

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, 丁铎, 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, 吕建毅, 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, 丁铖, 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, 郑佳峰 (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 O ₃ 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期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)
典型喀斯特城市湖泊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 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 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, 杨根, 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, 程阳阳, 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, 宴世卿, 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, 盛茂根, 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 CH ₄ 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, 魏庐潞, 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)	

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准

徐梦琪^{1,2}, 杨文弢^{1,2,3*}, 杨利玉^{1,2}, 陈勇林^{1,2}, 景灏楠^{1,2}, 吴攀^{1,2,3}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025)

摘要: 以贵州省西北某典型喀斯特山区耕地为研究区, 通过对 137 组土壤-农作物协同样品中重金属 (Cd、Hg、As、Pb 和 Cr) 含量进行检测, 系统评价了区域土壤和农作物中重金属健康暴露风险, 并基于物种敏感分布模型 (SSD) 反推区域耕地土壤环境风险基准值。结果表明: 研究区玉米和水稻土壤均受到不同程度重金属 (Cd、Hg、As、Pb 和 Cr) 污染, 其中 Cd 为首要污染物, 超标率在 87%~445% 之间, 且玉米地 > 水稻田; 与土壤重金属高污染水平相反, 仅有 3.51% 和 13.04% 的玉米籽粒和稻米中 Cd 含量超过国家食品安全限量标准, 重金属 Cd 累积能力为水稻 > 玉米。健康风险评价结果显示, 重金属对研究区成人和儿童的致癌/非致癌风险均处于较低水平, 稻米摄入的致癌风险略高于玉米, 儿童的健康风险值均高于成人。研究区土壤环境基准值是基于保护 95% (HC₅) 和 5% (HC₉₅) 的作物品种安全所得的土壤风险值, 玉米土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的 HC₅ 值分别为 0.67、771.99、40.85 和 609.88 mg·kg⁻¹, HC₉₅ 值分别为 20.83、14 381.82、2 427.36 和 8 606.28 mg·kg⁻¹; 水稻土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的 HC₅ 值分别为 2.42、8.88、41.41 和 27.84 mg·kg⁻¹, HC₉₅ 值分别为 48.47、159.67、1 735.68 和 1 671.74 mg·kg⁻¹。推导出的玉米和水稻土壤中重金属的 HC₅ 值均不同程度地高于现行标准中的土壤风险筛选值, HC₉₅ 值均高于土壤风险管控值, 现行土壤标准对该地区评价结果偏严。

关键词: 黔西北; 谷类农作物; 土壤; 重金属; 健康风险评价; 环境基准

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3799-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111053

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province

XU Meng-qi^{1,2}, YANG Wen-tao^{1,2,3*}, YANG Li-yu^{1,2}, CHEN Yong-lin^{1,2}, JING Hao-nan^{1,2}, WU Pan^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Laboratory of Karst Georesources and Environment (Guizhou University), Ministry of Education, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Karst Environmental Ecosystems Observation and Research Station, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

Abstract: An extensive investigation of heavy metal (Cd, Hg, As, Pb, and Cr) levels in 137 pairs of soil-maize/rice samples was conducted in cultivated land from a typical karst mountain area in the Northwest of Guizhou Province. A health risk assessment model was used to assess the health risks of those areas, and the environmental benchmarks of heavy metals in soils were evaluated using the species sensitivity distribution (SSD) model. The results showed that the soils of maize and rice were polluted by heavy metals. Cd was the primary pollutant, with an exceeding rate ranging from 87% to 445%. The contaminated level of maize fields was higher than those of rice fields. In contrast, only 3.51% and 13.4% of Cd content in maize kernels and rice grains exceeded the national threshold, and the Cd heavy metal accumulation ability of rice was higher than that of maize. The carcinogenic and non-carcinogenic risks of heavy metals for adults and children in the study area were at a low level. The carcinogenic risk of rice consumption was slightly higher than that of maize, and the health risk to children was higher than that to adults. The results derived from the SSD method showed that the 95% and 5% hazardous concentrations (HC₅ and HC₉₅) of maize fields were 0.67 for Cd, 771.99 for As, 40.85 for Pb and 609.88 for Cr mg·kg⁻¹, and HC₉₅ were 20.83 for Cd, 14 381.82 for As, 2 427.36 for Pb and 8 606.28 for Cr mg·kg⁻¹, respectively. The HC₅ values of rice fields were 2.42 for Cd, 8.88 for As, 41.41 for Pb and 27.84 for Cr mg·kg⁻¹, and the HC₉₅ values were 48.47 for Cd, 159.67 for As, 1 735.68 for Pb and 1 671.74 for Cr mg·kg⁻¹, respectively. The HC₅ values of Cd, As, and Cr in maize fields and Cd in rice fields were significantly higher than the soil risk screening values in the current standard, and the HC₉₅ values of the two fields were higher than the soil risk intervened values. The results indicated that the current standard would be too strict to evaluate the actual pollution level of soil heavy metals in this area.

Key words: northwest Guizhou; cereal crops; soil; heavy metals; health risk assessment; environmental benchmark

农业土壤中的重金属因其毒性、不可生物降解性和持久性以及食物链中积累的能力而备受关注^[1]。造成土壤中重金属累积的主要原因包括如矿产开采、金属冶炼和化肥施用等人为活动^[2], 以及含矿岩系风化成土过程等自然原因^[3]。贵州是中国西南喀斯特地区中心, 由于成土过程和特殊地形地貌等原因, 土壤中重金属元素背景值高, 存在较高重金属潜在暴露风险^[4]。重金属会通过多种途径进入人体, 例如吸入灰尘、皮肤接触土壤和食用受土壤

污染的粮食作物^[5], 并与心血管、肾脏和神经系统疾病风险增加相关^[6]。因此, 获取耕地土壤和作物

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32101391); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础[2020]1Y181); 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目 (U1612442); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1802601); 贵州省人才基地项目 (RCJD2018-21)

作者简介: 徐梦琪 (1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为耕地重金属污染评价和环境基准, E-mail: 1780563401@qq.com

* 通信作者, E-mail: wtyang0803@163.com

中重金属含量及其饮食接触的信息对于评估人类健康风险至关重要。

当前,国内外已有大量相关研究报道了耕地土壤以及农产品中的重金属污染问题^[7,8]。然而,已有研究大多集中在平原地区的农田、污灌区和金属冶炼厂。我国西南是世界喀斯特地貌广泛分布区,生态环境脆弱,现阶段对喀斯特山区土壤和农产品重金属的时空分布状况认识不足。研究区位于贵州省西部,主要以二叠系、三叠系和峨眉山玄武岩为主,为重金属高地质背景区^[9]。种植主要农作物包括玉米和水稻等,前期的调查表明可能存在潜在生态风险。由于中国农田土壤环境质量差异较大,采用现行标准对高背景值区土壤中不同作物种类的重金属污染评价并不完全适用,需要针对作物品种和不同重金属制定相应的农田土壤安全限量标准^[10]。非致癌和致癌风险评估是评估人体健康风险的主要手段^[11]。这些方法被广泛应用于蔬菜、地下水和土壤中与重金属相关的健康风险领域^[12-14]。此外,不同种类的作物对重金属富集能力存在差异^[15],全面分析多种作物中重金属含量对确保食品安全生产具有指导意义。

