

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.001

皖南地区工业聚集地土壤重金属生态风险和 健康风险评价

桂衍瑾¹, 岳正波¹, 刘亚风², 张威振³, 王晓辉⁴

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安庆师范大学 资源环境学院, 安徽 安庆 246133; 3. 成都理工大学 生态环境学院, 四川 成都 610059; 4. 安徽省生态环境科学研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要:为探究皖南地区工业聚集区土壤重金属生态及健康风险,文章选取典型代表地青阳县,通过实地调研获取其矿业、工业、居民、产业园4类用地重金属质量比数据,分析表层土壤重金属Cu、Ni、As、Cd、Hg、Pb的空间分布特征、污染程度、重金属溯源、生态风险和健康风险。结果表明,研究区域表层土壤重金属质量比的空间分布差异显著,总体呈现北高南低、西高东低的趋势。研究区北部存在较强的潜在生态风险,其中工业区和居民区的潜在风险指数相对较高。在健康方面的影响上,经口摄入是主要风险途径,Pb和As的影响远高于其他重金属,且儿童大于成人。重金属Ni主要来自于矿业行业和产业园区,重金属Pb、Hg主要来自于工业区和居民区,重金属Cd主要来自于工业区,重金属Cu和As的来源相对平均。

关键词:重金属;溯源;生态风险;富集;健康风险

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)10-1297-08

Evaluation of ecological and health risks of soil heavy metals in industrial agglomeration areas in southern Anhui

GUI Yanjin¹, YUE Zhengbo¹, LIU Yafeng², ZHANG Weizhen³, WANG Xiaohui⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 3. School of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Anhui Academy of Eco-Environmental Sciences, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to explore the ecological and health risks of heavy metals in the soil of industrial agglomeration areas in southern Anhui, this paper selected Qingyang County, a typical representative area, to obtain the heavy metal content of four types of land for mining, industry, residence and industrial parks through field investigation, and analyzed the spatial distribution characteristics, pollution degree, traceability, ecological risks and health risks of heavy metals Cu, Ni, As, Cd, Hg and Pb in the surface soil. The results show that the spatial distribution of heavy metal content in the surface soil in the study area is significantly different, and presents a trend of high in the north and low in the south, high in the west and low in the east. There are strong potential ecological risks in the northern part of the study area, and the potential risk index of industrial and residential areas is relatively high. In terms of health effects, oral ingestion is the main risk pathway, the effects of Pb and As are much higher than those of other heavy metals, and the impact on children is higher than on adults. Heavy metal Ni mainly comes from the mining industry and industrial parks, heavy metals Pb

收稿日期:2023-11-03;修回日期:2023-12-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1807500)

作者简介:桂衍瑾(1998—),男,安徽宁国人,合肥工业大学硕士生;

岳正波(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

王晓辉(1972—),男,安徽合肥人,安徽省生态环境科学研究院正高级工程师,硕士生导师,通信作者, E-mail: wxh0712@163.com.

and Hg mainly come from industrial and residential areas, heavy metal Cd mainly comes from industrial areas, and the sources of heavy metals Cu and As are relatively average.

Key words: heavy metal; traceability; ecological risk; enrichment; health risk

随着工业化和城市化的加速发展,重金属污染问题成为国内外环境学领域研究的重点^[1]。我国土壤重金属问题主要集中在工业排放污染、污水处理厂排放以及污水处理厂排放污泥等方面,有研究^[1]指出,我国耕地土壤重金属点位超标率为 19.4%,其中 Cr、Cd、Ba、Ni、Cu 等重金属都有不同程度的超标^[2-4]。重金属进入土壤之后,会在土壤和地下水中长期存在难以根除,且会存在不同程度累积,进而影响当地植被和农产品的生长发育^[5-6]。通过食物链的传递,重金属离子会在人体不同的器官和组织中积累,对健康构成潜在风险^[7]。

不同用地类型所产生的重金属污染差异显著,已经有很多研究对不同类型土壤重金属进行评价。文献[8]研究发现土壤中 Cr 和 Hg 的主要来源为金属加工和危废治理业,地下水中 As 主要来源于化工和危废治理行业,重金属 Cr、Pb 和 Ni 存在明显的水土复合污染现象;文献[9]研究发现土壤中重金属 Cd 在工业区表现出极高的潜在生态危害,Pb 在居民区和交通繁忙区为中等潜在生态危害,Cd、Zn 的富集较严重,Pb、Ni 次之。目前,对土壤重金属进行评价的研究主要关注于大型城市和资源耗竭型城市,其评价的对象种类也相对单一,对多种行业复杂因子的土壤污染评价较少^[10-13]。

皖南地区工业主要集中在轻工业和传统制造业领域,如纺织、服装、食品加工等,该地区拥有丰富的水资源和煤炭资源,因此在化工、能源等行业也有一定的发展。近年来,相关政府加大了对皖南地区工业的扶持力度,推动地方产业升级和转型,促进了工业的发展和壮大;青阳县位于皖南地区,工业基础相对薄弱,随着地方产业发展和周边城市带动的影响,也逐步形成了一定的产业特点,其基本的发展模式和产业路线与皖南地区工业的发展相似。

