

doi: 10.11720/wtyht.2024.2595

杨艳,刘彬,夏飞强,等.皖南典型区耕地土壤重金属富集特征、来源识别及健康风险评估[J].物探与化探,2024,48(1):255-263. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2595>Yang Y, Liu B, Xia F Q, et al. Enrichment characteristics, source identification, and health risk assessment of soil heavy metals in typical cultivated land in the mountainous area of southern Anhui Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 255-263. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2595>

皖南典型区耕地土壤重金属富集特征、 来源识别及健康风险评估

杨艳,刘彬,夏飞强,陈平峰,张祥

(安徽省地球物理地球化学勘查技术院,安徽 合肥 230022)

摘要:为探讨安徽省皖南山区典型耕地土壤重金属富集特征及成因,以安徽省东南部宁国市为研究对象,在耕地中采集 1 399 件表层土壤样品,测定 As、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn 元素含量,运用相关分析、土壤环境质量农用地土壤污染风险、地质累积指数、健康风险指数及 PMF(正定矩阵因子分解)模型方法开展重金属风险评价及来源识别。结果显示:As、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn 含量的平均值分别为: 15.8×10^{-6} 、 0.41×10^{-6} 、 0.106×10^{-6} 、 31×10^{-6} 、 67×10^{-6} 、 29.00×10^{-6} 、 29×10^{-6} 、 94×10^{-6} ,除 Ni 外,其他元素均高于安徽省背景值;重金属土壤污染风险水平整体较低,有 866 件土壤样品重金属含量低于风险筛选值;地质累积指数结果表明,耕地土壤主要受到 Hg、Cd、As 污染;健康风险评估结果显示,研究区内成人非致癌与致癌风险水平均在可接受范围内;基于 PMF 模型,确立了研究区重金属 4 种来源:与人类活动相关的工农业排放源、大气沉降源、与土壤类型相关的成土母质源和地质背景源。

关键词:耕地;土壤重金属;健康风险;PMF 模型**中图分类号:** X142;X825**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)01-0255-09

0 引言

我国历来高度重视粮食安全问题,将其视为关系国计民生的头等大事^[1]。耕地是粮食生产的根基,耕地土壤环境质量直接影响粮食质量安全。2015 年,自然资源部中国地质调查局发布了《中国耕地地球化学调查报告》,调查发现全国存在重金属污染或超标的点位占比为 9.2%^[2]。土壤重金属超标会对土壤环境质量造成一定的威胁,且重金属在土壤中具有不可降解、不可逆性和生物累积性等特点,随着重金属迁移转化,可进一步引起大气、水体和生物的污染,并通过食物链最终影响到人类的健康^[3]。中国耕地土壤重金属的污染状况及生态风险、来源分析等方面的研究受到了广泛关注^[4-5]。

本次研究区位于安徽省东南部,属皖南低山丘

陵区,地形地貌复杂,耕地图斑细碎,面积占比较小,约占全区总面积 6.8%。区内经济发展主要依托第二产业、第三产业,分别占国民经济生产总值的 58%、35%;规模以上工业企业 300 余家,以汽车橡胶零部件、耐磨铸件和电子元器件为 3 大主导产业,是典型的工业城市。学者们对研究区内地球化学特征^[6]、土壤肥力^[7]已经做了相关研究,但对耕地土壤重金属含量及富集特征、来源分析却鲜有报道,为此,本次系统采集研究区内耕地土壤样品,分析 8 种重金属元素(As、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn)含量及富集特征,评价重金属生态风险和健康风险,并利用 PMF 模型识别污染源,旨在为耕地土壤重金属污染成因探究、治理和修复提供参考。

1 研究区概况

研究区位于皖东南边缘之中段,地理坐标为东

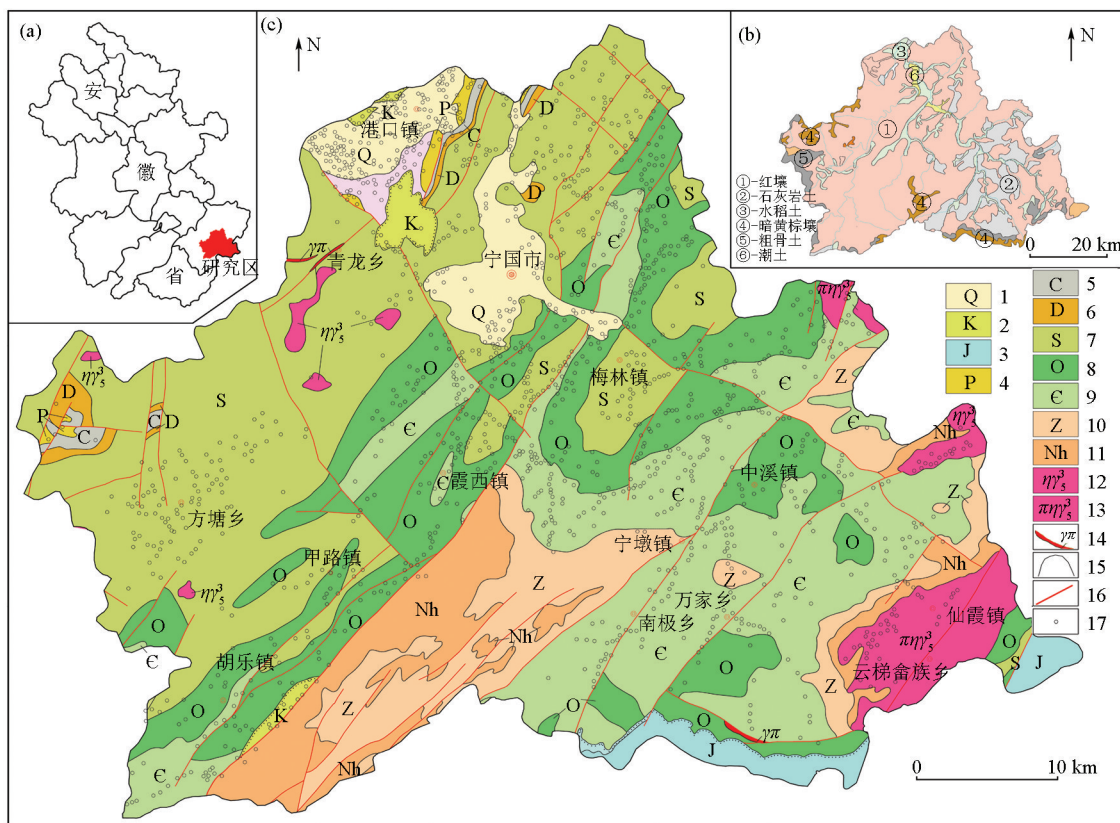
收稿日期: 2022-11-30; **修回日期:** 2023-05-05**基金项目:** 安徽省公益性地质工作项目(2016-g-3-11)**第一作者:** 杨艳(1993-),女,本科,2013 年毕业于中国地质大学(武汉),地球化学勘查工程师,主要研究方向为生态地球化学。Email: 1061839449@qq.com

