

台灣南部人工溼地之蒸發散特性

錢紀銘，嘉南藥理科技大學環境資源管理系副教授
林健榮，嘉南藥理科技大學環境資源管理系副教授
吳穎祥，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系碩士生
蔡宛宜，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系四技生
李訓奇，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系四技生
陳意銘，嘉南藥理科技大學環境資源管理系副教授

摘要

本文主要探討各類人工溼地之蒸發散特性及其與相關氣象因子之關連性，其觀察研究對象包括自由表面流動式(FWS：free water surface flow)、潛流式(SSF：subsurface flow)、無植栽潛流式等小型人工溼地模場及大型人工溼地實場，由相關實驗結果可知由於觀測期間洽由冬末漸至夏初，FWS(A1 系統)蒸發散呈二階段變化，於 2008.02.12~03.19 呈現區間變動特性，而於 2008.03.19~05.18 期間，則隨溫度而漸次增加，其平均值約為 3.44cm/d，此現象應肇因於前者之水生植物處於休眠期所致。至於 SSF(A2 系統)之結果與 FWS 系統相比較，可發現 SSF 蒸發散較無 FWS 呈兩階段化明顯，惟隨冬末漸至夏初之溫度升高，蒸發散值之變動範圍也明顯增大，其平均值約為 2.72cm/d。無植栽石頭床 SSF 系統，較不受蒸散影響，其變化趨勢亦未有 FWS 與 SSF 系統之兩階段變化，其平均值約為 1.97cm/d。而於冬季水生植物休眠期之大型人工溼地實場(系統 B)而言，其蒸發散呈現相對區間變動變化，其平均值約為 3.00cm/d。另由各類人工溼地系統與氣溫之相關性結果可發現小型 FWS 系統之蒸發散特性變化與氣溫間之相關係數為 0.76，顯示二者間具有高度相關，而當自由液面降至礫石面下後，亦即 SSF 系統，其相關係數則降為中度相關之 0.57。如將水生植栽去除，相關係數為-0.35，其結果呈現接近低度負向相關。以上各系統係置於六層大樓屋頂，系統受樓板輻射熱較大，氣溫之影響較大，而系統置於地面時(系統 B)，則其相關係數呈現低度相關之 0.2，顯示溫度於人工濕地之蒸發散程序中並非主導性因數。至於風速與相對濕度之關連性則未呈現高度相關性。

關鍵字：人工溼地、蒸發散、相關係數

一、前言

一般自然溼地多位於下游地帶，常承受來自上游因自然或人為因素所產生的

廢污水，由於污染物質在溼地系統中經複雜的淨化機制作用去除，因此溼地被形容為大地之腎，它的作用有如自然界的淨水廠，而人工溼地即是模擬真實溼地所設計用來處理水污染的生態系統，此外人工溼地也具有生態教育、景觀改善、棲地營造及其他許多的優點，故於世界各地業已經被研究與運用多年。而我國十餘年來，產官學各界亦大舉投入人工溼地之相關研究與推廣，然而相關研究多著重於人工溼地之污染處理效能及其相關影響因子之探討，其對人工溼地水文因子之特性變化卻較少討論。事實上，水文因子對於人工溼地之污染處理效能亦相當重要之影響，對於水生植物系統而言，其蒸發散（evapotranspiration）效應更為重要，目前國內尚未對人工溼地蒸發散特性進行較多相關探討，緣此，本研究乃以人工溼地之蒸發散特性變化及其與氣象因子間之關連性為主要研究探討重點目標。

二、文獻回顧及探討

由於人工溼地(constructed wetland)處理系統具有省能源、低建設成本(不含土地購置成本)、操作維護簡單、不破壞生態等優點，於世界各國皆有廣泛之應用案例及研究，依國外經驗，由 45 座表面流式人工溼地之操作結果所歸納之經驗，其 BOD5 平均去除率約為 82.7%，而 73 座潛流式人工溼地之 BOD5 平均去除率則約為 67.0%（Kadlec and Knight, 1996）。Knight et al.(2000)以 FWS 系統處理畜牧廢水氨氮去除率約為 48%、總氮去除率約為 42%，而 Stone et al.(2004)處理養豬廢水時，其氨氮去除率約為 25%、總氮去除率約為 35%。Neralla et al.(2001)亦用 FWS 系統處理一般的生活污水，其氨氮去除率 13~65%，而 Sakadevan & Bavor(1999)以 FWS 系統處理與生活污水類似的校園中廢污水，當其污染負荷較低時，其總氮去除率 27~66%，當污染負荷提高時，依 Rousseau et al.(2004)之研究發現，其總氮去除率降為 31%。若進流基質為人工合成廢水時，其去除率大幅提升，可達到氨氮去除率為 47~99%、總凱氏氮去除率為 25~95%(Lim et al.,2001)。由國外相關研究結果可知，無論 FWS 或 SSF 系統處理含氮污染物皆有其效果，但處理效能與廢污水來源、污染負荷及水文氣象條件有關。

而我國為加速解決其水污染問題，除推動各項污染防治與管制策略外，另針對鄉村偏遠地區亦推動污水生態處理工法，於 2003~2004 年間，由環保主管機關所推動之人工溼地相關自然淨水系統之規劃設置即完成 16 座，由此可見該處理法業為台灣環保主管單位大力推動為下水道系統完成前水污染防治之替代方案之一。同時，台灣地區產官學界亦相對投入相關應用研究，其範圍包括受污染自然水體、生活污水、工業廢水、養殖廢水之處理，而研究所涵蓋之系統有表面流式人工溼地及潛流式人工溼地，以 FWS 系統處理都市污水，其 BOD 去除率約

