

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

基於 BIM 之綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法

A BIM-based Method for Estimating  
CO<sub>2</sub> Capture of Green Vegetation

周敬淳

Ching-Chun Chou

指導教授：謝尚賢 博士

Advisor: Shang-Hsien Hsieh, Ph.D.

中華民國 105 年 7 月

July 2016

# 國立臺灣大學碩士學位論文

## 口試委員會審定書

基於 BIM 之綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法

A BIM-based Method for Estimating

CO<sub>2</sub> Capture of Green Vegetation

本論文係周敬淳君 (R02521619) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 105 年 4 月 21 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

謝 尚 賢

(指導教授)

陳 柏 翰

邱 祈 榮

謝尚賢

陳柏翰

邱祈榮

系主任、所長

呂 良 正

呂良正

## 致謝



本研究之所以能完成，必須由衷的感謝我的指導教授謝尚賢老師，除在研究上導引我思考、探究諸多可能性與做研究應具備的專業態度外，謝老師總在重要的時刻給予支持與深具啟發性之建議；生活中老師不吝分享其寶貴的經驗與見聞，如同人生道路上的一盞盞明燈，照亮了前方的道路。再來要感謝邱祈榮老師無私且用心地指導與森林相關的知識與長期願景，花費諸多時間向我細細說明，讓這份研究的價值能更上一層樓。亦相當感謝一同擔任口試委員的陳柏翰老師給予許多研究專業上之寶貴意見，補足許多研究中沒有注意到的細節。

另外要特別感謝指導資料庫技術的郭榮欽老師，郭老師具備豐富之實務經驗，總能系統性地分析技術細節，結合學術與實務觀點，提供諸多建議與鼓勵，使我獲益匪淺。CAE 組是一個充滿多樣性、活力與歡樂的地方，從陳俊杉老師與康仕仲老師的課堂上學習到的專業知識以及諸多啟蒙觀念與想法，此生受用不盡。

感謝 CAE 大家庭的朋友、學長姐、學弟妹與助理們，這份研究若沒有你們的協助與建議是無法完成的，感謝你們的傾囊相助，多次化解了我面臨的困境，紀念那些一起努力一同進退的日子，謝謝各位讓我成為你們生命中的一部份。

最後要謝謝最親愛的家人以及摯友們，長久以來的包容與關懷，總是全心支持我的決定與交流最衷心的想法，儘管大家分散在各地仍不忘聯絡彼此，並願意與我分享生活中的點點滴滴，帶我領略這美好的世界。

謝謝你們，得之於人太多，無法一一表述，最後將完成這份研究的喜悅與你們分享。Love and Peace！

## 摘要

臺灣綠建築標章分為九大指標，其中綠化量指標用以評估建築綠化區域的植栽 CO<sub>2</sub> 固定量，然而，綠建築評估手冊為避免估算作業的複雜度過高，目前未將綠化區域日照條件以及植栽品種差異納入考量，僅依照植栽類型給定單位面積 CO<sub>2</sub> 固定量。手冊中提及雖然該評估法的誤差甚大，但具備鼓勵多樣化綠地設計之功能。然而，若能將上述兩項影響因素納入考量，應可獲得更加細緻且可靠的 CO<sub>2</sub> 固定量估算結果。

著眼於建築資訊塑模 (Building Information Modeling, BIM) 技術對建築與營建產業的重要性與日俱增，越來越多的工作已基於 BIM 發展並相互整合，對於前述之議題，本研究認為 BIM 技術具備的優點包含 (1) 資訊整合、(2) 分析與模擬技術、(3) 自動化與視覺化，能有效地將現行評估方法忽略的兩項影響因素納入考量，並可促進規範型 (Prescriptive) 法規朝向性能型 (Performance-based) 法規的發展。

因此，本研究目標為提出基於 BIM 的綠化區域植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法。透過訪談執業建築師與景觀設計師，探討現行綠化區域之設計流程與議題，並提出建議之基於 BIM 之方法架構與綠化設計流程，說明研究單位、資料管理單位以及綠化設計單位扮演之角色。為驗證此方法之可行性，本研究根據該方法開發一輔助程式，並透過案例模型進行操作演示。

本研究提出之估算方法亦可用於既有綠化區域之植栽 CO<sub>2</sub> 固定量評估，更細緻之估算結果亦有助於永續發展。除此之外，本研究之成果衍生兩項值得發展與思考之議題：(1) 當設計流程逐漸轉向以 BIM 為基礎，專業人員之間的合作模式與權責分配或許需要重新構思與設計，(2) 隨著 BIM 技術之模擬與分析功能越臻成熟，現行眾多規範型法規有機會朝向性能型法規發展。

關鍵詞：建築資訊塑模、綠化量、二氧化碳、綠建築、性能型法規

## Abstract

EEWH, Taiwan's green building certification system, comprises of nine indicators, and the Greenery Indicator is designed for estimation of CO<sub>2</sub> capture. However, because green area designers need to manually calculate the estimation result, the Evaluation Manual for Green Building simplifies the formula, which ignore the sunlight condition and the differences between species. The Manual mentions that the Greenery Indicator implies huge estimation errors and is thus designed as more like an incentive policy.

As BIM technology becomes more mature and more design tasks are carried out on BIM platforms, this study considers the opportunity of using BIM to assist designers to get more accurate estimation without complicated manual calculation. Thus, a BIM-based method for estimating CO<sub>2</sub> capture of green vegetation is proposed. Some building architects and landscape architects were interviewed to help identify current design process and existing problems which may be solved with the assistance of BIM technology. In order to identify the feasibility of the proposed method, an estimation tool was developed and used to demonstrate the proposed method in a case study.

The proposed method is suitable not only for design of green buildings but also for assessment of existing green area. In addition, two potential issues worth further explorations. First, after design tasks are turned into the BIM-based process, the collaboration pattern between professionals of different disciplines may need to be redesigned. Second, the maturing of simulation and analysis capabilities of BIM technology may help the development of performance-based building codes.

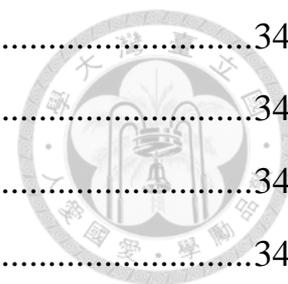
Keywords: BIM, CO<sub>2</sub> capture, green building, performance-based building codes

# 目錄



口試委員會審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	6
1.3 研究方法與流程.....	7
第二章 國家溫室氣體清冊之估算方法.....	11
2.1 背景簡介.....	11
2.2 2006 IPCC 指南估算方法.....	13
2.2.1 CO <sub>2</sub> 的吸收與排放過程.....	14
2.2.2 層級方法之定義.....	16
2.2.3 層級方法之選擇.....	17
2.2.4 氣候區與生態區.....	23
2.3 適用臺灣之轉換係數.....	26
2.3.1 碳含量比例 (CF).....	26
2.3.2 基礎木材密度 (D).....	28
2.3.3 地上部生物量與地下部生物量比例 (R).....	29
2.3.4 生物量擴展係數 (BEF) 及生物量轉換與擴展係數 (BCEF) ..	31
2.3.5 地上部生物量年生長量 (I).....	33

第三章	基於 BIM 之估算方法 .....	34
3.1	現況分析 .....	34
3.1.1	BIM 技術簡介 .....	34
3.1.2	臺灣現行綠建築規範估算方法 .....	34
3.1.3	臺灣現行綠化植栽設計流程 .....	36
3.2	建議之估算方法架構與綠化設計流程 .....	38
3.2.1	估算方法架構.....	38
3.2.2	綠化設計流程.....	40
第四章	估算輔助程式之開發 .....	44
4.1	需求分析 .....	44
4.2	BIM 工具整理與分析 .....	45
4.3	程式架構設計 .....	49
4.4	程式功能實作 .....	51
4.4.1	SQL Server.....	51
4.4.2	WCF .....	53
4.4.3	Revit API.....	55
第五章	案例演示 .....	59
5.1	案例介紹 .....	59
5.2	程式操作演示 .....	60
第六章	結論與建議 .....	71
6.1	整體貢獻 .....	71
6.2	未來展望 .....	72
	參考文獻.....	73

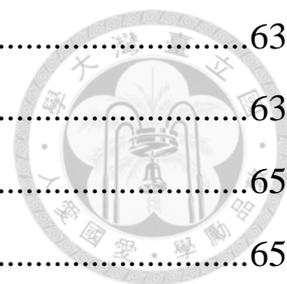


## 圖目錄



圖 1：全球大氣月平均二氧化碳濃度趨勢 (Dlugokencky & Tans, 2015) .....	2
圖 2：全球年平均氣溫趨勢 (Shaftel, 2015) .....	2
圖 3：北極海冰覆蓋面積 (Vizcarra, 2015) .....	3
圖 4：研究方法與流程.....	10
圖 5：AFOLU 報告的局部架構 (IPCC, 2006).....	13
圖 6：土地利用類別不變的林地的相應層級方法決策樹 (IPCC, 2006).....	21
圖 7：其他土地利用類別轉化為林地的相應層級方法決策樹 (IPCC, 2006) .....	22
圖 8：全球生態分區圖 (FAO, 2001) .....	24
圖 9：現行綠化區域設計流程.....	37
圖 10：建議之估算方法架構圖.....	38
圖 11：基於 BIM 之綠化區域 CO <sub>2</sub> 固定量估算流程.....	41
圖 12：植栽適應區域判斷.....	42
圖 13：分析點鄰近相似合併.....	42
圖 14：估算輔助程式之軟體架構 .....	50
圖 15：資料表關聯模型.....	53
圖 16：完成部署 WCF 服務 .....	55
圖 17：估算輔助程式之圖標.....	58
圖 18：功能區面板之控制項.....	58
圖 19：建築製圖應用乙級術科測試參考圖說 - 一層平面圖 (臺灣行政院勞 動部勞動力發展署, 2013) .....	59
圖 20：案例模型之 3D 視圖 .....	60
圖 21：綠化區域類型性質 .....	61
圖 22：完成綠化區域元件繪製.....	61

圖 23：綠化區域資訊之使用者介面 .....	63
圖 24：在模型中展示被選取的綠化區域元件 .....	63
圖 25：分析綠化區域日照值之使用者介面 .....	65
圖 26：Solar Analysis 工具.....	65
圖 27：日照分析之設定介面.....	66
圖 28：日光設定介面.....	66
圖 29：完成區域日照值分析.....	67
圖 30：日照分析結果之視覺化呈現 .....	67
圖 31：配置綠化區域植栽之使用者介面 .....	68
圖 32：於所有推薦品種中挑選植栽 .....	69
圖 33：使用篩選器挑選植栽.....	69
圖 34：CO <sub>2</sub> 固定量估算介面 .....	70



## 表目錄



表 1：各種植栽單位面積二氧化碳固定量 $G_i$ ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) .....	4
表 2：林地中所使用的碳庫定義 (IPCC, 2006).....	16
表 3：全球氣候帶分區與生態分區表 (FAO, 2001).....	23
表 4：IPCC 指南提供之碳含量比例 (IPCC, 2006).....	27
表 5：臺灣碳含量比例之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014).....	27
表 6：IPCC 提供之熱帶樹種基礎木材密度 (IPCC, 2006).....	28
表 7：臺灣基礎木材密度之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014).....	29
表 8：IPCC 提供之地下部與地上部生物比例 (IPCC, 2006).....	30
表 9：臺灣地上部生物量與地下部生物量比例之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014) .....	30
表 10：IPCC 提供之生物量轉換與擴張係數 (IPCC, 2006).....	32
表 11：臺灣生物量轉換與擴展係數之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)..	32
表 12：IPCC 提供之天然林地上部生物量年生長量 (IPCC, 2006).....	33
表 13：IPCC 提供之人工林地上部生物量年生長量 (IPCC, 2006).....	33
表 14：臺灣地上部生物量年生長量之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014) .	33
表 15：喬木最小栽種間距與樹冠投影面積 $A_i$ 基準 (財團法人臺灣建築中心, 2014) .....	35
表 16：日照條件對應之日照量.....	41
表 17：臺灣國內較常使用之 BIM 應用程式比較 .....	48
表 18：違反第三正規化之範例資料表 .....	52

# 第一章 緒論



## 1.1 研究背景與動機

2014 年 4 月，美國國家海洋暨大氣總署 (NOAA) 首次測得全球月平均二氧化碳濃度突破 400 ppm (圖 1)，為該組織自 1958 年開始觀測以來的最高值。觀察過去近六十年之觀測數據，二氧化碳濃度呈現穩定的上升趨勢，自 1958 年的 320 ppm 一路升高到 400 ppm 以上 (Dlugokencky & Tans, 2015)。而二氧化碳濃度的上升趨勢對於全球氣候的影響一直是科學家重視的議題。目前已知二氧化碳能吸收地球表面以紅外線 (Infrared) 為主的熱輻射。在白天的時候，地球表面吸收來自太陽的熱輻射與可見光而變得溫暖；同時，地球表面也因釋放紅外線熱輻射至外太空而冷卻，地表的溫度越高，釋放的熱輻射量也越多。因此，當地表吸收的熱輻射量和釋放到太空中的熱輻射量相等而達到平衡的時候，地表便能維持在一個穩定的溫度。而大氣中有些具有吸收紅外線熱輻射熱能力的氣體，像是二氧化碳，可以將熱保留在大氣中，避免地表冷卻速度過快，就好像在地表蓋上一張毯子，降低熱損失，科學家稱此現象為溫室效應，並將存在於大氣中並具有吸收紅外線熱輻射能力的氣體稱為溫室氣體 (Tans, 2007)。

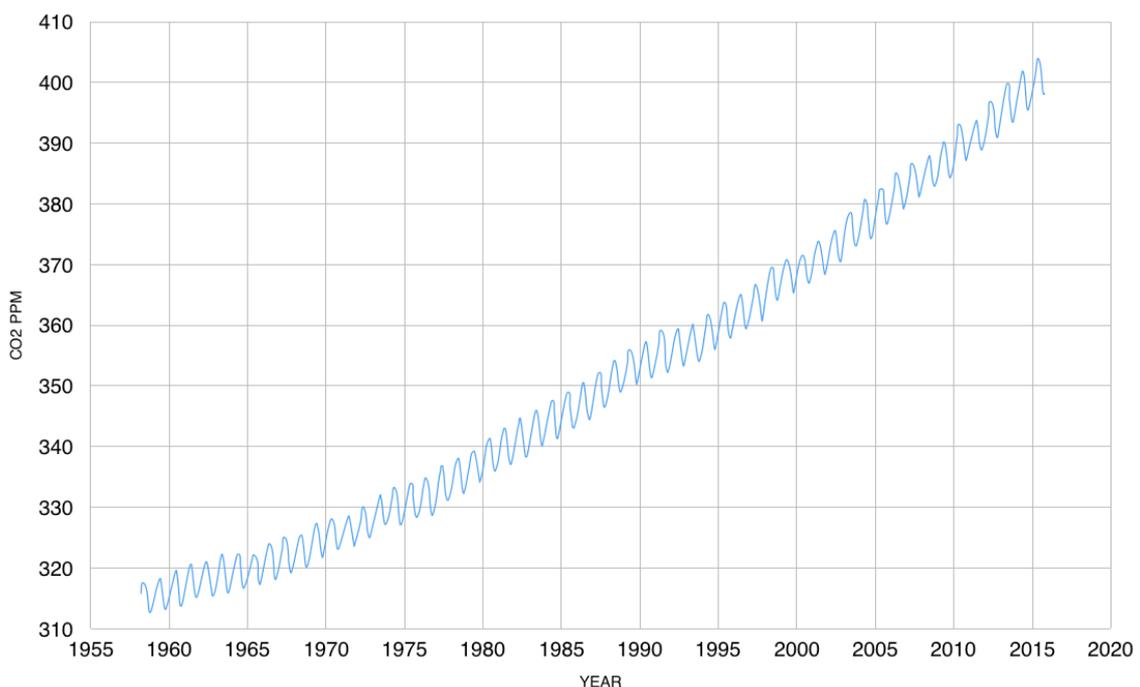


圖 1：全球大氣月平均二氧化碳濃度趨勢 (Dlugokencky & Tans, 2015)

值得注意的是，近年來全球氣溫亦呈現上升趨勢，美國國家航空暨太空總署 (NASA) 的資料顯示，2014 年的年平均氣溫與二十世紀初期相比高出  $1^{\circ}\text{C}$ ，且 2014 年也是有紀錄以來最暖和的一年 (圖 2)，在所有觀測記錄的 136 年中，平均氣溫最高的前十名除了 1998 年之外全發生在 2000 年之後，全球暖化的現象已是現在進行式 (Shaftel, 2015)。而根據美國國家冰雪資料中心 (NSIDC) 的數據，北極冬季海冰最大覆蓋面積於 2015 年創下歷史新低 (圖 3)，且發生日期較往年提前了兩個禮拜 (Vizcarra, 2015)。追蹤過去三十五年 4 月份的北極海冰覆蓋面積，則呈現每十年縮小 2.4% 的下降趨勢 (Vizcarra, 2015)。種種跡象皆顯示，全球氣溫暖化已經開始對地球的自然環境產生影響。

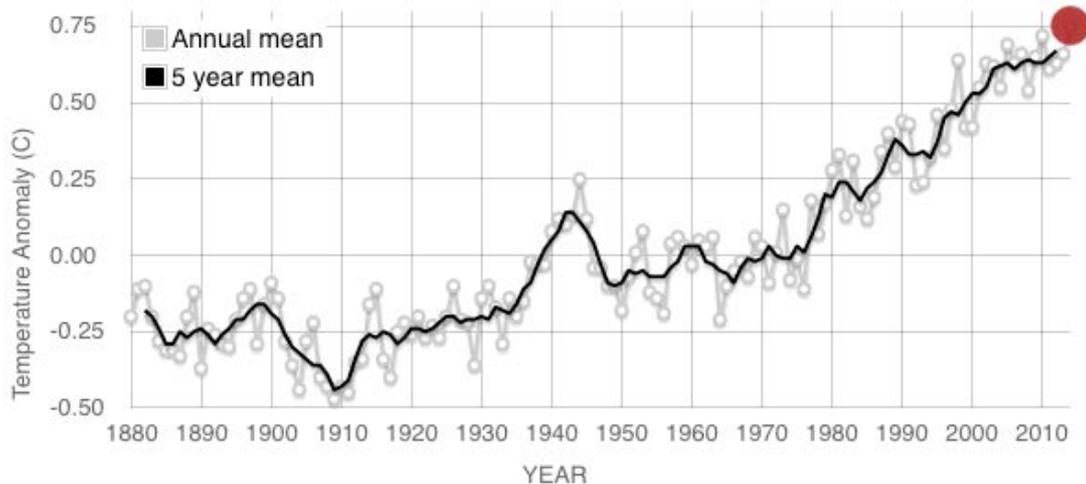


圖 2：全球年平均氣溫趨勢 (Shaftel, 2015)

科學家推測，大氣溫室氣體濃度上升是導致全球暖化的主要因素 (Przyborski, 2016)，而大氣中二氧化碳的濃度取決於兩項重要的變因，碳匯以及碳源，匯和源兩者是相對的概念，聯合國氣候變化綱要公約第一條定義「“匯”：指大氣中清除溫室氣體、氣溶膠或溫室氣體前體的任何過程、活動或機制。“源”：指向大氣排放溫室氣體、氣溶膠或溫室氣體前體的任何過程或活動。」(工業技術研究院能源與資源研究所, 1998)。而陸地森林的固碳作用是主要的碳匯之一，在 1997

年 12 月通過的「京都議定書」中亦承認森林碳匯對減緩氣候變暖的貢獻，並要求加強森林可持續經營與植被恢復與保護(臺灣綜合研究院, 1997)。

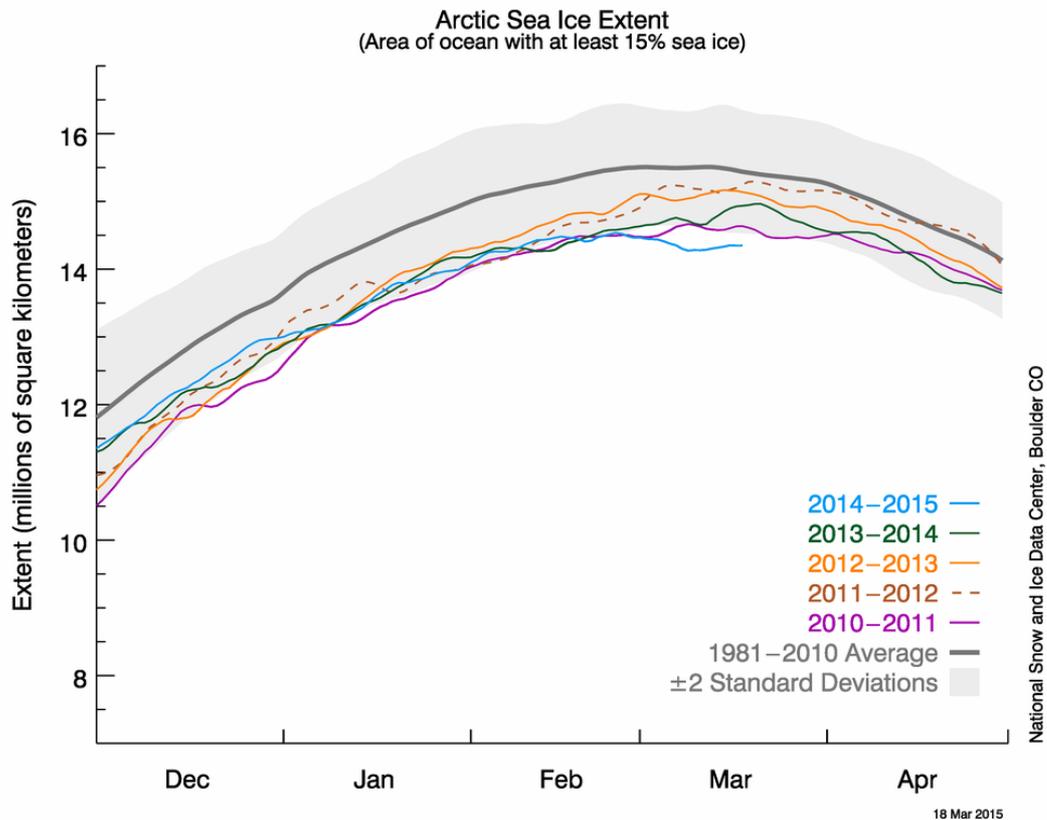


圖 3：北極海冰覆蓋面積 (Vizcarra, 2015)

