

新海人工溼地水生植物碳吸存量之評估

Estimation of Carbon Fixation of Aquatic Plants in Sinhai Artificial Wetlands

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

黃大肯*

Ta-Ken Huang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張文亮

Wen-Lian Chang

摘 要

本研究以新海二期人工溼地為實驗場址，透過現地分層隨機抽樣估算人工溼地中水生植物生長密度，另以影像辨識估算水生植物分布面積，並以高溫灰化法求得植生中有機質含量，進而估算水生植物碳吸存量。

研究結果發現，新海二期溼地五種優勢水生植物碳吸存量為：蘆葦 (*Phragmites australis*) $501.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、長苞香蒲 (*Typha angustata*) $135.6 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、蕹菜 (*Ipomoea aquatica*) $82.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、巴拉草 (*Brachiaria mutica*) $26.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、臺灣水龍 (*Ludwigia x taiwanensis* Peng) $17.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，水生植物碳吸存量與植生葉面積指數、植生葉片面積成正相關。新海二期溼地優勢水生植物碳吸存量為 $211.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。由植生影像辨識可知新海二期人工溼地植生面積為 $35,652 \text{ m}^2$ ，推估新海二期溼地水生植物碳吸存量為 7.5 ton yr^{-1} 。

關鍵詞：碳吸存量，人工溼地，水生植物，植生影像辨釋，分層隨機抽樣法。

ABSTRACT

The objective of this research is to estimate carbon fixation of five dominate aquatic plants in Sinhai second phase artificial wetland in New Taipei City. Concerning the analysis method, we used image based event identification and on site stratified random sampling to calculate area and density of aquatic plants in artificial wetland, and used high temperature combustion method to estimate organic matter content in aquatic plants.

The results showed that carbon fixation of five dominate aquatic plants in Sinhai second phase artificial wetland are: *Phragmites communis* $501.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, *Typha*

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，kent3480@gmail.com

angustata 135.6 gC m⁻² yr⁻¹, *Ipomoea reptans* 82.3 gC m⁻² yr⁻¹, *Brachiaria mutica* 26.8 gC m⁻² yr⁻¹, *Colocasia esculenta* 22.2 gC m⁻² yr⁻¹, *Ludwigia x taiwanensis* Peng 17.5 gC m⁻² yr⁻¹. Also, we found that aquatic plants carbon fixation are positive relative with leaf area index (LAI) and leaf area. Totally, carbon fixation of five dominate aquatic plants in Sinhai second phase artificial wetland is 211.0 gC m⁻² yr⁻¹. By means of image based event identification, We obtained the area of aquatic plants in Sinhai second phase artificial wetland is 35,652 m², and that we can estimate the carbon fixation of aquatic plants in Sinhai second phase artificial wetland is 7.5 ton yr⁻¹.

Keywords: Carbon fixation, Artificial wetland, Aquatic plants, Image based event identification, Stratified random sampling.

一、緒 論

1.1 前言

生態工程(Ecological Engineering)是以接近自然的工程設計，減少工程對環境的衝擊，在生態工程的發展過程中，人工溼地扮演重要的角色。過去十年間，臺灣營造了數十個人工溼地，人工溼地場址具有污水處理、生態保育與環境教育的功能。因著氣候變遷的衝擊，溼地的碳循環成為學界所關注的議題。

水生植物在人工溼地中可淨化水質、提供溼地生物食物的來源與棲息。溼地植栽的設計影響水質淨化效果與建造成本，過去對於人工溼地植栽的研究多針對水生植物水質淨化效果進行評估，少有對水生植物碳吸存量進行估算。本研究評估人工溼地常見水生植物的碳吸存量與單一溼地植生碳吸存量，可作為日後溼地工程營造時植栽設計與政策評估之重要參數。

1.2 研究目的

水生植物為人工溼地去除污染之介質，其在溼地中兼具有二氧化碳吸存之效果，國外亦有多篇文獻進行探討，但國內相關研究尚付之闕如。

本研究以新海二期人工溼地為場址，對人工溼地常見的十五種水生植物進行單位面積生長數量與碳吸存量之調查，可求得水生植物單位面積的植體碳吸存量，並以衛星影像辨識評估人工

溼地植生面積，以評估單一人工溼地植生碳吸存量，研究結果可成為政策評估、經濟效益評估與工程植栽設計之重要參數。

1.3 人工溼地碳循環

「人工溼地」為生態工程之重要發展項目，其優點為：利用自然之方式處理污水、有較低之營運、維護與建造成本，並能成為生物棲息地與環境教育場址(Machate *et al.*, 1997)，而溼地之碳排放量亦為近年來學術上所重視之議題，天然溼地溫室氣體排放約佔全球 25% (Whalen, 2005)，過去文獻顯示溼地維護管理與環境條件會影響其成為碳之排放(Carbon Source)或匯聚溫室氣體(Carbon Sink)之場址(Kayranli *et al.*, 2010)。

溼地中碳主要分布於：植生、土壤、水體、微生物、氣體五個碳庫中(Kadlec and Knight, 1996)。在溼地的二氧化碳通量研究上：曾以密閉罩法(Closed Chamber Method)測量愛沙尼亞(Estonia)水平式地下流人工溼地溫室氣體通量，該溼地年碳吸存(Carbon Sequestration)為 484-649 kgC yr⁻¹，該溼地單位面積碳捕捉為 1500-2200 g C m⁻² yr⁻¹ (Mander *et al.*, 2008)。國內的研究中，曾以鮑溫比/能量平衡系統量測水稻田二氧化碳平衡，發現水稻田一期作二氧化碳吸存量为 22.0 g m⁻² day⁻¹，二期作為 17.9 g m⁻² day⁻¹，水稻田碳吸存量受期作之葉面積指數影響，指數大則固定二氧化碳量多(姚銘輝等, 2006)，葉面積指數亦被

