

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文桦, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以 Cd 为例

王锐^{1,2,3}, 张风雷^{1,2}, 徐姝姝^{1,2,4}, 张永文^{1,2,5}

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038; 3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044; 5. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

摘要:《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)给出了我国土壤环境质量的风险筛选值,但由于不同地区土壤组分及理化性质等方面的差异,使得该值对某些地区存在局限性。基于《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中给出的农作物中污染物的限值,以渝东南主要农耕地土壤中 Cd 为例、元素生物有效态的含量为基础划分建议筛选值。此方法可为重金属生物有效性较高、较低或 Se 元素含量丰富等典型地区完善土壤重金属及健康元素阈值提供借鉴和参考。

关键词: Cd; 国家标准; 污染风险筛选值; 建议筛选值; 参考

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5082-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904132

Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example

WANG Rui^{1,2,3}, ZHANG Feng-lei^{1,2}, XU Shu-shu^{1,2,4}, ZHANG Yong-wen^{1,2,5}

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. College of Resources and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618-2018) provides the risk screening value of soil environmental quality in China; however, because of differences in soil composition, and physical and chemical properties in different regions, this value has limitations for certain regions. Based on the limits of pollutants in crops given in the National Food Safety Standards Limits of Pollutants for Foods (GB 2762-2017), and using Cd in the soil of the main farming areas in southeastern Chongqing as an example, the content of the elemental biological effective state was determined for the suggested screening value. This method can provide a reference and method for improving the heavy metal and healthy element thresholds of soils with high or low bioavailability, and that are rich in Se content, among other factors.

Key words: Cd; national standard; pollution risk screening value; suggested screening value; reference

土壤作为一种不可再生的自然资源,是人类生存和发展的基础^[1~4]。随着社会经济的发展,城市化进程不断加快,重金属污染对人类健康和经济发展的影响不断加剧^[5~7]。由于土壤重金属具有难降解、隐蔽性高、易被富集和可以通过食物链进入人体等特点,土壤重金属污染成为近些年来国内外研究的热点问题之一^[8~12]。

土壤中重金属的主要来源有自然来源和人为来源。有研究表明,重金属的自然来源主要与成土过程密切相关,重金属主要来自于对母岩的继承,人为来源主要与人类活动相关,包括农业活动和工业活动等,农业活动主要包括农药和化肥的使用,采矿等工业行为也会加快重金属向土壤中迁移的速率^[13~16]。重金属元素不仅会影响植物的生长,也会通过土壤-农作物发生迁移转换进入食物链中,从而影响人类健康^[17,18]。土壤酸碱度会影响重金属元素的生物有效性,土壤呈酸性时,会促进土壤

中一些以碳酸盐、氢氧化物等形式存在的重金属元素溶解,生物有效性提高^[19~21]。

土壤污染风险筛选值是指农用地土壤中污染物含量等于或者低于该值的,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低,一般情况下可以忽略;超过该值的,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,原则上应当采取安全利用措施。土壤污染风险筛选值对土地质量评价、生态评估以及土地安全区划及安全利用均具有重要意义,《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[22]给出了我国土壤环境质量

收稿日期: 2019-04-13; 修订日期: 2019-05-24

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范项目(社会民生类重点研发项目)(cstc2018jsex-mszd0617); 重庆市科技项目(KJ-2018034)

作者简介: 王锐(1994~),男,硕士,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 1372661182@qq.com

的风险筛选值, 但由于不同地区土壤组分及理化性质等方面的差异, 使得该值对某些地区存在局限性. 本文提出划分建议筛选值方法, 以期完善区域土壤重金属及健康元素阈值提供借鉴和参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于重庆市东南部, 包括秀山、酉阳以及黔江部分区域(图 1). 研究区分布有震旦系、

寒武系、二叠系和三叠系碳酸盐岩及砂岩、泥岩和板岩, 以喀斯特地貌为主, 其间分布有流水侵蚀形成的低山和丘陵. 主要土壤类型包括黄壤、石灰岩土及黄棕壤. 气候属于亚热带湿润季风气候, 年平均气温 14 ~ 16℃, 年平均降水量为 1 000 ~ 1 350 mm, 降水多集中在 5 ~ 9 月, 占全年总降水量的 70% 左右, 年平均相对湿度多在 70% ~ 80%, 年日照时数 1 000 ~ 1 400 h, 日照百分率仅为 25% ~ 35%, 冬、春季日照更少, 仅占全年的 35% 左右.

