

韩航, 陈雪娇, 侯晓龙, 等. Cd胁迫对类芦生长及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 647-653.

HAN Hang, CHEN Xue-jiao, HOU Xiao-long, et al. Effects of cadmium stresses on growth and antioxidant activities of *Neyraudia reynaudiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 647-653.

Cd胁迫对类芦生长及酶活性的影响

韩航, 陈雪娇, 侯晓龙*, 刘爱琴, 蔡丽平, 周垂帆, 马祥庆

(福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要:以类芦为材料,测定不同Cd胁迫浓度下类芦相关形态生理指标,探讨类芦在Cd污染矿区正常生长的响应机制。结果表明:低Cd浓度处理对类芦分蘖数、叶片数、株高、最大叶长有一定促进作用,随Cd浓度的增加,抑制作用逐渐增强;Cd胁迫对类芦根长和表面积有显著抑制作用,但对根平均直径($Cd \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和根体积($Cd \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)有显著促进作用;Cd胁迫下类芦抗氧化酶活性下降,MDA含量升高,根系和地上部分生物量等指标均逐渐减小,阻碍了类芦的生长;不同Cd浓度胁迫下类芦根系及地上部分Cd含量逐渐增加,且转运系数大于1,对Cd具有一定富集能力。研究表明,Cd胁迫会抑制抗氧化酶活性等阻碍类芦正常生长,类芦通过调整生长格局、提高根系平均直径和表面积、刺激地上部分富集转运能力来适应Cd胁迫。

关键词:类芦;镉胁迫;形态响应;酶活性;吸收

中图分类号:X503.23 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0647-07 doi:10.11654/jaes.2016.04.006

Effects of cadmium stresses on growth and antioxidant activities of *Neyraudia reynaudiana*

HAN Hang, CHEN Xue-jiao, HOU Xiao-long*, LIU Ai-qin, CAI Li-ping, ZHOU Chui-fan, MA Xiang-qing

(Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: *Neyraudia reynaudiana* is a hard plant that can grow in poor soil, even in heavy metal polluted soils. Here we examined physiological indexes of *N. reynaudiana* under different Cd stresses and discussed the response mechanisms of *N. reynaudiana* growth in Cd-polluted mining area. Low Cd concentrations had certain promotional effects on the number of tiller and leaf, the plant height and the maximum leaf length. However, increasing Cd concentrations caused inhibitory effects on plant. The length and surface area of *N. reynaudiana* roots were significantly inhibited even at low Cd stresses. However, the average diameter and volume of the roots were promoted by $\leq 100 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $\leq 50 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Cadmium stresses reduced antioxidant activity, but increased MDA content of *N. reynaudiana*. Cadmium content gradually increased in the roots and aboveground parts of *N. reynaudiana* under different Cd stresses. Transfer coefficient of Cd was greater than one, indicating the accumulation ability of Cd by the plant. These findings indicate that Cd stresses inhibit the activity of antioxidant enzymes, resulting in the decreases in the growth of *N. reynaudiana*; however, *N. reynaudiana* could adapt the Cd stresses through adjusting the growth pattern, increasing root diameter and surface area and stimulating the transportation capacity of Cd to the aboveground.

Keywords: *Neyraudia reynaudiana*; cadmium stress; phytoremediation; antioxidant activity; uptake

收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02);国家自然科学基金项目(41401364);国家林业局林业公益性行业科研项目(201304303);农业高校产学研合作科技重大项目(2013N5002);福建农林大学林学院青年基金项目(6112C039J);福建省自然科学基金项目(2013J01073)

作者简介:韩航(1993—),男,安徽桐城人,硕士研究生,从事生态修复方面的研究。E-mail:1198011986@qq.com

*通信作者:侯晓龙 E-mail:xlhou@fafu.edu.cn

福建省长汀县稀土矿是我国南方典型的离子型稀土矿,长期以来稀土开采造成矿区及周边土壤重金属污染严重,生态环境恶化,一般植物无法生长^[1-3]。研究表明,土壤酸化和重金属污染会限制稀土矿废弃地的生态恢复^[4]。本课题组前期研究发现,重金属镉是长汀稀土矿废弃地主要的重金属污染元素之一^[5],类芦(*Neyraudia reynaudiana*)可在稀土矿废弃地正常生长,且可保持较大的生物量^[6],在稀土矿废弃地治理中有一定潜力。类芦可适应Cd污染较为严重的逆境条件,其中可能存在特殊的适应机制。

