

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



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	
《环境科学》征稿简则 (1635)	
信息 (1724, 1769, 1800)	

重庆市主要农耕区土壤 Cd 生物有效性及影响因素

王锐^{1,2}, 胡小兰¹, 张永文^{1,2}, 余飞^{1,2}, 朱海山^{1,2}, 李瑜^{1,2}

(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)

摘要: 选择在重庆南川区采集大宗农作物水稻及根系土样品 155 件, 另采集部分玉米、土豆、番茄、油菜、李子和猕猴桃及根系土样品进行测试分析, 以生物富集系数表征元素的生物有效性, 分析土壤理化性质、土壤组分、地质背景及作物种类等因素对 Cd 生物有效性的影响。结果表明, 南川区水稻及根系土中均存在一定程度的 Cd 超标现象, 且 Cd 生物有效性相对较低; 土壤酸碱度为 Cd 生物有效性的主要控制因素, 酸性条件下生物有效性更高; 番茄、李子和猕猴桃对 Cd 的富集能力较弱。因此, 可通过人工调控田块酸碱度或调整种植结构等手段预防土壤重金属污染、提高农产品质量。该方法亦可用于其它土壤重金属或 Se 等健康元素的相关研究, 为土地安全利用、高品质农产品的生产提供科学依据。

关键词: Cd; 富集系数; 生物有效性; 影响因素; 农产品质量

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1864-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910229

Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing

WANG Rui^{1,2}, HU Xiao-lan¹, ZHANG Yong-wen^{1,2}, YU Fei^{1,2}, ZHU Hai-shan^{1,2}, LI Yu^{1,2}

(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)

Abstract: One-hundred and fifty five large-scale crop rice and root soil samples were collected in Nanchuan District of Chongqing, and some samples of corn, potato, tomato, rapeseed, plum and kiwifruit, and root soil were collected for testing and analysis. The bioavailability of the elements was characterized by bioconcentration factors. The effects of soil physical and chemical properties, soil composition, geological background, and crop types on the bioavailability of Cd were analyzed. The results showed that there was a certain degree of Cd exceeding the standard in rice and root soil in Nanchuan District, and the bioavailability of Cd was relatively low. Soil pH was the main controlling factor of Cd bioavailability, and the bioavailability was higher under acidic conditions. Plum, kiwi, and kiwifruit have weaker ability to enrich Cd. Therefore, it is possible to prevent heavy metal pollution in the soil and improve the quality of agricultural products by artificially regulating the pH of the field or adjusting the planting structure. The method can also be applied to the research of other soil heavy metals or health elements such as Se and provides a scientific basis for the safe use of land and the production of high-quality agricultural products.

Key words: Cd; enrichment factor; bioavailability; influencing factors; quality of agricultural products

土壤是人类赖以生存的基础, 是一种不可再生的宝贵资源^[1~4]。《全国土壤污染状况调查公报》结果显示, 我国西南地区由于广泛发育喀斯特岩溶地貌, 母岩在成土过程中发生淋溶, 易造成土壤中重金属的富集, 是我国土壤重金属污染较为突出的地区之一^[5,6]。南川区是重庆市优质粮油生产基地, 已有研究表明, 南川区土壤中 Cd、Hg、Zn 及 Ni 等元素含量偏高, 其中 Cd 元素的平均含量为全国土壤元素背景值的 2.1 倍, 是典型的 Cd 高背景区^[7]。

土壤中 Cd 元素由于活动性高、难降解以及可通过食物链传递等特点, 已成为影响人体健康、限制植物生长发育的主要重金属之一。人体如果长期暴露于 Cd 污染下, 会引发癌症、肝脏及肾脏衰竭, 而长期食用富 Cd 农作物, 则会导致“痛痛病”; Cd 元素会影响植物体内某些酶的合成, 进而影响植物的生长发育及农产品质量^[8~14]。土壤中的重金属元素

并不是全部都能被植物吸收利用, 能够产生毒害效应的重金属形态即为生物有效态, 植物对重金属的吸收程度即为元素的生物有效性^[15~22], 而元素生物有效性一般受到土壤理化性质、土壤组分、地质背景及作物种类等多种因素影响^[23,24]。

