

臺灣西部海岸濕地碳儲存效益

林蕙萱*、錢玉蘭**、林幸助***

全球二氧化碳（CO₂）濃度上升造成之極端氣候已嚴重威脅全球物種的生存。濕地碳儲存功能有助於調適氣候變遷，因此一旦濕地因不當開發而遭受破壞，將為社會帶來龐大成本。本研究透過文獻蒐集與實地調查六個濕地（涵蓋紅樹林、潟湖、潮間帶、鹽田、草澤、魚塭、農地等七種植被類型）內土壤與植物的單位面積碳儲存量，並且應用效益函數移轉估算臺灣西部 22 處海岸濕地共 26,420 公頃的碳儲存總量與碳儲存效益。

實地調查結果發現：相對其他植被類型，紅樹林濕地之單位土壤碳儲存量較高，其中四草濕地海茄冬區最高約 13,318 公噸，淡水河挖子尾濕地水筆仔區最低約 1,980 公噸；而潮間帶僅 408 公噸。臺灣西部 22 處濕地的 CO₂ 儲存量共約 7,758 萬公噸，而碳儲存效益以國內碳稅稅率（每公噸 CO₂ 3,000 元）估算約 2,327 億元；以國際減碳成本估算約 157 億元；以碳社會成本估算約 252~1,352 億元。本研究結果提供決策者與社會大眾在權衡濕地保育或開發利用時，瞭解濕地的碳儲存效益相當大，僅有回歸至濕地保育法提倡的明智利用，才能兼顧濕地生態永續與保有生態系統服務提供的經濟效益。

關鍵詞：碳儲存效益、實地調查、效益函數移轉、海岸濕地

* 國立臺北大學自然資源與環境管理研究所博士生。

** 通訊作者：國立臺北大學自然資源與環境管理研究所助理教授，地址：新北市三峽區大學路 151 號，Email: ylchien@mail.ntpu.edu.tw。

*** 國立中興大學生命科學系特聘教授。

本文承蒙兩位匿名審查人及主編的許多寶貴建議和指正，特此致謝，惟文中若有任何疏誤，概由作者負責。同時特別感謝營建署城鄉發展分署的經費（計畫編號：UR-10311、UR-10511）補助。

投稿日期：2019 年 1 月 31 日；第一次修改日期：2019 年 4 月 22 日；第二次修改日期：2019 年 5 月 6 日；接受日期：2019 年 5 月 8 日。

農業經濟叢刊 (Taiwanese Agricultural Economic Review), 25:1(2019), 1-26。

臺灣農村經濟學會出版

I、前言

全球二氧化碳（以下簡稱 CO₂）濃度上升造成的極端氣候已嚴重威脅全球物種的生存。大氣中 CO₂ 濃度從 1850~1900 年工業革命前 280ppm，2017 年時增至 405ppm，其中 75ppm 增加於近 50 年（World Meteorological Organization，簡稱 WMO，2019），而 2018 年的年均溫比 1850~1900 年間亦高了 1.16°C（Berkeley Earth, 2019）。聯合國氣候變遷政府間專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC）在 2018 年發佈的決策者摘要（summary for policymakers）中指出，2030~2050 年間溫升可能會到 1.5°C，屆時將會加劇洪水與乾旱的發生機率，以及造成水資源惡化與糧食短缺的問題，若不及時處理，一旦溫升超過 2°C，地球將會進入熱室地球（Hothouse Earth）之不可逆狀態；原本是扮演碳匯的自然生態系統轉變為碳源，屆時就算減排也無法避免溫度持續升高（Steffen et al., 2018）。因此，世界各國無不重視減碳問題。由過去文獻得知濕地碳儲存功能有助於調適氣候變遷（Herr & Landis, 2016; Jerath et al., 2016; Mitsch et al., 2013; Patton, Bergstrom, Moore, & Covich, 2015），使得濕地保育成為重要的減碳措施。

全球海洋生態系統（包括紅樹林、鹽澤、海草床等）每年儲存了約人類三分之一排放的 CO₂（Beaumont, Jones, Garbutt, Hansom, & Toberman, 2014）。聯合國於 2005 年發表千禧年生態系統評估計畫（millennium ecosystem assessment, 2005），統整了濕地提供人類生活所需的生態系統服務項目與價值估算方法。Patton et al. (2015) 調查美國 Black-water 海岸濕地每公頃碳儲存量約 2,966 公噸，並應用碳社會成本現值估算每公頃儲碳效益約一萬美元；Jerath et al. (2016) 調查美國南佛羅里達的紅樹林濕地每公頃碳儲存 70~537 公噸，並應用國家公園復育之邊際成本估算每公頃儲碳效益約 1.4~2.4 萬美元；Liu, Hemati and Zakaria (2017) 調查馬來西亞紅樹林濕地每公頃碳儲存量為 898

公噸，同時以國際碳交易價格估算公頃儲碳效益為 0.5~1.7 萬美元。若以上列文獻的效益推估值估算全球約 66 億公頃海岸濕地 (Davidson, Fluet-Chouinard, & Finlayson, 2018) 的碳儲存量與價值皆將相當可觀。

我國在 2015 年 2 月 2 日施行濕地保育法，劃設 84 處 (註 1) 國家重要濕地，總面積 45,483 公頃，占臺灣面積約 1.3%，其中海岸型濕地有 31 處，總面積為 29,076 公頃，占總濕地面積的 64%。檢視國內相關臺灣海岸濕地碳儲存量與效益推估的文獻，僅少數估算濕地碳儲存量，包括淡水河濕地 (林幸助、李美慧、陳義雄，2011)、關渡濕地 (陳昶璋等，2008；林幸助等，2011)、高美濕地 (林幸助、侯昌豪、童莉婷，2012；陳章波等，2011)、七股鹽田濕地 (林幸助等，2015；高苑科技大學綠工程技術研發中心、嘉南藥理科技大學生態工程技術研發中心，2011) 等；僅陳章波等 (2011) 估算高美濕地每年碳吸存量效益約 19 萬元 (註 2)；卻未有文獻推估我國海岸濕地整體之碳儲存量與碳儲存效益。