為 57.4%，氨氮去除率約為 10%、硝酸鹽氮去除率約為 47.1%、亞硝酸鹽氮去除率約為 75%，氨氮去除率約為 10%、硝酸鹽氮去除率約為 47.1%、亞硝酸鹽氮去除率約為 75%(劉與徐, 1997)。而將基質改成人工合成廢水，因其成分較為簡單其去除率大幅提昇，依王等人(1998)、李等人(1998)之研究，其 COD 去除率為 65.7~93.85%，氨氮去除率可達 89.3~98.63%，硝酸鹽氮去除率可達 88.4~94.2%。羅與楊(2002)以 FWS 及 SSF 系統處理工業廢水發現其 COD 去除率僅達 9.16~21.8%，煉油廢水之氨氮去除率為 18.7~34.2%，總氮去除率為 23.14~28.41%，而煉鋼廢水之氨氮去除率為 71.54~77.9%，總氮去除率為 47.1~50.3%，顯示溼地對於工業廢水含氮污染物質去除效能較有機物質為佳，主要原因為廢水中有機成分較複雜，使植物及微生物難以分解。至於 SSF 系統之應用，袁等人(2004)利用 SSF 系統處理校園污水，其氨氮去除率為 25~90%，硝酸鹽氮去除率為 5~37%，亞硝酸鹽氮去除率為 0~67%BOD 去除率為 20~75%。由相關研究結果可知，無論 FWS、SSF 系統及將兩種串聯結合處理各類污染物皆有其效果。

除前述有關人工濕地應用於污染處理之相關研究外，與溼地蒸發散有關之研究包括；Timemer & Weplon(1967)在佛羅里達州使用六個小水池，分四個實驗組栽種溼地植物布袋蓮與兩個無植物自由水面蒸發對照組，研究其蒸發散之情形，經實驗後得知其自由水面蒸發量(E_o)約為 3.9mm/day，布袋蓮之蒸發散量(E_w)為 14.4mm/day。Kadlec(2005)於有關溼地中植物遮蔽面積影響蒸發散之研究發現植物之存在妨礙蒸發，其原因在於植物之存在將減少風速及增加濕度所致。Bernatowicz et al.(1987)將相關蒸發散結果與無遮蔽的水域蒸發相比較發現植物之遮蔽大約削減 30%-86%之蒸發量；而 Koerselman & Beltman (1988)削減量為 41%~48%以及 Kadlec et al.(1987)則為 30%~86%。

國內有關於溼地蒸發散之相關研究則有；吳朝景(1980)則對溼地植物布袋蓮進行蒸發散相關研究。荊等人(2003)於二仁溪畔設置蒸發及蒸散系統以研究探討蒸發散效應對於人工溼地除污效能之影響，實驗結果在蒸發散系統中，水溫每升高 1°C，蒸發速率增加 $1.814 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ ；蒸散速率增加 $1.177 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ ；蒸發散速率則增加 $3.347 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 。陳治勛(2005)於屏東大學生態池探討溼地水文參數：降水量、蒸發量、蒸散量、地表逕流、地下水入滲等之特性變化，其在植物蒸散選用輪傘莎草、水薺菜、茭白筍、香蒲、印度杏菜、光冠水橘、屏東石龍尾、白花天胡荽做為植物蒸散試驗研究，除莎草於實驗期第一旬之蒸散值為 2~5.1mm/d，其他植物都介於-0.5~2mm/d 之間。

人工溼地已被許多學者應用和研究多年，惟大都著重於處理污染效能方面之研究，在蒸發散方面，亦多偏重於農田水利或森林集水區進行研究，於人工濕地則相對較少，因此本研究將探討各氣象因子對人工溼地蒸發散特性變化之影響，

以增進日後相關研究之完整性。

三、實驗佈置與分析

本研究主要探討人工溼地之蒸發散特性和各種不同水文條件下蒸發散之比較，研究之相關實驗係對於 A 系統(嘉南藥理科技大學人工溼地)及 B(1、2、3)系統(嘉南藥理科技大學活動中心六樓小型人工溼地)進行，以下謹對相關實驗細節扼述之。

3.1. 嘉南藥理科技大學小型人工溼地系統之規劃與佈置

本研究之小型實驗場所設立於嘉南藥理科技大學活動中心頂樓(五層樓高)，計有三組系統以模擬不同系統條件下人工濕地蒸發散之特性變化，每組系統分別由長 69cm、寬 47.5cm、高 66cm 之塑膠槽桶組成，分別模擬表面流動式(free water surface flow system; FWS, B1 系統)、潛流式(subsurface flow system; SSF, B2 系統)及無植栽潛流式人工溼地系統。在 A1 之 FWS 人工溼地系統底部鋪入厚約 15cm 的土壤，以便水生植栽(香蒲; *Typha orientalis* Presl.)固著，水深約為 0.45m，空槽停留時間為 1.14 天。而 A2 之 SSF 系統中填入的介質為礫石，其粒徑為 30~40mm，孔隙率實際量測約為 52%，系統植有蘆葦(*Phragmites communis* L.)，水深為 0.4m，空槽停留時間為 0.61 天，系統之後置有一儲水桶，以便利於觀測每日系統之蒸發散水量。A3 之 SSF 人工溼地系統與 A2 相同，惟無蘆葦植栽，以便觀察單純石頭床之蒸發特性。

