J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0222

鄱阳湖南岸堤垸区土壤重金属污染特征及源解析*

姜宏裕[1]，文帮勇[1**]，付检根[2]，肖英才[3]，张 娟[1]，徐志强[1]
(1.江西有色地质矿产勘查开发院，南昌 330030)
(2.江西省地质调查勘查院矿产勘查所，南昌 330025)
(3.江西省地质局生态地质大队，南昌 334000)

摘要：为识别鄱阳湖堤垸区土壤重金属的污染风险及来源，选取鄱阳湖南岸九龙-枫港地区为研究对象，采集了 3799 件表层土壤样品，采用地累积指数、内梅罗指数和潜在生态风险指数 3 种方法评价其污染状况，利用主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)对土壤重金属进行源解析。结果表明，表层土壤 As、Cd、Cu、Cr、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量是江西省土壤的背景值的 1.06-2.10 倍，空间分布上 Cd、Pb、Zn 等高值多分布于北部信江河湖沉积区，As、Cr、Ni 高值多分布于南部母岩风化区。83.05%的样点处于“未污染至轻度污染”范围内(I_{geo}<1)，83.84%的样点处于污染程度警戒线以下(P_n<1)，关键潜在生态风险区集中在信江滩涂及入湖三角洲(*RI*>60，占总面积的 10.85%)，目标因子均为 Cd。PMF 解析表明，土壤重金属有 4 种来源：红壤成土过程的次生富集、上游工矿活动、含煤母岩风化及农业生产和燃煤，贡献率分别为 49.28%、20.19%、11.91%和 18.62%，其中土壤 Cd 主要来源于上游运积(79.92%)，这为堤垸区耕地重金属污染精准防控及安全利用提供有效依据。
关键词：正定矩阵因子分解法；堤垸区；重金属；源解析；土壤

Pollution characteristics and source identification of heavy metals in polder soils from southern Lake Poyang, China*

Jiang Hongyu[1]，Wen Bangyong[1**]，Fu Jiangen[2]，Xiao Yin-cai[3]，Zhang Juan[1]，Xu Zhiqiang[1]
(1.Jiangxi Nonferrous Geological Mineral Exploration and Development Institute，Nanchang 330030，P.R.China）
(2.Mineral Exploration Institute of Jiangxi geological survey and Exploration Institute，Nanchang 330025，P.R.China）
(3.Ecological Geology Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Nanchang 334000，P.R.China）

Abstract：A comprehensive study was conducted in the Jiulong-Fenggang alluvial plain on the southern lakeshore of the Lake Poyang polder system to investigate the contamination characteristics and sources of heavy metals in soils. A total of 3799 surface soil samples were collected and the level of pollution was assessed using three methods: the geo-accumulation index, the Nemerow index and the potential ecological risk index. Principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) were employed to analyses the sources of the heavy metals in the soil. The results revealed that the average concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), copper (Cu), chromium (Cr), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn) in the surface soil were 1.06–2.10 times higher than the background soil value in Jiangxi Province. Northern Xinjiang River alluvial deposits showed significant Cd-Pb-Zn co-accumulation and southern bedrock weathering zones exhibited As-Cr-Ni geogenic anomalies. 83.05% of sampling sites were classified as "unpolluted to slightly polluted" (*I*geo <1), and 83.84% exhibited pollution levels below the warning threshold (*P*n <1). Critical ecological risk hotspots were concentrated in the Xinjiang River floodplain and its deltaic inflow zone (*RI* > 60), covering 10.85% of the total study area. Cd was identified as the sole priority control pollutant in these high-risk sectors. PMF source apportionment identified four primary contributors: secondary enrichment during red soil formation (49.28%), industrial and mining activities upstream (20.19%), weathering of coal-bearing parent rocks (11.91%), and agricultural practices combined with coal combustion (18.62%). This study confirms

*2025-01-20 收稿日期：2025-04-30 收修改稿.
江西省地质勘查基金(20190033，20220010，20240084，20240087)和江西省地质局(2023STXF01，2024STXF01，2024STXF08）联合资助/.
** 通讯作者，Email：343170393@qq.com.

that Cd contamination primarily originates from upstream mining activities (79.92% via fluvial transport), necessitating targeted source control measures within the Xinjiang River watershed. The integrated methodology provides a replicable framework for ecological risk management in floodplain agricultural systems.
Keywords： The positive definite matrix factor decomposition method; Polder area; Heavy metals; Source analysis; Soil

重金属具有不可降解性、生物毒性和持久性特征，是典型的累积型污染物，对环境质量构成了潜在的生态风险。在自然条件下，土壤中重金属来源于母岩风化以及成土过程的次生富集[1-3]，但工矿开采及冶炼、农业生产等外源输入型重金属在大气、水系等的作用下不断扩散并持续累积，使其成为我国土壤污染的主要超标因子[4]，特别在水系作用下，对南方水稻等的食品安全产生了不利影响。

不同成因来源的土壤重金属，生物活性迥异，生态风险高低不一，如有色金属矿区及其下游重金属活性高[5]，地质高背景区重金属活性低[3]，故而探究其来源是污染风险控制的必要前提条件。土壤源解析包括污染源的识别过程和定量解析，常用的方法有地统计分析法、主成分分析法(PCA)、化学质量平衡模型法(CMB)、正定矩阵因子分解法(PMF)、UNMIX 模型、同位素法等[6]，其中 PMF 是一种解析模型，可定量解析源及其贡献率[7-9]。

鄱阳湖是我国第一大淡水湖，对维系长江下游区域生态安全有着重要的保障功能，流域内矿产资源丰富，特别是钨、铜和稀土等的储量全国居前，并建有亚洲超大型的铜工业基地。矿产资源大规模的高强度开采及长期的金属冶炼，不仅对工矿区生态环境产生了影响，而且重金属等污染物通过河流最终汇入鄱阳湖，对流域生态环境系统(水体[10-15]、水系沉积物[16-22]、土壤[5,23-26]以及湿地[27-29])安全产生巨大威胁。这些研究主要关注于重金属的空间分布特征、赋存形态、污染程度、生态风险以及来源，但目前国内外对堤垸区土壤重金属污染风险及成因来源的研究鲜有报告。

