

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 環境學科

第一名

(鄉土)教材獎

052608

探討校園樹木固碳力-量化統計樹木固碳量與碳
吸存效率之研究

學校名稱： 高雄市立高雄高級中學

作者：	指導老師：
高二 李芯瑜	蔡喬木
高二 鐘專洧	
高二 王庭甄	

關鍵詞： 固碳量、光合作用、碳中和

得獎感言

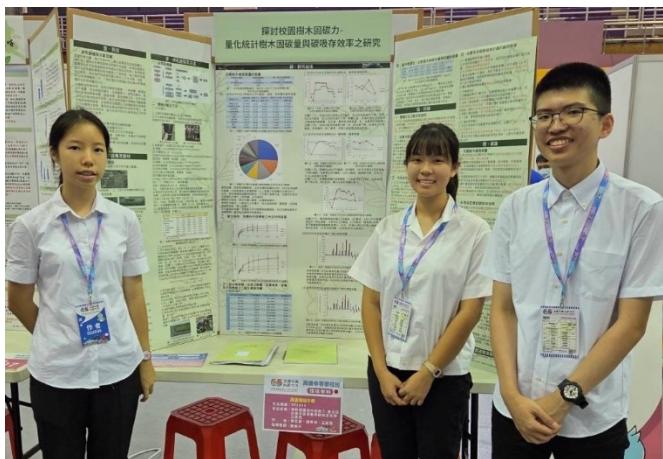
從校園林到科學心，碳吸存研究讓我們與科學真正相遇

這次科展研究的過程，從最基本的實地數據測量，到一筆筆數據代入公式及計算結果，可以說是聚沙成塔的最佳印證。當初在尋找科展方向時，在老師的引導下，我們注意到「種樹吸存二氧化碳」在全球暖化加劇的今日格外重要。然而，要量測都市林之一的校園中所固定的碳量，是一項龐大的工程，也不像許多科展作品能有許多變因可以比較、實驗，讓我們一度擔心題目不符科展標準。在老師的鼓勵下，不斷追問自己研究的初衷，才意識到科學源於觀察，而量測就是一項精準的觀察呀！於是毅然投入這份長達一年半的實驗，期間意外獲得了資料處理與分析的技能，也在漫長的量測過程中發現更多可深入探討的變因。這段佔據我們大半個高中的珍貴經驗讓我們更認識科學研究，培養了挑戰未知的勇氣。

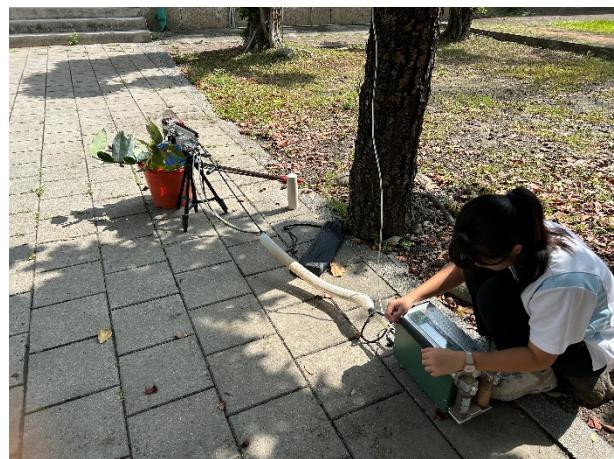
我們想期許學弟妹們不必害怕那看似枯燥的九成過程，也許在研究的起點會存在質疑及不確定，害怕努力付諸流水，但只要秉持求真、嚴謹且堅持的態度，將有機會造就一份完整的成果。

在全國科展活動的過程，我們也與同樣是環境學科的作者們交流，雖然因為領域和方向不同，對於他們的方法學並不太了解，但在深入提問和了解後，我們發現每一份科學研究中都有非常難能可貴的動機和創意，透過觀察自然中的機制，轉而思考能否使用類似概念創造出解決問題的新發法，我們非常欣賞每一份作品，也讚嘆科展競賽中為科學留下的結晶。此外，在後續的中研院參訪行程，我們也從科學家們學到寶貴的研究態度：問題在那裡就往哪裡走，不用自我設限，培養跨領域能力，並詳細記錄失敗的過程從中學習，勇於面對失敗，不害怕枯燥的過程，每一次小小的進展都是研究著大大的喜悅。這些收穫都點燃著我們對研究、探索未知的熱愛，或許這份作品只是我們人生中的初次嘗試，但埋下我們心中對科學研究的種子。

這次獲獎要感謝許多人，有給我們題目發想、背景知識且一直不厭其煩修改我們報告，精進內容並希望我們更好且無償付出的喬木老師，和提供專業學理及儀器方法的忠義教授，以及聽我們宣洩壓力、苦惱實驗困難的家人們，有這些人的陪伴才能使我們用嚴謹的態度堅持到底。此外，還要感謝評審委員們，提供我們意見以及可以延伸的課題，讓我們的思考更廣泛多元，最後，感謝科教館細心安排全國科展一系列豐富的活動，讓我們除了研究本身外也獲得了更多人生寶藏。



科展參展照片



光合作用法-測定毛柿及苦棟的光合作用曲線



在烈日下攜手合作，鎚而不捨地完成固碳量的量測

摘要

本研究針對校園樹木分析其固碳能力，透過生長量法測量全校樹種的固碳量，並利用光合作用法分析苦棟與毛柿在不同季節的碳吸存效率。結果顯示，全校 927 棵樹的總固碳量達 197.36 噸，等於 723.65 噸二氧化碳當量，且固碳能力集中於榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀及印度橡膠樹等(佔 61%)。未來校園植樹應考量速生與長壽型樹種的組合，以兼顧短期與長期的固碳穩定性。光合作用實驗發現，苦棟及毛柿皆於夏季有最高之碳吸存量，而苦棟在全年之總吸存量較毛柿多，但是季節變化幅度較大；相較之下，毛柿全年皆維持較低但穩定的固碳效益，且單位面積之碳吸存量亦較苦棟高。最後調查並計算全校之電力排碳量並分析碳中和情形。

壹、前言

一、研究動機與文獻回顧

隨著溫室效應加劇，減少大氣中的二氧化碳濃度是全球高度關注的議題，須從減少碳排放和增加碳吸存兩個方向並進，而增加碳吸存最環保的方式則是植樹造林與增加木製品的利用。我們發現目前在教育部建置的校園樹木資訊平台僅記錄校園中的樹種、棵數，但尚無胸徑、樹高以及樹木固碳量相關之數據，且國內外已有專家學者針對校園等人工造林區，進行樹木碳積存之研究(吳, 2022；Helen M Cox, 2012)，因此我們想要量測我們校園中樹木之立木材積，搭配政府間氣候變化專門委員會(IPCC)於 2006 年提供之材積轉換公式，計算並了解校園中所有樹種的總固碳量及相異樹種所佔的固碳量百分比。

同時，根據我們針對校園樹木的調查過程，發現在形態方面，苦棟此樹種的樹冠層單一、枝條擴展幅度較廣且葉片排列較分散、排列不重疊，應屬於耐光照樹種；而毛柿的樹冠上、中、下層皆佈滿葉片，枝條擴展幅度較狹窄集中且葉片排列高度重疊，則可能屬於耐陰樹種。而以上推論亦符合郭(2013)提出之植物耐陰性研究，該研究針對植物之幼苗生長光照條件、冠層形態、耐陰試驗結果及光合性狀等，將植物的耐陰性由高至低分為：陽性先驅樹種、陽性樹種、中等耐陰偏陽性樹種、中等耐陰樹種、耐陰樹種，其中苦棟屬於陽性先驅樹種，其光合速率可大於 $27(\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$ ；毛柿則屬於耐陰樹種，其光合速率通常小於 $13(\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$ 。結合上述研究之結果，我們決定挑選校園中的毛柿、苦棟兩種耐陰性差異甚大之台灣原生樹種進行研究，欲了解兩者在不同季節之碳吸存潛力差異。

最後，本研究光合作用之方法學參照陳等人(2016)於屏東萬隆農場測量無患子的二氧化碳吸存潛力研究以及 Chen et al.(2018)針對南台灣苦棟、大葉桃花心木、阿勒勃及印度紫檀於四季之碳吸存效率差異之研究，除比較季節差異性，我們也將量化樹種在單位時間內的碳吸存潛力。

二、研究目的

- (一) 利用生長量法測量校園內樹木的總固碳量。
- (二) 分析不同樹種的固碳量所佔之百分比。
- (三) 建立毛柿、苦棟在不同季節之光合作用曲線。
- (四) 結合葉面積、光度的數據，估算毛柿和苦棟於不同季節之二氣化碳吸存量，並比較其差異。
- (五) 對照樹木碳吸存量與學校電力的排碳量，初步評估校園碳中和的潛力，
- (六) 提供校園植樹計畫的建議

貳、研究設備及器材

一、研究樣區及樣木選取

- (一) 生長量法之樣區範圍(綠色大長方形所圍之範圍)

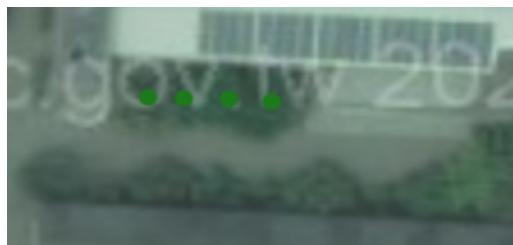


圖一、校園樹木樣區 (引自校園樹木資訊平台)

- (二) 光合作用法之樣區範圍



圖二、光合作用法毛柿樣區 (圖一之黃色長方形所圍) (引自校園樹木資訊平台)



圖三、光合作用法苦棟樣區 (圖一之白色長方形所圍) (引自校園樹木資訊平台)

1. 光合速率測量樣木：毛柿編號 5、6、9 棵，苦棟由左至右第 1、3 棵，每棵樹採取三片受光良好的葉片量測。
2. LAI 與樹冠幅測量樣木：毛柿選取編號第 5、10、13、18、22 棵，苦棟選取四棵。

二、儀器與設備 (*以下照片均為作者自行拍攝，軟體圖示擷取自應用程式)

7米測高桿	捲尺
可攜式光合作用測定儀(LI-6400, Li-Cor)	氣瓶
電池	植物冠層分析儀 (LAI-2200, Li-Cor)

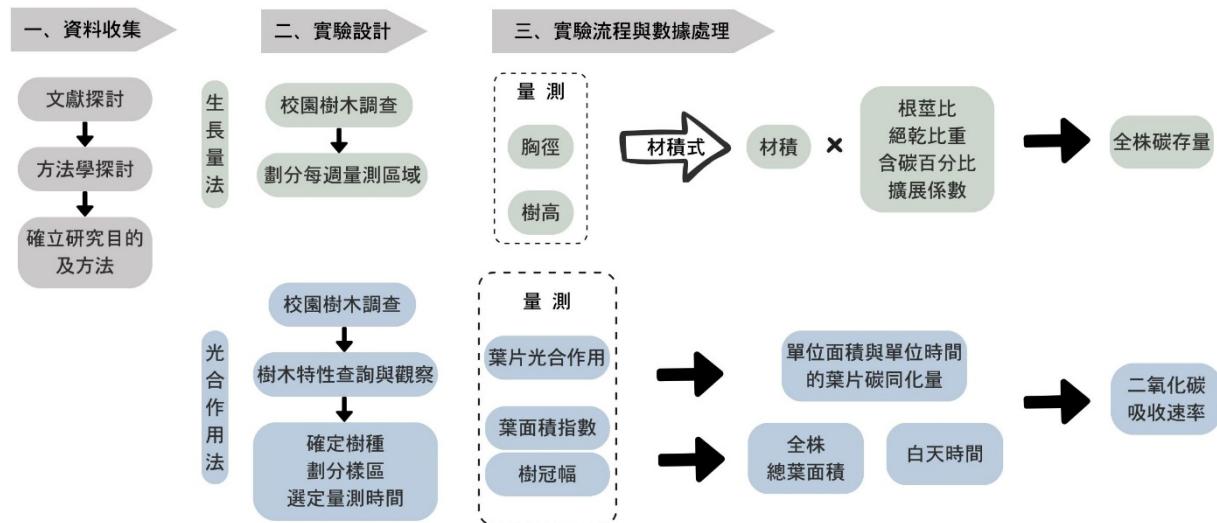
	
葉片高枝剪	測距儀(軟體)

三、名詞解釋

- (一) 量子收率(α)：低光度($<100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)，葉片利用每單位光能所吸收 CO_2 的效率。
- (二) 形狀參數(θ)：將光合作用曲線以二次曲線近似後，於光飽和點的切線斜率。
- (三) 光飽和點：光合作用曲線趨於平緩，光合速率不再大幅增加的光度。
- (四) 最大光合速率(A_{max})：光合作用曲線中，葉片最大的光合速率。
- (五) 同化速率(A)：葉片在特定環境光度下的二氣化碳吸存速率。
- (六) 葉面積指數 (leaf area index, LAI)：每單位地面表面積的葉面積總和。
- (七) 樹冠幅：樹木冠幅的投影面積。
- (八) 碳吸存：將二氣化碳 (CO_2) 從大氣中移除並儲存，以減少溫室氣體濃度，降低氣候變遷影響的過程。
- (九) 固碳量：指的是某一特定環境或系統（如森林、土壤、海洋等）能夠吸收並固定二氣化碳 (CO_2) 的總量。

參、研究過程或方法

一、研究架構圖



圖四、研究架構圖(研究者自行繪製)

二、實驗步驟及方法

(一) 生長量法

1. 以捲尺測量樹木離地 1.3m 處之圓周長，帶入公式時需轉換為胸高直徑(DBH) (圖五)。
2. 以 7m 測高桿測量樹高，若樹高超過測高桿的長度，則以測高桿作為比例尺，從遠處拍照並依比例計算樹高(圖六)。



圖五(研究者自行拍攝)



圖六(研究者自行拍攝)

3. 將數據代入材積式來計算出樹木主幹的材積。

- (1) 檉樹： $V=0.0000834*DBH^{1.8761885}*H^{0.8058127}$ (羅紹麟、馮豐隆，1986)
- (2) 大葉桃花心木： $V=0.0101-0.00679346*DBH+0.00058996*DBH^2+0.00033654*DBH*H$
(劉宣誠、林銘輝、曲俊麒，1981)
- (3) 楓香： $V=0.0000834*DBH^{1.8761885}*H^{0.8058127}$ (羅紹麟、馮豐隆，1986)
- (4) 其他闊葉樹： $V=0.0000862*DBH^{1.8742}*H^{0.8671}$ (羅紹麟、馮豐隆，1986)
- (5) 其他針葉樹： $V=0.0001430*DBH^{1.7009164}*H^{0.7410436}$ (羅紹麟、馮豐隆，1986)
- (6) 棕櫚科樹木固碳量： $C=\exp(-3.64+1.84*\ln(DBH)+0.88*\ln(H))$ (校園樹木資訊平台)

註 1： V：材積(m^3) C：固碳量(噸) DBH：胸高直徑(cm) H：樹高(m)

註 2： 棕櫚科樹木由公式計算所得數值即為固碳量

4. 配合 IPCC 的計算公式，使用材積轉換係數將主幹的材積轉換為整棵樹木的材積，最後再乘以比重及各碳轉換係數，得到其碳儲存量。

$$C_{tree} = V_{trunk} * BD * BEF * (1+R) * CF$$

註 3：

C_{tree} ：固碳量、 V_{trunk} ：主幹材積、BD：基礎木材密度、BEF：生物量擴展係數、

R：根莖比、CF：碳含量

以上參數查詢前人研究中針對特定樹種的數據(參見附錄二)，若查無資料則依以下表格數據，如圖(七)。

林型 / 係數	D	BEF	BCEF	R	CF	年生長量 (m^3 / ha)
天然針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	4.14
天然針闊葉混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.05
天然闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	3.58
人工針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	8.11
人工針闊葉混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.37
人工闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	4.34
木竹混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	3.31
竹林	0.62	1.40	-	0.46	0.4732	13.84

註1：混生林以針葉樹與闊葉樹之平均值為代表

註2：竹林之生長量單位為公噸/ha

圖七、碳轉換相關係數值

(引自國家溫室氣體排放清冊林業部門編撰實務說明〔電子版〕)

(二) 光合作用法

1. 同化速率的測定：於 2024 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)、2025 年 1 月(冬季)、2025 年 5 月(春季)，利用攜帶式光合作用系統測定儀(LI-6400, Li-Cor)測量校園中苦棟和毛柿的光合作用曲線，從校園裡的毛柿中任取 3 棵樣木，每棵需量測三片葉子，用高枝剪剪下枝條，將枝條插在水中，並選取枝條上的健康葉片進行量測(圖九)；苦棟則選取 2 株各三片葉片進行量測，量測前先以 $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 光度短暫照射葉片後(圖八)，依序調整光度為 2000、1500、1000、750、500、200、100、50、20、10、5、0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 並記錄各光度下的光合作用速率以建立光合作用反應曲線，再計算出 α 量子收率、 θ 形狀參數、 A_{max} 最大光合作用速率及 R_d 暗呼吸速率。

α 的計算方法為光度於 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下的數據做直線回歸的斜率， R_d 則為其直線的 y 軸截距； θ 為將光合作用曲線以二次回歸後在光飽和點的斜率；輔以中央氣象署高雄測站之光度數據，單位為 W m^{-2} ，再以(姚明輝,2011)提出的光度轉換單位方式轉換為 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

* 碳吸存的估算方式參考 Sands(1995)提出的公式計算出葉片的同化速率 A。將利用光合作用曲線求出的 A_{max} 、 α 、 θ 以及中央氣象署高雄測站的光度 I 帶入以下方程式，即可計算出同化速率 A($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

$$A(A_{max}, I_l) = A_{max} \frac{2\alpha I_l / A_{max}}{1 + \frac{\alpha I_l}{A_{max}} + \sqrt{\left(\frac{\alpha I_l}{A_{max}}\right)^2 - 4\theta \frac{\alpha I_l}{A_{max}}}}$$



圖八、待光合速率穩定後記錄光合作用速率
(研究者自行拍攝)



圖九、於不同光度下測量葉子之光合速率
(研究者自行拍攝)

