a | 1.399 a | 1.383 b | 0.822 a |
| Significant analysis         |                                               |         |         |         |         |
| Main effect                  |                                               |         |         |         |         |
| Light resource (L)           | *                                             | ns      | **      | **      | **      |
| Withering stage (S)          | **                                            | **      | **      | **      | **      |
| Interaction                  |                                               |         |         |         |         |
| LxS                          | **                                            | **      | *       | **      | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.



表 28. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁沒食子酸含量之影響

Fig 28. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on gallic acid content of tea leaves

| Treatment                             | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                       | 4/11                           | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    |
| Gallic acid (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>           |                                |         |         |         |         |
| SW                                    | 1.880 b <sup>z</sup>           | 1.181 a | 1.303 a | 1.560 a | 0.768 a |
| UVA                                   | 2.059 a                        | 1.159 a | -       | -       | 0.737 b |
| IR                                    | -                              | -       | 1.211 b | 1.387 b | 0.677 c |
| Relative humidity                     |                                |         |         |         |         |
| Normal                                | 1.976 a                        | 1.178 a | 1.312 a | 1.362 b | 0.775 a |
| High                                  | 1.963 a                        | 1.161 a | 1.201 b | 1.585 a | 0.679 b |
| Withering stage <sup>y</sup>          |                                |         |         |         |         |
| 1                                     | 1.881 b                        | 1.010 c | 1.068 c | 1.218 c | 0.693 b |
| 2                                     | 2.248 a                        | 1.147 b | 1.271 b | 1.637 a | 0.691 b |
| 3                                     | 1.778 c                        | 1.293 a | 1.431 a | 1.566 b | 0.798 a |
| Significant analysis                  |                                |         |         |         |         |
| Main effect                           |                                |         |         |         |         |
| Light resource(L)                     | **                             | ns      | *       | **      | **      |
| Relative humidity (W)                 | ns                             | ns      | *       | **      | **      |
| Withering stage (S)                   | **                             | **      | **      | **      | **      |
| Interaction                           |                                |         |         |         |         |
| L x W                                 | ns                             | ns      | ns      | **      | ns      |
| L x S                                 | **                             | ns      | ns      | **      | **      |
| W x S                                 | **                             | **      | ns      | **      | **      |
| L x W x S                             | **                             | **      | ns      | **      | **      |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 29. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之影響

Fig 29. The effect of light resource and withering stage on total free amino acids content of tea leaves

| Treatment                                                | Date of treatment (month/date) |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                                          | 4/11                           | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    |
| Total free amino acids content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>                              |                                |         |         |         |         |
| SW                                                       | 21.77 b <sup>z</sup>           | 16.93 b | 15.74 a | 10.42 c | 21.82 b |
| UVA                                                      | 22.86 a                        | 16.72 b | -       | -       | 20.24 c |
| IR                                                       | -                              | -       | 15.06 a | 12.00 b | 23.43 a |
| IW                                                       | 20.37 c                        | 18.53 a | 11.14 b | 14.84 a | 22.11 b |
| Withering stage <sup>y</sup>                             |                                |         |         |         |         |
| 1                                                        | 19.40 c                        | 15.20 c | 11.09 b | 12.10 b | 21.29 b |
| 2                                                        | 20.92 b                        | 17.96 b | 15.07 a | 11.58 b | 21.51 b |
| 3                                                        | 24.68 a                        | 19.03 a | 15.79 a | 13.57 a | 22.90 a |
| Significant analysis                                     |                                |         |         |         |         |
| Main effect                                              |                                |         |         |         |         |
| Light resource (L)                                       | **                             | *       | **      | **      | **      |
| Withering stage (W)                                      | **                             | **      | **      | *       | **      |
| Interaction                                              |                                |         |         |         |         |
| LxW                                                      | *                              | **      | **      | ns      | *       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 30. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁總游離胺基酸含量之影響  
Fig 30. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total free amino acids content of tea leaves

| Treatment                    | Date of treatment (month/date)                          |         |         |         |         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                              | 4/11                                                    | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31    |
|                              | Total free amino acid content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |         |         |         |         |
| Light resource <sup>x</sup>  |                                                         |         |         |         |         |
| SW                           | 22.31 a <sup>z</sup>                                    | 17.20 b | 15.20 a | 11.27 a | 21.52 b |
| UVA                          | 21.91 a                                                 | 18.02 a | -       | -       | 21.63 b |
| IR                           | -                                                       | -       | 14.53 a | 12.12 a | 23.16 a |
| Relative humidity            |                                                         |         |         |         |         |
| Normal                       | 22.31 a                                                 | 16.83 b | 15.40 a | 11.21 a | 22.38 a |
| High                         | 21.91 a                                                 | 18.36 a | 14.33 a | 12.18 a | 21.83 a |
| Withering stage <sup>y</sup> |                                                         |         |         |         |         |
| 1                            | 20.01 b                                                 | 15.49 c | 13.37 b | 11.48 b | 21.01 c |
| 2                            | 20.97 b                                                 | 17.43 b | 15.92 a | 10.43 b | 21.82 b |
| 3                            | 25.35 a                                                 | 19.90 a | 15.31 a | 13.18 a | 23.49 a |
| Significant analysis         |                                                         |         |         |         |         |
| Main effect                  |                                                         |         |         |         |         |
| Light resource(L)            | ns                                                      | *       | ns      | ns      | **      |
| Relative humidity (W)        | ns                                                      | **      | ns      | ns      | ns      |
| Withering stage (S)          | **                                                      | **      | **      | **      | **      |
| Interaction                  |                                                         |         |         |         |         |
| L x W                        | **                                                      | *       | ns      | ns      | **      |
| L x S                        | ns                                                      | **      | **      | ns      | ns      |
| W x S                        | **                                                      | ns      | ns      | ns      | ns      |
| L x W x S                    | ns                                                      | ns      | **      | ns      | *       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content(table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 31. 萎凋初期光源與萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響

Fig 31. The effect of light resource and withering stage on caffeine content of tea leaves

| Treatment                                  | Date of treatment (month/date) |          |         |         |          |
|--------------------------------------------|--------------------------------|----------|---------|---------|----------|
|                                            | 4/11                           | 4/18     | 6/11    | 6/18    | 8/31     |
| Caffeine content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |          |         |         |          |
| Light resource <sup>x</sup>                |                                |          |         |         |          |
| SW                                         | 30.39 a <sup>z</sup>           | 28.76 ab | 27.64 a | 30.00 a | 29.26 b  |
| UVA                                        | 29.87 a                        | 29.42 a  | -       | -       | 30.58 a  |
| IR                                         | -                              | -        | 27.80 a | 30.05 a | 30.01 ab |
| IW                                         | 28.61 b                        | 27.95 b  | 28.61 a | 29.09 a | 30.19 ab |
| Withering stage <sup>y</sup>               |                                |          |         |         |          |
| 1                                          | 28.54 b                        | 27.95 b  | 27.47 a | 29.97 a | 29.95 a  |
| 2                                          | 29.05 b                        | 29.09 a  | 28.41 a | 29.09 a | 30.15 a  |
| 3                                          | 31.25 a                        | 29.10 a  | 28.16 a | 30.08 a | 29.94 a  |
| Significant analysis                       |                                |          |         |         |          |
| Main effect                                |                                |          |         |         |          |
| Light resource (L)                         | **                             | **       | ns      | ns      | ns       |
| Withering stage (W)                        | **                             | *        | ns      | ns      | ns       |
| Interaction                                |                                |          |         |         |          |
| LxW                                        | *                              | *        | *       | **      | *        |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2,3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 32. 萎凋初期光源、萎凋相對溼度與萎凋階段對茶菁咖啡因含量之影響

Fig 32. The effect of light resource, relative humidity and withering stage on total polyphenol content of tea leaves

| Treatment                                  | Date of treatment (month/date) |         |         |         |          |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|----------|
|                                            | 4/11                           | 4/18    | 6/11    | 6/18    | 8/31     |
| Caffeine content (mg·g <sup>-1</sup> d.w.) |                                |         |         |         |          |
| Light resource <sup>x</sup>                |                                |         |         |         |          |
| SW                                         | 30.31 a <sup>z</sup>           | 29.94 a | 27.97 a | 29.8 a  | 29.48 b  |
| UVA                                        | 30.15 a                        | 29.02 b | -       | -       | 30.18 a  |
| IR                                         | -                              | -       | 27.34 a | 29.59 a | 30.02 ab |
| Relative humidity                          |                                |         |         |         |          |
| Normal                                     | 30.13 a                        | 29.09 b | 27.72 a | 30.03 a | 29.95 a  |
| High                                       | 30.34 a                        | 29.88 a | 27.59 a | 29.38 a | 29.83 a  |
| Withering stage <sup>y</sup>               |                                |         |         |         |          |
| 1                                          | 28.85 c                        | 28.86 b | 27.53 a | 29.44 a | 29.80 a  |
| 2                                          | 29.87 b                        | 29.67 a | 27.48 a | 29.65 a | 29.90 a  |
| 3                                          | 31.98 a                        | 29.92 a | 27.95 a | 30.02 a | 29.96 a  |
| Significant analysis                       |                                |         |         |         |          |
| Main effect                                |                                |         |         |         |          |
| Light resource(L)                          | ns                             | **      | ns      | ns      | ns       |
| Relative humidity (W)                      | ns                             | **      | ns      | ns      | ns       |
| Withering stage (S)                        | **                             | **      | ns      | ns      | ns       |
| Interaction                                |                                |         |         |         |          |
| L x W                                      | ns                             | **      | ns      | ns      | ns       |
| L x S                                      | *                              | ns      | ns      | **      | **       |
| W x S                                      | ns                             | **      | ns      | ns      | ns       |
| L x W x S                                  | ns                             | **      | ns      | **      | **       |

x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IW (indoor withering)

y: 1: end of 1hr lighting; 2, 3 water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at  $p < 0.05$  level within each column,  $n=3$ ; ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 33. 初期萎凋照光處理與萎凋階段對茶菁多元分類氧化酶活性的影響

Table 33. The effects of light treatment and withering stage of tea leaves on polyphenol oxidase (PPO) activity



| Treatment                    | PPO activity (U·g <sup>-1</sup> d.w.) <sup>w</sup> |
|------------------------------|----------------------------------------------------|
| Lighting <sup>x</sup>        |                                                    |
| SW                           | 15.57 b <sup>z</sup>                               |
| SWH                          | 12.70 d                                            |
| UVA                          | 14.21 c                                            |
| UVAH                         | 17.00 a                                            |
| IR                           | 16.65 ab                                           |
| IRH                          | 16.22 ab                                           |
| IW                           | 13.06 cd                                           |
| Withering stage <sup>y</sup> |                                                    |
| 1                            | 14.87 ab                                           |
| 2                            | 14.61 b                                            |
| 3                            | 15.63 a                                            |
| Significant analysis         |                                                    |
| Main effect                  |                                                    |
| Lighting (L)                 | *                                                  |
| Withering stage (S)          | **                                                 |
| Interaction                  |                                                    |
| LxS                          | **                                                 |

w: U- means OD variation in 1 mins. use acetone power from tea leaves.

x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA(ultraviolet a withering); UVAH (uva withering with high-humidity); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering)

y:1:end of 1hr lighting; stage 2 and 3 sampling according to water content (table 3)

z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3; ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 34. 試驗茶菁與毛茶揮發性化合物表列