因應前述之國際共識，臺灣內政部建築研究所委託財團法人臺灣建築中心於 1999 年 9 月 1 日起開始受理「綠建築標章」申請，「綠建築評估手冊 2015 年版」書中以綠建築九大指標評估系統 (EEWH) 來評估綠建築等級，其中綠化量指標用以評估基地植物的生態系統過程 (包含呼吸作用釋放 CO<sub>2</sub> 與光合作用吸收 CO<sub>2</sub>) 對 CO<sub>2</sub> 流量的影響，並以植物四十年生命期中的 CO<sub>2</sub> 固定量作為綠化效益的換算標準，給予各種類型植栽不同數值之二氧化碳固定量 (Gi 值)。各植栽種類的 CO<sub>2</sub> 固定量見表 1 (財團法人臺灣建築中心, 2014)；然而，評估手冊當中提及此估算方法之誤差甚大。本研究探究其原因主要有以下兩點：(1) 未充足反映栽植區域氣候與日照條件、(2) 植栽類型分類較為簡化。第一點為栽植區域的有效日照時數深受建築物遮蔽影響，然由於當代建築物的高度與外觀幾何多變，造成難以透過傳統 2D

繪圖法估算日照時數，而日照時數影響植栽生長狀況甚鉅，因而忽略栽植區域的日照時數條件會增加評估植栽 CO<sub>2</sub> 固定量之誤差；第二點為儘管同類型的植栽有較為接近的 CO<sub>2</sub> 固定量，不同品種之間仍存在差異，包含生長速度、適應日照類型及其他植栽特性等。而綠化量指標評估法包容此誤差的原因在於期望透過較為簡單且便利的方式來鼓勵多樣化綠地設計，若要提高估算的準確度，則會額外需要許多工作量，屬於妥協下的結果。因此，若要改善因植栽類型分類簡化而造成之估算誤差，則勢必需要使用與現行估算公式不同的估算方法。

表 1：各種植栽單位面積二氧化碳固定量 Gi (kg/m<sup>2</sup>)

植栽類型		CO <sub>2</sub> 固定量 Gi (kg/m <sup>2</sup> )	覆土深度	
			屋頂、陽台、露台	其他
生態複層	大小喬木、灌木、花草密植混種區(喬木間距 3.5m 以下)	1200	1.0m 以上	1.0m 以上
喬木	闊葉大喬木	900	0.7m 以上	
	闊葉小喬木、針葉喬木、疏葉喬木	600		
	棕櫚類	400		
灌木		300	0.4m 以上	0.5m 以上
多年生蔓藤		100		
草花花圃、自然野草地、水生植物、草坪		20	0.1m 以上	0.3m 以上
註：栽種於屋頂及露台的喬木若有良好的防颱技術工法(必須檢附技術資料)，加設特殊固定設施可給予優惠，其覆土深度得降為原來之 60%。				

時至今日，臺灣已推行「綠建築標章」十多年，隨著綠建築標章推廣逐漸成熟，臺灣首都臺北市之都市發展局於 2014 年公告臺北市綠建築自治條例，該條例自公告日起實施。條例中第三條第五項規定「新建建築物應符合下列綠建築基準：……應取得綠建築標章之非公有建築物及工程總造價達新臺幣五千萬元以上之公有建築物，屋頂平臺綠化面積應達百分之五十……。」第五條則定義「應取得綠建築標章之非公有新建建築物」為屬建築技術規則規定之高層建築物或申請增加容積者。另外，第四條規定公有新建建築物之工程總造價達新臺幣三千萬元以上



者，應取得綠建築分級評估合格級以上標章；達五千萬元以上者，應取得綠建築分級評估銅級以上標章(臺北市都市發展局, 2014)。綜合以上條文，臺北市眾多建築物自 2014 年起開始受法規要求進行區域綠化，且必須符合綠建築標章分級評估之建築物數量也較以往提升，進而提高滿足綠化量指標的設計需求。根據過往經驗，臺北市的施行政策往往是臺灣整體發展的領航者，因此，本研究預測將來臺灣對於建築物綠化的設計需求量將會有顯著的增加趨勢。

檢視法規的精神，主要目的為保障公眾的健康、安全與福利，要求的僅是最低標準。對設計者而言，法規則是一條清楚的責任界線，滿足法規則可謂設計者已滿足應盡之責任，避免設計者責任無限上綱之情形發生。在這樣的背景下，過去法規條文在設計時會盡可能地將可控的變因納入限制，透過歷史經驗與研究成果一點一點累積起來，逐漸降低意外發生的機率，使得設計過程在遵循法規限制下，應能達成法規訂立之目的，這樣的法規稱為規範型 (Prescriptive) 法規。然而，規範型法規經常會變得過於複雜且需要高度專業化的人員來詮釋，同時，過多變因受到控制亦造成設計缺乏彈性，設計者能改變或創新的空間有限，甚至發生能達成需求目的之設計卻無法通過法規檢核的狀況。有鑑於此，近年來眾多的規範型法規逐漸朝向以基於效能的 (Performance-Based) 法規，以避免規範型法規之缺點，基於效能的法規列出必須滿足的目標，而不限制達成這些目標的方法。

進而觀察臺灣現行綠建築設計，多為由建築師負責。然而，臺灣建築師之教育養成過程中，因綠化植栽相關知識與養成建築師核心能力所需之專業知識偏離較遠，有關綠化植栽特性的課程普遍非列為必修。因此，大多數執業之建築師對於此領域之相關知識往往較為陌生，建築師通常會將綠化區域的設計工作委託景觀設計師進行。而在最終設計版本確定之前，雙方為了取得共識，經常需要多次往返文件以進行溝通協作，其中不乏景觀設計師為了說明較為專業的植栽背景知識而產生之時間成本，而在建築物綠化日益成為設計要求的今天，這些成本累積起來相當可觀。因此，如何增進建築師與景觀設計在進行綠化區域設計時的效率，亦是本研究欲解決的議題之一。



近年來，建築與營建產業界新興之 Building Information Modeling (BIM) 技術，提供許多實務應用上的突破機會。BIM 技術提供串連建築物生命週期的數位化模型資訊建構、管理與應用潛力。而建築物生命週期涵蓋規劃階段、設計階段、施工階段、營運維護階段以及最後的拆除階段。因此，許多人也開始注重 BIM 技術應用於綠建築設計階段的發展 (謝尚賢, 綠建築結合 BIM 開創可能性, 2014)。BIM 實務應用的優勢之一，在於實際施工之前，透過事先模擬與分析，提供決策者更多的資訊，減少以往因為資訊不足而必須仰賴決策者經驗所造成的隱藏風險 (謝尚賢, et al., 2016)；分析與模擬的成果搭配視覺化技術，亦可加速溝通與協作之效率。而模擬分析工具的成熟有助於基於效能之設計，設計者可以透過模擬分析工具獲得更可靠的效能評估，從而知道是否滿足法規之目的。

陳以文於 2013 年開發一運用 BIM 模型的法則式 (Rule-Based) 綠建築規範檢核系統，用以輔助綠建築設計。法則式系統將已知的經驗或規則儲存於知識庫 (Knowledge Base)，推理引擎 (Inference Engine) 取得所需的資料後，配合知識庫中的經驗或規則導出適當的答案。該系統從 BIM 模型中自動擷取所需資料，設計者僅需將其他必須的資訊輸入後，便可得知設計結果是否符合規範之要求 (陳以文, 2013)。該研究成果實現運用 BIM 模型自動化檢核綠建築設計，屬於規範型法規之檢核，往後若導入分析模擬技術，應可促使規範型法規朝向基於效能型法規發展，利於擴大設計者的發揮空間。

綜合前述之背景，本研究認為透過 BIM 分析模擬技術以及尋找合適的估算方法可以改善以下現況：(1) 現行綠建築評估手冊未反映栽植區域日照條件所產生之估算誤差、(2) 現行綠建築評估手冊植栽類型分類較為簡化所造成之估算誤差、(3) 建築師與景觀設計師進行綠化區域設計時之效率不彰、(4) 促進基於效能型法規之發展。

## 1.2 研究目的

為了將日照條件與植栽品種差異兩項變因納入綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算，以降低估算誤差，並盡可能不增加設計者之工作負擔，本研究目的為運用 BIM 技術

之事前模擬、自動化與視覺化之特性，發展一基於 BIM 之評估綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量的方法。為驗證此方法之可行性，本研究設計並實作一估算輔助程式，並以案例演示其操作過程。



### 1.3 研究方法與流程

為達成前述目的，本研究將探討現行可應用並符合本研究需求之 BIM 技術與植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法，發展一符合研究目的之評估綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量的方法，以滿足於設計階段中實現即時評估綠化區域植栽 CO<sub>2</sub> 固定量之需求，且開發一輔助程式作為原型。透過建立各植栽品種之參數資料庫供輔助程式使用，以改善現行評估方法所犧牲之估算準確性，同時使建築師與景觀設計師甚或是其他設計者能於綠化區域設計階段即時獲得植栽固碳性能評估之回饋，以提高工作效率。考量現行評估手冊之估算式僅適用手冊中植栽類型分類方式，本研究勢必需要找尋新的估算方法，以達成研究目的。因此，本研究之研究方法與流程如圖 4 所示，流程分為五個主要部份：

#### 1. 研究現有植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算替代方法

首先，為了能反映各植栽品種的差異，需要找尋其它合適且可靠的植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法，結合研究目的後，判斷該方法是否合適與可靠的條件有四項：(1) 能反映不同植栽品種之 CO<sub>2</sub> 固定量差異者、(2) 考量栽植區域日照條件者、(3) 具備公信力者、(4) 考量較細節氣候條件者。前三項條件為必要，第四項條件在無法找到合適方法時可先不考慮。找到合適之估算方法後，需理解該評估方法背後之理論架構，掌握估算流程中每一個步驟之適用範圍與前提，接著探討應用於臺灣國內之最適方案與資料來源評估，然可預期以植栽品種作為分類方式之評估方法無可避免會產生部分植栽相關參數缺乏的狀況，若與到此種情況，本研究會回歸使用植栽類型分類方式。



## 2. 挑選合適之 BIM 開發工具

目前 BIM 工具之發展已有一段時間，眾多 BIM 軟體供應商提供了各式 BIM 環境、平臺以及工具 (三者之詳細說明請參閱 3.2 節)。BIM 工具為達成某特定功能的應用程式，例如日照分析、碰撞檢測、排程模擬等工具 (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)。而本研究預計產出能幫助使用者透過此應用程式輔助估算綠化區域之植栽 CO<sub>2</sub> 固定量，為實現單一功能之應用程式，因此以 BIM 工具稱呼之。而工欲善其事，必先利其器，因本研究重點在於提出一個可達成本研究目的植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法，用以評估是否可透過運用 BIM 技術來達成研究目的，將本著以下幾個原則挑選合適之 BIM 工具進行開發：(1) 能進行日照分析、(2) 普及性高、(3) 使用便利性高、(3) 開發便利性高。各名詞定義請參閱 3.2 節。

## 3. 開發估算程式

本研究採用 Autodesk Revit 2014 作為開發平臺，使用 Revit 提供之應用程式介面 (API，詳細介紹請參閱 3.2.3 節) 開發綠化區域 CO<sub>2</sub> 估算輔助程式。開發估算程式分成三個子步驟：分析程式需求、設計程式架構與實作程式功能。首先，程式需求應從使用者角度出發，以本研究之目的為基礎，探討設計者如何進行綠化區域植栽配置最為直覺且有效率，提出初步的使用 Revit 與本研究開發之輔助程式配置綠化區域植栽的流程，並考量現有軟體技術與其他限制，進行流程與程式功能的調整。接著，根據需求以模組化的方式陳述程式的架構，提出模組之間的互動、使用者介面以及運作邏輯。最後，根據提出的程式架構進行實作，內容將描述各程式功能的實作方法及編寫原則，並透過虛擬程式碼的方式展示其實作細節。

## 4. 使用案例測試程式

本步驟將透過實際的 Revit 案例模型驗證本研究開發之程式是否達成研究目的，並針對流程細節進行測試、展示與檢討，以了解程式設計是否



完善。本研究採用國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組課程提供之 BIM 案例模型進行案例測試與展示，該案例以國家建築製圖應用乙級技術士技能檢定考試試題之工程圖說為基準，工程圖說由勞動部勞動力發展署提供(臺灣行政院勞動部勞動力發展署, 2013)。本案例模型由臺灣大學 BIM Center 專案工程師建置，模型本身是在 Revit 平臺中建置，無轉檔之需求。該案例模型並已用於多堂 BIM 相關課程中，模型品質穩定可靠。此案例為地上六層、地下二層之建築物，雖並非存在於現實之建築物，然其有足夠之基地與屋頂空間供綠化區域測試，適合作為本研究之測試案例。

## 5. 結論與建議

最後，回顧本研究的主要貢獻與針對本研究因當前限制而未觸及的部份提出未來展望。研究之主要貢獻包含呼應研究目的達成與否進行討論，並描述其應用範圍以及限制；未來展望則描述本研究尚未完善的部分以及可繼續發展、延伸之方向，提供有共同興趣的研究夥伴參考。

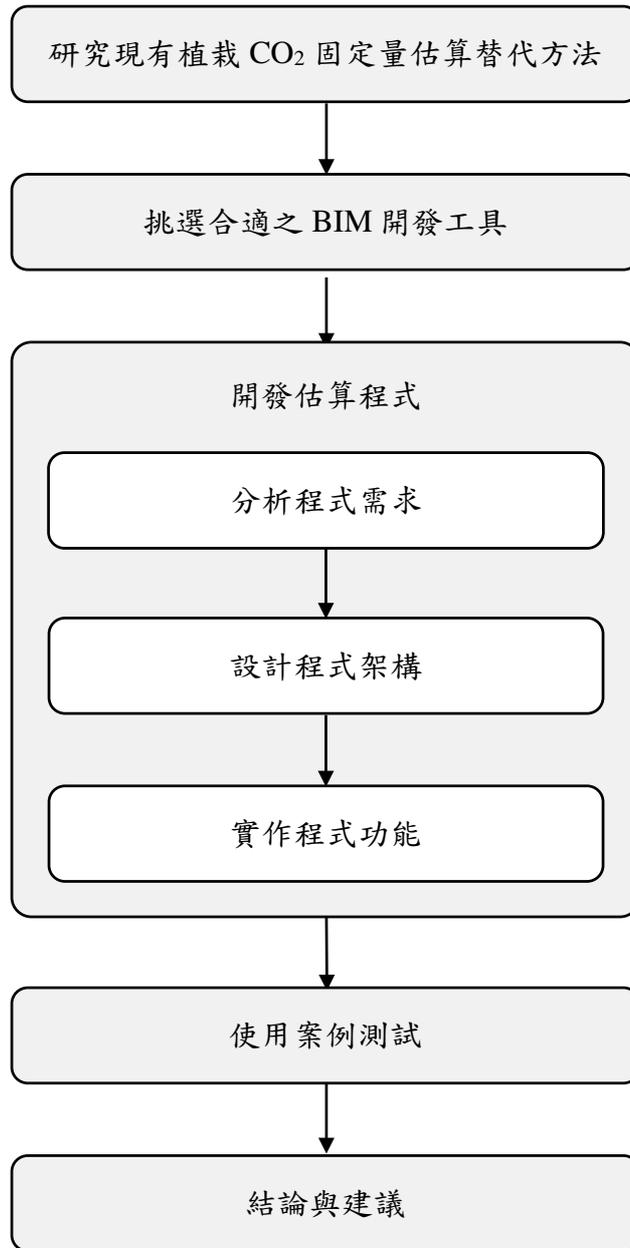


圖 4：研究方法與流程

## 第二章 國家溫室氣體清冊之估算方法



### 2.1 背景簡介

國家溫室氣體清冊是「聯合國氣候變化綱要公約」(The United Nations Frameworks Convention on Climate Change, UNFCCC) 要求之兩年期報告，目的是了解締約國的人為溫室氣體排放與吸收狀況。2011 年於南非德爾班召開之 UNFCCC 第 17 次締約國會議 (The 17th Conference of the Parties, COP) 與京都議定書第 7 次締約國會議 (The 7th Conference of the Parties serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol, CMP) 通過 2/CMP.7 決議文，該決議文鼓勵非附件一 (附件一為締約國清單) 之國家提交「兩年期更新報告」以及「國家通訊」，其中包含國家溫室氣體清冊 (UNFCCC, 2014)。然而考量世界各國之資源與經驗不同，為幫助各國執行完整且可靠的溫室氣體排放與吸收估算報告，政府間氣候變化專家委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 因此製作國家溫室氣體清冊指南 (Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)，使得編撰程序有標準可循。除了估算的方法外，指南還提供各式估算所需的排放因子與參數的預設值，因此在最簡單的情況下，國家僅需獲取活動資料即可 (IPCC, 2006)。IPCC 是由「世界氣象組織」(World Meteorological Organization, WMO) 與「聯合國環境規劃署」(United Nations Environment Program, UNEP) 於 1998 年所成立的國際機構，其主要目的為評估有助於了解人為造成的氣候變遷的相關科學資訊 (IPCC, 1998)。

雖然臺灣非屬於附件一之國家，然而臺灣政府認為身為國際社會的一份子，便有責任為減碳貢獻一己之力，因此主動遵循締約國會議訂定之規範，採用 IPCC 國家溫室氣體清冊指南之統計方法進行統計作業，並納入國家溫室氣體清冊統計成果。臺灣於 2014 年首次編撰國家溫室氣體清冊報告，該報告是根據 IPCC 於 1997 年出版之「修訂版國家溫室氣體排放清冊指南」(Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory) 並參考 IPCC 於 2000 年以及 2003 年提供之「良好做法指南及不確定性管理」(Good Practice Guidance and

Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories) 所編製而成。臺灣  
2014 年國家溫室氣體清冊架構依照 1996 IPCC 指南，共分以下五個部門：



1. 能源部門
2. 工業製程部門
3. 農業部門
4. 土地利用變化與林業部門
5. 廢棄物部門

其中與本研究相關之植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算位於清冊中林業部門之下。由於臺灣森林資源及土地利用調查與林業統計資料不盡完整，因此臺灣 2014 年國家溫室氣體清冊僅以目前臺灣國內可取得及歸納之資料進行分類計算；估算式中所需之相關係數，亦以臺灣研究可得之數值為主，若無相關資料，則採用 1996 IPCC 指南提供之預設值。

為配合 UNFCCC 於 2015 年起使用 2006 IPCC 國家溫室氣體清冊指南 (以下稱 2006 IPCC 指南)，臺灣已開始籌備以 2006 IPCC 指南為統計基礎與架構之國家溫室氣體清冊 (臺灣行政院環境保護署, 2014)。2006 IPCC 指南是基於「1996 IPCC 國家溫室氣體清冊指南修正版」以及接續的「關於土地利用、土地利用變化和林業的優良做法指南」(Good Practice Guidelines for Land Use, Land Use Change and Forestry, GPG-LULUCF) 的主要內容與精神，涵蓋新的科學成果、技術。2006 IPCC 指南共分成五冊，分別為：

1. 一般指引與報告 (General Guidance and Reporting)
2. 能源 (Energy)
3. 工業製程與產品使用 (Industrial Processes and Product Use)
4. 農業、森林與其他土地利用 (Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)
5. 廢棄物 (Waste)



## 2.2 2006 IPCC 指南估算方法

本研究對 2006 IPCC 指南做初步理解後，判斷建築基地或建築本體上之綠化區域與森林的土地利用類別組成(生物量、死有機質與土壤)相近，因此參考 2006 IPCC 指南中第四冊 AFOLU 作為 CO<sub>2</sub> 固定量估算方式的統計基礎。AFOLU 項目下分為三個子項目，包含牲畜、土地及土地的集成源與非 CO<sub>2</sub> 排放源，其中與本研究有關之土地利用類別為林地，位於子項目土地之下(圖 5)。每個土地利用類別進一步細分為類別不變與由別種土地利用類別轉化的土地。馬拉喀什協定對林地之明確定義為「森林的包含面積至少大於 0.05-1.0 公頃，喬木樹冠覆蓋率在 10%-30% 以上，同時喬木成熟後的最低高度應為 2-5 公尺。另外，正在生長中的天然林或人工林，雖未達到 10%-30% 的覆蓋度，或 2-5 公尺的高度，亦可視為林地。(臺灣大學森林系, 2014)」

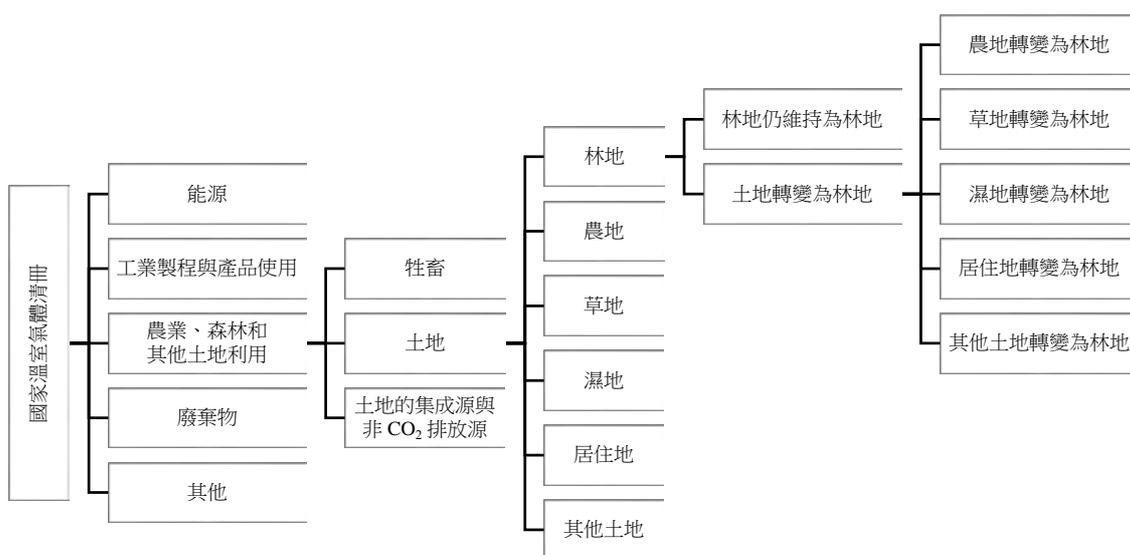


圖 5：AFOLU 報告的局部架構 (IPCC, 2006)

