

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, 关键, 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, 徐文师 (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 O ₃ _{8h} 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, 傅宗玖 (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, 梁思航, 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)
铜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, 颜晓元, 迺超普 (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, 刘佩娟, 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矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 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 N ₂ O 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	蒋洪利, 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, 宋阳, 潘杨, 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)	

皖江经济带耕地重金属健康风险评估及环境基准

刘海¹, 魏伟^{2*}, 宋阳¹, 潘杨¹, 黄健敏¹

(1. 安徽省公益性地质调查管理中心, 合肥 230091; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 成都 611830)

摘要:以皖江经济带耕地为研究区对象,采集了水稻和小麦及其根系土样品 338 组,测定了 5 种重金属含量(As、Cd、Cr、Hg 和 Pb),采用地累积指数法和综合污染指数法评价了土壤-农作物污染特征,进行摄入农作物重金属对人体健康风险进行评估,并基于物种敏感分布模型(SSD)反演了区域耕地土壤环境基准值。结果表明,研究区水稻和小麦土壤受到不同程度重金属(As、Cd、Cr、Hg 和 Pb)污染,其中 Cd 为水稻首要污染因子,超标率在 13.33%,Cr 为小麦的主要超标因子,超标率达 11.32%;地累积指数显示水稻 Cd 污染比例达 80.7%,小麦 Cd 污染率为 35.85%。与土壤重金属高污染水平相反,仅有 17.19% 和 7.55% 的水稻和小麦中 Cd 超过国家食品安全限量标准,重金属 Cd 的累积能力为水稻 > 小麦。健康风险评估表明重金属对研究区成人和儿童具有较高的非致癌风险和不可接受的致癌风险,水稻摄入的致癌风险高于小麦,儿童的健康风险均高于成人。SSD 反演得出研究区水稻田土壤的 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 基准值 HC_5 为 6.24、0.13、258.27、0.12 和 53.61 $mg \cdot kg^{-1}$, HC_{95} 值分别为 68.81、5.71、1 068.92、0.80 和 174.22 $mg \cdot kg^{-1}$;小麦地土壤的 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 基准值 HC_5 为 32.99、0.04、271.14、0.09 和 47.53 $mg \cdot kg^{-1}$, HC_{95} 值分别为 225.28、0.71、998.58、1.43 和 241.99 $mg \cdot kg^{-1}$ 。反演得出水稻和小麦中的重金属的 HC_5 不同程度地低于现行标准中的土壤风险筛选值。现行土壤标准对该地区评价结果偏宽松。

关键词:皖江经济带; 土壤; 重金属; 健康风险; 环境基准

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3531-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202208037

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone

LIU Hai¹, WEI Wei^{2*}, SONG Yang¹, PAN Yang¹, HUANG Jian-min¹

(1. Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230091, China; 2. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China)

Abstract: Focusing on the cultivated land in Wanjiang Economic Zone, 338 sets of soil samples of rice, wheat, and their roots were collected; the concentrations of five heavy metals (As, Cd, Cr, Hg, and Pb) were determined; the soil-crop pollution characteristics were evaluated using the method of geo-accumulation index and comprehensive evaluation; the human health risk of ingesting heavy metals from crops was assessed; and the soil environmental reference value of the regional cultivated land was inverted based on the species sensitive distribution model (SSD). The results showed that in the study area, the soil of rice and wheat was polluted by heavy metals (As, Cd, Cr, Hg, and Pb) in varying degrees, among which Cd was the primary pollution factor of rice, with the over-standard rate of 13.33%, and Cr was the main over-standard factor of wheat, with the over-standard rate of 11.32%. The cumulative index showed that the percentage of Cd pollution in rice was 80.7%, and that in wheat was 35.85%. Contrary to the high pollution level of soil heavy metals, only 17.19% and 7.55% of Cd in rice and wheat exceeded the national food safety limit, and the accumulation capacity of the heavy metal Cd was rice > wheat. The health risk assessment indicated that heavy metals had high non-carcinogenic risk and unacceptable carcinogenic risk to adults and children in this study. The carcinogenic risk of rice intake was higher than that of wheat, and the health risk of children was higher than that of adults. SSD inversion showed that the reference values of As, Cd, Cr, Hg, and Pb in paddy soil in the study area were an HC_5 of 6.24, 0.13, 258.27, 0.12, and 53.61 $mg \cdot kg^{-1}$ and an HC_{95} of 68.81, 5.71, 1 068.92, 0.80, and 174.22 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The reference values of As, Cd, Cr, Hg, and Pb in wheat soil HC_5 were 32.99, 0.04, 271.14, 0.09, and 47.53 $mg \cdot kg^{-1}$, and the values of HC_{95} were 225.28, 0.71, 998.58, 1.43, and 241.99 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The reverse analysis showed that the HC_5 of heavy metals in rice and wheat were lower than the soil risk screening values in the current standard to varying degrees. The current soil standard had loosened for the evaluation results of this region.

Key words: Wanjiang economic zone; soil; heavy metal; health risk assessment; environmental benchmark

耕地土壤是生态环境的重要组成部分,更是农业生产的主要载体^[1],其质量的好坏直接关乎农产品的安全和质量。然而重金属是影响耕地土壤环境质量的主要污染物^[2],据统计我国五大粮食产区耕地土壤重金属点位超标率为 21.49%,整体呈轻度污染为主,但耕地土壤重金属含量呈增加趋势^[3]。随着城市化、工业化和农业集约化等进程的快速发展^[4],日益加剧的土壤重金属污染将严重影响我国农业的高质量发展。重金属因毒性强、难降解、持久性,且能够通过大气、水体或食物链直接或间接

影响着食品安全和人体健康^[4~6]。因此,加强对耕地土壤和农作物重金属污染状况的风险健康评价是应对粮食安全的重要举措。

我国地域跨度辽阔,地形地貌多样,气候条件迥异,土地利用方式和耕作历史差异明显,造成各地区土壤类型和性质差别较大^[7,8]。为有效管理和防控

收稿日期: 2022-08-06; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 安徽省自然资源厅公益性地质调查项目(2015-g-17)

作者简介: 刘海(1984~),男,博士,主要研究方向为土壤生态环境风险评估与管理, E-mail: 103304365@qq.com

* 通信作者, E-mail: jpwflz@sicau.edu.cn

耕地土壤重金属污染,现行的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)明确规定了各类农用地重金属的风险筛选值和管制值^[8,9].但由于不同地区耕地土壤环境质量差异和农作物类型种类多,不同农作物对重金属的富集能力差异明显.因此造成用现行的土壤环境质量标准在实际评估中出现超标不对应的情况^[10,11].如朱志军等^[12]在评价广西桂平市土壤-水稻系统的土壤重金属时发现,土壤 Cd 含量不超标而稻米籽粒 Cd 含量超标的情况;王旭莲等^[13]也发现地质高背景区的黔西北土壤 Cd 超标严重而马铃薯超标率相对较低.目前,相关学者基于敏感性分布曲线法(SSD)开展了水稻^[14~16]、小麦^[14,17]、玉米^[18]和蔬菜^[19~22]等农作物的环境基准值研究,但大多数研究是基于如 Cd、Pb 等某一特征因子开展研究,而对于确定农作物安全状况下土壤不同重金属的环境基准研究相对较少,因此有必要针对不同农作物类型制定相应的耕地土壤安全限量标准^[23,24],对于确保食品安全生产具有重要的指导意义.