近年我國能源政策調整，以再生能源取代核能發電，因土地有限使得開發西部海岸濕地設置風力發電機或太陽能光電板場址的壓力持續增加。一旦濕地被開發，將致使濕地各項生態功能受損，特別是原本儲存在濕地土壤中的有機碳會被氧化而釋放到大氣中，加劇氣候變遷 (Pendleton et al., 2012)，就此議題國內各界人士與環保團體多有爭論與政治角力。本研究由於實際調查六處不同環境類型，同時涵蓋七種不同植被類型之海岸濕地的碳儲存效益，故旨在有系統性地估算我國海岸濕地整體的碳儲存量與碳儲存效益，期望所提供的科學數據有助國人在濕地開發與保育之間權衡利弊得失，做出對臺灣社會最有利的選擇。

II、研究範圍

目前屬於國家重要濕地的海岸濕地共有 31 個，根據我國濕地保育法的等

級，有兩處屬於國際級、25 處國家級、四處暫定地方級，本研究範圍為臺灣本島西部 22 處海岸濕地。海岸濕地依據植被類型大致分為紅樹林（水筆仔、海茄苳）、潟湖、潮間帶、鹽田、草澤（蘆葦）、魚塭、農地等七類，本研究選擇六處海岸濕地實地調查其碳儲存量，包括國際級曾文溪口濕地、四草濕地，國家級挖子尾濕地、關渡濕地、大漢新店濕地、七股鹽田濕地（圖 1）。

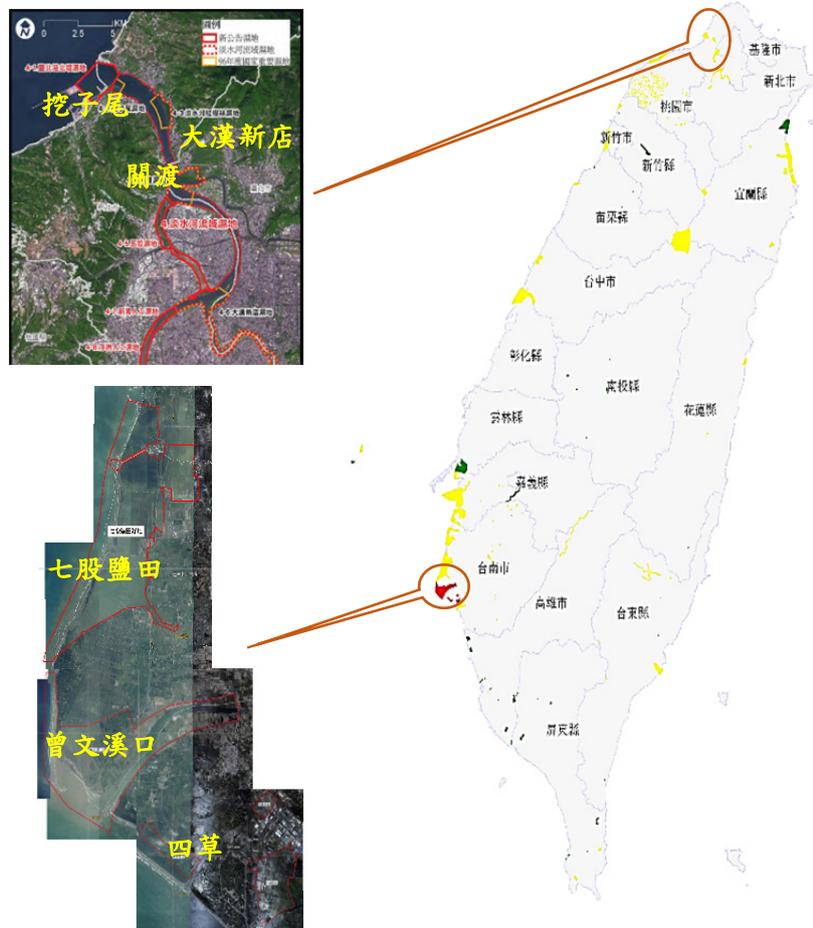


圖 1 實地調查範圍

資料來源：國家重要濕地網站—圖資套疊；本研究繪製。

曾文溪口濕地與四草濕地為瀕臨絕種鳥類黑面琵鷺來臺渡冬的重要棲地，數量約是全球黑面琵鷺總數量的一半；據 2018 年普查全球黑面琵鷺數量為 3,941 隻，當中有 2,195 隻飛抵臺灣，在臺南棲息的數量為 1,265 隻（行政院農業委員會林務局，2018），約占總數量 32%，因黑面琵鷺來台渡冬數量增加，也擴散到鄰近的七股鹽田濕地。

過去七股鹽田是臺灣最大的鹽灘，曬鹽面積最多高達 1,976 公頃，但在生產成本增加的情況下，鹽場陸續結束營業，至 2002 年後鹽灘完全停止生產，目前僅保留部分設施供民眾參觀。七股潟湖是七股鹽田濕地的另一特色，潟湖面積約 1,600 公頃，內部主要做為牡蠣養殖。

而挖子尾濕地、關渡濕地、大漢新店濕地則位於臺灣人口最密集的臺北市區內。其中挖子尾及關渡濕地是紅樹林水筆仔的主要分佈區之一；大漢新店濕地分別在 1992 年和 1993 年被臺北市政府公告成立華江雁鴨公園、及中興橋華江橋野生動物保護區，1998 年亦被評選為重要野鳥棲地（important bird area）。

III、研究流程與研究方法

3.1 研究步驟與流程

本研究估算之濕地碳儲存量係指儲存在植物體與土壤中的有機碳含量（註 3）（Donato, Kauffman, Mackenzie, Ainsworth, & Pflieger, 2012）；植物經由進行光合作用吸收大氣中的 CO₂ 並轉為有機碳而儲存在植物體中，而當植物死亡後則會累積於土壤中，因此可藉由蒐集濕地上植物生物量與土壤有機質含量加以估算濕地的碳儲存量（Liu et al., 2017）。

本研究將濕地依據植被型態將濕地分成七種（包括紅樹林、潟湖、潮間帶、鹽田、蘆葦草澤、魚塭、農地），利用實地調查與引用文獻蒐集各植被類

型濕地土壤與植物之單位面積碳儲存量。濕地碳儲存效益估算詳細步驟說明於下：

- (1)a. 選擇涵蓋上列七種植被類型的六個濕地，進行實地調查濕地範圍之單位面積土壤碳儲存量，與蘆葦草澤之單位面積植物碳儲存量；至於單位面積植物碳儲存量除蘆葦草澤外，皆直接引用國內相關研究成果；b. 其他未進行實地調查的濕地，其土壤與植物單位碳儲存量參數則引用步驟 (1) a. 所獲得之相似環境類型濕地的參數（此屬於利用效益移轉方法之參數移轉）；
- (2) 針對所有濕地，透過內政部營建署城鄉發展分署之全國土地使用分區資料查詢系統、Google Earth，以及地理資訊系統（geographic information system，簡稱 GIS）量測所有濕地含有各植被類型的面積；
- (3) 將步驟 (1) 計算之單位濕地面積碳儲存量，乘以步驟 (2) 量測之各植被類型濕地面積，即可獲得各海岸濕地之碳儲存量；
- (4) 將步驟 (3) 獲得之海岸濕地碳儲存量，乘以單位碳價格（單位減碳成本、碳交易市場單位碳價、或者單位碳社會成本），即可獲得海岸濕地之碳儲存效益（研究流程參見圖 2）。

