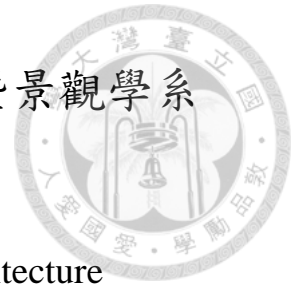


國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝暨景觀學系



碩士論文

Department of Horticulture and Landscape Architecture

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

結球萵苣採收成熟度指標與低壓包裝技術之研究
Studies on Maturity Index and Hypobaric Packaging
Technology of Crisphead Lettuce (*Lactuca sativa* var.
capitata L.).

廖國均

Kuo-Jyun Liao

指導教授：吳俊達 博士

Advisor : Chun-Ta Wu, Ph.D.

中華民國 104 年 6 月

June, 2015

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

結球萵苣採收成熟度指標與低壓包裝技術之研究

Studies on Maturity Index and Hypobaric Packaging
Technology of Crisphead Lettuce (*Lactuca sativa* var.
capitata L.)

本論文係廖國均君 (R01628202) 在國立臺灣大學園藝暨景觀學系完成之碩士學位論文，於民國 104 年 06 月 11 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

林棟樑 博士
臺南區農業改良場

林棟樑

李堂察 博士
國立嘉義大學園藝學系

李堂察

黃肇家 博士
農委會農業試驗所

黃肇家

吳俊達 博士
國立臺灣大學園藝暨景觀學系

吳俊達

(指導教授)



致謝

本論文承蒙指導教授 吳俊達老師悉心指導和教誨，於試驗方向及論文撰寫給予建議與修正。文稿初成，復蒙 林棟樑老師、李堂察老師及黃肇家老師費心審閱，詳加指正，並提供寶貴的意見。特別感謝恩師 李堂察老師當年的推薦，並對試驗惠予許多建議與提點、感謝 王自存老師於課堂上的指導及許多儀器設備的借用，特置卷首以表最深的謝意。

試驗期間承蒙二崙鄉鍾金遠先生，提供試驗材料並於採收處理作業給予諸多協助。感謝豐如國際股份公司 彭先隆總經理的勉勵，並不吝提供產業現況與產地參訪機會；怡君、阿澤、衣以及珊姐等豐如同事們不斷為我加油打氣，並體諒我在每年最忙的時刻缺席；嘉大處理室助理怡尹學姐協助舉辦進度報告，並於試驗給予諸多協助；多年同學兼奮鬥夥伴阿汪於試驗進行鼎力相助；嘉大同窗與好友們的鼓勵。在學期間感謝嘉祐、威廷、育昌、小葉、豬安、阿官、阿崙、阿良等學長姐於試驗的建議、指導與關心；同屆的阿汪、藝綸、阿華、韋汶、歐季等於試驗進行提供許多協助，並陪伴我度過許多苦悶的日子；Andy、昱琬、乃文、楊婕、哲孝、蕙安、孟頌謝謝你們的關心，在學的最後一年，是你們的陪伴與打氣，讓我在心灰意冷之際感受到溫度並度過困境，要感謝的人真的太多，遺漏之處敬請見諒。跟大家一起生活的每一刻，都是最美好的回憶，因為有你們論文才能順利完成，由衷感謝各位，也希望未來的日子大家都能天天愉快、事事順心。

最後要感謝我親愛的家人們，先父在天之靈的庇佑；叔公與嬸婆提供食宿，讓我無後顧之憂地全力衝刺；老媽與弟弟，給予全力支持與鼓勵，在我挫折失意時不斷加油打氣，終於完成學業了結先父心願。最後僅將此論文獻給我最摯愛的家人、師長及朋友們，感激不盡。

廖國均 於臺灣大學處理研究室 2015/08/06

摘要

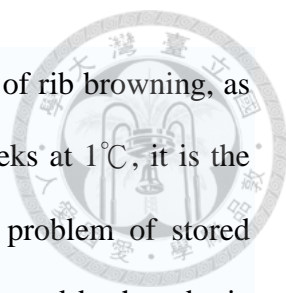


結球萵苣(*Lactuca sativa* var. *capitata* L.)為國內主要外銷蔬菜，每年11月至隔年2月為主要外銷季節，目前產業以葉球剖面內葉緻密度或以手指按壓葉球緊實度進行成熟度判定，仰賴農民經驗，因此常造成產銷雙方爭議，需要建立量化採收成熟度指標。‘3號’、‘常利6號’、‘大將’結球萵苣於10月定植於雲林地區，9週後葉球球徑成長趨緩、按壓具有彈性，葉球剖面內葉緻密度3級，產量合乎商業標準，總可溶性固形物含量與乾物率下降趨勢緩和，且呼吸率降至最低(25~40 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹)適合貯運，因此建議採收定植55~60天、葉球硬度為18~24 N且葉球重量達500~700 g為最適成熟度。定植9週成熟度合適葉球採收經修整後以慣行厚度25 μm低密度聚乙烯袋包裝，貯藏於貯運推薦1°C，葉球貯藏6週期間失重皆在2%以內，外觀無萎凋皺縮現象，‘3號’葉球球形扁圓整齊，有利裝箱作業，且貯藏期間葉球呼吸率最低(5~10 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹)生理代謝較慢，貯藏末期總可溶性固形物含量顯著維持較高(3.4~3.7%)，貯藏6週腐爛率12.5%顯著低於其他2品種(腐爛率>20%)，且無中肋褐變現象，維持良好外觀達4~6週，為三個參試品種中貯運性最佳品種。為改善貯後褐變現象，選用符合外銷規格之‘3號’結球萵苣葉球進行低壓包裝後貯於1°C，可顯著抑制中肋與莖部採收切口褐變，且貯藏10週仍維持高脆度(5 N·s⁻¹)與總可溶性固形物含量(2.8%)，並將腐爛率降至25%以下，而慣行包裝處理已幾乎全數腐爛；葉球經此技術包裝仍可於1°C貯藏期間保持良好外觀達8~10週。但低壓包裝葉球貯後二氧化碳累積達10%以上，產生無氧呼吸導致乙醛(47~81 μL·L⁻¹)、乙醇(974~2028 μL·L⁻¹)累積，貯藏8週後袋內產生明顯異味且葉球開始出現心葉傷害，整體品質因而逐漸下降，包裝技術仍待改進。

Abstract



Crisphead lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) is an important export vegetable in Taiwan. The major export season is from November through February annually. Up to date, the industrial-used maturity determination of crisphead lettuce is totally based on the degree of leaf compactness of head profile or the firmness of head compressed with hands, both are highly rely on personal experiences; as an consequence, the maturity of this commodity is ambiguous and usually caused a disputation between growers and wholesalers. Therefore, it is necessary to establish a quantify maturity index for crisphead lettuce. 'No. 3', 'Chang-Li No. 6', and 'Da-Jiang' lettuce heads were considered as the optimal maturity stage for harvest at 9 weeks after transplant in Yunlin County, Taiwan, on October, because the heads exhibited fully expansion in size, firm solidity by hand compression, appearance of Class 3 leaf compactness, stabilizations of the total soluble solids and dry weight, as well as a minimum of respiration rate ($25\sim 40\text{ mg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$). A 55- to 60-day-old lettuce head after transplant with 18-24 N firmness and 500-700 g is recommended as the optimum maturity. After harvest and trimming, the lettuce heads were packaged with 25 μm thickness low density polyethylene (LDPE) bags and store at 1°C , the temperature commercially used for transportation of crisphead lettuce. The percentage of weight loss of the produce was less than 2% and displayed no wilting and wrinkled on appearance. Among the three cultivars investigated, 'No.3' was the best cultivar for package operation due to its spheroid shape. Moreover, since the respiration rate of 'No.3' head had the lowest respiration rate ($5\sim 10\text{ mg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$), and thus, metabolism, and decay accident (12.5% vs. $>20\%$ of other two after 6 weeks storage),



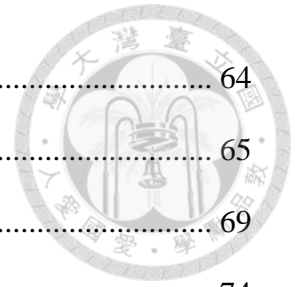
maintained the highest total soluble solids (3.4~3.7%), no disorder of rib browning, as well as good visual quality among the cultivars tested for 4~6 weeks at 1°C, it is the best cultivar for storage and export. To alleviate the browning problem of stored crisphead lettuce, 'No. 3' lettuce heads with export quality were treated by hypobaric packaging and then stored at 1°C. By comparing with conventional packaging, hypobaric packaging significantly retarded midrib browning and butt discoloration, and was able to retain crispy texture (5 N·s⁻¹) and high total soluble solids (2.8%), lower decay percentage (<25%) up to 10 weeks when compared with those treated with conventional packaging, which were almost completely decay. However, the hypobaric package treatment prone to cause problems of carbon dioxide (>10%), acetaldehyde (47~81 μL·L⁻¹), and ethanol (974~2028 μL·L⁻¹) accumulations due to anaerobic respiration. Because of marked off-odor formation and increase of heart-leaf injury percentage after 8 weeks storage, the overall quality of the product declined gradually. Further modification and improvement are required before this technique is applied in the postharvest handling of crisphead lettuce industry.

目錄



致謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	v
圖次	vii
表次	x
第一章 前言	1
第二章 前人研究	3
2.1. 結球萵苣產業發展概況	3
2.2. 結球現象的發生與影響因子	5
2.3. 田間常見生理障害與病害	8
2.4. 結球萵苣採收流程	11
2.5. 結球萵苣採後品質劣變	14
2.6. 抑制酵素型褐變之處理技術	21
2.7. 結球萵苣相關之氣調及氣變貯藏研究與應用	28
第三章 結球萵苣採收成熟度指標建立	32
前言	32
材料與方法	33
結果	38
討論	42
第四章 結球萵苣品種貯藏特性比較	64

前言	64
材料與方法	65
結果	69
討論	74
第五章 開發結球萵苣低壓包裝技術	93
前言	93
材料與方法	94
結果	100
討論	105
第六章 結論	126
參考文獻	129
附錄	150





圖次

圖 3-1.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (前 3 列)、2013 (後 3 列) 年度試驗發育期間植株形態變化.....	50
圖 3-2.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間外葉葉片數之變化.....	51
圖 3-3.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A、C、E)、2013 (B、D、F) 年度試驗發育期間葉球縱徑 (A、B)、橫徑 (C、D)、縱橫比 (E、F) 之變化.....	52
圖 3-4.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球鮮重變化.....	53
圖 3-5.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間切離葉球於 20°C 測得呼吸率變化.....	54
圖 3-6.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球硬度之變化.....	55
圖 3-7.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球葉片組織乾物率之變化.....	56
圖 3-8.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球總可溶性固形物量之變化.....	57
圖 3-9.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 年度試驗發育期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性 (C) 之變化.....	58
圖 3-10.	‘3 號’結球萵苣定植 5 週植株不同節位 (如數字所標示) 葉片之葉部形態.....	59
圖 3-11.	‘3 號’結球萵苣定植 5 週植株不同節位向頂的葉片之葉片長寬比變化.....	60
圖 3-12.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣定植 9 週葉球外觀之比較.....	61
圖 3-13.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012、2013 年度試驗葉球發育期間剖面緻密度變化.....	62
圖 4-1.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (上三排)、2014 (下三排) 年度試驗 1°C 貯藏期間葉球外觀.....	80
圖 4-2.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、D、F、H) 年度試驗 1°C 貯藏期間葉球外葉色澤—L* 值 (A、B)、a* 值 (C、D)、b* 值 (E、F) 與色相角 (G、H) 之變化.....	81
圖 4-3.	‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、	

D、F、H)年度試驗 1°C貯藏期間葉球中肋色澤—L*值 (A、B)、a*值 (C、D)、b*值 (E、F)與色相角 (G、H)之變化.....	82
圖 4-4. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、D、F、H)年度試驗 1°C貯藏期間葉球莖部採收切口色澤—L*值 (A、B)、a*值 (C、D)、b*值 (E、F)與色相角 (G、H)之變化.....	83
圖 4-5. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間葉球外葉葉綠素含量之變化.....	84
圖 4-6. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間於 1°C測得葉球呼吸率變化.....	85
圖 4-7. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間葉球硬度之變化.....	86
圖 4-8. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間葉球中肋脆度之變化.....	87
圖 4-9. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間葉球總可溶性固形物量之變化.....	88
圖 4-10. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C貯藏期間葉球失重率之變化.....	89
圖 4-11. 結球萵苣 1°C貯藏期間腐爛葉球外觀 (A)與病徵近照 (B).....	90
圖 4-12. 結球萵苣 1°C貯藏期間腐爛葉球出現之鏽斑徵狀.....	90
圖 4-13. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣試驗 1°C貯藏期間葉球腐爛率之變化.....	91
圖 4-14. ‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣試驗 1°C貯藏期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性 (C)之變化.....	92
圖 5-1. 心葉傷害嚴重程度(1:褐化面積為 5%以下; 2:褐化面積為 10%以上; 3:褐化面積達 25%; 4:褐化面積達 40%; 5:褐化面積達 50%).....	97
圖 5-2. ‘3 號’結球萵苣經慣行包裝(conventional package)、低壓包裝(hypobaric package)及低壓包裝+鹼石灰(hypobaric package + soda lime)葉球 1°C貯藏期間外觀之變化.....	114
圖 5-3. 不同包裝(●慣行包裝; ○低壓包裝; ▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C貯藏期間葉球外葉色澤之變化.....	115
圖 5-4. 不同包裝(●慣行包裝; ○低壓包裝; ▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C貯藏期間葉球外葉色相角與葉綠素之變化.....	116
圖 5-5. 不同包裝(●慣行包裝; ○低壓包裝; ▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C貯藏期間葉球中肋色澤之變化.....	117
圖 5-6. 不同包裝(●慣行包裝; ○低壓包裝; ▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C貯藏期間葉球莖部採收切口色澤之變化.....	118

圖 5-7. 慣行包裝結球萵苣 1°C 貯藏期間呼吸率變化(A)、低壓包裝袋內氣體變化(B)與葉球總可溶性固形物含量(C)之變化.....	119
圖 5-8. 不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C 貯藏期間葉球硬度(A)與中肋脆度(B)之變化.....	120
圖 5-9. 不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C 貯藏期間葉球失重率(A)與外觀腐爛率(B)之變化.....	121
圖 5-10. 不同包裝(慣行包裝、低壓包裝、低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C 貯藏期間外觀品質 (A)、心葉傷害程度(B)、氣味品質 (C)與購買意願 (D)之變化.....	122
圖 5-11. 不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰)‘3 號’結球萵苣 1°C 貯藏期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性(C)之變化.....	123



表次

表 3-1. 本結球萵苣試驗 2012、2013 年度發育期間旬平均溫 (Ave. Temp)、總日射量 (Total radiation) 變化與計算所得之有效日積溫 (EDDs)。	63
表 5-1. 慣行包裝、低壓包裝及低壓包裝+鹼石灰 '3 號' 結球萵苣葉球 1°C 貯藏期間乙醛、乙醇含量之變化。	124
表 5-2. 慣行包裝、低壓包裝及低壓包裝+鹼石灰 '3 號' 結球萵苣 1°C 貯藏 6 週葉球外葉與心葉乙醛、乙醇含量之比較。	125




第一章 前言

結球萵苣(*Lactuca sativa* var. *capitata* L.; Crisphead lettuce)為菊科萵苣屬一年生葉用蔬菜，俗稱西生菜、包心萵苣，原產於地中海沿岸(林，2005；徐等，2005)，主要產地為歐洲和美洲，而華南地區及臺灣亦有種植。因其具有適合生食、耐貯運等優點，是目前國際貿易大宗蔬菜之一。

臺灣冬季氣候相當適合種植涼季蔬菜，易發生十字花科蔬菜生產過剩價格崩盤，為農政單位長年面臨的棘手問題(何，2006)。結球萵苣在2001年以前即有少量生產內銷以替代進口，評估輔導轉作期間發現美國等大宗生產結球萵苣的國家在11月至隔年3月為寒冬，不利農業生產；而日本、韓國等原先可生產自給的國家，此時也因寒冬而需仰賴進口，我國氣候適宜，符合市場需求且佔有地利之便，具有極大的優勢。因此，2002年農委會開始輔導農民組織產銷班進行生產及外銷，成果豐碩，外銷量逐年上升，2013年外銷量已達10,633公噸、外銷值達983萬美元，其中以日本為主要銷售國，韓國與新加坡次之。目前為我國僅次於毛豆、胡蘿蔔的重要外銷生鮮蔬菜產品(林和謝，2012)。

日本結球萵苣市場總流通量約為508,600公噸/年，其中鮮食用(即超市販售完整葉球者)佔最大宗約450,500公噸，業務用(餐廳使用)次之約37,200公噸，加工用(用於製作截切產品)最少為20,900公噸。國產外銷日本之結球萵苣，大多為加工用途，因預冷技術的改善，包裝作業已簡化到僅需以紙箱裝填裸菜毛重達15公斤即可，為增加市場多樣性，外銷商也積極爭取鮮食市場訂單，但超市通路必須逐粒套袋包裝，作業上較為複雜，需要大型包裝作業場所及人力，對於品質的要求也相對嚴苛，因此，外銷社場的品質控管十分重要，從品種選擇、採收成熟度界定、採後處理流程及貯運條件皆須有相當程度的了解。



國內目前結球萵苣栽培品種大多為溫帶品種，缺乏耐熱性（許等，2010），高溫期導致植株抽苔、不結球、生理病變皆是臺灣結球萵苣夏季生產的限制因子，故平地栽培以秋冬季為主（林，2005；何，2006；林，2009）。然而國內由於西方餐食逐漸風行，結球萵苣消費量也逐年成長（林，2005、2008），每年夏秋之際非國內產期，需仰賴進口供應，年進口量 1 萬公噸，進口值 1 億 2 千 9 百萬元，需求量相當大；此外，進口結球萵苣售價也有逐年上升趨勢，進口平均單價皆在每公斤新臺幣 30 元以上，民國 100 年開始逐年上升，102 年平均單價高達每公斤 36 元。目前國內生產之結球萵苣單位面積產量約為 40 公噸/公頃，合作農場向農民契作每 0.1 公頃給付約 2.3 萬元，換算後收購單價在 10 元以下。因此，結球萵苣耐熱育種與夏季生產技術已成為當前農試單位努力的目標（林，2009；許等，2010；林和謝，2012）；而開發結球萵苣長期（2-3 個月）貯藏技術以供應 5-7 月份內銷需求，降低對價格偏高之進口產品依賴度，也有其利潤與必要性。

因此本試驗首先探討國內主要結球萵苣栽培品種‘3 號’、‘常利 6 號’、‘大將’發育期間的生理形態與品質變化，期能建立適合的成熟度指標(第三章)；測定適當成熟度三品種結球萵苣以目前業界使用之低密度聚乙烯袋包裝後，貯於外銷貨櫃常用 1°C 貯運溫度，不同貯藏時間其呼吸率與品質，藉以了解結球萵苣品質劣變因子及其採後壽命(第四章)；再探討利用低壓包裝技術降低氧氣分壓延緩結球萵苣貯藏期間酵素型褐變及其他品質劣變的效益，期能開發結球萵苣長程貯運處理技術(第五章)。


第二章 前人研究



2.1. 結球萵苣產業發展概況

結球萵苣(*Lactuca sativa* L. var. *capitata*)原產於地中海沿岸，為菊科(Asteraceae)萵苣屬(*Lactuca*)一年生國際貿易大宗葉用蔬菜(徐等, 2005; 林, 2005)。西元 500 年前的埃及古墓壁畫即可發現萵苣的蹤跡，中國則在西元 5 世紀左右傳入，曾因種子昂貴而稱為「千金菜」，而美國則晚至 1493 年才由哥倫布引入(翁, 2009)。其屬名字根“lac”於拉丁文中即牛奶般多汁之意，而種名“*sativa*”則是被栽種的意思，命名相當貼切(Kerns *et al.*, 1999)。結球萵苣全株可食，其含有 95% 以上的水分，葉片因而脆嫩多汁，廣泛用於生食食用，以作為生菜沙拉或漢堡、三明治配料居多。其莖葉富含維他命 A、B1、B2、C、鉀、鈣、磷、鐵、β-胡蘿蔔素、葉黃素及膳食纖維等，具開胃、解鬱，促進生長發育、增強體力、抗老化等養生功效，碳水化合物含量極少且不含脂肪，加上近年生機飲食風行，促使需求量逐年提升(林, 2009)。

目前世界結球萵苣生產概況，年生產量 24,946,142 公噸，於蔬菜生產量排名第 11 位，平均每公頃生產 22.35 公噸，生產量以亞洲最多佔 68.5%，美洲與歐洲則分居二、三，分別佔 18.7% 與 11.1%。以生產面積排序，中國最多為 57 萬 5 千公頃，印度次之為 17 萬公頃，美國位居第三為 10 萬 7 千公頃；總生產量仍為中國最多達 1400 萬公噸，美國勝過印度達 387 萬 6 千公噸，印度位居第三為 107 萬 5 千公噸；以進口量排名，前三名為德國、加拿大與美國，數量分別為 32 萬、31 萬及 17 萬公噸；出口量則以西班牙、美國及荷蘭位居前三，數量分別為 67 萬、36 萬及 12 萬公噸(FAOSTAT, <http://faostat3.fao.org>)。各國生產面積或生產量的多寡，與進出口量並無絕對關係，但美國在各方面皆位居前三，代表其在國際萵苣產業具有舉足輕重的地位。



萵苣類(*Lactuca sativa* L.)依植物學分類(洪等, 1992)及品種特性,可細分為嫩莖萵苣(Var. *angustana*)、葉萵苣(Var. *crispa*)、結球萵苣(Var. *capitata*)及蘿蔓萵苣(Var. *longifolia*)。其中葉萵苣及嫩莖萵苣是常見的東方型蔬菜,以熟食為主,植株形態也較為開散;結球萵苣葉面寬大,外葉開展,內葉捲成球狀,適合於冷涼環境種植,臺灣平地冬、春兩季氣候條件符合此需求。

臺灣秋冬兩季氣候涼爽乾燥,且陽光充足,適合許多涼季作物(cool season crops)生產,多數農民會在二期稻與一期稻間的休耕期進行冬季裏作以增加收益,大多種植甘藍、結球白菜、芥菜、花椰菜等十字花科蔬菜,此二季之整體蔬菜產量占全年的40~50%,生產過剩導致價格暴跌之問題應運而生,加上2002年台灣加入世界貿易組織(World Trade Organization, WTO),稻米受進口衝擊因而被迫休耕,農政機關面臨棘手難關,必須創新思考以不同作物配合新的產銷制度,為農民增加新利基。探討冬季適合生產的茄子與番茄等作物皆發現,目標市場與國內之需求品種不同,而結球萵苣為國際貿易大宗蔬菜,我國每年進口6千公噸左右,卻只生產數十公噸,評估後發現中部11月至隔年4月的氣候相當適合其生長,非常適合冬季裏作種植,品質優良且生產成本低,此時主要生產地區北美、澳洲及歐洲等溫帶國家因氣候不適產量降低,正好錯開產期,且可供應鄰近國家如:日本、韓國、新加坡等需求,具有產業競爭力與外銷潛力。經過完整評估後農委會遂於2002年推動「外銷結球萵苣生產及採後處理技術示範輔導」計畫,輔導庄西、新湖等合作農場及相關產銷班從品種選擇、栽培管理、病蟲害管理,到採收、預冷、包裝、貨櫃運輸等作業,建立有效的結球萵苣生產及運銷模式,期間積極辦理教育訓練,落實合理化施肥及病蟲害綜合管理技術,建立田間生產管理、病蟲害安全用藥防治標準作業程序,導入生產履歷制度,並補助設置集貨包裝場、冷藏庫、預冷設備及堆高機等設施,從採收保鮮處理、集運裝櫃及檢疫建立標準化作業模式,提升採後處理效率,此外也鼓勵業者參加日本東京綜合食品展及馬來西亞、香港與中國大陸之國際綜合食品展,增加國際曝光率,開發潛在客源,計畫推行

成果相當豐碩，外銷日本麥當勞反應良好，外銷量逐年增加，最重要的是成功調節冬季蔬菜供需，增加農民收益（何，2006；林，2008；林，2009）。


臺灣結球萵苣產業發展蓬勃，從進口替代到目前大量外銷，已成僅次於毛豆及胡蘿蔔之重要外銷蔬菜，主要栽培品種有‘3號’、‘常利6號’、‘大將’等（許等，2010；林和謝，2012）。根據統計2002年生產面積僅973公頃，2012已達2986公頃，增加3倍之多，而產量也從1萬5千公噸遽增至5萬4千公噸，其中以雲林為主要生產基地，佔全國總產量約9成（農業統計年報）。出口貿易同樣快速成長，2002年出口量僅386公噸，2008年已增加至1675公噸，之後的數年更是大幅成長，2013年已達10633公噸，其中以日本最多為9070公噸，佔總出口量的8成5，其次是新加坡、韓國及香港（農產貿易統計資料庫）。

2.2. 結球現象的發生與影響因子

結球萵苣、結球白菜、甘藍等為重要的葉菜類蔬菜，其生長模式與一般葉菜類有所不同，生長後期此類蔬菜的葉片會捲曲而成為球狀；大蒜與洋蔥等於生長後期也會因特化的鱗莖而於莖部形成球狀，兩者同樣是為了貯存養分而形成，但結球機制完全不同，根據伊東秀夫(1947)的分類，前者稱為葉球，而後者則稱為鱗莖球（加藤，1967）。

一般而言，「葉球」指的是前述蔬菜葉片特有排列方式形成的形狀，而「結球」指的是此一構造形成的過程(Ryder, 1999)。結球現象是遺傳因子所導致的特異現象，由演化的觀點看來，結球蔬菜應該是由不結球之野生種演化而來，而這些不結球蔬菜原產於溫暖的南方地帶，原為一年生作物，當被引入北方栽培，冬季嚴酷的環境，使得植物需要有保護頂芽的構造以度過如此極端的氣候，葉球因此應運而生，故葉球的形成通常需要較低的溫度，若於溫暖的環境下栽種，則不易結球（廖等，1993）。


結球蔬菜的葉片分化與發育顯著較早，以結球白菜為例，相較於非結球種類



之葉片數，同一時期結球種類可達 3 倍左右，定植初期每天約生長 0.5 枚葉片，旺盛生長期每天葉片發育達 1~2 片。結球萵苣播種後的育苗期約 30 天，期間葉片數與葉片重發育緩慢，定植後葉片數、葉片重、根重發育快速，葉片數達 20 片後植株發育會逐漸緩慢甚至停滯，此時結球現象出現，葉球開始肥大充實葉球重逐漸上升，伴隨著葉片數、葉片重與根重的下降(加藤，1974)。大園和杉山(1997)研究結球萵苣植株乾物重，結果顯示地上部的乾物重隨發育時間不斷上升，播種 50 天左右葉球開始成長，乾物率快速上升，並伴隨著外葉的乾物率下降與莖部乾物率的上升，分析不同發育期間的醣類含量發現果糖與葡萄糖含量無明顯變化(皆在 $5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 以下)，蔗糖則在結球初始期達最高($18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)，葉球發育期蔗糖含量開始下降，而聚果糖(fructan)顯著上升(最高達 $38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)，不同葉齡葉片分析醣類含量，除了聚果糖以外，老葉(第 10 與 14 片)在進入結球期後醣類含量就會下降。其他試驗也顯示葉球從外葉到內葉氮含量會逐漸降低，而碳水化合物與總可溶性醣含量會升高，證明葉球是營養貯藏器官(加藤，1967)。

結球初始與葉形的變化有密切關係，Bensink (1971)研究溫度、日長、光強對於結球特性的影響 Butterhead 萵苣植株自定植後會持續長出新葉片，在恆溫環境生長速率隨光強度提高而增加，而在恆定光強度環境生長速率則隨溫度上升而增加，長日、高光強度與低夜溫直接造成葉寬加寬，反之，短日、弱光與高夜溫導致葉長增長。葉片細胞數量隨光強度與溫度上升而增加，但細胞長度會減少，當葉片長度大於 2 cm 後，葉片的成長僅是細胞增大所導致，而非細胞分裂造成。植株發育初期，新生葉片形狀長且尖，然後開始逐漸變寬，待植株葉片發育成熟時葉寬會大於葉長，大約 10~12 片葉時，葉子會呈現杯狀並包住內葉，此時葉長/葉寬比值約 0.8，結球現象開始出現(Bensink, 1958, 1961, 1971)。而 Bassete (1975)也為低葉長/葉寬比是葉球緊密形成的必要因素，並且認為葉片向內捲主要是機械逆境造成的影響。

除葉形變化之外，尚有許多因子包括溫度、肥培管理、外葉、植物荷爾蒙等



會影響結球，結球萵苣發育適溫為 15~20°C，而結球適溫為 10~16°C，28°C 以上容易結球不良，30°C 以上更會促進抽苔(林，2005)。氮為植物生長所需的必要大量元素，會與體內有機酸化合物形成胺基酸醯胺，另一部分形成蛋白質，參與細胞分裂與生長，其可促進葉片生長，使葉面積增加，但卻不影響葉形比，若施用過多則會造成結球遲緩，酸性土壤甚至會導致不結球(加藤，1967)。此外，筍形球等不良球形的生成也是由超施氮肥所導致。外葉為葉球的養分來源，去除外葉，醣類合成受到阻礙而無法蓄積，因此葉片開始平展補充光合作用能力，使得葉球大小與重量明顯下降(廖等，1993)。此外，若將外葉以金屬線強制攤平展開，則光線照射葉球，受光的球葉會展開，若以紙取代外葉遮住葉球避免受光，則球葉不展開可形成葉球，可見葉球的形成是由於外葉避免光線直射葉球內部，利用遮光作用維持結球形態(加藤，1974)。植物生長激素，植物向光性與背光面的生長素累積有關，以生長素塗抹葉尖，葉片會展開，若改塗葉基或葉被則會彎曲生長，代表生長素運移與結球有關，因此，球葉生長素含量大於外葉，且莖頂生長點的生長素與激勃酸(gibberellic acid; GAs)的含量增加，表示其與內葉快速生長有關。分別以吲哚乙酸及激勃酸噴灑於葉球上，結果顯示吲哚乙酸促進葉球寬度增加，激勃酸則會增加葉球高度，若將兩者搭配 1% 蔗糖噴灑，可以得到相當碩大且充實的葉球(加藤，1974；廖等，1993)。

葉球發育與太陽輻射及溫度有關，太陽輻射與葉球重量成正比，溫度反應則相反，當溫度高於萵苣生長溫度時溫度越低葉球重量越重，而植株相對生長速率(relative growth rate; RGR)與結球前後的太陽輻射及結球時的溫度成正相關(Wurr and Fellows, 1991)。此外，不同品系的葉球發育特性也有所差異，‘Climax’葉數達到某程度後，可藉肥培管理得到較大的葉球，但‘New York’則葉數越多收穫的葉球越大(加藤，1963)。



2.3. 田間常見生理障害與病害

採前田間因子影響採後品質甚鉅，採收產品品質不良，除了失去貯藏價值外，更可能產生銷售壓力，因此，瞭解萵苣常見之生理障礙與病害，究其發生原因與解決辦法，對於管控採前優良品質相當重要。

● 生理障害

1. 頂燒症 (Tipburn)

頂燒症的徵狀為葉緣呈現淡黃褐色到深褐色的壞死現象，會出現在不同葉齡的葉片上，但不會危害幼嫩的心葉，好發於接近採收的時期，有此徵狀的葉球於溫暖潮濕環境下極易腐壞(Ryall and Lipton, 1979; Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999)。目前普遍認為此症狀是缺乏鈣元素所致，Kruger (1966)首先提到鈣的代謝與頂燒症的發生密切相關，Thibobedeau 和 Minotti (1969)以‘Meikoningen’ Butterhead 萵苣試驗發現鈣鹽溶液噴施可減少頂燒症發生，若施用草酸鹽溶液以降低鈣在組織中的溶解度，則可促進頂燒症發生並增加其嚴重程度，證明鈣元素的關鍵角色。增加溫度、光照強度、氮肥施用量、灌溉或其他促進生長的條件皆會促進頂燒發生，而徵狀發生區域多半是葉片邊緣組織，此部位容易缺鈣是因其生長迅速所致，鈣元素透過蒸散作用於植體內緩慢運移，未能及時補充至不斷擴大的葉緣組織，鈣對於細胞壁強度及膜系完整度的維持相當重要，缺乏時會導致萵苣的乳汁導管破裂使乳汁在其他細胞中擴散，因而導致褐化變色，隨後即出現頂燒徵狀。

除田間管理技術外，種植品種選擇也是很重要的一環，Cox 和 Mckee (1976) 試驗顯示‘Borough Wonder’、‘Cobham Green’、‘Lobjoits Green Cos’及‘Avoncrisp’頂燒徵狀嚴重，而‘Avondefiance’、‘Greak Lakes 659’、‘Little Gem’及‘Webbs Wonderful’則無徵狀出現，顯示部分品種對於頂燒症具有抗性。Davis 等(1997)也提及‘Salinas’是最具頂燒症抗性的品種，而美國農業部(USDA) 釋出之




‘Tiber’也對頂燒具有高度抗性。

2. 粉紅中肋 (Pink rib)

美國亞利桑那州生產的結球萵苣在 1950 年代發現一種生理障害，其葉片白色中肋出現淡紅色褐變情形，稱作粉紅中肋，主要發生於外層葉片中肋，葉球的內層葉片不會發生，褐變現象多半集中在葉片中肋向軸面，而背軸面亦會發生，且嚴重時會隨葉脈擴散(Marlatt and Stewart, 1956; Ramsey *et al.*, 1959; Lipton *et al.*, 1972; Davis *et al.*, 1997)。Lipton (1961)將粉紅中肋分類為三種型式：(1)擴散型(diffuse type)，通常發生於大葉球粗大中肋之寬厚基部，其中與機械傷害創傷組織相鄰或圍繞細胞間氣道(lacunae)的薄壁細胞褐變而呈現紅色；(2)乳汁型(laticiferous type)，為乳汁導管(lactifer)破裂及其細胞壁將乳汁滲出所導致；(3)木質型(xylar type)，由於部分導管細胞壁呈現淡紅色，受害導管細胞可能分散存在，也可能在正常導管中成群存在，有時會在其中出現橙黃色的阻塞物質。粉紅中肋除褐變外，並無水浸狀腐爛或組織凹陷等其他徵狀，且沒有被病原菌入侵造成腐敗，故被認定為生理障害(Ramsey *et al.*, 1959)。粉紅中肋好發於過熟葉球、葉球貯運時間過久或葉球經過高溫貯藏，故 Morris 等(1974a)認為其為老化徵狀之一，但乙烯無法加劇粉紅中肋發生，而 2% 左右低氧則會促進其徵狀，無論採前或採後的高溫也皆有促進效果，故要降低其發生應避免採收過熟葉球、貯於 2°C 以下、控制生長速率減少中肋內部細胞破裂(Ryall and Lipton, 1979)。

3. 葉球變形

環境氣候或施肥管理的影響，可能導致葉球形狀的改變，常見變形葉球有(1)筍形球(夕ヶノコ球)，結球時外葉立起來，呈現螺旋形狀似竹筍，在高溫、高氮及密植環境等惡劣環境種植柔弱苗株，結球時期遇到低溫、乾燥及高氮情況，即可能發生，因此適溫種植搭配適當的施肥使植株穩定的成長，並且增加磷肥的施用量，特別是在幼苗期，還有避免種植葉片受傷及徒長的苗株，皆可



避免筍形球的產生；(2)中肋突起(夕コ足球；ribbiness)，即原本平整服貼於葉球中肋呈現突起變形現象，故日文翻譯成「章魚腳球」，葉球內部葉片劇烈徒長，可從葉球底部看到葉球內部生長情況，葉柄通常薄且扭曲，通常是因為結球期外葉受損或結球期氮肥施用過量所導致；(3)分球，即同一植株上有 2 個或更多的葉球產生，通常是由於高溫、乾燥、氮肥或鉀肥過多，導致硼的吸收受阻，造成生長點的分化；(4)不結球，外葉尚未發育完全即進入結球狀態，結球期因此錯過，雖然沒有葉球的生成，但植株發育即將終止，高溫期種植非耐暑性、結球性差的品種容易發生；此外酸性土壤施用過量氮肥導致缺鉬也會助長其發生(大雪地區營農改善連絡協議會，2001)。


● 病害

1. 露菌病 (Downy mildew)

露菌病是萵苣的嚴重病害之一，不論溫室栽培抑或露地栽培皆可見其蹤跡，此病好發於低溫、多濕環境，任何季節皆可能發生，程度輕微會使品質降低，增加採後整修損耗，若嚴重則可能導致葉球失去商品價值。露菌病是由 *Bremia lactucae* 引起，主要由孢子靠風媒傳播，孢子適合於 10~17°C、相對溼度 100% 環境發芽，由葉片表面侵入感染後，會在葉片向軸面的外緣出現許多淡黃色病變，這些病徵大多發生在葉脈之間，故病徵多為不規則角形，大小約 0.50 cm × 0.25 cm 到 2 cm × 4 cm 不等(Davis *et al.*, 1997；Ryder, 1999)。可連續施用 Azoxystrobin 2000 倍、Copper Oxychloride +Metalaxyl-M 600，每隔 7 天一次，連續三次(植物保護手冊)。

2. 炭疽病 (Anthracnose)

炭疽病主要危害葉片，是由 *Microdochium panattoniana* (Berl.) 感染所引起，廣泛存在於世界各地，好發於氣候冷涼且潮濕的時期，初期出現水浸狀小斑點，然後病斑逐漸發展成直徑 2 mm 的灰褐色圓形，邊緣呈現褐色且中心會凹陷，後期中心會掉落，葉面呈現蛀孔狀(shothole)，發病嚴重時結球會變差且會增加



採後修整損耗，甚至會造成軟腐細菌等病原菌二次感染加速腐爛發生。Couch 和 Grogan (1955)提到炭疽病透過降雨或噴灑灌溉水傳播，通常透過氣孔侵入或透過表皮細胞入侵(Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999)。可連續施用 Pyraclostrobin 3000 倍，每隔 7 天一次，連續三次(植物保護手冊)。


3. 菌核病 (Sclerotinia drop)

最早發表於 1890，常見於冷涼潮濕萵苣栽培區域，美國各產區皆可發現其蹤跡，其病原菌 *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary 可存活數年之久，當病害發生可能影響全區 70% 以上的萵苣植株，造成相當大的經濟損失(Davis *et al.*, 1997)。其初期病徵為最外圍數層葉片萎凋，當病原菌繼續入侵後，全株包含葉球皆呈現萎凋狀態，整個植株平貼於土表，並呈現淡黃色，然後出現水浸狀軟腐，在高濕度環境下，會長出雪白菌絲，而貼近土表的葉片下表面則會長出一群黑色菌核，這些菌核可能小如芥籽、大如豌豆，大小取決於菌株的品系及形成時的氣候條件，整個發病的完整過程大約只需兩天，而菌核會存在土壤，Imolehin 等(1980)研究指出菌核發芽與菌絲生長最適合的溫度為 18°C，6~30°C 皆能正常分化發育，是相當難防治的病害(Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999)。目前國內栽培也常見此一病害危害，可連續施用二甲醯亞胺(dicarboximide)類殺菌劑來防治，推薦使用 Procymidone 2000 倍、Carbendazim + Iprodione 1000 倍、Dicloran 2000 倍等每隔 7~10 天使用一次，連續施用 3~4 次，用藥的要點為藥液必須要噴到地基部(植物保護手冊)。

2.4. 結球萵苣採收流程

1. 採收成熟度指標


採收成熟度對結球萵苣產量、風味品質、採後生理病害發生與貯藏力的影響甚鉅 (Cantwell and Kasmire, 2002)。Olfati 等(2011)指出太早採收單位面積產量下降；而延遲採收，產量既無法顯著增加，還會導致維生素 C 含量下降，



因此需建立採收成熟度描述具有最佳品質與最佳櫥架壽命的正確採收時間，這些指標必須客觀簡單、可靠且易於業界實際使用，最好為非破壞性 (Gil *et al.*, 2012)。結球萵苣大多在葉球形成且包覆緊實時採收(Ryall and Lipton, 1979)，Kader 等(1973)認為葉球緊實度(solidity)為結球萵苣重要的成熟度(maturity)指標，並依葉球剖面葉片緻密度分成 5 個等級：1 級，結球鬆軟、葉球尚未完全形成，極易受物理傷害且呼吸率較高，雖風味較甜，但消費市場無法接受；2 級，葉球仍偏軟，但球形已形成，呼吸率同樣高於合適成熟度，且食用帶有甜味；3 級，葉球緊實、剖面排列密度適當，以手按壓具有彈性者為最佳合適成熟度，貯藏力與風味最佳；4 級，葉球硬實，由葉球剖面可見中肋已經疊在一起，易發生鏽斑病(russet spotting)與粉紅中肋等生理障害，貯藏壽命較合適成熟度差，且甜味開始減少苦味變明顯；5 級，葉球極為堅硬、剖面葉片排列過於緊密為過熟葉球，採後預冷效率降低、風味偏苦，此時採收貯藏力最差(Cantwell and Kasmire, 2002)。以上為目前萵苣生產業者廣為使用的採收成熟度判斷之一，但達到合適成熟度的時間會隨種植區域的土壤及微氣候環境而不同，若無法掌握這些氣候因子做出採收時間的預測，業者將無法進行生產排程，易造成管理上的困難，故 Wurr 等(1988)於英國經過數年的研究，發現不同定植期的結球萵苣無論成熟天數、發育期間日積溫及太陽輻射能總和皆有所差異，但若利用 Scaife 等(1987)提出有效日積溫(effective day-degrees；EDD) $EDD^{-1} = DD^{-1} + a/R$ (DD 即日積溫；a 為常數當計算積溫的溫度 $>0^{\circ}\text{C}$ ，則等於 0.5；R 為總太陽輻射能)計算，則有效日積溫不隨定植期而有所差異，穩定維持在 589 EDDs，線性相關性達 0.822。

2. 採收作業流程


屆臨採收期時，農場品管人員會到田間勘查，並採集樣品進行農藥殘毒生化快速檢驗，通過檢查者會盡快於數天內進行採收，若遇下雨則延期，採收時由工人手持刀片無鋸齒的鐮刀，由基部切下葉球，留下二至三片外葉以保護葉



球，根據不同用途分別裝入塑膠籃或紙箱（田間裝箱通常為外銷加工使用），由卡車快速送回包裝場進行後續採後處理作業。由於美國規模較大，且使用裝有輸送帶的採收輔助平台於田間作業以增加作業效率，因此採收、分級、葉球套袋包裝及裝箱作業皆可簡化於田間進行(林，2004)。

結球萵苣包裝前必須進行整修(trimming)及分級，仔細檢查有無病蟲害危害，去除帶有病害、蟲咬痕跡或外觀不良的葉球，通過的合格品分為大、中、小及外銷格外品。外銷日本以供應截切加工為主，不須逐顆套袋，因此於田間進行選別、分級並直接裝箱，每箱裝有 20~24 個葉球總重需達 15 kg 以上；外銷其他國家(韓國、新加坡等)或內銷以超市通路為主，葉球必須逐粒套袋包裝，因此於田間裝進塑膠籃筐，運回包裝場進行預冷及暫貯後，才修整外葉及分級包裝，包裝箱規格則依外銷國家或不同貿易商而異。美國生產之結球萵苣約 75% 為逐粒套袋包裝，依大小分級，每箱有 24、30、38 粒三種規格；歐洲生產也以套袋包裝為主(Morris *et al.*, 1974b; Ryder, 1999)。套袋包裝起源於 1931，隨著科技日新月異，包裝袋材質由玻璃紙(cellophane)陸續演變為聚丙烯(polypropylene)、聚乙烯(polyethylene)及聚氯乙烯(polyvinylchloride)等材質(Morris *et al.*, 1974b; Brecht *et al.*, 1986)，使用套袋包裝進行運輸優點為去除外葉可減少 20% 以上重量，降低運輸成本、減少碰撞、擦傷與失水、袋上標誌具有廣告作用(Ryder, 1999)。國內產業套袋作業方式分為人工與機械兩種，人工作業即葉球修整後以具有 16 個直徑 1 mm 透氣孔、厚度 25 μm 的低密度聚乙烯(low density polyethylene; LDPE)打孔袋包裝，作業速度慢且耗費大量人工，為目前最廣為使用的方法；另有業者為增加效率，自荷蘭引進大型包裝機，葉球經人工修整後，機器會以具有許多透氣小孔且厚度 12 μm 的延伸聚丙烯薄膜(Oriented polypropylene; OPP)進行自動包裝，包裝速度提升為人工包裝的 4 倍。

預冷是為了在採後迅速移除田間熱(field heat)，迅速冷卻產品(劉，1995)。



結球萵苣雖較耐貯藏，若要維持貯運後的良好品質，仍須有很好的冷鏈(cold chain)維持，而第一步即為預冷(procooling)，真空預冷(vacuum cooling)效果最佳，利用倉室內的低壓造成萵苣內水分蒸發以達降溫目的，約 30 分鐘即可將溫度降至 5°C 以下，以目前國內 6 棧板真空預冷機之作業速度，僅 3 個半小時即可完成整個貨櫃所需數量的預冷，效率相當良好。壓差預冷(forced-air cooling)或強風室冷(room cooling)降溫效果緩慢，一櫃量的萵苣預冷作業至少需 15 小時以上才能完成，現已逐漸被真空預冷取代(林和謝，2012)。

冷鏈(cold chain)的維持對於園產品保鮮是相當重要的，故預冷後必須進行低溫貯運，結球萵苣建議貯藏條件為 0~2°C，相對溼度 95% 以上，貯藏壽命可達 28 天，若提高貯藏溫至 5 °C，則櫥架壽命減半(Morris *et al.*, 1974b; Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999; Cantwell and Kasmire, 2002; 林，2005)。貯運時應避免接觸乙烯或與會產生大量乙烯的蔬果共貯，易產生鏽斑病生理劣變。

2.5. 結球萵苣採後品質劣變

園產品自母體採收後即失去養分及水分的供應，但呼吸作用(respiration)與蒸散作用(transpiration)等生理代謝仍不斷進行，呼吸作用是維持生命現象的最基本代謝，會消耗組織蓄積養分提供能量，導致品質劣變而降低商品價值，因此呼吸作用速率被視為生理代謝速率的指標，可用來評估產品的貯藏壽命(Ryall and Lipton, 1979; Kader, 1986)。低溫貯藏對於降低結球萵苣呼吸速率有明顯效果，貯藏在 20 °C 呼吸率為 51-60 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹，若貯於 0°C，則呼吸率可降低約 5 倍僅 6-17 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ (Saltveit, 2004)。蒸散作用導致失水是影響結球萵苣採後品質的主要原因，會造成失重、萎凋、皺縮及軟化等現象，大多數蔬果失重 3~10% 外觀品質就開始敗壞(Morris *et al.*, 1974b; Kader, 1992)。

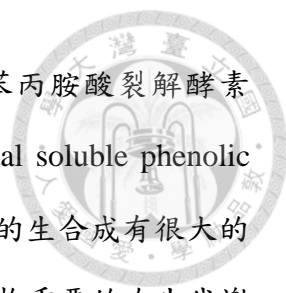
結球萵苣貯藏運輸期間除了自然老化與失水外，仍有許多影響品質的劣變因子，其中包含採後的褐變反應、貯藏環境不良所引起的生理障害及微生物滋生等，



常見的品質劣變現象如下：

1. 採後褐變現象

結球萵苣採後外觀品質劣化除了受失水影響外，另一主要原因即褐變反應所導致，採收切口採後數天即會出現褐變(butt discoloration)且貯藏期間易出現前述的粉紅中肋或衰老褐變(senescent browning)，而截切萵苣切口邊緣(cut-edge)也會快速產生褐變，以上皆為櫥架壽命的限制因子(Castaner *et al.*, 1997；Tomas-Barberan *et al.*, 1997；Hisaminato *et al.*, 2001)。園產品的褐化反應依作用機制可分為酵素型(enzymatic browning)與非酵素型褐變(non-enzymatic browning) (Friedman, 1996)，非酵素型褐變主要發生於加工過程，多半出現於加工食品，而生鮮園產品貯運過程出現的通常是酵素型褐變，其反應是由酵素催化後產生。無論是採前或採後因素皆會影響這類型褐變的發生，完整無創傷的園產品組織中，酚類化合物(phenolics)及參與其氧化的多酚氧化酵素(polyphenol oxidase, PPO)因細胞隔室化作用(compartmentalization)分處不同胞器，絕大部分酚類化合物存在液胞(vacuole)，PPO則位在質體(plastids)，是一群含銅以作為反應輔基(cofactor)的酵素(copper-containing enzyme)，其中包含酪胺酸酵素(tyrosinase)、綠原酸氧化酵素(chlorogenic acid)、兒茶酚氧化酵素(catecholase)及漆酵素(laccase)等(Toivonen and Brummell, 2008)。不管是採收、修整，抑或是截切，皆對組織產生機械傷害(mechanical injury)，且細胞壁與細胞膜因此受損，細胞隔室化因而破壞，造成創傷訊號傳導，使得酚類化合物與氧化酵素接觸產生反應，此反應必須在有氧環境下進行，首先酪胺酸酵素(tyrosinase)會將無色的單酚(monophenol)氧化成苯環上帶有兩個羥基(hydroxyl group；-OH group)無色的雙酚(diphenol)，接著兒茶酚氧化酵素(catecholase)及漆酵素(laccase)氧化鄰苯酚(*ortho*-diphenol)與對苯酚(*para*-diphenol)兩種雙酚化合物形成黃色或紅色的醌類化合物(quinones)，醌類化合物會進行自發性反應與胺基酸等物質結合，最後形成褐色聚合物沉澱(melanins)，酵素型褐變現象就此發生(Martinez and Whitaker, 1995；Saltveit, 1996)。




