doi: 10.11720/wtyht.2026.1373
王卓路, 余姝辰. 湖南清水塘老工业区重金属污染特征及其在食物链的迁移富集研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 169-179. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1373
Wang Z L, Yu S C. Heavy metal pollution of the Qingshuitang old industrial area in Hunan Province: Characteristics and its migration and enrichment in food chains[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 169-179. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1373

湖南清水塘老工业区重金属污染特征及其在食物链的迁移富集研究

王卓路[1], 余姝辰[2]
(1. 湖南省妇幼保健院, 湖南 长沙 410028; 2. 湖南省自然资源事务中心, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 湖南清水塘老工业区重金属污染对人体健康构成了高风险。为解析历史遗留工矿废弃地重金属在食物链中的迁移富集特征, 本文采集了不同人群对应的食物链样品 16 组共 128 件样品, 测试稻土、菜土、稻谷、蔬菜、饮用水、人体尿液、血液等样品中 Cd、Hg、Pb、As 4 种重金属元素的含量, 运用污染指数法、内梅罗综合污染指数法和 Pearson 相关分析法, 分析重金属在"土壤—农作物—人体"食物链中的迁移富集特征。结果表明: 稻土和菜土中的 Cd 为重度污染, Pb 为重度—中度污染, As 为中度—轻度污染, Hg 为轻度污染, 总体上稻土综合污染程度高于菜土; 稻谷中 Cd、Pb、Hg 为重度污染, As 为轻度污染, 蔬菜中 Cd 为重度污染, Hg 和 As 为轻度污染, Pb 为无污染, 稻谷综合污染程度大于蔬菜; 人体中, 尿液 Cd 平均超标准限量 2.73 倍, 血液 Cd、Pb 平均超标准限量 1.73 和 2.73 倍, 血液 As 和尿液 Hg 含量基本低于临床诊断限量; Cd、Hg、Pb、As 在"土壤—农作物(稻谷、蔬菜)"中的含量与 Cd 在"农作物(稻谷、蔬菜)—人体尿液"中的迁移富集相关性显著, 但人体血液 Cd、血液 Pb 的富集则另有其他迁移途径, As、Hg 在"农作物(稻谷、蔬菜)—人体"迁移环节的富集规律不明显, 为偶发的职业性中毒。本次研究成果将为工矿业废弃地重金属污染治理及其引起的人体健康风险防控提供参考。

关键词: 土壤; 农作物; 人体样本; 重金属; 污染特征; 食物链; 迁移富集
中图分类号: P632;X53;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0169-11

0 引言

经济社会发展对原材料的不断需求促进了矿业及其下游产业发展, 随之而来的是选冶矿业区环境问题日趋凸显[1]。我国土壤重金属污染形势不容乐观, 对农产品安全已构成了一定威胁[2]。《全国土壤污染状况调查公报》数据显示, 我国耕地土壤中 Cd、Pb、As、Hg 等重金属超标率达 19.4%[3], 表现为耕地土壤环境质量堪忧, 且工矿业废弃地土壤环境问题突出。在此背景下, 研究重金属迁移、转化及其对人体健康的影响, 对防控工矿业废弃地重金属污染及其带来的人体健康风险具有重要意义。

矿业活动中重金属通过"三废"排放进入土壤、水体和空气并污染耕地和农作物[4-5], 在"土壤—农作物—人体"等食物链中迁移转化并聚集于人体[6], 导致机体中毒, 引起神经系统、消化系统、循环系统、造血系统等损伤[7-9], 严重危害人体健康。近年来, 矿业区土壤重金属污染对人体健康的影响成为研究热点[10]。前人形成了比较完善的土壤重金属污染评价方法, 如王海洋等[11]、林曼利等[12]、杨帆等[13] 学者采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的综合质量影响指数评价法和单因子污染指数法, 以及德国科学家 Muller 提出的地累积指数法等方法, 先后评价了陕西潼关矿区、安徽铜陵矿区、云南卡房锡矿区等地土壤重金属来源、污染程度, 取得了良好的评价效果。然而, 这些评价主要关注土壤重金属含量, 未涉及农产品

收稿日期: 2025-10-15; **修回日期:** 2025-12-02
基金项目: 湖南省科技人才托举工程年轻优秀科技人才培养计划项目(2023TJ—N16); 湖南省自然科学基金项目"联合土壤有机质与多源高光谱数据的洞庭湖区典型农作区土壤重金属反演"(2025JJ80020)
第一作者: 王卓路(1988-), 男, 副教授, 主要从事病理学与临床医学研究工作。Email: joylu20xx@163.com

质量，在人体健康风险评价时缺少“经口摄入”农产品指标。为此，成晓梦等[14]、魏洪斌等[15]、张龙等[16]、黄钟霆等[17]、余飞等[18]学者采用生物富集系数（BCF）、内梅罗综合指数（PN）和风险评估指数（RAC）等方法，按照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022) 标准，对浙江龙游硫铁矿区、广东大宝山多金属矿区、湖南锡矿山锑矿区、湖南明乐锰矿区和重庆市煤矸山矿区等地的稻谷、蔬菜等主要农产品中重金属含量进行评价，较好地总结了重金属在“土壤—农作物”中的迁移富集规律和生态风险。然而，已有研究表明，不同的重金属元素对人体器官的损害具有一定的选择性，如 Cd 主要损害人体骨骼而导致“痛痛病”[9,19-21]，Hg 主要侵害人体的肝、肾和脑组织[22]，Pb 中毒主要危害人体中枢神经系统和造血系统[23]，As 中毒对人体循环系统、神经系统、泌尿生殖系统、消化系统、呼吸系统和免疫系统等都会造成损害[6-9,24]。因此，采集一定人体样品（血液、尿液等）并分析其重金属含量，是探究重金属元素在人体中迁移富集进而掌握毒理规律的基础。Etsuyankpa 等[25]研究了尼日利亚市场工作人员血液与尿液中重金属元素的含量水平，徐婷等[26]总结了云南南丹矿业活动区人体尿液中镉、砷和锑的含量特征，陆强等[27]调查了常州市铅作业工人的血铅异常情况。这些研究涉及地球化学环境到人体生物标志物的响应，囿于多学科交叉与人体样品采集的困难性，前人对此类研究总体相对较少。

本文以业已关停的湖南清水塘老工业区为研究区域，针对不同人群（性别、年龄、身体状况等）采集并测试与其关联的土壤（稻土、菜土）、农产品（稻谷、蔬菜）、饮用水（井水）和人体（血清、全血、尿液等）样品中的 Cd、Hg、Pb、As 等重金属元素含量，分析它们在“土壤—农作物—人体”食物链中的迁移转化和富集规律，以期为历史遗留的工矿业废弃地重金属污染治理、人体健康保护提供理论依据和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清水塘老工业区位于湖南省株洲市西北部，是 1950 年代建立的以冶金、化工、建材为主导产业的老工业区，也是我国著名的铅锌冶炼基地和稀贵金属综合回收基地之一，面积约 15 km^2。研究区是重金属污染严重区[28]，浅表层土壤中 Cd 的平均含量是湖南省土壤平均值的 155.82 倍，是中国表层土壤的 166.35 倍[29]，Cd、Hg、Pb、As 等重金属含量异常明显（图 1）。

