

探討生態系統服務評估能否反映人工溼地棲地 品質與生物多樣性之重要性

Does Ecosystem Service Valuation Reflect Importance of Habitat Quality and Biodiversity in Constructed Wetlands?

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士生

黃科溥

Ko-Pu Huang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
助理教授

任秀慧*

Rita S.W. Yam

國立中興大學
生命科學系
教授

林幸助

Hsing-Juh Lin

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士生

卞文俊

Woon-Chun Peng

摘 要

表面流人工溼地(SFCWs)可提供多項生態功能，為常用於溼地異地復育的方法。生態系統服務評估雖有助於公眾認同的價值標準客觀地量化生態功能與判斷人工溼地的重要性，但目前仍缺乏完善的 SFCWs 生態系統服務評估方法針對溼地於生物多樣性與棲地品質之價值作評估，故本研究以北臺灣兩座 SFCWs 為研究地點，探討以聯合國千禧年生態系統評估(MA)所計算的生物多樣性支持服務價值能否反映臺灣 SFCWs 於棲地品質與生物多樣性的重要性。研究結果顯示兩研究 SFCWs 為臺灣多種鳥類包括 2 種保育類和 5 種臺灣特有種的棲地及候鳥重要的過境棲地，同時水生底棲大型無脊椎動物之生物多樣性相似於其他國外自然及復育溼地，證實兩研究 SFCWs 在生物多樣性支持服務的重要性。然而 MA 的評估結果卻顯示，兩研究 SFCWs 在生物多樣性支持服務的價值偏低，只佔生態系統服務總價值<10%。因 MA 的方法主要建基於全球生態系統之物質與服務的供應(global assessment)，並不適宜直接套用於氣候、環境與生態條件獨特的臺灣溼地。本研究提出目前溼地生態系統服務評估值得改善之處，主張依據 MA 的架構，針對熱帶與亞熱帶海島型國家的溼地發展亞全球性評估(sub-global assessments)，以準確評估臺灣的溼地生態系統服務價值，協助建立相關的人工溼地管理政策。

關鍵詞：溼地生態系統服務評估，表面流人工溼地，生物多樣性。

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系助理教授，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，ritayam@ntu.edu.tw

ABSTRACT

Surface flow constructed wetlands (SFCWs) which have commonly used as the off-site mitigation measure for the degraded and loss of wetlands, have been developed to serve for multiple ecosystem functions. Ecosystem functions can be quantified by monetary values using ecosystem service assessment to enhance public recognition, and we can determine the importance of constructed wetlands based on the values of ecosystem services they provided. Biodiversity supporting services is one of the key ecosystem services of SFCWs. However, the biodiversity and habitat quality valuation of wetlands are generally underdeveloped in the current assessment of ecosystem services. Therefore, in this study, we conducted biodiversity survey in two SFCWs in the northern Taiwan and valued the biodiversity supporting services based on Millennium Ecosystem Assessment (MA) aiming to determine if MA could reflect the importance of habitat quality and biodiversity in Taiwan SFCWs. Our results showed that the two study SFCWs were important habitats for many birds in Taiwan including two protected species and five endemic species. Also, these two SFCWs located along the important migratory pathway for migratory birds. The biodiversity of benthic macroinvertebrates of our two study SFCWs was similar to other natural and restored wetlands in different parts of the world. Despite the importance of biodiversity supporting function of these two SFCWs, their monetary values of biodiversity supporting services as calculated by MA was relatively low (<10% of total values). Therefore, it could not be appropriate to use this MA method based on global assessment directly to assess wetlands in Taiwan which is characterized by unique climatic, environmental and ecological conditions. Hence, we proposed some improvement measures of the current MA, and advocated that Sub-Global Assessments for wetland ecosystem services should be developed for tropical and subtropical islands. Thus, this can allow derivation of a more accurate and objective ecosystem service assessment system for Taiwan wetlands and provision of important insights on the policies of constructed wetlands management in Taiwan.

Keywords: Ecosystem service assessment of wetlands, Surface flow constructed wetlands, Biodiversity.

一、前言

近年來，因人類過度開發自然溼地，使自然溼地遭受嚴重的破壞，Finlayson and Spiers (1999) 指出相較於 1900 年，現今世界各地的溼地面積已大幅下降至少 50%。人工溼地為目前常用於溼地異地補償之方法，例如美國陸軍工兵署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)為了補償自然溼地損失的情況，採取建立人工溼地、復育與保

育自然溼地等行動補償自然溼地，自 1993 年起已見成效，其中形貌與功能相近於自然溼地的表面流人工溼地(Surface flow constructed wetlands, SFCWs)在北美被廣為建立，作為補償已遭受破壞及損失自然溼地的方法(Mitsch and Jørgensen 2004)。SFCWs 為重要的人工生態系統，主要由四個淨水單元組成：(1)沉澱池：沉降大型顆粒與進行物理沉澱；(2)密集種植區：攔截細小顆粒與進行厭氧分解；(3)開放水域：增加水體溶氧與進

表 1 使用生態系統服務評估中的利益轉換方法(benefit transfer methods)進行評估，進而達成溼地的保育或復育之案例

國家	原開發計畫	結 果	參考文獻
澳洲	採礦	藉由利益轉換方法比較保護溼地保育區所能獲得的利益與原提案採礦開發所能獲得的利益後，澳洲政府於 1990 年決定將採礦的提案改為保護溼地保護區。	TEEB (2010)
英國	農業開發	當採礦區之採礦開發結束後，採礦公司作出創建人工溼地以復育野生動物棲地的提案。使用利益轉換方法評估後，推斷出該地區興建人工溼地所帶來的利益遠大於進行農業發展的利益，進而支持該項復育溼地的提案。	Olsen and Shannon (2010)
泰國南部	蝦類養殖	研究者透過比較泰國紅樹林不同土地利用的價值，發現保護紅樹林可獲得好處(包括保護內陸地區免於暴風侵襲)的價值遠大於養殖蝦業的價值(包括養蝦五年後池塘復原的代價)。此研究認為該地政府須擬定適當政策，才可避免這種不適當的開發決定。	Hanley and Barbier (2009)

行好氧分解；(4)生態池：生物棲地的提供與增加生物多樣性(U.S. EPA 1988；行政院環境保護署 2012)。目前 SFCWs 已可有效提供多項生態功能，包括污水處理、提供野生動物棲地以提高生物多樣性、防洪蓄水及綠化環境等。

雖然 SFCWs 可提供多項生態功能，但目前仍缺乏公眾認同的標準量化這些功能。近年來，生態系統服務評估的研究提供了量化生態功能的評估方法。生態系統服務的定義為人類從生態系統得到的利益，對於維持人類社會及生態系統的永續發展極度重要(Costanza *et al.* 1997)，主要包括四大類服務，分別為(1)供應服務(provisioning services)；(2)文化服務(cultural services)；(3)調節服務(regulating services)和(4)支持服務(supporting services) (MA 2005a)。生態系統服務評估綜合了專家與公眾認同的客觀標準，以人類社會永續發展為前提，將生態系統服務轉換成公眾認同的金融價值，此金融價值即為金錢。決策者可藉參考生態系統服務的價值訂定政策，優先保育重要的生態系統。相較於實質的金融市場資本價值，因生態系統服務包括有形與無形的服務，而無形的服務如提供生物多樣性，往往很難被適當地量化和評估。因此，決策者進行政策考量時，容易低估生態系統服務的價值(Costanza *et al.* 1997)。聯合國目前已藉建立「千禧年生態系統評估」(Millennium Ecosystem Assessment, MA)和「生態

系暨生物多樣性經濟倡議」(The Economic of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)等方法，訂定生態系統服務價值的評估方法。研究人員(包含專家學者、環境顧問公司、受訓過的 NGO 人員及政府相關人員等)可使用生態系統服務價值評估方法，將生態系統服務中有形和無形的服務轉換成實質的金融價值，在公眾認同的評估標準下，計算生態系統服務價值。當決策者需要進行開發、保育或復育生態系統之決策時，藉參考生態系統服務價值，可作出適當的決定。

位處內陸水域系統的溼地，包含自然溼地與人工溼地，可提供多樣重要的生態系統服務，包含(1)供應食物與蓄積淡水資源(供應服務)；(2)對自然的美學感受與休閒旅遊(文化服務)；(3)氣候調節、淨化水質與降低自然災害(調節服務)；(4)土壤形成與維持營養循環(支持服務) (MA 2005b)。國外已有一些研究案例，研究人員採用生態系統服務價值評估方法，將保育或復育溼地所帶來的利益轉換成實質金融價值供決策者參考，決策者從而作出保育或復育溼地的決定(表 1)。儘管人工溼地所提供的生態系統服務相當重要，Yang *et al.* (2008)指出一直以來只有少數的研究著重於人工生態系統服務價值的評估。

