

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

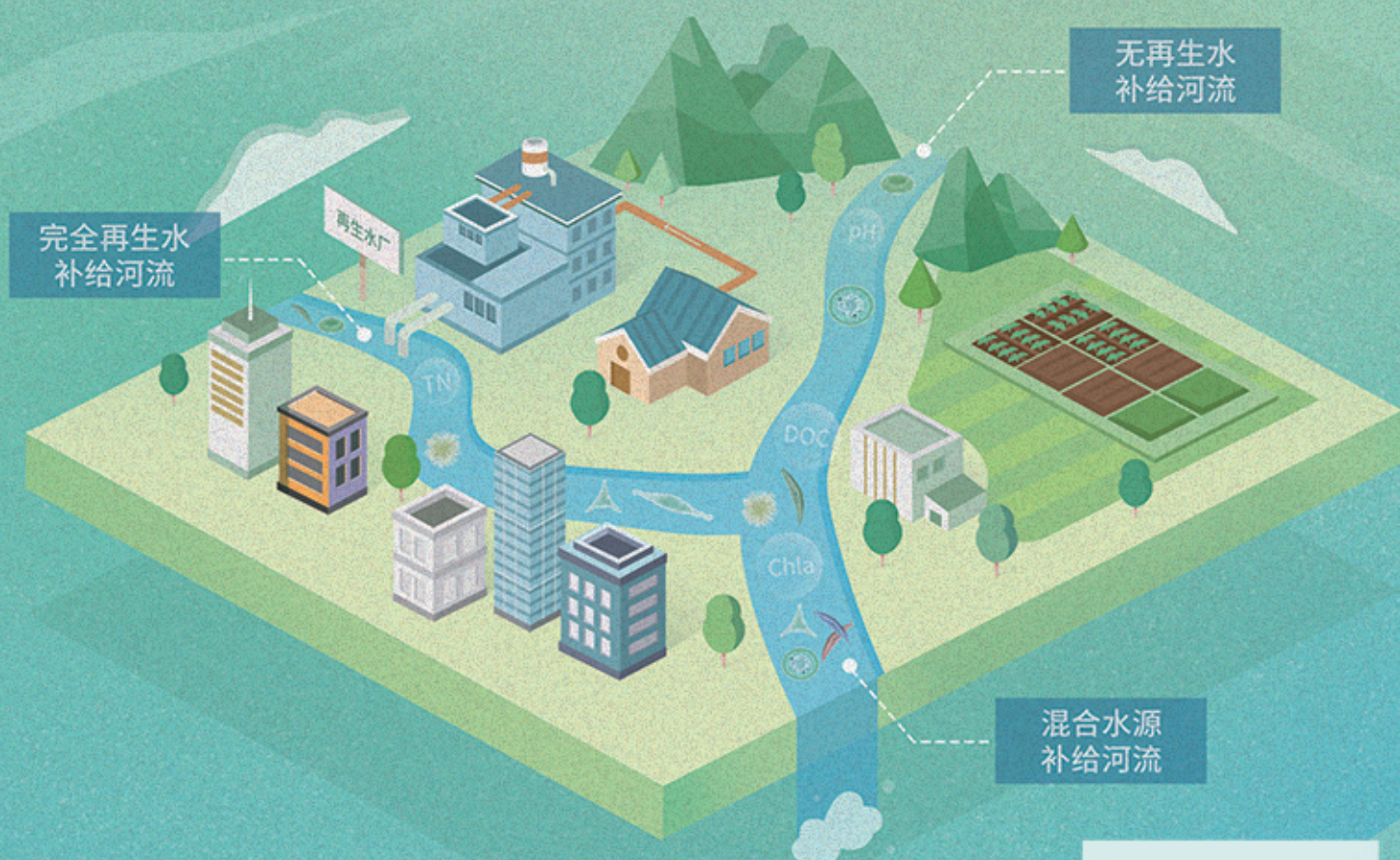
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜霖, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果

伍港繁¹, 周航^{1,2*}, 唐棋¹, 辜娇峰^{1,2*}, 曾鹏^{1,2}, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 象草(*Pennisetum purpureum* Schumach.) 因适应能力强、生长迅速和生物量大, 且具有一定的经济效益, 在重金属污染土壤植物修复中有很好的应用前景。通过田间试验, 研究不同肥料(有机肥、复合肥和追施氮肥)联合施用强化象草修复重度 Cd 污染农田的效果。结果表明: ①不同肥料调控处理降低了土壤 pH 值, 提高了土壤有机质含量, 根际土壤总 Cd 含量较修复前降低了 8.3%~23.3%, 土壤有效态 Cd 含量较对照降低了 11.7%~34.6%; ②不同肥料调控处理显著促进了象草生长和对 Cd 的吸收累积, 象草地上部生物量增加 29.2%~368.2%, 象草 Cd 总累积量增加了 37.8%~283.9%, 其中有机肥+复合肥+追施氮肥处理(F3N)象草 Cd 总累积量达到了 145.48 g·hm⁻²; ③不同肥料联合对提高象草 Cd 累积量的效果为: 有机肥+复合肥+追施氮肥>有机肥+复合肥>单一复合肥。因此, 在重度 Cd 污染农田植物修复中, 肥料调控可以强化象草对土壤中 Cd 的富集移除效果, 进而加快对污染农田的修复。

关键词: 肥料; 象草; 植物修复; 农田 Cd 污染; 富集

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5761-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202202059

Effects of Strengthening *Pennisetum purpureum* Schumach with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland

