

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铨, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性 & 控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价

张浙^{1,2}, 卢然^{1*}, 伍思扬¹, 贾智彬¹, 王宁¹

(1. 生态环境部环境规划院重金属污染防治研究中心, 北京 100012; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 研究长江经济带矿山土壤重金属污染状况, 是推动长江经济带矿山生态修复和绿色矿山建设的重要前提. 通过搜集 2006~2020 年间长江经济带矿山土壤重金属污染相关研究, 并对搜集文献采样数据运用地累积指数法、克里金插值法和健康风险评价法对重金属的污染状况、分布规律和健康风险进行研究. 结果表明, 长江经济带矿山土壤中 Pb、Cd、Cr、Hg、As、Zn、Ni 和 Cu 含量平均值超我国长江经济带土壤背景值, Cd 和 Hg 累积程度显著; 污染评价结果显示 8 种重金属污染程度大小为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr, Cd 和 Hg 污染程度最高, 存在超 60% 的样本点处于中污染以上; 污染评价显示锡矿和铅锌矿土壤污染较其他矿种明显突出; 健康风险评估显示经口摄入为非致癌和致癌风险的主要摄入途径, 总非致癌和致癌风险指数均处于不可接受范围内, 且长江经济带中上游各省市矿山土壤的非致癌和致癌风险明显高于下游.

关键词: 长江经济带; 矿山; 土壤重金属; 克里金插值法; 健康风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3763-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.202109102

Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt

ZHANG Zhe^{1,2}, LU Ran^{1*}, WU Si-yang¹, JIA Zhi-bin¹, WANG Ning¹

(1. Research Center of Heavy Metal Pollution Prevention and Control, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The study of heavy metal pollution in mine soil of the Yangtze River Economic Belt is important for promoting the ecological restoration of mines and the construction of green mines in the Yangtze River Economic Belt. For this study, we collected the relevant research on the pollution of heavy metals in the mine soil of the Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2020 and studied the pollution status, distribution law, and health risk of heavy metals by using the land accumulation index method, Kriging interpolation method, and health risk assessment method. The results showed that the average contents of Pb, Cd, Cr, Hg, As, Zn, Ni, and Cu in mine soil far exceeded the background value in China, and the accumulation degree of Cd and Hg was significant. The pollution evaluation results showed that the pollution degree of the eight heavy metals was Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr, the pollution degree of Cd and Hg was the highest, and more than 60% of the sample points were at medium pollution. The pollution evaluation showed that the soil pollution of tin and lead-zinc mines was more prominent than that of other minerals. The health risk assessment indicated that oral intake was the main intake route for non-carcinogenic and carcinogenic risks, the total non-carcinogenic and carcinogenic risk index was within the unacceptable range, and the non-carcinogenic and carcinogenic risk of mine soil in the middle and upper reaches of the Yangtze River Economic Belt was significantly higher than that in the lower reaches.

Key words: Yangtze River Economic Belt; mine; soil heavy metals; Kriging; health risk assessment

我国是世界上为数不多的矿产资源总量丰富且矿种齐全的大国之一^[1,2], 现已发现矿产 173 种^[3]. 矿产资源是人类发展的重要物质基础, 随着经济和社会的发展, 矿产资源的开采量不断增加^[4-6]. 多年来大量矿产资源的开发与利用造成了诸多矿山土壤重金属污染问题. 长江经济带作为我国重要的矿产资源基地和资源安全保障核心区域^[7,8], 面积占全国总面积的 21.4%, 横跨我国东、中和西三大地势阶梯, 地质地貌复杂多样, 涉及多个重要成矿带. 文献[9]显示, 长江经济带矿产资源丰富, 就储量而言, 金属矿产中锂矿储量占全国的 92.1%, 钨矿、锡矿、锑矿和铜矿分别占 74.4%、52.8%、43.1% 和 36.3%; 非金属矿产中磷矿与普通萤石储量占比超 84%. 就矿山数量而言, 共计 3.5 万个矿山, 占全国矿山总数的 45.2%. 就产量而言, 锑矿和钨矿产量占全国总量的 80% 以上, 锡矿产量占 70%, 铜矿和

锰矿产量占 42% 以上. 长江经济带矿山地质环境重点治理区 197 个, 占全国 37.60%. 长江经济带矿产资源产能大, 但资源综合利用效率不高, 资源开发与生态环境保护矛盾突出.

矿山开发过程不仅造成地表破坏、植被数量下降和水土流失等环境问题, 且废渣和粉尘等介质将含有重金属污染物通过多途径进入矿山周边土壤中^[10,11], 造成矿山土壤污染. 文献[12]显示, 我国土壤环境状况总体不容乐观, 工矿业废弃地土壤污染问题突出, 以重金属污染为主. 由于土壤重金属污染具有隐蔽性和滞后性等特性, 我国早期对土壤重金属污染关注度不高, 随着“镉米”等事件频发, 土壤

收稿日期: 2021-09-12; 修订日期: 2021-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800306)

作者简介: 张浙(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向土壤与重金属污染防治, E-mail: zhezhang1996@qq.com

* 通信作者, E-mail: luran@caep.org.cn

重金属污染环境风险问题凸显. 近年来,我国先后发布实施了土壤污染防治相关法律、行动计划^[13,14],针对土壤重金属污染问题采取了一系列有力措施.但目前土壤污染问题依旧突出,历史遗留等问题短期内难以彻底解决^[15,16].

目前与长江经济带矿山土壤重金属污染的相关研究综述文章较少,例如:方传棣等^[7]的研究统计分析了长江经济带 33 个地区的矿区土壤重金属元素含量,并分区评价了污染特征;Li 等^[17]的研究在 2014 年针对全国矿山进行重金属污染评价,并对这些污染物对人体健康构成的风险进行了量化.但上述研究未针对长江经济带整体从矿山土壤重金属污染状况和分布趋势、不同资源类型污染和人体健康风险等角度进行评价.因此,本文收集近 15 年来长江经济带各地区矿山土壤重金属污染相关文献,通过区域角度研究长江经济带矿山土壤重金属的总体污染状况,分析其重点污染区域和分布规律,评价人体健康风险,以期为我国长江经济带矿山土壤重金属污染防控与矿山修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

本文通过 Web of Science、知网和万方等全文数据库,以中文“矿山”、“土壤重金属”和英文“mining area”、“soil heavy metals”、“China”作为检索关键词,检索 2006~2020 年期间有关我国矿山土壤重金属污染的相关研究,初步筛选出研究区域为长江经济带的相关文献,舍去检索结果中未表明采样点位、矿产类型、重金属含量和采样与检测方法不符合相关规定的文献,最终筛选出 105 篇(对应 6 438 个采样点、353 个样本数据)有效文献用于进一步分析,收集各文献中矿区重金属含量均值、所在地、采样点经纬度和矿产资源类型等信息.其中所涉及的重金属为美国环保署(USEPA)指定的优先控制污染物名单中的 8 种重金属: Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn 和 Ni^[18].旨在总结长江经济带矿山土壤重金属污染状况和评价人体健康风险,为矿山生态修复与相关管理部门制定防控措施提供一定的依据.上述 105 篇文献中包含长江经济带内各典型矿山,如:江西省的德兴铜矿山是亚洲第一大铜矿^[19~21];贵州万山汞矿山是国内现存开采时间最早、历史最长且规模最大的汞矿^[22,23],文献覆盖了有矿产资源重点开采区的长江经济带各省份.虽然本文可能未检索出近 15 年间所有的长江经济带矿山土壤重金属相关研究成果,但作者认为所搜集文献基本能代表长江经济带矿山土壤重金属研究的主

要成果,这对了解长江经济带矿山土壤重金属的污染现状和分布规律具有一定的参考价值.