3.2 研究方法

3.2.1 土壤碳儲存量調查

本研究於各濕地採樣點採集表面土壤，分別以內徑 2.6 公分之塑膠管收取 5 公分土壤樣本，裝至塑膠罈罐中密封並以低溫保存攜回實驗室，每個樣點二重複（重複兩次）。回實驗室後則利用元素分析儀（elemental analyzer）測定單位重量土壤中之有機碳含量百分比，再根據濕地面積、土壤總體密度、土壤深度加以估算濕地土壤有機碳儲存量，參見公式(1)：

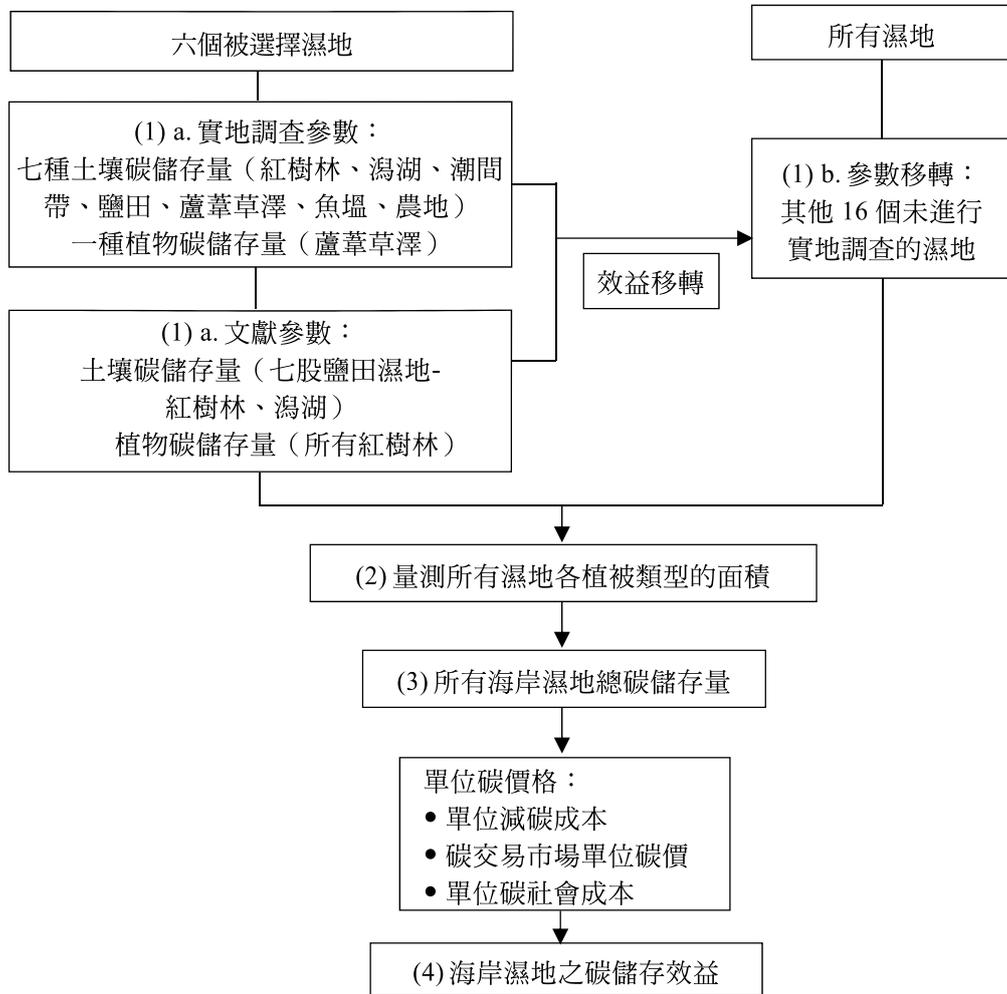


圖 2 海岸碳儲存效益評估流程

資料來源：本研究繪製。

$$SOC = OC \times BD \times SD \times SA, \tag{1}$$

式中， SOC = 濕地土壤有機碳儲存量（公噸），

OC = 濕地土壤有機碳含量（%），

BD = 濕地土壤總體密度（公克/立方公分），

SD = 土壤深度（公分）， SA = 濕地面積（公頃）。

3.2.2 植物碳儲存量調查

研究範圍內各濕地採樣點的植物包括紅樹林(水筆仔、海茄苳)、木麻黃、草澤(蘆葦)等四種,當植物行光合作用時便會吸收大氣中之 CO_2 ,並轉為有機碳儲存在生物量(biomass)中,因此需對植株採樣後進行有機碳含量的分析。植物有機碳的測定會依植物類型與生活史(一年生或多年生)而異,如蘆葦、香蒲、芒草等草本植物通常使用收割法測量單位面積生物量中有機碳含量百,乘以濕地面積即可獲得濕地碳儲存量,參見公式(2):

$$TC_1 = B_1 \times C_1 \times A_1, \quad (2)$$

式中, TC_1 = 濕地草本植物有機碳儲存量(公噸),

B_1 = 單位面積濕地之草本植物生物量(公噸/面積),

C_1 = 單位面積草本植物有機碳含量(%),

A_1 = 濕地面積(公頃)。

紅樹林、木麻黃等木本植物則以異速生長法(allometric method)進行估算每株植物有機碳含量,最後再根據其植株密度與濕地面積推算濕地碳儲存量,參見公式(3):

$$TC_2 = B_2 \times C_2 \times A_2 \times D_2, \quad (3)$$

式中, TC_2 = 濕地木本植物有機碳儲存量(公噸),

B_2 = 單位面積濕地之木本植物生物量(公噸/面積),

C_2 = 單位面積木本植物有機碳含量(%),

A_2 = 濕地面積(公頃), D_2 = 濕地木本植物植株密度。

(1)紅樹林:水筆仔、海茄苳分別代入異速生長方程式(allometric equations),便可推估其生物量,分別參見公式(4)及(5):

$$\begin{aligned} AB_1 &= 3.203 \times 10^{-2} (D_{0.1}^2 H)^{1.058} \\ BB_1 &= 4.830 \times 10^{-2} (D_{0.1}^2 H)^{0.834} \quad (\text{Rafiqul-Hoque, Sharma, \& Hagihara, 2011}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中， AB_1 = 水筆仔地上部生物量（公斤），