WU Gang-fan¹, ZHOU Hang^{1,2*}, TANG Qi¹, GU Jiao-feng^{1,2*}, ZENG Peng^{1,2}, LIAO Bo-han^{1,2}

(1. College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Changsha 410004, China)

Abstract: *Pennisetum purpureum* Schumach has a good application prospect in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soil due to its strong adaptability, rapid growth, large biomass, and certain economic benefits. In this study, field experiments were conducted to study the effects of different fertilizers (organic fertilizer, compound fertilizer, and topdressing nitrogen fertilizer) combined to enhance *Pennisetum purpureum* Schumach remediation of severely Cd-polluted farmland. The results showed the following: ① different fertilizer treatments reduced soil pH value and increased soil organic matter content, the total Cd concentration in rhizosphere soil decreased by 8.3%-23.3%, and the available Cd concentration decreased by 11.7%-34.6% compared with that of the control. ② The aboveground biomass of *Pennisetum purpureum* Schumach increased by 29.2%-368.2%, and the total accumulation of Cd increased by 37.8%-283.9%. The total Cd accumulation of *Pennisetum purpureum* Schumach treated with organic fertilizer + compound fertilizer + topdressing nitrogen fertilizer (F3N) reached 145.48 g·hm⁻². ③ The effects of different fertilizer treatments on improving Cd accumulation of *Pennisetum purpureum* Schumach were as follows: organic fertilizer + compound fertilizer + topdressing nitrogen fertilizer > organic fertilizer + compound fertilizer > single compound fertilizer. Therefore, in the phytoremediation of severely Cd-polluted farmland, fertilizer application strategy can enhance the effect of *Pennisetum purpureum* Schumach on Cd accumulation and removal in soil and thus accelerate the remediation of Cd-contaminated farmland.

Key words: fertilizer; *Pennisetum purpureum* Schumach; phytoremediation; Cd-polluted farmland; accumulation

镉(Cd)作为一种有害的重金属元素,易通过食物链传递从环境中富集到人体,进而引起慢性中毒^[1]。近年来,我国农田 Cd 污染问题受到全社会广泛关注。文献[2]指出:影响农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属,其中 Cd 为首要污染物。当前对于重金属污染土壤修复治理技术主要有物理、化学和植物修复等,其中植物修复技术是一种廉价高效且非破坏性的土壤修复方法,主要利用植物把受污染土壤中的污染物(重金属和有机物等)移除、分解或围堵^[3],如超富集植物东南景天、伴矿景天和龙葵等被广泛研究并应用于 Cd 污染土壤的修复治理。然而超富集植物具有生长速度慢、生物量小和修复周期长,且修复过程中无法产生经济收益等缺陷^[4~8]。因此,选用大生物量高 Cd 富集的经济类替代作物成为植物修复研究的热点之一。

象草(*Pennisetum purpureum* Schumach.) 是一种适应能力强、生物量大且生长迅速的多年生草本植物^[9]。近年来已有一些利用象草修复重金属污染耕地的报道,如刘影等^[10]在铅锌矿区重金属复合污染土壤中种植象草,根据植株的生长状况、重金属含量、富集能力和转运能力,认为象草可用于修复以 Cd 为主的重金属复合污染土壤。Yang 等^[11]对比了 3 种象草对 Cd 的富集移除能力,发现甜象草富集移除土壤 Cd 的能力强于矮象草和红象草。覃建军等^[12]的研究表明,谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)对强

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-03-26

基金项目: 湖南省 2020 高新技术产业科技创新引领计划项目(2020NK2001); 湖南省重点研发计划项目(2021NK2027); 湖南省科技人才托举工程项目(2019TJ-N05)

作者简介: 伍港繁(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: wugfcsu@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouhang4607@163.com; gujiaofeng@163.com

化象草修复中轻度 Cd 污染农田土壤具有较大潜力,土壤 Cd 最大移除量为 $16.78\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$. 以上研究均表明象草在 Cd 污染土壤植物修复中有很好的应用前景^[13-15].

在植物修复研究中,利用肥料调控可以提高植物生物量,促进植物对重金属的累积量^[16-21]. 李贺^[22]的研究发现,施有机肥可以有效提高遏蓝菜的生物量,分别添加低量和高量有机肥处理,遏蓝菜对 Cd 的总累积量分别达到了对照组的 1.90 倍和 2.26 倍. 杨曾平等^[23]的试验表明,基施氮、磷肥尤其是氮肥对桂牧一号有明显增产作用,追施氮肥可以明显促进桂牧一号的再生. 窦春英^[24]的研究发现,在一定范围内施加氮肥能显著提高超积累植物东南景天的生物产量,并且促进东南景天根部对 Zn 和 Cd 的吸收并转运至地上部. 显然对于 Cd 污染农田,单一肥料调控处理对提高植物修复效率具有一定的效果,然而不同肥料联合及不同肥料施用方式对象草修复 Cd 污染农田效果的研究尚鲜见报道. 因此,本文以湖南省浏阳市某中重度 Cd 污染农田为研究对象,探究有机肥和复合肥联合施用,并结合追施氮肥对强化象草修复 Cd 污染农田的效果,以期为中重