3.2. 嘉南藥理科技大學人工溼地系統之規劃與佈置

本系統(B 系統)係位於嘉南藥理科技大學新建校區，為嘉南藥理科技大學生態中心所建置，整個溼地的總面積約為 11,000 m²(不含景觀生態湖)，由四個單元所組成，分別為取水井、潛流式(subsurface flow system, SSF)溼地、表面流動式(free water surface, FWS)溼地，最後再將處理過後的淨化水排入景觀生態池，系統操作之水源係來自於校園宿舍區之生活污水，實驗操作期間每日操作水量約 340CMD，系統中設置面積為 2,300 m²之潛流式人工溼地系統，平均水深約為 0.7 m，其系統平均分區種植挺水性植物；諸如蘆葦、香蒲、風車草、培地毛、荳蔻菜等。除 SSF 系統外，另設置面積為 15,00 m²之表面流動式人工溼地系統，平均水深約為 0.4 m，此系統平均分區種植挺水性植物及浮葉性水生植物：日本紙莎草、粉綠狐尾藻、大安水蓴衣、睡蓮、台灣萍蓬草、白花水龍等水生植物，相關系統設置細部資料請參閱嘉南藥理科技大學生態中心網頁之相關資料(<http://ecocenter.chna.edu.tw/chnawetland/main/2/system.html>)。

另於此人工溼地中架設水文氣象監測站，其監測系統主要分為氣象監測系統與人工溼地監測系統兩大系統，氣象系統方面為人工溼地氣象站測站，主要監測項目有風向、風速、溫度、濕度與雨量。人工溼地監測系統則有 SSF 系統出流流速、FWS 出流流速與水位、地表水位、地下水位與蒸發，相關系統之規格細節詳請參閱吳(2009)。

3.3. 數據採樣與分析

由於六樓小型人工溼地蒸發散實驗設置時間較晚，且無氣象站監測系統，固六樓人工溼地氣象使用距離嘉南藥理科技大學較近的中央氣象局南區氣象中心的氣象資料，再將南區氣象中心與嘉南藥理科技大學人工溼地氣象監測站的氣象資料做差異性的比對，經統計比對嘉南藥理科技大學氣象監測站與南區氣象中間的氣象資料差異性不大，證明嘉南藥理科技大學人工溼地氣象監測系統的準確性並可將南區氣象資料作未設置氣象站的六樓小型人工溼地的氣象資料以作為經驗式中的參數。現場測量蒸發散方面，設置三個不同型態的溼地系統，分別為 FWS 系統、SSF 系統、石頭床系統，每個系統進流使用蠕動式幫浦以定流量方式進入小型溼地系統，於出流的地方設置一個蒸發桶，再採用人工方式每日進行測量紀錄各型態溼地系統之蒸發散。以下將對相關實驗觀測結果逐一討論之。

四、結果與與討論

本文以各領域蒸發散相關文獻配合分析嘉南藥理科技大學大型人工溼地氣象站、溼地監測站與位於學生活動中心六樓小型人工溼地系統和中央氣象局南區氣象站經長期收集各氣象水文因子之各系統統計量，再逐步進行分析探討與討論。

溫度為影響蒸發散的重要氣象因子之一，本文乃對相關特性進行必要之觀測與探討，A 系統之相關氣象資料係引用自台南氣象站，圖 1 係 FWS 人工濕地(A1 系統)於 2008.02.12 日~05.18 日間之蒸發散實測結果(ET)及其同時段日平均溫度變化，相關統計分析詳見表.1。由於觀測期間洽由冬末漸至夏初，故其日平均溫度 12.1℃ 漸增為 27.8℃，其平均溫度約為 20.9℃，同期間之 FWS 蒸發散實測結果(ET)亦由 2.10cm/d 漸增至 4.75cm/d，平均蒸發散量約為 3.44cm/d，由其變化趨勢可發現 FWS 蒸發散係呈二階段變化，於 2008.02.12~ 03.19 呈現區間變動特性，而於 2008.03.19~05.18 期間，則隨溫度而漸次增加至 4.75cm/d，此現象應肇因於前者之水生植物處於休眠期所致，其後則因生長期而使蒸發散有所增加，荊等人(2003)曾對 FWS 人工濕地之蒸發散特性進行實驗研究，由其結果亦發現蒸發散會隨溫度增加而遞增。

另為探討潛流式人工濕地之蒸發散之特性，本文亦對相關系統進行實驗觀

測，圖 2.即為 SSF 人工濕地（A2 系統）於 2008.02.12 日~06.10 日間之蒸發散實測結果(ET)及其同時段日平均溫度變化，其相關統計分析詳見表 1，由於觀測期間洽由冬末漸至夏初，故其日平均溫度 12.1℃ 漸增為 29.4℃，其平均溫度約為 23℃，同期間之 SSF 蒸發散實測結果(ET)亦由 1.55cm/d 漸增至 3.73cm/d，平均蒸發散量約為 3.72cm/d，由其變化趨勢可發現 SSF 蒸發散較無 FWS 呈兩階段化明顯，但也因季節的變化，隨著冬末漸至夏初的溫度升高，蒸發散值之變動範圍也明顯增大。圖 3.係無植栽石頭床人工濕地（A3 系統）於 2008.04.20 日~08.09 日間之蒸發實測結果及其同時段日平均溫度變化，相關統計分析詳見表 1，由此部份之觀測可知僅有填充材之蒸發特性，觀測期間洽為盛夏，故其日平均溫度約介於 23.1℃~30.2℃，其平均溫度約為 27.7℃，同期間之石頭床蒸發實測結果介於 1.14cm/d 與 3.16cm/d 間，平均蒸發散量約為 2cm/d，其相對變動範圍較小，此主要肇因於 A3 系統無水生植栽，較不受蒸散影響，其變化趨勢亦未呈現 FWS 與 SSF 系統之兩階段變化。由於上述系統係小型人工溼地，而於大型人工溼地實場(系統 B)而言，觀察期間洽為多為冬季水生植物休眠期，其蒸發散呈現相對區間變動變化趨勢，其平均值約為 3.00cm/d。

