

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

镉对不同生长期籽粒苋植物螯合肽的影响

刘佳欣¹, 陈文清^{1,2*}, 杨力¹, 李娜¹, 王宇豪¹, 康愉晨¹

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 植物螯合肽(PCs)由于其含有大量的巯基,能够螯合重金属离子,对重金属的积累和解毒起着重要作用.以镉(Cd)富集型植物籽粒苋 K472 为研究对象,采用土培法,设置6个Cd处理水平为:0(CK)、10(T1)、25(T2)、50(T3)、100(T4)和200 mg·kg⁻¹(T5),分析Cd胁迫下营养生长初期、中期和后期的K472植物螯合肽的变化特征,探究植物螯合肽对Cd的螯合解毒机制.结果表明,各生长阶段的K472的株高、根长、生物量随着Cd胁迫含量的升高而下降显著,其降幅随着K472生长发育逐渐降低.而营养生长中期的K472对Cd的富集能力最强,最大Cd富集量为6 695.35 mg,最大富集系数为6.3.此外,随着Cd胁迫含量的增加,不同生长阶段的K472根、茎和叶内Cd含量与PCs含量呈显著正相关.其中,根系及茎部中对Cd胁迫响应最强的植物螯合肽为PC3,叶片中对Cd胁迫响应最强的植物螯合肽为PC2.实际应用中,在营养生长中期采收籽粒苋K472可获得更高的修复效率.

关键词: 土壤污染; 镉(Cd); 富集植物; 籽粒苋; 植物螯合肽

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-4053-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012024

Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in *Amaranthus hypochondriacus* L. During Different Growth Periods

LIU Jia-xin¹, CHEN Wen-qing^{1,2,*}, YANG Li¹, LI Na¹, WANG Yu-hao¹, KANG Yu-chen¹

(1. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Phytochelatins (PCs) can chelate heavy metal ions due to their large number of thiols and play an important role in heavy metal accumulation and detoxification. *A. hypochondriacus* K472, a cadmium (Cd) enriched plant, was selected as the research object. Six Cd treatment concentrations, namely 0 (CK), 10 (T1), 25 (T2), 50 (T3), 100 (T4), and 200 mg·kg⁻¹ (T5), were used to analyze the variation of PCs in different growth stages under different degrees of Cd stress and to explore the mechanism by which PCs chelate and detoxify Cd. The results showed that the plant height, root length, and biomass of K472 decreased significantly with increasing Cd concentration, and the range of decrease gradually became less pronounced with the growth and development of K472. K472 exhibited the maximum ability to enrich Cd during the middle vegetative growth period. The maximum concentration was 6 695.35 mg, and the maximum bioconcentration factor was 6.3. In addition, with increasing Cd concentration, the Cd content of K472 roots, stems, and leaves was positively correlated with the concentration of PCs. PC3 had the strongest response to Cd stress in roots and stems, whereas PC2 responded to stress in leaves. For practical applications, harvesting K472 in the middle of vegetative growth is an optimal strategy for the remediation of Cd-contaminated soil.

Key words: soil pollution; cadmium(Cd); enrichment plant; *Amaranthus hypochondriacus* L.; phytochelatins

Cd污染已成为我国农业发展的主要环境限制因素^[1,2],对当地的经济发展和居民健康构成严重的威胁^[3].植物修复技术因其低成本^[4]和生态友好^[5]等特点,成为近年来土壤修复技术研究的热点,吸引了国内外学者对植物重金属解毒机制的研究^[6].

籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)具有生长速度快、生物量大、易栽培的特点,是一种良好的修复镉污染土壤的超富集植物^[7].李凝玉等^[8]通过盆栽试验发现,籽粒苋 K112 和 R104 对土壤中的Cd具有很强的耐性和积累的能力,在土壤Cd含量为16 mg·kg⁻¹时,2个品种叶内Cd含量分别为120.63 mg·kg⁻¹和109.96 mg·kg⁻¹,达到超富集植物的临界标准.龙玉梅等^[9]通过盆栽试验,比较4种Cd富集植物(籽粒苋、龙葵、商陆和青葙)对土壤的修复效果,结果表明在Cd含量为3.89 mg·kg⁻¹和

22.44 mg·kg⁻¹的土壤中,籽粒苋地上部分Cd含量分别为22.59 mg·kg⁻¹和216.60 mg·kg⁻¹,可收获的Cd总量最高.谷雨等^[10]通过田间试验,比较6种植物(甜高粱、生物高粱、玉米、油菜、商陆和籽粒苋)对土壤中Cd的富集特性,发现籽粒苋镉含量及富集系数均最高,在土壤Cd含量为1.7 mg·kg⁻¹时,籽粒苋地上部镉含量可达12.533 mg·kg⁻¹.Xie等^[11]的研究发现籽粒苋K472在100 mg·kg⁻¹Cd胁迫下,叶片Cd含量是未受镉胁迫的40倍,植物螯合肽PC2、PC3和PC4显著增加.然而富集型植物在不同生长阶段对Cd的耐受和富集能力还有待进一步

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-01-17

基金项目: 四川省重大科技专项项目(2018SZDX0028)

作者简介: 刘佳欣(1996~),女,硕士,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: sculiuji2020@163.com

* 通信作者, E-mail: scuChen2020@163.com

步研究.

重金属与配体的螯合作用以及随后在液泡中的区域化是植物采用的最常见的解毒方式^[12]. 在高等植物中,植物螯合肽(PCs)是最重要的一类金属配体^[13]. PCs在重金属离子的刺激下,与细胞溶胶中的有毒金属离子形成复合物,随后将其输送到液泡中,从而保护植物免受重金属的毒害^[14]. PCs的产生能力及其对Cd抗性的影响随生育期和Cd胁迫水平的不同而不同. 早在20世纪80年代,学者们就发现不同生长阶段的油菜、小麦和黄瓜等植物体内的Cd含量随着植物的生长而增加^[15]. 这可以解释为不同生长阶段的植物,其生理活动不同,尤其是与蒸腾作用^[16]、光合作用^[17]和植物代谢^[18,19]等有关的活动.

