

建築景觀設計之碳匯潛力評估— 以透天集合式住宅社區為例

李堅明* 洪悅容**

論文收件日期：105年03月03日
論文修訂日期：105年12月28日
論文接受日期：106年03月03日

摘 要

面臨全球暖化與氣候變遷衝擊，建築景觀綠化之碳匯與碳中和價值，已逐漸凌駕傳統美質之功能。本研究以集合住宅社區為例，估算建築節能與景觀設計之60年碳匯潛力。研究結果顯示，若以景觀綠化之碳足跡而言，景觀建造與管理維護之碳足跡約占景觀總碳匯量2.51%-4.54%。易言之，本研究證明景觀綠化本身具有「負碳排放」功能。若以整體社區碳排放為基礎，景觀綠化碳匯潛力約占1.12%-2.02%，平均每戶景觀碳匯量為2.67-4.83公噸CO₂/戶。

關鍵詞：生態景觀、建築節能、碳足跡、碳價值、碳中和
JEL分類代號：Q21, Q25, Q28

* 聯繫作者：李堅明，國立臺北大學自然資源與環境管理研究所副教授兼所長

TEL：(02)8674-1111#67335；FAX：(02)26716313，E-mail：cmlee@mail.ntpu.edu.tw。

** 洪悅容，國立臺北大學自然資源與環境管理研究所碩士生、景觀設計師

E-mail：greenart@mail.ntpu.edu.tw

The Assessment of Carbon Sinks Potential on Landscape Architecture — A Case of House-Style Community Patterns

Chien-Ming Lee*, Yue-Rong Hong**

ABSTRACT

To respond to global warming and climate change, landscape architecture is now performing an important value in carbon sinks, rather than amenities. This study uses a case of house-style community patterns to assess the potential of 60 year carbon sinks on landscape architecture for carbon neutral. The result indicates that the share of carbon footprint caused by the construction and maintenance of landscaping equals only 2.51%-4.54% of total carbon sinks. In other words, this research proved that the landscaping itself has a net carbon sinks, which reaches to 1.12% - 2.02% carbon sinks shares of building carbon emissions.

Key words: Carbon Footprint, Carbon Neutral, Carbon Value, Ecological Landscape, Energy Efficient Building

JEL classification: Q21, Q25, Q28

* Associate Professor, Institute of Natural Resource Management, National Taipei University, TEL: +886-2-8674-1111#67335, E-mail: cmlee@mail.ntpu.edu.tw.

** Master student, Institute of Natural Resource Management, National Taipei University/ Landscape Architect, E-mail: greenart@mail.ntpu.edu.tw.

一、前言

聯合國政府間氣候變遷委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）¹於2014年第五版研究報告中指出，若要將地表溫升控制在2°C內，則2100年以前，全球應達到淨零碳排（Net Zero Emission）水準，亦即達到碳中和（carbon neutral）。全球50%人口居住在占全球陸地面積2%的都市，城市約消費全球60%能源及排放約75%溫室氣體（Greenhouse Gas），其中，聯合國環境規劃署（United Nations Environment Program, UNEP）指出建築約貢獻25%溫室氣體排（UNEP, 2011），可知，都市已成為氣候變遷（Climate Change）的熱點（Hot Spot）（Grimm et al., 2008）。節能雖然是建築減碳的最主要措施，然而，尚無法達到零碳排放建築。爰此，如何透過景觀規劃，加強建築綠化，提高建築碳匯功能，已成為政府都市規劃的新趨勢（Tratalos et al., 2007; Bolund and Hunhammar, 1999; Niemela et al., 2010; Snep and Opdam, 2010）。

Strohbach et al.（2012）首開以生命週期評估法（Life Cycle Assessment, LCA）評估²城市綠地碳足跡（Carbon Footprint），研究顯示，扣除相關建造、管理與維護等活動排放量，綠地碳匯量逐年增加，以50年的累積量計算，平均每公頃綠地約可淨碳匯137-162公噸二氧化碳（CO₂）。Page et al.（2011）探討紐西蘭果園生產系統模型，分析相關栽培管理流程的碳匯量，指出每年每公頃果園可淨碳匯2.4噸至5噸的二氧化碳。國內學者，也有相關研究，例如曹正（2006）引用IPCC之方法學，依不同林型，推估台北市不同土地利用類型的二氧化碳碳匯量，約為每公頃7.3-15.0公噸/年。邱祈榮（2010）彙整台灣1996年至2007年台灣森林二氧化碳碳匯研究，指出台灣森林二氧化碳碳匯量為每公頃6.20-18.37公噸/年。有關建築生命週期碳足跡相關研究，Biswas（2014）利用LCA方法，評估建築³生命週期（包括建材、建造及使用階段）之碳足跡為14,229噸CO₂e，其中建材碳足跡為1,778噸CO₂e（約占12.5%）、建造碳足跡為306噸CO₂e（約占2.2%）及使用階段碳足跡為12,145

1 IPCC是聯合國氣候變化綱要公約（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）附屬的科學組織，於1988年成立，1989年發表第一版科學報告，成為全球最重要與權威的氣候變遷評估科學報告。隨後，分別於1995年發表第二版科學報告、2001年發表第三版科學報告、2007年發表第四版科學報告及2014年發表第五版科學報告。

2 生命週期評估（Life Cycle Assessment, LCA）屬於系統分析方法之一，其為「對產品系統自原物料的取得到最終處置之各階段投入和產出及潛在環境衝擊之整合評估。」（ISO14040, 2006）

3 該棟建築物為西澳的Curtin大學的第216號建築物。

噸CO₂e（約占85.4%），認為建築使用階段是最主要的碳排放，因此，提出使用階段的建築節能管理措施建議。林憲德（2013）評估代表性住宅建築物⁴ 60年生命週期之各項活動碳足跡占比，分別為電力占49%、建築軀體（或建材）占33%、天然氣占6%及營建施工占1%等。綜合上述文獻可知，使用階段是建築生命週期碳足跡的最主要排放源，電力及天然氣（或瓦斯）的碳足跡則是使用階段的最主要排放源。利用植樹綠化之碳匯效益，可以達到降低都市溫室氣體排放之功能。由於社區建築物是都市的主體，也是主要碳排放源，因此，如何評估與加強社區建築綠化之碳匯潛力，將是奠立都市低碳化的重要基礎。

雖然節能是降低建築碳排放的最優先策略，然而，僅能抑制建築碳排放，亦即僅是「減緩」（Mitigation）功能，反觀，建築景觀綠化具碳匯功能，可以達到「零（或負）碳建築目標，同時又能調節微氣候與增加水循環，兼具「減緩」功能與「調適」（Adaptation）功能，成為政府氣候政策的重要一環。由於建築景觀設計碳匯計算，受到諸多因素影響，包括樹木種類、樹木數量、管理策略、計算期間及參數引用等，相當複雜。因此，文獻較少涉及此課題。此外，文獻較重視大尺度之都市綠化碳匯潛力，尚未見以較嚴謹的方法學評估社區綠化碳匯之文獻。爰此，本研究將以臺灣常見之透天集合式住宅社區為例，考量景觀綠化之資材、運輸、營造、使用、維護管理、植栽地表碳匯及時間等層面之景觀綠化生命週期（life cycle）碳匯潛力。本研究同時導入IPCC（2006）（我國引用的方法）及Strohbach et al.（2012）兩種評估方法，並比較其碳匯量之差異，確立本研究結果的穩定性（Robustness）。

本研究內容安排如后：一為本研究緣起；二為建築景觀碳匯方法學分析；三為本研究案例之碳匯效益潛力評估；四為本文結語。

二、建築景觀綠化之碳匯方法

（一）都市綠地生命週期碳足跡評估方法（簡稱生命週期評估法）

Strohbach et al.（2012）首開以生命週期評估法，亦即包括建造、維護管理與樹生物量（tree biomass）三階段，並將景觀生命週期設定為50年，評估都市綠地碳

⁴ 該建築物為地上20樓地下3樓之40年的RC結構住宅大樓。

足跡⁵。另，基於不同樹種的異速生長方程式（Algomeric Equations），設定三種（平均、最小及最大）米高徑（Diameter Breast Height, DBH）⁶年成長率，及考量樹木的存活率，設定三種死亡率（低、中、高）。以下分述之：

