

# 人工溼地水生植物碳儲存量之評估

## The estimation of carbon storage of aquatic plants in constructed wetlands

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

研究生

黃大肯

Ta-Ken Huang

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，透過影像自動化判釋與現地分層隨機抽樣估算水生植物分布面積與密度，並以燃燒法求得八種溼地常見水生植物碳儲存量。

研究結果發現，新海二期溼地八種常見水生植物碳儲存量為蘆葦(*Phragmites australis*) 413.95 g/m<sup>2</sup>、長苞香蒲(*Typha angustata*) 105.13 g/m<sup>2</sup>、茭白(*Zizania latifolia*) 100.87 g/m<sup>2</sup>、蘿菜(*Ipomoea aquatica*) 66.14 g/m<sup>2</sup>、李氏禾(*Leersia hexandra*) 26.32 g/m<sup>2</sup>、巴拉草(*Brachiaria mutica*) 22.00 g/m<sup>2</sup>、水芋(*Colocasia esculenta*) 18.58 g/m<sup>2</sup>、臺灣水龍(*Ludwigia x taiwanensis* Peng) 13.99 g/m<sup>2</sup>。新海二期溼地植生碳儲存量 539.78 為 g/m<sup>2</sup>。透過影像自動化判釋得到新海二期人工溼地植生面積為 35,652 g/m<sup>2</sup>，推估新海二期溼地水生植物碳儲存量為 19.24 噸。

關鍵詞：碳儲存量，水生植物，人工溼地，影像自動化判釋，分層抽樣法

### Abstract

The objective of this research is to estimate carbon storage of eight common aquatic plants in Sinhai second phase constructed wetland in Taipei County. This research used image based event identification and on site stratified random sampling to calculate area and density of eight common aquatic plants in constructed wetland. Meanwhile, using high temperature combustion method to estimate carbon storage of eight common aquatic plants

The result of this experiment shows that carbon storage of eight common aquatic plants in Sinhai second phase constructed wetland is : *Phragmites communis* 413.95 g/m<sup>2</sup> , *Typha angustata* 105.13 g/m<sup>2</sup> , *Zizania latifolia* 100.87 g/m<sup>2</sup> , *Ipomoea reptans* 66.14 g/m<sup>2</sup> , *Leersia hexandra* 26.32 g/m<sup>2</sup> , *Brachiaria mutica* 22.00 g/m<sup>2</sup> , *Colocasia esculenta* 18.58 g/m<sup>2</sup> , *Ludwigia x taiwanensis* Peng 13.99 g/m<sup>2</sup> . In total, the carbon storage of eight common aquatic plants in Sinhai second phase constructed wetland is 539.78 g/m<sup>2</sup> . By means of image based event identification, the area of aquatic plants in Sinhai second phase constructed wetland is 35,652 m<sup>2</sup> , and the carbon storage of aquatic plants in Sinhai second phase

constructed wetland is 19.24 ton.

Key words: carbon storage , aquatic plants , constructed wetland , image based event identification , stratified sampling

## 一、緒論

「人工溼地」為台灣生態工程建設之重要發展項目，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) 人工溼地在建造與營運過程如何減少溫室氣體排放，甚至能成為碳匯 (carbon sink)，亦是國家未來建設人工溼地時所必須思考的問題，本研究以燃燒法 (LOI, loss of ignition) 求得人工溼地常見水生植物碳儲存量，並透過影像自動化判釋估算新海二期人工溼地植生碳儲存量，期能成為日後工程建造植栽設計之參考。

Kayranli et al.(2010) 回顧 ISI 資料庫 (ISI,Web of Knowledge, version 4.6 (www.isiknowledge.com). 中關於溼地碳通量(carbon flux)之文獻，提出溼地之維護管理，環境條件 (如：氣候與位置...等) 會影響溼地成為排放或吸收碳，甲烷，與二氧化氮等溫室氣體之場址，若溼地之條件可成為碳匯，其單位面積碳累聚量，如表 1.1 所示。

表 1.1 不同型態溼地，單位面積碳累聚量 (Kayranli,2010)

