

基於 Meta 分析的河南省農用地土壤重金屬污染現狀研究

RESEARCH ON THE CURRENT SITUATION OF HEAVY METAL POLLUTION IN AGRICULTURAL SOIL IN HENAN PROVINCE
BASED ON META-ANALYSIS

河南農業大學
資源與環境學院
本科生

田啟家
Qi-Jia Tian

河南農業大學
資源與環境學院
講師

胡亞瑾*
Ya-Jin Hu

河南農業大學
資源與環境學院
教授

李玲
Ling Li

西北農林科技大學
水利與建築工程學院
副教授

姚寧
Ning Yao

河南農業大學
資源與環境學院
講師

李棟浩
Dong-Hao Li

河南農業大學
資源與環境學院
講師

吳用
Yong Wu

摘要

為準確掌握河南省農用地土壤八種重金屬元素 (Cd、Hg、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As) 的污染狀況，本研究以河南省農用地土壤中的八種重金屬元素為例，使用 Meta 分析方法，獲取了於 2010 ~ 2024 年間在知網、萬方、維普和 Web of Science 等資料庫發表的河南省農用地土壤重金屬元素的含量資料，建立土壤重金屬元素含量資料集並以此開展一系列分析與研究。研究結果顯示，河南省農用地土壤中的八種重金屬元素的超背景值占比在 28.1% ~ 95.8% 之間，有六種重金屬元素含量的均值高於元素背景值。其中以 Cd 污染最為突出，平均含量達到 0.325 mg/kg，超背景值占比約為 95.8%。毒性回應係數最高的是 Hg (毒性係數=40)，其生態風險潛在指數達到 86.95，處於較強風險水準。地累積指數的計算結果表明河南省農用地土壤中的八種重金屬元素的污染程度按從高到低的順序依次為：Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > As，其中 Cd、Hg 兩種重金屬元素的污染程度相對較高，輕度及以上污染程度的採樣點數分別占到所有採樣點的 91.7% 和 75%。潛在生態風險指數的計算結果顯示，農用地土壤中的 Cd、Hg 兩種重金屬處於較強潛在生態風險危害等級，並且有 4 個採樣點的 RI > 300，處於中高風險等級，其中 Cd 的占比為 58.3%，Hg 為 31.6%。

關鍵詞：河南省、農用地、土壤重金屬污染、Meta 分析、潛在生態風險。

* 河南農業大學資源與環境學院講師

712100 陝西省咸陽市楊凌區西北農林科級大學北校區 · t3258005910@163.com

RESEARCH ON THE CURRENT SITUATION OF HEAVY METAL POLLUTION IN AGRICULTURAL SOIL IN HENAN PROVINCE BASED ON META-ANALYSIS

Qi-Jia Tiang

Faculty of Resources and Environment

Ya-Jin Hu*

Faculty of Resources and Environment

Ling Li

Faculty of Resources and Environment

Ning Yao

School of Water Conservancy and Architectural Engineering

Dong-Hao Li

Faculty of Resources and Environment

Yong Wu

Faculty of Resources and Environment

ABSTRACT

To accurately assess the contamination status of eight heavy metal elements (Cd, Hg, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, and As) in agricultural soils of Henan Province, this study employed a meta-analysis approach to compile data on heavy metal concentrations from databases including CNKI, Wanfang, VIP, and Web of Science, covering the period from 2010 to 2024. A comprehensive dataset of heavy metal concentrations in agricultural soils was established, facilitating a series of analytical investigations. The findings reveal that the proportion of samples exceeding background levels for the eight heavy metals ranged from 28.1% to 95.8%, with the mean concentrations of six elements surpassing their respective background values. Notably, Cd contamination was the most pronounced, with an average concentration of 0.325 mg/kg and a 95.8% exceedance rate. Hg exhibited the highest toxicity response coefficient (toxicity factor = 40), with a potential ecological risk index of 86.95, indicating a significant risk level. The geo-accumulation index calculations ranked the contamination levels of the eight heavy metals in descending order as follows: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > As. Cd and Hg exhibited relatively higher contamination levels, with 91.7% and 75% of sampling points, respectively, showing mild or higher contamination levels. The potential ecological risk index analysis indicated that Cd and Hg in agricultural soils were at a significant potential ecological risk level, with four sampling points registering RI > 300, indicating medium to high risk levels, where Cd accounted for 58.3% and Hg for 31.6% of these cases.

Keywords: Henan province, Farmland, Heavy metal pollution of soil, Meta analysis, Potential ecological risks.

Tian, Q.J., Hu, Y.J.*, Li, L., Yao, N., Li, D.H., & Wu, Y. (2026). "Research on the Current Situation of Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil in Henan Province Based on Meta-analysis." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(1), 41-54. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202603_72\(1\).0004](https://doi.org/10.29974/JTAE.202603_72(1).0004)

一、緒論

隨著社會經濟的不斷發展和農業生產方式的轉型升級，土壤污染問題尤其是重金屬污染日益成為全球環境治理中的重要議題。重金屬具有毒性強、持久性強、生物蓄積性強等特點，一旦進入土壤系統，便容易通過食物鏈影響生態環境和人類健康^[1,2]。我國作為全球最大的農業生產國，農用地土壤重金屬污染問題尤為突出，尤其是在河南這樣的農業大省，土壤重金屬污染現象已成為影響農作物生長、農產品安全和土壤品質的一大頑疾。

近年來，有許多學者對河南省農用地土壤的重金屬污染的來源、分佈、特徵、污染程度等進行了大量研究，包括污染源解析、風險評估等。但由於研究方法和資料來源的差異，關於污染情況的結論往往不一致，缺乏統一的綜合評價。Meta 分析作為一種整合多源異構資料的綜合研究方法，可通過量化權重分配與異質性檢驗，系統整理和量化分析多項獨立研究的資料，整合不同地區和不同研究之間的結果，能夠有效消除個別研究中的偏差，揭示土壤重金屬污染的普遍性與嚴重性，對其主要影響因素進行探討，突破了單一研究的時空局限性，為區域污染治理提供全域性決策依據^[3,4,5]。

河南省，是我國重要的農業生產基地，擁有廣闊的耕地面積，農業生產活動極為頻繁。但隨著化肥、農藥的過度使用，導致河南省部分地區的農用地土壤出現了不同程度的重金屬污染問題，它的農用地土壤的重金屬污染問題逐漸引起了廣泛關注。有研究表明，

河南省的 18 個地市中 17 個市的農用地的土壤中存在重金屬污染物超標現象^[6]，其中 Cd、Hg、Pb 等污染物的點位超標率顯著高於全國平均水準，局部區域如新鄉、洛陽等地甚至出現流域性污染。土壤中的重金屬不僅會在生態系統中產生消極作用，還會降低土壤品質，影響作物生長，導致農產品品質下降，更可能通過食物鏈進入人體，對人類的身體健康造成危害，成為制約農業可持續發展的關鍵^[7,8]。

因此，本研究使用 Meta 分析方法，通過篩選文獻收集 2010 年以來河南省農用地土壤的重金屬含量資料，探討河南省 18 個地市的農用地土壤的重金屬污染狀況，並使用地累積指數法和潛在生態風險指數法對河南省農用地土壤的重金屬污染狀況進行評價，能夠全面瞭解河南省農用地土壤重金屬污染的整體情況，為地方政府制定有效的污染防控措施提供科學依據，為優化《河南省“十四五”土壤污染防治規劃》提供科學支撐，對保障糧食安全與生態健康具有現實意義。

二、材料與方法

2.1 研究區概況

河南省位於我國中部、黃河中下游，地處北緯 31°23'—36°22'，東經 110°21'—116°39' 之間，東接安徽、山東，北靠河北、山西，西連陝西，南臨湖北，呈“居中”之勢，是連接東西、貫通南北的樞紐，地理位置十分重要（圖 1）。河南省總面積 16.7 萬平方公