2006 IPCC 指南估算森林和其他土地利用 CO<sub>2</sub> 排放量和清除量的指南與方法中包含的範疇有多項，本節依據本研究估算植栽 CO<sub>2</sub> 固定量之需求，整理 2006 IPCC 指南所列的指南和方法項目「所有管理土地上，生物量、死有機質和土壤中的碳庫變化引起的 CO<sub>2</sub> 排放和清除」之內容。



## 2.2.1 CO<sub>2</sub> 的吸收與排放過程

估算溫室氣體流量有兩種主要方式：(1) 以碳庫隨時間的淨變化表示、(2) 直接以來自和進入大氣層的氣體流通率表示。第一種方式適用於大多數 CO<sub>2</sub> 流量估算。利用淨變化估算是基於多數生態系統碳庫的變化是通過陸地與大氣層間的 CO<sub>2</sub> 交換實現的，因此，碳庫總量的增加量近乎等於大氣中 CO<sub>2</sub> 的清除量，反之亦然。

林地的主要碳庫依生態系統主要分為生物量、死有機質與土壤，以下說明三個碳庫的吸收與排放過程 (IPCC, 2006)，各碳庫定義請見表 2。

- **生物量**

指活體植栽本體，包含地上部與地下部，是清除大氣中 CO<sub>2</sub> 的主要管道，植栽行光合作用時，吸收大氣中 CO<sub>2</sub> 的量，稱為一次生產總量，且大約有一半的一次生產總量會在植栽消耗能量行呼吸作用時排出。因此，將一次生產總量扣除呼吸作用排放量，便得到淨初級產量。另外，植栽的孤枝落葉與土壤中有機質的分解會排放 CO<sub>2</sub> 回大氣，此 CO<sub>2</sub> 排放量稱作異氧呼吸損失量。在不受其他干擾 (如火燒、採伐等) 的情況下，將淨初級產量扣除異氧呼吸損失量，即得淨生態系統生產量。國家溫室氣體清冊所採計的碳庫變化量須將土地利用干擾 (火燒、採伐等) 計入 (稱淨生物群系生產量)，然而前述干擾不屬於建築綠化區域正常使用情境會發生的狀況，因此本研究採用淨生態系統生產量作為 CO<sub>2</sub> 固定量。比較森林生態系統與非森林生態系統，前者以多年生木本植物為主，後者以多年生非木本植物與一年生植被為主。森林生態系統中的木材能儲存碳達數年至數百年，即使生物本體死亡，部分碳能轉至其他庫，延遲碳排放；非森林生態系統占整體陸地生態系統碳庫總量的部分比森林生態系統小很多，因為多年生非木本植物與一年生植被的生物量在幾年內循環一次，其淨生物量碳庫幾乎保持固定。由以上事實可得知，多年生木本植物儲

存的碳量隨著時間而增加，且是整體陸地生態系統碳庫總量的主要貢獻者。



- **死有機質**

當活體植栽死亡之後，植栽本體中大部分的生物量轉為死有機質（孤枝落葉、死木），大部分的死有機質會在數月內被分解，排放碳回大氣中，而部分會停留較長的時間，可達數年之久。對於古老的森林而言，死有機質累積的速率與分解的速率趨近平衡，因此碳庫量呈現穩定的狀態。

- **土壤**

當死有機質被分解之後，部分轉變成土壤，土壤中包含各種有機質，這些有機質會隨著時間逐漸被微生物繼續分解，同時排放碳回大氣，而少部分的土壤會轉變為有機－無機複合體，這種化合物的分解速度較慢，甚至可停留數百年之久，若剛好在特定的壓力與溫度條件下，能形成煤礦。由此可知，土壤碳庫的增減主要受死有機質的分解進入以及土壤中有機質的分解排出。其他環境影響因素包括氣候變化與管理方式，死有機質作為土壤有機質的主要來源，是否清除枯枝落葉會影響土壤碳庫量，然而若長期以相同的方式進行管理，土壤碳庫量會接近平穩。

表 2：林地中所使用的碳庫定義 (IPCC, 2006)

碳庫		定義
生物量	地上部生物量	土壤以上的所有草本活體植物和木本活體植物生物量，包括莖、樹樁、枝、樹皮、果實和葉。
	地下部生物量	活根的全部生物量。當難以經驗將它們與枯枝落葉或土壤有機質區分時，直徑不足 2 公釐的細根不計入。
死有機質	枯枝落葉	直徑大於國家對土壤有機質的規定，並小於國家對非活生物量的最小直徑規定。
	死木	包含不在枯枝落葉中的所有非活木材生物量，不論是死根或死莖，或直徑大於國家規定之樹樁。
土壤	土壤有機質	包含達到國家規定 30 公分深度的礦質土中的有機碳。當憑經驗無法區分時，小於非活生物量的最小直徑規定之活細根、死細根與死有機質，包含在土壤有機質中。

### 2.2.2 層級方法之定義

考量編制清冊的複雜性與各國家掌握的資源不同，2006 IPCC 指南提供不同層級的三種方法，較高層級的方法雖能提高清冊的準確性，但會增加編製的複雜性與需要較多的資源，因此指南允許使用不同方法評估不同的碳庫，例如生物量使用方法一，土壤使用方法二。以下說明各層級方法之適用條件：

- **方法一**

為最簡單的方法，指南提供所需的方程式與參數值，對於特定活動的數據（例如毀林率、土地覆蓋），指南亦提供適用全球範圍的粗略估計值。

- **方法二**

可使用方法一的方程式，但採用基於國家或地區的特定活動的數據，這些數據更適合反應該國家的氣候條件與土地利用系統。

- **方法三**

為最高層級的方法，提供較高的確定性，須使用基於地理資訊系統或定期取樣的生產數據、土壤數據、土地利用與活動數據，整合這些數據的監測。

本研究將林地作為建築綠化區域的預設土地利用類型，參考指南提供之層級方法決策樹，分析適合本研究的層級方法。判斷適用的層級方法前，須先判斷該類別是否屬於關鍵類別，國家溫室氣體清冊定義對溫室氣體總量有重大影響的類別為關鍵類別，以幫助國家利用可得的資源獲得最可靠的清冊。由此可知，關鍵類別為對國家溫室氣體總量有重大影響的類別，若判斷為關鍵類別，則會列入國家溫室氣體清冊的優先類別，當國家需要掌握更可靠的清冊時，應優先將資源投入關鍵類別的數據搜集。

由於建築綠化區域與林地組成相近，且建築綠化區域面積與臺灣國內之林地面積（約兩百萬公頃）相比，所佔比例甚低，建築綠化區域不影響林地是否為關鍵類別。因此，關鍵類別判斷部分以國立臺灣大學森林環境暨資源學系編輯之「建置符合 MRV 原則林業溫室氣體清冊編製機制及試算 (1/2) - 期末報告書」為主要依據。綠化區域有兩種土地利用類型轉變情況：(1) 林地仍為林地、(2) 其他土地利用類型轉為林地。圖 6 與圖 7 為簡化後的相應層級方法決策樹，與指南提供之決策樹不同之處在於，指南提供之決策樹須考量該類別是否為關鍵類別。

### 2.2.3 層級方法之選擇

臺灣目前雖有部分國內係數，但不完整，所以應該採用方法二進行估算，對於國內缺乏數據的估算部分則採用方法一。活動數據從林業統計資料中擷取，並配合第四次森林資源調查結果（臺灣大學森林系, 2014），作為本研究採用之數據。

指南中對於 AFOLU 部門，溫室氣體吸收與排放的估算方法可分為兩類：(1) 適用於任何一種土地利用類別的方法，稱為碳量估算通式、(2) 僅應用於單一土地利用或應用於國家層級統計數據（沒有具體土地利用）的方法。臺灣國家溫室氣體清冊考量國內自 1992 年起實施禁伐天然林政策，因此僅就「林地維持林地」部分予以計算，其他土地利用類型轉化為林地不在其範圍。以下說明第一類的方法針對林地生態系統碳庫變化的估算通式，其中 CO<sub>2</sub> 的吸收量與排放量，依照生物量、死有機質與土壤，三主要碳庫進行說明。

林地土地利用類別的碳庫量變化可由其子分類的碳量變化加總而得，參見式

1：

$$\Delta C_{FL} = \sum_i \Delta C_{FL_i} \quad \text{式 1}$$

其中

$\Delta C_{FL}$  林地的碳庫變化量

$i$  林地土地利用類別內的某一子分類 (按照種類、氣候帶、生態行、管理制度等組合)。

而每一個子分類的碳量變化可透過六個碳庫量變化來估算，參見式 2：

$$\Delta C_{FL_i} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} \quad \text{式 2}$$

其中

$\Delta C_{FL_i}$  林地的一個子分類的碳量變化

$AB$  地上部生物量

$BB$  地下部生物量

$DW$  枯死木

$LI$  枯落物

$SO$  土壤有機物

$HWP$  收穫林產品

指南允許不須對式 2 中的所有碳庫變化量進行估算，取決於國情與選擇的方法。考量綠化區域未涉及收穫林產品之活動，以及多數情況下綠化區域管理者會清掃枯落物，因此假設枯落物與土壤有機物保持平衡狀態，因此  $DW$ 、 $LI$ 、 $SO$ 、 $HWP$  不列入本研究範圍。有兩種不相同但同樣有效的碳庫量變化估算方法：(1) 基於過程的方法，與 (2) 基於碳庫量的方法；前者估算碳吸收與碳排出的淨增減量，稱作增加 - 損失法 (Gain-Loss Methods) (式 3)，後者則估算在兩個時間點碳庫量的差異，稱作碳庫量差異法 (Stock-Difference Methods) (式 4)。增加 - 損失法適

用於所有層級方法，而碳庫量差異法更適合方法二與方法三，因為當國家進行準確的森林清查的情況下獲得適用於國內之數據時，對生物量的變化能提供更準確的估算結果。



$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L \quad \text{式 3}$$

其中

$\Delta C$  碳庫中每年碳儲存變化量 (噸/年)

$\Delta C_G$  年增加碳量 (噸/年)

$\Delta C_L$  年損失碳量 (噸/年)

$$\Delta C = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad \text{式 4}$$

其中

$\Delta C$  碳庫中每年碳儲存變化量 (噸/年)

$\Delta C_{t_2}$  在  $t_2$  時間點的碳庫量 (噸/年)

$\Delta C_{t_1}$  在  $t_1$  時間點的碳庫量 (噸/年)

由於臺灣國內全面性的森林調查時間間隔久，無法準確推估各年度碳儲存量變化，因此採用增加 - 損失法，以調查生物量的變化估算年度碳增量。且本研究假設植栽綠化區域無採伐情形發生，因此僅計算生物量年碳增加量部分。生物量年碳增加量如式 5 與式 6，使用面積與平均年生長量來估算生物量年碳增加量 (各轉換係數的詳細定義請參閱 2.3 節)。由於地下部的生物量難以量測，因此透過特定的植物種類地下部生物量與地上部生物量比例關係求得地下部生物量增加量。

$$\Delta C_G = \sum (A_i \cdot G_{TOTAL_i} \cdot CF_i) \quad \text{式 5}$$

其中

$A$  栽植面積 (公頃)

$G_{TOTAL}$  林分年平均生長量 (噸/公頃/年)

$CF$  乾物質碳含量比例

$i$  種類



$$G_{TOTAL} = \sum [I_v \cdot (BEF_i \cdot D) \cdot (1 + R)]$$

式 6

其中

$I_v$  特定樹種的年平均材積生長量 (立方公尺/公頃/年)

$BEF_i$  特定樹種的生物量擴展係數，將材積轉換成地上部生物量

$D$  特定樹種的基本木材密度，乾物質與原木之比值 (噸/立方公尺)

$i$  特定樹種的地下部生物量與地上部生物量比例

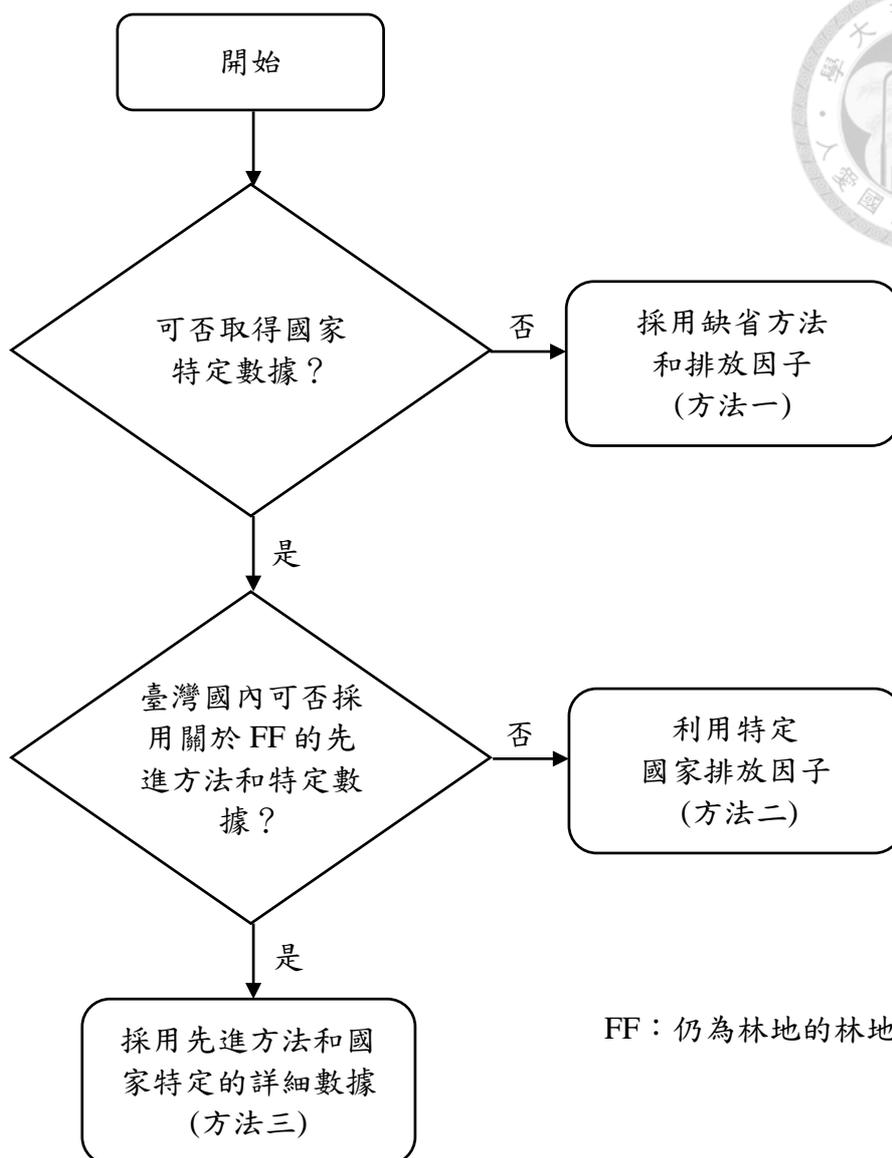


圖 6：土地利用類別不變的林地的相應層級方法決策樹 (IPCC, 2006)

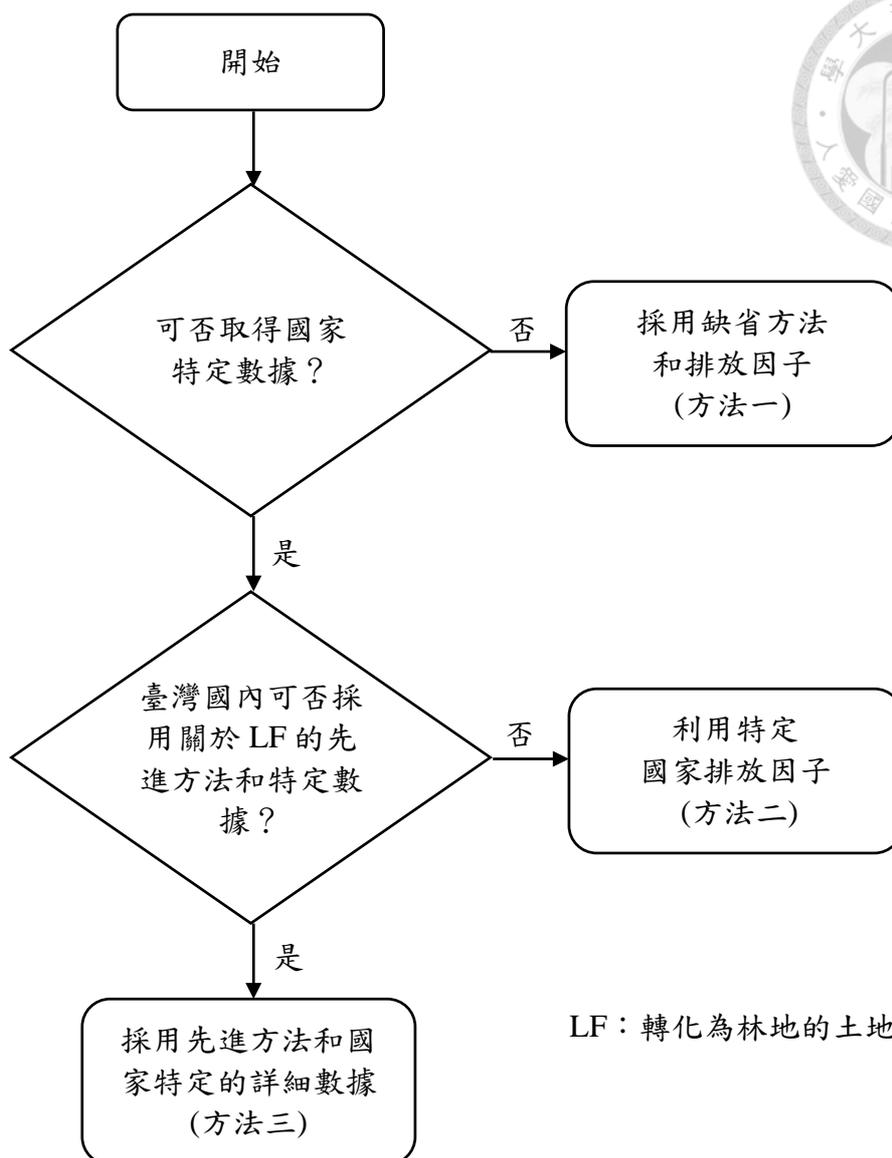


圖 7：其他土地利用類別轉化為林地的相應層級方法決策樹 (IPCC, 2006)

#### 2.2.4 氣候區與生態區

每公頃森林的溫室氣體吸收量與排放量的變化取決於天然林或人工林、立地因素、林分發展階段與管理方法。為降低估算之不確定性，好的做法是將林地分為多種亞類，以降低生長率和其他植栽參數的變量，達成降低不確定性之目的。因此，2006 IPCC 採用聯合國農糧組織 (Food and Agriculture Organization, FAO) 建立的全球生態分區圖(圖 8)、與氣候帶分區表 (表 3)，如果可能且合適的話，各國的專家應使用更加細緻的氣候區分類。根據中央氣象局資料，臺灣平地月均溫 (MAT) 全年皆高於 10°C，平均年降雨量 (MAP) 超過 2,500 公釐，蒸發潛力 (PET) 約 500 公釐，可知臺灣屬亞熱帶溫暖濕潤氣候區 (SCf)，無乾季。而使用方法二或方法三亦可發展自己國家的氣候帶分類系統，且根據良好指南的要求，所有土地利用類別應該使用相同的氣候帶分類系統，以達成估算一致性。

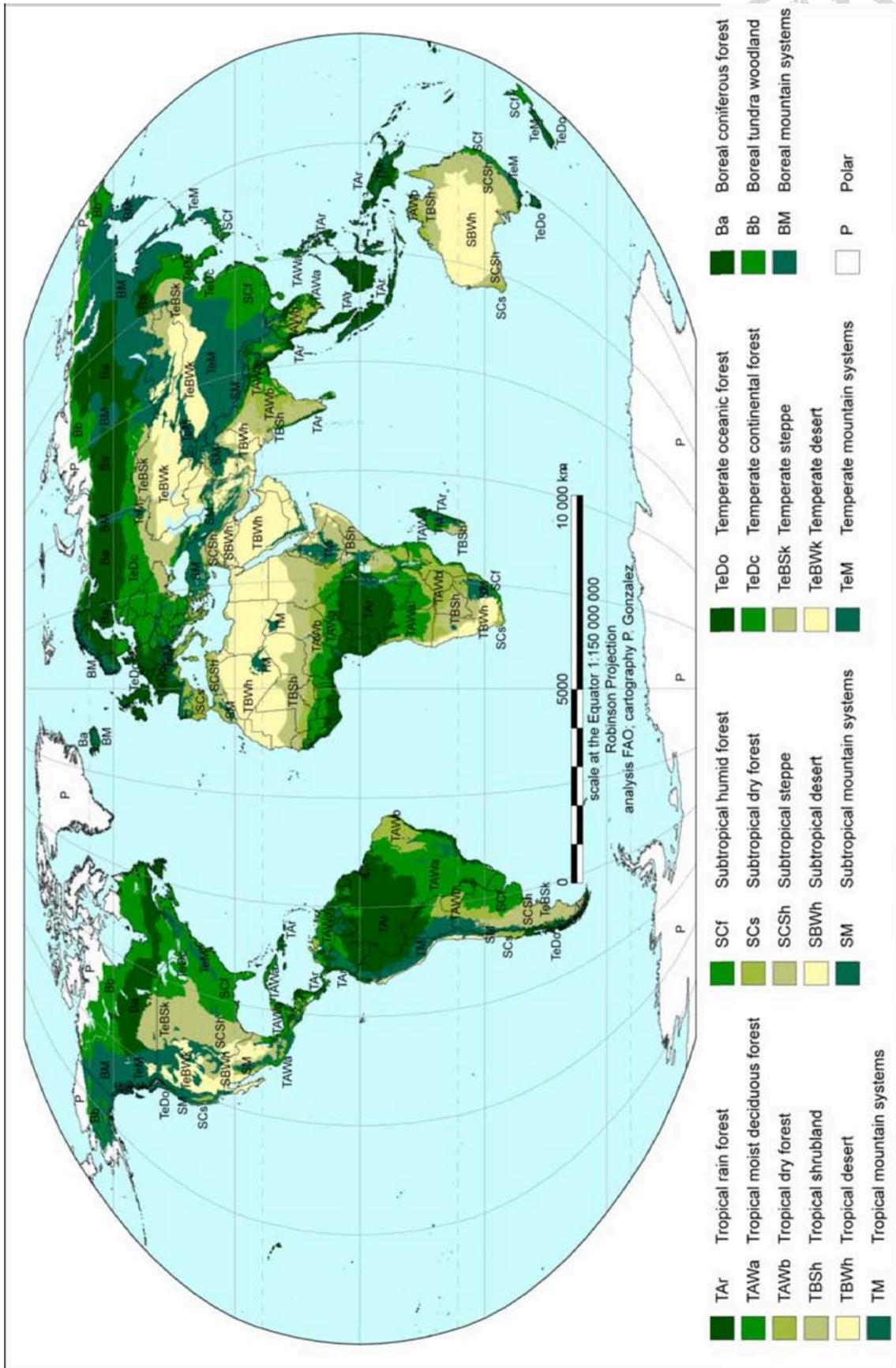


圖 8：全球生態分區圖 (FAO, 2001)