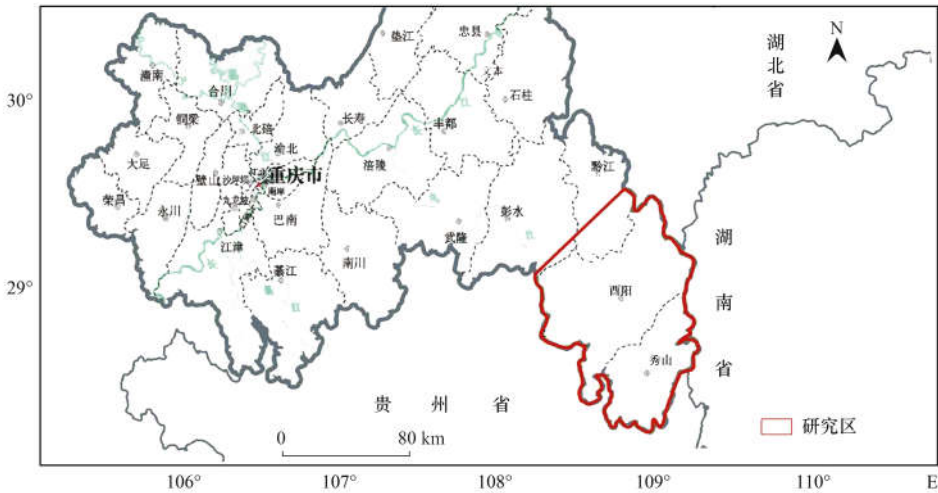


图 1 研究区地理位置示意
Fig. 1 Location map of the study area

1.2 采样方法与分析测试

采集研究区主要大宗农作物, 包括水稻、玉米, 采用星形法和蛇形法等方法, 进行多植株混合采样. 在农作物样品同点位采集根系土样品, 多株农作物根系土充分混合均匀后, 四分法留取 1.0 ~ 1.5 kg 装入样品袋.

土壤样品在自然条件下阴干, 在此过程中要经常揉搓样品, 以免胶结, 并去除土壤中的砾石以及植物根系. 晾干后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打, 以便使土壤样品恢复至自然粒级状态. 样品晾干后用尼龙筛截取 2 mm(10 目)粒级的样品装聚四氟乙烯样瓶, 送实验室进一步处理以便测试. 农作物样品在无污染、无扬尘、通风的条件下自然风干后, 脱粒, 送至实验室进一步处理. 各类样品分析测试由重庆市地质矿产测试中心完成.

分析测试方法参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[23]和《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T0279-2016)^[24], 选择使用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd 元素; 离子选择性电极法(ISE)测定 pH. 按照规范的要求, 本次样品分析方法的最低检出限均等于或优于相关规定(表 1).

样品分析测试过程中采用国家一级标准物质

(GBW07405、GBW07407、GBW07447、GBW07449、GBW07451、GBW07452、GBW07453 和 GBW07455)的测试结果进行准确度(相对误差, RE)检验. 随机抽样分析(数量为每批次试样数的 20% ~ 30%)进行精密度检验. 样品分析测试结果符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[23]要求, 数据质量可靠.

表 1 指标分析方法检出限

Table 1 Detection limit of indicator analysis method				
指标	分析方法	要求检出限	检出限	测定范围
Cd/mg·kg ⁻¹	ICP-MS	0.03	0.02	0.02 ~ 4.0
pH	ISE	0.10	0.10	0.10 ~ 14.0

土壤 Cd 形态分析包括水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态、强有机结合态以及残渣态. 土壤 Cd 形态分析采用七步法进行, 前处理方法分别为, 水溶态 2.500 0 g 样 25 mL 水提取; 离子交换态利用 25 mL MgCl 溶液提取; 碳酸盐结合态利用 25 mL NaAc 溶液提取; 腐殖酸结合态利用 50 mL Na₄P₂O₇ 溶液提取; 铁锰氧化态利用 25 mL HONH₃Cl 溶液提取; 强有机结合态利用 8 mL H₂O₂-HNO₃ 溶液恒温水浴提取; 残渣态利用 HNO₃-HClO₄ 溶解, 经处理的样品利用 ICP-

AES 法进行形态分析.

Cd 形态分析精密度控制:按照样品总数的 50% 随机抽取重复样,基本样品与重复样一同分析,计算相对方差(RD),形态检查分析监控限见表 2. 元素形态分析的合格率大于 85%,符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[23]要求.

表 2 形态检查分析监控限

Table 2 Morphological examination of the analysis of monitoring limits	
含量范围	RD/%
≤3 倍方法检出限	80
>3 倍方法检出限	60

农作物样品所测指标为 Cd 元素含量. 准确度控制:每一批样品插入同类型标准物质 1~2 个与样品同时分析,并计算单个样品单次测试值的相对误差,要求相对误差≤30%. 精密度控制:采用重复分析的方法控制样品分析的精密度,每件样品进行重复分析,双份分析的相对双差≤30%.

数据处理方法:数据整理利用 Excel 完成,图件绘制利用 CorelDRAW12、ArcGIS10.2 和 IBM SPSS Statistics 20 完成.

1.3 研究方法

土壤污染物建议筛选值确定方法如图 2 所示,

表 3 GB 15618-2018 给出的水田土壤 Cd 污染风险筛选值

Table 3 Screening value of Cd pollution risk in paddy soil given by GB 15618-2018				
项目	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
筛选值/mg·kg ⁻¹	0.3	0.4	0.6	0.8