1. 景觀綠化建造階段碳足跡

建造階段碳足跡評估，區分為七大項目，包括運送喬木、挖方、現地挖填、平板貨車、杉木支架、運送杉木支架及杉木支架拆除等。Strohbach et al. (2012) 參考「全球排放整合系統模型」（Global Emission Model for Integrated Systems, GEMIS）⁷，如表1所示。另，本研究蒐集我國運研所等相關機構資料，推估景觀綠化建造之本土化數據，詳見表1。由表1可以看出，我國相關係數與「全球排放整合系統模型」的確具些微差異性。爰此，藉由表1之我國（本研究）的景觀建造各項機具動力的溫室氣體排放係數，可作為後續計算本研究基地景觀建造碳足跡計算之依據。

2. 景觀綠化維護管理階段碳足跡

管理維護碳足跡評估區分六大項目，包括平板貨車、騎乘式割草機、割草機、剪枝機、木廢料及鏈鋸與吊桶卡車等。Strohbach et al. (2012) 假設修剪週期為3~10年及不進行裝飾性修剪，因此，50年內平均修剪11次。同時，依據枝葉體積成長的經驗值，假設幼樹每年成長0.04m³，老樹每年成長0.09m³。

3. 景觀綠化之樹生物量碳匯

文獻推估樹生物量之常用異速生長方程式，如式（1）所示：

$$\ln M = a + b \ln D \dots\dots\dots (1)$$

5 樹木年齡設定為60歲，且不考量維護管理之潛在技術進步因子。由於整地及與苗木之生產過程不易計算碳足跡，亦不計入。此外，草類、藤類、灌木、灌溉、施肥及現地條件等因素，將影響碳匯估算，故僅計算喬木地表上部樹幹之碳匯量（不考量地下根系）。

6 DBH係指胸部高度樹幹直徑，台灣又稱米高徑。

7 全球排放模型整合系統（Global Emissions Model for integrated Systems, GEMIS），為一個公共領域的生命週期和物質流分析模型與數據庫，由德國永續性分析與策略國際研究院（International Institute for Sustainability Analysis and Strategy, IINAS）維護及免費提供。GEMIS首次發布於1989年，並持續更新擴展。分析模型計算生命週期的過程和方案，考慮包含從資源萃取（一次能源，原料）到最終能量或材料的使用的所有過程，並且還包括輔助能源和材料使用以及材料構建能源，材料和運輸系統。數據庫包含的基本信息模型可分為四模組即：能源載體；電力與供熱；材料；交通。GEMIS現為世界銀行承認的氣候智慧型規劃工具平台。

表1 建造及管理維護之溫室氣體排放係數

機具設備/ 建造程序	排放係數 (排放量/燃油消耗)		參考來源
	Strohbach et al. (2012) (註1)	本研究	
(1) 平板卡車， 2.0L，柴油 引擎	每1公里，燃油9.8公 升，排放0.2597公斤 CO ₂ 市區駕駛 (註2)	每1公里燃油0.38公升排 放1.3224公斤CO ₂ ，公 路交通 (註2)	燃油量參照運研 所交通運輸工程 碳排放量推估模 式建立與效益分 析之研究 (99 年) / 排放係數 參照環保署碳足 跡資料庫
(2) 挖土機，柴 油引擎，馬 力 35kw	每1天燃油30公升，排 放79.5公斤CO ₂	每1天燃油30公升，排 放104.4公斤CO ₂ (註 3)	燃油量由園藝公 司估算；排放係 數參照環保署碳 足跡資料庫
(3) 傾卸貨車， 28-32 噸， 柴油引擎	每1公里排放1.164公斤 CO ₂ ，公路交通	每1公里燃油0.38公升排 放1.3224公斤CO ₂ ，公 路交通 (註4)	燃油量參照運研 所交通運輸工程 碳排放量推估模 式建立與效益分 析之研究 (99 年) / 排放係數 參照環保署碳足 跡資料庫
(4) 小貨車，小 於 7.5 噸， 柴油引擎	每1公里排放0.448公斤 CO ₂ ，公路交通	每1公里燃油0.141公升 排放0.491公斤CO ₂ ，公 路交通	燃油量參照運研 所交通運輸工程 碳排放量推估模 式建立與效益分 析之研究 (99 年) / 排放係數 參照環保署碳足 跡資料庫

表1 建造及管理維護之溫室氣體排放係數（續）

機具設備/ 建造程序	排放係數（排放量/燃油消耗）		參考來源
	Strohbach et al. (2012) (註1)	本研究	
(5) 連結車， 32-40 噸， 柴油引擎	每1公里排放1.085公斤 CO ₂ ，公路交通	每1公里燃油0.38公升排 放1.3224公斤CO ₂ ，公 路交通（註4）	燃油量參照運研 所交通運輸工程 碳排放量推估模 式建立與效益分 析之研究（99 年）/ 排放係數 參照環保署碳足 跡資料庫
(6) 乘坐式割草 機 18.6 千 瓦，汽油， 平均負荷 40%	0.7661 kW ¹ h ⁻¹ =5.71 h ⁻¹ 每1小時排放13.247公 斤CO ₂	0.7661 kW ¹ h ⁻¹ =5.71 h ⁻¹ 每1小時排放17.214公斤 CO ₂ （註5）	燃油量參照 Lambrecht et al., (2004)、排放 係數參照環保署 碳足跡資料庫
(7) 割草機 3 千 瓦，汽油， 平均負荷 50%	0.8541 kW ¹ h ⁻¹ =1.31 h ⁻¹ 每1小時排放3.039公斤 CO ₂	0.8541 kW ¹ h ⁻¹ =1.31 h ⁻¹ 每1小時排放3.926公斤 CO ₂ （註6）	燃油量參照 Lambrecht et al., (2004)、排放 係數參照環保署 碳足跡資料庫
(8) 剪枝機 1.5 千瓦，汽油， 平均負荷 50%	0.7821 kW ¹ h ⁻¹ =0.61 h ⁻¹ 每1小時排放1.415公斤 CO ₂	0.7821 kW ¹ h ⁻¹ =0.61 h ⁻¹ 每1小時排放1.812公斤 CO ₂ （註6）	燃油量參照 Lambrecht et al., (2004)、排放 係數參照環保署 碳足跡資料庫
(9) 生產杉木支 架	每1公斤木材排放0.064 公斤CO ₂	每1公斤木材排放0.064 公斤CO ₂	參照Gemis 4.5 (2009)
(10) 移除木廢 料	銷毀每1公斤木材排放 0.049公斤CO ₂	銷毀每1公斤木材排放 0.049公斤CO ₂	參照Gemis 4.5 (2009)

表1 建造及管理維護之溫室氣體排放係數 (續)

機具設備/ 建造程序	排放係數 (排放量/燃油消耗)		參考來源
	Strohbach et al. (2012) (註1)	本研究	
(11) 鏈鋸 1.7; 2.7; 5.5 千 瓦, 汽油, 平均負荷 50%	0.782 1 kW ⁻¹ h ⁻¹ =0.7:1.1:2.2 1 h ⁻¹	0.782 1 kW ⁻¹ h ⁻¹ =0.7:1.1:2.2 1 h ⁻¹	燃油量參照 Lambrecht et al., (2004)、排放 係數參照環保署 碳足跡資料庫
(12) 吊桶卡車 32 千瓦, 汽油, 平 均負荷 50.5%	733.8 gCO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹ =11.7kgCO ₂ h ⁻¹	733.8 gCO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹ =11.7kgCO ₂ h ⁻¹	燃油量參照 Nowak et al., (2002)、排放 係數參照環保署 碳足跡資料庫

註1：本研究整理自Strohbach et al. (2012)。

註2：基於我國碳排係數資料有限，以營業用大貨車（柴油）為計算基準取代平板卡車。交通運輸油耗標準，引用交通部運輸研究所運輸部門能源與溫室氣體資料之建構與盤查機制之建立（99年）資料。由於本研究基地位於龍潭市區邊陲，桃園113號市道為主要對外交通動線，故以公路交通取代案例之市區交通，並以時速50km/hr為油耗分析基準，以下交通運輸分析計算皆同。