早期人工溼地的主要建造目的為污水處理(Dunbabin and Bowmer 1992; Jenssen *et al.* 1993; Kadlec 1995)，發展至後期，因公眾對生物多樣性

之重要性的認知增加，生物多樣性的提供才納入人工溼地之建造目的(Hansson *et al.* 2005; Williams *et al.* 2008; Hsu *et al.* 2011)。目前，大部分針對溼地生態系統服務價值的研究案例，只評估溼地於污水處理和防洪的價值(TEEB 2012)。然而，由於生物多樣性支持服務(biodiversity supporting services)的價值難以量化，加上直到近年來才逐漸被強調和重視，只有少部分研究案例進行溼地生物多樣性支持服務價值的評估。

鑒於人工溼地於污水處理的效益為前人研究主要探討的課題，人工溼地在氮、磷和金屬廢水去除效率方面已累積不少證據(Dunbabin and Bowmer 1992; Jenssen *et al.* 1993)。然而，前人研究亦發現人工溼地可有效提供生物多樣性棲地，並促進生物之豐度與生物多樣性增加(Hickman 1994; Wan *et al.* 2001; Thiere *et al.* 2009; Becerra-Jurado *et al.* 2012)。近年建造的人工溼地主要為多功能溼地，除污水處理的功能外，更同時具備防洪和提供生物多樣性等功能(Hickman 1994; Hansson *et al.* 2005; Thiere *et al.* 2009)。因此，本研究主要目的為探討以聯合國千禧年生態系統評估(MA)所計算的生物多樣性支持服務價值，能否反映臺灣 SFCWs 於棲地品質與生物多樣性的重要性。

生態系統之健康狀況反映在生態系統內結構、功能與內部之交互作用等特性，健康的生態系統即穩定且永續的生態系統，於承受壓力後具有復原能力(Kimmins 1997; Rapport *et al.* 1998)。生物多樣性為生態系統健康狀況的重要指標，健康的生態系統若遭受人為干擾或壓力而惡化，生態系統之生物多樣性會降低，造成生態系統之結構與功能改變(De Leo and Levin 1997; Kimmins 1997; Rapport *et al.* 1998)。此外，Tilman and Downing (1994)發現高生物多樣性的生態系統較低生物多樣性的穩定，顯示保護生物多樣性對維持生態系統之穩定特別重要。因此，藉調查人工溼地生態系統之生物多樣性，可了解人工溼地之棲地品質，進而明瞭人工溼地生態系統之健康狀況(Wettstein and Schmid 1999; Stapanian *et al.* 2004)，人工溼地之生物多樣性愈高，反映棲地品

質愈良好，復育成效愈高。前人在人工溼地的生物研究中發現，以建造人工溼地復育遭受破壞的棲地可使生物增加，證實人工溼地可以增強生物多樣性支持此項服務(Hickman 1994; Wan *et al.* 2001; Thiere *et al.* 2009; Becerra-Jurado *et al.* 2012)。然而，評估人工溼地生物多樣性支持服務價值的研究，例如評估人工溼地中魚類、鳥類與水生大型無脊椎動物等生物豐度與生物多樣性的價值之研究卻極少，因而無法準確知道人工溼地在生物多樣性支持服務的價值。

藉建立溼地/人工溼地生態系統服務評估，以金錢價值量化其中生態系統服務，評估結果可建立在公眾認同的評估標準上，使公眾(包含非生態學家)能夠了解溼地的價值與重要性。因此，我們需要設計合適的溼地/人工溼地生態系統服務評估方法以正確評估其價值。目前，世界各地包括臺灣尚未建立完善的溼地生態系統服務評估系統，且在現行的溼地生態系統服務評估方法中，溼地於生物多樣性與棲地品質之價值的評估為最缺乏的部分，以致於在建造 SFCWs 後無法評估 SFCWs 是否達成提供多樣性功能、服務及其他生態效益與提升棲地品質等目標。此外，多數溼地生態系統服務評估案例集中於大陸地區的溼地，如歐、美、亞洲大陸等地，海島地區(尤其是在熱帶及亞熱帶氣候環境)的溼地研究案例相對稀少，而臺灣為一位處熱帶及亞熱帶之海島，且近年臺灣大規模興建多功能的人工溼地，其具備提供生物多樣性棲地的功能，因此針對臺灣人工溼地進行生態系統服務評估與生物多樣性支持服務的研究實在有其必要性。臺灣現今的國家重要溼地總計為 82 處，面積達 56865 公頃(翁義聰等 2011)，其中 41 處溼地為人工溼地或其包含部分的人工溼地。

本研究的目的是為探討依據 MA 所計算的生物多樣性支持服務價值能否反映臺灣 SFCWs 於棲地品質與生物多樣性的重要性，並提出現今溼地生態系統服務評估值得改善之處，以助建立熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統。本研究可分為四個部分，第一個部分為依照 MA 評估北臺灣兩新建 SFCWs (建造年齡

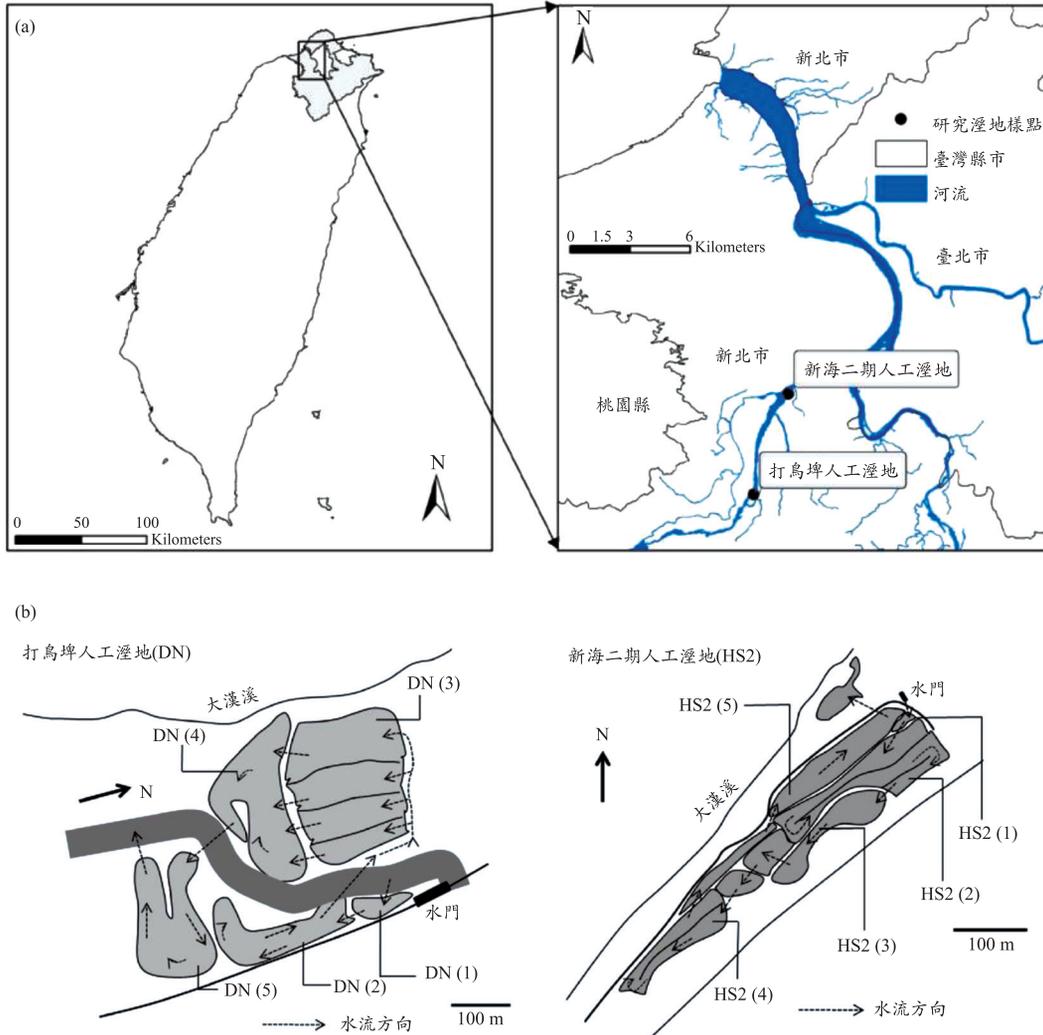


圖 1 (a)打鳥埤人工溼地(DN)和新海二期人工溼地(HS2)地理位置圖；(b) DN 及 HS2 人工溼地淨水單元配置圖

皆<5 年)的生態系統服務價值。第二部分為我們於 2009 至 2010 年北臺灣兩座新建 SFCWs 收集生物的豐度與生物多樣性資料，包括魚類、鳥類與水生大型無脊椎動物，調查兩研究溼地的生物多樣性與其時空變異。第三個部分為比較兩研究 SFCWs 與國內、國外溼地生物的豐度和生物多樣性資料，研究依據 MA 所計算的生物多樣性支持服務價值能否反映臺灣 SFCWs 於棲地品質與生物多樣性的重要性。最後，本研究提出現今溼地生態系統服務評估值得改善之處，並針對熱帶與

亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統，建立初步的架構。

二、研究方法

2.1 研究地點

臺灣為位處太平洋西面且北回歸線通過的海島，坐落於亞熱帶與熱帶交界，氣候溫暖(年平均氣溫：4.2°-25.1°)(中華民國交通部中央氣象局 2011)，雨量充沛(年平均降雨量：1,013.4-4,863.1 mm)(中華民國交通部中央氣象局 2011)，

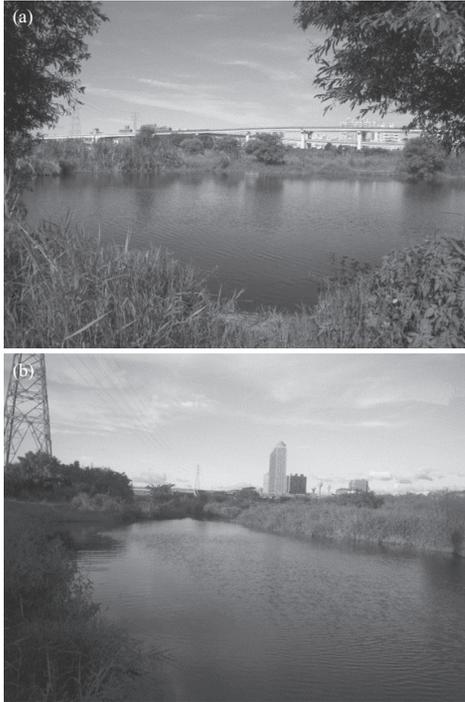


圖 2 (a)打鳥埤人工溼地(DN)之環境；(b)新海二期人工溼地(HS2)之環境

複雜的地形及氣候，造成臺灣生物多樣性相當高(植物：8,336 種；動物：36,229 種) (中央研究院生物多樣性研究中心 2012)。由於臺灣許多地區已被高度都市化，SFCWs 只能興建於既面積小、破碎且緊鄰都市的河岸地區(臺灣 SFCWs 之面積：0.35-120 公頃，平均 12.01 公頃) (行政院環境保護署 2012)，然而 Blackwell and Pilgrim (2011)指出小型的溼地仍可以提供許多生態系統服務，包含水質淨化、水量調控與生物多樣性保育等。因此，本研究以臺灣為例，探討熱帶或亞熱帶海島型國家都會區小型 SFCWs 的生態系統服務價值與生態系統服務之生物多樣性支持服務。本研究選擇臺灣北部兩個 SFCWs：打鳥埤人工溼地(DN) ($121^{\circ}26'07''E$, $24^{\circ}59'03''N$)與新海二期人工溼地(HS2) ($121^{\circ}27'09''E$, $25^{\circ}01'46''N$) (圖 1、圖 2)作為研究溼地樣點。DN 與 HS2 之面積分別約為 13 與 4.9 公頃，位於臺灣北部大漢溪的右岸河堤旁，屬高度都市化的地區。兩座人工

溼地分別於 2006 年 9 月與 11 月建造完成並開始營運，同樣為由五個淨水單元所組成的典型 SFCWs，承接周邊城市的家庭廢水，具有污水處理、提供生物多樣性、調節河川水量等功能(行政院環境保護署 2012)。

2.2 生態系統服務評估

本研究選取 MA 內陸水域系統章節(Inland Water Systems) (MA 2005b)的評估方法「溼地生態系統服務總經濟價值」(Total Economic Value of Ecosystem Services Provided by Wetlands) (表 2)，以評估兩研究 SFCWs 的生態系統服務價值。本研究首先調查兩座研究 SFCWs 所提供的生態系統服務項目，然後，不論溼地提供各項生態系統服務的品質，依據 MA 所彙整全球>200 座溼地之各項生態系統服務的平均價值(表 2；Costanza *et al.* 1997; Schuyt and Brander 2004)，乘上本研究兩座 SFCWs 之面積以計算該項生態系統服務在研究生態系統的價值，而各項生態系統服務價值的總和即為研究溼地生態系統服務價值的總額。另外，因部分生態系統服務項目目前缺乏相關科學研究，如基因和醫藥資源，或其認定方式以主觀角度衡量，如藝術和科學的見聞，MA 的評估方法並不將上述難以量化估計的生態系統服務價值納入評估。

2.3 生物多樣性資料收集

DN 及 HS2 皆由五個淨水單元所組成，每個淨水單元皆為一水池(圖 1)，入流廢水的水質會隨著通過 SFCWs 內各淨水單元逐漸改善而變得穩定。兩研究 SFCWs 的水質因直接受到入流廢水的影響，前兩個淨水單元的水質汙染物質[如生化需氧量(BOD) (表 3)]濃度較高且變化較大，因而前兩個淨水單元池主要為提供污水處理之功能，而在生物多樣性提供的效益較少(Hsu *et al.* 2011)。因此，本研究生物資料的調查只針對淨水單元池 3 (DN-3 和 HS2-3)、淨水單元池 4 (DN-4 和 HS2-4)和淨水單元池 5 (生態池) (DN-5 and HS2-5)進行生物多樣性資料採集(圖 1)。

表 2 溼地各項主要生態系統服務的平均經濟價值，以及兩研究人工溼地 DN 和 HS2 的生態系統服務價值評估

溼地生態系統服務項目		平均價值 (單位：美金/公頃/年)	DN 的價值	HS2 的價值
供應服務	(從溼地獲得的產品)	601		
	漁獲	374		
	供民眾打獵	123		
	水資源提供	45	585	221
	原始材料供應 (茅草、木頭、食物、肥料等)	45	585	221
	薪材供應	14		
	其他(基因、醫藥和裝飾資源)	*		
文化服務	(從溼地獲得的非實體利益)	1,373		
	美學感受	881	11,453	4,317
	休閒旅遊	492	6,396	2,411
	其他(例如：藝術、精神、歷史或科學方面的見聞)	*		
調節服務	(從生態系統過程中獲得的利益)	1,086		
	防洪/水量控制	464	6,032	2,274
	水質處理	288	3,744	1,411
	保護功能	201	2,613	985
	溫度調節	133	1,729	652
	其他(例如調節土壤、生物控制)	*		
支持服務	(維持所有其他服務的生態系統功能，為必須基礎)	214		
	生物多樣性棲地/庇護所	214	2,782	1,049
	其他(例如初級生產量、土壤生成、營養/生物化學循環)	*		
總價值		3,274	35,919	13,539

*難以量化估計的生態系統服務

註：DN 面積為 13 公頃，HS2 面積為 4.9 公頃

資料來源：Costanza *et al.* 1997; Schuyt and Brander 2004

表 3 本研究進行期間人工溼地 DN 及 HS2 中各淨水單元生化需氧量(BOD)的平均值與範圍

淨水單元	BOD (mg/L)	淨水單元	BOD (mg/L)
DN-1	25.42 (11.31–29.4)	HS2-1	27.12 (3.98–27.60)
DN-2	10.90 (6.28–13.24)	HS2-2	11.39 (7.68–16.84)
DN-3	11.22 (5.00–13.01)	HS2-3	8.87 (3.86–14.80)
DN-4	9.24 (5.60–13.27)	HS2-4	6.92 (3.24–14.21)
DN-5	10.89 (6.72–26.44)	HS2-5	8.88 (5.82–10.46)

資料來源：Hsu *et al.* 2011

本研究收集 2009 年至 2010 年，DN 與 HS2 的魚類與鳥類之生物多樣性與豐度資料，資料調查間距為每兩個月一次(資料來源：Hsu *et al.* 2011)。魚類調查使用撒網(漁網半徑：2 m；網目：2 cm)和蝦籠(直徑 15 cm)進行收集，魚類樣本以 4°C 冷凍保存，送回實驗室作物種鑑定與

數量記錄。鳥類資料的採集則由三位受訓過的調查人員負責，於三小時內記錄鳥類的種類與數量。我們根據臺灣乾濕季的月份，並配合調查月份的雨量與氣溫資料，將 6 月、8 月和 10 月定義為夏季(濕季)；12 月、2 月和 4 月定義為冬季(乾季)。