经 $118^{\circ}36' \sim 119^{\circ}24'$, 北纬 $30^{\circ}16' \sim 30^{\circ}47'$, 面积 $2\,428\text{ km}^2$ (图 1a)。研究区属皖南山地丘陵区, 地貌类型以丘陵、低山及陡峭的中山为主, 地势南高北低, 东西山川起伏。区内土壤类型以红壤、石灰岩土、暗黄棕壤、水稻土为主 (图 1b), 土地利用类型主要为林地、果园和水田, 农作物类型以水稻、山核桃、茶叶为主。研究区属北亚热带季风湿润气候区, 四季分明, 气候温和, 雨量丰沛, 年平均气温 15.4°C , 年降水量 $1\,739.7\text{ mm}$ 。

2 研究方法

2.1 样品采集

土壤样点采用网格加图斑的原则布设, 样点布设在网格内最大的耕地图斑中。本次调查共采集表层土壤样品 $1\,399$ 件, 平均采样密度为 $9\text{ 件}/\text{km}^2$, 见图 1c。样品采集由预布点周围 $20\sim 50\text{ m}$ 范围内 5 个子样点等量混合而成, 各子样点的土地利用类型



1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—二叠系;5—石炭系;6—泥盆系;7—志留系;8—奥陶系;9—寒武系;10—震旦系;11—南华系;12—燕山期侵入岩(二长花岗岩);13—燕山期侵入岩(二长花岗岩斑岩);14—花岗斑岩;15—地层界线;16—断层;17—土壤采样点
1—Quaternary;2—Cretaceous;3—Jurassic;4—Permian;5—Carboniferous;6—Devonian;7—Silurian;8—Ordovician;9—Cambrian;10—Tanian;11—Nanhua system;12—Yanshanian monzonitic granite;13—Yanshanian monzonitic granite porphyry;14—granite porphyry;15—stratigraphic boundary;16—fault;17—soil sampling points

图 1 研究区地理位置示意(a)、土壤类型(b)和采样点分布(c)

Fig. 1 Geographical location (a), soil type (b), and sampling point distribution (c) of the study area

一致, 采样位置的选择充分考虑样品代表性。采样深度 $0\sim 20\text{ cm}$, 去除土壤中杂物, 装入干净的样品袋, 质量不低于 1.5 kg 。样品自然风干后, 剔除杂物, 全部过 10 目尼龙筛后, 缩分称取 300 g 送实验室, 300 g 作为副样封存。

2.2 样品分析与质量监控

样品分析测试由安徽省地质实验研究所(自然资源部合肥矿产资源监督检查中心)完成。选择电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)分析 Cr 、 Ni 、 Cu 、

Zn , 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析 Cd 、 Pb , 原子荧光光谱法(AFS)分析 As 、 Hg , 离子选择性电极法(ISE)测定 pH 。各元素(指标)分析方法及检出限见表 1。

按照《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)采用内部质量控制和外部质量监控相结合的方法控制分析质量。内部质量监控包含检出限的高低、精密密度控制样、准确度控制样、重复性检查样和异常点检查样合格率、元素报出率; 外部质量

表 1 各元素(指标)分析及检出限

Table 1 Analysis methods and detection limits for each element

元素/指标	分析方法	检出限/ 10^{-6}	测定范围/ 10^{-6}
As	AFS	0.2	0.2~500
Cd	ICP-MS	0.02	0.02~4.0
Hg	AFS	0.0005	0.0005~10
Pb	ICP-MS	2	2~2000
Cr	ICP-AES	3	3~3500
Ni	ICP-AES	0.05	0.05~2000
Cu	ICP-AES	1	1~2000
Zn	ICP-AES	2	2~3000
pH	ISE	0.1*	0.1~14.0*

注:“*”代表无量纲。

监控由中国地质调查局化探样品测试质量检查组密码插入标准控制样,比例为 8%,与基本分析样同时分析。结果显示各元素(指标)检出率均为 100%,标准物质准确度、精确度合格率达 100%;重复性检验合格率、异常点检验合格率符合规范要求,分析数据质量真实可靠。

