

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM_{2.5}浓度调控模拟 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM_{2.5}碳质组分特征 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM₁中金属元素污染特征及健康风险评估 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及来源分析 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH₄、CO₂和N₂O浓度的时空变化特征及影响因素 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应

唐棋¹, 伍港繁¹, 辜娇峰^{1,2*}, 周航^{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: 为研究低分子有机酸柠檬酸与农艺措施刈割强化象草修复镉(Cd)污染土壤的效应, 开展象草盆栽种植试验. 试验中柠檬酸设置单次 1.25、2.5 和 5 mmol·kg⁻¹ 施用水平; 刈割设置 0、1 和 2 次. 结果表明: ① 在柠檬酸施用量为 1.25 mmol·kg⁻¹ 且刈割 1 次时, 象草地上部生物量增幅最大达 39.11%, 高剂量柠檬酸施用和多次刈割不利于生物量的增长; ② 柠檬酸施用和刈割均有增大象草茎和叶 Cd 含量的效应, 刈割措施中最后一茬收获的象草茎 Cd 含量较大, 且在 m_B (柠檬酸) 5 mmol·kg⁻¹ 施用下可将茎 ω(Cd) 增大到 18.53 mg·kg⁻¹, 相比第一茬增大约 6 倍; ③ 柠檬酸施用和刈割措施能够降低象草根际土壤 pH 和有机质, 对土壤总 Cd 含量和 Cd 的 TCLP 含量也能分别最大幅度降低 14.29% 和 10.17%; ④ 在 m_B (柠檬酸) 施用量为 1.25 mmol·kg⁻¹ 且刈割 1 次时, 象草植物提取 Cd 的效果最佳, 地上部位 Cd 提取量达到 6.95 mg·株⁻¹, 占盆栽试供土壤 Cd 总量的 9.38%. 未来利用象草修复 Cd 污染土壤时, 可考虑将 1.25 mmol·kg⁻¹ 柠檬酸施用和刈割 1 次相结合, 以提高修复效率.

关键词: 象草; 镉(Cd); 柠檬酸; 刈割; 修复

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4810-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112028

Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (*Pennisetum purpureum* Schum)

TANG Qi¹, WU Gang-fan¹, GU Jiao-feng^{1,2*}, ZHOU Hang^{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: A pot experiment was conducted to investigate the effects of citric acid application and mowing frequency on the remediation of cadmium (Cd) contaminated soil by napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum). Three levels of citric acid were divided into three applications of 1.25, 2.5, and 5 mmol·kg⁻¹. The mowing frequency of the plants was divided into no mowing, one mowing, and two mowing treatments. The results showed that: ① 1.25 mmol·kg⁻¹ citric acid increased the biomass of the upper part of the plant by 39.11% with one mowing, and multiple mowing treatments and high citric acid application were not beneficial to the biomass increase. ② Both citric acid application and mowing had the effect of increasing the Cd content in stems and leaves, and Cd content in stems harvested in the last mown crop was larger and increased by approximately six times under the 5 mmol·kg⁻¹ citric acid application. ③ Citric acid application and mowing reduced the rhizosphere soil pH and organic matter and also reduced the total soil Cd content and TCLP-Cd content by a maximum of 14.29% and 10.17%, respectively. ④ Under the 1.25 mmol·kg⁻¹ citric acid application and one mowing treatment (L1), the best Cd extraction by Napier grass was achieved with 6.95 mg·plant⁻¹ of above-ground parts, accounting for 9.38% of the total Cd content in the potted test soil. Therefore, the L1 treatment can be considered to improve the remediation efficiency when using napier grass to remediate Cd-contaminated soil in the future.

Key words: napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum); cadmium(Cd); citric acid; mowing; phytoremediation

我国土壤环境状况不容乐观, 部分地区存在严重的重金属土壤污染问题. 文献[1]显示, 土壤污染点位超标率为 16.1%, 其中无机污染物镉(Cd)的污染点位超标率最大, 达到 7.0%, 且文献[2]显示, Cd 依旧是影响农用地土壤环境质量的首要污染物. 因此, 探寻适宜于修复 Cd 污染土壤的技术至关重要.

有机酸强化植物修复(植物提取)技术是目前针对重金属污染土壤较为有前景的修复方法[3]. 柠檬酸(citric acid)是一种由植物原料制成的低成本可生物降解有机酸, 已有诸多淋洗试验表明其对土壤 Cd 具有较强的活化能力. 例如, 魏佳等[4]的研究表明, 向 Cd 污染土壤施入柠檬酸并振荡, 可以有效活化难溶态 Cd. 李珍[5]的研究发现, 土壤经柠檬酸多次淋洗后, 吸附态、碳酸结合盐态、硫化物残渣态和残渣态 Cd 可得到有效去除. 杨文俊等[6]的研

究也表明, 柠檬酸淋洗可有效降低土壤酸可提取态 Cd. 由此可见, 柠檬酸在辅助植物提取 Cd 污染土壤方面具有较大活化土壤重金属、强化植物吸收的潜力. 有研究也证实了这一结论, 例如, 0.5 mmol·kg⁻¹ 柠檬酸应用于伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 的情况下对红黄泥土壤 Cd 修复效率提升 29.35% [7], 青葙 (*Celosia argentea* L.) 在 5 mmol·kg⁻¹ 柠檬酸施用量的情况下叶中 Cd 含量较对照提升了 2.72 倍 [8], 高羊茅 (*Festuca elata*) 施用 1 mmol·kg⁻¹ 柠檬酸使根际土壤中 Cd 浓度提高了 11.6 倍, 高羊茅植株 Cd 的吸收总量增加了 2.8

收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801105); 湖南省科技人才托举工程项目(2019TJ-N05)

作者简介: 唐棋(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境中重金属污染与控制, E-mail: TQ1633895@163.com

* 通信作者, E-mail: gujiaofeng@163.com

倍^[9].但在技术应用上,由于伴矿景天和青箱等植物大多存在生物量小和抗逆性差等缺点,使得技术推广、规模化较难.