青阳县地处皖南山区、水土丰润、植被茂盛,且人群居住相对分散,发生重金属污染对当地居民生活和生态环境影响较大^[14-15]。另一方面,皖南地区的青阳县存在多种产业类型,包括农业、矿产加工和机械制造等,期间通过工业废水排放、工业废弃物处理、大气沉降等途径可能释放重金属

至土壤中。但目前对于不同区域土壤的重金属质量浓度及潜在风险并不清楚。

因此本研究选取青阳县作为皖南地区工业聚集地的典型样本,对青阳县不同区域土壤进行了调查分析,并对生态风险和健康风险进行预估评价,为当地重金属污染防治和居民健康保护提供参考。同时,这些评估结果还可以为预测土壤重金属变化、地方农业生产和生态环境修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域位于安徽省南部青阳县内,结合研究区域的重点产业及规划,将所研究区域分为矿业区、工业区、居民区和产业园区,分别进行采样分析。

1.2 样品的采集和分析测定

2021 年 10 月,通过对研究区土壤历史资料和排污情况进行调查分析,结合研究区地势情况,保证在科学性和针对性原则下布点,本文拟探究工业聚集地的土壤重金属,因此以工业、矿业等企业为监测单元,在其厂界红线外 20 m 范围内的裸露土壤布设,监测点位不少于 4 个,若 20 m 范围内无裸露土壤,取样点位可向外延伸;现场用双对角线五点混合法采 0.15 m 处表层土壤,各分点经四分法取 1 kg 土样装入样品袋,去除石头、植物组织等杂物,保持采样袋清洁以密封。所有采用点位均用 GPS 定位,总共采集 49 个土壤样品,其中矿业区 19 个,工业区 13 个,居民区 7 个,产业园区 10 个。

采集回来的土壤编号后放于阴凉处加以干燥 48 h,用玛瑙碾钵将样品研细后过 1.0 mm 网筛,土壤重金属 Cu、Ni、As、Cd、Hg 和 Pb 采用微波消解法完全消解土壤。土壤样品中 Cu、Ni 用火焰原子吸收分光光度法进行分析,检出限大小分别为 1、3 mg/kg,重金属 Pb、Cd 用石墨炉原子吸收分光光度法进行分析测定,检出限大小分别为 0.10、0.01 mg/kg,As、Hg 用原子荧光法进行分析测定,检出限大小分别为 0.010、0.002 mg/kg。整个土壤样品的分析测定严格执行 CNAL/AC01:2003《检测和校准实验室认可准则》的要

求,样品的保留时间和温度均达到规定要求,分析结果中的平行样的标准偏差均在要求内,每批样品做一个实验室空白样,目标化合物质量比低于检出限。

1.3 土壤重金属评价方法及源解析

为了综合评价重金属对土壤的污染情况,分别采用潜在生态风险指数法^[16-18]、主成分分析(principal component analysis, PCA)法^[19]、美国环境保护署(U. S. Environmental Protection Agency, USEPA)的概率矩阵分解(probabilistic matrix factorization, PMF)模型^[20-23]进行风险评

估,本研究利用 USEPA 的健康风险评估模型^[24-26]来评估其对人体的健康风险;选用 Excel 2010 和 SPSS 27.00 软件对数据进行分析和处理,用 Origin 2021 和 ArcGIS 11.2 进行相关图形绘制。

