

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

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

引用本文:

郭堤, 管伟豆, 张洋, 等. 雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2151-2161.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1028

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

设施农田土壤重金属污染评价及分区阈值研究

曹志强,韦炳干,虞江萍,孟敏,李海蓉,杨林生,尹舒慧,李峰,张国印,陈清 农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2227-2238 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0465

黑麦草抗氧化酶对Cd、Zn和Pb复合污染的响应

张军, 王文科, 耿雅妮, 任雪盈, 王周锋, 曹书苗 农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1117-1124 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1506

不同红麻品种的土壤重金属污染修复潜力对比研究

李文略,金关荣,骆霞虹,安霞,李苹芳,朱关林,陈常理 农业环境科学学报.2018,37(10):2150-2158 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0381

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

蚯蚓(Eisenia foetida)对水稻土中Cd的富集及其氧化应激

陈娴, 王晓蓉, 季荣 农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1464-1469 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.005



关注微信公众号,获得更多资讯信息

郭堤,管伟豆,张洋,等.雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2151-2161. GUO Di, GUAN Wei-dou, ZHANG Yang, et al. Tolerance and bioaccumulation characteristics of Cd and Zn by potherb mustard[J]. *Journal* of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2151-2161.



雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究

郭堤1,2,管伟豆2,张洋3,刘翔宇2,李一曼2,张增强2*

(1.西北工业大学生态环境学院,西安 710129; 2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100; 3.西安市固体废弃物处置中心,西安 710038)

摘 要:利用不同培养方式(土培和砂培)探讨了梯度浓度 Cd、Zn 胁迫下雪里蕻的重金属富集特性、耐受性及生理响应,以期为雪 里蕻修复重金属污染场地提供基础理论依据。结果表明:雪里蕻种子发芽率受到 Cd、Zn 胁迫的抑制,在18.3%~37.8% 之间;Cd、 Zn 胁迫下雪里蕻的茎叶和根系表现出不同程度的毒害症状,土培雪里蕻生物量在0.78~10.60 g之间,砂培生物量在1.83~3.16 g之 间;土培和砂培雪里蕻叶片中叶绿素、可溶性蛋白含量均随 Cd、Zn浓度升高呈下降趋势,雪里蕻通过调节体内抗氧化酶的活性来 缓解由 Cd、Zn 胁迫引起的氧化应激;雪里蕻植株内(茎叶和根系)Cd、Zn含量随生长基质中 Cd、Zn浓度的增加呈线性增长趋势,土 培各处理下雪里蕻植株内最高可富集 Cd、Zn 的浓度分别为 80 mg·kg⁻¹和 3 318 mg·kg⁻¹,砂培下为 129 mg·kg⁻¹和 5 195 mg·kg⁻¹。根 据雪里蕻植物提取指数计算结果可知,不同培养方式下雪里蕻对 Cd、Zn 胁迫具有较强的耐受性和富集、转运能力(且 Cd>Zn),具 有较大的潜力用于修复 Cd/Zn 中、低污染程度的土壤。

关键词:重金属;培养方式;富集;生理特征;雪里蕻

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2151-11 doi:10.11654/jaes.2020-1028

Tolerance and bioaccumulation characteristics of Cd and Zn by potherb mustard

GUO Di1.2, GUAN Wei-dou2, ZHANG Yang3, LIU Xiang-yu2, LI Yi-man2, ZHANG Zeng-qiang28

(1.School of Ecology and Environment, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710129, China; 2.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Xi' an Solid Waste Management Center, Xi' an 710038, China)

Abstract: Herein, the heavy metal accumulation, tolerance, and physiological response of potherb mustard are investigated under cadmium (Cd) and zinc (Zn) stress. This study aims to investigate the relationship between potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss.), cultivation patterns (soil and sand cultures), and heavy metal, and provides a theoretical basis for site remediation by potherb mustard. The results showed that the germination of potherb mustard seeds was inhibited by the stress posed by Cd and Zn, ranging from 18.3% to 37.8%. The biomass of potherb mustard under soil and sand culture was between 0.78 and 10.60 g and 1.83 and 3.16 g, respectively. With an increase in the concentration of Cd and Zn, the contents of chlorophyll and soluble protein in the leaves of potherb mustard decreased. Potherb mustard adjusted the enzyme defense system to alleviate the oxidative stress caused by Cd and Zn. With an increase in the concentration of Cd and Zn in the growing substrate, the highest concentrations of Cd and Zn in the potherb mustard shoots were recorded as 80 and 3 318 mg \cdot kg⁻¹ (soil culture) and 129 and 5 195 mg \cdot kg⁻¹ (sand culture), respectively. According to the calculation of phytoextraction indices, potherb mustard showed strong tolerance to the Cd and Zn stress, accumulation, and translocation abilities (Cd>Zn). Potherb mustard is suggested to remediate Cd/Zn contaminated soils at medium and low levels.

