

臺中日南灌區農地土壤重金屬分布調查與 工業潛勢影響分析

Assessment of Soil Heavy Metal Distribution and Industrial Impact in the Rinan Irrigation Area of Taichung, Taiwan

財團法人農業工程研究中心

助理研究員

譚允維

Yun-Wei Tan

研究員

陳豐文

Feng-Wen Chen

副研究員

林修德

Hsiu-Te Lin

摘 要

臺中市大甲區日南灌區因鄰近工業區及散布多處小型工廠，為潛在水土重金屬污染風險。為掌握灌區內農田土壤品質與污染分布狀況，本研究於 2023 年進行共 54 處農地土壤採樣，採樣規劃於灌溉系統各班別進行採樣，以涵蓋空間範圍及其代表性，並利用 XRF(X-Ray Fluorescence, X 射線螢光光譜儀)進行重金屬快篩作業，分析八大重金屬元素(銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳、砷及汞)濃度，並以食用作物農地土壤之監測及管制標準作為參考依據。分析結果顯示，所有 54 處採樣點之重金屬濃度均低於監測標準值，顯示該區農地目前並無明顯重金屬污染疑慮，具備農業生產安全性。

為進一步探討土壤重金屬潛在污染分布特性，本研究利用反距離加權法(IDW, Inverse Distance Weighting)進行空間插值分析。結果顯示銅、鋅、鉻、鎳等 4 個元素於灌區之空間上具有類似的分布特性，且多位於工業區下游之灌溉系統及散佈於灌區中小型工廠附近，呈現土壤重金屬濃度較高之現象。雖然土壤重金屬均符合標準規範，但其空間分布特性與工業設施位置之關聯性，顯示工廠活動疑似為潛在污染來源之一，建議應加強對灌區內工業設施之監控及灌溉系統水質的監測，並持續進行土壤重金屬長期監測，維持農地環境品質、確保農產品安全，以降低未來重金屬潛在污染之風險。

關鍵詞：農地土壤、重金屬、空間分布

Abstract

The Rinan Irrigation Area in Dajia District, Taichung City, is adjacent to industrial zones and scattered small-scale factories, posing a potential risk of heavy metal contamination in both soil and water environments. To assess the quality and potential contamination of agricultural soils within the irrigation area, this study conducted a total of 54 soil sampling sites in 2023. Sampling locations were strategically planned across various irrigation groups to ensure spatial coverage and representativeness. A portable X-Ray Fluorescence (XRF) analyzer was employed to rapidly screen for eight major heavy metals (Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, As, and Hg), and the results were evaluated against Taiwan's soil monitoring and control standards for farmland growing edible crops. The analysis showed that all 54 sampling points had heavy metal concentrations below the regulatory thresholds, indicating no significant contamination concerns and supporting the area's current suitability for agricultural production.

To further explore potential spatial trends in heavy metal distribution, Inverse Distance Weighting (IDW) was applied for spatial interpolation. The results revealed that copper, zinc, chromium, and nickel exhibited similar spatial patterns, with higher concentrations observed in irrigation systems located downstream of industrial zones and near small-scale factory clusters. Although concentrations remain within acceptable limits, the spatial correlation between elevated values and industrial activity suggests that factory operations may be a potential source of localized contamination. Based on these findings, it is recommended to strengthen monitoring and management of industrial facilities within the irrigation area, as well as to enhance surveillance of irrigation water quality. Continued long-term soil monitoring is also advised to maintain agricultural land quality, ensure food safety, and reduce future risks of heavy metal contamination.