萵苣組織 PPO 活性並不會因為創傷而顯著變化，但其苯丙胺酸裂解酵素(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性及總可溶性酚類含量(total soluble phenolic content)隨著創傷程度增加而上升，表示褐變反應與酚類化合物的生合成有很大的關係(Ke and Saltveit, 1989; Tanaka *et al.*, 2011)。酚類化合物是植物重要的次生代謝產物(secondary metabolite)，具有保護作用可抵禦病蟲害侵擾，其生合成起源自醣類代謝路徑中的 erythrose 4-phosphate 與 phosphoenolpyruvate，兩者會合成莽草酸(shikimic acid)，再透過莽草酸路徑(shikimic acid pathway)產生酪胺酸(tyrosine)、色胺酸(tryptophane)及苯丙胺酸(phenylalanine)三種芳香族胺基酸(Taiz and Zeiger, 2006; Hopkins and Huner, 2008)。PAL 最早發現於大麥幼苗 (Koukol and Conn, 1961)，為酚類生合成的關鍵酵素，苯丙胺酸與其反應脫去氫之後形成反式肉桂酸(*trans*-cinnamic acid)，而反式肉桂酸由其他酵素反應轉換為各種酚類物質，下游酚類化合物可能轉換為抗氧化物質、木質素(lignin)或褐變反應基質(Ke and Saltveit, 1989; Loaiza-Velarde *et al.*, 1997; Tomas-Barberan *et al.*, 1997a; Hopkins and Huner, 2008)。Saltveit (2000)認為創傷訊號由受傷組織傳導擴散，受體接收後 PAL 基因表達量會上升，促進 DNA 轉錄成 mRNA 再轉譯成蛋白質，PAL 酵素重新合成，酚類化合物生成量因此上升，與 PAL 活性上升有高度相關性，且受傷組織細胞壁受到破壞，需要木質素作為修補原料，因此酚類化合物會大量生成，容易導致褐變反應發生。

分析 Romain、Crisphead、Butterhead 萵苣皆能發現綠原酸(chlorogenic acid)、異綠原酸(isochlorogenic acid)及二咖啡醯酒石酸(dicaffeoyl tataric acid)，其中以 crisphead 萵苣的酚類總含量為三者最低，創傷 72 小時後其總酚含量會上升 2.8 倍，綠原酸為增加最多的酚類化合物(Tomas-Barberan *et al.*, 1997b)。

2. 鏽斑病 (russet spotting)

鏽斑病為不良貯藏條件所引起之生理障害，其徵狀為多個 0.2~0.3 cm 褐色斑點，初期為淡黃色，後期逐漸轉為粉紅、棕色或黑褐色，但最常見的為紅褐色，



分佈於葉片上的斑點就如生鏽般而得名，嚴重時斑點會結合並形成不規則的變色斑塊。此徵狀於葉球上分佈廣泛，主要發生於葉基部缺乏葉綠素的中肋部位，嚴重時會逐漸擴散至葉脈甚至是整個葉球，通常外葉發病情況較內葉嚴重，心葉則不會受到危害。此一生理障害常發生於結球萵苣與蘿蔓萵苣，尤其‘Great Lakes’結球萵苣極易發生，其他種類的萵苣則較少出現(Rood, 1956；Ramsey *et al.*, 1959；Lipton, 1961；Lipton *et al.*, 1972；Morris *et al.*, 1974)。

美國西部加州等地盛產結球萵苣，消費市場以東部紐約等地為主，過去交通不便東西兩地的交通路程相當漫長，再加上採後的冷藏運輸技術尚未普及，貯運條件不良易導致腐爛與生理病變，Link 和 Gardner (1919)記錄一種於消費市場發現的紅褐色斑點狀採收生理障害，並命名為 Russet，此外 Rood (1956)提到紐約在 1953 年春天檢查鐵路運輸結球萵苣近 25%的鏽斑病發生率，早期園產品多半混合堆疊於車廂中進行貯運，研究顯示將蘋果產生的揮發氣體通至結球萵苣上，具有誘導鏽斑病的能力，使用吸收劑去除香氣成分等揮發氣體再通入，發現蘋果所生成之乙烯氣體可誘導鏽斑且嚴重程度相近，且若去除乙烯或通入 3% 二氧化碳，則可抑制鏽斑病發生，故推測鏽斑病的發生與乙烯有關。Morris 等(1978)與 Moline 和 Lipton (1987)使用 $0.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙烯處理結球萵苣數天可誘導鏽斑發生，證實低濃度乙烯即具誘導效果。結球萵苣自身乙烯生成量極低，Ke 和 Saltveit (1989)研究顯示結球萵苣的乙烯生成量僅 $0.1 \text{ nL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，創傷後雖會在短時間內導致乙烯生成量上升至 $0.6 \text{ nL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，但一天內會迅速降低至與對照組無異，不易累積到誘導鏽斑病所需濃度 $0.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，表示其內生乙烯量不足以誘導鏽斑病發生。


鏽斑病通常發生於表皮細胞或表層的葉肉細胞，褐變後會伴隨細胞崩解塌陷而形成凹點(pitting)狀(Lipton, 1961；Lipton *et al.*, 1972；Davis *et al.*, 1997)。乙烯處理後會造成 PAL 活性上升，PAL 是導致咖啡酸(caffeic acid)、綠原酸等單酚類化合物生成的關鍵酵素，酚類化合物與多酚氧化酵素反應導致褐變，此外 PAL 反應生成的肉桂酸經過一連串代謝會生成木質素(ligin)，在切片樣本上可以觀察到病徵部

位有木質素累積導致木質化(lignification)現象，細胞壁因此增厚，表示鏽斑病的發生與 PAL 有密切關係，此病變生成過程同時發生細胞褐變與細胞壁增厚兩種現象 (Ilker *et al.*, 1977 ; Ke and Saltveit, 1988, 1989)。

許多因子皆會影響結球萵苣對乙烯的敏感性，使得鏽斑病發生的嚴重程度有所差異，如外源乙烯、貯藏溫度、大氣條件、成熟度、採收季節等。外源乙烯，乙烯存在的環境鏽斑病發生最為嚴重，僅 $0.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 即可誘導其發生，創傷乙烯不易累積到此濃度，但仍需小心避免創傷發生以維護品質，在貯藏環境中外源乙烯的管控相當重要，應避免與番茄、蘋果、香蕉、甜瓜等會生成乙烯的更年性果實合併貯運，而且貯藏庫及貨櫃內應避免燃油器械(如柴油堆高機等)進入。 5°C 貯藏鏽斑病發生嚴重度最高，低於 2°C 或高於 8°C 則較不明顯，但高溫環境會加速產品老化，引發其他品質劣變現象，故建議於 $0\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 進行貯運。氧氣濃度 $2\sim 6\%$ 可有效抑制此生理障害發生，不過應避免低於 1% 或高於 8% ，濃度過低會造成低氧傷害、過高則失去抑制效果，此外增加二氧化碳濃度也可降低鏽斑病的發生，當濃度高於 11% 時鏽斑病抑制率可達 65% ，但濃度高過 5% 會產生其他生理障害應多加留意。結球萵苣隨成熟度增加葉球越緊實，葉球內葉緻密度越高，過熟葉球對乙烯敏感度較大，故建議以前述成熟度三級之葉球最適合採收貯運。採前數天若遭逢 30°C 以上高溫超過 2 天，極易發生鏽斑病，且連續高溫會造成乙烯敏感度增加，故應避免於高溫季節種植(Rood, 1956 ; Ramsey *et al.*, 1959 ; Lipton *et al.*, 1972 ; Morris *et al.*, 1974a ; Ryall and Lipton, 1979 ; Ke and Saltveit, 1989 ; Davis *et al.*, 1997)。

3. 褐斑病 (brown stain)

氣調(controlled atmosphere ; CA)與氣變(modified atmosphere ; MA)環境的低氧 (10% 以下)、高二氧化碳 (1% 以上) 已被確定可抑制鏽斑病、粉紅中肋、切口褐變發生(Ryall and Lipton, 1979)，但 Stewart 等(1970)證實二氧化碳濃度過高導致褐斑病，主要發生於葉綠素偏少的葉基中肋(midrib)上，通常只出現在葉球外部的數片葉片，



但也可能在葉球內部的葉片上發現，此病變具有顏色鮮明的邊緣，中心往往顏色較深且凹陷，初期出現水浸狀，然後變成黃褐色、褐色甚至是黑色，典型的病斑大小約 5 mm × 12 mm，嚴重時病斑可能合併成數英吋長，不過無論嚴重程度如何，其傷害僅限於表層，褐變並不會向內延伸(Ilker *et al.*, 1977)。此外高二氧化碳也會造成心葉傷害(heart leaf injury)，使生長點附近的叢生葉產生橘紅色邊緣(reddish orange margin)或全葉褐變。以上徵狀在鬆軟葉球上比堅實葉球更易發生，且發生程度更為嚴重，葉球於 35°F(約 1.7°C)以 1% 二氧化碳處理 1 週即可能出現傷害，但嚴重傷害通常發生於 2% 以上二氧化碳環境，可能發生在長程貯運的萵苣存放空間 (Ramsey *et al.*, 1959 ; Lipton *et al.*, 1972 ; Morris *et al.*, 1974a ; Ryder, 1999)。

褐斑病需要低溫與高二氧化碳環境誘導，若同時以 5% 以下低氧處理會加劇其發生，但病變通常不會在當下出現，而是移至大氣室溫時開始出現且日益嚴重 (Lipton *et al.*, 1972 ; Stewart *et al.*, 1972 ; Siriphanich and Kader, 1985 ; Morris *et al.*, 1974a ; Davis *et al.*, 1997)。當溫度提高至 5°C 可顯著減少褐斑病發生，高於 12.5°C 即使施用高濃度二氧化碳也不會發生病變，由於低溫二氧化碳溶解度增加，使細胞 pH 值下降導致傷害，因此低溫為此生理障害發生的必要因子，在高二氧化碳環境冷藏越久，病變更嚴重(Brecht *et al.*, 1973; Davis *et al.*, 1997)。Murr 和 Morris (1974) 證明二氧化碳是 PPO 的競爭抑制劑，PPO 活性於高二氧化碳受到抑制，因此減緩褐變反應發生，此外 Siriphanich 和 Kader (1985) 研究顯示高二氧化碳於低溫環境顯著誘導 PAL 活性上升，且酚類化合物含量與病變嚴重程度呈現正相關，但如同前述之病變發生情況，處於低溫高二氧化碳萵苣組織雖有高 PAL 活性，但卻無酚類生成，當組織移至常溫大氣下酚化物開始大量累積。改變大氣成分可延緩萵苣褐斑病產生的褐變，而適當的氧氣、二氧化碳濃度更可控制褐斑病與褐變反應發生，維持葉球良好外觀品質；除此之外，不同品種對二氧化碳的敏感度也不同，因此造成氣調或氣變貯藏的結果有所差異(Brecht *et al.*, 1973b ; Siriphanich and Kader, 1985)。



4. 腐爛 (decay)

灰黴病(gray mold)與軟腐病(soft rot)是萵苣主要採後病害，為導致腐爛發生的重要因子(Ramsey *et al.*, 1959；Ryder, 1999)，腐爛後外觀品質下降嚴重影響消費者購買意願。灰黴病由真菌 *Botrytis cinerea* Pers ex Fr. 引起，早年造成溫室栽培萵苣重大損失，雖然偶發於消費市場，一旦發生往往造成嚴重耗損(Moline and Lipton, 1987)，受感染組織呈現灰綠色或褐色水浸狀，組織逐漸變軟爛，此時可於病部發現灰色菌絲(mycelium)與孢子堆(spore masses)，腐爛葉球並無明顯異味，若軟腐病原細菌侵入灰黴病發病部位，則會造成更嚴重的腐爛，病害末期發病部位會長出黑色菌褐(sclerotia)。

細菌性軟腐病是萵苣最嚴重的市場病害，接近採收的萵苣最容易感染，主要由 *Pseudomonas marginalis* (Brown) Stevens 及 *Erwinia carotovora* (Jones) Holland 引起，*Erwinia carotovora* 為兼性厭氧菌，會製造 β -半乳糖苷酵素(β -galactosidase)導致組織軟化，此病害通常發生於受傷葉片或發生頂燒(tip-burn)、邊緣褐化(marginal browning)的葉緣上，且軟腐病菌常於鏽斑病、灰黴病、凍害等發生部位造成二次感染，感染部位首先出現無色或褐色水浸狀斑塊，隨病害嚴重度上升葉球會變軟爛，呈現潮濕的糊狀，通常不會產生惡臭，而腐爛發生後周圍的葉脈通常會變成紅褐色。

灰黴病原真菌於 20~25°C 菌絲生長最快速，且 20°C 以下生長速率會大於 25°C 以上(Ramsey *et al.*, 1959)；軟腐細菌則在 15~30°C 的潮濕環境生長最快，低於 7°C 會抑制其生長，而超過 32°C 也會減緩(Ramsey *et al.*, 1959)，但過高溫度會加速產品老化。因此，降溫為抑制腐爛的重要關鍵，田間採收後立即去除多餘外葉，且採後處理作業應小心避免擦壓傷等機械傷害，儘快預冷降溫後以 0~2.5°C 低溫貯運，可減少或延緩腐爛發生(Ramsey *et al.*, 1959；Davis *et al.*, 1997；Ryder, 1999)。



2.6. 抑制酵素型褐變之處理技術


褐變現象是造成外觀品質下降的主因之一，影響消費者購買意願，導致商品價值下降、櫥架壽命結束，因此如何降低園產品褐變反應的發生將是品質控管的關鍵(Garcia and Barrett, 2002；Zhuang *et al.*, 2011)。酵素型褐變反應必須有具活性的PPO、氧氣與酚類基質參與才能完成，因此透過基質的移除及PPO酵素活性的抑制，可避免褐變反應發生，使用化學性及物理性方法皆可達到以上目的。化學性方法係以化學藥劑參與反應，因而產生酵素活性抑制、移除反應基質或作為競爭成為反應基質等效果；而物理性方法則利用改變溫度、壓力、氣體組成等方式，達到破壞酵素活性及移除褐變反應要素氧氣等效果，因而抑制褐變發生(Garcia and Barrett, 2002)。

1. 化學性方法 (chemical methods)

(1) 酸化劑 (acidulants)

大部分蔬果的PPO反應最佳pH範圍落在弱酸性到中性，最高活性出現在pH 6.0~6.5，而pH降至4.5以下會明顯降低PPO活性，若降至3.0以下甚至會造成無法回復的PPO失活(Richardson and Hyslop, 1985；Whitaker, 1994)。但蘋果PPO對酸有相當大的耐性，pH 3.0時仍舊保有40%活性(Goodenough *et al.*, 1983；Trejo-Gonzalez *et al.*, 1991；Nicolas *et al.*, 1994)。結球萵苣綠原酸氧化酵素及兒茶酚氧化酵素的最高活性分別出現在pH 4.5與pH 7.8，兩者反應活性在pH 6~8最為穩定，pH 4.0時活性降至最大活性的60%，當pH降至3.0時PPO失去活性(Fujita *et al.*, 1991)。

酸化劑廣泛應用於降低pH以抑制酵素型褐變，檸檬酸(citric acid)與醋酸(acetic acid)為目前最常使用的酸化劑種類。不同種類的酸化劑對於褐變抑制的效果不同，以醋酸處理結球萵苣切口抑制褐變效果較檸檬酸為佳，雖醋酸pH比檸檬酸高，但其化學結構簡單且分子量小，於組織中擴散較佳，此外醋酸可



抑制PAL活性，減少chlorogenic acid的生成，因而避免褐變發生(Castaner *et al.*, 1997; Tomas-Barberan *et al.*, 1997)。酸化劑通常會搭配其他抗褐化劑一起使用，因為僅利用酸化處理來抑制褐變是相當困難的，除非pH可降到相當低且不影響消費者對商品的接受度。

(2) 還原劑 (reducing agents)

此類型抗褐化劑會產生化學性還原反應，使PPO反應產生的鄰苯醌(*ortho*-quinones)還原成無色的鄰苯酚(*ortho*-diphenols) (Iyengar and McEvily, 1992)。還原劑在反應中進行不可逆的氧化，保護作用僅是暫時的，因為還原劑會在反應中逐漸被消耗，當添加的還原劑被完全氧化，PPO反應的鄰苯醌可進行氧化反應，迅速聚合褐色物質生成。因為酵素型褐變的氧化性質，故還原劑可應用於延緩園產品的褐變。

抗壞血酸(ascorbic acid)即俗稱的維生素C (vitamin C)，是目前最廣泛使用的抗褐化劑之一，除了會略降pH外，當醌類形成時，其會立即將醌類還原成無色的雙酚，且高濃度抗壞血酸對PPO活性也有直接抑制效果，因此具有抑制褐化發生的效果(Bauernfeind, 1982; Golan-Goldhirsh *et al.*, 1992; Whitaker, 1995)，但抗壞血酸本身極易被氧化消耗而導致抑制效果不佳(Santerre *et al.*, 1988)。

含硫醇基(thiol)的化合物也是用於抑制酵素型褐變的重要還原劑，尤其是半胱氨酸(cysteine)，其硫醇基與醌類有較高的親核性(nucleophilic attack)故易與之結合，然後形成無色複合物，避免醌類進一步反應產生褐化物質(Richard-Forget *et al.*, 1992; Friedman and Bautista, 1995; Ding *et al.*, 2002; Garcia-Molina *et al.*, 2005)；另外，硫醇基與醌類形成的複合物(cysteine-quinone addition compound)為競爭型抑制物(competitive inhibition)，會抑制PPO活性(Altunkaya and Gokmen, 2008)；Cilliers和Singleton (1990)認為半胱氨酸具有將醌類還原成酚化物或其前驅物的能力。然而，要完全抑制褐變所需的用量必須



大於酚類含量，如此大的用量通常會造成產品風味改變。


另一常用的含硫還原劑為二氧化硫(sulphur dioxide ; SO₂)，二氧化硫具有漂白及防腐的性質，且為PPO抑制劑，過去廣泛使用於去皮馬鈴薯、桃及蘋果加工等食品工業上，施用1 ppm即具抑制效果，若pH 4搭配20 ppm二氧化硫則可抑制1000 unit的PPO活性，幾乎可完全抑制PPO活性，但此處理可能導致產品異味(Ponting, 1960 ; Soto, 1984)。Swarts (1983)首先應用二氧化硫以抑制荔枝果皮褐變，二氧化硫除了可抑制PPO引起的褐變反應，還會與果皮中的花青素苷結合形成anthocyanin-SO₃H複合體(complex)，其結構十分穩定，因此可維持果皮的艷紅色則得到維持，此一穩定效果可能勝過抑制PPO所帶來的效果(Underhill and Critchley, 1992)。但二氧化硫的使用對於人體健康有疑慮，尤其是其可能導致氣喘病患的過敏症(Taylor, 1993)，因此美國FDA於1986年已明令除了葡萄外，禁止新鮮水果與蔬菜產品使用。

(3) 螯合劑 (chelating agents)

PPO的活性位(active site)上具有銅離子以催化反應，若使用適當之螯合劑如EDTA (ethylenediamine tetraacetic acid)以去除活性位銅離子，即可有效抑制酵素型褐變發生。檸檬酸除可作為酸化劑外，也可作為螯合劑，其上有3個羧基(carboxyl group ; -COOH)可螯合移除PPO活性位銅離子，降低PPO活性，其他多元有機酸如：蘋果酸、琥珀酸、酒石酸等也具有螯合效果(Teixeira *et al.*, 2008)。不過以上陳述藥劑之效果可能因不同物種而異，在結球萵苣的使用上，施用檸檬酸可顯著抑制結球萵苣切口褐變，而EDTA的效果則較檸檬酸為差(Castaner *et al.*, 1997 ; Chiesa *et al.*, 2001)。

(4) 吸附劑 (complexing agents)

此類物質具有吸附PPO基質或反應產物的能力，並形成複合物(complexes)。最具代表性的即環糊精(cyclodextrins)，其結構中心具有空腔可將酚類化合物包裹住形成複合物(inclusion complexes)，因而消耗PPO的作用基質，其中以β-環



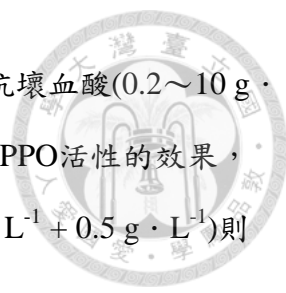
糊精(β - cyclodextrins) 具有最適合的空腔尺寸，但是其溶解度相當差，可能因此降低其於組織中的擴散性，影響實際使用的效果(Sapers and Hicks, 1989；Billaud *et al.*, 1995)。此外，環糊精的鍵結強度(binding strength)隨酚類種類而異，當不同種類的酚類混合在一起時，其與PPO基質間存在的平衡可能被改變，環糊精吸附酚化物之鍵結力下降，酚化物與PPO反應導致酵素型褐變發生(Billaud *et al.*, 1995)。

(5) PAL酵素抑制劑 (enzyme inhibitors)

PAL為酚類化合物生合成的關鍵酵素，萵苣組織的PAL活性及總可溶性酚類含量隨著創傷訊號傳導而上升(Ke and Saltveit, 1989)。酵素型褐變的發生有三大要素：具活性的PPO、氧氣與酚類基質，因此透過基質的移除及PAL酵素活性的抑制，可避免褐變反應發生(Garcia and Barrett, 2002)。前述方法大多是以抑制PPO活性為主，而抑制PAL以減少褐變反應基質生成，也是避免酵素型褐變發生的辦法之一，Peiser等(1998)將截切成塊狀的結球萵苣浸泡在20°C 50–100 μM 的2-aminoindan -2-phosphonic acid (AIP)再置於5°C觀察，無論於空氣或5 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙烯中皆可顯著抑制褐變發生，且其組織中酚類化合物含量顯著下降，表示酚類化合物含量確實與褐變反應的發生有關。Choi等(2005)使用不同碳數的醇類處理蘿蔓萵苣的中肋切片，發現以己醇(hexanol)處理後酚類含量為最低，進一步測試不同取代基位置的影響，發現1-己醇(1-hexanol)的效果最佳且PAL活性也顯著最低。使用PAL抑制劑雖可減少酚類化合物的生成，並延緩褐變反應的發生，但是組織中的酚類化合物具有抑制微生物生長之功效，酚類生成量減少容易導致微生物的滋生，因而加速產品腐敗(Barros and Saltveit, 2013)。

(6) 其他化學藥劑

氯化鈉(或其它鹵化物)對於PPO具有抑制性，pH值降低會增加其抑制效果。氯化物是一種弱抑制劑，若要達到抑制PPO的效果，則其用量可能損害產



品風味(Mayer and Harel, 1991)。Pizzocaró等(1993)單獨使用抗壞血酸($0.2 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)或氯化鈉($0.2 \sim 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)處理蘋果切片，不僅沒有達到抑制PPO活性的效果，反而增加其活性，但若將抗壞血酸與氯化鈉混合使用($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} + 0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)則可完全抑制PPO活性。

施用氯化鈣等鈣鹽可使組織結構更堅實，有利細胞膜系構造維持完整性並減少褐變的發生(Drake and Spayd, 1983；Hopfinger *et al.*, 1984；Bolin and Huxsoll, 1989)。當創傷、老化細胞隔室化破壞，不同胞器內容物於細胞質液中接觸而產生褐變反應，因此結球萵苣貯後離子滲漏率(electrolyte leakage)顯著上升，官能品評之視覺品質也隨之下降(Witkowska and Woltering, 2014)。

蜂蜜分離出的小肽(peptide)被證實具有抗褐變的功能。Oszmianski和Lee (1990)於室溫下將蘋果切片置於10%蜂蜜溶液浸泡30分鐘後，褐變抑制效果達62%，相較於浸泡同樣蔗糖濃度溶液僅可抑制23%，差異相當顯著。

4-hexylresorcinol是相當有潛力應用於園產品的抗褐化劑，且此藥劑使用安全，常用於抑制蝦子變色(melanosis)並被FDA核可為GRAS(generally regarded as safe)，且其效果優於亞硫酸鹽，McEvily等(1991)以截切蘋果及馬鈴薯進行初步試驗並向FDA申請用於蔬果產品上。此外，番木瓜蛋白酶(papain)、無花果蛋白酶(ficin)蛋白質水解酶也被認為具有清除PPO抑制褐變發生的功效，使用溶於pH 4.5檸檬酸緩衝液之2%酵素液浸泡蘋果與馬鈴薯切片，結果顯示papain使用於蘋果效果最好，而ficin則適合使用於馬鈴薯，相較於對照組(檸檬酸緩衝液)能有效抑制酵素型褐變發生(Labuza *et al.*, 1992)。McEvily等(1992)指出無花果蛋白酶不僅可分解PPO，其中含有2,4-dihydroxydihydrocinnamic acid、2-4-dihydroxydihydrocinnamoylputrescine、bis(2,4-dihydroxy-dihydrocinnamoyl) spermidine等物質，這些都是PPO抑制劑 4-substituted resorcinols的類似物。

2. 物理性方法(physical methods)




(1) 溫度

一般而言，溫度的變化會對生化反應速率產生影響，溫度每變化 10°C 反應速率的增減倍數可以 Q_{10} (temperature coefficient)表示，生理代謝反應的 Q_{10} 值通常為2~3，若低於此數值意味著此反應至少有部分是透過物理作用調控，而物理作用反應的 Q_{10} 值通常為1.3(Munns, 1999)。Sakiroglu等(2008)研究蒔蘿(*Anethum graveolens*)萃取純化之PPO酵素，分別使用兒茶酚(catechol)、多巴胺(dopamine)及綠原酸(chlorogenic acid)作為反應基質，結果顯示三者最適反應溫度及pH各有不同，其 Q_{10} 值落在1.10~1.22，相關性(R^2)皆達0.98以上。降低溫度可以降低酵素活性並減緩褐變反應速率，並可減少微生物滋生及降低呼吸作用速率，因此低溫的維持在產品生產端至消費端是相當重要的，溫度是延長櫥架壽命的重要因子(Garcia and Barrett, 2002；Zhuang *et al.*, 2011)。

熱處理大多用於加工原料的殺菁(blanching)，而新鮮園產品大多是為了檢疫需求進行高溫短時間的熱處理，而過程中造成的熱休克反應即為抑制褐變發生的原因之一。熱處理的最佳條件除了不能造成植物組織傷害外，還必須產生足夠的熱休克蛋白(heat shock protein)以取代原有的蛋白質生成，過高的溫度不只對產品造成傷害更會抑制熱休克蛋白的轉譯(Ferguson *et al.*, 1994)。近年來，熱休克反應被發現具有降低PAL活性的功能，經過處理後細胞會優先合成熱休克蛋白，PAL基因表達雖未受阻，但其轉譯作用受阻，PAL酵素生成量因此減少而降低活性，間接導致酚類化合物生成量減少，因而抑制了酵素型褐變的發生(Saltveit, 2000；Campos-Vargas *et al.*, 2005)。萵苣適用的熱處理溫度約在 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，適當的處理時間約在90秒左右(Loaiza-Velarde *et al.*, 1997；Loaiza-Velarde and Saltveit, 2001)。

(2) 高壓技術(high-pressure processing)

高壓技術(冷殺菌技術)是將食品在 $100\sim 1000\text{ MPa}$ 的壓力下進行處理，生物材料會發生不可逆反應，如同加熱一樣會使食品中的酵素、蛋白質、澱粉等




生化高分子物質分別失去活性、變性和糊化，不須加熱即可達到破壞微生物細胞膜使微生物滅亡之效用，有助維持食品之新鮮度、品質和延長保存期限，並減少維生素等營養物質的損失，並改善傳統熱殺菌處理導致風味改變(Seyderhelm *et al.*, 1996；Hendrickx *et al.*, 1998；Weemaes *et al.*, 1999)。此技術常使用水作為壓力傳導介質，故又稱為高靜水壓(High Hydrostatic Pressure，HHP)，是以帕斯卡原理，在密閉空間充滿液體，並在不使液體洩漏下，強力壓下活塞所產生的壓力。高靜水壓可在任一點均不衰減下傳至所有方向，容器內部均受同等壓力之作用，但處理之產品須有一定含水量，否則易在處理過程遭壓碎。

高壓技術除了良好的殺菌功效外，更可使褐變反應參與酵素產生不可逆的失活，維持園產品良好的外觀品質與風味(Hendrickx *et al.*, 1998)。Anese 等(1995)研究顯示高壓處理可導致園產品中 PPO 失活，但不同物種所需壓力不同，杏需求壓力較低僅 100 MPa 即可造成 PPO 失活；草莓則需 400 MPa；馬鈴薯與洋菇需要壓力更高約 800~900 MPa。Denoya 等(2015)以 500 MPa 高靜水壓處理真空包裝截切桃 5 分鐘，顯著抑制 PPO 活性且效果維持 21 天，貯藏期間色澤維持良好、質地軟化速度慢，且改善了真空包裝造成的無氧呼吸，貯藏 21 天乙醇累積量僅為原本的十分之一，是相當具有發展潛力的園產品保鮮技術。

(3) 改變大氣組成

園產品採後仍為活組織，具有基本的生理代謝，因此不能存放於完全無氧環境，然而降低氧氣能延遲酵素型褐變反應發生，因此修改大氣組成常用於包裝及貯藏蔬果產品(Garcia and Barrett, 2002)。氣調(controlled atmosphere；CA)及氣變(modified atmosphere；MA)技術通常以降低氧氣、提高二氧化碳與除去乙烯達到延長園產品貯藏壽命的目的；兩者的差異在於 CA 氣體調控較 MA 精準，貯藏過程中 CA 必須經常監測調整氣體濃度以維持固定的氣體組成，MA

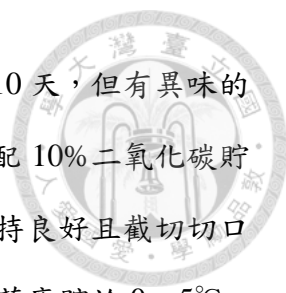


通常使用塑膠材料進行包裝，故稱為氣變包裝(modified atmosphere packaging；MAP)，藉由產品本身的呼吸作用消耗氧氣而釋出二氧化碳，再配合包裝袋塑膠膜對這兩種氣體透氣性，以減低袋內氧氣濃度及提高二氧化碳濃度，同樣具有 CA 的保鮮功能，但操作簡便且成本相對低廉，因此應用範圍較 CA 廣(Isenberg, 1981; Lipton, 1975; Smock, 1981；Al-Ati and Hotchkiss, 2002；Artés, 2006；Thompson, 2010)。MAP 技術運用於園產品可延緩後熟及老化、減輕或抑制寒害，對於某些病害、生理障礙、害蟲具有控制效果，逐漸被應用在園產品的貯運 (Yahia and Singh, 2009)，在小規模短期運銷上極具發展潛力(王，1997)。Kader (2002a)也指出利用氣變包裝於園產品上具有維持高維生素 C、含水量、硬度、降低腐爛情形、外觀表現佳及減少果實失重率等優點。

改變大氣應用於萵苣上可抑制褐變反應關鍵酵素 PPO (polyphenol oxidase) 活性抑制鏽斑病，維持萵苣優良外觀品質(Ryall and Lipton, 1979；Siriphanich and Kader, 1985)。King 等(1991)研究顯示截切萵苣使用 MAP 貯於 2.8℃ 兩週，不僅可抑制褐變發生，維持良好外觀品質，更可有效控制貯藏期間微生物的滋生，兼顧食品安全需求。由於改變大氣組處理沒有藥劑殘留困擾，無食用安全疑慮且不造成環境汙染，易為消費者接受，是目前園產品採後處理技術開發的趨勢。

2.7. 結球萵苣相關之氣調及氣變貯藏研究與應用

低溫是維持結球萵苣品質的首要條件，葉球貯於 0~2℃、相對溼度 95% 以上環境中，貯藏壽命可達 28 天，然而，CA 可以創造更多的好處，Singh 等(1972a)研究顯示當萵苣於 2℃、氧氣 2.5%、二氧化碳 2.5% 環境貯藏 39 天後，萵苣外觀品質相較於一般低溫貯藏有大幅的改善，可減少腐爛(decay)、粉紅中肋(pink rib)、切口褐變(butt discoloration)與鏽斑病(russet spotting)。Heimdal 等(1995)使用 80 μm 厚的 LDPE 膜進行切絲萵苣(shredded lettuce)包裝，充入 80% 氧氣、20% 二氧化碳或



進行真空(0.45 atm)包裝，結果可維持良好外觀品質與色澤長達 10 天，但有異味的產生。López-Gálvez 等(1996)試驗指出截切萵苣使用 3% 氧氣搭配 10% 二氧化碳貯於 5°C 環境 12 天再置於 15°C 回溫 12 小時，回溫後外觀品質保持良好且截切切口褐變(cut edge browning)顯著被抑制。Kader(2002b)指出 MAP 萵苣應貯於 0~5°C，葉球貯藏的推薦大氣條件為氧氣 1~3%、二氧化碳 0%；截切或切絲的萵苣則適合氧氣 1~5%、二氧化碳 5~20%。


改變萵苣貯藏大氣組成除了保持良好外觀品質、延長櫥架壽命，也會降低生理代謝速率，使組織內的各生化物質含量或性質產生改變。Singh 等(1972b)發現當萵苣貯於 2°C、氧氣 2.5%、二氧化碳 2.5% 的環境中 60 天，期間組織維持高總葉綠素(total chlorophyll)含量與可溶性蛋白質(soluble protein)含量，且還原糖含量顯著最高，而總糖(total sugars)與總澱粉(total starch)含量則與對照組無顯著差異。Heimdal 等(1995)結果也顯示氣變包裝後切絲萵苣的 PPO 活性可被顯著抑制，且總碳水化合物(total carbohydrates)含量也顯著維持。

不當的氣體組成條件易導致異味與其他不良影響，不管是截切萵苣或是完整萵苣葉球，經過 15% 以上二氧化碳處理於 5°C 以下低溫貯藏 1 週以上，回到常溫空氣中數小時到數天，中肋易出現褐斑病(brown stain)病徵，分析組織酚類化合物與其生合成關鍵酵素 PAL 活性，結果顯示高濃度二氧化碳處理期間 PAL 活性即顯著上升，但酚類化合物並未開始累積，待組織移至常溫空氣環境時才開始大量累積酚化物，產生褐變反應而導致生理病變，此外二氧化碳濃度過高也會促進無氧呼吸(anaerobic respiration)發生，導致乙醛、乙醇累積而產生異味(Siriphanich and Kader, 1985; Mateos *et al.*, 1993)。因此，利用改變大氣技術貯藏結球萵苣必須避免二氧化碳濃度過高，CA 可透過通入氣體來進行調節，氣變包裝則需透過包裝膜的氣體通透性來進行調控，目前常用的 LDPE、PP (polypropylene)、PVC (polyvinyl chloride) 膜氧氣通透性分別為 3900~13000、1300~6400、620~2248 cc·m⁻²·mil⁻¹·Day⁻¹ at 1 atm，二氧化碳通透性則分別為 7700~77000、7700~21000、4263~8138

$\text{cc}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mil}^{-1}\cdot\text{Day}^{-1}$ at 1 atm (Kader, 2002b), 通透性會隨相對濕度與溫度的增加而上升 (Gontard, 1996; Velde *et al.*, 2002)。

生鮮截切 (fresh-cut) 即園產品經過物理方式改變其原始型態且保持新鮮狀態，於田間採收後經過篩選、清洗、切片(絲)、清洗及消毒等處理，又稱為輕度加工 (minimally processed)，此類產品多半主打「方便性」與「營養性」，即時可食 (ready to eat) 的特性符合時下職業婦女的備餐需求，美國截切製造協會 (International Fresh-Cut Produce Association; IFPA) 指出美國地區 2000 年生鮮截切產品市場約占 100-120 億美元，美國調查 1990~1998 年生鮮產品消費量其中生菜沙拉約佔 53.1%，且消費者習慣性食用這些產品的比例高達 75.3%，消費金額比起 1987 年增加 105%，表示生鮮截切產品市場成長相當快 (王, 2005)。萵苣也是重要生鮮截切原料之一，截切創傷導致細胞隔室化破壞，使褐變反應基質酚類化合物與多酚氧化酵素接觸反應，加速褐變反應發生，且創傷組織細胞液流出易產生微生物污染，產品保存期限因而縮短，雖可利用許多化學藥劑控制酵素型褐變及腐爛的發生，但卻不符合消費者對於食品安全的期待，此時改變氣體組成以達保鮮與抑制腐爛的 MAP 技術具有相當好的應用潛力 (Brecht, 1995; Garcia and Barrett, 2002; Toivonen and Brummell, 2008; Tanaka, 2011)。Ballantyne 等 (1988) 以 35 μm 厚的低密度聚乙烯 (low density polyethylene; LDPE) 膜進行截切萵苣包裝，充入 5% 氧氣、5% 二氧化碳與 90% 氮氣，其平衡濃度為 1~3% 氧氣、5~6% 二氧化碳，貯於 5°C 有 14 天櫥架壽命，幾乎是對照組的兩倍。

新鮮結球萵苣葉球貯於 0~2°C、相對溼度 95% 以上環境中，貯藏壽命可達 28 天，且除了甘藍、結球白菜及西洋芹以外，包含結球萵苣在內的其餘葉菜類蔬菜皆不建議貯藏一個月以上 (Morris *et al.*, 1974b; Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999; Cantwell and Kasmire, 2002; 林, 2005)。生鮮截切雖具有食用方便性，廣受歐美消費者喜愛，但東亞市場消費者仍傾向購買完整葉球，根據野菜情報別冊統計資料 (2013) 指出日本結球萵苣主要為超市完整葉球銷售占消費量 88%，故我國銷往日、



韓等國拍賣市場與超市進行銷售之萵苣葉球皆需逐顆套袋包裝，業者自採收備貨到貯運銷售需要數週時間，到貨時莖部採收切口通常已出現明顯褐變，若貯運期間遭逢碰撞等造成之機械傷害將引發葉球外觀快速褐變，以上外觀品質限制因子由於成本考量無法於櫥架陳列前重新進行修整，若能利用包裝內氣體組成的改變來抑制褐變反應的發生，將降低以上現象所造成的損耗，提升結球萵苣櫥架品質。

第三章 結球萵苣採收成熟度指標建立



前言

結球萵苣 (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*; Crisphead lettuce) 為原生於地中海沿岸菊科 (Asteraceae) 萵苣屬 (*Lactuca*) 一、二年生蔬菜，主要產地為歐洲和美洲，而華南地區及臺灣亦有種植，具有適合生食、耐貯運等優點，是國際貿易大宗蔬菜之一 (林，2005；徐等，2005；Ryder, 1999; Saltviet, 2004)。

臺灣冬季生產結球萵苣以外銷日本為主，深具發展潛力，但是種植農民多為十字花科結球葉菜轉作，甘藍採收成熟度為葉球硬實且葉球重量在 2 kg 以上，每公頃產量高於 40 公噸，產業發展初期農民誤將此一成熟度標準套用於結球萵苣上，加上以高產為前提，使得採收成熟度均過高，加上缺乏病蟲害綜合管理 (Integrated Pest Management; IPM) 技術及安全用藥防治觀念，導致產品符合外銷規格合格率僅 45~60%，粉紅中肋、鏽斑病等生理障害發生率與加工損耗率也因此增加，買賣雙方經常產生爭執，經過相關單位輔導並導入履歷制度，目前合格率已明顯改善 (林，2009；林和謝，2012)。

採收成熟度對結球萵苣產量、風味品質、採後生理病害發生與貯藏力的影響甚鉅 (Cantwell and Kasmire, 2002)。結球萵苣大多在葉球形成且包覆緊實時採收 (Ryall and Lipton, 1979)，Kader 等 (1973) 等認為葉球緊實度 (solidity) 為結球萵苣重要的成熟度 (maturity) 指標，並依葉球剖面葉片緻密度分成 5 個等級，其中 3 級葉球緊實、剖面排列密度適當，以手按壓具有彈性為最適成熟度，此時貯藏力與風味最佳 (Cantwell and Kasmire, 2002)。此外，褐變反應為結球萵苣採後重要品質劣變因子 (Castaner et al., 1997; Tomas-Barberan et al., 1997; Hisaminato et al., 2001)，主要由創傷訊號造成苯丙胺酸裂解酵素 (PAL) 活性上升，導致酚類褐變基質生成 (Saltveit, 2002)，且創傷破壞細胞隔室化，使酚類基質與多酚氧化酵素 (PPO) 反應

產生褐變現象(Toivonen and Brummell, 2008)，不同成熟度亦會對酵素活性與基質含量造成影響，Chutichudet 等(2011)指出 PPO 於結球萵苣葉球發育期間維持低活性，過熟葉球 PPO 活性會劇烈上升，具有高度褐化潛力。

雖然國外對於結球萵苣採收成熟度已有一些文獻發表(Kader *et al.*, 1973；Ryall and Lipton, 1979；Cantwell and Kasmire, 2002；Gil *et al.*, 2012)，然而，上述判斷方式皆未數值量化、判斷方式仰賴經驗，且目前國產結球萵苣外銷採收成熟度與貯運條件資料尚為闕如，亟需進行試驗建立相關指標，以供業者參考。故本試驗於國產結球萵苣主要產區雲林縣進行栽培，選用國產結球萵苣重要栽培品種‘3號’、‘常利6號’、‘大將’，比較品種間發育期形質差異、不同採收成熟度品質變化，並測量呼吸率變化與不同成熟度褐變反應基質含量與酵素活性，以評估其貯運性，建立該產品採收成熟度客觀指標，作為外銷收穫適期與品質判斷之參考。

材料與方法

一. 試驗材料

試驗以購自農友公司的‘大將’與合歡農產的‘3號’及‘常利6號’三品種結球萵苣做為材料，委託雲林縣二崙鄉鍾姓農民進行育苗及種植管理，試驗在2012與2013年度各進行1次重複，於2012年11月19日及2013年11月3日播種，育苗生長達四片本葉進行定植，苗株於2012年12月14日與2013年11月30日分別定植在崙背鄉與二崙鄉，苗齡分別為25及27天，農地面積約0.7公頃，種植方向為南北向，畦寬1公尺，株距45公分，每一品種定植一畦(大約400棵)，每畦逢機選取15棵標定用以發育調查，試驗期間之栽培管理依農民慣行農法進行。

二. 調查項目與調查方法

(一)結球萵苣生長曲線變化

植株於定植後每週調查各品種15株標定植株發育情形，試驗共計15重複。計算莖頂端已開展且長度大於1.5 cm的葉片至莖基部的葉片數；進入結球期後(定植後6週)則計算未包覆葉球之開展外葉總數，稱之為外葉葉片數。植株於2013年1月26日及2014年1月11日進入結球期(球徑達3公分以上)開始調查葉球生長曲線，每週以游標卡尺(Digimatic caliper, Model CD-6"CS, Mitytoyo)連續測量葉球縱徑與橫徑變化，縱徑為葉球頂端至葉球基部的長度，橫徑為葉球最寬部位兩個測量點長度之平均值；縱橫比亦稱為「球形指數」，是縱徑除以橫徑之商數。

(二)結球萵苣葉球發育期間生理與品質之變化

植株進入結球期，各品種每週隨機採收 13 顆葉球進行調查，採後置於 4°C 冷藏庫去除田間熱，以 5°C 宅配冷藏貨運送至臺灣大學園藝暨景觀學系園產品處理實驗室，取 5 顆測定呼吸率與乾物率，另取 5 顆分析葉球鮮重、葉球硬度及總可溶性固形物含量，試驗共計 5 重複。最後 3 顆葉球用於褐變反應基質含量與酵素活性測定，共計 3 重複。

1. 葉球鮮重

利用BL1500 電子天平 (Sartorius, Germany)測量葉球重量，讀值取至小數點第一位，以g表示。

2. 呼吸速率與葉球內氣體組成

葉球發育呼吸率於 20°C 採用流通式系統 (flowing system)測定，意即將單顆葉球秤重後密封於 5.7 L 壓克力呼吸缸，高壓空氣通過加濕水瓶及含有乙烯吸收劑(吸附 2.8% 高錳酸鉀與 1% 氫氧化鈉之珍珠石)淨氣瓶，以流量板控制流速為 5.7 L · hr⁻¹，系統完成 3 次換氣(即流通 3 小時)後達到動態平衡進行第一次採配備熱傳導度檢測器 (thermal conductivity detector, TCD) 的 GC-8AIT 氣相層析儀 (Shimadzu, Japan)測定 CO₂濃度，分離管柱不鏽鋼材質外徑 1/8" × 內徑 1/16" × 長度 6 呎，填充 Porapak Q (80~100 mesh)，分析時層析管柱 (COL) 溫度設定為 40°C，注射口與偵測器 (INJ/ DET)溫度為 80°C，並使用氫氣作為載流氣體(carrier

gas)，壓力設定為 $2 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，並以 1% CO_2 作為標準品。

其呼吸速率計算依據下列公式，單位以 $\text{mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 表示。

$$\frac{(\text{樣本 CO}_2 \text{ 波峰面積} - \text{空氣 CO}_2 \text{ 波峰面積})}{\text{CO}_2 \text{ 標準品波峰面積}} \times \text{標準品濃度}(\%) \times 10 \times \frac{\text{流速}(\text{L} \cdot \text{hr}^{-1})}{\text{葉球鮮重}(\text{kg})} \times \text{轉換值}$$

※ 20°C 之轉換值為 1.83

2013 年度試驗為了解葉球內外氣體交換是否隨成熟度改變，故於進入結球期後(定植 6 週)標定 3 株‘3 號’植株，每隔 7 天固定於早上 10 點使用長度 3.8 cm 針頭插入葉球中心取 10 mL 氣體樣品，並取田間 3 點抽取 10 mL 空氣作為比較，取樣後於 1 個小時內以配備熱傳導度檢測器氣相層析儀分析 O_2 與 CO_2 濃度， O_2 分離管柱為不鏽鋼材質外徑 1/8”×內徑 1/16”×長度 6 呎，填充物 Molecular sieve 5A (80~100 mesh)，分析時層析管柱 (COL) 溫度設定為 40°C ，注射口與偵測器 (INJ/DET) 溫度為 80°C ，並使用氫氣作為載流氣體 (carrier gas)，壓力設定為 $2 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。每次分析注入 1 mL 氣體樣品； CO_2 濃度測定方式同上所述。分析結果以 Q Chrom 數據處理軟體 (訊華公司，臺灣) 運算，並以 1% O_2 及 1% CO_2 作為標準品。

3. 乾物率

取 40 g 葉球組織樣品置於信封袋中，參考 Scuderi 等 (2011) 以 70°C 熱風烘箱烘乾 48 小時，取出置於乾燥皿冷卻後，以電子天平測得乾重。

$$\text{乾物率}(\%) = \text{乾重} \div \text{鮮重} \times 100\%$$

4. 葉球硬度

以質地測定儀 (TA.XT plus texture analyzer) (Texture Technologies Corp, U.K.)，配備直徑 25 mm 圓底探頭，將葉球置於質地測定儀載物台上，模擬以手按壓葉球對葉球進行非破壞性葉球硬度檢測。探頭下壓速度為 $5 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ，每一葉球選取赤道 4 點與頂端 1 點，當感測力值達 0.098 N 以上開始下壓葉球 10 mm，同一點按壓兩次，過程中記錄力值變化並取兩次下壓的最大力值平均，再將測得 5 筆數據平均以代表該葉球硬度 (N)。

5. 總可溶性固形物含量

縱切 1/8 葉球組織 (包含內葉與外葉)，使用 National MJ-C85N blender 果菜汁機

(Matsushita, Japan) 榨取後以濾網過濾，收集菜汁原液後，以數位折光計 (Atago PR-1, Japan) 測定總可溶性固形物含量，單位以 $^{\circ}$ Brix表示。

(三) 結球萵苣葉球發育期間褐變反應基質含量與酵素活性測定

2012年度試驗植株於2013年1月26日進入結球期，各品種每週隨機採收3顆葉球，每顆葉球分成外圍三分之一生理年齡較老的綠色外葉組織，以及球內三分之一靠近心葉的黃綠色幼嫩內葉組織，苯丙胺酸裂解酵素與多酚氧化酵素活性測定分別於外葉及內葉各取2 g切碎混合組織作為樣品；酚類化合物含量測定則各取10 g混合組織作為樣品，取樣後立即裝入4號塑膠夾鏈袋並以液態氮急凍固定，貯存於 -80°C 凍箱直至分析測定，最後將內、外葉組織測得結果平均為1重複，每處理測定3重複。

1. 苯丙胺酸裂解酵素(phenylalanine amino lyase. PAL)活性測定

PAL酵素萃取方法參考Ke和Saltveit (1986);取凍存於 -80°C 凍箱的萵苣組織2 g，倒入裝有boric acid (Sigma, U.S.A.)與borax (Sigma, U.S.A.) 0.2 M硼酸緩衝液 (pH 8.8;內含5 mM 2-mercaptoethanol及2.5% Polyvinylpolypyrrolidone) 10 mL於50 mL塑膠離心管中，在 0°C 冷房中使用POLYTRON PT 10-35均質機 (Kinematica, Swiss)以最高轉速均質30秒，均質液使用雙層茶包袋過濾後以Avanti® J-E高速冷凍離心機 (BECKMAN COULTERTM, U.S.A.)於 4°C 進行 $15000\times g$ 離心20分鐘，取上層澄清液為酵素萃取液。酵素活性測定取15 mL試管加入1 mL 60 mM L-phenylalanine溶液、1 mL酵素萃取液及4 mL去離子水，混合均勻後置於 40°C 熱循環水浴槽 (國洲儀器, ROC)反應1小時，然後加入0.1 mL濃鹽酸 (林純製藥, Japan)終止反應。取反應液置入3 mL石英比色管中，以U-2600分光光度計 (Shimadzu, Japan)測定290 nm吸光值，代入由0、50、100、200、300、400、500 nmol \cdot 6 mL $^{-1}$ t-cinnammic acid (Sigma, U.S.A.)製作之標準曲線求出含量，酵素活性以 $\mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ 表示。

2. 酚類物質含量測定

酚類物質萃取方法參考Campos-Vargas和Saltveit (2002)。取凍存於-80°C 凍箱的萵苣組織10 g，倒入裝有20 mL methanol (J.T. Baker, U.S.A.)之50 mL塑膠離心管，使用POLYTRON PT 10-35均質機以最高轉速均質30秒，均質液使用雙層茶包袋過濾後以Avanti® J-E高速離心機於20°C進行15000×g離心20分鐘，取上層澄清液為酚類萃取液，將萃取液置入3 mL石英比色管中，以U-2600分光光度計測定320 nm吸光值，代入由0、5、10、20、40、60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chlorogenic acid (Sigma, U.S.A.) 製作之標準曲線求出酚類物質含量，以 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示。

3. 多酚氧化酵素 (polyphenol oxidase, PPO) 活性與蛋白質含量測定

PPO酵素萃取參考Degl'Innocenti等(2005)試驗使用之溶劑配方及溶劑與萵苣組織的比例。取凍存於-80°C 凍箱的萵苣組織2 g，倒入裝有Sodium dihydrogen phosphate (Sigma, U.S.A.)與Disodium hydrogen phosphate (Sigma, U.S.A.)配製而成之50 mM磷酸緩衝液 (pH 6.5；內含5% polyvinylpolypyrrolidone)於50 mL塑膠離心管中，在0°C冷房中使用POLYTRON PT 10-35均質機以最高轉速均質30秒，均質液使用雙層茶包袋過濾後以Avanti® J-E高速冷凍離心機於4°C進行15000×g離心20分鐘，取上層澄清液為酵素萃取液。活性測定參考 Augustin等 (1985)，於3 mL石英比色管中加入1.9 mL 50 mM磷酸緩衝液 (pH 6.5)，再加入0.2 mL以上述磷酸緩衝液作為溶劑的0.5 M兒茶酚 (catechol) (Sigma-Aldrich公司，USA) 溶液，最後加入0.1 mL酵素萃取液，上下震盪混合3次後，立即以U-2600型分光光度計測定反應初期0~60秒之420 nm吸光值變化。吸光值每分鐘增加0.001為1個酵素單位 (enzyme activity unit, EAU)，酵素活性以 $\text{EAU}\cdot\text{mg}^{-1}$ protein表示。