本试验以籽粒苋 K472 为研究对象,结合前期的研究工作,对不同生长阶段其根、茎和叶中 Cd 含量进行分析,并测定其巯基化合物(GSH、Cys 和 PCs)及生长性能以探究其耐 Cd 性能,找出典型生长阶段 PCs 的产生和富集规律,以期达到更高的植物修复效率.

1 材料与方法

1.1 试验材料

籽粒苋种子(*A. hypochondriacus* K472)由中国科学院地理科学与资源研究所提供. 将 K472 种子用含量为 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的赤霉素浸泡 5 h,放置在潮湿的纱布上,置于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的恒温培养箱中进行发芽. 在黑暗中保存 7 d 后,将发芽的幼苗转移到有机质中,培养至 Cd 处理阶段.

1.2 试验设计

本研究为土培方式的盆栽试验,土壤来自成都金品花卉有限公司. 供试土壤(pH 6.56,总 Cd $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态 Cd $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)经风干、混合并用 2 mm 筛网筛分后置于 $80 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 塑料盆钵中,每盆土壤约 75 kg. 将 Cd 以 $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液(2.5 L)的形式添加至土壤中,添加镉含量为 0 (CK)、10 (T1)、25 (T2)、50 (T3)、100 (T4) 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T5),充分混匀并保湿. 在营养生长初期(发芽后 20 d)、营养生长中期(发芽后 40 d)和营养生长后期(发芽后 60 d),将长势均匀的健康幼苗分别移入各处理土壤中,置于温室大棚中培养 20 d. 每个处理条件设 3 个重复. 本试验于 4 月下旬开始,7 月下旬结束,日间温度 $(29 \pm 2)^\circ\text{C}$,夜间温度 $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$.

1.3 植物生物量测定

采集 3 株 K472 植株,根部用自来水冲洗掉浮土后,置于预冷的 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液中浸泡

10 min,去除根表面及自由空间吸附的 Cd. 再用超纯水清洗 3 次,吸水纸擦干后称其鲜重并测量株高及根长(每株植株为一个重复样品),再置于烘干箱中烘干至恒重(80°C , 48 h),称其干重并记录.

1.4 植物与土壤 Cd 含量测定

采集 K472 植株,进行根表 Cd 的交换及植株清洗工作,烘干至恒重. 分别称取根、茎和叶样品 0.3 g ,采用湿式消解法,用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (5:1, 体积比)消解,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICPE-9000,日本岛津)进行检测,设置空白对照并使用国家标准物质(GBW 07063)进行质量控制($95\% \pm 5\%$).

同时采集 K472 植株根际土壤,经自然风干后研磨,过 100 目筛. 称取 0.2 g 过筛样品,采用电热板消解法,用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ (5:5:3, 体积比)消解,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICPE-9000,日本岛津)进行检测,设置空白对照并使用国家标准物质(GBW 08303)进行质量控制($95\% \pm 5\%$).

1.5 植物巯基化合物测定

1.5.1 植物组织中巯基化合物的提取

采集 6 株 K472 植株,同样进行根表 Cd 的交换及植株清洗工作. 吸水纸擦干后用液氮迅速固定并储存于 80°C 冰箱中,每株植株为一个重复. 植株巯基化合物检测采用 Sneller 等^[20]的研究方法,即将液氮固定的鲜样组织放于研钵中,加入 2 mL 0.1% TFA(含 $6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA)充分研磨,冰浴超声 30 min 后离心(4°C , $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min),上清液冷藏用于巯基化合物的分析测定. 为避免巯基化合物接触空气的氧化损失,立即进行柱前衍生化反应.

1.5.2 巯基化合物标准品的配制

以 0.1% TFA(内含 $6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA)配置一定含量的 Cys、GSH、PC2、PC3 和 PC4 这 5 种巯基化合物母液($0.2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)于 4°C 保存. 以 GSH 为例,用 0.1% TFA(内含 $6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA)将母液稀释成 $1.25 \sim 80 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 的标准系列,立即进行柱前衍生化反应.

1.5.3 衍生试剂的配制及其柱前衍生化反应

用 100% ACN 准确配制 $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ mBBR 衍生化试剂,振荡混匀后避光 4°C 保存,现配现用. 柱前衍生化反应参照 Sneller 等^[20]的研究方法,即向 $250 \mu\text{L}$ 5 种巯基化合物标准液或植物组织上清液中加入 $450 \mu\text{L}$ $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HEPPS(内含 $6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MDTPA, $\text{pH} = 8.2$)和 $10 \mu\text{L}$ $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ mBBR,充分混合, 45°C 反应 30 min 后加入 $300 \mu\text{L}$ $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MSA 终止反应,摇匀,转移至棕色液相色谱进样瓶内, 4°C 保存,直到 HPLC 分析测定. 同时作试剂空白衍生化反应,确定试剂空白杂质峰.

1.5.4 HPLC 检测条件

采用 LC-20 高效液相色谱系统(岛津,中国). 参照 Sneller^[20] 和 Tang 等^[21] 的分离方法和条件,稍作改进. 采用二元的梯度洗脱系统室温下分离 mBBr 衍生物. 荧光检测器条件为 E_x (激发波长):380 nm, E_m (发射波长):470 nm; 流动相 A 为 0.1% 的 TFA, 流动相 B 为 100% ACN; 流速 0.5 mL·min⁻¹; 进样量为 10 μ L; 梯度洗脱程序:12%~25% B(15 min), 25%~35% B(14 min), 35%~50% B(21 min).

1.6 数据处理

所有数据采用 Microsoft Excel 2019 收集汇总, 采用 OriginPro 2016 作图,采用 IBM SPSS Statistics 19 进行相关性分析、单因素方差分析和 Duncan 多重比较.

