

百方知库
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



2019

Vol.40 No.1

第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响

王起凡, 郭伟*, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥

(内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 内蒙古自治区煤化工废水处理与资源化工程技术研究中心, 呼和浩特 010021)

摘要: 采用温室盆栽试验的方法, 研究不同浓度的镧处理(0、50、200 和 800 mg·kg⁻¹) 对中度铅胁迫下(200 mg·kg⁻¹) 玉米生长、矿质营养元素吸收、C:N:P 生态化学计量比及 Pb 和 La 吸收的影响, 探讨土壤-植物系统中稀土重金属的相互作用, 旨在为稀土矿区稀土重金属复合污染土壤的治理提供基础数据和理论依据. 结果表明, 随着外源 La 浓度的增加土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 La 的浓度显著增加, 而乙酸铵-EDTA 提取态 Pb 的浓度显著降低; 玉米地上部干重显著降低了 17.90% ~ 81.17%, 根冠比显著增加了 21.74% ~ 86.96%; 随着土壤中 La 浓度的增加根部 P 含量显著降低了 19.16% ~ 89.68%, La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 地上部 P 和 N 含量分别显著降低了 65.51% ~ 91.98% 和 48.27% ~ 76.58%; 随着土壤中 La 浓度的增加, 植株 C:P、N:P 和植株 La 浓度显著增加, 地上部和根部 Pb 浓度分别显著增加了 52.61% ~ 99.01% 和 15.99% ~ 44.34%; 随着 La 浓度的升高显著降低了玉米植株 K、Ca 和 Mg 的含量. 结果初步证明, 在稀土-重金属复合污染土壤中, 稀土元素的存在加剧了重金属对植物生长的毒害效应及其所引发的生态风险问题, 应进一步深入研究稀土对植物吸收重金属的影响及作用机制.

关键词: 镧; 铅; 玉米; 生长; 吸收

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0480-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806051

Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress

WANG Qi-fan, GUO Wei*, CHANG Qing, PAN Liang, ZHOU Xin-nan, YANG Liang, LI E

(Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Waste Resource Recycle, Inner Mongolia Engineering Research Center of Coal Chemical Wastewater Treatment & Resource Utilization, School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effects of different concentrations of lanthanum (0 mg·kg⁻¹, 50 mg·kg⁻¹, 200 mg·kg⁻¹ and 800 mg·kg⁻¹) on growth, nutrient uptake, C:N:P stoichiometry, and La and Pb uptake by maize (*Zea mays* L.) under moderate lead stress (200 mg·kg⁻¹) and evaluate the interaction of rare earth elements and heavy metals in the soil-plant system. The aim was to provide basic data and a theoretical basis for the remediation of rare earth element and heavy metal-contaminated soils in a rare earths mining area. The results indicate that the concentrations of CH₃COONH₄-EDTA-extractable La and Pb significantly increase and decrease, respectively, with increasing La concentrations of the soils. The shoot dry weights of maize significantly decreases by 17.90% to 81.17% and the root to shoot ratio of maize significantly increases by 21.74% to 86.96% with increasing La concentrations of the soils. With increasing La concentrations in soils, the root P contents of maize significantly decrease by 19.16% to 89.68%. The shoot P and N contents significantly decrease by 65.51% to 91.98% and 48.27% to 76.58%, respectively, when the exogenous application of La is 200 mg·kg⁻¹ and 800 mg·kg⁻¹, respectively. The increasing La concentrations in soils significantly increase the C:P and N:P ratios and shoot and root La concentrations of maize. The shoot and root Pb concentrations of maize significantly increase by 52.61% to 99.01% and 15.99% to 44.34%, respectively, with increasing La concentrations. Overall, the increasing La concentrations in soils significantly decrease the K, Ca, and Mg contents of maize. The results demonstrate that the presence of rare earth elements aggravates the phytotoxicity of heavy metals to plant and ecological risks. Further research should focus on the effects and mechanisms of rare earth elements on the heavy metal uptake by plants.

Key words: La; Pb; maize; growth; uptake

在自然界中, 单个污染物质构成的环境污染虽时有发生, 但绝对意义上的单一污染是不存在的, 污染多具伴生性和综合性, 即多种污染物形成的复合污染^[1]. 我国是世界上稀土资源最丰富的国家^[2], 稀土产量占全球 80% 以上, 从 20 世纪 90 年代开始就成为世界上最大的稀土开采国. 目前, 我国南方离子吸附型稀土开采普遍采用强酸浸提, 增强了土壤中重金属的活性^[3]; 另外, 任意堆积的稀

土尾矿和残渣如不经妥善处理, 其中仍含有的稀土和与矿物伴生的重金属势必同时发生迁移转化, 导致土壤中稀土与重金属含量增加. 江西赣南稀土矿

收稿日期: 2018-06-06; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461071, 31200421); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2012MS0603)

作者简介: 王起凡(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态修复与污染控制, E-mail: 675666784@qq.com

* 通信作者, E-mail: ndguowei@163.com

区土壤稀土含量为 $869.73 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是非矿区稀土含量的 3.8 倍^[4]; 同时其大部分县、区也都受到了重金属污染, 尤其是砷、铬和镍属重度污染水平^[5]. 内蒙古包头白云鄂博稀土尾矿区土壤中稀土 La 浓度最高可达 $11\,145 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 重金属 Pb 浓度最高可达 $323 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为内蒙古土壤背景值的 340 倍和 22 倍^[6]. 福建省长汀县某个大型稀土矿区附近的蔬菜地土壤稀土含量平均值为 $242.921 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别高于福建省和全国背景值 8.7% 和 29.49%, 同时存在重金属 Cd、Cu 和 As 的污染, 其中 Cd 污染最严重(最大超标倍数为 15.8 倍)^[3, 7]. 因此, 稀土矿藏的开采、冶炼等过程会导致土壤呈现稀土-重金属复合污染的新特征. 除此之外, 稀土作为饵料、微肥、植物助长剂等农、林、渔业的广泛应用已有多年的历史, 使得环境中稀土元素污染日益严重^[8, 9], 加之土壤重金属污染的存在, 造成了稀土与重金属共存的复合污染环境现状, 严重地危害了农业生产和居民健康.