淤洲是由河流携带的泥沙在河口或湖泊的边缘沉积而形成的，地势上通常高于消落带，低于河流阶地。堤垸区是在湖区的淤洲上建设堤垸来控制垸区的水位，以获得生活和生产空间的乡土景观类型。环鄱阳湖的堤垸建设起于隋唐，盛于 20 世纪中后期，止于 20 世纪 90 年代，且堤垸区主要分布于季节性出露的湖滩和赣江、抚河、信江等入湖三角洲。以往研究主要关注了河湖(水体和沉积物)、湿地以及流域耕地，而忽略了作为粮食生产基地的堤垸区土壤，本文通过对鄱阳湖南岸九龙-枫港的堤垸区进行高密度土壤样品采集，基于常量元素、微量重金属元素等 16 个指标的含量数据，分析重金属的含量特征及污染程度，采用 PMF 模型识别重金属来源和贡献率，为堤垸区重金属污染污染防治及耕地安全利用提供有效依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省鄱阳湖南岸滨湖三角洲(图 1)，总面积为 190 km^2，包括余干县的九龙镇(含垦殖场)、枫港乡，属亚热带湿润气候，年均气温为 17.8 ℃，年均降水为 1726.5 mm。研究区总体地势南高北低，由南部低岗(海拔+30~+40m)向北缓慢倾斜，过渡到湖滨洼地(海拔约+20m)；除信江干流内陆滩涂外，研究区东、北、西三侧均修建有堤坝，与南侧低岗地带相连，是信江（干流）入湖三角洲较为典型的堤垸建设区之一。作为典型的江南鱼米之乡，研究区主要种植水稻、蔬菜、油茶等作物，是全国重要的商品粮基地之一；河网密布、湖库众多，水产养殖得天独厚，水产品主要有甲鱼、黄鳝、螺蚌、虾蟹等。研究区南部的垦殖场有纺织基地，分布有毛纺厂、苎麻纺织厂、黄麻纺织厂、棉纺厂，主要产品为纺纱、麻纱、棉纺、针织品等，未见其它规模化工业生产或矿产资源开发等活动。信江全长约 300 km，流域面积约 1.76 万 km^2，分为两支注入鄱阳湖，作为流经研究区第一大河，其南部支流-九龙河自南向北于宋家村汇入干流。流域内重要矿产有铜、铅、锌、钨、铀、金、银、稀有金属和稀土等，其中信江中游的永平铜矿是以铜、硫为主的大型矿山，是我国第二大露天铜矿，已开采约 40 年；同处中游的贵溪冶炼厂是我国最大的铜冶炼厂，生产规模已经进入世界第二，已运行 40 余年。

根据第二次全国土壤普查结果[30]，研究区土壤类型主要有水稻土、红壤。按照江西省区域地质志[31]，研究区属扬子地层大区，推(滑)覆构造发育，主要出露青白口系、二叠系、三叠系及第四系等地层，其中二叠系乐平组、三叠系安源组为江西省较为典型的含煤地层，且均出露于研究区南部；。地表物质成因

主要有第四系河湖积物、第四系冲洪积物、含煤地层及变质岩的残坡积物。

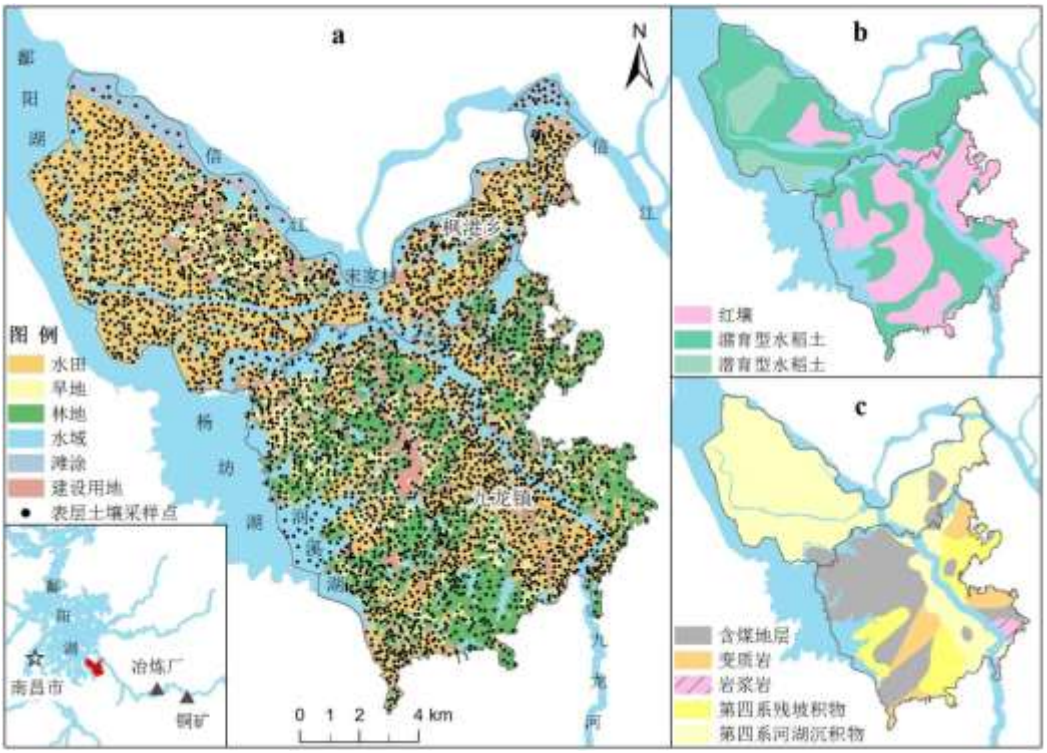

图 1 研究区及样点分布图（a.土地利用,b.土壤类型,c.地层岩性）

Fig.1 Map of the study area and sampling locations（a.Land use, b.Siol type, c.Formation lithology）

1.2 样点布设与采集

为查明研究区土壤环境现状及重金属污染来源，为堤垸区耕地重金属污染精准防控提供有效依据，利用 ArcGIS10.2 软件按照网格(1.0 km×1.0 km)进行样点布设，样点密度为 20 点/1km^2。采样点能代表研究区不同水系、土地利用类型、土壤类型、成土母质等。2022 年 3 月至 7 月，根据地块形状选择“X”型、“S”型或“棋盘”型由主样点向周边辐射 30~50 m 确定 4~6 个分样点，采集表层土壤(0-20 cm)样品等份组成一个混合样，采样时去除地表落叶、砂砾石、腐殖质等杂物，共 3799 件(含堤垸区外的滩涂样品 58 件)。