2.3 评价模型

2.3.1 农用地土壤污染风险

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[8]规定了农用地土壤污染风险筛选值和管制值,当耕地中重金属含量等于或低于农用地土壤污染风险筛选值时,耕地土壤污

染风险低,一般可忽略不计;当重金属含量高于风险筛选值、等于或低于风险管制值时,可能存在土壤污染风险,应加强土壤环境监测和农产品协同监测;当土壤中重金属含量高于风险管制值时,耕地土壤污染风险高,原则上采取禁止种植食用农产品、退耕还林等严格管控措施。掌握土壤环境质量及其污染风险状况,有利于土壤环境风险全面管控和土壤污染防治工作的有效落实^[9]。

2.3.2 地质累积指数

地质累积指数^[10]又称 MuLL 指数,是 20 世纪 70 年代发展起来的,广泛用于研究沉积物中的重金属污染程度,尤其用于研究现代沉积物中重金属污染的评价。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n), \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地质累积指数; C_n 为样品中元素 n 的实测值; B_n 为元素 n 的地球化学背景值,当 B_n 取值为全国土壤或区域土壤背景值时, $k=1.5$ 。

公式(1)表明,地质累积指数与地球化学背景的选择有关,本文选用安徽省 A 层土壤背景值^[11]进行计算。参照表 2,对耕地土壤重金属元素的污染程度进行评价。

表 2 地质累积指数分级标准划分

Table 2 Classification standard of geoaccumulation index

等级	1	2	3	4	5	6	7
I_{geo}	≤ 0	$>0 \sim 1$	$>1 \sim 2$	$>2 \sim 3$	$>3 \sim 4$	$>4 \sim 5$	≥ 5
污染程度	无	无到中等	中等	中等到重度	重度	重度到极度	极度

2.3.3 健康风险评价模型

采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型揭示重金属等污染物对人体健康风险状况的研究已在土壤、大气沉降物中广泛开展^[12-13],结合《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)、《局部生态地球化学评价规范》、《中国人群暴露参数手册》^[14-15]和实际情况,其计算公式如下:

$$EDI_{\text{手口直接摄入}} = \frac{C \times IR_{\text{土壤}} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}, \quad (2)$$

$$EDI_{\text{皮肤接触摄入}} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}, \quad (3)$$

$$EDI_{\text{土壤尘吸入}} = \frac{C \times (1/PEF) \times IR_{\text{空气}} \times EF \times ED}{BW \times AT}, \quad (4)$$

式中: $EDI_{\text{手口直接摄入}}$ 、 $EDI_{\text{皮肤接触摄入}}$ 、 $EDI_{\text{土壤尘吸入}}$ 分别为通过直接摄入、皮肤接触、呼吸途径摄入的重金属日均暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C 为重金属质量分数, 10^{-6} 。其余参数含义及参考值见表 3。

表 3 健康风险模型暴露参数^[12,15-16]

Table 3 Health risk assessment model exposure parameters

参数	含义	单位	成人	儿童
$IR_{\text{土壤}}$	土壤摄入量	mg/d	100	200
EF	暴露频率	d/a	350	350
ED	暴露期	a	24	6
BW	平均体重	kg	61.8	19.2
AT	平均作用时间	d	9125	2190
SA	可能接触土壤的皮肤面积	cm^2/d	5700	2800
AF	皮肤对土壤的吸附系数	mg/cm^2	0.07	0.2
ABS	皮肤吸收率	%	0.1	0.1
PEF	土壤尘产生因子	m^3/kg	1.36×10^9	1.36×10^9
$IR_{\text{空气}}$	日空气吸入量	m^3/d	14.5	7.5

重金属对人体产生的健康风险主要分为非致癌和致癌两种效应,非致癌风险水平通过平均到整个

暴露作用期的每天摄入量除以每一途径的慢性参考剂量计算:

$$HQ_i = \frac{EDI_i}{RfD} \quad , \quad (5)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad , \quad (6)$$

式中: HQ_i 为某种污染物 i 不同摄入途径的非致癌水平; EDI_i 为平均每天不同途径污染物 i 的摄入量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; RfD 为各种途径的慢性“毒性”参考剂量(表 4), $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; HI 为非致癌风险指数, 当 $HI < 1$, 表示非致癌风险水平为可接受范围, 当 $HI \geq$

1, 表示为不可接受范围。
致癌水平通过平均到整个生命期的平均每天摄入量乘以经口、皮肤、呼吸摄入致癌风险斜率系数计算得出:

$$CR = \sum EDI_i \times SF_i \quad , \quad (7)$$

式中: CR 为致癌风险指数, $CR < 1 \times 10^{-4}$ 时, 表示致癌风险为可接受水平, $CR \geq 1 \times 10^{-4}$ 时表示致癌风险为不可接受水平; SF_i 为各类途径的致癌斜率(表 4), $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$ 。

表 4 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF ^[12,15-16]
Table 4 RfD and SF of different heavy metal exposure pathways

元素	参考剂量 $RfD/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$			致癌斜率 $SF/[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$		
	经口	皮肤	呼吸	经口	皮肤	呼吸
As	3.00×10^{-4}	1.23×10^{-4}	4.29×10^{-6}	1.50	1.50	15.10
Cd	1.00×10^{-3}	2.50×10^{-5}	2.86×10^{-6}			6.30
Hg	3.00×10^{-4}	2.14×10^{-5}				
Pb	1.40×10^{-3}	5.24×10^{-4}		8.50×10^{-3}		4.20×10^{-2}
Cr	3.00×10^{-3}	3.00×10^{-5}	2.86×10^{-5}	5.01×10^{-1}	2.00×10^1	4.20×10^1
Ni	2.00×10^{-2}	5.40×10^{-3}	9.00×10^{-5}	1.70	4.25×10^1	8.40×10^{-1}
Cu	4.00×10^{-2}	1.20×10^{-2}				
Zn	3.00×10^{-1}	6.00×10^{-2}				