象草(*Pennisetum purpureum* Schum)是多年生丛生高秆禾本科草本植物,具有抗逆性强、生物量大和生长速度快的特点,目前已被应用于各类污染土壤的修复研究中.例如,高姗姗^[10]的研究发现,象草对土壤石油污染有很强的耐受性,在5%、10%和20%的石油污染水平下,象草的降解效率分别达到了30.93%、34.51%和45.37%.象草对Cd也有较好耐受性,盆栽试验表明,在土壤 $\omega(\text{Cd}) \leq 16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内,象草均可存活;当土壤 $\omega(\text{Cd}) \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时还有促进象草生长的效应^[11].刈割指收割植株的地上部分,同时留茬,象草茎节可再次萌芽生长,是象草栽培的常规做法,也是提高一季种植象草生物量的重要措施^[12],Yang等^[13]的盆栽试验表明,象草刈割1次与未刈割相比生物量增加了26.1%.周志强^[11]指出盆栽试验多次刈割的方式可以提高象草对土壤Cd的修复效率.可见,将象草应用于Cd污染土壤的修复治理,并结合刈割措施

有望通过提高生物量,增大象草植物提取Cd的效率.

本研究假设在象草种植中联合刈割措施和柠檬酸施用能够有效提升象草植物提取Cd的效率.在尽可能还原象草种植过程中自然光、热和水等气候条件下,开展象草的田间盆栽试验,研究象草刈割次数与柠檬酸施用量对于象草生物量、各部位Cd含量、Cd提取量、土壤pH和有机质的影响和相关关系,构建象草Cd富集移除技术,以期为Cd污染土壤的修复提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验地点位于湖南省七宝山矿区附近,地处亚热带季风湿润气候区,四季分明,光照充足,降水丰沛.试供土壤取自试验地点农田耕作层(0~20 cm),为红壤性水稻土,基本理化性质见表1.供试象草为桂闽引象草(*Pennisetum purpureum* Schum. Cv. Gui Min Yin),为高产量象草品种.柠檬酸购于潍坊英轩实业有限公司.

表1 试供土壤基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

指标	pH	CEC /mg·kg ⁻¹	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (总Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (HCl-Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (TCLP-Cd) /mg·kg ⁻¹
数值	6.14	31.70	19.56	4.94	1.78	0.49

1.2 试验设计

本研究采用田间盆栽试验.将试供土壤自然风干,去除杂质和混匀后装入上口口径43.0 cm,底径32.5 cm,高32.0 cm圆形塑料盆中,每盆装干土15 kg,然后置于当地大田,盆口与周边地面平齐.试验柠檬酸施用设置低、中和高3个梯度,分别为1.25、2.5和5 mmol·kg⁻¹,标记为L、M和H;刈割设置未刈割、刈割1次和2次,标记为0、1和2次,对应

象草地上部收获茬数有1、2和3茬;同时设置对照组CK(表2),试验共12个处理,每个处理重复3次,共36盆,随机区组排列于试验田中.象草种植前7 d,基肥(氮磷钾复合肥,总养分 $\geq 45\%$)按1.5 g·kg⁻¹施入试供土壤.2020年5月8日,选取长势相近的象草幼苗移栽(1盆1穴1株).象草生长满60 d开始施用柠檬酸,施用方法是将各处理对应重量的柠檬酸配制为2 L溶液浇灌于种植土上,施用

表2 柠檬酸及刈割处理措施

Table 2 Treatments of citric acid and mowing application

处理名称	单次施用量(m_B) /mmol·kg ⁻¹	总施用量(m_B) /mmol·kg ⁻¹	分施距移栽时间 间隔/d	刈割次数	收割距移栽时间 间隔/d
CK0	0	0	—	0	225
CK1	0	0	—	1	150、225
CK2	0	0	—	2	75、150和225
L0	1.25	3.75	60、135和210	0	225
L1	1.25	3.75	60、135和210	1	150、225
L2	1.25	3.75	60、135和210	2	75、150和225
M0	2.5	7.5	60、135和210	0	225
M1	2.5	7.5	60、135和210	1	150、225
M2	2.5	7.5	60、135和210	2	75、150和225
H0	5	15	60、135和210	0	225
H1	5	15	60、135和210	1	150、225
H2	5	15	60、135和210	2	75、150和225

时间是每次刈割前 15 d 施入,共施用 3 次.象草生长满 75 d 开始刈割,刈割间隔天数为 75 d,且每次刈割后所有处理均追施 $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 尿素(氮含量约为 46.7%).象草全程种植 225 d,期间土壤持水率维持在 50% 左右,并适时松土,不进行农药喷施.

1.3 样品采集与预处理

象草生长周期内,记录各处理象草的生长性状(株高,叶片萎蔫发黄情况).象草生长至 75 d 和 150 d 开展刈割,收获地上部位(距离根基茎 10 cm),225 d 后收获全株(含根),同时称量植株其地上部鲜重,并采集 225 d 后象草根际土壤.象草植株分根、茎和叶 3 个部位(部分样品只分根和地上部),依次用自来水、超纯水洗净,晾干后,于 105°C 烘箱杀青,再 70°C 烘干至恒重.称量干重后粉碎,过 10 目筛,密封保存备测.土壤自然风干、去除杂质、碾磨,分别过 10 目和 100 目筛,密封保存备测.

1.4 化学分析与检测

土壤 pH、有机质含量(OM)、阳离子交换量(CEC)和 Cd 总含量参照文献[14]的相应方法测定.土壤 Cd 的生物有效态含量采用 HCl 提取法^[15]、美国 EPA 的毒性浸出法(toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)提取量^[16]来表达.象草植株各部位 Cd 含量采用干灰法消解、稀硝酸浸提^[17].使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-6300,美国 Thermo)测定植株和土壤消解液中 Cd 含量.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.土壤 Cd 的回收率为 99%~103%,植物 Cd 的回收率为 98%~103%.

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 19 统计分析数据,其中 ANOVA 中 Duncan 多重比较法($P < 0.05$)分析处理间差异,图表中不同字母表示差异具有统计学意义,并使用 Spearman 指数分析数据间相关关系.Origin pro 8.0 进行图形绘制.象草 Cd 提取量按以下公式计算.

第 i 茬象草植株:

$$\text{Cd 提取量} = \sum C_i \times M_i$$

一季种植象草植株:

$$\text{Cd 总累积提取量} = \sum_i \sum C_i \times M_i$$

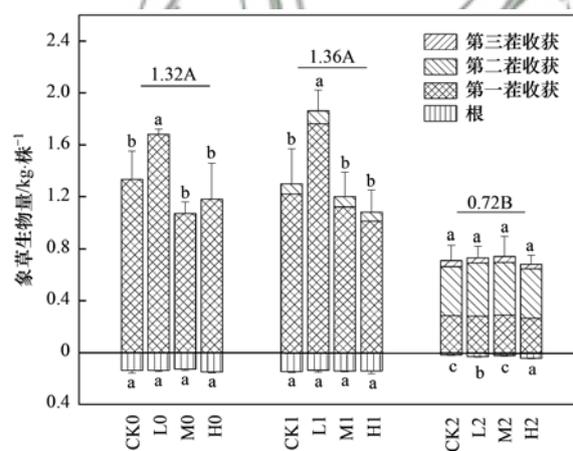
式中, i 为收获茬数(对应移栽后第 75、150 和 225 d 收获的第一茬、第二茬和第三茬); n 为总收获茬数,最大为 3; C_i 分别为第 i 茬收获象草茎、叶中 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); M_i 为第 i 茬收获象草茎和叶干重

(kg).