目前关于南川区农产品质量及重金属元素生物有效性等方面的研究鲜有报道, 为了更好地预防土壤重金属污染、提高土地利用效率及农产品质量, 以生物富集系数表征元素的生物有效性, 分析土壤理化性质、土壤组分、地质背景及作物种类等因素对 Cd 生物有效性的影响, 得到主要控制因素, 以期能为土地安全利用及高品质农产品生产提供科学依据。

收稿日期: 2019-10-31; 修订日期: 2019-11-27

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)(cstc2018jcsx-mszd0617); 重庆市科技项目(KJ-2018034)

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

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南川区位于重庆市南部(图 1),地貌以中低山为主,地势呈东南向西北倾斜,属亚热带湿润季风

气候,年平均气温 16.5℃,年平均降雨量在1 160 mm 左右.主要出露寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系和侏罗系等地层,岩性以沉积岩为主.土壤类型主要有水稻土、黄壤、紫色土、黄棕壤和冲积土.

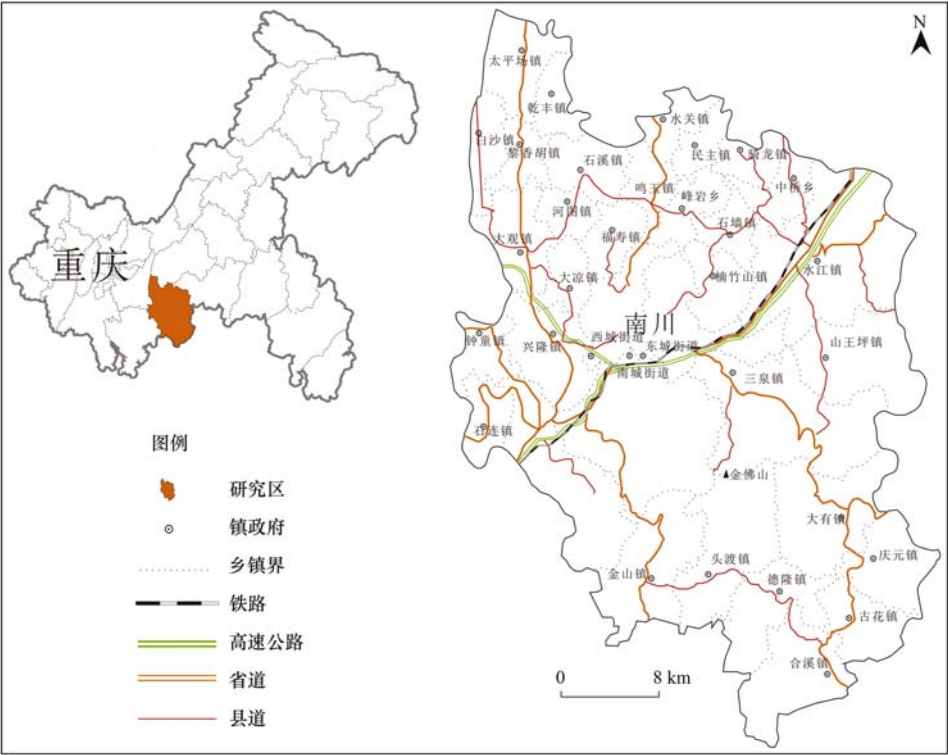


图 1 本研究区地理位置示意
Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 采样方法与分析测试

根据田块特点采用星形法、蛇形法等方法,进行多植株混合采样,采集本研究区大宗农作物水稻共计 155 件,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1.5 ~ 2 kg 装入样品袋.同样的方法,采集了玉米样 60 件、土豆样 48 件、番茄样 15 件、油菜样 15 件、李子样和猕猴桃样各 9 件.

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 500 g,装瓶,送实验室进一步处理以便测试.谷物样品在无污染、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.农作物鲜样采集后冷藏,并及时送至实验室.各类样品分析测试由国土资源部重庆矿产资源监督检测中心完成.土壤样品分析及检出限见表 1.

土壤样品分析测试过程中采用国家一级标准物

质(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)^[25]要求,数据质量可靠.