註3：以環保署碳足跡資料庫中，柴油每公升排放3.48E+000kgCO₂e為計算基準。

註4：基於我國碳排係數資料有限，以營業用大貨車（柴油）為計算基準取代傾卸貨車。

註5：基於我國碳排係數資料有限，以營業用大貨車（柴油）為計算基準取代連結車。

註6：以環保署碳足跡資料庫中車用汽油（於固定源使用，2014）每公升排放3.02E+000 kgCO₂e為計算基準。

其中，M為樹生物量；D為米高徑；a與b為估計參數。表2是相關文獻依據三種米高徑年成長率（平均、最小及最大），推估樹生物量的迴歸方程式。以米高徑平均成長率為例，計算文獻之平均生物量年成長率為0.68公分。再將樹生物量乘上碳匯係數1.854公斤CO₂（Zimmer and Wegener, 1996），即可估算喬木碳匯量，再扣除建造與維護管理總碳排放量，可獲得淨碳匯量。

表2 不同樹種之生物量成長率比較表

樹種學名	平均	最小	最大	R ²	生物量方程式資料來源
	生長 (公分/年)				
Acer platanoides	0.48	0.38	0.59	0.63	Eq. (7), Zianis et al. (2005)
Alnus glutinosa	0.81	0.70	0.91	0.77	Eq. (10), Zianis et al. (2005)
Carpinus betulus	0.7	0.62	0.81	0.83	Birch (combined), Bunce (1968)
Fraxinus excelsior	0.83	0.73	0.92	0.84	Eq. (134), Zianis et al. (2005)
Prunus avium	0.52	0.44	0.60	0.77	Mixed hardwood, Jenkins et al. (2003)
Quercus robur	0.70	0.63	0.76	0.89	Oak (combined), Bunce (1968)
Robinia pseudoacacia	0.65	0.58	0.71	0.78	Table 7, Clark and Schroeder (1986)
Salix alba	0.81	0.70	0.91	0.77	Aspen/alder/cottonwood/willow, Jenkins et al. (2003)
Tilia cordata	0.61	0.53	0.69	0.82	Lime, Bunce (1968)
平均 ^{註1}	0.68	0.59	0.77	-	本研究

資料來源：本研究整理自Strohbach et al. (2012)。

註1：為本研究計算

(二) IPCC 都市綠地碳足跡評估法 (簡稱 IPCC 評估法)

依照IPCC (2006) 之國家溫室氣體清冊指南 (Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) (以下簡稱指南)，針對「轉換為林地」之樹木 (喬木) 碳匯量估算公式，如式 (2) 所示 (詳細估算步驟，詳見附錄一)：

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{conversion} - \Delta C_L \dots\dots\dots (2)$$

其中： ΔC_B 為某一特定轉換為林地之土地生物量的年淨碳存量變化 (單位：噸碳/年)； $\Delta C_{conversion}$ 為維持該類型土地之年生物量之碳存量變化 (噸碳/年)； ΔC_G 為土地轉換之初始生物量碳存量變化 (噸碳/年)，本研究參考我國2014年國家溫室氣體清冊 (環保署，2014)，不計此項； ΔC_L 為木材、燃木及其它因素等之年度碳總損失量 (噸碳/年)。

三、透天集合式住宅社區景觀綠化碳匯潛力評估

(一) 基地背景概述

本研究之基地位於桃園市龍潭區市中心外緣東北方，為新建透天集合式住宅社區，如圖1所示。基地面積 $1,880\text{m}^2$ ，共18戶，地上3.5層地下1層，每戶約120坪（約 396.7m^2 ），可規劃4~6個房間數。社區綠化面積共 338m^2 ，其中，草坪面積為 203m^2 ，木本灌木面積為 135m^2 ，其中規劃15戶擁有私人綠地，每戶面積約 10.5m^2 。中庭為西北、東南走向，私人綠地與公共中庭綠地日照條件均良好。共栽種24株喬木，15株大型觀賞灌木。

(二) 基地碳足跡

電力約占建築總能耗的86%，亦是主要的二氧化碳排放源，因此，本研究以用電量推估建築為二氧化碳排放量。本研究彙整全國各縣市2009年至2012年住宅建築物用電力及戶數資料（詳見附錄二），可知，桃園市住宅建築物四年平均用電量為3,784,337千度/年，而四年平均住宅建築物為678,921戶，若扣除約10.99%低度用電住宅比例（或稱空屋率）（內政部營建署，2015），則四年平均高用電住宅建築物約為604,308戶，可以獲得平均每戶用電量約為6,262度/年。依2015年電力係數0.528公斤/度換算（經濟部能源局，2016），每戶每年約排放3,306公斤 CO_2 。本研究社區合計18戶住宅，推估60年用電 CO_2 總排放為3,570.48公噸 CO_2 。

用水量亦是建築碳足跡負荷之一，依據經濟部水利署（2016）之桃園市用水統計，四年（2009-2012年）平均生活用水量為180,357,802度，若扣除約10.99%空屋



圖1 本研究基地範圍圖

資料來源：Google map

率（內政部營建署，2015），則四年平均高用水住宅建築物約為604,308戶，可以獲得平均每戶用電量約為298.5度/年。依據環保署（2016）公布1度水的碳足跡為0.167公斤計算，每戶每年約排放49.8公斤CO₂。本研究社區合計18戶住宅，推估60年CO₂總排放為53.8公噸CO₂。

天然氣亦為家戶主要碳足跡負荷，依據研究基地天然氣供應業者，欣桃天然氣股份有限公司（2017）統計，桃園市家庭用戶平均年用氣量為335.4度。依據環保署（2016）公布1度天然氣的碳足跡為1.881公斤計算，本研究社區合計18戶住宅，推估60年CO₂總排放為681.36公噸CO₂。

（三）景觀碳匯生命週期評估法

本研究依據我國建築景觀設計與營造地域之特色，推估60年之景觀碳匯量。本研究假設景觀碳足跡範疇，不包含結構、土木、水電等項目，且本研究基地之建築地下室全開挖，故排除一樓建築結構體防水層完工前之所有工項。依英國標準協會（British Standard Institution, BSI）提出之PAS2050指引，指出景觀營造過程之人力資源投入與植物於苗圃中生產過程可不計入（BSI, 2011）。此外，雖然有相關文獻估計喬木根系生物量，例如Johnson and Gerhold（2003）推估城市喬木根系生物量約占16%至41%及李宣德與馮豐隆（2008）分析台灣樟樹森林，估計樟樹根系生物量約占28.95%。然而，由於城市社區與森林之生長環境迥異，不確定性過高，本研究將喬木根系生物量之碳匯忽略不計。至於草類與低矮灌木則受到灌溉、施肥及割草頻率等因子影響，碳匯量亦相當不確定，故本研究參考Strohbach et al.（2012）之作法，排除計算草類與低矮灌木的碳匯量。爰此，本研究景觀設計之建造、管理維護與生物量之碳匯量估算如下：

1. 建造過程之碳足跡計算

由於本研究基地景觀建造項目與Strohbach et al.（2012）相同，因此，本研究將直接引用表1之機具與建照程序項目。排放係數與能耗資料為符合國內實際情況，如前文所述本研究蒐集國內交通部運輸研究所、環保署等國家等級數據以茲運用。本研究基地之栽植24株喬木與15株大型觀賞灌木，由彰化田尾運至桃園龍潭基地，共4趟700km。沃土填方取得地點距離基地6m，共14車次。施工期共5天，施工單位人員及機具設備存放處距離基地10km。喬木杉木支架由南投竹山運至基地，共1趟167km，台灣慣例不拆除支架，故不計拆除支架之碳足跡。據此，可以獲得本研究建造過程之碳足跡（詳如表4所示）。由表4可知，本研究基地景觀建造約排

表4 建造過程碳足跡計算表

機具設備/建造程序 (參照表1)	活動強度 (A) (註1)	排放係數 (B)	碳排放量 (A) × (B) 公斤CO ₂
運送喬木及灌木 (5)	24株喬木，15株優型灌木，由彰化田尾送達桃園龍潭，共4趟700km	1.3324 公斤CO ₂ /公里	932.68
填沃土 (3)	運送沃土填方傾卸，共84km	1.3324 公斤CO ₂ /公里	111.922
現地挖填 (2)	建造與植樹，施工5天	104.4 公斤CO ₂ /天	522
平板貨車 (1)	運送工作人員、設備、機具，每天來回20km，施工5天共100km	1.3324 公斤CO ₂ /1公里	133.24
杉木支架 (9)	支撐喬木前2年，共251kg	0.064 公斤CO ₂ /1公斤木材	16
運送杉木支架 (4)	南投竹山到桃園龍潭，共1趟167km	0.491 公斤CO ₂ /1公里	81.997
總排放量公斤CO ₂			933
每公頃排放量 (公斤CO ₂ /公頃)			4,964