本文以水城县某山地农业区为研究区域,研究目标包括:①分析重金属在玉米和水稻不同种类的含量特征。②评估食用玉米和稻米对成人和儿童的潜在健康风险。③基于物种敏感分布模型(SSD)推导该地土壤安全基准值。本研究结果将有助于进一步了解研究区域玉米和水稻对土壤重金属的累积特征,以及高地质背景区土壤的精确分类管理和安全利用。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区(104°58'38"E, 26°21'23"N)位于贵州省西部,与云南省接壤,隶属贵州省六盘水市,属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,气候温和,年日照1 300~1 500 h,年平均气温 12.4℃,年平均降水量1 100 mm,无霜期 250 d 左右。夏季凉爽,紫外辐射适中,

年平均日照时数1 430.7 h,属贵州省日照较多地区之一。夏季主栽农作物为玉米和水稻,耕地土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 分别在1.21~4.13、0.10~0.35、13.98~30.46、39.15~70.84和135.69~170.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

1.2 样品采集与处理

土壤和农作物采集于2020年8~10月。研究区为常年种植玉米和水稻的区域,玉米和水稻利用传统的施肥方式进行施肥。待作物成熟后采用农产品和土壤点对点协同采样方法在农田采集作物籽粒部分和表层土壤(0~20 cm),在每个样区内随机采集6株谷类农作物籽粒,混合均匀后装袋,1个样品采样量约为800 g,共采集274个农作物和土壤样品,其中玉米籽粒样品114个和稻谷籽粒样品23个,同步采集耕地土壤样品137个。土壤样品经风干、磨细过100目筛后装袋备用。将采集的谷类作物籽粒样品去壳(皮)后将籽粒用自来水冲洗,然后用去离子水冲洗,沥去水分、烘干和粉碎过筛保存备用。

1.3 样品分析方法

农作物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 加热消解,土壤样品经 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF-HClO}_4$ 消解。消解液中Cr、Cd和Pb采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定;As和Hg采用氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定;采用电位法测定土壤pH值(水:土=2.5:1)。

1.4 模型方法

1.4.1 土壤重金属污染评价

利用地累积指数(I_{geo})分析土壤中重金属污染程度^[16],其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n/K \times B_n) \quad (1)$$

式中, C_n 为土壤样品中重金属元素 n 的实际测量含量; B_n 为元素 n 在贵州省表层土壤的背景值^[17](Cd:0.66、Hg:0.11、As:20.00、Pb:35.20和Cr:95.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); K 为考虑到成岩作用引起背景值变动而选取的系数,取1.5^[18]。地累积指数的分级与相应的污染程度划分为7级,详见表1。

表1 地累积指数分级与污染程度

Table 1 Geoaccumulation index classification and degree of pollution

地累积指数分级	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
污染程度	无污染	轻度-中等污染	中等污染	中度-强污染	强污染	强-极严重污染	极严重污染

1.4.2 作物籽粒中重金属污染评价方法

利用重金属富集因子(BCF)分析农作物对重金属的积累能力^[19]。其计算公式为:

$$\text{BCF} = C_p/C_s \quad (2)$$

式中, C_p 和 C_s 分别表示作物和土壤样品中对应重

金属的含量。

作物籽粒采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法开展评价^[20]。土壤和谷类农作物中的重金属污染评价临界值分别以我国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准、《食品安

国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)和《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、砷等五种元素限量》(NY 861-2004)为依据。

单因子污染指数法计算公式为:

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

式中, P_i 为重金属污染物 i 的单因子污染指数, C_i 为污染物 i 的实际测量值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_i 为污染物 i 的评价标准的临界值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

内梅罗综合污染指数法计算公式为^[21]:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{(P_{\text{均值}}^2 + P_{\text{最大}}^2)/2} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为农作物籽粒中重金属综合污染指数, $P_{\text{均值}}$ 为重金属单项污染指数的平均值, $P_{\text{最大}}$ 为重金属最大单项污染指数。

1.4.3 谷类农作物摄入的健康风险评价

1.4.3.1 非致癌风险

通过摄入玉米和稻米来估计人体摄入或可能接触重金属对健康产生不利影响的概率。这项研究使用美国环境保护局^[22]提供的健康风险评估一般暴露方程式。每日平均摄入量(EDI) [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 用于计算人体接触水平。EDI 的定义如下:

$$\text{EDI} = \frac{C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

式中, C 为作物籽粒中重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), IR 为摄食率($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$) (玉米: 儿童和成人分别为 $0.100 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.150 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 稻米: 儿童和成人分别为 $0.42 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$), EF 为暴露频率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), 取 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[23], ED 为暴露持续时间(a), (儿童: 10 a ; 成年人: 30 a)^[24], BW 为暴露个体的体重(kg) (儿童: 16 kg ; 成年人: 70 kg)^[25], 而 AT 为非致癌重金属的平均暴露时间, 等于 $\text{ED} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[26]。

农产品摄入的单一重金属健康风险通常以危害商数(HQ)评价, 其公式如下:

$$\text{HQ} = \text{EDI}/\text{RfD} \quad (6)$$

式中, RfD 为参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 取值为 $\text{Cr}: 3 \times 10^{-3}$ 、 $\text{As}: 0.3 \times 10^{-3}$ 、 $\text{Cd}: 1 \times 10^{-3}$ 和 $\text{Pb}: 3.5 \times 10^{-3}$ ^[27]。 $\text{HQ} > 1.0$ 表明该污染物会引起人体健康风险, 而 HQ 越大则表明该污染物对人体健康风险越大; $\text{HQ} < 1.0$ 表明该污染物不会引起人体健康风险。

1.4.3.2 致癌风险评价

从作物中摄取重金属引起的致癌风险可根据目标致癌风险(TCR)进行评估^[28], 其计算如下:

$$\text{TCR} = \text{EDI} \times \text{SF} \quad (7)$$

式中, SF 为癌症斜率因子, 取值为 $\text{Cr}: 0.50$ 、 $\text{As}:$

1.50 、 $\text{Cd}: 0.0038$ 和 $\text{Pb}: 0.0085$ ^[29, 30]。 $\text{TCR} < 1 \times 10^{-6}$ 表示无风险, $\text{TCR} > 1 \times 10^{-4}$ 表示高风险^[31]。

1.4.4 健康基准值推导方法

健康风险基准值推导方法采用敏感性分布曲线法(SSD), 该曲线是一系列物种或相同物种的不同品种间对某一种污染物敏感性差异提出来的生态风险评价方法^[32]。作物重金属的 $1/\text{BCF}$ 对土壤中重金属的富集效应的敏感分布遵循“S”型曲线分布, 拟合 SSD 曲线。拟合方程如下:

$$y = a + \frac{b}{1 + (x/x_0)^c} \quad (8)$$

式中, x 为 $1/\text{BCF}$; y 为作物样品对应的累积概率, a 、 b 、 c 和 x_0 为常数。

通过以上方程反推不同比例各类作物存在超标风险的 $1/\text{BCF}$ 值, 根据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的标准限值反推得到农田土壤安全基准值。

$$C_s = C_p \cdot (\text{BCF})^{-1} \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 值和重金属含量