研究区重金属污染对紧邻的湘江水质构成了重要威胁。2011 年国务院将清水塘老工业区列为湘江流域 7 大重点治理区域之一。2015 年由世界银行出资，湖南省政府和株洲市政府联合实施了“株洲市土壤污染治理项目”。鉴于原株洲铅锌冶炼活动对土壤 Cd、Pb 污染的贡献率高达 48.62%[30-31]，2017 年 3 月株洲冶炼厂整体搬迁、拆除工程正式启动。2018 年 12 月清水塘基地冶炼产能实现全部关停，但区内被重金属污染的土壤仍然对当地居民人体健康构成高风险。

1.2 样品采集及分析

采集的样品包括土壤、农作物、饮用水和人体样品 4 类。土壤和饮食样品的采样点按人体取样对象确定，即采集被采人体样的人员所饮用的水、所食用的蔬菜、稻谷农产品以及对应的土壤。因此，首先确定人体样的采集对象，然后确定待采的其他样品，以实现各样品的一一对应。

1.2.1 人体样品

人体样品的采样对象由株洲市疾病控制中心组织，株洲市石峰区卫生防疫站、株洲市白马乡医院、株洲市石峰区铜坊湾办事处清霞居委会联合确定，综合考虑采样对象的身体状况、年龄结构、疾病类型、性别等，且原则上至少需连续 3 代居住在取样区域，无长时间外出居住经历，并基本食用样区的水体与农作物。身体状况包括病人和健康人，年龄结构选择中、老年人，疾病类型以肺癌和心脑血管疾病为主。

人体样品主要采集尿液与血液，其中血液样又包括血清与全血两种。样品重量根据分析元素所需要量的多少而定，总体上大于常规的临床采样量。尿液一般为 150 mL，血清一般为 2～5 mL，全血一般为 8～10 mL。由于采样对象以患者为主，部分病例一次性难以采集到要求的样品重量，采用同一天多次采集予以解决。

人体样品的采集与分析由湖南省劳动卫生职业病防治所中心实验室承担，并负责提供贮样容器，采用上门实地单样采集方式。共采集人体对象 16 人，其中男性 9 人，女性 7 人。具体采集对象分布情况如图 2 所示。

采样对象中，肺癌与肺结核患者 4 人，骨痛患者 3 人，心脑血管疾病患者 4 人，其他系统疾病患者 2 人，健康人 3 人，共采集尿样、全血样和血清样 48 件。尿样采集第一次晨尿，常温下装于聚乙烯瓶

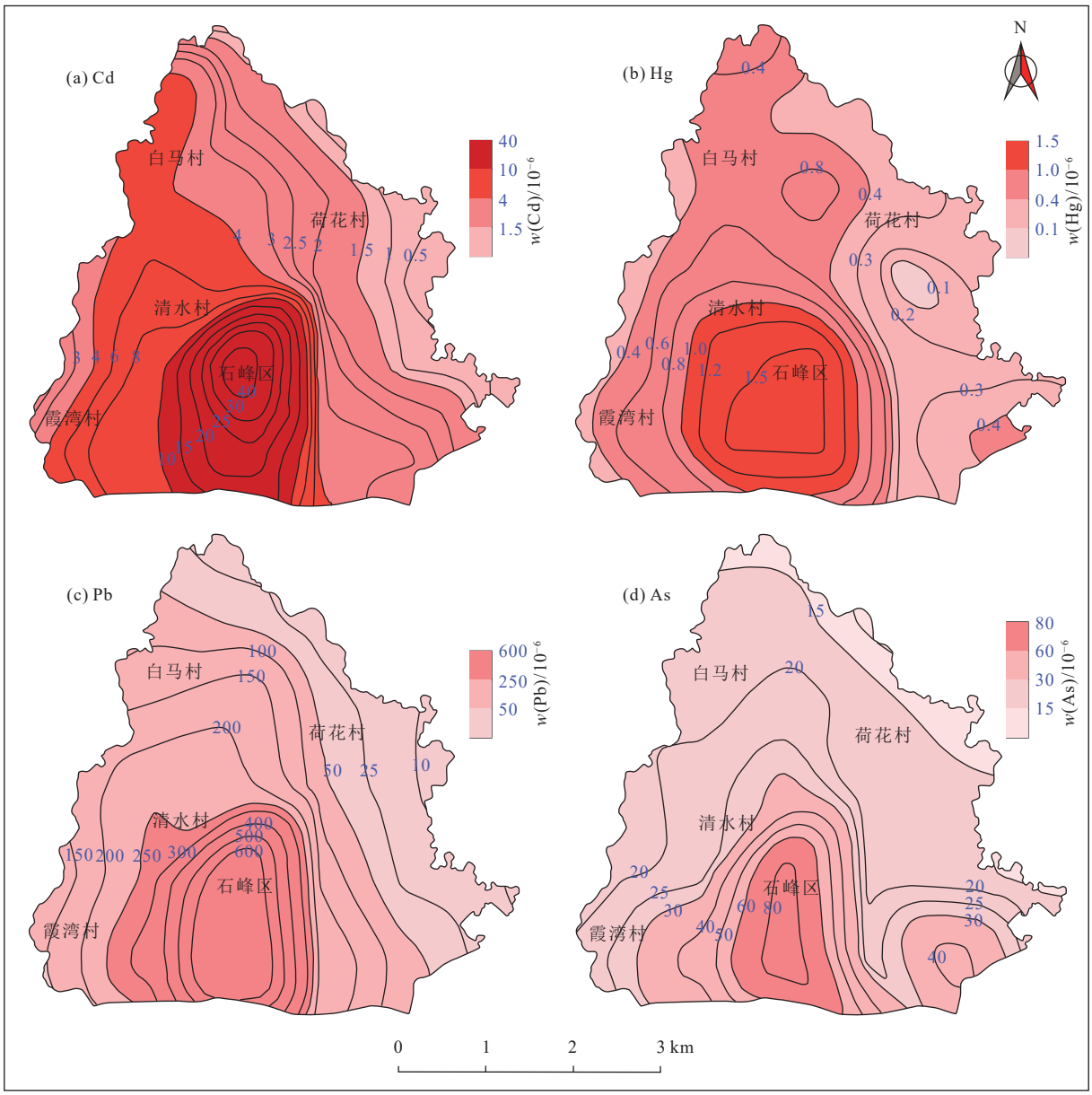


图 1　研究区土壤重金属元素含量等值线分布

Fig. 1　The contour line distribution of heavy metal element content in the soil of the study area

保存; 血样采集清晨空腹状态的肘静脉血, 常温下装于 EDTA 抗凝管, 在 2 h 内用高速离心机处理样本, 分离并保存血清。尿样和血样均在采样后 4 h 内完成检测, 采用石墨炉原子吸收法进行 Cd(尿 Cd 和血清 Cd)、Hg(尿 Hg)、Pb(全血 Pb)、As(全血 As)等项目测定, 测试过程参照《尿液标本的采集与处理》(WS/T 348—2024)和《临床化学检验血液标本的采集与处理》(WS/T 225—2024)标准进行。