表 3：全球氣候帶分區與生態分區表 (FAO, 2001)

氣候帶分區		氣候區	生態分區		
分區	分區條件		區域	代碼	區域條件
熱帶	全年無霜；濱海地帶溫度 $>18^{\circ}\text{C}$	熱帶潮濕	熱帶雨林	TAr	潮濕： 冬季 $\leq 3$ 個月乾燥
		熱帶濕潤	熱帶濕潤 落葉林	TAwa	主要潮濕： 冬季 3-5 個月乾燥
		熱帶乾燥	熱帶乾燥 林	TAWb	主要乾燥： 冬季 5-8 個月乾燥
			熱帶草原	TBSh	半乾燥： 蒸發量 $>$ 雨量
		熱帶沙漠	TBWh	乾燥：全年乾燥	
		熱帶山區	熱帶山區 系統	TM	海拔約 $>1000$ 公尺，具地方變化
亞熱帶	全年有 $\geq 8$ 個月 溫度 $>10^{\circ}\text{C}$	溫暖濕潤	亞熱帶濕潤 林	SCf	濕潤：無乾季
		溫暖乾燥	亞熱帶乾 燥林	SCs	季節性乾燥： 冬雨夏乾
			亞熱帶草 原	SBSH	半乾燥： 蒸發量 $>$ 雨量
			亞熱帶沙 漠	SBWh	乾燥：全年乾燥
		溫暖濕潤 或乾燥	亞熱帶山 區系統	SM	海拔約 800-1000 公尺
溫帶	全年有 4-8 個月 溫度 $>10^{\circ}\text{C}$	涼溫濕潤	溫帶海岸 林	TeDo	海洋性氣候： 最冷月 $>0^{\circ}\text{C}$
			溫帶大陸 林	TeDc	大陸性氣候： 最冷月 $<0^{\circ}\text{C}$
		涼溫乾燥	溫帶草原	TeBSk	半乾燥： 蒸發量 $>$ 雨量
			溫帶沙漠	TeBWk	乾燥：全年乾燥
		涼溫濕潤 或乾燥	溫帶山區 系統	TeM	海拔約 $>800$ 公尺
北極	全年有 $\leq 3$ 個月 溫度 $>10^{\circ}\text{C}$	北極濕潤	北極針葉 林	Ba	以密集針葉林為主
		北極乾燥	北極林地	Bb	以林地及稀疏森林 為主
		北極濕潤 或乾燥	北極山區 系統	BM	海拔約 $>600$ 公尺
極地	全年溫度 $<10^{\circ}\text{C}$	極地潮濕 或乾燥	極地	P	全年 $<10^{\circ}\text{C}$



## 2.3 適用臺灣之轉換係數

由式 3、式 4、式 5、式 6 可知估算林地土地利用類別的碳庫量變化需要六種係數，包含栽植面積、年平均生長量、碳含量比例、基礎木材密度、地上部生物量與地下部生物量比例與生物量擴展係數。臺灣 2014 國家溫室氣體清冊採用「第三次臺灣森林資源及土地利用調查」之數據為估算依據，當時將臺灣林型分為人工林與天然林，依據樹種又可分為針葉林、闊葉林、針闊葉混合林與竹林，因此有八種林型的各項數據，然而其調查時間介於 1990 年 3 月至 1993 年 9 月，至今已超過二十年，且考量「第四次臺灣森林資源源及土地利用調查」正在推動中，其林型分類不再區分人工林與天然林，改成七個分類，分別為針葉林、闊葉林、針闊葉混合林、竹林、竹針葉混合林、竹闊葉混合林與竹針闊葉混合林，預期將來估算 CO<sub>2</sub> 之相關數據會調整為採用新的林型分類作為分類基礎 (臺灣大學森林系, 2014)，因此本研究亦採用新的林型分類作為轉換係數的分類基礎。

接下來描述 IPCC 指南提供之轉換係數預設值以及由「建置符合 MRV 原則林業溫室氣體清冊編製機制及試算 (1/2) - 期末報告書」整理而得之國內研究數據，本節所整理之臺灣國內研究數據皆是參考該期末報告之內容，以取得所需之各林型轉換係數。栽植面積則透過 BIM 模型自動擷取數據。由於有許多樹種同時出現在多篇國內研究報告中，最終使用數據採用各研究成果之平均值為代表，再依照樹種所屬類別 (針葉林、闊葉林、竹) 分類，進行平均後得出該類別的數據。對於未列入任何研究報告之樹種，則採用該類別的平均數據。

### 2.3.1 碳含量比例 (CF)

碳含量比例為乾物質中的含碳比例，用於將乾物質重量轉換為碳重量。2006 IPCC 指南提供地上部林地生物量的碳含量比例的預設值 (表 4)，對缺乏估算林地碳量所需之碳含量比例相關數據時，各國可採用預設值作為替代。由表 4 可發現樹直徑在 10 公分以上之木材相對於小於 10 公分之木材，在木材以及樹葉部分都擁有較高之碳含量比例。

臺灣國內之林地碳含量比例之研究集中於 2000 年後，共 16 篇研究成果報告，範圍包含臺灣林地較常見的樹種，分為針葉林、闊葉林與竹三大類。表 5 列出臺灣研究成果之碳含量比例。



表 4：IPCC 指南提供之碳含量比例 (IPCC, 2006)

氣候帶	部位	碳含量比例
預設值	全部	0.47
熱帶與亞熱帶	全部	0.47
	木材	0.49
	木材 樹直徑 < 10 公分	0.46
	木材 樹直徑 ≥ 10 公分	0.49
	樹葉	0.47
	樹葉 樹直徑 < 10 公分	0.43
	樹葉 樹直徑 ≥ 10 公分	0.46

表 5：臺灣碳含量比例之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)

部位	類別	碳含量比例
全部	平均值	0.4828
	針葉樹	0.4839
	闊葉樹	0.4817
	竹	0.4722
幹部	針葉樹	0.4841
	闊葉樹	0.4767
葉部	針葉樹	0.4990
	闊葉樹	0.5040



### 2.3.2 基礎木材密度 (D)

基礎木材密度為一立方公尺原木的乾物質重量 (噸)，用於將原木的重量轉換為乾物質的重量。2006 IPCC 指南根據氣候帶以及大陸別 (亞洲、美洲、非洲) 提供各樹種的基礎木材密度，若缺乏本土數據，針葉樹預設值為 0.42，闊葉樹預設值為 0.60，平均預設值為 0.50。表 6 擷取 IPCC 提供臺灣常見樹種之數據。

臺灣國內研究成果除劉宣誠、吳萬益與馬子斌等人的研究在 2000 年之前，大多數研究成果亦集中於 2000 年之後。針葉樹、闊葉樹與竹三大類別皆有研究成果，將樹種依類別分類後平均，得各類別平均值：針葉樹為 0.41、闊葉樹為 0.57、竹為 0.64，全部為 0.49。表 7 整理臺灣常見樹種之基礎木材密度。

表 6：IPCC 提供之熱帶樹種基礎木材密度 (IPCC, 2006)

樹種	基礎木材密度	樹種	基礎木材密度
合歡屬	0.52	天料木屬	0.76
波羅蜜屬	0.58	深裂灰木亞屬	0.64
羊蹄甲屬	0.67	紫薇屬	0.55
瓊南屬	0.61	木薑子屬	0.40
蘇木屬	1.05	蛋黃果屬	0.79
胡桐屬	0.53	美登木屬	0.71
嘉賜木屬	0.62	烏心石屬	0.43
朴屬	0.59	老荊藤屬	0.72
破布子屬	0.53	肉豆蔻屬	0.53
厚殼桂屬	0.59	膠木屬	0.55
通脫木屬	0.74	鱧梨屬	0.40-0.52
柿樹屬	0.70	羅漢松屬	0.43
龍腦香屬	0.61	番龍眼屬	0.54
鐵色屬	0.63	櫟屬	0.70
荊桐屬	0.23	赤楠屬	0.69-0.76
灰莉屬	0.73	山黃麻屬	0.40
垂榕	0.65	盤龍木屬	0.44
福木屬	0.75	牡荊屬	0.65
銀葉樹屬	0.56		

表 7：臺灣基礎木材密度之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)

樹種	基礎木材密度	樹種	基礎木材密度
平均值	0.49	木麻黃	0.670
針葉樹	0.41	樟木	0.475
闊葉樹	0.57	牛樟	0.390
竹	0.64	光蠟樹	0.730
肖楠	0.570	大葉楠	0.460
柳杉	0.367	香楠	0.470
杉木	0.310	棟樹	0.540
臺灣杉	0.344	烏心石	0.520
紅檜	0.374	印度紫檀	0.580
臺灣肖楠	0.540	木荷	0.610
臺灣扁柏	0.420	大葉桃花心木	0.500
福州杉	0.310	臺灣檫	0.794
臺灣雲杉	0.470	桉樹	0.460
臺灣二葉松	0.502	桂竹	0.710
臺灣鐵杉	0.420	孟宗竹	0.650
相思樹	0.770	麻竹	0.590
臺灣赤楊	0.470	刺竹	0.640
茄苳	0.650		

### 2.3.3 地上部生物量與地下部生物量比例 (R)

因為地下部生物量位於土壤中，不容易直接測量其生物量，因此透過地上部生物量與地下部生物量的比例來推估地下部生物量，以反映全株之生物量。地上部生物量與地下部生物量比例定義為地下部生物量乾物質重量與地上部生物量乾物質重量的比值。IPCC 指南根據不同氣候區、生態區與地上部生物量提供地上部生物量與地下部生物量比例數據，如表 8 所示。

臺灣國內研究稱乎地上部生物量與地下部生物量比例為根莖比，李訓煌於 1978 年對不同齡級的人工柳杉林進行研究，為國內最早的研究者。之後以林國銓等人的研究成果次數最多，時間介於 2006-2010 年之間。臺灣國內地上部生物量

與地下部生物量比例之研究數量與品種不若其它轉換係數豐富，因此有較多樹種必須採用 IPCC 提供之預設值，表 9 整理臺灣研究者的研究成果。

表 8：IPCC 提供之地下部與地上部生物比例 (IPCC, 2006)

氣候帶	生態區	地上部生物量 (噸/公頃)	R
熱帶	熱帶雨林	-	0.37
	熱帶濕潤落葉林	<125	0.20 (0.09-0.25)
		>125	0.24 (0.22-0.33)
	熱帶乾燥林	<20	0.56 (0.28-0.68)
		>20	0.28 (0.27-0.28)
	熱帶草原	-	0.40
熱帶山區系統	-	0.27	
亞熱帶	亞熱帶濕潤林	<125	0.20 (0.09-0.25)
		>125	0.24 (0.22-0.33)
	亞熱帶乾燥林	<20	0.56 (0.28-0.68)
		>20	0.28 (0.27-0.28)
	亞熱帶草原	-	0.32 (0.26-0.71)
	亞熱帶山區系統	-	無可用估計值

表 9：臺灣地上部生物量與地下部生物量比例之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)

樹種	R	樹種	R
平均值	0.28	臺灣檫	0.23
針葉樹	0.32	相思樹	0.30
闊葉樹	0.24	木油桐	0.21
竹	0.46	樟樹	0.29
柳杉	0.25	楓香	0.22
木麻黃	0.21	光蠟樹	0.23
桂竹	0.46	檜木	0.37

### 2.3.4 生物量擴展係數 (BEF) 及生物量轉換與擴展係數 (BCEF)

由於林地清查木材體積常會排除如樹冠、樹枝、樹葉等佔比較小的部分，而生物量碳庫評估應包含這些部分，因此透過生物量擴展係數 (BEF) 將木材體積擴大，將其他被排除的部分計入，而生物量轉換與擴展係數 (BCEF) 則計入基本木材密度 (D)，如此一來，便可以透過 BCEF 直接從木材體積 (立方公尺) 獲取地上部生物量 (噸)。GPG-LULUCF 僅提供 BEF 預設平均值以及範圍，以及各國如何挑選合適數據的指南。2006 IPCC 指南則進一步提供 BCEF 之預設值，但對於已具有 BEF 以及基礎木材密度研究之國家，仍可以使用國內之研究數據來計算國內特定的 BCEF。由於計算立木體積和淨年增量或清除量的 BEF 或是 BCEF 差異甚大 (砍伐所造成的損失不僅僅是取得的木材體積，整棵樹木都會死亡)，因此，指南以下標區分三者：

- $BCEF_I$  適用於年淨增量的生物量轉換與擴展係數；將年淨增加的木材量體積轉換為地上部生物量增加量
- $BCEF_S$  適用於立木蓄積量的生物量轉換與擴展係數；將立木的蓄積木材量轉換為地上部生物量
- $BCEF_R$  適用於木材清除量的生物量轉換或擴展係數；將木材生物量轉換為總生物量

因為本研究採用增加 - 損失法估算碳移除量，因此  $BCEF_R$  不在範圍內，表 10 整理 IPCC 提供之生物量轉換與擴張係數。由表中可觀察得立木蓄積量越高， $BCEF_I$  與  $BCEF_S$  數值越接近。

呂錦明與陳財輝於 1992 年針對桂竹生物量擴展係數發表研究成果，是臺灣國內最早的研究者，之後以林國銓等人的研究成果次數最多；而生物量轉換與擴展係數的研究最早始於 2004 年，最多研究成果者亦為林國銓。表 11 整理臺灣國內之研究成果。

表 10：IPCC 提供之生物量轉換與擴張係數 (IPCC, 2006)

氣候帶	林型	BCEF	立木蓄積量 (m <sup>3</sup> )			
			<20	21-40	41-80	>80
地中海、 乾燥熱帶、 亞熱帶	針葉樹	BCEFS	5.0 (2.0-8.0)	1.9 (1.0-2.6)	0.8 (0.6-1.4)	0.66 (0.4-0.9)
		BCEFI	1.5	0.5	0.55	0.66
	闊葉樹	BCEFS	6.0 (3.0-8.0)	1.2 (0.5-2.0)	0.6 (0.4-0.9)	0.55 (0.4-0.7)
		BCEFI	1.5	0.4	0.45	0.54

表 11：臺灣生物量轉換與擴展係數之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)

樹種	BEF	樹種	BCEF
針葉樹	1.27	針葉樹	0.54
闊葉樹	1.26	闊葉樹	0.97
桂竹	1.40	桂竹	0.76
臺灣杉	1.23	臺灣杉	0.42
臺灣二葉松	1.22	杉木	0.57
柳杉	1.28	柳杉	0.45
紅檜	1.36	木麻黃	0.92
樟樹	1.27	桉樹	0.52
相思樹	1.50	孟宗竹	0.68
木油桐	0.65	麻竹	0.56
楓香	1.04	刺竹	0.64
		臺灣檫	1.80
		檜木	0.80



### 2.3.5 地上部生物量年生長量 (I)

IPCC 指南未提供以乾重量表示的單一樹種生物量生長量，而是依照氣候帶、生態區、大陸/洲提供地上部生物量年生長量，表 12 列出亞熱帶濕潤林區的天然林數據，然而對於相同生態區的亞洲人工林，IPCC 指南僅提供單一數據，如表 13。

臺灣國內對生長量的研究較少，針葉樹種每公頃平均年生長量為 6.73 公噸，闊葉樹種為 5.08 公噸，竹類為 14.2 公噸，如表 14。對於缺乏數據之樹種，本研究以 IPCC 提供之人工林地地上部生物量年生長量替代。

表 12：IPCC 提供之天然林地上部生物量年生長量 (IPCC, 2006)

氣候帶	生態區	大陸/洲	地上部年平均生長量 (噸/公頃)
亞熱帶	亞熱帶濕潤林	亞洲大陸 ≤ 20y	9.0
		亞洲大陸 > 20y	2.0
		亞洲島嶼 ≤ 20y	11
		亞洲島嶼 > 20y	3.0

表 13：IPCC 提供之人工林地上部生物量年生長量 (IPCC, 2006)

氣候帶	生態區	大陸/洲	年生長量 (噸/公頃)
亞熱帶	亞熱帶濕潤林	亞洲大陸 ≤ 20y	8

表 14：臺灣地上部生物量年生長量之研究成果 (臺灣大學森林系, 2014)

樹種	年生長量 (噸/公頃)	樹種	年生長量 (噸/公頃)
針葉樹	6.73	孟宗竹	21.60
闊葉樹	5.08	桂竹	6.08
竹	14.2	相思樹	5.02
柳杉	13.55	木油桐	4.38
臺灣二葉松	1.93	光蠟樹	5.53
紅檜	4.70		

## 第三章 基於 BIM 之估算方法



### 3.1 現況分析

#### 3.1.1 BIM 技術簡介

BIM 技術運用數位模型物件及物件之屬性資料來模擬及管理實際建築的表現，從基礎層面的幾何、顏色、材質、物件性質等，到應用層面的結構分析、耗能分析、動線分析等。由於使用電腦變更虛擬模型較重新製作實體模型的效率好，加上 BIM 整合多方資訊的優勢，將更多屬性資料提供至應用層面的模擬分析使用，BIM 能讓設計者更加即時地了解特定設計變更對建築性能的影響，像是加大一扇窗戶會增加多少空調的耗能量。因此，BIM 對需要比較方案的永續設計而言相當合適。對於本研究而言，目前已發展之 BIM 工具，有機會達成本研究訂立之目的，這些工具提供之功能包含：(1) 日照分析模擬、(2) 自動擷取模型屬性資料、(3) 自動取得資料庫中之植栽資訊、(4) 可自行設計的應用程式介面。

#### 3.1.2 臺灣現行綠建築規範估算方法

臺灣綠建築評估手冊 EEWB 目前分為四大範疇，包含生態、節能、減廢與健康。各範疇往下細分為大指標，四大範疇總共包含九大指標，其中屬於生態範疇的第二項指標「綠化量指標」以植物光合作用量作為評估標準，估算植物四十年生命期的 CO<sub>2</sub> 固定量，以評估綠化區域的效益。其中，各類植栽之單位面積預設 CO<sub>2</sub> 固定量 G<sub>i</sub> 值 (參閱 1.1 節第 4 段) 是由國立成功大學建築研究所根據國外溫暖氣候區的樹葉光合作用實驗值，搭配臺中之日照與氣候條件、樹形、葉面積之統計資料，解析合成而得 (財團法人臺灣建築中心, 2014)。由於綠化量指標之計分方式、合格條件與綠化區域之對應設備要求非本研究範疇，以下僅描述綠化量指標中估算 CO<sub>2</sub> 固定量的方法與說明，其中注意到  $\alpha$  為鼓勵生態綠化之修正係數，與 CO<sub>2</sub> 固定量估算無關。

$$TCO_2 = \left( \sum (G_i \times A_i) \right) \times \alpha \quad \text{式 7}$$

其中



- $G_i$  某植栽種類之單位面積 CO<sub>2</sub> 固定量，查表 1
- $A_i$  某植栽之栽種面積基準，喬木以表 15 之樹冠投影面積計算。灌木、花圃、草地以實際種植平面面積計算。
- $\alpha$  生態綠化修正係數。原生植物、誘鳥誘蝶植物等生態綠化之優惠。

表 15：喬木最小栽種間距與樹冠投影面積  $A_i$  基準 (財團法人臺灣建築中心, 2014)

評估對象		栽種間距	樹冠投影面積 $A_i$
新開發基地新種喬木或已開發基地新種喬木 (*1)	市街地或一般小建築基地	4 m	16 m <sup>2</sup>
	學校、小公園社區、工業區或一公頃以上基地開發	5 m	25 m <sup>2</sup>
	都會公園、科學園區或五公頃以上基地開發	6 m	36 m <sup>2</sup>
基地老樹評估	任何基地	以實際樹冠投影面積計算	
*1 喬木間距大於或等於上述間距者，以本表 $A_i$ 基準值計算其 CO <sub>2</sub> 固定量；喬木間距小於上述間距者，以實際間距之平方面積計算其 CO <sub>2</sub> 固定量。			
*2 距地面一公尺高處樹幹直徑 30 cm 以上或樹齡 20 年以上之喬木謂之老樹，但由移植的老樹視同新樹，不予以優惠計算。			

