

地被植物對柑橘果園土壤碳匯增加之應用研究

任心怡^{*1}、邱怡萍¹、蔡正賢¹、林鈺荏¹、劉怡娟¹、賴瑞聲¹、鄧宜嫻²、黃家恩²、詹竣元²

¹ 農業部苗栗區農業改良場

² 屏東科技大學森林系

摘要

近年來研究顯示草生栽培可有效提升農田及果園土壤有機質含量，本研究進一步探討地被植物種類對柑橘果園土壤碳匯的影響。試驗於苗栗縣苑裡鎮柑橘果園進行，選用四種地被植物—石莧 (*Phyla nodiflora* (L.) Greene)、蠅翼草 (*Grona triflora* (L.) H.Ohashi & K.Ohashi)、金腰箭舅 (*Calyptracarpus vialis* Less.) 與心葉水薄荷 (*Clinopodium brownei* (Sw.) Kuntz)，探討不同地被植物種類對土壤碳匯之影響並依其光合作用效能特性配置適宜草種，以提升果園碳來源。結果顯示採保留地被植物的果園管理方式土壤碳匯量較原生草種果園增加 19.33%，四種地被植物中以石莧碳匯表現最佳累積碳匯量為 9.40 公噸 / 公頃 (佔總碳匯 38.11%)，其次為心葉水薄荷 8.62 公噸 / 公頃 (34.94%)、金腰箭舅 3.12 公噸 / 公頃 (12.65%) 及蠅翼草 2.28 公噸 / 公頃 (6.42%)；光反應曲線結果顯示石莧具備最強的光合作用能力，中高光照環境下持續維持高效率的光合作用，蠅翼草的光合效率偏低僅在光照強度較高時才能開始進行淨碳吸收碳匯效益有限，金腰箭舅表現居中適合中等光照條件下生長具有一定的光能利用潛力與覆蓋穩定性，心葉水薄荷則顯示出良好的耐陰性能在遮蔽或光照不足區域穩定進行光合作用為低光環境下的理想地被植物，透過適合的地被植物種類與組合配置，提升果園土壤碳匯效益及豐富生態多樣性。

關鍵詞：地被植物、柑橘果園、土壤碳匯、光合作用

*通訊作者電子郵件位址：herb36@mdares.gov.tw

前言

近年來氣候變遷為全球關注的議題，經生態系統自然調節減緩大氣中二氧化碳(CO₂)濃度為目前以自然為本之策略。碳匯(carbon sink)是指生物體將大氣中的二氧化碳吸收固定於生物體內或土壤中的過程，主要分為藍碳(海洋碳匯)、綠碳(森林碳匯)及黃碳(土壤碳匯)，其中土壤碳匯(黃碳)是陸域系統中最大的自然碳匯潛力場域，透過植物光合作用吸收二氧化碳於植物體枯萎後轉化為土壤有機質，使「碳」得以儲存與固定。在果園中地被植物因生長快速、易腐解成為增加土壤碳，提高光合作用效率，促進土壤有機碳累積以增加碳源。本研究選擇適合果園的地被植物如生長勢佳、割草後易腐爛分解等特性、促進土壤碳匯量及多元地被植物組合具有不同的覆蓋率和特性，充分利用土壤和光源，提升群體適應性草種間互補作用有效增加土壤碳匯量。

材料與方法

本試驗自 2022 年起於苗栗地區果園進行調查與蒐集，針對常見 60 餘種草種進行地被植物評估，篩選條件包括具匍匐性、多年生、適應力及覆蓋性佳以及生長速率快等特性，經調查後於 2023 年選定石莧、蠅翼草、金腰箭舅與心葉水薄荷作為試驗地被植物。草種來源為種苗公司提供之分株苗，定植於 7 年生帝王柑果園植株樹冠下方，試驗地點選於苑裡鎮蕉埔里帝王柑果園，果樹行株距約為 5x5 公尺，地被植物定植位於樹冠下方之遮陰環境。

一、篩選地被植物種類：

1. 石莧 (*Phyla nodiflora* (L.) Greene)

馬鞭草科臺灣原生種多年生植物，又名鴨舌癩、過江藤具匍匐生長特性、適應性廣、耐旱耐瘠、生長勢佳、覆蓋率高及莖節易發根易貼地形成草毯，有助於減少割草次數。石莧葉片狹長質地偏厚，長約 1~1.5 公分，呈微鋸齒狀，穗狀花序花色包括白色、粉紅及紫紅，主要於春、夏、秋季開花。

2. 蠅翼草 (*Grona triflora* (L.) H.Ohashi & K.Ohashi)

豆科臺灣原生種多年生植物因葉形似蒼蠅翅膀而得名，莖細長且匍匐生長、節點易發根，春、夏及秋季開紫紅色小花，冬季生長狀況較差。葉為 3 出複葉葉形斜卵形長約 0.2 公分，花瓣紫紅色花萼具細柔毛。

3. 金腰箭舅 (*Calyptocarpus vialis* Less.)