酵素萃取液總蛋白質含量參考Bradford (1976) 分析方法。Bradford試劑製備秤取100 mg Coomassie Brilliant Blue G 250 (Sigma, USA)，溶於50 mL 95%乙醇，再添加100 mL 85%磷酸 (J.T. Baker, USA.)混合均勻，最後以去離子水定量至1 L，以Whatman No.1濾紙抽氣過濾，並裝入不透光容器備用。以小牛血清蛋白 (bovine serum albumin, BSA) (BIO-RAD, USA) 作為蛋白質標準品，配製1

$\mu\text{g}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 之母液，分別吸取0、10、20、40、60、80及100 μL BSA母液於15 mL玻璃試管中，再加入50 mM磷酸緩衝液（pH 6.5）定量至100 μL ，最後各試管加入5 mL Bradford試劑，均勻混合後靜置反應5分鐘，以分光光度計測定595 nm吸光值，並使用Bradford試劑作為空白背景參考溶液，將BSA濃度對595 nm吸光值作圖，求出標準曲線方程式。酵素萃取液之蛋白質濃度測定，則是取100 μL 酵素萃取液加入5 mL Bradford試劑後反應5分鐘，測定步驟相同，測定結果代入上述標準曲線方程式，計算總蛋白質濃度。

三. 數據統計與圖表繪製

本試驗之數據資料使用SAS軟體（Statistic Analysis System software）進行ANOVA統計分析，並以Least significant difference（L.S.D.）（ $p \leq 0.05$ ）分析顯著性差異。圖表繪製則使用Sigma Plot[®]軟體（systat software Inc., USA）進行繪製。

結果

一、 結球萬苣發育形態變化

三供試品種結球萬苣定植後植株大小與外葉葉片數即快速持續上升（圖 3-1）。「常利 6 號」葉片發育最快、「3 號」次之、「大將」葉片發育則最慢，定植 7 週時外葉葉片數達最高分別為 14、13 及 12 片，隨後外葉葉片數下降，至定植 9 週時「常利 6 號」與「3 號」降至 12 片，而「大將」則降至 10 片左右，2012、2013 年度試驗結果趨勢類似，僅 2013 年度「大將」葉片數不斷上升，定植 8 週時達最高 13 片，定植 9 週仍未下降（圖 3-2）。

兩年度試驗「常利 6 號」與「3 號」皆在定植 6 週外葉葉片數增加趨緩時形成葉球，「大將」則略慢一週。2012 年度試驗「常利 6 號」與「3 號」於進入結球期後縱徑快速上升，定植 6 週時分別為 45 mm 與 58 mm，定植 8 週達最高約 120 mm，「3 號」定

植 9 週時無顯著變化約 110 mm；‘大將’定植 7 週為 76 mm，定植 9 週時達最高 110 mm(圖 3-3A)。「常利 6 號」與「3 號」結球後橫徑也快速發展，定植 6 週時分別為 44 mm 與 59 mm，快速上升至定植 7 週分別為 116 mm 與 128 mm，接著上升趨緩，至定植 9 週達最高分別為 148 mm 與 157 mm；‘大將’葉球發育期間橫徑顯著小於其他品種，定植 7 週為 74 mm，定植 9 週達最高為 114 mm(圖 3-3C)。2013 年度試驗，縱橫徑皆於結球後持續快速上升。三品種縱徑成長無顯著差異，皆由 45 mm 生長至 115mm 左右(圖 3-3B)。橫徑成長快速，結球初期橫徑 45 mm 左右，‘3 號’橫徑成長最為顯著，至定植 9 週橫徑為 161 mm。「常利 6 號」則次之，定植 9 週橫徑為 145 mm。「大將」橫徑顯著最小，採收時橫徑僅 129 mm，三者橫徑生長趨勢相同(圖 3-3D)。

葉球縱橫比定植 6 週時約為 1，快速下降至定植 7 週後開始趨緩。2012 年度試驗定植 9 週時‘3 號’縱橫比最低 0.75、「常利 6 號」縱橫比次之為 0.85、「大將」縱橫比最高為 0.96(圖 3-3E)。2013 年度試驗縱橫比持續下降，各品種發育末期之縱橫比與先前試驗結果接近(圖 3-3F)。

二、 結球萵苣葉球發育期間生理與品質變化

1. 葉球鮮重變化

‘3 號」、「常利 6 號」及‘大將’三個品種結球萵苣葉球呈現單 S 曲線發育形式(圖 3-4)，葉球發育初期(定植 6~7 週)為遲滯期(lag phase)；葉球發育中期(定植 7~8 週)為對數生長期(logarithmic phase)；葉球發育末期(定植 8 週後)葉球重量成長趨緩逐漸進入平穩期(stationary phase)。定植 6 週葉球鮮重約 30 g，‘3 號’定植 8 週快速上升達 609 g，接著緩慢上升，至定植 9 週為 729 g，定植 10 週最重達 867 g，顯著高於其他品種。「常利 6 號」定植 8 週快速上升至 582 g，發育過程變化與‘3 號’無異，定植 9 週達 681g，定植 10 週最重達 800 g。「大將」葉球發育為三者間最緩慢，定植 8 週僅 343 g，定植 9 週達 439g，定植 10 週最重僅達 619 g，顯著低於其他品種(圖 3-4A)。2013 年度試驗結果趨勢與先前試驗大致相同，僅定植

8 週之後重量仍持續快速上升，且發育期間葉球重量略低於 2012 年試驗結果，定植 9 週時‘3 號’及‘常利 6 號’葉球鮮重約 600 g，兩者間無顯著差異；‘大將’發育情況依然最差，期間葉球鮮重顯著最低，定植 9 週僅 409 g (圖 3-4B)。由葉球鮮重變化可見，‘3 號’發育情形最佳，‘大將’發育情形最差。

2. 葉球呼吸率與球內氣體組成變化

結球萵苣葉球發育期間葉球呼吸率變化隨著生長而逐漸降低，自葉球發育初期定植 6 週逐漸降低，至定植 9 週時達最低，然後趨於穩定。‘大將’定植 6 週呼吸率 $96 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，快速下降至 $50 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，變化趨緩，至定植 9 週達 $40 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，定植 10 週幾乎維持不變。‘常利 6 號’定植 6 週呼吸率為 $86 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，快速下降至 $47 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，至定植 9 週達 $38 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，定植 10 週也幾乎維持不變。‘3 號’定植 6 週呼吸率為 $85 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，快速下降至定植 9 週達最低為 $33 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，定植 10 週小幅上升至 $38 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，葉球發育期間‘3 號’呼吸率顯著低於其他品種 (圖 3-5A)。2013 年度結果同前年度趨勢，呼吸率隨葉球發育而降低，發育初期呼吸率較高在 $100 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 以上，隨葉球成長硬實而降低至定植 8 週為 $50 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 左右，變化開始趨緩，定植 9 週時‘大將’呼吸率顯著最高為 $31 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，‘常利 6 號’與‘3 號’呼吸率則無顯著差異為 $25 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (圖 3-5B)。

2013 年度試驗測定‘3 號’葉球內部氣體組成變化，氧氣濃度隨成熟度上升而逐漸下降，由定植 6 週時 21.4% 降至定植 9 週時為 19.0%，空氣則穩定維持 21~22%；二氧化碳則隨成熟度而逐漸上升，定植 6 週為 0.2%，至定植 9 週已達 0.86%，空氣則穩定維持 0.03~0.04%，二氧化碳明顯於葉球內累積 (附錄三)。以上結果顯示，葉球內外氣體交換隨成熟度上升而逐漸變差。



3. 葉球硬度變化

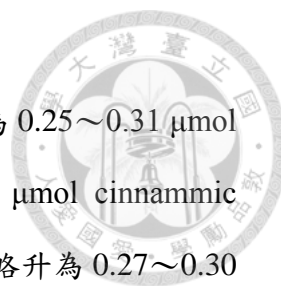
結球萵苣葉球隨發育而逐漸堅實，葉球硬度也隨之上升(圖 3-6)。三供試品種定植 6 週時葉球硬度僅 2 N 左右，葉球發育初期硬度成長緩慢至定植 8 週達 9 N，但‘3 號’明顯較低只有 6 N，接著快速上升至定植 9 週達 22 N，定植 10 週更高達 45 N，葉球發育期間硬度變化趨勢相同 (圖 3-6A)。2013 年度試驗結果趨勢與 2012 年度試驗結果相似，惟葉球硬度提早於定植 7 週即開始劇烈上升，至定植 9 週已達 23~32 N，明顯高於 2012 年度試驗 (圖 3-6B)。

4. 乾重率與總可溶性固形物含量變化

如同其呼吸率變化趨勢一般，乾重率也會隨著葉球發育而逐漸下降。定植 6 週時乾重率約 7% 左右，僅‘3 號’顯著較高為 7.7%，葉球發育期間乾重率不斷下降至定植 8 週達最低值 3.2%，定植 9 週轉折回升至 4.7%，定植 10 週又降至與定植 8 週時無異，葉球發育期間乾重率變化趨勢相同不隨品種而異 (圖 3-7A)。2013 年度試驗結果定植 6~7 週無明顯變化，定植 7 週後乾重率由 6.9% 開始快速下降，至定植 9 週降至最低為 3.8% (圖 3-7B)。

總可溶性固形物含量變化於結球萵苣葉球發育期間與乾重率的變化趨勢相似，皆隨發育時間而下降。定植 6 週時總可溶性固形物含量約 5.3% 左右，葉球發育初期快速下降至定植 8 週達最低約 3.2%、‘常利 6 號’則顯著最低為 2.7%，定植 9 週約 3.6%，定植 10 週最高達 4% (圖 3-8A)。2013 年度試驗可見定植 7 週時總可溶性固形物含量最高為 6.5%、‘大將’顯著較低為 5.4%，快速下降至定植 9 週達最低為 3.8%、‘常利 6 號’顯著較高為 4% (圖 3-8B)。兩年度試驗結果顯示三參試品種之乾重率與總可溶性固形物含量變化趨勢一致，雖 2012 與 2013 年度試驗結果有些微差異，但整體而言，乾重率與總可溶性固形物含量會隨葉球發育而逐漸下降。

三、 結球萵苣葉球發育期間褐變反應基質含量與酵素活性測定



1. 苯丙胺酸裂解酵素活性測定

葉球發育期間苯丙胺酸裂解酵素活性先降後升，定植 7 週為 $0.25\sim 0.31 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，定植 8 週降至最低為 $0.13\sim 0.19 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，定植 9 週回升至與定植 6 週無異，定植 10 週活性略升為 $0.27\sim 0.30 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，三參試品種變化趨勢相同，品種間苯丙胺酸裂解酵素活性無顯著差異（圖 3-9A）。

2. 酚類物質含量測定

葉球發育期間酚類物質含量消長與苯丙胺酸裂解酵素活性變化趨勢相符，皆呈先降後升。定植 7 週時酚類含量最高為 $1.7\sim 3.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，定植 8 週降至最低為 $0.07\sim 0.14 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，定植 9 週無明顯上升，僅‘大將’顯著上升至 $0.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，定植 10 週快速攀升至 $1.0\sim 3.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，三參試品種變化趨勢相同，品種間酚類物質含量無顯著差異（圖 3-9B）。

3. 多酚氧化酵素活性測定

多酚氧化酵素活性變化隨結球萵苣葉球發育而逐漸上升，葉球發育期間以定植 7 週活性最低為 $7105\sim 7244 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，發育期間活性不斷上升定植 9 週活性達 $11775\sim 14710 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，定植 10 週活性仍在上升，‘大將’為參試品種中最高為 $15845 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，‘3 號’活性則略降至與‘常利 6 號’接近為 $13927\sim 14043 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ （圖 3-9C）。

討論

一、 外葉發育進入遲滯期，結球現象出現葉球開始發育

本試驗結球萵苣苗株定植後葉片數不斷上升，‘常利 6 號’及‘3 號’植株定植 6

週前平均每週增長 1.3 片葉，當葉片成長到 12~14 片時發育開始趨緩，圖 3-1 顯示定植 6 週進入結球期，葉球開始成長，期間外葉葉片不再明顯增大且發育趨緩，後期下位葉受上位葉遮蔽且接觸土壤部分開始腐壞故外葉葉片數呈現下降趨勢，2012 與 2013 兩年度重複試驗結果相似。加藤(1974)研究指出結球萵苣播種後的育苗期約 30 天，期間葉片數與葉片重發育緩慢，定植後葉片數、葉片鮮重與根重皆發育快速，葉片數達 20 片左右植株發育會逐漸趨緩甚至停滯，此時出現頂端葉片包覆莖頂的結球現象，葉球形成後開始肥大充實且葉球重會逐漸上升，伴隨著葉片數、葉片重與根重的下降。

此外，不同溫度(10~30°C)與光照強度(10~90 $\text{ergs}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)環境對 Butterhead 型萵苣植株發育速度與型態有顯著影響，植株定植後不斷長出新葉，若於恆溫環境培養，生長速率與光照強度成正比，而以恆定光強度培養，生長速率則與溫度成正比。除了影響生長速率外，環境因子也會影響細胞數或細胞大小，導致葉形改變，當長日照、高光照強度、低夜溫會使得細胞數量上升因而增加葉寬，反之，短日照、弱光照強度、高夜溫則促進葉長(Bensink, 1958; 1971)。而葉形改變為影響結球的因子之一，結球萵苣苗株定植於室外，植株發育初期，葉片形狀長且尖，接著開始持續增寬，當植株進入成熟期，葉寬會大於葉長，外帽葉(cap leaf)呈現杯狀並包住內葉，將成熟植株逐葉剝下測量，大約第 10~14 節位葉片長寬比降為 0.8 左右，結球現象自此出現，且不僅在萵苣如此，結球白菜結球現象亦然(加藤，1964; 1974; Wurr and Fellows, 1991; Jenni and Bourgeois, 2008)。而 Bassete (1975)也提到低葉長/葉寬比是葉球緊密形成的必要因素，並認為結球創始的葉片內捲現象是由於外在的逆境所導致。本試驗於 2013 年度取用定植 6 週外觀剛出現結球現象的‘3 號’植株進行測量(圖 3-10、3-11)，結果顯示第一節位葉片長寬比為 1.2，葉片形狀偏圓，至第九節位長寬比降至 0.8 即不再變化，維持至第 15 節位葉片明顯呈現杯狀包覆心葉，於是結球現象開始，與前述研究有相似的結果。

Bensink (1971)試驗顯示光照強度及溫度與葉片發育速度成正比。而 Jenni 和 Bourgeois (2008)指出葉球發育期間心葉會不斷生成，填滿外帽葉(cap leaf)包覆的空間，球形因而逐漸增大且葉球會越來越緊實。因此，加藤 (1974) 於萵苣生活週期的形態變化圖中提及，葉球發育期若遇低溫形成的葉球較小，若於發育適溫生長則葉球較大。觀察本研究兩年度試驗結果發現葉球發育期間縱橫徑變化趨勢並不相同，2012 年度於定植 8 週縱徑成長至 120 mm 左右即穩定不再成長，橫徑則成長至定植 7 週達 120 mm 左右即不再大幅上升，定植 9 週葉球橫徑約 150 mm；2013 年度葉球發育期間縱橫徑則是不斷上升，且相同發育時間球徑都小於 2012 年度種植者，定植 9 週縱徑僅 114 mm 左右、橫徑則與先前試驗結果無異，經查閱試驗年度中央氣象局公佈之臺南區農業改良場雲林分場氣象觀測站旬月平均氣象資料(附錄一)，2013 年度試驗葉球發育期間適逢低溫期溫度約 15°C，相較前一年度 19°C 降低 4°C，推測可能因此減緩生長速率，因而影響葉球大小。

發育試驗於定植 9 週採收，各品種葉球縱橫比差異顯著，且兩年度試驗趨勢相同，皆為‘大將’比值最高將近 1.0，球形較為尖或圓；‘常利 6 號’次之，比值在 0.8 上下，球形不若‘大將’圓但仍偏尖，且有許多葉球莖部並非位於葉球中心；‘3 號’為三者中最低，比值約 0.7，球形較為扁圓平整且莖部大多位於葉球中心，圓整球形有利於裝箱作業且箱內堆疊空間利用較佳(圖 3-12)。

二、 葉球發育期間乾物率與總可溶性固形物含量逐漸下降

結球萵苣生長模式異於非結球葉菜類，植株發育初期是外葉生長，後期則由內葉發育形成葉球，因此內外葉性質有所不同，根據 Hara 和 Sonoda (1981)利用 $^{14}\text{CO}_2$ 追蹤證明外葉為光合作用主要器官，供應碳水化合物，內葉則負責貯存外葉供應的碳源，故結球葉菜類生長模式與果菜類作物類似(廖等，1993)。廖和吳 (1997) 研究甘藍結球過程葉片發育及醣類含量變化，進入結球期外葉葉數、鮮重、乾物率皆不再有明顯變化，僅醣含量逐漸減少，表示結球階段外葉生長停頓，與本試驗前述結果趨勢相符(圖 3-2、3-4、3-7)；內葉葉數、鮮重、醣含量皆

隨結球時間而增加，因此認為外葉光合作用合成的醣類僅留一部份供自身代謝所需，其餘大部分轉運至葉球供內葉生長及發育，內葉之醣含量隨結球而上升。結球萵苣生長期間乾重與碳水化合物含量變化如同前述趨勢，當結球開始時，第 18 節位之前的外圍葉片乾重下降，而 24 節位以上之葉球內葉乾重則持續上升，同時伴隨莖部乾重上升，表示外葉是供源(source)，碳源經由莖部運送至內葉貯藏，葉球發育期莖部主要運送的碳水化合物為蔗糖(sucrose)與聚果糖(fructan)，而同一時期葉球內葉主要貯存的碳水化合物則以果糖(fructose)與葡萄糖(glucose)為主(大園和杉山，1997)。

前述試驗結果皆顯示葉球為貯藏碳源部位，結球後葉球乾重與醣類含量隨發育時間上升，本試驗於結球後測定不同發育時間之葉球乾物率及總可溶性固形物含量，兩年度試驗結果變化雖有些許差異(圖 3-7、3-8)，但整體而言無論乾物率或總可溶性固形物含量皆隨發育時間而逐漸下降。Bensink (1971)指出當萵苣葉片長度大於 2 cm 時，葉片擴展僅由細胞增大所致，而非細胞分裂造成。植物細胞水分含量超過 80%，細胞體積的增加主要來自含水量的增加，因此細胞的成長必須依賴水分的吸收，葉球發育期水分吸收速度快，使得細胞溶質被稀釋，乾物率與總可溶性固形物含量因而隨之下降(廖和吳，1997; Hopkins and Huner, 2008)。此外，兩年度試驗結果之差異(圖 3-7、3-8)，經查閱氣象資料後發現兩年度試驗期間降雨量多寡與降雨時間分佈有所不同(附錄一)，2012 年度 11 月至 12 月定植初期雨量較 2013 年度豐沛，但 1 月進入結球期後雨量減少，葉球逐漸成形，1 月下旬至 2 月上旬農民減少供水，準備進行採收；然而，2013 年度 1 月完全無降雨，此時適逢葉球膨大期，農民每週進行溝灌供水，2 月採收前後有 30 mm 左右降雨。推測差異可能為降雨影響農民灌溉頻率所致，因此，2012 年度試驗總可溶性固形物含量與乾物率於定植 8 週後有回升現象，2013 年度試驗則呈現持續下降趨勢。

三、 酚類化合物含量於成熟適期降至最低，PPO 活性則隨成熟度持續升高

結球萵苣採後外觀品質劣化除了受失水影響外，褐變反應亦為貯運壽命的限制因子之一(Castaner *et al.*, 1997; Tomas-Barberan *et al.*, 1997a; Hisaminato, 2001)。植物組織的褐變現象通常是由酵素型褐變反應所引起(Toivonen and Brummell, 2008)，無論是採前或採後因素皆會影響酵素型褐變的發生，其反應是由酵素催化後產生，完整無創傷的園產品組織，酚類化合物(phenolics)及參與其氧化的多酚氧化酵素(polyphenol oxidase, PPO)因細胞隔室化作用(compartmentalization)而分處不同胞器中，絕大部分的酚類化合物存在液胞，PPO 則位於質粒體(plastids)(Toivonen and Brummell, 2008)。本試驗針對不同成熟度葉球組織測定酚類化合物生合成關鍵酵素苯丙胺酸裂解酵素(PAL)活性、褐變基質酚類化合物含量、褐變關鍵酵素多酚氧化酵素活性變化，結果顯示 PAL 活性不受成熟度變化影響(圖 3-9A)，僅定植 7 週有顯著下降；對照酚類化合物含量變化趨勢與 PAL 活性消長並不一致，而是隨成熟度上升逐漸下降，定植 9 週達最低含量，至定植 10 週葉球過熟才顯著上升(圖 3-9B)；PPO 活性則是隨著成熟度上升而持續上升，試驗期間三參試品種無顯著差異(圖 3-9C)，就褐變反應觀點而言，定植 9 週的確是合適的採收成熟度，因為酚類化合物基質含量低，可避免褐化劣變。此結果與 Chutichudet 等(2011)研究‘Grand Rapids’結球萵苣不同發育階段內部組織性質變化結果趨勢相同，且作者提到 PPO 於葉球發育期間維持低活性，但過熟時活性會劇烈上升，此一結果意味著萵苣採前即具有褐化的潛力，結球萵苣粉紅中肋(pink rib)即為採前褐化的例子之一，Morris 等(1974a)認為其為葉球過熟組織細胞老化所造成，根據前述試驗結果顯示過熟葉球具有最高的 PPO 活性且酚類基質含量相對較高，推測粉紅中肋是因此引起，可見採前因子對於採後品質有極大的影響。成熟度低的幼嫩組織 PPO 活性顯著低於過熟的老化組織，是因為前者維持相當良好的膜系構造強度，當植物組織進入老化階段細胞隔室化作用破壞，PPO 與酚化物洩漏到細胞質液(cytosol)中，導致褐化關鍵酵素與基質接觸，增加

植體外觀褐化的敏感度(Jiang *et al.*, 2004 ; Benjawan *et al.*, 2008 ; Segovia-Bravo *et al.*, 2009)。

此外，不同組織的 PPO 酵素活性各有不同，Chutichudet 等(2011)與 Mai 和 Glomb (2013)試驗皆顯示葉片具有最高的 PPO 活性；且葉球外葉酚類化合物含量顯著高於內葉所含，推測與粉紅中肋主要發生於外層葉片有關(Mai and Glomb, 2013)。

四、 結球萵苣建議採收成熟度為硬度 18~24 N、重量 500~700 g 之葉球

採收成熟度(maturity)對結球萵苣產量、風味品質、採後生理病害發生與貯藏力的影響甚鉅，葉球成熟度不足易受物理傷害且呼吸率較高，而葉球過熟則容易發生鏽斑病(russet spotting)與粉紅中肋(pink rib)等生理障害，貯藏力差且有苦味生成(Cantwell and Kasmire,2002 ; Gil *et al.*, 2012)。現今的採收成熟度判斷依據為使用手指按壓葉球彈性與葉球剖面之內葉緻密度(Kader *et al.*, 1973 ; Cantwell and Kasmire,2002 ; Gil *et al.*, 2012)。結球萵苣大多在葉球形成且包覆緊實時採收，因此葉球緊實度(solidity)為結球萵苣重要的成熟度指標(Ryall and Lipton, 1979)。Gil 等(2012)認為結球萵苣採收成熟度指標需呈現具有最佳品質與最佳貯運壽命的正確採收時間，而這些指標必須客觀、簡單、可靠且易為業界實際使用，最好為非破壞性的，由於目前結球萵苣採收成熟指標無法完全量化評估，判斷需仰賴經驗，因此本研究利用質地分析儀(texture analyzer)將葉球緊實度(即葉球硬度)量化，使用圓形平底探頭模擬手指按壓，發展非破壞性完全量化指標，且將質地分析儀測得數據與手持式硬度計測得數據進行迴歸分析， r^2 達 0.9361(附錄二)，表示此指標可利用便於攜帶之手持式硬度計於田間進行測定，並對照葉球剖面緻密度與其他品質、生理參數，歸納出國內種植結球萵苣最適採收成熟指標。

本研究兩年度使用之試驗田皆為農民實際配合外銷種植園區，選取其中 3 畦作為試驗使用，其餘皆種植‘3 號’植株供外銷之用。定植 8~9 週葉球不再明顯

增大(圖 3-3)，但內葉仍不斷成長以充實葉球，1 週間重量變化極大相差可達數百公克，期間‘3 號’與‘常利 6 號’重量平均落在 600 g 上下(圖 3-4)，以農家要覽(林，2005)刊載之每公頃約 80,000 苗計算，估計單位面積產量每公頃約 40 公噸，相較於聯合國糧食與農業組織(FAO)統計資料(FAOSTAT；<http://faostat3.fao.org/>)中主要生產國之單位面積產量已達水準以上，此階段葉球之內葉緻密度符合 3~4 級(Cantwell and Kasmire,2002; Gil *et al.*, 2012)的優良成熟度(圖 3-13)，葉球呼吸率、乾物率、總可溶性固形物等生理與品質皆呈現變化趨緩甚至停滯現象(圖 3-5、3-7、3-8)，因此推測葉球已經達到園藝成熟度。‘大將’結球較其它參試品種晚了將近一週，至定植 9 週葉球平均重量僅 400 g 左右(圖 3-4)，葉球粒徑也顯著較小(圖 3-3)，但定植 9 週之葉球剖面緻密度與‘3 號’及‘常利 6 號’無異(圖 3-13)，其他品質參數也無明顯差異，以上結果顯示種植‘大將’結球萵苣產量偏低、葉球粒徑偏小，推測是此一品種栽培面積逐漸萎縮的主因。

目前農政單位輔導產銷班之採收標準為葉球頂端按壓具有彈性且球重 600~800 g (林，2009)，兩年度試驗期間農民皆判斷定植 9 週左右為採收適期，2012 年度延後採收至定植 10 週，葉球球重較 9 週者上升 100~200 g (圖 3-4)，產量雖顯著增加，但葉球硬度卻從 20 N 左右快速飆升至將近 50 N (圖 3-6)，球內葉片包覆緊密已達過熟(圖 3-13)，即 5 級(Cantwell and Kasmire,2002; Gil *et al.*, 2012)，截切廠由於加工不易而視為格外品，且葉球成熟期於田間發現菌核病(由 *Sclerotinia sclerotiorum* 引起)發生，此病極易擴大感染卻因接近採收期而無法藥劑防治以免毒性殘留，因此不建議採收過熟葉球。更有農民指出過熟堅實葉球外觀健康但心葉易發生褐變現象，與 Lipton 等(1972)報導高二氧化碳傷害徵狀相似，故 2013 年度試驗使用長度 38 mm 針頭對不同成熟度葉球內氣體取樣調查，顯示葉球內部氣體通透性隨成熟度上升而變差，二氧化碳隨成熟度上升而從 0.15% 不斷上升至 0.86%(附錄三)，因此推測過熟結球萵苣心葉褐變症狀是由於葉球氣體通透性差加上早期採後預冷不確實所導致，現今真空預冷技術普及後此一問題幾

乎已經解決。綜合以上所述，冬季 11~12 月定植之結球萵苣大約種植 8~9 週(55~60 天)可達採收成熟適期，葉球硬度 18~24 N、重量 500~700 g，產量達到經濟標準，且葉球呼吸率顯著較低(圖 3-5)，生理代謝趨緩有利貯運，此一採收標準與目前農政單位之輔導標準相符。三參試品種中以‘3 號’為首選，球徑與球重顯著高於其它品種，於採收適期呼吸率最低有利貯運，且其球形較為圓整利於裝箱。

各種植區域土壤及微氣候環境有所差異，達到合適成熟度的時間也會受到影響，因此生產者管理與生產排程必須掌握這些環境因子並預測採收時間。Wurr 等(1988) 計算有效日積溫(effective day-degrees; EDD)，以 $EDD^{-1} = DD^{-1} + a/R$ (DD 即日積溫；a 為常數當計算積溫的溫度 $> 0^{\circ}\text{C}$ ，則等於 0.5；R 為總太陽輻射能) (Scaife *et al.*, 1987)，其不隨定植期而有所差異，有效日積溫穩定維持在 589 EDDs，若利用此一參數預估採收時間，與實際採收時間差異在 5 天之內。而本研究整理試驗期間氣象資料後參照其方式進行計算，兩年度試驗之有效日積溫皆為 549 EDDs (表 3-1)，與 Wurr 等(1988)研究結果相似，而數值上的差異可能是不同地域氣候條件改變所造成，未來試驗可再深入針對我國氣候條件進行修正，預測結果將更為準確。

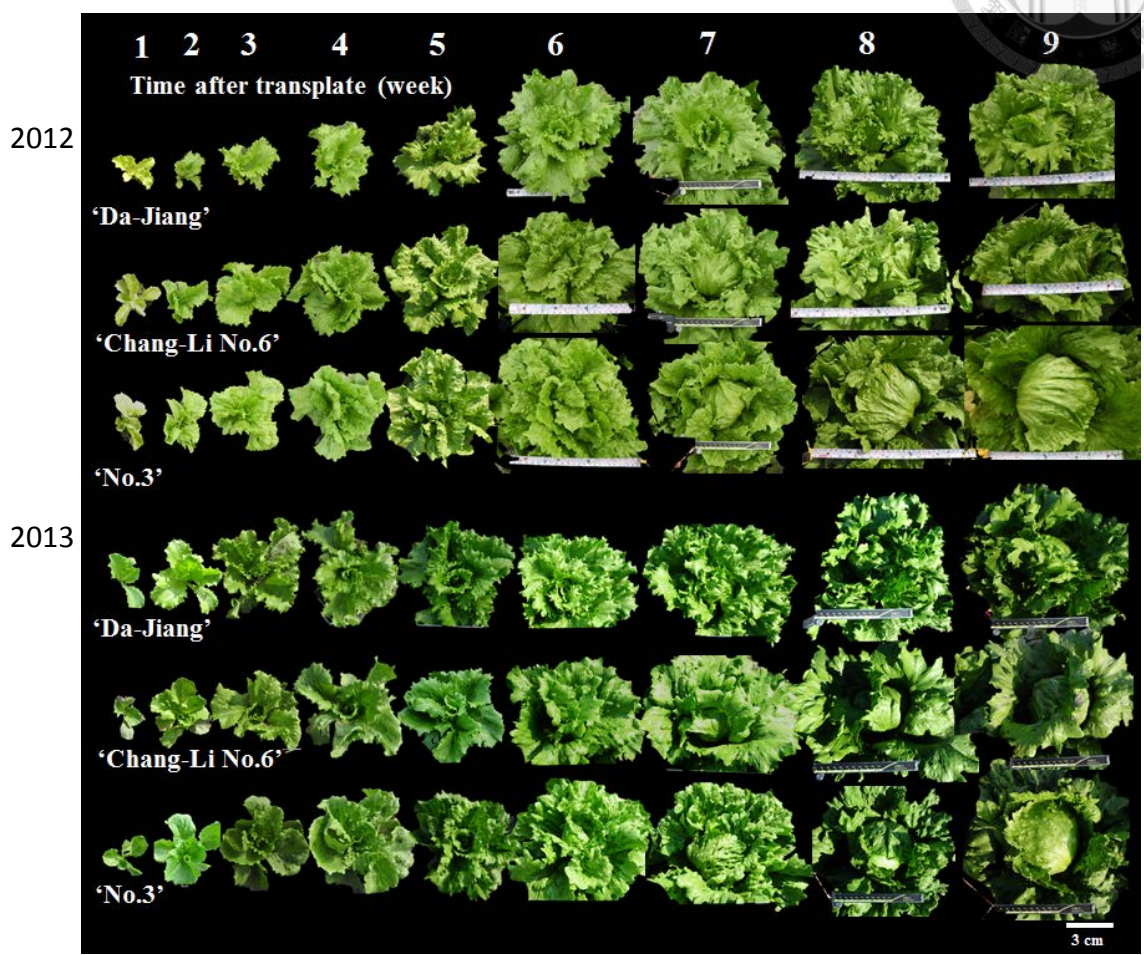


圖 3-1、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (前 3 列)、2013 (後 3 列) 年度試驗發育期間植株形態變化
Fig. 3-1. Change in ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce plants morphology during development in 2012 (upper 3 rows) and 2013 (lower 3 rows).

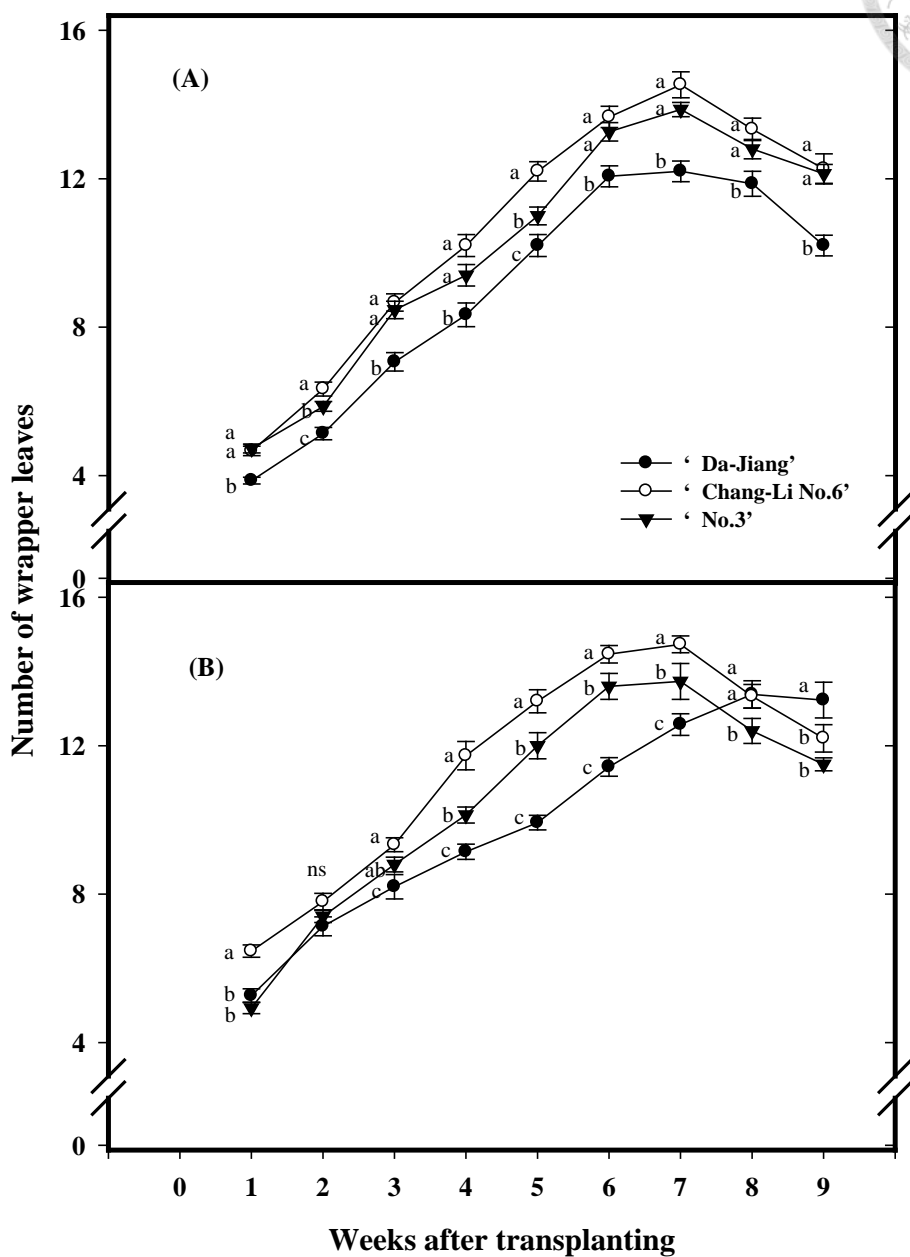


圖 3-2、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B)年度試驗發育期間外葉葉片數之變化

Fig. 3-2. Change in number of wrapper leaves of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ during development in 2012 (A) and 2013 (B).

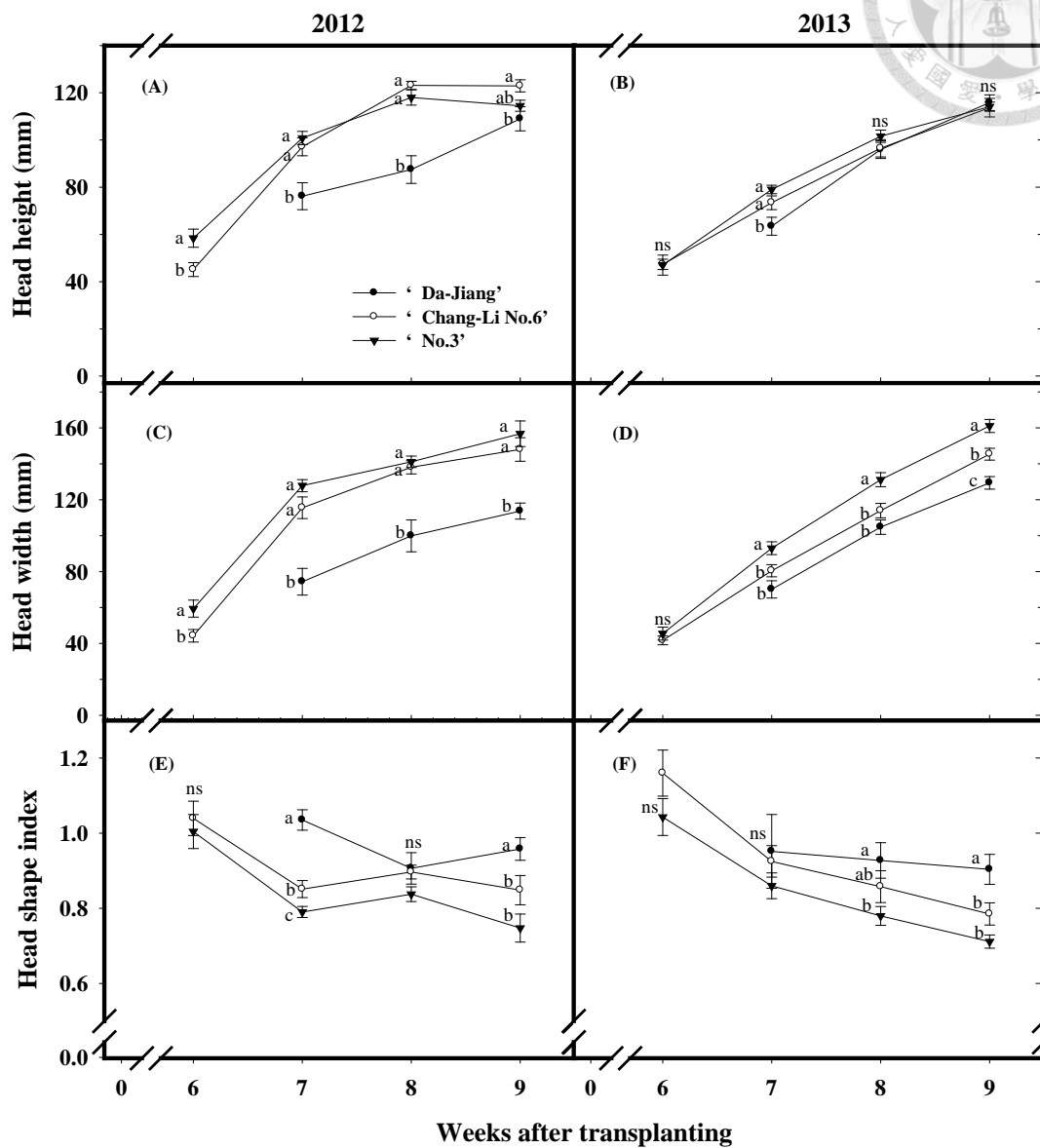


圖 3-3、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A、C、E)、2013 (B、D、F) 年度試驗發育期間葉球縱徑 (A、B)、橫徑 (C、D)、縱橫比 (E、F) 之變化

Fig. 3-3. Changes in head height (A、B), head width (C、D) and head shape index (E、F) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce during development in 2012 (A、C、E) and 2013 (B、D、F).

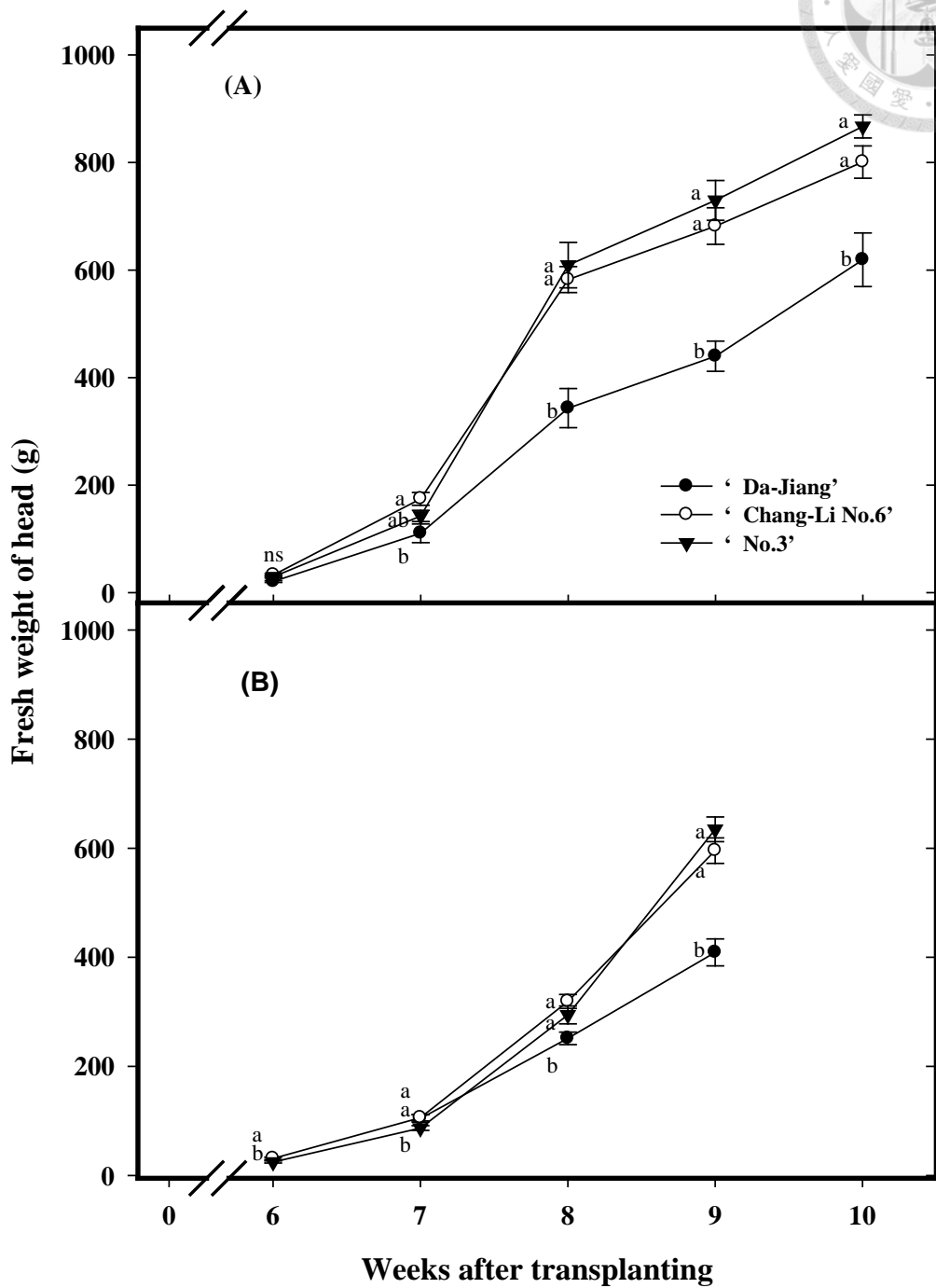


圖 3-4、'大將'、'常利 6 號'、'3 號' 結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球鮮重變化

Fig. 3-4. Change in fresh weight of 'Da-Jiang', 'Chang-Li No.6' and 'No.3' lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).

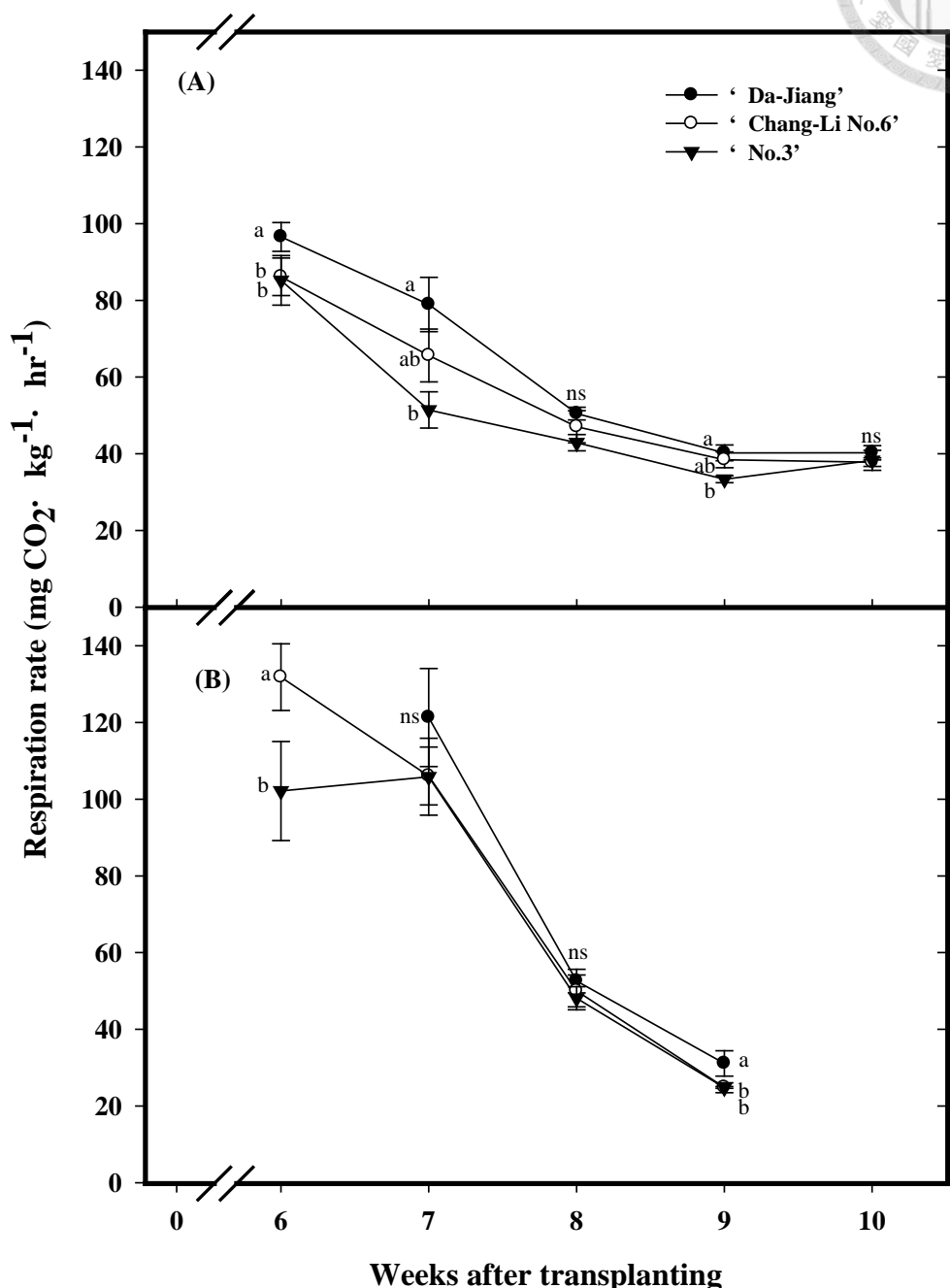


圖 3-5、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B)年度試驗發育期間切離葉球於 20°C 測得呼吸率變化
Fig. 3-5. Change in respiration rate of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).

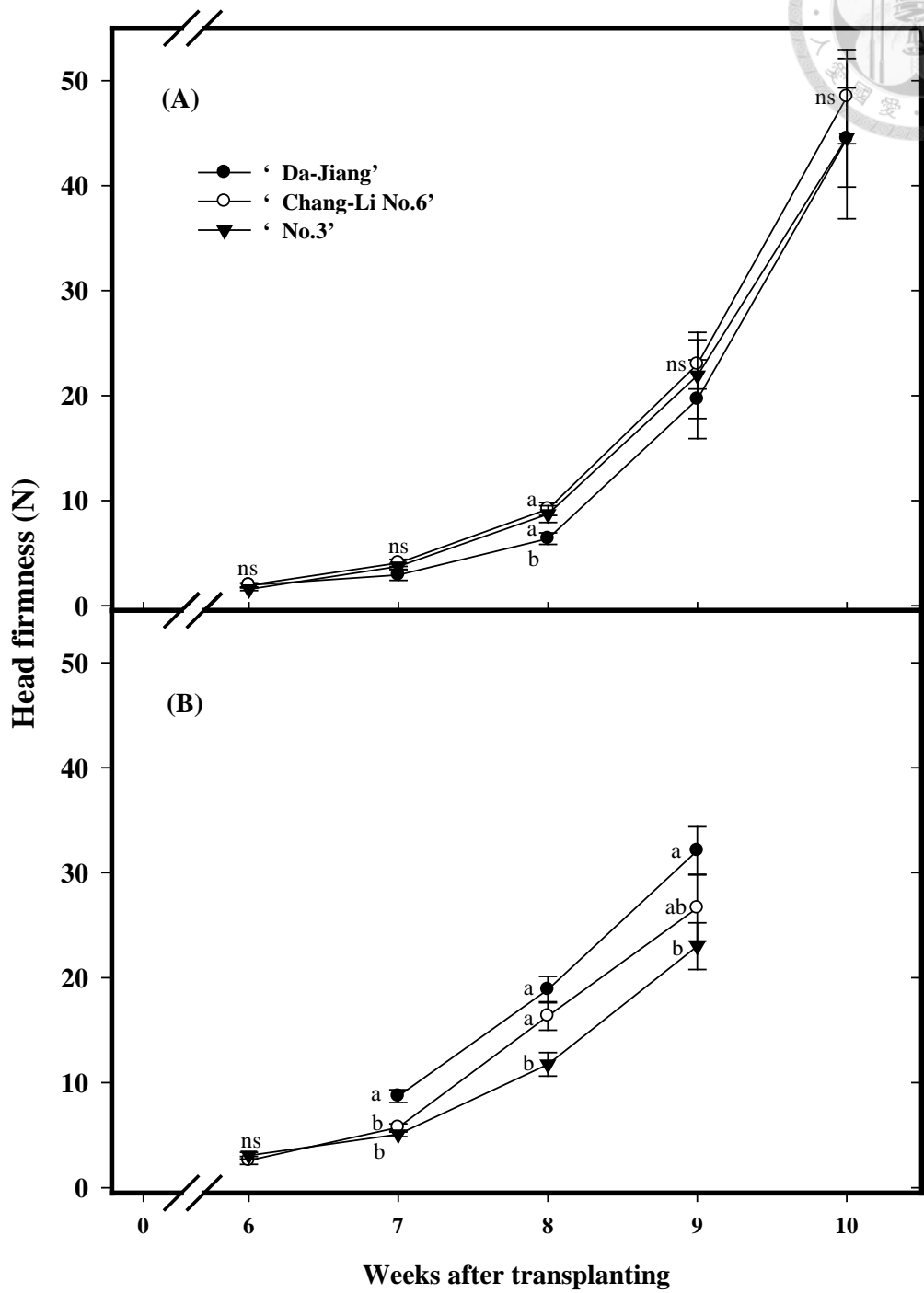
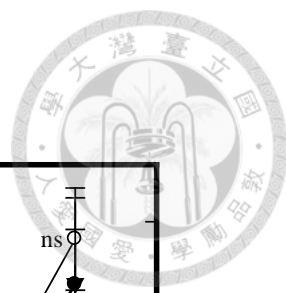


圖 3-6、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B)年度試驗發育期間葉球硬度之變化

Fig. 3-6. Change in firmness of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).

