

土壤镉对龙牙百合生长过程中生理生化特性的影响

吴家萌, 黄雅媛, 把德功, 王薪琪, 覃思, 邓玉玲, 雍志标, 雷鸣

引用本文:

吴家萌, 黄雅媛, 把德功, 王薪琪, 覃思, 邓玉玲, 雍志标, 雷鸣. 土壤镉对龙牙百合生长过程中生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 983-990.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0594>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究

郭堤, 管伟豆, 张洋, 刘翔宇, 李一曼, 张增强

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2151-2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1028>

镉胁迫对桑树生理指标及富集转运特征的影响

耿丽莎, 杨再福, 许志楠, 舒文君, 朱彤

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1667-1674 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0030>

阿特拉津胁迫下外源磷对香蒲磷吸收和抗氧化酶系统的影响

武淑文, 侯磊, 洪子萌, 范黎明, 叶敏

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 844-851 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1075>

屎肠球菌胞外多糖对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

罗晟, 赵泽文, 任新宇, 魏宏宇, 马雅静, 潘起涛, 李荣同, 龚国胜, 程新

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1888-1899 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0181>

巨大芽孢杆菌与柠檬酸联合强化青茭修复镉污染土壤研究

张冰, 刘杰, 蒋萍萍, 蒋旭升, 丁志凡, 程艳, 雷玲

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 552-561 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴家萌, 黄雅媛, 把德功, 等. 土壤镉对龙牙百合生长过程中生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 983–990.
WU J M, HUANG Y Y, BA D G, et al. Effects of soil cadmium on physiological and biochemical characteristics of *Lilium brownii* var. *viridulum* during its growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 983–990.



开放科学 OSID

土壤镉对龙牙百合生长过程中生理生化特性的影响

吴家萌¹, 黄雅媛¹, 把德功¹, 王薪琪¹, 覃思², 邓玉玲³, 雍志标³, 雷鸣^{1*}

(1. 湖南农业大学环境与生态学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学食品科学技术学院, 长沙 410128; 3. 湖南山水青杨环保科技有限公司, 长沙 410000)

摘要:为探究土壤不同含量Cd对龙牙百合生长及其生理生化指标的影响,设置对照(无Cd)、低(0.86 mg·kg⁻¹)、中(2.16 mg·kg⁻¹)、高(4.76 mg·kg⁻¹)Cd含量的盆栽实验进行研究。结果表明:随着土壤Cd含量的增加,龙牙百合植株的生长量和叶片中叶绿素含量呈上升趋势;龙牙百合各部位Cd含量分布为下盘根>叶>地上茎>地下茎>上盘根>鳞茎,各处理下鳞茎Cd含量最低,最安全。在中浓度Cd处理下,百合下盘根的富集能力大于上盘根。土壤Cd浓度增加显著提高了龙牙百合鳞茎向地下茎的转移系数($P<0.05$)。百合叶、地上茎、鳞茎和下盘根的丙二醛含量在高浓度Cd处理下分别显著提高了11.72%、11.31%、133.72%和79.37% ($P<0.05$),而超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性整体随Cd含量升高呈先上升后下降趋势。研究表明,龙牙百合有较强的耐Cd能力。

关键词: 镉; 土壤; 龙牙百合; 生理响应; 转移系数; 抗氧化酶

中图分类号: S567.239 文献标志码: A 文章编号: 1672–2043(2024)05–0983–08 doi:10.11654/jaes.2023–0594

Effects of soil cadmium on physiological and biochemical characteristics of *Lilium brownii* var. *viridulum* during its growth

WU Jiameng¹, HUANG Yayuan¹, BA Degong¹, WANG Xinqi¹, QIN Si², DENG Yuling³, YONG Zhibiao³, LEI Ming^{1*}

(1. College of Environment & Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Hunan Shanshui Qingyang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effects of different concentrations of Cd in soil on the growth and physiological and biochemical indexes of *Lilium brownii* var. *viridulum*. A pot experiment consisting of without Cd and a concentration gradient ranging from low (0.86 mg·kg⁻¹) to medium (2.16 mg·kg⁻¹) to high (4.76 mg·kg⁻¹) Cd was performed. The results showed that the growth of *Lilium brownii* var. *viridulum* plants and the chlorophyll content in leaf increased with increase of Cd concentration in the soil. The distribution of Cd content in the different parts of the plant was aboveground lower root>leaf>stem>underground stem>upper root>bulb. Thus, the Cd content of the bulb was the lowest and the safest under each concentration treatment. Under the medium concentration of Cd treatment, the enrichment capacity of *Lilium* root was greater than that of upper root. Soil Cd significantly increased the transfer coefficient of the bulb to underground stem of *Lilium brownii* var. *viridulum* ($P<0.05$). In addition, the malondialdehyde contents of lily leaves, above-ground stem,

收稿日期: 2023–07–24 录用日期: 2023–10–30

作者简介: 吴家萌(1998—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 从事土壤微生物研究。E-mail: wjm1225jy@163.com

*通信作者: 雷鸣 E-mail: leiming@hunau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42207043); 国家重点研发计划项目(2019YFL604903); 长江生态环境保护修复城市驻点跟踪研究任务(二期)(2022-LHYJ-02-0507-01); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40179); 长沙市自然科学基金项目(kq2202217)

