

水空心菜濕地對市區污水之去除能力

Removal Ability to Municipal Wastewater by Water Spinach Wetland

淡江大學水資源及環境工程學研究所研究生
農業工程研究中心技師

劉玉雪

Yu-Hsiueh Liu

淡江大學土木工程學研究所
教授

涂錠基

Ting-Chi Hsu

摘要

本研究在台中市大里地區以稀釋的都市污水，灌溉水空心菜田進行試驗，該農田因長年用漫灌方式已形成人工溼地，為評估農民此種灌溉田操作之合宜性，該田區乃以類似的自然漫地流系統評估之。

研究結果發現本田區之土壤、長度、坡度、面積均符合規定，但灌溉週期採連續流方式使灌溉率與水力負荷夠高，雖然 BOD 負荷仍在理想值內，但對停留時間較長的氮硝化作用則不甚理想，因此建議採分數個小田區的批式灌溉較合適。

本試驗中以 SS、BOD 去除效果較佳，單位去除量為 5.10、1.34 g/m².d，氮、磷去除情形分別為 0.45、-0.03 g/m².d 較差，水空心菜在進水口的生長也不如出水口良好，可見營養質是供過於求。

無機氮的去除中僅 NO₂⁻-N 在溼地之天然曝氣作用有明顯降低；農田出水中磷含量反較進水高，以白天最為明顯；因此若能將水空心菜田的流速降低或減少灌溉率與週期，以提高污水在農田中的停留時間，則能增進處理成效。

關鍵詞：溼地，表面漫地流系統，水空心菜，市區污水，氮，磷。

ABSTRACT

This experiment was performed with diluted municipal wastewater to irrigate water spinach in Taichn Tsieh Tali region. Experimental area is on artificial wetland formed by overland-flow system over a period of time. The purpose of this paper is to estimate suitability of irrigation operation by municipal wastewater with natural overland-flow system.

Result shows soil characteristic, slope length and grade, area were in accordance

with overland-flow system. However, irrigation rate and hydraulic loading rate were too high by continual irrigation. Although BOD loading rate was under suggested value, the nitrification was not completed perfectly due to retention time. Thus, it will respond if the irrigation operation can change to pilot provision.

The removal rate of SS and BOD were 5.10, 1.34g/m².d, which is pretty effective, and the removal rate of nitrogen and phosphorus is insignificant, only 0.45, -0.03 g/m².d.

Aeration process in water flow significantly decreased NO₂⁻-N concentration in artificial wetland. However, removal efficiency of phosphorus is insignificant, and concentration of phosphate in outflow is higher than inflow in daytime. Therefore, decreasing flow rate, irrigation rate and or increasing water retention time in this wetland system may increase efficiency of wastewater treatment.

Keywords: Wetland, Overland-flow system, Water spinach, Municipal wastewater, Nitrogen, Phosphorus.

一、前言

目前台灣地區都市污水下水道普及率偏低，而且部份農工業等廢水在未經處理下直接排入渠道內，造成水質污染，如日本痛痛病、水俣症等慘痛經驗，因此灌溉水質監視工作大部份著重在重金屬污染防治，但農田一旦遭受重金屬污染，其復育工作則相當困難，至今尚無有效、經濟可行的土壤復育方法，本省除局部地區灌溉水質遭受重金屬污染外，因都市污水及豬糞尿等有機性污染則為最普遍與常見者，有機污水中含有碳、氮、磷等生質能源，可藉自然界微生物的分解、植物的吸收而達淨化作用。目前農田以栽種水稻為主，碳、氮、磷的需求並不高，但有機污染中此種養份常有過高情形，因而造成水稻徒長、產量銳減、土壤厭氣化，所以農田作物未能有效發揮淨化功能；對於經常灌溉的農田而言，其已略具濕地型態，若能在水稻田上栽種需高營養源（N、P）之菜葉類或水生植物，藉土壤過濾吸附及植物吸收等機制，在水質淨化及作物轉作上均有所助益，可說是一舉兩得之方法。