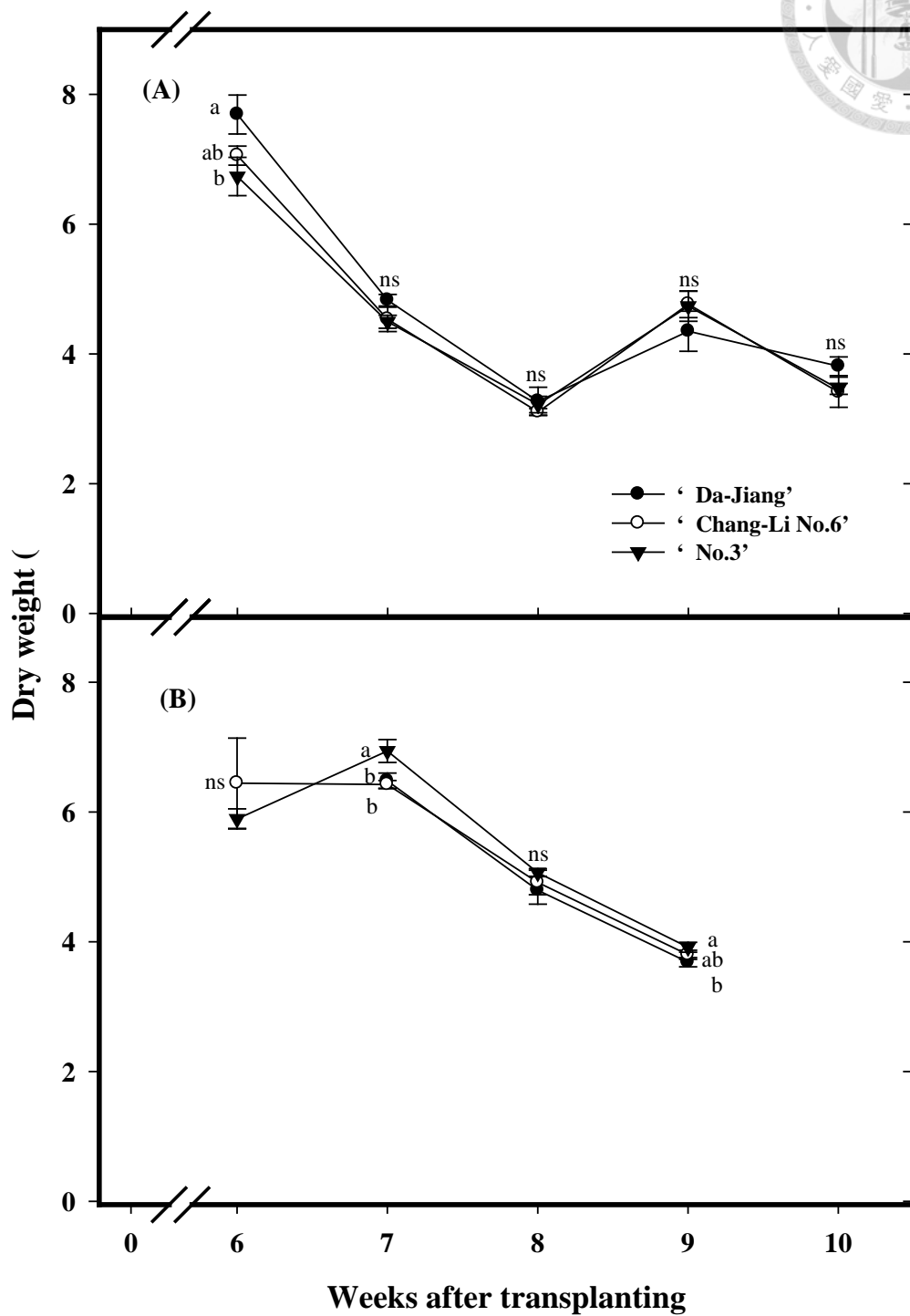


圖 3-7、'大將'、'常利 6 號'、'3 號' 結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗發育期間葉球葉片組織乾物率之變化

Fig. 3-7. Change in dry weight of 'Da-Jiang', 'Chang-Li No.6' and 'No.3' lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).

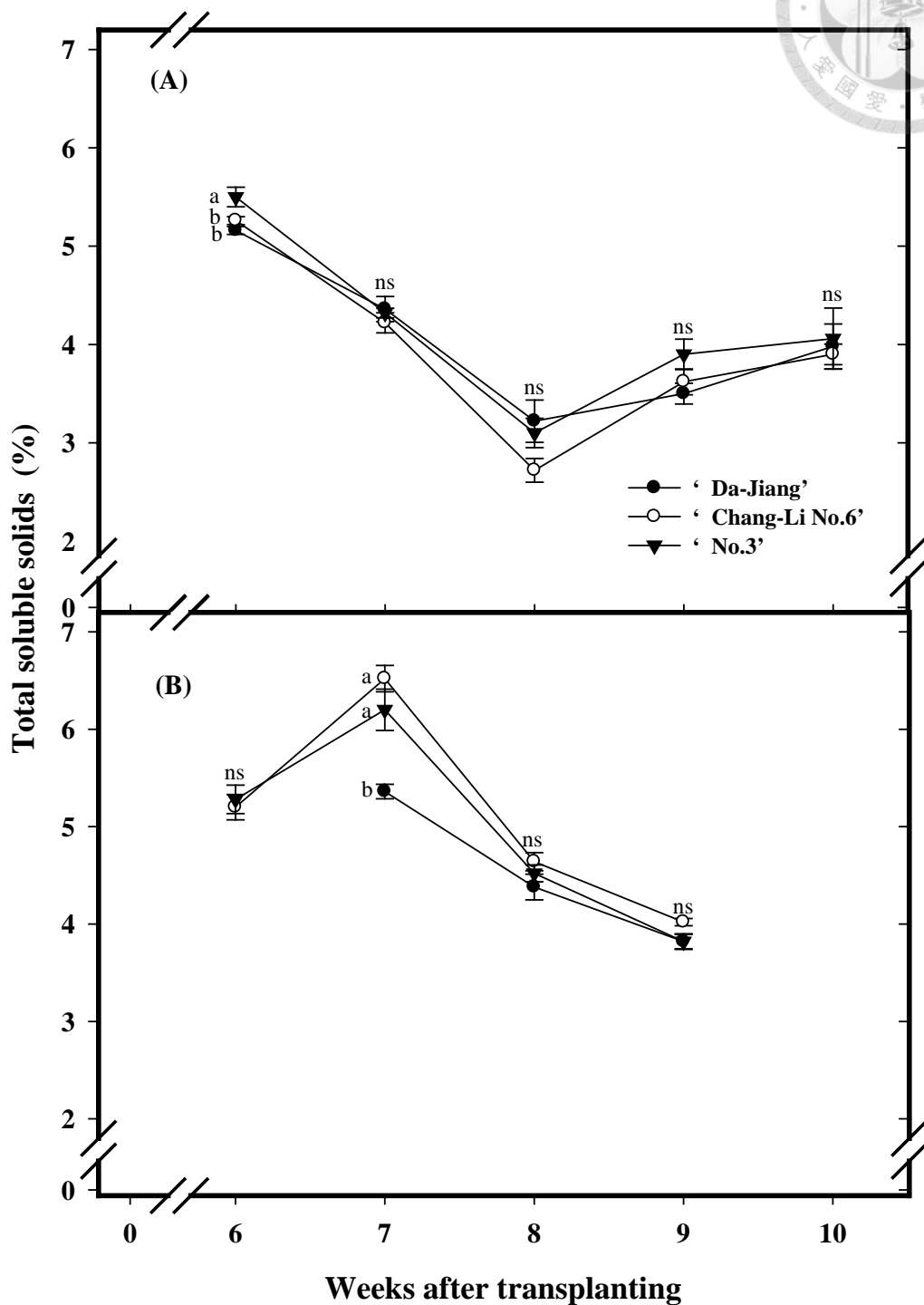


圖 3-8、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2012 (A)、2013 (B)年度試驗發育期間葉球總可溶性固形物量之變化
Fig. 3-8. Change in total soluble solids of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).

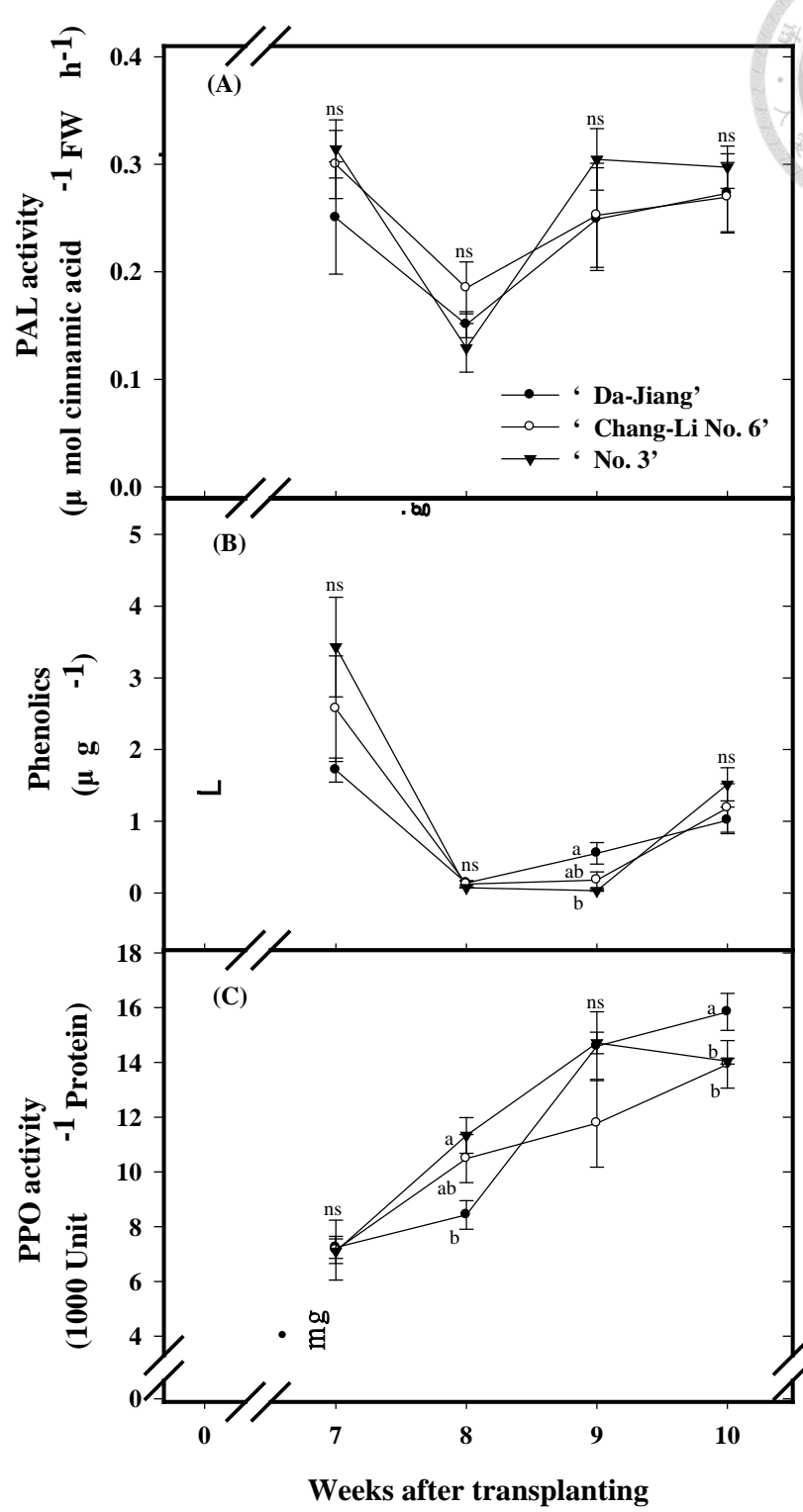


圖 3-9、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’ 結球萵苣 2012 年度試驗發育期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性 (C)之變化
 Fig. 3-9. Changes in PAL activity (A)、phenolics content (B) and PPO activity (C) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head during development in 2012.



圖 3-10、‘3 號’結球萵苣定植 5 週植株不同節位（如數字所標示）葉片之葉部形態

Fig. 3-10. Appearance of leaf shape of 5-week-old ‘No.3’ lettuce from different nodes (as indicated by the number).

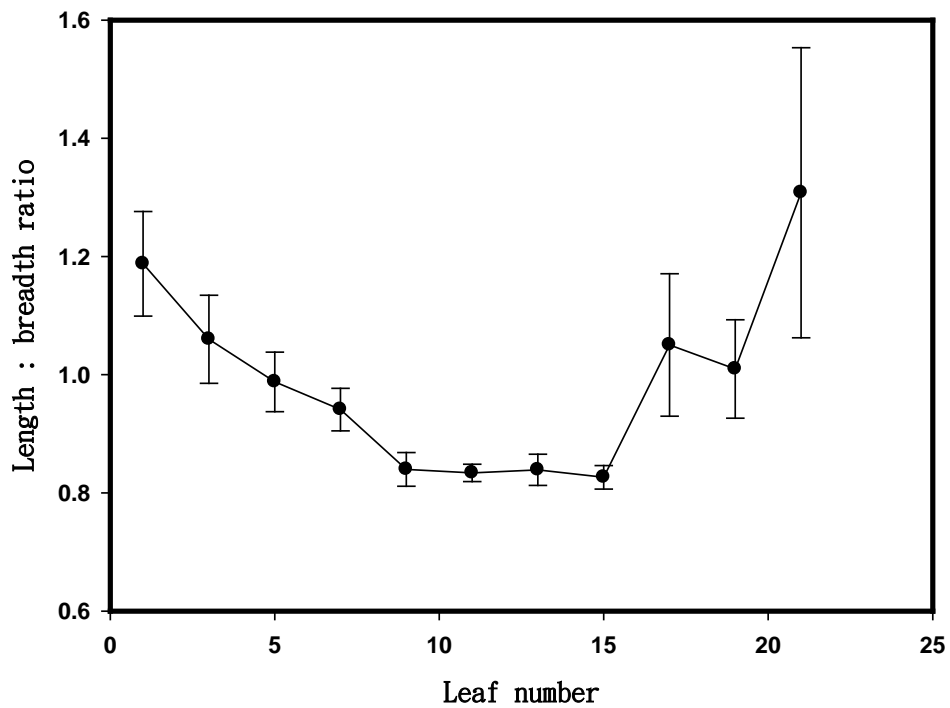


圖 3-11、‘3 號’結球萵苣定植 5 週植株不同節位向頂的葉片之葉片長寬比變化
Fig. 3-11. Change in length : breadth ratio of ‘No.3’ lettuce leaves from different nodes acropetally.



圖 3-12、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣定植 9 週葉球外觀之比較
Fig. 3-12. Comparison in the shape of lettuce head among ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’.



圖 3-13、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’ 結球萵苣 2012、2013 年度試驗葉球發育期間剖面緻密度變化

Fig. 3-13. Change in the leaf compactness of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head during development in 2012 (A) and 2013 (B).



表 3-1、本結球萵苣試驗 2012、2013 年度發育期間旬平均溫 (Ave. Temp)、總
日射量 (Total radiation) 變化與計算所得之有效日積溫 (EDDs)。

Table 3-1. Changes in the average temperature (Ave. Temp) and total radiation
as well as calculation of effective day-degrees (EDDs) during the lettuce
development of this research in 2012 and 2013.


Time	2012		2013	
	Ave. Temp (°C)	Total radiation (MJ/m ²)	Ave. Temp (°C)	Total radiation (MJ/m ²)
Dec. Early	—	—	17.9	98.37
Middle	19.0	115	17.7	52.27
Late	17.4	91.24	15.2	91.27
Jan. Early	16.9	70.43	17.4	95.95
Middle	15.8	101.75	15.4	104.75
Late	17.3	117.14	15.3	128.19
Feb. Early	19.7	99.05	18.9	75.89
Middle	19.7	125.71	—	—
EDDs > 0°C		549.45		549.45

第四章 結球萵苣品種貯藏特性比較



前言

結球萵苣 (Crisphead lettuce) (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) 為菊科 (Asteraceae) 萵苣屬 (*Lactuca*) 國際貿易大宗葉用蔬菜 (林, 2005)。國內主要產區為雲林縣, '3 號'、'常利 6 號'、'大將' 為重要栽培品種, 由於我國產季與美國及歐洲等結球萵苣生產大國產季錯開, 且鄰近日、韓進口市場運輸距離短、生產成本較低 (林, 2008), 因此外銷量逐年攀升, 日本為最大進口市場, 目前國產結球萵苣輸日主要供作截切蔬菜原料 (即所謂「業務加工用」), 該用途僅佔日本結球萵苣總消費量的 12% (農畜產業振興機構, 2013), 其對葉球品質要求相對寬鬆; 現行採收處理流程為葉球採收修整後, 於田間直接裝箱, 並未個別套袋包裝, 田間集貨後由卡車運往包裝場真空預冷 (vacuum cooling)、集貨裝櫃出口。但是我國結球萵苣栽培面積逐年擴大, 導致業者間削價競爭, 銷日平均單價逐年降低, 部分業者開始規劃轉型供應日本結球萵苣消費量約 88% 的超市完整葉球通路區塊, 期能區隔目標市場, 避免惡性競爭; 然而, 超市販售葉球需逐顆套袋包裝, 作業上較為複雜, 需較大的包裝作業場, 且耗費大量人力修整葉球與套袋作業, 目前面臨人工短缺包裝效率明顯不足的問題, 導致農場備貨時間增長而影響到貨品質, 故農政單位於 2011 年辦理外銷合作社場引進自動包裝機, 大幅提升逐顆套袋的處理效率, 每週可完成 2~3 個貨櫃所需貨量。此外超市銷售葉球品質要求甚高, 且葉球到貨後不再進行修整, 必須能直接上架販賣, 莖部切口褐變 (butt discoloration)、粉紅中肋 (pink rib) 或衰老褐變 (senescent browning)、乙烯引起的銹斑病 (russet spotting)、病害腐爛、機械傷害、失水萎凋等貯運後產生的品質劣變皆為市場銷售限制因子 (Castaner *et al.*, 1996; Tomas-Barberan *et al.*, 1997; Hisaminato *et al.*, 2001)。莖部切口褐變、粉紅中肋與衰老褐變為結球



萬苴採後外觀品質劣化主因(Castaner *et al.*, 1997; Tomas-Barberan *et al.*, 1997; Hisaminato *et al.*, 2001), 褐變反應是由酵素催化產生, 當組織受到物理傷害或老化時, 創傷訊號傳導, 苯丙胺酸裂解酵素(PAL)活性會上升, 使總可溶性酚類含量(total soluble phenolic content)增加(Ke and Saltveit, 1989; Saltveit, 2000; Tanaka *et al.*, 2011), 且細胞隔室化破壞, 使原本分處質體與液胞中的多酚氧化酵素及酚類化合物接觸反應, 生成醌類化合物並進行自發性反應與胺基酸等物質結合, 最後形成褐色聚合物沉澱(melanins), 酵素型褐變現象就此發生(Martinez and Whitaker, 1995; Saltveit, 1996)。前人研究指出結球萬苴適合貯藏條件為 0~2°C, 相對濕度 95% 以上, 貯藏壽命可達 28 天, 若提高貯藏溫至 5 °C, 則櫥架壽命減半(Morris *et al.*, 1974b; Davis *et al.*, 1997; Ryder, 1999; Cantwell and Kasmire, 2002; 林, 2005)。

雖然國外結球萬苴產業發展成熟, 採收流程與貯運條件也有需多資料可供參考(Morris *et al.*, 1974b; Cantwell and Kasmire, 2002; Saltveit, 2004), 但是國內現有栽培品種眾多, 品種間性狀與採後生理調查仍屬闕如, 因此, 亟需對於貯藏生理進行基本研究以瞭解主要栽培品種貯運壽命及其品質劣變現象, 故本試驗比較國內重要結球萬苴栽培品種‘3 號’、‘常利 6 號’、‘大將’葉球經現行打孔聚乙烯套袋包裝, 於外銷貨櫃常用 1°C 貯運溫度環境, 觀察品質與生理變化之差異, 並測定褐變反應基質含量與酵素活性, 期能篩選出適合貯運的品種, 以作為我國結球萬苴產業發展的後盾。

材料與方法

一. 植物材料

試驗使用發育試驗種植之‘大將’、‘3號’及‘常利6號’三品種結球萬苴, 分別於 2013 年 2 月 15 日及 2014 年 2 月 1 日進行採收, 於田間隨機選取定植 9 週且成熟度達前

一章所述之合適葉球約60顆(3箱)，採收時留4~5片外葉並直接於田間裝箱，採後盡快送回包裝廠真空預冷至5°C，預冷後以冷藏貨運方式送至臺灣大學園藝暨景觀學系園產品處理實驗室進行試驗。

葉球樣品抵達實驗室後，於常溫下逐顆以消毒過的刀具進行外葉修整與切口修齊，留下1~2片外葉，測定鮮重，各品種選取500~700 g、外觀完好無病害與機械傷害之葉球50顆，以業者現行使用之25 μm 厚低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE)袋包裝葉球，並於袋上標示鮮重以利貯藏失重計算，完成包裝後置於10 mm厚的雙層瓦楞紙箱(長60 cm、寬39 cm、高30 cm)，模擬目前商業貨櫃貯運溫度1°C環境貯藏。

二. 調查項目與調查方法

(一)結球萵苣貯藏期間生理與品質之變化

各品種取15顆葉球，其中5顆樣品分析貯藏當天葉球硬度、葉脈脆度與總可溶性固形物品質，5顆於1°C貯藏庫中以流通式系統進行貯藏期呼吸率測定。剩餘5顆於外葉3點、中肋3點、切口2點標示，作為LMG-160手持式色差筆 (DR LANGE, Germany)及SPAD-502葉綠素計 (Konica Minolta, Japan)測定貯藏期間色澤變化及葉片葉綠素含量變化測定點。各品種其餘葉球於貯藏2、4、6週取出5顆於20°C回溫1天分析失重率、葉球硬度、葉脈脆度、總可溶性固形物與腐爛率，共計5重複。

1. 葉球外觀色澤與葉綠素測定

葉球樣品選取前述之標示點，以LMG-160型手持式色差計測定L*、a*、b*數值，取其平均值作為該葉球葉面、葉脈、莖部切口色澤之讀值。亮度以L*值表示，亮度越大則數值越高(0為全黑，100為全白)；a*值代表紅綠值，數值大於0表示偏紅，數值小於0則表示顏色偏綠；b*值表示藍黃值，數值大於0偏黃，數值小於0則偏藍。顏色以a*、b*值計算色相角值(Hue angle) $[180^\circ - \tan^{-1}(b^*/a^*)]$ ，色相角0°為紅色、60°為黃色、90°為黃綠色、120°為綠色。

葉球樣品葉面標示三點除色澤測定外，並使用SPAD-502葉綠素計非破壞性測定葉綠素含量，讀值範圍為-9.9~199.9，數值越高則葉綠素含量越高。

2. 葉球呼吸率與乙烯釋放率

葉球於常溫進行修整，故於 20°C 採用流通式系統(flowing system) 測定貯前呼吸率與乙烯釋放率，再移置 1°C 以相同系統測定貯藏期間呼吸率與乙烯釋放率。流通式系統意即將單顆葉球秤重後密封於 5.7 L 壓克力呼吸缸，高壓空氣通過加濕水瓶及含有乙烯吸收劑(吸附 2.8% 高錳酸鉀與 1% 氫氧化鈉之珍珠石)淨氣瓶，以流量板控制流速為 5.7 L·hr⁻¹，系統完成 3 次換氣(即流通 3 小時)後達到動態平衡進行第一次採樣，以 1 mL 塑膠針筒分別抽取進氣口(空氣)與出氣口(樣本)之氣體樣品。2013 年度試驗於 1°C 貯藏 2、4、6 週測定呼吸率與乙烯釋放率，2014 年度試驗於移置 1°C 後 12 小時加測一次呼吸率與乙烯釋放率。以配備熱傳導度檢測器 (thermal conductivity detector, TCD) 的 GC-8AIT 氣相層析儀 (Shimadzu, Japan)測定 CO₂濃度，分離管柱為不鏽鋼外徑 1/8"×內徑 1/16"×長度 6 呎，填充 Porapak Q (80~100 mesh)，分析時層析管柱 (COL) 溫度設定為 40°C，注射口與偵測器 (INJ/ DET) 溫度為 80°C，並使用氫氣作為載流氣體(carrier gas)，壓力設定為 2 kg·cm⁻²，並以 1% CO₂作為標準品。

依據下列公式計算其呼吸速率，單位以 mg CO₂ kg⁻¹·hr⁻¹表示。

$$\frac{(\text{樣本 CO}_2 \text{ 波峰面積} - \text{空氣 CO}_2 \text{ 波峰面積})}{\text{CO}_2 \text{ 標準品波峰面積}} \times \text{標準品濃度}(\%) \times 10 \times \frac{\text{流速}(\text{L} \cdot \text{hr}^{-1})}{\text{葉球鮮重}(\text{kg})} \times \text{轉換值}$$

※1°C 之轉換值為 1.96

乙烯釋放率測定則使用配備火焰離子偵測器 (flame ionization detector; FID) 的 GC-8AIT 氣相層析儀測定乙烯濃度，分離管柱為不鏽鋼外徑 1/8"×內徑 1/16"×長度 2 呎，填充 Unibeads A (80~100 mesh)，分析時層析管柱 (COL) 溫度設定為 90°C，注射口及偵測器 (INJ/ DET) 溫度為 130°C，

以氮氣作為載流氣體，燃燒氣體為氫氣與氧氣，並以 $1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙烯作為標準品。乙烯釋放率以 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ 表示。



3. 葉球鮮重與失重率

利用BL1500 電子天平 (Sartorius, Germany)測量葉球重量，讀值取至小數點第一位，以g表示。葉球於包裝貯藏前秤取鮮重，經貯藏回溫後再秤取貯藏後重量。

失重率 (%) = (葉球貯後鮮重 - 葉球貯前鮮重) \times 100%

4. 葉球硬度

以質地測定儀 (TA.XT plus texture analyzer) (Texture Technologies Corp, U.K.)，配備直徑25 mm圓底探頭，將葉球置於質地測定儀載物台，模擬以手按壓葉球的方式，非破壞性測量葉球硬度。每一葉球選取赤道4點與頂端1點，探頭下壓速度 $5 \text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$ ，當感測力值達0.098 N以上開始下壓葉球10 mm，同一點按壓兩次，過程中記錄力值變化並取兩次下壓的最大力值平均，再將測得5筆數據平均以代表該葉球硬度 (N)。

5. 中肋脆度

以質地測定儀，配備長度20 mm的楔形探頭，將中肋切片置於質地測定儀載物台上，模擬牙齒咀嚼葉脈的方式測量葉脈脆度。每一葉球剝取第3~6片葉片，取下中肋部分並切成10個 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 大小的方塊，以楔形探頭 $5 \text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 速度下壓，當感測力值達0.049 N以上繼續下壓至葉脈頂端與載物距離的80%，記錄過程力值變化並取力度與時間的變化曲線斜率作為葉脈脆度，再將測得10筆數據平均以代表該葉球的葉脈脆度 ($\text{N}\cdot\text{S}^{-1}$)。

6. 總可溶性固形物含量

縱切1/8葉球組織(包含內葉與外葉)，使用National MJ-C85N blender果菜汁機 (Matsushita, Japan) 榨取後以濾網過濾，收集菜汁原液後，以PR-1數位折光計 (Atago, Japan) 測定總可溶性固形物含量，單位以 $^{\circ}\text{Brix}$ 表示。

7. 腐爛率

試驗期間各品種皆於貯藏2、4、6週在貯藏庫調查葉球腐爛數目。通常

市售期間只要外觀有些微腐爛情形，就會喪失商品價值，所以葉球表面出現組織腐爛與水浸狀即視為腐損。

三. 結球萵苣葉球貯藏期間褐變反應基質含量與酵素活性測定

2013年度試驗各品種於進樣當天隨機擇取3顆葉球進行測定，1°C貯藏2、4、6週各品種隨機擇取3顆葉球置於20°C回溫一天後進行測定，每顆葉球分成外圍三分之一生理年齡較老的綠色外葉組織，以及球內三分之一靠近心葉的黃綠色幼嫩內葉組織，苯丙胺酸裂解酵素與多酚氧化酵素活性測定分別於外葉及內葉各取2g切碎混合組織作為樣品；酚類化合物含量測定則各取10g切碎混合組織作為樣品，取樣後立即裝入4號塑膠夾鏈袋並以液態氮急凍固定，貯存於-80°C凍箱直至分析測定。PAL活性、酚類物質含量、PPO酵素活性測定方法同本論文第三章材料方法(三)所述，最後將內、外葉組織測得結果平均為1重複，每處理測定3重複。

四. 數據統計與圖表繪製

本試驗之數據資料使用 SAS 軟體 (Statistic Analysis System software) 進行 ANOVA 統計分析，並以 Least significant difference (L.S.D.) ($p \leq 0.05$) 分析顯著性差異。圖表繪製則使用 Sigma Plot[®] 軟體 (systat software Inc., USA) 進行繪製。

結果

一、 結球萵苣葉球貯藏期間生理與品質之變化

1. 葉球外觀色澤與葉綠素變化

結球萵苣貯藏期間葉球外觀變化如圖 4-1，貯前亮度(L*值)為 51~55，經過貯藏後數值不斷上升，貯藏 6 週時達 58~66，貯藏 2 及 4 週時‘3 號’亮度顯著最高(圖 4-2A)；a*值貯藏期間則無明顯變化皆維持在-11~-8 之間(圖 4-2C)；b*值於貯藏 2 週後快速上升，由 20~22 上升至貯藏 6 週達 22~24，

貯藏 4 週時‘3 號’ b^* 值顯著最高達 24.6(圖 4-2E)；葉片顏色呈現綠色，貯前色相角為 $114\sim 117^\circ$ ，貯藏期間小幅下降，貯藏 4~6 週顯著下降，貯藏 6 週最低為 $109\sim 112^\circ$ ，綠色略為轉淡(圖 4-2G)。

採收時葉球中肋亮度(L^* 值) 61~66，不隨貯藏時間而有明顯變化(圖 4-3A)，‘3 號’貯藏期間亮度顯著高於其他品種；採收時 a^* 值為 -4~-2，貯後數值逐漸上升，貯藏 6 週上升最為顯著達 -3~-1，‘3 號’的 a^* 值於期間顯著低於其他品種(圖 4-3C)； b^* 值貯藏期間為 7~11 無明顯變化。中肋色相角變化與葉片色相角趨勢相同，於貯藏期間逐漸下降，由採收時的 $106\sim 108^\circ$ 下降至貯藏 6 週達最低為 $100\sim 104^\circ$ ，品種間無顯著差異，變化範圍約在淡綠與黃綠交界處(圖 4-3G)。

葉球貯藏期間莖部切口亮度(L^* 值)由 53~59 於貯藏期間逐漸下降，貯藏 6 週顯著下降至最低為 44~50(圖 4-4A)； a^* 值採收時為 0.6~2.4，貯藏 2 週即顯著上升，貯藏 6 週升至最高為 8~9，品種間無明顯差異(圖 4-4C)； b^* 值變化趨勢與 a^* 值相似，貯藏期間逐漸上升，由採收時的 10~14 上升至貯藏 6 週達最高為 18~22(圖 4-4E)。色相角變化趨勢同樣隨貯藏時間而逐漸下降，採收時色相角為 $80\sim 87^\circ$ ，貯藏 2~4 週下降趨緩，貯藏 6 週顯著下降至最低為 $63\sim 68^\circ$ ，品種間無明顯差異，顏色變化在淡黃綠色至黃色之間(圖 4-4G)。

2013、2014 兩年度試驗結果之中肋色澤變化趨勢與數值有些微差異，2014 年度試驗之中肋 a^* 值略高貯藏期間在 -2~-1 之間(圖 4-3C、D)； b^* 值隨貯藏時間上升但數值範圍與 2013 年試驗結果相近(圖 4-3E、F)；‘大將’色相角貯藏期間維持 98° 左右，‘3 號’與‘常利 6 號’則隨時間而下降，由 106° 分別降至 102° 與 98° ，即綠色轉為黃色或黃綠色，其中‘3 號’色相角維持較佳。莖部採收切口顏色變化兩年度變化趨勢也不同，2013 年度試驗結果 a^* 值不斷上升(圖 4-4C)，2014 年度則是貯藏 2 週顯著上升後即不再變化，色

相角則相反由逐漸下降變成貯藏 2 週下降後即不再變化(圖 4-4D)，貯後切口色相角皆在 60~80°，即貯後切口色澤呈現黃色。

葉綠素含量與葉片色相角有相同變化趨勢，皆隨貯藏時間而逐漸下降(圖 4-2、4-5)，且色相角較高的品種葉綠素含量也相對較高，2013 年度試驗為‘常利 6 號’最高，由 28.8 降至 19.4；‘大將’次之，由 23.6 降至 13.5；‘3 號’最低，由 20.0 降至 8.9(圖 4-5A)。2014 年度則反為‘3 號’最高，由 22.6 降至 15.9；‘常利 6 號’次之，由 21.1 降至 13.9；‘大將’最低，由 20.1 降至 12.2(圖 4-5B)，各品種葉綠素含量雖有所差異，但貯藏期間降低的幅度皆相當接近。

2. 葉球呼吸率與乙烯釋放率變化

結球萵苣葉球經過修整於 20°C 測定採收時呼吸率為 33~40 mg CO₂ · kg⁻¹ · hr⁻¹(圖 4-6A)，完成包裝後置於 1°C 冷藏庫貯藏，入庫隔天呼吸率即顯著下降，貯藏期間呼吸率在 10 mg CO₂ · kg⁻¹ · hr⁻¹ 以下，貯藏 4 週時呼吸率降至最低為 4~7 mg CO₂ · kg⁻¹ · hr⁻¹，貯藏 6 週呼吸率開始攀升至 9~13 mg CO₂ · kg⁻¹ · hr⁻¹。兩年度試驗‘大將’呼吸率於貯藏初期 2 週間為三參試品種最高，且 2014 年度試驗之呼吸率略低於前一年的試驗結果(圖 4-6)。

貯藏期間於 1°C 以流通式系統取樣測定結球萵苣葉球乙烯釋放率，檢測乙烯濃度低於氣相層析儀偵測極限 0.01 μL · L 以下，乙烯濃度因而無法檢出，故乙烯釋放率極低幾乎接近 0 μL · kg⁻¹ · hr⁻¹。

3. 葉球硬度與中肋脆度變化

葉球硬度並未隨貯藏而有明顯變化，2013 年度試驗貯藏期間葉球硬度介於 19~25 N，品種間無顯著差異(圖 4-7A)；2014 年度試驗貯藏期間葉球硬度則介於 21~33 N，‘大將’貯藏期間葉球應度顯著高於其他品種(圖 4-7B)。

貯藏期間中肋脆度除‘大將’外皆隨時間而下降，2013 年度試驗樣品中

肋脆度為 4.8~5.3 N·s⁻¹，貯藏 4~6 週脆度顯著下降至 3.0~3.7 N·s⁻¹，僅‘大將’中肋脆度至貯藏 6 週仍維持 5.4 N·s⁻¹，貯藏期間其中肋脆度皆為 4.9 N·s⁻¹ 以上(圖 4-8A)。2014 年度試驗樣品中肋脆度為 6.4~6.7 N·s⁻¹，貯藏 2 週顯著下降後即無明顯變化，期間‘常利 6 號’與‘3 號’中肋脆度為 4.4~5.2 N·s⁻¹，‘大將’同樣在中肋脆度的維持有良好表現，貯藏末期達 6.3 N·s⁻¹，貯藏期間中肋脆度皆維持 5.8 N·s⁻¹ 以上(圖 4-8B)。

4. 總可溶性固形物含量變化

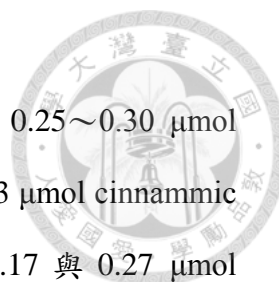
總可溶性固形物於貯藏期間逐漸消耗，其含量隨時間而下降，貯藏前總可溶性固形物含量為 3.5~4%，貯藏 6 週時總可溶性固形物含量顯著下降至 2.8~3.7% (圖 4-9A)。2013 年度試驗貯藏 2 週後總可溶性固形物含量即顯著下降。2014 年度試驗則經貯藏 6 週才顯著下降(圖 4-9B)，‘3 號’於兩年度試驗貯藏末期總可溶性固形物含量皆高於其他品種，分別為 3.3% 及 3.7%(圖 4-9)。

5. 葉球失重率與腐爛率變化

葉球因套袋貯藏並未大幅失重，但失重率仍隨貯藏時間而上升，貯藏 4 週之前失重皆在 1% 以內，貯藏 6 週明顯攀升達到最高約 1.5% (圖 4-10A)；2014 年度試驗結果略低為 1.2%，失重率不隨品種不同而有所差異(圖 4-10B)。

結球萵苣貯後腐爛情形如圖 4-11，此外，移除腐損組織後可於葉球上觀察到與鏽斑病相同病變徵狀(圖 4-12)。腐爛率隨貯藏時間增加而上升，貯藏 2 週腐爛率仍在 3.3% 以內，4 週後即顯著上升至 10% 上下，貯藏 6 週腐爛率更高達 20%。‘大將’腐爛率顯著較低，貯藏 6 週僅為 12.5% (圖 4-13)。

二、 結球萵苣葉球貯藏期間褐變反應基質含量與酵素活性測定



1. 苯丙胺酸裂解酵素活性測定

葉球貯藏期間 PAL 活性隨時間而下降，採收時活性為 $0.25 \sim 0.30 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏 2 週‘3 號’快速下降至 $0.23 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，‘大將’與‘常利 6 號’無明顯變化分別為 0.17 與 $0.27 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏 4 週‘3 號’活性回升至 $0.28 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，‘大將’與‘常利 6 號’亦無明顯變化分別為 0.21 與 $0.25 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏 6 週三品種活性皆降至最低為 $0.18 \sim 0.21 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏期間苯丙胺酸裂解酵素活性以‘3 號’最高、‘大將’最低，‘常利 6 號’則與其他兩品種無顯著差異(圖 4-14A)。

2. 酚類物質含量測定

葉球貯藏期間組織內酚類物質含量變化趨勢呈先升後降，貯前酚類含量為 $0.11 \sim 0.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，‘大將’貯藏 2 週顯著上升至最高活性為 $1.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，隨後不斷下降至貯藏 6 週達最低為 $0.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ；‘常利 6 號’與‘3 號’貯後不斷上升，至 4 週達最高為 1.50 與 $1.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，貯藏 6 週顯著下降至 0.59 與 $1.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。貯藏前期(0~2 週)‘大將’酚類化合物含量顯著較高，貯藏 4~6 週品種間則無明顯差異(圖 4-14B)。

3. 多酚氧化酵素活性測定

PPO 活性變化隨結球萵苣葉球貯藏呈先降後升趨勢，採收時活性為 $11775 \sim 14710 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，貯藏 2 週顯著降至最低為 $2887 \sim 2975 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，4 週微幅上升至 $3366 \sim 4484 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，貯藏 6 週活性顯著上升至 $11838 \sim 13557 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ 與貯前無異。三參試品種貯藏期間 PPO 活性無顯著差異(圖 4-14C)。

討論



一、 套袋包裝葉球貯藏期間維持良好外觀，僅貯藏末期中肋出現褐變情況，同時 PPO 活性有劇烈上升之勢

本試驗葉球使用現行具有透氣孔之 25 μm LDPE 袋包裝後裝箱置於 1 $^{\circ}\text{C}$ 進行貯藏，貯藏期間葉球維持良好外觀達 4 週以上，貯藏 6 週‘大將’與‘常利 6 號’中肋褐變現象較明顯(圖 4-1)，試驗貯藏期間‘3 號’中肋 a^* 值顯著低於其他品種(圖 4-3C)，其色相角於貯藏期間也無顯著變化，色澤維持較佳(圖 4-3G、H)；莖部採收切口於貯藏 2 週即出現褐變現象且顏色隨貯藏時間加深，貯後 a^* 值及 b^* 值顯著上升(圖 4-4C、D、E、F)，色相角則顯著下降由綠轉黃(圖 4-4G、H)，品種間無顯著差異。結球萵苣的褐變現象主要係由酵素型褐變所導致(Martinez and Whitaker, 1995；Saltveit, 1996；Altunkaya 和 Gökmen, 2008)，貯藏期間葉球組織 PAL 活性維持在 0.2~0.3 $\mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ 之間，不隨時間而有顯著變化(圖 4-14A)；酚類化合物含量則於貯藏 4 週前逐漸累積至 1.4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右，貯藏後期顯著降低(圖 4-14B)；PPO 採收時活性最高為 12000~16000 $\text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1}\text{protein}$ ，貯後活性降至原先的 1/4 左右，但到貯藏後期 PPO 活性劇烈上升至與貯前無異(圖 4-14C)，推測是貯藏後期酚類化合物含量下降的原因之一。本試驗貯藏末期葉球中肋出現褐變現象與 Mateos 等(1993)敘述結球萵苣衰老褐變(senescent browning)徵狀類似。植物組織器官的老化過程中會伴隨呼吸率上升、光合作用效率下降且生理代謝會變得相當活躍，細胞內蛋白質、脂質等大分子物質轉換為可溶性胺類、可溶等小分子，衰老(senescence)即老化過程(aging process)所造成的結果(Hopkins and Huner, 2008)。Jiang 等(2004)提到老化組織有較高的 PPO 活性可能是由於細胞膜系強度較弱所導致，Witkowska 與 Woltering (2014) 研究結果顯示萵苣於 12 $^{\circ}\text{C}$ 貯藏 15 天組織離子滲漏率顯著上升，表示細胞膜系強度會隨貯藏時間而弱化；故植物老化時細胞隔室化破壞，導致原本分處質粒體(plastid)與液胞的 PPO 與酚類化合物基質接觸產生反應(Benjawan *et al.*, 2008；

Segovia-Bravo *et al.*, 2009)，此時產品外觀褐變的敏感度會上升。本試驗三品種結球萵苣褐變酵素活性與酚化物含量結果(圖 4-14)相符，故推測貯藏後期的褐變現象(圖 4-1)與老化有關。

葉球貯後外觀以肉眼觀察並未查覺明顯黃化現象，參照色澤測定結果，兩年度試驗 L*值皆隨貯藏時間而逐漸上升(圖 4-2A、B)，而色相角皆由 118°逐漸下降至 110°左右(圖 4-2G、H)，表示葉片顏色由綠色逐漸轉變為黃綠色，推測貯藏後期 L*值的上升與色相角的下降有關。此外，採收時以 SPAD-502 葉綠素計測得之葉綠素含量與日本農業綜合研究中心野菜研究室測得之葉綠素數值皆在 20~35 之間相符(暖地園芸研究所野菜、メロン研究室，2003)，葉綠素含量也隨貯藏時間而不斷下降，各品種貯藏期間數值下降幅度皆在 10 以內(圖 4-5)；本試驗葉球經套袋包裝後即裝箱置入 1°C 冷藏庫黑暗貯藏，黑暗貯藏會誘導園產品老化相關程序發生，包含葉綠素、蛋白質、核酸降解和膜系完整性喪失等生理代謝的變化(Trippi and Thimann, 1983; Biswal and Biswal, 1984; Hodges and Forney, 2003; Buchanan-Wollaston *et al.*, 2005; Witkowska and Woltering, 2014)，且 Witkowska 與 Woltering (2014)試驗結果顯示結球萵苣於 12°C 貯藏 15 天葉綠素含量即顯著降低，類胡蘿蔔素變化趨勢亦同，且經 12°C 黑暗貯藏 5 天後再進行截切，其外觀品質顯著較照光貯藏者為差櫥架壽命較短，故推測本試驗葉球貯藏期間葉綠素降解與黑暗環境誘導的衰老現象有關。

二、生理代謝指標-呼吸率於 1°C 貯藏下顯著降低，總可溶性固形物於貯藏期間逐漸降低

結球萵苣葉球採收時於 20°C 呼吸率最高數值約 25~40 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹，置於 1°C 貯藏 1 天後劇降至 6~10 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹，貯藏期間結球萵苣葉球呼吸率維持在此一範圍內，與 Saltveit (2004)報導結球萵苣呼吸率資料相符。比較兩年度試驗結果發現 2014 年度之呼吸率明顯較前一年度低(圖 4-6)，比較氣象資料可發現 2014 年度試驗葉球發育期間平均氣溫較前一年度降低約 2°C，且於葉球發

育期測定不同成熟度葉球內部氣體組成變化，結果顯示葉球成熟度越高則葉球包覆越緊密，而氣體交換率也隨之下降，使得葉球內氧氣濃度降低、二氧化碳濃度漸升，而 2014 年度之結球萵苣葉球硬度較高(圖 4-7)，故推測其呼吸率低可能是由於葉球氣體交換率相對較差所導致。目前國內真空預冷技術已經開發成熟，廣泛應用於結球萵苣產業，真空預冷冷卻效率相當良好且產品溫度一致(林和謝，2012)，本試驗使用之結球萵苣皆於採後立即送至農場建置的真空預冷機預冷至 5°C，並以冷藏車運輸至實驗室暫貯於 5°C，葉球整修作業在室溫一小時內完成隨即貯藏於 1°C，採後冷鏈(cold chain)穩定維持，可能是試驗葉球於 1°C 貯藏一天呼吸速率即遽降達到平衡(圖 4-6B)的重要原因。

慣行農法種植的萵苣經截切後貯於低溫(4~5°C)，剛開始呼吸商可能較低僅 0.5，但數小時後呼吸商即達到平衡為 1 左右，表示呼吸作用以碳水化合物作為基質，而有機栽培萵苣呼吸商則大於 1，表示其可能以有機酸作為呼吸基質，故慣行農法栽培之結球萵苣碳水化合物消耗較快，導致貯藏期間乾重顯著低於有機栽培者(Mello *et al.*, 2010; Deltsidis *et al.*, 2012)。Witkowska 與 Woltering (2014) 試驗結果也顯示萵苣的蔗糖與果糖含量於 12°C 黑暗貯藏 7 天即自 1 mg·g⁻¹ FW 顯著降至 0.1 mg·g⁻¹ FW，期間由於碳水化合物的供應被切斷，組織中的碳水化合物平衡被徹底改變，需求量反而上升，組織處於飢餓狀態呼吸商常低於 1，呼吸作用基質由碳水化合物替換成脂質或蛋白質為主，且容易生成活性氧族(reactive oxygen species; ROS)，導致細胞膜系結構弱化而加速組織敗壞而老化(Kar and Feierabend, 1984; Philosoph-Hadas *et al.*, 1991; Couée *et al.*, 2006; Rosenvasser *et al.*, 2006)。本試驗葉球總可溶性固形物含量隨貯藏時間而逐漸下降，推測主要是呼吸作用消耗可溶性糖類所導致，‘大將’貯藏期間呼吸率較高尤其是貯藏初期(圖 4-6)，而‘3 號’於貯藏 2 週內呼吸率低於其他品種，且貯藏後期呼吸率與其他品種無顯著差異，‘3 號’貯藏後期之總可溶性固形物含量為三參試品種中最高(圖 4-9)，且‘3 號’外觀維持最為良好，貯藏 6 週中肋尚未出現褐變現象(圖 4-1)，可溶性糖

於細胞中可能扮演活性氧族清除者角色，且可保護細胞膜系構造避免降解 (Bolouri-Moghaddam *et al.*,2010)，細胞隔室化維持功能，褐變反應酵素與基質分處不同胞器中，褐變反應不易發生，與試驗結果符合。