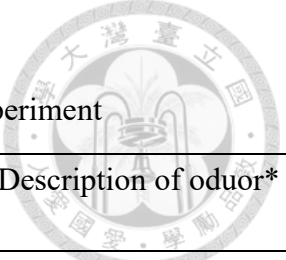
Table 34. Table of volatile compounds of tea leaves and dry tea in experiment

| NO. | Volatile organic compounds         | Chemical formula                               | Molecular weight | Precursors                | Description of odour*     |
|-----|------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1   | Hexanal                            | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 100.16           | Lipids                    | Grassy, green             |
| 2   | (E)-2-Hexenal                      | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O               | 98.14            | Lipids                    | Green                     |
| 3   | (S)-3,4-Dimethylpentanol           | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O               | 116.20           |                           | -                         |
| 4   | Styrene                            | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>                  | 104.15           |                           | Sweet, balsamic, floral   |
| 5   | Heptanal                           | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 114.19           | Lipids                    | Green, fatty, hay         |
| 6   | (E,E)-2,4-Hexadienal               | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 96.13            | Lipids                    | Sweet, green, floral      |
| 7   | 5-Methyl-3-methylene-5-hexen-2-one | C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O               | 124.18           |                           | -                         |
| 8   | Benzaldehyde                       | C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O                | 106.12           |                           | Sweet, bitter, almond     |
| 9   | 6-Methyl-5-hepten-2-one            | C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O               | 126.20           | Carotenoids               | Citrus, green, lemongrass |
| 10  | 2-Pentylfuran                      | C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O               | 138.21           |                           | Fruity, green, earthy     |
| 11  | Octanal                            | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O               | 128.21           |                           | Aldehydic, waxy, citrus   |
| 12  | 4-Methylcyclopentene               | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 82.14            |                           | -                         |
| 13  | (E,E)-2,4-Heptadienal              | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O               | 110.15           |                           | Fatty, green, aldehydic   |
| 14  | Limonene                           | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 136.23           |                           | Citrus, sweet             |
| 15  | Benzyl alcohol                     | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O                | 108.14           | Glycosides                | Sweet, floral, fruity     |
| 16  | Benzeneacetaldehyde                | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O                | 120.15           |                           | Green, sweet, floral      |
| 17  | cis-β-Ocimene                      | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 136.23           |                           | Floral, herbal, sweet     |
| 18  | (E)-2-hexadecenal                  | C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O              | 238.41           |                           | -                         |
| 19  | Isophorone                         | C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O               | 138.21           |                           | Sweet, green, fruity      |
| 20  | 3,5-Octadien-2-one                 | C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O               | 124.18           |                           | -                         |
| 21  | Linalool oxide I                   | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> | 170.25           | Glycosides                | Earthy, floral, green     |
| 22  | Linalool oxide II                  | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> | 170.25           | Glycosides                | Earthy, floral, green     |
| 23  | Linalool                           | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O              | 154.25           | Carotenoids<br>Glycosides | Floral, citrus, sweet     |
| 24  | Nonanal                            | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O               | 142.24           | Lipids                    | Aldehydic, fatty, orange  |

\*Precursors and odour information refer to Ho et al.(2015), Yang et al. (2013) and tgsc information system.

表 34. 試驗茶菁與毛茶揮發性化合物表列(續)

Table 34. Table of volatile compounds of tea leaves and dry tea in experiment



| NO. | Volatile organic compounds | Chemical formula                               | Molecular weight | Precursors  | Description of odour* |
|-----|----------------------------|------------------------------------------------|------------------|-------------|-----------------------|
| 25  | Phenylethyl alcohol        | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O               | 122.16           | Glycosides  | Sweet, floral, honey  |
| 26  | N-Ethylsuccinimide         | C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>  | 127.14           |             | -                     |
| 27  | Benzyl nitrile             | C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N                | 117.15           |             | Sweet, bitter, almond |
| 28  | Linalool oxide III         | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> | 170.25           | Glycosides  | Earthy, floral, green |
| 29  | Linalool oxide IV          | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> | 170.25           | Glycosides  | Earthy, floral, green |
| 30  | α-Terpineol                | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O              | 154.25           |             | Pine, woody, floral   |
| 31  | Methyl salicylate          | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>   | 152.15           | Glycosides  | Minty, sweet          |
| 32  | β-Cyclocitral              | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O              | 152.23           | Carotenoids | Sweet, green, fruity  |
| 33  | Geraniol                   | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O              | 154.25           | Glycosides  | Sweet, floral, fruity |
| 34  | Citral                     | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O              | 152.23           |             | Sweet, citrus         |
| 35  | Indole                     | C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N                | 117.15           |             | Floral, animal        |
| 36  | β-Ionone                   | C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O              | 192.30           | Carotenoids | Floral, woody, sweet  |

\*Precursors and odour information refer to Ho et al. (2015), Yang et al. (2013) and tgsc information system.



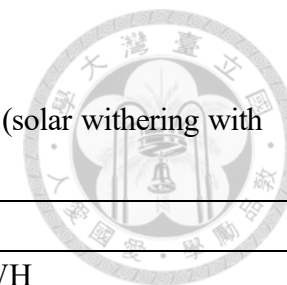


表 35. 日光萎凋與日光高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度

Table 35. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of SW (solar withering) and SWH (solar withering with high- humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds                          | Treatment         |                |       |       |      |        |       |       |       |      |
|-----|-----------------|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|------|--------|-------|-------|-------|------|
|     |                 |                                    | Fresh             | SW             |       |       |      | SWH    |       |       |       |      |
|     |                 |                                    |                   | 1 <sup>z</sup> | 2     | 3     | 4    | 1      | 1.5   | 2     | 3     | 4    |
| 1   | 4.53            | Hexanal                            | 5.53 <sup>y</sup> | 7.35           | 6.39  | 7.87  | -    | 9.47   | 6.59  | 7.15  | 5.25  | -    |
| 2   | 5.30            | (E)-2-Hexenal                      | 88.79             | 98.28          | 85.54 | 83.53 | -    | 135.40 | 72.24 | 98.86 | 68.61 | -    |
| 3   | 5.54            | (S)-3,4-Dimethylpentanol           | -                 | 1.36           | 1.18  | 1.37  | -    | 1.99   | 1.61  | 2.82  | 13.83 | -    |
| 4   | 5.92            | Styrene                            | 8.95              | 2.85           | 3.03  | 3.31  | 1.29 | 2.93   | 2.49  | 2.83  | 5.64  | 1.33 |
| 5   | 6.06            | Heptanal                           | 1.30              | 1.58           | 1.38  | 0.38  | 0.85 | 0.81   | 1.58  | 1.74  | 1.30  | 0.82 |
| 6   | 6.22            | (E,E)-2,4-Hexadienal               | 1.86              | 1.28           | 1.58  | 2.18  | -    | 1.68   | 1.03  | 1.05  | 1.85  | -    |
| 7   | 6.76            | 5-Methyl-3-methylene-5-hexen-2-one | -                 | 0.31           | 0.33  | 0.48  | -    | 0.36   | 0.35  | 0.36  | 0.52  | -    |
| 8   | 7.11            | Benzaldehyde                       | 17.25             | 8.34           | 7.62  | 13.61 | 2.01 | 8.55   | 9.41  | 11.42 | 12.29 | 2.14 |
| 9   | 7.55            | 6-Methyl-5-hepten-2-one            | 1.35              | 0.99           | 0.80  | 1.40  | 0.55 | 0.99   | 1.00  | 1.14  | 1.14  | 0.46 |
| 10  | 7.64            | 2-Pentylfuran                      | 1.22              | 1.50           | 1.45  | 2.05  | 0.33 | 1.60   | 1.60  | 1.87  | 1.60  | 0.31 |
| 11  | 7.83            | Octanal                            | 1.56              | 1.65           | 1.41  | 2.10  | 0.56 | 1.59   | 1.54  | 1.71  | 1.48  | 0.53 |
| 12  | 7.90            | 4-Methylcyclopentene               | 0.50              | 0.47           | 0.90  | 0.55  | 0.81 | 0.82   | 0.95  | 0.39  | 0.52  | 0.67 |
| 13  | 7.98            | (E,E)-2,4-Heptadienal              | 5.54              | 6.38           | 6.02  | 8.13  | -    | 5.80   | 6.09  | 5.76  | 5.79  | -    |
| 14  | 8.36            | Limonene                           | 0.98              | 0.63           | 0.64  | 0.72  | 3.30 | 0.61   | 0.62  | 0.68  | 0.86  | 3.65 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

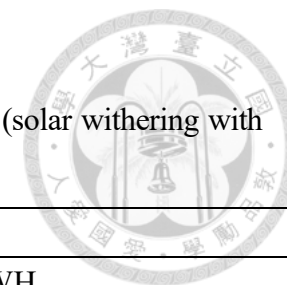


表 35. 日光萎凋與日光高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 (續)

Table 35. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of SW (solar withering) and SWH (solar withering with high- humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds             | Treatment          |                |        |        |       |        |        |        |        |      |
|-----|-----------------|-----------------------|--------------------|----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|------|
|     |                 |                       | Fresh              | SW             |        |        |       | SWH    |        |        |        |      |
|     |                 |                       |                    | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4     | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4    |
| 15  | 8.42            | Benzyl alcohol        | 24.60 <sup>y</sup> | 17.62          | 17.19  | 18.17  | 1.00  | 20.91  | 16.07  | 17.59  | 17.76  | 0.91 |
| 16  | 8.64            | Benzeneacetaldehyde   | 1.22               | 1.36           | 2.04   | 4.66   | 1.83  | 1.52   | 1.94   | 3.75   | 4.53   | 1.92 |
| 17  | 8.69            | cis- $\beta$ -Ocimene | 2.05               | 1.47           | 2.15   | 4.45   | 12.37 | 1.31   | 1.57   | 3.32   | 3.26   | 4.72 |
| 18  | 8.88            | (E)-2-hexadecenal     | 0.64               | 0.99           | 0.80   | 1.16   | -     | 0.94   | 0.79   | 0.86   | 0.74   | -    |
| 19  | 8.96            | Isophorone            | 0.42               | 0.45           | 0.40   | 0.65   | -     | 0.50   | 0.46   | 0.50   | 0.52   | -    |
| 20  | 9.13            | 3,5-Octadien-2-one    | 6.32               | 8.77           | 6.55   | 10.97  | -     | 8.61   | 8.71   | 8.13   | 5.47   | -    |
| 21  | 9.20            | Linalool oxide I      | 46.54              | 51.38          | 53.48  | 55.12  | 3.00  | 53.22  | 50.21  | 69.94  | 48.01  | 1.61 |
| 22  | 9.50            | Linalool oxide II     | 70.71              | 80.82          | 81.80  | 85.51  | 1.74  | 84.07  | 79.54  | 101.20 | 75.46  | 1.10 |
| 23  | 9.69            | Linalool              | 228.06             | 192.35         | 187.51 | 185.58 | 7.24  | 186.76 | 171.07 | 200.22 | 198.30 | 3.29 |
| 24  | 9.77            | Nonanal               | 8.70               | 10.48          | 9.31   | 12.29  | 5.52  | 10.65  | 9.97   | 10.95  | 8.31   | 4.39 |
| 25  | 9.98            | Phenylethyl Alcohol   | 16.92              | 16.96          | 17.75  | 17.00  | 10.53 | 17.55  | 15.10  | 14.80  | 17.03  | 4.16 |
| 26  | 10.37           | N-Ethylsuccinimide    | 1.46               | 1.05           | 0.86   | 0.97   | 0.65  | 1.10   | 1.24   | 1.08   | 0.74   | 0.00 |
| 27  | 10.49           | Benzyl nitrile        | 1.03               | 1.09           | 1.67   | 2.78   | 1.19  | 1.62   | 1.21   | 1.35   | 2.20   | 0.88 |
| 28  | 11.09           | Linalool oxide III    | 4.29               | 4.32           | 6.44   | 6.13   | 4.48  | 4.99   | 4.93   | 6.93   | 6.90   | 3.51 |
| 29  | 11.16           | Linalool oxide IV     | 13.10              | 11.97          | 15.05  | 13.80  | 9.80  | 13.14  | 13.51  | 15.60  | 15.38  | 9.29 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

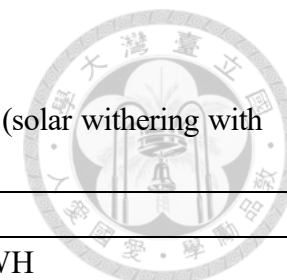


表 35. 日光萎凋與日光高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 (續)

