

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)	

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¹, 朱新萍^{1,2*}, 韩耀光¹, 赵一¹, 金航¹, 贾宏涛^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究棉花秸秆生物质炭添加对碱性水稻土壤-水稻体系中镉迁移转化的影响, 通过室外盆栽试验, 以水稻品种特丰优2号为试验材料, 在添加外源镉含量为0、1、4和8 mg·kg⁻¹的碱性水稻土中分别施入炭土质量比分别为0%、1%、2.5%和5%的棉花秸秆生物质炭, 待水稻收获后, 分析不同含量镉胁迫处理下, 施用不同量棉秆炭对碱性水稻土壤pH、养分和水稻体内镉富集、转移情况及镉在土壤中的赋存形态的影响。结果表明: ① 添加棉秆炭可以显著提高土壤养分 ($P < 0.05$), 其中5%量的棉秆炭添加后, 相比于对照组土壤有机质增加了25.74~47.53%, 速效钾提高了3.16~4.25倍。② 施用生物质炭可以显著降低土壤及水稻体内镉含量 ($P < 0.05$), 尤其5%量的棉秆炭施用后, Cd4和Cd8含量下糙米镉含量分别由0.31 mg·kg⁻¹和0.43 mg·kg⁻¹降低到0.15 mg·kg⁻¹和0.10 mg·kg⁻¹, 达到国家标准范围。生物质炭可以显著降低镉在土壤-水稻体系的富集、转移系数, 并使残渣态镉含量增多, 弱酸提取态、可还原态、可氧化态镉含量显著降低 ($P < 0.05$)。③ 土壤pH、电导率和养分各指标与水稻体内镉含量和土壤中弱酸提取态、可还原态和可氧化态镉含量有极显著负相关关系, 与残渣态镉含量呈正相关关系 ($P < 0.05$)。上述研究结果说明, 棉秆炭的施用可增加土壤养分, 对碱性水稻土和水稻体内镉的富集、转化有显著的阻控作用。

关键词: 镉; 棉秆炭; 碱性土壤; 理化性质; 富集系数; 转移系数; 镉形态

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1871-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909118

Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar

LIU Shi-dou¹, ZHU Xin-ping^{1,2*}, HAN Yao-guang¹, ZHAO Yi¹, JIN Hang¹, JIA Hong-tao^{1,2}

(1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)

Abstract: We investigated the effects of cotton stalk biochar addition on the soil nutrient characteristics of alkaline paddy soil and the migration and transformation of cadmium in a soil-rice system. An outdoor pot experiment was conducted with Tefengyou 2 rice as the testing material. We added cotton stalk biochar (0%, 1%, 2.5%, and 5%) in the alkaline paddy soil with cadmium content of 0, 1, 4, and 8 mg·kg⁻¹. After rice harvesting, the effects of different concentrations of cotton stalk biochar on alkaline soil physical and chemical properties, cadmium enrichment and transfer in rice, and the occurrence of cadmium in soil were analyzed under different concentrations of cadmium stress. The results showed that ① adding cotton stalk biochar can effectively increase soil nutrient ($P < 0.05$). After the addition of cotton stalk biochar, the organic matter increased by 25.74%~47.53%, and the available potassium content increased by 3.16~4.25 times. ② Cotton stalk carbon can reduce the cadmium content in soil and rice, especially after the application of 5% cotton stalk carbon. The cadmium content of brown rice at Cd4 and Cd8 concentrations decreased from 0.31 mg·kg⁻¹ and 0.43 mg·kg⁻¹ to 0.15 mg·kg⁻¹ and 0.10 mg·kg⁻¹, respectively, reaching the national standard. Cotton stalk biochar can significantly reduce the enrichment and transfer coefficient of cadmium in soil-rice systems and can increase the cadmium content in the residual cadmium but decrease the acid extractable cadmium, reducible cadmium, and oxidizable cadmium content ($P < 0.05$). ③ Soil pH, conductivity, and nutrient indicators were significantly negatively correlated with cadmium content in rice and acid extractable cadmium, reducible cadmium, and oxidizable cadmium content in soil and were positively correlated with cadmium content in residual cadmium. The above results indicate that the application of cotton stalk biochar can significantly improve the soil nutrient of alkaline cadmium-contaminated paddy soil, and the application of cotton stalk biochar has a significant control effect on the migration and transformation of cadmium in alkaline soil and rice.

Key words: cadmium; cotton stalk biochar; alkaline soil; physical and chemical properties; bioaccumulation factor; translocation factor; fractions of cadmium

镉是一种迁移性高、毒性高、隐蔽性强的重金属^[1]. 全国土壤污染点位超标率达16.1%, 其中土壤镉超标率为7.0%^[2]. 水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为镉富集作物之一^[3], Cd通过根系吸收和体内转运在水稻籽粒部分积累, 从而进入食物链被人体摄入, 影响人体健康^[4]. 因此合理选择一种改良剂, 阻控镉的迁移转化, 降低镉的生物有效性, 从而保障农作物的

安全生产, 是目前亟待解决的问题之一.

生物质炭 (biochar, BC) 是生物质在缺氧条件下高温裂解生成的一类新型环境功能材料^[5], 其具有

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-11-28

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2017D01A36)

作者简介: 刘师豆 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染控制与修复, E-mail: 1436476722@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhuxinping1978@163.com

性质稳定、比表面积大、孔隙丰富、表面能高和吸附性强等特点^[6]. 生物质炭可以改善土壤理化性质^[7], 提高农产品产量^[8], 尤其在吸附重金属, 降低其生物有效性方面有很好的应用潜力^[9]. 生物质炭的种类来源可分为木炭^[10]、竹炭^[11]、秸秆炭^[12]、稻壳炭^[13]和动物粪便炭^[14]等, 不同品种生物质炭对重金属的调控效果不一^[15]. 有报道称新疆乌鲁木齐大米主产区之一的米东区^[16], 引用污水灌溉已有 30 多年的历史^[17], 并且部分区域土壤母质为半荒漠棕钙土或荒漠灰钙土母质^[18], 其部分农田土壤 Cd 含量高于新疆土壤背景值约 1.5 倍, 明显高过全国背景值^[19, 20], 甚至某水稻种植地附近检出镉的浓度达 $34.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21, 22], 可见在乌鲁木齐市部分水稻种植区存在农作物生长受镉污染影响的风险. 新疆是我国最大和最重要的商品棉生产基地, 具有丰富的棉花秸秆资源^[23], 其就地应用于农田土壤改良与修复具有广大的前景. 新疆土壤 pH 值普遍 > 8.0, 为高碱性土壤^[24]. 近年来研究生物质炭减缓镉对水稻胁迫效应的研究多在中国东南部的酸性土壤区域开展^[25], 生物质炭在酸性土壤中可以提高 pH 值, 促进镉向更稳定的形态转化, 减少有效态镉含量^[9], 阻控镉在土壤-作物体系中迁移, 在碱性土壤中这种阻控效果是否依然存在? 棉秆生物质炭施用后对碱性土壤养分有何影响? 对土壤中镉的生物有效性及在水稻体内镉的富集、转运能力又有何影响? 这关系到新疆棉秆生物质炭在农田环境中的推广应用和碱性重金属污染农田土壤中农作物的安全生产.