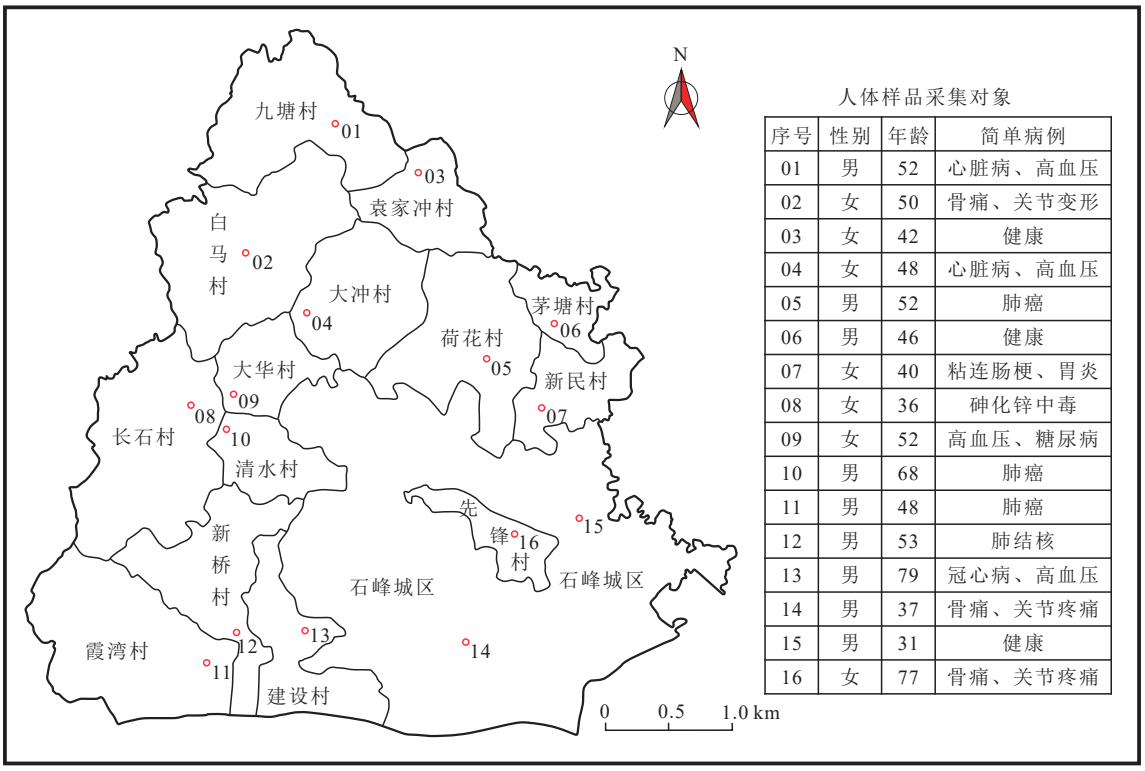
1.2.2　饮用水样品

采集人体样品采集对象的饮用水源, 主要来自井口密封的地下水民井, 共 16 个样品。原样保存于聚乙烯塑料瓶中, 每 1 000 mL 加入 10 mL 浓硝酸进行酸化处理至 pH＜2, 用石蜡密封。饮用水样品采集与分析方法执行《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2023)标准。

1.2.3　农产品（稻谷、蔬菜）样品

稻谷样品从被采样人日常食用的稻谷中采集, 蔬菜样品直接从菜地中采集。无论是稻谷还是蔬菜, 都和土壤样一一对应。如果人体样食用的稻谷与蔬菜都是从市场上购买, 则不予取样。研究中共采集稻谷样品和蔬菜样品各 16 件, 蔬菜样品包括采样时期的时令蔬菜白萝卜、大白菜、包菜、红菜苔和南瓜。

水稻与蔬菜样品的贮样容器为化学稳定性好的全棉样袋与聚乙烯塑料样袋, 不使用金属器具。对采集的农产品样品, 首先进行清洗、分切, 然后进行杀青与干燥处理, 再粉碎、过筛, 储存于聚乙烯塑料



人体样品采集对象

序号	性别	年龄	简单病例
01	男	52	心脏病、高血压
02	女	50	骨痛、关节变形
03	女	42	健康
04	女	48	心脏病、高血压
05	男	52	肺癌
06	男	46	健康
07	女	40	粘连肠梗、胃炎
08	女	36	砷化锌中毒
09	女	52	高血压、糖尿病
10	男	68	肺癌
11	男	48	肺癌
12	男	53	肺结核
13	男	79	冠心病、高血压
14	男	37	骨痛、关节疼痛
15	男	31	健康
16	女	77	骨痛、关节疼痛

图 2　人体样品采集对象位置示意

Fig. 2　Schematic diagram of the location of the human sample collection object

瓶，采用等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cd、Hg、Pb、As 含量，具体执行《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD 2005—03) 标准。

1.2.4　土壤样品

土壤样品分为稻田土壤与蔬菜土壤，采样地块为人体样采集对象所食用的水稻、蔬菜对应的水田、菜地，其中菜地为水旱轮作地。人体样食用的稻谷与蔬菜从市场上购买，则不予采集。研究中共采集并分析水稻土壤样品和蔬菜土壤样品各 16 件，共计 32 件。

从野外采回的土壤样品，置于干净整洁的室内通风场地晾晒风干，剔除植物残体、石块等，并用静电吸附的方法清除细小已断的植物须根，用木棍碾压使样品全部通过 2 mm 的孔径筛，再用牛皮纸盛装送实验室分析。土壤样品采集与分析执行《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD 2005—03) 的要求控制精度，通过副样重复测试和标准物质比对以控制分析质量。

饮用水、农作物（稻谷籽粒、蔬菜）及其对应的土壤样分析均由自然资源部长沙地质实验测试中心承担。

1.3　评价方法

1.3.1　土壤重金属污染评价方法

采用单元素重金属污染指数和内梅罗（Nemerow）指数法评价土壤重金属污染程度。单元素重金属污染指数反映土壤中某种重金属元素浓度相对于其标准限值或环境背景值的污染水平，是计算内梅罗综合污染指数的基础，其计算公式如下[32]：

$$K_i = C_i / S_i , \qquad (1)$$

式中：K_i 为土壤重金属元素 i 的污染指数；C_i 为土壤中重金属元素 i 的实测值；S_i 为土壤中重金属元素 i 的标准限量，即《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15 618—2018) 中风险筛选值。单元素重金属污染程度划分为[15]：$K_i \leqslant 1.0$，无污染；$1.0 < K_i \leqslant 2.0$，轻度污染；$2.0 < K_i \leqslant 3.0$，中度污染；$K_i > 3.0$，重度污染。

内梅罗污染指数通过同时考虑各单元素标准限值的最大值和平均值构建计算式，突出污染最严重因子的影响，是用来评价多因子（本文指多种重金属元素）复合污染程度的一种指标，计算公式如下[27]：

$$K_N = \sqrt{\left[K_{i(\mathrm{ave})}^2 + K_{i(\mathrm{max})}^2 / 2 \right]} , \qquad (2)$$

$$K_{i(\mathrm{ave})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} K_i , \qquad (3)$$

式中：K_N 为重金属污染内梅罗综合指数；K_i 为单因子标准污染指数；n 为样本数量；$K_{i(\mathrm{ave})}$ 为所有重金属污染指数 K_i 的算术平均值；$K_{i(\mathrm{max})}$ 为所有重金属元素污染指数 K_i 的最大值。重金属综合污染程度划分

为[15]: $K_N \leqslant 1.0$, 无污染; $1.0 < K_N \leqslant 2.0$, 轻微污染; $2.0 < K_N \leqslant 3.0$, 轻度污染; $2.0 < K_N \leqslant 5.0$, 中度污染; $K_N > 5.0$, 重度污染。