Table 35. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of SW (solar withering) and SWH (solar withering with high- humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

|                                     |                 |                      | Treatment         |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| No.                                 | RT <sup>x</sup> | Compounds            | Fresh             | SW             |        |        |       | SWH    |        |        |        |       |
|                                     |                 |                      |                   | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4     | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4     |
| 30                                  | 11.53           | $\alpha$ -Terpineol  | 0.64 <sup>y</sup> | 0.79           | 0.85   | 0.96   | -     | 0.88   | 0.61   | 0.91   | 1.22   | -     |
| 31                                  | 11.62           | Methyl salicylate    | 10.90             | 10.63          | 13.49  | 12.97  | 11.20 | 11.09  | 7.32   | 14.55  | 15.33  | 6.78  |
| 32                                  | 12.14           | $\beta$ -Cyclocitral | 2.50              | 2.41           | 1.92   | 2.98   | 0.96  | 2.55   | 2.36   | 2.41   | 2.22   | 0.65  |
| 33                                  | 12.69           | Geraniol             | 9.32              | 23.15          | 37.47  | 21.92  | 0.46  | 30.04  | 23.46  | 23.74  | 28.39  | 0.36  |
| 34                                  | 13.03           | Citral               | 0.68              | 0.98           | 1.22   | 1.31   | -     | 1.05   | 0.98   | 1.33   | 1.24   | -     |
| 35                                  | 13.51           | Indole               | 8.02              | 6.88           | 8.21   | 5.51   | 3.03  | 10.49  | 8.80   | 6.12   | 5.30   | 1.42  |
| 36                                  | 17.07           | $\beta$ -Ionone      | 1.66              | 1.92           | 1.71   | 2.76   | 0.51  | 1.99   | 3.05   | 2.36   | 2.76   | 0.74  |
| Sum of compounds relative abundance |                 |                      | 594.59            | 580.79         | 586.85 | 595.31 | 78.46 | 637.56 | 530.00 | 645.43 | 581.76 | 56.99 |
| Percentage of compounds (%)         |                 |                      |                   |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|                                     |                 | Terpenoids           | 64.00             | 64.08          | 66.50  | 64.04  | 50.55 | 59.70  | 66.40  | 66.41  | 66.01  | 50.72 |
|                                     |                 | Aldehydes            | 22.26             | 23.71          | 20.80  | 22.83  | 12.42 | 27.67  | 20.98  | 22.19  | 18.94  | 17.20 |
|                                     |                 | Alcohols             | 6.98              | 6.19           | 6.15   | 6.14   | 13.94 | 6.34   | 6.19   | 5.46   | 8.36   | 8.90  |
|                                     |                 | Ketones              | 1.36              | 1.81           | 1.38   | 2.27   | 0.63  | 1.64   | 1.99   | 1.57   | 1.31   | 0.81  |
|                                     |                 | Nitrogen compounds   | 1.77              | 1.55           | 1.83   | 1.56   | 5.61  | 2.07   | 2.12   | 1.33   | 1.41   | 4.04  |
|                                     |                 | Esters               | 1.83              | 1.83           | 2.30   | 2.18   | 12.91 | 1.74   | 1.38   | 2.25   | 2.64   | 11.90 |
|                                     |                 | Others               | 1.80              | 0.83           | 1.04   | 0.99   | 3.95  | 0.84   | 0.95   | 0.79   | 1.33   | 6.43  |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

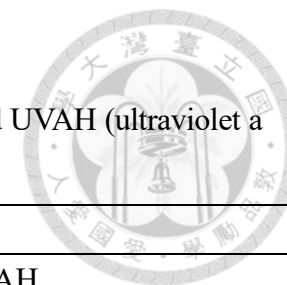


表 36. 紫外線萎凋與紫外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度

Table 36. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of UVA (ultraviolet a withering) and UVAH (ultraviolet a withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds                          | Treatment         |                |       |        |      |       |       |       |       |      |
|-----|-----------------|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|------|
|     |                 |                                    | Fresh             | UVA            |       |        |      | UVAH  |       |       |       |      |
|     |                 |                                    |                   | 1 <sup>z</sup> | 2     | 3      | 4    | 1     | 1.5   | 2     | 3     | 4    |
| 1   | 4.53            | Hexanal                            | 5.53 <sup>y</sup> | 7.82           | 8.68  | 7.60   | -    | 4.06  | 3.88  | 6.13  | 5.24  | -    |
| 2   | 5.30            | (E)-2-Hexenal                      | 88.79             | 93.12          | 91.60 | 113.71 | -    | 73.22 | 70.08 | 68.76 | 71.15 | -    |
| 3   | 5.54            | (S)-3,4-Dimethylpentanol           | -                 | 1.69           | 1.67  | 8.66   | -    | 0.28  | 1.44  | 1.49  | -     | -    |
| 4   | 5.92            | Styrene                            | 8.95              | 2.93           | 3.20  | 4.05   | 1.77 | 4.60  | 4.48  | 8.42  | 5.02  | 1.53 |
| 5   | 6.06            | Heptanal                           | 1.30              | 1.94           | 2.22  | 1.81   | 0.84 | 1.23  | 1.33  | 2.42  | 1.32  | 0.89 |
| 6   | 6.22            | (E,E)-2,4-Hexadienal               | 1.86              | 1.36           | 1.89  | 2.39   | -    | 1.40  | 1.89  | 3.33  | 2.39  | -    |
| 7   | 6.76            | 5-Methyl-3-methylene-5-hexen-2-one | -                 | 0.43           | 0.49  | 0.39   | -    | 0.31  | -     | 0.52  | 0.43  | -    |
| 8   | 7.11            | Benzaldehyde                       | 17.25             | 12.43          | 12.65 | 11.22  | 2.38 | 9.31  | 10.93 | 11.39 | 11.60 | 2.69 |
| 9   | 7.55            | 6-Methyl-5-hepten-2-one            | 1.35              | 1.31           | 1.35  | 1.73   | 0.49 | 0.86  | 1.02  | 1.23  | 0.95  | 0.50 |
| 10  | 7.64            | 2-Pentylfuran                      | 1.22              | 2.07           | 2.39  | 3.82   | 0.40 | 1.18  | 1.16  | 1.60  | 1.35  | 0.33 |
| 11  | 7.83            | Octanal                            | 1.56              | 1.91           | 2.17  | 1.59   | 0.60 | 1.24  | 1.20  | 1.76  | 1.44  | 0.51 |
| 12  | 7.90            | 4-Methylcyclopentene               | 0.50              | 0.67           | 0.91  | 0.44   | 0.82 | 0.00  | 0.73  | 0.84  | 0.75  | 0.69 |
| 13  | 7.98            | (E,E)-2,4-Heptadienal              | 5.54              | 6.79           | 7.55  | 6.55   | -    | 4.49  | 4.84  | 4.69  | 4.30  | -    |
| 14  | 8.36            | Limonene                           | 0.98 <sup>y</sup> | 0.72           | 0.70  | 3.42   | 3.86 | 3.47  | 4.59  | 1.72  | 1.49  | 3.09 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

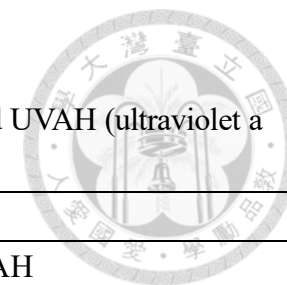


表 36. 紫外線萎凋與紫外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 (續)

Table 36. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of UVA (ultraviolet a withering) and UVAH (ultraviolet a withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds             | Treatment          |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|-----|-----------------|-----------------------|--------------------|----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
|     |                 |                       | Fresh              | UVA            |        |        |       | UVAH   |        |        |        |       |
|     |                 |                       |                    | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4     | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4     |
| 15  | 8.42            | Benzyl alcohol        | 24.60              | 22.90          | 22.07  | 19.07  | 1.21  | 24.04  | 25.47  | 20.68  | 18.89  | 1.08  |
| 16  | 8.64            | Benzeneacetaldehyde   | 1.22               | 1.83           | 3.92   | 7.40   | 2.07  | 1.47   | 1.86   | 3.40   | 5.25   | 2.33  |
| 17  | 8.69            | cis- $\beta$ -Ocimene | 2.05               | 2.54           | 4.73   | 4.04   | 13.91 | 1.80   | 3.00   | 7.34   | 3.74   | 7.30  |
| 18  | 8.88            | (E)-2-hexadecenal     | 0.64               | 1.00           | 1.26   | 1.05   | -     | 0.41   | 0.54   | 0.74   | 0.74   | -     |
| 19  | 8.96            | Isophorone            | 0.42               | 0.57           | 0.63   | 0.72   | -     | 0.18   | 0.31   | 0.48   | 0.43   | -     |
| 20  | 9.13            | 3,5-Octadien-2-one    | 6.32               | 10.27          | 10.02  | 6.35   | -     | 3.92   | 5.14   | 4.20   | 4.14   | -     |
| 21  | 9.20            | Linalool oxide I      | 46.54              | 55.45          | 52.91  | 56.26  | 2.28  | 36.07  | 39.39  | 53.33  | 44.97  | 2.17  |
| 22  | 9.50            | Linalool oxide II     | 70.71              | 87.75          | 77.88  | 89.73  | 1.43  | 58.40  | 61.56  | 75.38  | 73.44  | 1.39  |
| 23  | 9.69            | Linalool              | 228.06             | 196.84         | 185.41 | 244.04 | 4.72  | 217.32 | 237.30 | 337.62 | 211.06 | 3.77  |
| 24  | 9.77            | Nonanal               | 8.70               | 11.53          | 12.55  | 10.02  | 5.34  | 7.18   | 8.31   | 11.60  | 10.13  | 4.60  |
| 25  | 9.98            | Phenylethyl Alcohol   | 16.92              | 17.70          | 17.17  | 20.68  | 8.33  | 15.17  | 15.47  | 12.04  | 17.60  | 4.75  |
| 26  | 10.37           | N-Ethylsuccinimide    | 1.46               | 1.32           | 1.17   | 0.65   | 0.78  | 0.75   | 1.14   | 0.26   | 0.40   | 0.64  |
| 27  | 10.49           | Benzyl nitrile        | 1.03               | 1.89           | 3.04   | 4.31   | 0.96  | 1.03   | 2.25   | 3.68   | 4.21   | 0.80  |
| 28  | 11.09           | Linalool oxide III    | 4.29               | 6.42           | 6.80   | 6.66   | 5.02  | 3.17   | 7.05   | 7.80   | 4.87   | 4.91  |
| 29  | 11.16           | Linalool oxide IV     | 13.10 <sup>y</sup> | 15.39          | 14.01  | 14.09  | 10.64 | 9.89   | 16.50  | 13.45  | 10.73  | 10.08 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.



表 36. 紫外線萎凋與紫外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度 (續)

Table 36. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of UVA (ultraviolet a withering) and UVAH (ultraviolet a withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

| No.                                 | RT <sup>x</sup> | Compounds            | Treatment |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------|----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                                     |                 |                      | Fresh     | UVA            |        |        |       | UVAH   |        |        |        |       |
|                                     |                 |                      |           | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4     | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4     |
| 30                                  | 11.53           | $\alpha$ -Terpineol  | 0.64      | 1.10           | 0.97   | 1.03   | -     | 0.63   | 0.94   | 0.98   | 0.84   | -     |
| 31                                  | 11.62           | Methyl salicylate    | 10.90     | 13.77          | 12.62  | 18.40  | 5.52  | 11.66  | 13.05  | 20.56  | 13.56  | 4.03  |
| 32                                  | 12.14           | $\beta$ -Cyclocitral | 2.50      | 2.87           | 2.85   | 2.69   | 1.00  | 1.68   | 1.78   | 1.83   | 1.72   | 0.89  |
| 33                                  | 12.69           | Geraniol             | 9.32      | 21.35          | 27.47  | 58.15  | 0.39  | 25.12  | 12.96  | 25.71  | 31.05  | 0.54  |
| 34                                  | 13.03           | Citral               | 0.68      | 1.30           | 1.65   | 1.73   | -     | 0.81   | 0.95   | 0.91   | 1.08   | -     |
| 35                                  | 13.51           | Indole               | 8.02      | 9.37           | 9.01   | 4.79   | 2.11  | 8.50   | 13.00  | 10.10  | 2.54   | 0.81  |
| 36                                  | 17.07           | $\beta$ -Ionone      | 1.66      | 3.68           | 3.85   | 1.79   | 0.72  | 1.20   | 2.15   | 0.85   | 0.92   | 0.74  |
| Sum of compounds relative abundance |                 |                      | 594.59    | 622.04         | 610.47 | 742.23 | 79.66 | 536.08 | 578.27 | 727.22 | 570.24 | 62.84 |
| Percentage of compounds (%)         |                 |                      |           |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|                                     |                 | Terpenoids           | 64.00     | 63.57          | 62.12  | 65.16  | 55.20 | 67.07  | 67.13  | 72.45  | 67.67  | 55.50 |
|                                     |                 | Aldehydes            | 22.26     | 22.46          | 23.67  | 22.02  | 14.10 | 19.40  | 18.14  | 15.70  | 20.00  | 17.54 |
|                                     |                 | Alcohols             | 6.98      | 6.80           | 6.70   | 6.52   | 11.98 | 7.37   | 7.33   | 4.70   | 6.40   | 9.27  |
|                                     |                 | Ketones              | 1.36      | 2.02           | 2.04   | 1.24   | 0.62  | 0.98   | 1.12   | 0.88   | 1.05   | 0.80  |
|                                     |                 | Nitrogen compounds   | 1.77      | 2.02           | 2.17   | 1.31   | 4.83  | 1.92   | 2.83   | 1.93   | 1.26   | 3.58  |
|                                     |                 | Esters               | 1.83      | 2.21           | 2.07   | 2.48   | 6.93  | 2.18   | 2.26   | 2.83   | 2.38   | 6.41  |
|                                     |                 | Others               | 1.80      | 0.91           | 1.23   | 1.27   | 6.35  | 1.08   | 1.20   | 1.49   | 1.25   | 6.90  |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

