

人工濕地的氧化亞氮排放

林瑩峰、荊樹人

嘉南藥理大學環境工程與科學系教授

賴建志、黃盈慈、李博霖

嘉南藥理大學環境工程與科學系碩士

摘 要

近年來，大氣層溫室氣體濃度逐年增加進而引發全球暖化的議題受到國際間的重視。人工濕地為一種低成本、省能源、容易操作、且兼具生態保育及景觀價值的廢水處理程序，在國內及國際間的應用逐漸普遍。然而濕地在水質淨化過程中，不可避免會產生甲烷(CH₄)及氧化亞氮(N₂O)溫室氣體，尤其 N₂O 的暖化潛勢為二氧化碳(CO₂)的 298 倍，因此有必要釐清人工濕地排放 N₂O 的特性及環境影響因子，並了解此排放途徑對濕地總氮物質去除的貢獻。本文乃針對嘉南藥理大學人工濕地在 2007 年 12 月至 2010 年 5 月期間，經長期監測 N₂O 通量結果進行討論，並與國外人工濕地的文獻報導資料進行比較。期望能提供國家溫室氣體排放量盤查工作上有用的資料。

關鍵字：人工濕地、氧化亞氮、溫室氣體、全球暖化、氮循環

一、前言

濕地中含有豐富的水分、土壤、動植物、微生物及物理化學環境，因此構成特殊的濕地生物地質化學作用，透過物理、化學及生物程序，含碳、氮、硫、磷、鐵的相關化合物在濕地中滯留、轉換及循環，進而產生不同種類的氣體(如 CO₂、N₂、N₂O、CH₄、H₂S 等)排放到大氣中。濕地甚至可視為平衡大氣層氣體含量的重要一環。

由於濕地具有高的生產量、高的水位、厭氧的底部環境及低的有機物分解速率，導致濕地能從大氣中吸收主要的溫室氣體—二氧化碳(CO₂)，轉換為有機碳



捕集於濕地土壤或底泥中。因長期的碳吸存，使得濕地是所有的陸域生態系統中平均碳密度最高者，為陸域生態系統的重要碳庫(carbon reservoir)。不過，濕地因為長期淹水形成厭氧的底泥環境，不可避免地成為另一種主要溫室氣體—甲烷(CH₄)的產生源⁽¹⁾。

此外，濕地環境也適合進行完整的氮循環作用。部分水中藻類具有固氮作用將大氣中的 N₂ 轉化為 NH₄⁺，再合成為細胞的有機氮，水生植物及微生物能直接攝取水溶性的氮營養物。濕地中也富含有氮轉換細菌，包括：氮水解菌將有機物礦化分解為 NH₄⁺、硝化菌將 NH₄⁺ 氧化為 NO₂⁻ 及 NO₃⁻、脫硝菌則在缺氧環境中將 NO₃⁻ 還原為 N₂ 氣體，返回大氣。濕地為高生產量的生態系統，所有生物體死亡後的殘體則貢獻出有機氮。濕地中的 N₂O 則是脫硝菌進行脫硝作用過程中的中間產物，反應簡示如下：



從濕地外部經由雨水逕流及廢水流入帶入的含氮物質，則會刺激上述氮轉化作用地進行(圖 1)。天然濕地中的碳源與氮磷營養物質來源較為缺乏，因此產生溫室效應氣體的排放速度相對也較為緩慢。反觀人工濕地系統，其主要功能為廢水處理及水質淨化，經常接受高有機物與高氮磷營養物質的廢污水，將使得微生物對物質的轉換程序及溫室氣體的排放產生實質的變化。

在國家溫室氣體排放量盤查工作中，濕地歸類於農業森林土地利用部門，而人工濕地由於進流廢水也屬於廢棄物部門⁽²⁾。儘管最近 10 年間國外有不少關於人工濕地排放溫室氣體的文獻報導^(3~10)，但國內這方面的參考資料卻相當闕如。國家溫室氣體盤查更精準的估算乃建議使用國家特殊數據(country-specific data)的第二或第三層級方法⁽²⁾，因此實有必要針對國內人工濕地 CH₄ 及 N₂O 排放參數及條件進行長期及嚴謹的調查。