目前, 有研究表明稀土和重金属元素在土壤-植物系统中存在复杂的交互作用. 稀土能显著影响重金属在土壤-植物系统中的赋存形态、迁移转化和吸收等特征. 在旱培和水淹条件下, 混合稀土元素 ($50 \sim 1\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 可显著提高土壤中交换态重金属 Fe、Mn 和 Zn 的含量^[10]. Wang 等^[11] 的研究也表明混合稀土 ($40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 可以增加 15 种测试土壤中水溶态、可交换态、碳酸盐结合态和有机结合态重金属 (Pb、Cd、Zn 和 Ni 等) 的含量. 外源稀土 (以轻稀土 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ La 和 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Ce 为主) 处理使油菜对 Fe、Mn 和 Zn 的吸收显著降低了约 13% ~ 77.63%, 稀土抑制了根系对重金属的吸收^[12]. 有研究还发现, 利用浓度为 $20 \sim 80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 稀土元素镧浸种后对镉胁迫下 ($200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 小麦种子萌发及根、芽生长的毒害有一定的缓解作用, 而 $100 \sim 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镧浸种后种子活力及幼苗生长等受到显著抑制作用^[13], 可见稀土对植物重金属毒害的缓解作用具有明显的浓度效应. 另外, 稀土对重金属在土壤-植物系统间的交互作用会受稀土与重金属的种类、浓度、作用时间和植物类型等多种因素的影响^[14, 15]. 然而, 目前有关土壤-植物系统中稀土和重金属元素间交互作用的研究还很少, 特别是将稀土作为污染元素, 分析在稀土-重金属复合污染的情况下二者之间的交互作用对植物生长和污染元素吸收的影响鲜见报道, 因此有必要对此进行深入研究.

本研究采用温室盆栽试验的方法, 以玉米为供试植物, 模拟中度重金属 Pb 污染土壤 (200

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 通过添加不同浓度的稀土元素 La (0 、 50 、 200 和 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 分析不同浓度 La 处理在 Pb 胁迫下对玉米生物量、矿质营养元素吸收、C:N:P 生态化学计量比、稀土元素 La 和重金属 Pb 吸收的影响, 探讨土壤-植物系统中稀土和重金属元素的交互作用, 以期对稀土-重金属复合污染土壤的植物修复研究提供基础数据和理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试植物

供试植物为内蒙地区主要的农作物品种玉米 (*Zea mays* L., 高优 1 号), 种子采购于内蒙古农牧科学研究院蔬菜研究所. 播种前先对种子表面消毒, 然后在 25°C 恒温培养箱中进行催芽处理, 种子露白后即可播种.

1.2 培养基质

供试土壤取自内蒙古自治区呼和浩特市苗圃区无污染土壤, 采样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$. 土壤基本理化性质见表 1. 本试验采用电位法测定 pH 值 (基质与水的质量比为 $1:2.5$), 采用重铬酸钾-油浴法测定有机质含量, 凯氏定氮法测定全氮, 氢氧化钠碱-钼锑抗比色法测定全磷, 碱性扩散法测定速效氮, 碳酸氢钠法测定速效磷. 土壤样品经王水-高氯酸法消解后采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Optima 3300 DV, PerkinElmer USA) 测定镧和铅的浓度. 采集的供试土壤自然风干后过 2 mm 土壤筛备用.

通过向土壤中人工施加 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液模拟不同程度的镧铅复合污染土壤, 使其重金属铅的浓度 (以干土计) 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 稀土镧的浓度分别为 0 、 50 、 200 和 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在不同程度的镧铅复合污染土壤中加入相应量的硝酸铵 (NH_4NO_3) 溶液, 以弥补因加入不同浓度硝酸镧和硝酸铅时造成的处理间氮素背景差异. 为保证植物在生长期能获得充足的养分, 以溶液形式向不同程度的镧铅复合污染土壤中加入基础肥料^[16]: P 为 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 为 $71.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mg 为 $4.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Ca 为 $20.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 为 $1.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn 为 $3.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cu 为 $0.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mo 为 $0.009\,35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 加入肥料后混合均匀, 于室温、80% 田间持水量条件下老化 1 个月使用.

1.3 试验设计与处理

本试验采用生物学盆栽法在内蒙古大学温室内进行. 模拟不同程度的 La 和 Pb 复合污染土壤, 设置 1 个重金属元素铅的浓度 (以干土计) 为 200

表 1 供试土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

分析指标	La /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	pH	有机质/%	全 N /%	全 P /%	全 K /%	速效 N /mg·kg ⁻¹	速效 P /mg·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹
参数	26.49	8.65	7.44	1.39	0.079 95	0.073 5	1.825	40.5	3.925	76.0

1) 数据为 3 个样本的算术平均值

mg·kg⁻¹ (Pb200), 4 个稀土元素 La 的浓度分别为 0 mg·kg⁻¹ (La0)、50 mg·kg⁻¹ (La50)、200 mg·kg⁻¹ (La200)、800 mg·kg⁻¹ (La800), 共计 4 个处理 (Pb200-La0, Pb200-La50, Pb200-La200, Pb200-La800), 每个处理重复 6 次, 共 24 盆, 随机排列. 以圆形塑料花盆 (上口径 14.5 cm × 下口径 10.2 cm × 高度 12.5 cm) 作为培养容器, 内衬塑料自封袋. 每盆装混匀老化 1 个月后的镉铅复合污染土壤 2 kg, 老化后测定不同镉铅复合污染土壤中 La 和 Pb 的有效态浓度. 选择颗粒饱满的玉米种子, 每盆播种 8 粒, 出苗 10 d 后间苗, 每盆保留 3 株长势相近的植物. 试验期间自然采光, 采用称重法每天定时为植物补水, 维持土壤基质含水量为田间最大持水量的 80%. 本试验在内蒙古大学温室内进行, 试验期间温室白天温度控制在 20 ~ 35℃, 夜间温度在 10 ~ 20℃, 相对湿度在 20% ~ 70%, 自出苗之日起植物生长 2 个月后收获.