比較 2006 IPCC 指南之估算方法 (式 5) 與臺灣現行之綠建築規範之 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法 (式 7)，可發現其基礎十分類似，皆可拆解為兩部分：面積與單位面積固定量。指南方法中的  $A_i$  與綠建築規範方法中的  $A_i$  皆為栽植面積，差別在於綠建築規範考量綠化區域之栽種間距，避免栽種密度過低使得有效面積小於計算面積；單位面積固定量部分，指南方法先估算單位面積林木生長量之乾重量，再乘以碳含量比例，以得出最終單位面積吸收的碳重量，而綠建築規範則是依據植栽類型給予不同的單位面積 CO<sub>2</sub> 固定量。由此可知，兩估算方法的基礎結構是類似的。綜合來看，2006 IPCC 指南方法適合估算大面積的碳庫量變化，且估算過程包含不同品種林木的固碳量相關係數，綠建築規範則考慮了栽種疏密程度以避免單純考量栽種面積可能造成的誤差。呼應本研究之目的，2006 IPCC 指南方法能提供考量林木品種 CO<sub>2</sub> 固定量能力差異的需求，而綠建築規範能避免種植過於稀疏，然而本研究未知 IPCC 指南之數據來源各林木之樹冠投影面積，因此決定

先不處理此部分，以模型中綠化區域面積直接作為式 5 中的  $A_i$  值，並假定綠化區域之栽種密度符合 IPCC 數據，實際上之密度需配合後續之研究成果。



### 3.1.3 臺灣現行綠化植栽設計流程

同研究背景所描述，臺灣首都臺北市於 2014 年通過綠建築自治條例後，需進行綠化之房屋數量增加，且綠建築規範中的綠化量指標要求最小綠地面積不得低於 15% 基地面積，使得整體綠化區域之設計需求量較以往提升。臺灣綠建築設計主要由建築師負責，然而建築師所需負責的項目眾多，項目通常會與各專業領域的專家一同合作來完成專案，以綠化區域設計而言，建築師可能與景觀設計師合作。考量以上現況，為使本研究之產出能反映使用者之需求，本研究先訪談建築師以及與該建築師合作之景觀設計師，從認識現行的綠化區域設計流程著手，再了解建築師與景觀設計師之使用需求與期待改善之部分。該建築師具備八年以上建築專案工作經驗。

建築師表示目前幾乎所有的案子都有綠化區域的設計，且主要之設計細節大多委託景觀設計師負責。對於本研究欲提出之輔助設計工具，建築師肯定更詳細的設計資訊回饋有助於決策。

景觀設計師表示儘管對於常見的植栽大都熟悉，但如果設計過程中能便利地的檢視與比較各種植栽的特性與差異，可提升採用過往使用頻率較低的植栽品種的機會，對於建築師而言，也能增進決策的效率。關於綠化量指標之要求，景觀設計師提到大部分設計都能通過綠化量指標之要求，對目前作業上沒有太大的負擔，因為現行綠建築規範估算方式僅需知道綠化面積以及栽種類型即可，意即知道綠化區域範圍與植栽類型，便可以預測設計是否能符合規範。

圖 10 整理本研究訪談之建築師與景觀設計師的現行綠化區域設計流程。流程分為兩個主要階段。第一階段為初步設計階段，在此階段，由建築師決定較為概略的議題，像是綠化區域的大致範圍、植栽的類別等；更細節的設計則進入第二

階段，交由景觀設計師進行細部設計，包含植栽種類挑選及決定相關設施如覆土高度、澆灌、排水方式等細節，最後進行綠建築規範的檢討以及成本估算。

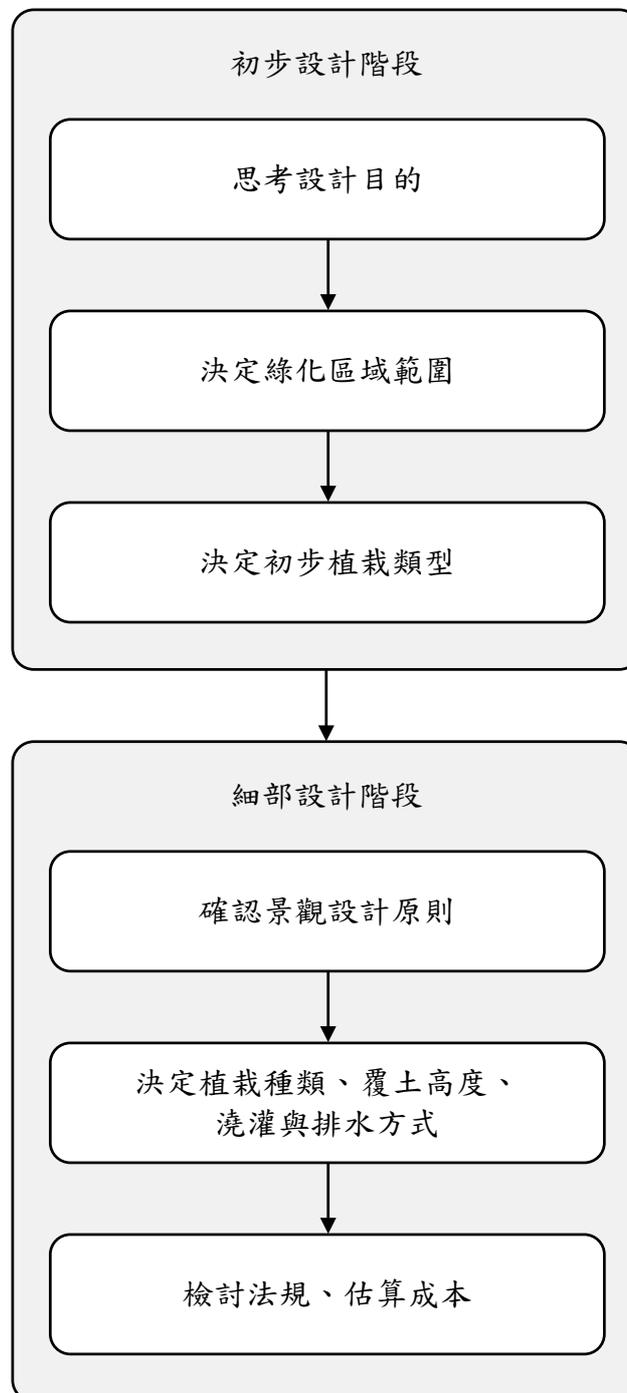


圖 9：現行綠化區域設計流程



## 3.2 建議之估算方法架構與綠化設計流程

### 3.2.1 估算方法架構

本研究建議之估算方法架構可由圖 10 來表示，區分為三種角色，包含研究單位、資料庫管理單位與綠化設計單位。

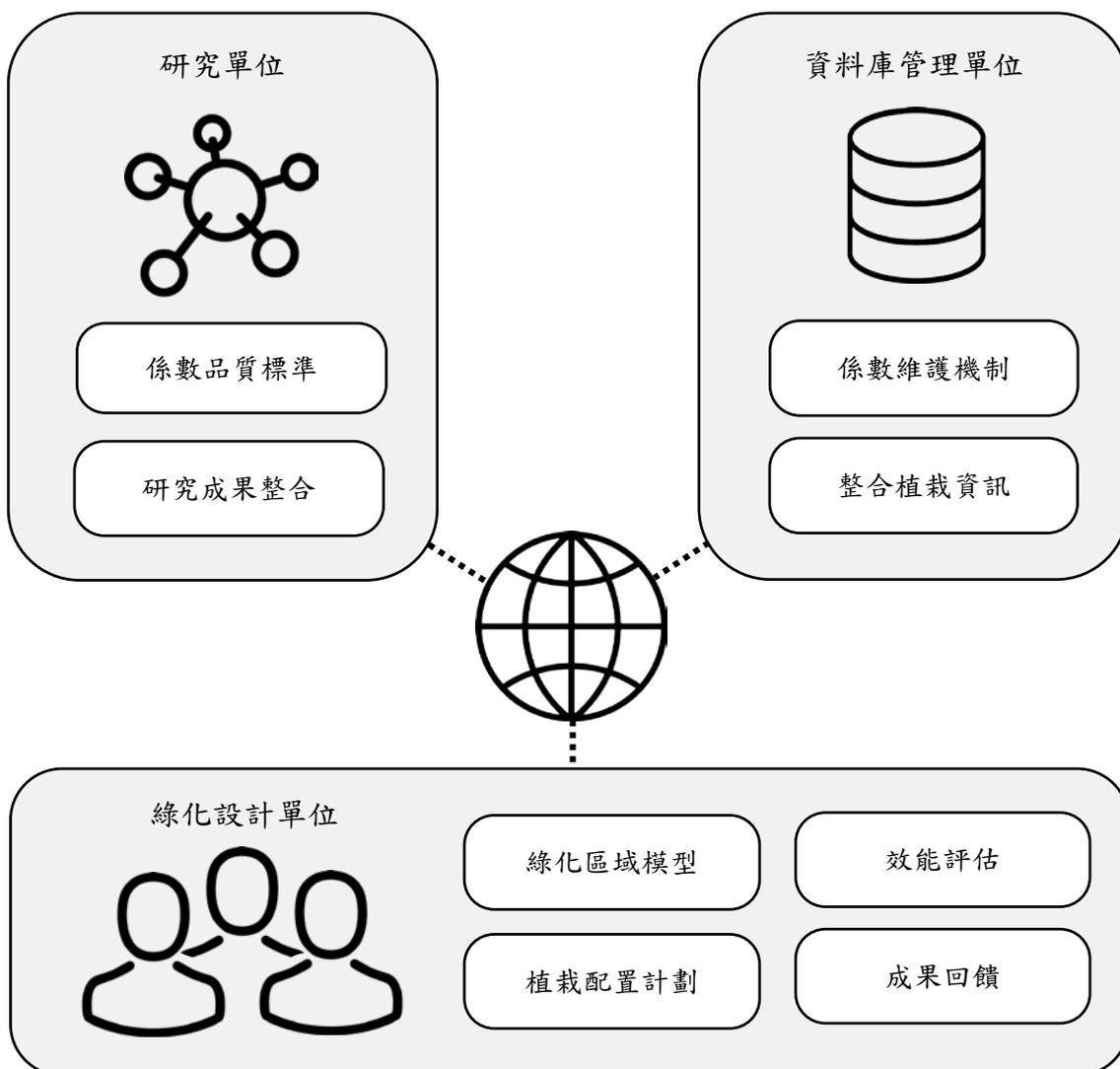


圖 10：建議之估算方法架構圖

2.2.2 節描述 IPCC 指南提供的方法分為三種層級，除方法一採用指南提供之係數外，方法二與方法三皆需採用基於國家或地區的特定活動數據。若要讓綠化區域設計者能便利地取得可靠的國內數據，應建立具備公信力之資料庫，提供綠化設計區域位於臺灣之綠化設計者一致且可靠的植栽係數。然目前臺灣本土係數



的研究成果尚未有良好的資訊集中與維護機制，為配合本研究建議之估算方法所需，首要任務為建立適用臺灣植栽 CO<sub>2</sub> 固定量相關係數的資料庫，並配合研究單位訂立係數品質之標準及整合研究成果，這些數據經由研究單位核可並整合後透過網際網路提供給資料庫管理單位。綠化設計單位直接向資料庫取得植栽相關係數，而不必再額外花費心力更新數據或擔心與其他設計單位採用之數據不一致之情形。以下列點說明研究單位之權責、資料庫管理單位之資料維護與更新機制以及綠化設計單位如何採用係數與植栽相關資訊以及需要執行之設計作業：

- **研究單位**

過往轉換係數之研究成果多由各學術單位獨立進行，研究方法與植栽所屬地理區域皆不盡相同，在研究資源有限的情況下，應挑選或成立專責之研究單位，整合臺灣目前既有之研究資源，並參考 IPCC 估算層級方法二或層級方法三之係數說明，建立研究係數方法之規範。除此之外，依照綠化設計之需求評估關鍵樹種以及氣候區進行，並據此規劃植栽品種研究之優先次序。2.3 節整理臺灣本土的植栽係數研究成果，目前多以常見之天然林之係數較為豐富，然而，天然林之研究數據是否適用人工林需要探究，理想上綠化區域之植栽 CO<sub>2</sub> 固定量評估所需之轉換係數應以人工林作為研究對象。

- **資料庫管理單位**

3.1 節描述運用 BIM 於本研究的主要優勢，其中自動植栽屬性資料庫提供使用者端自動估算所需之植栽 CO<sub>2</sub> 固定量轉換係數及其相關資訊，並架設於雲端，以利提供四方之使用者。資料庫管理單位除了更新與維護研究單位提供之轉換係數外，尚需整合植栽其他相關資訊，如「臺灣野生植物資料庫」以及「應用於綠建築設計之臺灣原生植物圖鑑」之資料。當這些資料有新增、刪除或更新時，綠化設計單位能及時地獲取最新的資訊，確保同一時期估算成果品質之一致性。

- **綠化設計單位**

3.1.3 節中提及現行綠化設計之分工模式，3.2.2 將探討其細節，這邊主要說明綠化設計單位如何採用資料庫之數據以及其設計作業。綠化設計單位運用建模軟體並透過應用程式介面來進行綠化區域之配置與植栽規劃，此介面專注於設計者最需知道的資訊呈現，包含日照分析結果、區域分割計畫、植栽四季外觀型態、維護成本以及 CO<sub>2</sub> 固定量資訊。最終，這些估算資訊可以直接輸出成表單，或回饋至雲端資料庫，利於全國性的資料集中與透明化。

### 3.2.2 綠化設計流程

根據 3.1.3 節的描述，現行綠化量指標對景觀設計師之作業負擔小，而本研究將日照條件與各植栽品種固碳量相關係數納入考量後，較難以直覺估算 CO<sub>2</sub> 固定量，因此建議將法規檢討步驟提前，緊跟隨決定綠化區域範圍以及決定植栽種類步驟之後，使得設計者可以隨時檢視目前的 CO<sub>2</sub> 固定量估算結果，及時回饋設計。因此，本研究提出如圖 11 所示之綠化區域設計流程圖，建議之流程拉近步驟「決定綠化區域範圍」與「CO<sub>2</sub> 固定量估算」之間的距離，輔助設計者能及時地檢視目前設計成果。

由於 2006 IPCC 指南之估算方法對象為大面積之林地，小區域的日照陰影對整體影響不顯著，因此估算式中無日照條件相關之係數，且目前臺灣國內也缺乏以日照條件為控制變因探討植栽生長情況之研究，因此建議之流程步驟三「進行日照分析」以目前常使用的植栽適合生長日照條件作為判斷依據，意即採用全日照、半日照、耐陰作為綠化區域是否合適之三種情況。本研究以臺灣內政部建築研究所出版品「應用於綠建築設計之臺灣原生植物圖鑑」（內政部建築研究所，2010）為參考資料來源，該書自臺灣國內 4000 多種維管束植物中，篩選 162 種適用於綠建築之植物名單，並依照植栽類型（常綠中大喬木、常綠小喬木等）區分。其日照量依照相對程度的百分比表示，如表 16 所示。

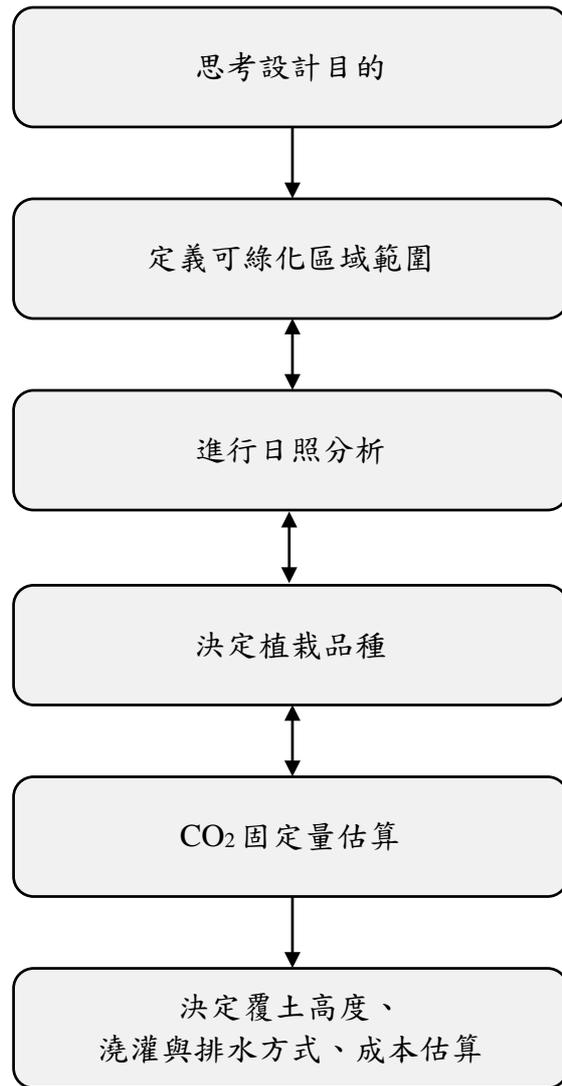


圖 11：基於 BIM 之綠化區域 CO<sub>2</sub> 固定量估算流程

表 16：日照條件對應之日照量

日照條件	相對日照量 (%)
全日照	>70
半日照	40-70
陰影區	<40

考量日照分析以網格撒點方式分析，再透過內差或外插呈現連續視覺化結果，將日照分析納入考量之後，本研究提出兩種可能的植栽配置方式，以下分項描述：

- **植栽適應判斷**

參考圖 12 示意，已知植栽投影面積，綠化設計者將植栽模型直接擺放於綠化區域中，程式分析投影面積內的分析點，透過設定好之計算規則判斷該栽植位置是否合適。此方法好處是，計算規則可容許投影面積內部份分析點之數值與植栽適應區域適應，但因為佔整體投影面積的比例夠低，因此仍允許設計者將植栽配置於該位置。此方法提供設計者較高的配置彈性。

- **鄰近分析點合併**

參考圖 13 示意，與植栽適應判斷方法不同，此方法在設計者配置植栽之前程式會對分析點進行分區，將分析數值落在相同區間之相鄰點合併為同一區域，設計者可以直接看出不同日照分區。配置植栽時，程式僅允許植栽投影面積完全落在該植栽品種適應之區域內。此方法能幫助設計者規劃綠化分區，提高配置之效率。

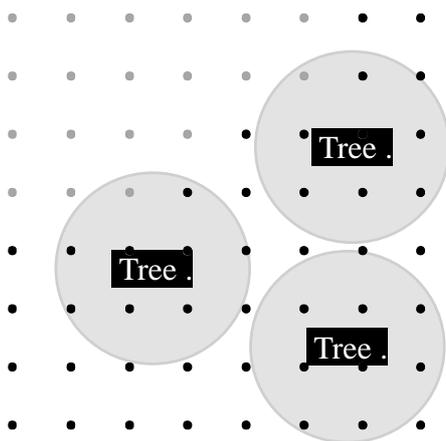


圖 12：植栽適應區域判斷

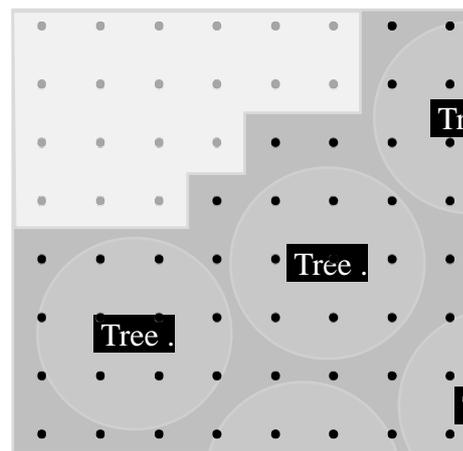


圖 13：分析點鄰近相似合併

針對專案中所有可綠化區域進行通盤的日照分析後，將「定義可綠化區域範圍」至「CO<sub>2</sub> 固定量估算」成為一系列可短時間內反覆來回調整之步驟。通常會認為此系列步驟交由同一設計者負責效率最好，不過，考量 BIM 具有資訊整合與

協同作業的優勢，或許也不盡然須由同一設計者負責。不論如何，本研究認為建議之流程或多或少會改變建築師與景觀設計師雙方的權責分配，且權責分配方式應該隨設計者們之間的習慣自行發展。



## 第四章 估算輔助程式之開發



根據 3.2.2 節描述之綠化設計流程，本研究實作一輔助工具測試建議之方法的可行性。由於目前尚未建立各植栽之投影面積資訊，此測試先將日照分析結果部份進行簡化，僅確認輔助工具可以提供日照分析結果並進行區域之平均日照值計算。

### 4.1 需求分析

根據本研究之目的 (1.2 節) 與潛在使用者之訪談成果 (3.2.2 節)，以下條列並說明開發估算輔助程式需滿足之需求項目：

- **能取得 BIM 模型中之綠化區域面積**

增進綠化區域設計的效率為本研究的目的之一，可使用 Revit API 汲取 BIM 模型屬性資料中的綠化區域面積資料，並透過自定義的綠化區域編碼方便設計者管理模型與清單項目的對應關係。且為提升效率，配置同一種植栽的綠化區域應使用相同的分類編碼，以降低選擇植栽所需的操作步驟。

- **能分析或獲得綠化區域之日照條件**

3.2.3 節中提及本研究採用的日照分析工具是 Solar Analysis for Revit Plugin，經評估後，有三種取得日照分析結果的方案，以下分別說明：  
(1) 獲得該工具之計算方法，將計算方法編寫進輔助程式中、(2) 直接將該分析工具坎入輔助程式中、(3) 若前述兩者方案皆無法達成，則改為設計一使用者介面，介面中以文字描述進行日照分析之步驟，指引設計者進行適當的日照分析，完成後，再將分析結果檔案載入至輔助程式中，藉由輔助程式整理與分析數據得出所需之綠化區域日照值。

- **根據綠化區域氣候與日照條件取得合適之栽種品種**

Revit 專案中可設定專案地理位置，為了減少資訊的重複或矛盾的情形，輔助程式應直接從 Revit 讀取專案地理位置，以取得專案所在位置之氣

候資訊，若輔助程式偵測到專案地理位置尚未設置，則提醒使用者先設置專案的地理位置，並以文字描述說明設置專案地理位置之步驟，導引使用者設置專案地理位置。具備專案地理位置與日照分析結果後，輔助程式會給予推薦的植栽清單。

- **能快速估算目前設計之 CO<sub>2</sub> 固定量**

程式從資料庫讀取估算所需之植栽數據，並透過編寫完成之計算式估算 CO<sub>2</sub> 固定量，以清單列出各綠化區域以及總基地之每年 CO<sub>2</sub> 固定量估算值。