2 结果与分析

2.1 梯度 Cd 胁迫对籽粒苋 K472 生长发育的影响

不同生长阶段的 K472 株高和根长随着 Cd 处理水平的升高而降低(表 1). 与对照组相比, 3 个阶段的 K472 株高最大降幅分别为 59.6%、23.8% 和 17.3%, 根长最大降幅分别为 49.0%、27.1% 和

20.8%, Cd 对株高及根长的抑制能力随着 K472 的生长而逐渐减弱.

各处理组与对照相比,不同生长阶段的 K472 根、茎和叶生物量随着 Cd 处理水平的升高而下降显著(表 1),各生长阶段根部生物量最大降幅分别为 95%、49.5% 和 38.7%,茎部生物量最大降幅分别为 85.1%、41.4% 和 43.1%,叶片生物量最大降幅分别为 85.0%、58.2% 和 54.1%. 随着 K472 生长,其对 Cd 胁迫的耐受能力逐渐增强. 在同一生长阶段,随着 Cd 处理水平的增大,K472 生物量的降低速率逐渐变小,表明其在高含量 Cd 刺激下具有较强的耐受能力. 与对照相比,各生长阶段 K472 的总生物量在 T5 水平下降最多,降低量分别为 12.25、11.12 和 16.94 g.

2.2 梯度 Cd 胁迫对籽粒苋 K472 富集性能的影响

图 1(a)所示,任一生长阶段的 K472 植株 Cd 含量随着 Cd 处理水平的升高而升高,在 T5 水平达到最大. 3 个生长阶段的 K472 最大 Cd 富集量分别为 1 898.66、6 470.66 和 6 695.35 mg,是对照的 17.9、34.1 和 24.6 倍,表现为营养生长中期 $\approx$ 营养生长后期 > 营养生长初期.

表 1 梯度 Cd 胁迫下不同生长阶段 K472 生长指标变化¹⁾

Table 1 Changes in growth indexes of K472 at different growth stages under gradient cadmium stress							
生长指标	株高/cm	根长/cm	干物质量/g				
			根系	茎部	叶片	总干重	
20 d	CK	57 ± 1.25a	5.1 ± 0.27a	1.40 ± 0.04a	5.45 ± 0.02a	7.45 ± 0.07a	14.30 ± 0.05a
	T1	35 ± 1.70b	3.3 ± 0.16b	0.46 ± 0.03b	1.41 ± 0.02b	2.98 ± 0.06b	4.84 ± 0.08b
	T2	31 ± 1.25bc	3.1 ± 0.18c	0.32 ± 0.01c	0.94 ± 0.02c	1.73 ± 0.04c	2.99 ± 0.02c
	T3	28 ± 0.82bcd	3.0 ± 0.32c	0.16 ± 0.01d	0.87 ± 0.01d	1.48 ± 0.02d	2.51 ± 0.01d
	T4	26 ± 2.45cd	2.7 ± 0.19d	0.15 ± 0.01d	0.85 ± 0.02d	1.15 ± 0.01e	2.15 ± 0.03e
	T5	23 ± 2.16d	2.6 ± 0.18d	0.12 ± 0.01d	0.81 ± 0.01d	1.12 ± 0.02e	2.05 ± 0.03e
40 d	CK	63 ± 2.05a	5.9 ± 0.30a	2.16 ± 0.03a	6.88 ± 0.49a	12.37 ± 0.02a	21.41 ± 0.5a
	T1	57 ± 1.25ab	5.6 ± 1.7b	2.03 ± 0.02b	6.78 ± 0.06a	7.11 ± 0.02b	15.92 ± 0.05b
	T2	53 ± 2.05bc	4.9 ± 0.16d	1.85 ± 0.03c	6.27 ± 0.03b	7.04 ± 0.04b	15.16 ± 0.04b
	T3	61 ± 1.25bc	5.3 ± 0.18c	1.42 ± 0.03d	5.84 ± 0.03b	5.71 ± 0.03c	12.98 ± 0.05c
	T4	57 ± 1.25c	4.4 ± 0.17e	1.16 ± 0.03e	4.22 ± 0.01c	5.32 ± 0.01d	10.69 ± 0.04d
	T5	48 ± 1.70d	4.3 ± 0.21e	1.09 ± 0.01e	4.03 ± 0.07c	5.17 ± 0.06e	10.29 ± 0.05d
60 d	CK	75 ± 2.87a	7.2 ± 0.30a	2.92 ± 0.02a	17.60 ± 0.03a	15.20 ± 0.00a	35.71 ± 0.04a
	T1	70 ± 1.25ab	6.5 ± 0.18b	2.83 ± 0.07a	13.62 ± 0.04b	9.93 ± 0.02b	23.38 ± 0.09b
	T2	64 ± 1.25bc	6.2 ± 0.17c	2.29 ± 0.07b	9.91 ± 0.01d	6.95 ± 0.03c	19.15 ± 0.08c
	T3	67 ± 4.11bc	5.9 ± 0.17d	1.99 ± 0.03c	9.58 ± 0.01e	6.88 ± 0.07c	18.45 ± 0.05d
	T4	62 ± 0.47c	6.5 ± 0.18b	1.77 ± 0.02d	10.16 ± 0.12e	6.89 ± 0.03c	18.81 ± 0.15cd
	T5	63 ± 1.63c	5.7 ± 0.17e	1.79 ± 0.03d	10.01 ± 0.06d	6.97 ± 0.03c	18.77 ± 0.13d