Table 2 Example of carbon accumulation in sediments of different wetland types

Type of wetland	Location	Carbon accumulation (kg C m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Reference
Agricultural field and riparian ecosystem	USA (Maryland)	0.16-0.22	McCarty and Ritchie (2002)
Coastal wetlands	USA (California)	0.033±0.0029	Brevik and Homburg (2004)
Prairie wetland	Northcentral USA	0.305	Euliss et al. (2006)
Boreal forests	Canada (Ontario)	0.003-0.01	Trumbore and Harden (1997)
Horizontal subsurface flow constructed wetlands	Estonia	1.5-2.2	Mander et al. (2008)
Boreal peatlands	Finland	0.015-0.026	Turunen et al. (2002)
Temperate peatlands	Finland	0.01-0.046	Turunen et al. (2002)
Peatlands	North America	0.029	Gorham (1991)

其中 Mander et al.(2008) 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之通量，該溼地年碳捕捉 (carbon sequestration) 為 484-649 kg C year<sup>-1</sup>，該溼地單位面積碳捕捉為 1.5-2.2kg C m<sup>-2</sup>

國內的研究中，姚銘輝等人 (2006) 以鮑溫比/能量平衡系統量測水稻田耳氧化碳平衡，發現水稻田一期作二氧化碳吸存量為 22.0 g m<sup>2</sup> /day，二期作為 17.9 g m<sup>2</sup> /day，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。林瑩峰等人 (2008) 研究嘉南藥理科技大學校園人工溼地溫室於不同季節和水質條件下溫室氣體排放，而臺灣本土尚無溼地不同種植物之碳儲存量之研究。

## 二、理論分析

### 2.1 分層抽樣法

分層隨機抽樣 (stratified random sampling) 之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，使研究者在抽樣設計架構上具便利性，且推論結果能更精確。

在一分層抽樣的設計中，若將母體分為  $N$  層，各分層中的次樣本亦為簡單隨機樣本，各分層所佔母體的比例為  $p_i$ ，並由獨立且具有相同分配 (independent and identical distribution) 的隨機變數組成。各分層的次母體平均數為  $\mu_i$ 。在各次樣本的取樣率皆相等的情況下，此時該抽樣的母體平均數  $\mu = \sum_{i=1}^N p_i \mu_i$  在假設各分層之層內變異數皆相等

( $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma^2$ ) 的條件下，分層的樣本平均數  $\bar{X} = \sum_{i=1}^N p_i X_i$ ， $\bar{X}$  之平均數為  $\mu =$

$\sum_{i=1}^N p_i \mu_i$ ， $\bar{X}$  之變異數為  $\sum_{i=1}^N \frac{p_i \sigma^2}{n_i}$ ，即  $\bar{X} \sim N(\mu = \sum_{i=1}^N p_i \mu_i, \sum_{i=1}^N \frac{p_i \sigma^2}{n_i})$  (李，2006)

### 2.2 以最大相似法 (Maximum Likelihood) 進行影像自動化判釋

最大相似法 (Maximum Likelihood) 藉由對未知的分類項目統計其平均值及標準差，其基本假設為像素 (pixel) 呈常態分佈 (Normal Distribution)，藉由估計機率分佈曲線，再對於像素判釋其在各類別中出現的機率，將分佈機率最大者作為自動化判釋的依據。公式為：

$$\text{Cat}_i = \max (\text{prob}_j(x_i))$$

最大相似法分類遵循高斯密度分配，並且屬於 Bayesian 分類法所衍生的一種，其運算邏輯為：

$$d_j(x) = \ln p(\omega_j) - \frac{1}{2} \ln |C_j| - \frac{1}{2} [(x - m_j)^T C_j^{-1} (x - m_j)] \quad (1)$$

$$d_j(x) = \ln p(\omega_j) + x^T C^{-1} m_j - \frac{1}{2} m_j^T C^{-1} m_j \quad (2)$$

一特定向量  $x$  來自於  $\omega_i$  類的機率記為  $p(\omega_i/x)$ ，

此為像素  $x$  來自  $\omega_i$  類的機率密度函數， $p(\omega_i)$  是  $\omega_i$  類出現的機率值。

函數  $\text{Prob}_j$ ：為  $\text{Cat}_j$  之常態分布機率函數；最大或然率之  $j$  即為  $\text{Cat}_i$  之值。

