DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180010

塌陷积水区沉积物重金属污染特征与混合源解析

李连刚[1]，赵明坤[2*]，陈大星[1]，彭位华[2]，付 敦[2]，徐智敏[3]

（1. 安徽省皖北煤电集团有限责任公司，安徽 宿州 234000；2. 宿州学院资源与土木工程学院，安徽 宿州 234000；
3. 中国矿业大学，江苏 徐州 221000）

摘要：为查明宿州市埇桥区采煤塌陷积水塘表层沉积物重金属污染程度、生态风险及污染来源，本研究系统采集沉积物样品，测定As、Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn等9种重金属含量。综合运用地积累指数（I_{geo}）、内梅罗综合污染指数（P_N）、潜在生态风险指数（E^i_r、RI）评价污染水平与生态风险，并结合Pearson相关性分析、系统聚类分析和主成分分析（PCA）进行源解析。结果表明：（1）除As元素外，其余8种元素均超过了宿州市土壤背景值，Hg、Zn富集显著；Cd、Zn、Hg呈现高度空间变异。（2）污染评价显示，Hg污染突出，其余元素主要为轻度污染；潜在生态风险评价（E^i_r和RI）表明仅Hg存在显著生态风险。（3）源解析表明，塌陷积水区沉积物中重金属主要受两个来源控制：自然源主要主导Cr、Ni、Mn、As等元素，Cd、Hg、Zn和Pb等主要则为农业生产-交通运输-矿山活动共同作用的混合源。研究表明，自然来源是埇桥区塌陷塘沉积物重金属累积主要驱动因素。

关键词：塌陷积水区；重金属污染；源解析；生态风险评价；主成分分析；PMF模型
中图分类号：P591；X82 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)02-0531-13

Characteristics of Heavy Metal Pollution in Sediments of Subsidence Water-accumulated Areas and Analysis of Mixed Sources

LI Liangang[1], ZHAO Mingkun[2*], CHEN Daxing[1], PENG Weihua[2], FU Dun[2], XU Zhimin[3]

(1. *Anhui Wanbei Coal and Power Group Co., Ltd., Suzhou, Anhui* 234000, *China*; 2. *School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui* 234000, *China*; 3. *China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu* 221000, *China*)

Abstract: To investigate the contamination levels, ecological risks, and sources of heavy metals in surface sediments of subsidence ponds within Yongqiao District, Suzhou City, sediment samples were systematically collected and analyzed for the contents of nine heavy metals: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, and Zn. Pollution levels and ecological risks were comprehensively evaluated using the Geo-accumulation Index (I_{geo}), Nemerow Integrated Pollution Index (P_N), and Potential Ecological Risk Index (E^i_r, RI). Source apportionment was conducted using Pearson correlation analysis, hierarchical cluster analysis (HCA), and principal component analysis (PCA). The results indicate: (1) Except for As element, the other 8 elements all exceeded the soil background values in Suzhou City, with significant enrichment of Hg and Zn; Cd, Zn, and

收稿日期：2025-06-28；**修回日期：**2025-12-26；**编辑：**袁茂文。
基金项目：皖北煤电技术开发项目（HY-JG-2024-05）；国家自然科学基金青年项目（42207305）；宿州学院人事处人才项目（2023BSK062）；自然资源部黄河流域中下游水土资源保护与修复重点实验室2023年开放基金（WSRCR-2023-06）。
作者简介：李连刚，男，高级工程师，1985年出生，主要从事煤矿安全及生态环境修复工作。Email：397172188@qq. com
***通信作者：**赵明坤，男，高级工程师，1984年出生，主要从事煤炭资源勘查、水工环等方面教学和科研工作。Email：153093939@qq. com。
引用格式：李连刚，赵明坤，陈大星，等. 塌陷积水区沉积物重金属污染特征与混合源解析［J］. 现代地质，2026，40（2）：531-543. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180010.
LI Liangang, ZHAO Mingkun, CHEN Daxing, et al. Characteristics of Heavy Metal Pollution in Sediments of Subsidence Water-accumulated Areas and Analysis of Mixed Sources［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 531-543. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180010.

Hg exhibits high spatial variability. (2) Pollution assessment shows that Hg pollution is prominent, while other elements are mainly mildly polluted; The potential ecological risk assessment (E_r^i and RI) indicates that only Hg poses significant ecological risks. (3) Source analysis shows that heavy metals in sediments from collapsed water accumulation areas are mainly controlled by two sources: natural sources mainly dominate elements such as Cr, Ni, Mn, and As, while Cd, Hg, Zn, and Pb are mainly mixed sources of agricultural production, transportation, and mining activities. Research has shown that natural sources are the main driving factor for heavy metal accumulation in the sediments of collapsed ponds in Yongqiao District.

Key words: subsidence waterlogged area; heavy metal pollution; source apportionment; ecological risk assessment; principal component analysis (PCA); PMF model

0 引 言

煤矿开采引发的大规模地面沉降导致大量地表塌陷积水区形成，这些区域已成为矿区独特的次生水生态系统。塌陷积水区沉积物不仅是水生动植物栖息、生长的重要场所[1-2]，也是煤矿塌陷区生态系统物质的“源”和“汇”[3-4]。随着工、农业生产等人类活动的加剧，有毒有害物质（尤其是重金属）通过水、扬尘、大气等媒介载体在塌陷积水区沉积，导致其生态环境恶化，污染频发，重金属污染因其隐蔽性、持久性和治理难度大等特点[5]，已成为包括塌陷积水区在内的湖泊、河流、湿地等生态系统面临的严峻环境问题之一[6-7]。在特定环境条件下（如pH、Eh变化），沉积物中吸附或固定的重金属可能发生二次释放，并通过水生生物的食物链富集放大效应[8]，对已遭破坏的煤矿区生态环境及周边居民健康构成潜在威胁，日益受到学术界和政府部门的高度关注。

国际上对沉积物重金属污染的研究开展较早，美国环境保护署（EPA）早在1976年已将As、Cd、Cr等12种金属列入优先控制的污染元素名录[9]；我国相关研究始于20世纪80年代，张立成等学者提出了沉积物可以作为天然水体重金属污染探索工具[10]，早期研究多侧重于通过重金属总量评估污染程度[11-12]，随着研究的深入，重金属的赋存形态、环境活性、生物可利用性及其生态毒性效应逐渐被纳入综合评价体系[13-15]。然而，现有成果多聚焦于江河、湖泊、海湾等自然水体，如孙丞帅等采集了11个洱海水系沉积物样品，采用单因子指数法，发现Cu、Zn、Ni为首要污染重金属，11个点位有8个点位处于污染状态，运用多元统计学方法分析了污染物的来源：通过相关性分析推断As、Pb、Cd和Zn来源相似，Cu、Ni、Cr来源相似，Hg有其单独来源；主成分分析的结果表明：As、Pb、Cd和Zn污染来源为人类生活和交通复合污染源；Cr、Cu、Ni污染来源为自然源；Hg污染来源为工业源[16]。杜古尔·卫卫以新疆戈壁荒漠区典型煤矿周边土壤为研究对象，通过利用描述性统计分析、相关性分析、聚类分析以及主成分分析等多元地学统计分析方法研究了土壤重金属含量特征并初步识别了土壤重金属来源，其源解析结果表明研究区土壤重金属主要来源为成土母质源（50.902%）、废污水与煤尘源（31.507%）[17]。朱英海以长江上游攀西大梁子铅锌矿区水系沉积物为研究对象，采集18件水系沉积物样品，1件尾矿库矿渣样品，采用主成分分析得出大桥河流域水系沉积物中Pb、As、Cd、Zn主要来源于大梁子铅锌矿的采选和尾矿的存储活动；部分Cd、Cr、Pb、Hg应该来源于岩石风化、土壤剥蚀等自然源；Cu和部分Cr、Zn则来源于当地的农业和工业活动[18]。针对煤矿开采形成的塌陷积水区这一特殊人工-自然复合水体的沉积物重金属污染特征、风险及来源研究相对匮乏。