度 Cd 污染农田开展替代种植和植物修复提供理论与技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验田选址于靠近七宝山硫铁矿的湘东某重度污染农田($113^{\circ}55'99''\text{ E}$, $28^{\circ}19'33''\text{ N}$). 该矿山区域的主要活动是锌矿开采和电解铜生产,因其生产所排放的废气、废水和废渣造成周边区域重金属污染. 该地区位于亚热带季风湿润气候区,年平均气温为 18.6°C ,年降水量为 $1\,550\sim1\,650\text{ mm}$,无霜期约为 270 d. 试验田中土壤类型为红壤,土壤基本理化性质见表 1. 供试象草为桂闽引象草 (*Pennisetum purpureum* Schumach cv. Guiminyin),是一种高产量象草. 象草购于新余市稻草人农业园,有机肥购于宁夏伊品生物科技股份有限公司,有机质含量 $\geq 45\%$,总养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) $\geq 10\%$;复合肥购于湖南隆科肥业有限公司,总养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) $\geq 45\%$;氮肥购于重庆建峰化工股份有限公司,主要成分为尿素,总氮 $\geq 46\%$,以上肥料中 Cd 含量均未检出(检出限 $20\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

表 1 试验田土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested farmland soil

土壤类型	pH	阳离子交换量 / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (有机质) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (碱解氮) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (有效磷) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (速效钾) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (总 Cd) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (有效态 Cd) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
红壤	5.36	32.13	34.21	202.72	16.81	154.33	3.01	1.71

1.2 试验设计

将复合肥、有机肥和氮肥这 3 种肥料进行不同联合处理,本试验各处理设计见表 2. 其中复合肥施用量设置为 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;有机肥设置 3 个施用量,分别为 $3\,750$ 、 $7\,500$ 和 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;追施氮肥量设置为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 每个样方面积为 12 m^2 ($3\text{ m}\times4\text{ m}$),象草间距为 $0.5\text{ m}\times0.5\text{ m}$,每个样方种植 40 株象草. 本试验共 7 个处理,每个处理 3 个重复,共设置 24 个样方,所有样方均以随机区组设计排列. 象草种植前,将有机肥和复合肥均匀施于各处理样方中,并与土壤混合均匀. 象草于 2020 年 4 月 17 日移栽于大田样方中,生长 60 d 后在处理 F1N、F2N 和 F3N 中施加氮肥,生长 190 d 后于 2020 年 10 月 25 日收获.

1.3 样品采集与分析

象草生长 190 d 后,在每个样方中按对角线法采集 5 株象草,随后将象草分为地上部和根部,称量各处理象草各部位的鲜重. 收获的象草样品依次用自来水冲洗去除表面灰尘和土壤颗粒,然后用去离子水冲洗干净后,在 105°C 的恒温干燥箱中杀青 30

min,然后在 70°C 下烘干至恒重. 称量干重后,将象草样品用粉碎机研磨过 100 目筛,保存待测. 土壤样品自然风干后,研磨过 10 目和 100 目筛,保存备用.

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

编号	试验处理
CK	不施肥(对照)
F0	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥
F1	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $3\,750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
F2	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
F3	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
F1N	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $3\,750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + 追施氮肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
F2N	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + 追施氮肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
F3N	基施 $1\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥 + 有机肥 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + 追施氮肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

象草样品采用干灰化-硝酸提取法消解,土壤 Cd 总量测定采用王水-高氯酸电热板加热消解,消解液中的 Cd 含量采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP6300, Thermo Fisher)测定. 所有土壤和植物样品分析过程以国家标准物质土壤[GBW(E)-

070009] 和生物成分标准物质 (GBW-10010) 进行质量控制分析, 同时做空白试验, Cd 的回收率为 97.0%~103.1%。土壤的 pH、有机质含量和阳离子交换量等基本理化性质根据文献[25,26]所述方法测定。

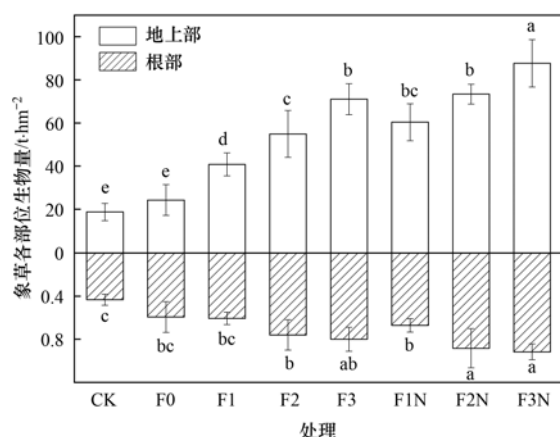
1.4 数据统计分析

试验数据用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行统计处理, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n=3$)。采用单因素 ANOVA 中 Duncan 多重比较法分析各处理间差异 ($P<0.05$), 图采用 Origin Pro 2018 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理下象草的生物量的影响

从图 1 中不同肥料处理对象草生长的影响可知, 施用不同肥料处理显著提高了象草地上部位和根部生物量, 且随着肥料施用量的增加, 象草各部位生物量呈增加趋势。对于地上部位而言, CK 生物量为 $18.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F0 (仅复合肥处理) 为 $24.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F1、F2 和 F3 (有机肥 + 复合肥处理) 的生物量为 $24.3 \sim 54.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F1N、F2N 和 F3N (有机肥 + 复合肥 + 追施氮肥) 的生物量为 $60.4 \sim 87.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CK 相比, 各施肥处理对象草地上部生物量提高了 29.2%~368.2%。对于根部而言, CK 生物量为 $0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F0 的生物量为 $0.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F1、F2 和 F3 的生物量为 $0.61 \sim 0.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, F1N、F2N 和 F3N 的生物量为 $0.67 \sim 0.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 各处理根部生物量与 CK 相比增加了 37.2%~113.9%。各肥料处理提高象草地上部位和根部生物量均以 F3N 处理效果最高, 其次为 F2N 和 F3 处理。显然施肥处理能显著促进象草生长, 提高象草各部位生物量;