Keywords: Farmland Soil, Heavy Metals, Spatial Distribution

一、前言

臺中市大甲區日南灌區因鄰近工業區及散布多處小型工廠，為潛在水土重金屬污染風險，過去灌區內之日南圳亦曾被列管為高污染潛勢圳路，並已於 2019 年解除列管。

本研究基於台灣各地農地均有遭受不同程度重金屬污染的問題，考量土壤品質與作物有密切之關聯性，倘若土壤遭受重金屬污染，如常見之銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳、砷及汞等 8 種，將可能造成農地重金屬污染、作物危害，人畜食用後致癌生病等風險(陳吉村，1993、林浩潭，2005)，例如：食用鎘米者即易患痛痛病(Itai-Itai disease)，導致人體全身關節無故疼痛、砷可能引起慢性砷中毒或烏腳病、鉛之攝取則可能易造成致癌風險(臺灣省農田水利聯合會，1995、陳豐文，2007)。農地污染亦是持續關注中的環境議題，對於日南灌區是否也存在相同問題保有高度興趣，因此著手進行本次研究，期透過基本普查方式評估日南地區農地是否存在重金屬污染問題亦或空間分布為何等相關基礎資訊。

為釐清灌區內農田土壤品質與污染分布狀況，本研究於 2023 年針對日南灌區進行共 54 處農地土壤採樣，採樣規劃於灌溉系統各班別進行採樣，以較均勻之採樣方式涵蓋空間範圍以利具有代表性，採集之土壤樣本則並利用 XRF(X-Ray Fluorescence, X 射線螢光光譜儀)進行重金屬快篩作業，分析八大重金屬元素(銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳、砷及汞)濃度，並以食用作物農地土壤之監測及管制標準作為參考依據進行分析。

二、研究區域及方法

(一).研究區域

本研究區域主要以日南灌區為主(如圖 1 所示)，日南灌區位於臺灣中部臺中市大甲區，灌溉管理單位為日南工作站，灌溉面積約 1,991 公頃，取用水源為大安溪之北岸，由上游至下游取水分別為日南圳、九張犁圳及雙寮補給支線，上游工廠距離日南圳取水口約 4.7 公里，日南圳取水口至九張犁圳取水口則約 2.8 公里，九張犁圳取水口至雙寮補給支線取水口則約 6.6 公里。灌溉系統方面則可依照三個灌溉水路進行區分，日南圳灌溉面積約 1,293 公頃、九張犁圳灌溉面積約 526 公頃、雙寮補給支線則約 172 公頃；圳路長度部分日南圳約 7,773 公尺、九張犁圳約 9,474 公尺及雙寮補給支線約 2,112 公尺(日南工作站業務檢查資料，2023；譚允維，2025)。