查明埇桥区塌陷积水塘沉积物中重金属的含量水平、空间分布特征、潜在生态风险并精准识别其污染来源，不仅对科学评估其环境影响至关重要，更是该区域开展“依托塌陷地治理后的独特自然生态系统，因地制宜进行采煤沉陷区综合治理”的基础前提。本研究旨在填补该领域数据空白，为宿州市“山水林田湖草沙”一体化保护修复工程提供关键的数据支撑和科学依据。

本研究的创新之处在于：(1) 首次系统揭示了封闭型采煤塌陷积水区这一特殊人工-自然复合水体的沉积物重金属污染特征与来源；(2) 综合运用多种评价方法与受体模型（PMF），实现了对研究区重金属从污染程度、生态风险到来源解析

的精准、定量化评估。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

埇桥区作为安徽省宿州市的核心辖区，位于皖东北部，煤炭资源丰富。长期的煤矿开采导致该区出现大面积地面塌陷和严重积水，原有生态系统遭到显著破坏。宿州市现有采煤沉陷区总面积约12万亩，其中埇桥区占比高达10.9万亩；塌陷形成的坑塘水面总面积超过3.3万亩[19-20]，本研究选取区域内面积较大的13个典型塌陷积水塘（图1）作为研究对象，这些区域目前主要被用作水产养殖、光伏发电场地及备用水源地。

1.2　样品采集与处理

1.2.1　采样方案

2023年旱季（11月），使用抓斗式采样器（Van Veen，容积2.5 L）采集表层沉积物（0～20 cm）。每个塌陷塘按五点法（中心及四向距岸50 m处）采集子样品，混合后四分法取1.5 kg装袋，共采集水系沉积物样品13件。同步采集上层覆水样品（距水面0.5 m处）及周边土壤样品（0～20 cm）各13件。所有样品现场记录GPS坐标、pH（±0.01）、Eh（±5 mV）等参数，冷藏运输至实验室。

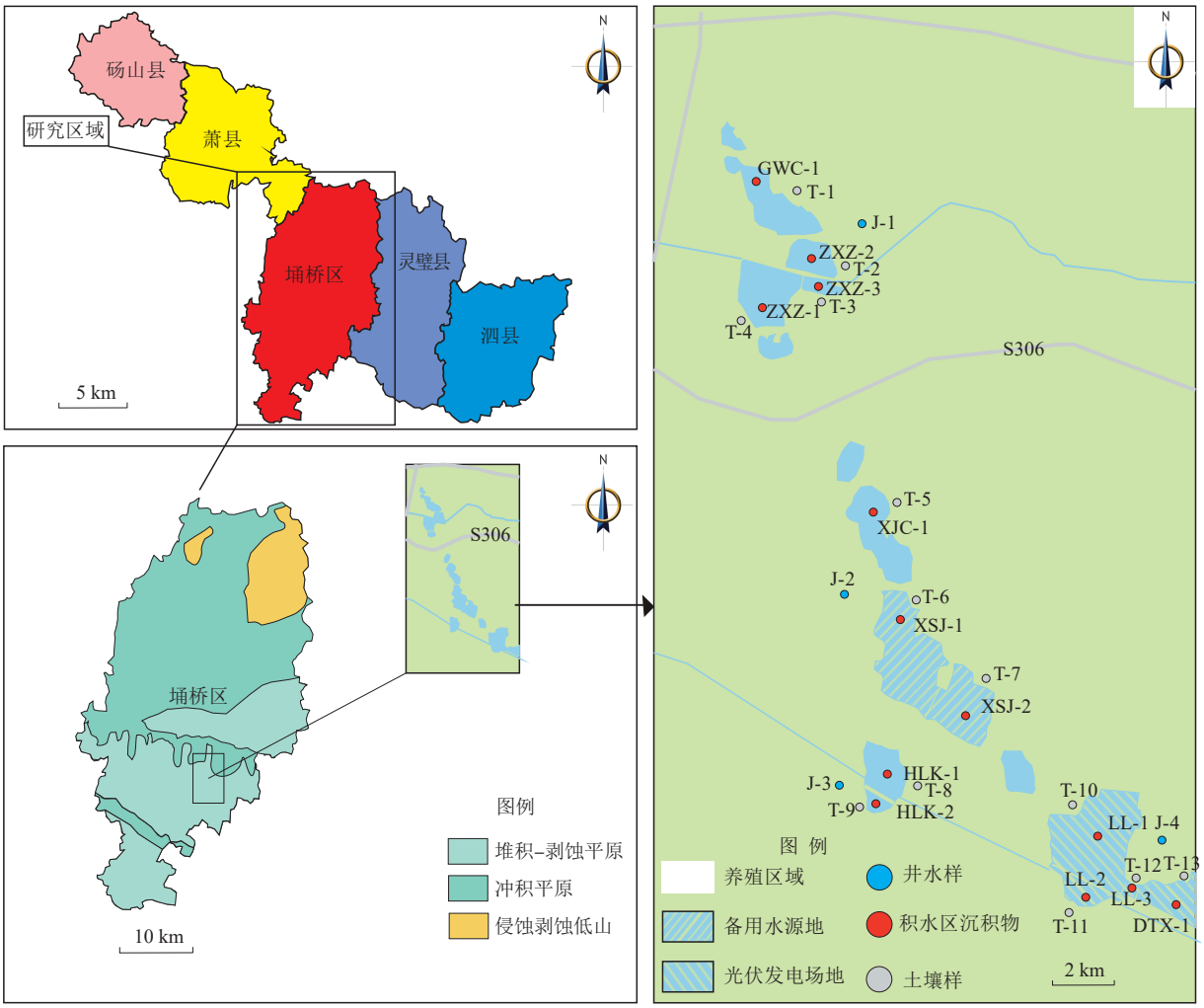


图1　研究区位置及采样点分布图

Fig. 1　Location of the research area and distribution map of sampling points

1.2.2　样品处理分析与质量控制

①水样预处理及测定

溶解性总固体（TDS）、电导率（EC）、pH、氧化还原电位（ORP）使用OHAUS Suite 310便携式测试笔现场测定并记录。水样样品带回实验室后，醋酸纤维膜过滤后分装，4 ℃保存待测。

Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+}、K^{+}、SO_4^{2-}、Cl^{-}、F^{-}和NO_3^{-}等采用美国戴安公司ICS-600-900测定；CO_3^{2-}、

HCO_3^-采用滴定法测定，微量元素采用ICP-MS测定。

②塌陷积水沉积物及土壤样品预处理及测定。

样品经冷冻干燥（-50 ℃，72 h）后，玛瑙研钵研磨至过100目尼龙筛。土壤样品参照《DZ/T 0279—2016》规范处理。

采用ICP-MS（Thermo iCAP RQ）测定Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn；AFS（Persee PF7）测定As、Hg；XRF（Bruker S8 TIGER）测定Mn。分析过程采用国家土壤标准物质（GBW07425）进行质量控制，回收率92%～108%，RSD < 5%。

1.2.3 重金属污染评价方法

①地积累指数法。

地积累指数（*I*geo）方法优点为在考虑人为因素的基础上充分兼顾环境本底[21]。计算公式如式（1）所示：

$$I_{geo} = \log_2[C_n/KB_n] \quad (1)$$

式中，I_{geo}为地积累指数，无量纲；C_n为测试值，mg/kg；K为各成岩作用引起的背景值变化的系数，经验值为1.5（采样值相对于标准背景值的正常波动范围为0.67～1.5倍，取1.5倍为判别污染设定高门槛）；B_n评价背景值，mg/kg；采用宿州市、安徽省和中国土壤重金属背景值分别进行评价。其中宿州市的土壤重金属背景值采用文献［22］与本次测试的10个土壤样品确定其土壤重金属背景值。I_{geo}污染等级采用与本研究条件相似的水系沉积物污染划分方案，<0（无）、0～1（轻度）、1～2（偏中度）、2～3（中度）、3～4（偏重度）、4～5（重度）、>5（严重）[21]。

②内梅罗污染综合指数法。

内梅罗污染综合指数法同样能反映高浓度重金属对塌陷积水区沉积物的污染影响[22]，计算公式如式（2）（3）。

$$Pi=Ci/Si \quad (2)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{imax}^{\ 2} + P_{iave}^{\ 2}}{2}} \quad (3)$$

