

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

## 土壤性質對人工溼地活性關係之探討

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：CNEV92-18

執行期間：92年1月1日至92年12月31日

計畫主持人：荊樹人

共同主持人：林瑩峰

計畫參與人員：謝明奇

執行單位：嘉南藥理科技大學環境工程與科學系

中華民國九十三年二月二十八日

# 土壤性質對人工溼地活性關係之探討

## 摘要

本研究利用位於台南縣二行社區全國首座以人工溼地技術為主體且自然淨水的實場人工溼地系統，針對系統表面自由流動式(FWS)中土壤作不同深度的營養鹽和重金屬分析，以探討人工溼地系統還原性土壤的性質與分類。然而有關人工溼地系統應用於實場處理廢(污)水皆為國外研究，且針對系統土壤的特性之探討較少；至於國內在實場人工溼地系統對底泥特性之探討尚未有相關研究，由於底泥之性質與土壤類似，希望能將此研究成果，提供實場人工溼地系統穩定後處理廢(污)水之污染物殘留於基質-土壤的基本性質，作為日後建立本土之實場操作參數，以達到水資源保育與永續利用之目的。

本研究之土壤是採自 FWS 系統，自 92 年 9 月 26 日至 93 年 1 月 3 日，分析土壤活性，以四個採樣點(CW1、CW2、CW3、CW4)於每兩星期採樣一次，每個採樣點分成上、下兩層，在土壤採樣過程中發現，人工溼地前段渠道的沉積物(底泥)深度為 5~10 公分，而後段渠道僅 3~5 公分，也同時採原土壤深度為 5 公分作不同深度土壤性質分析。其土壤基本性質分析結果：(1) 質地分析發現四個採樣點上層質地均屬泥炭土又稱腐植土屬有機土，而下層 CW1 及 CW4 質地均為粒性土、下層 CW2 及 CW3 質地皆為粘性土，經分析發現重金屬是分佈在屬土；而依重金屬之吸附性和移動性的大小為粒性土 > 粘性土 > 泥炭土，可知人工溼地上層的底泥較下層原土壤能夠有效的束縛營養鹽和重金屬的移動小且吸附性大。(2) 氧化還原電位(ORP)之土壤從進流到出流均呈現負相關性，顯示人工溼地底泥環境均屬還原型態且具厭氧特性，能長期束縛底泥中的重金屬而使其不易釋出到水體，避免二次污染。(3) 土壤的酸鹼值(pH)從進流到出流屬於中性至中鹼範圍，顯示在人工溼地底泥中重金屬的移動性(mobility)及生物有效性(bioavailability)雖較差，但卻能夠將其保留於底泥不易釋出水體。(4) 土壤的溶解性有機碳(STOC)本研究結果顯示不同深度的土壤 STOC 值雖無明顯差異，但已具足夠含量，因人工溼地所種植的蘆葦和香蒲成長非常茂盛，表示有足夠碳源提供給底泥中的微生物作脫硝分解成植物所需的營養源。(5) 底泥含水量測定除提供計算重金屬分析結果外，也發現底泥上層的含水量較下層高，透過質地分析得知底泥的含水量大小為泥炭土 > 粘性土 > 粒性土，這表示含水量高的底泥具較低的容積密度及較高的孔隙率與保水容量。

關鍵字：人工溼地系統、還原性土壤、底泥、重金屬、質地分析

## 一、前 言

近年來，國人已逐漸了解溼地在生態上的重要性，尤其對保護沿岸溼地為候鳥棲息地特別重視，然而溼地的特殊功能並非唯獨於此，對淨化水質、調節氣候、調節洪水、保護海岸、休憩觀光及教育上都有很重要的貢獻。在以上所提到之功能中，利用溼地的自淨能力來處理人類所產生的廢水，除了可將污水水質淨化，減少對環境的污染外，亦可維持自然溼地或人工溼地之生態系統。除此之外，若二級以上處理過之廢污水經過溼地系統淨化後，其放流水可考慮回收再利用之可行性，達到水資源可永續利用的目的。