表 4 六個世界重要溼地與研究溼地(DN 和 HS2)之地理位置、氣候、溼地類型、面積以及魚類、鳥類之生物多樣性

溼地名稱	地理位置	國家	氣候	溼地類型	面積(ha)	鳥類物種	魚類物種
佛羅里達大沼澤地 (Everglades)	55°-58°W, 16°-20°S	美國	熱帶乾濕季	海岸和內陸自然溼地	16,000,000	349	432
潘塔納爾 (Pantanal)	81°W, 26°N	巴西、玻利維亞與巴拉圭	亞熱帶潮濕	內陸自然溼地	1,000,000	390	263
奧卡萬戈 (Okavango)	22°-24°E, 18°30'-20°S	波札那	熱帶乾濕季	內陸自然溼地	2,800,000	444	71
鬆達班 (Sundarban)	88°-90°E, 21°30'-22°40'N	孟加拉與印度	亞熱帶潮濕	海岸和內陸自然溼地	1,000,000	163	154
金邊 (Tonle Sap)	104°E, 13°N	柬埔寨	熱帶乾濕季	內陸自然溼地	1,500,000	220	149
卡卡杜國家公園 (Kakadu National Park)	133°31'E, 13°02'S	澳洲	熱帶乾濕季	海岸和內陸自然溼地	288,600	107	62
打鳥埤人工溼地	121°26'E, 24°59'N	臺灣	熱帶和亞熱帶乾濕季	內陸人工溼地	13	45	5
新海二期人工溼地	121°27'E, 25°01'N	臺灣	熱帶和亞熱帶乾濕季	內陸人工溼地	4.9	30	3

資料來源：Junk *et al.* 2006

此外，本研究分別於 2009 年至 2010 年之冬季(2009 年 12 月 29 日至 2010 年 2 月 9 日)與夏季(2010 年 8 月 3 日至 2010 年 10 月 12 日)進行底棲水生大型無脊椎動物的採樣，使用被動採樣方法，以陶磚(23×6 cm)作為底棲水生大型無脊椎動物附著的底質。我們分別於乾、濕季在溼地各池內隨機放置 15 塊陶磚，隨後每隔約 14 天回收溼地內的磚塊，一共回收五次，直到 70 天左右結束。收回的磚塊先置於內含 95%酒精的密封袋中保存，運送回實驗室，進行底棲水生大型無脊椎動物的鑑定與豐度計數。

本研究同時匯整國外溼地生物的豐度與生物多樣性資料，包括魚類、鳥類與底棲水生大型無脊椎動物(表 4、表 5)，以及臺灣國家重要溼地的生物多樣性資料，包括魚類與鳥類之生物多樣性，並依據 MA 的評估方法，針對臺灣溼地之生物多樣性支持服務價值，進行生態系統服務價值的評估(表 6)，以供本研究進行比較分析。

本研究中之鳥類和魚類的物種豐富度 (species richness)，以及底棲水生大型無脊椎動物的物種類群豐富度(taxa richness)，本文此後皆以「生物多樣性」代表。溼地各池記錄到的魚鳥總數此後皆以「總豐度」表示；而底棲水生大型無脊椎動物的密度此後則以「豐度」表示。

2.4 統計分析

本研究使用變異數分析中的 Partly-nested analysis of variance (p-nested ANOVA)檢定時空變異是否會對兩研究 SFCWs 生物之豐度與生物多樣性造成顯著性影響(Minitab 16 software; Minitab Inc., 2009)。P-nested ANOVA 的階層包括兩個不同的巢狀階層(溼地×池)(nested structure)，且所有的階層皆與季節交錯(crossed structure)，主要目的為比較生物資料(包括魚類、鳥類與底棲水生大型無脊椎動物)在不同階層(levels)中是否存在顯著差異。

表 5 比較組溼地樣點之環境特徵

溼地名稱	溼地情況	氣候	溼地類型	地景	參考文獻
愛荷華州草原壺洞溼地 (Iowa Prairie Pothole Wetlands, IPP)	溼地已無受到人類密集管理長達 6 年	溫帶氣候	內陸 自然溼地	缺乏樹林覆蓋，開放水域面積廣大，水位淺，半永久/永久性溼地	Hentges and Stewart (2010)
西維吉尼亞州 11 個復育溼地 (11 mitigation wetlands in West Virginia, mWV)	溼地位置接近人為干擾區域，溼地建置年齡：4-21 年	亞熱帶氣候	內陸 人工溼地	沼澤溼地或底部透水性溼地，水文特性為季節性或永久性氾濫	Balcombe <i>et al.</i> (2005)
西維吉尼亞州 4 個自然溼地 (4 reference wetlands in West Virginia, rWV)	未受干擾(無伐木和放牧的紀錄證據)	亞熱帶氣候	內陸 自然溼地	沼澤溼地或灌叢灌木溼地，水文特性為季節性或永久性氾濫	Balcombe <i>et al.</i> (2005)
普拉特河流域 3 個自然溼地 (3 natural wetlands in Platte River Basin, nPRB)	有人為管理，包含放牧與植物焚燒	溫帶氣候	內陸 自然溼地	潮濕草原，沼澤交錯其中成樹狀系統，沼澤之水文特性為暫時性或永久性沼澤	Meyer and Whiles (2008)
普拉特河流域 4 個復育溼地 (4 restored wetlands in Platte River Basin, rPRB)	有人為管理，包含放牧與植物焚燒；復育過程正在進行(例如：土地規劃、植物播種)，溼地建置年齡：5-16 年	溫帶氣候	內陸 人工溼地	潮濕草原，沼澤交錯其中成樹狀系統，沼澤之水文特性為暫時性或永久性沼澤	Meyer and Whiles (2008)
上科洛自然溼地(Upper Colo, UC)	位於未受人類破壞的河流，為原始棲地樣點	溫帶氣候	內陸 自然溼地	位處國家公園內，為休閒空間，有輕微的農業活動	Rawson <i>et al.</i> (2010)

表 6 臺灣國家重要溼地與研究溼地(DN 和 HS2)之地理位置、溼地類型、面積、魚類、鳥類之生物多樣性以及根據表 2 所計算出的生物多樣性支持服務價值

單位：美金/公頃/年

溼地名稱	地理位置	溼地類型	面積(ha)	鳥類物種	魚類物種	生物多樣性支持服務價值
四草溼地	120°08'E, 23°01'N	海岸自然溼地及小部分人工溼地	547	50		117,058
蘭陽溪口溼地	121°49'E, 24°42'N	海岸自然溼地	2,799	115		598,986
香山溼地	120°54'E, 24°46'N	海岸自然溼地	1,600	152		342,400
西湖溼地	120°44'E, 24°36'N	海岸自然溼地、人工溼地	183	49	18	39,162
花蓮溪口溼地	121°36'E, 23°56'N	海岸自然溼地	259	68		55,426
大漢新店溼地	121°29'E, 25°01'N	內陸自然溼地	650	65		139,100
嘉南埤圳溼地	120°23'E, 23°13'N	內陸人工溼地及小部分自然溼地	1,383	32		295,962
龍鑾潭溼地	120°44'E, 21°58'N	內陸自然溼地	289	120		61,846
馬太鞍溼地	121°24'E, 23°39'N	內陸自然溼地	177	70		37,878
半屏湖溼地	120°18'E, 22°41'N	內陸人工溼地	12	31	5	2,568
烏松溼地	120°21'E, 22°39'N	內陸人工溼地	4	89		856
打鳥埤人工溼地	121°26'E, 24°59'N	內陸人工溼地	13	45	5	2,782
新海二期人工溼地	121°27'E, 25°01'N	內陸人工溼地	4.9	30	3	1,049

資料來源：溼地名稱、地理位置、溼地類型，以及面積摘錄自翁義聰等(2011)；鳥類與魚類之生物多樣性資料摘錄自郭瓊瑩和張宇欽(2012)。

三、結果

3.1 生態系統服務的評估

兩研究 SFCWs 生態系統服務項目之調查結果發現，DN 與 HS2 不具備供民眾打獵、漁獲提供，以及薪材提供等功能，故兩研究溼地在這三項生態系統服務並無價值(表 2)。依據本研究之評估結果顯示，兩研究 SFCWs 所提供的生態系統服務包括供應服務(水資源提供與原始材料供應)；文化服務(美學感受與休閒旅遊)；調節服務(防洪/水量控制、水質處理、保護功能與溫度調節)；支持服務(生物多樣性棲地與庇護所)(表 2)。支持服務中，生物多樣性棲地與庇護所的價值即相當於溼地生物多樣性支持服務的價值。DN 與 HS2 兩溼地的生態系統服務總價值分別為 35,919 和 13,539 美元/年，然而兩研究 SFCWs 的生物多樣性支持服務價值只佔生態系統服務總價值的<10% (DN：每年 2,782 美元，HS2：每年 1,049 美元)。

3.2 魚類與鳥類的生物多樣性

在 DN 人工溼地，魚類共計 5 種，平均每次記錄數量為 67.5 尾(夏：72 尾；冬：63 尾)，而鳥類共計 45 種，平均每次記錄數量為 76.5 隻(夏：78.7 隻；冬：74.3 隻)。於新海二期人工溼地(HS2)，魚類共計 3 種，平均每次記錄數量為 101.5 尾(夏：80 尾；冬：123 尾)，而鳥類共計 30 種，平均每次記錄數量為 34.7 隻(夏：41.3 隻；冬：28 隻)。時空變異對魚類的總豐度(季節*池(溼地)， $p = 0.023$)與生物多樣性(季節*溼地， $p = 0.028$)皆造成顯著的影響，顯示魚類之總豐度與生物多樣性於不同溼地、池和季節有明顯差異。鳥類的總豐度(池(溼地)， $p = 0.003$)與生物多樣性(池(溼地)， $p < 0.001$)則只在不同的溼地和池有顯著性的差異，在不同季節(夏、冬)則無顯著性差異，表示人工溼地中鳥類群聚只呈現出空間變異。