1.3.2　农作物、饮用水、人体样品重金属污染评价方法

采用单元素污染指数法和综合污染指数法评价农作物、饮用水和人体样品重金属污染程度。单元素污染指数的计算参考式(1), 综合污染指数的计算参考式(2)和式(3)。其中, 农作物中重金属标准限量依据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022); 饮用水中重金属标准限量依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022); 人体样品中 Cd 的标准限量依据《职业性镉中毒诊断标准》(GBZ 17—2015), Hg 的标准限量依据《职业性汞中毒诊断标准》(GBZ 89—2024), Pb 的标准限量依据《职业性铅及其无机化合物中毒诊断标准》(GBZ 37—2024), As 的标准限量依据《职业性砷中毒诊断标准》(GBZ 83—2025)。

农作物、饮用水和人体样品重金属综合污染程度划分如下[18]: $K_N \leqslant 0.7$, 无污染; $0.7 < K_N \leqslant 1.0$ 尚未污染 (警戒线); $1.0 < K_N \leqslant 2.0$, 轻度污染; $2.0 < K_N \leqslant 3.0$, 中度污染; $K_N > 3.0$, 重度污染。

1.3.3　重金属元素迁移富集评价方法

食物链中重金属的迁移富集途径有“土壤—农作物—人体”“土壤—饮用水—人体”“土壤—大气—人体”等, 其迁移富集特点可通过不同食物链中重金属含量的相关性反映。

采用 Pearson 回归分析方法, 求解食物链中重金属元素含量的相关性和显著性水平。

2　结果与分析

2.1　重金属元素的异常特征

2.1.1　土壤中重金属元素异常特征

研究区土壤 pH 值介于 6.09~8.18, 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)明确的不同 pH 值对应的农用地土壤污染风险筛选值, 以及“对于水旱轮作地采用其中较严格的风险筛选值”的规定, Cd、Pb、As 和 Hg 4 种重金属元素含量和污染程度统计如表 1 所示。

表 1　稻土、菜土中重金属元素含量特征

Table 1　Characteristics of heavy metal element content in rice soil and vegetable soil

参数	稻土				菜土			
	Cd	Pb	As	Hg	Cd	Pb	As	Hg
含量范围/10^{-6}	1.12～53.89	112.0～1 521.0	22.7～192.0	0.40～2.46	0.95～18.20	117.0～459.0	12.0～68.1	0.39～1.02
均值/10^{-6}	14.65	504.81	60.58	1.12	7.06	264.67	32.95	0.68
标准差/10^{-6}	16.26	398.79	43.37	0.60	6.95	142.71	19.11	0.24
标准限量/10^{-6}	0.4～0.8	100～240	20～30	0.5～1.0	0.3～0.6	90～170	20～30	0.5～1.0
污染指数K_i	21.83	3.09	2.66	1.56	14.89	1.97	1.45	0.98
内梅罗综合指数K_N	21.06				11.59			

可以看出, Cd 是污染程度最大的重金属元素, 稻土和菜土的 K_i 值分别达 21.83 和 14.89, 均为重度污染; 其次是 Pb, 稻土和菜土的 K_i 值分别为 3.09 和 1.97, 为重度污染和轻度污染; 再次是 As, 稻土和菜土的 K_i 值分别为 2.66 和 1.45, 为中度污染和轻度污染; Hg 的污染程度相对较轻, 稻土处于轻度污染水平, 菜土尚未污染。总体上, 土壤中 4 种重金属元素的污染程度依次为 Cd>Pb>As>Hg。从内梅罗综合指数看, 稻土和菜土的 K_N 值分别为 21.06 和 11.59, 均为重度污染, 且稻土中重金属综合污染程度高于菜土。

2.1.2　农作物中重金属元素异常特征

根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022), 研究区重金属元素含量和污染程度见表 2。

可以看出, 研究区稻谷和蔬菜均遭受不同程度的重金属污染。稻谷中, Cd、Pb、Hg 的单元素污染指数 K_i 值分别为 161.01、54.876 和 3.78, 为重度污染, As 的单元素污染指数 K_i 值为 1.78, 为轻度污染。蔬菜中, 除 As 的单元素污染指数 K_i 值只有 0.54 外, Cd、Pb 和 Hg 均超过食品中污染物限量值, 其中 Cd 的 K_i 值达到 19.66, 为重度污染; Pb 和 Hg 的 K_i 值分别为 1.12 和 1.08, 为轻度污染。总体上, 研究区稻谷和蔬菜均被重金属重度污染, 且稻谷污染程度远大于蔬菜, 两者综合污染指数 K_N 分别为 126.88 和 15.00。

2.1.3　饮用水中重金属元素异常特征

根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022), 饮用水中 Cd、Hg、Pb 和 As 4 种重金属元素含量特征见表 3。

可以看出, 饮用水中 4 种重金属元素含量均值

表 2 稻谷、蔬菜重金属元素含量特征

Table 2 Characteristics of heavy metal element content in rice and vegetables

参数	稻谷				蔬菜			
	Cd	Pb	As	Hg	Cd	Pb	As	Hg
含量范围/10^{-6}	9.65～89.75	0.950～43.055	0.77～1.42	0.003～0.398	0.22～2.03	0.05～0.16	0.03～0.96	0.007～0.016
均值/10^{-6}	29.93	10.975	0.86	0.075	0.983	0.112	0.272	0.011
标准差/10^{-6}	20.26	13.64	0.30	0.10	0.64	0.03	0.34	0.001
标准限量/10^{-6}	0.2	0.2	0.5	0.02	0.05	0.1	0.5	0.01
单元素污染指数K_i	161.01	54.875	1.78	3.78	19.66	1.12	0.54	1.08
综合污染指数K_N	126.88				15.00			

表 3 饮用水重金属元素含量特征

Table 3 Characteristics of heavy metal element content in drinking water

参数	Cd	Pb	As	Hg
含量范围/(μg·L^{-1})	0～13.0	0～78.0	0～19.5	0.2～1.8
均值/(μg·L^{-1})	1.4	23.7	4.0	0.8
标准差/(μg·L^{-1})	0.9	14.8	1.7	0.1
标准限量/(μg·L^{-1})	5.0	10.0	10.0	1.0
单元素污染指数K_i	0.24	0.47	0.35	0.61
综合污染指数K_N	0.62			

均未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5 749—2022)规定的毒理学指标,单元素污染指数 K_i 值均小于 1,综合污染指数 K_N 为 0.62,处于尚未污染 (警戒线) 程度。由于饮用水水样全部来自井口密封的地下水民井,说明研究区的重金属尚未污染地下水,未对人体健康构成危害。

2.1.4 人体中重金属元素异常特征

根据 16 名采样对象的尿 Cd、血清 Cd、全血 Pb、尿 Hg 和全血 As 等项目测定数据,按不同身体状况(疾病类型)的人群分析人体中 Cd、Pb、Hg、As 重金属含量特征。

1)人体中 Cd 元素异常特征

Cd 是一种软金属,可通过饮食或呼吸道进入人体。人体内的 Cd 主要以金属硫蛋白的形式蓄积在肾和肝脏中,蓄积于肾的 Cd 经尿液缓慢排泄,蓄积于肝脏的 Cd 进入血液循环系统[20]。因此,研究中同时采集并分析了尿 Cd 和血清 Cd 含量。

《职业性镉中毒诊断标准》(GBZ 17—2015) 提供的尿 Cd、血清 Cd 标准限量值(诊断下限值)分别为 5.0 μg/g(肌酐) 和 5.0 μg/L。据此,研究区不同人群尿 Cd、血清 Cd 富集系数见表 4。