證實與植物淨初級生產力具有高度正相關(Gholz, 1982)。在植體碳吸存量的研究中，曾評估加州沙加緬度聖華金三角洲溼地海三稜(*Schoenoplectus acutus*)和香蒲(*Typha spp.*)的植體碳吸存量，發現這兩種主要物種的年碳吸存量達 1300-3200 gC m⁻²yr (Miller and Fujii, 2010)。

1.4 水生植物與碳吸存

評估水生植物的碳吸存量可作為人工溼地植栽設計之參考依據，水生植物通常以其葉片和水面之相對位置和生活習性進行分類，可分為：沉水型植物、挺水型植物、浮葉型植物、漂浮型植物、溼生型植物五種類型。

對於水生植物碳儲存量的評估，美國俄亥俄州愛莉湖溼地(Lake Erie coastsl wetland, 41°37'N, 83°14'W)三種主要物種的植生碳儲存量分別為：蘆葦(*Phragmites australis*)地上部 660 ± 130 gC m⁻²、地下部 153 ± 40 gC m⁻²、香蒲科植物(*Typha spp.*)地上部 530±74 gC m⁻²、地下部 660 ± 130 gC m⁻²、野慈姑(*Sagittaria latifolia*)地上部 206 ± 30 gC m⁻²、地下部 50±19 gC m⁻² (Rothman and Bouchard, 2007)而水生植物生物量(biomass)在空間中的分布亦和水深有相關性，離岸較近水深較淺處，植生生物量較高(Hudon, 2004)。

關於水生植物的碳傳輸，以 C-14 同位素法分析蘆葦(*Phragmites australis*)植物體中所吸收的 C-14 同位素於沼澤土中的傳輸，發現植體在 27 天的實驗中留有 90%-95%的 C-14 同位素，於土中發現碳同位素出現的最大值為 2%，二氧化碳為 5%-9% (Richert *et al.*, 2000)。在野外研究中，學者整理相關文獻也提出在丹麥 Vejlerne 自然保留區，以蘆葦為主的溼地中，蘆葦每年的碳吸存為 98 molC m⁻² yr⁻¹，而透過根系傳輸至地底的有機碳為 46 molC m⁻² yr⁻¹(Brix *et al.*, 2001)。

二、研究理論

2.1 研究架構

本研究之架構如圖 1 所示，選取人工溼地常見的 15 種水生植物進行調查，於新海二期人工溼地採樣後帶回實驗室以高溫灰化法求得單株

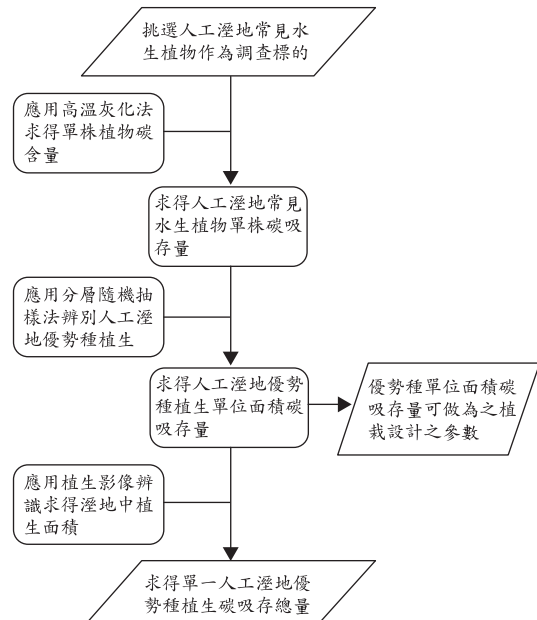


圖 1 人工溼地水生植物碳吸存量研究架構示意圖

植生碳含量，本研究假設調查植株之碳含量為過去一年之碳吸存量。並以分層隨機抽樣法調查 15 種水生植物於新海二期人工溼地空間之分布，以調查中植生出現頻率判斷何為新海二期人工溼地之優勢種，並以調查中植生單位面積生長數量乘上單株植生碳吸存量，求得優勢種水生植物單位面積碳吸存量。再透過影像辨識法求得人工溼地植生面積，以估計新海人工溼地優勢種水生植物碳吸存量。

2.2 分層隨機抽樣法

分層隨機抽樣(Stratified Random Sampling)廣泛運用於環境科學與社會科學各領域實證研究中，其特色為利用已知的事前資訊，將具有共同特質的單位歸入同一分層，此方法可提高分層內的同質性(Homogeneity)，使得層內變異縮小，層間變異增大。一般使用分層隨機抽樣法的原因為：1.可求得各分層的平均數和信賴區間 2.各分層之間抽樣難易度有差異 3.可使母體參數之推估更加精確，並使推估的信賴區間較狹窄 4.可方便不同研究人員於不同區域進行抽樣作業。(Cochran, 1977; 李琇玉, 2006)

在一分層隨機抽樣中，將母體分為 L 層，而母體的面積為 N 個單位，則：

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_L \dots\dots\dots(1)$$

其中 N_i 為第 i 層之面積。各層在抽樣中的權重 (Weight) 為：

$$W_i = \frac{N_i}{N} \dots\dots\dots(2)$$

其中 W_i 為第 i 層在抽樣中之權重， N_i 為第 i 層之

$$\begin{aligned} V(\bar{X}_{st}) &= V(W_1\bar{X}_1 + W_2\bar{X}_2 + \dots + W_L\bar{X}_L) \\ &= W_1^2V(\bar{X}_1) + W_2^2V(\bar{X}_2) + \dots + W^2V(\bar{X}_n) + 2W_1W_2Cov(\bar{X}_1, \bar{X}_2) + 2W_1W_3Cov(\bar{X}_1, \bar{X}_3) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^L W_i^2V(\bar{X}_i) + 2\sum_{i=1}^L \sum_{j>i}^L W_iW_jCov(\bar{X}_i, \bar{X}_j) \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