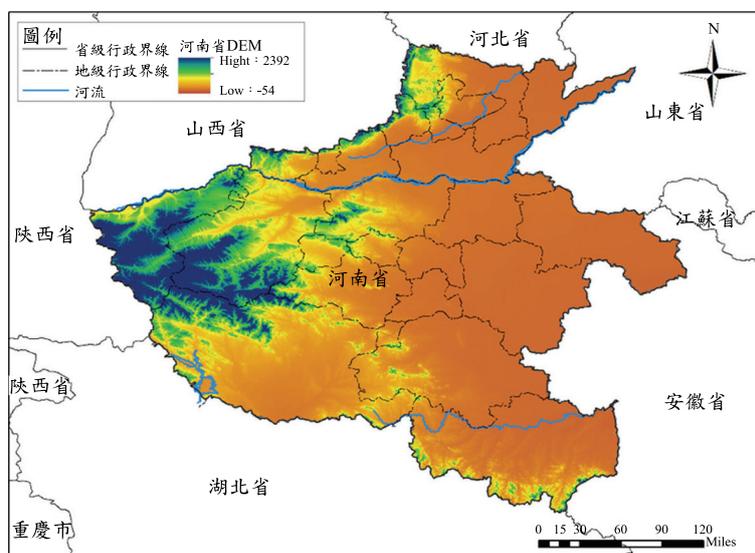


圖 1 河南省區位示意圖

里，地形多樣，擁有廣闊的農業耕地面積，土地肥沃、土壤類型多樣，適宜農作物生長。河南省擁有豐富的農作物種植和養殖資源，包括糧食作物（如水稻、小麥、玉米）、棉花、油料作物、蔬菜水果等。河南省作為中原糧倉，用全國 1/16 的耕地生產了全國 1/10 的糧食，在全國糧食生產格局中發揮著舉足輕重的作用。

2.2 研究資料的收集與篩選

首先，在 Web of Science，萬方，維普和中國知網等資料庫中，使用“重金屬”、“農用地土壤”、“河南”等關鍵字，對 2010 年至 2024 年這 14 年間發表的河南省農用地土壤重金屬研究進行搜索。制定納入分析的篩選標準，剔除不合格的文章。論文的選擇標準如下：①實驗類型為農田土壤監測實驗，採集農田耕作層土壤樣品（0~10 cm、0~20 cm 或表層剖面）；②研究中要體現研究所在區域（地市/經緯度）和採樣點的具體資訊（數量/點位元位置）；③研究中土壤採集、樣品製備及測試要使用國家/行業認證的技術標準及方法；④研究中提供了土壤重金屬含量的平均值等資料。圖 2 為文獻收集具體流程圖。基於以上標準，最後得到相關研究論文共 72 篇。

2.3 資料提取

土壤重金屬資料提取策略如下：①提取文獻發表資訊：包括文獻名稱、作者、發表年份及期刊；②提取土壤採樣資訊：採樣區域地理位置或經緯度、採樣點數量採樣時間（若未明確採樣時間則記錄論文發表時間）等；③該農田目前的種植制度，並將種植制度

分為混合（沒有具體描述，主要為稻田+菜地）、水稻（水稻）、蔬菜（田間蔬菜）等、果園（果園、茶園等）、設施農業（大棚、溫室）、林地等；⑤平均值、標準差和變異係數等。

完成資料提取後，在資料庫中將 Cd、Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Hg 和 As 8 個元素分離為 8 個檔。其中，共收集農田土壤 Cd 研究 66 項、Hg 研究 20 項、Cr 研究 46 項、Ni 研究 35 項、Cu 研究 48 項、Zn 研究 45 項、Pb 研究 54 項和 As 研究 36 項。Cd 的記錄量最高，其次是 Pb、Cu、Cr 和 Zn，說明有關 Cd、Cu、Cr 和 Zn 的研究相比於其他重金屬更多，是人們重點研究的土壤重金屬類型；相比之下，Hg 的資料量最小，所受關注度相對較低。根據資料提取結果，河南省農業土壤中重金屬的研究案例分佈在全省 18 個地市，按地市計算的研究數如表 1 所示。

表 1 各地市重金屬元素研究數

地市	研究數	地市	研究數
鄭州	8	漯河	1
開封	5	三門峽	4
洛陽	9	南陽	2
平頂山	3	商丘	4
安陽	6	信陽	1
鶴壁	1	周口	1
新鄉	10	駐馬店	1
焦作	2	濟源	2
濮陽	2	其他 ¹	6
許昌	4		

¹位於河南省內但未列明具體研究位置或涵蓋多地市相關研究。

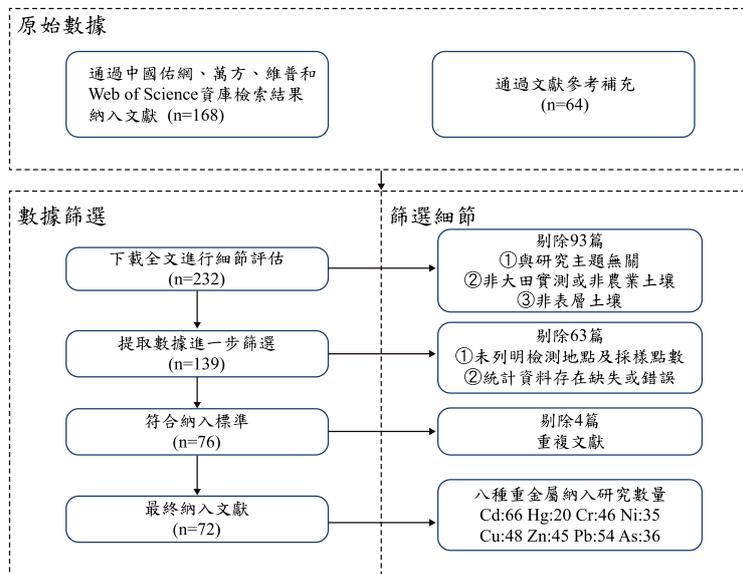


圖 2 文獻收集流程圖

2.4 Meta 分析

2.4.1 效應值選取和計算

在 Meta 分析的方法中，效應值 (Effect Size, ES) 效應值有助於比較不同研究結果的大小和方向^[9]，因此在進行 Meta 分析時，效應值的選取和計算是關鍵步驟。在生態環境領域的研究中，使用 Meta 分析方法時通常選取對數響應比作為效應值^[10,11,12]。對數響應比 (Log Response Ratio, LogRR) 通過比較處理組與對照組的均值比率，以自然對數形式量化相對變化幅度^[13]，從而更加直觀地反映均值間的差異，比 Hedges'd 指數更加準確。本研究的效應值和方差的計算公式^[14]分別為：

$$ES_i = \ln R = \ln \frac{\bar{X}_e}{\bar{X}_c} \dots\dots\dots(1)$$

$$v_i = \frac{S_e^2}{N_e \bar{X}_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c \bar{X}_c^2} \dots\dots\dots(2)$$

式中： ES_i 表示收集的實測土壤重金屬含量資料的效應值； v_i 表示 ES_i 的方差； \bar{X}_e 、 S_e 、 N_e 分別表示收集的各採樣點的農用地土壤的重金屬含量的平均值、標準差和樣本數，若研究中沒有給出標準差，則用平均值的 1/10 作為標準差的估計值^[15]； \bar{X}_c 、 S_c 、 N_c 分別表示河南省土壤的重金屬背景含量的平均值、標準差及樣本數，參考《中國土壤元素背景值 (1990 年)》^[16]。

