

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价

刘娅君¹, 李彩霞¹, 梅楠², 张美平³, 张成^{1*}, 王定勇¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市固体废物管理中心, 重庆 401147; 3. 重庆市万州区生态环境监测站, 万州 404120)

摘要: 以三峡库区(重庆段)12个区县稻田土壤为研究对象,分析了土壤Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn和Ni含量,采用不同方法评估稻田土壤重金属的污染程度、潜在生态风险和人体健康风险.结果表明,三峡库区稻田土壤8种重金属除Cr外,其它7种重金属平均值均超过三峡库区土壤背景值,且分别有12.32%、4.35%和2.54%的土壤样品Cd、Cu和Ni含量超过相关标准的筛选值.8种重金属变异系数为29.08%~56.43%,属于中等及以上强度变异水平,受人为活动影响较大.8种重金属在土壤中均存在污染现象,且有16.30%、6.52%和2.90%的土壤Cd、Hg和Pb存在重度污染.同时,土壤Cd和Hg的潜在生态风险较高,整体为中度危害.12个区县中,巫溪县和巫山县污染程度较高,内梅罗综合污染评价为中等污染水平,且综合潜在生态风险也达到中度生态危害水平.健康风险评价结果表明,手口摄入是人体非致癌风险和致癌风险的主要暴露途径.土壤重金属对成人没有非致癌风险(HI < 1),但有12.68%的点位对儿童具有非致癌风险(HI > 1).土壤重金属对儿童具有致癌风险(TCR = 5.75×10^{-4}),同时有19.57%的点位对成人也具有致癌风险.As和Cr是研究区域内非致癌和致癌风险的主要影响因素,二者对非致癌和致癌风险的总贡献率分别超过75%和95%,需要引起关注.

关键词: 三峡库区; 稻田土壤; 重金属; 污染特征; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3520-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207115

Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area

LIU Ya-jun¹, LI Cai-xia¹, MEI Nan², ZHANG Mei-ping³, ZHANG Cheng^{1*}, WANG Ding-yong¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Solid Waste Management Center, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Wanzhou District Ecological and Environment Monitoring Station, Wanzhou 404120, China)

Abstract: Soil Cd, Hg, Pb, As, Cr, Cu, Zn, and Ni of 12 districts in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) were analyzed, and different evaluation methods were used to assess the degree of contamination, potential ecological risk, and human health risk of soil heavy metals in paddy soils. The results showed that the average values of all heavy metals except Cr in paddy soils in the Three Gorges Reservoir area exceeded the background values of soils in the Three Gorges Reservoir area, and the contents of Cd, Cu, and Ni in 12.32%, 4.35%, and 2.54% of the soil samples exceeded the screening values, respectively. The variation coefficients of the eight heavy metals were 29.08%-56.43%, which belonged to the medium and above-intensity variation levels and were influenced by anthropogenic activities. The eight heavy metals were contaminated in the soil, and 16.30%, 6.52%, and 2.90% of the soil Cd, Hg, and Pb were heavily contaminated. At the same time, the potential ecological risk of soil Hg and Cd were in the medium risk level on the whole. Wuxi County and Wushan County had relatively high pollution levels among the 12 districts, the Nemerow pollution index showed a moderate pollution level, and the comprehensive potential ecological risks were also at a moderate ecological hazard level. The results of the health risk evaluation showed that hand-mouth intake was the main exposure path of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk. Soil heavy metals presented no non-carcinogenic risk for adults (HI < 1), but 12.68% of the sites had non-carcinogenic risk for children (HI > 1). As and Cr were the main influencing factors for non-carcinogenic and carcinogenic risks in the study area, and their total contributions to non-carcinogenic and carcinogenic risks were more than 75% and 95%, respectively, which was cause for concern.

Key words: Three Gorges Reservoir area; paddy soil; heavy metals; pollution characteristics; risk evaluation

我国是粮食生产大国,水稻作为第一大粮食作物,其产量占全国粮食总产量的40%左右.近年来,稻米镉等重金属超标事件时有发生,由此引发的农产品安全问题引起了大家的广泛关注.土壤污染是造成稻米等农产品污染的重要因素,土壤中的重金属通过生物富集等作用在稻米等农产品中累积,并进一步通过食物链传递从而危害人体健康^[1].文献^[2]显示,我国19.4%的耕地土壤样点受到Cd、Pb、Cr和As等重金属的污染,且南方土壤污染重于北方,特别是西南地区土壤重金属超标范围较大.因此,耕地土壤重金属污染问题受到了国家有关部门的高度重视.近年来,国家出台了一系列方案^[3,4],

开展了土壤污染状况详查和耕地土壤环境质量类别划分等工作,加大土壤重金属污染管控力度.我国学者对土壤重金属污染问题也广泛关注,已有的报道主要集中在工矿企业附近耕地^[5~7]和平原地区农田^[8]等.陈文轩等^[9]综述了我国农田土壤重金属的空间分布特征及污染状况,发现南方农田土壤重金属含量明显高于北方,重庆等省市土壤重金属富集

收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 重庆市科技局重点研发项目(cstc2018jszx-cyzdX0019); 重庆市生态环境局科技项目(2021-113)

作者简介: 刘娅君(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染防治,E-mail:runnerupj@126.com

* 通信作者,E-mail:zhcheng@126.com

程度较高. Jiang 等^[10] 研究有色金属冶炼厂周围土壤发现 Cd 和 Pb 含量远高于背景值, 张丁等^[11] 研究成都平原-龙门山脉过渡带耕地土壤发现, Cd 是造成耕地土壤潜在生态风险的主要元素. 不同土壤类型和不同土地利用方式对土壤重金属的影响具有较大差异, 因此, 开展不同区域土壤重金属污染特征和风险评价工作对于我国耕地土壤重金属污染防治具有重要意义.

三峡库区位于长江流域生态屏障的咽喉地带, 具有重要的生态地理位置, 其生态环境敏感且脆弱. 重庆市直辖以来, 三峡库区经济快速发展, 城镇化和工业化进程不断加快, 耕地土壤存在重金属累积风险^[12]. 许书军等^[13] 于 2003 年调查了三峡库区 16 个区县主要淹水区耕地土壤重金属污染状况, 发现土壤 As、Cd、Cu 和 Ni 存在超标现象, 且 Cd 超标最严重. 罗友进等^[14] 调查发现, 三峡库区(重庆段) 沿岸土壤重金属污染水平较低, 仅在巫山县、涪陵区和忠县部分区域存在中度或重度污染. 王金霞等^[15] 研究了三峡库区 8 个区县农业土壤重金属污染状况和生态风险, 其结果表明 Cd、Cr、Cu、Hg 和 Zn 具有一定程度的累积, Hg 是综合潜在生态风险的主要因素. 石雨佳等^[16] 调查也发现, 三峡库区(重庆段) 16 个区县菜地土壤 As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 处于轻微污染水平, 且 Cd 存在中度生态风险. 这些研究主要集中在三峡库区淹没区(消落带) 土壤和农业用地^[17], 缺乏对三峡库区稻田土壤重金属污染特征和风险评价的研究. 因此, 本文以三峡库区(重庆段) 12 个区县稻田土壤为研究对象, 分析土壤重金属(Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn) 的污染状况, 评价其生态风险和健康风险, 了解三峡库区稻田土壤环境质量状况, 以期有效防控土壤重金属环境风险和保障耕地安全利用提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

重庆地处长江上游, 三峡库区(重庆段) 位于东经 105°49′~110°12′, 北纬 28°31′~31°44′, 是三峡库区的重要组成部分, 同时也是长江流域经济迅速发展和人口最为密集的区域之一. 该地区处于大巴山褶皱带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起带三大构造单元交汇处, 地形起伏剧烈, 属于温和湿润的亚热带季风气候区, 冬暖夏热, 降雨充沛, 年平均降雨量 1 140~1 200 mm, 降水量主要集中在 6~9 月, 空气湿度大, 多年平均气温 15~18℃. 本文研究区域包括重庆市长寿区、涪陵区、武隆区、丰都县、石柱县、忠县、万州区、开州区、云阳县、奉节县、巫溪

县和巫山县共 12 个区县(图 1), 研究区域的稻田土壤类型主要有紫色土、水稻土和黄壤等.