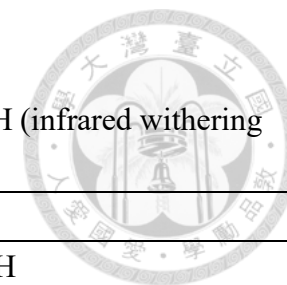


表 37. 紅外線萎凋與紅外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度

Table 37. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of IR (infrared withering) and IRH (infrared withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds                          | Treatment         |                |       |       |      |        |       |       |       |      |
|-----|-----------------|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|------|--------|-------|-------|-------|------|
|     |                 |                                    | Fresh             | IR             |       |       |      | IRH    |       |       |       |      |
|     |                 |                                    |                   | 1 <sup>z</sup> | 2     | 3     | 4    | 1      | 1.5   | 2     | 3     | 4    |
| 1   | 4.53            | Hexanal                            | 5.53 <sup>y</sup> | 3.63           | 5.50  | 5.42  | -    | 6.30   | 4.33  | 5.17  | 7.37  | -    |
| 2   | 5.30            | (E)-2-Hexenal                      | 88.79             | 67.59          | 94.05 | 78.18 | -    | 108.93 | 71.98 | 77.64 | 66.84 | -    |
| 3   | 5.54            | (S)-3,4-Dimethylpentanol           | 0.00              | 1.22           | 1.89  | 0.85  | -    | 1.25   | 0.78  | 1.56  | -     | -    |
| 4   | 5.92            | Styrene                            | 8.95              | 5.86           | 7.58  | 5.59  | 1.73 | 6.21   | 5.65  | 6.42  | 3.21  | 1.43 |
| 5   | 6.06            | Heptanal                           | 1.30              | 1.90           | 2.57  | 2.02  | 0.69 | 2.05   | 1.05  | 2.04  | 1.01  | 0.81 |
| 6   | 6.22            | (E,E)-2,4-Hexadienal               | 1.86              | 1.59           | 3.17  | 2.13  | -    | 2.75   | 1.02  | 2.09  | 1.58  | -    |
| 7   | 6.76            | 5-Methyl-3-methylene-5-hexen-2-one | -                 | 0.33           | 0.59  | 0.52  | -    | 0.57   | 0.36  | -     | 0.46  | -    |
| 8   | 7.11            | Benzaldehyde                       | 17.25             | 8.01           | 12.80 | 11.03 | 2.04 | 9.76   | 9.64  | 13.17 | 12.56 | 2.09 |
| 9   | 7.55            | 6-Methyl-5-hepten-2-one            | 1.35              | 0.77           | 1.15  | 1.58  | 0.47 | 1.06   | 0.93  | 1.32  | 1.30  | 0.43 |
| 10  | 7.64            | 2-Pentylfuran                      | 1.22              | 1.08           | 1.43  | 2.98  | 0.40 | 1.57   | 1.25  | 2.59  | 2.21  | 0.39 |
| 11  | 7.83            | Octanal                            | 1.56              | 1.38           | 1.80  | 1.60  | 0.53 | 1.82   | 1.50  | 1.58  | 2.02  | 0.58 |
| 12  | 7.90            | 4-Methylcyclopentene               | 0.50              | 0.28           | 0.54  | -     | 0.77 | -      | -     | -     | 0.46  | 0.94 |
| 13  | 7.98            | (E,E)-2,4-Heptadienal              | 5.54              | 3.77           | 4.56  | 4.67  | -    | 4.69   | 3.95  | 4.93  | 6.18  | -    |
| 14  | 8.36            | Limonene                           | 0.98              | 1.32           | 1.51  | 1.21  | 3.44 | 1.31   | 1.00  | 1.01  | 0.73  | 3.80 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

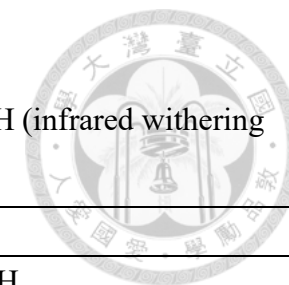


表 37. 紅外線萎凋與紅外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度(續)

Table 37. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of IR (infrared withering) and IRH (infrared withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds           | Treatment          |                |        |        |      |        |        |        |        |      |
|-----|-----------------|---------------------|--------------------|----------------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|------|
|     |                 |                     | Fresh              | IR             |        |        |      | IRH    |        |        |        |      |
|     |                 |                     |                    | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4    | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4    |
| 15  | 8.42            | Benzyl alcohol      | 24.60 <sup>y</sup> | 16.98          | 25.70  | 21.30  | 1.09 | 31.23  | 20.51  | 22.30  | 18.42  | 0.94 |
| 16  | 8.64            | Benzeneacetaldehyde | 1.22               | 1.29           | 2.12   | 4.84   | 1.91 | 1.49   | 1.16   | 1.93   | 5.20   | 2.07 |
| 17  | 8.69            | cis-β-Ocimene       | 2.05               | 1.97           | 4.02   | 3.19   | 9.62 | 1.68   | 1.13   | 1.53   | 3.31   | 3.94 |
| 18  | 8.88            | (E)-2-hexadecenal   | 0.64               | 0.54           | 0.65   | 0.68   | -    | 0.73   | 0.59   | -      | 1.11   | -    |
| 19  | 8.96            | Isophorone          | 0.42               | -              | 0.45   | 0.43   | -    | 0.49   | 0.22   | 0.43   | 0.64   | -    |
| 20  | 9.13            | 3,5-Octadien-2-one  | 6.32               | 3.24           | 4.76   | 4.29   | -    | 4.71   | 4.53   | 6.70   | 9.42   | -    |
| 21  | 9.20            | Linalool oxide I    | 46.54              | 32.87          | 31.17  | 49.57  | 1.65 | 50.84  | 43.31  | 39.27  | 49.95  | 1.68 |
| 22  | 9.50            | Linaloo oxide II    | 70.71              | 50.17          | 48.06  | 78.89  | 1.01 | 84.14  | 71.83  | 60.69  | 75.92  | 0.91 |
| 23  | 9.69            | Linalool            | 228.06             | 223.68         | 199.70 | 274.44 | 3.36 | 315.95 | 197.33 | 192.28 | 189.44 | 2.39 |
| 24  | 9.77            | Nonanal             | 8.70               | 10.05          | 10.78  | 10.36  | 4.58 | 11.15  | 9.64   | 9.19   | 13.08  | 3.76 |
| 25  | 9.98            | Phenylethyl Alcohol | 16.92              | 14.82          | 18.12  | 17.30  | 6.82 | 18.52  | 10.49  | 14.55  | 12.74  | 3.60 |
| 26  | 10.37           | N-Ethylsuccinimide  | 1.46               | 0.50           | 0.57   | 0.44   | 0.61 | 0.52   | 0.71   | 0.77   | 0.54   | 0.33 |
| 27  | 10.49           | Benzyl nitrile      | 1.03               | 1.95           | 2.25   | 3.07   | 0.82 | 1.56   | 1.07   | 2.06   | 3.60   | 0.62 |
| 28  | 11.09           | Linalool oxide III  | 0.98               | 1.32           | 1.51   | 1.21   | 3.44 | 1.31   | 1.00   | 1.01   | 0.73   | 3.80 |
| 29  | 11.16           | Linalool oxide IV   | 13.10              | 12.23          | 9.96   | 14.10  | 9.10 | 14.29  | 16.34  | 11.83  | 12.26  | 9.28 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.



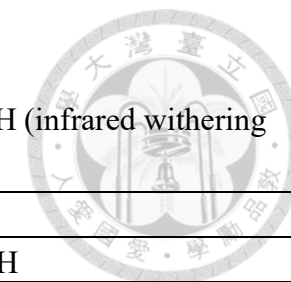


表 37. 紅外線萎凋與紅外線高濕度萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度(續)

Table 37. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of IR (infrared withering) and IRH (infrared withering with high-humidity) treatment tea leaves and dry tea (continued)

|                                     |                 |                      | Treatment         |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| No.                                 | RT <sup>x</sup> | Compounds            | Fresh             | IR             |        |        |       | IRH    |        |        |        |       |
|                                     |                 |                      |                   | 1 <sup>z</sup> | 2      | 3      | 4     | 1      | 1.5    | 2      | 3      | 4     |
| 30                                  | 11.53           | $\alpha$ -Terpineol  | 0.64 <sup>y</sup> | 0.61           | 0.58   | 1.17   | -     | 1.00   | 0.87   | 0.74   | 1.16   | -     |
| 31                                  | 11.62           | Methyl salicylate    | 10.90             | 9.42           | 9.51   | 15.50  | 3.15  | 17.51  | 11.67  | 10.87  | 10.94  | 2.15  |
| 32                                  | 12.14           | $\beta$ -Cyclocitral | 2.50              | 1.47           | 1.85   | 1.83   | 0.90  | 2.04   | 1.92   | 2.44   | 2.57   | 0.91  |
| 33                                  | 12.69           | Geraniol             | 9.32              | 19.61          | 21.11  | 37.27  | 0.34  | 32.86  | 19.74  | 14.46  | 16.64  | 0.47  |
| 34                                  | 13.03           | Citral               | 0.68              | 0.75           | 1.01   | 1.42   | -     | 1.06   | 1.15   | 1.04   | 1.54   | -     |
| 35                                  | 13.51           | Indole               | 8.02              | 11.87          | 6.99   | 4.89   | 1.70  | 11.89  | 8.11   | 5.14   | 5.31   | 0.96  |
| 36                                  | 17.07           | $\beta$ -Ionone      | 1.66              | 0.81           | 1.19   | 1.07   | 0.69  | 1.15   | 1.78   | 1.96   | 1.32   | 1.07  |
| Sum of compounds relative abundance |                 |                      | 594.59            | 519.02         | 543.95 | 671.26 | 63.02 | 758.07 | 533.13 | 524.71 | 546.49 | 50.39 |
| Percentage of compounds (%)         |                 |                      |                   |                |        |        |       |        |        |        |        |       |
|                                     |                 | Terpenoids           | 64.00             | 67.62          | 59.64  | 70.09  | 54.04 | 67.45  | 67.90  | 63.08  | 65.93  | 55.92 |
|                                     |                 | Aldehydes            | 22.26             | 19.22          | 25.37  | 18.02  | 15.48 | 19.74  | 19.67  | 22.44  | 21.40  | 18.48 |
|                                     |                 | Alcohols             | 6.98              | 6.36           | 8.40   | 5.88   | 12.56 | 6.73   | 5.96   | 7.32   | 5.70   | 9.01  |
|                                     |                 | Ketones              | 1.36              | 0.84           | 1.28   | 1.02   | 0.74  | 0.90   | 1.13   | 1.61   | 2.16   | 0.85  |
|                                     |                 | Nitrogen             | 1.77              | 2.76           | 1.80   | 1.25   | 4.97  | 1.84   | 1.85   | 1.52   | 1.73   | 3.79  |
|                                     |                 | Esters               | 1.83              | 1.82           | 1.75   | 2.31   | 5.00  | 2.31   | 2.19   | 2.07   | 2.00   | 4.27  |
|                                     |                 | Others               | 1.80              | 1.39           | 1.76   | 1.44   | 7.21  | 1.03   | 1.29   | 1.97   | 1.08   | 7.67  |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

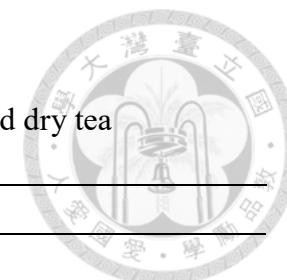


表 38. 室內萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度

Table 38. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of indoor withering tea leaves and dry tea