3.3 底棲水生大型無脊椎動物的生物多樣性

DN 人工溼地底棲水生大型無脊椎動物之豐度為 $5,781.8 \pm 763.2$ 個體數/ m^2 (mean \pm SE) (夏：

$7,140.1 \pm 1,220.9$ ；冬： $4,423.5 \pm 884.0$)，生物多樣性共計 14 種。新海二期人工溼地(HS2)底棲水生大型無脊椎動物之豐度[$4,500.8 \pm 1,012.1$ 個體數/ m^2 (mean \pm SE) (夏季： $1,373.6 \pm 342.8$ ；冬季： $7,628.0 \pm 1,892.7$)]與生物多樣性(9 種)皆小於打鳥埤人工溼地(DN)。兩研究 SFCWs 的底棲水生大型無脊椎動物之豐度(季節*池(溼地)， $p = 0.001$)顯著地受到時空因子影響，於不同溼地、池和季節有顯著差異；其生物多樣性則只受到空間因子影響(池(溼地)， $p < 0.005$)，只在不同溼地和池有顯著差異。

3.4 世界各地溼地之生物多樣性

本研究匯整六個世界重要溼地之魚類與鳥類的生物多樣性資料(表 4)，六個溼地包括佛羅里達大沼澤地(Everglades)、潘塔納爾(Pantanal)、奧卡萬戈(Okavango)、鬆達班(Sundarban)、金邊(Tonle Sap)與卡卡杜國家公園(Kakadu National Park)。六個世界重要溼地皆位處熱帶或亞熱帶，為海岸或內陸自然溼地，其鳥類生物多樣性介於 107-444 種，而魚類生物多樣性介於 62-432 種。

底棲水生大型無脊椎動物方面，本研究收集愛荷華州草原壺洞溼地(Iowa Prairie Pothole Wetlands, IPP)、西維吉尼亞州 11 個復育溼地(11 mitigation wetlands in West Virginia, mWV)、西維吉尼亞州 4 個自然溼地(4 reference wetlands in West Virginia, rWV)、普拉特河流域 3 個自然溼地(3 natural wetlands in Platte River Basin, nPRB)、普拉特河流域 4 個復育溼地(4 restored wetlands in Platte River Basin, rPRB)與上科洛自然溼地(Upper Colo, UC)的底棲水生大型無脊椎動物之豐度與生物多樣性資料(表 5；圖 3、圖 4)。這些比較組溼地(包括自然與人工溼地)為位處溫帶或亞熱帶的內陸溼地，其底棲水生大型無脊椎動物豐度平均為 46-61,714 個體數/ m^2 ，生物多樣性則為 4.7-20.4 種。

3.5 臺灣國家重要溼地之生物多樣性與生物多樣性支持服務價值估算

本研究選取 11 個臺灣國家重要溼地，包括

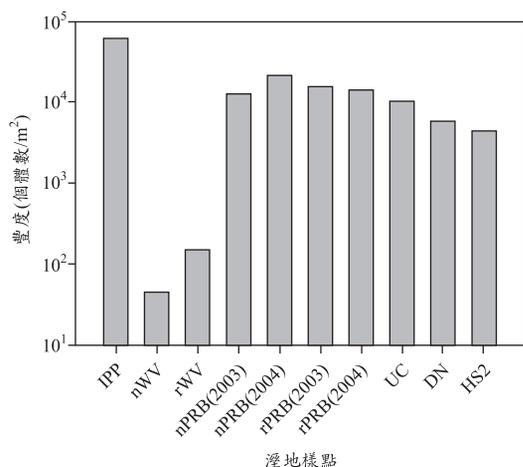


圖 3 研究溼地(DN 和 HS2)和比較組溼地的底棲水生大型無脊椎動物豐度之比較結果。比較組溼地的樣地編碼與環境特性詳見表 5

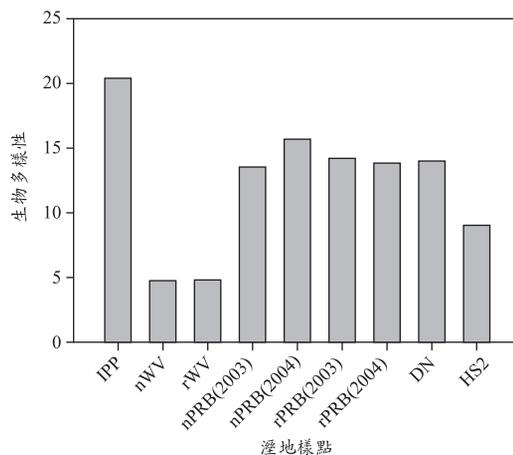


圖 4 研究溼地(DN 和 HS2)和比較組溼地的底棲水生大型無脊椎動物生物多樣性(物種類群豐富度)之比較結果。比較組溼地的樣地編碼與環境特性詳見表 5

四草溼地、蘭陽溪口溼地、香山溼地、西湖溼地、花蓮溪口溼地、大漢新店溼地、嘉南埤圳溼地、龍鑾潭溼地、馬太鞍溼地、半屏湖溼地與鳥松溼地，收集其鳥類與魚類的生物多樣性資料，並評估各溼地之生物多樣性支持服務價值(表 6)。這 11 個臺灣國家重要溼地包含自然或人工的溼地，部分為內陸溼地，部分為海岸溼地。這些溼地之鳥類生物多樣性共 31-152 種，而這些臺灣國家重要溼地之生物多樣性支持服務價值介於 856-598,986 美金/公頃/年。

四、討 論

4.1 生物多樣性資料比較

本研究運用「溼地生態系統服務總經濟價值」以評估兩研究 SFCWs，結果顯示 DN 與 HS2 的生態系統服務總價值主要由三項生態系統服務構成(共佔 66.49%) (表 2)，分別為美學感官、休閒旅遊和防洪/水量調節。然而生物多樣性棲地與庇護所的价值只佔溼地生態系統服務總價值的 <8%，指出溼地於提供生物多樣性支持服務的價值明顯低於上述之三項生態系統服務的价值。DN 與 HS2 分別記錄到 45 與 30 種鳥類，其中包含 2 種保育鳥類(例如彩鵲(*Rostratula benghalensis*) (平均每次記錄數量，DN：1.0 隻；HS2：0.2 隻))

和 5 種臺灣特有鳥種[例如大卷尾(*Dicrurus macrocercus*) (平均每次記錄數量，DN：0.3 隻；HS2：0.3 隻、白頭翁(*Pycnonotus sinensis*) (平均每次記錄數量，DN：17.7 隻；HS2：5.5 隻)](表 7) (中華民國野鳥學會鳥類紀錄委員會 2012)。同時，由於兩研究 SFCWs 位處候鳥的遷徙路徑上，兩溼地皆為候鳥重要的過境棲地(翁義聰等 2011)。DN 與 HS2 雖為臺灣多種鳥類的棲地，但依據 MA 所評估的生態系統服務價值，卻未能凸顯其生態重要性。

本研究進一步利用兩研究溼地的魚種與鳥種之生物多樣性與六個世界重要自然溼地(Junk *et al.* 2006)進行比較，發現兩研究 SFCWs[DN(鳥種：45 種；魚種：5 種)；HS2(鳥種：30 種；魚種：3 種)]鳥類與魚類之生物多樣性明顯低於這六個自然溼地[(鳥種：107-444 種；魚種：62-432 種)] (表 4)。DN(面積=13ha)與 HS2(面積=4.9ha)的面積遠小於這六個自然溼地，六個世界重要溼地的平均面積(288,600-16,000,000 ha)約為 DN 的兩百萬倍，HS2 的五百萬倍。前人研究如物種與面積的關係(Species-area relationship, SPARs; Rosenzweig 2003)顯示，棲地的面積大小與棲地的複雜度會直接影響棲地的生物多樣性，理論上

