

農田水利生態工程減碳效益評估方法之建立

The Establishment of the Carbon Reduction Benefit Assessment Method in Irrigation Ecological Engineering

國立中興大學
園藝學系
助理教授

吳振發
Chen-Fa Wu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

林裕彬
Yu-Pin Lin

國立成功大學
測量及空間資訊學系
助理教授

朱宏杰
Hone-Jay Chu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士生

黃韜
Tao Huang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士生

蕭戎雯*
Jun-wen Hsiao

摘 要

研究已證實農田水利生態工程具備灌溉與生態功能，近年來學者開始思考如何在工程過程中減少二氧化碳排放量，但長久以來缺乏一有效方法進行估算，有鑑於此本研究目的即在於建立農田水利生態工程二氧化碳計算及減碳效益評估方法，並以射馬干圳生態池工程為例，驗證方法之有效性，以及生態工程之減碳效益。二氧化碳計算方法是採用工程生命週期的方式進行，分別估算生產、運輸、施工階段的二氧化碳排放量，而完工階段則是計算植生工程的固碳量。減碳效益評估方面，分別計算生態工程、模擬之傳統工法兩者二氧化碳排放量，並比較差異量後計算出二氧化碳削減量，驗證生態工程之二氧化碳削減效益；同時，以工程碳平衡的觀念，驗證相對於傳統工程，生態工程達到碳平衡的時間效益。

研究結果發現工程材料生產與運輸階段產生的碳排放量較高，分別佔總工程碳排放量的 49.8%與 33.7%；相較於模擬之傳統工法，採用生態工程可有效降低碳排放量，於生產階段可削減 64.2%，運輸階段削減 6.1%，施工階段削減 46.6%，總削減

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，r00622020@ntu.edu.tw

量達 51.4%。至於工程完工階段，結果顯示植物的年總固碳量為 16,310 公斤，相較於傳統工程，可大幅增加固碳量。除此之外，生態工程需 6.98 年達到工程碳平衡，傳統工程則需 14.37 年。綜合言之，本研究提出的農田水利生態工程二氧化碳計算及減碳效益評估方法，不僅能夠有效的估算出農田水利生態工程於材料生產、運輸、施工階段之碳排放量，更可估算出工程完工後植物的固碳量，以及評估出生態工程相較於傳統工法之減碳效益、達碳平衡之時間效益、減碳之經濟效益等。未來此方法可進一步發展出排碳量計算、減碳效益評估軟體，提供農田水利工程人員使用。

關鍵詞：生態工程，生命週期法，減碳效益評估，射馬干圳。

ABSTRACT

Studies have proved that the ecological engineering has the function of irrigation and ecology. In recent years, scientists start to think that how to reduce the emission of carbon dioxide, but long it lacks of an effective method to do estimates. The purpose of this research is to establish a method of calculating carbon dioxide emission in an agricultural irrigation ecological engineering and the method of carbon reduction benefit assessment. Besides, as Shemagan canal for an example, verify the effectiveness of the method and the benefit of carbon reduction. The calculation of carbon dioxide conducts by the life-cycle engineering method, calculates separately by the material production, transportation and construction stage. And in the completion stage, we calculate the carbon sequestration produced by vegetation engineering.

Results show that the carbon emission is higher in the stage of material production and transportation, make up 49.8% and 33.7% of total carbon emission respectively; In comparison with the traditional method, ecological engineering could efficiently reduce carbon emission, reduce by 64.2% at the production stage, 6.1% at the transportation stage, 46.6% at the construction stage, the total reduction amounted to 51.4%. At the completion stage, results show that the total annual carbon sequestration of plants is 16,310 kg, in comparison with the traditional method, it could significantly increase the amount of carbon sequestration. In addition, ecological engineering reach to carbon balance in 6.98 year, traditional engineering should take 14.37 year. To sum up, the method of carbon dioxide calculation in irrigation ecological engineering and benefit assessment of carbon reduction provided by our study, not only estimate the carbon emission at material production, transportation and construction stage of irrigation ecological engineering, but also estimate the carbon sequestration of plants after the project completed, and assess the benefit of carbon sequestration of ecological project relative to traditional method, the temporal benefit of carbon balance, the economic benefit of carbon reduction. The method could extend to carbon emission calculation, carbon reduction benefit assessment software, provide for irrigation staff.

Keywords: Ecological Engineering, Life Cycle Assessment, Carbon Reduction Analysis, Shemagan Canal.

一、前言

環保署正積極推動適合我國情需求之溫室氣體國家適當減緩行動，以因應 2009 年 UNFCCC 第 15 次締約國大會的「哥本哈根協議(The Copenhagen Accord)」中要求附件一國家之量化減量目標承諾與非附件一國家之國家適當減緩行動。因此，2010 年 4 月經行政院院會通過的「國家節能減碳總計畫」及其十大標竿方案，即是我國符合哥本哈根協議要求制訂溫室氣體「國家適當減緩行動(NAMAs)」的主要內涵，包含「健全法規體制」、「改造低碳能源系統」、「打造低碳社區與社會」、「營造低碳產業結構」、「建構綠色運輸網絡」、「營建綠色新景觀與普及綠建築」、「擴張節能減碳科技能量」、「推動節能減碳公共工程」、「深化節能減碳教育」及「強化節能減碳宣導與溝通」等多面向，期望結合跨部會力量，統籌規劃及推動包含產業、運輸、住宅以及生活等各層面的具體行動，有系統地引導全民邁向低碳社會，達到我國承諾的節能減碳目標(環保署，2010)。為配合十大標竿方案之「推動節能減碳公共工程」行政院農業委員會農田水利處積極推動農田灌溉排水路生態工程之減碳研究，期望未來的農田灌溉排水路生態工程同時兼具灌溉、生態與減碳之效用。截至目前為止，該如何計算農田水利生態工程的二氧化碳排放量以及如何驗證農田水利生態工程的減碳效益仍然缺乏一有效的二氧化碳計算及減碳效益評估方法。

一般工程的二氧化碳排放量估算，常以生命週期評估(LCA)的方式進行估算，而生命週期評估是一個衡量產品生產或人類活動所伴隨產生之環境負荷的工具，不僅要知道整個生產過程的能量、原料需求量及環境的排放量，還要將這些能量、原料及排放量所造成的影響予以評估，並提出改善的機會及方法。因此生命週期的概念經常用來探討二氧化碳減量評估之研究，在建築耗能研究方面，林憲德、張又升等人(2002)針對臺灣建築利用生命週期概念做出二氧化碳排放量評估；劉漢卿(1994)提出建築生命週期能源消費與溫室氣體排放量分析；張又升(2002)、林建隆