1.2 土壤污染评价方法

1.2.1 普通克里金空间插值

克里金插值法(Kriging)又称为空间局部插值法,是以变异函数理论和结构分析为基础,可在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计,是最常用的地统计方法之一^[24].本研究采用普通克里金插值法进行空间插值,通过确定待插点周围采样点的权重来求取待插点的近似值.在插值过程中,选择插值的变量类型为半变异函数.

1.2.2 地累积指数法

地累积指数法(index of geoaccumulation)是 20 世纪 60 年代末由 Müller^[25]提出用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量评价方法,该法能够反映土壤重金属污染分布特征,同时考虑人为污染因素、环境地球化学背景值和自然成岩作用的影响^[26],近年来被国内外学者广泛应用于土壤重金属污染评价中^[27],其公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \cdot B_i)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; K 为表征岩石地质和沉积特征等影响背景值变化的系数(通常取 $K = 1.5$); B_i 为土壤中重金属 i 的地球化学背景值.根据 I_{geo} 的计算结果,可将重金属分为 7 个等级(表 1).

表 1 地累积指数级数

级数	地累积指数 I_{geo}	污染程度
0	$I_{geo} < 0$	无污染
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	无污染-中污染
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	中污染
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	中污染-重污染
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	重污染
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	重污染-极度污染
6	$I_{geo} \geq 5$	极度污染

1.2.3 人体健康风险评价

土壤重金属往往通过 3 种途径被人体摄入并危害人体健康:经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物^[28],即人体日均暴露 $\text{ADD}_{\text{经口摄入}}$ 、 $\text{ADD}_{\text{皮肤接触}}$ 和 $\text{ADD}_{\text{呼吸吸入}}$ [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 计算公式分别如下^[29]:

$$\text{ADD}_{\text{经口摄入}} = \frac{C_i \times \text{IR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{皮肤接触}} = \frac{C_i \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

$$\text{ADD}_{\text{呼吸吸入}} = \frac{C_i \times \text{PM}_{10} \times \text{DAIR} \times \text{PIAF} \times \text{FSPO} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

式中, C_i 为样本点中 i 重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其他参数值(见表 2)来源于《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)推荐值、USEPA 暴露因子手册和国内外相关研究^[27-30]。

根据污染场地风险评估技术导则,对于健康效应的分析分为致癌效应和非致癌效应^[28],其中非致癌效应通过单个重金属 i 的非致癌风险指数(HQ_i)和总非致癌风险指数(HI)表示,致癌效应通过单个重金属 i 的致癌风险指数(CR_i)和总致癌风险指数(CRI)表示,其计算公式如下:

$$\text{HQ}_i = \sum_{j=1}^3 \text{ADD}_{ij} / \text{RfD}_{ij} \quad (5)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^8 \text{HQ}_i \quad (6)$$

$$\text{CR}_i = \sum_{j=1}^3 \text{ADD}_{ij} \times \text{SF}_{ij} \quad (7)$$

$$\text{CRI} = \sum_{i=1}^4 \text{CR}_i \quad (8)$$

式中, i 为某重金属; j 为某暴露途径; RfD 为参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{kg})^{-1}$; SF 为斜率系数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; 其具体参考值见表 3^[27,28,30]。

表 2 健康风险评估模型暴露参数

评价参数	参考值	
	成人	儿童
土壤摄入率(IR)/ $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100	200
转换因子(CF)/ $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$	10^{-6}	10^{-6}
暴露频率(EF)/ $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350
暴露年限(ED)/a	24	6
平均体重(BW)/kg	56.8	15.9
暴露皮肤表面积(SA)/ cm^2	5 075	2 448
皮肤土壤黏附系数(AF)/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2	0.07
皮肤吸收效率因子(ABS)(无量纲)	0.001	0.001
空气中可吸入悬浮颗粒物含量(PM_{10})/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.15	0.15
人每日空气呼吸量(DAIR)/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	15	7.5
吸入颗粒物在人体内滞留比例(PIAF)/无量纲	0.75	0.75
空气中来自土壤的颗粒物所占比例(FSPO)/无量纲	0.5	0.5
平均接触时间(致癌)(AT)/d	26 280	26 280
平均接触时间(非致癌)(AT)/d	9 125	9 125

表 3 重金属不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率系数(SF)

重金属	呼吸吸入		皮肤接触		经口摄入	
	RfD	SF _i	RfD	SF _d	RfD	SF _o
Pb	3.52E-03	4.20E-02	5.25E-04	1.70E-02	3.50E-03	8.50E-03
Cd	2.40E-06	6.30	1.00E-05	6.10	1.00E-03	6.10
Cr	2.86E-05	42.00	6.00E-05	20.00	3.00E-03	5.01E-01
Hg	7.66E-05		2.10E-05		3.00E-04	
As	3.01E-04	15.10	1.23E-04	3.66	3.00E-04	1.50
Zn	3.00E-01		6.00E-02		3.00E-01	
Ni	2.06E-02		5.40E-03		2.00E-02	
Cu	1.20E-02		4.00E-02		4.00E-02	