皖江经济带是我国水稻和小麦等大宗农作物生产的重要基地^[25,26].区内耕地土壤和农作物中均存在 Cd、Hg、As、Pb、Fe 和 Mn 等重金属超标或异常现象^[26,27],有潜在生态和健康风险.然而研究区关于土壤-农作物系统重金属的累积规律和健康风险的研究工作相对缺乏,对于土壤重金属阈值确定的研究尚未见相关报道.鉴于此,本文以皖江经济带为研究区域,评价重金属(As、Cd、Cr、Hg 和 Pb)在土壤-农作物(水稻和小麦)中含量及污染特征;评估摄入水稻和小麦对人体的潜在健康风险;基于物种敏感分布模型(SSD)推导耕地土壤安全基准;旨在为耕地土壤污染防治和农业种植调整与优化提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

皖江经济带地处安徽省中部(图1),涉及46个县(市、区),面积为 $7.58 \times 10^4 \text{ km}^2$.区内地势南北高、中间低,整体上自西南向东北倾斜,以平原、丘陵和低山等地貌类型为主.土壤母质主要以河流冲积物母质、晚更新世黄土母质、(蠕虫状网纹)红土母质和基岩风化残-坡积物(洪积物)母质为主^[25,26].土壤类型主要为水稻土和红壤.土地利用类型主要为农用地(包括水田、旱地和园地)和林地.粮食作物以水稻和小麦为主,经济作物主要有棉花、油菜籽、茶叶、山核桃、丹皮和生姜等.

1.2 样品采集与测试

考虑土地利用特征和特色农产品种植情况,同

时兼顾农作物的实际种植现状和空间的均匀性,基于GPS定位采样点,土壤和农作物采集于2017年7~8月.采用农作物和土壤协同采样方法在农田采集农作物籽实和根系土壤(0~20 cm).在每个样点取60 cm×60 cm样方随机采集4~5个土壤和农作物籽实,混合均匀成一个样品后装袋,土壤样品重量不低于1 000 g,农作物样品重量不低于500 g.共采集农作物和土壤样品338组,其中水稻及其根系土285组,小麦及其根系土53组.土壤样品经风干、研磨过100目筛后装袋备用,农作物籽实样品去壳(皮)后将籽实用去离子水冲洗,烘干和粉碎后过筛(60目)备用.

土壤和农作物样品测试前采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄和王水进行消解,制备待测液.农作物重金属测试采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为主,以原子荧光法(AFS)和比色法(COL)为辅的分析方法配套方案进行测试.使用X射线荧光光谱法(XRF)测定土壤Cr和Pb,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定Cd,原子荧光法(AFS)测定As和Hg,离子选择性电极法(ISE)测定pH.测试过程中采用试样空白、平行双样和国家标准样品进行质量保证和控制,加标回收率在95%~105%.所有样品分析误差均小于10%.所有测试均在安徽省地质实验研究所完成.

1.3 重金属污染评价

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(I_{geo})^[28]不仅考虑了沉积成岩作用对背景值的影响,同时也考虑了人类活动对重金属的影响^[29,30].其计算公式如下:

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

式中, C_i 为重金属实测含量值, K 为修正系数,通常用来校正成岩作用引起区域背景值的变动,一般取1.5; B_n 为重金属土壤背景值,采用安徽省土壤重金属背景值^[31].将地累积指数划分以下7个等级^[29,30]: $I_{\text{geo}} < 0$,无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$,无污染-轻度污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$,中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$,中度污染-强污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$,强污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$,强污染-极强污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$,极强污染.

1.3.2 综合污染指数法

内梅罗污染指数法^[32,33]既可反映土壤和农作物中单一重金属元素的污染水平,也能评价多种重金属的综合污染水平,计算公式如下:

$$PI = C_i / S_i \quad (2)$$

$$NPI = \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2) / 2} \quad (3)$$

式中,PI为土壤或农作物的重金属单因子污染指

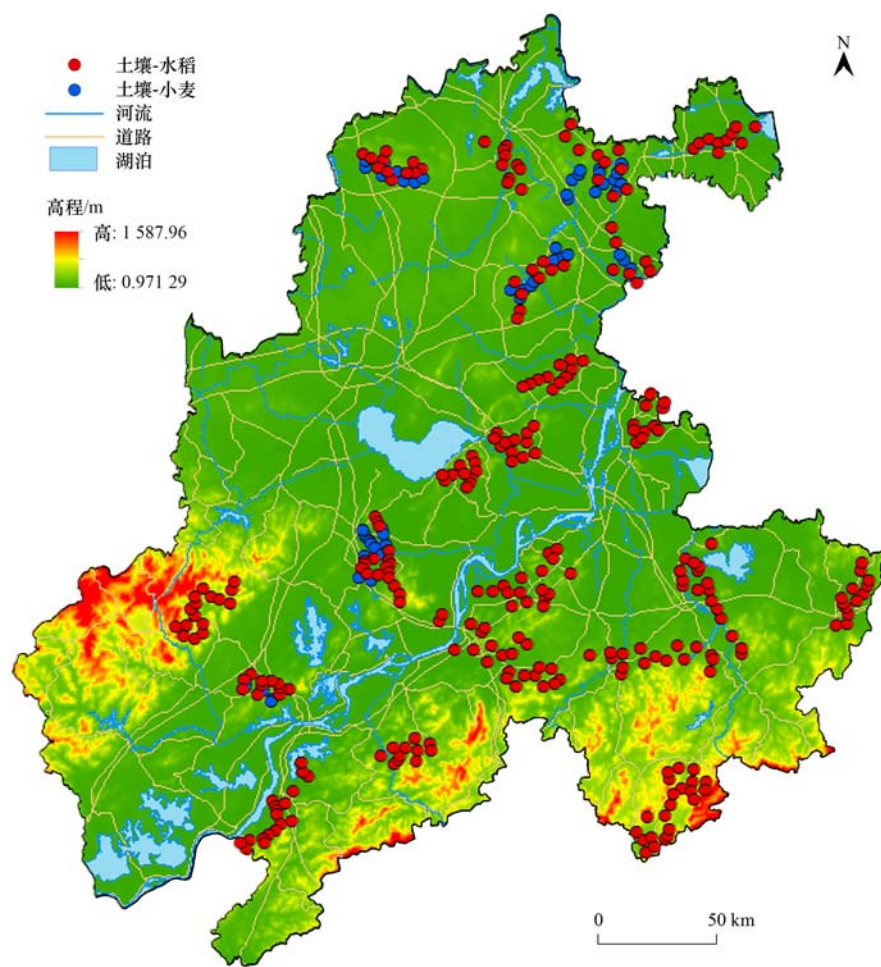


图1 研究区位置及土壤-农作物采样点分布示意
Fig. 1 Location and distribution of sampling sites

数; C_i 为土壤或农作物重金属 i 的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为土壤或农作物重金属 i 的评价标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤和农作物中的重金属污染评价标准值分别以我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)和《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)限量标准为依据. NPI 为内梅罗综合污染指数, P_{ave} 为重金属单项污染指数的平均值; P_{max} 为重金属单项污染指数的最大值. 其分级标准见文献[32].

1.3.3 富集因子法

富集系数反映生物富集、累积和吸收重金属的能力^[34~36]. 计算公式如下:

$$\text{BCF} = C_p / C_s \tag{4}$$

式中, BCF 为富集系数, C_p 为农作物中重金属实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_s 为土壤重金属实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.4 农作物摄入健康风险评价

1.4.1 非致癌风险

重金属威胁人体健康最常见的暴露途径为土壤-作物-人体. 但重金属通过皮肤、呼吸等暴露方式

进入人体的危害程度远低于食物摄入. 采用美国环保署推荐的健康风险评价模型^[37]对研究区成人和儿童摄入农作物的致癌和非致癌健康风险进行评价. 农作物(水稻和小麦)日均摄入量采用如下公式计算:

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

式中, C 农作物籽实中重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; IR 为摄食率, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (其中水稻: 儿童和成人分别为 $198.4 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $389.2 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 小麦: 儿童和成人分别为 $94.47 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $159.9 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$)^[38,39]; EF 为暴露频率, $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$, 一般取 $350 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[38]; ED 为暴露持续时间, a (儿童: 6 a; 成年人: 24 a)^[40], BW 为暴露个体的体重, kg (儿童: 16 kg; 成年人: 60 kg)^[40]; AT 为非致癌重金属的平均暴露时间; $\text{ED} \times 365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$, 致癌重金属的平均暴露时间取 $70 \times 365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[40].

