

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>空间分布特征 .....姚青,丁净,杨旭,蔡子颖,韩素芹 (2487)

基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析 .....周红,王鸣,柴文轩,赵昕 (2497)

基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测 .....杨晓彤,康平,王安怡,臧增亮,刘浪 (2507)

海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估 .....符传博,林建兴,唐家翔,丹利 (2516)

京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估 .....高冉,李琴,车飞,张艳平,祖永刚,刘芬 (2525)

2022年北京市城区PM<sub>2.5</sub>水溶性离子含量及其变化特征 .....陈圆圆,崔迪,赵泽熙,常森,景宽,沈秀娥,刘保献 (2537)

郑州市冬春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征、来源及健康风险评估 .....陶杰,闫慧姣,徐艺斐,荆海涛 (2548)

淄博市供暖前后PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险 .....孙港立,吴丽萍,徐勃,高玉宗,赵雪艳,姬亚芹,杨文 (2558)

西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析 .....李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元 (2571)

天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析 .....卢苗苗,韩素芹,刘可欣,唐晓,孔磊,丁净,樊文雁,王自发 (2581)

基于空间尺度效应的山东省PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化及空间分异地理探测 .....徐勇,韦梦新,邹滨,郭振东,李沈鑫 (2596)

我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势 .....武婷,崔焱文,肖成德,翟增秀,韩萌 (2613)

廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析 .....张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮 (2622)

景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析 .....王玉仓,杜晶晶,张禹,吴昊,胡敏韵,陈丁江 (2631)

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源 .....孟佳靖,婁红,陈哲,周石磊,底怡玲,武辰彬,王晨光,张家丰,崔建升 (2640)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析 .....胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹 (2651)

庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价 .....刘海,魏伟,宋阳,徐洁,管政亭,黄健敏,赵国红 (2665)

农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价 .....王蔚青,徐雄,刘权震,林利华,吕婧,王东红 (2678)

黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征 .....韦程宸,魏枫沂,夏慧,黄魁 (2686)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析 .....金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥 (2694)

再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征 .....贺赞,李雪梅,李宏权,魏琳琳,姜春晖,姜大伟,李魁晚 (2707)

水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响 .....梅渝,黄平,王鹏,朱凯 (2715)

银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系 .....蒙俊杰,刘双羽,邱小琼,周瑞娟 (2727)

热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析 .....张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然 (2741)

市政污水中吗啡来源辨析 .....耶雪婷,赵悦彤,蒋冰,裴伟,李彦莹,谭冬芹,王德高 (2748)

溱沔河流域生态环境动态遥感评价 .....李艳翠,袁金国,刘博涵,郭豪 (2757)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素 .....王奕洪,洪学莹 (2767)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例 .....蔡进,危小建,江平,梁玉琦 (2780)

贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因 .....李月,冯霞,吴路华,罗光杰,罗红芬 (2793)

2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子 .....周怡婷,严俊霞,刘菊,王璞 (2806)

基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量 .....崔霞,董燕,张露尹,王荣耀 (2817)

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响 .....武爱彬,陈辅国,赵艳霞,秦彦杰,刘欣,郭小平 (2828)

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响 .....江可,贾亚男,杨琰,陈坚淇,禹朴家 (2840)

不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析 .....黄世威,赵一锴,朱馨雨,刘贺雷,刘姣姣,陈稍,陈佳永,张阿凤 (2848)

基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测 .....胡志瑞,赵万伏,宋根先,王芳,林妍敏 (2859)

不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响 .....孙凯,崔玉涛,李顺晋,魏冰丽,王媛,杨宏博,王孝忠,张伟 (2871)

集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性 .....周连吴,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰 (2881)

控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响 .....高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵 (2891)

生物炭对黄绵土中NO<sub>3</sub>-N运移过程影响及模拟 .....白一茹,刘旭,张钰涵,张睿媛,马艳,王幼奇 (2905)

中国农田土壤重金属污染分析与评价 .....杨雳,白宗旭,薄文浩,林静,杨佩佳,陈涛 (2913)

城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望 .....王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,王碧莲,林锦阔,颜梦霞,毕世杰 (2926)

场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展 .....陈玥如,高文艳,陈虹任,薛生国,吴川 (2939)

黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析 .....戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霖红,张培培,樊洪明 (2952)

拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价 .....韩双宝,袁磊,张秋霞,郑焰,李甫成 (2962)

银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析 .....于路加,马海军,王翠平 (2971)

基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估 .....陈莲,邹子航,张培珍,王雨茜,王振江,林森,唐翠明,罗国庆,钟建武,李智毅,王圆 (2983)

西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型 .....唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧 (2995)

贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划 .....韦美溜,周浪,黄燕玲,庞瑞,王佛鹏,宋波 (3005)

柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应 .....刘梦宇,罗绪锋,辜娇峰,易轩韬,周航,曾鹏,廖柏寒 (3016)

改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响 .....肖乃川,王子芳,杨文娜,谢永红,代文才,高明 (3027)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响 .....郑晨格,裴欢欢,张亚珊,李嘉欣,刘奋武,乔星星,秦俊梅 (3037)

基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应 .....姜继韶,侯睿,崔慧林,闫广轩,刘栋 (3047)

微塑料对土壤N<sub>2</sub>O排放及氮素转化的影响研究进展 .....刘一戈,杨安琪,陈舒欣,牛奕奕,卢瑛,李博 (3059)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响 .....戴柳云,侯磊,王化,符立松,王艳霞,李晓琳,王万宾,梁启斌 (3069)

养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征 .....宋可心,贺金成,李昌文,解思琦,刘宝莹,黄伟,冯志华 (3078)

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响 .....王志超,李哲,李嘉辰,屈忠义,胡文煊,李卫平 (3088)

鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测 .....俞锦丽,赵俊凯,罗思琦,景文慧,杨启武,刘淑丽 (3098)

粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径 .....徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡 (3107)

电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析 .....徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪 (3119)

# 柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应

刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰\*, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:** 甜高粱生物量大, 镉(Cd)吸收能力强, 具有植物修复 Cd 污染土壤的潜力. 为研究柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的 Cd 修复效应, 在湖南省 2 种典型成土母质(中性紫泥田和黄麻砂泥田)Cd 污染农田, 开展甜高粱植物修复田间试验. 结果表明: ①柠檬酸对甜高粱生长无抑制, 施用柠檬酸后甜高粱成熟期地上部生物量均呈现增大趋势, 增幅为 10.1%~24.7%; ②甜高粱种植和柠檬酸施用降低了土壤 pH 值, 其中柠檬酸施用进一步降低甜高粱各生育期土壤 pH 值, 且在中性紫泥田降幅更大, 降低了 0.24~0.72 个单位; ③甜高粱种植和柠檬酸施用降低了土壤 Cd 总量, 中性紫泥田和黄麻砂泥田降幅分别为 23.8%~52.2% 和 17.1%~31.8%, 并同时增大两地土壤 Cd 酸可提取态占比 38.6%~147.7% 和 4.8%~22.7%; ④柠檬酸施用显著提高甜高粱各部位 Cd 含量, 中性紫泥田甜高粱茎和叶  $\omega(\text{Cd})$  分别为 0.25~1.90  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.21~0.64  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均高于黄麻砂泥田; ⑤施用柠檬酸后中性紫泥田甜高粱成熟期地上部 Cd 提取量可达 47.56  $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ . 综上, 柠檬酸可强化甜高粱修复 Cd 污染土壤效率, 在中性紫泥田上效果更好, 该技术具有重金属污染农田的边生产边修复潜力.

**关键词:** 甜高粱; 柠檬酸; 镉(Cd); 生育期; 成土母质; 植物修复

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3016-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202306027

## Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China

LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng\*, YI Xuan-tao, ZHOU Hang, ZENG Peng, LIAO Bo-han

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Sweet sorghum has a large biomass and strong cadmium (Cd) absorption capacity, which has the potential for phytoremediation of Cd-contaminated soil. In order to study the Cd phytoremediation effect of sweet sorghum assisted with citric acid on the typical parent materials in southern China, a field experiment was carried out in two typical parent material farmland areas (neutral purple mud field and jute sand mud field) with Cd pollution in Hunan Province. The results showed that: ① Citric acid had no inhibitory effect on the growth of sweet sorghum. After the application of citric acid, the aboveground biomass of sweet sorghum at the maturity stage increased by 10.1% - 24.7%. ② Both sweet sorghum planting and citric acid application reduced the soil pH value, and the application of citric acid further reduced the soil pH value at each growth stage of sweet sorghum; this decrease was greater in the neutral purple mud field, which decreased by 0.24 - 0.72 units. ③ Both sweet sorghum planting and citric acid application reduced the total amount of soil Cd, and the decreases in the neutral purple mud field and jute sand mud field were 23.8% - 52.2% and 17.1% - 31.8%, respectively. The acid-extractable percentage of soil Cd in both places increased by 38.6% - 147.7% and 4.8% - 22.7%, respectively. ④ The application of citric acid could significantly increase the Cd content in various tissues of sweet sorghum. The Cd content in the aboveground part of the plant in the neutral purple mud field was higher than that in the jute sand mud field, and the Cd content in stems and leaves was 0.25 - 1.90  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and 0.21 - 0.64  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. ⑤ After applying citric acid, the Cd extraction amount of sweet sorghum in neutral purple mud soil in the mature stage reached 47.56  $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ . In summary, citric acid could enhance the efficiency of sweet sorghum in the phytoremediation of Cd-contaminated soil, and the effect was better in neutral purple mud fields. This technology has the potential for remediation coupled with agro-production for heavy metal-contaminated farmland.