2.4 数据处理

土壤重金属数据参数统计利用 Office365、SPSS 软件完成, 相关分析和箱图采用 Origin 2021 进行制作, 土壤重金属来源及贡献率采用 EPA PMF5.0 模拟, 采用 GeoIPAS、MapGIS 对各影响因子进行空间分析, 采用高斯克吕格方法对因子进行插值。

3 结果与讨论

3.1 土壤酸碱度和重金属含量特征

对调查获得的 1 399 个耕地土壤样品进行原始

数据统计分析, 采用算数平均值加(减)3 倍标准差的方式对原始数据进行迭代剔除后, 获得研究区背景值, 统计数据见表 5。

研究区土壤主要呈强酸性—酸性, 平均值为 5.4, 显著低于安徽省 A 层土壤平均值, 其中 pH 低于 5.4 的土壤样品有 886 个, 占总土壤样品的 63.3%。据研究, 近 20 年来研究区土壤酸化现象较明显, 已成为农作物增产的主要限制因子^[18], 绝大多数重金属元素随着 pH 的降低, 在土壤中的溶解度增强, 土壤酸碱性影响土壤养分的有效性、土壤物理性质及植物和微生物的生存^[3]。

表 5 土壤重金属元素参数统计
Table 5 Basic statistics of heavy metals in soil

参数		Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb	As	Hg	pH
原始数据	最大值	326	95	94.48	451	16.06	225	292.5	0.650	8.3
	最小值	10	7	4.49	39	0.03	4	1.3	0.030	4.3
	中位数	68	27	28.20	91	0.21	30	10.6	0.100	5.4
	算术平均值	67	29	29.00	94	0.41	31	15.8	0.106	5.5
	标准离差	17.450	10.998	9.863	34.392	0.799	7.993	18.902	0.048	0.659
	变异系数	0.26	0.38	0.34	0.37	1.97	0.26	1.20	0.46	0.12
迭代剔除后	算术平均值	67	29	28.57	91	0.27	30	11.4	0.098	5.4
	标准离差	14.657	9.919	9.025	26.139	0.173	4.567	6.155	0.031	0.363
	变异系数	0.22	0.35	0.32	0.29	0.64	0.15	0.54	0.32	0.07
	样品数量	1374	1380	1383	1363	1288	1357	1276	1329	1290
安徽省 ^[11]	算术平均值	66.5	20.4	29.8	62	0.097	26.6	9.0	0.033	6.4
全国 ^[17]	算术平均值	66	25	27	71	0.205	30	10.3	0.076	

注: 元素含量单位为 10^{-6} , pH 无量纲。

由上表可知,原始数据中 8 种重金属元素变异系数由高到低为: Cd>As>Hg>Cu>Zn>Ni>Cr>Pb。变异系数是衡量和判别元素含量离散程度的重要参数,根据变异系数分级标准,除 Cd (1.97)、As (1.20) 为强变异外,其他元素均为较均匀。土壤重金属含量除 Ni 低于安徽省背景值外,其他元素均不同程度高于安徽省背景值,其中 Hg、Cd、Zn、Cu、As、Pb、Cr、Ni 的含量中位数分别是安徽省背景值的 3.03、2.16、1.46、1.31、1.18、1.13、1.02、0.95 倍,是全国背景值的 1.32、1.02、1.28、1.07、1.03、1.00、1.03、1.04 倍。

3.2 土壤重金属污染程度

依据《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 8 种重金属元素

土壤污染风险筛选值和管制值标准,对评价区耕地土壤污染风险等级进行划分,风险筛选值采用较严格的标准(Hg、As 取水田标准,Cd、Pb、Cr、Cu 取其他标准),统计结果(表 6)表明,研究区土壤污染风险等级为低风险的样品数有 866 件,占总样品数的 61.9%;风险可控的样品数 498 件,占总样品数的 35.6%,主要影响指标为 Cd(437 件),其次为 As(130 件)、Cu(56 件)、Zn(17 件),其中 Cr、Hg、Pb、Ni 土壤污染风险可控的样品数仅为 1~6 件;超过土壤污染风险管制值的样品数有 35 件,主要影响指标为 Cd(32 件)、As(2 件)。因此,研究区耕地土壤重金属污染风险等级由高到低为 Cd>As>Cu>Zn>Ni>Pb>Hg>Cr。

表 6 研究区耕地土壤污染风险等级统计结果

Table 6 Statistical results of cultivated land soil pollution risk levels in the study area

土壤污染 风险等级	样品数/件							
	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb	As	Hg
低风险	1398	1343	1393	1382	930	1396	1266	1397
风险可控	1	56	6	17	437	3	130	2
较高风险					32		3	

以安徽省 A 层土壤样品重金属含量为背景值,利用式(1)计算了 8 种元素的地质累积指数及其等级所占比例(表 7),统计结果显示:Hg 仅有 3.4% 的样品为未污染,51.5% 的样品为无污染—中等污染,41.0% 为受到中等污染;Cd 无污染至中等、中等、中