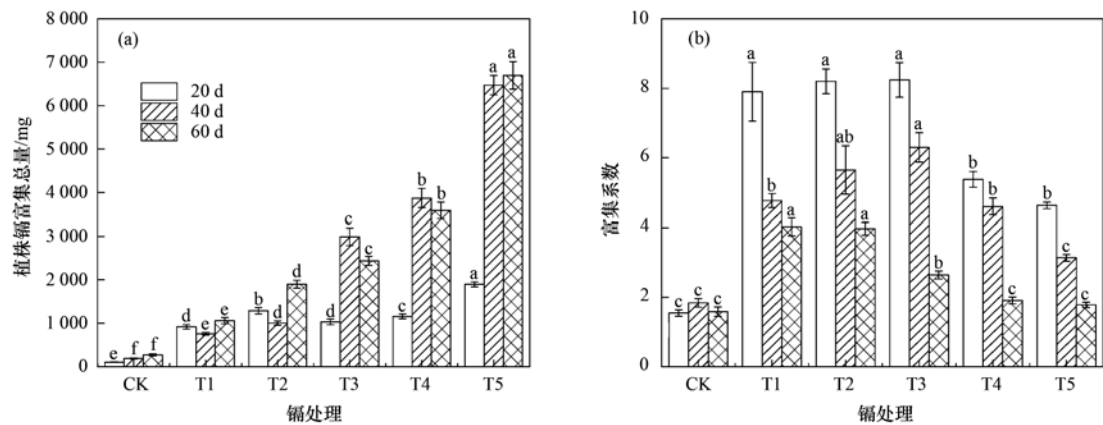
1) 数据为平均值 $\pm$ 标准差,不同小写字母表示各处理组间差异显著($P < 0.05$)

图 1(b)所示,营养生长初期及中期的 K472 富集系数随着 Cd 处理水平的升高先升高再降低,在 T3 水平达到最大. 其中,营养生长初期 K472 的最大富集系数为 8.24,营养生长中期 K472 的最大富集系数为 6.3. 营养生长后期 K472 富集系数随着 Cd 处理水平的升高持续降低, Cd 富集能力显著下降,在此阶段的 K472 进入生殖生长阶段,生理机能减弱.

2.3 梯度 Cd 胁迫对籽粒苋 K472 巯基化合物的影响

2.3.1 籽粒苋 K472 根系中巯基化合物含量的变化特征

图 2 中各处理组间 K472 根系中 5 种巯基化合物含量随着 Cd 处理水平的增加而增加,在 T5 水平达到最大. 如图 2(a) 和图 2(b) 所示,各处理组与对照相比,Cys 和 GSH 含量均有显著增加. 如图 2(c) ~



不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 梯度 Cd 胁迫下不同生长阶段 K472 富集性能变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of cadmium content in different organs of K472 at different growth stages under gradient cadmium stress

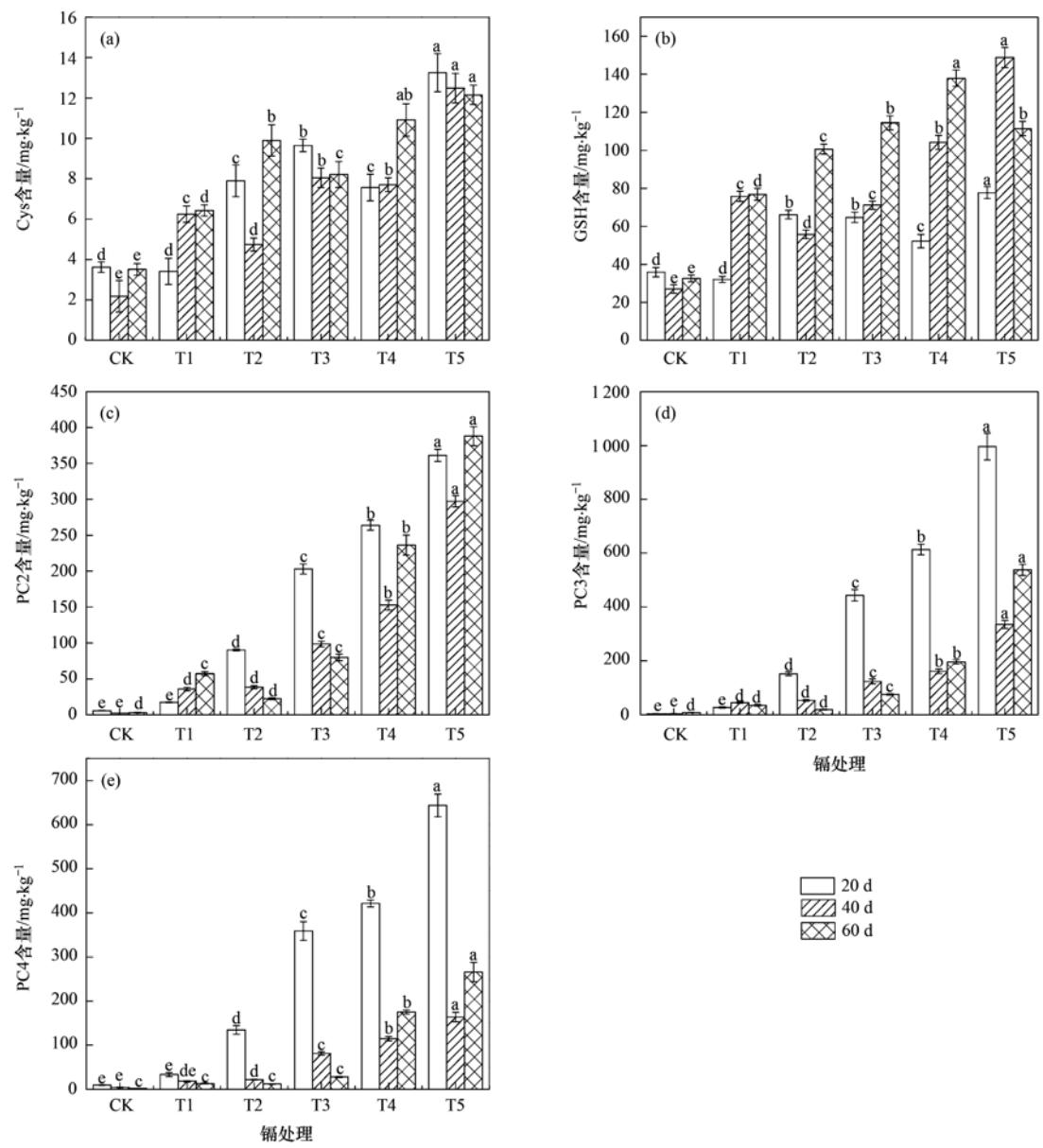


图2 梯度 Cd 胁迫下不同生长阶段 K472 根系巯基化合物含量变化特征

Fig. 2 Variation of thiol compounds in roots of K472 at different growth stages under gradient cadmium stress