註1：活動強度由園藝公司依實際值提供，並輔以Google map工具計算距離。

放量933公斤CO₂，換算平均每公頃之排放量為4,964公斤CO₂抑或每平方公尺約排放量0.4964公斤CO₂

2. 管理維護階段之碳足跡計算

由於本研究基地景觀管理維護之機具與建照程序項目亦與Strohbach et al. (2012) 相同，因此，本研究亦將直接引用表1之項目。排放係數與能耗資料亦為符合國內實際情況，本研究亦蒐集國內交通部運輸研究所、環保署等國家等級數據以茲運用。本研究假設管理維護為龍潭區當地廠商，距離基地來回共6公里，每年於颱風季節前維護一次。草坪由社區居民割草，假設平均1年6次。剪枝時數依經驗豐富景觀現場工程師推估，疏枝廢料與鏈鋸吊桶，本研究參考Strohbach et al. (2012) 之總株樹比例換算。據此，可以獲得60年管理維護之總碳足跡約為1,245公斤CO₂。（詳如表5）

表5 管理維護過程碳足跡計算表

機具設備/建造程序 (參照表1)	活動強度 (A)	排放係數 (B)	60年碳排放量 (公斤CO ₂) (A) × (B)
小貨車 (4)	往返一樹木管理維護, 1年6km, 60年共360km	0.491 公斤CO ₂ /1公里	176.76
割草機 (7)	1分鐘約15m ² , 1年6次, 50年共4141分鐘=70小時	3.926 公斤CO ₂ /1小時	274.82
剪枝機 (8)	剪枝, 每年6時, 50年共360小時	1.812 公斤CO ₂ /1小時	652.32
木廢料 (9)	疏枝廢料依Strohbach et al. (2012)。總株樹比例換算2.6kg	0.049 公斤CO ₂ /1公斤木材	0.3
鏈鋸、吊桶卡車 (11、12)	疏枝依Strohbach et al. (2012)。總株樹比例換算(註1)		141.1
總排放量 (公斤CO ₂)			1,245

註1：以原作者使用參數2.33E+000與我國車用汽油（於固定原使用,2014）3.02E+000 kgCO₂等比例換算。

3. 樹生物量與總碳匯量估算

(1) 喬木碳匯量估算

本研究假設透天集合式住宅社區為60年生命週期⁸，由於社區之植栽具有較佳的維護管理，因此，可降低樹木死亡率（Sklar and Ames, 1985），然而，人為的社區植栽生長環境又卻不若天然之森林生長環境優異，因此，不適合直接引用自然成長模式⁹。爰此，本研究將參考Strohbach et al. (2012)之城市綠地樹成長率與死亡率的觀念，估算研究基地之樹生物量。說明如下：

a. 單株喬木每年成長之樹生物量估算

本研究蒐集與本研究樹種近似之流蘇、青楓、黑松、羊蹄甲及羅漢松等之異速生長方程式文獻（詳見表6），由表6可知，不同樹種之生物量（Y）的成長呈現

8 依照環保署2015年通過之建築物碳足跡產品類別規則PCR規定建築物碳足跡生命週期標準為60年，故本研究之生命週期設為60年。

9 雖然國內學者李宣德與馮豐隆（2008）研究台灣樟樹森林碳匯量年增長率約為6%，然而，該研究屬於自然增長模式，不適合本研究此處引用。

表6 本研究基地喬木之異速生長方程式

中名	學名	異速生長方程式	參考文獻
流蘇	<i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxt.	$\ln Y = -2.4598 + 2.4882 \times \ln D$	式(134) ; Zianis et al. (2005) 註1
青楓	<i>Acer serrulatum</i> Hayata	$\ln Y = -2.7606 + 2.5189 \times \ln D$	式(7) ; Zianis et al. (2005) 註2
黑松	<i>Pinus thunbergii</i>	$Y = 108.31 \times D^{2.2987}$	表3之式(7) ; 林世宗等 (2008) 註3
羊蹄甲	<i>Bauhinia variegata</i>	$\ln Y = -2.53 + 2.5609 \ln D$	表4之式(1) ; 林國銓等 (2009) 註4
羅漢松	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	$Y = 92.589 \times D^{2.2848}$	表3之式(1) ; 林世宗等 (2008) 註5

註1：引用歐洲白臘樹 (*Fraxinus excelsior*)，木樨科之異速生長方程式。本研究受限於國內異速生長方程式研究文獻缺乏，此處雖引用同科之異速生長方程式，然而，樗屬與流蘇屬之生長速度亦可能有所差異，為本研究之限制。

註2：引用槭樹科 (*Acer pseudoplatanus*) 之異速生長方程式。

註3：引用台灣二葉松 (*Pinus taiwanensis*)，松科之異速生長方程式。

註4：引用相思樹，豆科 (*Fabaceae*) 之異速生長方程式。

註5：引用台灣二葉松 (*Pinus taiwanensis*)，松科主幹之異速生長方程式。本案例基地栽植之羅漢松，與社區景觀中作為端景景觀之用，其碳匯效益將集中於主幹之生長，故此處引用國內本土研究同為裸子植物，台灣二葉松之主幹的異速生長方程式，不計入其枝葉生物量，此處差異為本研究之限制。

差異性，以Zianis et al. (2005) 之大楓樹 (*Acer Serrulatum Hayata*) 迴歸方程式為例，如式(3)所示：

$$\ln Y = -2.7606 + 2.5189 \times \ln D \dots\dots\dots (3)$$

式(3)表示，大楓樹之米高徑(D)增長1%，則大楓樹生物量(Y)將增長2.5189%。由於本研究基地種植之青楓與大楓樹同為槭樹科，因此，本研究將援引該異速成長方程式，評估青楓年成長生物量。青楓苗木栽種之米高徑(D)為10公分¹⁰，代入表2之三種成長率的平均值(平均0.68公分/年，最小0.59公分/年及最大0.77公分/年)，獲得60年之米高徑分別為50.74公分、45.4公分與56.02公分，再代入式(3)，可分別求得60年單株青楓樹生物量之平均1,228.51公斤、最小923.26公斤與最大1,582.31公斤(詳如表7)，再除以60年，可以獲得單株青楓每年樹生物量10 苗木高度為3.8公尺。

表7 喬木樹生物量計算表

中名	株數	栽種苗木尺寸		60年後三種成長速率之DBH (公分)			60年後三種成長速率之單株喬木新增樹生物量 (公斤)		
		H (公尺)	DBH (公分)	平均	最小	最大	平均	最小	最大
流蘇	1	3.2	8	48.74	43.4	54.02	1,338.60	999.11	1,733.40
青楓	10	3.8	10	50.74	45.4	56.02	1,228.51	923.26	1,582.31
黑松	1	3.5	18	58.74	53.4	64.02	1,178.38	930.16	1,454.40
羊蹄甲	4	3.0	12	52.74	47.4	58.02	2,002.40	1,512.38	2,569.43
羅漢松	2	3.2	8	48.74	43.4	54.02	654.62	499.67	830.88

表8 單株喬木每年樹生物量 (公斤) 與二氧化碳碳匯量 (公斤) 計算表

中名	成長率					
	平均		最小		最大	
	生物量 (公斤)	碳匯量 (公斤)	生物量 (公斤)	碳匯量 (公斤)	生物量 (公斤)	碳匯量 (公斤)
流蘇	22.31	41.36	16.65	30.87	28.89	53.56
青楓	20.48	37.97	15.39	28.53	26.37	48.89
黑松	19.64	36.41	15.5	28.74	24.24	44.94
羊蹄甲	33.37	61.87	25.21	46.74	42.82	79.39
羅漢松	10.91	20.23	8.33	15.44	13.85	25.68