(2003)與趙又嬋(2004)、黃國倉(2006)分別提出以建築物、住宅設備和百貨公司室內裝修、辦公建築作為主題對象的內容，其中張又升量測建築物從建造、使用、維修到拆除等各生命階段的能源消耗來計算其總耗能與二氧化碳排放量，並且針對樓層數差異，以其資料推估建築物生命週期的二氧化碳排放量。王育忠(2007)進行建築空調設備生命週期二氧化碳排放量評估。施安餘(2009)針對營建廢棄物之回收再利用，透過文獻收集、現地勘查、專家訪談與問卷調查等方式，建立二氧化碳減碳量效益之評估模式，且經由案例分析來驗證再利用之減碳成效。Leif Gustavsson (2006)以各種不同的情境變數探討分析木材建材與混凝土建材之節能減碳效能，並以紐西蘭建築為例。Xianghua Di (2007)以生命週期評估方法研究中國每單位電能所製造的消耗與排放氣體，使用各種不同能量來源如煤、石油、天然氣等等，並且考量水力、火力發電等各種不同發電方式，分析比較其所產生之各種不同污染廢棄物與溫室氣體項目。Takuyuki Yoshioka (2005)以產品生命週期評估法，量測林地砍伐、運輸、燃燒發電等過程所排放之二氧化碳總量與總耗能，並比較其輸入與產出效益。David J.M. Flower (2007)針對混凝土產業，評估其生產到完工整個過程所產生的二氧化碳，結果得知二氧化碳產出之大宗為其機具之拌合過程。此外亦有不少應用在探討臺灣產業界原物料的例子，例如胡秋蘭(1999)以石化原料業做為個案研究，瞭解生命週期評估架構與比較不同評估方法的差異及其限制；吳翊民(2000)以混凝土製品業為討論主題，利用生命週期評估技術做一實例探討；陳秋龍(2001)提出鋼鐵業之生命週期盤查分析，以投入產出生命週期評估模型操作期望解決生命週期評估法範圍界定不易之問題；蔡宗廷(2010)也以建築工程灌漿作業為例，研究營建施工作業過程中的減碳評估。在生態工程方面，楊育誠等人(2009)也以生命週期的概念分成生產、運輸、施工及完工後階段套入水保各項工程，分析評估傳統工程和生態工程間節能減碳的效益。綜合上述的文獻，可得知以生命週期評估(LCA)的方式估算農田水利生態工程是

可行、有效的方式。但是生命週期評估(LCA)方式對於生態工程的植物並未估算其二氧化碳固碳量，而植生工程是生態工程中相當重要的一部份，因此若忽略此部分的固碳量計算，將大幅降低結果之正確性。

植物的二氧化碳固碳能力國內外許多研究已發展出計算方法，並證實其重要性，相關研究包括 Andrew H. Buchanan 等人(1999)針對以木材做為建材的排碳量進行分析，並比較木材與其他建材之差異，分析其減碳效益。王亞男(2000)進行柳杉、樟樹對溫室氣體二氧化碳固定效益之研究，測定二氧化碳氣體濃度之變化，換算單位面積內林木之總固碳量，進而推算本省造林之固碳量及減碳效益。杜大治與王亞男等人(2003)提出孟宗竹在不同冠層二氧化碳固定效益之研究。王亞男與劉秀卿等人(2005)針對行道樹黃皮與黑板樹二氧化碳固定效益之研究。焦緒娟等人(2007)提出幾種綠化樹種降低城市熱島效應之研究，選擇華北三種常見之綠化樹種，估算其固碳釋氧量及降溫增溫量，對其生態學效應及熱島效應之減緩作用做一評估。李想等人(2008)進行居住區綠化樹種固碳釋氧和降溫增溫效應之研究，針對青島市居住區廣用之 14 種植物做為對象進行量化研究，研究結果可做為居住區綠化樹種之選擇與配置的科學參考依據。李宣德等人(2008)提出森林碳吸存資源調查推估模式系統，以臺灣樟樹為例，建立包含單株、林分、森林等多層級之地理資料庫，進而推估其碳吸存量及碳儲存量。由此可知，各種植物碳吸存量的實驗與計算方法已發展成熟，進一步應用於農田水利生態工程各種樹種碳吸存量及整個農田水利生態工程所有植栽碳吸存總量計算，將有助於瞭解農田水利生態工程之減碳效益。

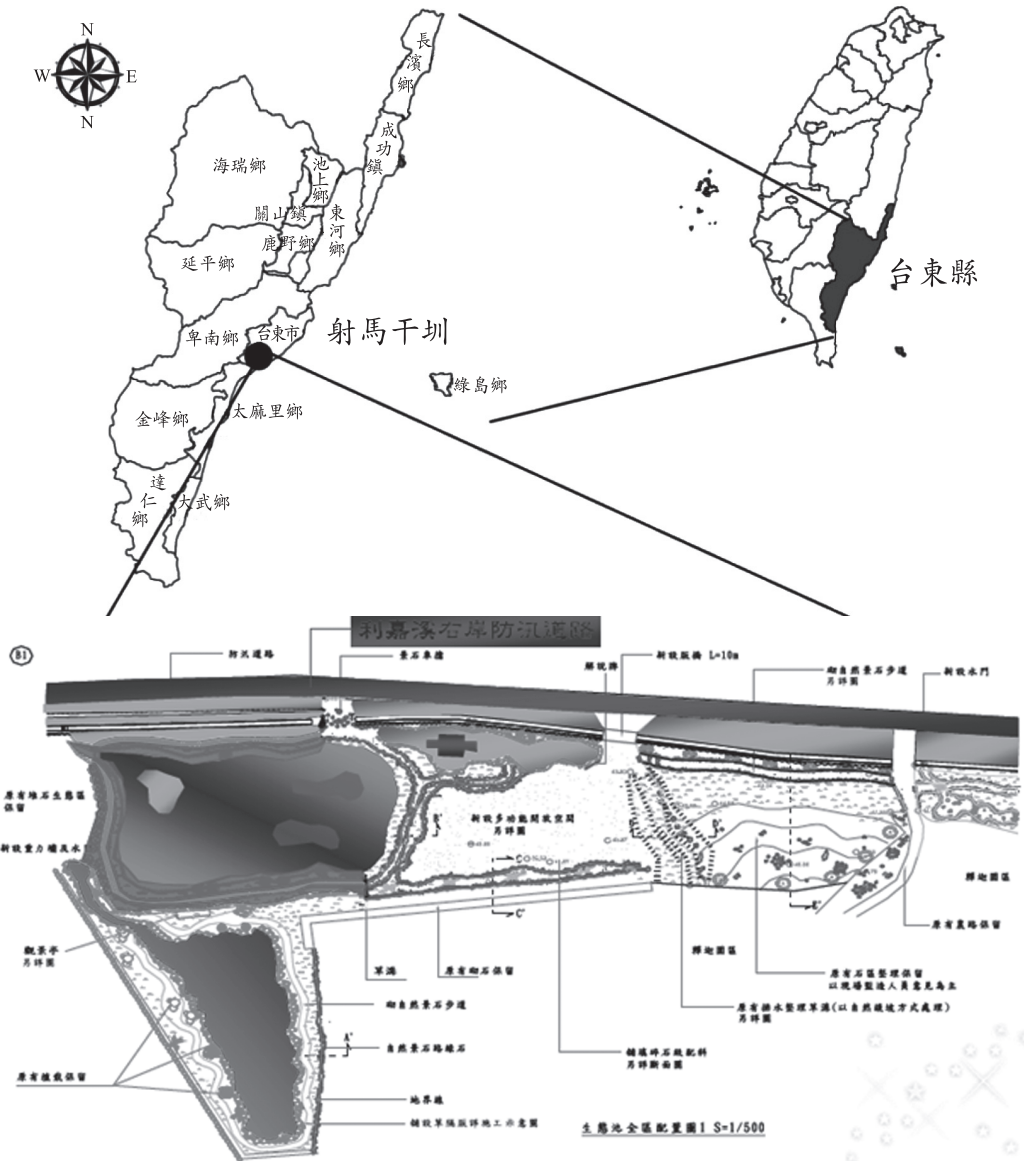
環境經濟學者經常以經濟學的角度來衡量工程或工廠二氧化碳減碳量，World Bank (2010)出版的 *State and Trends of the Carbon Market 2010*，此篇報告針對 2009 年的碳交易市場的交易量、交易金額以及發展趨勢有相當完整的分析。Massimo Tavoni (2007)等人同時考量森林管理與碳交易市場對穩定氣候目標所帶來的影