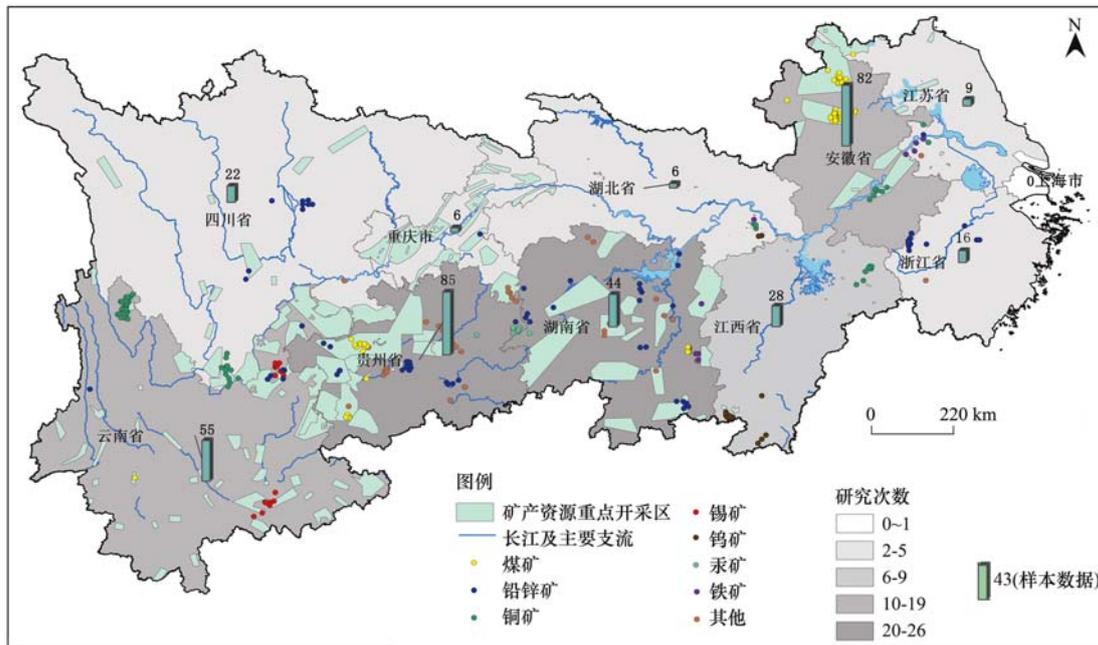
2 结果与讨论

2.1 矿山土壤重金属污染水平与空间分布特征

所收集文献中矿山分布于长江经济带 10 个省市(上海市未涉及),主要集中在贵州、湖南、安徽和云南,如图 1 所示。矿产资源类型涵盖了煤矿、金属矿和化学矿,主要为煤矿和金属矿,其中煤矿和铅锌矿均有 94 个样本数据,其次为铜矿和锡矿分别有 64 个和 20 个样本数据,其余各矿种均小于 20 个。

长江经济带矿山土壤 8 种重金属污染含量如图 2 所示,结果表明矿山土壤重金属含量均值均已经远超长江经济带土壤环境背景值^[31]。其中 Cd、Hg、Zn、Pb、As、Cu、Ni 和 Cr 元素含量平均值(18.08、8.09、1465.02、425.18、136.30、148.81、73.93 和 123.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)超标倍数分别为 100.85、79.95、18.32、14.35、10.57、5.41、2.36 和 1.73 倍,最严

重为 Cd 和 Hg 均表现出显著地累积。除 Cr 以外其余 7 种元素含量超长江经济带背景值的样本点数均占 73% 以上,比例最大为 Cd 和 Hg,分别有 86.40% 和 83.69%。参考《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)第一类用地筛选值[未规定的总铬和锌沿用《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准],8 种重金属均存在部分点位超过筛选值情况,其中 As、Zn、Pb 和 Hg 含量均值超筛选值,超标倍数分别为 6.82、5.86、1.06 和 1.01 倍,而其样本点数超筛选值比例分别为 55.94%、41.52%、22.09% 和 10.64%。综上所述,长江经济带矿山土壤应当聚焦于 Cd、Hg、As 和 Zn 的污染。其中 Cd 是困扰中国粮食安全的一个重要难题之一^[32,33],针对 Cd 污染应进一步加强对长江经济带地区“镉米”的防控,健全监督管理制度严防镉超标粮食流入餐桌^[34,35];随着文献[36]于



矿产资源重点开采区数据来源于国家自然资源和地理空间信息基础数据库

图 1 长江经济带矿山土壤重金属点位分布

Fig. 1 Distribution of soil heavy metals in the mining area of the Yangtze River Economic Belt

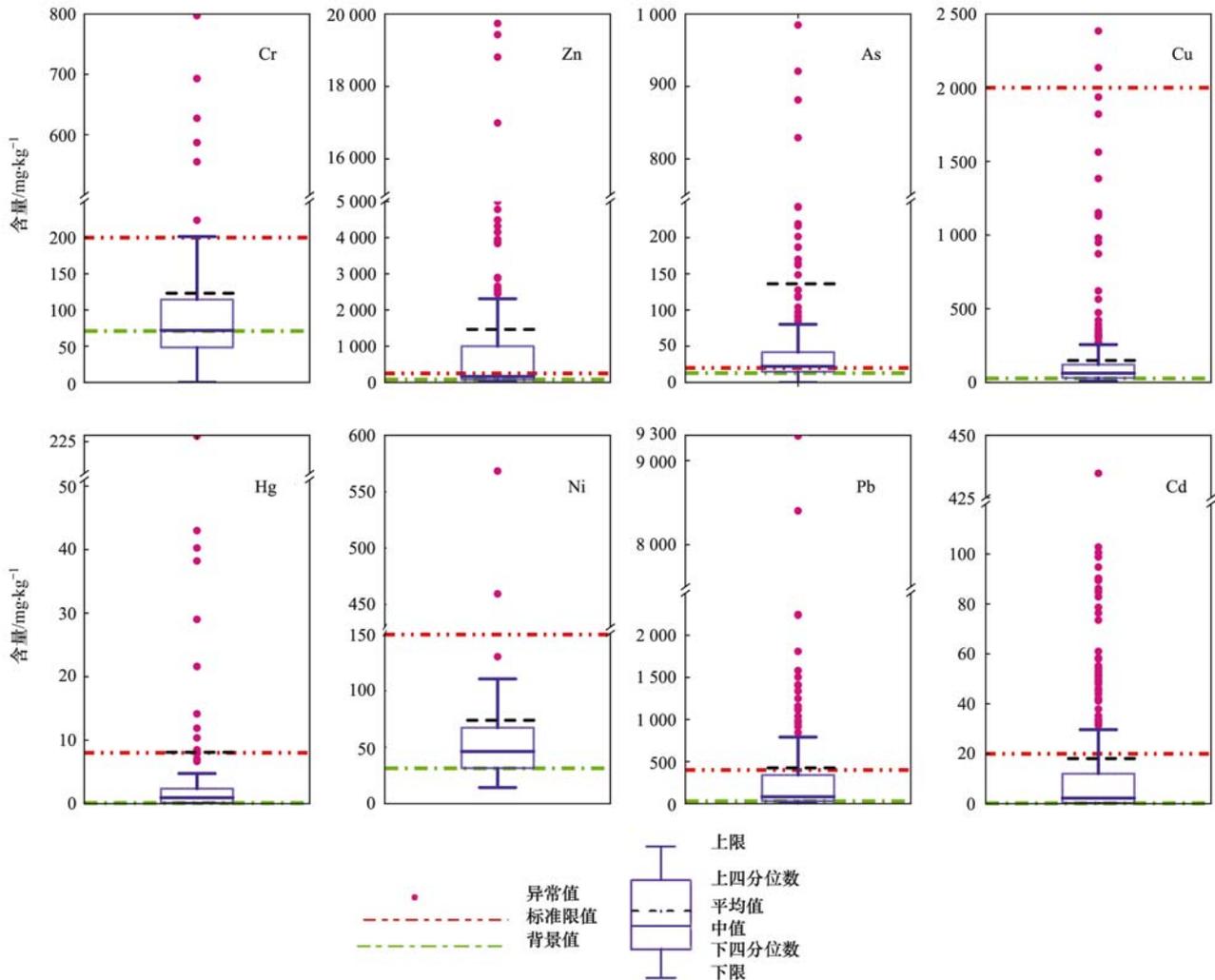


图 2 长江经济带矿山土壤重金属含量箱线图

Fig. 2 Boxplots of heavy metal concentrations in mine soil of Yangtze River Economic Belt

