Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.8
第41卷 第8期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第8期
2020年8月15日

目 次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 …… 钟凝盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸(3449)
基于天津市在线数据评估ISORROPIA-Ⅱ模式结果及气溶胶pH的影响因素 …… 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂(3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征 …… 李源滤, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹜, 胡敏(3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间$PM_{2.5}$中12种微量元素特征及来源解析 …… 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程铖, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭(3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析 …… 张喆, 丁建丽, 王瑾杰(3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及VOCs对SOA生成潜势 …… 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟赟, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文(3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气VOCs特征及源解析 …… 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋(3500)
长江三角洲2010~2018年生物质燃烧中等挥发性有机物(IVOCs)排放清单 …… 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君(3511)
北方常见绿化树种BVOCs排放特征及其与光合作用参数的相关性 …… 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠(3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 …… 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启(3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 …… 李凯, 刘敏, 梅如波(3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 …… 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮(3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 …… 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青(3556)
超低排放高湿废气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 …… 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 邬晓东(3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 …… 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡(3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 …… 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏(3581)
基于无人机多光谱影像和OPT-MPP算法的水质参数反演 …… 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨琅晖, 杜晓晨(3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响:以三峡水库和小湾水库为例 …… 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富(3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 …… 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋(3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 …… 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰(3621)
过氧化钙(CaO_2)联合生物炭对河道底泥的修复 …… 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋(3629)
基于双同位素($\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$-$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$)和IsoSource模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 …… 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮(3637)
三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷 …… 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋(3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 …… 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴(3657)
Fe@GOCS的制备及其对水中As(Ⅲ)的吸附 …… 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦(3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 …… 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉(3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响 …… 江宇勤, 厉炯慧, 方治国(3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性:MBBR和IFAS …… 李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪(3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 …… 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰(3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 …… 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰(3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 …… 张星星, 王超超, 王垚, 徐乐中, 吴鹏(3715)
基于AHP-PROMETHEE Ⅱ法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 …… 刘晓蕾, 李安婕(3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 …… 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖锋, 左壮, 魏源送(3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 … 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱(3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 …… 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮(3748)
四环素胁迫对*Shigella flexneri*细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 …… 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁(3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 …… 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻(3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 …… 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟(3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 …… 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉(3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 …… 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠(3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 …… 方笑莹, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕(3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 …… 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强(3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土N_2O排放的影响 …… 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚(3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 …… 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林(3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 …… 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰(3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 …… 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国(3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 …… 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南(3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻Cd累积的影响 …… 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒(3855)
螯合剂GLDA对象草修复镉污染农田的影响 …… 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦(3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 …… 俞映倞, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨桢, 薛利红(3870)
《环境科学》征订启事(3636) 《环境科学》征稿简则(3764) 信息(3538, 3628, 3724)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第8期 2020年8月
Vol.41, No.8 Aug., 2020

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响

覃建军[1], 唐盛爽[1], 蒋凯[1], 黄敬[1], 侯红波[1,2], 龙坚[1,2*], 彭佩钦[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: 为探明螯合剂谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)对象草修复镉(Cd)污染农田的影响,通过田间小区试验,于 60 d 内以不同方式(总施加量 585、1 170和2 340 kg·hm^{-2}分别等分为 1 ~ 4 次施加,分 2 ~ 4 次施加的时间间隔分别为 30、20 和 15 d)向已种植 60 d 象草的 Cd 污染农田(总 Cd:0.62 mg·kg^{-1})施加 GLDA,分析了象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量以及土壤 pH 和可溶性有机碳(DOC)质量浓度等指标. 结果表明,少量且分多次施加 GLDA 能显著提高象草地上部生物量和 Cd 含量,其中分施次数和总施加量分别是生物量和 Cd 含量的关键影响因子; Cd 提取量在总施加量 585 kg·hm^{-2}分 4 次施加时最高,为 16.78 g·hm^{-2},较 CK(不施加 GLDA)显著提高 275.39%; 土壤 pH、DOC 质量浓度和 DTPA-Cd 含量与总施加量和分施次数存在显著正相关关系; DOC 质量浓度是影响 DTPA-Cd 含量的主要因素; 土壤总 Cd 含量在总施加量 585 kg·hm^{-2}分 4 次施加时可较种植象草前土壤降低 3.23%. 因此,在利用象草修复 Cd 污染农田时,施加 GLDA 具有重要意义,且需合理选择施加方式.

关键词:谷氨酸二乙酸四钠(GLDA); 象草; 修复; 镉; 农田
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)08-3862-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202002070

Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by *Pennisetum purpureum* Schum

QIN Jian-jun[1], TANG Sheng-shuang[1], JIANG Kai[1], HUANG Jing[1], HOU Hong-bo[1,2], LONG Jian[1,2*], PENG Pei-qin[1,2*]
(1. College of Environmental 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: In order to clarify the effects of chelate tetrasodium glutamate diacetate (GLDA) on the remediation of cadmium (Cd) contaminated farmland by *Pennisetum purpureum* Schum, GLDA was applied in different methods within 60 days: total application doses of 585, 1 170, and 2 340 kg·hm^{-2} were equally divided into 1-4 applications, respectively, and the time intervals of 2-4 applications were 30, 20, and 15 days, respectively. The biomass, Cd content, and amount of Cd extracted from aboveground parts of *Pennisetum purpureum* Schum, in addition to the pH, dissolved organic carbon (DOC) mass concentration, and other indicators in soil were analyzed. The results showed that the biomass and Cd content of the aboveground parts of *Pennisetum purpureum* Schum increased significantly when GLDA was applied many times at a low application dose. The number of applications and the total dose were the key factors influencing the biomass and Cd content, respectively. The highest amount of Cd extracted was 16.78 g·hm^{-2} at 585 kg·hm^{-2} (applied four times), which was 275.39% higher than the CK treatment (i.e., no GLDA was applied). There was significant positive correlations between the pH, mass concentration of DOC, and content of DTPA-Cd, and the total dose and number of applications. The mass concentration of DOC was the main factor affecting the DTPA-Cd content. The total Cd content in the soil (after at 585 kg·hm^{-2} was applied four times) decreased by 3.23% compared with that of the soil before planting *Pennisetum purpureum* Schum. Therefore, the application of GLDA is of great significance for the remediation of Cd contaminated farmland by *Pennisetum purpureum* Schum, and the application method should be selected reasonably.