響，建立了能源-經濟-氣候模型，找尋最佳的二氧化碳減量策略。A. Ramudhin (2008)嘗試設計出一套結合碳交易市場與綠能供應鏈網路的混合指數數學模式，可以供決策者了解權衡過程中溫室氣體減量之影響以及物流總成本。Julien Chevallier (2009)以 2006 年為例針對歐洲的碳交易市場和風險規避彼此之間的交互影響作一探討與研究。Larry Lohmann (2008)舉出了十種例子有關於碳交易與氣候正義間所必須調適的關係。由此可知，減碳除了環境上的價值外，現已將碳量轉換為貨幣價值，並且已發展出碳交易市場，因此農田水利生態工程之減碳量，若能轉換為貨幣價值，將更有助於瞭解減碳之實質效益。

綜合上述，降低碳排放量是現今農田水利生態工程努力的目標之一，而採用工程生命週期法進行農田水利生態工程排碳量的估算是可行的估算方式。然而，目前工程生命週期排碳估算過程中，並未估算生態工程中植物的固碳量，可能發生低估工程減碳效益的情形。因此，本研究目的在於建立農田水利生態工程二氧化碳計算及減碳效益評估方法，並以射馬干圳生態池工程為例，驗證方法之有效性及減碳效益。二氧化碳計算方法是採用工程生命週期的方式進行，分別估算生產、運輸、施工階段的二氧化碳排放量，而完工階段則是計算植生工程的固碳量。減碳效益評估方面，分別計算生態工程、模擬之傳統工法兩者二氧化碳排放量，比較差異量後計算出二氧化碳削減量，驗證生態工程之二氧化碳削減效益；同時，以工程碳平衡的觀念，驗證相對於傳統工程，生態工程達到碳平衡的時間效益。

二、研究方法

本研究臺東縣的射馬干圳生態工程試辦地點為個案研究地區，採用簡約式生命週期評估(Streamlined LCA)方法進行工程材料生產階段、工程材料運輸階段、現地施工階段二氧化碳排放量估算，以及工程完工階段植物的固碳量，並利用材料替換方式模擬傳統工程案例，比較傳統與生態工程排碳量之差異，以驗證生態工程之減碳效益。



平面配置圖來源:台東農田水利會

圖 1 研究區位及平面配置圖

2.1 研究地點

本研究以臺東縣的射馬干圳生態工程之生態池試辦地點為研究區(圖 1)，工程採親水公園模式設計，兼顧多樣性生物棲息空間之砌石水路，多處營造出深潭、激流、淺瀨等效果，且採用現地取材，以現地大塊石疊砌護岸及圳堤，運用台東利吉地區特有低滲透率之黏性土壤施築

池底。生態島上廣植各類水生及陸生植物、樹叢，以提供昆蟲、鳥類等多樣性生物之棲息空間，並藉由生態池中優良的水質涵養，保育利嘉溪原生魚、蝦、貝類，維護該區域水中生態完整性。底部運用臺東利吉地區特有黏性土壤的不透水特性加以施工，除符合自然環境生態的要求，並讓緊鄰的利嘉溪水中的生物生態得以延續、棲

息與保育。

本工程生產、運輸、施工階段之工程項目與排碳計算詳見表 5、表 6、表 7。工程現場植物種類與數量之確定，是以竣工圖為底圖，研究人員進行現場調查與記錄，現地目前所種植之植栽主要可以分為當初工程設計時所種植之原生植物與後續工程完成後自然產生之衍生植物，植物種類共十八種，包括棋盤腳、臺灣赤楠、大王椰子、月桃、羅漢松、臺灣海棗、紅番薯、蘭嶼柿、毛柿、虎尾蘭、彩葉山漆莖、流蘇、日日櫻、腎蕨、小蚌蘭、狀元紅、大葉山欖、假檢草等，詳細的數量詳見表 8。

2.2 研究方法

本研究為了更有效率估計二氧化碳排放量，依循楊育誠(2009)、張又升(2002)、施安餘(2009)、蔡宗廷(2010)等人、焦緒娟等人(2007)與李想等人(2008)之研究，採用簡約式生命週期評估(Streamlined LCA)，以維持具有相同意義和結論的結果為出發點，暫不考慮難以估算的能源消耗(例如：人力、損耗等)，簡化工程程序成四大部分，分別是：工程材料生產階段、工程材料運輸階段、現地施工階段、工程完工階段，前三階段主要是計算工程的二氧化碳排放量；第四階段「工程完工階段」以計算工程中植物的「固碳能力」為主，實驗與計算方法參考王亞男(2000)、杜大治與王亞男(2003)、王亞男與劉秀卿(2005)之研究方法進行。