BB_1 = 水筆仔地下部生物量（公斤），

$D_{0.1}$ = 樹高 0.1 公尺處樹徑（公分）， H = 樹高（公尺）。

$$\begin{aligned} AB_2 &= 0.1012 \times DBH^2 + 0.5402 \times DBH - 1.567 \quad (\text{Fan, 2008}), \\ BB_2 &= 1.28 \times DBH^{1.17} \quad (\text{Comley \& Mcguinness, 2011}), \end{aligned} \quad (5)$$

式中， AB_2 = 海茄苳地上部生物量（公斤），

BB_2 = 海茄苳地下部生物量（公斤），

DBH_2 = 樹高 1.3 公尺處樹徑（公分）。

(2) 木麻黃：利用異速生長方程式建構之木麻黃生物量模型（表 1）（洪元程、徐偉強、葉功富、張麗華，2010）估算，於頂頭額沙洲木麻黃林中隨機採樣 11 棵木麻黃，分別蒐集其樹高（ H ）與胸高直徑（ D ）數據，再帶入模型計算其生物量。

表 1 木麻黃生物量模型

部位	公式	a	b
根	$y = a + bx$	2.812	0.004
樹幹	$y = ax^b$	0.045	0.922
枝	$y = ax^b$	0.027	0.781
小枝	$y = ax^b$	0.122	0.494

註：公式 $x = D^2 H$ 、 $y =$ 生物量（公斤）、 $D =$ 胸高直徑（公分）、 $H =$ 樹高（公尺）、 a 與 b 為參數。

資料來源：洪元程等（2010）。

IV、濕地碳儲存量推估結果

4.1 實地調查海岸濕地碳儲存量推估

根據研究步驟與流程所述進行六個海岸濕地之面積調查與碳儲存量推估，由研究結果得知，每公頃土壤碳儲存量最多是四草濕地 A2 區紅樹林約 13,317 公噸，每公頃植物碳儲存量最多則是七股鹽田濕地木麻黃約 567 公噸（表 2）。整體而言，有紅樹林覆蓋的濕地植被類型樣區其碳儲存量皆較漁塭、農地、蘆葦草澤要高。另根據 Jerath et al. (2016) 調查美國南佛羅里達 Everglades 國家公園紅樹林濕地之每公頃碳儲存量約 70~537 公噸，又 Liu et al. (2017) 調查馬來西亞紅樹林濕地每公頃碳儲存量最多有 898 公噸，可以發現臺灣紅樹林濕地的碳儲存量相對要高。

4.2 海岸濕地利用參數移轉推估之碳儲存量

未進行實地調查之海岸濕地，由前述六個實地調查濕地中選擇濕地環境類相似者，利用其土壤與植物單位碳儲存量參數進行效益移轉（若實地調查同個濕地中有數個相同植被類型之土壤或植物碳儲存量參數時，以平均值計，參見表 3）；若仍有缺少的植被類型再從其他濕地環境類型有的植被類型補足。因高美濕地尚缺少植物碳儲存量數據，而從表 2 知其植被皆為草澤，故參採大漢新店濕地中蘆葦草澤的植物碳儲存量數據。

表 2 實地調查之海岸濕地土壤與植物的碳儲存量推估

濕地名稱	碳儲存量項目	植被類型	a. 單位面積			資料來源	
			碳儲存量 (公噸 C /公頃)	b. 面積 (公頃)	c. 碳儲存量 (公噸 C)		
曾文溪口	土壤	魚塭	1,406.9	1,221	1,717,873.7		
		農地	741.7	335	248,469.5		
		潮間帶	408.1	293	119,573.3		
四草	土壤	A1 瀉湖	464.2	54	25,066.8	本研究	
		A2 瀉湖	2,640.5	315	831,757.5		
		A2 魚塭	833	42	34,986.0		
		A2 紅樹林-海茄冬	13,317.7	5	66,588.5		
		A3 魚塭	1,666.9	128	213,363.2		
	植物	海茄冬	88.2	5	441.2	林幸助等 (2015)	
挖子尾	土壤	紅樹林-水筆仔	1,980.0	66	130,680.0	本研究	
	植物	水筆仔	55.5	12	665.8	林幸助等 (2011)	
關渡	土壤	紅樹林-水筆仔	2,200.0	379	833,800.0	本研究	
	植物	水筆仔	78.6	55	4,321.4	林幸助等 (2011)	
大漢新店	土壤	蘆葦草澤	1,180.0	559	659,620.0		
	植物	蘆葦草澤	27.1	149.9	4,056.3		
七股鹽田	土壤	扇形鹽田	1,160.0	295.22	342,455.2	本研究	
		東區	705	455.67	321,247.4		
		西區	1,448.4	312.92	453,233.3		
		南區	2,869.0	451.01	1,293,947.7		
			海寮海茄冬	2,098.4	4.7	9,862.4	林幸助等 (2015)
			瀉湖	1,395.0	1,100	1,534,500.0	高苑科大與嘉藥科大* (2011)
	植物	木麻黃	567.4	17.37	9,854.9	李欽祿等 (2015)	
		海茄冬	88.2	4.7	414.6	林幸助等 (2015)	
高美	土壤	裸灘 (潮間帶)	909.3	282	256,467.8	林幸助等 (2012)	
		甘草區	708.2	7.9	5,573.1		
		雲林莞草	1,284.5	22.3	28,643.2		
		互花米草	1,313.5	2.9	3,795.9		

