

大安森林公園樹木碳儲存及碳吸存評估計畫期末報告

邱祈榮

臺灣大學森林環境暨資源學系

2022/12/30

2022 年林郁庭碩士論文「都市樹木之固碳能力推估－以台北市大安森林公園為例」受本計畫資助執行完畢，本報告節錄自該論文，特此說明。

摘要

氣候變遷與全球暖化已成為國際間首要關注之重大議題，如何有效減排為全球共同面臨之挑戰。都市樹木於都市地區之二氧化碳減量扮演重要角色，然而其固碳能力尚未明瞭。本研究以臺北市大安森林公園為例，建立樹木生長推估模式，並推估都市樹木之碳儲存、碳吸存量。本研究建立樹木連年生長率迴歸式，其 R^2 值大於 0.7，可有效應用於樹木未來生長預測，若輔以定期複查，可進一步建立校正迴歸式，提高預測之有效性。2019 年大安森林公園樹木之碳儲存密度介於 39.49 至 65.84 ton C/ ha，總碳儲存量則界於 1024.07 至 1707.30 ton C。2019 至 2021 年大安森林公園樹木之年平均碳吸存密度界於 1.16 至 2.55 ton C/ ha/ year，年平均總碳吸存量 30.13 至 66.15 ton C/ year，換算為一年之二氧化碳吸存量則介於 110.49 至 242.55 ton CO₂e/ year。使用不同之推估公式及係數對於推估結果之影響甚大，未來進行都市樹木碳儲存與碳吸存量推估時，應審慎選擇推估方法與係數，以提升推估準確性。未來仍需進行更長期之生長監測，以及建立臺灣在地都市樹種資料，以期對於都市樹木固碳能力有更完善之推估。

關鍵字： 都市樹木、碳儲存、碳吸存

壹、前言

因應淨零排放議題的興起，做為負碳重要工具的樹木，自然成為眾所矚目的焦點，透過造林來增加森林面積或加強森林經營來提高單位面積碳密度，都是增加森林碳匯能力的重要手段。然而，在森林碳匯資訊的掌握方面，最重要的在於森林碳匯的估算，透過符合 MRV(Measurement, Reporting, and Verification, MRV)機制，估算出可以供比較的碳匯量，方能掌握造林或加強森林經營的碳成果效益。

本計畫目的在於運用大安森林公園以往樹木普查資訊及樹木生長監測成果，配適出大安森林公園生長的預測模式，並配合實地檢核探究生長預測模式的適切性。同時依據樹木調查成果估算大安森林公園樹木總碳儲存量，並結合生長預測模式估算每年碳吸存量，以瞭解大安森林公園樹木碳表現。

貳、材料與方法

一、研究地點與材料

以台北市大安森林公園為研究地區，該公園位於臺北市大安區，於 1994 年 3 月 29 日正式對外開放，四周由新生南路、信義路、復興南路及和平東路環繞，面積約 26 公頃，由臺北市政府工務局公園路燈工程管理處負責管理與維護。

大安森林公園曾於 2019 年完成每木調查(調查時間 2019/1-2019/3)，結果顯示園區內樹種涵蓋 49 科、95 屬、146 種之木本植物，共計有 6,015 株樹木，具有相當之樹種豐富度，其中亦包含受威脅樹種與受保護樹木等珍貴資源。株數排名前十之樹種占全部樹木之 60.1%，共計 3,611 株。株數達 100 株以上樹種，代表其於園區為具數量優勢之族群，共計 3,859 株，占全區 64.2%。

2021 年 1 月至 3 月對於 2019 年普查樹木進行複查，結果顯示 2019-2021 兩次調查僅可比對出 4,346 株林木前後調查差異，可做為推算生長量之用。2022 年 5 月針對 300 株樹木進行複查，用以檢核生長預測模式之有效性。