2.2.1 工程材料生產階段二氧化碳排放量

工程材料生產階段二氧化碳排放量計算，是各項建材使用量乘上單位二氧化碳排放量之總和，計算方式可表示如下：

$$P_{CO_2} = \sum_{i=1}^n CO_2 P_i \times V_{mi} \dots\dots\dots(1)$$

P_{CO_2} = 材料生產階段產生之總二氧化碳量；
 n = 工程所使用的建材種類數； $P_{CO_2 P_i}$ = 各類材料生產階段之單位二氧化碳排放量，如表 1 所示；
 V_{mi} = 工程施作之各類材料總量。

表 1 材料生產階段之排碳量

材料名稱		碳排放量 (kg)	單位
石質類	砂礫	3.11	m ³
	原石	3.9	m ³
鋼鐵類	鋼筋	923.45	T
	型鋼	940.86	T
水泥類	一般水泥	409.57	T
	1:1 水泥砂漿粉刷	9.19	m ²
	1:2 水泥砂漿粉刷	6.01	m ²
	1:3 水泥砂漿粉刷	4.2	m ²
	預拌混凝土(175 kgf/平方公分)	128.69	m ³
	預拌混凝土(210 kgf/平方公分)	148.95	m ³
	預拌混凝土(245 kgf/平方公分)	159.13	m ³
木材類	木材原材	12.07	m ³
	木模板	0.34	m ³
塑膠類	PVC 原料	562.26	T
	PVC 塑膠管	0.75	kg
瀝青類	瀝青混凝土	29.12	T

資料來源：林憲德等人，2002；楊育誠，2009

2.2.2 工程材料運輸階段二氧化碳排放量

工程材料運輸階段二氧化碳排放量計算，是各項建材運輸趟數乘上每趟二氧化碳排放量之總和，計算方式可表示如下：

$$TCO_2 = \sum_{i=1}^n \frac{V_{mi}}{V_{cari}} \times CO_{2cari} \dots\dots\dots(2)$$

TCO_2 = 材料運輸階段產生之總二氧化碳量； n = 工程所使用的建材種類數； V_{mi} = 工程施作之各類材料總量； V_{cari} = 各類車種之材料承載容量； CO_{2cari} = 各類車種材料運輸每趟之二氧化碳排放量。其中，

$$CO_{2car} = \sum_{i=1}^n O_{cari} \times HR_{cari} \times C_{CO2i} \dots\dots\dots(3)$$

n = 各類材料運輸之車種； O_{cari} = 各類車種之平均耗油率，如表 2 所示； HR_{cari} = 各類材料運輸消耗的時間，依施工規範，傾卸貨車於市區內平面道路之速率通常假定重車 30 km/hr，空車 40 km/hr，平均為 35 km/hr； C_{CO2i} = 各車種使用之油類二氧化碳排放係數，如表 3 所示。

表 2 材料運輸之車種規格及耗油

名稱	飛輪出力 (KW)	燃料	載貨量 (m ³)	平均耗油率 (l/hr)
傾卸貨車	140-149	高級柴油	5	13.63
	200-209		8	19.27
	270-279		12	25.38
預拌混凝土車	140-149	高級柴油	3.5	19.43
	200-209		5.5	27.47

資料來源：施工規範及工料分析，第貳篇施工機具費率分析及工作量計算，楊育誠，2009。

表 3 化石能源二氧化碳排放係數

化石能源	碳排放係數	
	(T-C/TJ)	Kg-CO ₂ /L
能源		
汽油	18.9	2.241
柴油	20.2	2.702
燃料油	21.1	2.95
煤油	19.6	2.532

資料來源：IPCC 準則。楊育誠，2009。

2.2.3 現地施工階段二氧化碳排放量

現地施工作業的碳排放計算，本研究主要是拆成施工場內耗能排碳與場外耗能排碳兩部分。其中場內耗能為主要排碳來源，以兩大施工作業為計算項目，一為混凝土灌漿作業，其二為土石挖填方作業。而場外耗能為數不大，計算項目包括機具運輸與人員旅次排碳。場內與場外排碳加總所得即為現地施工階段的二氧化碳排放量。

- (1) 場內耗能：場內耗能部份則是因為施工作業使用各項機具與人工而消耗能源，直接產生碳排放，參考蔡宗廷(2010)依各排放源所使用之能源之不同加以分類為耗油機具、耗電機具以及施工人員為維持生命所排放之二氧化碳等三個部份。對於施工當中所使用的耗電機具，首先調查每部耗電機具功率，根據目標施工作業時間特性不同，計算該耗電機具單位時間耗電量，再乘上單位電量碳排放量後，得到該機具單位時間二氧化碳排放量。

表 4 推土機之平均耗油率與平均工作量分析表

飛輪出力 (KW)	燃料	平均耗油率 (l/hr)	土壤性質	平均工作量 (m ³ /hr)
250-259	高級柴油	42.3	粗砂	180.92
			普通土	136.69
			黏土	105.54
			硬岩	60.31
160-169	高級柴油	31.02	粗砂	83.36
			普通土	62.99
			黏土	48.63
			硬岩	27.79
120-129	高級柴油	23.5	粗砂	58.53
			普通土	44.22
			黏土	34.14
			硬岩	19.51
80-89	高級柴油	15.98	粗砂	44.34
			普通土	33.50
			黏土	25.87
			硬岩	14.78

資料來源：楊育誠，2009。

- (2) 機具輸送：施工機具輸送同樣也會因為機具來源地之不同會影響碳排放量，雖然並非由施工作業直接產生，但是這兩部份碳排放量會由於施工時間之長短造成影響，因此對於施工作業減碳評估是必須加以計算，詳細計算請參閱蔡宗廷(2010)。
- (3) 施工人員旅次：由於受到工人來源地與施工總日數影響，會因總工時變化而有所不同。
- (4) 場內耗能中機具耗油的排碳量，計算如下：

$$S_{CO_2} = \sum_{i=1}^n O_{mi} \times HR_{work} \times C_{CO_2i} \dots\dots\dots (4)$$

S_{CO_2} = 工程施工階段產生總二氧化碳量；
 O_{mi} = 各機具平均耗油率(表 4)； HR_{work} = 各機具總工作時數； C_{CO_2i} = 各機具所用油類二氧化碳排放係數。