式中，P_i为单因子污染指数，无量纲；C_i为测试值，mg/kg；S_i为评价标准值，采用宿州市、安徽省和中国土壤重金属背景值分别评价，mg/kg；P_N为内梅罗污染综合指数，无量纲；$P_{i\,max}$为污染指数的最大值；$P_{i\,ave}$为平均值。*Pi*污染级别划分为0～1（无）、1～2（轻度）、2～3（中度）、>3（重度）四级；P_N污染级别划分为0～0.7（无）、0.7～1（轻微）、1～2（轻度）、2～3（中度）、>3（重度）五级[23]。

1.2.4 潜在生态风险评价方法

潜在生态风险指数（RI）计算公式如（4）（5）所示[24-26]：

$$E_r^i = T_r^i \times C_i/B_i \quad (4)$$

$$\mathrm{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \quad (5)$$

式中，E_r^i为评价因子i的潜在生态危害系数，无量纲；T_r^i为评价因子i的毒性系数，As、Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn的T_r值采用国际上广泛采用的、由瑞典科学家Lars Håkanson（1980）于提出的经典体系，分别取10、30、2、5、40、1、5、5、1[27-28]；C_i为实测值；B_i为背景值，mg/kg，采用宿州市、安徽省和中国土壤重金属背景值分别进行评价；RI为综合潜在生态风险指数，无量纲。E_r^i分五级，分别为0～40（低）、40～80（中）、80～160（较高）、160～320（高）、>320（极高）；RI分0～150（轻度）、150～300（中度）、300～600（强）、>600（很强）四级[29]。

2 数据分析

使用SPSS 27.0进行Pearson相关性分析（双尾检验）和PCA分析（KMO = 0.56，Bartlett检验$p < 0.001$）。图表用Origin 2022制作。采样点位置图和重金属空间分布等图用CorelDRAW X8制作。

3 结果与讨论

3.1 塌陷积水区沉积物重金属含量与空间分布特征

宿北煤矿塌陷积水区表层沉积物中9种重金属的含量统计结果见表1，空间分布见图2。

元素的空间变异系数（CV）反映了其分布的不均匀性[31]，当其值 > 20%时，认为其空间分布受到人为活动影响[32]。根据Wilding变异程度分类等级划分标准[33]，Cd（CV = 37.93%）、Zn（CV = 40.14%）和Hg（CV = 117.33%）属高度变异（CV > 36%），表明其空间分布受人为活动影响显著[34]。其余元素（As，Cr，Cu，Mn，Ni，Pb）CV在17.16%～27.49%之间，属中等变异（15% ≤ CV < 36%），见表1，空间分布图（图2）进一步显示，位于朱仙庄北部的ZXZ-1样点Hg、Cd、Zn含量均较高，HLK-2和LL-3样点Hg含量较高，提示这些点位可能受到强烈的人为活动影

表 1　重金属含量统计结果及背景值表

Table 1　Test result statistics

样点	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
塌陷积水区沉积物平均值/(mg/kg)	8.65	0.14	68.57	28.19	0.05	555.00	28.38	24.34	84.22
塌陷积水区沉积物极大值/(mg/kg)	11.97	0.24	87.40	38.80	0.23	719.00	38.20	31.80	146.50
塌陷积水区沉积物极小值/(mg/kg)	5.99	0.07	46.30	13.21	0.02	393.60	18.30	17.20	39.70
塌陷积水区沉积物标准差	1.87	0.05	12.48	7.58	0.06	106.05	6.97	4.15	33.62
塌陷积水区沉积物变异系数/(%)	21.50	37.93	18.41	27.49	117.33	19.33	24.92	17.16	40.14
井水平均值(4样)/(mg/L)	0.43	0.04	2.30	2.15	0.00	3.00	6.10	3.72	3.51
塌陷坑水平均值(13样)/(mg/L)	0.80	0.16	2.18	7.97	0.01	19.05	1.90	3.27	7.96
附近土壤平均值(13样)/(mg/kg)	16.26	0.07	53.00	46.01	0.13	550.33	39.41	21.29	58.34
风险筛选值(GB15618)/(mg/kg)	40.00	0.30	150.00	50.00	1.80	\	70.00	90.00	200.00
宿州市土壤背景值[22]/(mg/kg)	9.59	0.11	53.66	19.31	0.03	543.80	24.93	21.59	50.57
安徽省土壤背景值[30]/(mg/kg)	9.00	0.10	66.50	20.40	0.03	530.00	29.80	26.60	62.00
中国土壤背景值[30]/(mg/kg)	11.20	0.10	61.00	22.60	0.07	583.00	26.90	26.00	74.00

响或存在独立污染源。

分析显示，除As元素外，其余8种元素（Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn）的平均含量均高于宿州市土壤背景值，表明存在不同程度富集。其中，Hg的富集程度最为显著，平均值为背景值的1.67倍，最高值超标7.77倍，其他元素富集程度依次为Zn（1.66倍）、Cu（1.43倍）、Cr（1.26倍）、Cd（1.18倍）、Ni（1.12倍）、Pb（1.12倍）、Mn（1.01倍）。

与安徽省土壤背景值相比，Cd、Cu、Cr、Mn、Hg、Zn等6种元素呈现富集，Hg元素超标最多，平均1.58倍，最高点超标3.58倍；与中国土壤背景值相比，Cd、Cr、Cu、Ni、Zn等5种元素呈现富集。所有元素含量均显著低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中对应pH范围（5.5 < pH ≤ 6.5）的风险筛选值（研究区土壤pH值平均5.6[22]），处于安全水平。

3.2　重金属污染程度评价

3.2.1　地积累指数（I_{geo}）评价

采用宿州市、安徽省和中国土壤背景值分别计算I_{geo}值（图3—5）。以宿州市背景值为基准（图5a），I_{geo}平均值排序为：Zn > Cu > Hg > Cr > Cd > Pb > Ni > Mn > As。仅Zn整体处于轻度污染水平（$I_{geo} > 0$），其余元素整体无污染（$I_{geo} < 0$）。单点评价显示：As、Mn、Pb在所有点位均无污染；Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Hg存在不同程度污染，其中Hg在23.1%的点位呈轻度污染，7.7%的点位呈中度污染。

以安徽省背景值评价（图5b），所有元素I_{geo}平均值均小于0（无污染），但Cd（38.5%点位轻度污染）、Zn（46.2%点位轻度污染）和Hg（23.1%点位轻度污染，7.7%点位中度污染）在部分点位存在污染。

以中国背景值评价（图5c），所有元素I_{geo}平均值均小于0（无污染），但Cd（46.2%点位轻度污染）、Cu（15.4%点位轻度污染）和Zn（23.1%点位轻度污染）在部分点位存在污染，Hg在7.7%的点位呈偏中度污染。

3.2.2　内梅罗综合污染指数（P_N）评价

基于宿州市背景值的单因子污染指数（Pi）计算结果（图6）显示，Pi平均值排序为：Hg > Zn > Cu > Cr > Cd > Ni > Pb > Mn > As。除As无污染外，其余元素整体呈轻度污染。单点评价（图4、6及图7）：Hg在30.8%、15.4%和7.7%的点位分别呈轻度、中度和重度污染，图3显示重度污染点位于卢岭煤矿洗煤厂附近，距离洗煤厂越近，Hg含量越高，这与程琛等人研究成果一致[35-36]；Zn在61.5%点位轻度污染，15.4%点位中度污染（中度点亦位于洗煤厂附近）；Cu在69.2%点位轻度污染，15.4%点位中度污染；Cd在76.9%点位轻度污染，7.7%点位中度污染；Cr、Ni、Pb、Mn均为轻度污染，污染点位占比分别为92.3%、53.8%、76.9%和53.8%。

内梅罗综合污染指数（P_N）评价表明，Hg元素为重度污染水平，其余元素均为轻度污染（图6）。采用安徽省和中国背景值进行的P_N评价结果（图6）也显示Hg污染突出（分别为重度和中度污染）。