表 7 打鳥埤人工溼地(DN)與新海二期人工溼地(HS2)所記錄到的保育鳥種與臺灣特有鳥種與其平均每次調查記錄隻數

	鳥名	英名	學名	保育等級	臺灣特有種	平均每次記錄隻數
打鳥埤人工溼地(DN)	彩鶇	Greater Painted-snipe	<i>Rostratula benghalensis</i>	珍貴稀有		1.0
	金背鳩	Oriental Turtle-Dove	<i>Streptopelia orientalis</i>		臺灣特有亞種	1.8
	黃頭扇尾鶯	Golden-headed Cisticola	<i>Cisticola exilis</i>		臺灣特有亞種	0.3
	褐頭鷓鴣	Plain Prinia	<i>Prinia inornata</i>		臺灣特有亞種	5.2
	大卷尾	Black Drongo	<i>Dicrurus macrocercus</i>		臺灣特有亞種	0.3
	白頭翁	Light-vented Bulbul	<i>Pycnonotus sinensis</i>		臺灣特有亞種	17.7
新海二期人工溼地(HS2)	彩鶇	Greater Painted-snipe	<i>Rostratula benghalensis</i>	珍貴稀有		0.2
	紅尾伯勞	Brown Shrike	<i>Lanius cristatus</i>	應予保育		0.2
	金背鳩	Oriental Turtle-Dove	<i>Streptopelia orientalis</i>		臺灣特有亞種	0.2
	黃頭扇尾鶯	Golden-headed Cisticola	<i>Cisticola exilis</i>		臺灣特有亞種	1.0
	褐頭鷓鴣	Plain Prinia	<i>Prinia inornata</i>		臺灣特有亞種	4.0
	大卷尾	Black Drongo	<i>Dicrurus macrocercus</i>		臺灣特有亞種	0.3
白頭翁	Light-vented Bulbul	<i>Pycnonotus sinensis</i>		臺灣特有亞種	5.5	

註：保育等級分為三類，依序為瀕臨絕種、珍貴稀有、應予保育。特有種分為二類，依序為臺灣特有種與臺灣特有亞種
資料來源：中華民國野鳥學會鳥類紀錄委員會(2012)

棲地面積越大，棲地內的生物多樣性就會越高。此外，棲地破碎化也會影響生物多樣性，破碎化程度越高，棲地的生物多樣性即會下降(Perrow and Davy 2002)。因此，兩研究 SFCWs 雖屬於新建表面流人工溼地(溼地建置年齡：3 年)，棲地面積既小又破碎，且又位處都會區，但仍為臺灣多種重要鳥類(包括 2 種保育鳥類和 5 種臺灣特有鳥種)提供棲息地，確定兩研究 SFCWs 於生物多樣性支持服務價值的重要性。

DN 與 HS2 之鳥類生物多樣性與臺灣國家重要溼地的比較結果顯示，大面積溼地(面積>500 ha)的鳥類生物多樣性高於 DN 與 HS2，為 DN 的 1.84 倍和 HS2 的 2.76 倍(表 6)。小面積溼地(面積<500 ha)的鳥類生物多樣性則為 DN 與 HS2 的 1.58 倍與 2.37 倍(表 6)。大漢新店溼地位處淡水河流域，屬內陸自然溼地，附近為都會區，且遭受人為干擾(包括定期施工、除草以及遊客造訪)，其地理位置和棲地類型與兩研究 SFCWs 最相似。鳥類生物多樣性比較結果發現，DN 的鳥類生物多樣性只略低於大漢新店溼地，而 HS2 的鳥類生物多樣性則約為大漢新店溼地的二分之一。溼地鳥類的生物多樣性可反映溼地之鳥類棲

地品質(Stapanian *et al.* 2004)，所以兩研究 SFCWs 雖為新建場址，但其鳥類棲地品質僅稍低於鄰近的大面積自然溼地。此外，DN 因鳥類生物多樣性較高，復育成效較 HS2 好。

兩研究 SFCWs 的底棲水生大型無脊椎動物豐度明顯低於比較組溼地(圖 3；表 5)。自然溼地與建置 4 年以上的人工溼地之底棲水生大型無脊椎動物豐度皆明顯高於 DN 與 HS2，只有 mWV 和 rWV 兩比較組溼地之豐度低於 DN 與 HS2。然而，DN 與 HS2 之底棲水生大型無脊椎動物生物多樣性則相近於比較組溼地生物多樣性的平均值(圖 4；表 5)。對棲地復育而言，棲地的生物多樣性會影響棲地生態系統功能的穩定，故生物多樣性為棲地復育成效的重要指標(Palmer *et al.* 1997)。兩研究 SFCWs 之底棲水生大型無脊椎動物生物多樣性相近於比較組溼地，說明兩溼地於提供生物多樣性方面之復育成效良好。相關溼地復育的研究結果顯示，溼地水生大型無脊椎動物的豐度與生物多樣性於溼地復育十年後才會逐漸穩定(Marchetti *et al.* 2010)。因兩研究 SFCWs 相較於比較組溼地，其建置年齡較小，只有 3 年，所以底棲水生大型無脊椎動物群聚結構容易受

環境變化影響而出現劇烈變動，造成兩研究 SFCWs 之底棲水生大型無脊椎動物群聚被少數適應力強的優勢種佔據而出現偏低的豐度。

上述比較證實，雖然兩研究 SFCWs 的鳥類棲地品質低於鄰近的大面積自然溼地，兩研究溼地卻為臺灣多種鳥類(包含 2 種保育鳥類和 5 種臺灣特有鳥種)的棲地，同時也為候鳥重要的過境棲地。DN 與 HS2 之底棲水生大型無脊椎動物生物多樣性相近於比較組溼地，說明兩座 SFCWs 於提供生物多樣性方面之復育成效良好。研究結果皆確定兩研究 SFCWs 在生物多樣性支持服務價值的重要性。然而依據 MA 的生態系統服務評估方法，卻發現 DN 和 HS2 之生物多樣性支持服務價值分別只有 2,782 與 1,049 美元/年，故使用目前 MA 的評估方法可能低估氣候與地理高複雜度的臺灣 SFCWs 於生物多樣性支持服務的價值，值得對評估方法進行修正與改進。

4.2 生物多樣性支持服務之時空變異

由於生態系統為動態系統，其中之結構、過程與功能會隨時間變化，故進行生態系統服務評估時，須將此概念納入評估方法中(Costanza *et al.* 1997)。Partly-nested ANOVA 的結果證實魚類之總豐度和生物多樣性與底棲水生大型無脊椎動物之豐度皆強烈地受到時空變異影響，顯示魚類與底棲水生大型無脊椎動物會因在不同季節及不同溼地棲地採樣，呈現不同的生物多樣性。因此，本文建議生物多樣性支持服務價值的評估方法需明定研究人員須至溼地量測生物多樣性指標，每年至少兩次[冬季(乾季)與夏季(濕季)]，每次至少挑選溼地內部三個採樣點進行量測，如此量測的棲地生物多樣性數值相對完善及客觀，有助提升呈現溼地生物多樣性支持服務的正確性。

4.3 生態系統服務評估改進與施行流程

本研究採用依據 Costanza *et al.* (1997)和 Schuyt and Brander (2004)之研究成果所建立的 MA 生態系統服務評估方法，以計算溼地在永續利用的前提下可提供生態系統服務之平均價值(MA 2005b)。

Costanza *et al.* (1997)及 Schuyt and Brander (2004)的評估方法為生態系統服務評估的初步探討，得出的評估價值比較保守，並容易出現錯估或低估生態系統服務價值的情況(Gustavson and Kennedy 2010)。Costanza *et al.* (1997)彙整全球生態系統服務評估的多個案例，並根據各國國民生產毛額(GNP)進行調整，以 1994 年作為計算標準，估算不同生態系統之服務的經濟價值(即單位棲地面積生態系統服務的平均價值)，著重評估全球生態系統服務和自然資本的價值。然而 Costanza *et al.* (1997)的方法會因全球生態系統服務的空間異質性(位處不同地區之生態系統所提供服務的類型與品質皆不相同)，無法正確評估個別生態系統服務。此外，因生態系統基礎建設(infrastructure)的價值並未被 Costanza *et al.* (1997)列入生態系統服務評估的價值計算，導致因未列入計算而低估生態系統服務的價值。生態系統之環境與生物相由生物成分與非生物成分(包含物理、化學與地理等要素)構成，這些成分須達到一定的條件，生態系統才得以提供生態系統服務，此即生態系統基礎建設。Schuyt and Brander (2004)則針對 89 個世界溼地生態系統服務評估的案例進行分析，得出全球平均單位溼地面積所提供生態系統服務的價值。可是 Schuyt and Brander (2004)選取分析的溼地案例半數為美國的研究，且缺乏東亞地區的研究案例，故在世界各地的分布並不均勻。東亞地區氣候及地理環境與歐美地區明顯不同，故東亞溼地的生態系統結構與功能亦異於 Schuyt and Brander (2004)使用之參考溼地，因此所評估之溼地生態系統服務的平均價值未必能有效代表東亞地區溼地的生態系統服務價值。

溼地生態系統服務評估的建立有助以公眾認同的價值標準客觀地判斷溼地的重要性，幫助進行溼地保育與開發的權衡分析，且可協助溼地復育或保育之公眾投資者與人員清楚了解溼地管理與溼地保育的利益(Gustavson and Kennedy 2010)。然而本研究採用 MA 的評估方法，進行臺灣溼地生態系統服務價值的初步評估，評估結果發現，臺灣各溼地生物多樣性支持服務的價值只