2.2.4 施工完工階段

工程完工階段是以工程完工後植物二氧化碳固碳量為主，本研究參考王亞男(2000)、杜大治與王亞男(2003)、王亞男與劉秀卿(2005)之實驗

方法，共實測八種植物，每種植物由花市選購生長一致，無病蟲危害之健康植株各三株，每盆皆選擇用培養土為介質之植株，每天澆水一次，每次每盆澆水量相同，每種植物分別排成一列，放置於中興大學作物科學大樓頂樓周圍環境因子(溫度、溼度及風速等)相似且有光照處。每兩個禮拜選擇晴朗無雨的日子測量一次，從早上 6:00 到下午 18:00，每兩個小時測量一次，每次各種植株每株逢機選擇完全展開葉各 3 片，利用攜帶式光合作用測定儀(Li-6400)測量，每一次測量皆等到光合作用速率穩定後紀錄其瞬時光合作用速率。各時段測得的光合作用率計算平均，可得到各植株日平均光合作用率。另外，在葉面積估算上是任意取每種樹種大小不同的葉片 30 片，利用葉面積儀(LI-3100)測量每一片葉的面積，同時量出各葉片的長乘寬；接著以簡單迴歸分別進行長、寬、長乘寬與葉面積的迴歸分析，可分別求得葉面積與長、葉面積與寬、葉面積與長乘寬等三個迴歸公式，最後利用最高迴歸係數的公式估算全株葉面積。而植株固碳量是利用下列公式求出單株日固碳量(蔡本原，2006)，再由日估碳量乘上 365 天估算年固碳量：

$$P \times 60 \times 60 \times 12 \div 1000 \div 1000 \times 44 \times A \div 10000 = WCO_2 \dots\dots\dots(5)$$

其中，P 為單日平均光合作用速率($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
 A 為單株總葉面積(cm^2)
 WCO₂ 為全株日總二氧化碳吸收量 (g/day/m^2)
 44 為 CO₂ 的莫耳數
 12 為測量時間(6:00~18:00) (hr)

2.2.5 生態工程之二氧化碳削減量與削減率

本研究計算農田水利生態工程二氧化碳排放量，並以材料替換方式，模擬以傳統工程方式興建之二氧化碳排放量，進一步計算相較於模擬傳統工程，生態工程二氧化碳削減量與削減率，計算公式表示如下：

$$EVco_2 = ETco_2 - EEco_2 \dots\dots\dots(6)$$

$$ERco_2 = EVco_2 / ETco_2 \dots\dots\dots(7)$$

EVco₂ 為二氧化碳總削減量，ERco₂ 為二氧化碳總削減率，EEco₂ 為生態工程二氧化碳總排放量，ETco₂ 模擬傳統工程二氧化碳總排放量。

三、研究結果

根據台東農田水利會提供的設計圖說、預算書等資料，以及對監造人員、工程人員之訪談，得知本工程機具的使用量及種類不多，且大部分的工程材料距離施工地點不遠，因此本研究假設現地材料運輸距離工區一百公尺以內，並且假設各個同種類運輸機具之平均耗油率相同，且皆以柴油為燃料，貨車運輸時間給定為 0.5 小時，預拌混凝土車運輸時間則假定為 25 分鐘。

3.1 生產階段二氧化碳排碳量計算

依據竣工圖數量表彙整生態工程試辦地點的生態池工程材料數量，包括砂礫 10,724 立方公尺(m³)、原石 815.2 立方公尺(m³)、鋼筋 4.38 噸(T)、一般水泥 6.90 噸(T)、預拌混凝土 103 立方公尺(m³)、木材 1.54 立方公尺(m³)等，分別乘上單位碳排放量並加總後，計算出生產階段排碳量為 56,677.1 公斤(kg)，詳細計算表格如表 5 所示。

3.2 運輸階段二氧化碳排碳量計算

生態池工程材料需經由運輸才能到達施工地點，運輸的車次數是根據材料數量除以單位車次承載量得知，單次的時間是對施工與監造單位訪談後，設定為 0.5 小時(hr)，平均耗油率依不同車種有所差異，詳見表 6。經計算後得出運輸階段二氧化碳排碳總量為 38,341.1 公斤。

3.3 施工階段二氧化碳排碳量計算

現地施工作業的碳排放包括施工場內耗能排碳與場外耗能排碳兩部分，本生態示範工程計算得出場內耗能排碳量為 18,793.3 公斤(表 7)，場外耗能排碳量為 6.6 公斤，施工階段總二氧化碳排碳量為 18,799.9 公斤。

表 5 生產階段二氧化碳排碳量計算表

項目	材料數量	單位碳排放	排放量(kg)
砂礫	10,724 (m ³)	3.11 (kg/m ³)	33,351.6
原石	815.2 (m ³)	3.90 (kg/m ³)	3,179.3
鋼筋	4.38 (T)	923.4 5(kg/T)	4,046.6
一般水泥	6.90 (T)	409.57 (kg/T)	2,826.0
預拌混凝土	103 (m ³)	128.69 (kg/m ³)	13,255.0
木材	1.54 (m ³)	12.07 (kg/m ³)	18.6
合計		56,677.1	

表 6 運輸階段二氧化碳排碳量計算表

項目	材料數量	乘載量	車次	單次時間(hr)	平均耗油率(l/hr)	排放量(kg)
砂礫	10,724 (m ³)	8 (m ³)	1,341	0.5	19.27	34,911.3
原石	815.2 (m ³)	8 (m ³)	102	0.5	19.27	2,655.5
鋼筋	4.382 (T)	9 (T)	1	0.5	25.38	34.3
一般水泥	6.9 (T)	3.5 (T)	2	0.5	19.43	52.5
預拌混凝土	103 (m ³)	3.5 (m ³)	29	0.42	19.43	661.5
木材原材	1.54 (m ³)	8 (m ³)	1	0.5	19.27	26.0
合計				38,341.1		

表 7 施工階段二氧化碳排碳量計算表

項目	細部內容	各細項排碳量(kg)	排碳量(kg)
場內耗能	灌漿作業	2,062.3*	18,793.3
	挖填方作業	16731.0	
場外耗能	機具輸送	5.0	6.6
	人員旅次	1.6	
合計		18,799.9	

*灌漿作業的場內耗能包含施工作業使用各項機具泵送車、預拌車、振動機等消耗能源，產生之排碳量

3.4 完工階段植物年總固碳量

生態工程合計使用的植物種類共十八種，包括棋盤腳、臺灣赤楠、大王椰子、月桃、羅漢松、臺灣海棗、紅番薯、蘭嶼柿、毛柿、虎尾蘭、彩葉山漆莖、流蘇、日日櫻、腎蕨、小蚌蘭、狀元紅、大葉山欖、假檢草等，詳見表 8。本研究以實驗方式取得棋盤腳、月桃、羅漢松、紅番薯、虎尾蘭、彩葉山漆莖、腎蕨、假檢草等八種植物之光合作用速率，帶入式 5 中，計算出各種植物的日固碳量，其中以喬木的日固碳量較高，羅漢松日固碳量為 15.88 g CO₂ stem⁻¹day⁻¹，其次是棋盤腳日固碳量為 11.18 g CO₂ stem⁻¹day⁻¹；灌木或草類的日固碳量較低，其中以腎蕨(1.66 g CO₂

stem⁻¹day⁻¹)、彩葉山漆莖(1.73 g CO₂ stem⁻¹day⁻¹)最低。另外十種植物經回顧相關文獻後，並無相關研究，本研究觀察各植物生理特徵後，以最相似植物的光合作用速率進行代替後，分別計算各植物之日總固碳量(表 8)。