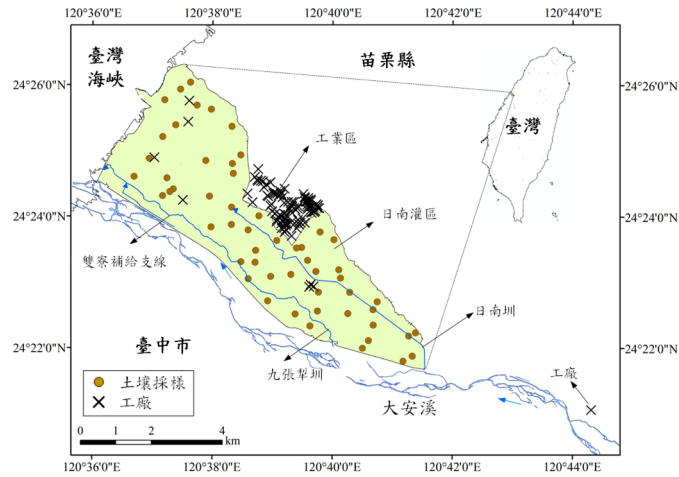


圖 1 研究區域-日南灌區

(二).土壤取樣選點方式

本研究農地土壤採樣作業為依據農業改良場公告土壤採樣須知，有以下若干之注意準則：(1).採樣位置不可位於田埂邊緣，堆肥或草堆放所，且每一樣本至少 5 採樣位置混合而成，如圖 2 所示。(2).採樣數目依個別農戶農田為採樣單位。(3).採樣點選好後除去土表作物殘株或雜草，用鋤頭或圓鋤將土層挖成 V 形空穴，依作物別選擇土層，如：水稻、蔬菜、花卉等淺根作物只採取表土層 0~15 cm；果樹或深根作物則須採取表土 0~20 cm 及底土 20~40 cm，取出約 1.5 cm 厚，上下齊寬的土片(如圖 3)。(4).每塊農田至少取 5 採樣位置以上，置於塑膠盆或水桶中，充分混合均勻後，取約 600~1,000 g，裝於塑膠袋中。(5).每一混合樣本裝入塑膠袋後，袋上必須註明採樣日期、地點等，土樣採集後應置於室內通風處陰乾，不可在太陽底下曝曬。

(二).土壤採樣坵塊位置選定

本研究針對日南灌區灌溉系統最小單位，即每個班進行土壤採樣，每個班的面積不同介於 20.5~164.7 ha，由於日南站總計有 55 個班，故總計有 55 處土壤坵塊採樣，採樣點位則依據以下兩個原則進行。(1).當年度芋頭受災戶之求償土地清冊之受災坵塊進行採樣。(2).利用 GIS 計算出平均中心位置之坵塊，現場採樣概況如圖 4 所示。

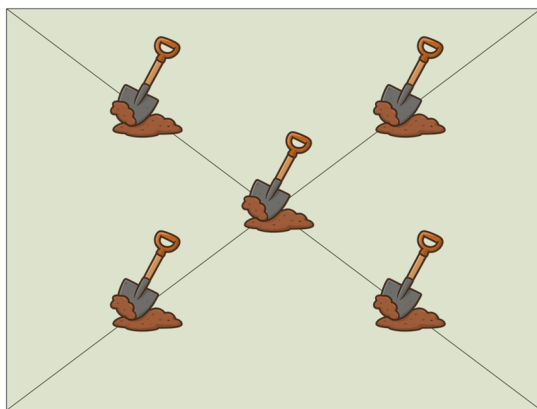


圖 2 坵塊採樣示意圖

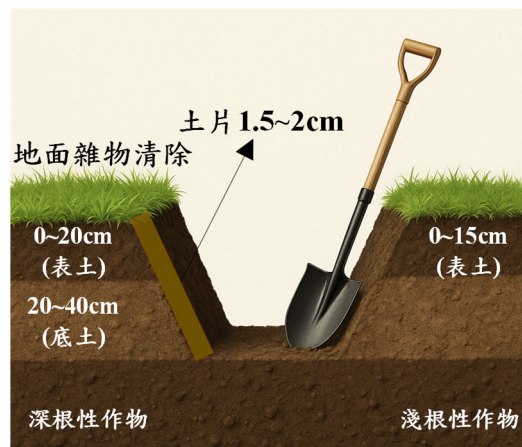


圖 3 土壤採樣示意圖



圖 4 農地土壤採樣概況

(三).土壤重金屬檢驗方法—快篩測定

本研究對於土壤重金屬濃度的測定方式乃依據行政院環境保護署環境檢驗所規範農地土壤重金屬檢測方法—「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法—攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(NIEA S322.60C)」之規範進行快篩測定。快篩測定分析原理為利用高強度 X-射線照射樣品，將放射出來之螢光，利用分光晶體分光後偵測不同波長強度，即可分析樣品中所含元素種類，也可進一步定量分析，惟待測元素受到樣品其他元素基質干擾為目前之技術瓶頸，故截至目前國內對於底泥重金屬含量測定，仍僅被發展成以攜帶式 XRF 之半定量篩選方法(葉玉珍等，2011)，其與 ICP-OES 比較如表 1 所示。本研究使用 XRF 設備之廠牌為 Olympus Innov-XDP-4050 手持式 X 射線螢光光譜儀，檢測操作均依據前述「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法—攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(NIEA S322.60C)」進行檢測，由於本研究著重於農作物與土壤之關係，故土壤重金屬檢測標準則依據食用作物農地土壤規範如表 2 所示)，另表 1 顯示 XRF 其優點為其可攜式之便利性及快速掌握土壤重金屬概況，然而存在其對各項重金屬檢測標準之下限值，鉛之偵測下限值最高為 1~3 g/kg，其次為鉻 5~10 mg/kg、鎳與銅為 5~7 mg/kg、汞砷及鋅為 2~4 mg/kg，最後為鎘之 2~3 mg/kg，對照表 3 可發現，鎘、汞之偵測下限值。約與食用作物農地土壤規範大約相同，此顯示鎘與汞之檢測成果可能存在其誤差。相關操作照片如圖 5 所示，相關步驟如下：