类芦是多年生具木质根状茎草本植物,具有耐干旱贫瘠、根系发达等特点,是一种水土保持的先锋植物,在南方水土流失治理中有广泛应用^[7]。近年来,国内外学者在类芦对环境逆境胁迫的响应方面开展了研究,蔡丽平等^[8]研究发现,类芦对干旱有较好的耐性,其一方面会通过叶片数、最大叶宽和分蘖数的增加及最大叶长的减小来减少水分的蒸发速率,另一方面会通过CO₂浓度、叶绿素、MDA及相对电导率的增加来提高水分利用率。戴文娇等^[9]发现,类芦对Pb有较强的耐性,对土壤铅耐受浓度可达800 mg·kg⁻¹,随胁迫浓度增加,出现中毒症状,但仍能存活。重金属胁迫下的植物会表现为叶形变小或者枯黄、叶片伤斑增多、节间变短、枯梢明显、小枝丛生、树冠发育差、年生长量减少,同时对植物生理也有很大影响^[4,10-12]。正常情况下,植物体内有完善的清除活性氧的防卫系统,在重金属胁迫下,活性氧代谢失衡,对植物造成毒害^[13]。但耐性植物对环境逆境可表现出特殊的适应机制,通过形态改变、调整转运重金属在体内位置,降低毒害来适应胁迫^[14-16],揭示植物对逆境胁迫的响应机制,对挖掘其环境修复潜力具有重要现实意义。目前有关类芦对土壤重金属Cd胁迫的研究还较少,特别是类芦对Cd胁迫的形态响应尚不清楚。

本文通过类芦室内土培胁迫试验,设计不同Cd胁迫浓度处理,测定不同Cd胁迫条件下类芦的地上部分、根系形态、酶活性和生物量等生长指标,分析类芦对Cd的富集和转运能力,探讨类芦对Cd胁迫的响应策略,以期为稀土矿废弃地的植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料和处理

类芦种子选自深圳鑫森森种子。种子进行预处理后,用蒸馏水浸泡24 h,播入盆中,待发芽后,每

隔7 d浇一次100 mL的Hoagland营养液。选取长势一致和根系完整的类芦植株,在株高12 cm左右进行盆栽试验。培养盆中基质为3:1的洗净河沙和黄心土,一盆一苗,缓苗14 d后进行胁迫实验。共设4组镉胁迫处理: Cd-0 mg·kg⁻¹、Cd-25 mg·kg⁻¹、Cd-50 mg·kg⁻¹、Cd-100 mg·kg⁻¹ (分别对应图表中Cd0、Cd25、Cd50、Cd100),每个浓度5个重复。采用CdCl₂·2.5H₂O配成对应浓度溶液,胁迫前一次性施加。

1.2 测试指标和方法

1.2.1 根系形态

在处理150 d收获类芦,对其根系进行图像扫描(数字化扫描仪STD1600 Epson USA)。根系形态、根长指标等使用WinRhizo(Version 4.0B)根系分析系统软件(Regent Instruments Inc, Canada)进行分析。

1.2.2 地上形态

每隔30 d测量类芦株高、叶片长度、分蘖数、叶片数等指标。叶片宽度用卷尺测量,株高为分蘖节到拉直后最长叶尖距离,叶片长度以叶身计算(不含叶鞘)。

1.2.3 生物量

类芦收获后洗净尘土放入烘箱,105℃杀青30 min,70~80℃烘至恒重,百分之一天平称量其生物量。

1.2.4 抗氧化酶

超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑法;过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定。