一般以危害商数来表征农作物摄入单一重金属健康风险程度, 其计算为:

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^n \text{HQ}_i = \sum_{i=1}^n \frac{\text{EDI}_i}{\text{RFD}_i} \tag{6}$$

式中,HQ 为单一重金属元素的非致癌风险;HI 为综合非致癌风险;RfD 为特定金属的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ (其中 As: 0.3×10^{-3} ; Cd: 1.0×10^{-3} ; Cr: 3.0×10^{-3} ; Hg: 0.3×10^{-3} ; Pb: 3.5×10^{-3})^[41]. 非致癌风险可分为无风险 ($\text{HQ}/\text{HI} < 1$) 和有风险 ($\text{HQ}/\text{HI} > 1$).

1.4.2 非致癌风险

根据目标致癌风险(TCR)进行评估从农作物(水稻和小麦)中摄入重金属引发的致癌风险^[14,41],其计算如下:

$$\text{TCR} = \sum_{i=1}^n \text{CR}_i = \sum_{i=1}^n \text{EDI}_i \times \text{SF}_i \quad (7)$$

式中,TCR 和 CR 分别为重金属综合和单项重金属致癌健康风险指数. SF 为癌症斜率因子(As: 1.5; Cd: 6.1; Cr: 0.008 5; Pb: 0.008 5)^[41]. 致癌风险可分为无风险($\text{CR}/\text{TCR} < 10^{-6}$)、有人体可耐受的风险($10^{-6} \leq \text{CR}/\text{TCR} < 10^{-4}$)和有人体不可耐受的风险($\text{CR}/\text{TCR} \geq 10^{-4}$).

1.5 健康风险基准值推导

土壤生态环境基准一般是指土壤中的污染物既不影响农产品产量和生物的生存发展,又不致使水体污染的阈值^[7,42,43]. 目前健康风险基准值推导一般采用敏感性分布曲线法(SSD)^[8,14,16],该曲线基于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而提出来的一种生态风险评价方法^[8,14,44].

通过协同采集分析农作物-土壤样品重金属含

量,计算农作物富集系数 BCF,将富集系数倒数 $1/\text{BCF}$ 作为概率分布指标,一般情况下,农作物重金属的 $1/\text{BCF}$ 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^[8],根据如下公式拟合 SSD 曲线:

$$y = a + b/[1 + (x/x_0)^c] \quad (8)$$

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.

参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)规定的农作物限值,反演保护各农作物耕种土壤中重金属的基准值^[8,14]. 其计算公式如下:

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

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 和重金属含量

研究区耕地土壤整体呈弱酸性. 水稻田土壤 pH 在 4.65~8.38 之间,平均值为 6.47;小麦地土壤 pH 在 4.58~8.03 之间,平均值为 6.15(表 1). 水稻田土壤 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 平均值为 10.93、0.31、71.93、0.08 和 35.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,小麦地土壤 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 平均值为 11.50、0.15、88.78、0.05 和 27.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,统计检验显示水稻田中 Cd、Hg 和 Pb 含量平均值显著高于小麦地($P < 0.05$),小麦地中 Cr 含量的均值明显高于水稻田($P < 0.05$),而 As 差别不大.

表 1 耕地土壤重金属含量统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in agricultural soils

项目	统计值	As	Cd	Cr	Hg	Pb	pH
水稻田 ($n=285$)	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	91.90	2.45	242.40	0.30	441.50	8.38
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.90	0.08	13.80	0.02	15.10	4.65
	中值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	9.20	0.22	67.70	0.07	30.60	6.40
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	10.93	0.31	71.93	0.08	35.62	6.47
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	8.52	0.30	29.24	0.04	32.19	0.97
	变异系数	0.78	0.95	0.41	0.54	0.90	0.15
小麦地 ($n=53$)	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	29.80	0.85	330.90	0.33	49.20	8.03
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.60	0.07	41.10	0.02	17.80	4.58
	中值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	10.90	0.13	72.20	0.04	27.50	5.90
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	11.50	0.15	88.78	0.05	27.33	6.15
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	5.41	0.11	56.24	0.05	5.72	1.00
	变异系数	0.47	0.70	0.63	0.91	0.21	0.16
参考值	江淮流域土壤背景值 ^[45]	9.4	0.104	69.4	0.041	25.9	/
	安徽省土壤背景值 ^[31]	9	0.097	66.5	0.33	26.6	/

1) pH 无量纲,“/”表示无该值

水稻田土壤重金属变异系数大小依次为: Cd (0.95) > Pb (0.90) > As (0.78) > Hg (0.54) > Cr (0.41), 其中 Cd、Pb、As 和 Hg 为强变异^[46], 而小

麦地土壤重金属变异系数大小依次为: Hg (0.91) > Cd (0.70) > Cr (0.63) > As (0.47) > Pb (0.21), 其中 Hg、Cd 和 Cr 为强变异^[46], 元素变异程度与水稻

田具有明显差别. 表明研究区土壤重金属具有明显的空间异质性,受人类活动影响较大^[47].

与江淮流域土壤背景值和安徽省土壤背景相比 (表 1),研究区除水稻田和小麦地中的 Hg 含量低于安徽省土壤背景值外,其余重金属元素均超过背景值,其中水稻田的 Cd 含量平均值为江淮流域土壤背景值和安徽省土壤背景的 3 倍和 3.22 倍,其余元素的平均值超过背景值 1.03 ~ 1.98 倍不等. 这表明研究区耕地土壤重金属存在明显富集,研究区是安徽省重要的粮食生产基地,农业集约化程度高,大量施用农业和化肥,导致重金属的富集^[48]. 此外,本区是研究区属长江中下游典型的铁铜硫金成矿带,具有较高的高地质背景值,采矿业的高速发展也进一步导致重金属富集^[49].

2.2 土壤重金属污染评价

以现行国家标准 (GB 1568-2018) 土壤风险筛选值为评价标准,得出水稻田土壤 Cd 超过土壤风险筛选值的占比为 13.33%,Cd 污染较高,为水稻田首要的限制因子,其次为 As (4.21%) 和 Pb (1.75%),所有样品 Cr 和 Hg 含量均在风险筛选值之内. 小麦地土壤 Cr 超标率为 11.32%,Cr 污染较高,为小麦地的首要限制因子,其次为 As (1.89%),所有样品 Cd、Hg 和 Pb 含量均在风险筛选值之内 (表 2). 研究区 2 种耕地类型的污染特征元素表现差异明显,一方面可能是不同耕地类型其土壤重金属的风险筛选值不同导致评价结果出现偏差,另一方面可能与耕作方式不一致有关,水稻田更易受 Cd 污染,这也是造成“Cd 大米”的重要因素之一.

表 2 土壤超过风险筛选值的数量及占比

Table 2 Number and ratio of excess pollution risk screening in soils						
项目	元素	超过风险筛选值数量(占比/%)				总数
		pH≤5.5	5.5 < pH≤6.5	6.5 < pH≤7.5	pH>7.5	
水稻田 (n=285)	区间总数	58	99	64	64	285
	As	1(1.72)	2(2.02)	3(4.69)	6(9.38)	12(4.21)
	Cd	11(18.97)	14(14.14)	6(9.38)	7(10.94)	38(13.33)
	Cr	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Hg	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Pb	1(1.72)	2(2.02)	1(1.56)	1(1.56)	5(1.75)
小麦地 (n=53)	区间总数	18	15	13	7	53
	As	0(0)	0(0)	0(0)	1(14.29)	1(1.89)
	Cd	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Cr	4(22.22)	1(6.67)	1(7.69)	0(0)	6(11.32)
	Hg	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	Pb	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)

地累积指数计算结果如图 2 所示. 水稻田土壤重金属地累积指数平均值大小依次为: Cd (0.759) > Pb (- 0.317) > As (- 0.561) > Cr (- 0.572) > Hg (- 2.802). 从重金属污染等级来看,除 Hg 不存

在污染外,其余元素均存在不同等级的污染,其中 Cd 轻度-中度污染的比例为 45.61%,中度污染的比例 24.56%,中度-强污染的比例为 10.53%,而 As、Cr 和 Pb 以无污染水平为主 (80% 以上).

