

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.03.007

引用格式:程贤达,孙建伟,贾煦,等. 豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染及来源解析[J]. 华东地质, 2022, 43(3): 313-323. (CHENG X D, SUN J W, JIA X, et al. Pollution and source apportionment of heavy metals in the farmland soils of the gold mining area in Tantou Basin, western Henan metallogenic belt[J]. East China Geology, 2022, 43(3): 313-323.)

豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染及来源解析

程贤达¹, 孙建伟¹, 贾煦^{1,2}, 商连南¹, 张龙^{1,3}, 孙亚柯¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;

2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为查明豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染特征及污染来源, 在该盆地农田中系统采集土壤样品, 分析土壤中的重金属含量, 采用聚类分析和主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型对污染源进行解析并计算污染源贡献率。结果显示: 研究区农田土壤重金属 Hg、As、Cr、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 含量平均值均低于农用地土壤污染风险筛选值, 整体土壤污染风险较低, 仅部分样品 Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cd 含量超过风险筛选值; Pb、Zn 和 Cd 主要呈区域性污染, 其他重金属元素主要呈孤立点状污染。Hg、Cd、Pb 变异系数达到强变异水平, 表明潭头盆地农田土壤中 Hg、Cd、Pb 元素受人类活动干扰比较强烈。综合聚类分析、主成分分析及空间分布特征, 8 种重金属主要来源于 4 类污染源: Cu、Pb、Zn 和 Cd 污染来源于交通源(PC1); Cr 和 Ni 污染来源于自然源(PC2); As 污染来源于与金矿开采和尾矿堆存相关的矿业源(PC3); Hg 污染来源于与小作坊汞溶解炼金相关的矿业源(PC4)。

关键词: 金矿区; 土壤; 重金属污染; 潭头盆地; 豫西成矿带

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2022)03-313-11

土壤是陆地生态环境重要的缓冲调控和净化系统, 土壤安全是农业可持续绿色发展的基础, 决定着农产品的数量和质量, 直接影响着人类的健康和发展。然而, 随着工业化进程和经济的快速发展, 矿业开发中的污水排放、大气降尘、尾矿扬尘、矿区交通等对矿区周边农田造成了重金属污染^[1-4]。土壤重金属污染可导致农作物产量和质量下降, 并通过土壤-植物系统进入食物链, 最终影响人体的健康^[5-8]。此外, 土壤重金属污染具有隐蔽性和难治理性, 查明土壤中重金属污染物质的来源, 对实施土壤污染防治具有重要意义^[9-11]。

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)/绝对主成分分数(Absolute Principal Component Scores, APCS)受体模型在大气科学研究领

域已获得广泛应用, 该模型可计算出每个污染源对每个样本的浓度贡献, 对污染源进行定量解析^[12]。近些年来, PCA/APCS 模型逐渐应用在土壤污染研究领域, 瞿明凯等^[13]利用 PCA/APCS 模型解析了武汉市东湖高新技术开发区土壤中的 Cd 来源; 陈丹青等^[14]基于 PCA/APCS 模型对广州市土壤重金属来源及贡献率进行研究, 发现该市土壤重金属来源主要为自然源、交通源和工业源; 袁宏等^[15]基于 PCA/APCS 模型分析了崇州市典型农田土壤重金属污染风险与来源, 认为交通源对 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 具有较大贡献, 农业源对 As、Cr、Cu、Ni、Pb 具有较大贡献; 王锐等^[16]运用 PCA/APCS 模型对重庆市酉阳县西南部农田土壤重金属来源进行解析, 发现该区土壤中 As、Cd、Cr 及 Ni 的来源主要受

* 收稿日期: 2021-12-10 修订日期: 2022-05-16 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“熊耳山—伏牛山矿集区生态修复支撑调查(编号: DD20208079)”项目资助。

第一作者简介: 程贤达, 1992 年生, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事矿山地质环境调查与研究。Email: xiandacugb@163.com。

到地质背景控制, Hg、Pb 及 Zn 主要受矿业活动控制, Cu 同时受到地质背景和矿业活动的双重影响。以上研究表明, PCA/APCS 模型能够有效解决土壤重金属污染来源及贡献率等问题, 是一种能够对土壤重金属来源进行定量解析和准确判定的方法。

潭头盆地位于豫西成矿带东部熊耳山—伏牛山矿集区中部, 周边矿山分布密集, 以金矿为主的大小矿山达 14 座。盆地内土地肥沃, 是当地居民重要的粮食产区。为了查明该盆地金矿区农田土壤重金属污染特征及污染来源, 本文基于野外调查和室内分析, 通过聚类分析和 PCA/APCS 受体模型对该区农田土壤重金属污染现状和来源进行定量分析, 为区域土壤重金属污染防控提供科学依据, 对促进地区高品质农业发展具有重要意义。

1 研究区概况

潭头盆地位于河南西部栾川县—嵩县一带, 熊耳山—伏牛山中部地区, 近 EW 向展布, 从西往东分布潭头镇、旧县镇、大章镇、德亨镇, 南北两侧为中低山, 以林地为主, 交通便利, 洛栾高速、国道、乡村道路以及矿山道路遍布全区。区内矿产以构造蚀变岩型金矿为主, 主要分布在盆地南北两侧, 为