1.2.5 丙二醛

丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定。

1.2.6 镉含量

类芦样品粉碎后,采用HNO₃-HClO₄消解,1% HNO₃处理并定容后,使用SolaarM6火焰原子吸收分光光度法(AAS)测定Cd含量。

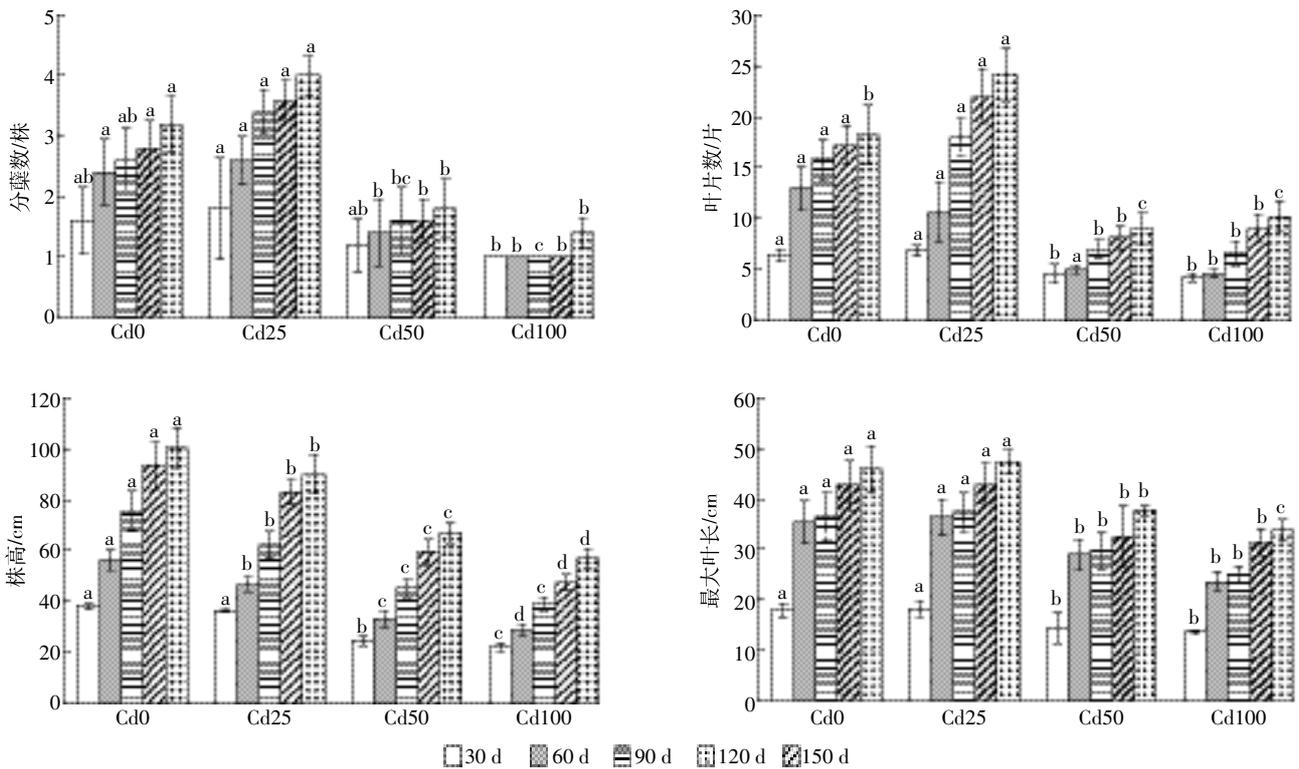
1.2.7 数据处理

统计分析使用单因子方差分析、相关性方法SPSS 19.0,数据均为5次重复实验数据的平均值±标准差,不同小写英文字母表示处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 镉胁迫下类芦生长指标变化趋势

由图1可知,Cd25处理下,除株高外,对类芦不同生长时期的各生长指标均有一定的促进效应;随Cd胁迫浓度的增加,类芦的分蘖数和叶片数抑制作



相同处理时间下不同小写字母表示不同胁迫浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 不同浓度镉胁迫下类芦的生长指标

Figure 1 Growth index of *Neyraudia reynaudiana* under Cd stresses

用明显,但 Cd50 和 Cd100 处理下无显著差异($P < 0.05$),说明在土壤 Cd 浓度达到一定高度后,对类芦的分蘖数和叶片数抑制作用逐渐减弱。类芦株高和最大叶长在 Cd50 和 Cd100 处理下显著小于 Cd0 和 Cd25 处理,说明对株高和叶长的抑制作用显著($P < 0.05$)。

2.2 镉胁迫对类芦根系的影响

由图 2 可知,Cd 胁迫对类芦根表面积和根长有显著抑制作用($P < 0.05$),且随 Cd 浓度的增大,抑制作用更为明显;低 Cd 浓度处理($25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对类芦根体积和平均直径有显著促进作用($P < 0.05$),且 Cd 浓度增大,对根平均直径的促进作用明显,说明类芦可能通过根系直径的增大来适应高浓度 Cd 胁迫环境。

2.3 镉胁迫对类芦生物量及其分配的影响

由图 3 可知,Cd 胁迫对类芦地上部分和整株生物量均有显著抑制作用($P < 0.05$),且随 Cd 浓度的增大,抑制作用更为明显。Cd 浓度大于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后,地上部分生物量无显著差异($P < 0.05$),说明高浓度 Cd 胁迫条件下,类芦地上部分生物量抑制作用有减弱趋势;低 Cd 浓度($25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对类芦根系生物量无显著影响,但随 Cd 浓度的增大,抑制作用显著($P <$

