

以田口法維護水田生態機能之用水量評估研究

陳鈞華

屏東科技大學木工程系副教授、水利技師

童伯倫

屏東科技大學土熱帶農業所

宋建明

屏東科技大學坡地防災與水資源工程所

甘俊二

七星農田水利基金會董事長、水利技師

摘要

選定嘉南水利會內水田，進行水質、土壤、植物現場調查，得到維護水田生態機能之用水量。探討項目為：(一) 植物與溫度變化：正規化植生指標 (NDVI) 之之分佈圖顯示，水田之 NDVI 分佈範圍較窄(0.07-0.18)，然隨田間生育階段之不同而有較大範圍之溫度變化，其變化範圍達 15°C，其點分佈呈直橢圓狀。旱田之溫度及 NDVI 變化範圍均大，其點分佈略呈圓形。當 20%水田變都市後之溫度變化升高 1.80°C，20%水田變旱作後之溫度升高 1.01 °C。當 20%水田變水體後之溫度降低 2.82°C。(二) 植物與水質淨化：對六種污染物(正磷酸鹽、氨態氮、硝酸態氮、生物需氧量(BOD)、化學需氧量(COD)、懸浮性固體(SS)) 求出污染物分解速率，以正磷酸鹽為例其分解速率為 0.1371 (1/hr)，去除率與分解速率簡單迴歸分析，正磷酸去除率=0.757*正磷酸 k 值($R^2=0.883$)。

(三) 以田口法設計分析水田生態基流量:採用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 標準直交表進行實驗分析。水質(SS 去除率%)為望大特性，地力(EC 防止土壤鹽鹼化)為望小特性，本田用水量(mm) 為望目特性。本田用水量預測：當 S/N=20.2077, 平均本田用水量為 450.296mm, 為每公頃生

態基流量 4502.96m³/期作。試驗田區粗估雨量蓄存為每公頃 700-1000m³。試驗田一期作對於補注地下水、回歸水之水源涵養量粗估為每公頃 3320-6194m³/期作，二期作粗估為每公頃 3297-5968m³/期作。實務操作上應特別注意事項為該區農業用水仍呈不足之事實。

關鍵字：遙測、本田用水量、田口法



山水綜合技術顧問 股份有限公司

公司電話：02-27044382

公司傳真：02-27040944

網 站：<http://www.phl.com.tw>

地址：台北市光復南路 626 號 7 樓

執業技師：凌邦暉

水利技師 / 水土保持技師

E-mail：phl@phl.com.tw

執業技師：林永祥

水利技師 / 土木技師

E-mail：peter@phl.com.tw

營業項目：

- 河川整治及環境營造規劃暨設計監造
- 「水」、「滯」等地目廢除及改道申請
- 跨河建造物暨河川公地申請一維及二維水理分析 ➢ 防洪抽水站規劃設計
- 都市雨水、污水下水道檢討及設計監造
- 山坡地開發水土保持計畫編製及監造

The Assessment on the Water Requirement for Maintaining the Ecological Functions of Rice Paddy Fields by Taguchi Method

Key Word: Factor Analysis, Data Envelopment Analysis, Free Disposal Hull

Rice paddy fields (including fallow fields) in Chia-Nan Irrigation Association areas were selected, and the on-site investigations on water quality, soil, as well as vegetation were conducted to obtain the water requirement for maintaining the ecological functions of rice paddy fields.

I. Vegetation and temperature variation: (a) Discussion of temperature and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): the NDVI plots showed that NDVI values of rice paddy range narrower (0.07-0.18), but the temperature variation ranged wider as much as 15°C according to growing stages with elongated elliptical shape in distribution. The temperature and NDVI variation both range wider in uplands with distribution close to circular shape. Cities are characterized in land-use with lower average NDVI, higher temperature, and slightly tilted ellipse in distribution. (b) The impact on temperature due to the changes of rice-paddy areas: the temperature is raised by 1.80°C when 20% of rice paddy area is urbanized, raised by 1.01°C when

the rice paddy area is changed to upland, while lowered by 2.82°C when converted to water body.

II. Plants in paddy fields and water purification: (a) The degrading rate of six pollutants, namely phosphate (PO₄-P), ammonia nitrogen (NH₃-N), nitrate (NO₂-N), BOD, COD, and suspended solids (SS), were calculated, for example, 0.1371 l/hr for PO₄-P. (b) The simple regression with 95% confidence interval between removal rate and decomposition rate was conducted, for example, the removal rate of PO₄-P = 0.757*k value of decomposition rate (R² = 0.883).

III. The analysis of ecological base flow of rice paddy fields by Taguchi method: The L₁₈ (2¹ × 3⁷) standardization orthogonal arrays was adopted to perform experimental analysis. On the characteristics of targets, the water quality (SS removal rate %) is larger-the-better, the salinization prevention (EC) is smaller-the-better, while paddy field water requirement (mm) is nominal-the-better. Prediction of paddy field water requirement: the average paddy field water

requirement is 450.296mm when S/N=20.2077, and the ecological base flow per hectare is estimated 4,502.96m³/crop.

The rainfall storage in experimental fields is roughly estimated to be 700-1,000m³ per hectare. The amount of recharge to groundwater as well as return flow in first crop of experimental fields is estimated to be 3,320-6,194m³ /crop per hectare, while in second crop is 3,297-5,968 m³. Nonetheless, it should be aware in practice that the agricultural water is still in short in the area.