1.4 样品制备与分析测定

收获时, 将植物地上部分自茎基部剪下, 玉米根系先用自来水洗净砂粒和土壤, 再用蒸馏水冲洗 3 次, 70℃ 烘干, 称重. 粉碎植物样品, 每个样品称取 2 ~ 3 mg 利用元素分析仪 (Vario EL III, CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Co Germany) 测定植物样品地上部和根部 C 和 N 元素含量. 称取 0.5 g 左右的植物样品加入 5 mL BV-III 级 HNO₃ 于 120℃ 条件下开放式消煮, 制备待测溶液. 利用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer USA) 测定消煮液中 P、K、Ca 和 Mg 的浓度; 利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Optima 3300 DV, PerkinElmer, USA) 测定植物样品中稀土元素 La 和重金属元素 Pb 的浓度. 为了保证消煮和测定过程的准确性, 样品分析过程采用试剂空白和标准物质 (玉米 GBW10012, 国家标准物质中心) 进行质量监控, 各

元素的回收率在 86.3% ~ 114.7%.

老化后的土样自然风干后过 1 mm 筛, 称取约 2.5 g 的土壤样品于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 的 pH 为 4.65 的乙酸铵-EDTA (0.5 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄, 0.5 mol·L⁻¹ CH₃COOH, 0.02 mol·L⁻¹ Na₂EDTA) 提取剂, 摇匀后在 THZ-82 数显水浴恒温振荡器上 25℃ 恒温振荡 1 h. 在 800 型电动离心沉淀器上以 3 500 ~ 4 000 r·min⁻¹ 的转速离心 25 min 后, 用 0.45 μm 滤膜过滤到 20 mL 离心管中, 每个处理 6 个重复. 利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Optima 3300 DV, PerkinElmer, USA) 进行乙酸铵-EDTA 提取态 La 和 Pb 的分析测定.

1.5 数据分析

所有试验数据利用 Excel 2003 进行平均值和标准误差的计算, SPSS 17.0 软件进行统计分析, 邓肯氏新复极差检验法 (Duncan's multiple range test, DMRT) 检验各处理平均值之间的差异显著性, 差异显著水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生物量的影响

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生物量的影响见表 2. 在中度 Pb 胁迫下, 随着土壤中 La 浓度的增加, 玉米地上部、根部和总干重都显著降低, 玉米根冠比显著增加. 当 La 浓度分别为 50、200 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 玉米地上部干重与对照相比分别显著降低了 17.90%、57.57% 和 81.17%; 当 La 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 玉米根部和总干重没有显著变化, 当 La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 玉米根部和总干重分别显著降低了 46.08%、64.98% 和 55.60% 和 78.18%. 随着土壤中 La 浓度的增加, 玉米根冠比分别显著增加了 21.74%、26.09% 和 86.96%.

表 2 不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生物量的影响¹⁾ / g·pot⁻¹Table 2 Effect of different concentrations of La on the biomass of maize under the Pb stress / g·pot⁻¹

项目	地上部干重	根部干重	总干重	根冠比
Pb200-La0	9.61 ± 0.60a	2.17 ± 0.18a	11.78 ± 0.74a	0.23 ± 0.01c
Pb200-La50	7.89 ± 0.89b	2.21 ± 0.27a	10.09 ± 1.15a	0.28 ± 0.01b
Pb200-La200	4.06 ± 0.29c	1.17 ± 0.07b	5.23 ± 0.34b	0.29 ± 0.01b
Pb200-La800	1.81 ± 0.12d	0.76 ± 0.03b	2.57 ± 0.14c	0.43 ± 0.02a

1) 数据为 6 次重复的平均值 ± 标准误差, 同一列中不同字母表示差异显著, 显著水平为 $P < 0.05$, 下同

2.2 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C、N 和 P 含量的影响

不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C、N 和 P 含量的影响见表 3。在中度 Pb 胁迫下, 随着土壤中 La 浓度的增加, 玉米地上部 C 含量与对照相比分别显著降低了 19.36%、59.92% 和 82.19%; 当外源 La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 玉米根部 C 含量分别降低了 48.74% 和 65.85%。当外源 La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 地上部和

根部 N 含量与对照相比分别显著降低了 48.27%、76.58% 和 40.44%、65.66%。当外源 La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 地上部 P 含量与对照相比分别显著降低了 65.51% 和 91.98%; 随着土壤中 La 浓度的增加, 根部 P 含量分别显著降低了 19.16%、70.02% 和 89.68%。当外源 La 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 玉米根部 C 含量、地上部和根部 N 含量以及地上部 P 含量与对照相比均无显著变化。

表 3 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C、N 和 P 含量的影响/mg·pot⁻¹

Table 3 Effect of different concentrations of La on the C, N and P contents of maize under the Pb stress/mg·pot⁻¹