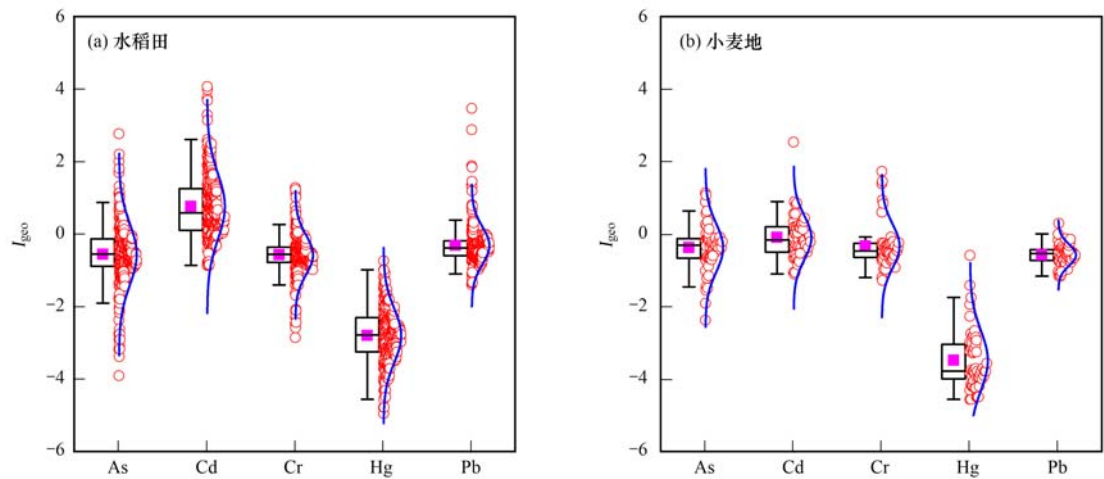


图 2 耕地土壤地累积指数评价结果

Fig. 2 Evaluation results of geoaccumulation index of agricultural soils

小麦地土壤重金属地累积指数平均值大小依次为: $Cd(-0.098) > Cr(-0.330) > As(-0.379) > Pb(-0.576) > Hg(-3.448)$. 除 Hg 不存在污染外, 小麦地土壤其余重金属元素均存在不同等级的污染, 其中 Cd 轻度-中度污染比例达 35.85%, As 轻度-中度污染也占 16.98%, Cr 和 Pb 以无污染水平为主(近 90% 以上). 综上发现, 研究区土壤中 Cd 污染程度高, 研究结果与广东^[4]、黔西北^[14]、浙中典型硫铁矿区^[30] 等地区耕地重金属污染状况相似.

2.3 农作物籽实重金属含量

研究区水稻籽实和小麦籽实中重金属含量统计如表 3. 水稻籽实 $\omega(As)$ 、 $\omega(Cd)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Hg)$

和 $\omega(Pb)$ 的范围分别为 0.01 ~ 0.350、0.005 ~ 2.553、0.080 ~ 0.660、0.002 ~ 0.033 和 0.034 ~ 0.139 $mg \cdot kg^{-1}$, 平均值分别为 0.100、0.120、0.128、0.005 和 0.057 $mg \cdot kg^{-1}$; As、Cd、Cr 和 Hg 较 Pb 的空间分布差异明显, 空间变异程度高, Cd 为异常的强变异($CV > 100\%$), Hg 为强变异($50\% < CV \leq 100\%$), 其余为中等强度变异. 小麦籽实 $\omega(As)$ 、 $\omega(Cd)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Hg)$ 和 $\omega(Pb)$ 的范围分别为 0.030 ~ 0.064、0.019 ~ 0.213、0.110 ~ 0.380、0.001 ~ 0.013 和 0.050 ~ 0.330 $mg \cdot kg^{-1}$, 平均值分别为 0.046、0.052、0.156、0.003 和 0.119 $mg \cdot kg^{-1}$; 与水稻籽实不同, Cd 和 Hg 为强变异, 其余元素均为中等强度变异.

表 3 农作物籽实重金属含量统计

Table 3 Statistics of heavy metal contents of rice and wheat

项目	重金属元素	含量/ $mg \cdot kg^{-1}$					变异系数	超标率/%	PI	NPI
		最小值	最大值	中值	均值	标准差				
水稻 ($n=285$)	As	0.010	0.350	0.090	0.100	0.048	0.479	2.80	0.501	0.648
	Cd	0.005	2.553	0.054	0.120	0.207	1.727	17.19	0.599	
	Cr	0.080	0.660	0.120	0.128	0.062	0.481	0.00	0.128	
	Hg	0.002	0.033	0.005	0.005	0.003	0.574	1.05	0.247	
	Pb	0.034	0.139	0.052	0.057	0.017	0.296	0.00	0.284	
小麦 ($n=53$)	As	0.030	0.064	0.047	0.046	0.009	0.203	0.00	0.092	0.418
	Cd	0.019	0.213	0.045	0.052	0.037	0.700	7.55	0.525	
	Cr	0.110	0.380	0.140	0.156	0.051	0.326	0.00	0.156	
	Hg	0.001	0.013	0.002	0.003	0.002	0.715	0.00	0.150	
	Pb	0.050	0.330	0.100	0.119	0.053	0.440	0.00	0.239	

水稻籽实中除 Cr 和 Pb 未超过现行国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2017)外, As、Cd 和 Hg 的超标率分别为 2.80%、17.19% 和 1.05%, 而在小麦籽实样品中除 Cd 有 7.55% 超标外, 其余元素均未超过现行国家食品限量标准. 总的来说, 研究区农作物籽实以 Cd 超标为主, 应特别关注 Cd 的污染.

2.4 农作物籽实重金属污染评价

采用了单因子指数和内梅罗综合指数评价了研

究区水稻和小麦的污染特征, 结果见表 3 和图 3. 研究区水稻和小麦 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的单因子污染指数(PI)平均值均小于 1(表 3), 表明水稻籽实和小麦籽实重金属污染较低. 但就水稻籽实而言, Cd 元素轻污染、中污染和重污染的比例分别为 12.28%、2.81% 和 2.11%. As 和 Hg 有少量样品为轻污染, Cr 和 Pb 为无污染. 小麦籽实仅有 Cd 元素存在少量样品污染, 其轻污染和中污染的比例分别

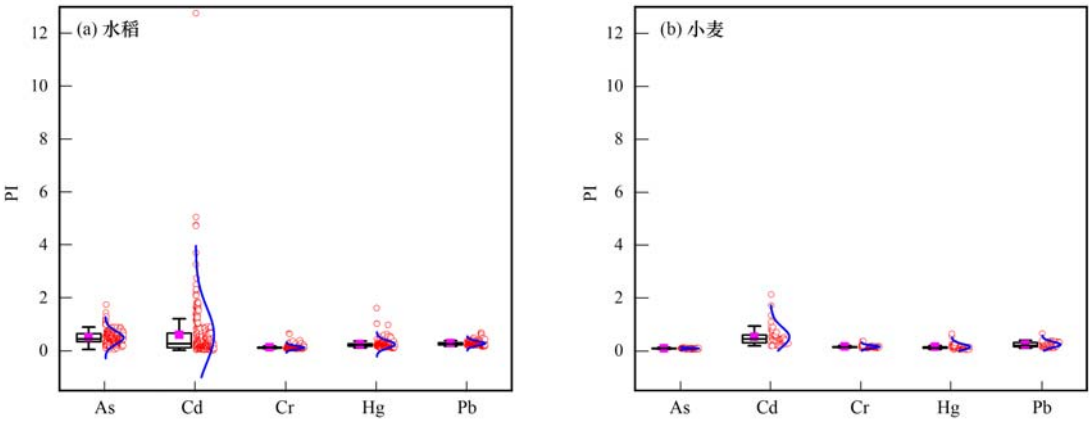


图 3 耕地土壤单因子指数评价结果

Fig. 3 Evaluation results of single factor index of agricultural soils

为 5.66% 和 1.89%, 可见农作物籽实主要是受 Cd 污染。

水稻籽实和小麦籽实的内梅罗指数(NPI)分别为 0.648 和 0.418(表 3), 表明研究区农作物整体上处于安全状态, 但仍有部分样品存在污染, 水稻籽实轻污染、中污染和重污染的样品比例占 10.53%、1.05% 和 1.40%; 而小麦籽实仅有 3.77% 样品为轻污染。整体上来说, 水稻籽实重金属污染比小麦籽实更为严重。

