

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)

可生物降解螯合剂 GLDA 强化三叶草修复镉污染土壤

贺玉龙^{1,2}, 余江^{1,2*}, 谢世前^{1,2}, 李佩柔^{1,2}, 周宽^{1,2}, 何欢^{1,2}

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川大学新能源与低碳技术研究院, 成都 610065)

摘要: 螯合剂可增加重金属的生物可利用性, 强化植物的富集作用。以三叶草为研究对象, 通过盆栽试验考察不同浓度可生物降解螯合剂谷氨酸 *N,N*-二乙酸 (GLDA) 对三叶草修复重金属 Cd 污染土壤的影响机制。结果表明, 低剂量 GLDA 能显著促进三叶草的生长, 其中以 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理浓度三叶草生物量最高, 达到对照组的 1.30 倍; 不同浓度 GLDA 均能提高三叶草各部分的 Cd 含量, 总体而言, $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ GLDA 的处理效果最为理想, 根部、地上部分和整株 Cd 含量分别为对照组的 3.57、4.69 和 4.67 倍; GLDA 能显著增加土壤有效态 Cd 含量, 促进三叶草根部分对其直接吸收, 并较好地转运至地上部分; 通过拟合土壤理化性质、GLDA 与三叶草 Cd 含量的线性关系得出的预测模型, 可为今后土壤-三叶草富集效果的研究提供参考。研究表明, 在强化植物修复重金属 Cd 污染土壤方面, 生物可降解螯合剂 GLDA 具有潜在应用前景。

关键词: 植物修复; 重金属; 镉; 谷氨酸 *N,N*-二乙酸 (GLDA); 三叶草; 可降解螯合剂

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0979-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201907117

Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by *Trifolium Repens* with Biodegradable Chelate GLDA

HE Yu-long^{1,2}, YU Jiang^{1,2*}, XIE Shi-qian^{1,2}, LI Pei-rou^{1,2}, ZHOU Kuan^{1,2}, HE Huan^{1,2}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of New Energy and Low Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Chelating agents can increase the bioavailability of heavy metals and enhance their enrichment in plants. The effects of different concentrations of biodegradable chelating agent L-glutamic acid *N,N*-diacetic acid (GLDA) on the remediation of heavy metal-contaminated soil by super-enriched plant *Trifolium repens* were investigated by pot experiments with Cd-contaminated soil. Results show that low-dose GLDA could significantly promote the growth of *Trifolium repens*, and the biomass of *Trifolium repens* was the highest at $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ -GLDA, which was 1.30 times that of the control group. Different concentrations of GLDA can increase Cd content of various parts of *Trifolium repens*. In general, the treatment effect of $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ GLDA was ideal. In this scenario, the root, aerial parts, and whole Cd content were 3.57, 4.69, and 4.67 times of the control group, respectively. GLDA can significantly increase the available Cd content in soil, promote direct absorption at the *Trifolium repens* roots, and provide better transport to the aerial parts. The prediction model obtained by fitting the linear relationship between physical and chemical properties of soil indicates that GLDA and *Trifolium repens* Cd content can provide references for the future research of soil-*Trifolium repens* enrichment. Studies have shown that the biodegradable chelating agent GLDA has potential applications for enhancing phytoremediation of heavy metal Cd contaminated soil.

Key words: phytoremediation; heavy metals; cadmium; L-glutamic acid *N,N*-diacetic acid (GLDA); *Trifolium repens*; degradable chelating agent

工农业的快速发展造成土壤重金属污染日趋严重, 给人类的生存环境带来巨大威胁。植物修复技术以其环境友好、易于接受和价格低廉等优点而成为重金属污染土壤修复的研究热点之一^[1]。螯合剂能与土壤重金属发生键合/螯合作用, 使重金属从不溶态转变成可溶态, 形成水溶性的金属-螯合剂络合物, 从而提高植物对重金属的修复效率。EDTA (乙二胺四乙酸) 是应用最为广泛, 同时也是效果较好的一种螯合剂, 但 EDTA 及其复合物在土壤中生物毒性大、持续时间长、降解能力差, 存在潜在的生态风险^[2]。也有研究发现可降解螯合剂 EDDS (乙二胺二琥珀酸) 对重金属具有较强的螯合能力, 但由于人工合成成本高, 难以推广应用^[3]。