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds                          | Treatment         |                  |       |        |       |      |
|-----|-----------------|------------------------------------|-------------------|------------------|-------|--------|-------|------|
|     |                 |                                    | Fresh             | Indoor withering |       |        |       |      |
|     |                 |                                    |                   | 1 <sup>z</sup>   | 1.5   | 2      | 3     | 4    |
| 1   | 4.53            | Hexanal                            | 5.53 <sup>y</sup> | 3.97             | 5.27  | 5.86   | 3.87  | -    |
| 2   | 5.30            | (E)-2-Hexenal                      | 88.79             | 64.16            | 73.73 | 102.15 | 60.03 | -    |
| 3   | 5.54            | (S)-3,4-Dimethylpentanol           | -                 | 1.16             | 1.70  | 1.80   | 0.50  | -    |
| 4   | 5.92            | Styrene                            | 8.95              | 2.04             | 2.95  | 2.62   | 2.53  | 1.55 |
| 5   | 6.06            | Heptanal                           | 1.30              | 1.58             | 2.08  | 2.08   | 1.24  | 1.06 |
| 6   | 6.22            | (E,E)-2,4-Hexadienal               | 1.86              | 1.05             | 2.37  | 2.99   | 1.57  | -    |
| 7   | 6.76            | 5-Methyl-3-methylene-5-hexen-2-one | -                 | -                | 0.38  | 0.44   | 0.31  | -    |
| 8   | 7.11            | Benzaldehyde                       | 17.25             | 10.95            | 11.55 | 12.89  | 10.96 | 2.43 |
| 9   | 7.55            | 6-Methyl-5-hepten-2-one            | 1.35              | 1.10             | 1.08  | 1.10   | 0.79  | 0.42 |
| 10  | 7.64            | 2-Pentylfuran                      | 1.22              | 1.25             | 1.38  | 1.51   | 1.02  | 0.36 |
| 11  | 7.83            | Octanal                            | 1.56              | 1.25             | 1.69  | 1.66   | 1.13  | 0.60 |
| 12  | 7.90            | 4-Methylcyclopentene               | 0.50              | -                | 0.30  | 1.44   | 0.87  | 1.00 |
| 13  | 7.98            | (E,E)-2,4-Heptadienal              | 5.54              | 3.05             | 4.00  | 4.11   | 3.35  | -    |
| 14  | 8.36            | Limonene                           | 0.98              | 1.99             | 2.28  | 2.16   | 1.21  | 3.78 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

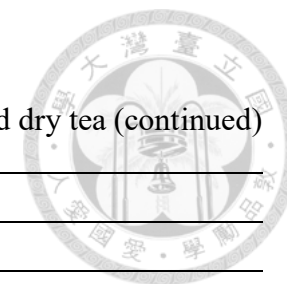


表 38. 室內萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度(續)

Table 38. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of indoor withering tea leaves and dry tea (continued)

| No. | RT <sup>x</sup> | Compounds             | Treatment          |                  |        |        |        |      |
|-----|-----------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------|--------|--------|------|
|     |                 |                       | Fresh              | Indoor withering |        |        |        |      |
|     |                 |                       |                    | 1 <sup>z</sup>   | 1.5    | 2      | 3      | 4    |
| 15  | 8.42            | Benzyl alcohol        | 24.60 <sup>y</sup> | 18.34            | 29.52  | 18.89  | 16.78  | 1.23 |
| 16  | 8.64            | Benzeneacetaldehyde   | 1.22               | 1.42             | 2.41   | 4.72   | 4.54   | 2.57 |
| 17  | 8.69            | cis- $\beta$ -Ocimene | 2.05               | 3.48             | 3.62   | 5.86   | 3.05   | 7.31 |
| 18  | 8.88            | (E)-2-hexadecenal     | 0.64               | 0.51             | 0.61   | 0.69   | 0.50   | -    |
| 19  | 8.96            | Isophorone            | 0.42               | 0.37             | 0.43   | 0.27   | 0.35   | -    |
| 20  | 9.13            | 3,5-Octadien-2-one    | 6.32               | 4.94             | 3.67   | 3.79   | 2.94   | -    |
| 21  | 9.20            | Linalool oxide I      | 46.54              | 48.25            | 36.54  | 55.03  | 40.59  | 2.48 |
| 22  | 9.50            | Linalool oxide II     | 70.71              | 74.65            | 58.53  | 83.44  | 62.51  | 1.57 |
| 23  | 9.69            | Linalool              | 228.06             | 228.83           | 257.72 | 224.91 | 165.32 | 4.85 |
| 24  | 9.77            | Nonanal               | 8.70               | 9.11             | 11.07  | 11.69  | 7.54   | 4.72 |
| 25  | 9.98            | Phenylethyl Alcohol   | 16.92              | 16.55            | 18.44  | 19.17  | 14.14  | 4.72 |
| 26  | 10.37           | N-Ethylsuccinimide    | 1.46               | 0.80             | 0.70   | 0.77   | 0.30   | 0.51 |
| 27  | 10.49           | Benzyl nitrile        | 1.03               | 1.08             | 1.44   | 5.22   | 3.37   | 0.73 |
| 28  | 11.09           | Linalool oxide III    | 4.29               | 5.22             | 3.97   | 7.69   | 3.87   | 4.05 |
| 29  | 11.16           | Linalool oxide IV     | 13.10              | 13.17            | 9.86   | 14.58  | 7.88   | 8.52 |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: high-humidity withering group compare same water content with normal.

表 38. 室內萎凋取樣階段茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度(續)

Table 38. The relative abundance of volatile organic compounds in the sampling stage of indoor withering tea leaves and dry tea (continued)

| No.                                 | RT <sup>x</sup> | Compounds            | Treatment         |                  |        |        |        |       |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|------------------|--------|--------|--------|-------|
|                                     |                 |                      | Fresh             | Indoor withering |        |        |        |       |
|                                     |                 |                      |                   | 1 <sup>z</sup>   | 1.5    | 2      | 3      | 4     |
| 30                                  | 11.53           | $\alpha$ -Terpineol  | 0.64 <sup>y</sup> | 0.77             | 0.82   | 0.87   | 0.71   | -     |
| 31                                  | 11.62           | Methyl salicylate    | 10.90             | 13.90            | 13.44  | 18.50  | 12.13  | 2.14  |
| 32                                  | 12.14           | $\beta$ -Cyclocitral | 2.50              | 1.95             | 1.70   | 1.81   | 1.35   | 0.89  |
| 33                                  | 12.69           | Geraniol             | 9.32              | 17.13            | 26.95  | 33.13  | 23.15  | 0.56  |
| 34                                  | 13.03           | Citral               | 0.68              | 1.08             | 1.34   | 1.90   | 0.92   | -     |
| 35                                  | 13.51           | Indole               | 8.02              | 8.89             | 14.20  | 8.10   | 1.22   | 0.39  |
| 36                                  | 17.07           | $\beta$ -Ionone      | 1.66              | 1.44             | 1.39   | 0.53   | 0.73   | 1.03  |
| Sum of compounds relative abundance |                 |                      | 594.59            | 565.44           | 609.14 | 664.38 | 463.27 | 60.50 |
| Percentage of compounds(%)          |                 |                      |                   |                  |        |        |        |       |
|                                     |                 | Terpenoids           | 64.00             | 70.38            | 66.44  | 65.01  | 67.19  | 57.90 |
|                                     |                 | Aldehydes            | 22.26             | 17.16            | 18.84  | 22.40  | 20.45  | 18.82 |
|                                     |                 | Alcohols             | 6.98              | 6.37             | 8.15   | 6.00   | 6.78   | 9.83  |
|                                     |                 | Ketones              | 1.36              | 1.13             | 0.91   | 0.84   | 0.95   | 0.70  |
|                                     |                 | Nitrogen compounds   | 1.77              | 1.90             | 2.68   | 2.12   | 1.06   | 2.70  |
|                                     |                 | Esters               | 1.83              | 2.46             | 2.21   | 2.78   | 2.62   | 3.53  |
|                                     |                 | others               | 1.80              | 0.58             | 0.76   | 0.84   | 0.96   | 6.51  |

x: RT means retention time; y: Relative abundance of internal standard (n = 3); z: Stage. 1: end of lighting, 2: water content 69.7%, 3: water content 65%, 4: dry tea, 1.5: control withering group compare same water content with normal.



表 39. 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶具香氣揮發性化合物相對豐度之影響

Table 39. The effect of light source and relative humidity during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds

| No.    Compounds |                         | Treatment                        |         |         |                        |         | Significant analysis |    |             |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|---------|---------|------------------------|---------|----------------------|----|-------------|
|                  |                         | Light source (L)                 |         |         | Relative humidity (RH) |         | Main effect          |    | Interaction |
|                  |                         | SW <sup>x</sup>                  | UVA     | IR      | Normal                 | High    | L                    | RH | L x RH      |
| 1-3 <sup>w</sup> | Hexanal                 | 6.56 <sup>y</sup> a <sup>z</sup> | 6.18 a  | 6.39 a  | 6.88 a                 | 5.95 b  | ns                   | ** | **          |
| 1-4              |                         |                                  |         |         |                        | -       |                      |    |             |
| 2-3              | (E)-2-Hexenal           | 76.07 b                          | 88.17 a | 72.51 b | 89.07 a                | 68.86 b | **                   | ** | **          |
| 2-4              |                         |                                  |         |         |                        | -       |                      |    |             |
| 3-3              | styrene                 | 1.83 c                           | 2.34 b  | 2.60 a  | 2.84 a                 | 1.72 b  | **                   | ** | **          |
| 3-4              |                         | 0.54 a                           | 0.56 a  | 0.56 a  | 0.56 a                 | 0.54 a  | ns                   | ns | ns          |
| 4-3              | Heptanal                | 0.84 c                           | 1.67 b  | 2.17 a  | 1.26 a                 | 1.81 b  | **                   | ** | **          |
| 4-4              |                         | 0.84 a                           | 0.86 a  | 0.75 a  | 0.79 a                 | 0.84 a  | ns                   | ns | ns          |
| 5-3              | (E,E)-2,4-Hexadienal    | 2.01 b                           | 2.57 a  | 1.75 b  | 2.25 a                 | 1.94 a  | **                   | ns | ns          |
| 5-4              |                         |                                  |         |         |                        | -       |                      |    |             |
| 6-3              | Benzaldehyde            | 2.60 a                           | 2.11 b  | 2.20 b  | 2.48 a                 | 2.17 b  | **                   | ** | **          |
| 6-4              |                         | 2.08 b                           | 2.54 a  | 2.07 a  | 2.14 a                 | 2.31 a  | *                    | ns | ns          |
| 7-3              | 6-Methyl-5-hepten-2-one | 1.27 b                           | 1.26 b  | 1.44 a  | 1.55 a                 | 1.13 b  | ns                   | ** | **          |
| 7-4              |                         | 0.52 a                           | 0.50 a  | 0.45 a  | 0.50 a                 | 0.47 a  | ns                   | ns | ns          |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 39. 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶具香氣揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 39. The effect of light source and relative humidity during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds (continued)

| No.              | Compounds             | Treatment                        |          |         |                        |         | Significant analysis |    |             |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|----------|---------|------------------------|---------|----------------------|----|-------------|
|                  |                       | Light source (L)                 |          |         | Relative humidity (RH) |         | Main effect          |    | Interaction |
|                  |                       | SW <sup>x</sup>                  | UVA      | IR      | Normal                 | Control | L                    | RH | L x RH      |
| 8-3 <sup>w</sup> | 2-Pentylfuran         | 1.83 <sup>y</sup> c <sup>z</sup> | 2.34 b   | 2.60 a  | 2.84 a                 | 1.72 b  | *                    | ns | **          |
| 8-4              |                       |                                  |          |         |                        | -       |                      |    |             |
| 9-3              | Octanal               | 1.79 a                           | 1.50 b   | 1.81 a  | 1.78 a                 | 1.65 a  | *                    | ns | **          |
| 9-4              |                       |                                  |          |         |                        | -       |                      |    |             |
| 10-3             | (E,E)-2,4-Heptadienal | 6.96 a                           | 5.20 b   | 5.43 b  | 6.44 a                 | 5.42 b  | **                   | *  | **          |
| 10-4             |                       | 0.74 a                           | 0.85 a   | 0.75 a  | 0.80 a                 | 0.76 a  | ns                   | ns | *           |
| 11-3             | D-Limonene            | 0.79 c                           | 2.26 a   | 0.97 b  | 1.58 a                 | 1.03 b  | **                   | ** | **          |
| 11-4             |                       | 3.47 a                           | 3.62 a   | 3.47 a  | 3.53 a                 | 3.51 a  | ns                   | ns | *           |
| 12-3             | Benzyl alcohol        | 17.97 b                          | 18.96 ab | 19.86 a | 19.57 a                | 18.36 b | *                    | *  | ns          |
| 12-4             |                       | 0.96 b                           | 1.14 ab  | 1.02 a  | 1.10 a                 | 0.98 b  | *                    | *  | ns          |
| 13-3             | Benzeneacetaldehyde   | 17.97 b                          | 18.96 ab | 19.86 a | 19.57 a                | 18.36 b | *                    | *  | ns          |
| 13-4             |                       | 1.87 b                           | 2.20 a   | 1.99 b  | 1.94 b                 | 2.10 a  | **                   | *  | ns          |
| 14-3             | cis-β-Ocimene         | 3.85 a                           | 3.86 a   | 3.25 b  | 3.87 a                 | 3.44 b  | **                   | ** | **          |
| 14-4             |                       | 8.54 b                           | 10.61 a  | 6.78 c  | 11.97 a                | 5.32 b  | **                   | ** | ns          |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 39 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶具香氣揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 39. The effect of light source and relative humidity during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds (continued)