项目	地上部			根部		
	C	N	P	C	N	P
Pb200-La0	3 992.50 ± 246.01a	279.92 ± 18.80a	20.21 ± 1.56a	850.89 ± 76.06a	64.19 ± 4.37a	4.07 ± 0.30a
Pb200-La50	3 219.44 ± 367.72b	248.73 ± 27.61a	17.93 ± 1.61a	834.27 ± 109.71a	68.88 ± 6.73a	3.29 ± 0.42b
Pb200-La200	1 600.22 ± 114.05c	144.81 ± 11.10b	6.97 ± 0.41b	436.18 ± 24.06b	38.23 ± 2.38b	1.22 ± 0.05c
Pb200-La800	710.99 ± 49.63d	65.55 ± 4.10c	1.62 ± 0.10c	290.55 ± 15.15b	22.04 ± 0.90c	0.42 ± 0.02d

2.3 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 K、Ca 和 Mg 含量的影响

不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 K、Ca 和 Mg 的影响见表 4。在中度 Pb 胁迫下, 当外源 La 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 对玉米地上部和根部 K、Ca 和 Mg 的含量均无显著影响。当 La 的浓度为 200

mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 地上部和根部 K 含量与对照相比分别显著降低了 40.16%、83.54% 和 33.85%、63.36%, 地上部和根部 Ca 含量分别显著降低了 28.83%、51.23% 和 45.64%、71.91%, 地上部和根部 Mg 含量分别显著降低了 55.91%、82.18% 和 40.16%、59.72%。

表 4 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 K、Ca 和 Mg 含量的影响/mg·pot⁻¹

Table 4 Effect of different concentrations of La on K, Ca and Mg contents of maize under the Pb stress/mg·pot⁻¹

项目	地上部			根部		
	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
Pb200-La0	291.45 ± 21.63a	97.86 ± 7.52a	69.68 ± 6.09a	25.79 ± 2.58a	53.61 ± 4.55a	16.61 ± 0.95a
Pb200-La50	279.42 ± 16.97a	100.82 ± 5.44a	64.59 ± 8.03a	31.49 ± 3.42a	63.00 ± 7.11a	17.68 ± 1.83a
Pb200-La200	174.40 ± 13.36b	69.65 ± 3.39b	30.72 ± 2.28b	17.06 ± 1.07b	29.14 ± 1.68b	9.94 ± 0.69b
Pb200-La800	47.97 ± 5.87c	47.73 ± 1.68c	12.42 ± 0.69c	9.45 ± 0.29c	15.06 ± 0.64c	6.69 ± 0.30c

2.4 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C:N:P 的影响

不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C:N:P 的影响见表 5。在中度 Pb 胁迫下, 随着土壤中 La 浓度的增加, 与对照相比玉米地上部 C:N 显著降低, 而对根部 C:N 无显著影响。当 La 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 与对照相比, 对玉米地上部和根部 C:P 无显著影

响; 而随着土壤中 La 浓度的持续增加, 地上部和根部 C:P 均显著增加。当 La 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 与对照相比, 对玉米地上部 N:P 无显著影响, 而当 La 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 和 800 mg·kg⁻¹ 时, 显著增加了玉米地上部 N:P; 随着土壤中 La 浓度的增加, 显著增加了玉米根部 N:P。

表 5 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 C:N:P 比的影响

Table 5 Effect of different concentrations of La on C:N:P ratios of maize under the Pb stress

项目	地上部			根部		
	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
Pb200-La0	14.35 ± 0.68a	199.08 ± 6.39c	14.03 ± 0.77c	13.17 ± 0.48a	208.96 ± 11.25c	15.88 ± 0.75d
Pb200-La50	12.94 ± 0.21b	177.98 ± 6.53c	13.79 ± 0.62c	11.99 ± 0.79a	253.55 ± 11.70c	21.50 ± 1.28c
Pb200-La200	11.09 ± 0.25c	228.96 ± 6.73b	20.66 ± 0.43b	11.46 ± 0.33a	358.49 ± 13.03b	31.33 ± 1.05b
Pb200-La800	10.84 ± 0.23c	438.56 ± 16.24a	40.60 ± 1.85a	13.28 ± 0.87a	697.89 ± 47.29a	52.83 ± 2.78a

2.5 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米 La 和 Pb 浓度的影响

不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米植株中 La 和

Pb 浓度的影响见图 1。在中度 Pb 胁迫下, 随着土壤中 La 浓度的增加, 玉米根部 La 浓度均显著增加; 但与对照相比, 仅当 La 浓度为 800 mg·kg⁻¹

时,玉米地上部 La 浓度显著增加.随着土壤 La 浓度的增加,玉米地上部 Pb 浓度与对照相比分别显著增加了 52.61%、93.97% 和 99.01%;当 La 浓度为 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,地上部 Pb 浓度与 La 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时相比显著增加了 30.41%,其余处理间无显著差异.当 La 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,玉米根部 Pb 浓度与对照相比分别显著增加了 44.34% 和 37.10%;当 La 浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与对照相比根部 Pb 浓度无显著影响,而与 La 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时相比,根部 Pb 浓度却显著降低了 19.64%.