Keywords: heavy metal; cultivation patterns; accumulation; physiological characteristics; potherb mustard

收稿日期:2020-09-05 录用日期:2020-09-28

作者简介:郭堤(1992—),男,河南南阳人,博士,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:guodi_123@126.com

^{*}通信作者:张增强 E-mail:zhangzq58@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801101)

Project supported : National Key R&D Program of China (2017YFD0801101)

农业环境科学学报 第39卷第10期

在众多的重金属污染土壤修复技术中,植物提取 由于其绿色环保性及实用性,自20世纪80年代以来 就出现在公众视野中^[1]。植物提取技术的关键是寻 找到合适的、能高效吸收重金属的植物,即超富集植 物。由于植物提取技术主要依靠超富集植物对重金 属污染土壤进行修复,所以植物生长状况、对环境的 适应性和对重金属的吸收等成为植物修复技术效率 的关键因素^[2]。然而,自然界中符合该条件的超富集 植物种类相当有限。因此,众多科研工作者将工作重 心放在超/高富集植物品种筛选方面^[3-4]。

修复植物的生物量和重金属富集转运能力直接 决定了植物中金属提取量的大小和植物提取的效率。 另外,修复植物对于重金属的解毒能力和耐受性也能 够显著影响植物生长的状况,从而影响其生物量的大 小。重金属能够诱发植物一系列生化、形态变化和生 理紊乱。超富集植物在重金属污染土壤中采取不同 的策略以避免细胞损伤,维持生长。植物所采用的耐 受机制之一是通过各种抗氧化酶对抗活性氧的增加, 这些酶包括过氧化氢酶、多酚氧化酶、超氧化物歧化 酶和过氧化物酶等時。因此,修复植物的重金属耐受 性和解毒能力亦是植物提取技术的关键。由于超/高 富集植物种植的地域差异性,围绕矿山开采及金属冶 炼厂周边筛洗优势先锋植物进行场地植被恢复和污 染修复是经济可行的,且相比其他超/高富集植物适 官性更强。近年来,国内学者在矿山及冶炼厂废弃场 地生态修复方面取得了一些新的进展。例如,黄建洪 等◎发现羽序灯心草具有较强的恶劣环境适应性及 Zn/Cu耐受性,具有较大的修复酸性矿山废弃场地的 潜力。叶文玲等四的研究结果表明苏槐蓝、续断菊、 苦卖菜和巢菜可作为耐性植物,应用于重金属含量比 较高的尾矿区修复。薛清泼等¹⁸指出可选用苜蓿修 复铀矿污染土壤中的U和Cd。

十字花科的许多种类植物由于生长速度快、产量 较高、易于收获等优点已经作为植物修复候选者被广 泛报道。雪里蕻(Brassica juncea, Coss),又名雪里红, 隶属于十字花科、芸苔属,是我们常见的蔬菜之一。 本课题组于 2012—2015 年对陕西凤县某锌冶炼厂 (33°56′45.5″N,106°31′53.5″E)周边65种植物(分属 28科、56属)的生物量、重金属富集转运能力和耐受 性进行了分析。雪里蕻从众多植物中脱颖而出,其对 Cd和Zn有较好的富集和耐受能力,在修复Cd、Zn污 染土壤方面具有很大的应用潜力^[9]。然而,在试验条 件可控情况下,基于雪里蕻作为修复植物的目的,关 于其对Cd、Zn耐受性和富集转运能力的系统研究还 未曾报道。因此,本研究着眼于探讨供试植物雪里蕻 在不同培养方式(土培和砂培)下对于重金属Cd、Zn 的富集转运能力及雪里蕻生长状况和生理响应,以期 为雪里蕻修复农业Cd、Zn污染场地提供基础理论依 据,为土壤重金属植物修复技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用污染土壤采自陕西省凤县某锌冶炼厂 附近的农田,干净土壤采自距该锌冶炼厂上风向10 km左右的农田,取样深度为0~20 cm。采集的土壤去 除大颗粒石块和植物残骸,风干后过2 mm尼龙网筛。 供试土壤基本理化性质如表1所示。