1.3 分析测试

样品分析测试在自然资源部南昌矿产资源监督检测中心完成，取一份 50g 样品，使用电极法(ISE，雷磁 PHSJ-3F)检测 pH。取一份 50g 样品经玛瑙球磨机破碎成 100 目粒径，采用容量法(VOL)检测有机质(SOM)和全氮(N)，使用高频红外法测定全硫(S)。取一份 100g 样品经玛瑙球磨机破碎成 200 目粒径，采用王水分解，使用原子荧光光谱仪(AFS，北京海光 AFS-9760)测定 As 和 Hg；采用混合酸(HF+HNO_3+$HClO_4$+H_2SO_4)消解，使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS，赛默飞 iCAP Q)测定土壤 Cd、Pb，使用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES，赛默飞 iCAP7000)测定 Cr、Cu、Ni 和 Zn；采用 X 射线荧光光谱仪(XRF，荷兰帕纳科 PW4400)测定土壤 P、K、Al_2O_3 和 Fe_2O_3。测试时插入标准样控制分析样品的准确度和精密度，准确度高于 0.04%，精密度高于 1.50%，均在允许限内；测定平行样进行重复性试验，计算两次试验相对偏差，各元素合格率均为 100%。

1.4 污染评价方法

地累积指数法不仅考虑了自然成壤过程造成背景值的影响，也充分注意了人为活动对重金属污染的影响，计算公式如下：

$$I_{geo} = \log_2[C_i/(K \times B_i)]$$

式中，I_{geo} 为地累积指数；C_i 为重金属 i 实测含量值；K 为修正指数(通常取 1.5)；B_i 为江西省土壤重金属

i 的背景值[32]。地累积指数 I_{geo} 污染程度分为六级，其中：I_{geo}<0，无污染；0≤I_{geo}<1，轻度污染；1≤I_{geo}<2，中度污染；2≤I_{geo}<3，中-重度污染；3≤I_{geo}<4，重度污染；4≤I_{geo}<5，重-极重度污染；I_{geo}≥5，极重度污染。

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区表层土壤重金属单一和综合污染水平进行评价，计算公式分别如下：

$$P_i = C_i / S_i$$

$$P_n = \sqrt{\{max(P_i)^2 + ave(P_i)^2\}/2}$$

式中，P_i 为土壤中第 i 种重金属元素的单因子污染指数；C_i 表示第 i 种重金属元素的实测浓度；S_i 表示第 i 种重金属元素的评价标准，采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)[33]中重金属的风险筛选值；P_n 为土壤重金属综合污染指数。污染程度分为四级:P<1，表示无污染；1≤P<3，轻度污染；3≤P<6，中度污染；P≥6，重度污染。

采用 Hakanson[34]潜在生态危害指数法来评价研究区土壤重金属生态风险，计算公式如下：

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} \left(T_r^i \times P_i\right)$$

式中：RI 为综合生态风险指数；E_r^i 为 i 污染物的潜在生态风险指数，P_i 为 i 污染物的单因子污染指数；T_r^i 为 i 污染物的毒性响应系数，本文的毒性响应系数分别为 Hg(40)、Cd(30)、As(10)、Pb(5)、Cu(5)、Ni(5)、Cr(2)和 Zn(1)[35]。根据优化后的潜在生态风险分级[36-37]，单项潜在生态风险系数分为五级：E_r^i <30，低生态风险；30≤E_r^i<60，中等生态风险；60≤E_r^i<120，较高生态风险；120≤E_r^i<240，高生态风险；E_r^i≥240，极高生态风险。综合潜在生态风险系数分为五级：RI<60，低生态风险；60≤RI<120，中等生态风险；120≤RI<240，较高生态风险；240≤RI<480，高生态风险；RI≥480，极高生态风险。

1.5 数据处理

运用 Excel2021 对数据进行统计分析，计算平均值、变异系数等，使用 Arcgis10.2 的地统计分析功能，进行空间插值图绘制，按分位值(10%、25%、50%、75%和 90%)进行分级，将土壤中的重金属分布特征进行可视化。使用 SPSS26 对研究区表层土壤重金属含量进行 PCA 分析，使用 USEPA PMF5.0 进行土壤重金属源解析。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量及分布特征

据研究区表层土壤样品重金属含量统计结果(表 1)，As、Cd、Cu、Cr、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 12.6、0.21、27.0、77.2、0.10、27.6、37.1 和 73.2 mg/kg，均超过了江西省土壤的背景值[32]，分别为背景值的 1.21、2.10、1.30、1.61、1.25、1.45、1.15 和 1.06 倍，超出背景值的样点比例分别为 63.2%、71.8%、87.1%、88.1%、62.1%、86.8%、58.5%和 53.5%。变异系数反映了土壤中元素的均匀性和离散程度，研究区表层土壤 Cd 的变异系数高达 183%，空间分布变异强；As 和 Cu 的变异系数相对较大，呈中等变异；Hg、Pb、Cr、Zn 和 Ni 的变异系数相对较小，呈弱变异，空间分布相对均匀。

表 1 研究区表层土壤重金属浓度特征

Table 1 Characteristics of heavy metal concentrations in the surface soils of the study area

元素	含量范围 (mg/kg)	算术平均 (mg/kg)	几何平均 (mg/kg)	变异系数 (%)	背景值	平均/背景
As	1.97～182	12.6	11.62	48.3	10.4	1.21
Cd	0.02～8.12	0.21	0.15	183	0.10	2.10
Cr	14.0～511	77.2	73.2	33.1	48.0	1.61
Cu	8.02～790	26.9	25.9	55.7	20.8	1.30
Hg	0.017～0.90	0.10	0.09	29.7	0.08	1.25
Ni	6.79～146	27.6	26.4	30.6	19.0	1.45
Pb	14.2～101	37.1	35.7	30.8	32.1	1.15
Zn	20.8～306	73.2	70.3	30.8	69.0	1.06

据研究区重金属及氧化物的空间分布结果(图 2)，土壤 Cd、Pb、Zn 和 K 的空间分布相似，呈现北高南低的特征，特别是高值区(75%分位值)主要分布于北部信江的干流及入湖三角洲，这可能与其上游的工矿等人为输入污染息息相关[13-14]，同时各元素的极高值区略有差异：土壤 Cd 的极高值区(90%分位值)主要分布于信江干流的滩涂中，Pb 和 Zn 的极高值分布于入湖三角洲和滩涂，K 的极高值主要分布于干流及支流低洼地带；南部九龙河小流域土壤 Cd、Pb 和 Zn 与江西省土壤背景值相当，表明未受明显的人为活动影响。这些分布规律与多目标区域地球化学调查[38]、水系沉积物调查[39]的成果较为一致，即在信江流域的干流下游河谷及入湖口附近形成了较为突出的 Cd 等重金属高值带。