Key words: remote sensing, paddy field water requirement Taguchi method



電話：(02)2923-8528

E-mail：YCL63012@ms45.hinet.net

傳真：(02)2927-9835

地址：台北縣永和市保順路
13號2樓

負責人：林永敏 水利技師

營業項目：

水利工程、水土保持、大地工程、道路工程規劃研究設計

前言

水稻田在水系的調節及整個生態環境的保護，依據專家學者的研究其功能、效益，分別為：1.調節洪流，防止土壤沖蝕。2.儲存水源，安定河川流況。3.涵養地下水源，防止地層下陷。4.提供動植物群落繁衍及保育的棲所。6.提供休閒旅遊與研究教育。7.區域生態系調節等。

近年來氣候條件多變，生活與工業用水時有不濟之苦。雖有農業用水調配使用的協商會議，但在協商的過程中，農業用水的底線為何，乃一重要議題。倘使所有水田停耕轉為非農業用水，雖可解一時之枯旱，但是停灌休耕造成水田生態功能的喪失所造成的損失可能會無法衡量。在維持水田生態與永續經營水資源保育的前提下，乾旱時期水田生態基流量的評估遂成重要課題。透過水田生態基流量的客觀評估，選定嘉南水利會內水田，進行水質、土壤、植物現場調查，得到維護水田生態機能之用水量。探討項目為：(一)植物與溫度變化(二)水田植物與水質淨化(三)以田口法設計分析水田生態基流量。預期成果為建立水田生態指標觀測示範區，提供未來推廣水田生態指標觀測模式之參考。

一、植物與溫度之變化評估

2.1 田間雜草發生情形：

2004年8月之田間調查得知以甘藷田間雜草最多，其次為落花生。水稻則雜草最少，水稻田之雜草以稗草為主，旱作輪作田以小葉灰、假馬唐、牛筋草較多。

2.2 小區域田間作物類型判別及溫度判斷

(一)田間之作物生育類型判別

本實驗在中央氣象局嘉義氣象站之實驗田進行水稻栽種。水稻插秧後至分蘖期，在田中央架設各種微氣候感應器，淨輻射計、土壤熱通量計、風速、溫度、濕度各為 3 點高度，各點架設高度隨者水稻生長期而調整，並校驗準確度。所有感測器均利用電纜連接，將各種感應信號經由信號調諧器輸入資料收集器，其結果資料可由印表機印出。

選用水稻品種為台梗 12 號，採用機器插秧方式於 1998 年 7 月 2 日，行株距 30*18cm，施肥量與田間管理依農林廳推薦法進行。試驗期間為第二期、第一期稻作（1998 年 7 月 2 日-1999 年 6 月 1 日）。

(二)由氣象衛星影像推估地表溫度之材料與方法

所選取不同土地利用種類分別為水田、都市、蔗田、森林、漁塭。平均最高溫度變化之研究材料：

- (1) 氣象資料：由中央氣象局購得地面氣象資料，資料年份為 1987 至 1998 年。利用 Excel 軟體，計算各站每年氣象資料（最高溫度與平均氣溫）之相關係數，所得相關係數為 0.94-0.978。
- (2) 氣象衛星資料：由中央大學購得 1998 年 NOAA 氣象衛星，經選取當日全省各地區雲覆蓋少之氣象衛星資料進行分析。由航測所購得 1998 年 SPOT 地面衛星資料。所用影像處理溫度

判讀軟體為 Erdas Imagine 8.3.1 版本，地理資訊系統(GIS)為 PC ARC3.5.1 版本。

- (3) 平均最高溫度變化：地表輻射溫度由 NOAA 衛星影像波段，以下式計算 (Smith and Choudhury,1991)：

$$T(E)=C_z \gamma / \ln(1+c_1 \gamma^3/E) \dots\dots\dots [1]$$

式中：T：輻射溫度 ($^{\circ}\text{K}$)， γ ：波長中心量 = $1/\lambda$ ， c_1 ：常數 ($1.1941 \times 10^{-5} \text{ Mw.m}^{-2}\text{str.cm}^4$)， c_2 ：常數 ($1.43883\text{cm}^{\circ}\text{K}$)，E：遙測載具上感應器所測出之輻射量 (Mw)。

2.3 植物蒸發散量使地表溫度降低之公式：

有植物生長之情況，由植物因蒸發散量會造成鄰近地表溫度降低之公式（近藤，1994）：

$$T_s - T_a = ((1 - \alpha) R_s - LE - G) / (\rho C_p h + 4 \sigma T_a^3) \dots\dots\dots [2]$$

式中：式中： T_s ：地表之溫度 ($^{\circ}\text{C}$)， T_a ：空氣之溫度 ($^{\circ}\text{C}$)， α 為短波反射率， R_s ：太陽輻射能 (W/m^2)，以一種短波型式進入地表之量，隨當地季節及緯度而改變，LE：蒸發散所吸收潛熱 (W/m^2)，G：與地表下層交換的能量 (W/m^2)， ρ 為空氣密度， C_p 為空氣比熱，h 為攪動交換常數， σ ：為史帝芬-波茲曼常數 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2/\text{k}^4$)。

在公式 2 中可探討當一定氣象條件下，蒸發散量愈大，LE 亦愈大，地表附近呈現之溫度將降低。

2.4 大區域內不同土地利用下溫度變化及 NDVI 之推估：

- (1) SPOT 與 NOAA 衛星影像處理程序：SPOT 與 NOAA 衛星影像之解析度不同，且影像資訊所代表之意義不同。但經過精準之幾何校正程序，即可將 SPOT 衛星影像之資訊套疊至 NOAA 氣象衛星影像上，將可進行溫度及植生指標之分析。將相同日期之全台灣金馬的 SPOT 與最高氣溫時段 NOAA 衛星影像，選取 30 個控制點（含中央氣象局全省 10 各主要氣象站）進行精密之幾何校正疊加程序處理。如符合規範要求之精度，則 NOAA 衛星影像存有不同土地利用之資訊。
- (2) NOAA 衛星影像推估地表溫度之流程：將 NOAA 氣象衛星影像所需波段，合成為溫度影像之假色合成圖。NOAA 衛星影像前級處理如輻射校正、幾何校正程序、溫度之假色合成圖等處理後，即進行不同土地利用下溫度推估表，由公式 1 可得。選取不同土地利用之 NOAA 衛星影像多邊形，由 Erdas Imagine 影像處理軟體所內建克利金區域分析統計法計算 (Smith and Choudhury,1991)：

