

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区

吴松泽, 王冬艳, 李文博*, 王兴佳, 闫卓冉

(吉林大学地球科学学院, 长春 130000)

摘要: 农产品是重金属经土壤-作物系统危害人体健康的直接途径,其质量安全是我国粮食安全体系的重要组成部分。针对目前农田重金属分区研究对农产品考虑的不足,以农产品重金属累积特征及其导致的人体健康风险为指标,构建了基于农产品视角的农田重金属风险分区体系,同时以黑土地中重金属污染风险更高的城郊地带为研究区进行实例探讨。结果表明,农产品综合质量指数($IICQ_{AP}$)为1.09,整体呈重金属微弱累积状态且以Pb和Ni这两种元素的积累为主;人体健康风险高指数(Q_{HI})为0.61,即无风险;分区结果显示,研究区目前仅有无风险安全耕种区(89.45%)和少量低风险预警监控区(10.55%),建议分别对应采取优先保护和预警监控的策略,并从干预重金属向农产品方向富集、种植结构调整和适当进行原位钝化修复等手段对该区提出了具有实际参考价值的管控措施。本研究结果对于丰富农田重金属分区防治的内涵、加强黑土区农产品质量安全管理水平和制定黑土地城乡差别化农田分区防治策略等具有可探索的现实意义。

关键词: 城郊耕地; 黑土区; 重金属; 农田重金属风险分区; 农产品

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0454-09 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202104350

Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products

WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo*, WANG Xing-jia, YAN Zhuo-ran

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130000, China)

Abstract: Agricultural products are a primary pathway for humans to accumulate heavy metals (HMs) via the soil-crop system and should therefore be included as a crucial part of the food security in our country. Given that previous studies on protection zoning for preventing farmland HM pollution rarely considered agricultural products as a basic element, this study attempted to establish a zoning system for farmland HM prevention, which was based on the perspective of agricultural product pollution. We subsequently took a representative peri-urban area in the black soil region, which was provided with a higher risk of being polluted, as an empirical case. The results indicated that: ① the comprehensive quality index of agricultural products ($IICQ_{AP}$) was 1.09, illustrating only a mild HM pollution, with Pb and Ni having the highest accumulation levels; ② the human health risk index (Q_{HI}) was 0.61, showing no risk for human health; and ③ the designed zoning method revealed 89.45% of the farmlands to be risk-free at the moment and 10.55% of the farmlands to be under low risk of HM pollution in agricultural products. According to the zoning results, we suggested prioritized protection and an early-warning strategy, respectively, and further recommended prevention methods such as accumulation intervention, crop restructuring, and in-situ passivation. The results served to enrich the theoretical basis for preventing farmland HM pollution, to reinforce the management standards for agricultural products in the black soil region, and also to build a differentiated urban-rural farmland protection system.

Key words: peri-urban farmland; black soil area; heavy metals; risk zoning of heavy metals in farmland; agricultural products

农田污染防治是污染防治攻坚战的重要一环,也是保障我国口粮质量安全的重要基础^[1]。近年相继颁布的《土壤污染防治行动计划》和《中华人民共和国土壤污染防治法》等法律法规对农田重金属分区分级防控的主体思路进行了阐述^[1,2],科学地进行重金属分区分级防治不仅是提升污染防治管理水平的有效途径,也是未来农田管理工作的发展趋势^[3,4]。然而当前大多数农田重金属分区分级防治研究都仅以土壤重金属全量作为评价指标量化耕地重金属污染风险并提出管控策略^[5-7],忽视了农田所产出的农产品质量对农田生产状态的指示作用^[8]。有研究表明,农产品的污染状态并不一定与土壤重金属全量呈强相关^[9-12],如马宏宏等^[13]的研究对于广西碳酸盐区农田的土壤-作物污染评价结果显示,作物重金属累积现象明显低于土壤,存在As元素的土壤超标而作物未超标现象;敖明等^[14]关于都匀

市土壤-作物系统的重金属风险来源解析表明,作物和土壤重金属含量不呈明显相关且空间分布也没有明显的一致性;而秦越华等^[15]和叶脉等^[16]的研究中都出现了Pb元素的土壤样点未超标但作物中存在严重的重金属累积现象。可见,仅以土壤重金属全量表征农田重金属污染状态并不全面^[12,14],农产品作为人类经土壤-作物系统摄取重金属的最直接途径,其质量安全本应成为农田系统安全体系的重要组成部分^[8,15,16]。但现有研究缺乏对农产品重金属累积状态及其对人体健康风险的考量,这对科学客观评价区域污染现状、落实污染的分区分级防治和精确管理十分不利^[16,17]。

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071255, 42001223); 吉林省自然科学基金项目(20170101076JC)

作者简介: 吴松泽(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土地规划与资源利用, E-mail: wus2215@126.com

* 通信作者, E-mail: wb_li@jlu.edu.cn

东北黑土区是我国重要粮食产区,黑土区农田环境质量的优劣及其产出农产品的数量和质量安全直接关系到我国粮食战略安全的稳定^[18]。但随着该地区土地城镇化的快速发展,黑土区农田污染逐渐出现由工至农、由城至乡的趋势,环境质量退化的问题愈发严重,城郊地区已成为黑土地污染的热点区域^[19~21]。综上,本文尝试构建基于农产品视角的重金属风险预警分区管理体系,以黑土区典型城乡交错地带为研究区,依据农产品的重金属累积特征及其所形成的人体健康风险进行定量评价并划定分区提出管控建议。本研究可丰富农田污染分区分级防治的内涵,有助于夯实黑土区耕地质量建设在城郊这一薄弱环节,以期为保障黑土区农产品质量安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在吉林省中部狭义黑土区分布范围内,是位于长春市宽城区北侧的典型城乡交错带(15 km×16 km),自南向北逐渐由城市景观过渡为乡村景观,南部主要分布城市居民点、工业用地和交通道路等,北部则是以水田和旱地为主典型农耕地(图1)。前期研究结果表明^[22],研究区Cd、Cr、Ni、Cu、Zn和Pb这6种土壤重金属元素发生了明显的