人工溼地的建設目的是要將廢水滯留於底部土壤層上方進行處理，因此需將廢水滲濾損失至土壤下層部分，減少至最低。所以人工溼地場址的表層土壤性質要求低滲透性（小於5 mm/h）為佳。隨著人工溼地的形成及廢水處理的過程，表層土壤的孔隙會逐漸被沉積的固體及細菌生物膜生長所密封【11】。由此可知，人工溼地系統的土壤是植物生長的媒質，水生動物活動的基石以及土壤微生物繁殖的培養基。自然界的生態系統之所以能夠連綿不斷、生生不息，土壤所扮演的角色雖不是唯一，但確是最重要的一部分。

溼地土壤持續或季節性處於淹水條件下，加上來自植物屍體殘枝而累積的有機物，使得許多溼地土壤永久地處於厭氧狀態。溶氧在飽和含水土壤中的擴散相當緩慢，土壤中的溶氧一但被微生物耗盡而呈厭氧條件時，分解過程亦趨緩。由此相對地增加了有機物的累積，淹澇的結果也影響著溼地土壤的生物地質化學等特性。這樣的條件使得溼地環境中的土壤自成一類，美國農業部特別在土壤保育協會之下成立國家還原性土壤技術委員會（National Technical Committee for Hydric Soils）以研究還原性的性質與分類【15】。

本校人工溼地研究團隊於民國86年開始致力於溼地的研究，從實驗型的溼地去探討污染物淨化效能，以估算未來實場人工溼地之設計參數。在團隊的辛苦研究設計與政府環保機關的贊助以及二行社區民眾的支持，讓全國首座的實場人工溼地系統於民國90年誕生【11】。二行社區實場人工溼地遵循最初設計方法，針對污染源水質的淨化和植物生長過程作嚴謹的監測與分析，已在近年發表相當多的文獻與論文。

本研究是選定全國首座已完成之二行社區實場人工溼地系統，針對人工溼地之底泥土壤活性作探討。根據國外實場經驗指出人工溼地系統操作兩年以上的時間發現土壤基質上有沉積物（底泥）的累積，是因渠道上植物殘骸和處理機制所造成沉積物的累積；而在前段渠道的沉積物深度是5~8公分，後段渠道僅2~3公分【5】。本研究實場系統已操作兩年多的時間，經採樣亦發現土壤上有沉積物（底泥）存在，將有助於進一步對土壤的性質與分類作分析探討；茲將不同深度底泥土樣，分別進行氧化還原電位、酸鹼值、溶解性有機碳、土壤水分含量、質地分析、重金屬（鐵、錳、鋅、鎘、鉛、鉻、銅）等基本理化性質分析。

## 二、研究目的

本研究選定在全國首座實場人工溼地系統，其啟動操作過程，大多是針對水質和植物的生長關係作監測，歷經兩年多的操作系統已趨於穩定，且在近年發表相當多的文獻與論文，成為國內在實場系統設計上之規範指標，然而在穩定的人工溼地系統對於還原性土壤的性質與分類作分析，為另一項重要的研究。根據文獻指出總營養負荷比含量在溼地的分配：(1) 在土壤、沉積物和枯枝落葉層或底泥為 80%；(2) 在水層中為 15~20%；(3) 在植物和其他生物群為 5%【7】；由此可見人工溼地系統處理廢水的淨化過程，其大部份的營養鹽和重金屬均會落在基質—土壤上，故本研究目的是利用二行社區實場人工溼地自由表層流動系統 (FWS) 中的土壤作不同深度的活性分析，以探討人工溼地系統還原性的土壤性質與分類，包含氧化還原電位、酸鹼值、溶解性有機碳、土壤水分含量、質地分析、重金屬 (鐵、錳、鋅、鎘、鉛、鉻、銅) 等基本理化性質分析。有關人工溼地系統應用於實場處理廢(污)水皆屬國外研究，國內此方面技術及操作參數明顯不足，希望能建立本土之操作參數。

## 三、文獻探討

人工溼地在國際間已經有相當普遍之應用，對於廢(污)水之處理、調洪、暴雨逕流的處理，以及景觀生態環境的再造，都有日新月異的成果。反觀於國內對人工溼地技術之瞭解、研究及應用較缺乏且起步較晚。然而隨著國外的研究進展，國內學者由文獻中較能清楚人工溼地的淨化機制及導入工程設計方法來增強溼地功能。在 1994~1998 年期間，國內建立數個人工溼地研究場址，為國內溼地技術的草創期。在 1998~2001 年間在溫清光教授等人，共同執行『溼地對水資源之保育管理及永續利用』之研究計劃，茲將近幾年整合其國內有關人工溼地的成果，陸續完成了人工溼地設計準則與操作條件的資訊系統，以及訂定溼地之管理辦法。對未來國內實場人工溼地系統的應用與設計，能有依循的準則與規範。