近年來本中心所進行的全省水生植物栽培與水質利用研究中，以受都市污染的台中大里溪灌區，部分田區栽種水空菜的成效最為好，而且

據有關資料顯示表面漫地流的田間能種植合適的植被，對氮、磷去除有助益(曾四恭，1996)，但國內在該類的研究則相當缺乏，因此本文之研究選擇大里溪灌區為野外試驗場地，探討污染灌溉水經水空心菜田區後之淨化情形，該試驗結果若有成效將可推廣於類似污染灌區，除可去除污染質外並能利用生質能源栽培作物以提高農民收益。

本研究試驗田區對污水的處理方式屬於自然處理中的地表漫地流系統(Overland-Flow Systems, OF系統)，一般OF系統是用於二級處理或營養的去除(Water Pollution Federation, 1990)，因此本實驗田區分析數據以OF系統的有關經驗公式加以計算，以探討其對灌溉污水之去除成效及農民灌溉操作之合宜性。

二、實驗場地與分析方法

(一)實驗場地介紹

實驗場地位於台中縣大里市涼益圳灌區內，該灌區約有10公頃之農田長年種植水空心菜維生，田區已具有穩定的溼地功能，試驗田區長100公尺、寬20公尺、坡度1%，田區之布置如圖1所示。

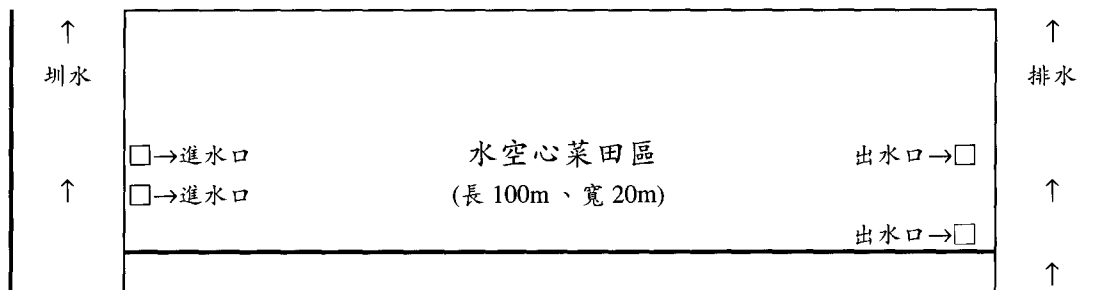


圖 1 台中大里試驗田區示意圖

(二)灌溉水質

田區種植水空心菜，採收週期為夏季每 4 週收割一次，秋季需 5~6 週才能收成。農田灌溉水源為大里市區污水經圳水稀釋之水質，試驗期間每 1 小時採一次進、出口水質，連續採 24 小時，因礙於經費有限及試驗場地位在台中之限制，故試驗期間每 6 日採樣分析一次。本試驗區之水源主要為大里市排出之生活污水並無其他污染源，且試驗期間並未降雨，因此每日所排出污染總量變異甚微，故以四次分析值之平均作為負荷之計量，進水之平均濃度 SS、BOD、COD、有機氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 為 20.1、5.4、19.4、4.22、0.20、0.04、0.34、0.29mg/l，電導度 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 25℃。

(三)表面漫流灌溉系統之有關操作準則及公式

在利用自然廢水處理系統中可分為快濾法、慢濾法、表面漫地流法，均利用廢水在土壤中之沈降、生物分解或植物吸收的方法而達淨化作用；對於表面漫流灌溉系統(OF)設計與規劃建議的基本條件，例如土壤應為黏土或黏質壤土，田區斜度介於 0~15%之間，在田區首端將廢水灌入以漫地流方式經過有植被的土壤，流至田區之末端時再以逕流方式收集，有關漫地流系統設計規定如表 1。

本試驗田區乃由灌溉渠道引灌混有都市污水之水質灌溉，至田區後採漫地流再排水，其與 OF 系統相類似，因此以 OF 系統的相關公式來評估該田區在灌溉操作上之合宜性。田區有關的重要參數流量 $Q=864 \text{ m}^3/\text{d}$ 、田間水深 $D=25\text{cm}$ 、

斜坡寬度 $W=20\text{m}$ 、斜坡長度 $Z=100\text{m}$ 、灌溉週期 $P=24 \text{ h/d}$ 、施灌率 $q=1.8 \text{ m}^3/\text{h.m}$ 。