累积现象,但少有样点超过农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018),土壤重金属含量多数呈现南部城市景观高于北部乡村景观的空间分异特征,其主要污染源包括农药和化肥的使用、交通排放与成土母质等。基于这一背景,本研究尝试从农产品视角构建评价体系并依此开展农田重金属分区研究,以验证该方法的重金属风险分区结果,同时考虑城乡耕地环境的差异,为制定黑土地城乡差别化防治策略提供指导。

1.2 样品采集与测试

研究区耕地资源以水田和旱地为主,采集农产品主要为水稻和玉米。样品采集依据网格采样在农田分布范围内均匀分布,共采集183个作物籽实样品(其中水稻样品31个,玉米样品152个)及其所对应土壤样品(图1)。将作物籽实蒸馏水清洗后烘干粉碎,过40目尼龙筛(DD2005-03),取0.5 g作物样品,加2 mL H_2O_2 + 5 mL HNO_3 微波消解(Multiwave PRO, 奥地利 Anton Paar)并定容。Cd、Cu、Pb、Ni和Zn元素含量用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, NexION 300X, 美国 PerkinElmer)测定;As和Hg的含量测定采用原子荧光光谱法(AFS230E, 北京海光);Cr的测定采用等离子体光谱法(ICP-OES, IRIS Intrepid II, 美国 Thermo Fisher Scientific)。土壤元素全量的测试方法同文献[22]。

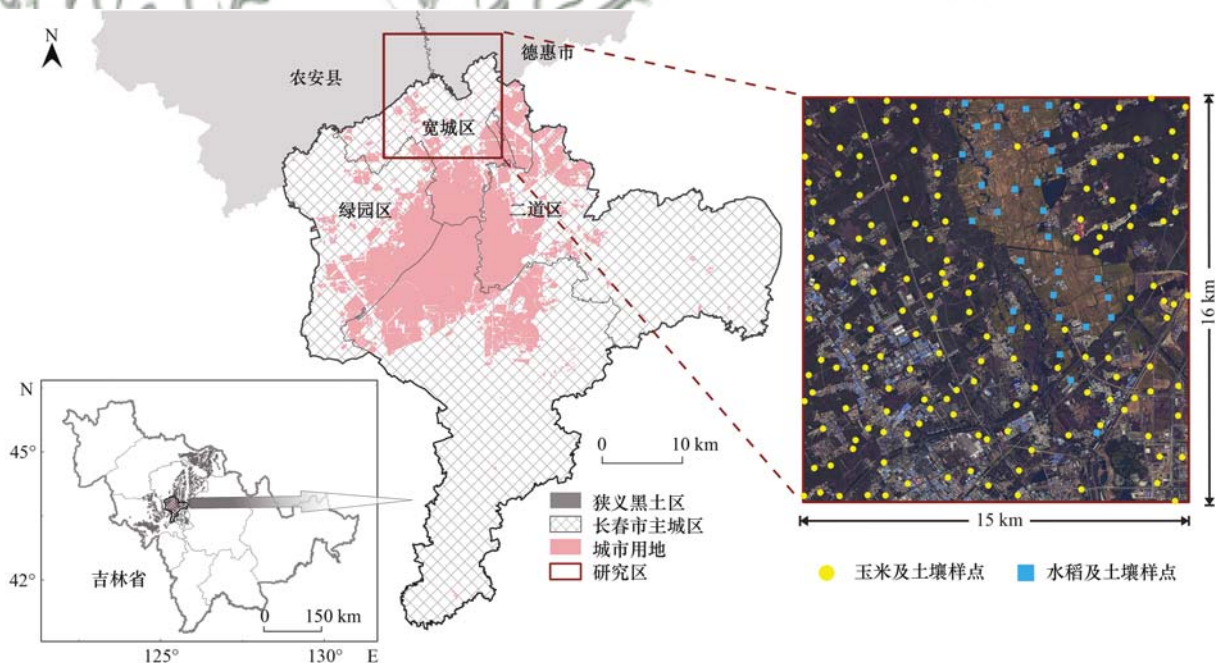


图1 研究区区位及采样点分布示意

Fig. 1 Study area and distribution of samples

1.3 其他数据来源

研究区土地利用现状数据解译自2017年高分一号的影像数据(2 m),主要通过目视解译获取研

究区地块尺度的旱地、水田、水体和工业用地等。由于研究区范围有限,全部地块均逐块验证,经土地变更调查数据校验,精度符合研究需求。

1.4 评价方法

1.4.1 农产品综合质量指数法

采用农产品综合质量指数法对作物累积特征进行评价,该方法考虑了农产品与土壤缓冲性(DDSB)及背景校正因子(k)间的关系,将土壤和农产品重金属含量有机地联系在一起,同时还考虑了作物系统多种重金属对农产品综合质量的复合影响^[23,24].

$$DDSB = \sum_{i=1}^N (C_{Si}/C_{Bi})^{1/n} \quad (1)$$

式中,DDSB 为总体上土壤标准偏离背景值的程度, C_{Si} 和 C_{Bi} 分别为土壤标准值与背景值, n 为元素在土壤中的稳定态的氧化数,As 和 Cr 元素 n 值分别为 5 和 3,其余元素 n 值为 2.

$$P_{Ai} = C_{APi}/C_{LSi} \quad (2)$$

表 1 农产品重金属累积等级划分方案

Table 1 Classification criteria and descriptions for the indexes of crop heavy metal accumulation