(Richards 1999, Lillesand, 2000)

### 三、材料與方法

#### 3.1 新海二期溼地簡介

研究之場址位於台北縣新海大橋旁，經緯度位於北緯 25°01'32"~44"N，東經 121°27'17"~24"，人工溼地於民國 95 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 公頃，水源主要為民生污水，都市逕流排水和少部分工業污水。

#### 3.2 研究流程

本研究之實驗與計算流程之簡示如圖 3-1 所示

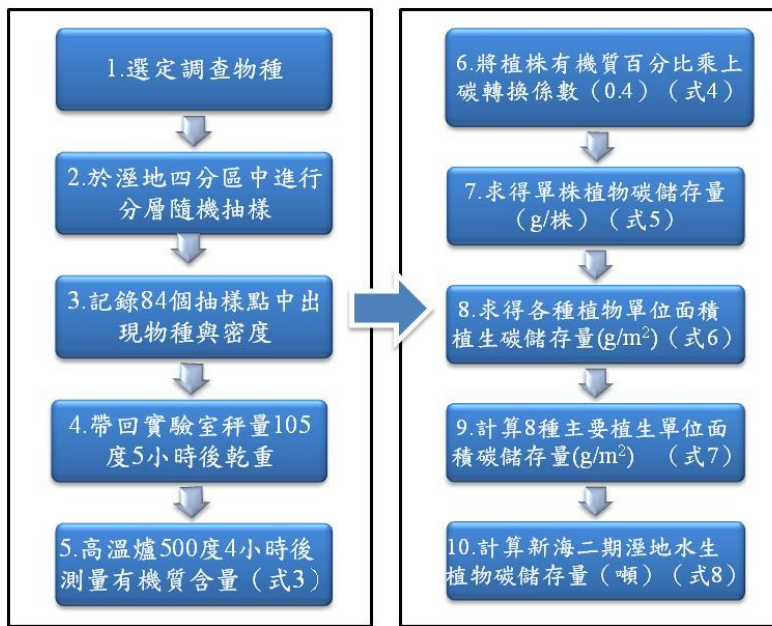


圖 3-1 人工溼地水生植物碳儲存量估算簡易流程

#### 3.3 調查植生選擇

本研究之實驗與流程之簡示「水質自然淨化—人工濕地規劃設計操作管理參考手冊」中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」，配合現地目視調查，選出 15 種調查水生植物，分別為：

表 3-1 本研究抽樣調查選擇之物種

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>	蕹菜	<i>Ipomoea aquatica</i>
燈心草	<i>Juncus effusus var. decipiens</i>	李氏禾	<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>		

### 3.3 溼地植生密度調查

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 20m\*20m，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 20m\*20m 樣本點。在各個樣本點的四邊隨機挑選一邊後於 6m，8m，10m，12m 處用 1m\*1m 方框進行主要水生植物數量調查(Roberts et al. 1999)，共調查 84 個 1m\*1m 樣本點。

### 3.4 水生植物碳儲存量分析方法

將溼地採集之植物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，至少 5 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。(陳,2003)

其中：

$$\text{有機質 (LOI) \%} = \frac{\text{植體乾重} - \text{植體灰分重}}{\text{植體乾重}} \times 100\% \quad (3)$$

植株有機質分子式以  $C_6H_{12}O_6$  表示 (本研究之假設)，植株中碳重以  $C_6H_{12}O_6$  中  $C_6$  之分子量表示，可求得有機質中碳重比例(碳轉換係數)

$$\text{碳轉換係數} = \frac{\text{植株中碳重}}{\text{植株中有機質重}} = \frac{\text{碳之分子量}}{\text{有機質分子量}} = 0.4 \quad (4)$$

$$\text{植株碳儲存量 (g/株)} = \text{植株乾重(g)} \times \text{植株有機質百分比 (\%)} \times \text{碳轉換係數} \quad (5)$$

$$\text{單種植物碳儲存量 (g/m}^2\text{)} = \text{單株植生碳儲存量 (g/株)} \times \text{植生單位面積密度 (株/m}^2\text{)} \quad (6)$$

$$\text{溼地植生單位面積碳儲量 (g/m}^2\text{)} = \sum \frac{\text{抽樣中單種植株數量 (株)} \times \text{單株植株碳儲存量 (g/株)}}{\text{抽樣點中有植株之面積 (m}^2\text{)}} \quad (7)$$