其中 $V(\bar{X}_{st})$ 為分層抽樣樣本平均數之變異數， $Cov(\bar{X}_i, \bar{X}_j)$ 為第 i 分層樣本平均數 \bar{X}_i 與第 j 分層樣本平均數 \bar{X}_j 之共變異數，因 \bar{X}_i 與 \bar{X}_j 來自不同分層，兩者互相獨立，所以 $Cov(\bar{X}_i, \bar{X}_j)$ 其值為 0。(4)式可簡化為：

$$V(\bar{X}_{st}) = \sum_{i=1}^L W_i^2V(\bar{X}_i) \dots\dots\dots(5)$$

又第 i 層樣本平均數的變異數 $V(\bar{X}_i)$ 可寫成式(6)：

$$V(\bar{X}_i) = \frac{s_i^2}{n_i} \frac{N_i - n_i}{N_i} \dots\dots\dots(6)$$

其中 s_i^2 為第 i 層樣本之變異數， n_i 為第 i 層抽樣點個數，將式(6)代入式(5)，可求得：

$$V(\bar{X}_{st}) = \sum_{i=1}^L W_i^2 \frac{s_i^2}{n_i} \frac{N_i - n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^L W_i^2 \frac{s_i^2}{n_i} (1 - f_i) \dots\dots\dots(7)$$

其中， W_i 為第 i 層之權重， f_i 為第 i 層抽樣率 ($f_i = n_i/N_i$)。(1 - f_i) 為有限母體下之抽樣校正項，若 f_i 小於 5% 則計算時可忽略此校正項。(Cochran, 1977)

面積，N 為母體之面積。而整個分層隨機抽樣的平均數可由式(3)得出：

$$\bar{X}_{st} = \frac{\sum_{i=1}^L N_i \bar{X}_i}{N} = \sum_{i=1}^L W_i \bar{X}_i \dots\dots\dots(3)$$

其中 \bar{X}_{st} 為分層隨機抽樣之樣本平均數， N_i 為第 i 層之面積， \bar{X}_i 為第 i 層樣本平均數，N 為母體之面積。由(3)式可知 \bar{X}_{st} 是 \bar{X}_i 的直線型函數 (Linear Combination)，因此：

2.3 植生影像辨識

2.3.1 監督式分類(Supervised Classification)

監督式分類的原理為將已知類別的地貌光譜資訊，作為訓練的樣區(Training Areas)，藉由計算各訓練樣區光譜的統計資訊(平均值和共變異數)對欲分類樣區進行分類(呂秀惠，2001)，Richards and Jia (2006)敘述監督式步類法步驟如下：

1. 決定欲分類之項目，即地面覆蓋物之類別，如：水體、植生、裸地、都市地...等。
2. 藉由現地勘查、地圖或欲分類樣區的照片、選定各分類項目中具代表性的像素(Representative Pixels)，稱為訓練樣區(Training Areas)。
3. 由訓練樣區的光譜統計資訊，估計各分類項目演算所需之參數，這些參數所組成的集合稱為各分類項目之特徵(Signature)。
4. 以訓練樣區的光譜統計資訊，對欲分類樣區進行逐像素分類，使得各像素被分類至不同項目之中。
5. 以圖或表之方式表達分類結果。
6. 以已知之地貌分類評估監督式分類結果準確度。

2.3.2 貝氏分類法(Bayes' Classification)

衛星影像中每個像素皆有其在不同光譜波段所反射的數值，R 為像素的紅光波段反射值，G 為像素的綠光波段反射值，B 為像素的藍光波段反射值，IR 為像素的近紅外光波段反射值，因此，可將任意像素點 z_i 以四維之空間向量表示，即：

$$\bar{z}_i = \begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \\ IR_i \end{bmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

其中 R_i 為第 i 個像素的紅光波段反射值， G_i 為第 i 個像素的綠光波段反射值， B_i 為第 i 個像素的藍光波段反射值， IR_i 為第 i 個像素的近紅外光波段反射值。

將所欲分類之影像分為 S 類，將第 k 個類別稱為 ω_k ，而第 i 個像素 z_i 屬於 ω_k 類別之機率可用式(9)表示，即：

$$\Pr(\omega_k | \bar{z}_i), k=1,2,\dots,S \dots\dots\dots(9)$$

而貝氏分類之判定原則為第 i 個像素 z_i 屬於 ω_k 類別機率最大時，判定 z_i 屬於 ω_k 類別，判定原則可用式(10)表示，即：

$$\bar{z}_i \in \omega_k \text{ if } \Pr(\omega_k | \bar{z}_i) > \Pr(\omega_j | \bar{z}_i), \text{ for all } j \neq k \dots\dots\dots(10)$$

因式(9)未能直接在分類過程求出，故假設各類別訓練區皆有足夠的統計資訊，以訓練區的統計資訊估計 $\Pr(\omega_k | \bar{z}_i)$ ，由貝氏定理(Bayes' Theorem)，可得到下式之關係：

$$\Pr(\omega_k | \bar{z}_i) = \Pr(\bar{z}_i | \omega_k) \Pr(\omega_k) / \Pr(\bar{z}_i) \dots\dots\dots(11)$$

其中， $\Pr(\omega_k | \bar{z}_i)$ 為第 i 個像素 z_i 屬於 ω_k 類別之機率， $\Pr(\bar{z}_i | \omega_k)$ 可由

訓練區之資料求出， $\Pr(\omega_k)$ 為第 k 個分類在分類區中出現之機率又稱為事前機率(prior probability)，而 $\Pr(\bar{z}_i)$ 指的是第 i 個像素 z_i 屬於任意分類之機率，可由下式表示：

$$\Pr(\bar{z}_i) = \sum_{k=1}^S \Pr(\bar{z}_i | \omega_k) \Pr(\omega_k) \dots\dots\dots(12)$$

因 $\Pr(\omega_i)$ 可以由分類前所具有的資訊進行估計，由式(10)與式(11)，可求得：

$$\bar{z}_i \in \omega_k \text{ if } \Pr(\bar{z}_i | \omega_k) \Pr(\omega_k) > \Pr(\bar{z}_i | \omega_j) \Pr(\omega_j), \text{ for all } j \neq k \dots\dots\dots(13)$$