土壤 As、Cr、Ni 和 Fe_2O_3 空间分布相反，即低值区主要分布于北部河湖沉积区，其含量亦低于江西省土壤背景值，高值区主要分布于南部九龙河小流域，特别是极高值区与红壤的分布高度重叠。土壤 Cu、Hg 和 Al_2O_3 空间分布相对均匀，在信江滩涂以及含煤地层中均出现极高值。

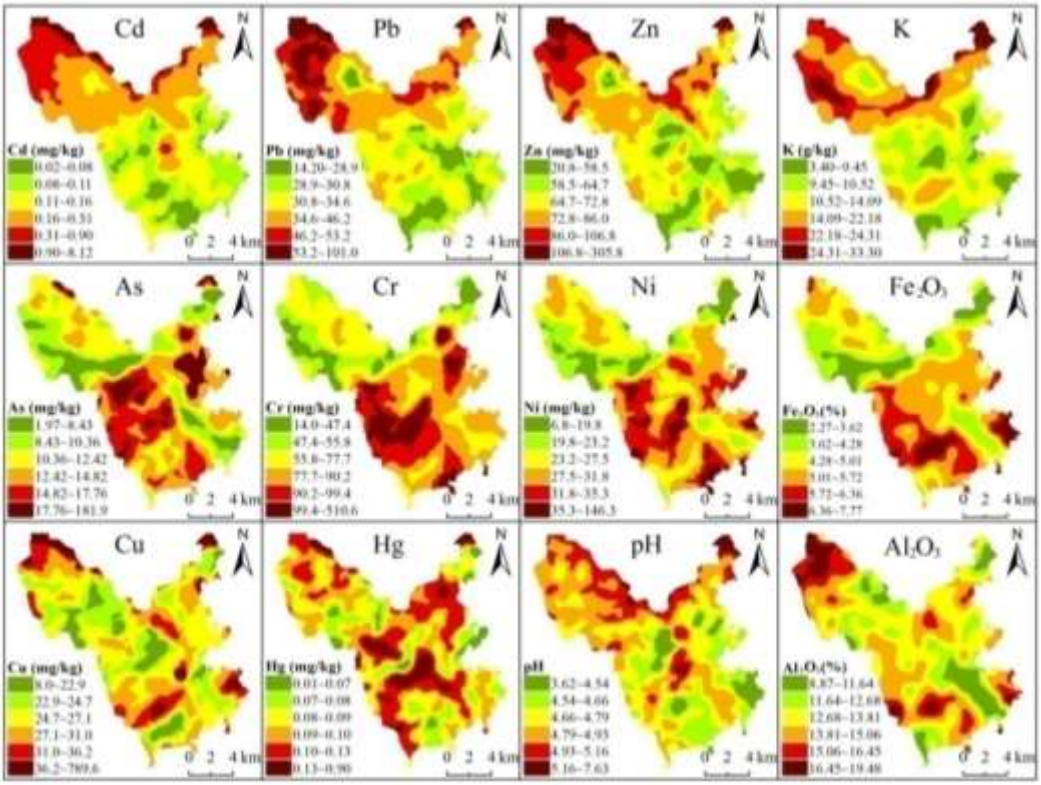

图 2 研究区表层土壤重金属及氧化物含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals and oxides in surface soil of the study area

2.3 土壤重金属污染特征

2.3.1 地累积指数法

研究区土壤重金属地累积指数均值从大到小依次为：Cr>Cd>Ni>Cu>Hg=As>Pb>Zn，其中 Cr 的平均地累积指数 I_{geo} 为 0.02，整体属于轻度污染水平，而其他指标的平均地累积指数 I_{geo} 均小于 0(图 3)。

土壤 Cd 地累积指数值的变化幅度较大，有 34.90%的样点处于轻度污染，12.42%的样点处于中度污染，2.21%的样点处于中重度及以上污染水平；Cr、Ni、Cu、Hg、As、Pb 和 Zn 处于污染水平的样点比例分别为 61.07%、41.09%、16.14%、17.06%、22.69%、16.06%和 7.79%。总体而言，83.05%的样点处于“未污染至轻度污染”范围内（I_{geo}<1）。

2.3.2 内梅罗指数法

对研究区表层土壤各重金属污染进行单指标评价，单项污染指数表现为 Cd>Zn>As>Cu>Cr>Ni>Pb>Hg，其中 Cd 的污染指数最高(19.2)，处于重度污染水平；其次为 Cu(11.2)，处于重度污染

水平；再次为 As(4.30)，处于中度污染水平；其他元素污染指数均较低，处于轻度污染水平。剔除 As、Cu 个别异常点后，其单项污染指数分别为 2.62、2.63，处于轻度污染水平。

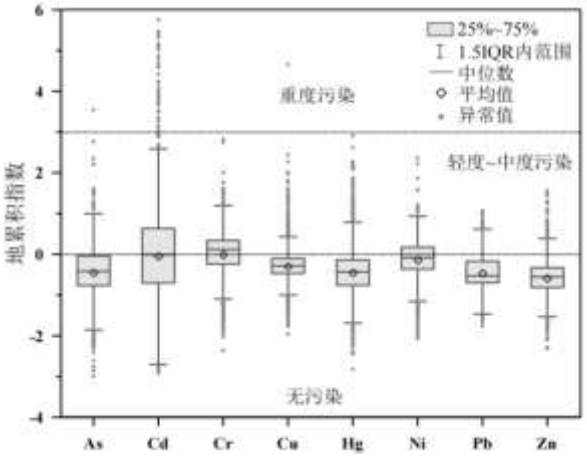

图 3 研究区表层土壤重金属地累积指数箱线图

Fig.3 Boxplot of the accumulation index of heavy metals in topsoil

研究区内梅罗综合污染指数变化范围 0.20~27.1，平均值 0.90，污染程度警戒线(P_n＜1)以下样点占比 83.84%，轻度污染(1≤P_n<3)占比 9.61%，中度污染(3≤P_n<6)占比 0.55%，重度污染(P_n≥6)占比 0.92%，整体上污染情况较为轻微。从空间分布(图 4)上看，污染样点主要分布于研究区北部沿江（湖）堤垸的低洼处，特别是中度-重度污染样点均位于堤垸区外信江干流的滩涂中。从不同地类(图 5)上看，位于滩涂的样点土壤 Cd 含量范围 0.06~8.12 mg/kg，中位值 2.04mg/kg，远远高于其他地类，这与前人鄱阳湖及信江水系沉积物重金属超标的研究一致[19-20,40-44]。