0.05)。根冠比表现为先增大后减小的规律,说明随镉胁迫增加,地上部分分配的生物量增加,可能是通过将 Cd 转移至地上部而减轻其对根系的危害。

2.4 镉胁迫对类芦抗氧化酶和丙二醛的影响

由图 4 可知,类芦抗氧化酶系统中 SOD、POD、CAT 活性在 Cd 胁迫下基本呈下降趋势,且两两之间差异显著。MDA 含量随 Cd 浓度增加而显著增长,其在 Cd100 处理组达到最大值,比对照组增长了 72.3%。

2.5 镉胁迫对类芦体内镉含量的影响

由图 5 可知,类芦在不同浓度 Cd 胁迫处理下,根系和地上部 Cd 含量均显著大于对照($P < 0.05$),根系中 Cd 含量比对照分别增长了 640.5%、1 639.2%、1 294.6%,地上部分别增长了 1 487.2%、2 587.4%、3 006.3%,说明类芦对 Cd 有强的富集能力;类芦根系富集能力在 Cd50 处理下达到最大值 $12.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,地上部在 Cd100 处理下达到最大值 $29.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各胁迫浓度下生物转运系数均大于 1(转运系数=地上部 Cd 含量/地下部 Cd 含量),说明类芦对 Cd 有较强的转运能力,具有一定的修复潜力。