2.4.2 模型選擇與合併效應值計算

因為不同的研究所使用的方法、實驗環境等都不盡相同，所以本文選擇使用隨機效應模型來估計合併效應值 (E_{++})，首先通過限制性最大似然函數估計各研究間的方差 (τ^2)，確定各研究的權重，然後再使用加權平均法計算其合併效應值 (E_{++})。權重及合併效應值的計算公式為：

$$\omega_i^* = \frac{1}{(\tau^2 + v_i)} \dots\dots\dots(3)$$

$$E_{++} = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i^* (ES_i)}{\sum_{i=1}^k \omega_i^*} \dots\dots\dots(4)$$

合併效應值的標準誤差的計算公式為：

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i^*}} \dots\dots\dots(5)$$

式中： ω_i 表示模型中第 i 個研究的權重；SE 表示標準誤差。

合併效應值可以通過式 (7) 轉化為百分數^[17]：

$$per = (e^{E_{++}} - 1) \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

式中，per 表示實測重金屬含量超過背景值的百分比，%。

2.5 土壤重金屬污染風險評價

為進一步評價河南省農用地土壤的重金屬污染狀況，分別使用地累積指數法和潛在生態風險指數法，對河南省農用地土壤的八種重金屬元素的污染程度進行評價，並劃分潛在生態風險等級。

2.5.1 地累積指數法

地累積指數^[18](I_{geo})，是評估沉積物或土壤中重金屬污染程度的經典方法，它不僅揭示了重金屬自然分佈的變化規律，還能夠評估和識別人類活動對環境的具體影響^[19,20]，是判斷人類活動對生態環境所造成的影響程度的關鍵參數。其計算公式為：

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \dots\dots\dots(7)$$

式中： C_n 為收集的實測重金屬含量 (mg/kg)； B_n 為背景值 (mg/kg)，通常採用當地土壤背景值。如表 2 所示，土壤的重金屬污染程度可以根據地累積指數大小的不同劃分為 4 個等級。

表 2 地累積指數等級標準 (I_{geo})

評價等級	無污染	輕污染	中污染	強污染	嚴重污染
I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	≥ 3

2.5.2 潛在生態風險指數法

潛在生態風險指數法^[21] (Potential Ecological Risk Index, PERI) 通過量化重金屬的生物毒性、污染程度及空間異質性，綜合評估不同污染源對生態系統的影響。可以計算一種重金屬元素的單項潛在生態風險指數，也可以計算多種重金屬累積的綜合潛在生態風險指數^[22,23]，其計算公式為：

$$C_f^j = \frac{C_s^j}{C_n} \dots\dots\dots(8)$$

$$E_r^j = T_r \times C_f^j \dots\dots\dots(9)$$

$$RI = \sum_{j=1}^n E_{ij}^j \dots\dots\dots(10)$$

式中： C_{ij} 為單項污染係數； C_{ie} 為重金屬 i 的實測濃度 (mg/kg)； C_{ic} 為重金屬 i 的區域背景值 (mg/kg)； T_{ij} 為重金屬 i 的標準化毒性回應係數，在潛在生態風險評價體系中，重金屬 Cd、Hg、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、As 對應的毒性回應係數依次為 30、40、2、5、1、5、5、10^[24,25]； E_{ij} 為單項潛在生態風險指數；RI 為綜合潛在生態風險指數。如表 3 所示，土壤重金屬元素的潛在生態風險等級可以根據潛在生態風險指數大小的不同劃分為 5 個等級。

2.6 資料分析

本研究的 Meta 分析通過 Metawin 進行，使用 Excel 2019 完成土壤重金屬污染分析與評價的相關計算，並使用 ArcGIS 10.8 和 Origin 2024 繪製圖片。

三、結果與分析

3.1 發表性偏倚

在進行 Meta 分析時，首先需要通過發表性偏倚

檢查來確保文獻採集的全面性，以保證後續資料分析和評價工作的準確性^[26]。分別以樣本量 n 為引數，重金屬的效應值 (ES) 為因數變數，進行線性擬合，建立一元線性回歸方程，若擬合的斜率越接近 0，則發表性偏倚程度越低，所收集到的文獻資料也就比較可靠。圖 3 為河南省農用地土壤重金屬含量均值的發表性偏倚檢測結果。由圖 3 可知，八種重金屬含量均值的線性擬合的斜率範圍在 0.001 ~ 1168 之間，均接近於 0，表明本文所篩選的文獻發表性偏倚程度較低，資料較為可靠，資料分析評估工作還可繼續開展。楊琰琿等^[27]認為 Meta 分析的源單位以市、縣、區為基本單位時，能夠有效地避免後續分析過程受到文獻發表性偏倚的影響。

3.2 河南省農田土壤重金屬總體污染狀況

2010 ~ 2024 年河南省農用地土壤的重金屬元素含量資料如圖 4 和表 4 所示。使用本研究所計算得到的重金屬元素含量的平均值代替全省的平均值，河南省元素背景值參考《中國土壤元素背景值 (1990 年)》^[16]。由圖表可知，河南省農用地土壤中八種重金屬元素含量的均值有一半高於背景值；其中 Cd 元素的

表 3 潛在生態風險指數分級標準

項目	潛在生態風險等級				
潛在風險	輕微風險	中等風險	較強風險	很強風險	極強風險
E_{ij}	$E_{ij} \leq 40$	$40 < E_{ij} \leq 80$	$80 < E_{ij} \leq 160$	$160 < E_{ij} \leq 320$	$E_{ij} > 320$
RI	$RI \leq 150$	$150 < RI \leq 300$	$300 < RI \leq 600$	$600 < RI \leq 1200$	$RI > 1200$