2 结果与分析

2.1 柠檬酸施用和刈割对象草地上部生物量的影响

生物量是影响植物重金属提取量的重要因素^[18].由图 1 可知,在相同的柠檬酸施用量处理下,刈割措施影响了象草的生物量.在柠檬酸低剂量 L 处理组中(L0~L2),与 L0 相比,L1 处理地上部生物量增加了 10.26%,而 L2 处理则显著($P < 0.05$)降低了 56.49%.在中剂量 M 处理组中(M0~M2),与 M0 相比,M1 处理地上部生物量增加了 12.42%,而 M2 处理则显著($P < 0.05$)降低了 30.44%.在高剂量 H 处理组中(H0~H2),与 H0 相比,H1 处理地上部生物量减少了 8.18%,而 H2 处理则显著($P < 0.05$)降低了 42.11%.这说明在柠檬酸低剂量和中剂量施用下,刈割 1 次处理可辅助获得更大的生物量.



不同小写字母代表柠檬酸不同施用量之间的差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示不同刈割次数平均值之间的差异显著($P < 0.05$)

图 1 柠檬酸与刈割处理对象草生物量的影响

Fig. 1 Effects of citric acid and mowing on biomass of napier grass

由图 1 也可知,在未刈割处理组中(CK0~H0),与 CK0 相比,L0 处理象草生物量显著($P < 0.05$)增大了 26.17%,而 M0 和 H0 处理减少了 19.78%和 11.53%.在刈割 1 次处理组中(CK1~H1),与 CK1 相比,L1 处理象草生物量显著($P < 0.05$)增大了 41.70%,而 M1 和 H1 处理则减少了 8.14%和 17.26%.在刈割 2 次处理组中(CK2~H2),与 CK2 相比,L2、M2 和 H2 处理的生物量均无显著差异.这说明柠檬酸低剂量 L 处理($1.25 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施用量)可提升刈割 1 次的象草总生物量,而中、高剂量($\geq 2.5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)施用处理对象草持续生长不利.

综合分析柠檬酸与刈割联合施用,与未刈割

处理组(CK0~H0)生物量的平均值相比,刈割1次处理组(CK1~H1)的平均生物量增加了3.03%,刈割2次处理组(CK2~H2)的平均生物量则显著($P < 0.05$)降低了45.45%,这说明联合处理下,刈割1次具有整体提高象草生物量的潜力,多次刈割则不利.此外,本试验中L1处理中象草地上部位累积生物量最大,达到 $1.85 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$,与CK0相比提高了39.11%,是生物量提升最大的联合施用技术组合.

2.2 柠檬酸施用和刈割对象草各部位 Cd 含量的影响

象草各部位 Cd 含量不仅直接决定了象草植物提取 Cd 效果,还能为其资源化利用提供参考^[19].由表3可知,在未刈割处理组中(CK0~H0),象草各部位 Cd 含量的大小顺序是根 > 茎 > 叶,柠檬酸施用对茎中 Cd 含量有增大效应,其中M0和H0处理茎 Cd 含量显著($P < 0.05$)增大了73.64%和66.67%.在刈割1次处理组中(CK1~H1),第一茬收获的象草茎 Cd 含量大于叶,随柠檬酸施用量的增加,茎和叶中 Cd 含量有降低趋势;在第二茬收获

的象草中,茎 Cd 含量远大于根,随柠檬酸施用量增大,茎和叶中 Cd 含量增大,其中H1处理茎和叶 Cd 含量相比CK1显著($P < 0.05$)增大53.52%和143.68%;对比两茬收获象草茎和叶 Cd 含量,第二茬收获的象草茎和叶均大于第一茬收获的,且茎 Cd 含量显著增大,增大了1.7~6.4倍.在刈割2次处理组中(CK2~H2),第一茬收获的象草茎 Cd 含量略大于叶,第二茬收获的象草CK2和L2处理象草茎 Cd 含量小于叶,M2和H2处理象草茎 Cd 含量大于叶,柠檬酸施用对根和叶 Cd 含量增大的效应不显著;第三茬收获的象草茎 Cd 含量最大,远大于根和叶,随柠檬酸施用量增大,茎和叶 Cd 含量有增大的效应,分别增大25.45%~83.33%和42.62%~80.00%,其中H2处理差异显著($P < 0.05$);对比三茬收获象草茎和叶 Cd 含量,整体呈现:第三茬 > 第二茬 > 第一茬,其中第三茬的茎 Cd 含量相比第一茬增大了3.1~4.7倍.综上分析,柠檬酸施用有增大象草茎和叶 Cd 含量的效应,刈割也能增加象草茎和叶 Cd 含量,且随刈割次数增加,茎和叶 Cd 含量逐渐增大.