本研究选取碱性水稻土壤和棉花秸秆生物质炭, 采用室外盆栽试验, 以新疆常种植水稻品种特丰优 2 号为试验材料, 分析不同浓度镉胁迫处理下, 施用不同量的棉秆炭对镉在碱性土壤-水稻体系中迁移、转化的影响, 探寻土壤养分与水稻各器官中镉分布含量及土壤中镉的赋存形态之间的关系, 通过明确棉秆炭对镉在碱性土壤-水稻中富集、迁移的阻控效果, 以期对棉秆炭资源利用及其对重金属镉在土壤-作物中富集转化的阻控效应研究提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

以水稻品种特丰优 2 号为研究材料, 供试土壤为乌鲁木齐市米东区稻田土壤, 土壤 pH 为 8.07 (水土比 2.5:1), 有机质含量为 $31.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量为 $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾含量为 $5.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量为 $17.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速

效磷含量为 $38.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $1005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉含量为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 供试生物质炭为棉花秸秆生物质炭, 由新疆农业科学院提供, 炭化温度为 360°C , 炭化时间为 16 h, 过 0.5 mm 筛备用. 棉秆生物质炭 pH 值为 9.37, 全氮含量为 $21.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量为 $10.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾含量为 $21.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量为 $5.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $200.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉含量为 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

水稻室外盆栽试验在新疆农业大学农科楼试验地进行. 将稻田土壤风干后过 5 mm 筛, 装入聚乙烯桶 (高 50 cm, 直径 42 cm), 每盆装土 15 kg. 试验设有两个处理因素, 镉和棉秆炭. 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) 及相关论文中对乌鲁木齐市农作物种植区中镉浓度的调查结果^[19~22], 将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 配置为所需镉量的镉溶液, 用注射器喷施并与土混合均匀, 向土壤中添加镉含量分别为 0、1、4 和 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别记为 Cd0、Cd1、Cd4 和 Cd8, 稳定 2 个月; 将生物质炭按照与土壤质量比分别为 0%、1%、2.5% 和 5% 的比例混入不同镉含量处理土壤中, 分别记为 C0、C1、C2.5 和 C5, 再稳定 2 周后覆水插秧, 水深 5 cm. 试验共 16 个处理, 每处理 4 次重复, 每盆定苗 3 株. 以不加镉不加生物质炭的处理为对照组 (Cd0C0). 基肥施用量参考乌鲁木齐本地水稻种植农田用量, 尿素 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷酸氢二胺 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 硫酸钾 $52.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 折合盆栽试验中, 每盆施用尿素 1.2 g, 磷酸氢二胺 1.5 g, 硫酸钾 0.4 g, 出穗期“晒田”10 d. 整个生育期 165 d (2018 年 5 月 20 日至 10 月 5 日), 全生育期水肥条件一致. 水稻收获后, 测定水稻各器官和稻土镉含量, 测定土壤中镉的赋存形态及土壤理化性质.

1.3 样品测定方法

用陶瓷剪刀将水稻植株分为根、茎、叶、稻壳和糙米, 各器官于烘箱 (NY881-1, 南亚烘箱有限公司) 中 105°C 杀青 20 min, 80°C 烘至恒重后研磨备用. 用四分法取待测土壤, 自然风干后过 0.25 mm 筛备用. 土壤和水稻各器官采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系消解, 使用石墨炉原子吸收仪 (TAS-990, 北京普析通用有限责任公司) 测定水稻各器官和土壤中镉含量. 采用 BCR 逐步提取法^[26] 测定土壤中镉的赋存形态 (酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态), 土壤理化性质 (pH、电导率、速效钾、速效磷、碱解氮和有机质) 测定方法参考文献^[27]. 植物重金属富集系数、转移系数的计算方法如下:

$$\text{富集系数(BCF)} = \frac{\text{各器官镉含量}}{\text{土壤镉含量}}$$
$$\text{转移系数(TF)} = \frac{\text{地上器官镉含量}}{\text{根系镉含量}}$$

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据统计分析,用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较分析(Duncan 法),不同小写字母表示 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著,使用 Origin 8.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 棉秆炭对镉污染碱性水稻土壤养分的影响

由表 1 可知,不同浓度镉胁迫和不同施用量的棉秆炭处理均对水稻土壤 pH、电导率和养分(有机质和速效养分)有极显著影响($P < 0.001$)。在相同

炭量处理下(0%~5%),与对照 Cd0 相比,土壤 pH、电导率和养分各指标均随镉含量递增而降低($P < 0.05$)。在不同镉含量处理下(0~8 mg·kg⁻¹),较对照组 C0,各指标均随棉秆炭施用量增多而升高($P < 0.05$),其中施加 5% 量的棉秆炭能更有效提高土壤 pH、电导率和各养分含量,在各镉浓度胁迫处理下,5% 量的棉秆炭使土壤 pH 增加了 3.85%~5.47%,电导率增加了 21.87%~42.9%,有机质增加了 25.74%~47.53%,速效钾提高了 3.16~4.25 倍,速效磷增加了 0.76~2.63 倍,碱解氮增加了 3.21~4.07 倍。根据全国土壤肥力等级标准判定(表 2),施用棉秆炭后土壤中有有机质、速效钾含量显著增多,并且其余养分指标含量也有所提高,说明棉秆生物质炭的施用能显著改善镉污染土壤环境,提高土壤养分。