與溼地面積成正比關係，無法反映出臺灣各溼地提供的生物多樣性，故無法呈現臺灣各溼地支持生物多樣性的能力(表 6)。我們因而懷疑使用 MA 的評估方法會錯估臺灣人工溼地生態系統服務的價值，尤其低估生物多樣性支持服務的價值。因此，MA 的評估方法不適宜直接套用於臺灣溼地，於是本研究進一步依據 MA 和 TEEB 的概念，調整溼地生態系統服務評估以提高其在臺灣溼地之應用性。

目前，MA 之評估方法中，各項生態系統服務價值為世界各地不同溼地案例的平均價值。以此平均價值乘上研究溼地面積，計算出研究溼地各項生態系統服務的價值，這種計算方法，無法反映出評估溼地於提供各項生態系統服務的能力，只呈現各項生態系統服務的平均價值，因而對提供高於平均值之生態系統服務項目造成低估，提供低於平均值之生態系統服務項目則造成高估，形成溼地生態系統服務評估的錯誤。

因地理及氣候條件不同，位處不同地區之生態系統所提供服務的類型與品質皆不相同(Costanza *et al.* 1997)，導致直接使用整合國外研究案例而建立的生態系統服務評估方法(global assessment)去計算臺灣溼地價值的效果不佳。因此，我們必須按各地區的環境與生態特性分區，發展適用於特定區域的亞全球性評估(sub-global assessments, SGAs) (Mooney *et al.* 2004)。現今 MA 已發展出多個亞全球性評估，Layke *et al.* (2012)的研究中更進一步探討全球性與亞全球性生態系統服務評估之指標的評定，但目前已發展的亞全球性生態系統服務評估並沒有完整涵蓋熱帶與亞熱帶海島型國家的溼地。此外，現今多數溼地研究案例多集中於大陸地區(如歐洲、北美洲等)，臺灣為位處熱帶與亞熱帶交界的海島，具備高度生態獨特性，因此本研究主張針對熱帶與亞熱帶的海島型國家，需依據 MA 亞全球性評估的架構，開發另一套合適的溼地生態系統服務評估方法，才得以準確評估熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務之價值。我們以臺灣為研究案例，建立熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務的評估方法，並輔以國外熱帶與亞熱帶海

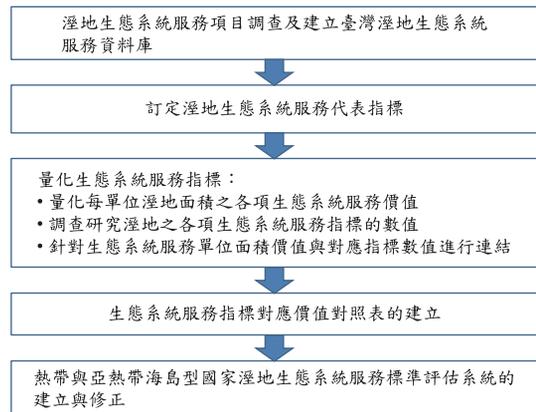


圖 5 熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統的開發流程

島型國家溼地的研究，進行修正使其更臻完善，即可得出熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務之標準評估系統。本研究建議熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統的開發流程之步驟詳述如下(圖 5)：

- (1) 溼地生態系統服務項目調查及建立臺灣溼地生態系統服務資料庫：研究人員(包含專家學者、環境顧問公司、受訓過的 NGO 人員及政府相關人員等)首先調查臺灣所有溼地的生態系統服務項目，針對臺灣各溼地(包含自然溼地與人工溼地)具備的溼地生態系統服務進行彙整，並建立資料庫。
- (2) 訂定溼地生態系統服務代表指標：研究人員針對各項生態系統服務進行彙整分析，並選出最佳呈現各項生態系統服務之指標。
- (3) 量化生態系統服務指標：研究人員挑選重要的臺灣溼地，針對各項生態系統服務價值進行研究，運用直接衡量市場價值方法或間接調查方法，量化每單位溼地面積之各項生態系統服務價值，並調查研究溼地之各項生態系統服務指標的數值，將生態系統服務單位面積價值與對應指標數值進行連結。舉例來說，研究人員調查發現研究溼地在生物多樣性支持服務的價值為 20 萬臺幣/公頃/年，其對應之溼地鳥類生物多樣性為 100 種，研究人員將其連結，代表具有 100 種鳥類的溼地，

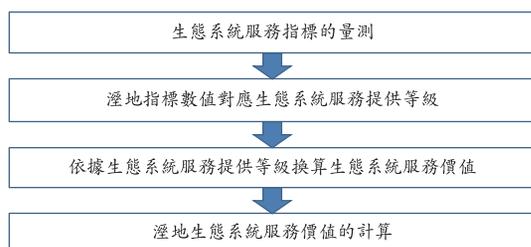


圖 6 熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統之使用說明

其生物多樣性支持服務的價值為 20 萬臺幣/公頃/年。

- (4) 生態系統服務指標對應價值對照表的建立：研究人員依據各項生態系統服務價值由高至低分類為不同等級，定義各等級的金錢價值以及對應指標數值的範圍。
- (5) 熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統的建立與修正：研究人員依照上述步驟，制訂臺灣溼地生態系統服務評估方法。後續參照國外亞熱帶與熱帶海島型國家溼地之生態系統服務評估的研究結果，進行評估系統的修正與改進，即可訂定熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統。

有關熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統之使用說明敘述如下(圖 6)：

- (1) 生態系統服務指標的量測：研究人員至選定評估的溼地進行生態系統服務指標的量測。舉例來說：研究人員若針對溼地生物多樣性支持服務進行評估，其指標包含鳥類生物多樣性、保育物種的數量等，即針對這些指標進行量測。
- (2) 溼地指標數值對應生態系統服務提供等級：研究人員依據溼地指標數值，評定溼地所提供的各項生態系統服務之等級。
- (3) 依據生態系統服務提供等級換算生態系統服務價值：研究人員評定溼地所提供的各項生態系統服務之等級後，依照生態系統服務指標對應價值對照表換算單位面積溼地於各項生態系統服務的價值。

- (4) 溼地生態系統服務價值的計算：研究人員將單位面積溼地於各項生態系統服務的價值乘以溼地面積，一一得出溼地所提供的各項生態系統服務之價值，而各項溼地生態系統服務價值的總和，即為選定評估的溼地之生態系統服務總價值。

五、結 論

本研究採用 MA 的評估方法，進行臺灣表面流人工溼地生態系統服務價值的評估，並調查兩研究溼地的生物多樣性與其時空變異，以探討得出的生物多樣性支持服務價值能否反映臺灣 SFCWs 於棲地品質與生物多樣性的重要性。研究結果發現，DN 與 HS2 的鳥類棲地品質雖低於鄰近的大面積自然溼地(大漢新店溼地)，其卻為臺灣多種鳥類(包括 2 種保育鳥類和 5 種臺灣特有鳥種)的棲地及候鳥重要的過境棲地。底棲水生大型無脊椎動物方面，兩研究溼地之生物多樣性相近於比較組溼地，證實復育成效良好。這些生物調查結果皆證明兩研究 SFCWs 在生物多樣性支持服務價值的重要性。然而 MA 的評估結果卻顯示 DN 和 HS2 之生物多樣性支持服務價值偏低，因此，本研究認為使用 MA 評估方法可能低估臺灣 SFCWs 於生物多樣性支持服務的價值。

溼地生態系統服務評估的建立有助以公眾認同的價值標準客觀地判斷溼地的重要性。可是目前 MA 的評估方法為生態系統服務評估的初步探討，不適宜直接套用於臺灣溼地，需調整溼地生態系統服務評估以提高其在臺灣溼地之應用性。故本研究主張依據 MA 亞全球性評估的架構，針對熱帶與亞熱帶的海島型國家，發展另一套合適的溼地生態系統服務評估方法，才得以準確評估熱帶與亞熱帶海島型國家的溼地生態系統服務價值。未來，臺灣應針對人工溼地與自然溼地之生態系統服務進行全面性的研究，建立適合臺灣使用的熱帶與亞熱帶海島型國家溼地生態系統服務標準評估系統，才可獲得精確且客觀的溼地生態系統服務價值，為決策者在溼地保育與復育問題提供重要參考。

誌 謝

感謝行政院國科會提供本研究經費(NSC 99-2621-M-005-003 及 NSC 100-2410-H-002-196-MY3)及新北市政府高灘地工程管理處提供新海橋人工溼地及打鳥埤人工溼地之通行證。感謝徐崇斌教授協助底棲動物採集、吳聲海教授協助魚類採集、何一先先生協助野外鳥類觀測，以及生態保育研究室全體人員人工溼地野外採集及實驗分析的協助。

