

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李助之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 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 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价

刘洋¹, 何朝辉^{1*}, 牛学奎², 张迪¹, 潘波¹

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500; 2. 云南省生态环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要: 为研究云南省某矿区小流域受铜矿影响的土壤重金属污染状况以及污染土壤对当地居民构成的健康风险, 采集农田土壤(39个)、底泥(6个)、水体及其中悬浮物(6个)和降尘样本(1个), 测定其中 Cd、Pb、Hg、As、Zn、Cu、Ni 和 Cr 的含量以及土壤 pH。分析了重金属在小流域主要介质中的空间分布, 并尝试通过重金属在各类介质中的相对比例, 判断土壤重金属污染来源。利用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对流域内土壤重金属污染状况和潜在生态风险进行评价分析, 采用 USEPA 推荐的健康风险模型对该流域进行了健康风险评价。结果表明流域上游村庄的重金属污染可能来源于浇灌、大气沉降和坡地水土流失的协同输入, 而中游和下游村庄的重金属分别来源于浇灌和坡地土壤流失。流域上游农田土壤受重金属污染程度大于下游。污染负荷指数法结果显示 Cd、Zn、Pb 和 Cu 污染严重, Cd、Zn 和 Pb 具有较高的潜在生态风险。当地居民虽然未面临患非癌症疾病的风险, 但是致癌风险已超过可接受水平, 并且儿童患癌症的风险更高。此外, 虽然 As 在土壤中的含量低于 Cd、Zn 和 Pb, 却具有更高的致癌风险。

关键词: 土壤污染; 重金属; 多介质; 铜矿; 健康风险

中图分类号: X821; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0936-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105114

Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan

LIU Yang¹, HE Zhao-hui^{1*}, NIU Xue-kui², ZHANG Di¹, PAN Bo¹

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the pollution of soil heavy metals and the health risk of the contaminated soil to residents, which was affected by the copper mine in a small basin of a mining area in Yunnan Province. Soil (39 samples), sediment (six samples), water, and corresponding suspended particle (six samples) and dust (one sample) samples were collected. The contents of Cd, Pb, Hg, As, Zn, Cu, Ni, and Cr in the samples and the soil pH were determined. The spatial distribution of heavy metals was analyzed, and the source of soil heavy metals was innovatively traced by the relative proportion of heavy metals in various media. The geo-accumulation index, Nemerow comprehensive pollution index, and potential ecological risk index were used to evaluate and analyze the pollution status and the potential ecological risk of soil heavy metals in the watershed, whereas the health risk model recommended by USEPA was applied to evaluate the health risk. The results showed that the heavy metals in the soil of the upstream area might be derived from the synergistic input of irrigation, atmospheric deposition, and soil erosion. In the middle reaches and lower reaches, the irrigation and the soil erosion of sloping land mainly contributed the heavy metal input, respectively. It was also found that the pollution degree in the upstream area was higher than that in the downstream area. The farmland soil was seriously polluted by Cd, Zn, Pb, and Cu, and Cd, Zn, and Pb had high potential ecological risks. Although residents did not face the risk of non-cancer diseases, the carcinogenic risk had exceeded the acceptable level, and children were at higher risk of cancer. In addition, although the content of As in the soil was lower than that of Cd, Zn, and Pb, it had a higher carcinogenic risk.

Key words: soil pollution; heavy metals; multi-medium; copper mine; health risks

我国金属矿产资源丰富, 20 世纪 50 年代以来被大量开采^[1]。采选和冶炼过程中产生的废渣通过降雨和降尘等形式向周边地区迁移扩散, 导致矿区土壤、地表水和地下水受到不同程度的重金属污染^[2]; 使用受污染的地表水浇灌进一步加重了土壤重金属污染状况。目前, 矿区土壤重金属超标率达到 30%^[3]。

重金属进入土壤后可以长期存在并不断积累, 通过植物进入食物链富集, 危害人体健康^[4], 例如由 Hg 污染引起的“水俣病”^[5]和由于长期食用 Cd 污染的大米而导致的“痛痛病”^[6]。此外 Pb、As 和 Cr 等重金属不仅可以破坏人体的神经系统和消化系统, 而且会引发皮肤癌、膀胱癌等癌症, 且土壤遭

受的重金属污染难以去除, 长期危害人体健康^[7]。因此, 对土壤重金属污染及其健康风险进行评估具有重要意义。

健康风险评价自 20 世纪 80 年代开始发展, 将环境污染和人体健康相联系, 定量描述环境污染对人体健康产生的危害风险^[8]。所选云南省某小流域铜矿区、当地居民住宅区和农田均位于河流两岸, 流域面积小、水系简单且被高山环绕, 因此受外来干扰因素小, 土壤重金属污染主要受采矿、冶炼、

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 中央土壤污染防治专项

作者简介: 刘洋(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染评价与治理, E-mail: 136247184@qq.com

* 通信作者, E-mail: 58557760@qq.com

降尘和污水浇灌等人为因素影响. 将小流域选择为研究对象, 可以更为精确地识别当地重金属来源、分布和健康风险特征.

目前此小流域受铜矿影响的土壤重金属污染状况以及污染土壤对当地居民构成的健康风险尚不清楚. 因此, 为了提供有关环境暴露风险的信息以及土壤污染的预防和补救的依据, 本研究计划: ①对农田土壤重金属进行溯源分析, ②评估此小流域土壤重金属污染水平、潜在的生态风险和潜在的土壤健康风险.

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

研究区域位于云南省中北部, 楚雄彝族自治州中部, 境内最低海拔 1 140 m, 最高海拔 2 897 m. 地处北亚热带季风气候区, 年平均气温 15.8℃, 年平均降雨量 872 mm, 无霜期 238 d, 全年日照时数 2 359 h, 主导风向为东南风.

小流域中铜矿区自 20 世纪 60 年代建设投产, 近年因资源枯竭, 多数企业相继关闭, 半个世纪的铜矿采选生产活动对当地土壤和河流造成一定污染. 流域中有河流经铜矿区, 最终汇入金沙江南岸一级支流. 流域内村庄多以此河水进行作物浇灌, 导致农田土壤受到不同程度的重金属污染, 当地村民面临着健康风险.

在流域范围内的 6 个村庄共布设 39 个农田土壤点位 (A 村 8 个、B 村 5 个、C 村 11 个、D 村 4 个、E 村 9 个和 F 村 2 个), 分别采集 0~20 cm 表层土 1 kg. 每村庄各设一个采水点位, 共取 6 个地表水水样和 6 个对应底泥样品. 在流域上游设置 1 个为期半年的降尘采样点. 具体研究区域和采样点分布见图 1.