**Key words:** sweet sorghum; citric acid; cadmium (Cd); growth stage; soil parent material; phytoremediation

《2021 年中国生态环境状况公报》<sup>[1]</sup>显示, 影响农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属, 其中镉(Cd)为首要污染物. 土壤中的 Cd 易被植物吸收, 并通过食物链进入人体, 对人体健康造成严重威胁<sup>[2]</sup>. 因此, 如何利用或修复 Cd 污染农田, 实现 Cd 污染农田的安全利用、可持续利用是当前亟需解决的环境问题.

植物修复技术一般利用超富集植物对重金属污染物的提取、吸收、分解、转化和固定从而降低土壤中重金属总量<sup>[3]</sup>, 具有修复成本低、环境友好的优点, 是公认的最具应用潜力的绿色修复技术<sup>[4]</sup>. 已发现的超富集植物有蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)、东南景天(*Sedum alfredii* Hance)和龙葵(*Solanum nigrum*

L.)等. 此外, 有研究也发现具有较大生物量的纤维植物具有较强的重金属富集能力, 可用于污染土壤的植物修复. 例如, 杂交狼尾草(*Pennisetum glaucum* × *purpureum*)、高丹草(*Sorghum bicolor* × *sudanense*)和苏丹草(*Sorghum sudanense*)对 Cd、砷(As)的吸收能力较强<sup>[5]</sup>, 黑麦草(*Lolium perenne* L.)、高羊茅(*Festuca arundinacea* L.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和菊苣(*Cichorium intybus* L.)<sup>[6]</sup>也可降低底泥中锌

收稿日期: 2023-06-04; 修订日期: 2023-07-24

基金项目: 湖南重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点项目(湘财农指 2019[33]); 国家重点研发计划项目(2017YFD0801105)

作者简介: 刘梦宇(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: 1456713243@qq.com

\* 通信作者, E-mail: gujiaofeng@csuft.edu.cn

(Zn)、铜(Cu)、铅(Pb)和Cd含量.与超富集植物相比,此类纤维植物生物量大、抗逆性强、易于种植,近年来被提出用于植物修复重金属污染土壤.甜高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]是一年生禾本科高粱属草本植物,是我国重要的经济作物之一,用于糖和青贮饲料的生产,同时,甜高粱也是重要的能源植物之一,可用于纤维乙醇的生产<sup>[7]</sup>.有研究表明,甜高粱具有光合效率高、生物量大、抗逆性强和适应性广等特点<sup>[8]</sup>,对土壤重金属污染也具有较好的耐受性<sup>[9]</sup>,尤其是相当一部分甜高粱品种可以在Cd污染农田正常生长,同时富集大量Cd,实现Cd污染土壤的植物修复<sup>[10,11]</sup>.Xiao等<sup>[12]</sup>研究发现,在 $\omega$ (总Cd)为 $1.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤上甜高粱产量可达 $76.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,对Cd的植物提取量可达 $51.6 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ .Feng等<sup>[13]</sup>研究了Cd胁迫条件下甜高粱细胞结构、形态生理特性和金属离子分布等的响应和变化,从植物生理角度证明甜高粱可作为Cd污染土壤的植物修复品种.我国部分Cd污染农田已不再适合种植水稻等粮食作物,需要进行农业种植结构调整,保持土壤的耕地属性和区域经济,尝试替代种植其他经济作物,用于饲料或生物能源生产,具有广阔的应用前景.

在筛选、鉴定可用于植物修复的物种同时,相关辅助、强化植物修复效率的技术也在深入研究.例如,使用螯合剂GLDA辅助三叶草(*Trifolium repens*)<sup>[14]</sup>、象草(*Pennisetum purpureum* Schum)<sup>[15]</sup>植物修复Cd污染土壤;EDTA增强黑麦草<sup>[16]</sup>和类芦(*Neyraudia reynaudiana*)<sup>[17]</sup>对重金属的吸收累积; $\beta$ -环糊精( $\beta$ -CD)提高茵根苋菜(*Amaranthus hypochondriacus* L.)幼苗中Cd含量和BDE-209在土壤中的降解量<sup>[18]</sup>.其中低分子有机酸柠檬酸,因可通过促进金属离子解吸作用及与金属离子形成可溶性的络合物,增加土壤中重金属的溶解度和生物利用度,且生物降解性强、对土壤无二次污染,备受关注<sup>[19]</sup>.柠檬酸施入土壤后可以为土壤提供 $\text{H}^+$ ,使土

壤Cd从难溶态向可溶态转化,生物有效性提升,从而促进重金属向植物体内的迁移<sup>[20,21]</sup>.例如,施用柠檬酸( $1 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )可将高羊茅根际土壤中Cd含量提升11.6倍,高羊茅植株Cd的累积量增大2.8倍<sup>[22]</sup>;柠檬酸( $5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )可增大青葙(*Celosia argentea* L.)叶中Cd含量2.72倍<sup>[23]</sup>,柠檬酸( $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )可将伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)对Cd污染土壤的修复效率提升29.35%<sup>[24]</sup>.由此可见,柠檬酸在辅助植物修复Cd污染农田土壤方面具有较好的应用潜力.

本研究假设在甜高粱种植中柠檬酸施用能够有效提升甜高粱植物修复Cd污染土壤的效率,并以我国南方典型成土母质(中性紫泥田和黄麻砂泥田)的Cd污染农田土壤为研究对象,开展甜高粱种植辅以柠檬酸施用的田间试验.通过分析甜高粱根际土壤基本理化性质,甜高粱植株生物量、各部位Cd含量以及甜高粱对Cd的吸收与转运等,探明甜高粱以及柠檬酸施用技术对我国南方典型母质土壤Cd的植物修复效应和作用机制,以期为重污染农田植物修复提供理论依据及技术参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点和供试材料

试验地分别位于湖南湘潭( $27.78^\circ \text{N}$ ,  $112.89^\circ \text{E}$ )和湖南醴陵( $27.65^\circ \text{N}$ ,  $113.5^\circ \text{E}$ ),土壤类型分别为中性紫泥田和黄麻砂泥田,基本理化性质见表1.两地属亚热带季风气候,平均气温 $16.7^\circ \text{C}$ ,年平均降水量 $1350 \text{ mm}$ ,年平均无霜期 $288 \text{ d}$ .污染物溯源分析发现湘潭中性紫泥田是高Cd背景,醴陵黄麻砂泥田是历史污灌.在水稻耕种上,前者稻米Cd含量超标,后者则无法种植.自2019年两地均划归种植结构调整,尝试休耕或替代种植,以保持用地农业化属性.供试植物为甜高粱G98(品种登记为非主要农作物品种,能源用途),由中国科学院植物研究所提供.柠檬酸购于潍坊英轩实业有限公司.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

土壤类型	pH	$\omega(\text{OM})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{全氮})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效磷})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{速效钾})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{总Cd})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{HOAc-Cd})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{黏粒})$ /%
中性紫泥田	6.76±0.01	30.89±2.28	179.50±33.23	17.60±3.11	131.00±24.04	0.53±0.03	0.153±0.002	26.89±1.42
黄麻砂泥田	4.52±0.01	35.18±1.27	164.50±38.89	15.05±3.61	120.50±26.16	0.52±0.01	0.202±0.004	3.83±0.62

### 1.2 试验设计

田间试验在两地同时进行.试验田旋耕平整后,田块按垄宽 $180 \text{ cm}$ ,垄间距 $30 \text{ cm}$ ,垄沟深 $20 \text{ cm}$ 整理.甜高粱株距 $15 \sim 20 \text{ cm}$ ,每垄控制3行,种植密度每公顷7.5万株( $7.5 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ ).试验设

置对照组(CK)和柠檬酸施用组(CA,  $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),每处理样方面积 $667 \text{ m}^2$ ,重复3次,两地共12个样方.柠檬酸施用方式是,在甜高粱苗高 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 时,结合第二次中耕除草,撒施在根基附近,并翻耕入土.甜高粱播种前施用氮磷钾复

合肥 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, 总养分 ≥51%, 26-10-15) 750 kg·hm<sup>-2</sup> 作基肥. 种植期间追肥 3 次, 追施尿素总量按 450 kg·hm<sup>-2</sup> 计, 第 1 次在定苗后期 75 kg·hm<sup>-2</sup>, 第 2 次在拔节前后 225 kg·hm<sup>-2</sup>, 第 3 次在打苞抽穗时 150 kg·hm<sup>-2</sup>. 2020 年 5 月 15 日甜高粱穴播种植, 2020 年 10 月 14 日成熟收获. 种植过程中不施用农药, 7 月和 8 月全田灌溉各一次.