表 1 土壤指标分析方法检出限

Table 1 Detection limits of soil index analysis methods		
指标	分析方法	检出限
pH	ISE	0.10
CaO/%	ICP-AES	0.02
MgO/%	ICP-AES	0.05
SiO ₂ /%	ICP-AES	0.10
S/mg·kg ⁻¹	ICP-AES	50
Se/mg·kg ⁻¹	AFS	0.01
Cd/mg·kg ⁻¹	ICP-MS	0.02

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 Cd 生物有效性

元素富集系数是农作物样品某元素含量与根系土中对应元素含量的比值,反映出植物对土壤中元素的吸收富集能力,可用来表征元素的生物有效性,计算式如下:

$$K = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}}$$

式中, K 表示元素的富集系数; C_{plant} 为重金属元素在作物中的含量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{soil} 为重金属元素在根系土中的含量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 水稻及根系土中 Cd 的含量

统计本研究区采集的大宗农作物水稻及根系土中 Cd 的含量,参照文献[26,27]中给出的农作物及土壤中 Cd 的限值,计算其超标率.结果显示,水稻中 Cd 的含量范围为 $0.01 \sim 1.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 1.65,超标率为 10.2%;根系土中 Cd 的含量范围为 $0.10 \sim 2.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 1.42,超标率为 22.1% (表 2). 可以看出,水稻及根系土中 Cd 元素均存在一定程度的 Cd 超标现象,且在空间上分布不均匀,受到多种因素的影响.

表 2 水稻及根系土中 Cd 的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Cd content in rice and root soil/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
项目	平均值	最大值	最小值	变异系数	超标率/%
水稻	0.15	1.51	0.01	1.65	10.2
根系土	0.41	2.45	0.10	1.42	22.1

2.2 水稻 Cd 富集系数

计算本研究区大宗农作物水稻 Cd 的富集系数,结果见表 3. 水稻 Cd 的富集系数平均值为 0.34,变异系数为 2.01. 对比本研究区与国内部分地区水稻 Cd 的富集系数,结果见图 2,可以看出,湖南湘潭、江西鹰潭、广州市郊区、珠江三角洲及江苏昆山地区水稻 Cd 富集系数的平均值均高于本研究区,广西以及湖北天门地区水稻 Cd 富集系数的平均值均低于本研究区. 因此,本研究区 Cd 的生物有效性处于较低水平.

表 3 水稻 Cd 的富集系数 K

Table 3 Enrichment factors of rice Cd				
项目	平均值	最大值	最小值	变异系数
K	0.34	4.25	0.01	2.01

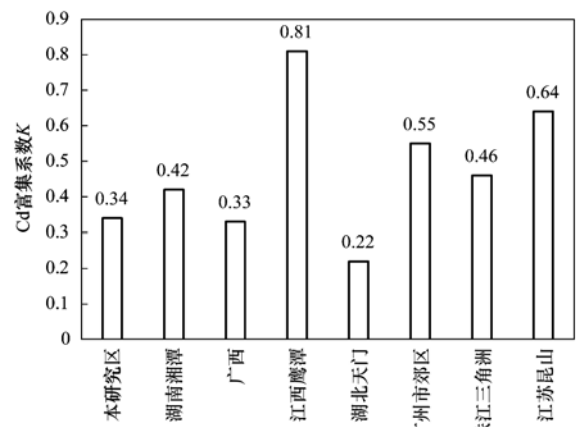


图 2 本研究区及我国部分地区水稻 Cd 富集系数 K 的平均值^[28~34]

Fig. 2 Average value of rice Cd enrichment factor in the studied area and parts of China

2.3 Cd 生物有效性影响因素

2.3.1 土壤酸碱度

水稻 Cd 富集系数 K 与土壤 pH 呈负相关关系,随着土壤 pH 的上升,Cd 生物有效性降低(图 3). 土壤 pH 是影响 Cd 元素迁移转换行为的重要因素,其直接影响了 Cd 在土壤中的吸附解吸、形态转化. 在酸性条件下,土壤溶液中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 H^{+} 等阳离子含量增加,加剧了 Cd 元素在土壤中交换位的竞争,使得土壤对 Cd 元素的吸附减少,增加了 Cd 元素的有效性;而在中性和碱性条件下,Cd 氢氧化物、硫化物、磷酸盐和碳酸盐的沉淀反应所起的作用逐渐增大,有机质和土壤表面胶体对 Cd 吸附增加. 随着土壤 pH 值的增高,土壤胶体负电荷增加, H^{+} 的竞争能力减弱,使 Cd 被结合得更牢固,多以难溶的氢氧化物或碳酸盐及磷酸盐的形式存在,土壤中的有效态 Cd 向无效(缓效)态 Cd 转化,从而降低 Cd 的有效性,作物对 Cd 的吸收也降低^[35,36].