生物量以象草干重计; 不同小写字母表示 $P<0.05$

水平上差异显著, 下同

图 1 不同处理下象草的生物量

Fig. 1 Biomass of *Pennisetum purpureum* Schumacher in different treatments

各种组配肥料对提高象草生物量的效果为: 有机肥 + 复合肥 + 追施氮肥 > 有机肥 + 复合肥 > 单一复合肥。

2.2 不同处理下象草各部位 Cd 含量的影响

图 2 为不同肥料处理对象草各部位 Cd 含量的影响。对于象草地上部位, CK 的 $\omega(\text{Cd})$ 为 $1.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除 F0 和 F1 以外, 其余肥料处理 (F2~F3N) 地上部 Cd 含量均低于 CK, 降幅达到 9.2%~26.0%, 其中 F3 和 F3N 处理降幅最大, 且均与 CK 之间差异性显著 ($P<0.05$)。然而与 CK 相比较, 各肥料处理均提升了根部 Cd 含量, CK 根部 $\omega(\text{Cd})$ 为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, F0 处理使象草根部 Cd 含量增加了 68.1%, F1、F2 和 F3 处理象草根部 Cd 含量增加了 63.3%~29.4%, F1N、F2N 和 F3N 处理增加了 35.5%~23.8%, 各处理均与 CK 之间存在显著差异性 ($P<0.05$)。显然, 各肥料处理可显著提高象草根部对 Cd 的吸收。

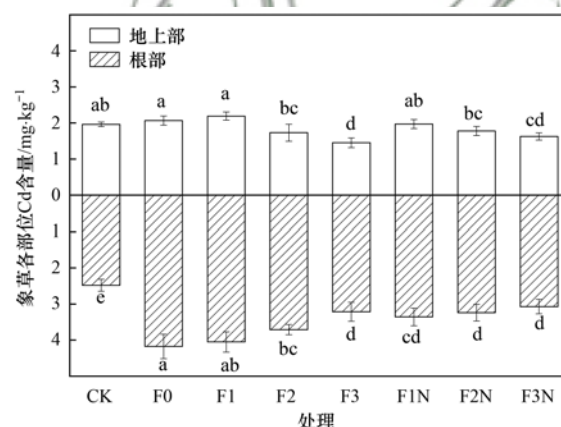


图 2 不同处理下象草各部位 Cd 含量

Fig. 2 Cd concentrations in different parts of *Pennisetum purpureum* Schumacher in different treatments

2.3 不同处理下象草 Cd 累积量的影响

图 3 为各肥料处理对象草 Cd 累积量的影响。从中可以看出, 各肥料处理均不同程度地提高了象草对土壤中 Cd 的累积量, 且随着肥料施用量的增加, 象草 Cd 累积量呈逐渐增加趋势。所有处理象草根部与地上部的 Cd 累积量分别占整株累积量的 1.4%~3.1% 和 96.9%~98.6%, 表明象草地上部 Cd 累积量远高于根部。CK 处理地上部位和根部 Cd 累积量分别为 $36.70 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.19 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CK 处理相比, F0 处理使象草地上部和根部 Cd 累积量分别增加了 38.3% 和 22.7%, F1、F2 和 F3 处理使象草地上部和根部 Cd 累积量分别增加了 139.5%~179.8% 和 28.6%~64.7%, F1N、F2N 和 F3N 处理使象草地上部和根部 Cd 累积量分别增加了 223.2%~290.7% 和 38.7%~92.4%。相比于 CK, 各

处理象草 Cd 总累积量为 52.23 ~ 145.48 g·hm⁻², 增加了 37.8% ~ 283.9%, 其中 F3N 的处理象草 Cd 总累积量最大, 其次为 F2N 和 F1N 处理。

通过不同肥料处理之间的比较可计算复合肥、有机肥和追施氮肥分别提升象草 Cd 累积量。与 CK 相比, 单一复合肥 (F0) 提高象草 Cd 总累积量 37.8%; 与 F0 处理相比, 有机肥 + 复合肥联合处理中 (F1 ~ F3), 3 750 ~ 15 000 kg·hm⁻² 的有机肥提高象草 Cd 总累积量 71.2% ~ 100.3%; 与 F1 ~ F3 处理相比, 有机肥 + 复合肥 + 追施氮肥处理中 (F1N ~ F3N), 追施氮肥提高象草 Cd 总累积量 34.5% ~ 39.0%。显然, 不同肥料联合对提高象草 Cd 累积量的效果为: 有机肥 + 复合肥 + 追施氮肥 > 有机肥 +

复合肥 > 单一复合肥; 各单一施肥措施提高象草 Cd 累积量的效果为: 有机肥 > 追施氮肥 > 复合肥。

2.4 不同处理下象草根际土壤 Cd 含量、pH 和有机质的影响

在利用象草进行 Cd 污染农田修复中, 施加肥料促进了象草对根际土壤 Cd 的吸收, 降低了根际土壤总 Cd 含量、有效态 Cd 含量和 pH 值 (表 3)。与种植前土壤相比 [ω (总 Cd) 为 3.01 mg·kg⁻¹, ω (HCl-Cd) 为 1.71 mg·kg⁻¹], CK 及各肥料处理下象草根际土壤总 Cd 和 HCl-Cd 含量分别降低了 8.3% ~ 23.3% 和 5.3% ~ 38.0%, 其中 F3N 处理效果最好。这表明, 施用有机肥、复合肥和氮肥对象草修复中重度 Cd 污染农田具有强化效果, F3N 处理根际土壤 ω (Cd) 降为 2.31 mg·kg⁻¹, 但仍远高于农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018) 中筛选值 [ω (Cd) 为 0.3 mg·kg⁻¹]。