### 1.3 样品采集与分析

分别在拔节期(8月12日)、抽穗期(9月21日)和成熟期(10月14日), 在各处理样方按照棋盘式取样法采集 9 株甜高粱. 甜高粱植株分根、茎、叶和果穗称量鲜重, 并依次用自来水、超纯水洗净(根用 0.005 mol·L<sup>-1</sup> 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液, 浸泡 30 min, 去除表面重金属<sup>[25]</sup>), 随后 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重, 称重、粉碎、过 0.149 mm 筛, 保存备用. 同期, 采集甜高粱根际土壤样品, 方法是将根取出后, 去掉表层大块土壤, 然后剧烈摇动, 收集根系上附着的土壤. 土壤样品自然风干、研磨并过 0.149 mm 和 2.0 mm 筛, 保存待测.

采用文献[26]所述方法测定土壤基本理化性质和土壤重金属总量, 修正 BCR 法<sup>[27]</sup> 分析土壤中 Cd 的赋存形态. 甜高粱各部位 Cd 含量采用硝酸湿法消解<sup>[28]</sup>. 土壤和植物样品消解液中重金属含量使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP 6300, Thermo Fisher, 美国)测定. 试验同时使用国家标准物质土壤[GBW(E)070009]和生物成分标准物质(GBW 10010)进行质量控制, 并做空白试验. 土壤样品 Cd 的回收率为 98.0%~101.0%, 植物样品 Cd 的回收率为 97.0%~103.0%.

### 1.4 数据统计与分析

用富集系数(bioaccumulation factor, BCF)和转运系数(translation factor, TF)评价甜高粱地上部对 Cd 的富集能力和根系对 Cd 转运能力<sup>[29]</sup>. 单位面积甜高粱 Cd 提取量, 按照单株甜高粱 Cd 累积量乘以每公顷种植株数(7.5 万株)计算, 计算方法如下:

$$BCF = \frac{C_{\text{shoot}}}{C_s}$$

$$TF = \frac{C_{\text{shoot}}}{C_{\text{root}}}$$

$$\text{单株甜高粱 Cd 累积量} = \sum M_i \times C_i$$

式中,  $C_{\text{shoot}}$  表示甜高粱地上部 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>),  $C_s$  表示土壤 Cd 总量(mg·kg<sup>-1</sup>),  $C_{\text{root}}$  表示根部 Cd 含量,  $M_i$  表示甜高粱各部位干重(kg),  $C_i$  表示对应各部位 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>).

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 22.0 进行数据统计分析, 文中数据为平均值 ± 标准偏差( $n = 9$ ).

采用独立样本  $T$  检验和 one-way ANOVA with Duncan's multiple range 检验( $P < 0.05$ )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. 在厦门大学合作的云平台上进行 Mantel 测试分析, 图形采用 Origin 2019 软件进行绘制.

## 2 结果与分析

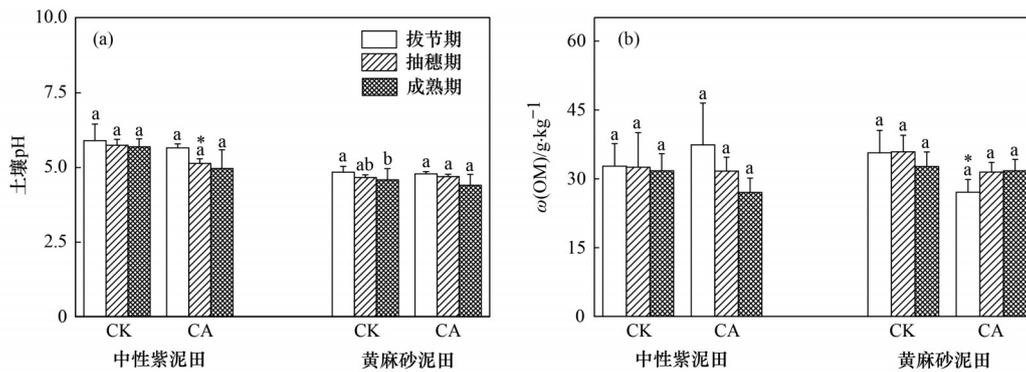
### 2.1 施加柠檬酸对各生育期甜高粱根际土壤 pH 和有机质的影响

由图 1(a)可知, 在中性紫泥田, 随生育期延长, 对照 CK 和柠檬酸 CA 处理土壤 pH 呈现降低趋势, 降低了 0.16~0.69 个单位; 与对照 CK 相比, CA 处理土壤 pH 降低了 0.24~0.72 个单位, 其中抽穗期差异显著( $P < 0.05$ ). 在黄麻砂泥田, 随生育期延长, 土壤 pH 的变化趋势与中性紫泥田相似, 其中对照 CK 拔节期土壤 pH 值最大, 与成熟期差异显著( $P < 0.05$ ); 此外, 与对照 CK 相比, CA 处理有降低土壤 pH 值的效应, 但差异不显著. 对比两种类型土壤, 甜高粱种植会降低土壤 pH 值, 柠檬酸施用则有进一步降低甜高粱各生育期土壤 pH 值的效应, 且在中性紫泥田上效果更显著.

由图 1(b)可知, 在中性紫泥田, 随甜高粱生育期延长, 对照 CK 和 CA 处理土壤有机质含量呈现降低趋势, 降低了 0.7%~15.2%, 但处理间差异不显著; 与对照 CK 相比, CA 处理抽穗期和成熟期土壤有机质降低了 2.6%~14.9%, 但差异不显著. 在黄麻砂泥田, 随甜高粱生长和 CA 处理, 土壤有机质变化趋势与中性紫泥田一致, 且在拔节期与对照差异显著( $P < 0.05$ ). 综上分析, 柠檬酸施用有加速土壤有机质消耗的可能.

### 2.2 施加柠檬酸对各生育期甜高粱根际土壤 Cd 总量、酸可提取态含量及赋存形态的影响

如图 2(a)所示, 在中性紫泥田, 随生育期延长土壤 Cd 总量逐渐降低, 与拔节期相比, 对照 CK 和柠檬酸 CA 处理分别降低了 13.1%~34.9% 和 14.1%~24.0% ( $P < 0.05$ ); CA 处理有进一步加速土壤 Cd 总量降低的趋势, 与对照 CK 相比, 在各生育期 CA 处理的降幅为 3.8%~18.5%, 但差异不显著. 在黄麻砂泥田, 随生育期延长土壤 Cd 总量无显著变化, 与对照 CK 相比, CA 处理下土壤 Cd 总量降幅为 0.3%~13.1%, 但无显著差异. 对比两种类型土壤, Cd 总量并无显著差异, 但甜高粱种植后 Cd 总量降低, 且在中性紫泥田的降低效应更显著, 同时 CA 施用强化了这种降低效应, 尤其是在中性紫泥田. 分析两地土壤 Cd 酸可提取态含量, 在中性紫泥田, 随生育期延长呈先增大后降低趋势, 与拔节期相比, 在对照



不同小写字母表示相同处理下不同生育期间差异显著( $P < 0.05$ ), \*表示同一生育期下与CK差异显著( $P < 0.05$ )

图1 不同处理下各生育期甜高粱根际土壤基本理化性质

Fig. 1 Basic physical and chemical properties in rhizosphere soil of sweet sorghum at different growth stages under different treatments

CK处理甜高粱抽穗期时土壤Cd酸可提取态含量显著增大37.5% ( $P < 0.05$ ); 与对照CK相比, CA处理下拔节期和成熟期土壤Cd酸可提取态含量增大3.0%~8.1%, 但无显著差异. 在黄麻砂泥田, 随生育期延长和CA施用, 土壤Cd酸可提取态含量呈增大趋势, 但均无显著差异. 对比两种类型土壤, 种植前中性紫泥田土壤Cd酸可提取态含量低于黄麻砂泥田, 但随着甜高粱种植和柠檬酸CA处理, 两地呈现相反变化趋势, 在中性紫泥田土壤Cd酸可提取态含量增大了4.6%~43.8%, 在黄麻砂泥田则降低9.3%~16.8%.