為此，筆者在國科會研究計畫的經費支持下自 2007 年 12 月至 2010 年 5 月期間，針對嘉南藥理大學人工濕地的水質及氣體通量每月進行一次監測，以了解人工濕地溫室氣體的排放量及影響因子，期望能提供國家溫室氣體排放量盤查工作上有用的資料。

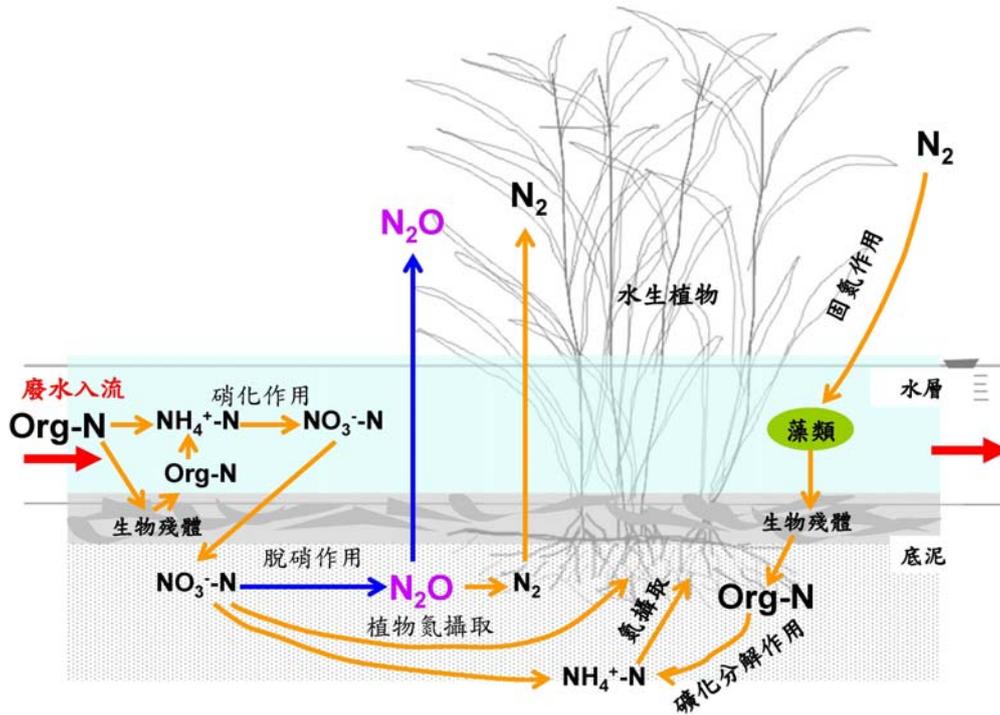


圖 1 濕地中的氮循環可能途徑

三、研究方法

(一) 濕地場址敘述

本研究場址位於嘉南藥理大學校園人工濕地，於 2007 年經內政部營建署「國家重要濕地評選小組」評選為編號 58 號之地方級國家重要濕地。該濕地系統自完工後於 2005 年 11 月開始操作，進流水源為校園機械式污水處理廠所排放的二級放流水。濕地場址佔地約 1,1000 m²，由四個單元所組成：沉降槽、表面下流動式(subsurface flow, SSF)濕地(1,450 m²)、表面流動式(free water surface, FWS)濕地(2,200 m²)、及生態池(圖 2)。二級放流水先由水井收集後，以抽水機送入沉降槽，隨後以重力流方式流經後續單元。

(二) 採樣點的選擇

本研究主要調查 SSF 濕地及 FWS 濕地兩個單元。在各單元沿著水流方向距離進流口不同距離設置多個採樣點，SSF 單元設置 4 個採樣點、FWS 單元設置 3 個採樣點，共 7 個採樣點(圖 2)，以了解溫室氣體排放的空間差異。為了減少採樣時攪動底泥或干擾到植被，在 FWS 單元各採樣點設置木板便橋。採樣時間自 2007 年 12 月至 2010 年 5 月期間，除了 2008 年 7 月因雨季及 2009 年 8、9 月因莫拉克颱風濕地受衝擊濕地無法正常操作外，每月監測一次水質與溫室氣體排



