

臺灣農業生產環境安全問題與對策- 利用 WASP 模式以桃園大園區為例

Issues and Countermeasures on the Safety of Agriculture Production Environment in Taiwan – Using WASP Model in the Dayuan District Taoyuan City

業興環境科技股份有限公司

業興環境科技股份有限公司

國立臺灣大學

生物環境系統

教授

工程師

工程師

許適棋*

黃寶萱

范致豪

Shih-Chi Hsu

Pao-Hsuan Huang

Chih-hao Fan

行政院農業委員會

行政院農業委員會

行政院農業委員會

農田水利處

農田水利處

農田水利處

技正

科長

處長

張郁麟

何逸峯

謝勝信

Yu-Lin Chang

Yi-Fong Ho

Sheng-Hsin Hsieh

摘要

本研究目的為整合各單位環境資源(農田水利會與環保署),利用現有渠道水質及底泥等資料,建立渠道水質污染傳輸模式,並從過往的定期採樣數據,透過數學統計檢定方法,評定出電導度與重金屬離子濃度之間的顯著關係,得以推估此區域的水質污染為銅離子所造成。

並依據前人研究顯示,WASP 模式(Water Quality Analysis Simulation Program (WASP))已廣泛運用在大尺度流域及河川模擬,然較少研究利用 WASP 模式模擬小範圍之灌溉渠道。本研究透過 WASP 模式採用簡單毒物模組,建立銅離子污染傳輸模式,透過建立水理與水質的模型,評估灌溉渠道的涵容能力,並且計算下游灌溉農田所會遭受之重金屬污染之程度與濃度年成長率,並建議其改善方案,以提升農業生產安全。

*通訊作者,業興環境科技股份有限公司工程師,10597 台北市南京東路五段 168 號 12 樓,shihchi@setl.com.tw

關鍵詞：銅污染，水質模式(WASP)，農業生產環境，總量管制。

ABSTRACT

The purpose of this study is to integrate the resources of Irrigation Association and Environment Protection Agency. Utilize the sampling data of water and sediment in irrigating channels to establish the model of water pollutant transportation, and based on the sampling data and statistical methods to analyze the correlation between the electrical conductivity and concentration of heavy metal ion in the irrigation water. According to the results, water pollution in this area caused by copper pollutant.

According to previous studies, Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) has been widely applied in large-scale watersheds and river, but rarely applied in small-scale irrigation channels. This study utilized WASP model to establish copper ion transport and evaluate the assimilative capacity of irrigation channels. By calculate the annual accumulating rate of heavy metal pollutant in downstream farmland and evaluate current polluted situation, suggest improvement countermeasures to assure the safety of agricultural products.

Keywords: Copper Contamination, Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), Agriculture Production Environment, Total Maximum Daily Loads (TMDL).

一、緒 論

1.1 農業發展

臺灣地處亞熱帶，為多山島嶼，氣候溫暖、雨水豐沛，適合農作物生長。臺灣農地總面積達 85 萬公頃，約佔國土面積約 23%，其中位於平原且透過灌溉系統引灌之農地，約 38 萬公頃，並以種植水稻為主。由於自然環境限制，臺灣農戶平均耕地規模僅 1.02 公頃，屬於小農經營形態。(行政院農業委員會-農業經營現況，2017)。

本研究研究區域位於臺灣桃園灌區，桃園灌溉區域主要位於台灣西北部之桃園台地，在行政區域上跨台北、桃園、新竹三縣，依地勢及灌溉系統區分為桃園、湖口、大溪、新海等四個灌溉區域，灌溉面積在約為 24,749 公頃。

其地勢南向西北傾斜與台灣海峽相界，由東南部高亢地勢，以 1/100 坡度由東南向西北延伸入海，區內河流短促，雨水貯留時間甚短，可能引用之水源有限，一向為看天種植之常旱田地，

僅靠於台地傾斜起伏處鑿地築池，貯存天然雨水以供灌溉，因此當時台地上可耕地面積僅約 27,000 公頃，而埤池占地卻廣達 8,000 餘公頃，尤其大小不一，數量最多時曾高達 1 萬餘處，可謂埤池星羅棋佈，處處可見，形成本地區之特色。區內耕地土壤以粘質壤土所佔比例最高，約為 39%，砂質壤土則佔 26%，輕粘土再次之約 18.6%，砂質粘壤土最少，僅佔 16.4%(文獻)。灌溉區域內農作物以兩期作水稻為主，佔全區耕地面積 95%以上，在糧食生產中居重要之地位。

臺灣 1950 年代因工業規模、都市聚落急速擴張，導致區域排水欠缺整體規劃，造成農業灌溉渠道與都市排水系統混用，造成重金屬污染經由渠道傳輸進入到農地土壤，進而影響農作物生產安全。

1.2 臺灣近年農土作物污染

臺灣地區因地狹人稠，許多工業皆在農田區發展，長期以來因為農業與工業的灌排不分，造

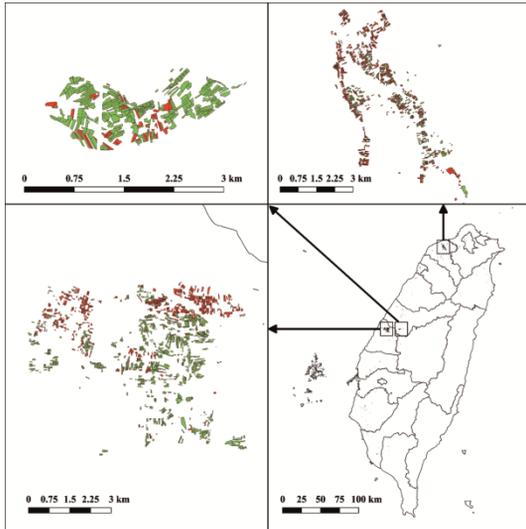


圖 1 台灣列管農田分布

成諸多起重大影響民眾生活與糧食作物的事件，較為重大案件如 1994 年爆發的美國無線電公司長期掩埋有機廢料所引發千餘人罹癌的 RCA 事件；2005 年由台灣鋼聯排放戴奧辛所引起的彰化毒鴨蛋事件；2013 年的日月光廢水污染所引發的農田污染問題；以及從 1980 年以來層出不窮的鎘米事件，所導致的民眾集體重金屬中毒，都曾短暫引起台灣社會對土壤-污染的重視。