1. 分析前儀器需暖機 15~30 分鐘。
2. 採集長和寬為 10×10 cm 且 2、3 cm 深之樣品，並將樣品內的石礫由土壤中移走。
3. 若樣品屬於含有水分和高黏土成分，可將樣品置放在塑膠袋中揉捏使之均勻化。
4. 自然烘乾使土壤盡可能保持乾燥。
5. 以研鉢和碾槌磨碎土壤或底泥樣品，再以 60 篩目的篩網過篩，樣品應連續研磨至最少 90% 以上樣品通過 60 篩目之篩網。
6. 將過篩後樣品混合均勻。
7. 取適量過篩後樣品放置在 31 mm 的聚乙烯樣品承裝器內，以 2.5μm 的聚酯薄膜(Mylar) 蓋

住樣品承裝器，等待分析。

8. 此外土壤表面應該盡量平坦，以便探針端的視窗有較佳表面接觸，建議壓緊土壤以增加土壤的緊密度，以得到較好的重複分析和代表性。
9. 檢測時射源計數時間通常使用 30~120 秒，但射源計數時間會隨儀器不同而改變，和依偵測限值之需求而定，依儀器使用手冊之說明操作。

表 1 ICP-OES 與 XRF 比較一覽

儀器名稱	ICP-OES	XRF
檢驗用途	定量分析，適用於單一材料，需要隨貨附上檢驗報告者，如原料供應商，簡單零件供應商。	定性分析，用作確效、品保、線上生原料之快速分析，適用於零件組裝廠、成品廠。
前處理方法	EPA 3050B, EN 1122, EPA 3052	不需要前處理，直接上機
環境危害	1. 前處理使用強酸、實驗危險性高。 2. 實驗室廢氣問題。 3. 廢棄樣品容易造成二次環保問題。	無環境化學物污染問題
廢溶劑處理	廢酸、化學廢水、實驗室廢氣	無實驗室廢棄物
實驗時間	240~360 分鐘	4~6 分鐘
特點	1. 可作定量分析。 2. 檢測法規明確。 3. 高度擴充性。	1. 日本及歐洲官方建議使用之方法。 2. 可保持樣品完整性，不需消化，省時、沒有廢氣及廢酸之污染，實驗無危險性。 3. 偵測下限值門檻較高 2~3 mg/kg：鎘 2~4 mg/kg：汞、砷、鋅 5~7 mg/kg：鎳、銅 mg/kg：鉻 1~3 g/kg：鉛

資料來源：賴俊杰，2005。

表 2 食用作物農地土壤規範

項目	銅	鎘	鉛	鋅	鉻	鎳	砷	汞
合格	<120	<2.5	<300	<260	<175	<130	<30	<2
監測	120~200	2.5~5	300~500	260~600	175~250	130~200	30~60	2~5
管制	>200	>5	>500	>600	>250	>200	>60	>5