OF 系統的水力負荷(Hydraulic Loading Rate, L_w)，單位為 cm/d ，近代研究顯示 L_w 與每月的灌溉時間具有相關性(Sherwood, 1995)，兩者的關係式如 2-1 式所示：

$$L_w = qP(100\text{cm/m})/Z \dots\dots\dots (2-1)$$

在 OF 系統中的有機負荷公式如 2-2 式(Sherwood, 1995)：

$$L_{\text{BOD}} = 0.1L_wC_o \dots\dots\dots (2-2)$$

上式中 L_{BOD} 單位為 $\text{kg}/\text{ha.d}$

0.1 = 轉換因子

C_o = 使用廢水 BOD 之濃度， mg/l

以 OF 系統處理污水所需要的土地面積乃用 2-3 式計算之(Sherwood, 1995)，該式是在無季節性廢水儲存時之推估方法。

$$A_s = QZ/qPC \dots\dots\dots (2-3)$$

上式中 A_s = 田間需要的表面積， ha

C = 轉換因子 = $10000 \text{ m}^2/\text{ha}$

(四)各項水質分析方法

1. 現場分析項目有水溫、酸鹼度(pH)、電導度(EC)、氧化還原電位(ORP)等項目。
2. 實驗室分析項目有化學需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、有機氮、硝酸氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亞硝酸氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、氨氮、磷酸磷、鹼度，以美國公共環境衛生協會(APHA)『水與廢

表 1 地流系統設計之有關規定

規定之項目	操作之規定與理想值	備 註
預定達成處理目標	二級、氮的去除	
氣候上的限制	溫暖的氣候	
是否需要植被	需要	
面積之需要(ha)	6-40	日處理量在 3785 ³ /d 流量時所需之面積
所用土地之要求	透水性低的土壤，包括黏土或黏質壤土，長度 30-60m	
土地之斜率(%)	0-15	
與地下水之距離(m)	0.5-1.0	
典型之有機負荷值(kg/ha.d)	40-100	
建議之灌溉率	0.16-0.33m ³ /h.m、3-6 cm/d	氣候與處理效率要求中等之情形
施灌水質之限制	EC:<700μs/cm、TDS:<450mg/l、SAR<3、Cl ⁻ :<140 mg/l、B:<0.7 mg/l	
處理後出流水質(mg/l)	BOD 10、TSS 10、TN 10	

以上資料摘自 Natural Systems for Waste Management and Treatment,1995。

水標準檢驗法』之方法分析。

三、結果與討論

茲將實驗數據分別以 OF 操作系統之重要影響因子加以討論如下：

(一)試驗田操作之檢討

1. 進流水前處理設置的需要

由以往試驗證實 OF 處理生活污水時，如有細篩網除、初沈降等前處理將使 OF 系統之成功率增加(Abernathy, 1985; Smith, 1982; Smith, 1985)，前處理中以 1 天停留時間的好氧池是理想的方式之一，有時也需視廢水的特性、污泥處理方式或偏遠地區等條件而定，美國 EPA 建議網篩加好氧池(屬於不完全混合活性污泥法)對市區污水較適合(Pound, 1973)，本操作田區所引灌經稀釋後之進流水 SS 最大值僅 60mg/l，尚不致造成田區土壤孔隙之阻塞，而且污水在經渠道輸送過程中部分固體物已經沈降，故進流水之前處理設置是不需要的。

2. 栽培田土壤之合宜性

OF 處理所選擇的位置一般適合在表土滲透

力 ≤ 0.5 cm/h 的地區進行(Sherwood, 1995)，這種低滲透力地區，屬於細質地的黏土或黏壤土，該緊密土壤能防止廢污水下滲，選取處理位置時，有時在深度 0.3~0.6m 間也需有硬土盤或黏土層以降低深層滲漏，本田區土壤屬於黏壤土，農民在水空心菜生長遲緩期的冬季，休耕晒田以降低土壤厭氧程度，土壤底層並不加設防水布，但一般農田中的牛踏層較堅硬也稍具有防滲的功能。