事實上，臺灣土壤污染有 8 成都是來自水污染，這主要來自各產業的工業廢水、畜糞、市鎮廢水、酸雨、農業用藥等等，根據環保署的統計資料，其中工業廢水佔 54%、市鎮污水佔了 25%。截至 2013 年底，台灣農地目前因重金屬污染而禁止耕作、被列管的農地共 746 公頃(共 4,402 筆)。

因廢水而大規模污染農地的案例年年都有，如 2011 年台中后里鎘米事件，銷毀了近一萬斤的稻穀；2012 年虎尾鎘蒜事件；2013 年，同樣是工業搭灌灌溉渠道問題，彰化再度爆發因電鍍工廠廢水而造成 300 公頃農地疑遭重金屬污染、44 公頃確定污染而強迫休耕的問題，圖 1 為台灣全部列管中與曾列管土地分布，可以看到在在桃園、彰化與臺中地區有大量的污染事件存在。

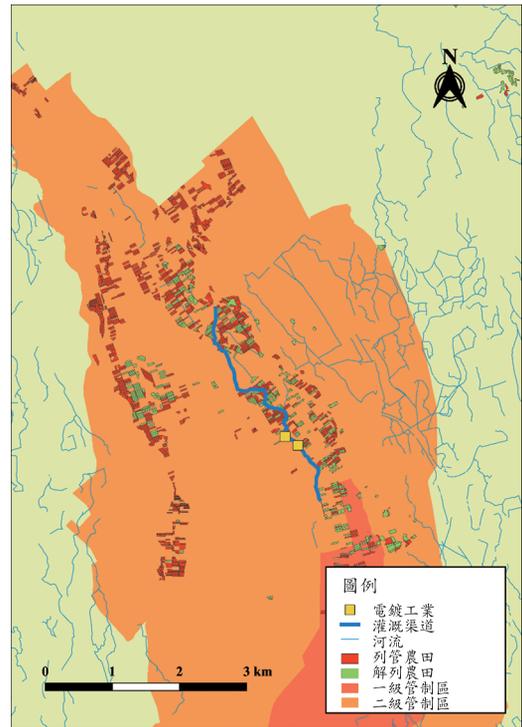


圖 2 桃園市總量管制範圍

二、材料和方法

2.1 研究區域

臺灣桃園市為全國工業重鎮之一，歷年農地污染列管及整治工作頻繁，為避免事業排放含重金屬廢水造成農地污染，桃園市政府於 105 年 2 月 3 日公告「桃園市新街溪及埔心河流域廢(污)水排放總量管制方式」，以總量管制河川流域之概念，劃設新街溪及埔心河流域為廢(污)水排放總量管制區，劃設管制區範圍詳見圖 2，管制區放流水標準詳見表 1。

2.2 統計分析

2.2.1 監測參數

以位於桃園水利會模式區域內的三塊厝支線中取得三個監視點，包含「25 號河水堰」、「25-3 號河水堰」與「補助河水堰」之 8 年歷史水質監測資料(2009 至 2017 年)，其中複驗資料共有 25 項水質參數，考慮檢測資料數據的連續性及完整

表 1 管制區放流水標準

對 象	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Cr ⁶⁺
第一級管制區	不得新設或變更增加排放六項重金屬製程事業					
新設事業						
既設事業 (緩衝期 2 年)	0.2	2.0	0.1	0.2	0.01	0.025
第二級管制區						
新設事業	0.2	2.0	0.1	0.2	0.01	0.025
既設事業 (緩衝期 2 年)	1.5	2.5	1.0	0.5	0.015	0.25
工業區專用污染下水道系統 (緩衝期 2 年)	1.5	2.5	1.0	0.5	0.015	0.25
管制區外業者(現行標準)	3.0	5.0	2.0	1.0	0.03	0.5

表 2 三監視點的基本水質資料統計

項 目	補助河水堰		25-3 號河水堰		25 號河水堰	
水溫(°C)	範圍	15.3-31.4	範圍	15.20-32.20	範圍	14.20-32.90
	平均	25.66	平均	24.91	平均	23.98
	中位數	27.10	中位數	25.20	中位數	25.10
	標準差	4.88	標準差	4.93	標準差	5.25
pH	範圍	6.70-7.95	範圍	5.890-8.030	範圍	2.85-8.16
	平均	7.36	平均	7.246	平均	7.07
	中位數	7.40	中位數	7.280	中位數	7.07
	標準差	0.32	標準差	0.480	標準差	0.77
EC (µS/cm)	範圍	163-1241	範圍	333-5350	範圍	456-5130
	平均	478.4	平均	2566	平均	1842
	中位數	394.5	中位數	2280	中位數	1740
	標準差	326.7	標準差	1241	標準差	826

表 3 三監視點導電度變方分析

	自由度	均差平方和	均方值	F 值	Pr(>F)
Factor (Station)	2	46,954,563	23,477,281	28.212	3.599e-10 ***
Residuals	87	72,400,290	832,187		