表3 柠檬酸与刈割对象草 Cd 含量的影响⁽¹⁾

Table 3 Effects of citric acid and mowing on Cd content in napier grass tissues

处理名称	$\omega(\text{Cd})/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						
	距移栽 75 d 收获		距移栽 150 d 收获		距移栽 225 d 收获		
	茎	叶	茎	叶	根	茎	叶
CK0	—	—	—	—	4.54 ± 0.83a	1.29 ± 0.27b	1.01 ± 0.52a
L0	—	—	—	—	3.97 ± 0.83a	1.57 ± 0.12b	0.91 ± 0.45a
M0	—	—	—	—	4.68 ± 0.86a	2.24 ± 0.32a	0.70 ± 0.46a
H0	—	—	—	—	3.88 ± 0.36a	2.15 ± 0.04a	0.52 ± 0.25a
	第一茬				第二茬		
CK1	—	—	4.40 ± 0.85a	1.97 ± 0.06b	3.53 ± 0.42a	12.07 ± 0.90b	2.77 ± 0.76b
L1	—	—	3.69 ± 0.44ab	2.59 ± 0.37a	4.10 ± 1.20a	10.98 ± 0.66b	4.09 ± 1.62b
M1	—	—	2.22 ± 0.58c	1.26 ± 0.49c	3.61 ± 0.49a	12.75 ± 2.94b	4.52 ± 0.38b
H1	—	—	2.50 ± 0.64bc	1.03 ± 0.14c	3.47 ± 0.23a	18.53 ± 1.45a	6.75 ± 1.39a
	第一茬		第二茬		第三茬		
CK2	2.45 ± 0.11a	2.13 ± 0.54ab	2.90 ± 0.92a	3.71 ± 1.26a	4.35 ± 0.77ab	10.02 ± 2.29b	3.05 ± 0.95b
L2	2.69 ± 0.11a	2.80 ± 0.48a	2.45 ± 0.36a	3.76 ± 0.22a	5.13 ± 1.12a	12.57 ± 2.60b	4.55 ± 0.45ab
M2	3.08 ± 1.27a	1.62 ± 0.44ab	3.03 ± 0.67a	3.02 ± 1.43ab	4.67 ± 0.48ab	12.52 ± 0.65b	4.35 ± 0.69ab
H2	3.23 ± 0.56a	1.88 ± 0.50b	3.18 ± 0.51a	1.63 ± 0.47b	3.31 ± 0.07b	18.37 ± 7.57a	5.49 ± 0.92a

1) 同列和相同茬数的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

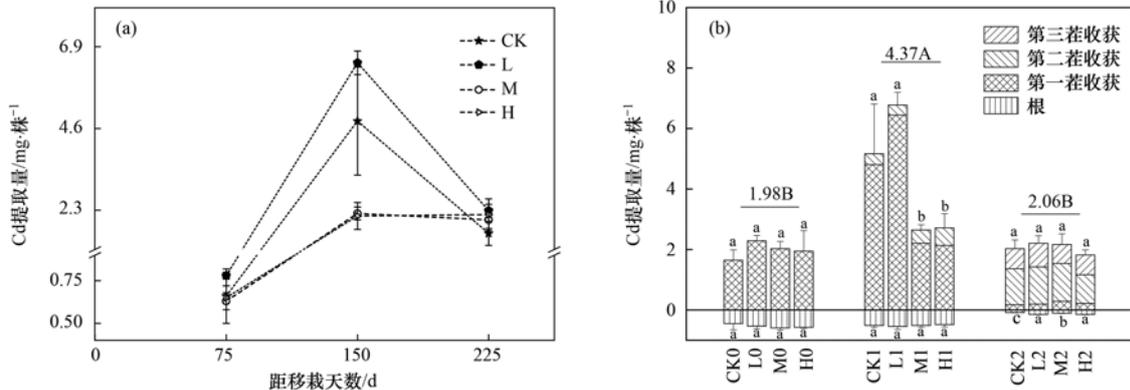
2.3 种植天数、柠檬酸施用和刈割对象草植物提取 Cd 的影响

第75 d、150 d和225 d象草 Cd 提取量分别为刈割2次、刈割1次和未刈割组的第一茬地上部象草 Cd 提取量.由图2(a)可知,随着象草生长天数的增加,CK、L、M和H处理象草地上部位 Cd 提取量总体呈先增加后减少的趋势. CK、L、M和H处理种植150 d和种植75 d相比,分别增大了6.3、7.3、2.5和2.3倍;而种植225 d试验各处理,与150 d

时相比,CK、L和M处理植株 Cd 提取量则分别降低了0.7、0.6和0.1倍,H处理无明显变化.这表明,除柠檬酸高剂量施用处理外,其他3组处理中均是在象草移栽种植150 d收获的象草植株地上部 Cd 提取量较大,且以柠檬酸低剂量L处理 Cd 提取量最大.

由图2(b)可知,象草地上部位 Cd 总累积提取量,以刈割1次处理组最大,各处理平均值达 $4.37 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,显著大于未刈割和刈割2次处理

组. 在刈割 1 次处理组中, 与 CK1 相比, L1 处理植物 Cd 总累积提取量增大了 34.30%, 而 M1 和 H1 则显著 ($P < 0.05$) 下降了 48.83% 和 47.30%. 在未刈割和刈割 2 次处理组中, 对比 CK0 和 CK2, 柠檬酸施用处理并没有显著增大植株 Cd 总累积提取量.



不同小写字母表示柠檬酸不同施用量之间的差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同刈割次数平均值之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 种植天数、柠檬酸与刈割对象草提取量的影响

Fig. 2 Effects of transplanting days, citric acid and mowing on Cd uptake accumulation by napier grass

2.4 柠檬酸施用和刈割对象草根际土壤 pH 和有机的影响

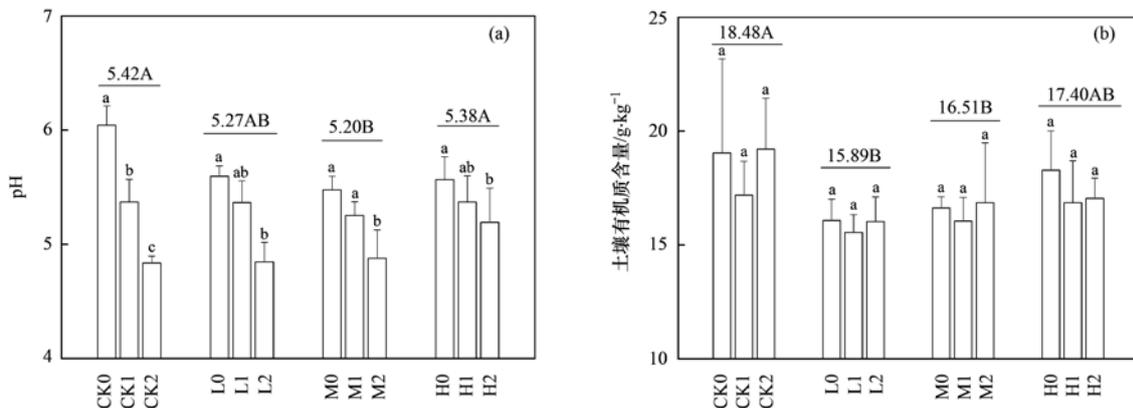
土壤 pH 和有机质不仅能影响植物生长, 还是影响 Cd 生物可利用性的重要因素^[20]. 如图 3(a) 所示, 随柠檬酸施用量的增加, 土壤 pH 呈降低趋势, CK 组 (CK0 ~ CK2) 的 pH 平均值为 5.42, 柠檬酸施用量的增大后, L (L0 ~ L2)、M (M0 ~ M2) 和 H (H0 ~ H2) 处理组的土壤平均 pH 分别下降了 0.15、0.22 和 0.04 个单位, 其中柠檬酸 M 处理组达到显著差异 ($P < 0.05$). 在相同柠檬酸施用量处理下, 随刈割次数的增加, 土壤 pH 呈降低趋势, 与未刈割相比, CK、L、M 和 H 这 4 组处理土壤 pH 分别降低 0.67 ~ 1.21、0.23 ~ 0.75、0.22 ~ 0.60 和 0.20 ~ 0.37 单位, 二次刈割均与未刈割差异显著 ($P <$

本试验中, L1 处理象草地上部位 Cd 总累积提取量达到 $6.95 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$, 与 CK0 相比显著增大了 321.93%, 同时, 植株 Cd 累积量也占到了供试盆栽土壤 Cd 总量的 9.38%. 综上分析, 柠檬酸 $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施用联合刈割 1 次措施下象草地上部位 Cd 总累积提取量最大.