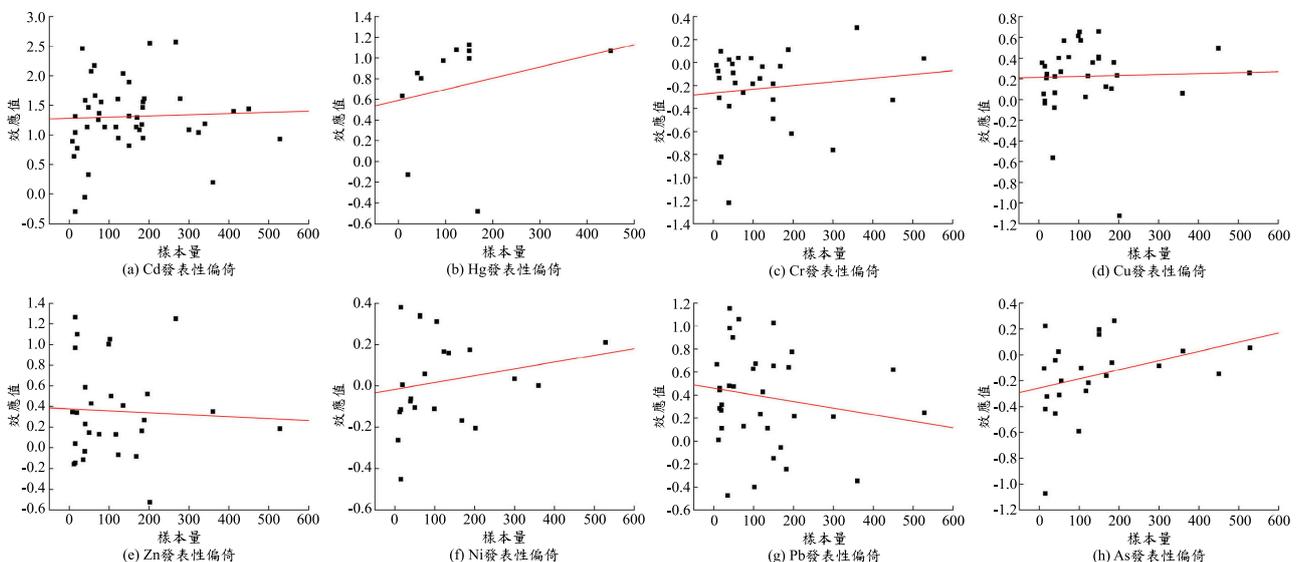


圖 3 發表性偏倚檢驗

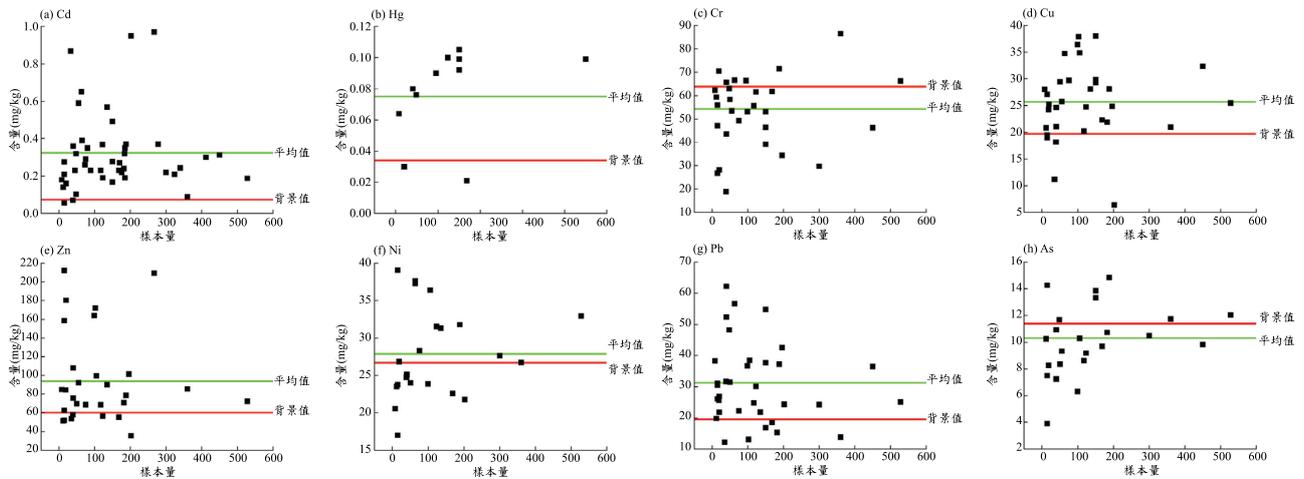


圖 4 各採樣點位土壤重金屬含量及相應土壤環境背景值

表 4 2010-2024 年河南農田土壤重金屬統計結果 (mg/kg)

元素	Cd	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	As
最大值	0.970	0.105	86.420	38.010	212.200	39.070	62.240	14.850
中位數	0.273	0.085	57.095	25.200	75.710	26.800	26.900	10.290
算術平均值	0.325	0.075	54.205	25.659	93.942	27.876	31.254	10.300
幾何平均值	0.273	0.068	51.692	24.474	84.615	27.306	28.696	9.922
標準差	0.205	0.027	14.852	6.910	47.125	5.678	12.987	2.597
變異係數/%	63.128	36.519	27.399	26.929	50.164	20.369	41.555	25.211
超背景值占比/%	95.833	83.333	28.125	85.714	77.419	54.167	83.784	32.000
河南省元素背景值 ^[16]	0.074	0.034	63.800	19.700	60.100	26.700	19.600	11.400
風險篩選值	0.3	1.8	105	85	200	70	90	50

表 5 本研究結果與國內其他研究及其他國家土壤重金屬污染現狀比較

重金屬	Cd	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	As	採樣點數/研究數量	參考文獻
河南省農田土壤	0.32	0.08	54.21	25.66	93.94	27.88	31.25	10.30	研究數=72	本研究
河南省農田土壤	0.25	0.08	60.57	32.90	84.72	/	30.03	10.10	(2020 全國農田土壤綜述)	[28]
全國農田土壤	0.24	0.11	58.13	28.26	86.73	/	31.91	10.35	(2019 全國農田土壤綜述)	[31]
全國農田土壤	0.24	0.13	62.18	28.34	83.29	28.17	32.07	10.71	(2021 全國農田土壤綜述)	[32]
全國城市土壤	0.29	0.08	72.59	26.58	104.28	28.69	35.24	12.98	(2021 全國農田土壤綜述)	[32]
全國礦山土壤	3.76	0.18	67.30	28.34	83.29	28.17	196.40	20.59	72 個礦區	[33]

超背景值占比最高，達到了 95.83%。As 和 Cr 的超背景值占比相對較低，分別達到了 32%和 28.12%。農用地土壤的八種重金屬元素中，Cd 的積累量最大，平均含量達到了 0.325 mg/kg，是背景值的 4.4 倍。同時比 Cd 的風險篩選值還要高出 0.025 mg/kg，存在明顯的污染風險，需要儘快開展風險控制與源頭防控工作。此外，Hg、Zn 和 Pb 的濃度分別達到了 0.075 mg/kg、93.942 mg/kg 和 31.254 mg/kg，均高於背景值，較背景值分別上漲 221%、477%和 159%，與對應風險篩選值分別相差 1.72 mg/kg、106.06 mg/kg 和 58.74 mg/kg，考慮到其增長速率，同樣需要對這三種元素進行合理管控與修復。其他 4 種重金屬濃度低於中國農田土壤

污染風險管控標準的篩選值，且其農用地土壤中的均值與背景值相比，未發現明顯上漲。Cd、Zn 兩種重金屬元素含量的最大值都超過了相應的風險篩選值，Cd 的最大值是風險篩選值 3 倍，Zn 的最大值比風險篩選值高出 12.2 mg/kg。陳文軒等^[28]在研究中也發現中國農田土壤重金屬污染主要以 Cd 和 Hg 為主，部分區域污染較重。

如表 5 所示，將河南省農田土壤重金屬平均值與其他農田土壤研究進行進一步對比。根據統計學中的一致性檢驗原理，當多個獨立研究結果具有較好的一致性時，說明研究結論具有較高的可靠性和可重複性。本研究的河南省農田土壤重金屬含量平均值與河南省

另一項研究數值上差異較小，相當於在一定程度上驗證了本研究 Meta 分析結論的一致性，表明該結論並非偶然得出，而是基於大量資料和科學分析得到的，能夠更客觀地反映河南省農田土壤重金屬含量的真實水準。相較于前一項研究，本研究農田土壤中 Cd、Cr 明顯增加，這表明近年來人為活動對這兩種重金屬在農田土壤累積具有較大貢獻。此外，相較於我國農田土壤重金屬，本省農田土壤中 Cd、Zn 濃度高於全國平均，一方面，人口高密度地區（鄭州、開封等地區）密集的人為排放引起農用地土壤中這兩種重金屬快速累積^[29]；另一方面，河南省快速發展的城市化、工業化，導致工業廢氣、廢水的大量排放，對周邊農田土壤造成影響^[30]。

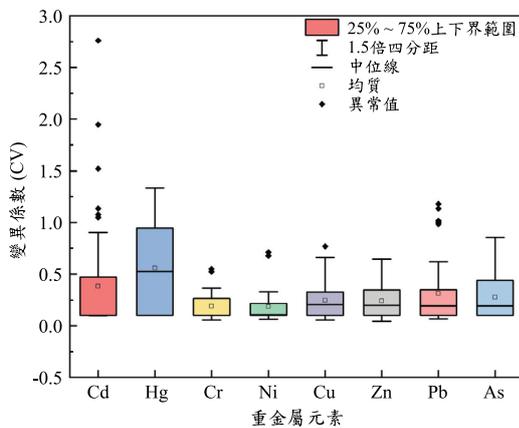


圖 5 河南省農田土壤重金屬變異係數

變異係數 (Coefficient of Variation, CV) 通過標準差與平均值的比值消除量綱影響，比較不同樣本或不同環境下重金屬含量的變異程度，常用於判斷重金屬污染的分佈特徵及人為干擾程度^[34]。由表 4 和圖 5 可知 8 種重金屬的變異係數範圍再 20.369% ~ 63.128% 之間，全部大於 15%，說明八種重金屬的含量都存在空間變化；其中 Cd、Hg、Zn 和 Pb 的變異係數大於 35%，說明這四種土重金屬元素的空間分佈極不均勻，可能存在顯著的局部污染或富集現象。呂玉娟等^[35]認為，土壤重金屬的空間分佈具有顯著的自然變異性和外在變異性，自然變異性是指重金屬含量在空間上的變化是由自然因素引起的這些因素通常包括地質背景、氣候、植被等，外在變異性是指由於人為活動或外部干擾因素引起的重金屬空間分佈差異。當農用地土壤重金屬含量的變異係數 > 50% 時，表明污染分佈不均勻，受人為干擾顯著^[36]。本研究的 Cd、Zn 和 Pb 的變異係數和超背景值占比均較高，說明它們主要受人為活動或外部干擾的影響，而 Cr、Ni 和 As 三種土壤重金屬元素的變異係數和超背景值占比均較低，說明它們可能主要受自然因素的影響。