菊科多年生植物適應性佳及耐貧瘠土壤和乾旱環境，全日照或半日照條件下良好生長，其莖節易生根，植株匍匐擴展形成緊密的草毯覆蓋地面能有效減少裸露土壤和水土流失，植株高度約 5~20 公分，葉形呈卵形或寬卵形長寬約 1.5 公分，頭狀花序花冠為黃色。

4. 心葉水薄荷 (*Clinopodium brownei* (Sw.) Kuntz)

唇形科多年生植物，耐陰性強適合種植於樹蔭下環境、莖節易發根呈匍匐性生長，水分充足有灌溉條件的環境中表現佳四季常綠散發薄荷香氣，植株高度約 10-20 公分，葉端圓鈍呈心形，花色淡紫色，適合遮陰區域作為地面覆蓋植物。



圖一、四種地被植物型態 (A：石莧、B：蠅翼草、C：金腰箭舅、D：心葉水薄荷)

Figure 1. Morphological characteristics of four ground cover plants

(A: *Phyla nodiflora*, B: *Desmodium triflorum*, C: *Calyptocarpus vialis*, D: *Clinopodium brownei*)

二、果園栽培管理：

柑橘果園碳匯試驗位於苑裡鎮蕉埔里，主作物為帝王柑種植面積約 0.4 公頃。草生栽培以保留地被植物管理方式，果園走道以割草維護，割草頻率約每 2 至 3 個月一次。

(1) 果園肥培管理：

- I. 1-2 月未添加有機質，施用春肥(開花肥-磷、鉀液肥)及追肥(果實膨大肥-磷、鉀、鈣液肥)
- II. 1 月 20 日全區 160 公斤 5 號肥(氮-磷鉀 16-8-12；氧化鈣-硫-有機質 5.5-5.1-3)

(2) 病蟲害管理：

- I. 開花期：防治薊馬、蚜蟲及黑星病等，使用丁基加保扶、益達胺、百克靈及鋅錳乃浦)。
- II. 小果期：防治銹蟬、介殼蟲及東方果實蠅，使用滅達胺、百克靈及福隆納乃得。
- III. 中果期：防治葉蟬、蚜蟲及黑星病等，使用愛殺松、待客利、賽洛寧及亞滅培。
- IV. 果實膨大前期：防治銹蟬佈使用賜芬蟬。

(3) 果園原地草種：以鴨拓草為主要草種，次要為銅錢草、紫花霍香薊、鴨跖草、兩耳草、狗牙根、水蜈蚣、大花咸豐草、雞屎藤、金銀花、菁芳草、印度蔞菜等。

三、試驗設計：

本試驗採完全隨機設計 (CRD, Completely randomized design)，於果園中隨機選取 15 株行株距為 5 × 5 公尺的帝王柑作為調查樣株。每株樹冠下方定植 4 種地被植物(石菖、蠅翼草、金腰箭舅、心葉水薄荷)及原地草種作為對照處理，每種處理設置 3 重複。帝王柑樹冠投影接近圓形，半徑約 1.5 公尺，換算面積約為 7.07 平方公尺 ($\pi \times r^2$)，試驗期間為 113 年 1 月至 12 月，觀測定植不同地被植物下土壤碳匯變化量。

四、試驗處理：

- (一) 定植時間：2024 年 1 月將石菖、蠅翼草、金腰箭舅、心葉水薄荷四種地被植物定植於帝王柑樹冠下方。
- (二) 地被植物定植於 2024 年 1 月，約 10 個月後調查四種地被植物處理及原地草種對照土壤碳匯量調查，評估不同地被植物對土壤碳匯影響。

五、土壤採樣與分析：

- (一) 採樣深度：各採樣點分兩層深度，分別為 0-10 公分及 10-30 公分。
- (二) 調查時間：土壤基線調查於 1 月，測定土壤總體密度、有機質、有機碳；定植地被植物約 10 個月後測定土壤有機質。
- (三) 採樣方法：各試驗區內，定期採集兩層深度的土壤樣本 (0-10 公分與 10-30 公分)，每區設三個試區隨機採集 3 個樣點，混合後作為一個合併樣本，用以測定土壤有機碳含量與碳匯累積量。

六、光合作用參數測定：

測定地被植物石莧、蠅翼草、金腰箭舅及心葉水薄荷光合作用速率 (A, Assimilation rate) 隨光子通量密度 (PPFD, Photosynthetic photon flux density) 變化關係。採用攜帶式光合作用測定系統 (LI-6800, LI-6800 Portable photosynthesis system)，設定環境條件溫度 25°C、相對濕度 40%、CO₂ 濃度 400 ppm，控制 PPFD 依序設為 0、50、100、200、400、800、1200、1600、1800、2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，紀錄淨光合作用速率 (A, Assimilation rate)，以光反應曲線以計算光補償點 (LCP, light compensation point)、光飽和點 (LSP, light saturation point) 及最大光合作用速率 (A_{max})，評估地被植物對光環境的適應性，重複 3 次。