2.5 重金属富集特征

重金属从土壤到农作物籽实的迁移和累积是土

壤重金属进入食物链的主要途径之一^[50]。水稻籽实中重金属的富集系数分别为: As (0.0123 ± 0.0098)、Cd (0.4358 ± 0.4993)、Cr (0.0020 ± 0.0013)、Hg (0.0750 ± 0.0482) 和 Pb (0.0018 ± 0.0006) [图 4(a)]。水稻从土壤中富集重金属的能力大小依次为: Cd > Hg > As > Cr > Pb。研究结果与前人研究基本一致^[51]。水稻易从土壤中富集 Cd, 是造成“Cd 大米”的主要原因之一, 使得水稻镉污染受到社会的广泛关注。水稻对 Cr 和 Pb 的富集系数较低, 可能是因为水稻植株在吸收土壤中 Cr 和 Pb 后主要在根部累积, 而较少迁移到籽实中^[52,53]。

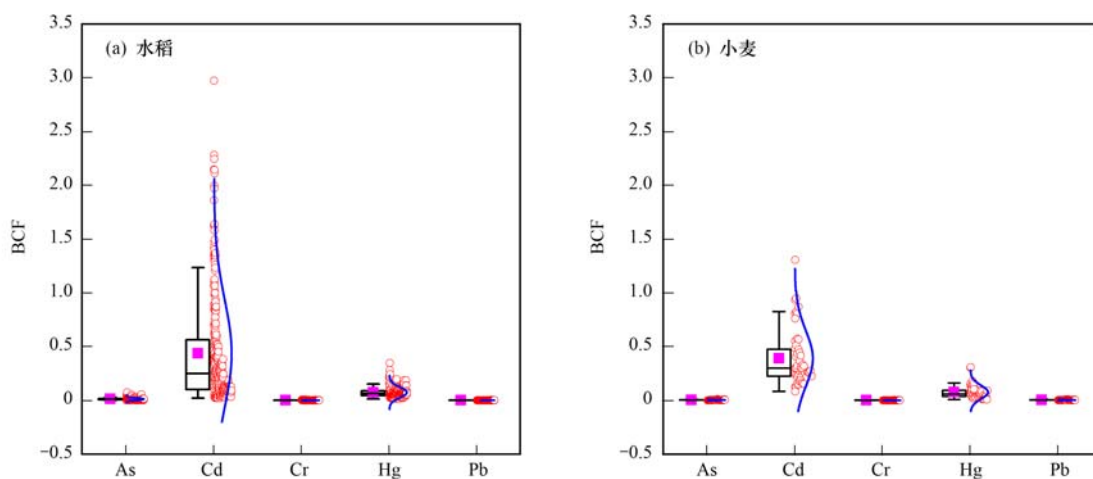


图 4 农作物籽实重金属富集因子

Fig. 4 Bioaccumulation factors of rice and wheat

小麦籽实中重金属的富集系数分别为: As (0.0049 ± 0.0042)、Cd (0.3900 ± 0.0300)、Cr (0.0020 ± 0.0019)、Hg (0.0771 ± 0.0588) 和 Pb (0.0046 ± 0.0040) [图 4(b)]。小麦从土壤中富集重金属的能力大小依次为: Cd > Hg > As > Pb > Cr。同样以 Cd 富集最为明显, 这可能是一方面土壤中 Cd 主要以可交换态或碳酸盐结合态等易于迁移的形态存在, Cd²⁺ 通过 Fe²⁺、Ca²⁺ 和 Zn²⁺ 等二价离子转运易于被作物吸收; 另一方面, Zn 与 Cd 在土壤-农作物系统中的协同作用促进了 Cd 向植物可食部分的迁移富集^[54]。

水稻籽实 Cd 的富集程度远高于小麦。相关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分 Cd 累积的重要决定因素^[55]。水稻根系中 Cd 的运输速率显著高于小麦, 其流动的最大速度比小麦高 2~6 倍^[56]。

2.6 摄入农作物籽实健康风险评价

2.6.1 非致癌健康风险评价

研究区儿童和成人食用水稻和小麦摄入重金属单项非致癌风险指数如图 5 所示。就水稻来说[图 5

(a)], 儿童食用水稻摄入 Cr、Hg 和 Pb 的单项非致癌风险指数(HQ)平均值小于 1, 表明水稻中的 Cr、Hg 和 Pb 对儿童造成的非致癌风险不明显, 而 As 和 Cd 的非致癌风险指数为 3.97 和 1.42, 明显大于 1, 其中 97.89% 样品的 As 单项非致癌指数大于 1, Cd 也有 36.84% 的样品的单项非致癌指数大于 1, 表明 As 和 Cd 对儿童具有明显的非致癌风险。成人仅有 As 的单项非致癌风险指数平均值大于 1, 其中大于 1 的样品数达 89.82%。其余元素的均小于 1。此外也有 22.11% 样品 Cd 的单项非致癌风险指数大于 1。表明 As 和 Cd 对成人也具有较高的非致癌风险。整体上, 儿童的 HQ 要高于成人, 表明食用研究区的水稻会对儿童造成较高的非致癌风险。

对于小麦来说[图 5(b)], 成人食用小麦摄入各重金属的 HQ 均小于 1, 表明食用小麦对成人不存在非致癌健康风险。而对于儿童来说, 整体上摄入各重金属的 HQ 均值小于 1, 对儿童不存在非致癌风险。但 As 仍有 26.42% 小麦样品的 HQ 大于 1, 表明小麦中的 As 对儿童仍具有一定的非致癌健康风险。

除成人食用小麦引发的非致癌健康风险总指数 (HI) 小于 1 外(图 6), 儿童和成人食用水稻和儿童食用小麦引发的非致癌风险健康总指数 (HI) 均大于 1, 而且表现为儿童 > 成人 ($P < 0.05$). 表明食用研究区水稻和小麦存在一定的非致癌健康风险. 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 Huang 等^[41]的研究中也发现了类似的结果. 另外水稻和小麦中 As 和 Cd 这 2 种元素对 HI 的贡献最大, 尤其是在水稻中, 其贡献率分别为 63.11% 和 22.66%. 因此需要特别关注对农作物 As 和 Cd 这 2 种元素的管控, 以避免造成较大的食源性危害.