| No.               | Compounds           | Treatment                        |          |          |                        |          | Significant analysis |    |             |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|----------|----------|------------------------|----------|----------------------|----|-------------|
|                   |                     | Light source (L)                 |          |          | Relative humidity (RH) |          | Main effect          |    | Interaction |
|                   |                     | SW <sup>x</sup>                  | UVA      | IR       | Normal                 | Control  | L                    | RH | L x RH      |
| 15-3 <sup>w</sup> | Isophorone          | 0.59 <sup>y</sup> a <sup>z</sup> | 0.55 a   | 0.54 a   | 0.59 a                 | 0.53 b   | ns                   | ** | **          |
| 15-4              |                     |                                  |          |          | -                      |          |                      |    |             |
| 16-3              | Linalool oxide I    | 51.56 a                          | 49.49 a  | 49.76 a  | 53.33 a                | 47.64 b  | ns                   | ** | *           |
| 16-4              |                     | 2.30 a                           | 2.22 a   | 1.67 b   | 2.31 a                 | 1.82 b   | *                    | *  | *           |
| 17-3              | Linalool oxide II   | 80.49 a                          | 79.95 a  | 77.41 a  | 84.08 a                | 74.94 b  | ns                   | ** | ns          |
| 17-4              |                     | 1.42 a                           | 1.41 a   | 0.96 b   | 1.39 a                 | 1.13 b   | **                   | ** | **          |
| 18-3              | Linalool            | 191.94 b                         | 224.25 a | 231.94 a | 233.52 a               | 199.60 b | **                   | ** | **          |
| 18-4              |                     | 5.27 a                           | 4.25 b   | 2.87 c   | 5.11 a                 | 3.15 b   | **                   | ** | **          |
| 19-3              | Nonanal             | 6.96 a                           | 5.20 b   | 5.43 b   | 6.44 a                 | 5.42 b   | **                   | *  | **          |
| 19-4              |                     | 4.96 a                           | 4.97 a   | 4.17 b   | 5.15 a                 | 4.25 b   | **                   | ** | ns          |
| 20-3              | Phenylethyl Alcohol | 17.02 b                          | 18.83 a  | 15.02 c  | 18.03 a                | 15.79 b  | **                   | ** | *           |
| 20-4              |                     | 7.35 a                           | 6.54 b   | 5.21 c   | 8.56 a                 | 4.17 b   | **                   | ** | **          |
| 21-3              | Linalool oxide III  | 6.52 a                           | 5.59 a   | 5.88 a   | 6.33 a                 | 5.74 a   | ns                   | ns | *           |
| 21-4              |                     | 3.99 ab                          | 4.97 a   | 3.83 b   | 4.48 a                 | 4.05 a   | ns                   | ns | ns          |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 39. 萎凋初期光源與相對溼度對茶菁與毛茶具香氣揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 39. The effect of light source and relative humidity during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds

| No.               | Compounds            | Treatment                         |         |         |                        |         | Significant analysis |             |        |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------|---------|---------|------------------------|---------|----------------------|-------------|--------|
|                   |                      | Light source (L)                  |         |         | Relative humidity (RH) |         | Main effect          | Interaction | L x RH |
|                   |                      | SW <sup>x</sup>                   | UVA     | IR      | Normal                 | Control |                      |             |        |
| 22-3 <sup>w</sup> | Linalool oxide IV    | 14.59 <sup>y</sup> a <sup>z</sup> | 12.07 a | 13.18 a | 13.99 a                | 12.79 a | ns                   | ns          | ns     |
| 22-4              |                      | 9.55 a                            | 10.36 a | 9.19 a  | 9.85 a                 | 9.55 a  | ns                   | ns          | ns     |
| 23-3              | $\alpha$ -Terpineol  | 1.09 a                            | 0.91 b  | 1.16 s  | 1.05 a                 | 1.07 a  | *                    | ns          | *      |
| 23-4              |                      |                                   |         |         | -                      |         |                      |             |        |
| 24-3              | Methyl salicylate    | 14.15 b                           | 15.50 a | 13.22 b | 15.27 a                | 13.28 b | **                   | **          | **     |
| 24-4              |                      | 6.67 a                            | 6.15 a  | 3.59 b  | 4.31 b                 | 6.62 a  | **                   | **          | **     |
| 25-3              | $\beta$ -Cyclocitral | 2.60 a                            | 2.11 b  | 2.20 b  | 2.48 a                 | 2.17 b  | **                   | **          | **     |
| 25-4              |                      | 0.32 b                            | 0.39 ab | 0.41 a  | 0.37 a                 | 0.38 a  | ns                   | ns          | ns     |
| 26-3              | Geraniol             | 25.15 b                           | 41.89 a | 26.95 b | 36.73 a                | 25.36 b | **                   | **          | **     |
| 26-4              |                      | 0.41 a                            | 0.48 a  | 0.41 a  | 0.40 a                 | 0.46 a  | ns                   | ns          | *      |
| 27-3              | Citral               | 1.28 b                            | 1.34 ab | 1.48 a  | 1.46 a                 | 1.28 b  | ns                   | **          | **     |
| 27-4              |                      |                                   |         |         | -                      |         |                      |             |        |
| 28-3              | Indole               | 5.40 a                            | 3.44 b  | 5.10 a  | 5.10 a                 | 4.38 b  | **                   | **          | **     |
| 28-4              |                      | 2.22 a                            | 1.46 b  | 1.33 b  | 2.28 a                 | 1.06 b  | **                   | **          | **     |
| 29-3              | $\beta$ -Ionone      | 2.76 a                            | 1.27 b  | 1.19 b  | 1.88 a                 | 1.67 a  | **                   | ns          | **     |
| 29-4              |                      | 0.62 b                            | 0.73 ab | 0.88 a  | 0.64 b                 | 0.85 a  | *                    | **          | ns     |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering). y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*, \*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.



表 40. 萎凋初期照光處理對茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度之影響

Table 40. The effect of light treatment during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds

| No.              | Compounds               | Treatment                        |          |          |          |          |         |         | Significant analysis |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------------------|
|                  |                         | SW <sup>x</sup>                  | SWH      | UVA      | UVAH     | IR       | IRH     | IW      |                      |
| 1-3 <sup>w</sup> | Hexanal                 | 7.87 <sup>y</sup> a <sup>z</sup> | 5.25 b   | 7.60 a   | 5.24 b   | 5.42 b   | 7.37 a  | 3.87 c  | **                   |
| 1-4              |                         |                                  |          |          |          | -        |         |         |                      |
| 2-3              | (E)-2-Hexenal           | 83.53 b                          | 68.61 cd | 113.71 a | 71.15 cd | 78.18 bc | 66.84 d | 60.03 d | **                   |
| 2-4              |                         |                                  |          |          |          | -        |         |         |                      |
| 3-3              | styrene                 | 3.31 bc                          | 5.64 a   | 4.05 b   | 5.02 a   | 5.59 a   | 3.21 bc | 2.53 c  | **                   |
| 3-4              |                         | 1.29 b                           | 1.33 b   | 1.77 a   | 1.53 ab  | 1.73 a   | 1.43 ab | 1.55 ab |                      |
| 4-3              | Heptanal                | 0.38 d                           | 1.30 c   | 1.46 c   | 1.81 b   | 2.02 b   | 2.31 a  | 1.24 c  | **                   |
| 4-4              |                         | 0.85 bc                          | 0.82 bc  | 0.84 bc  | 0.89 b   | 0.69 c   | 0.81 bc | 1.06 a  |                      |
| 5-3              | (E,E)-2,4-Hexadienal    | 2.18 abc                         | 1.85 bc  | 2.85 a   | 2.39 ab  | 1.92 bc  | 1.58 c  | 1.58 c  | *                    |
| 5-4              |                         |                                  |          |          |          | -        |         |         |                      |
| 6-3              | Benzyl aldehyde         | 2.98 a                           | 2.22 abc | 1.79 bc  | 1.72 bc  | 1.83 bc  | 2.57 ab | 1.35 c  | ns                   |
| 6-4              |                         | 2.01 b                           | 2.14 b   | 2.38 ab  | 2.69 a   | 2.04 b   | 2.09 b  | 2.43 ab |                      |
| 7-3              | 6-Methyl-5-hepten-2-one | 1.40 b                           | 1.14 c   | 1.73 a   | 0.95 d   | 1.58 a   | 1.30 bc | 0.79 d  | **                   |
| 7-4              |                         | 0.55 a                           | 0.48 ab  | 0.49 ab  | 0.50 ab  | 0.47 ab  | 0.43 b  | 0.42 b  |                      |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering) y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

表 40. 萎凋初期照光處理對茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 40. The effect of light treatment during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds (continued)

| No.              | Compounds             | Treatment                        |          |         |          |         |         |         | Significant analysis |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|----------------------|
|                  |                       | SW <sup>x</sup>                  | SWH      | UVA     | UVAH     | IR      | IRH     | IW      |                      |
| 8-3 <sup>w</sup> | 2-Pentylfuran         | 2.05 <sup>y</sup> c <sup>z</sup> | 1.60 d   | 3.82 d  | 1.35 e   | 2.98 a  | 2.21 b  | 1.02 c  | **                   |
| 8-4              |                       | 0.33 b                           | 0.31 b   | 0.40 a  | 0.33 b   | 0.40 a  | 0.39 a  | 0.36 ab | **                   |
| 9-3              | Octanal               | 2.10 a                           | 1.48 b   | 1.59 b  | 1.44 b   | 1.60 b  | 2.02 a  | 1.13 c  | **                   |
| 9-4              |                       | 0.56 a                           | 0.53 a   | 0.60 a  | 0.51 a   | 0.53 a  | 0.58 a  | 0.60 a  | ns                   |
| 10-3             | (E,E)-2,4-Heptadienal | 8.13 a                           | 5.79 b   | 6.55 b  | 4.30 cd  | 4.67 c  | 6.18 b  | 3.35 d  | **                   |
| 10-4             |                       | 0.81 bc                          | 0.67 c   | 0.82 bc | 0.69 c   | 0.77 bc | 0.94 ab | 1.00 a  | *                    |
| 11-3             | D-Limonene            | 0.72 d                           | 0.86 d   | 3.42 a  | 1.49 b   | 1.21 c  | 0.73 d  | 1.21 c  | **                   |
| 11-4             |                       | 3.30 ab                          | 3.65 ab  | 3.86 a  | 3.09 b   | 3.44 ab | 3.80 a  | 3.78 a  | ns                   |
| 12-3             | Benzyl alcohol        | 18.17 bc                         | 17.76 bc | 19.07 b | 18.89 b  | 21.30 a | 18.42 b | 16.78 c | **                   |
| 12-4             |                       | 1.00 bc                          | 0.91 c   | 1.21 a  | 1.08 abc | 1.09 ab | 0.94 bc | 1.23 a  | *                    |
| 13-3             | Benzeneacetaldehyde   | 18.17 bc                         | 17.76 bc | 19.07 b | 18.89 b  | 21.30 a | 18.42 b | 16.78 c | **                   |
| 13-4             |                       | 1.83 c                           | 1.92 c   | 2.07 bc | 2.33 ab  | 1.91 c  | 2.07 c  | 2.57 a  | **                   |
| 14-3             | cis- $\beta$ -Ocimene | 4.45 a                           | 3.26 c   | 4.04 ab | 3.74 b   | 3.19 c  | 3.31 c  | 3.05 c  | **                   |
| 14-4             |                       | 12.37 b                          | 4.72 e   | 13.91 a | 7.30 d   | 9.62 c  | 3.94 e  | 7.31 d  | **                   |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering) y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