七、調查項目：

- (一) 土壤採樣與分析評估地被植物對土壤碳匯效益影響：測定指標為土壤有機碳濃度 (SOC, Soil organic carbon)、總體密度 (BD, Bulk density) 及含石率，土壤採樣於 0-30 cm 深度，每處理隨機選取 3 個採樣點 (n=3)，採用土鑽進行採樣。土壤有機碳濃度以元素分析儀測定，總體密度以烘乾法 (105°C，48 小時) 計算，含石率則以篩分法測定。土壤有機質 (SOM, Soil Organic Matter) 包含動植物殘體、微生物及其代謝產物，土壤有機質換算關係估算碳含量： $\text{SOC} = \text{SOM} / 1.724$ (土壤有機質約含 58%，碳換算係數為 1.724)。公式：土壤有機碳濃度 = 總有機碳 TOC (Cg/kg) $\times$ [總體密度 BD (g/cm^3) $\times 108 \text{cm}^2 / \text{ha}$ 土層深度 (10cm) $\times 10^{-3} \text{kg/g}$] $\times 10^{-6} \text{ton/gx}$ (1- 含石率 %)； $\text{SOC}_{0-30\text{cm}} = \text{SOC}_{0-10\text{cm}} + \text{SOC}_{10-30\text{cm}}$ 。

- (二) 石莧、蠅翼草、金腰箭舅及心葉水薄荷生物量及生長性狀測定 (n=5)，評估地被植物適應性與土壤碳匯潛力，包括植株生長量 (鮮重與乾重)、植株長度 (莖長或匍匐莖長)、根系發展 (根系長度與根部鮮重)。
- (三) 紀錄植物在不同光照強度下淨光合作用速率，繪製光反應曲線 (light response curve)，估算光補償點、光飽和點與最大光合作用速率以評估地被植物對光反應能力及光合作用效率。

結果與討論

一、2024 年定植地被植物對果園土壤碳匯影響

本試驗於苗栗縣苑裡鎮帝王柑果園定植四種地被植物石莧、蠅翼草、金腰箭舅與心葉水薄荷將近一年後，調查土壤碳匯基線量由 24.66 公噸 / 公頃 (表一) 提升至 29.42 公噸 / 公頃，增加 4.76 公噸 / 公頃增幅達 19.33% (表二)，其中以石莧提升碳匯量最高平均增加 9.40 公噸 / 公頃 (表三) (圖二)，其次為心葉水薄荷平均增加 8.62 公噸 / 公頃，金腰箭舅與蠅翼草則分別增加 3.12 與 2.82 公噸 / 公頃，相較之下原地草種平均呈現 -0.12 公噸 / 公頃的碳匯。整體結果顯示石莧與心葉水薄荷具有較佳的增匯潛力，金腰箭舅及蠅翼草因覆蓋率及生長勢等因素使得碳匯累積量相對較少但仍可增加土壤碳匯量。

本研究於同一時期在西湖鄉及卓蘭鎮柑橘果園亦定植相同四種地被植物 (石莧、蠅翼草、金腰箭舅與心葉水薄荷)，觀察不同管理方式如定期割草及使用除草劑對碳匯的影響，結果顯示若未持續保留地被植物的草生栽培，使用定期割草及除草劑管理導致土壤碳匯量下降，推測可能與割草後植體尚未回歸土壤進而影響地被植物碳固定能力與土壤微生物導致有機碳流失，由於三區 (苑裡鎮、西湖鄉及卓蘭鎮) 土壤條件與環境背景不同，故未將西湖鄉及卓蘭鎮兩區果園試驗數據作為研究間數據比較，相關觀察仍可作為實務上碳匯管理經驗參考。綜合而言地被植物的選擇與草生栽培管理影響果園土壤碳匯，建議未來草生栽培管理可導入碳匯潛力之地被植物，配合適當保留草種的管理方式提升果園土壤碳貯效益。

表一、調查苑裡鎮帝王柑果園土壤 0-30 公分土壤碳匯變化

Table 1. Changes in soil carbon sequestration (0-30 cm) in citrus orchards of yuanli township.

Experimental plot	Soil depth (cm)	Bulk density (g/cm ³)	Organic matter (%)	OM-C factor (1.724)	Organic carbon (%)	Soil organic carbon (ton/ha)	Total soil organic carbon (ton/ha)
Yuanli (Citrus orchard)	0-10	1.40	0.93±0.08 ^z	1.724	0.54±0.05	7.60±0.68	24.66±1.62
	10-30	1.62	0.85±0.08	1.724	0.50±0.05	17.06±1.59	

^zMean ± SE(n = 3)

Organic carbon (%) was calculated by dividing organic matter (%) by the conversion coefficient 1.724.

Soil organic carbon (tons/ha) = Organic carbon (%) × bulk density (g/cm³) × soil depth (cm) × 10³.

Total soil organic carbon is the sum of each soil layer.

OM-C factor refers to the organic matter to carbon conversion factor used to estimate soil organic carbon from organic matter content.