$$\gamma(d_{i,j}) = 1/2 * \text{Var}(h_i - h_j) \dots \dots \dots [3]$$

式中： $\gamma(d_{i,j})$ 為一距離 i,j 溫度函數之半變異圖。

都市為一複雜土地利用，內有工業區、綠地等，需分別對其各分區土地利用之散射率及面積，採面積加權平均計算出該都市平均散射

率。

分別計算出選取多邊形之面積經度、緯度、高程及氣溫平均值，區域內各點溫度之統計量（最高最低及平均氣溫、標準偏差），該多邊形之氣溫平均值 T_r 需經過輻射校正程序（ $T_r * em^{(-4.5)}$ ， em ：散射率），各地高程不同因高程影響而使溫度差異，高程氣溫校正是以溫度傾率（每升高 100 公尺，氣溫下降 $0.6^{\circ}C$ ）分別校正。選取區域內之多邊形內如無地面氣象觀測站，需選取鄰近氣象站（如農業氣象站、水利局、林務局等）氣象資料，與經過前項校正之遙測方法推估氣溫資料，進行線性回歸，求出溫度之斜率與截距，進行區域內溫度校正推估。經由面積加權平均計算，推估出不同土地利用之溫度變化，如表 1 所示。

表 1 嘉南地區不同土地利用與溫度變化

Table1. Different land-use and temperature change in Chia-Nan area

日期	水田 (°C)	旱田 (°C)	都市 (°C)	魚塭 (°C)	森林 (°C)
01/03/98	21.3	26.6	31.2	18.9	23.8
03/27/98	28.0	30.4	34.3	31.5	31.5
04/04/98	24.2	26.5	28.6	21.9	29.7
07/15/98	32.3	34.5	38.9	30.1	20.6
07/16/98	33.5	36.8	36.7	32.0	34.0
08/11/98	33.0	36.1	39.9	31.6	33.8
10/01/98	30.6	32.6	37.6	27.7	30.1
11/15/98	26.7	29.8	34.7	24.4	24.4
12/30/98	21.7	25.3	29.6	20.1	21.2
平均值	27.9	30.9	34.6	26.5	27.7
標準偏差	4.75	4.31	4.07	5.25	5.23

- (3) 正規化植生指標 (NDVI) 之估算：為求不同土地利用下探討作物生育階段溫度變化情形，本研究所採用正規化植生指標 (NDVI)，NDVI 值大者表示植生覆蓋良好，反之則否。NDVI 可免去植被比指標時間、空間差異

影響，可供相對量比較。在 NOAA 衛星影像分別推估出 1998 年不同時期之面積加權平均的植生指標變化，如圖 1 所示。

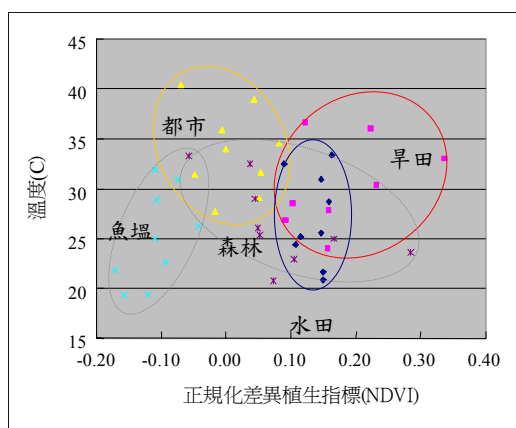


圖 1 嘉南地區各土地利用溫度與植生量變化

Fig.1 Temperature vs. NDVI variation of different land-use in Chia-Nan area

圖 1 顯示，其 NDVI 變化高低順序分別為森林>旱田>水田>都市>魚塭。溫度與 NDVI 之分佈圖顯示，水田之 NDVI 分佈範圍較窄 (0.07-0.18)，然隨田間生育階段之不同而有較大範圍之溫度變化，其變化範圍達 15°C，其點分佈呈直橢圓狀。旱田之溫度及 NDVI 變化範圍均大，其點分佈略呈圓形。都市之平均 NDVI 頗低，溫度偏高，分佈略呈偏斜之橢圓狀，為其土地利用之特色。

都市、魚塭 NDVI 在四季中均為負值，都市 NDVI 為負值，表示植生量少，故溫度較高。魚塭 NDVI 為負值，表示魚塭內雖有藻類亦會行光合作用，會降低溫度，但水体蒸發會吸收蒸發潛熱會降低溫度，但水體會大量吸收近紅外線

(NIR)，使 NDVI 為負值。森林水田蔗田 NDVI 在四季中均為正值，森林 NDVI 漸增，在秋季中為最高(表示南區為熱帶亞熱帶，85%降雨分佈於 5-10 月)，森林 NDVI 漸增，而溫度變化顯現冬暖夏涼趨勢。甘蔗為 2-3 年生高莖長期作物(甘蔗為製糖原料，台糖公司採大面積契約耕作)，採分區收成，收穫期為 12-1 月，NDVI 變化葉面增長而增加，在秋季中為最高。水稻田為 1、2 期作之短期作物(水田生育期間有湛水灌溉，NDVI 變化為水体及作物之組合)，但水体蒸發會吸收蒸發潛熱會降低溫度，但水體會大量吸收近紅外線(NIR)，使水稻之 NDVI 低於甘蔗，水稻之 NDVI 變化隨葉面增長而增加，收穫季中為最高值(為機械收穫而乾田)。