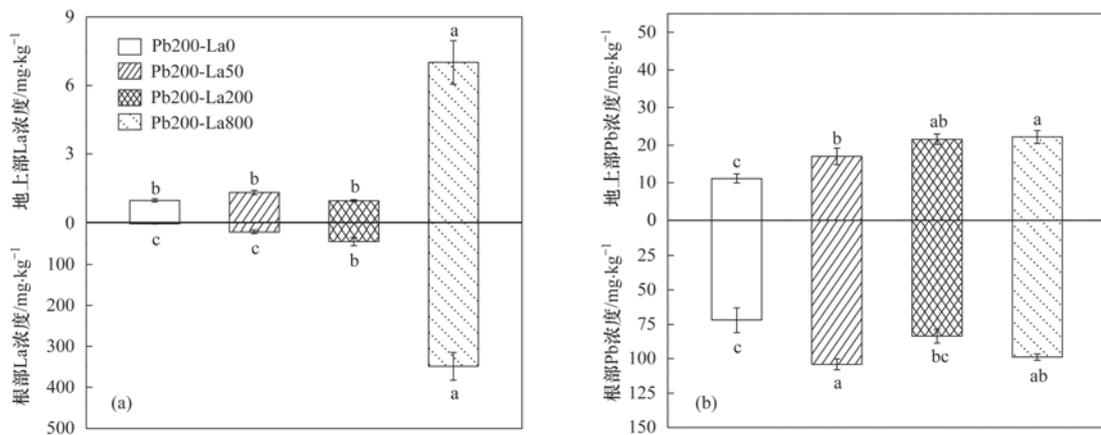


图 1 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米中 La 和 Pb 浓度的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of La on La and Pb concentrations of maize under the Pb stress

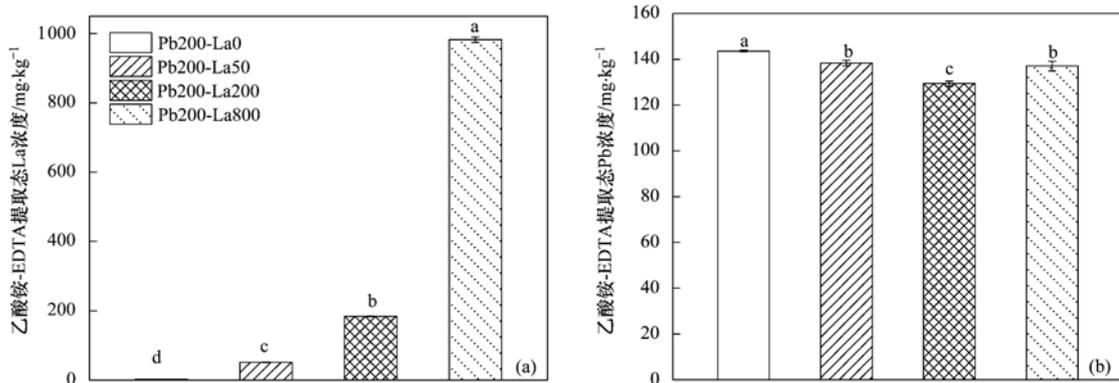


图 2 不同浓度镧处理对土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 La 和 Pb 浓度的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of La on the concentrations of $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ -EDTA-extractable La and Pb in the soil under the Pb stress

3 讨论

稀土元素对植物重金属毒害的缓解作用具有明显“低促高抑”的 Homesis 现象,其相关研究多集中于水生生态系统和水培培养条件.杜兰芳等^[17]采用水培方法研究发现低浓度 ($\leq 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的镧能够促进铅 ($0 \sim 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下豌豆幼苗的生长,使其根长和芽长分别增加了 $0\% \sim 68.97\%$ 和 $2.63\% \sim 62.26\%$,缓解铅的毒害效应;但当 La 浓度达到 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Pb 浓度大于 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,

2.6 不同浓度镧处理对土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 La 和 Pb 浓度的影响

不同浓度镧处理对土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 La 和 Pb 浓度的影响见图 2.随着外源添加 La 浓度的增加,土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 La 浓度按比例显著增加.随着外源添加 La 浓度的增加,土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 Pb 浓度与对照相比分别显著降低了 3.68%、9.94% 和 4.57%;当 La 浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤中乙酸铵-EDTA 提取态 Pb 浓度与 La 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比分别显著降低了 6.50% 和 5.62%.

La 加剧了 Pb 对豌豆幼苗生长的毒害效应,使其根长和芽长显著降低了 5.08% ~ 6.06% 和 7.35% ~ 25.76%.在 Cd 胁迫 ($5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,添加 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合轻稀土,对青椒地上和根干重无显著影响;添加 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部和总生物量分别增加了 19.26% 和 16.18%;当 $> 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部和总干重分别下降了 2.57% ~ 15.50% 和 0.67% ~ 14.72%^[18].本研究结果显示,随着土壤中外源添加 La 浓度的增加,铅胁迫下玉米地上部生物量显著降低了 17.90% ~ 81.17%,表明稀土 La 加剧

了重金属 Pb 对玉米生长的毒害作用; 而同时植株体内 La 和 Pb 的浓度均显著增加, 矿质营养元素的吸收显著降低, 因此稀土 La 和重金属 Pb 的复合污染表现出协同毒性作用. 共存污染元素之间的交互作用使得复合污染比单一元素的污染要复杂得多, 与在环境中的浓度及其组合关系、植物的种类、所作用的植株部位等多种因素有关^[19]. 因此, 对稀土和重金属之间的复合效应、影响因素以及对植物生长毒性效应的作用机制还有待进一步深入地研究.