人工溼地系統的土壤是植物生長的媒質，水生動物活動的基石以及土壤微生物繁殖的培養基。自然界的生態系統之所以能夠連綿不斷、生生不息，土壤所扮演的角色雖不是唯一，但確是最重要的一部分。溼地土壤持續或季節性處於淹水條件下，加上來自植物屍體殘枝而累積的有機物，使得許多溼地土壤永久地處於厭氧狀態。溶氧在飽和含水土壤中的擴散相當緩慢，土壤中的溶氧一但被微生物耗盡而呈厭氧條件時，分解過程亦趨緩。由此相對地增加了有機物的累積，淹澇的結果也影響著溼地土壤的生物地質化學等特性。這樣的條件使得溼地環境中的土壤自成一類，美國農業部特別在土壤保育協會之下成立國家還原性土壤技術委員會 (National Technical Committee for Hydric Soils) 以研究還原性的性質與分類。依該委員會的描述—還原性土壤一詞乃指：「在生長季裏保持非排水狀況下為飽和、淹澇、或者止水成塘造成足夠的延時，使在此條件之下能形成適於水生

植物生長繁衍之還原環境的一類土壤。」【15】

還原性土壤的組成可被概分為兩種：(1) 有機土或分類上名為Histosol，主要由有機質組成的含水土壤綱，又稱為泥碳層或腐植土。(2) 礦質土包括一些新成土 (Entisol)、老成土 (Ultisols)、以及始成土 (Inceptisols)。有機土通常比礦質土具較低的容積密度 (小於 $1\text{g cm}^{-3}$ ) 及較高的孔隙率與保水容量，所以淹滯過的有機土比礦質土更能涵容水分。然而在溼地某些有機質形成速率大於分解速率的環境中，最有可能形成有機土，此種環境通常具有相當低的溶氧、貧營養性、與較高的植物生物質量等特色【2】。

人工溼地系統是利用濕地中之動、植物及微生物等各種機制處理水或廢水的技術應用，一種自然淨化單元，水中污染物在溼地系統中被去除的機制除了物理、化學、生物處理外，還包括植物的吸收作用，其植物在人工溼地是為了去除污染源，它們不僅會消耗營養物亦能夠去吸收和累積金屬物，整體形成穩定的循環【6】，包括有下列去除機制：

人工溼地氮的去除機制較複雜，去除的過程視氮的型態而定，但大部分是屬於植物和細菌的作用。氮基本上以有機態和無機態存在，有機態氮一般被微生物分解為無機態氮，部分當作植物生長過程中的元素被攝取，而透過定期植物的收割，可去除廢水中部分的氮。有機態氮可能會附著於懸浮固體上隨沉澱和過濾去除，固態狀的部分會進入土壤的腐植質內，此腐植質不易被分解，故常有累積於系統內的現象【10】。

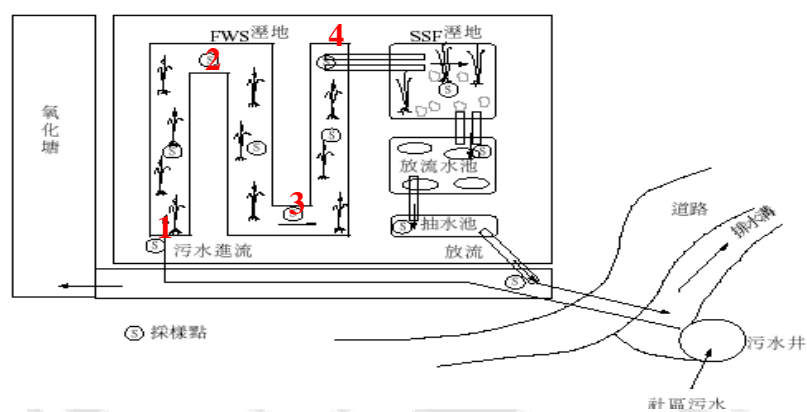
人工溼地磷的去除機制包括吸附、植物吸收、合成作用、沉降作用和沉澱。Bavor and Addock (1994)認為磷在溼地的去除是結合短期和長期過程。短期的過程是經由植物的吸收、襯底中的微生物有機體和沉積物。而長期的去除過程是以吸附和增加物進到底泥。吸附是磷去除最重要的機制。磷的吸附發生主要因為複合物與底泥中的鐵、鈣、鎂和鋁等礦物反應而沉降。吸附和沉澱起初僅作短期的存儲，一旦這物質沉積到泥炭層，它即成為長期的累積存儲的一部分。植物經由土壤的根吸收磷可達到 80% 以上，但因季節性返回又釋放到系統有大約 35% 到 75% 的量。所以磷最有效的去除就是在植物成熟時收割植物或將底泥挖出即可達成。否則，會與氮的方式相同，隨著植物枯枝葉腐朽後，磷會再被釋放回到水中【1】。