2(e)所示,各处理组间 K472 根系中 3 种植物螯合肽 PC2、PC3 和 PC4 含量与 Cd 胁迫水平呈显著正相关。在任一生长阶段, K472 根部 3 种植物螯合肽含量随着 Cd 胁迫含量的增加而递增。在中低 Cd 水平胁迫下,各生长阶段 K472 根部 PC2、PC3 和 PC4 含量表现为营养生长初期 > 营养生长中期 > 营养生长后期; 在高 Cd 水平胁迫下,各生长阶段 K472 根部 PC2、PC3 和 PC4 含量表现为营养生长初期 > 营养生长后期 > 营养生长中期。

2.3.2 籽粒苋 K472 茎中巯基肽含量的变化特征

由图 3(a)可知,在不同 Cd 水平胁迫下,不同生长阶段的 K472 茎部 Cys 含量差异不显著,介于 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 8.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。图 3(b)所示,与对照相比,不同生长阶段的 K472 茎部 GSH 含量随着 Cd

含量的增加先增加再下降。随着 Cd 处理水平的增加,茎部 PC2、PC3 和 PC4 含量显著增加,在 T5 水平达到最大。图 3(c) ~ 3(e)所示,不同处理组间,茎部的 3 种植物螯合肽 PC2、PC3 和 PC4 含量在营养生长初期最高,分别为 207.57 、 314.87 和 $233.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一 Cd 含量胁迫下,各生长阶段叶片中 3 种植物螯合肽含量表现为营养生长初期 > 营养生长后期 > 营养生长中期。

2.3.3 籽粒苋 K472 叶片中巯基肽含量的变化特征

图 4(a)所示,各处理组间, K472 叶片中 Cys 含量显著高于对照。随着 Cd 处理水平的增加, Cys 含量增加缓慢,增至 $21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后维持稳定。图 4(b)所示,各处理组与对照相比,叶片中 GSH 含量差异不显著,处于动态平衡状态。图 4(c) ~ 4(e)所示,在营养

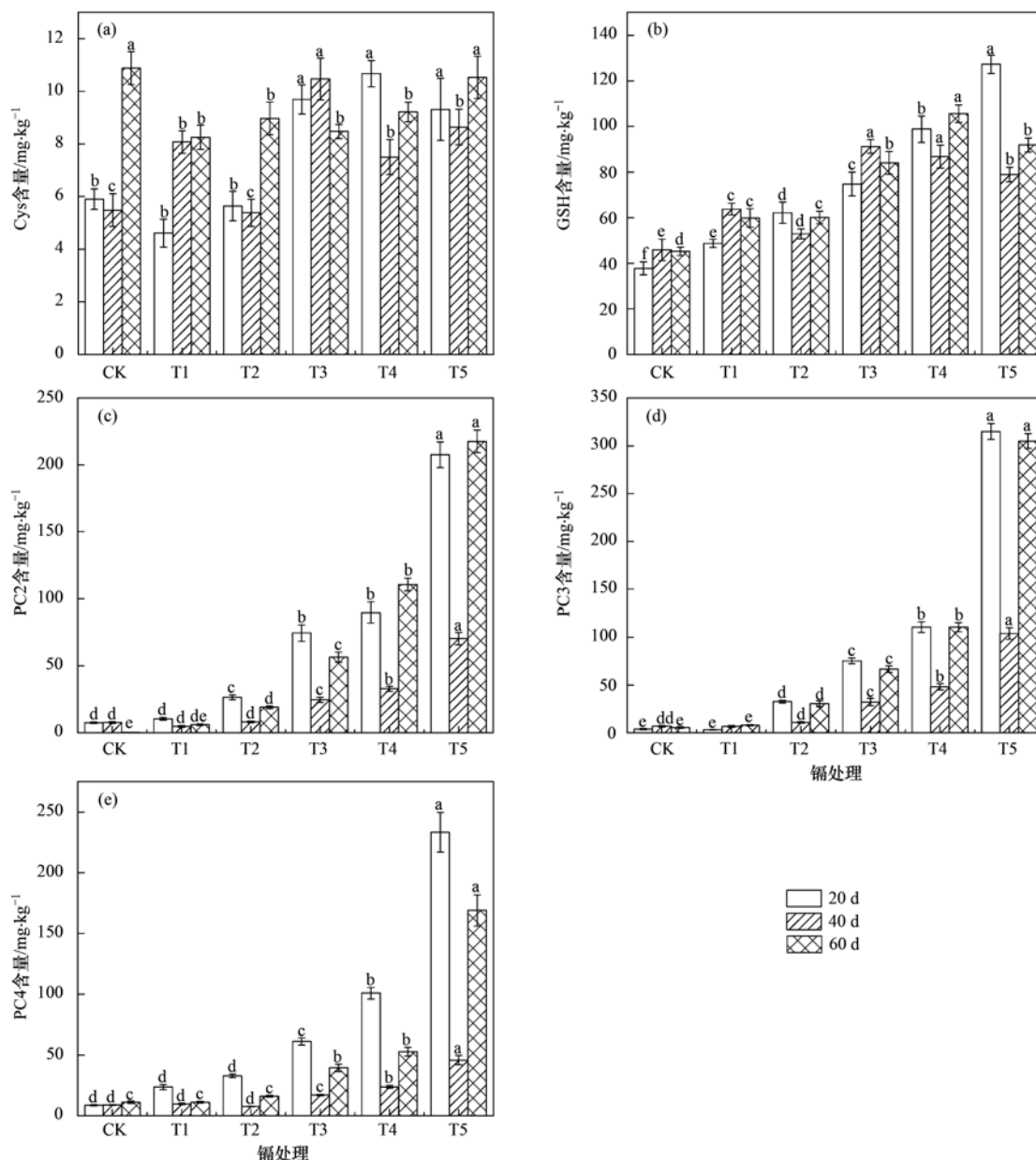


图 3 梯度 Cd 含量刺激下不同生长阶段 K472 茎部巯基化合物含量变化特征

Fig. 3 Variation of thiol compounds in shoots of K472 at different growth stages under gradient cadmium stress