土壤中的 N、P 和 K 等矿质元素是生命物质的重要组成成分, 是植物生长发育所必需的大量元素, 以多种形式参与植物生长发育和新陈代谢等不同生理生化过程. 因此, 矿质代谢是植物赖以生存的根本^[20, 21], 研究稀土-重金属复合污染胁迫对植物矿质营养吸收的影响具有十分重要的意义. 本研究表明, 当土壤中外源添加 La 浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 使得铅胁迫下玉米对 N、P、K、Ca 和 Mg 等矿质营养元素的吸收显著降低了 28.83% ~ 91.98%. 刘冰等^[22]的水培试验结果显示, 喷施 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀土 La 使得 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下玉米幼苗茎叶 Ca 和 Mg 的含量分别显著降低 29.77% 和 45.43%. 不同浓度稀土镧 ($2 \sim 480 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理使得 $6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下蚕豆根部 Mg、K 和 Ca 含量分别下降了 0.21% ~ 15.30%、0.80% ~ 10.85% 和 4.55% ~ 17.13%^[23]. 本研究表明, 低浓度稀土处理可促进植物对矿质营养元素的吸收, 而高浓度则表现出抑制效果. 水培条件下, 低浓度 La ($0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 使得小麦地上部 N、P 的含量分别增加了 3.09% ~ 15.46% 和 5% ~ 25%; 而当 La 浓度 $> 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 地上部 N、P 的含量分别降低了 6.16% 和 5% ~ 7.5%^[24]. 研究发现, 高浓度镧处理时可能会抑制植物的生理蛋白酶活性, 降低植物细胞对离子的吸收和转运, 从而影响植物矿质元素含量^[25, 26]. 当土壤中稀土元素浓度过高时, 吸收的过量稀土聚集在植物细胞的表面, 改变其显微结构及膜的渗透性, 进而抑制矿质营养元素的吸收^[27]. 另外, 稀土 La 可能会阻断 K^+ 和 Ca^{2+} 的通道, 从而抑制其吸收和转运^[28]. 稀土 La 离子是 Ca 的类似物, 由于 La 和 Ca 对植物体内离子吸收和运输的影响相似, La 可以替代细胞酶中的 Ca^{2+} ; 或者由于稀土离子结合稳定性要高于 Ca^{2+} , 导致 La^{3+} 占据了 Ca^{2+} 在细胞壁和质膜上的结合位点^[29, 30]. 目前, 相关机制研究说法众多, 有待进一步证实.

生态化学计量学的概念由 Elser 等^[31] 首先明确提出, 是指生态过程和生态相互作用中多种化学元素和能量平衡的科学, 它主要研究 3 种元素 C、N

和 P 之间的关系. 生长速率假设是生态化学计量学的核心思想, 认为随着生长速率的加快, 植物体内 N 和 P 含量逐渐增加, 而 P 增加得更快, C:P 与 N:P 比会随之降低. 本研究结果显示, 在 Pb 胁迫下, 当土壤中外源 La 浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 显著地抑制了植物对于 P 元素的吸收, 显著增加了玉米植株的 C:P 和 N:P, 表明随着 La 和 Pb 协同毒害作用的增加玉米植株生长速率降低, 在同样的生长期生物量积累明显降低, 符合生长速率假设. 王芳等^[32] 的研究结果显示, 随着土壤中稀土元素 Ce 污染程度的增加, 也显著增加了玉米植株的 C:P 和 N:P, 与本试验结果相一致.

本研究表明, Pb 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 外源 La 的添加使得玉米植株地上部和根部 Pb 浓度显著增加了 37.10% ~ 99.01%. 水培条件下, 铅浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时外加镧或镧配合物 ($5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 可使小萝卜茎叶和根中铅浓度分别显著降低 39.34% ~ 97.41% 和 63.03% ~ 83.81%, 减轻铅对植物的毒害作用^[33]. 另外, 低浓度的 La ($< 120 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 可抑制 Cd ($6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 对蚕豆幼苗的毒害, 使根系对 Cd 吸收降低 5.81% ~ 26.63%; 而高浓度的 La ($> 120 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 与 Cd 产生协同毒害, 使根系对 Cd 吸收增加了 5.95% ~ 12.39%, 加重重金属所引起的生态风险问题^[34]. 经根施 La^{3+} ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 Pb^{2+} ($500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液处理的大蒜幼苗, 与仅施 Pb 处理相比植株内 Pb 含量明显减少了约 40%^[35]. 低浓度的碳酸轻稀土 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 却显著增加了镉 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 胁迫下青椒茎中 Cd 的含量, 显著降低果实中 Cd 的含量; 而高浓度的碳酸轻稀土 ($140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 则显著增加了叶中 Cd 的含量^[18]. 因此, 稀土对于植物吸收重金属的影响, 可能受到试验方式 (水培、土培)、稀土或重金属的浓度、类型以及植物种类、不同累积器官等相关因素的影响. 已有的研究表明 Pb 离子可以借助 Ca 离子通道进入植物细胞, Ca 离子通道抑制剂阻碍 Pb 进入细胞组织^[36], 而 LaCl_3 正是 Ca 离子通道抑制剂中的一种^[37], 这也许可以解释为何外源添加 La 会抑制植物对 Pb 的吸收. 另外, 在一定浓度 Pb 胁迫下, 由于 La 和 Pb 具有相似的半径^[11], La 与 Pb 在植物根细胞壁中存在竞争关系^[38], 这也可能导致植物体内 Pb 含量的降低. 然而, 对于外源稀土的添加促进植物吸收重金属的可能机制尚未见相关报道. 目前, 有关稀土对植物吸收重金属元素的影响及其作用机制的研究还很少, 有必要深入研究稀土对植物吸收重金属产生不同影响的主要因素和作用机制.