註：本表單位為 mg/kg。



A. 土壤烘乾



B. 60 篩號篩網



C. 樣品裝袋



圖 5 土壤重金屬快篩相關步驟與設備

(四).空間推估方法

本研究除了為針對空間上各點土壤取樣之重金屬數據進行檢測標準分析，為進一步掌握灌區之土壤重金屬含量及分布，擬採樣空間推估方法中較常見之反距離權重法(IDW, inverse distance weighting)，反距離權重法是美國國家氣象局(U.S. National Weather Service)於 1972 年發展出的方法，主要依照平均權重的概念，利用未知測站的附近測站之水文量推估未知測站的水文量(Bedient et al., 1992; Goovaert, 2000)。反距離權重法之計算觀念源自於 1970 年提出之地理學第一定律(Tobler's first law)的觀念進行數據內插；依據未知點(目標點)和各個測站的距離關係給予權重，距離越近的權重越大，距離越遠的權重越小，權重乘以各個測站的水文或地文值，其總和即為未知點的估計量，其方程式表示如(1)~(2)式(Bedient et al., 1992; Burrough et al., 1998; Goovaert, 2000)：

$$\hat{R}_p = \sum_{i=1}^N w_i R_i \dots\dots\dots(1)$$

$$w_i = \frac{d_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\alpha}} \dots\dots\dots(2)$$

式中： \hat{R}_p 為未知點的估計污染潛勢分數、 R_i 為各特登工廠之污染潛勢分數、 N 為特登工廠的數量、 w_i 為各樣站所占之權重。 d_i 為未知點和各樣站的距離(m)、 α 為指數，一般設為 2 (Zhu et al., 2004; Lin et al., 2008)。

三、結果與討論

本研究針對日南灌區農地土壤利用 XRF 快篩儀器進行重金屬含量調查，統計結果如表 4 及圖 6 A 所示。分析項目包含銅(Cu)、鎘(Cd)、鉛(Pb)、鋅(Zn)、鉻(Cr)、鎳(Ni)、砷(As)與汞(Hg)等八大重金屬。檢測結果顯示，各金屬含量變異度明顯，最大值以鋅(543 mg/kg)與鉛(78.00 mg/kg)為高，而平均值則以鋅(113.18 mg/kg)與鉛(50.55 mg/kg)偏高。在標準差方面，鋅與鉛亦呈現較高數值，分別為 79.07 mg/kg 及 10.66 mg/kg。此外，汞的最小值為 0.00 mg/kg，顯示部分地區可能未檢出，然而其最大值達 7.10 mg/kg，亦有

超過土壤品質管制標準之情形，然而考量 XRF 對於汞的偵測極限較低，故有關汞之檢測僅建議做為參考。

進一步彙整重金屬合格與超標情形，如表 5 所示。結果顯示銅、鉛、鋅、鉻與砷等五項金屬皆為 100%合格，未達監測或管制標準。然而，鎘與鎳則分別有 5.6%與 1.9%的樣點進入監測級別，顯示部分區域仍需持續追蹤。在汞方面則問題較為顯著，僅 33.3%樣點符合合格標準，64.8%屬監測標準，並有 1.9%超過管制值。

值得注意的是，汞(Hg)雖為本次調查中唯一出現管制等級超標者，然根據現行檢測方法，XRF 之鎘(Cd)偵測下限約為 2~3 mg/kg、汞(Hg)偵測下限約為 2~4 mg/kg，與農地土壤品質管制標準中汞項目的臨界值接近。因此，在實際檢測中可能出現低劑量鎘、汞難以準確區辨的情形，導致監測級別樣本比例偏高，產生一定程度的結果偏差。若將鎘、汞項目排除評估，即不將其納入整體八項重金屬合格判定條件，則整體樣點合格數將由 49 處提升至 51 處，合格率由 29.6%顯著上升至 94.4%(如圖 6 B 所示)。此結果顯示，在排除偵測敏感度較低的鎘、汞項目後，多數樣區農地土壤之重金屬濃度已符合農業使用之安全標準，整體環境風險屬可接受範疇。然而，由於鎘、汞具高度毒性，仍建議未來採用感度更高之儀器如 ICP-MS 進行進一步分析，以確保評估結果具準確性與代表性。