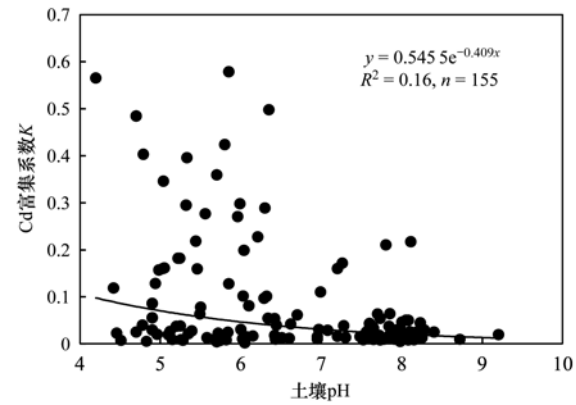


图 3 土壤 pH 与水稻 Cd 富集系数 K 相关关系

Fig. 3 Correlation between soil pH and rice Cd enrichment factor

2.3.2 土壤组分

对土壤中 SiO_2 含量与水稻 Cd 富集系数 K 进行了相关性分析,发现土壤中 SiO_2 含量的增加对水稻

吸收 Cd 具有显著的促进作用,在土壤 SiO_2 含量相对较低时,水稻 Cd 的富集系数 K 缓慢增大,在 SiO_2 含量大于 70% 时,随着土壤 SiO_2 含量增加, Cd 的富集系数迅速增大[图 4(a)]. 土壤中 SiO_2 含量越高, Al_2O_3 、 TFe_2O_3 和 MgO 等组分含量越低,土壤质地越偏向于砂质和粉砂质,对 Cd 的吸附能力越弱, Cd 生物有效性越强^[37,38].

本研究区水稻 Cd 富集系数 K 与土壤中 CaO 含量相关关系见图 4(b),可以看出,在土壤 CaO 含量相对较低时,水稻 Cd 的富集系数 K 随着土壤 CaO 含量的增加迅速减小,当土壤 CaO 含量较高时,水稻 Cd 的富集系数趋于平缓. Cd^{2+} 与 Ca^{2+} 具有相似的离子半径, Cd^{2+} 的离子半径为 0.097 nm,而 Ca^{2+} 的离子半径为 0.099 nm, Ca^{2+} 会竞争 Cd^{2+} 的吸附点位,抑制水稻根系对 Cd^{2+} 的吸收. 同时,土壤中的 CaCO_3 会促进活动态 Cd 向稳定态转化,降低 Cd 的生物有效性^[39].

本研究区水稻 Cd 富集系数 K 与土壤中 S 含量相关关系见图 4(c),随着 S 含量的增加,水稻 Cd 的富

集系数 K 逐渐减少. 硫化物在自然界广泛分布,其数量仅次于氧化物,而 Cd 为典型的亲 S 元素,土壤中 S 通过改变自身形态与重金属发生反应,影响土壤重金属的生物有效性,从而起到调控重金属迁移的作用. 土壤中有有效 S 包括水溶性 S、吸附态 S 和部分有机态 S,以 SO_4^{2-} 的形态存在. SO_4^{2-} 在水稻土厌氧状况下被还原为 S^{2-} ,而 S^{2-} 易与 Cd^{2+} 发生沉淀反应生成难溶性的 CdS,从而导致有效硫和有效态镉含量下降^[40].