表 4 不同疾病类型人群尿 Cd、血清 Cd 富集系数

Table 4 Abnormal characteristics of urinary and serum Cd levels in populations with different disease types

参数	肺癌与肺结核人群		骨痛患者人群		心脑血管疾病人群		其他疾病人群		健康人群	
	尿Cd	血清Cd	尿Cd	血清Cd	尿Cd	血清Cd	尿Cd	血清Cd	尿Cd	血清Cd
含量范围	9.6~60.1	9.6~26.9	4.0~20.1	4.4~7.8	8.2~21.9	6.1~14.6	5.2~6.0	6.6~6.8	2.5~8.7	2.4~7.8
均值	24.23	14.75	10.30	6.30	15.38	9.15	5.60	6.70	6.00	4.60
标准差	24.05	8.13	8.60	1.73	6.45	3.75	0.57	0.14	3.18	2.84
标准限量	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
富集系数K_i	4.85	2.95	2.06	1.26	3.08	1.83	1.12	1.34	1.20	0.92
超标样本数	4	4	2	2	4	4	2	2	2	1
超标率/%	100	100	66.67	66.67	100	100	100	100	66.67	33.33

注: 尿Cd含量单位为μg/g(肌酐), 血清Cd含量单位为μg/L。

16 名取样对象中,尿 Cd 超标者 14 人,超标率 87.50%;血清 Cd 超标者 13 人,超标率 81.25%。尿 Cd 的最大含量为 60.1 μg/g(肌酐),最小含量为 2.5 μg/g(肌酐),均值 13.66 μg/g(肌酐),富集系数 K_i 变化于 1.12～4.85,平均超标准限量 2.73 倍;血清 Cd 的最大含量为 26.9 μg/L,最小含量为 2.4 μg/L,均值 8.59 μg/L,富集系数 K_i 变化于 0.92～2.95,平均超标准限量 1.73 倍。不同人群的尿 Cd、血清 Cd 富集系数 K_i 不同,表现为肺癌与肺结核人群>心脑血管疾病人群>骨痛患者人群>其他疾病人群>健康人群。总体上,研究区人体 Cd 含量普遍偏高,即便是 3 例健康人群,也有 2 例尿 Cd 和 1 例血清 Cd 超过人体 Cd 含量标准限量,癌症患者更是严重异常。

2)人体中 Pb 元素异常特征

Pb 通过饮食和呼吸道进入人体,主要表现为对血液系统产生毒理作用,长时间低浓度 Pb 暴露会导

致血铅水平异常[22], 因此, 研究中采集并分析全血 Pb 含量。

根据《职业性铅及其无机化合物中毒诊断标准》(GBZ 37—2024), 成人血铅正常值为 0～99 μg/L, ≥100 μg/L 者为铅中毒。本研究将血铅含量 100 μg/L 作为标准限量(诊断下限值), 分析 16 名采样对象不同人群全血 Pb 富集系数(表 5)。

16 名采样对象中, 全血 Pb 的最大含量为 480 μg/L, 最小含量为 70 μg/L, 均值为 280.6 μg/L, 只有 1 例未超过标准限量值(2 号样品, 骨痛病患者), 超标率 93.75%。从表 5 可以看出, 不同人群的全血 Pb 含量均超过慢性铅中毒诊断标准, 富集系数 K_i 变化于 2.17～4.00, 平均超标准限量 2.81 倍, 其中肺癌与肺结核人群的全血 Pb 富集系数最大, 健康人群最小。可见, 研究区人体中 Pb 含量异常明显, 即便健康人群, 其血 Pb 含量也均超出临床诊断下限值。

表 5　不同疾病类型人群全血 Pb 富集系数

Table 5　Abnormal characteristics of whole blood Pb content in populations with different disease types

参数	肺癌与肺结核人群	骨痛患者人群	心脑血管疾病人群	其他疾病人群	健康人群
含量范围/(μg·L^{-1})	320~480	70~430	130~350	130~460	160~290
均值/(μg·L^{-1})	400	223	248	295	217
标准差/(μg·L^{-1})	73	186	93	233	67
标准限量/(μg·L^{-1})	100	100	100	100	100
富集系数K_i	4.00	2.23	2.48	2.95	2.17

3)人体中 As 元素异常特征

As 中毒表现为肝损伤等多种慢性疾病风险, 高 As 暴露史人群的全血 As 含量是反映慢性肝病的重要指标[23], 因此, 研究中采集并分析血清 As 含量。

根据《职业性砷中毒诊断标准》(GBZ 83—2025), 成人血清 As 中毒诊断指标为 60 μg/L。对 16 个采样对象血清 As 含量测定的数据显示, 血清 As 含量小于 10 μg/L 的有 15 个血样, 说明 93.75% 的取样对象血清 As 处于正常范围, 另 1 个血样 As 含量为 90 μg/L (8 号样品, 砷化锌中毒患者, 已治愈), 说明 As 对本区人群健康的影响方式主要是职业性中毒。

4)人体中 Hg 元素异常特征

Hg 作为唯一的液态金属, 可经呼吸道、皮肤和食道进入体内, 引起急慢性中毒及其他不良反应。汞主要经肾脏排出, 其排出量占总排出量的 70%[21], 因此, 研究中采集并分析尿 Hg 含量。

《职业性汞中毒诊断标准》(GBZ 89—2024) 没有提供尿 Hg 标准限量值, 湖南省职业病控制研究中心提供的诊断下限值为 10 μg/L, 本研究以此作为尿 Hg 的标准限量。据此, 16 名采样对象的尿 Hg 分析结果及富集系数见表 6。

从表 6 可以看出, 16 名采样对象的尿 Hg 均值为 5.88 μg/L, 只有两例超过标准限量值, 分别为 5 号样品(肺癌患者)19 μg/L 和 15 号样品(健康人群) 25 μg/L, 超标率为 12.5%, 其余 14 个尿样 Hg 含量均值为 3.13 μg/L, 均低于标准限量, 且不同人群的尿 Hg 含量没有太大差异。可见, 虽然研究区是高 Hg 异常区, 但人体中 Hg 的含量并无明显异常。

表 6　16 名采样对象尿 Hg 含量及富集系数

Table 6　Urine Hg content and enrichment coefficient of 16 sampling subjects

参数	样品编号																平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
尿Hg含量/(μg·L^{-1})	2.0	3.0	5.0	2.0	19.0	4.0	6.0	3.0	4.0	4.0	2.0	3.0	2.0	2.0	25.0	8.0	5.88
富集系数K_i	0.2	0.3	0.5	0.2	1.9	0.4	0.6	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	2.5	0.8	0.59

综上, 研究区 Cd、Pb、As 和 Hg 4 种重金属在人体中存在异常的主要是 Cd 和 Pb, 且具有普遍性, 而 As 和 Hg 的异常局限于个别肺癌患者或砷化物中毒患者, 无普遍性。

2.2　食物链中重金属元素的相关性与迁移富集

清水塘铅锌冶炼老工业区于 2018 年 12 月 30 日关停, 大气污染已得到控制, 故本文未采集并分析大气样本。前述研究表明, 研究区的重金属尚未污染地下水, 饮用水未对人体健康构成危害; As 在人体中只有 8 号血清样检出量为 90 μg/L, 其余均小于 10 μg/L。鉴于此, 在食物链重金属元素的迁移富集研究中, 未考虑饮用水的迁移途径, 未分析 As 在“稻谷—人体”“蔬菜—人体”和“饮水—人体”迁移中的相关性。以人体采样对象为主线, 对土壤、农作物、饮用水、人体等样本中 Cd、Pb、Hg、As 重金属含量进行 Pearson 相关分析, 结果如表 7 所示。