(4) 水田面積變動時對溫度造成之影響：

探討水田面積變動時，對氣溫變化所造成之影響，研究方法為在各不同土地利用情形下，計算各土地利用單位面積百分率之溫度貢獻量。此一結果，可推求水田佔有比率變動時造成當地溫度之變化情形，進而提供對居住環境品質維持之依據。

土地利用變更可能溫度變化之方法為結合遙測分析氣溫之主成分分析法。推求一定範圍內水田以不同比率變成都市後溫度之變化，如圖 2 所示。

嘉南地區該土地利用為都市占有率 14.907%，魚塭占有率 30.711%，森林占有率 7.342%，水体占有率 23.288%，旱作占有率 1.634%，其他占有率 22.118%。研究區域之溫度單位百分率貢獻度比較，水田之貢獻較都市低 8.50℃。當 20%水田變都市後

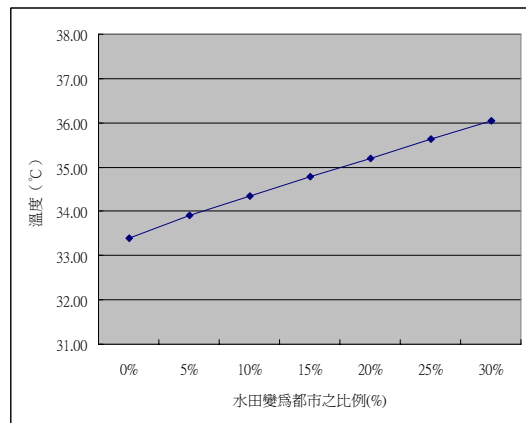


圖 2 水田以不同比率變成都市後溫度之變化

Fig.2 Temperature variation when paddy fields changed to urban area with different percentage

之溫度變化升高 1.80℃，30%水田變都市後之溫度變化升高 2.65℃，20%水田變旱作後之溫度變化升高 1.01℃。當 20%水田變水體後之溫度變化降低 2.82℃。

二、植物與水質變化之評估

- (1) 水質調查: 2004 年 8 月 5 日至 9 月 22 日在嘉南水利會台南安南灌區(A=10ha) (水稻分蘖初、中、乳熟期) 進水口、排水口進行有關水質調查項目 (PH、導電度、氯離子、TDS、DO、水溫)，水質檢測均符合灌溉用水質標準。

為探討植物與水質變化之評估，採用最佳水質管理策略(BMPs)進行試驗設計。本試驗水田區 (玉里鎮禹東段 36 號，地目：田，面積一·0 一七三公頃)位於花蓮縣玉里鎮大禹

里，本區東西寬 800 公尺，南北長 4000 公尺。本試驗中考慮影響草帶去除污染質的功效因子有長度與坡度二項因子。草帶之設計為，長 h 寬 b 為 5 公尺，水深利用耕耘機與推土機將地表整為無側向坡度之均勻坡，但無滾壓存實，共有 5%、1%二種坡度 32 塊場區。

讓 BMPs 系統應用上更方便，更容易設計處理各種不同濃度的進流水，及能達到所要求的水質標準，推估出所需的水力停留時間以體積，系統模式之建立採用 CFSTR 模式，因此需以數值方法去運算，以 Mathematica 軟體推求各污染物分解速率(k)，利用相關性分析及標準化簡單迴歸方式找出與各污染物之相關係數。

3.1 去除率 (Rr) 計算方法

將入流污染質總重，扣除草帶本身被洗出之污染質總重，及出流之污染質總重後，所剩餘之污染質重量與入流污染質總重量相比之比值，稱為去除率。

$$R_r = \frac{M_i + M_e + M_o}{M_i} \dots \dots \dots [4]$$

Mi：入流污染質總重(mg)，Me：草帶本身被洗出之污染質總重(mg)，Mo：流出污染質總重(mg)

3.2 週期性污染負荷模式 (CFSTR) 求分解速率 k 值

採用週期性污染負荷 (CFSTR) 模式模擬之水體中污染質分解速率，假定污染質分解為一階反應，其公式為 $r_c = -kC$ ，則由質量平衡可推得其微分方程式為：

$$V \frac{dC}{dt} = W(t) - Q(t)C + r_c V \dots \dots \dots [5]$$

式中，V,Q,k,C 為 t 之函數，設初始條件 $C(0)=C_0$ ，假設 V,Q,k,C 均為常數情況下，W(t)不為常數而為一週期

性污染負荷，式中， $\omega = 2\pi/T$ 為頻率， T 為週期， W_0 為最大污染負荷，故(5)式其解為：

$$C(t) = \frac{W_0}{\left(\frac{k'}{V}\right)^2 + \omega^2} \left(\frac{k'}{V} \sin \omega t - \omega \cos \omega t \right) + \left(C_0 + \frac{\omega \left(\frac{W_0}{V} \right)}{\left(\frac{k'}{V}\right)^2 + \omega^2} \right) e^{-\frac{k'}{V}t} \dots\dots[6]$$

C_0 ：進流濃度 (mg/L)， $C(t)$ ：在 t 時間之放流濃度 (mg/L)， k' ：一階動力參數 (1/hr)， W_0 ：最大污染負荷， V ：水體體積 (m^3)， ω ：週期， t ：水力停留時間 (hr)

3.3 推求所需水體體積及水力停留時間

如入流濃度 (C_i) 為 0.414ppm，出流濃度 (C_o) 0.316ppm 欲降低至 0.1ppm，代入公式，可求得 k 值為 0.1371，再代入可求水力停留時間 (t)， $t = 10.4497$ hr。 $t = 10.4497$ hr 代入原式中，則需要體積為 34.6526 m^3 ，如 $t = 11$ hr 代入原式中，可知需要體積為 39.408 m^3 。