研究区土壤 pH 值和重金属含量如表 2 所示。研究区土壤整体为中性偏弱酸性。玉米土壤样品中 pH 值在 $4.53 \sim 8.09$ 之间, 平均值为 6.32 , 中位值为 6.24 ; 稻田土壤 pH 值在 $4.67 \sim 7.47$ 之间, 平均值为 6.07 , 中位值为 6.08 。2 种类型土壤中 Cd 均呈高累积特征, 且不同采样点重金属含量差异较大, 分布极不均匀^[33]。玉米土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 范围分别为: $0.30 \sim 66.50$ 、 $0.04 \sim 2.87$ 、 $2.43 \sim 532.00$ 、 $13.50 \sim 696.00$ 和 $28.70 \sim 404.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数依次为: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cr}$, 其中 Cd、As、Pb 和 Hg 的变异程度极高^[34]。水稻田中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 平均值分别为 1.23 、 0.11 、 14.10 、 39.29 和 $136.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为: $\text{As} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cr}$, 其中 As 的变异系数最高。与贵州省土壤背景值^[35, 36]和中国土壤背景值^[17]相比(表 2), 研究区玉米土壤中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 平均值均超过了背景值, 其中 Cd 分别高出中国和贵州土壤背景值 34 倍和 4.5 倍, Hg、As、Pb 和 Cr 高出背景值的范围在 $0.5 \sim 2.4$ 倍之间。研究区水稻田中 Cd、Pb 和 Cr 的平均值均超出背景值, 超过贵州省土壤背景值的 $0.12 \sim 0.86$ 倍; Hg 的平均值约等于贵州省土壤背景值, 高于中国土壤背景值; As 的平均值低于贵州省土壤背景值, 高于中国土壤背景值。

表 2 农业土壤重金属含量描述性统计及相关土壤质量标准

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in agricultural soils and related soil quality standards

项目	统计值	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					pH
		Cd	Hg	As	Pb	Cr	
玉米地 ($n=114$)	最小值	0.30	0.04	2.43	13.50	28.70	4.53
	最大值	66.50	2.87	532.00	696.00	404.00	8.09
	中值	2.19	0.20	22.20	46.00	138.00	6.24
	标准差	6.68	0.28	51.26	94.51	83.56	0.93
	平均值	3.60	0.24	30.29	70.17	169.80	6.32
	变异系数	1.85	1.16	1.69	1.35	0.49	0.15
水稻田 ($n=23$)	最小值	0.26	0.04	3.23	18.20	52.30	4.67
	最大值	3.55	0.32	51.90	102.00	216.00	7.47
	中值	0.99	0.10	7.84	30.70	130.00	6.08
	标准差	0.91	0.07	13.45	24.39	50.65	0.71
	平均值	1.23	0.11	14.10	39.29	136.28	6.07
	变异系数	0.74	0.65	0.95	0.62	0.37	0.12
参考值	贵州省土壤背景值 ^[35,36]	0.66	0.11	20.00	35.20	95.90	/
	中国土壤背景值 ^[17]	0.10	0.07	11.20	26.00	61.00	/

2.2 土壤中重金属污染评价

以文献[37]中土壤污染筛选值和管控值为参考值,对研究区2种土壤中重金属污染水平进行评价(表3).研究区土壤Cd污染较高,为首要限制因子.玉米土壤中Cd超过土壤风险筛选值

的占比高达99.12%;其次是As、Pb和Cr,超标率分别为28.07%、12.28%和38.60%.水稻田中Cd的超标率为91.30%,As和Pb的超标率较低.研究区2种作物土壤Cd含量均超过土壤风险管控值.

表 3 作物土壤中超过污染风险筛选值与管控值的数量及占比/%

Table 3 Number and ratio of excess pollution risk screening and control values in crop soils/%

项目	元素	超过风险筛选值数量(占比/%)					超过风险管控值数量(占比/%)				
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	总量	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	总量
		23	46	28	17	114	23	46	28	17	114
玉米地 ($n=114$)	区间总数	23	46	28	17	114	23	46	28	17	114
	Cd	11(48.83)	19(41.30)	20(71.43)	15(88.24)	65(57.02)	12(52.17)	27(58.70)	8(28.57)	1(5.88)	48(42.11)
	Hg	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	As	2(8.70)	7(15.22)	12(42.86)	11(64.71)	32(28.07)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Pb	2(8.70)	6(13.04)	3(10.71)	3(17.65)	14(12.28)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Cr	9(39.13)	20(43.48)	12(42.86)	3(17.65)	44(38.60)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
水稻田 ($n=23$)	区间总数	7	8	8	0	23	7	8	8	0	23
	Cd	6(85.71)	4(50.00)	7(87.50)	0(0)	17(73.91)	1(14.29)	3(42.86)	0(0)	0(0)	4(17.39)
	Hg	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	As	0(0)	2(25.00)	0(0)	0(0)	2(8.70)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Pb	0(0)	1(12.50)	0(0)	0(0)	1(4.35)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Cr	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)

利用地累积指数法对研究区的耕地土壤重金属污染进行评价,如图1所示.研究区2种土壤中Cd

元素污染程度高,Hg、As、Pb和Cr元素污染水平较低.玉米土壤的地累积指数平均值大小顺序依次为:

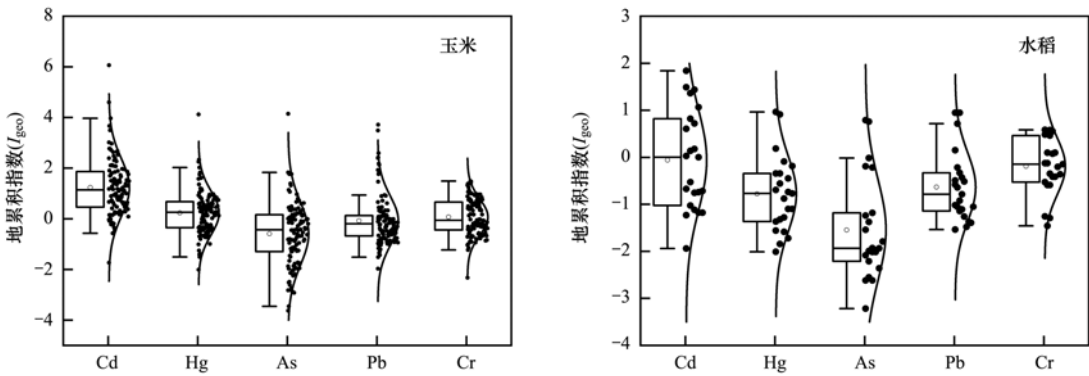


图 1 作物土壤地累积指数评价结果

Fig. 1 Evaluation results of crop soil geoaccumulation index

Cd(1.24) > Hg(0.23) > Cr(0.07) > Pb(−0.07) > As(−0.58). 从重金属的污染等级来看, Cd 轻度污染到中度污染水平(1 级)占 33.3% 左右, 中度污染到强污染水平(2~4 级)的样品占 52.74%, 强污染到极严重污染水平(5~6 级)的样品占 1.88%; As、Pb 和 Cr 元素以无污染水平(0 级)为主, 约 99.49% 的土壤不存在 Hg 污染. 水稻田的地累积指数平均值大小顺序依次为: Cd(−0.06) > Cr(−0.19) > Pb(−0.63) > Hg(−0.78) > As(−1.54). 其中 Cd 的污染水平相对较高, 有 52.16% 的土壤处于轻度至中度污染(1~2 级); Hg、As、Pb 和 Cr 元素处于无污染水平.