表 1 不同含量镉胁迫和棉秆炭处理对碱性水稻土壤养分的影响¹⁾

Table 1 Effects of different concentrations of cadmium stress and cottonstalk biochar treatment on alkaline paddy soil nutrients						
处理	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹
Cd0C0	8.05 ± 0.03f	931.00 ± 1.00d	39.47 ± 0.31fgh	1 075.72 ± 0.97l	15.30 ± 0.26f	17.37 ± 1.58g
Cd0C1	8.14 ± 0.03cd	1 020.33 ± 1.53c	41.57 ± 0.24ef	1 254.63 ± 1.9i	17.93 ± 0.25e	58.06 ± 1.58e
Cd0C2.5	8.18 ± 0.02cd	1 135.00 ± 1.00b	47.40 ± 0.39c	2 627.59 ± 0.72e	22.80 ± 1.91b	64.01 ± 1.58b
Cd0C5	8.36 ± 0.03a	1 202.67 ± 6.11a	58.23 ± 0.26a	4 474.93 ± 11.92a	26.97 ± 0.64a	73.15 ± 2.10a
Cd1C0	7.89 ± 0.01i	731.67 ± 2.52k	38.27 ± 0.80gh	922.32 ± 0.32n	11.67 ± 0.12g	14.17 ± 2.10gh
Cd1C1	7.93 ± 0.03hi	828.67 ± 2.08h	39.95 ± 0.52fgh	1 205.67 ± 1.40j	17.37 ± 0.06e	31.09 ± 1.58f
Cd1C2.5	8.14 ± 0.02cd	835.67 ± 2.08g	45.11 ± 0.24cd	2 476.86 ± 2.10f	20.43 ± 0.12c	53.04 ± 3.17d
Cd1C5	8.28 ± 0.02b	891.67 ± 2.08e	53.38 ± 0.34b	4 225.11 ± 23.75b	26.67 ± 0.25a	71.78 ± 2.86a
Cd4C0	7.78 ± 0.03j	622.33 ± 1.53n	37.61 ± 0.51h	780.63 ± 8.09o	8.70 ± 0.17h	12.8 ± 0.79h
Cd4C1	7.98 ± 0.03g	686.00 ± 2.65l	39.18 ± 0.52fgh	1 121.03 ± 0.74k	16.00 ± 0.26f	27.71 ± 0.48f
Cd4C2.5	8.11 ± 0.01de	763.67 ± 1.53j	44.01 ± 2.04de	2 108.39 ± 5.45g	19.20 ± 0.30d	31.55 ± 0.00e
Cd4C5	8.17 ± 0.06cd	852.33 ± 0.58f	52.67 ± 6.02b	3 934.71 ± 1.30c	23.83 ± 1.10b	64.47 ± 2.74b
Cd8C0	7.75 ± 0.01j	563.33 ± 3.51o	36.78 ± 0.02h	685.26 ± 1.85p	6.33 ± 0.58i	6.86 ± 0.00i
Cd8C1	7.89 ± 0.01hi	634.00 ± 1.00m	38.98 ± 0.46fgh	1 048.20 ± 0.28m	6.50 ± 0.00i	8.23 ± 0.00i
Cd8C2.5	8.09 ± 0.02ef	760.67 ± 1.15j	41.36 ± 1.18efg	2 003.15 ± 1.47h	17.23 ± 0.21f	27.89 ± 3.17f
Cd8C5	8.16 ± 0.02cd	805.00 ± 2.65i	46.25 ± 1.11cd	3 596.07 ± 5.44d	23.00 ± 1.00e	34.29 ± 2.38e
Cd	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
C	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
Cd × C	0.000 ***	0.000 ***	0.004 **	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

1) 同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); * * * 表示因素对土壤理化性质的影响在 $P < 0.001$ 水平极极显著

表 2 全国土壤肥力等级标准

Table 2 National soil nutrient rating standard				
级别	有机质/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
1 很丰富	>40	>150	>40	>200
2 丰富	30~40	120~150	20~40	150~200
3 中等	20~30	90~120	10~20	100~150
4 缺乏	10~20	60~90	5~10	50~100
5 很缺乏	6~10	30~60	3~5	30~50
6 极缺乏	<6	<30	<3	<30

2.2 棉秆炭对镉在碱性稻土-水稻体系中积累和迁移的影响

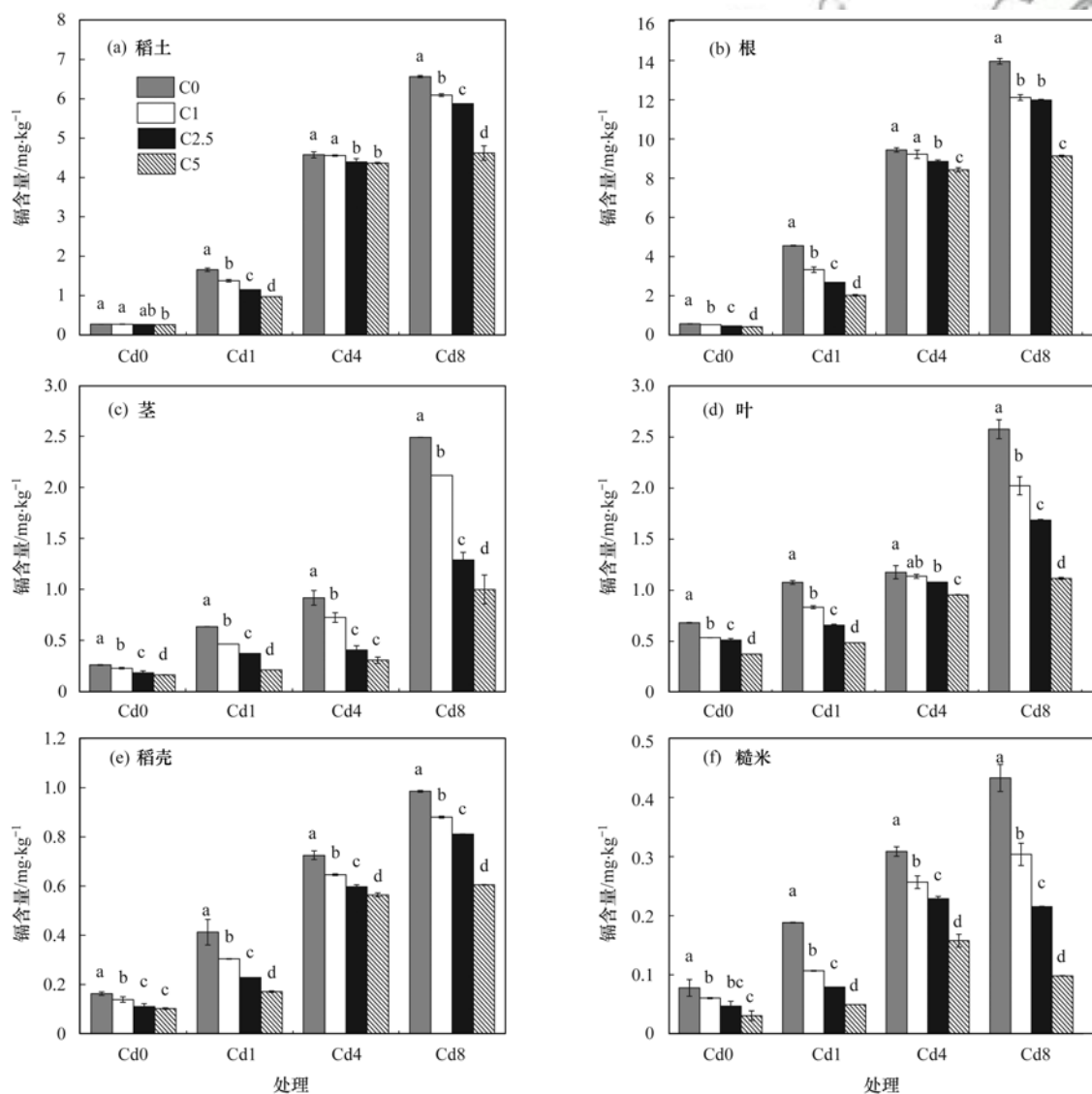
由图 1 可知,外界环境镉含量的增加会导致水稻体内镉含量增加。重金属镉在水稻各器官的含量