2 结果与分析

2.1 空间分布特征

为直观了解研究区域土壤重金属质量比的分布特征,利用 ArcGIS 10.2 软件的反距离权重法绘制重金属质量比的空间分布如图 1 所示。

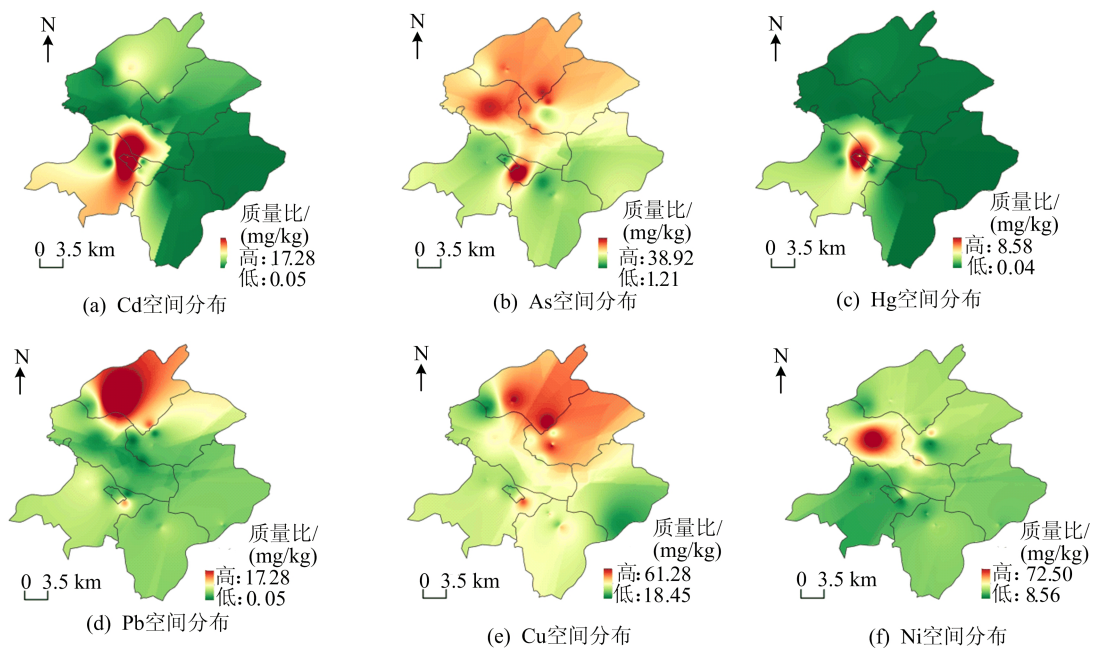


图 1 研究区土壤重金属质量比空间分布

6 种重金属在空间分布上具有一定的差异性,As、Cu 和 Pb 的金属质量比分布区域几乎一致,基本体现为北高南低的布局,Cd、Hg 的高值区分布在研究区中部偏西南,而 Cd 的低值区分布在除高值区的其他位置,Hg 的低值区分布在东南地区,Ni 的高值区分布于西北部,其余部分重金属分布较为均匀。

4 个类型区域描述性统计结果如图 2 所示,Pb 的平均质量比最高,达到 36.33 mg/kg,其余重金属质量比从大到小依次为 Cu、Ni、As、Cd、Hg,为安徽省土壤背景值的 0.90~3.00 倍;4 种功能区的 Cu、Ni 和 Pb 均值与研究区总体均值相近,而矿业区的 Cd、Hg 和居民区 Cd 是总体研究区背景值的 0.41~0.44 倍,远低于总体均值,而居民区的 Hg 高于总体均值,达到 2.10 倍。

变异系数能综合反映重金属元素的聚集程度,体现为重金属污染中人为活动的干扰作用^[27],除去矿业区的 Cu、居民区的 Cu、Pb 以及产业园区的 Cu 以外,其余功能区的 6 种重金属整体变异系数相对较高,数值均大于 0.36,属于高变异系数,说明这 4 类功能区的质量比分布不均匀,在很大程度上受人类活动的影响,具有显著干扰作用。

因此,研究区不同重金属质量比差异较大,As、Cu 和 Pb 质量比空间分布是北高南低,Hg、Cd 和 Ni 质量比空间分布西高东低,6 种重金属质量比从大到小依次为 Pb、Cu、Ni、As、Cd、Hg。Cu、Ni 和 Pb 研究区总体均值相近,矿业区的 Cd、Hg 和居民区 Cd 质量比远低于背景值,居民区 Hg 质量比远高于背景值。