0.05). 上述结果说明, 柠檬酸施用和刈割措施均对象草根际土壤 pH 有降低效应, 且刈割措施的降低效应更显著. 图 2(b) 显示, 在相同柠檬酸施用量处理下, 土壤有机质的降低效应不显著, 而增大柠檬酸施用, 相比 CK 组处理 (CK0 ~ CK2), L (L0 ~ L2)、M (M0 ~ M2) 和 H (H0 ~ H2) 组的平均有机质含量均有所下降, L 组和 M 组显著 ($P < 0.05$) 下降了 14.02% 和 10.66%, 这表明柠檬酸施用后加速了土壤有机质的消耗, 而刈割的效应则不显著.

2.5 柠檬酸施用和刈割对根际土壤总 Cd、HCl-Cd 和 TCLP-Cd 含量的影响

柠檬酸施用可以促使土壤 Cd 的形态转化^[21], 土壤中赋存形态关乎其生物有效性, HCl-Cd 和 TCLP-Cd 含量可表示土壤中生物有效性 Cd 含



不同小写字母代表不同刈割次数之间的差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示柠檬酸不同施用量平均值之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 柠檬酸与刈割对土壤 pH 和有机质的影响

Fig. 3 Effect of citric acid and mowing on soil pH and organic matter

量^[22,23]. 由图 4(a)可知,对比柠檬酸不同施用量,与对照 CK 组(CK0~CK2)相比,L(L0~L2)、M(M0~M2)和 H(H0~H2)组的土壤总 Cd 含量平均分别下降了 11.43%、14.29% 和 13.85%,各处理与对照差异显著($P < 0.05$);在相同柠檬酸施用量处理下,随刈割次数的增加,CK、L、M 和 H 组处理土壤总 Cd 含量呈降低趋势,但仅在 M2 处理下有显著

差异,相比 M0,降低了 7.48%;对比象草种植前土壤总 Cd 含量 $4.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CK、L、M 和 H 组的土壤总 Cd 含量平均分别下降了 7.89%、18.42%、21.05% 和 20.65%;这表明,试验各处理有降低土壤总 Cd 含量的效应,柠檬酸和刈割组合措施降低效应更显著.由图 4(b)和 4(c)可知,土壤 Cd 的 HCl 提取态含量大于 TCLP 提取态含量,柠檬酸不同施用量 CK、L、M 和 H 组处理平均值之间与各组内刈割次数 0、1 和 2 次之间土壤 HCl-Cd 含量无显著变化;就土壤 TCLP-Cd 含量,对比不同刈割次数,仅 CK 组,刈割对土壤 TCLP-Cd 有增大效应,而随柠檬酸施用量增大,土壤 TCLP-Cd 含量呈降低趋势,其中 H 组平均值显著小于对照 CK 组,降低了 10.17%;对比象草种植前土壤 HCl-Cd 和 TCLP-Cd 含量,试验各处理均有增大效应,4 组处理的增幅分别在 2.81%~10.11% 和 8.16%~20.41% 范围;综上分析可知,试验开展后土壤 Cd 的生物有效性整体增大,同时伴随象草植物吸收,柠檬酸 H 组处理象草根际土壤 Cd 的生物有效性整体呈现低于 CK、L 和 M 组的趋势.

3 讨论

3.1 柠檬酸和刈割措施影响象草对土壤 Cd 的提取量

象草 Cd 提取量由生物量、象草地上部 Cd 含量决定,需要探究柠檬酸施用量、刈割次数与象草生物量、象草地上部 Cd 含量的关系,相关系数如表 4 所示.象草生物量与刈割次数存在负线性相关关系($P < 0.01$),相关系数 r 为 -0.669 ,并结合图 1 可知,刈割次数是生物量的关键影响因子.本研究中,刈割次数的增加会显著降低象草地上部生物量,并且刈割 1 次与未刈割相比生物量没有显著差异,刈割 2 次则显著下降.这可能是由于象草最适宜生长的季节是夏季^[24],在此时进行刈割,会使象草的单次生物量降低.本试验结果表明,未刈割象草茎和叶 Cd 含量低于刈割处理,刈割处理中第一茬象草茎 Cd 含量低于第三茬 3.1~4.7 倍(表 3),且象草在移栽 150 d 后 Cd 的植物提取量大于移栽 225 d [图 2(a)],其原因可能来自两个方面,一是刈割后象草地上部生长减缓,尤其是最后一茬象草生长时已进入秋冬季,生长发育滞于分蘖期,而根系仍在持续生长,从而使得大量的 Cd 吸收富集在生物量较小的茎和叶中,形成生物浓缩的现象;二是象草属禾本科植物,而禾本科植物如玉米、小麦和水稻等都可通过水孔结构产生吐水现象^[25~27],从而外泌 Cd,降低茎和叶内 Cd 含量.例如,有研究发现^[28,29],禾本