另由各類人工溼地系統與氣溫之相關性結果可發現小型 FWS 系統之蒸發散特性變化與氣溫間之相關係數為 0.76，顯示二者間具有高度相關，而當自由液面降至礫石面下後，亦即 SSF 系統，其相關係數則降為中度相關之 0.57。如將水生植栽去除，相關係數為-0.35，其結果呈現接近低度負向相關。以上各系統係置於六層大樓屋頂，系統受樓板輻射熱較大，氣溫之影響較大，而系統置於地面時(系統 B)，則其相關係數呈現低度相關之 0.2，顯示溫度於人工濕地之蒸發散程序中並非主導性因數。

表 1. 環境大氣溫度與人工溼地蒸發散之統計表

統計參數	A1 系統		A2 系統		A3 系統		B 系統	
	溫度	ET	溫度	ET	溫度	E	溫度	ET
平均數	20.9	3.44	23.0	2.72	27.69	1.97	21.1	3.00
中位數	20.9	3.25	24.4	2.76	27.74	1.83	21.2	3.01
標準差	4.67	1.26	4.78	0.90	1.91	0.51	2.71	0.65
變異數	21.8	1.58	22.8	0.80	3.65	0.26	7.35	0.42
全距	15.7	4.73	17.4	3.72	7.13	2.02	11.7	3.44
最小值	12.1	1.23	12.1	1.21	23.10	1.14	14.0	1.18
最大值	27.8	5.96	29.4	4.93	30.24	3.16	25.7	4.62
相關係數	1.0	0.76	1.0	0.57	1.0	-0.35	1.0	0.2