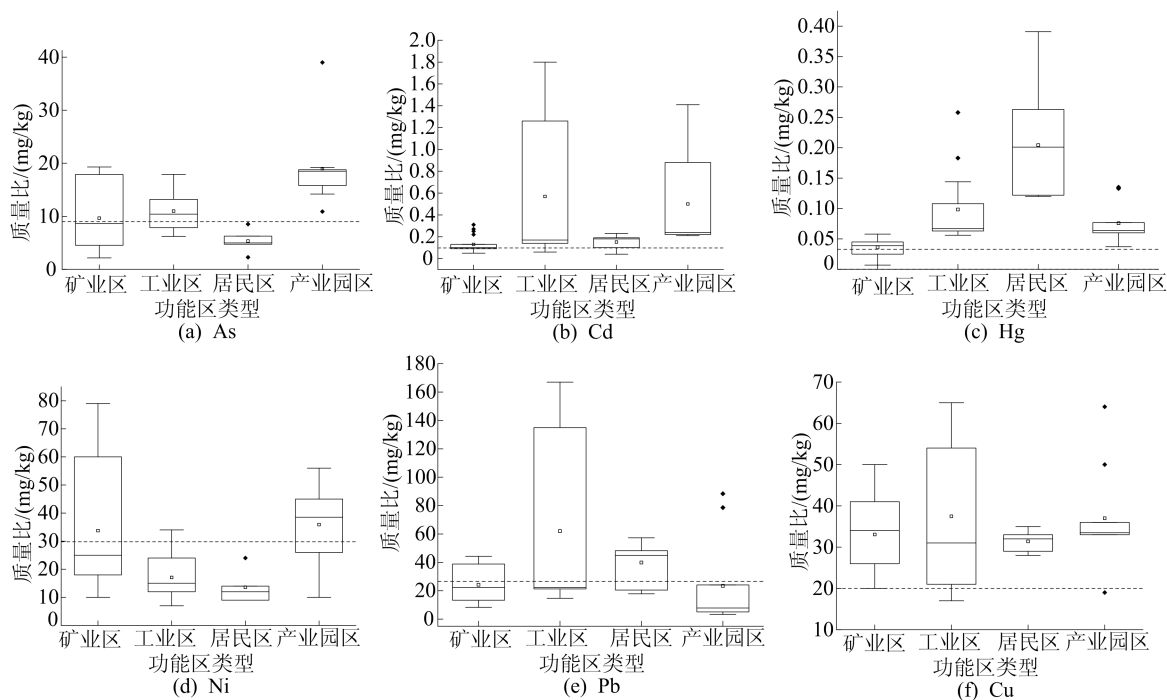


图 2 研究区土壤重金属质量比描述性统计分布

2.2 土壤重金属潜在生态风险评价

本文研究的 4 类功能区潜在风险指数分布如图 3 所示,其中金属 Pb、Hg、Ni、Cd 这 4 种金属在 4 个类型的工业区中单项潜在风险污染指数占比超过 70%。根据其风险标准可知,矿业区和产

业园区的金属 Ni、居民区金属 Pb、工业区金属 Cd 中有 90% 以上的土壤样点 E_i 大于 160, 风险程度处于较强风险等级水平,其余功能区的重金属大多处于中等和轻度风险水平,研究区可能存在点状的 Ni、Pb 和 Cd 的很强的污染点位。

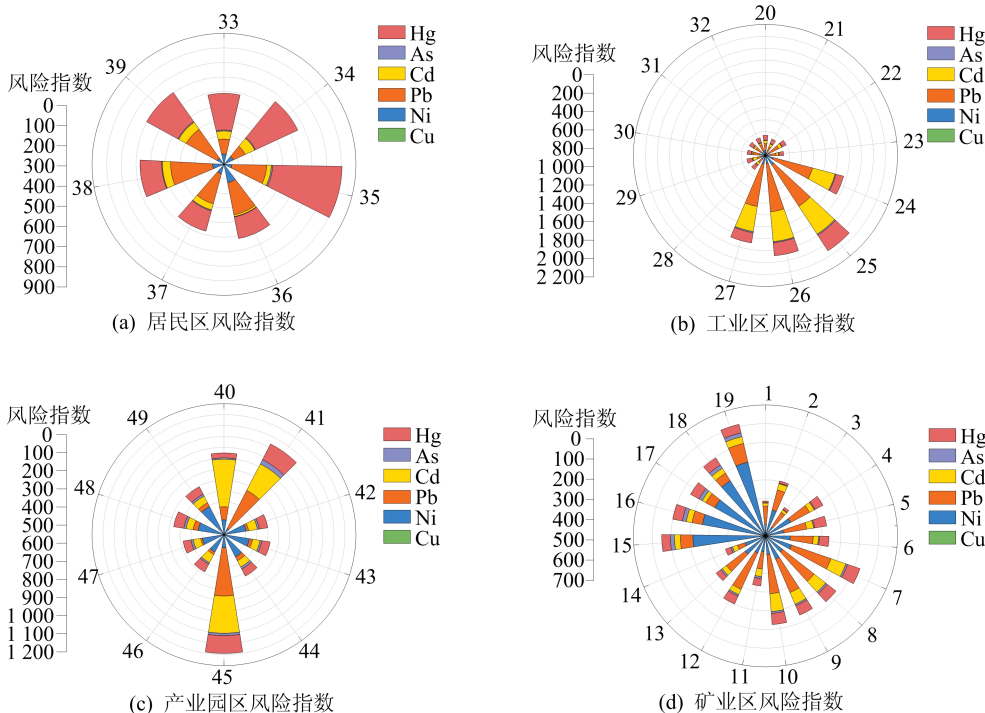


图 3 功能区重金属潜在风险指数

潜在生态风险指数 (potential ecological risk index, RI) 的空间分布如图 4 所示,综合的潜在生

态风险指数 RI 值呈现出西北、东南偏高,中部偏低;4 个类型工业区的 RI 值从大到小依次为工业区、居民区、产业园区、矿业区。工业区、居民区和产业园区综合污染指数处于很强的风险等级,矿业区则处于较强的风险等级。

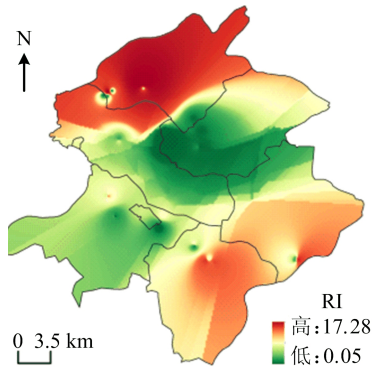


图 4 功能区重金属潜在风险分布

结合土壤重金属空间分布和土壤溯源分析来看,重金属 Pb、Ni 和 Cd 两两之间相关性较高,且 Pb 高质量比区位分布在研究区北侧,研究区北侧工业产业丰富,这与溯源分析中工业、矿业产业源中金属 Pb 为主要贡献源相呼应,其工业区 Pb 的均值是总体研究区的 1.55 倍,是安徽省土壤背景