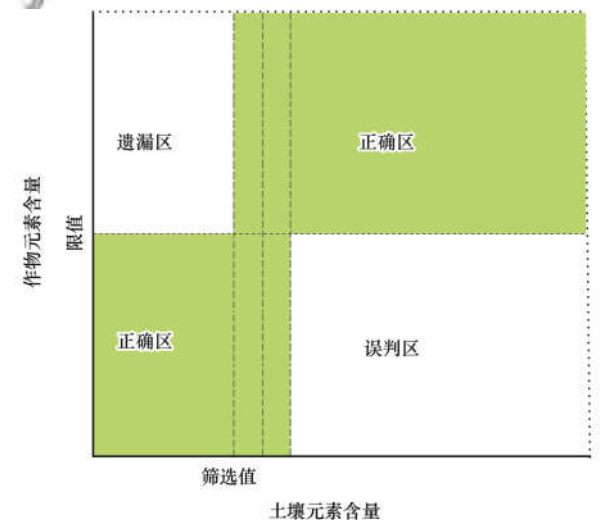


图 2 土壤污染物筛选值确定方法示意

Fig. 2 Schematic diagram of the method for determining the screening value of soil pollutants

结果显示,土壤 pH≤5.5 时,以土壤污染风险值等于 0.3 mg·kg⁻¹ 进行统计,正确率、误判率和遗漏率分别为 33.8%、58.5% 和 7.7%. 逐步提高土壤污染风险筛选值,分别取 0.4、0.5、0.6 和 0.7

在既定土壤污染风险筛选值下,土壤不超标且农作物不超标以及土壤超标且农作物超标的区域即为正确区,土壤不超标但农作物超标的区域即为遗漏区,土壤超标但农作物不超标的区域即为误判区. 分别统计在不同筛选值下,落入正确区、遗漏区、误判区的点数,得到落入正确区点数最多的筛选值,即为建议筛选值. 根据研究区农作物种植情况,将玉米作为旱地主要大宗农作物,水稻为水田主要大宗农作物进行研究.

2 结果与分析

2.1 土壤 Cd 筛选值的划分

2.1.1 水田土壤 Cd 筛选值的划分

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[22]针对水田以土壤 pH 为 5.5、6.5 和 7.5 划分出 4 个区间,分别给出了不同土壤 pH 区间土壤 Cd 的污染风险筛选值(表 3),结合《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[25]给出的水稻中 Cd 限值 0.2 mg·kg⁻¹,划分出不同土壤 pH 区间土壤 Cd 污染风险建议筛选值. 投点结果见图 3,统计结果见表 4 和图 4.

表 4 不同土壤 pH 值对应的正确区、遗漏区和误判区样品数

Table 4 Number of correct, missing, and misrepresented samples corresponding to different soil pH values				
土壤 pH 值	土壤污染 风险筛选值 /mg·kg ⁻¹	正确区样 本数/件	误判区样 本数/件	遗漏区样 本数/件
pH≤5.5 (n=65)	0.3	22	38	5
	0.4	29	28	8
	0.5	25	26	14
	0.6	24	23	18
	0.7	23	22	20
5.5<pH≤6.5 (n=99)	0.4	36	56	7
	0.5	44	44	11
	0.6	48	37	14
	0.7	65	18	16
	0.8	61	16	22
6.5<pH≤7.5 (n=75)	0.6	39	34	2
	0.7	49	21	5
	0.8	52	16	7
	1.0	54	13	8
	2.0	65	1	9
pH>7.5 (n=46)	0.8	31	14	1
	1.0	35	9	2
	2.0	41	3	2
	3.0	42	2	2