3. 水力負荷

以美國有關地區 OF 成功例子的經驗值 L_w 一般是 2~10cm/d (Sherwood, 1995)，另外 EPA 建議經氧化塘再以 OF 系統處理之 L_w 值為 1.3~3.3 cm/d。將田區分析資料的 q 、 P 、 Z 代入公式 2-1，所得 $L_w = 43.2$ cm/d，顯然該田區的水力負荷遠大於一般值與建議值甚多，因此若調整灌溉週期為 8h/d，即每日灌溉 8 小時，休息 16 小時之灌溉方式，或降低進流之流量，則 L_w 與一般理想值較接近，對污水之處理成效將可以提高。

4. 斜坡的長度、斜率

BOD、SS 及 N 處理去除需有足夠長度進行，如要提高處理等級必需在長度方面增加，典

型的長度為 30~60m，本田區有 100m 長，該項因子仍超出一般值，因此在該田區的斜坡長度並不是影響去除成效之限制因子。

對 OF 系統處理位置具有的斜率為 1~12%，最佳斜率為 2~6%，在巴黎、德克薩斯州最佳操作範圍在 2~6% (Abernathy, 1985)，斜率在 8% 以下則減少沖刷，當斜率少於 1% 時，則在低窪處增加積水的風險，本田區斜率為 1% 仍屬合理。

5. 灌溉週期

灌溉週期一般為 6~12 小時/天，5~7 天/週，典型值為 8 小時/天，OF 在短期內能以 24 小時/天方式操作，若以 12 小時灌溉、12 小時休息的方式灌溉將使氨氧化減弱 (Kruzic, 1990)，操作 8 小時/天方式則將面積分成三個部分，以便能 24 小時/天，在本田區中農民採 24 小時全天候的灌溉方式，是導致 L_w 過高之原因。

6. 有機負荷

對 OF 系統而言，有機負荷率將限制 O_2 經薄膜傳輸進入與廢水接觸的功用，通常在 0.5 公分水深的斜坡上，有機負荷率大約為 100 kg/ha.d (Sherwood, 1995)，以避免過量施灌而呈厭氧化。

以田區進水 BOD 之平均值 5.4 mg/l 及由 2-1 式所算得之 LW 值 43.2 cm/d，代入 2-2 式即得 L_{BOD} 值為 23.3 kg/ha.d，該值顯示 BOD 負荷對田間土壤尚不致造成過量負荷，但水空心菜田在長期浸水狀態才是其厭氧化的主因，在這種負荷下 BOD 的平均去除率為 57.4%，單位去除量 1.34g/m².d，若能提高水力停留時間讓水田中之微生物有足夠時間將有機物完全分解，則可提升其淨化成效。

另外由進、出水之 COD/BOD 比值分別為 3.6 及 6.7 可知出流水中含較多微生物難分解之物質，其中應以田間之植株纖維殘遺物為主，若扣除該類有機質計算所得之田間有機質去除率應提高。

7. 懸浮固體物負荷

在低流速及淺深度的灌溉下，SS 較能藉著斜坡的沈澱、過濾等機制而有效的去除，以表面

灌溉方法，大部分在灌溉點的起始數尺即被去除，對含高 SS 含量的工業廢水而言，將有污泥沈積問題，對噴灌者而言將考慮水質的均勻性，由本試驗田灌溉水 SS 之平均值 20.1mg/l，最大值 60mg/l 來看，將不致造成污泥淤積之問題，其平均去除率在 58.7%，單位去除量為 5.10 g/m².d。另外依美國廢水回收再利用準則中對於懸浮固體物之要求，在食用性作物灌溉方面，SS 之限制值介於 5~30mg/l，因此本灌溉水質之 SS 尚稱良好，對食用作物水空心菜較不致於造成污染問題。

8. 氮的移除

氮的去除則需有適當的 BOD/N 比、停留時間、溫度及長停留時間，為達長停留時間需有低施灌率及長的坡度。硝化及脫硝是氮的去除方式，溫度低於 4 °C 將限制硝化作用，當原水在網篩及一級流出水時脫硝較為有效，因為在高 BOD/N 比時，在 OF 系統中生活廢水中僅少量氨轉換成硝酸，氮僅少量被去除 (Reed, 1984)，很明顯的在田間剛開始停留的氨是先被土壤吸附，將優先行硝化及脫硝作用。