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
累积系数 (P_{Ai})	$0 < P_{Ai} \leq 1$	$1 < P_{Ai} \leq 2$	$2 < P_{Ai} \leq 3$	$3 < P_{Ai} \leq 5$	$P_{Ai} > 5$
农产品综合质量指数 ($IICQ_{AP}$)	$0 < IICQ_{AP} \leq 1$	$1 < IICQ_{AP} \leq 2$	$2 < IICQ_{AP} \leq 3$	$3 < IICQ_{AP} \leq 5$	$IICQ_{AP} > 5$
描述	清洁	微弱累积	轻度积累	中度积累	重度积累

1.4.2 目标危险系数法

采用目标危险系数法评价农产品摄入的人体健康风险,其中污染物日平均摄入量采用美国国家环保局推荐的 MMSOILS 模型^[26,27] 中的食物摄入暴露评价方程进行估算.此外由于重金属进入人体并不会完全被吸收,会使评价结果被高估,故本文考虑重金属被人体肠胃吸收的生物可给性^[28,29],进行生物利用效率的修正,使结果具有可比性.

$$C_{DI} = C_{APi} \cdot I \cdot E_D \cdot E_F \cdot BA / (W_{AB} \cdot T_A) \quad (4)$$

式中, C_{DI} 为污染物经农产品摄入的重金属元素日均摄取量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; I 为接触频率,稻米和玉米的摄入频率分别为 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[30]; E_D 为暴露区间,取 70 a ^[31,32]; E_F 为农产品摄食暴露频率,取值 $350 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; BA 为经肠胃吸收的重金属的生

式中, P_{Ai} 为农产品中重金属 i 的累积系数, C_{APi} 、 C_{LSi} 分别为农产品样品的元素 i 的实测值与限量标准.

$$IICQ_{AP} = Z \cdot \left(1 + \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_{Ai})^{1/n} \right] / N}{k} \right) + \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_{Ai})^{1/n} \right] / N}{k \cdot DDSB} \quad (3)$$

式中, $IICQ_{AP}$ 为农产品综合质量指数,其数值越大表明农产品多种重金属复合累积程度越强、污染风险越高; Z 为农产品污染物含量超过限量标准的元素数目; N 为测定元素的数目; k 为背景校正因子,参考以往农产品背景值测算研究确定 k 值取 5 ^[23,25].农产品重金属累积等级划分见表 1.

物可给性,参考文献^[29,32],各重金属生物可给性分别取 As: 53.88%、Hg: 43.62%、Cd: 72.86%、Cr: 11.29%、Ni: 55.68%、Cu: 59.96%、Zn: 69.51% 和 Pb: 77.85%; W_{AB} 为成年人平均体重,取值 56.8 kg ; T_A 为平均接触时间, $T_A = 365 \cdot E_D$ ^[30].

$$Q_{TH} = C_{DI} / \text{RfD} \quad (5)$$

式中, Q_{TH} 为单一重金属元素 i 的靶标危害系数, RfD 为口服参考剂量.

$$Q_{HI} = \sum_{i=1}^n Q_{THi} \quad (6)$$

式中, Q_{HI} 为高危指数,其数值越大表示多种重金属对人体健康的综合风险越大,区别于传统风险等级划分方式,对健康风险采取更为详细的等级划定(表 2).

表 2 人体健康风险等级划分方案

Table 2 Classification criteria and descriptions for the indexes of health risk

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级
靶标危害系数 (Q_{TH})	$0 < Q_{TH} \leq 1$	$1 < Q_{TH} \leq 3$	$3 < Q_{TH} \leq 7$	$Q_{TH} > 7$
高危指数 (Q_{HI})	$0 < Q_{HI} \leq 1$	$1 < Q_{HI} \leq 3$	$3 < Q_{HI} \leq 7$	$Q_{HI} > 7$
描述	无风险	微弱风险	中风险	高风险

1.4.3 评价标准限值

农产品综合质量土壤标准值参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中的风险筛选值,背景值参照吉林省土壤元素背景值,农产品重金属 Cu 和 Zn 临界值参照

《粮食中重金属元素含量限量国家标准》(NY 861-2004),Ni 元素临界值参考文献^[33],其余元素临界值参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)的相关限量标准.目标危险系数法 RfD 参数值中,依据 FAO/WHO 成人 Pb 周摄入参考

限值($25\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算得出 Pb 的 RfD 值为 $0.004\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,其余元素参考《污染场地风险评估技术导则(发布稿)》(HJ 25.3-2014)的口服参考剂量。

1.4.4 农产品视角的农田重金属风险分区

农产品累积特征及其人体健康风险是分别从农产品自身及其对人体危害视角衡量农产品安全状态的最直观指标.对农产品综合质量指数及高危指数评价结果进行排列组合与总结,将农田重金属风险分区划分为4个等级(表3),各分区内涵、特征及主要防治对策阐述如下。

I级无风险安全耕种区:农产品未发生重金属累积或累积程度十分微弱,且不会对人体健康产生风险,农产品质量指示当前农田产出状态健康,处无

风险安全水平,可采取优先保护策略。

II级低风险预警监控区:农产品存在一定的重金属累积或人体健康风险表明摄取该区农产品对人体健康存在微弱风险,农田虽未发生严重污染但其重金属累积的抬头态势表明农田生产状态存在轻微风险,建议对应采取预警监控的策略。

III级中风险重点管控区:农产品存在严重的重金属累积或对人体健康构成一定威胁,区域农产品环境质量处于中风险水平,产出农产品发生污染的可能性大,需及时采取重点管控措施。