1.2 重金属化学分析与土壤 pH 测定

土壤预处理: 采集的土壤样品和底泥自然风干后去除草根和石块等杂物, 将地表水过 40 μm 滤纸后收集悬浮物; 土样、底泥和悬浮物在使用玛瑙研钵研磨后, 过 100 目筛, 混匀并使用自封袋密封, 放在阴凉和干燥处保存.

土壤重金属含量分析: 准确称取 0.1 g 土壤、降尘、底泥和悬浮物样品, 并加入 6.0 mL 王水于微波消解仪中消解后使用电感耦合等离子体质谱仪 (iCAP-RQ) 测定 Cd、Ni、Pb、Cu、Zn 和 Cr 的含量; 另称取 0.2 g 样品于 10.0 mL 王水中消解 2 h 后使用原子荧光光度计测定 As 和 Hg 的含量. 准确量取 45.0 mL 摇匀后的水体样品于消解罐中, 加入 4.0 mL 浓硝酸和 1.0 mL 浓盐酸, 在 170℃ 温度下微波

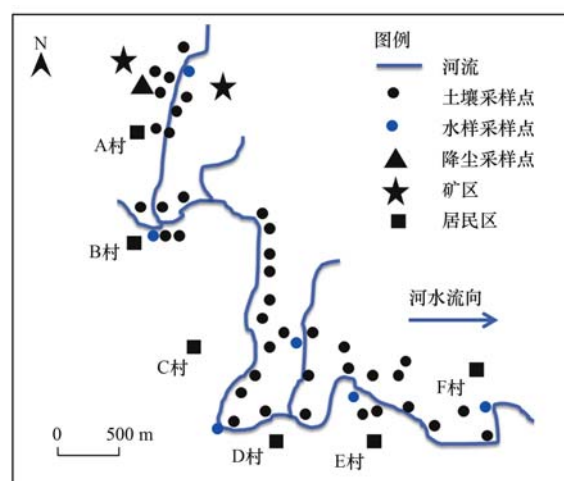


图 1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Study area and distribution of sampling sites

消解 10 min 后使用电感耦合等离子体质谱仪测定 Cd、Ni、Pb、Cu、Zn 和 Cr 的含量; 另量取 5.0 mL 水样加入 1.0 mL 王水在沸水浴中消解 1 h 后使用原子荧光光度计测定 As 和 Hg 的含量.

土壤 pH 测定: 称取 10.0 g 土壤样品置于 50.0 mL 烧杯中, 加入 25.0 mL 去离子水. 将容器用封口膜密封后, 用磁力搅拌器剧烈搅拌 2 min, 静置 30 min, 在 1 h 内使用酸度计 (PHS-3E) 完成测定. 以上所有样品检测均设置 3 个平行样和 1 个空白样.

2 数据分析方法

2.1 土壤重金属污染评价

2.1.1 地累积指数法

地累积指数法 (I_{geo}) 是德国学者 Muller 提出用于定量评价水体中沉积物重金属污染状况的方法, 近年来多被国内学者用来评价土壤中重金属的污染程度^[9]. 其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 C_i / (K \times C_0) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为土壤样品中 i 类型重金属含量实际检测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为参比值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本文采用云南省土壤元素平均背景值^[10]; K 为修正系数, 本研究取 1.5^[9]. 地累积指数法将重金属的污染程度分为 7 个等级: $I_{geo} \leq 0$, 无污染 (等级 0); $0 < I_{geo} \leq 1$, 介于无污染与中污染 (等级 1); $1 < I_{geo} \leq 2$, 中污染 (等级 2); $2 < I_{geo} \leq 3$, 介于中污染与强污染 (等级 3); $3 < I_{geo} \leq 4$, 强污染 (等级 4); $4 < I_{geo} \leq 5$, 介于强污染与极强污染 (等级 5); $5 < I_{geo} \leq 10$, 极强污染 (等级 6)^[9].

2.1.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数 (Nemerow comprehensive pollution index) 是由单因子污染指数法发展而来的一种重金属污染评价方法. 因为该方法可以兼顾重

金属在土壤中含量的平均值和突出最大值,综合地反映出不同重金属污染物在土壤中的污染程度,因此是目前国内外最常用的多因子环境质量指数方法之一^[11].

$$P_N = \sqrt{[(P_{\max})^2 + (P_{\text{ave}})^2]/2}$$
 (2)

$$P_i = C_i/S_i$$
 (3)

式中, P_N 为重金属综合污染指数; P_i 是单一重金属污染指数; $P_{\max}$ 是 P_i 中的最大值; P_{ave} 是 P_i 的平均值; C_i 和 S_i 分别是某单一金属在土壤中的实测浓度和评价标准浓度^[12], $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 内梅罗综合污染指数将重金属污染分为 5 个等级: $P_N \leq 0.7$, 等级 I (优); $0.7 < P_N \leq 1.0$, 等级 II (清洁); $1.0 < P_N \leq 2.0$, 等级 III (轻度); $2.0 < P_N \leq 3.0$, 等级 IV (中度); $P_N > 3.0$, 等级 V (重度)^[13].

2.2 潜在生态危害

根据 Hakanson 潜在生态危害指数法定量划分出潜在生态危害的程度,该指数不仅能反映某一特定环境中的每种污染物的影响,而且还可反映多种污染物的综合影响^[13]. 国内很多学者使用该方法根据重金属毒性和环境响应评估当地重金属污染的程度^[14,15]. 其计算公式为:

$$RI = \sum_i^n E_i$$
 (4)

$$E_i = T_i \times C$$
 (5)

$$C = C_i/C_0$$
 (6)

式中, RI 为潜在生态风险指数; E_i 为潜在生态风险参数; T_i 为单个污染物毒性响应参数,根据瑞典科学家 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数, Cd 、 Pb 、 Hg 、 As 、 Zn 、 Cu 、 Ni 和 Cr 的 T_i 值分别为 30、5、40、10、1、5、5 和 2; C 为污染因子; C_i 为某单一金属在土壤中的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_0 为参比

值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本文采用云南省土壤元素平均背景值. 潜在生态风险可以被划分为以下 5 个等级: $E_i < 40$, $RI < 150$, 低潜在生态风险; $40 \leq E_i < 80$, $150 \leq RI < 300$, 中潜在生态风险; $80 \leq E_i < 160$, $300 \leq RI < 600$, 较高潜在生态风险; $160 \leq E_i < 320$, 高潜在生态风险; $E_i \geq 320$, $RI \geq 600$, 很高的潜在生态风险^[13].