分布情况为:根>叶>茎>稻壳>糙米。在相同镉浓度处理下,与 C0 相比,增加棉秆炭的施用量会显著降低水稻各器官中镉含量($P < 0.05$)。当土壤镉含量处理超过 1 mg·kg⁻¹,添加生物质炭量在 2.5% 以

下,水稻糙米中镉含量超过《食品安全国家标准》(GB 2762-2017 食品中污染物限量)中的规定范围(糙米中镉 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).而 Cd4 和 Cd8 浓度处理中,与对照组 C0 相比,施用 5% 量的棉秆生物质炭处理后,Cd4 含量中糙米镉含量由 $0.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd8 含量中糙米镉含量由 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,即 C5 处理后糙米镉含量均达到国家标准.上述研究结果说明在土壤镉含量为 $0 \sim 8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,随棉秆炭施用量的增多,稻土和水稻各器官中镉含量逐渐降低($P < 0.05$),5% 施用量的棉秆炭可以有效阻控重金属镉向水稻籽粒中转移,并可使水稻糙米镉含量下降达到国家标准范围内.

由土壤-水稻体系中镉的富集和转移系数可知

(表 3),在相同镉含量胁迫处理下,水稻各器官的富集系数(BCF)随棉秆炭施用量的增多而递减($P < 0.05$),说明棉秆生物质炭可以有效降低植物体内各器官富集的镉含量.由转移系数(TF)可知,镉从水稻地下部分转移至地上的分布情况为:TF(叶/根) > TF(茎/根) > TF(稻壳/根) > TF(糙米/根),且除了 Cd0 含量下的 C0 和 C1 处理中 TF(叶/根) > 1,其余处理各器官转移系数均小于 1.在不同镉含量胁迫处理下,各器官转移系数随棉秆炭施用量的增多随之降低($P < 0.05$),说明施用棉秆生物质炭后可以将镉元素固定在水稻根部,阻控重金属镉从水稻地下部分向地上部分转移,使镉在水稻体内的富集、转移能力下降,达到减少重金属对作物的毒害作用.



不同小写字母表示相同镉浓度处理下不同炭量处理间差异 ($P < 0.05$)

图 1 各浓度镉胁迫下棉秆炭对碱性稻土及水稻体内各器官镉含量的影响

Fig. 1 Effect of cotton stalk biochar on cadmium content in alkaline paddy soil and rice body under different concentrations of cadmium stress

表 3 棉秆炭对土壤-水稻体系中镉的富集和转移系数的影响¹⁾

Table 1 Table 3 Effect of cotton stalk biochar on cadmium bioaccumulation factor and translocation factor in a soil-rice system

处理	富集系数					转移系数			
	根/土	茎/土	叶/土	稻壳/土	糙米/土	茎/根	叶/根	稻壳/根	糙米/根
Cd0C0	2.09a	0.95a	2.5a	0.59a	0.28a	0.45a	1.19a	0.28a	0.14a
Cd0C1	1.96b	0.84b	1.99b	0.51b	0.22ab	0.43ab	1.01b	0.26ab	0.11a
Cd0C2.5	1.73c	0.69c	1.71b	0.42c	0.18bc	0.40bc	0.99c	0.24b	0.10ab
Cd0C5	1.63d	0.62c	1.45c	0.39c	0.12c	0.38c	0.89d	0.24b	0.07b
Cd1C0	2.75a	0.38a	0.65a	0.27a	0.11a	0.14a	0.26a	0.10a	0.04a
Cd1C1	2.42b	0.34b	0.61b	0.22ab	0.08b	0.14a	0.25ab	0.09b	0.03b
Cd1C2.5	2.34b	0.32c	0.57c	0.2bc	0.07c	0.14a	0.24ab	0.09c	0.03c
Cd1C5	2.09c	0.22d	0.5d	0.18c	0.05d	0.1b	0.24b	0.08c	0.02d
Cd4C0	2.06a	0.2a	0.26a	0.16a	0.07a	0.1a	0.15a	0.08a	0.03a
Cd4C1	2.02a	0.16b	0.25a	0.14b	0.06b	0.08b	0.12a	0.07b	0.03b
Cd4C2.5	2.01a	0.09c	0.25a	0.14bc	0.05b	0.05c	0.12a	0.07bc	0.03b
Cd4C5	1.93b	0.07c	0.22b	0.13c	0.04c	0.04c	0.11b	0.07c	0.02c
Cd8C0	2.13a	0.38a	0.39a	0.15a	0.07a	0.18a	0.18a	0.07a	0.03a
Cd8C1	2.1a	0.35a	0.33b	0.14b	0.05b	0.16b	0.16b	0.07b	0.02b
Cd8C2.5	2.04b	0.24b	0.29c	0.14c	0.04c	0.11c	0.14c	0.07c	0.02c
Cd8C5	1.98b	0.22b	0.24d	0.13d	0.02d	0.1d	0.12d	0.07d	0.01d