2. 樹冠幅的測定：於 7 月、10 月、1 月、5 月分別量測樹冠幅，量測方法為使用測距儀測量樹木在兩個互相垂直的方向的投影長，以橢圓面積公式求出投影面積，單位為 m^2 ，毛柿取五棵樣木量測，苦棟取四棵樣木量測。
3. LAI 的測定：每個月以植物冠層分析儀（LAI-2200, Li-Cor）量測，共 12 個月，再經由儀器內建軟體（FV2200）計算出 LAI。毛柿取五棵樣木量測，苦棟取四棵樣木量測。
4. 將樹冠幅與 LAI 相乘後即可得葉面積。
5. 每個月的二氧化碳吸存量為白天吸存量-夜間暗呼吸量，算式如下：

$$\text{每個月二氧化碳吸存量} = (A * \text{日照時數} - R_d * \text{夜長}) * \text{葉面積}$$

將各月份數據加總，可得一年內平均單棵之二氧化碳吸存量。

肆、研究結果

一、校園樹木總固碳量的測量

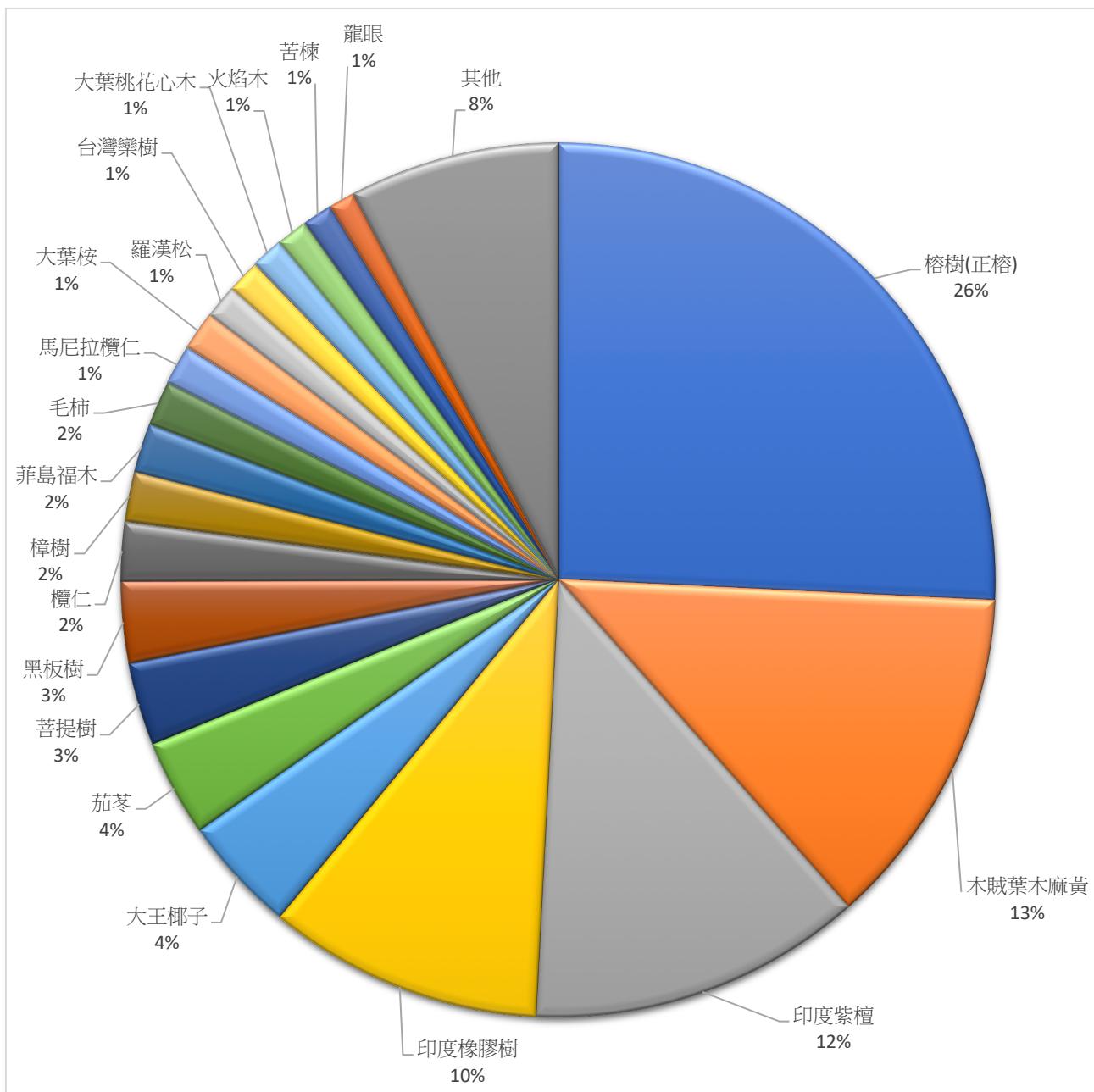
本研究針對校園樹木的固碳能力進行統計與分析，選取前 20 種代表樹種的總固碳量、單棵平均樹高及單棵平均胸徑，並透過圓餅圖呈現其碳吸存分佈情況。根據表(一)，全校共有 927 棵樹木，總固碳量為 197.36 噸，換算為 723.65 噸的二氧化碳當量。全校樹木的平均胸徑為 23.24cm，平均樹高為 8.06m，而每棵樹的平均固碳量為 0.21 噸，相當於 $\text{戶} \cdot \text{戶} = 0.77$ 噸的二氧化碳當量。

在總固碳量方面，根據表(二)及圖(十)之統計結果，榕樹 (*Ficus microcarpa*) 固碳量最高，達 50.85 噸，占全校總固碳量的 26%。其次依序為木賊葉木麻黃 (*Casuarina equisetifolia*)、印度紫檀 (*Pterocarpus indicus*) 與印度橡膠樹 (*Ficus elastica*)，其總固碳量分別為 25.04 噸、24.42 噸與 20.04 噸。這三種樹木的總固碳量分別占比為 13%、12%、及 10%，以上樹種之固碳量占比達全校之 61%。此外，其他樹種的固碳量相對較低，其中大王椰子 (*Roystonea regia*) 固碳量為 8.47 噸，為第五高，但遠低於前四名樹種的 20 噸以上固碳量，占比僅為 4%。而固碳量最少的樹種為龍眼，其總固碳量僅為 1.91 噸，占比 1%。最後，根據圖(十)結果，除前四大樹種外，其餘樹木的總固碳量占比為 39%。

在單棵平均樹高方面，根據表(二)之統計結果，馬尼拉欖仁 (*Terminalia calamansanai*) 之平均樹高最高，達 20.24m，其次依序為黑板樹 (*Alstonia scholaris*)，平均樹高為 16.99m；印度紫檀 (*Pterocarpus indicus*)，為 15.04m；與大王椰子 (*Roystonea regia*)，達 14.10m。最後，台灣欒樹 (*Koelreuteria elegans*) 與茄苳 (*Bischofia javanica*) 之平均樹高最低，分別為 7.53m 與 7.79m。

在單棵平均胸徑方面，大葉桃花心木 (*Swietenia macrophylla*) 之平均胸徑最大，達 153.00cm。其次為菩提樹 (*Ficus religiosa*)，其平均胸徑為 122.07cm；再來依序為黑板樹 (*Alstonia scholaris*)、印度橡膠樹 (*Ficus elastica*) 與榕樹 (*Ficus microcarpa*)，其平均胸徑分別為 84.83cm、74.75cm 與 75.29cm。最後，欖仁 (*Terminalia catappa*) 之平均胸徑最小，僅 8.43cm，其次為楓香(30.96 cm)與大王椰子(35.76cm)。

最後，在平均單棵固碳量方面，菩提樹 (*Ficus religiosa*) 之平均單棵固碳量最高，達 3.03 噸/棵。而黑板樹 (*Alstonia scholaris*) 與印度橡膠樹 (*Ficus elastica*) 為次高，分別是 1.49 噸/棵與 1.43 噸/棵。最後，菲島福木 (*Garcinia subelliptica*) 與羅漢松 (*Podocarpus macrophyllus*) 之平均單棵固碳量最低，僅為 0.06 噸/棵。



圖十、校園中 20 種代表樹種之總固碳量統計(註：其他 8%見附錄) (研究者自行繪製)

校園樹木總數	總固碳量(噸)	總二氧化碳當量(噸)
927	197.36	723.65
平均胸徑(cm)	平均樹高(m)	平均每棵樹之固碳量(噸)
23.24	8.06	0.21

表一、全校樹種相關數據(註：樹木於 1.3m 以下分枝者單獨計數) (研究者自行整理繪製)

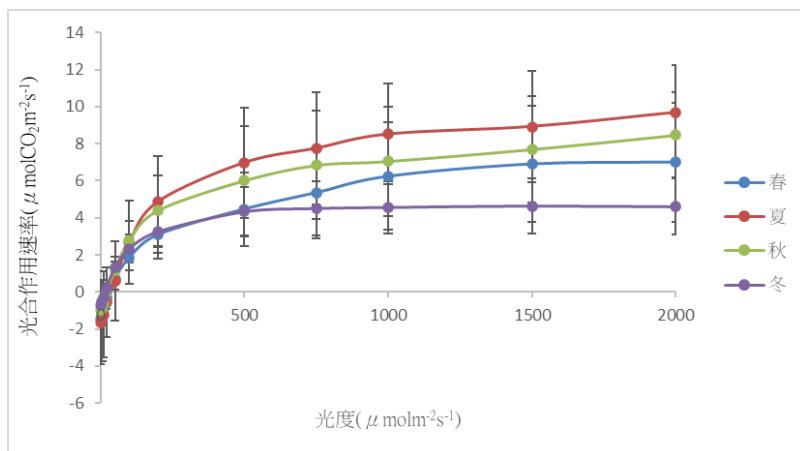
樹種(俗名)	學名	總固碳量 (ton)	單棵平均 樹高 (m)	單棵平均 胸徑 (cm)	單棵平均 材積(m ³)	平均單棵固 碳量 (噸)
榕樹(正榕)	<i>Ficus microcarpa</i>	50.8485	10.91	75.29	4.0384	1.3038
木賊葉木麻黃	<i>Casuarina equisetifolia</i>	25.0423	11.12	55.28	1.4435	0.7826
印度紫檀	<i>Pterocarpus indicus</i>	24.4211	15.04	48.93	2.3447	1.1101
印度橡膠樹	<i>Ficus elastica</i>	20.0359	10.99	74.75	3.1382	1.4311
大王椰子	<i>Roystonea regia</i>	8.4798	14.10	35.76	1.1508	0.2068
茄苳	<i>Bischofia javanica</i>	7.0843	7.79	17.57	0.4793	0.2530
菩提樹	<i>Ficus religiosa</i>	6.0679	13.12	122.07	6.6528	3.0340
黑板樹	<i>Alstonia scholaris</i>	5.9516	16.99	84.83	4.5065	1.4879
欖仁	<i>Terminalia catappa</i>	4.2947	10.76	34.86	0.5981	0.2863
樟樹	<i>Zelkova serrata</i>	3.6282	10.65	34.71	0.4622	0.1395
菲島福木	<i>Garcinia subelliptica</i>	3.5998	8.90	18.72	0.1356	0.0554
毛柿	<i>Diospyros blancoi</i>	3.2681	9.41	26.15	0.2389	0.1089
馬尼拉欖仁	<i>Terminalia calamansanai</i>	2.8650	20.24	44.09	1.4961	0.7162
大葉桉	<i>Eucalyptus robusta</i>	2.8461	7.99	33.52	0.4275	0.2846
羅漢松	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	2.4795	10.41	23.02	0.1975	0.0605
台灣欒樹	<i>Koelreuteria elegans</i>	2.4031	7.53	18.52	0.1521	0.0751
大葉桃花心木	<i>Swietenia macrophylla</i>	2.3538	12.11	48.70	1.4345	0.5885
火焰木	<i>Spathodea campanulata</i>	2.2782	9.18	44.70	0.8326	0.3797
苦棟	<i>Melia azedarach</i>	2.1796	8.57	23.59	0.2933	0.1282
龍眼	<i>Dimocarpus longan</i>	1.9064	7.91	22.39	0.3484	0.1589

表二、校園中 20 種代表樹種之總固碳量、樹高、直徑與平均固碳量統計表(研究者自行繪製)

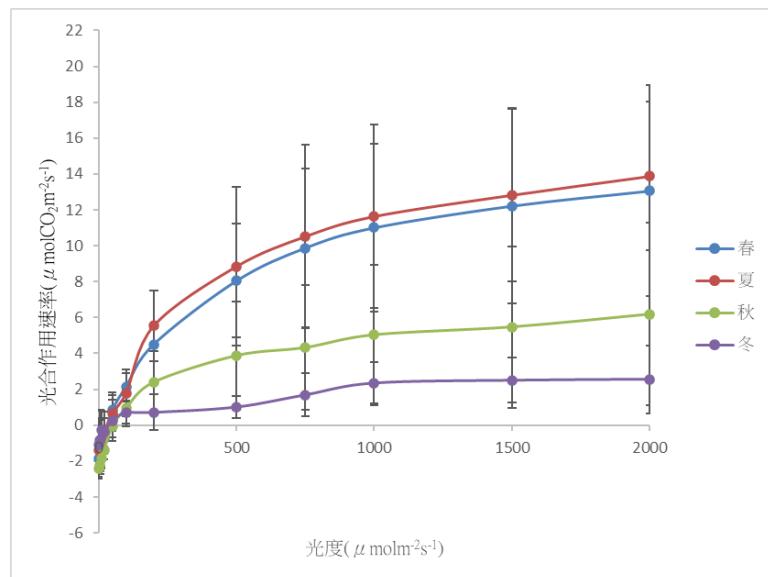
二、建立毛柿、苦棟在不同季節之光合作用曲線

圖(十一)、圖(十二)分別為毛柿及苦棟於不同季節的光合作用曲線，由此曲線可得毛柿於春夏秋冬四季的最大光合速率(A_{max})依序為 7.41 、 9.68 、 8.47 、 4.63 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)，量子收率(α)依序為 0.0324 、 0.0435 、 0.0389 、 0.0309 ，形狀參數(θ)依序為 0.01029 、 0.00729 、 0.00579 、 0.00339 ；苦棟於四季的最大光合速率依序為 13.06 、 13.88 、 6.18 、 2.56 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)，量子收率(α)依序為 0.0401 、 0.0298 、 0.0342 、 0.0161 ，形狀參數(θ)依序為 0.01839 、 0.10088 、 0.00729 、 0.00260 。

比較兩者之光合作用曲線，苦棟各季節的變化較顯著，且於秋冬間之差異大於春夏間，毛柿則為春冬間之差異較夏秋間來的大。苦棟於春夏季之最大光合速率(A_{max})較毛柿高，而秋、冬季則相反。此外，兩種樹的光飽和點皆由夏季至冬季逐季降低。



圖十一、毛柿於不同季節之光合作用曲線 (研究者自行繪製)



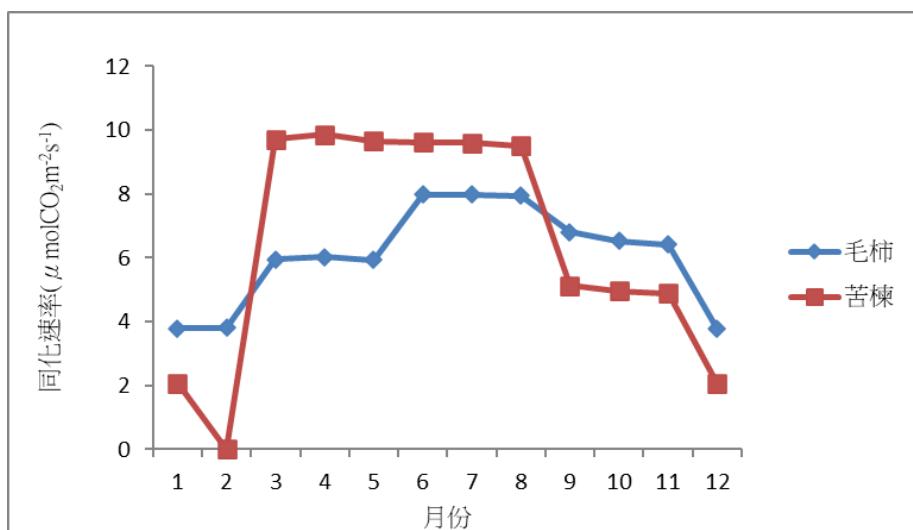
圖十二、苦棟於不同季節之光合作用曲線 (研究者自行繪製)

三、結合葉面積、光度之數據，估算毛柿、苦棟於不同季節之二氣化碳吸存量

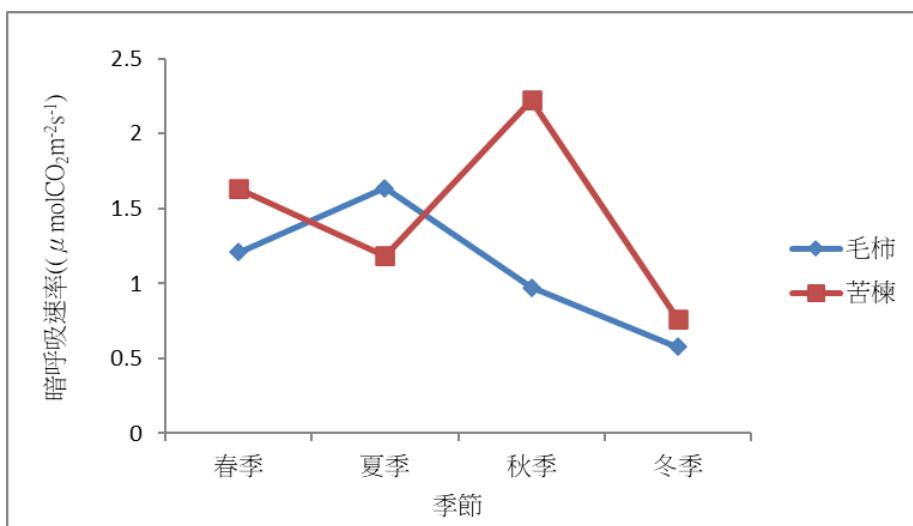
(一)各月份毛柿及苦棟的同化速率(A)、暗呼吸速率(Rd)

圖(十三)、圖(十四)分別為毛柿及苦棟各月份的同化速率(A)、暗呼吸速率(Rd)折線圖。毛柿的同化速率以6月之 $7.986 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 最大，之後逐月下降至12月，以12月之 $3.779 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 最低；苦棟則以4月的同化速率 $9.859 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 最高，之後亦逐月下降至12月。綜觀二者，可發現苦棟於夏秋間及秋冬間之同化速率衰減情況較毛柿顯著，且苦棟在春夏季的同化速率大高於毛柿，毛柿則於秋冬季高於苦棟。

由圖(十四)可知，毛柿於春、夏、秋、冬季之暗呼吸速率分別為 $1.209 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $1.636 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.975 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.576 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，自夏到冬呈現逐漸下降的趨勢；苦棟則為 $1.632 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $1.184 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $2.224 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.765 \mu \text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，以秋季最高，冬季最低。除了夏季，苦棟之暗呼吸速率皆高於毛柿。



圖十三、毛柿、苦棟於不同月份之同化速率 (研究者自行繪製)