放。

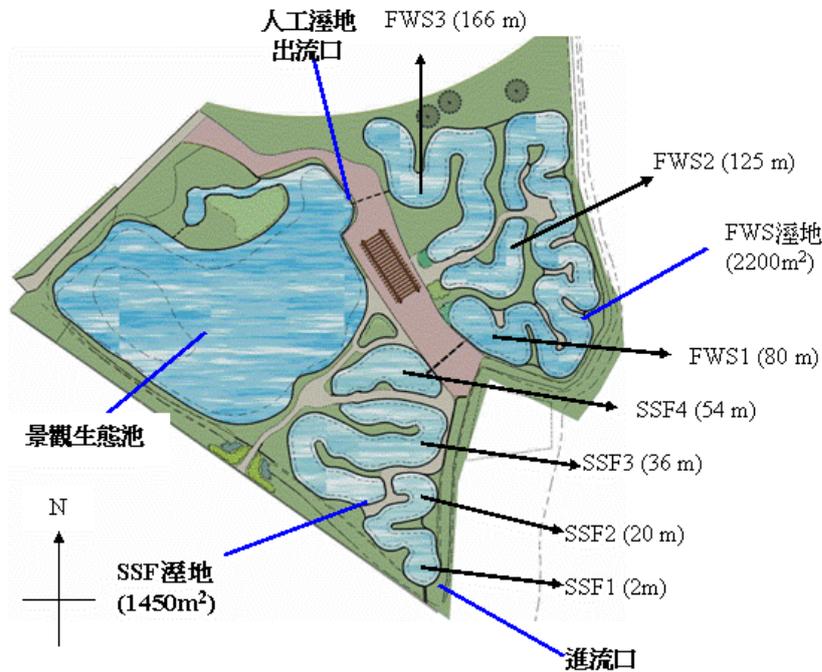


圖 2 嘉南藥理大學人工濕地實場與採樣點

(三) 氣體通量量測

本研究以靜置式採氣罩技術(static chamber)量測濕地溫室氣體通量。以壓克力製採樣罩(長 24cm、寬 24cm、高 50cm)配合不銹鋼底座(長 25cm、寬 25cm 和高 20cm、40 cm or 50 cm)組合使用。採氣進行時先將採樣罩置於不銹鋼底座之上，再以水封住凹朝接縫處。確定水平後，啟動罩中風扇，靜待 10 分鐘讓罩內外空氣平衡，再以矽膠塞塞住壓克力罩開口後開始計時。分別自第 0、10、20、30 分鐘以拋棄式注射針筒抽取罩內氣體樣品 100 毫升，注入事先抽成真空之採氣袋內，再帶回研究室以氣相色層分析儀(組裝電子捕捉偵測器，ECD)(Perkin Elmer Clarus 500)，分析氣體樣品中 N₂O 的濃度(ppm)，同時記錄氣罩溫度。最後，以下列公式計算 N₂O 通量：

$$F = H \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{M}{V} \times \left(\frac{273}{273 + T} \right) \quad (1)$$

其中，

F = N₂O 交換通量 (mg/m²/hr)

H = 氣罩的高度 (m)

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \text{N}_2\text{O 的濃度隨時間的變化斜率 (ppm/hr)}$$

$M = \text{N}_2\text{O}$ 分子量, 44 g/mol

$V =$ 標準狀態下(0°C, 1atm)氣體的莫耳體積, 22.4 L/mol

$T =$ 採氣時罩內氣溫 (°C)

在每月中旬進行採樣一次, 並挑選採樣日前 3-5 天無下雨的情況下進行採樣, 以減少採樣的誤差。每個採樣點斷面均設置 2 個採氣罩進行二重複試驗, 並固定在採樣日的上午 10~12 點之間進行採樣, 氣體樣品在 12 小時內完成分析工作。

(四) 採樣點環境因子及水質採樣分析

每次氣體通量量測時, 同時測定採樣點的氣溫、水溫、底泥溫度及水質, 水質檢測參數包括: DO、ORP、比導電度、pH、BOD、COD、TKN、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 等。