1) 不同小写字母表示相同镉浓度处理下不同炭量处理间差异 ($P < 0.05$)

2.3 施用棉秆炭对镉在碱性稻土中赋存形态的影响

由表 4 可知, 对照组 Cd0 含量下, 稻土中镉的不同赋存形态含量分布情况为: 残渣态 (44.11% ~ 87.43%) > 可还原态 (6.01% ~ 33.13%) > 弱酸提取态 (5.47% ~ 19.66%) > 可氧化态 (1.08% ~ 3.13%)。在镉胁迫处理下 (Cd1、Cd4 和 Cd8), 稻土中镉的不同赋存形态含量分布情况为: 可还原态 (41.22% ~ 74.42%) > 残渣态 (19.68% ~ 54.97%) > 可氧化态 (2.35% ~ 4.07%) > 弱酸提取态

(0.61% ~ 2.13%), 本试验水稻土壤中镉主要以可还原态的形式赋存, 酸提取态较少。在 Cd0 含量下残渣态镉的比例大于其他形态镉, 可能是对照处理 (Cd0) 土壤中长期存在的镉元素较稳定, 而在添加外源镉的短期镉胁迫处理下, 土壤中镉元素较不稳定, 更多的是以较活跃的形式在土壤中存在。研究发现, 在不同镉浓度胁迫处理下, 施用棉秆炭可显著降低稻土中可还原态镉含量 ($P < 0.05$), 并随棉秆炭施用量的增多 (0% ~ 5%), 可还原态镉含量降低幅

表 4 棉秆生物质炭对碱性稻土中镉的赋存形态的影响¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Effect of cotton stalk biochar on the fractions of cadmium in alkaline paddy soil / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	弱酸提取态	可还原态	可氧化态	残渣态
Cd0C0	0.054 ± 0.007a	0.09 ± 0.09a	0.008 ± 0.000a	0.12 ± 0.01d
Cd0C1	0.050 ± 0.001a	0.08 ± 0.08b	0.008 ± 0.000a	0.13 ± 0.01c
Cd0C2.5	0.035 ± 0.002b	0.03 ± 0.03c	0.006 ± 0.000b	0.20 ± 0.00b
Cd0C5	0.014 ± 0.000c	0.02 ± 0.02d	0.003 ± 0.000c	0.23 ± 0.00a
Cd1C0	0.028 ± 0.000a	1.09 ± 1.09a	0.039 ± 0.002a	0.49 ± 0.03b
Cd1C1	0.017 ± 0.000b	0.82 ± 0.82b	0.033 ± 0.002b	0.51 ± 0.03a
Cd1C2.5	0.011 ± 0.000c	0.59 ± 0.59c	0.033 ± 0.001b	0.51 ± 0.02a
Cd1C5	0.006 ± 0.000d	0.40 ± 0.40d	0.031 ± 0.000b	0.53 ± 0.00a
Cd4C0	0.047 ± 0.003a	3.13 ± 3.13a	0.186 ± 0.007a	1.21 ± 0.07d
Cd4C1	0.041 ± 0.002ab	2.93 ± 2.93b	0.153 ± 0.007b	1.43 ± 0.03c
Cd4C2.5	0.039 ± 0.005b	2.65 ± 2.65c	0.132 ± 0.001c	1.57 ± 0.08b
Cd4C5	0.037 ± 0.000b	2.46 ± 2.46d	0.129 ± 0.007c	1.75 ± 0.05a
Cd8C0	0.140 ± 0.009a	4.88 ± 4.88a	0.247 ± 0.004a	1.29 ± 0.16b
Cd8C1	0.125 ± 0.011b	4.25 ± 4.25b	0.226 ± 0.001b	1.49 ± 0.02b
Cd8C2.5	0.094 ± 0.002c	3.87 ± 3.87c	0.210 ± 0.011c	1.71 ± 0.01a
Cd8C5	0.077 ± 0.002d	2.58 ± 2.58d	0.186 ± 0.003d	1.78 ± 0.15a
Cd	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
C	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
Cd × C	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

1) 不同小写字母表示相同镉浓度处理下不同炭量处理间差异 ($P < 0.05$); * * * 表示因素对土壤理化性质的影响在 $P < 0.001$ 水平极显著

度也增大,在 Cd0 含量中,与对照组 C0 相比,可还原态镉含量经 C5 处理后降低了 4.82 倍,在 Cd1 含量中,C5 处理下可还原态镉含量降低了 1.75 倍,在 Cd4 含量中,C5 处理下降低了 0.27 倍,在 Cd8 含量中,C5 处理下降低了 0.89 倍.弱酸提取态和可氧化态镉含量随炭量变化的趋势与可还原态镉含量一致,残渣态镉含量却随棉秆炭施用量的增加而增多 ($P<0.05$),说明棉秆炭的添加能使残渣态镉含量增加,使可还原态镉、弱酸提取态镉和可氧化态镉含

量减少,显著降低了镉的有效性.

2.4 土壤理化性质与土壤镉形态、水稻各器官镉含量的相关性分析

由表 5 可知,除速效钾分别与土壤镉全量和可氧化态镉含量未达到相关关系,其它土壤理化性质指标均与土壤中镉全量和弱酸提取态、可还原态、可氧化态镉含量有负相关关系 ($P<0.01$),但它们却与残渣态镉含量呈正相关关系 ($P<0.01$).由表 6 可知,土壤理化性质各指标与水稻各器官(根、茎、

表 5 土壤理化性质与土壤中各镉形态含量相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation between soil physical and chemical properties and cadmium occurrence in soil

项目	土壤镉全量	弱酸提取态	可还原态	可氧化态	残渣态
pH	-0.523 **	-0.527 **	-0.598 **	-0.541 **	0.530 **
电导率	-0.802 **	-0.552 **	-0.826 **	-0.793 **	0.661 **
速效钾	-0.259	-0.426 **	-0.344 **	-0.273	0.354 *
速效磷	-0.523 **	-0.658 **	-0.611 **	-0.551 **	0.592 **
有机质	-0.378 **	-0.494 **	-0.443 **	-0.396 **	0.392 **
碱解氮	-0.587 **	-0.630 **	-0.642 **	-0.606 **	0.367 **