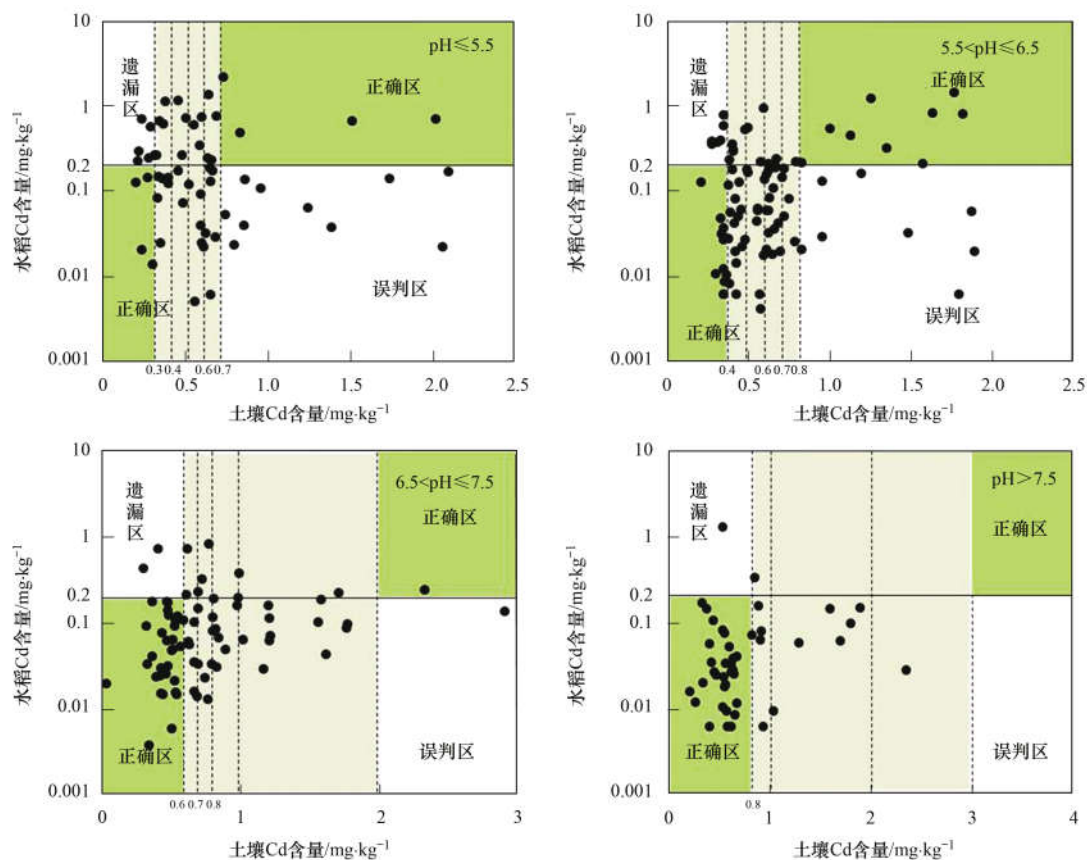


图3 土壤 Cd 含量与水稻籽实 Cd 含量散点图

Fig. 3 Scatter plots of soil Cd content and Cd content of rice

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，误判率逐渐降低，但遗漏率逐渐提高，当土壤污染风险筛选值取 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时，正确率最高。同样的方法可以得到，土壤 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 和 $\text{pH} > 7.5$ 时，土壤污染风险筛选值分别取 0.7 、 2.0 和 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，对应正确率最高。

2.1.2 旱地土壤 Cd 筛选值的确定

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618-2018）^[22] 针对旱地以土壤 pH

$= 7.5$ 将土壤划分为 2 个区间，分别给出了不同土壤 pH 区间土壤 Cd 的污染风险筛选值（表 5），结合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762-2017）^[25] 给出的玉米中 Cd 限值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，划分出不同土壤 pH 区间土壤 Cd 污染风险筛选值。投点结果见图 5，统计结果见表 6 和图 6。

结果显示，当土壤 $\text{pH} \leq 7.5$ 时，以土壤污染风险值等于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 进行统计，正确率、误判率

表 5 GB 15618-2018 给出的旱地土壤 Cd 污染风险筛选值

Table 5 Screening values of Cd pollution risk in dryland soil given by GB 15618-2018

项目	$\text{pH} \leq 5.5$	$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	$\text{pH} > 7.5$
$\text{Cd}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.3	0.3	0.3	0.6

和遗漏率分别为 26.2%、72.6% 和 1.2%。逐步提高土壤污染风险筛选值，分别取 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1.0 、 2.0 和 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，误判率逐渐降低，但遗漏率逐渐提高，当土壤污染风险筛选值取 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时，正确率最高。土壤 $\text{pH} > 7.5$ 时，土壤污染风险筛选值取 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，正确率最高。

根据以上讨论分析，提出研究区土壤 Cd 污染风险建议筛选值，见表 7。

2.2 土壤 Cd 污染风险评价

依据《土地质量地球化学评价规范》（DZ/T 0295-2016）^[23] 给出的单元素土地质量地球化学评

价方法，参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）^[22] 给出的土壤污染风险筛选值及前文给出的土壤污染风险建议筛选值（表 6），进行土地质量等级划分，将土壤 Cd 测试值小于筛选值的区域定义为安全区，大于筛选值的区域定义为风险区，并利用 ArcGis 10.2 进行插值分析（图 7），分别统计两种筛选值下安全区和风险区所占全区面积比例（表 8）。

评价结果显示，两种筛选值下 Cd 土壤污染风险评价结果存在明显差异，按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-