IV高风险限制生产区:农产品重金属累积程度大,人体健康风险高,甚至可能存在慢性毒性,农产品安全受到极大的威胁,应尽快采取限制生产的措施。

表3 农田重金属风险分区划分方案¹⁾

Table 3 Classification criteria and descriptions for risk zones				
等级	I级无风险安全耕种区	II级低风险预警监控区	III级中风险重点管控区	IV高风险限制生产区
组合类型	G_{IICQ} 为 1 或 2 和 G_{HI} = 1	G_{IICQ} 为 3 或 4 和 G_{HI} 为 1; G_{IICQ} 为 1 或 2 或 3 或 4 和 G_{HI} 为 2	G_{IICQ} 为 1 或 2 或 3 或 4 和 G_{HI} 为 3; G_{IICQ} 为 5 和 G_{HI} 为 1 或 2	G_{IICQ} 为 5 和 G_{HI} 为 3; G_{HI} 为 4

1) G_{IICQ} 和 G_{HI} 分别表示农产品综合质量指数($IICQ_{AP}$)高危指数(Q_{HI})的等级

2 结果与分析

2.1 作物重金属累积特征

2.1.1 农产品重金属含量统计特征分析

统计性描述分析结果表明(图2),仅 Cr、Ni 和 Pb 这3种重金属部分点位含量超过限量标准,并以 Ni 和 Pb 两种元素的累积更为明显,其中水稻中 Ni 元素和玉米中 Pb 元素的平均含量分别为 $0.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过 Ni 元素卫生标准含量 $0.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[33] 及食品安全国家标准规定的 Pb 限量标准 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2762-2017),其余 As、Hg、Cd、Cu 和 Zn 这5种重金属所有点位重金属含量低于标准限值.与其他研究中传统农田采集农产品测定的重金属含量对比发现(表4),本研究城郊农田农产品重金属含量几乎明显高于传统农田农产品,特别是与更具参考意义的吉林中部黑土区传统农田采集的农产品相比较(由于该研究中仅采集玉米一种农产品,对比两研究玉米籽实重金属含量),除 Ni 元素含量相似外,其余重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别为:As(0.04 和 0.02)、Cr(0.34 和 0.10)和 Cu (1.39 和 0.99),城郊耕地农产品含量是传统农田农产品含量的 $1.4\sim 3.4$ 倍,说明在城郊农田所产出农产品更易发生重金属的累积.此外变异系数(CV)结果显示,除水稻中 Zn 元素变异系数属中等变异(17%)外,其余全部重金属元素 CV 值范围在 38%

$\sim 115\%$,均超过 36% ,属强变异^[14,34,35],重金属含量空间分布不均匀,受到显著的外部干扰。

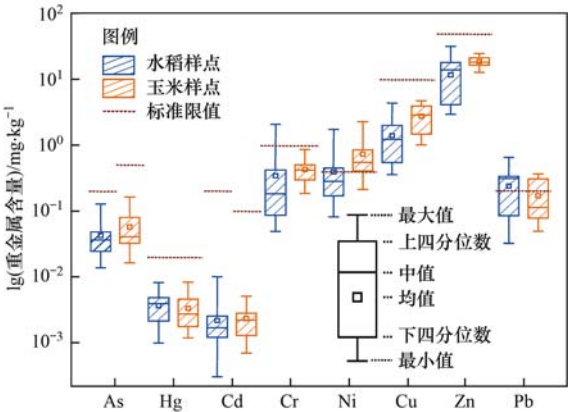


图2 研究区农产品重金属含量统计

Fig. 2 Statistical analysis of heavy metals in crops of the study area

2.1.2 农产品重金属累积评价结果

农产品8种重金属累积系数(P_{Ai})结果表明(图3),As、Hg、Cd、Cu 和 Zn 这5种重金属全部点位 P_{Ai} 值小于1,处清洁状态,Cr、Ni 和 Pb 这3种重金属元素累积程度相对较高,Cr 元素绝大部分点位处 I 级清洁,仅 6.55% 的点位处微弱累积或轻度累积;而 Ni 和 Pb 两种元素发生累积的点位等级分布情况为:微弱累积(23.63% 和 48.63%)、轻度累积(7.66% 和 2.19%)、中度累积(4.94% 和 2.19%),此外 Ni 元素 0.55% 点位达 V 级重度累积。

表 4 本研究区域农产品重金属含量与其他地区比较¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Comparison of contents of heavy metals in crops from different areas/mg·kg⁻¹

研究区位置	作物类型	$\omega(\text{As})$	$\omega(\text{Hg})$	$\omega(\text{Cd})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Ni})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Zn})$	$\omega(\text{Pb})$	文献
长春市城郊农田	水稻	0.06	3.32 *	2.33 *	0.43	0.73	2.76	18.62	0.17	本研究
三江平原传统农田	水稻	0.10	2.20 *	2.50 *	0.10	0.30	2.63	16.64	0.01	[18]
河南焦作传统农田	水稻	0.07	—	4.60 *	0.38	0.44	—	—	0.03	[31]
长春市城郊农田	玉米	0.04	3.69 *	2.17 *	0.34	0.39	1.39	11.75	0.24	本研究
吉林中部传统农田	玉米	0.02	—	—	0.10	0.39	0.99	—	—	[20]
三江平原传统农田	玉米	0.02	0.90 *	2.50 *	0.13	0.37	1.26	19.26	0.01	[18]
河南焦作传统农田	玉米	0.01	—	0.01 *	0.09	0.09	—	—	0.04	[31]

1) * 表示该数值单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

农产品综合质量指数(IICQ_{AP})评价结果显示,研究区农产品 IICQ_{AP} 范围在 0.01 ~ 3.56 之间,平均 IICQ_{AP} 值为 1.09. 采用 IDW 方法对研究区农产品综合质量指数进行空间化[图 4(a)],据结果推测:研究区农产品处 I ~ IV 级累积的贡献率依次为 28.10%、67.63%、4.00% 和 0.27%,整体呈微弱累积状态,且在研究区北侧的水田分布区与西南侧兰家镇工业园区附近出现了较明显的高累积现象. 依据当前的农产品重金属累积状态,研究区并未出现严重的农田重金属污染现象,但存在一定程度的累积态势,可能会存在人体健康风险.