***P 值 < 0.001

度，從複驗項目中挑選出其中 18 項與水質相關之參數項目如，水溫、電導度(EC)、酸鹼度(pH)、懸浮固體(SS)、硫酸鹽、銨、碳酸氫鹽、鈣、氯、鎂、鈉、銅、鉛、鎳、鋅、鎘、鉻與鐵，基本初驗資料如水溫、電導度與酸鹼度統計資料如表 2 所示，本研究採用 R 語言 3.4.1 與 RStudio 1.0.153 進行計算。

透過變方分析(ANOVA)將數據分解成因子效應(effects of factors)與隨機變量(random variation)，用以確立三個監視點之間變方的顯著性(表 3)，變方分析顯示在三個監視點測站之間有著顯著的差異(p 值 = 0.001)，三者電導度的盒鬚圖如圖 3 所示，而污染排放位置位於於「補助河水堰」與「25-3 號河水堰」兩者監視點之

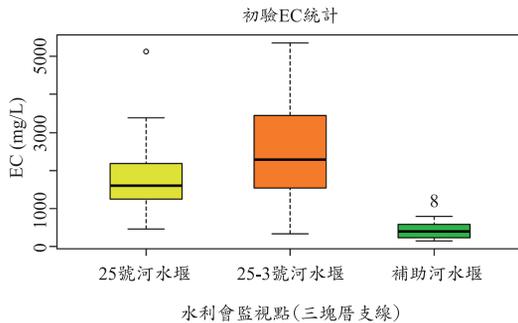


圖 3 三監視點 EC 盒鬚圖

表 4 三監視點之 Turkey's 成對比較方法

成對比較	均差	信賴區間		校正後 P 值
		下界	上界	
25-3 號河水堰- 25 號河水堰	807.7	281.9	1333.6	0.001
補助河水堰- 25 號河水堰	-1262.4	-1871.0	-653.8	<0.001
補助河水堰- 25-3 號河水堰	-2070.2	-2727.3	-1413.0	<0.001

間，電導度也明顯影響下游地區，也就是在「25號河水堰」與「25-3號河水堰」監視點顯著的高於上游監視點。其次在「25-3號河水堰」與「補助河水堰」監視點資料中都有一個異常值，本研究應該將此兩筆數據做為後續討論。而從 Tukey 方法中確立了三個監視點之間的兩兩比較(表 4)，可以發現「25-3號河水堰」監視點的電導度明顯高於另外兩者，其次為「25號河水堰」與「補助河水堰」監視點。

2.2.2 資料處理與回歸分析

本研究在處理原始數據時，因在重金屬檢測項目中常有小於檢測極限之數值，一般採用檢測極限值的一半做為資料缺補(表 5)，然而在這種情況之下數據常不能滿足常態分布的前提假設，因此將其中 7 項重金屬參數(銅、鉛、鎳、鋅、鎘、鉻與鐵)進行對數轉換以調整偏歪的數據。

逐步回歸模式(stepwise regression model)在

表 5 重金屬檢測極限

Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	Cr
3 ng/L	1 ng/L	4 ng/L	22 ng/L	0.7 ng/L	15 ng/L

感應耦合電漿質譜儀(Agilent 7500, Normal Mode)

一群變中以自動搜索的程序找到變數群中的最佳子集合，在建立過程中每一步以添加或刪除一個變數作為疊代過程。以下就逐步回歸模式的數學模式進行說明：

在考慮有 $p-1$ 個預測變數 X_1, \dots, X_{p-1} 的情境之下，回歸模式為：

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i$$

其中， $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ 為參數， $X_{i1}, \dots, X_{i,p-1}$ 為已知常數， ε_i 為自變數 $N(0, \sigma^2)$ ， $i = 1, \dots, n$ ，也可將方程式改寫成：

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{k=0}^{p-1} \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i$$

判斷是否添加或刪除變數的尺度是以每一步迴歸分析中的誤差平方和、淨相關(partial correlation)的相關係數，或是以標準化的 t^* 統計量或 F^* 統計量作為判定標準。在本研究的逐步回歸分析中，以電導度(EC)為 Y 依變數，其他 18 項參數作為自變數 X 。

2.3 模式

本研究採用 WASP7 (Di Toro *et al.* 1983, Ambrose *et al.* 1988, Wool *et al.* 2001, Wool *et al.* 2006)做為模擬，是一套可計算動態質量平衡的地表水模擬程式，其基於 flexible compartment 的建模方法，可適用於一維、二維或三維的情境中，而在離散的網格之間具有平流與延散的傳輸功能，且提供了一系列模組可以計算常見的水質與毒物問題。WASP 中的動力模型為解算傳輸偏微分方程式，平流傳輸是通過設定網格內的水流過程，將水流從邊界流入，並在網格之間設定水流的流經順序，在下游透過設定邊界將水流移除模擬系統中。

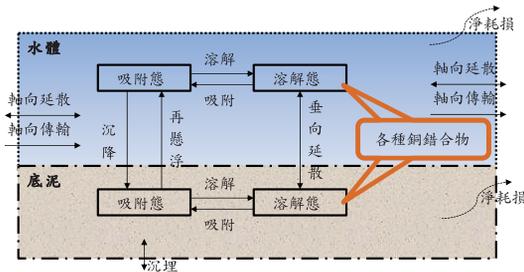


圖 4 重金屬銅在水體及底泥交互反應及質量平衡

本研究關注區域為人工灌溉渠道，渠道形狀簡單，呈現倒置梯形(上寬下窄)，接觸面為水泥材料，因本區域環境單純，固本研究採用曼寧公式轉換水位、流量與流速三者之間，將所得水流資料帶入水質模式中進行水質模擬。

$$Q = k \frac{S^{1/2} A^{5/3}}{n P^{2/3}}$$

$$Q = A \times V$$

其中， Q 為流量(m^3/s)， S 為坡度， P 為潤周長(m)， A 為通水面積(m^2/s)， n 為曼寧係數， v 為流速(m/s)， k 為轉換參數($m^{1/3}/s$)。