四、結果與討論

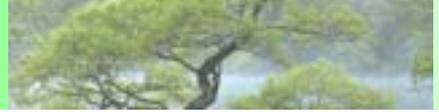
(一) 濕地的總氮削減

研究期間人工濕地的進流量介於 220~390 m^3/d ($316.4 \pm 34.5 \text{ m}^3/\text{d}$), 相當於 SSF-FWS 濕地的水力負荷為 0.06~0.107 m/d ($0.087 \pm 0.009 \text{ m}/\text{d}$), 水力停留時間為 2.51~4.47d ($3.14 \pm 0.35 \text{ d}$)。濕地進流口的總氮(TN)濃度介於 2.95~52.66 mg/L ($18.79 \pm 11.50 \text{ mg}/\text{L}$), 流經 SSF 濕地降解後, SSF 出流端的 TN 濃度下降到 2.27~26.69 mg/L ($13.12 \pm 6.86 \text{ mg}/\text{L}$), 流至 FWS 濕地出流端的 TN 濃度為 0.99~22.27 mg/L ($7.58 \pm 5.14 \text{ mg}/\text{L}$), 因此整個 SSF-FWS 人工濕地之 TN 濃度削減效率為 56±28%。

(二) N_2O 通量的時間變化

N_2O 通量監測結果顯示, SSF 濕地 4 個採樣點、各別 27 次(總計 108 個數據)的結果介於 3.83~87.37 (33.58 ± 21.85) $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$, 均為正值代表氣體從濕地向大氣的排放。而在 FWS 濕地的 3 個採樣點、各別 27 次(總計 81 個數據)的通量介於 -6.10~128.78 (30.78 ± 23.38) $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$, 僅有 2 個結果為負值, 其餘為正值。

圖 3 為 SSF 濕地 4 個採樣點及 FWS 濕地 3 個採樣點分別平均計算 N_2O 通量的不同月份變化。 N_2O 通量變化趨勢與氣溫變化曲線極為相近, 大體上在每年的



12~3 月期間通量逐漸下降並保持較低值，呼應了此期間的氣溫與水溫較低的結果；反觀，在 4 月~10 月 N₂O 通量上升維持較高數值，與溫度上升變化一致。

圖 4 為 SSF 及 FWS 濕地在各月份之 N₂O 平均通量與氣溫的關係圖，結果可知濕地的 N₂O 平均通量對數值與氣溫呈現顯著的正相關，此結果與 modified Arrhenius 方程式相當吻合，因此可考慮利用以下方程式以氣溫推算濕地的 N₂O 通量。

$$F = 23.299 \times 1.047^{(T-20)} \quad (\text{SSF 濕地}, R = 0.719) \quad (2)$$

$$F = 17.344 \times 1.070^{(T-20)} \quad (\text{FWS 濕地}, R = 0.721) \quad (3)$$

其中， F = N₂O 交換通量 (mg/m²/hr)， T = 氣溫條件(°C)。Dobbie and Smith⁽¹¹⁾ 和 Smith⁽¹²⁾ 也曾發現微生物活性及脫硝和硝化作用會隨溫度上升而使活性增加，進而促進 N₂O 的排放。而溫度每增加 10°C 生物活性則增加兩倍($Q_{10}=2$)，使得 N₂O 的排放通量也隨之增加。