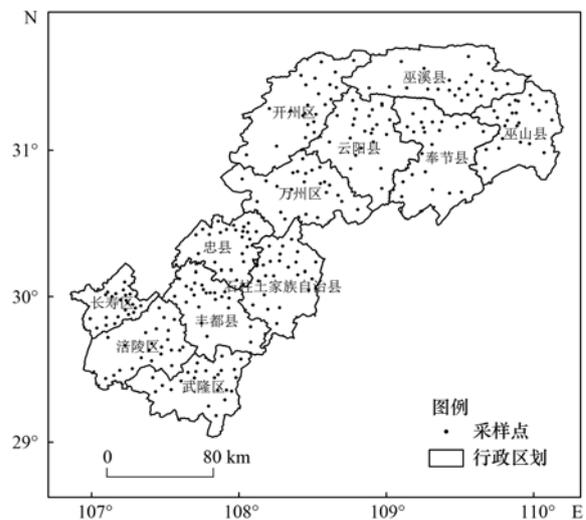


图 1 研究区域采样点位示意

Fig. 1 Soil sampling sites of study area

1.2 样品采集

每个区县选择面积较大且连片的稻田种植区域, 布设 23 个采样点, 共采集 276 个稻田土壤样品. 每个采样点选择面积较大具有代表性的田块, 采用五点采样法进行混合采样. 其中, 田块近似正方形时, 以田块中心按双对角线法 5 点采样; 田块为狭长形时, 采用蛇形法 5 点采样. 采样过程使用木铲采集 0~20 cm 的土样, 每个样品混合后用四分法留取 1 kg, 用样品袋密封保存, 样品经自然风干、破碎和剔除碎石及稻茎等杂物, 再研磨过 100 目尼龙筛保存待测.

1.3 样品分析与质量控制

土壤 Cd、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 用电热板加水进行加热消解后用 ICP-MS(安捷伦, 美国) 进行测定, As 采用 HNO₃-H₂O₂ 进行消解后用原子荧光光谱法(AFS-9700) 测定, Hg 用 Milestone 公司的 DMA-80 测汞仪进行测定, 土壤 pH 值用 pH 计测定, 水土比为 2.5:1. 本实验过程采用空白实验、平行实验和标准物质回收率进行质量控制, 实验所用药品均为分析纯或优级纯. 所有样品做 3 次重复, 相对误差在 ±5% 以内, 采用标准物质 GBW 07405(GSS-5) 进行质量控制, 回收率在 92%~110% 之间. 实验数据使用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 进行分析处理, 使用 Origin 2022 进行图形绘制.

1.4 评价方法

1.4.1 重金属污染评价

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区域稻田土壤重金属污染程度进行评价, 计算公式如下:

$$P_i = C_i/C_0 \quad (1)$$

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

本文选用三峡库区土壤重金属元素背景值^[18]作为评价标准,式中, C_i 为土壤重金属含量实测值, C_0 为土壤污染物的背景值, P_{ave} 为单因子污染指数的平均值, P_{max} 为单因子污染指数的最大值,污染等级划分参见文献^[19].

1.4.2 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法由瑞典 Hakanson 提出,以土壤和沉积物重金属元素背景值为基础,结合毒性响应系数、生态效应和环境效益,常被应用于土壤重金属元素对环境污染的评价,计算公式如下:

$$E_i = T_i \cdot C_i/C_0 \quad (3)$$

$$RI = \sum E_i \quad (4)$$

式中, E_i 为重金属 i 的单项潜在生态危害指数, T_i 为重金属 i 的毒性响应系数, C_i 为重金属 i 的实际测定值, C_0 为重金属背景值, RI 为综合潜在生态危害指数. Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的毒性响应系数分别为 30、40、5、10、2、5、1 和 5^[20]. 单项潜在生态危害指数 E_i 分级为:轻度危害, ≤ 40 ; 中度危害, 40~80; 强度危害, 80~160; 很强危害, 160~320; 极强危害, > 320 . 综合潜在生态危害指数 RI 分级为:轻度危害, ≤ 150 ; 中度危害, 150~300; 强度危害, 300~600; 很强危害, > 600 .

1.4.3 健康风险评价

人体健康风险评价模型由 USEPA 提出,评价内容包括暴露量以及致癌和非致癌风险计算,土壤重金属进入成人和儿童主要有手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径,暴露量具体计算公式如下:

$$CDI_{ing} = \frac{C \times IR_{ing} \times CF \times ED \times EF}{BW \times AT} \quad (5)$$

$$CDI_{inh} = \frac{C \times IR_{inh} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (6)$$

$$CDI_{der} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (7)$$

式中, CDI_{ing} 、 CDI_{inh} 和 CDI_{der} 分别为手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径的吸收剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], C 为实际测量的土壤重金属含量 ($mg \cdot kg^{-1}$),其它参数的含义及数值见文献^[21~24].

人体在上述 3 种暴露途径下的非致癌和致癌风险计算公式如下.

非致癌风险:

$$HQ_i = CDI/Rfd \quad (8)$$

$$HI = \sum_{i=1}^{\infty} HQ_i \quad (9)$$

致癌风险:

$$ILCR = CDI \times SF \quad (10)$$

$$TCR = ILCR_{ing} + ILCR_{inh} + ILCR_{der} \quad (11)$$

公式(8)~(11)中的具体参数说明见文献^[21~25]. 当 HQ_i 或 $HI \leq 1$ 时,土壤重金属不会对人体造成明显伤害,当 HQ_i 或 $HI > 1$ 时,存在非致癌风险. 土壤重金属致癌风险基准值结合我国情况取 10^{-4} ,当 $TCR < 10^{-4}$ 时,不存在致癌风险,当 $TCR > 10^{-4}$ 时,存在致癌风险.