雪里蕻种子购自安徽省淮南市玉良种子公司,发 芽率≥85%。

砂培试验所用 Hoagland 营养液配方如表2所示。 配制全营养液时,取A液、B液各10 mL、C液与铁盐溶 液各1 mL进行混合,然后稀释至1 L,即得理论浓度 的 Hoagland 营养液。Cd、Zn复合重金属溶液中Cd、 Zn 的来源分别为CdCl₂、ZnCl₂(分析纯,天津科密欧化 学试剂有限公司)。分别称取CdCl₂、ZnCl₂溶于蒸馏 水中,制成100 mg·L⁻¹和1 000 mg·L⁻¹的Cd/Zn储备 液,储存于4℃冰箱中,使用时按设计浓度进行稀释。 1.2 不同培养方式下雪里蕻Cd、Zn耐性及富集特性试验 1.2.1 土培试验

土培试验在西北农林科技大学资源环境学院旱棚中进行。试验共设置5个处理,每个处理重复3次, 共计15盆。采用圆形塑料盆(高12 cm、直径20 cm),

		オ	ζ Ι	I.	堪 百	ኮን	「奉	4 珰	化性应		
г 1 1	1	DI		1	1	1		1		c . 1	

Table 1 Thysical and chemical properties of the soft								
土壤类型		有机质	阳离子交换量	全氮 Total N/	全磷 Total P/	全钾 Total K/	全Cd Total Cd/	全Zn Total Zn/
Soil types	рп	Organic matter/($g \cdot kg^{-1}$)	$CEC/(cmol \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(\mathbf{g} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{k} \mathbf{g}^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$
污染土 Polluted soil	8.39	5.02	50.6	0.40	0.61	4.39	58.7	5 372
干净土 Clean soil	8.26	6.14	54.4	0.47	0.63	4.67	ND	113

注:"ND"表示未检出。

Note: "ND" represent not detected.

21	53
	22

表2 Hoagland营养液配方

Table 2 Th	Table 2 The recipe of nutrient solution for potherb mustard					
项目 Items	营养物质 Nutrient substance	摩尔浓度 Molar concentration	质量浓度 Quality concentration/ (g・L ⁻¹)			
А	KNO3	$5 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	50.6			
	$Ca(NO_3)_2{\boldsymbol{\cdot}} 4H_2O$	$5 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	118			
В	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$2 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	49.3			
	$\mathrm{KH}_2\mathrm{PO}_4$	$1 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	13.6			
С	H_3BO_3	$0.045 \text{ mmol} \cdot L^{\scriptscriptstyle -1}$	2.78			
	$MnCl_2{\boldsymbol{\cdot}} 4H_2O$	$0.01 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	1.98			
	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	$0.3 \ \mu mol \cdot L^{-1}$	0.075			
	$Na_2M_0O_4{\boldsymbol{\cdot}}7H_2O$	$0.3 \ \mu mol \cdot L^{-1}$	0.097			
铁盐溶液	$\mathrm{FeSO_4}{\boldsymbol{\cdot}}7\mathrm{H_2O}$	$0.2 \ \mu mol \cdot L^{-1}$	5.56			
Iron salt solution	EDTA-Na ₂	$0.2 \ \mu mol \cdot L^{-1}$	7.49			

将已风干的供试土壤过孔径2 mm 尼龙筛后装盆,每 盆3 kg,再分别加入 N 0.3 g·kg⁻¹、P 0.2 g·kg⁻¹和 K 0.3 g·kg⁻¹(来源分别为尿素、磷酸二氢钠和氯化钾,分析 纯)作为底肥。每盆播种经5% NaClO消毒的雪里蕻 种子20粒,待幼苗长出真叶后,间苗为5株。每天给 盆栽添加自来水(未检测出 Cd、Zn),维持土壤田间持 水量的70%。经55 d的生长期,将成熟植物的茎叶和 根系分别用自来水冲洗后再用去离子水洗净,装入信 封 105℃下杀青 30 min,然后在70℃下烘至恒质量, 称量干物质质量,研磨过20目筛,密封保存^[5]。另外, 采集盆栽土100 g左右,自然风干,分别过100目和20 目筛,用于测定土壤的理化性质和重金属含量。试验 处理设计见表3。