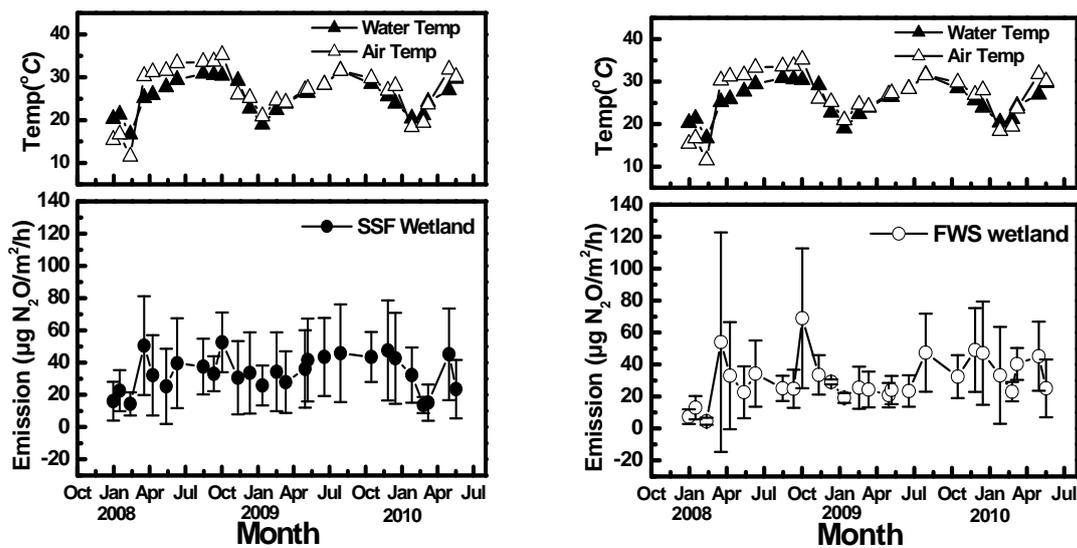


圖 3 本研究之 SSF 與 FWS 濕地個別單元平均 N₂O 排放通量隨月份的變化

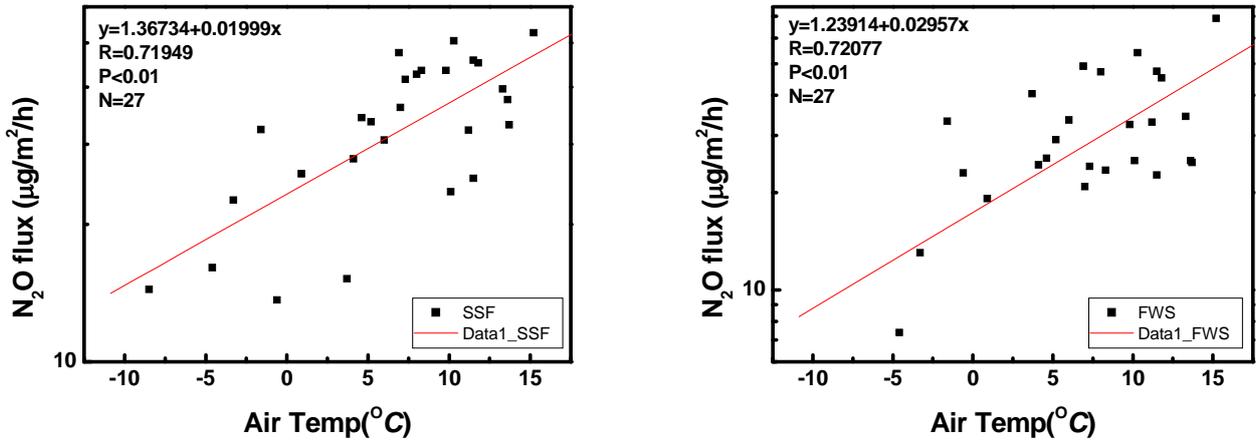


圖 4 SSF 與 FWS 濕地平均 N₂O 排放通量與氣溫的關係

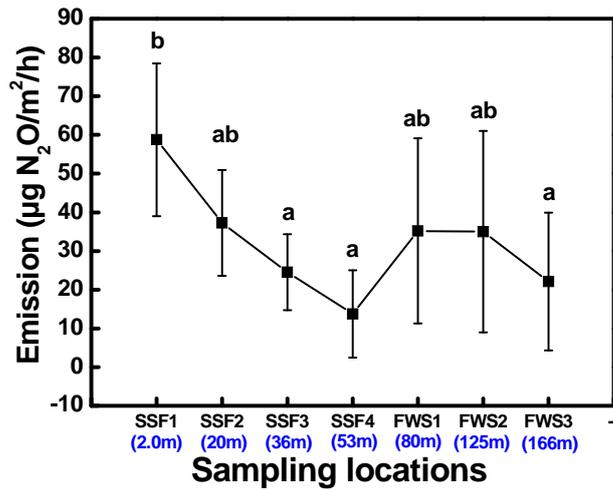


圖 5 人工濕地各採樣點平均 N₂O 通量的空間變化(n=27)

(三) N₂O 通量的空間變化

圖 5 為人工濕地不同採樣點在研究期間計 27 次監測結果的平均 N₂O 通量。結果顯示 SSF 濕地單元中，進流前端的平均 N₂O 通量顯著最高，SSF1 的 N₂O 平均通量為 58.75±19.73 µg N₂O/m²/h，隨著流動距離的增加而逐漸下降，SSF4 的平均通量僅為 13.6±11.2 µg N₂O/m²/h。反觀，FWS 濕地前 2 個採樣點(FWS1 及 FWS2)監測到的 N₂O 通量無顯著差異，但是在最後一個採樣點(FWS3)則有降低趨勢。濕地 N₂O 的產生主要源自脫硝作用，細菌脫硝反應需要三個條件：有機物作為電子提供者、硝酸鹽作為電子接受者、及缺氧條件。