二、研究方法

本研究之研究流程共分為三大部分：資料蒐集、生物量及碳儲存量推估與碳吸存能力推估（圖 1）：

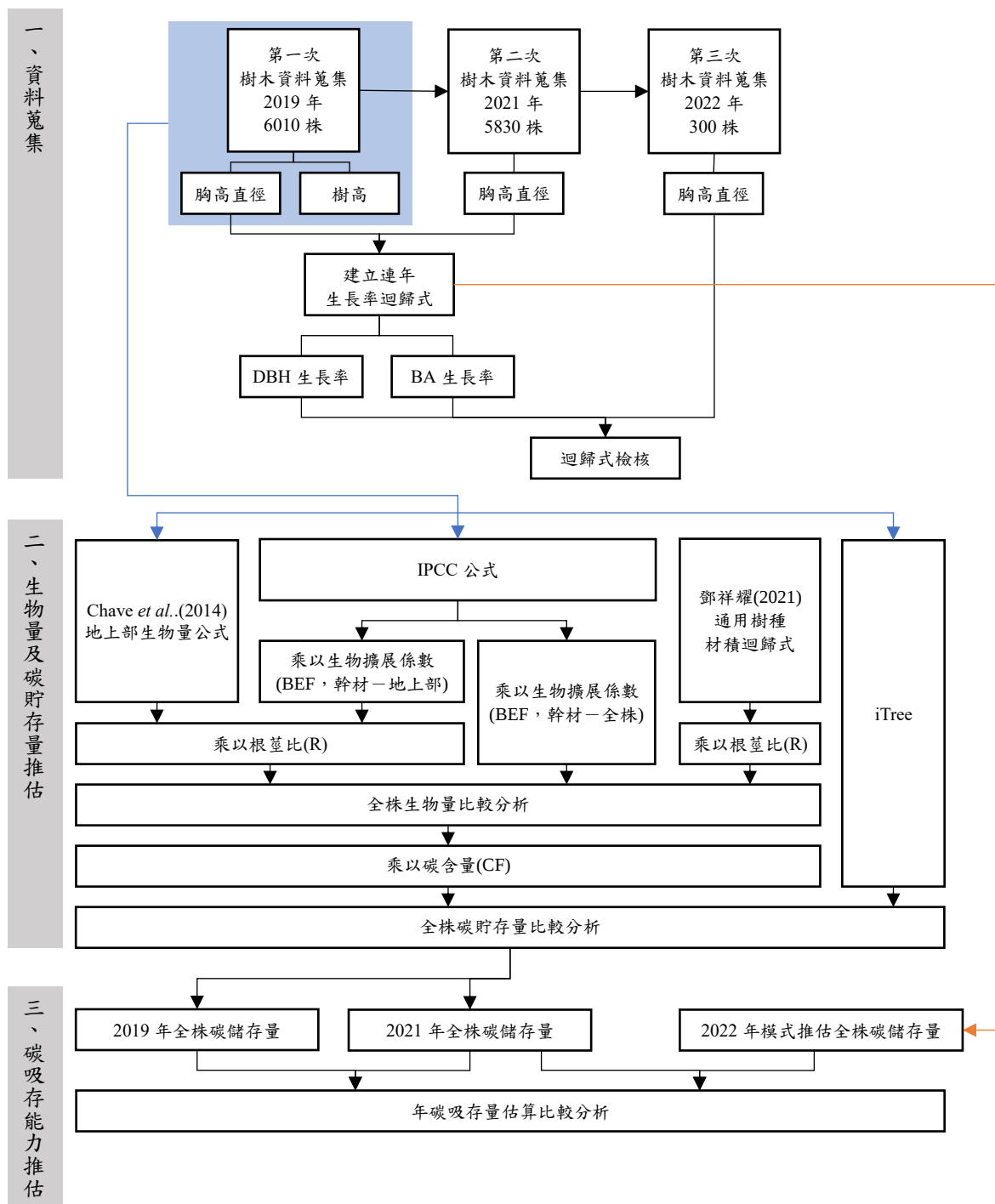


圖 1 研究流程圖

(一) 基本資料建立及生物量測定

本研究之調查共計三次。第一次調查於 2019 年一月至四月間進行樹木基本資料建立及生物量測定，基本資料項目包含：編號、樹種、座標位置，生物量測定項目包含：胸高直徑、樹高。第二次調查於 2021 年一月至四月測定所有樹木之胸高直徑，作為胸徑生長率計算之依據。第三次調查於 2022 年五月進行，並分為胸徑及樹高複查兩部分，胸徑部分抽查 300 株樹木，作為胸徑生長率有效性之檢測依據；抽查之樹木選自 2019 年大安森林公園中，扣除榕屬及竹類，數量前十名之樹種，包含：黑板樹、茄苳 (*Bischofia javanica*)、阿勃勒 (*Cassia fistula*)、楓香、水黃皮、樟樹、印度紫檀 (*Pterocarpus indicus*)、臺灣欒樹 (*Koelreuteria elegans*)、苦楝 (*Melia azedarach*)、大王椰子 (*Roystonea regia*)，每個樹種依據其胸徑分布，選取 30 株進行複查，共計 300 株。樹高部分自胸徑複查之 300 株樹木中，依據其樹高分布，共選取 30 株進行複查，用以檢視樹高變化情形。

(二) 生長率計算

利用生長率關係式可用來預測大安森林公園林木，未來短期內各林木連年生長量的預測，或者做為未來生長監測的比較基線。以下分為胸徑生長率及胸徑斷面積生長率兩個類別說明：

1. 胸徑生長率

胸徑生長率以 2019 年各樹種平均胸徑為分母基準，計算 2019 至 2021 年胸徑連年生長量當分子，可以得出 2019 至 2021 年胸徑連年生長率 (式 1)。

$$\begin{aligned} & \text{胸徑連年生長率 (\%)} \\ &= \frac{(2019 \text{ 至 } 2021 \text{ 年各樹種平均胸徑生長量} \div 2)}{\div 2019 \text{ 年各樹種平均胸徑}} \\ &= \frac{2019 \text{ 至 } 2021 \text{ 年各樹種平均胸徑連年生長量}}{2019 \text{ 年各樹種平均胸徑}} \end{aligned} \quad (\text{式 1})$$

2. 胸徑斷面積生長率

在林木材積估算方面，主要以胸徑斷面積乘以樹高為基準，因此對於評估材積生長，運用胸徑連年生長率不如運用斷面積年生長率，故將胸徑平方除以 4 乘以 π 轉化成胸徑斷面積，計算其 2019 年各樹種平均斷面積為分母，2019 至 2021 年斷面積連年生長量當分子，計算出 2019 至 2021 年斷面積連年生長率（式 2）。

$$\begin{aligned} & \text{胸徑斷面積年生長率 (\%)} \\ &= (2019 \text{ 至 } 2021 \text{ 年各樹種平均胸徑斷面積生長量} \div 2) \\ & \quad \div 2019 \text{ 年各樹種平均胸徑斷面積} \quad \quad \quad (\text{式 } 2) \\ &= \frac{2019 \text{ 至 } 2021 \text{ 年各樹種平均胸徑斷面積連年生長量}}{2019 \text{ 年各樹種平均胸徑斷面積}} \end{aligned}$$

(三) 碳儲存及碳吸存能力推估

依據 IPCC (2003)，林木之碳吸存量可經由碳儲存量變化法計算，取得兩個時間點之間各自之碳儲存量，相減後得出碳儲存量變化量，並除以時間變化量，即可得出年平均碳吸存量（式 3）。

$$\Delta C = \frac{(C_{t2} - C_{t1})}{t_2 - t_1} \quad (\text{式 } 3)$$

ΔC = 碳儲存量變化 (ton C/ year)

C_{t1} 、 C_{t2} = 時間於 t_1 年及 t_2 年之碳儲存量 (ton C)

t_1 、 t_2 = 時間於 t_1 年及 t_2 年

單株林木碳儲存量推估如（式 4 所示，將幹材材積乘以木材基礎密度，得出幹材生物量，接著乘以地上部生物量擴展係數，得出地上部生物量，然後乘以根莖比，得出全株生物量，最後乘上碳含量轉換係數，得出全株碳儲存量。而地上部生物量部分，除了使用材積式配合地上部生物量擴展係數推估，亦可使用地上部生物量推估公式直接推估。

$$C = \left[V_{\text{幹材}} \times D \times \text{BEF}_{\text{幹材-地上部}} \right] \times (1 + R) \times CF$$

$$= \text{AGB} \times (1 + R) \times CF \quad (\text{式 4})$$

C = 單株林木碳儲存量(kg)

D = 木材基礎密度(ton/ m³)

$V_{\text{幹材}}$ = 幹材材積(m³)

$\text{BEF}_{\text{幹材-地上部}}$ = 地上部生物量擴展係數

R = 根莖比

CF = 碳含量轉換係數(%)

AGB = 地上部生物量(kg)

以下將分別說明各項係數數值之選擇。

1. 材積推估

鑑於大安森林公園樹木以闊葉樹為主，本研究採用以下兩種材積式進行材積之計算及比較，分別為林木幹材材積通式（式 5）及鄧翔耀（2021）提出之大安森林公園通用樹種地上部材積迴歸式（式 6）：

$$V_{\text{幹材}} (\text{m}^3) = \left(\frac{\text{DBH}}{100} \div 2 \right)^2 \times \pi \times H \times f \quad (\text{式 5})$$

$$V_{\text{地上部}} (\text{m}^3) = 0.001 \times (\text{DBH}^2 \times H)^{0.7384^2} \quad (\text{式 6})$$

DBH = 胸高直徑(cm)

H = 樹高(m)

f = 形數

根據林務局所建議，一般闊葉樹均採用 0.45 為胸高形數。鄧翔耀（2021）曾針對大安森林公園 23 株樹木進行光達掃描，並建立主幹胸高形數及地上部全材胸高形數分別為 0.3997 及 0.8889，與林務局所建議之數值兩者存在差異，故本研究將分別採用以上數值進行計算，並進行比較分析。

2. 材積與生物量之轉換係數

木材基礎密度 (D) 一般採用 0.5 (IPCC, 1997)。馬子斌等人 (1992) 收錄了近百種臺灣木材性質，包含比重。林裕仁等人 (2002) 針對臺灣地區主要用材進行比重測定，闊葉樹材之絕乾比重介於 0.37-0.77 間。其中，茄苳、樟樹、光臘樹、苦楝、印度紫檀及大葉桃花心木之絕乾比重分別為 0.65、0.37、0.73、0.54、0.58 及 0.50。