近年来, GLDA (L-glutamic acid *N,N*-diacetic

acid, 谷氨酸 *N,N*-二乙酸) 被认为是更绿色环保的新一代螯合剂, 受到广泛关注^[4]。GLDA 由可再生植物原料制成, 易生物降解, 并且在螯合能力上与 EDTA 相当。GLDA 能活化土壤中的重金属离子, 提高其生物有效性; 与重金属离子结合形成螯合物, 降低重金属对植物的毒性; 促进植物对重金属的直接吸收和由根部向地上部转运能力^[5]。在实际应用方面, GLDA 用于修复土壤中重金属已有报道, 但主要运用于淋洗重金属污染土壤上^[6]。初步研究发现 GLDA 在诱导超富集植物东南景天提取土壤重金属

收稿日期: 2019-07-14; 修订日期: 2019-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1802605); 四川省科技重点攻关项目 (2017GZ0383, 2017SZ0181)

作者简介: 贺玉龙 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染治理与修复技术, E-mail: 1115755313@qq.com

* 通信作者, E-mail: yuj@scu.edu.cn

方面具有巨大潜力^[7]. 筛选试验表明三叶草对重金属 Cd 具有较强的富集能力,且在 Cd 含量为 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中富集效果良好. 因此,本试验通过探究不同浓度 GLDA 对三叶草生长状况及重金属 Cd 富集效果的影响,并揭示三叶草各部分 Cd 含量与土壤理化性质等因素的响应关系,以期为植物修复效率的提高提供强化措施和科学依据.

1 材料与方法

1.1 试供材料

供试土壤取自成都市双流区某农田表层土(0~20 cm),其基本理化性质见表 1. 供试植物为三叶草(购自双流区牧马山种子公司). 供试试剂为可生

物降解螯合剂 GLDA(谷氨酸, *N,N*-乙酰乙酸四钠,购自阿克苏诺贝尔公司)^[8], 分子结构如图 1 所示. $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 化学纯(购自成都市科隆化学品有限公司).

1.2 材料筛选

以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 作为土壤 Cd 的添加试剂,设置 A、B 和 C 这 3 个 Cd 添加梯度,分别为 0、25 和 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在四川大学江安校区(103°59'N, 30°33'E)进行土壤种子库-金属法筛选试验^[9]. 让土壤中的杂草种子在不同梯度的 Cd 污染条件下自然生长,成熟后测定其干重以及 Cd 含量,以期筛选出 Cd 超富集植物,为高浓度镉污染土壤的植物修复提供材料.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test soil

项目	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效态 Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总 Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
参数值	7.53	12.6	157.9	35.01	98.37	14.30	0.030	0.271

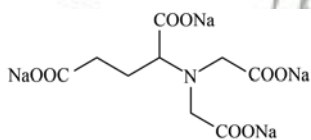


图 1 GLDA- Na_4 分子结构

Fig. 1 Molecular structure of GLDA- Na_4

从表 2 可知,在收获的 6 种杂草中,除三叶草和繁缕 Cd 含量分别达到 92.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 99.68

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,其余的 Cd 含量都较低. 三叶草和繁缕 Cd 含量接近 Cd 超富集植物的临界值(100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[10],在添加螯合剂条件下可能达到 Cd 超富集植物的临界值. 此外,三叶草和繁缕富集系数均远大于 1. 由此可见,三叶草和繁缕都可能是 Cd 富集植物,但由于繁缕生物量总体偏少, Cd 的累积量有限. 因此,综合考虑植物生物量以及对 Cd 的富集特性,将三叶草作为本试验进一步研究的供试植物.

表 2 植物筛选试验植物与土壤基本特征

Table 2 Basic characteristics of both plant and soil in plant screening test

处理编号	植物名称	土壤全镉 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤有效态镉 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	植物镉含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	干重 / g	富集系数
A1	藜	0.53	0.19	0.40	3.11	0.75
A2	藜	0.58	0.17	0.37	2.91	0.64
A3	狗尾巴草	0.51	0.19	0.44	4.89	0.86
A4	菎草	0.52	0.18	0.31	10.39	0.60
A5	稗草	0.48	0.16	0.43	4.18	0.90
B1	三叶草	23.91	9.94	92.52	1.97	3.87
B2	繁缕	24.41	10.14	99.68	0.94	4.08
B3	三叶草	24.06	11.02	88.74	2.52	3.69
B4	菎草	23.32	9.34	22.92	6.61	0.98
C1	藜	48.62	25.11	50.65	0.62	1.04
C2	繁缕	47.21	24.01	97.03	0.33	1.94
C3	藜	46.82	24.36	41.79	0.76	0.89
C4	菎草	47.84	26.08	56.93	2.98	1.19

1.3 浓度梯度试验

称取 30 kg 过 5 mm 筛的风干土壤,按照 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 投加量进行染毒,分别采用尿素和 KH_2PO_4 (均为分析纯)用作基肥与土壤混匀,其用量分别为 N: 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, P: 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, K: 100

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每盆(高 17 cm,内径 20 cm)装土 2 kg,陈化一周.