表 1 顯示濕地平均 N_2O 通量隨流動距離的下降趨勢，與水中 BOD 及無機氮(氨氮+亞硝酸鹽氮+硝酸鹽氮的總和)濃度隨流動距離的下降趨勢相當一致。因此，推測濕地前段有較高的無機氮及有機碳負荷，進行脫硝反應的活性高於濕地後段，因此導致較高的 N_2O 通量。He 等人⁽¹³⁾也報導 N_2O 之通量率會隨各種不同的條件而影響，如：氮的供應、有機質含量、溶氧、溫度、pH 值及其他物質等。Beauchamp⁽¹⁴⁾研究農田土壤中氧化亞氮的排放通量，發現在無氧環境下，有助於微生物進行脫硝作用；在有氧環境下，則是有利於微生物進行硝化作用，而這兩者皆會產生氧化亞氮。

表 1 人工濕地 7 個採樣點的 N_2O 平均排放通量及水質($n=27$)

水質	SSF1	SSF2	SSF3	SSF4	FWS1	FWS2	FWS3
N_2O ($\mu g / m^2 / h$)	58.7±19.7	37.2±13.6	24.5±9.8	13.6±11.2	35.1±23.9	35.0±26.0	22.1±17.8
水溫($^{\circ}C$)	25.5±4.0	25.2±4.0	24.1±4.1	23.8±4.0	25.0±4.0	24.5±4.8	24.2±4.7
DO(mg/L)	1.9±1.1	2.7±2.0	1.8±1.4	1.4±0.5	2.1±0.8	1.9±0.9	2.3±1.0
pH	7.7±0.5	7.66±0.57	7.46±0.58	7.47±0.58	7.53±0.51	7.43±0.54	7.45±0.55
導電度($\mu s / cm$)	582±257	561±278	537±272	541±259	543±257	518±257	498±255
ORP(mg/L)	210±96	216±110	172±139	164±149	190±138	192±131	191±127
BOD(mg/L)	11.5±11.0	7.5±4.4	3.4±2.3	2.7±1.7	3.2±2.2	2.9±1.8	2.6±1.8
TKN(mg/L)	17.6±11.2	13.9±9.7	12.3±7.9	11.6±6.5	11.4±5.7	11.2±12.3	6.9±4.9
NH_4^+ (mg/L)	11.2±6.7	8.0±6.1	6.7±4.0	6.5±4.5	5.7±4.1	3.7±3.0	3.2±2.8
NO_2^- (mg/L)	0.1±0.1	0.1±0.1	0.2±1.0	0.2±1.1	0.1±0.1	0.1±0.1	0.1±0.1
NO_3^- (mg/L)	1.0±2.3	1.4±4.1	1.0±2.4	1.5±2.9	1.6±3.0	0.8±1.3	0.5±0.5
NO_x^a (mg/L)	1.1±2.3	1.5±4.1	1.3±2.5	1.8±3.1	1.7±3.0	0.9±1.3	0.6±0.6
無機 N (mg/L)	12.4±7.2	9.6±8.5	8.1±5.5	8.3±6.4	7.4±6.0	4.6±3.4	3.9±3.0
TN(mg/L)	18.7±11.5	15.5±10.9	13.7±8.4	13.4±7.7	13.1±6.8	12.2±12.3	7.5±5.1
PO_4^{3-} (mg/L)	0.5±0.7	0.2±0.3	0.3±0.4	0.2±0.2	0.3±0.4	0.1±0.1	0.1±0.1
TOC(mg/L)	5.6±4.3	3.5±1.3	3.6±1.5	3.1±1.0	3.4±0.9	3.8±1.0	4.2±1.4

(四) N_2O 通量的擴大化計算及全球暖化潛勢

若以算術平均法將 SSF 濕地 4 個採樣點及 FWS 濕地 3 個採樣點，及 27 個

月份監測而得的數據進行計算，所得結果代表個別濕地的整年平均排放通量，則嘉南藥理大學 SSF 濕地、FWS 濕地、及 SSF-FWS 濕地(合併計算)的 N_2O 每年平均通量分別為 294.2、269.6、及 283.7 $mg N_2O/m^2/year$ 。根據 IPCC⁽¹⁵⁾ 報導 N_2O 的全球暖化潛勢(global warming potential, GWP) 為 298，因此，SSF 濕地、FWS 濕地、及 SSF-FWS 濕地的 N_2O 排放所貢獻的 GWP 為 23.91、21.91、及 23.05 $g CO_2-C equivalent/m^2/year$ 。而相同濕地同時間監測 CH_4 的結果顯示⁽¹⁶⁾，SSF 濕地、FWS 濕地、及 SSF-FWS 濕地的 CH_4 排放所貢獻的 GWP 為 536.95、444.37、及 497.52 $g CO_2-C equivalent/m^2/year$ ，因此 N_2O 排放所貢獻的 GWP 僅約 CH_4 排放 GWP 的 4~5%。