2017 年正式生效^[37], 加强对 Hg 排放和释放的监督管理, 由于汞污染土壤修复过程中存在向外界环境释放 Hg 污染的可能性^[38,39], 针对汞矿山土壤污染应更加谨慎地选择修复方式。

使用 ArcGIS 10.6 软件地统计模块中普通克里金插值法, 对收集到的 353 个样本点经纬度和 8 种重金属含量进行插值分析, 得到长江经济带 8 种重金属含量的空间分布, 如图 3 所示。其中 Pb 和 Zn 含量超过第一类用地筛选值的区域面积分别占总面积的 60.44% 和 94.26%, 两者地球化学性质相近, 在自然

界中原生矿床常共生^[40], 污染常具有较高的相关性, 本研究结果显示两者空间分布特征较为一致且均呈岛状空间分布特征, 其高值区主要位于成都的大邑县、重庆市和杭州市, 其次为贵州的六盘水市和湖南的长沙市。Cr 含量超筛选值的面积仅占 10.35%, 其中安徽的淮北市、江西的赣州市和贵州的黔西南布依族苗族自治州污染含量相对偏高。Hg 含量存在 79.63% 的面积超过筛选值, 污染相对集中, 高值区主要集中在贵州铜仁市万山区, 这是由于贵州汞矿的储量和产量均居全国首位^[41], 其高值区同长江经济带

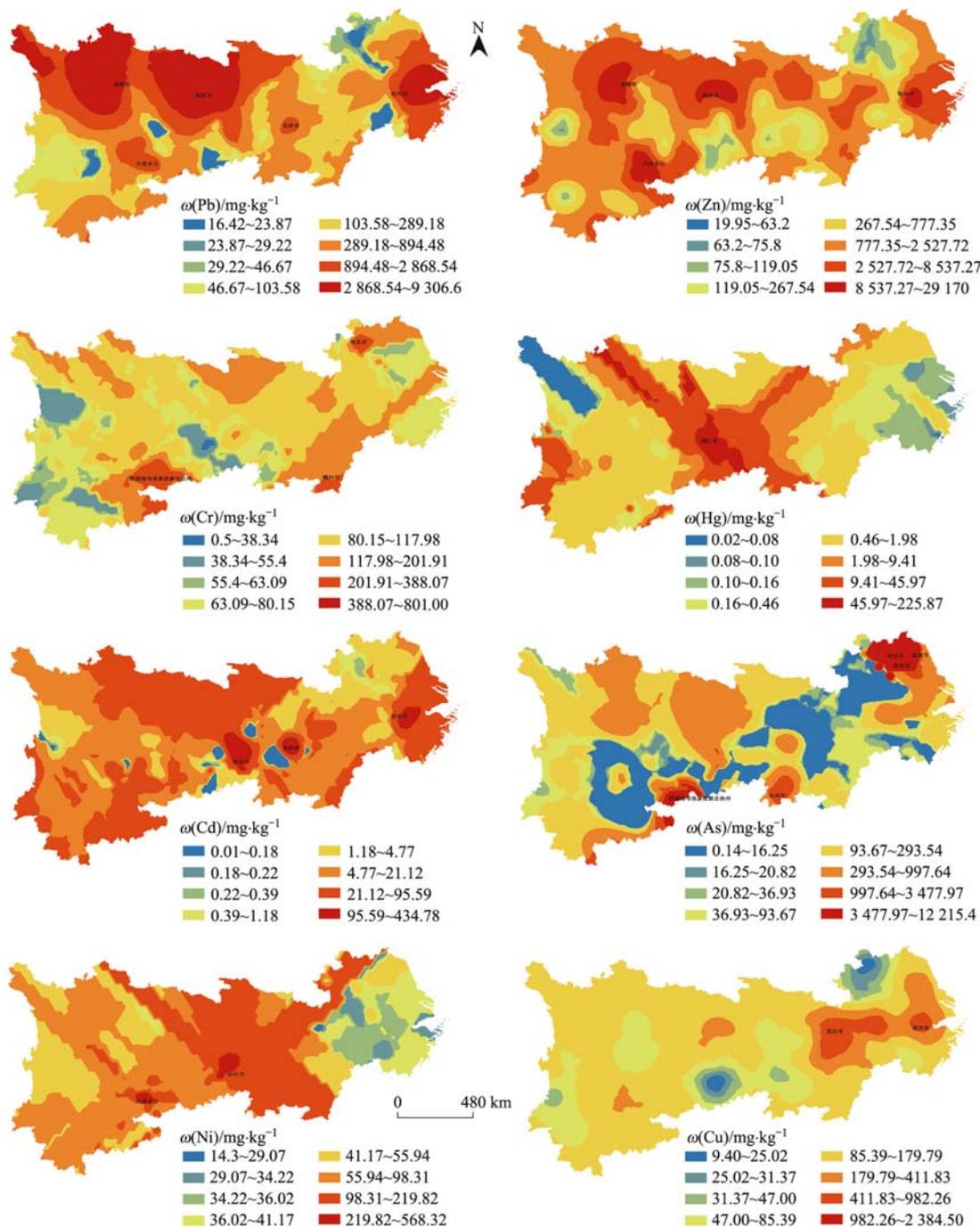


图 3 长江经济带矿山土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in mine soil of the Yangtze River Economic Belt

的 Hg 矿资源分布较为一致. Cd 含量超过筛选值的面积占 48%,高值区主要分布在怀化市、长沙市和杭州市等. As 含量超过筛选值的面积占 83.7%,其高含量主要分布在江苏和安徽的北部、贵州南部和湖南的南部地区. Ni 含量超筛选值的面积仅占 14.12%,整体污染较轻,高值区主要分布在湖南省的怀化市和贵州的六盘水市. Cu 含量几乎不存在超筛选值区域,含量相对偏高的区域主要为绍兴市和黄石市周边区域,总体污染状况符合铜矿分布特征^[42].