各肥料处理降低了土壤 pH 值, 提升了土壤有机质。与 CK 相比, 单一复合肥 F0 处理下土壤 pH 显著降低了 0.41 个单位, 有机肥 + 复合肥处理下, 土壤 pH 下降了 0.77 ~ 1.10 个单位, 有机肥 + 复合肥 + 追施氮肥处理下, 土壤 pH 下降了 0.81 ~ 1.11 个单位, 尤其是 F3N 处理下土壤 pH 最低。不同肥料处理均能提高土壤有机质, F0 处理下土壤有机质含量较 CK 处理增加了 8.4%, F1、F2 和 F3 处理下土壤有机质含量增加了 17.9% ~ 31.3%, F1N、F2N 和 F3N 处理下土壤有机质增加了 9.3% ~ 28.0%。

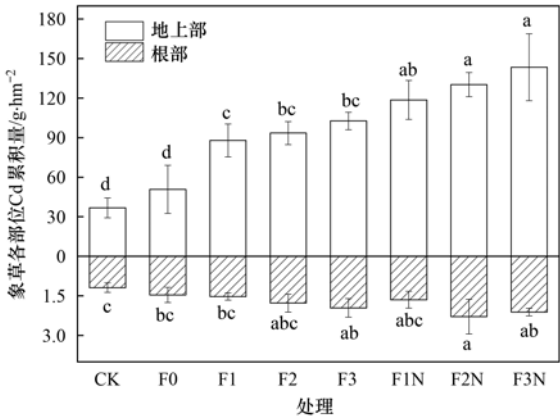


图3 不同处理下象草各部位 Cd 累积量

Fig. 3 Cd accumulation in different parts of *Pennisetum purpureum* Schumacher in different treatments

表3 不同肥料处理对象草根际土壤 Cd 含量、pH 和有机质的影响¹⁾

Table 3 Effects of different fertilizer treatments on Cd concentrations, pH values, and the organic matter contents in rhizosphere soil

处理	修复后根际土壤 ω (总 Cd)/mg·kg ⁻¹	根际土壤总 Cd 含量 降低率/%	ω (HCl-Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	pH
CK	2.76 ± 0.12a	8.3 ± 4.0c	1.62 ± 0.13a	47.75 ± 1.82d	5.85 ± 0.04a
F0	2.62 ± 0.12ab	12.9 ± 4.0bc	1.43 ± 0.13ab	51.78 ± 0.99cd	5.44 ± 0.06b
F1	2.51 ± 0.12abc	16.6 ± 3.5abc	1.22 ± 0.15cd	56.29 ± 0.99bc	5.08 ± 0.06c
F2	2.48 ± 0.18bc	17.6 ± 5.9abc	1.19 ± 0.09d	59.96 ± 4.33ab	5.04 ± 0.02c
F3	2.43 ± 0.17bc	19.2 ± 5.6ab	1.09 ± 0.05d	62.72 ± 2.38a	4.75 ± 0.02c
F1N	2.44 ± 0.24bc	18.9 ± 8.0ab	1.39 ± 0.15bc	52.23 ± 0.46cd	5.04 ± 0.02d
F2N	2.40 ± 0.12bc	20.3 ± 3.6ab	1.18 ± 0.08d	61.13 ± 3.91ab	4.95 ± 0.03e
F3N	2.31 ± 0.09c	23.3 ± 2.9a	1.06 ± 0.05d	58.12 ± 3.35ab	4.74 ± 0.03e

1) 同列不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著

3 讨论

3.1 施肥对象草生长、Cd 吸收累积及土壤有效态 Cd 含量的影响

象草地上部生物量和 Cd 含量是影响其修复效率的关键因素, 通过强化措施来提高象草地上部生物量和 Cd 含量均有利于提高象草修复 Cd 土壤的效率。本研究中, 不同肥料 (有机肥、复合肥和追

氮肥) 联合施用均能提高象草生物量 (图 1)。原因可能是肥料的施入不同程度提高了土壤有机质 (表 3) 和土壤 N、P 和 K 含量, 进而促进了象草的生长。张佳等^[27] 的研究表明, 施用有机肥能显著提高土壤有机质含量; 邓月强等^[28] 的研究发现, 有机物料处理不同程度地提高了土壤速效养分含量, 尤其是土壤碱解氮和速效钾含量达显著性提高, 进而促进了伴矿景天生长。然而, 不同肥料 (有机肥、复合肥和追

施氮肥)联合施用处理下象草地上部 Cd 含量随施加量的增加而略有降低(图 2),其原因可能是肥料施用水平的提高显著促进了象草的生长,象草生物量的增加引起了稀释效应,导致其 Cd 含量有所下降^[29,30],但随着肥料施用量的增加,象草地上部和根系对 Cd 累积量呈逐渐增加趋势(图 3)。