如图2(b)所示, 在中性紫泥田, 甜高粱根际土壤Cd的赋存形态以酸可提取态(39.7%~70.8%)为主, 其次是残渣态(15.12%~49.4%)、铁锰结合态(6.0%~9.6%)和有机结合态(4.6%~6.1%). 随生育期延长, 对照CK和柠檬酸CA处理土壤Cd的酸可提取态占比和残渣态占比变化显著, 与拔节期相比, 酸可提取态增幅分别为57.7%~60.4%和32.1%~36.9% ( $P < 0.05$ ), 残渣态则降低52.5%~55.1%和51.4%~57.1%; 与对照CK相比, CA处理后土壤Cd的酸可提取态占比进一步增大, 增大了7.5%~30.4%, 残渣态则降低了22.8%~35.5%. 在黄麻砂泥田, 甜高粱根际土壤Cd的赋存形态以酸可提取态(41.0%~48.0%)和残渣态(43.3%~51.0%)为主, 其次为铁锰结合态(4.6%~6.1%), 有机结合态(1.7%~3.0%)最少. 随生育期延长, Cd酸可提取态和有机结合态占比呈现增大趋势, 但Cd的4种赋存形态占比变化不显著; 与对照CK相比, CA处理增大了酸可提取态和铁锰结合态在各生育期的占比, 增幅分别为1.5%~13.6%和6.5%~18.1%, 土壤残渣态Cd占比降低0.1%~12.6%. 对比两地4个处理, 两种类型土壤Cd的赋存形态占比相似, 甜高粱种植后增大了土壤Cd酸可提取态占比, 柠檬酸施用则更大幅度提升了Cd酸可提取态占比.

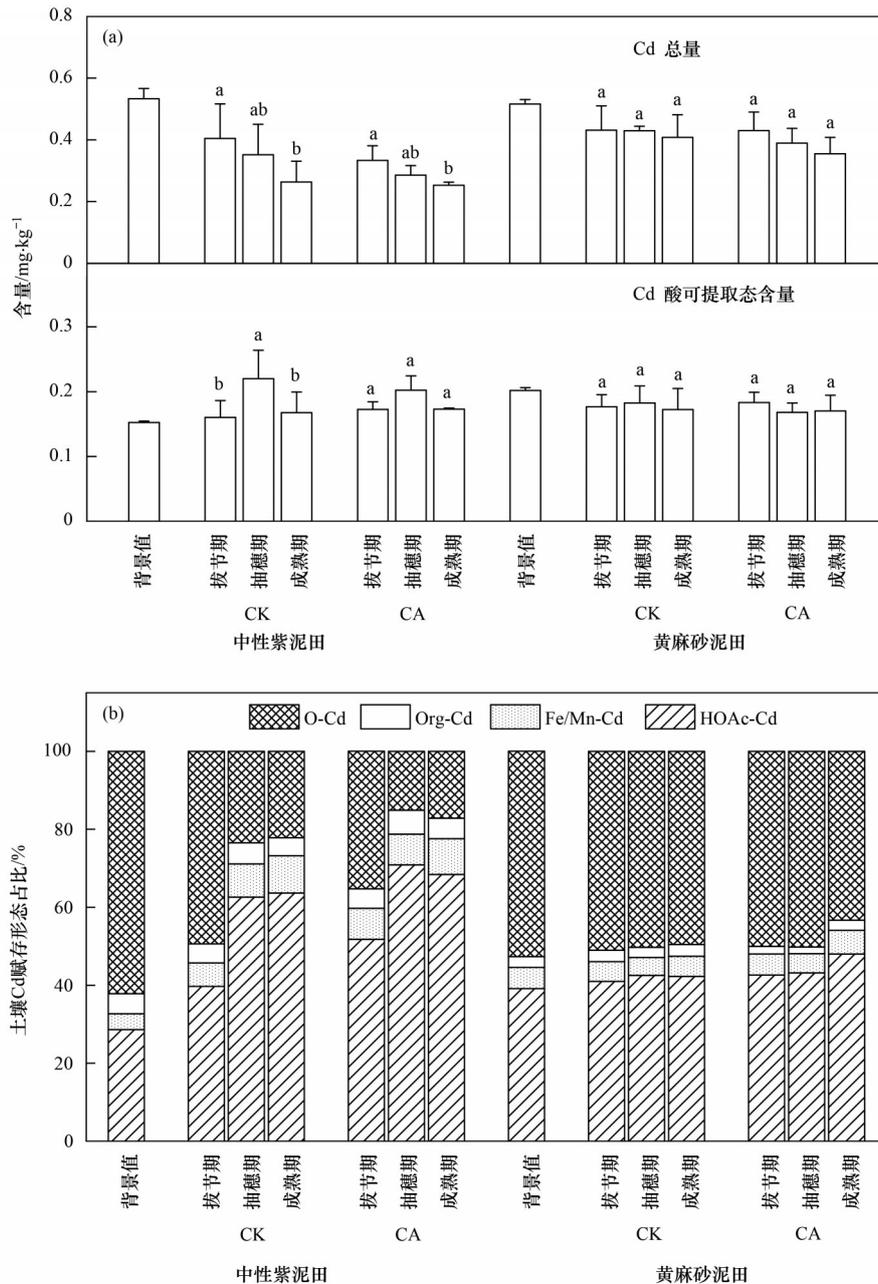
### 2.3 施加柠檬酸对各生育期甜高粱生长性状及生物量的影响

由表2可知, 在中性紫泥田, 随生育期延长, 甜高粱株高可达400 cm以上, 在抽穗期基本稳定; 根长不断增长, 各部位生物量均呈上升趋势, 而胸径变化不显著. 与对照CK相比, 柠檬酸CA处理中拔节期的甜高粱株高为277 cm, 高出13.9% ( $P < 0.05$ ); 地上部生物量呈增大趋势, 但差异不显著; 甜高粱成熟期产量(鲜重)下降8.0%, 但差异不显著. 在黄麻砂泥田, 随生育期延长, 甜高粱株高可达370 cm左右; 根长增长, 成熟期根长值最大, 达到28.38 cm; 各部位生物量均呈增大趋势. 与对照CK相比, CA处理各生育期株高均有下降, 其中拔节期和抽穗期降幅显著, 降幅分别为16.4%和12.7% ( $P < 0.05$ ), 但各部位生物量并无显著差异, 地上部生物量和产量也呈增大趋势.

对比两种类型土壤种植甜高粱, 中性紫泥田成熟期收获甜高粱在根长上小于黄麻砂泥田种植的甜高粱, 但在株高和生物量上大于黄麻砂泥田. 同时, 除成熟期CA处理外, 中性紫泥田上甜高粱产量均大于黄麻砂泥田. 这表明中性紫泥田更有利于甜高粱的茂盛生长. 对比CK和CA处理, CA处理对甜高粱生物量无降低效应, 呈现出增大趋势.

### 2.4 施加柠檬酸对各生育期甜高粱富集、吸收和转运Cd的影响

由图3可知, 在中性紫泥田, 甜高粱根、茎和叶的 $\omega(\text{Cd})$ 范围分别是1.50~2.34、0.25~1.90和0.21~0.64  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 随生育期延长根系Cd含量持续增大, 茎和叶Cd含量则呈现抽穗期最低的现象. 与拔节期相比, 对照CK和柠檬酸CA处理茎Cd含量降低82.6%和86.4% ( $P < 0.05$ ), 叶Cd含量降低36.45%和61.6% ( $P < 0.05$ ). CA处理增大了各生育期甜高粱根、茎和叶Cd含量, 尤以成熟期最显著, 与对照CK相比, CA处理下成熟期根、茎和叶Cd含量分别



HOAc-Cd: 酸可提取态, Fe/Mn-Cd: 铁锰结合态 Cd, Org-Cd: 有机结合态 Cd, O-Cd: 残渣态 Cd; 不同小写字母表示相同处理下不同生育期间差异显著 ( $P < 0.05$ ), \*表示同一生育期下与 CK 差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 2 不同处理下各生育期甜高粱根际土壤 Cd 总量、酸可提取态含量及赋存形态

Fig. 2 Total amount, acid extractable content, and speciation of Cd in rhizosphere soil of sweet sorghum at different growth stages under different treatments

增大了 21.2%、95.9%、106.5% ( $P < 0.05$ ). 在黄麻砂泥田, 甜高粱根、茎和叶的  $\omega(\text{Cd})$  范围分别是 1.55 ~ 2.25、0.32 ~ 0.79 和 0.06 ~ 0.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 随生育期延长根和茎 Cd 含量呈下降趋势, 分别降低 4.5% ~ 31.3% 和 25.0% ~ 46.8% ( $P < 0.05$ ); 叶部 Cd 含量则呈现抽穗期显著低于拔节期和成熟期 ( $P < 0.05$ ) 的现象. 与对照 CK 相比, CA 处理均增大了各生育期根和茎 Cd 含量, 尤以拔节期最显著, 根、茎 Cd 含量分别增大了 35.5% 和 51.9% ( $P < 0.05$ ). 对比两种类型土壤下种植的甜高粱, 中性紫泥田甜高粱茎、叶 Cd

含量高于黄麻砂泥田, 柠檬酸施用增加了各部位 Cd 含量, 且其增量在中性紫泥田更大.