之平均值為20.48公斤、最小值為15.39公斤及最大值為26.37公斤，詳如表8所示。
 (其餘樹種計算方式相同，不再贅述，計算成果詳見表7與表8)

b. 不同死亡率情境之樹生物量估算

由於樹木成長過程中，將遭受外界因素影響，例如颱風或地震等天然災害因素，造成樹木死亡。爰此，本研究再設定低(0.5%)、中(1%)、高(4%)三種死亡率(參考Strohbach et al. (2012))，估算樹生物量。以中死亡率(1%)及平均成長率為例，加總本研究基地五種(24株)喬木平均成長率之60年樹生物量(參考表7)，即流蘇1株(1,338.60公斤)、青楓10株(單株1,228.51公斤)、黑松1株(1,178.38公斤)、羊蹄甲4株(單株2,002.40公斤)、羅漢松2株(單株654.62公斤)，以生命週期60年計，扣除該成長速率加總樹生物量之1%，獲得平均成長率

表9 不同情境之60年喬木樹生物量與碳匯量

		死亡率					
		0.5%		1%		4%	
		生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)
成長率	平均	24.000	44.497	23.880	44.273	23.156	42.931
	最小	18.120	33.594	18.029	33.425	17.482	32.412
	最大	30.796	57.095	30.641	56.808	29.712	55.087

下1%死亡率之生物量為23.880公噸，最後透過碳匯係數1.854公斤CO₂ (Zimmer and Wegener, 1996)，獲得喬木碳匯量44.273公噸（詳見表9）。如表9所示，本研究案例60生命週期喬木碳匯量約為32.412公噸（最小成長率，4%死亡率）至57.095公噸（最大成長率，0.5%死亡率）。

(2) 灌木碳匯量估算

本研究基地配置15株大型觀賞灌木，為生長速度緩慢之優型桂花（Osmanthus Fragens），樹高2公尺，樹寬1.5公尺，無主幹多分枝。本研究爰引前文與桂花同屬木樨科之流蘇碳匯計算成果（參考表8），假設桂花之單株碳匯量為流蘇單株碳匯量的三分之二估算¹¹，推估優型桂花之碳匯量，推估成果詳見表10。如表10所示，本研究基地15株灌木之60年總累積碳匯量約為17.781公噸CO₂（最小成長率及最高死亡率）至31.977公噸（最大成長率及最小死亡率）。

表10 不同情境之50年灌木樹生物量與碳匯量

		死亡率					
		0.5%		1%		4%	
		生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)
成長率	平均	13.319	24.694	13.252	24.569	12.851	23.825
	最小	9.940	18.429	9.890	18.336	9.590	17.781
	最大	17.247	31.977	17.161	31.816	16.641	30.852

11 本案栽植之大型觀賞灌木，於植物形態分類上，介於小喬木與木本灌木之間；參考內政部建築研究所「綠建築解說與評估手冊」（2007）中，二氧化碳固定量Gi指標，此類植物之固碳Gi值為闊葉大喬木之三分之二，故本研究假設大型觀賞灌木之碳匯量為喬木之三分之二。

(3) 景觀淨碳匯量

本研究加總喬木與灌木60年總碳匯量約為50.19公噸CO₂（最小成長率及最高死亡率）至89.07公噸CO₂（最大成長率及最小死亡率）（詳見表11）。再扣除建造碳足跡0.933公噸與維護管理碳足跡1.245公噸CO₂，推估本研究基地不同情境下之60年生命週期之景觀淨碳匯量為48.01公噸CO₂（最小成長率及最高死亡率）至86.89公噸（最大成長率及最小死亡率）（詳見表11）。以景觀工程自身而論，景觀建造與管理維護之總碳足跡約占60年生命週期的2.51%-4.54%。

(4) 研究基地社區碳足跡

依據前文推估，本研究18戶集合住宅社區，60年用電總CO₂排放量約為3,570.48公噸CO₂；用水碳足跡為53.8公噸CO₂；用氣碳足跡為681.36公噸CO₂，在不同情境下，社區淨碳排放量（或碳足跡）約為4,218.75公噸（最大成長率及最小死亡率）至4,257.63公噸CO₂（最小成長率及最大死亡率），詳見表11，可以估算景觀淨碳匯量占比約1.12%（最小成長率及最大死亡率）至2.02%（最大成長率及最小死亡率）。

表11 不同情境之60年生物量、碳匯量與景觀淨碳匯量與社區碳足跡

		死亡率											
		0.50%				1%				4%			
		生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	景觀淨碳 匯量 (公噸)	社區 碳足跡 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	景觀淨 碳匯量 (公噸)	社區 碳足跡 (公噸)	生物量 (公噸)	碳匯量 (公噸)	景觀淨 碳匯量 (公噸)	社區 碳足跡 (公噸)
成長率	平均	37.32	69.19	67.01	4,238.63	37.13	68.84	66.66	4,283.98	36.01	66.76	64.58	4,241.06
	最小	28.06	52.02	49.84	4,255.80	27.92	51.76	49.58	4,256.06	27.07	50.19	48.01	4,257.63
	最大	48.04	89.07	86.89	4,218.75	47.80	88.62	86.45	4,219.19	46.35	85.94	83.76	4,221.88

(四) IPCC 景觀碳匯評估法

依循指南步驟，本研究第二部分亦依據我國建築景觀設計與營造地域之特色，推估60年之景觀碳匯量。本研究基地開發前，為休耕6年以上之農地。設定景觀之品質，相當於集約管理之人工林地面積，並設定碳足跡範疇，亦不包含結構、土木、水電等項目，樹生物量之估算亦將根系生物量排除。

依循指南架構，此方法需納入土地轉換相關之生物量損失，而草類、低矮灌木之影響應納入，此部分定義與前述生命週期方法略有差異。

相關係數之前提假設如下：

- (1) 粗放型管理林地之面積為零。
- (2) 無林地燃木清除量
- (3) 因透天集合住宅社區之景觀，將有良好的管理，故其他活動的碳損失量為零。

綜合上述假設情境，本研究基地之景觀碳匯量引用指南公式計算如下：

1. 估算集約型管理林地（景觀綠化地）單一年度生物量之碳存量變化

依據IPCC（2006）計算公式如下：

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times G_{total,i,j}) \cdot CF_{i,j} \dots\dots\dots (3)$$

$$G_{total} = \sum_{i,j} [I_V \cdot BCEF_I \cdot (1+R)] \dots\dots\dots (4)$$

其中： ΔC_G 為維持該類型土地之年生物量之碳存量變化（噸碳/年）； $A_{i,j}$ 為維持第*i*生態帶及第*j*氣候區¹²之土地面積（公頃），即研究基地綠化面積0.0338公頃； $CF_{i,j}$ 為生物量的含碳比例（噸碳/噸生物量），引用IPCC建議值枝葉值0.47。 G_{total} 應用生物量轉換及擴展係數（biomass conversion and expansion factor）求得，如式（4）所示，其中， I_V 為I樹種（或植被）之年淨成長量（公尺³/公頃年），引用我國103年12月中華民國國家清冊報告建議人工闊葉林值為6.11； $BCEF_I$ 為特定樹種（或植被）的材積（包括樹皮）之年度淨成長量，轉換為地上部生物量成長量之轉換及擴展係數（單位：噸地上部生物量/公尺³），引用IPCC（2006）建議值為4.5；假設無地下生物量故*R*值為0。可以獲得 ΔC_G 等於0.4554噸碳/年。

2. 估算商業性採伐

本研究假設管理維護過程中之疏枝廢料量為商業性採伐量，因此，本文依據IPCC（2006）計算公式如下：

$$L_{wood-removals} = H \cdot BCEF_R \cdot (1+R) \cdot CF \dots\dots\dots (5)$$

其中： $L_{wood-removals}$ 為木材清理之年度碳損失量（噸碳/年）； H 為年度清除木材量（圓木）（公尺³）/年），本研究估算研究基地之單年度疏枝廢料量¹³為0.0782m³； $BCEF_R$ 引用IPCC2006建議值2.11； CF 生物量的含碳比例（噸碳/噸生物量），引用IPCC建議值枝葉值0.47。可以獲得 $L_{wood-removals}$ 為0.0776（噸碳/年）。

12 由於研究基地僅有唯一生態帶與氣候區，故*i*、*j*定義可省略不計。

13 本研究依據Strohbach et al.（2012）推估60年之疏枝廢料約為2.63公斤生物量，求得每年生物量為0.0438公斤，再利用林裕仁等（2002）闊葉樹材平均密度BD值0.56，計算為本研究基地之材積量（*H*）。