值的 2.12 倍,变异系数相对较高,人类活动影响明显,同时与研究区的 RI 高值分布相同,由此可见 Pb 对研究区 RI 的影响更为显著。在工业土地利用工程中,要重点关注重金属 Pb 所造成的生态风险影响,以及 Ni、Cd 与金属 Pb 所产生的协同污染所造成的影响。

综上所述可知:研究区域综合潜在生态风险的分布是南北高、中部偏低;工业区、居民区和产业园区综合污染指数处于较强的风险等级;Pb、Hg、Ni、Cd 在工业区中单项潜在风险污染指数占比超过 70%,矿业区和产业园区的金属 Ni、居民区金属 Pb、工业区金属 Cd 处于较强的风险等级。

2.3 人体健康风险评估

本研究通过 USEPA 的模型对 4 种类型工业区土壤重金属进行健康风险评估,通过计算皮肤接触、吸入、经口摄入 3 种途径下重金属 As、Cd 和 Ni 的健康风险中致癌风险指数,其儿童和成人的结果如图 5 所示,相关数据见表 1 所列。

4 种类型工业区中,产业园区的致癌风险最高,矿业区、工业区和居民区次之;由于儿童相对于成人所受环境影响更大,因此针对儿童的健康风险需进行重点分析^[19]。

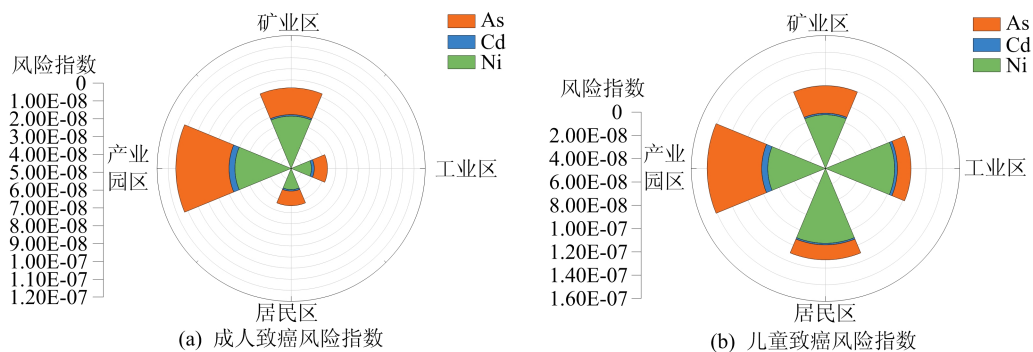


图 5 不同类型工业区致癌风险指数对比

在致癌风险中,重金属 As、Cd 和 Ni 的临界比值(critical ratio, CR)值和质量指标(total complaints rate, TCR)值均未大于 USEPA 的最大可接受水平^[29],其中 3 种重金属的 CR 值在 $1.38 \times 10^{-9} \sim 6.88 \times 10^{-8}$ 之间,由此可得儿童致癌风险在可忽略范围之内。

在非致癌风险中,成人和儿童重金属 Cu、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的非致癌风险指数(hazard quotient, HQ)值从大到小都依次为 As、Pb、Ni、Cu、Cd、Hg, As 是人类主要的非致癌性重金属元素,在工业区域有一定的显著非致癌性风险。儿童和

成人的综合非致癌危害指数(hazard index, HI)为 0.73、0.08,6 种重金属的 HQ 值均小于 1,表明对于儿童来说这 6 种重金属的非致癌风险可忽略不计,成人的各项数值均小于儿童,这是由于儿童相对于成人在免疫机理方面更加敏感,其非致癌风险以此类推^[28-30]。在 6 种金属中,经口摄入重金属造成的非致癌风险均高于 93.9%;金属 Pb 和 As 占综合非致癌风险的 94.4%,因此经口摄入金属 Pb 和 As 是造成非致癌危害的主要原因。

金属 As 与 Pb 无相关性,存在协同污染的可

能性较小,As 是复合源的主要贡献金属,Pb 是工业、矿业源的主要贡献金属,通过空间分布可知,矿业区和工业区中金属 Pb 的均值和变异系数相差较为明显,总体趋势依次为工业区、总体研究区、矿业区;As 在产业园区的均值和变异系数显著高于整体研究区,但变异系数相对较小,说明人类影响不显著。

因此,通过对成人和儿童的健康风险评估可

知,进口摄入重金属是造成人类致癌和非致癌风险的主要途径。其中在致癌风险中,金属 As、Cd 和 Ni 的致癌风险远低于健康风险评价标准;非致癌风险中,6 种重金属造成的非致癌风险可忽略不计,经口摄入重金属 Pb 和 As 占综合非致癌风险主要部分。在生产活动中,需要考虑到金属 Pb 和 As 对人所产生的影响,有针对性的对 Pb 和 As 进行管控,以降低对人群的健康风险。