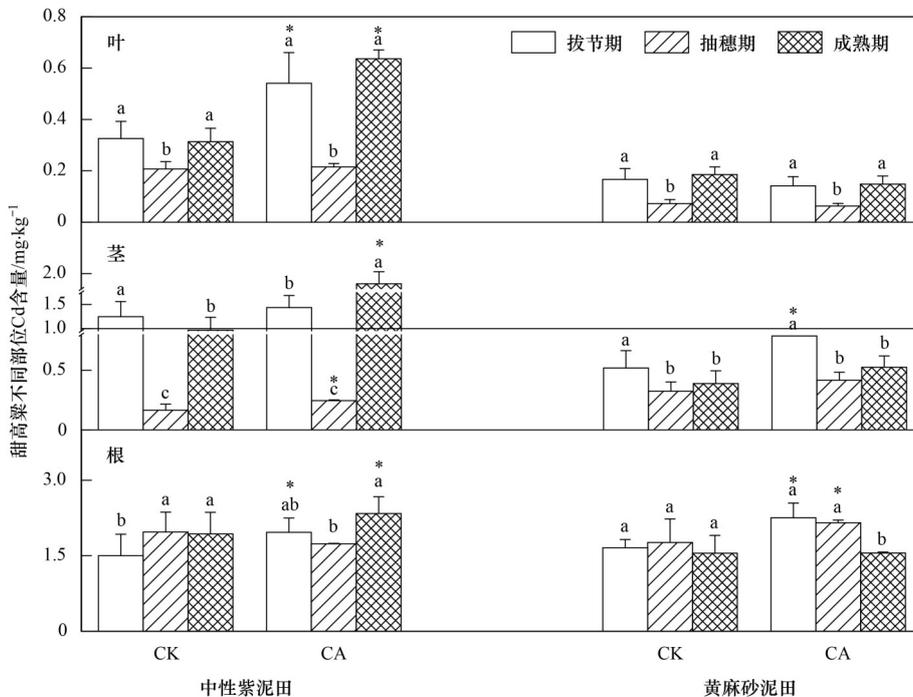
由图 4(a) 可知, 在中性紫泥田, 随生育期延长, 对照 CK 和柠檬酸 CA 处理下甜高粱植株 Cd 富集系数 (BCF) 呈现抽穗期最低、成熟期最大的现象, 且成熟期 BCF 值显著高于拔节期和抽穗期 ( $P < 0.05$ ); 与对照 CK 相比, CA 处理增大了各生育期 BCF 值, 在成熟期 BCF 值可以达到 3.03. 在黄麻砂泥田, BCF 则随生育期延长先降低后增大, 其中 CA 处理下, 拔节期 BCF 值为 1.00, 显著大于抽穗期, 也

表 2 不同处理下甜高粱各生育期生长性状及生物量<sup>1)</sup>

Table 2 Growth characters and biomass of sweet sorghum at different growth stages under different treatments

土壤类型	处理	生育期	根长/cm	株高/cm	胸径/cm	生物量(以 WT 计)/g·plant <sup>-1</sup>				产量(以 FW 计) t·hm <sup>-2</sup>
						根	茎	叶	地上部	
中性紫泥田	CK	拔节期	18.63±2.78b	243.11±18.00a	2.43±0.22a	40.77±9.59a	137.51±37.19c	98.51±25.44a	236.00±61.32b	119.60±26.10a
		抽穗期	24.88±2.65a	407.22±33.58b	2.51±0.26a	40.20±10.16a	206.61±39.73b	66.58±16.12b	273.18±52.50b	120.91±25.93a
		成熟期	21.78±4.16ab	401.00±38.17b	2.52±0.23a	47.94±12.17a	261.6±68.74a	94.88±26.02a	355.93±94.28a	131.19±27.20a
	CA	拔节期	24.15±2.98a*	277.00±30.81b*	2.71±0.15a	38.40±2.50a	185.63±29.18b	90.43±5.91a	276.07±32.67ab	102.06±27.22a
		抽穗期	24.15±2.98a	401.33±24.91a	2.43±0.16a	39.30±3.72a	209.57±16.65ab	53.50±5.78b	263.07±10.90b	117.13±2.26a
		成熟期	21.45±1.48a	399.00±25.16a	2.55±0.18a	39.80±7.50a	299.79±72.36a	92.17±27.45a	391.96±99.56a	120.68±28.30a
黄麻砂泥田	CK	拔节期	16.51±1.90c	218.29±20.75b*	2.71±0.46a	28.79±6.54b*	86.01±19.10b	52.06±11.66b	138.07±29.24b	72.32±18.37b
		抽穗期	20.03±3.10b	381.67±26.56a*	2.65±0.22a	37.66±10.51a	232.59±49.91a	66.27±12.66ab	298.86±58.97a	100.41±17.33a
		成熟期	26.62±2.69a	370.00±25.00a	2.51±0.23a	38.35±9.02a	246.42±57.11a	78.52±19.22a	324.94±73.70a	113.89±20.16a
	CA	拔节期	19.11±7.64a	182.40±19.44b	2.24±0.09b	18.80±0.66c	93.87±27.37c	67.33±19.20a	162.20±46.53c	92.40±13.83b
		抽穗期	21.00±4.50a	333.33±35.12a	2.59±0.10a	37.13±2.02a	231.27±15.73b	64.70±6.32a	295.97±18.56b	104.54±8.51ab
		成熟期	28.38±1.98a	360.00±17.32a	2.60±0.15a	32.95±0.95b	315.27±65.35a	89.80±14.75a	405.07±79.28a	132.41±24.83a

1)不同小写字母表示相同处理下不同生育期间显著差异( $P < 0.05$ ),\*表示同一生育期下与CK的显著差异( $P < 0.05$ );甜高粱果穗生物量非常小,合并到茎部



横线为《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)中植物性饲料原料限值, $\omega(\text{Cd}) \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;不同小写字母表示相同处理下不同生育期间差异显著( $P < 0.05$ ),\*表示同一生育期下与CK的差异显著( $P < 0.05$ )

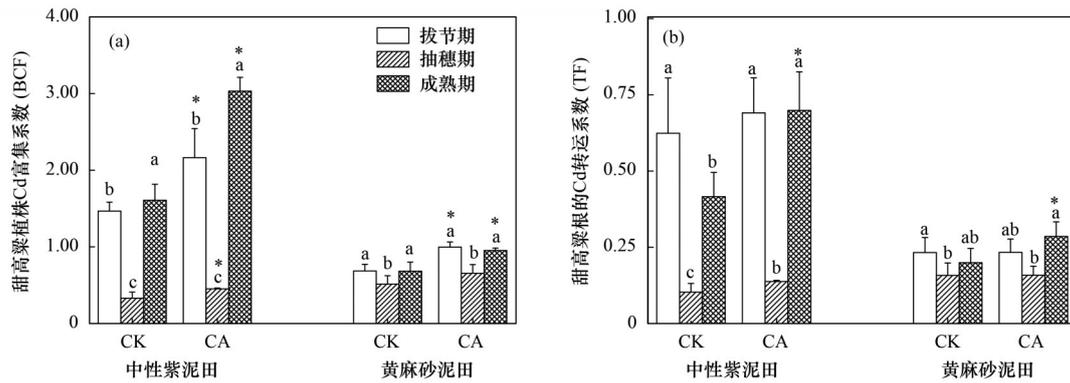
图 3 不同处理下甜高粱各生育期各部位 Cd 含量

Fig. 3 Sweet sorghum tissues Cd content in different growth stages under different treatments

显著大于对照CK处理的拔节期.由图4(b)可知,在中性紫泥田,对照CK和CA处理甜高粱根Cd转运系数(TF)值分别是0.10~0.62和0.14~0.70,随生育期延长,呈现先降低后增大的现象,抽穗期TF值显著低于拔节期和成熟期;CA处理增大了各生育期TF值,成熟期TF值可增大到0.70,与对照CK差异显著( $P < 0.05$ ).在黄麻砂泥田,对照CK和CA处理甜高粱TF值的范围是0.16~0.29,随生育期延长,变化规律与中性紫泥田相同,CA处理也

增大了成熟期TF值( $P < 0.05$ ).对比两种类型土壤试验数据,除抽穗期外,中性紫泥田甜高粱BCF和TF值均高于黄麻砂泥田,表明在中性紫泥田上甜高粱对Cd的富集、根系对Cd的转运能力均更强;CA处理能提升甜高粱BCF和TF值,表明柠檬酸施用提升了甜高粱地上部Cd的富集能力和根系对Cd转运能力.