為了方便數學運算，將式(13)左右各取自然對數可求得式(14)與式(15)：

$$g_i(\bar{z}_i) = \ln[\Pr(\bar{z}_i | \omega_k) \Pr(\omega_k)] = \ln \Pr(\bar{z}_i | \omega_k) + \ln \Pr(\omega_k) \dots\dots\dots(14)$$

$$\bar{z}_i \in \omega_k \text{ if } g_k(\bar{z}_i) > g_j(\bar{z}_i), \text{ for all } j \neq k \dots\dots\dots(15)$$

其中 $g_k(\bar{z}_i)$ 為最大相似法中之鑑別函數(Discriminate Function) (Richards and Jia., 2006)。

2.3.3 多維常態分布模型(Multivariable Normal Class Models)

假設空間中第 i 個像素 z_i 屬於 ω_i 類別之機率 $\Pr(\bar{z}_i | \omega_i)$ 為一多維常態分布(Lillesand and Kiefer, 2000)。在 y 個波段(band)的光譜之中， $\Pr(\bar{z}_i | \omega_k)$ 可用下式表示：

$$\Pr(\bar{z}_i | \omega_i) = (2\pi)^{-y/2} \left| \sum_k \right|^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\bar{z}_i - \bar{m}_k)' \sum_k^{-1} (\bar{z}_i - \bar{m}_k) \right\} \dots\dots\dots(16)$$

其中 \bar{m}_k 為第 k 類訓練樣區各波段光譜反射值平均數所構成的向量(mean vector)， \sum_k 為第 k 類訓練樣區光譜之共變異數矩陣(covariance matrix)，將式(16)取自然對數並消去常數項，代入式(14)可得到式(17)，如下所示：

$$g_k(\bar{z}_i) = \ln \Pr(\omega_k) - \frac{1}{2} \left| \sum_k \right| - \frac{1}{2} (\bar{z}_i - \bar{m}_k)' \sum_k^{-1} (\bar{z}_i - \bar{m}_k) \dots\dots\dots(17)$$

在進行分類時若未能得知第 k 類分類在分類區中出現的機率 $\Pr(\omega_k)$ ，則假設 $\Pr(\omega_k)$ 在各分類中皆為相等(Richards and Jia., 2006)，為了運算上的方便，忽略式(17)之常數項，可將多維常態分布下最大似法之鑑別函數(Discriminant

表 1 誤差矩陣示意表

參考資料 (Reference)	A	B	合計
辨識分類 (Classification)			
A	M_{11}	M_{12}	M_{1+}
B	M_{21}	M_{22}	M_{2+}
合計	M_{+1}	M_{+2}	K

Function)由式(18)表示，即：

$$g_k(\bar{z}_i) = -\ln \left| \sum_k \left| -(\bar{z}_i - \bar{m}_k)' \sum_k^{-1} (\bar{z}_i - \bar{m}_k) \right| \right| \dots \dots \dots (18)$$

2.3.4 誤差矩陣(Error Matrix)

誤差矩陣為影像辨識時評估辨識正確率之工具，將參考資料(Reference)(現地勘查、地圖或欲分類樣區的照片) 視為地表真實之情形，可將其與分類結果之關係以方陣描述，稱為誤差矩陣。如表 1 所示：在矩陣對角線上之元素(M_{ii})即為分類正確之像元，不在對角線上之像元，為分類錯誤之像元，此結果可以用生產者正確率(Producer's Accuracy, PA)、使用者正確率(User's Accuracy, UA)與整體正確率(Overall Accuracy, OA)。其中生產者正確率指的是分類生產者將地

表真實情形正確辨識為該分類之比例，第 i 類分類生產者正確率可由下式表示：

$$PA_{+i} = \frac{M_{ii}}{M_{+i}} \dots \dots \dots (19)$$

使用者正確率指的是使用者在檢視分類結果時，該結果符合地表真實狀況之比例，第 i 類分類使用者正確率可由下式表示：

$$MA_{i+} = \frac{M_{ii}}{M_{i+}} \dots \dots \dots (20)$$

整體正確率指的是正確分類之像素佔全部像素的比例，若將欲分類區域分成 S 類資料，整體正確率可表示為：

$$OA = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^S M_{ii} \dots \dots \dots (21)$$

三、材料與方法

3.1 新海二期溼地簡介

研究之場址位於新北市新海大橋旁，經緯度位於北 25°01'32"~44"N，東經 121°27'17"~24"，如圖 2 所示，人工溼地於 2006 年 11 月完工，水域面積約 2.6 公頃，連同陸域全部面積為 4.9 公