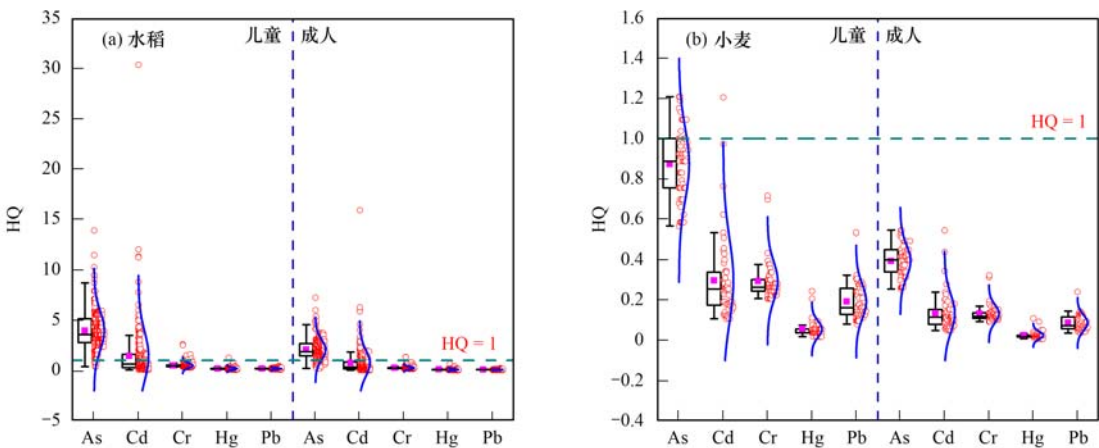
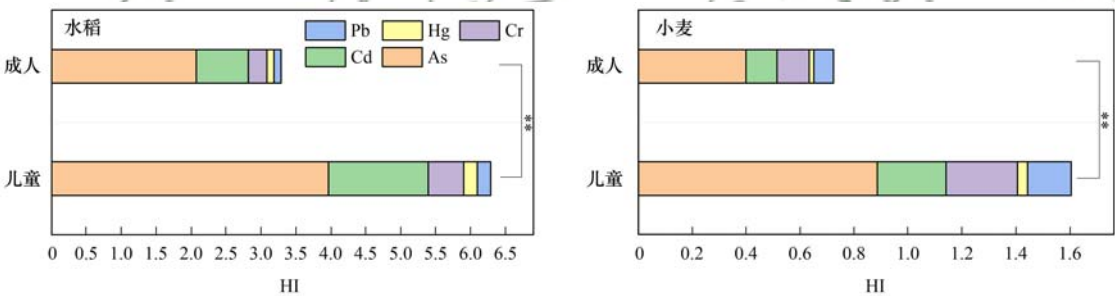


图 5 研究区人群食用谷类农作物非致癌健康风险指数
Fig. 5 Non-carcinogenic health risk indices in the study area



** 表示两组数据之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图 6 研究区人群摄入农作物的总目标危害商数

Fig. 6 Total target hazard quotient of cereal intake in the study area

2.6.2 致癌健康风险评价

食用农作物对成人和儿童的单项致癌风险指数 (CR) 和致癌风险总指数 (TCR) 如表 4 所示. 结果显

示农作物 CR 和 TCR 基本表现为水稻 > 小麦, 且成人 > 儿童, 大部分 CR 和 TCR 高于 USEPA 推荐的最大可接受水平 (10^{-6}), 故食用研究区的水稻和小麦

表 4 食用农作物摄入重金属的致癌暴露风险值

Table 4 Risk of carcinogenic exposure to heavy metals in different crops

项目			CR				TCR
			As	Cd	Cr	Pb	
水稻 ($n = 285$)	儿童	最小值	1.53E-05	3.11E-05	6.93E-07	2.95E-07	7.25E-05
		最大值	5.35E-04	1.59E-02	5.72E-06	1.20E-06	1.60E-02
		平均值	1.53E-04	7.45E-04	1.11E-06	4.92E-07	9.00E-04
	成人	最小值	3.20E-05	6.50E-05	1.45E-06	6.16E-07	1.52E-04
		最大值	1.12E-03	3.32E-02	1.20E-05	2.52E-06	3.35E-02
		平均值	3.20E-04	1.56E-03	2.32E-06	1.03E-06	1.88E-03
小麦 ($n = 53$)	儿童	最小值	2.18E-05	5.62E-05	4.54E-07	2.06E-07	8.70E-05
		最大值	4.66E-05	6.31E-04	1.57E-06	1.36E-06	6.68E-04
		平均值	3.37E-05	1.55E-04	6.44E-07	4.93E-07	1.90E-04
	成人	最小值	3.94E-05	1.02E-04	8.19E-07	3.72E-07	1.57E-04
		最大值	8.41E-05	1.14E-03	2.83E-06	2.46E-06	1.21E-03
		平均值	6.08E-05	2.80E-04	1.16E-06	8.89E-07	3.43E-04

对附近居民健康构成严重威胁. 另外,农作物中 Cd 元素对 TCR 的贡献率占 81.70%,说明农作物 Cd 元素是构成致癌健康风险的关键因子. 为降低当地居民通过稻米摄入重金属的风险,建议在综合考虑土壤污染和农作物对根系土中重金属富集能力的基础上,将 Cd 作为重金属污染防控工作中优先控制的元素,采取适当措施开展对研究区土壤进行治理.

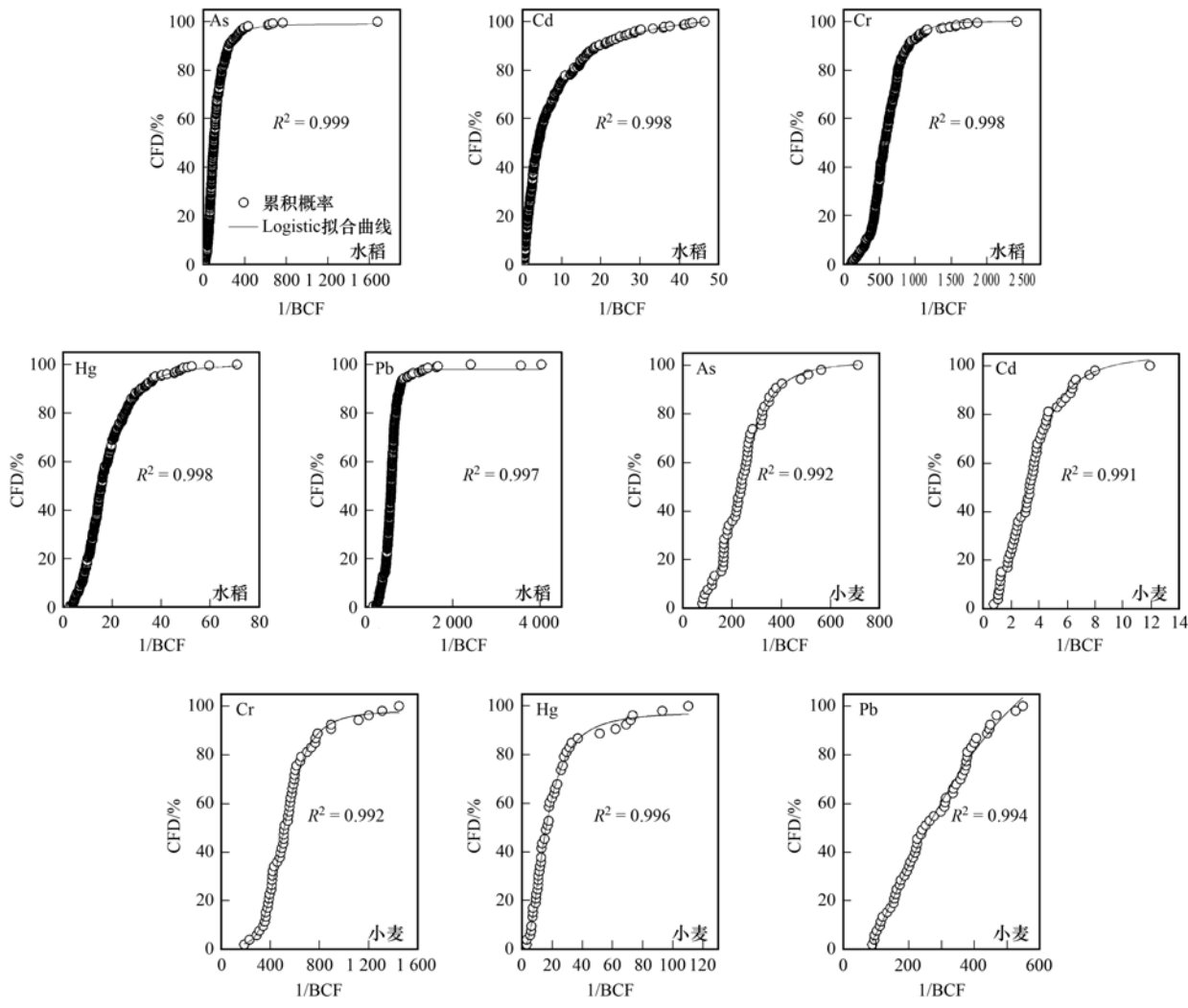
2.7 土壤环境基准值预测

基于 Logistic 分布模型拟合水稻和小麦中各重金属敏感性分布(SSD)曲线(图7). 前人研究表明数据点集中位于曲线上端,说明农作物对重金属的吸收富集能力越弱,即敏感性较差;反之亦然^[8,14,22]. 研究区水稻和小麦中各重金属的敏感分布曲线走向基本一致,且2种作物对不同重金属富集特征具有明显差异. 特别是水稻和小麦 Cd 和 Pb 曲线分布明显不同,其中水稻 Cd 的大多数点位于 0~30 之间,而小麦的 Cd 主要分布在 0~8 之间,水

稻 Cd 的曲线斜率较小麦的要陡,说明水稻较小麦对 Cd 的吸收富集能力要强,敏感度较高^[14]. 水稻中 Pb 点位主要分布在 0~1000 之间,且主要为主曲线下方,说明水稻对 Pb 的吸收富集能力强,而小麦在曲线上分布均匀,小麦对 Pb 敏感性低.