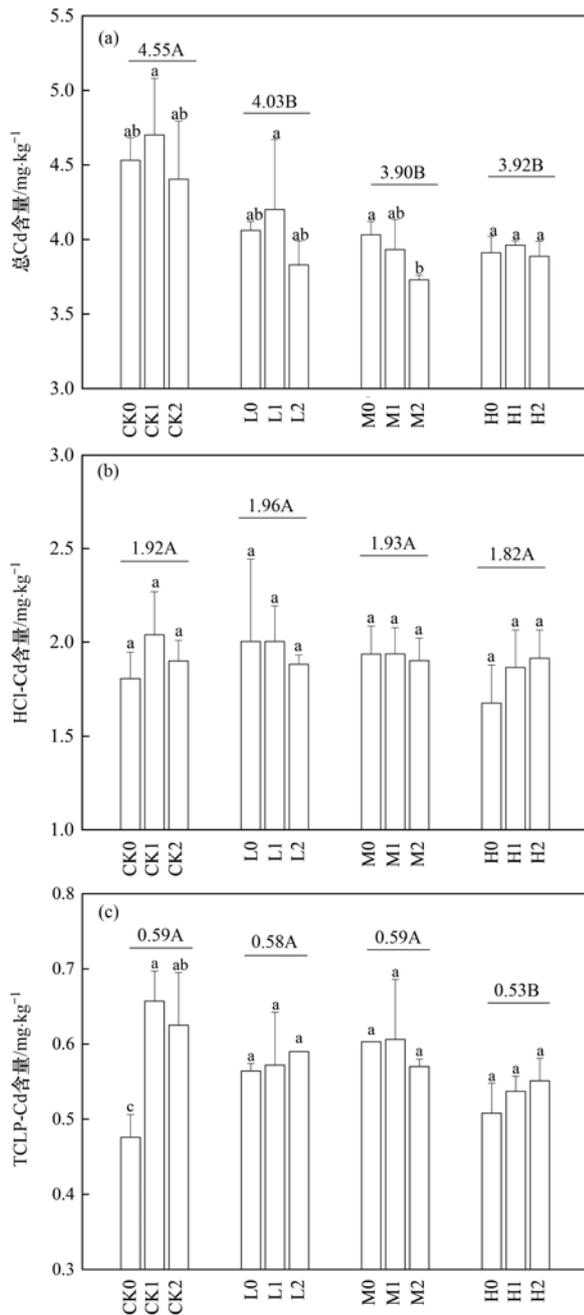


图 4 柠檬酸与刈割对根际土壤总 Cd、HCl-Cd 和 TCLP-Cd 含量的影响

Fig. 4 Effects of citric acid and mowing on contents of soil total Cd, HCl-Cd, and TCLP-Cd

科植物高羊茅体内赋存的 Cd, 主要分布在维管束、叶脉的机械组织中, 老叶和枯叶可以通过叶片的水孔结构外泌更多的 Cd. 所以, 在本试验中未刈割处理以及前茬收获的茎和叶可能因叶片老化, 外泌 Cd 增多, 进而致使象草茎和叶 Cd 含量相对较低, 植株 Cd 提取量较低. 因此, 象草成熟前需及时刈割或是收割, 以保障植物 Cd 的提取效率.

本试验发现, 当柠檬酸施用量超过 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的施用量时 (M 和 H 处理), 象草的生长明显出现叶片发黄枯萎, 茎秆变细变矮的现象; 当柠檬酸施用量为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 象草生物量显

表 4 柠檬酸施用量、刈割次数、土壤理化性质、象草生物量和 Cd 吸收累积的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficients between citric acid application, mowing frequency, soil physical and chemical properties, napier grass biomass and Cd uptake accumulation

	pH	有机质	HCl-Cd	TCLP-Cd	土壤总 Cd	柠檬酸施用量	刈割次数	象草地上部生物量	象草地上部 Cd 含量
pH	1	0.201	-0.199	-0.582*	0.390	-0.017	-0.886**	0.647*	-0.594*
有机质	—	1	-0.572*	-0.296	0.463	-0.146	-0.078	-0.318	-0.298
HCl-Cd	—	—	1	0.699**	0.278	-0.454	0.192	0.318	0.520
TCLP-Cd	—	—	—	1	0.214	-0.394	0.394	-0.138	0.632*
土壤 Cd 总量	—	—	—	—	1	-0.695**	-0.242	0.260	0.182
柠檬酸施用量	—	—	—	—	—	1	0.000	-0.261	-0.204
刈割次数	—	—	—	—	—	—	1	-0.669**	-0.651*
象草地上部生物量	—	—	—	—	—	—	—	1	-0.094
象草地上部 Cd 含量	—	—	—	—	—	—	—	—	1

1) * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平; $n = 12$, $r_{0.05} = 0.532$, $r_{0.01} = 0.661$

3.2 柠檬酸和刈割措施影响土壤 pH、有机质含量、总 Cd 和 Cd 生物有效态含量

相关分析显示 (表 4), pH 与刈割次数存在极显著的负线性关系 ($P < 0.01$), 相关系数 r 为 -0.886 , pH 含量与 TCLP-Cd 含量也存在负线性相关关系 ($P < 0.05$), 相关系数 r 为 -0.582 , 而 TCLP-Cd 含量与象草地上部 Cd 含量存在正线性相关关系 ($P < 0.05$), 相关系数 r 为 0.632 , 这表明刈割次数的增大能降低土壤 pH, pH 的降低则促进了土壤 Cd 形态转化, 提高了土壤 TCLP-Cd 含量, 进而增大土壤 Cd 的生物可利用性, 最终使得象草地上部 Cd 含量得以提高, 这与 Yang 等^[34] 的研究结果一致. 本试验中刈割降低象草根际土壤 pH, 其原因可能是, 刈割提高了植物根系活力, 促进了根系代谢^[35, 36], 从而促进了象草根际分泌物的产生, 根系分泌物中含有的有机酸等物质能降低土壤 pH, 并使得土壤 Cd 形态发生转化^[37~39]. 柠檬酸是低分子有机酸, 其施用向土壤大量引入 H^+ ^[40], 降低土壤 pH 的效应应该更显著, 但本试验中刈割对 pH 的降低效应更为显著, 原因可能是试验分析的是柠檬酸第三次施用 15 d 后的土壤, 因柠檬酸的降解, 对土壤 pH 的降低效应减弱, 而刈割对 pH 的降低是由于根系活动, 在

著下降. 有研究表明^[30, 31], 随着柠檬酸施用量的增加, Cd 毒性有所增强, 使得黑麦草的叶绿素含量和生物量随之降低; 黄玉婷等^[32] 和刘欢^[33] 的研究也表明, 低施用量的柠檬酸会使美洲商路 (*Phytolacca americana* L.) 和多花黑麦草 (*Lolium multiflorum* Lam.) 体内的 SOD、POD 和 CAT 酶活性提高, MDA 下降, 高施用量的柠檬酸则恰恰相反. 由此可以推测, 高量施用柠檬酸也会对象草叶绿素含量及抗氧化酶活性产生影响, 进而影响象草的生物量增大. 结合本试验结果, 柠檬酸 $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施用量并刈割 1 次 (L1 处理), 象草的植物 Cd 的提取能力最大.