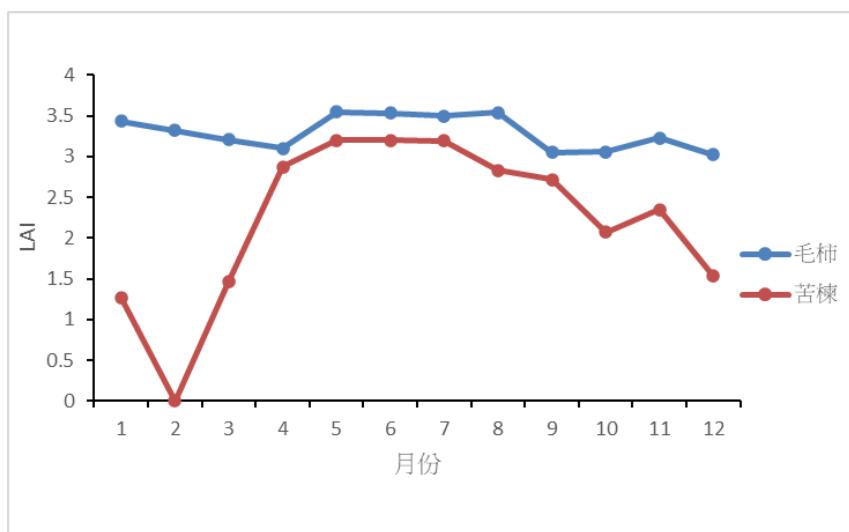
圖十四、毛柿、苦棟於不同季節之暗呼吸速率 (研究者自行繪製)

(二)各月份毛柿及苦棟的 LAI、樹冠幅、葉面積

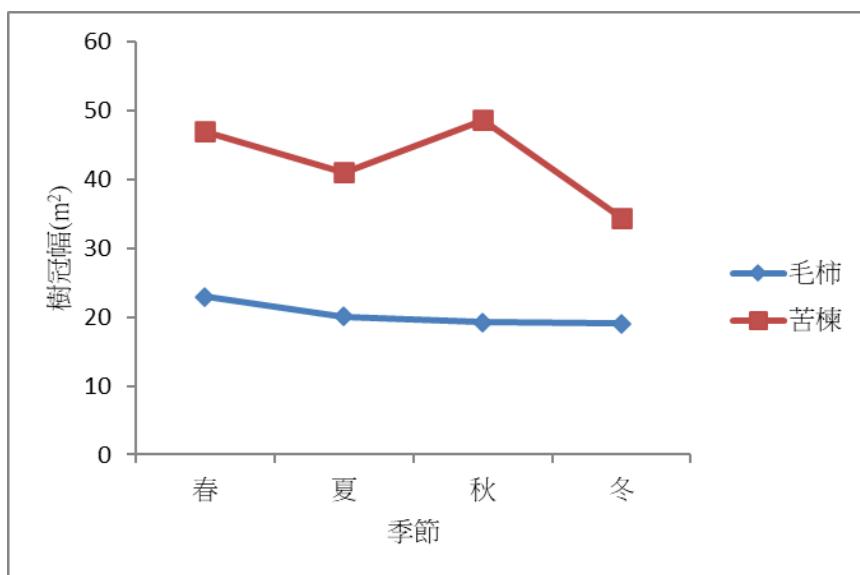
圖(十五)為各月份樹木之 LAI 折線圖，苦棟以七月的 3.19 最高，二月的 0 最低，自七月至隔年二月呈現逐漸下降的趨勢；毛柿則以五月的 3.55 高，十二月的 3.02 最低，趨勢較苦棟平穩，而且各月份的 LAI 皆高於苦棟。

圖(十六)為各月份樹木的樹冠幅折線圖，苦棟於春、夏、秋、冬四季分別為 $47.00\text{、}41.04\text{、}48.66\text{、}34.48\text{m}^2$ ，毛柿則為 $22.97\text{、}20.03\text{、}19.25\text{、}19.02\text{m}^2$ ，苦棟於秋季最高，入冬後則下降 29%，毛柿則逐季下降 12%、4% 及 1%，顯示毛柿的樹冠幅季節變化較小。

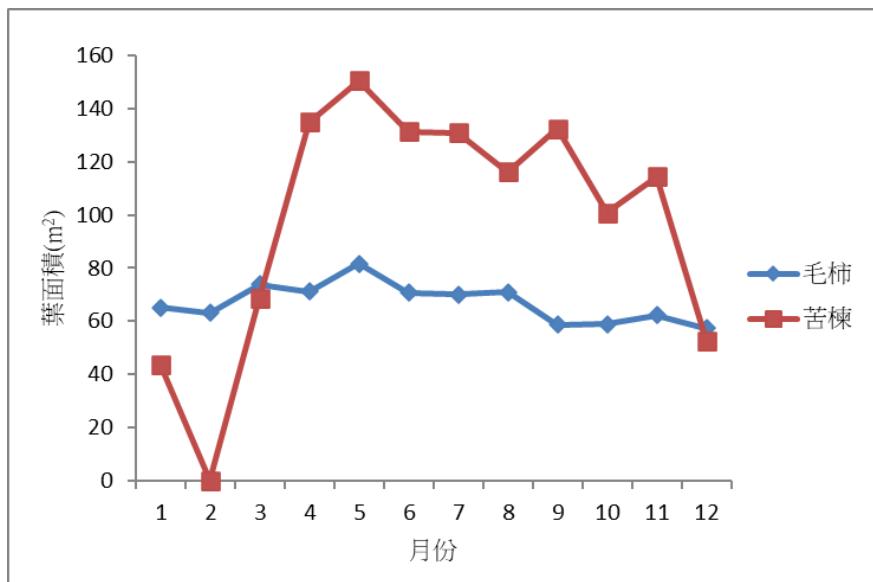
圖(十七)為各月份樹木的葉面積折線圖，苦棟以 4 月的 134.89m^2 最高，2 月的 0m^2 最低，各月份間的變化情形，自 2 至 4 月份逐月上升，而 5 至 12 月份整體呈現逐月下降的趨勢；毛柿則以 5 月的 81.54m^2 最高，12 月的 57.44m^2 最低，各月份間的葉面積變動較苦棟小。此外，苦棟於 4 到 11 月份的葉面積皆大於毛柿，12 月出現逆轉，12 月到 3 月以毛柿較大。



圖十五、毛柿、苦棟於不同月份之 LAI (研究者自行繪製)



圖十六、毛柿、苦棟於不同月份之樹冠幅 (研究者自行繪製)



圖十七、毛柿、苦棟於不同月份之葉面積 (研究者自行繪製)

(三)光度逐月資料

	全天空日射量(Wm^{-2})	日照時數(hr)	光度($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	夜時數(hr)
1	406.72	162.5	675.7407	581.5
2	378.86	118.7	696.8944	553.3
3	561.90	220.3	933.5629	523.7
4	576.95	207.9	990.5199	512.1
5	548.88	146.0	911.9310	598.0
6	607.43	205.0	1042.8490	515.0
7	624.80	235.1	1038.0680	508.9
8	608.01	218.8	1010.1720	525.2
9	517.89	186.5	889.1244	533.5
10	441.80	147.3	734.0240	596.7
11	394.52	173.3	677.3202	546.7
12	398.42	173.9	661.9508	570.1

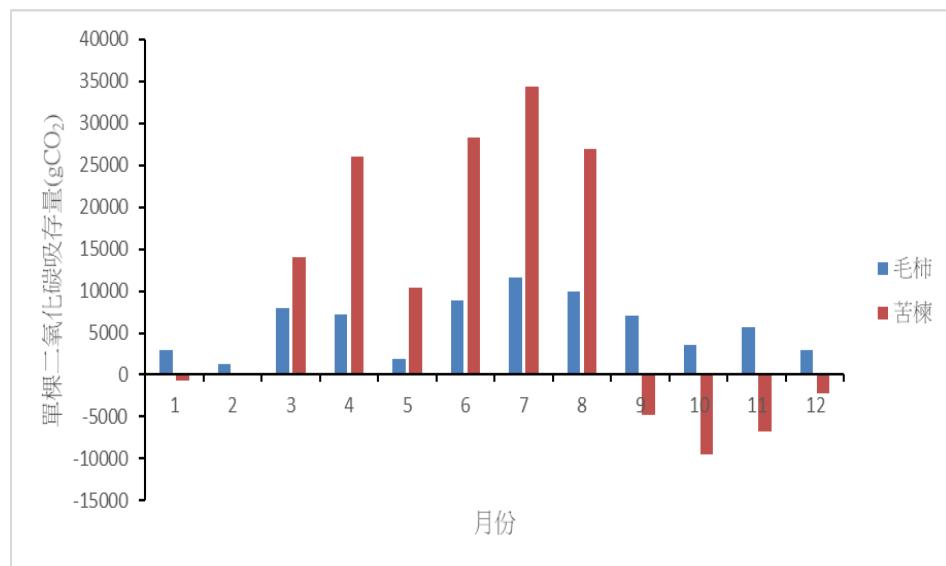
表三、光度逐月資料 (研究者整理自中央氣象署)

(四)各月份毛柿及苦棟的二氧化碳吸存量

圖(十八)為毛柿、苦棟於不同月份之平均每棵碳吸存量，得到毛柿和苦棟一年內的碳吸存量分別為 70796.23 和 115846.78 gCO₂，毛柿以 7 月之 11585.17 gCO₂最高，2 月之 1344.25 gCO₂最低；苦棟以 7 月之 34307.36 gCO₂最高，10 月之 -9505.03 gCO₂最低，且於 9、10、11、12、1 月為負值（即淨碳排放）。

在趨勢方面，毛柿自春季到夏季呈現微幅上升趨勢，並於 7 月達到高峰，至秋末及冬季時呈現下降趨勢，並於 2 月冬末時達到最低；苦棟在各季節的變化幅度甚大，在春夏季的碳吸存量明顯高於其他季節，而於秋冬季的碳吸存效益則顯著下降，甚至於 9 到 12 月及 1 月呈現負值（淨碳排放），並於冬末經歷落葉期（1-2 月），此時對碳吸存較無貢獻。

綜觀兩者之數值，我們發現毛柿與苦棟皆在夏季時達到碳吸存的高峰，且在春季時亦有頗高的碳吸存量，但苦棟於此兩季的碳吸存量皆高出毛柿許多，而毛柿於各季節的變化幅度則較苦棟小，且於全年均為淨碳吸存。

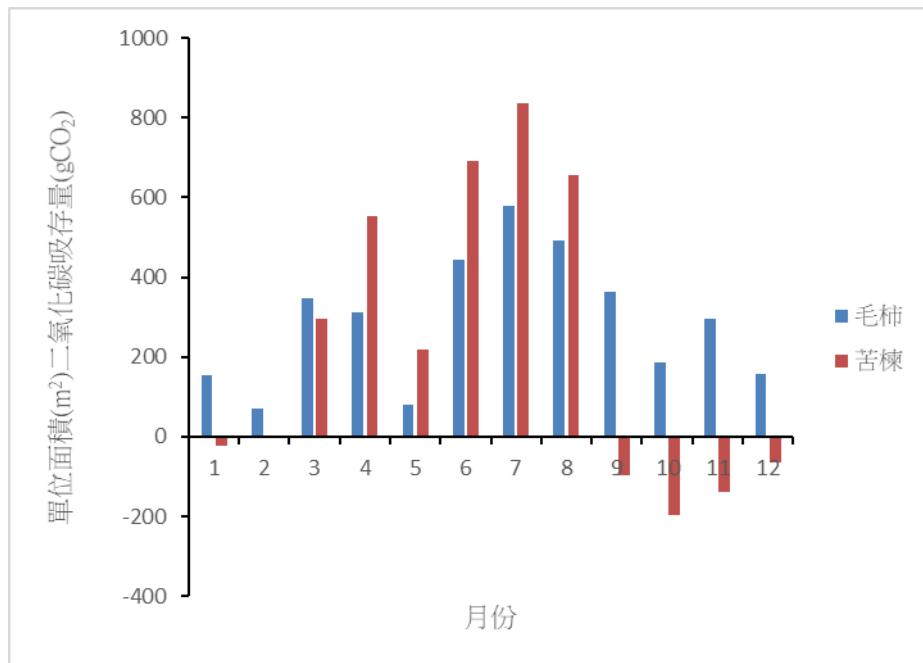


圖十八、毛柿、苦棟於不同月份之平均每棵碳吸存量 (研究者自行繪製)

(五)各月份毛柿及苦棟單位面積的碳吸存量

圖(十九)為毛柿、苦棟於不同月份之單位面積碳吸存量，得到毛柿和苦棟一年內單位面積 (m²) 的碳吸存量分別為 3478.21 和 2733.91 gCO₂，毛柿以 7 月之 578.39 gCO₂最高，2 月之 70.68 gCO₂最低；苦棟以 7 月之 835.95 gCO₂最高，10 月之 -195.34 gCO₂最低，且於 9、10、11、12、1 月為負值（即淨碳排放）。

在趨勢方面，兩種樹皆與單棵的碳吸存量趨勢相仿，且毛柿於一年內的單位面積 (m²) 碳吸存量較苦棟高出 744.30 gCO₂；綜觀兩者之數據，兩種樹亦與單棵碳吸存量的趨勢相仿，惟苦棟於春夏季高出毛柿的數值比例較單棵碳吸存量小。



圖十九、毛柿、苦棟於不同月份之單位面積(m^2)碳吸存量 (研究者自行繪製)

四、對照樹木碳吸存量與校園內排碳量，評估碳中和潛力

我們取得本校 113 年各月之電力排碳量(如表四)，一年內的電力排碳量為 802264 kgCO_2 ，本實驗推估平均一棵毛柿一年的碳吸存量為 70.796 kgCO_2 ，苦棟為 115.847 kgCO_2 ，若欲達成發電上的碳中和，至少需要種植 11333 棵毛柿，或 6926 棵苦棟。由此數據可知，欲使用林木的碳吸存效益來達成碳中和，需要非常大面積的人工造林，因此，除增加植栽面積之外，人類更需從根本的減少碳排做起，而校園可選擇適當植樹計畫來達成最大效益，例如目標佔排放量 10%以上。

月份	1	2	3	4	5	6	
排碳量	54404	44670	39977	55727	80452	87725	
月份	7	8	9	10	11	12	總計
排碳量	82286	62905	63702	93270	74116	63030	802264

表四、學校於 113 年之各月之電力排碳量(單位： kgCO_2) (研究者整理自學校電費單)

伍、討論

一、實驗方法之選定與採用

生長量法所測得的固碳量僅能反映出樹木自種植到現今所累積之總固碳量，由於各樹木之年齡未知，故無法得知並衡量單位時間內的碳吸存效益，因此，本實驗結合光合作用法，以光合作用之碳同化速率及葉面積來評估並量化樹木的碳吸存效率，計算出每月之固碳量。

二、校園內固碳分布及優勢樹種分析

(一) 校園樹木之總固碳量分布情形

根據實驗結果，校園樹木之總固碳量集中於少數樹種：榕樹(*Ficus microcarpa*)、木賊葉木麻黃(*Casuarina equisetifolia*)、印度紫檀(*Pterocarpus indicus*)、印度橡膠樹(*Ficus elastica*)和大王椰子(*Roystonea regia*)，這五種樹木的總固碳量占比高達 65%，表示這些樹種在校園的碳積存中扮演著重要角色，尤其是榕樹占全部的四分之一，而其餘樹種的總固碳量占比僅為 35%，此固碳量集中的現象可能會有生態單一化風險，即當固碳量高度依賴少數幾種樹木時，若這些樹種因病害、極端氣候或其他環境變化而減少，校園碳吸存能力可能受到極大之影響而快速下降。

(二) 影響樹木總固碳量之因素

1. 胸徑 (DBH)、樹高 (H) 及主幹材積 (V)

根據本研究的實驗結果及測量數據，樹種的固碳量有極大部份取決於其主幹材積，亦即若樹種之胸徑與樹高愈大，則其含有木材（碳質）的總體積就愈多，總固碳量也會隨之增加。此外，由胸徑及樹高換算主幹材積之公式亦可探悉，數值間的量化關係均與胸徑樹高呈現正相關。

舉本研究測量之榕樹為例，其總立木材積為本校之最 (157.50m^3)，經由碳轉換係數換算後，其總固碳量亦為最高 (50.85 噸)。

2. 基礎木材密度 (BD) 及含碳百分比 (CF)

根據本研究的實驗結果及數據分析過程，除了立木材積外，樹木固碳量亦受基礎木材密度及含碳百分比的影響，若兩項係數的乘積愈大，表示樹種木材除去水份後的實際碳乾重愈大，即固碳量也隨之提升。舉本研究的大王椰子為例，其立木材積雖為第三多 (47.18m^3)，但由於其為棕櫚科單子葉植物，木材密度和含碳百分比皆較低，故其總固碳量排名居於第五多 (8.47 噸)。

3. 生物量擴展係數 (BEF) 及根莖比 (R)

根據本研究的實驗結果及數據分析過程，樹木的固碳量亦和其生物量擴展係數及根莖比有關，若 BEF 值愈大，則樹木的地上生物量由主幹拓展為枝條的比例就越高，立木材積及固碳量也隨之增加；同理，若 R 值越大，則樹木的地下生物量（主要為根部）相對於主幹的比例就愈大，立木材積和固碳量也會越多。

以（圖七）人工闊葉樹與人工針葉樹的數值為例，闊葉樹的 BEF (1.40) 及 R (0.24) 皆高於針葉樹的 BEF (1.27) 及 R (0.22)，故在主幹材積相同的前提下，闊葉樹的總生物量會多於針葉樹。

三、毛柿及苦棟的碳吸存效率分析

（一） A_{max} 、 α 、 R_d 分析：本實驗得到毛柿和苦棟於夏季時 A_{max} 分別為 9.68 和 $13.88 \mu \text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，以苦棟較高；毛柿於夏秋冬三季之 α 皆高於苦棟，可反映其在低光時可較有效的利用光能，故推測較適應低光環境，在樹蔭下仍可有效光合作用。由暗呼吸速率的圖表，毛柿在秋冬季之暗呼吸速率都低於毛柿，此亦可反映出毛柿在低光環境之能量消耗較少，苦棟則維持高能量消耗。以上差異吻合郭耀綸 (2013) 對於耐陰樹種及陽性先驅樹種描述之差異性，唯本實驗中苦棟之 A_{max} 未達 $27 \mu \text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的標準，推測應為本校苦棟植於教學大樓旁，長期受光較不充足，加上樹齡的因素所致。此外，Chen et al. (2018) 以屏東萬隆農場的苦棟樣木做研究，測得其在夏、秋季之 A_{max} 分別為 11.57 、 $5.89 \mu \text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，本實驗於兩季皆較此高出約 $1-2 \mu \text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，亦反映出樹木之碳吸存效率與其生長環境和樹齡應有關係。