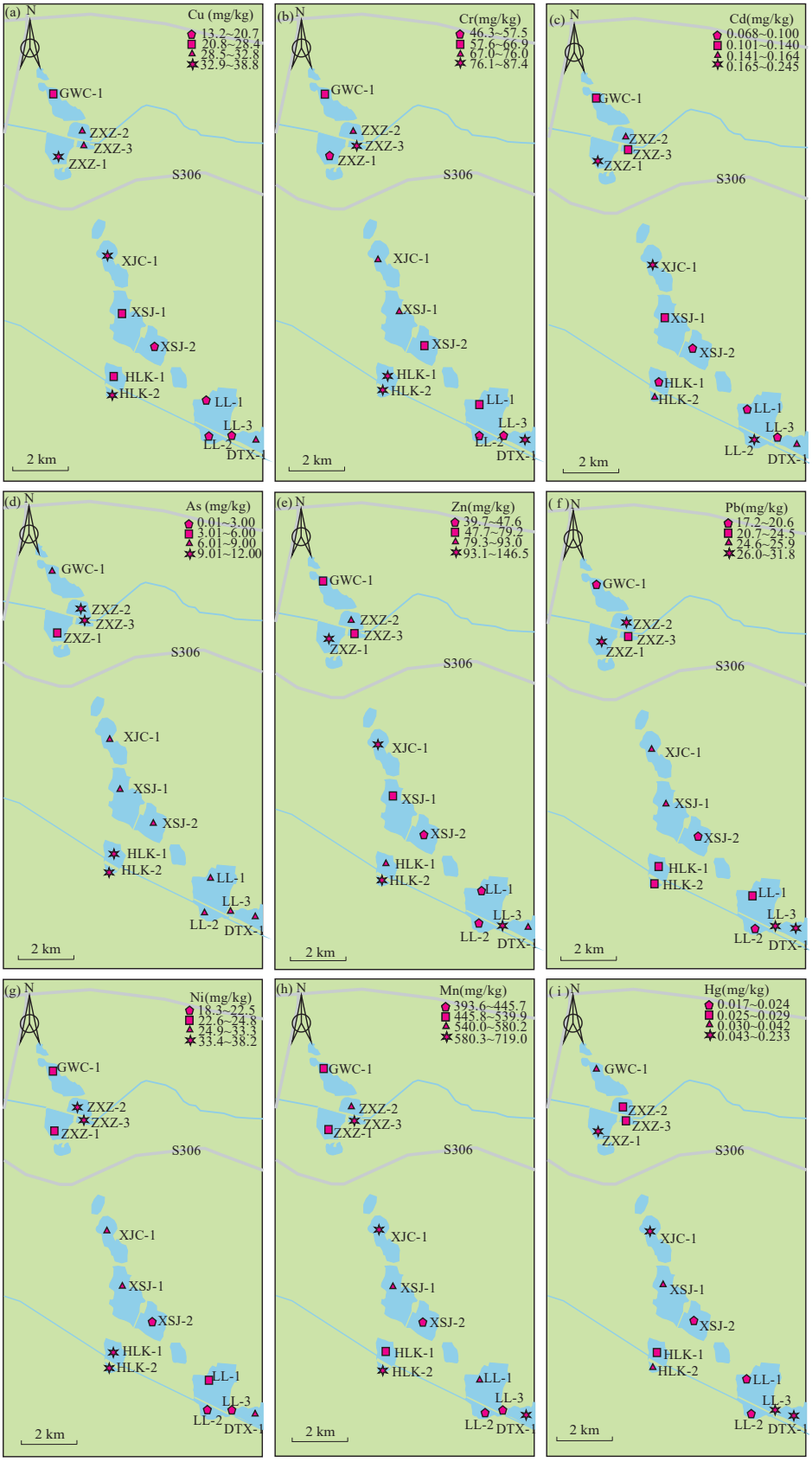


图2 各种重金属含量空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of various heavy metal contents

(a)Cu含量分布;(b)Cr含量分布;(c)Cd含量分布;(d)As含量分布;(e)Zn含量分布;(f)Pb含量分布;(g)Ni含量分布;(h)Mn含量分布;(i)Hg含量分布

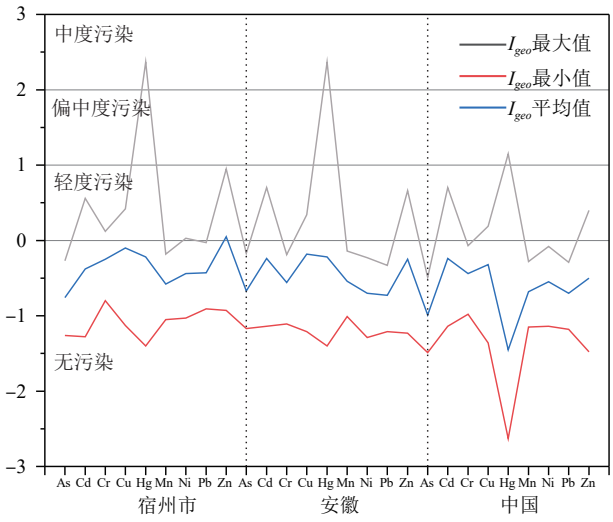


图 3　重金属地积累指数（I_{geo}）评价结果

Fig. 3　Evaluation results of heavy metal accumulation index （I_{geo}）

3.2.3　潜在生态风险评价（E_r^i、RI）

根据潜在生态风险指数法计算各项重金属的单因子生态风险（E_r^i）结果见图 8，以宿州市土壤背景值为依据 E_r^i 计算及评价结果显示，仅有 Hg 具有生态污染风险，见图 9a，Hg 中等、较高、极高生态风险点位占比分别为 23.1%、15.4%、7.7%，极高风险点位于卢岭煤矿洗煤厂附近。

以宿州市土壤背景值为依据计算 RI 值显示，LL-3 和 DTX-1 两个塌陷塘具有中等生态危害，ZXZ-1 具有强度生态危害。

以安徽省土壤背景值为依据 E_r^i 评价结果见图 9b，Cd、Hg 等 2 个元素具有潜在生态风险。Cd 元素中等生态风险点位占 53.8%；Hg 中等生态风险点位占 30.8%，高生态风险点位占 23.1%。根据 RI 值评价结果见图 10，本研究区有生态危害的占比为 23.8%，具体为 ZXZ-1、DTX-1 两个取样点的坑塘具有中等生态危害，ZXZ-2 坑塘为强度生态危害。以中国土壤背景值为依据单因子潜在生态风险评价结果见图 9c，RI 值计算结果显示，仅 ZXZ-2 具有中等生态危害。

3.3　重金属来源解析

3.3.1　Pearson 相关性分析

采用 Pearson 相关性分析研究各元素变量之间的线性关系。分析见图 11：在 $P < 0.01$ 级别上，As 与 Cr、Ni 呈显著正相关，揭示它们可能受共同的成土母质控制或来源于矿山开采相关的自然风化过程[37]；Cr、Ni、As、Mn 之间呈极强正相关；Cd、Pb、Zn、Cu 之间呈高度正相关，这一组合特征通常指示人为工业活动的贡献，如交通源影响[38]；Hg 与其他元素相关性较弱，尤其与 As、Cr 呈负相关，说明其来源具有独立性，可能与历史燃煤等特定人为活动有关[39]。综上，该区域重金属污染来源复杂，兼具自然地质背景与多类型人为输入的共同影响，后续结合系统聚类分析与主成分分析进一步识别主要污染源。

3.3.2　系统聚类分析（HCA）

进一步系统聚类分析（HCA）对各元素之间的相似性进行群体划分，结果（图 12）显示，元素可分为三类：第一类为 Cr、Ni、As、Mn。Cr 和 Ni 是强烈的亲铁元素，在基性岩和超基性岩中富集，其分布主要受控于成土母岩的风化过程，在环境中相对稳定，是公认的自然背景标志元素[1]，Mn 是地壳中丰度较高的元素，其分布同样与地质背景密切相关[5]，揭示它们可能是自然源。第二类为 Pb、Zn、Cu；第三类为 Cd、Hg。其结果与 Pearson 相关性分析基本一致，值得注意的是，第二类（Pb、Zn、Cu）与第三类（Cd、Hg）之间表现出较强的聚类关联性，提示这两类元素的污染来源可能存在密切联系。Pb 还与历史上含铅汽油的使用有关（尽管已禁用，但会在环境中持久残留），Cd 主要来源于磷肥的施用，Hg 则有其非常独特的来源，最典型的是燃煤（煤矿开采区、火电厂）[17]，第二类和第三类可解释为农业生产、交通运输和矿山活动共同作用的混合源。