表 1 成人和儿童的非致癌健康风险指数

类型	方式	Cu	Ni	Pb	Cd	As	Hg
成人	经口摄入	1.40×10^{-3}	2.15×10^{-3}	1.66×10^{-2}	5.19×10^{-4}	6.01×10^{-2}	4.52×10^{-4}
	皮肤接触摄入	4.26×10^{-6}	6.38×10^{-6}	5.02×10^{-5}	1.58×10^{-6}	1.83×10^{-4}	4.81×10^{-6}
	呼吸摄入	1.42×10^{-5}	2.44×10^{-5}	3.37×10^{-5}	3.16×10^{-5}	4.47×10^{-4}	1.96×10^{-5}
	合计	1.42×10^{-3}	2.19×10^{-3}	1.67×10^{-2}	5.52×10^{-4}	6.08×10^{-2}	4.76×10^{-4}
儿童	经口摄入	1.26×10^{-2}	1.95×10^{-2}	1.49×10^{-1}	4.67×10^{-3}	5.41×10^{-1}	4.06×10^{-3}
	皮肤接触摄入	1.05×10^{-5}	1.58×10^{-5}	1.24×10^{-4}	3.90×10^{-6}	4.51×10^{-4}	1.19×10^{-5}
	呼吸摄入	3.88×10^{-5}	6.66×10^{-5}	9.21×10^{-5}	8.64×10^{-5}	1.22×10^{-3}	5.37×10^{-5}
	合计	1.26×10^{-2}	1.95×10^{-2}	1.50×10^{-1}	4.76×10^{-3}	5.43×10^{-1}	4.13×10^{-3}