經由前述步驟所得集約型管理林地估算於該土地成長之年生物量的碳存量變化 ΔC_G 為0.4554（噸碳/年）；商業性採伐量 $L_{wood-removals}$ 為0.0776（噸碳/年）。依據式（2），可以求得研究基地60年生命週期之碳匯量為22.67噸碳，亦即等於83.12噸CO₂。依本文前述假設，灌木碳匯量為喬木之2/3，回推單株喬木年碳匯量a如式（6）：

$$83.12 \text{ (噸CO}_2\text{)} / 60 \text{ (年)} = 24a + 15 \times 2/3a \dots\dots\dots (6)$$

得單株喬木年碳匯量a=40.74（公斤CO₂/年）。

3. 研究基地社區碳足跡

依據前文推估，本研究18戶集合住宅社區，60年用電總CO₂排放量約為3,570.48公噸CO₂；用水碳足跡為53.8公噸CO₂，景觀總碳匯量為83.12噸CO₂，碳匯潛力占比約為2.29%，社區碳足跡為3,541.16公噸CO₂。

（五）評估結果比較

綜合前文分析，可知，在都市社區中庭中的植栽，不同評估方法之碳匯量呈現差異性。以生命週期法計算之單株喬木平均年碳匯量為15.44-79.39公斤CO₂；然而，IPCC方法估算之單株喬木平均年碳匯量為40.74公斤CO₂。相較於其他文獻，Nowak（2002）估計平均胸徑為31-46公分，樹冠幅約50m²單株喬木之平均年碳匯量約為69.73公斤CO₂；Akbari（2002）估計美國加州洛杉磯（Los Angeles）市之單株林木，平均年碳匯量約為16.52-40.37公斤CO₂；林俊成等（2002）推估20年生林木，依樹種不同，單株平均年約可碳匯11-18公斤CO₂。綜合上述文獻單株喬木碳匯量可知，本研究推估之單株喬木碳匯量，尚落在上述文獻範圍之間。

彙整本研究兩種方法計算之碳足跡，可以獲得景觀碳匯潛力，如表12所示。由表12可知，IPCC方法與於LCA方法評估結果略有差異，主要原因有二，前者沒有計算（或扣除）相關運輸動力碳排放，以及本文沒有計算 $\Delta C_{conversion}$ 之碳損失量。惟，兩種方法的推估的景觀碳匯潛力相當接近，顯示本研究所推估的社區碳匯量占比，具穩定性及可參考性。另，由表12可知，平均每戶景觀碳匯量為2.67-4.83公噸CO₂/戶（LCA方法）及4.62公噸CO₂/戶（IPCC方法），可以提供政府未來推動零碳建築之政策參考。

表12 本研究兩種方法60年碳匯潛力比較

	LCA方法	IPCC方法
建築用電、用水與用氣總碳排放量 (公噸 CO ₂) (A)	4,305.64	4,305.64
景觀淨碳匯量 (公噸 CO ₂) (B)	48.01 - 86.89	83.12
淨碳排放量 (A) - (B)	4,257.63 - 4,218.75	4,222.5
景觀碳匯占比 (%) (B) / (A)	1.12% - 2.02%	1.93%
平均每戶景觀碳匯量 (公噸 CO ₂ /戶)	2.67 - 4.83	4.62

四、結 語

面臨全球暖化與氣候變遷衝擊，建築景觀綠化之碳匯與碳中和價值，已逐漸凌駕傳統美質之功能。本研究首開國內集合住宅社區景觀碳匯潛力評估之先河，並分別導入IPCC (2006) 與Strohbach et al. (2012) (生命週期) 評估方法，估算本研究基地景觀設計60年之碳匯潛力。由於IPCC方法是提供全球參考，因此，其參數設定是採用全球平均值為代表，因此，其優點是可進行國際比較，且參數亦較容易取得，然而，實際計算目標基地碳匯量時，則具有本土特性，則採取LCA調查數據，更能反映真實性，這是LCA的優點，然而，資料調查與蒐集成本高，這是LCA方法的限制。

本研究證明景觀綠化本身具有「負碳排放」功能，因此，可將降低建築碳足跡。雖然，本研究之景觀綠化淨(總)碳匯量約占社區總碳足跡的1.12%-2.02% (LCA方法)，然而，景觀綠化碳匯量受到綠化面積、樹生物量及建造與維護管理等三大因子有關，易言之，如果擴大景觀綠化面積、增加喬木種植及適當的建造與管理，將可擴大景觀綠化之碳匯能量及降低碳足跡之價值，是未來景觀規劃應特別思考課題。

由於建築使用階段是最主要的碳足跡來源，因此，本研究LCA範疇簡化為建築物使用階段，且簡化計算項目為用電、用水與瓦斯碳排放，並沒有納入其他項目(例如裝潢及廢棄物處理)及相關活動(例如建材、建造及拆除等)之碳排放，這是本研究不足之處，亦可以作為未來進一步延伸課題。本研究景觀綠化之樹生物量估算，在缺乏我國相關研究資料情況下，直接引用國內外文獻之數據，可能受到地理環境差異，而產生偏誤情況，亦是本研究的限制。此外，喬木根系之生物量碳匯潛力大，可提高景觀綠化碳匯量，可列為未來進一步研究方向。

參考文獻

- 李宣德、馮豐隆，2008，森林碳吸存資源調查推估模式系統，台灣林業科學，第 23 卷副刊，頁 S11-22。
- 林世宗、鍾智昕、邱祈榮、林朝欽，2008，台灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算，中華林學季刊，第 41 卷，第 4 期，頁 521-535。
- 林裕仁、劉瓊霏、林俊成，2002，台灣地區主要用材比重與含碳量測定，台灣林業科學，第 17 卷，第 3 期，頁 291-299。
- 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國思，2002，全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估，台灣林業科學，第 17 卷，第 3 期，頁 311-321。
- 林憲德，2013，建築物設計階段碳揭露標示法之研究（1）—建築物碳揭露方法及碳排放資料庫之研究，內政部建築研究所專家研究計畫，內政部建築研究所。
- 邱祈榮、蔡維倫、林思吟、陳莉坪，2010，台灣林業碳匯管理策略探討，中華林學季刊，第 43 卷，第 2 期，頁 277-293。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美，2009，台東地區相思樹與楓香兩種人工林碳累積量，林業研究季刊，第 31 卷，第 3 期，頁 55-68。
- 行政院環境保護署，2014，2014 年中華民國國家溫室氣體清冊報告，台北。
- 行政院環境保護署，2016，產品碳足跡計算服務平台，<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/LoginPage.aspx>。
- 交通部運輸研究所，2010，交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究，台北。
- 內政部營建署，2015，辦理 103 年度低度使用住宅及新建餘屋資訊統計分析與發布，內政部不動產資訊平台，<https://pip.moi.gov.tw/V2/Default.aspx#news02>。
- 欣桃天然氣股份有限公司，2017，106 年度供氣計畫書，台北。
- 曹正，2006，碳量統計系統之研擬—以台北市為例。陸生圈碳匯評估及管理策略研討會論文集，台北。
- 經濟部水利署，2016，經濟部水利署自來水生活用水量統計資料集，環境資源資料庫，<https://erdb.epa.gov.tw/DataRepository/EnvMonitor/TapWaterLivehoodStatistics.aspx>
- Biswas W. K., 2014, Carbon footprint and embodied energy consumption assessment of building construction works in Western Australia, International Journal of Sustainable Built Environment, 3, pp. 179-186.