3.3.3　主成分分析（PCA）

为进一步探讨各重金属元素来源，采用 PCA 法对重金属进行源解析。主成分分析中 KMO 值为 0.56，大于 0.50，Bartlett 球形度检验相伴概率小于 0.001，小于 0.05，说明主成分分析法适用。依据分析结果提取特征值大于 1 的两个主成分（图 13），累计方差贡献率达 87.51%（图 14）。

第一主成分（PC1，方差贡献率 50.35%）：在 Cd、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 上具有高载荷（>0.7），在 Cr、As、Hg 上载荷相对较低。参考陈凯等人研究成果，PC1 元素组合特征与区域土壤和岩石背景值高度吻合[37]，而本研究区封闭的塌陷积水区，其底泥主要来源于扬尘沉降，PC1 主要代表自然来源（母岩风化和沉积过程），控制着 Cd、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的主要来源，同时对 Cr、As、Hg 的来源也有一定贡献，该类型受到人为活动影响较小，主要受沉积物母质风化、沉积等过

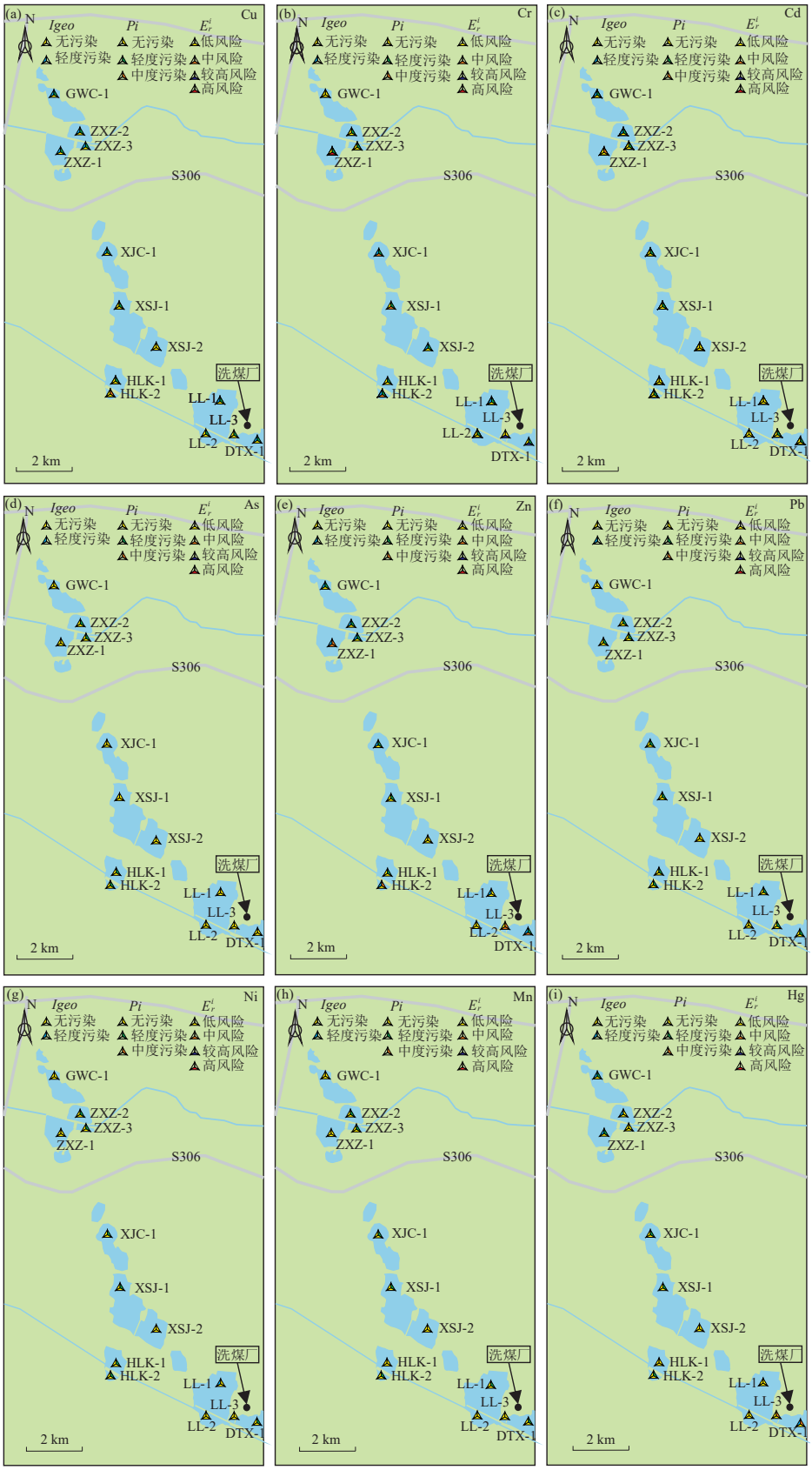


图4 重金属污染与生态风险评价结果

Fig. 4 Results of heavy metal pollution and ecological risk assessment

(a)Cu污染与生态风险评价;(b)Cr污染与生态风险评价;(c)Cd污染与生态风险评价;(d)As污染与生态风险评价;(e)Zn污染与生态风险评价;(f)Pb污染与生态风险评价(g)Ni污染与生态风险评价;(h)Mn污染与生态风险评价;(i)Hg污染与生态风险评价

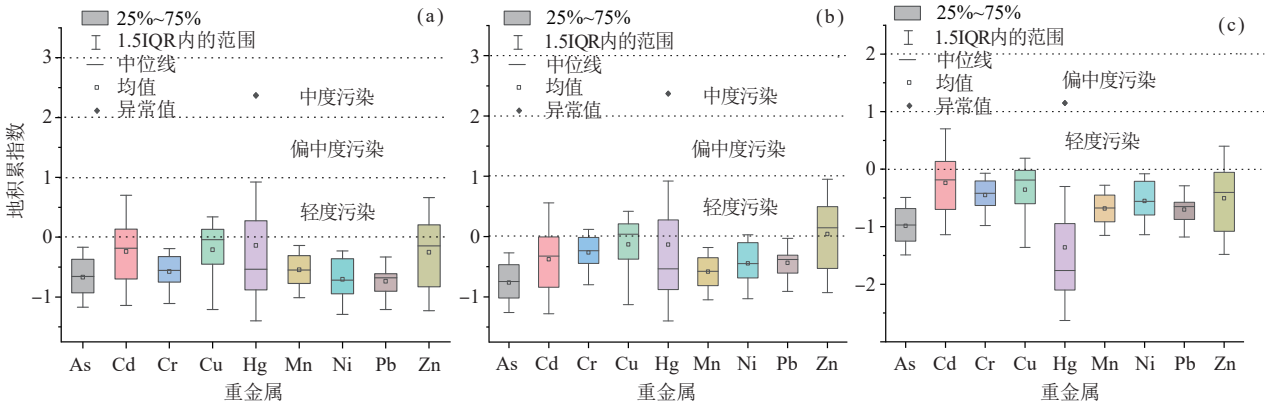


图5　不同背景值的重金属地积累指数箱线图

Fig. 5　Box plot of heavy metal accumulation index with different background values

(a)宿州市背景值箱线图;(b)安徽省背景值箱线图;(c)中国背景值箱线图

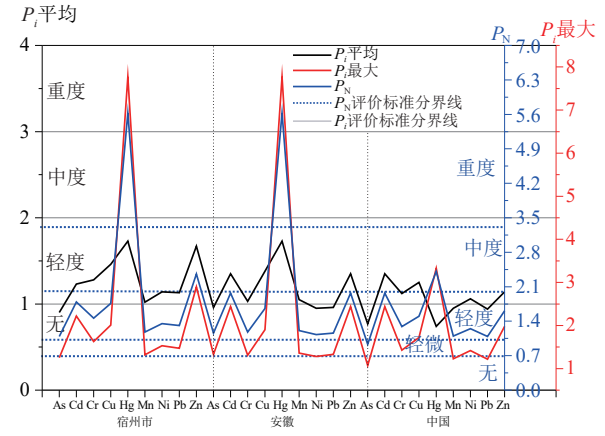


图6　单因子污染指数（Pi）和内梅罗综合污染指数（P_N）评价结果图

Fig. 6　Evaluation results of single factor pollution index (Pi) and Nemerow comprehensive pollution index (P_N)