三、葉球套袋包裝於貯藏期間維持低失重率與腐爛率，期間葉球硬度無顯著變化，脆度卻隨失重增加而逐漸下降

目前國內結球萵苣最常使用的包裝是將修整後的葉球置入具有透氣孔的 25 μm 厚低密度聚乙烯袋，再以人工綑綁紮口完成套袋包裝，本試驗模擬國內慣行包裝方式並將包裝後葉球置於 1 $^{\circ}\text{C}$ 貯藏，結果顯示貯藏期間葉球失重率隨時間逐漸上升，兩年度試驗貯藏 6 週期間失重率皆在 1.5% 以內，三參試品種間並無顯著差異，依目前商業包裝規格每箱 24 顆 600 g 左右葉球計算，貯藏 6 週單箱失重約 220 g，符合商業容許誤差範圍 500 g 以內，且葉球於貯藏後期無明顯失水皺縮現象發生(圖 4-1)。Nunes 和 Emond (2003)指出萵苣大約失重 2.7% 左右葉球硬度就會開始下降，本試驗結果失重皆在 1.5% 以內，因此貯藏期間葉球硬度無顯著影響皆維持 20 N 以上(圖 4-7)，相較 Artés 和 Martínez (1996)以 2 $^{\circ}\text{C}$ 貯藏裸裝萵苣葉球 2 週高達 6% 的失重，外觀已出現明顯萎凋軟化，表示現行包裝貯藏可有效抑制失水並保持良好外觀；此外，當失重達 5~6% 時葉組織即呈現軟化現象，葉片硬度明顯下降使質地品質變差，雖然本試驗貯藏之結球萵苣未達 5~6%，但中肋切片脆度(crispness)仍舊隨著失重上升而由採收時 5~6 $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至貯藏末期為 3~4 $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ ，推測‘大將’中肋脆度較高是由於其葉片與中肋的厚度比其他參試品種厚所致。脆度是結球萵苣鮮食重要品質項目，且消費者也會以食用時感受到的脆度來評斷產品優劣，但其構成因素複雜，難以得到一致客觀的表徵與測量方式，解與陳 (2010) 使用質地分析儀穿刺測定番茄、黃瓜、胡蘿蔔等產品硬度，並計算其力度測量圖譜最大斜率，與官能品評度有良好相關性，故本試驗以該斜率作為中肋脆度指標。

灰黴病(gray mold)與軟腐病(soft rot)是萵苣主要採後病害，是導致腐爛發生

的重要因子(Ramsey *et al.*, 1959 ; Ryder, 1999)，腐爛後外觀品質下降嚴重影響消費者購買意願，因此本試驗只要於葉球上出現褐化水浸徵狀即判定為腐爛，大部分具有水浸腐爛徵狀的葉球於病斑出現灰白色菌絲(圖 4-11B)，且貯藏後期腐爛嚴重葉球產生黑色疑似菌核，符合灰黴病癥，且 1°C 貯藏環境，對軟腐病菌生長抑制性佳(Ramsey *et al.*, 1959)，故推測本試驗葉球腐爛現象主要是由灰黴病原真菌(*Botrytis cinerea*)所引起(Ramsey *et al.*, 1959 ; Davis *et al.*, 1997 ; Ryder, 1999)。試驗中發現一個有趣的現象，即過程中並未測得乙烯生成，但在腐爛葉球剝去腐敗組織後可見到鏽斑病癥狀(圖 4-12)，此現象僅僅發生在腐爛葉球上，周遭的葉球並未出現鏽斑病癥狀，Qadir 等(1997)與 Chagué 等(2002)研究指出園產品採後病原灰黴菌(*Botrytis cinerea*)與乙烯的生成有關，菌絲於含有甲硫胺酸(methionine)的培養基上培養，其乙烯生成量可達到 780 $\mu\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ mycelium DW $\cdot\text{hr}^{-1}$ 或 1.8 $\mu\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ mycelium FW $\cdot\text{hr}^{-1}$ ，且照光培養會增加乙烯生成量，故推測本試驗所見之鏽斑病癥狀是由灰黴病菌感染所導致，而試驗中未測得乙烯生成的原因可能是由於健康葉球生成量極低，加上試驗使用流通式測定系統於呼吸缸內連續換氣，生成的乙烯氣體濃度可能因此被稀釋使儀器無法偵測。

此外，建議業者進行套袋包裝作業時，未修整葉球勿置於室溫超過 1 小時，對修整用刀具與包裝作業檯面應確實消毒，本試驗操作依循上述操作注意事項仍無法完全杜絕腐爛發生，業者操作規模為試驗的數倍大，稍有不慎可能造成龐大的經濟損失。

四、 ‘3 號’結球萵苣呼吸率低、總可溶性固形物含量維持良好且腐爛率顯著最低，較適合進行貯運

觀察國內結球萵苣主要栽培種 ‘3 號’因貯藏初期葉球呼吸率顯著較其他品種低(圖 4-6)，期間呼吸率僅 5 $\text{mg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ 左右，因此兩年度試驗皆可於貯藏後期維持最高的總可溶性固形物(圖 4-9)，由 4% 降至 3.4~3.7%，貯藏 6 週腐爛率 12.5% (圖 4-13)最低，僅為其他品種腐爛率的二分之一，每箱約 3 顆葉球腐爛

尚在商業可接受範圍內，此外，葉脈色相角下降幅度小且 a^* 值無顯著增加(圖 4-3)，葉球於貯藏末期無明顯中肋褐變現象發生(圖 4-1)，且‘3 號’呈球形扁圓整齊包裝空間利用率佳、葉球鮮重高(500~700 g)且葉球硬度維持相對較低具有彈性等優點。脆度較差為‘3 號’的缺點，脆度顯著低於其他參試品種至貯藏後期僅 $3\sim 4\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ (圖 4-8)，‘大將’中肋脆度佳，可惜因葉球顆粒小、重量低(僅 400~500 g)、腐爛率高，已逐漸被生產者淘汰，因此，本試驗結果顯示‘3 號’貯運表現最佳，在 1°C 包裝貯藏可保持良好外觀及較低腐爛率達 6 週，適合作為長期貯藏品種；‘大將’與‘常利 6 號’ 1°C 貯藏期間可維持良好外觀達 4 週以上，但貯藏 4 週後腐爛率已高於 12.5%。上述結果與結球萵苣貯藏壽命 28 天文獻值(Cantwell and Kasmire, 2002)相符。

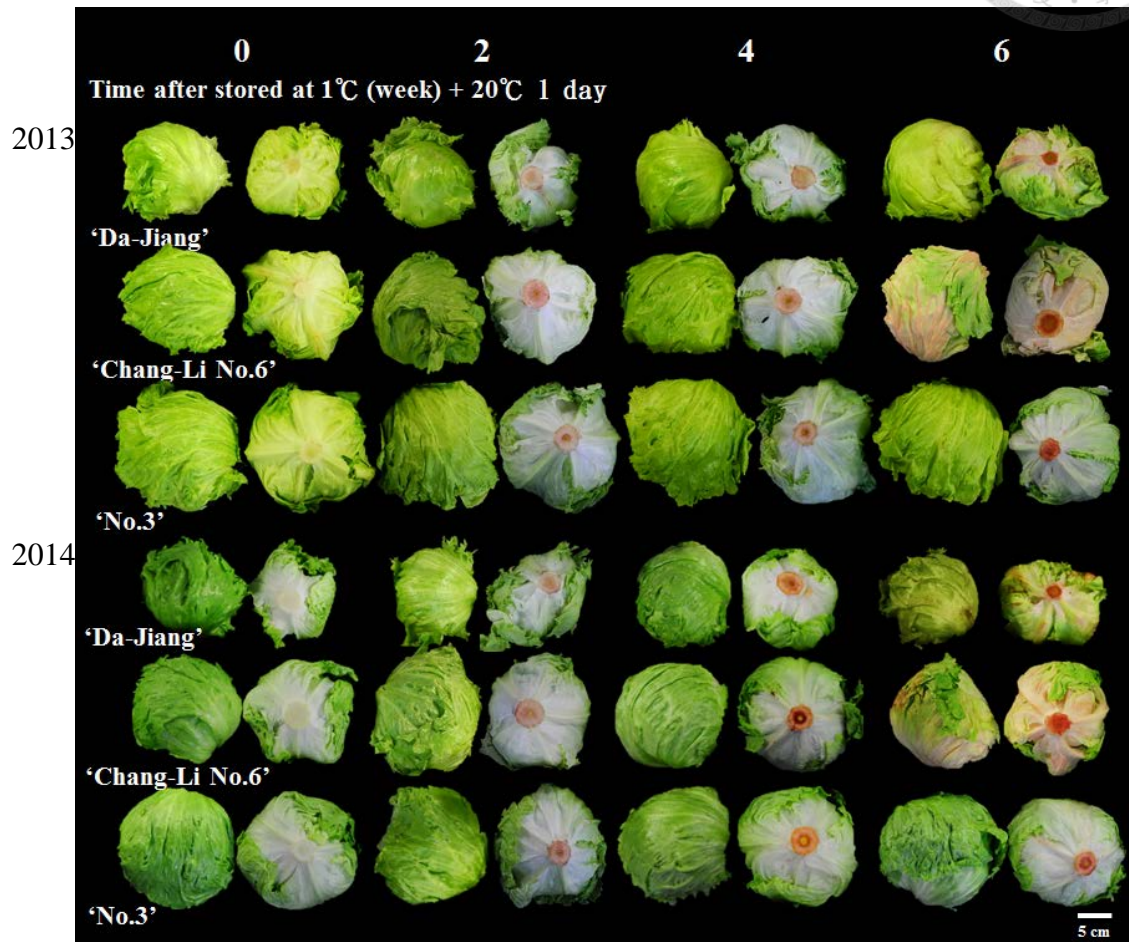


圖 4-1、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’ 結球萵苣 2013（上三排）、2014（下三排）年度試驗 1°C 貯藏期間葉球外觀

Fig. 4-1. Appearance of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C followed by 1 day at 20°C in 2013 (upper 3 rows) and 2014 (lower 3 rows).

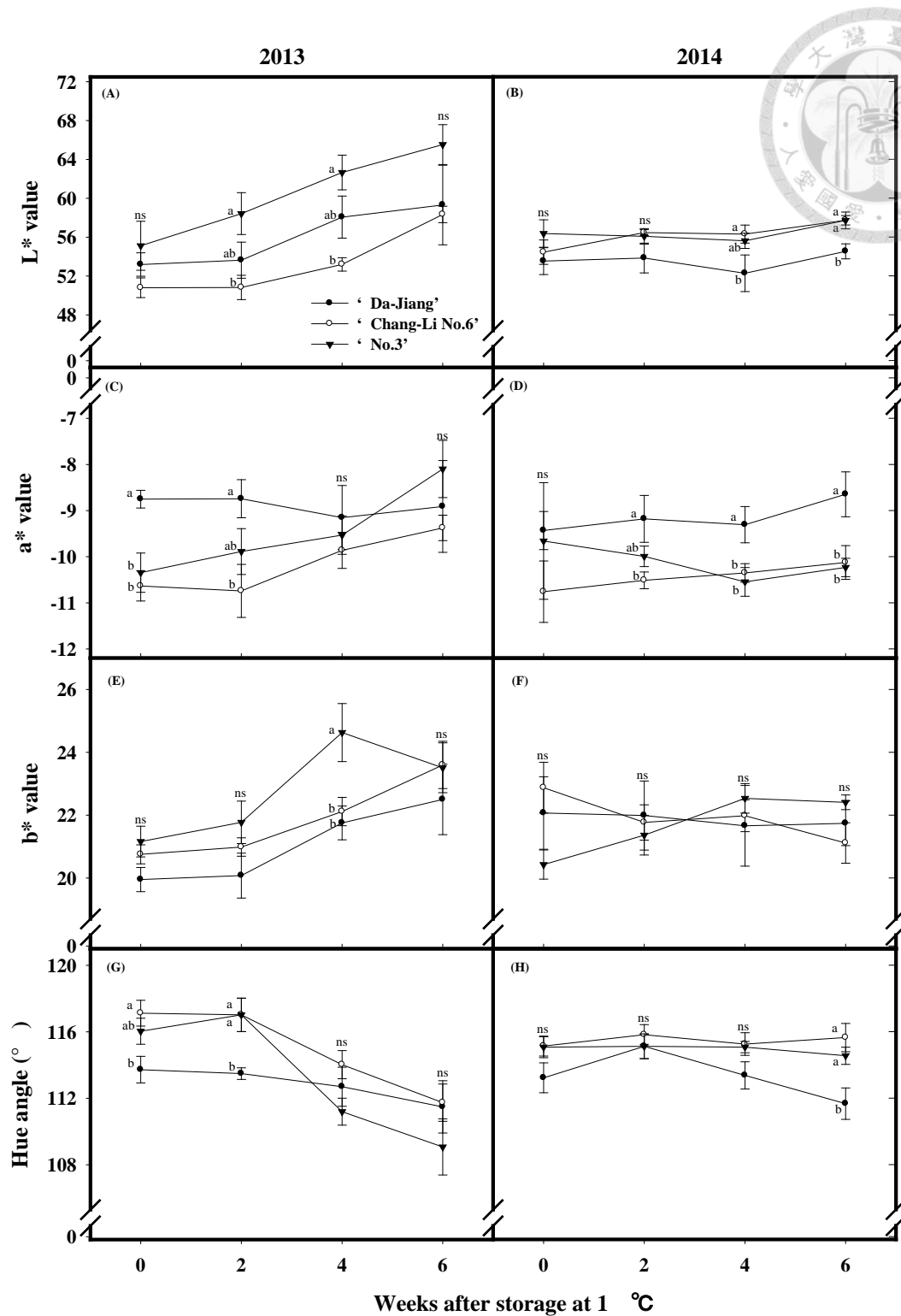


圖 4-2、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、D、F、H) 年度試驗 1°C 貯藏期間葉球外葉色澤—L* 值 (A、B)、a* 值 (C、D)、b* 值 (E、F) 與色相角 (G、H) 之變化

Fig. 4-2. Change in cap leaf color (L*, a*, b*, hue angle) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce stored at 1°C in 2013 (A、C、E、G) and 2014 (B、D、F、H).

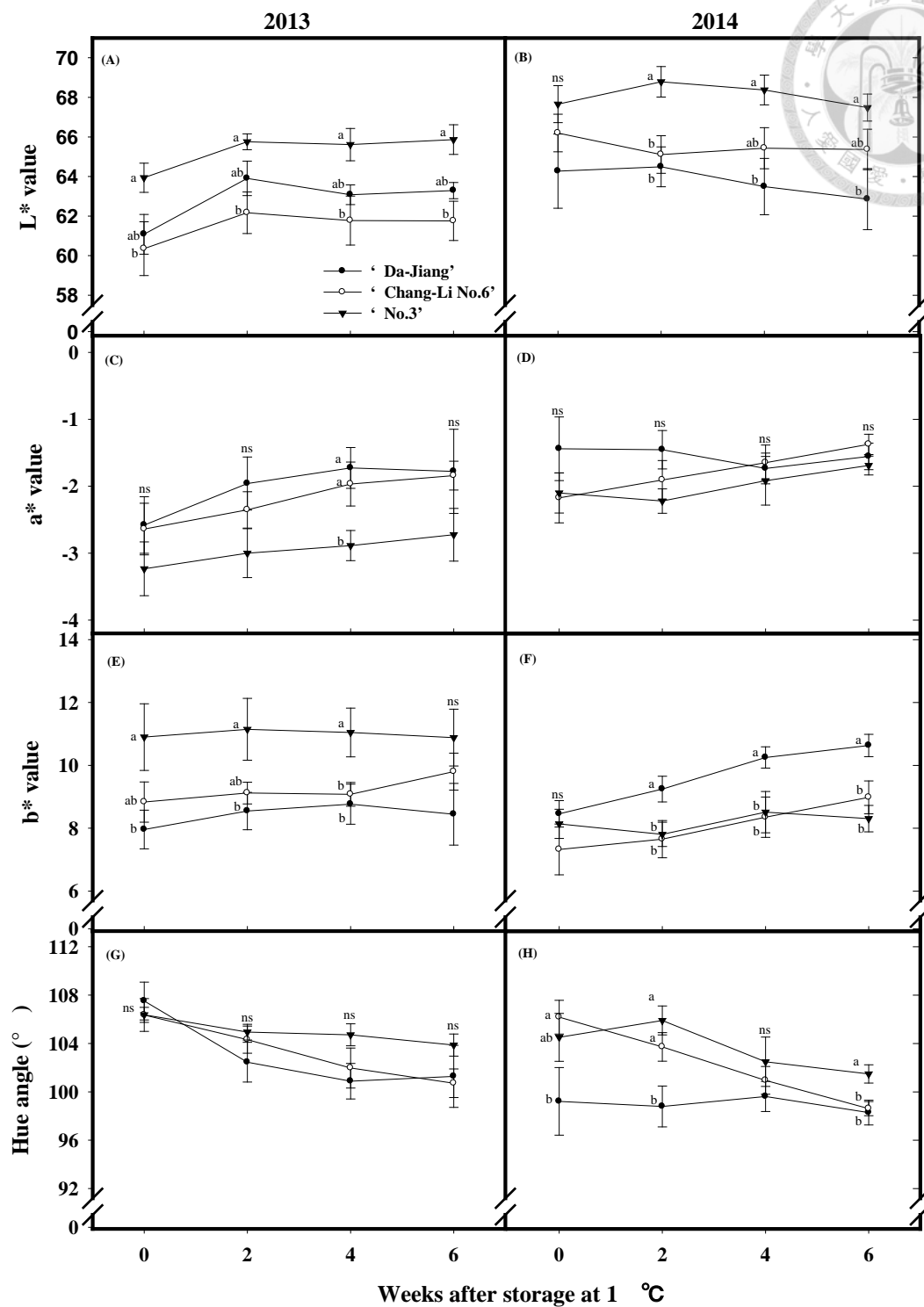


圖 4-3、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、D、F、H)年度試驗 1°C貯藏期間葉球中肋色澤—L*值 (A、B)、a*值 (C、D)、b*值 (E、F)與色相角 (G、H)之變化

Fig. 4-3. Change in leaf midrib color (L*、a*、b*、hue angle) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head stored at 1°C in 2013 (A、C、E、G) and 2014 (B、D、F、H).

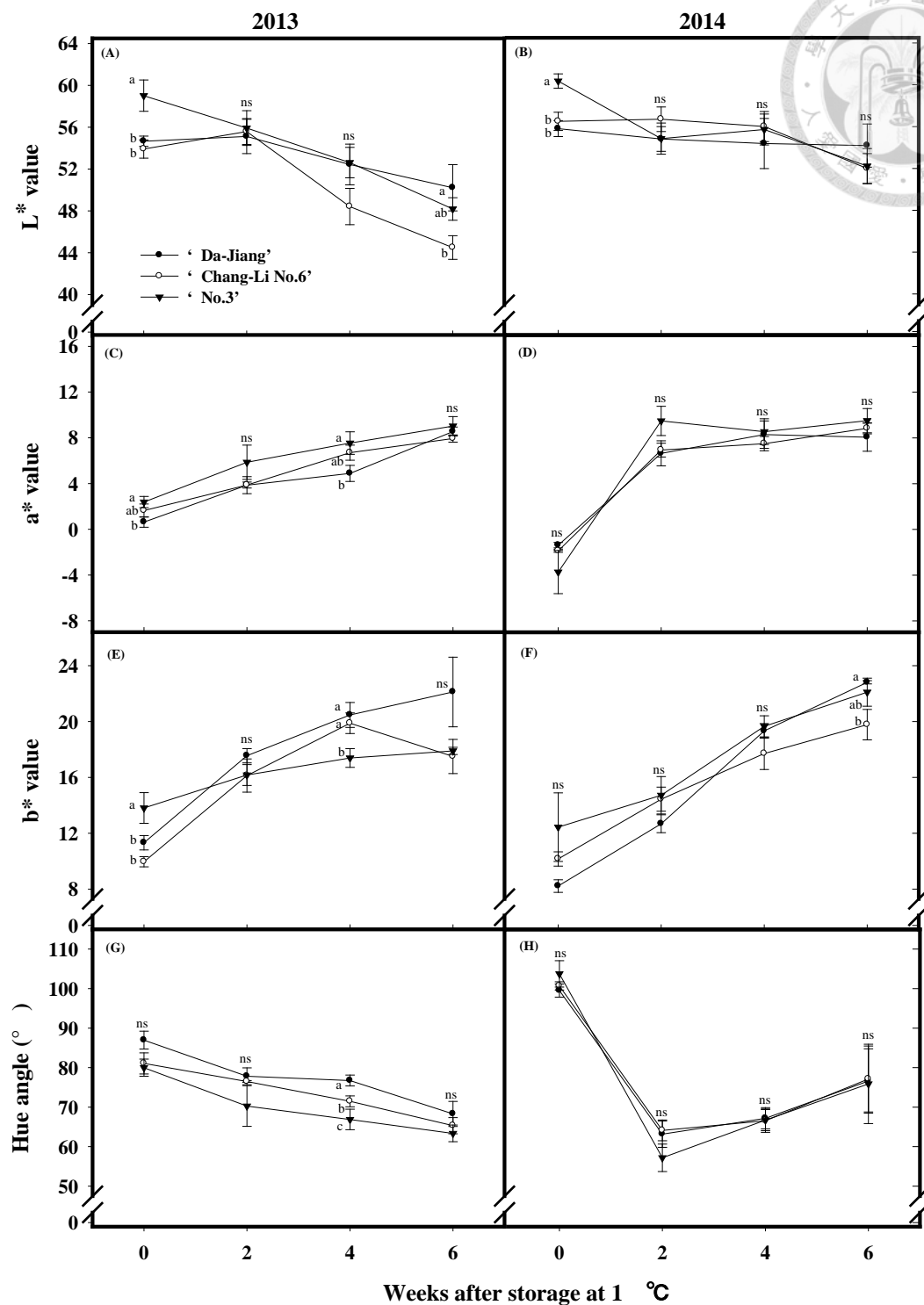


圖 4-4、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A、C、E、G)、2014 (B、D、F、H)年度試驗 1°C 貯藏期間葉球莖部採收切口色澤—L*值 (A、B)、a*值 (C、D)、b*值 (E、F)與色相角 (G、H)之變化

Fig. 4-4. Change in butt color (L*、a*、b*、hue angle) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce head stored at 1°C in 2013 (A、C、E、G) and 2014 (B、D、F、H).

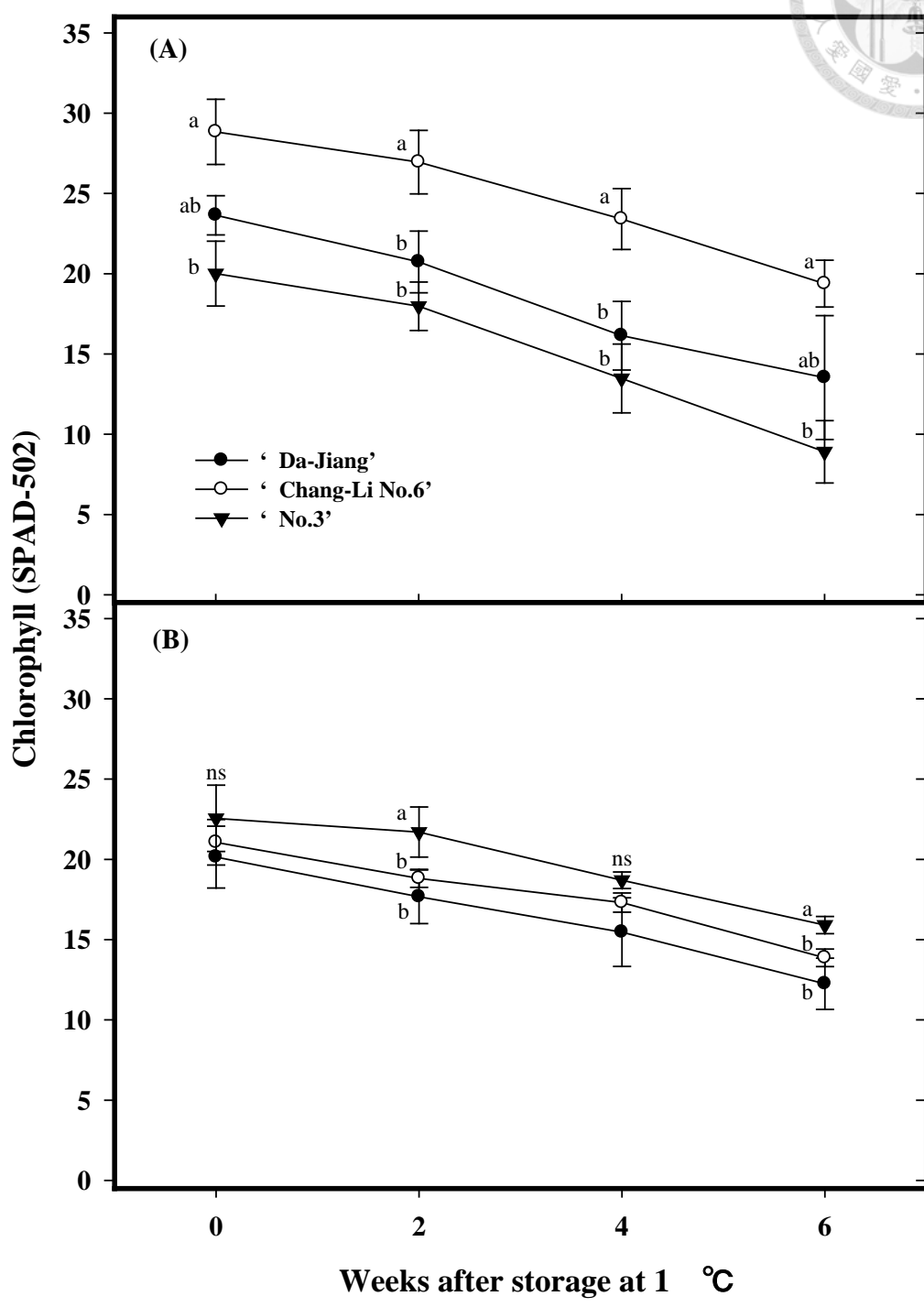


圖 4-5、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C 貯藏期間葉球外葉葉綠素含量之變化

Fig. 4-5. Change in chlorophyll content of cap leaves of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce stored at 1°C in 2013 (A) and 2014 (B).

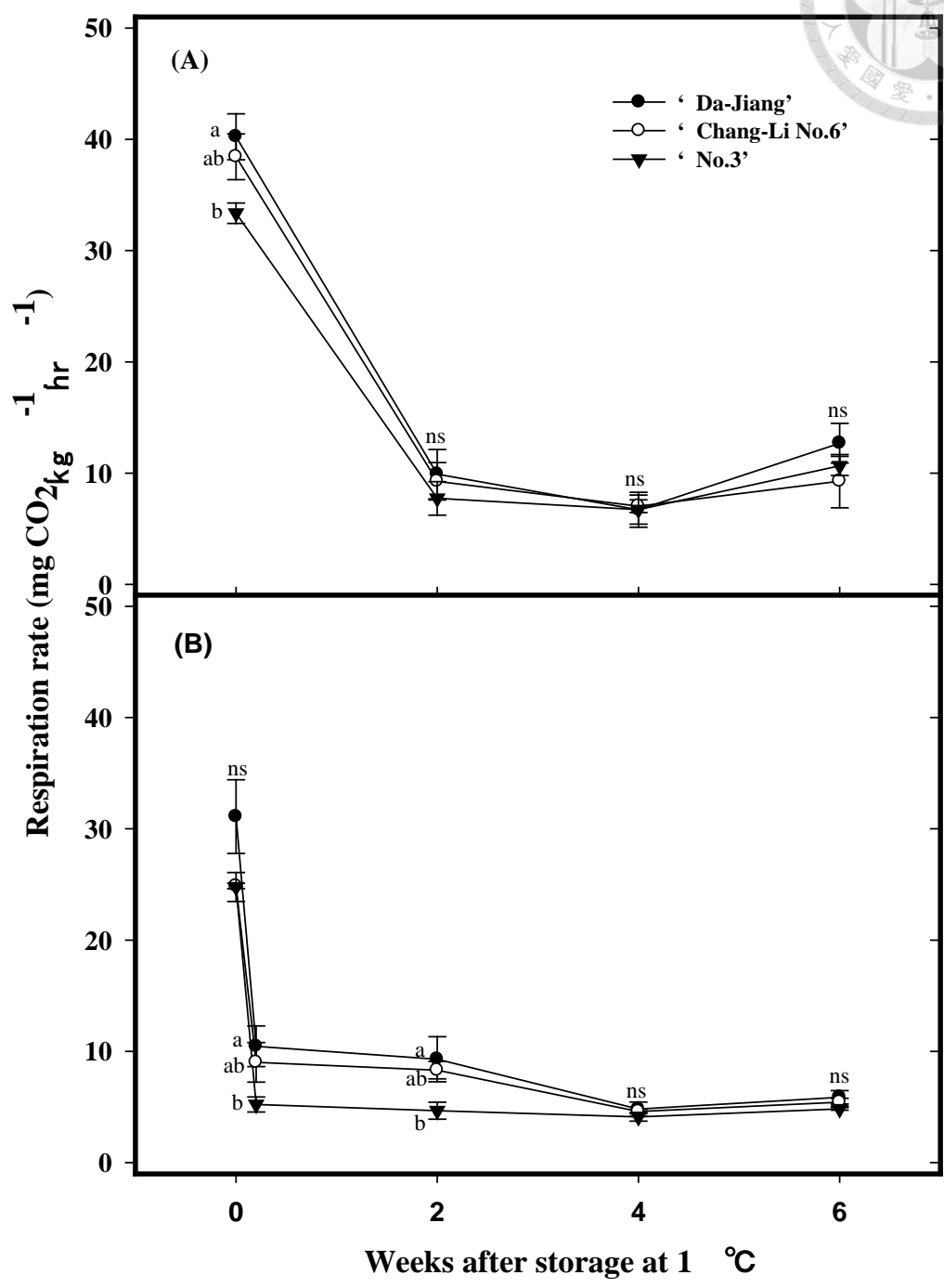
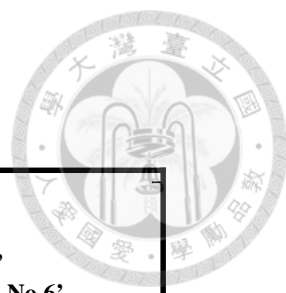


圖 4-6、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C 貯藏期間於 1°C 測得葉球呼吸率變化

Fig. 4-6. Change in the reaperation rate of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C in 2013 (A) and 2014 (B).

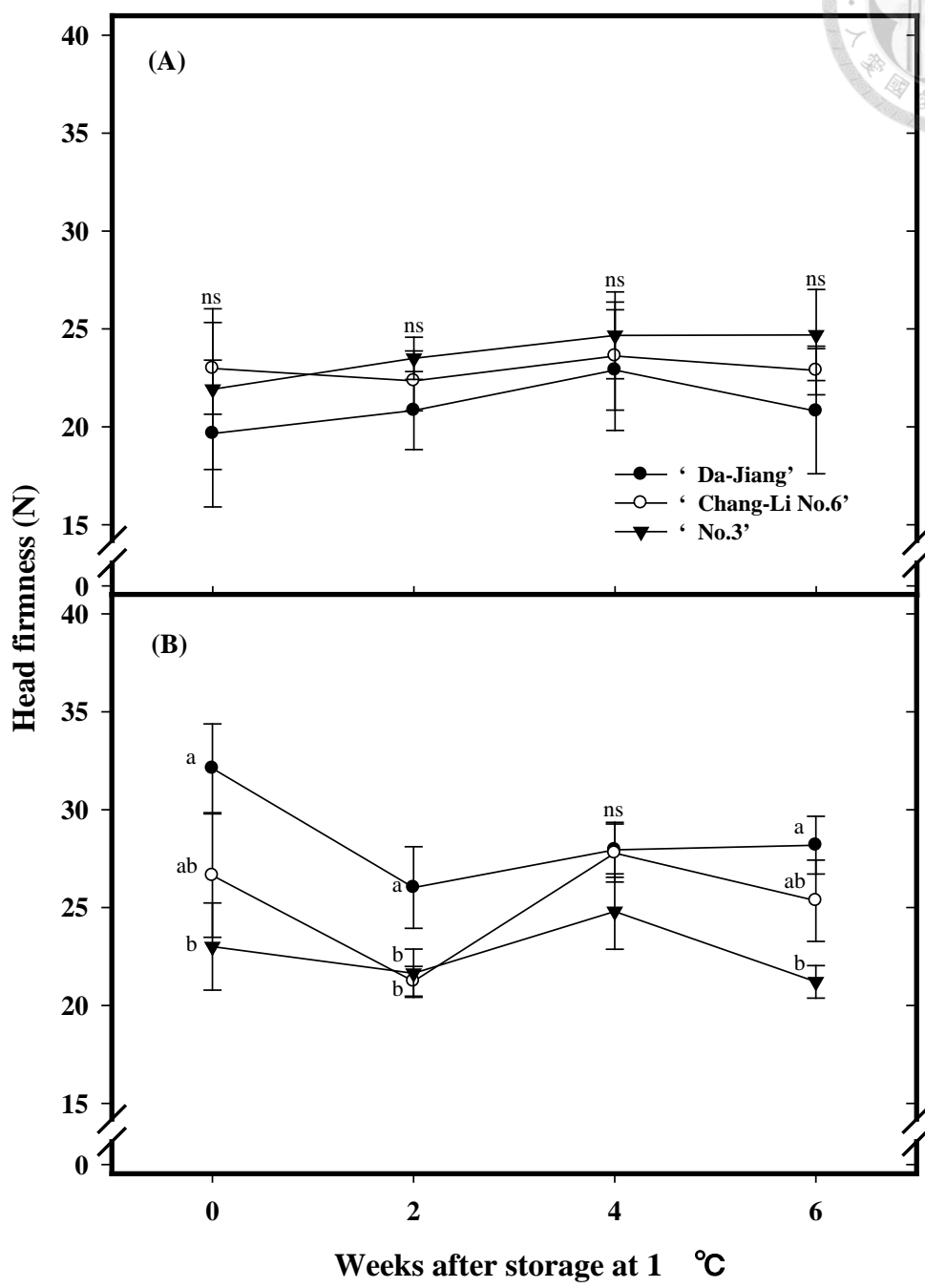


圖 4-7、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C 貯藏期間葉球硬度之變化
Fig. 4-7. Change in head firmness of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored in 1°C at 2013 (A) and 2014 (B).

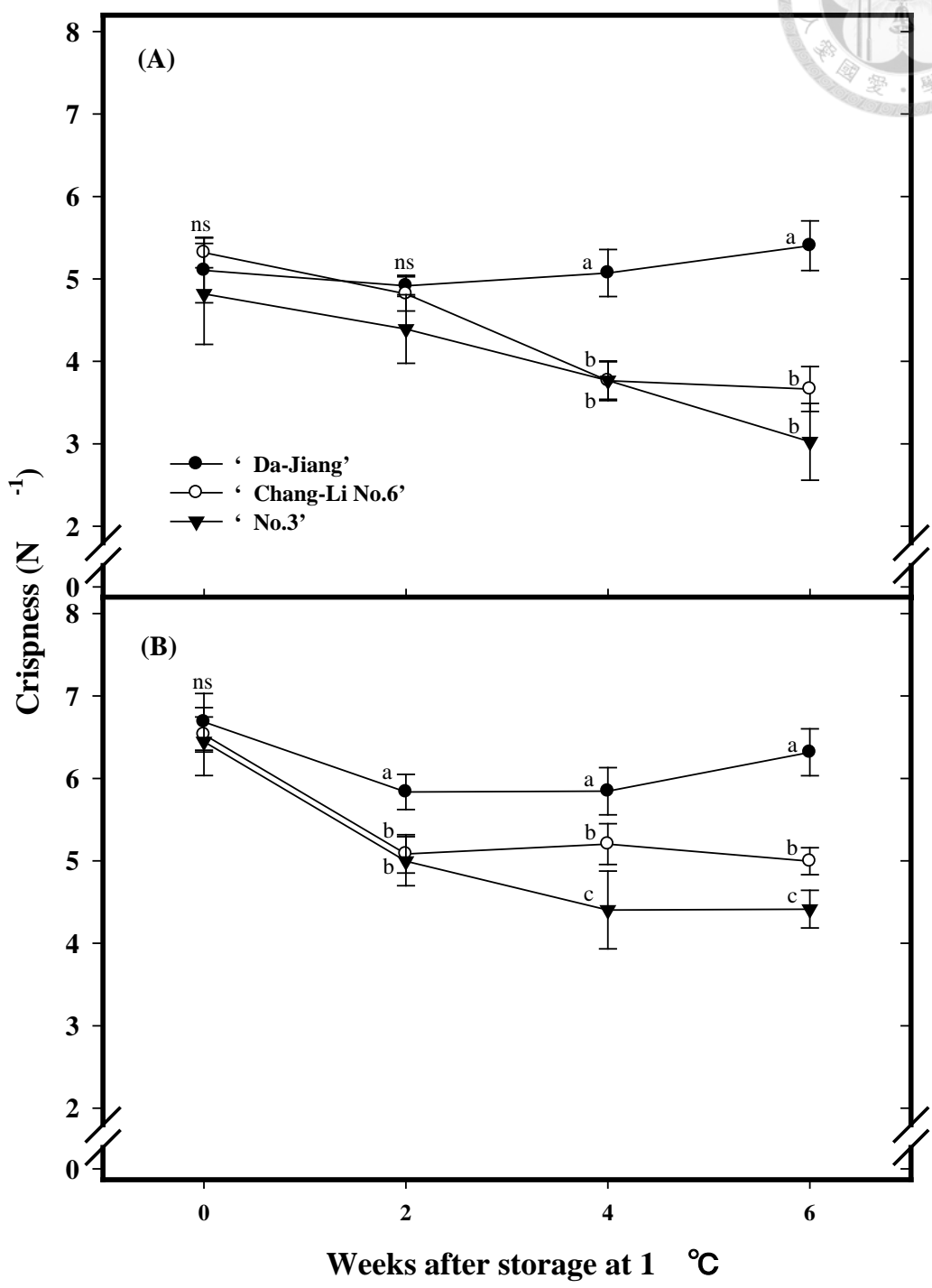
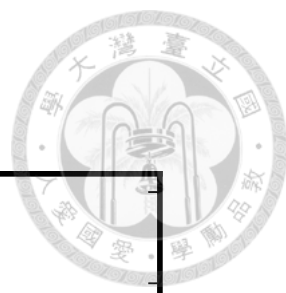


圖 4-8、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B) 年度試驗 1°C 貯藏期間葉球中肋脆度之變化

Fig. 4-8. Change in crispness of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C in 2013 (A) and 2014 (B).

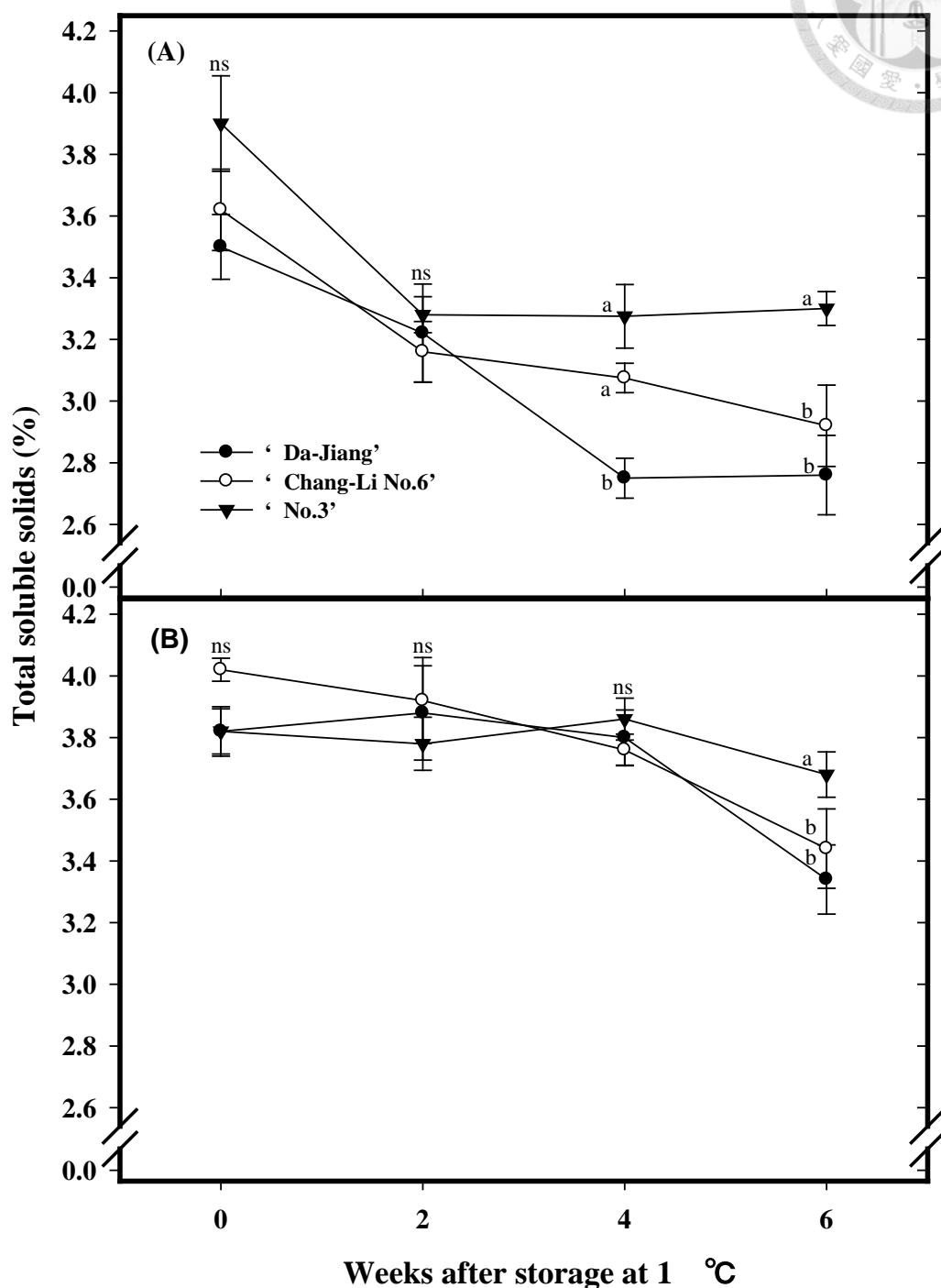


圖 4-9、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C 貯藏期間葉球總可溶性固形物量之變化

Fig. 4-9. Change in total soluble solids content of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads during stored at 1°C in 2013 (A) and 2014 (B).

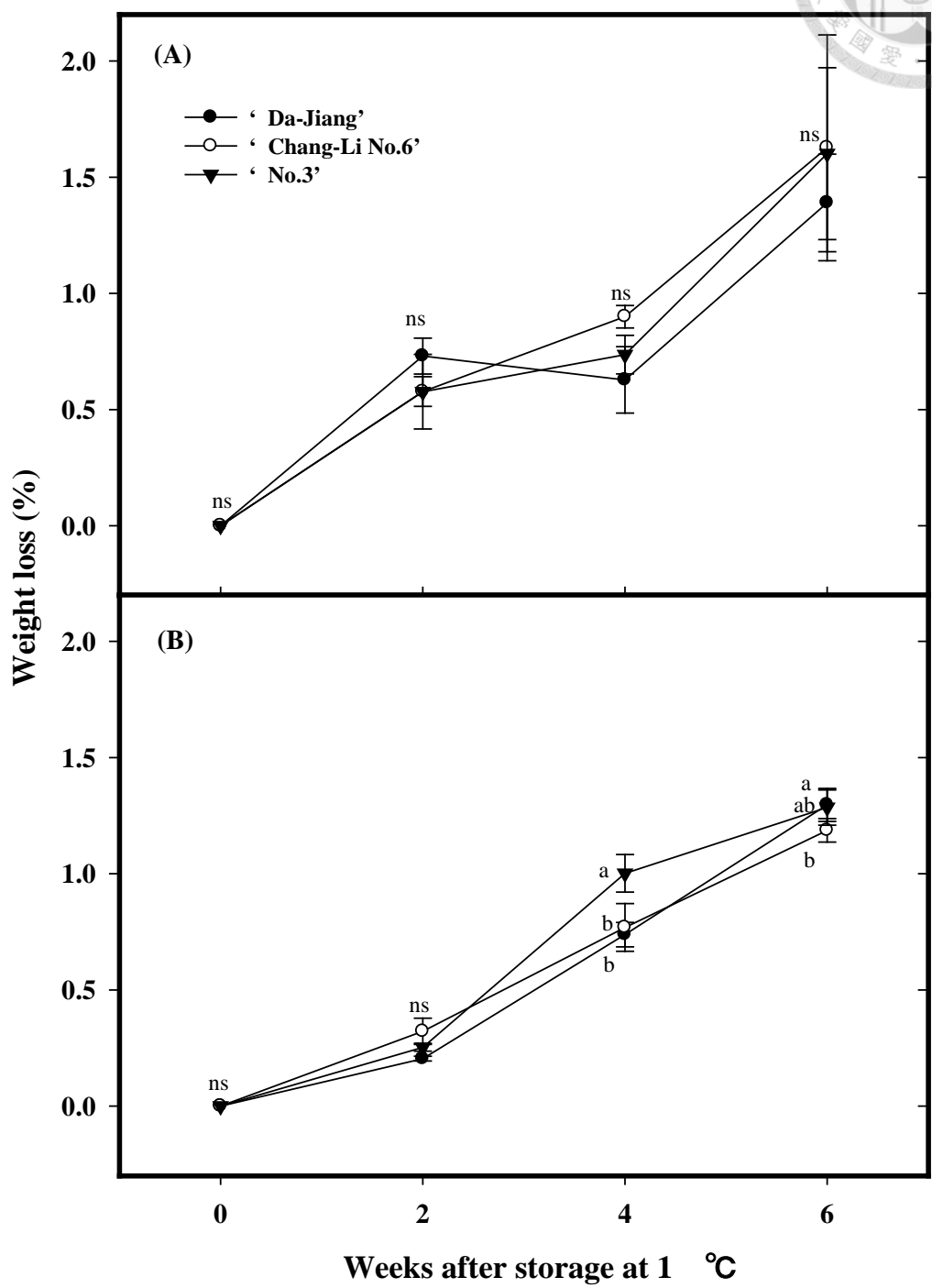


圖 4-10、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 (A)、2014 (B)年度試驗 1°C 貯藏期間葉球失重率之變化

Fig. 4-10. Change in weight loss of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C in 2013 (A) and 2014 (B).

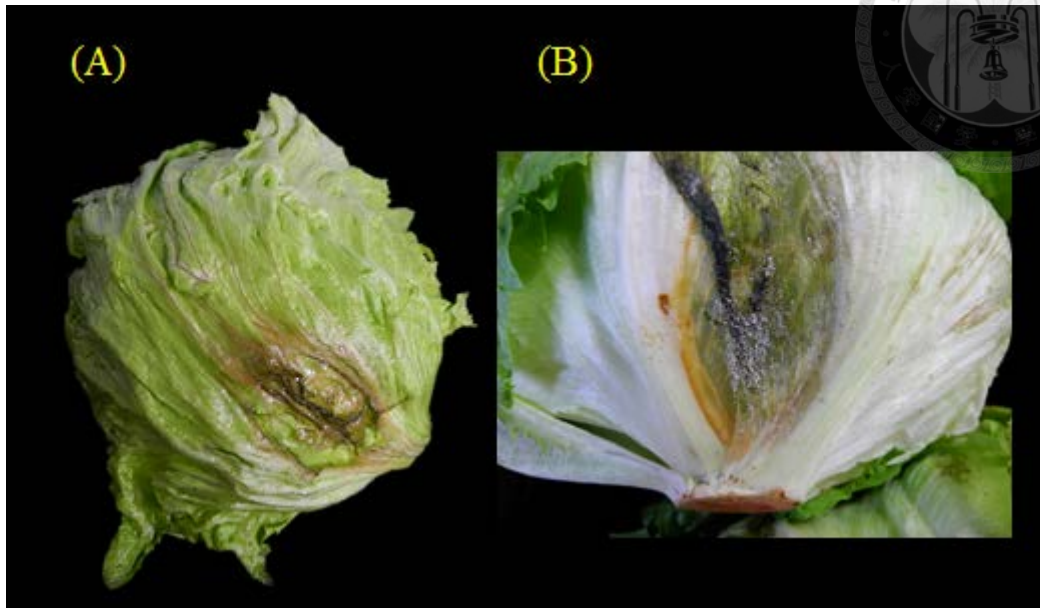


圖 4-11、結球萵苣 1°C 貯藏期間腐爛葉球外觀 (A) 與病徵近照 (B)
Fig. 4-11. The appearance and symptoms of decayed lettuce head that stored at 1°C.



圖 4-12、結球萵苣 1°C 貯藏期間腐爛葉球出現之鏽斑徵狀
Fig. 4-12. The russet spotting symptoms appeared on decayed lettuce head stored at 1°C.

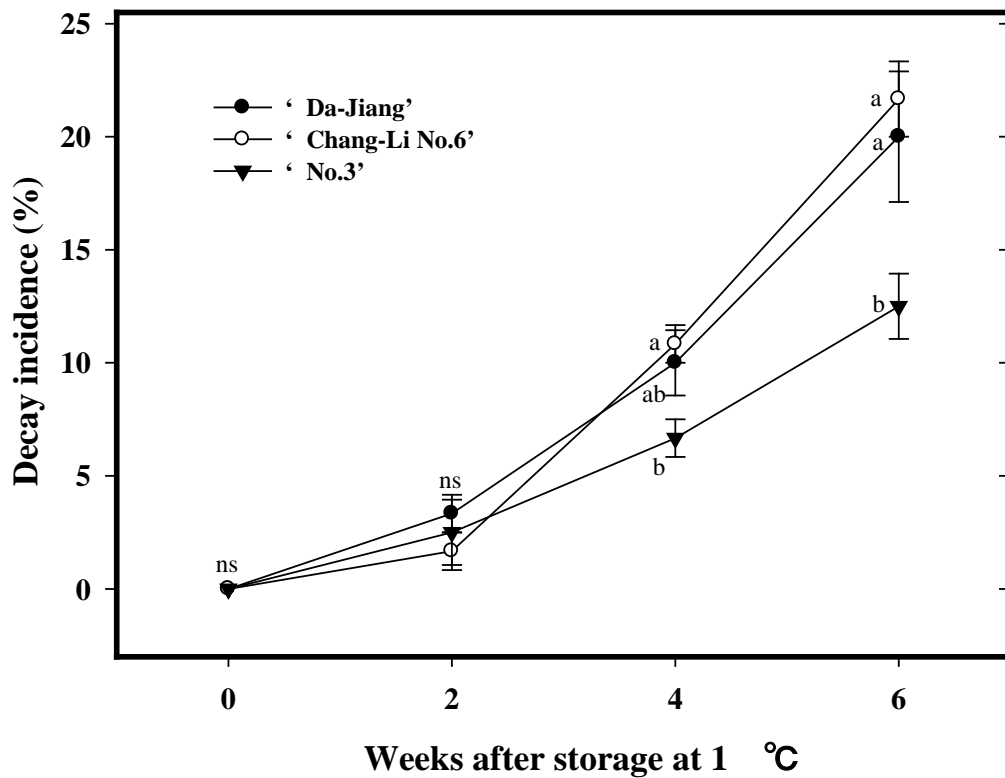


圖 4-13、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’ 結球萵苣試驗 1°C 貯藏期間葉球腐爛率之變化

Fig. 4-13. Decay incidences of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C.