(五) 人工濕地的氮收支計算

將濕地的氮質量收支分為：(1)進流水帶入的總氮通量，(2)出流水帶出的總氮通量，(3) N_2O 排放通量，(4)濕地植物的氮攝取通量，及(5)硝化脫硝與氮累積通量和等 5 大項目進行平衡計算，結果如表 2。 N_2O 排放通量僅占 TN 去除通量的 0.02%(SSF 濕地)、0.08%(FWS 濕地)、及 0.04%(SSF-FWS 濕地)。且僅為 TN 負荷的 0.012%(SSF 濕地)、0.042%(FWS 濕地)、及 0.032%(SSF-FWS 濕地)。濕地植物氮攝取量為 TN 去除通量的 9.6%(SSF 濕地)、20.5%(FWS 濕地)、及 12.5%(SSF-FWS 濕地)。大部分的氮去除歸因於硝化脫硝轉換為 N_2 及氮的累積。

表 2 嘉南藥理大學人工溼地系統氮質量收支計算結果

氮通量收支項目($g N/m^2/year$)	SSF 濕地	FWS 濕地	SSF-FWS 濕地系統
進流水帶入的總氮通量 (N_{Inf})	1423	400.6	565.6
出流水帶出的總氮通量(N_{Eff})	607.8	200.6	120.9
N_2O 排放通量(N_{N_2O})	0.187	0.171	0.181
植物氮攝取量(N_{uptake})	77.9	41	55.7
硝化脫硝及氮累積通量和($\Delta N + N_{N_2}$)	737.9	158.9	388.9

(六) 與文獻值比較

最近 10 年，國際間陸續發表不少有關人工濕地處理廢水產生 N_2O 排放的報導，大多為歐洲及亞洲高緯度國家的濕地，少有亞熱帶及熱帶區域的濕地報導(表 3)。另外，IPCC 針對 2006 年所發刊的「國家溫室氣體盤查指南」於 2013 年特別補充「濕地專冊」，其中第六章乃針對人工濕地溫室氣體排放的估算方法及相



關參數提出建議⁽¹⁷⁾。與文獻值比較，本研究監測的人工濕地 N₂O 通量落在較低的範圍，惟仍在文獻值的範圍內。

表 3 嘉南藥理大學人工濕地 N₂O 排放通量與國際間人工溼地文獻之比較

Location	Wetland type	Influent wastewater	Emission flux (µg N ₂ O /m ² /h)	Reference
Taiwan	SSF CW	secondary treated effluent	3.83~87.37	This study
Taiwan	FWS CW	secondary treated effluent	-6.1~128.78	This study
Norway	FWS CW	municipal wastewater	20.4~4,583	Søvik et al. (2007)
Sweden	FWS CW	municipal wastewater	-350~1,800	Johansson et al. (2003)
Germany	FWS CW	dairy farm wastewater	23~239	Fey et al. (1999)
Estonia	SSF CW	hospital wastewater	27~370	Mander et al. (2005)
Estonia	SSF CW	municipal wastewater	72~500	Mander et al. (2005)
Finland	FWS CW	peat mining wastewater	-46.3~113.3	Liikanen et al. (2006)
Norway	FWS CW	municipal wastewater	20.4~4,583	Søvik et al. (2007)
Japan	SSF CW	domestic wastewater	-229~1,362	Wang et al. (2008)
Japan	SSF CW	domestic wastewater	0~2,200	Inamori et al. (2008)
Estonia	VSSF CW	hospital wastewater	1~2,600	Teiter et al. (2005)
Estonia	HSSF CW	municipal wastewater	-3.3~190	Teiter et al. (2005)
	FWS-CW		14~1,021	IPCC (2013)
	HSSF-CW		220~1,398	IPCC (2013)
	VSSF-CW		52~666	IPCC (2013)