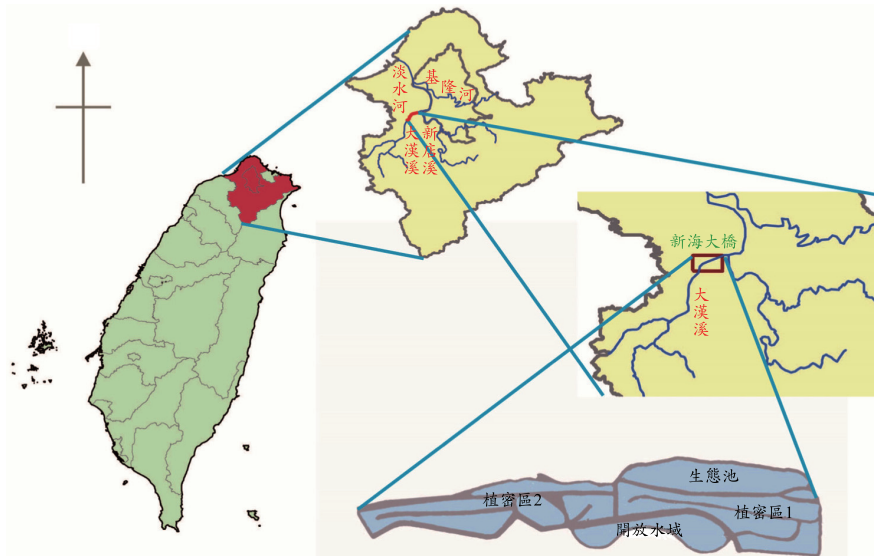


圖 2 新海二期人工溼地位置示意圖

表 2 本研究調查之物種

植物名稱	植物學名	植物名稱	植物學名
帚馬蘭	<i>Aster subulatus Michaux</i>	巴拉草	<i>Brachiaria mutica</i>
水芋	<i>Colocasia esculenta Schott</i>	荸薺	<i>Eleocharis dulcis var. tiberosa</i>
野薑花	<i>Hedychium coronarium Koenig</i>	蘿菜	<i>Ipomoea aquatica</i>
燈心草	<i>Juncus effusus var. decipiens</i>	李氏木	<i>Leersia hexandra</i>
臺灣水龍	<i>Ludwigia x taiwanensis Peng</i>	蘆葦	<i>Phragmites australis</i>
水芙蓉	<i>Pistia stratiotes Linn</i>	紅辣蓼	<i>Polygonum glabrum Willd</i>
長苞香蒲	<i>Typha angustata</i>	香蒲	<i>Typha orientalis Presl</i>
茭白	<i>Zizania latifolia</i>		

頃，水源主要為民生污水，都市逕流排水和少部分工業污水。年雨量平均為 2405.1 公釐，年日照時數平均為 1405.2 小時，月平均氣溫為攝氏 23 度，月最高氣溫平均為攝氏 34.3 度，月最低溫度平均為攝氏 19.1 度。新海二期人工溼地場址工法使用三段式表面流人工溼地，設計最大處理水量 4,000 CMD。並在各池下的底質作不透晶化處理，以確保避免滲漏而污染地下水，水力停留時間約 4.61 日(陳江河，2010)。

3.2 調查植生選擇

本研究參考「水質自然淨化—人工溼地規劃設計操作管理參考手冊」(張文亮，2007)中臺灣人工溼地常見水生植物以及「新海二期人工溼地設計栽種植栽表」(台北縣政府環保局，2005)，配合現地目視調查，選出 15 種調查水生植物，如表 2 所示。

3.3 植體碳吸存量分析

為調查植體之吸存量，於 2009 年 7 月前往新海溼地於採樣表 2 之調查物種，將溼地採集之植株樣本帶回實驗室以自來水及蒸餾水沖去植體上附著之土壤，以衛生紙擦乾後進行植體溼重測量，隨後送入烘箱中以攝氏 105 度烘乾，12 小時後取出秤重，將秤得重量扣除盤重為植體乾重。取植體乾重 1.0000 克置於坩鍋內送入高溫爐，加熱至攝氏 500 度，並維持該溫度 4 小時，取出坩鍋後，秤量其殘留灰分重量，將灰化前之植體乾重與灰分重相減，即是植體有機質重量，

如方程式(22) (Fagbenro and Oyeleye, 1999)：

$$OM = \frac{W_{dry} - W_{ash}}{W_{dry}} \times 100\% \dots\dots\dots (22)$$

其中，OM 為植體乾重中有機質之比例、 W_{dry} 為植體乾重(g)、 W_{ash} 為植體灰分重(g)。雖本研究之優勢種皆為多年生植物，但考量實驗條件限制，假設調查植生碳含量為過去一年碳吸存量，計算如方程式(23)所示：

$$C_{sto} = W_{dry} \cdot OM \cdot C_{pro} \dots\dots\dots (23)$$

其中 C_{sto} 為單株植生碳吸存量($g \text{ stem}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)、 W_{dry} 為植體乾重(g)、OM 為植體乾重中有機質百分比、 C_{pro} 為有機質中碳含量之比例。參考過去文獻認為有機質中碳含量在 0.45~0.50 之間(Bano *et al.*1997; Zweifel, 1999; Rothman and Bouchard, 2007; Kayranli *et al.*, 2010)，故本研究將 C_{pro} 設為 0.475。

3.4 溼地單位面積植生數量調查

為了解人工溼地植生分布之密度，於 2010 年 2 月 1 日進行現地分層隨機抽樣法調查，新海二期溼地可分為第一密植區、開放水面區、第二密植區和生態池。因四分區在水質淨化功能上有所不同，其植栽數量與維護管理時植生移除頻率亦有差異。故將四分區劃為 200 個樣區，每樣區大小為 400 平方公尺的正方形，再考量第一密植區、開放水面區、第二密植區和生態池面積大小以分層隨機抽樣法於四區分別抽出 5、5、6、5

個四百平方公尺正方形的樣本點。在各個樣本點的四邊隨機挑選一邊後於 6 m、8 m、10 m、12 m 處用 1 平方公尺 PVC 管方框進行水生植物數量調查(李美慧, 2006), 共調查 84 個 1 平方公尺樣本點。

3.5 植株葉面積指數(Leaf Area Index)調查

於 2011 年 2 月中旬前往新海二期人工溼地, 調查溼地優勢種的李氏禾、巴拉草、蘆葦、台灣水龍、薤菜、長苞香蒲、水芋的葉面積指數, 將上述各植物在溼地中選取三個不同密度的樣區、每樣區計算單位面積生長植株生長數量後, 於各樣區中隨機採取三株植株, 放入塑膠袋中, 帶回實驗室後, 計算各植株之葉片數目, 並以可攜式葉面積儀(LI-3000A, LICOR)量測各植株的葉片面積, 植物葉面積指數之計算, 如方程式(24)所示:

$$LAI = \frac{\sum A_{leaf}}{n} \cdot s \quad \dots\dots\dots(24)$$

其中 LAI 為葉面積指數(平方公尺/平方公尺)、 A_{leaf} 為量測之葉片面積(平方公尺/株)、n 為量測植株數(株)、s 為單位面積植株數量(株/平方公尺)。