2.2 土壤污染评估

采用地累积指数法对长江经济带矿山土壤中 8 种重金属进行评价,其 I_{geo} 平均值从大到小的顺序为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr,其地累积指数等级分布情况如图 4 所示. 其中 Cd 污染最为严重, I_{geo} 平均值为 3.98,其极度污染占 40%,近 65% 位点的 Cd 污染达到了中污染以上; Hg 的 I_{geo} 平均值为 3.05,极度污染占 18%,中污染以上占 61% 左右; Pb 和 Zn 的 I_{geo} 平均值分别为 1.48 和 1.40,其极度污染分别占 8% 和 12%,中污染以上分别为 39% 和 32%; Cu 和 As 的 I_{geo} 平均值分别为 1.08 和 0.77,极度污染分别占 3% 和 4%,中污染以上占比分别为 23% 和 20%; Ni 和 Cr 不存在重度污染以上的位点,中污染以上占比均不超过 10%. 即长江经济带矿山土壤重金属污染地累积指数评价结果显示: 矿山土壤中 Cd 和 Hg 污染最严重,其次则为 Pb、Zn、Cu 和 As, Ni 与 Cr 污染较轻.

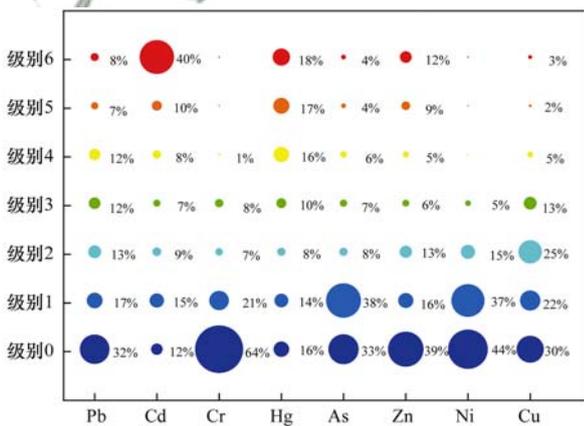


图 4 矿山土壤重金属污染地累积指数分级分布

Fig. 4 Class distribution of I_{geo} for heavy metals in mine soil

按不同矿山资源类型进行统计分析,其平均地累积指数 I_{geo} 如图 5 所示. 锡矿最为突出的污染元素为 Cd 和 As, I_{geo} 平均值处于极度污染级别; 其次为 Pb、Zn 和 Cu, 处于中污染-重污染之间; 而 Cr、Hg 和 Ni 污染相对不突出, I_{geo} 平均值小于 1, 处于中污染以下. 其评价结果同张德刚等^[43] 和姚航等^[44] 关于锡矿土壤污染的研究结果基本相符,即锡矿土壤污染

治理中应主要重视 Pb、Cd、As、Zn 和 Cu 等污染的治理. 铅锌矿山周边土壤中以 Cd 污染严重,评价结果显示为极度污染; 其次则为重污染的 Pb、Zn 和 Hg, 而 As、Ni、Cu 和 Cr 污染较轻. 徐佩等^[45] 研究表明铅锌矿区域表层土壤 Cd、Pb 和 Zn 污染最重, Cr 偶有超过背景值,吴迪等^[46] 研究表明在铅锌矿山土壤中 Cd、Zn、Hg 和 Pb 已达到极强污染程度,而 Cr 污染是最轻的,同本研究结果一致. 煤矿总体 I_{geo} 均较低,仅 Cd 与 Hg 处于中污染级别,与 Liu 等^[47] 的研究结果相符. 铜矿总体污染较轻,主要为 Cd、Hg 和 Cu 这 3 种污染,评价结果显示处于中污染级别.

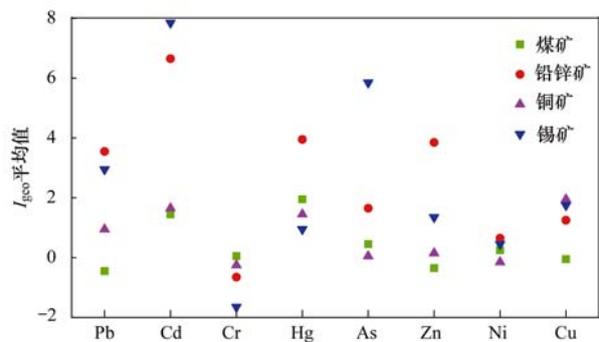


图 5 长江经济带不同类型矿山 I_{geo} 平均值

Fig. 5 Average I_{geo} values of heavy metals for different types of examined sampling sites in mine soil of the Yangtze River Economic Belt

2.3 健康风险评估

长江经济带矿山土壤 8 种重金属非致癌与致癌风险评价结果如表 4 所示. 就单一重金属不同暴露途径的非致癌风险而言,成人和儿童的 HQ_i 值大小依次均为: 经口摄入 > 呼吸吸入 > 皮肤接触,即经口摄入途径是非致癌风险的主要途径. 3 种暴露途径共同作用下不同重金属的非致癌风险指数大小为: As > Pb > Cd > Cr > Hg > Zn > Ni > Cu, 其中 As 非致癌风险最大, HQ_{As} 小于 1, 表明单一重金属作用对人体尚不形成非致癌风险. 但成人和儿童的总非致癌风险指数 HI 均大于 1, 因此长江经济带矿山土壤重金属整体对人体构成非致癌健康风险. 致癌风险指数 CR_i 在不同暴露途径中的排序与非致癌风险相同,即致癌风险主要暴露途径也为经口摄入,其中成人与儿童经口摄入 CR_i 分别为 1.63×10^{-4} 和 2.92×10^{-4} , 均大于 10^{-4} , 即对人体健康已经构成了致癌风险. 不同重金属成人致癌风险指数大小为: Cr > As > Cd > Pb, 儿童为: As > Cd > Cr > Pb, 其中儿童的致癌风险指数 CR_{Cd} 与 CR_{As} 均大于 10^{-4} , 即 Cd 和 As 污染单独影响下对儿童已构成致癌风险,总致癌风险指数 CRI 成人与儿童均大于 10^{-4} , 表明 4 种重金属整体作用下对人体构成致癌风险.