表 7 土壤—饮食—人体中重金属元素 (Cd、Pb、As、Hg) 相关关系

Table 7 The correlation between soil, diet, and heavy metal elements (Cd, Pb, As, Hg) in the human body

元素	相关系数	稻土—稻谷—人体			菜土—蔬菜—人体		
		稻土—稻谷	稻谷—人体尿液	稻谷—人体血液	菜土—蔬菜	蔬菜—人体尿液	蔬菜—人体血液
Cd	*r*	0.838 9*	0.485 2*	0.254 2	0.790 3*	0.819 6*	0.199 3
	P	0.012	0.049	0.484	0.047	0.045	0.442
Pb	*r*	0.715 5*	-	0.105 2	0.730 2*	-	0.064 7
	P	0.034	-	0.265	0.044	-	0.872
As	*r*	0.606 3*	-	/	0.811 2*	-	/
	P	0.042		/	0.031	-	/
Hg	*r*	0.784 0*	0.091 5	-	0.754 7*	0.014 8	-
	P	0.039	0.454	-	0.032	0.733	-

注: “*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, “-”表示未测试到相应元素, “/”表示测试元素含量极低。

Cd 是研究区土壤重度污染的重金属元素, 其在稻土与菜土中的污染指数 K_i 分别达到 21.83 和 14.89(表 1)。表 7 显示, Cd 在“稻土—稻谷”“菜土—蔬菜”“稻谷—人体尿液”“蔬菜—人体尿液”4 个迁移环节的相关性均呈显著性水平(P<0.05), 在“稻谷—人体血液”“蔬菜—人体血液”2 个迁移环节的相关性不显著(P>0.05)。亦即, 稻谷、蔬菜中的 Cd 主要来自土壤, 人体通过食用稻谷和蔬菜而摄入重金属 Cd, 显著地迁移至人体尿液。人体血液中 Cd 含量普遍超高, 富集系数 K_i 为 0.92～2.95(表 4), 均值 1.72, 但与稻谷、蔬菜中的 Cd 相关性不强, 说明人体血液中 Cd 的富集尚难以简单地通过一个人食用的稻谷来反映其血镉水平, 亦即从“摄入”到“血镉”的迁移过程中尚存在诸多干扰因素: 一是人对 Cd 的摄入有多种暴露源, 除稻谷以外, 尚有蔬菜、水产品、动物内脏[33-34] 以及空气粉尘[29]、吸烟[35] 等, 它们会影响稻谷镉含量与血镉之间的直接关联; 二是不同个体存在生理与代谢差异, 如铁、钙、锌等元素的缺乏会增加镉的吸收, 肾功能差异也会影响镉排出速率, 即使摄入等量的镉, 不同个体的血镉水平也会不同[20]; 三是个别职业暴露影响人体血镉的含量[26]。另外, 本研究分析的样本量只有 16 个, 为小样品数, 在统计学中个别异常值容易导致不确定性, 如果存在个别“吸烟者”或“严重铁缺乏者”, 血镉水平因个体差异而相对分散, 可能破坏整体的相关性。因此, “稻谷镉污染”是导致“人群血镉升高”的必要条件, 但尚难以揭示“个体血镉差异”的迁移与转化。

Pb 是研究区土壤污染程度仅次于 Cd 的重金属元素, 稻土与菜土中 Pb 的污染指数 K_i 分别为 3.09 和 1.97(表 1)。相关性分析表明, Pb 在“稻土—稻谷”“菜土—蔬菜”2 个迁移环节呈显著性相关(P<0.05), 说明土壤中高 Pb 含量迁移至稻谷、蔬菜后产生富集。鉴于 Pb 主要作用于血液系统, 研究中仅测试全血 Pb, 未测试尿 Pb。人体血液中 Pb 富集系数 K_i 为 2.17～4.00(表 5), 均值 2.81, 但 Pb 在“稻谷—人体血液”“蔬菜—人体血液”2 个环节不仅相关性差, 且显著性水平低(P>0.05), 说明人体血液中 Pb 的来源和途径隐藏着更为复杂的人体暴露和代谢机制, 如职业暴露[27,36]、空气灰尘[21]、个体的肠胃道吸收与排泄功能[21] 以及行为习惯[37] 等。

As 在稻土和菜土中的污染指数 K_i 分别为 2.66 和 1.45(表 1), 在稻谷和蔬菜中的污染指数分别为 1.78 和 0.54(表 2), 处于轻度污染—无污染程度。As 在“稻土—稻谷”“菜土—蔬菜”迁移环节中相关性显著(P<0.05), 说明稻谷、蔬菜中 As 的高含量与土壤密切相关。由于 As 进入人体后主要导致肝损伤等慢性肝病, 故研究中只测试了血 As 含量。测试结果表明, 16 个全血样品中有 15 个样品的 As 含量小于 10 μg /L。虽然难以根据血 As 测试结果进行 As 在“稻谷—人体血液”“蔬菜—人体血液”迁移环节的相关性分析, 但这也说明 As 从稻谷、蔬菜迁移至人体的富集量不大, 迁移规律不明显。

研究区土壤 Hg 的污染程度较轻, 稻土和菜土的污染指数分别为 1.56 和 0.98(表 1)。表 7 显示, Hg 在“稻土—稻谷”和“菜土—蔬菜”迁移环节均呈显著相关(P<0.05), 说明土壤中的 Hg 通过根系吸收能迁移并富集于稻谷和蔬菜中, 致使稻谷和蔬菜的 Hg 污染指数 K_i 分别达到 3.78 和 1.08(表 2)。鉴于 Hg 主要经肾脏排出, 研究中测试了尿 Hg 而未测试血 Hg。从表 7 可以看出, Hg 在“稻谷—人体尿液”和“蔬菜—人体尿液”迁移环节不仅相关系数 r 值极小, 显著性指标 P 也远大于 0.05。因此, 尽管研究区土壤和稻谷、蔬菜均存在 Hg 异常, 但人体尿 Hg 异常

指数 K_i 只有 0.59, 由此说明, Hg 难以经稻谷、蔬菜迁移至人体。

3　结论

本文采集并测试了湖南清水塘老工业区关停后不同人群对应的土壤、农产品、饮用水和人体样品中 Cd、Hg、Pb、As 等重金属含量, 分析它们在“土壤—农作物—人体”食物链中的迁移富集特征, 得出以下结论:

1) 稻土和菜土的内梅罗综合指数 K_N 分别为 21.06 和 11.59, 为重度污染。其中, 稻土和菜土中 Cd 为重度污染, Pb 为重度—中度污染, As 为中度—轻度污染, Hg 为轻度—未污染。

2) 稻谷和蔬菜的综合污染指数 K_N 分别为 126.88 和 15.00, 均为重度污染。其中, 稻谷中, Cd、Pb、Hg 为重度污染, As 为轻度污染; 蔬菜中, Cd 为重度污染, Hg 和 As 为轻度污染, Pb 为无污染; 饮用水中 Cd、Hg、Pb、As 均处于尚未污染 (警戒线) 程度, 未对人体健康构成危害。