3.6 植生影像辨識

輸入新海二期溼地 2010 年 1 月 14 日福爾摩沙衛星二號衛星(FORMOSAT-2)彩色融合影像照片解析度為 2 m × 2 m, 各光譜感測波段為: 藍光波段: 450 nm~520 nm、綠光波段: 520 nm~600 nm、紅光波段: 630 nm~690 nm、近紅外光波段 760 nm~900 nm。運用 EARDAS IMAGINE 2010 遙測影像處理系統(以下簡稱 IMAGINE), 選取新海二期溼地開放水面區之植生 103 個像素, 水體 202 個像素, 作為監督式影像辨識植生與水體分類訓練樣區, 並於開放水面區南側道路之裸地選取 266 個像素作為影像辨識裸地分類之訓練樣區, 各訓練樣區不同波段光譜反射統計資訊如表 3 所示, 選定訓練區後以 IMAGINE 影像分類功能, 選取監督式分類(Supervised Classification),

表 3 各訓練區反射值平均數向量(\bar{m}_k)

訓練區類別 波段類別	植生 (\bar{m}_1)	裸地 (\bar{m}_2)	水體 (\bar{m}_3)
紅光波段(R)	90.573	131.038	76.926
綠光波段(G)	96.515	117.571	81.619
藍光波段(B)	128.320	150.177	125.525
近紅外光波段(IR)	142.136	110.812	46.564

於作業視窗影像分類原則中選取最大相似法(Maximum Likelihood), 將新海二期溼地衛星照片進行影像分類。完成分類後以 IMAGINE 之影像選取功能, 對照新北市政府環境保護局新海二期溼地工程圖將新海二期溼地影像自衛照圖中進行影像分割, 並以 IMAGINE 之影像屬性功能(Attributes)計算新海二期溼地各分類像素個數。

四、結果與討論

4.1 人工溼地植株密度

於新海二期溼地進行分層隨機取樣, 在抽出的 84 個 1 平方公尺樣區中, 調查 15 種植物單位面積生長數量, 調查結果如表 4 所示。在調查過程中, 共出現 7 種調查水生植物, 其分布密度分別為: 李氏禾 59.5 stem m⁻²、巴拉草 33.5 stem m⁻²、蘆葦 22.1 stem m⁻²、台灣水龍 21.9 stem m⁻²、薤菜 10.7 stem m⁻²、長苞香蒲 6.6 stem m⁻²、水芋 3 stem m⁻²。將 84 個 1 平方公尺樣點中, 出現該種植物之次數記為植株於抽樣中出現次數, 於調查中有高出現頻率之植物為: 台灣水龍(14 次)、巴拉草(11 次)、長苞香蒲(10 次)、薤菜(10 次)、蘆葦(10 次), 由於新海二期人工溼地於 2006 年 11 月完工, 至 2010 年 2 月的調查時間已經過 3 年 2 個月, 完工至今經過多次颱風、洪水之衝擊, 該生態系屬於次級演替(Secondary Succession)之情形, 故可推論上述五種物種屬於溼地之優勢種。

4.2 溼地植生碳吸存量

溼地植生碳吸存量調查結果發現: 抽樣中出現的 6 種植物, 其單株植株碳吸存量为: 蘆葦

表 4 新海二期溼地植株密度調查結果

植物名稱	台灣水龍	巴拉草	長苞香蒲	薺菜	蘆葦	李氏禾	水芋
植株於抽樣中出現次數(次)	14	11	10	10	10	2	1
植株密度(平均±標準差)(stem m ⁻²)	21.9 ± 20	33.5 ± 22	6.6 ± 4.2	10.7 ± 11.9	22.1 ± 9.8	59.5 ± 78.5	3

表 5 新海二期人工溼地植株碳吸存量

植物名稱	巴拉草	台灣水龍	水芋	薺菜	長苞香蒲	蘆葦
植株碳吸存量(平均±標準差)(gC stem ⁻¹ yr ⁻¹)	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.4	7.4 ± 13.6	6.8 ± 4.5	19.1 ± 12.4	22.7 ± 14.2
單位面積碳吸存量(gC m ⁻² yr ⁻¹)	26.8	17.5	22.2	82.3	135.6	501.7
植生樣本數	8	8	8	8	7	4

表 6 新海二期溼地植生葉面積與碳吸存量調查結果

測量項目(單位)	巴拉草	台灣水龍	水芋	薺菜	長苞香蒲	蘆葦
樣本數(stem)	8	8	8	8	7	4
乾重平均數(g stem ⁻¹)	5.1	1.9	16.7	16.9	51.4	50.0
溼重含水量平均數	0.65	0.92	0.86	0.93	0.81	0.69
乾重有機質比例平均數	0.97	0.88	0.89	0.78	0.68	0.94
碳吸存量平均數(gC stem ⁻¹ yr ⁻¹)	0.8	0.8	7.4	6.8	19.1	22.7
葉面積指數	0.8	0.5	1.3	0.1	2.7	5.6
葉面積平均數(cm ² stem ⁻¹)	122.34	22.94	636.77	43.95	1062.48	791.04
葉面積測量樣本數目(株)	6	8	3	3	7	8

22.7 gC stem⁻¹ yr⁻¹、長苞香蒲 19.1 gC stem⁻¹ yr⁻¹、水芋 7.4 gC stem⁻¹ yr⁻¹、薺菜 6.8 gC stem⁻¹ yr⁻¹、巴拉草 0.8gC stem⁻¹ yr⁻¹、水龍 0.8 g stem⁻¹ yr⁻¹。將其單株植生碳吸存量乘上表 5 中植株密度之平均數(stem m⁻²)可得到單位面積植生碳吸存量(gC m⁻² yr⁻¹)，計算結果為：蘆葦 501.7 gC m⁻² yr⁻¹、長苞香蒲 135.6 gC m⁻² yr⁻¹、薺菜 82.3 gC m⁻² yr⁻¹、巴拉草 33.5 gC m⁻² yr⁻¹、水芋 22.2 gC m⁻² yr⁻¹、臺灣水龍 17.5 gC m⁻² yr⁻¹。其中水芋因在抽樣調查中僅出現一次，不若其他五種水生植物為優勢種，故參考性較低。由調查結果可發現大型水生植物其碳吸存量亦較高，可見植體生物量(Biomass)對於碳吸存量的影響高於植體有機質比例對植生碳吸存量的影響。