3.4. 污染物去除率與分解速率之關係

經由 CFSTR 模式計算所得結果為六種污染物（正磷酸鹽、氨氮、硝酸態氮、化學需氧量、懸浮性固體、生化需氧量）之分解速率，如正磷酸鹽為 0.1371 (1/hr) 在，其它分解速率。再由統計軟體 SPSS (Ver.13) 所用 ANOVA 中逐步法求出各污染物去除率與分解速率關係，由圖 3-7 中之去除率與分解速率相關圖中，去除率高則分解速率就高，其去除率與分解速率有正相關；但在圖 8 中之 BOD_5 去除率與分解速率相關圖中，並無明顯正相關，其原因可能為田區實驗沒有超過 5 天的停留時間，而污染物之有機質未分解，所以 BOD_5 去除率與

分解速率不具相當的關係，這在表 2 中的 BOD_5 去除率與分解速率簡單迴歸式也可看出， R^2 也只有 0.367，可知在此田區實驗中 BOD_5 去除率與分解速率不具相當的關係。

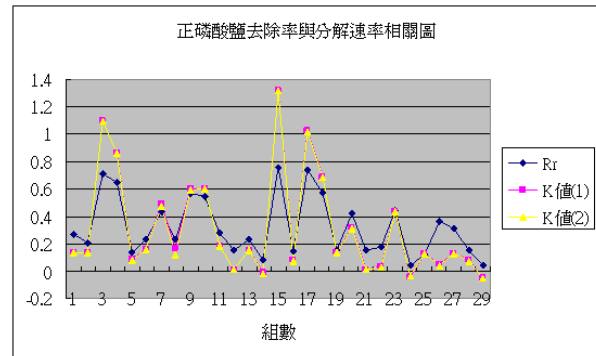


圖 3 正磷酸鹽去除率與分解速率相關圖

Fig.3 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of phosphate ($PO_4\text{-P}$)

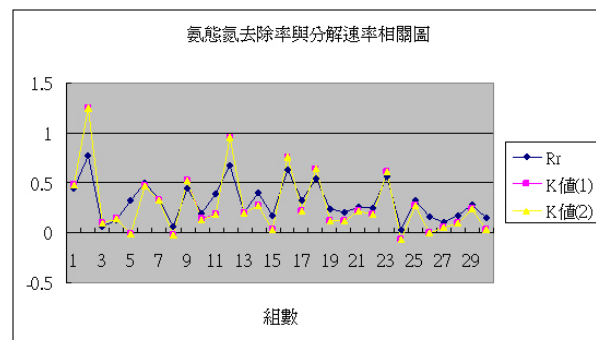


圖 4 氨態氮去除率與分解速率相關圖

Fig.4 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of ammonia nitrogen ($NH_3\text{-N}$)

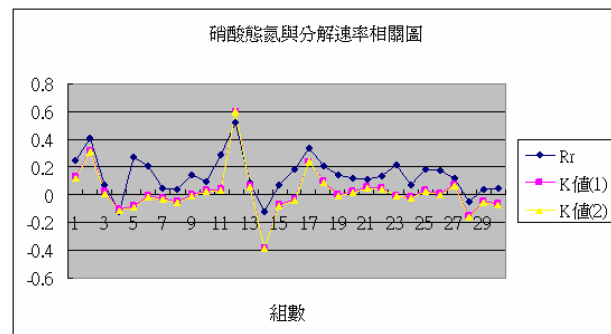


圖 5 硝酸態氮去除率與分解速率相關圖

Fig.5 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of nitrate ($NO_2\text{-N}$)

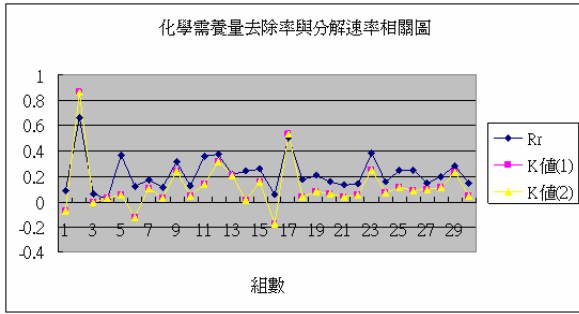


圖 6 懸浮性固體去除率與分解速率相關圖

Fig.6 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of chemical oxygen demand (COD)

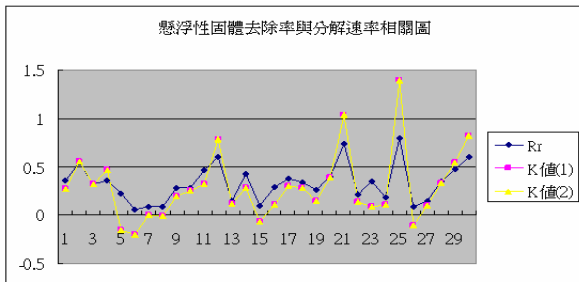


圖 7 懸浮性固體去除率與分解速率相關圖

Fig.7 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of suspended solid(SS)

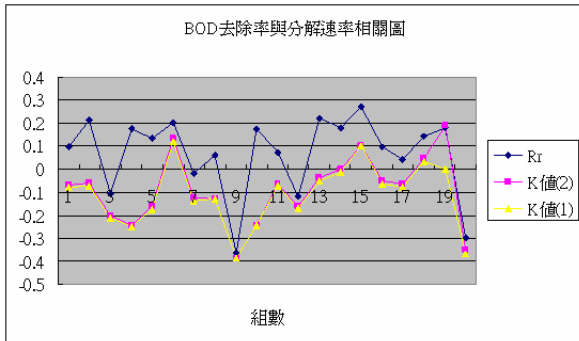


圖 8 BOD₅ 去除率與分解速率相關圖

Fig.8 Relationship diagram between removal rate vs. decomposition rate of biochemical oxygen demand(BOD₅)