臺東射馬干圳生態池工程的植生年總固碳量之計算是將各植物的日固碳量乘上 365 天成為年固碳量，接著以年固碳量乘上栽植株數，即可得出本工程中各種植物的年總固碳量，加總後計算出本生態工程年總固碳量。表 8 彙整本工程中各種植物年總固碳量，由於本工程總共密鋪 4,282 m²假檢草，因此年總固碳量達 14,153,894.08 g CO₂ stem⁻¹day⁻¹，其次是種植 210 株月桃，年總固

表 8 完工階段植物年總固碳量估算表

植栽	規格	單位	數量	日固碳量 (g CO ₂ stem ⁻¹ day ⁻¹)	年固碳量 (g CO ₂ stem ⁻¹ year ⁻¹)	備註 (光合作用速率)
棋盤腳	H = 3 m φ 8 cm	株	5	11.18	20,399.38	本研究實測
臺灣赤楠	H = 80 cm 袋植	袋	80	3.32	96,944.00	暫以金露花代替
大王椰子	H = 4 m φ 18 cm	株	7	10.00	25,550.00	暫定為 10
月桃	H = 50 cm 袋植	袋	210	7.60	582,540.00	本研究實測
羅漢松	H = 4 m φ 12 cm	株	1	15.88	5,797.26	本研究實測
羅漢松	H = 2.5 m φ 7 cm	株	2	11.11	8,110.30	本研究實測
臺灣海棗	H = 1.8 m φ 25 cm	株	5	10.00	18,250.00	暫定為 10
臺灣海棗	H = 1 m φ 25 cm	株	4	10.00	14,600.00	暫定為 10
紅番薯	袋植	袋	180	2.40	157,680.00	本研究實測
蘭嶼柿	H = 2.5 m φ 5 cm	株	90	7.12	233,892.00	暫以土肉桂代替
毛柿	H = 3 m φ 10 cm	株	7	7.12	18,191.60	暫以土肉桂代替
虎尾蘭	鉢植	袋	100	2.97	108,282.55	本研究實測
彩葉山漆莖	H = 60 cm 袋植	袋	60	1.73	37,887.00	本研究實測
流蘇	H = 1.5 m φ 3 cm	株	15	6.80	37,230.00	暫以扶桑代替
日日櫻	H = 1.5 m φ 4 cm	株	2	2.00	1,460.00	暫定為 2
腎蕨	袋植	株	350	1.66	212,246.85	本研究實測
小蚌蘭	袋植	株	250	2.97	271,012.50	暫以虎尾蘭代替
狀元紅	H = 60 cm	株	220	3.32	266,596.00	暫以金露花代替
大葉山欖	移植費	株	11	10.00	40,150.00	暫定為 10
假檢草	密鋪	m ²	4282	9.06	14,153,894.08	本研究實測
年總固碳量					16,310,713.53 (g CO ₂ stem ⁻¹ year ⁻¹)	

表 9 射馬干圳生態池生態工程與模擬傳統工程排碳量比較

工程階段	排碳量(kg)		削減量(kg)	削減率(%)
	生態工程	模擬傳統工程		
生產階段	56,677.1	158,405.9	101,728.8	64.2%
運輸階段	38,341.1	40,823.2	2,482.2	6.1%
施工階段	18,799.9	35,174.1	16,374.2	46.6%
總計	113,818.1	234,403.3	120,585.2	51.4%

碳量為 582,540 g CO₂ stem⁻¹day⁻¹。計算後十八種植物年總固碳量高達 16,310 公斤(表 8)。

3.5 總排放量二氧化碳削減量與削減率

臺東射馬干圳生態池工程大量使用當地石材，滿足「就地取材，就地利用」的生態工程原則，本研究將射馬干圳生態池生態工程與模擬傳統工程做一對照，以瞭解生態工程二氧化碳削減量與削減率結果。利用案例中生態工程材料的替換來做為假設案例，使用相同體積、不同材料來

更換，我們假設原本生態工程的原石材料全數置換成混凝土材料，模擬傳統工法興建方式，發現生態工程於生產階段的二氧化碳削減量為 101,728.8 kg，削減率為 64.2% (如表 9)；運輸階段由於兩種材料運輸的單趟承載量不同，原石單趟承載量為 8 m³，而混凝土運輸過程需要不斷攪拌，單次承載量僅為 3.5 m³，因此，兩種材料運輸過程二氧化碳排放量有所差異，生態工程的二氧化碳削減量為 2482.2 kg，削減率為 6.1%；於施工階段主要為土方的挖填與混凝土澆灌作

業，施工階段的二氧化碳削減量為 16,374.2 kg，削減率為 46.6%。其傳統工程的總排碳量為 234,403.3 kg，比原本生態工程總排碳量 113,818.1 kg 增加了 120,585.2 kg，故生態工程的二氧化碳削減量為 120,585.2 kg，總削減率為 51.4%。

四、結論與建議

本研究目的在於建立農田水利生態工程二氧化碳計算及減碳效益評估方法，主要是採用工程生命週期的觀念及植物固碳量實驗，研擬農田水利生態工程排固碳量計算方法，並以射馬干圳生態池生態工程進行方法驗證。研究結果發現農田水利生態工程於材料生產、運輸、現地施工階段之二氧化碳排放量，以材料生產與運輸階段產生的碳排放量較高，分別佔工程建設過程中的碳排放量的 49.8%與 33.7%。相較於以傳統工法以混凝土為材料及施作方式，台東射馬干圳生態池的二氧化碳削減量為 120.6 公噸，生產階段的削減率為 64.2%，運輸階段削減率為 6.1%，施工階段削減率為 46.6%，總削減率為 51.4%。至於工程的完工階段，本研究以工程中栽植的植物為分析主體，結果顯示年總固碳量為 16,310 公斤，以碳平衡的觀點來看，6.98 年之後工程中栽種的植栽可吸附本生態工程排放的二氧化碳；相對的若以傳統工程施作，總工程二氧化碳排放量將增加至 234,403.3 公斤，需 14.37 年才能達到碳平衡。