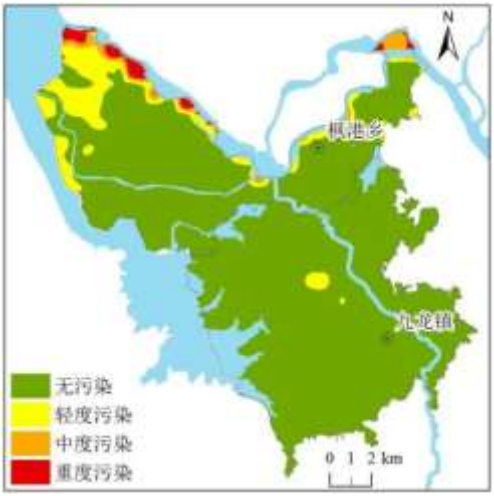

图 4 土壤重金属综合污染评价

Fig.4 Evaluation of heavy metal pollution in topsoil

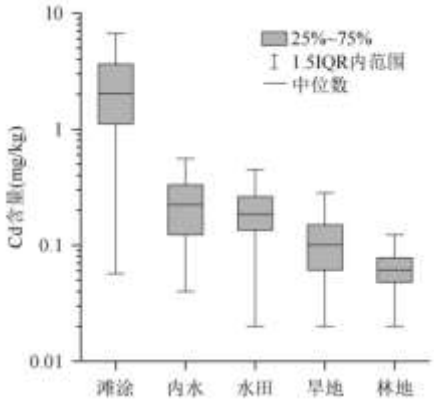

图 5 不同地类表层土壤 Cd 含量箱线图

Fig.5 Box plot of Cd content in different types of topsoil

2.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法考虑环境毒性差异，弥补了重金属生物毒性和相对贡献的比例[45]。据研究区潜在生态风险指数评价结果，表层土壤风险指数依次为 Cd>Hg>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn，均值分别为 21.2、7.73、4.22、2.69、2.31、2.30、0.61 和 0.37，其中仅 Cd 存在高或更高生态风险点位，中等风险(30≤E_r^i<60)、较高风险(60≤E_r^i<120)、高风险(120≤E_r^i<240)和极高风险(E_r^i≥240)分别占比 12.4%、1.11%、0.53%和 0.58%；Hg、As 和 Cu 存在中等和较高生态风险点位，分别占比 0.45%、0.05%和 0.05%；Ni、Pb、Cr 和 Zn 均为低生态风险(E_r^i<30)。

综合潜在生态风险指数表现为以低生态风险(*RI*<60)为主，占研究区面积的 89.1%，中等风险(60≤*RI*<120)、较高风险(120≤*RI*<240)、高风险(240≤*RI*<480)、极高风险(*RI*≥480)，面积分别占比 6.42%、2.31%、1.62%和 0.50%，关键生态风险区(*RI*≥60）集中分布于信江滩涂及入湖三角洲。

通过地累积指数法、内梅罗指数法及潜在生态风险指数法评价，表明研究区表层土壤总体上处于无污染或低风险水平，仅北部信江干流滩涂及入湖三角洲低洼地带存在一定程度的污染或风险。

2.4 土壤重金属源解析

应用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett 球形度检验，结果分别为 0.728(＞0.7)和 0.000(＜0.001)，表明指标间相关性强，适合做主成分分析。根据特征值大于 1 的原则，筛选出 4 个因子，特征值依次为 3.88、3.32、2.65 和 1.24，累计方差贡献率达 73.98%。据元素组合特征，土壤重金属污染源类别主要可划分 As-Cr-Ni-Al_2O_3-Fe_2O_3、Cd-Pb-Zn-K-Al_2O_3、N-S-SOM 和 Hg-Cd 四类，而 Cu 的载荷较弱，意味其存在复合来源或具有多源性。

表 2 表层土壤元素主成分旋转载荷

Table 2　Rotating loadings of soil elements and oxides on principal components

组分	PC1	PC2	PC3	PC4
As	**0.67**	−0.03	−0.20	**0.40**
Cd	−0.16	**0.64**	−0.09	**0.54**
Cr	**0.78**	−0.33	0.03	0.25
Cu	**0.37**	**0.39**	−0.02	0.23
Hg	0.20	0.03	0.17	**0.76**
Ni	**0.88**	0.02	0.05	0.06
Pb	−0.12	**0.88**	0.20	−0.02
Zn	0.21	**0.89**	0.03	0.23
N	−0.21	0.04	**0.92**	0.10
P	0.01	0.08	**0.44**	**0.41**
K	−0.37	**0.79**	−0.04	−0.26
S	0.14	−0.02	**0.86**	−0.05
SOM	−0.22	0.06	**0.93**	0.09
Al_2O_3	**0.70**	**0.58**	0.01	−0.28
Fe_2O_3	**0.88**	0.04	−0.27	−0.07
特征值	3.88	3.32	2.65	1.24
方差百分比%	25.89	22.13	17.69	8.27
累积贡献率%	25.89	48.01	65.71	73.98

将 3799 件表层土壤样品 15 个指标导入 EPA PMF5.0 分析，各项指标信噪比(S/N)范围为 6.8~9.0，均被归为“Strong”(S/N＞2)，通过设定因子数为 4 时，各指标残差在-3~3 之间，其中得到 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Hg 和 Zn 拟合度 R^2 分别为 0.78、0.99、0.87、0.70、0.81、0.76、0.56 和 0.96，表明拟合结果基本可靠。解析出的表层土壤重金属的 4 因子(PM1~PM4)成分谱见图 6 所示，其贡献率依次为 18.62%、20.19%、11.91%和 49.28%。

由表 2、图 6 可知，PM1 对 Cr、Hg、As、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的贡献率分别为 25.06%、24.30%、18.97%、18.47%、18.28%、11.99%、9.01%和 1.88%；PC4 解释了 8.27%的方差变异，Hg 具有强载荷。研究显示，化石燃料的燃烧和金属冶炼是 Hg 主要的排放来源，通过大气沉降进入地表土壤[45]，从而导致土壤 Hg 相对累积。经济快速发展和人口扩张，工矿企业和城镇的煤炭消耗量大，这可能是大气沉降物中 Hg 的主要来源，有研究表明，江西省表层土壤 Hg 在城镇居民区及冶炼区周边显著富集[38-39]。因此 PM1 代表了 Hg 的煤炭燃烧来源。