1) 正数表示正相关,负数表示负相关; * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$,下同

表 6 土壤理化性质与水稻体内镉含量相关性分析

Table 6 Correlation between soil physical and chemical properties and cadmium content in rice

项目	根部镉含量	茎部镉含量	叶部镉含量	稻壳镉含量	糙米镉含量
pH	-0.571 **	-0.671 **	-0.705 **	-0.655 **	-0.809 **
电导率	-0.834 **	-0.748 **	-0.797 **	-0.830 **	-0.868 **
速效钾	-0.302 *	-0.443 **	-0.493 **	-0.421 **	-0.594 **
速效磷	-0.563 **	-0.734 **	-0.748 **	-0.676 **	-0.811 **
有机质	-0.420 **	-0.514 **	-0.564 **	-0.514 **	-0.619 **
碱解氮	-0.625 **	-0.692 **	-0.733 **	-0.708 **	-0.760 **

叶、稻壳、糙米)中镉含量均有负相关关系 ($P<0.01$).这也直接体现提高土壤理化性质能在一定程度上降低土壤中镉的有效性,阻控镉在土壤-水稻体系的迁移能力,达到钝化镉污染的效果.

3 讨论

3.1 棉秆炭对碱性水稻土壤养分的影响

镉胁迫及生物质炭处理会对土壤 pH、电导率和养分会产生一定的影响.棉花秸秆生物质炭制备后 pH 较高,pH 升高会影响土壤溶解-吸附、吸附-解吸等反应.有机质是衡量土壤养分、也是影响土壤重金属行为的重要性质之一^[28].电导率是反映土壤质量和物理性质的重要信息,土壤速效养分是指作物当季利用的那一部分,能表征作物的养分利用率^[29].本研究中,土壤有机质等养分含量随镉含量递增而降低,原因可能是有机质与镉离子可形成不易被植物吸收的配位络合物,在生物质炭成分的研究中表明,生物质炭中含有大量的有机质、氮、磷等成分,土壤中施入棉秆炭后随着镉含量的递增,更多的有机质与镉结合,使土壤有机质含量呈随镉增加而减少

的趋势^[30].本研究中 5% 量的棉秆炭对镉污染稻土 pH、速效养分和有机质的提升效果最明显.原因主要为棉花为喜钾性植物,在种植中施用的肥料会导致棉秆吸收,因此作为生物质施入土壤后得到释放,为土壤添加了足够的养分^[7],从而改善了镉污染水稻土壤的养分等指标,这与他人的研究结果一致^[22,31].

3.2 棉秆炭对碱性水稻土壤中镉形态的影响

生物质炭本身具有高度芳香化的结构,含有大量酚羟基、羧基和羰基,这些基本性质使生物炭具备了良好的吸附特性及稳定性^[32],有研究表明生物炭能够提高土壤的 pH,增加土壤有机质含量,显著影响土壤中重金属迁移行为,使土壤中镉离子向更稳定的形态转化,从而起到钝化镉离子的效果^[33].而较高的 pH 能诱导重金属形成氢氧化物沉淀,从而达到钝化目的^[34].生物质炭影响镉形态转化的机理主要有 3 个方面:①土壤 pH 的提高使土壤中黏土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷也增加,促进 CdCO_3 和 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀的生成,使土壤碳酸盐结合态 Cd 含量升高.②土壤 pH 升高时 H^+ 含量

减小,降低了 H^+ 和 Cd^{2+} 在吸附位点上的竞争,使得土壤中的有机质、铁锰氧化物等与重金属的结合更紧密^[35]. ③生物质炭表面富含的 $C=C$ 、 $C=O$ 和 $-OH$ 等官能团可与 Cd^{2+} 进行络合与离子交换等反应而钝化^[36]. 生物质炭还可通过离子交换、专性吸附及共沉反应来降低重金属活性^[37]. 同时生物质炭通过改善土壤理化性质而间接改善水稻根系微环境,增强水稻根表铁膜吸附沉淀重金属的能力^[38],将重金属固定在根部,阻控了镉在水稻体内富集、迁移能力,降低了镉在水稻各器官中的累积. 然而有研究发现,在黄壤中施用竹炭后土壤镉含量增高,镉的转移系数也略有增加,可见生物质炭对土壤中镉含量的影响和镉在植物体内向上转移作用也因土壤类型和生物质炭种类不同而异.

土壤重金属生物有效性主要体现在有效形态. 有研究表明在 BCR 提取法中,弱酸提取态和可还原态较不稳定,可以被作物吸收利用,故将弱酸提取态和可还原态作为有效态镉^[39]. pH 值的高低可以影响土壤中重金属的生物有效态,本研究中随棉秆炭的增加,稻土 pH 也增加,同时土壤中镉的有效态降低,结果与罗洋^[29]、闫家普^[31] 和吴迪等^[40] 的研究结果一致. 这可能因为随着土壤 pH 值的升高,带负电荷的土壤胶体对带正电荷的重金属离子吸附能力增加,易形成氢氧化物为重金属离子提供更多的吸附位点^[41],从而降低了重金属的生物有效性. 而土壤和生物质炭中的有机质可与镉离子形成不易被作物吸收的配位络合物,降低了重金属移动性和有效性,进而减少作物对镉离子的利用^[30]. 因此施用生物质炭能一定程度上降低土壤中镉的有效性,达到钝化镉污染对作物毒害的效果.

3.3 水稻体内镉分布情况与棉秆炭阻控镉富集、转运能力的效应

根系是作物吸收和富集镉离子的主要器官,镉离子可以通过细胞膜扩散至作物细胞内^[42]. 水稻根部及根际微生物可对重金属元素吸收或固定,增强根部对重金属的吸收能力^[43].

镉在水稻根部富集最多,而向地上部转移量少, Rizwan 等^[44] 也验证了相同结果. 对于镉在水稻体内各器官的分布情况,本研究发现镉在特丰优 2 号水稻各器官分布的情况为:根 > 叶 > 茎 > 稻壳 > 糙米,这与他人研究结果较不同. 胡雪芳等^[38] 认为镉在盐梗-939 水稻中的分布顺序为:根 > 籽粒 > 茎叶,廖雄辉等^[45] 认为镉在深两优 5814 水稻不同器官中的分布顺序为:根 > 茎叶 > 籽粒,这可能与供试水稻品种有关,导致其重金属富集部位不同. 棉秆炭对水稻体内镉含量有明显抑制作用. 当土壤镉含

量达到 $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米镉含量超标部分在施用 5% 量的生物质炭后均降到国家标准要求范围.