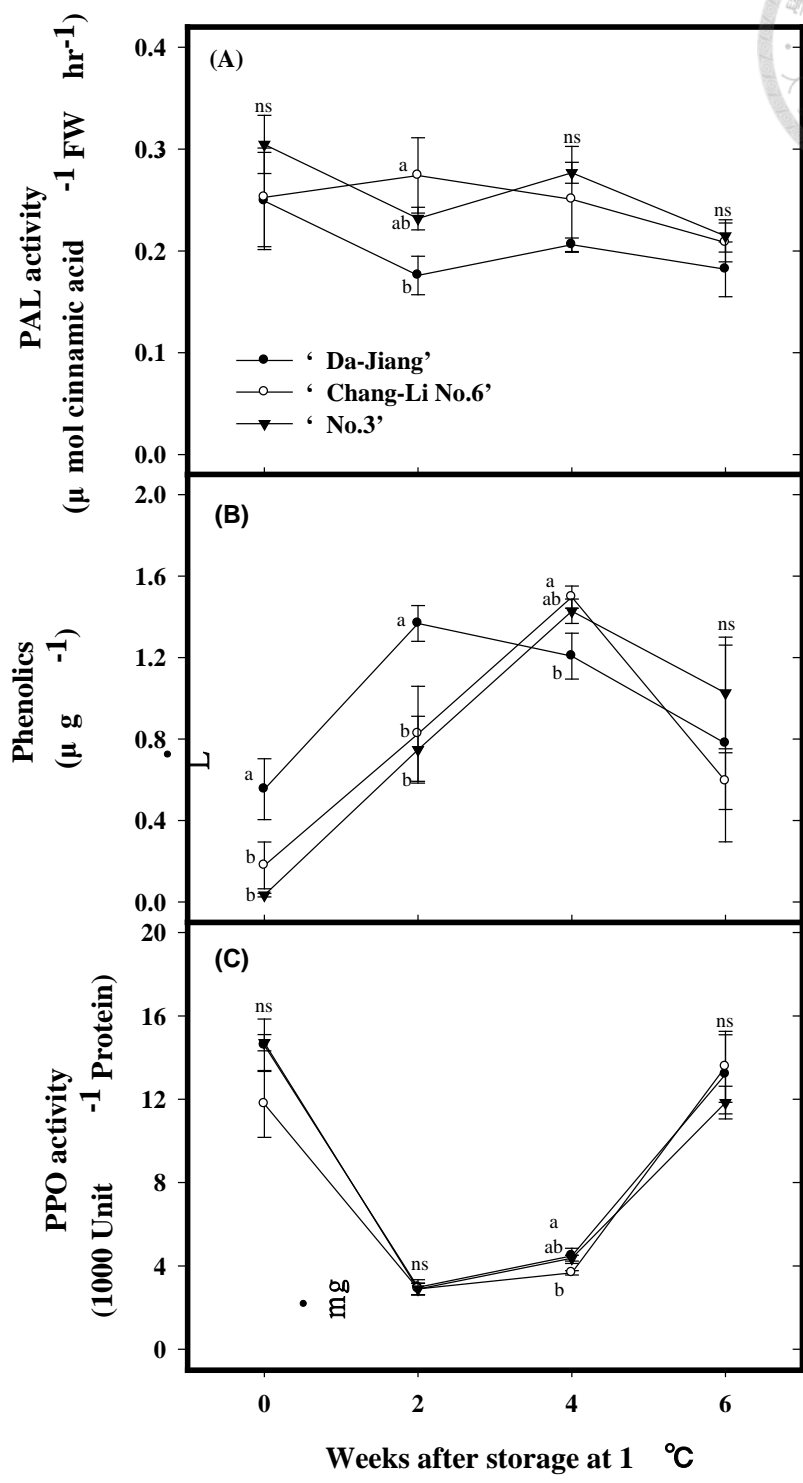


圖 4-14、‘大將’、‘常利 6 號’、‘3 號’結球萵苣 2013 年度試驗 1°C 貯藏期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性 (C) 之變化
 Fig. 4-14. Change in PAL activity (A)、phenolics content (B) and PPO activity (C) of ‘Da-Jiang’, ‘Chang-Li No.6’ and ‘No.3’ lettuce heads stored at 1°C in 2013.

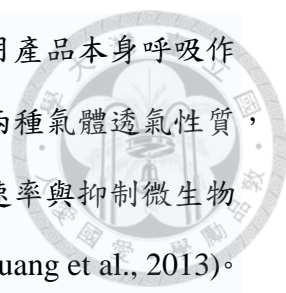
第五章 開發結球萵苣低壓包裝技術



前言

結球萵苣 (Crisphead lettuce) (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) 為菊科 (Asteraceae) 萵苣屬 (*Lactuca*) 一、二年生國際貿易大宗葉用蔬菜 (林, 2005)。

國產結球萵苣目前主要銷往日本供作截切蔬菜原料, 部分業者規劃轉型供應日本結球萵苣消費量約 88% 的超市完整葉球通路區塊, 期能分隔市場、增加通路; 然而, 超市販售葉球除需逐顆套袋, 更對品質要求甚高, 莖部切口褐變 (butt discoloration)、粉紅中肋 (pink rib) 或衰老褐變 (senescent browning)、乙烯引起的銹斑病 (russet spotting)、病害腐爛、機械傷害、失水萎凋皆為消費者無法接受的品質劣變重要原因 (Castaner *et al.*, 1996; Tomas-Barberan *et al.*, 1997; Hisaminato *et al.*, 2001)。不僅日本市場, 業者也積極開拓新興外銷市場, 希望將國產結球萵苣出口到歐美及中東超市通路, 但船期與報關手續需要 21-28 天以上的時間; 以當前供應超市銷售完整葉球的採後處理技術, 經真空預冷後逐顆套上打孔聚乙烯袋, 貯藏於接近 0°C、相對濕度 98~100% 環境, 僅有 28 天左右的貯藏壽命 (林, 2005; Cantwell and Kasmire, 2002), 長程運輸後品質欠佳、櫥架壽命過短。除此之外, 國內由於西方餐食逐漸風行, 結球萵苣消費量也逐年成長 (林, 2005; 2008), 每年夏秋國內非產期間, 需仰賴進口供應, 年進口量 1 萬公噸, 進口值 1 億 2 千 9 百萬元, 需求量相當大, 然而, 進口結球萵苣售價有逐年上升趨勢, 進口平均單價皆在新臺幣 30 元以上, 民國 100 年開始逐年上升, 102 年平均單價高達 36 元, 開發結球萵苣長期 (2-3 個月) 貯藏技術以供應 5-7 月份內銷需求, 降低對價格偏高之進口產品依賴度, 有其利潤與必要性。因此, 亟需開發採後保鮮處理技術, 維持產品品質與延長櫥架壽命, 以作為我國結球萵苣產業永續發展之後盾。



氣變包裝(modified atmosphere packaging ; MAP)技術是利用產品本身呼吸作用消耗氧氣和釋放出二氧化碳，再配合包裝袋塑膠膜本身對這兩種氣體透氣性質，以減低袋內氧氣分壓並提高二氧化碳濃度，降低產品生理代謝速率與抑制微生物滋生，達到保鮮效益的處理技術 (Kader, 2002b; Brecht, 2009; Zhuang et al., 2013)。

MAP 技術運用於生鮮園產品採後處理有許多有利潛力，包括延緩後熟及老化、減輕或抑制寒害，對於某些病害、生理障礙、害蟲具有控制效果，延長採後壽命 (Kader, 2002b; Brecht, 2009; Zhuang et al., 2013)，由於改變大氣組成沒有藥劑殘留困擾、不造成環境汙染，易為消費者接受，是目前園產品採後處理研究的趨勢。

許多試驗報告都已證實，改變周邊大氣組成，有益於結球萵苣品質維持與增加貯運壽命，Saltveit (2004)指出，結球萵苣貯藏於 0°C、相對濕度 98-100%、3% 氧氣 + 2% 二氧化碳環境，貯運壽命可達 1 個月以上。低氧環境亦可抑制酵素型褐變反應關鍵酵素多酚氧化酶(polyphenol oxidase)活性，且可避免銹斑病生理障害發生，維持萵苣外觀品質 (Ryall and Lipton, 1979 ; Siriphanich and Kader, 1985; Lopez-Galvez *et al.*, 2015)。

本試驗以適合長期貯藏‘3 號’結球萵苣為材料，嘗試使用作業方法簡便之低壓包裝達到降低氧氣分壓的目的，以突破採收切口褐化、衰老褐變、失水萎凋、貯運壽命短等結球萵苣採後品質劣變瓶頸，希望改善目前慣行商業包裝貯運壽命僅 4 週，期能有效解決國產結球萵苣外銷日本、韓國、東南亞鄰近市場遭遇的褐變問題，並有助於開拓加拿大等需要長程海運的新通路，以增加農民收益。

材料與方法

一. 植物材料

‘3號’結球萵苣分別於2014年3月8日及4月27日委託農民於田間採收符合外銷規格葉球約200顆(10箱)，留4~5片外葉採收後直接於田間裝箱，盡快送回包

裝廠真空預冷至5°C，再以冷藏貨運方式送至臺灣大學園藝暨景觀學系園產品處理實驗室進行試驗。

葉球樣品抵達實驗室後，於常溫下逐顆以消毒過的刀具進行外葉修整與切口修齊，留下1~2片外葉，測定鮮重選取500~700 g、外觀完好無病害與機械傷害之‘3號’葉球180顆，60顆以市售低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE) 塑膠袋作為包材，葉球樣品置入塑膠袋中央後以減壓封口機 (北全機械公司 PC-611, ROC) 進行抽氣低壓後封口(固定抽氣數秒，包裝袋緊貼葉球表面)；另外60顆抽氣低壓包裝條件如同上述，但封口前於袋內置入葉球鮮重1%劑量二氧化碳吸收劑鹼石灰 (Soda lime) (Alfa Aesar, U.S.A)；而對照組60顆葉球則以業者現行使用之25 μm厚LDPE袋包裝，共3個處理組別，完成包裝葉球外觀如附錄四所示。各樣品於袋上標示鮮重以利貯藏失重計算。完成包裝後置於10 mm厚雙層瓦楞紙箱，模擬目前商業貨櫃貯運1°C貯藏。

二. 調查項目與調查方法

(一)結球萵苣貯藏期間生理與品質之變化

試驗於1°C恆溫庫進行冷藏，在處理當日取5顆葉球進行外觀色澤、葉綠素含量、葉球硬度、葉脈脆度與總可溶性固形物含量品質分析，再另取3顆貯藏期間連續測定呼吸率，隔日測量對照組呼吸率與低壓包裝組之袋內氣體氧氣、二氧化碳組成。於貯藏6、8、10週測定呼吸率與包裝袋內氣體組成，並於每處理組樣品取出11顆葉球在10°C回溫1天，5顆用於外觀色澤、失重率、葉球硬度、葉脈脆度、總可溶性固形物、外觀腐爛率、心葉傷害程度與官能品評品質分析，並測定葉球組織乙醛、乙醇含量；另外3顆用於測量袋內氣體組成，其餘3顆用於酚類物質含量、苯丙胺酸裂解酵素及多酚氧化酵素活性測定。

1. 葉球外觀色澤與葉綠素測定

此項目測定方式同本論文第四章材料方法二. - (一) - 1.所述。

2. 呼吸率

此項目測定方式同本論文第四章材料方法二. - (一) - 2.所述。

3. 包裝袋內氣體成分分析

低壓包裝處理組，因袋內低壓環境無法直接抽取袋內氣體分析，故參考Park等(1993)及Saltveit (1982)方法，使用上蓋裝有氣閥連接真空幫浦之玻璃乾燥皿，建構減壓抽氣系統(附錄五)，並自製頂端裝有抽氣裝置的塑膠漏斗供排水集氣用。首先將乾燥皿置於木架上，倒入8~9分滿的蒸餾水，取未拆封袋之葉球樣品放入塑膠漏斗，完全浸入玻璃乾燥皿水中，排除氣泡後利用針頭於樣品袋戳洞解除密封，再以不鏽鋼環鎮壓固定塑膠漏斗與樣品包裝於水中，蓋上乾燥皿上蓋，啟動真空幫浦減壓抽氣30秒，利用排水集氣法使包裝袋內產品間隙氣體釋放集中於漏斗頂端，關閉幫浦恢復常壓後打開乾燥皿上蓋，以1 mL塑膠針筒由塑膠漏斗上的抽氣裝置抽取頂端氣體作為樣品。

使用配備熱傳導度檢測器(thermal conductivity detector, TCD)的GC-8AIT 氣相層析儀 (Shimadzu, Japan) 測定氧氣及二氧化碳濃度，分離管柱不鏽鋼材質外徑1/8"×內徑1/16"×長度6呎，氧氣分析管柱填充物為Molecular sieve 5A (80~100 mesh)；二氧化碳分析管柱則填充Porapak Q (80~100 mesh)。分析時層析管柱 (COL) 溫度設定為40°C，注射口與偵測器 (INJ/ DET) 溫度為80°C，並使用氫氣作為載流氣體 (carrier gas)，壓力設定為2 kg·cm⁻²。每次分析注入1 mL氣體樣品，分析結果以Q Chrom數據處理軟體 (訊華公司，臺灣)運算，並以1% O₂及1% CO₂作為標準品。

4. 葉球鮮重與失重率

此項目測定方式同本論文第四章材料方法二. - (一) - 3.所述。

5. 葉球硬度與葉脈脆度

此項目測定方式同本論文第四章材料方法二. - (一) - 4.與二. - (一) - 5.所述。

6. 總可溶性固形物含量

此項目測定方式同本論文第四章材料方法二. - (一) - 6.所述。

7. 外觀腐爛率

慣行包裝葉球腐爛時，表面會出現水浸狀，嚴重時此一區域會擴散且可於其中發現灰色菌絲，通常市售期間只要外觀有些微腐爛情形發生，消費者就會失去購賣意願。試驗期間，各處理皆於貯藏6、8及10週進入貯藏庫調查葉球腐爛數目，並挑出丟棄，低壓包裝葉球貯藏腐損情形與慣行包裝不同，但貯藏後期部分葉球出現組織液滲出現象，腐爛情況差異如附錄六所示，記錄出現此一現象的葉球數目，並挑出丟棄。

腐爛葉球的計算採累計制，計算方式如下：

$$\text{腐爛率 (\%)} = (\text{累計腐爛葉球數} / \text{貯藏個數}) \times 100\%$$

8. 心葉傷害程度

於貯藏6、8、及10週葉球縱切割剖半，以肉眼評估結球萵苣心葉褐變面積比例進行調查，並以計分方式表示傷害嚴重程度，0表示無傷害徵狀；1表示輕微(褐化面積為5%以下)；2表示輕度傷害(褐化面積為10%以上)；3表示中等(褐化面積達25%)；4表示嚴重(褐化面積達40%)；5表示極嚴重(褐化面積達50%)。當心葉傷害程度達到3級以上即判定產品失去商品價值。



圖 5-1、心葉傷害嚴重程度(1：褐化面積為 5%以下；2：褐化面積為 10%以上；3：褐化面積達 25%；4：褐化面積達 40%；5：褐化面積達 50%)

Fig. 5-1. The degree of lettuce head heart leaf injury(1 : browning area below 5% ; 2 : browning area above 10% ; 3 : browning area reach 25% ; 4 : browning area above 40% ; 5 : browning area above 50%)

9. 官能品評

官能品評調查方法參考區 (2012) 及 Larmond (1977)，於抽氣低壓包裝貯藏6、8及10週評估目視外觀 (visual appearance)、氣味 (aroma) 及整體接受度 (overall acceptance) 三大項目，又細分成樣品外觀品質、氣味、質地、整體接受度共四項。品評小組成員共10人，無抽菸、酗酒、濃妝艷抹等嗜好，年齡為20-25歲之間。本試驗於25°C冷氣房中進行，預備員於試驗前清楚告知品評員描述的定義，以降低品評員間之差異，樣品外觀以照片方式每次固定於同一電腦螢幕上呈現，氣味樣品則取30 g組織切碎後分別裝在不會吸附氣味之等體積聚丙烯 (polypropylene, PP) 塑膠盒中，葉球樣品切成約4×4 cm²大小供食用咀嚼後評估質地，品評員以眼睛及口鼻品評3種不同包裝處理之結球萵苣樣品，依差異性試驗 (difference test) 中結構式評分法 (structured scoring) 作為基礎，以1~5分表現之，分數越高者表示品質越佳。各項評分若低於3分以下，即判定失去商品價值。

- (1) 外觀品質(visual)：品評員目視照片，並判斷結球萵苣葉球葉片的翠綠程度及葉脈、切口之褐化程度給予1-5分，5分為葉片翠綠、葉脈及切口無褐化；4分為葉片翠綠、葉脈及切口有些許褐化出現；3分為葉片稍綠、葉脈及切口中度褐化；2分為葉片偏黃、葉脈及切口嚴重褐化；1分為葉片黃化、葉球嚴重褐化甚至伴隨腐爛情況發生。
- (2) 氣味(odor)：由品評員判斷是否出現無氧發酵異味、霉味等非新鮮結球萵苣氣味，5分為非常新鮮（無任何異味）；4分為還算新鮮；3分為普通；2分為有點怪（臭）味；1分為腐敗臭（黴）味。
- (3) 整體接受度(acceptance)：假設照片為展示架上的產品外觀，食用葉球切片樣品評估質地與風味，再根據整體感受評斷喜歡程度、是否具購買意願，5分為非常喜歡、購買意願極高；4分為喜歡、具購買意願；3分為普通、可能會購買；2分為不喜歡、不願購買；1分為非常不喜歡、不可能購買。

10. 葉球組織乙醛和乙醇含量測定

乙醛和乙醇含量測定方法參考自Huang (2009)，每顆樣品縱切1/8葉球組織以果菜汁機 (National MJ-C85N blender) (Matsushita, Japan)榨汁，使用15 mL塑膠離心管收集菜汁凍存於-20°C，測定前於4°C回溫至融化，取4 mL果汁樣品置於15 mL玻璃試管，以血清塞密封，於60°C熱水浴加熱20分鐘後取出，再使用2.5 mL氣密針 (SGE, Australia) 穿透血清塞抽取試管內頂空氣體作為樣品，以氣相層析儀注入1 mL樣品分析，層析管柱(COL)溫度設定為100°C，注射口與偵測器(INJ/DET)溫度為160°C，以氫氣、空氣與氮氣為載行氣體，壓力分別設定為0.5 kg·cm⁻²、0.8 kg·cm⁻²、1 kg·cm⁻²。乙醛、乙醇標準品為HPLC分析級(99.8%)(Sigma, USA)，分別以25、50、100、200 μL·L⁻¹及100、200、400、600、800、1000、1200 μL·L⁻¹濃度製作檢量線，濃度計算以Q Chrom數據處理軟體分析。將樣品分析結果分別代入乙醛、乙醇檢量線，即可得到樣品中乙醛及乙醇的含量。

使用配備火焰離子檢測器 (flame ionization detector; FID) 之GC-8A 氣相層析儀(Shimadzu, Japan) 測定乙醛及乙醇濃度，分離管柱為不鏽鋼外徑1/8"吋 × 內徑1/16"吋 × 長度1.83公尺，填充Porapak Q (80 ~ 100 mesh)。

(二) 結球萵苣葉球貯藏期間褐變反應基質含量與酵素活性測定

進樣當天隨機擇取3顆葉球進行測定，1°C貯藏2、4、6週各包裝處理隨機擇取3顆葉球置於10°C回溫一天後進行測定，每顆葉球分成外圍三分之一生理年齡較老的綠色外葉組織，以及球內三分之一靠近心葉的黃綠色幼嫩內葉組織，苯丙胺酸裂解酵素與多酚氧化酵素活性測定分別於外葉及內葉組織各取2 g切碎混合組織作為樣品；酚類化合物含量測定則各取10 g切碎混合組織作為樣品，取樣後立即裝入4號塑膠夾鏈袋並以液態氮急凍固定，貯存於-80°C凍箱直至分析測定。PAL活性、PPO酵素活性測定方法同本論文第三章材料方法三所述，最後將內、外葉組織測得結果平均為1重複，每處理測定3重複。



三. 數據統計與圖表繪製

本試驗之數據資料使用SAS軟體 (Statistic Analysis System software) 進行ANOVA統計分析，並以Least significant difference (L.S.D.) ($p \leq 0.05$) 分析顯著性差異。圖表繪製則使用Sigma Plot[®]軟體 (systat software Inc., USA)進行繪製。

結果

一. 結球萵苣葉球貯藏期間生理與品質之變化

1. 葉球外觀色澤與葉綠素變化

不同包裝方式之結球萵苣葉球貯藏期間葉球外觀變化如圖 5-2 所示，外葉色澤採收時亮度(L^* 值)為 55.4，25 μm LDPE 慣行包裝葉球外葉亮度貯藏後不斷上升，貯藏 6 週時達最高為 63.5，期間數值皆顯著高於其他包裝處理(圖 5-3A)；低壓包裝處理 L^* 值於貯藏 6 週降至 53.1，隨後開始上升，低壓包裝加入鹼石灰與否並無顯著差異，惟貯藏 10 週加入鹼石灰為 57.0，顯著高於未添加低壓包裝處理者 53.9(圖 5-3A)。採收時 a^* 值為-10.9，貯藏前期不同包裝處理無顯著差異，貯藏 6 週時上升至-9.6~-10.1，慣行包裝於貯藏 8 週快速攀升至-7.3，隨後不再明顯變化至貯藏結束(圖 5-3B)；低壓包裝處理並未隨貯藏時間顯著上升，貯藏 8 週低壓包裝+鹼石灰處理 a^* 值顯著高於低壓包裝，數值分別為-9.1 與-10.1，貯藏 10 週皆為-10.2，顯著低於慣行包裝(圖 5-3B)；貯前 b^* 值為 22.5，慣行包裝貯藏 6 週後快速上升至 24.5，貯藏 6~10 週變化不顯著，低壓包裝處理則於貯藏 6 週降至 21.1，貯藏 8 週低壓包裝+鹼石灰處理 b^* 值顯著低於低壓包裝，數值分別為 20.3 與 22.0，貯藏 10 週則升至 22.1 與 21.5，抽氣低壓包裝顯著低於慣行包裝(圖 5-3C)。採收時色相角為 115.9° ，貯藏前期不同包裝處理無顯著差異，貯藏 6 週時為 114.5° ~ 115.2° ，慣行包裝於貯藏 8 週快速下降至 106.8° ，隨後不再明顯變化至貯藏結

束 10 週為 105.5°(圖 5-4A)；低壓包裝處理則未隨貯藏時間顯著變化，至貯藏 10 週仍維持 114.8~115.4°，表示貯藏期間抽氣低壓包裝至貯藏末期仍維持葉片鮮綠，而慣行包裝則有黃化現象產生(圖 5-4A)。

葉綠素含量變化與葉片色相角趨勢類似，採收時數值為 18.3，慣行包裝貯藏期間葉綠素含量不斷下降，貯藏 8 週顯著降至 14.4，貯藏 10 週下降幅度更大達最低為 10.0；低壓包裝貯藏 8 週內無明顯變化數值在 18~22 之間，貯藏 10 週顯著下降，且低壓包裝處理顯著高於低壓包裝+鹼石灰處理，數值分別為 16.4 與 14.3(圖 5-4B)。

貯藏期間結球萵苣葉球中肋色澤採收時亮度(L*值)為 64.3，貯藏 6 週顯著下降至 57.1~59.2，隨後不再劇烈變化，貯藏 10 週為 56.8~59.9，不同包裝處理中肋亮度無顯著差異(圖 5-5A)。採收時 a*值為-2.1，慣行包裝貯藏 6 週顯著上升至 0.3，貯藏後期即不再顯著變化，貯藏 10 週為-0.4，期間其數值皆顯著高於其他包裝處理；低壓包裝處理貯藏期間 a*值則無顯著變化，數值維持在-1.4~-2.1 之間，添加鹼石灰與否並無明顯影響(圖 5-5B)。採收時 b*值為 8.14，貯藏期間各包裝處理皆無顯著變化維持 7.0~8.3 之間，僅貯藏至 10 週時低壓包裝+鹼石灰處理 b*值降低到 6.5 顯著低於其他處理(圖 5-5C)。採收時色相角為 104.5°，慣行包裝貯藏 6 週即顯著降低至 87.1°，貯藏 8 週仍無明顯變化，貯藏 10 週顯著降至最低為 71.8°，表示貯藏期間葉球中肋由綠轉黃，低壓包裝貯藏期間色相角一直維持在 100~104.5°間，添加鹼石灰與否並無差異，色相角顯著較高，至貯藏末期仍維持綠色(圖 5-5D)。

結球萵苣葉球莖部切口色澤採收時亮度(L*值)為 60.4，慣行包裝貯藏 6 週顯著降至 42.0，貯藏後期不再變化；低壓包裝則於貯藏 6 週降至 49.7~50.4，之後一直維持 48 以上，添加鹼石灰與否並無差異，低壓包裝貯藏期間亮度值顯著高於慣行包裝(圖 5-6A)。採收時 a*值為-3.7，變化趨勢與中肋 a*值相同，慣行包裝貯後顯著上升，貯藏 6 週上升至 8.7 即不再變化；低壓包裝則是貯藏 6 週顯著上

升至 0~1.2 即不再明顯變化，貯藏期間慣行包裝 a^* 值顯著高於減壓包裝者(圖 5-6B)。採收時 b^* 值為 12.4，慣行包裝貯藏期間 b^* 值不斷上升，貯藏 6 週上升至 15.5，貯藏 10 週更顯著上升至 20.2；低壓包裝貯藏期間 b^* 值無顯著變化，添加鹼石灰與否並無差異，貯藏期間慣行包裝 b^* 值顯著較高(圖 5-6C)。採收時莖部切口色相角為 103.7° ，慣行包裝貯藏 6 週顯著降至 60.7° ，貯藏 8 週升至 68° 即不再變化；低壓包裝貯藏 6 週降至 90° 左右，貯藏後期不再明顯變化，添加鹼石灰與否並無差異，貯藏期間低壓包裝葉球莖部切口色相角顯著高於慣行包裝，代表顏色由綠轉黃，而慣行包裝貯後莖部切口顯著較黃(圖 5-6D)。

2. 葉球呼吸率與包裝袋內氣體組成變化

結球萵苣葉球採收時於 20°C 測定呼吸率為 $24.8 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，移入 1°C 貯藏庫 1 天後即快速下降至 $7.9 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，貯藏 2~6 週顯著降至 $5 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 左右，貯藏後期開始出現回升，貯藏 8 週呼吸率回升至 $7.4 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，貯藏 10 週更是顯著上升至 $9.8 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (圖 5-7A)。

低壓包裝置入 1°C 貯藏隔日袋內氧氣濃度為 11.1%、二氧化碳濃度為 1.4%，與一般大氣組成已有差異，貯藏 6 週袋內氧氣顯著降至 1.6%，貯藏後期無明顯變化，於 10 週降至最低為 1.3%，添加鹼石灰與否對袋內氧氣濃度無顯著影響。低壓包裝袋內二氧化碳則於貯藏 6 週顯著上升至 8.4~16.0%，貯藏至 8 週仍持續上升為 13.2~19.6%，貯藏 10 週不再顯著變化約 15.9~20.0%，添加鹼石灰可有效降低貯藏期間袋內二氧化碳濃度(圖 5-7B)。

3. 總可溶性固形物含量變化

結球萵苣葉球採收時總可溶性固形物含量為 3.2%，隨貯藏時間而逐漸下降，慣行包裝貯藏 6 週顯著降至 2.8%，貯藏後期仍不斷下降，至貯藏 10 週達最低為 2.4%；低壓包裝則於貯藏 6 週顯著降至 2.9%，貯藏後期即不再明顯變化，貯藏期間總可溶性固形物含量顯著高於慣行包裝，而鹼石灰添加與否無顯著影響(圖

5-7C)。



4. 葉球硬度與中肋脆度變化

採收時葉球硬度為 13.3 N，貯藏期間葉球硬度小幅下降但未達顯著差異，至貯藏 10 週為 9.9~12.0 N，各包裝處理貯藏期間葉球硬度無顯著差異(圖 5-8A)。

中肋脆度則隨著貯藏時間而逐漸下降，採收時中肋脆度為 $6.2 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ ，慣行包裝貯藏 6 週顯著降至 $4.2 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 即不再明顯變化；抽氣低壓包裝變化趨勢相同，貯藏 6 週顯著降至 $4.7\sim 5.0 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 即不再明顯變化，貯藏期間低壓包裝中肋脆度顯著高於慣行包裝，是否添加鹼石灰則無顯著影響(圖 5-8B)。

5. 失重率與葉球外觀腐爛率變化

慣行包裝貯後失重率明顯上升，貯藏 6 週上升至 1.8% 即不再變化，為貯藏期間失重最高的處理；低壓包裝趨勢相同，貯藏 6 週顯著上升至 0.6% 即不再變化，若添加鹼石灰則貯藏期間失重不斷上升，至貯藏 10 週達最高為 1.3%，失重顯著高於低壓包裝處理(圖 5-9A)。

腐爛率為貯藏力的重要指標之一，慣行包裝貯後腐爛率不斷攀升，貯藏 6 週已高達 27.5%，貯藏 10 週時更高達 90% 幾乎全數腐爛；低壓包裝貯藏 6 週腐爛仍在 2% 以內，貯藏後期逐漸上升，至貯藏 10 週低壓包裝+鹼石灰腐爛率為 26.7%，低壓包裝則更低為 18.3%，只有慣行包裝的 1/5，顯示抽氣低壓包裝可顯著抑制腐爛率攀升(圖 5-9B)。

6. 心葉傷害程度與官能品評變化

本試驗使用材料經過修整並擇取外觀無瑕疵、無不良異味之新鮮葉球進行貯藏試驗，故品質良好，貯前各項官能品評皆判定為 5 級，慣行包裝葉球中肋與莖部採收切口於貯藏 6 週出現褐變現象，外觀品質評比部分於貯藏 6 週即低於 3 級失去商品價值，且貯藏延長到 10 週葉片明顯黃化；低壓包裝明顯抑制中肋與

採收切口的褐變，且無葉片黃化現象，故外觀品評與整體接受度顯著高於慣行包裝，貯藏期間外觀品評皆維持 4 級以上(圖 5-10A)。慣行包裝葉球氣味品評於貯藏期間皆維持 4 級以上，至貯藏末期仍無明顯異味；低壓包裝葉球異味較為明顯，貯藏 8 週氣味品評分數已顯著低於慣行包裝(圖 5-10B)。慣行包裝葉球即使至貯藏末期仍未出現心葉傷害；低壓包裝葉球貯藏 6 週心葉傷害即達 1 級，隨貯藏時間逐漸上升，但貯藏 10 週傷害程度仍在 3 級以內(圖 5-10C)。慣行包裝葉球整體接受度於貯藏 6 週低於 3 級失去商品價值，貯藏期間官能品評結果顯著低於其他包裝處理；低壓包裝葉球整體接受度則於貯藏 8 週後因異味與心葉傷害而快速下降，貯藏 10 週低於 3 級失去商品價值，添加鹼石灰無顯著影響，僅貯藏 10 週時低壓包裝+鹼石灰處理整體接受度顯著低於低壓包裝處理且與慣行包裝無異(圖 5-10D)。

7. 組織乙醛和乙醇含量變化

官能品評結果顯示慣行包裝處理並無明顯異味產生，採收時葉球組織乙醛和乙醇含量分別為 $13.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 與 $6.0 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，貯後組織乙醛和乙醇含量未有明顯變化，僅貯藏 6 週乙醛含量有顯著上升，期間乙醛和乙醇含量分別為 $11.4\sim 18.5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 與 $5.9\sim 7.0 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，顯著低於低壓包裝。低壓包裝處理於貯藏 6 週已出現異味，此時乙醛、乙醇含量皆已明顯上升，低壓包裝處理貯藏 6 週劇烈上升後即不再顯著變化，期間乙醛和乙醇含量分別為 $47.6\sim 59.8 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 與 $1191.9\sim 2104.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，低壓包裝+鹼石灰處理貯藏 8 週乙醛和乙醇含量顯著升至最高分別為 $81.0 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 與 $1089.64 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，貯藏 10 週又顯著降至 $46.7 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 與 $1209.1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ，是否添加鹼石灰對葉球組織乙醛和乙醇含量無顯著影響，僅貯藏 8 週時低壓包裝處理之乙醛含量顯著低於低壓包裝+鹼石灰處理(表 5-1)。

二. 結球萵苣葉球發育期間褐變反應基質含量與酵素活性測定

1. 苯丙胺酸裂解酵素活性測定

葉球貯藏期間 PAL 活性呈現先降後升之勢，採收時 PAL 活性為 $0.35 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，慣行包裝貯藏 6 週無明顯變化，活性為 $0.24 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏 8 週活性顯著上升至與採收時水準無異，貯藏期間其 PAL 活性顯著高於其他包裝處理。低壓包裝於貯藏 6 週顯著降至最低為 $0.16 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏後期明顯上升，貯藏 10 週升至 $0.28 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，而低壓包裝+鹼石灰處理則於貯藏 6 週顯著降低至 $0.21 \mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，貯藏後期即不再變化，是否添加鹼石灰對 PAL 活性無顯著影響(圖 5-11A)。

2. 多酚氧化酵素活性測定

貯藏期間不同包裝處理結球萵苣 PPO 活性變化趨勢各有不同，採收時多酚氧化酵素活性為 $4268 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，慣行包裝貯藏 6 週活性顯著上升至 $6916 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，貯藏 8 週降回 $4884 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，貯藏期間其 PPO 活性顯著高於其他包裝處理。低壓包裝貯藏期間 PPO 活性無明顯變化，至貯藏 10 週活性為 $2828\sim 3466 \text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1} \text{protein}$ ，是否添加鹼石灰對 PPO 活性無顯著影響(圖 5-11B)。

討論

一、 低壓包裝顯著抑制 PPO 活性、葉綠素降解、中肋褐變、莖部採收切口褐變現象，維持結球萵苣良好外觀品質長達 10 週

為延緩結球萵苣貯藏後期葉片黃化、中肋褐變與莖部採收切口褐變現象，本研究利用低壓包裝技術降低包裝袋中氧氣分壓，創造貯藏期間袋內低氧、高二氧化碳環境，降低生理代謝速率與抑制褐變發生。低壓包裝葉球貯藏期間外觀翠綠，維持良好外觀視覺品質(圖 5-2)，中肋 L^* 值於貯藏 6 週降至 58 左右即無顯著變

化、b*值維持 7~8.5 之間，雖然與慣行包裝無顯著差異，不過低壓包裝樣品中肋 a*值的上升與色相角的下降皆被顯著抑制，a*值保持-2 左右、色相角則為 100° 上下，表示色澤維持淡綠色(圖 5-5)；莖部採收切口色澤數值變化與中肋色澤變化趨勢相同，低壓包裝處理切口 L*值在 40~50 之間、a*值維持在 0 左右、色相角則為 90° 上下，惟 b*值小幅下降維持在 6~10 之間，慣行包裝則不斷上升至 20 左右，色澤維持黃綠色，以上結果顯示低壓包裝顯著抑制葉球貯後褐變現象(圖 5-6)。低壓包裝處理 PAL 維持在 0.15~0.25 $\mu\text{mol cinnammic acid}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，顯著低於慣行包裝(圖 5-11A)，PPO 活性只有慣行包裝的 1/2，貯藏期間活性 3000~4000 $\text{Unit}\cdot\text{mg}^{-1}\text{protein}$ (圖 5-11B)，推測褐變抑制現象是袋內氧氣分壓降低導致 PPO 酵素活性降低所致。王和王 (1988) 提到萵苣、洋菇與菜豆 PPO 活性會被高二氧化碳或低氧所抑制，Siriphanich 和 Kader (1985) 將萵苣中肋切片貯於 0°C，貯藏期間 15% 二氧化碳添加與否對於 PPO 活性無顯著影響，但在 20°C 回溫一天後空氣處理組 PPO 活性顯著升高，15% 二氧化碳處理置於 20°C 空氣一天 PPO 活性維持不變，若維持原氣體條件回溫則 PPO 活性不升反降，為所有處理活性最低者，表示二氧化碳對於 PPO 活性有抑制效果，與本試驗結果相符。雖二氧化碳對於抑制結球萵苣褐變有良好效果，但 Siriphanich 和 Kader (1985) 與 Mateos 等(1993) 試驗結果皆顯示二氧化碳處理結球萵苣於低溫貯藏期間具有顯著較高 PAL 活性，於 20°C 空氣回溫一天 PAL 活性上升更為顯著；酚類化合物含量於貯藏期間卻無顯著差異或顯著較低，不過只要置於 20°C 空氣回溫一天，酚類化合物含量顯著增加，與 PPO 產生反應後高二氧化碳傷害褐斑病(brown stain)生理障礙因而發生，故建議氣變包裝結球萵苣應避免回溫，且拆封後宜儘快使用，以免生理障害發生影響外觀品質，本試驗貯後不拆封置於 10°C 回溫一天以模擬櫥架販售，能維持良好外觀，且貯藏期間未有褐斑病發生。

外觀翠綠為消費者辨別葉菜類蔬菜品質優劣、新鮮與否的指標之一，因為葉片黃化為該項產品老化最明顯特徵，意味著葉綠素會隨老化降解(Lipton, 1987)。

低壓包裝除抑制褐變反應發生外，葉球也維持良好翠綠外觀長達 10 週(圖 5-2)，慣行包裝葉球貯藏 6 週葉片即出現黃化現象，其 L*值不斷攀升、a*值及 b*值也顯著較高(圖 5-3)，色相角更從 116°顯著降至 104°左右，顏色由濃綠轉為黃綠色(圖 5-4)；低壓包裝葉球色澤數值於貯後並無顯著變化，色相角維持 114~116°之間，葉綠素含量於貯藏期間皆顯著高於慣行包裝葉球(圖 5-4)。Eckhardt 等(2004)及 Shemer 等(2008)指出葉綠素的降解始於葉綠素分解酵素(chlorophyllase)催化其上的長碳鏈斷裂生成自由態的植醇(phytol)與脫植醇葉綠素(chlorophyllide)，葉綠素分解酵素通常以不活化型式存在於類囊體膜(thylakoid membrane)，當老化引起膜系崩解，類囊體膜即被破壞導致葉綠素分解酵素活性上升，誘發葉綠素分解，下一階段脫植醇葉綠素紫質環(tetrapyrrole)中的鎂離子被鎂離子螯合酵素(magnesium-dechelataase)移去形成脫鎂葉綠素(pheophorbide a)，至此葉綠素降解產物仍維持綠色；再經脫鎂葉綠素氧化酵素(pheophorbide a oxygenase)氧化作用使紫質環斷鍵開環，形成紅色葉綠素降解物(red chlorophyll catabolite)，失去綠色色澤。據此推測降低氧氣分壓有助於避免葉綠素降解，低壓包裝葉球因而維持較高葉綠素含量。此外，Singh 等(1972b)將萵苣貯於 2°C、氧氣 2.5%、二氧化碳 2.5% 環境 60 天，萵苣組織可維持高葉綠素含量，與本試驗結果相符。

二、 低壓包裝結球萵苣貯藏期間袋內氧氣消耗至 1%達平衡、二氧化碳則不斷上升至高達 20%，總可溶性固形物含量於貯藏 8~10 週顯著較高

慣行包裝葉球貯藏 2 週呼吸率達到平衡維持 5 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹左右，貯藏 6 週後呼吸率顯著上升至貯藏 10 週為 10 mg CO₂·kg⁻¹·hr⁻¹(圖 5-7A)，總可溶性固形物含量也從貯藏 6 週後開始顯著低於低壓包裝，貯藏 10 週更顯著至貯藏 8 週的 2.8%劇降至 2.4%(圖 5-7C)；低壓包裝袋內氧氣濃度由試驗起始 11%劇降至 1%左右達到平衡，二氧化碳濃度則不斷累積上升由包裝完成初始 0.5%至貯藏 8 週平衡高達 20%(圖 5-7B)，考慮結球萵苣推薦貯藏條件不適合添加 CO₂ (Kader, 2002b；Saltveit, 2004)，因此本試驗嘗試添加鹼石灰於低壓包裝袋內，避免二氧化碳累積

過高，預試驗使用鹼石灰二氧化碳吸收效率約 $24 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，吸收效果可達 100 小時，葉球呼吸率約為 $0.01 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ，計算得知每公克葉球組織約需 0.01 g 鹼石灰，故於每一包裝袋內添加樣品鮮重 1% 鹼石灰，添加鹼石灰顯著降低低壓包裝袋內二氧化碳濃度，貯藏 10 週為 16%，但鹼石灰添加與否對於總可溶性固形物含量則無影響。

低壓包裝袋內氣體如同預期於貯藏後形成低氧、高二氧化碳狀態，王和王 (1988) 指出呼吸作用供應園產品生理、生化作用及維持細胞完整所需能量，改變大氣條件造成呼吸率下降，表示新陳代謝速率減緩，減少植體糖分、有機酸與貯藏物質消耗，園產品壽命因而延長；Thompson (2010) 亦提及降低氧氣或提高二氧化碳濃度皆會使園產品呼吸率降低。由於產品在低氧環境多個參與三羧酸循環反應的酵素活性會受到影響，呼吸率因而下降 (Goodenough and Thomas, 1981；Kays and Paull, 2004)，有利減少貯藏物質消耗，Wang (1983) 研究結果顯示結球白菜貯於 0°C 、1% 氧氣 3 個月，組織中果糖、葡萄糖、蔗糖的消耗顯著較貯藏於空氣者少，可延緩維生素 C、葉綠素、還原糖含量下降，並且延長貯藏壽命、降低腐爛率，Singh 等 (1972b) 指出結球萵苣利用氧氣 2.5%、二氧化碳 2.5% 氣調 (controlled atmosphere；CA) 於 35°F 貯藏 75 天，CA 處理維持較高的澱粉與總糖含量，且可溶性蛋白含量顯著較低，表示 CA 處理可延緩老化避免大分子水解成小分子，並降低生理代謝速度減少貯藏物質消耗，故推測此乃本試驗結球萵苣低壓包裝貯藏 10 週總可溶性固形物含量維持較高的重要原因。

三、 低壓包裝結球萵苣貯藏期間葉球硬度無顯著變化，失重低於 1.5% 以下，脆度至貯藏 10 週仍保持 $5 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$


結球萵苣葉球貯藏期間失重影響葉片質地甚鉅，慣行包裝葉球貯藏 6 週失重上升至 2% 左右即不再變化，貯藏期間葉球硬度維持 12~14 N、中肋脆度由 $6.2 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $4 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右 (圖 5-8)。低壓包裝+鹼石灰貯藏葉球失重顯著較高，貯藏期間不斷上升，至貯藏 10 週約 1.3% (圖 5-9A)。低壓包裝者失重率則於貯藏 6 週升

至 0.6% 即不再變化，葉球硬度 9~14 N 之間(圖 5-8A)，與慣行包裝無顯著差異；脆度則自採收時 $6.2 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ ，貯藏 6 週後降至 $5 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右即不再變化，質地變化趨勢與本論文第四章貯藏試驗結果相近。雖然低壓包裝+鹼石灰處理葉球失重率較高，貯藏 10 週仍在 1.5% 以內，未達造成結球萵苣葉球硬度下降的 2.7% 失重率(Nunes and Emond, 2003)。

低壓包裝貯藏期間顯著抑制中肋脆度下降，添加鹼石灰無顯著影響。園產品採收質地變化除了受失水改變膨壓影響外，細胞壁結構成分改變亦為影響因子之一(劉, 1995; Kays and Paull, 2004)，細胞壁主要成分為 25~30% 纖維素(cellulose)、15~25% 半纖維素(hemicellulose)、35% 果膠(pectins)、5~10% 結構性蛋白質(structural protein)(柯, 2002; Taiz and Zeiger, 2006)，Rouse 和 Barmore (1974)與 Zauberman 和 Schiffmann-Nadel (1972)指出酪梨果肉後熟軟化發生在聚半乳糖醛酸酵素(polygalacturonase)活性高峰及果膠酯酵素(pectinesterase)活性低點後的 2~3 天；酪梨的纖維素水解酵素(cellulase)與聚半乳糖醛酸酵素於 2.5% 氧氣活性被抑制 50~60%，且貯藏在氧氣 2%、二氧化碳 10% 具有顯著較低的果膠酯酵素活性，果實硬度維持良好(Barmore and Rouse, 1976; Kanellis and Solomos, 1986)。此外，蘋果貯藏於空氣半乳糖苷酵素(β -galactosidase)活性增加，半乳糖(galactose)從細胞壁流失，此現象可經 2% 氧氣處理抑制(Bartley, 1974)，而蘋果 CA 貯藏則可抑制原果膠(protopectin)轉變為可溶性果膠物質，減少細胞壁結構物質流失，延緩可溶性果膠的分解速率(Thompson, 2010)。故推測本試驗低壓包裝維持葉球中肋脆度應與低氧(1%)抑制細胞壁結構物質流失所致。


四、低壓包裝結球萵苣雖顯著抑制腐爛，但乙醛、乙醇逐漸累積，貯藏後期產生異味、心葉傷害，使品評分數下降

腐爛與褐變為結球萵苣貯藏外觀品質劣變的主因(Ramsey *et al.*, 1959; Castaner *et al.*, 1997; Tomas-Barberan *et al.*, 1997; Ryder, 1999; Hisaminato *et al.*, 2001)，為長期貯藏的限制因子。本試驗結球萵苣貯後腐爛率不斷上升(圖 5-9B)，



慣行包裝葉球貯藏 6 週腐爛率已達 27.5%，超過業界可接受標準，貯藏 10 週更高達 90%，觀察病徵與本論文第四章貯藏試驗描述相似，皆有灰白色菌絲生長，且嚴重腐爛後會出現黑色疑似菌核物體，研判是由真菌 *Botrytis cinerea* 所引起的灰黴病(Ramsey *et al.*, 1959；Davis *et al.*, 1997；Ryder, 1999)。低壓包裝葉球外觀腐爛率於貯藏期間顯著被抑制，貯藏 8 週仍未達 10%，貯藏 10 週低壓包裝+鹼石灰處理組腐爛率 26.7% 顯著高於低壓包裝處理 18.3%；此外，低壓包裝者腐爛現象為按壓葉球失去彈性且袋內有組織液滲出，與慣行包裝所見的腐爛現象有所差異(附錄四)。灰黴病原真菌為採後主要病害之一，高二氧化碳可抑制病原菌的生長(Thompson, 2010)，Crisosto 等(2002)以 5% 二氧化碳處理‘Thompson Seedless’葡萄即有抑制灰黴病腐爛的效果，若增高為 10% 則效果更為顯著，且不影響果實糖酸比(風味)，然而貯藏於二氧化碳濃度 10% 以上異味顯著增強，因此以氧氣 3% 搭配二氧化碳 10% 的 CA 條件最適合葡萄貯藏，可避免異味累積與腐爛率上升；葡萄於 0°C、12% O₂+12% CO₂ CA 貯藏前以 40% CO₂ 進行預措 48 小時，貯藏 7 週腐爛率由 100% 降至 7.4%，此處理對於外觀品質與官能品評無顯著影響，但對灰黴病原菌生長有顯著的抑制效果(Teles *et al.*, 2014)。本試驗低壓包裝內累積 8%~21% 高二氧化碳濃度推測為抑制腐爛發生的主因。

雖然結球萵苣低壓包裝優點很多，但仍有部分不良影響，葉球貯藏期間低壓包裝處理組視覺外觀 4 分以上、整體接受度 3 分以上維持達 8 週以上，可是也因異味導致氣味品評在貯藏 8 週之後開始出現顯著差異，低壓包裝貯藏 10 週葉球異味與心葉傷害造成貯藏壽命終了。降低氧氣及提高二氧化碳濃度易誘發蔬果產品產生無氧呼吸，結球萵苣氧氣臨界濃度為 1~3%(Lipton, 1975；Kader, 2002b)，當二氧化碳濃度提高時無氧呼吸氧氣臨界濃度也會隨之增高。一般情況下，糖解作用生成的丙酮酸(pyruvate)會進入粒線體內，氧化成二氧化碳及水，在低氧逆境下，細胞為了能量的持續供應，會加速糖解作用進行，丙酮酸無法氧化進入粒線體進行三羧酸循環(tricarboxylic acid cycle, TCA cycle)，而是經丙酮酸脫羧酵素



(pyruvate decarboxylase)與酒精脫氫酵素(alcohol dehydrogenase)反應生成乙醛(aldehyde)與乙醇(alcohol)，使得 CO₂ 產生速率出現轉折回升現象，稱為巴斯德效應(Pasteur effect) (Salisbury and Ross, 1985；Kader, 1986；Kays and Paull, 2004；Hopkins and Huner, 2008)。當結球萵苣貯於 2°C、氧氣 2.5%、二氧化碳 2.5% 環境 39 天，對品質的維持有大幅改善(Singh *et al.*, 1972a)，Saltveit (1997)指出結球萵苣適合貯於 0°C、氧氣濃度 1~3% 且無二氧化碳的環境，當二氧化碳濃度高於 2~5% 即可能對萵苣產生傷害。本試驗低壓包裝貯藏 6 週後氧氣濃度降至 1.5% 左右，二氧化碳濃度則升至 10~20%，明顯高於適合結球萵苣貯藏的二氧化碳濃度，故貯後葉球組織乙醛、乙醇含量明顯累積，含量皆高於慣行包裝葉球，乙醛含量增高 3~5 倍、乙醇含量更是高達數百倍；此外低壓包裝葉球出現心葉傷害徵狀尤其嚴重，貯藏 6 週葉球中心乙醛含量顯著高於外葉，即使低壓包裝添加鹼石灰處理組葉球中心乙醇含量也顯著高於葉球外葉(表 5-2)。無氧呼吸產生乙醛、乙醇、乳酸累積於組織中，當含量逐漸上升後會造成細胞毒害，導致細胞死亡(Kader, 1986；Kays and Paull, 2004)，推測本試驗低壓包裝結球萵苣葉球心葉傷害源於乙醛、乙醇累積造成的毒害作用。Kidd 和 West (1923)指出高二氧化碳能引起冷藏蘋果產生中心褐化症狀，隨後也有其他產品陸續被報導，例如馬鈴薯(Davis, 1926)、‘Mc-Intosh’蘋果(Smock and Doren, 1941)、‘Barlett’西洋梨(Kidd and West, 1937)與‘Anjou’西洋梨(Hansen, 1942)。以塑膠袋包裝的‘Anjou’西洋梨，袋內二氧化碳累積過高就容易產生褐心症，若於袋內置入石灰吸收二氧化碳，使其濃度維持 3% 以下，即可減少梨的褐心症(Hansen, 1942)。本研究試以鹼石灰(soda lime)吸收包裝內的二氧化碳，其雖具有顯著吸收二氧化碳效果，但二氧化碳累積濃度仍高於 10%(圖 5-7B)，因此抑制心葉傷害的成效相較未添加鹼石灰處理並不顯著。若要改善上述不良情況，可由包裝袋氣體通透性著手，針對不同厚度與材質之包裝膜，篩選出氧氣通透率極低、二氧化碳通透率佳的包裝膜，抑或開發低成本、低體積、高吸收效率的二氧化碳吸收劑，期能降低包裝內二氧化碳累積濃度、維

持袋內 1~3% 低氧條件，維持葉球貯藏期間良好品質，避免袋內累積異味及心葉傷害發生。



五、 低壓包裝結球萵苣維持良好外觀達 8~10 週以上，較慣行包裝延長 2~4 週，貯藏期間顯著抑制中肋與莖部採收切口褐變現象

低壓包裝與氣變包裝(modified atmosphere packaging; MAP)技術相似，皆是利用產品呼吸作用消耗氧氣釋放二氧化碳，再配合包裝袋塑膠膜對這兩種氣體透氣性，以減低袋內氧氣濃度及提高二氧化碳濃度，降低產品生理代謝與抑制微生物滋生，達到保鮮效益的處理技術，不同之處僅在於包裝密封貯藏前，前者使用抽氣裝置除去袋內部分空氣以降低氧氣分壓，期能盡早達到低氧環境以抑制褐變反應發生 (Kader, 2002; Brecht, 2009; Zhuang *et al.*, 2013)。由於氣變包裝技術具有藥劑殘留困擾、環境汙染程度低等優點，因此易為消費者所接受，其運用於新鮮園產品採後處理潛力極佳，除了可以延緩老化、減輕或抑制寒害，更對於採後病、蟲害與生理障礙具良好控制效果，因此逐漸廣泛應用於園產品運輸與貯藏階段 (Kader, 2002; Brecht, 2009; Zhuang *et al.*, 2013)，為目前園產品採後處理技術開發的趨勢，故本研究參考其原理，期能開發出可提高貯運品質且成本低廉的結球萵苣包裝技術，供業界使用。

‘3 號’結球萵苣葉球經低壓包裝貯藏期間葉球外葉與中肋色相角無顯著變化，葉綠素含量顯著高於慣行包裝，PPO 活性低且無顯著變化，並顯著抑制中肋及莖部採收切口 a^* 值上升，使中肋色相角於貯藏期間無顯著差異，明顯延緩中肋與莖部採收切口褐變的發生，維持良好外觀長達 10 週(圖 5-1)，而總可溶性固形物含量、中肋脆度、失重率與腐爛率品質參數於貯藏後期表現皆顯著優於慣行包裝葉球；但是低壓包裝貯藏 6 週後袋內二氧化碳高達 10% 以上，導致葉球組織乙醛、乙醇累積量明顯增高，貯藏 8 週葉球官能品評可聞出明顯異味，且心葉傷害程度嚴重已達失去商品價值的邊緣。總結以上所述，低壓包裝葉球貯藏可維持良好外觀達 8~10 週，相較慣行包裝處理貯後容易發生葉片黃化、中肋褐變、採

收切口褐變，低壓包裝技術於 1°C 冷藏環境可再延長貯藏期 2~4 週。



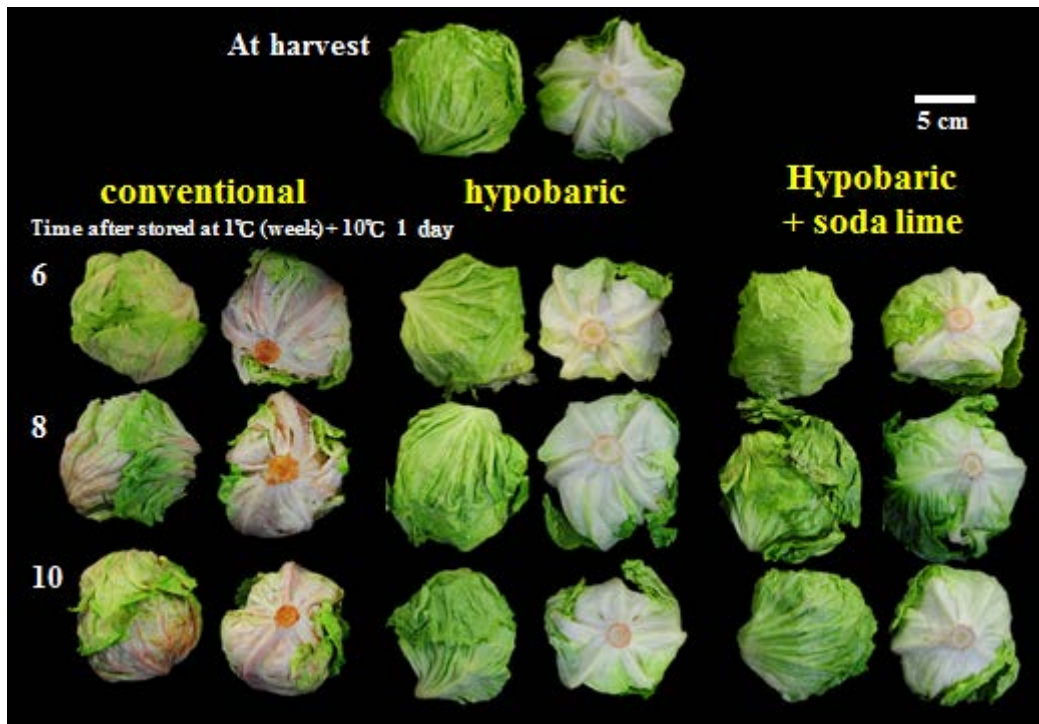


圖 5-2、‘3 號’結球萵苣經慣行包裝(conventional package)、低壓包裝(hypobaric package) 及低壓包裝+鹼石灰(hypobaric package + soda lime)葉球 1°C 貯藏期間外觀之變化

Fig. 5-2. Change of the appearance of ‘No. 3’ lettuce treated with conventional package, hypobaric package , or hypobaric packaging + soda lime treatment stored at 1°C.

