

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

生物炭陶粒作為無土栽培介質之研究

Study of Biochar-based Ceramsite as the Growing
Substrate for Soilless Cultivation

朱毅豪

Yi-Hao Chu

指導教授：鄭智馨博士

Advisor: Chih-Hsin Cheng, Ph.D.

中華民國 109 年 9 月

September, 2020





謝誌

三年過去了，轉眼之間竟到了撰寫謝誌的這一刻。在這段不長卻也不算短的時間中，我受到了很多人的幫助，首先要感謝鄭智馨老師擔任我的指導教授，時時給予我方向以及指導，並仔細審閱我的論文。在論文口試時，也承蒙了吳耿東教授與陳建德教授願意擔任口試委員，並給予諸多寶貴的建議，以及指出之前未察覺的不足之處。令我的論文更臻完善。


待在研究室的日子，有許多同學陪伴著我，也多虧了他們的各種幫助，我才能順利的完成論文。剛進研究室時，我對土壤學實驗時所學到的儀器操作方法已經很生疏，幸好有實驗室的音蓁、鴻儒、婷雅、佳怡幾位學長學姊的照顧，他們用心的帶領我熟悉研究室的環境，並在我實驗和分析遇到瓶頸時適時給予建議。也十分感謝之後加入的皓雲以及筱翊，經常在 meeting 時提供不少意見，令我發現自己的盲點。

而和我同時加入這個大家族的宇祥，更是在這三年生涯中和我相處最長時間的人。陶粒介質的製備以及性質相關知識，很大一部分都是我們在過去從未接觸過的，於是在一開始的拓荒階段我們遇到了很多困難，光是燒製出品質一致的樣本都花了不少心力，而為了生產足夠做盆栽實驗的大量陶粒，我們四處奔波尋找適合的爐子，並整天坐在造粒機前，過著天天揉生坯並不間斷燒製陶粒的生活；在盆栽試驗完成後，也是他幫忙我收穫那如山一般多的 128 盆樣本，其他的課程以及競賽活動，我們也經常同甘苦共患難。能在學生生涯中遇到這些好夥伴，實在是萬分的榮幸。

最後要特別感謝的當然就是我的家人們。無論是物質還是精神上，他們都給了我許多支持和鼓勵，令我時時充滿繼續向前的動力，並且可以無後顧之憂，專心地完成學業。

回首這幾年，還是覺得這是一段辛苦的歲月。不過也是有了這些經歷，才有了今天的我們。經過了碩士班的三年，我學會了更加嚴謹有條理的思考方式以及完成一件事情的方法。在人與人間的相處方面我也有了許多成長，過去我一直是獨來獨往的人，大部分的事都是自己完成，而如今的我學會了和人合作，能完成更多原本自己一個人難以辦到的事情。我想不僅是在學術研究上，在將來的日子中，這段經驗一定也能帶來很大的助益。

摘要



本研究利用採自石門水庫第四和第五沉澱池的水庫底泥以及花生殼粉以不同比例混合，經 800 °C 溫度絕氧燒結，製成一種具保水性的新型生物炭陶粒介質，並與傳統工法製成的水庫底泥陶粒及兩種市售無土栽培介質（發泡煉石、火山岩）進行比較，探討生物炭陶粒與傳統陶粒或市售介質在物理、化學與栽培性質上的差異。實驗結果顯示生物炭陶粒具有良好的保水能力，其田間容水量約為 20~25 %，高於兩種商用介質的 6.1 和 9.7 %，維持介質從飽和含水至枯萎點的可利用水分時間也高於商用介質的兩倍以上，且隨混合生物炭含量增加而增加。在養分方面，生物炭陶粒保留豐富植物可利用營養元素，如有機碳與無機銨態氮及硝酸態氮，為其他介質所缺乏；生物炭陶粒吸附磷的能力也較其他種介質好，具有能減少磷肥釋放到都市中造成汙染的能力。在為期四個月的萬壽菊(*Tagetes erecta*)及香蜂草(*Melissa officinalis*)種植盆栽試驗中，生物炭陶粒盆栽的乾重、苗高以及綠覆蓋面積皆顯著高於商用介質。在限制供水處理中，萬壽菊綠覆蓋面積隨陶粒生物炭含量越高，植物表現也越好。綜合以上結果顯示生物炭陶粒具有作為栽培介質的潛力，然而對其使用的長期穩定性及對植物以及環境的長遠影響仍需更多研究。

關鍵字：水庫底泥、生物炭、綠屋頂、保水力、養分吸附

Abstract



This study developed a novel growing medium—biochar ceramsite—contented with high water retention and fertile ability. We made the biochar ceramsite by mixing the Shimen Reservoir and peanut shell at different ratios and sintering the mixtures under the anaerobic atmosphere at 800 °C. The physiochemical and cultivated properties between the biochar ceramsite and two other commercial soilless cultivation media were accessed. The results showed that the biochar ceramsite contented with higher water holding capacity. Its field capacity was about 20 - 25%, higher than two commercial media (6.1% and 9.7%, respectively). The effective water retention time from the saturation to the wilting point is twice higher than commercial media and increased with the biochar content. The biochar ceramsite also contained higher organic carbon and inorganic ammonium and nitrate nitrogen than the commercial media, which were almost absent. The carbon and inorganic nitrogen concentrations increased with the biochar content. The four-month pot experiments showed that the *Tagetes erecta* and *Melissa officinalis* growth was better in the biochar ceramsite than other media, with higher dry mass weight, shoot height, and green coverage area. The results suggest that the biochar ceramsite has the potential as a cultivation medium; however, more research is necessary on the long-term stability of the biochar ceramsite and their long-term effects on both plant and environment.

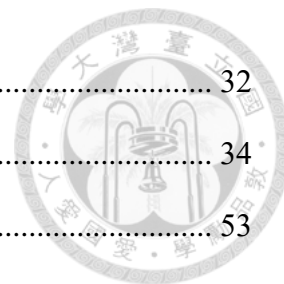
Key words: reservoir sediment, biochar, green roof, water retention , nutrient adsorption

目錄



| | |
|----------------------------|-----|
| 謝誌 | i |
| 摘要 | ii |
| Abstract..... | iii |
| 目錄 | iv |
| 表目錄 | vi |
| 圖目錄 | vii |
| 一、前言 | 1 |
| 1.1. 水庫底泥 | 1 |
| 1.2. 綠屋頂 | 2 |
| 1.3. 生物炭 | 3 |
| 1.4. 研究目的 | 5 |
| 二、材料與方法 | 6 |
| 2.1. 陶粒材料與製作 | 6 |
| 2.2. 性質分析 | 6 |
| 2.3. 盆栽試驗 | 11 |
| 2.4. 統計分析 | 13 |
| 三、實驗結果 | 14 |
| 3.1. 陶粒基本性質 | 14 |
| 3.2. 盆栽試驗 | 18 |
| 四、討論 | 22 |
| 4.1. 生物炭陶粒與傳統介質之性質比較 | 22 |
| 4.2. 盆栽試驗 | 27 |
| 五、結論與建議 | 31 |
| 5.1. 結論 | 31 |

| | |
|---------------|----|
| 5.2. 建議 | 32 |
| 六、 參考文獻 | 34 |
| 附錄 | 53 |



表目錄



| | |
|---|----|
| 表 1 各種陶粒及兩種商用無土介質之物理性質。(生物炭陶粒：SN+0-10；通氣陶粒：SA+0-10；市售發泡煉石 (Com-1)；火山岩石 (Com-2)。 | 41 |
| 表 2 各種陶粒及兩種商用無土介質之化學性質。(生物炭陶粒：SN+0-10；通氣陶粒：SA+0-10；市售發泡煉石 (Com-1)；火山岩石 (Com-2)；生水庫底泥 (RS)；生物炭 (BC)。ND 為測值低於儀器測量極限或檢量線換算後呈現負值之樣本。 | 42 |
| 表 3 各樣品兩種選擇性萃取之鐵鋁含量。 | 43 |
| 表 4 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>) 和香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)在各種介質中之苗高 (cm)。小寫英文字母為相同水分管理下之介質間比較。 | 44 |
| 表 5 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>) 和香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)在各種介質中之乾重 (g)。小寫英文字母為相同水分管理下之介質間比較，大寫則為同樣介質下不同水分管理之比較。 | 45 |
| 表 6 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>) 和香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)在各種介質中之綠覆蓋面積(cm^2)。不同小寫字母表示同水分處理不同介質下具顯著差異，不同大寫字母表示同介質不同水分處理下具顯著差異($p < 0.05$)。 | 46 |
| 表 7 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>) 和香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)在各種介質中之存活率。 | 47 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1 各樣本於田間容水量及永久萎凋點範圍間之水分特性曲線。..... | 48 |
| 圖 2 各樣本體積含水率與時間之關係 (A) 通氧陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN (C) 商用無土介質 Com。紅點標示為該樣本永久萎凋點。 | 49 |
| 圖 3 各樣品單位質量之磷吸脫附量(mgP/kg)。 | 50 |
| 圖 4 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>)於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 通氧陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN。限水處理以_L 做標示。 | 51 |
| 圖 5 香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 通氧陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN。限水處理以_L 做標示。 | 51 |
| 圖 6 兩種以商用介質栽培的植栽於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 萬壽菊(<i>Tagetes erecta</i>) (B) 香蜂草(<i>Melissa officinalis</i>)。限水處理以_L 做標示。 | 52 |



一、前言

1.1. 水庫底泥

水庫淤積為現代社會中許多國家面臨的問題。由於河川自然攜帶來自集水區的泥沙，這些泥沙隨著逕流進入水庫而被截留下來並沉澱於水庫底部，便會造成水庫的淤積。隨著水庫底泥所占有的體積增加，水庫的有效容量便會逐漸減少，導致有效蓄水量的減少，進而使水庫所應有的供水、發電以及防洪等功能下降。目前台灣也有許多水庫已經遭受淤積的影響，根據經濟部水利署（2020）的統計報告，台灣地區經公告的 95 座水庫總容量為 20 億 6022 萬立方公尺，由於泥沙淤積影響，現今水庫總有效容量已經較最初完工時的總有效容量減少了 5 億 9943 萬立方公尺，加上面對氣候變遷的影響，風災、暴雨等強降雨事件的增加，河川攜帶的泥沙量上升，加劇水庫淤積的問題。

為了減緩淤積對水庫造成的傷害，水庫底泥的清淤作業是不可或缺的。目前相應的清淤工程已實施有年，以石門水庫為例（經濟部水利署北區水資源局，2020），主要利用水力排沙以及機械動力清淤兩種策略。水力排沙是在颱風時期藉由底孔排出大量洪水所夾帶淤沙的方式，具有清運成本低的優點，缺點則是只能適用於特定時期。在平時則需要利用機械動力進行清淤工作。和水力排沙不同，此機械動力清淤法需要考慮水庫淤積物的後續清運作業，蓄水域上游的淤積物屬於可直接標售的有價料，可利用陸挖及採售分離土石申購方式處理，而下游的淤積物則是屬於無價料，處置辦法為透過抽泥船進行抽泥浚渫，輸送到沉澱池放置。由於新的淤積物不斷產生，沉澱池並非水庫底泥的最終去處，仍需要進一步的清運作業。沉澱池底泥和主要組成為砂石原料的上游淤積物不同，屬於無價料，其質地較細而不適合直接作為工程用途，較不受民間廠商青睞，因此若能找到底泥的再利用方式，對於它的清運成本以及效率具有很大的助益。目前已探討了數種可行的處理方式，如：填方材料、水泥原料、製磚原料、輕質骨材以及農業栽培等方法。在農業栽培的方面，主要有混合蛭石加工成農業土壤、公園填

土、以及燒製成無土栽培介質等利用（經濟部水利署北區水資源局，2008）。由於市面上已有種類繁多的農業栽培介質，在傳統的運用上幾乎可以滿足大部分需求，單純製成功能相同的農業資材並不能提高水庫底泥的附加價值，因此底泥再生資材必須有其特別優勢。為了提高它的附加價值，本研究以新興的產業需求——屋頂綠化為目標，旨在開發一種適用於綠屋頂的新型栽培介質。

1.2. 綠屋頂

綠屋頂是一種藉由在建築屋頂種植植栽，達到綠化效果的建築工法。綠屋頂具有減少溫室熱島效應、增加二氧化碳吸收等功能，在氣候變遷的現今，其重要性漸漸被重視。臺北市在中華民國 105 年 6 月 2 日發布《臺北市新建建築物綠化實施規則》第十條規定新建建築物屋頂平臺綠化面積應達該屋頂平臺面積之百分之五十，可見台灣也已經步上這個趨勢。

根據介質深度，綠屋頂分為精緻式(intensive)和薄層式(extensive)兩種。介質深度淺於 20 公分的綠屋頂稱為薄層式綠屋頂，反之稱為精緻式綠屋頂。台灣大多數的綠屋頂皆屬於薄層式綠屋頂(Chen, 2013)，薄層式綠屋頂具有低維護管理、低承載需求、費用經濟等特性，可用在台灣大多數的建築物上。

為了承載量需求，薄層式綠屋頂通常使用輕質的材料作為介質，而非一般的栽培土壤。通常使用礦物類的栽培介質，例如膨脹頁岩、發泡煉石等(Getter & Rowe, 2006)。此類介質有輕量、顆粒大、不易阻塞的優點，適用於低載重量的薄層式綠屋頂。然而這種介質同時也有著保水性不足的缺點。為了改良保水性，可以在介質中添加有機物，如 Nagase & Dunnett (2011)在以碎磚為基底的薄層式綠屋頂介質中依體積百分比添加了 0~50%的有機質，同樣發現有機質有增加土壤含水量和植物生長的效果，並在乾旱的情況下，仍增加了三種不同植物(*Limonium latifolium*, *Melica ciliata* and *Nepeta × faassenii*)的生長。但對於薄層式綠屋頂而言，有機物的含量不應該過高。這是因為有機物容易分解，導致介質的損失，使土壤收縮並降低介質的充氣孔隙度，影響植物的生長(Bilderback, 2005)。德國的


造景及景觀發展學會(Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, FLL)針對綠屋頂制定的標準也建議了單層的薄層式綠屋頂有機質含量不應超過 40 g/l (FLL, 2018)，原因也是避免有機質分解對介質整體結構產生過多的破壞。有機質的分解也會導致多餘的含氮和磷污染物釋出，造成污染 (Moran *et al.*, 2005)。此外為了維持介質肥力，綠屋頂常透過施肥等方式外加養分，這導致了施加於綠屋頂的營養物質會隨著降水釋放到都市逕流中，造成額外的環境問題，特別是磷的污染。一些研究也表明施肥的行為使綠屋頂成為磷的污染來源(Bliss *et al.*, 2009; Berndtsson *et al.*, 2006)。

因此，我們希望新型的水庫底泥介質能夠改善上述的劣勢。於改良保水性的部分，前人文獻已經報導了水庫底泥經過 900 °C 的較低溫度燒結後可以製成具良好栽培性能的陶粒介質（黃春翔，2007；楊昆憲，2008），並且保水性高於傳統的發泡煉石，由此可知低溫燒結的水庫底泥陶粒具有改善綠屋頂介質保水能力的潛能。根據江康鈺等人（2005）的研究，水庫底泥的吸水率隨燒結溫度下降而增加，不過燒結溫度低於 800 °C 時尚未達成表面燒結之作用，遇水便會崩解，故若欲製成保水性強又保持結構穩定的栽培介質，在 800 °C 下燒製可能是較佳的選擇。

而於保肥性的部分則較少研究，為了使綠屋頂更加符合環保永續的概念，降低綠屋頂本身所造成的污染是必要之舉。為了改善此點，可以透過在介質中添加能夠持留養份的物質來減少養分的釋放。

1.3. 生物炭

生物炭是一種低成本，容易製造的吸附劑，透過生質物在低氧或無氧環境下熱裂解所形成，由於其表面的多孔性結構，能夠吸附污染物，降低其移動性 (James *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2006)。除此之外，生物炭也是一種良好的土壤改良劑，能夠增加土壤的 CEC、有機碳含量及提高土壤的 C/N 比(何緒生等人，2011)，生物炭添加同時可以改善土壤的保水性，增加土壤的有效含水