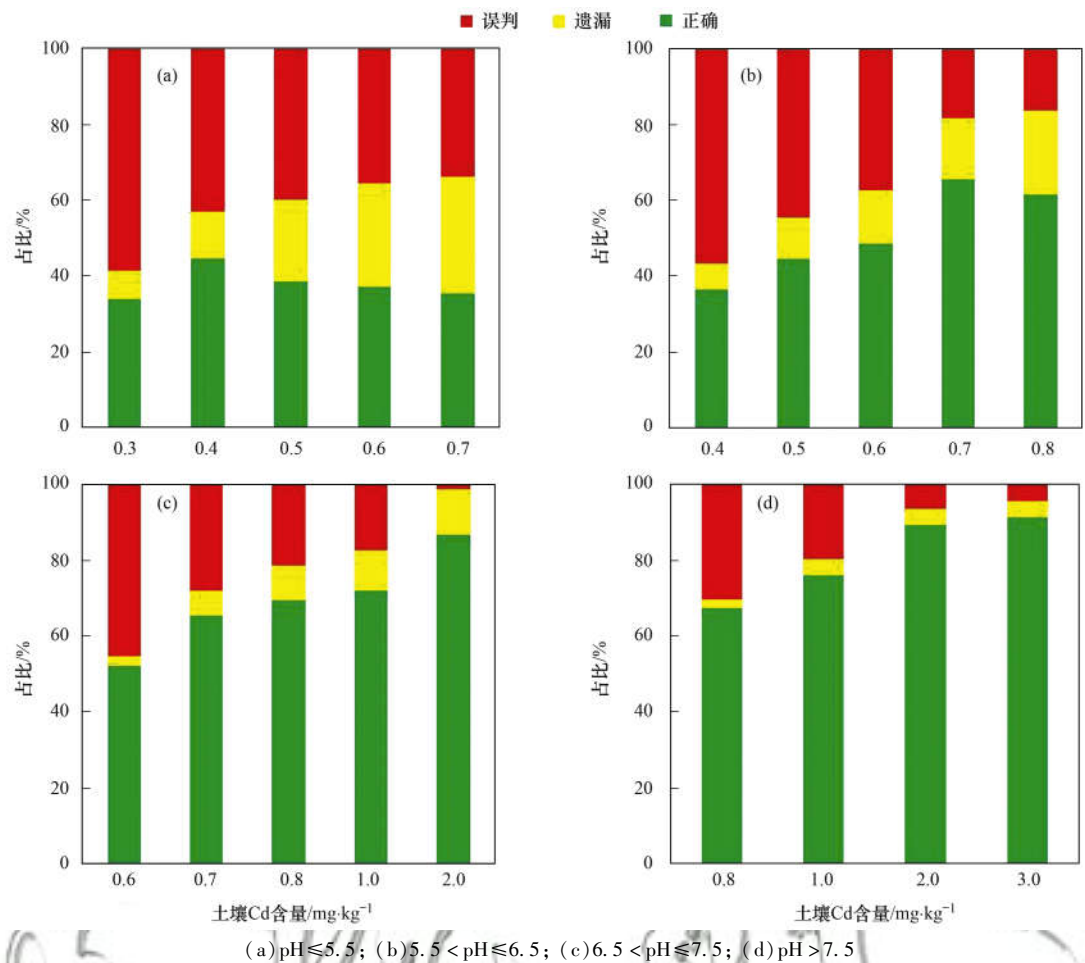


图4 不同土壤 Cd 污染风险筛选值投点统计结果柱状图

Fig. 4 Histogram of statistical results of Cd pollution risk screening values of different soils

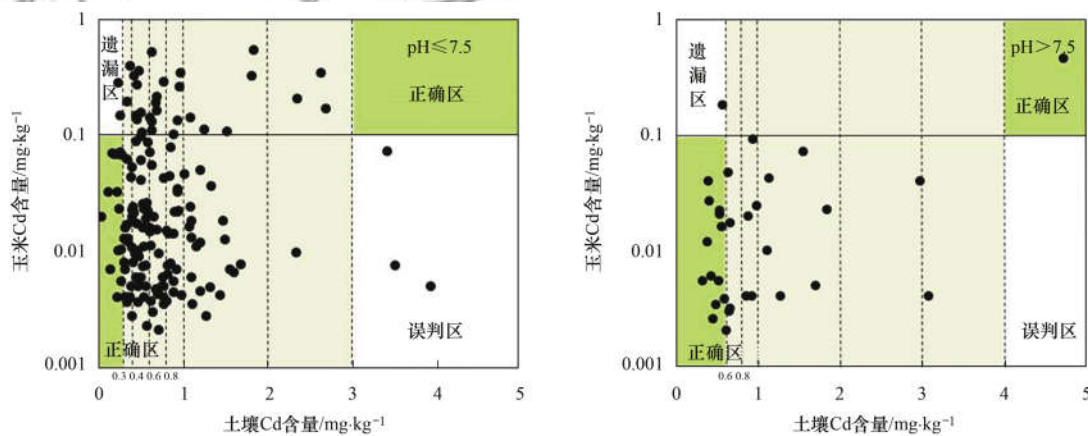


图5 土壤 Cd 含量与玉米籽实 Cd 含量散点图

Fig. 5 Scatter plots of soil Cd content and Cd content of corn

2018)^[22] 给出的筛选值进行评价,安全区面积仅占全区面积的 25.7%,风险区面积高达 74.3%,而根据建议筛选值进行评价,安全区面积所占比例为 78.9%,风险区面积所占比例为 21.2%。

3 讨论

参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[25] 给出的农作物中 Cd 的限量,分

别统计研究区采集的水稻及玉米样品 Cd 超标情况,结果见表 9。

评价及统计结果显示,研究区土壤中 Cd 的生物有效性较低。有研究表明,元素生物有效性主要取决于元素在土壤中的赋存状态,土壤中 Cd 形态包括水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态、有机结合态以及残渣态,其中水溶态及离子交换态易被植物吸收,称为生物有

表 6 不同土壤 pH 值对应的正确区、遗漏区和误判区样品数

Table 6 Number of correct, missing, and misrepresented samples corresponding to different soil pH values

土壤 pH 值	土壤污染风险筛选值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	正确区样本数/件	误判区样本数/件	遗漏区样本数/件
$\text{pH}\leq 7.5$ ($n=164$)	0.3	43	119	2
	0.4	61	99	4
	0.6	84	68	12
	0.8	98	49	17
	1.0	111	29	24
	2.0	131	4	29
	3.0	129	3	32
$\text{pH}> 7.5$ ($n=34$)	0.6	14	19	1
	0.8	19	14	1
	1.0	24	9	1
	2.0	30	3	1
	3.0	32	1	1
	4.0	33	0	1