2.2 农产品摄入的健康风险评价

对农产品摄入的健康风险进行评价,经食物摄取考虑肠胃吸收效率的健康风险评价结果显示(图 5):仅 As 元素有极少量(1.09%)的点位 Q_{TH} 略超阈值,其余各重金属全部点位的 Q_{TH} 值均小于 1,且

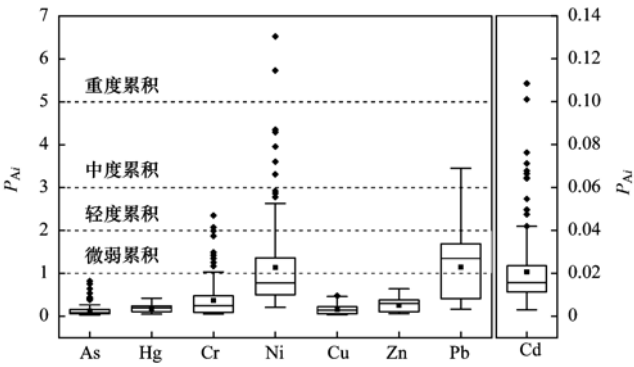


图 3 农产品重金属累积特征

Fig. 3 Accumulation characteristics of heavy metals in crops

Q_{TH} 平均值远小于 1,总体来看各重金属经农产品直接摄取不会对健康产生风险. 各重金属风险值的贡献率中以 As(39.59%) 和 Pb(20.65%) 为最大. 值得注意的是 As 元素并不是在农产品累积中占主导地位的元素,As 在人体中较强的生理毒性是导致其

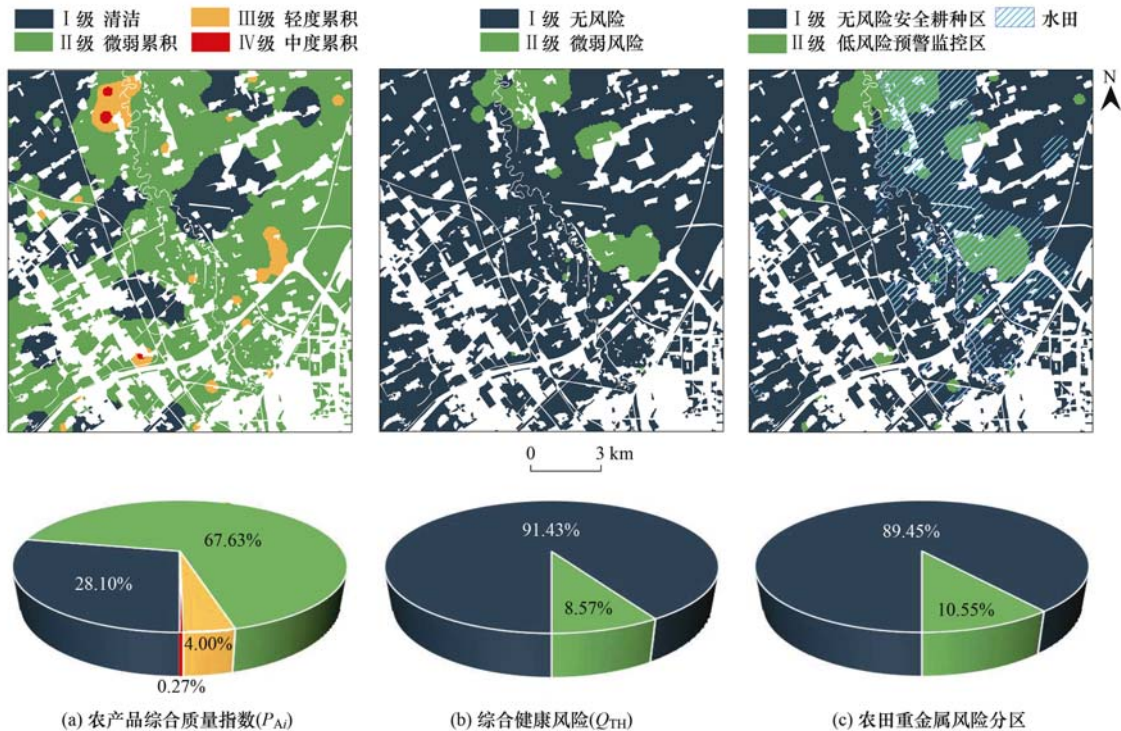


图 4 研究区空间化成果

Fig. 4 Spatial distributions in study area

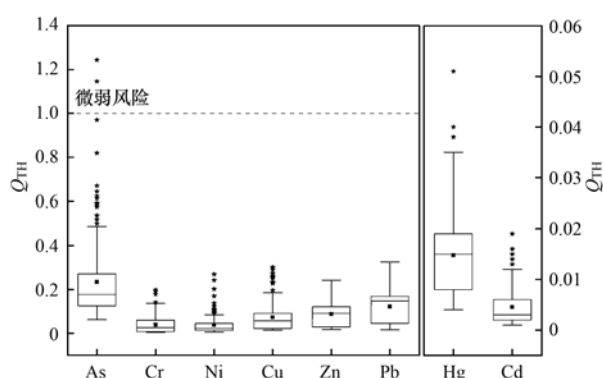


图5 人体健康风险评价结果

Fig. 5 Health risk assessment of heavy metals by intaking crops

人体健康风险高的主要原因^[32].