2.3 健康风险评价

重金属的健康风险取决于两方面,一是环境污染水平,包括重金属的浓度、形态及其毒害作用^[16];二是人体暴露行为,包括人体接触重金属的行为和特征^[17]. 重金属在进入土壤后,通过皮肤接触,手-口摄入以及附着在灰尘中被呼吸吸入等途径进入人体危害人体健康. 根据美国环境保护署 (USEPA) 推荐的健康风险评估模型对研究区域农田土壤重金属暴露造成的危害(致癌风险和非致癌风险)进行评估和预测. 由于成人和儿童存在不同的生理特征和行为方式,因此平均体重和暴露持续时间等参数选取不同的值^[18].

经手-口摄入途径暴露量计算:

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{C \times IR_{\text{ing}} \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$
 (7)

经呼吸摄入途径暴露量计算:

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C \times IR_{\text{inh}} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$
 (8)

汞通过蒸气暴露量计算:

$$ADD_{\text{vapour}} = \frac{C \times IR_{\text{inh}} \times EF \times ED}{VF \times BW \times AT}$$
 (9)

经皮肤接触暴露量计算:

$$ADD_{\text{der}} = \frac{C \times SA \times CF \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$$
 (10)

参数的定义和具体参考值见表 1^[18~22].

表 1 参数的定义和参考值

Table 1 Parameter definitions and reference values

参数	定义	单位	参考值	
			儿童	成人
C	土壤重金属浓度	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	检测数据获得	
IR_{ing}	经口摄入率	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	200	100
CF	转换因子	$\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	1×10^{-6}	1×10^{-6}
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	87.5	87.5
ED	暴露持续时间	a	6	24
BW	体重	kg	15.9	56.8
AT	平均作用时间	d	致癌因素 $AT = ED \times 365$ 非致癌因素 $AT = 70 \times 365$	
IR_{inh}	经呼吸摄入率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	7.5	15
PEF	土壤产生因子	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	1.36×10^9	1.36×10^9
VF	汞蒸发系数	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	32 675.6	32 675.6
SA	暴露皮肤面积	cm^2	2 800	5 700
ABS	皮肤吸收频率系数	/	As:0.03; 其他金属:0.001	

各类型重金属通过不同的暴露途径进入人体后会产生差异性的毒害作用,风险指数 HI 和风险度 HQ 用来评估接触某种重金属导致患非癌症疾病的风险,致癌风险 CR 用来评估患癌症的风险:

$$HQ_{ij} = ADD_{ij}/RfD_{ij} \tag{11}$$

$$HI = \sum HQ \tag{12}$$

$$CR = ADD_{ij} \times SF_{ij} \tag{13}$$

表 2 本研究重金属的 RfD 和 SF

Table 2 RfD and SF of the heavy metals studied

项目	Cd	Pb	Hg	As	Zn	Cu	Cr	Ni
RfD _{ing}	1.00 × 10 ⁻³	3.50 × 10 ⁻³	3.00 × 10 ⁻⁴	3.00 × 10 ⁻⁴	3.00 × 10 ⁻¹	4.00 × 10 ⁻²	3.00 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻²
RfD _{inh}	1.00 × 10 ⁻³	3.52 × 10 ⁻³	8.57 × 10 ⁻⁵	3.00 × 10 ⁻⁴	3.00 × 10 ⁻¹	4.02 × 10 ⁻²	2.86 × 10 ⁻⁵	2.06 × 10 ⁻²
RfD _{der}	1.00 × 10 ⁻⁵	5.25 × 10 ⁻⁴	2.10 × 10 ⁻⁵	1.23 × 10 ⁻⁴	6.00 × 10 ⁻²	1.20 × 10 ⁻²	6.00 × 10 ⁻⁵	5.40 × 10 ⁻³
SF	6.30	—	—	15.1	—	—	42.0	0.84

3 结果与讨论

3.1 土壤 pH 与重金属含量

土壤 pH 根据土壤酸碱性并参考农用地土壤污染风险筛选值^[12],将研究区域农田土壤 pH 划分为:pH≤5.5、5.5~6.5、6.5~7.5 和 pH>7.5 共 4 个指标.调查点表层土壤 pH 范围为 4.95~8.57(见图 2),共采集 39 件土壤样品,其中土壤 pH<5.5 的土壤样品 2 件,占总样品 5.1%;土壤 pH 在 5.5~6.5 范围内土壤样品 2 件,占总样品 5.1%;土壤 pH 在 6.5~7.5 范围内土壤样品 6 件,占总样品 15.4%;土壤 pH>7.5 的土壤样品 29 件,占总样品 74.4%.总体上,研究区域周边农田表层土壤以碱性土壤为主.

分析研究区域农田重金属含量与 pH 的关系后发现,重金属的含量随着 pH 的变化趋势为先上升后下降.土壤 Zn 含量在 pH 为 5.5~6.5 范围时最高,土壤 Cu 含量在 pH 为 6.5~7.5 范围时最高,土壤 Cd 含量在 pH 为 5.5~6.5 范围时最高,在 pH≤5.5 时最低.林小兵等^[24]在江西的研究也发现农田土壤重金属 Hg、Cr、Cd、As 和 Pb 含量呈现随 pH 增加而降低的趋势.有研究分析表明土壤 pH 增高,土壤中氧化物、黏粒矿物和负电荷也会相应增加,因此对土壤中重金属离子的吸附能力增强,从而导致土壤重金属含量降低^[25].在本研究中,土壤 pH<7.5 的样本仅占 25.6%,样品数量偏少,一定程度上可能会影响酸性土壤重金属含量.

参考不同土壤 pH 范围下农田土壤各种重金属污染风险筛选值和管制值^[12],39 件土壤样品中金属 Hg、Cr 和 Ni 的含量均未超过污染风险筛选值,金属 As 和 Pb 的含量超标的仅有 4 件和 2 件,金属

式中,i 和 j 分别为重金属的某种类型和某种暴露途径;HI 为风险指数,%;HQ 表示风险度,%;RfD 为参考剂量,mg·(kg·d)⁻¹;SF 为致癌斜率因子,(kg·d)·mg⁻¹,表 2 描述的是重金属元素的 RfD_{ing}(手-口摄入)、RfD_{inh}(呼吸摄入)、RfD_{der}(皮肤接触摄入)和 SF 参考值^[23].非致癌风险的可接受水平为 HI<1^[18].根据规定,致癌风险 CR 值若超过 1×10⁻⁶,居民则会有患癌症的风险^[22].