Se 元素是人体及动植物体重要的健康元素之一,Se 元素对 Cd 等重金属元素具有一定的拮抗作用,一方面,Se 元素会竞争 Cd 元素在植物根系上的吸附位置,从而减少植物对 Cd 的吸收,另一方面,在植物体内,Se 元素会和 Cd 元素发生反应,形成 Cd 的 Se 化物,减少重金属元素的毒害作用. 分析本研究区水稻 Cd 的富集系数 K 与土壤中 Se 元素的相关关系,二者呈明显的负相关[图 4(d)],进一步说明了土壤富 Se 可一定程度地抑制植物对 Cd 的吸收^[41].

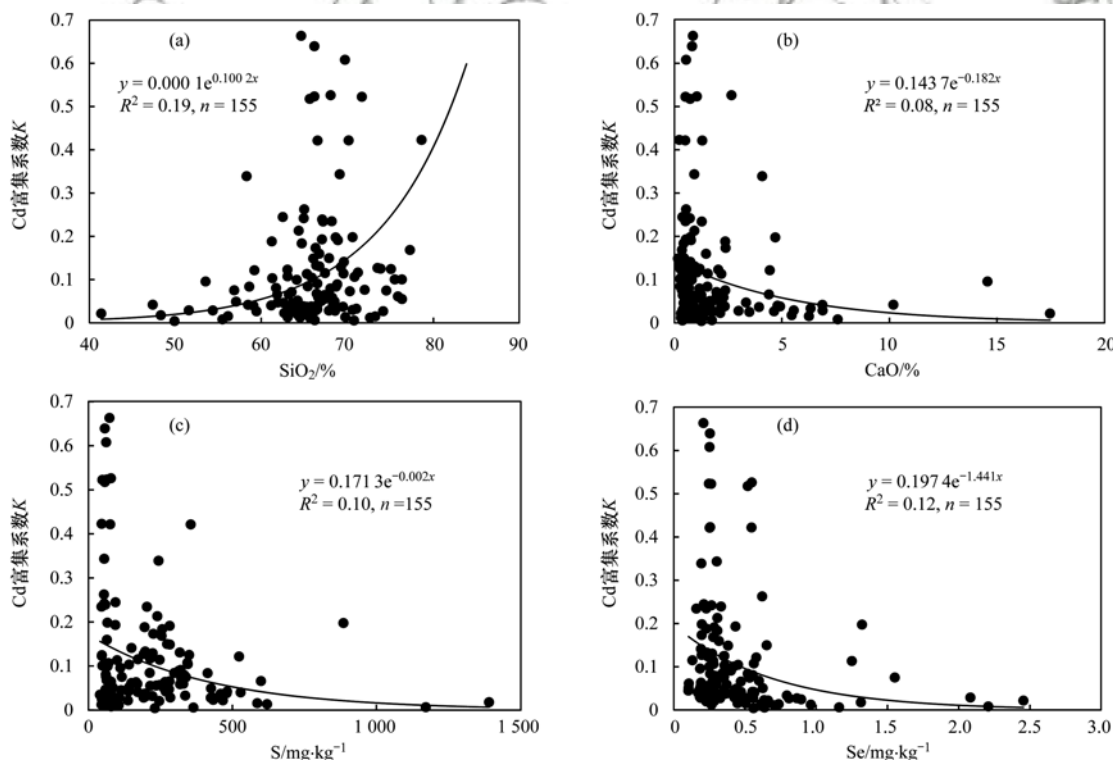


图4 土壤组分与水稻 Cd 富集系数 K 相关关系

Fig. 4 Correlation between soil composition and rice Cd enrichment factor

2.3.3 地质背景

统计南川不同地层分布区水稻 Cd 富集系数的平均值,结果见图 5,寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系地层分布区水稻 Cd 富集系数的均值均低于全区平均值,而侏罗系地层分布区水稻 Cd 富集系数的均值为 0.5,富集程度较高. 因此,同一地

区,不同地层分布区,农作物对 Cd 的富集程度也有较大差异.