3.5 污染物去除率與分解速率簡單迴歸

利用 SPSS 軟體分別求出玉里田區標準化去除率對分解速率簡單迴歸公式如表 2-3 所示，採用標準化的用意，在於去除變數單位的不同，係數愈大者，表示越重要。

分別求出六種污染物之去除率與分解速率簡單迴歸 (95%信賴區)，可由其係數發現其參數重要性程度，實驗所得為化學需氧量、硝酸態氮、氨氮為重要去除分解指標。

表 2 標準化之簡單迴歸式污染物去除率與分解速率

Table 2 Standardization simple regression formula of removal rate vs. decomposition rate

污染物名稱	分解速率	簡單迴歸式	R ²
亞硝酸態氮	mg/L	$R_r = 0.197 + 0.0002 \times K$	0.003
氨氮	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.007
硝態氮	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
化學需氧量	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
懸浮性固體	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
BOD ₅	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.007

表 3 未標準化之簡單迴歸式污染物去除率與分解速率

Table 3 Un-standardization simple regression formula of removal rate vs. decomposition rate

污染物名稱	分解速率	簡單迴歸式	R ²
亞硝酸態氮	mg/L	$R_r = 0.197 + 0.0002 \times K$	0.003
氨氮	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.007
硝態氮	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
化學需氧量	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
懸浮性固體	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.000
BOD ₅	mg/L	$R_r = 0.0002 \times K - 0.0002$	0.007

四、以田口法分析水田生態基流量

田口式品質方法 (Taguchi Method)，是一種改善品質的工程方法，由田口玄一博士 (Dr. Shin Taguchi) 所提出，以統計為主 (特別是實驗設計) 運用到品質改善程序的方法。田口博士將品質工程分成線上品質管制及線外品質改善兩大系統，為了解決提升研究開發工作的效率、更正確的評價品質、求得合理的允差範圍重要品質問題，而將直交表、參數設計、S/N 比等應用，引入產業界之研究開發及製程設計，並注入主動與積極的精神，其主要應用於研究開發與製程設計兩階段，基本上均包含了系統設計、參數設計及允差設計三步驟，田口方法的特色，為其利用直交表來簡化整個實驗過程，由損失函數定義以計算實驗結果和回應值之間的偏差，進一步把損失函數轉變成 S/N 比(信號雜音訊比)。通常在 S/N 比最佳化回應的過程的分析計算方法有三個範疇為望小特性、望大特性、望目特性。在計算對每一個實驗回應值的過程中，S/N 比不管過程回應的範圍如何，最大的 S/N 比就是最好的回應值，是最理想水準的製程回應，田口法被公認為追求品質穩定、改善品質和降低成本的方法之一，其廣泛應用在工業界。應用田口方法主要的目的在於找出影響產品品質的顯著因子，以最少的實驗次數來達到最高的產品品質。

田口法定義出 S/N 比是一種衡量績效的函數指標。其為每單位所對應變異誤差的大小之倒數。S/N 比越大，表示品質損失越小。S/N 比的本質是變異係數比 cv 的倒數 其中 σ 表標準差，

y 表平均值。

將 S/N 比特性定義整理如下：

(1)望大特性
$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) db \dots\dots\dots [7]$$

(2)望小特性
$$\eta = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right) db \dots\dots\dots [8]$$

(3)望目特性
$$\eta = -10 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma} \right) db \dots\dots\dots [9]$$

S/N 比本質上為兩個能量的比值， \bar{y}^2 表示想要的輸出，愈大愈好； s^2 表示不想要的輸出，越小越好。由於能量基本上是與信號的平方成正比的。上式中乘以 10 之目的，是讓 SN 比數值加大，容易觀察與比較。 η 為 S/N 比特性，db 則為 S/N 比的分貝單位。

以田口法分析水田生態基流量實驗設計：採用 $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ 標準直交表進行實驗分析，本實驗共有 8 個控制因子，包含 7 個三水準因子與 1 個二水準因子，其各因子代表為：A. 本田用水量(mm)；B. 滲漏量(mm)；C. 氣溫和緩($^{\circ}C$)；D. 水質(SS 去除率%)；E. 地力(EC) F. 雜草總重(g)；G. 粗蛋白質(%)；H. 收益(萬元/期作/公頃)，參數與水準分配如表 4 所示，共有 8 個外側因子與 23 個內側因子， $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ 標準直交表之配置，在目標特性方面，水質(ss 去除率%) 為望大特性，地力(EC) 為望小特性，本田用水量(mm) 為望目特性，將 L_{18} 直交表實驗所測得的數據紀錄之，並將所得數據經田口望大特性轉換成 S/N 比後分析之。有關實驗設計及參數等資料如表 4-5 所示。

4.1 水質(SS 去除率%)爲望大特性所得結果爲：

水質SS線性推估模式爲：

$$SN1(A,B,C,D,E,F,G,H)=12.9842+0.1508A1+0.7814B1+0.7002C1+2.7481C2+2.6127D1+0.4888E2+3.0478F2+1.9864G1+0.8073H2+1.9392A*B11+0.2749A*B12$$

水質SS預測：當S/N=-18.9665,平均去除率爲0.21125(參數組合爲A1B1C3D2F1G3)

4.2 地力(EC)爲望小特性所得結果爲：

地力EC線性推估模式爲：

$$SN2(A,B,C,D,E,F,G,H)=3.83129+0.18729B2+0.49753C1+0.29099C2+0.60094D1+0.62806E1+1.24895F1+0.15254F2+0.31797G2$$

地力EC預測：當S/N=7.37628,平均EC爲0.3375(參數組合爲E1F1G3H3)

4.3 本田用水量(mm) 爲望目特性所得結果爲：

本田用水量線性推估模式爲：

$$SN3(A,B,C,D,E,F,G,H)=10.4667+0.8613A1+0.5495B2+2.7984D1+1.6132G1+0.2712H1+0.2461H2$$

最佳參數組合爲 C3D1E3F3，本田用水量預測：當 S/N=20.2077,平均本田用水量爲 450.296(參數組合爲C3D1E3F3)。

嘉南灌區本田用水量(期作)預測值爲 450.296mm,推估每公頃生態基流量爲 4502.96m³/期作。嘉南地區年平均降雨量(1949-2003 年)爲 2406.6mm,雨季(5-10 月)爲