表 7 研究区土壤 Cd 污染风险建议筛选值

Table 7 Suggested screening values for soil Cd pollution risk in the study area

土地利用类型	土壤 pH 值	土壤污染风险筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		建议值	GB 15618-2018
水田	$\text{pH}\leq 5.5$	0.4	0.3
	$5.5<\text{pH}\leq 6.5$	0.7	0.4
	$6.5<\text{pH}\leq 7.5$	2.0	0.6
	$\text{pH}> 7.5$	3.0	0.8
旱地	$\text{pH}\leq 7.5$	2.0	0.3
	$\text{pH}> 7.5$	4.0	0.6

表 8 两种筛选值下 Cd 土壤污染风险评价结果统计

Table 8 Statistical table of Cd soil pollution risk assessment results under two screening values

土壤污染风险评价等级	安全区/%	风险区/%
建议筛选值	78.9	21.1
GB 15618-2018	25.7	74.3

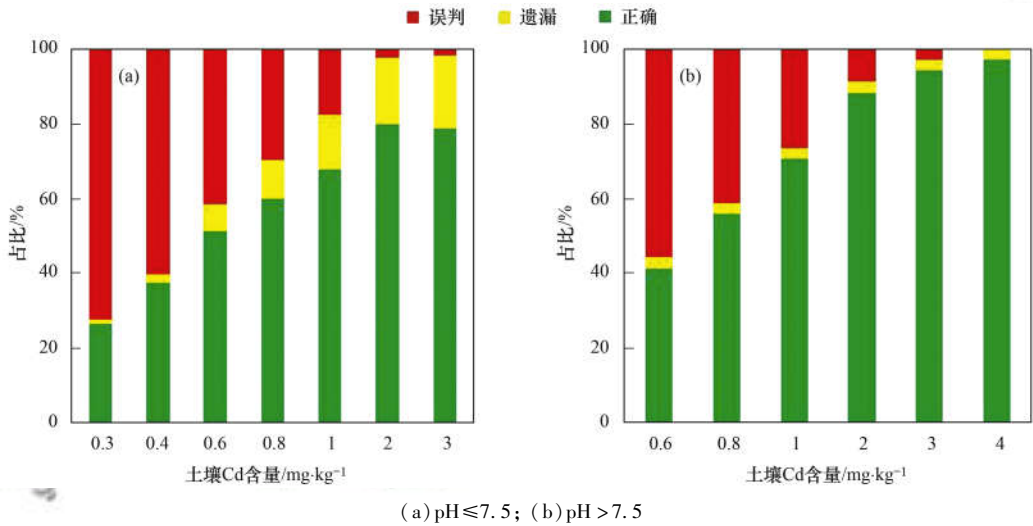


图 6 不同土壤 Cd 污染风险筛选值投点统计结果柱状图

Fig. 6 Histogram of statistical results of Cd pollution risk screening values of different soils

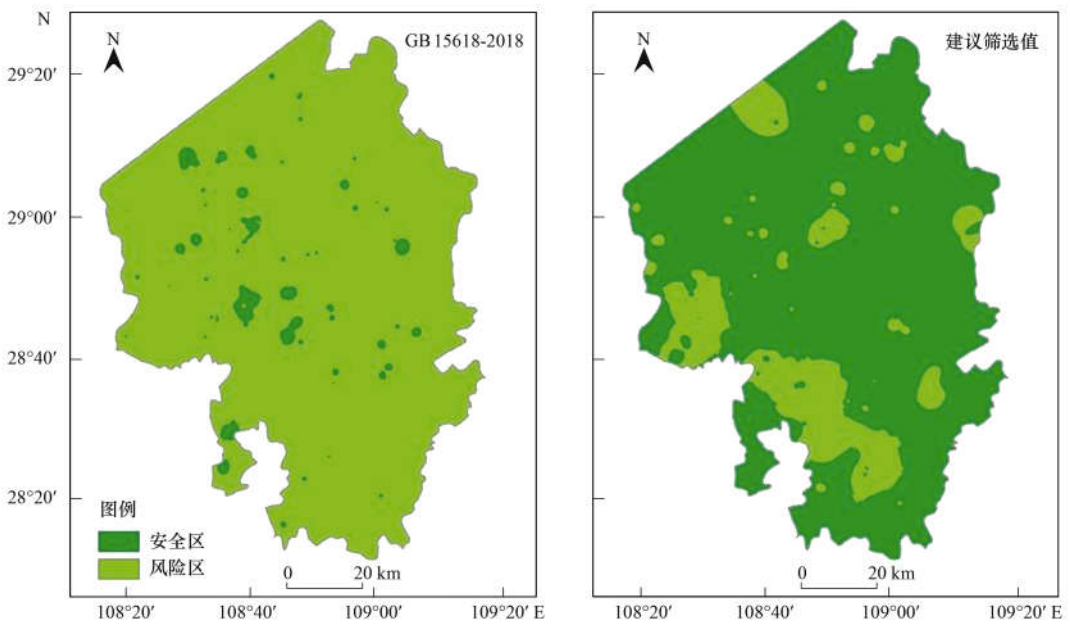


图 7 两种筛选值下 Cd 元素土壤污染风险评价结果

Fig. 7 Results of soil pollution risk assessment of Cd elements under two screening values