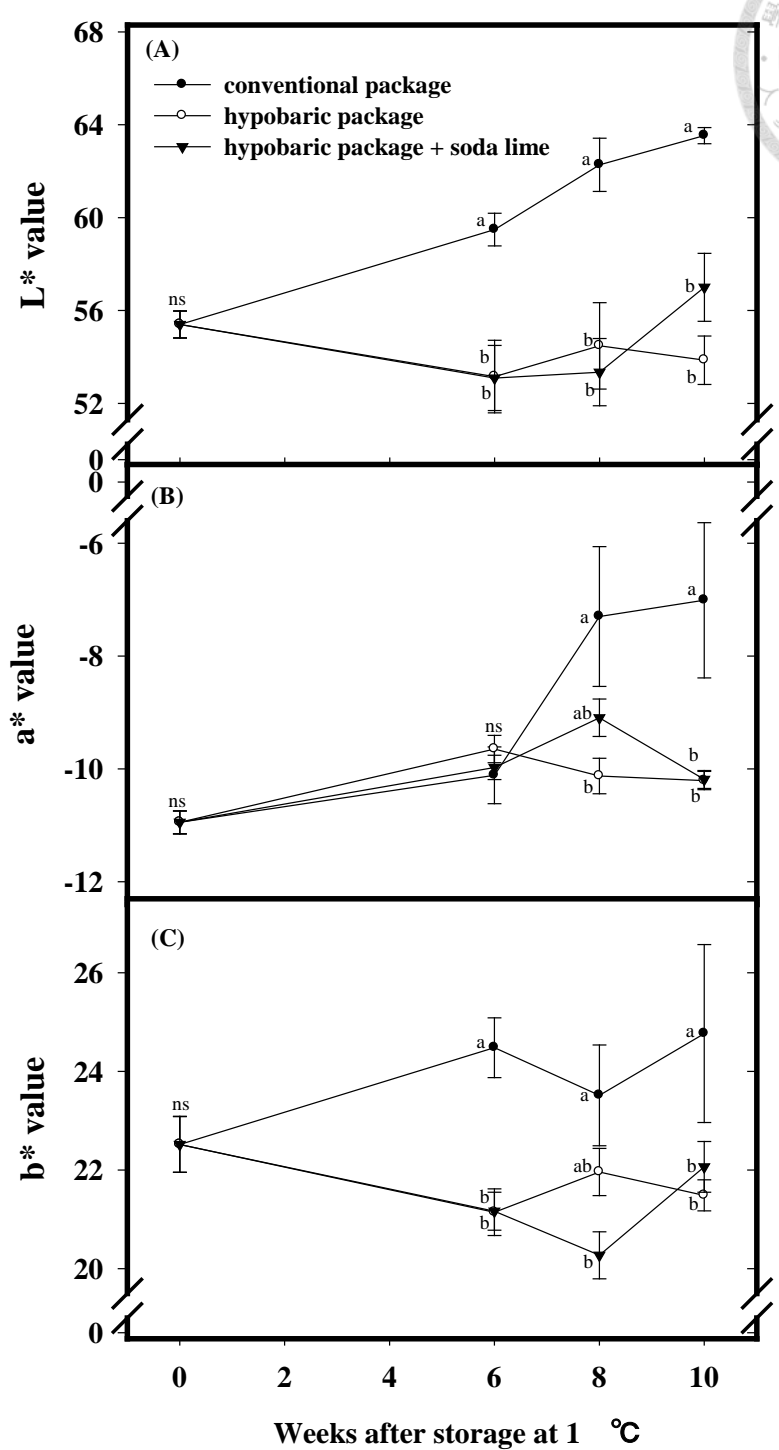


圖 5-3、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3 號' 結球
 萵苣 1°C 貯藏期間葉球外葉色澤之變化

Fig. 5-3. Change of leaf color of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

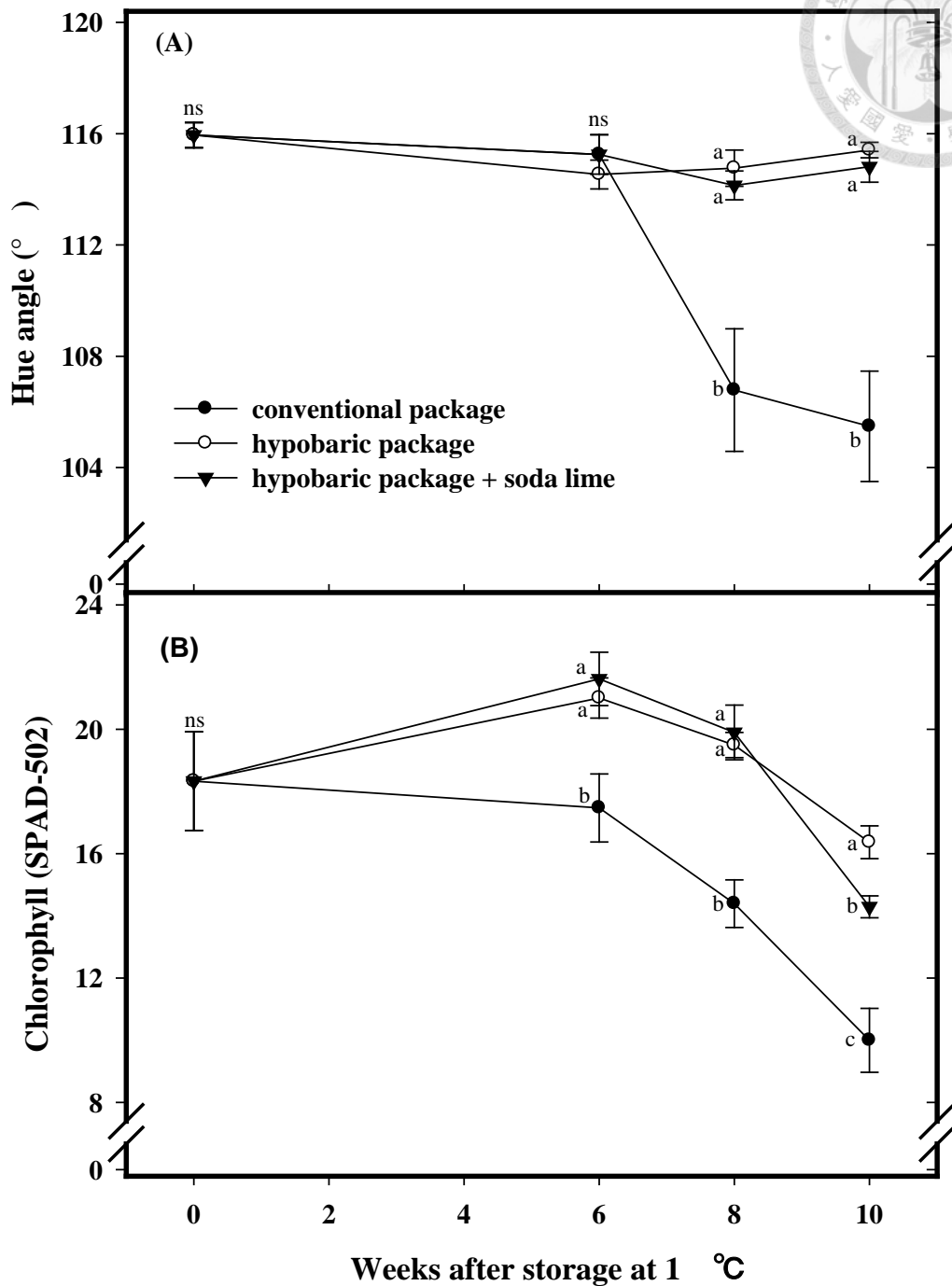


圖 5-4、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3號' 結球
萵苣 1°C 貯藏期間葉球外葉色相角與葉綠素之變化

Fig. 5-4. Changes of leaf hue angle (°) and chlorophyll content of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

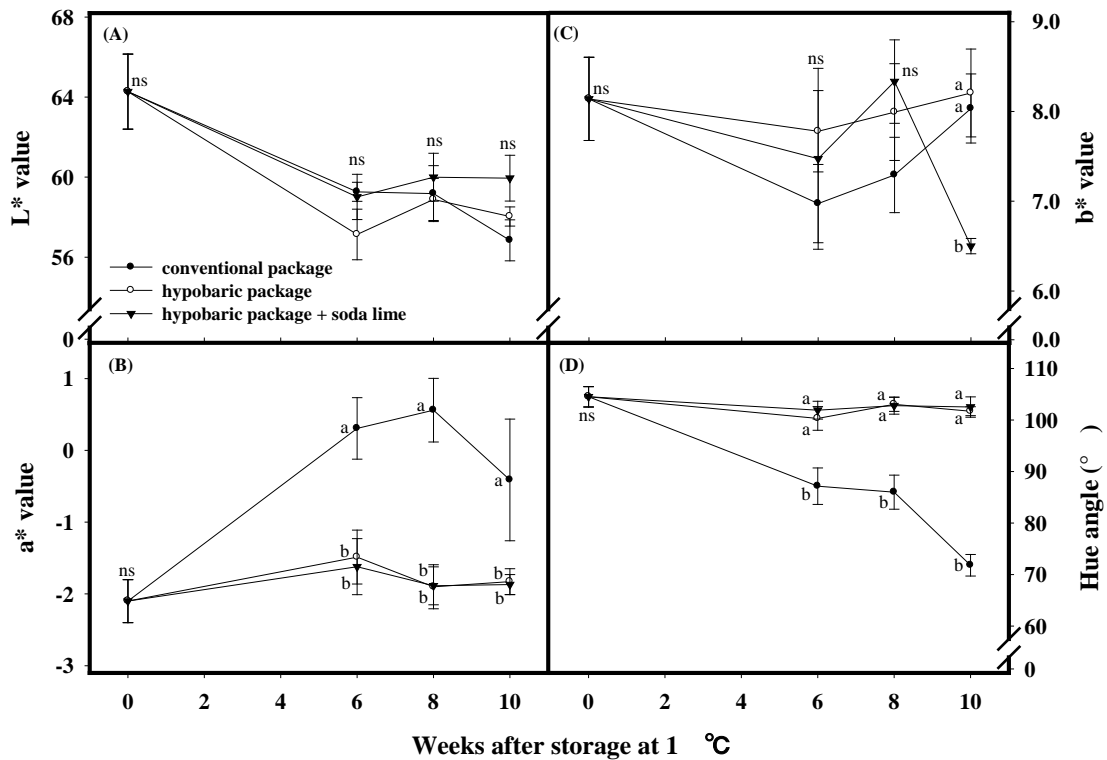


圖 5-5、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3號' 結球
萵苣 1°C 貯藏期間葉球中肋色澤之變化

Fig. 5-5. Change of midrib color of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

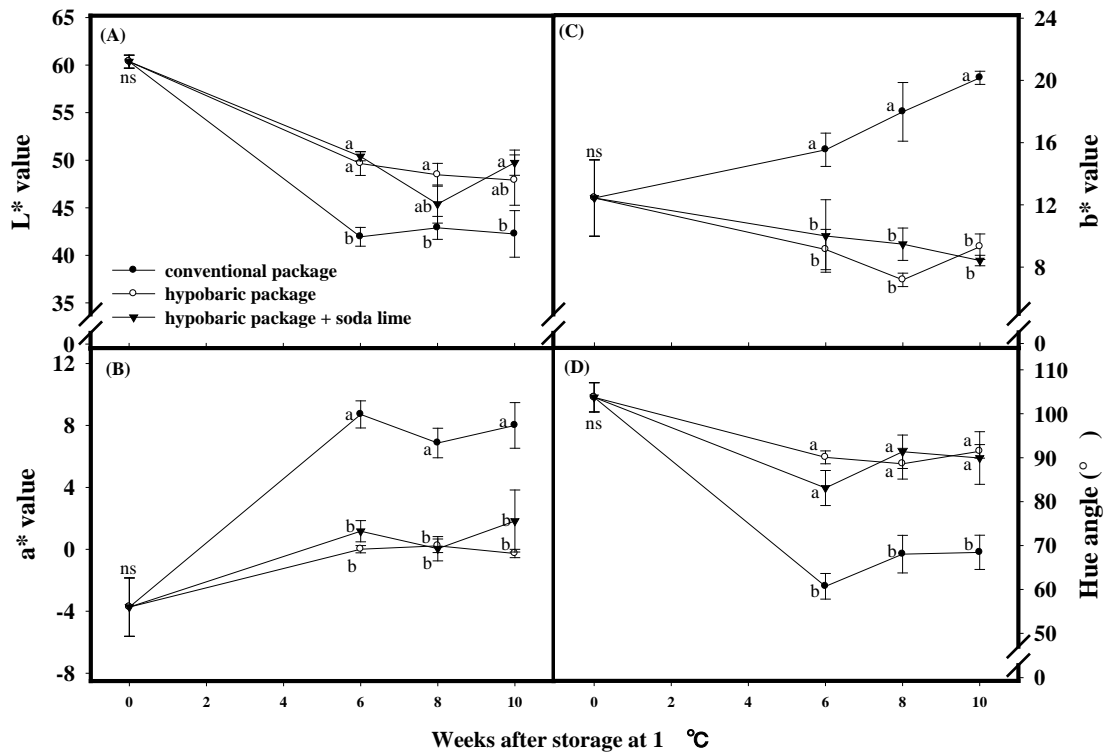


圖 5-6、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3號' 結球萵苣 1°C貯藏期間葉球莖部採收切口色澤之變化

Fig. 5-6. Change of butt color of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

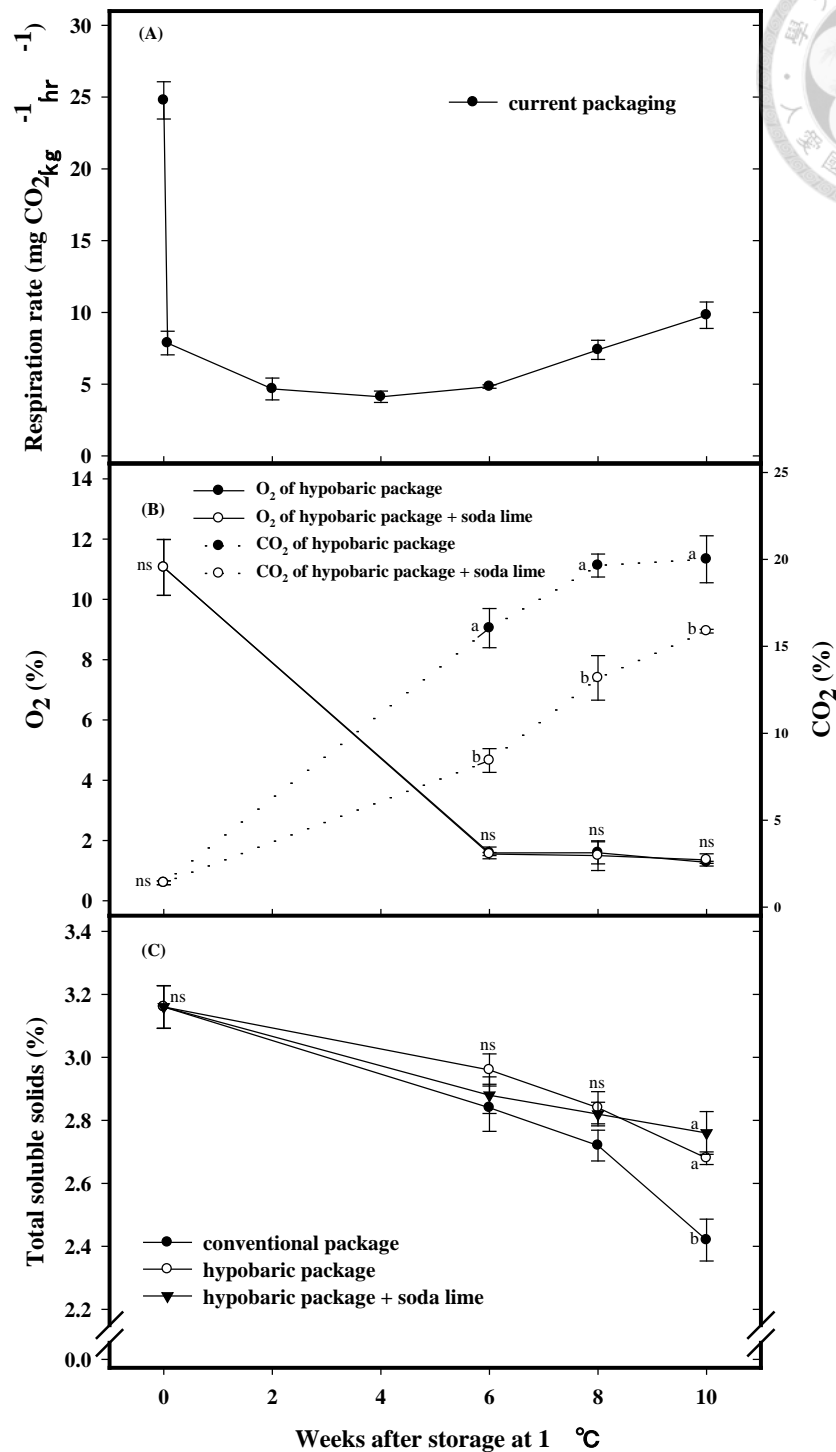
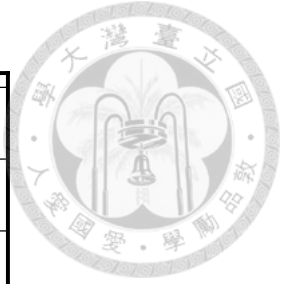


圖 5-7、慣行包裝結球萵苣 1°C 貯藏期間呼吸率變化(A)、低壓包裝袋內氣體變化 (B)與葉球總可溶性固形物含量(C)之變化

Fig. 5-7. Change in respiration rate of conventional package (A), O₂ and CO₂ concentrations of hypobaric package (B), total soluble solids content of all above package treatments stored at 1°C (C).

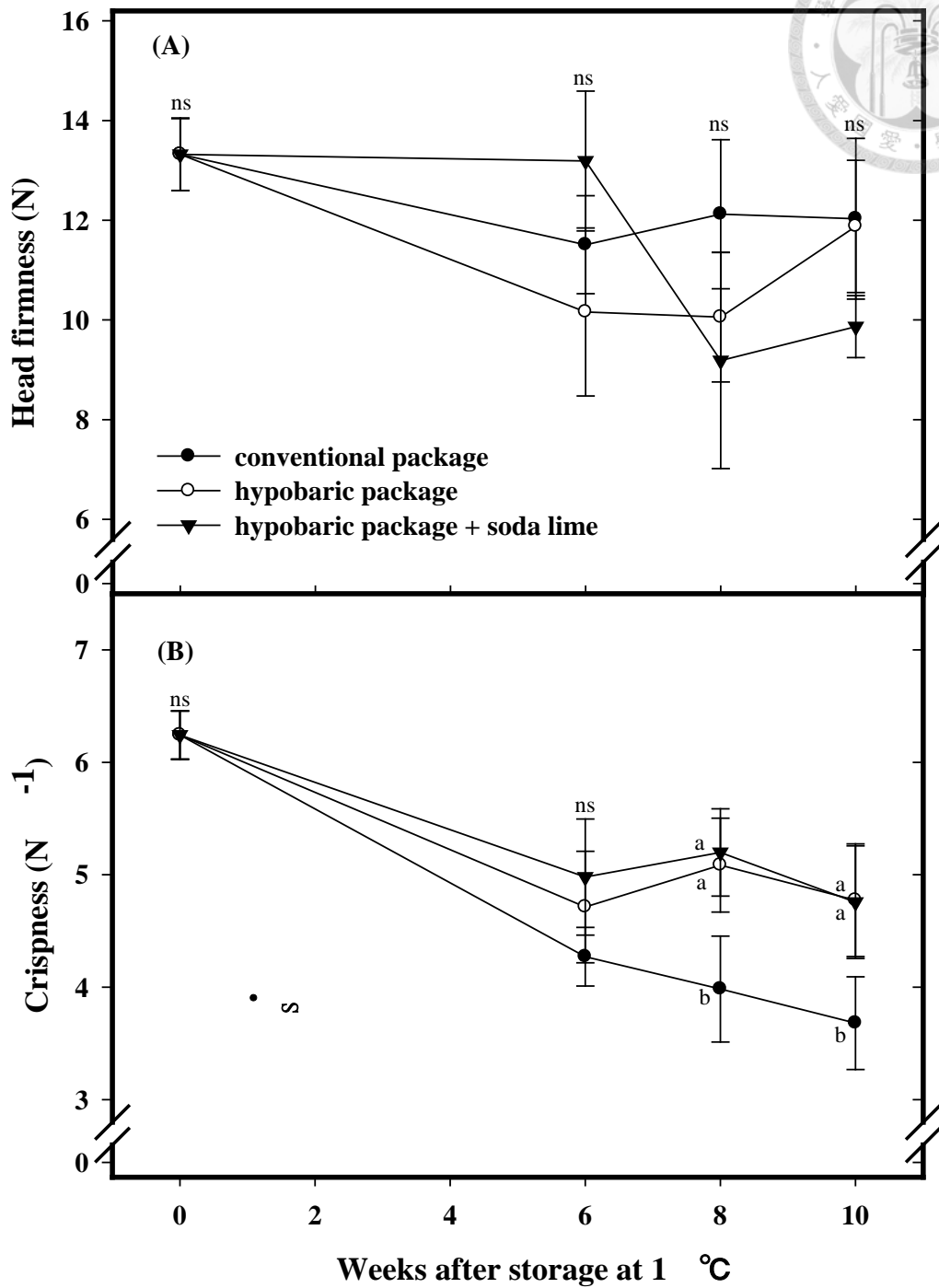


圖 5-8、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3號' 結球萬苣 1°C貯藏期間葉球硬度(A)與中肋脆度(B)之變化

Fig. 5-8. Changes of head firmness and crispness of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

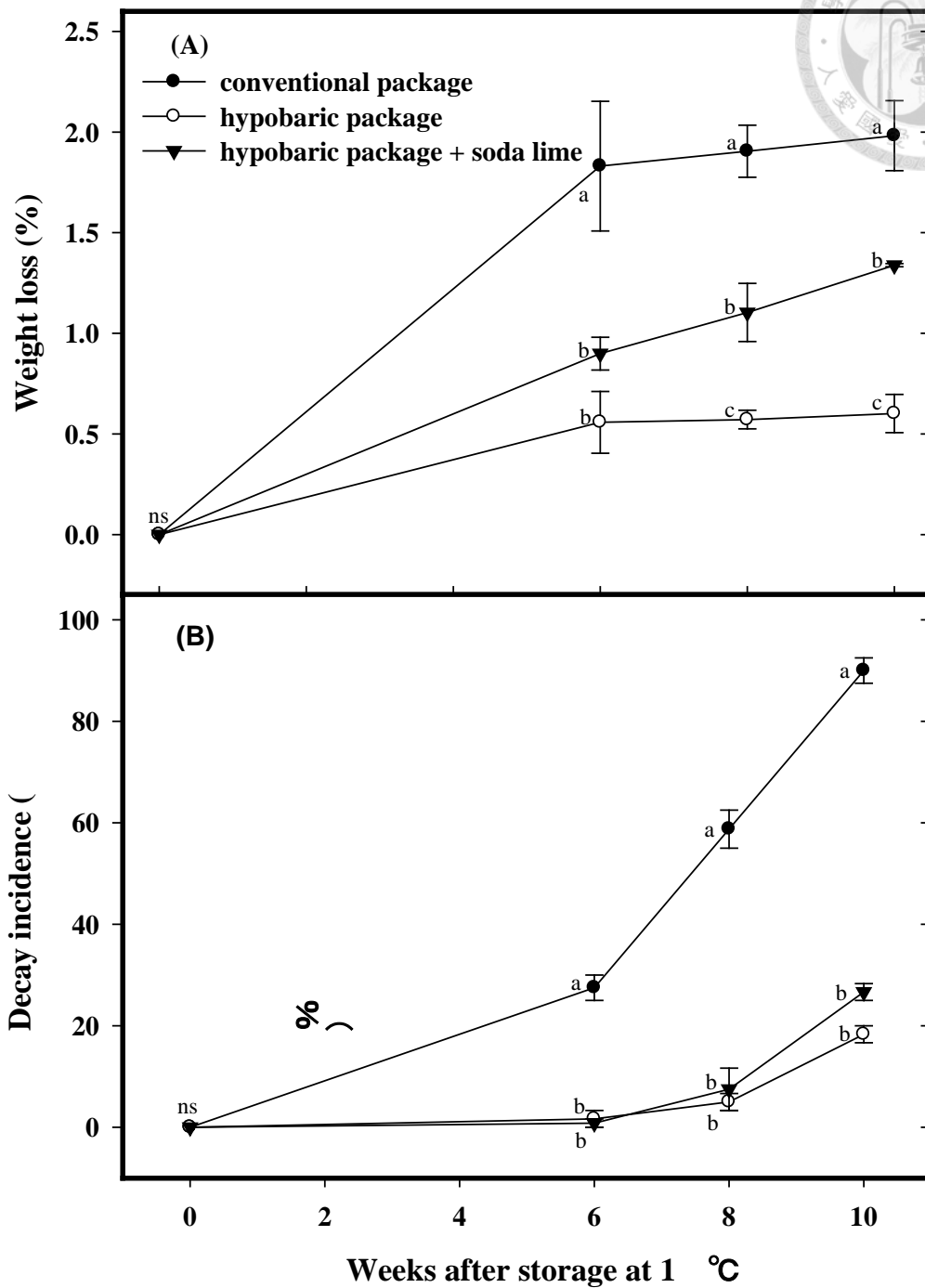


圖 5-9、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3號' 結球
萵苣 1°C 貯藏期間葉球失重率(A)與外觀腐爛率(B)之變化

Fig. 5-9. Change in weight loss and decay incidence of 'No. 3' lettuce treated with conventional package (●), hypobaric package (○), or hypobaric package + soda lime (▼) stored at 1°C.

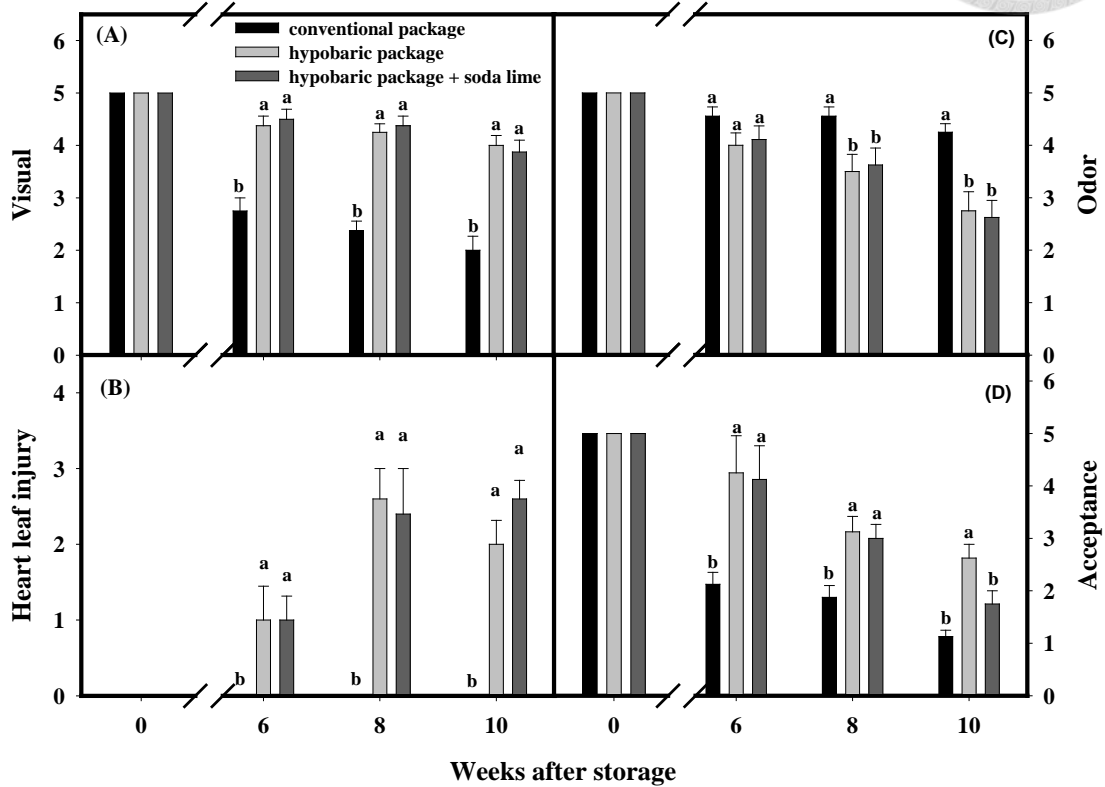


圖 5-10、不同包裝(慣行包裝、低壓包裝、低壓包裝+鹼石灰) '3 號' 結球萵苣 1 °C 貯藏期間外觀品質 (A)、心葉傷害程度(B)、氣味品質 (C)與購買意願 (D)之變化

Fig. 5-10. Changes in visual quality (A), heart leaf injury (B), odor (C) and acceptance (D) of 'No. 3' lettuce treated with conventional package, hypobaric package, or hypobaric package + soda lime stored at 1°C. (Quality scale : 5 = excellent ; 4 = good ; 3 = limit of marketability ; 2 = poor ; 1 = inedible)

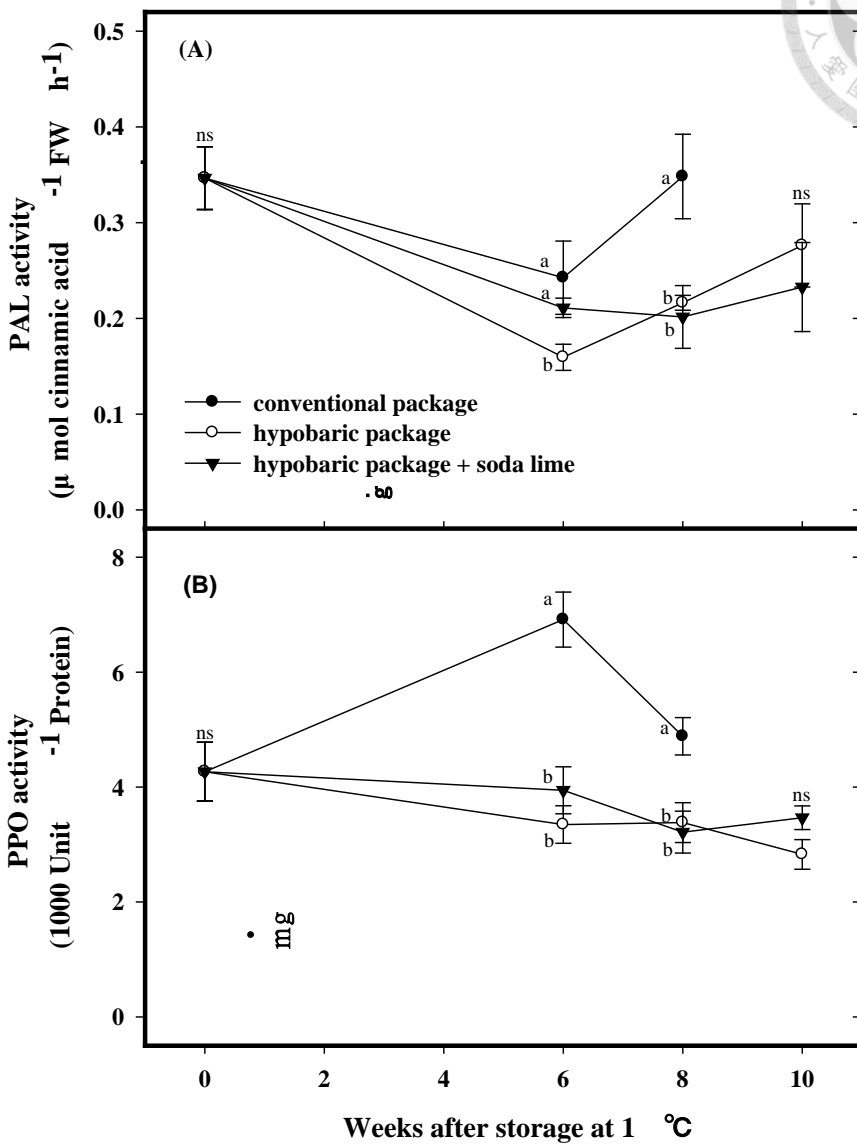
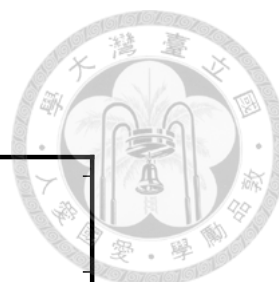


圖 5-11、不同包裝(●慣行包裝；○低壓包裝；▼低壓包裝+鹼石灰) '3 號' 結球萵苣 1°C貯藏期間葉球 PAL 活性 (A)、酚類化合物含量 (B)、PPO 活性(C)之變化

Fig. 5-11. Change in PAL activity (A)、phenolics content (B)、PPO activity (C) of 'No.3' lettuce head in conventional package(●), hypobaric package (○) and hypobaric package + soda lime(▼) treatment stored at 1°C.



表 5-1、慣行包裝、低壓包裝及低壓包裝+鹼石灰 '3 號' 結球萵苣葉球 1°C 貯藏期間乙醛、乙醇含量之變化。

Table 5-1. Changes in aldehyde and ethanol content of 'No. 3' lettuce treated with conventional package, hypobaric package, or hypobaric package + soda lime stored at 1°C.

Weeks after storage	Aldehyde ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			Ethanol ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	conventional package	hypobaric package	hypobaric package + soda lime	conventional package	hypobaric package	hypobaric package + soda lime
0	13.08	13.08	13.08	5.95	5.95	5.95
6	18.49 b ^z	59.47 a	66.64 a	69.80 b	1099.87 a	974.33 a
8	14.62 c	59.82 b	81.02 a	6.44 b	2104.05 a	1898.38 a
10	11.41 b	47.62 a	46.72 a	5.94 b	2028.81 a	1089.64 ab

^z Means in the same row followed by a different letter are significantly by L.S.D. at $p \leq 0.05$.



表 5-2、慣行包裝、低壓包裝及低壓包裝+鹼石灰 '3 號' 結球萵苣 1°C 貯藏 6 週葉球外葉與心葉乙醛、乙醇含量之比較。

Table 5-2. Comparisons in aldehyde and ethanol content of cap leaves and heart leaves on 'No. 3' lettuce treated with conventional package, hypobaric package, or hypobaric package + soda lime after 6 weeks stored at 1°C.

treatment	Aldehyde ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		Ethanol ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	cap leaves	heart leaves	cap leaves	heart leaves
conventional package		18.49		69.80
hypobaric package	39.81 a ^z	38.30 a	1099.9 a	1157.2 a
hypobaric package + soda lime	45.72 b	68.46 a	939.50 b	3276.7 a

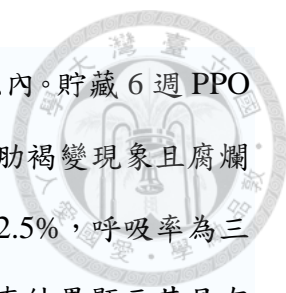
^z Means in the same row followed by a different letter are significantly by L.S.D. at $p \leq 0.05$.



第六章 結論

臺灣結球萵苣產業於近年發展蓬勃，現以供應外銷為主，其中日本市場佔 8 成以上。結球萵苣採收成熟度影響採後品質甚鉅，外銷發展初期農民常為了高產而採收過熟葉球，除了容易發生粉紅中肋等生理障害外，更造成截切加工損耗增加，使截切成品率降低，而導致產銷雙方爭執，此一現象目前雖有改善，但採收成熟度判定仍依賴經驗，由農民按壓葉球緊實度判斷採收時間。故本研究於國內結球萵苣外銷主要種植季節 11 月下旬進行試驗，測定不同成熟度葉球硬度、葉球重量、呼吸速率、乾物率、總可溶性固形物含量、褐變反應相關酵素(PPO、PAL)活性與褐變反應基質酚類化合物含量之品質與生理參數，期能找出其與成熟度的關係，將成熟度指標客觀量化，定植 9 週時葉球重量約 500~700 g，葉球已成長至適當大小且按壓具有彈性不鬆軟，呼吸率與酚類化合物含量為發育期間最低，總可溶性固形物含量與乾物率也趨於穩定不再降低，葉球硬度為 18~24 N；若延遲採收時間，雖然葉球重量會上升，但品質參數會下降，且 PPO 活性持續上升而增加葉球對褐變的敏感度，因此建議採收重量 500~700 g、硬度 18~24 N 的葉球，於 11~12 月進行定植約 55~60 天可達此一標準。

目前國產結球萵苣外銷日本以供應截切加工廠為主，日方市場每年約需 50 萬噸結球萵苣，其中 8 成為超市完整葉球流通，僅不到 2 成供應業務加工用途，且國內業界不斷有生力軍加入，導致競爭劇烈外銷平均單價逐年下降，故部分業者開始規劃轉型供應日本超市通路，期能區隔市場避免削價競爭，需逐顆套袋，增加備貨時間，且買方對於品質要求也更加嚴苛，因此亟需進行貯運期間葉球品質劣變因子與品種間差異的相關研究。國內主要結球萵苣栽培品種‘大將’、‘常利 6 號’與‘3 號’葉球經過真空預冷後，以慣行具有透氣孔之 25 μm LDPE 袋套袋後貯藏於 1°C，期間呼吸率降至 10 $\text{mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 以下，葉球硬度無顯著



變化，總可溶性固形物與葉球中肋脆度逐漸下降，失重率在 2% 以內。貯藏 6 週 PPO 活性顯著上升，因此‘大將’與‘常利 6 號’部分葉球出現中肋褐變現象且腐爛率已達 20% 以上；而‘3 號’葉球仍維持良好外觀且腐爛率僅 12.5%，呼吸率為三參試品種中最低且總可溶性固形物含量維持最佳，加上發育調查結果顯示其具有球形扁圓整齊包裝空間利用率佳優點，因而推薦‘3 號’結球萵苣為較適合長期貯藏品種，於 1°C 貯藏可維持良好外觀長達 4~6 週。

為解決貯藏期間中肋與莖部採收切口褐變導致外觀品質下降的問題，以‘3 號’結球萵苣葉球比較低壓包裝與慣行包裝之保鮮效益，前者 1°C 貯藏期間維持低 PPO 活性，中肋與切口褐變現象維持良好外觀達 8 週，並維持高葉綠素與高總可溶性固形物含量，葉球硬度無顯著變化，中肋脆度維持較佳，失重率極低 1.5% 以下，抑制腐爛效果更為顯著，貯藏 6 週低於 5%，貯藏 10 週控制在 30% 以內；但是貯藏 6 週後袋內處於 1% 左右低氧環境且二氧化碳累積過高達 10% 以上，導致組織內乙醛、乙醇大量累積，使得袋內開始產生異味造成氣味品評分數下降，葉球也開始出現心葉傷害且貯藏越久問題越顯嚴重，即使添加葉球鮮重 1% 劑量鹼石灰在貯藏 6 週時對於品質無顯著影響，且添加鹼石灰作為二氧化碳吸收劑會增加整體包裝成本，因此建議結球萵苣使用低壓包裝進行貯藏，於 1°C 可維持良好外觀長達 8 週，相較慣行包裝延長 2~4 週。

抽氣低壓包裝可解決日本超市難以接受的莖部採收切口褐變問題，貯運壽命的延長也允許開發航程需數週以上的長程海運外銷市場(如歐洲國家、加拿大等)，更可延長國內市場供貨期，若未來培育出耐熱品種或高溫期生產技術，則可以全年供應國內市場，減少對進口結球萵苣的依賴，產業能獲得永續發展。惟抽氣低壓包裝為密封包裝不具透氣孔，可能因無法檢疫燻蒸而遭進口國拒絕，且貯藏 8 週乙醛、乙醇大量累積，產生異味及嚴重心葉傷害，因此若能測試不同包裝膜材質，或找出二氧化碳吸收效果更強更持久的吸收劑，包裝袋打微孔避免袋內二氧化碳濃度累積過高，並進行檢疫試驗證明袋內低氧、低溫環境對檢疫害蟲的殺蟲


效果，相信改善以上缺點之後此技術更具實業發展價值，促進國內結球萵苣產業發展。



參考文獻




- 大藪正史、杉山信男. 1997. レタスの生長に伴う炭水化物濃度の変化. 園学雜 66:557-562.
- 大雪地区営農改善連絡協議会. 2001. レタス類の栽培. 上川支庁大雪地区農業改良普及センター, 北海道.
- 王建一、王自存. 1988. 大氣成分對園產品生理與生化之影響. 中國園藝 34:220-248.
- 王自存. 1997. 氣調技術應用在蔬菜採後保鮮之研究. 園產品採後處理與運銷技術研討會專刊. 台灣省農業試驗所編印. p. 204-217.
- 王憶鎧. 2005. 截切蔬菜之處理技術及產業之應用. 園產品採後處理技術之研究與應用研討會專刊. 台灣省農業試驗所編印. p. 120-130.
- 加藤徹. 1963. 發育經過からみたレタスの栽培技術. 農及園 38:1854-1858.
- 加藤徹. 1967. 野菜の結球現象, p. 63-109. 刊於: 杉山直儀編著. 野菜の發育生理と栽培技術. 誠文堂新光社, 東京.
- 加藤徹. 1974. レタス, ハクサイはなぜ巻くか. 化学と生物 12:844-850.
- 伊東秀夫. 1947. 甘藍の結球性と早期抽苔性. 農学 1:554-560.
- 何偉真. 2006. 台灣冬季生產結球萵苣外銷之探討. 中國園藝 52:277-290.
- 林棟樑. 2004. 結球萵苣採後處理技術. 農業世界 248:28-30.
- 林棟樑. 2005. 萵苣, p. 277-290. 臺灣農家要覽增訂(三版). 行政院農委會. 臺北. 臺灣
- 林棟樑. 2008. 外銷結球萵苣生產現況與展望. 農友 59:10-12.
- 林棟樑、謝明憲. 2012. 台灣外銷結球萵苣採後處理技術發展之探討. 園產品採後處理技術研討會專刊. 屏東科技大學農園生產系編印. pp. 141-145.

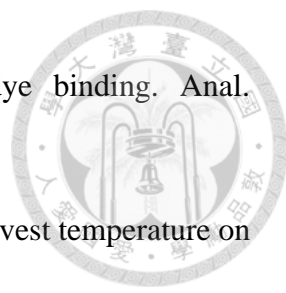
- 
- 林煥章. 2009. 結球萵苣產銷概況與輔導措施執行情形. 農政與農情 204:51-54.
- 柯勇. 2002. 植物生理學. 藝軒.
- 洪立、黃涵、嚴新富. 1992. 蔬菜名彙集. 台大園藝系, 台北. 臺灣.
- 徐兆生、張合龍、謝丙炎. 2005. 萵苣系列優良品種簡介. 長江蔬菜 11:9-10.
- 翁愷慎. 2009. 安眠抗癌的輕食蔬菜—萵苣. 鄉間小路 35(10):6-7.
- 區少梅. 2012. 食品感官品評學與實習. 第三版. 華格那企業公司, 臺中.
- 許涵鈞、謝明憲、林棟樑、王三太. 2010. 耐熱結球萵苣引種觀察比較試驗. 行政院農委會臺南區農業改良場研究彙報 55:36-43.
- 農委會. 2002-2015. 農產貿易統計資料庫. <
<http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/trade/TradeReport.aspx>>
- 農畜產業振興機構. 2013. 野菜情報別冊統計資料. <
<http://books.google.com.tw/books?id=Q2zqoAEACAAJ>>
- 暖地園芸研究所野菜、メロン研究室. 2003. 秋どりレタスの好適品種. 農業総合研究センター. 千葉県.
- 解偉妮、陳建揚. 2010. 食品脆度的客觀表徵及其通用測量公式的研究. 食品科學 31:150-152.
- 農業藥物毒物試驗所. 2012. 植物保護手冊. 行政院農業委員會.
- 廖芳心、洪立、黃涵. 1993. 甘藍及結球白菜之結球生理. In “蔬菜生產與發展研討會”, pp. 181-192. 農業試驗所, 台中, 農業試驗所, 台中.
- 廖芳心、吳明哲. 1997. 溫度對甘藍結球過程中葉片發育及醣含量之影響. 中國園藝 43:350-357.
- 劉富文. 1995. 園產品採後處理及貯藏技術. 行政院農委會臺灣省政府農林廳.
- Al-Ati, T. and J.H. Hotchkiss. 2002. Application of packaging and modified atmosphere to fresh-cut fruits and vegetables, p. 305-338. In: O. Lamikanra (ed.). Fresh-cut fruits and vegetables: science, technology, and market., CRC Press, Boca Raton,




FL.