WASP 為一網格式模型，可以利用網格式設計方法，模擬水體與底泥的污染情況，本研究為考量水體及底泥參數之變異性，故採用 WASP 模式進行污染傳輸模擬工作，並加入重要介入點水體排放因素，評估渠道重金屬銅在水體及底泥隨時間之交互變化及影響性，本研究重金屬銅在水體及底泥交互反應及質量平衡如圖 4 所示。模式主要控制方程式為非齊性偏微分方程式(Partial Differential Eq, PDE)如下，並選用 runge-kutta 模組，進行解算：

(一)水質控制方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} - \frac{\partial \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial z} = S_L + S_K$$

(二)底泥控制方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial z} = S_K$$

其中， U 為 x 向流速(m/s)， C 為污染物濃度(g/m^3)， E_x 、 E_z 為 x 向及 z 向延散係數(m^2/s)， S_L 為外部負荷量($g/m^3/s$)， S_K 為源匯項($g/m^3/s$)。

水體中，重金屬溶解態與吸附態轉換方程式：

$$C_t = C_{td} + C_{tp}$$

$$C_{td} = \frac{C_t}{1 + K_d SS} = F_d C_t$$

$$C_{tp} = \frac{K_d SS C_t}{1 + K_d SS} = F_p C_t$$

其中， C_t 為重金屬總濃度(g/m^3)， C_{td} 為溶解態濃度(g/m^3)， C_{tp} 為吸附態濃度(g/m^3)， SS 為懸浮質總量(g/m^3)， K_d 為吸附係數(L/g)。

三、結果與討論

3.1 逐步回歸模式分析

為了找出「25 號河水堰」與「25-3 號河水堰」影響電導度的重要變數，利用逐步規模式找出 18 個參數中的最佳配適模式，回歸模式以電導度(EC)作為依變數，自變數為水溫、酸鹼度 pH、懸浮固體 SS、硫酸鹽、銨、碳酸氫鹽、鈣、氯、鎂、鈉、銅、鉛、鎳、鋅、鎘、鉻與鐵。

1. 「25-3 號河水堰監視點」逐步回歸模式，包含 11 個變數如下：

$$EC \sim \text{Temperature} + Cu + SS + Cl + SO_4 + Mg + Na + Pb + Ni + Cr + Fe$$

其回歸模式之殘差摘要統計量、回歸估計值及變方分析結果如表 6~表 8。

表 6 「25-3 號河水堰監視點」逐步回歸模式之殘差摘要統計量

最小值	一分位數	中位數	三分位數	最大值
-856.32	-207.05	25.75	167.48	1231.15

表 7 「25-3 號河水堰監視點」逐步回歸模式之參數估計值分析結果

	估計值	標準誤	T 值	Pr (> t)
截距	-2251.66	1245.29	-1.81	0.09 *
水溫	102.60	35.93	2.85	0.01 *
Cu	222.66	160.28	1.39	0.19
SS	10.43	4.20	2.48	0.03 *
Cl	2.82	1.49	1.89	0.08 *
SO ₄	-0.43	0.33	-1.29	0.22
Mg	-88.11	58.66	-1.50	0.15
Na	3.65	1.50	2.44	0.03 *
Pb	295.32	80.52	3.67	<0.01 **
Ni	-202.25	75.52	-2.68	0.02 *
Cr	-282.67	228.84	-1.24	0.24
Fe	-194.25	145.60	-1.33	0.20

顯著性註記符號：

0 '****', 0.001 '***', 0.01 '**', 0.05 '.', 0.1 ' ' 1

殘差標準誤：552，自由度：15

多項式 R²：0.8859，校正後 R²：0.8022

F 統計值：10.58，自由度：11, 15，p 值：3.451e-05

表 8 「25-3 號河水堰監視點」逐步回歸模式變方分析表

因變數：EC

因子	平方和	F 值	Pr (>F)
水溫	3,925,222	12.8834	0.0027 **
Cu	3,072,597	10.0849	0.0063 **
SS	9,908,623	32.5222	4.18e-05 ***
Cl	9,467,547	31.0745	5.31e-05 ***
SO ₄	1,531	0.0050	0.9444
Mg	16,791	0.0551	0.8176
Na	1,412,839	4.6372	0.0480 *
Pb	2,460,987	8.0775	0.0124 *
Ni	4,401,873	14.4479	0.0017 **
Cr	262,997	0.8632	0.3676
Fe	542,295	1.7799	0.2020
殘差	304,673		

顯著性註記符號：

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

2. 「25 號河水堰」最終模式，包含 11 個變數如下：

$$EC \sim pH + Cu + Cl + NH_4N + Ca + Mg + Na + Pb + Ni + Zn + Cr + Fe + HCO_3$$

其回歸模式之殘差摘要統計量、回歸估計值及變方分析結果如表 9~表 11。

表 9 「25 號河水堰監視點」逐步回歸模式之殘差摘要統計量

最小值	一分位數	中位數	三分位數	最大值
-656.12	-145.99	38.35	170.28	553.3

表 10 「25 號河水堰監視點」逐步回歸模式之參數估計值分析結果

	估計值	標準誤	T 值	Pr (> t)
截距	4257.98	626.37	6.80	3.25e-07 ***
pH	-686.32	127.79	-5.37	1.27e-05 ***
Cu	-152.64	64.137	-2.38	0.02 *
Cl	2.65	1.76	1.51	0.14
NH ₄ N	-12.77	9.78	-1.31	0.20 *
Ca	-20.01	12.30	-1.63	0.12
Mg	-112.17	19.85	-5.65	6.07e-06 ***
Na	5.67	0.78	7.32	8.94e-08 ***
Pb	106.63	43.32	2.46	0.02 *
Ni	-59.14	33.19	-1.78	0.09 * *
Zn	-56.63	44.89	-1.26	0.22
Cr	-283.64	101.44	-2.80	0.01 **
Fe	-137.52	60.19	-2.29	0.03 *
HCO ₃	2.58	1.70	1.51	0.14