Zn、Cu 和 Cd 的超标率达到 23.1%、38.5% 和 51.3%.对于农用土重金属污染管制值,除金属 Cd 以外其余金属含量均未超过管制值,Cd 的超标率达到 30.8%.总体上看,研究区域农田土壤中 Hg、Cr、Ni、As 和 Pb 的平均含量未超过污染风险筛选值,这几类重金属富集到所种植的农产品中的风险较低,可以忽略;土壤中 Zn 和 Cu 的平均含量部分超过筛选值,因此可能存在所种植食用农产品不符合质量安全标准的风险;土壤中 Cr 的平均含量不仅超过了污染风险筛选值还超过了污染风险管制值,食用该区域农产品不符合质量安全标准的风险高,且难以通过安全利用措施降低风险,该区域的食物安全应引起重视^[26].

在不同 pH 范围内农田土壤重金属含量超标比例以及平均含量是否超标,可以用来判别在该区域内种植的食用农产品受到重金属污染的可能性大小.土壤 Hg、Cr、Ni、As 和 Pb 含量未超过风险筛选值仅意味着农产品可能会较少地富集这几类重金属,通过膳食途径对人体造成的危害较小,但并不意味着不存在健康暴露风险,手-口、呼吸和皮肤接触也会造成一定的致癌和非致癌风险;其次,由于不同重金属健康风险的暴露参数和毒性系数的差异以及健康风险叠加效应等,该区域内的重金属暴露健康风险应引起关注^[27].

3.2 土壤重金属空间分布特征及来源分析

土壤重金属变异系数由大到小顺序为(见表 3):Cd(1.94)>Zn(1.11)>Pb(1.03)>Cu(0.86)=Hg(0.86)>As(0.32)>Ni(0.19)>Cr(0.18),Ni 和 Cr 的变异系数最小,说明在空间上 Ni 和 Cr 的含量变化不大,受人为因素影响较小.Cd、Zn 和 Pb 这 3 种金属的变异系数均大于 1,表现出明显的空

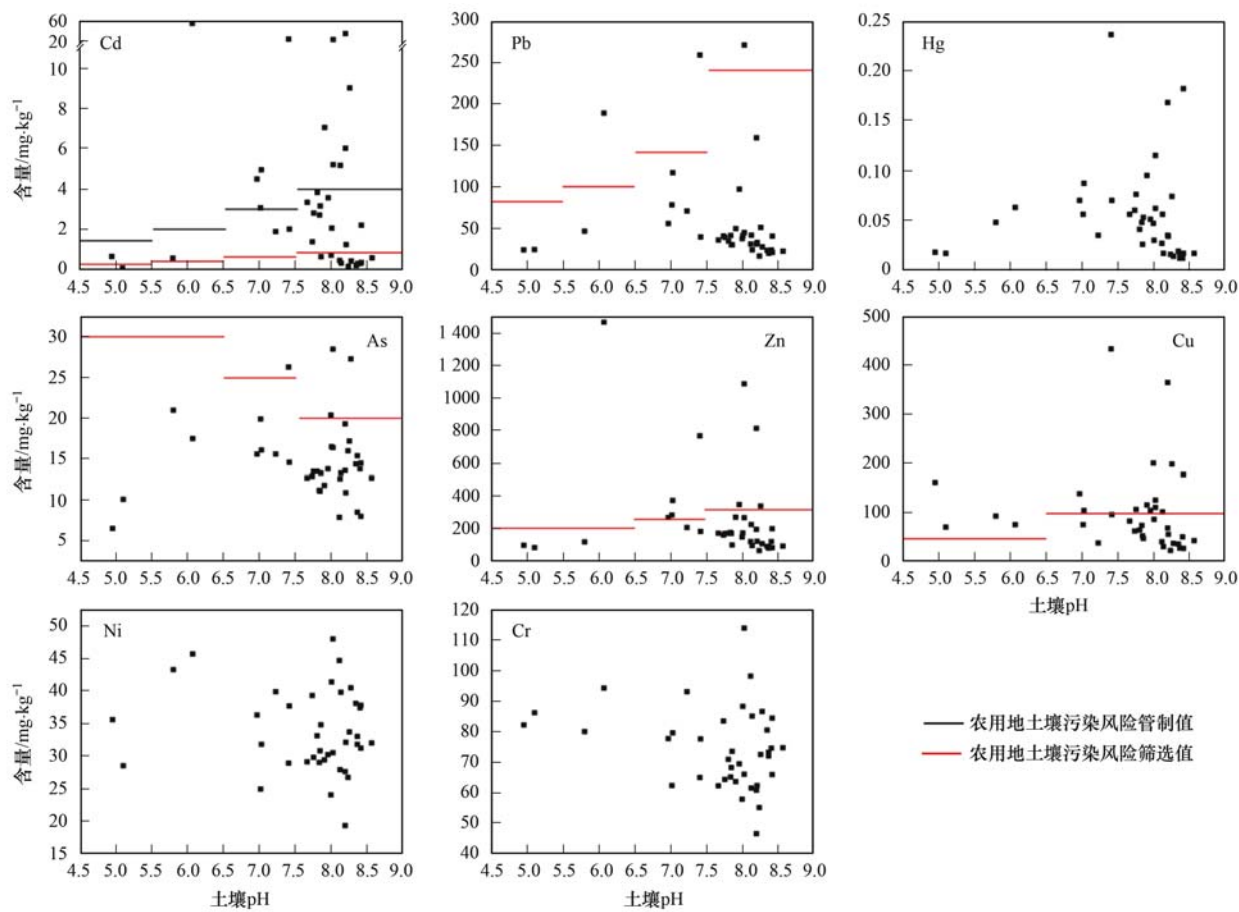


图2 土壤重金属含量与 pH 关系

Fig. 2 Relationship between soil heavy metals content and pH

间变异性,表明这些金属有一定的与自然或外部因素相关的离散输入^[28].尤其是 Cd 的变异系数高达 1.94,说明受到了强烈的人为因素的影响^[29].

研究区域土壤 Cd、Pb、Hg、As、Zn、Cu、Ni 和 Cr 的平均含量与全国土壤环境背景值的比值分别为 61.05、2.25、0.86、1.34、7.89、4.32、1.25 和 1.22,与云南省土壤环境背景值的比值分别为 8.97、1.44、0.93、0.81、2.89、2.11、0.79 和

1.14. Cd 平均浓度与全国和云南省土壤环境背景值的比值分别为 61.05 和 8.97,不仅说明当地 Cd 的污染程度十分严重,也反映出云南省土壤环境重金属背景值要普遍高于全国背景^[30].此外,Cd 和 Zn 的最高含量分别是全国土壤环境背景值的 577 和 45 倍,说明这两种重金属在空间分布上存在显著异常的高浓度点,可能是人为因素造成的离散输入^[26].