溼地重金屬之某些特定的金屬元素為植物生長所必需，如：鉀、鈣、鎂等為植物生長所需的大量元素；而鐵、錳、銅、鋅、硼、鉬等在植物生理學上為植物微量需求不可或缺；而像鎘、鉛、汞、砷、鉻等這些金屬並非植物所需，但在自然情況下，其皆可經由植物的正常代謝過程而累積吸附於植物體內。植物從土壤中攝取其生長所必須的營養元素如氮、磷、鉀及水份，藉由此機制，土壤中的重金屬物質也可隨之進入植物體內。土壤中的重金屬物質必須先溶解在土壤孔隙水中才能隨水份的傳輸進入植物體內。據研究指出，植物的根部會釋放出低分子量有機酸的物質 (Low molecular weight organic acids; LMWOAs)，這些低分子量之有機酸物質會解離出氫質子，來酸化根圈環境，以利於植物吸收土壤中之營養元素，此一作用機制稱之為根圈效應【13】。

人工溼地系統應用於實場處理廢(污)水皆為國外研究，但針對系統土壤的特性之探討較少；至於國內在實場人工溼地系統對底泥特性之探討尚未有相關研究，由於底泥之性質與土壤類似，能提供實場人工溼地系統穩定後處理廢(污)水之污染物殘留於基質-土壤的基本性質，作為日後建立人工溼地系統之實場操作參數，以達到水資源保育與永續利用之目的。本研究應用已操作兩年之久實場人工溼地系統，其FWS系統上有沉積物(底泥)累積5~10公分高，據此同時將不同深度的上層底泥與下層原土壤基質作分析，亦有助於對人工溼地系統土壤活性與土壤性質關係作探討。

## 四、研究方法

### 1. 實驗場址與採樣點位置圖：(下圖)



本實驗人工溼地場址總佔地面積約1,330 m<sup>2</sup>，由表面自由流動式 (free water surface, FWS) 及表面下流動式 (subsurface flow, SSF) 所串聯組成，人工溼地系統末端連接放流水池與抽水池(圖1)。FWS溼地約佔地492 m<sup>2</sup>，為一長104.5 m、寬4.2 m、水深0.5 m 的S型渠道，底部鋪設不透水布，並覆土30 cm，系統中種植香蒲 (*Typha orientalis Presl.*) 及蘆葦 (*Phragmites australis L.*)。SSF溼地長14.4 m、寬5 m、水深0.8 m，底部鋪滿卵石並種植蘆葦。放流水池即為景觀池，長12.2 m、寬5 m、水深0.8 m，池中除種植香水蓮花外，並放養鯉魚。抽水池長為4.2 m、寬8 m、水深0.8 m，其功能為貯留處理後污水，以方便處理水再利用。

### 2. 採樣

本研究之土壤係採自台南縣仁德鄉二行社區實場人工溼地系統之 FWS 系統，沿著溼地前(進流水)、彎曲兩處和後(出流水)共設四處採樣點。每兩星期採樣一次。於四個採樣點現場測定 ORP，並作紀錄。每一採樣點分成上、下兩層，其上層為沉積物(底泥)、下層為原現地土壤。採土樣時，將土壤採樣器加裝自製 PE 管，以垂直方式取土樣，封裝於 PVC 瓶。採樣後檢測 pH 及 STOC，土樣經烘乾(測土壤水分含量)、磨碎、過篩，以 0.10 mm 篩網過篩作 ICP 重金屬分析；另以 0.4 mm 篩網過篩作 FIA 分析。