2 结果与分析

2.1 三峡库区稻田土壤重金属含量分析

三峡库区稻田土壤 pH 值和重金属含量见表 1. 从中可知,研究区域土壤 pH 为 3.52~7.94, pH < 6.5 的点位占 56.52%,土壤以酸性为主. 土壤 $\omega(Cd)$ 、 $\omega(Hg)$ 、 $\omega(Pb)$ 、 $\omega(As)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Cu)$ 、 $\omega(Zn)$ 和 $\omega(Ni)$ 平均值分别为 (0.25 ± 0.14)、(0.08 ± 0.05)、(44.03 ± 16.10)、(8.05 ± 3.40)、(63.98 ± 23.69)、(26.08 ± 14.51)、(84.25 ± 24.50) 和 (34.89 ± 14.57) $mg \cdot kg^{-1}$. 从平均值来看,仅土壤 Cr 含量低于三峡库区土壤背景值^[18],其它重金属含量平均值均高于背景值. 土壤 Cd 和 Cr 含量低于重庆土壤背景值^[26],其它重金属含量平均值均高于背景值. 与文献^[27]的筛选值相比, Cd、Cu 和 Ni 存在超标情况,超标率分别为 12.32%、4.35% 和 2.54%,由此可见,三峡库区稻田土壤重金属存在一定程度的累积现象,其中,土壤 Cd 累积更显著,但未超过文献^[27]的管控值,且其他重金属均不存在超标点位. 与其它典型水稻种植区相比,三峡库区稻田土壤 Cd 含量高于成都平原稻田土壤^[8]和太湖水流域农田土壤^[28],但远低于湖南省凤凰、湘潭等地区稻田土壤^[29].

变异系数可以反映土壤重金属受人为活动影响的程度,以及反映样本的空间变异性情况^[30],变异系数越大,离散程度越大,土壤受到的外界干扰越大,重金属的分布越不均匀^[31]. 8 种重金属变异程度大小为: Hg (56.43%) $>$ Cu (55.65%) $>$ Cd (54.18%) $>$ As (42.27%) $>$ Ni (41.76%) $>$ Cr (37.03%) $>$ Pb (36.55%) $>$ Zn (29.08%),都属于中等及以上强度变异水平. 其中, Pb、As、Cr、Zn 和 Ni 的变异系数在 20%~50% 范围内,为中等变异水平; Cd、Hg 和 Cu 超过 50%,达到强变异水平. 各重金属离散程度高,分布不均匀,空间变异显著,说明研究区域重金属受人为活动的影响较大.

表 1 土壤 pH 值和重金属含量统计¹⁾

Table 1 Statistics of soil pH and heavy metal contents

项目	pH	Cd	Hg	Pb	As	Cr	Cu	Zn	Ni
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.94	0.73	0.28	78.98	18.44	161.40	79.16	165.25	78.09
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.52	0.06	0.01	7.43	1.23	18.45	3.15	29.08	5.53
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.25	0.08	44.03	8.05	63.98	26.08	84.25	34.89
标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.14	0.05	16.10	3.40	23.69	14.51	24.50	14.57
变异系数/%	—	54.18	56.43	36.55	42.27	37.03	55.65	29.08	41.76
三峡库区背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.13	0.05	23.88	5.84	78.03	25.00	69.88	29.47
重庆土壤背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.28	0.07	28.10	6.62	74.40	24.60	81.90	31.60

1) “—”表示没有相关数据

2.2 不同区县稻田土壤重金属分布特征

12 个区县稻田土壤重金属含量分布见表 2. 土壤 Cd 在巫山县和巫溪县较高, 开州区、丰都县和忠县较低; 其中, 巫山县的 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $(0.39 \pm 0.18) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是三峡库区土壤背景值^[18] 的 3 倍, 重庆市土壤背景值^[26] 的 1.39 倍, 显著高于其它区县. Hg 在巫溪县、万州区和开州区较高, 忠县、石柱县和丰都县较低; 其中, 巫溪县的 $\omega(\text{Hg})$ 平均值为 $(0.13 \pm 0.07) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是三峡库区土壤背景值的 2.60 倍, 重庆市土壤背景值的 1.86 倍, 显著高于除万州区外的其它区县. Pb 在云阳县、奉节县和长寿区较高, 在涪陵区、忠县和石柱县较低; 其中, 云阳

县的 $\omega(\text{Pb})$ 平均值为 $(59.26 \pm 16.91) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是三峡库区土壤背景值的 2.48 倍, 重庆市土壤背景值的 2.11 倍. As 在丰都县和巫溪县较高, 在长寿区和忠县较低; 其中, 丰都县的 $\omega(\text{As})$ 平均值为 $(10.77 \pm 3.54) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是三峡库区土壤背景值的 1.84 倍, 重庆市土壤背景值的 1.63 倍. Cr 平均值在奉节县和云阳县较高, 在巫山县和忠县较低. Cu 平均值在巫溪县和丰都县较高, 在忠县、长寿区和奉节县较低. Zn 平均值在奉节县、丰都县和巫溪县较高, 在忠县和巫溪县较低. Ni 平均值在丰都县和涪陵区较高, 在长寿区、巫山县和忠县较低.

表 2 不同区县稻田土壤重金属含量分布¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Distribution of heavy metal contents in paddy soils of different districts and counties/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

区县	Cd	Hg	Pb	As	Cr	Cu	Zn	Ni
长寿区	$0.26 \pm 0.13\text{bc}$	$0.07 \pm 0.03\text{c}$	$52.12 \pm 15.05\text{ab}$	$5.12 \pm 1.48\text{d}$	$73.94 \pm 27.64\text{ab}$	$18.26 \pm 9.67\text{cd}$	$90.49 \pm 22.68\text{ab}$	$19.96 \pm 6.16\text{e}$
涪陵区	$0.29 \pm 0.15\text{bc}$	$0.07 \pm 0.04\text{c}$	$31.95 \pm 12.77\text{d}$	$7.49 \pm 2.72\text{bc}$	$68.19 \pm 27.15\text{b}$	$22.25 \pm 11.60\text{cd}$	$81.74 \pm 21.03\text{b}$	$47.38 \pm 15.12\text{ab}$
武隆区	$0.20 \pm 0.08\text{cd}$	$0.08 \pm 0.04\text{c}$	$40.78 \pm 14.44\text{bc}$	$7.95 \pm 2.51\text{bc}$	$54.68 \pm 16.99\text{cd}$	$32.81 \pm 11.67\text{ab}$	$88.18 \pm 24.42\text{ab}$	$33.95 \pm 11.82\text{c}$
丰都县	$0.18 \pm 0.08\text{cd}$	$0.06 \pm 0.02\text{cd}$	$48.34 \pm 11.06\text{b}$	$10.77 \pm 3.54\text{a}$	$67.80 \pm 21.79\text{b}$	$34.66 \pm 16.09\text{ab}$	$93.13 \pm 29.39\text{ab}$	$53.25 \pm 12.55\text{a}$
石柱县	$0.29 \pm 0.11\text{bc}$	$0.05 \pm 0.03\text{cd}$	$36.73 \pm 14.40\text{cd}$	$9.10 \pm 3.62\text{ab}$	$60.10 \pm 9.17\text{bcd}$	$30.29 \pm 15.91\text{b}$	$76.74 \pm 15.18\text{bc}$	$37.51 \pm 5.65\text{bc}$
忠县	$0.16 \pm 0.08\text{cd}$	$0.05 \pm 0.02\text{d}$	$34.27 \pm 13.48\text{cd}$	$5.58 \pm 1.83\text{cd}$	$52.61 \pm 12.32\text{cd}$	$15.48 \pm 9.23\text{d}$	$67.57 \pm 17.63\text{c}$	$25.91 \pm 11.57\text{de}$
万州区	$0.22 \pm 0.14\text{c}$	$0.11 \pm 0.06\text{ab}$	$45.19 \pm 15.79\text{bc}$	$9.66 \pm 3.74\text{ab}$	$63.31 \pm 25.12\text{bc}$	$20.57 \pm 11.18\text{cd}$	$85.10 \pm 22.22\text{ab}$	$31.44 \pm 11.89\text{cd}$
开州区	$0.14 \pm 0.09\text{d}$	$0.10 \pm 0.05\text{b}$	$44.24 \pm 13.54\text{bc}$	$9.04 \pm 2.80\text{b}$	$57.73 \pm 10.08\text{bcd}$	$26.88 \pm 13.06\text{bc}$	$79.36 \pm 19.56\text{bc}$	$41.05 \pm 10.41\text{b}$
云阳县	$0.30 \pm 0.12\text{b}$	$0.09 \pm 0.03\text{bc}$	$59.26 \pm 16.91\text{a}$	$6.77 \pm 2.27\text{c}$	$78.90 \pm 29.05\text{a}$	$28.88 \pm 13.06\text{bc}$	$87.16 \pm 20.97\text{ab}$	$41.40 \pm 13.75\text{b}$
奉节县	$0.27 \pm 0.11\text{bc}$	$0.09 \pm 0.03\text{bc}$	$54.45 \pm 10.69\text{a}$	$6.04 \pm 2.31\text{cd}$	$83.44 \pm 30.68\text{a}$	$19.73 \pm 10.00\text{cd}$	$96.18 \pm 28.61\text{a}$	$28.59 \pm 9.84\text{cd}$
巫溪县	$0.33 \pm 0.10\text{ab}$	$0.13 \pm 0.07\text{a}$	$38.61 \pm 14.23\text{cd}$	$10.65 \pm 3.27\text{ab}$	$58.99 \pm 12.41\text{bcd}$	$38.66 \pm 16.67\text{a}$	$92.78 \pm 27.78\text{ab}$	$34.40 \pm 7.68\text{c}$
巫山县	$0.39 \pm 0.18\text{a}$	$0.08 \pm 0.04\text{bc}$	$42.46 \pm 13.81\text{bc}$	$8.44 \pm 3.30\text{bc}$	$48.12 \pm 16.10\text{d}$	$24.47 \pm 12.17\text{bc}$	$72.57 \pm 21.25\text{bc}$	$23.84 \pm 12.46\text{de}$