量(Sun & Lu, 2014)，並且生物炭具有高度穩定的多環芳香結構，在土壤中的分解緩慢，也使它不易因為分解而損失。至於生物炭的添加改善綠屋頂養分流失的研究，前人也已經有文獻探討，例如 Beck *et al.* (2011)在商用綠屋頂介質中添加重量百分比 7 % 的生物炭，並且進行模擬降雨試驗，發現經過生物炭處理的介質降低了逕流的氮、磷以及有機炭含量；而較長期的影響，在 Kuoppamäki & Lehvävirta (2016)的研究中，在以碎磚為主，10 cm 厚的綠屋頂基質中添加 1 cm 生物炭，進行為期一年的栽培試驗，觀察到生物炭的添加能在逕流量高時有效減少介質釋出的養分，整體降低了總氮和總磷的年釋出量，減少綠屋頂造成的污染。綜合上述，可望能透過在新型介質中添加生物炭全面改善綠屋頂介質的性質。

許多生質物都可以製成生物炭的原料，例如花生殼、稻殼、木材碎屑等農業廢棄物便是很好的材料，使用農業廢棄物製成生物炭也是一種廢棄物再利用的方法。台灣每年生產大量有機農業廢棄物，根據行政院農業委員會（2019）統計，在民國 107 年生產的生物性農業廢棄物總量約為 4983143 公噸，其中植物性的農業廢棄物占 2461738 公噸。若能利用這些廢棄物生產生物炭，便是不虞匱乏的原料來源，並且也能達到廢棄物清運的效果。

生物炭以及陶粒介質的製作過程均須經過高溫處理的步驟，由之前文獻得知，在製造陶粒介質的步驟中便已經有混合有機物燒製的進程，這個過程是為了讓有機質在燒結的過程中燒失，在陶粒介質中產生空洞，藉以製成具有保水性的輕質介質（方新政，1991；楊昆憲，2008）。為了使有機物燒失，這個過程會在通氣的氣氛中進行。由於生物炭便具有保水性質，若使陶粒本身便含有生物炭，可能也能達到類似的效果，並且生物炭可能還能進一步改善陶粒的保肥能力。因此，我們設計了一種可生產含有生物炭的陶粒的新型製程，在原料處理方面和傳統方法相同，但在燒結過程中採用無氧而非通氧氣氛，在無氧氣氛中，原料中的有機質不會因為接觸氧氣而燒失，而會熱解形成生物炭，成品便成為含有生物炭

的陶粒。我們預期新型介質可以由於生物炭的存在達到較現行介質更佳的保水以及保肥能力，提供綠屋頂植栽更好的生長環境。



1.4. 研究目的

綜上所述，本研究的目標在於利用水庫底泥以及農業廢棄物製作一種新型綠屋頂栽培介質，而這種新型介質的各種性能則需透過性質測試以及實際的栽培試驗來確認。研究目的整理如下：

1. 運用水庫底泥和有機農業廢棄物燒製成陶粒介質，依據農業廢棄物添加量製作出數個樣本，進行各種物理、化學性質測試，並和傳統方法燒製之陶粒介質做比較，探討無氧燒結以及有機質添加量對於生物炭陶粒性質的影響。
2. 為得知各種介質長時間持留有效水分的能力，探討介質於綠屋頂環境中處於限水狀況的水分供給性能，設置一個水分保持時間試驗，觀察介質含水率隨著時間的變化。
3. 設置一個磷吸脫附試驗，模擬各種介質接受以及釋出磷肥的過程，以探討在實地運用中，生物炭陶粒是否能降低釋放到環境中的磷污染。
4. 進行盆栽試驗，將兩種已經運用於實際綠屋頂的植物栽植在生物炭陶粒、傳統方法燒製的介質以及市售的兩種無土栽培介質中，並且為了模擬綠屋頂植栽在現實環境中可能遇到的水分缺乏環境，設計了正常供水以及限水處理，以得知生物炭陶粒對於植物生長的影響，以及在限水環境下是否能改進綠屋頂植栽的生長表現。



二、 材料與方法

2.1. 陶粒材料與製作

本研究使用之水庫底泥樣本取自石門水庫第四和第五沉澱池（附錄一）；有機機添加成分則使用花生殼，取自彰化雲林一帶相關花生加工產業所產生的農業廢棄物，花生品種以台南十一號花生為主。

陶粒製作流程大致上分為兩個步驟：

2.1.1. 生胚製作

將水庫淤泥及花生殼分別以粉碎機打碎為粉料，兩種粉料以 0.25 mm 篩網過篩後依實驗需求調整不同比例混合，再以粉碎機進行乾式攪拌混勻。將混勻之粉料與水揉合成黏土狀，再利用造粒設備製成直徑為 9.5 mm 之生胚。生胚放入烘箱以 105 °C 烘乾 24 小時使其達到絕乾狀態。

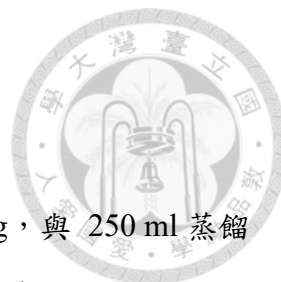
2.1.2. 陶粒燒結

製成之生胚置入高溫爐內，於通氧或絕氧氣氛下燒結。通氧處理為一般空氣環境，絕氧處理則在爐內通入氮氣，使爐內呈缺氧之狀態。以每分鐘 10 °C 之升溫速率，升溫至 800 °C 並持溫 2 小時，而後自然降溫至室溫。

在絕氧氣氛下燒結之陶粒，生胚中的有機成分經熱裂解轉化為生物炭，而熱裂解產生的氣體及損失體積提供陶粒孔隙結構，成為具多孔性並且含有生物炭之輕質陶粒資材。

2.2. 性質分析

根據以上製程，本研究以 5 % 花生殼添加量(重量百分比)為區間，在兩種氣氛處理下製備數種陶粒樣品（生物炭陶粒：SN+0-10；通氧陶粒：SA+0-10），並且作為對照，另外選用兩種現行商用無土介質：市售發泡煉石（Com-1）及火山岩石（Com-2）一併進行性質分析。火山岩石為取自印尼之黑火山岩。各介質外



觀如附錄二所示。分析項目如下：

2.2.1. 質地

以沉降法 (sedimentation) 進行測量，取水庫底泥樣品 40 g，與 250 ml 蒸餾水以及 100 ml 六偏磷酸鈉 (Sodium hexametaphosphate) (50 g L^{-1}) 混合。混合液以攪拌器攪拌混合五分鐘，倒入 1000 ml 沉降筒 (內徑 6 cm，表面積 113.04 cm^2)，並加蒸餾水至 1000 ml，同時以 1000 ml 蒸餾水為對照組。以攪拌棒使樣品均勻懸浮後，以鮑氏比重計測量所有樣品與對照組的 40 秒時以及 7 小時時的讀數。依下式換算出土壤的砂粒(Sand)、粉粒(Silt)、黏粒(Clay)比例：

$$\text{Sand \%} = 100 - (\text{R40S} - \text{RL}) \times 100/40$$

$$\text{Clay \%} = 100 - (\text{R7h} - \text{RL}) \times 100/40$$

$$\text{Silt \%} = 100 - (\text{Sand \%} + \text{Clay \%})$$

$$\text{R40S}、\text{R7h}、\text{RL} = (1000x - 1000) \times 2.65/1.65$$

2.2.2. 充氣孔隙度、容器含水量、總體密度

充氣孔隙度(Air-filled Porosity, AFP)為介質排除重力水後空氣量占總體積之百分比；容器含水量(Container Capacity, CC)為介質排除重力水後含水量占總體積之百分比；總孔隙度(Total Porosity, TP)則為充氣孔隙度與容器含水量的總和。測定方法參考 Bragg & Chambers (1987)，將樣品填滿容積為 400 ml(V_1)之玻璃容器，並於罐口覆上紗網，將容器浸入水中浸泡 30 分鐘使其達到飽水狀態。取出容器倒置 10 分鐘使重力水排乾，量測排出之水分體積(V_2)以及秤量飽水樣品重量(W_1)，之後將樣品以 105°C 烘乾 24 小時以達絕乾狀態，並再度秤量重量(W_2)。經計算得充氣孔隙度、容器含水量、總孔隙度，並測出總體密度(Bulk Density, BD)數值，計算公式如下：

$$\text{AFP (\%)} = V_2 / V_1 \times 100\%$$

$$CC (\%) = (W_1 - W_2) / (\text{水比重} \times V_1) * 100\%$$

$$TP (\%) = AFP + CC$$

$$BD (g / cm^3) = W_2 / V_1$$



2.2.3. 田間容水量(Field Capacity, FC)、植物可利用水分(Plant Available Water, PAW)及水分特性曲線

透過 WP4C 露點水勢儀(model WP4C, METER Group, USA)測定各樣本之水分特性曲線，並求出田間容水量以及植物可利用水分。田間容水量為樣本在-0.33 bar 下之含水量，植物可利用水分則為田間容水量以及永久萎凋點（-15 bar 下樣本含水量）之含水量差值。將各介質於水中浸泡 24 小時後取出，靜置 10 分鐘去除重力水後開始測量，每次測量後紀錄含水量及水勢皆置入定溫 28℃ 之烘箱風乾 5 分鐘，重複直到樣本水勢抵達永久萎凋點。

2.2.4. 水分保留曲線

為得知樣品水分隨時間散失的情形，於實驗室環境進行水分保留實驗。將各樣品裝滿 3 吋方盆（底面邊長 5 cm，頂面邊長 7.5 cm，高 7 cm），完全浸泡入水中 24 小時使其到達飽水狀態後，置入定溫 28℃ 之烘箱，每間隔一定時間(0、3、6、9、24、48、72、100、136、184、213 小時)測量樣品含水量，繪出水分保留曲線。並配合 WP4C 測出之數據，標示出樣本抵達永久萎凋點之時間。

2.2.5. pH 值

使用玻璃電極法(Gregorich & Carter, 2007)。將待測樣本敲碎並通過 0.25 mm 孔徑篩網，並將水與樣本以 1:2.5 (w/v)比例混合，以震盪機（裕德科技有限公司，TS-520D）於 180rpm 下振盪待測樣品和水之混合液 30 分鐘，靜置 30 分後以 pH 玻璃電極（Model 720P, ISTEK, South Korea）測定 pH 值。

2.2.6. 電導度

使用電導度計將樣品與去離子水以 1:5 比例混合，在 140rpm 混勻一小時，以

土壤電導度計測量其 EC 值，並根據陳鴻堂(1992)提出之土水比 1:5 EC 與飽和水溶液 EC 之換算標準，換算出飽和水溶液 EC：

$$\text{飽和水溶液 EC (mS/cm)} = \text{土水比 1:5 EC} \times 6.11$$



2.2.7. 交換性陽離子與陽離子交換能力

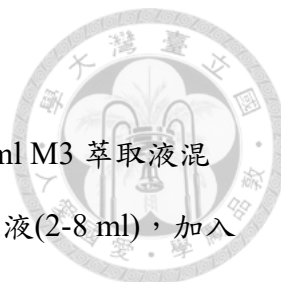
以中性醋酸銨法(Gregorich & Carter, 2007)測定。取 2g 陶粒或生物炭樣品，敲碎並通過 0.25 mm 孔徑篩網，加入 40ml 1N NH₄OAc (pH7.0) 淋洗一小時，重複 2 次，淋洗液定量至 100ml 後並經濾紙(Advantec 2, 90mm)過濾，濾液以原子吸光光譜儀(Sens AA, GBC, Australia)測定濾液中鉀、鈉、鈣、鎂離子濃度。以 95%酒精 10ml 淋洗每樣品兩次去除殘餘 NH₄OAc，再以 40ml 2N KCl 溶液淋洗一小時以取代樣品表面上吸附之銨離子，重複 2 次，同樣定量至 100ml 並過濾。使用銨離子選擇電極(HI4101, Hanna Instruments, USA)測定其銨離子濃度，藉以推估其陽離子交換能力。

2.2.8. 有機碳、全氮含量

以球磨機(Retsch MM400, Haan, Germany)磨碎陶粒樣品，每樣品取 15-25mg 包入 8*5 mm 錫囊 (tin capsules) 中，以元素分析儀(Perkin Elmer 2400, Waltham, MA, USA)分析碳、氮含量。

2.2.9. 銨態氮(NH₄-N)及硝酸態氮(NO₃-N)含量

參考自 Banwar *et al.* (1972)，Myers *et al.* (1978)，使用離子選擇電極法測量土壤中之銨態氮(NH₄-N)及硝酸態氮(NO₃-N)。銨態氮使用 2M KCl 作為萃取液，硝酸態氮則使用去離子水作為萃取液(Wheatley *et al.*, 1989)。將陶粒和生物炭樣品與萃取液以 1:5(w:v)比例混合，置入振盪器以 60rpm 震盪 1 小時後以 Advantec 2 號濾紙過濾，濾液以銨離子選擇電極以及硝酸根離子選擇電極(perfectION comb NO₃, Mettler-Toledo, Switzerland)測量濾液電導度，由於電導度和濃度具有對數關係，可藉此推算樣品中銨態氮及硝酸態氮之含量。



2.2.10. 磷含量

以梅立克第三號法(Mehlich, 1984)測定。取 3g 樣品，與 30ml M3 萃取液混合，在 200rpm 下震盪五分鐘並以 Advantec 2 號過濾。取適量濾液(2-8 ml)，加入 8ml 混合試劑並定量至 50ml，靜置 15 分鐘後以分光光度計(V-630, Jasco, Japan)在 880 nm 波長下測量濾液中磷濃度並換算為有效性磷含量。

2.2.11. 磷吸脫附能力

2.1.11.1. 吸附試驗

參考 Xu 等人(2014)之分析方法，取 2g 樣品陶粒置入 50ml 離心管，依照各別加入 20 ml 100 ppm 磷溶液(0.01M KCl + K₂SO₄)。為了抑制細菌生長，在每樣品中加入 2 滴 chloroform，以震盪機震盪 24h，將溶液倒出，以 Advantec 2 號濾紙過濾，以鉬藍法分析磷養分濃度。陶粒吸附量計算如下：

$$\text{吸附量 } (\mu\text{g g}^{-1}) = (100 - x) \times 20 / 2$$

2.1.11.2. 脫附試驗

吸附試驗後將樣本秤重，以得知離心管內剩餘之溶液量，進行脫附試驗。每管樣本加入 20 ml 之 0.01M KCl 溶液，滴入兩滴 chloroform，震盪 24h 後過濾，以與吸附試驗相同方法測定各種養分含量。脫附試驗連續進行三次，取得各種陶粒之吸脫附曲線。

2.2.12. 鐵鋁選擇性萃取

2.2.12.1. DCB 可萃取鐵鋁

以 DCB(Sodium Dithionite-Citrate-Bicarbonate)抽出法(Mehra & Jackson, 1960)測量。取 1 g 樣本，加入 0.3M 檸檬酸鈉(Na₃C₆H₅O₇)溶液 40 ml 及 1M 碳酸氫鈉(NaHCO₃)溶液 5 ml，置於 80 °C 水浴中 10 分鐘後，加入 1 g 連二亞硫酸鈉(Na₂S₂O₄)，持續搖晃樣品 15 分鐘，再加入 5 滴 0.4 % 聚丙烯醯胺(polyacrylamide)溶液作為絮聚劑，以 3500 rpm 轉速離心 15 分鐘，收集上清液，重複上述步驟



一次，將抽出液定量至 100 ml，以原子吸收光譜儀測定鐵、鋁含量，鐵、鋁測定波長分別為 372.0 nm 與 309.3 nm。

2.2.12.2. 酸性草酸銨可萃取鐵鋁

使用酸性草酸銨法 (McKeague & Day, 1966)。秤取 2 g 土壤，加入 100 ml 0.2M 之酸性草酸銨溶液($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$, pH 3.0)，在黑暗中震盪 4 小時，加入 5 滴 0.4% 之聚丙烯醯胺溶液，劇烈震盪數秒後靜置約 30 分鐘，接著以 3500 rpm 轉速離心 15 分鐘，而後以 Advantec 2 號濾紙過濾，以原子吸光儀測定溶液中之鐵、鋁含量。