3.3 各地市重金屬污染濃度與評價

利用偏移性檢驗後的重金屬資料對河南省農用地土壤重金屬含量進行各地市亞組分析，得到河南省各地市的農用地土壤中的八種重金屬含量的均值 (表 6、

表 6 河南省各地市農田土壤重金屬含量 (mg/kg)

	Cd	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	As
鄭州	0.188	0.047	44.190	20.596	72.732	23.820	28.392	10.610
開封	0.398	0.076	55.113	33.035	147.340	26.080	35.750	9.000
洛陽	0.486	0.090	63.775	29.490	185.358	37.977	47.933	3.905
平頂山	0.123	/	52.710	24.440	66.225	23.903	31.270	7.930
安陽	0.232	0.103	45.890	27.260	56.210	29.575	23.730	11.167
鶴壁	0.320	/	/	/	/	/	/	/
新鄉	0.469	0.021	48.483	23.347	100.315	25.210	21.607	9.160
焦作	0.447	/	48.535	23.385	84.025	/	52.380	8.280
濮陽	0.175	/	86.420	20.940	85.330	26.750	13.860	11.740
許昌	0.245	/	64.893	26.633	78.420	28.925	27.973	9.605
漯河	0.230	/	/	/	/	/	/	/
三門峽	0.307	0.099	50.445	31.078	65.315	24.408	33.683	14.555
南陽	0.300	/	/	/	/	/	/	/
商丘	0.216	/	66.170	23.660	71.670	32.950	20.205	11.390
信陽	0.243	/	/	/	/	/	/	/
周口	0.270	/	/	/	/	/	/	/
駐馬店	0.210	/	/	/	/	/	/	/
濟源	0.680	0.092	39.150	29.240	/	/	54.800	13.330
其他	0.302	0.090	59.630	26.553	91.325	26.805	41.737	11.660

圖 6 和圖 7)。由圖表可知，8 種重金屬含量最高的地區分別為 Cd 0.68 mg/kg (濟源)、Hg 0.103 mg/kg (安陽)、Cr 86.42 mg/kg (濮陽)、Cu 33.035 mg/kg (開封)、Zn 185.358mg/kg (洛陽)、Ni 37.977 mg/kg (洛陽)、Pb 54.8 mg/kg (濟源)、As 14.555 mg/kg (三門峽)。其中濟源市的 Cd 的平均效應濃度比風險篩選值更高。

圖 6 和圖 7 也表明河南省農用地土壤重金屬污染的區域差異顯著，其分佈特徵與工業佈局、農業活動等密切相關。河南省農用地重金屬污染的空間分佈呈

現出西部高於東部，北部高於南部的趨勢。西部 (洛陽、三門峽、濟源)：以採礦區及冶煉廠周邊的污染為主，Pb、Cd、As 的污染較為突出^[36]。東部 (商丘、開封、周口)：以農業面源污染為主，Hg、As 的污染較為明顯，與化肥、農藥的過量施用有關^[38]。南部 (南陽、駐馬店)：以 Cd、Pb 污染為主，與磷肥的過度施用和使用工業廢水灌溉有關^[39]。北部 (新鄉、安陽、焦作)：Cd、As、Hg 複合污染顯著，工業源的貢獻率超過了 60%^[40]。