本研究建立的農田水利生態工程生命週期減碳效益評估方法，未來可應用於農田水利生態工程之相關實務及研究。當農委會補助各農田水利會進行農田水利生態工程時，可要求計畫提送單位(各農田水利會)必須先完成設計書說及預算，根據設計書說及預算計算工程各階段及總二氧化碳排放與固碳量，以及計算是否達到排固碳平衡。進一步可計算出相較於傳統工法之減碳效益，進行成本效益估算等。各農田水利會提送上述的資料，對於補助單位而言是相當重要的補助參考指標，足以瞭解補助各工程之實質效益(建設)與環境效益(二氧化碳減量)，甚至瞭解工程的成本效益比，並可依此正確的補助高效益的工程，減少補助工程對於環境造成的損害。除此之外，

本研究建立的減碳效益評估方法，可作為各種工程於規劃設計階段，進行不同設計方案二氧化碳效益、成本與減碳效益比較時使用，能夠有效的輔助決策者、規劃設計者提出低成本高減碳的工程方案。

目前本研究僅提出一完整的計算與評估方法，後續仍需進行更深入或延伸性的研究，例如：本研究發現減碳擁有最顯著效益的階段為材料生產階段，因此未來研究可針對不同工程材料以及不同工法進行探討，分析各材料之節能減碳效益，建立各種工程材料的碳排放量，可作為農田水利工程材料選用之參考。此外，應持續進行農田水利生態工程常用植物光合作用速率的實驗，建立起常用植物固碳計算表，進一步發展出農田水利生態工程減碳效益計算程式，提供各農田水利單位進行工程減碳效益評估使用，以及農委會檢驗各工程之減碳效益、成本效益使用，有助於提升農委會推動農田水利生態工程減碳之效益。後續研究建議方面，目前本研究僅考慮農田水利工程之生態工程減碳效益，未來可進行系統性的估算，例如同時估算水田及農田水利工程之減碳效益。

五、謝 誌

本研究感謝農委會提供研究經費(計畫編號 99 農發-04.01-利-03)之協助，同時感謝台東農田水利會提供設計圖說、預算等相關資料。

六、參考文獻

1. A. Ramudhin, A. Chaabane, 2008, Carbon Market Sensitive Green Supply Chain Network Design, Proceedings of the 2008 IEEE IEEM, 1093-1097.
2. Andrew H. Buchanana, S. Bry Levine, 1999, Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions, Environmental Science & Policy 2: 427-437.
3. Carbon Finance At the World Bank, 2010, State and Trends of the Carbon Market.
4. David J. M. Flower and Jay G. Sanjayan, 2007,

- Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture, Department of Civil Engineering Monash University.
5. Julien Chevallier, FlorianIelpo, 2009, Risk aversion and institutional information disclosure on the European carbon market: A case-study of the 2006 compliance event. *Energy Policy*, 37: 15-28.
 6. Larry Lohmann, 2008, Carbon Trading, Climate Justice and the Production of Ignorance: Ten examples. *Development*, 51: 359-365.
 7. Leif Gustavsson, Roger Sathre, 2006, Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials, *Building and Environment* (41): 940-951.
 8. Massimo Tavonia, Brent Sohngenb, 2007, Forestry and the carbon market response to stabilize climate, *Energy Policy*, 35: 5346-5353.
 9. Takuyuki Yoshioka, Kazuhiro Aruga, Toshio Nitami, Hiroshi Kobayashi and Hideo Sakai, *Energy and Carbon Dioxide Balance of Logging Residues as Alternative Energy Resources: System Analysis Based on the Method of a Life Cycle Inventory (LCI) Analysis*, The Japanese Forest Society and Springer-Verlag, 2004.
 10. Xianghua Di, Zuoren Nie, Baorong Yuan, and Tiejong Zuo, *Life Cycle Inventory for Electricity Generation in China*, Beijing University of Technology, 2007.
 11. 王育忠, 2007, 建築空調設備生命週期二氧化碳排放量評估, 國立成功大學建築研究所碩士論文。
 12. 王亞男, 2000, 柳杉、樟樹對溫室氣體二氧化碳固定效益之研究, 行政院環保署科技計劃。
 13. 王亞男、劉秀卿、蕭英倫, 2005, 行道樹水黃皮二氧化碳固定效益之研究, *中華林學季刊*, 38(2): 151-161。
 14. 王景玟, 2005, 結合生命週期評估及生態效益之分析研究-以鋼鐵廠製品為例, 國立成功大學環境工程學系碩士論文。
 15. 行政院公共工程委員會, 2008, 永續公共工程－節能減碳政策白皮(核定本)。
 16. 行政院農委會, 2008, 農田水利生態工程研發期中報告。
 17. 行政院農委會, 2007, 農田水利生態工程研發期末報告。
 18. 行政院農委會網站, <http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=6030>
 19. 行政院農業委員會, 2005, 農田水利建設推行生態工法之整體規劃, 國立臺灣大學水工試驗所(94 農發-5.1-利-11), 郭振泰。
 20. 行政院農業委員會, 2007, 農田水利工程設計單元參考圖冊。
 21. 李宣德、馮豐隆, 2008, 森林碳吸存資源調查推估模式系統－以臺灣樟樹為例。 *臺灣林業科學* 15-26。
 22. 李想、李海梅、馬穎、劉培利, 2008, 居住區綠化樹種固碳釋氧和降溫增溫效應研究, *北方園藝*, 8: 99-102。
 23. 何明錦, 陳瑞鈴, 林憲德, 江哲銘, 2007, 綠建築解說與評估手冊, 內政部建築研究所出版。
 24. 吳俊賢、林俊成、李國忠、陳溢宏、林麗貞、林瑞進, 2005, 森林能源作物之二氧化碳吸存效果與能源產出效率, 臺大實驗林研究報告, 19(1): 43-53。
 25. 吳振發、蔡昀婷、吳芋菁, 2010, 農村常用綠籬植物減碳效益初探, 造園季刊(編審中)。
 26. 吳翊民, 2000, 生命週期評估技術在臺灣產業界應用實例之探討－以混凝土製品業為例, 中華大學工業工程與管理研究所碩士論文。
 27. 杜大治、王亞男、蕭英倫, 2003, 孟宗竹在不同冠層二氧化碳固定效益之研究, 臺大實驗林研究報告, 17(3): 187-194。
 28. 杜大治、王亞男、蕭英倫, 2005, 行道樹水黃皮二氧化碳固定效益之研究, *中華林學季刊*, 38(2): 151-161。
 29. 周佩琪, 2008, 農村植栽配置減碳效益之研