表3 流域内农田土壤重金属统计分析

Table 3 Statistical analysis of heavy metals in farmland soils in the basin

元素	土壤重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						变异系数	背景值 ^[10] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	A 村	B 村	C 村	D 村	E 村	F 村		云南省	中国
Cd	11.54	14.98	3.88	2.04	0.71	3.19	1.94	0.66	0.10
Pb	94.29	131.90	42.92	29.95	24.48	25.75	1.03	40.60	26.00
Hg	0.05	0.12	0.08	0.03	0.02	0.03	0.86	0.06	0.07
As	16.12	20.52	13.96	16.55	12.36	10.81	0.32	18.40	11.20
Zn	451.25	471.00	214.20	135.88	106.00	138.85	1.11	89.70	32.80
Cu	105.30	214.04	112.43	56.03	37.34	46.95	0.86	46.30	22.60
Ni	36.66	29.64	33.29	33.68	34.93	29.40	0.19	42.50	26.90
Cr	85.66	66.66	71.79	73.60	74.36	63.35	0.18	65.20	61.00

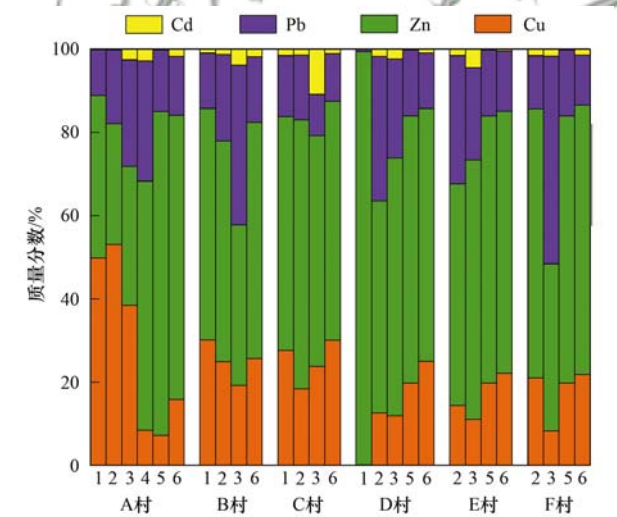
Cu、Zn、Pb 和 Cd 均具有较高的变异系数,说明其空间分布受人为因素影响较大;且 4 种重金属在环境迁移转化时具有类似的性质,因此各污染介

质中的相对比例可用于构建指纹图谱,从而实现对农田土壤重金属的溯源分析.由图 3 可知,A 村所在流域水体中悬浮物、底泥和溶解态中各类重金属比

例相似,但是与农田土壤中比例差距较大,说明 A 村农田土壤重金属并非全部来自灌溉水携带的悬浮物、底泥或水体游离重金属输入;农田土壤中各类重金属的比例与坡地土壤和大气降尘的比例也并不匹配,但较趋近于各介质的平均值.上述结果说明 A 村的重金属并非来源于单一介质,可能是重金属污染的水体浇灌、矿区受污染或高背景值土壤的大气沉降、高背景坡地水土流失协同输入造成的^[31].

B 村和 C 村灌溉水悬浮物、底泥和溶解态各类重金属比例和农田土壤中重金属的比例匹配度很高,说明两个村庄农田土壤的重金属输入大概率来源于浇灌水中携带的重金属.然而,如表 3 所示,B 村受重金属污染的程度大于 C 村,原因可能是两个村庄的浇灌方式不同.实地调研时发现,B 村的灌溉用水量要高于 C 村;此外,C 村还会使用山泉水对作物进行浇灌,因此导致 C 村受污染的程度更小.

位于下游的 D 村、E 村和 F 村水体重金属比例和农田土壤并不匹配,加之下游村庄常使用山泉水和水库水进行浇灌,因此其农田土壤重金属也并非全部来自受污染的浇灌用水.对坡地土壤重金属和农田土壤重金属比例进行分析,两者重金属的比例相似程度很高.此流域下游河道两岸的山坡比上游陡峭,雨季时在雨水的冲刷下更容易发生水土流失,可能造成受污染或者高背景的山坡土壤进入农田中,最终导致农田土壤受污染^[32].



1、2、3、4、5 和 6 分别代表水体悬浮物、底泥、溶解态、降尘、坡地土壤和农田土壤,E 村和 F 村采取的水样悬浮物含量低于检出标准

图3 研究区域重金属来源指纹图谱

Fig. 3 Fingerprint of heavy metal sources in the study area

3.3 土壤重金属污染和潜在生态风险

根据流域内土壤重金属平均值计算的累积指数 (I_{geo}) 计算结果见表 4 ($n = 39$). Pb、Hg、As、Ni 和 Cr 地累积指数平均值均为负数,说明若按照流域内

平均值对土壤重金属污染状况进行评价,此 5 种重金属为无污染状态;Cd、Zn 和 Cu 的污染程度较小,均介于无污染与中污染.

表 4 根据流域内土壤重金属平均值计算的
地累积指数 (I_{geo})

Table 4 Geo-accumulation index (I_{geo}) calculated by the mean value of soil heavy metals in the basin			
元素	最大值	最小值	平均值
Cd	5.82	-3.80	0.84
Pb	2.15	-1.89	-0.05
Hg	1.39	-2.91	-1.12
As	0.05	-2.08	-0.95
Zn	3.45	-1.05	0.46
Cu	2.64	-1.67	0.11
Ni	-0.41	-1.72	-0.94
Cr	0.22	-1.07	-0.42

若按土壤样本污染分级比例进行评价(图 4),所有样品中 Ni 无污染的级别占 100%,不存在污染;Cr、Hg 和 As 的污染较轻,多数样本级别为无污染,少量样本级别介于无污染和中污染之间;Pb、Zn 和 Cu 属于重度污染,Cd 的污染程度更为严重,样本有 5.1% 属于极度污染状态,其污染比例达到 61.5%.总体上,研究区域农田土壤污染最严重的为 Cd,其次是 Pb、Zn、Cu.