2.3. 盆栽試驗

除了基本性質分析外，為確認生物炭陶粒的農藝性能，實際使用生物炭陶粒作為無土栽培介質，同樣以兩種現行商用資材（發泡煉石、火山岩石）為對照，進行為期四個月的栽培試驗。

2.3.1. 試驗前處理

參考張采依(2012)對現行綠屋頂植栽種類調查結果，從這些植栽或其相近種中挑選兩種植物作為本次試驗之植栽種類。所選用物種為萬壽菊(*Tagetes erecta*)及香蜂草(*Melissa officinalis*)，植栽種子先播種於穴盤中，以泥炭土作為栽培基質並在 25 °C 下孵育，直至小苗達約 7 cm 高度時，將小苗移植進各介質中，種植初期維持每日正常供水培植一個月，使小苗適應移植環境。使用盆栽為邊長 8.5 cm 方盆，供水方式為從上方澆灌，直至盆底有水流出。使用之種子、泥炭土及穴盤來源，均購自農友種苗公司。

2.3.2. 試驗設計

盆栽試驗地點為國立台灣大學森林系實驗溫室，試驗時間從 2019 年 4 月 26 日開始，於 2019/7/4 結束。為確認生物炭陶粒之保水能力，除了不同介質處理，每種介質再分為正常供水及限水兩種灌溉處理：正常供水處理，給水方式如同培

植期，每日澆水至盆底有水流出現；限水處理則為每周灌溉一次、每次灌溉 100 ml，於每周限水處理灌溉結束後測量各種生長性質。

盆栽試驗共計 SA+0、SA+5、SA+10、SN+0、SN+5 與 SN+10 六種陶粒，加上兩種商用資材（發泡煉石、火山岩石），共計八種處理，每種處理區分正常供水及限水兩種灌溉方式，每種處理採四重複，共計 8 (處理) x 2 (供水處理) x 2 (萬壽菊、香蜂草) x 4 (重複) = 128 盆。除每周限水處理灌溉結束後，測量各種生長性質外，於試驗結束後收穫所有樣本。試驗結束時之各樣本外觀如附錄三到附錄五所示。

2.3.3. 苗高

使用皮尺測量苗高，測量由介質平面開始至頂芽處長度。

2.3.4. 綠覆蓋面積

參考彭一弘（2012）、張惠娟（2016）之試驗方法，以俯視法於植株正上方拍攝植株照片記錄生長狀況，並配合影像處理軟體做前處理，選取植株未枯損部分覆蓋範圍並保存，以做綠覆蓋面積之計算。使用美國國家衛生院(National Institutes of Health, NIH)開發之免費且屬於公有領域(Public Domain)的影像分析軟體 ImageJ (1.52a)進行影像分析，以盆器邊長（8.8 cm）作為基準設定比例尺，便可計算出所選取覆蓋範圍之面積（cm²）。

2.3.5. 葉片 SPAD 值

葉綠素之含量為測量植物養分及水分逆境之生長指標之一。由於本實驗使用較小的植株，並有測量葉覆蓋面積之需求，不適合破壞性測試，故使用手持式葉綠素計(SPAD-502, Spectrum Technologies)測量 SPAD 值。SPAD 值為葉片於 650 與 950 nm 兩波長下的透光係數之比值，因葉綠素對紅外線吸收率低，並對紅藍光吸收率最高，因此藉由不同波長之光線吸收率差異可以間接表示葉綠素含量高。測量方法為每植株選取植株頂端算起第二層三片完全展開葉，並避開葉脈處測量葉肉部位，讀值取平均作為該植株之 SPAD 值。



2.3.6. 乾重

於試驗結束後收穫所有樣本，根部以洗瓶沖洗乾淨後置於牛皮紙袋內，於 65°C 烘乾一週，烘乾之植體分割為地上、地下部位，分別測重並記錄。

2.4. 統計分析

陶粒及市售介質之 CEC、各種養分含量、磷吸附試驗及盆栽試驗數據進行 ANOVA 分析，判斷不同介質處理是否具顯著差異($p < 0.05$)，並以 Tukey 法事後檢定比較各組處理之間的差異情形。



三、 實驗結果

3.1. 陶粒基本性質

3.1.1. 物理性質

表一為陶粒與商用介質的各種物理性質。在總體密度方面，完全不添加花生殼的陶粒，SA+0 及 SN+0 之總體密度均為 1.0 g/cm^3 ，添加 5%花生殼時，SA+5 及 SN+5 均為 0.8 g/cm^3 ，添加 10%花生殼時，SA+10 及 SN+10 分別為 0.7 與 0.8 g/cm^3 。用作對照的發泡煉石(CA)、火山岩(CB)之總體密度則分別為 0.4 與 0.8 g/cm^3 。陶粒的總體密度隨著花生殼的添加量上升而有降低的趨勢。此外在實驗中發現，所有陶粒皆具透水特性，浸入水中時氣泡從陶粒表面釋出，並且皆會沉入水中。

陶粒介質和 Com-1 的充氣孔隙度皆在 37.0 到 39.5%左右，Com-2 的充氣孔隙度則高達 50.3%。在容器容水量方面，呈現隨花生殼添加比例上升而增加的趨勢，SA 介質從 SA+0 的 23.1%提升至 SA+10 的 26.8%，SN 介質則從 SN+0 的 20.7%提升至 SN+10 的 25.4%。兩種商用介質的容器容水量則不到 10%，Com-1 為 6.1%，Com-2 為 9.7%。

總孔隙度為充氣孔隙度和容器容水量的總和，陶粒介質的總孔隙度介於 57.8%到 66.0%之間，Com-1 的總孔隙度最低，僅為 45.0%，Com-2 為 60.0%，高於 SN+0 的 57.8%，但低於其他所有陶粒介質。

3.1.2. 保水能力


如表一，水庫底泥陶粒介質的田間容水量和植物可利用水分皆高於兩種商用無土栽培介質，田間容水量介於 20.2~25.3%，植物可利用水分則介於 12.3 到 19.1%之間。其中，在 SA 樣本中，植物可利用水分與容器容水量同樣隨著有機物增加而提升，可知有機質燃燒後所留下的孔隙不只增加了整體的吸水量，也使有效水量上升。而在 SN 中，雖然原料添加 5%花生殼並未提高植物可利用水分，然

而 10%花生殼使其從 14.9 上升至 17.7%。另外，在所有陶粒樣本中都觀察到有機質添加量提升使永久萎凋點下降的狀況，這現象表示在本實驗的燒結環境中，有機質的添加可能有助於提升陶粒成品在高水勢下的供水能力。

本研究中所使用的各種栽培介質，其在田間容水量及永久萎凋點間之水分特性曲線如圖一所示。兩種商用介質的田間容水量遠低於水庫底泥陶粒介質，並迅速隨水分勢能降低而耗盡水分。在水庫底泥陶粒介質中，未添加有機質的 SA+0 及 SN+0 樣本，在較低水勢(0.03 ~ -0.4 Mpa)階段，曲線較陡峭，此階段陶粒水分散失量小，而在吸力到達-0.4Mpa 以上時，曲線變為平緩，含水率迅速降低，表示在此階段陶粒其相對應大小孔隙集中，隨水分勢能稍稍降低即損失較大部分的水分，直至約-0.6Mpa 以上時才再度轉為陡峭。添加了有機質對陶粒的水分特徵曲線具有明顯的改變，無論是 SA 還是 SN 介質，有機質的添加皆使陶粒於低水勢時曲線變得更為平緩，即高水分勢能時，其水分散失量增加，但在低水勢時，陶粒間的斜率改變變得較為不明顯。相比於 SA 介質，SN 介質添加有機質後，水分特性曲線整體的水平位移較大，此原因主要在於 SN+5、SN+10 有著較 SN+0 更低的永久萎凋點，因此使曲線往左方延伸。

3.1.3. 水分保留曲線

各樣本保留含水率與時間之關係展現於圖二。在 SA 樣品中，SA+10 之含水率起先為三樣品中最高，然而水分喪失的速率較高，在實驗開始約 100 小時之後，含水率便與其他兩樣本相同，並在之後降至最低。SA+5 及 SA+10 樣本均在實驗開始約 150 小時後達到永久萎凋點，SA+0 則在 159 小時才抵達永久萎凋點；在 SN 樣品中則呈現不同的結果，SN+0 樣本初始含水率為三樣本最低，達到永久萎凋點之時間也最短，約為 123 小時。隨著有機質添加量增加，初始含水率以及抵達永久萎凋點時間也隨著上升。SN+5 以及 SN+10 樣本分別在實驗開始後約 164 和 174 小時之後達到永久萎凋點。而兩種商用介質均在 70 小時內便測量不出含水率。



本實驗結果與先前所測定之田間容水量以及植物可利用水之結果不盡相同，田間容水量與植物可利用水兩數值較高的介質，長時間下保持水分的能力並不一定較好。如 SN+0 擁有最高的田間容水量和植物可利用水，卻為陶粒樣本中 fastest 達到永久萎凋點之個體，而 SN+10 之田間容水量、植物可利用水較低，長時間保持水分的能力反而最好。於圖中可知 SN+10 於永久萎凋點之含水率最低，導致它保持植物可用水的時間最長，因此推測添加高比例生物炭的陶粒可能具有在乾旱氣候下減輕植株缺水壓力的能力。

3.1.4. 化學性質

表二為陶粒的化學性質。RS 的 pH 值為 7.6，屬於中性偏鹼的土壤，BC 則為 10.1，為強鹼性。經過燒結處理的陶粒 pH 上升，並且無論是 SA 或 SN，添加花生殼之陶粒 pH 皆較高。未添加花生殼之陶粒，SA+0 之 pH 為 8.5，SN+0 之 pH 為 8.8；添加 5%花生殼後，SA 及 SN 之 pH 上升至 9.4，添加 10%花生殼時，SA 及 SN 之 pH 則分別為 9.2 和 9.4。Com-1 呈現弱酸性，pH 值為 6.5，Com-2 則為 8.6。

本次試驗所用的生物炭產率為 29.4%，含有 70.6%的有機碳量，全氮量則為 2.0%，未經燒結之 RS 本身則含有有機碳 5.9%及 0.2%的全氮量。SA 組、SN+0 和 Com 組皆未在 EA 中檢測出碳含量(偵測極限： $<0.10\%$)；SN+5、SN+10 的含碳量則分別為 1.2 及 2.9%。於含氮量方面，所有陶粒和商用介質樣本均呈現甚低含氮量，低於 EA 中氮含量之偵測極限。

然而，使用離子選擇電極測定法則在陶粒和商用介質中檢測出了兩種無機態氮的存在。在 NH_4^+ 、 NO_3^- 兩種型態的氮方面，RS 分別為 82.2 和 10.9 mg/kg，生物炭則是 20.1 和 5337.7 mg/kg。SA 的樣本中無法測出 NH_4^+-N ， NO_3^--N 自 SA+0 到 SA+10 為 18.0、17.9 和 16.5 mg/kg。SN 之 NH_4^+-N 自 SN+0 到 SN+10 分別為 4.9、10.2 和 10.1 mg/kg； NO_3^--N 分別為 85.0、105.6 和 114.9 mg/kg。Com-1 之 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 各為 0.1 和 14.5 mg/kg，Com-2 之 NH_4^+-N 和 SA 一樣未有測



值， NO_3^- -N 為 29.7 mg/kg。

RS 和 BC 各含有 0.8 和 141.3 mg/kg 之有效性磷，在陶粒樣本中，以 SA 之含量較高，自 SA+0 到 SA+10 分別為 12.3、10.0 及 25.7 mg/kg；SN+0 到 SN+10 分別為 4.9、10.2 及 5.3 mg/kg。Com-1 及 Com-2 各為 3.6 和 24.3 mg/kg。

RS 的 EC 值為 3.15 mS/cm，BC 則為 155.8 mS/cm，在所有樣品中，SA 組的 EC 值最高，自 SA+0 到 SA+10 分別為 5.7、4.9 及 4.8 mS/cm，SN 的 EC 值較水庫底泥低，自 SN+0 到 SN+10 分別為 2.8、2.1 及 2.2 mS/cm。Com-1、Com-2 之 EC 皆較陶粒樣本低，分別為 1.3、0.4 mS/cm。

K、Mg、Na、Na 四種交換性陽離子，在 RS 中依序為 0.4、0.9、4.8、0.2 cmol/kg；在 BC 中依序為 11.1、4.5、16.9、2.0 cmol/kg，兩種原料交換性鈣含量皆為最高。SA 樣品之交換性鉀含量均為 0.9 cmol/kg；另外三種交換性陽離子自 SA+0 到 SA+10，交換性鎂含量為 1.4、1.2、1.3 cmol/kg；交換性鈣含量為 5.4、5.2、4.6 cmol/kg；交換性鈉含量為 1.2、1.0、1.0 cmol/kg。在 SN 中，自 SN+0 到 SN+10，交換性鉀含量為 0.9、0.8、1.0 cmol/kg；交換性鎂含量為 0.7、0.8、0.8 cmol/kg；交換性鈣含量為 5.2、5.9、5.8 cmol/kg；交換性鈉含量為 1.1、1.2、1.2 cmol/kg。Com-1 之四種交換性陽離子依 K、Mg、Na、Na 順序為 0.2、0.1、0.6、0.2 cmol/kg；Com-2 則各為 0.6、0.8、5.7、0.8 cmol/kg。整體而言，兩種商用介質之交換性陽離子含量低於陶粒樣本，而在陶粒樣本中，SA 的交換性鎂含量高於 SN。

在 CEC 方面，RS 為 15.1 cmol/kg，BC 則為 9.5 cmol/kg。在 SA 樣本中，自 SA+0 到 SA+10 分別為 3.0、2.1、2.6 cmol/kg；在 SN 樣本中，自 SN+0 到 SN+10 分別為 3.4、1.5、1.5 cmol/kg。Com-1 無法測出 CEC，Com-2 則為 1.8 cmol/kg。從 CEC 結果可以發現，水庫底泥在燒結之後 CEC 降低，並且不論是通氣還是無氧燒結，有機質的添加皆不會提升陶粒的 CEC，甚至有稍微下降的趨勢。

表三顯示了各樣品之兩種選擇性萃取之鐵鋁含量。酸性草酸銨的部分，鐵在

SN 具有較高的含量，介於 15.1 到 19.3 g/kg 間，其次為 RS，為 9.8 g/kg，Com-2 為 5.2 g/kg，SA 系列含量介於 1.1 到 1.3 g/kg 間，而 BC 則為 0.4，為全樣本最低。鋁仍為 SN 最高，介於 5.0 到 5.5 g/kg 間，其次為 Com-2，為 3.3 g/kg，SA 系列含量介於 1.2 到 1.7 g/kg 間，RS 為 1.1 g/kg，BC 為 0.2 g/kg。

DCB 可萃取鐵則為水庫底泥最高，為 20.5 g/kg，其次為 SA，介於 14.0 到 16.2 g/kg 間，SN 介於 8.2 到 10.8 g/kg 間，Com-1 為 3.4 g/kg，Com-2 和 BC 皆為 0.7 cmol/kg。相較於其他型態，鋁的含量皆較低，SA 介質為 1.6 g/kg，SN 介於 0.9 到 1.0 g/kg 間，RS 為 1.0 g/kg，Com-1 為 0.2 g/kg，BC 為 0.1 g/kg，Com-2 則不到 0.1 g/kg。

3.1.5. 陶粒對磷吸附之能力

圖三為各樣本單位質量之磷吸脫附量。由圖中可以看到，在吸附量方面，由大至小依序為 SN+10、RS、SN+5、SN+0、SA+10、SA+5、SA+0、BC、Com-1、Com-2。經一次脫附後，陶粒及商用介質樣本之磷含量順序沒有改變，但 RS 和 BC 的磷吸附量則大幅度降低，到第三次脫附後，RS 的磷吸附量降至低於 SN+10，但仍高於 SN+5，BC 則降至全樣本最低，甚至釋放出了多餘的有效性磷。實驗結果顯示底泥在經過燒結後，對於磷的保持能力產生了變化，並且生物炭雖有吸附磷能力，然而本身保持磷的能力不高，磷保持能力的主要貢獻可能來自於燒結後的陶粒基質本身。