1) 同一列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 稻田土壤重金属污染评价

8 种重金属单因子污染指数平均值 (图 2) 为: $\text{Cd}(1.94) > \text{Pb}(1.84) > \text{Hg}(1.60) > \text{As}(1.38) > \text{Zn}(1.21) > \text{Ni}(1.18) > \text{Cu}(1.04) > \text{Cr}(0.82)$. Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni 均存在轻度污染现象, 点位占比分别为 41.67%、45.29%、40.58%、58.33%、17.39%、35.51%、70.65% 和 57.25%. 同时, Cd、Hg、Pb、As、Cu 和 Zn 分别有 22.83%、21.01%、42.75%、13.41%、7.97% 和 2.54% 的土壤样品达到中度污染水平. Cd、Hg 和 Pb 还存在重

度污染现象, 点位占比分别为 16.30%、6.52% 和 2.90%. 其中, 土壤 Cd 污染样品占比高, 为研究区域稻田土壤的主要污染物.

不同区县 8 种重金属的内梅罗综合污染指数为 0.81 ~ 4.26 (图 3), 平均值为 2.11, 整体处于中度污染水平. 各区县平均值为: 巫溪县 (2.57) > 巫山县 (2.49) > 云阳县 (2.39) > 万州区 (2.21) > 奉节县 (2.12) > 涪陵区 (2.10) > 长寿区 (2.07) > 丰都县 (2.05) > 石柱县 (2.02) > 开州区 (2.00) > 武隆区 (1.82) > 忠县 (1.43). 除忠县和武隆区处于轻度污

染水平,其它区县均处于中度污染水平. 其中,巫溪县和巫山县污染程度相对较高,重度污染水平点位占比分别为 21.74% 和 26.09%,中度污染水平点位分别为 56.52% 和 52.17%. 忠县污染程度最低,有 8.70% 的点位处于尚清洁水平,86.96% 的点位处于轻污染水平,仅 1 个点位达到中度污染水平.

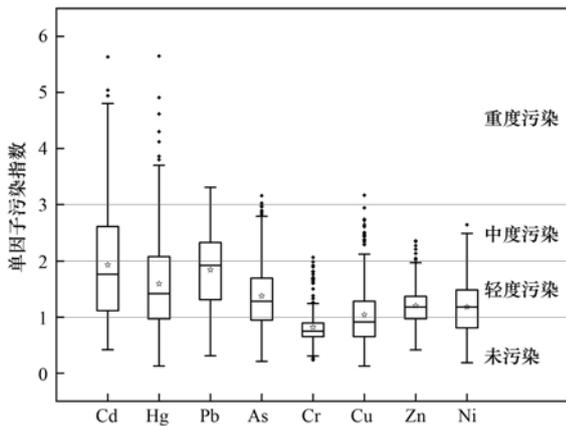


图 2 单因子污染指数评价结果

Fig. 2 Results of individual element pollution index

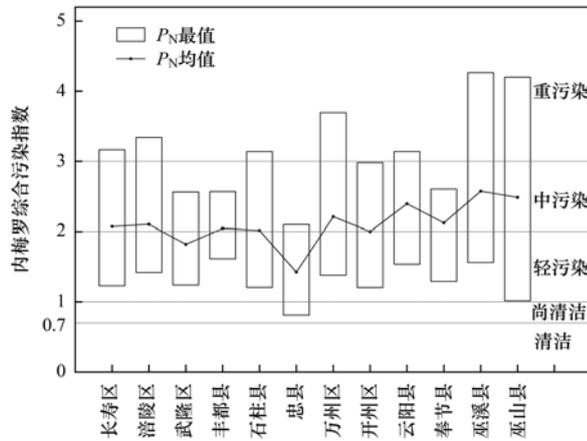


图 3 不同区县内梅罗综合污染指数

Fig. 3 Nemerow pollution index in different districts

2.4 稻田土壤重金属潜在生态风险

8 种重金属的 E_i 平均值(图 4)为: Hg(69.42) > Cd(56.32) > As(13.79) > Pb(9.22) > Ni(5.92) > Cu(5.22) > Cr(1.64) > Zn(1.21). Hg 和 Cd 潜在生态危害风险较高,整体处于中度危害. 其中,土壤 Hg 很强、强度和中度危害点位分别占 3.62%、29.35% 和 45.65%,其余为轻度危害;土壤 Cd 强度和中度危害点位分别占 20.65% 和 40.22%,其余为轻度危害;其它重金属均为轻度危害. 研究区域土壤 Hg、Cd、As 和 Pb 含量均为三峡库区土壤背景值^[18] 的 2 倍左右,但只有 Hg 和 Cd 存在中度危害的点位,两者毒性响应系数分别为 40 和 30^[20],远高于其它重金属,表明除了土壤重金属含量较高以外,较高的毒性响应系数也是 Hg 和 Cd 潜在生态危害较高的原因.