试验中是一个持续作用的过程.

本试验发现, 象草各种植处理结束后土壤总 Cd 含量降低, 且从物质平衡角度, 将象草种植前土壤总 Cd 减去象草提取 Cd 与种植后土壤总 Cd 相比, 整体是相当的. 但是, 同时发现, 刈割联合 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柠檬酸施用后的土壤总 Cd 与种植前土壤总 Cd 相比, 除被植物提取的 Cd 之外, 土壤总 Cd “损失”了 $14.84\% \sim 21.41\%$, 其原因可能是柠檬酸对 Cd 的吸收、转运和代谢起着重要作用^[41, 42], 加速了象草老叶、枯叶的产生, 致使其通过水孔结构外泌更多的 Cd, 而这些 Cd 附着在茎和叶上, 伴随试验的清洗过程而损失. 试验采样处理中舍弃了腐败老叶, 这也可能是土壤总 Cd “损失”的原因.

象草各种植处理结束后土壤 TCLP-Cd 和 HCl-Cd 含量整体增大, 这源于柠檬酸的活化效应和象草根际分泌有机酸的酸化效应, 这有利于促进象草吸收更多的有效态 Cd. 此外, 象草吸收土壤有效态 Cd 又会使得土壤有效态 Cd 含量降低, 所以土壤 TCLP-Cd 与 HCl-Cd 含量在象草根际呈现一个动态的过程. 试验中柠檬酸施用 15 d 后收获最后一茬象草, 柠檬酸活化了更多的 Cd, 伴随象草植物吸收, 柠檬

酸 H 组处理象草根际土壤 Cd 活化的更多,象草吸收的更多(表 3),这可能就是其土壤 Cd 生物有效性反而整体呈现低于 L 和 M 组的原因。

最后,本试验显示施用 $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柠檬酸处理(L 和 M 处理)对土壤有机质含量有显著的降低作用,一方面可能是由于柠檬酸对象草根系的激发效应,促进了原有机质的分解^[43],另一方面是因为柠檬酸对细菌和放线菌的数量有增加态势,对真菌有抑制作用,真菌参与土壤有机质的分解和腐殖质的形成^[44,45],因此, $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柠檬酸施用加速了土壤有机质的消耗,而 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柠檬酸施用有机质消耗减缓。

4 结论

(1) 高剂量施用柠檬酸和多次刈割均不利于象草总生物量的增大,在施用 $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柠檬酸并联合刈割 1 次的处理中象草地上部位生物量最大,达到 $1.85 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

(2) 柠檬酸施用有增大象草茎和叶 Cd 含量的效应,刈割也能增加象草茎和叶 Cd 含量,且随刈割次数增加,茎和叶 Cd 含量逐渐增大,其中刈割 1 次和刈割 2 次最后一茬收获的象草茎 $\omega(\text{Cd})$ 较大,可达 $18.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比第一茬增大约 6 倍。

(3) 柠檬酸施用和刈割措施能够降低象草根际土壤 pH 和有机质,土壤总 Cd 含量和 Cd 的 TCLP 含量也能降低,可最大幅度分别降低 14.29% 和 10.17%。

(4) 在柠檬酸施用量为 $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 且刈割 1 次时,象草植物提取 Cd 的效果最好,地上部位 Cd 提取量达到 $6.95 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,占盆栽试供土壤 Cd 总量的 9.38%。

参考文献:

[1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759.

[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 Ecology and Environment of the People's Republic of China. China ecological environment status bulletin 2020 (excerpt)[J]. Environmental Protection, 2021, 49(11): 47-68.

[3] 龙珍,徐海涛,张亚平,等. 活化剂联合植物移除污染土壤重金属的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(10): 172-176, 152.
Long Z, Xu H T, Zhang Y P, et al. Removal of heavy metals from contaminated soils by activating agents combined with plants [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10): 172-176, 152.

[4] 魏佳,李取生,徐智敏,等. 多种有机酸对土壤中碳酸镉的

活化效应[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5298-5306.

Wei J, Li Q S, Xu Z M, et al. Mobilization effects of various organic acids on cadmium carbonate in soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5298-5306.

[5] 李珍. 环保型淋洗剂对污染壤土中 Cd 的淋洗修复研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Li Z. Remediation of Cd from contaminated LOU soil by washing with environmental friendly eluants [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017.

[6] 杨文俊,辜娇峰,周航,等. 农田土壤重金属淋洗剂筛选与效应分析[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 321-328.
Yang W J, Gu J F, Zhou H, et al. Screening and effect analysis of eluents removing heavy metals from paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 321-328.

[7] 柏佳,谭长银,曹雪莹,等. 3 种有机酸对伴矿景天修复效率及土壤微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 318-324.
Bai J, Tan C Y, Cao X Y, et al. Effect of three organic acids on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* and soil microbial quantity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 318-324.

[8] 姚诗音. 超富集植物青葙对土壤镉的修复性能及强化措施研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
Yao S Y. Cd repairing performance and strengthening measures of *Celosia argentea* Linn. for phytoremediation of Cd-contaminated soil [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.

[9] 王舒婷. 柠檬酸和 EDTA 对高羊茅和草地早熟禾体内 Cd 富集的调控[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
Wang S T. The regulation of citric acid and EDTA on cadmium accumulation in tall fescue and kentucky bluegrass [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

[10] 高姗姗. 三种草本植物对石油污染土壤的修复效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
Gao S S. Study on the remediation effects of three herbaceous plants on crude oil polluted soil [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[11] 周志强. 象草对镉污染土壤的田间植物提取修复效果研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
Zhou Z Q. Phytoextraction of cadmium in napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum) under field conditions [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.

[12] 易显凤,滕少花,赖志强,等. 桂闽引象草的特征特性与高产栽培技术[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014, (5): 99-101.

[13] 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.

[14] 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, 2000.

[15] 陈莹,刘汉焱,刘娜,等. 农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3494-3506.
Chen Y, Liu H Y, Liu N, et al. Screening and evaluation of methods for determining available lead (Pb) and cadmium (Cd) in farmland soil [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3494-3506.