註：1. 高美濕地之土壤碳儲存量不在本研究實地調查範圍，僅做為參數移轉。

2. *全名為高苑科技大學綠工程技術研發中心、嘉南藥理科技大學生態工程技術研發中心。

3. 植物碳儲存量已將地上部碳儲存量與地下部碳儲存量加總。

4. 四草濕地由 A1、A2、A3 等 3 個區塊範圍組成。

資料來源：本表中註明「本研究」者，皆為本研究實證調查濕地單位土壤有機碳參數，其餘為引用文獻相關參數。

表 3 進行參數移轉之濕地植被類型碳儲存量數據選擇

濕地環境類型	植被類型	實地調查濕地 濕地內各植被類型 之單位碳儲存量 (公噸 C/公頃)	缺少的植被類型	進行參數移轉濕地
海岸 複合式	曾文溪口	魚塭-1,406.9 農地-741.7 潮間帶-408.1	海茄苳-七股鹽田 水筆仔-關渡/挖子尾 蘆葦草澤-大漢新店	許厝港、新豐、香山、 高美**、大肚溪口、鰲 鼓、朴子溪河口、八掌 溪口、北門、臺北港北 堤、西湖
紅樹林、 河口	挖子尾 關渡	*水筆仔-1,957.0	潮間帶-曾文溪口 魚塭-曾文溪口 蘆葦草澤-大漢新店	淡水河紅樹林 鹽水溪口
草澤	大漢新店	*蘆葦草澤-1208.0	—	五股
瀉湖	四草	瀉湖-1,552.4 魚塭-1,245.4	潮間帶-曾文溪口	好美寮
鹽田	七股鹽田	鹽田-1,591.5 *海茄苳-2,186.6	—	布袋鹽田

註：*海茄苳、蘆葦草澤、水筆仔等三種植被類型之單位碳儲存量，已包含土壤與植物的碳儲存量。

**因高美濕地已有土壤碳儲存量數據，缺少的植物碳儲存量參考大漢新店濕地中蘆葦草澤的植物碳儲存量數據。

資料來源：本研究計算彙整。

本研究透過 Google Earth 的影像判斷各濕地之植被類型，並與國家重要濕地範圍圖進行比對，再以 Google Earth 內建的面積量測工具獲取面積；若影像中綠地上的植被難以區分是草澤或紅樹林等類型，為避免高估，皆歸類為草澤。農地類型則以營建署城鄉發展分署提供之圖層進行套疊得到面積。16 個未進行實地調查之海岸濕地內各植被類型面積整理於表 4。潮間帶類型面積最多共 14,784.9 公頃、瀉湖次多 793.4 公頃、依序是魚塭 779 公頃、鹽田 722 公頃、蘆葦草澤 581.6 公頃、水筆仔有 302.3 公頃、海茄苳 172.1 公頃、農地 18.5 公頃。

表 4 進行參數移轉之海岸濕地各植被類型面積與總碳儲存量

單位：公頃

環境類型	植被類型 公告 面積	潮間帶	紅樹林		蘆葦 草澤	魚塭	潟湖	鹽田	農地	總碳儲存量 (公噸 C)
			海茄苳	水筆仔						
海岸複合濕地（曾文溪口）										
臺北港北堤	357	348.6		0.8	7.7					153,013
許厝港	961	955.3		1.0	5.2					397,969
新豐	157	139.4		17.6						91,333
香山	1,768	1,710.1		57.9						811,204
西湖	142	112.7		4.7	24.6					84,880
高美	734	700.9			33.1					676,274
大肚溪口	3,817	3,420.0			23.4	355.1			18.5	2,132,143
鰲鼓	512	142.1	84.4		285.5					587,129
朴子溪河口	4,882	4,716.2	77.6			88.2				2,266,903
八掌溪口	628	529.9			27.3	70.9				387,841
北門	1,791	1,761.4	10.1			19.5				779,089
紅樹林、河口（挖子尾、關渡）										
淡水河 紅樹林	109	69.0		40.0						106,440
鹽水溪口	453	259.5			22.6	170.9				339,472
草澤（大漢新店）										
五股	175				152.2					183,827
潟湖（四草）										
好美寮	959	91.1				74.5	793.4			1,236,753
鹽田（七股鹽田）										
布袋鹽田	722							722		1,148,702
總計	18,167	14,784.9	172.1	302.3	581.6	779.0	793.4	722.0	18.5	11,382,972

註：空白處即表示面積為零。

資料來源：本研究計算彙整。

最後估算各海岸濕地總碳儲存量，將各植被類型之單位面積碳儲存量與植被類型面積相乘，並加總濕地中各個植被類型的碳儲存量，可得到各濕地的總碳儲存量，參見公式(6)：

$$CQ = \sum_{i=1}^7 Q_i \times S_i, \quad (6)$$

式中， CQ = 濕地總碳儲存量（公噸），

Q_i = 植被類型 i 之單位面積碳儲存量（公噸/公頃）， $i=1\dots7$ ，

S_i = 植被類型 i 之總面積（公頃）。

觀察表 4，朴子溪河口濕地碳儲存量最多為 226 萬公噸，因其面積最大。

V、海岸濕地碳儲存效益推估

5.1 單位儲碳效益

估算濕地的單位碳儲存效益，可由以下三個角度觀之：

- (1) 以國內產業之單位減碳成本估算；若濕地開發致使濕地儲存的碳排放至大氣中，國內產業就須減碳以維持碳排放總量。因我國目前尚未實施碳交易，亦未公告碳稅稅率，故參考王京明（2016）以資產組合理論中的平均數－變異數分析方法，分析臺灣電力公司 2003 至 2014 年之發電成本資料加以推導我國最適發電配比，研究結果顯示當達成 2025 年發電配比目標時，台電會提高財務風險與發電成本較低之燃煤發電比例，為使台電降低燃煤發電以減少碳排，政府需對每公噸 CO_2 至少課徵 3,000 元之碳稅。
- (2) 以國際碳減量成本估算；若濕地開發致使濕地儲存的碳排放至大氣中，我國亦可考慮至全球碳市場購買碳排放許可因應。本研究採用歐盟排放交易體系（European Union greenhouse gas emission trading

scheme，簡稱 EU ETS) 的 2017 年碳交易年均價為每公噸 CO₂ 當量 5.8 歐元，約臺幣約 203 元 (European Environment Agency，簡稱 EEA，2018)。

- (3) 以全球排碳造成之碳社會成本 (Social Cost of Carbon，簡稱 SCC) 估算；引用美國跨部會工作小組 (United States Government, Interagency Working Group on Social Cost of Carbon，簡稱 IWG) (2016) 採用學界目前最常運用與討論的三大整合性評估模型 (註 4) 所估算的碳社會成本現值 (social cost of carbon，以下簡稱 SC-CO₂) 加以估算增加碳儲存對全球產生的效益。假設 2017 年每多排一公噸 CO₂ 至大氣中對全球所造成的損害會持續到 2300 年，在折現率為 5%、3%、2.5% 下，造成的全球損害分別為 11、39 與 59 美元 (2007 年幣值)，透過匯率與躉售物價定基指數調整後，分別為臺幣 325.0 元、1,152.4 元、1,743.4 元 (2017 年幣值)。