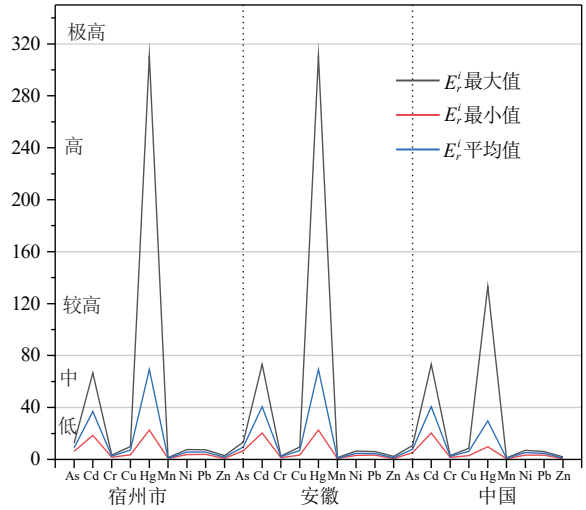


图8　各项重金属的单因子生态风险（E_r^i）结果

Fig. 8　Results of single factor ecological risks (E_r^i) for various heavy metals

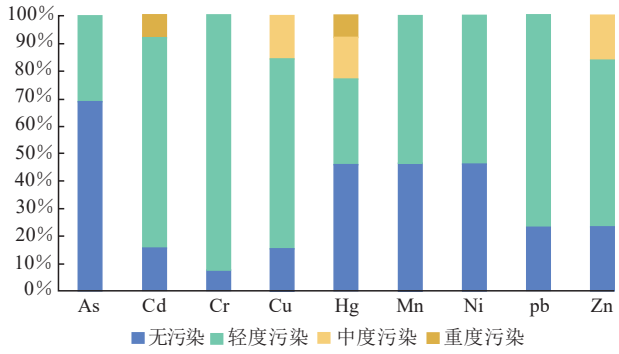


图7　各重金属单点评价不同污染程度占比

Fig. 7　Proportion of different pollution levels in single point evaluation of various heavy metals

程控制。

第二主成分（PC2，方差贡献率37.16%）：在Hg上具有最高载荷（>0.8），在Cd、Pb和Zn上也表现出一定载荷。结合Hg的高空间变异特征及其环境行为[35, 40-41]，PC2代表受人为活动影响的混合源。分析表明：Hg可能主要来源于洗煤废水排放、煤矸石浸出液及粉尘沉降（研究区地下水及塌陷水体中重金属含量远低于沉积物及周边土壤（表1），排除了溶解迁移为沉积物主要富集途径的可能性；粉尘沉降可能是重要输入途径）；Pb和Zn的高值点（如ZXZ-1、XJC-1、HLK-3、LL-3、DTK-1）多分布于水产养殖塘和光伏板场地（表1和图1），光伏板场地也有养殖活动，推断与养殖活动关系密切[42-44]；此外，靠近道路的LL-3、DTK-1塘Pb含量较高，表明交通排放（尾气颗粒物）也是Pb的可能来源[45]；Cd是化肥农药的常见组分[46]，研究区塌陷塘周边农业活动频繁，且地势较低利于径流输入，农业活动对其含量有贡

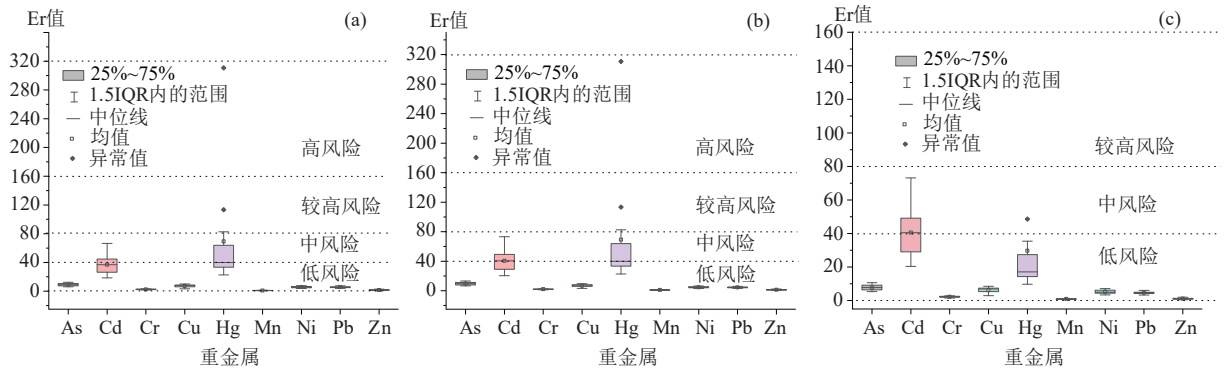


图9 不同背景值的生态风险评价箱线图

Fig. 9 Box plot of ecological risk assessment with different background values

(a)宿州市背景值箱线图;(b)安徽省背景值箱线图;(c)中国背景值箱线图

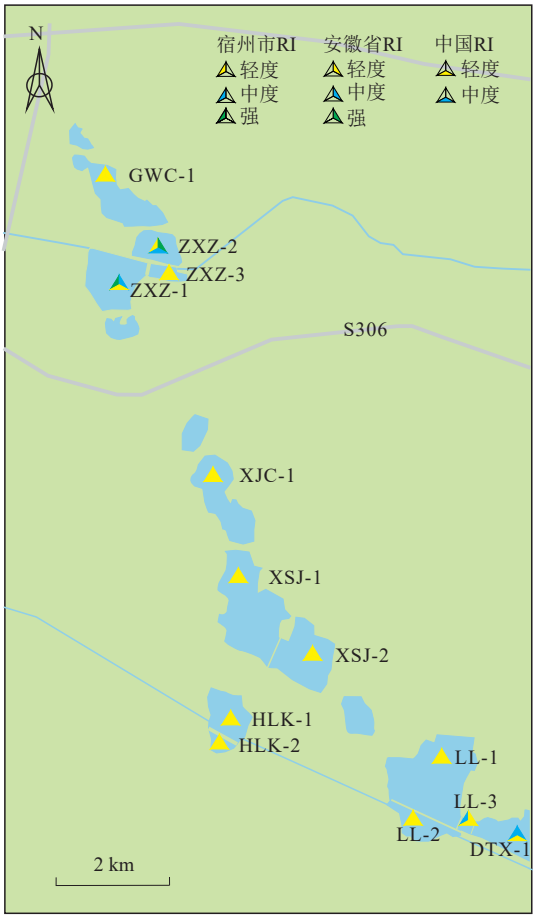


图10 不同背景值潜在重金属生态风险评价（RI）评价结果

Fig. 10 Potential ecological risk assessment (RI) results of heavy metals with different background values

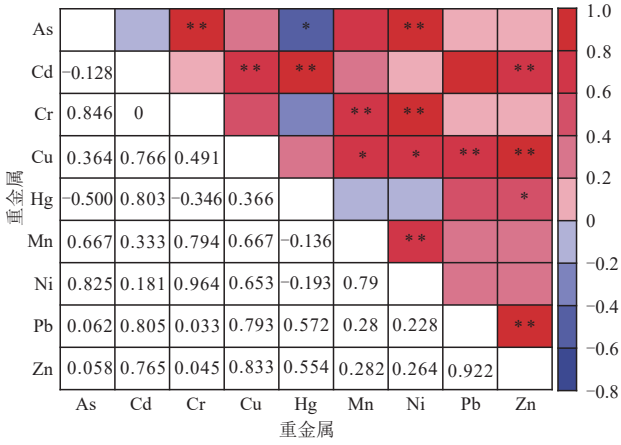


图11 研究区水系沉积物重金属Pearson相关性分析结果图

Fig. 11 Pearson correlation analysis results of heavy metals in water system sediments in the study area