表 4 水稻栽培實驗設計與數據(嘉南區, 1998-2005 年)

Table 4 Experimental design and datum of cultured paddy rice (Chia-Nan area, 1998-2005)

實驗設計	水稻直播栽培		水稻慣行栽培		水稻有機栽培	
	一期作	二期作	一期作	二期作	一期作	二期作
整地 (mm)	154	57.3	138.5	60.5	160	60
本田 (mm)	290	144	498	148	357.3	164.7
有效雨量 (mm)	337	71.3	309	459	308	700
雨量利用率 (%)	97.7	71.2	89.6	46.6	89.3	69.9
蒸發量 (mm (mm/day))	389.2(2.68)	431(4.06)	415.7(2.85)	306.7(3.69)	392.6(2.71)	479.5(4.03)
滲漏量 (mm (mm/day))	391.4(2.76)	483.3(3.62)	529.6(3.63)	360.6(4.34)	432.3(2.98)	442.6(3.72)
pH	7.48	7.05	6.47	5.75	7.52	7.07
有機質(g/Kg)	25.65	28.41	22.31	21.37	33.2	41.91
K-	0.17	0.13	0.17	0.13	0.34	0.4
Ca+	8.02	7.67	4.44	4.50	11.63	12.07
Mg+	0.98	0.87	0.61	0.57	1.14	1.2
EC	0.65	0.67	0.46	0.44	0.88	0.84
N	1.54	1.36	1.16	1.05	1.91	2.05
P	143	152	107	115	198	186
雜草總重(株/10m ²)	16.5	20.5	7.5	10.5	90	65.5
雜草鮮重(g)	40.5	41.5	19.5	23.75	256	158
氣溫 (c)	23.8	27.7	23.7	27.6	23.7	27.7
三磷酸鹽(PO ₄ ³⁻ -P)	0.2148	0.6486	0.1344	0.5765	0.2738	0.7084
硝酸態氮(NO ₃ -N)	0.16	0.564	0.147	0.402	0.173	0.677
氨態氮(NH ₄ ⁺ -N)	0.183	0.251	0.1	0.285	0.147	0.419
化學需氧量(COD)	0.119	0.375	0.173	0.258	0.141	0.252
總懸浮固體物(TSS)	0.266	0.541	0.144	0.599	0.348	0.735
產量(公噸/ha 期作)	4.89	4.13	6.46	6.16	4.13	3.69
產值(萬元/ha 期作)	13.932	10.062	13.887	13.7112	13.987	12.763
成本(萬元/ha 期作)	6.1393	5.583	7.054	6.692	10.581	10.702
收益(萬元/ha 期作)	7.7927	4.479	6.833	7.0192	3.406	2.061
水分 (%)	12	10.9	12.9	12.3	12.6	10.6
容積量 (%)	775.4	825.5	790.3	798	760.5	824
未熟粒 (%)	72.4	76.7	69.1	80.1	72.5	83
死粒 (%)	9.5	10.4	7.4	8.1	11.8	5.2
白米率 (%)	4.1	3.4	6.7	2.1	6.5	5.2
完整率 (%)	73.6	75.7	71.3	76.1	73.2	75.1
透明度 (%)	69.6	72.6	64.2	74	69.5	72.6
直隸性澱粉 (%)	3	4	3	3.5	3.5	4
直隸性澱粉 (%)	16.7	16	17.7	15.2	16.7	15.4
粗蛋白質 (%)	7	6.4	6.4	7.7	7.6	6.7

表 5 實驗參數與水準表

Table 5 Experimental parameter and design level

控制因素	水準 1(直播栽培)	水準 2(慣行栽培)	水準 3(有機栽培)
	培)	培)	培)
A 本田用水量(mm)	100	350	600
B 滲漏量(mm)	300	400	500
C 氣溫和緩 (c)	10	25	40
D 水質(ss 去除率%)	0.2	0.6	0.4
E 地力(EC)	0.4	0.65	0.9
F 雜草總重(g)	10	100	1000
G 粗蛋白質(%)	6.0	7.0	8.0
H 收益(萬元/期作/公頃)	6	10	2

2156.9mm, 旱季(11-4 月)爲 249.7mm。試驗田區各處理區在試驗期間降雨量:一期作在 300-600mm 之間,但有效雨量利用率較高,可減少引灌水量,減緩此期間用水壓力。二期作在 1000-1400mm 之間,有效雨量利用率較低,但降雨量對田間用水量的補助量占作物需水量比例大。因此如採節水灌溉可提高有效雨量利用率,這些雨量蓄存水田中,除提供作物蒸發散量以及田間滲漏量外,使水田成爲天然滯洪池,減低下游排水的尖峰流量。粗估爲每公頃 700-1000m³(試驗田區田埂高 10 公

分，每坵塊設有寬 20 公分排水口，種植期間田面平均湛水深 30mm 或田間無湛水)。

種植期間田面多呈湛水狀況，其用水量除向上之蒸發散量外，其餘多為向下滲透水量。水田的滲透水量可視為補注地下水、伏流水、回歸水之水源涵養，可延伸雨水之時間與空間有效應用，對水資源循環生態系有重要地位，不應視為消耗性之損失水量，應歸類為生態用水。試驗田一期作對於補注地下水、回歸水之水源涵養量粗估為每公頃 $3320-6194\text{m}^3$ /期作，二期作粗估為每公頃 $3297-5968\text{m}^3$ /期作。