本试验设置不同 GLDA 浓度梯度:0、2.5、5、7.5 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,共 5 个处理,每个处理 3 次重复,共计 15 盆. 为保证添加的均匀性, GLDA 以溶液

形式添加,并添加磷酸二氢钾调节溶液 pH 值为 6.5 左右,以消除溶液 pH 对处理的影响。

每盆播种籽粒饱满、大小均匀的三叶草种子 7~10 颗,10 d 后定苗 5 株,期间以称重法保持田间持水量 60% 左右,植株在温室内 18~30℃ 自然光照条件下生长。种子发芽 45 d 后,三叶草进入营养生长旺盛期,将不同梯度的 GLDA 一次性缓慢施入土壤,添加处理 14 d 后收获三叶草,采集根际土壤样品。

1.4 样品的采集与分析

三叶草成熟后采集植株样品,用超纯水洗净,将地上部、根系放入烘箱在 105℃ 杀青 30 min,70℃ 烘干 24 h,称取干重,粉碎保存待测。同时采集三叶草根系 0~5 cm 处根际土壤(后文所述土壤均指根际土壤),自然风干,研钵磨碎后分别过 0.149 mm 和 2 mm 尼龙筛,若干次四分后装袋备用。

土壤基本理化性质测定参照文献[11];土壤重金属全量混酸(HNO₃/HClO₄/HF)消解,有效态含量用混酸(DTPA/TEA/CaCl₂)浸提,植物重金属全量采样混酸(HNO₃/HClO₄)消解;用 ICP-MS 测定重金属 Cd 含量,检出限为 1 μg·kg⁻¹。以国家标准物质四川盆地土壤 GBW07428(GSS-14)进行质量控制,同时做空白试验,Cd 的回收率为 90.1%~105.3%。

相关系数^[12,13]计算公式如下。

抗性系数 = $\frac{\text{处理组总生物量}}{\text{对照组总生物量}}$

富集系数(BCF) = $\frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{土壤重金属含量}}$

转移系数(TF) = $\frac{\text{植物地上部分重金属含量}}{\text{根部重金属含量}}$

1.5 数据处理与分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS

22.0 统计软件进行统计分析,采用 OriginPro 9.1 制图。

2 结果与讨论

2.1 GLDA 处理对三叶草生物量的影响

添加 GLDA 处理时,随着其用量的增加,三叶草的株高和根长均呈现先增后降的趋势(表 3)。当 GLDA 为 2.5 mmol·kg⁻¹时,株高和根长最大分别达到 11.67 cm 和 27.16 cm,比对照组分别高出 25.4% 和 22.2%,表明低浓度 GLDA 能显著促进三叶草的生长。而高浓度的螯合剂对植物有毒害作用^[14],GLDA 浓度过高时,明显抑制了三叶草茎叶生长和根系伸长(表 3)。在不同浓度 GLDA 处理下,三叶草根长和株高的最大与最小值之比均为 1.37,表明 GLDA 对三叶草两部分的生长影响大体一致。

超富集植物的生物量是反映植物修复能力的一个重要指标^[15]。由表 2 可知,各处理的地上部分生物量明显高于地下部分,并均随 GLDA 浓度的增加先增后减,其中 2.5 mmol·kg⁻¹处理条件下三叶草生物量最高,达到对照组的 1.30 倍。而当 GLDA 浓度大于 5 mmol·kg⁻¹时生物量开始下降,到达 10 mmol·kg⁻¹时出现茎秆变细、叶片发黄,表现出明显的毒害作用。卫泽斌等^[16]的盆栽试验也出现了类似结果,过高浓度的 GLDA(10 mmol·kg⁻¹)会使富集植物东南景天的生长受到抑制。随 GLDA 浓度的增加,三叶草的冠根比(地上与地下部分质量比)呈“降→升→降”的变化规律(最大值为 3.46),而抗性系数呈先增后减的趋势(最大值为 1.30,表 3)。综上所述,施用低浓度(2.5 mmol·kg⁻¹)的 GLDA 最有助于三叶草生物量的增加。