Project supported: Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (42207043); National Key Research and Development Program of China (2019YFL604903); Urban Residence Tracking Research Task for Yangtze River Ecological Environment Protection and Restoration (Phase II) (2022-LHYJ-02-0507-01); Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2022JJ40179); Natural Science Foundation of Changsha City, China (kq2202217)

bulb, and underground root were significantly increased by 11.72%, 11.31%, 133.72%, and 79.37%, respectively, under the high concentration of Cd treatment ($P < 0.05$), while superoxide dismutase and catalase enzymes first increased and then decreased. Therefore, *Lilium brownii* var. *viridulum* has a strong tolerance to Cd.

Keywords: cadmium; soil; *Lilium brownii* var. *viridulum*; physiological response; transfer coefficient; antioxidant enzymes

百合是百合科、百合属多年生球根类所有品种的总称^[1]。百合含有较高的糖量、低的粗纤维量及许多有益人体健康的成分^[2],往往作为膳食补充剂来改善人体健康,在中国药食同源植物中被定义为食品^[3],即百合是一种药食同源植物。龙牙百合主要器官包括下盘根、鳞茎、地下茎、上盘根、地上茎和叶,具体如图1所示。下盘根位于百合基部,属于基生根;上盘根在鳞茎之上,位于地下茎,属于茎生根。当前在我国种植面积最广的百合品种主要是龙牙百合(即百合)、宜兴百合(即卷丹)和兰州百合等,其分布在湖南隆回、湖南龙山、甘肃兰州和江苏宜兴等地^[4]。百合的主要食用部位为鳞茎,而鳞茎生长在地下,这就导致其很容易从土壤中吸收镉(Cd)。阳丽等^[5]对江西、湖南两省百合样品中Cd含量进行了检测,发现Cd超标率为13.3%。杨伟等^[6]在对兰州百合Cd测定中得出Cd的平均含量为 $0.324 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,超过《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T 2—2004)($\text{Cd} \leq 0.3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)有关规定。姚素梅等^[7]对6种中药的Cd含量进行了检测,结果显示百合Cd含量明显超标。Huang等^[8]对从田间采集的百合和从药店购买的百合进行了重金属含量分析,结果表明Cd的含量比其他重金属都要高,其中Cd最高

含量达 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过《中国药典》中Cd含量限值。上述研究表明,百合对Cd有较强的富集能力,但有关土壤Cd污染对百合生长过程中生理生化的影响还鲜有报道,百合对Cd的富集特征不清晰,关键控制点不确定、阻控措施尚缺乏等问题可能对其食用安全性产生潜在隐患。本研究通过盆栽实验,以湖南省隆回县龙牙百合和Cd为研究对象,探究龙牙百合在不同污染土壤条件下的生理生化反应特性,旨在进一步阐明Cd对百合毒害的生理机制,以期对百合优质安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试百合为隆回龙牙百合种球,购置于湖南省邵阳市隆回县猫儿凼村。供试土壤采自湖南农业大学耘园基地,理化性质为:pH值4.86,有机质 $19.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全Cd $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 实验方法

本实验在湖南农业大学实训基地的温室大棚里进行。Cd处理含量参考刘泽伟^[9]和梅鑫^[10]的研究设置。种植百合前,将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液均匀喷洒到土壤中,设置清洁(CK)、低(L)、中(M)、高(H)4个Cd含量,土壤老化2个月后种植百合。种植之前取土壤样品进行Cd含量测定,L、M、H处理的Cd含量分别为 0.86 、 $2.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后添加复合肥和有机肥,稳定24 h后播种百合种球。

百合种球的预处理:将大小一致的百合种球用纯水冲洗干净,再经酒精消毒后用无菌水冲洗2~3次,接着用4%的NaClO溶液消毒大约15 min,然后再用无菌水冲洗4~5次,最后将百合种球表面擦干,备用。

2021年10月下旬,将已进行过预处理的百合种球种植在已处理的Cd污染土壤中,每盆3株,每个处理4盆,16盆为一组,重复3次,共48盆144株。实验期间,每隔一段时间随机移动盆子,且不定期进行土壤疏松并浇灌自来水保持土壤湿润。

1.3 样品采集

2022年5月下旬收获百合,将每株百合按部位进行分离,如图1所示。随机取1/3洗净烘干,用于测定



该图片源于个人图书馆 (<http://www.360doc.com/advice.html>)

This image is from personal library (<http://www.360doc.com/advice.html>)

图1 龙牙百合植株各部位分布图

Figure 1 Distribution map of plant parts of *Lilium brownii* var. *viridulum*

各部位总Cd含量;剩下的2/3清洗后置于-80℃冰箱冷冻保存,用于测定各项生理生化指标。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 株高、茎粗及生物量的测定

在收获当天,用卷尺从百合基部测量其株高;用游标卡尺统一在最下方叶子处测量茎粗;将百合按部位分开,用电子天平称量其生物量,用鲜质量表示。

1.4.2 叶绿素含量的测定

叶绿素含量采用96%乙醇浸提,分光光度法测定^[11]。总叶绿素含量(C_{a+b} , $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)为叶绿素a含量与叶绿素b含量之和。