表 4 长江经济带矿山健康风险表征指数

Table 4 Characterization index of mine health risk in Yangtze River Economic Belt

指标	呼吸吸入		皮肤接触		经口摄入	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
HQ _{Pb}	1.64E-03	7.32E-04	1.32E-02	5.69E-03	1.95E-01	3.49E-01
HQ _{Cd}	1.03E-01	4.61E-02	2.98E-02	1.28E-02	2.93E-02	5.24E-02
HQ _{Cr}	5.89E-02	2.63E-02	3.38E-02	1.46E-02	6.66E-02	1.19E-01
HQ _{Hg}	1.44E-03	6.45E-04	6.34E-03	2.73E-03	4.37E-02	7.81E-02
HQ _{As}	3.48E-03	1.55E-03	1.02E-02	4.41E-03	4.13E-01	7.38E-01
HQ _{Zn}	6.68E-05	2.98E-05	4.02E-04	1.73E-04	7.91E-03	1.41E-02
HQ _{Ni}	4.91E-05	2.19E-05	2.25E-04	9.70E-05	5.99E-03	1.07E-02
HQ _{Cu}	1.70E-04	7.57E-05	6.12E-05	2.64E-05	6.03E-03	1.08E-02
HI	1.69E-01	7.54E-02	9.40E-02	4.05E-02	7.68E-01	1.37E+00
CR _{Pb}	8.41E-08	3.76E-08	4.10E-08	1.76E-08	2.02E-06	3.60E-06
CR _{Cd}	5.42E-07	2.42E-07	6.31E-07	2.72E-07	6.21E-05	1.11E-04
CR _{Cr}	2.46E-05	1.10E-05	1.41E-05	6.06E-06	3.47E-05	6.20E-05
CR _{As}	5.49E-06	2.45E-06	1.60E-06	6.89E-07	6.46E-05	1.15E-04
CRI	3.07E-05	1.37E-05	1.63E-05	7.04E-06	1.63E-04	2.92E-04

本文采用更加严格的儿童暴露参数对长江经济带非致癌风险空间分布进行评估,如图 6 所示. 其中 77% 点位的总非致癌风险指数(HI)小于 1,即大多数样本点非致癌风险可忽略. 其高非致癌风险点位大多数分布在长江的中上游,主要分布在贵州省、湖南省、重庆市、四川省和云南省;仅存两个点位

HI 大于 10,分别在贵州省和重庆市,而该水平下会对人体产生慢性致毒效应. 长江中下游的安徽、浙江和江苏省仅存在个别点位总非致癌风险指数 HI 大于 1,湖北省和江西省则所有样本点的 HI 均小于 1. 综上所述,长江经济带矿山土壤重金属中上游非致癌风险同下游相比较高.

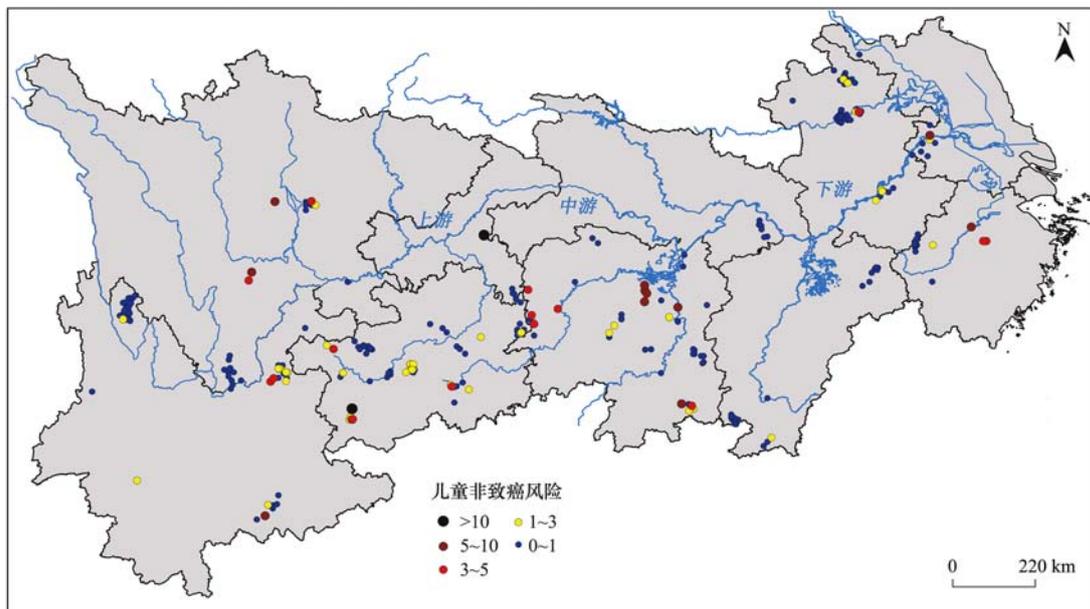


图 6 长江经济带矿山土壤重金属非致癌健康风险指数分布

Fig. 6 Distribution map of non carcinogenic health risk index of heavy metals in mine soil of Yangtze River Economic Belt

长江经济带矿山土壤重金属总致癌风险(CRI)分布如图 7 所示,在 As、Cd、Cr 和 Pb 复合作用下近 50% 的点位 CRI 大于 10^{-4} ,存在致癌的风险. 同非致癌风险相比,总致癌风险更加突出,长江经济带每个省份均存在总致癌风险 CRI 大于 10^{-4} 点位,其中四川省 72% 的点位 CRI 大于 10^{-4} ,贵州省、湖南

省和云南省分别有 67%、66% 和 55% 的样本点的 CRI 大于 10^{-4} ,安徽省、江西省和湖北省样本点中分别有 33%、33% 和 38% 点位的 CRI 大于 10^{-4} ,而江苏省、浙江省和重庆市内 CRI 大于 10^{-4} 的样本点数低于 25%. 就长江经济带整体而言,长江中上游各省市致癌风险明显高于长江经济带下游.

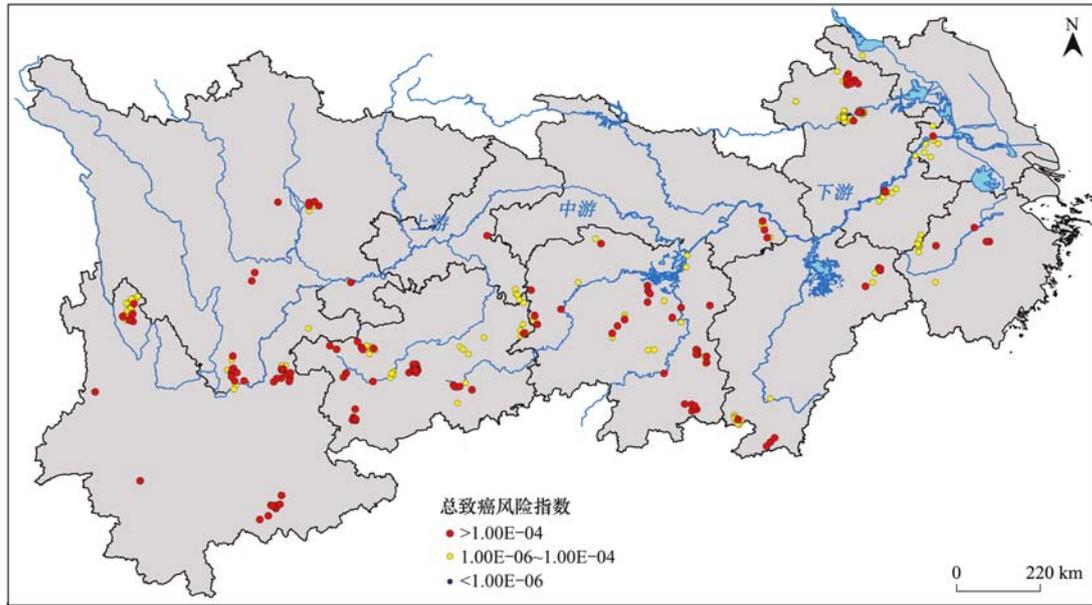


图7 长江经济带矿山土壤重金属致癌健康风险指数分布

Fig. 7 Distribution map of carcinogenic health risk index of heavy metals in mine soil of Yangtze River Economic Belt