表 3 GLDA 对三叶草生长的影响¹⁾

Table 3 Effects of GLDA on *Trifolium repens* growth

GLDA /mmol·kg ⁻¹	株高/cm	根长/cm	干物质量			冠根比	抗性系数
			根部/g	地上部分/g	总干重/g		
0	9.21 ± 0.98b	21.65 ± 2.49b	0.83 ± 0.12b	2.44 ± 0.62a	3.27 ± 0.74a	2.94c	1.00c
2.5	11.67 ± 1.42a	27.16 ± 2.32a	1.31 ± 0.35a	2.94 ± 0.54a	4.25 ± 0.89a	2.24e	1.30a
5	9.37 ± 1.19b	23.33 ± 1.98b	0.98 ± 0.25ab	2.54 ± 0.42a	3.52 ± 0.67a	2.29d	1.08b
7.5	9.02 ± 0.62b	20.33 ± 1.38b	0.68 ± 0.19b	2.35 ± 0.59a	3.03 ± 0.78a	3.46a	0.93d
10	8.34 ± 0.54b	19.82 ± 1.22b	0.66 ± 0.23b	2.03 ± 0.48a	2.69 ± 0.71a	3.08b	0.82e

1) 根据 Duncan 检验(P=0.05), 同列具有不同字母者表示数据间差异显著,下同

2.2 GLDA 处理对三叶草富集转移重金属的影响

由表 4 可知,随 GLDA 浓度的增加,三叶草根部分 Cd 含量呈上升趋势,在 10 mmol·kg⁻¹处理浓度时达到最大值 560.85 mg·kg⁻¹。从低到高各梯度浓度处理三叶草根部分 Cd 含量分别是对照组的 2.77、

3.57、4.15 和 4.49 倍,差异均达显著水平(P<0.05);三叶草地上部分 Cd 含量随着 GLDA 浓度的增大而先增后减,在 5 mmol·kg⁻¹时达到最大(435.15 mg·kg⁻¹)。随着浓度继续增加地上部分 Cd 含量逐渐减少,说明 GLDA 浓度过高反而影响了茎

叶对 Cd 的吸收. 本试验结果表明, 虽然过高浓度螯合剂会对三叶草生长产生毒害, 但依然能显著增加三叶草植株对 Cd 的吸收. GLDA 的密封瓶试验 (OECD 301D) 表明, GLDA 的 28d 生物降解率超过 60%^[17]. 可见, GLDA 具有良好的生物可降解性, 故在三叶草营养生长旺盛期 (45d) 施加 GLDA, 能获得最好的富集效果和最小的环境风险. 总体而言, 5 mmol·kg⁻¹ GLDA 的处理效果最为理想, 根部和地上部分 Cd 含量分别为 445.15 mg·kg⁻¹ 和 435.15 mg·kg⁻¹, 远超富集植物 100 mg·kg⁻¹ 的临界值; 三叶草对 Cd 的提取量也达到 1.54 mg·pot⁻¹.

转移系数被用来评价植物将重金属从地下部分转移到地上部分的转运能力^[18]. 由表 4 可知, 三叶草的转移系数变化范围在 0.74~1.14 之间, 且随着

GLDA 浓度的增大转移系数先增后减, 在 2.5 mmol·kg⁻¹ 处理时达到最大, 比对照增加了 54%. 表明 Cd 污染土壤环境中, 三叶草能将 Cd 从根部较好地转运至地上部分, 且 GLDA 可以提高三叶草对 Cd 的转运能力. 生物富集系数大于 1 是重金属超富集植物区别于普通植物的一个重要特征^[19]. 由表 4 可知, 地下 (根部) 和地上两部分富集系数均远大于 1, 根部富集系数随 GLDA 浓度增加, 从 4.90 提高到 25.25 ($P<0.05$); 地上部分富集系数先增后减, 变化范围在 3.65~18.65 之间, 在 5 mmol·kg⁻¹ 处理时到达最大. 地下和地上两部分富集系数的最大与最小值之比分别为 5.15 和 5.11, 由此可见, 地下部分的富集系数高于地上部分, GLDA 处理后三叶草地下部分对 Cd 富集能力好地上部分.