試驗期間水溫均在 25~30 °C 間，BOD/N 比為 1.22 為硝化菌適合生長條件，但水力停留時間為 13.9 小時對硝化菌整個硝化過程仍嫌過短，因此對有機氮、氨氮、亞硝酸氮、硝酸氮的平均去除率僅為 19%、10%、75%、47.1%，以硝化過程中的中間產物亞硝酸氮效果較為良好，田區對總氮的單位去除量為 0.44 g/m².d，若與加州的 Davis 市的 OF 系統斜坡長 45~60m，灌溉率 0.10 m³/h.m 下對氮的去除可高達 90% 比較 (Smith, 1982)，顯然本田區的施灌率 1.80m³/h.m 太高，為氮去除能力降低之原因。

另外在德克薩斯州的 Garland 市以二級出流水進行研究硝化研究，夏天氨可達 2mg/l，冬天則在 5mg/l，兩段時期進行的數據，冬天溫度在 3~21 °C，在 Garland 市建議的灌溉率為 0.43 m³/h.m (Sherwood, 1995)，噴灌在 61 公尺長下的操作時間是 10h/d，因此在本田間的操作則建議降低灌溉率與操作時間對氮的淨化能力將有利。

9. 正磷酸磷之去除

各類植物體中氮/磷比率低者在 10:1，高者可達 40:1 以上(Nuttall, 1985; Lorenz, 1980)，可見植物對磷的需求遠低於氮，由進流水 $\text{NO}_3^- \text{--} \text{N}:\text{PO}_4^{3-} \text{--} \text{P}$ 比為 1.17，可見磷的進流量是供過於求，一般環境中若為厭氧狀態磷蓄積菌將釋出正磷酸磷，該田區在長期漫灌下土壤呈厭氧態，因此出現出水磷含量反較進水高之現象，而且隨進水之氧化還原電位降低而昇高。

10. 試驗田所需面積之探討

OF 系統主要視流量、灌溉率、斜坡長及灌溉週期來定田間的土地面積(Sherwood, 1995)，將相關數據以方程式 2-3 計算之，得到需要面積為 0.2 公頃，因此本田區所用的面積大小尚稱合理。

(二) 各時段之水質狀況

一般典型住宅社區之污水水質範圍，其中 BOD、COD、SS、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 平均濃度分別為 200、500、250、35、25、5 mg/l (歐陽嶠輝, 1992)，而本試驗所用的灌溉水各項平均濃度各為 5.4、19.4、20.1、4.8、0.2、0.30 mg/l，可見大里地區污水是經圳路乾淨水 10~40 倍的稀釋，以 BOD 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 僅 5.4、0.2mg/l 之偏低濃度來看，社區污水流達農田灌溉時水中碳、氮在渠道中已經微生物行某種程度的分解作用。

全日 24 小時的採樣分析值發現渠道水質中以早上 7 時之有機氮 6.32mg/l 為最高，氨氮則以下午 1、6 時含量較多，其他時段水中有機氮及無機氮之硝酸鹽氮、氨氮含量及處理成效呈不規則性的變化，有時更出現出水濃度高於進水者，田區對亞硝酸氮之成效極佳，進水濃度為 0.03~0.08 mg/l，出水中僅為 N.D.~0.01 mg/l，出水含量甚微，各類氮進出水變化情形詳如圖 2~4 所示。

進水之 ORP 由上午 5 時呈明顯的下降趨勢，而且均為負值，一直到下午 5 時才有回升情形，可見該段時間渠道水中有機物行氧化作用，但水中氧氣供應有不足現象；水溫則由上午 7 時開始回升，下午 4 時達最高值，因白日陽光的照

射，其中以田區之表面較大，因此田間出水口水溫略高於進水，全日進、出水溫度範圍為 25.8~30.9 °C 及 26.0~31.4 °C；另外出水中正磷酸磷則在上午 9 時至下午 6 時有較高含量，曾高達 0.56 mg/l 之記錄，其釋出情形與田間水溫及進水之 ORP 有明顯的正相關，可見白天田間磷之釋出遠大於植物的需要量，詳如表 2 及圖 5~7 所示。