表 4 为《土地质量地球化学评价规范》(DZT 0295-2016)^[25]对土壤酸碱度的划分标准,按照该标准给出的定义,统计本研究区不同地层中土壤样品的酸碱度,侏罗系地层分布区土壤样品中酸

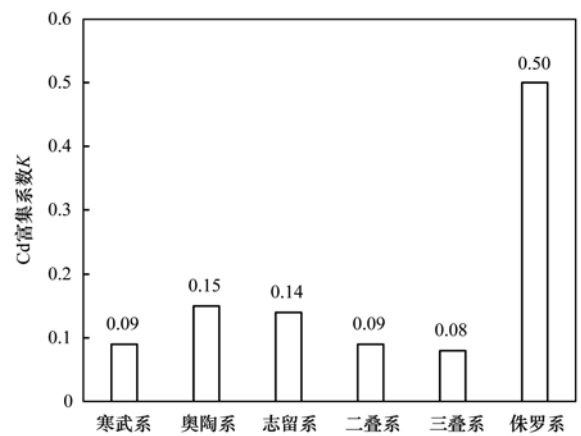


图5 本研究区不同地层分布区水稻 Cd 的富集系数 K

Fig. 5 Enrichment factor of rice Cd in different stratigraphic distribution areas in the study area

性样点占 55%,强酸性样点占 9%,土壤以酸性为主,而其它地层分布区,土壤以中性和碱性为主(图 6),说明土壤酸碱度是区分不同地层分布区 Cd 生物有效性差异的主要因素。

表 4 土壤酸碱度分级标准
Table 4 Soil pH grading standards

土壤 pH	<5.0	5.0~6.5	6.5~7.5	7.5~8.5	≥8.5
含义	强酸性	酸性	中性	碱性	强碱性

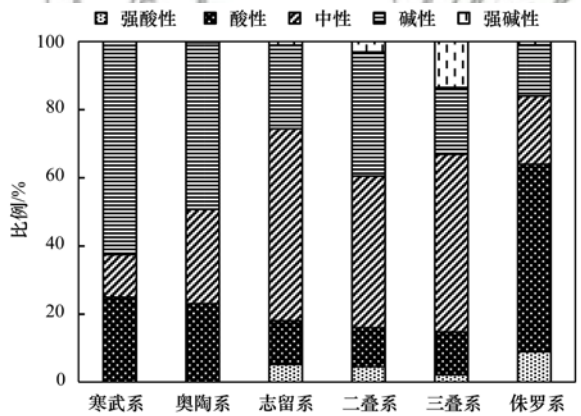


图6 本研究区各地层土壤酸碱度统计结果

Fig. 6 Statistical results of soil pH in all strata of the study area

2.3.4 作物种类

计算本研究区不同种类农作物中 Cd 富集系数,可以看出,油菜、土豆及玉米对 Cd 的富集能力较强,而番茄、李子及猕猴桃对 Cd 的富集能力较弱。即不同农作物对 Cd 的富集能力差异较大(图 7)。

3 讨论

通过分析可知,本研究区土壤 Cd 的生物有效性受到土壤酸碱度、土壤组分及作物种类等因素的影响,将水稻 Cd 的富集系数 K、土壤 pH、土壤组分进行偏相关分析发现,本研究区土壤 Cd 的生物有

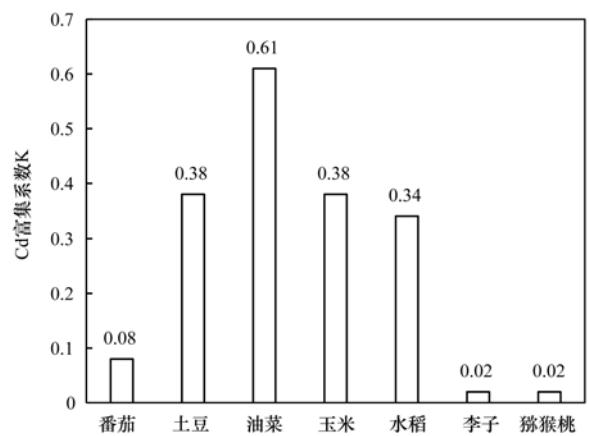


图7 本研究区不同种类农作物 Cd 富集系数 K 比较

Fig. 7 Comparison of Cd enrichment factor of different types of crops in the study area

效性主要是受到土壤酸碱度的控制,且酸性条件下 Cd 生物有效性更高(表 5)。张会民等^[42]提出 Cd 在土壤中的专性吸附模型为:

$(-OH)_s + Cd^{2+} + H_2O \rightleftharpoons (-O)_sCdOH_2^+ + H^+$
式中, $(-OH)_s$ 为土壤吸附表面的羟基团,在酸性条件下,土壤中部分固相盐类会溶解使土壤溶液中阳离子增加,与 Cd 在土壤中对交换位的竞争加剧,从而使得土壤对 Cd 的吸附减少,增加了 Cd 元素的有效性;在中性和碱性条件下,土壤中 H^+ 减少, H^+ 对 Cd^{2+} 的竞争减弱,同时胶体表面的负电荷增加,Cd 多以难溶的化合物形式存在,从而降低 Cd 的生物有效性。

表 5 水稻 Cd 富集系数 K 与土壤 pH、土壤组分偏相关分析结果¹⁾

Table 5 Analysis results of partial correlation between Cd enrichment factor and soil pH and soil composition

因变量	控制变量	自变量	相关系数
K	CaO,pH,SiO ₂ ,S	Se	-0.135
	Se,pH,SiO ₂ ,S	CaO	-0.149
	CaO,pH,Se,S	SiO ₂	0.240
	CaO,pH,SiO ₂ ,Se	S	-0.072
	CaO,Se,SiO ₂ ,S	pH	-0.655 *

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关

基于本文的研究方法,结合区域面积性土壤及农作物调查数据,对 Cd 生物有效性较高或土壤 Cd 含量较高的区域,一方面可通过人为手段在田块尺度上调控土壤酸碱度,例如施用草木灰等,可有效改变土壤酸碱度^[43],另一方面,也可通过调整种植结构,选择对重金属富集程度较低的作物,以此提高土地利用效率、改善农作物质量。该方法亦可用于其它土壤重金属或 Se 等健康元素的相关研究,为土地安全利用、高品质农产品的生产提供科学依据。

4 结论

(1)本研究区大宗农作物水稻及其根系土中均存在一定程度的 Cd 超标现象,超标率分别为

10.2% 及 22.1%, Cd 含量的变异系数分别为 1.65 及 1.42, 说明水稻及根系土中 Cd 含量在空间上分布不均匀, 受到多种因素的影响。通过对比本研究区及我国其他地区水稻 Cd 的富集系数发现, 南川区 Cd 生物有效性较低。

(2) 水稻 Cd 的富集系数受到土壤 pH、土壤组分、地质背景及作物种类的影响。统计不同地层分布区土壤的酸碱度, 结合偏相关分析结果, 表明本研究区 Cd 生物有效性主要受到土壤酸碱度的影响, 酸性条件下生物有效性更高。不同农作物对 Cd 的富集能力也存在较大差异, 番茄、李子和猕猴桃较其他农作物对 Cd 的富集能力弱。

(3) 结合区域面积性土壤及农作物调查结果, 可通过人为手段调控田块土壤理化性质或调整种植结构的方法, 提高土地利用效率、改善农作物品质。

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**(1): 40-47.
- [5] 杨璐, 张智, 李余杰, 等. 西南地区典型农田土壤中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附特性研究[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(4): 985-992.
Yang L, Zhang Z, Li Y J, *et al.* Adsorption characteristics of Cd^{2+} and Pb^{2+} in typical agricultural soils in the Southwest of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(4): 985-992.
- [6] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2443-2452.
Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2443-2452.
- [7] 鲍丽然, 龚媛媛, 严明书, 等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(1): 31-40.
Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, *et al.* Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing west economic zone, China[J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(1): 31-40.
- [8] 王锐, 张风雷, 徐姝姝, 等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法: 以 Cd 为例[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- [9] 周建民, 党志, 司徒粤, 等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1172-1176.
Zhou J M, Dang Z, Situ Y, *et al.* Distribution and characteristics of heavy metals contaminations in soils from Dabaoshan mine area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(6): 1172-1176.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 龚梦丹, 朱维琴, 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.
- [17] 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.
- [18] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China