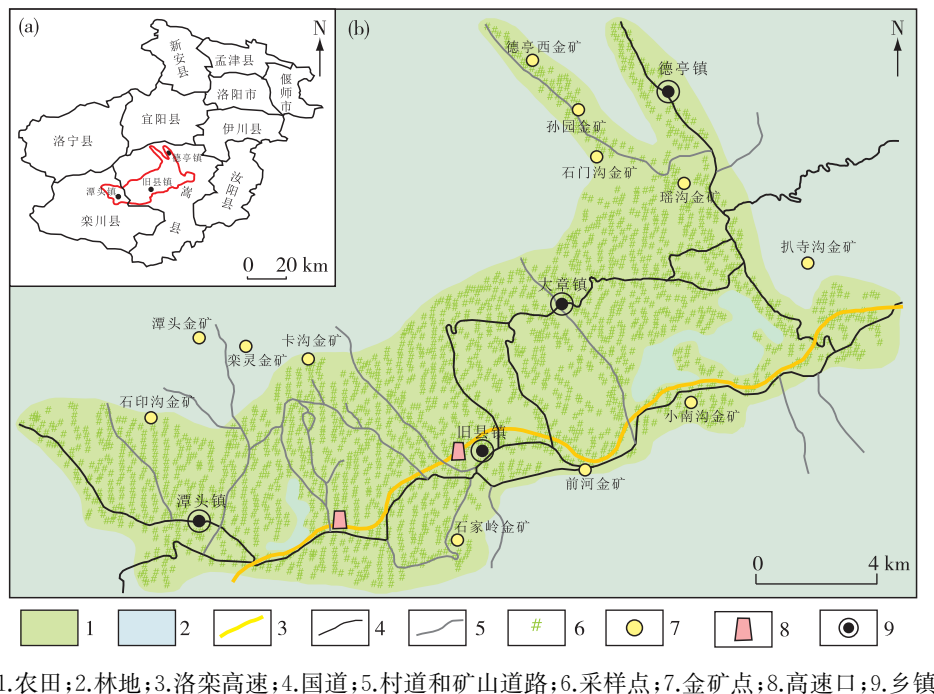
熊耳山金矿集中区。伊河水系沿盆地南侧自西向东延伸, 盆地内农田以旱地为主, 主要种植玉米、小麦、西瓜, 为当地主要粮食产地。

研究区大地构造位置处于华北板块南缘与秦岭逆冲推覆带北侧的交界地带, 属于豫西地区新生代拉张作用形成的断陷红层盆地^[17-18], 充填于盆地中的新生代地层为一套河湖相红色岩系, 以紫红色粉砂质泥岩等细碎屑沉积岩为主, 局部夹少量粗砂岩、砂砾岩、砾岩等粗碎屑岩^[17,19]。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集与分析

样品采集参照《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》^[20], 网格化采集农田表层土壤样品, 采样密度为 9 个/km², 根据土壤类型和周边矿山分布适当调整采样密度, 并确保每组分析单元 1 km² 范围内至少有 4 个样品。在采样地块采用“X”形或“棋盘”形布设子样点, 使用竹铲、竹片直接采取样品, 采样深度为 0~20 cm, 由 4~6 个子样等量混合组成 1 个样品, 共采集样品 1 880 件(图 1)。野外采用 GPS 定位, 填写“采样记录表”, 详细记录采样点周围污染源种类及分布情况。



1.农田;2.林地;3.洛栾高速;4.国道;5.村道和矿山道路;6.采样点;7.金矿点;8.高速口;9.乡镇

图1 研究区区域位置(a)及采样位置(b)图

Fig. 1 The location (a) and sampling sites (b) of the study area

土壤样品在室温下自然风干,用木棍碾碎后通过 2 mm 孔径筛,称重混匀后送实验室分析。样品测试在中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室完成,Cr、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 分析采用“盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸”四酸法进行消解,Hg、As 分析用王水进行消解,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,X-Series)测定 Cd、Pb、Cr 和 Ni 含量,利用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES,ICAP6300)测定 Cu 和 Zn 含量,利用原子荧光分光光度计(AFS,230E)测定 Hg 和 As,采用国家土壤标准物质(GSS-13)进行质量控制,Hg、As、Cr、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 的回收率均控制在 95%~105%,分析过程中采用的试剂均为优纯级。

2.2 研究方法

采用 SPSS 22.0 对土壤重金属含量进行基本统计分析、聚类分析及主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型分析,利用 ArcGIS 10.2 中的地统计模块进行空间分析,图件绘制由 ArcGIS 10.2 和 CorelDRAW X4 完成。

主成分分析(PCA)是对一组变量降维的统计学方法,在损失较少信息的前提下将多个指标划分为若干个成分,利用归类后的成分来分析重金属的来源^[16]。主成分分析结果只能定性给出每个源的主要贡献因子,发掘变量间的潜在关系,不能定量给出每个元素对主成分的因子贡献程度。主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型是通过传统的主成分分析(PCA)进行改进获得的用于元素来源定量分析的方法,可以给出不同来源对同一元素的贡献率,具体步骤如下。

(1)对元素数据进行标准化,计算公式为

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_i}{\sigma_i}, \quad (1)$$

式中: Z_{ij} 为标准化后的浓度值(无量纲), C_{ij} 、 $\bar{C}_i$ 和 σ_i 分别为元素*i*的实测浓度值、浓度均值和标准偏差, 10^{-6} 。

(2)对所有元素引入一个浓度为 0 的样本,计算其因子分数,公式为

$$(Z_0)_i = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i}, \quad (2)$$

式中: $(Z_0)_i$ 为无量纲, $\bar{C}_i$ 和 σ_i 分别为元素*i*的浓度均值和标准偏差, 10^{-6} 。

PAC/APCS 在主成分分析的结果上得到归一化的因子分数,每个样本的因子分数减去 0 浓度样本的因子分数得到每个重金属元素的 APCS,再用重金属浓度 C_i 对 APCS 做多元线性回归可得到相应的回归系数,该回归系数可将 APCS 转化为每个污染源对每个样本的浓度的贡献,相应公式为