Key words: tetrasodium glutamate diacetate (GLDA); *Pennisetum purpureum* Schum; remediation; cadmium; farmland

镉(Cd)是污染我国农田土壤的主要污染物,严重威胁农业经济和人体健康,就我国农田土壤 Cd 污染现状而言,多为 Cd 含量较低的中轻度污染,因而探寻适宜于修复中轻度 Cd 污染农田土壤的方式至关重要[1]. 螯合剂强化植物提取土壤重金属是目前针对重金属污染土壤较为有前景的修复方式[2]. 谷氨酸二乙酸四钠(tetrasodium glutamate diacetate, GLDA)是一种由植物原料制成的低成本可生物降解螯合剂,并且已有诸多淋洗试验表明其对土壤 Cd 具有较强的活化能力,有望强化植物提取土壤 Cd[3,4]. 由此可见,GLDA 在强化植物修复 Cd 污染农田土壤方面具有较好前景.

目前,仅有部分盆栽试验表明 GLDA 在强化东南景天(*Sedum alfredii* hance)和籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)等植物提取高 Cd 含量土壤中的 Cd 方面具有较好潜力[5,6],鲜见报道 GLDA 强化植物修复中轻度 Cd 污染农田土壤的实际应用. 然而 GLDA 强化植物修复中轻度 Cd 污染农田土壤的效率可能会与在高 Cd 含量土壤中有所差异,并且在

收稿日期: 2020-02-12; **修订日期**: 2020-03-10
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02); 农业部财政部重大专项(农办财函[2016]6 号)
作者简介: 覃建军(1994 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境生物与生态修复,E-mail:jjqin123@yeah.net
* 通信作者,E-mail:longjiancsuft@yeah.net; pqpeng123@sina.com

实际农田土壤修复中的效果也可能会因径流淋溶和生物降解等作用而与盆栽试验存在较大差异[7,8]. 另外,研究者们所关注的东南景天和籽粒苋等植物大多存在生物量小和抗逆性差等缺点,在实际农田土壤修复中难以达到理想效果[9]. 象草(*Pennisetum purpureum* Schum)是一种适应性强、耐刈割和生物量巨大的多年生草本植物,对土壤 Cd 具有较好的提取能力,生物质可用作板材、纸品和生物乙醇制造,在实现 Cd 污染农田土壤边修复边生产上具有较好前景[10~13].

因此,本文将 GLDA 与象草相结合开展中轻度 Cd 污染农田土壤修复的田间小区试验,研究 GLDA 以不同方式施加时,对象草生物量、Cd 含量和 Cd 提取量和土壤 pH 和可溶性有机碳(DOC)质量浓度等理化性质的影响及相关关系,并建立象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量在不同施加方式下的预测模型,以期为 Cd 污染农田土壤的修复提供方法参考.

1　材料与方法

1.1　试验地点与材料

试验地选址为湘潭县,地理坐标:N27°32′47.26″, E112°41′1.87″,属亚热带季风湿润气候区,平均气温一般在 16.7 ~ 18.3℃之间,年平均降水天数 150 d,年平均降水量约1 300 mm. 该农田土壤为紫色砂页岩母质发育而来的紫泥田,其基本理化性质见表 1. 供试植物为桂闽引象草(*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Gui Min Yin),为高产量象草品种. GLDA 购于临沂邦普进口有限公司.

表 1　土壤理化性质

Table 1　Physical and chemical properties of the test soil

项目	pH	总 Cd /mg·kg^{-1}	DTPA-Cd /mg·kg^{-1}	CEC /cmol·kg^{-1}	有机质 /g·kg^{-1}	碱解氮 /mg·kg^{-1}	黏粒 /%
参数	6.1	0.62	0.14	29.42	14.34	30.07	25.88

1.2　试验设计

用小型旋耕机对农田耕作层(0 ~ 20 cm)进行旋耕后,划分出 39 个小区,每个小区面积为 3 m^2(1.5 m × 2 m),所有小区对应 13 个处理,每个处理 3 个重复,各处理分别是:对照组(CK)、60 d 内 GLDA 总施加量 585 kg·hm^{-2}等分为 1 ~ 4 次施加(D1 ~ D4)、1 170 kg·hm^{-2}等分为 1 ~ 4 次施加(Z1 ~ Z4)和2 340 kg·hm^{-2}等分为 1 ~ 4 次施加(G1 ~ G4). GLDA 分 2 ~ 4 次施加的时间间隔分别为 30、20 和 15 d,具体施加方式如表 2 所示. 小区之间开设宽 30 cm,深 40 cm 的隔沟,并在沟中铺设塑料地膜,以便排水和阻断 GLDA 在各区之间耕作层的横向渗流. 于 2019 年 4 月 28 日,选取长势和大小一致的象草幼苗(株高约 30 cm,剪去顶部细茎及叶片,以减少营养消耗和水分蒸发,提高成活率)移栽,移栽密度为:株行距 60 cm × 60 cm,每个小区均匀种植 6 株. GLDA 于象草移栽 60 d 后(2019 年 6 月 28 日)第 1 次施加,各小区每次浇灌 GLDA 水溶液 20 L 于象草根际土壤中, 60 d 后(2019 年 8 月 27 日)进行象草和土壤样品的采集. 对每个小区均采用相同培肥制度, 即在象草移栽时施加 N: P_2O_5: K_2O 为 25: 10: 16 的复合肥作为底肥,施加量为 300 kg·hm^{-2},并在象草移栽 20 和 60 d 后追加尿素(总氮≥46.0%),每次追加量为 150 kg·hm^{-2}. 复合肥和尿素分别以穴施和撒施的方式施加.