五、結論與建議

嘉南藥理大學人工濕地於 2007 年 12 月至 2010 年 5 月期間所監測的 N₂O 排放通量範圍介於 3.83 ~ 87.37 µg N₂O/m²/h(SSF 濕地)及 -6.10 ~ 128.78 µg N₂O/m²/h(FWS 濕地)，並發現 12~3 月期間的通量下降並保持較低值，而在 4 月~10 月間的通量上升並維持較高數值。此時間的變化趨勢，可歸因於溫度條件隨季節變動，影響細菌硝化與脫硝活性，導致 N₂O 排放的變動。濕地 N₂O 平均通量對數值與氣溫呈現顯著的正相關，此結果與 modified Arrhenius 方程式相當

吻合，溫度校正係數值分別為 1.047(SSF 濕地)及 1.070(FWS 濕地)，也說明濕地 N₂O 通量受溫度顯著影響。在兩個濕地中均發現 N₂O 通量、水中 BOD 及無機氮濃度均隨水流動距離而逐漸下降，推測濕地前段有較適合的脫硝條件，因此導致較高的 N₂O 通量。經擴大化推估，本研究場址 SSF 濕地、FWS 濕地、及 SSF-FWS 濕地的 N₂O 每年平均通量分別為 294.2、269.6、及 283.7 mg N₂O/m²/year。約僅占 TN 負荷的 0.012%(SSF 濕地)、0.042%(FWS 濕地)、及 0.032%(SSF-FWS 濕地)，相當微小。N₂O 排放所貢獻的 GWP 僅約 CH₄ 排放的 4~5%。

參考文獻

- 1.林瑩峰、陳國超，濕地與全球暖化，台灣濕地，第87期，第4~12頁，2012。
- 2.IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4, Agriculture Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, 2006.
- 3.Søvik, A. K., Kløve, B., Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway, *Sci Total Environ.* 380, 28-37, 2007.
- 4.Johansson, A.E., Gustavsson, A.M., Oquist, M.G., Svensson, B.H., Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater-seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors. *Water Research* 38, 3960-3970, 2004.
- 5.Fey, A., Benckise, G. and Ottow, J. C. G. Emissions of nitrous oxide from a constructed wetland using a groundfilter and macrophytes in wastewater purification of a dairy farm. *Biol. Fertil. Soils* 29, 354-359, 1999.
- 6.Mander, U., Løhmus, K., Teiter, S., Nurk, K., Mauring, T., Augustin, J. Gaseous Fluxes from Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Science and Health* 40, 1215-1226, 2005.
- 7.Liikanen, A., Huttunen, J. T., Karjalainen, S.M., Heikkinen, K., Vaisanen, T.S., Nykanen, H, Martikainen, P.J., Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland putifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering* 26, 241-251, 2006.
- 8.Wang, Y., Inamori, R., Kong, H., Xu, K., Inamori, Y., Kondo, T., Zhang, J. Nitrous oxide emission from polyculture constructed wetlands: Effect of plant species. *Environmental Pollution* 152, 351-360, 2008.
- 9.Inamori, R., Gui, P., Dass, P., Matsumura, M., Xu, K.-Q., Kondo, T., Ebie, Y., Inamori, Y., Investigating CH₄ and N₂O emissions from eco-engineering wastewater treatment processes using constructed wetland microcosms, *Process Biochemistry* 42, 363-373, 2007.
- 10.Teiter S, Mander Ü. Emission of N₂O, N₂, CH₄ and CO₂ from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Ecological Engineering* 25(5):528-41, 2005.



11. Dobbie K. E., and K. A. Smith., The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. *Eur. J. Soil Sci.* 52:667-673, 2001.
12. Smith, K.A., Soils and the greenhouse effect: Foreword. *Soil Use Manage*, 13-229, 1997.
13. He, Y.W., Mizuochi, M., Kong, H.N., Inamori, Y., Sun, T.H., N₂O emission from waste management systems. *J. Water Treat. Biol.* 35, 67–83, 1999.
14. Beauchamp, E. G., 1997, Nitrous oxide emission from agriculture soils. *Can. J. Soil Sci.* 77, 113-123.
15. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK.
16. 莊建和，人工濕地碳質量收支平衡及碳匯能力之研究，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系碩士論文，2004。
17. IPCC. Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, 2013.