表二、苑裡鎮帝王柑果園土壤碳匯變化 (2024 年 1 月至 10 月)

Table 2. Soil carbon sequestration changes in citrus orchard in Yuanli township (January to October, 2024)

Experimental plot	Jan 2024 (ton/ha)	Oct 2024 (ton/ha)	Carbon sequestration change (ton/ha)	Carbon sequestration change %
Yuanli (Citrus orchard)	24.66±1.62 ^z	29.42±4.67	4.76±2.36	19.33

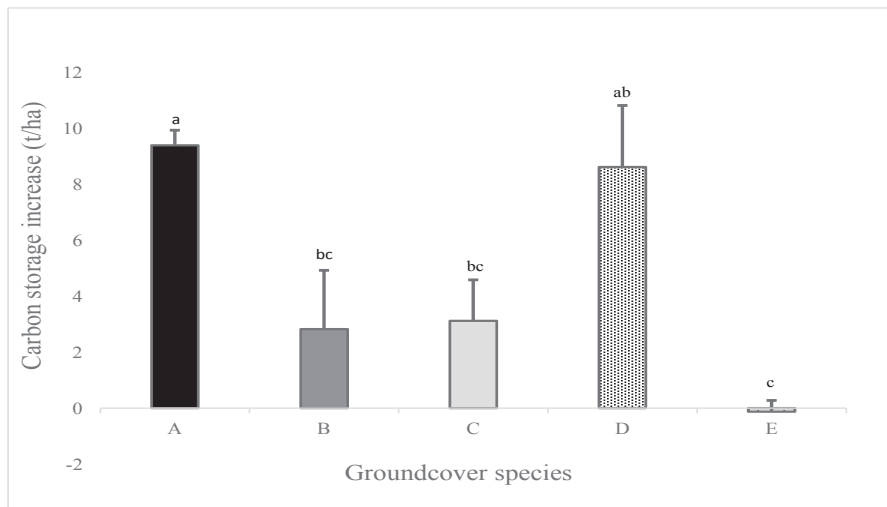
^z Mean ± SE (n = 3). Change in SOC stock and its percentage were calculated based on differences between the two sampling periods.

表三、不同地被植物對土壤碳匯量變化調查

Table 3. Investigation of soil carbon sequestration changes under different ground cover plant species.

Experimental plot	groundcover plant species	Jan 2024 (ton/ha)	Oct 2024 (ton/ha)	Carbon sequestration change (ton/ha)	Carbon sequestration change %
Yuanli (Citrus orchard)	<i>Phyla nodiflora</i>		34.06±5.33 a ^z	9.40±5.33 a	38.11
	<i>Grona triflora</i>		27.49±1.58 bc	2.82±1.58 bc	6.42
	<i>Calypocarpus vialis</i>	24.66±1.62	27.78±2.53 bc	3.12±2.53 bc	12.65
	<i>Clinopodium brownei</i>		33.27±2.36 ab	8.62±0.92 ab	34.94
	Indigenous grass species		24.53±3.81 c	-0.12±3.81c	-0.5

^z Mean ± SE (n = 3). Means for each groundcover plant species followed by different letter(s) are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Fisher's protected LSD test.



圖二、四種地被植物草本碳匯累積量 (A：石莧、B：蠅翼草、C：金腰箭舅、D：心葉水薄荷、E：原地草種)

Figure 2. Carbon sequestration accumulation of four groundcover herbaceous species.

(A: *Phyla nodiflora*, B: *Grona triflora*, C: *Calypocarpus vialis*, D: *Clinopodium brownei*, E: Indigenous grass species)

Error bar represents the standard error of mean(n=3).Mean with same letter(s) represent not significantly different at $p \leq 0.05$ according to Fisher's protected LSD test.