*表示相关系数在0.05级别相关性显著,**表示相关系数在0.01级别相关性显著

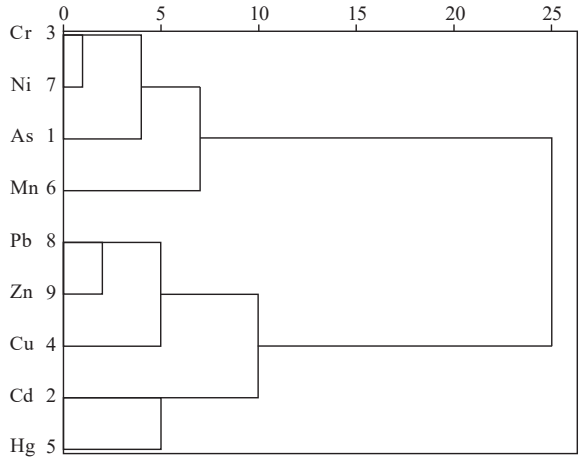


图12 积水区沉积物的重金属系统聚类分析

Fig. 12 Cluster analysis of heavy metal systems in sediments from flooded areas

献。结合塌陷积水区这一特殊人工-自然复合水体，其沉积物无河流搬运等输入，均来自扬尘等沉降，因此，PC2可解释为塌陷区周边农业生产、交通运输和矿山活动共同作用的混合源，主导Hg的来源，并部分影响Cd、Pb和Zn的来源。

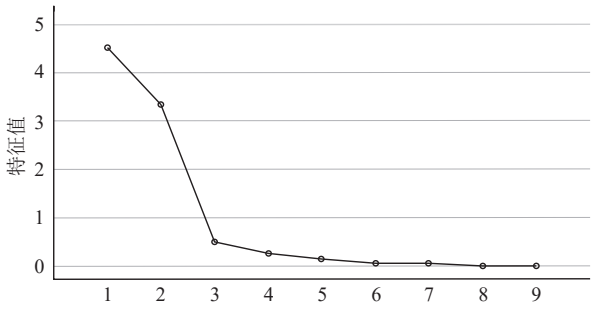
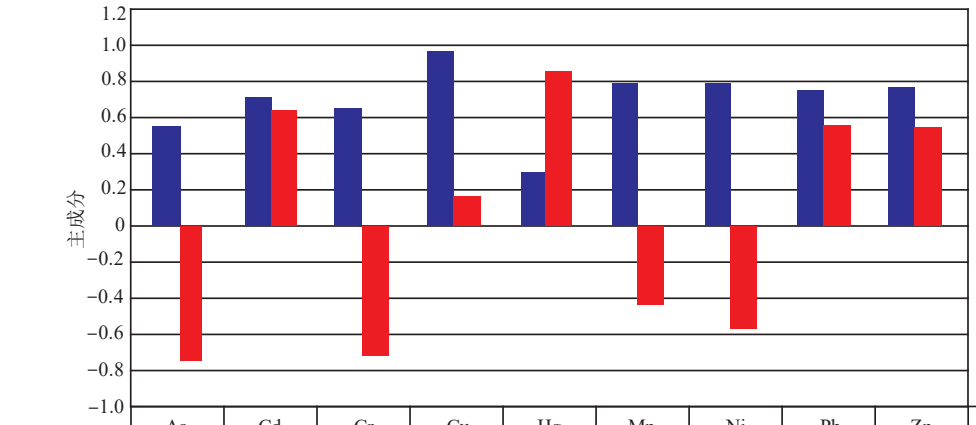


图 13　碎石图

Fig. 13　Scree plot

3.3.4　正定矩阵因子分解（PMF）模型

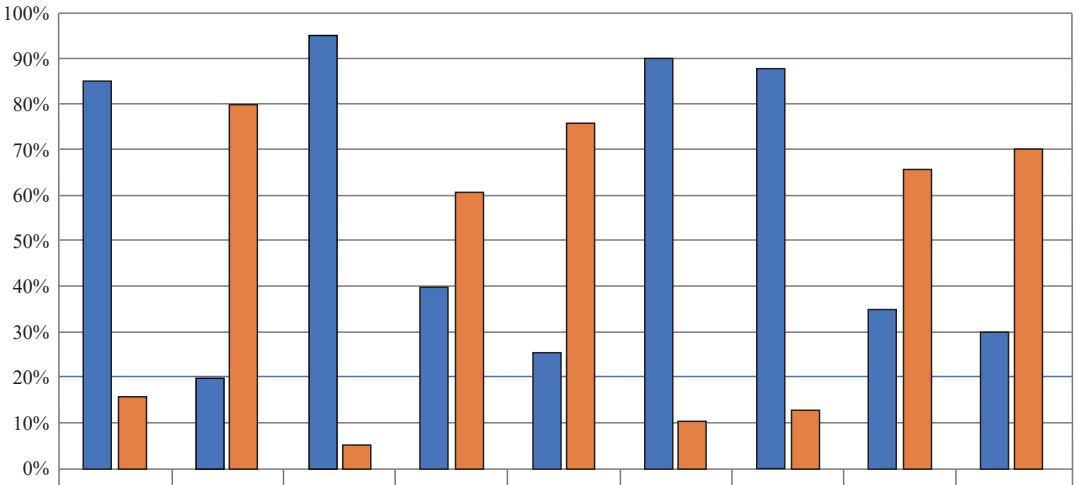
为了深入揭示研究区各元素的来源，采用传统方法难以定量区分构建基于正矩阵分解（Positive Matrix Factorization，PMF）的定量源解析模型，定量识别不同来源对沉积物组分的贡献率[47]。采用US EPA PMF 5.0软件模型构建，模型运行20次，本文分析判定重金属主要有2个来源，结果分别贡献64.72%和35.28%（图15），因子1载荷元素主要为Cr（95.24%），Ni（87.52%），Mn（89.92%），As（84.62%），与聚类分析的第一类一致，同PC1基本一致，结合各元素空间分布与污染分析结果，该组元素与地壳和区域土壤的基本组成成分高度协同变化[37]，即主要受原生



	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
第一主成分	−0.752	0.638	−0.729	0.16	0.843	−0.438	−0.575	0.549	0.53	4.54	50.35	50.35
第二主成分	0.539	0.702	0.627	0.962	0.288	0.075	0.076	0.747	0.756	3.35	37.16	87.51

图 14　主成分分析结果图

Fig. 14　Principal component analysis results



	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
因子1	84.62%	19.82%	95.24%	39.55%	24.77%	89.92%	87.52%	34.82%	29.63%
因子2	15.38%	80.18%	4.76%	60.45%	75.23%	10.08%	12.48%	65.18%	70.37%

图 15　基于正定矩阵因子分解（PMF）模型重金属源解析

Fig. 15　Analysis of heavy metal sources based on Positive definite Matrix Factorization （PMF） Model

矿物风化和成土过程控制。因子2载荷元素主要Cd（80.18%）、Hg（75.23%）、Zn（70.37%）、Pb（65.18%），该元素组合同PC2完全一致，是典型的人为活动指示组合，其来源解释塌陷区周边农业生产–交通运输–矿山活动源。

4 结 论

（1）污染特征与富集程度：除As外，其余8种重金属的平均含量均超过宿州市土壤背景值，呈现不同程度富集，其中Hg（1.67倍）和Zn（1.66倍）富集最为显著。Cd、Zn、Hg的空间变异系数（CV）大于36%，属高度变异，表明其分布受人为活动影响显著；As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb的CV介于17.16%～27.49%，属中等变异。所有元素含量均低于国家土壤污染风险筛选值（GB 15618—2018）。

（2）污染水平与生态风险：基于宿州市背景值的评价表明：地积累指数（I_{geo}）显示Zn整体轻度污染，Hg在部分点位呈轻度（23.1%）至中度（7.7%）污染；内梅罗综合污染指数（P_N）揭示Hg为重度污染，其余元素主要为轻度污染；潜在生态风险指数显示Hg是主要的生态风险因子，存在中等、较高和极高风险点位，综合风险指数（RI）评价表明LL-3和DTX-1塌陷塘呈中等生态危害，ZXZ-1塘呈强度生态危害。

（3）污染来源解析：PCA和PMF模型揭示区内Cr、Ni、Mn、As等元素主要为自然源，Cd、Hg、Zn和Pb等主要为农业生产–交通运输–矿山活动源。Pearson相关性与系统聚类分析结果同样支持PCA和PMF模型的分类解析。

（4）核心驱动因素与治理启示：埇桥区塌陷积水塘沉积物已存在明显的重金属累积现象。在塌陷区综合治理与生态修复工作中，应重点加强矿业污染源（特别是Hg排放）的防控，同时关注农业生产（如化肥农药输入Cd）和水产养殖（影响Pb、Zn）对沉积物环境质量的潜在影响。本研究为宿州市“山水林田湖草沙”一体化保护修复工程提供了重要的科学依据。

参考文献：

[1] 刘海，魏伟，宋阳，等. 霍邱县城湖泊沉积物重金属污染特征、潜在生态风险及来源[J]. 地学前缘，2024，31(3)：420－431.