### 3.5 土地利用影像自動化判釋

本研究比較三種影像分類法 (最小距離法、平行桿法和最大相似法) 之判釋正確性後，使用最大相似法(Maximum Likelihood)，藉由自動化判釋的結果推測新海橋二期溼地土地利用情形。

新海二期人工濕地之土地利用劃分為植生與非植生二類。在紅外光模式下，輸入新海二期溼地2010年2月衛星照片(SPOT衛星影像，解析度2m\*2m)運用IMAGINE 遙測影



像處理系統，每個土地利用分類選取10個判釋點做為最大相似法的判別依據。自動化判釋後輸出影像檔，於地理資訊系統軟體Arc Gis 9.2 數化測定範圍，選取面積為57,392 m<sup>2</sup>。再於遙測影像處理系統針對影像自動化判釋的結果進行其「像元個數」的計算。

$$\text{新海二期溼地主要水生植物碳儲存量 (噸)} = \frac{\text{自動化判釋植生面積(m}^2\text{)} \times \text{單位面積植生碳儲存量 (g/m}^2\text{)}}{10^6}$$

## 四、結果與討論

### 4.1 溼地植生密度

於新海二期溼地進行分層隨機取樣，在選出的 84 個 1 平方公尺樣區中，調查 15 種植物分布密度，植物分布密度調查結果如表 4-1。在抽樣過程中，共出現 8 種調查水生植物，其分布密度分別為：李氏禾 59.5 株/m<sup>2</sup>、巴拉草 33.5 株/m<sup>2</sup>、蘆葦 22.1 株/m<sup>2</sup>、台灣水龍 21.9 株/m<sup>2</sup>、薤菜 10.7 株/m<sup>2</sup>、筊白 7 株/m<sup>2</sup>、長苞香蒲 6.6 株/m<sup>2</sup>、水芋 3 株/m<sup>2</sup>。將 84 個 1m\*1m 樣本點中，樣本點出現該種植物之次數記為植株於抽樣中出現次數。

表 4-1 新海二期溼地植生密度調查結果

植物名稱	台灣水龍	巴拉草	長苞香蒲	薤菜	蘆葦	李氏禾	水芋	筊白
植株於抽樣中出現次數(次)	14	11	10	10	10	2	1	1
植株密度平均數 (株/m <sup>2</sup> )	21.9	33.5	6.6	10.7	22.1	59.5	3	7
植株密度標準差 (株/m <sup>2</sup> )	20	22	4.2	11.9	9.8	78.5	----	----

### 4.2 溼地植生碳儲存量

將植株之乾重乘上植株有機質百分比(%)再乘上碳轉換係數(0.4)可得到單株植株之碳儲量，如表 4-2：

表 4-2 新海二期人工溼地植生單位面積碳儲存量

名稱	李氏禾	巴拉草	台灣水龍	水芋	薤菜	長苞香蒲	筊白筍	蘆葦
植株樣本數	4	8	8	8	8	7	4	4
單株植生碳儲存量平均數(g/株)	1.62	2.41	2.34	22.71	19.99	54.29	52.84	68.68
單株植生碳儲存量標準差(g/株)	0.56	0.98	1.35	42.09	13.12	32.62	25.43	44.56
單位面積植生密度 (株/m <sup>2</sup> )	59.5	33.5	21.9	3	12.1	7.1	7	22.1
植生單位面積碳儲存量 (g/m <sup>2</sup> )	26.32	22.00	13.99	18.58	66.14	105.13	100.87	413.95

調查結果發現，單株植株碳儲存量為：蘆葦 68.68 g/株、長苞香蒲 54.29 g/株、筊白筍 52.84 g/株、水芋 22.71 g/株、空心菜 19.99 g/株、巴拉草 2.41 g/株、水龍 2.34 g/株、李氏禾 1.62 g/株。調查結果亦發現：相較於植株乾重之差異，不同種植物間有機質百分比差異較小，使得乾重較重之植物其單株碳儲量也愈高。