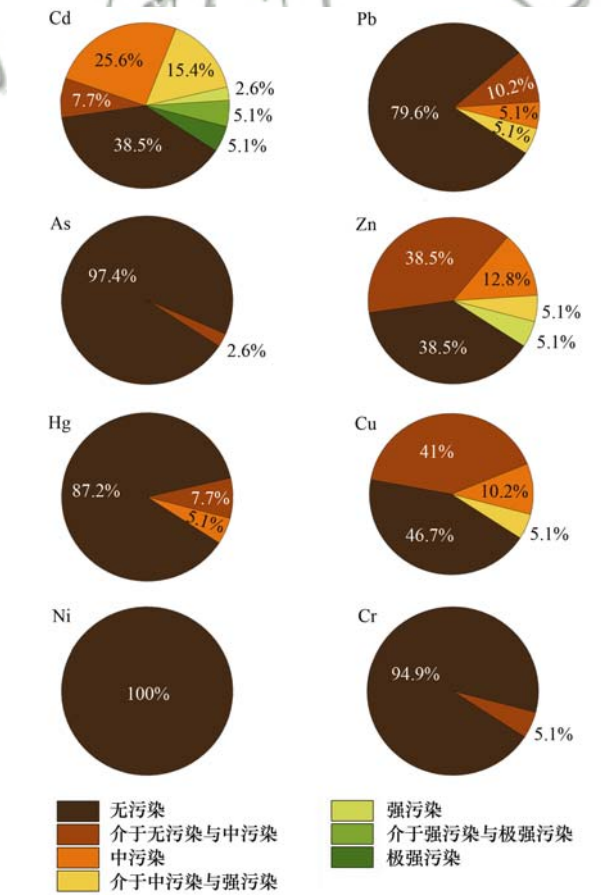


图4 土壤重金属地累积指数 (I_{geo})

Fig. 4 Geo-accumulation index (I_{geo}) of soil heavy metal

各自然村的内梅罗综合污染指数见表 5. 上游最靠近矿区的 A 村和 B 村内梅罗指数分别为 4. 93 和 6. 32, 说明两个村庄均达到重度污染级别. 距矿区较远的 4 个村庄的综合污染等级均在Ⅲ级及Ⅲ级以下, 污染较轻. 重度污染村庄 A 村的内梅罗指数最大值和最小值分别为 23. 55 和 0. 19, 表明在该区域内存在与外部因素相关的离散输入导致重金属污染情况差异较大. 潜在生态危害指数(表 6)与内梅罗综合污染指数具有相同的趋势, 距离矿区较近的两个上游村庄生态风险高于其余 4 个

距离较远的村庄, 并且金属 Cd 造成的危害最高. A 村和 B 村污染程度大, 原因可能是矿区烟囱排放的烟尘和被风吹起的厂区灰尘降落在处于下风向且距矿区最近的 A 村和 B 村, 导致两村庄土壤重金属高于其他村庄^[33]. 在流域下游的村庄受降尘的影响较小, 其重金属的主要来源可能是农作物浇灌或者坡地土壤流失输入. 铜矿区附近村庄土壤的 Cd、Zn 和 Pb 这 3 种重金属污染较为严重, 可能是因为这 3 种金属是研究区域铜矿的伴生矿^[34].

表 5 重金属的内梅罗指数和单一污染指数评价结果

Table 5 Evaluation results of Nemerow pollution index and single factor pollution index for heavy metals

村庄	P_i								P_N	等级
	Cd	Pb	Hg	As	Zn	Cu	Ni	Cr		
A	19. 24	0. 27	0. 05	0. 64	1. 50	1. 05	0. 61	0. 34	4. 93	V
B	24. 97	0. 38	0. 12	0. 82	1. 57	2. 14	0. 49	0. 27	6. 32	V
C	6. 47	0. 12	0. 08	0. 56	0. 71	1. 12	0. 55	0. 29	1. 65	Ⅲ
D	3. 41	0. 09	0. 03	0. 66	0. 45	0. 56	0. 56	0. 29	0. 90	Ⅱ
E	1. 19	0. 07	0. 02	0. 49	0. 35	0. 37	0. 58	0. 30	0. 35	I
F	5. 31	0. 07	0. 03	0. 43	0. 46	0. 47	0. 49	0. 25	1. 35	Ⅲ

表 6 重金属潜在生态风险指数评价结果

Table 6 Evaluation results of potential ecological risk index of heavy metals

村庄	E_i								RI	等级
	Cd	Pb	Hg	As	Zn	Cu	Ni	Cr		
A	524. 7	11. 6	31. 3	8. 8	5. 0	11. 4	4. 3	2. 6	599. 8	较高
B	680. 9	16. 2	79. 3	11. 2	5. 3	23. 1	3. 5	2. 0	821. 5	很高
C	176. 5	5. 3	51. 3	7. 6	2. 4	12. 1	3. 9	2. 2	261. 3	中
D	92. 9	3. 7	21. 3	9. 0	1. 5	6. 1	4. 0	2. 3	140. 7	低
E	32. 4	3. 0	13. 3	6. 7	1. 2	4. 0	4. 1	2. 3	67. 0	低
F	144. 9	3. 2	17. 3	5. 9	1. 5	5. 1	3. 5	1. 9	183. 3	中

3. 4 健康风险评价

3. 4. 1 重金属暴露评估

土壤中的重金属可以通过 3 种主要的接触途径进入人体: 手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触. 表 7 的结果显示, 无论是成人还是儿童, 手-口摄入均为主要的暴露途径, ADD_{ing} 的贡献占总 ADD 的 99%, 呼吸吸入和皮肤接触仅占 1%, 贡献量非常小. 儿童

的暴露量要大于成人的, 原因可能是由于儿童的玩耍地点和不健康的饮食习惯(儿童更容易吮吸手指)导致他们比成年人有更多的机会接触到受重金属污染的土壤颗粒. 从单个元素来看, 研究区域内 Cd 的含量高于其他金属, 因此成人和儿童 Cd 的摄入量最大. 手-口摄入是重金属暴露的主要途径、儿童的暴露风险大于成人, 这与前人的研究相似^[35].

表 7 成人和儿童经由 3 种暴露途径的平均每日剂量/ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$

Table 7 ADD of each heavy metal via three exposure routes for adults and children/ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$