此外水稻和小麦 As 的多数点位于 0~400 之间,Cr 的多数点介于 0~1 000 和 0~800 之间,Hg 多数点在 0~40 之间. 上述元素点位数据绝大部分位于曲线下端,但水稻的曲线斜率相对小麦较陡,表明重金属在水稻中吸收富集能力较强,敏感度较高^[8].

基于 Logistic 分布模型拟合了水稻和小麦各重金属的 SSD 曲线(图7). 根据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)规定的农作物限值,反演得出基于保护 95% 和 5% 的水稻和小麦安全的 HC₅ 和 HC₉₅ 值(表5). 本文设定临界值(HC₅)为耕地土壤中各重金属的环境基准值^[57]. 结果显示水稻田土壤 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的环境基



CFD 表示 1/BCF 的累积概率

图7 农作物中重金属敏感性分布(SSD)曲线

Fig. 7 Sensitivity distribution (SSD) curves of heavy metals in crops

均值分别是 6.24、0.13、258.27、0.12 和 53.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小麦地土壤 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的环境基准值 32.99、0.04、271.14、0.09 和 47.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.除 Cr 外,水稻田和小麦地的 As、Cd、Hg 和 Pb 的环境基准值均低于农用地土壤风险筛选值.除 Cr 和 Hg 外,水稻田和小麦地的其余元素的环境基准值均低于所测样品的均值;所有重金属的含量

均值均小于警戒值(表 5).不同重金属含量与临界值和警戒值之间分布情况各不同,其中水稻田中 As、Cd、Hg 和 Pb 含量超过临界值比例分别为 83.86%、88.07%、14.39% 和 4.91%,小麦地中除 Cd 全部超过临界值外,其余元素基本在临界值内.表明研究区水稻田比小麦地更容易受重金属的污染,而且 Cd 是重要的污染因子.

表 5 基于 Logistic 模型拟合公式及土壤健康阈值划分¹⁾

Table 5 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 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	警戒值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
水稻	As	$y = 99.09 - 99.12/[1 + (x/99.23)^{2.53}]$	0.999	6.24	68.81
	Cd	$y = 108.61 - 118.72/[1 + (x/4.0)^{1.04}]$	0.998	0.13	5.71
	Cr	$y = 100.35 - 97.48/[1 + (x/581.88)^{4.68}]$	0.998	258.27	1 068.92
	Hg	$y = 100.18 - 99.25/[1 + (x/15.97)^{3.16}]$	0.998	0.12	0.80
	Pb	$y = 97.99 - 92.07/[1 + (x/593.88)^{8.86}]$	0.997	53.61	174.22
小麦	As	$y = 101.15 - 96.56/[1 + (x/239.02)^{4.24}]$	0.992	32.99	225.28
	Cd	$y = 104.70 - 98.87/[1 + (x/3.44)^{3.04}]$	0.991	0.04	0.71
	Cr	$y = 97.88 - 96.26/[1 + (x/512.14)^{5.21}]$	0.992	271.14	998.58
	Hg	$y = 97.74 - 98.01/[1 + (x/15.74)^{2.34}]$	0.996	0.09	1.43
	Pb	$y = 164.84 - 176.48/[1 + (x/374.48)^{1.65}]$	0.994	47.53	241.99

1) 临界值和警戒值分别表示 95% 和 5% 作物种植土壤重金属的含量^[57];水稻中 Pb 和小麦中 Cd 的临界值是根据样点拟合模型估算得出

本文研究得出现行农用地土壤风险管控值均不同程度地高于推导出的土壤临界值.徐梦琪等^[14]推导出黔西北地区玉米和水稻土壤中的重金属的 HC_5 值不同程度高于现行农用地标准中的土壤风险筛选值,现行的土壤标准对黔西北地区评价结果偏严.刘娟等^[8]研究发现滇东农田土壤 Pb 推导临界值均低于农用地土壤风险筛选值.文典等^[58]推算珠三角典型区域蔬菜产地土壤 Cd 的阈值均远高于现行土壤环境质量标准.本文研究成果与黔西北和珠三角地区存在较大的差异,与滇东地区农田具有相对一致性.显然不同地区农作物健康风险存在较大差异,一方面可能是受高地地质背景值、土壤理化性质(如有机质和 pH 等)和土地利用类型等因素的影响,另一方面,不同农作物对土壤重金属的富集能力导致土壤健康风险值的差异^[8].

当前现行的《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)作为我国农用地管理质量标准,在保障农产品质量安全、农作物正常生长和土壤生态环境保护等方面发挥着十分重要的作用.但由于我国农田土壤环境质量差异较大,不同农作物对重金属的富集能力强弱不同等原因,导致在应用现行标准的过程中,对于不同地区尤其是土壤背景值高的土壤不同作物种类重金属污染评价并不完全适用^[8,14,20,21].本研究结果证实现行标准对研究区土壤重金属偏宽松,或难以准确评价土壤重金属的实际暴露水平,建议根据农作物中重金属的富集能力

和实际含量进行调整和优化.

3 结论

(1)研究区水稻田和小麦地土壤重金属呈高含量水平,其中 Cd 是主要的超标元素,超标率达 13.33%,地累积指数显示水稻田土壤中 Cd 轻度-中度污染的比例为 45.61%,中度污染的比例 24.56%,中度-强污染的比例为 10.53%,小麦地土壤 Cd 轻度-中度污染比例达 35.85%.水稻田重金属污染程度高于小麦地.

(2)研究区水稻籽实 Cd 的富集程度远高于小麦.农作物籽实以 Cd 超标为主,水稻和小麦有 17.19% 和 7.55% 超过国家食品安全限量标准.食用研究区的水稻对儿童和成人具有一定的非致癌风险和不可接受的致癌风险.

(3)利用物种敏感度分布曲线法(SSD)推导出研究区水稻田土壤 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的环境基准值分别是 6.24、0.13、258.27、0.12 和 53.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;小麦地土壤 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的环境基准值 32.99、0.04、271.14、0.09 和 47.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

参考文献:

[1] 于林松, 万方, 范海印, 等. 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4199-4211.
Yu L S, Wan F, Fan H Y, et al. Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of soil heavy metals in Jianghugongmi producing area, Shandong province[J].