顯著性註記符號：

0 '****', 0.001 '***', 0.01 '**', 0.05 '.', 0.1 ' ' 1

殘差標準誤：347.3，自由度：26

多項式 R²：0.8821，校正後 R²：0.8232

F 統計值：14.97，自由度：13, 26，p 值：6.939e-09

表 11 「25 號河水堰監視點」逐步回歸模式變方分析表

因變數：EC

因子	平方和	F 值	Pr(>F)
pH	564,594	4.68	0.04 *
Cu	1,091,955	9.05	0.01 **
Cl	12,592,605	104.39	1.353e-10 ***
NH ₄ N	27,426	0.23	0.64
Ca	892,888	7.40	0.01 *
Mg	382,356	3.17	0.09 *
Na	5,000,271	41.45	8.025e-07 ***
Pb	85,304	0.71	0.41
Ni	95,104	7.88	0.01 **
Zn	210,206	1.74	0.20
Cr	940,373	7.80	0.01 **
Fe	456,495	7.80	0.06 *
HCO ₃	275,726	2.29	0.14
殘差	120,628		

顯著性註記符號：

0 '****', 0.001 '***', 0.01 '**', 0.05 '.', 0.1 ' ' 1

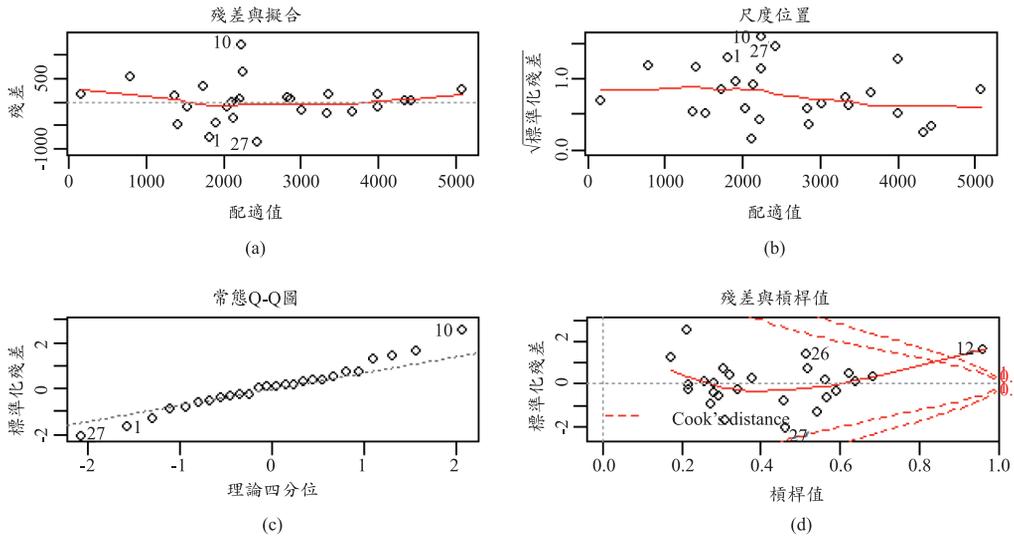


圖 5 「25-3 號河水堰監視點」逐步回歸模式診斷圖 (a)殘差值與配適值散佈圖，(b)配適值尺度位置圖，(c)常態 Q-Q 圖，(d)標準化殘差及槓桿值散佈圖

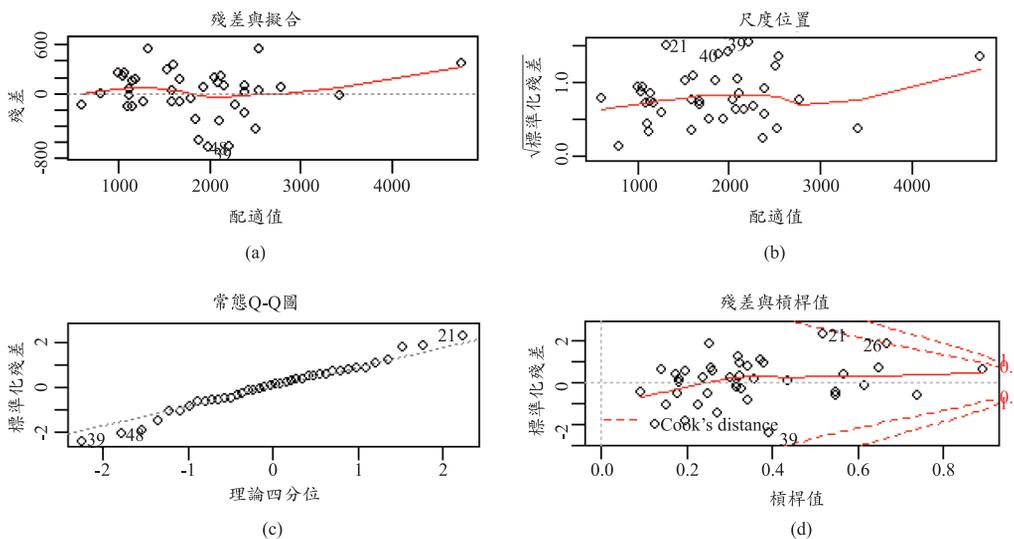


圖 6 「25 號河水堰監視點」逐步回歸模式診斷圖 (a)殘差值與配適值散佈圖，(b)配適值尺度位置圖，(c)常態 Q-Q 圖，(d)標準化殘差及槓桿值散佈圖

為了檢驗逐步回歸模式的配適性，以作圖方式檢驗配適值 \hat{Y}_i 與理論殘差 $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ 的配飾結果，圖 5 與圖 6 分別為兩個模式的配適值與殘差值診斷圖，由圖 5(a)及圖 6(a)的配適值與殘差值散佈圖顯示，配適值與殘差值為直線關係，且點位為