### 3. 土壤的性質與分類

將不同深度底泥和土壤樣品，分別進行氧化還原電位、酸鹼值、溶解性有機碳、土壤水分含量、質地分析、重金屬（鐵、錳、鋅、鎘、鉛、鉻、銅）等基本性質分析。

- ◇ **氧化還原電位**：溼地底泥之 ORP 值採現地量測方式。
- ◇ **酸鹼值測定**：溼地 pH 測量為參考環保署公佈之 NIEAS410.60T5 量測溼地底泥之 pH 值。
- ◇ **溶解性有機碳**：溼地底泥的溶解性總有機碳(solubility total organic carbon, STOC)含量為參考 White and Reddy【4】之分析方法。
- ◇ **土壤水分含量**：土壤水分含量測量為參考環保署公佈之 NIEA S280.61C 量測溼地底泥之 pH 值。
- ◇ **質地分析**：溼地土壤質地是以現地實場 FWS 系統採樣，在渠道操作數年後的植物殘骸發現有沉積物（底泥）。而在溼地前段渠道 CW1、CW2 兩點上層的沉積物（底泥）深度為 5~10 公分，而後段渠道 CW3、CW4 兩點上層僅 3~5 公分，也同時採原土壤深度為 5 公分作不同深度分析。將採回之土樣分別作 pH 及 STOC 之檢測後烘乾(測土壤水分含量)、磨碎，以 0.10 mm 篩網過篩作 ICP 分析重金屬測定；另參考美國統一土壤分類法【9】將土樣作質地分析，以 0.075 mm 篩網過篩來決定土壤的類別。
- ◇ **重金屬分析**：參考環保署公佈之 NIEA S321.62C 作萃取。並參考環保署公佈之 NIEA M104.01C 感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP) 作鐵、錳、鋅、鎘、鉛、鉻、銅等重金屬分析。

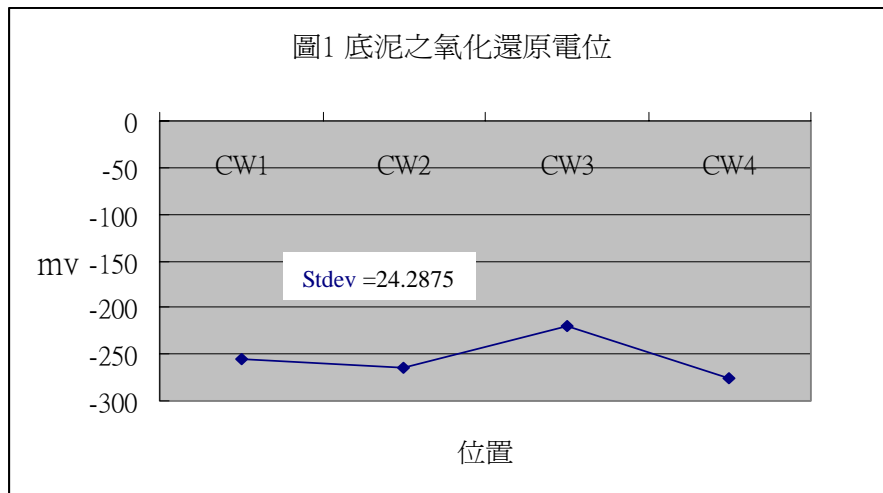
## 五、結果與討論

本研究之二行社區實場人工溼地系統，從91年1月啟用至93年1月已有兩年的操作時間，在FWS渠道發現有沉積物（底泥）產生，在溼地前段渠道兩點（CW1、CW2）的沉積物（底泥）深度為5~10公分，而後段渠道兩點（CW3、CW4）僅3~5公分，此分析結果與文獻值不謀而合；根據文獻指出當人工溼地穩定操作數年後，因植物生長的作用而有沉積物的產生，沉積物的深度由開始的5~8公分，流至後段時其深度約剩2~3公分。另現場採原土壤深度10 cm作分層分析。將不同深度底泥和土壤樣品，分別進行氧化還原電位、酸鹼值、溶解性有機碳、土壤水分含量、質地分析、重金屬（鐵、錳、鋅、鎘、鉛、鉻、銅）等基本理化性質分析。