以 pH 而言，出水比進水低 0.3 個單位，顯見水中 H^+ 有增加的情形，硝化反應方程式如下式：

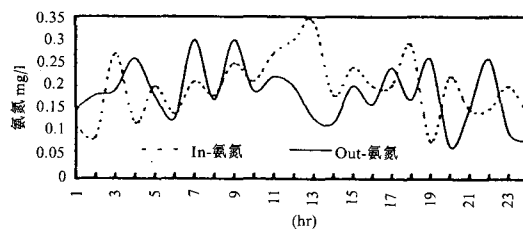
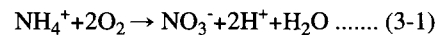


圖 2 大里試驗田區進出水氨氮比較圖

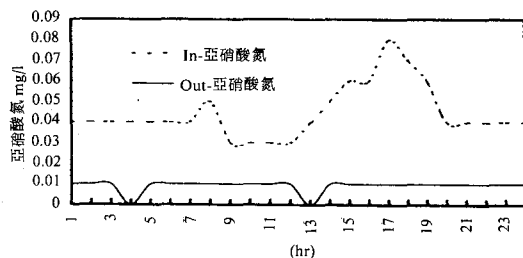


圖 3 大里試驗田區進出水氨氮比較圖

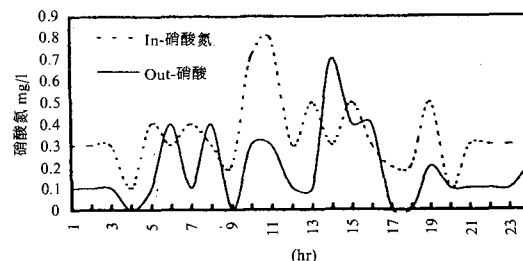


圖 4 大里試驗田區進出水硝酸氮比較圖

表 2 試驗田區進出流水質及處理成效

分析項目	濃度單位	平均進流水	平均出流水	平均去除率%	單位去除量(g/m ² .d)
SS	mg/l	20.1	8.3	58.7	5.10
BOD	mg/l	5.4	2.3	57.4	1.34
COD	mg/l	19.4	15.4	20.6	1.73
Org.N	mg/l	4.22	3.42	19.0	0.35
NH ₄ ⁺ -N	mg/l	0.20	0.18	10.0	0.01
NO ₂ ⁻ -N	mg/l	0.04	0.01	75.0	0.01
NO ₃ ⁻ -N	mg/l	0.34	0.18	47.1	0.07
PO ₄ [≡] -P	mg/l	0.29	0.35	-20.7	-0.03
EC	μs/cm 25 °C	440	439		
pH	無單位	7.5	7.2		
ORP.	mv	-12.8	0.46		
鹼度	mg/l	134	138		

以上資料乃以四次水質分析數據之平均值計算。

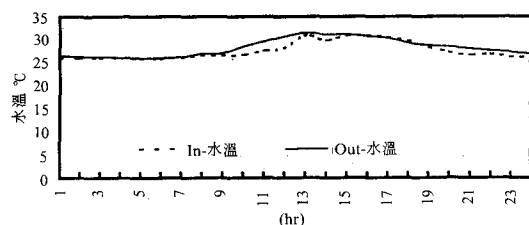


圖 5 大里試驗田區進出水溫度比較圖

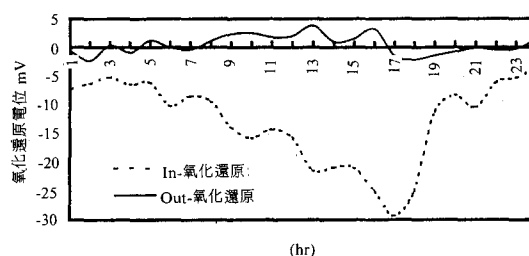


圖 6 大里試驗田區進出水氧化還原電位比較圖

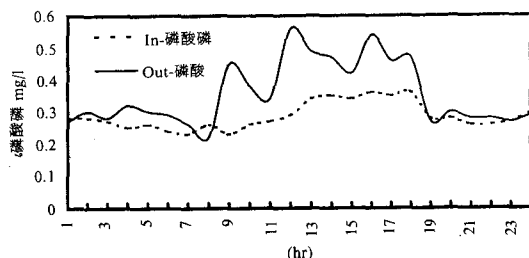
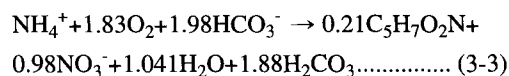
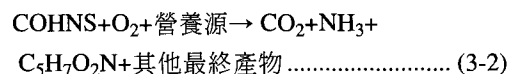