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^n (APCS_p \times b_{pi}), \quad (3)$$

式中: b_{0i} 为对金属元素*i*做多元线性回归所得的常数项, b_{pi} 是源*p*对金属元素*i*的回归系数, $APCS_p$ 为调整后的因子*p*的分数, $APCS_p \times b_{pi}$ 表示源*p*对 C_i 的质量浓度贡献,所有样本的 $APCS_p \times b_{pi}$ 的平均值就表示了源平均绝对贡献量,详细介绍见文献^[13,21]。

3 结果与分析

3.1 土壤中重金属描述性统计

潭头盆地土壤 pH 值为 8~9,为碱性土壤。通过对研究区土壤样品的重金属进行分析统计(表 1),参照《GB15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[22]中的 pH 值和农用地土壤污染风险筛选值,计算重金属超标率。盆地农田土壤中 Hg、As、Cr、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 的平均含量分别为 0.12×10^{-6} 、 12.29×10^{-6} 、 72.16×10^{-6} 、 31.15×10^{-6} 、 33.34×10^{-6} 、 83.94×10^{-6} 、 125.09×10^{-6} 、 0.40×10^{-6} ,均低于农用地土壤污染风险筛选值,表明土壤污染风险较低;但部分样品 Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cd 含量超过农用地土壤污染风险筛选值,其中 Pb、Zn 和 Cd 超标率分别为 10.11%、2.66%、13.19%,呈区域性污染;其他重金属超标率均<1%,主要呈孤立点状污染,Ni 所有样品均未超标。所有重金属平均含量均高于河南省土壤背景值^[23],可能与金矿集区的地质高背景有关。从变异系数看,Hg、Cd 和 Pb 变异系数分别为 2.63、1.28 和 1.15,达到强变异水平(>1),表明潭头盆地农田土壤中 Hg、Cd、Pb 分布不均匀^[24],可能受人类活动干扰比较强烈。

表 1 潭头盆地金矿区农田土壤重金属含量特征统计

Table 1 Contents of heavy metals in farmland soils of the gold mining area in Tantou Basin

元素	重金属元素含量/ 10^{-6}							
	Hg	As	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	Cd
最大值	5.00	136	472	58.2	342	1 000	591	7.66
最小值	0.005	1.00	19.0	3.00	1.50	5.00	15.0	0.080
平均值	0.12	12.29	72.16	31.15	33.34	83.94	125.09	0.40
标准偏差	0.31	6.73	17.90	7.53	17.41	96.76	60.26	0.55
变异系数	2.63	0.55	0.25	0.24	0.52	1.15	0.48	1.38
农用地土壤污染风险筛选值 ^[22]	3.4	25	250	190	100	170	300	0.6
河南省土壤背景值 ^[23]	0.025	9.8	63.2	27.4	20	22.3	62.5	0.065
超标样品数量/件	6	15	2	0	18	190	50	248
样品超标率/%	0.32	0.80	0.11	0.00	0.96	10.11	2.66	13.19

测试单位:中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室。

3.2 聚类分析

聚类分析代表各重金属元素之间的密切程度,其值越小,反映元素之间关系越密切^[25-26]。潭头盆地土壤重金属含量聚类分析结果(图 2)显示。当组间距离为 15 时,农田土壤重金属可分为四组:Cu、Zn、Cd、Pb 为一组,Hg 单独为一组,As 和 Ni 为一组,Cr 单独为一组。

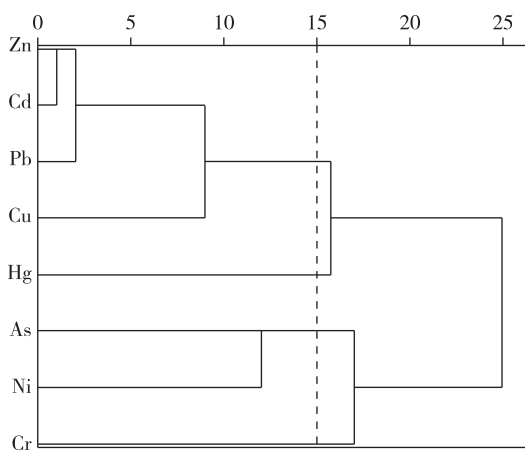


图 2 潭头盆地土壤样品重金属元素聚类分析树状图

Fig. 2 Cluster analysis tree diagram of heavy metal elements in soil samples of Tantou Basin

3.3 主成分分析

运用 SPSS 22.0 对土壤重金属数据进行主成分分析,数据 KMO 和 Bartlett 检验显示:KMO 值为 0.669,Bartlett 球形检验 P 值为 0.000,表明各重金属之间的相关性较强,可以进行主成分分析^[27]。

基于主成分分析,采用 Kaiser 标准的 varimax 旋转得到有意义的因子,根据累积贡献率(80%以上)和初始特征值(接近 1)为标准决定合适的因子个数^[28],提取出 4 个因子(表 2)。4 个因子特征根为 0.942~3.116,累积方差贡献率为 83.326%(>80%),各元素变量共同度均>0.6,说明提取因子信息丢失较少,对原始变量解释程度较高,因子提取效果好^[14,29]。第一主成分 PC1 与 Cu、Pb、Zn、Cd 相关,占总体方差的 38.946%;第二主成分 PC2 与 Cr 和 Ni 相关,占总体方差的 19.361%;第三主成分 PC3 与 As 相关,占总体方差的 12.244%;第四主成分 PC4 与 Hg 相关,占总体方差的 11.775%。通过综合分析可判断潭头盆地农田土壤重金属污染源主要有 4 个,分别对应以上 4 个因子,与聚类分析结果比较一致。