3 结论

(1)长江经济带矿山土壤重金属含量均值均已超过长江经济带土壤环境背景值,其中Cd和Hg存在明显的富集;各重金属均存在部分位点超筛选值,而Pb、Hg、As和Zn含量均值超过我国土壤污染筛选值。克里金插值法结果表明Pb、Zn、Hg和As含量超筛选值的区域面积占长江经济带总面积的60%以上,Cd占48%,其余则占比低于15%。

(2)土壤污染评价结果表明长江经济带矿山土壤8种重金属污染程度依次为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr,其中污染程度最严重的为Cd,近64.46%位点达到了中污染以上。不同资源类型中,锡矿和铅锌矿污染较其他矿种而言较为突出,其中锡矿中Cd和As与铅锌矿的Cd为极度污染级别;而铜矿和煤矿各污染物均处于中污染及其以下级别。

(3)人体健康风险评价结果表明经口摄入是长江经济带矿山土壤重金属非致癌和致癌风险的主要暴露途径;单一重金属作用对人体不构成非致癌风险,但As或Cd两者单独作用可对儿童均构成致癌风险;总非致癌和致癌风险指数对成人和儿童均处于不可接受范围内。就空间分布而言,非致癌风险和致癌风险均在长江中上游的贵州省、湖南省、重庆市、四川省和云南省等较为突出。

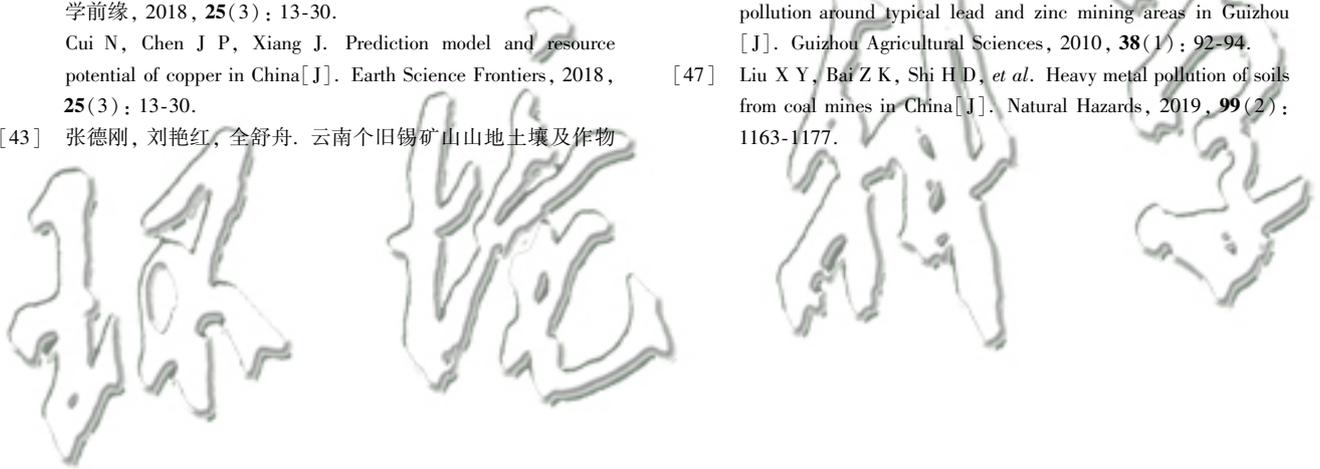
参考文献:

- [1] 傅雷, 仲冰. 中国矿产资源现状与思考[J]. 资源与产业, 2008, 10(1): 83-86.
Fu L, Zhong B. Views on current status of minerals resources in

- China[J]. Resources & Industries, 2008, 10(1): 83-86.
[2] Li C F, Wang A J, Chen X J, et al. Regional distribution and sustainable development strategy of mineral resources in China [J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(4): 470-481.
[3] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2020 [R]. 北京: 地质出版社, 2020.
Ministry of Natural Resources. China mineral resources [R]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
[4] 成金华, 朱永光, 徐德义, 等. 产业结构变化对矿产资源需求的影响研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 558-566.
Cheng J H, Zhu Y G, Xu D Y, et al. Impact of industrial structural change on mineral resource demand [J]. Resources Science, 2018, 40(3): 558-566.
[5] Krausmann F, Gingrich S, Eisenmenger N, et al. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century [J]. Ecological Economics, 2009, 68(10): 2696-2705.
[6] He K, Wang L, Li X Y. Review of the energy consumption and production structure of China's steel industry: current situation and future development [J]. Metals, 2020, 10(3), doi: 10.3390/met10030302.
[7] 方传棣, 成金华, 赵鹏大, 等. 长江经济带矿区土壤重金属污染特征与评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 230-239.
Fang C D, Cheng J H, Zhao P D, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soils of mining areas in the Yangtze River Economic Belt [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 230-239.
[8] 张玉韩, 吴尚昆, 董延涛. 长江经济带矿产资源开发空间格局优化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 839-852.
Zhang Y H, Wu S K, Dong Y T. Optimization of the spatial pattern of mineral resources development in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 839-852.
[9] 国土资源部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 全国矿产资源规划(2016-2020年) [EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html, 2016-11-15.