3. 幹材材積與全株材積（幹、枝、根、葉）之轉換係數

樹木行光合作用吸收二氧化碳，也經呼吸作用排出過多的二氧化碳，兩者差值即經轉化，以有機碳的形式儲存於植物體內，包含幹、枝、葉、根等部分，然而一般在推估林木蓄積量時主要為幹材的部分，因此需透過轉換係數將幹材材積轉換為全株材積，以利後續推估全株固碳量，而轉換係數主要可分為兩種：一為透過地上部生物量擴展係數 (Biomass Expansion Factor, BEF) 將幹材材積轉換為地上部材積 (含幹、枝、葉)，再利用根莖比 (R) 將地上部材積轉換為全株材積 (Eggleston *et al.*, 2006)；二則是直接使用幹材材積與全株材積轉換係數，可直接由幹材材積換算得出全株材積 (林俊成等人, 2002)。一般全株材積 (含幹、枝、根、葉等) 約為幹材材積之 1.3-2.0 倍，而轉換係數亦隨著樹種、林型、林齡而有所差異 (Brown *et al.*, 1986; Cruickshank *et al.*, 2000; Mohren *et al.*, 1999; Sedjo, 1989; Winjum *et al.*, 1998; 林裕仁等人, 2002)。IPCC (2006) 所建議人工闊葉林之地上部生物量擴展係數與根莖比分別為 1.4 與 0.24。而目前國內仍較缺乏本土闊葉樹種轉換系樹之相關研究，林國銓 (1980) 對山黃麻 (*Trema orientalis*) 生物量之研究結果，其幹材材積與全株材積之轉換係數為 2.14，林俊成等人 (2002) 則將 2.14 作為該研究中闊葉樹種之轉換係數。鄧翔耀 (2021) 針對大安森林公園 23 株樹木進行光達掃描，以主幹材積及枝條材積建立之地上部材積擴展係數為 2.30 ± 0.64 。本研究將採用以上各種不同數值進行計算及比較分析。

4. 地上部生物量推估公式

除了利用材積式推估，本研究亦採用 Chave *et al.* (2014) 提出之地上部生物量 (AGB) 估算法進行計算 (式 7)：

$$AGB(kg) = 0.0673 \times (D \times DBH^2 \times H)^{0.976} \quad (\text{式 } 7)$$

後續將加以比較材積法與生物量法推估結果之差異。

5. 碳含量轉換係數 (CF)

碳含量轉換係數以 0.5 為最常採用數值 (Brown *et al.*, 1986; Dewar & Cannell, 1992; Hall & Uhlig, 1991; Houghton, 1996; Kinerson *et al.*, 1977; Marland & Schlamadinger, 1997; Niskanen *et al.*, 1996)。林裕仁等人 (2002) 針對臺灣地區主要用材進行碳含量測定，闊葉樹之碳含量介於 45.69-47.66% 之間，平均值為 46.91%，雖略低於木材碳含量為 50% 之理論值，但差異不大。其中，茄苳、樟樹、光臘樹、苦楝、印度紫檀及大葉桃花心木之碳含量分別為 46.78%、47.00%、46.83%、46.63%、47.02% 及 47.26%。IPCC (2006) 建議人工闊葉林之碳含量數值為 46.91%。

6. 二氧化碳與轉換係數

林木之二氧化碳吸存當量，可經由林木碳吸存量乘以二氧化碳及碳的分子量比 (44/12) 得出。

為了解不同推估方法之差異，本研究使用四種方法進行大安森林公園兩年度個別之碳儲存量估算並加以比較分析，四種方法分別為：方法 1、使用 Chave 等人 (2014) 提出之地上部生物量估算公式推估生物量，並參考 IPCC (2006) 之林木碳儲量公式，以根莖比、木材密度及碳含量加以換算得出碳儲存量；方法 2、使用林務局 (1997) 林木材積通式，並參考 IPCC (2006) 之林木碳儲量公式，以地上部生物量擴展係數、根莖比、木材密度及碳含量加以換算得出碳儲存量，其中，擴展係數及形數分別帶入不同數值以比較其差異；方法 3、使用鄧翔耀 (2021) 所建立大安森林公園通用樹種之材積回歸式推估樹木地上部材積，並參考 IPCC (2006) 之林木碳儲量公式，以根莖比、木材密度及碳含量加以換算得出碳儲存量；方法 4、使用都市林效益評估軟體—i-Tree Eco Version 6.0.25 之內建模組進行碳儲存量之推估。i-Tree 為美國農業部林務署所開發之模式軟體，透過輸入樹木之基本參數 (如：胸高直徑、樹高、樹冠幅、枝下高等)，結合該地區之氣象資料 (如：氣溫、雨量

等)，並將資料回傳至美國林務署由系統資料庫進行運算，即可快速獲得樹木碳儲存量、碳吸存量等效益估算結果。各方法詳細之計算內容如下（表 1）。

表 1 碳儲存量推估之四種方法

方法 1	地上部生物量	$AGB = 0.0673 \times (D \times DBH^2 \times H)^{0.976}$
	單株林木碳儲存量	$C = AGB \times (1 + R) \times D \times CF$
方法 2	幹材材積	$V_{\text{幹材}} = \left(\frac{DBH}{100} \div 2 \right)^2 \times \pi \times H \times f$ $= BA \times H \times f$
	單株林木碳儲存量	$C = V_{\text{幹材}} \times BEF_{\text{幹材-地上部}} \times (1 + R) \times D \times CF$
方法 3	地上部材積	$V = 0.001 \times (DBH^2 \times H)^{0.7384}$
	單株林木碳儲存量	$C = V_{\text{地上部}} \times (1 + R) \times D \times CF$
方法 4	iTree	

參、結果與討論

一、樹木基本資料

根據本研究於 2019 年對大安森林公園樹木進行調查，園區內樹木及周圍行道樹共計 6010 株。樹種共計 146 種，多以闊葉樹種為主，數量最多的前 10 個樹種依序為垂榕（*Ficus benjamina*，621 株，10.33%）、黑板樹（600 株，9.98%）、正榕（*Ficus microcarpa*，489 株，8.14%）、茄苳（347 株，5.77%）、阿勃勒（343 株，5.71%）、楓香（327 株，5.44%）、水黃皮（242 株，4.03%）、樟樹（220 株，3.66%）、臺灣欒樹（208 株，3.46%）、印度紫檀（208 株，3.46%）。樹木胸徑多分布於 50 公分以下，佔總體之 90.03%，其中又以胸徑 20 至 30 公分之數量最多，共 1806 株，佔所有樹木之 30.05%。

二、連年生長率

（一）胸徑連年生長率

根據 2019 及 2021 年之調查，為排除測量誤差，本研究在計算生長率時，先將生長量大於 2 公分或小於 0 公分者予以排除，再將株數小於 5 的樹種排除，最後

納入生長率計算之樹木共 4215 株。以 2019 年各樹種平均胸徑為分母基準，計算 2019 至 2021 年胸徑連年生長量當分子，可以得出 2019 至 2021 年胸徑連年生長率，以 2019 年各樹種平均胸徑為 X 軸，2019 至 2021 年胸徑連年生長率為 Y 軸（圖 2）：