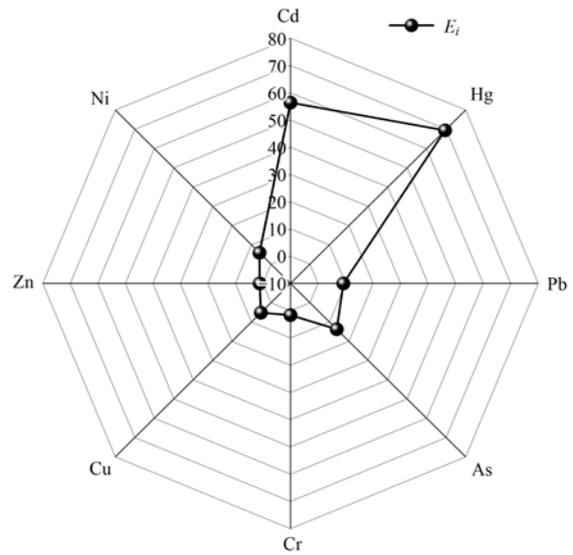


图 4 单项潜在生态危害指数

Fig. 4 Ecological risk index of individual element

土壤重金属 RI 平均值为 162.74,处于中度生态危害水平. 各采样点重金属 RI 为 47.64 ~ 361.47,以轻度和中度生态危害为主,分别占比 34.42% 和 60.14%,另有 5.44% 的土壤处于强度生态危害水平. 不同区县 RI 平均值为: 巫溪县(225.89) > 巫山县(192.69) > 云阳县(184.83) > 万州区(180.36) > 涪陵区(172.96) > 奉节县(157.46) > 开州区(157.15) > 武隆区(152.41) > 石柱县(148.97) > 长寿区(145.18) > 丰都县(139.72) > 忠县(97.19). 忠县、丰都县、长寿区和石柱县处于轻度生态危害水平,其它区县总体处于中度生态危害水平. 从图 5 可以看出,RI 最大值出现在巫溪县(361.47),处于重度生态危害水平,最小值出现在忠县(47.64). 从重金属元素对 RI 的贡献率来看,Hg 和 Cd 的贡献率分别为 42.66% 和 34.61%,合计 77.27%,表明研究区域稻田土壤重金属潜在生态危害主要由 Hg 和 Cd 引起.

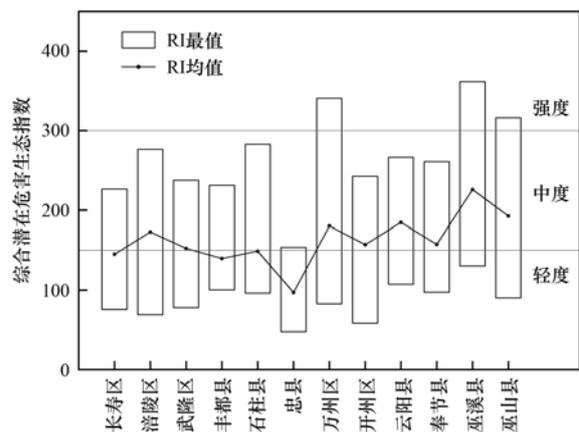


图 5 不同区县综合潜在生态危害指数

Fig. 5 Comprehensive ecological risk index in districts

2.5 人体健康风险评价

2.5.1 非致癌风险

稻田土壤重金属 3 种暴露途径 HQ 平均值见表 3. 3 种不同暴露途径下,成人和儿童 HQ 平均值均表现为: $HQ_{\text{手口摄入}} > HQ_{\text{皮肤接触}} > HQ_{\text{呼吸吸入}}$,其中,通过手口摄入的重金属剂量比皮肤接触高 1~3 个数量级,表明手口摄入是 8 种重金属对成人和儿童非致癌风险的主要暴露途径. 8 种重金属在 3 种暴露途

径下儿童和成人的 HI 分别为 0.79 和 0.11,对儿童的非致癌风险平均值接近警戒值,并且有 12.68% 的点位 $HI > 1$,最大值为 1.81,表明稻田土壤可能会对儿童造成非致癌风险. 8 种重金属在 3 种暴露途径下 HI 平均值大小分别为: $As > Cr > Pb > Ni > Cu > Zn > Hg > Cd$ (儿童)和 $As > Cr > Pb > Ni > Cu > Cd > Zn > Hg$ (成人),单项重金属 HI 均小于警戒值 1,说明单项重金属不会对人体造成非致癌风险.

表 3 不同暴露途径非致癌风险评价结果

Table 3 Results of non-carcinogenic risk assessment via different exposure paths

元素	HQ _{手口摄入}		HQ _{呼吸吸入}		HQ _{皮肤接触}		HI	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
Cd	3.03E-03	4.25E-04	3.28E-05	1.78E-05	1.94E-04	5.95E-05	3.26E-03	5.02E-04
Hg	3.21E-03	4.49E-04	3.47E-07	1.88E-07	7.34E-05	2.25E-05	3.28E-03	4.72E-04
Pb	1.52E-01	2.12E-02	4.15E-06	2.25E-06	1.62E-03	4.97E-04	1.53E-01	2.17E-02
As	3.24E-01	4.53E-02	6.99E-04	3.78E-04	5.18E-04	1.59E-04	3.25E-01	4.58E-02
Cr	2.57E-01	3.60E-02	8.35E-04	4.52E-04	1.65E-02	5.04E-03	2.75E-01	4.15E-02
Cu	7.86E-03	1.10E-03	2.28E-07	1.24E-07	1.26E-05	3.85E-06	7.88E-03	1.10E-03
Zn	3.39E-03	4.74E-04	9.34E-08	5.05E-08	5.42E-06	1.66E-06	3.39E-03	4.76E-04
Ni	2.10E-02	2.95E-03	5.05E-04	2.73E-04	8.42E-04	2.58E-04	2.24E-02	3.48E-03
HI	7.71E-01	1.08E-01	2.08E-03	1.12E-03	1.97E-02	6.04E-03	7.93E-01	1.14E-01

不同区县儿童和成人的总非致癌风险 (HI) 见图 6. 各区县的非致癌风险大小为:丰都县 > 云阳县 > 巫溪县 > 万州区 > 奉节县 > 开州区 > 石柱县 > 涪陵区 > 长寿区 > 武隆区 > 巫山县 > 忠县. 其中,风险最低的是忠县,儿童和成人的 HI 分别为 0.60 和 0.09. 风险最高的是丰都县,分别为 0.94 和 0.14. 儿童的 HI 接近风险阈值. 各区县的非致癌风险均表现为儿童高于成人,约为成人的 7~8 倍,但 HI 平均值均未超过 1. 除忠县外,其它区县均具有对儿童存在非致癌风险的点位. 其中,丰都县和云阳县分别有 39.13% 和 21.74%,万州区、奉节县、石柱县和巫溪县 17.39%,武隆区和开州区 13.04%,长寿区和涪陵区 8.70% 以及巫山县 4.35% 的点位对儿童存在非致癌风险.

2.5.2 致癌风险

稻田土壤重金属不同暴露途径致癌风险评价平均值见表 4. 3 种暴露途径下成人和儿童致癌风险平均值为: $ILCR_{\text{ing}} > ILCR_{\text{der}} > ILCR_{\text{inh}}$,儿童和成人通过手口摄入的重金属剂量远高于皮肤接触和呼吸吸入,表明手口摄入是稻田土壤重金属致癌风险的主要途径.