而未於溼地植生分布調查出現的 5 種植株，其單株植株碳吸存量为：筊白 14.41 g stem⁻¹ yr⁻¹、紅辣蓼 10.76 g stem⁻¹ yr⁻¹、香蒲 10.20 g stem⁻¹ yr⁻¹、野薑花 6.47 g stem⁻¹ yr⁻¹、水芙蓉 0.12 g stem⁻¹ yr⁻¹。因以上植物未於溼地植生分布調查

實驗中出現，研究中僅記錄於採樣點之生長數量，無法估計在溼地中單位面積植生碳吸存量。

4.3 植株葉面積與碳吸存量

過去研究中指出葉面積指數與植體生產力具有高度正相關(Gholz, 1982)，並可作為植體生長狀況之指標，本研究量測新海二期溼地優勢種植物葉面積指數如表 6。以最小平方方法進行迴歸分析比較植株溼重含水量、單株葉片面積、葉面積指數對單株植生碳吸存量的影響，結果顯示單株葉片面積、葉面積指數對單株植生碳吸存量有顯著影響，如圖 3 與圖 4 所示，植株葉片面積與葉面積指數越高時，其所對應之單株碳吸存量與單位面積碳吸存量也越高，因較大的葉片面積可以有較多的光合作用量，因此在溼地植栽設計時，高葉面積指數(Leaf Area Index)與較高葉片面積的作物如：蘆葦和長苞香蒲，可作為增加溼地植物碳吸存量的選擇。

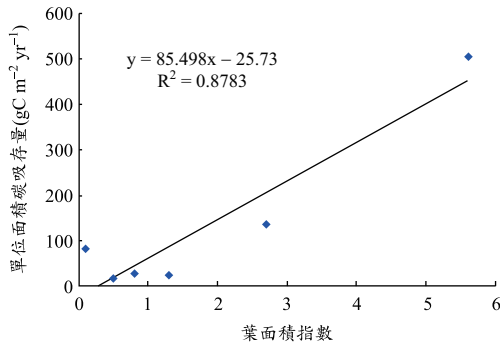


圖 3 植株葉面積指數與單位面積碳吸存量關係圖

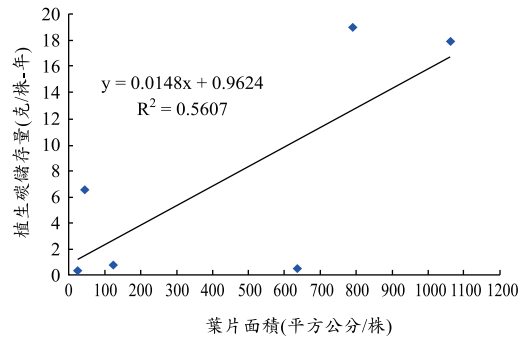


圖 4 植株葉片面積與單株碳吸存量關係圖

表 7 新海二期溼地各分區碳吸存量

分層名稱 (單位)	分層抽樣 權重 W_i	分層碳吸存量 平均數 \bar{X}_i ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	分層碳吸存量 標準差 S_i ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	各分層抽樣 點個數 n_i (個)	各分層 抽樣率 f_i
第一密植區	0.303	453.0	426.1	19	0.00186
開放水面區	0.184	30.0	25.5	2	0.00032
第二密植區	0.291	156.9	127.7	13	0.00133
生態池	0.223	102.5	184.6	9	0.0012

4.4 新海人工溼地各區植生碳吸存量估計

應用分層隨機抽樣法估算各分區植生碳吸存量，以採樣中水生植物成株碳吸存量之平均數為單株植生碳吸存量之估計值，並假設各植生為一年生植物，計算結果如表 7 所示：各分區碳吸存量分別為第一密植區 $453.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、開放水面區 $30.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、第二密植區 $156.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、生態池 $102.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。其中開放水面區因操作功能需要，新北市政府環保局定期移除水面水生植物，固其於抽樣調查時所呈現的碳吸存量較低，而第一密植區因種植大型水生植物其碳吸存量較高，生長蘆葦樣點之碳吸存量可達 $1470.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，為調查中碳吸存量最高之區域。以方程式(3)和(7)計算分層隨機抽樣下全區之碳吸存量，新海二期溼地有植生區域，植生碳吸存量的平均值為 $211.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，標準差為 $34.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

4.5 植生影像辨識

4.5.1 植生影像辨識

由圖 5 新海二期溼地 2010 年 2 月衛星照片 (FORMOSAT-2 彩色融合影像, 解析度 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) 運用 IMAGINE 遙測影像處理系統，進行影像分類，辨釋結果如下：像素辨釋為植生者共有 8,637 個像素，面積為 $35,652 \text{ m}^2$ ，佔新海二期溼地面積 62.3%；辨識為水體者共有 1,459 個像素，面積為 $5,836 \text{ m}^2$ ，佔新海二期溼地面積 10.5%；辨識為裸地者共有 3,758 個像素，面積為 $15,032 \text{ m}^2$ ，佔新海二期溼地面積 27.1%。

4.5.2 植生影像辨識正確率評估

由 IMAGINE 遙測影像處理系統內建之正確率評估功能 (accuracy assessment) 隨機於評估區域產生 60 個正確率評估點，由評估者藉由目視現場照片對評估點分類正確性進行評估，如表 8 所示，新海二期溼地影像辨識整體正確率達 86.7%，植生分類生產者正確率 (PA) 為 89.7%，使用者正確率 (UA) 為 83.9%；水體分類生產者正確率為 83.3%，使用者正確率為 90.9%；裸地分類生產者正確率為 84.2%，使用者正確率為 88.9%。

表 8 新海二期溼地影像辨識誤差矩陣

辨識分類 \ 實際類別	植生	水體	裸地	合計	使用者正確率(UA)
植生	26	2	3	31	83.9%
水體	1	10	0	11	90.9%
裸地	2	0	16	18	88.9%
合計	29	12	19	60	
生產者正確率(PA)	89.7%	83.3%	84.2%		
整體正確率(OA)	86.7%				