備註：參數單位；溫度(TEMP)：℃；ET(Evap)：cm/d；E(E)：cm/d

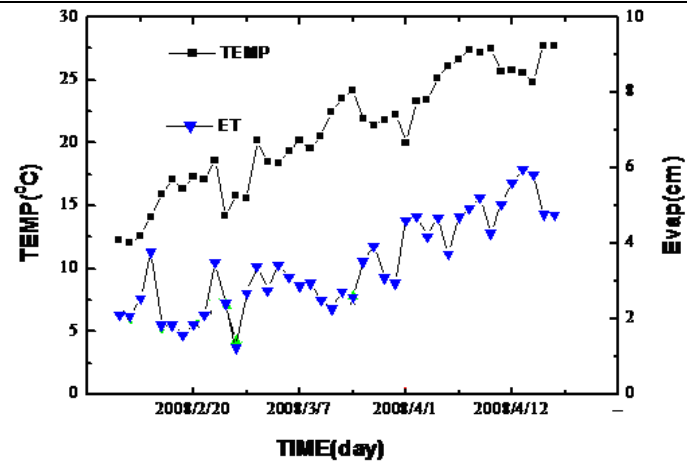


圖 1. FWS 人工濕地 A1 系統之溫度與蒸發散歷時變化

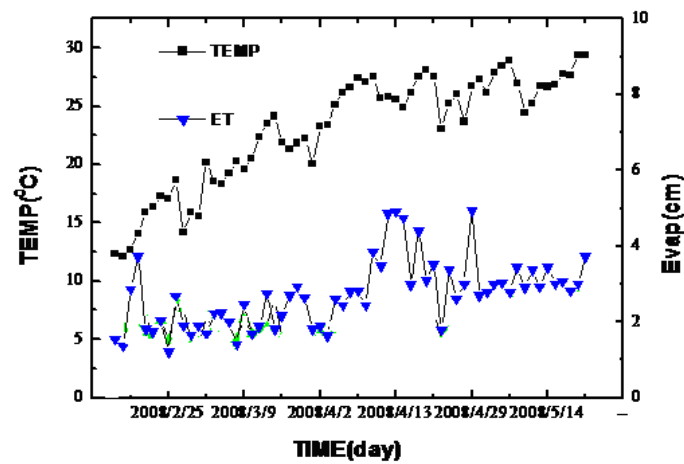


圖 2. SSF 人工濕地 A2 系統之溫度與蒸發散歷時變化

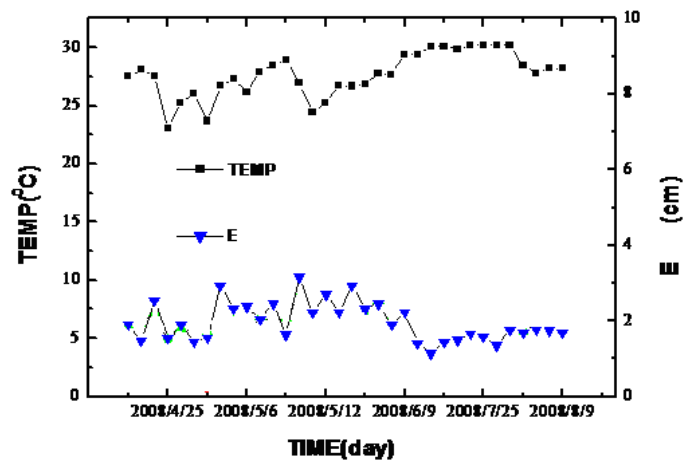


圖 3. 無植栽 SSF 人工濕地 A3 系統之溫度與蒸發歷時變化

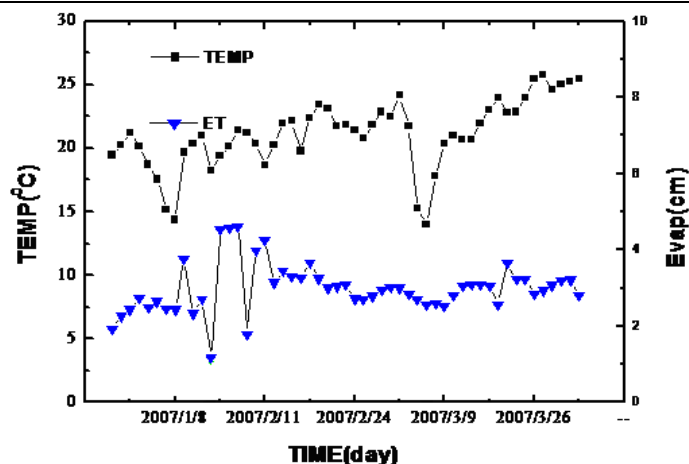


圖 4. 人工溼地 B 系統溫度與蒸發散歷時變化

平均風速為影響蒸發散特性變化之重要氣象因子之一，本文乃對相關特性進行必要之觀測與探討，圖 5 係 FWS 人工濕地（A1 系統）於 2008.02.12~05.18 間之蒸發散實測結果(ET)及其同時段日平均風速變化，相關統計分析詳見表 2，由於風速較易受地域影響，故與溫度不同，無季節變化影響而有規律性變化，其變動主要受氣象系統之影響，諸如冬季季風、西南氣流、颱風、海陸風等，本文觀察期間最大日平均風速 6.4(m/s) 最小日平均風速為 1.89(m/s)，其平均風速約為 3.56(m/s)。潛流式人工濕地（A2 系統）之蒸發散實測結果(ET)及其同時段日平均風速變化詳見圖 6，根據觀察其最大日平均風速 6.4m/s、最小日平均風速為 1.9m/s，其平均風速約為 3.4m/s。

圖 7 係石頭床人工濕地（A3 系統）於 2008.04.20 日~08.09 日間之蒸發實測結果(E)及其日平均風速變化，由表 2 可知其最大日平均風速 4.73m/s、最小日平均風速 2.13m/s，其平均風速約為 2.95m/s。除前述系統外，圖 8 為嘉藥校園人工濕地（B 系統）之蒸發散實測結果(ET)及其同時段日平均風速變化，由其結果可知其最大日平均風速 3.03m/s，最小日平均風速為 0.7m/s，其平均風速約為 1.57m/s。另由各類人工溼地系統與平均風速之相關性結果可發現小型 FWS 系統之蒸發散特性變化與平均風速間之相關係數為-0.43，顯示二者間關係具有負向中度相關，而當自由液面降至礫石面下後，亦即 SSF 系統，其相關係數則轉為負向低度相關之-0.24。如將水生植栽去除，相關係數為 0.47，其結果呈現接近中度負向相關。而系統 B 之相關係數呈現負向低度相關之-0.36，顯示平均風速於人工濕地之蒸發散程序中所扮演之角色頗為複雜。

表 2. 環境大氣平均風速與人工溼地蒸發散之統計表

統計參數	A1 系統		A2 系統		A3 系統		B 系統	
	風速	ET	風速	ET	風速	ET	風速	E
平均數	3.56	3.44	3.40	2.72	2.95	1.97	1.57	3.00
中位數	3.35	3.25	3.20	2.76	2.73	1.83	1.34	3.01
標準差	1.12	1.26	1.00	0.90	0.64	0.51	0.69	0.65
變異數	1.26	1.58	1.00	0.80	0.41	0.26	0.47	0.42
全距	4.51	4.73	4.50	3.72	2.60	2.02	2.33	3.44
最小值	1.89	1.23	1.90	1.21	2.13	1.14	0.70	1.18
最大值	6.40	5.96	6.40	4.93	4.73	3.16	3.03	4.62
相關係數	1.0	-0.43	1.0	-0.24	1.0	0.47	1.0	-0.36