3.4 空间分布特征

运用 ArcGIS 10.2 软件中的地统计模块对土壤重金属含量进行克里金插值,分析其空间分布特征(图 3)。研究区 Cu、Pb、Zn、Cd 空间分布特征比较一致,在潭头镇与旧县镇之间呈现含量高值区,该区域为盆地内平坦开阔农田集中分布区,农业活动密集,机械化程度较高,同时沿洛栾高速和国道等主干道路元素含量较高,具有线状分布特征,特别是 Pb 在德亨镇呈现含量相对较高分布特征,整体呈现出与人类活动的高度正相关性。Cr 和 Ni 在全区分布较均匀,含量变化范围较小,在潭头镇北侧、旧县镇西北侧、以及盆地东南侧等农业活动较弱的坡地含量相对较高,与 Cu、Pb、Zn、Cd 分布呈现相

反态势,表现出与人类活动的负相关性。As 在前河金矿、小南沟金矿、石家岭金矿等矿业活动周边区域含量较高,反映其受矿业活动影响显著。Hg 含

量在潭头镇、旧县镇、大章镇、德亨镇、孙园金矿、德亨西金矿以及石家岭金矿区域较高,表现出受矿业活动和人类活动的双重影响。

表 2 土壤重金属元素的成分矩阵和旋转成分矩阵

Table 2 The component matrix and rotated component matrix for the concentrations of heavy metals in soils

元素	成分矩阵				旋转成分矩阵				变量共同度
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	
Hg	0.426	0.175	0.632	-0.561	0.135	-0.070	0.049	0.949	0.927
As	0.003	0.740	-0.448	-0.390	0.103	0.098	0.938	0.014	0.900
Cr	-0.153	0.621	0.231	0.573	0.016	0.885	0.048	-0.079	0.792
Ni	-0.489	0.717	0.117	-0.015	-0.402	0.596	0.394	0.075	0.766
Cu	0.643	0.165	0.395	0.246	0.587	0.305	-0.260	0.389	0.657
Pb	0.899	0.088	0.015	-0.089	0.825	-0.132	0.021	0.354	0.824
Zn	0.884	0.033	-0.171	0.279	0.937	-0.005	-0.107	-0.004	0.889
Cd	0.818	0.189	-0.356	-0.004	0.869	-0.131	0.242	0.021	0.832
特征值	3.116	1.549	0.980	0.942	2.849	1.280	1.267	1.190	
方差贡献率/%	38.946	19.361	12.244	11.775	35.611	15.998	15.838	14.879	
累积方差贡献率/%	38.946	58.307	70.551	82.326	35.611	51.609	67.447	82.326	

3.5 源贡献率分析

在主成分分析的基础上根据 PCA/APCS 受体模型,以元素含量为因变量,绝对主成分分数为自变量进行回归分析,对各重金属污染来源进行定量分析,结果见表 3。 R^2 用来衡量解析模型对观

测值的拟合度, R^2 越接近 1,模型拟合程度越好^[30]。本研究中 $R^2 > 0.6$,说明模型解释准确性较好。平均贡献率结果显示,贡献率存在负值,可能与污染源的排入对其他非影响指标的稀释有关^[30-31]。