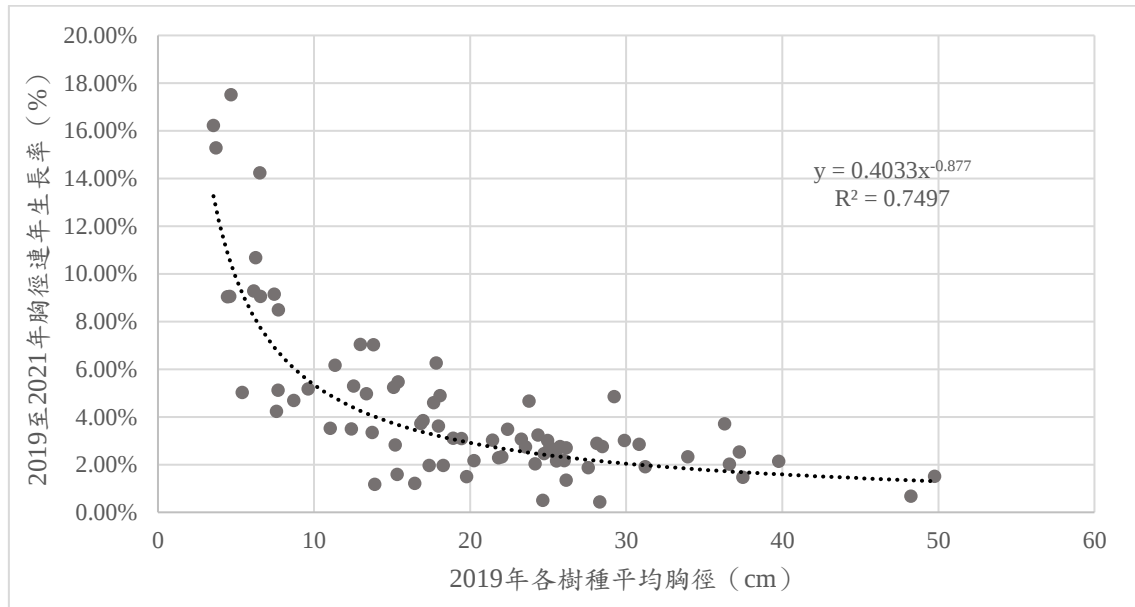


圖 2 2019 年各樹種平均胸徑與 2019-2021 年胸徑連年生長率關係圖

上圖可以發現兩者間呈現乘冪關係，透過關係式兩者 R^2 為 0.7497：

$$y = 0.4033 \times x^{-0.877} \quad (\text{式 } 8)$$

其中 x ：2019 年各樹種平均胸徑； y ：2019 至 2021 年胸徑連年生長率

利用本關係式將可用來預測大安森林公園林木，未來短期內各林木連年生長量的預測，或者做為未來生長監測的比較基線。針對前述排除生長率計算樹木，本研究亦採用本關係式之預測值作為其 2021 年胸徑資料，以利後續其他推估計算。

為檢核上述關係式的可用性，特於 2022 年初複查 300 株樹木，將 300 株複查樣木胸徑實際測量值與迴歸式預測值繪製成散布圖（圖 3），透過關係式兩者 R^2 為 0.9968：

$$y = 1.0016 x - 0.1819 \quad (\text{式 } 9)$$

其中 x ：迴歸式預測 2022DBH(cm)； y ：實測 2022DBH(cm)

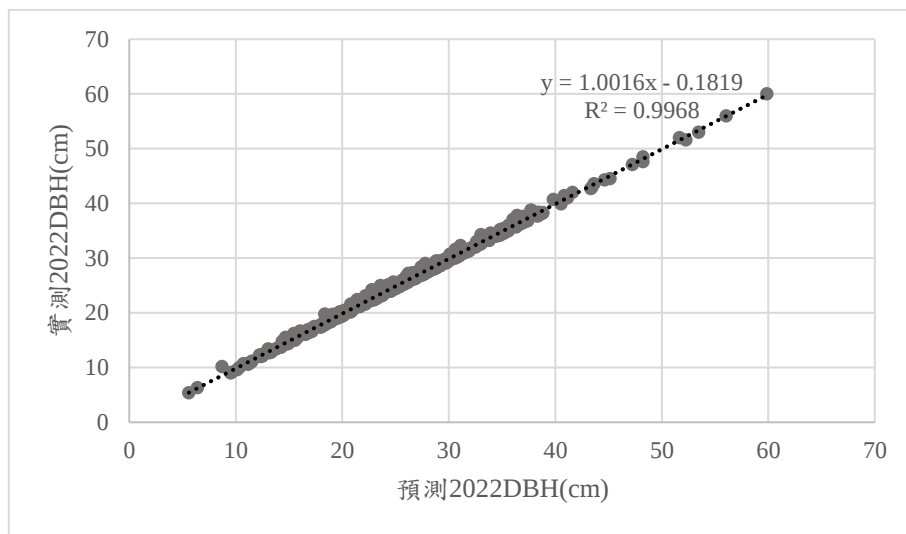


圖 3 300 株複查樣木胸徑實際測量值與迴歸式預測值關係圖

使用上述迴歸式加以校正原本迴歸式之預測值，並繪製 300 株複查樣木胸徑實際測量值與校正後迴歸式預測值繪製成散布圖，如圖 4，其斜率更接近 1，顯示經過校正後，胸徑迴歸式之預測效果更加，未來用於樹木胸徑生長預測也將更加精準。

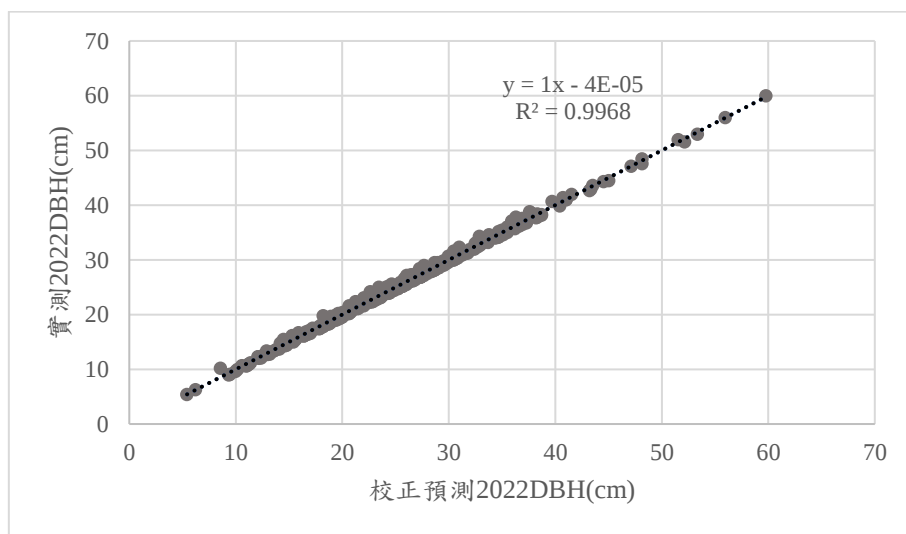


圖 4 300 株複查樣木胸徑實際測量值與校正後迴歸式預測值關係圖

(二) 樹高變化情形

本研究於 2022 年抽查 30 株樹木進行樹高複查，檢視其樹高變化情形，結果如表 1 所示。由於都市樹木之樹高，除測量產生之誤差外，還會受到其他人為擾動（如：修剪等），故本研究使用獨立樣本 T 檢定分析 2019 及 2022 年樹高是否有差

異。經計算後 t 統計值為 -0.586，雙尾顯著性 p 值為 0.560，大於 0.05，顯示抽查之 30 株樹木其 2019 年及 2022 年測量之樹高無顯著差異。於 2021 年末針對所有樹木測量樹高之情形下，本研究於推估 2021 年樹木碳儲存量時，將使用 2019 年樹高數值進行計算。