2.3 作物籽粒中重金属含量

研究区玉米籽粒和稻谷中重金属含量统计结果见表 4. 与土壤重金属高含量水平相反, 玉米和水稻籽粒中重金属含量均较低. 研究区玉米籽粒中除 Cd 和 Pb 超标率分别为 3.51% 和 0.88% 外, 其他

重金属含量均未超过国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2017). 玉米中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 范围分别为: 0.014~0.214、0.001~0.009、0.010~0.490 和 0.030~0.612 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 0.032、0.003、0.056 和 0.068 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Hg 含量均低于检出限. 玉米籽粒中 Pb、Cd 和 Cr 较 As 的空间分布差异显著, 变异性较高, As 含量为高等变异($50\% < \text{CV} \leq 100\%$), Pb、Cd 和 Cr 均为极高可变性($\text{CV} > 100\%$). 研究区稻谷中 Cd 和 Cr 超标率为 13.04% 和 4.35%, $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 范围分别为: 0.007~0.316、0.009~0.101、0.010~0.092 和 0.092~2.440 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 0.068、0.053、0.019 和 0.350 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Hg 含量均低于检出限. 与玉米相同, 稻谷中的 Cd、Pb 和 Cr 的变异系数均表现为极高可变性, 其中 As 为高等变异.

表 4 研究区玉米和稻谷重金属含量统计

Table 4 Statistics of heavy metal content in corn and rice in the study area						
项目	元素	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 (CV)	超标率 /%
玉米($n=114$)	Cd	0.014~0.214	0.021	0.032 ± 0.032	1.02	3.51
	Hg	/	/	/	/	0.00
	As	0.001~0.009	0.003	0.003 ± 0.002	0.50	0.00
	Pb	0.010~0.490	0.014	0.056 ± 0.131	2.34	0.88
	Cr	0.030~0.612	0.047	0.068 ± 0.076	1.11	0.00
水稻($n=23$)	Cd	0.007~0.316	0.031	0.068 ± 0.083	1.22	13.04
	Hg	/	/	/	/	0.00
	As	0.009~0.101	0.051	0.053 ± 0.030	0.56	0.00
	Pb	0.010~0.092	0.013	0.019 ± 0.019	1.00	0.00
	Cr	0.092~2.440	0.145	0.350 ± 0.492	1.41	4.35

2.4 作物籽粒中的重金属污染评价

采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数对玉米籽粒和稻谷中重金属进行污染评价(表 5). 研究区玉米和水稻籽粒中重金属污染均较低. 两种作物中 Cd、Pb、As 和 Cr 的单因子污染指数的平均值均小于 1. 玉米籽粒中 Cd 和 Pb 的

综合污染指数为 1.53 和 1.74, 处于轻污染水平; 而 As 和 Cr 的综合污染指数均未超过 0.7, 表明研究区玉米没有受到 As 和 Cr 的污染. 稻谷中重金属的综合污染指数大小顺序为: $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb}$, 其中 Cd 和 Cr 处于轻污染水平, 而 As 和 Pb 则未受到污染.

表 5 研究区农产品籽粒重金属污染指数

Table 5 Heavy metal pollution index of agricultural grains in the study area						
项目	元素	单因子污染指数(P)				综合污染指数 ($P_{\text{综合}}$)
		最小值	中值	最大值	平均值	
玉米($n=114$)	Cd	0.14	0.21	2.14	0.32	1.53
	Hg	/	/	/	/	/
	As	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01
	Pb	0.05	0.07	2.45	0.28	1.74
	Cr	0.03	0.05	0.61	0.07	0.44
水稻($n=23$)	Cd	0.03	0.15	1.58	0.34	1.14
	Hg	/	/	/	/	/
	As	0.04	0.26	0.51	0.27	0.41
	Pb	0.05	0.07	0.46	0.10	0.33
	Cr	0.09	0.15	2.44	0.35	1.74

2.5 重金属在玉米和水稻中的富集

研究区土壤重金属含量较高,但对应的农作物重金属含量却较低.通过计算玉米和水稻的重金属富集因子(BCF)分析农作物对重金属的积累能力(表6).结果发现,玉米和水稻的BCF均呈现为低水平,普遍低于非喀斯特区玉米、水稻的富集系数^[38,39,40].分析原因可能是:①研究区土壤的pH值较高.玉米和水稻土壤的pH平均值分别为6.32和6.07,中位值分别为6.24和6.08,高于多数非喀斯特地区土壤pH值^[41,42].较高的土壤pH值有利于土壤中重金属从离子交换态转变成碳酸盐沉淀^[43],从而形成稳定的形态,使重金属的有效性下降.②土壤中重金属形态稳定.贵州省是全世界范

围内最大且相对集中的喀斯特地貌分布区^[44],碳酸盐岩和碎屑岩的风化成土过程导致土壤中重金属大多以残渣态存在^[45],形态稳定,活性较低,农作物难以对其吸收和利用^[46].相关研究也证实,在我国西南地区pH值较高或地貌特殊的土壤中,尽管土壤中重金属严重超标,对应的农产品却相对安全^[47].和淑娟等^[48]在云南某区域研究发现,重金属Cr、Ni和Cu含量在土壤中超风险筛选值,但普遍农作物却没有重金属超标的现象;马宏宏等^[49]在广西的农田发现土壤重金属超标,但其有效态含量却较低;陈梓杰等^[50]在重庆某地区研究发现,Cd污染较严重的土壤中作物对Cd富集程度却较低.

表6 玉米籽粒和稻谷中的生物富集因子

Table 6 Bioaccumulation factors in corn kernels and rice

项目	类型	生物富集因子(BCF)				
		Cd	Hg	As	Pb	Cr
玉米(<i>n</i> = 114)	平均值	0.016 31	/	0.000 22	0.000 61	0.000 51
	最小值	0.000 28	/	0.000 02	0.000 07	0.000 10
	中值	0.010 83	/	0.000 14	0.000 36	0.000 34
	最大值	0.198 97	/	0.001 64	0.002 4	0.005 14
水稻(<i>n</i> = 23)	平均值	0.056 54	/	0.006 20	0.000 62	0.002 66
	最小值	0.002 95	/	0.001 14	0.000 14	0.000 54
	中值	0.039 20	/	0.003 08	0.000 44	0.001 19
	最大值	0.133 77	/	0.019 57	0.002 71	0.012 32
上海颀桥水稻 ^[38]	平均值	0.330 00	0.100 00	0.010 00	/	/
江苏苏南水稻 ^[39]	平均值	0.299 00	0.028 00	0.014 00	0.002 00	0.007 00
四川沐川玉米 ^[40]	中值	2.120 00	1.270 00	0.160 00	0.160 00	0.100 00

比较2种农作物中重金属富集系数的大小关系.玉米富集系数的大小顺序依次为: Cd > Pb > Cr > As,水稻为: Cd > As > Cr > Pb,且稻谷中重金属Cd的富集程度均远高于玉米.已有研究指出,植物根系对Cd的吸收速率和转运方式是不同作物地上部Cd积累的重要决定因素^[51].首先,水稻根系中Cd的运输速率显著高于玉米,水稻中Cd流动的最大速度比玉米高约2~6倍^[52].其次,水稻根系吸收Cd的主要转运载体OsNramp5与玉米的主要转运蛋白ZmNramp5在氨基酸序列上具有高度同源性^[53,54].然而,ZmNramp5在玉米根系中的表达水平远低于OsNramp5在水稻根系中的表达水平^[55].再次,玉米和水稻受到土壤中某些矿物质营养元素的影响,会改变其对重金属的富集和吸收能力.介质中的必需元素(如Ca、Mg和Fe)含量较高时,作物对重金属的吸收速率显著降低;若介质中缺少这些矿物质营养元素,由于具有一些与之相似的水合半径等物化性质的重金属,会通过矿质养分元素的载体蛋白主动运输到细胞内^[3,40,56].