PM2 对 Cd、Pb、Zn、Cu、Hg、As 和 Ni 的贡献率分别为 79.92%、45.34%、43.34%、26.03%、15.88%、12.55%和 9.86%；PC2 解释了 22.13%的方差变异，Pb、Zn 和 K 具有强载荷，Cd 和 Al_2O_3 具有中等载荷。常作为表生地球化学环境中的指示元素，主要来源于区域母岩风化，因化学性质极度活泼易流失，同时其极化率高，易被土壤、黏土矿物以及其他胶体物质吸附，并沉积于下游河湖中[47]；Cd、Pb、Zn 和 Cu 是亲硫元素，常常共生于硫化物矿床中，自然条件下 Cd 等重金属的溶解度及迁移能力相对有限，水系下游含量相对较低且平稳，但流经研究区的信江中游有大型铜矿和铜冶炼基地，自 20 世纪 80 年代以来大规模的矿山开采、金属冶炼等生产活动，导致 Cd、Pb、Zn 和 Cu 等重金属不断释放到环境中，但各重金属的溶解度及搬运距离受地表环境影响较大，如 Cu 易形成碳酸盐、磷酸盐等难溶矿物，主要以残渣态赋存，其迁移距离相对较近，而 Cd 主要以悬浮态赋存并可随地表水系向下游远距离扩散，与 K 等沉积于水动力较弱的平缓地带[14,40-44,48-49]。有研究表明，信江流域地表水 Cu 和 Zn 主要来源于工业生产废水和废渣排放[40]，信江流域水系沉积物受到 Cd 严重污染[41]，特别是信江中游底泥重金属主要来源于铜矿开采和冶炼活动[42-43]，并导致信江入湖口沉积物严重的 Cd 污染[44]；也有研究表明，信江每年向鄱阳湖输送 26.5 吨镉、123.39 吨锌、24.41 吨铅，重金属输入量达总入湖量的三分之一，其中 Cd 的贡献率高达 65.8%[14]。因此，PM2 可认为是上游工矿等人为来源。

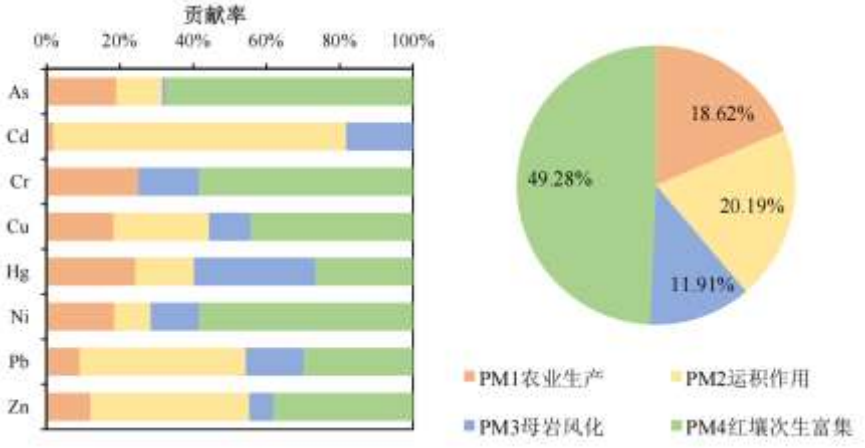

图 6 土壤重金属 PMF 分析污染源成分谱及其组分贡献率

Fig.6 PMF analysis of heavy metals in soil pollution sources and its contribution rate

PM3 对 Hg、Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 和 As 的贡献率分别为 33.14%、18.20%、16.56%、15.91%、13.23%、11.43%、6.52%和 0.98%；PC3 解释了 17.69%的方差变异，N、S 和 SOM 具有强载荷。S 是自然界丰度相当高的元素之一，土壤 S 主要来源于含硫矿物的母岩风化[50-51]；含煤地层与成矿关系密切，不但本身含矿，而且作为矿源层为后生矿床的形成提供成矿物质[52]，富含有机质、硫化物等的含煤地层风化过程中，不断释放重金属[53-54]，而且 S^{2-}暴露后极易被氧化成 SO_4^{2-}，并释放大量的 H^+使得 Cd 等重金属更加易迁移，最终在土壤中累积[55]；有研究表明，江西省地域煤炭中重金属含量偏高，如 Cd 含量范围为 0.29~4.26 mg/kg[56]。人类农业生产活动也会带来等重金属，如早期农药富含铜、砷等，磷肥、复合肥等富含镉等，有研究表明，信江地表水 Cd 主要来源于农业和渔业等人为污染[46]。研究区作为商品粮基地，规模化种植，使用化肥和农药是当地种植管理的一种普遍现象，因此 PM3 代表了含煤母岩风化和农业生产的共同来源。

PM4 对 As、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Hg 的贡献率分别为 67.51%、58.38%、58.45%、44.26%、38.14%、29.74%和 26.68%；PC1 解释了 25.89%的方差变异，Ni、Cr 和 Fe_2O_3 具有强载荷、As 和 Al_2O_3 具有中等载荷。研究区属亚热带湿润气候，雨量充沛，母岩风化和土壤形成过程中，风化物和土体内的硅酸盐和铝硅酸盐矿物遭受强烈分解，硅和盐基类物质遭受淋失，移动性较小的铁、铝氧化物残留原地并相对富集，同时也意味着原生矿物不断分解过程中，颗粒由粗变细，次生的粘土矿物不断形成，土质普遍变粘[30]。这可能是地带性红壤脱硅富铁铝过程中，As、Cr 和 Ni 作为典型亲铁元素，在表生地球化学环境中

通常与铁铝氧化物共生在一起[30,32,47]。因此，PM4 代表了地带性红壤成土过程中的次生富集来源。

3 结论

（1）研究区表层土壤 As、Cd、Cu、Cr、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量是江西省土壤背景值的 1.06~2.10 倍，其中 Cd 的变异系数高达 183%，反映其空间分布差异显著，其高值多分布于北部信江河湖沉积区。三种评价结果显示研究区表层土壤总体上处于无污染或低风险水平，仅北部信江干流滩涂及沿岸部分低洼地带存在一定程度的 Cd 污染。

（2）PMF 模型解析表明，土壤重金属有 4 种来源：红壤成土过程的次生富集、上游工矿活动、含煤地层的母岩风化与农业生产和燃煤，贡献率分别为 49.28%、20.19%、11.91%和 18.62%，其中土壤 Cd 主要来源于上游工矿活动(79.92%)运积，为堤垸区耕地重金属污染精准防控及安全利用提供有效依据。

（3）模型解析中，引入 Fe、K、S 等元素指标，对识别流域性的土壤成土过程、母岩风化及流域运积作用有较好的佐证；引入 N、P 等元素，可有效识别人为活动尤其是农业生产来源，可减少源成分谱 PMF 模型的偏差，使解析的结果更加精确，同时也需要进一步验证常量指标对其他解析模型、污染场景的适用性。

4 参考文献

(1) Wei FS, Chen JS, Wu YY, *et al*. Study on the background contents on 61 elements of soils in China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1991, 12(4): 12-19. [魏复盛, 陈静生, 吴燕玉等. 中国土壤环境背景值研究. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.]