表 4 農地土壤重金屬檢測成果統計

統計別	銅	鎘	鉛	鋅	鉻	鎳	砷	汞
最大值	90.00	3.20	40.20	543.00	78.00	55.00	20.40	7.10
平均值	20.52	0.11	26.34	113.18	50.55	20.11	4.71	2.15
最小值	0.00	0.00	12.30	45.40	27.10	6.30	2.20	0.00
標準差	11.97	0.59	6.40	79.07	10.66	8.70	2.50	1.05

本表單位：mg/kg

表 5 農地土壤重金屬合格、監測與超標統計

類別	銅	鎘	鉛	鋅	鉻	鎳	砷	汞	整體	整體 (不考量鎘汞)
合格處	54	52	54	51	54	54	54	18	16	51
合格(%)	100.0	96.3	100.0	94.4	100.0	100.0	100.0	33.3	29.6	94.4
監測處	0	2	0	3	0	0	0	35	37	3
監測(%)	0.0	3.7	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	64.8	68.5	5.6
管制處	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
管制(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.9	0.0

註：整體之合格標準亦即 8 大重金屬項皆合格，任一項重金屬類別含量達管制則屬管制標準，而未達管制標準者任一項重金屬含量達監測標準則屬監測標準。

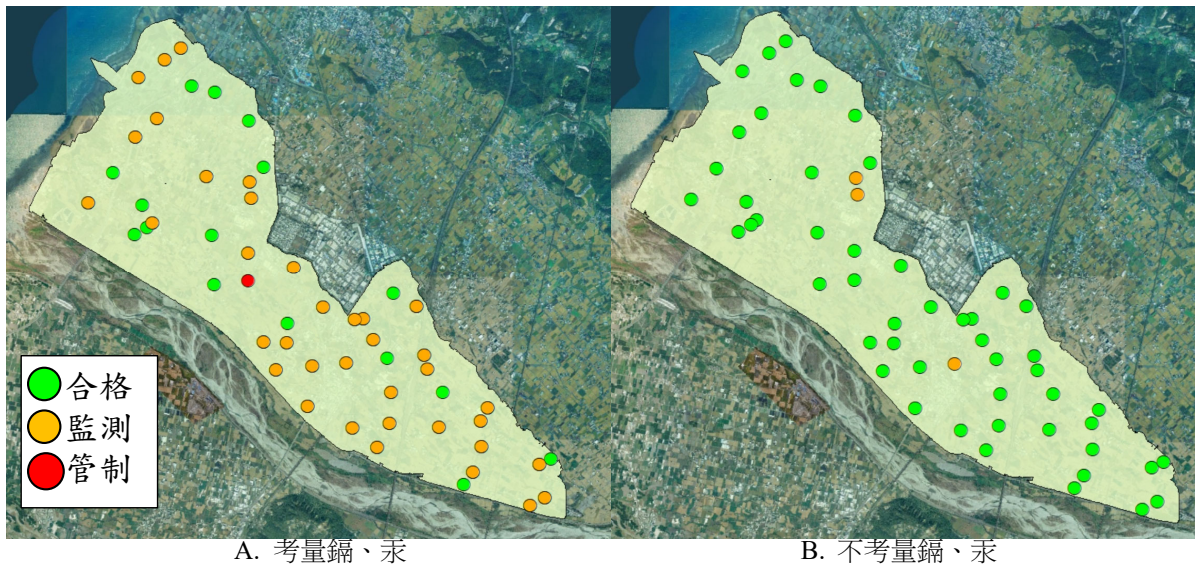


圖 6 土壤重金屬檢測成果點位分布

透過反距離加權法(IDW)進行八項重金屬元素之空間分布推估，結果如圖 7 所示。圖中紅色區域代表濃度相對較高、綠色則為濃度低值；左上為灌區西北側下游區域，右下為東南側上游地區。整體而言，銅、鉛、鋅、鉻與鎳呈現明顯高濃度熱點，主要集中於灌區下游西北部與中部交界區域，局部亦延伸至東南部邊緣，顯示該區域可能長期受到點源性污染來源影響。相對地，鎘與砷呈現整體濃度較低且分布較為均勻，僅少數地區出現局部上升，推測其主要來源仍以背景值為主。汞則分布零星，高濃度熱點主要出現在中南部下游區域。