隨機散佈，並無可明顯辨識的非線性關係或變異性。同樣在 5(b)及圖 6(b)的尺度位置圖中可確認回歸模式殘差項的母群體分配符合等分散性 (homoscedasticity) 的假設。圖 5(c)及圖 6(c)的常態 Q-Q 圖中可確認兩模式的配適結果均可符合常

表 12 三塊厝支線工程表

樁號(起)	樁號(訖)	斜率(m/m)	曼寧係數	寬(m)	深(m)
0k+000	0k+260	0.0067	0.025	12	3.8
0k+260	0k+457	0.0063	0.025	12	1.6
0k+457	0k+570	0.0009	0.025	12	1.7
0k+570	0k+823	0.0028	0.025	12	1.9
0k+823	1k+400	0.0085	0.025	12	1.6
1k+400	2k+116	0.0022	0.025	12	1.2
2k+116	2k+435	0.0029	0.032	7	1.8
2k+435	2k+955	0.0052	0.032	7	2.3
2k+955	3k+361	0.0068	0.032	7	1.5
3k+361	3k+838	0.0069	0.032	7	2.2

態分布的前提假設。最後以圖 5(d)及圖 6(d)的殘差值及槓桿值(估計值中顯著偏高的值)作圖，這是一種用來檢驗回歸模式配適性的作圖方法，尤其是用於檢驗原始數據中離群值與估計值中槓桿值對模式配適性的影響，由兩圖的結果顯示模式中並無顯著的離群值。

由兩個測站的逐步回歸模式結果顯示，影響水質的重要變數包含氯、鎂、鈉、銅、鋁、鎳及鐵，由於氯、鎂、鈉可視為自然界中的背景離子，兩個測站同時具較大顯著性影響的重金屬因子為銅及鎳。

3.2 污染分佈

根據現場調查成果建立渠道基本參數(渠道寬、斜率、底床斜率等，如表 12)，全長 3838 公尺，高度落差共計 19.89 公尺，全程切分 32 個網格，如圖 7，共計 21 處分、匯流點。其中包含三處電子工廠(點源污染，入水量約原渠道水量的 8 成)，根據列管污染源基本資料取得的銅(Cu^{2+})離子排放量，並搭配灌溉用水量與實測濃度數據，作為邊界條件參數，建立水理與水質污染物模式。

分別針對電子工廠設計不同排放量(3 ppm、1.5 ppm、1 ppm、近年定檢資料)進行模擬評估，空間成果如圖 8 與圖 9 所示。根據取得不同的污染來源設計使用邊界條件(濃度)或污染物負載(質量)，不同的排放標準與入流量，會顯著的影

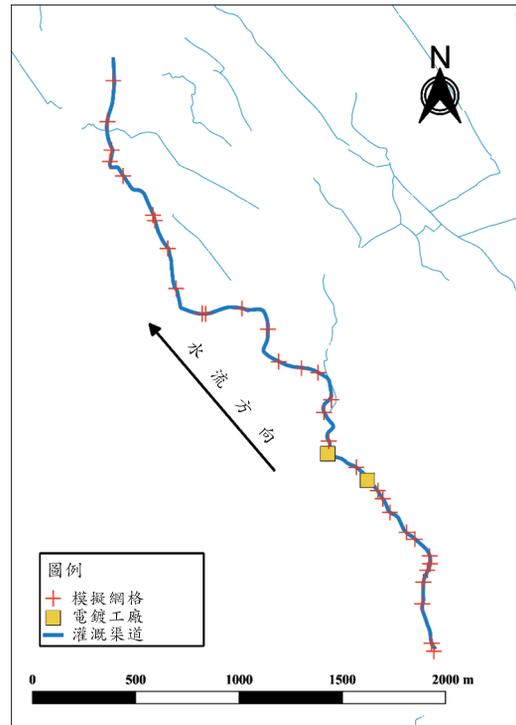


圖 7 三塊厝模式網格分配

響整體濃度分布，由於本研究區域原水水量不大，在經過電子工廠時，濃度易受到大幅度的波動，產生明顯的躍升，但在工廠下游 1000 公尺處，開始有非工業廢水排入，使得重金屬濃度得以稀釋，但以臺灣地區規定之灌溉水體管制標準(Cu , 0.2 ppm)來做為許可門檻，依舊屬於超標狀態，所以雖然電子工廠排放濃度未超過許可濃度，但渠道本身的污染物含容能力較差，仍會造成對於下游灌溉的嚴重影響。

3.3 長期影響評估

本研究評估華通電腦工廠所排放之銅離子濃度所造成的影響，分別針對一廠、二廠與三廠所核准的排放水量(7549.8、986 與 4579.4 cmd)與管制前放流水標準(3 mg/L)進行評估，分得取濃度最高值與渠道下游時的濃度為 1.346 mg/L 與 0.749 mg/L。