表 1 樹高複查表

編號	樹種	DBH(cm)			H(m)		
		2019	2022	變化量	2019	2022	變化量
20195716	樟樹	8.9	10.7	1.8	3.96	5.32	1.36
20193250	茄苳	26.2	27.1	0.9	4.56	9.79	5.23
20195615	茄苳	22.1	23.9	1.8	5.02	6.13	1.10
20195538	阿勃勒	16	16.7	0.7	5.47	7.84	2.38
20194869	茄苳	22.6	24.4	1.8	5.77	6.61	0.84
20193156	茄苳	25.8	28.6	2.8	5.93	8.67	2.74
20192270	樟樹	20.6	23.1	2.5	6.30	8.12	1.83
20193745	水黃皮	22.5	23.1	0.6	6.71	6.04	-0.67
20193324	印度紫檀	21.8	24.2	2.4	6.94	12.36	5.42
20194025	台灣欒樹	17.7	19.3	1.6	7.13	7.66	0.53
20193426	阿勃勒	16.2	17.5	1.3	7.30	7.99	0.69
20191062	阿勃勒	22	22.6	0.6	7.70	9.76	2.06
20191039	苦楝	24.1	24.8	0.7	8.10	8.30	0.20
20192760	印度紫檀	17.4	17.5	0.1	8.30	9.35	1.05
20193000	阿勃勒	18	19.5	1.5	8.64	9.04	0.40
20191016	樟樹	22.4	23.8	1.4	9.00	8.49	-0.51
20193327	苦楝	33.8	38.8	5.0	9.25	10.71	1.46
20191922	大王椰子	29.8	30	0.2	9.50	8.30	-1.21
20191927	大王椰子	28.8	29.2	0.4	9.60	7.56	-2.05
20191904	大王椰子	30.8	30.9	0.1	10.10	8.93	-1.17
20190396	楓香	24.4	26.5	2.1	10.40	10.92	0.51
20194759	黑板樹	32.4	36	3.6	10.60	12.60	2.00
20192723	印度紫檀	27.2	28	0.8	11.30	9.95	-1.35
20193734	黑板樹	37.3	37.7	0.4	11.94	12.39	0.45
20194227	水黃皮	19.4	19.6	0.2	12.50	11.14	-1.36
20190082	黑板樹	44.4	44.5	0.1	12.90	13.91	1.01
20191797	大王椰子	33.6	34.1	0.5	13.60	9.48	-4.12
20191485	大王椰子	28.2	28.6	0.4	14.50	10.21	-4.29
20195284	樟樹	45.5	47.1	1.6	15.67	13.64	-2.04
20190258	楓香	39.1	40.7	1.6	17.36	18.95	1.59
平均值		26.0	27.3	1.3	9.20	9.67	0.47
標準差		8.3	8.4	1.1	3.33	2.75	2.14

(三) 碳儲存及碳吸存能力推估（林分層級）

1. 不同方法之碳儲存量及碳吸存量推估結果比較

本研究採用四種方法推估大安森林公園 2019 至 2021 年兩年間之碳儲存量、碳儲存密度、年平均碳吸存量及年平均碳吸存密度，結果如表 2 所示：

表 2 大安森林公園碳儲存及碳吸存量推估結果

		方法 1	方法 2				方法 3	方法 4
		-	方法 2-1	方法 2-2	方法 2-3	方法 2-4	-	-
木材密度		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
生物量擴展係數	幹材－地上部	-	-	1.4 ¹	2.3 ²	-	-	-
	幹材－全株	-	2.14 ³	-	-	-	-	-
根莖比 (R)		0.24 ⁴	-	0.24 ³	0.24 ³	0.24 ³	0.24 ³	-
形數		-	0.45 ⁵	0.45 ⁴	0.3997 ⁶	0.8889 ⁷	-	-
含碳量		0.4691	0.4691 ⁸	0.4691 ⁷	0.4691 ⁷	0.4691 ⁷	0.4691 ⁷	-
2019 年	幹材材積(m ³)	-	2515.03	2515.03	2233.91	-	-	-
	地上部材積(m ³)	-	-	3521.05	5137.99	4968.03	5159.64	-
	全株材積(m ³)	-	5382.17	4366.10	6371.11	6160.36	6397.96	-
	地上部生物量(ton)	1905.29	-	1760.52	2569.00	2484.02	2579.82	-
	全株生物量(ton)	2362.56	2691.09	2183.05	3185.55	3080.18	3198.98	-
	碳儲存量(ton C)	1108.28	1262.39	1024.07	1494.34	1444.91	1500.64	1707.30
	碳儲存密度(ton C/ ha)	42.74	48.69	39.49	57.63	55.73	57.87	65.84
2021 年	幹材材積(m ³)	-	2663.05	2663.05	2365.38	-	-	-
	地上部材積(m ³)	-	-	3728.27	5440.37	5260.40	5427.73	-
	全株材積(m ³)	-	5698.92	4623.05	6746.06	6522.90	6730.38	-
	地上部生物量(ton)	2025.29	-	1864.13	2720.18	2630.20	2713.86	-
	全株生物量(ton)	2511.35	2849.46	2311.52	3373.03	3261.45	3365.19	-
	碳儲存量(ton C)	1178.08	1336.68	1084.34	1582.29	1529.95	1578.61	1839.60
	碳儲存密度(ton C/ ha)	45.43	51.55	41.82	61.02	59.00	60.88	70.95
2019-2021 年	年平均碳吸存量(ton C/ year)	34.90	37.15	30.13	43.97	42.52	38.99	66.15
	年平均碳吸存密度(ton C/ ha/ year)	1.35	1.43	1.16	1.70	1.64	1.50	2.55
	年平均二氧化碳吸存量(ton CO ₂ e/ year)	127.97	136.20	110.49	161.23	155.90	142.95	242.55
	年平均二氧化碳吸存密度(ton CO ₂ e/ ha/ year)	4.94	5.25	4.26	6.22	6.01	5.51	9.35

以下將分為幾個部分依序進行討論：

(1) 幹材材積比較

¹ IPCC (2006) 人工闊葉林地上部擴展係數數值。

² 鄧翔耀 (2021) 地上部擴展係數(不含葉部)為 2.30±0.64。

³ 林國銓 (1980) 對山黃麻生物量之研究結果，其幹材材積與全株材積之轉換係數為 2.14。

⁴ IPCC (2006) 人工闊葉林根莖比數值。

⁵ 一般通用形數。

⁶ 鄧翔耀 (2021) 主幹胸高形數。

⁷ 鄧翔耀 (2021) 地上部胸高形數。

⁸ 林裕仁 et al. (2002) 臺灣地區闊葉樹之碳含量平均值、IPCC (2006) 建議人工闊葉林之碳含量數值皆為 0.4691。

納入幹材材積比較的有方法 2-1、2-2 及 2-3。以上三種方法皆使用一般通用之材積式（式 5）計算幹材材積，其中採用不同形數，造成了推估結果之差異，方法 2-1 及 2-2 同樣使用 0.45 為形數，所得 2019 年大安森林公園樹木之幹材材積為 2515.03 m³，而方法 2-3 採用數值為 0.3997，所得推估結果為 2,233.91 m³。