USEPA 提出的土壤重金属致癌风险基准值为 10^{-6} ,但结合我国的基本情况,有研究认为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 仍属于可接受范围^[32]. 单项重金属致癌风险大小为: $Cr > As > Cd > Ni$,Cr 对儿童和成人的致癌风险分别为 4.11×10^{-4} 和 6.16×10^{-5} ,对儿童的致癌风险已超过可接受水平,对成人的致癌风险虽在可

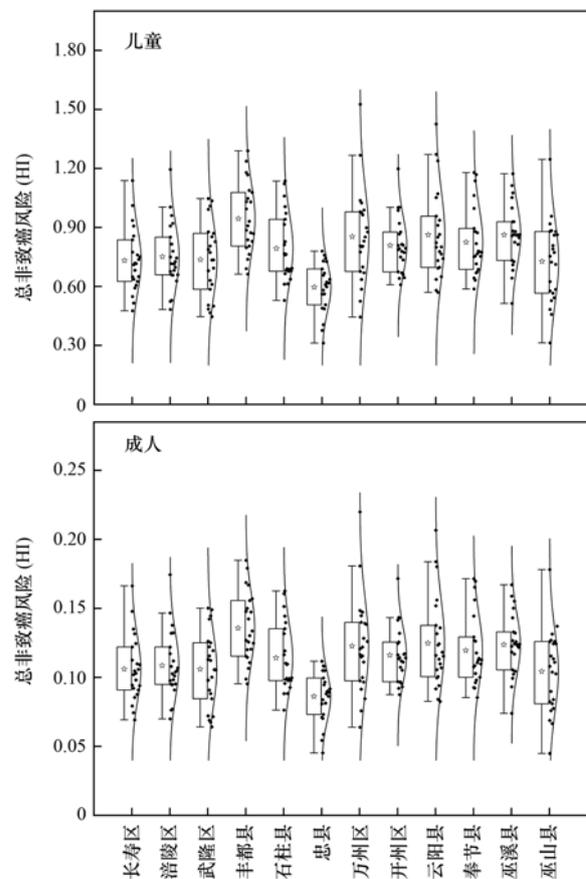


图 6 不同区县儿童和成人总非致癌风险

Fig. 6 Total non-carcinogenic risk for children and adults in different districts

接受范围内,但也处于较高的水平,需要引起关注. 同时,儿童在 3 种暴露途径下的 TCR 平均值为 5.75

$\times 10^{-4}$, 超过可接受水平, 说明研究区域对儿童存在多种重金属共同作用引起的致癌风险. 成人的 TCR

平均值为 8.46×10^{-5} , 整体处于可接受范围, 但有 19.57% 的点位 TCR 超过 10^{-4} .

表 4 不同暴露途径致癌风险评价结果¹⁾

Table 4 Results of carcinogenic risk assessment via different exposure routes

元素	ILCR _{ing}		ILCR _{inh}		ILCR _{der}		TCR	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
Cd	1.85E-05	2.59E-06	5.27E-10	2.85E-10	2.96E-08	9.07E-09	1.85E-05	2.60E-06
As	1.46E-04	2.04E-05	4.50E-08	2.43E-08	2.33E-07	7.13E-08	1.46E-04	2.05E-05
Cr	3.86E-04	5.40E-05	8.94E-07	4.84E-07	2.47E-05	7.56E-06	4.11E-04	6.16E-05
Ni	—	—	9.75E-09	5.28E-09	—	—	9.75E-15	5.28E-15
TCR	5.50E-04	7.70E-05	9.49E-07	5.14E-07	2.50E-05	7.64E-06	5.75E-04	8.46E-05

1) “—”表示没有相关数据

三峡库区不同区县儿童和成人 TCR 见图 7. 各区县致癌风险大小为: 奉节县 > 云阳县 > 丰都县 > 万州区 > 巫溪县 > 涪陵区 > 长寿区 > 石柱县 > 开州区 > 武隆区 > 巫山县 > 忠县. 所有区县稻田土壤重金属对儿童的 TCR 平均值均高于 10^{-4} , 超过可接受水平, 比成人的致癌风险高了 1 个数量级. 其中, 奉节县的 TCR 最高, 对儿童和成人的 TCR 分别为 6.65×10^{-4} 和 9.84×10^{-5} , 忠县的 TCR 相对最低, 对儿童和成人的 TCR 分别为 4.50×10^{-4} 和 6.64×10^{-5} . 不同区县稻田土壤重金属对成人的致癌风险在可接受水平, 但也接近风险阈值, 尽管成人的免疫力相对较高, 也不能忽视可能存在的致癌风险.

3 讨论

重金属污染评价结果显示, 研究区域土壤 Cd 污染最严重, 重度、中度和轻度污染水平点位分别占 16.30%、22.83% 和 41.67%. 污染最严重的点位在巫山县, 有 34.78% 的土壤 Cd 超过筛选值, 其次是巫溪县, 有 8.70% 的土壤 Cd 超过筛选值. 许书军等^[13]研究三峡库区主要淹水区耕地重金属时也发现 Cd 污染严重, 巫山县超标点位达 60%, 处于中等程度污染, 但其调查范围为淹水区域的水田和旱地, 本研究为稻田土壤 (包括未淹水区域). 有研究表明, 采矿^[35]和石灰岩母质^[34]等因素会使重金属 Cd 含量增加, 巫山县和巫溪县相邻, 具有相似的土壤母质成因, 出露的黑色岩系可能是 Cd 异常的重要自然源^[35]. 同时煤矿开采和煤燃烧过程中 Cd 通过大气沉降进行迁移, 也可能是该区域土壤 Cd 含量较高的原因. 此外, 有研究表明^[36], 土壤 pH 值可以控制重金属的活性, 进而影响重金属的迁移. 与旱地、林地和园地等土壤不同, 稻田土壤是受人为因素干扰下、水旱交替作用形成的特殊土壤类型^[37], 水旱交替过程的厌氧-好氧状态下微生物的活动会驱动铁、氮和硫的氧化还原循环, 能直接影响 pH 等土壤性质, 从而间接影响 Cd 在土壤中的赋存形态^[38]. 有研究表明, 稻田土壤 pH 值降低会增强 Cd 的迁移性和生物可利用性, 从而增加 Cd 在土壤中累积的风险^[39]. 本研究中, 土壤 Cd 超过筛选值的点位对应 pH 值均小于 5, 表明研究区域土壤 Cd 安全风险主要存在于酸性土壤中, 与李娜等^[40]研究的结果相似.