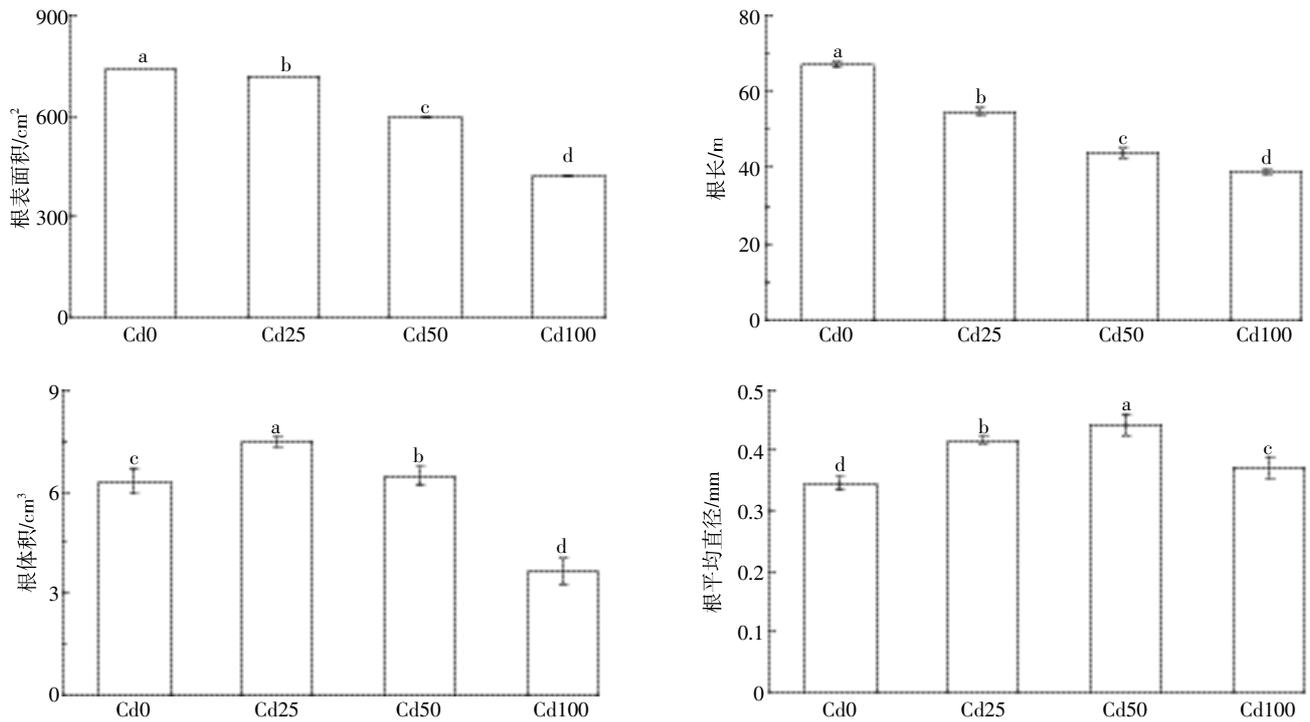


图 2 不同浓度镉胁迫下类芦根系形态变化

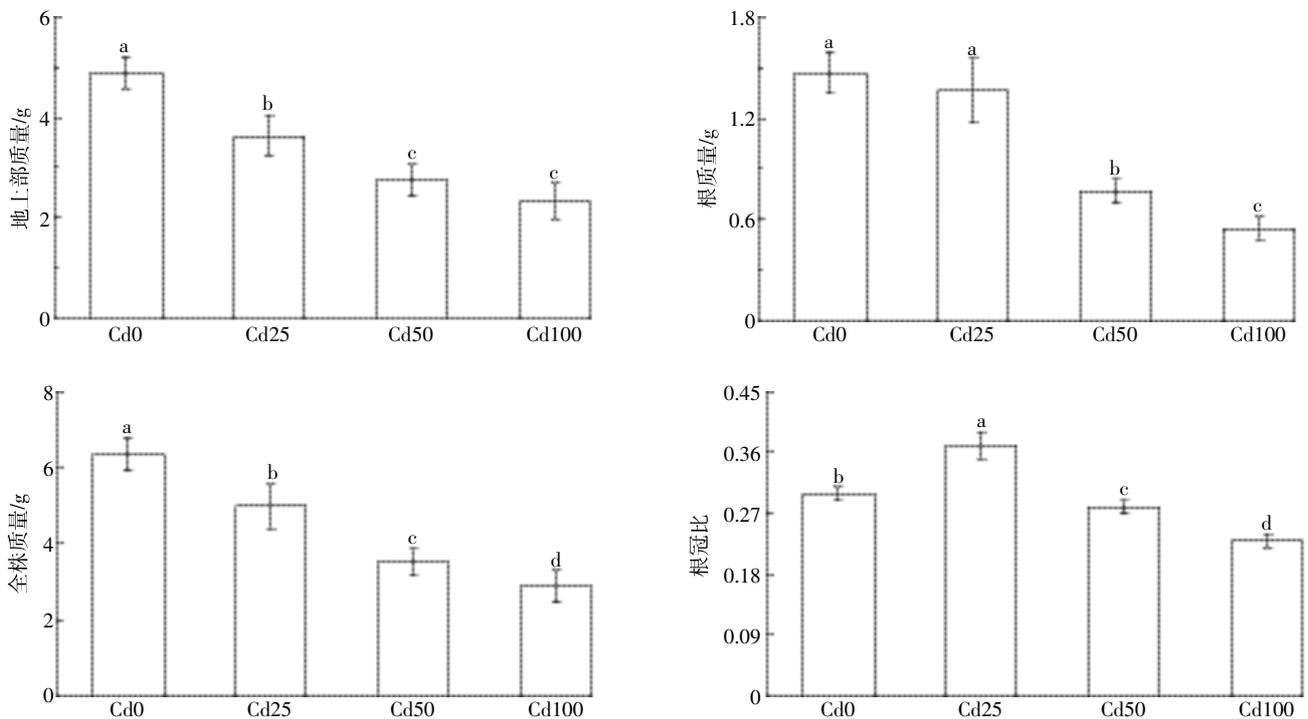
Figure 2 Root morphology of *Neyraudia reynaudiana* under Cd stresses

图 3 不同浓度镉胁迫处理对类芦生物量的影响

Figure 3 Biomass of *Neyraudia reynaudiana* under Cd stresses

2.6 镉胁迫下类芦相关形态指标、酶活性以及重金属含量相关性分析

通过 SPSS19.0 软件对类芦根系(根表面积、根

长、根体积、根平均直径)、抗氧化酶活性(POD、SOD、CAT 活性)、MDA 含量以及类芦体内镉含量数据进行 Pearson 相关性分析,结果表明:根长、根表面积、