實務操作上應特別注意事項為該區農業用水仍呈不足之事實；曾文-烏山頭水庫灌區 65 至 93 水文年度計畫灌溉用水量之平均值約為每年 9.0 億立方公尺，由於水庫蓄水量不足，故實際取水量之平均值約為每年 6.3 億立方公尺，顯示該區農業用水仍呈不足之事實，又該水利會於缺水期雖亦已飽受缺水之苦，然為配合政府政策不得不將部份農業用水移作他用，以使各標的事業用水皆能渡過缺水難關。

三、結論與建議

國內水田生態基本觀測研究資料不足，有關單位也日漸重視，生態基礎研究需要長期大量投入人力與物力觀查研究。本研究限於時間與經費，今年選定嘉南水利會內水田(包括休耕田)，進行水質、土壤、植物現場調查、資料分析等程序，所得到結論與建議為：

(一) 植物與溫度變化評估

a、不同土地利用溫度與 NDVI 之探討:其 NDVI 變化高低順序分別為森林>旱田>水田>都市>魚塢。溫度與 NDVI 之分佈圖顯示，水田之 NDVI 分佈範圍較窄 (0.07-0.18)，然隨田間生育階段之不同而有較大範圍之溫度變化，其變化範圍達 15°C ，其點分佈呈直橢圓狀。旱田之溫度及 NDVI 變化範圍均大，其點分佈略呈圓形。都市之平均 NDVI 頗低，溫度偏高，分佈略呈偏斜之橢圓狀。

b、水田面積變動時對溫度造成之影響：嘉南地區該土地利用為都市占有率 14.907%，魚塢占有率 30.711%，森林占有率 7.342%，水体占有率 23.288%，旱作占有率 1.634%，其他占有率 22.118%)。研究區域之溫度單位百分率貢獻度比較，水田之貢獻較都市低 8.50°C 。當 20%水田變都市後之溫度變化升高 1.80°C ，30%水田變都市後之溫度變化升高 2.65°C ，20%水田變旱作後之溫度變化升高 1.01°C 。

當 20%水田變水體後之溫度變化降低 2.82°C 。

(二) 植物與水質淨化

a、探討六種污染物(正磷酸、氨態氮、硝酸態氮、生物需氧量、化學需氧量、懸浮性固體)分解速率，以正磷酸為例，其分解速率為 0.1371 (1/hr)。標準化去除率與分解速率簡單迴歸分析，去除率 = $0.757 * \text{正磷酸 k 值}$ ($R^2 = 0.883$)，其它五項污染物簡單迴歸式，詳如表 3 至表 4 所示。

b、週期性污染負荷(CFSTR)模式,原運用於湖泊學,其假設的污染物濃度是均勻的,若污染物進流濃度如不均勻或流量變化大時,代入水田(淺水層)進行模式演算,試驗應加以適當修正,以符合實際。本研究未對暴雨逕流對水質污染物稀釋現象加以探討,如有暴雨流經正在復育的農田,使得污染物進流濃度急速變化,而導致復育失敗,需重新試驗配置。

c、本實驗設計採用 6 種設計污染物, 16 重複,所以污染物不會產生交感作用,此實驗所推估出污染物去除率與分解速率的簡單迴歸式,可做為設計人工濕地水質處理,判斷濾材與植物和土壤三者之間是否污染物有交感作用。此研究可計算分解污染物所需的停留時間、水體體積、水力負荷。

(三) 以田口法設計分析水田生態基流量

採用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 標準直交表,水質(ss 去除率%)為望大特性,地力(EC)為望小特性,本田用水量(mm)為望目特性,將 L_{18} 直交表實驗所測得的數據紀錄之,並將所得數據經田口望大特性轉換成 S/N 比後分析之。平均本田用水量為 450.296mm。每公頃生態基流量 4502.96m³/期作。試驗田區粗估為每公頃 700-1000m³。試驗田一期作對於補注地下水、回歸水之水源涵養量粗估為每公頃 3320-6194m³/期作,二期作粗估為每公頃 3297-5968m³/期作。實務操作上應特別注意事項為該嘉南灌區農業用水仍呈不足之事實。

四、參考文獻

1. 吳淑麗、張可盈、陳鈞華：水田之溫度和緩效應量化評估之研究,九十年農業工程研討會論文集,2001。
2. 蔡明華：台灣水稻田灌溉排水事業永續發展面臨課題,第十二屆水利工程研討會論

文集,2001。

3. 蔡明華：台灣農業水資源之有效利用,兩岸水資源與農田水利建設研討會論文集,2000。
4. 張文亮：水田排水量與水質對於附近溼地生態之影響,行政院國家科學委員會 NSC87-2621-B002-033,1997。
5. 王東勝,(2004),「水體農業非點源污染危害及其控制」。
6. 范正成、張尊國、鄭克聲,(1996),「農業用地非點源污染調查及最佳管理作業之研究(四)」,行政院環境保護署委託計畫報告。
7. 張榮保等,(2005),「太湖地區典型小流域非點源污染物流失規律——以宜興梅林小流域為例」,長江流域資源與環境,第14卷,第1期。
8. T.N.Carlson,E.M.Perry,and T.J.Schmugge,「Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields」,Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 52, pp.45-69,1990。
9. K.S.Humes,W.P. Kustas and T. J. Schmugge,「Effects of soil moisture and spatial resolution on the surface temperature/vegetation index relationship for a semiarid watershed」,American Meteorological Society Conference on Hydrology Preprints, Dallas, Texas, pp.147-151,1995。
10. M.S. Moran, T. R.,Clarke,Y.Inoue,and A. Vidal : 「Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index」, Remote Sensing of Environment, Vol. 49, pp.246-263,1994。
11. John R. MacMillan,(2003),「Best management practice development to minimize environmental impact from large flow-through trout farms」。
12. Whigham D F,(1999; 240:31-40),「Ecological issues related to wetland preservation, restoration, creation and assessment.」The Science of the Total Environment.