表 4 GLDA 对三叶草中 Cd 含量及转运与富集系数的影响

Table 4 Effect of GLDA on cadmium content and transshipment and enrichment coefficients in *Trifolium repens*

GLDA /mmol·kg ⁻¹	Cd			转移系数 (TF)	富集系数 (BCF)	
	根部含量 /mg·kg ⁻¹	地上部分含量 /mg·kg ⁻¹	提取量 /mg·pot ⁻¹		根部	地上部分
0	124.83 ± 5.18e	92.83 ± 4.58d	0.33 ± 0.02c	0.74 ± 0.13b	4.90 ± 0.52d	3.65 ± 0.73c
2.5	345.70 ± 11.27d	396.70 ± 12.56b	1.50 ± 0.11a	1.14 ± 0.21a	14.20 ± 1.33c	16.30 ± 1.38a
5	445.15 ± 15.35c	435.15 ± 17.35a	1.54 ± 0.16a	0.97 ± 0.19ab	18.46 ± 1.53b	18.04 ± 1.46a
7.5	518.53 ± 14.69b	422.53 ± 17.68a	1.35 ± 0.13a	0.81 ± 0.11ab	22.89 ± 2.13a	18.65 ± 1.26a
10	560.84 ± 18.63a	320.84 ± 13.76c	1.02 ± 0.07b	0.57 ± 0.08b	25.25 ± 2.21a	14.45 ± 0.96b

2.3 GLDA 处理对土壤基本理化性质及全量和有效态 Cd 的影响

土壤 pH 值能直接影响各种离子在固相中的吸附水平, 从而决定重金属的赋存形式和生物有效性^[20]. 通过研究 GLDA 对土壤 pH 值的影响, 可以了解其对土壤环境的潜在影响. 由于 GLDA 呈碱性, 在 GLDA 处理后土壤 pH 略微升高, 但无显著差异, 变化范围在 7.47~7.92 之间, 呈中性 (图 2). 可能与土壤具有较强的缓冲能力, 螯合剂溶液的 pH 对土壤的 pH 影响不大有关. 由图 2 可知, 施加 GLDA 后

土壤电导率显著升高, 10 mmol·kg⁻¹ 处理时电导率达到 664.3 μS·cm⁻¹. 各浓度处理电导率分别是对照组的 1.19、1.35、1.64 和 1.87 倍, 由此可见电导率与 GLDA 浓度呈显著正相关. 可能的原因是 GLDA 活化土壤中的金属与非金属离子, 使得土壤溶液导电性增强而引起电导率升高^[21]. 但由于 GLDA 是一种可降解的螯合剂, 随着时间自身分解, 活化能力降低, 土壤电导率也会随之下降.

土壤中 Cd 的存在形态直接关系其生物有效性的差异, 其中有效态 Cd 可被植物根部直接吸

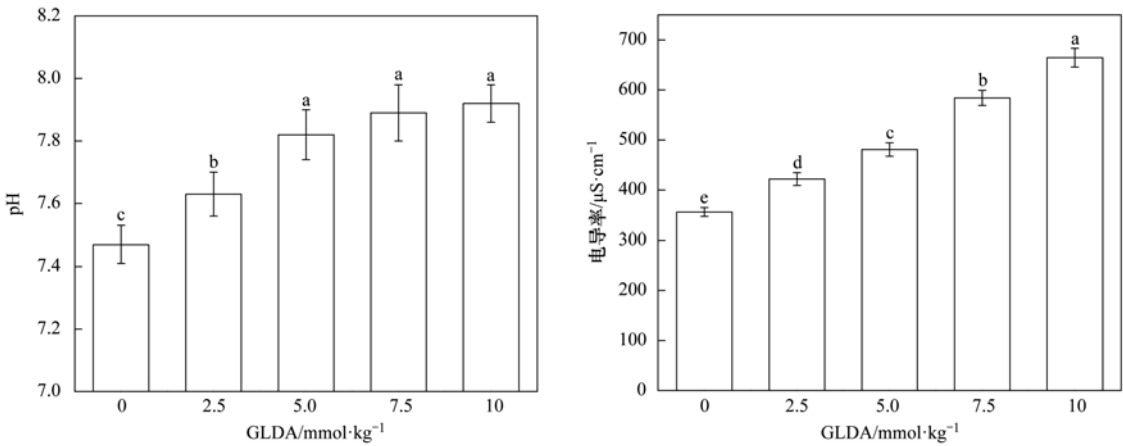


图 2 GLDA 的施用对土壤 pH 和电导率的影响

Fig. 2 Effect of GLDA application on soil pH and conductivity

收^[22]. 由图 3 可知, GLDA 能显著增加有效态 Cd 含量, 5 mmol·kg⁻¹ 处理下相比对照增加了 80. 7%, 而当施加浓度继续增加, 有效态 Cd 含量变化不大, 这与王洪等^[23] 研究 EDTA 的施用对叶用红苜蓿 Cd 富集的影响得出的结论一致. 对照组土壤中总 Cd 为 25. 43 mg·kg⁻¹, 高于 25. 00 mg·kg⁻¹ 的 Cd 染毒浓度, 可能原因是土壤中本身含有 Cd 元素. 随 GLDA 添加浓度增加, 各处理土壤中的总 Cd 含量呈显著下降趋势, 在 10 mmol·kg⁻¹ 处理时降至最低 22. 21 mg·kg⁻¹. 有研究表明^[24], 螯合剂的施入能够增加 Cd 在土壤中的迁移性, 促使重金属向深处迁移, 造成表层土壤重金属含量的减少以及地下水的污染. 与对照组 34. 2% 的生物有效性系数相比, GLDA 的