圖 7 大里試驗田區進出水磷酸磷比較圖

因此水中 pH 之降低可能由硝化作用釋出氫離子而來；田間在大氣供應氧氣的情形下，有機物在好氧下之氧化乃以 3-2 式進行，該反應是釋出 CO₂；另外微生物細胞的合成作用詳細如 3-3 式，由該式中可知每消耗 1g 的氧則消耗 7.14g 的鹼度。



雖然植物體的光合作用消耗 CO₂ 放出 O₂，但水中優養化有藻類產生時也將釋出鹼度，間接使 pH 升高，實驗期間田間出水中的鹼度經常有略高於進水情形，可見水中釋出鹼度的活動多於消耗鹼度者，其中包括有機分解與藻體生長等現象較為旺盛，而且以白天較為明顯，有關全天的變化情形如圖 8 及圖 9 所示。

該灌區所引灌水質電導等級在第二級，進、出水範圍分別為 415~468、410~468 μs/cm 25 °C，有關其變化如圖 10 所示，由圖中可見田間作物對 EC 之需求與去除極微，以此中等級之水質灌溉尚不致造成土壤鹽份之累積。

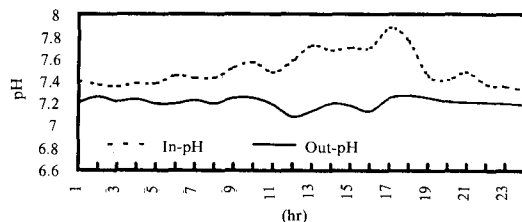


圖 8 大里試驗田區進出水 pH 比較圖

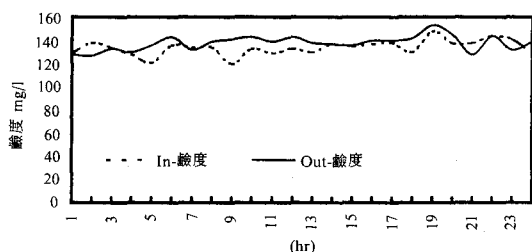


圖 9 大里試驗田區進出水總度比較圖

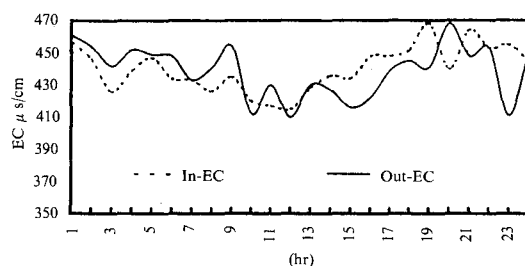


圖 10 大里試驗田區進出水電導度比較圖

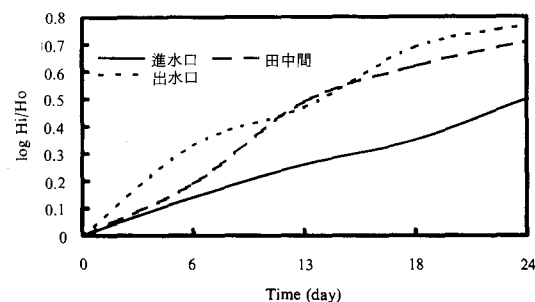


圖 11 試驗田間水空心菜生長率比較圖

(三)田間水空心菜生育及收穫量

在水空心菜生育期間定期量測其株高，各生長期的株高 H_i 除以植株原有高度 H_o 後，再取對數所繪成各生長期之生長率如圖 11 所示，圖中發現田間進水口數公尺植株生長高度遠低於田中間及出水口者，顯然以該進水速度及供應之水質與水量對進水口植株反有抑制作用，反而在出水口的植株生長相當良好，顯然流速過快對作物生長反有不良影響，另外也可能因進水中有過量營養源供應而造成負面影響，該方面問題實需進一步試驗方能確知。