土壤中有有效态 Cd 含量是影响植物根系吸收 Cd 的重要因素,肥料调控可通过改变土壤 Cd 的生物有效性来影响植物对土壤 Cd 的吸收^[31]。本研究中,施用复合肥、有机肥与追施氮肥处理下土壤 pH 值和有效态 Cd 含量均有所下降(表 3),这与已有研究中 pH 值降低提高土壤有效 Cd 的结果不一致^[32]。其原因可能是各处理施用的有机肥中含有丰富的有机质,显著提高了土壤有机质含量(表 3),有机质的官能团,如羧基、醇羟基和烯醇羟基以及不同类型的羰基结构等,都可以通过吸附、螯合和络合等多种作用方式影响到 Cd 在土壤中的迁移转化^[33]。同时,有机肥进入土壤后可分解产生大分子腐殖酸,腐殖酸可通过吸附、螯合等作用固定重金属,还可与 Cd^{2+} 形成稳定性较高的络合物,进而降低了土壤有效态 Cd 含量^[34~38]。显然本研究中各肥料处理降低土壤 pH,促进根际土壤有效 Cd 增加的效能低于有机质固定 Cd 的效能。此外,象草根对土壤 Cd 的吸收也会影响根际土壤总 Cd 和有效 Cd 含量,随肥料施用量增加象草根和地上部对 Cd 的吸收累积逐渐增大(图 3),说明象草根对根际土壤中有有效态 Cd 含量的吸收逐渐增强,从而也可能导致根际土壤有效态 Cd 含量降低。

3.2 肥料调控强化象草对 Cd 污染农田的修复潜力

象草是一种优良的经济作物,生长迅速、生物量大且耐旱耐涝,各类土壤均可栽培,是当地农民普遍可以接受的重度 Cd 污染耕地的经济类替代作物^[39~41]。本研究中有有机肥与复合肥联合施用处理可以显著提高象草的 Cd 累积量,同时追施 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥(F1N、F2N 和 F3N)可进一步提高象草的 Cd 累积量(图 3)。因此,有机肥+复合肥+追施氮肥联合处理可通过提高象草的生物量,促进象草根 Cd 吸收,提高各部位对 Cd 累积量,为 Cd 污染农田土壤的修复和治理提供良好的前提条件。本研究中,在重度 Cd 污染土壤种植象草,象草 Cd 总累积量为 37.89 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK 处理),明显低于已报道的景天类超富集植物。张云霞等^[42]在 Cd 重度污染土壤中[土壤 ω (总 Cd)为 4.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]田间种植八宝景天,地上部 Cd 总累积量为 70.20 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。曹雪莹等^[43]在轻度污染土壤中[土壤 ω (总 Cd)为

0.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]田间种植伴矿景天,对污染土壤中 Cd 的总累积量为 81.3 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,且田间管理十分复杂。而本研究中, F3N 处理象草生物量达 87.7 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, Cd 总累积量可达 145.48 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ [土壤 ω (总 Cd)为 3.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],明显高于景天类超富集植物。显然,肥料调控强化象草进行植物修复具有一定的优势。此外,象草作为一种草本作物,可通过刈割等农艺措施进一步提高其生物量。王郝为等^[44]的研究表明,多次刈割可以增加象草的生物量。梁志霞等^[45]在研究刈割对桂牧 1 号杂交象草产量和品质中发现,象草刈割 3 次,产量最高达 96.8 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由此可见,在利用象草对 Cd 污染农田替代种植过程中,可通过结合肥料调控、刈割等农艺措施促进生物量的增长,大幅提升土壤 Cd 的移除量,缩短修复年限。

本研究中 F3N 的处理象草 Cd 总累积量最大(145.48 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$),其肥料成本达到 3.38 万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$,而 F1N (120.27 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)和 F2N (132.59 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理象草 Cd 总累积量略低于 F3N,但其肥料成本明显低于 F3N,仅为 1.13 万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 1.88 万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同时过多的肥料施入可能导致土壤持续酸化(表 3),甚至造成 N、P 和 K 流失等面源污染的风险。因此在利用肥料强化象草对 Cd 污染土壤植物修复过程中,施用“有机肥(3 750 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) + 复合肥(1 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) + 追施氮肥(200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)”是一种经济可行的措施。当前移除的秸秆等处置与资源化利用已经成为植物修复技术应用的瓶颈。象草生物量巨大,对于重金属含量满足饲料卫生标准[(GB 13078-2017, ω (Cd) < 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)]的象草可作为牛、羊等动物饲草原料^[46]。近年来还有研究表明,象草含有丰富的木质素,可作为能源植物生产纤维乙醇^[47]。因此利用象草修复重度 Cd 污染农田具有巨大的潜力以及经济与生态环境效益。

4 结论

(1)在重度 Cd 污染农田土壤,不同肥料(有机肥、复合肥和追施氮肥)联合施用使象草根际土壤 pH 值显著降低,有机质含量显著增加,土壤有效态 Cd 含量降低 11.7%~34.6%。

(2)不同肥料(有机肥、复合肥和追施氮肥)联合施用促进了象草生长和 Cd 积累,与 CK 相比各施肥处理地上部和根系生物量分别提高了 29.2%~368.2%和 37.2%~113.9%,同时,象草 Cd 总累积量增加了 37.8%~283.9%,其中有机肥+复合肥+追施氮肥处理(F3N)的象草 Cd 总累积量达到了

145.48 g·hm⁻².

(3) 不同肥料联合对提高象草 Cd 累积量的效果为:有机肥+复合肥+追施氮肥>有机肥+复合肥>单一复合肥;各单一施肥措施提高象草 Cd 累积量的效果为:有机肥>追施氮肥>复合肥.肥料调控是一种提升 Cd 污染土壤植物修复效率行之有效的措施.