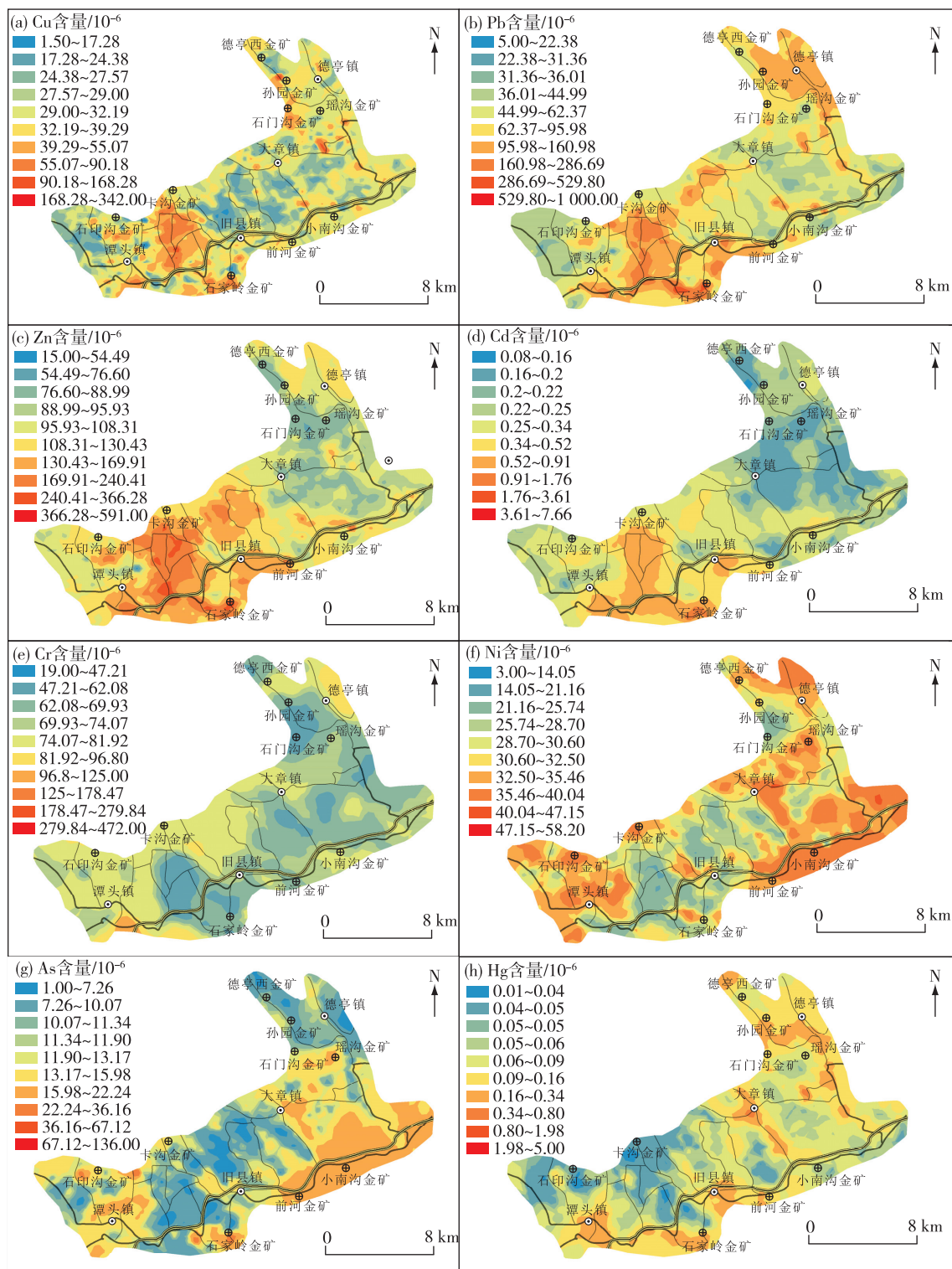
表 3 土壤各重金属源贡献率

Table 3 Source contribution ratios of heavy metals in soils

元素	常量	非标准化系数				平均贡献率/%				R^2
		APCS _{PC1}	APCS _{PC2}	APCS _{PC3}	APCS _{PC4}	PC1	PC2	PC3	PC4	
Hg	-0.006	0.046	-0.003	0.020	0.272	15.96	-1.04	6.94	94.38	0.962
As	-1.761	0.634	0.613	5.927	0.095	9.97	9.64	93.16	1.49	0.784
Cr	9.371	0.285	15.747	0.858	-1.405	1.60	88.49	4.82	-7.89	0.784
Ni	7.350	-3.002	4.455	3.694	0.561	-40.15	59.58	39.40	7.50	0.759
Cu	-0.685	10.155	5.271	-4.503	6.732	58.82	30.53	-26.08	38.99	0.649
Pb	-5.886	76.203	-12.192	1.916	32.706	83.08	-13.29	2.09	35.66	0.821
Zn	22.451	55.653	-0.296	-6.354	-0.252	93.98	-0.50	-10.73	-0.43	0.868
Cd	-0.001	0.511	-0.077	0.142	0.012	87.22	-13.14	24.24	2.05	0.832

从源平均贡献率来看,Hg 污染主要来源于 PC4,贡献率为 94.38%;As 污染主要来源于 PC3,贡献率为 93.16%;Cr 污染主要来源于 PC2,贡献率

为 88.49%;Ni 污染主要来源于 PC2,贡献率为 59.58%;Cu、Pb、Zn 和 Cd 污染主要来源于 PC1,贡献率分别为 58.82%、83.08%、93.98%和 87.22%。



(a).Cu 空间分布图;(b).Pb 空间分布图;(c).Zn 空间分布图;(d).Cd 空间分布图;(e).Cr 空间分布图;(f).Ni 空间分布图;(g).As 空间分布图;(h).Hg 空间分布图

图 3 潭头盆地农田土壤重金属元素含量空间分布图

Fig. 3 The spatial distributions of heavy metal contents of farmland soils in Tantou Basin

4 讨论

根据主成分分析结果,PC1 主要与 Cu、Pb、Zn、Cd 相关。研究表明,Pb 通常被认为来源于汽车尾气,含 Pb 汽油在燃烧过后,Pb 等重金属经过大气沉降进入土壤^[4, 32],Cu、Zn、Cd 也被作为交通源重金属,主要源自汽车尾气排放、橡胶轮胎磨损、机动车机件磨损、汽车散热器、沥青或水泥路面磨损等^[33-34]。研究区 Cu、Pb、Zn、Cd 在潭头镇东侧平坦农田区含量较高,该区域农业机械化水平较高,贯穿农田的矿山道路密集,此外沿国道和高速公路两侧区域呈现高值区域,具有带状分布特征(图 3),与交通运输呈现出明显的相关性。潭头镇九龙山高速口和旧县镇高速口周边农田土壤 Cu、Pb、Zn、Cd 超标尤为严重,因此推测 PC1 为交通源。

PC2 与 Cr 和 Ni 相关。研究^[35]表明,Cr 和 Ni 主要受成土母质影响,受人类活动影响较小。研究区 Cr 和 Ni 变异系数较小,在全区分布均匀,含量均超过河南省土壤元素背景值^[23],但未超过农用地土壤污染风险筛选值,说明其受人类活动影响较小,其空间分布与 Cu、Pb、Zn、Cd 的空间分布特征相反。在 Cu、Pb、Zn、Cd 含量高值区,Cr 和 Ni 含量相对较低,反映 Cr、Ni 含量主要受成土母质控制。在人类活动影响较小的坡地林地等区域,Cr 和 Ni 受矿区高背景值的影响整体含量相对较高且均匀;在人类活动影响较大的平坦农田区域,表层土壤由于耕作频繁,易于通过风化淋滤作用导致 Cr 和 Ni 迁移流失,从而含量降低呈现为低值区域,因此推断 PC2 为自然源。