表 2　GLDA 具体施加方式

Table 2　Detailed application methods of GLDA

处理名称	单次施加量/kg·hm^{-2}	分施次数	总施加量/kg·hm^{-2}	分施时间间隔/d
CK	0	0	0	—
D1	585	1	585	—
D2	293	2	585	30
D3	195	3	585	20
D4	146	4	585	15
Z1	1 170	1	1 170	—
Z2	585	2	1 170	30
Z3	390	3	1 170	20
Z4	293	4	1 170	15
G1	2 340	1	2 340	—
G2	1 170	2	2 340	30
G3	780	3	2 340	20
G4	585	4	2 340	15

1.3 采样与分析

植物样品的采集与测定:收获象草时,沿土面割取地上部分,称量各处理象草的鲜重,同时挖出其根部. 从各处理中各选取少部分象草,用超纯水洗净后风干表面水,再用切片机将象草切成小片,置于烘箱内 105℃杀青 30 min 后, 70℃烘干至恒重,然后用粉碎机磨碎、过 70 目筛和称量备用. 象草各部位 Cd 含量采用干灰化法消解,用石墨炉-火焰分光光度计(iCE 3500 Thermo,赛默飞世尔科技有限公司)测定[14],检出限为 0.02 μg·L^{-1},每个样品测 3 次,并以国家标准植物样品圆白菜(GBW 10014)进行质量控制,Cd 的回收率为 96.6%~101.5%.

土壤样品的采集与测定:收获象草后,采集根际土壤样品,将样品置于室内风干,去除石块、植物根系和凋落物等,并研磨过 10 和 100 目尼龙筛,包装登记后保存备测. 用 pH 计(pHs-3C 雷磁,上海精密科学仪器有限公司)以水土比 2.5∶1 测定土壤 pH[15]; DOC 以水土比 5∶1用 TOC 分析仪 (TOC-V CPN FA, CN200, 日本岛津公司) 测定[16]; 土壤总 Cd 和 DTPA-Cd 含量分别采用王水-高氯酸混酸消解和 DTPA 提取剂浸提,用石墨炉-火焰分光光度计(iCE 3500 Thermo,赛默飞世尔科技有限公司)测定[17],检出限为 0.02 μg·L^{-1},每个样品测 3 次,并以标准土壤样品湖南水稻土(NST-5)进行质量控制,Cd 的回收率为 97.2%~102.4%.

1.4 数据分析

本研究中相关系数的计算公式如下:

$$BCF = C_{ds}/C_t \quad (1)$$

$$TI = C_{ds}/C_g \quad (2)$$

$$E_{Cd} = C_{ds} \times B_{ds} \times 10^{-3} \quad (3)$$

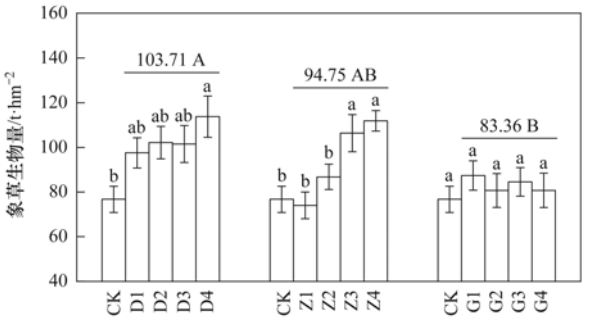
式中,BCF 为富集系数,表示地上部富集土壤 Cd 的能力; TI 是转移系数,表示将 Cd 从根部转移到地上部的能力; E_{Cd}(g·hm^{-2})为 Cd 提取量,表示每公顷象草地上部从农田土壤中提取 Cd 的量. C_{ds}为地上部 Cd 含量(mg·kg^{-1}), C_t 为土壤中总 Cd 含量(mg·kg^{-1}), C_g 为根部 Cd 含量(mg·kg^{-1}), B_{ds}为每公顷象草地上部的干重(kg).

本研究利用 Excel 2010 对数据进行平均值和标准偏差计算,使用 SPSS 22.0 对数据进行差异显著性、相关性分析及线性拟合,并用 Origin 9.0 对数据作图.

2 结果与分析

2.1 施加 GLDA 对象草地上部生物量的影响

植物的生物量不仅能影响经济效益,还是反映其对土壤重金属提取能力的重要指标[18]. 各处理象草地上部生物量(鲜重)如图 1 所示. CK 的生物量为 76.69 t·hm^{-2},D4 和 Z3、Z4 的生物量较 CK 显著提高($P < 0.05$,下同),其中 D4 的生物量最高,为 113.72 t·hm^{-2},较 CK 提高了 48.29%,按照此方式 1 年刈割 2 次生物量约为 227.44 t·hm^{-2},较邓素媛等[19]研究中象草 1 年刈割 3 次的生物量 194.05 t·hm^{-2}高 17.21%; D1~D4、Z1~Z4 和 G1~G4 的平均生物量分别为 103.71、94.75 和 83.36 t·hm^{-2},随总施加量增加存在显著降低; D1~D4 和 Z1~Z4 的生物量随分施次数增加存在显著提高. 说明 GLDA 少量且分多次施加有利于象草增产.



不同小写字母表示同一总施加量不同分施次数之间的差异显著;不同大写字母表示不同总施加量之间的差异显著($P < 0.05$),下同

图 1 GLDA 以不同方式施加时的地上部生物量

Fig. 1 Biomass of aboveground parts when GLDA was applied in different methods

2.2 施加 GLDA 对象草富集和转移 Cd 的影响

象草各部位 Cd 含量能为其资源化利用提供参考,富集和转移系数可以反映 Cd 在土壤-象草系统中的富集转移特征[20]. 由表 3 可知,各处理象草茎和叶中的 Cd 含量分别为 0.30~0.66 和 0.10~0.37 mg·kg^{-1},均未超过植物性饲料原料限值(GB 13078-2017, 1.0 mg·kg^{-1}),有较好的安全利用前景. D1~D4 的 BCF 都较 CK 显著提高,说明 GLDA 少量施加能显著提高地上部对土壤 Cd 的富集能力. CK 的 TI 为 0.45,D1~D4、Z1~Z4 和 G1~G4 的平均 TI 分别为 0.50、0.50 和 0.78,都较 CK 有所提高,说明施加 GLDA 能促进根部 Cd 向地上部转移.