二、地被植物生長特性與土壤碳匯量變化

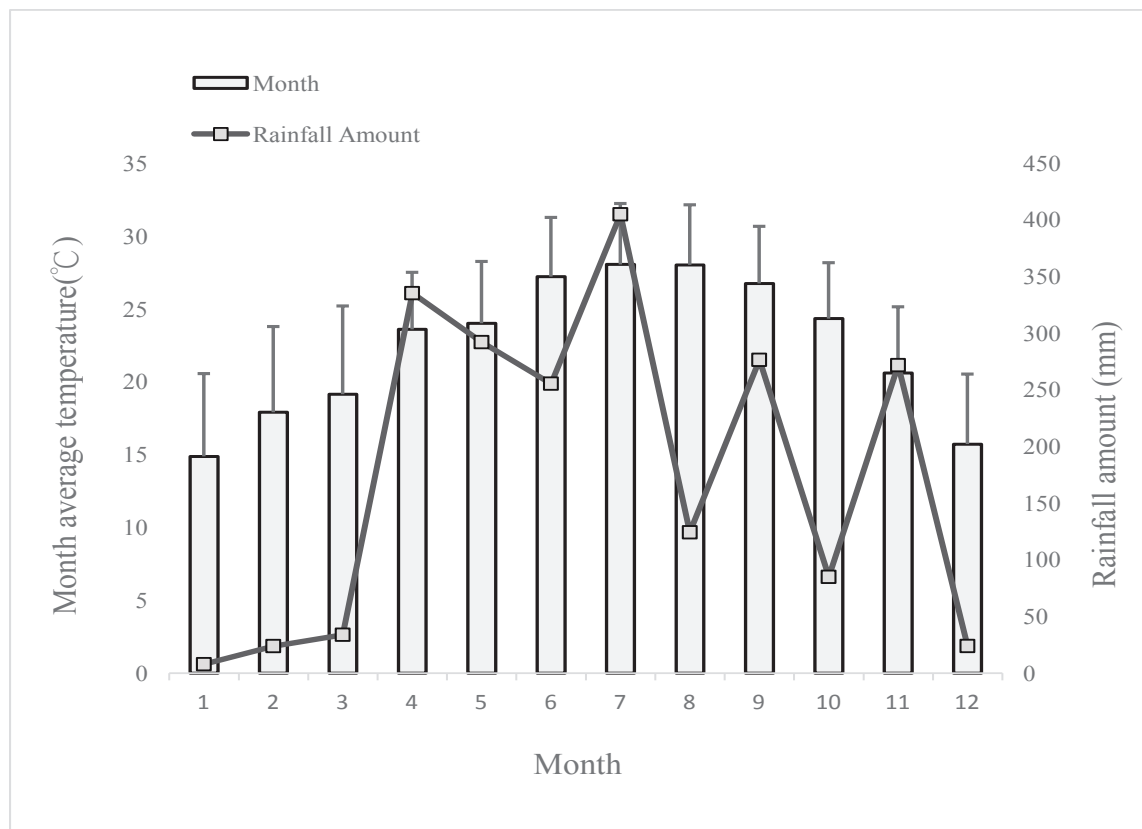
本試驗調查苑裡鎮帝王柑果園所定植四種地被植物石莧、蠅翼草、金腰箭舅與心葉水薄荷土壤碳匯變化與植株生物量分析，結果顯示以石莧碳匯增加量最高達 9.40 噸 / 公頃 (表三)，增幅 38.11%；其單株乾重亦為最高 (2.18 g/株) (表四)，總長度平均 133.56 公分與地上部平均 124.34 公分長度均明顯優於其他草種顯示具有良好的地上部生長勢與有機質累積潛力；心葉水薄荷單株乾重僅 0.86 g/株，但由於覆蓋率佳、生長迅速且分布均勻穩定有機質累積等特性，碳匯增加量達 8.62 噸 / 公頃，增幅為 34.94%，整體表現亦具應用潛力；金腰箭舅的碳匯增加量為 3.12 噸 / 公頃 (+12.65%)，單株乾重與根長皆屬中等；蠅翼草根長達 17.10 cm，乾重 / 鮮重比值最高 (0.29) 顯示具良好的根系發展，但其碳匯增加量僅為 2.82 噸 / 公頃 (+6.42%)，推測可能與其地上部植株密度與覆蓋率較低有關，冬季生長勢逐漸衰弱降低碳匯累積等因素；原地草種因覆蓋度低、生長不均，碳匯量反而略為下降 (-0.12 噸 / 公頃) 由此結果可知地被植物的種類選擇、生長量、形態特性及草生栽培管理方式皆影響果園土壤的碳匯累積，透過適當草種的組合與配置可有效增加土壤有機質及碳匯量。此外，2024 年苑裡鎮蕉埔里帝王柑果園 1 至 12 月月均溫與月累積雨量的變化 (圖三)，其中 5-10 月為溫度與降雨均高的生長旺季，有利於地被植物快速生長

表四、草種定植於柑橘果園後經 10 個月生長量變化調查

Table 4. Growth survey of grass species in citrus orchards after 10 months of planting

groundcover plant species	Total length (cm)	Shoot length (cm)	Root length (cm)	Dry weight (g)	Dry weight / Fresh weight ratio
<i>Phyla nodiflora</i>	133.56 ± 43.99 a ^z	124.34 ± 42.31 a	9.22 ± 3.33 bc	2.18 ± 0.90 a	0.17 ± 0.04 a
<i>Grona triflora</i>	94.80 ± 27.94 b	77.70 ± 30.65 ab	17.10 ± 5.74 a	1.54 ± 0.77 bc	0.29 ± 0.05 bc
<i>Calypocarpus vialis</i>	45.00 ± 7.75 c	35.20 ± 2.23 c	13.34 ± 2.31 ab	1.30 ± 0.51 bc	0.13 ± 0.03 bc
<i>Clinopodium brownii</i>	55.06 ± 12.30 c	48.68 ± 12.70 c	6.38 ± 0.96 c	0.86 ± 0.58 c	0.20 ± 0.01 c

^z Mean ± SE (n = 5). The dry/fresh weight ratio is unitless. Means for each groundcover plant species followed by different letter(s) are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Fisher's protected LSD test.