- [10] 陈晶, 余振国, 孙晓玲, 等. 基于山水林田湖草统筹视角的矿山生态损害及生态修复指标研究[J]. 环境保护, 2020, **48**(12): 58-63.
Chen J, Yu Z G, Sun X L, *et al.* Study on ecological damage of mine and the ecological remediation indexes in view of the holistic approach to conserving mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands[J]. Environmental Protection, 2020, **48**(12): 58-63.
- [11] 武强, 刘宏磊, 陈奇, 等. 矿山环境修复治理模式理论与实践[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(5): 1085-1092.
Wu Q, Liu H L, Chen Q, *et al.* Theoretical study of mine geo-environmental restoration model and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(5): 1085-1092.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 国务院. 土壤污染防治行动计划[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676582.shtml, 2016-05-31.
- [15] 王夏晖, 卢然, 伍思杨, 等. 中国重金属污染防治政策进展报告 2009-2019[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020.
- [16] 陈卫平, 谢天, 李笑诺, 等. 中国土壤污染防治技术体系建设思考[J]. 土壤学报, 2018, **55**(3): 557-568.
Chen W P, Xie T, Li X N, *et al.* Thinking of construction of soil pollution prevention and control technology system in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(3): 557-568.
- [17] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 843-853.
- [18] USEPA. Toxic and priority pollutants under the clean water act [R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2014.
- [19] 常玉虎, 赵元艺, 曹冲, 等. 德兴铜矿区主要流域内环境介质中重金属含量特征与健康风险评估[J]. 地质学报, 2015, **89**(5): 889-908.
Chang Y H, Zhao Y Y, Cao C, *et al.* Characteristics of heavy metals content and assessment of health risk in different environment media in the Dexing copper mining area[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, **89**(5): 889-908.
- [20] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 基于污染指数法和 GIS 技术评价江西德兴矿区土壤重金属污染[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, **38**(1): 105-111.
Chen C H, Ni S J, He B B, *et al.* Assessing heavy metals contamination of soils based on the pollution index and GIS methods in Dexing mines, Jiangxi Province, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, **38**(1): 105-111.
- [21] Zhao B, Han L, Wu J J, *et al.* Ore- and bio-geochemical survey based on the Landsat remotely sensed data in and around the Dexing porphyry copper-polymetal ore-field, Southeastern China [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, **46**: 97-107.
- [22] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评估[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 879-885.
Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(5): 879-885.
- [23] 苟体忠, 阮运飞. 万山汞矿区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 化工环保, 2020, **40**(3): 336-341.
Gou T Z, Ruan Y F. Characteristics and source of heavy metals in contaminated soil in Wanshan mercury mine area [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2020, **40**(3): 336-341.
- [24] 马妍, 程芦, 阮子渊, 等. 近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1065-1072.
Ma Y, Cheng L, Ruan Z Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of China (2000-2020): temporal and spatial distribution, influencing factors [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1065-1072.
- [25] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geology Journal, 1969, **2**: 108-118.
- [26] 秦顺超, 张焕祯, 郭伟, 等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[A]. 见:《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册)[C]. 北京:《工业建筑》杂志社, 2018.
- [27] 李玉梅, 李海鹏, 张连科, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(1): 88-96.
Li Y M, Li H P, Zhang L K, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding an aluminum factory in Baotou, China [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(1): 88-96.
- [28] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [29] HJ 875-2017, 环境污染物人群暴露评估技术指南[S].
- [30] USEPA. Exposure factors handbook [R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2011.
- [31] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [32] 白婧, 张文, 张思思, 等. 锡矿山土壤重金属生态健康风险评估及重金属在优势植物的分布[J]. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(3): 411-421.
Bai J, Zhang W, Zhang S S, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in soils and their distribution in dominant plants in the Xikuangshan mining area[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, **38**(3): 411-421.
- [33] 张儒德, 李军, 秦利, 等. 辽宁省 5 种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(5): 842-849.
Zhang R D, Li J, Qin L, *et al.* Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(5): 842-849.
- [34] Feng L, Yan H L, Dai C H, *et al.* The systematic exploration of cadmium-accumulation characteristics of maize kernel in acidic soil with different pollution levels in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138972.
- [35] Du B Y, Zhou J, Lu B X, *et al.* Environmental and human health risks from cadmium exposure near an active lead-zinc mine and a copper smelter, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137585.
- [36] 环境保护部, 外交部, 发展改革委, 等.《关于汞的水俣公约》生效公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201708/t20170816_419736.htm, 2017-08-15.

- [37] Lin Y, Wang S X, Steindal E H, *et al.* Minamata convention on mercury: Chinese progress and perspectives [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(5): 677-679.
- [38] 卢光华, 岳昌盛, 彭彝, 等. 汞污染土壤修复技术的研究进展[J]. *工程科学学报*, 2017, **39**(1): 1-12.
Lu G H, Yue C S, Peng B, *et al.* Review of research progress on the remediation technology of mercury contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, **39**(1): 1-12.
- [39] 李爱民, 杨福胜, 郝帅, 等. 基于热脱附法的汞污染土壤修复研究进展[J]. *土壤*, 2020, **52**(3): 433-438.
Li A M, Yang F S, Hao S, *et al.* Research progress on the remediation of mercury-contaminated soil using thermal desorption method [J]. *Soils*, 2020, **52**(3): 433-438.
- [40] 张明超. 江苏栖霞山铅锌银多金属矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [41] 李强, 郭飞, 莫测辉, 等. 贵州省环境中汞污染现状与分布特征[J]. *生态科学*, 2013, **32**(2): 235-240.
Li Q, Guo F, Mo C H, *et al.* A study of distribution of environmental mercury in Guizhou Province [J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 235-240.
- [42] 崔宁, 陈建平, 向杰. 中国铜矿预测模型与资源潜力[J]. *地学前缘*, 2018, **25**(3): 13-30.
Cui N, Chen J P, Xiang J. Prediction model and resource potential of copper in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, **25**(3): 13-30.
- [43] 张德刚, 刘艳红, 全舒舟. 云南个旧锡矿山地土壤及作物中重金属污染分析[J]. *西南农业学报*, 2014, **27**(5): 2045-2049.
Zhang D G, Liu Y H, Quan S D. Heavy metal contamination analysis of montanic soil and crops of tin mine in Gejiu of Yunnan [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **27**(5): 2045-2049.
- [44] 姚航, 张杏锋. 锡矿开采对土壤的重金属污染及风险评估——以广西南丹县大厂镇为例[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(6): 230-235.
Yao H, Zhang X F. Effect of tin mining on heavy metal contamination and risk assessment of soil—taking Dachang Town, Nandan County, Guangxi as an example [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(6): 230-235.
- [45] 徐佩, 吴超, 邱冠豪. 我国铅锌矿山土壤重金属污染规律研究[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(3): 739-744.
Xu P, Wu C, Qiu G H. Study on the law of soil heavy metals pollution around lead-zinc mining areas in China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(3): 739-744.
- [46] 吴迪, 李存雄, 邓琴, 等. 贵州省典型铅锌矿区土壤重金属污染状况评价[J]. *贵州农业科学*, 2010, **38**(1): 92-94.
Wu D, Li C-X, Deng Q, *et al.* Evaluation on soil heavy metal pollution around typical lead and zinc mining areas in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, **38**(1): 92-94.
- [47] Liu X Y, Bai Z K, Shi H D, *et al.* Heavy metal pollution of soils from coal mines in China [J]. *Natural Hazards*, 2019, **99**(2): 1163-1177.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)