- 究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
30. 林文智、楊耀綸，2007，山胡椒、光葉柃木及錐果櫟樹苗的生長與生理對不同光環境的反應，行政院農委會林業試驗所六龜研究中心，研究報告。
 31. 林世強，2007，以二氧化碳排放量探討島嶼之永續發展策略，地理學報，47: 39-57。
 32. 林建隆，2003，住宅設備生命週期二氧化碳排放量解析，成功大學建築研究所碩士班碩士論文。
 33. 林政興、楊育誠、連惠邦，2009，生態工程節能減碳評估，第十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會。
 34. 林素貞、胡秋蘭，1999，生命週期評估方法探討-以石化原料業為例，工業污染防治，71: 103-121。
 35. 林裕彬，2006，農田水利生態工程選址及效益評估模式，行政院農委會。
 36. 林裕彬，2007，農田水利生態工程選址及效益評估模式，行政院農委會。
 37. 林裕彬，2008，農田水利生態工程選址及效益評估模式，行政院農委會。
 38. 林裕彬，2009，農田水利會生態工程成效評估與技術推廣計畫，行政院農委會。
 39. 林裕彬、吳振發、楊博宇、顏佑瑾，2008，農田水利生態工程建設效益評估，農工學報，54: 58-82。
 40. 林憲德、張又升、歐文生、楊熙照、劉漢卿，2002，臺灣建材生產耗能與二氧化碳排放之解析，建築學報，40: 1-15。
 41. 林鎮洋、鍾詩明，2002，生態工法在農村規劃上的應用，造園季刊，42: 29-34。
 42. 林憲德、趙又嬋、歐文生，2007，百貨公司生命週期室內裝修環境衝擊評估—裝修二氧化碳減量對策之研究，中華民國建築學會「建築學報」，60: 137-152。
 43. 姚銘輝、陳守泓，2005，水稻田二氧化碳吸存量之研究，臺灣農業研究，54: 150-161。
 44. 施安餘，2009，營建廢棄物回收再利用-二氧化碳減量效益評估模式建立之研究，國立中央大學營建管理研究所碩士論文。
 45. 施淑貞，2008，不願面對的真相：談綠建築與二氧化碳減量，律師雜誌，336(9): 23-31。
 46. 胡通哲，2004，蘭陽地區魚道對魚類棲地復育的影響，中央研究院生物多樣性研究中心九十三年蘭陽溪生物多樣性研究計劃報告。
 47. 徐善德、廖玉琬編譯，2006，植物生理學，偉明圖書有限公司。
 48. 郭耀綸、楊月玲、鄭鈞騰、傅瑩娟，2003，三種臺灣特有種樹苗在不同光環境下的淨光合作用季節變化，臺灣林業科學，18(2): 107-16。
 49. 郭幸榮，2003，植物在逆境下的生存策略，國科會網站 http://www.nsc.gov.tw/_newfiles/popular_science.asp?add_year=2003&popsc_aid=240
 50. 張又升，2002，建築物生命週期二氧化碳評估，國立成功大學建築研究所博士論文。
 51. 張四明，2001，成本效益分析在政府決策上的應用與限制，行政暨政策學報，3: 45-80。
 52. 陳明健，2003，自然資源與環境經濟學，雙葉書廊。
 53. 陳明儀，2005，農業灌溉水路生態工程之應用與評估研究，朝陽科技大學營建工程系碩士論文。
 54. 陳炳宏，2003，從綠建築之綠化量指標改善溫室效應之分析：以國立交通大學新行政大樓為例，國立交通大學工學院產業安全與防災學程碩士論文。
 55. 陳秋龍，2000，鋼鐵業之生命週期盤查分析—投入產出生命週期評估模型之應用，國立臺北大學資源管理研究所碩士論文。
 56. 陳意昌，2004，農地重劃地區土地利用與景觀變遷之研究，國立中興大學水土保持學系博士論文。
 57. 陳豐文、陳獻、黃勝頂、蔡西銘，2008，臺東湧水圳棲地特性及多樣性工法之應用，先進工程學刊，3(4)。
 58. 陳獻、楊紹洋、張德鑫、蔡西銘、王繼緯，2005，農水路生態化改善工程之設計，水稻

- 田農業多樣性機能研討會。
59. 焦緒娟、趙文飛、張衡亮、姜成平、王華田，2007，幾種綠化樹種降低城市熱島效應之研究，江西農業大學學報，29(1): 89-93。
 60. 童慶斌，國立臺灣大學生物環境系統工程學系環境系統分析授課講義。
 61. 黃國倉，2006，辦公室建築生命週期節能與二氧化碳減量評估之研究，國立成功大學建築研究所博士論文。
 62. 黃文俊，2000，臺灣東北部六種闊葉樹種樹冠層二氧化碳固定功能之研究，國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。
 63. 農田水利入口網，<http://doie.coa.gov.tw/index.asp>
 64. 農業工程研究中心，2008，「生態工程技術研討會論文集」。
 65. 楊育誠，2009，生態工程節能減碳之評估，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
 66. 楊博宇，2008，農水路生態工程效益評估及規畫設計之研究，臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
 67. 福留脩文，1994，近自然河川工法の研究，信山社出版。
 68. 趙又嬋，2004，百貨公司室內裝修生態週期二氧化碳排放量評估，國立成功大學建築研究所碩士論文。
 69. 歐文生，2000，建築物室內裝修環境負荷評估之研究-以耗能量與二氧化碳排放量解析，國立成功大學建築研究所碩士論文。
 70. 歐文生、林憲德，2004，住宅及辦公建築室內裝修二氧化碳減量評估，中華民國建築學會「建築學報」，47: 77-88。
 71. 劉秀卿，2003，行道樹水黃皮與黑板樹二氧化碳固定效益之研究，國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。
 72. 劉漢卿，2004，溫室氣體排放量分析，成功大學建築研究所碩士班碩士論文。
 73. 蔡本原，2006，樟樹、榕樹、茄冬及黑板樹在中鋼公司二種環境樹冠層光合作用率日變化及碳固定量之比較，國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。
 74. 蔡宗廷，2010，營建施工作業減碳評估之研究-以建築工程灌漿作業為例，中央大學營建管理研究所碩士論文。
 75. 蔡宗佑，2003，六種臺灣原生闊葉樹種對二氧化碳固定效果之研究，國立嘉義大學，林業研究所碩士論文。
 76. 韓煥金，2005，城市綠化植物的固碳釋氧效應，東北林業大學學報，33(5)。
 77. 鐘欣民，2008，棲蘭山樣區臺灣扁柏更新林不同冠層位置光合作用之研究，碩士論文，國立東華大學自然資源管理研究所。
 78. 環保署，2010，推動臺灣參與氣候變遷綱要公約網站，<http://unfccc.epa.gov.tw/unfccc/chinese/index.html>

收稿日期：民國 100 年 6 月 28 日

修正日期：民國 100 年 9 月 5 日

接受日期：民國 100 年 9 月 9 日