- Bolund, P. and S. Hunhammar, 1999, Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), pp. 293-301.
- BSI, 2011, PAS 2050: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
- Bunce, R. G. H., 1968, Biomass and production of trees in a mixed deciduous woodland: I. Girth and height as parameters for the estimation of tree dry weight. *Journal of Ecology*, 56(3), pp. 759-775.
- Clark III, A. and J. G. Schroeder, 1986, Weight, volume, and physical properties of major hardwood species in the Southern Appalachian Mountains. Technical Report No. 253. USDA Forest Service: Southeastern Forest Experiment Station, pp. 63.
- Gemis 4.5., 2009, Oko-Institut-Institute for applied ecology. <http://www.gemis.de>
- IPCC, 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S. and Birdsey, R. A., 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 49, pp. 12-35.
- Johnson, A. D. and H. D. Gerhold, 2003, Carbon storage by urban tree cultivars, in roots and above-ground. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(2), pp. 65-72.
- Lambrecht, U., H. Helms, K. Kullmer, and W. Knörr, 2004, Entwicklung eines modells zur berechnung der luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen. IFEU – Institut für energie und umweltforschung heidelberg gmbH., p. 122.
- Niemela, J., S.-R Saarela, T. Soderman, L. Kopperoinen, V. Yli-Pelkonen, and S. Vare, 2010, Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: A finland case study. *Biodiversity and Conservation*, 19(11), pp. 3225-3243.
- Nowak, D. J., Stevens, J. C., Sisinni, S. M. and C. J. Luley, 2002, Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*, 28(3), pp. 113-122.
- Page. G., T. Kelly, M. Minor, and E. Cameron, 2011, Modeling Carbon Footprints of Organic Production Systems to Address Carbon Trading: An Approach Based on Life cycle Assessment. *HortScience*, 46(2), pp. 324-327.
- Sklar, F. and R. Ames, 1985, Staying alive: Street tree survival in the inner-city. *Journal of Urban Affairs*, 7(1), pp. 55-66.

- Snep, R. and P. Opdam, 2010, Integrating nature values in urban planning and design. In K. J. Gaston (Ed.), *Urban Ecology*, pp. 261-286, Cambridge University Press.
- Strohbach, M. W., D. Haase, and E. Arnold, 2012, The carbon footprint of urban green space - A life cycle approach, *Landscape and Urban Planning*, 04, pp. 220-229.
- Tratalos, J., R. A. Fuller, P. H. Warren, R. G Davies, and K. J. Gaston, 2007, Urban form biodiversity potential and ecosystem services, *Landscape and Urban Planning*, 83(4), pp. 308-317.
- UNEP, 2011, *Towards a Green Economy... Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. and Mencuccini, M., 2005, *Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe*, *Silva Fennica* Mencuccini 4, Finnish Society of Forest Science, Finnish Forest Research Institute, Tampere Finland.
- Zimmer, B. and G. Wegener, 1996, Stoff-und Energieflüsse vom Forst zum Sägewerk Material and energy flows from the forest to the sawmill. *European Journal of Wood and Wood Products*, 54(4), pp. 217-223.

附錄一、IPCC（2006）林地碳匯量估算方法學

依據IPCC之2006年版本的國家溫室氣體清冊指南（以下簡稱指南）（Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）之「轉換為林地」之樹木（喬木）碳匯量估算方法學，區分十大估算步驟，說明如下：

（一）步驟一

估算轉換為林地面積，以估算前20年為計算為依據。

（二）步驟二

將轉換為林地面積，再估算集約型管理林地面積（人工林面積）及粗放型管理林地面積（天然林地面積）。

（三）步驟三

估算與土地轉換之相關初始生物量損失，估算公式如式（A1）所示：

$$\Delta C_{conversion} = \sum_i [(B_{i,after} - B_{i,before}) \cdot \Delta A_{to-others}] \cdot CF \dots\dots\dots (A1)$$

其中： $\Delta C_{conversion}$ 為土地轉換之初始生物量碳存量變化（噸碳/年）； $B_{i,after}$ 為轉換為第i類土地之生物量變化（噸生物量/公頃）； $B_{i,before}$ 為第i類土地轉換前之生物量變化（噸生物量/公頃）； $\Delta A_{to-other}$ 為某一特定年轉換為第i類土地之面積（公頃/年）； CF 為生物量的含碳比例（噸碳/噸生物量）。

（四）步驟四

針對集約型管理林地估算於該土地成長之年生物量的碳存量變化，估算公式如式（A2）所示：

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} (A_{i,j} \cdot G_{total\ i,j}) \cdot CF_{i,j} \dots\dots\dots (A2)$$

$$G_{total} = \sum_{i,j} G_w \cdot (1+R) \dots\dots\dots (A3)$$

$$\Delta C_{total} = \sum_{i,j} [I_V \cdot BCEF_l \cdot (1+R)] \dots\dots\dots (A4)$$

$$BCEF_l = BEF_l \cdot D \dots\dots\dots (A5)$$

其中： ΔC_G 為維持該類型土地之年生物量之碳存量變化（噸碳/年）； $A_{i,j}$ 為維持第*i*生態帶及第*j*氣候區之土地面積（公頃）； $G_{total,i,j}$ 為第*i*生態帶及第*j*氣候區之土地面積之年均生物量（包括地上部與地下部）成長量（噸生物量/公頃/年），有兩種計算方法，方法一，直接以生物量成長計算，如式（A3）所示，其中， G_w 為地上部生物量成長量（噸生物量/公頃/年）； R 為地下部生物量成長量占地上部生物量成長量比例，¹⁴如果假設地下部生物量沒有成長，則 $R = 0$ ；方法二：應用生物量轉換及擴展係數（biomass conversion and expansion factor），如式（A4）所示，其中， I_V 為*I*樹種（或植被）之年淨成量（公尺³/公尺/年）； $BCEF_I$ 為特定樹種（或植被）的材積（包括樹皮）之年度淨成長量，轉換為地上部生物量成長量之轉換及擴展係數（單位：噸地上部生物量/公尺³）；如果缺乏*I*樹種的 $BCEF_I$ 資料，則可透過*I*樹種的生物量擴展係數（ BEF_I ）與基本木材密度（ D ）乘積求得（如式（A5）所示）； $CF_{i,j}$ 第*i*生態帶及第*j*氣候區之土地面積之生物量的含碳比例（噸碳/噸生物量）。

（五）步驟五

依據步驟四估算粗放型管理林地之年生物量的碳存量變化。

（六）步驟六

估算商業性採伐（包括商業性木材與儲木），作為估算年碳損失量。估算公式如式（A6）所示：

$$L_{wood-removals} = H \cdot BCEF_R \cdot (1 + R) \cdot CF \dots\dots\dots (A6)$$

其中： $L_{wood-removals}$ 為木材清理之年度碳損失量（噸碳/年）； H 為年度清除木材量（圓木）（公尺³/年）；其餘變數意義與前文相同，不再贅述。

（七）步驟七

估算轉換為林地之燃木清除之年碳損失量，如式（A7）所示：

$$L_{fuelwood} = \{[(FG_{trees} \cdot BCEF_R \cdot (1 + R)] + FG_{part} \cdot D\} \cdot CF \dots\dots\dots (A7)$$

其中： $L_{fuelwood}$ 為燃木清除之年度碳損失量（噸碳/年）； FG_{trees} 為整棵樹燃燒的年清除量（公尺³/年）； FG_{part} 為部分樹燃燒的年清除量（公尺³/年）；其餘變數意義與前文相同，不再贅述。

14 依據IPCC（2006）「指南」的最佳作法，依據不同樹種， R 值採預設值。

(八) 步驟八

估算其他活動產生的年碳損失量，如式 (A8) 所示：

$$L_{disturbance} = [(A_{disturbance} \cdot B_w \cdot (1+R) \cdot CF \cdot fd)] \dots\dots\dots (A8)$$

其中： $L_{disturbance}$ 為其他因素（例如蟲害等）之年度碳損失量（噸碳/年）； $A_{disturbance}$ 為受其他因素影響的面積（公頃/年）； B_w 為受影響地區面積之地上部生物量（噸生物量/公頃）； fd 為受到影響地區之生物量損失比例；¹⁵其餘變數意義與前文相同，不再贅述。

(九) 步驟九

估算由木材、燃木及其它因素等清除之年碳損失量總合，如式 (A9) 所示：

$$\Delta C_L = L_{wood-removals} + L_{fuelwood} + L_{disturbance} \dots\dots\dots (A9)$$

其中： ΔC_L 為木材、燃木及其它因素等清之年度碳總損失量（噸碳/年）；其餘變數意義與前文相同，不再贅述。

(十) 步驟十

透過前述九大步驟，可以估算某一特定轉換為林地之土地生物量的年淨碳存量變化 (ΔC_B)（單位：噸碳/年），如式 (A10) 所示：

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{conversion} - \Delta C_L \dots\dots\dots (A10)$$