稻田土壤 $\omega(\text{Hg})$ 平均值为 $(0.08 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是三峡库区土壤背景值^[18]的 1.6 倍, 略高于陈秋禹等^[41]调查的三峡库区消落带稻田 Hg 含量, 但其仅调查了 1 个区县 4 个土壤点位, 而本研究调查了 12 个区县, 各区县稻田土壤 Hg 差异较大. 生态风险评价结果显示, 研究区域稻田土壤 Hg 潜

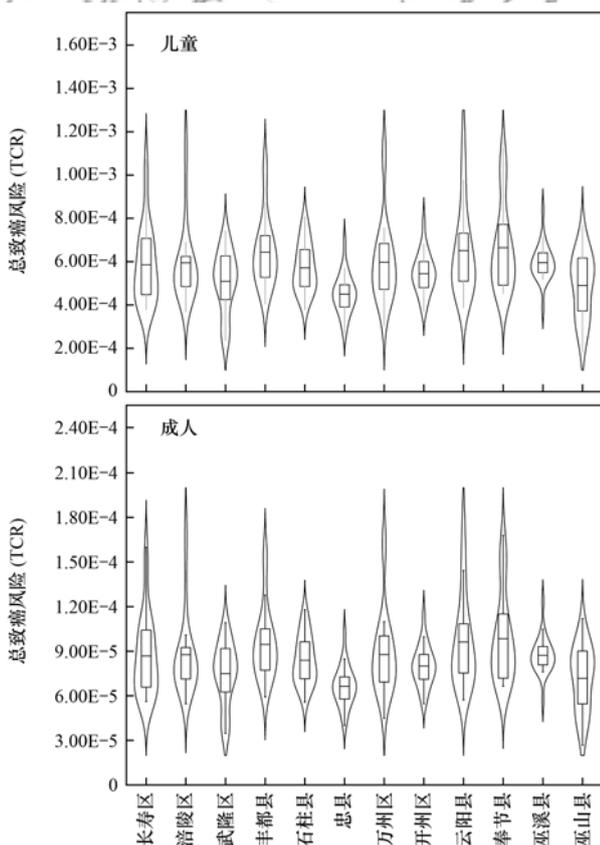


图 7 不同区县儿童和成人总致癌风险

Fig. 7 TCR for children and adults in different districts

在生态风险最高,重、较重和中风险水平点位占比分别为 3.62%、29.35% 和 45.65%,和张成等^[42]对三峡库区自然消落带的研究结果相近,但是其研究也表明,由于不同形态汞的可溶性和迁移能力存在较大差异,生物可利用性也存在差异,用总汞进行风险评价的结果可能会偏高.潜在生态风险评价结果表现为: $Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$,与单因子污染评价结果 ($Cd > Pb > Hg > As > Zn > Ni > Cu > Cr$) 有一定差异,可能是与计算方式相关.单因子污染指数法主要评价土壤重金属的污染程度,而潜在生态危害指数法综合考虑了重金属毒理学方面的研究,其毒性响应系数通过重金属元素的丰度原则和释放效应原理进行计算和修正,具有一定的主观性^[43].

各区县稻田土壤重金属污染存在差异,内梅罗综合污染指数法和综合潜在生态危害指数均显示巫溪县和巫山县稻田土壤受污染程度较高,主要是巫山县和巫溪县的成土母质大部分由三叠系和二叠系的地层发育而来,土壤母质中重金属含量相对较高^[14],同时,这 2 个区县矿产资源丰富,矿业开采和历史遗留矿渣堆存对周边耕地土壤造成影响,且巫

溪县和巫山县的土壤 Hg 和 Cd 含量较高.因此,这 2 个区县污染程度相对较高.本研究发现忠县受污染程度最低,而罗友进等^[14]研究发现忠县污染较高,主要是其调查对象为三峡库区沿岸土壤,且采样点位在城镇周边,受到城镇工业活动等人为影响,重金属含量高.而本研究的调查对象为稻田土壤,离城镇和工矿企业较远,受工业活动影响较小,重金属含量相对其它区县均较低.

健康风险评价结果表明儿童和成人总体上不存在非致癌风险,但儿童的非致癌风险是成人的 6.94 倍,明显高于成人,与他人的研究结果一致^[44~46].同时有 12.68% 的点位对儿童构成非致癌风险,这可能是儿童在玩耍时会吮吸手指^[33],并且体重较轻,通过手口摄食途径接触重金属的频率较高^[47],而且儿童身体的各组织器官尚未发育完全,代谢功能较弱^[48],因此面临更高的非致癌风险.从图 8 来看,As 和 Cr 对儿童和成人的非致癌风险贡献率较高,其中,As 为 40.96% 和 39.91%,Cr 为 34.64% 和 35.96%,表明 As 和 Cr 是研究区域内非致癌风险的主要影响因子,这与鲍丽然等^[26]在重庆秀山西北部的研究结果相同.

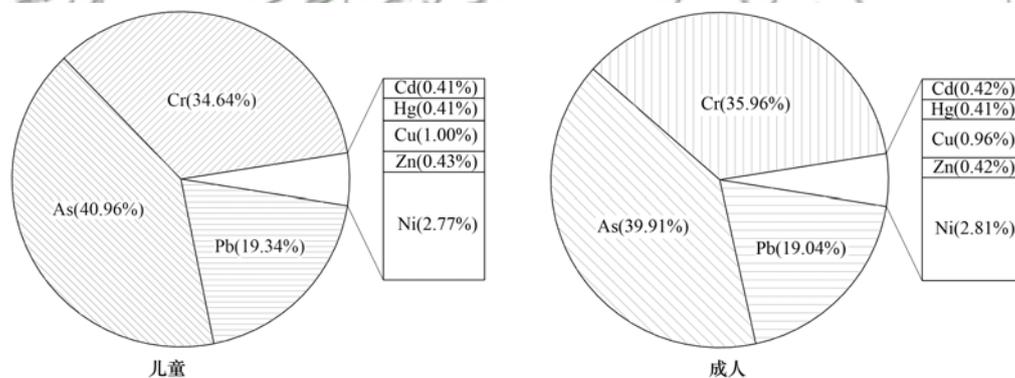


图 8 儿童和成人重金属非致癌风险贡献率

Fig. 8 Contribution rates of non-carcinogenic risk for heavy metals in children and adults

儿童的总致癌风险高于成人,且整体超过风险阈值(图 9),主要由 Cr 和 As 引起,对儿童 TCR 贡献率分别为 71.47% 和 25.39%.同时,19.57% 的点位对成人具有致癌风险,同样由 Cr 和 As 引起,贡献率分别为 72.81% 和 24.23%.可见,Cr 和 As 是研究区域稻田土壤的主要致癌因子,二者对成人和儿童的致癌风险贡献率之和超过 95%.根据潜在生态风险评价结果,研究区域内土壤 Cd 为主要污染因子,有 16.30% 的点位处于重度污染水平,但是在健康风险评价中却不是主要的致癌因子和非致癌因子,这与尹伊梦等^[19]研究的结果相似,可能是由于 Cd 属于分散元素,绝对含量低于 Cr 和 As^[26].由于 8 种重金属中仅 Cr、As、Cd 和 Ni 有致癌斜率因子,因

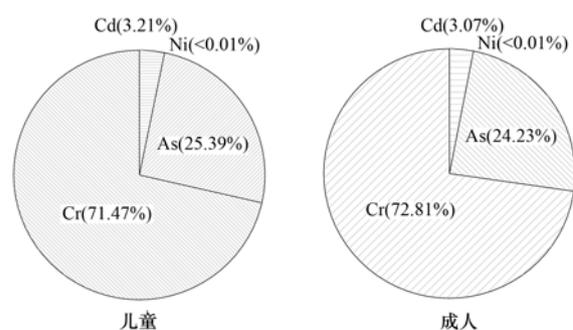


图 9 儿童和成人重金属致癌风险贡献率

Fig. 9 Contribution rates of carcinogenic risk for heavy metals in children and adults

此,各区县的致癌风险和非致癌风险大小排序存在差别,由重金属含量分布特征可知,Cr、As 和 Ni 的

高值都出现在奉节县,而 Cr 和 As 是主要的致癌风险贡献因子,所以奉节县整体致癌风险高于其它区县。

4 结论

(1)三峡库区稻田土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Ni 和 Zn 含量平均值均高于三峡库区土壤背景值,且 Cd(超标率,下同 12.32%)、Cu(4.35%)和 Ni(2.54%)超过了相关标准的筛选值。