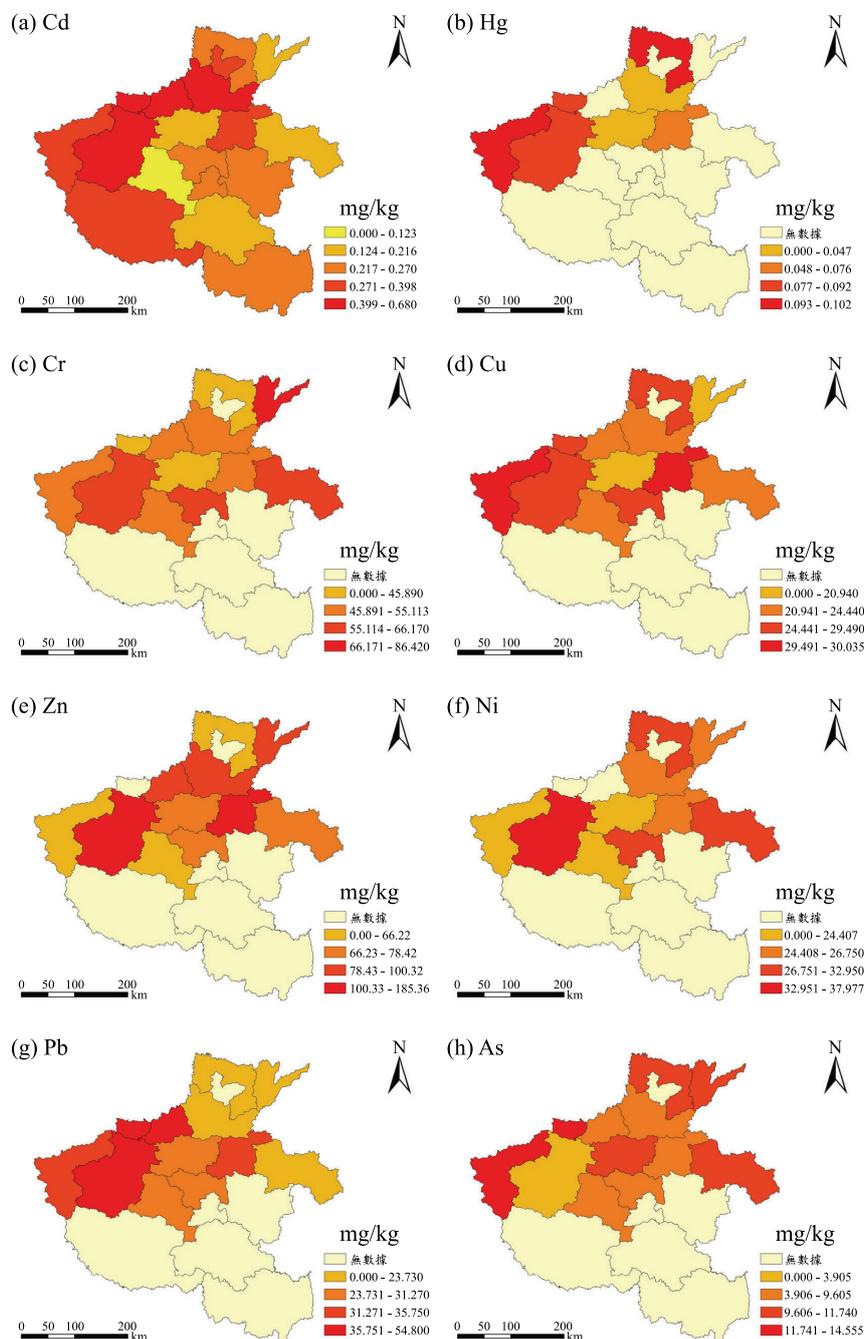


圖 6 河南省各地市農田土壤重金屬空間分佈情況

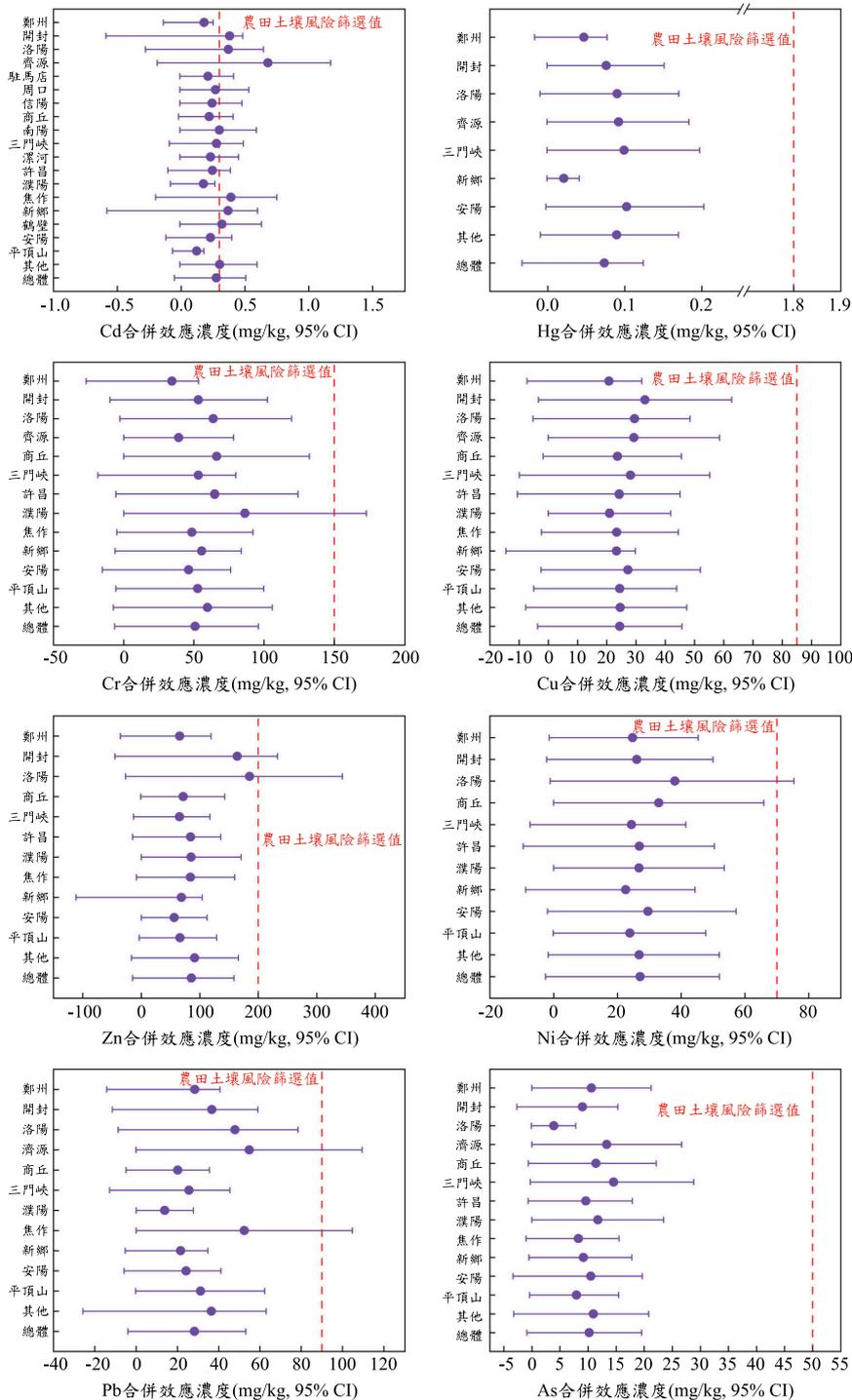


圖 7 河南省各地市農田土壤重金屬空間變化情況

3.3.1 農田土壤重金屬污染地累積指數評價

以河南省的土壤背景值為標準，計算出河南省各地市農用地土壤中各重金屬元素的地累積指數 (I_{geo}) (表 7)，結果如圖 8 和圖 9 所示。

河南省農用地土壤中各重金屬元素的平均地累積指數按從大到小的順序依次為： $Cd > Hg > Pb > Zn >$

$Cu > Ni > Cr > As$ ，其中 Cr、Cu、Zn、Ni 和 As 的全省平均地累積指數均小於 0，且 Cr、Cu、Zn、Ni 和 As 各地市的農用地土壤地累積指數也多小於 0，表明這 5 種重金屬主要受自然因素的影響。全省農用地土壤中 Cd、Hg 和 Pb 的平均地累積值分別為 1.35、0.453、0.078，表明它們主要受人為活動或外部干擾的影響。

表 7 河南省各地市農田土壤地累積指數 (I_{geo})

	Cd	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	As
鄭州	0.760	-0.118	-1.115	-0.521	-0.310	-0.750	-0.050	-0.689
開封	1.843	0.576	-0.796	0.161	0.709	-0.619	0.282	-0.926
洛陽	2.131	0.819	-0.586	-0.003	1.040	-0.077	0.705	-2.131
平頂山	0.142	/	-0.860	-0.274	-0.445	-0.745	0.089	-1.109
安陽	1.062	1.007	-1.060	-0.116	-0.682	-0.437	-0.309	-0.615
鶴壁	1.528	/	/	/	/	/	/	/
新鄉	2.080	-1.280	-0.981	-0.340	0.154	-0.668	-0.444	-0.901
焦作	2.009	/	-0.979	-0.338	-0.102	/	0.833	-1.046
濮陽	0.657	/	-0.147	-0.497	-0.079	-0.582	-1.085	-0.543
許昌	1.142	/	-0.560	-0.150	-0.201	-0.469	-0.072	-0.832
漯河	1.051	/	/	/	/	/	/	/
三門峽	1.467	0.957	-0.924	0.073	-0.465	-0.714	0.196	-0.232
南陽	1.434	/	/	/	/	/	/	/
商丘	0.958	/	-0.532	-0.321	-0.331	-0.282	-0.541	-0.586
信陽	1.130	/	/	/	/	/	/	/
周口	1.282	/	/	/	/	/	/	/
駐馬店	0.920	/	/	/	/	/	/	/
濟源	2.615	0.851	-1.290	-0.015	/	/	0.898	-0.359
其他	1.444	0.811	-0.682	-0.154	0.019	-0.579	0.505	-0.552
全省平均	1.350	0.453	-0.809	-0.192	-0.058	-0.538	0.078	-0.810
污染占比	100.00%	75.00%	0.00%	15.38%	33.33%	0.00%	53.82%	0.00%

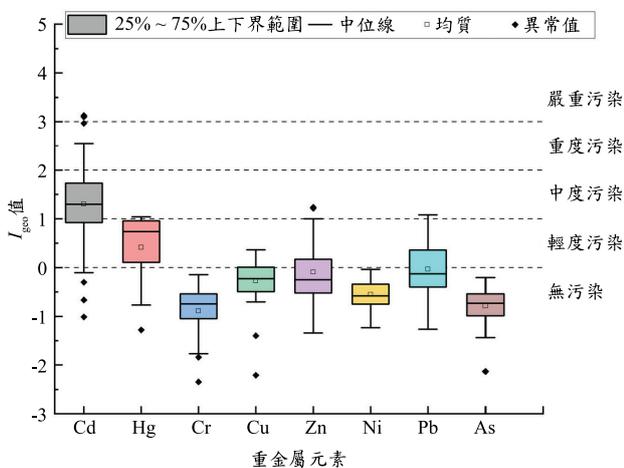


圖 8 土壤中重金屬元素地累積指數分佈箱式圖

此外，地累積指數通過對比採樣介質中元素含量與背景介質中元素含量，結合修正係數，反映了元素的非自然富集程度，由圖 8 可知，Cr、Cu、Zn、Ni、As 的 I_{geo} 均值均小於 0，總體上處於無污染水準，但有個別採樣點的 I_{geo} 值處於輕度污染水準。Hg 和 Pb 的 I_{geo} 均值分別為 0.453 和 0.078，整體處於輕度污染水準，但輕度污染及以上的採樣點的占比分別達到了 75% 和 53.82%。由圖 9 可知，河南省 18 個地市中大多數地市的農用地土壤重金屬污染水準相對較低，土