1.4.3 Cd含量的测定

百合各部位Cd含量采用硝酸-高氯酸湿法消解,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION™ 350X, PerkinElmer, MA, 美国)测定,同时以国家标准物质(GBW-10049)和空白进行质量控制。

1.4.4 丙二醛含量与超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性的测定

丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[12],超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[13],过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用高锰酸钾滴定法^[13]。

1.4.5 龙牙百合的富集系数

富集系数(BCF)表示重金属从土壤向植物中迁移的难易程度,反映了植物吸收转移重金属到体内各部位能力的大小,BCF越大表明植物相应部位重金属富集含量越多^[14]。

$\text{BCF} = \text{龙牙百合某一部位Cd含量} / \text{土壤中Cd含量}$

1.4.6 龙牙百合各部位的转移系数

转运系数(TF)是衡量植物转移重金属的能力,TF越高表明植物对重金属吸收和转运的能力越强^[15]。

$\text{TF} = \text{地上部Cd含量} / \text{地下部Cd含量}$

如: $\text{TF}_{\text{地上茎-叶}} = \text{叶中Cd含量} / \text{地上茎中Cd含量}$

$\text{TF}_{\text{鳞茎-地下茎}} = \text{鳞茎中Cd含量} / \text{地下茎中Cd含量}$

1.5 数据处理

采用SPSS统计软件对数据进行处理,采用GraphPad Prism 8进行单因素方差分析以及图的制作,采用Excel 2016进行数据整理。

2 结果与分析

2.1 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合生长状况和生物量的影响

土壤不同Cd污染程度对龙牙百合幼苗期生长状

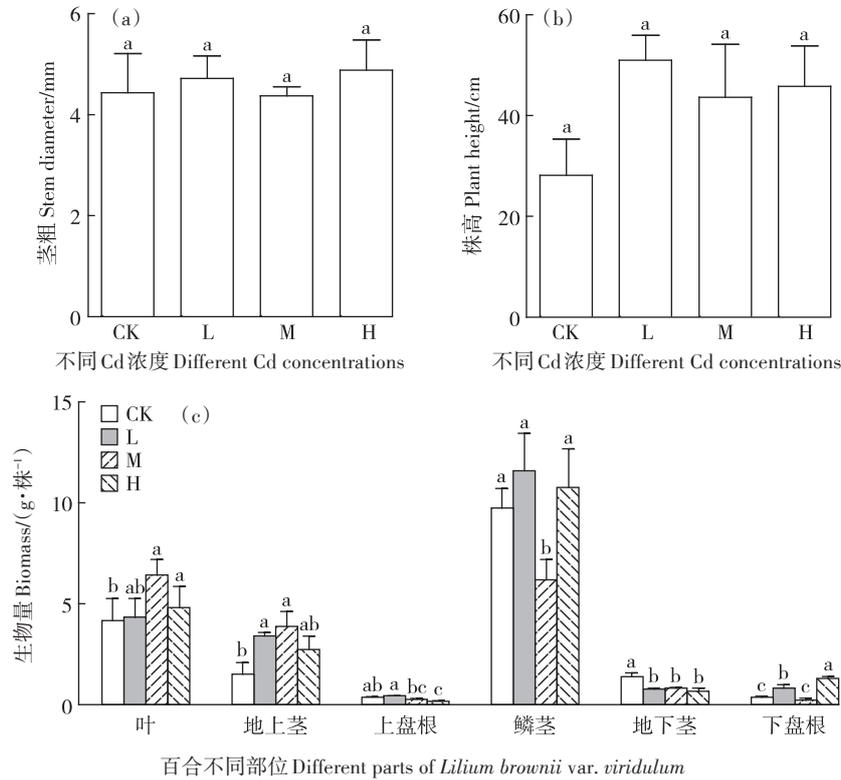
况和生物量的影响如图2所示。从图2(a)可以看出,与CK相比,L和H处理下百合茎粗有所增加,但M处理下,百合茎粗有下降趋势,各处理间均无显著性差异($P>0.05$),表明不同胁迫处理对百合幼苗期茎粗影响较小。由图2(b)可以看出,与CK相比,L、M和H处理下幼苗期百合株高均增加但无统计学上的差异,表明Cd胁迫对龙牙百合苗期株高影响较小。由图2(c)可知,L处理下,百合上盘根和鳞茎生物量达到最大值,但与CK相比无显著性差异($P>0.05$);M处理下,百合叶和地上茎生物量显著增加($P<0.05$);而H处理下,百合上盘根和地下茎的生物量下降,表现出显著抑制作用($P<0.05$)。除M处理外,同一处理下百合鳞茎生物量显著大于其他部位($P<0.05$),上盘根和下盘根生物量显著降低($P<0.05$)。

2.2 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合叶绿素含量的影响

土壤Cd含量对龙牙百合叶绿素含量的影响如图3所示。由图3可知,随着Cd含量升高,百合叶绿素a和总叶绿素均呈现先上升后下降再上升的趋势,且在H处理下达到最大值,分别是CK处理的1.06倍和1.11倍。百合叶片叶绿素a、叶绿素b在各处理下均无显著性差异($P>0.05$),而总叶绿素在M和H处理下有显著差异($P<0.05$)。