（二）A 分析：由各月份同化速率曲線圖，如圖（十三），苦棟的同化速率於秋、冬季下降趨勢較毛柿顯著，推論原因如下：苦棟為落葉樹，毛柿則為常綠樹，落葉樹於秋天落葉前會進行養分回收、葉片老化，並將葉綠素、氮、磷等養分從葉片轉移回樹幹或根部儲存，以便來年春天利用，葉綠素減少後，葉片吸收與轉換光能的能力降低，導致光合作用速率下降，葉片老化亦使光合酶（如 Rubisco）活性下降，降低 CO_2 固定效率。故毛柿在冬季仍維持較高的同化速率，可維持較久的碳吸存效益。

（三）LAI 與樹冠幅分析：比較 LAI 與樹冠幅折線圖，如圖（十五）與圖（十六），可得知毛柿相對於苦棟，屬於高 LAI 但窄樹冠的樹種，顯示出其葉片較密集，增加了葉片之間的遮蔽效應，推測與上述其較適應低光環境的結論有關。由各月份的總葉面積曲線圖（圖十七），可看出苦棟於春季四月份起至夏季比毛柿多出將近一倍，於秋冬交替後即急速下降，至 2 月完全落葉歸零，毛柿則維持較穩定之葉面積，符合其常綠樹的特性；

此外，在十月的實驗進行前，有山陀兒颱風來襲（民國 113 年 9 月 26 日至 10 月 4 日之間），苦棟之葉面積有明顯下降，毛柿則不受影響，由此可見毛柿具有強抗風能力，可作為防風林之用途，當遭遇氣候災害時，亦較能維持其碳吸存潛力。

(四) 由不同月份之平均每棵碳吸存量的長條圖（圖十八），毛柿於秋冬季維持較穩定的碳吸存量，苦棟於 9 到 12 月以及 1 月出現負值，即進行碳排放，由各項數據分析應為暗呼吸速率高且秋冬夜長晝短之緣故。雖苦棟於秋冬的碳吸存量少於毛柿，甚至出現負值，但在整年的總量上仍高出毛柿 45050.55 gCO₂，反應出就長期而言，苦棟具較高之碳吸存效率。雖然苦棟單棵的碳吸存量較毛柿高，但其單位面積(m²)的碳吸存量低於毛柿的 744.30 gCO₂，因此在土地面積有限的情況下，種植毛柿有較高的碳吸存效益；若土地面積充裕，種植苦棟的碳吸存效益則較毛柿高。

四、校園未來碳匯植樹計畫討論與推論

(一) 以下針對校園內 6 種具較高固碳優勢的樹種進行討論：

1. 榕樹：屬於陽性樹種，生長速度快，十年內及高達 7.6 公尺。適應多種土壤，根系廣佈且耐風耐潮，可作為行道樹、觀景樹、家具、建築。在本實驗中為全校總固碳量占比最多的樹種。
2. 木賊葉木麻黃：屬於陽性樹種，生長速度快，自然壽命 20-30 年，後開始衰老、無法自行更新，幾十年間樹高可達 30 公尺。主幹健壯，耐鹽防風，植於沙灘可固沙，不僅可作為防風林，且可以固氮改良貧瘠土地，亦可作為建築結構木材。
3. 印度紫檀：屬於陽性樹種，生長速度快。喜高溫、多雨且可固氮，帶有美麗紋路，可作為貴重器具、雕刻、建築用。但不抗風，颱風來臨前須修剪避免枝幹折斷。
4. 印度橡膠樹：屬於陽性樹種，生長速度快，樹高可達 30 公尺。耐旱、耐熱，栽培容易但高濕度可促進生長，生性強健，可作為觀景樹、行道樹，乳汁可製天然橡膠。
5. 大王椰子：屬於陽性樹種，生長速度慢，壽命長。耐熱、耐寒、耐旱、耐濕、耐瘠、抗風、抗污染。在本研究中，大王椰子 (*Roystonea regia*) 雖然生長速度快，樹高達 14.10m，但其絕乾比重（木材密度）較低，導致長期碳吸存能力有限。其總固碳量為 10.39 噸，排名第五，表示其在校園碳吸存中仍具一定貢獻。然而，其單棵平均胸徑僅 35.76cm，其樹幹較細，木材累積較少，碳儲存的穩定性可能不如胸徑較大的樹種。

此外，大王椰子的單棵平均固碳量僅 0.25 噸/棵，顯示其單棵固碳效率較低。這可能與其生長模式有關，其生長特性偏向於快速增加樹高，而非大量累積木質部。由於椰子科植物的木材密度普遍較低，這類樹種的碳儲存主要依賴於其存活年限，而非木材本身的高碳含量。

6. 大葉桃花心木：屬於陽性樹種，生長速度快，十年內即成大樹，適合成為行道樹。其材質堅韌且耐潮、耐旱、抵抗白蟻，又帶有美麗紋路，可作為家具、造船、宮寶等裝飾用料。

大葉桃花心木平均胸徑為 153.00cm，遠高於全校平均胸徑 23.24cm；相對地，其平均樹高（12.11m）雖亦較全校平均樹高（8.06m）還要高，但高出的比例明顯不如平均胸徑，推測其固碳能力主要來自於木質莖次級生長加粗的緩慢生長模式，而非莖部初級生長增高的快速生長模式。大葉桃花心木的總固碳量為 2.35 噸，居於前二十名之末，但其單棵材積及單棵固碳量較高，因目前植株數量僅 4 棵所以總固碳量低，若增加植栽，未來的固碳能力將趨於可觀。

由以上的描述可以了解除了棕櫚科的大王椰子外，皆為生長速度較快的樹種，且具有雙重優勢：其存活期間的碳吸存效率高，能在短時間內大量固定大氣中的二氧化碳；而當這些樹木收穫後，可加工製成家具、建材等高經濟價值的木製品，持續發揮碳匯功能。同時，原有林地可立即重新造林，使新種的樹木在其生長最旺盛、碳吸存效率最高的階段，持續發揮最大的固碳效益。

(二)植樹計畫

1. 樹種選擇與多樣化種植

本校的固碳能力主要來自少數幾種樹木，前四名的樹種為榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀與印度橡膠樹，皆屬於速生樹種，雖然在短期內能有效吸收二氧化碳，但長期碳儲存穩定性可能較低，若要提升長期的碳儲存能力，可與木材密度較高的長壽型樹種混合種植，如大葉桃花心木，這類樹種的生長速率較慢，但長期固碳效果穩定，適合作為碳儲存的基礎樹種。同時避免生態單一化風險，本校可適度減少榕樹的種植比例，增加印度紫檀、大葉桃花心木等單棵固碳量高的樹種，提升生態多樣性並分散固碳風險，也可優先選擇單棵固碳量高於 0.21 噸的多樣樹種，以提升固碳量。

2. 種植區位

由光合作用法的實驗結果及相關文獻可知，雖然校園要達成碳中和的目標實屬不易，但仍可透過種植區位的調整達成碳吸存效益的最大化，毛柿（陰性樹種）可密集種植於教學大樓間，因其於低光環境能維持較高的碳吸存量，亦適合種於受颱風災害等影響較大的區域，以確保氣候災害後維持碳吸存；苦楝（陽性樹種）則可疏散種植於操場、壘球場旁等受光良好的區域，使其於春、夏季達到更高的碳吸存潛力。

3. 植栽管理優化

透過光合作用速率可以判斷樹木的健康狀況，校園可引進人工造林的經營模式，在樹木老熟及碳吸存效率急遽下降時，可進行樹木更新，原本的木材即可製成家具或紙等再生用途，以提升校園長期固碳效率。

陸、結論

一、校園樹木總固碳量

- (一) 本研究透過生長量法測量校園樹木，統計出校園中 927 棵樹木之總固碳量達 197.36 噸，相當於 723.65 噸二氧化碳當量。
- (二) 校園樹木固碳能力主要集中於少數優勢樹種，其中榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀及印度橡膠樹等四種佔總固碳量的 61%。
- (三) 樹木的固碳量與其胸徑、樹高、木材密度及樹種特性密切相關。具較大胸徑和樹高的樹種，其主幹及立木材積大，如榕樹和印度橡膠樹，因此單株固碳能力明顯高於其他樹種。
- (四) 根據本研究結果及探討樹木本性相關的研究，優勢樹種（如榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀及印度橡膠樹）雖具高碳吸存效率，但我們建議避免過度種植此少數樹種以降低生態單一化所造成之風險。未來植樹應採取混合策略，兼顧生長速度快的樹種的短期碳吸存效益與長壽型樹種的長期碳儲存穩定性。
- (五) 優先選擇單株固碳量高於 0.21 噸的樹種，提升生物多樣性並分散風險。同時，木材收穫後可製成木製品，持續發揮碳匯功能，並在原地重新植樹造林，維持長期的碳吸存效率，實現校園碳匯永續發展。

二、毛柿及苦棟的碳吸存效率

- (一) 本實驗建立毛柿（耐陰樹種）及苦棟（陽性樹種）於春夏秋冬季的光合作用曲線，藉由比較 α 、A、Rd 等數值顯示：相較於苦棟，毛柿在低光環境時可以有效率的利用光能，且能量消耗較少，而苦棟的同化速率於秋、冬季下降趨勢較毛柿顯著，
- (二) 由葉面積的量測發現，苦棟於春季四月份起至夏季，葉面積比毛柿多出將近一倍，於秋冬交替後便急速下降，毛柿則維持較穩定之葉面積，且具有強抗風能力，可作為防風林之用途，當遭遇氣候災害時，亦較能維持其碳吸存潛力。
- (三) 綜合以上結論，比較毛柿及苦棟的碳吸存潛力差異：平均單一棵毛柿在一年內的碳吸存量為 70.796 kgCO₂，苦棟則為 115.847 kgCO₂，兩者均於春夏季有較多的碳吸存

量，苦棟於秋冬季的碳吸存效率不如毛柿。

- (四) 平均單一棵毛柿一年內的單位面積(m^2)碳吸存量為 3478.21gCO₂，苦棟為 2733.91gCO₂，故若土地面積有限，則種植毛柿為較佳選擇，反之種植苦棟有較好的碳吸存效益。
- (五) 由樹種生理特性分析，毛柿（陰性樹種）可密集種植於教學大樓間，或受颱風災害等影響較大的區域，以確保氣候災害後維持碳吸存，苦棟（陽性樹種）則可疏散種植於操場、壘球場旁等受光良好的區域，藉此達到碳吸存效益的最大化。
- (六) 若校園欲達成電力排碳的碳中和，需種植 11333 棵毛柿或 6926 棵苦棟。

未來展望

一、本研究之生長量法的實驗僅進行單一次數之調查，計算目前全校既有的固碳量，未來可以兩年或以上的時間為普查的基數，進行多次調查及量測，比較單位時間內固碳量的變化，可計算出校園樹木之總固碳速率；此外目前使用光合作用法量測碳吸存效率僅針對毛柿與苦棟兩種樹種，未來可應用至全校之各樹種並完整進行全年四季之實驗，亦可計算出總固碳速率，並將以上兩者的結果進行比較與深入探討。

二、本研究使用的立木材積估算法，使用人為量測胸徑及樹高，並帶入前人既有的資料進行回歸估算而得出之通式，然而除人為誤差外，樹木之個體形狀差異亦大，故未來可採用光達（LiDAR）技術，實際掃描每個樣木個體之形狀及體積，得到更準確之立木材積與生物量估算。

三、本研究目前聚焦於校園「綠碳」（樹木）的固碳能力，然而，除了綠碳之外，土壤中的「黃碳」也是陸域生態系中固碳能力之要角。未來可利用土壤採樣及分析等技術，量測校園中土壤之有機碳含量，進而計算出固碳量，以更精確的評估校園固碳力，並搭配綠碳之研究結果，推論出更全面且有效率之碳中和策略。

四、本研究針對碳排放部分僅調查校園之電力排碳數據，未來可進行更詳細之碳盤查，統計包含人員交通運輸，廢棄物清運，及生物（含人類）呼吸等排碳來源，了解校園內碳排放主要來源，制定減排策略，完整並精確評估校園碳中和之實際情形。

柒、參考文獻資料

1. 中央氣象署(2024-2025)。縣市測站觀測資料。交通部中央氣象署。<https://reurl.cc/2KVdQ4>
2. 教育部 (2024)。校園樹木地圖。校園樹木資訊平台。
<https://edutreemap.moe.edu.tw/trees/#/Map>
3. 吳科增(2022)。南華大學森林固碳量資料庫建立之研究。南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程。
4. 邱祈榮、莊媛卉(2016)。國家溫室氣體排放清冊林業部門編撰實務說明〔電子版〕。台灣林業, 42, 26。
5. 姚明輝(2011)。光度單位轉換問題之探討。農業試驗所技術服務, 85, 26 – 29。
6. 羅紹麟、馮豐隆(1986)。台灣第一次林相變更造林木生長情形及生長量調查計劃報告。林務局。
7. 郭耀綸(2013)。植物耐陰性及臺灣原生樹種耐陰性類別。林業研究專訊, 20(4), 36 – 40。
<https://reurl.cc/RYmMK6>
8. 郭耀綸、楊月玲、吳祥鳴(1999)。墾丁熱帶森林六種樹苗生長性狀及光合作用對光量的可塑性。台灣林業科學, 14(3), 255 – 73。
9. 郭耀綸、楊月玲、鄭鈞瞻、傅瑩娟(2003)。三種台灣特有種樹苗在不同光環境下的淨光合作用季節變化。林業研究專訊, 18(2), 107 – 116。
10. 陳忠義、酈學文、余瑞珠、王亞男(2016 年 6 月)。屏東萬隆農場無患子造林木之碳吸存潛力：研究論文。臺大實驗林研究報告, *Jour. Exp. For. Nat. Taiwan Univ.*
11. 劉宣誠、林銘輝、曲俊麒(1981)。台灣大葉桃花心木造林木枝生長及木材性質之研究。台灣省林業試驗所。
12. Chen, C.-I., Wang, Y.-N., & Yu, J.-C. (2018). Diurnal and seasonal CO₂ assimilation by four plantation species in Taiwan. *Forest Science*, 65(1), 68 – 76. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy033>
13. Chen, C.-I., Wang, Y.-N., & Yu, J.-C. (2019). Diurnal and seasonal CO₂ assimilation by four plantation species in Taiwan. *Forest Science*, 65(1), 68 – 76. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy033>
14. Cox, H. M. (2012). A sustainability initiative to quantify carbon sequestration by campus trees. *Journal of Geography*.
15. IPCC. (2006). *Climate change 2006 : Working Group I : The scientific basis*. Cambridge University Press.
16. Sands, P. J. (1995). Modelling canopy production. II. From single-leaf photosynthetic parameters to daily canopy photosynthesis. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22, 603 – 614. <https://doi.org/10.1071/PP9950603>

附錄一、生長量法測量數據(研究者自行繪製)

樹種(俗名)	樹種(學名)	數量	單棵平均樹高(m)	單棵平均胸徑(cm)	總材積(m ³)	單棵平均材積(m ³)	總固碳量(ton)	單棵平均固碳量(ton)
榕樹(正榕)	<i>Ficus microcarpa</i>	39	10.91	75.29	157.4969	4.0384	50.8485	1.3038
木賊葉木麻黃	<i>Casuarina equisetifolia</i>	32	11.12	55.28	46.1925	1.4435	25.0423	0.7826
印度紫檀	<i>Pterocarpus indicus</i>	22	15.04	48.93	51.5829	2.3447	24.4211	1.1101
印度橡膠樹	<i>Ficus elastica</i>	14	10.99	74.75	43.9346	3.1382	20.0359	1.4311
大王椰子	<i>Roystonea regia</i>	41	14.10	35.76	47.1808	1.1508	8.4798	0.2068
茄苳	<i>Bischofia javanica</i>	28	7.79	17.57	13.4207	0.4793	7.0843	0.2530
菩提樹	<i>Ficus religiosa</i>	2	13.12	122.07	13.3056	6.6528	6.0679	3.0340
黑板樹	<i>Alstonia scholaris</i>	4	16.99	84.83	18.0260	4.5065	5.9516	1.4879
樟樹	<i>Zelkova serrata</i>	26	10.65	34.71	12.0182	0.4622	3.6282	0.1395
欖仁	<i>Terminalia catappa</i>	15	10.76	34.865542 87	8.9711	0.5981	4.2947	0.2863
楓香	<i>Liquidambar formosana</i>	8	10.70	30.96	3.3870	0.4234	1.6069	0.200
菲島福木	<i>Garcinia subelliptica</i>	65	8.90	18.72	8.8164	0.1356	3.5998	0.0554
毛柿	<i>Diospyros blancoi</i>	30	9.41	26.15	7.1661	0.2389	3.2681	0.1089
馬尼拉欖仁	<i>Terminalia calamansanai</i>	4	20.24	44.09	5.9846	1.4961	2.8650	0.7162
大葉桉	<i>Eucalyptus robusta</i>	10	7.99	33.52	4.2754	0.4275	2.8461	0.2846
羅漢松	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	41	10.41	23.02	8.0962	0.1975	2.4795	0.0605
台灣欒樹	<i>Koelreuteria elegans</i>	32	7.53	18.52	4.8674	0.1521	2.4031	0.0751
火焰木	<i>Spathodea campanulata</i>	6	9.18	44.70	4.9957	0.8326	2.2782	0.3797
苦楝	<i>Melia azedarach</i>	17	8.57	23.59	4.9861	0.2933	2.1796	0.1282
大葉桃花心木	<i>Swietenia macrophylla</i>	4	12.11	48.70	5.7380	1.4345	2.3538	0.5885
龍眼	<i>Dimocarpus longan</i>	12	7.91	22.39	4.1804	0.3484	1.9064	0.1589
水黃皮	<i>Millettia pinnata</i>	20	7.48	18.72	2.7487	0.1374	1.4653	0.0733
芒果樹	<i>Mangifera indica</i>	4	8.31	41.30	2.8247	0.7062	1.2882	0.3220
可可椰子	<i>Cocos nucifera</i>	6	16.63	34.06	6.8208	1.1368	1.2324	0.2054
大葉合歡	<i>Albizia lebbeck</i>	1	14.71	56.02	1.6785	1.6785	0.7655	0.7655
美人樹	<i>Ceiba speciosa</i>	4	10.22	43.37	3.1045	0.7761	0.7232	0.1808
竹柏	<i>Nageia nagi</i>	9	12.18	26.57	2.1844	0.2427	0.6690	0.0743