2.6 作物籽粒摄入的健康风险评价

2.6.1 非致癌风险评价

采用非致癌风险评价法^[57]分析成人和儿童食用玉米和稻米的健康风险(图2).可以看出,重金属对成人和儿童的非致癌风险均处于较低水平.成人和儿童对玉米中Cd、As、Pb和Cr的每日摄入量(EDI)均小于参考暴露剂量(RFD),且单一重金属健康风险指数(HQ)平均值均小于1.0;稻米中As和Cr(儿童)的HQ值均大于1.0,说明As和Cr对儿童存在健康风险,而Cd和Pb的HQ平均值均小于1.0,说明其对人体非致癌健康风险不明显.

根据总目标危害商数(THQ)来看(图3),玉米的非致癌风险明显低于水稻.玉米中成人和儿童的THQ值分别为0.19和0.51;水稻中成人和儿童的THQ值分别为2.21和3.45.儿童的单一健康风险指数均高于成人,即在饮食中暴露于重金属的情况下,儿童通常比成人更脆弱.在Li等^[58]的研究中也发现了类似的结果.

2.6.2 致癌风险评价

研究区玉米籽粒和稻米的致癌风险如表 7 所示.2 种农作物的致癌风险水平均较低.玉米和水稻

中的 Cd 和 Pb 的目标致癌风险(TCR)值均低于 1×10^{-6} ,说明其风险不会造成重大影响.玉米和水稻中 TCR 值较高的是Cr和As,摄入后可能对人类构成

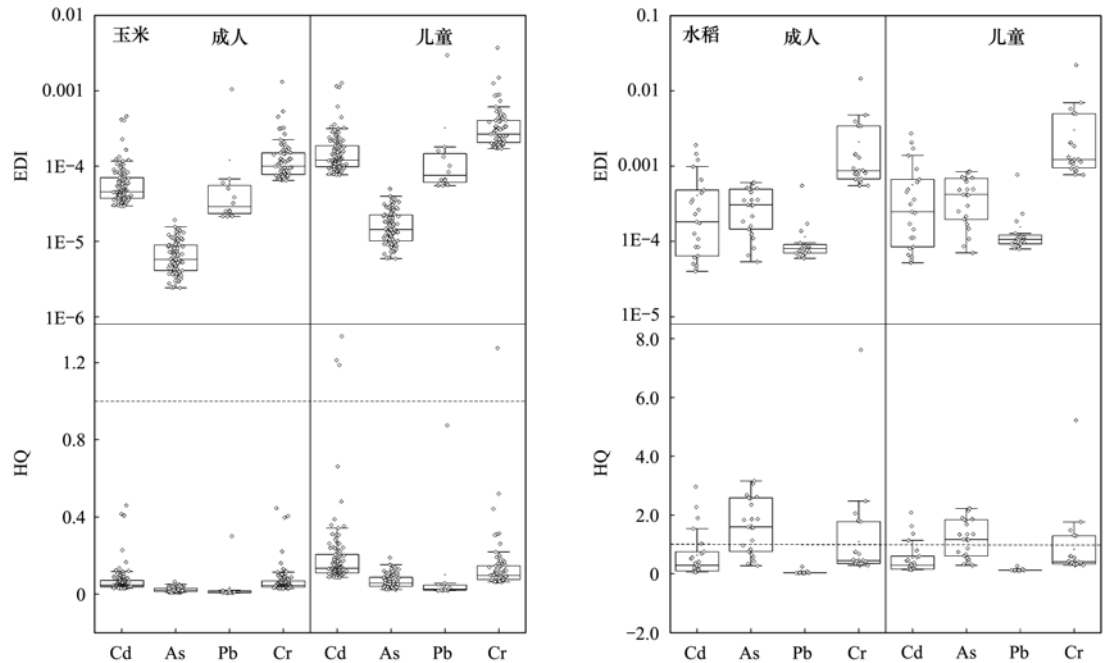
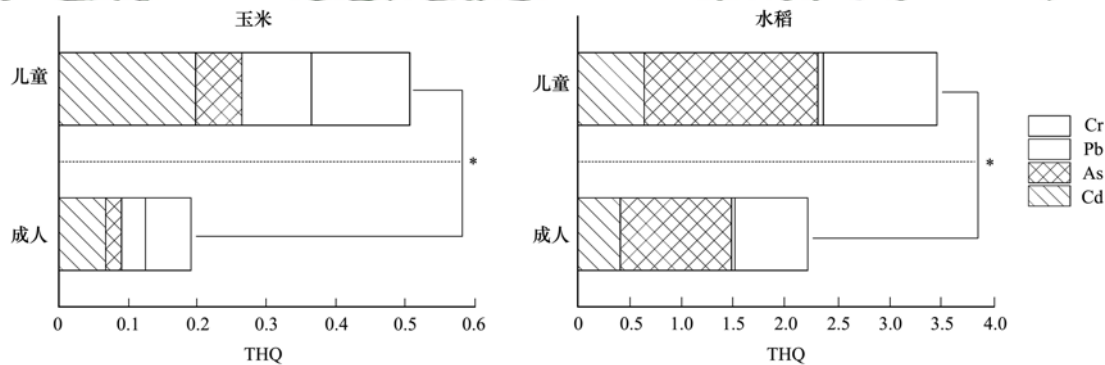


图2 研究区人群食用谷类农作物的摄入量和非致癌健康风险指数
Fig. 2 Cereal consumption and non-carcinogenic health risk indices in the study area



* 表示两组数据之间存在显著差异($P < 0.05$)

图3 研究区人群摄入谷类农作物的总目标危害商数

Fig. 3 Total target hazard quotient of cereal intake in the study area

表7 食用谷类农作物的致癌健康风险评价

Table 7 Evaluation of carcinogenic health risks from the consumption of cereal crops

项目			TCR				TTCR
			Cd	As	Pb	Cr	
玉米($n=114$)	成人	最小值	1.12E-07	3.63E-06	1.82E-07	3.23E-05	3.62E-05
		最大值	1.74E-06	2.91E-05	8.93E-06	6.56E-04	6.95E-04
		平均值	2.57E-07	1.03E-05	1.02E-06	7.30E-05	8.46E-05
	儿童	最小值	3.28E-07	1.06E-05	5.31E-07	9.41E-05	1.06E-04
		最大值	5.08E-06	8.48E-05	2.60E-05	1.91E-03	2.03E-03
		平均值	7.50E-07	3.01E-05	2.98E-06	2.13E-04	2.47E-04
稻米($n=23$)	成人	最小值	1.52E-07	8.05E-05	5.10E-07	2.76E-04	3.57E-04
		最大值	7.20E-06	9.09E-04	4.69E-06	7.32E-03	8.24E-03
		平均值	1.55E-06	4.81E-04	9.83E-07	1.05E-03	1.53E-03
	儿童	最小值	2.38E-07	1.26E-04	7.97E-07	4.31E-04	5.58E-04
		最大值	1.13E-05	1.42E-03	7.32E-06	1.14E-02	1.29E-02
		平均值	2.42E-06	7.52E-04	1.54E-06	1.64E-03	2.40E-03

潜在的致癌风险. 长期摄入 Cr 可能引起扁平上皮癌、腺癌及肺癌等疾病^[59]. 水稻根系对 As 的富集较高^[60]会造成慢性 As 中毒常伴随着致癌、致畸和致突变作用^[61]. 从总目标致癌风险(TTCR)来看, 稻米摄入的致癌风险高于玉米, 成人高于儿童.