2.3 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合富集Cd的影响

如图4所示,随土壤中Cd含量的增加,百合各部位Cd含量也增加。在CK中,百合叶和下盘根中Cd的富集量显著高于其他部位($P<0.05$),其含量顺序是下盘根>叶>地上茎>地下茎>上盘根>鳞茎,百合鳞茎Cd含量($0.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)虽然低于《中国药典》Cd的限量值($1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但超出《食品安全国家标准》(GB 2762—2017)块茎蔬菜Cd的限量值($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。随土壤中Cd含量增加,百合鳞茎Cd含量也增加,在H处理下最高含量达到 $1.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显超过《中国药典》的规定限值。在L处理下,除百合上盘根、地下茎和鳞茎外,百合其余部位Cd含量与CK相比有显著性差异($P<0.05$),叶和地上茎的Cd含量显著大于其他部位的Cd含量($P<0.05$)。在M处理下,百合上盘根Cd含量为 $5.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其叶、地上茎、地下茎、鳞茎和下盘根的Cd含量,且除鳞茎外各部位与CK相比均有显著性差异($P<0.05$),地下茎和鳞茎中Cd含量显著低于其他部位($P<0.05$)。在H处理下,百合地上茎、地下茎、鳞茎和下盘根中的Cd含量有大幅度上升,地上茎Cd含量最高,鳞茎Cd含量显著低于其余



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图2 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合生长状况和生物量的影响

Figure 2 Effects of different levels of Cd pollution on growth status and biomass of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

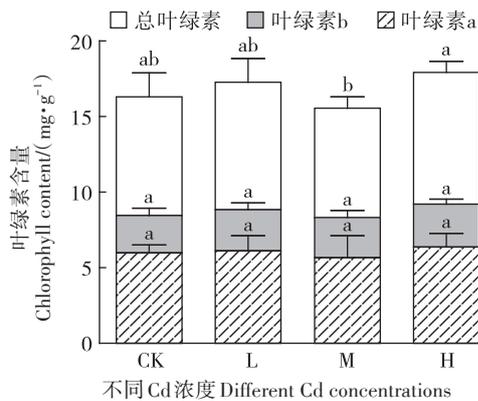


图3 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合叶绿素含量的影响
Figure 3 Effects of different levels of Cd pollution on chlorophyll content of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

部位 ($P < 0.05$)。

2.4 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合BCF和TF的影响

由图5可知,随Cd含量的升高,BCF_{土壤-下盘根}呈下降趋势,在CK处理下达到最大值2.17;但是BCF_{土壤-上盘根}是呈先上升后下降的趋势,尤其在M处理下,BCF_{土壤-上盘根}显著大于BCF_{土壤-下盘根},达到最大值2.35,

表明此含量的Cd胁迫下上盘根富集Cd的能力大于下盘根。

由图6可以看出,CK处理的百合TF大小顺序是TF_{上盘根-地上茎} > TF_{地下茎-地上茎} > TF_{鳞茎-地下茎} > TF_{地上茎-叶} > 1 > TF_{下盘根-鳞茎}。随Cd含量的增加,百合TF_{鳞茎-地下茎}呈上升趋势;龙牙百合TF_{下盘根-鳞茎} < 0.5,表明百合将Cd从下盘根转运到鳞茎的能力较弱;百合TF_{鳞茎-地下茎}较CK显著升高 ($P < 0.05$),最高达4.55,各处理TF均大于1.0,表明百合将Cd从鳞茎转运到地下茎的能力较强。以上情况表明,当Cd含量升高时,百合通过调节自身转运机制会增加鳞茎向地下茎的转运,从而保护鳞茎不受伤害。TF_{地下茎-地上茎}呈先上升后下降的趋势,在L处理下TF最高,TF_{地上茎-叶}呈下降趋势。CK和L处理下,上盘根-地上茎的转运能力最大,但随着Cd含量的增加,鳞茎-地下茎的转移能力显著高于其他部位 ($P < 0.05$),在设置含量范围内,下盘根-鳞茎的转移能力最弱。