(2) 地上部材積比較

納入地上部材積比較的有方法 2-2、2-3、2-4 及方法 3。以上方法推估 2019 年大安森林公園樹木之地上部材積由大至小依序為：方法 3（5159.64 m³）>方法 2-3（5137.99 m³）>方法 2-4（4968.03 m³）>方法 2-2（3521.05 m³）。方法 2-2 採用一般通用形數 0.45 及 IPCC 所建議之人工闊葉林地上部生物量擴展係數數值 1.4，其推估結果與方法 2-3 相差約 31.5%，相較之下，此法可能低估了都市樹木之地上部材積。方法 2-3、2-4 及方法 3 之推估結果相近（相差小於 5.0%），此三種方法皆參考鄧翔耀(2021)提出之大安森林公園樹木之數值，包含胸高形數、地上部生物量擴展係數、全材胸高形數及通用樹種地上部材積迴歸式等，由於這些數值皆經由針對大安森林公園約 30 株樹木進行光達掃描而建立，因此本研究認為這些推估結果相較於採用國際間用於人工林參數所得之推估結果，可能更接近大安森林公園樹木實際之蓄積量。

(3) 地上部生物量比較

納入地上部材積比較的有方法 1、方法 2-2、2-3、2-4 及方法 3。以上方法推估 2019 年大安森林公園樹木之地上部生物量由大至小依序為：方法 2-4（2484.02 ton）>方法 3（2579.82 ton）>方法 2-3（2569.00 ton）>方法 1（1905.29 ton）>方法 2-2（1760.52 ton）。方法 2-2、2-3、2-4 及方法 3 之大小關係與地上部材積之趨勢相當，而方法 1 之推估結果與方法 2-2 較接近（以方法 1 為基準，相差約 7.6%），兩者皆偏低。方法 1 係使用 Chave *et al.* (2014) 提出之地上部生物量估算公式，雖具備免除形數、地上部生物量擴展係數等數值之不確定性，但從結果來看，其推估結果仍偏低，加上欲使用地上部生物量估算公式推估樹木地上部生物量，需要取得每株樹木之胸徑、樹高等數值，相較於林業領域中經常以蓄積量為資源調查之呈現方式，其資料取得難度較高，因此方法 1 除推估結果是否貼近真實情形外，在實務運用上亦存在其限制。

(4) 碳儲存量比較

所有方法皆納入碳儲存量比較。以上方法推估 2019 年大安森林公園樹木之碳儲存密度（每公頃碳儲存量）由大至小依序為：方法 4（65.84 ton C/ha）> 方法 3（57.87 ton C/ha）> 方法 2-3（57.63 ton C/ha）> 方法 2-4（55.73 ton C/ha）> 方法 2-1（48.69 ton C/ha）> 方法 1（42.74 ton C/ha）> 方法 2-2（39.49 ton C/ha），而 2019 年大安森林公園樹木之總碳儲存量介於 1024.07 至 1707.30 ton C。

方法 2 之推估結果差異甚大，其中可發現形數及生物量擴展係數數值之選擇，為造成推估結果差異的主要原因。方法 2 使用一般通用之材積式（式 5）計算幹材材積，並以 IPCC(2006)提出之單株林木碳儲量公式，公式中使用到之形數及生物量擴展係數等皆會隨樹種、林型等因素而有所不同，雖然 IPCC 曾提出各林型建議之轉換係數，但若取得適合當地之係數，將可有效提高推估結果之可信度。

方法 2-3、方法 2-4 使用的形數、地上部生物量擴展係數及方法 3 使用之材積式皆來自鄧翔耀(2021)針對大安森林公園樹木經光達掃描並進行模擬推估得出，以上三個方法之推估值理應與大安森林公園樹木實際之碳儲存量最為接近。其中方法 3 與方法 2-3 之碳儲存密度推估結果相當接近（以方法 3 為基準，相差 0.41%），而方法 2-4 則相差較大（以方法 3 為基準，相差 3.70%）。

方法 4 之推估結果在碳儲存量分別為最大者，碳吸存量方面則僅次於方法 2-4。由於方法 4 係將樹木調查資料回傳交由美國林務署資料庫進行運算，其詳細之計算方法並不明瞭，較難進行詳細之比較分析；另外，i-Tree 為美國林務署所開發，在樹種資料庫中較缺乏臺灣本土樹種資料，因此部分樹種僅能以同屬或同科之資料替代，未來若能擴充更完善之本土資料，將能使推估更加精確。

綜合以上分析，使用不同方法及係數可能對樹木碳儲存量推估結果產生相當之影響，在選擇時應謹慎為之。未來進行都市樹木碳儲存量推估時，建議使用光達掃描初步建立當地之地上部生物量擴展係數或形數，用以調整方法 2 之推估結果。

(5) 碳吸存量比較

所有方法皆納入碳吸存量比較。以上方法推估 2019 至 2021 年大安森林公園樹木之年平均碳吸存密度（每公頃每年之碳吸存量）由大至小依序為：方法 4（2.55

ton C/ ha/ year) > 方法 2-3 (1.70 ton C/ ha/ year) > 方法 2-4 (1.64 ton C/ ha/ year) > 方法 3 (1.50 ton C/ ha/ year) > 方法 2-1 (1.43 ton C/ ha/ year) > 方法 1 (1.35 ton C/ ha/ year) > 方法 2-2 (1.16 ton C/ ha/ year), 與碳儲存量比較之趨勢相比, 僅方法 2-3、2-4 及方法 4 之大小關係略有不同, 其餘則大致相同。

2019 至 2021 年大安森林公園樹木之年平均總碳吸存量介於 30.13 至 66.15 ton C, 換算為一年之二氧化碳吸存量則介於 110.49 至 242.55 ton CO₂e/ year。大安森林公園作為國內重要之都市公園, 政府機關或企業經常以大安森林公園一年之吸碳量作為比較對象, 檢視自身碳排量及減碳效益。行政院環境保護署 (2015) 探討國人參與跨年活動所產生之碳排量, 2015 年全國將舉行至少 13 場跨年活動, 約將產生 3169 ton CO₂e 之二氧化碳, 相當於 8.2 座大安森林公園一年之碳吸存量, 其中大安森林公園碳吸存量參考農委會推估, 每公頃森林一年之碳吸存量為 15 ton CO₂e, 以面積 25.8 公頃計算, 則大安森林公園一年之碳吸存量為 387 ton CO₂e。此數值與本研究之推估結果差異甚大, 本研究認為森林與都市樹木受到環境、樹種、栽培管理措施等多項差異, 其碳儲存及碳吸存量亦會有所不同, 因此使用森林碳吸存量數值直接進行都市公園樹木碳吸存量之推估, 容易產生極大之差異。然國內對於都市公園碳匯潛力之研究仍屬少數, 未來應建立更完整之基礎研究, 以提升人們對於都市樹木固碳能力之了解。

綜合以上討論可發現, 不同計算方法間之推估結果差異甚大, 因此在進行碳儲存與碳吸存量推估時, 應審慎選擇推估方法與係數, 以獲得更精準之推估結果。而在此為了方便後文各項比較分析, 本研究取推估結果較接近為中間值之方法 2-4 作為後續比較分析之基準。