### （一）在氧化還原電位方面：

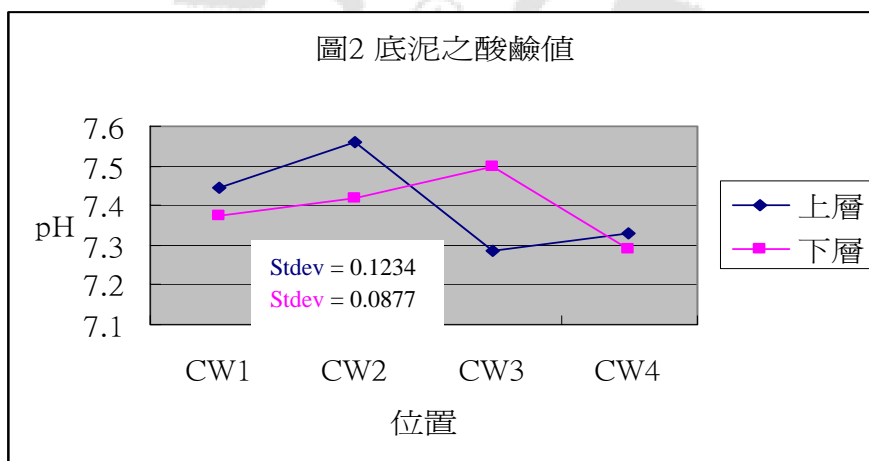
根據文獻認為一般溼地土壤飽和含水和低溶氧的條件常造成氧化還原電位呈負值，其典型的溼地土壤 ORP 值為-200 mV 至-300 mV 的還原環境【3】。本研究各組土壤的 ORP 值，由圖1可以發現由進流至出流均呈現負相關性，其 ORP 值平均 CW1 為-256 mV、CW2 為-265 mV、CW3 為-220 mV、CW4 為-276 mV，其標

準偏差為24.288 mV，顯示底泥OPR值越高，土壤基質愈趨向還原態且厭氧的環境。



### (二) 在酸鹼值測定方面：

根據文獻指出在酸鹼值方面，pH值為影響河川底泥重金屬含量及型態之最直接因子，偏酸性底泥中重金屬的移動性(mobility)及生物有效性(bioavailability)較鹼性底泥大【12】。另有文獻指出在土壤酸鹼值屬中性偏鹼性的狀態下，為土壤中理想的脫硝作用環境，可證實底泥的脫硝作用受到pH的影響【14】。從圖2顯出上層底泥pH值介於7.29~7.56之間，下層原土壤為7.29~7.42範圍，由於底泥之性質與土壤類似，參考美國農業部於1957年所出版的農業年鑑中對土壤酸鹼度的等級劃分可知，土壤所測得之pH值，自進流至出流均屬於中性至中鹼範圍，顯示在溼地底泥中重金屬的移動性(mobility)及生物有效性(bioavailability)雖較差，但能夠保留重金屬不易釋出水體且又利於脫硝作用的進行。

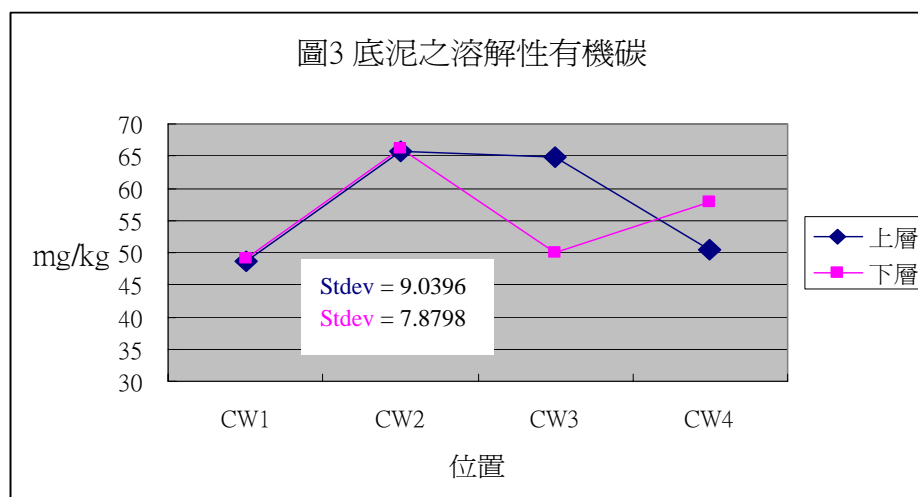


### (三) 在溶解性總有機碳方面：

在Buford and Bremner文獻中針對底泥作分析發現脫硝作用與水溶性有機碳的相關性比與總有機碳相關性來得高，因此對脫硝作用而言，溼地中可利用碳源的獲得將比總碳的來源重要【14】。本研究從進流至出流的各組土壤STOC值，其平均結果上層底泥CW1為48.76 mg/kg、CW2為65.69 mg/kg、CW3為64.76