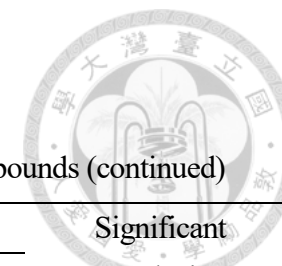


表 40. 萎凋初期照光處理對茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 40. The effect of light treatment during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds (continued)

| No.               | Compounds           | Treatment                        |           |          |          |          |          |          | Significant analysis |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|
|                   |                     | SW <sup>x</sup>                  | SWH       | UVA      | UVAH     | IR       | IRH      | IW       |                      |
| 15-3 <sup>w</sup> | Isophorone          | 0.65 <sup>y</sup> a <sup>z</sup> | 0.52 b    | 0.72 a   | 0.43 c   | 0.43 c   | 0.64 a   | 0.35 d   | **                   |
| 15-4              |                     |                                  |           |          |          | -        |          |          |                      |
| 16-3              | Linalool oxide I    | 55.12 a                          | 48.01 bc  | 56.26 a  | 44.97 cd | 49.57 bc | 49.95 b  | 40.59 d  | **                   |
| 16-4              |                     | 3.00 a                           | 1.61 d    | 2.28 bc  | 2.17 bcd | 1.65 cd  | 1.68 cd  | 2.48 ab  | **                   |
| 17-3              | Linalool oxide II   | 85.51 ab                         | 75.46 c   | 89.73 a  | 73.44 c  | 78.89 b  | 75.92 c  | 62.51 d  | **                   |
| 17-4              |                     | 1.74 a                           | 1.10 c    | 1.43 b   | 1.39 b   | 1.01 c   | 0.91 c   | 1.57 ab  | **                   |
| 18-3              | Linalool            | 185.58 d                         | 198.30 cd | 244.04 b | 211.06 c | 274.44 a | 189.44 d | 165.32 e | **                   |
| 18-4              |                     | 7.24 a                           | 3.29 d    | 4.72 b   | 3.77 c   | 3.36 d   | 2.39 e   | 4.85 b   | **                   |
| 19-3              | Nonanal             | 8.13 a                           | 5.79 b    | 6.55 b   | 4.30 c   | 4.67 c   | 6.18 b   | 3.35 d   | **                   |
| 19-4              |                     | 5.52 a                           | 4.39 bc   | 5.34 ab  | 4.60 c   | 4.58 cd  | 3.76 d   | 4.72 c   | **                   |
| 20-3              | Phenylethyl Alcohol | 17.00 b                          | 17.03 b   | 20.68 a  | 17.60 b  | 17.30 b  | 12.74 c  | 14.14 c  | **                   |
| 20-4              |                     | 10.53 a                          | 4.16 de   | 8.33 b   | 4.75 d   | 6.82 c   | 3.60 e   | 4.72 d   | **                   |
| 21-3              | Linalool oxide III  | 6.13 ab                          | 6.90 a    | 6.66 ab  | 4.87 cd  | 6.31 ab  | 5.45 bc  | 3.87 d   | **                   |
| 21-4              |                     | 4.48 ab                          | 3.51 b    | 5.02 a   | 4.91 ab  | 3.94 ab  | 3.73 ab  | 4.05 ab  | ns                   |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering) y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at p<0.05 level within each column, n=3. ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

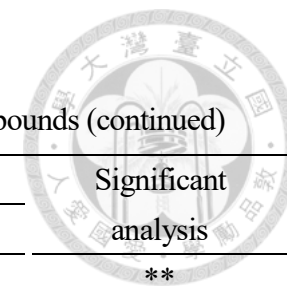


表 40. 萎凋初期照光處理對茶菁與毛茶揮發性化合物相對豐度之影響 (續)

Table 40. The effect of light treatment during early withering stage on the relative abundance of aromatic volatile organic compounds (continued)

| No.               | Compounds            | Treatment                          |          |          |          |         |          |          | Significant analysis |
|-------------------|----------------------|------------------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------------------|
|                   |                      | SW                                 | SWH      | UVA      | UVAH     | IR      | IRH      | IW       |                      |
| 22-3 <sup>x</sup> | Linalool oxide IV    | 13.80 <sup>y</sup> ab <sup>z</sup> | 15.38 a  | 14.09 ab | 10.73 bc | 14.10 a | 12.26 ab | 7.88 c   | **                   |
| 22-4              |                      | 9.80 a                             | 9.92 a   | 10.64 a  | 10.08 a  | 9.10 a  | 9.28 a   | 8.52 a   | ns                   |
| 23-3              | $\alpha$ -Terpineol  | 0.96 bc                            | 1.22 a   | 1.03 abc | 0.84 cd  | 1.17 ab | 1.16 ab  | 0.71 d   | **                   |
| 23-4              |                      |                                    |          |          |          | -       |          |          |                      |
| 24-3              | Methyl salicylate    | 12.97 cd                           | 15.33 b  | 18.40 a  | 13.56 c  | 15.50 b | 10.94 e  | 12.13 de | **                   |
| 24-4              |                      | 11.20 a                            | 6.78 b   | 5.52 b   | 4.03 c   | 3.15 cd | 2.15 d   | 2.14 d   | **                   |
| 25-3              | $\beta$ -Cyclocitral | 2.98 a                             | 2.22 c   | 2.69 ab  | 1.72 d   | 1.83 d  | 2.57 b   | 1.35 e   | **                   |
| 25-4              |                      | 0.32 c                             | 0.32 c   | 0.40 abc | 0.37 bc  | 0.37 bc | 0.45 ab  | 0.48 a   | *                    |
| 26-3              | Geraniol             | 21.92 ef                           | 28.39 cd | 58.15 a  | 31.05 c  | 37.27 b | 16.64 f  | 23.15 de | **                   |
| 26-4              |                      | 0.46 ab                            | 0.36 bc  | 0.39 bc  | 0.54 a   | 0.34 c  | 0.47 ab  | 0.56 a   | **                   |
| 27-3              | Citral               | 1.31 a                             | 1.24 a   | 1.15 a   | 1.08 a   | 1.42 a  | 1.54 a   | 0.92 a   | ns                   |
| 27-4              |                      |                                    |          |          |          | -       |          |          |                      |
| 28-3              | Indole               | 5.51 a                             | 5.30 a   | 4.79 a   | 2.54 b   | 4.89 a  | 5.31 a   | 1.22 c   | **                   |
| 28-4              |                      | 3.03 a                             | 1.42 d   | 2.11 b   | 0.81 e   | 1.70 c  | 0.96 e   | 0.39 f   | **                   |
| 29-3              | $\beta$ -Ionone      | 2.76 a                             | 2.76 a   | 1.79 b   | 0.92 cd  | 1.07 cd | 1.32 bc  | 0.73 d   | **                   |
| 29-4              |                      | 0.51 b                             | 0.74 b   | 0.72 b   | 0.74 b   | 0.69 b  | 1.07 a   | 1.03 a   | **                   |

w: Sampling stage. number-3: stage 3(freeze dry leaves); number-4: stage 4(dry tea). x: SW (solar withering); SWH (solar withering with high-humidity); UVA (ultraviolet a withering); IR (infrared withering); IRH (infrared withering with high-humidity); IW (indoor withering) y: Relative abundance of internal standard. z: Means followed by the same letter in columns are not significantly different by LSD test at  $p < 0.05$  level within each column,  $n=3$ . ns, not significant; \*,\*\* indicates statistic significant at 5% and 1% level.

## 參考文獻



行政院農委會. 2021. 農情報告資源網. 農情調查資訊查詢

<<http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/official/OfficialInformation.aspx>>

王進學、葉德銘. 2013. 菊花之細胞膜熱穩定性檢測及其應用於篩選耐熱實生苗.

臺灣園藝 59:153-166.

甘子能(編). 1984. 茶葉化學入門. 行政院農委會茶業改良場林口分場. 臺北

甘子能(編). 1987. 製茶原理的生化關. 臺灣省茶業改良場文山分場. 臺北

吳振鐸. 1985. 台灣茶葉的分類. 臺灣茶葉研究彙報 4: 155-158。

林書妍. 2013. 部分發酵茶茶菁、製程及成茶中可溶性化學成分與揮發性有機化合物之研究. 國立臺灣大學園藝暨景觀學系博士論文. 臺北.

林真如. 2011. 紫外線對茶樹葉片中兒茶素含量之影響. 國立臺灣大學園藝學系碩士論文. 台北.

林真如. 2011. 紫外線對茶樹葉片中兒茶素含量之影響. 國立臺灣大學園藝學系碩士論文. 台北.

林真如、李金龍、陳右人、阮素芬. 2020. 紫外線對茶樹嫩梢兒茶素含量與葉片細胞膜熱穩定性之影響. 臺灣園藝 66(1):37-50.

林馥泉. 1956. 烏龍茶及包種茶製造學. 大同書局. 臺北.

張如華. 1992. 不同萎凋處理對包種茶品質之影響. 國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文. 臺北

張如華、阮逸明、蔡永生. 1995. 茶葉主要化學成分於製茶過程中之變化及其對品質之影響. 農業試驗所特刊 56:120-148.

張連發. 1991. 以紅外線萎凋茶菁製造包種茶之研究. 國立中興大學食品科學研究所碩士論文. 臺中.

陳英玲. 1995. 不同茶樹品種多酚酶活性及其在製茶過程中之變化. 農特產品加工研討會專刊 56:111-119.

蔡志賢、王自存、張唯勤. 2002. 包種茶萎凋與攪拌製程中茶菁之乙烯與二氯化碳生成及多酚氧化酶活性的變化. 中國園藝 48:227-238.

範仕勝、晉秀、楊清、劉東娜、杜曉. 2012. 人工光照萎凋對茶葉主要品質成分與酶活性的影響. 湖北農業科學 51:1152-1155.

Ai, Z., B. Zhang, Y. Chen, Z. Yu, H. Chen, and D. Ni. 2017. Impact of light irradiation on black tea quality during withering. *J. Food Sci. Technol.* 54:1212-1227.

Araújo, W.L., T. Tohge, K. Ishizaki, C.J. Leaver, and A.R. Fernie. 2011. Protein degradation and alternative respiratory substrate for stressed plants. *Trends Plant Sci* 16:489-498.

Armstrong, G.A. and J.E. Hearst. 1996. Genetics and molecular biology of carotenoid pigment biosynthesis. *The FASEB journal* 10:228-237.

Ashihara, H. and A. Crozier. 1999. Biosynthesis and metabolism of caffeine and related purine alkaloids in plants. *Adv. Bot. Res.* 30:117-205.

Assumpção, C.F., V.S. Hermes, C. Pagno, A. Castagna, A. Mannucci, C. Sgherri, C. Pinzino, A. Ranieri, S.H. Flôres, and A.D.O. Rios. 2018. Phenolic enrichment in apple skin following post-harvest fruit UV-B treatment. *Postharvest Biol. Technol.* 138:37-45.

Chaturvedula, V.S.P. and I. Prakash. 2011. The aroma, taste, color and bioactive constituents of tea. *J. Med. Plants Res.* 5(11): 2110-2124.

Cho, J.-Y., M. Mizutani, B.I. Shimizu, T. Kinoshita, M. Ogura, K. Tokoro, M.-L. Lin, and K. Sakata. 2007. Chemical profiling and gene expression profiling during the manufacturing process of Taiwan oolong tea “oriental beauty”. *Biosci., Biotechnol., Biochem.* 71:1476-1486.

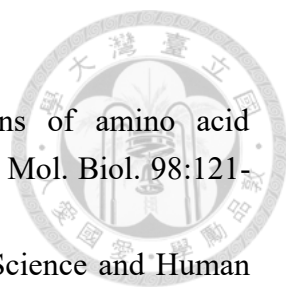
Fall, R., T. Karl, A. Hansel, A. Jordan, and W. Lindinger. 1999. Volatile organic compounds emitted after leaf wounding: On-line analysis by proton-transfer-reaction mass spectrometry. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 104:15963-15974.

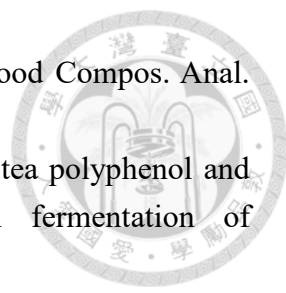
Good, A.G. and S.T. Zaplachinski. 1994. The effects of drought stress on free amino acid accumulation and protein synthesis in *Brassica napus*. *Physiol. Plant.* 90:9-14.