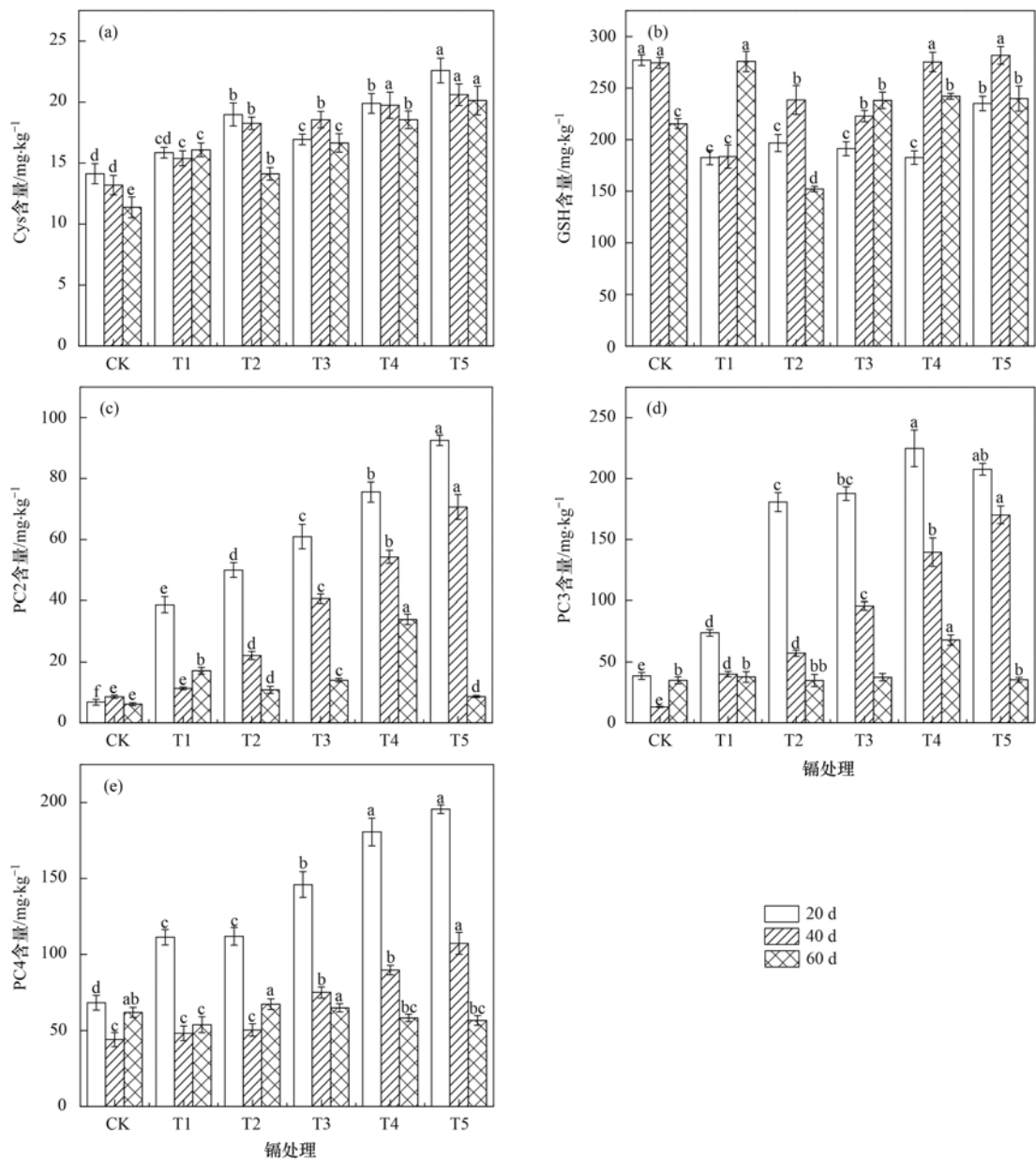


图4 梯度 Cd 含量刺激下不同生长阶段 K472 叶片巯基化合物含量变化特征

Fig. 4 Variation of thiol compounds in leaves of K472 at different growth stages under gradient cadmium concentration

生长初期及中期,叶片中 3 种植物螯合肽含量随着 Cd 处理水平的增加而显著增加,在 T5 水平达到最大,最大增幅为 12.57 倍和 12.01 倍. 在营养生长后期,叶片中 PC2、PC3 和 PC4 含量随着 Cd 处理水平的增加先降低后增加再降低. 在同一 Cd 水平胁迫下,各生长阶段叶片中 3 种植物螯合肽含量表现为营养生长初期 > 营养生长中期 > 营养生长后期.

2.4 籽粒苋 K472 植物螯合肽含量与 Cd 富集量的相关性

由表 2 可知,籽粒苋 K472 根、茎和叶中 3 种植物螯合肽含量与 Cd 积累量在 0.01 水平上显著相关,相关系数分别高达 0.930、0.919 和 0.946; 各器官 PC2、PC3 和 PC4 这 3 种植物螯合肽含量之间呈极显著正相关. 根系、茎部和叶片之间植物螯合肽

含量除茎部 PC2 与叶片中 PC2、PC3 和 PC4 含量不显著相关以外,其余器官之间各植物螯合肽含量均呈显著正相关.