等至重度、重度污染级别的样品比例分别为 42.8%、20.6%、11.8%、2.7%;As 中等、中等至重度、重度污染级别以上的样品比例分别为 7.0%、3.1%、0.6%;Zn、Cu 为无污染、中等污染的样品比例分别为 44.8%、36.9%;Cr、Ni、Pb 污染程度较低。

表 7 各元素不同地质累积指数级别的样品数占总样品数的百分比

Table 7 The proportion of heavy metals in different levels of geo-accumulation index

元素	$I_{geo} \leq 0$	$0 < I_{geo} \leq 1$	$1 < I_{geo} \leq 2$	$2 < I_{geo} \leq 3$	$3 < I_{geo} \leq 4$	$4 < I_{geo} \leq 5$	$I_{geo} > 5$
污染程度	无	无到中等	中等	中等到重度	重度	重度到极度	极度
Cr	99.0	0.9	0.1	0	0	0	0
Cu	62.1	36.9	1.0	0	0	0	0
Ni	95.4	4.4	0.1	0	0	0	0
Zn	53.4	44.8	1.6	0.1	0	0	0
Cd	20.7	42.8	20.6	11.8	2.7	0.8	0.6
Pb	93.9	6.0	0.1	0.1	0	0	0
As	65.0	24.2	7.0	3.1	0.6	0.1	0
Hg	3.4	51.5	41.0	4.0	0.1	0	0

3.3 研究区健康风险评价

由式(2)~(6)计算得到研究区 As、Cd、Cr、Ni 等 4 种重金属元素对成人和儿童经手—口摄入、呼吸摄入、皮肤接触摄入 3 种暴露途径的单项 HQ 和 HI,由统计结果可知,研究区 As、Cd、Cr、Ni 对成人的非致癌指数 HI 均小于 1,说明其含量处于安全范围内,基本不会危害成人健康;对儿童来说,As 元素的 HI 值有 123 个样品含量高于 1,占比 0.09%,说明研究区少部分地区 As 对儿童产生了非致癌风险,

易对儿童健康造成伤害,应引起重视并制定人体保护措施^[19]。

由式(7)计算得到研究区 Cr、As、Ni 的致癌风险,结果显示,成人、儿童 CR 中位数均小于 1,儿童致癌指数中有 23 个样品超过致癌风险可接受水平,占全区 0.02%。

3.4 土壤污染源识别与分布

对研究区内 8 种土壤重金属进行 Pearson 简单相关系数统计(表 8),初步判断其同源性,结果显

表 8 土壤重金属含量相关性分析
Table 8 Correlation analysis of heavy metal content in soil

元素	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Cr	1.000							
Cu	0.613	1.000						
Ni	0.743	0.872	1.000					
Zn	0.371	0.818	0.769	1.000				
Cd	0.224	0.554	0.551	0.759	1.000			
Pb	0.181	0.401	0.290	0.444	0.256	1.000		
As	0.273	0.379	0.348	0.269	0.170	0.225	1.000	
Hg	0.116	0.175	0.136	0.187	0.125	0.130	-0.019	1.000

示,Cu 与 Ni、Zn 相关系数大于 0.8,属高度相关关系,Cr 与 Cu、Ni 属中度相关关系,Ni 与 Zn、Cd 属中度相关关系,Pb、As、Hg 和其他元素的相关性较小,表明其各自有不同的来源。

定量解析土壤重金属污染来源并绘制空间分布图是土壤重金属调查评价的核心^[20]。利用正定矩阵因子分解定量解析土壤重金属的来源贡献,获取各因子的空间分布图,以期探索重金属来源。通过 PMF 软件对研究区 1 399 个土壤样品进行分析,得到研究区土壤重金属污染源成分谱系(图 2、图 3),根据 4 种因子的贡献率(标准化值),制作了研究区等值线分布(图 4)。

因子 1 主要由 Hg(贡献率 75.5%)和 Pb(贡献率 31.5%)元素构成,图 4a 显示,全区因子 1 贡献率

高值主要呈星点状、不规则面状展布,主要在城区、乡镇及生产、生活密集的地方广泛分布。Hg 为分散元素,也存在某些地区 Hg 含量远超过自然背景,但大多为汞矿区。有研究表明,全球约 60%~80%的汞来自人为排放^[21]。人类的工农业活动可向环境中释放汞,农业污染源推测与有机汞农药的使用有关,工业污染源主要为工业“三废”的排放,含汞废水灌溉农田、含汞废气沉降、含汞废渣淋溶,均可使土壤汞含量增加。因子 1 另外一个高载荷元素为 Pb,其高值分布与研究区主干道路吻合较好^[22],推测与汽车含铅尾气的排放有关。因子 1 可解释为与人类活动相关的工农业排放源。据统计,Hg、Pb 均值都未超过农用地土壤污染风险筛选值,研究区 Hg、Pb 环境质量均为一等清洁。