1.2.2 砂培试验

砂培试验设置5个处理,每个处理重复3次,共计 15盆。砂培杯中采用20目石英砂为基质(石英砂经

Table 3 Experimental design of soil culture experiment							
处理编号	混合 ^比 Mixing	匕例 ratio	全量重 Total hea (mg・	重金属 vy metal/ kg ⁻¹)	有效态重金属 Available heavy metal/(mg·kg ⁻¹)		
Treatments	污染土	干净土	Cd	Zn	Cd	Zn	
	Polluted soil	Clean soil					
СК	—	1	0.021	113	ND	24.2	
T1	1	19	2.95	376	0.67	98.1	
T2	1	9	5.89	639	1.69	186	
Т3	1	4	11.8	1 165	2.58	315	
T4	1	1	29.4	2 743	5.95	683	

表3 土培试验设计

注:"一"表示未添加;"ND"表示未检出。

Note: "---" represents not added; "ND" represents not detected.

过泡酸和水洗处理去除重金属)。选大小一致的雪里 蕻种子 20粒,经5% NaClO 消毒、蒸馏水浸种后播种 于砂培杯中,并在表面覆盖60~100 目石英砂少许,以 减少水分散失。砂培杯放置于人工气候室,白天温度 25℃,光照16h;晚上温度18℃,黑暗8h。每天称质 量法交替补充1/2 Hoagland营养液或设计浓度的Cd/ Zn复合溶液,观察雪里蕻出苗和幼苗生长情况,待长 出真叶后,每盆间苗为3株¹⁰。经55 d 的生长期,将 成熟植物的茎叶和根系分别用自来水冲洗后再用去 离子水洗净,取1g左右茎叶鲜样于3 d 内测定雪里蕻 生理生化指标,其余样品装入信封105℃下杀青30 min,然后在70℃下烘至恒质量,称量干物质质量,研 磨过20目筛,密封保存。综合考虑前人研究^[2,10]并结 合先前雪里蕻砂培预试验的生长状况,本试验处理设 计如表4。

1.3 Cd、Zn胁迫下雪里蕻种子萌发试验

取121℃下灭菌30min、直径9cm的培养皿作为 种子发芽皿床,在每个培养皿中放置两张与皿同大小 的无菌滤纸。按照设计处理,在相应的皿床中加入 10mL的蒸馏水(对照组)或重金属溶液,设计浓度如 表5所示。选大小一致的雪里蕻种子30粒,经5% NaClO溶液消毒后用蒸馏水冲洗干净,并浸种6h,然 后均匀置于准备好的滤纸皿床中,盖上皿盖,在28℃ 培养箱中进行培养,每天以称质量法添加蒸馏水保持 皿床的湿度,一周之内观察种子的萌发情况(以胚芽 或胚根突破种皮者计为萌发)¹⁰。

表4 砂培试验设计

Table 4 Experimental design of sand culture

处理编号	重金属溶液浓度 Heavy metal concentrations/(mg·L ⁻¹)				
Treatments	Cd	Zn			
СК	0	0			
S1	1	20			
S2	2	50			
S3	5	100			
S4	10	200			

表5 种子萌发试验设计

Table 5 Experimental design of seed germination

处理编号	重金属溶液浓度 Heavy metal concentrations/(mg·L ⁻¹)				
Treatments	Cd	Zn			
СК	0	0			
G1	2	100			
G2	5	250			
G3	10	500			
G4	20	1 000			

统计发芽试验第4d雪里蕻种子的发芽率,即为 发芽势。

发芽势=
$$\frac{第4 \, \mathrm{d} \% + 7 \%}{$$
播种种子数 ×100% (1)

统计发芽试验第7d雪里蕻种子的发芽率,即为 发芽率。

发芽率=
$$\frac{$$
第7 d发芽种子数}
播种种子数 ×100% (2)