3 讨论

镉对植物生理影响包括生长迟缓、生物量减少、水分平衡受损和光合活性降低等^[22,23]. 镉胁迫对各生长阶段的 K472 的株高、根长、生物量具有明显的抑制作用,呈显著正相关关系,且随着 K472 的生长发育, Cd 对其抑制作用逐渐减弱. 籽粒苋作为西南地区传统牲畜饲料,近年来作为 Cd 超富集植物逐渐被熟知^[24]. K472 对 Cd 具有很强的富集能力,营养生长中期的 K472 富集能力最强,最大 Cd 富集量为 6 695.35 mg,最大富集系数为 6.3.

表 2 籽粒苋 Cd 富集量与各植物螯合肽含量相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between cadmium concentration and thiol compounds content of *A. Hypochondriacus* (K472)

		根				茎				叶			
		Cd	PC2	PC3	PC4	Cd	PC2	PC3	PC4	Cd	PC2	PC3	PC4
根	Cd	1											
	PC2	0.807 **	1										
	PC3	0.930 **	0.883 **	1									
	PC4	0.908 **	0.832 **	0.981 **	1								
茎	Cd	0.869 **	0.865 **	0.919 **	0.912 **	1							
	PC2	0.834 **	0.920 **	0.871 **	0.812 **	0.740 **	1						
	PC3	0.930 **	0.883 **	1.000 **	0.981 **	0.919 **	0.871 **	1					
	PC4	0.914 **	0.848 **	0.940 **	0.890 **	0.794 **	0.949 **	0.940 **	1				
叶	Cd	0.815 **	0.661 **	0.775 **	0.786 **	0.914 **	0.504 *	0.775 **	0.532 *	1			
	PC2	0.738 **	0.633 **	0.744 **	0.793 **	0.889 **	0.436	0.744 **	0.471 *	0.946 **	1		
	PC3	0.646 **	0.588 *	0.710 **	0.773 **	0.876 **	0.377	0.710 **	0.476 *	0.909 **	0.955 **	1	
	PC4	0.740 **	0.549 *	0.792 **	0.851 **	0.842 **	0.459	0.792 **	0.624 **	0.869 **	0.897 **	0.904 **	1

1) **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$

有研究表明,植物在长期进化过程中形成了抗重金属胁迫机制以减少重金属对其的生理伤害,巯基化合物半胱氨酸(Cys)、谷胱甘肽(GSH)和植物螯合肽(PCs)是参与植物螯合及重金属解毒的关键物质^[25].半胱氨酸巯基(—SH)对Cd具有很高的亲和力,Cys是GSH生物合成的主要限制底物,GSH是PCs合成的前体物及自由基清除剂^[26].试验各处理组间,不同生长阶段的K472各器官Cys及GSH含量处于动态平衡状态.随着Cd胁迫含量的增加,诱导Cys的生成,Cys通过直接和间接作用缓解氧化应激,促进GSH和PCs的生物合成,通过螯合作用来实现其调节功能^[27].在营养生长初期,K472根系中Cys及GSH含量最高.在营养生长中期及营养生长后期,K472叶片中Cys及GSH含量最高.这可能是由于在营养生长初期,K472向上转运Cd的能力较弱,致使更多的Cd积累在根系,促使根系产生更多的Cys和GSH以螯合Cd;在营养生长中期及营养生长后期,K472将Cd转运至叶片中,导致Cys和GSH合成大量的PCs,通过螯合作用最终将Cd稳定在液泡中.

其次,相同生长阶段的不同Cd处理组及相同Cd处理下不同生长阶段的K472根、茎和叶中PCs含量均显著高于对照组.试验证实,K472根系及茎部中对Cd胁迫响应最强的植物螯合肽均为PC3,而在叶片中对Cd胁迫响应最强的植物螯合肽为PC2,这与Najmanova等^[28]的研究结果一致.相关性分析结果显示,K472根、茎和叶中3种植物螯合肽含量与其Cd积累量均呈极显著正相关.巯基肽可以在各器官之间进行长距离运输^[29,30],K472根、茎和叶之间植物螯合肽PC2、PC3和PC4含量整体上呈显著正相关关系.植物叶片是Cd最终稳定化存在的场所^[31].K472叶片中3种植物螯合肽对Cd胁迫的

响应强度为PC2 > PC3 > PC4,这表明PC2是参与K472镉螯合的主要巯基化合物.

4 结论

本试验证实,营养生长中期的K472对Cd的富集能力最强,在营养生长中期收获K472可得到更高的修复效率.同时,PC2是参与K472镉螯合的主要巯基化合物,后续研究可以通过调控PC2在叶片中的过量表达来提高K472的Cd富集效率.本研究为K472应用于Cd污染土壤植物修复提供了理论依据,对植物修复技术的实际应用具有一定的指导意义.

参考文献:

[1] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 690-700.

[2] Zeng S Y, Ma J, Yang Y J, *et al.* Spatial assessment of farmland soil pollution and its potential human health risks in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 642-653.

[3] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level [J]. Environmental Pollution, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114961.

[4] Wan X M, Lei M, Chen T B. Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2016, **563-564**: 796-802.

[5] Shah V, Daverey A. Phytoremediation: a multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, **18**, doi: 10.1016/j.eti.2020.100774.

[6] Yadav K K, Gupta N, Kumar A, *et al.* Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: a review on application and future prospects [J]. Ecological Engineering, 2018, **120**: 274-298.

[7] 谷雨, 黄铁平, 唐珍琦, 等. 籽粒苋修复土壤重金属污染研究进展 [J]. 农学学报, 2020, **10**(10): 41-45.