(2) Alexakis D E, Bathrellos G D, Skilodimou H D, *et al*. Spatial distribution and evaluation of arsenic and zinc content in the soil of a Karst Landscape. *Sustainability*, 2021, 13(12), 6976.

(3) Hu PJ, Zhan J, Liu J, *et al*. Research progress on the causes, risks, and control of high geological background of heavy metals in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1363–1377. [胡鹏杰, 詹娟, 刘娟等. 土壤重金属地质高背景成因、风险与管控研究进展. 土壤学报, 2023, 60(5): 1363–1377.]

(4) 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 北京, 2014.

(5) Wen BY, Jiang HY, Gao Y, *et al*. Source analysis and bioavailability of soil cadmium in Poyang Lake Plain of China based on principal component analysis and positive definite matrix factor. *Minerals*, 2024, 14(5), 514.

(6) Yu DY, Wang YH, Ding F, *et al*. Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4): 1000-1008. [于旦洋, 王颜红, 丁茯等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较. 土壤通报, 2021, 52(4): 1000-1008.]

(7) 张文通, 董伟. SPSS 统计分析高级课程(第 3 版). 北京:高等教育出版社, 2018: 1-525.

(8) Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Entronmetrics*. 1994. 5(2). 111-126.

(9) Chen YL, Wong LP, Ma J, *et al*. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2219-2238. [陈雅丽, 翁莉萍, 马杰等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.]

(10) Duan WL ,Bin H, Daniel, *et al*. Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods.*Sustainability*, 2016, 8(2), 133.

(11) Chu XD, Wu DS, Wang H, *et al*. Spatial distribution characteristics and risk assessment of nutrient elements and heavy metals in the Ganjiang River Basin. *Water*, 2021, 13(23), 3367.

(12) Zhang DW, Zhang L, He JH, *et al*. Spatial distributions and risk assessment of dissolved heavy metals in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 8028-8035. [张大文, 张莉, 何俊海等. 鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局及风险评估. 生态学报, 2015, 35(24): 8028-8035.]

(13) Ma MZ, Gao Y, Song X W, *et al*. Transport characteristics and risk assessment of heavy metals in multi-scale watersheds in the Poyang Lake area. *China*. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6404-6415. [马明真, 高扬, 宋贤威等. 鄱阳湖地区多尺

度流域水体重金属输送特征及其污染风险评价. 生态学报, 2018, 39(17): 6404-6415.]

(14) Li WM, Yang ZF, Zhou L, *et al*. Geochemical characteristic and fluxes of heavy metals in water system of the Poyang Lake. *Geoscience*, 2014, (3): 512-522, 536. [李文明, 杨忠芳, 周雷等. 鄱阳湖水系重金属元素地球化学特征及入湖通量. 现代地质, 2014, (3): 512-522, 536.]

(15) Rao Z, Chu XD,Wu DS, *et al*. Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(5): 31-37. [饶志, 储小东, 吴代赦等. 鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 31-37.]

(16) He ZK, Chen HY, Chen RH, *et al*. Pollution assessment and source apportionment of heavy metal pollution in sediments of Le'an River. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2020, 56(1): 78-85. [何柱锟, 陈海洋, 陈瑞晖等. 乐安河沉积物重金属污染评价与来源解析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(1): 78-85.]

(17) Chen JH, Zhang YH, Shen W, *et al*. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in Nanchang section of the Fuhe River. *Environmental Science*, 2020, 40(11): 4936-4944. [陈俊华, 章艳红, 沈威等. 抚河南昌段重金属空间分布特征及来源分析.中国环境科学, 2020, 40(11): 4936-4944.]

(18) Zeng FP, Xiao HY, Zhou WB. Environment significance and research of heavy metal in the sediments of Poyang Lake basin. Jiangxi Chemical Industry, 2007(2): 21-23. [曾凡萍, 肖化云, 周文斌. 鄱阳湖流域沉积物中重金属研究及环境意义. 江西化工, 2007(2): 21-23.]

(19) Cao BD,Li WM, Zhou YF, *et al*. Geochemical characteristic and fluxes of trace metal in water system of the Poyang Lake. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 343-353. [曹佰迪, 李文明, 周一凡等.鄱阳湖流域沉积物中重金属元素分布特征及生态风险浅析.西北地质, 2022, 55(4): 343-353.]

(20) Chen M, Liao YQ, Zheng XJ, *et al*. Assessment of heavy metal pollution in sediments of the Ganjiang River: Using pollution assessments and multivariate statistical techniques. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(12): 3861-3874. [陈明, 廖月清, 郑小俊等.基于多元统计技术的赣江沉积物重金属污染评价.环境化学, 2021, 40(12): 3861-3874.]

(21) Kuang H F, Hu C H, Wu G L, *et al*. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 964-976. [匡荟芬, 胡春华, 吴根林等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析. 湖泊科学, 2020, 32(4): 964-976.]

(22) Dai LJ, Wang LQ, Li LF, *et al*. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang lake in China. *Science of the Total Environment*. 2018, 621, 1433–1444.

(23) Zhao J, Luo ZJ, Zhao Y, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2018, 38(6): 2475-2485. [赵杰, 罗志军, 赵越,等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475-2485.]

(24) Li J, Teng YG, Wu J, *et al*. Source apportionment of soil heavy metal in the middle and upper reaches of Le'an River based on PMF Model and Geostatistics. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(6): 984-992. [李娇, 滕彦国, 吴劲,等. 基于 PMF 模型及地统计法的乐安河中上游地区土壤重金属来源解析. 环境科学研究, 2019, 32(6): 984-992.]