2.7 研究区环境基准值研究

采用 Logistic 分布模型拟合 2 种作物中各重金属敏感性分布(SSD)曲线(图 4), 若数据点集中在曲线上端, 说明该作物对重金属的吸收富集能力较弱, 敏感度较差; 反之亦然^[62]. 由图 4 可知, 玉米和水稻中各重金属的敏感度分布曲线走向基本一致,

且 2 种作物对不同重金属富集现象有明显差异. 玉米和水稻 Cd 的多数点位数据在 0 ~ 1 000 和 0 ~ 200 之间, 均大致分布于曲线下端, 说明两种作物对 Cd 的吸收富集能力较强, 敏感度较高; 玉米和水稻 As 的多数点位数据在 0 ~ 40 000 和 0 ~ 900 之间, 在曲线上分布较均匀, 说明 2 种作物对 As 的敏感度低; 玉米和水稻 Pb 的多数点位数据分布在 0 ~ 7 500 和 0 ~ 4 000 之间, 均大致分布于曲线下端, 说明两种作物对 Pb 的吸收富集能力较强, 敏感度较高; 玉米和水稻 Cr 的多数点位数据在 0 ~ 7 500 和 0 ~ 2 000 之间, 在曲线上分布较均匀, 对 Cr 的敏感度低.

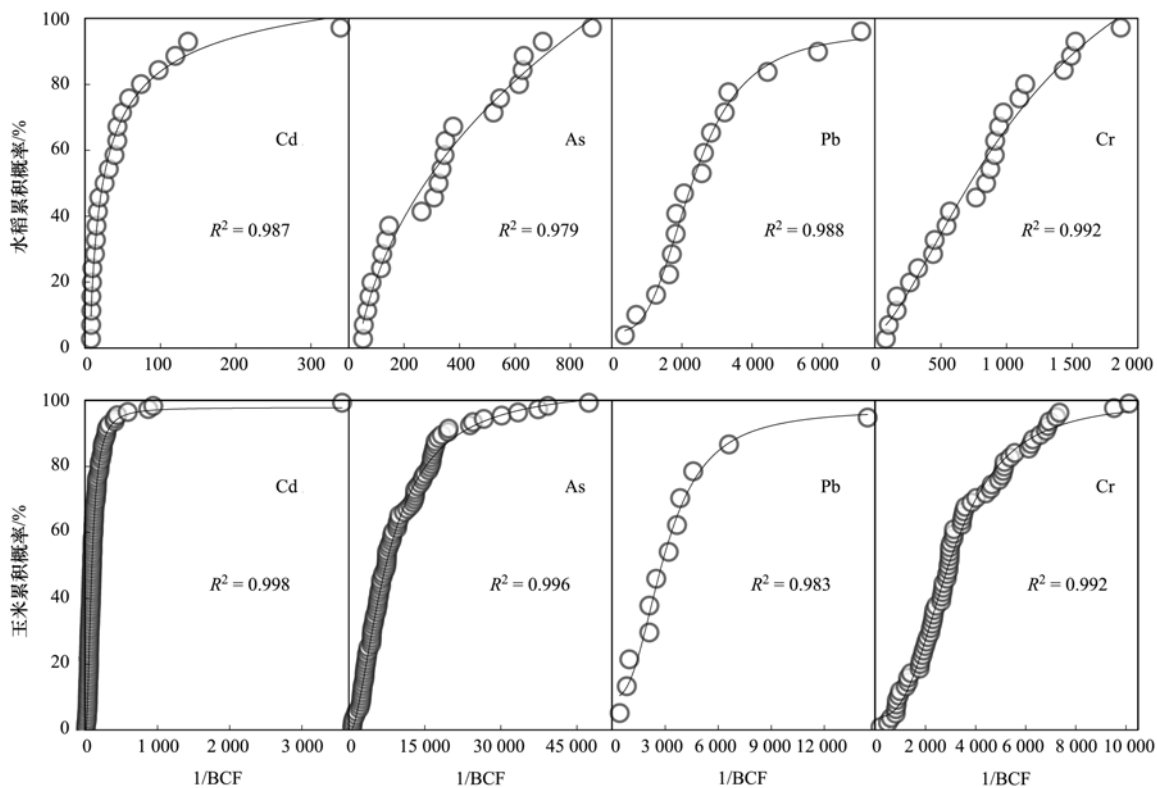


图 4 玉米与水稻作物中各重金属敏感性分布(SSD)曲线

Fig. 4 Sensitivity distribution (SSD) curves of heavy metals in maize crops

通过 SSD 曲线推导出的结果及拟合公式, 由公式可以推算出基于保护 95% 和 5% 作物安全的临界值(HC_5)和警戒值(HC_{95})(表 8). 其中 HC_5 为可保障区域 95% 种植水稻和玉米可食部位的重金属含量低于安全限值, HC_{95} 为区域仅有 5% 种植水稻和玉米可食部位的重金属含量低于安全限值. 根据 2006 年欧盟委员会制定的 REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) 法规^[63], 本研究设定临界值(HC_5)为土壤中各重金属的环境基准值. 结果可知, 研究区 2 种作物的土壤 Cd 基准值均远高于我国现行土壤风险筛选值(GB 15618-2018), Cd、As、Pb 和 Cr 土壤警戒值均远高于我国现行土壤

风险管控值. 推导出的玉米土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的环境基准值分别为 0.67、771.99、40.85 和 609.88 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 稻田土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的环境基准值分别是 2.42、8.88、41.41 和 27.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 玉米土壤中 Cd、As、Pb 和 Cr 的相关区间(临界值 ~ 警戒值)分别为 0.6 ~ 21、771 ~ 14 382、40 ~ 2 428 和 609 ~ 8 607 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Cd、As 和 Cr 的临界值分别是现行土壤筛选值的 2.2、19.3 和 4.1 倍; 水稻土壤中 Cd、As、Pb 和 Cr 的相关区间(临界值 ~ 警戒值)分别为 2 ~ 49、8 ~ 160、41 ~ 1 736 和 27 ~ 1 672 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Cd 的临界值是国家现行筛选值的 6.1 倍, 其余重金属临界值均低于筛选值. 上述结果表明, 现行农用地

表 8 基于 Logistic 模型拟合公式及模型分布对农田土壤健康风险值划分¹⁾

Table 8 Classification of farmland soil health risk values based on logistic model fitting formula and model distribution					
农作物	重金属	拟合公式	R ²	临界值/mg·kg ⁻¹	警戒值/mg·kg ⁻¹
玉米	Cd	$y = 97.906\,97 + \frac{-99.494\,69}{1 + (x/87.930\,74)^{2.052\,39}}$	0.998	0.67	20.83
	As	$y = 104.585\,24 + \frac{-105.979\,94}{1 + (x/7\,563.136\,71)^{1.727\,94}}$	0.996	771.99	14 381.82
	Pb	$y = 97.412\,06 + \frac{-87.609\,32}{1 + (x/2\,979.172\,58)^{2.537\,73}}$	0.983	40.85	2 427.36
	Cr	$y = 99.937\,05 + \frac{-96.089\,94}{1 + (x/3\,001.427\,87)^{2.767\,95}}$	0.992	609.88	8 606.28
水稻	Cd	$y = 124.117\,74 + \frac{-551.889\,02}{1 + (x/0.419\,33)^{0.465\,15}}$	0.987	2.42	48.47
	As	$y = 1\,917.970\,66 + \frac{-1\,953.553\,3}{1 + (x/417\,840.331)^{1.421\,1}}$	0.979	8.88	159.67
	Pb	$y = 96.438\,79 + \frac{-91.487\,41}{1 + (x/2\,310.275\,44)^{3.125\,53}}$	0.988	41.41	1 735.68
	Cr	$y = 152.630\,97 + \frac{-148.115\,09}{1 + (x/1\,239.273\,49)^{1.505\,02}}$	0.982	27.84	1 671.74