就元素來源而言，銅、鋅、鉻與鎳等金屬通常與工業活動密切相關，特別是電鍍、金屬加工、焊接與表面處理產業。觀察本區域空間分布可發現，其高濃度熱點多集中於鄰近工業區、都市重劃區或過去有工業設施聚集之地段。推測可能與工業廢水排放至灌溉渠道進而導致農地有所累積有關。

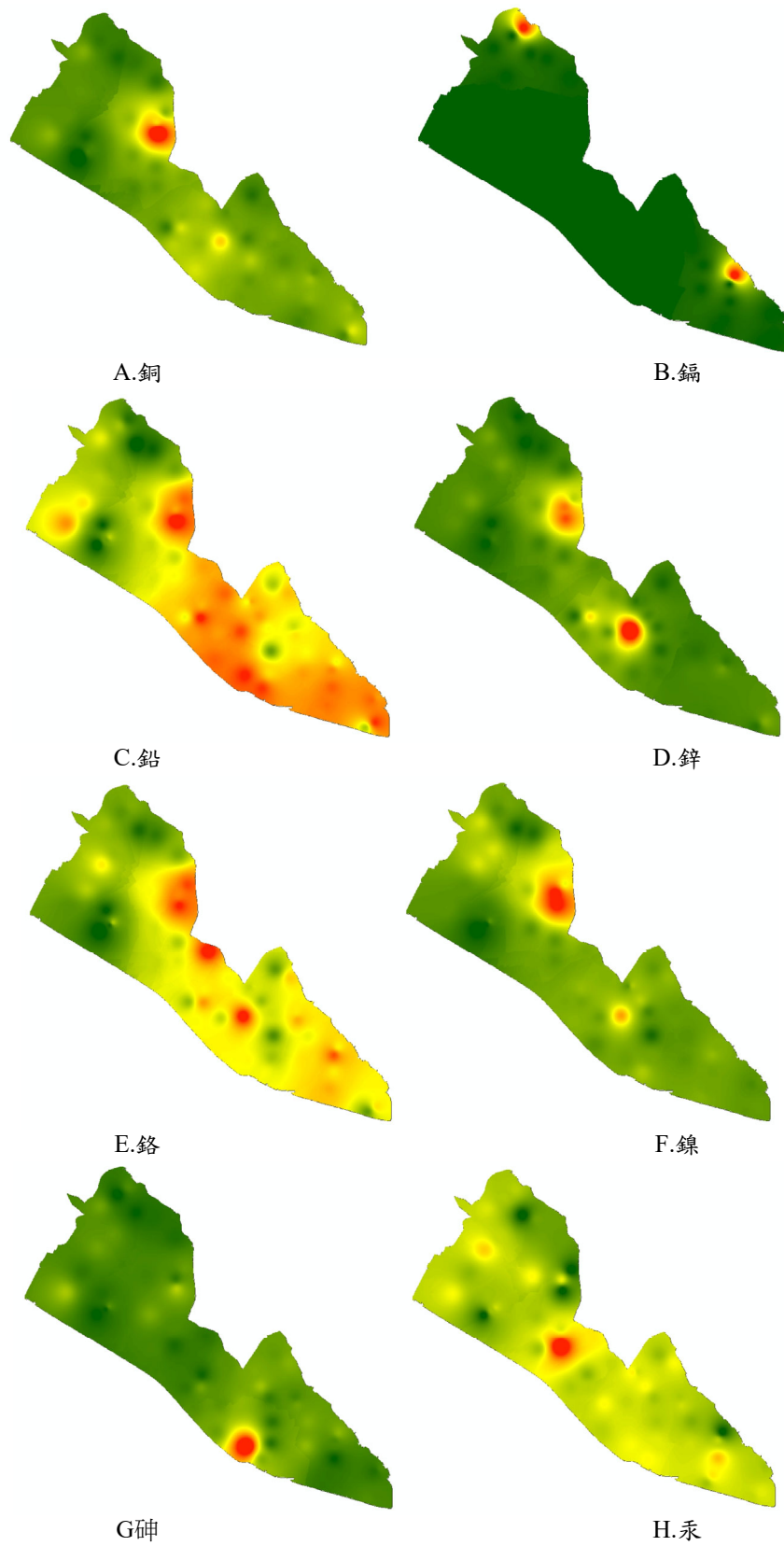


圖 7 土壤重金屬之空間推估

四、結論與建議

本研究針對臺中管理處日南灌區於 2023 年調查農地土壤樣點共 54 處，評估八項主要重金屬(銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳、砷、汞)之濃度與分布情形。整體而言高濃度熱點主要集中於灌區西北部之下游區域，與鄰近工業區位置可能有一定之關聯性，尤其以銅、鉻、鎳等重金屬分布特性，推測與當地工業活動可能存在關聯。從統計資料觀察，八項金屬皆合格者僅 16 處(約 29.6%)，若排除鎘、汞因偵測極限偏高所造成之誤差，則合格率可上升至 94.4%。

雖然整體而言，日南灌區農地土壤重金屬濃度普遍符合安全標準，顯示當前農業生產環境具備良好基礎條件，但部分地區長期可能受都市開發與工業活動之影響，致使污染物潛移累積於下游灌區。因此，建議未來應建立例行性之土壤重金屬監測制度，特別針對高風險區域加強監控密度與頻率，並進行土壤與灌溉水質整合評估，以確保農地永續使用與糧食安全。若經驗證與工業污染具關聯性，亦應研擬土地用途管制及污染源遏止對策，以降低環境與農業衝擊。

參考文獻

1. Bedient, P. B., Huber, W. C., 1992, "Hydrology and floodplain analysis", 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA.
2. Burrough, P. A., McDonnell R. A., 1998, "Principles of geographical information systems", Oxford.