[2] LI Y，GAO B，XU D Y，et al. Hydrodynamic impact on trace metals in sediments in the cascade reservoirs，North China[J]. Science of the Total Environment，2020，716：136914.

[3] 吴文星，李开明，汪光，等. 沉积物重金属污染评价方法比较——以潭江为例[J]. 环境科学与技术，2012，35(9)：143－149.

[4] 曹伟，张雷，秦延文，等. 云蒙湖表层沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. 地学前缘，2021，28(5)：448－455.

[5] 张雅然，车霏霏，付正辉，等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. 环境科学，2022，43(6)：3037－3047.

[6] HE P J，XIAO Z，SHAO L M，et al. In situ distributions and characteristics of heavy metals in full-scale landfill layers[J]. Journal of Hazardous Materials，2006，137(3)：1385－1394.

[7] LI C，SONG C W，YIN Y Y，et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary，China [J]. Marine Pollution Bulletin，2015，98 (1/2)：358－364.

[8] Memet V. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials，2011，195：355－364.

[9] MATSUMOTO E，WONG C S. Heavy metal sedimentation in Saanich Inlet measured with ^{210}Pb technique[J]. Journal of Geophysical Research，1977，82(34)：5477－5482.

[10] 张立成. 探索天然水体重金属污染的工具——沉积物[J]. 环境保护，1980，3(3)：41–42.

[11] 王伟力，王继纲，林彩，等. 福建兴化湾中部表层海水及沉积物中重金属含量特征与生态风险评价[J]. 应用海洋学学报，2016，35(2)：284－293.

[12] 邓延慧，王正文，丁润楠，等. 太湖湖体沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 环境生态学，2020，2(12)：67－72.

[13] 李鸣. 鄱阳湖重金属污染特征研究及环境容量估算[D]. 南昌：南昌大学，2010.

[14] 蒋豫，吴召仕，赵中华，等. 阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学研究，2016，29(11)：1590－1599.

[15] 王卓月，王桂芳，杨金林，等. 膨润土吸附废水中的抗生素和重金属研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊，2024(4)：59－63.

[16] 孙丞帅，张艳，魏平堂，等. 大理洱海流域河道水系沉积物中的重金属污染特征与风险评估及源解析[J]. 净水技术，2025，44(10)：159－170.

[17] 杜古尔·卫卫，石海涛，邢浩，等. 新疆戈壁荒漠区典型露天煤矿土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 现代地质，2023，37(3)：790－800.

[18] 朱英海，施泽明，王新宇，等. 攀西大梁子铅锌矿区水系沉积物重金属地球化学特征及源解析[J]. 现代地质，2022，36(3)：923－932.

[19] 李龙. 皖北采煤塌陷区湿地资源开发现状调查研究[J]. 绥化学院学报，2016，36(12)：10－12.

[20] 李龙，邓抱林. 皖北地区湿地生态资源保护与旅游开发研究[J]. 蚌埠学院学报，2016，5(4)：85－89.

[21] 陈方伟，李聪，郭军，等. 洞庭湖及其支流沉积物重金属分布特征、风险及影响因子分析[J]. 地质论评，2025，71(5)：1687－1700.

[22] ZHANG J，PENG W H，LIN M L，et al. Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coal-based cities：A case study of Suzhou City in Anhui Province，China[J]. Heliyon，2023，9(1)：e14841.

[23] 李世龙. 清水河流域重金属分布特征及风险评价[D]. 银川：宁夏大学，2020.

[24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control：A sedimentological approach[J]. Water Research，1980，14(8)：975－1001.

[25] 韩双宝，袁磊，张秋霞，等. 拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价[J]. 环境科学，2024，45(5)：2962－2970.

[26] 向语兮，王晓，单保庆，等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学学报，2020，40(6)：2237－2246.

[27] 徐争启，倪师军，庹先国，等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，2008，31(2)：112－115.

[28] 陈静生，王忠，刘玉机. 水体金属污染潜在危害：应用沉积学方法评价[J]. 环境科技，1989，9(1)：16－25.

[29] 李志清，吴苏舒，诸晓华，等. 石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. 水资源保护，2020，36(2)：73－78.

[30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京：中国环境科学出版社，1990.

[31] ZHANG Y H，LAI X J，ZHANG L，et al. The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition：A field study in Dongting Lake，China[J]. Journal of Hydrology，2020，584：124644.

[32] WANG L F，YANG L Y，KONG L H，et al. Spatial distribution，source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake，China[J]. Journal of Geochemical Exploration，2014，140：87－95.

[33] WILDING L P. Spatial variability：Its documentation，accommodation and implication to soil surveys[M]//NIELSEN D R，BOUMA J. Soil spatial variability. Wageningen：Pudoc，1985：166－193.

[34] 郭彦海，高国龙，王庆，等. 典型平原地区生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属赋存形态分布特征及生物有效性评价[J]. 环境科学研究，2019，32(9)：1613－1620.

[35] 程琛，刘佳俊，汪玲. 朱仙庄矿区水体重金属特征分析与评价[J]. 黄冈师范学院学报，2020，40(6)：37－41.

[36] 檀丽娟，冯松宝，程琛，等. 朱仙庄煤矿周边土壤有机质和重金属的含量研究[J]. 延边大学学报(自然科学版)，2020，46(3)：256－259，269.

[37] 张超，刘同华. 矿区土壤重金属污染特征及污染源解析研究[J]. 山西冶金，2025，48(8)：100－102.

[38] 何高波，徐丹，桂智凡，等. 黄石市城区土壤重金属分布特征及来源解析[J]. 土壤通报，2025，56(3)：851－860.

[39] 沈文静. 乡村振兴视角下农田重金属污染风险评价与溯源分析[D]. 淮南：安徽理工大学，2025.

[40] 朱阳春，陈学民，伏小勇. 青海湖表层沉积物重金属富集特征及其来源[J]. 生态学杂志，2013，32(7)：1862－1869.

[41] 仝双梅，连国奇，杨琴，等. 贵州典型煤矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 甘肃农业大学学报，2018，53(3)：112－117，125.

[42] 宗超，高峰，吴仑，等. 华北某地区渔用饲料中重金属含量调查及养殖环境评价[J]. 中国渔业质量与标准，2024，14(4)：54－62.

[43] 李致春，王运好，陈松，等. 淮河流域沱湖沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. 湖泊科学，2025，37(3)：889－901.

[44] 李兆冉. 海水养殖区底泥老化过程中硫与典型重金属的环境行为及其耦合机制[D]. 烟台：中国科学院烟台海岸带研究所，2023.

[45] SHAHAB A，ZHANG H，ULLAH H，et al. Pollution characteristics and toxicity of potentially toxic elements in road dust of a tourist city，Guilin，China：Ecological and health risk assessment[J]. Environmental Pollution，2020，266：115419.

[46] PERIS M，RECATALÁ L，MICÓ C，et al. Increasing the knowledge of heavy metal contents and sources in agricultural soils of the European Mediterranean region[J]. Water，Air，& Soil Pollution，2008，192：25－37.

[47] 赵武强，胡俊良，李剑锋，等. 广西某水源地水土重金属空间分布与生态风险评价[J/OL]. 环境科学，2025：1－11[2025-11-07]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202508062.