(6) 使用統一及個別樹種木材密度及碳含量進行碳儲存量及碳吸存量推估結果比較

為了解進行碳儲存及碳吸存量推估時, 使用不同木材密度數值與碳含量係數對推估結果之影響, 本研究分別在計算碳儲存量時, 分為以下兩種計算方式:(一) 統一數值組: 所有樹種皆採用統一數值, (二) 樹種分類組: 各樹種分別採用各自之數值, 並進行比較分析。統一數值組使用之數值, 木材密度為 0.5, 碳含量為 0.4691。

樹種分類組使用採用趙國容(2019)建置臺灣地區植物碳吸存能力資料庫中各樹種之木材密度及碳含量數值，資料庫缺乏資料之樹種，則採用木材密度 0.5、碳含量 0.4691 替代，納入計算之 6010 株（145 個樹種）樹木中，共 2660 株（42 個樹種）使用該樹種之密度數值，共 2547 株（38 個樹種）使用該樹種之碳含量數值。碳儲存量計算則統一採用前述方法 2-4 推估。

推估結果如表 4 所示，兩組之推估結果具依定程度之差異，自地上部材積轉換為地上部生物量時，木材密度數值之選用對計算結果產生部分差異，而從地上部生物量擴展為碳儲存量時，其差異有變大之情形，顯示碳含量數值更拉大了兩者差距，造成以上結果之原因，可能與樹種組成及胸徑分布有關，對於樹種組成較複雜的都市公園中進行之碳儲存及碳吸存量推估時，若能取得所有樹種各自之木材密度及碳含量係數，將有助於提升推估結果之精確性。

表 4 使用統一及個別樹種木材密度及碳含量進行碳儲存量及碳吸存量推估結果比較

		統一數值	樹種分類
2019 年	地上部材積 (m ³)	4968.03	4968.03
	地上部生物量 (ton)	2484.02	2536.54
	碳儲存量 (ton C)	1444.91	1209.49
	碳儲存密度 (ton C/ ha)	55.73	46.65
2021 年	地上部材積 (m ³)	5260.40	5260.40
	地上部生物量 (ton)	2630.20	2684.46
	碳儲存量 (ton C)	1529.95	1280.03
	碳儲存密度 (ton C/ ha)	59.00	49.37
2019-2021 年	年平均碳吸存量 (ton C/ year)	42.52	35.27
	年平均碳吸存密度 (ton C/ ha/ year)	1.64	1.36
	年平均二氧化碳吸存量 (ton CO ₂ e)	155.90	129.33
	年平均二氧化碳吸存密度 (ton CO ₂ e/ ha/ year)	6.01	4.99

(7) 與其他都市森林之碳儲存與碳吸存量比較

與其他都市森林之碳儲存與碳吸存量比較結果如表 5 所示。在碳儲存密度 (carbon storage density) 部分，以方法 2-4 為例，大安森林公園 2019 年碳儲存密度為 55.73 ton C ha⁻¹，僅次於菲律賓宿霧市 87.8 ton C/ ha (Pansit, 2019)、美國 28 個都市森林平均 76.90 ton C/ ha (Nowak *et al.*, 2013)，並大於其他多數都市。

在碳吸存效率 (carbon sequestration efficiency) 部分，以方法 2-4 為例，大安森林公園碳吸存密度為 1.64 ton C/ ha/year，即二氧化碳吸存量為 6.01 ton CO₂e/ ha/year，與美國多個城市之平均值每公頃 2.8 ton C/year 較接近，但低於菲律賓宿霧市每公頃 9.45 ton C/ year，也低於中國北京每公頃 20.6 ton C/ year。

造成以上差異之可能原因，除了各個研究使用之方法學、研究地點之氣候條件、樹種組成、胸徑及樹齡分布不盡相同外，本研究之研究範圍僅限於公園內，綠地比例較高，而其他研究多以整個都市為研究範圍，其中包含住宅區、商業區、交通用地等，故於計算時綠地比例大幅降低，樹木密度減少，碳儲存密度亦隨之降低；亦有部分研究之研究範圍包含樹木木度較高之市郊森林，而產出較高之碳儲存量推估結果。

表 5 與其他都市森林之碳儲存與碳吸存量比較

城市	碳儲存量 (tonC/ ha)	碳吸存量 (tonC/ ha/ year)	樹木密度 (No./ha)	文獻
菲律賓宿霧市	87.80	9.45	NA	Pansit (2019)
中國瀋陽	33.22	2.84	569	Liu & Li (2012)
美國 28 個都市森林 平均	76.90	2.77	NA	Nowak 等人 (2013)
臺灣台北	55.73	1.64	232	本研究
中國杭州	30.25	1.66	465	Zhao <i>et al.</i> (2010)
中國北京	31.90	1.30	223	Tang <i>et al.</i> (2016)
美國亞特蘭大	35.74	1.23	276	Nowak & Crane (2002)
美國雪城	22.82	0.73	137	Nowak & Crane (2002)
美國巴爾的摩	25.28	0.71	136	Nowak & Crane (2002)
美國波士頓	20.30	0.67	83	Nowak & Crane (2002)
美國紐約	15.33	0.48	65	Nowak & Crane (2002)
美國費城	14.09	0.43	62	Nowak & Crane (2002)
美國澤西市	5.02	0.21	36	Nowak 與 Crane (2002)
美國加州奧克蘭	11.00	NA	120	Nowak (1993)
德國萊比錫	11.00	NA	NA	Strohbach & Haase (2012)
南韓大邱	24.90	NA	NA	Yoon <i>et al.</i> (2013)
美國都市森林平均	25.10	NA	NA	Nowak & Crane (2002)

(8) 與其他都市公園之二氧化碳吸存量比較

與其他以都市公園為研究對象之案例比較其碳儲存及碳吸存量，發現大安森林公園之碳儲存量最高，而碳吸存量則略為偏高，可能原因包含環境條件、氣候因子、樹種組成、計算方法學以及計算範疇之不同，如：Othman *et al.* (2019) 以馬來西亞雪蘭莪 Putra Heights 社區公園為研究對象，其面積僅 4.23 公頃，其中該研究將喬木、果樹、棕櫚樹、灌木及草坪皆納入計算，並發現草坪佔整個公園之碳吸存率比例最高 (69.2%)；Martin (2011) 及 Pace *et al.* (2018) 同樣使用 i-Tree 軟體進行推估。

表 6 與其他都市公園之二氧化碳吸存量比較

城市	碳儲存量 (tonC/ ha)	碳吸存量 (tonC/ ha/ year)	樹木密度 (No./ha)	文獻
馬來西亞雪蘭莪 Putra Heights 社區公園	NA	2.94	NA	Othman 等人 (2019)
臺北市大安森林公園	55.73	1.64	232	本研究
德國慕尼黑英國公園	18.86	0.65	29	Pace 等人 (2018)
美國奧本大學	6.65	0.29	31	Martin (2011)

肆、結論

本研究以 2019 至 2022 年間三次樹木調查資料為基礎，探討臺北市大安森林公園樹木之固碳能力，綜合以上研究結果，歸納出下列幾點結論：

一、生長預測模式建立

本研究以 2019 及 2021 年兩年度樹木胸徑調查資料建立胸徑及胸高斷面積連年生長率迴歸式，其 R^2 值皆大於 0.7，並配合 2022 年 300 株樹木複查資料，建立校正迴歸式，可使預測值更加精準。研究結果顯示連年生長率迴歸式能有效應用於樹木生長推估，未來為增進推估模式之精確性，建議每年進行 300 株樹木胸徑複查，用以校正短期樹木生長推估，每五年進行每木調查，重新建立生長率迴歸式，達到兼顧修正短期與長期預測之目的。