[16] 汤家庆,张绪,黄国勇,等. 水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1185-1190.
Tang J Q, Zhang X, Huang G Y, et al. Effect of water regimes on Pb and Cd immobilization by biochar in contaminated paddy

- soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1185-1190.
- [17] Gunawardana B, Singhal N, Johnson A. Amendments and their combined application for enhanced copper, cadmium, lead uptake by *Lolium perenne*[J]. Plant and Soil, 2010, **329**(1-2): 283-294.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 吴浩杰, 周兴, 鲁艳红, 等. 紫云英翻压对稻田土壤镉有效性及水稻镉积累的影响[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(16): 105-111.
Wu H J, Zhou X, Lu Y H, et al. Effects of *Astragalus smicus* on cadmium effectiveness in paddy soil and cadmium accumulation in rice plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(16): 105-111.
- [21] 倪幸, 李雅倩, 白珊, 等. 活化剂联合柳树对重金属 Cd 污染土壤的修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(3): 365-371.
Ni X, Li Y Q, Bai S, et al. Remediation effects of activating agents combined with willow on the heavy metal Cd contaminated soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(3): 365-371.
- [22] Chen Q, Peng P Q, Long J, et al. Cadmium phytoavailability evaluation in rice-soil system using a field capacity-derived soil solution extraction: An entire growth period study in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **194**, doi: 10.1016/j.still.2019.104315.
- [23] 赫天一. 生物炭对土壤镉赋存形态和水稻镉积累的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
He T Y. Effects of biochar on soil Cd fractions and Cd accumulation in rice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [24] 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.
- [25] Mozaffar A, Schoon N, Digrado A, et al. Methanol emissions from maize: ontogenetic dependence to varying light conditions and guttation as an additional factor constraining the flux [J]. Atmospheric Environment, 2017, **152**: 405-417.
- [26] Singh S, Singh T N. Guttation I: chemistry, crop husbandry and molecular farming[J]. Phytochemistry Reviews, 2013, **12**(1): 147-172.
- [27] 席亚升. 拟南芥铜胺氧化酶家族基因的表达分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [28] 董沁. 高羊茅叶片镉的外泌途径及其调控机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Dong Q. Study on the pathway and regulation mechanism of the cadmium excretion in tall fescue leaves[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020.
- [29] 徐佩贤. 高羊茅和草地早熟禾对镉的耐受能力和解毒机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Xu P X. Studies on cadmium tolerance and detoxification tall fescue and kentucky bluegrass[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [30] 廖敏, 黄昌勇. 黑麦草生长过程中有机酸对镉毒性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(1): 109-112.
Liao M, Huang C Y. Effects of organic acids on the toxicity of cadmium during ryegrass growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(1): 109-112.
- [31] 张远兵, 刘爱荣, 黄守程, 等. 柠檬酸和 EDTA-Na₂ 对黑麦草吸收 Pb 及营养元素特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2016, **24**(5): 545-552.
Zhang Y B, Liu A R, Huang S C, et al. Effects of citric acid or EDTA-Na₂ on the absorption characteristic of Pb and nutrient elements of *Lolium perenne* L. [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2016, **24**(5): 545-552.
- [32] 黄玉婷, 刘大林, 张卫红, 等. 柠檬酸对铝胁迫下苗期黑麦草生长生理的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(7): 44-50.
Huang Y T, Liu D L, Zhang W H, et al. Effects of citric acid on growth physiology of ryegrass seedlings under aluminum stress [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(7): 44-50.
- [33] 刘欢. 外源低分子量有机酸对镉胁迫下美洲商陆的超累积和解 Cd 毒的机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Liu H. The effects and mechanism of Cd contaminated soils by different levels of exogenous low-molecular-weight organic acids with *phytolacca Americana* [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [34] Yang Z H, Xue B H, Li N, et al. Effects of cutting frequency of tall fescue on cadmium form in soil and cadmium enrichment in the plant [J]. Agronomy Journal, 2020, **112**(6): 4693-4704.
- [35] 林贻卿, 谭芳林, 肖华山, 等. 不同时期刈割对互花米草根系生理影响的研究[J]. 湿地科学, 2010, **8**(4): 371-378.
Lin Y Q, Tan F L, Xiao H S, et al. Effects of different mowing periods on physiology of *Spartina alterniflora* root system [J]. Wetland Science, 2010, **8**(4): 371-378.
- [36] 吴超, 陈心胜, 邹业爱, 等. 不同水位和刈割处理对南荻生长和生理的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, **44**(3): 290-294.
Wu C, Chen X S, Zou Y A, et al. Effects of different water levels and cutting treatments on the growth and physiology of *Miscanthus lutarioriparius* [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, **44**(3): 290-294.
- [37] Chen C, Li Z B, Li S J, et al. Effects of root exudates on the activation and remediation of cadmium ion in contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(3): 2926-2934.
- [38] Kandel T P, Elsgaard L, Laerke P E. Annual balances and extended seasonal modelling of carbon fluxes from a temperate fen cropped to festulolium and tall fescue under two-cut and three-cut harvesting regimes [J]. GCB-Bioenergy, 2017, **9**(12): 1690-1706.
- [39] Kim S, Lim H, Lee I. Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, **109**(1): 47-50.
- [40] 詹淑威, 潘伟斌, 赖彩秀, 等. 外源有机酸对小飞杨草 (*Euphorbia thymifolia*L.) 修复镉污染土壤的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(10): 5096-5102.
Zhan S W, Pan W B, Lai C X, et al. Effects of exogenous

- organic acids on phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Euphorbia thymifolia* L. [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(10): 5096-5102.
- [41] Hussain A, Amna, Kamran M A, *et al.* Individual and combinatorial application of *Kocuria rhizophila* and citric acid on phytoextraction of multi-metal contaminated soils by *Glycine max* L.[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, **159**: 23-33.
- [42] Wang S T, Dong Q, Wang Z L. Differential effects of citric acid on cadmium uptake and accumulation between tall fescue and Kentucky bluegrass [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **145**: 200-206.
- [43] 黄敬. 外源有机酸对土壤—水稻系统 Cd 迁移的影响研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- Huang J. Effects of organic acids on Cd migration and accumulation in soil-rice systems[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.
- [44] 孔涛, 刘民, 淑敏, 等. 低分子量有机酸对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 环境化学, 2016, **35**(2): 348-354.
- Kong T, Liu M, Shu M, *et al.* Effect of low molecular weight organic acids on soil microbe number and soil enzyme activities [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(2): 348-354.
- [45] 刘强, 姚拓, 马晖玲. 菌肥与柠檬酸互动对石灰性土壤生物学特性及草坪质量的影响[J]. 草业学报, 2014, **23**(5): 223-230.
- Liu Q, Yao T, Ma H L. Combined effects of bio-fertilizer and citric acid on turf quality and soil biology on a calcareous soil [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, **23**(5): 223-230.

环境科学

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)