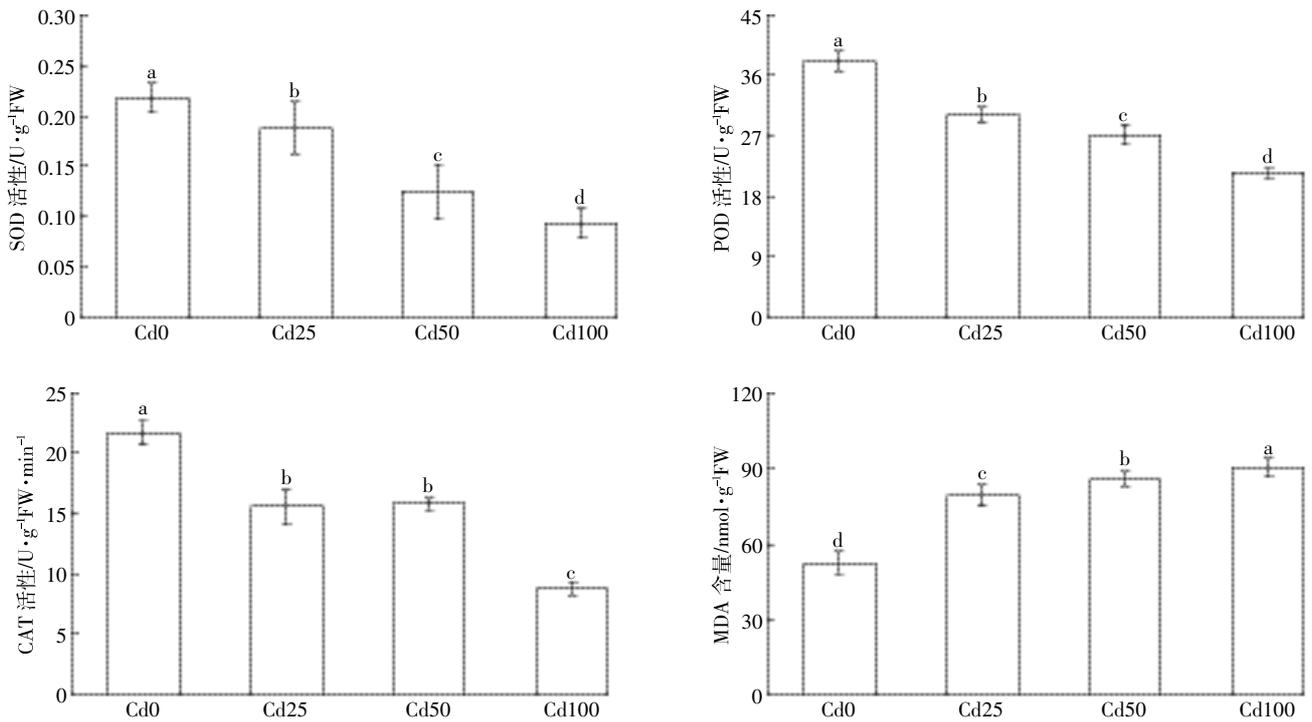


图4 不同浓度镉胁迫处理对类芦抗氧化酶及丙二醛的影响

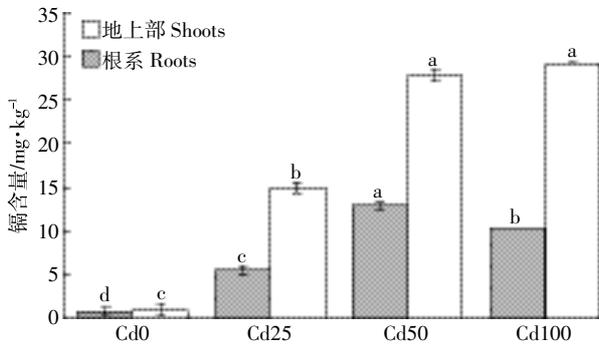
Figure 4 Effects of Cd stresses on antioxidant enzymes and MDA content of *Neyraudia reynaudiana*

图5 不同浓度 Cd 胁迫下类芦植株镉含量

Figure 5 Concentrations of Cd in shoots and roots of *Neyraudia reynaudiana* under Cd stresses

POD、SOD、CAT 分别与根系重金属含量、地上部分重金属含量互为极显著负相关;根平均直径与根系重金属含量、地上部分重金属含量呈极显著正相关;根长、根表面积分别与 POD、SOD、CAT 活性互为极显著正相关。

3 讨论

镉是毒性最强的重金属元素之一,镉胁迫下植物细胞和植株生长受到强烈抑制,生物量下降,干物质减轻,叶片变黄出现死斑^[17-18],同时植物体内蛋白质及

生物大分子发生变性、细胞膜脂过氧化严重,活性氧代谢失衡,酶活性降低,产生大量过氧化物MDA,对植物生长造成过氧化伤害甚至致其死亡^[11,18-19]。本文中类芦受重金属 Cd 胁迫后,体内抗氧化酶系统受到显著抑制,POD、CAT、SOD 活性大幅下降,MDA 含量显著上升,类芦生长受到一定阻碍,与前人的研究结论基本一致^[20-22]。