2.5 施加柠檬酸对各生育期甜高粱提取Cd的影响  
由图5可知,在中性紫泥田,对照CK和柠檬

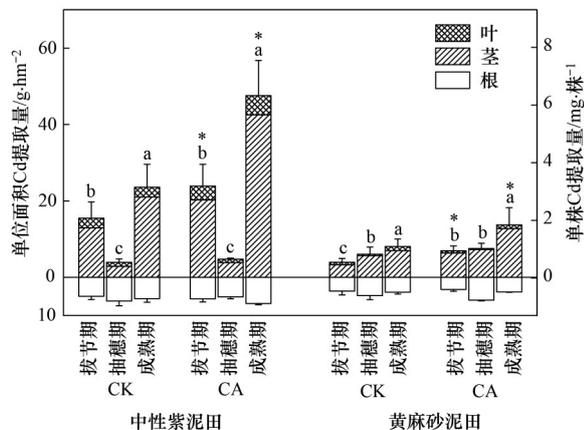


不同小写字母表示相同处理下不同生育期间差异显著( $P < 0.05$ ), \*表示同一生育期下与CK的差异显著( $P < 0.05$ )

图4 不同处理下甜高粱各生育期植株Cd富集系数和根的Cd转运系数

Fig. 4 Cd bioaccumulation factor and Cd transport factor of sweet sorghum in different growth stages under different treatments

酸CA处理甜高粱地上部Cd提取量范围分别为 $3.92 \sim 23.59 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4.73 \sim 47.56 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 随生育期延长, 呈现抽穗期最小、成熟期最大的现象, 与抽穗期相比, 成熟期Cd提取量增大 $5.0 \sim 9.0$ 倍( $P < 0.05$ ); CA处理均增大了各生育期Cd提取量, 其中成熟期地上部Cd总提取量达到 $47.56 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 增大了 $23.97 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 约是对照CK的2.0倍( $P < 0.05$ ). 在黄麻砂泥田, CK和CA处理甜高粱地上部Cd提取量范围分别为 $3.94 \sim 8.06 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.95 \sim 13.72 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 随生育期延长和CA处理地上部Cd提取量也呈增大趋势, 但其增大效应远小于中性紫泥田, 其中CA处理对甜高粱成熟期Cd提取量仅增大 $5.66 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 对比两种类型土壤种植甜高粱, 相同之处是甜高粱吸收的Cd主要累积在地上部(占比为 $38.7\% \sim 87.4\%$ ), 且柠檬酸施用可大幅提升甜高粱地上部Cd提取量; 不同之处是中性紫泥田上种植的甜高粱Cd提取量高于黄麻砂泥田. 综上, 甜高粱提取Cd能力在中性紫泥田上更大, 柠檬酸辅助更可大幅提升这一效果.



不同小写字母表示相同处理下不同生育期间差异显著( $P < 0.05$ ),

\*表示同一生育期下与CK的差异显著( $P < 0.05$ )

图5 不同处理下甜高粱各生育期Cd提取量

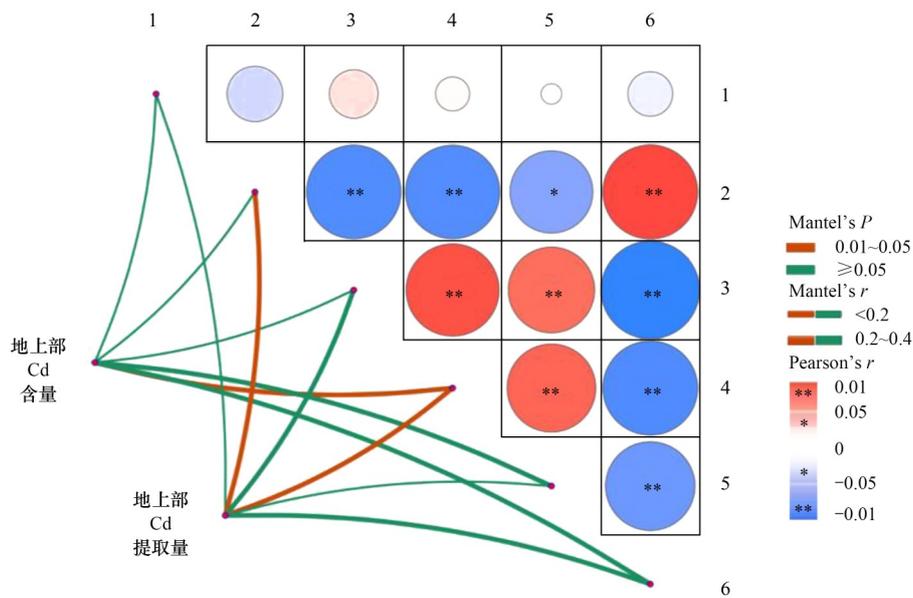
Fig. 5 Extraction amount of Cd in different growth stages of sweet sorghum under different treatments

### 3 讨论

#### 3.1 柠檬酸辅助甜高粱Cd富集的效果与机制

随着甜高粱生长发育和柠檬酸施用(CA处理), 根际土壤pH呈下降趋势[图1(a)], 均低于种植前土壤pH值(表1), 这一方面是因为甜高粱根呼吸释放出的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}^+$ 以及分泌的氨基酸降低了根际土壤pH值<sup>[30]</sup>, 另一方面则是因为柠檬酸施入土壤可为土壤提供 $\text{H}^+$ , 进一步降低土壤pH值<sup>[20]</sup>. 土壤pH值的降低则会促进土壤胶体、黏土矿物颗粒吸附的Cd与 $\text{H}^+$ 交换, 活化土壤Cd, 使得土壤有效态Cd的含量增加, 增大Cd的迁移性和生物有效性<sup>[21]</sup>. 本试验中对甜高粱根际Cd赋存形态的分析[图2(b)]和植株各部位Cd含量(图3)的分析证实了这一点. 同时, 试验结果表明随着柠檬酸的施用, 甜高粱根际土壤Cd总量降低[图2(a)], 甜高粱植株BCF增大[图4(a)], 地上部Cd提取量大幅增加(图5), 这也进一步说明施用柠檬酸提高了土壤中Cd的活性, 促进了甜高粱对Cd的积累, 从而提高了甜高粱对重金属Cd的提取效率和对污染土壤的修复效率.

本试验中, 根际土壤pH值随柠檬酸的施用而降低[图1(a)], 酸可提取态含量及其占比随柠檬酸的施用而升高(图2); 将试验中检测指标做相关性分析可知(图6), 甜高粱地上部Cd提取量与土壤中铁锰结合态Cd占比呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 相关系数 $r$ 为0.617, 铁锰结合态Cd占比和酸可提取态Cd占比呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数 $r$ 为0.889, 说明柠檬酸施用带来的土壤酸性条件, 使得土壤Cd从难溶态向可溶态转化, 生物有效性提升, 从而促进重金属向植物体内的迁移, 加速了甜高粱对土壤Cd的植物提取效率, 这正是本研究中柠檬酸辅助甜高粱Cd富集的机制.



1. CA, 2. Total-Cd, 3. HOAc-Cd, 4. Fe/Mn-Cd, 5. Org-Cd, 6. O-Cd

图6 地上部Cd含量和提取量与柠檬酸施量和土壤指标的相关性

Fig. 6 Correlation of above-ground Cd content and extraction with citric acid application and soil indicators

### 3.2 甜高粱植物修复Cd污染土壤的潜力及在两种典型成土母质土壤上的植物修复差异

本试验中, 甜高粱植株Cd富集系数可达3.03, 具有Cd富集特性, 这与Yuan等<sup>[31]</sup>研究的结果一致; 同时甜高粱成熟期地上部Cd提取量达 $47.56 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与超富集植物相比, 甜高粱对Cd的提取量并不低, 如遏蓝菜(*Nocca caerulea*)地上部Cd累积量为 $10.00 \sim 20.00 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ [土壤 $\omega(\text{Cd}): 1.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]<sup>[32]</sup>, 孔雀草(*Tagetes patula* L.)地上部Cd累积量为 $50.00 \sim 85.00 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ [土壤 $\omega(\text{Cd}): 2.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]<sup>[33]</sup>. 甜高粱在我国大部分地区均可种植, 同时, 甜高粱生物量较大, 且其干物质主要集中在地上部分(82.8%~92.5%), 其植株Cd提取量也主要集中在地上部(38.7%~87.4%), 这对利用甜高粱开展植物修复是一个巨大优势, 即通过在适当时机收获其植株, 可以实现将土壤中Cd带走, 达到生物修复目的. 同时, 本试验中, 甜高粱根部也累积大量Cd, 其根部Cd提取量为 $3.18 \sim 6.86 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 未来技术应用, 在追求移除最大化情况下, 建议对秸秆和根系均进行离田处理.