2.5 Cd对百合MDA含量及SOD、CAT活性的影响

由表1可知,受土壤Cd胁迫,龙牙百合叶和地上茎中MDA含量变化呈先降低后升高的趋势,百合上

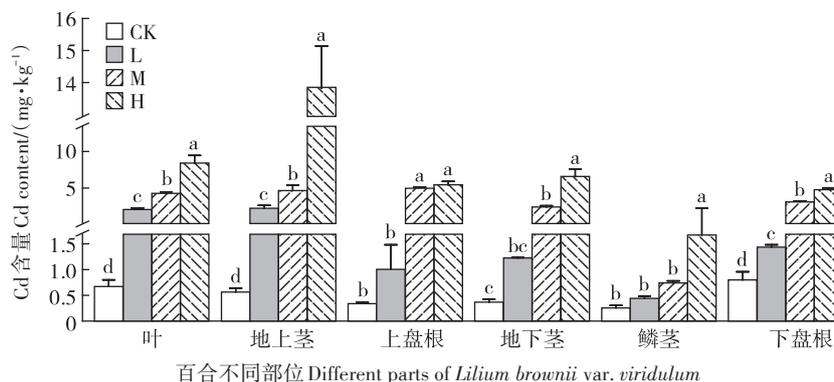
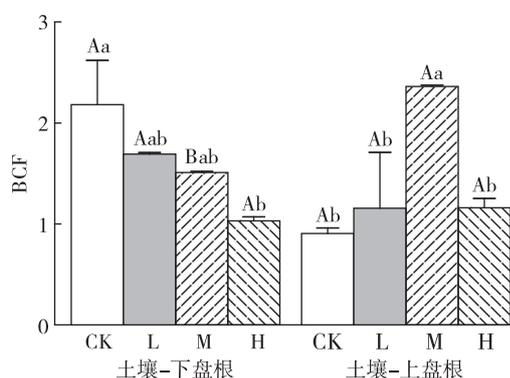


图4 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合富集Cd的影响

Figure 4 Effects of different levels of Cd pollution on Cd enrichment of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

不同大写字母表示同一处理下各部位间的差异显著($P<0.05$)。Different uppercase letters indicate significant differences between different parts of the same treatment ($P<0.05$)。)

图5 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合BCF的影响

Figure 5 Effects of different Cd pollution degree on BCF of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

盘根和地下茎的MDA含量均呈下降趋势,且地下茎各处理间无显著性差异($P>0.05$)。CK处理下,百合叶的氧化损伤要显著大于其他部位的损伤($P<0.05$),地下茎和鳞茎次之,上盘根和下盘根的MDA含量显

著低于其他部位($P>0.05$);L处理下,鳞茎和叶的MDA含量最高,上盘根和下盘根的MDA含量最低。百合鳞茎中MDA含量较CK显著增加,且在H处理时达到 $0.51\text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,与CK相比增加了133.72%。在H处理下,百合下盘根的MDA含量显著增加($P<0.05$)。M和H处理下的趋势相同,叶和鳞茎中的MDA含量显著高于百合其他部位,为叶>鳞茎>地下茎>地上茎>下盘根>上盘根。综上表明H处理对百合的伤害显著,Cd对百合叶和鳞茎的氧化损伤较强。

随Cd含量的增加,百合叶和地上茎的SOD活性下降,且各处理与CK相比差异显著($P<0.05$),其他4个部位均呈先升高后下降的趋势,表明一定的Cd含量会使百合SOD酶活性升高。百合上盘根、地下茎和下盘根在L处理下的SOD值与CK相比显著增加($P<0.05$),分别增加了53.91%、87.74%和55.01%;百合鳞茎在M处理下的SOD值显著升高($P<0.05$),为 $160.09\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同一Cd处理下,上盘根SOD酶活性显著高于百合其他部位($P<0.05$)。CK处理下,鳞茎中SOD酶活性最低;L处理下,地下茎和下盘根中SOD

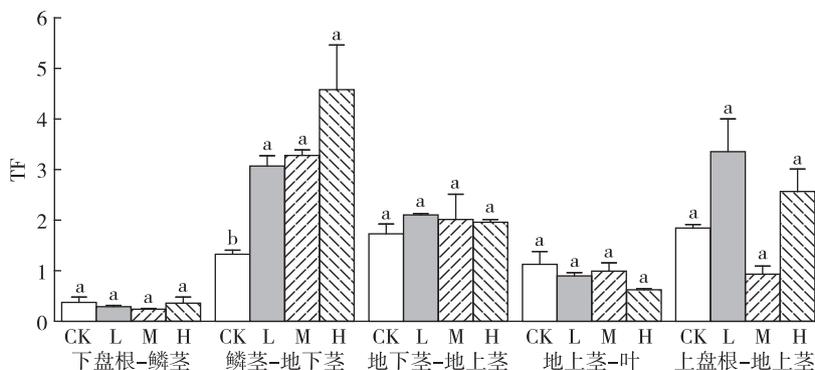


图6 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合TF的影响

Figure 6 Effects of different Cd pollution degree on TF of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

酶活性显著低于地上茎($P<0.05$),其次是鳞茎、叶和地上茎;M处理下,鳞茎中MDA含量升高,下盘根MDA含量降低;H处理下,百合叶、地上茎和地下茎的Cd含量显著低于其他部位。

由表1可知,随Cd含量的增加,百合叶、上盘根和下盘根的CAT酶活性呈先上升后下降的趋势,当CAT值达到最大时与其他处理组比均差异显著($P<0.05$)。百合地上茎则是呈先下降后上升的趋势,但均低于CK。CK处理下,百合上盘根CAT活性显著高于其他部位($P<0.05$),百合叶、地上茎和下盘根的CAT活性显著低于其他部位($P<0.05$);L处理下,百合上盘根CAT活性显著升高且高于其他部位($P<$