圖三、2024 年 1-12 月苑裡鎮月均溫與月累積雨量變化圖

Figure 5. Monthly average temperature and accumulated rainfall in Yuanli Township, 2024 (January–December)

與生物量累積。根據本試驗調查，定植地被植物近一年後，可提升土壤碳匯量平均 19.33%，此結果與 Xiang, Y., Li, Y. 等人 (2022) 針對果園 0–30 公分土壤有機碳 (SOC) 含量的研究結果趨勢相似，該研究指出草生栽培相較於清耕處理可提升 SOC 含量達 21.47%，推測其原因可能與地被植物根系分泌物及有機殘體的分解作用有關，進而促進碳匯量的增加與本研究觀察結果結果方向大致相近，本試驗則繼續探討地被植物種類對土壤碳匯影響。

三、地被植物光反應曲線關係探討

利用光反應曲線評估植物於不同光照強度下 (光量子通量密度, PPFD, photosynthetic photon flux density) 光合作用效率，單位葉面積之淨光合作用速率 (A , assimilation rate) 作為指標，曲線中三個重要參數為光補償點、光飽和點及最大光合

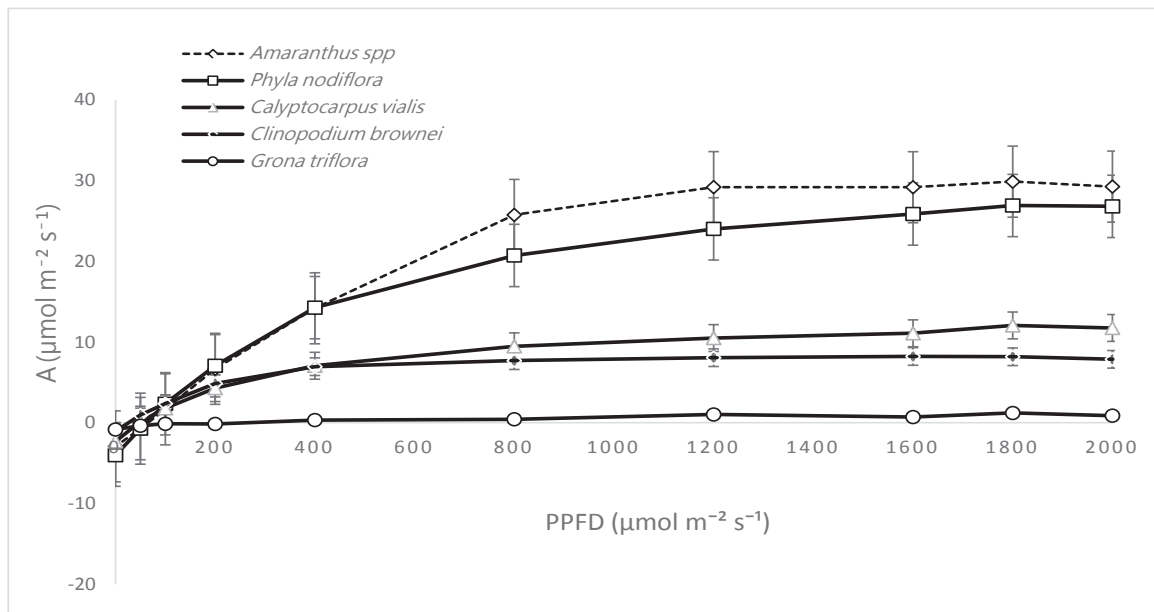
速率，光補償點代表植物淨光合作用為零的光照強度反映對低光環境適應力；若光照低於此點，植物呼吸作用大於光合作用導致碳損失。光飽和點則為光合速率不再隨光照增加而上升的臨界光強，顯示植物對光能的吸收已達極限，高光飽和點通常出現在陽性植物，適合強光環境；低光飽和點則常見於陰性植物適應中低光條件光能利用穩定但生長速率較慢，以這三種參數可推估地被植物在光照環境下表現與碳固定提供栽培管理與碳匯潛力之評估。本試驗測定四種地被植物石莧、金腰箭舅、心葉水薄荷與蠅翼草，皆屬於 C_3 光合作用類型，另加入野莧 (*Amaranthus spp.*, C_4 植物) 作為對照，探討不同光合作用路徑在光能利用效率上的差異， C_3 植物以 Rubisco(核酮糖 -1,5- 雙磷酸羧化酶 / 加氧酶) 為主酶，直接在葉肉細胞中進行 CO_2 固定，易因光呼吸造成效率損失，特別在高光、高溫或低 CO_2 濃度下表現較弱；而 C_4 植物碳固定與 Calvin 循環在不同細胞進行，透過 PEP 羧化酶 (PEPC) 初步固定 CO_2 有效提升 CO_2 濃度減少光呼吸，在強光與乾旱環境中展現更高的光合作用效率。試驗結果 C_4 植物野莧具有最高的最大光合作用速率 ($A_{max} = 29.95 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (表五) 並於 $PPFD = 1037.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 達光飽和點顯示光能轉換效率高 (圖四) 能於中等至高光環境下快速達到光合作用，光補償點為 $65.19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，表示具有一定低光環境適應能力， C_3 植物則呈現出光合效率與環境適應性之多樣性，石莧雖為 C_3 植物最大光合作用速率亦高達 $27.13 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 光飽和點為 $1536.39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 顯示需更高光照方能達到光合飽和，光能利用效率相對野莧較低；金腰箭舅與心葉水薄荷分別具有中等光合效率 (12.22 與 $8.22 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 而蠅翼草則光合效率表現最低 ($1.29 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 且光補償點高達 $184.45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，反映蠅翼草低光利用效率及對光強依賴性較高，雖石莧之光飽和點高於野莧但並不代表其光能利用能力較佳，野莧可於較低光量子通量密度下即達最大光合表現為典型效率型植物，而石莧需更高光強才能達到最大淨光合作用速率，此結果與 C_4 植物在光能利用效率及碳固定潛力上的理論優勢相符。然以實際應用上野莧光合效率優異但生長高大直立性於果園中可能造成遮蔽、干擾修剪與病蟲害管理等問題不利於果園實際操作，因此本研究推薦以低矮、匍匐型且維護便利者為優先，包括石莧、金腰箭舅、心葉水薄荷與蠅翼草。此三者雖淨光合作用速率較 C_4 低，但具穩定光合反應與良好地面覆蓋力，適合應用於中低光環境之果園、坡地以增加果園土壤碳儲存累積。