棉秆炭不仅降低了水稻体内各器官镉含量,对镉在土壤-水稻中的富集、转移能力也有明显的抑制作用. 棉秆炭对钝化镉的富集、转运能力的影响可从富集系数和转移系数体现. 富集系数反映植物对重金属富集能力的强弱,转移系数体现植物向地上部位运输重金属的能力. 在本试验中,根据镉的富集系数和转移系数可知,增加棉秆炭施用量(0%~5%),富集、转移系数显著降低($P < 0.05$),且在本试验中,施加生物质炭后水稻地上部各器官的转运系数基本都小于 1. 有研究指出,转移系数小于 1 的植物,可以把重金属固定在根部^[37],限制重金属向地上部转移. 这说明生物质炭可阻控重金属镉在水稻-土壤体系的转移,从而表现为根部镉富集量最大,而转移至糙米的镉含量最少^[46].

4 结论

(1) 镉胁迫处理下施用棉秆生物质炭有效提升了土壤 pH、电导率以及有机质等速效养分, 5% 施用量的棉秆炭对碱性水稻土壤养分提升效果最好.

(2) 施用棉秆炭后重金属镉在水稻体内各器官分布规律为:根 > 叶 > 茎 > 稻壳 > 糙米. 棉秆炭的添加可以显著降低土壤及水稻体内各器官(根、茎、叶、稻壳、糙米)中镉的富集量,并阻控镉向籽粒转移,其中在 Cd4 和 Cd8 处理下, 5% 量的棉秆炭可使糙米镉含量超标情况降到国家标准范围,削弱了重金属的毒害作用.

(3) 镉污染碱性水稻土壤中,镉的不同赋存形态含量分布情况为:可还原态 > 残渣态 > 可氧化态 > 弱酸提取态. 棉秆炭的添加可以有效降低可还原态、可氧化态和弱酸提取态镉含量,同时使残渣态镉含量增加. 土壤 pH、电导率、有机质和速效养分与水稻各器官镉含量和土壤弱酸提取态、可还原态、可氧化态镉含量呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与残渣态镉含量有极显著正相关关系($P < 0.01$).

参考文献:

- [1] Shen M, Chen Y Q, Han H, et al. Study on electrokinetic remediation of cadmium-contaminated soil [J]. Agricultural Biotechnology, 2019, 8(1): 135-139.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [3] Ding Z L, Wu J P, You A Q, et al. Effects of heavy metals on soil microbial community structure and diversity in the rice (*Oryza sativa* L. subsp. Japonica, food crops institute of Jiangsu academy of agricultural sciences) rhizosphere [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 63(1): 75-83.

- [4] Tang L, Deng S H, Tan D, *et al.* Heavy metal distribution, translocation, and human health risk assessment in the soil-rice system around Dongting Lake area, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(17): 17655-17665.
- [5] Elwahed M S A, El-Aziz M E, Shaaban E A, *et al.* New trend to use biochar as foliar application for wheat plants (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, **42**(10): 1180-1191.
- [6] Saiz-Rubio R, Balseiro-Romero M, Antelo J, *et al.* Biochar as low-cost sorbent of volatile fuel organic compounds; potential application to water remediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(12): 11605-11617.
- [7] 汪玉瑛, 计海洋, 吕豪豪, 等. 羊栖菜生物炭对镉污染土壤性质及镉形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(6): 1132-1140.
Wang Y Y, Ji H Y, Lü H H, *et al.* Effects of biochar derived from *Sargassum fusiforme* on the properties and cadmium forms of cadmium-contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(6): 1132-1140.
- [8] Oladele S, Adeyemo A, Awodun M, *et al.* Effects of biochar and nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties, nitrogen use efficiency and upland rice (*Oryza sativa*) yield grown on an Alfisol in Southwestern Nigeria [J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019, **8**(3): 295-308.
- [9] Zhang M, Shan S D, Chen Y G, *et al.* Biochar reduces cadmium accumulation in rice grains in a tungsten mining area-field experiment: effects of biochar type and dosage, rice variety, and pollution level [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(1): 43-52.
- [10] Saini S, Katnoria J K, Kaur I. A comparative study for removal of cadmium (II) ions using unmodified and NTA-modified *Dendrocalamus strictus* charcoal powder [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2019, **17**(1): 259-272.
- [11] Li W C, Sheng H Y. Effects of bamboo charcoal-based bio-fertilizer on wine bamboo sap yield and nutrient composition[J]. Journal of Forestry Research, 2018, **29**(4): 1083-1092.
- [12] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, *et al.* Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting[J]. Bioresource Technology, 2018, **258**: 279-286.
- [13] Khan M A, Khan S, Ding X D, *et al.* The effects of biochar and rice husk on adsorption and desorption of cadmium on to soils with different water conditions (upland and saturated) [J]. Chemosphere, 2018, **193**: 1120-1126.
- [14] Bai X F, Li Z F, Zhang Y Z, *et al.* Recovery of ammonium in urine by biochar derived from faecal sludge and its application as soil conditioner[J]. Waste and Biomass Valorization, 2018, **9**(9): 1619-1628.
- [15] Huang L G, Li Y Y, Zhao M, *et al.* Potential of *Cassia alata* L. coupled with biochar for heavy metal stabilization in multi-metal mine tailings [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(3): 494.
- [16] 张栋, 翟勇, 张妮, 等. 新疆水稻主产区土壤硒含量与水稻籽粒硒含量的相关性[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (1): 139-143.
Zhang D, Zhai Y, Zhang N, *et al.* Correlation between soil selenium content and rice grain selenium content in Xinjiang rice production areas [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (1): 139-143.
- [17] 刘玉燕, 刘浩峰. 新疆米泉市污灌区土壤重金属污染及防治[J]. 昌吉学院学报, 2007, (3): 45-48.
- [18] 曹冉, 孜比布拉·司马义, 斯琴. 乌鲁木齐市北郊农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 河北农业大学学报, 2019, **42**(3): 57-63.
Cao R, Simayi Z, Si Q. Evaluation of heavy metals pollution and ecological risk of farmland soils in north Urumqi of Xinjiang[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, **42**(3): 57-63.
- [19] 斯琴. 乌鲁木齐市郊安宁渠区农田土壤重金属污染现状调查与分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
Si Q. Investigation and analysis on heavy metal pollution of soil in Anningqu county of Urumqi suburb [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.
- [20] 王显. 乌鲁木齐市米东工业区周边农田土壤重金属调查及源解析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
Wang X. Investigation and source apportionment on heavy metal of soils in farmland around Midong industrial park of Urumqi city [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [21] 郑江, 张江丽, 于洪, 等. 乌鲁木齐市米东污灌区农田土壤重金属污染评价[J]. 干旱环境监测, 2012, **26**(1): 17-21.
Zheng J, Zhang J L, Yu H, *et al.* Assessment of farmland soil heavy metal pollution in Urumqi Midong sewage irrigation region [J]. Arid Environmental Monitoring, 2012, **26**(1): 17-21.
- [22] 易治伍, 王灵, 钱翌, 等. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(2): 150-154.
Yi Z W, Wang L, Qian Y, *et al.* Heavy metal contents and evaluation of farmland soil in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, **23**(2): 150-154.
- [23] Zhang W, Du Y. Analysis of the succession of structure of the bacteria community in soil from long-term continuous cotton cropping in Xinjiang using high-throughput sequencing [J]. Archives of Microbiology, 2018, **200**(4): 653-662.
- [24] Heng T, Liao R K, Wang Z H, *et al.* Effects of combined drip irrigation and sub-surface pipe drainage on water and salt transport of saline-alkali soil in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, **10**(6): 932-945.
- [25] 隋凤凤, 王静波, 吴昊, 等. 生物质炭钝化农田土壤镉的若干研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1468-1474.
Sui F F, Wang J B, Wu H, *et al.* Several research progresses in Cd inactivation by biochar application in agricultural soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1468-1474.
- [26] Ippolito J A, Berry C M, Strawn D G, *et al.* Biochars reduce mine land soil bioavailable metals[J]. Journal of Environmental Quality, 2017, **46**(2): 411-419.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [28] 肖瑞芳, 沈普翠, 赵秀兰. 三种生物质炭对红壤和黄壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(5): 915-920.
Xiao R F, Shen P C, Zhao X L. Effects of three types of biochar on bioavailability of cadmium in a red soil and a yellow soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(5): 915-920.
- [29] 罗洋, 高晋, 罗绪强, 等. 木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(8): 1676-1682.
Luo Y, Gao J, Luo X Q, *et al.* Effects of charcoal on growth and Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(8): 1676-1682.
- [30] 张振宇. 生物炭对稻田土壤镉生物有效性的影响研究[D].