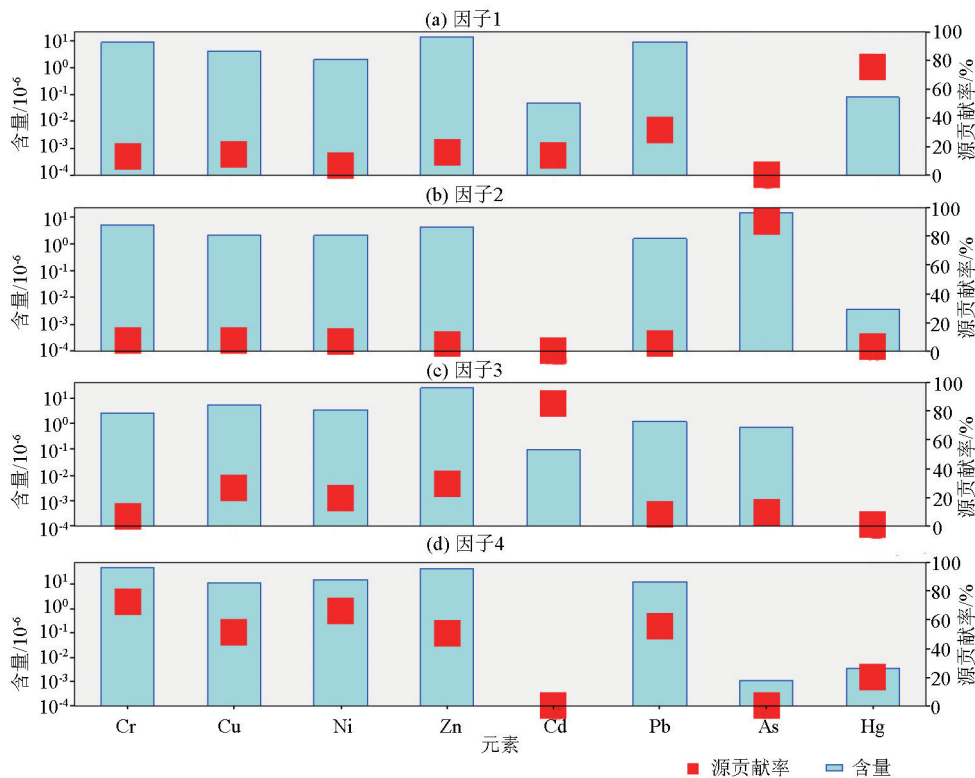


图 2 通过 PMF 模型获得的研究区重金属污染源成分谱

Fig. 2 Source profiles and source contribution of soil heavy metals in the study area from PMF