3.2. 盆栽試驗

3.2.1. 苗高

表四為本次試驗所有植栽樣本的苗高。本次實驗中在 6/21 當週記錄到一次突發的高溫事件，最高溫達 37.59℃，導致部分處理樣本全部死亡，故苗高以前一週(6/14)的數據為最終結果。在正常供水的處理中，萬壽菊和香蜂草呈現相似的表現。SA 和 Com-1、Com-2 中培育的植株在苗高上沒有差異，萬壽菊約為

13.9~17.2 cm，香蜂草則為 7.7~9.0 cm。而在 SN 中培育的植株顯著高於其他處理，萬壽菊的苗高約提升 157%，香蜂草則提升 95%。在 SN 處理之間，萬壽菊沒有明顯差異，而香蜂草之 SN+0 苗高低於 SN+5、SN+10，但仍高於其他非 SN 處理。

在限水處理的樣本中，萬壽菊的非 SN 栽培之植株間無顯著差異，SN+5、SN+10 樣本仍顯著高於所有非 SN 栽培之植株，SN+0 則顯著高於 SA，但與兩種 Com 樣本無顯著差異。而在香蜂草中，SN 之所有樣品苗高皆顯著高於其他 SA 樣品。整體而言，在限水處理下，相較於其他介質，萬壽菊栽植於 SN 中苗高增加了 82%，香蜂草則增加 95%。

3.2.2. 乾重與根莖比

在乾重方面（表五），兩种植物的表現和苗高相似。整體而言，SN 系列樣本均顯著高於 SA 和 Com-1、Com-2 組，此外在香蜂草的正常供水處理中，SN+10 的乾重顯著低於 SN+0 和 SN+5，但仍高於其他非 SN 介質。非 SN 介質栽培之樣本，除了香蜂草在限水處理下之 Com-2 樣本高於 SA 及 Com-1，其他介質之間均無明顯差異。

在正常供水處理的其他樣本下，萬壽菊的乾重約為 0.17~0.37 g，香蜂草為 0.04~0.17 g，SN 組中，萬壽菊的乾重約為 2.07~2.39 g，香蜂草為 0.6~1.41 g；在限水處理的其他樣本下，萬壽菊的乾重約為 0.14~0.19 g，香蜂草為 0.04~0.16 g，SN 組中，萬壽菊的乾重約為 1.03~1.5 g，香蜂草為 0.67~0.89 g。和非 SN 介質相比，SN 在正常供水處理下，分別提高萬壽菊和香蜂草的乾重 838 和 975%，在限水處理下則提高 655 和 979%。

而在根莖比方面，本次實驗未發現各種變因對它的影響，所有處理均無顯著差異。

3.2.3. 綠覆蓋面積

各種處理的綠覆蓋面積結果如表六所示，和苗高相同，採用 6/14 當週之數

據。在萬壽菊的綠覆蓋面積方面，正常供水處理之表現和乾重以及苗高具有相似表現，仍為 SN 組顯著高於 SA 和 Com-1、Com-2 組。在 SA 和 SN 內花生殼添加量之表現沒有差異。在限水處理中，萬壽菊在 SA、Com 介質中綠覆蓋面積較 SN 低，SN 介質之間則觀察到 SN+0 綠覆蓋面積較 SN+5、SN+10 小的狀況，SN+0 與 SN+5 間則沒有顯著差異。

而在香蜂草的樣本中，SN 組高於 SA 組，但 SN+10 分別在正常供水和限制供水中接近 Com-2 和 Com-1、Com-2 之表現。雖然和其他 SN 樣本間無顯著差異，然而相較於 SN+0、SN+5，SN+10 之表現更為接近綠覆蓋面積較小的 Com-2 組。

3.2.4. 葉片 SPAD 值

圖四至圖六為萬壽菊與香蜂草每周 SPAD 值的變化圖。從表中可以看到，在 SA 的處理中，SPAD 大致保持在同一水準，在整個實驗中保持在 5 到 15 之間。而 SN 的處理則隨著時間而下降，萬壽菊 SPAD 起始值在 35 左右，最終則在 26 到 27 之間。香蜂草 SPAD 起始值在 20 左右，最後則在 10-15 左右。

此外，從圖表中觀察到 SPAD 值會隨著氣溫高低呈現上下波動的現象，在較低的溫度下，SPAD 值會稍微回升，反之若溫度升高 SPAD 值則會降低。6/14 當週溫度相對前後週皆較低，此時在 SN 介質中觀察到 SPAD 的上升，而在整個試驗中，以 6/21 該週達到最高溫紀錄，並觀察到最大的 SPAD 降幅。在這周後，萬壽菊於限水處理的 SN+5、SN+10、Com-1、Com-2，以及香蜂草於限水處理的 SN+5、Com-1、Com-2 全部個體死亡。

3.2.5. 存活率

表七呈現了各種處理下，兩種植物在試驗結束時的最終存活率。在正常供水處理中，萬壽菊僅有 SA+10 有一株個體死亡，剩餘介質存活率皆為 100%。而在香蜂草中，植株在 SN 和兩種商用介質中所有個體皆存活，然而在 SA 介質中死亡率高，SA+0 存活率為 75%；SA+5 存活率為 25%；SA+10 存活率則為 0%。而

在限水處理中，萬壽菊的所有 SA 個體存活，在其他介質則具有高死亡率，除了 SN+0 外，所有非 SA 個體之植株均全部死亡。香蜂草的 SA 個體在限水和正常處理下存活率表現相近，差別在於在限水處理下 SA+10 有一株個體存活。Com 個體和萬壽菊一樣全數死亡，SN 個體則僅有 SN+5 存活率為 0%，SN+0 和 SN+10 的存活率分別為 25 和 75%。




四、 討論

4.1. 生物炭陶粒與傳統介質之性質比較

4.1.1. 物理性質與保水能力

由於有機質在燃燒或熱解途中會損失質量並留下孔隙，因此隨著有機質的添加，無論是 SA 或 SN 陶粒成品皆呈現總體密度下降、總孔隙度提升的現象，並且由於生物質熱解後留下之質量較燃燒為多，在同比例有機物添加量下，SN 個體的密度較高。與類似製作過程的 Com-1（發泡煉石）相比，無論是 SA 還是 SN 陶粒，都具有較高的容器含水量，即具備良好吸水能力。在俞偉、關慶偉（2014）對於幾種綠屋頂蓄排水材料的研究中使用的市售陶粒介質在 30 L 的體積下能蓄積 2.19 L 水，換算為容器含水量約為 7.3 %，與本研究中的 Com-1 接近。值得一提的是該研究中使用的兩種商用蓄排水材料，PVC 和 HDPE 蓄排水板，蓄水能力換算為容器含水量分別為 15.8 和 10.8 %，而本研究所有低溫燒結陶粒的容器含水量都超過 20%，並且通氣能力也符合 FLL 設定充氣孔隙度需大於 10 % 的標準 (FLL, 2018)，表示水庫底泥陶粒不僅保留了一般陶粒的通氣性，還增進了保水能力。陶粒介質本身為大型顆粒，介質堆積時會在顆粒之間留下許多空隙，這個特點賦予它通氣能力。吸水能力則與燒結溫度有關，一般的發泡煉石或是陶粒為黏土礦物在超過 1100°C 之高溫下燒結所形成的材料，而本研究所使用之水庫底泥陶粒燒結溫度為 800°C，在低溫下燒結之陶粒，其孔隙表現出互相連通的開孔特性，使水分可以滲透到內部，這時的陶粒具備吸水能力，然而燒結溫度超過 1100°C 時，陶粒的孔隙性質改變，轉變為互相隔離的閉孔特性(Liu & Coffman, 2016)，導致陶粒的吸水能力降低，因此 Com-1 表現出較低的容器含水量。

Cao *et al.* (2014)將生物炭以 10 到 40%的體積百分比混入火山岩介質中，研究結果顯示添加生物炭可以提高介質的田間含水量，並且使永久萎凋點之含水量降



低，使得植物可利用水分增加。並發現在添加 30%生物炭時，可以提高 16%的植物可利用水分，以及使介質達到永久萎凋點的時間延長兩天。與本研究結果相比，生物炭的添加並未增加陶粒的田間容水量，在植物可利用水分方面，與相同有機質添加量的通氣陶粒相比，生物炭陶粒並不具較好表現。然而在水份保持時間部分，生物炭陶粒延長了介質的保水時間，並且隨著生物炭添加的比例增加而提升。在 SA 介質中，原料含有機物的比例對成品的保水能力影響和 SN 大不相同，SA 介質之保水時間隨有機物的添加而降低，並且在實驗中可發現添加了有機質的 SA+5、SA+10 雖然提高了容器容水量，但水分散失速率也增加，最終反而比 SA+0 更快抵達永久凋萎點(圖二)。

在一般的土壤中，孔隙的大小以及分布和其保水的能力具有很明確的關係，具有較多小孔隙的土壤保水能力通常較高。譚龍等人(2017)研究不同土質土壤以及孔隙分布對於保水能力影響，提到不同土質在同一排水階段下吸力範圍不同，大孔隙多的砂質土壤吸力較小，進氣壓力也較低，使脫水較為容易。對比本研究水分特性曲線的結果，發現無論是 SA 還是 SN，隨著有機質添加量增加，進入不飽和階段的水勢皆隨之降低，類似於黏質土壤到砂質土壤水分特性曲線的轉變，推測有機質添加可能增加了陶粒中較大的孔隙，也導致在 SA 樣本中，原料有機質添加量上升保水時間反而降低的現象。而 SN 的保水時間表現和一般土壤以及 SA 樣本相反，因此，保水能力的差異可能和生物炭本身的性質有關。

依熱解溫度不同，生物炭表面可以表現出親水或是疏水性質，在低於 500°C 的溫度下製成的生物炭表面具有疏水特性，然而隨著溫度上升，生物炭的疏水性下降(Kinney *et al.*, 2012)。此現象是由於在低熱解溫度下，生物炭表面保留許多疏水性官能基，而熱解溫度超過 500°C 會導致這些官能基揮發，使生物炭表現出親水特性(Hallin *et al.*, 2015)。而關於生物炭對於土壤蒸發的影響，Wang *et al.* (2018)的研究結果表示，添加生物炭降低了土壤蒸發量，並對此方面的機制提出解釋。生物炭具有高比表面積，可以提高水分保持及抑制水分蒸發的能力，此

外，生物炭增加了導水能力較差的微孔，並破壞土壤的孔隙連續性，導致有效導水率下降，使土壤深處水分向土壤表面的輸送能力降低，因而抑制了土壤蒸發。根據以上文獻推測，本實驗使用的 800°C 花生殼生物炭可能也具有類似特性，藉由高比表面積以及表面親水性質增加水分吸附能力，並且透過影響導水能力影響水分蒸發性能，進而使 SN 失水速率不隨原料有機質添加量而增加。

在本研究中，添加生物炭降低了永久萎凋點之含水量，和前人研究(Cao *et al.*, 2014; Koide *et al.*, 2015)具有類似的結果。由於 SN 介質失水速率相近，保水時間便決定於永久萎凋點，具較低永久萎凋點之 SN+5、SN+10 因此具有更長的保水時間。

4.1.2. 化學性質

前人研究(Gaskin *et al.*, 2010; Nigussie *et al.*, 2012)指出，生物炭的添加可以增加土壤中的有機碳含量、氮含量及各種有效性養分，而在本研究中，生物炭陶粒主要增加了碳、氮含量。經過有氧燒結後，水庫底泥損失了有機碳，以及絕大部分的氮，而無氧燒結則可以將它們以生物炭的方式保留下來。相較於碳和氮，生物炭陶粒並沒有明顯增加四種交換性陽離子含量。和碳、氮表現不同，在本研究中無額外添加有機物的 SA+0 以及 SN+0 處理，其四種交換性陽離子含量在燒結後都有所提升，並且添加有機物也沒有進一步提升含量，表示它們的來源可能主要是來自水庫底泥本身。除了有機質的貢獻，前人文獻(Nishita & Haug, 1971)也報導，土壤在經過加熱後能夠釋放出陽離子。在土壤中含有許多碳酸鹽類，當溫度到達 600°C 以上時便會分解，釋放出二氧化碳以及原本結合的鹼金屬化合物，使可萃取的陽離子增加。除了碳酸鹽類外，土壤中的陽離子也會以吸附方式存在，或是存在於部分礦物的晶格內，如長石、蒙特石、伊利石、蛭石、綠泥石等鋁矽酸鹽類礦物。這些礦物的結構中含有晶格水，在高溫環境下（300 到 700°C）這些水分會喪失，導致晶格結構的破壞，因此原本結合或吸附的陽離子便會因此被釋放出來。

燒結過程也改變了 CEC 的表現。水庫底泥原本 CEC 為 15.1 cmol/kg，經過有
氧或無氧燒結後分別降低至 3.0 和 3.4 cmol/kg，這一點在 Nishita & Haug (1971)
的研究中也發現了同樣的現象，該研究認為土壤顆粒在溫度提高下，土壤細顆粒
的燒結，以及在高溫下土壤礦物脫水導致的晶格結構破壞都會導致 CEC 的下
降。

SA 和 SN 對兩種萃取方法的鐵、鋁表現具有明顯的不同，在 SA 中是 DCB
可萃取鐵鋁高於酸性草酸銨可萃取鐵鋁，在 SN 中卻相反。在土壤鐵鋁型態分析
中，酸性草酸銨可萃取鐵鋁可代表土壤中無定形態鐵鋁，以及與有機物鍵結的鐵
鋁；DCB 可萃取鐵鋁則代表土壤中游離態鐵鋁、無定形態鐵鋁，以及與有機物鍵
結的鐵鋁（陳震菖，2016）。因此一般來說，土壤中可被酸性草酸銨萃取的鐵鋁
型態也可被 DCB 萃取，故 DCB 萃取液中測得的數值應該會較高，可知生物炭陶
粒具有和一般土壤不同的特性。結晶或低度結晶含鐵礦物的型態差異可能是造成
此現象的原因，根據 Kodama & Ross (1991)的研究，兩種萃取液對於不同的氧化
鐵溶解度不同，DCB 對於針鐵礦以及赤鐵礦溶解度較高，酸性草酸銨則較易溶解
水鐵礦及磁鐵礦。這類含鐵礦物溶解時，不但導致溶液中的鐵濃度增加，礦物中
含有的鋁也有可能被釋放出來。如果土壤中水鐵礦或磁鐵礦的含量高，便有可能
導致酸性草酸銨萃取測值高於 DCB 萃取。在 Liu *et al.* (2016)的研究中，將赤泥以
添加或不添加鋸屑處理，在通氧或通氮氣環境中分別在 200 到 600°C 溫度下進行
熱處理，以 XRD 分析燒成物的結果發現，在通氧環境中，鐵氧化物主要以赤鐵
礦的形式存在，但當加熱溫度達到 600°C 時，在氮氣環境中添加鋸屑的處理出現
了磁鐵礦的訊號，原因為碳的存在所引起的還原反應，將赤鐵礦還原，生成磁鐵
礦。生物炭陶粒在熱解過程中可能也產生了同樣的反應，導致磁鐵礦含量提高。
又因 DCB 萃取液幾乎不溶解磁鐵礦，酸性草酸銨溶液對其的溶解性則很強，導
致出現和一般土壤不同的測量結果。




4.1.3. 陶粒的磷含量與磷吸脫附性能

水庫底泥無論是經過通氧或是無氧燒結，有效性磷含量都會增加，並且隨著花生殼粉的添加量有上升的趨勢，顯示燒結過程與有機質添加為均為有效性磷增加的重要來源。有氧燒結的 SA 陶粒有效性磷的含量較 SN 為高，可能是由於生胚中的有機質經過燃燒變為灰分後，釋放出大量有效性磷的緣故。