3) 人体中, 尿 Cd 平均超标准限量 2.73 倍, 血 Cd 平均超标准限量 1.73 倍。不同人群 Cd 的超标程度不同, 表现为肺癌与肺结核人群>心脑血管疾病人群>骨痛患者人群>其他疾病人群>健康人群。血 Pb 平均超标准限量 2.81 倍, 肺癌与肺结核人群的异常指数最大, 健康人群最小。除个别肺癌患者或砷化物中毒患者外, 人体中血 As 和尿 Hg 含量均低于临床诊断限量。

4) Cd、Hg、Pb、As 在“稻土—稻谷”“菜土—蔬菜”迁移环节均呈显著性相关, 说明土壤中重金属均通过根系吸收迁移至稻谷、蔬菜中。“农作物—人体”迁移环节中, 只有 Cd 在“稻谷—人体尿液”和“蔬菜—人体尿液”呈现显著性相关, Hg、Pb、As 元素从农作物进入人体的相关性不显著, 表明这些重金属元素进入人体隐藏着更为复杂的人体暴露和代谢机制, 干扰了相关性分析结果。

综上, 尽管研究区已经关停, 但稻土、菜土重金属污染严重, 并仍然迁移、转化、富集于稻谷、蔬菜等农作物和普通人群暴露者, 给人体健康构成了高风险。研究结果同时表明, 人体血液中重金属元素的迁移富集除饮食摄入外, 还有呼吸道摄入等多样化暴露途径。土壤、农作物重金属异常是导致人群重金属含量高风险的必要条件, 但尚难以揭示“个体重金属差异”的迁移与转化。大幅增加不同个体人群及其对应农产品、土壤样品数量, 加强 Cd 的有机结合态、Pb 的残留态等重金属形态分析, 解析重金属形态对农作物吸收的影响与地球化学过程, 研究总结不同人群的生理与代谢机理对重金属的吸收和排泄差异, 是构建重金属在人体中污染迁移机制的有效途径。对此, 有待后续进一步研究。

参考文献(References):

[1] 任思达. 中国矿业经济绿色发展研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
Ren S D. Research on the green development of China’s mining economy[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2019.

[2] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考 [J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35−41.
Chen S B, Wang M, Li S S , et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 35−41.

[3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查报告 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China.National soil pollution status investigation report[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2014.

[4] 张庆辉. 镉环境地球化学特征 [J]. 阴山学刊:自然科学版, 2005, 19(3): 31−34.
Zhang Q H. Characteristics of cadmium environmental geochemical[J]. Yinshan Academic Journal:Natural Science Edition, 2005, 19(3): 31−34.

[5] 张庆辉. 汞环境地球化学特征 [J]. 阴山学刊:自然科学版, 2006, 20(1): 35−37,69.
Zhang Q H. Characteristics of mercury environmental geochemical [J]. Yinshan Academic Journal:Natural Science Edition, 2006, 20(1): 35−37,69.

[6] 李向宏, 郑国璋. 土壤重金属污染与人体健康 [J]. 环境与发展, 2016, 28(1): 122−124.
Li X H, Zheng G Z. Soil heavy metal pollution and human health[J]. Environmental and Development, 2016, 28(1): 122−124.

[7] 熊欣欣, 田杰, 束会娟, 等. 重金属中毒影响脑内神经发生的研究进展 [J]. 华中科技大学学报: 医学版, 2020, 49(1): 102−105.
Xiong X X, Tian J, Shu H J, et al. Research progress on the effect of heavy metal poisoning on neurogenesis in brain[J]. Acta Medicinae Universitatis Scientiae et Technologiae Huazhong, 2020, 49(1): 102−105.

[8] 于娌. 重视重金属中毒诊断与治疗的临床意义分析 [J]. 中国医药指南, 2018, 16(35): 286−287.
Yu L. Analysis of the clinical significance of emphasizing the diagnosis and treatment of heavy metal poisoning[J]. Guide of China Medicine, 2018, 16(35): 286−287.

[9] 李小迎, 张银萍, 郭雄. 骨骼重金属含量与人体健康的关系 [J]. 国外医学: 医学地理分册, 2006, 27(1): 6−8.
Li X Y, Zhang Y P, Guo X. The relationship between bone heavy metal content and human health[J]. Foreign Medical Sciences: Sec-

tion of Medgeography, 2006, 27(1): 6−8.

[10] 龙新宪, 刘文晶, 仇荣亮. 中国农田土壤重金属污染的人体健康风险评估: 研究进展与展望 [J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1188−1200.
Long X X, Liu W J, Qiu R L. Research progress and prospects of human health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1188−1200.

[11] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2104−2114.
Wang H Y, Han L, Xie D N, et al. Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2104−2114.

[12] 林曼利, 胡振琪, 彭位华, 等. 安徽铜陵典型矿区周边土壤重金属污染评价及来源解析 [J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5494−5505.
Lin M L, Hu Z Q, Peng W H, et al. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in the surrounding soil of typical mining areas in Tongling, Anhui Province[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5494−5505.

[13] 杨帆, 杨熙斌, 黄小凤, 等. 卡房锡尾矿库重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7177−7186.
Yang F, Yang X B, Huang X F, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of Kafang Tin Tailings Pond[J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7177−7186.

[14] 成晓梦, 赵辰, 吴超, 等. 典型硫铁矿区农田土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 [J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6309−6318.
Cheng X M, Zhao C, Wu C, et al. Ecological risk assessment and migration, accumulation characteristics of heavy metal in farmland soil-crop system from typical pyrite mining area[J]. Environmental Science, 2023, 44(11): 6309−6318.

[15] 魏洪斌, 罗明, 向垒, 等. 金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 [J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2461−2472.
Wei H B, Luo M, Xiang L, et al. Health risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around metal mines[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 2461−2472.

[16] 张龙, 宋波, 黄凤艳, 等. 湖南锡矿山周边土壤—农作物系统锑迁移转换特征及污染评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1558−1566.
Zhang L, Song B, Huang F Y, et al. Characteristics of antimony migration and transformation and pollution evaluation in a soil-crop system around a Tin Mine in Hunan Province[J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1558−1566.

[17] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤—农作物重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(2): 975−984.
Huang Z T, Yi S W, Chen B B, et al. Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 975−984.

[18] 余飞, 张风雷, 周皎, 等. 矿区周边耕地土壤-农作物系统重金属富集特征及风险评价 [J/OL]. 环境科学, 1-15[2025-03-09]. http://doi.org/10.13227/j.hjkx.202410194.
Yu F, Zhang F L, Zhou J, et al. Enrichment characteristics and risk assessment of heavy metal in soil-crop system of cultivated land around mining area[J]. Environmental Science, 1-15[2025-03-09]. http://doi.org/10.13227/j.hjkx.202410194.

[19] 易宗娓, 何作顺. 镉污染与痛痛病 [J]. 职业与健康, 2014, 30(17): 2511−2513.
Yi Z W, He Z S. Cadmium pollution and itai-itai disease[J]. Occup and Health, 2014, 30(17): 2511−2513.

[20] 谢黎虹, 许梓荣. 重金属镉对动物及人类的毒性研究进展 [J]. 浙江农业学报, 2003(6): 52−57.
Xie L H, Xu Z R. The toxicity of heavy metal Cadmium to animals and humans[J]. Acta Agricultureae Zhejiangenis, 2003(6): 52−57.