1.4 指标的测定

1.4.1 植物中Cd、Zn的含量

称取 0.500 g 充分烘干、磨碎的植物样品于 100 mL锥形瓶中,加入 10 mL HNO₃-HClO₄(3:1)混酸,置 于不断升温的电热板上消解。在消解过程中,不断补 充 HNO₃溶液以防止煮干。待溶液消解至无色透明, 将最终溶液在室温下定容至 50 mL,经过滤后,用火 焰原子分光光度计(Z-5000,日立,日本)测定溶液中 Cd、Zn 的含量^[11]。

1.4.2 丙二醛及植物酶的含量

取 0.500 g新鲜雪里蕻叶片剪成 0.2 cm 左右的小 块,在研钵中加入 0.1 mol·L⁻¹ pH 7.0 的磷酸缓冲液 (Na₂HPO₄-KH₂PO₄)进行冰浴研磨(加入少量石英 砂)。待磨成匀浆后,将其转移至 10 mL离心管中,在 4℃下 10 000 r·min⁻¹离心 15 min,然后用定性滤纸进 行过滤,得到的过滤液即为粗酶液。测定丙二醛 (Malondialdehyde, MDA)时,取 1 mL 粗酶液于 10 mL 具塞试管中,加入 5 mL 0.5% 硫代巴比妥酸溶液,摇 匀。将试管放入沸水浴中煮沸 10 min(自试管出现小 气泡开始计时),随后立即取出并放入冷水浴中冷却 至室温。将该溶液在 3 000 r·min⁻¹下离心 15 min,取 上清液分别于 532、600、450 nm 下测定吸光度,计算 公式见公式(3),式中 V_i和 V_i分别为测定时取用粗酶 液的体积和粗酶液的定容体积,单位均为mL。

MDA (mmol · g⁻¹FW) = $[6.452 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.559 \times A_{450}] \times \frac{V_i}{FW \times V_i}$ (3)

植物叶片中多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT)和叶绿素含量根据Guo等^[5]的方法利 用紫外分光光度计(UVmini-1240,岛津,日本)进行 吸收测定。可溶性蛋白的测定遵照Zheng等^[12]的方 法:取植物提取液0.2 mL,加入0.9 mL蒸馏水和5 mL 考马斯亮蓝G-250试剂,充分混合,放置2 min后在 595 nm下比色。 1.4.3 土壤中Cd、Zn的含量

称取 0.500 g 过 100 目筛(0.149 mm)的土壤于 100 mL锥形瓶中,加入 10 mL HCl-HNO₃-HClO₄混酸 (*V/V/V*,5:5:1),放置过夜。次日,将锥形瓶置于电热 板上 190 ℃消解,过程中补充 HNO₃溶液以防止烧干。 待土壤消解至灰白色,取下锥形瓶冷却至室温。用蒸 馏水定容至 50 mL,定性滤纸过滤。滤液用火焰原子 吸收分光光度计测定溶液中 Cd、Zn 的含量,即为全量 Cd、Zn^[13]。

1.5 植物提取指数计算

植物重金属耐性系数(Tolerance index,TI)和植物提取指数,即生物富集系数(Biological concentration factor,BCF)、转运系数(Translocation factor,TF)和金属提取量(Metal extraction factor,MEA)计算公式^[5]分别为:

MEA=茎叶重金属浓度×茎叶生物量+根系重金 属浓度×根系生物量 (7)

所有数据以3次重复的平均值表示。原始数据 用 Excel 2010软件进行预处理。采用 IBM SPSS 19.0 软件,在5%的概率水平下,进行单因素方差分析,统 计分析各处理间的显著性差异。所有数据图均由 Origin 2016软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 雪里蕻的生长状况及耐性系数

生物量的大小可指示植物在逆境下的生长情况。 耐性系数是用于评判植物对重金属耐性的指标之一。 如图1所示,砂培雪里蕻对照处理的生物量低于土培 下的对照处理,且不同培养方式(土培、砂培)下不同 浓度Cd、Zn处理对雪里蕻生物量的影响不同。土培 下雪里蕻地上部分和根系生物量均呈先增长后降低 的趋势,即低浓度Cd、Zn对土培雪里蕻生物量的增 加具有促进作用。雪里蕻在T1处理时(污染土/干净 土=1:19)生物量达到最高,茎叶、根系分别为9.67、 0.94 g·pot⁻¹;耐性系数分别为1.04和1.06。当污染土/ 干净土≤1:9时,雪里蕻的耐性系数均超过0.80,对 Cd、Zn胁迫具有较好的耐受性。之后随着Cd、Zn浓