至於磷的吸脫附實驗結果顯示，在所有樣本中，對磷吸附能力最好的是 RS 和 SN+10，其中 RS 有最大的吸附量，SN+10 初始吸附量低於 RS，但脫附速率較低，因此最後殘餘吸附量變為全樣本最高。另兩種生物炭陶粒 SN+5 和 SN+0 吸附能力較低，但仍高於其他樣本。生物炭本身對磷的吸附能力雖然比兩種商用介質好，並且在 SN 中隨著生物炭含量提升，吸附能力也增加，但是生物炭對磷的吸附量低於不含生物炭的 SA 陶粒，並且從脫附實驗中可以看出，生物炭的表現和陶粒樣本不同，生物炭迅速釋放所吸附的磷，甚至最終的釋放量大於總吸附量，而陶粒樣本對磷的保留能力較強，無論是 SA 或是 SN 脫附曲線皆較生物炭緩和，最終的釋放量也較少，表示在磷吸脫附的機制中，陶粒基質本身的性質具有重大影響。

在土壤中，磷的吸附或固定通常經由幾個途徑：(1)吸附於土壤膠體表面。(2)土壤中的陽離子，如鐵、鋁、鈣離子的固定作用。(3)與土壤中有機質形成錯合物（陳明義等人，1988）。根據基本性質的測試結果，土壤中鐵、鋁以及有機質的含量可能對於磷的吸附能力較有影響。在 Fink *et al.* (2016) 的研究中，解釋了數種土壤中鐵、鋁以及有機質對於磷吸附的機制。土壤礦物中的鐵鋁氧化物表面含有羥基官能團，這些官能團主要以兩種機制吸附磷：(1)質子化的官能團帶正電，吸引磷酸根離子。(2)官能團和磷酸根發生置換作用。有機官能團的存在則可能以陽離子橋的方式吸引陰離子，增加磷的吸附。除了 RS 樣本外，所有陶粒的磷吸附能力大致上依照酸性草酸銨可萃取鐵、鋁含量的順序由高至低遞減，因此它可能是主導因素。前文提到，酸性草酸銨可萃取鐵、鋁包含了無定形態鐵鋁、有機質




可萃取鐵鋁，以及部分可被酸性草酸銨萃取液溶解的結晶態鐵，如水鐵礦、磁鐵礦。無定形態鐵鋁較結晶態鐵鋁具有更大的反應表面積，因此吸附磷的效率更好 (Zhang *et al.*, 2010)。而結晶態鐵鋁於磷吸附能力的差別，Celi *et al.* (2020) 對數種結晶態鐵氧化物進行磷的吸脫附試驗，發現了磁鐵礦的磷吸附能力高於赤鐵礦，綜合以上結果得知，生物炭陶粒的磷吸附能力可能是來自於陶粒基質中無定形鐵氧化物，以及結晶態氧化鐵的型態差異所致。生物炭本身的磷吸附量較陶粒基質低，然而可能在燒結過程中將赤鐵礦還原成磁鐵礦，改善磷的吸附能力。此外，pH 值也影響磷的吸附能力，由於土壤 pH 值降低能增加帶正電的吸附位點，因此吸附能力也越好（李明銳、沙麗清，2002）。雖然在陶粒間並未發現此現象，但可能是導致 RS 磷吸附能力最高的原因。相較於燒結後的陶粒介質，RS 的磷脫附曲線較陡，表示釋放磷的能力較好，這可能和有機質的含量有關，夏漢平、高子勤（1992）提到，鐵鋁氧化物對磷吸附的牢固度高於有機質，在有機質含量最高的水庫底泥中，可能有一部分磷是以吸附於有機質的狀態存在，因此在脫附實驗中觀察到較多的磷釋放量。

4.2. 盆栽試驗

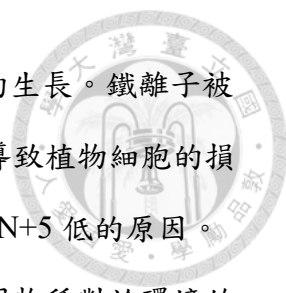
4.2.1. 不同介質對植栽生長表現的影響

在盆栽試驗中，SN 樣本在兩種植物中都顯著獲得較好表現。在水份充足的狀態下，SN 的生長表現便已經和其他處理產生差異，並且本實驗並沒有施肥處理，因此這個改善可能是來自於養分供給的差異。前人研究 (Van Zwieten *et al.*, 2010; Rajkovich *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014) 也提及，添加生物炭能夠透過提高土壤中各種植物所需養分含量或增加養分利用效率達到改善植物生長的效果。生物炭對於各種養分的改善能力會依不同生物炭種類施用土壤的差異而有所不同，在本研究中，根據各種介質的化學分析結果，可知 SN 和其他介質於基本性質方面最大的差異在於銨態氮以及硝酸態氮部分。在其他介質中無法以電極測出銨態氮的存在，只有 SN 以及 Com-1 樣本具有測值，且 SN 的含量遠高於 Com-1。而



硝酸態氮的含量也是 SN 高於其他介質。在 SN 中兩種型態的氮隨著花生殼的添加量提高，SA 則否。表示介質中含氮養分的來源主要來自於有機質，在 SA 中含氮養分隨著有氧燒結的過程而損失，SN 則藉由無氧氣氛引起的熱解過程將它保留下來，由於氮是維持植物生長最需要的大量元素之一，因此它可能是改善植栽表現最關鍵的部分。氮為構成葉綠素的必要元素，因此植體中氮的狀態和葉綠素具有關聯性，可以藉由葉綠素計的 SPAD 讀值推估（楊純明，2003）。無論是萬壽菊還是香蜂草，栽培於 SN 的處理初始 SPAD 值皆高於 SA 以及兩種商用介質，並隨著時間慢慢降低，表示在實驗前期，栽培於 SN 的個體可能獲得較好的氮素供給，而隨著植株成長，對氮的需求增加，介質中的養分也慢慢耗盡，因此在實驗中後期便會觀察到 SPAD 值的降低。然而，儘管高生物炭含量的介質養分含量更高，在正常供水下，SN 介質處理的萬壽菊之間並沒有發現差異，香蜂草甚至在 SN+10 中乾重低於其他兩者。

大致上兩種植物對所有介質的表現相似，但仍有些許不同。在所有的萬壽菊上，除 SA 以及 Com-1、Com-2 葉色較黃外並未發現任何表觀病徵，然而所有栽培於 SA、SN 介質的香蜂草均有葉緣焦枯的現象，此現象可能是由於鹽分過高所造成（卓家榮，2005）。雖然根據王才義（1994）的報告，生物炭陶粒的 EC 值並未超過栽培介質所合適的範圍 2-11 dS/cm，但 EC 值的合適範圍可能依植物種類而異。根據 United States Salinity Laboratory Staff (1954) 定義的鹽度標準，得知 SA 屬於中鹽度介質（4-8 mS/cm），SN 則為低鹽度介質（2-4 mS/cm），因此對鹽較為敏感的作物可能會發生鹽分障礙。在盆栽試驗中也發現，所有栽培於 SN 介質中的香蜂草植株葉背均變為紫紅色，此為磷缺乏的病徵（連深，1980；劉東憲、蔡正賢，2019）。前面實驗結果已知，生物炭陶粒具有較低的磷含量，以及具有高磷吸附能力，並得知這個機制可能與介質中含有的鐵氧化物有關。雖然磷的吸附能力對於降低綠屋頂養分污染方面為一優勢，但也表示在栽作需磷量高的物種時可能會造成磷分的缺乏。而關於鐵對於植物的其他影響方面，在 Casierra-Posada



et al. (2017)的研究中提到，土壤中過高的鐵含量可以抑制植物的生長。鐵離子被植物吸收後會在植物體內產生高活性自由基，因此過量的鐵會導致植物細胞的損害。這兩項因素或許造成了香蜂草在 SN+10 中乾重較 SN+0、SN+5 低的原因。結果表示植物生長表現並非隨著生物炭含量增加而提高，依不同物種對於環境的需求而有所變化。

4.2.2. 植栽於不同介質中對限水環境的反應

除了實驗結束時才測量的乾重外，苗高、綠覆蓋面積以及 SPAD 的測值皆可顯示在 6/21 前的植株生長狀況。從觀測數值可以發現在 6/21 前限水處理便已經對植株產生部分影響。在苗高表現方面，限水處理沒有明顯影響，然而對於綠覆蓋面積影響明顯，在限水處理中，SN+5、SN+10 與正常供水無顯著差異，但 SN+0 之綠覆蓋面積均明顯降低，特別是在萬壽菊的處理中，SN+0 的表現已經低於 SN+5、SN+10，且整體綠覆蓋面積生長表現呈現為隨著生物炭添加比率增加，綠覆蓋面積越高的趨勢。於 Olszewski & Eisenman (2017)的研究中，在發泡煉石中添加不同比例的生物炭，並以兩周一次的灌溉頻率栽培薄荷與羅勒，發現薄荷的綠覆蓋面積會因生物炭的添加而上升，而在 Yuristy (2013)的研究中也提到綠屋頂植栽的綠覆蓋率和基質保水能力有很顯著的相關性。萬壽菊所表現出的趨勢也和先前利用烘箱所做的保水時間試驗的結果雷同，隨著生物炭添加量增加，陶粒的保水時間也隨之變長，三種介質中 SN+0 的保水時間最短，SN+10 最長。由此可知，生物炭陶粒可能透過延長保水時間的能力提高植株在限水環境下的表現，雖然 SN+0 的容器容水量並不比其他兩種生物炭陶粒低，然而在日照強烈的屋頂環境中，介質可能快速失去水分，導致實際能被植物吸收的水量減少，在這情況下，保持水分的時間可能對於綠屋頂植物生理或是綠屋頂水分管理更為重要。

然而，SN 的保水能力似乎無助於植物度過 6/21 該週的逆境。在該周後 SN 大量個體死亡，在萬壽菊中 SN+5、SN+10 全數死亡，香蜂草則是 SN+5 全數死

亡。在盆栽試驗結束時，所有 SA 處理均有個體存活，因此 SN 處理的生存率表現較 SA 差。雖然在實驗室環境中，SN+5、SN+10 皆能保存約 7 天的植物有效水分，但在實際種植時植物本身會消耗水分，且溫室在日間的溫度可以超過實驗室的烘箱環境 (28 °C)，因此實際上保有有效水分的時間可能會較理想情況更短。

SN 介質生存率表現較差的原因也可能和個體大小差異有關。栽植於 SN 中的個體遠大於 SA 以及 Com-1、Com-2。Olszewski & Eisenman (2017) 的研究發現了擁有較低生物量的個體在同樣環境下氣孔導度較高的現象，這是由於較小的個體需水量也更小，因此對乾旱的反應也比較不敏感。另外，介質中含有的水分對於穩定介質溫度的波動具有很大的幫助 (Tsiotsiopolou *et al.*, 2003)，如果種植在 SN 中的植株較快用完水分，可能導致它更容易受到高熱逆境的影響。Savi *et al.* (2016) 研究 11 種耐旱植株於薄層綠屋頂上的生長狀況，提出高熱對植物的影響可能比缺水更大的看法，在淺層介質中，根系更容易暴露於極端溫度下，高溫會改變細胞膜的穩定性以及酵素活性，從而影響各種生理活動。考慮到 Com-1、Com-2 即使在實驗室環境也很快在 70 小時內耗盡有效水分，在栽培試驗中卻能支持植株在限水環境下生存數個月，這可能是限水處理的 SN 和 Com-1、Com-2 的植株在 6/21 後才大量死亡的原因，該週紀錄到整個試驗過程中最高的溫度，高熱可能引起植物不可逆的傷害，加上缺水的作用因而導致植株死亡。而 SA 植株由於低溫陶粒的保水能力以及較小的生物量而得以存活。於 6/14 以及最終的兩個結果可知，SN+5、SN+10 確實擁有良好的保水性能，在一定程度的水分限制狀況下能夠確保有效水的供給，減少缺乏水分或高熱對植株的影響，然而這個效果有其極限，在更嚴苛的乾旱條件下仍然需要透過灌溉來維持植被生存。



五、 結論與建議


5.1. 結論

本研究以石門水庫底泥與花生殼混合，依據原料花生殼所占重量百分比製成三種生物炭陶粒(SN)，與相同原料配比製成之三種傳統陶粒(SA)及兩種市售無土栽培介質(Com-1, Com-2)進行物理化學性質與盆栽試驗結果比較，得到以下結論：

在物理性質的方面，原料中有機物添加量增加，陶粒成品的總體密度、充氣孔隙度以及容器容水量也隨之上升。SN 由於有機質未完全燒失，總體密度稍高於同樣原料配比下的 SA，並且所有水庫淤泥陶粒都重於發泡煉石。發泡煉石、火山岩以及除 SN+0 之外的陶粒總體密度均小於 1，然而僅有發泡煉石會浮在水上。水庫底泥陶粒之充氣孔隙度與兩種商用介質相比均沒有優勢，然而容器容水量均較兩者為高。而從各介質的保水時間實驗中發現，兩種商用介質均在 70 小時內耗盡有效水分，而低溫燒結的水庫底泥陶粒則有較長的保水時間。在水庫底泥陶粒中，SN+0 保水時間最短，SA 次之，SN+5 及 SN+10 表現最好，可知含有越高比例生物炭的陶粒在長時間內維持介質水分的能力也越強。

在化學性質方面，生物炭陶粒具有較高的銨態氮、硝酸態氮以及碳含量，並隨有機質添加量增加而提高，而在其他介質中則無法測得此三種成分。四種交換性陽離子不隨生物炭的添加而上升，然而草酸銨可萃取鐵隨著生物炭的添加而提升，生物炭本身鐵含量較低，但它的存在改變了鐵的型態，並似乎影響了磷的吸脫附能力，生物炭陶粒吸附磷的能力較其他為高，其中以 SN+10 的吸附能力最強。水庫底泥陶粒的磷脫附能力均較兩種商業介質和原本的底泥差，表示磷的釋放較為緩慢，可能因此降低隨逕流釋放到都市環境的磷。而介質本身的有效性磷含量則以 SA 較高，推測存在於灰分中的磷有效性較生物炭高。

由盆栽試驗的結果可得知各種介質中存在明顯不同。SA 以及商用介質由於



氮素養分含量較低，在苗高、乾重、綠覆蓋面積方面均表現較差。在水份充足的狀態下，不同生物炭含量的陶粒彼此之間沒有差異，然而在水份限制的環境中 SN+0 的綠覆蓋面積均明顯降低。這個狀況在萬壽菊中更為明顯，在正常供水下三種生物炭陶粒表現無差異，但在限水環境下變為隨生物炭含量上升綠覆蓋面積增加的趨勢。這個現象反映了三種生物炭陶粒於保水時間上的差異，表示生物炭含量的增加有助於使植株在限水環境下維持較好表現。

以上實驗結果顯示了生物炭陶粒的性能符合研究目的，展現了改善陶粒介質養分保持以及保水的性能，並且在未施肥狀態下仍能夠增進植物生長表現，這些性能皆對薄層式綠屋頂的栽植環境具有正面助益，表示低溫燒結製成的生物炭陶粒相較於傳統陶粒以及商用介質具有獨特的優勢，可能具有作為新型綠屋頂栽培介質的潛力。

5.2. 建議

在本研究中生物炭陶粒展現了各種優於傳統陶粒的優勢，然而盆栽試驗僅進行四個月，因此更長期的影響仍有待後續研究探討。另外在試驗中儘管生物炭陶粒的生長表現均較傳統陶粒佳，但根據生物炭 SPAD 值隨時間而降低的現象可知養分仍會漸漸耗盡，因此生物炭陶粒所含的養分帶來的效益應為改善綠屋頂植物在苗期的生長表現，而非長期養分來源。並且在香蜂草中也觀察到葉片變紅的現象，可能是由於磷份缺乏所致，這個現象表示各種植物對養分的需求有所不同，儘管生物炭陶粒含有各種養分，仍須依據栽植物種需求加以施肥調整，特別是磷的部分。香蜂草也發生了葉緣焦枯的現象，這可能是鹽分過高所致，雖然水庫底泥陶粒介質的鹽度仍在建議範圍內（王才義，1994），但對於較低鹽份耐受性的植物可能造成生長劣勢，而在實用上可能需要透過泡水等方式先行洗鹽處理以降低 EC。