圖片來源：福爾摩沙2號衛星影像

圖 5 新海二期人工溼地衛星照片

4.6 新海二期人工溼地碳吸存量之估算

以方程式(3)和(7)計算分層隨機抽樣下溼地全區之碳吸存量，新海二期溼地有植生區域，植生碳吸存量的平均值為 $211.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，標準差為 $34.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。影像辨識之結果新海二期溼地植生面積為 $35,652 \text{ m}^2$ 。將新海二期溼地植生碳吸存量平均值乘上影像辨識中新海二期溼地植生面積，可得到新海二期溼地碳吸存量为 7.5 ton yr^{-1} 。此結果尚不包含植生透過根系傳送至土壤的有機碳與植生落葉所蘊含的碳。並且亦未考慮植生的溫室氣體通量，上述項目可成為後續研究之發展目標。

五、結 論

考量碳吸存量作為人工溼地水生植物植栽

設計之依據，由本研究調查之結果建議採用蘆葦、長苞香蒲、薤菜、巴拉草及台灣水龍，其碳吸存量分別為：蘆葦 $501.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、長苞香蒲 $135.6 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、薤菜 $82.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、巴拉草 $33.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、臺灣水龍 $17.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，水生植物碳吸存量與植株葉面積指數和葉片面積呈正相關，溼地植栽設計時可使用高葉面積指數之植物以增加溼地植株碳吸存量。以分層隨機抽樣法推估，整個新海二期溼地水生植物碳吸存量为 $211.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，標準差為 $34.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。而以植生影像辨識的結果顯示新海二期溼地面積植生面積為 $35,652 \text{ m}^2$ ，佔新海二期溼地面積 62.3% 結合衛星影像辨識與現地分層隨機抽樣調查結果可得到新海二期溼地水生植物碳吸存量为 7.5 ton yr^{-1} 。

謝 誌

感謝瑞昶科技股份有限公司對於本研究進行的協助，特別感謝陳江河先生與郭正翔先生給予的協助與建議，在此謹表謝意。

參考文獻

1. Brix, H., B. K. Sorrell, B. Lorenzen, "Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?," *Aquatic Botany*, **69**, 313-324, 2001.
2. Bano, N., M. A. Moran, R.E. Hodson, "Bacterial utilization of dissolved humic substances from a freshwater swamp," *Aquatic Microbial Ecology*, **12**:233-238, 1997.

3. Cochran, W. G., *Sampling Techniques*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons. 1977.
4. Fagbenro, J. A. and B.Oyeleye, "Relationships between four methods of organic carbon determination in leaves of nitrogen-fixing trees and lignite-based organic fertilizers," *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **30**(17): 2345-2362, 1999.
5. Gholz, H. L., "Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest," *Ecology*. **63**(2): 469-481, 1982.
6. Hudon, C., "Shift in wetland plant composition and biomass following low-level episodes in the St. Lawrence River: looking into the future," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **61**(4): 603-617, 2004.
7. Richards, J. A. and X. Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
8. Richert, M., S. Saarnio, S. Juutinen, J. Silvola, J. Augustin, W. Merbach, "Distribution of assimilated carbon in the system Phragmites australis-waterlogged peat soil after carbon-14 pulse labelling," *Biology and Fertility of Soils*. **32**(1): 1-7,2000.
9. Rothman, E. and V. Bouchard, "Regulation of carbon processes by macrophyte species in a Great Lakes coastal wetland," *Wetlands*. **27**(4): 1134-1143, 2007.
10. Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., and Hedmark, Å., "Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review," *Wetlands*. **30**:111-124, 2010.
11. Kadlec R.H., and R. L. Knight, *Treatment wetlands*. Boca Raton, FL: Lewis. 1996.
12. Machate T, H. Noll, H.Behrens and A. Kettrup, "Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland," *Water Research*. **31**:554-560, 1997.
13. Mander, Ü, K. Lõhmus, S. Teiter, T. Muring, K.Nurk and J. Augustin, "Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands," *Science of the Total Environment* **404**:343-353, 2008.
14. Miller. R. L. and R. Fujii, "Plant community, primary productivity, and environmental conditions following wetland re-establishment in the Sacramento-San Joaquin Delta, California," *Wetlands Ecology and Management*, **18**:1-16, 2010.
15. Lillesand T. M. and Kiefer R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation. 4rd eddition*, New York: John Wiley and Sons, 2000
16. Whalen S.C., "Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere," *Environmental Engineering Science*, **22**:73-94, 2005.
17. Zweifel, U. L., "Factors controlling accumulation of labile dissolved organic carbon in the Gulf of Riga. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **48**:357-370,1999.
18. 呂秀惠, 「頭前溪流域植生覆蓋變遷之研究」。碩士論文, 交通大學土木工程研究所, 2001。
19. 台北縣政府環境保護局, 『台北縣淡水河系主要支流排水水質淨化計畫-新海橋自然淨化系統工程建置計畫(第二期)及新海橋人工溼地取水擴增計畫』。台北: 台北縣政府環保局, 2005。
20. 李琇玉, 「分層隨機抽樣下母體平均數推論之研究」。博士論文, 交通大學經營管理研究所, 2006。
21. 李美慧, 『生態監測概論』。台北: 明文。
22. 姚銘輝、陳守泓、陳述: 「台灣水稻田溫室氣體排放之估算研究」, 臺灣農業研究, 55卷, 6期, 280 -293, 2006。
23. 陳江河, 「臺北縣現地處理水質淨化系統經營管理與功能效益分析計畫後續擴充」。台北縣政府環保局補助研究計畫。瑞昶科技股

份有限公司，2010。

24. 張文亮。「建立河川水質淨化工法指導原則暨評鑑計畫」。行政院環保署補助研究計畫。EPA-96-U1GI-0II-101。臺灣大學生態工程研究中心，2007。

收稿日期：民國 102 年 4 月 15 日

修正日期：民國 103 年 3 月 10 日

接受日期：民國 103 年 3 月 21 日