2.3 施加 GLDA 对象草提取农田土壤 Cd 的影响

本试验期间为象草刈割阶段,对农田土壤 Cd 的提取量取决于地上部. 由图 2 可知,象草地上部主要通过茎部对土壤 Cd 进行提取,茎部 Cd 提取量占比为 82.4%~95.0%; CK 地上部的 Cd 提取量为 4.47 g·hm^{-2},除 D1 外,其他施加 GLDA 处理的 Cd 提取量都较 CK 显著提高,其中 D4 的 Cd 提取量最高,为 16.78 g·hm^{-2},较 CK 提高了 275.39%; D1~D4、Z1~Z4 和 G1~G4 的平均 Cd 提取量分别为

表 3　GLDA 以不同方式施加时的象草 Cd 含量及富集、转移系数[1)]

Table 3　Cd content and enrichment and transport coefficient of *Pennisetum purpureum* Schum when GLDA was applied in different methods

处理名称	Cd 含量/mg·kg^{-1}				BCF	TI
	根	茎	叶	地上部		
CK	0.66 ±0.01d	0.33 ±0.03d	0.25 ±0.01d	0.30 ±0.02d	0.48e	0.45d
D1	0.82 ±0.01c	0.40 ±0.04c	0.26 ±0.01c	0.35 ±0.02c	0.57d	0.43e
D2	0.84 ±0.03c	0.53 ±0.04b	0.19 ±0.01e	0.41 ±0.01b	0.67c	0.49c
D3	0.94 ±0.01b	0.66 ±0.02a	0.30 ±0.01b	0.53 ±0.01a	0.88b	0.56a
D4	1.01 ±0.01a	0.65 ±0.01a	0.32 ±0.01a	0.54 ±0.01a	0.90a	0.53b
CK	0.66 ±0.01bc	0.33 ±0.03b	0.25 ±0.01c	0.30 ±0.02c	0.48d	0.45c
Z1	0.96 ±0.05a	0.42 ±0.01a	0.22 ±0.03c	0.35 ±0.02a	0.57a	0.36e
Z2	0.61 ±0.01c	0.42 ±0.01a	0.12 ±0.02d	0.32 ±0.02bc	0.52c	0.52b
Z3	0.72 ±0.06b	0.30 ±0.02c	0.29 ±0.01b	0.29 ±0.01c	0.47d	0.40d
Z4	0.48 ±0.02d	0.32 ±0.01b	0.37 ±0.01a	0.34 ±0.01ab	0.55b	0.71a
CK	0.66 ±0.01a	0.33 ±0.03ab	0.25 ±0.01a	0.30 ±0.02c	0.48c	0.45e
G1	0.50 ±0.01b	0.31 ±0.01b	0.10 ±0.02d	0.24 ±0.02d	0.39e	0.48d
G2	0.48 ±0.02b	0.38 ±0.03a	0.16 ±0.01b	0.31 ±0.02bc	0.50b	0.65c
G3	0.31 ±0.04c	0.34 ±0.04ab	0.13 ±0.01c	0.27 ±0.02cd	0.44d	0.87b
G4	0.28 ±0.03c	0.37 ±0.03a	0.23 ±0.01a	0.32 ±0.02ab	0.52a	1.14a

1)不同小写字母表示同一总施加量不同分施次数之间的差异显著($P<0.05$)

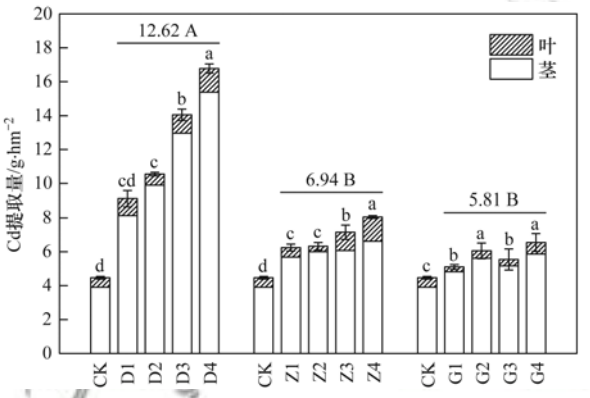


图 2　GLDA 以不同方式施加时的地上部 Cd 提取量

Fig. 2　Amount of Cd extracted from farmland by the aboveground parts when GLDA was applied in different methods

12.62、6.94 和 5.81 g·hm^{-2},随总施加量增加存在显著降低；同一总施加量分不同次数施加时的 Cd 提取量随分施次数增加存在显著提高. 说明 GLDA 少量且分多次施加有利于象草地上部提取农田土壤 Cd.

2.4　施加 GLDA 对土壤 pH 和 DOC 的影响

土壤 pH 和 DOC 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[21]. 各处理土壤的 pH 如图 3(a)所示,CK 的 pH 为 5.07,施加 GLDA 处理的 pH 都较 CK 显著提高,其中 G2 的 pH 最高,为 6.72,较 CK 提高了 1.65 个单位；D1 ~ D4、Z1 ~ Z4 和 G1 ~ G4 的平均 pH 值分别为 5.78、5.85 和 6.33,随总施加量增加存在显著提高. 说明施加 GLDA 能显著提高土壤 pH,且总施加量越多提高越显著. 由图 3(b)可知,CK 的 DOC 质量浓度为 318.17 mg·L^{-1},D2 ~ D4、Z1 ~ Z4 和 G1 ~ G4 的 DOC 质量浓度都较 CK 显著提高,其中 G4 的 DOC 质量浓度最高,为1 792.33 mg·L^{-1},较 CK 提高了 4.63 倍；D1 ~ D4、Z1 ~ Z4 和 G1 ~ G4 的平均 DOC 质量浓度分别为 491.60、758.92 和 1 192.75 mg·L^{-1},随总施加量增加存在显著提高；同一总施加量的 DOC 质量浓度随分施次数增加存在显著提高. 说明施加 GLDA 能显著提高土壤 DOC 质量浓度,且多量和分多次施加提高更显著.