5.2 海岸濕地碳儲存經濟效益公式

由於 5.1 所述的三種單位碳儲存效益是每公噸 CO₂ 計價，故需將單位碳 (C) 轉換成單位 CO₂，把各濕地總碳儲存量乘上 44 再除以 12 後，即可轉換成公噸 CO₂，最後乘上單位碳儲存效益，即可獲得海岸濕地總碳儲存經濟效益，參見公式 (7)：

$$C_i = CQ \times \frac{44}{12} \times P_i, \quad (7)$$

式中， C_i = 濕地總碳儲存量 (公噸)，

CQ = 濕地總碳儲存量 (公噸)，

P_i = 單位碳儲存效益 (元/公噸 CO₂)，

$i = 1, 2, 3$ 種估價方式。

5.3 海岸濕地碳儲存效益

將各海岸濕地碳儲存量分別乘上每公噸 CO₂ 排放之國內碳稅額 3,000 元、歐盟碳交易價格 203 元、以及 2019 年每公噸 CO₂ 排放之 SC-CO₂ 分別為 325.0 元、1,152.4 元、1,743.4 元後，所得到的海岸濕地的碳儲存效益整理至表 5。臺灣西部 22 處海岸濕地的 CO₂ 儲存量共有 7,758 萬公噸；以國內碳稅額估算臺灣西部 22 處海岸濕地的碳儲存效益為 2,327 億元；透過國際減碳成本估算為 157 億元；以 SC-CO₂ 估算分為 252 億元、894 億元、1,352 億元。

表 5 海岸濕地碳儲存經濟效益

濕地名稱	公告面積	CO ₂ 儲存量 (公噸)	碳儲存經濟效益 (百萬元)				
			國內碳稅	歐盟碳交 易價格	三種折現率下 SC-CO ₂		
					5%	3%	2.5%
曾文溪口	3,001	9,380,695	28,142	1,904	3,049	10,810	16,354
四草	551	4,301,986	12,906	873	1,398	4,958	7,500
挖子尾	66	482,039	1,446	98	157	556	840
關渡	379	3,075,905	9,228	624	1,000	3,545	5,363
大漢新店	559	2,394,661	7,184	486	778	2,760	4,175
七股鹽田	3,697	16,167,212	48,502	3,282	5,254	18,631	28,186
臺北港北堤	357	561,559	1,685	114	183	647	979
許厝港	961	1,460,547	4,382	296	475	1,683	2,546
新豐	157	335,191	1,006	68	109	386	584
香山	1,768	2,977,117	8,931	604	968	3,431	5,190
西湖	142	311,510	935	63	101	359	543
高美	734	2,481,924	7,446	504	807	2,860	4,327
大肚溪口	3,817	7,824,964	23,475	1,588	2,543	9,017	13,642
鰲鼓	512	2,154,762	6,464	437	700	2,483	3,757
朴子溪河口	4,882	8,319,536	24,959	1,689	2,704	9,587	14,504
八掌溪口	628	1,423,376	4,270	289	463	1,640	2,482
北門	1,791	2,859,257	8,578	580	929	3,295	4,985
淡水河紅樹林	109	390,634	1,172	79	127	450	681
鹽水溪口	453	1,245,862	3,738	253	405	1,436	2,172
五股	175	674,646	2,024	137	219	777	1,176
好美寮	959	4,538,884	13,617	921	1,475	5,231	7,913
布袋鹽田	722	4,215,736	12,647	856	1,370	4,858	7,350
總計	26,420	77,578,005	232,734	15,748	25,213	89,401	135,249

資料來源：本研究計算彙整。

進一步將本研究估算之紅樹林濕地碳儲存效益與各國數據相比（參見表 6），我國的四草與挖子尾濕地每公頃的CO₂ 儲存量約 7,303~7,808 公噸是最高的；根據Li et al. (2018) 的研究指出相對於緯度、濕度、溫度等影響紅樹林濕地碳儲存量的因素，我國紅樹林植物密度較高是促使碳儲存量高於國外數據的最主要因素。從不同的碳減排效益進行碳價的選擇時，每公頃CO₂ 碳儲存效益從六美元至 100 美元，相差極大；故在估算濕地碳減緩效益時，所選取的單位碳價格或單位損害成本值，都會對最終的效益值高低有很大的影響。

表 6 各國紅樹林濕地碳儲存效益

地點/濕地類型	碳儲存量 (公噸 CO ₂ /公頃)	碳價 (US\$/公噸 CO ₂) /來源	碳儲存效益 ^註 (臺幣萬元 /公頃)	文獻來源
四草/紅樹林	7,807.6	(1) 100/國內碳稅 (2) 6.7/歐盟碳交易價格 (3) 12-61/美國 IWG 估 算之 SC-CO ₂	(1) 23,423 (2) 1,585 (3) 253-1,361 (1) 21,911	本研究
挖子尾/紅樹林	7,303.6		(2) 1,483 (3) 237-1,273	
巴西/紅樹林	95.5-341.3	4.9/全球森林碳交易均 價	1.4-5.0	Estrada, Soares, Fernandez, and de-Almeida (2015)
馬來西亞/紅樹林	555.6-898.3	(1) 6/自願性碳交易市場 (2) 19.18/歐盟碳交易市 場	(1) 10-16 (2) 32-52	Liu et al. (2017)
美國南佛羅里達/ 紅樹林	908.3-1,588.0	15.3/Everglades 國家公 園復育計畫經費推估邊 際減碳成本	42-73	Jerath et al. (2016)

註：1 美元=30 元臺幣。

資料來源：本研究彙整。

VI、結論與建議

6.1 結論

我國地處亞熱帶與熱帶氣候地區，且海岸濕地植被之紅樹林密度相當高，使得單位濕地面積之碳儲存量遠高於他國，難以直接引用文獻數據效益移轉至本國海岸濕地。本研究結合生態面向的海岸濕地碳儲存量實地調查，與經濟面向的濕地碳儲存效益評估，估算出臺灣西部 22 處海岸濕地維持現況時之CO₂ 儲存量約7,758 萬公噸。以國內減碳成本估算，至少為我國節省 2,327 億元的減碳成本；從國際碳市場購買排碳權則可省下臺幣 157 億元；以碳社會成本法估算，則可避免對全球造成損害成本約252~1,352 億元。綜合上述估算結果顯示，臺灣西部海岸濕地之碳儲存效益都相當龐大；反之，若對海岸濕地進行開發將需要付出龐大的社會成本。由於CO₂ 仍持續在大氣中累積，使得全球減碳成本或社會損害成本亦逐年提高且高於預期，加之濕地在維持現況下每年仍會不斷累積碳儲存量，故本研究目前的估算結果預計會是未來年度海岸濕地碳儲存效益的低估值。