PC3 主要与 As 相关。研究区 As 含量较高的区域均位于金矿开采区周边(图 3),并沿河道水系分布于金矿山下游,上游及周边存在大量金矿尾矿库和废矿渣堆。潭头盆地周边金矿床主要为构造蚀变岩型金矿,矿石矿物以黄铁矿、黄铜矿等为主,金矿开采过程中对矿石研磨遴选造成含 As 细小粉末随水系迁移到周边土壤。此外,尾矿中的 As 在堆放过程中也会发生迁移^[36],形成 As 元素的累积超标,因此推测 PC3 为金矿开采与尾矿堆存相关的矿业源。

PC4 与 Hg 相关。研究区 Hg 只有 6 个点位超标,均位于矿山或城镇周边,Hg 含量最大值为农用地土壤污染风险值的 1.4 倍,表现为点状污染,变异

系数为 2.42,表明 Hg 元素受人类活动影响较大。Hg 元素在空间分布上与矿山和集镇具有一定的相关性,在矿山和城镇周边土壤中 Hg 含量相对较高。潭头盆地金矿开采历史悠久,早期民间私自开采选冶现象较普遍,不规范选冶小作坊多设置在方便取材或隐蔽的矿山周边区域或家庭民房,选冶主要采取 Hg 溶解法,在冶炼过程中含 Hg 废水的外排造成土壤中 Hg 超标^[37]。此外,由于 Hg 的沸点较低,具有高挥发性,这也导致在冶炼过程中 Hg 更容易通过挥发、干湿沉降发生迁移^[38]。因此推断 PC4 为小作坊汞溶解法炼金相关的矿业源。

5 结论

(1)潭头盆地金矿区农田土壤重金属平均含量均低于农用地土壤污染风险筛选值,区域整体污染风险较低;局部地区 Pb、Zn、Cd 超标明显,超标率分别为 10.11%、2.66%、13.19%。

(2)利用主成分分析对潭头盆地农用地土壤重金属解析出 4 个主成分,总解释方差为 82.326%,结合聚类分析和重金属空间分布特征,判断研究区农田土壤重金属污染来源主要有 4 个:Cu、Pb、Zn 和 Cd 污染来源于交通源(PC1);Cr 和 Ni 污染来源于自然源(PC2);As 污染来源于与金矿开采和尾矿堆存相关的矿业源(PC3);Hg 污染来源于与小作坊汞溶解炼金相关的矿业源(PC4)。

(3)采用 PCA/APCS 受体模型分析潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染源贡献率,发现交通源对 Cu、Pb、Zn、Cd 贡献率分别为 58.82%、83.08%、93.98%、87.22%;自然源对 Cr 和 Ni 的贡献率分别为 88.49%和 59.58%;金矿开采和尾矿堆存相关矿业源对 As 的贡献率为 93.16%;小作坊汞溶炼金相关的矿业源对 Hg 的贡献率为 94.38%。

致谢:评审专家和编委对稿件提出宝贵意见,陈伟副教授在稿件撰写过程中给予了指导,在此一并表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 周永章,宋书巧,杨志军,等.河流沿岸土壤对上游矿山及矿业开发的环境地球化学响应:以广西刁江流域为例[J].地质通报,2005,24(10/11):945-951.
ZHOU Y Z, SONG S Q, YANG Z J, et al. Environ-