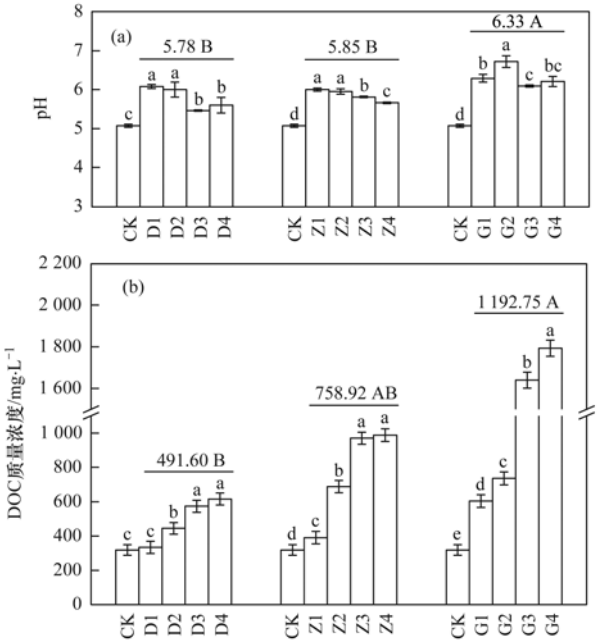


图 3　GLDA 以不同方式施加时的土壤 pH 和 DOC 质量浓度

Fig. 3　The pH and mass concentration of DOC in soil when GLDA was applied in different methods

2.5　施加 GLDA 对土壤总 Cd 和 DTPA-Cd 含量的影响

土壤 Cd 的形态关系其生物可利用性,其中 DTPA-Cd 可被植物直接吸收[22,23]. 螯合剂能促使

Cd 从土壤固相释放到土壤溶液,提高 DTPA-Cd 含量,进而提高植物对其富集累积,使土壤总 Cd 含量下降[24]. 由图 4(a)可知,施加 GLDA 处理的总 Cd 含量都较种植象草前的土壤(Cd:0.62 mg·kg^{-1},见表 1)降低,其中 D4 降低最多,降低了 3.23%. 由图 4(b)可知,CK 的 DTPA-Cd 含量为 0.15 mg·kg^{-1},施加 GLDA 处理的 DTPA-Cd 含量较 CK 都有所提高,提高效果表现为 G2 > Z2 > D2、G3 > Z3 > D3 和 G4 > Z4 > D4; D1 ~ D4、Z1 ~ Z4 和 G1 ~ G4 的 DTPA-Cd 含量随分施次数增加分别表现为先提高后降低、持续提高和先提高后平缓. 由此可见,GLDA 多量且分多次施加更能提高土壤 DTPA-Cd 含量,但达到一定分施次数时,对 DTPA-Cd 含量的提高效果可能会受土壤 Cd 背景值限制,少量且分次过多时对 DTPA-Cd 含量的提高效果可能会因单次的施加量过低而丧失.

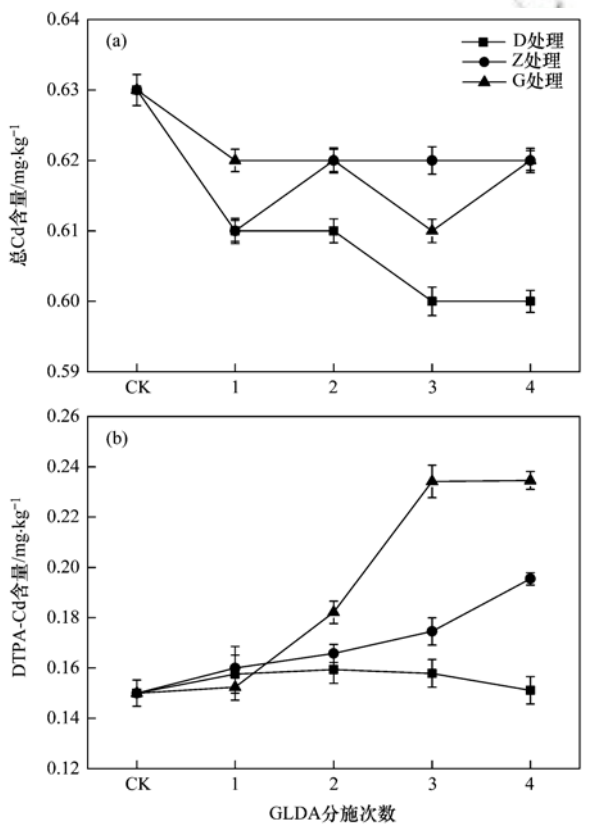


图 4 GLDA 以不同方式施加时的土壤总 Cd 和 DTPA-Cd 含量

Fig. 4 Content of total Cd and DTPA-Cd in soil when GLDA was applied in different methods

3 讨论

3.1 影响象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量的因素

为探究影响象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量的因素,与 GLDA 施加方式和土壤理化性质做相关性分析,结果如表 4 所示. 可以看出,地上部 Cd 提取量与生物量和 Cd 含量存在极显著正相关关系($P < 0.01$,下同),相关系数分别为 0.726 和 0.953,后者较前者略大,说明利用 GLDA 强化象草提取该农田土壤 Cd 时,Cd 含量的提高较生物量提高更为关键.

Cd 含量与 GLDA 总施加量存在负显著相关关系($P < 0.05$,下同),相关系数为 -0.553,结合表 3 可知总施加量是 Cd 含量的关键影响因子. 由表 4 可以看出,DTPA-Cd 含量与 GLDA 总施加量存在显著正相关关系,土壤 DTPA-Cd 含量的提高能促进象草对 Cd 的富集,但过量的 DTPA-Cd 可能会对象草生长产生胁迫,致使地上部对 Cd 的富集能力减弱. 贺玉龙等[25]的盆栽试验表明,当 GLDA 物质的含量大于 5 mmol·kg^{-1} 时,DTPA-Cd 含量显著提高,三叶草(*Trifolium repens*)生物量开始下降,到达 10 mmol·kg^{-1}时出现茎秆变细和叶片发黄,表现出明显的毒害作用,地上部 Cd 含量开始显著下降. 另外,过快的 DTPA-Cd 转化率与象草本身 DTPA-Cd 吸收速率之间的不平衡也可能导致对 DTPA-Cd 的吸收受到阻滞,造成地上部 Cd 含量并未随 GLDA 总施加量的增加而提高[26].