0.05),叶、地上茎、地下茎、鳞茎和下盘根之间无显著性差异($P<0.05$);在M处理下百合地上茎的CAT活性最低,为 $50.23 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,百合地下茎的CAT活性显著高于其他部位($P<0.05$),上盘根的CAT活性显著低于地下茎但高于鳞茎、叶、下盘根和地上茎($P<0.05$)。百合地下茎和鳞茎中CAT值呈先下降后上升再下降的趋势,分别在M和CK组活性最高。H处理下,地下茎CAT活性最高,且与其他部位差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

由于Cd被植物大量累积会导致茎叶发黄、叶片掉落,且植物的株高、叶片的长度和干质量等会受到明显影响^[16-17],Cd胁迫下的生长特性可以反映植株耐受能力的大小。相关研究表明,马铃薯根部将土壤中Cd吸收之后,可进一步转移、富集在植物体内,当Cd处于较低水平时,其能促进马铃薯的生长,当含量达到一定水平后,促进作用将逐步减弱^[18-19]。本实验发现土壤Cd对百合生长并没有产生明显毒害作用,但随Cd含量的增加,Cd对百合叶绿素的影响整体呈上升趋势,说明低Cd处理可以刺激百合叶片叶绿素含量的增加,且百合仍能维持正常生长,这表明百合可能存在一定的保护和防御机制来适应一定含量的Cd胁迫,也可能是百合处于幼苗期,对其光合作用无影响,这也与香草根^[20]的研究相似。董洪霞^[21]、钱翌等^[22]的研究表明,随Cd含量的升高,大蒜体内MDA含量呈先上升后下降的趋势。MDA是由植物衰老而氧化或在不利条件下产生的^[23]。百合上盘根在Cd高含量时MDA含量反而下降并且低于CK,这可能是大量的Cd离子进入植物体内,超过了植物本身的代谢阈值,导致生理混乱。H处理下,百合叶、地上茎、鳞茎以及下盘根的MDA含量升高与CAT和SOD酶的活性下降有关,Cd胁迫会导致植物体内细胞膜系统遭到破坏,膜脂过氧化加剧,植物体细胞正常的代谢活动被扰乱^[24],最终出现膜结构损伤。

本实验中,百合叶和地上茎中SOD酶活性均低于CK,这与沙棘相同^[25],但与圆叶锦葵^[26]、龙葵^[27]相反,推测可能是百合叶和地上茎本身对Cd有较高的抗性,在Cd胁迫下主要是CAT酶起主要抗氧化作用,并伴随SOD的降低,抗氧化酶类之间保持良好的平衡,从而将胁迫产生的活性氧维持在平衡的状态。百合其他部位中SOD酶活性均随Cd含量的升高呈先上升后下降的趋势,这是因为Cd胁迫启动了植物体内重金属防御机制,增加了抗氧化酶活性,使植物体内

表1 不同Cd污染程度对幼苗期龙牙百合MDA、SOD及CAT的影响

Table 1 Effects of different levels of Cd pollution on MDA, SOD and CAT of *Lilium brownii* var. *viridulum* in seedling stage

部位 Part	处理 Treatment	MDA/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	SOD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	CAT/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)
叶 Leaf	CK	0.46Aab	106.78BCa	75.54Cc
	L	0.37Abc	61.92Cb	92.41Bb
	M	0.30Ac	58.92Cb	103.49Ca
	H	0.51Aa	67.30Cb	88.70Bb
地上茎 Stem	CK	0.12Cab	111.45BCa	88.45Ca
	L	0.10Cc	58.67Cb	75.67Ba
	M	0.11Bbc	56.87Cb	50.23Db
	H	0.14Ba	59.07Cb	77.59BCa
上盘根 Upper root	CK	0.05Da	283.69Ab	471.86Ab
	L	0.05Cab	436.61Aa	1 210.40Aa
	M	0.02Cc	306.97Ab	208.93Bc
	H	0.03Cbc	187.46Ab	55.69Cc
地下茎 Underground stem	CK	0.22Ba	111.86BCb	206.27Bb
	L	0.18Ba	210.00Ba	146.18Bbc
	M	0.18Ba	156.48Bab	354.58Aa
	H	0.15Ba	111.29BCb	118.87Ac
鳞茎 Bulb	CK	0.22Bc	81.22Cb	199.42Ba
	L	0.40Ab	84.70Cb	86.29Bbc
	M	0.34Ab	160.09Ba	112.74Cb
	H	0.51Aa	83.37BCb	66.65BCc
下盘根 Aboveground lower root	CK	0.03Db	144.70Bb	54.44Cc
	L	0.03Cb	224.30Ba	86.61Bab
	M	0.03Cb	148.89Bb	95.79Ca
	H	0.06Ca	140.23ABb	74.10BCbc

注:不同小写字母表示处理间差异显著,不同大写字母表示同一处理下各部位间的差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments, and different uppercase letters indicate significant differences between different parts of the same treatment ($P<0.05$).