瓊崖海棠	<i>Calophyllum inophyllum</i>	2	11.15	38.04	1.3106	0.6553	0.5977	0.2988
蓮霧	<i>Syzygium samarangense</i>	1	10.00	56.34	1.2142	1.2142	0.5537	0.5537
加羅林魚木	<i>Crateva religiosa</i>	3	10.82	29.82	1.2141	0.4047	0.5537	0.1846
蒲葵	<i>Livistona chinensis</i>	16	6.47	18.52	2.1952	0.1372	0.4839	0.0302
黃椰子	<i>Dypsis lutescens</i>	133	5.01	6.48	1.7554	0.0132	0.4701	0.0035
黃連木	<i>Pistacia chinensis</i>	4	9.89	21.41	0.8658	0.2165	0.4573	0.1143
印度塔樹	<i>Polyalthia longifolia</i>	4	8.91	23.08	0.8492	0.2123	0.3873	0.0968
琉球松	<i>Pinus luchuensis</i>	6	6.34	29.31	1.1323	0.1887	0.3468	0.0578
鳳凰木	<i>Delonix regia</i>	2	7.83	31.83	0.6797	0.3398	0.3315	0.1658
香椿樹	<i>Toona sinensis</i>	6	8.09	15.33	0.6561	0.1094	0.2992	0.0499
青剛櫟	<i>Quercus glauca</i>	5	5.89	19.35	0.6304	0.1261	0.2875	0.0575
蘭嶼羅漢松	<i>Podocarpus costalis C.Presl</i>	26	4.95	11.20	0.8741	0.0336	0.2677	0.0103
孔雀椰子	<i>Caryota urens</i>	23	6.69	10.75	1.0564	0.0459	0.2555	0.2555
珊瑚樹	<i>Viburnum odoratissimum</i>	23	5.22	8.75	0.5363	0.0233	0.2477	0.0108
中東海棗	<i>Phoenix dactylifera</i>	1	7.33	50.29	1.0926	1.0926	0.2048	0.2048
台東漆	<i>Semecarpus gigantifolia Vidal</i>	1	8.67	31.51	0.3611	0.3611	0.1647	0.1647
蘭嶼烏心石	<i>Michelia compressa</i>	7	6.16	11.96	0.3538	0.0505	0.1518	0.0217
阿勒勃	<i>Cassia fistula</i>	1	10.96	21.65	0.2188	0.2188	0.1472	0.1472
雀榕	<i>Ficus subpisocarpa</i>	5	5.70	17.38	0.4335	0.0867	0.1468	0.0294
小實孔雀豆	<i>Adenanthera microsperma</i>	4	7.02	12.57	0.3206	0.0802	0.1462	0.0366
白玉蘭	<i>Magnolia denudata</i>	5	6.11	13.49	0.2882	0.0576	0.1314	0.0263
厚葉石斑木	<i>Rhaphiolepis umbellata</i>	19	5.14	6.57	0.2817	0.0148	0.1285	0.0068
榔榆	<i>Ulmus parvifolia</i>	1	7.67	26.42	0.2333	0.2333	0.1064	0.1064
象牙木	<i>Diospyros ferrea</i>	23	4.13	5.40	0.2293	0.0100	0.1046	0.0045
小葉桑	<i>Morus australis</i>	4	5.39	8.83	0.1861	0.0465	0.0849	0.0212
木棉	<i>Bombax ceiba</i>	3	8.71	16.76	0.3447	0.1149	0.0775	0.0258
白水木	<i>Heliotropium foertherianum</i>	8	3.78	8.91	0.1463	0.0183	0.0667	0.0083
羅比親王海棗	<i>Phoenix roebelenii</i>	11	3.20	9.52	0.1941	0.0176	0.0521	0.0047
蘭嶼肉桂	<i>Cinnamomum kotoense</i>	3	5.21	8.38	0.0923	0.0308	0.0421	0.0140
火筒樹	<i>Leea guineensis</i>	24	2.88	4.40	0.0858	0.0036	0.0391	0.0016

龍柏	<i>Juniperus chinensis</i>	5	2.95	8.53	0.0628	0.0126	0.0273	0.0055
柚子	<i>Citrus maxima</i>	3	6.00	7.80	0.0583	0.0194	0.0266	0.0089
棋盤腳	<i>Barringtonia asiatica</i>	5	3.70	7.38	0.0552	0.0110	0.0252	0.0050
羊蹄甲	<i>Bauhinia variegata</i>	1	9.15	9.23	0.0379	0.0379	0.0229	0.0229
金桔	<i>Pinus luchuensis</i>	3	5.07	7.22	0.0457	0.0152	0.0209	0.0070
無患子	<i>Sapindus saponaria</i>	2	4.89	7.32	0.0341	0.0170	0.0182	0.0091
棍棒椰子	<i>Hyophorbe verschaffeltii</i>	1	2.10	22.60	0.0632	0.0632	0.0156	0.0156
酒瓶蘭	<i>Beaucarnea recurvata</i>	1	5.50	10.19	0.0293	0.0293	0.0134	0.0134
欒	<i>Zelkova serrata</i>	1	6.68	7.32	0.0187	0.0187	0.0113	0.0113
可可	<i>Theobroma cacao</i>	3	3.50	6.05	0.0230	0.0077	0.0105	0.0035
梔子花	<i>Gardenia jasminoides</i>	4	4.07	4.68	0.0210	0.0053	0.0096	0.0024
圓葉竹柏	<i>Nageia nagi</i>	1	9.50	8.28	0.0276	0.0276	0.0085	0.0085
土肉桂	<i>Cinnamomum osmophloeum</i>	1	7.36	7.64	0.0171	0.0171	0.0078	0.0078
雞蛋花	<i>Plumeria rubra</i>	3	2.81	5.73	0.0170	0.0057	0.0078	0.0026
台灣赤楠	<i>Syzygium formosanum</i>	1	3.11	6.37	0.0147	0.0147	0.0066	0.0066
洋玉蘭	<i>Magnolia grandiflora</i>	18	3.06	1.91	0.0137	0.0008	0.0049	0.0003
台東龍眼	<i>Pometia pinnata</i>	1	3.50	7.00	0.0098	0.0098	0.0045	0.0045
波羅蜜	<i>Artocarpus heterophyllus</i>	2	4.00	4.88	0.0055	0.0027	0.0025	0.0012
枇杷	<i>Eriobotrya japonica</i>	1	2.00	5.09	0.0033	0.0033	0.0015	0.0015
全校		927	8.06	23.24	522.2448	0.5634	200.4766	0.2163

附錄二、生長量法比重及碳轉換參數表(研究者自行繪製)

樹種(俗名)	BD 絶乾比重	CF 含碳百分比	BEF 擴展係數	R 根莖比
榕樹(正榕)	0.41	0.4536	1.4	0.24
木賊葉木麻黃	0.67	0.4661	1.4	0.24
印度紫檀	0.58	0.4702	1.4	0.24
印度橡膠樹	0.56	0.4691	1.4	0.24
茄苳	0.65	0.4678	1.4	0.24
菩提樹	0.56	0.4691	1.4	0.24
黑板樹	0.38	0.5005	1.4	0.24
樟樹	0.37	0.47	1.4	0.24
欖仁	0.57	0.4838	1.4	0.24
楓香	0.56	0.488	1.4	0.24
菲島福木	0.49	0.48	1.4	0.24

毛柿	0.56	0.4691	1.4	0.24
馬尼拉欖仁	0.57	0.4838	1.4	0.24
大葉桉	0.83	0.462	1.4	0.24
羅漢松	0.41	0.4821	1.27	0.22
台灣欒樹	0.6	0.474	1.4	0.24
火焰木	0.56	0.4691	1.4	0.24
苦棟	0.54	0.4663	1.4	0.24
大葉桃花心木	0.5	0.4726	1.4	0.24
龍眼	0.56	0.4691	1.4	0.24
水黃皮	0.62	0.4953	1.4	0.24
芒果樹	0.56	0.4691	1.4	0.24
大葉合歡	0.56	0.4691	1.4	0.24
美人樹	0.29	0.4627	1.4	0.24
竹柏	0.41	0.4821	1.27	0.22
瓊崖海棠	0.56	0.4691	1.4	0.24
蓮霧	0.56	0.4691	1.4	0.24
加羅林魚木	0.56	0.4691	1.4	0.24
黃連木	0.68	0.4474	1.4	0.24
印度塔樹	0.56	0.4691	1.4	0.24
琉球松	0.41	0.4821	1.27	0.22
鳳凰木	0.58	0.4844	1.4	0.24
香椿樹	0.56	0.4691	1.4	0.24
青剛櫟	0.56	0.4691	1.4	0.24
蘭嶼羅漢松	0.41	0.4821	1.27	0.22
珊瑚樹	0.59	0.451	1.4	0.24
台東漆	0.56	0.4691	1.4	0.24
蘭嶼烏心石	0.52	0.4751	1.4	0.24
阿勒勃	0.8	0.4844	1.4	0.24
雀榕	0.43	0.4536	1.4	0.24
小實孔雀豆	0.56	0.4691	1.4	0.24
白玉蘭	0.56	0.4691	1.4	0.24
厚葉石斑木	0.56	0.4691	1.4	0.24
榔榆	0.56	0.4691	1.4	0.24
象牙木	0.56	0.4691	1.4	0.24
小葉桑	0.56	0.4691	1.4	0.24
木棉	0.28	0.4627	1.4	0.24
白水木	0.56	0.4691	1.4	0.24
蘭嶼肉桂	0.56	0.4691	1.4	0.24
火筒樹	0.56	0.4691	1.4	0.24

龍柏	0.48	0.5214	1.4	0.24
柚子	0.56	0.4691	1.4	0.24
棋盤腳	0.56	0.4691	1.4	0.24
羊蹄甲	0.72	0.4844	1.4	0.24
金桔	0.56	0.4691	1.4	0.24
無患子	0.7	0.439	1.4	0.24
酒瓶蘭	0.56	0.4691	1.4	0.24
欒	0.73	0.4766	1.4	0.24
可可	0.56	0.4691	1.4	0.24
梔子花	0.56	0.4691	1.4	0.24
圓葉竹柏	0.41	0.4821	1.27	0.22
土肉桂	0.56	0.4691	1.4	0.24
雞蛋花	0.56	0.4691	1.4	0.24
台灣赤楠	0.57	0.451	1.4	0.24
洋玉蘭	0.44	0.4698	1.4	0.24
台東龍眼	0.56	0.4691	1.4	0.24
波羅蜜	0.56	0.4691	1.4	0.24
枇杷	0.56	0.4691	1.4	0.24

備註：

大王椰子、可可椰子、蒲葵、黃椰子、孔雀椰子、中東海棗、羅比親王海棗、棍棒椰子等棕櫚科植物，材積公式使用校園樹木平台之棕櫚科材積轉換固碳量公式，故無參數

【評語】052608

本研究針對校園內樹木分析其固碳能力，使用生長量法估算校園樹木的總固碳量，並利用光合作用法分析苦棟與毛柿在不同季節的碳吸存效率。研究設計完整，動機具吸引力，研究缺口明確，研究切入點的思路清楚，且有益於校內碳匯之瞭解。實驗結果由不同面向分析比較，屬於高階研究探討。

相關問題與建議如下：

1. 數據是否有與已發表的數據比對？
2. 是否有過去少有樹種的結果？
3. 台灣9-12月仍很熱，為何苦棟的CO₂吸存量為負值？

作品海報

探討校園樹木固碳力- 量化統計樹木固碳量與碳吸存效率之研究

一、研究動機與文獻回顧

溫室效應加劇，減少大氣中的二氧化碳備受全球高度關注，須從減少碳排放和增加碳吸存兩個方向並進，而增加碳吸存最環保的方式則是植樹造林與增加木製品的利用。我們發現國內外已有專家學者針對校園等人工造林區，進行樹木碳積存之研究，因此我們想調查校園中樹木之立木材積，搭配IPCC的材積轉換公式，了解校園所有樹種的固碳量及相異樹種所佔的固碳量百分比。

在調查全校樹木時，發現苦楝樹冠層單一、枝條廣、葉面散且不重疊，而毛柿樹冠層多、枝條擴展少、狹窄而集中，兩樹的形態有顯著差異，推論有陽、陰性樹種之別，也符合郭(2013)的植物耐陰性研究，其中也將苦楝分為陽性先驅樹種，毛柿則為耐陰樹種，故我們決定挑選以上兩種耐陰性差異甚大之台灣原生樹種，量測其在單位時間內的碳吸存潛力，參照陳等人(2016)的研究，進行光合作用法比較兩者在不同季節之碳吸存潛力差異。

二、研究目的

- (一) 利用生長量法測量校園內樹木的總固碳量。
- (二) 分析不同樹種所佔之固碳量百分比。
- (三) 建立毛柿、苦楝在不同季節之光合作用曲線。
- (四) 結合葉面積、光度之數據，估算毛柿、苦楝於不同季節之二氣化碳吸存量，並比較其差異。
- (五) 對照樹木碳吸存量與學校電力的排碳量，初步評估校園碳中和的潛力。
- (六) 提供校園植樹計畫的建議

貳、研究設備及器材

一、研究樣區及樣木選取

(一) 生長量法之樣區範圍(綠色大長方形所圍之範圍)



圖一、校園樹木樣區(圖一、二、三皆引自校園樹木資訊平台)

(二) 光合作用法之樣區範圍



圖二、光合作用法毛柿樣區
(圖一之黃色長方形所圍)



圖三、光合作用法苦楝樣區
(圖一之白色長方形所圍)

1. 光合速率測量樣木：毛柿編號5、6、9棵，苦楝由左至右第1、3棵，每棵樹採取三片受光良好的葉片量測。
2. LAI與樹冠幅測量樣木：毛柿選取編號第5、10、13、18、22棵，苦楝選取四棵。

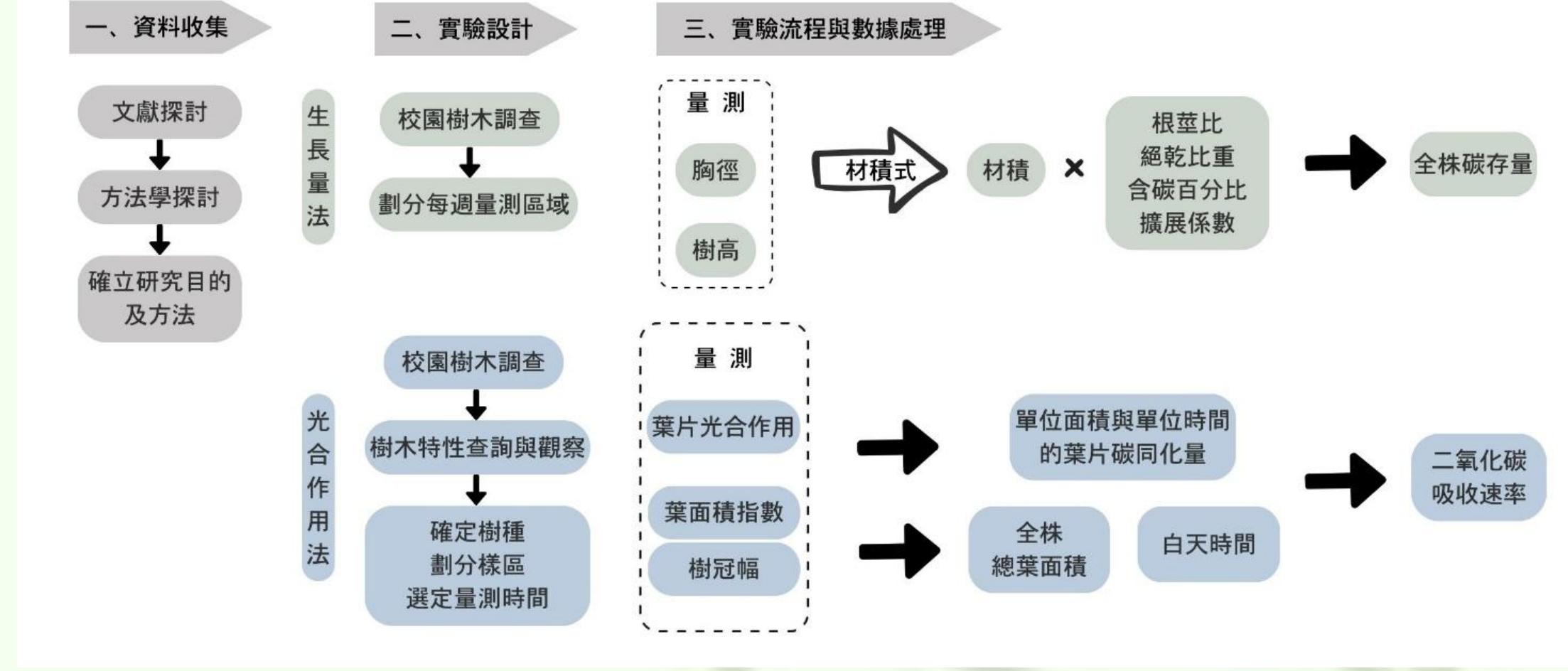
二、儀器與設備(以下皆為研究者自行拍攝)



三、名詞解釋

- (一) 量子收率(α)：於低光度($<100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)，葉片利用每單位光能所吸收 CO_2 的效率。
- (二) 形狀參數(θ)：將光合作用曲線以二次曲線近似後，於光飽和點的斜率。
- (三) 光飽和點：光合作用曲線趨於平緩，光合速率不再大幅增加的光度。
- (四) 最大光合速率(A_{max})：光合作用曲線中，葉片最大的光合速率。
- (五) 同化速率(A)：葉片在一光度下之二氣化碳吸存速率。
- (六) LAI指數：每單位地面表面積的葉面積總和。
- (七) 樹冠幅：樹木冠幅的投影面積。
- (八) 碳吸存：將二氣化碳(CO_2)從大氣中移除並儲存，以減少溫室氣體濃度，降低氣候變遷影響的過程。
- (九) 固碳量：某一特定環境或系統(如森林、土壤、海洋等)固定二氣化碳(CO_2)的總量。

一、研究架構圖



圖四、研究架構圖(研究者自行繪製)

二、實驗步驟及方法

(一) 生長量法

1. 以捲尺測量樹木離地1.3m處之圓周長
2. 以7m測高桿測量樹高，若樹高超過測高桿的長度，則以測高桿作為比例尺，從遠處拍照並依比例計算樹高。



圖五(研究者自行拍攝)



圖六(研究者自行拍攝)

3. 將數據代入材積式來計算出樹木的材積。

$$(1) 樟樹 : V = 0.0000834 * DBH^{1.8761885} * H^{0.8058127}$$

$$(2) 大葉桃花心木 : V = 0.0101 - 0.00679346 * DBH + 0.00058996 * DBH^2 + 0.00033654 * DBH * H$$