生物量与 GLDA 分施次数存在显著正相关关系,相关系数为 0.571,结合图 1 可知分施次数是生物量的关键影响因子. 本文结果显示,施加 GLDA 能显著提高象草地上部生物量,并且少量且分多次施加提高效果更显著. 这可能是由于施加 GLDA 影响了土壤酶活性,张灿灿等[27]的研究发现,低含量(5 mmol·kg^{-1})的乙二胺四乙酸(EDTA)能显著提高土壤脲酶和蔗糖酶等酶的活性,从而促进高羊茅(*Festuca elata* Keng ex E. Alexeev)对营养元素的摄取,提高生物量,而高浓度时这些土壤酶的活性则有不同程度的降低. 植物叶绿素的含量是反映其光合作用强弱的重要指标,会对生物量产生一定影响[28]. 王思予等[29]的研究发现,低含量的 GLDA 对高羊茅叶绿素含量无显著影响,而高含量(12 mmol·kg^{-1})则产生显著抑制作用,这与高羊茅生物量对 GLDA 的响应一致. 由此,可以推测施加 GLDA 对象草叶绿素含量产生了一定影响,从而影响生物量. 另外,GLDA 降解给象草提供生长所需的 C 和 N 等营养元素和 GLDA 引起的过量 DTPA-Cd 对象草的胁迫也是造成此生物量响应的原因[30].

因此,在施加 GLDA 强化象草提取土壤 Cd 时需降低总施加量或分次施加,从而提高强化效果和降低过量 DTPA-Cd(迁移性较强)带来的环境风险,也可节约成本. 另外,3-吲哚乙酸(IAA)等植物激素能促进细胞分裂和伸长,提高植物生物量

和缓解螯合剂-重金属带来的胁迫作用[31]. 袁江等[32]的盆栽试验表明,在 Cd 污染土壤中施加高含量的 GLDA(6 mmol·kg^{-1})不利于龙葵(*Solanum nigrum* L.)生长,但辅以施加 IAA 能缓解此胁迫作用,显著提高龙葵对土壤 Cd 的提取能力. 可见在施加 GLDA 强化象草提取土壤 Cd 时辅以施加或叶面喷施植物激素可能会提高生物量和对 DTPA-Cd 的吸收能力.

表 4　GLDA 施加方式、土壤理化性质与地上部生物量及 Cd 吸收累积的皮尔逊相关系数[1)]

Table 4　Pearson's correlation coefficient between the application methods of GLDA, soil physical and chemical properties and biomass, Cd uptake and accumulation in aboveground parts

	pH	DOC	DTPA-Cd	GLDA 总施加量	GLDA 分施次数	地上部生物量	地上部 Cd 含量	地上部 Cd 提取量
pH	1	0.290	0.348	0.791 **	0.018	−0.301	−0.404	−0.319
DOC	—	1	0.955 **	0.682 *	0.664 *	−0.084	−0.300	−0.229
DTPA-Cd	—	—	1	0.666 *	0.558 *	−0.192	−0.357	−0.326
GLDA 总施加量	—	—	—	1	0.243	−0.379	−0.553 *	−0.473
GLDA 分施次数	—	—	—	—	1	0.571 *	0.377	0.476
地上部生物量	—	—	—	—	—	1	0.551	0.726 **
地上部 Cd 含量	—	—	—	—	—	—	1	0.953 **
地上部 Cd 提取量	—	—	—	—	—	—	—	1

1) * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$

3.2　影响土壤 pH、DOC 质量浓度和 DTPA-Cd 含量的因素

本试验结果显示,施加 GLDA 能显著提高土壤 pH 和 DOC 质量浓度,由表 4 也可知,pH 和 DOC 质量浓度与 GLDA 的施加存在显著正相关关系,这可能分别与 GLDA 在土壤中的水解和降解过程有关. GLDA 所含的—COO^- 发生：—COO^- + H_2O ═ —COOH + OH^- 的水解过程能致使 OH^- 增加,pH 提高[33]. 土壤系统中 DOC 主要来源为生命体的腐解,施加 GLDA 增加的 DOC 可能包含:GLDA 降解产生的可溶性小分子有机质、GLDA 对土壤中原本存在的有机质的活化部分、GLDA 刺激象草根部分泌的可溶性有机酸和微生物及其他生命体腐解的可溶性部分[34,35]. 但土壤中原本存在的 DOC(一般不超过土壤有机碳总量的 2%)及可被活化为 DOC 的部分与本试验施加 GLDA 降解的 DOC(GLDA 在 21 d 内的降解率可达 98%)相比极少,因而在本试验中增加的 DOC 主要来自 GLDA 的降解[36,37]. 诸多研究表明,pH 是影响重金属在土壤中释放的主要因素[38,39]. 但从表 4 可以看出,DTPA-Cd 含量与 pH 无显著相关关系,而与 DOC 质量浓度存在极显著正相关关系,可推测在施加 GLDA 时,DOC 质量浓度的提高对土壤 Cd 的活化起主要作用. 陈亚斯等[40]的研究也表明,DOC 中存在的活性基团可通过络合作用与土壤固相竞争 Cd^{2+},从而影响土壤对 Cd 的吸持能力,DOC 质量浓度的提高是导致土壤溶液 Cd 质量浓度提高的主要原因.

3.3　象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量的预测模型

预测模型可以为今后利用 GLDA 强化象草修复 Cd 污染农田土壤提供参考. 因象草地上部 Cd 提取量由生物量和 Cd 含量决定,地上部生物量和 Cd 含量又与 GLDA 施加方式存在显著相关关系,就地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量分别拟合关于 GLDA 总施加量和分施次数的线性回归方程,结果如表 5 所示. 可以看出,地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量的回归模型的样本决定系数(R^2)分别为 0.611、0.584 和 0.595,解释百分比相对较高; 各模型的德宾-沃森值(DW)均接近 1,表示残差项之间为较弱的正相关; F 值的显著性均小于 0.05,说明所建的各模型有效; 方差膨胀因子(VIF)均接近 1,说明总施加量和分施次数之间共线性极弱. 由此可见,总施加量和分施次数能很好地拟合地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量.