- Gu Y, Huang T P, Tang Z Q, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus*: research progress[J]. Journal of Agriculture, 2020, **10**(10): 41-45.
- [8] 李凝玉, 卢焕萍, 李志安, 等. 籽粒苋对土壤中镉的耐性和积累特征[J]. 应用与环境生物学报, 2010, **16**(1): 28-32.
- Li N Y, Lu H P, Li Z A, *et al.* Tolerance and accumulation of cadmium in soil by *Amaranthus hypochondriacus* L. [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, **16**(1): 28-32.
- [9] 龙玉梅, 刘杰, 傅校锋, 等. 4 种 Cd 超富集/富集植物修复性能的比较[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(8): 296-300.
- Long Y M, Liu J, Fu X F *et al.* Comparative study on remediation performance of 4 kinds of Cd hyperaccumulators[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, **47**(8): 296-300.
- [10] 谷雨, 蒋平, 谭丽, 等. 6 种植物对土壤中镉的富集特性研究[J]. 中国农学通报, 2019, **35**(30): 119-123.
- Gu Y, Jiang P, Tan L, *et al.* Enrichment characteristics of cadmium by six plants in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, **35**(30): 119-123.
- [11] Xie M D, Chen W Q, Lai X C, *et al.* Metabolic responses and their correlations with phytochelatin in *Amaranthus hypochondriacus* under cadmium stress [J]. Environmental Pollution, 2019, **252**: 1791-1800.
- [12] Krzeslowska M, Rabęda I, Basińska A, *et al.* Pectinous cell wall thickenings formation-a common defense strategy of plants to cope with Pb[J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 354-361.
- [13] Yadav S K. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatin in heavy metal stress tolerance of plants[J]. South African Journal of Botany, 2010, **76**(2): 167-179.
- [14] Adamis P D B, Panek A D, Eleutherio E C A. Vacuolar compartmentation of the cadmium-glutathione complex protects *Saccharomyces cerevisiae* from mutagenesis [J]. Toxicology Letters, 2007, **173**(1): 1-7.
- [15] Pettersson O. Heavy-metal ion uptake by plants from nutrient solutions with metal ion, plant species and growth period variations[J]. Plant and Soil, 1976, **45**(2): 445-459.
- [16] Bartoli F, Coinchelin D, Robin C, *et al.* Impact of active transport and transpiration on nickel and cadmium accumulation in the leaves of the Ni-hyperaccumulator *Leptoplax emarginata*: a biophysical approach[J]. Plant and Soil, 2012, **350**(1): 99-115.
- [17] Hattab S, Dridi B, Chouba L, *et al.* Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(11): 1552-1556.
- [18] D'Alessandro A, Taamalli M, Gevi F, *et al.* Cadmium stress responses in *Brassica juncea*: hints from proteomics and metabolomics [J]. Journal of Proteome Research, 2013, **12**(11): 4979-4997.
- [19] Xie M D, Dai H B, Liu J X, *et al.* Metabolomics reveals the "Invisible" detoxification mechanisms of *Amaranthus hypochondriacus* at three ages upon exposure to different levels of cadmium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110520.
- [20] Sneller F E C, van Heerwaarden L M, Koevoets P L M, *et al.* Derivatization of phytochelatin from *Silene vulgaris*, induced upon exposure to arsenate and cadmium: comparison of derivatization with Ellman's reagent and monobromobimane[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, **48**(9): 4014-4019.
- [21] Tang D G, Shafer M M, Vang K, *et al.* Determination of dissolved thiols using solid-phase extraction and liquid chromatographic determination of fluorescently derivatized thiolic compounds[J]. Journal of Chromatography A, 2003, **998**(1-2): 31-40.
- [22] Genisel M, Erdal S, Kizilkaya M. The mitigating effect of cysteine on growth inhibition in salt-stressed barley seeds is related to its own reducing capacity rather than its effects on antioxidant system[J]. Plant Growth Regulation, 2015, **75**(1): 187-197.
- [23] Khan Y K, Ali B, Stoffella P J, *et al.* Study amino acid contents, plant growth variables and cell ultrastructural changes induced by cadmium stress between two contrasting cadmium accumulating cultivars of *Brassica rapa* ssp. *chinensis* L. (pak choi) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **200**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110748.
- [24] Yuan M, He H D, Xiao L, *et al.* Enhancement of Cd phytoextraction by two *Amaranthus* species with endophytic *Rhizobium* sp. JN27 [J]. Chemosphere, 2014, **103**(5): 99-104.
- [25] 杨红霞, 陈俊良, 刘葳. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(2): 1-8.
- Yang H X, Chen J L, Liu W. Research progress on cadmium toxicity and detoxification mechanism in plants [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, **47**(2): 1-8.
- [26] Jozefczak M, Keunen E, Schat H, *et al.* Differential response of *Arabidopsis* leaves and roots to cadmium: glutathione-related chelating capacity vs antioxidant capacity [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, **83**: 1-9.
- [27] Erdal S, Turk H. Cysteine-induced upregulation of nitrogen metabolism-related genes and enzyme activities enhance tolerance of maize seedlings to cadmium stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **132**: 92-99.
- [28] Najmanova J, Neumannova E, Leonhardt T, *et al.* Cadmium-induced production of phytochelatin and speciation of intracellular cadmium in organs of *Linum usitatissimum* seedlings [J]. Industrial Crops and Products, 2012, **36**(1): 536-542.
- [29] Chen A, Komives E A, Schroeder J I. An improved grafting technique for mature arabidopsis plants demonstrates long-distance shoot-to-root transport of phytochelatin in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2006, **141**(1): 108-120.
- [30] Gong J M, Lee D A, Schroeder J I. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatin and cadmium in *Arabidopsis* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, **100**(17): 10118-10123.
- [31] Rosén K, Eriksson J, Vinichuk M. Uptake and translocation of ¹⁰⁹Cd and stable Cd within tobacco plants (*Nicotiana sylvestris*) [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, **113**: 16-20.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)