多种重金属对人体的综合健康风险(Q_{HI})范围在0.3~2.02之间,平均 Q_{HI} 为0.61,总体来看,摄入研究区农产品不会对健康产生风险或风险极其微弱,对健康风险进行空间化,结果显示[图4(b)]:91.43%地区属一级无风险;仅8.57%耕地处于二级微弱风险.经查明,处于二级微弱风险的样点大多位于水稻种植区.

2.3 农产品重金属风险分区

基于农产品重金属累积特征及其人体健康风险评价结果划定的农田重金属风险分区结果表明[图4(c)]:研究区仅存在Ⅰ级无风险安全耕种区和Ⅱ级低风险预警监控区,分别占比为89.45%和10.55%.Ⅰ级无风险安全耕种区广泛分布于研究区大部分地区,而Ⅱ级低风险预警监控区在空间分布上主要表现为呈较大规模集中分布在伊通河沿岸水稻田范围内或其周边区域.此外玉米可食部分虽较其他作物而言重金属累积程度相对较低,但在城镇化作用下,靠近城市一侧的兰家镇工业园区附近玉米田仍出现了少量的低风险预警监控区.

2.4 农产品重金属相关性特征

重金属经土壤向农产品迁移和累积是其进入食物链的重要途径^[29],引入农产品富集系数(作物籽实重金属含量与土壤全量之比),各重金属的富集系数分别为: 0.005 ± 0.003 (As)、 0.108 ± 0.074 (Hg)、 0.019 ± 0.019 (Cd)、 0.006 ± 0.006 (Cr)、 0.017 ± 0.017 (Ni)、 0.072 ± 0.055 (Cu)、 0.198 ± 0.122 (Zn)和 0.010 ± 0.006 (Pb),农产品富集重金属能力大小: $Zn > Hg > Cu > Cd > Ni > Pb > Cr > As$.农产品对Zn、Hg和Cu的富集系数较高,其中Zn和Cu是作物生长发育的必需营养元素^[29,36],而尽管作物对土壤中Hg具有很强的富集能力^[14,37],但目前研究区农产品平均 $\omega(Hg)$ ($0.004 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)远远低于食品安全国家标准($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2017).此外农产品对Pb、Cr和As这3种重金属的

富集系数较低,原因在于这3种重金属在土壤中大部分都以残渣态的形式存在^[13,16],不易被生物利用.

另对土壤全量和籽实含量以及籽实含量之间进行Pearson双变量相关性分析,结果显示土壤和作物中同一种重金属含量之间没有显著相关性,与前人的研究结果一致^[13,16,38],籽实中重金属含量可能受土壤重金属赋存形态、土壤理化环境和作物重金属富集能力等多因素决定^[29,39].而不同重金属作物籽实含量的Pearson相关性分析结果显示,作物籽实中Pb和Hg在0.01水平(双侧)存在显著的相关性(0.578),说明Pb和Hg可能具有协同变化的关系^[14],已有研究表明作物Pb和Hg的来源除根系吸收外,大气干湿沉降也是其主要的来源途径^[15,40],且研究区位处城乡交错地带,近城市侧广泛分布交通用地及物流仓储用地,因此农产品中Pb累积的主要来源很有可能来自汽车尾气排放.此外Pb和Hg与其余重金属间均不存在明显的相关性,而其余6种重金属间普遍存在0.01水平上的显著相关性.另分析在农产品重金属累积中同样占主导地位Ni元素的来源,Ni元素与Cu和Zn之间的相关系数分别在0.01水平上达0.752和0.409,呈显著相关,而这3种元素又通常被认为是农业活动源的标志元素^[40],因此推测农产品中Ni元素累积异常高点主要受农业活动影响.另外目前有关Ni元素的国家食品卫生标准仅有油脂及其制品的限量值($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2012),而本次Ni元素的限量标准参考的是以往研究中的粮食探讨值($0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),相对更加严格,导致农产品中Ni元素的累积程度整体偏高.

3 讨论

针对目前研究区存在的Ⅰ级无风险安全耕种区建议采取优先保护的策略,以维持其安全稳定的农田产出状态.针对现存的部分Ⅱ级低风险预警监控区,建议积极采取预警监控的策略:首先要加强区域农产品和土壤环境的协同监测,其次可以选择种植同种作物的重金属低累积品种^[41,42],适当地通过调节土壤pH、提高阳离子交换量和改变氧化还原电位等手段干预重金属向农产品方向的富集^[43,44].此外针对伊通河流域的低风险区做进一步风险来源调查,若该区风险来源确由伊通河污灌导致且短时间内难以有效治理,则可以考虑“水改旱”进行耕作制度调整^[45,46].

研究区目前不存在中风险重点管控区和高风险限制生产区,但是本研究目前考虑的谷物类作物相

对于蔬菜具有较低的重金属累积效率,而素有“城市菜篮子”之称的城郊耕地一旦变更种植类型为蔬菜,则可能会导致农田风险由低转变为中甚至高风险.若农田重金属风险达Ⅲ级说明农产品安全受到了一定威胁,应采取重点管控的措施:积极选取适宜的低累积品种或调整作物种植结构^[43,45],同时联合钝化修复,通过调节农田理化环境使重金属发生沉淀、吸附、拮抗等效应降低重金属有效量,再结合适宜的农艺措施如水分处理、秸秆还田或是植物修复^[47]等方式进行治理^[43],减少重金属对农产品的胁迫^[48].若区域已达四级高风险可考虑对区域进行生产限制,相对弱化城郊高风险黑土地的生产功能,退耕还林还草,甚至调整为非农用地,强调黑土地的生态功能、景观功能和娱乐文化功能,以确保重金属元素不会经由农产品威胁人体健康.