- Altunkaya, A. and V. Gokmen. 2008. Effect of various inhibitors on enzymatic browning, antioxidant activity and total phenol content of fresh lettuce. *Food Chem.* 107:1173-1179.
- Anese, M., M.C. Nicoli, G. Dall'Aglio, and C.R. Lerici. 1995. Effect of high pressure treatments on peroxidase and polyphenoloxidase activities. *J. Food Biochem.* 18:285-293.
- Artes, F. and J.A. Martinez. 1996. Influence of packaging treatments on the keeping quality of 'Salinas' lettuce. *Lebenson Wiss Technol.* 29:664-668.
- Augustin, M.A., H.M. Ghazali, and H. Hashim. 1985. polyphenol oxidase from guava (*Psidium guajava* L.). *J. Sci. Food Agric.* 36:1259-1265.
- Ballantyne, A., R. Stark, and J.D. Selman. 1988. Modified atmosphere packaging of shredded lettuce. *International Journal of Food Science and Technology* 23:267-274.
- Barmore, C.R. and A.H. Rouse. 1976. Pectinesterase activity in controlled atmosphere stored avocados. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101:294.
- Bartley, I.M. 1974. β -Galactosidase activity in ripening apples. *Phytochemistry.* 13:2107-2111.
- Barros, M. and M.E. Saltveit. 2013. Microbial growth in fresh-cut lettuce increases when wound-induced phenolic accumulation is suppressed. *Postharvest Biology and Technology* 83:34-39.
- Bassett, M.J. 1975. The role of leaf shape in the inheritance of heading in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 100:104-105.
- Bauernfeind, J.C. 1982. Ascorbic acid technology in agricultural, pharmaceutical, food, and industrial applications., p. 395-498. In: P.A. Seib and B. M. Tolbert (eds.).

- 
- Ascorbic Acid: Chemistry, Metabolism, and Uses. American Chemical Society, Washington, DC, USA.
- Benjawan, C., P.T. Chutichude, and S. Khumkratok. 2008. Effect of harvesting index on browning reaction and changes of tissue structure in santol fruits. *Pak. J. Biol. Sci.* 11:1212-1219.
- Bensink, J. 1958. Morphogenetic effects of light intensity and night temperature on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with special reference to the process of heading. *Proc. Royal Netherlands Acad. Sci. Ser.* pp. 104-105.
- Bensink, J. 1961. Heading of lettuce (*Lactuca sativa* L.) as a morphogenetic effect of leaf growth. *Proc. XV Int. Hortic. Cong. Advances in Hortic. Sci., Vol. 1.* Pergamon Press, New York. pp. 470-475.
- Bensink, J. 1971. On morphogenesis of lettuce leaves in relation to light and temperature. PhD thesis. Wageningen University.
- Billaud, C., E. Regaudie, N. Fayad, F.A. Richard-Forget , and J. Nicolas. 1995. Effect of cyclodextrins on polyphenol oxidation catalyzed by apple polyphenol oxidase., p. 295-312. In: C. Y. Lee and J. R. Whitaker (eds.). *Enzymatic Browning and Its Prevention.*, ACS Symp. Ser. 600, Washington, D.C.
- Biswal, U.C. and B. Biswal. 1984. Photocontrol of leaf senescence. *Photochem. Photobiol.* 39:875–879.
- Bolin, H.R. and C.C. Huxsoll. 1989. Storage stability of minimally processed fruit. *J. Food Process. Preserv.* 13:281-292.
- Bolouri-Moghaddam, M.R., K. Le Roy, L. Xiang, F. Rolland, and W. van den Ende. 2010. Sugar signalling and antioxidant network connections in plant cells. *FEBS J.* 277:2022-2037.
- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram

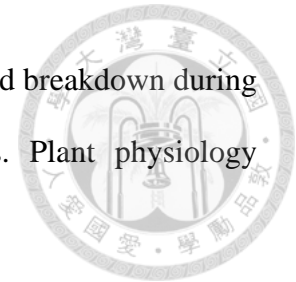
- 
- quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72:248-254.
- Brecht, P., A. A. Kader, and L.L. Morris. 1973a. Influence of postharvest temperature on brown stain of lettuce. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98:399-402.
- Brecht, P., L. L. Morris, C. Cheyney, and D. Janecke. 1973b. Brown stain susceptibility of selected lettuce cultivars under controlled atmospheres and temperatures. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98:261-263.
- Brecht, J.K., M. Sherman, and J.J. Allen. 1986. Film wrapping to improve the postharvest quality of Florida head lettuce. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 99:135-140.
- Brecht, J.K. 1995. Physiology of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30:18-22.
- Brecht, J.K. 2009. Vegetables, p. 445-461. In: E. M. Yahia (eds.). *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities.*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Buchanan-Wollaston, V., T. Page, E. Harrison, E. Breeze, P.O. Lim, H.G. Nam, J.-F. Lin, S.H. Wu, J. Swidzinski, K. Ishizaki, and C.J. Leaver. 2005. Comparative transcriptome analysis reveals significant differences in gene expression and signalling pathways between developmental and dark/starvation-induced senescence in *Arabidopsis*. *Plant J.* 42:567–585.
- Campos-Vargas, R. and M.E. Saltveit. 2002. Involvement of putative chemical wound signals in the induction of phenolic metabolism in wounded lettuce. *Physiologia Plantarum* 114:73-84.
- Campos-Vargas, R., H. Nonogaki, T. Suslow, and M.E. Saltveit. 2005. Heat shock treatments delay the increase in wound-induced phenylalanine ammonia-lyase

- 
- activity by altering its expression, not its induction in Romaine lettuce (*Lactuca sativa*) tissue. *Physiol. Plant.* 123:82-91.
- Cantwell, M.I. and R.F. Kasmire. 2002. Postharvest handling systems : flower, leafy, and stem vegetables, p. 423-433. In: A. A. Kader (eds.). Postharvest technology of horticulture crops. University of California Agriculture and Natural Resources Publication, California.
- Castaner, M., M. Gil, and F. Artes. 1997. Organic acids as browning inhibitors on harvested “Baby” lettuce and endive. *Zeitschrift fur Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A* 205:375-379.
- Chagué V., Y. Elad, R. Barakat, P. Tudzynski, and A. Sharon. 2002. Ethylene biosynthesis in *Botrytis cinerea*. . *FEMS Microbiology Ecology* 40:143-149.
- Chiesa, A., S. Carballo, M. Cabot, and O.S. Filippini de Delfino. 2001. Browning inhibition of harvested lettuce. *Acta Hort.* 553:317-320.
- Choi, Y.J., F.A. Tomas-Barberan, and M.E. Saltveit. 2005. Wound-induced phenolic accumulation and browning in lettuce (*Lactuca sativa* L.) leaf tissue is reduced by exposure to n-alcohols. *Postharvest Biology and Technology* 37:47-55.
- Chutichudet, B., P. Chutichudet, and S. Kaewsit. 2011. Influence of developmental stage on activities of polyphenol oxidase, internal characteristics and colour of Lettuce cv. Grand Rapids Amer. *J. Food Tech.* 6:215-225.
- Cilliers, J.J. and V.L. Singleton. 1990. Caffeic acid autoxidation and the effects of thiols. *J. Agric. Food Chem.* 38:1789-1796.
- Couch, H.B. and R.G. Grogan. 1955. Etiology of lettuce anthracnose and host range of the pathogen. *Phytopathology* 45:375-380.
- Couée, I., C. Sulmon, G. Gouesbet, and A. Amrani El. 2006. An involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative



- stress in plants. *J. Exp. Bot.* 57:449–459.
- Cox, E.F. and J.M.T. McKee. 1976. A comparison of tipburn susceptibility in lettuce under field and glasshouse conditions. *Journal of Horticultural Science* 51:117-122.
- Crisosto, C.H., D. Garner, and G. Crisosto. 2002. High carbon Dioxide atmospheres affect stored 'Thompson Seedless' table grapes. *Hortscience* 37:1074-1078.
- Davis, W.B. 1926. Physiological investigation of black heart of potato tuber. *Botanical Gazette* 81:323-338.
- Davis, R.M., K.V. Subbarao, R.N. Raid, and E.A. Kurtz. 1997. Compendium of lettuce diseases. APS Press, St. Paul, MN.
- Degl'Innocenti, E., L. Guidi, A. Pardossi, and F. Tognoni. 2005. Biochemical study of leaf browning in minimally processed leaves of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. *Acephala*). *J. Agric. Food Chem.* 53:9980-9984.
- Deltsidis, A.I., P. Tsouvaltza, and J.K. Brecht. 2012. Wound-induced respiration and ethylene production in fresh cut romaine lettuce. *Acta Hort.* 934:613-618.
- Denoya, G.I., Sergio R. Vaudagna, and G. Polenta. 2015. Effect of high pressure processing and vacuum packaging on the preservation of fresh-cut peaches. *Food Science and Technology* 62:801-806.
- Ding, C.K., K. Chachin, Y. Ueda, and C.Y. Wang. 2002. Inhibition of loquat enzymatic browning by sulfhydryl compounds. *Food Chem.* 76:213-218.
- Drake, S.R. and S.E. Spayd. 1983. Influence of calcium treatment on 'Golden Delicious' apple quality. *J. Food Sci.* 48:403-405.
- Eckhardt, U., B. Grimm, and S. Hortensteiner. 2004. Recent advances in chlorophyll biosynthesis and breakdown in higher plants. *Plant Molecular Biology* 56:1-14.
- FAOSTAT-Agriculture, statistical database. <http://faostat3.fao.org>.

Ferguson, I.B., S. Lurie, and J.H. Bowen. 1994. Protein synthesis and breakdown during heat shock of cultured pear (*Pyrus communis* L.) cells. *Plant physiology* 104:1429-1437.



Friedman, M. 1996. Food browning and its prevention: an overview. *J. Agric. Food Chem.* 44:631-653.

Friedman, M. and F.F. Bautista. 1995. Inhibition of polyphenol oxidase by thiols in the absence and presence of potato tissue suspensions. *J. Agric. Food Chem.* 43:69-76.

Fujita, S., T. Tono, and H. Kawahara. 1991. Purification and Properties of Polyphenol oxidase in Head Lettuce (*Lactuca sativa*). *J. Sci. Food. Agric.* 55:643-651.

Garcia, E. and D.M. Barrett. 2002a. Preservative treatments for fresh-cut fruits and vegetables, p. 267-303. In: O. Lamikanra (eds.). *Fresh-cut Fruits and Vegetables*. CRC, Boca Raton.

Garcia, E. and D.M. Barrett. 2002b. Preservative treatments for fresh-cut fruits and vegetables., p. 267-304. *Fresh-Cut Fruits and Vegetables.*, CRC Press, Boca Raton.

Gil, M.I., J.A. Tudela, A. Martínez-Sánchez, and M.C. Luna. 2012. Harvest maturity indicators of leafy vegetables. *Stewart Postharvest Review* 1:1-9.

Golan-Goldhirsh, A., D.T. Osuga, A.O. Chen, and J.R. Whitaker. 1992. Effect of ascorbic acid and copper on proteins, p. 61-76. In: V. T. O'Souza and J. Feder (eds.). *The Bioorganic Chemistry of Enzymatic Catalysis: An Homage to Myron L. Bender.*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Gontard, N., R. Thibault, B. Cuq, and S. Guilbert. 1996. Influence of relative humidity and film composition on oxygen and carbon dioxide permeabilities of edible films. *J. Agric. Food Chem.* 44:1064-1069.

Goodenough, P.W. and T.H. Thomas. 1981. Biochemical changes in tomatoes stored in modified gas atmosphere. II. Isoenzymes involved in glycolysis and the citric acid cycle Ann. Appl. Biol. 98:517.

Goodenough, P.W., S. Kessel, A.G.H. Lea, and T. Loeffler. 1983. Mono- and di-phenolase activity from fruit of *Malus pumila*. Phytochem. 22:359-364.

Hansen, E. 1942. Quantitative study of ethylene production in relation to respiration of pears. Bot. Gaz. 103:543.

Hara, T. and Y. Sonoda. 1981. The role of macronutrients in cabbage-head formation. IV Effects of nitrogen supply or light intensity on the growth and the $^{14}\text{CO}_2$ and $\text{NH}_3\text{-N}$ assimilation of cabbage plants. . Soil Sci. Plant Nutr. 27:185-194.

Heimdal, H., B.F. Kuhn, L. Poll, and L.M. Larsen. 1995. Biochemical Changes and Sensory Quality of Shredded and MA-Packaged Iceberg Lettuce. J. Food Sci. 60:1265-1268.

Hendrickx, M., L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, and C. Weemaes. 1998. Effects of high pressure on enzymes related to food quality. Trends Food Sci. Technol. 9:107-203.

Hisaminato, H., M. Murata, and S. Homma. 2001. Relationship between the enzymatic browning and phenylalanine ammonia-lyase activity of cut lettuce, and the prevention of browning by inhibitors of polyphenol biosynthesis. Bioscience, biotechnology, and biochemistry 65:1016-1021.

Hodges, D.M. and C.F. Forney. 2003. Postharvest ascorbate metabolism in two culti-vars of spinach differing in their senescence rates. . J. Amer. Soc. Hort. Sci 128:930-935.

Hopfinger, J.A., B.W. Poovaiah, and M.E. Patterson. 1984. Calcium and magnesium interactions in browning of 'Golden Delicious' apples with bitter pit. Sci. Hort.

23:345-351.



Hopkins, W.G. and N.P.A. Huner. 2008. Introduction to Plant Physiology. 4th/Ed. John Wiley and Sons Ltd.

Huang, Y.F., Y.C. Wang, and P. Zhang. 2009. Study on rapid determination of alcohol and acetaldehyde in grape by static head-space gas chromatography. Storage & Process. 9:28-30.

Ilker, Y., A. A. Kader, R. Ilker, and L.L. Morris. 1977. Anatomy of lettuce tissue affected by three physiological disorders. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102:426-428.

Imolehin, E.D., R.G. Grogan, and J.M. Duniway. 1980. Effect of temperature and moisture tension on growth, sclerotial production, germination, and infection by *Sclerotinia minor*. Phytopathology 70:1153-1157.

Isenberg, F.M.R. 1981. Control atmosphere storage of vegetables. Hort. Rev. 1:337-394.

Iyengar, R. and A.J. McEvily. 1992. Anti-browning agents: alternatives to the use of sulfites in foods. Trends Food Sci. Technol. 3:60-64.

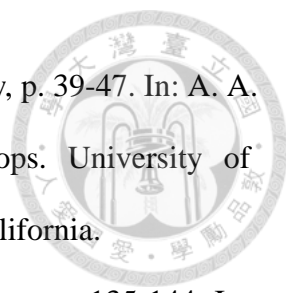
Jenni, S. and G. Bourgeois. 2008. Quantifying phenology and maturity in crisphead lettuce. HortTechnology 18:553-558.

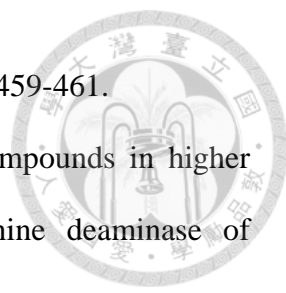
Jiang, Y., X. Duan, Z. Joyce, Z. Zhang, and J. Li. 2004. Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit. Food Chem. 88:443-446.

Kader, A.A., W.J. Lipton, and L.L. Morris. 1973. Systems for scoring quality of harvested lettuce. Hortscience 8:408-409.

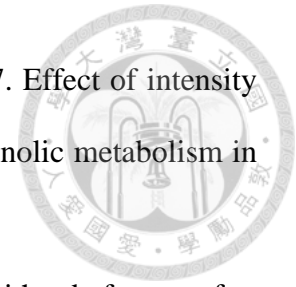
Kader, A.A. 1986. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. Food Technol. 4:99-104.

Kader, A.A. 1992. Postharvest biology and technology: an overview. In "Postharvest technology of horticultural crops" (A. A. Kader, ed.), pp. 15-201. University of California, Davis.

- 
- Kader, A.A. 2002a. Postharvest biology and technology: an overview, p. 39-47. In: A. A. Kader (eds.). Postharvest technology of horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources Publication, California.
- Kader, A.A. 2002b. Modified atmosphere during transport and storage, p. 135-144. In: A. A. Kader (eds.). Postharvest technology of horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources Publication, California.
- Kanellis, A.K. and T. Solomos. 1986. Personal communication.
- Kar, M. and J. Feierabend. 1984. Metabolism of activated oxygen in detached wheat and rye leaves and its relevance to the initiation of senescence. *Planta* 160:385-391.
- Kays, S.J. and R.E. Paull. 2004. Postharvest biology. Exon Press, Athens, GA.
- Ke, D. and M.E. Saltveit. 1986. Effects of calcium and auxin on russet spotting and phenylalanine ammonia-lyase activity in Iceberg lettuce. *HortScience* 21:1169-1171.
- Ke, D. and M.E. Saltveit. 1988. Plant hormone interaction and phenolic metabolism in the regulation of russet spotting in iceberg lettuce. *Plant physiology* 88:1136-1140.
- Ke, D. and M.E. Saltveit. 1989. Wound induced ethylene production, phenolic metabolism and susceptibility to russet spotting in iceberg lettuce. *Physiologia Plantarum* 76:412-418.
- Kerns, D.L., M.E. Matheron, J.C. Palumbo, C.A. Sanchez, D.W. Still, B.R. Tickes, K. Umeda, and M.A. Wilcox. 1999. Guidelines for head lettuce production in Arizona. IPM Series 12.
- Kidd, F. and C. West. 1937. The gas storage of English grown Williams' Bon Chretien pears. Grt. Brit. Dept. Sci. Indus. Res. Food Invest. Bd. Rept. 1937:93.
- King Jr., A.D., J.A. Magnuson, T. Török, and N. Goodman. 1991. Microbial flora and

- 
- storage quality of partially processed lettuce. *J. Food Sci.* 56:459-461.
- Koukol, J. and E.E. Conn. 1961. The metabolism of aromatic compounds in higher plants IV. Purification and properties of the phenylalanine deaminase of *Hordeum vulgare*. *J. Biol. Chem.* 236:2692-2698.
- Kriedemann, P.E. 1999. Biochemistry and basic concepts, p. 693-694. In: B. J. Atwell, P. E. Kriedemann and C. G. N. Turnbull (eds.). *Plants in Action*. Macmillan Education Australia Pty Ltd, Melbourne, Australia.
- Kruger, N.S. 1966. Tipburn of lettuce in relation to calcium nutrition. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Science* 23:379-385.
- Labuza, T.P., J.H. Lillemo, and P.S. Taoukis. 1992. Inhibition of polyphenol oxidase by proteolytic enzymes. *Fluessiges Obst.* 59:15-20.
- Larmond, E. 1977. Laboratory methods for sensory evaluation of food. Canadian Department of Agriculture, Ottawa, Canada.
- Link, G. and M.W. Gardner. 1919. Market pathology and market diseases of vegetables. *Phytopathology* 9:497-520.
- Lipton, W.J. 1961. Anatomical observations on russet spotting and pink rib of lettuce. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 78:367-374.
- Lipton, W.J., J.K. Stewart, and T.W. Whitaker. 1972. An illustrated guide to the identification of some market disorders of head lettuce. USDA, ARS, Washington, D.C.
- Lipton, W.J. 1975. Controlled atmosphere for fresh vegetables and fruits - why and when. , p. 130-143. In: N. F. Harrd and D. K. Salunkhe (eds.). *Symposium: Postharvest biology and handling of fruits and vegetables*. AVI Publishing, Westport, Conn.
- Lipton, W.J. 1987. Senescence of leafy vegetables. *Hortscience* 22:854-859.

Loaiza-Velarde, J.G., F. A. Tomas-Barbera, and M.E. Saltveit. 1997. Effect of intensity and duration of heat-shock treatment on wound-induced phenolic metabolism in iceberg lettuce. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 122:873-877.



Loaiza-Velarde, J.G. and M.E. Saltveit. 2001. Heat shocks applied either before or after wounding reduce browning of lettuce leaf tissue. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 126:227-234.

Lopez-Galvez, G., M.E. Saltveit, and M. Cantwell. 1996. The visual quality of minimally processed lettuces stored in air or controlled atmosphere with emphasis on romaine and iceberg types. *Postharvest Biology and Technology* 8:179-190.

Lopez-Galvez, F., P. Ragaert, M. A. Haque, M. Eriksson, M. C. van Labeke, and F. Devlieghere. 2015. High oxygen atmospheres can induce russet spotting development in minimally processed iceberg lettuce. *Postharvest Biol. Technol.* 100:168-175.

Mai, F. and M.A. Glomb. 2013. Isolation of phenolic compounds from iceberg lettuce and impact on enzymatic browning. *J. Agric. Food Chem.* 61:2868-2874.

Marlatt, R.B. and J.K. Stewart. 1956. Pink rib of head lettuce. *Plant Disease Reporter* 40:742-743.

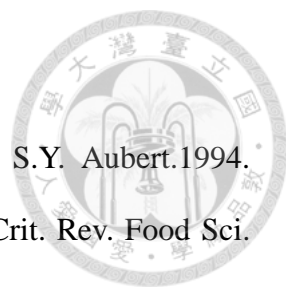
Martinez, M. and J.R. Whitaker. 1995. The biochemistry and control of enzymatic browning. *Trends in Food Science and Technology* 6:195-200.

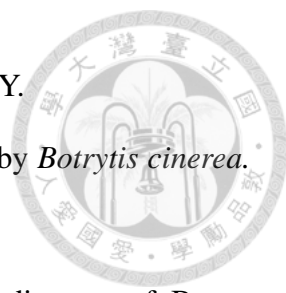
Mateos, M., D. Ke, M. Cantwell, and A. Kader. 1993. Phenolic metabolism and ethanolic fermentation of intact and cut lettuce exposed to CO₂-enriched atmospheres. *Postharvest Biology and Technology* 3:225-233.

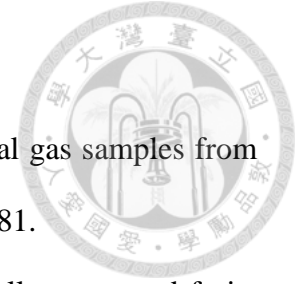
Mayer, A. and E. Harel. 1991. Phenoloxidases and their significance in fruit and vegetable., p. 373-398. In: P. F. Fox (eds.). *Food Enzymology*. Vol. 1, Elsevier,



- London.
- McEvily, A.J. 1991. Compositions and methods for inhibiting browning in foods using resorcinol derivatives., Vol. 5,059,438, U.S.
- McEvily, A.J., R. Iyengar, and W.S. Otwell. 1992. Inhibition of enzymatic browning in foods and beverages. *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 32:253-273.
- Mello, J.C., R. Dietrich, L.F.D. Probst, and E.R. Amante. 2010. Evaluation of respiratory parameters in minimally processed lettuce grown under organic or conventional system. *Rev. Ceres* 57:730-735.
- Moline, H.E. and W.J. Lipton. 1987. Market diseases of beets, chicory, endive, escarole, globe artichokes, lettuce, rhubarb, spinach, and sweetpotatoes. , p. 86 p. Agriculture Handbook Number 155. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, USA.
- Morris, L.L., J.A. Klaustermeyer, and A.A. Kader. 1974a. Postharvest Requirements of Lettuce to Control Physiological Disorders. *In* “26th International Conference on Handling Perishable Agricultural Commodities”, pp. 22-29. Michigan State University, East Lansing.
- Morris, L.L., A.A. Kader, and J.A. Klaustermeyer. 1974b. Postharvest handling of lettuce. *ASHRAE Transactions.* 80:341-349.
- Morris, L.L., A. A. Kader, J. A. Klaustermeyer, and C.Cheyney. 1978. Avoiding ethylene concentrations in harvested lettuce. *California Agriculture* 32:14-15.
- Munns, R. 1999. Temperature: a driving force for plant growth and acclimation p. 436-458. *In*: B. J. Atwell, P. E. Kriedemann and C. G. N. Turnbull (eds.). *Plants in Action: Adaptation in Nature, Performance in Cultivation.* Macmillan Education Australia Pty Ltd, Melbourne, Australia.
- Murr, D.P. and L.L. Morris. 1974. Influence of O₂ and CO₂ on O-diphenol oxidase

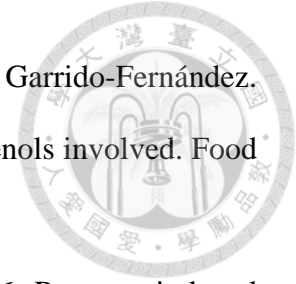
- 
- activity in mushroom. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 99:155-158.
- Nicolas, J.J., F.C. Richard-Forget, P.M. Goupy, M.J. Amiot, and S.Y. Aubert.1994. Enzymatic browning reaction in apple and apple products. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 34:109-157.
- Nunes, M.C.N. and J.P. Emond. 2003. Storage temperature, p. 209-228. In: J. A. Bartz and B. J.K. (eds.). *Postharvest Physiology-Pathology of Vegetables*. Marcel-Dekker Inc., NY, USA.
- Olfati, J.A., M. Saadatian, G. Peyvast, S.H. Malakouti, A. Kiani, and M. Poor-Abdollah. 2011. Effect of Harvesting Date on Yield and Quality of Lettuce. *Advances in Environmental Biology* 5:1647-1650.
- Oszmianski, J. and C.Y. Lee. 1990. Inhibition of polyphenol activity and browning by honey. *J. Agric. Food Chem.* 38:1892-1895.
- Park, Y.M., G.D. Blanpied, Z. Zozwiak, and F.W. Liu. 1993. Postharvest studies of resistance to gas diffusion in McIntosh apple. *Postharvest Biol. Technol.* 2:329-339.
- Peiser, G., G. Lopez-Galvez, M. Cantwell, and M.E. Saltveit. 1998. Phenylalanine ammonia lyase inhibitors control browning of cut lettuce. *Postharvest Biology and Technology* 14:171-177.
- Philosoph-Hadas, S., S. Meir, and N. Aharoni. 1991. Effect of wounding on ethylene biosynthesis and senescence of detached spinach leaves. *Physiol. Plant* 83:241-246.
- Pizzocaro, F., D. Torreggiani, and G. Gilardi. 1993. Inhibition of Apple Polyphenoloxidase (PPO) By Ascorbic Acid, Citric Acid and Sodium Chloride. *Journal of Food Processing and Preservation* 17:21-30.
- Ponting, J.D.. 1960. The control of enzymatic browning of fruits, p. 105-124. In: H. W.

- 
- Schultz (eds.). Food Enzymes. AVI Publishing, New York, NY.
- Qadir, A., E. W. Hewett, and P.G. Long. 1997. Ethylene production by *Botrytis cinerea*. Postharvest Biol. Technol. 11:85-91.
- Ramsey, G.B., B. ERIEDMAN, and M.A. Smith. 1959. Market diseases of Beets, Chicory, Endive, Escarole, Globe Artichokes, Lettuce, Rhubarb, Spinach, and Sweetpotatoes. USDA Marketing research report 155:15p.
- Richard-Forget, F.C., P.M. Goupy, and J.J. Nicolas. 1992. Cysteine as an inhibitor of enzymic browning. 2. Kinetic studies. J. Agric. Food Chem. 40:2108-2113.
- Richardson, T. and D.B. Hyslop. 1985. Enzymes. In "Food Chemistry" (O. R. Fennema, ed.), pp. 371-476, New York, Marcel Dekker.
- Rood, P. 1956. Relation of ethylene and postharvest temperature to brown spot of lettuce. In "Proc. Amer. Soc. Hort. Sci", Vol. 68, pp. 296-303.
- Rosenvasser, S., S. Mayak, and H. Friedman. 2006. Increase in reactive oxygen species(ROS) and in senescence-associated gene transcript (SAG) levels during dark-induced senescence of Pelargonium cuttings, and the effect of gibberellic acid. Plant Sci. 170:873-879.
- Rouse, A.H. and C.R. Barmore. 1974. Changes in pectic substances during ripening of avocados. Hortscience 9:36.
- Ryall, A.L. and W.J. Lipton. 1979. Handling, transportation and storage of fruits and vegetables. AVI Publishing Company Inc, Westport, CT.
- Ryder, E.J. 1999. Lettuce, endive, and chicory. CABI Pub.
- Sakiroglu, H., A.E. Oztuerk, A.E. Pepe, and M. Erat. 2008. Some kinetic properties of polyphenol oxidase obtained from dill (*Anethum graveolens*). J. Enzyme Inhib. Med. Chem. 23:380-385.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1985. Plant physiology. 3rd/Ed. Wadsworth Publishing



- Company, Belmont, California.
- Saltveit, M.E. 1982. Procedures for extracting and analyzing internal gas samples from plant tissues by gas chromatography. . *HortScience* 17:878-881.
- Saltveit, M.E. 1996. Physical and physiological changes in minimally processed fruits and vegetables. *In* “proceedings-phytochemical society of europe”, Vol. 41, pp. 205-220. Oxford University Press Inc.
- Saltveit, M.E. 2000. Wound induced changes in phenolic metabolism and tissue browning are altered by heat shock. . *Postharvest Biology and Technology* 21:61-69.
- Saltveit, M.E. 2004. Lettuce, p. *In*: K. C. Gross, C. Y. Wang and M. Saltveit (eds.). *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service., Beltsville Area
- Santerre, C.R., J.N. Cash, and D.J. Vannorman. 1988. Ascorbic acid/citric acid combinations in the processing of frozen apple slices. *J. Food Sci.* 53:1713-1716.
- Sapers, G.M. and K.B. Hicks. 1989. Inhibition of enzymatic browning of fruits and vegetables., p. 29-43. *In*: J. J. Jen (eds.). *Quality Factors of Fruits and Vegetables: Chemistry and Technology*. ACS Symp. Ser. 405, Washington, D.C.
- Scaife, A., E.F. Cox, and G.E.L. Morris. 1987. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. *Annals of Botany* 59:325-334.
- Scuderi, D., F. Giuffrida, and G.Noto. 2009. Effects of nutrient solution EC on yield, quality and shelf-life of lettuce grown in floating system. *Acta Hort.* 807:221-227.

Segovia-Bravo, K.A., M. Jarén-Galán, P. García-García, and A. Garrido-Fernández. 2009. Browning reactions in olives: Mechanism and polyphenols involved. *Food Chem.* 114:1380-1385.



Seyderhelm, I., S. Boguslawski, G. Michaelis, and D. Knorr. 1996. Pressure induced inactivation of selected food enzymes. *J. Food Sci.* 61:308-310.

Shemer, T.A., S. Harpaz-Saad, E. Belausov, N. Lovat, O. Krokhin, V. Spicer, K.G. Standing, E.E. Goldschmidt, and Y. Eyal. 2008. Citrus Chlorophyllase Dynamics at Ethylene-Induced Fruit Color-Break: A Study of Chlorophyllase Expression, Posttranslational Processing Kinetics, and in Situ Intracellular Localization. *Plant physiology* 148:108-118.

Singh, B., D.J. Wang, and D.K. Salunkhe. 1972a. Controlled atmosphere storage of lettuce. 1. Effects on quality and the respiration rate of lettuce heads. *J. Food Sci.* 37:48-51.

Singh, B., D.J. Wang, and D.K. Salunkhe. 1972b. Controlled atmosphere storage of lettuce. 2. Effects on biochemical composition of the leaves. *J. Food Sci.* 37:52-55.

Sriphanich, J. and A. Kader. 1985. Effects of CO₂ on total phenolics, phenylalanine ammonia lyase, and polyphenol oxidase in lettuce tissue. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110:249-253.

Smock, R.M. 1981. Control atmosphere storage of fruits. *Hort. Rev.* 1:301-336.

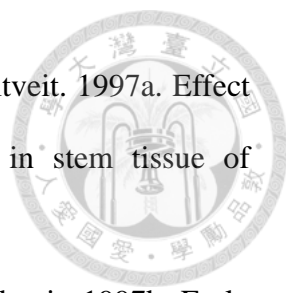
Smock, R.M. and A.V. Doren. 1941. Controlled atmosphere storage of apples. *Cornell Univ. Agr. Exp. Sta. Bul.* 762:1.

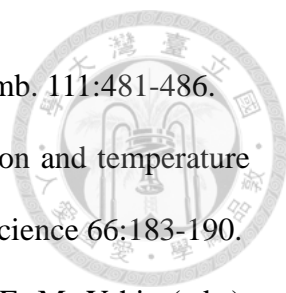
Soto, L.A.S. 1984. Inhibition of Polyphenol Oxidase by Sulfur Dioxide, Oregon State University.

Stewart, J.K., M. J. Ceponis, and L. Beraha. 1970. Modified-atmosphere effects on the

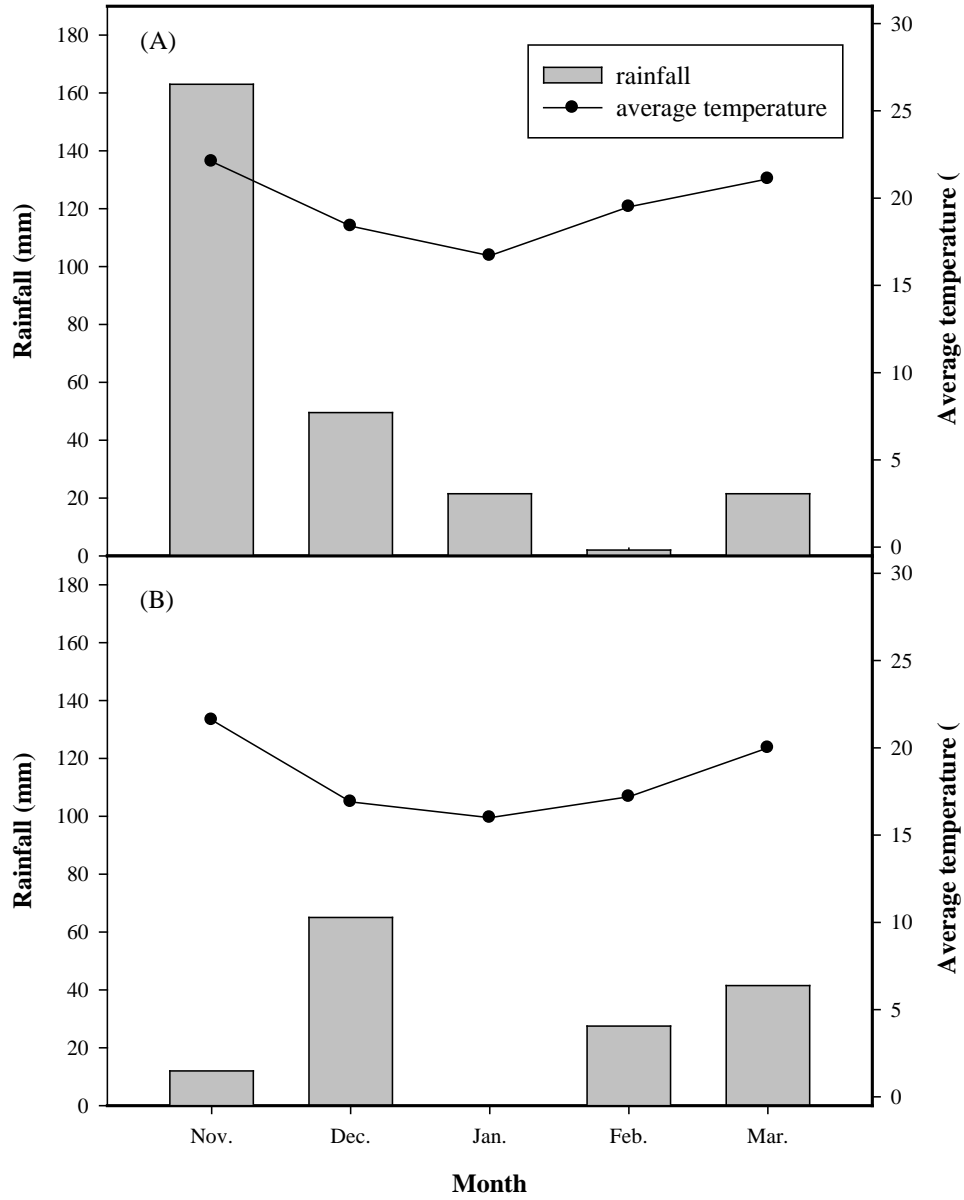


- market quality of lettuce shipped by rail.
- Stewart, J.K., J. M. Harvey, M. J. Ceponis, and W.R. Wright. 1972. Carbon dioxide levels in railcars and their effect on lettuce.
- Swarts, D.H. 1983. Postharvest handling of litchis. (C. S. F. R. Inst., ed.), Vol. 1, Nelspruit, South Africa.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. Plant physiology. 4th/Ed.
- Tanaka, E., S. Okumura, R. Takamiya, H. Hosaka, Y. Shimamura, and M. Murata. 2011. Cinnamaldehyde inhibits enzymatic browning of cut lettuce by repressing the induction of phenylalanine ammonia-lyase without promotion of microbial growth. *J. Agric. Food Chem.* 59:6705-6709.
- Taylor, S.L. 1993. Why sulfite alternatives? *Food Technol.* 47:14-19.
- Teixeira, G.H.A., J.F. Durigan, R.E. Alves, and T.J. O'Hare. 2008. Response of minimally processed carambola to chemical treatments and low-oxygen atmospheres. *Postharvest Biology and Technology* 48:415-421.
- Teles, C.S., B.C. Benedetti, W.D. Gubler, and C.H. Crisosto. 2014. Prestorage application of high carbon dioxide combined with controlled atmosphere storage as a dual approach to control *Botrytis cinerea* in organic 'Flame Seedless' and 'Crimson Seedless' table grapes. *Postharvest Biol. Technol.* 89:32-39.
- Thibodeau, P.O. and P.L. Minotti. 1969. The influence of calcium on the development of lettuce tipburn. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 94:372-376.
- Thompson, A.K. 2010. Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables. 2nd/Ed. CAB international., UK.
- Toivonen, P. and D.A. Brummell. 2008. Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 48:1-14.

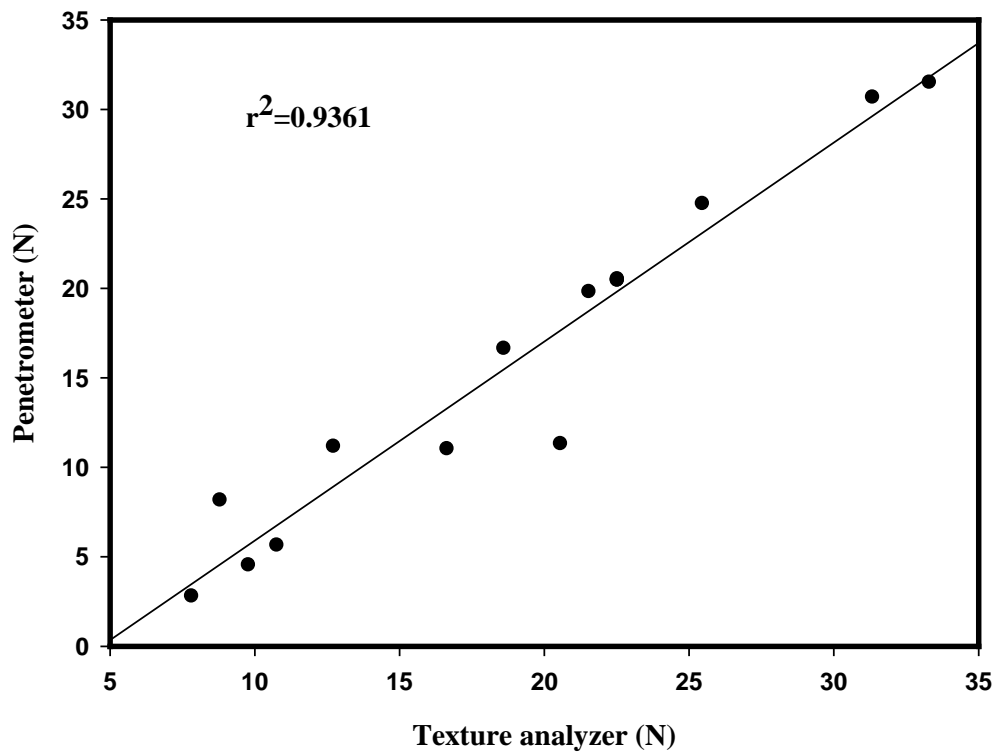
- 
- Tomas-Barberan, F.A., J. Loaiza-Velarde, A. Bonfanti, and M.E. Saltveit. 1997a. Effect of selected browning inhibitors on phenolic metabolism in stem tissue of harvested lettuce. *J. Agric. Food Chem.* 45:583-589.
- Tomas-Barberan, F.A., J. Loaiza-Velarde, A. Bonfanti, and M.E. Saltveit. 1997b. Early wound-and ethylene-induced changes in phenylpropanoid metabolism in harvested lettuce. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 122:399-404.
- Trejo-Gonzalez, A. and H. Soto-Valdze. 1991. Partial characterization of polyphenoloxidase from 'Anna' apple. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 116:672-679.
- Trippi, V. and K.V. Thimann. 1983. The exudation of solutes during senescence of oatleaves. *Physiol. Plant.* 58:21–28.
- Underhill, S.J.R. and C. Critchley. 1992. The physiology and anatomy of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp during fruit development. *J. Hort. Sci.* 67:437-444.
- Van-de Velde, M.D., A.M. Van Loey, and M.E. Hendrickx. 2002. Modified Atmosphere Packaging of Cut Belgian Endives. *J. Food Sci.* 67:2202-2206.
- Wang, C.Y. 1983. Postharvest response of Chinese cabbage to high CO₂ treatment on low O₂ storage. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 108:125.
- Weemaes, C., L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, and M. Hendrickx. 1999. Kinetic study of antibrowning agents and pressure inactivation of avocado polyphenoloxidase. *J. Food Sci.* 64:823-827.
- Whitaker, J.R. 1994. Principles of enzymology for the Food Science. 2nd/Ed., Marcel Dekker, New York.
- Witkowskaa, I.M. and E.J. Wolteringa. 2014. Storage of intact heads prior to processing limits the shelf-life offresh-cut *Lactuca sativa* L. *Postharvest Biol. Technol.* 91:25-31.
- Wurr, D.C.E., J.R. Fellows, and R.F. Suckling. 1988. Crop continuity and prediction of

- 
- maturity in the crisp lettuce variety Saladin. *J. agric. Sci., Camb.* 111:481-486.
- Wurr, D.C.E. and J.R. Fellows. 1991. The influence of solar radiation and temperature on the head weight of crisp lettuce. *Journal of Horticultural Science* 66:183-190.
- Yahia, E.M. and S.P. Singh. 2009. Tropical fruits., p. 397-444. In: E. M. Yahia (eds.). *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities.*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Zauberman, G. and M. Schiffmann-Nadel. 1972. Pectin methylesterase and polygalacturonase in avocado fruit at various stages of development. *Plant Physiology* 49:864.
- Zhuang, H., M.M. Barth, and X. Fan. 2011. Respirations and browning discoloration of fresh-cut produce in modified atmosphere packaging, p. 31-55. In: A. L. Brody, H. Zhuang and J. H. Han (eds.). *Modified Atmosphere Packaging for Fresh-Cut Fruits and Vegetables.* Wiley-Blackwell.
- Zhuang, H., M. M. Barth, and L. Cisneros-Zevallos. 2013. Modified atmosphere Packaging for fresh fruits and vegetables., p. 445-473. In: J. H. Han (eds.). *Innovations in food packaging.* Academic Press. , New York, NY.

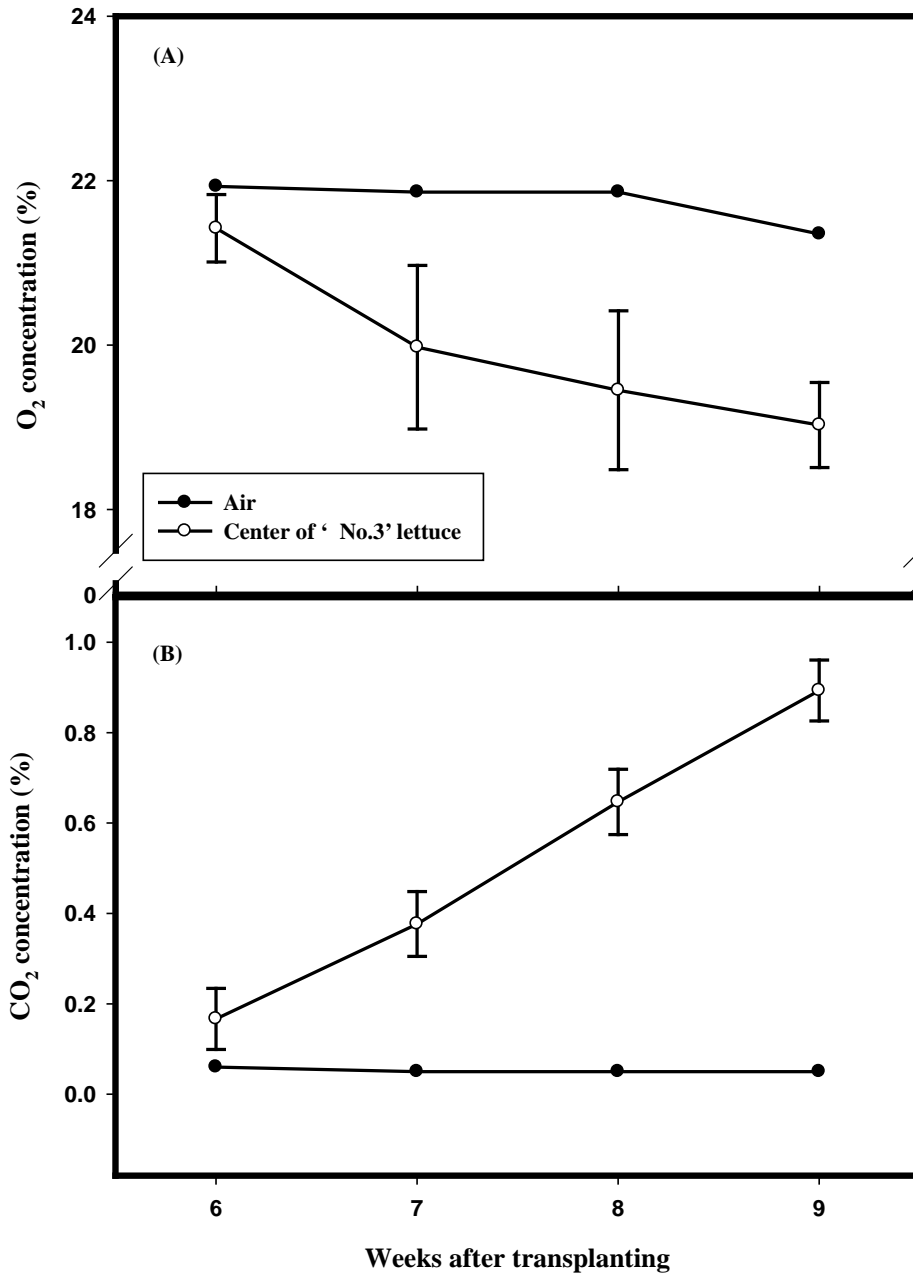
附錄



附錄一、結球萵苣 2012 (A)、2013 (B) 年度試驗期間雲林氣象站雨量與平均溫度。



附錄二、質地分析儀(Texture analyzer)與手持式硬度計(Penetrometer)測量結球萵苣葉球硬度相關性分析。



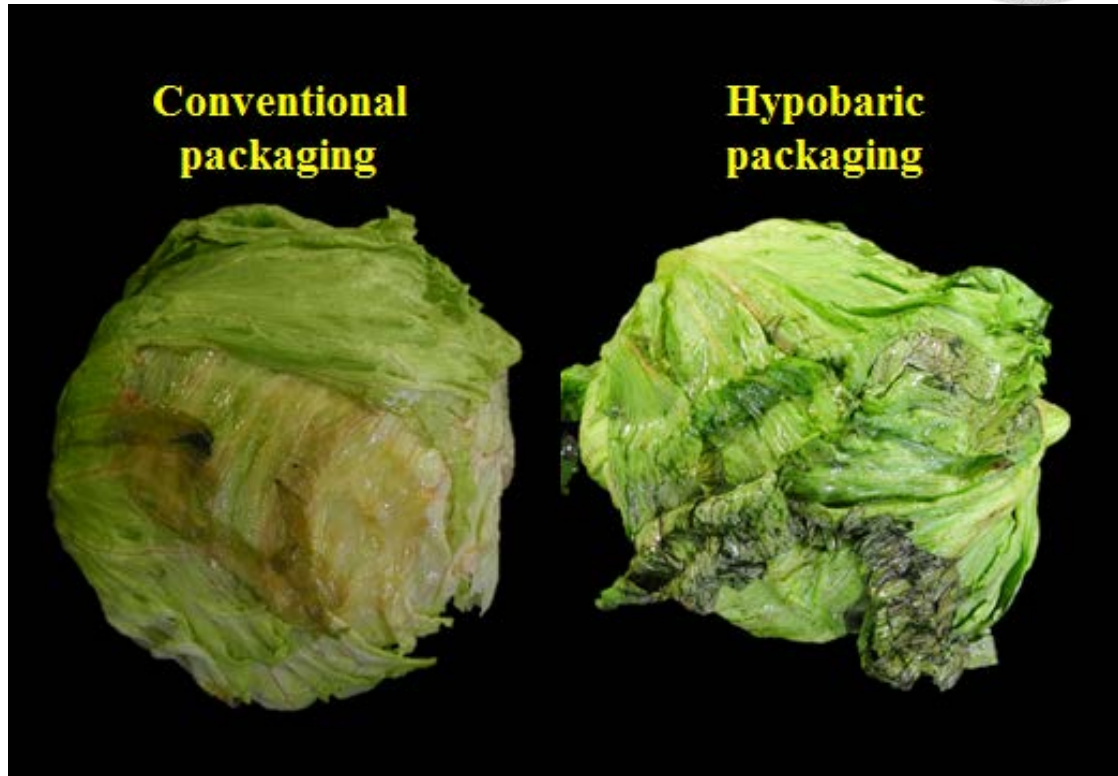
附錄三、2013 年度試驗期間田間空氣與‘3 號’結球萵苣葉球中心氧氣(A)與二氧化碳(B)濃度變化。



附錄四、慣行包裝(左)與低壓包裝(右) 結球萵苣葉球外觀。



附錄五、抽氣低壓包裝袋內氣體取樣使用之減壓抽氣裝置 (A) 將樣品與包裝完全沒入水中，以針頭戳數個洞以利氣體取樣 (B) 蓋上抽氣漏斗後以鐵環固定於缸中 (C) 蓋上裝置外蓋進行減壓抽氣 (D) 袋內及樣品組織內氣體集中於漏斗頂端，並抽取其頂空氣體進行分析。



附錄六、慣行包裝(左)與低壓包裝(右) 結球萵苣葉球腐爛情況比較。