(2)三峡库区稻田土壤 8 种重金属均存在污染累积情况,Cd 和 Hg 污染程度相对较高。三峡库区 12 个区县中,巫溪县和巫山县的稻田土壤污染程度较高,忠县最低。

(3)健康风险评价结果表明,手口摄入是稻田土壤重金属非致癌风险及致癌风险的主要暴露途径。8 种重金属对成人的致癌风险、对成人和儿童的非致癌风险总体处于可接受范围,但对儿童具有致癌风险。As 和 Cr 是研究区域非致癌风险和致癌风险的主要影响因子。

参考文献:

- [1] Wang H X, Li X M, Chen Y, *et al.* Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: a case study from Xuyi County, eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139058.
- [2] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [3] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm, 2016-05-28.
- [4] 生态环境部. 中华人民共和国土壤污染防治法 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/201809/t20180907_549845.shtml, 2018-08-31.
- [5] Zhao G L, Ma Y, Liu Y Z, *et al.* Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around heavy metal industry in Anxin County [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-13977-6.
- [6] 张义,周心劝,曾晓敏,等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2062-2070. Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2062-2070.
- [7] 陈丹丹,谭璐,聂紫萌,等. 湖南典型金属冶炼与采选行业企业周边土壤重金属污染评价及源解析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(9): 2667-2679. Chen D D, Tan L, Nie Z M, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in the soil around typical metal smelting and mining enterprises in Hunan Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(9): 2667-2679.
- [8] 杨刚,李燕,巫林,等. 成都平原表层水稻土重金属污染健康风险分析[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 269-275. Yang G, Li Y, Wu L, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in topsoil of paddy field of Chengdu Plain [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 269-275.
- [9] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833. Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [10] Jiang Z C, Guo Z H, Peng C, *et al.* Heavy metals in soils around non-ferrous smelteries in China: status, health risks and control measures [J]. *Environmental Pollution*, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117038.
- [11] 张丁,黄容,高雪松. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 946-956. Zhang D, Huang R, Gao X S. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in the transition zone of a mountain plain [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 946-956.
- [12] 马世五,谢德体,张孝成,等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. *生态学报*, 2018, **38**(23): 8512-8525. Ma S W, Xie D T, Zhang X C, *et al.* Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(23): 8512-8525.
- [13] 许书军,魏世强,谢德体. 三峡库区耕地重金属分布特征初步研究[J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(4): 64-66, 89. Xu S J, Wei S Q, Xie D T. Characteristics of heavy metals distribution in cultivated soil in Three Gorge Reservoir Area (TGRA) [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(4): 64-66, 89.
- [14] 罗友进,韩国辉,余端,等. 三峡库区土壤重金属污染评价及其来源[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(8): 1800-1808. Luo Y J, Han G H, Yu D, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metal in soils of the three gorges reservoir Area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(8): 1800-1808.
- [15] 王金霞,李谢玲,何清明,等. 三峡库区典型农业区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(8): 227-234. Wang J X, Li X L, He Q M, *et al.* Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils in Three Gorge Reservoir Area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(8): 227-234.
- [16] 石雨佳,方林发,方标,等. 三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1611-1619. Shi Y J, Fang L F, Fang B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in vegetable field in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [17] 宋珍霞,高明,王里奥,等. 三峡库区农业土壤重金属含量特征及污染评价——以 Cu、Pb 和 Zn 为例[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2189-2194. Song Z X, Gao M, Wang L A, *et al.* Heavy metal concentrations in agriculture soils of the Three-Gorge Reservoir area and their pollution evaluation—taking Cu, Pb, and Zn as examples [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2189-2194.

- [18] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(4): 848-852.
Tang J, Zhong Y P, Wang L. Background value of soil heavy metal in the Three Gorges Reservoir district[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(4): 848-852.
- [19] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 916-926.
Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 916-926.
- [20] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [21] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5114-5124.
Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- [22] USEPA. Exposure factors handbook[R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [23] 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 等. 独山锑冶炼厂周边土壤锑砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 655-664.
Xiong J, Han Z W, Wu P, *et al.* Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan County[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 655-664.
- [24] 张浙, 卢然, 伍思扬, 等. 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3763-3772.
Zhang Z, Lu R, Wu S Y, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of mine soil in Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3763-3772.
- [25] 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 等. 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 936-945.
Liu Y, He Z H, Niu X K, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in a small watershed of a mining area in Yunnan [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 936-945.
- [26] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1625-1636.
Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. Geology in China, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [27] 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].
- [28] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太滹运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [29] Zeng F F, Wei W, Li M S, *et al.* Heavy metal contamination in rice-producing soils of Hunan Province, China and potential health risks[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(12): 15584-15593.
- [30] Phil-Eze P O. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape[J]. Journal of Geography and Regional Planning, 2010, **3**(7): 177-184.
- [31] Wang H Y, Lu S G. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban-suburban soils of Lishui City, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **64**(7): 1921-1929.
- [32] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju Country (eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, **15**(1): 163-178.
- [33] 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.
- [34] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(5): 1538-1544.
Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al.* Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in south China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [35] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2390-2398.
Liu Y Z, Xiao T F, Ning Z P, *et al.* Cadmium and selected heavy metals in soils of Jianping area in Wushan County, the Three Gorges Region: distribution and source recognition [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2390-2398.
- [36] Sezgin N, Ozcan H K, Demir G, *et al.* Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway[J]. Environmental International, 2003, **29**(7): 979-985.
- [37] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1257-1263.
Zhan J, Wei S H, Niu R C. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(7): 1257-1263.
- [38] K-gel-Knabner I, Amelung W, Cao Z H, *et al.* Biogeochemistry of paddy soils[J]. Geoderma, 2010, **157**(1-2): 1-14.
- [39] Liu X M, Zhong L B, Meng J, *et al.* A multi-medium chain modeling approach to estimate the cumulative effects of cadmium pollution on human health[J]. Environmental Pollution, 2018, **239**: 308-317.
- [40] 李娜, 贺红周, 冯爱焯, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4637-4646.
Li N, He H Z, Feng A X, *et al.* Safe utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4637-4646.
- [41] 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 等. 三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2456-2463.
Chen Q Y, Sun S, Yin D L, *et al.* Effects of agricultural activities on soil mercury changes in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2456-2463.

- [42] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1060-1067.
Zhang C, Chen H, Wang D Y, *et al.* Distribution and risk assessment of mercury species in soil of the water-level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [43] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(2): 466-480.
Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(2): 466-480.
- [44] Fan W, Zhou J L, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural land in the Southern Margin of Tarim Basin in Xinjiang, China[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2021, **31**(7): 835-847.
- [45] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 143-153.
- [46] Yang J, Ma S L, Zhou J C, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables and health risk assessment of inhabitants in Daye, China[J]. Journal of International Medical Research, 2018, **46**(8): 3374-3387.
- [47] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 1658-1668.
- [48] 王北洪, 马智宏, 冯晓元, 等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, **6**(7): 2736-2745.
Wang B H, Ma Z H, Feng X Y, *et al.* Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, **6**(7): 2736-2745.



CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)