Gui, J., X. Fu, Y. Zhou, T. Katsuno, X. Mei, R. Deng, X. Xu, L. Zhang, F. Dong, N. Watanabe, and Z. Yang. 2015. Does enzymatic hydrolysis of glycosidically bound volatile compounds really contribute to the formation of volatile compounds during the oolong tea manufacturing process? *Journal of J. Agric. Food Chem.* 63:6905-6914.

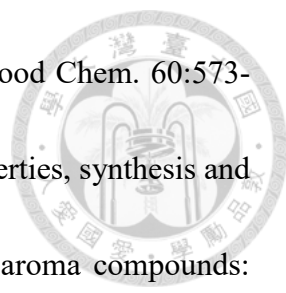
Hatanaka, A. 1993. The biogenesis of green odour by green leaves. *Phytochemistry* 34(5):1201-1218.

Hideg, Ü. and I. Vass. 1996. UV-B induced free radical production in plant leaves and

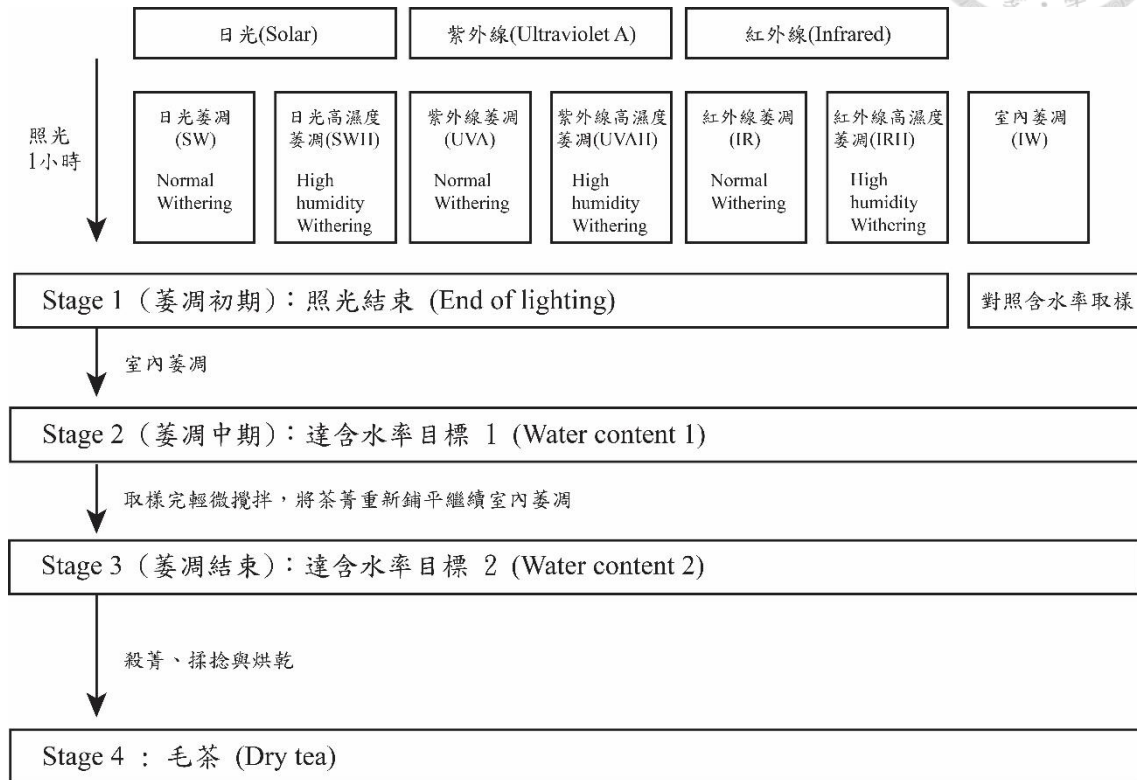
- 
- isolated thylakoid membranes. *Plant Sci.* 115:251-260.
- Hildebrandt, T.M. 2018. Synthesis versus degradation: directions of amino acid metabolism during *Arabidopsis* abiotic stress response. *Plant Mol. Biol.* 98:121-135.
- Ho, C.T., X. Zheng, and S. Li. 2015. Tea aroma formation. *Food Science and Human Wellness.* 4(1): 9-27.
- Hollósy, F. 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells, p. 179-197, *Micron*.
- Jang, J., Y.C. Yang, G.H. Zhang, H. Chen, J.L. Lu, Y.Y. Du, J.H. Ye, Q. Ye, D. Borthakur, X.Q. Zheng, and Y.R. Liang. 2010. Effect of ultra-violet B on release of volatiles in tea leaf. *Int. J. Food Prop.* 13:608-617.
- Kalidass, S., K.U. Vijaya, and R.R. Kumar. 2019. Biochemical changes during withering process of CTC black tea manufacture. *Orient. J. Chem.* 35:1313-1319.
- Kawakami, M. and A. Kobayashi. 2002. Carotenoid-derived aroma compounds in Tea, p. 145-159. American Chemical Society.
- Kawakami, M., & Kobayashi, A. 2002. Carotenoid-derived aroma compounds in tea. In P. Winterhalter, & R. Rouseff (Eds.), *Carotenoid-derived aroma compounds*. ACS symposium series, 802. (pp. 145–161). Washington: American Chemical Society.
- Kobayashi, A., K. Tachiyama, M. Kawakami, T. Yamanishi, I.-M. Juan, and W.T.-F. Chiu. 1985. Effects of solar-withering and turn over treatment during indoor-withering on the formation of pouchong tea aroma. *Agr. Biol. Chem.* 49:1655-1660.
- Li, D., C.Y. Li, C.J. Hu, Y.S. Yang, C. Lin, D. Zhao, Q.S. Li, J.H. Ye, X.Q. Zheng, Y.R. Liang, and J.L. Lu. 2020. Study on the accumulation mechanism of amino acids during bruising and withering treatment of oolong Tea. *J Agric Food Chem* 68:14071-14080.
- Lin, Y.-S., Y.-J. Tsai, J.-S. Tsay, and J.-K. Lin. 2003. Factors affecting the levels of tea polyphenols and caffeine in tea leaves. *J. Agric. Food Chem.* 51:1864-1873.
- Ma, C., J. Li, W. Chen, W. Wang, D. Qi, S. Pang, and A. Miao. 2018. Study of the aroma formation and transformation during the manufacturing process of oolong tea by solid-phase micro-extraction and gas chromatography–mass spectrometry combined with chemometrics, p.413-422, *Food Research International*. Elsevier.
- Mayer, A.M. and E. Harel. 1979. Polyphenol oxidases in plants. *Phytochemistry* 18:193-215.
- Niu, Y. and Y. Xiang. 2018. An overview of biomembrane functions in plant responses to high-temperature stress. *Front Plant Sci* 9.
- ölmez, H. and A. Yilmaz. 2010. Changes in chemical constituents and polyphenol oxidase activity of tea leaves with shoot maturity and cold storage. *J. Food Process. Preserv.* 34:653-665.
- Peterson, J., J. Dwyer, S. Bhagwat, D. Haytowitz, J. Holden, A.L. Eldridge, G. Beecher,

- 
- and J. Aladesanmi. 2005. Major flavonoids in dry tea. *J. Food Compos. Anal.* 18:487-501.
- Qin, J.H., N. Li, P.F. Tu, Z.Z. Ma, and L. Zhang. 2012. Change in tea polyphenol and purine alkaloid Composition during solid-state fungal fermentation of postfermented tea. *J. Agric. Food Chem.* 60:1213-1217.
- Ravichandran, R. 2002. Carotenoid composition, distribution and degradation to flavour volatiles during black tea manufacture and the effect of carotenoid supplementation on tea quality and aroma. *Food Chem.* 78:23-28.
- Roberts, G. and G. Sanderson. 1966. Changes undergone by free amino-acids during the manufacture of black tea. *J. Sci. Food Agric.* 17:182-188.
- Sanderson, G.W. 1964. The theory of withering in tea manufacture. *Tea Q.* 35:146-163.
- Sanderson, G.W. 1968. Change in cell membrane permeability in tea flush on storage after plucking and its effect on fermentation in tea manufacture. *J. Sci. Food Agric.* 19:637-639.
- Sanderson, G.W. 1972. The Chemistry of Tea and Tea Manufacturing. In *Recent advances in phytochemistry* 5:247-316. Elsevier.
- Sanderson, G.W. and H.N. Graham. 1973. Formation of black tea aroma. *J. Agric. Food Chem.* 21:576-585.
- Sari, F. and Y.S. Velioglu. 2013. Changes in theanine and caffeine contents of black tea with different rolling methods and processing stages. *Eur. Food Res. Technol.* 237:229-236.
- Selvendran, R. and N. King. 1976. Ultrastructural changes in tea leaves during 'orthodox' black tea manufacture. *Ann. Appl. Biol.* 83:463-473.
- Simon, E. 1974. Phospholipids and plant membrane permeability. *New Phytol.* 73:377-420.
- Suzuki, T., N. Yamazaki, Y. Sada, I. Oguni, and Y. Moriyasu. 2003. Tissue distribution and intracellular localization of catechins in tea Leaves. *Biosci., Biotechnol., Biochem.* 67:2683-2686.
- Takeo, T. 1966. Tea leaf polyphenol oxidase: part III. studies on the changes of polyphenol oxidase activity during black tea manufacture. *Agric. Biol. Chem.* 30: 529-535.
- Takeo, T. and T. Tsushida. 1980. Changes in lipoxygenase activity in relation to lipid degradation in plucked tea shoots. *Phytochemistry* 19:2521-2522.
- Tanaka, T., C. Mine, S. Watarumi, T. Fujioka, K. Mihashi, Y.-J. Zhang, and I. Kouno. 2002. Accumulation of epigallocatechin quinone dimers during tea fermentation and formation of theasinensins. *J. Nat. Prod.* 65:1582-1587.
- Tanaka, Y. and K. Matsuo. 2011. Non-thermal effects of near-infrared irradiation on melanoma. *Breakthroughs in Melanoma Research.* Citeseer.
- Tomlins, K.I. and A. Mashigaidze. 1997. Influence of withering, including leaf handling,



- 
- on the manufacturing and quality of black teas - a review. *Food Chem.* 60:573-580.
- Vuong, Q.V., M.C. Bowyer, and P.D. Roach. 2011. L-Theanine: properties, synthesis and isolation from tea. *J. Sci. Food Agric.* 91:1931-1939.
- Winterhalter, P. and G.K. Skouroumounis. 1997. Glycoconjugated aroma compounds: occurrence, role and biotechnological transformation. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 55:73-105.
- Wright, L.A., T.M. Murphy, and R.L. Travis. 1981. The effect of ultraviolet radiation on wheat root vesicles enriched in plasma membrane. *Photochem. Photobiol.* 33:343-348.
- Yang, Z., S. Baldermann, and N. Watanabe. 2013. Recent studies of the volatile compounds in tea. *Food Res. Int.* 53:585-599.
- Ye, Y., J. Yan, J. Cui, S. Mao, M. Li, X. Liao, and H. Tong. 2018. Dynamic changes in amino acids, catechins, caffeine and gallic acid in green tea during withering. *J. Food Compos. Anal.* 66:98-108.
- Zhu, C., S. Zhang, H. Fu, C. Zhou, L. Chen, X. Li, Y. Lin, Z. Lai, and Y. Guo. 2019. Transcriptome and phytochemical analyses provide new insights into long non-coding RNAs modulating characteristic secondary metabolites of oolong tea (*Camellia sinensis*) in solar-withering. *Front Plant Sci* 10:1638.

## 附錄



附圖 28. 製茶試驗流程圖

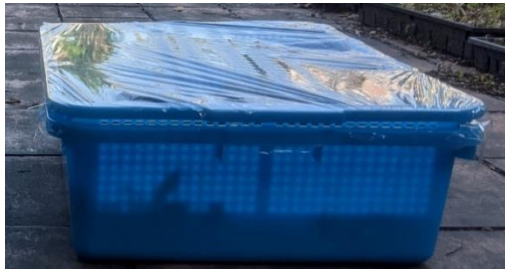
Appendix fig. 1. Flow chart of tea manufacturing experiment



a



b



c



d



e

附圖 2. 萎凋初期照光設備照片

Appendix fig. 2. Photos of lighting equipment on early withering stage

a: Solar withering; b: Setting of UVA light tube; c: Solar withering with high-humidity; d: UVA withering; e: Infrared withering