本试验中, 在中性紫泥田上甜高粱各部位生物量略高于黄麻砂泥田, 株高也高于黄麻砂泥田. 将柠檬酸施用(CA处理)到湖南两种典型成土母质土壤, 甜高粱植株的生长并未受抑制, 反而有促进效应, 同时, 柠檬酸施用均提高了各生育期甜高粱植株Cd提取量, 且在拔节期和成熟期, 甜高粱地上部Cd提取量显著高于对照CK处理, 增大了54.1%~101.6%(图5), 这表明柠檬酸施用能够提升甜高粱

植物修复Cd污染土壤的效率. 与种植前土壤相比, 两地根际土壤Cd总量减少了17.1%~52.2%[图2(a)], 从物质平衡角度, 甜高粱Cd提取量和土壤Cd降低量整体相当, 但存在土壤Cd含量损失现象. 这可能是试验处理中舍弃了凋落的老叶和枯叶, 而老叶和枯叶积累的Cd远高于其他叶片<sup>[34]</sup>, 同时在试验清洗过程中叶片外泌Cd被洗掉了<sup>[35]</sup>.

对比两种类型土壤的植物修复差异, 尽管土壤Cd总量相似, 但中性紫泥田甜高粱地上部Cd提取量显著高于黄麻砂泥田, 甜高粱的植物修复效率也更高. 分析原因可能在于以下3点: ①在甜高粱生育期内, 中性紫泥田Cd活性更高. 虽然种植前黄麻砂泥田土壤酸可提取态Cd含量高于中性紫泥田(表1), 但随着甜高粱生育期延长和柠檬酸施用, 中性紫泥田pH值降低幅度更大[图1(a)], 酸可提取态Cd含量及占比更大(图2), 因此中性紫泥田中Cd活性更高, 被甜高粱移除的土壤Cd总量更多[图2(a)]. 同时, 中性紫泥田中甜高粱BCF和TF值高于黄麻砂泥田(图4), 这也表明中性紫泥田更利于本试验甜高粱品种G98发挥其自身对Cd的吸收富集能力, 从土壤中吸收转运更多的Cd. ②柠檬酸对中性紫泥田的酸化效应更强. pH在5~7的土壤, 主要酸缓冲体系为盐基和硅酸盐体系, 对酸化敏感<sup>[36]</sup>, 黄麻砂泥田各处理根际土壤pH均小于5, 所以其受柠檬酸酸化影响效果不大, 此外, 在酸度较高的环境中, 柠檬酸并不对其土壤环境中Cd造成显著影响<sup>[37]</sup>. 中性紫泥田土壤pH在5~7之间, 酸化更显著, 增大了对土壤Cd的活化能力、甜高粱对Cd的富集能力, 从

而种植在中性紫泥田的甜高粱植物修复效率高于黄麻砂泥田。③黄麻砂泥田黏粒含量低于中性紫泥田,基于砂土保水性差、营养含量较低等特点,致使该地的甜高粱在拔节期生长性状及生物量不及中性紫泥田(表2),“错失”Cd吸收的高峰期。不同生育期作物对重金属的累积也不同,有研究表明,作物生长营养期对Cd有较强的吸收能力,比如水稻<sup>[38]</sup>、黄麻<sup>[39]</sup>和小麦<sup>[40]</sup>等。同时,分析各生育期甜高粱生物量和Cd含量变化,甜高粱Cd提取量也呈现先降低后升高趋势,因此本试验结果表明拔节期为甜高粱Cd吸收的高峰期。后期笔者将持续开展试验,通过不同生育期定量施加外源Cd,并分期采样,进一步验证这一结果的正确性。此外,两地土壤黏粒比例差异显著,有研究表明,黏土比砂土对重金属有更强的结合力,土壤黏粒含量越大对重金属的吸附固定能力越强,使得重金属的有效性降低<sup>[41]</sup>,黄麻砂泥田黏粒含量显著低于中性紫泥田,这是其土壤Cd含量与中性紫泥田相当(表1),但土壤Cd有效性本底值更高的原因。

### 3.3 富Cd甜高粱秸秆资源化利用途径

甜高粱具有茎秆含糖量高、生育期短和能够充分利用边际土地等优点,是应用前景较广的经济植物之一<sup>[42]</sup>,本试验甜高粱品种产品明确登记为能源用和非主要农作物品种。利用甜高粱秸秆发酵生产生物质乙醇工艺研究表明,Cd处理并不会影响茎秆的糖利用率和乙醇转化率<sup>[43]</sup>,因此,用于植物修复的富Cd甜高粱秸秆可用于生物质乙醇的生产。其次,通过后期对发酵液的重金属脱除,可实现重金属集中回收;针对后续发酵渣可焚烧发电<sup>[44]</sup>或生产沼气(甲烷)等清洁能源<sup>[45]</sup>,进一步实现资源循环利用。

本试验数据表明,在中性紫泥田种植的甜高粱单位面积产量抽穗期为117.13~120.91 t·hm<sup>-2</sup>,成熟期为120.68~131.19 t·hm<sup>-2</sup>(表2),抽穗期与成熟期鲜重并无显著差距,但是抽穗期甜高粱茎和叶部的 $\omega(\text{Cd})$ 范围为0.06~0.42 mg·kg<sup>-1</sup>(图3),低于植物性饲料原料限值1.0 mg·kg<sup>-1</sup>的要求(GB 13078-2017),因此,也可在甜高粱抽穗期进行刈割处理,收获甜高粱秸秆用于饲料加工;在黄麻砂泥田,各处理、各生育期甜高粱茎和叶中的Cd含量均未超过1.0 mg·kg<sup>-1</sup>,更可用于饲料加工。另有研究表明,与其他植物蛋白饲料相比,甜高粱的粗蛋白含量较低,但其他主要营养成分与植物蛋白饲料接近,因此,甜高粱可以作为昂贵蛋白饲料的替代品,降低饲料的经济成本<sup>[46]</sup>,具有较大的市场应用潜力。

## 4 结论

(1)在两种成土母质土壤上甜高粱种植和柠檬酸施用均降低了土壤pH值,在中性紫泥田施用柠檬酸降低了甜高粱各生育期土壤pH值0.24~0.72个单位;

(2)在中性紫泥田和黄麻砂泥田上甜高粱种植和柠檬酸施用均降低了土壤Cd总量,降幅分别为23.8%~52.2%和17.1%~31.8%;甜高粱种植和柠檬酸施用均增大土壤Cd酸可提取态占比,增幅分别为38.6%~147.7%和4.8%~22.7%;

(3)在中性紫泥田甜高粱茎和叶的 $\omega(\text{Cd})$ 分别为0.25~1.90 mg·kg<sup>-1</sup>和0.21~0.64 mg·kg<sup>-1</sup>,均高于黄麻砂泥田;柠檬酸的施用显著提高了甜高粱各部位Cd含量。

(4)在中性紫泥田施用柠檬酸,甜高粱成熟期时植株提取Cd的效果最好,地上部Cd提取量可达47.56 g·hm<sup>-2</sup>。

### 参考文献:

- [1] 中国生态环境部. 2021年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2022, 50(12): 61-74.  
Ministry of Ecological Environment of China. China ecological environment status bulletin 2021 (Excerpt) [J]. Environmental Protection, 2022, 50(12): 61-74.
- [2] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿农区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 442-453.  
Cheng X M, Sun B B, Wu C, et al. Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the Central Zhejiang Province, China [J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 442-453.
- [3] Mudgal V, Raninga M, Patel D, et al. A review on phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 77: 201-208.
- [4] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.
- [5] 张丽, 赵颖, 党晋华, 等. 牧草对重金属复合污染农田土壤的修复研究[A]. 见: 2016中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C]. 海口: 中国环境科学学会, 2016.
- [6] 谷超, 梁隆超, 陈卓. 4种牧草植物对红枫湖底泥中重金属污染的植物修复研究[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 148-151.  
Gu C, Liang L C, Chen Z. Study on phytoremediation of heavy metals in the sediments of Hongfeng Lake by four species of pasture grass[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(7): 148-151.
- [7] 王志恒, 赵延蓉, 黄思麒, 等. 外源海藻糖影响甜高粱幼苗抗旱性的生理生化机制[J]. 植物生理学报, 2022, 58(4): 654-666.  
Wang Z H, Zhao Y R, Huang S Q, et al. Physiological and biochemical mechanism of exogenous trehalose on drought resistance in sweet sorghum seedlings [J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(4): 654-666.
- [8] 薛忠财, 王治, 柳洁, 等. 能源植物甜高粱在铜污染耕地上的应用潜力研究[J]. 河北农业科学, 2022, 26(3): 90-96.  
Xue Z C, Wang Y, Liu J, et al. Application potential of energy