二、樹木碳儲存與碳吸存量推估

本研究使用多種推估公式及各項係數數值進行碳儲存及碳吸存量推估，並進行比較分析。2019 年大安森林公園樹木之碳儲存密度介於 39.49 至 65.84 ton C/ha，總碳儲存量則界於 1024.07 至 1707.30 ton C。2019 至 2021 年大安森林公園樹木之年平均碳吸存密度界於 1.16 至 2.55 ton C/ha/year，年平均總碳吸存量 30.13 至 66.15 ton C，換算為一年之二氧化碳吸存量則介於 110.49 至 242.55 ton CO₂e/year。不同計算方法間之推估結果差異甚大，因此在進行都市樹木碳儲存與碳吸存量推估時，應審慎選擇推估方法與係數，若採用一般通用材積式進行推估，建議先以光達掃描初步建立當地地形數或地上部生物量擴展係數數值，以獲得更精準之推估結果。

使用前述胸徑生長率迴歸式推估 2021 至 2022 年之碳吸存量，預測結果與 2019 至 2021 年實際調查之結果相近，顯示生長率迴歸式亦可適用於短期碳吸存量推估。

與其他都市森林或都市公園比較碳儲存與碳吸存量，可能因氣候環境、樹種組成、推估方法等造成較大之差異，不過本研究之推估結果亦介於合理範圍之內，具一定程度之可信度。

本研究僅針對大安森林公園內所有樹木之生長量及固碳能力進行調查與推估，而樹木之碳儲存與碳吸存量仍會受到樹木自然死亡，或是人為維護管理(如：修剪、

新植或移除樹木等)影響，若將尺度放大至整個公園，更應納入計算灌叢、草皮等其他植被之碳匯、土壤碳匯，而對樹木進行維護管理工作，或是公園設施進行使用及維護管理時，可能產生之碳排放亦可納入考量。

都市公園樹木之固碳能力雖不及一般森林或人工林，然而根據臺北市政府工務局公園路燈工程管理處(2022)統計，截至2022年四月，台北市已開闢之公園已達676座，加上兒童遊樂場、廣場等其他處所，共計1146處，綠地面積高達2420.62公頃，其對於溫室氣體減量之效益不容忽視，未來有賴更多相關研究，以有效掌握都市綠地及樹木之固碳能力，作為經營管理者決策之參考，於面對氣候變遷衝擊之際，提升都市韌性與促進永續發展。

伍、參考文獻

- 行政院環境保護署 (2015)。低碳跨年迎新春環境友善樂活年。取自 <https://enews.epa.gov.tw/page/3b3c62c78849f32f/0f70ad1e-dbee-4c09-97ef-cac01e7fe588>
- 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠 (2002)。全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估。臺灣林業科學 17 (3): 311-321。
- 林務局 (1997)。台灣林產處分調查用立木材積表。臺北：台灣省林務局。
- 林國銓 (1980)。山黃麻生物量及養分含量之研究。中華林學季刊 13 (2): 77-85。
- 林裕仁、劉瓊霏、林俊成 (2002)。台灣地區主要用材比重與碳含量測定。臺灣林業科學 17 (3): 291-299。
- 馬子斌、陳政靜、熊如珍、黃清吟、陳欣欣、翟思湧 (1992)。重要商用木材之一般性質。臺灣省林業試驗所。
- 趙國容 (2019)。土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置結案報告書。載於 行政院農業委員會水土保持局 (主編)。
- 鄧翔耀 (2021)。地面光達於都市林木材積推估及修剪評估之研究—以大安森林公園為例。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所。
- Brown, S., Lugo, A. E., Chapman, J. (1986) Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. Canadian Journal of Forest Research 16(2): 390-394.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global change biology 20(10): 3177-3190.
- Cruickshank, M., Tomlinson, R., Trew, S. (2000) Application of CORINE land-cover mapping to estimate carbon stored in the vegetation of Ireland. Journal of Environmental Management 58(4): 269-287.
- Dewar, R. C., Cannell, M. G. (1992) Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. Tree physiology 11(1): 49-71.
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (2006) IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Hall, C. A., Uhlig, J. (1991) Refining estimates of carbon released from tropical land-use

- change. *Canadian Journal of Forest Research* 21(1): 118-131.
- Houghton, R. A. (1996) Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio*: 267-272.
- IPCC (1997) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Paris. France. IPCC/OECD/IEA.
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- Kinerson, R. S., Ralston, C. W., Wells, C. G. (1977) Carbon cycling in a loblolly pine plantation. *Oecologia* 29(1): 1-10. doi: 10.1007/BF00345358
- Liu, C., Li, X. (2012) Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry & Urban Greening* 11(2): 121-128.
- Marland, G., Schlamadinger, B. (1997) Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and bioenergy* 13(6): 389-397.
- Martin, N. A. (2011) A 100% tree inventory using i-Tree Eco protocol: A case study at Auburn University, Alabama.
- Mohren, G., Caligaris, J. G., Masera, O., Kanninen, M., Karjalainen, T., Pussinen, A. et al. (1999) CO₂ FIX for Windows: a dynamic model of the CO₂-fixation in forests; Version 1.2.
- Niskanen, A., Saastamoinen, O., Rantala, T. (1996) Economic impacts of carbon sequestration in reforestation: examples from boreal and moist tropical conditions.
- Nowak, D. J. (1993) Atmospheric carbon reduction by urban trees. *Journal of environmental management* 37(3): 207-217.
- Nowak, D. J., Crane, D. E. (2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution* 116(3): 381-389.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., Lapoint, E. (2013) Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental pollution* 178: 229-236.
- Othman, R., Suid, S., Mohd Noor, N. F., Baharuddin, Z. M., Hashim, K. S. H. Y., Lukman Hakim Mahamod, L. H. (2019) The influence of urban park green spaces, plant material specifications and spatial design organization and pattern towards carbon sequestration rate. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(4): 8079-8088. doi: 10.15666/aeer/1704_80798088
- Pace, R., Biber, P., Pretzsch, H., Grote, R. (2018) Modeling ecosystem services for park

- trees: Sensitivity of i-tree eco simulations to light exposure and tree species classification. *Forests* 9(2): 89.
- Pansit, N. R. (2019) Carbon storage and sequestration potential of urban trees in Cebu City, Philippines. *Mindanao Journal of Science and Technology*: 17.
- Sedjo, R. A. (1989) Forests to offset the greenhouse effect. *Journal of Forestry*; USA, 87(7).
- Strohbach, M. W., Haase, D. (2012) Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. *Landscape and Urban Planning* 104(1): 95-104.
- Tang, Y., Chen, A., Zhao, S. (2016) Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4:53.
- Winjum, J. K., Brown, S., Schlamadinger, B. (1998) Forest harvests and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *Forest Science* 44(2):272-284.
- Yoon, T. K., Park, C.-W., Lee, S. J., Ko, S., Kim, K. N., Son, Y. et al. (2013) Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban forestry & urban greening* 12(3): 344-349.
- Zhao, M., Kong, Z.-h., Escobedo, F. J., Gao, J. (2010) Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of environmental management* 91(4): 807-813.