根據我國在巴黎協定中「國家自定預期貢獻」(intended nationally determined contribution, 簡稱 INDC) 定出，到 2030 年我國溫室氣體排放量要降為 2.13 億公噸 CO₂ 當量。2016 年我國淨排放約2.58 億公噸 CO₂ 當量(行政院環境保護署, 2018)，表示未來要減少4,500 萬公噸CO₂ 當量。近年再生能源場址選擇多因生態問題碰壁而以增加火力發電量彌補缺口，此舉必定會讓我國的CO₂ 排放量增加，又即使再生能源發展順利，離岸風機與太陽能板使用海岸濕地將無可避免地會對西部海岸濕地的生態環境造成衝擊，恐有將濕地碳匯轉為碳源之虞，決策者必須深思。

尚且不論濕地擁有的其他眾多生態系統服務價值，本研究估算結果可讓

社會大眾與決策者在進行海岸濕地保育或開發的討論時，對於濕地碳儲存價值有明確的參考數據，能夠回歸到濕地保育法中所提倡的明智使用原則，並在討論中理性地看待濕地存續與否。現今海岸濕地在地球上扮演的碳匯角色已日益重要 (Luisetti, Jackson, & Turner, 2013)，若能使濕地永續存在，不僅對我國提出的 CO₂ 減排目標有很大的助益，更是對全世界共同努力減碳提供直接的貢獻。

6.2 建議

6.2.1 政策建議

本研究顯示臺灣海岸濕地單位面積確實具有相當高的碳儲存效益。目前行政院環境保護署「溫室氣體減量及管理法」中有抵換專案的設計，但因國內外之碳減量計算公式皆未納入濕地碳匯，故無法鼓勵企業以認養濕地使濕地品質提升或避免惡化而增加碳匯，作為碳排之抵換量。建議日後政府能將濕地碳匯納入碳抵換專案，如此可減少企業開發濕地的企圖，同時增加企業參與濕地保育工作的誘因。

此外，內政部營建署「濕地保育法」中有濕地影響費的設計，用意是讓濕地開發業者在無法迴避與減輕濕地衝擊情況下，需對濕地環境品質衝擊繳交濕地影響費。濕地影響費應該涵蓋濕地遭受衝擊而損失之各項濕地生態系統服務效益的總和，其中濕地碳儲存效益將使全球受益 (Patton et al., 2015)，故建議參考本研究以碳社會成本法估算之單位面積碳儲存效益。

6.2.2 未來研究建議

過去文獻僅少數調查濕地單一年度之碳儲存量，調查碳吸存量者更少。本研究新增調查六處不同環境類型海岸七種植被類型土壤與植物（僅蘆葦草澤）的碳儲存量，提升了效益移轉國內整體海岸濕地的合理性。但是為使海岸濕地碳儲存效益之估算更為精確，建議未來研究持續累積調查各濕地之碳

儲存量與碳吸存量，以建立國內海岸濕地土壤與植物之碳吸存速率 (carbon sequestration rate)。此外，除 CO₂ 外，建議也調查濕地之甲烷 (CH₄) 排放量。

日後若有研究者擬以本研究成果進行效益移轉至其他海岸濕地，首先要考慮政策點海岸濕地之環境類型是否與本研究相似，其次針對相似環境類型濕地進一步考慮植被類型是否相似，之後再估算濕地內各類型植被之面積，至於碳儲存效益的估算則可依據研究者的需求參考本文採取的三種碳價擇一進行。

附註

1. 本研究為進一步區分類型，將濕地保育法中編號 TWn004 淡水河流域濕地中涵蓋的 11 處濕地各別分類後，則有 84 處。
2. 濕地減碳效益分為兩部分，一為每年之碳吸存量 (carbon sequestration)，另一為碳儲存量 (carbon stock)。
3. 本研究調查為營建署城鄉發展分署於 2015~2017 年委託計畫案經費補助；分別於 2015 年調查挖子尾、關渡、大漢新店濕地，2016 年七股鹽田，以及 2017 年曾文溪口、四草。
4. 三大整合性評估模型分別為地區動態整合氣候經濟模型 (dynamic integrated climate and economy model，簡稱 DICE)、溫室效應政策分析 (policy analysis of the greenhouse effect，簡稱 PAGE) 與氣候架構的不確定、協商與分配 (climate framework for uncertainty, negotiation, and distribution，簡稱 FUND)。

參考文獻

- 王京明 (2016)。能源決策分析與實證研究。行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告 (編號: 1052001UNER019)。臺北市: 行政院原子能委員會。
- 行政院農業委員會林務局 (2018年3月28日)。2018 黑面琵鷺全球普查結果出爐【自然保育網】。取自 <https://conservation.forest.gov.tw/latest/0062156>
- 行政院環境保護署 (2018)。2018 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。臺北市: 行政院環境保護署。
- 李欽祿、莫其鋒、王法明、李應文、徐馨、鄒碧、...李志安 (2015)。華南熱帶沿海不同林齡木麻黃人工林養分利用特征。應用與環境生物學報, 21, 139-146。
- 林幸助、李美慧、陳義雄 (2011)。淡水河生態系之服務機制、價值評估及效益移轉－淡水河的生態系統碳通量(I)。科技部補助專題研究計畫成果報告 (編號: NSC 100-2621-M-005-004)。臺中市: 中興大學生命科學系 (所)。
- 林幸助、林子平、薛美莉、鐘佳芸、劉博漢、李世博、...何瓊紋 (2015)。七股沿岸生態系統碳吸存功能(3/3)。科技部補助專題研究計畫成果報告 (編號: MOST 103-2627-B-005-001)。臺中市: 中興大學生命科學系 (所)。
- 林幸助、侯昌豪、童莉婷 (2012)。高美濕地生態系統碳通量 (第 2 年)。科技部補助專題研究計畫成果報告 (編號: NSC 99-2611-M-005-001-MY2)。臺中市: 中興大學生命科學系 (所)。
- 洪元程、徐偉強、葉功富、張麗華 (2010)。東南沿海木麻黃人工林生物量估測模型研究。浙江林業科技, 36, 66-69。
- 高苑科技大學綠工程技術研發中心、嘉南藥理科技大學生態工程技術研發中心 (2011)。國家重要濕地碳匯功能調查計畫。內政部營建署城鄉發展分署委託之專題研究成果報告。臺北市: 內政部營建署城鄉發展分署。
- 陳昶璋、許明晃、黃盟元、楊志維、楊棋明、黃文達 (2008)。關渡自然保留區蘆葦對土壤有機碳庫影響之研究。中華民國雜草學會會刊, 29 (1), 11-22。
- 陳章波、林幸助、陳吉仲、陳韻如、郭奇正、謝蕙蓮、...童莉婷 (2011)。國家重要濕地社會經濟及績效評估先期作業。內政部營建署城鄉發展分署補助研究計畫。