表五、地被植物的光合作用類型及其最大光合速率、光飽和點與光補償點

Table 5. The photosynthetic types of ground cover plants and their maximum assimilation rates, light saturation points, and light compensation points

Groundcover plant Species	Photosynthetic type	Amax (Amax, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Light saturation point ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Light compensation point ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>Amaranthus spp</i>	C ₄	29.95 $\pm$ 2.24 ^z	1037.52	65.19
<i>Phyla nodiflora</i>	C ₃	27.13 $\pm$ 8.28	1536.39	61.66
<i>Calypocarpus vialis</i>	C ₃	12.22 $\pm$ 1.79	1676.01	46.97
<i>Clinopodium brownnei</i>	C ₃	8.22 $\pm$ 2.46	918.86	26.19
<i>Grona triflora</i>	C ₃	1.29 $\pm$ 1.16	1775.82	184.45

^z Mean $\pm$ standard error (SE) based on three replicates (n = 3). Light saturation point and light compensation point were estimated from light–response curves.



圖四、不同地被植物在光合有效光量子通量密度 (PPFD) 下的光合作用速率變化

Fig. 4. Variations in photosynthetic rate of different ground cover plants under photosynthetically active photon flux density (PPFD) max.

Mean $\pm$ standard error (n = 3). The vertical axis (A) represents the assimilation (photosynthetic) rate.

結論

本研究探討定植不同地被植物種類於柑橘果園中對土壤碳匯累積之影響，研究結果顯示選擇的不同地被植物會影響果園土壤碳匯量變化，本試驗以四種地被植物（石菖、蠅翼草、金腰箭舅與心葉水薄荷）定植於柑橘果園中皆表現出增加土壤碳匯量，其中以石菖與心葉水薄荷碳匯效果最顯著，與適應力佳、生物量較高、覆蓋性佳有關。另以光反應曲線評估地被植物光合作用效率，地被植物碳匯潛力與其最大光合作用速率 (A_{max})、光飽和點與光補償點具高度相關， C_3 植物中石菖 A_{max} 達 $27.13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，顯示其具強光適應力；金腰箭舅與心葉水薄荷則光合潛力中等且穩定，分別適應中光與低光環境；蠅翼草之 A_{max} 與碳匯量均最低光補償點卻相對偏高，顯示其對光需求較高但轉換效率有限，適當地被植物組合配置可提升光能利用與碳源輸入效率，選擇及配置光適應性與生理特性的地被植物，搭配長期維護管理策略可提升果園土壤有機質增加及碳匯量。本研究結果與 Xiang *et al.* (2022) 針對果園草生栽培提升土壤有機碳含量之研究結果相近，其指出草生栽培可透過根系活動與有機殘體改善土壤結構進而提升 SOC 含量平均增幅達 21.47%；此外，McClelland, Paustian, & Schipanski (2021) 對溫帶地區覆蓋作物的統合分析亦指出，覆蓋作物能平均提升土壤碳儲約 12% 尤其當其年生物量高於 $7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 時 SOC 提升效果更顯著，其他文獻如 Lugato *et al.* (2014) 在果園試驗中證實覆蓋作物能提升土壤有機碳，Zhou *et al.* (2023) 則指出草本植物為熱帶草原碳來源的主要貢獻者顯示地被植物在不同氣候與作物系統中皆具碳匯潛能。本研究評估地被植物種類與生長特性對果園土壤碳匯的增益效應，增加土壤有機質及碳匯時也促進生態多樣性及具備生態與農業兼容的應用潛力。建議後續進行長期調查觀測與其他鄉鎮試驗，納入對果園作物產量影響評估，整合地被植物管理與果園實際生產需求提升永續經營效益。