2.4 土壤重金属溯源分析

利用 EPA PMF 模型对研究区域中 6 种土壤

重金属进行迭代分析,6 种重金属元素的 S 与 N 质量比大于 9,迭代运行 20 次,结果如图 6 所示。

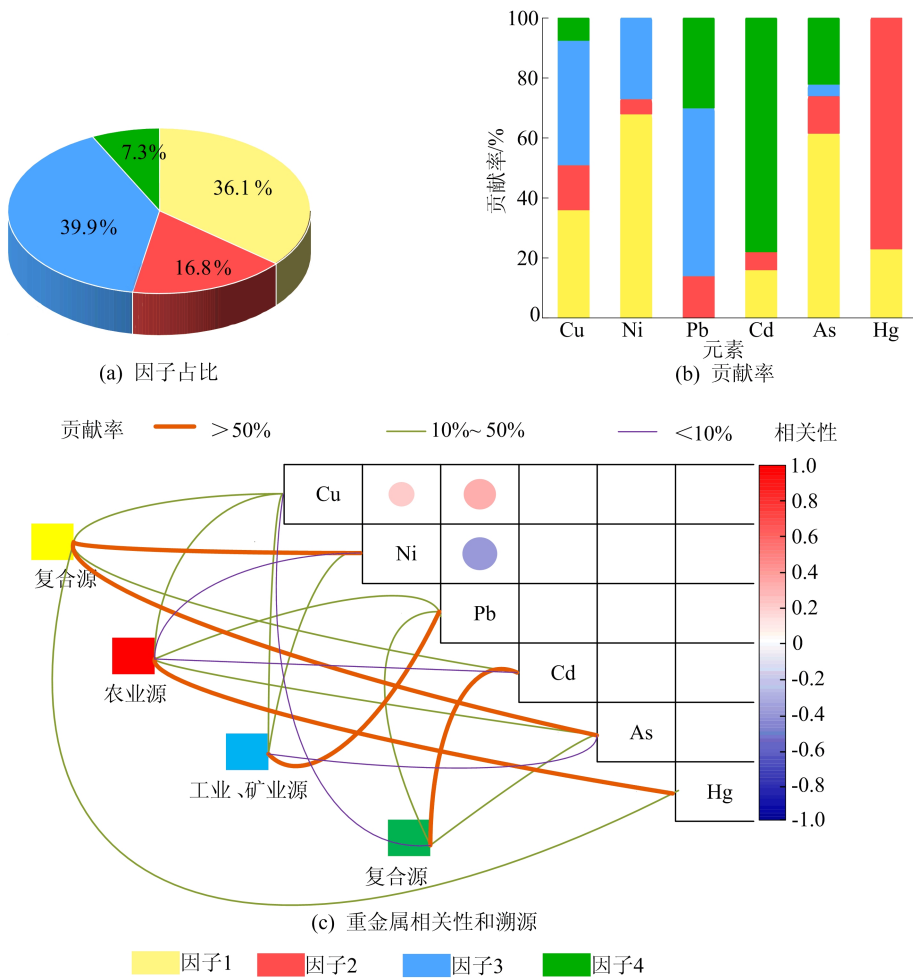


图 6 污染因子占比和重金属贡献率

因子 1 代表了 36.1% 的重金属来源,其中重金属 Ni、As 在因子 1 中贡献率占比较高,分别为 70% 和 64%,根据相关性分析可知,Ni 和 As 呈显著正相关性,说明 Ni 和 As 的来源具有一定相似性,且这 2 种重金属变异系数相对较低,受人类影响相对较小,同时 Cu、Cd 和 Hg 在因子 1 有一定占比。有研究表明,Ni、As 与土壤母质和大气沉降有关,在自然界中普遍存在,As、Cu、Cd 和 Hg 则在矿业和农业中普遍存在^[31]。故推测因子 1 为大气沉降、自然源和矿、农业的复合源。

因子 3 说明了 39.9% 的重金属来源,其中权重较高的为 Cu 和 Pb,贡献率权重分别为 40%、56%,Cu 和 Pb 均超过其自然背景值,且 2 种重金属之间的相关系数在 0.4 左右,这与复杂工业源重金属特征相似。故因子 3 定义为工业、矿业源。

因子 2 和因子 4 分别解释了 16.8% 和 7.3% 的重金属来源,其主要贡献率权重金属分别为 68% 的 Hg 和 77% 的 Cd。Hg 与主要污染地区处于研究区西部和西南部,村镇人口相对集中的区域,且 Hg 的均值均大于研究区域的背景值;而 Cd 在高污染区处于研究区西南侧,公路交通复杂,金属 Cd 广泛存在于大型柴油货车的轮胎和尾气中。因此,因子 2 和因子 4 分别定义为农业源和交通源。

分析表明,金属 Pb 对研究区内存在较大生态和健康风险,从空间分布看,Pb 高质量比地区位于研究区北部,是工业区和产业园区较为集中区域,工业排放、矿石加工和尾矿堆放,会伴生大量 Pb 的释放,同时工业区中大气沉降和丰富降水促进了 Pb 在土壤中的富集和扩散迁移^[32]。

2.5 重金属空间分布分析

青阳县交通便利,工业产业丰富,全县的工业产业分布基本分布在青阳县北部地区,通过 As 元素、Pb 元素、Cu 元素的空间分布图可以发现,青阳县北部地区这 3 种重金属元素质量比有较高的累计。青阳县北部工业产业大多以电镀和铸造行业为主,且黄泥垅有色金属产业园区也位于此地。因此,电镀行业废水的排放可能是导致重金属污染的重要原因之一,且当地镀 Cu 工艺占比较高,电镀行业中的电镀废水含有数十种无机和有机污染物,这些废水中的离子态重金属元素,通过排水或降水方式加入到环境中造成环境污染;另外,电镀工艺产生的多种颗粒物和废弃也包含大量重金属元素,通过排气和降尘进行长距离迁移。铸造行业主要流程不触及水资源的利用,但

在淬火和修边除尘等工艺上,会运用大量水资源并排放废水,而上漆的原料中普遍含有重金属 Pb,油漆挥发会造成一定的重金属迁移。电镀和铸造行业周边交通资源丰富,毗邻京台高速、G330 和 G318 国道;有调查说明,交通运输过程中,车辆尾气中的重金属占比 Pb、As 为最高,人类活动造成的影响间接导致了动植物对重金属吸附和富集能力的下降,此区域环境的重金属元素累计程度进一步提高^[29]。研究区东部以机械制造业为主,主要为汽车零部件的制造,其金属加工过程中的清洗废水含有大量的 Cd,含油废水和涂装废水则含有一定的 Ni 和 Hg 等重金属元素,且该区域人口密集程度较高,存在一定量的耕地,故化肥和农药使用量较高,有研究表明,磷肥中存在较多的 Cd,化肥中则存在 Hg 较多^[30]。研究区东南部为九华山风景区所在地,受国家保护和地形影响,其 6 种重金属元素质量比均相对较低。

2.6 污染应对策略

研究区北部是重金属 Pb 主要富集地,对当地生态和人类健康影响较为显著,针对性地在工业园和产业园区应用设备和技术,减少 Pb 等重金属的排放;居民区位于研究区西部,在工业区和矿业区的儿童,户外时要注意与工、矿产业活动保持一定距离,避免 Pb、As 的摄入危害人体健康。

3 结 论

1) 研究区不同重金属质量比差异显著,且空间分布也较为不均匀,除金属 Ni 以外,其余元素平均质量比均高于当地土壤背景值,As、Cu、Pb 与 Hg、Cd、Ni 空间分布分别为北高南低和西高东低。

2) 不同重金属来源不同,Ni 和 As 存在协同污染,主要来自工业源,Cu 和 Pb 主要来自矿业源,Hg 和 Cd 主要来自农业源和自然源。

3) 进口摄入重金属是造成人类致癌和非致癌风险的主要途径。其中在致癌风险中,金属 As、Cd 和 Ni 的致癌风险远低于健康风险评价标准;经口摄入金属 Pb 和 As 占综合非致癌风险主要部分。