- ment geochemical response of soils along banks of a river to mines and mining activities in the upper reaches of the river-A case study of the Diaojiang River drainage system, Guangxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (10/11): 945-951.
- [2] 王庆仁, 刘秀梅, 崔岩山, 等. 我国几个工矿与污灌区土壤重金属污染状况及原因探讨[J]. 环境科学学报, 2002, 22 (3): 354-358.
- WANG Q R, LIU X M, CUI Y S, et al. Soil contamination and sources of heavy metals at individual sites of industry and mining associate with wastewater irrigation in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22 (3): 354-358.
- [3] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 矿业活动区农田土壤重金属累积风险的评判方法: 以小秦岭金矿区为例[J]. 地质通报, 2014, 33 (8): 1097-1105.
- XU Y N, ZHANG J H, KE H L, et al. An assessment method for heavy metal cumulative risk on farmland soil in the mining area: A case study of the Xiaqingling gold mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (8): 1097-1105.
- [4] 赖斯颖, 曹容浩, 谭桂丽. 福建省龙海市南部表层土壤重金属元素累积特征研究[J]. 华东地质, 2021, 42 (1): 29-36.
- LAI S Y, CAO R H, TAN G L, et al. Study on accumulation characteristics of heavy metal elements in topsoil of southern Longhai City, Fujian Province[J]. East China Geology, 2021, 42 (1): 29-36.
- [5] BOCCA B, ALIMONTI A, PETRUCCI F, et al. Quantification of trace elements by Sector Field Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry in Urine, Serum, Blood and Cerebrospinal Fluid of Patients with Parkinson's Disease [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59 (4): 559-566.
- [6] 张开军, 魏迎春, 徐友宁. 小秦岭某金矿区土壤-农作物重金属元素富集规律[J]. 地质通报, 2015, 34 (11): 2018-2023.
- ZHANG K J, WEI Y C, XU Y N. The discussion on heavy metal accumulation regularity in the soil and crop of the Xiaoqingling gold mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2018-2023.
- [7] WU Y G, XU Y N, ZHANG J H, et al. Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaqingling gold mining region, Shaanxi, China [J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 2010, 20 (4): 688-694.
- [8] 郗海满, 文帮勇, 王继强, 等. 江西赣州梓山地区富硒土壤重金属元素安全性评价[J]. 华东地质, 2017, 38 (3): 234-240.
- QIE H M, WEN B Y, WANG J Q, et al. Safety evaluation of heavy metal contents in selenium-rich soils in Zishan area, Ganzhou, Jiangxi province[J]. East China Geology, 2017, 38(3): 234-240.
- [9] 宋泽峰, 栾文楼, 崔邢涛, 等. 冀东平原土壤重金属元素的来源分析[J]. 中国地质, 2010, 37 (5): 1530-1537.
- SONG Z F, LUAN W L, CUI X T, et al. An analysis of the sources of heavy metals in soils of eastern Hebei plain[J]. Geology in China, 2010, 37 (5): 1530-1537.
- [10] LIAO G L, LIAO D X, LI Q M. Heavy metals contamination characteristics in soil of different mining activity zones [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: 207-211.
- [11] HE B, YUN Z J, SHI J B, et al. Research Progress of Heavy Metal Pollution in China: Sources, Analytical Methods, Status and Toxicity [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (2): 134-140.
- [12] SONG Y, XIE S, ZHANG Y, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX [J]. Science of the Total Environment, 2006, 372: 278-286.
- [13] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, 33 (5): 854-860.
- QU M K, LI W D, ZHANG C R, et al. Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics [J]. China Environmental Science, 2013, 33 (5): 854-860.
- [14] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. 生态环境学报, 2016, 25 (6): 1014-1022.
- CHEN D Q, XIE Z Y, ZHANG Y J, et al. Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Guangzhou Based on the PCA/APCS Model and Geostatistics [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25 (6): 1014-1022.
- [15] 袁宏, 钟红梅, 赵利, 等. 基于 PCA/APCS 受体模型的崇州市典型农田土壤重金属污染源解析[J]. 四川环境, 2019, 38 (6): 35-43.
- YUAN H, ZHONG H M, ZHAO L, et al. Analysis of Heavy Metal Pollution Sources of Typical Farmland Soils in Chongzhou City Based on PCA/APCS Receptor Model [J]. Sichuan Environment, 2019, 38

- (6): 35-43.
- [16] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4749-4756.
- WANG R, DENG H, YAN M S, et al. Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4749-4756.
- [17] 李淑娟. 豫西潭头、汝阳盆地中生代红层沉积环境研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- LI S J. The study of depositional environment of Mesozoic and Cenozoic red beds in Tantou-Ruyang Basin, western Henan, China[D]. Beijing: University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [18] 江小均, 柳永清, 姬书安, 等. 豫西栾川-潭头盆地含脊椎动物化石地层序列和K/T界线初步研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 41(5): 738-744.
- JIANG X J, LIU Y Q, JI S A, et al. Dinosaur-bearing strata and K/T boundary in the Luanchuan-Tantou Basin of western Henan Province, China [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2014, 41(5): 738-744.
- [19] 朱淑慧. 豫西潭头盆地上白垩统一古新统沉积特征及物源分析[D]. 河南: 河南理工大学, 2015.
- ZHU S H. Analysis on Sedimentary Characteristics and Provenances of Upper Cretaceous-Paleocene of Tantou Basin in West Henan[D]. Henan: Henan Polytechnic University, 2015.
- [20] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 地质出版社, 2016: 1-51.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1-51.
- [21] THURSTON G D, SPENGLER J D. A qualitative assessment of source contribution to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. Atmospheric Environment, 1985, 18: 1347-1355.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. GB15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 1-4.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil environment quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018: 1-4.
- [23] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. 河南农业, 1998, 10: 28.
- SHAO F S, ZHOU H Y. Soil environmental background values of main elements in Henan Province [J]. Henan Agriculture, 1998, 10: 28.
- [24] 王运, 邹勇军, 王鹤, 等. 江西信丰油山地区土壤硒及重金属元素地球化学特征[J]. 华东地质, 2019, 40(2): 152-160.
- WANG Y, ZOU Y J, WANG H, et al. Geochemical characteristics of Se and heavy metal elements in the soil of Youshan, Xinfeng County, Jiangxi Province [J]. East China Geology, 2019, 40(2): 152-160.
- [25] 刘青枰, 邓时强, 赵元艺, 等. 西藏孜尔勤矿床区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 481-490.
- LIU Q P, DENG S Q, ZHAO Y Y, et al. Sources Analysis and Element Geochemical Characteristics of Regional Soil Heavy Metals from the Ga'erqin Ore Deposit, Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(4): 481-490.
- [26] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLIN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [27] 时立文. 统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 150-256.
- SHI L W. Statistical Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University publishing house, 2012: 150-256.
- [28] 谭赛章, 杨涛, 可愚, 等. 海洋表层沉积物中金属镉的来源解析[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 683-689.
- TAN S Z, YANG T, KE Y, et al. Source apportionment of metal Cd in the surfacemarine sediments [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 683-689.
- [29] 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 等. 南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2436-2442.
- ZHANG Y F, MA Y, QI L, et al. Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM_{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter [J]. Environmental Science, 2016, 37(7): 2436-2442.
- [30] GUO H, WANG T, LOUIE P K K. Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model [J]. Environmental Pollution, 2004, 129(3): 489-498.
- [31] SHELLY L M, MELISSA J A, EILEEN P D, et al.