壤中 Cr、Cu、Ni、As 這 4 種重金屬元素的無污染採樣點占比都達到了 80% 以上，整體處於無污染水準；Zn 元素的無污染採樣點占比達到了 66.7%，整體污染水準較低；河南省農用地土壤中的主要重金屬污染為 Cd、Hg 和 Pb 這三種元素。結合表 7 可知，重金屬 Cd、Hg 和 Pb 在河南省的污染採樣點（即 $I_{geo} > 0$ ）占比分別為 100%、75% 和 53.82%，達輕度污染及以上，其中開封、洛陽、安陽等城市，各項重金屬累積程度較高。總體來看河南各地市農用地土壤中的 Cd 和 Hg 的 I_{geo} 值較高，各地市的重金屬累積程度占比也表明農用地土壤 Cd 和 Hg 的污染較為嚴重，這與各地市農用地土壤的重金屬的平均含量的空間分佈一致。

3.3.2 潛在生態風險評價

河南省農用地土壤中重金屬潛在生態風險指數 (RI) 如圖 10 所示。8 種重金屬元素的單項潛在生態風險指數均值按從大到小的順序依次為：Cd > Hg > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn。其中 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As 的 RI 值均小於 150，處於輕微生態風險水準。由圖 10 可知，Cd 和 Hg 的生態風險指數較高，生態危害較強，其中等生態風險水準及以上的占比分別達到了 93.75% 和 83.33%。河南省的 18 個地市中共有 3 個市的農用地土壤中的 Cd 元素 RI 值超過 300，占比達到 16.7%。

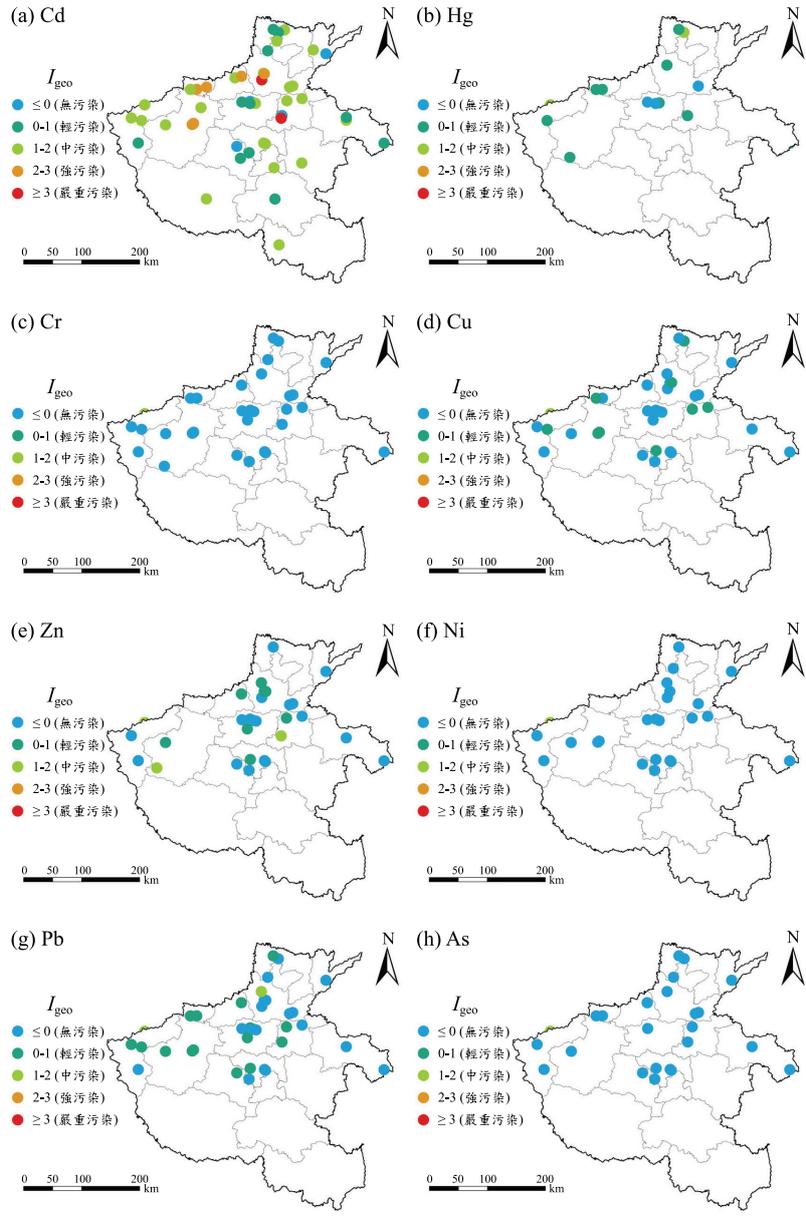


圖 9 土壤重金屬地累積指數 (I_{geo}) 的空間分佈

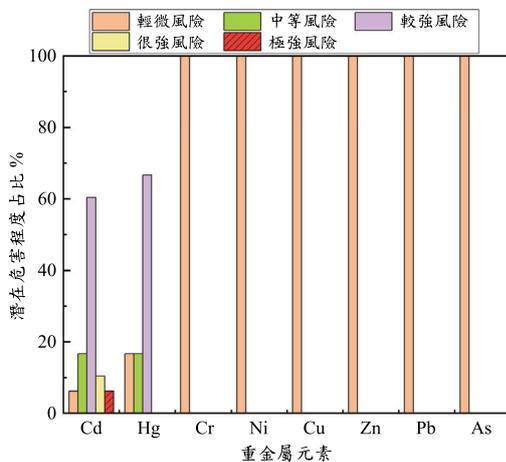


圖 10 土壤中重金屬風險等級區域占比情況

四、結論

- (1) 河南省農用地土壤重金屬含量的平均值為 Cd (0.325 mg/kg)、Hg (0.075 mg/kg)、Cr (54.205 mg/kg)、Cu (25.659 mg/kg)、Zn (93.924 mg/kg)、Ni (27.876 mg/kg)、Pb (31.254 mg/kg)、As (10.3 mg/kg)，普遍高於河南省土壤重金屬背景值，Cd 的超背景值占比最高，達到了 95.833%，Cr 的超背景值占比最低為 28.125%，Hg、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As 超背景值占比在 32%~85.714%之間。
- (2) 河南省農用地土壤中八種重金屬元素的地累積指數的均值按從大到小的順序依次為：Cd > Hg >

Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > As。其中，Cd 和 Hg 元素的污染等級較高，有累積風險。潛在生態風險指數的計算結果也表明，河南省農用地土壤中的 Cd 和 Hg 元素處於較強生態風險危害等級。

(3) 八種重金屬污染的空間分佈特點呈現出“西部高於東部，北部高於南部”的特點，突出表現為 Cd、Hg，在經濟較為發達的地區含量較高，其中污染最為嚴重的地區包括鄭州、開封、洛陽等。