长汀类芦能够在 Cd 污染环境正常生长,并保持较高的生物量,说明类芦可能对重金属 Cd 有特殊的适应机制。研究表明,逆境胁迫下植物可通过改变生物量分布布局来维持生存^[23]。类芦在干旱胁迫下,根系总长度、根表面积、根冠比等相应增大来汲取更多水分维持生存。根系作为植物和土壤联系界面,会敏感捕捉土壤环境变化,及时产生化学信号传递给植物器官,进行各器官形态建构和生理调整来适应变化^[8]。从本文中类芦生长来看,低浓度 Cd 胁迫下,改变自身形态指标,会刺激类芦地上部分生长,增加分蘖数、叶片数等来适应胁迫,增强生存能力。类芦根系在高浓度(Cd50、Cd100)胁迫下,根生物量和根长大幅降低,全株生物量整体下降,干物质减轻,但根表面积相对稳定发育,根平均直径和根体积有所增大,增强了对重金属的吸收转运能力,将 Cd 转移至地上部,造

成地上部Cd含量远大于地下部,从而减轻重金属对植物的伤害。另外,通过对类芦数据相关性分析可得,Cd胁迫下类芦根系生长受到部分抑制,体内酶活性随之下降,但根平均直径的增长、根体积的稳定,一定程度刺激了根系和地上部吸收转运Cd的能力。这可能是类芦适应逆境生存的特殊机制之一。此外,类芦在Cd100处理时地上部Cd含量最大值为 $29.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,虽未达到Cd超富集植物标准,但类芦生物量较大,每平方米生物量可达 $410\text{ g}^{[9]}$,在不同浓度胁迫下其生物转运系数均大于1,因而具有较好的迁移能力和修复潜力。类芦在废弃矿污染区大面积种植,除修复生态环境作用,还有中药药用植物解毒利湿功能的经济价值,作为南方治理水土流失、固土保水的先锋植物,其在福建水土流失严重和部分重金属污染重叠区具有一举两得的作用。

本文对类芦胁迫下细胞超微结构变化和叶绿素等指标研究还有所不足,进一步论证类芦在复杂环境下的修复效果,改善生长环境和其他诱导强化条件来提高对重金属离子的吸收能力和植株生物量,强化其适应胁迫和吸收重金属能力,服务于重金属污染区修复工作,具有重要意义。

4 结论

类芦在Cd胁迫下,体内SOD、POD、CAT等活性受抑制,抗氧化系统失衡,产生MDA等有害物质,抑制植物生长。低浓度Cd胁迫对类芦分蘖数、叶片数、根平均直径等有一定促进作用,对类芦根体积和平均直径有显著促进作用($P<0.05$)。随Cd胁迫浓度的升高,类芦分蘖数、叶片数、最大叶长、根长等抑制作用明显,但趋势较缓,表现出对Cd胁迫逐步适应的趋势;对根平均直径的促进作用明显,说明类芦可能通过调整自身生长格局及生物量分配,增大根系直径、根体积等方式来适应高浓度Cd胁迫环境。整体来看,类芦在不同Cd浓度胁迫下转运系数均大于1,且生物量较高,可作为修复重金属Cd污染地区的潜力植物。

参考文献:

- [1] 潘攀,杨俊诚,邓仕槐,等.土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2389-2398.
PAN Pan, YANG Jun-cheng, DENG Shi-huai, et al. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2011, 30(12):2389-2398.
- [2] 王焕校.污染生态学[M].北京:高等教育出版社,2002:97-98.
WANG Huan-xiao. *Pollution ecology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:97-98.
- [3] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等.重金属污染评价办法(TCLP)评价资江流域土壤重金属生态风险[J].环境化学,2011,30(9):1582-1589.
LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, et al. Assessment of ecological risks of heavy metal contaminated soils in Zijiang River region by toxicity characteristic leaching procedure [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(9):1582-1589.
- [4] Gill S S, Khan N A, Tuteja N. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.)[J]. *Plant Science*, 2012, 182:112-120.
- [5] 王友生,吴鹏飞,侯晓龙,等.稀土矿废弃地不同植被恢复模式对土壤肥力的影响[J].生态环境学报,2015,24(11):1831-1836.
WANG You-sheng, WU Peng-fei, HOU Xiao-long, et al. Effect of different revegetation model on soil properties in abandon mine area of rare earth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(11):1831-1836.
- [6] 孙发政,胡荣,张艺东,等.类芦在岩壁上生长的机理及其应用评价[J].中国水土保持,2004(7):18-20.
SUN Fa-zheng, HU Rong, ZHANG Yi-dong, et al. The evaluation mechanism and application of Burma reed on the growth[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(7):18-20.
- [7] 王友生,侯晓龙,吴鹏飞,等.长汀稀土矿废弃地土壤重金属污染特征及其评价[J].安全与环境学报,2014(4):472-477.
WANG You-sheng, HOU Xiao-long, WU Peng-fei, et al. Analysis of the characteristics and the evaluation of heavy metal pollutions in the deserted land area left over by the rare earth mining in Changting, Fujian[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014(4):472-477.
- [8] 蔡丽平,吴鹏飞,侯晓龙,等.干旱胁迫对水土保持先锋植物类芦光合特性的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):237-241.
CAI Li-ping, WU Peng-fei, HOU Xiao-long, et al. Effect of drought stress on the photosynthetic characteristics of the pioneer plant of soil and water conservation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):237-241.
- [9] 戴文娇,宁平,刘晓海,等.类芦对铅的耐性及富集能力探讨[J].环境工程学报,2008,2(7):1004-1008.
DAI Wen-jiao, NING Ping, LIU Xiao-hai, et al. Tolerance and accumulation of *Neyraudia reynaudiana* for Pb[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(7):1004-1008.
- [10] Qadir S, Hameed A, Nisa N, et al. Brassicas: Responses and tolerance to heavy metal stress[J]. *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes*, 2014. doi:10.1007/1978-1-4614-8824-8-1.
- [11] Peng H, Kroneck P M H, Kupper H. Toxicity and deficiency of copper in *Elsholtzia splendens* affect photosynthesis biophysics, pigments and metal accumulation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12):6120-6128.
- [12] Islam E, Liu D, Li T Q, et al. Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3):914-926.

- [13] Dias M C, Monterio C, Santos C. Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels[J]. *Acta Physiol Plant*, 2013, 35(4):1281-1289.
- [14] 王涵, 高树芳, 罗丹, 等. Cd Pb 污染土壤中蛋白酶酸性磷酸酶脱氢酶活性的变化[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):500-505.
WANG Han, GAO Shu-fang, LUO Dan, et al. Changes of protease, acid phosphomonoesterase and dehydrogenase activities in Cd-Pb polluted agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):500-505.
- [15] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):17-20.
LI Zi-fang, LIU Hui-fen, XIONG Xiao-xia, et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):17-20.
- [16] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3):497-504.
SUN Rui-lian, ZHOU Qi-xing. Ecological characteristics of cadmium-hyperaccumulators and their mechanism analysis of pollution endurance[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3):497-504.
- [17] Wu C L, Cao F L, Ding Y J, et al. Effect of pH on seed germination and seedling growth of *Glycyrrhiza uralensis*[J]. *Medicinal Plant*, 2011, 2(3):10-12, 16.
- [18] Gattido F, Illera V, Campbell C G, et al. Regulating the mobility of Cd, Cu and Pb in an acid soil with amendments of phosphogypsum, sugar foam, and phosphoric rock[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(2):95-105.
- [19] 杨建伟, 杜瑞卿, 沙文沛, 等. 土壤 Pb 含量对杨树幼苗生理生长影响的综合因素分析[J]. 林业科学, 2015, 51(11):129-136.
YANG Jian-wei, DU Rui-qing, SHA Wen-pei, et al. Analysis on the influence of soil Pb content on physiological growth of poplar seedlings[J]. *Forest Science*, 2015, 51(11):129-136.
- [20] 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累积性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1):48-53.
ZHAO Yang-di, PAN Yuan-zhi, LIU Bi-ying, et al. *Pilea cadierei* Gagnep. et guills growth and accumulation under single and combined pollution of Cd and Pb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1):48-53.
- [21] Cho Y S, Bolick J A, Butcher D J. Phytoremediation of lead with green onions(*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns(*Pteris cretica* cv *Mayii*)[J]. *Microchemical Journal*, 2009, 91(1):6-8.
- [22] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 等. 铅、锌及其交互作用对鱼腥草(*Houttuynia cordata*)叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5441-5445.
LI Zheng-zheng, WU Jun, TANG Ya, et al. Effect of Pb, Zn and their interactions on the chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Houttuynia cordata* thumb[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5441-5445.
- [23] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. 生态学报, 2009, 29(10):5407-5416.
LI Fang-lan, BAO Wei-kai, WU Ning. Morphological and physiological responses of current *Sophora davidii* seedlings to drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5407-5416.