元素	ADD_{ing}		ADD_{inh}		ADD_{der}	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
Cd	$1. 79 \times 10^{-5}$	$2. 50 \times 10^{-6}$	$4. 92 \times 10^{-10}$	$2. 76 \times 10^{-10}$	$5. 00 \times 10^{-8}$	$9. 97 \times 10^{-9}$
Pb	$1. 76 \times 10^{-4}$	$2. 46 \times 10^{-5}$	$4. 86 \times 10^{-9}$	$2. 72 \times 10^{-9}$	$4. 93 \times 10^{-7}$	$9. 83 \times 10^{-8}$
Hg	$1. 68 \times 10^{-7}$	$2. 35 \times 10^{-8}$	$1. 93 \times 10^{-7}$	$1. 08 \times 10^{-7}$	$4. 71 \times 10^{-10}$	$9. 40 \times 10^{-11}$
As	$4. 52 \times 10^{-5}$	$6. 32 \times 10^{-6}$	$1. 25 \times 10^{-9}$	$6. 97 \times 10^{-10}$	$3. 79 \times 10^{-6}$	$7. 57 \times 10^{-7}$
Zn	$7. 81 \times 10^{-4}$	$1. 09 \times 10^{-4}$	$2. 15 \times 10^{-8}$	$1. 21 \times 10^{-8}$	$2. 19 \times 10^{-6}$	$4. 36 \times 10^{-7}$
Cu	$2. 94 \times 10^{-4}$	$4. 12 \times 10^{-5}$	$8. 11 \times 10^{-9}$	$4. 54 \times 10^{-9}$	$8. 23 \times 10^{-7}$	$1. 64 \times 10^{-7}$
Ni	$1. 02 \times 10^{-4}$	$1. 42 \times 10^{-5}$	$2. 80 \times 10^{-9}$	$1. 57 \times 10^{-9}$	$2. 85 \times 10^{-7}$	$5. 68 \times 10^{-8}$
Cr	$2. 24 \times 10^{-4}$	$3. 14 \times 10^{-5}$	$6. 18 \times 10^{-9}$	$3. 46 \times 10^{-9}$	$6. 28 \times 10^{-7}$	$1. 25 \times 10^{-7}$
总和	$1. 64 \times 10^{-3}$	$2. 30 \times 10^{-4}$	$2. 38 \times 10^{-7}$	$1. 33 \times 10^{-7}$	$8. 26 \times 10^{-6}$	$1. 65 \times 10^{-6}$

3.4.2 健康风险特征

所研究的 8 种重金属对成人和儿童的非致癌健康风险见图 5(a) 和 5(b). 儿童的 HI 值依次为: $As > Cr > Pb > Cd > Cu > Ni > Zn > Hg$. 对于成人, 可以观察到相同的顺序. 以单一重金属来看, 儿童和成人两者的非癌症风险指数 $HQ < 1$, 不会因某种特定重金属患非癌症疾病. 此外, 儿童和成人暴露于所有重金属的风险总和分别为 0.36 和 0.05, 尚未超过安全水平 ($HI > 1$), 因此, 当地居民并没有患非癌症疾病的风险.

Cd、As、Ni 和 Cr 是被国际癌症研究机构 (IARC) 确定的致癌物, 这 4 种被研究的致癌重金属的致癌风险指数 (CR) 如图 5(c) 所示. 儿童和成人 As 的 CR 分别为 5.96×10^{-6} 和 4.20×10^{-6} , 儿童和成人的总 CR 分别为 7.20×10^{-6} 和 4.26×10^{-6} , 均超过可接受水平 (1×10^{-6}), 说明当地的成人和儿童有患癌症的风险, 并且儿童患癌症的风险相较于成人更大. 因为儿童特殊的生理特征和行为习惯, 导

致其暴露于环境重金属的可能性更大^[36].

此外还可以看出, As 是总致癌风险的主要贡献者. As 在土壤中的含量虽然不高, 甚至低于土壤中 Cd、Zn 和 Pb 的浓度, 却具有更高的致癌风险. 此现象与蔡刚刚等^[37]的研究结果相似, 其观察到矿区周围土壤中 Cd 的含量高于 As, 但是 As 对人体的健康的危害要大于 Cd.

4 结论

(1) 研究区域农田土壤 pH 以碱性土壤为主, 重金属的含量随着 pH 的变化趋势为先上升后下降. 土壤中 Zn 和 Cu 的平均含量部分超过筛选值, 土壤中 Cd 的平均含量不仅超过了污染风险筛选值还超过了污染风险管制值, 存在较大的食品安全风险.

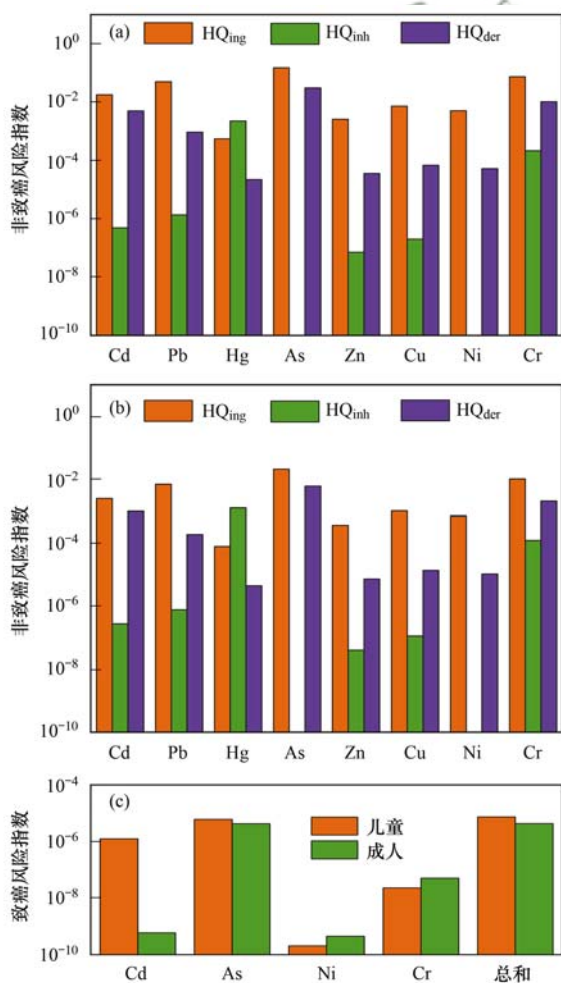
(2) Cd、Zn 和 Pb 这 3 种金属的变异系数均大于 1, 尤其是 Cd 的变异系数高达 1.94, 说明受到了强烈的人为因素的影响. 建立指纹图谱判别出流域上游村庄的重金属污染可能来源于浇灌、大气沉降和坡地水土流失的协同输入, 而中游和下游村庄的重金属分别来源于浇灌和坡地土壤流失.

(3) 污染负荷指数法评价结果显示, 研究区域内农田土壤中 Cd、Zn、Pb 和 Cu 污染严重, Cd、Zn 和 Pb 的潜在生态风险很高. 在空间上, 流域上游最靠近矿区的村庄的污染级别要高于其余村庄.

(4) 当地居民虽然未面临非致癌疾病的风险, 但是致癌风险已超过可接受水平, 儿童患癌症的风险更高. 此外, 虽然 As 的污染程度低于 Cd、Zn 和 Pb, 却具有更高的致癌风险, 因此当地在进行土壤修复时应优先考虑致癌风险更高的 As.