的活性氧维持在一个相对低的水平^[28-29]。然而,植物对Cd的适应和耐受能力有限,在高浓度Cd环境下,Cd会与酶的辅因子位点(如Cu/Zn SOD)竞争性结合,导致植物抗氧化酶活性降低^[30]。CAT酶在百合叶和上盘根中活性先上升后下降,在百合地下茎和鳞茎中则是呈先下降后上升再下降的规律,这与郭智^[31]对超富集植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)在Cd胁迫下的生理响应机制研究和钱翌等^[22]对Cd对大蒜生理生化影响的研究结果相似。对于百合而言,SOD和CAT酶活性的提高对MDA的清除起到了一定的促进作用,这是百合耐Cd的主要机制之一。但是在较高Cd含量下,百合体内SOD活性的降低和CAT活性的不规则变化或许是导致MDA清除系统遭到损伤,MDA清除能力下降的原因^[32]。百合地下部酶活性整体高于地上部,保证了百合的生理活性,这也是为什么百合能保持正常生长的原因之一。

通过对百合各器官Cd含量的测定,探究百合对Cd的富集和迁移规律,从而揭示百合对Cd的富集特征。本实验结果表明,随Cd含量的增加,百合各部位Cd含量逐渐上升,这与何雪等^[19]研究的马铃薯、宋阿琳^[32]研究的小白菜结果一致,说明植物中的Cd含量与土壤中的Cd含量呈正相关关系,土壤Cd污染促进了Cd在百合各部位的累积。龙牙百合将Cd截留于茎部和根部,以减少Cd在其他部位的累积,使得鳞茎中Cd的含量最低。当土壤Cd含量 $<2.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,百合鳞茎Cd含量低于《中国药典》Cd的限值,但超出《食品安全国家标准》(GB 2762—2017)中块茎蔬菜的限值,这说明百合鳞茎存在Cd超标的风险,值得进一步关注。综上,百合鳞茎想要达到药用级别,土壤中的Cd含量要限制在 $2.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以内,若达到食品级须对土壤进行重金属修复治理。

4 结论

(1)土壤镉污染对百合生长没有产生明显的毒害作用,对百合光合作用效率影响不显著。

(2) $2.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd处理下,龙牙百合下盘根对土壤中Cd的富集能力要大于上盘根,鳞茎-地下茎的转运能力最强。鳞茎中Cd含量最低,低于《中国药典》Cd的限量值,但仍超出《食品安全国家标准》(GB 2762—2017)中块茎蔬菜的限量值。

(3)随着Cd含量的升高,百合体内丙二醛大量积累,抗氧化酶活性发生变化,表明龙牙百合通过调节自身抗氧化防御系统来抵御Cd胁迫。

参考文献:

- [1] TANG L, DENG S H, TAN D, et al. Heavy metal distribution, translocation, and human health risk assessment in the soil-rice system around Dongting Lake area, China[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2019, 26: 17655-17665.
- [2] SUN H X, CHENG H G, LIN L Z, et al. Bioaccumulation and sources of metal(loid)s in lilies and their potential health risks[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 151: 228-235.
- [3] APAK R, GUCLU K, OZYUREK M, et al. The cupric ion reducing antioxidant capacity and polyphenolic content of some herbal teas[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2006, 57(5/6): 292-304.
- [4] 宋云胜, 柳平增. 我国百合市场与产业调查分析报告[J]. 农产品市场, 2021(17): 3. SONG Y S, LIU P Z. Investigation and analysis report of Chinese lily market and industry[J]. *Agricultural Products Marke*, 2021(17): 3.
- [5] 阳丽, 邓家军, 廖健, 等. 江西、湖南2省百合及其土壤风险性评估[J]. 生物灾害科学, 2016, 39(4): 282-286. YANG L, DENG J J, LIAO J, et al. Risk assessment of soil and lily in Jiangxi Province and Hunan Province[J]. *Biological Disaster Science*, 2016, 39(4): 282-286.
- [6] 杨伟, 柴焯, 高克立. 兰州百合中铅、镉含量测定[J]. 中国中医药信息杂志, 2014, 21(5): 83-85. YANG W, CHAI Y, GAO K L. Content determination of Pb and Cd in Lanzhou lily[J]. *Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine*, 2014, 21(5): 83-85.
- [7] 姚素梅, 王强. 六种常用滋补中药铅、汞、镉含量的测定[J]. 广东微量元素科学, 2006(3): 50-52. YAO S M, WANG Q. Determination of lead, mercury and cadmium in six kinds of restorative Chinese herbs in common use[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2006(3): 50-52.
- [8] HUANG Y Y, WANG X Q, ZHOU Y M, et al. The ignored risk: heavy metal pollution of medicine and food homologous substances[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(7): 18577-18587.
- [9] 刘泽伟. 紫薯矿质代谢对镉污染的生理响应及机理研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. LIU Z W. Physiological response and mechanism of mineral metabolism of *Ipomoea batatas* L. to cadmium pollution [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [10] 梅鑫. 硅对大蒜铅镉胁迫的缓解效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018. MEI X. The mitigative effect of silicon on lead and cadmium stress in garlic[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018.
- [11] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002(4): 478-481. YANG M W. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002(4): 478-481.
- [12] 王岩. Cu、Zn胁迫下苦草和黑藻的生理生化响应研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2020. WANG Y. Study on physiological and biochemical responses to Cu and Zn stress of *V. natans* and *H. Verticillata*[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2020.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 117-124. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education