[21] 徐亚莉. 多金属复合暴露与代谢综合征的关联研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
Xu Y L. Association between Co-exposure to Multiple Metals and Metabolic Syndrome[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[22] 张红兵, 张宏群, 窦建瑞, 等. 汞毒性研究概况及职业性汞中毒诊断标准修订探讨 [J]. 职业卫生与应急救援, 2022, 40(4): 501−505.
Zhang H B, Zhang H Q, Dou J R, et al. Overview of study on mercury toxicity and thinking on revision of diagnostic criteria for occupational mercury poisoning[J]. Occup Health & Emerg Rescue, 2022, 40(4): 501−505.

[23] 李亚楠. 1980 至 2018 年中国成人血铅水平及其相关因素研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
Li Y N. Study on Chinese adult blood lead levels and its related factors from 1980 to 2018[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021.

[24] 田宇, 王祺, 黎国秀, 等. 肝功能联合血常规检测对燃煤污染型地方性砷中毒患者肝损伤的诊断价值 [J]. 贵州医科大学学报, 2023, 48(11): 1368−1373.
Tian Y, Wang Q, Li G X, et al. The diagnositic value of combination detection of liver function and blood routine in the identification of liver damage of patients with coal-burning arsenicosis[J]. Journal of Guizhou Medical University, 2023, 48(11): 1368−1373.

[25] Etsuyankpa M B, Ahmad A S, Mustapha S. Levels of selected heavy metals in blood and urine of workers of Alkali Kongo Plaza GSM market within Lafia Metropolis, Nasarawa State, Nigeriaa[J]. Environmental Challenges, 2022.https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100649.

[26] 徐婷, 钟雪梅, 田美玲, 等. 南丹矿业活动影响区人尿镉、砷和锑含量特征 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 170−176.
Xu T, Zhong X M, Tian M L, et al. Characteristics of Cd, As and Sb in human urine affected by mining activities in Nandan of Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 170−176.

[27] 陆强, 付强, 汪国海, 等. 常州市铅作业工人血铅异常调查 [J]. 职业与健康, 2023, 39(15): 2039−2042, 2048.
Lu Q, Fu Q, Wang G H, et al. Investigation on abnormal blood lead among lead-exposed workers in Changzhou City[J]. Occup and Health, 2023, 39(15): 2039−2042, 2048.

[28] 朱云. 株洲市清水塘工业区污染分析及综合治理模式 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(11): 82−86.
Zhu Y. Theoretical study of the pollution control pattern and contamination analysis in Qingshuitang industrial district of Zhuzhou City[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012,

39(11): 82−86.

[29] Luo Q, Tagen D, Wu Y. Distribution characteristics and present situation of heavy metals in soil in different functional zones of Zhuzhou[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2016, 9(3): 1018−1023.

[30] 施宸皓, 王云燕, 柴立元, 等. 洞庭湖湿地周围表层土壤重金属污染及其人体健康风险评价 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 150−161.
Shi C H, Wang Y Y, Chai L Y, et al. Assessment of heavy metal and human health risk in surface soils around Dongting Lake wetland, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 150−161.

[31] Zhou Y, Jiang D D, Ding D, et al. Ecological-health risks assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soils around a super-sized lead-zinc smelter with a long production history, in China[J]. Environmental Pollution, 2022, 307: 119487.

[32] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889−896.
Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. Evaluation method for soil heavy metal pollution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 889−896.

[33] 李鸣. 非镉米型镉污染对人群健康影响评估 [D]. 遵义: 遵义医学院, 2014.
Li M. Assessment to affection of non cadmium rice cadmium pollution on hunan health[D]. Zunyi: Zunyi Medical University, 2014.

[34] 应涛, 杨家齐, 卿颖, 等. 非职业暴露于镉、铅和全氟化合物的健康成年居民的甲状腺激素水平研究 [J]. 上海预防医学, 2022, 34(5): 425−431.
Ying T, Yang J Q, Qing Y, et al. Thyroid hormone levels in healthy adults with non-occupational exposure to cadmium, lead and perfluoroalkyl substances[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2022, 34(5): 425−431.

[35] 许青松, 许松姬, 金永三. 韩国某大学学生吸烟行为与血镉的相关性研究 [J]. 中国学校卫生, 2006(6): 479−481.
Xu Q S, Xu S J, Jin Y S. Correlation study of smoking behavior on blood cadmium in Korean undergraduates[J]. Chin. J. School Health, 2006(6): 479−481.

[36] 何金铜, 齐莹莹, 张楚东, 等. 铅作业工人血铅水平与血常规指标的关联分析 [J]. 工业卫生与职业病, 2025, 51(2): 150−153.
He J T, Qi Y Y, Zhang C D, et al. Correlation analysis between blood lead levels and routine blood test indicators in lead-exposure workers[J]. Ind. Hlth. & Occup. Dis., 2025, 51(2): 150−153.

[37] 郜振彦. 儿童铅中毒的相关原因与健康教育 [D]. 苏州:苏州大学, 2014.
Gao Z Y. The related reasons of childhood lead poisoning and its health education[D]. Suzhou:Soochow University, 2014.

Heavy metal pollution of the Qingshuitang old industrial area in Hunan Province: Characteristics and its migration and enrichment in food chains

WANG Zhuo-Lu [1], YU Shu-Chen [2]

(1. *Hunan Provincial Maternal and Child Health Care Hospital*, *Changsha* 410028, *China*; 2. *Hunan Center of Natural Resources Affairs*, *Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Heavy metal pollution in the Qingshuitang old industrial area in Hunan province poses a high risk to human health. To investigate the migration and enrichment characteristics of heavy metals in the food chain of historical industrial and mining wastelands, this study collected 128 food chain samples comprising 16 groups corresponding to different populations. The contents of four heavy metals, including cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb), and arsenic (As), were tested in samples such as paddy soil, vegetable soil, rice, vegetables, drinking water, along with human urine and blood. Then, the migration and enrichment characteristics of heavy metals in the "soil-crop-human" food chain were investigated using the pollution index, Nemerow composite pollution index, and Pearson correlation analysis. The results show that the paddy and vegetable soils both exhibited heavy Cd pollution, heavy to moderate Pb pollution, moderate to mild As pollution, and mild Hg pollution. Overall, the paddy soil presented higher comprehensive pollution levels than the vegetable soil. Moreover, the rice displayed heavy pollution in Cd, Pb, and Hg and mild As pollution. In contrast, vegetables presented severe Cd pollution and mild pollution in Hg and As, with no Pb pollution observed. Generally, the comprehensive pollution level of rice was higher than that of vegetables. In addition, humans showed exceedances of standard limits for key biomarkers: Cd in urine (2.73 times), Cd in blood (1.73 times), and Pb in blood (2.73 times). In contrast, the As in blood and Hg in urine were generally below the clinical diagnostic limits. Significant correlations were determined between the Cd, Hg, Pb, and As contents in the "soil-crop (rice and vegetables)" and the migration and enrichment of Cd in the "crop (rice and vegetables)-human urine". However, the enrichment of Cd and Pb in human blood followed other migration pathways. No clear enrichment patterns of As and Hg were observed in the "crop (rice and vegetables)-human" transfer, indicating occasional occupational poisoning. These findings will provide a valuable reference for mitigating heavy metal pollution in industrial and mining wastelands and preventing and controlling associated human health risks.

Key words: soil; crops; human sample; heavy metals; pollution characteristics; food chain; migration and enrichment

（本文编辑: 蒋实）