参考文献:

- [1] Kumar A, Subrahmanyam G, Mondal R, *et al.* Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources[J]. *Chemosphere*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128855.
- [2] 生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2021, **49**(11): 47-68.
Ministry of Ecological Protection and Environment. China ecological environment status bulletin 2020 (excerpt) [J]. *Environmental Protection*, 2021, **49**(11): 47-68.
- [3] 董盼盼, 张振明, 张明祥. 生物炭-植物联合修复对土壤重金属 Pb、Cd 分布效应[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(1): 280-286.
Dong P P, Zhang Z M, Zhang M X. Distribution effect of biochar-phytoremediation on soil heavy metal Pb and Cd [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 280-286.
- [4] Kurtyka R, Małkowski E, Burdach Z, *et al.* Interactive effects of temperature and heavy metals (Cd, Pb) on the elongation growth in maize coleoptiles[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2012, **335**(4): 292-299.
- [5] Liu Y, Zhuang P, Li Z A, *et al.* Cadmium accumulation in maize monoculture and intercropping with six legume species[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2013, **63**(4): 376-382.
- [6] 朱慧君, 江婷, 郭海川. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 生物化工, 2019, **5**(2): 105-107.
Zhu H J, Jiang T, Guo H C. Research progress in remediation technology of heavy metal contaminated soil [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2019, **5**(2): 105-107.
- [7] 梅娟, 李华, 郭翠花. Cd 超富集植物修复污染土壤的研究进展[J]. 能源与节能, 2013, **18**(2): 80-82.
Mei J, Li H, Guo C H. The research progress of cd-hyperaccumulator in contaminated soil remediation [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2013, **18**(2): 80-82.
- [8] 朱凰榕, 周良华, 阳峰, 等. 两种景天修复 Cd/Zn 污染土壤效果的比较[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(2): 403-410.
Zhu H R, Zhou L H, Yang F, *et al.* Phytoremediation effects and contrast of *Sedum alfredii* and *Sedum plumbizincicola* on Cd/Zn contaminated soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(2): 403-410.
- [9] 温晓娜, 简有志, 解新明. 象草资源的综合开发利用[J]. 草业科学, 2009, **26**(9): 108-112.
Wen X N, Jian Y Z, Xie X M. The comprehensive exploitation and utilization of *Pennisetum purpureum* [J]. *Pratacultural Science*, 2009, **26**(9): 108-112.
- [10] 刘影, 伍钧, 杨刚, 等. 3 种能源草在铅锌矿区土壤中的生长及其对重金属的富集特性[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(5): 291-296.
Liu Y, Wu J, Yang G, *et al.* The growth of three kinds of energy grass in lead-zinc mining area and their bioaccumulation characteristics of heavy metals [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(5): 291-296.
- [11] Yang W J, Gu J F, Zhou H, *et al.* Effect of three Napier grass varieties on phytoextraction of Cd-and Zn-contaminated cultivated soil under mowing and their safe utilization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(14): 16134-16144.
- [12] 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 等. 螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3862-3869.
Qin J J, Tang S S, Jiang K, *et al.* Effects of chelate GLDA on the remediation of cadmium contaminated farmland by *Pennisetum purpureum* Schum [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- [13] 欧阳益兰. 中国边际土地发展能源植物象草的潜力与效益分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
Ouyang Y L. Development potential and benefit analysis of energy plants *pennisetum purpureum* on marginal land in China [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [14] 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 等. 两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1158-1165.
Zheng R L, Shi D, Liu W J, *et al.* Uptake and accumulation of cadmium and zinc by two energy grasses: a field experiment [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1158-1165.
- [15] 钟云平, 雷小文, 李建军, 等. 利用蚯蚓粪种植桂牧 1 号象草对稀土尾矿土壤的改良作用[J]. 江西科学, 2016, **34**(2): 178-181.
Zhong Y P, Lei X W, Li J J, *et al.* The study on the use of vermicompost planted Guimu No. 1 elephantgrass and repaired rare earth tailings [J]. *Jiangxi Science*, 2016, **34**(2): 178-181.
- [16] Duan Y M, Yang J F, Song Y F, *et al.* Clean technology for biochar and organic waste recycling, and utilization in apple orchard [J]. *Chemosphere*, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129914.
- [17] 王沛裴. 有机肥对 Pb、Cd 污染下马铃薯生长以及各器官 Pb、Cd 累积的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
Wang P P. Effects of liquid organic fertilizer on the growth and absorption of lead and cadmium in different organs of potato [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [18] 鲁洪娟, 周德林, 叶文玲, 等. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(11): 1378-1383.
Lu H J, Zhou D L, Ye W L, *et al.* Advances in application of bio-organic fertilizer in soil improvement and remediation of heavy metals pollution [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(11): 1378-1383.
- [19] 王琪, 张永波, 贾亚敏, 等. 有机肥和生物炭对重金属污染农田土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, **48**(1): 263-267.
Wang Q, Zhang Y B, Jia Y M, *et al.* Influences of organic fertilizer and biochar on soil fertility of heavy metal polluted farmland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, **48**(1): 263-267.
- [20] 张丽娜, 宗良纲, 沈振国. 有机肥和生态肥对土壤中镉行为以及水稻生长的影响[J]. 土壤通报, 2007, **38**(6): 1182-1186.
Zhang L N, Zong L G, Shen Z G. Effects of organic fertilizer and ecological fertilizer on behaviors of Cadmium and rice growth in Cd contaminated Soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(6): 1182-1186.
- [21] Li N Y, Li Z A, Fu Q L, *et al.* Agricultural technologies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus* L. [J]. *Water, Air, & Soil*