综上所述,由于土壤中重金属具有隐蔽性和滞后性等特点以及重金属在土壤-作物-人体各个环节的毒性响应特征不同,土壤重金属全量与农产品中作物累积量并不具有较好的相关性,这再一次印证了当前仅以土壤重金属风险划定农田风险管控区在精准对应农产品风险方面存在偏差^[16].而有关农田重金属分区防治的内涵,越来越多的专家学者提出不仅要关注土壤环境质量,也要关注农产品安全^[8].至此,本文提出了农产品视角的农田重金属分区防治划定方法及相应策略,以期弥补农田分区防治在保障农产品安全及反映农田生产状态的不足.最后在实际农田风险评价与分区整治中,可将土壤与农产品效应做关联评价,结合传统土壤重金属分区与本文探讨的农产品分区全面开展农田的重金属风险分区、分级整治工作.

4 结论

(1)研究区农产品重金属累积特征显示,仅Cr、Ni和Pb 3种重金属分别有6.55%、36.78%和53.01%的点位存在不同程度的重金属累积,且以Ni和Pb元素的重金属累积程度更高,农产品综合质量指数(IICQ_{AP})为1.09,研究区农产品整体呈重金属微弱累积状态.

(2)人体健康风险评价结果显示,仅As元素存在1.09%的点位靶标危害系数(Q_{TH})略超阈值,其余重金属全部点位的 Q_{TH} 值远小于1,多种重金属高危害系数(Q_{HI})为0.61,即无风险.

(3)农产品重金属风险分区结果表明,研究区大部分耕地属无风险安全耕种区(89.45%),仅少量耕地(10.55%)因轻至中度的重金属累积或微弱健康风险划入低风险预警监控区,建议分别采取优

先保护与预警监控策略,可从适当调整种植结构和干预重金属向农产品方向富集等手段进行积极可行的农田治理.

参考文献:

- [1] 郭书海,吴波,李宝林,等.中国土壤环境区划——原理、方法与实践[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 骆永明,滕应.我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J].中国科学院院刊,2018,33(2):145-152.
Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 145-152.
- [3] 刘作新,谷健.我国土壤环境功能区划内涵及其框架[J].土壤,2014,46(3):389-393.
Liu Z X, Gu J. Concept and framework of soil environmental function regionalization in China[J]. Soils, 2014, 46(3): 389-393.
- [4] 王琦,李芳柏,黄小追,等.一种基于风险管控的稻田土壤重金属污染分级方法[J].生态环境学报,2018,27(12):2321-2328.
Wang Q, Li F B, Huang X Z, et al. A classification approach of heavy metal pollution of paddy soil based on risk management [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(12): 2321-2328.
- [5] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [6] 徐夕博,吕建树,徐汝汝.山东省沂源县土壤重金属来源分布及风险评价[J].农业工程学报,2018,34(9):216-223.
Xu X B, Lü J S, Xu R R. Source spatial distribution and risk assessment of heavy metals in Yiyuan county of Shandong province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 216-223.
- [7] 郑晴之,王楚栋,王诗涵,等.典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价:以临安市为例[J].环境科学,2018,39(6):2875-2883.
Zheng J Z, Wang C D, Wang S H, et al. Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an city and its potential risk evaluation[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2875-2883.
- [8] 刘霏珈,吴克宁,罗明,等.农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区[J].农业工程学报,2016,32(23):254-262.
Liu P J, Wu K N, Luo M, et al. Evaluation of agricultural land soil heavy metal elements exceed standards and safe utilization zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23): 254-262.
- [9] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,艾尼瓦尔·买买提,阿吉古丽·马木提,等.新疆焉耆盆地农田土壤重金属污染及健康风险评价[J].生态毒理学报,2018,13(2):171-181.
Eziz M, Mohammad A, Mamut A M, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of farmland soils of Yanqi basin in Xinjiang Province[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2): 171-181.
- [10] Cherfi A, Achour M, Cherfi M, et al. Health risk assessment of heavy metals through consumption of vegetables irrigated with reclaimed urban wastewater in Algeria[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 245-252.
- [11] 周亚龙,杨志斌,王乔林,等.雄安新区农田土壤-农作物系