此外，生物炭陶粒確實具有在水份限制環境中維持植物生長的能力，但在遭受強烈的乾旱環境時仍可能無法維持植物生長，故生物炭陶粒仍須注意水分供給

問題，但由於它較好的水分保持能力，相較於市售介質它的灌溉頻率和水量可以降低，可能具有減少能量消耗和養護成本的效果，增加的保水時間對於降低屋頂溫度的能力也可在未來安排試驗進一步探討。而在養分保持能力方面，生物炭陶粒所帶來的效益可能並不僅是減少養分釋出對於都市環境的汙染，Chen *et al.*

(2018) 的研究中提到，生物炭除了增加綠屋頂介質的可利用水份，還可吸附可溶性養分，並長期促進有益微生物的生長，改善的生長環境有利於植物生長，促進光合作用對於碳的固定，綠屋頂整體的碳捕捉和儲存能力也會因此提高。建議未來可進行較長期的現地試驗，以評估生物炭陶粒對於都市碳儲存的貢獻。



六、 參考文獻

- 方新政（1991）。發泡煉石之製造。臺南區農業改良場研究彙報，(27)，32-36。
- 王才義（1994）。設施環境管理技術-栽培介質。亞熱帶地區花卉設施栽培技術。
- 江康鈺、簡光勵、黃淑貞、陳宜晶（2005）。水庫淤泥燒結製磚之可行性研究。環境保護，28(1)，1-13。
- 行政院農業委員會（2019）。綠色國民所得帳編製報告。行政院農業委員會。
- 何緒生、張樹清、余雕、耿增超、高海英（2011）。生物炭對土壤肥料的作用及未來研究。中國農學通報，27，16-25。
- 李明銳、沙麗清（2002）。雲南保山西莊河流域森林土壤磷吸附特性。山地學報，(3)。
- 卓家榮（2005）。柑桔土壤肥力檢測及營養診斷技術。合理化施肥專刊。
- 俞偉、關慶偉（2014）。種植屋面 5 種不同排蓄水材料性能分析。中國城市林業，12(4)，18-22。
- 夏漢平、高子勤（1992）。無機磷在白漿土中的吸附與解吸機制。中國科學院研究生院學報，(4)，9。
- 張采依（2012）。薄層屋頂綠化植物選擇與應用之研究。臺灣大學園藝學研究所學位論文，1-159。
- 張惠娟（2016）。屋頂可食地景之降溫研究。東海大學景觀學系碩士論文。
- 連深（1980）。作物營養障礙徵狀。作物需肥診斷技術。
- 陳明義、林昭遠、呂金誠（1988）。土壤有機質對木麻黃林地磷肥吸附之影響。中華水土保持學報，19(1)，80-88。
- 陳震菖（2016）。鄰近火成岩與沉積岩母質化育土壤之性質與碳儲存量差異。臺灣大學森林環境暨資源學研究所學位論文，1-102。
- 陳鴻堂（1992）。臺灣中部設施栽培土壤鹽分累積之特性及改良。國立中興大學土壤學研究所碩士論文。

彭一弘（2012）。植栽在不同混合比例輕量介質之生長差異。成功大學建築學系碩士在職專班學位論文，1-134。

黃春翔（2007）。具保水性顆粒介質之燒製與物理性質。成功大學土木工程學系學位論文，1-85。

楊昆憲（2008）。不同粒徑與保水性顆粒介質之物理性質。成功大學土木工程學系學位論文，1-86。

楊純明（2003）。由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態。水稻精準農業體系，2003，89-96。

經濟部水利署（2020）。台灣地區民國 107 年蓄水設施水量營運統計報告。經濟部水利署。

經濟部水利署北區水資源局（2008）。石門水庫淤泥多元化處置方案評估規劃綜合報告。

經濟部水利署北區水資源局（2018）。107-108 年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究。經濟部水利署北區水資源局。

經濟部水利署北區水資源局（2020）。石門水庫淤積情形及清淤工作執行現況。經濟部水利署北區水資源局。取自

<https://www.wranb.gov.tw/3452/3486/3487/12592/>


劉東憲、蔡正賢（2019）。氮磷鉀合理施用對蔬果影響之案例分享。苗栗區農業專訊，(85)，14-22。


蔡佳儒、吳耿東。（2013）。木質材料製備之生物炭應用對植物生長機制之探討。林產工業，32(3)，169-178。

譚龍、韋昌富、田慧會、王卉、張芹（2017）。土體持水特性及孔隙水分佈特性的試驗研究。工程地質學報，25(1)，73-79。

Beck, D. A., Johnson, G. R., & Spolek, G. A. (2011). Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*,

- 159(8-9), 2111-2118.
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., & Bengtsson, L. (2006). The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355(1-3), 48-63.
- Bilderback, T. E., Warren, S. L., Owen, J. S., & Albano, J. P. (2005). Healthy substrates need physicals too!. *HortTechnology*, 15(4), 747-751.
- Bliss, D. J., Neufeld, R. D., & Ries, R. J. (2009). Storm water runoff mitigation using a green roof. *Environmental Engineering Science*, 26(2), 407-418.
- Bragg, N. C., & Chambers, B. J. (1987, September). Interpretation and advisory applications of compost air-filled porosity (AFP) measurements. In *Symposium on Horticultural Substrates and their Analysis* 221 (pp. 35-44).
- Cao, C. T., Farrell, C., Kristiansen, P. E., & Rayner, J. P. (2014). Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71, 368-374.
- Casierra-Posada, F., Cortés-Bayona, J. D., & Cutler, J. (2017). Effect of Iron Excess on Growth of Sisal Plants (*Furcraea hexapetala*). *Gesunde Pflanzen*, 69(3), 123-129.
- Celi, L., Prati, M., Magnacca, G., Santoro, V., & Martin, M. (2020). Role of crystalline iron oxides on stabilization of inositol phosphates in soil. *Geoderma*, 374, 114442.
- Chen, C. F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering*, 52, 51-58.
- Chen, H., Ma, J., Wang, X., Xu, P., Zheng, S., & Zhao, Y. (2018). Effects of biochar and sludge on carbon storage of urban green roofs. *Forests*, 9(7), 413.
- Fink, J. R., Inda, A. V., Tiecher, T., & Barrón, V. (2016). Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciencia e Agrotecnologia*, 40(4), 369-379.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2018).

- 
- Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofs: Green Roof Guidelines. *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*.
- Gaskin, J. W., Speir, R. A., Harris, K., Das, K. C., Lee, R. D., Morris, L. A., & Fisher, D. S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, 102(2), 623-633.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Gregorich, E. G., & Carter, M. R. (2007). Soil sampling and methods of analysis. *CRC Press*.
- Hallin, I. L., Douglas, P., Doerr, S. H., & Bryant, R. (2015). The effect of addition of a wettable biochar on soil water repellency. *European Journal of Soil Science*, 66(6), 1063-1073.
- James, G., Sabatini, D. A., Chiou, C. T., Rutherford, D., Scott, A. C., & Karapanagioti, H. K. (2005). Evaluating phenanthrene sorption on various wood chars. *Water Research*, 39(4), 549-558.
- Kinney, T. J., Masiello, C. A., Dugan, B., Hockaday, W. C., Dean, M. R., Zygourakis, K., & Barnes, R. T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41, 34-43.
- Kodama, H., & Ross, G. J. (1991). Tiron dissolution method used to remove and characterize inorganic components in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 55(4), 1180-1187.
- Koide, R. T., Nguyen, B. T., Skinner, R. H., Dell, C. J., Peoples, M. S., Adler, P. R., & Drohan, P. J. (2015). Biochar amendment of soil improves resilience to climate change. *Gcb Bioenergy*, 7(5), 1084-1091.
- Kuoppamäki, K., & Lehvävirta, S. (2016). Mitigating nutrient leaching from green roofs

- 
- with biochar. *Landscape and Urban Planning*, 152, 39-48.
- Liu, R., & Coffman, R. (2016). Lightweight aggregate made from dredged material in green roof construction for stormwater management. *Materials*, 9(8), 611.
- Liu, Y., Naidu, R., Ming, H., Dharmarajan, R., & Du, J. (2016). Effects of thermal treatments on the characterisation and utilisation of red mud with sawdust additive. *Waste Management & Research*, 34(6), 518-526.
- McKeague, J., & Day, J. (1966). Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 46(1), 13-22.
- Mehlich A. (1984) Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15:12-1409-1416.
- Mehra, O. P., & Jackson, M. L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In *Proceedings 7th nat. Conf. Clays* (Vol. 5, pp. 317-327).
- Moran, A., Hunt, B., & Smith, J. (2005, May). Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. In *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show* (pp. 4-6).
- Nagase, A., & Dunnett, N. (2011). The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 230-236.
- Nigussie, A., Kissi, E., Misganaw, M., & Ambaw, G. (2012). Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 12(3), 369-376.



- Nishita, H., & Haug, R. M. (1971). Some physical and chemical characteristics of heated soils (No. UCLA-12-819). California Univ., Los Angeles. *Lab. of Nuclear Medicine and Radiation Biology*.
- Olszewski, M. W., & Eisenman, S. W. (2017). Influence of biochar amendment on herb growth in a green roof substrate. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58(4), 406-413.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3), 271-284.
- Savi, T., Dal Borgo, A., Love, V. L., Andri, S., Tretiach, M., & Nardini, A. (2016). Drought versus heat: What's the major constraint on Mediterranean green roof plants?. *Science of the Total Environment*, 566, 753-760.
- Sun, F., & Lu, S. (2014). Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 26-33.
- Tsiotsiopolou, P., Nektarios, P. A., & Chronopoulos, I. (2003). Substrate temperature fluctuation and dry-weight partitioning of Lantana grown in four green roof growing media. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78(6), 904-910.
- United States Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *US Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 60*.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327(1-2), 235-246.
- Wang, H., Lin, K., Hou, Z., Richardson, B., & Gan, J. (2010). Sorption of the herbicide

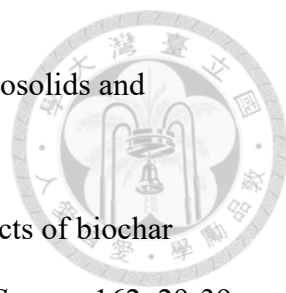
- 
- terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars. *Journal of Soils and Sediments*, 10(2), 283-289.
- Wang, T., Stewart, C. E., Sun, C., Wang, Y., & Zheng, J. (2018). Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils. *Catena*, 162, 29-39.
- Yu, X. Y., Ying, G. G., & Kookana, R. S. (2006). Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8545-8550.
- Yuristy, G. (2013). Considering a green roof substrate for northern climates (Doctoral dissertation).
- Zhang, L., Sun, X. Y., Tian, Y., & Gong, X. Q. (2014). Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. *Scientia Horticulturae*, 176, 70-78.
- Zhang, W., Faulkner, J. W., Giri, S. K., Geohring, L. D., & Steenhuis, T. S. (2010). Effect of soil reduction on phosphorus sorption of an organic-rich silt loam. *Soil Science Society of America Journal*, 74(1), 240-249.

表 1 各種陶粒及兩種商用無土介質之物理性質。(生物炭陶粒：SN+0-10；通氣陶粒：SA+0-10；市售發泡煉石 (Com-1)；火山岩石 (Com-2)。

| | SA+0 | SA+5 | SA+10 | SN+0 | SN+5 | SN+10 | Com-1 | Com-2 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bulk density (g/cm³) | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.8 |
| Air-filled porosity (%) | 37.0 | 38.3 | 39.2 | 37.1 | 39.5 | 38.9 | 38.9 | 50.3 |
| Container capacity (%) | 23.1 | 25.2 | 26.8 | 20.7 | 24.9 | 25.4 | 6.1 | 9.7 |
| Total porosity (%) | 60.1 | 63.5 | 66.0 | 57.8 | 64.4 | 64.3 | 45.0 | 60.0 |
| Field capacity (%) | 19.9% | 23.1% | 25.3% | 23.3% | 20.2% | 23.0% | 3.1% | 1.8% |
| Permanent wilting point (%) | 7.7% | 7.1% | 6.2% | 8.4% | 5.9% | 5.3% | 0.4% | 0.0% |
| Plant available water (%) | 12.3% | 16.0% | 19.1% | 14.9% | 14.2% | 17.7% | 2.7% | 1.8% |



表 2 各種陶粒及兩種商用無土介質之化學性質。(生物炭陶粒：SN+0-10；通氣陶粒：SA+0-10；市售發泡煉石 (Com-1)；火山岩石 (Com-2)；生水庫底泥 (RS)；生物炭 (BC)。ND 為測值低於儀器測量極限或檢量線換算後呈現負值之樣本。

| | SA+0 | SA+5 | SA+10 | SN+0 | SN+5 | SN+10 | Com-1 | Com-2 | RS | BC |
|---|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| pH | 8.5 | 9.4 | 9.2 | 8.8 | 9.4 | 9.4 | 6.5 | 8.6 | 7.6 | 10.1 |
| C(%) | ND | ND | ND | 0.4 | 1.2 | 2.9 | ND | ND | 5.9 | 70.6 |
| N(%) | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 0.2 | 2.0 |
| NH₄⁺ (mg/kg) | ND | ND | ND | 4.9 | 10.2 | 10.1 | 0.1 | ND | 82.1 | 10.9 |
| NO₃⁻ (mg/kg) | 18.0 | 17.9 | 16.5 | 85.0 | 105.6 | 114.9 | 14.5 | 29.7 | 20.1 | 5337.7 |
| P (mg/kg) | 12.3 | 10.0 | 25.7 | 2.6 | 5.0 | 5.3 | 3.6 | 24.3 | 0.8 | 141.3 |
| EC (mS/cm) | 5.7 | 4.9 | 4.8 | 2.8 | 2.1 | 2.2 | 1.3 | 0.4 | 3.2 | 155.8 |
| CEC (cmol/kg) | 3.0 | 2.1 | 2.6 | 3.4 | 1.5 | 1.5 | ND | 1.8 | 15.1 | 9.5 |
| K⁺ (cmol/kg) | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 0.2 | 0.6 | 0.3 | 11.1 |
| Mg²⁺ (cmol/kg) | 1.4 | 1.2 | 1.3 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.1 | 0.8 | 0.9 | 4.5 |
| Ca²⁺ (cmol/kg) | 5.4 | 5.2 | 4.6 | 5.2 | 5.9 | 5.8 | 0.6 | 5.7 | 4.8 | 16.9 |
| Na⁺ (cmol/kg) | 1.2 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 0.1 | 0.8 | 0.2 | 2.0 |

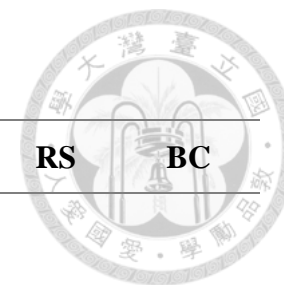


表 3 各樣品兩種選擇性萃取之鐵鋁含量。

| | SA+0 | SA+5 | SA+10 | SN+0 | SN+5 | SN+10 | Com-1 | Com-2 | RS | BC |
|---------------------------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-----|
| Acid oxalate extractable | | | | | | | | | | |
| Fe (g/kg) | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 15.1 | 17.2 | 19.3 | 0.8 | 5.2 | 9.8 | 0.4 |
| Al (g/kg) | 1.2 | 1.3 | 1.7 | 5.5 | 5.0 | 5.2 | 0.1 | 3.3 | 1.1 | 0.2 |
| DCB extractable | | | | | | | | | | |
| Fe (g/kg) | 16.2 | 14.3 | 14.0 | 10.0 | 8.2 | 10.8 | 3.4 | 0.7 | 20.5 | 0.7 |
| Al (g/kg) | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 0.2 | 0.0 | 1.0 | 0.1 |