(劉宣誠、林銘輝、曲俊麒，1981)

$$(3) 楓香 : V = 0.0000834 * DBH^{1.8761885} * H^{0.8058127}$$

$$(4) 其他闊葉樹 : V = 0.0000862 * DBH^{1.8742} * H^{0.8671}$$

$$(5) 其他針葉樹 : V = 0.0001430 * DBH^{1.7009164} * H^{0.7410436}$$

(1,3,4,5皆出自羅紹麟、馮豐隆，1986)

(6) 棕櫚科樹木固碳量：

$$C = \exp(-3.64 + 1.84 * \ln(DBH) + 0.88 * \ln(H)) \text{ (校園樹木資訊平台)}$$

註1：V：材積(m^3) C：固碳量(噸)

DBH：胸高直徑(cm) H：樹高(m)

註2：棕櫚科樹木由公式計算所得數值即為固碳量

4. 配合IPCC的計算公式，將主幹的材積轉換為整株樹木的材積，之後再乘以密度及碳轉換係數，得到其碳儲存量。

$$C_{tree} = V_{trunk} * BD * BEF * (1+R) * CF$$

註3： C_{tree} ：固碳量 V_{trunk} ：主幹材積 BD：基礎木材密度

BEF：生物量擴展係數 R：根莖比 CF：碳含量百分比

以上參數查詢前人研究中針對特定樹種的數據，若查無資料則依以下表格數據，如圖(七)。

林型 / 係數	D	BEF	BCEF	R	CF	年生長量 (m^3/ha)
天然針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	4.14
天然針闊葉混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.05
天然闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	3.58
人工針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	8.11
人工針闊葉混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.37
人工闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	4.34
木竹混生林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	3.31
竹林	0.62	1.40	-	0.46	0.4732	13.84

註1：混生林以針葉樹與闊葉樹之平均值為代表

註2：竹林之生長量單位為公噸/ha

圖七、碳轉換相關係數值(引自國家溫室氣體排放清冊林業部門編撰實務說明(電子版))

(二) 光合作用法

1. 同化速率的測定：於1、5、7、10月，以攜帶式光合作用系統測定儀實驗。每株樣木選取3片葉片，如圖(九)，量測前先以 $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光度短暫照射葉片後，依序調整光度為 $2000, 1500, 1000, 750, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, 0 (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$ 並記錄光合作用速率，如(圖八)，以建立光合作用曲線，再計算出 α 量子收率、 θ 形狀參數、 A_{max} 最大光合作用速率及 Rd 暗呼吸速率，並查詢氣象局高雄測站之光度數據，單位為 Wm^{-2} ，由(姚明輝, 2011)提出的轉換方式轉換為 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。再以Sands(1995)提出的公式計算出葉片的同化速率。

$$A(A_{max}, I_l) = A_{max} \frac{2\alpha I_l / A_{max}}{1 + \frac{\alpha I_l}{A_{max}} + \sqrt{\left(1 + \frac{\alpha I_l}{A_{max}}\right)^2 - 4\theta \frac{\alpha I_l}{A_{max}}}}$$

2. 樹冠幅的測定：於1、5、7、10月以測距儀測量樹木在兩個互相垂直的方向的投影長，以橢圓面積公式求出投影面積。

3. LAI的測定：每個月以植物冠層分析儀(LAI-2200, Li-Cor)量測，共有12個月，再經由儀器內建軟體(FV2200)計算出LAI。

4. 將樹冠幅與LAI相乘後即可得葉面積。

5. 每個月的二氣化碳吸存量為白天吸存量-夜間暗呼吸量，算式如下：

每個月二氣化碳吸存量 = $(A * \text{日照時數} - Rd * \text{夜長}) * \text{葉面積}$
將各月份數據加總，可得一年內平均單棵之二氣化碳吸存量。



圖八、待光合速率穩定後記錄光合速率(兩圖皆研究者自行拍攝)



圖九、於不同光度下測量葉子之光合速率

肆、研究結果

一、校園樹木總固碳量的測量

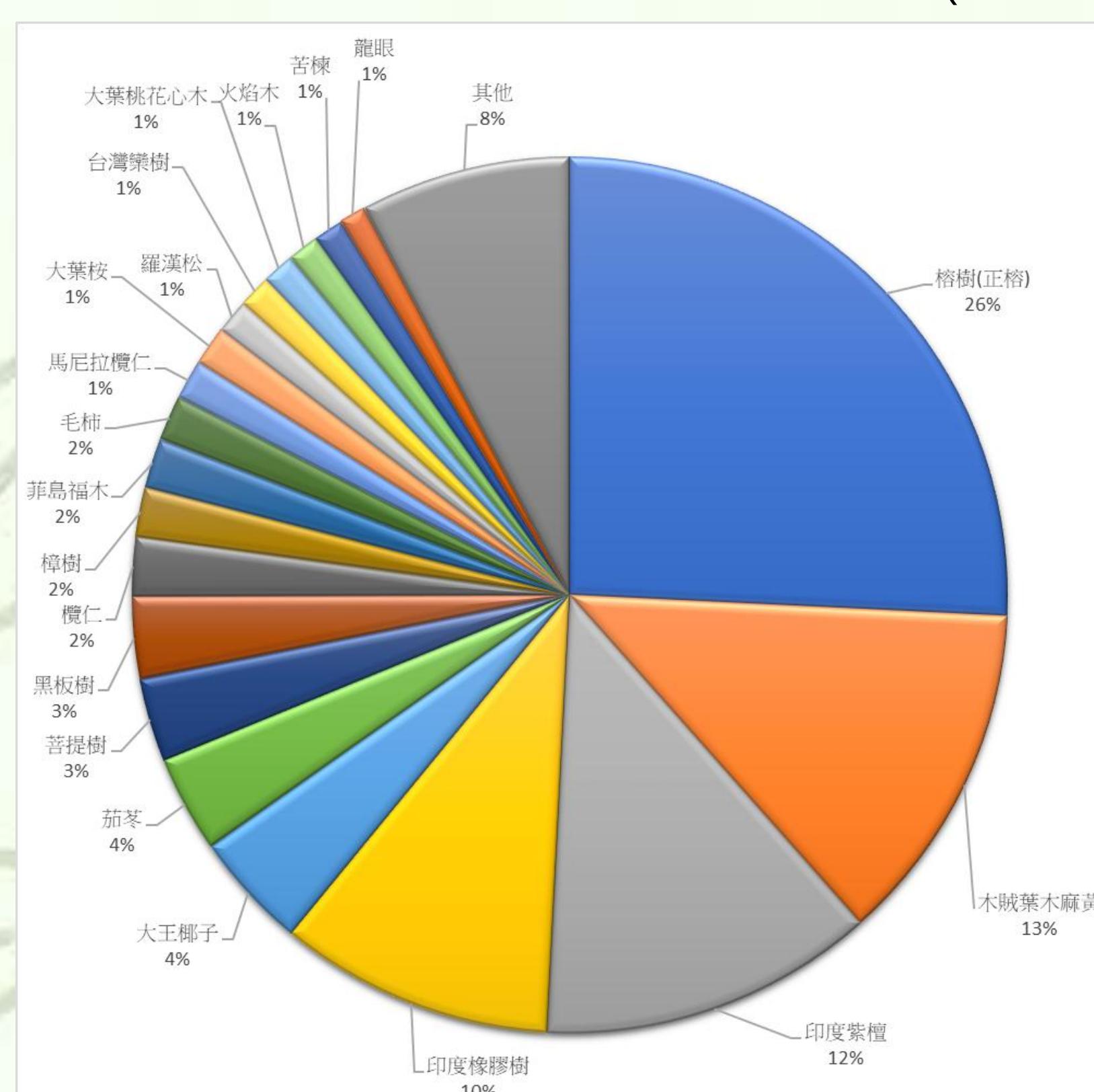
校園樹木總數	總固碳量(噸)	總二氧化碳當量(噸)
927	197.36	723.65
平均胸徑(cm)	平均樹高(m)	平均每棵樹之固碳量(噸)
23.24	8.06	0.21

表一、全校樹種相關數據(註：樹木於1.3m以下分枝者單獨計數)
(研究者自行整理繪製)

表(一)呈現全校共927棵樹木之平均胸徑、樹高、固碳量及總固碳量。

樹種(俗名)	總固碳量 (ton)	單棵平均 樹高 (m)	單棵平均 胸徑 (cm)	單棵平均材積 (m ³)	平均單棵固 碳量 (噸)
榕樹(正榕)	50.8485	10.91	75.29	4.0384	1.3038
木賊葉木麻黃	25.0423	11.12	55.28	1.4435	0.7826
印度紫檀	24.4211	15.04	48.93	2.3447	1.1101
印度橡膠樹	20.0359	10.99	74.75	3.1382	1.4311
大王椰子	8.4798	14.10	35.76	1.1508	0.2068
茄苳	7.0843	7.79	17.57	0.4793	0.2530
菩提樹	6.0679	13.12	122.07	6.6528	3.0340
黑板樹	5.9516	16.99	84.83	4.5065	1.4879
欖仁	4.2947	10.76	34.86	0.5981	0.2863
樟樹	3.6282	10.65	34.71	0.4622	0.1395

表二、校園中10種代表樹種之生長量法統計表(研究者自行繪製)



圖十、校園中20種代表樹種之總固碳量統計(研究者自行繪製)

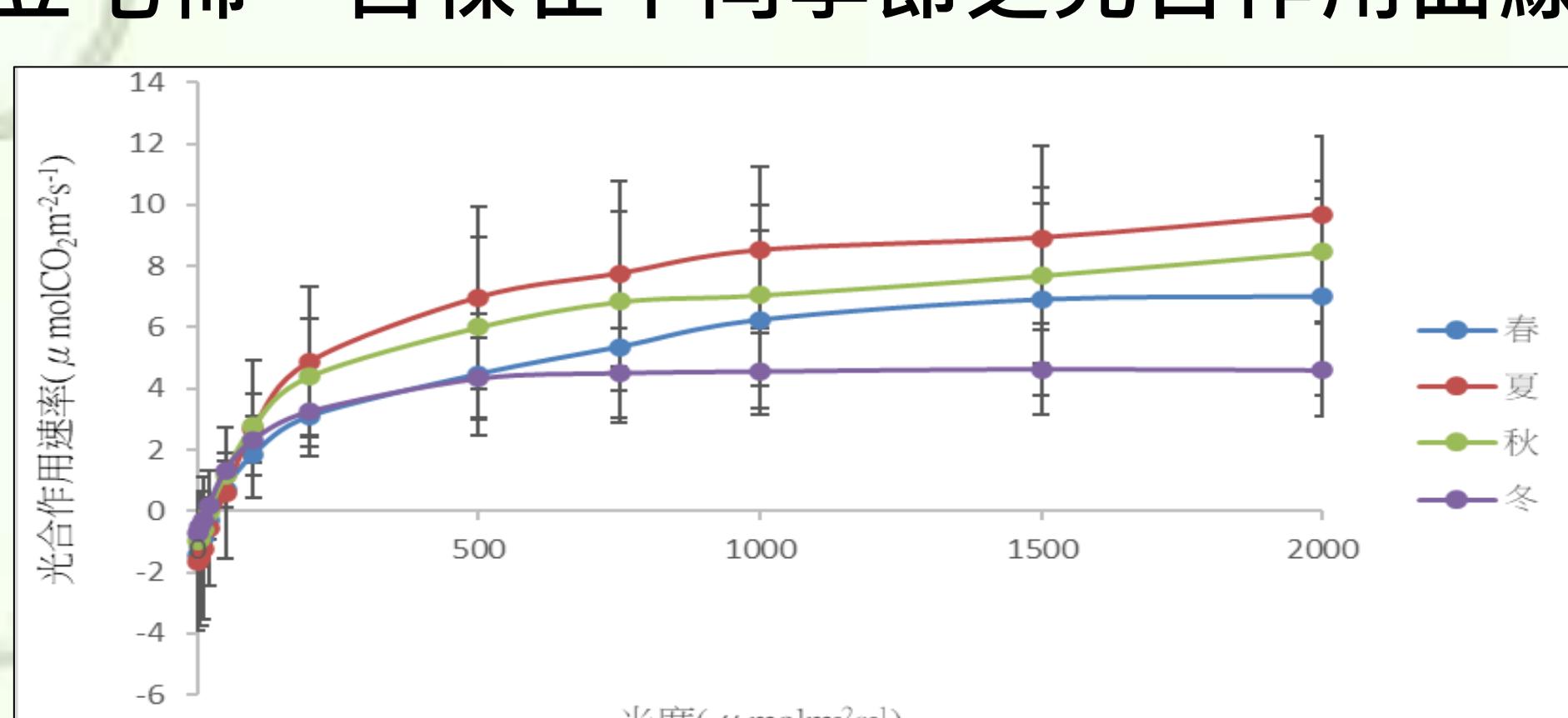
總固碳量：榕樹固碳量最高，占全校總固碳量的26%。其次為木賊葉木麻黃、印度紫檀與印度橡膠樹。以上樹種之固碳量占比達全校之61%。其他樹種固碳量相對較低，大王椰子為第五高，但遠低於前四名樹種的20噸以上固碳量，占比僅4%。

單棵平均樹高：馬尼拉欖仁最高，台灣欒樹最低。

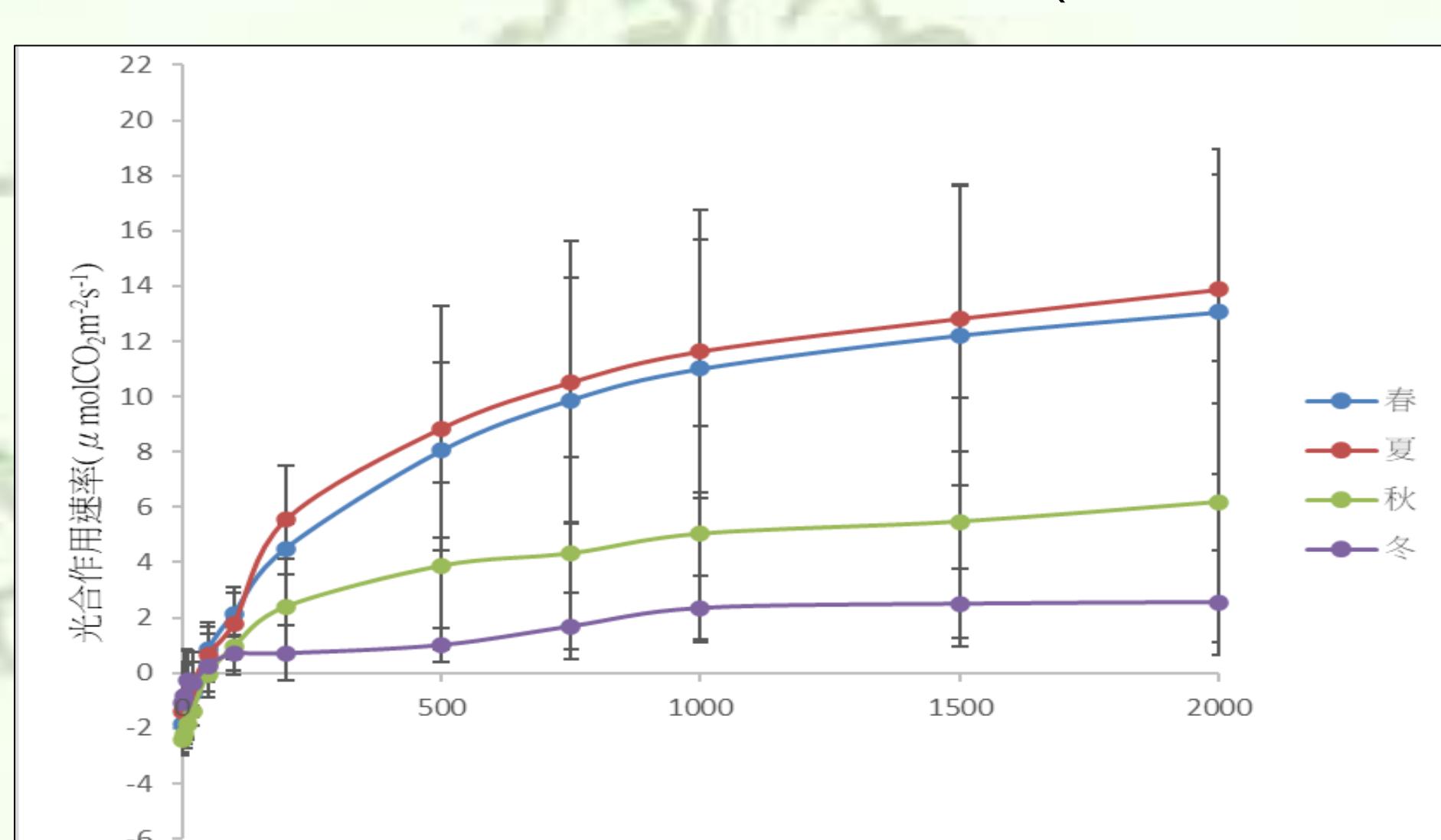
單棵平均胸徑：大葉桃花心木最大，其次為菩提樹、黑板樹、印度橡膠樹與榕樹。最小為欖仁。

平均單棵固碳量：菩提樹之平均單棵固碳量最高，其次為黑板樹與印度橡膠樹，最低為菲島福木與羅漢松。

二、建立毛柿、苦棟在不同季節之光合作用曲線



圖十一、毛柿於不同季節之光合作用曲線(研究者自行繪製)



圖十二、苦棟於不同季節之光合作用曲線(研究者自行繪製)