- **設計流程之步驟具有雙向性**

一項專案中可能包含多塊綠化區域，綠化區域又分為三種綠化形式，不同綠化區域配置的栽種品種不一定相同。因此，輔助程式應允許僅部分綠化區域完成栽種品種設計時，亦能進行 CO<sub>2</sub> 固定量之估算，並在設計流程中能直接回到任一前步驟變更部分設計後再進行估算，提高方案比較之效率。

- **能提供植栽品種的詳細資訊**

根據綠化區域之氣候條件與日照分析結果，程式能自動篩選合適的栽種品種，並根據單位面積之 CO<sub>2</sub> 固定量由大至小以清單方式排列，給予使用者參考。同時，使用者能查看植栽的相關資訊簡介，例如生長高度、花色、開花期、結果期、所需覆土深度等。

## 4.2 BIM 工具整理與分析

目前市面上軟體公司提供的 BIM 應用程式數量相當多，而大部分應用程式除了本身主要功能之外亦提供了一些附加的功能，例如建模軟體提供匯出供進度排程使用的專案檔案的工具、自由曲面設計軟體提供匯出至建模軟體之檔案格式等，各軟體之間通常會透過某種介面進行資訊的傳輸或轉換，這使得通常在一家公司或機構內為了滿足需求常會使用數款應用程式。因此，如何系統性的區分各應用

程式之間的定位有助於 BIM 技術應用者尋找合適的軟體來使用。在 BIM 手冊的 2.4 節中從 BIM 應用設計的角度，依照功能涵蓋之層面，以工具、平臺與環境三個層級來分類 (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)，以下條列說明：

### 1. BIM 工具

為達成某特定功能之應用程式，像是能源分析、碰撞檢查、數量表生成、渲染等；且通常產出為一個特定的結果，例如一份報告書或是一份施工圖，少部分產出則是作為另一份應用程式之輸入，例如結構分析、造價分析等。

### 2. BIM 平臺

為功能多樣化之應用程式，像是塑模軟體；其產出通常具有多重的用途，最常見的平臺主要產出為裝載許多資訊的數據模型，且大部分的平臺會內建一些 BIM 工具或是具備與其他 BIM 工具資料交換的介面。目前臺灣最常使用的 BIM 平臺為 Autodesk Revit，本研究之程式開發亦是建構於 Revit 之上的 BIM 工具。

### 3. BIM 環境

著重在公司或組織內整合性的資料管理。當公司或組織使用許多 BIM 工具以及平臺的時候，更上一層級的資料管理是必須的，包含檔案追蹤、版本控制、協同作業、檔案庫等。然以目前而言，多數 BIM 環境是因應公司或組織對一系列的資料管理具有需求而逐步慢慢發展出來的；言下之意，甚多時候公司或組織對其 BIM 環境不見得有明確的概念性架構。

有的時候，BIM 平臺與 BIM 環境的界線不會那麼鮮明，因為 BIM 平臺在有些時候會被作為 BIM 環境使用，這種情況發生於公司或組織的一系列所有工作與資訊整合皆是建立在單一平臺上。許多現行的 BIM 平臺軟體開發商也會推銷其軟體可以作為 BIM 環境使用，稱為全套的解決方案 (Complete Solution)，然不見是最符合客戶需求之方案 (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)。例如，許多人認

為 Revit 是平臺，而同時有人認為 Revit 是環境，是因為對有些公司的工作內容而言，Revit 足以滿足工作所需之功能。

本研究針對國內常用之三種 BIM 應用程式做比較，就各軟體是否能進行日照分析、普及性、使用便利性與開發便利性四個面向進行比較，以挑選合適之開發工具，比較結果請見表 16。其中普及性、使用便利性與開發便利性由本研究定義如下：

- **普及性**

參考臺灣國內使用該軟體之整體比例進行判斷，較高的普及性有助於使用者或研究人員對本研究開發之程式有較高的使用或探討意願。本項指標由了解 BIM 軟體發展現況之專業人士給予分析與評斷。

- **使用便利性**

著重使用者對使用該軟體的難易程度進行評斷，較高的使用便利性可以降低初次使用者的入門門檻，有助提升該軟體對新手的吸引力。使用便利性的判斷相當主觀。本項指標由使用 BIM 軟體經驗豐富之專業人士給予分析與評斷。

- **開發便利性**

著重程式開發者對該軟體提供之開發工具的開發便利程度進行判斷，較佳的開發便利性可提供開發人員較好的開發效率，資源獲取也相對容易。開發便利性的判斷相當主觀。本項指標由具備 BIM 軟體開發經驗之人士給予分析與判斷。

表 17：臺灣國內較常使用之 BIM 應用程式比較

應用程式	層級	日照分析	普及性	使用便利性	開發便利性
Autodesk Revit	平臺	是	高	中	高
Bentley Architecture	環境	是	低	低	中
Graphisoft ArchiCAD	平臺	否	中	高	低

透過表 17 之比較，本研究綜合評估四項指標後，認為 Autodesk Revit 為最合適之開發平臺，評估其在普及性與開發便利性為最佳，使用便利性則次於 ArchiCAD，然而 ArchiCAD 提供之 Sun Study 功能僅能視覺化某一時刻之日照情形，不合本研究之需求，因此不予考慮。

Revit 應用程式介面 (Application Programming Interface, API) 定義了一個介面予程式開發人員，開發人員可以透過此介面開發擴充元件，而介面本身即是擴充元件與主程式之間相互溝通的橋樑。一般而言，較大型的程式會提供 API 以增加擴充性，因為其有三個好處：(1) 使用頻率低的功能不必隨附在主程式中造成程式肥大的缺點、(2) 擴充程式之間相互影響程度低，一個擴充元件損壞不易造成其他擴充程式或主程式的損壞、(3) 修改與維護擴充程式較為方便與簡單。

本研究將使用 Revit API 提供程式開發人員之汲取模型元件之參數資料的功能，並搭配由 Autodesk Labs 提供之 Solar Analysis for Revit Plugin 取得日照分析數據。該工具採用 Perez 天空模型與日照計算，並通過 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 提供的數據測試。工具中包含兩種計算模式：(1) Surface Analysis 與 (2) Cumulative Sky。第一種模式即是採用 NREL 記載的 Perez 逐時日照計算方法，適合計算每個小時的日照量；第二種則是 Autodesk 將第一種模式之逐時計算結果累加起來，誤差值在 1% 以內 (Autodesk, 2015)。在本研究進程式開發時，Solar Analysis for Revit Plugin 尚屬於 Technology Preview，然該項目已於 2015 年 11 月 16 日自 Technology Preview 畢業，目前 Autodesk 官方正計畫將此功能放入正式的產品中，然確切時間尚不明朗。

### 4.3 程式架構設計

本研究使用 Revit API 進行輔助程式開發，考量 IPCC 指南估算方法需要豐富的植栽品種數據，且這些數據具有三項特性：(1) 應會隨著研究成果不斷更新、(2) 臺灣目前仍缺乏許多植栽品種的數據、(3) 數據全國適用，應可以進行共享。考量上述特性，以及將來的數據維護與管理需求，將數據儲存於資料庫是理想的方式，同時考量資料庫用戶端不僅一人，多位用戶直接提取資料庫之內容易產生安全性的問題，甚或是可以透過 Revit 增益集以外的其他應用程式存取，而與不同的應用程式通訊則有互通性的問題，因此本研究採用 Windows Communication Foundation (WCF) 作為提供廣泛互通性的服務導向之開發介面，WCF 屬於 .NET 框架中的一部份，能達成前述情境之需求。綜合以上，輔助程式整體架構分為三個元件，包含植栽參數資料庫、WCF 介面與 Revit API，圖 14 為示意圖。以下分別說明三者之設計：

- **SQL Server**

本研究所需數據種類多樣，包含 4 種臺灣氣候分區、198 種植栽、6 種與 CO<sub>2</sub> 固定量相關之植栽係數，且每種植栽有 3 張以上的照片與 1 份簡介。由於本研究所需之數據規模不大，且不會有大量資料搜集或累積之需求，因此採用關聯式資料庫管理系統 SQL Server，儲存前述之所有數據、文字與照片，以方便應用程式介面取用。SQL Server 為關聯式資料庫，使用 SQL 語言進行資料查詢。關聯式資料庫核心精神是以資料的關聯模型來組織資料庫。關聯模型有三個組成要素：實體（資料表）、紀錄（列）、屬性（欄）。實體指的是可以從其他物件分離出來的真實物件，例如選課資料裡面包含學生資訊、課程資訊、教師資訊，而學生資訊可以從選課資料中分離出來，則學生資訊是一種實體。紀錄則是實體中的一例（某位學生），屬性則代表屬於例的特性或值（例如會紙模型製作、擅長服飾搭配）。而資料表與資料表之間是以關聯的方式組織起來，以前述例子而言，即是將課程資料與學生資料的關係連結起來。



- **WCF**

WCF 是一種 Service-Oriented Architecture (SOA) 的實作技術，具有鬆散耦合力的 (loosely coupled) 軟體服務的優點，在 SOA 的情境裡，軟體模組可分為服務的提供者與服務的使用者，消費者可以隨意地選擇軟體服務，轉換服務的提供者。可以想像服務為購買高鐵車票，消費者可以選擇使用手機 APP 訂購、透過高鐵網站預訂或是直接至服務窗口購票，服務的提供者不唯一。而 WCF 的另一項好處是可以確保資料的安全性，將服務的使用者與服務的提供者隔開，避免服務的使用者直接觸碰到資料庫本身的風險 (Bustamante, 2007)。

- **API**

API 主要任務為面對使用者以及與 WCF 取得聯繫以獲取資料庫的數據，考量本研究目的在於發展並實作基於 BIM 之綠化區域 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法，案例測試與展示不需資料庫架設在伺服器上即可進行，因此未實作資料庫伺服器，僅實作本機資料庫。而實際的運作情形應透過網路發送請求至 WCF，直接面對使用者端。使用者介面設計依設計流程分為四個頁籤，包含綠化區域資訊、日照分析、植栽配置與 CO<sub>2</sub> 固定量估算，且任何一個頁籤皆可切換至前面任一其他頁籤。



圖 14：估算輔助程式之軟體架構



## 4.4 程式功能實作

依據前一節之程式架構設計，以下對估算輔助程式的三個元件實作過程與技術分別描述。

### 4.4.1 SQL Server

首先將所有資料進行正規化，正規化是指組織資料庫的程序，包含建立資料表以及依據資料的規則建立資料表之間的關聯性。正規化的目的是避免儲存重複的資料與保護資料，並提升資料庫進行查詢的效率。一般而言，正規化主要有三個動作：

#### 1. 第一正規化

兩項要求條件：(1) 資料表必須有主鍵、(2) 一個資料格 (cell) 只能有一個值。主鍵的用途為辨識每一筆資料，意即資料表中的每一筆紀錄會對應到一個獨一無二的主鍵值，如同每個人都擁有不同的指紋。而也因為主鍵用作辨識每一筆資料，因此每一筆資料的主鍵直接不可為空值 (null)。對本研究之植栽資料而言，儘管植栽學名是獨一無二不會重複的，但一般會使用整數來做為主鍵類型，所以另外新增欄位「Plant\_ID」做為主鍵。

#### 2. 第二正規化

兩項要求條件：(1) 符合第一正規化、(2) 除了主鍵之外的所有欄位，都完全相依主鍵。相依指的是當已知 A 時，便可以知道 B 是多少，則稱 B 相依於 A。完全相依則表示資料不能僅和部分的主鍵相依 (因為主鍵可能包含兩個以上欄位)，若發生僅和部分主鍵相依的情況，則應該將該資料拉出單獨成一個資料表。

#### 3. 第三正規化

要求非主鍵的欄位沒有間接相依於主鍵。意思是欄位之間不能有依賴關係，所有欄位只能相依於主鍵。以表 18 銷售明細為例，主鍵為商品編號，

且根據商品編號都可以確定其他欄位之資料，因此符合第二正規化，然而總銷售額相依於銷售數量與單價，可直接透過銷售數量乘以單價得到總銷售額，此資料欄位為冗贅，因此將總銷售額移除即可符合第三正規化。

表 18：違反第三正規化之範例資料表

商品編號	商品名稱	銷售數量	單價	總銷售額
188610	康丹好管家	42	30	1260
188611	辰耳天氣泥	45	20	900
188612	卸乃總裁椅	53	100	5300

圖 15 為完成正規化後的資料表關聯模型，其中植栽品種與適合生長之氣候區的關係為多對多，因為一種植栽可能適應兩種以上的氣候區，一種氣候區也不只適合一種植栽生長。然而資料表會盡量避免多對多關聯，因為關聯的欄位值彼此都可以出現許多次，不易看出彼此的關連性，所以應該將其拆分成兩個一對多的關係，將兩個資料表拆分成三個資料表。

以下說明各資料儲存的數據與其來源：資料表「PLANTS」儲存與品種相依之係數，涵蓋類型名稱、品種名稱、資料創建日期、最低合適日照值、最高合適日照值、氣候區資料，以上資料主要來自 3.3 節提到的「應用於綠建築設計之臺灣原生植物圖鑑」以及 2006 IPCC 指南提供適合臺灣的部分樹種。資料表「PLANTPHOTOS」儲存植栽的實際照片，每一品種至少三張，照片主要取自「臺灣野生植物資料庫」（特有生物研究保育中心, 2006）。資料表「PARAS」儲存採用 IPCC 指南估算方法所需之植栽數據，並以可得的臺灣國內研究係數優先，若國內研究缺乏該品種之數據，則採用該林木類型國內研究係數之平均值或 2006 IPCC 指南提供之預設值替代。資料表「CZTEMPLATE」儲存氣候區資料，配合「應用於綠建築設計之臺灣原生植物圖鑑」將臺灣分為北部、中部、南部、東部，四個部分。資料表「CLIMATEZONE」儲存植栽與適合生長氣候區的配對資料。

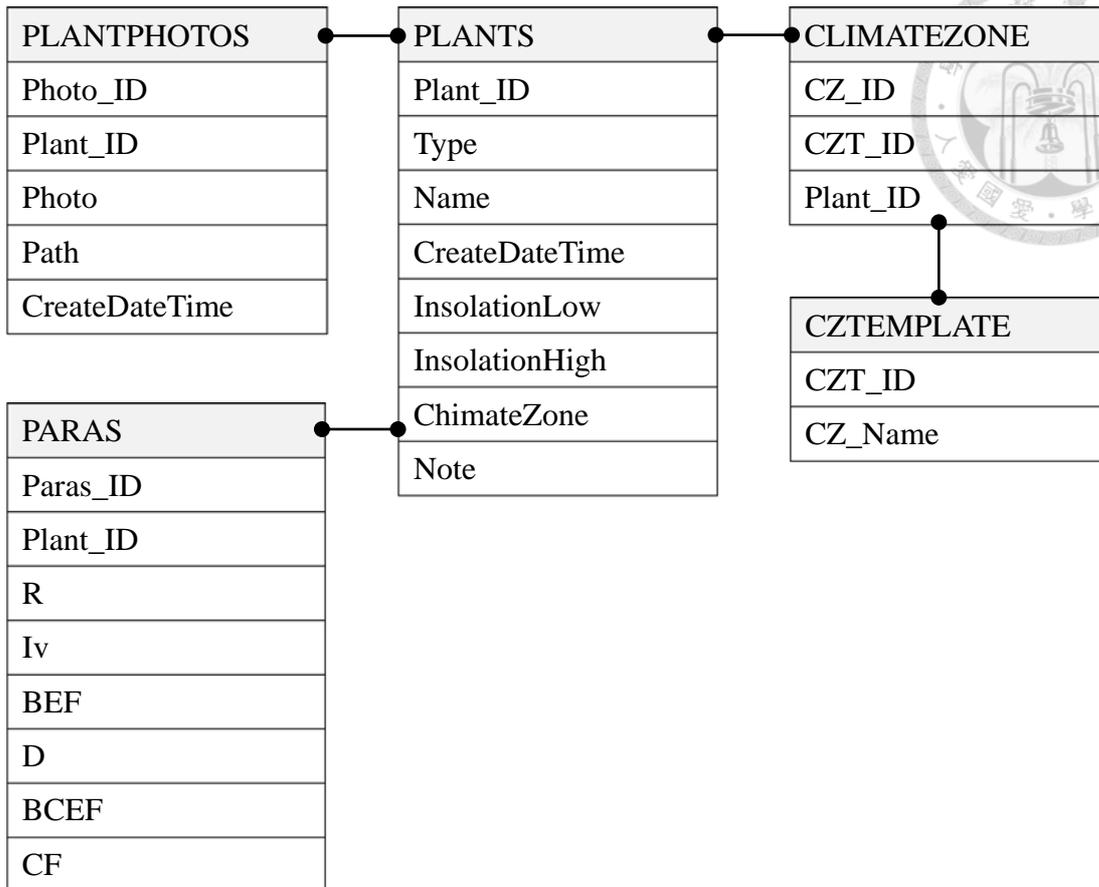


圖 15：資料表關聯模型

#### 4.4.2 WCF

在 Visual Studio 加入 WCF 專案範本後，會在專案中新增三個檔案，包含 IService.cs、Service1.cs 與 Web.config。首先需要在 IService.cs 編輯提供給使用者端的服務，IService.cs 包含 IService 介面與 CompositeType 類別。前者定義提供給使用者呼叫的操作，這些定義套用了 ServiceContractAttribute 屬性標記，表示用於定義服務合約的介面，沒有標示 ServiceContractAttribute 則為 WCF 內部自己使用之方法；後者則定義呼叫操作時所傳遞的資料型別，以本研究所需，使用預設程式碼即可。在 IService 介面中加入程式碼完成其服務介面定義，以下以取得推薦植栽方法為例。

```
[OperationContract]
List<string> GetRecommendedPlants(string type,
double area, double aveInsolationRatio, string catagory);
```



接著依照此介面至 Service1.cs 實作服務，在實作前須先新增類別「LINQ to SQL」進專案，用以把建立好的植栽係數資料庫連結進來。程式碼實作部分同樣以取得推薦植栽方法為例，程式碼示意如下。省略處為使用 LINQ 語法取得所需之資料以及將取得之資料整理成推薦植栽清單，最後回傳該清單給使用者。

```
Public List<string> GetRecommendedPlants(string type,
double area, double aveInsolationRatio, string catagory)
{
    try
    {
        using (PlantCO2ParasDataContext plantCO2 =
            new PlantCO2ParasDataContext("
            Data Source = OLIVER2190\\SQLEXPRESS;
            Initial catalog = PlantCO2Paras;
            Integrated Security = True"))
        {
            ...
            return plantList;
        }
    }
    catch (Exception ex)
    {
        throw ex;
    }
}
```

將所有需要的操作服務完成定義與實作之後，便可部署服務到 host process，可以使用瀏覽器測試是否成功，如圖 16 表示成功部署。



圖 16：完成部署 WCF 服務

### 4.4.3 Revit API

Revit API 允許使用任何與 .NET 相容的程式語言撰寫程式，本研究使用 C#。需要實作兩個專案：(1) 增益集應用程式、(2) 功能區 (Ribbon) 面板 (Panel) 控制項。以下依序說明實作概要。

#### 1. 增益集應用程式

此步驟使用 Visual Studio 創建類型為類別庫的專案。此專案中必須實作的功能包含面使用者操作以及與 WCF 建立存取通道獲得植栽清單功能。使用者介面設計使用 Windows Form 實作，按照使用流程分為四頁籤，以達成隨時可回到任一前步驟調整設計之需求，以下分別說明四頁籤之實作方式。

- 綠化區域資訊

在開啟 BIM 模型之前，使用者應已先使用綠化區域類型之樓板元件定義好綠化區域的位置與尺寸，本研究保留屋頂綠化以及植生牆的



選項，但目前僅應用地面綠化。應用程式在開啟當下，須執行三件事：(1) 取得綠化區域元件屬性資料、(2) 取得專案地理位置、(3) 顯示綠化區域元件屬性資料、(4) 資料庫建立通道。應用程式透過篩選器將 BIM 模型中的綠化區域元件過濾出來，並讀取元件的分類編碼、綠化形式以及面積資訊，篩選條件為元件類型是「綠化區域」者。篩選出來的元件屬性資料轉存至綠化區域清單。清單下方配置兩按鈕「更新元件資料」與「在模型中展示」。前者使得使用者可以保持應用程式開啟狀態更改綠化區域元件之任何屬性資料；後者則讓使用者知道清單中的項目對應至模型中的哪一個元件，並具備多重選取功能。

- **日照分析**

由於無法獲得日照分析工具 Solar Analysis for Revit Plugin 的計算方法或直接將它坎入應用程式中，因此採用文字描述顯示進行日照分析之步驟導引使用者完成日照分析。應用程式於此頁籤執行兩件事：(1) 若使用者未設置專案地址，要求設置、(2) 載入日照分析結果檔案，並整理數據後，將相對日照值顯示於清單中。由於一地之日照值隨地形與緯度變化，應採用相對值來判斷日照條件為全日照或半日照，所以，總共需進行兩次日照分析，第一次用來取得該地區 100% 日照值 (亦即終年除大氣活動外無其他遮蔽物的條件下所得之日照值)，做法是在模型中建置一綠化區域元件，其平面法相量與重力方向相反，且所有其他模型元件皆必須完全在該平面下方，進行一年日照量分析所得之日照值訂為全日照值；第二次則分析模型內之綠化區域元件之日照值，與全日照值相除後及得相對日照值。

- **植栽配置**

應用程式於此頁籤執行三件事：(1) 依照分類編碼合併綠化區域清單、(2) 從資料庫獲取推薦植栽清單、(3) 配置使用者選擇的植栽。為減

少配置相同植栽的重複動作，應用程式會將分類編碼相同的綠化區域元件合併，意即面積相加，並將日照值依照各綠化區域元件之面積大小進行加權平均。清單下方設置兩按鈕「不安排植栽」與「取得推薦植栽」。介面右方用於顯示植栽資訊，包含分類按鈕、建議品種(名稱)清單、主照片顯示區、滾動式照片預覽區、詳細資訊顯示區(文字)，以及選擇按鈕。