mg/kg、CW4為50.51 mg/kg，標準偏差為9.0396和下層土壤CW1為49.20 mg/kg、CW2為66.08 mg/kg、CW3為50.07 mg/kg、CW4為57.86 mg/kg，標準偏差為7.8798。由圖3顯示底泥上、下層的STOC雖無明顯差異，但含量足夠，因為由人工溼地所種植的蘆葦和香蒲成長非常茂盛可知，土壤中含有足夠的碳源提供給微生物作脫硝分解作用形成植物所需的營養源。

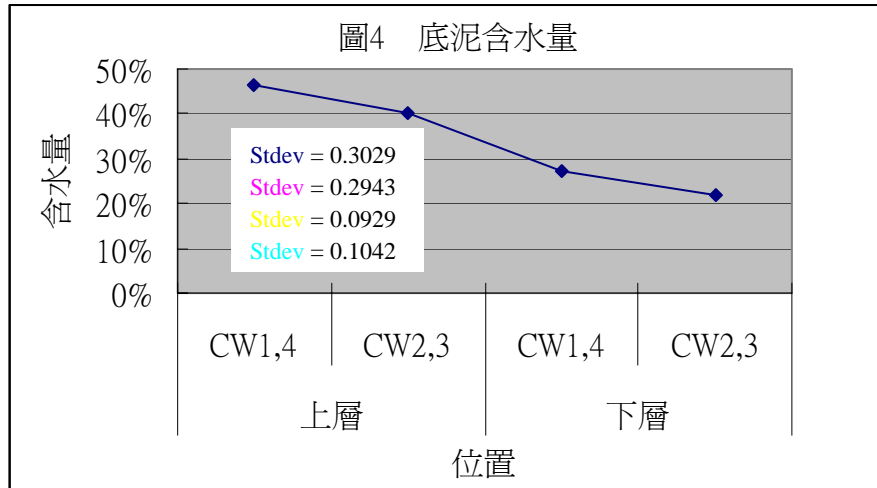


#### (四) 在質地分析方面：

根據文獻指出底泥質地粗細影響其對重金屬之吸附性及傳輸性。一般而言，粗質地者之粒徑較大，表面積較小，化學物理反應性亦較小，但傳輸性較大，使重金屬易在泥層中移動。細質地者之表面積較大，孔隙較小，流動不易，使重金屬較易吸持在底泥中而降低移動性【12】。本研究的土樣質地分析，以0.075 mm篩網過篩，發現CW1和CW4下層質地土粒性土屬礦質土的一種；而CW2和CW3下層質地土為粘性土也稱為礦質土。另一發現四個採樣點上層土壤沉積物為泥炭土是屬有機土。顯示對重金屬之吸附性和移動性的大小為粒性土 > 粘性土 > 泥炭土，可知溼地上層的底泥較下層原土壤能夠有效的束縛營養鹽和使重金屬的移動性小且吸附性大。

#### (五) 在底泥含水量方面：

本研究主要是提供重金屬分析結果後代入公式得到重金屬濃度含量。根據文獻指出有機土通常比礦質土具較低的容積密度（小於1 g/cm<sup>3</sup>）及較高的孔隙率與保水容量，所以淹澇過的有機土比礦質土更能涵容水分【1】。然由圖4底泥含水量平均結果底泥上層CW1與CW4百分比為46.52±0.3029、CW2與CW3百分比為40.02±0.2943和底泥下層CW1與CW4百分比為27.21±0.0929、CW2與CW3百分比為21.93±0.1042。這顯示底泥上層的含水量較下層高，透過質地分析得知底泥的含水量大小為泥炭土 > 粘性土 > 粒性土，故本研究實場人工溼地系統之底泥含水量與文獻相符，表示含水量高的底泥具較低的容積密度及較高的孔隙率與保水容量。