施加显著增加了 Cd 的生物有效性系数, 且在 5 mmol·kg⁻¹ 的施加浓度下增幅最大, 随后逐渐趋于稳定. 因此, 在利用螯合剂促进植物对重金属吸收的同时要把握螯合剂的使用量, 实现螯合剂的高效、安全利用. 综上所述, 中等浓度的 GLDA 即可对重金属产生较明显的活化作用, 促进三叶草对 Cd 的吸收, 提高修复效率, 其中以 5 mmol·kg⁻¹ 的施加量活化效果最好.

2. 4 三叶草对 Cd 富集的相关性分析及预测模型

土壤的理化性质是影响重金属富集的关键因素. pH 值不仅决定了土壤中各种重金属的溶解度, 而且影响着重金属形态以及生物有效性^[25]. 电导率 (EC) 是仅次于土壤 pH 的另一重要因素, 是判定土壤水溶性盐是否限制植物生长的重要指标. 谭海燕等^[26] 发现土壤溶液电导率与水溶性盐含量之间呈显著正相关关系. 土壤有机质 (OM) 含有丰富的羟基、羧基、羰基和氨基等官能团, 能够与金属离子发生金属-有机配合作用, 从而影响土壤中重金属的形态及其生物有效性^[27]. 表 5 的相关性分析表明, 土壤理化性质和螯合剂浓度与三叶草重金属含量具有正相关关系, 反映了土壤理化性质和 GLDA 浓度对三叶草各部分 Cd 的富集特性存在内在关联性, 即随着 pH 值、EC、OM 以及 GLDA 浓度升高, 三叶草各部分对重金属 Cd 的富集效率越高, Cd 进入植物后由根部转移至地上部分的迁移性越好. 其中, 随着 GLDA 施加浓度增加, 土壤 OM 含量呈增加趋势, 但与三叶草的富集量的相关性不显著 ($P > 0. 05$).

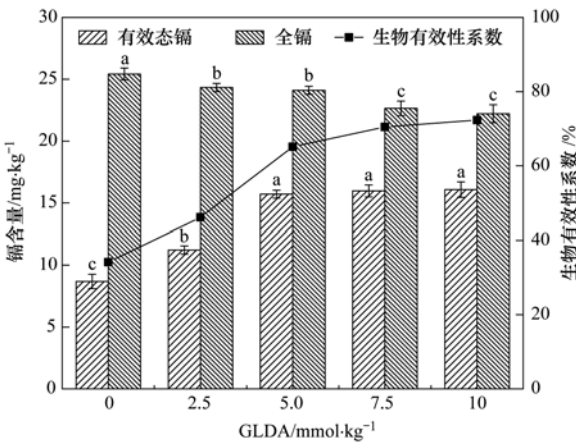


图 3 GLDA 处理下土壤中全量及有效态 Cd 含量变化
Fig. 3 Changes of total Cd and available Cd content in soil under GLDA treatment

表 5 土壤理化性质、GLDA 浓度与三叶草各部分富集量双变量相关性分析¹⁾

Table 5 Analysis of variability of soil physical and chemical properties, GLDA concentration, and enrichment in various parts of <i>Trifolium repens</i>							
	pH	EC	OM	GLDA	根部 Cd 含量	地上部分 Cd 含量	整株 Cd 提取量
pH	1	—	—	—	—	—	—
EC	0. 907 **	1	—	—	—	—	—
OM	0. 902 **	0. 918 **	1	—	—	—	—
GLDA	0. 906 **	0. 990 **	0. 727 **	1	—	—	—
根部 Cd 含量	0. 949 **	0. 924 **	0. 516	0. 949 **	1	—	—
地上部分 Cd 含量	0. 699 **	0. 478	0. 466	0. 535 *	0. 772 **	1	—
整株 Cd 提取量	0. 594 *	0. 328	0. 303	0. 381	0. 651 **	0. 975 **	1

1) ** 表示在 0. 01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示在 0. 05 水平 (双侧) 上显著相关