- [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 507-515.
- [19] Rezapour S, Atashpaz B, Moghaddam S S, *et al.* Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system [J]. Chemosphere 2019, **231**: 579-587.
- [20] Lu A X, Li B R, Li J, *et al.* Heavy metals in paddy soil-rice systems of industrial and township areas from subtropical China: levels, transfer and health risks [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, **194**: 210-217.
- [21] 杨阳, 彭叶棉, 王莹, 等. 稻田土壤镉的表面络合模型及其生物有效性验证[J]. 科学通报, 2019, **64**(33): 3449-3457.
Yang Y, Peng Y M, Wang Y, *et al.* Surface complexation model of Cd in paddy soil and its validation with bioavailability [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(33): 3449-3457.
- [22] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2964-2971.
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an autonomous county of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [23] Gu Q B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Application of ecogeochemical prediction model to safely exploit seleniferous soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **177**: 133-139.
- [24] Gu Q B, Yu T, Yang Z F, *et al.* Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: a case study of Guangxi, China [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, **70**: 103199.
- [25] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [26] GB 2762-2017, 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
- [27] 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].
- [28] 王维. 水稻镉吸收的区域模型及其调控研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [29] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属生物有效性[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(6): 123-125.
Chai S W, Wen Y M, Zhang Y N, *et al.* Bio-availability of heavy metal of agriculture soil in Guangzhou suburb [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, **16**(6): 123-125.
- [30] 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(4): 90-94.
Chai S W, Wen Y M, Wei X G, *et al.* Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River delta [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, **43**(4): 90-94.
- [31] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 经济快速发展区土壤重金属累积评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1608-1616.
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, *et al.* Evaluation of soil heavy metals accumulation in the fast economy development region [J]. Environmental Science, 2010, **31**(6): 1608-1616.
- [32] 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 天门市土壤—水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报, 2014, **45**(1): 221-226.
Shen T Z, Zhu M X, Xiao J. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of Tianmen and its health risk assessment [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(1): 221-226.
- [33] 李慧敏, 方圆, 唐翠荣, 等. 广西水稻土镉有效性、水稻镉富集系数与土壤性质的关系研究[J]. 西南农业学报, 2018, **31**(12): 2678-2684.
- Li H M, Fang Y, Tang C R, *et al.* Relationship among bioavailability cadmium and cadmium enrichment coefficient in rice and paddy soil properties in Guangxi [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, **31**(12): 2678-2684.
- [34] 李心, 林大松, 刘岩, 等. 不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1511-1520.
Li X, Lin D S, Liu Y, *et al.* Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1511-1520.
- [35] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, **55**(4): 678-687.
Guo C, Wen Y B, Yang Z F, *et al.* Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, **55**(4): 678-687.
- [36] 杨伟光, 陈卫平, 杨阳, 等. 新疆某矿冶区周边土壤重金属生物有效性与生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2019, **13**(8): 1930-1939.
Yang W G, Chen W P, Yang Y, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in soils around a mining area in Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, **13**(8): 1930-1939.
- [37] Sebei A, Helali M A, Oueslati W, *et al.* Bioavailability of Pb, Zn, Cu, Cd, Ni and Cr in the sediments of the Tessa River: a mining area in the North-West Tunisia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, **137**: 1-8.
- [38] Han L F, Zhao X J, Jin J, *et al.* Using sequential extraction and DGT techniques to assess the efficacy of plant-and manure-derived hydrochar and pyrochar for alleviating the bioavailability of Cd in soils [J]. Science of the Total Environment, 2019, **678**: 543-550.
- [39] Zhang J Z, Sugir M E, Li Y Y, *et al.* Effects of vermicomposting on the main chemical properties and bioavailability of Cd/Zn in pure sludge [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(20): 20949-20960.
- [40] Jin C, Nan Z R, Wang H C, *et al.* Effect of Cd stress on the bioavailability of Cd and other mineral nutrition elements in broad bean grown in a loess subsoil amended with municipal sludge compost [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(8): 7418-7432.
- [41] 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.
- [42] 张会民, 吕家珑, 徐明岗, 等. 土壤镉吸附的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2006, (6): 8-12.
Zhang H M, Lü J L, Xu M G, *et al.* Review of studies on cadmium adsorption by soils [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2006, (6): 8-12.
- [43] 谢邦廷, 贺灵, 江官军, 等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. 岩矿测试, 2017, **36**(3): 273-281.
Xie B T, He L, Jiang G J, *et al.* Regulation and evaluation of selenium availability in Se-rich soils in southern China [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, **36**(3): 273-281.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)