- Environmental Science, 2022, **43**(8): 4199-4211.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022.
- [3] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [4] 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.
- [5] Rai P K, Lee S S, Zhang M, *et al.* Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, **125**(1-3): 365-385.
- [6] 孙厚云, 卫晓峰, 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.
- [7] 郎笛, 王宇琴, 张芷梦, 等. 云南省农用地土壤生态环境基准与质量标准建立的思考及建议[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(1): 74-86.
- Lang D, Wang Y Q, Zhang Z M, *et al.* The establishment of soil eco-environmental criteria and environmental quality standards for agricultural land in Yunnan Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(1): 74-86.
- [8] 刘娟, 李洋, 张敏, 等. 滇东农田土壤铅污染健康风险评价及基准研究[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(1): 241-250.
- Liu J, Li Y, Zhang M, *et al.* Health risk assessment and benchmark of lead pollution in agricultural soils in East Yunnan, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(1): 241-250.
- [9] 周旭, 周安琪, 曹红斌, 等. 基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(6): 1213-1220.
- Zhou X, Zhou A Q, Cao H B, *et al.* Safety limits of heavy metals in planted soil of Chinese cabbage based on health risk assessment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(6): 1213-1220.
- [10] 宋静, 许根焰, 骆永明, 等. 对农用地土壤环境质量类别划分的思考: 以贵州马铃薯产区 Cd 风险管控为例[J]. 地学前缘, 2019, **26**(6): 192-198.
- Song J, Xu G Y, Luo Y M, *et al.* Some thoughts on the classification of soil environmental quality for agricultural land: taking risk control of Cd in potato producing area of Guizhou as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2019, **26**(6): 192-198.
- [11] 薛强, 赵元艺, 张佳文, 等. 基于农作物食用安全的土壤重金属风险阈值[J]. 地质通报, 2014, **33**(8): 1132-1139.
- Xue Q, Zhao Y Y, Zhang J W, *et al.* The risk threshold value method of soil heavy metals based on crop safety [J]. Geological Bulletin of China, 2014, **33**(8): 1132-1139.
- [12] 朱志军, 杨寿山, 杨泽忠, 等. 广西桂平市稻田土壤酸化与镉污染风险评价探析[J]. 南方农业学报, 2019, **50**(7): 1466-1471.
- Zhu Z J, Yang S S, Yang Z Z, *et al.* Risk assessment of soil acidification and cadmium pollution in paddy field of Guiping, Guangxi [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, **50**(7): 1466-1471.
- [13] 王旭莲, 刘鸿雁, 周显勇, 等. 地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(2): 355-363.
- Wang X L, Liu H Y, Zhou X Y, *et al.* Risk threshold for soil cadmium, based on potato quality in a high geological background area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(2): 355-363.
- [14] 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 等. 黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3799-3810.
- Xu M Q, Yang W T, Yang L Y, *et al.* Health risk assessment and environmental benchmark of heavy metals in cultivated land in mountainous area of northwest Guizhou Province [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3799-3810.
- [15] 程菁靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 70-78.
- Cheng J L, Zhao L, Yang Y, *et al.* Classification methods for typical lead-contaminated rice production areas of the middle and lower Yangtze River in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 70-78.
- [16] 韩东锦, 赵龙, 张乃明, 等. SSD 法对西南碳酸盐岩母质区稻田土壤镉污染类型划分研究[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(2): 409-418.
- Han D J, Zhao L, Zhang N M, *et al.* Classification of Cd contaminated paddy soils in carbonate parent material area of southwest China by Species Sensitivity Distribution method (SSD) [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(2): 409-418.
- [17] 管伟豆, 肖然, 李荣华, 等. 土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 969-977.
- Guan W D, Xiao R, Li R H, *et al.* Investigations on the derivation of a safe wheat-producing threshold of soil Cd content and classification of Cd contaminated wheat-producing areas in northern China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 969-977.
- [18] 管伟豆, 郭堤, 王萍, 等. 北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5958-5966.
- Guan W D, Guo D, Wang P, *et al.* Investigations on the derivation of safe maize-producing threshold of soil Cd content and on classification of Cd contaminated maize-producing areas in Northern China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5958-5966.
- [19] 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.
- [20] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东镉高背景区菜地土壤健康风险评价与基准[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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农用地土壤重金属生态安全阈值确定方法的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2019, **14**(4): 54-64.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Research progress in determination methods of ecological safety thresholds for heavy metals in agricultural land[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(4): 54-64.
- [24] 李勛之, 姜璐, 王国庆, 等. 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 577-585.
- Li X Z, Jiang R, Wang G Q, *et al.* A Comparative study of soil environmental standards for agricultural land among different countries and its implication for China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 577-585.
- [25] 周葆华, 胡睿鑫, 赵宽, 等. 皖江经济带土壤 Cd 空间分布特征与生态风险评价[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(12): 3261-3270.
- Zhou B H, Hu R X, Zhao K, *et al.* Spatial distribution characteristic of Cd in soils and its ecological risk assessment in the economic belt of Yangtze River in Anhui[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(12): 3261-3270.
- [26] 李子杰, 孟源思, 郑梦蕾, 等. 某流域农田土壤-水稻系统重金属空间变异特征及生态健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 957-968.
- Li Z J, Meng Y S, Zheng M L, *et al.* Spatial variability and ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil-rice system in a watershed of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 957-968.
- [27] 王茜, 张光辉, 田言亮, 等. 皖江经济区基本农田地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2016, **90**(8): 1988-1997.
- Wang Q, Zhang G H, Tian Y L, *et al.* The character and influencing factors of geochemical distribution in basic farmland of economic zone along Yangtze River in Anhui[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90**(8): 1988-1997.
- [28] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [29] 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.
- [30] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿农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 concentration 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.
- [31] 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] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [33] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 975-984.
- Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 975-984.
- [34] 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.
- [35] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [36] 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.
- [37] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual supplemental guidance[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S. EPA, 1989.
- [38] Li Y B, Fang F M, Wu M H, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in soil-rice system near Xinqiao mine in Tongling city, Anhui province, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, **24**(3): 743-753.
- [39] Liu Y M, Liu D Y, Zhang W, *et al.* Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113581.
- [40] US EPA. Exposure factors handbook[R]. Washington, DC: US EPA, 2011.
- [41] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [42] 周启星, 罗义, 祝凌燕. 环境基准值的科学研究与我国环境标准的修订[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(1): 1-5.
- Zhou Q X, Luo Y, Zhu L Y. Scientific research on environmental benchmark values and revision of national environmental standards in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(1): 1-5.
- [43] 张耀丹, 邱琳琳, 杜文超, 等. 土壤环境基准的研究现状及

- 展望[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, **53**(2): 209-217.
- Zhang Y D, Qiu L L, Du W C, *et al.* Current research and prospect of soil environmental criteria[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2017, **53**(2): 209-217.
- [44] 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.
- [45] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, **39**(2): 302-310.
- Chen X R, Chen F R, Jia S J, *et al.* Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui Province[J]. Geology in China, 2012, **39**(2): 302-310.
- [46] Karimi Nezhad M T, Tabatabaie S M, Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter impacted urban soils, Ahvaz, Iran [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **152**: 91-109.
- [47] 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.
- [48] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3127-3138.
- [49] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al.* Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of Southeast China: an integrated approach [J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 650-661.
- [50] Sharma S, Nagpal A K, Kaur I. Heavy metal contamination in soil, food crops and associated health risks for residents of Ropar wetland, Punjab, India and its environs[J]. Food Chemistry, 2018, **255**: 15-22.
- [51] 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 等. 闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 359-367.
- Lin C Q, Cai Y H, Hu G R, *et al.* Bioaccessibility and health risks of the heavy metals in soil-rice system of southwest Fujian Province[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 359-367.
- [52] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湖北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. 土壤学报, 2017, **54**(2): 410-420.
- Jiang Y J, Hu X F, Shu Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in the paddy fields-a case study of a town in the northern part of Hunan Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(2): 410-420.
- [53] Mao C P, Song Y X, Chen L X, *et al.* Human health risks of heavy metals in paddy rice based on transfer characteristics of heavy metals from soil to rice[J]. CATENA, 2019, **175**: 339-348.
- [54] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. Science of the Total Environment, 2002, **285**(1-3): 187-195.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 文典, 赵沛华, 陈楚国, 等. 珠三角典型区域蔬菜产地土壤Cd安全阈值研究[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(3): 603-609.
- Wen D, Zhao P H, Chen C G, *et al.* Study on safety threshold of soil cadmium in the vegetable producing areas of the Pearl River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(3): 603-609.

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 - _{8h} 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 Xue, 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)