参考文献:

- [1] 苏耀明, 陈志良, 雷国建, 等. 多金属矿区土壤重金属垂直向污染特征及风险评估[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 130-134.
- [2] 仇荣亮, 仇浩, 雷梅, 等. 矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1085-1091.
- [3] Qiu R L, Qiu H, Lei M, et al. Advances in research on remediation of multi-metal contaminated soil in mine and surrounding area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1085-1091.
- [4] Jin L, Andrew D H. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 53: 173-189.
- [5] Liu W X, Shen L F, Liu J W, et al. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(2):



(a) 儿童重金属非致癌风险指数; (b) 成人重金属非致癌风险指数; (c) 成人和儿童重金属致癌风险指数

图 5 研究区域重金属对成人和儿童的健康风险

Fig. 5 Health risks of heavy metals to adults and children in the study area

- 209-213.
- [5] Yorifuji T, Tsuda T, Inoue S, *et al.* Critical appraisal of the 1977 diagnostic criteria for minamata disease[J]. Archives of Environmental & Occupational Health, 2013, **68**(1): 22-29.
- [6] 易宗妮, 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]. Occupation and Health, 2014, **30**(17): 2511-2513.
- [7] 王显炜, 徐友宁, 杨敏, 等. 国内外矿山土壤重金属污染风险评价方法综述[J]. 中国矿业, 2009, **18**(10): 54-56.
- Wang X W, Xu Y N, Yang M, *et al.* Review on risk assessment methods for soil heavy metal contamination in mines at home and abroad[J]. China Mining Magazine, 2009, **18**(10): 54-56.
- [8] 孙树青, 胡国华, 王勇泽, 等. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, **6**(2): 12-15.
- Sun S Q, Hu G H, Wang Y Z, *et al.* Water environmental health risk assessment of Xiangjiang River[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, **6**(2): 12-15.
- [9] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 109-118.
- [10] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 中国环境科学出版社, 1990.
- [11] 常瑛, 李彦荣, 施志国, 等. 基于内梅罗综合污染指数的农田耕层土壤重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(19): 63-67, 80.
- Chang Y, Li Y R, Shi Z G, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution in farmland soils based on Nemerow comprehensive pollution index[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, **47**(19): 63-67, 80.
- [12] 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].
- GB 15618-2018, Soil Environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [14] 金晓丹, 马华菊, 廖俊鸿, 等. 广西某铅锌矿区土壤重金属污染生态和健康风险特征[J]. 桂林理工大学学报, 2018, **38**(1): 124-131.
- Jin X D, Ma H J, Liao J H, *et al.* Health risk characteristics and ecological risk assessment in soil heavy metals from lead and zinc mines soils in Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, **38**(1): 124-131.
- [15] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an New district[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [16] 刘丹丹, 刘菲, 缪德仁. 土壤重金属连续提取方法的优化[J]. 现代地质, 2015, **29**(2): 390-396.
- Liu D D, Liu F, Miu D R. Optimization of soil heavy metal sequential extraction procedures[J]. Geoscience, 2015, **29**(2): 390-396.
- [17] 杨强, 马祥爱. 晋城市工矿区部分农田土壤重金属健康风险评价[J]. 山西农业科学, 2016, **44**(6): 811-816.
- Yang Q, Ma X A. Health risk assessment of heavy metals in soils in the industrial and mining area of Jincheng City[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, **44**(6): 811-816.
- [18] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund. Vol. I Human health evaluation manual (Part A)[R]. Washington DC, USA: Office of Emergency and Remedial Response, 1989. [EPA/540/1-89/002].
- [19] De Miguel E, Iribarren I, Chacón E, *et al.* Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain)[J]. Chemosphere, 2007, **66**(3): 505-513.
- [20] 段小丽. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Duan X L. Exposure factors handbook of Chinese population[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [21] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(4): 726-733.
- [22] HJ 25. 3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [23] Lu X W, Zhang X L, Li L Y, *et al.* Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. Environmental Research, 2014, **128**: 27-34.
- [24] 林小兵, 张秋梅, 周利军, 等. 不同母质发育及pH的农田土壤重金属含量差异[J]. 环境生态学, 2021, **3**(1): 83-88.
- Lin X B, Zhang Q M, Zhou L J, *et al.* Change of heavy metals in farmland soil from different parent material development and pH[J]. Environmental Ecology, 2021, **3**(1): 83-88.
- [25] 费杨, 阎秀兰, 李永华. 铁锰双金属材料在不同pH条件下对土壤As和重金属的稳定化作用[J]. 环境科学, 2018, **39**(03): 1430-1437.
- Fei Y, Yan X L, Li Y H. Stabilization effects of Fe-Mn binary oxide on arsenic and heavy metal Co-contaminated soils under different pH condition[J]. Environmental Science, 2018, **39**(03): 1430-1437.
- [26] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [27] 姬超, 侯大伟, 李发志, 等. 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- Ji C, Hou D W, Li F Z, *et al.* Assessment and spatial characteristics analysis of human health risk of heavy metals in cultivated soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- [28] 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 等. 贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4628-4636.
- Tang Q L, Liu X M, Liu F, *et al.* Cd accumulation and risk assessment for arable soils in the Karst region of northern Guizhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4628-4636.
- [29] Jiang F, Ren B Z, Hursthouse A, *et al.* Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(16): 16556-16567.
- [30] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. Environmental Pollution, 2020, **266**(Pt 3): 114961.

- [31] 肖冰, 薛培英, 韦亮, 等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉砷铅污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2869-2877.
Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [32] 陈三雄, 周春坚, 谢江松, 等. 广东大宝山矿区堆积土水土流失对重金属迁移量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(1): 16-21.
Chen S X, Zhou C J, Xie J S, *et al.* Effects of soil erosion of accumulative soil on the migration of heavy metals in Dabaoshan mining area, Guangdong province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(1): 16-21.
- [33] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3118-3125.
Tian C H, Yang R Z, Yilihamu G, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3118-3125.
- [34] 陶美霞, 胡虎, 胡兰文, 等. 上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(6): 1153-1159.
Tao M X, Hu H, Hu L W, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals in polluted abandon soil of Shangrao, Jiangxi[J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- [35] Hu B F, Jia X L, Hu J, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(9), doi: 10.3390/ijerph14091042.
- [36] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 690-700.
- [37] 蔡刚刚, 张学洪, 梁美娜, 等. 南丹大厂矿区周边农田土壤重金属健康风险评价[J]. 桂林理工大学学报, 2014, **34**(3): 554-559.
Cai G G, Zhang X H, Liang M N, *et al.* Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soil surrounding Dachang ore district in Nandan [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, **34**(3): 554-559.

生态环境学报

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)