预测模型可以很好地体现土壤理化性质和螯合剂的施加对三叶草富集重金属的影响, 为今后土壤-三叶草重金属富集效果的研究提供参考. 利用 SPSS 22. 0 线性回归, 拟合 pH 值、EC、GLDA 浓度与三叶草富集量之间的线性关系, 结果分根部 Cd 含量、地上部分 Cd 含量、整株 Cd 提取量三部分. 如表 6 所示, 拟合曲线相关系数 R^2 达 0. 965 ~ 0. 994, 表明模型能够解释绝大部分试验数据和现象. 螯合剂

GLDA 的施加改善了土壤理化环境, 提高了土壤 pH 值和 EC, 分别促进了 Cd 在土壤溶液中的溶解度以及三叶草的生长, 并与 Cd 形成有机配合物结合态, 强化了三叶草对 Cd 的富集和转移. 总体而言, 整株三叶草 Cd 提取量的线性回归拟合效果最好, 相关系数 R^2 最高, 能更好的预测三叶草对 Cd 的富集效果, 故选作最终预测模型, 即:

$$y = 29. 282\text{pH} + 0. 684\text{GLDA} + 0. 039\text{EC} - 204. 622$$

表 6 三叶草各部分 Cd 富集量的回归方程

Table 6 Regression equation of Cd enrichment in various parts of *Trifolium repens*

因变量	回归方程	R ²
根部 Cd 含量	$y = 7.852\text{pH} + 0.175\text{GLDA} + 0.010\text{EC} - 54.993$	0.965
地上部分 Cd 含量	$y = 25.654\text{pH} + 0.481\text{GLDA} + 0.031\text{EC} - 180.498$	0.989
整株 Cd 提取量	$y = 29.282\text{pH} + 0.684\text{GLDA} + 0.039\text{EC} - 204.622$	0.994

3 结论

(1)低剂量 GLDA 能显著促进三叶草生长,其中以 2.5 mmol·kg⁻¹的处理浓度三叶草生物量最高,而高浓度螯合剂的毒害作用则会抑制其生长。

(2)初步发现三叶草具有超富集能力,而 GLDA 能显著增加土壤有效态 Cd 含量,促进三叶草根部分对其直接吸收,并较好地转运至地上部分,总体而言,5 mmol·kg⁻¹ GLDA 的处理效果最为理想。

(3)三叶草的生物富集效果与土壤理化性质(pH、电导率)和螯合剂用量等因素密切相关,通过拟合得出的预测模型,可以为污染农田土壤的植物修复治理提供科学依据。

(4)可以预见,在强化植物修复重金属 Cd 污染土壤方面,生物可降解螯合剂 GLDA 具有潜在应用前景。

致谢:感谢四川省冶金地质勘察局六零五大队提供的分析测试支持,魏威、冉宗信、邓思维和常家华等在采样和试验过程提供了帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 樊莹, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(10): 1727-1736.
Fan T, Ye W L, Chen H Y, *et al.* Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. Ecology and Environmental Science, 2013, **22** (10): 1727-1736.

[2] Luo C L, Shen Z G, Li X D, *et al.* Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS [J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1773-1784.

[3] Tandy S, Bossart K, Mueller R, *et al.* Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(3): 937-944.

[4] Begum Z A, Rahman I M M, Tate Y, *et al.* Formation and stability of binary complexes of divalent ecotoxic ions (Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) with biodegradable aminopolycarboxylate chelants (dl-2-(2-carboxymethyl) nitrilotriacetic acid, GLDA, and 3-hydroxy-2,2'-iminodisuccinic acid, HIDS) in aqueous solutions [J]. Journal of Solution Chemistry, 2012, **41** (10): 1713-1728.

[5] 吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 等. 生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1733-1738.
Wu Q, Cui Y R, Tang X X, *et al.* Extraction of heavy metals from sludge using biodegradable chelating agent N, N-bis (carboxymethyl) glutamic acid tetrasodium [J]. Environmental

Science, 2015, **36**(5): 1733-1738.

[6] Begum Z A, Rahman I M M, Sawai H, *et al.* Effect of extraction variables on the biodegradable chelant-assisted removal of toxic metals from artificially contaminated European reference soils [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, **224**: 1381.

[7] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 和磷素活化剂促进东南景天提取土壤重金属的潜力[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(7): 1402-1404.
Wei Z B, Wu Q T, Long X X, *et al.* Efficiency of biodegradable chelate GLDA and phosphorus activators on heavy metals phytoextraction with *Sedum alfredii* hance [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(7): 1402-1404.

[8] 陈叶享. 更绿色和持续性螯合剂 GLDA 及其应用之道[J]. 中国洗涤用品工业, 2011, **12**(3): 65-67.