將其單株植生碳儲存量乘上植生單位面積密度(株/m<sup>2</sup>)可得到單位面積植生碳儲存量 (g/m<sup>2</sup>)，計算結果為：蘆葦 413.95 g/m<sup>2</sup>、長苞香蒲 105.13 g/m<sup>2</sup>、筊白 100.87 g/m<sup>2</sup>、蕹菜 66.14 g/m<sup>2</sup>、李氏禾 26.32 g/m<sup>2</sup>、巴拉草 22.00 g/m<sup>2</sup>、水芋 18.58 g/m<sup>2</sup>、臺灣水龍 13.99 g/m<sup>2</sup>。將 43 個 1m\*1m 有植生的抽樣點中，各種植物出現總株數乘以其單株碳儲存量後除以抽樣點中有植株之面積 (43 m<sup>2</sup>)，可求得新海二期溼地主要水生植物單位面積碳儲存量為 539.78 g/m<sup>2</sup>。

#### 4.3 溼地土地利用影像自動化判識結果：

由新海二期溼地 2010 年 2 月衛星照片(SPOT 衛星影像，解析度 2m\*2m)運用 IMAGINE 遙測影像處理系統，進行土地利用自動化判識，再由 Arc GIS 軟體計算植生面積、路面面積與水體面積，判釋結果如圖 4-1，4-2，表 4-3 所示，選取溼地範圍共有 14,348 個像元，每像元大小為 2m\*2m，選取面積共 57,392 m<sup>2</sup>。IMAGE 軟體判釋為植生者共有 8913 個像元，可計算新海二期植生面積為 35,652m<sup>2</sup>，佔溼地面積 62.1%；判釋為非植生者共有 5,435 個像元，面積為 21,740 m<sup>2</sup>，佔溼地面積 37.9%。新海二期人工溼地水生植物碳儲量估算方法為土地利用自動化判釋後植生面積 (m<sup>2</sup>) 乘上溼地單位面積植生碳儲存量 (g/m<sup>2</sup>) = 19.24 公噸。

表 4-3 新海二期溼地影像自動化判釋結果

土地分類	像元個數 (2m*2m)	面積 (m <sup>2</sup> )	佔溼地面積之 百分比 (%)
植生	8,913	35,652	62.1
非植生	5,435	21,740	37.9
總計	14,348	57,392	100