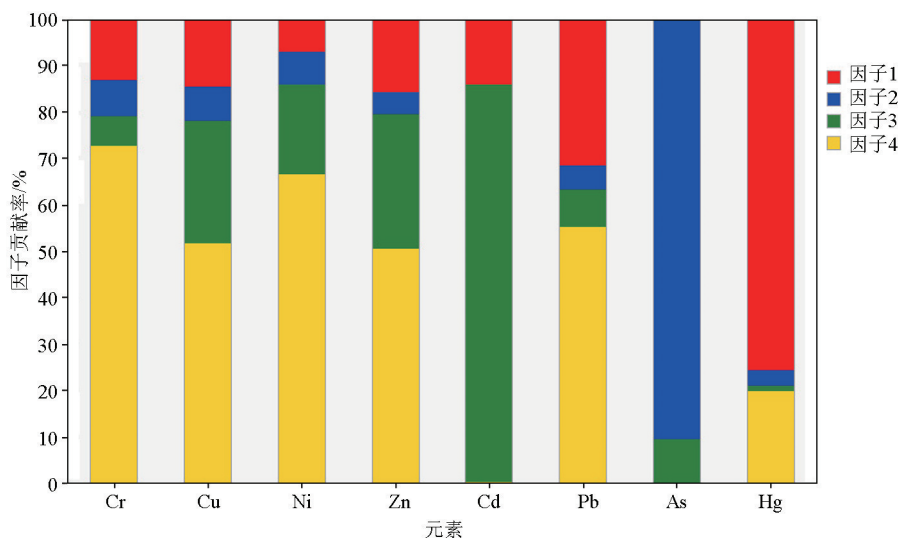


图3 研究区重金属污染源成分谱

Fig. 3 Factors profiles of heavy metals sources identified by PMF

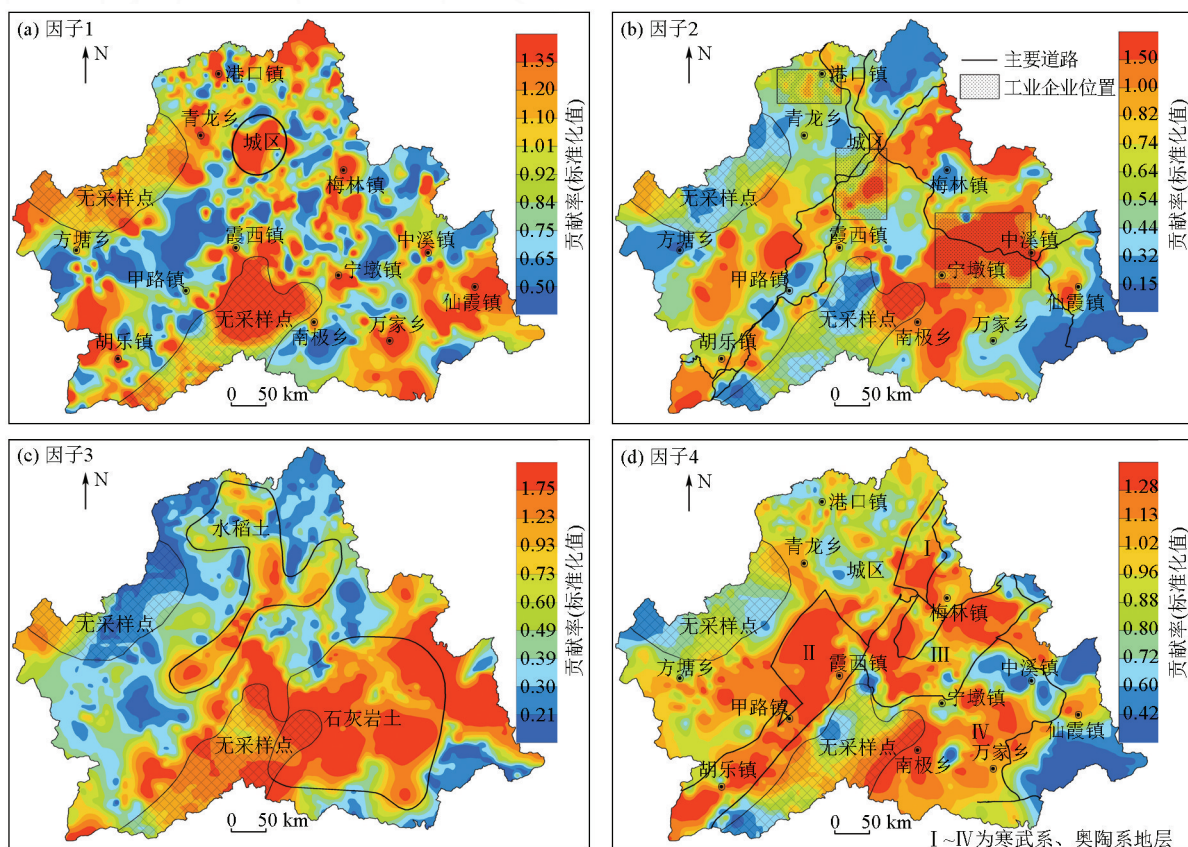


图4 PMF影响因子空间分布

Fig. 4 Space distribution of PMF-factors

As 在因子 2 中有较高的浓度值,贡献率达 90.6%,相关分析显示 As 与其他元素相关度较差,这与因子 2 分析结果一致。图 4b 显示,因子 2 高载荷点主要沿铁路、公路呈条带状分布,在工业集聚区呈面状分布。研究区工业主要以生产汽车橡胶零部件、耐磨铸件、电子元器件为主,在铸造生产过程中

产生的粉尘、烟尘、清洗废液等推测是导致土壤中 As 累积的重要原因。因此因子 2 可解释为与交通和工业活动有关的人为排放源。

Cd 在因子 3 中有较高的贡献值,贡献率为 85.7%,其次为 Zn、Cu、Ni,贡献率分别为 29.1%、26.6%、19.2%,这与前文相关性分析结果一致。图 4c 显

示,因子3高载荷点分布与水稻土和石灰岩土分布规律吻合较好。王云等^[23]研究全国不同土类Cd背景值发现,石灰岩土的Cd背景值最高,达 0.332×10^{-6} ,水稻土次之,为 0.155×10^{-6} ;石灰岩土、水稻土中Zn、Cu、Ni背景值显著处于高水平范围;其次,工业冶炼和磷肥施用等工农业活动,也常常会加剧土壤Cd的累积。因此因子3可解释为与土壤类型相关的成土母质源。

因子4是反映研究区土壤中多种重金属空间分布特征的主要因子,主要由Cr、Ni、Pb、Cu、Zn组成,其贡献率分别为72.7%、66.6%、55.4%、51.7%、50.6%。本研究中相对于Hg、Cd,土壤Cr、Ni、Pb、Cu、Zn含量更接近于背景值,图4d显示,因子4贡献率分布情况与研究区地质背景相吻合,高载荷点空间分布与寒武、奥陶地层分布吻合较好,表明因子4为与地质背景有关的自然来源。

4 结论

1)安徽省东南典型工业城市,其耕地土壤呈强酸—酸性,除Ni外,土壤Hg、Cd、Zn、Cu、As、Pb、Cr含量均不同程度高于安徽省土壤背景值。

2)地质累积指数计算结果表明,研究区耕地重金属元素Hg、Cd、As中等污染及以上的样品分别占45.1%、35.7%、10.7%,表明Hg、Cd、As相对地质背景富集程度较高,值得强调的是研究区绝大多数样品Hg含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值的标准。

3)研究区耕地土壤重金属污染风险等级整体较低,有866件土壤样品低于风险筛选值,498件土壤样品介于风险筛选值和风险管制值之间(影响指标以Cd、As为主),35件土壤样超过风险管制值(影响指标主要为Cd)。

4)人体健康风险评估结果表明,研究区重金属对成人均没有非致癌风险和致癌风险,但存在少量样品中As对儿童存在非致癌风险,儿童在平时的生活中应注意防范。

5)PMF模型来源识别结果显示,研究区重金属主要有4种来源:Hg主要为与人类活动相关的工农业排放源,As主要为大气沉降源,Cd主要为与土壤类型相关的成土母质源,Cr、Ni、Pb、Cu、Zn主要为与地质背景相关的自然来源。利用PMF模型可以识别出成分因子的主控元素,但现实中土壤重金属元素的累积是多种因素综合作用的结果。

致谢:感谢项目组成员采集土壤样品过程中的

辛劳付出,同时感谢杨剑洲工程师对本文的帮助和指导!