- **CO<sub>2</sub>固定量估算**

此頁籤為估算流程的最後一個步驟。應用程式於此頁籤僅執行一件事：二氧化碳固定量估算，估算方式如式 5 與式 6 所示，然注意到 2006 IPCC 指南提供之估算結果為碳的固定量，而綠建築規範則是使用 CO<sub>2</sub> 的固定量，為方便比較，輔助程式最終將碳重量轉換為 CO<sub>2</sub> 重量(此轉換是合理的，參閱 2.2.1 節)。估算完成後以清單方式顯示各綠化區域 CO<sub>2</sub> 固定量以及總固定量。

## 2. 功能區面板控制項

此步驟用意為在 Revit 功能區添加面板控制項，讓使用者可直接透過這個功能區面板控制項直接開啟增益集。首先，需要創建另一個類別庫專案，與第一步驟的專案不同之處在於，其使用 IExternalApplication 介面，其包含兩個抽象方法，OnStartup() 與 OnShutdown()，因此這個專案會在 Revit 啟動時自動被呼叫，程式內容主要包含新增面板控制項按鈕與呼叫步驟一創建之執行檔。控制項按鈕上可新增圖標，由於此 API 用於估算植栽 CO<sub>2</sub> 固定量，因此圖標採用 CO<sub>2</sub> 轉化為樹木的意象。做法是將 C、O、2 三個字元拆開，2 成為樹幹的部分，O 成為數冠的細枝，C 成為茂密的樹葉，如圖 17。建置好此應用程式後，再透過清單檔案註冊至 Revit 中，便完成功能區面板的控制項，如圖 18 所示。

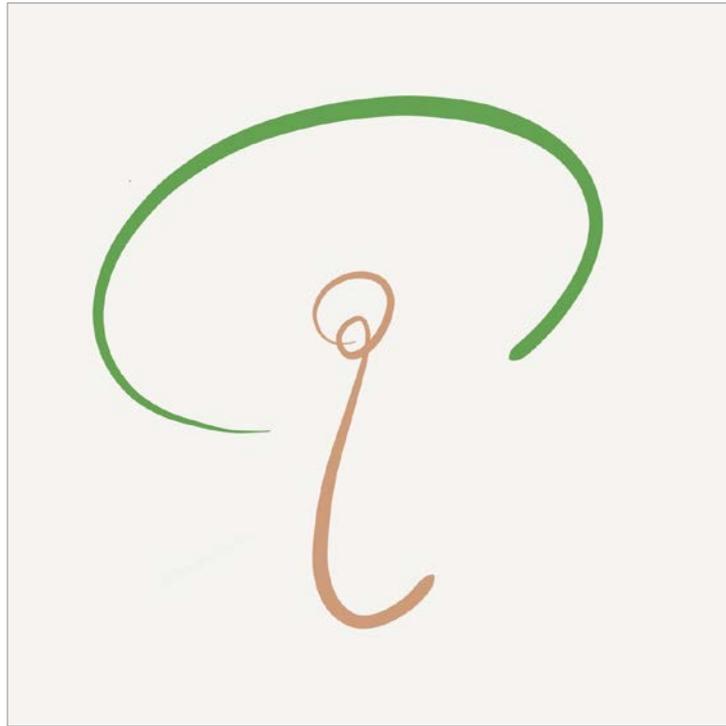


圖 17：估算輔助程式之圖標



圖 18：功能區面板之控制項

## 第五章 案例演示



### 5.1 案例介紹

本章以 Revit 建築模型作為案例，透過使用者視角演示輔助程式之操作流程，意即使用增益集應用程式進行綠化區域設計操作流程。該案例由臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組提供，此模型是依照臺灣勞動力發展署於 2011 年審定通過的「建築製圖應用乙級技術士技能檢定術科測試應檢參考資料」（臺灣行政院勞動力發展署, 2013) 建製。如圖 19 所示，該案例建築基地寬 32.27 公尺，深 18.69 公尺，建築物寬 18.05 公尺，深 12.80 公尺。由於本研究現有資料以林木為主，因此在估算部分以地面綠化類型 (另兩種類型為屋頂綠化與牆面綠化) 作演示。觀察地面可綠化之區域，建築量體集中於基地西北側，且建築量體之東北側為通往地下一層之樓梯與通道，無法綠化。因此綜觀建築基地，地面可綠化區域主要位於西南側與東南側。圖 20 為案例模型的 3D 視圖。

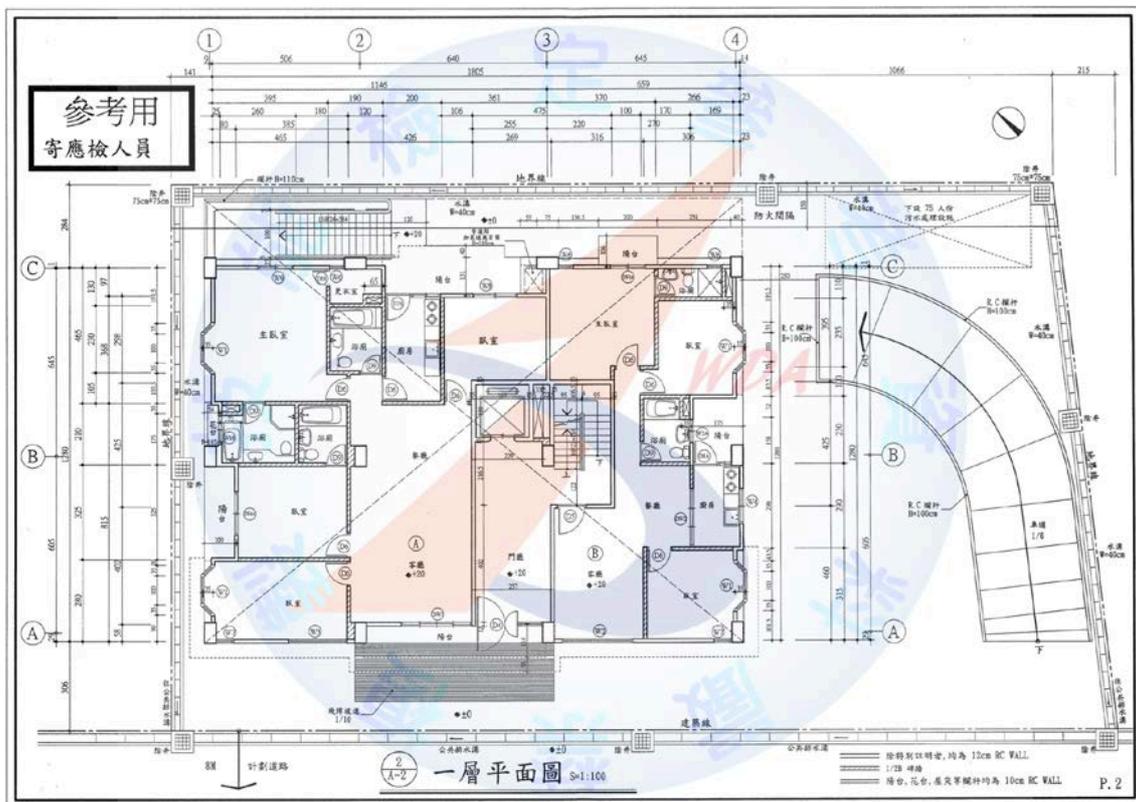


圖 19：建築製圖應用乙級術科測試參考圖說 - 一層平面圖

(臺灣行政院勞動力發展署, 2013)



圖 20：案例模型之 3D 視圖

## 5.2 程式操作演示

第一次使用輔助程式須先進行兩件事：(1) 新增建築樓板類型、(2) 設置專案參數。首先新增建築樓板類型，為了不讓綠化區顯得厚重，因此建議將「樓板厚度」與「距樓層的高度偏移」皆設為 2.0 公分，並命名該類型為「綠化區域」。接著載入本研究提供之共用參數檔案或自行設置專案參數，參數至少需包含「綠化形式」與「綠化區域分類編碼」，這些參數應屬於參數群組「Green Building 性質」，輔助程式會讀取或儲存這些欄位中的相關資訊，如圖 21。



圖 21：綠化區域類型性質

### 1. 區域元件繪製

使用建築樓板族群中的綠化區域類型元件定義綠化區域，本案例以地面綠化區域作演示。樓板元件的好處是邊界可以繪製成任意形狀，如圖 22

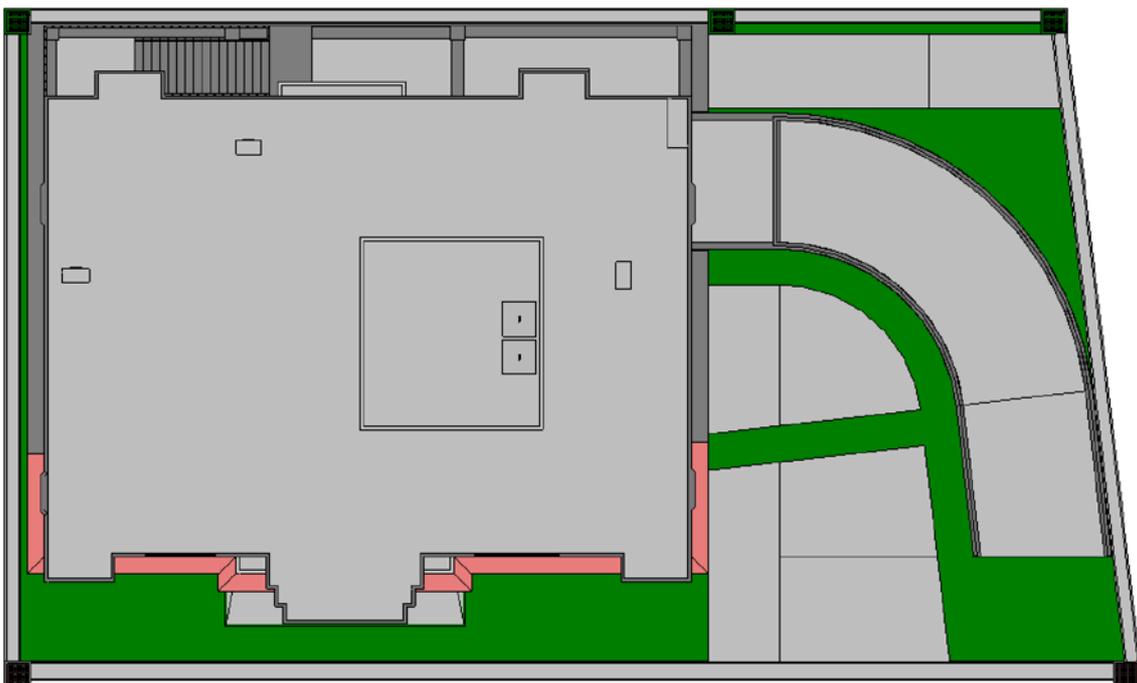


圖 22：完成綠化區域元件繪製

之展示，設計者可沿著車道弧形繪製邊界，使綠化區域與車道邊緣維持固定距離。在此示範擺放七塊綠化區域元件。



## 2. 區域資訊編輯

擺放好綠化區域元件後，開啟增益集「iTree」中的「CO<sub>2</sub> Sequestration Analysis」，視窗開啟後，使用者介面如圖 23。介面分為左右兩部份，左方為綠化區域清單，用來檢視專案中所有的綠化區域屬性資料，右方為區域屬性編輯框，用來編輯與更新區域屬性。選取清單中任意數量的項目後，點擊按鈕「在模型中展示」，可讓繪圖中對應之綠化區域元件被選取並亮顯，藉此了解正在編輯哪些區域的屬性(圖 24)。區域屬性編輯框可選擇綠化形式與輸入分類編碼，建議之操作原則是，預計配置相同植栽之綠化區域使用相同的分類編號，以節省後續步驟之操作時間。在此將所有綠化區域之綠化形式設置為地面綠化，並分配五組分類編碼(L-01 至 L-05)，其中兩組編碼(L-01、L-02)各包含兩塊綠化區域。選取欲編輯之項目後，在編輯框中選擇綠化形式與輸入分類編碼，完成後按下按鈕「更新」，即完成屬性資料更新。區域屬性資料會同步更新至模型元件的屬性欄位以及綠化區域清單中，使用者可以直接在繪圖區點選模型元件查看各元件目前的區域屬性資料。即使在增益集開啟狀態下，仍可直接新增、刪除或修改模型元件，只需點擊綠化區域清單下方的按鈕「更新元件資料」。

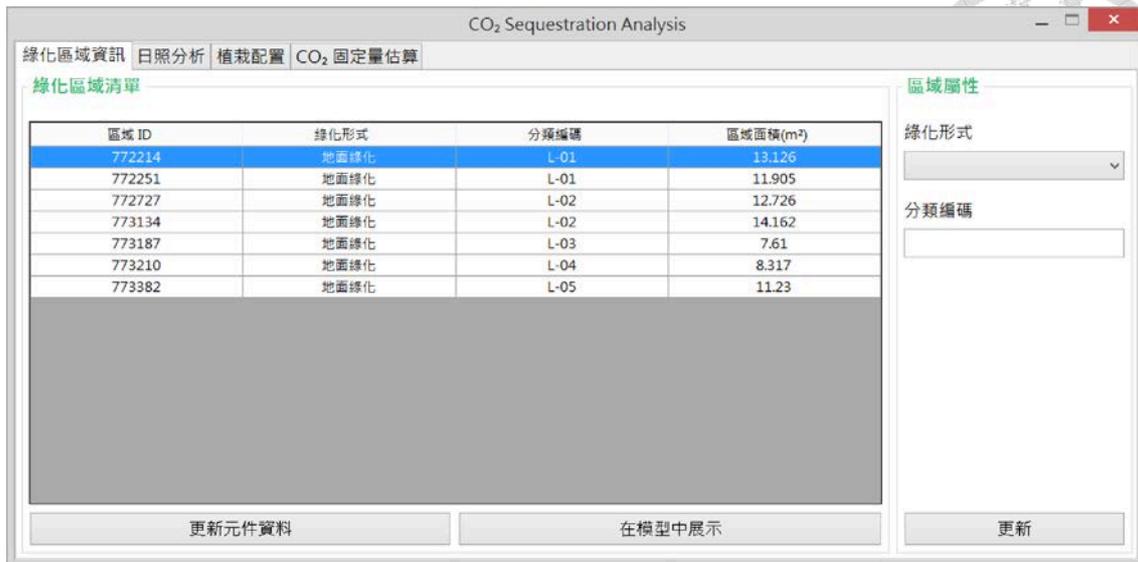


圖 23：綠化區域資訊之使用者介面

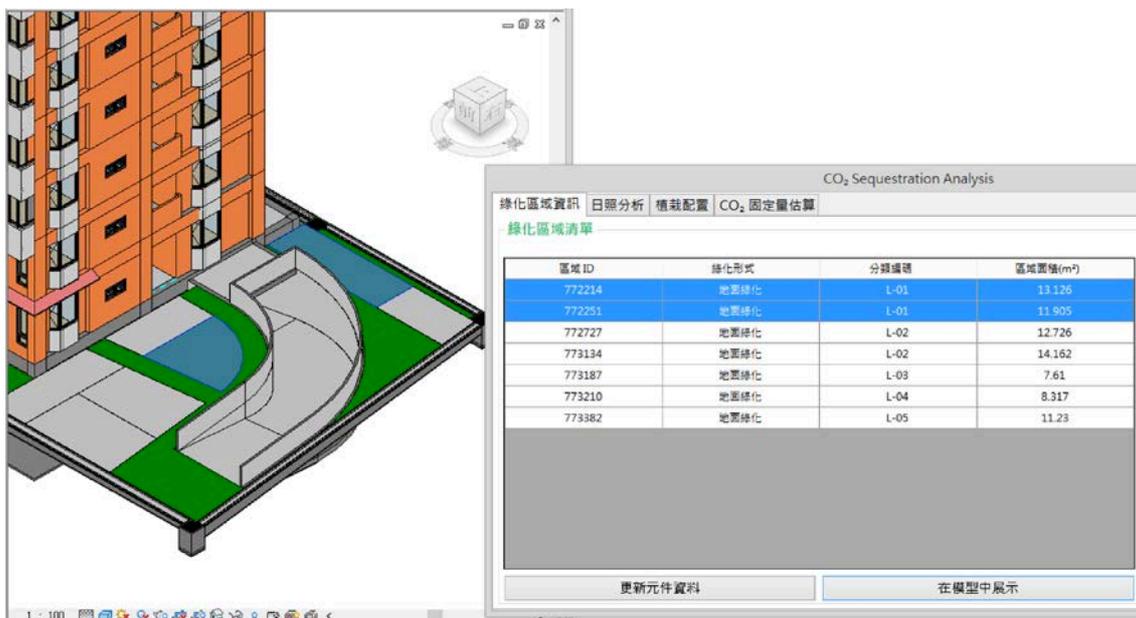


圖 24：在模型中展示被選取的綠化區域元件

### 3. 區域日照值分析

日照分析頁籤 (圖 25) 需要使用專案的地理位置，專案的地理位置顯示於使用者介面中左上方框中，若顯示「尚未設置」的話，則須依循下方的導引文字至 Revit 管理頁籤中設置，設置完成後，點擊右方的重新整理圖示即可。確認專案的地理位置設置正確後，遵循日照分析框中的導引文字進行 Solar Analysis，該工具位於「解析」頁籤中，如圖 26 所示。由



於植栽位置終年不變，需計算一整年的日照情形，設定「Sun Setting」為一年日光，時間從日出至日落，分析網格採用 0.5 公尺 (圖 27、28)，並選用 Cumulative 模式計算。如 4.3.3 節所述，一共需進行兩次日照分析，第一次分析用來取得全日照條件下的日照分析結果(100%日照量)，第二次則取得全部綠化區域的日照分析結果。儲存分析結果為 CSV 檔案後，分別點擊按鈕「載入全日照分析結果」與「載入區域分析結果」將檔案載入，即完成日照分析。本案例之分析結果得全日照值為 997.4895 kWh/m<sup>2</sup>。如圖 29，輔助程式將數據整理後，右方清單立即顯示各綠化區域的平均日照值，七塊綠化區域中最高者為 90.5%，最低者為 56.8%，顯示所有區域皆屬於半日照或全日照區域，無陰影區。由以上結果可以看出，儘管部分綠化區域十分靠近建築物，但因為綠化區域皆位於東南或西南側，且因為臺灣位處北半球，因此不致於產生陰影區。此日照分析工具同時具備視覺化呈現功能，如圖 30，可見區域中最小日照值為 529 kWh/m<sup>2</sup>，最大值為 941 kWh/m<sup>2</sup>，最小值約是最大值的 56%。使用者於此步驟可初步觀察各區域之日照量是否符合預期，並隨時調整區域配置。