1) 临界值和警戒值分别代表 95% 和 5% 作物种植土壤铅的含量, 95% 与 5% 的比例参照现行国标编制说明; 玉米中 Pb 的临界值是根据样本点拟合模型估算得出

土壤风险管控值均不同程度地低于了推导出的土壤临界值, 现行土壤标准对该地区评价结果偏严。

当前现行的《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 作为我国农用地分类分级管理质量标准, 发挥着十分重要的作用^[37], 但该标准对于土壤重金属背景值较高的地方并不完全适用。由于地域特征、保护水平、制定背景或使用方法等方面的不同, 使得不同地区作物中重金属健康风险基准值存在较大差异^[64,65]。本研究结果也证实, 现行标准对研究区整体偏严, 或难以准确评价土壤重金属的实际暴露水平, 需根据农作物中重金属的实际含量进行调整。

3 结论

(1) 研究区玉米和水稻土壤重金属呈现高含量水平, 2 种土壤中的 Cd 分别高出贵州土壤背景值的 4.5 倍和 0.86 倍。从地累积指数可看出, 玉米土壤中 Cd 处于中度污染到极严重污染水平的样品占比高达 54.62%; 水稻田中 Cd 轻度至中度污染占比为 52.16%。玉米土壤受重金属污染程度高于水稻田。

(2) 与土壤重金属高含量水平相反, 玉米籽粒中 Cd 和 Pb 仅有 3.51% 和 0.88% 超过国家食品安全限量标准, 稻米中 Cd 和 Cr 超标率为 13.04% 和 4.35%。重金属对研究区成人和儿童的致癌/非致癌风险均处于较低水平。

(3) 利用物种敏感度分布曲线法推导出研究区玉米土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的环境基准值分别为

0.67、771.99、40.85 和 609.88 mg·kg⁻¹; 稻田土壤 Cd、As、Pb 和 Cr 的环境基准值分别是 2.42、8.88、41.41 和 27.84 mg·kg⁻¹。

参考文献:

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

[2] 鞠铁男, 雷梅. 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[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 957-964.
Ju T N, Lei M. Geo-accumulation index method to optimize the evaluation method of polymetallic environment quality: taking developed agricultural areas as an example[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 957-964.

[3] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 18-26.
Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 18-26.

[4] 张富贵, 彭敏, 贺灵, 等. 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2081-2093.
Zhang F G, Peng M, He L, et al. Sources identification, ecological risk assessment, and controlling factors of potential toxic elements in typical lead-zinc mine area, Guizhou Province, Southwest China[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2081-2093.

[5] Boim A G F, Wragg J, Canniatti-Brazaca S G, et al. Human intestinal Caco-2 cell line in vitro assay to evaluate the absorption of Cd, Cu, Mn and Zn from urban environmental matrices[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(2): 601-

- 615.
- [6] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 2009, **325**(5939): 419-422.
- [7] 杨文弢, 廖柏寒, 吴攀, 等. 菜籽饼堆肥对水稻土壤 Cd 有效性及 Cd 在水稻全生育期转运与累积的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(2): 317-322.
- Yang W T, Liao B H, Wu P, *et al.* Effects of rapeseed cake compost on Cd availability in soil, and its translocation and accumulation in rice plant [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(2): 317-322.
- [8] 杨文弢, 张佳, 廖柏寒. Cd 胁迫下外源有机肥对土壤中 Cd 有效性和水稻糙米中 Cd 含量的影响[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2020, **37**(1): 105-111.
- Yang W T, Zhang J, Liao B H. Effects of external organic matter on Cd availability in soil and Cd accumulation in brown rice exposed to excess Cd[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2020, **37**(1): 105-111.
- [9] 张兵强, 杨清毫, 赵富远, 等. 贵州西部峨眉山玄武岩区金矿赋矿层位及矿石特征-以盘县架底金矿为例[J]. *地质与勘探*, 2020, **56**(6): 1145-1157.
- Zhang B Q, Yang Q H, Zhao F Y, *et al.* The ore-bearing horizon and ore characteristics of gold deposits in the Emeishan basalt area of western Guizhou: a case study of the Jiadi gold deposit in Panxian County[J]. *Geology and Exploration*, 2020, **56**(6): 1145-1157.
- [10] 杜俊杰, 李娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(6): 1193-1201.
- Du J J, Li N, Wu Y N, *et al.* Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: a review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(6): 1193-1201.
- [11] Jiang Y L, Ma J H, Ruan X L, *et al.* Compound health risk assessment of cumulative heavy metal exposure: a case study of a village near a battery factory in Henan Province, China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2020, **22**(6): 1408-1422.
- [12] Shaheen N, Irfan N M, Khan I N, *et al.* Presence of heavy metals in fruits and vegetables; health risk implications in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 2016, **152**: 431-438.
- [13] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型镉矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 975-984.
- Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 975-984.
- [14] 强珥, 李英菊, 罗谦, 等. 典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5967-5976.
- Qiang Y, Li Y J, Luo Q, *et al.* Relationship characteristics and risk assessment of heavy metal contents in soil aggregates and in crops around a typical Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5967-5976.
- [15] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1606-1619.
- Ren C, Ren Y Z, Wang H, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of different wheat varieties under cadmium stress [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1606-1619.
- [16] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geology Journal*, 1969, **2**: 109-118.
- [17] 倪莘然, 龙明睿, 杨瑞东, 等. 贵州丹寨排庭汞矿区土壤-玉米重金属含量及生态影响[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(6): 324-333.
- Ni X R, Long M R, Yang R D, *et al.* Heavy metal contents of soil-maizes and its ecological effects in mercury mining area of Danzhai Paiting, Guizhou [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(6): 324-333.
- [18] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [19] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1166-1176.
- Sun H Y, Wei X F, Sun X M, *et al.* Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical vanadium-titanium magnetite tailings [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1166-1176.
- [20] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1085-1094.
- Zhang H, Wang H, Tang H Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1085-1094.
- [21] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
- [22] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response U. S. EPA, 1989.
- [23] Vatanpour N, Feizy J, Talouki H H, *et al.* The high levels of heavy metal accumulation in cultivated rice from the Tajan river basin: health and ecological risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2019, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125639.
- [24] Zang F, Wang S L, Nan Z R, *et al.* Accumulation, spatio-temporal distribution, and risk assessment of heavy metals in the soil-corn system around a polymetallic mining area from the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Geoderma*, 2017, **305**: 188-196.
- [25] 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.
- [26] 叶脉, 张景茹, 张路路, 等. 广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5579-5588.
- Ye M, Zhang J R, Zhang L L, *et al.* Transfer factor and health risk assessment of heavy metals in a soil-crop system in a high incidence area of nasopharyngeal carcinoma, Guangdong [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5579-5588.
- [27] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水中重金属含量及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- Wu D, Yang X Z, Li C X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(10): 1992-1998.