- Press, 2006: 117-124.
- [14] 陶亮, 张乃明. 3种叶类蔬菜对镉污染的生长发育响应及累积特征[J]. 中国农学通报, 2018, 34(18): 99-106. TAO L, ZHANG N M. Growth response of three leafy vegetables to Cd pollution and their Cd accumulation characteristics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(18): 99-106.
- [15] 刘爱中, 邹冬生, 刘飞. 龙须草对镉的耐受性和富集特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 473-480. LIU A Z, ZOU D S, LIU F. Cadmium tolerance and enrichment characteristics of *Eulaliopsis binata* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 473-480.
- [16] 时萌, 王芙蓉, 王棚涛. 植物响应重金属镉胁迫的耐性机理研究进展[J]. 生命科学, 2016, 28(4): 504-512. SHI M, WANG F R, WANG P T. Research advances in the tolerance mechanism of plant response to heavy metal cadmium stress[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2016, 28(4): 504-512.
- [17] HE S Y, YANG X E, HE Z L, et al. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(3): 421-438.
- [18] 王沛裴, 郑顺林, 何彩莲, 等. 液体有机肥对铅、镉污染下马铃薯重金属吸收及干物质积累的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 425-431. WANG P P, ZHENG S L, HE C L, et al. Effects of liquid organic fertilizer on absorption of lead and cadmium and dry matter accumulation in different organs of potato[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 425-431.
- [19] 何雪, 陆引罡, 张洁, 等. 镉胁迫下不同土壤类型对马铃薯生长及镉富集转运特性的影响[J]. 地球与环境, 2023, 51(1): 87-101. HE X, LU Y G, ZHANG J, et al. Effects of soil types on potato growth and cadmium accumulation and transport characteristics under cadmium stress[J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(1): 87-101.
- [20] AIBIBU N A, LIU Y G, ZENG G M, et al. Cadmium accumulation in vetiveria zizanioides and its effects on growth, physiological and biochemical characters[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6297-6303.
- [21] 董洪霞. 铅、镉胁迫对大蒜某些生理生化指标的影响[J]. 上饶师范学院学报, 2012, 32(3): 76-80. DONG H X. Effects of lead cadmium stress on some physiological and biochemical indicators of garlic [J]. *Journal of Shangrao Normal University*, 2012, 32(3): 76-80.
- [22] 钱翌, 杨立杰. 土壤镉污染对大蒜生理生化指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8420-8422. QIAN Y, YANG L J. Effects of cadmium pollution in soil on physiological and biochemical index of *Allium sativum* L.[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(18): 8420-8422.
- [23] 郑爱珍, 刘传平, 沈振国. 镉处理下青菜和白菜MDA含量、POD和SOD活性的变化[J]. 湖北农业科学, 2005(1): 67-69. ZHENG A Z, LIU C P, SHEN Z G. Effect of cadmium on MDA content, POD and SOD activities of *Brassica pekinensis* and *Brassica chinensis*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2005(1): 67-69.
- [24] 王志伟, 李涵, 梁少华, 等. 镉对薄皮甜瓜幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 81-88. WANG Z W, LI H, LIANG S H, et al. Effects of cadmium on growth and some physiological of oriental melon seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(1): 81-88.
- [25] WÓJCIK M, SKÓRZYŃSKA-POLIT E, TUKIENDORF A. Organic acids accumulation and antioxidant enzyme activities in *Thlaspi caerulescens* under Zn and Cd stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2006, 48(2): 145-155.
- [26] 苟静. 圆叶锦葵对镉胁迫的生理响应与主要根际特征研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020. GOU J. Physiological response and rhizosphere characteristics of *Malva pusilla* to cadmium stress[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [27] JIN X F, YANG X E, ISLAM E, et al. Effects of cadmium on ultra-structure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 156(1/2/3): 387-397.
- [28] 陈宏, 徐秋曼, 王葳, 等. 镉对小麦幼苗脂质过氧化和保护酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(3): 399-403. CHEN H, XU Q M, WANG W, et al. The effect of Cd²⁺ on the activity of protease and cell membrane lipidperoxidation change of wheat seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(3): 399-403.
- [29] 石贵玉, 梁士楚, 黄雅丽, 等. 互花米草幼苗对重金属镉胁迫的生理响应[J]. 广西植物, 2013, 33(6): 812-816. SHI G Y, LIANG S C, HUANG Y L, et al. Physiological response of *Spartina alterniflora* seedlings to cadmium stress[J]. *Guihaia*, 2013, 33(6): 812-816.
- [30] KIEFFER P, SCHROEDER P, DOMMES J, et al. Proteomic and enzymatic response of poplar to cadmium stress[J]. *Journal of Proteomics*, 2009, 72(3): 379-396.
- [31] 郭智. 超富集植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)对镉胁迫的生理响应机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. GUO Z. Study on mechanisms of physiological response of hyperaccumulator plant *Solanum nigrum* L. to cadmium stress[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [32] 宋阿琳. 小白菜对镉胁迫的响应及硅缓解镉毒害的机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. SONG A L. Responses of *Brassica chinensis* L. to cadmium stress and silicon-alleviated cadmium toxicity[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.