若以每日總計 41 公斤的排放量作為評估，

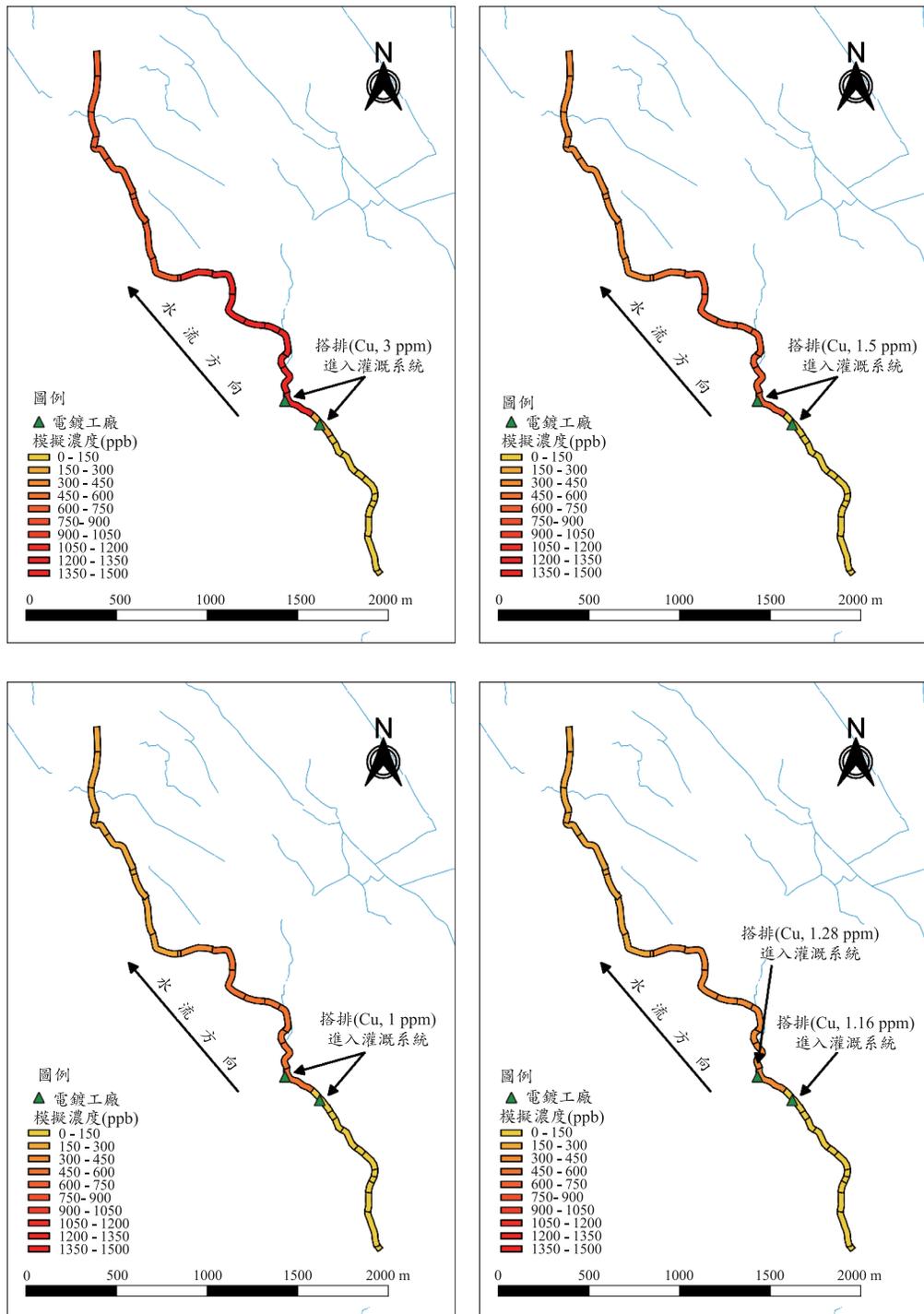


圖 8 不同情境模擬成果(空間)

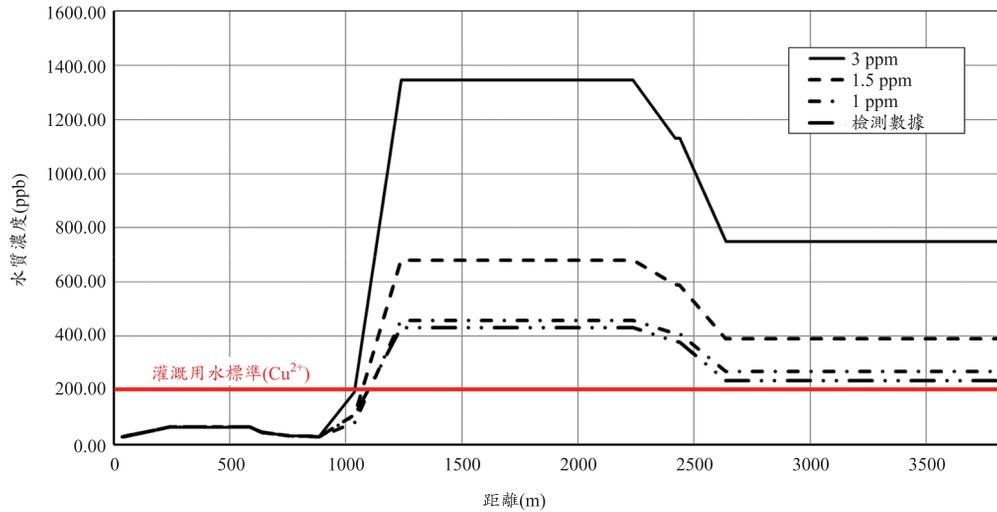


圖 9 不同情境模擬成果(距離)