参考文献(References):

- [1] 国务院. 中共中央国务院关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见[N/OL]. 新华社, 2022-2-22. http://www.gov.cn/zhengce/2022-02/22/content_5675035.htm
The State Council. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on doing well the key work of comprehensively promoting rural revitalization in 2022[N/OL]. Xinhua News Agency, 2022-2-22. http://www.gov.cn/zhengce/2022-02/22/content_5675035.htm
- [2] 中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告(2015年)[EB/OL]. 北京, 2015. <https://www.cgs.gov.cn/xwl/dzzl/201603/U020160726370276602662.pdf>
China Geological Survey. Report on geochemical survey of cultivated land in China 2015[EB/OL]. Beijing, 2015. <https://www.cgs.gov.cn/xwl/dzzl/201603/U020160726370276602662.pdf>
- [3] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016: 366-374.
Guan L Z. General soil science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016: 366-374.
- [4] Wang F, Guan Q, Tian J, et al. Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. Catena: Giessen, 2020, 191: 104573.
- [5] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 96-104.
Yin G Q, Jiang H, Wang Q, et al. Analysis of the causes and characteristics of heavy metal pollution in agricultural land in typical areas of Anhui Province[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2018, 37(1): 96-104.
- [6] 夏飞强, 张祥, 杨艳, 等. 安徽省宁国市土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(3): 585-593.
Xia F Q, Zhang X, Yang Y, et al. Selenium geochemical characteristics and influencing factors of soil and agricultural products in Ningguo City Anhui Province[J]. Soil, 2021, 53(3): 585-593.
- [7] 陶汝鹏, 吴志辉. 宁国山核桃主产区土壤肥力调查与分析[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(18): 73-75, 84.
Tao R P, Wu Z H. Investigation and analysis of soil fertility in Ningguo City cathayensis main production area[J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2018, 24(18): 73-75, 84.
- [8] 生态环境部国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
Ministry of Ecology and Environment General Administration for National Market Supervision. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk management standard for soil pollution of agricultural land[S].
- [9] 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 等. 土壤环境质量预警体系构建与应用[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2834-2841.
Li X N, Ding S K, Chen W P, et al. Construction and application of soil environmental quality early warning system[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2834-2841.

- [10] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river [J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 109-118.
- [11] 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: 329-380.
China National Environmental Monitoring Centre. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 329-380.
- [12] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002: 4-24.
- [13] US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume 1; human health evaluation manual[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 6-50.
- [14] 中华人民共和国地质矿产行业标准. DZ/T 0354—2020 局部生态地球化学评价规范[S].
Geological and Mineral Industry Standards of the People's Republic of China. DZ/T 0354—2020 Specification of local ecogeochemistry assessment[S].
- [15] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 16-845.
Ministry of Environmental Protection. Chinese population exposure parameter manual[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013: 16-845.
- [16] Liu H, Wang H, Zhang Y, et al. Risk assessment spatial distribution and source apportionment of heavy metals in Chinese surface soils from a typically tobacco cultivated area[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(17): 16852-16863.
- [17] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical parameters in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [18] 肖婷. 宁国市土壤 pH 调查及改良措施[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(8): 46-56.
Xiao T. Soil pH survey and improvement measures in Ningguo City[J]. *Ningxia Journal of Agro-Forestry Science and Technology*, 2013, 54(8): 46-56.
- [19] 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 等. 海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4590-4600.
Yang J Z, Gong J J, Wang Z L, et al. Enrichment factors health risks and source identification of heavy metals in agricultural soil in semi-arid area of Hainan Island[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4590-4600.
- [20] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 713-725.
Lyu J S. Quantitative source analysis and spatial prediction of soil heavy metals in Yantai coastal zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 713-725.
- [21] Liu R, Wang Q, Lu X, et al. Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing'an Mountain northeastern China[J]. *Environment Pollution*, 2003, 124(1): 39-46.
- [22] 夏飞强, 张祥, 杨艳, 等. 宁国市土地质量地球化学调查与评价成果报告[R]. 安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 2020.
Xia F Q, Zhang X, Yang Y, et al. Results report of geochemical survey and evaluation of land quality in Ningguo City[R]. Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Technology, 2020.
- [23] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 58-71.
Wang Y, Wei F S. Soil environmental element chemistry[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 58-71.

Enrichment characteristics, source identification, and health risk assessment of soil heavy metals in typical cultivated land in the mountainous area of southern Anhui Province

YANG Yan, LIU Bin, XIA Fei-Qiang, CHEN Ping-Feng, ZHANG Xiang
(Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting Techniques, Hefei 230022, China)

Abstract: This study aims to explore the enrichment characteristics and origin of soil heavy metals in typical cultivated land in the mountainous area of southern Anhui province. With Ningguo City in southeastern Anhui Province as the research object, this study collected 1399 topsoil samples in the cultivated land for determining the concentrations of As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu, and Zn. Furthermore, this study conducted a health risk assessment and source identification of heavy metals using the correlation analysis, the soil environmental quality - risk control standard for soil contamination of agricultural land, the geoaccumulation index, the health risk index, and the positive matrix factorization (PMF) model. The results are as follows: (1) The average concentrations of As, Cr, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu, and Zn were 15.8×10^{-6} , 0.41×10^{-6} , 0.106×10^{-6} , 31×10^{-6} , 67×10^{-6} , 29×10^{-6} , 29×10^{-6} , and 94×10^{-6} , respectively, which were all higher than their background values in Anhui Province, except Ni. (2) The soil heavy metals generally exhibited low pollution risks, with the heavy metal concentrations of 866 soil samples lower than their risk screening values. (3) The cultivated soil was primarily polluted by Hg, Cd, and As, as indicated by the geoaccumulation index results. (4) Both non-carcinogenic and carcinogenic risk levels in adults in the study area were within the acceptable ranges, as revealed by the health risk assessment results. (5) Four sources of heavy metals in the study area were identified based on the PMF model: industrial and agricultural emissions associated with human activities, atmospheric deposition, soil parent materials related to soil types, and the geological background source.

Key words: cultivated land; soil heavy metals; health risk; PMF model

(本文编辑:蒋实)