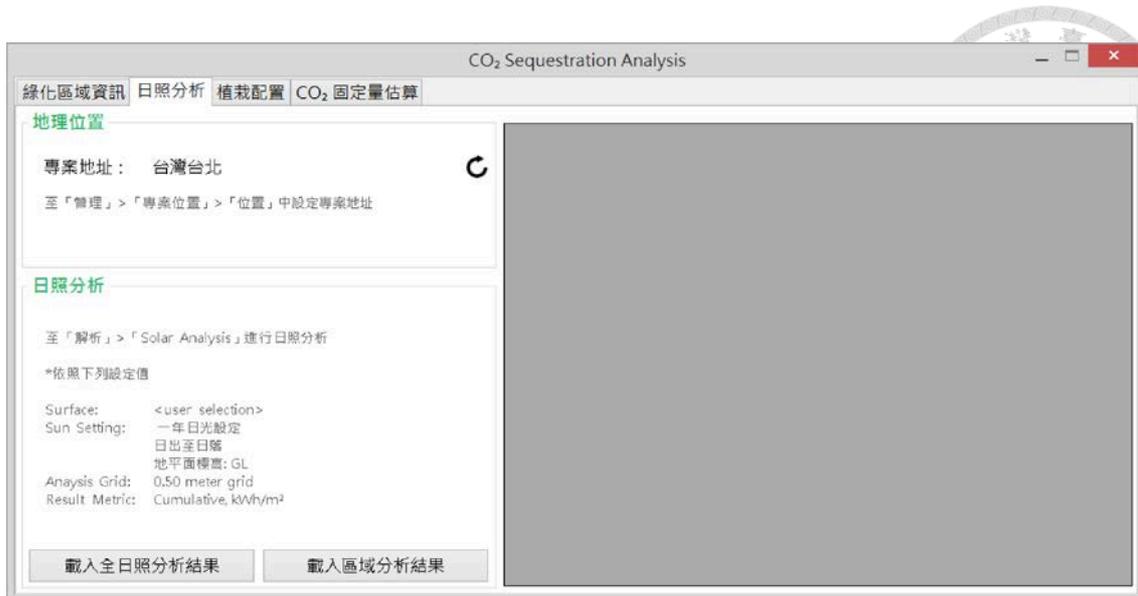


圖 25：分析綠化區域日照值之使用者介面

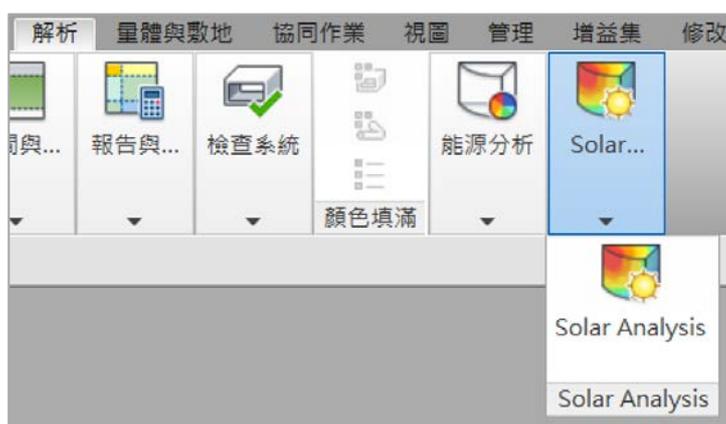


圖 26：Solar Analysis 工具

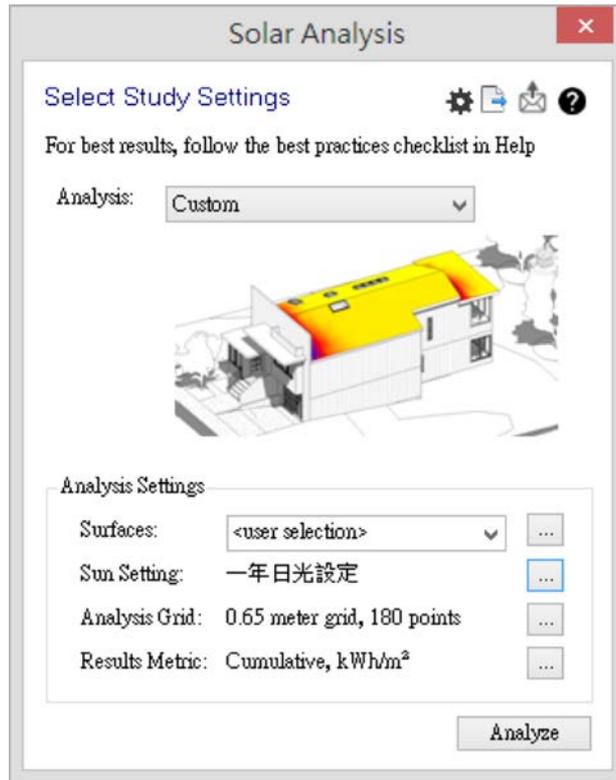


圖 27：日照分析之設定介面

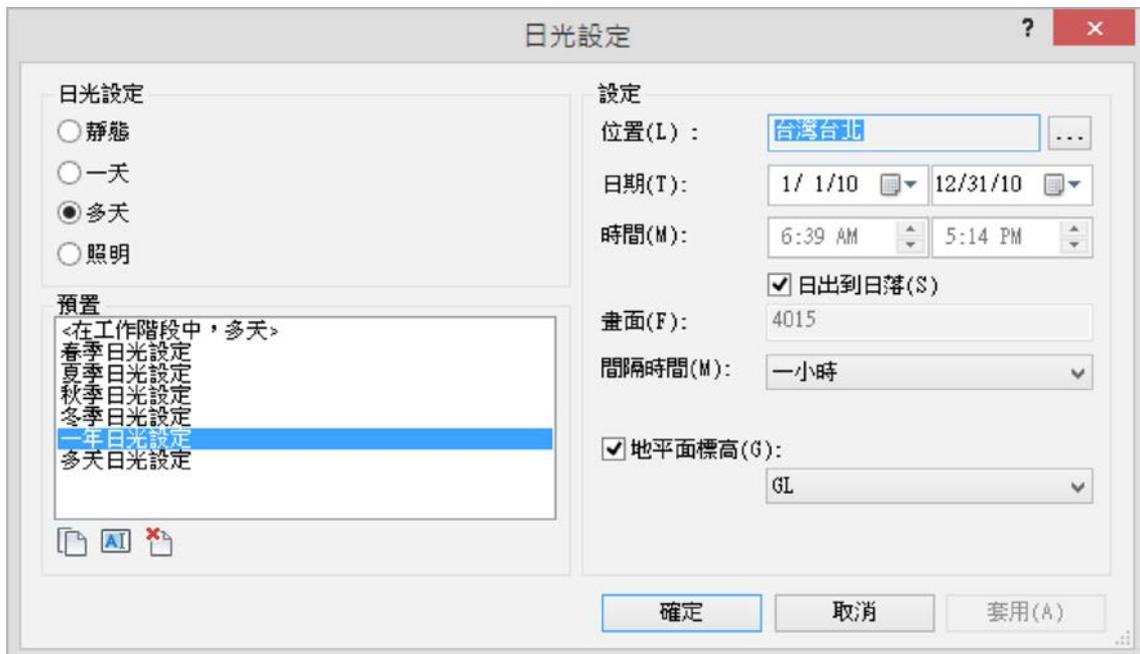


圖 28：日光設定介面

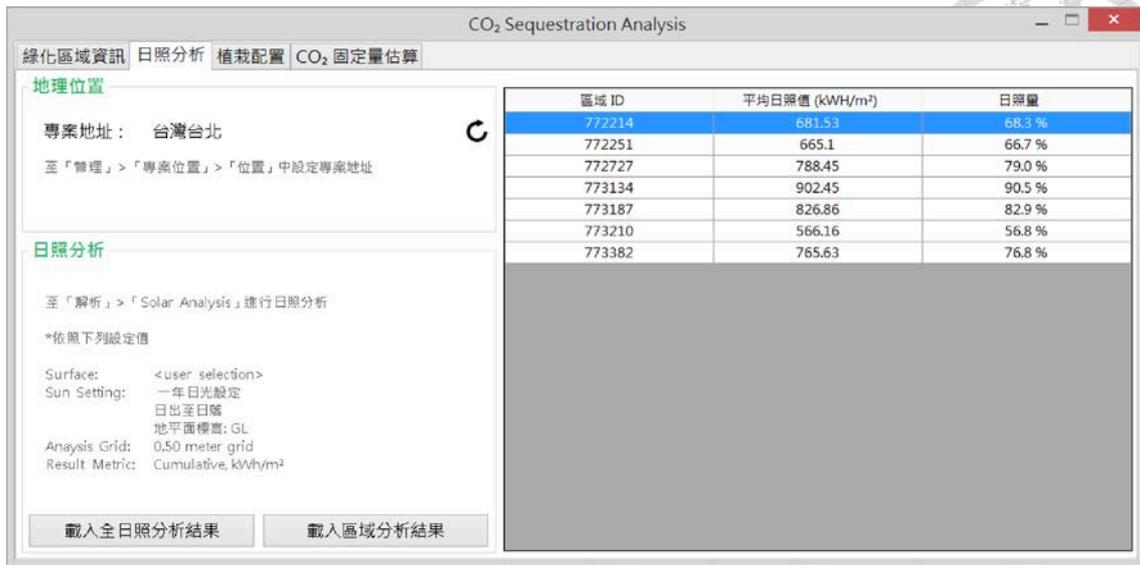


圖 29：完成區域日照值分析

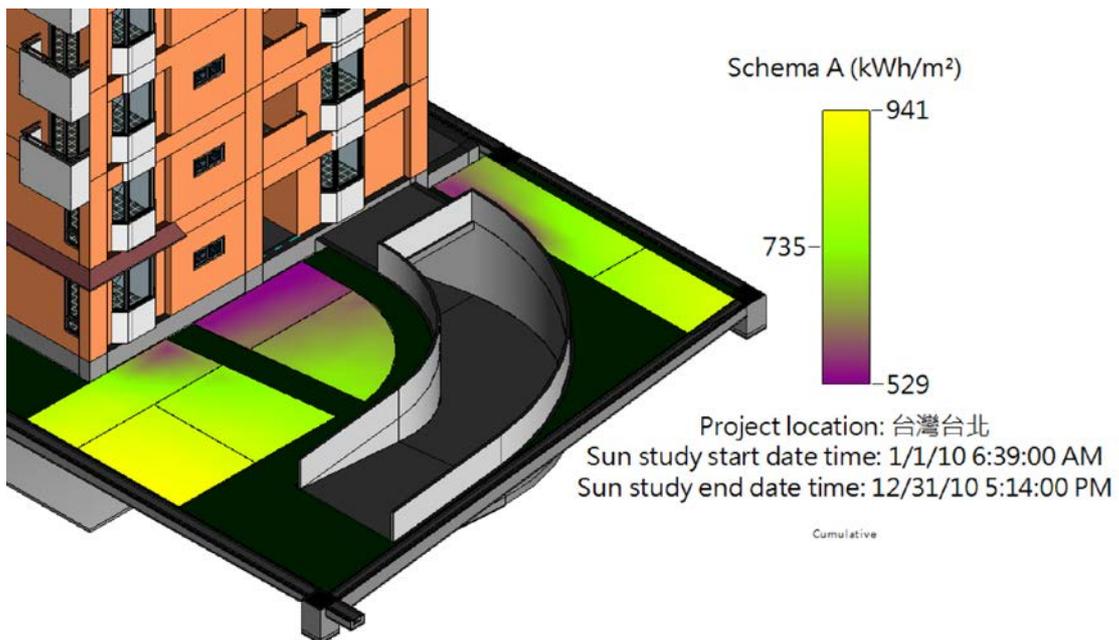


圖 30：日照分析結果之視覺化呈現

#### 4. 區域植栽配置

如圖 31，植栽配置頁籤之使用者介面同樣分為左右兩區塊，左為依編碼合併之綠化區域清單，右為輔助程式推薦的植栽清單與詳細資訊。此時輔助程式已將具有相同分類編碼之綠化區域合併，並依區域的面積大小進行日照值加權平均，因此等待指定植栽區域僅剩五項，這邊程式限制一次僅能選取一項目。選取欲配置植栽之項目後，點選「取得推薦植栽」，右方會出現符合該區域生長條件的推薦植栽清單，此時可透過篩選器依照種類(中大喬木、小喬木、灌木等)瀏覽植栽清單，同時查看各品種的簡介，選定好之後按下按鈕「選擇」即完成該區域植栽配置。圖 32 示範不篩選樹種條件情形下，選擇烏心石配置於編碼 L-01 之區域。圖 33 則示範僅列出常綠中大喬木條件下，選擇相思樹配置於編碼 L-02。

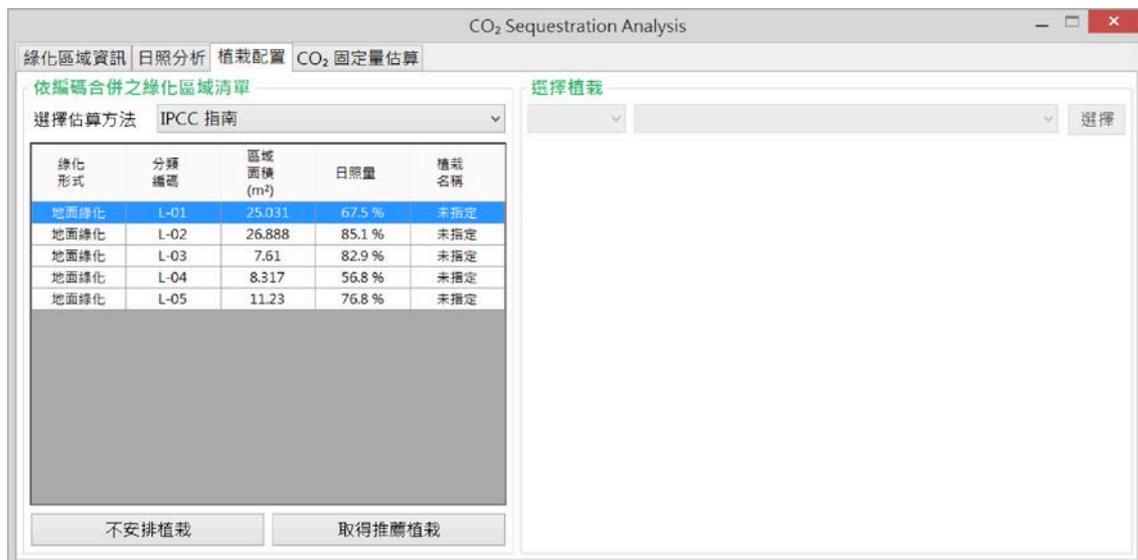


圖 31：配置綠化區域植栽之使用者介面



圖 32：於所有推薦品種中挑選植栽



圖 33：使用篩選器挑選植栽

## 5. CO<sub>2</sub> 固定量估算

即使有部分區域未配置植栽，輔助程式仍允許僅估算已完成植栽配置的區域的 CO<sub>2</sub> 固定量，如圖 34，點擊「開始估算」後得到下方清單，清單中列出依分類編碼分組的各區域每年 CO<sub>2</sub> 固定量，分類編碼 L-01 一年可吸收 44.23 公斤的二氧化碳，L-02 則可吸收 84.60 公斤的二氧化碳。清單下方顯示所有區域加總後的每年 CO<sub>2</sub> 固定量 (kg/yr)，L-03 至 L-05 為配置植栽，固定量皆為 0。所有區域加總後，一年的總 CO<sub>2</sub> 固定量為 128.83 公斤。上述結果可發現，L-01 與 L-02 的區域面積差距在 8% 以內，且兩區域皆是種植常綠中大喬木，但 L-02 的 CO<sub>2</sub> 固定量卻高出 90% 以上，凸顯同類型的植栽之間 CO<sub>2</sub> 吸收速率的顯著差異。同時注意到現行的綠建築綠化量指標是以植栽四十年生命期中的 CO<sub>2</sub> 固定量作為綠化效益的換算標準。

分類編碼	植栽名稱	CO <sub>2</sub> 固定量 (kg/yr)
L-01	假心石	44.23
L-02	相思樹	84.6
L-03	未指定	0
L-04	未指定	0
L-05	未指定	0

總 CO<sub>2</sub> 固定量: 128.83 (kg/yr)

圖 34：CO<sub>2</sub> 固定量估算介面

## 第六章 結論與建議



### 6.1 整體貢獻

本研究利用 BIM 技術自動化與視覺化的優點，搭配需要植栽品種研究數據的估算方式，提出基於 BIM 之綠化植栽 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法，藉以降低臺灣綠建築規範綠化量指標植栽 CO<sub>2</sub> 固定量之估算誤差。與現行臺灣綠建築規範的綠化量指標估算方式比較，此估算方法能提供準確性較高的 CO<sub>2</sub> 固定量估算結果。如 1.1 節所描述，綠建築規範的估算方式鼓勵性質成分高，且考量精確估算需要耗費相當多時間成本，因此簡化許多細節。本研究建議之估算方法將數據獲取與估算過程自動化，幫助設計者在不需耗費過多時間成本的條件下，取得更細緻的估算成果。方法著重既有研究資源之分析與整合，並說明研究單位、資料庫管理單位與綠化設計單位三種角色之權責。

為驗證建議之方法的可行性，本研究開發一輔助程式，應用 BIM 的自動化與視覺化技術，使得作業效率與估算準確性得以兼顧。因此，本研究認為綠建築規範應可允許採納估算程式之成果作為綠化量指標的計分依據的方法之一，或是結合本研究嘗試成功之 BIM 技術至既有的估算方法中，以增進臺灣綠化量指標的評估彈性與準確性。以法規之特性而言，本研究之估算方法是透過分析與模擬的方式取得估算結果，有助於規範型法規朝向基於效能型法規的發展(參閱 1.1 節)，一方面降低規範控制過多變因的潛在缺點，另一方面提供使用者更多的設計彈性與更有利於創新的設計環境。

就目前國內的建築設計過程來看，仍有許多需要查找資料或計算繁複之作業，本研究之經驗可提供工作性質類似的使用者或研究者參考，作為將來改善作業流程的知識養分。且當越多作業能基於 BIM 環境發展，這些設計作業中的資訊得以整合且變得更加有效率，對於設計者而言方便性亦能顯著提升，加速臺灣建築產業升級。

最後，本研究亦注意到，此估算工具不僅適用於建築設計階段，亦可運用於營運管理階段，用以評估現有綠化區域的植栽 CO<sub>2</sub> 固定量。例如，臺灣各校園

管理者可以透過輔助程式量化校園內的植栽對於減少溫室氣體的貢獻程度，或藉以知道哪些區域適合栽種哪些品種的植栽。中央政府甚至可以訂立獎勵措施，獎勵綠化量高的學校，提高學校實行區域綠化的意願。



## 6.2 未來展望

本研究開發之估算輔助程式需運用許多植栽固碳參數，而今日大多數品種仍缺乏國內研究數據。即便 IPCC 指南的 CO<sub>2</sub> 固定量估算方法提供不同層級的估算方法，對研究資源缺乏與經驗尚未成熟的國家，可採用層級較低的估算方法，但長期來看，更豐富的國內數據對估算成果的準確性必然有幫助，且有助於提升臺灣在國際永續議題的參與度，共同承擔全球環境變遷的責任。然而此估算方法是從 IPCC 指南借用過來的，顧慮都市中的植栽生長情況與森林中的生長情況可能有落差，因此若可行的話，直接以都市綠化區域的植栽作為研究數據來源應是更好的做法。

本研究實作之估算輔助程式目前一區域僅能配置單一品種之植栽，將來應納入複層綠化設計，呼應現行綠化量指標之精神。且估算程式因考量綠化區域之死有機質（枯枝落葉）大多當廢棄物處理，而森林中的死有機質長大多為年累積，因此本研究將綠化區域的死有機質忽略。然此範疇掌控在管理單位手裡，若可改變死有機質的處理方式，或許將來亦可納入這些碳庫的儲存量。

另一方面，估算輔助程式的計算過程以面積作為基礎而非植栽的數量，亦即估算程式是以綠化區域的栽植密度與林地的栽植密度相同為前提進行估算。加上目前缺乏面積與數量的轉換數據，因此無法清楚掌握需要栽植的數量。未來可將栽植間距、綠化區域幾何形狀納入考量，使得估算結果更貼近事實且更具彈性。同時，植栽年齡亦為目前尚未考量的變因之一，有兩種情況應被考量，一是樹木從別的地方移植過來，二是栽植新苗。

## 參考文獻



- 陳以文. (2013). 應用 BIM 模型之法則式綠建築設計輔助系統之研發. 碩士論文. 臺北市, 臺灣: 臺灣大學土木工程學系.
- 謝尚賢. (2014). 綠建築結合 BIM 開創可能性. 2015 年 12 月 19 日參考自臺大土木工程資訊模擬與管理研究中心:  
[http://bim.caece.net/bim\\_detail.php?id=69&frompage=2](http://bim.caece.net/bim_detail.php?id=69&frompage=2)
- 謝尚賢, 郭榮欽, 郭瀚嶸, 蔡沅浩, 周敬淳, 陳以文. (2016). 透過案例演練學習 BIM : 應用篇. 臺灣: 國立臺灣大學出版中心.
- 臺灣綜合研究院. (1997). 京都議定書. 2015 年 12 月 15 日參考自 Facing Global Warming-Taiwan's Response:  
<http://www.tri.org.tw/unfccc/Unfccc/UNFCCC02.htm>
- 臺灣大學森林系. (2014). 建置符合 MRV 原則林業溫室氣體清冊編製機制及試算 (1/2) - 期末報告書. 臺北市: 國立臺灣大學森林環境暨資源學系.
- 內政部建築研究所. (2010). 應用於綠建築設計之臺灣原生植物圖鑑. 臺北縣: 內政部建築研究所.
- 臺北市都市發展局. (2014). 臺北市法規條文. 2015 年 12 月 17 日參考自臺北市法規查詢系統: [http://www.laws.taipei.gov.tw/lawsystem/wfLawArticle\\_Search.aspx](http://www.laws.taipei.gov.tw/lawsystem/wfLawArticle_Search.aspx)
- 特有生物研究保育中心. (2006). 臺灣野生植物資料庫. 2016 年 3 月 23 日參考自農委會特有生物研究保育中心: <http://plant.tesri.gov.tw/plant100/index.aspx>
- 財團法人臺灣建築中心. (2014). 綠建築評估手冊 (2015 年版) 實施日期、手冊下載. 2015 年 12 月 15 日參考自財團法人臺灣建築中心:  
<http://gb.tabc.org.tw/modules/news/article.php?storyid=5>
- 臺灣行政院環境保護署. (2014). 2014 中華民國國家溫室氣體清冊報告. 臺北市, 臺灣: 台灣行政院環境保護署.
- 臺灣行政院勞動部勞動力發展署. (2013). 技能檢定中心全球資訊網. 2016 年 3 月 28 日參考自勞動部勞動力發展署:  
<http://www.labor.gov.tw/home.jsp?pageno=201109290020>

工業技術研究院能源與資源研究所. (1998). Facing Global Warming-Taiwan's

Response. 2015 年 12 月 15 日參考自 Taiwan Research Institute:

<http://www.tri.org.tw/unfccc/Unfccc/UNFCCC01.htm>

Autodesk. (2015). Solar Analysis. 2016 年 3 月 30 日參考自 Autodesk Feedback

Community:

<https://beta.autodesk.com/project/article/item.html?cap=50194CAAF4D044E993DC6F977D3AEA0E&artypeid={D154A560-B915-4DE5-B00C-6EBB9874E360}&artid={53A3CFD6-A294-48CA-921E-02D659500301}>

Bustamante, M. (2007). *Learning WCF: A Hands-on Guide*. O'Reilly Media.

Dlugokencky, E., and P. Tans. (2015). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. 2015 年

12 月 11 日參考自 NOAA/ESRL: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)

Eastman, C., P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, Second Edition*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

FAO. (2001). Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015 年 12 月

25 日參考自 Food and Agriculture Organization of the United Nations:

[www.fao.org/](http://www.fao.org/)

IPCC. (1998). About IPCC TFI. 2015 年 12 月 25 日參考自 Intergovernmental Panel on Climate Change: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/org/aboutnggip.html>

IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2015 年

12 月 25 日參考自 Intergovernmental Panel on Climate Change:

<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

Przyborski, P. (2016). Global Warming. 2016 年 3 月 14 日參考自 The Earth Observatory:

<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/page2.php>

Shaftel, H. (2015). Global Temperature. 2015 年 12 月 13 日參考自 Global Climate

Change: <http://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Syverson, B., and Murach, J. (2012). *Murach's SQL Server 2012 for Developers*. Mike Murach & Associates.

Tans, P. (2007). 二氧化碳如何造成全球暖化?. 科學人雜誌 2007 年第 59 期 1 月號. 遠流出版公司

UNFCCC. (2014). Meetings. 2015 年 12 月 26 日參考自 United Nations Framework Convention on Climate Change:

[http://unfccc.int/meetings/durban\\_nov\\_2011/meeting/6245.php](http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245.php)

Vizcarra, N. (2015). Arctic sea ice reaches lowest maximum extent on record. 2015 年 12 月 3 日參考自 National Snow and Ice Data Center:

<http://nsidc.org/arcticseaicenews/2015/03/2015-maximum-lowest-on-record/>

Vizcarra, N. (2015). Third dimension: new tools for sea ice thickness. 2015 年 12 月 13 日參考自 National Snow & Ice Data Center:

<http://nsidc.org/arcticseaicenews/2015/05/new-tools-for-sea-ice-thickness/>