試驗期間水空心菜約需 24 天的生長期，採收時在離田間進水口不同距離之三處收割植株秤重，並計算單位面積之產量，以田中間 3.84kg/m^2 產量為最高，出水口 3.72kg/m^2 居其次，再者為進水口 3.60kg/m^2 ，其中以進水口的產量最差；若以三處產量取平均，全年以 9 個月栽種期計算，平均採收期以一個月計，年單位產量為 334.8 噸/公頃·年，顯然收成量遠比水稻高，其一般售價也高於 10 元/公斤，在收益方面可歸類於高經濟作物，因此水空心菜對污染質不但有淨化作用外，作物之收益也遠高於水稻。

四、結 論

在台中大里田區進行的水空心菜田試驗，因該田區屬於自然處理系統中之地表漫流，因此將實驗結果以該系統之有關經驗公式計算之，並探討其灌溉操作之合理性，田區斜坡長度、斜率及面積方面均適合該類型系統對污水之處理要求，因灌溉週期採全天候方式及在高流量之情形下，使施灌率與水力負荷均遠超過一般表面漫流系統之經驗值，若調整兩項操作對系統內之 SS、BOD、N、P 等之去除將會有幫助。

以該田區的試驗結果發現以 SS、BOD 之去除率 58.7%、57.4% 為最高，單位去除量分別為 5.10 、 $1.34\text{g/m}^2\cdot\text{d}$ ，氮及正磷酸磷之平均去除率則為 37.8%、-20.7%，單位去除量分別為 0.44 、 $-0.33\text{g/m}^2\cdot\text{d}$ ，因此增加水力停留時間及調整灌溉週期對兩者之淨化均會有所改善。

五、參考文獻

1. 歐陽嶠暉，『以厭氣好氧 RBC 及活性污泥法並用程序同時脫氮脫磷之基礎研究』，第十七屆廢水處理技術研討會論文集，第 503-514 頁(1992)。
2. 曾四恭、張至誠，『生活污水土壤處理』，能源、資源與環境，第 6 卷，第 1 期，第 55 頁(1996)。
3. Abernathy , A. R., J. Zirschky , and M. B. Borup, “Overland Flow Wastewater Treatment at Easley” J. Water Pollution Control Fed., 57(4) pp. 291-299. Apr. (1985).
4. Kruzic , A. P., and E.D. Schroeder, “Nitrogen Removal in the Overland Flow Wastewater Treatment Process--Removal Mechanisms” Res. J. Water Pollution Control Fed., 62(7) pp. 867-876 (1990).
5. Lorenz, O. A. and M. T. Vittum, “Phosphorus Nutrition of Vegetable Crops and Sugar Beets. In. F. E. Khasawneh, E. C. Sample, and E. J. Kamprath (eds.)” The Role of Phosphorus in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, MI. (1980).
6. Pound, C. E., and R.W. Crites, “Wastewater Treatment and Reuse by Land Application” EPA 660/2-73-006b, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water Program Operations, Washington, DC, (1973).
7. Nuttall , W. F., “Effect of N, P, and S fertilizers on Alfalfa Grown on Three Soil Types in northeaster Saskatchewan. II. Nitrogen, P, and S Uptake and Concentration in Herbage” Agron. J.77 pp 224-228. (1985).
8. Reed, S. C., and R. W. Crites, ‘Handbook on Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes, Noyes Data, Park Ridge, NJ, (1984).
9. Sherwood, C. R., R. W. Crites, and E.J. Middlebrooks, “Natural Systems for Waste Management and Treatment,” 2nd Ed, Mc Graw-Hill Publisher, New York, pp. 309-316 (1995).
10. Smith, R. G., and E. D. Schroeder, “Field Studies of the Overland Flow Process for the Treatment of Raw and Primary Treated Municipal Wastewater”, J. Water Pollution Control Fed., 57(7) pp 785-794 (1985).
11. Smith, R. G., and E. D. Schroeder, “Demonstration of the Overland Flow Process for the Treatment of Municipal Wastewater-Phase 2. Field Studies”, California State Water Resources Control Board, Sacramento, (1982).
12. Water Pollution Control Federation, “Natural Systems for Wastewater Treatment”, Manual of Practice FD-16 , Alexandria , VA (1990).

收稿日期：民國 86 年 11 月 19 日

修正日期：民國 86 年 12 月 5 日

接受日期：民國 86 年 12 月 23 日