4 结论

(1) 在 200 mg·kg⁻¹ 铅胁迫下, 随着 La 浓度的增加(50、200 和 800 mg·kg⁻¹), 玉米植株生物量显著降低了 14.35% ~ 78.18%, 根冠比显著增加了 21.74% ~ 86.96%。

(2) 在 200 mg·kg⁻¹ 铅胁迫下, 当 La 浓度大于 200 mg·kg⁻¹ 时, 玉米植株地上部和地下部 N 含量分别显著降低了 48.27% ~ 76.58% 和 40.44% ~ 65.66%, P 含量分别显著降低了 65.51% ~ 91.98% 和 70.02% ~ 89.68%; 玉米植株地上部和地下部 C:P 分别显著增加了 15.01% ~ 120.29% 和 71.56% ~ 233.98%, N:P 分别显著增加了 47.26% ~ 189.38% 和 97.29% ~ 232.68%。

(3) 在 200 mg·kg⁻¹ 铅胁迫下, 当 La 浓度大于 200 mg·kg⁻¹ 时, 玉米植株地上部和地下部 K 含量分别显著降低了 40.16% ~ 83.54% 和 33.85% ~ 63.36%, Ca 含量分别显著降低了 28.83% ~ 51.23% 和 45.64% ~ 71.91%, Mg 含量分别显著降低了 55.91% ~ 82.18% 和 40.16% ~ 59.72%。

(4) 在 200 mg·kg⁻¹ 铅胁迫下, 随着 La 浓度的增加(50、200 和 800 mg·kg⁻¹), 玉米地上部和根部 Pb 浓度分别显著增加了 52.61% ~ 99.01% 和 15.99% ~ 44.34%。

参考文献:

- [1] 王恒. 吉林省土壤-水稻系统环境质量分析评估及重金属复合污染研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [2] 廖丝琪. 我国稀土资源出口问题与建议[J]. 合作经济与科技, 2018, (1): 33-35.
- [3] 李小飞, 陈志彪, 陈志强, 等. 南方稀土采矿地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评估[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 146-151.
Li X F, Chen Z B, Chen Z Q, *et al.* Concentrations and health risk assessment of heavy metals in soil and vegetables from REEs mining area, Fujian Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 146-151.
- [4] 金姝兰, 黄益宗. 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4836-4845.
Jin S L, Huang Y Z. A review on rare earth elements in farmland ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4836-4845.
- [5] 杨芳英, 廖合群, 金姝兰. 赣南稀土矿产开采环境代价分析[J]. 价格月刊, 2013, (6): 87-90.
Yang F Y, Liao H Q, Jin S L. The environmental costs of the mining on rare earths in the south of Jiangxi Province [J]. Prices Monthly, 2013, (6): 87-90.
- [6] 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 等. 内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1895-1900.
Guo W, Fu R Y, Zhao R X, *et al.* Distribution characteristic and current situation of soil rare earth contamination in the Bayan Obo mining area and Baotou tailing reservoir in Inner Mongolia

- [J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1895-1900.
- [7] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 835-843.
Li X F, Chen Z B, Zhang Y H, *et al.* Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 835-843.
- [8] 孟晓红, 贾琰, 付超然. 重金属稀土元素污染在水生物体内的生物富集[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 50-52.
Meng X H, Jia Y, Fu C R. The biological accumulation of Pb, Cd, Hg, La, Ce in carps [J]. Agro-Environmental Protection, 2000, 19(1): 50-52.
- [9] 万强. 稀土农用的历史、现状和发展趋势[J]. 湖南农业科学, 2000, (5): 22-23.
- [10] 丁士明, 张自立, 梁涛, 等. 外源稀土对土壤中稀土和重金属可交换态的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 122-126.
Ding S M, Zhang Z L, Liang T, *et al.* Effect of extraneous rare earths (REs) on form of soil exchangeable REs and heavy metals [J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 122-126.
- [11] Wang Z W, Shan X Q, Zhang S Z. Effect of exogenous rare earth elements on fraction of heavy metals in soils and bioaccumulation by plants [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34(11-12): 1573-1588.
- [12] 丁士明, 张自立, 梁涛, 等. 外源稀土对根际稀土和重金属地球化学行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 13-17.
Ding S M, Zhang Z L, Liang T, *et al.* Influence of extraneous rare earth elements (REE's) on biogeochemical behaviors of the elements and several other metals in rhizosphere [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(1): 13-17.
- [13] 何俊瑜, 任艳芳, 任明见, 等. 镉对镉毒害下小麦种子萌发的缓解效应[J]. 中国稀土学报, 2010, 28(1): 97-103.
He J Y, Ren Y F, Ren M J, *et al.* Alleviation effect of praseodymium on cadmium toxicity during wheat seed germination [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28(1): 97-103.
- [14] 赵文静, 郭伟, 赵仁鑫, 等. 稀土元素对土壤-植物系统中重金属行为的影响及其机理研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 508-512.
Zhao W J, Guo W, Zhao R X, *et al.* Effects of rare earth elements on heavy metal behavior and their action mechanisms in a soil-plant system [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 508-512.
- [15] 张杰, 黄永杰, 刘雪云. 镉对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 835-841.
Zhang J, Huang Y J, Liu X Y. Effects of La on growth and some physiological characteristics of rice seedlings under Cd stress [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 835-841.
- [16] 肖雪毅, 陈保冬, 朱永官. 丛枝菌根真菌对铜尾矿上植物生长和矿质营养的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 312-317.
Xiao X Y, Chen B D, Zhu Y G. The influences of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and mineral nutrition of plants grown in copper mine tailing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(2): 312-317.
- [17] 杜兰芳, 郁建锋, 屠云霞. 镉对铅胁迫下豌豆幼苗生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2007, (12): 14-18.
Du L F, Yu J F, Tu Y X. Effect of the La on the growth and development of pea under the Pb stress [J]. Northern Horticulture, 2007, (12): 14-18.