- 统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an new district[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [12] 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 等. 广西典型岩溶区农田土壤-作物系统Cd迁移富集影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1514-1522.
- Ma H H, Peng M, Guo F, *et al.* Factors affecting the translocation and accumulation of cadmium in a soil-crop system in a typical karst area of Guangxi province, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1514-1522.
- [13] 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.
- [14] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(6): 198-205.
- Ao M, Chai G Q, Fan C W, *et al.* Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(6): 198-205.
- [15] 秦越华, 强承魁, 曹丹, 等. 徐州市典型稻区土壤和稻米重金属含量及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- Qin Y H, Qiang C K, Cao D, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in soils and rice grains from typical rice-growing region of Xuzhou city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- [16] 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.
- [17] 史文娇, 王宗, 吴溪. 三江源生态畜牧业有机产品产地环境质量评价[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(7): 209-217.
- Shi W J, Wang Z, Wu X. Evaluation of environmental quality for organic production areas in ecological animal husbandry of Sanjiangyuan [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(7): 209-217.
- [18] 周涛, 苏小四, 宋铁军, 等. 三江平原典型农作区作物籽粒重金属健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2018, **35**(10): 896-899.
- Zhou T, Su X S, Song T J, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in seeds of different crops in typical agricultural area of Three River Plain[J]. *Journal of Environment and Health*, 2018, **35**(10): 896-899.
- [19] 刘媚媚, 高凤杰, 韩晶, 等. 黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析[J]. 中国农业大学学报, 2020, **25**(11): 12-21.
- Liu M M, Gao F J, Han J, *et al.* Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a Mollisol watershed of China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, **25**(11): 12-21.
- [20] 余丹. 吉林黑土区耕地土壤重金属元素转化富集效率及其对耕地利用的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [21] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- He B, Zhao H, Wang T Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- [22] Zhu Y L, Wang D Y, Li W B, *et al.* Spatial distribution of soil trace element concentrations along an urban-rural transition zone in the black soil region of northeastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(7): 2946-2956.
- [23] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(7): 1225-1232.
- Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A new approach for evaluating soil heavy metal impact: a comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1225-1232.
- [24] 陆素芬, 张云霞, 余元元, 等. 广西南丹土壤-玉米重金属积累特征及其健康风险[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(8): 706-714.
- Lu S F, Zhang Y X, Yu Y Y, *et al.* Characteristics of heavy metal accumulation in soil-corn system contents and their health risks in Nandan, Guangxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(8): 706-714.
- [25] 农业环境背景值协作组. 我国十三省(市)主要农业土壤及粮食作物中有害元素环境背景值研究[J]. 农业环境科学学报, 1986, (3): 1-11.
- [26] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [27] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [28] 徐笠, 刘洋, 杨婧婧, 等. 利用体外实验方法评估稻米中镉的生物可给性和健康风险[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(5): 219-226.
- Xu L, Liu Y, Yang J J, *et al.* Bioaccessibility of cadmium in rice and its health risk assessment by in vitro method [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(5): 219-226.
- [29] 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.
- [30] US EPA. Exposure factors handbook 2011 edition (final report) [R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2011.
- [31] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 豫北典型农田作物中重金属污染状况及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(8): 1351-1358.
- Ma B J, Wang H L, Li X C, *et al.* Pollution of heavy metals in typical crops of northern Henan province and health risk

- assessment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23** (8): 1351-1358.
- [32] 李继宁, 侯红, 魏源, 等. 株洲市农田土壤重金属生物可给性及其人体健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26** (10): 1139-1146.
- Li J N, Hou H, Wei Y, *et al.* Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil from Zhuzhou, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(10): 1139-1146.
- [33] 傅逸根, 胡欣, 俞苏霞. 食品中镍限量卫生标准的研究[J]. 浙江省医学科学院学报, 1999, (37): 9-11.
- Fu Y G, Hu X, Yu S X. Study on the tolerance limit of nickel in foods[J]. Acta Academiae Medicinae Zhejiang, 1999, (37): 9-11.
- [34] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [35] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于PMF模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(9): 185-192.
- Imin B, Abliz A, Shi Q D, *et al.* Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of eastern Junggar coalfield based on PMF model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(9): 185-192.
- [36] Zhang H, Feng X B, Larssen T, *et al.* Bioaccumulation of methylmercury versus inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) grain[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44** (12): 4499-4504.
- [37] Zhang J R, Li H Z, Zhou Y Z, *et al.* Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 710-719.
- [38] 韩娟英, 张宁, 舒小丽, 等. 水稻对重金属的吸收特性及其影响因素[J]. 中国稻米, 2018, **24**(3): 44-48, 54.
- Han J Y, Zhang N, Shu X L, *et al.* Absorption of heavy metals in rice and the influence factors[J]. China Rice, 2018, **24**(3): 44-48, 54.
- [39] 王腾云, 周国华, 孙彬彬, 等. 福建沿海地区土壤-稻谷重金属含量关系与影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2016, **35**(3): 295-301.
- Wang T Y, Zhou G H, Sun B B, *et al.* The relationship between heavy metal contents of soils and rice in coastal areas, Fujian province, including influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, **35**(3): 295-301.
- [40] 李保杰, 王思宇, 周生路, 等. 田块尺度下农田重金属污染特征及其源汇关系响应解析[J]. 农业工程学报, 2018, **34** (6): 204-209.
- Li B J, Wang S Y, Zhou S L, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and its response of source-sink relationship in agricultural soil at field scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(6): 204-209.
- [41] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对Cd、Pb、As积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1867-1875.
- Du C Y, Yu X F, Du J L, *et al.* Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of zeamays[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(9): 1867-1875.
- [42] Guo X F, Wei Z B, Wu Q T, *et al.* Cadmium and zinc accumulation in maize grain as affected by cultivars and chemical fixation amendments[J]. Pedosphere, 2011, **21**(5): 650-656.
- [43] 肖蓉, 聂园军, 曹秋芬, 等. 中、轻度重金属污染农田的特征及治理[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(33): 101-106.
- Xiao R, Nie Y J, Cao Q F, *et al.* Farmland contaminated by moderate and mild heavy metal pollution: characteristics and abatement strategies[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(33): 101-106.
- [44] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9): 1846-1853.
- Liu W T, Zhou Q X. Effectiveness of different soil ameliorants in reducing concentrations of Cd and Pb in Chinese cabbage[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(9): 1846-1853.
- [45] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(2): 153-159.
- Xu J M, Meng J, Liu X M, *et al.* Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 153-159.
- [46] 陈亮妹, 李江遐, 胡兆云, 等. 重金属低积累作物在农田修复中的研究与应用[J]. 作物杂志, 2018, (1): 16-24.
- Chen L M, Li J X, Hu Z Y, *et al.* Review on application of low accumulation crops on remediation of farmland contaminated by heavy metals[J]. Crops, 2018, (1): 16-24.
- [47] Wang P, Deng X J, Huang Y A, *et al.* Comparison of subcellular distribution and chemical forms of cadmium among four soybean cultivars at young seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(24): 19584-19595.
- [48] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 等. 植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究[J]. 环境科学, 2014, **35** (11): 4305-4312.
- Wei Z B, Guo X F, Wu Q T, *et al.* Continuous remediation of heavy metal contaminated soil by co-cropping system enhanced with chelator[J]. Environmental Science, 2014, **35** (11): 4305-4312.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)