- Pollution, 2013, **224**(9), doi: 10.1007/s11270-013-1673-3.
- [22] 李贺. 不同农艺措施对黑麦草、地肤、遏蓝菜修复 Cd 污染土壤的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- Li H. The influence of *perennial ryegrass*, *kochia scoparia*, *thlaspi arvense* on Cd contaminated soil with different agronomic measures[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [23] 杨曾平, 聂军, 廖育林, 等. 不同施肥量对桂牧一号产量及氮磷钾吸收的影响[J]. 湖南农业科学, 2015, (6): 46-50.
- Yang Z P, Nie J, Liao Y L, *et al.* Effect of different fertilizer rates on the biomass yield and the N, P, K absorption of Guimu-1 hybrid *Pennisetum purpureum* [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015, (6): 46-50.
- [24] 窦春英. 施肥对东南景天吸收积累锌和镉的影响[D]. 杭州: 浙江林学院, 2009.
- Dou C Y. Effect of fertilizer application on soil heavy metal phytoremediation by *Sedum alfredii* Hance [D]. Hangzhou: Zhejiang Forestry University, 2009.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 张佳, 杨文强, 廖柏寒, 等. 有机肥对酸性稻田土壤 Cd 赋存形态的影响途径和机制[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(1): 365-370.
- Zhang J, Yang W T, Liao B H, *et al.* Mechanisms and influence approaches of organic fertilizer on occurrence mode of Cd in acid paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(1): 365-370.
- [28] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(12): 2762-2770.
- Deng Y Q, Cao X Y, Tan C Y, *et al.* Effect of organic materials on phytoremediation efficiency of Cd-contaminated acid soil by *Sedum plumbizincicola* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(12): 2762-2770.
- [29] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, **43**(2): 221-225.
- Shen L B, Wu L H, Han X R, *et al.* Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. Soils, 2011, **43**(2): 221-225.
- [30] Wu L H, Luo Y M, Christie P, *et al.* Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil [J]. Chemosphere, 2003, **50**(6): 819-822.
- [31] Yang W T, Zhou H, Gu J F, *et al.* Application of rapeseed residue increases soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activity and mitigates cadmium pollution risk in paddy fields[J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114681.
- [32] 杨文强, 张佳, 廖柏寒. Cd 胁迫下外源有机肥对土壤中 Cd 有效性和水稻糙米中 Cd 含量的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, **37**(1): 105-111.
- Yang W T, Zhang J, Liao B H. Effects of external organic matter on Cd availability in soil and Cd accumulation in brown rice exposed to excess Cd[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2020, **37**(1): 105-111.
- [33] 谭长银, 吴龙华, 骆永明, 等. 长期施肥条件下黑土镉的积累及其趋势分析[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(12): 2738-2744.
- Tan C Y, Wu L H, Luo Y M, *et al.* Cadmium accumulation and its development tendency in black soil under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(12): 2738-2744.
- [34] 李顺江, 李鹏, 李新荣, 等. 不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(3): 235-241.
- Li S J, Li P, Li X R, *et al.* The influence of concentration of chromium, cadmium in soil-crop system under different fertilizers and fertilization amount [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(3): 235-241.
- [35] 华路, 白铃玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(4): 346-350.
- Hua L, Bai L Y, Wei D P, *et al.* Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd, Zn formation in soil and wheat growth[J]. China Environmental Science, 2002, **22**(4): 346-350.
- [36] Chang C, Entz T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, **25**(1): 145-153.
- [37] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(12): 2319-2324.
- Xu M G, Wu H W, Liu J. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(12): 2319-2324.
- [38] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, *et al.* Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(12): 7586-7595.
- [39] 卓坤水, 苏水金, 杜仲清, 等. 闽引象草 (*Pennisetum purpureum schum MIN-YIN*) 的选育[J]. 热带作物学报, 2009, **30**(8): 1196-1200.
- Zhuo K S, Su S J, Du Z Q, *et al.* Breeding and selection of *Pennisetum purpureum schum* 'Minyin' [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, **30**(8): 1196-1200.
- [40] Das A, Belgaonkar P, Raman A S, *et al.* Bioremoval of lead using *Pennisetum purpureum* augmented with *Enterobacter cloacae*-VITPASJ1: A pot culture approach [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(18): 15444-15453.
- [41] 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 等. 柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4810-4819.
- Tang Q, Wu G F, Gu J F, *et al.* Effect of citric acid and mowing on enhance the remediation of cadmium contaminated soil by Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum) [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4810-4819.
- [42] 张云霞, 周浪, 肖乃川, 等. 鬼针草 (*Bidens pilosa* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5805-5813.
- Zhang Y X, Zhou L, Xiao N C, *et al.* Remediation potential of *B. pilosa* L. in cadmium-contaminated farmland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(16): 5805-5813.
- [43] 曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 等. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2022, **41**(4): 765-773.
- Cao X Y, Tan C Y, Cai R Z, *et al.* Potential of plant rotation patterns for phytoremediation of cadmium contaminated farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, **41**(4): 765-773.
- [44] 王郝为, 王启业, 吴端钦. 刈割高度对象草营养成分及饲用

- 价值的影响分析[J]. 中国饲料, 2018, **29**(3): 73-75.
- Wang H W, Wang Q Y, Wu D Q. Study on nutrients composition and feeding value of napiergrass at different cutting height[J]. China Feed, 2018, **29**(3): 73-75.
- [45] 梁志霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 氮素和刈割对桂牧1号杂交象草光合作用、产量和品质的影响[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2008-2014.
- Liang Z X, Song T Q, Zeng F P, *et al.* Effects of nitrogen fertilization and cutting on the photosynthesis, yield, and quality of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(8): 2008-2014.
- [46] Yang Y, Zhou X H, Tie B, *et al.* Comparison of three types of oil crop rotation systems for effective use and remediation of heavy metal contaminated agricultural soil [J]. Chemosphere, 2017, **188**: 148-156.
- [47] Carvalho A R, Fragoso R, Gominho J, *et al.* Water-energy nexus: Anaerobic co-digestion with elephant grass hydrolyzate [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **181**: 48-53.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)