- [18] 王甲辰, 左强, 邹国元, 等. 添加稀土对镉污染土壤上青椒生长与镉吸收分布的影响[J]. 中国稀土学报, 2013, **31**(3): 353-362.
Wang J C, Zuo Q, Zou G Y, et al. Effects of adding rare earths on growth, cadmium absorption and distribution of sweet pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*) in cadmium contaminated soil [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2013, **31**(3): 353-362.
- [19] 郭观林, 周启星. 土壤-植物系统复合污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(5): 823-828.
Guo G L, Zhou Q X. Advances of research on combined pollution in soil-plant systems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(5): 823-828.
- [20] 周碧青, 张金彪, 黄维南. 镉胁迫下草莓幼龄期叶、根矿质元素积累和分布的变化[J]. 亚热带植物科学, 2007, **36**(3): 4-7.
Zhou B Q, Zhang J B, Huang W N. Changes of mineral element accumulation and distribution in young age strawberry under cadmium stress [J]. Subtropical Plant Science, 2007, **36**(3): 4-7.
- [21] 周青, 黄晓华, 黄纲业, 等. La 对 Pb 伤害大豆幼苗的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1999, **5**(1): 22-25.
Zhou Q, Huang X H, Huang G Y, et al. Effect of La on glycine max seedling under Pb stress [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 1999, **5**(1): 22-25.
- [22] 刘冰, 周青. 稀土 La 对 Cd 胁迫下玉米幼苗吸收矿质元素的影响[J]. 玉米科学, 2006, **14**(5): 91-93.
Liu B, Zhou Q. Effect of La on the growth of maize seedling under Cd stress [J]. Journal of Maize Sciences, 2006, **14**(5): 91-93.
- [23] 汪承润, 卢韞, 李月云, 等. 镉胁迫下稀土镧对蚕豆幼苗根尖细胞分裂和吲哚乙酸氧化酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(4): 679-684.
Wang C R, Lu Y, Li Y Y, et al. Effects of rare earth lanthanum on root tip cell mitosis and indole acetic acid oxidases in roots of *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(4): 679-684.
- [24] 王艳. 镧、铈对小麦酶活性及矿质元素利用的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2005.
Wang Y. The effects of La, Ce elements treatments on wheat in enzyme activity and mineral elements using [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2005.
- [25] Li Y H, Yan C L, Liu J C, et al. Effects of La^{3+} on ATPase activities of plasma membrane vesicles isolated from *Casuarina equisetifolia* seedlings under acid rain stress [J]. Journal of Rare Earths, 2003, **21**(6): 675-679.
- [26] Wang L H, Huang X H, Zhou Q. Effects of rare earth elements on the distribution of mineral elements and heavy metals in horseradish [J]. Chemosphere, 2008, **73**(3): 314-319.
- [27] 金姝兰, 黄益宗. 土壤中稀土元素的生态毒性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(2): 213-223.
Jin S L, Huang Y Z. A review on ecological toxicity of rare earth elements in soil [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, **9**(2): 213-223.
- [28] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of nutrient elements by Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) grown in lanthanum spiked soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 675-678.
- [29] 庞欣, 王东红, 彭安. 镧对铅胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 环境化学, 2002, **21**(4): 318-323.
Pang X, Wang D H, Peng A. Effect of La^{3+} on the activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings under lead stress [J]. Environmental Chemistry, 2002, **21**(4): 318-323.
- [30] 姜文君, 张智勇, 李子杰, 等. LaCl_3 对轮藻节间细胞吸收矿质元素的影响[J]. 中国稀土学报, 2008, **26**(6): 797-800.
Jiang W J, Zhang Z Y, Li Z J, et al. Effects of LaCl_3 on absorption of mineral nutrients in internodal cells of chara [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, **26**(6): 797-800.
- [31] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000, **3**(6): 540-550.
- [32] 王芳, 郭伟, 马朋坤, 等. 丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 309-316.
Wang F, Guo W, Ma P K, et al. Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and Ce uptake of maize grown in Ce-contaminated soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 309-316.
- [33] 梁利芳, 张丽霞, 杨肖伟, 等. 稀土镧及其配合物对植物铅、镉单一及复合污染的作用[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2002, **19**(1): 69-73.
Liang L F, Zhang L X, Yang X W, et al. Study on the effect of rare earth La and its complex to raddish under the stress of Pb and Cd [J]. Journal of Guangxi Teachers College (Natural Science Edition), 2002, **19**(1): 69-73.
- [34] Wang C R, Luo X, Tian Y, et al. Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk [J]. Chemosphere, 2012, **86**(5): 530-537.
- [35] 张玲, 谢晓梅, 张文龙, 等. 镧对大蒜幼苗吸收铅的影响[J]. 安徽中医学院学报, 2005, **24**(6): 40-41.
Zhang L, Xie X M, Zhang W L, et al. Effect of lanthanum on lead absorption in *Allium sativum* L. [J]. Journal of Anhui Traditional Chinese Medical College, 2005, **24**(6): 40-41.
- [36] 徐劼, 保积庆, 于明革, 等. 植物对 Pb 的吸收转运机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(36): 17467-17470, 17491.
Xu J, Bao J Q, Yu M G, et al. Research advances in uptake and translocation of Pb in plants [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, **40**(36): 17467-17470, 17491.
- [37] 黄玉婷, 钱文俊, 王博, 等. 外源 Ca^{2+} 及钙离子信号抑制剂对茶树抗寒性的影响[J]. 茶叶科学, 2015, **35**(6): 520-526.
Huang Y T, Qian W J, Wang B, et al. Effects of exogenous calcium and inhibitors of calcium signaling transduction pathway on cold resistance of tea plant [J]. Journal of Tea Science, 2015, **35**(6): 520-526.
- [38] 熊双莲, 熊治廷. 镧和铅相互作用对雪菜生长及其镧铅累积的影响[J]. 华中农业大学学报, 2007, **26**(2): 199-202.
Xiong S L, Xiong Z T. Interactive effects of La and Pb on plant growth and bioaccumulation of La and Pb in *Brassica juncea* var. *crispifolia* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, **26**(2): 199-202.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)