土壤密度為 $1,670 \text{ kg/m}^3$ 、土深為 20 公分作為參數，以農地管制標準 200 mg/L 作為計算，每年最多可以使 22.43 公頃的農田超過管制標準。

若以進入農田之水量做為重金屬遷移考量，根據桃園灌溉計畫書若農田為黏質壤土且施作兩期稻作，其灌溉水深分別為 1016 公厘與 976 公厘，共計 199.2 公分，所以一年進入農田的水量為 56971.2 立方公尺，可以根據上述條件計算得到電子工廠每年對於此兩區灌溉農田的銅離子濃度上升量為 $4.467 \text{ (mg/L-year)}$ ，但此估算法的水量只占約此灌溉系統中水量的 0.5%。

假設此灌溉系統中水量會使用一半作為灌溉，則每年可使 11 公頃農田持續累積 200 mg/kg ，若以灌溉小組面積推估，此灌溉渠道約提供 400 公頃的農田，則每年可以使此範圍內的農田每年累積 11.2 mg/kg 的重金屬污染量。

故根據不同算法可以評估出此灌溉系統每年對於重金屬污染量範圍約在 4.467 mg/kg 至 11.2 mg/kg 之間，若全部水皆灌溉使用，至多可以影響至 22.4 mg/kg 。

四、結論和建議

若以土壤管制標準 200 mg/kg 來計算，假設整治完為 100 mg/kg ，要使農地安全度過 30 年以

上，則每年只能上升 3 mg/kg ，取水口的水體的濃度只能為 0.5 mg/L ，若要有效使農業生產在安全範圍內，則建議以下三種作為：

1. 工廠移廠

在臺灣現行環境時空背景之下，對於工廠與農地的分離尚無法執行，可建議工廠是否可拉長管線將放流水排放至非農業區，後續則以政府統一集中管理工廠成立工業區為目標。

2. 工廠濃度依總量管制標準改善

在 105 年政府將其區域劃置成總量管制區域，並將華通電腦的排放許可降低至 1.5 mg/L ，此一作為可以預期使得下游農田每年所累積的銅離子有效的減半。

3. 環保單位應降低水污許可流量

再來就是可以針對政府，除水體濃度的管制，也可以針對排放量進行加強標準，使得總排放質量得到有效的減少。

參考文獻

1. Barnwell, T.O., Brown, L.C., and Mareck, W. 1989. Application of Expert Systems Technology in Water Quality Modeling. Water Sci. Tech. 21(8-9):1045-1056.
2. Brown, A. P., and Anson, F. C. 1997. Cyclic

- and differential pulse voltammetric behavior of reactants confined to the electrode surface. *Analytical Chemistry* 49(11): 1589-1595.
3. WASP7 Stream Transport – Model Theory and User’s Guide
 4. 行政院環境保護署，「特予保護農地水體重金屬總量管制推動方案(簡報資料)」，水質保護處，2015。
 5. 行政院環境保護署，「全國重金屬高污染潛勢農地之管制及調查計畫(第2期)」，瑞昶科技股份有限公司，2014。
 6. 行政院環境保護署，「102年河川水庫底泥污染傳輸模式應用及研析計畫」，美商傑明工程顧問(股)台灣分公司，2014。
 7. 行政院環境保護署，「102年度全國農地污染之環境資料蒐集與污染關聯性分析計畫」，臺灣大學生物環境系統工程學系，2013。
 8. 行政院環境保護署，「水體污染總量管制方式規劃專案工作計畫」，美商傑明工程顧問(股)臺灣分公司，2013。
 9. 行政院環境保護署，「底泥污染來源及傳輸模式調查計畫—以重點河川為例」，美商傑明工程顧問(股)臺灣分公司，2013。
 10. 行政院環境保護署，「全國重金屬高污染潛勢農地之管制及調查計畫」，環興科技股份有限公司，2012。
 11. 行政院環境保護署，「環境影響評估河川水質評估模式技術規範」，2011。
 12. 行政院環境保護署，「灌溉水及灌溉渠道底泥對農地污染之影響探討」，國立中興大學土壤環境科學系，2006。
 13. 行政院環境保護署，「民國 81~86 年度臺灣省土壤重金屬含量調查資料彙編參考手冊」，1998。
 14. 行政院環境保護署，「農田土壤重金屬含量細密調查採樣作業規範」，1991。
 15. 桃園農田水利會-田間需水量表。網址：<http://www.tia.org.tw/relic/methodwater.asp>，上網時間：2016-09-26。
 16. 桃園農田水利會-自然環境。網址：<http://www.tia.org.tw/intro.asp>，上網時間：2016-12-08。
 17. 桃園市政府環境保護局，環保新聞，全國首例桃市劃設新街溪及埔心流域為廢(污)水排放總量管制區。網址：<http://www.tydep.gov.tw/TYDEP/Message/Detai/687>，上網時間：2016-06-28。
 18. 許良璋，「桃園埤塘輪灌系統之模擬分析」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2011。
 19. 許睿翔，「水田埤塘之系統動力模式」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2006。
 20. 劉黔蘭，「電鍍廢水污染土壤，土壤與環境」，第1卷第2期，第161-169頁，1998。
 21. 農業經營現況(中華民國國情介紹-農業建設)。網址：https://www.ey.gov.tw/state/News_Content3.aspx?n=0E57D34A3C127591&sms=FE33AFFA1C25C4DD&s=9963D58B76C1AE51，上網時間：2016-07-25。

收稿日期：民國 106 年 11 月 24 日
 修正日期：民國 106 年 12 月 8 日
 接受日期：民國 106 年 12 月 25 日