- [28] 王蕊, 陈楠, 张二喜. 基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1546-1557.
Wang R, Chen N, Zhang E X. Ecological and health risks assessment based on the total amount and speciation of heavy metals in soils around mining areas[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1546-1557.
- [29] Prasad M N V, Strzałka K. Physiology and biochemistry of metal toxicity and tolerance in plants [M]. Dordrecht Boston: Springer, 2002.
- [30] 王玥, 刘莹雪, 李丹丹, 等. 盐碱农田土壤 Cr 污染特征及健康风险评价—以滨城区为例[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(12): 2723-2732.
Wang Y, Liu Y X, Li D D, et al. Characteristics of soil Cr pollution and health risk assessment in saline alkali farmland: a case study of Bincheng District[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(12): 2723-2732.
- [31] Wei R P, Wang X, Tang W L, et al. Bioaccumulations and potential human health risks assessment of heavy metals in *ppk*-expressing transgenic rice[J]. Science of the Total Environment, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136496.
- [32] 郭瞻宇, 张子杨, 蒋亚辉, 等. 不同品种芥菜对镉胁迫的敏感性分布及抗氧化特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2660-2668.
Guo Z Y, Zhang Z Y, Jiang Y H, et al. Assessment of variation in sensitivity and antioxidant characteristics of different mustard cultivars under different Cd stress levels[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(12): 2660-2668.
- [33] Xiao Q, Zong Y T, Lu S G. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **120**: 377-385.
- [34] Nezhad M T K, Tabatabaie S M, Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **152**: 91-109.
- [35] 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.
- [36] 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 Luodian, Guizhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4628-4636.
- [37] 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].
- [38] 郝晓洁, 金曹贞, 孙灿, 等. 上海市闵行区稻田土壤-水稻系统中重金属含量水平及富集特征[J]. 上海农业学报, 2020, **36**(1): 88-93.
Hao X J, Jin C Z, Sun C, et al. The content and enrichment characteristics of heavy metals in paddy soil-rice system in Minhang district, Shanghai [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, **36**(1): 88-93.
- [39] 郝社锋, 任静华, 范健, 等. 江苏某市水稻籽粒重金属富集特征及健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(2): 217-222, 228.
Hao S F, Ren J H, Fan J, et al. Heavy metals accumulation characteristics and health risk assessment of rice grain produced in Jiangsu area[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, **43**(2): 217-222, 228.
- [40] 韩伟, 王成文, 彭敏, 等. 川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2480-2489.
Han W, Wang C W, Peng M, et al. Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2480-2489.
- [41] 代鹏飞, 王帅, 钱坤, 等. 某铀矿区农田土壤重金属生物有效性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(5): 644-650.
Dai P F, Wang S, Qian K, et al. Analysis of bioavailability of heavy metals in farmland soil in uranium mining area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(5): 644-650.
- [42] 杨文毅, 廖柏寒, 周航, 等. 有机肥施用下水稻不同生育期土壤-水稻系统中微量元素与 Cd 的关系[J]. 安全与环境学报, 2020, **20**(5): 1932-1941.
Yang W T, Liao B H, Zhou H, et al. On relation between trace elements and Cd content in soil-rice system at different rice stages under organic fertilizer application [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, **20**(5): 1932-1941.
- [43] 代杰瑞, 郝兴中, 庞绪贵, 等. 典型土壤环境中重金属元素的形态分布和转化——以山东烟台为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, **32**(6): 713-719, 728.
Dai J R, Hao X Z, Pang X G, et al. Distribution and transformation of heavy metals in typical soil environments, a case study in Yantai [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, **32**(6): 713-719, 728.
- [44] 姚永慧, 张百平, 周成虎, 等. 贵州森林的空间格局及组成结构[J]. 地理学报, 2003, **58**(1): 126-132.
Yao Y H, Zhang B P, Zhou C H, et al. Spatial pattern and component structure of forests in Guizhou [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(1): 126-132.
- [45] 张家春, 曾宪平, 张珍明, 等. 喀斯特林地土壤重金属形态特征及其评价[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(6): 347-352, 358.
Zhang J C, Zeng X P, Zhang Z M, et al. Characteristics and evaluation of speciation of heavy metals in forest soils of Karst [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(6): 347-352, 358.
- [46] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, et al. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102281.
- [47] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2877-2884.
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [48] 和淑娟, 李丽娜, 杨牧青, 等. 云南某冰川侵蚀区域土壤高背景值成因及农作物重金属累积规律探究[J]. 环境科学导刊, 2021, **40**(2): 68-74, 84.
He S J, Li L N, Yang M Q, et al. Research on the causes of high soil background value and the accumulation of heavy metals in crops in a glacier eroded area in Yunnan [J]. Environmental Science Survey, 2021, **40**(2): 68-74, 84.
- [49] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 449-459.
Ma H H, Peng M, Liu F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop

- system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [50] 陈梓杰, 肖唐付, 刘意章, 等. 典型黑色岩系地质高背景区农田土壤-玉米系统重金属富集特征[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(8): 2315-2323.
- Chen Z J, Xiao T F, Liu Y Z, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and maize in a typical black shale area with high geochemical background [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(8): 2315-2323.
- [51] 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 等. 溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1577-1583.
- Min T, Luo T, Chen L L, *et al.* Enhanced remediation of Cd contaminated soil by cotton with DOM [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1577-1583.
- [52] Sui F Q, Chang J D, Tang Z, *et al.* Nramp5 expression and functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize[J]. *Plant and Soil*, 2018, **433**(1-2): 377-389.
- [53] Yang M, Zhang Y Y, Zhang L J, *et al.* OsNRAMP5 contributes to manganese translocation and distribution in rice shoots [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, **65**(17): 4849-4861.
- [54] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, *et al.* Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice [J]. *The Plant Cell*, 2012, **24**(5): 2155-2167.
- [55] Wu D Z, Yamaji N, Yamane M, *et al.* The HvNramp5 transporter mediates uptake of cadmium and manganese, but not iron[J]. *Plant Physiology*, 2016, **172**(3): 1899-1910.
- [56] Reeves P G, Chaney R L. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 13-19.
- [57] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 442-453.
- Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentrations characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 442-453.
- [58] Li X Y, Li Z G, Lin C J, *et al.* Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in Central China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **161**: 99-110.
- [59] 王瑛, 林钰清, 李爱军, 等. 重金属危害机制及益生菌清除重金属机制研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, **46**(3): 281-292.
- Wang Y, Lin Y Q, Li A J, *et al.* Research progress on the mechanism of heavy metal contamination and probiotics sequestration[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, **46**(3): 281-292.
- [60] 杨文毅, 王英杰, 周航, 等. 水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 694-699.
- Yang W T, Wang Y J, Zhou H, *et al.* Transformation and mobility of arsenic in the rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of rice[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 694-699.
- [61] 花日茂. 环境毒理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [62] 穆德苗, 孙约兵. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 965-974.
- Mu D M, Sun Y B. Safety production threshold and land quality classification of vegetable Pb in high geological background area of Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 965-974.
- [63] EU EC. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 [R]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2006.
- [64] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝, 等. 基于富集系数对蔬菜地土壤重金属的安全阈值研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(2): 130-134.
- Shi M Y, Wang Z W, Wang J B, *et al.* Study on safety threshold of heavy metals in vegetable soils based on bioaccumulation factor [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(2): 130-134.
- [65] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东镉高背景区菜地土壤健康风险评估与基准[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4522-4530.
- Li Y, Zhang N M, Wei F S. A benchmark study on soil health risks of vegetable fields in a high-cadmium background area in eastern Yunnan [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4522-4530.

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)
Spatial-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 PICRUSt2-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)