表 5　地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量关于 GLDA 施加方式的回归方程

Table 5　Regression equations of biomass, Cd content and the amount of Cd extracted from aboveground parts involve with the application methods of GLDA

因变量	回归方程[1)]	R^2	DW	F 值显著性	VIF_a	VIF_t
地上部生物量	$V=-0.009\ a+7.264\ t+87.278$	0.611	1.384	0.009	1.063	1.063
地上部 Cd 含量	$V=-0.000\ a+0.038\ t+0.360$	0.584	0.945	0.012	1.063	1.063
地上部 Cd 提取量	$V=-0.003\ a+1.746\ t+7.631$	0.595	1.227	0.011	1.063	1.063

1) V 表示因变量的值; a 表示 GLDA 总施加量,kg·hm^{-2}; t 表示分施次数

4 结论

(1)GLDA 少量且分多次施加能显著提高象草地上部生物量和 Cd 含量,从而提高 Cd 提取量,其中分施次数和总施加量分别是生物量和 Cd 含量的关键影响因子; GLDA 多量施加虽更能提高土壤 DTPA-Cd 含量,但对 Cd 提取量的提高能力较弱.

(2)GLDA 在满足强化象草提取农田土壤 Cd 的同时,象草茎和叶的 Cd 含量均不超过植物性饲料原料限值(GB 13078-2017, 1.0 $mg \cdot kg^{-1}$),有较好的安全利用前景.

(3)施加 GLDA 能显著提高土壤 pH 和 DOC 质量浓度,但 pH 和 DOC 质量浓度与象草地上部生物量、Cd 含量和 Cd 提取量无显著相关关系; DOC 质量浓度与 DTPA-Cd 含量存在极显著正相关关系,是影响 Cd 生物可利用性的主要因素.

(4)施加 GLDA 的土壤总 Cd 含量较种植象草前土壤都有所降低,种植象草 120 d 可降低 3.23%. 因此,GLDA 对强化象草修复中轻度 Cd 污染农田土壤具有较大潜力.

参考文献:

[1] 庞荣丽, 王瑞萍, 谢汉忠, 等. 农业土壤中镉污染现状及污染途径分析[J]. 天津农业科学, 2016, **22**(12): 87-91.
Pang R L, Wang R P, Xie H Z, *et al*. Analysis of cadmium pollution in agricultural soils and analysis of its way of pollution [J]. Tianjin Agricultural Science, 2016, **22**(12): 87-91.

[2] 李晓宝, 董焕焕, 任丽霞, 等. 螯合剂修复重金属污染土壤联合技术研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(12): 1993-2000.
Li X B, Dong H H, Ren L X, *et al*. Effects of chelating agent combination technologies on soil contaminated by heavy metals [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(12): 1993-2000.

[3] Wang K, Liu Y, Song Z, *et al*. Effects of biodegradable chelator combination on potentially toxic metals leaching efficiency in agricultural soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **182**: 109399.

[4] Guo X, Zhang G, Wei Z, *et al*. Mixed chelators of EDTA, GLDA, and citric acid as washing agent effectively remove Cd, Zn, Pb, and Cu from soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(3): 835-844.

[5] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1864-1869.
Wei Z B, Chen X H, Wu Q T, *et al*. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils using *Sedum alfredii* hance with biodegradable chelate GLDA [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1864-1869.

[6] Wang K, Liu Y H, Song Z G, *et al*. Chelator complexes enhanced *Amaranthus hypochondriacus* L. phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils [J]. Chemosphere, 2019, **237**: 124480.

[7] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Factors affecting phytoextraction: a review[J]. Pedosphere, 2016, **26**(2): 148-166.

[8] 段明梦, 王帅, 黄道友, 等. 易降解有机物及其施加方式对高粱吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(5): 1000-1007.
Duan M M, Wang S, Huang D Y, *et al*. Effect of biodegradable organic materials and application regimes on cadmium absorption in *Sorghum bicolor* L. [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(5): 1000-1007.

[9] 孟楠, 王萌, 陈莉, 等. 不同草本植物间作对 Cd 污染土壤的修复效果[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2618-2624.
Meng N, Wang M, Chen L, *et al*. Remediation efficiency of Cd polluted soil by intercropping with herbaceous plants[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2618-2624.

[10] Wiangkham N, Prapagdee B. Potential of Napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoremediation and its possibility to use as biomass fuel[J]. Chemosphere, 2018, **201**: 511-518.

[11] Chen Y H, Liu M J, Deng Y W, *et al*. Comparison of ammonium fertilizers, EDTA, and NTA on enhancing the uptake of cadmium by an energy plant, Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumach) [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, **17**(12): 2786-2796.

[12] Ko C H, Yu F C, Chang F C, *et al*. Bioethanol production from recovered Napier grass with heavy metals [J]. Journal of Environmental Management, 2017, **203**: 1005-1010.

[13] 张建丽, 吴娟子, 钱晨, 等. 不同品系象草的生物产量及木质纤维素乙醇生产潜力研究[J]. 江苏农业科学, 2016, **44**(8): 503-505.

[14] GB 5009.15-2014, 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].

[15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[16] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (don) and dissolved organic carbon (doc) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(5): 991-999.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[18] 王静, 刘如. 植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2019, **25**(16): 110-112.
Wang J, Liu R. Advances in phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, **25**(16): 110-112.

[19] 邓素媛, 易显凤, 赖志强, 等. 不同种植密度对桂闽引象草生长性能的影响[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2014, (4): 34-35.

[20] 龚建华, 薛合伦, 康敏, 等. 巨菌草的重金属富集特性及对土壤的修复效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, **45**(2): 154-161.
Gong J H, Xue H L, Kang M, *et al*. Heavy metal enrichment characteristics and soil remediation effects of *Pennisetum giganteum* [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, **45**(2): 154-161.

[21] 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.

[22] Beygi M, Jalali M. Assessment of trace elements (Cd, Cu, Ni, Zn) fractionation and bioavailability in vineyard soils from the

Hamedan, Iran[J]. Geoderma, 2019, **337**: 1009-1020.

[23] 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**: 104315, doi: 10.1016/j.still.2019.104315.

[24] Gul I, Manzoor M, Hashim N, *et al*. Comparative effectiveness of organic and inorganic amendments on cadmium bioavailability and uptake by *Pelargonium hortorum*[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(5): 2346-2356.

[25] 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.

[26] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al*. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system[A]. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology[M]. New York: Springer, 2016. 73-137.