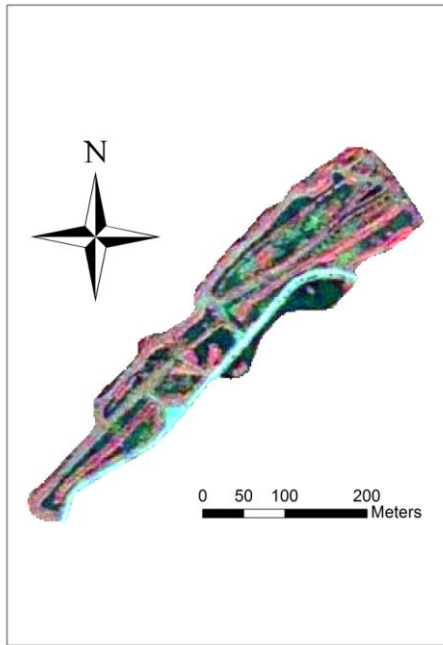


圖 4-1 新海二期人工溼地衛星圖

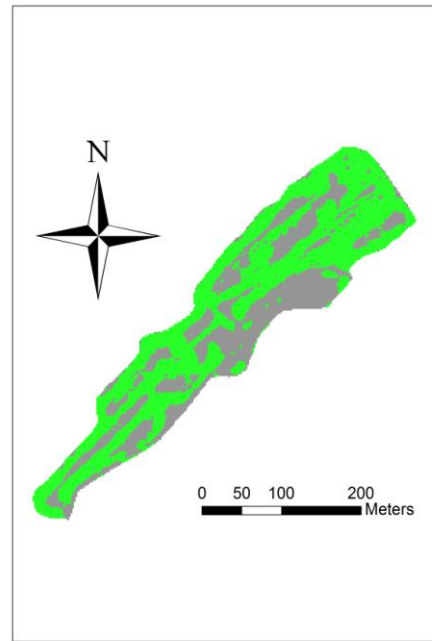


圖 4-2 新海二期人工溼地影像自動化判釋之結果（灰色部分為植生）

## 五、結論與建議

1. 人工溼地植生碳儲存量之估算，以衛星影像土地利用化自動化判釋，佐以現地抽樣調查方法，為一可行之研究方法。本研究以新海二期人工溼地估算得到水生植物單位面積碳儲存量為  $539.78 \text{ g/m}^2$ ，新海二期人工溼地主要水生植物碳儲存量共計 19.24 噸
2. 研究結果發現新海二期溼地八種常見水生植物碳儲存量為蘆葦  $413.95 \text{ g/m}^2$ 、長苞香蒲  $105.13 \text{ g/m}^2$ 、茭白  $100.87 \text{ g/m}^2$ 、蕹菜  $66.14 \text{ g/m}^2$ 、李氏禾  $26.32 \text{ g/m}^2$ 、巴拉草  $22.00 \text{ g/m}^2$ 、水芋  $18.58 \text{ g/m}^2$ 、臺灣水龍  $13.99 \text{ g/m}^2$ ，可供日後溼地植栽設計之參考，惟其種植密度仍須考慮溼地之水土條件，避免植栽因厭氧而產生甲烷等溫室氣體。
3. 單株植生碳儲量估計除燃燒法（LOI）以外，亦可使用 Walkley-Black 溼式氧化法或元素分析儀（EA, Element analyzer）分析法。
4. 現地分層抽樣之取樣率，在實驗條件允許下，可增加樣本點，以減少抽樣誤差

## 六、參考文獻

Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., and Hedmark, Å., "Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: a Critical Review," *Wetlands*, Vol.30, pp.111–124, 2010.

C. G. F. De Kovel, A. J. E. M. Van Mierlo, Y. J. O. Wilms, F. Berendse " Carbon and Nitrogen in Soil and Vegetation at Sites Differing in Successional Age. Source: *Plant Ecology*, Vol. 149, No. 1, pp.



43-50, 2000.

Fagbenro, John A. and Oyeleye, B. "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*, Vol.30: 17, pp. 2345 -2362, 1999.

Lillesand T. M. and Kiefer R. W., *Remote sensing and image interpretation*. 4rd eddition, John Wiley & Sons, 2000, New York.

Machate T, Noll BHH, Kettrup A, "Degradation of Phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland." *Water Research* Vol.31, pp.554–560, 1997.

Mander Ü, Lõhmus K, Teiter S, Mauring T, Nurk K, Augustin J, "Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands." *Science of the Total Environment* Vol.404, pp.343–353, 2008.

Nelson, D.W. and L.E. Sommers." Total carbon, organic carbon and organic matter." .In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 199-224, 1982.

Richardson, J. L., Bigler, R. J., "Comparison of Walkley-Black and dry combustion organic carbon determinations in calcareous water-logged North Dakota soils. " *Commun. Soil Sei. Plant Anal.* Vol. 13: 175-183. 1982

Richards, J. A. and X. Jia, "Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag", Berlin, 1999,

Roberts-Pichette, R, Gillespi, L "Terrestrial vegetation biodiversity monitoring protocols." *Ecological Monitoring and Assessment Network Occasional Paper Series, Repor No.9* Ecological Monitoring Coordinating Office, Burlington, Ontario. 1999.

Whalen SC, "Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere." *Environmental Engineering Science* Vol. 22, pp.73–94, 2005.

林瑩峰, 荊樹人, 劉瑞美, 賴建志, 張翊峰, 「台灣南部人工溼地溫室氣體釋放之研究」, 第一屆亞洲濕地大會, 2008。

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。

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4期,280-293頁,2006。

陳仁炫,蔡蕙芳,林毓雯,「三種分析方法在測定肥料中有機質含量之適宜性評估」,臺灣農業化學與食品科學,42卷2期,2004。

張文亮,童心欣,「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-U1G1-02-101,台灣大學生態工程研究中心,2007。