#### 四、結論與建議

1. 本系統土壤在長期淹滯條件且隨著深度的增加溶氧極速的耗盡，讓水體下的土壤形成厭氧型態，以致於氧化還原電位達到負相關性，可知本實場的土壤是屬還原性土壤。
2. 本研究土壤所測得之 pH 值，自進流至出流均屬於中性至中鹼範圍，顯示在溼地底泥中重金屬的移動性(mobility)及生物有效性(bioavailability)雖較差，但能夠保留重金屬不易釋出水體且又利於脫硝作用的進行。
3. 在本系統操作兩年來發現原土壤上層已有沉積物的累積，茲將不同深度的土壤，利用『美國統一土壤分類法』來瞭解溼地沉積物和原土壤作質地分析，上層沉積物屬有機土，而下層原土壤屬礦質土。
4. 表 1 為本研究實場之人工溼地自由表面流動系統作不同深度的土壤之基本性質分析，可透過表中的數據清楚瞭解本實場人工溼地土壤為還原性土壤，能有效的對危害性的污染物（如重金屬和營養鹽）作最終的住所。

**表 1 在溼地不同深度的還原性土壤之基本性質**

Location	Soil depth cm	Soil	pH	Water Content g kg <sup>-1</sup>	ORP mv	STOC mg kg <sup>-1</sup>
CW1	5-10	泥炭土	7.45	48.70	-255.86	16.50
	10-15	粒性土	7.38	26.36		21.04
CW2	5-10	泥炭土	7.56	36.63	-265.29	40.08
	10-15	粘性土	7.42	22.28		42.76
CW3	3-5	泥炭土	7.29	32.27	-220.27	53.28
	5-15	粘性土	7.50	19.98		43.90
CW4	3-5	泥炭土	7.33	40.23	-276.43	41.39
	5-15	粒性土	7.29	24.76		52.42

## 五、誌謝

本研究計劃承嘉南藥理科技大學 CNEV92-18 贊助經費，使計劃工作得以順利完成，特此致謝。另於研究期間承嘉南藥理科技大學人工溼地研究團隊的參與及同學幫忙，特此一併致謝。

## 六、參考文獻

1. Bavor H J and Addock P W (1994) Relating phosphorus distribution within wetlands to their long term performance, Proceedings of 2,d Annual Conference, pp 24-29.
2. Kadlec, E. R.H. and Knight, R. L.,1996. Treatment wetlands, 2<sup>nd</sup> ed., Lewis.
3. Hammer, D. A., 1996. Creating freshwater wetlands, 2<sup>nd</sup> ed., Lewis.
4. White, J. R., and Reddy, K. R., “Influence of nitrate and phosphorus loading on denitrifying enzyme activity in Everglands wetland soils,” Soil. Soc. Am. J. 63, pp.1945-1954, (1999).
5. Hanna Obarska- Pempkowiak, Katarzyna Klimkowska “Distribution of nutrients and heavy metals in a constructed wetland system” Chemosphere, Vol. 39, No. 2, pp.303-312, (1999).
6. Lin, Y. F., Jing, S. R., Lee, D. Y., and Wang, T. W., 2001a. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*, in press.
7. Faulkner S P and Richardson C J (1990) Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils in Constructed wetlands for wastewater treatment, 2<sup>nd</sup> printing ed. D A Hammer, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, pp 41-72.
8. DLWC(1998a)The constructed wetland manual vol.1 DLWC, New South Wales.
9. 潘國樑 (1993) ，應用環境地質學：地景企業股份有限公司，台北市，471 頁。
10. 吳曉磊 (1995) ，「人工溼地廢水處理機制」，環境科學 16 卷 (3 期)，82-88。
11. 台南縣仁德鄉二行村社區發展協會，2001，環保署環保示範社區計劃。
12. 刁茂文、李芳胤，底泥中重金屬分佈特性之探討，屏東科技大學環境工程與科學系，中華民國環境工程學會之研討會 (2003)。
13. 張維妮“不同營養特性之植物組織及部位對土壤中重金屬之累積吸附研究”，碩士論文，朝陽科技大學環境工程與管理研究所，台中縣(2003)。
14. 施凱鐘“溼地中硝酸鹽去除與底泥特性之關係”，碩士論文，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系，台南縣(2003)。
15. 李黃允“以二階段人工濕地去除生活污水中之營養鹽”，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所，高雄市(2003)。