參考文獻

- Münzel T, Hahad O, Lelieveld J, *et al.* “Soil and Water Pollution and Cardiovascular Disease[J]”. *Nature Reviews Cardiology*, 22(2): pp.1-19, 2024.
- Kim M J, Heo M, Kim S J, *et al.* “Associations Between Plasma Metabolites and Heavy Metal Exposure in Residents of Environmentally Polluted Areas[J]”. *Environment International*. 187: 108709, 2024.
- 李賀、王書航、車霏霏等。「巢湖、洞庭湖、鄱陽湖沉積物重金屬污染及來源的 Meta 分析[J]」。中國環境科學，43 卷 2 期，頁 831-842，2023。
- Shao D, Zhan Y, Zhou W, *et al.* “Current Status and Temporal Trend of Heavy Metals in Farmland Soil of the Yangtze River Delta Region: Field Survey and Meta-Analysis[J]”. *Environmental Pollution*, 219: pp.329-336, 2016.
- Shuai T S, L. S C, Kailiang Y, *et al.* “A Global Meta-Analysis on the Effects of Organic and Inorganic Fertilization on Grasslands and Croplands[J]”. *Nature Communications*, 15(1): pp.3411-3411, 2024.
- 楊丹瑞。「河南省輪作休耕問題研究[D]」。河南農業大學，2018。
- Abazar G, Abolghassem E, Necla P, *et al.* “Nano-enabled Agrochemicals: Mitigating Heavy Metal Toxicity and Enhancing Crop Adaptability for Sustainable Crop Production[J]”. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1): pp.91-91, 2024.
- Wang C C, Zhang Q C, Yan C A, *et al.* “Heavy Metal(oid)s in Agriculture Soils, Rice, and Wheat Across China: Status Assessment and Spatiotemporal Analysis[J]”. *The Science of the Total Environment*, 882: pp.163361-163361, 2023.
- 文進、李幼平。「Meta 分析中效應尺度指標的選擇[J]」。中國循證醫學雜誌。8 期，頁 606-613，2007。
- 杜藝、翟鵬輝、賈鎮寧等。「天然草地土壤化學性質對氮磷添加回應的 Meta 分析[J]」。草原與草坪，41 卷 1 期，頁 76-82，2021。
- Tian K, Zhao Y, Xu X, *et al.* “Effects of Long-term Fertilization and Residue Management on Soil Organic Carbon Changes in Paddy Soils of China: A Meta-Analysis[J]”. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 204: pp.40-50, 2015.
- Zhang Q, Miao F, Wang Z, *et al.* “Effects of Long-Term Fertilization Management Practices on Soil Microbial Biomass in China's Cropland: A Meta-Analysis[J]”. *Agronomy Journal*, 109(4): pp.1183-1195, 2017.
- Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. “The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology[J]”. *Ecology*, 80(4): pp.1150-1156, 1999.
- Du Y, Cui B, Zhang Q, *et al.* “Effects of Manure Fertilizer on Crop Yield and Soil Properties in China: A Meta-Analysis[J]”. *Catena*, 193, 2020.
- Rose T M, Patti F A, Little R K, *et al.* “A Meta-Analysis and Review of Plant-Growth Response to Humic Substances[J]”. *Advances in Agronomy*, 124: pp.37-89, 2014.
- 國家環境保護局，中國環境監測總站。「中國土壤元素背景值[M]」。北京：中國環境科學出版社，1990。
- 張健琳、瞿明凱、陳劍等。「中國西南地區金屬礦開採對礦區土壤重金屬影響的 Meta 分析[J]」。環境科學，42 卷 9 期，頁 4414-4421，2021。
- MÜLLER G. “Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River[J]”. *Geology Journal*, 2: pp.108-118, 1969.
- Zhang L. “Evaluation of Heavy Metal Contamination of Soil in a Planting Area in Hengshui City, Hebei Province[J]”. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, 4(7), 2022.
- 鞠鐵男、雷梅。「地累積指數法評價多金屬環境品質的方法優化探索：以農業發達地區為例[J]」。環境科學，43 卷 02 期，頁 957-964，2022。
- Hakanson L. “An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach[J]”. *Water Research*, 14(8): 975-1001, 1980.
- 晏利晶、姜淼、趙慶良等。「基於 Meta 分析的中國工礦業場地土壤重金屬污染評價[J]」。環境科學研究，36 卷 1 期，頁 9-18，2023。
- Fangting H, Xiangxin L, Ali H, *et al.* “Anthropogenic Perturbations on Heavy Metals Transport in Sediments in

- a River-dominated Estuary (Modaomen, China) During 2003–2021[J]”. *Marine Pollution Bulletin*, 199: pp.115970-, 2024.
24. 范晨子、郭威、袁繼海等。「西南地區典型工礦業城市土壤—作物系統中重金屬和硒元素特徵及評價[J]」。西南農業學報, 35 卷 8 期, 頁 1909-1919, 2022。
25. 徐爭啟、倪師軍、虞先國等。「潛在生態危害指數法評價中重金屬毒性係數計算[J]」。環境科學與技術, 2 期, 頁 112-115, 2008。
26. P M, D S W, L I. “A Comparison of Methods to Detect Publication Bias in Meta-analysis[J]”. *Statistics in Medicine*, 20(4): pp.641-54, 2001.
27. 陳文軒、李茜、王珍等。「中國農田土壤重金屬空間分佈特徵及污染評價[J]」。環境科學, 41 卷 6 期, 頁 2822-2833, 2020。
28. 楊琰琰、陳瀟涵、張曉晴等。「基於 Meta 分析的 2000—2022 年中國茶園土壤重金屬污染風險評價與來源分析[J]」。茶葉科學, 44 卷 1 期, 頁 37-52, 2024。
29. 高洪娥、劉樹寶、敖淑楠等。「土壤污染成因及防治策略研究[J]」。農業工程與裝備, 50 卷 4 期, 頁 11-13, 2023。
30. 劉雁楠, 「河南典型農區農用地重金屬污染防治困境與優化建議[D]」。鄭州大學, 2022。
31. Huang Y, Wang L, Wang W, *et al.* “Current Status of Agricultural Soil Pollution by Heavy Metals in China: A Meta-analysis[J]”. *Science of the Total Environment*, 651(P2): pp.3034-3042, 2019.
32. Yuan X, Xue N, Han Z. “A Meta-analysis of Heavy Metals Pollution in Farmland and Urban Soils in China Over the Past 20 Years[J]”. *Journal of Environmental Sciences*, 101: pp.217-226, 2021.
33. Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, *et al.* “A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]”. *Science of The Total Environment*. 468-469: pp.843-853, 2014.
34. 沈宸宇、閻鈺、於瑞蓮等。「APCS-MLR 結合 PMF 模型解析廈門杏林灣近郊流域沉積物金屬來源[J]」。環境科學, 43 卷 5 期, 頁 2476-2488, 2022。
35. 呂玉娟、王秋月、孫雪梅等, 「浙江省某尾礦庫周邊農田土壤重金屬污染特徵及來源解析[J]」。環境工程技術學報, 13 卷 4 期, 頁 1464-1475, 2023。
36. 崔豔紅、孫鵬、曹冬梅等。「松嫩平原產油區農田土壤重金屬含量及污染風險評價[J]」。土壤通報, 53 卷 5 期, 頁 1182-1193, 2022。
37. 張軍鋒、邱道持。「豫西丘陵煤礦區耕地重金屬污染狀況研究[J]」。河南農業科學, 9 期, 頁 72-74+78, 2007。
38. 馬麗, 「豫東地區土壤重金屬污染治理及農業生態風險評估研究」。河南省。商丘師範學院, 2023-03-01.
39. 王璐。「南陽盆地土壤重金屬源解析及生態環境風險評價[D]」。華北水利水電大學, 2024。
40. 龐國濤、劉玖芬、劉曉煌等, 「豫北典型耕地區土壤重金屬分佈特徵及風險評價[J/OL]」。中國地質, 頁 1-19 [2025-05-08]。
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20250415.1738.017.html>.

收稿日期：民國 114 年 06 月 19 日

修改日期：民國 114 年 10 月 02 日

接受日期：民國 114 年 12 月 03 日