[9] Zhang X F, Xia H P, Li Z A, *et al.* Identification of a new potential Cd-hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1): 414-419.

[10] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苋菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 及其对 Cd 的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1386-1389.
Li Y S, Sun L N, Sun T H, *et al.* Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26** (4): 1386-1389.

[11] 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. 175-192.

[12] 赵杨迪, 潘远智, 刘碧英, 等. Cd、Pb 单一及复合污染对花叶冷水花生长的影响及其积累特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 48-53.
Zhao Y D, Pan Y Z, Liu B Y, *et al.* *Pilea cadieri* *agnep. et guill's* growth and accumulation under single and combined pollution of Cd and Pb [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(1): 48-53.

[13] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3845-3853.
Li J K, Zhang D, Zhou P, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3845-3853.

[14] 杨丹丹, 杨丽雯, 张永清, 等. 2,6-二甲基-β-环糊精螯合强化苋草对 Pb 吸收的影响和机理[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3346-3353.
Yang D D, Yang L W, Zhang Y Q, *et al.* Effect and mechanism of 2, 6-Demethyl-β-Cyclodextrin on chelate-induced humulus towards lead accumulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3346-3353.

[15] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J]. 生命科学研究, 2015, **19**(2): 176-184.
Liu L, Hao X H, Tian L F, *et al.* Research progresses on the mechanism of Cd absorption, transport and accumulation in plant [J]. Life Science Research, 2015, **19**(2): 176-184.

- [16] 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 alfredoo hance with biodegradable chelate GLDA [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1864-1869.
- [17] AkzoNobel. Dissolvine® GL Technical Brochure [R]. AkzoNobel Amsterdam, The Netherlands, 2010. 1-5.
- [18] 林立金,宁博,廖明安,等. 冬季农田杂草繁缕对镉的积累特性研究[J]. 生态环境学报, 2014, **16**(4): 673-678.
Lin L J, Ning B, Liao M G, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of winter farmland weed *Stellaria media* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **16**(4): 673-678.
- [19] 王小蒙,郑向群,丁永祯,等. 不同土壤下苋菜镉吸收规律及其阈值研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(10): 1-8.
Wang X M, Zheng X Q, Ding Y Z, *et al.* Absorption rules and threshold value of amaranth cadmium under different soil types [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(10): 1-8.
- [20] 王晓蓉,章慧珠,周爱和,等. 金沙江颗粒物对重金属的吸附[J]. 环境化学, 2015, **2**(1): 23-32.
Wang X R, Zhang H Z, Zhou A H, *et al.* Adsorption of heavy metals by Jinsha River particulates [J]. Environmental Chemistry, 2015, **2**(1): 23-32.
- [21] LEO, Tairone P, Edmund P, *et al.* New semi-empirical formulae for predicting soil solution conductivity from dielectric properties at 50 MHz[J]. Journal of Hydrology, 2010, **393**(3-4): 321-330.
- [22] 于方明,汤叶涛,仇荣亮,等. Cd 胁迫下超富集植物圆锥南芥抗氧化机理[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(2): 409-414.
Yu F M, Tang Y T, Qiu R L, *et al.* Antioxidative responses to cadmium stress in the hyperaccumulator *Arabis paniculata* Franch [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(2): 409-414.
- [23] 王洪,孙丽娜,李海波,等. 两种螯合剂施用对污染土壤中叶用红苋菜 Cd 富集的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2249-2252.
Wang H, Sun L N, Li H B, *et al.* Effect of different chelators application on Cd accumulation in metal polluted soils by *Beta vulgaris* var. *cicla* L [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(6): 2249-2252.
- [24] 王伟. EDTA 络合诱导土壤 Cd 的纵向迁移转化规律研究[D]. 保定:河北农业大学, 2009. 54-65.
- [25] 张志敏,王会峰,晁旭,等. 常量元素及 pH 对土壤中重金属形态的影响[J]. 中国锰业, 2017, **35**(6): 151-153.
Zhang Z M, Wang H F, Chao X, *et al.* Effects of major elements and pH on speciation of heavy metals in soil [J]. China's Manganese Industry, 2017, **35**(6): 151-153.
- [26] 谭海燕,周文星,童江云,等. 昆明地区耕地土壤电导率和水溶性盐的关系及土壤盐化情况分析[J]. 云南农业科技, 2018, **23**(1): 4-6.
- [27] 郭微,戴九兰,王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, **43**(3): 761-768.
Guo W, Dai J L, Wang R Q. Progress in the effect of dissolved organic matter on adsorption of heavy metals by soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(3): 761-768.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)