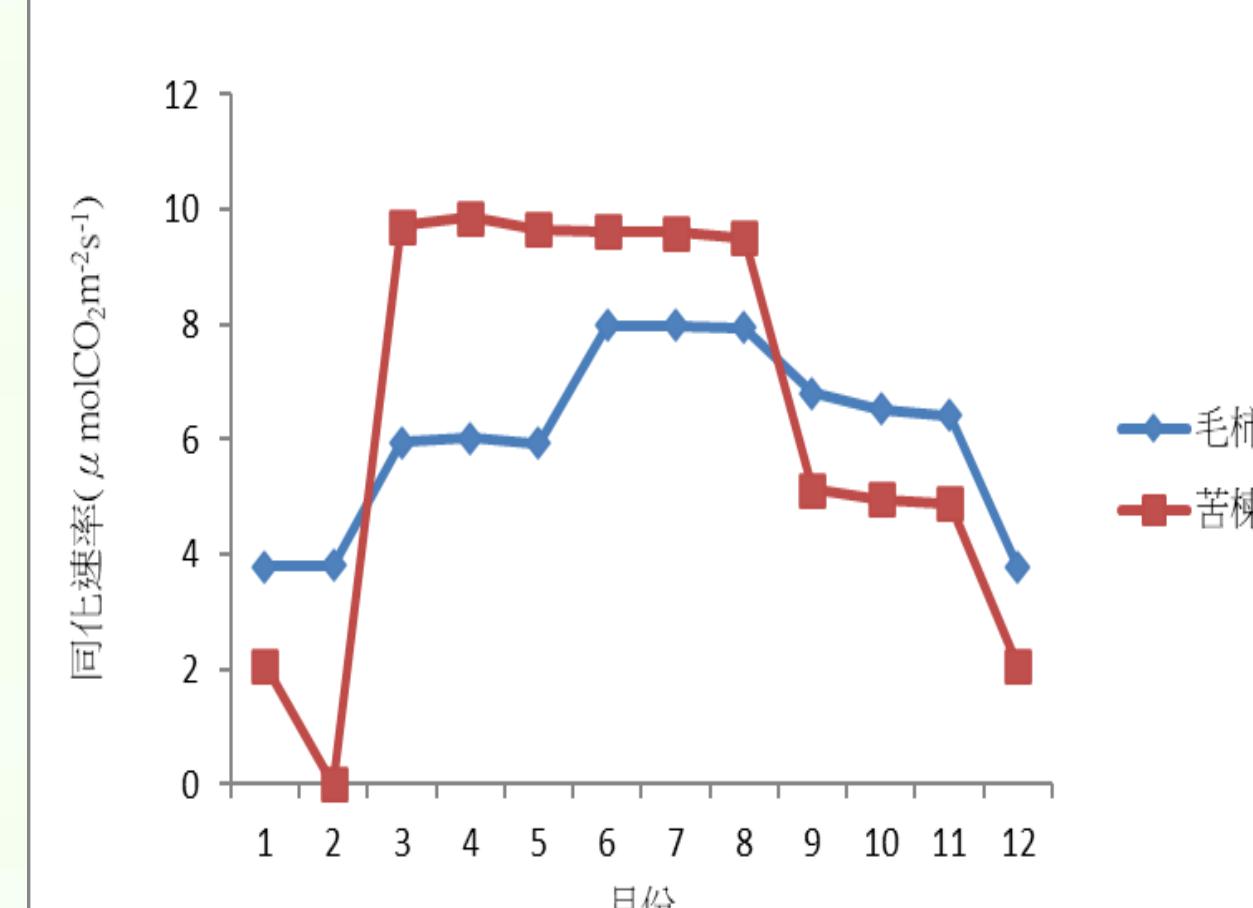
三、結合葉面積、光度之數據，估算毛柿、苦棟於不同季節之二氧化碳吸存量

(一)光度逐月資料

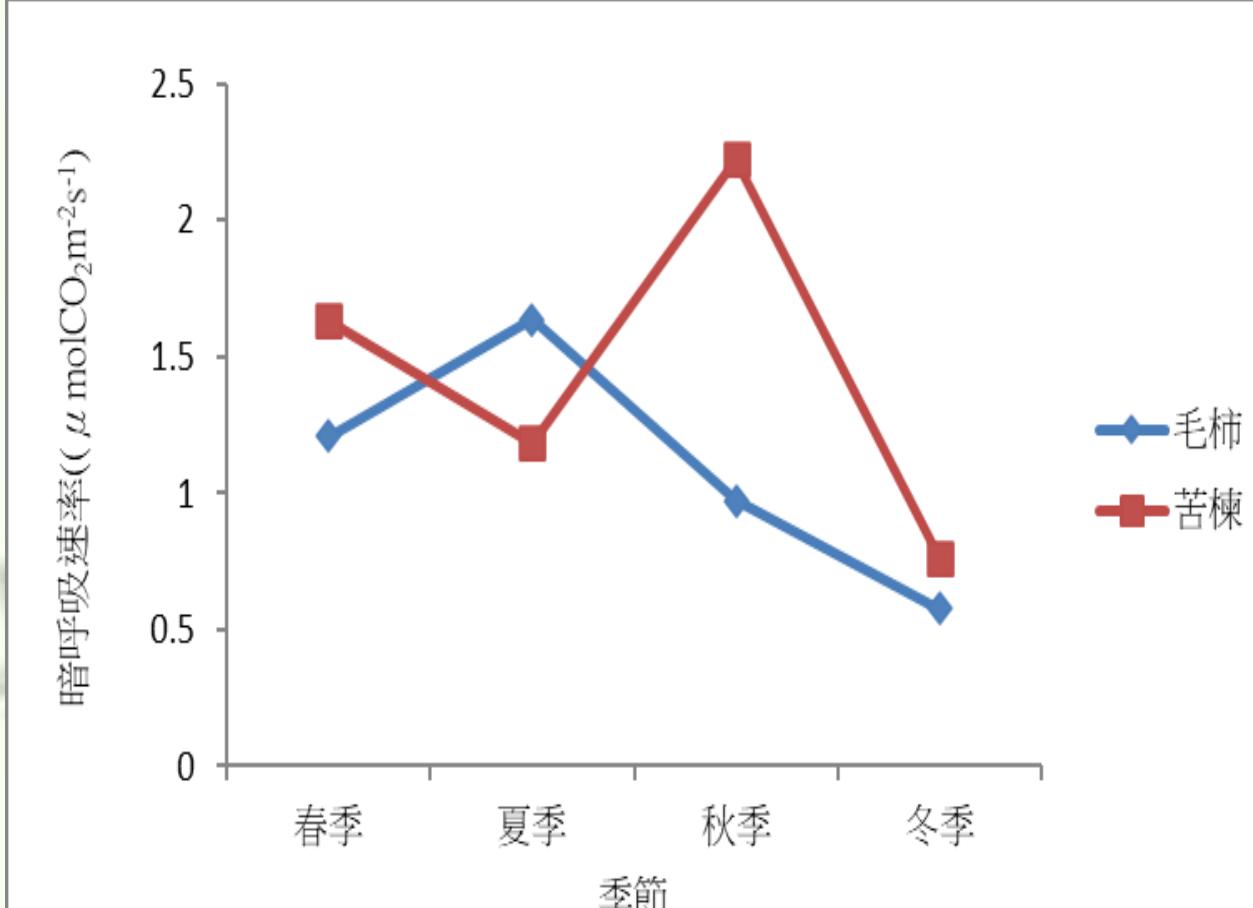
	全天空日射量(Wm⁻²)	日照時數(hr)	光度(μmolm⁻²s⁻¹)	夜時數(hr)
1	406.72	162.5	675.7407	581.5
2	378.86	118.7	696.8944	553.3
3	561.90	220.3	933.5629	523.7
4	576.95	207.9	990.5199	512.1
5	548.88	146.0	911.9310	598.0
6	607.43	205.0	1042.8490	515.0
7	624.80	235.1	1038.0680	508.9
8	608.01	218.8	1010.1720	525.2
9	517.89	186.5	889.1244	533.5
10	441.80	147.3	734.0240	596.7
11	394.52	173.3	677.3202	546.7
12	398.42	173.9	661.9508	570.1

表三、光度逐月資料(研究者整理自中央氣象署)

(二)各月份毛柿及苦棟的同化速率(A)、暗呼吸速率(Rd)



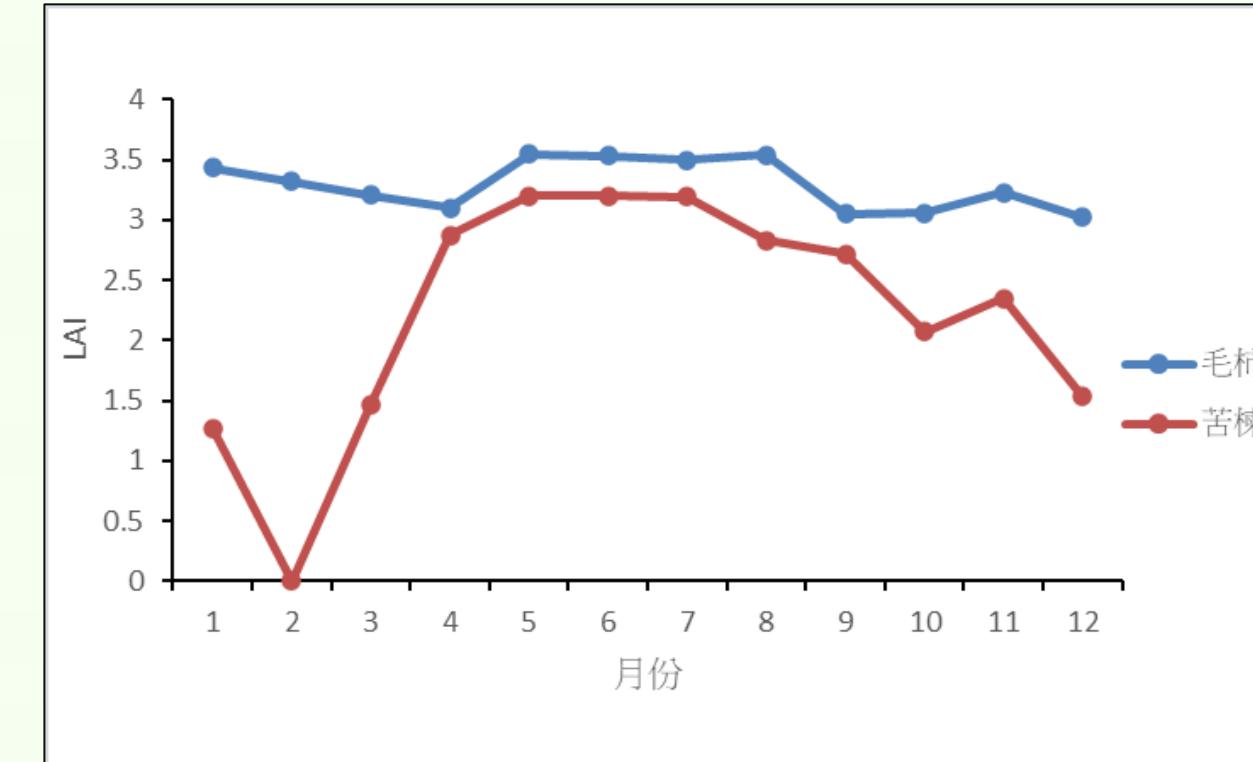
圖十三、毛柿、苦棟於不同月份之同化速率(研究者自行繪製)



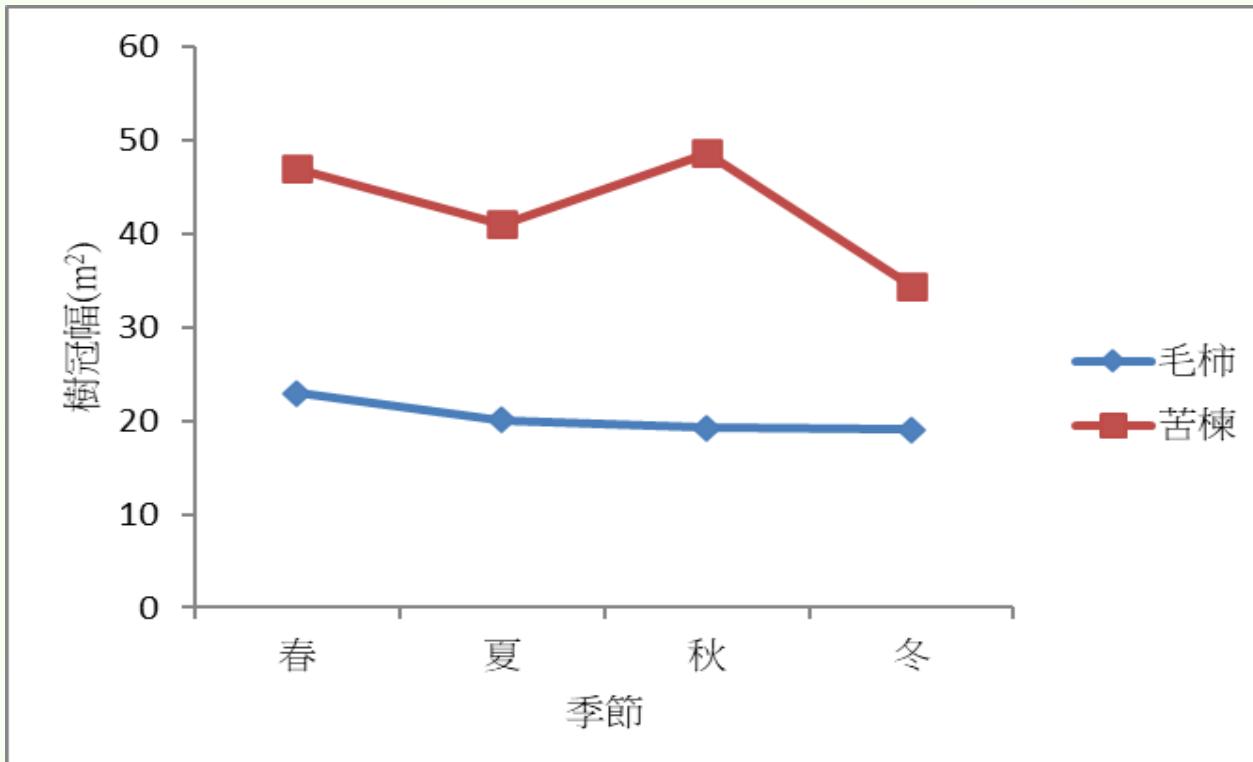
圖十四、毛柿、苦棟於不同月份之暗呼吸速率(研究者自行繪製)

由圖(十三)，毛柿的同化速率以6月最大，至12月前皆逐月下降；苦棟則以4月最高，至12月前亦逐月下降。綜觀二者，苦棟於夏秋及秋冬間之衰減情況較顯著，且在春、夏季時苦棟較高，秋、冬季時毛柿較高。由圖(十四)，毛柿的暗呼吸速率於夏、秋、冬逐漸下降；苦棟則以秋季最高，冬季最低。除了夏季，苦棟之暗呼吸速率皆較高。

(三)各月份毛柿及苦棟的LAI、樹冠幅、總葉面積



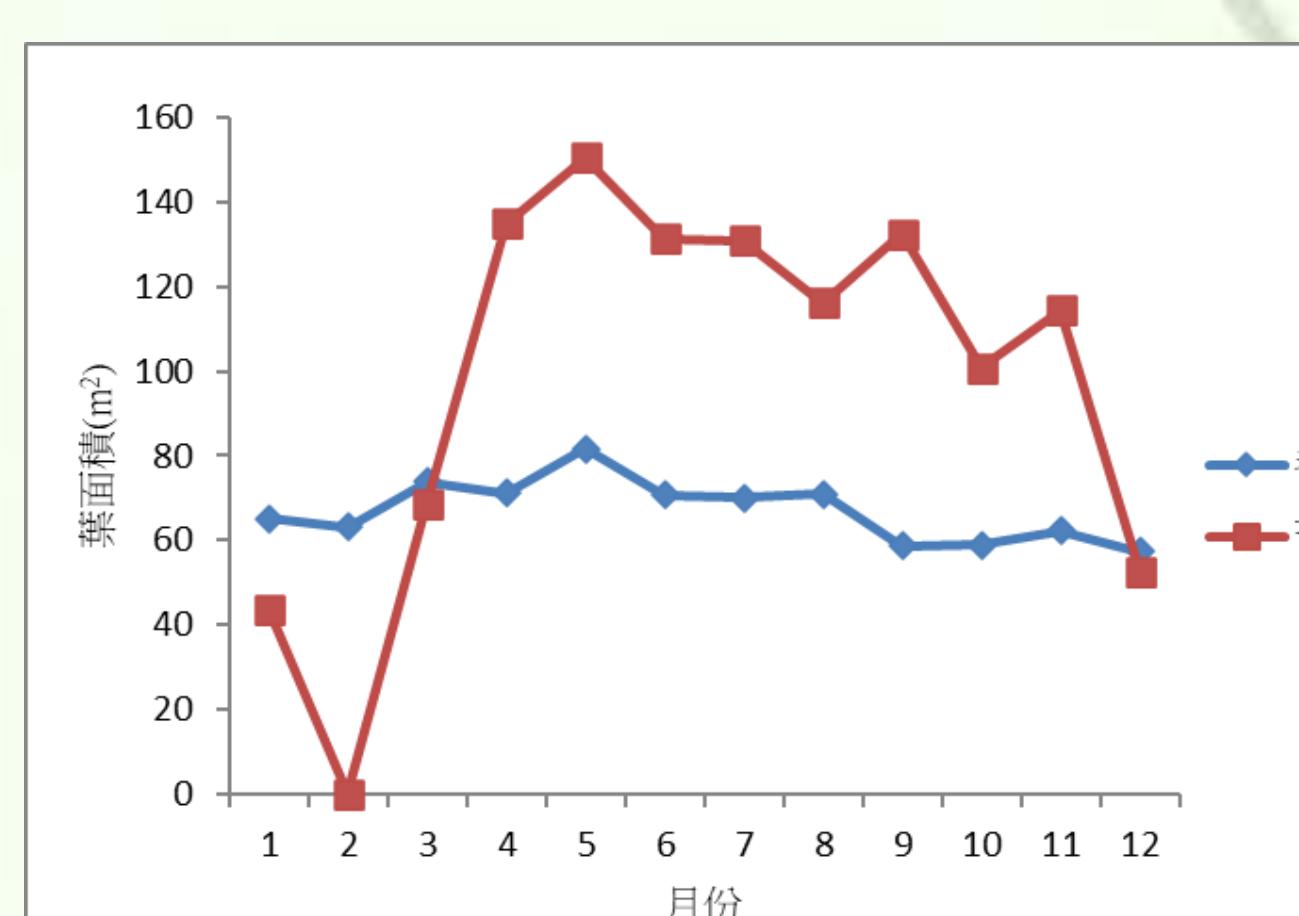
圖十五、毛柿、苦棟於不同月份之LAI (研究者自行繪製)



圖十六、毛柿、苦棟於不同月份之樹冠幅 (研究者自行繪製)