備註：參數單位；平均風速(AWV)：m/s；ET(Evap)：cm/d；E(E)：cm/d

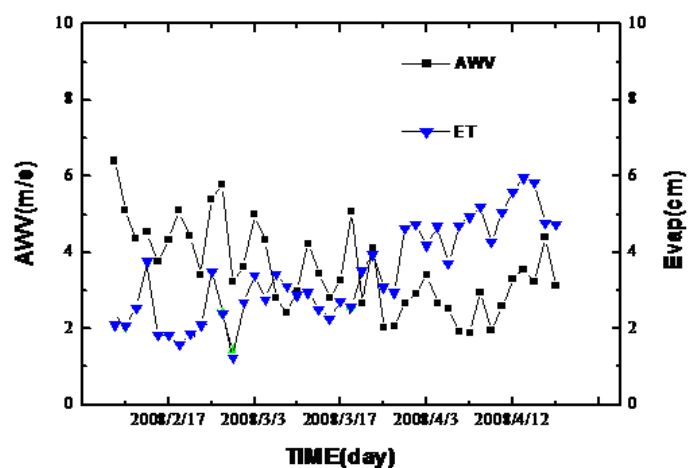


圖 5. FWS 人工濕地 A1 系統之平均風速與蒸發散歷時變化

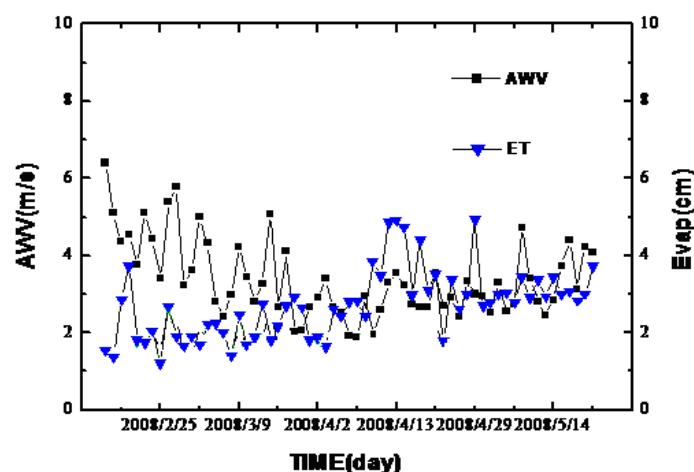


圖 6. SSF 人工濕地 A2 系統之平均風速與蒸發散歷時變化

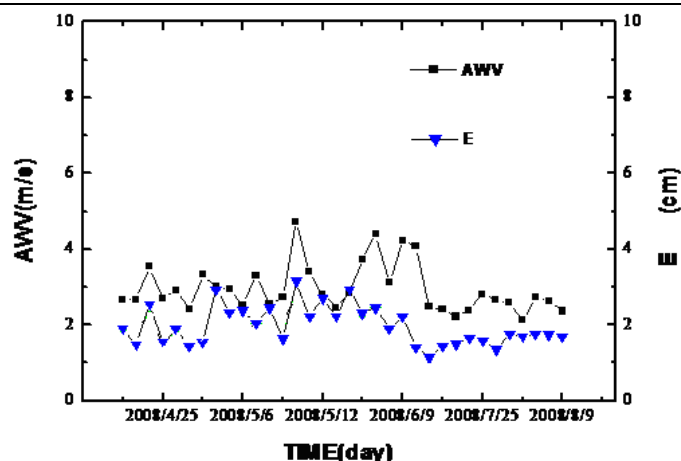


圖 7. 無植栽 SSF 人工濕地 A3 系統之平均風速與蒸發歷時變化

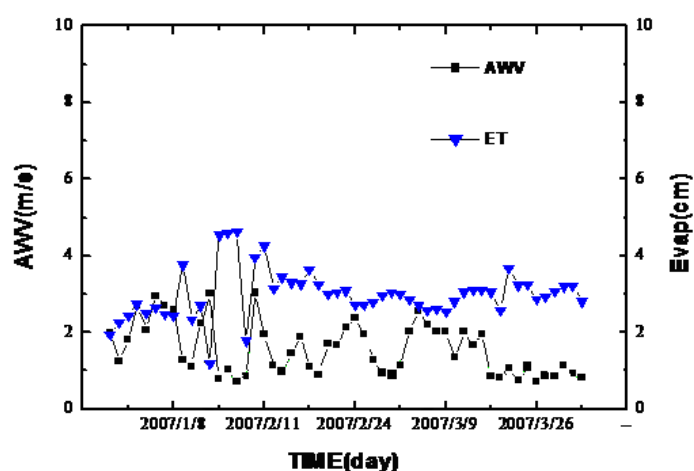


圖 8. 人工濕地 B 系統之平均風速與蒸發散歷時變化

人工濕地之蒸發散特性亦受相對濕度影響，本文乃對相關特性進行必要之觀測與探討，圖 9 係 FWS 人工濕地（A1 系統）於 2008.02.12~05.18 間之蒸發散實測結果(ET)及其相對濕度變化，相關統計分析詳見表 3，相對濕度較容易直接受其他氣象因子所影響，變化也相對較低，最高相對濕度 79.21% 最低相對濕度為 46.58%，其平均相對濕度約為 69.26%。而 SSF 人工濕地（A2 系統）於 2008.02.12~06.10 間之蒸發散實測結果(ET)及其相對濕度變化如圖 10 所示，由其結果可知其相對濕度介於 46.58%~79.21%，其平均溫度約為 68.10%。

圖 11 係石頭床人工濕地（A3 系統）於 2008.04.20 日~08.09 日間之蒸發實測結果(E)及其同時段相對濕度變化，其最高相對濕度 74.92%、最低相對濕度 56.71%，其平均相對濕度約為 67.42%。圖 12 係嘉藥校園人工濕地（B 系統）於 2008.01.01 日~03.31 日間之蒸發散實測結果(ET)及其同時段相對濕度變化，其最高相對濕度 74.34%、最低相對濕度為 45.69%，其平均相對濕度約為 59.03%。

另由各類人工溼地系統與平均風速之相關性結果可發現小型 FWS 系統之蒸發散特性變化與相對濕度間之相關係數為 0.01，顯示二者間關係具有低度相關，而當自由液面降至礫石面下後，亦即 SSF 系統，其相關係數仍為低度相關之 0.07。如將水生植栽去除，相關係數為-0.36，其結果呈現接近低度負向相關。而系統 B 之相關係數呈現負向低度相關之-0.34，顯示相對濕度於人工濕地之蒸發散程序中並未扮演重要角色。