誌謝

試驗期間承蒙苑裡鎮橘香果園主人邱熙銘夫婦對本試驗及地被植物研究熱忱與支持，盡力維持果園生態多樣性及張凱傑技佐與謝淑珍小姐協助果園病蟲害調查及防治，讓試驗得以展現地被植物的生態服務及價值。

引用文獻

- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Cover crops and soil carbon sequestration: Benefits and challenges. *Agronomy Journal*, 101(2), 288–298.
- Li, H., Zhang, Y., Xiao, X., & Chen, B. (2019). Measuring leaf-level photosynthesis with LI-6800 to estimate canopy carbon assimilation potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276–277.
- Liu, M., Zhang, Z., Li, Y., Zhao, Y., Zhang, J., & Wang, D. (2024). Effects of different living grass mulching on soil carbon and nitrogen in an apple orchard on Loess Plateau. *Agronomy*, 14(9), 1917.
- Lugato, E., Berti, A., & Giardini, L. (2014). Assessing the impacts of cover crops on soil organic carbon in vineyards: A case study in southern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 77–89.
- Lugato, E., Vaccari, F. P., Genesio, L., Baronti, S., Pozzi, A., & Miglietta, F. (2014). An energy-biochar chain involving biomass gasification and rice cultivation in Northern Italy. *GCB Bioenergy*, 6(2), 189–201.
- McClelland, S. C., Paustian, K., & Schipanski, M. E. (2021). Cover crops improve soil carbon in temperate regions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 311, 107325.
- McClelland, S. C., Paustian, K., et al. (2021). Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Ecological Applications*, 31(3), e02278. <https://doi.org/10.1002/eap.2278>
- Ren, H.-Y.(任心怡). (2023). 應用於柑橘果園增加碳匯潛力之草種 [Groundcover species with carbon sequestration potential in citrus orchards]. 苗栗區農業專訊, 106, 15–20.
- Xiang, Y., Li, Y., Wang, J., Zhang, H., & Chen, L. (2022). Effects of orchard grass cover cultivation on soil organic carbon in 0–30 cm depth: A comparison with clean tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77(3), 215–223.
- Zhou, Y., Bomfim, B., Bond, W. J., Boutton, T. W., & Case, M. F. (2023). Soil carbon in tropical savannas mostly derived from grasses. *Nature Geoscience*.

Impacts of Ground Cover Management and Cover Plant Species on Soil Carbon Sequestration in Citrus Orchards

Hsin-Yi Jen^{*1}, Yi-Ping Chiu¹, Jeng-Hsien Tsai¹, Yu-Ren Lin¹, Yi-Chuan Liu¹, Jui-Sheng Lai¹, Yi-Hsien Teng², Chia-En Huang², Chun-Yuan Chan²

¹ Miaoli District Agricultural Research and Extension Station, Ministry of Agriculture.

² Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

In recent years, studies have shown that groundcover cultivation can effectively enhance soil organic matter content in farmland and orchards. This study further investigated the effects of different groundcover plant species on soil carbon sequestration in citrus orchards. The experiment was conducted in a citrus orchard located in Yuanli Township, Miaoli County, using four groundcover species—*Phyla nodiflora* (L.) Greene, *Grona triflora* (L.) H. Ohashi & K. Ohashi, *Calyptocarpus vialis* Less., and *Clinopodium brownei* (Sw.) Kuntz. The aim was to evaluate their influence on soil carbon sequestration and photosynthetic characteristics. The results indicated that orchard management with groundcover retention increased soil carbon sequestration by 19.33% compared to areas dominated by indigenous grasses. Among the four species, *Phyla nodiflora* showed the highest performance, contributing 9.40 t/ha of accumulated carbon sequestration (38.11% of the total), followed by *Clinopodium brownei* (8.62 t/ha; 34.94%), *Calyptocarpus vialis* (3.12 t/ha; 12.65%), and *Grona triflora* (2.28 t/ha; 6.42%). Light-response curve analysis revealed that *Phyla nodiflora* exhibited the strongest photosynthetic capacity, maintaining high photosynthetic efficiency under moderate to high light intensity. In contrast, *Grona triflora* had significantly lower photosynthetic efficiency and only began net carbon assimilation under relatively high light intensity, indicating limited carbon sequestration potential and a higher sensitivity to environmental conditions. *Calyptocarpus vialis* showed intermediate performance, adapting well to moderate light levels and demonstrating stable ground coverage and light-use potential. *Clinopodium*

brownei exhibited strong shade tolerance, maintaining stable photosynthesis in low-light or shaded conditions, making it a suitable choice for groundcover in low-light orchard areas. The study suggests that selecting appropriate groundcover species with different light adaptability, based on site conditions, can enhance orchard carbon sequestration and promote sustainable groundcover management.

Keywords: Ground cover plants, citrus orchard, soil carbon sequestration, photosynthesis

* Corresponding author email: herb36@mdares.gov.tw