(25) Jiang Y, Guo X. Multivariate and geostatistical analyses of heavy metal pollution from different sources among farmlands in the Poyang Lake region, China. *Journal of Soils and Sediments*,2019, 19, 2472–2484.

(26) Li YH, Kuang HF, Hu CH, *et al*. Source apportionment of heavy metal pollution in agricultural soils around the Poyang Lake region using UNMIX model. *Sustainability*, 2021, 13(9), 5272.

(27) Jian MF, Li LY Xu PF, *et al*. Spatiotemporal variation characteristics of heavy metals pollution in the water, soil and sediments environment of the Lean River - Poyang Lake Wetland. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1759-1765. [简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞,等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征. 环境科学, 2014(5): 1759-1765.]

(28) 申钊颖. 鄱阳湖湿地 DOM 来源及其对重金属形态变化的影响研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2024.

(29) Zeng H, Zhang H, Ding MJ, *et al*. Enrichments, migrations, and conversions of heavy metal in the soil/sediment-plant system rowards the lake in typical Poyang Lake wetland. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 781-795. [曾欢, 张华, 丁明军,等. 鄱

阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析. 环境科学, 2023, 44(2): 781-795.]

(30) 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土壤. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.

(31) 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志•江西志. 北京: 地质出版社, 2017.

(32) 何纪力, 徐光炎, 朱惠民等. 江西省土壤环境背景值研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

(33) GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行) .

(34) Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control - A sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001. DOI: 10. 1016/0043-1354(80)90143-8.

(35) Xu ZQ, Ni SJ, Tuo X G, *et al*. Caleulation of heavy metalstoxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Seience and Technology*,2008, 31(2): 112-115. [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. 环境科学与技术,2008, 31(2): 112-115.]

(36) Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1233-1241. [马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题. 地理研究, 2020, 39(6): 1233-1241.]

(37) Wu M, Liu S L, Yuan Y Y, *et al*. Optimization of potential ecological risk index method for soil heavy metals—a case study of Chengkou County, Chongqing City. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 473-480. [吴梅, 刘属灵, 袁余洋等. 土壤重金属潜在生态风险指数法优化研究−以重庆市城口县为例. 土壤通报, 2023, 54(2): 473-480.]

(38) 中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集：江西省鄱阳湖及周边经济区. 北京：地质出版社,2010.

(39) 谢学锦, 任天祥, 孙焕振. 中国地球化学图集. 北京：地质出版社,2012.

(40) Zhang J, Chen X, Liu QC, *et al*. Distribution and potential risk assessment of heavy metals in the main estuaries of lake Poyang´s tributaries. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(1): 95-100. [张杰, 陈熙, 刘倩纯等. 鄱阳湖主要入湖口重金属的分布及潜在风险评价. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 95-100.]

(41) Wu JF, Wang HM, Tian ZQ. The tracing and evaluation of heavy metals in sediment of Xinjiang River Basin. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science)*, 2023, 47(6): 599-604. [吴健芳, 王红梅, 田自强. 信江流域底泥重金属溯源与评价. 江西师范大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 599-614.]

(42) 吴送先, 邹晓红, 潘筱璐等. 信江(土桥断面)水系沉积物中重金属污染研究. 江西化工, 2012(4): 89-92.

(43) Fang Z, Mo ZF, Huang QW, *et al*. Enrichment sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Xinjiang River .*Ground water*, 2023, 45(1):116-121. [方正, 莫子奋, 黄启伟等. 信江底泥重金属富集来源及生态风险评估. 地下水, 2023, 45(1): 116-121.]

(44) Ge Q, Gao B, Lin CY, *et al*. Sources of heavy metals and related health risk of surface water in Xinjiang River Basin. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(12): 4984-4994. [葛勤, 高柏, 林聪业等. 信江流域地表水重金属来源及污染风险分析. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 4984-4994.]

(45) Zheng DM, Wang QC, Li ZB, *et al.* Comparative study of mercury pollution in two different typical cities of northern china:coal-consumer and industrial cities. *Earth and Environment*, 2007, 35(3): 273-278. [郑冬梅, 王起超, 李志博等. 中国北方燃煤型和工业复合型城市汞污染对比研究. 地球与环境, 2007, 35(3): 273-278.]

(46) Chen B Y. Assessment of heavy metal pollution and method comparison: a case study of the shallow-sea sediments in Fujian. *Geology and Resources*, 2008, 17(3): 213-218. [陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比-以福建浅海沉积物为例.地质与资源, 2008, 17(3): 213-218.]

(47) 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984.

(48) Zhou QQ, Wen BY, Zhang J, *et al*. Migration rules of soil Cd in typical small watershed of Western Jiangxi. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(4): 385-391. [周强强, 文帮勇, 张娟等. 赣西典型小流域河道镉元素迁移规律研究. 东华理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(4): 385-391.]

(49) Cheng HX, Yang ZF, Xi XH, *et al*. Strategies and strategies for tracing and source of Cd anomalies along the Changjiang river basin. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 285-291. [成杭新, 杨忠芳, 奚小环等. 长江流域沿江镉异常示踪与追源的战略与战术. 第四纪研究, 2005, 25(3): 285-291.]

(50) Wang F, Zhu YJ, Lu L. Sulphur in soil and its transformation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(5): 249-253. [王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述. 中国农学通报, 2007, 23(5): 249-253.]

(51) 张卓, 危超, 别亮亮.硫元素地球化学行为的几点思考. 广东化工, 2013, 40(22): 69-70.

(52) 郑度, 周成虎, 申元春等. 地理区划与规划词典[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.

(53) Lavergren U, Åström M E, Falk H, *et al*. Metal dispersion in groundwater in an area with natural and processed black shale: Nationwide perspective and comparison with acid sulfate soils. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 359-369.

(54) Rimmer SM. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Missis sippian black shales, Central Appalachian Basin(USA). *Chemical Geology*, 2004, 206: 373-391.

(55) Zhao WF, Song YX, Guan DX, *et al*. Pollution status and bioavailability of heavy metals in soils of a typical black shale area. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1332-1341. [赵万伏, 宋垠先, 管冬兴等. 典型黑色岩系分布区土壤重金属污染与生物有效性研究. 农业环境科学学报, 2018, 37 (7): 1332-1341.]

(56) Yang XY, Liu XZ, Du X, *et al*. Distribution of heavy metal element of coal powder in Jiangxi. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(1):115-117. [杨晓燕,刘小真,杜翔,等.江西地域煤炭中重金属元素分布研究.环境科学与技术, 2009, 32(1):115-117.]