- 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- Zhang Z Y. Effect of biochar on cadmium bio-availability in paddy soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [31] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- Yan J P, Ding X D, Cui L, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- [32] Li J H, Zhang M, Ye Z Y, *et al.* Effect of manganese oxide-modified biochar addition on methane production and heavy metal speciation during the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **76**: 267-277.
- [33] Huang L, Liu C, Liu X W, *et al.* RETRACTED ARTICLE: Immobilization of heavy metals in e-waste contaminated soils by combined application of biochar and phosphate fertilizer [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, **230**(2): 26.
- [34] Sun K N, Wen D, Yang N, *et al.* Heavy metal and soil nutrient accumulation and ecological risk assessment of vegetable fields in representative facilities in Shandong Province, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, **191**(4): 240.
- [35] 周涵君, 韩秋静, 马静, 等. 生物炭对红壤和褐土中镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(3): 433-442.
- Zhou H J, Han Q J, Ma J, *et al.* Effects of biochar on Cd forms in red soil and cinnamon soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(3): 433-442.
- [36] 罗海艳, 李丹阳, 刘寿涛, 等. 铁锰改性椰壳炭对土壤镉形态及水稻吸收积累镉的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 857-865.
- Luo H Y, Li D Y, Liu S T, *et al.* Effects of Fe-Mn modified coconut shell biochar on cadmium speciation and accumulation in rice [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(5): 857-865.
- [37] Wang X H, Li X, Liu G Q, *et al.* Mixed heavy metal removal from wastewater by using discarded mushroom-stick biochar: adsorption properties and mechanisms [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2019, **21**(3): 584-592.
- [38] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- Hu X F, Tian Z Q, Liang L, *et al.* Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- [39] 高焕方, 曹园城, 何炉杰, 等. Tessier 法和 BCR 法对比磷酸二氢钠处置含铅污染土壤形态分析[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(10): 5751-5756.
- Gao H F, Cao Y C, He L J, *et al.* Speciation analysis of lead-contaminated soil treated with sodium dihydrogen phosphate using Tessier and BCR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(10): 5751-5756.
- [40] 吴迪, 魏小娜, 澎湃, 等. 钝化剂对酸性高镉土壤钝化效果及水稻镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, **50**(2): 482-488.
- Wu D, Wei X N, Peng P, *et al.* Effects of passivators on acid and cadmium farmland soils and cadmium absorption by rice [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(2): 482-488.
- [41] Yu B, Men M X, Liu P J, *et al.* Leaching effect of organic acids on heavy metal contaminated soil [J]. Agricultural Biotechnology, 2019, **8**(1): 130-134, 139.
- [42] Zheng J, Gu X Q, Zhang T J, *et al.* Phytotoxic effects of Cu, Cd and Zn on the seagrass *Thalassia hemprichii* and metal accumulation in plants growing in Xincun Bay, Hainan, China [J]. Ecotoxicology, 2018, **27**(5): 517-526.
- [43] Khan A, Khan S, Khan M A, *et al.* Heavy metals effects on plant growth and dietary intake of trace metals in vegetables cultivated in contaminated soil [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, **16**(5): 2295-2304.
- [44] Rizwan M, Ali S, Akbar M Z, *et al.* Foliar application of aspartic acid lowers cadmium uptake and Cd-induced oxidative stress in rice under Cd stress [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(27): 21938-21947.
- [45] 廖雄辉, 龙琴, 王惠群, 等. 南荻炭与镉钝化剂互作对水稻镉含量和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1818-1826.
- Liao X H, Long Q, Wang H Q, *et al.* Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar and cadmium passivators on rice cadmium content and yield [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1818-1826.
- [46] Liang C Z, Xiao H J, Hu Z Q, *et al.* Uptake, transportation, and accumulation of C₆₀ fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil [J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 330-338.

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)