參考文獻

1. Balcombe, C. K., Anderson, J. T., Fortney, R. H., and Kordek, W. S. (2005). "Aquatic macroinvertebrate assemblages in mitigated and natural wetlands." *Hydrobiologia* **541**: 175-188.
2. Becerra-Jurado, G., Harrington, R., and Kelly-Quinn, M. (2012). "A review of the potential of surface flow constructed wetlands to enhance macroinvertebrate diversity in agricultural landscapes with particular reference to Integrated Constructed Wetlands (ICWs)." *Hydrobiologia* **692**: 121-130.
3. Blackwell, M. S. A. and Pilgrim, E. S. (2011). "Ecosystem services delivered by small-scale wetlands." *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* **56**: 1467-1484.
4. Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., and Belt, M. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature* **387**: 253-260.
5. De Leo, G. A. and Levin, S. (1997). "The Multifaceted Aspects of Ecosystem Integrity." *Conservation Ecology* [online] **1**: Art. 3.
6. Dunbabin, J. S. and Bowmer, K. H. (1992). "Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals." *Science of the Total Environment* **111**: 151-168.
7. Finlayson, C. M. and Spiers, A. G. (1999). "Global review of wetland resources and priorities for wetland inventory." Supervising Scientists Report 144/Wetlands International Publication 53, Supervising Scientist, Canberra.
8. Gustavson, K. and Kennedy, E. (2010). "Approaching wetland valuation in Canada." *Wetlands* **30**: 1065-1076.
9. Hanley, N. and Barbier, E. B. (2009). "Pricing Nature: Cost-Benefit Analysis and Environmental Policy." Edward Elgar, London.
10. Hansson, L. A., Brönmark, C., Nilsson, P. A., and Åbjörnsson, K. (2005). "Conflicting demands on wetland ecosystem services: nutrient retention, biodiversity or both?" *Freshwater Biology* **50**: 705-714.
11. Hentges, V. A. and Stewart, T. W. (2010). "Macroinvertebrate assemblages in Iowa Prairie Pothole Wetlands and relation to environmental features." *Wetlands* **30**: 501-511.
12. Hickman, S. (1994). "Improvement of habitat quality for nesting and migrating birds at the Des Plains River Wetlands Demonstration Project." *Ecological Engineering* **3**: 485-494.
13. Hsu, C. B., Hsieh, H. L., Yang, L., Wu, S. H., Chang, J. S., Hsiao, S. C., Su, H. C., Yeh, C. H., Ho, Y. S., and Lin, H. J. (2011). "Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment." *Ecological Engineering* **37**: 1533-1545.
14. Jenssen, P. D., Mæhlum, T., and Krogstad, T. (1993). "Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern environments." *Water Science and Technology* **28**: 149-157.
15. Junk, W. J., Brown, M., Campbell, I. C., Finlayson, M., Gopal, B., Ramberg, L., and Warner, B. G. (2006). "The comparative biodiversity of seven globally important wetlands: a synthesis." *Aquatic Sciences* **68**: 400-414.

16. Kadlec, R. H. (1995). "Overview: Surface flow constructed wetlands." Water Science and Technology **32**: 1-12.
17. Kimmins, J. P. (Hamish) (1997). "Biodiversity and its relationship to ecosystem health and integrity." The Forestry Chronicle **73**: 229-232.
18. Layke, C., Mapendembe, A., Brown, C., Walpole, M. and Winn, J. (2012). "Indicators from the global and sub-global Millennium Ecosystem Assessments: An analysis and next steps." Ecological Indicators **17**: 77-87.
19. Marchetti, M. P., Garr, M., and Smith, A. N. H. (2010). "Evaluating wetland restoration success using aquatic macroinvertebrate assemblages in the Sacramento Valley, California." Restoration Ecology **18**: 457-466.
20. Meyer, C. K. and Whiles, M. R. (2008). "Macroinvertebrate communities in restored and natural Platte River slough wetlands." Journal of the North American Benthological Society **27**: 626-639.
21. Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005a). "Ecosystems and Their Services." Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment, URL: <http://www.maweb.org/documents/document.300.aspx.pdf>.
22. Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005b). "Inland Water Systems." Ecosystems and human well-being: Current States and Trends, URL: <http://www.maweb.org/documents/document.289.aspx.pdf>
23. Mitsch, W. J. and Jørgensen, S. E. (2004). "Ecological Engineering and Ecosystem Restoration." John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
24. Mooney, H. A., Cropper, A. and Reid, W. (2004). "The millennium ecosystem assessment: what is it all about?" Trends in Ecology and Evolution **19**: 221-224.
25. Olsen, N. and Shannon, D. (2010). "Valuing the net benefits of ecosystem restoration: the Ripon City Quarry in Yorkshire." Ecosystem Valuation Initiative Case Study No. 1', WBCSD, IUCN, Geneva/Gland, Switzerland.
26. Palmer, M. A., Ambrose, R. F., and Poff, N. L. (1997). "Ecological theory and community restoration ecology." Restoration Ecology **5**: 291-300.
27. Perrow, M. R. and Davy, A. J. (2002). "Handbook of Ecological Restoration: Volume 1. Principle of Restoration." The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom.
28. Rapport, D. J., Costanza, R., and McMichael, A. J. (1998). "Assessing ecosystem health." Trends in Ecology and Evolution **13**: 397-402.
29. Rawson, C. A., Lim, R. P., Tremblay, L. A., Wame, M. S. J., Ying, G. G., Laginestra, E., and Chapman, J. C. (2010). "Benthic macroinvertebrate assemblages in remediated wetlands around Sydney, Australia." Ecotoxicology **19**: 1589-1600.
30. Rosenzweig, M. L. (2003). "Reconciliation ecology and the future of species diversity." Oryx **37**: 194-205.
31. Schuyt, K. and Brander, L. (2004). "The economic value of the World's wetlands." WWF Living Waters: Conserving the Source of Life. Gland, Switzerland. 31 pp.
32. Stapanian, M. A., Waite, T. A., Krzys, G., Mack, J. J., and Micacchion, M. (2004). "Rapid assessment indicator of wetland integrity as an unintended predictor of avian diversity." Hydrobiologia **520**: 119-126.
33. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) (2010). "The TEEB Synthesis Report." URL: www.teebweb.org/Portals/25/TEEB%20Synthesis/TEEB_SynthReport_09_2010_online.pdf
34. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) (2012). "The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands: A

- contribution to Rio +20.” URL: www.unccd2012.org/content/documents/5101206-UNEP-TEEB-water-Brochure-Bd.pdf
35. Thiere, G., Milenkovski, S., Lindgren, P. E., Sahlén, G., Berglund, O., and Weisner, S. E. B. (2009). “Wetland creation in agricultural landscapes: Biodiversity benefits on local and regional scales.” *Biological Conservation* **142**: 964-973.
36. Tilman, D. and Downing, J. A. (1994). “Biodiversity and stability in grassland.” *Nature* **367**: 363-365.
37. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development (1988). “Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment.” Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH 45268.
38. Wan, S. W., Qin, P., Li, Y., and Lui, X. P. (2001). “Wetland creation for rare waterfowl conservation: A project designed according to the principles of ecological succession.” *Ecological Engineering* **18**: 115-120.
39. Wettstein, W. and Schmid, B. (1999). “Conservation of arthropod diversity in montane wetlands: effects of altitude, habitat quality and habitat fragmentation on butterflies and grasshoppers.” *Journal of Applied Ecology* **36**: 363-373.
40. Williams, P., Whitfield, M., and Biggs, J. (2008). “How can we make new ponds biodiverse? A case study monitored over 7 years.” *Hydrobiologia* **597**: 137-148.
41. Yang, W., Chang, J., Xu, B., Peng, C. H., and Ge, Y. (2008). “Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China.” *Ecological Economics* **68**: 116-125.
42. 中華民國野鳥學會鳥類紀錄委員會(2012)。“2012 年臺灣鳥類名錄”中華民國野鳥學會鳥類紀錄委員會。
43. 行政院環境保護署水質淨化現地處理網站(2012)。“場址導覽：打鳥埤人工溼地與新海人工溼地”行政院環境保護署，URL: <http://wqp.epa.gov.tw/ecological/Default.aspx>。
44. 郭瓊瑩和張宇欽(2012)。“濕地生態交響曲：國家重要濕地生態環境調查及復育計畫成果專輯”內政部營建署城鄉發展分署。
45. 中央研究院生物多樣性研究中心(2012)。“臺灣生物多樣性資訊入口網”，URL: <http://www.taibif.org.tw/>。
46. 中華民國交通部中央氣象局(2011)。“中央氣象局全球資訊網”，URL: <http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>。
47. 翁義聰、楊英欽和陳坤能(2011)。“2011 國家重要濕地彙編”內政部營建署城鄉發展分署。

收稿日期：民國 102 年 1 月 24 日

修正日期：民國 102 年 2 月 6 日

接受日期：民國 102 年 2 月 8 日