表 4 萬壽菊(*Tagetes erecta*) 和香蜂草(*Melissa officinalis*)在各種介質中之苗高(cm)。小寫英文字母為相同水分管理下之介質間比較。

| | <i>Tagetes erecta</i> | | <i>Melissa officinalis</i> | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | Full irrigation | Limited irrigation | Full irrigation | Limited irrigation |
| SA+0 | 13.9±4.1a | 13.3±2.7a | 9±1.3a | 9±1.3a |
| SA+5 | 15.3±2.8a | 13.2±1.1a | 7.7±0.5a | 6.1±3.7a |
| SA+10 | 15.3±1.8a | 14.5±2.8a | 8.3±1a | 7.6±0.3a |
| SN+0 | 38±19b | 23.9±6.2bc | 14.4±1.3b | 14.4±2.2b |
| SN+5 | 37.9±3b | 27.6±3c | 17.5±2.2c | 15.6±1.1b |
| SN+10 | 42.2±22b | 30.8±2.8c | 16.6±0.7c | 14.6±1.9b |
| Com-1 | 17.2±3.3a | 17.5±2a | 7.7±1.8a | 7.6±1a |
| Com-2 | 15.1±4.6a | 16.8±4.4ab | 8.8±0.9a | 7.9±0.5a |

註：表中數據為平均數 ± 標準差 (mean ± SD)，每樣本四重複。



表 5 萬壽菊(*Tagetes erecta*) 和香蜂草(*Melissa officinalis*)在各種介質中之乾重(g)。小寫英文字母為相同水分管理下之介質間比較，大寫則為同樣介質下不同水分管理之比較。

| | <i>Tagetes erecta</i> | | <i>Melissa officinalis</i> | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | Full irrigation | Limited irrigation | Full irrigation | Limited irrigation |
| SA+0 | 0.27±0.05aA | 0.19±0.11aA | 0.13±0.07aA | 0.05±0.03aA |
| SA+5 | 0.2±0.07aA | 0.14±0.04aA | 0.04±0.001aA | 0.05±0.02aA |
| SA+10 | 0.17±0.07aA | 0.17±0.06aA | 0.05±0.0004aA | 0.04±0.02aA |
| SN+0 | 2.39±1.51bB | 1.03±0.39bA | 1.4±0.27cB | 0.67±0.1cA |
| SN+5 | 2.07±0.49bA | 1.5±0.55bA | 1.41±0.22cB | 0.89±0.12cA |
| SN+10 | 2.29±1.35bB | 1.09±0.31bA | 0.6±0.29bA | 0.86±0.12cB |
| Com-1 | 0.18±0.08aA | 0.12±0.02aA | 0.08±0.01aA | 0.07±0.03aA |
| Com-2 | 0.37±0.04aA | 0.18±0.05aA | 0.17±0.06aA | 0.16±0.02bA |

註：表中數據為平均數 ± 標準差 (mean ± SD)，每樣本四重複。



表 6 萬壽菊(*Tagetes erecta*) 和香蜂草(*Melissa officinalis*)在各種介質中之綠覆蓋面積(cm^2)。不同小寫字母表示同水分處理不同介質下具顯著差異，不同大寫字母表示同介質不同水分處理下具顯著差異($p < 0.05$)。

| | <i>Tagetes erecta</i> | | <i>Melissa officinalis</i> | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | Full irrigation | Limited irrigation | Full irrigation | Limited irrigation |
| SA+0 | 13.1±5.8aB | 5.1±1.6aA | 3.5±2.9aA | 1.4±1.7aA |
| SA+5 | 11.8±3.4aB | 4.3±1aA | 0.2±0aA | 0.4±0.4aA |
| SA+10 | 6.3±3.5aA | 6.9±3.2aA | 1.4±0.2aA | 2.1±2.9abA |
| SN+0 | 129.9±101bB | 32.1±12.1bA | 44.2±4.2cB | 25.5±6.6dA |
| SN+5 | 99.1±10bA | 55.8±24.2bcA | 38.2±12.7cA | 36.1±8dA |
| SN+10 | 121.6±81.5bA | 67.4±29cA | 16.7±16.2bcA | 20.3±15.6cdA |
| Com-1 | 14.2±4.5aA | 6±4.8aA | 3.8±1.3aA | 6.9±1.9bcA |
| Com-2 | 15.4±4.2aA | 14.9±3.4abA | 6.5±3.4abA | 10.3±0.9cA |

註：表中數據為平均數 ± 標準差 (mean ± SD)，每樣本四重複。

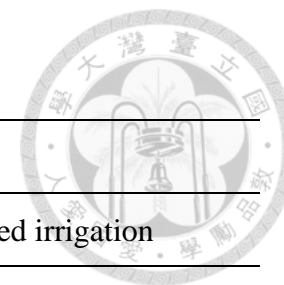


表 7 萬壽菊(*Tagetes erecta*) 和香蜂草(*Melissa officinalis*)在各種介質中之存活率。

| | <i>Tagetes erecta</i> | | <i>Melissa officinalis</i> | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | Full irrigation | Limited irrigation | Full irrigation | Limited irrigation |
| SA+0 | 100% | 100% | 75% | 75% |
| SA+5 | 100% | 100% | 25% | 25% |
| SA+10 | 75% | 100% | 0% | 25% |
| SN+0 | 100% | 50% | 100% | 25% |
| SN+5 | 100% | 0% | 100% | 0% |
| SN+10 | 100% | 0% | 100% | 75% |
| Com-1 | 100% | 0% | 100% | 0% |
| Com-2 | 100% | 0% | 100% | 0% |

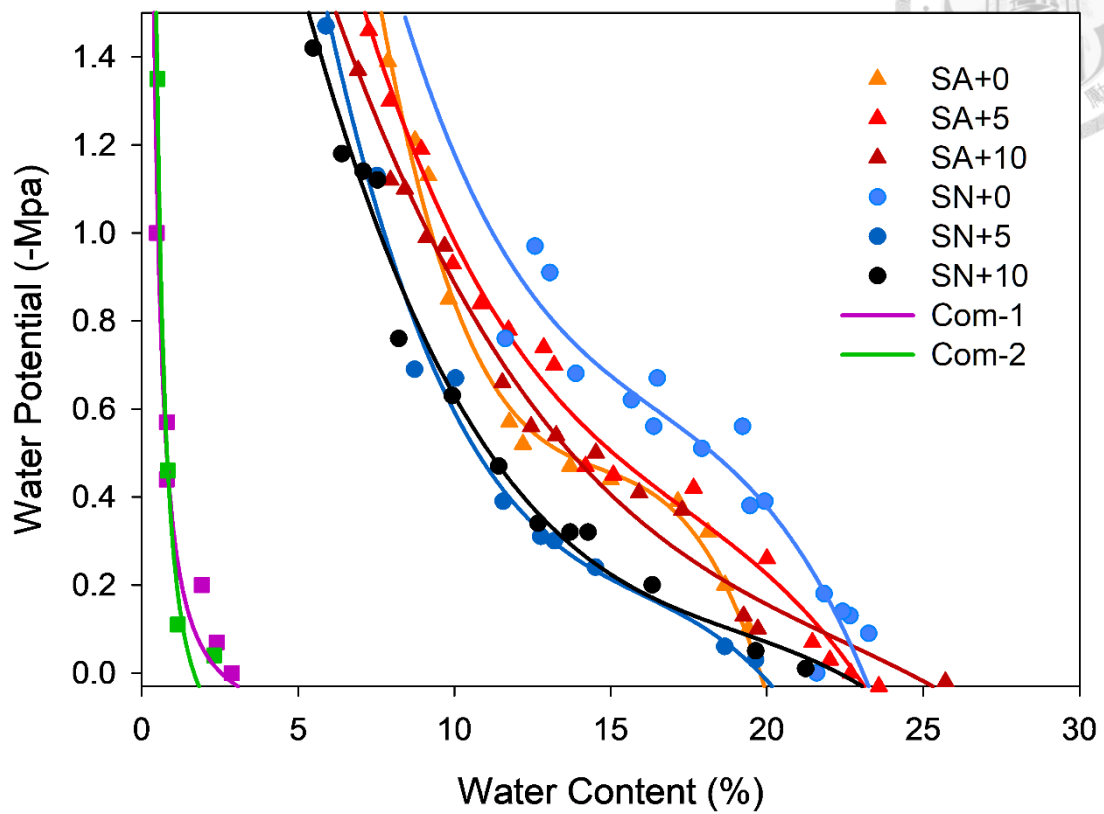


圖 1 各樣本於田間容水量及永久萎凋點範圍間之水分特性曲線。

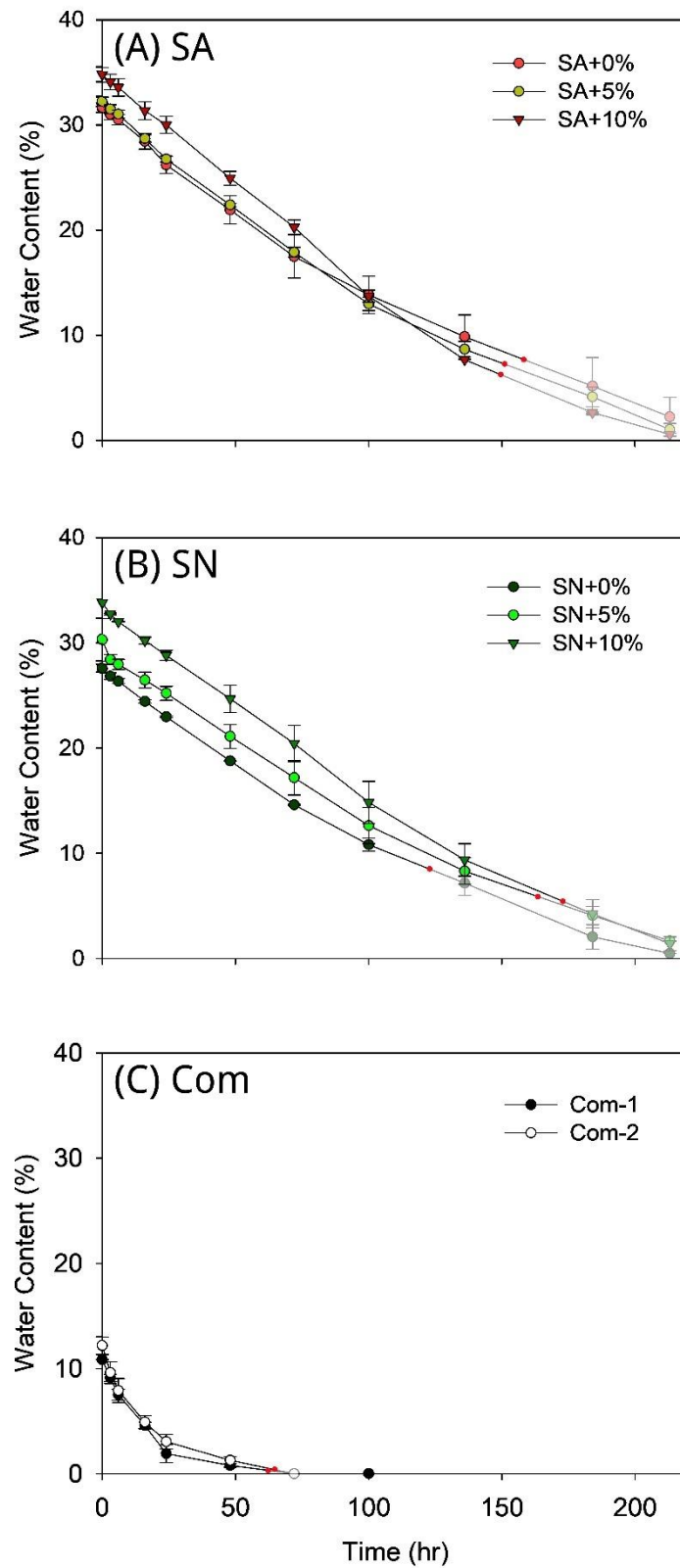


圖 2 各樣本體積含水率與時間之關係 (A) 通氣陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN (C) 商用無土介質 Com。紅點標示為該樣本永久萎凋點。

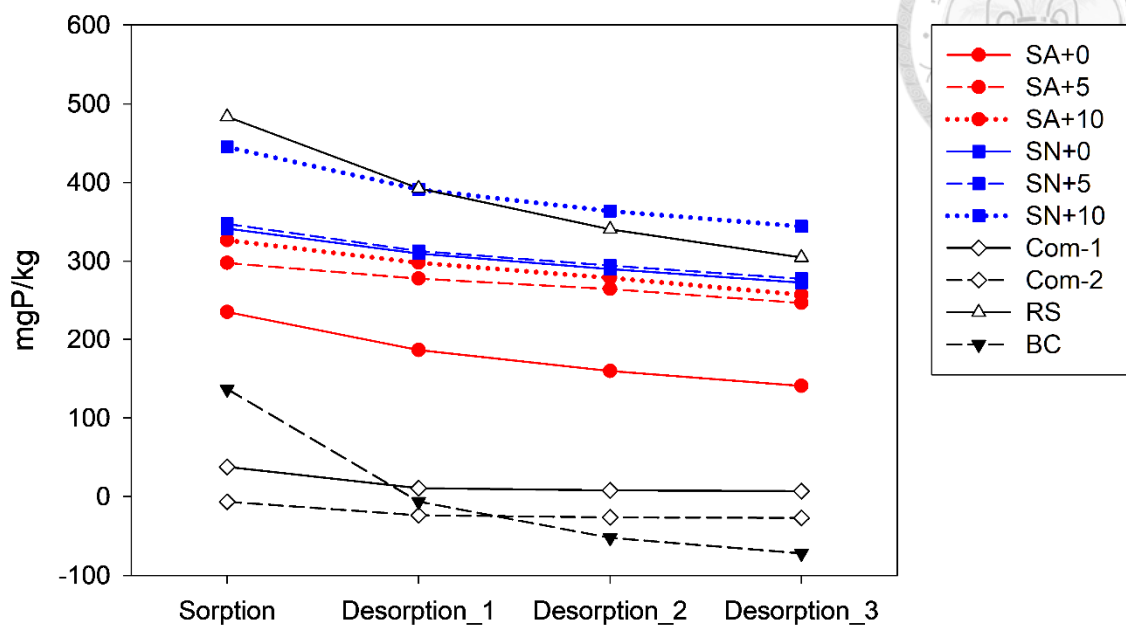


圖 3 各樣品單位質量之磷吸脫附量(mg P/kg)。

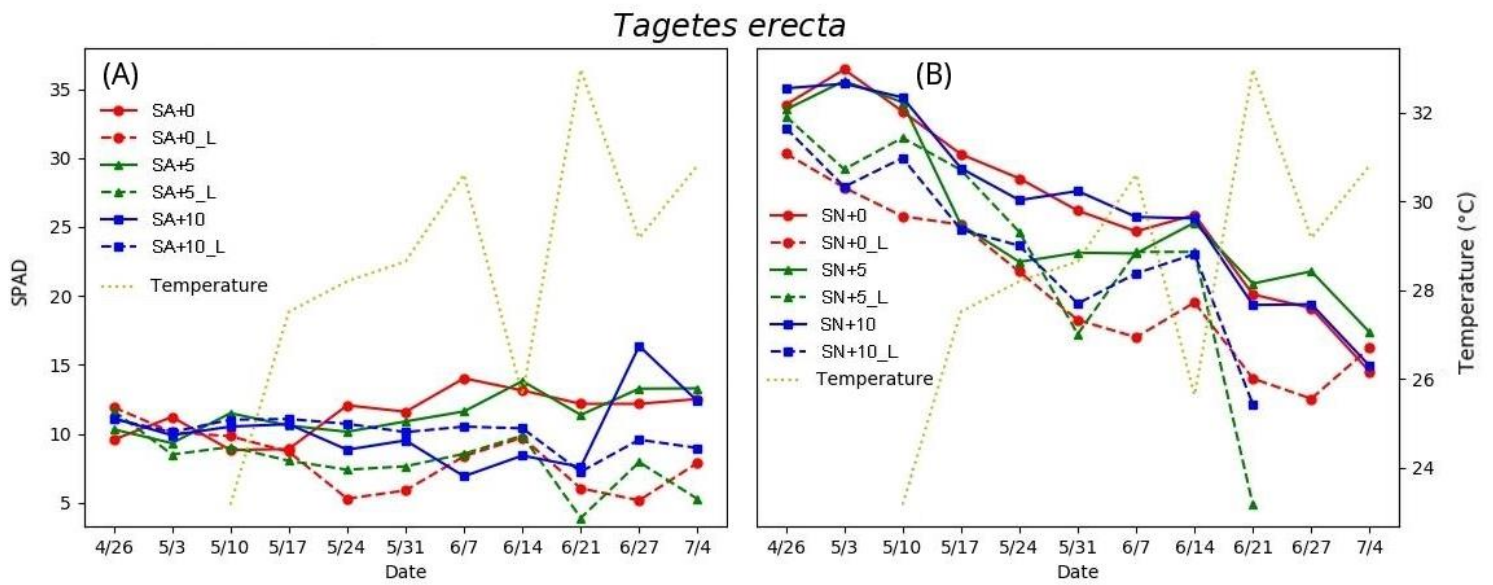


圖 4 萬壽菊(*Tagetes erecta*)於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 通氣陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN。限水處理以_L 做標示。