臺北市：內政部營建署城鄉發展分署。

- Beaumont, N., Jones, L., Garbutt, A., Hansom, J. D., & Toberman, M. (2014). The value of carbon sequestration and storage in coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 137, 32-40.
- Berkeley Earth. (2019, January 24). Global temperature report for 2018 [Blog & Announcements]. Retrieved from <http://berkeleyearth.org/2018-temperatures/>
- Comley, B., & Mcguinness, K. (2005). Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany*, 53(5), 431-436.
- Davidson, N. C., Fluet-Chouinard, E., & Finlayson, C. M. (2018). Global extent and distribution of wetlands: Trends and issues. *Marine and Freshwater Research*, 69(4), 620-627.
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Mackenzie, R. A., Ainsworth, A., & Pflieger, A.Z. (2012). Whole-island carbon stocks in the tropical pacific: Implications for mangrove conservation and upland restoration. *Journal of Environmental Management*, 97, 89-96.
- Estrada, G. C. D., Soares, M. L. G., Fernadez, V., & de-Almeida, P. M. M. (2015). The economic evaluation of carbon storage and sequestration as ecosystem services of mangroves: A case study from southeastern Brazil. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1), 29-35.
- European Environment Agency (2018). *Trends and projections in the EU ETS in 2018: The EU emissions trading system in numbers* (EEA report No. 14). Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-the>
- Fan, K. C. (2008). Population structure, allometry and above-ground biomass of *Avicennia marina* forest at the Chishui River Estuary, Tainan County, Taiwan. *Quarterly Journal of Forest Research*, 30(2), 1-15.
- Herr, D., & Landis, E. (2016). *Coastal blue carbon ecosystems: Opportunities for nationally determined contributions*, Policy Brief. Gland, Switzerland: IUCN and Washington, DC, USA: TNC.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Summary for policymakers*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- Jerath, M., Bhat, M., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Simard, M., & Twilley, R. R. (2016). The role of economic, policy, and ecological factors in estimating the value of carbon stocks in Everglades mangrove forests, South Florida, USA. *Environmental Science & Policy*, 66, 160-169.
- Li, S. B., Chen, P. H., Huang, J. S., Hsueh, M.L., Hsieh, L. Y., Lee, C. L., & Lin, H. J. (2018). Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Global Change Biology*, 24(9), 4195-4210.
- Liu, C. H., Hemati, Z., & Zakaria, R. M. (2017). Carbon stock evaluation of selected mangrove forests in Peninsular Malaysia and its potential market value. *Journal of Environmental Science and Management*, 20(2), 77-87.
- Luisetti, T., Jackson, E. L., & Turner, R. K. (2013). Valuing the European 'coastal blue carbon' storage benefit. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1-2), 101-106.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water: Synthesis*. Retrieved from <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., ...Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28(4), 583-597. doi: 10.1007/s10980-012-9758-8
- Patton, D., Bergstrom, J. C., Moore, R., & Covich, A. P. (2015). Economic value of carbon storage in U.S. national wildlife refuge wetland ecosystems. *Ecosystem Services*, 16, 94-104.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., ...Baldera, A. (2012). Estimating global 'Blue Carbon' emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9), e43542. doi: 10.1371/journal.pone.0043542
- Rafiqul-Hoque, A. T. M., Sharma, S., & Hagihara, A. (2011). Above and belowground

carbon acquisition of mangrove *Kandelia obovata* trees in Manko wetland, Okinawa, Japan. *International Journal of Environment*, 1, 7-13.

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., ...Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 115(33), 8252-8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115

United States Government, Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2016). *Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 12866*. US: United States Government.

World Meteorological Organization (2019). *WMO statement on the state of the global climate in 2018*. Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789

Carbon Storage Benefits of Western Coastal Wetlands in Taiwan

Hui-Hsuan Lin^{*}, Yu-Lan Chien^{**}, Hsing-Juh Lin^{***}

The literature points out climate change has seriously threatened the survival of global species, meanwhile the carbon storage in wetlands plays an important role in climate change adaptation. This paper aims to estimate the amount and benefits of carbon storage for 22 western coastal wetlands in Taiwan, with total area 26,420 hectares. First, we reviewed literature and carried out field surveys to investigate the soil and plant carbon storage per hectare in the chosen six wetlands, which cover seven different vegetation types. Then, we applied the benefit function transfer to other 16 wetlands. The results show that the highest soil carbon storage of per hectare wetlands is 13,318 metric tons in the vegetation type of 'mangrove', and the lowest is 408 metric tons in the 'intertidal zones'. The CO₂ stored in 22

* Ph.D. student, Institute of Natural Resources Management, National Taipei University, New Taipei City, Taiwan, R.O.C.

** Corresponding author: Assistant Professor, Institute of Natural Resources Management, National Taipei University, New Taipei City, Taiwan, R.O.C. Address: No. 151, University Rd., San Shia District, New Taipei City, 23741 Taiwan. Email: ylchien@mail.ntpu.edu.tw

*** Distinguished Professor, Department of Life Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, R.O.C.

Suggestions from the chief editor and two anonymous referees are greatly appreciated. This study is financially supported by the Urban and Rural Development Branch, construction and Planning Agency, Ministry of Interior (No.UR-10311、UR-10511).

Received 31 January 2019; Received in first revised form 22 April 2019; Received in second revised form 6 May 2019; Accepted 8 May 2019.

western coastal wetlands in Taiwan was 77.6 million metric tons in total. The benefit of CO₂ storage is estimated NT\$232.7 billion with carbon tax, NT\$15.7 billion with the carbon price from European emission allowances, and NT\$252-1,352 billion with the social carbon cost. This result will provide useful information to help the public and policy makers to wisely choose whether to preserve or develop coastal wetlands.

Keywords: *carbon storage benefits, field survey, benefit function transfer, coastal wetlands*