15 林分替換擾亂會清除所有生物量 ($fd=1$)，而蟲害擾亂可能僅清除部分平均生物量碳密度（例如， $fd=0.3$ ）。

附錄二

表A-1 我國住宅建築物用電量

單位：千度/年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	7,046,007	7,162,055	7,304,341	7,083,223
臺北市	4,706,866	4,776,870	4,829,501	4,791,548
臺中市	4,714,361	4,726,678	4,908,610	4,880,948
臺南市	2,630,223	3,337,483	3,424,504	3,323,358
高雄市	4,906,349	4,950,844	4,993,269	4,658,163
宜蘭縣	722,154	750,070	772,346	757,787
桃園市	3,693,519	3,735,420	3,889,246	3,819,162
新竹縣	899,524	913,288	956,883	889,180
苗栗縣	884,032	892,533	917,533	847,973
彰化縣	2,070,901	2,063,417	2,143,179	2,083,192
南投縣	771,142	768,175	792,081	797,015
雲林縣	1,161,765	1,166,631	1,206,037	940,079
嘉義縣	803,648	801,188	817,681	473,993
屏東縣	1,466,275	1,474,734	1,483,705	1,169,584
臺東縣	333,960	343,176	345,009	341,629
花蓮縣	556,924	571,086	573,249	780,791
澎湖縣	157,698	159,481	162,444	161,415
基隆市	647,516	654,738	667,390	1,452,422
新竹市	837,664	845,790	874,000	643,110
嘉義市	478,660	476,444	488,016	560,657

資料來源：台灣電力公司，網址：<http://www.taipower.com.tw/>。

表A-2 我國住宅建築物樓地板面積

單位：m²/年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	3,116,373	2,143,452	1,814,024	2,523,908
臺北市	1,529,750	1,359,680	995,746	1,172,439
臺中市	1,077,727	1,671,145	1,312,882	1,779,160
臺南市	495,736	1,044,441	1,112,464	1,164,047
高雄市	1,063,992	1,521,876	1,211,429	1,546,387
宜蘭縣	93,006	138,807	253,823	161,205
桃園縣	1,141,901	813,868	1,609,516	1,410,710
新竹縣	543,636	339,082	654,961	888,632
苗栗縣	186,498	154,917	217,389	289,539
彰化縣	209,402	195,198	311,556	397,443
南投縣	103,639	90,635	165,403	162,648
雲林縣	106,347	141,884	201,063	262,809
嘉義縣	70,982	83,403	96,152	122,939
屏東縣	87,568	175,460	257,676	237,546
臺東縣	30,095	54,044	60,303	64,050
花蓮縣	89,986	85,475	83,369	105,653
澎湖縣	55,385	45,169	22,289	13,983
基隆市	233,599	64,612	96,423	120,957
新竹市	602,040	339,010	468,805	660,376
嘉義市	94,823	90,764	146,188	184,843

資料來源：內政部營建署，網址：http://www.cpami.gov.tw/chinese/index.php?option=com_content&view=article&id=7302&Itemid=102。

表A-3 我國歷年家庭戶口數

單位：戶數/年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	1,375,268	1,405,348	1,431,791	1,458,292
臺北市	969,418	983,237	999,879	1,017,063
臺中市	837,042	852,788	867,854	883,302
臺南市	631,886	640,132	648,283	656,402
高雄市	1,007,751	1,022,493	1,035,012	1,046,588
宜蘭縣	151,942	154,021	156,356	159,031
桃園市	654,106	673,477	686,273	701,827
新竹縣	157,821	161,237	165,495	170,476
苗栗縣	170,104	172,725	175,305	178,404
彰化縣	359,341	363,424	367,801	372,303
南投縣	169,274	170,693	172,262	174,398
雲林縣	227,121	229,669	231,594	235,001
嘉義縣	174,312	176,398	177,906	179,676
屏東縣	274,745	276,889	278,703	280,934
臺東縣	79,756	80,411	80,840	81,342
花蓮縣	119,916	120,903	121,833	122,651
澎湖縣	33,134	34,199	35,031	36,171
基隆市	146,136	147,187	147,971	148,805
新竹市	138,505	142,057	145,517	149,056
嘉義市	94,513	95,152	96,043	97,018

資料來源：內政部戶政司，網址：<http://sowf.moi.gov.tw/stat/year/list.htm>。

表A-4 我國歷年人口數

單位：人/年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	3,873,653	3,897,367	3,916,451	3,939,305
臺北市	2,607,428	2,618,772	2,650,968	2,673,226
臺中市	2,635,761	2,648,419	2,664,394	2,684,893
臺南市	1,875,406	1,873,794	1,876,960	1,881,645
高雄市	2,770,887	2,773,483	2,774,470	2,778,659
宜蘭縣	461,625	460,486	459,061	458,595
桃園縣	1,978,782	2,002,060	2,013,305	2,030,161
新竹縣	510,882	513,015	517,641	523,993
苗栗縣	561,744	560,968	562,010	563,976
彰化縣	1,312,467	1,307,286	1,303,039	1,299,868
南投縣	530,824	526,491	522,807	520,196
雲林縣	722,795	717,653	713,556	710,991
嘉義縣	547,716	543,248	537,942	533,723
屏東縣	882,640	873,509	864,529	858,441
臺東縣	232,497	230,673	228,290	226,252
花蓮縣	340,964	338,805	336,838	335,190
澎湖縣	96,210	96,918	97,157	98,843
基隆市	388,321	384,134	379,927	377,153
新竹市	411,587	415,344	420,052	425,071
嘉義市	273,861	272,390	271,526	271,220

資料來源：內政部戶政司，網址：<http://sowf.moi.gov.tw/stat/year/list.htm>。

表A-5 我國歷年住宅建築數量

單位：間/年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	5,729,008	5,742,503	5,422,428	6,423,750
臺北市	3,414,952	3,416,338	3,527,963	2,815,952
臺中市	1,799,119	1,819,622	3,193,261	2,739,116
臺南市	1,090,614	1,073,138	2,384,958	2,040,171
高雄市	2,221,483	2,206,911	3,633,142	2,877,008
宜蘭縣	671,735	659,053	669,723	775,222
桃園縣	2,833,292	2,850,607	2,282,870	2,038,980
新竹縣	659,124	671,119	558,392	667,649
苗栗縣	698,796	699,206	720,483	549,522
彰化縣	1,465,011	1,482,232	1,524,077	1,059,029
南投縣	624,360	616,442	606,908	539,469
雲林縣	895,848	889,854	979,945	673,826
嘉義縣	659,751	655,830	688,337	512,214
屏東縣	1,077,060	1,075,264	1,071,830	767,275
臺東縣	331,352	331,477	350,578	315,035
花蓮縣	503,168	500,091	513,053	364,690
澎湖縣	123,579	123,282	130,559	114,849
基隆市	624,545	612,665	640,310	440,638
新竹市	585,857	601,059	541,440	446,949
嘉義市	415,901	416,330	370,730	329,751

資料來源：內政部戶政司，網址：<http://sowf.moi.gov.tw/stat/year/list.htm>。

表A-6 我國歷年住宅建築屋齡

單位：年

縣市別 \ 年度	2009年	2010年	2011年	2012年
新北市	21.4	22.0	22.7	17.7
臺北市	26.5	27.3	27.9	21.7
臺中市	18.5	19.4	22.5	17.5
臺南市	23.0	23.8	26.4	20.3
高雄市	22.4	23.3	24.8	19.3
宜蘭縣	25.6	26.3	27.0	20.8
桃園縣	18.7	20.1	20.3	15.8
新竹縣	21.4	22.3	22.4	17.2
苗栗縣	27.4	28.6	29.2	22.4
彰化縣	25.5	27.0	27.8	21.5
南投縣	27.7	28.5	28.0	21.3
雲林縣	29.7	30.8	30.8	23.6
嘉義縣	28.3	29.4	30.0	23.3
屏東縣	27.5	28.3	28.4	21.8
臺東縣	28.3	29.2	29.5	22.7
花蓮縣	26.1	27.2	27.9	21.7
澎湖縣	34.3	35.3	32.3	24.0
基隆市	22.1	23.0	23.8	18.6
新竹市	20.5	21.1	21.3	16.5
嘉義市	24.4	25.5	26.0	20.1

資料來源：內政部不動產資訊平台，網址：<http://pip.moi.gov.tw/NET/E-Statistics/E5.aspx>。