表 3. 環境大氣相對濕度與人工溼地蒸發散之統計表

統計參數	A1 系統		A2 系統		A3 系統		B 系統	
	溼度	ET	溼度	ET	溼度	ET	溼度	E
平均數	69.26	3.44	68.10	2.72	67.42	1.97	59.03	3.00
中位數	70.36	3.25	69.08	2.76	68.56	1.83	57.15	3.01
標準差	7.00	1.26	6.69	0.90	5.29	0.51	7.26	0.65
變異數	48.95	1.58	44.70	0.80	27.96	0.26	52.71	0.42
全距	32.63	4.73	32.63	3.72	18.21	2.02	28.65	3.44
最小值	46.58	1.23	46.58	1.21	56.71	1.14	45.69	1.18
最大值	79.21	5.96	79.21	4.93	74.92	3.16	74.34	4.62
相關係數	1.0	0.01	1.0	0.07	1.0	-0.36	1.0	-0.34

備註：參數單位；相對溼度(RH)：%；ET(Evap)：cm/d；E(E)：cm/d

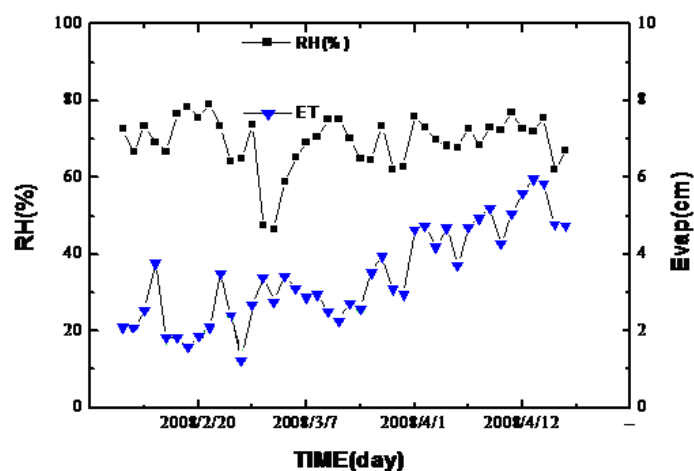


圖 9. FWS 人工濕地 A1 系統之相對濕度與蒸發散歷時變化

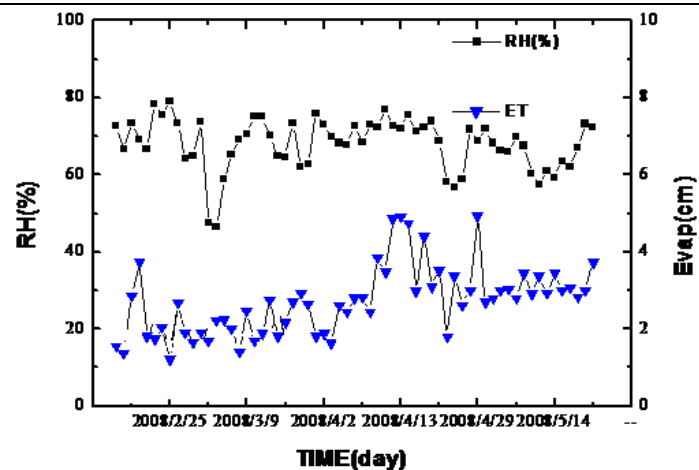


圖 10. SSF 人工濕地 A2 系統之相對濕度與蒸發散歷時變化

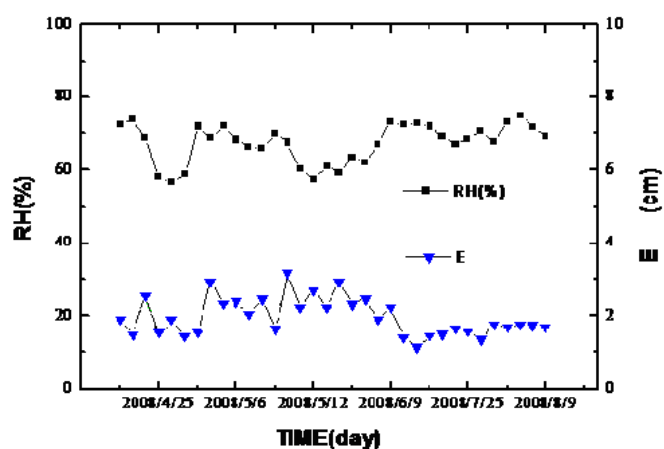


圖 11. 無植栽 SSF 人工濕地 A3 系統之相對濕度與蒸發歷時變化

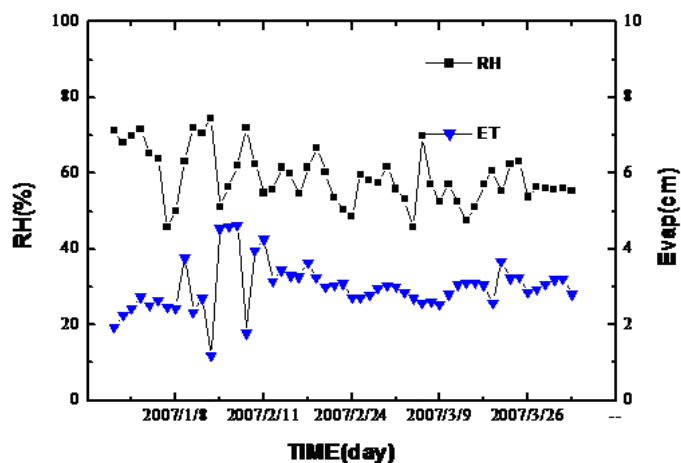


圖 12. 人工濕地 B 系統之相對濕度與蒸發散歷時變化

五、結論

本文主要探討各類人工溼地之蒸發散特性及其與相關氣象因子之關連性，由相關實驗結果可知由於觀測期間洽由冬末漸至夏初，FWS(A1 系統)蒸發散呈二階段變化，於 2008.02.12~03.19 呈現區間變動特性，而於 2008.03.19~05.18 期間，則隨溫度而漸次增加，其平均值約為 3.44cm/d，此現象應肇因於前者之水生植物處於休眠期所致。至於 SSF(A2 系統)之結果與 FWS 系統相比較，可發現 SSF 蒸發散較無 FWS 呈兩階段化明顯，惟隨冬末漸至夏初之溫度升高，蒸發散值之變動範圍也明顯增大。無植栽石頭床 SSF 系統，較不受蒸散影響，其變化趨勢亦未有 FWS 與 SSF 系統之兩階段變化。而於冬季水生植物休眠期之大型人工溼地實場(系統 B)而言，其蒸發散呈現相對區間變動變化，其平均值約為 3.00cm/d。

另由各類人工溼地系統與氣溫之相關性結果可發現小型 FWS 系統之蒸發散特性變化與氣溫間之相關係數為 0.76，顯示二者間具有高度相關，而當自由液面降至礫石面下後，亦即 SSF 系統，其相關係數則降為中度相關之 0.57。如將水生植栽去除，相關係數為-0.35，其結果呈現接近低度負向相關。以上各系統係置於六層大樓屋頂，系統受樓板輻射熱較大，氣溫之影響較大，而系統置於地面時(系統 B)，則其相關係數呈現低度相關之 0.2，顯示溫度於人工濕地之蒸發散程序中並非主導性因數。至於風速與相對濕度之關連性則未呈現高度相關性。

六、參考文獻

1. Kadlec, H.K. and Knight, R.L. Treatment Wetlands, CRC Press, Lewis Publishers (1996).
2. Kadlec, R.H., "Wetland to pond treatment gradients," *Water Sci. Technol.*, Vol. 51 (9), pp.291-298 (2005).
3. Knight, Robert L., Jr., Victor W.E. Payne, Borer, Robert E., Jr., Ronald A. Clarke, and Pries, John H., "Constructed wetlands for livestock wastewater management," *Ecological Engineering*, Vol. 5, pp.41-55 (2000).