4) 潜在生态风险评价显示,研究区南北地区土壤中 Pb、Hg、Ni、Cd 构成潜在风险较大,其余元素处于低生态风险。当地相关部门需对其进行针对性关注,特别是在居民区与其余区域相邻处,减少对生态和人类的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 张国强. 城市空间生产与现代化进程中的机场发展[J]. 综合运输, 2022, 44(2): 1.
- [2] ZHANG Z R, GAO X X, ZHANG S B, et al. Urban development enhances soil organic carbon storage through increasing urban vegetation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312(3): 114922.
- [3] 熊悦丁. 辽河铁岭段污染物入河通量及支流污染物贡献率分析[J]. 水利规划与设计, 2022, 44(9): 31-35.
- [4] 张金辉, 张焕, 朱新锋, 等. UiO-66 复合材料用于典型有机污染物吸附和光催化氧化的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 42(1): 445-456.
- [5] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海市不同工业类型土壤重金属含量差异性分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1777-1782.
- [6] 龚露, 范二川, 李丽. 浅谈炼金厂载金炭解析中汞污染及治理方法, 以 SK-200A 型快速提金设备为例[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 173-175.
- [7] ALOTAIBI M O, ALBEDAIR L A, ALOTAIBI N M, et al. Pollution indexing and health risk assessment of heavy-metals-laden indoor and outdoor dust in elementary school environments in Riyadh, Saudi Arabia [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(3): 464.
- [8] 李晓曼, 李青青, 杨洁, 等. 上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5687-5697.
- [9] 于瑞莲, 胡恭任, 戚红璐, 等. 泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2010, 29(6): 1086-1090.
- [10] WEI Y L, WANG L Y. Pollution characteristics and comprehensive evaluation of soil organic compounds at a chemical contaminated site [J]. *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science)*, 2020, 514(3): 032045.
- [11] 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 等. 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5615-5622.
- [12] ZHAO W Y, WU S Y, CHEN X, et al. How would ecological restoration affect multiple ecosystem service supplies and tradeoffs? a study of mine tailings restoration in China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110451.
- [13] 李柏林, 张贺, 王俊, 等. 长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2023-2039.
- [14] 管礼松, 郭伟玲, 李鑫, 等. 2000—2018 年皖南山区土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 114-121.
- [15] 毛雪, 朱海娣, 马友华, 等. 安徽省现代特色农业生态地质条件分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 194-199.
- [16] 贾冰婵, 张鸣, 武娟, 等. 固城湖及其退圩还湖区表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4741-4751.
- [17] 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 等. 昆明市土壤重金属污染特征及其生态与健康风险评价[J]. 轻工学报, 2022, 37(4): 118-126.
- [18] 刘锐涵, 王艳华, 赵建, 等. 土壤微塑料污染与生态健康风险[J]. 环境化学, 2022, 41(10): 3214-3230.
- [19] 霍霞, 郑相斌, 刘强, 等. 无序电子垃圾拆解对人群健康的影响[J]. 中华预防医学杂志, 2019, 59(4): 426-432.
- [20] 雷成琦, 钟山, 张滴杉, 等. 浙江某垃圾焚烧厂周边土壤中稀土元素分布特征及潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1629-1638.
- [21] 侯妹伊, 张蔚. 冬季节节性积雪中重金属污染物对人体健康的影响[J]. 农业开发与装备, 2022, 35(1): 157-159.
- [22] 黄剑波, 姜登登, 温冰, 等. 基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2204-2214.
- [23] 陈云飞, 周金龙, 胡艳, 等. 新疆塔里木盆地东南缘红枣产地土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(11): 3629-3639.
- [24] 卢宏亮, 赵明松. 基于神经网络模型的安徽省土壤 pH 预测[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1119-1123.
- [25] 王琴, 许延霞. 大气干湿沉降中重金属的污染特征及来源分析[J]. 天津化工, 2022, 36(4): 5-8.
- [26] 付蓉洁, 辛存林, 于爽, 等. 石期河西南部流域地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 796-806.
- [27] 杨育振, 刘森荣, 杨勇, 等. 黄石市城市边缘区土壤重金属分布特征、风险评价及溯源分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1147-1156.
- [28] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5192-5204.
- [29] 蒋金柱, 吴媛媛, 蒋艳娇. 安徽省东南部江淮平原区农业土壤的重金属含量特征[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(12): 49-51, 59.
- [30] 郭亚科, 高燕燕, 钱会, 等. 楮河流域水体重金属时空分布特征及健康风险评价[J]. 环境工程, 2022, 41(1): 112-119.
- [31] 赵明升, 任丽红, 李刚, 等. 2018~2019 年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5376-5386.
- [32] 程佳明, 杨银科, 王金星. 盐田正坑水库水源地水质分析与健康风险评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 76-79, 57.

(责任编辑 吴 亮)