表 9 农作物中 Cd 含量统计

Table 9 Statistical table of Cd content in crops				
农作物类型	最大值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	超标率 /%
水稻(<i>n</i> = 285)	2. 13	0. 004	0. 10	17. 1
玉米(<i>n</i> = 198)	0. 53	0. 002	0. 06	13. 2

表 10 农作物 Cd 含量与土壤中各形态 Cd 含量相关系数¹⁾

Table 10 Correlation coefficient between Cd content of crops and Cd content of various forms in soil							
项目	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐殖酸结合态	铁锰氧化态	有机结合态	残渣态
水稻 Cd	0. 77 **	0. 62 *	0. 25	0. 41 *	0. 19	0. 11	0. 06
玉米 Cd	0. 80 **	0. 71 *	0. 17	0. 32	0. 24	0. 20	0. 16

1) * 表示在 0. 05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0. 01 水平(双侧)上显著相关

Cd 含量与农作物中 Cd 含量相关系数,可以看出,水溶态和离子交换态 Cd 与农作物中 Cd 含量相关性较高,可作为生物有效 Cd 研究.

研究区土壤中 Cd 的生物有效态、生物潜在可利用态和不可利用态分别占全量的 5.48%、72.66% 和 21.86%, 其中有机结合态占全量的 45.13%, 即研究区土壤中 Cd 生物有效态含量相对较低^[27].

建议筛选值以元素生物有效态的含量为基础,同时考虑了农作物中 Cd 的含量及土壤中 Cd 的赋存状态,与国标筛选值存在一定差异. 经过上述讨论可以发现,研究区土壤中 Cd 含量处于较高水平,而主要大宗农作物中 Cd 的含量处于相对较低水平,即研究区主要特征表现为土壤 Cd 含量高而农作物 Cd 含量低,主要原因为研究区土壤中有机质含量丰富,有机质对 Cd 具有较强的吸附作用,有机结合态 Cd 含量较高,Cd 生物有效性较低^[28, 29]. 同样地,该方法也适用于农作物 Cd 含量较高的典型地区,例如湘江流域水口山、郴州和长株潭等地区,土壤中 Cd 的生物有效性较高,主要原因为该地区土壤多为酸性,土壤溶液中 H⁺ 含量较高,由于 H⁺ 电负性较高,使得重金属多以离子态存在,易被植物吸收利用^[30~31]. 此外,Se 对 Cd 存在一定的拮抗作用,会影响植物对 Cd 的吸收,例如湖北恩施高 Se 高 Cd 地区^[32]. 此方法可为上述类似地区完善土壤重金属及健康元素阈值提供借鉴和参考.

4 结论

(1)通过本文提出的方法,得到研究区土壤 Cd 污染风险建议筛选值. 水田以土壤 pH 为 5.5、6.5 和 7.5 划分出 4 个区间的污染风险建议筛选值,分别为 0.4、0.7、2.0 和 3.0 mg·kg⁻¹. 旱地以土壤 pH 为 7.5 划分出两个区间的污染风险建议筛选值,分别为 2.0 mg·kg⁻¹和 4.0 mg·kg⁻¹.

(2)《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控

效态;碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物态被称为生物潜在可利用态;残渣态被称为生物不可利用态,而元素在土壤中的赋存状态主要受到土壤组分及理化性质的影响,包括黏土矿物,有机质及土壤酸碱度等^[26]. 表10为研究区土壤中各形态

标准(试行)》(GB 15618-2018)所给筛选值污染风险评价结果显示,安全区面积所占比例为 25.7%,风险区面积所占比例为 74.3%. 建议筛选值污染风险评价结果显示,安全区面积所占比例为 78.9%,风险区面积所占比例为 21.2%.

(3)建议筛选值以元素生物有效态的含量为基础,同时考虑了农作物中 Cd 的含量及土壤中 Cd 的赋存状态. 该方法可为土壤 Cd 含量高农作物 Cd 含量低、土壤 Cd 含量低而农作物 Cd 含量高、土壤硒镉含量较高等典型地区完善土壤重金属及健康元素阈值提供借鉴和参考.

参考文献:

[1] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao zinc plant in China via consumption of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2007, **383**(1-3): 81-89.

[2] Jallad K N. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(20): 15449-15458.

[3] Lei M, Tie B Q, Song Z G, et al. Heavy metal pollution and potential health risk assessment of white rice around mine areas in Hunan Province, China[J]. Food Security, 2015, **7**(1): 45-54.

[4] Yuan G L, Sun T H, Han P, et al. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **136**: 40-47.

[5] 谢小进,康建成,闫国东,等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1110-1117.

Xie X J, Kang J C, Yan G D, et al. Heavy metal concentration in agricultural soils around the upper-middle reaches of Huangpu River[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(8): 1110-1117.

[6] 王农,郑庆祥,孙约兵,等. 关于耕地土壤重金属污染综合防治的思考[J]. 天津农业科学, 2019, **25**(3): 88-90.

Wang N, Zheng Q X, Sun Y B, et al. Thoughts on comprehensive prevention and control of heavy metal pollution in farmland soil[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2019, **25**(3): 88-90.