4. Koerselman, W. and Beltman, B., "Evapotranspiration from fens in relation to Penman's potential free water evaporation (E_o) and pan evaporation," *Aquat. Bot.*, Vol.31, pp.307-320 (1988).
5. Lim, P.E., Wong, T.F., and Lim, D.V., "Oxygen demand, nitrogen and copper removal by free-water-surface and subsurface-flow constructed wetlands under tropical conditions," *Environment International*, Vol. 26, pp.425-431 (2001).

6. Neralla, Srinivasan , Weaver, Richard W., Lesikar, Bruce J.,and Persyn, Russell A. Persyn, “Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands,” *Bioresource Technology*, Vol. 175, pp.19-25 (2001).
7. Rousseaua, Diederik P. L., Vanrolleghem, Peter A.,amd Pauw, Niels De , “Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis,” *Ecological Engineering*, pp.151-163 (2004).
8. Sakadevan, K.,and Bavor, H. J., “Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management,” *Wat. Sci. Teach.*, Vol. 40, No 2, pp.121-128 (1999).
9. Stone, K.C. Stone, Poach, M.E., Hunt, P.G.,and Reddy, G.B., “Marsh-pond-marsh constructed wetland design analysis for swine lagoon wastewater treatment,” *Ecological Engineering*, Vol. 23, pp.127–133 (2004).
10. 吳朝景，「布袋蓮蒸發散之研究」，台灣大學農業工程研究所，碩士論文(1980)。
11. 劉玉雪、徐錠基，“水生植物栽培對都市污水之去除能力”，第 22 屆廢水處理技術研討會論文集，台中市(1997)。
12. 王姿文、林瑩峰、荊樹人、李得元、宋玉齡、陳欽昭、陳香瑩、簡嘉佑，「種植不同本土型水生植物之小型人工濕地淨化污水之效能比較」，第 23 屆廢水處理技術研討會論文集，高雄市(1998)。
13. 李志源、劉文得、李駿智，“氮磷在布袋蓮人工濕地之去除機制”，第 23 屆廢水處理技術研討會論文集，高雄市(1998)。
14. 羅瑋琪、楊磊，「以人工濕地處理煉油及煉鋼廢水之研究」，第 27 屆廢水處理技術研討會論文(2002)。
15. 賴恩華，「以人工溼地處理工業廢水之研究」，國立中山大學環境工程研究所，碩士論文(2002)。
16. 荊樹人、林瑩峰、錢紀銘、李得元、何茂賢、陳韋志、張弘昌，「蒸發散效應對人工溼地系統處理效能上之影響」，第 28 屆廢水處理技術研討會，台中，第 1-138 頁(2003)。
17. 袁菁、連興隆、黃世孟、陳郁文、方湜惠，「人工溼地實驗模組應用於校園水源淨化之研究」，第 29 屆廢水處理技術研討會論文，台南市(2004)。

18. 陳治勛、蔡欣恬、丁澈士、張祥仁、簡新洋，「濕地水文之研究-以屏東科技大學靜思湖為例」，第二屆資源工程研討會論文集(2005)。
19. 吳穎祥，「台灣南部人工溼地蒸發散之特性」，嘉南藥理科技大學環境工程衛生系所，碩士論文（2009）