由圖(十五)，苦棟之LAI以7月最高，2月最低，自7月至隔年2月呈逐漸下降的趨勢；毛柿則以5月最高，12月之最低，趨勢較平穩，且各月份之LAI皆高於苦棟。

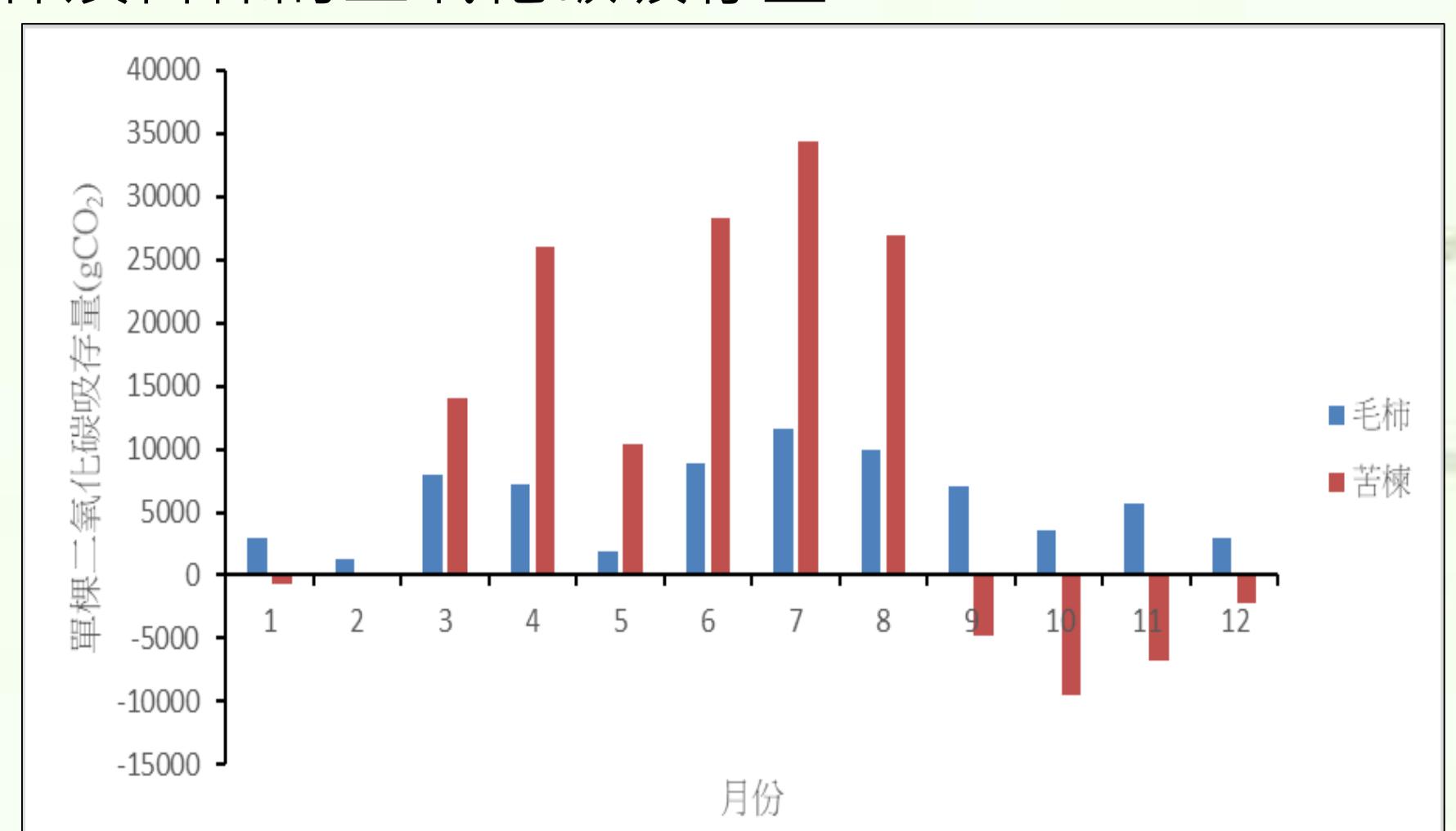
由圖(十六)，苦棟樹冠幅於秋季最高，入冬後下降了29%，毛柿則逐季下降12%、4%及1%，顯示毛柿的季變化較小。



圖十七、毛柿、苦棟於不同月份之葉面積(研究者自行繪製)

如圖(十七)，單株葉面積苦棟以5月最高，2月最低，5至12月份整體呈現逐月下降的趨勢；毛柿則以5月最高，12月最低，趨勢和LAI相仿，各月間總葉面積變動較苦棟小。此外，苦棟於4到11月間之總葉面積皆大於毛柿，12月出現扭轉，12月到3月以毛柿較大。

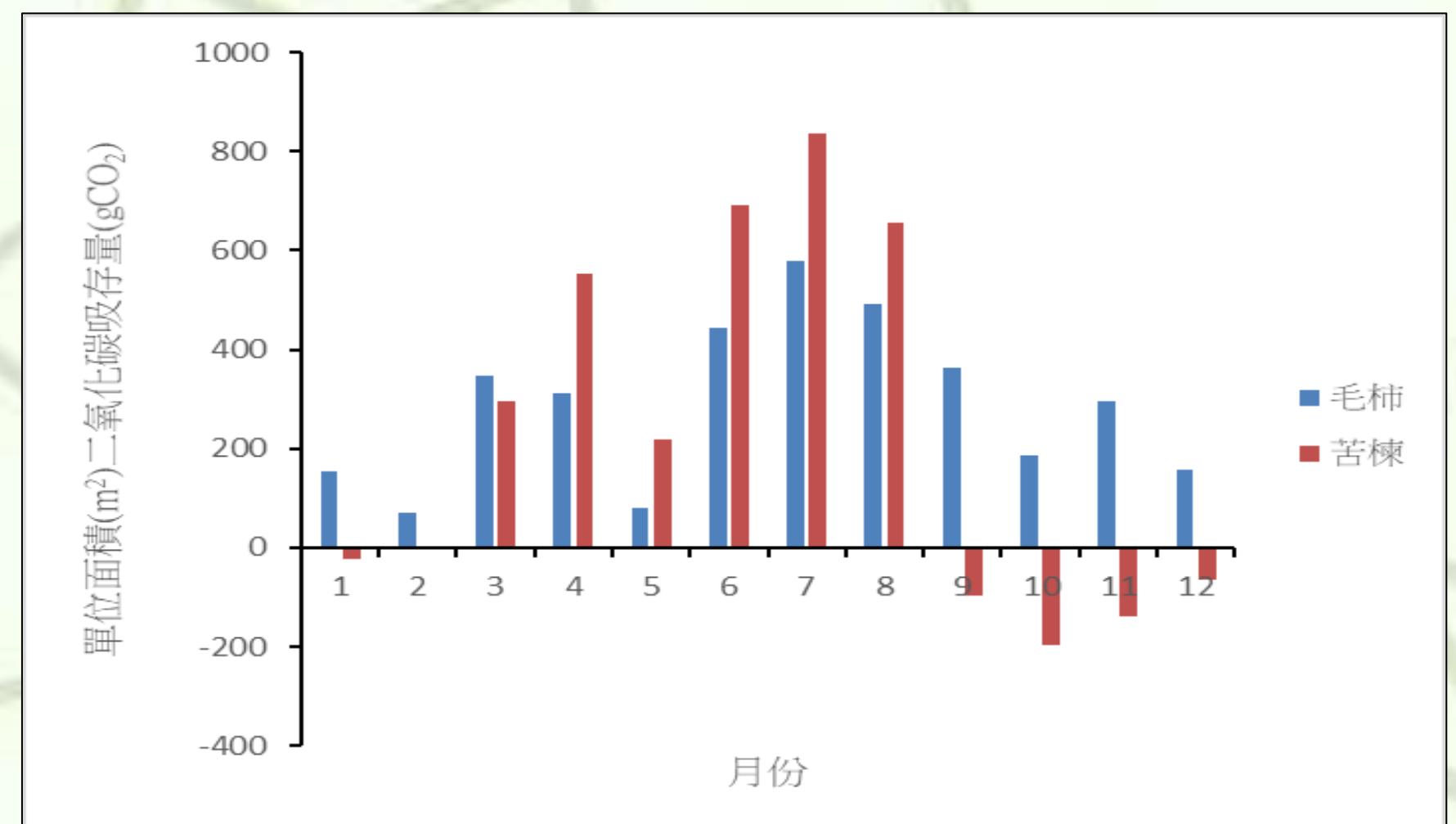
(四)各月份毛柿及苦棟的二氧化碳吸存量



圖十八、毛柿、苦棟於不同月份之平均每株碳吸存量 (研究者自行繪製)

毛柿及苦棟一年內的碳吸存量分別為70796.23和115846.78 gCO₂。毛柿與苦棟皆在夏季時達到碳吸存的高峰，且在春季時亦有頗高的碳吸存量，苦棟於此兩季的碳吸存量皆高出毛柿許多，但於9到1月為負值(即淨碳排放)。而毛柿於各季節的變化幅度則較苦棟小，全年均為淨碳吸存。

(五)各月份毛柿及苦棟單位面積之二氧化碳吸存量



圖十九、毛柿、苦棟於不同月份之單位面積(m²)碳吸存量 (研究者自行繪製)

毛柿和苦棟一年內單位面積(m²)的碳吸存量分別為3478.21和2733.91 gCO₂，兩種樹皆與單株碳吸存量的趨勢相仿，但苦棟於春夏季高出毛柿的數值比例較單株碳吸存量小，且毛柿於一年內的單位面積碳吸存量較苦棟高。

四、碳中和評估，比較樹木碳吸存量與校園排碳量

月份	1	2	3	4	5	6	
排碳量	54404	44670	39977	55727	80452	87725	
月份	7	8	9	10	11	12	總計
排碳量	82286	62905	63702	93270	74116	63030	802264

表四、學校於113年之各月之電力排碳量(單位：kgCO₂)
(研究者整理自學校電費單)

一年內的電力排碳量為802264 kgCO₂，一棵毛柿及苦棟一年的碳吸存量為70.796、115.847 kgCO₂，若欲達成發電上的碳中和，需種植11333棵毛柿或6926棵苦棟。

由此可知，欲使用林木的碳吸存效益來達成碳中和，需要大面積的人工造林，因此，除了增加植栽面積，更需減少碳排放，而校園可選擇適當植樹計畫來達成最大效益。

伍、討論

一、實驗方法之選定與採用

生長量法所測得的固碳量僅能反映出樹木自種植到現今所累積之總固碳量，由於樹齡未知，無法得知單位時間內的碳吸存效益，故本實驗結合光合作用法，以碳同化速率及葉面積來量化樹木的碳吸存效率，計算出每月之固碳量。

二、校園內固碳分布及優勢樹種分析

(一) 校園樹木之總固碳量分布情形

校園樹木之總固碳量集中少數樹種。榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀與印度橡膠樹、大王椰子的總固碳量占比高達65%，表示這些樹種在校園碳積存中至關重要。而剩餘樹種總固碳量占比僅為35%。此固碳量集中現象有兩項影響：

1. 生態單一化風險：固碳量高度依賴少數樹種，若因病害、極端氣候或其他環境變化而減少，碳吸存能力將受極大影響。
2. 長期固碳穩定性：部分生長快速之樹種如木賊葉木麻黃短期內固碳量高，但其壽命較短，長期固碳效果可能不如緩慢成長但壽命長的樹種，如菩提樹與大葉桃花心木。

三、毛柿及苦棟的碳吸存效率分析

(一) 光合作用生理特性分析

1. A_{max}、 α 、R_d分析

(1) 苦棟於夏季之A_{max}高於毛柿；而毛柿於夏秋冬季之 α 值高於苦棟，較適應低光環境。

(2) 毛柿在秋冬季之暗呼吸速率都低於毛柿，此亦可反映出毛柿在低光環境之能量消耗較少，苦棟則維持高能量消耗。

(3) 吻合郭耀綸(2013)對於耐陰樹種及陽性先驅樹種描述之差異性。

(4) 苦棟之A_{max}未達27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的標準，推測應為本校苦棟植於教學大樓旁，長期受光不足，及樹齡較年長。

2. A(碳同化速率)分析

(1) 苦棟之同化速率於秋、冬季下降趨勢較毛柿顯著，推論原因如下：苦棟為落葉樹，毛柿則為常綠樹。

(2) 秋冬季時苦棟(落葉樹)葉片老化使Rubisco等光合酶活性下降，降低CO₂固定效率。

(3) 毛柿(常綠樹)在冬季仍維持較高之同化速率，可維持較久之碳吸存效益。

3. 其他影響因素

(1) 根據Chen et al.(2018)，苦棟在屏東夏秋季A_{max}為11.57、5.89，低於本實驗數據約1-2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

(2) 表示碳吸存效率亦受地區環境與樹齡等影響。

(二) 葉面積與葉片分布對碳吸存的影響

1. 毛柿與苦棟LAI與樹冠幅比較

(1) 毛柿屬於高LAI及窄樹冠。

(2) 葉片較密集，易產生遮蔽效應。

(3) 此現象與毛柿較適應低光環境之特性相符。

2. 總葉面積變化

(1) 春季四月份起至夏季之苦棟葉面積為毛柿近兩倍。

(2) 秋冬交替後，苦棟葉面積急速下降，至翌年2月完全落葉歸零。

(3) 毛柿葉面積則全年穩定，符合常綠樹特性。

3. 山陀兒颱風事件觀察(113/9/26-10/4)

(1) 苦棟葉面積明顯下降。

(2) 毛柿葉面積無明顯變化，表示毛柿具備較強抗風能力，能在災害中維持碳吸存能力及作為防風林。

(三) 碳吸存量之季節變化與整體效益

1. 季節性碳吸存量變化

(1) 毛柿於秋冬季碳吸存量穩定，無負值出現。

(2) 苦棟於9至12月及1月碳吸存量出現負值，代表淨碳排放。

(3) 原因推測為苦棟暗呼吸速率高。秋冬日照時間縮短，光合作用時間減少。

2. 全年碳吸存總量比較

(1) 苦棟全年碳吸存總量高出毛柿45050.55g。

(2) 苦棟秋冬表現差，苦棟長期碳吸存效率仍較佳。

(3) 苦棟樣木在本校調查中亦呈現較高的固碳量。

3. 單株與單位面積(m²)碳吸存量及效益比較

(1) 單株：苦棟>毛柿。

(2) 單位面積：苦棟<毛柿(苦棟低744.30g)。

(3) 推論：若土地面積有限，種植毛柿較符合效益。

若土地面積充裕，種植苦棟可達更高總碳吸存量。

四、校園未來碳匯植樹計畫討論與推論

(一) 樹種選擇與多樣化種植

1. 本校的固碳量集中少數樹種，前四名的樹種皆屬於速生樹種，長期碳儲存穩定性較低。
2. 混合種植木材密度較高的長壽型樹種，如大葉桃花心木。
3. 避免生態單一化風險，本校可適度減少榕樹的種植比例，增加印度紫檀、菩提樹等單棵固碳量高的樹種，提升生態多樣性並分散固碳風險。
4. 優先選擇單棵固碳量高於0.21噸的多樣樹種。

(二) 種植區位

1. 由實驗結果及文獻可知，校園要達成碳中和實屬不易，但仍可透過種植區位的調整達成碳吸存效益的最大化。
2. 毛柿(陰性樹種)可密集種植於教學大樓間，於低光環境能維持較高的碳吸存量，亦適合種於受颱風災害等影響較大的區域，確保災害後維持碳吸存。
3. 苦棟(陽性樹種)可分散種植於操場、壘球場等良好受光區，於春、夏季達到更高的碳吸存潛力。

(三) 植栽管理優化

1. 光合作用速率可判斷樹木的健康狀況，校園可引進人工造林的經營模式。
2. 在樹木老熟及碳吸存效率急遽下降時，進行樹木更新。
3. 原本的木材可製成家具或紙等再生用途，以提升校園長期固碳效率。

陸、結論

一、校園樹木總固碳量

- (一) 本研究統計出校園中927棵樹木之總固碳量達197.36噸，相當於723.65噸二氧化碳當量。
- (二) 校園樹木固碳量集中於少數樹種，其中榕樹、木賊葉木麻黃、印度紫檀及印度橡膠樹等四種佔總固碳量的61%。
- (三) 樹木固碳量與其胸徑、樹高、木材密度及樹種特性呈密切相關。
- (四) 校園植樹應採取混合策略，兼顧生長速度快的樹種的短期碳吸存效益與長壽型樹種的長期碳儲存穩定性。
- (五) 優先選擇單株固碳量高於0.21噸/棵的樹種，提升生物多樣性並分散風險。維持長期的碳吸存效率。
- (六) 木材收穫後製成木製品，並在原地重新植樹造林，維持長期的碳吸存效率，實現校園碳匯永續發展。

二、毛柿及苦棟的碳吸存效率

- (一) 本研究建立毛柿及苦棟於四季的光合作用曲線，比較生理數值，得出苦棟為陽性樹種，毛柿為耐陰樹種，且毛柿較適應低光環境。
- (二) 毛柿在冬季維持較苦棟高之同化速率，有較久之碳吸存效益。在暗呼吸速率方面，兩者於秋冬皆下降，且苦棟下降較多。
- (三) 毛柿相對於苦棟屬於高LAI但窄樹冠的樹種，其葉片較密集，增加了遮蔽效應；毛柿具有強抗風能力，當遭遇災害時也能維持碳吸存能力。
- (四) 苦棟因氣候災害及生理特性之因素，於秋、冬季的碳吸存效率不如毛柿。
- (五) 單株毛柿一年碳吸存量為70.796 kgCO₂，苦棟115.847 kgCO₂，兩者均於春、夏季有較多的碳吸存量；校園欲達成電力碳中和，需種植11333棵毛柿或6926棵苦棟。
- (六) 單株毛柿一年單位面積碳吸存量為3478.21 gCO₂/m²，苦棟為2733.91 gCO₂/m²故。若土地有限，則種植毛柿為較佳選擇，反之種植苦棟有較好的碳吸存效益。
- (七) 毛柿(陰性樹種)可密集種植於教學大樓間，或受災影響大的區域，確保災害後維持碳吸存，苦棟(陽性樹種)可分散種植於良好受光區，達到碳吸存效益的最大化。

未來展望

一、以兩年或以上的時間為普查的基數，進行多次生長量法的調查及量測，比較單位時間內固碳量的變化，可計算出校園樹木之總固碳速率；此外光合作用法可應用至全校樹種。

二、未來生長量法可採光達(LiDAR)技術，掃描每個樣木個體之形狀及體積，得到更準確之立木材積與生物量估算。

三、本研究目前聚焦於校園「綠碳」(樹木)的固碳能力，然而，土壤中的「黃碳」也是陸域生態系中固碳能力之要角。未來可利用土壤採樣及分析等技術，量測校園中土壤之有機碳含量，進而計算出固碳量，以更精確的評估校園固碳力，並搭配綠碳之研究結果，推論出更全面且有效率之碳中和策略。

四、未來可進行更詳細之碳盤查，統計人員交通運輸，廢棄物清運，及生物(含人類)呼吸等排碳來源，了解校園內碳排放主要來源，制定減排策略，完整並精確評估校園碳中和之實際情形。

柒、參考文獻資料及其他

1. 中央氣象署(2024-2025)。縣市測站觀測資料。交通部中央氣象署。<https://reurl.cc/2KVdQ4>
2. 教育部(2024)。校園樹木地圖。校園樹木資訊平台。<https://edutreemap.moe.edu.tw/trees/#/Map>
3. 吳科增(2022)。南華大學森林固碳量資料庫建立之研究。南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程。
(其餘參考文獻詳見說明書)