[7] 陈生涛,苗安洋,温婷婷,等. 辽东湾表层沉积物重金属污

- 染特征及潜在生态危害评价[J]. 海洋环境科学, 2019, **38**(2): 256-262.
- Chen S T, Miao A Y, Wen T T, *et al.* Heavy metals in the surface sediment of Liaodong bay and their potential ecological risk [J]. Marine Environmental Science, 2019, **38**(2): 256-262.
- [8] Zhao L, Xu Y F, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 654-662.
- [9] Chai Y, Guo J, Chai S L, *et al.* Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China [J]. Chemosphere, 2015, **134**: 67-75.
- [10] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al.* Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- [11] 龚梦丹, 朱维颀, 顾燕青, 等. 杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2329-2337.
- Gong M D, Zhu W Q, Gu Y Q, *et al.* Evaluation on heavy metal pollution and its risk in soils from vegetable bases of Hangzhou [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2329-2337.
- [12] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, **54**(1): 81-91.
- Song J Q, Zhu Q, Jiang X S, *et al.* GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils—a case study of Baguazhou, Nanjing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(1): 81-91.
- [13] 周旭, 吕建树. 山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J]. 地理研究, 2019, **38**(2): 414-426.
- Zhou X, Ly J S. Sources, distribution and ecological risk of soil heavy metals in Guangrao county, Shandong province [J]. Geographical Research, 2019, **38**(2): 414-426.
- [14] 汤波. 陕南铅锌尾矿区土壤重金属污染特征及来源分析[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(18): 271-275.
- Yang B. Characteristics and sources of heavy metal pollution in soils of lead-zinc tailings in southern Shaanxi [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, **46**(18): 271-275.
- [15] 吕悦风, 孙华. 浙江某县耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 95-102.
- Lü Y F, Sun H. Spatial differentiation characteristics, pollution evaluation, and source analysis of heavy metals in farmland soil in a county in northern Zhejiang Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 95-102.
- [16] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **78**: 2-8.
- [17] 刘辉, 邹继颖, 边红枫, 等. 菜地土壤重金属污染状况及对蔬菜安全性分析[J]. 食品研究与开发, 2018, **39**(22): 175-180.
- Liu H, Zou J Y, Bian H F, *et al.* Heavy metal pollution in vegetable soils and analysis of vegetable safety [J]. Food Research and Development, 2018, **39**(22): 175-180.
- [18] 徐永梅, 字润祥, 卞世闻. 云龙水库周边土壤中重金属的危害评价[J]. 环境科学导刊, 2019, **38**(1): 88-91.
- Xu Y M, Zi R X, Bian S W. Hazard assessment of heavy metal in the soil around Yunlong reservoir [J]. Environmental Science Survey, 2019, **38**(1): 88-91.
- [19] 张婷, 刘爽, 宋玉梅, 等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 706-715.
- Zhang T, Liu S, Song Y M, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of marine aquaculture in Zhelin Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 706-715.
- [20] 元妙新, 俞栋, 肖愉, 等. 重金属的生物有效性影响因素[J]. 化工设计通讯, 2018, **44**(8): 208.
- Yuan M X, Yu D, Xiao Y, *et al.* Heavy metal bioavailability factors [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, **44**(8): 208.
- [21] 元妙新, 林德坡, 潘佑祥, 等. 重金属生物有效性评价方法[J]. 化工设计通讯, 2018, **44**(8): 222.
- Yuan M X, Lin D P, Pan Y X, *et al.* Evaluation method of bioavailability of heavy metals [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, **44**(8): 222.
- [22] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [23] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [24] DZ/T 0279-2016, 区域地球化学样品分析方法[S].
- [25] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [26] 朱亮, 邵孝侯. 耕作层中重金属 Cd 形态分布规律及植物有效性研究[J]. 河海大学学报, 1997, **25**(3): 50-56.
- Zhu L, Shao X H. Chemical form distribution and plant availability of Cd in plough horizon [J]. Journal of Hohai University, 1997, **25**(3): 50-56.
- [27] 邓朝阳, 朱霞萍, 郭兵, 等. 不同性质土壤中镉的形态特征及其影响因素[J]. 南昌大学学报(工科版), 2012, **34**(4): 341-346.
- Deng Z Y, Zhu X P, Guo B, *et al.* Distribution and influence factors of Cd speciation on the soil with different properties [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2012, **34**(4): 341-346.
- [28] 王英杰, 邹佳玲, 杨文骏, 等. 组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4004-4010.
- Wang Y J, Zou J L, Yang W T, *et al.* Synergetic control of bioavailability of Pb, Cd and As in the rice paddy system by combined amendments [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4004-4010.
- [29] He Y Z, Zhang W, Guo T, *et al.* Drug nanoclusters formed in confined nano-cages of CD-MOF: dramatic enhancement of solubility and bioavailability of azilsartan [J]. Acta Pharmaceutica Sinica B, 2019, **9**(1): 97-106.
- [30] 刘俊, 朱允华, 胡劲松, 等. 湘江中游江段沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(2): 135-141.
- Liu J, Zhu Y H, Hu J S, *et al.* Characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in the sediments of middle reaches of Xiangjiang river [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, **33**(2): 135-141.
- [31] Chen Z B, Hu S S. Heavy metals distribution and their bioavailability in earthworm assistant sludge treatment wetland [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **366**: 615-623.
- [32] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(7): 1647-1654.
- Wang R, Yu T, Yang Z F, *et al.* Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(7): 1647-1654.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)