- Source apportionment of exposures to volatile organic compounds. I. Evaluation of Receptor Models using simulated exposure data [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36 (32): 3629-2641.
- [32] 王学松, 秦勇. 徐州市城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35 (1): 84-88.
- WANG X S, QIN Y. Accumulation and identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35 (1): 84-88.
- [33] 全致琦, 谷蕾, 段海静, 等. 基于 Kriging 插值的路旁土壤重金属含量空间分布——以 310 国道郑州—开封段为例 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32 (12): 3030-3038.
- TONG Z Q, GU L, DUAN H J, et al. Spatial distribution of heavy metals in roadside soils based on Kriging interpolation: A case study of Zhengzhou-Kaifeng section along the 310th national highway[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (12): 3030-3038.
- [34] LESTAND, GRGMANH, ZUPANM, et al. Relationship of soil properties to fractionation of Pb and Zn in soil and their uptake into *Plantago lanceolata* [J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2003, 12 (4): 507-522.
- [35] ALLOWAY B J. Heavy metals in soils [M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [36] 曹见飞, 段欣荣, 吴泉源, 等. 金矿区周边农田土壤重金属源解析研究——以焦家金矿为例[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(5): 546-552.
- CAO J F, DUAN X R, WU Q Y, et al. Source apportionment of soil heavy metals in surrounding farmland of gold mining: a case study of Jiaojia gold mine[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43 (5): 546-552.
- [37] 刘恢, 刘志楼, 杨姝, 等. 矿区生态环境修复丛书-有色冶金汞污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-241.
- LIU H, LIU Z L, YANG S, et al. Control of mercury pollution in non-ferrous metallurgy [M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-241.
- [38] WANG S X, ZHANG L, ZHAO B, et al. Mitigation potential of mercury emissions from coal-fired power plants in China[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26 (8): 4635-4642.

Pollution and source apportionment of heavy metals in the farmland soils of the gold mining area in Tantou Basin, western Henan metallogenic belt

CHENG Xianda¹, SUN Jianwei¹, JIA Xu^{1,2}, SHANG Liannan¹, ZHANG Long^{1,3}, SUN Yake¹

(1. *Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an, 710100, Shaanxi, China*;

2. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China*;

3. *School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054, Shaanxi, China*)

Abstract: Heavy metals contents of soil samples from the gold mining areas in Tantou Basin of the western Henan metallogenic belt were analyzed to determine the pollution characteristics and sources. The authors used the Cluster analysis and Principal Component Analysis/Absolute Principal Component Scores (PCA/APCS) receptor model to identify the pollution source and its contribution rate. The results showed that the average contents of Hg, As, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, and Cd of the farmland soil in the study area are lower than risk control standard for soil contamination of agricultural land, indicating lower risk of soil pollution in the gold mining area of the Tantou Basin. However, some samples showed excess contents of Hg, As, Cu, Pb, Zn and Cd elements with regional pollution in Pb, Zn, and Cd and point pollution in other heavy metal elements. The variable coefficients of Hg, Cd, and Pb are at a strong variation level, indicating that they were strongly influenced by anthropogenic activities. Combining the results of cluster a-

nalysis, principal component analysis and the spatial distribution characteristics, the eight heavy metals mainly come from four types of pollution sources: Cu, Pb, Zn, and Cd pollutions origin from traffic source (PC1); Cr and Ni pollutions come from the natural source (PC2); both As and Hg pollutions are derived from mining source but the former is related to gold mining and tailings stockpiling (PC3) and the latter is related to small workshop mercury dissolution smelting (PC4).

Key words: gold mining area; soil; heavy metal pollution; Tantou Basin; Western Henan metallogenic belt

《华东地质》作者文稿清样校对要求

期刊出版前,将排版清样交由作者自校,是对读者、作者负责并保证期刊质量的重要环节。本刊编辑部会在稿件编排完成后,通过邮箱将排版好的清样发送给作者,并要求在限定时间内完成。此过程中,请作者严格按照要求通读全文,逐字逐句认真完成校对,不要采取敷衍了事、走过场的态度,导致校对不严或校对错误,从而影响了文稿的质量及期刊的后续流程。在此,本刊编辑部重申相关校对要求,请各位作者遵照执行。

1. 保证作者姓名、单位、邮编、作者简介等内容正确无误(含英文部分)。
2. 请保证图(图是最容易出错的地方,务必仔细核实图面、图例及图例说明、文字等)、表(原始数据、保留位数、在文中出现的数据范围、表名等)、参考文献(必须与文中析出的文献对号入座,作者名、题名、刊名、年卷期、页码及标点符号等必须无误)、英文(含图名、表名、摘要的英文拼写)正确无误。
3. 保证正文中的中外文字、数据、计量单位、缩略语、标点符号正确无误,请务必逐句通读全文,逐句检查。
4. 注意校样稿中编辑提出的问题(含缺项及问号部分),应按编辑要求及规定格式补充完整或修正,必要时与本文责任编辑电话沟通。
5. 须修改内容请在 PDF 上做标注;如不擅长在 PDF 上做标注,可打印后在纸稿空白处手写补充,字迹要清楚,改后拍照发回;如修改或补充内容过多,请联系本文责任编辑并发送 word 文档至本刊邮箱。原则上,修改内容不得超过原有篇幅。
6. 确认校样稿无误并补充或修正完缺项内容后,请在首页文题上方空白处签名,并在 5 日内将校样稿发送扫描文件(PDF 或 JPG 格式)至邮箱: hddzbjb@163.com。

注意:自校的清样只能进行个别文字、数据等的纠错处理,不要对清样进行再修饰或增、删超过一行的文字。

请严格执行以上规定,如因作者自校环节未纠正或未予及时解决而发生的内容错误及刊期延误由作者自行负责。

本刊编辑部