[27] 张灿灿, 多立安, 赵树兰. EDTA 对高羊茅生长及其土壤中酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2013, **35**(3): 116-120.
Zhang C C, Duo L A, Zhao S L. Effect of EDTA on growth of *Festuca arundinacea* and soil enzyme activities[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, **35**(3): 116-120.

[28] Sali A, Zeka D, Fetahu S, *et al*. Selenium supply affects chlorophyll concentration and biomass production of maize (*Zea mays* L.)[J]. Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment, 2018, **69**(4): 249-255.

[29] 王思予, 多立安, 赵树兰. 可降解螯合剂对草坪植物高羊茅发育及生理的影响[J]. 园艺学报, 2017, **44**(11): 2186-2194.
Wang S Y, Duo L A, Zhao S L. Effects of biodegradable chelator on growth and physiology of *Festuca arundinacea* seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, **44**(11): 2186-2194.

[30] 潘新星. "螯合—解毒"联合强化黑麦草修复 Pb 污染土壤研究[D]. 常州: 常州大学, 2017.
Pan X X. Enhancement of chelating agent and antidote on *Lolium perenne* to remediate Pb contaminated soil[D]. Changzhou: Changzhou University, 2017.

[31] 郭梦露. 植物激素-螯合剂复合处理对红苋菜富集能力的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(1): 79-82.
Guo M L. The effect of combined treatments of phytohormones and chelating agents on the accumulation capacity in Amaranth[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, **45**(1): 79-82.

[32] 袁江, 李晔, 许剑臣, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 和植物激素共同诱导植物修复重金属污染土壤研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, **38**(2): 82-86, 92.
Yuan J, Li Y, Xu J C, *et al*. Enhanced phytoremediation of heavy metal polluted soil from contaminated soils using plant by biodegradable chelate GLDA in combination with plant hormones[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, **38**(2): 82-86, 92.

[33] 金鹏康, 刘柯君, 王先宝. 慢速可生物降解有机物的转化特性及利用[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(5): 2168-2174.
Jin P K, Liu K J, Wang X B. Conversion and utilization of slowly biodegradable organic matter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(5): 2168-2174.

[34] Kopáček J, Evans C D, Hejzlar J, *et al*. Factors affecting the leaching of dissolved organic carbon after tree dieback in an unmanaged European mountain forest[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(11): 6291-6299.

[35] Anwar S, Khan S, Ashraf M Y, *et al*. Impact of chelator-induced phytoextraction of cadmium on yield and ionic uptake of maize[J]. International Journal of Phytoremediation, 2017, **19**(6): 505-513.

[36] 吴健敏, 郁敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)动态变化影响因素研究进展[J]. 地质论评, 2013, **59**(5): 953-961.
Wu J M, Xi M, Kong F L, *et al*. Review of researches on the factors influencing the dynamics of dissolved organic carbon in soils[J]. Geological Review, 2013, **59**(5): 953-961.

[37] AkzoNobel. Dissolvine® GL Technichal Brochure[R]. The Netherlands: AkzoNobel Amsterdam, 2010. 1-5.

[38] Dai S L, Li H L, Yang Z W, *et al*. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil[J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2018, **24**(7): 1887-1900.

[39] Hou S N, Zheng N, Tang L, *et al*. Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, **191**(10): 634.

[40] 陈亚斯. 麦秸淹水腐解对土壤 Cd 活度的影响及其与 DOC 的关系[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
Chen Y S. Effect of decay process of wheat straw on Cd solubility and its relation with DOC in flooded soil[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 8

Aug. 15, 2020

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital …… ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, *et al.* (3449)

Evaluation of Different ISORROPIA-Ⅱ Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data …… GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, *et al.* (3458)

Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking …… LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (3467)

Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in $PM_{2.5}$ During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China …… CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, *et al.* (3475)

Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region …… ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie (3484)

Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin …… XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, *et al.* (3492)

Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou …… LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, *et al.* (3500)

Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds(IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018 …… ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, *et al.* (3511)

Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters …… XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, *et al.* (3518)

Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou …… GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, *et al.* (3527)

Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City …… LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo (3539)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks …… FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, *et al.* (3547)

Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses …… FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, *et al.* (3556)

Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant …… HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, *et al.* (3563)

Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area …… WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, *et al.* (3572)

Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data …… PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, *et al.* (3581)

Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm …… HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, *et al.* (3591)

Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir …… LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, *et al.* (3601)

Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers …… ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, *et al.* (3612)

Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels …… XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, *et al.* (3621)

Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide(CaO_2) Combined with Biochar …… LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, *et al.* (3629)

Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ and the IsoSource Model …… XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, *et al.* (3637)

Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area …… YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, *et al.* (3646)

Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region …… GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, *et al.* (3657)

Adsorption of As(Ⅲ) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan …… ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, *et al.* (3665)

Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution …… XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, *et al.* (3675)

Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth …… JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo (3684)

Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS …… LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, *et al.* (3691)

Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification … FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, *et al.* (3699)

Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration …… ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, *et al.* (3707)

Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources …… ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, *et al.* (3715)

Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE Ⅱ Method …… LIU Xiao-lei, LI An-jie (3725)

Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron …… LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, *et al.* (3731)

Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste …… DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, *et al.* (3740)

Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations …… YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, *et al.* (3748)

Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in *Shigella flexneri* …… GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, *et al.* (3758)

Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria …… QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, *et al.* (3765)

Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing …… HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, *et al.* (3773)

Universality and Potential Application of Mn(Ⅱ) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions …… NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, *et al.* (3781)

Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River …… LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, *et al.* (3787)

Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice …… FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, *et al.* (3797)

Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of *Picea schrenkiana* Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang …… SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, *et al.* (3804)

Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N_2O Emissions from Saline Soil …… ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, *et al.* (3811)

Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by *in-situ* Electrical Resistance Heating …… GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, *et al.* (3822)

Acid Mine Wasteland Reclamation by *Juncus ochraceus* Buchen as a Potential Pioneer Plant …… HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, *et al.* (3829)

Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse …… CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, *et al.* (3836)

Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution …… LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, *et al.* (3846)

Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice …… WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, *et al.* (3855)

Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by *Pennisetum purpureum* Schum …… QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, *et al.* (3862)

Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution …… YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, *et al.* (3870)