3. Goovaerts, P., 2000, "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall", Journal of Hydrology 228: 113-129.
4. Li, J., Heap, A. D., 2008, "Spatial interpolation methods: A Review for environmental scientists", Geoscience Australia, Record.
5. Zhu, H. Y., Jia, S. F., 2004, "Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data", Progress in Geography 23(2): 34-42.
6. 內政部營建署，2002，金門國家公園土壤調查分析及植生適應性研究，金門國家公園管理處委託研究報告。
7. 行政院農業委員會，2021，農業統計年報。
8. 行政院環境保護署，2015，土壤取樣方法(NIEA S102.63B)。
9. 林浩潭，2005，重金屬及微量元素對作物之影響，台灣農家要覽(三)農作篇，P.557-560。
10. 金門縣政府，2019，金門縣第五期(108~111 年)離島綜合建設實施方案(核定本)。
11. 陳吉村，1993，重金屬對農業的影響，花蓮區農業專訓 6，P.8-10。

12. 陳豐文、譚允維、卓宇謙、徐聖軒，2020，金門地區埤塘之蓄水量及水質調查及空間分析，109 年度農業工程研討會。
13. 陳豐文、陳靖葳、陳獻，2007，農業灌溉水質標準與工業放流水標準之差異性探討，水利工程研討會。
14. 譚允維、陳豐文、譚義績、林修德，2025，河川點源汙染對區域性農地土壤鹽鹼化問題之探討-以臺灣中部日南灌區為例，第二十九屆海峽兩岸水利科技交流研討會。