- plant sweet sorghum in copper polluted farmland [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2022, **26**(3): 90-96.
- [9] Xue Z C, Li J H, Li D S, *et al.* Bioaccumulation and photosynthetic activity response of sweet sorghum seedling (*Sorghum bicolor* L. Moench) to cadmium stress [J]. Photosynthetica, 2018, **56**(4): 1422-1428.
- [10] Xiao M Z, Sun Q, Hong S, *et al.* Sweet sorghum for phytoremediation and bioethanol production [J]. Journal of Leather Science and Engineering, 2021, **3**(1), doi: 10.1186/s42825-021-00074-z.
- [11] Liu Z Q, Li H L, Zeng X J, *et al.* Coupling phytoremediation of cadmium-contaminated soil with safe crop production based on a sorghum farming system [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123002.
- [12] Xiao M Z, Hong S, Shen X J, *et al.* In vivo cadmium-assisted dilute acid pretreatment of the phytoremediation sweet sorghum for enzymatic hydrolysis and cadmium enrichment [J]. Environmental Pollution, 2023, **324**, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121372.
- [13] Feng J J, Jia W T, Lv S L, *et al.* Comparative transcriptome combined with morpho-physiological analyses revealed key factors for differential cadmium accumulation in two contrasting sweet sorghum genotypes [J]. Plant Biotechnology Journal, 2018, **16**(2): 558-571.
- [14] 贺玉龙, 余江, 谢世前, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 强化三叶草修复镉污染土壤 [J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 979-985.  
He Y L, Yu J, Xie S Q, *et al.* Enhanced phytoextraction of cadmium contaminated soil by *Trifolium Repens* with biodegradable chelate GLDA [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 979-985.
- [15] 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.
- [16] Li F L, Qiu Y H, Xu X Y, *et al.* EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals from sludge soil by Italian ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110185.
- [17] Li Y, Luo J W, Yu J D, *et al.* Improvement of the phytoremediation efficiency of *Neyraudia reynaudiana* for lead-zinc mine-contaminated soil under the interactive effect of earthworms and EDTA [J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-24715-2.
- [18] Li X, Chen A Y, Yu L Y, *et al.* Effects of  $\beta$ -cyclodextrin on phytoremediation of soil co-contaminated with Cd and BDE-209 by arbuscular mycorrhizal amaranth [J]. Chemosphere, 2019, **220**: 910-920.
- [19] 方治国, 谢俊婷, 杨青, 等. 低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 [J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4669-4678.  
Fang Z G, Xie J T, Yang Q, *et al.* Role and mechanism of low molecular-weight-organic acids in enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4669-4678.
- [20] 陈敏妮, 聂小奇, 张杏峰, 等. 蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复锌铅镉污染土壤的影响 [J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1714-1726.  
Chen M N, Nie X Q, Zhang X F, *et al.* Effects of earthworm, straw, and citric acid on the remediation of Zn, Pb, and Cd contaminated soil by *Solanum photeinocarpum* and *Pterocypsel indica* [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1714-1726.
- [21] 李侃麒, 吴佳玲, 陈喆, 等. 天然有机酸对伴矿景天吸取土壤镉的影响 [J]. 中国环境科学, 2023, **43**(5): 2413-2422.  
Li K Q, Wu J L, Chen Z, *et al.* Effects of natural organic acids on cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* from the soil [J]. China Environmental Science, 2023, **43**(5): 2413-2422.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 胡雨丹, 周航, 辜娇峰, 等. 水培试验下水稻 Pb 吸收累积关键生育期 [J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4218-4225.  
Hu Y D, Zhou H, Gu J F, *et al.* Key growth stage of Pb accumulation in rice through a hydroponic experiment with Pb stress [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4218-4225.
- [26] 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.
- [27] Quevauviller P, Rauret G, Griepink B. Single and sequential extraction in sediments and soils [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993, **51**(1-4): 231-235.
- [28] 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.
- [29] 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 等. 橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力 [J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4253-4261.  
Zhang H, Xiong M B, Wang Q X, *et al.* Remediation potential of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin on lead and cadmium contaminated farmland soil [J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4253-4261.
- [30] 戴凌燕. 甜高粱苗期对苏打盐碱胁迫的适应性机制及差异基因表达分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.  
Dai L Y. Study on adaptive mechanisms and expression analysis of different genes of sweet sorghum seedlings under saline-alkali stress [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [31] Yuan X Z, Xiong T, Yao S, *et al.* A real filed phytoremediation of multi-metals contaminated soils by selected hybrid sweet sorghum with high biomass and high accumulation ability [J]. Chemosphere, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124536.
- [32] 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.
- [33] 闫秀秀, 徐应明, 王林, 等. 叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 [J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5151-5159.  
Yan X X, Xu Y M, Wang L, *et al.* Effects of intercropping of *Brassica chinensis* L. and *Tagetes patula* L. on the growth and

- cadmium accumulation of plants [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5151-5159.
- [34] Dong Q, Hu S, Fei L, *et al.* Interaction between Cd and Zn on metal accumulation, translocation and mineral nutrition in tall fescue (*Festuca arundinacea*) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, **20**(13), doi: 10.3390/ijms20133332.
- [35] 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.
- [36] 凌云, 刘汉焱, 张小婷, 等. 西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 376-386.  
Ling Y, Liu H Y, Zhang X T, *et al.* Characteristics of typical soil acidification and effects of heavy metal speciation and availability in southwest China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 376-386.
- [37] 张磊. 低分子有机酸对复垦土壤中镉的赋存形态特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.  
Zhang L. Study on occurrence and morphological characteristics of cd in reclaimed soil by low molecular weight organic acids [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [38] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(10): 1867-1872.  
Zhang Z X, Ji X H, Xie Y H, *et al.* Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(10): 1867-1872.
- [39] 侯文焕, 廖小芳, 唐兴富, 等. 不同黄麻品种对重金属镉和铅的吸收与富集规律[J]. *西南农业学报*, 2020, **33**(9): 2075-2081.  
Hou W H, Liao X F, Tang X F, *et al.* Absorption and enrichment of heavy metals cadmium and lead in different jute varieties [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(9): 2075-2081.
- [40] 姚澄, 周天宇, 易超, 等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(9): 1955-1965.  
Yao C, Zhou T Y, Yi C, *et al.* Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(9): 1955-1965.
- [41] Zhao M, Li C P, Zhang C G, *et al.* Typical microplastics in field and facility agriculture dynamically affect available cadmium in different soil types through physicochemical dynamics of carbon, iron and microbes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **440**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129726.
- [42] Nazli R I. Effects of harvest time on bioethanol production and bagasse characteristics for combustion and forage in sweet sorghum [J]. *Field Crops Research*, 2022, **280**, doi: 10.1016/j.fcr.2022.108464.
- [43] 薛忠财, 李纪红, 李十中, 等. 能源作物甜高粱对镉污染农田的修复潜力研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1621-1627.  
Xue Z C, Li J H, Li S Z, *et al.* Study on the phytoremediation potential of energy crop sweet sorghum to Cd-contaminated agriculture soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1621-1627.
- [44] Jia W T, Miao F F, Lv S L, *et al.* Identification for the capability of Cd-tolerance, accumulation and translocation of 96 sorghum genotypes [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **145**: 391-397.
- [45] Pasteris A M, Heiermann M, Theuerl S, *et al.* Multi-advantageous sorghum as feedstock for biogas production: A comparison between single-stage and two-stage anaerobic digestion systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **358**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131985.
- [46] 王文颖, 张健男, 孙阔, 等. 甜高粱饲用价值的研究进展[J]. *饲料研究*, 2021, **44**(14): 153-156.  
Wang W Y, Zhang J N, Sun Y, *et al.* Research progress on the feed value of *Sorghum bicolor* [J]. *Feed Research*, 2021, **44**(14): 153-156.

## CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i> (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i> (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i> (2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i> (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i> (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i> (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i> (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i> (2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i> (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i> (2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i> (2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i> (2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i> (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i> (2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i> (2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i> (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i> (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i> (2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i> (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i> (2793)
Spatial-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i> (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i> (2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i> (2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i> (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i> (2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i> (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i> (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> (2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i> (2891)
Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i> (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i> (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i> (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i> (2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i> (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i> (2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i> (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i> (3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i> (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i> (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> (3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i> (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-hua, <i>et al.</i> (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i> (3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i> (3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i> (3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i> (3119)