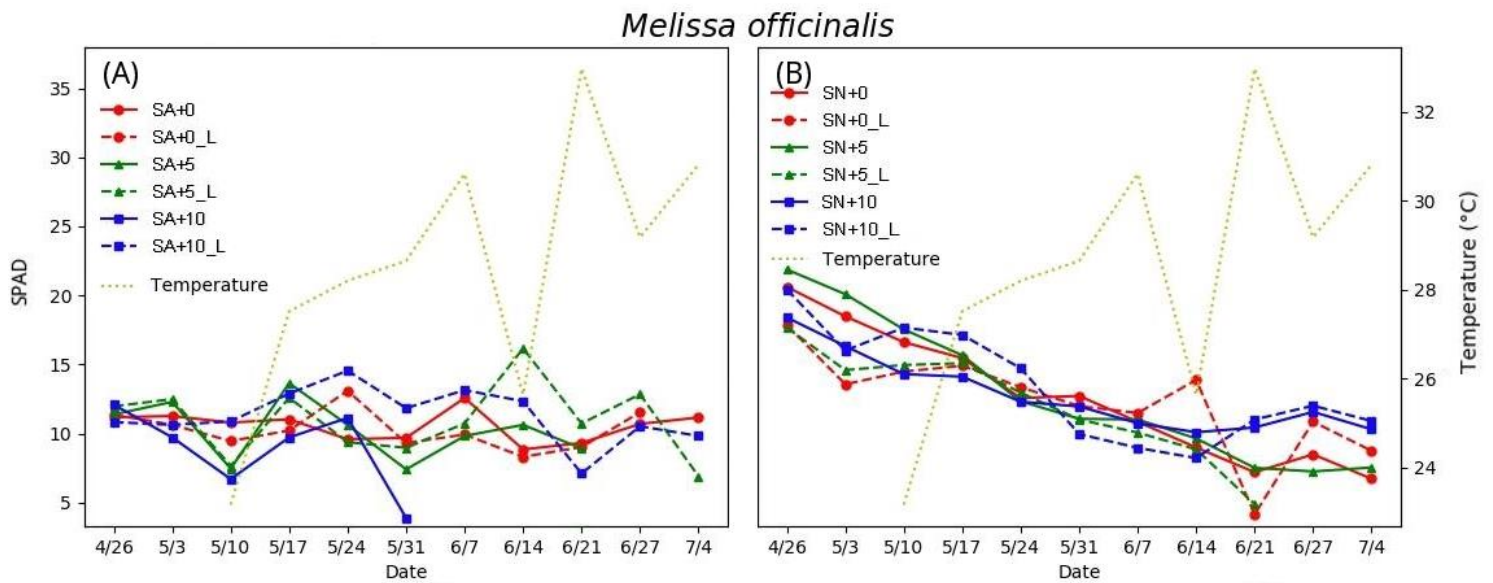


圖 5 香蜂草(*Melissa officinalis*)於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 通氣陶粒 SA (B) 生物炭陶粒 SN。限水處理以_L 做標示。

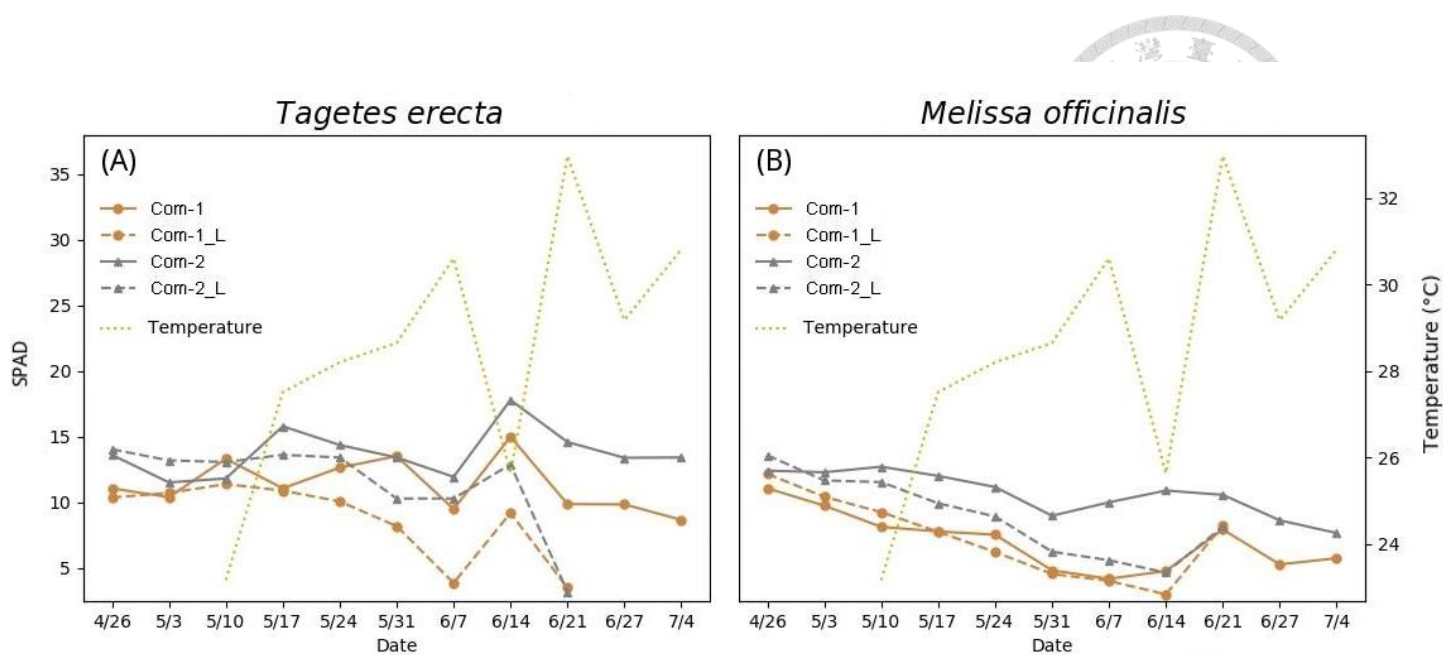


圖 6 兩種以商用介質栽培的植栽於試驗每週紀錄之 SPAD 值 (A) 萬壽菊(*Tagetes erecta*) (B) 香蜂草(*Melissa officinalis*)。限水處理以_L 做標示。

附錄

附錄 1 石門水庫沉澱池。



附錄 2 本研究所使用的各種介質照片（生物炭陶粒：SN+0-10；通氧陶粒：SA+0-10；市售發泡煉石：Com-1；火山岩石：Com-2）。



SA+0



SA+5



SA+10



SN+0



SN+5



SN+10

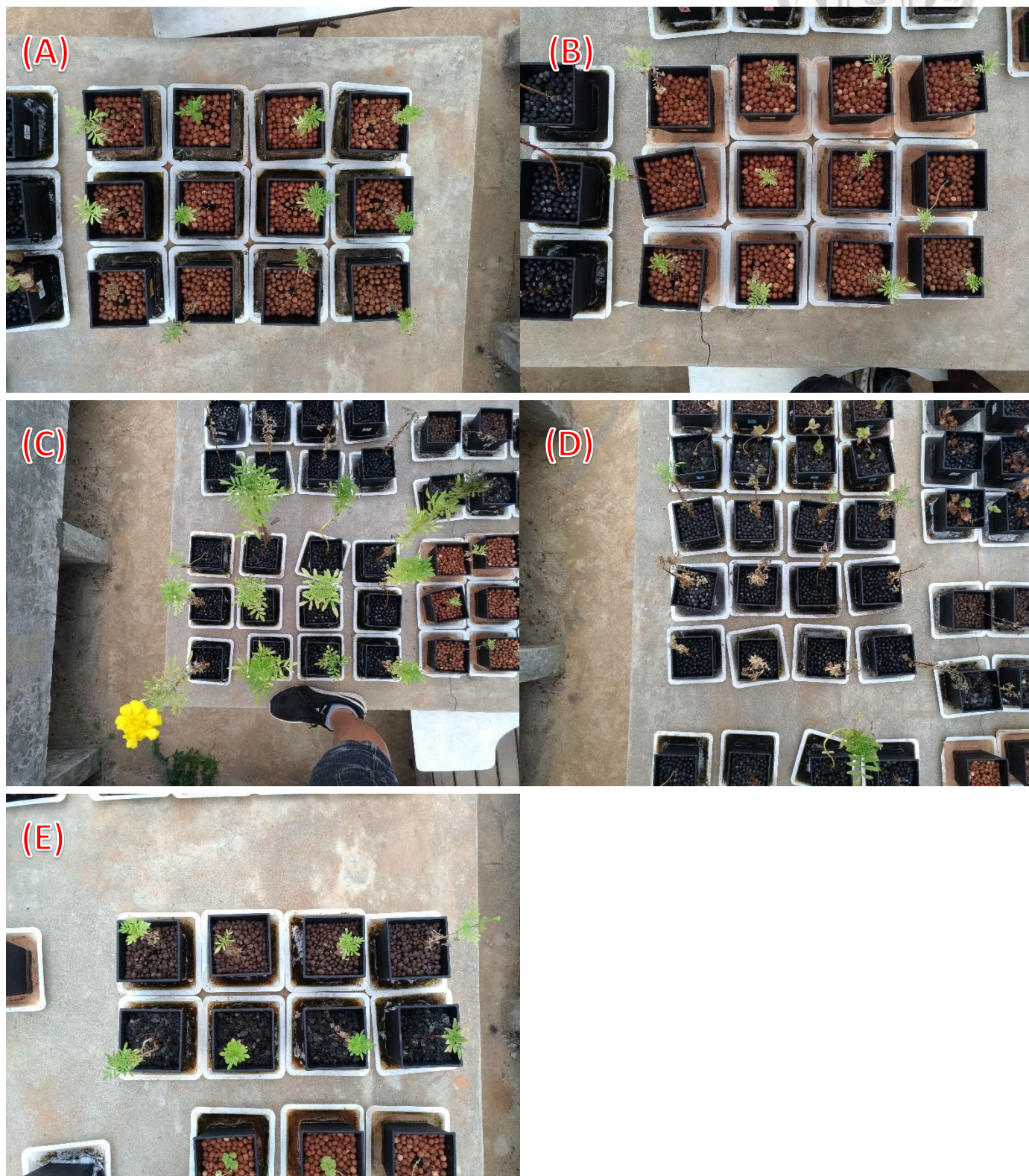


Com-1

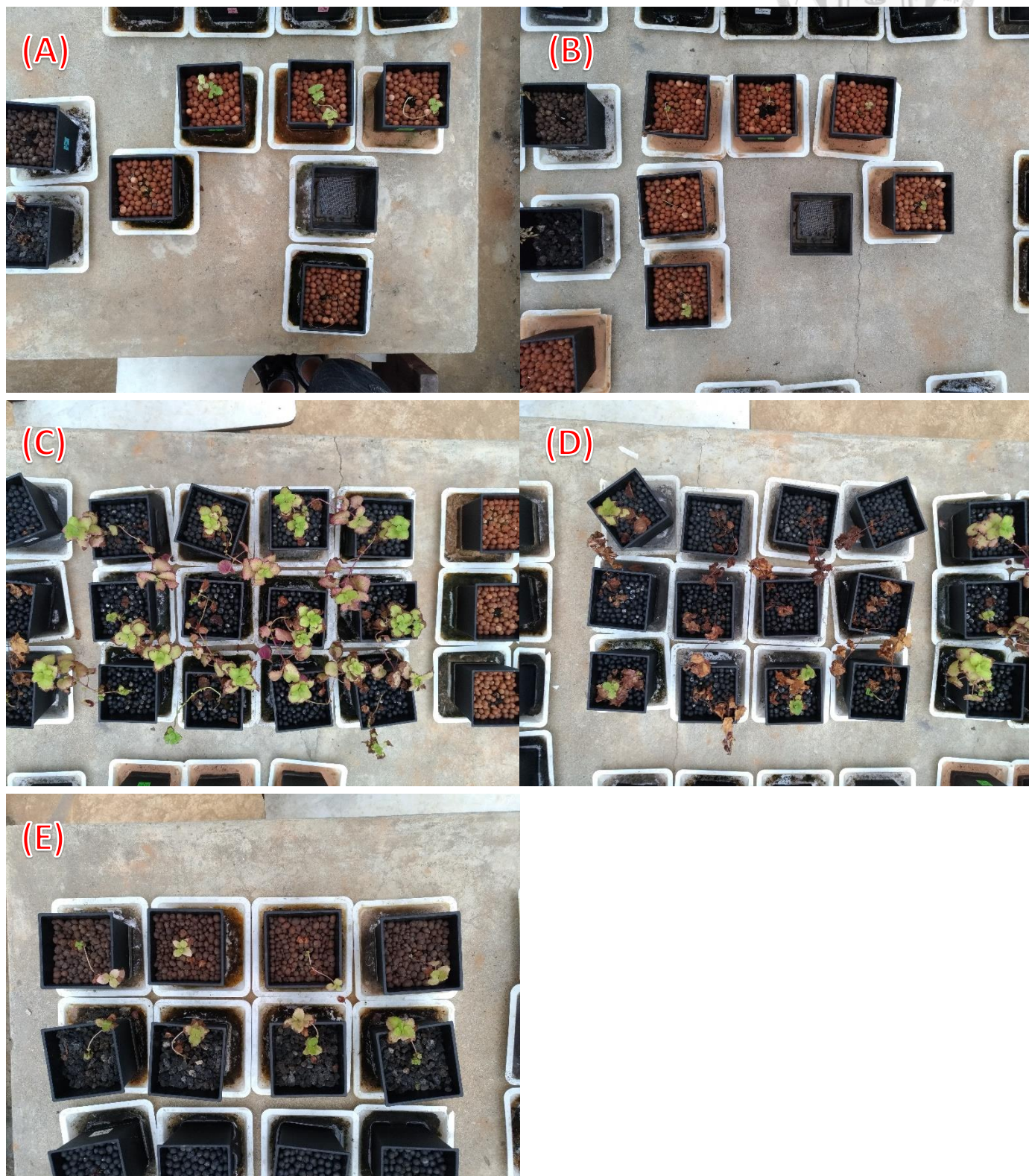


Com-2

附錄 3 萬壽菊(*Tagetes erecta*)於試驗最後一週之生長狀況紀錄 (A) 通氧陶粒 (正常供水) (B) 通氧陶粒 (限制供水) (C) 生物炭陶粒 (正常供水) (D) 生物炭陶粒 (限制供水) (E) 商用介質 (正常供水)。



附錄 4 香蜂草(*Melissa officinalis*)於試驗最後一週之生長狀況紀錄 (A) 通氧陶粒 (正常供水) (B) 通氧陶粒 (限制供水) (C) 生物炭陶粒 (正常供水) (D) 生物炭陶粒 (限制供水) (E) 商用介質 (正常供水)。



附錄 5 正常供水之兩物種於實驗最後一週苗高比較 (A) 萬壽菊(*Tagetes erecta*) (B) 香蜂草(*Melissa officinalis*)。