Figure 1 Biomass and tolerance index of potherb mustard under soil and sand cultivation patterns

度不断增加,生物量开始降低。当污染土/干净土>1:9 后,雪里蕻生物量大幅降低,在T4处理时达到最低 值,茎叶、根系分别为0.67、0.11g·pot⁻¹,耐性系数分 别为0.072和0.124。该结果与谢建治等^[14]对小白菜 在Cd/Zn复合污染下生长情况的研究结果相似。此 外,随着重金属浓度的提高,T2、T3、T4处理雪里蕻 植株叶面积不断降低,叶片出现发黄、萎蔫,植株矮小 等症状(图2)。推测可能是Cd、Zn浓度超过了雪里 蕻的耐受限度,对植物的生长发育产生了抑制,如Cd 会抑制根系对于养分的吸收,导致植物体内细胞器 功能紊乱^[15],Zn则会抑制植物的生长、光合、呼吸作 用等^[16]。

砂培中雪里蕻在S1处理时出现了根冠比增加的 情况(图2),根系生物量达到最大值0.549g·pot⁻¹。这 与王慧忠等^[17]对于高羊茅耐Cd特性的研究结果相 似。而除S1处理雪里蕻根系生物量出现小幅增加 外,随着Cd、Zn浓度的增加,砂培雪里蕻生物量呈不 断减小趋势,且在S4处理时达到最小值,地上、根系 生物量分别为1.51、0.327g·pot⁻¹,耐性系数分别为 0.568和0.641。由图2可看出,砂培下随着基质中 Cd、Zn浓度的增加,雪里蕻株高、叶面积减小,叶片萎



图 2 不同培养方式下雪里蕻的生长状况 Figure 2 Growth of potherb mustard under different cultivation patterns

蔫发黄,在S2~S4处理下甚至多叶片出现褐色重金属 毒害现象;而雪里蕻的根长在S1、S2、S3处理下有所 增加,S4处理相比对照根的生长明显受到Cd、Zn胁 迫的抑制。根系是植物最早感知生长环境中胁迫的 部位,其形态的变化一定程度上反映了植物对胁迫环 境的适应能力。本试验结果与田晓锋等^[18]对Cd胁迫 下梧桐根系生长的研究结果相似,认为低浓度Cd可 以在一定程度上促进侧根的生长。因此,我们推测植 物在适度胁迫环境下根系的刺激性生长是植物应对 逆境的一种手段^[19]。

2.2 雪里蕻叶片中叶绿素和可溶性蛋白的含量

植物生理代谢活动中,在叶绿体中进行的光合作 用是一重要反应。单位质量植物叶绿素的含量可以 用来表示植物光合作用的强弱,从而指示植物的生理 活性^[20]。由图3可知,随着Cd、Zn浓度的增大,土培和 砂培雪里蕻的叶绿素含量均呈不断下降趋势,这与刘 亮^[21]和李元等^[22]研究结果一致,表明Cd会降低雪里蕻 叶绿素含量,抑制雪里蕻光合作用。这可能是由于 Cd抑制了与叶绿素前体合成相关酶的作用,导致叶 绿素分解,破坏了叶绿体微结构^[23]。Zn参与植物叶绿 素的形成,但当Zn浓度超过一定临界值后会对植物 产生毒害作用,减弱植物光合作用,抑制植物的生 长^[16]。土培下雪里蕻叶绿素a、叶绿素b均在T3处理 后出现大幅下降,并在T4处理时达到最低,叶绿素a、 叶绿素b分别比对照降低了42.3%和42.1%。姚俊修 等^[24]的研究表明,黑杨受到Cd、Zn胁迫时出现了光合 速率随胁迫浓度低促高抑的现象,并推测是由于低浓 度Cd、Zn可促进黑杨派的叶绿素合成,过多的Cd²⁺取 代铁和镁离子与叶绿体蛋白质的巯基结合,阻断了叶 绿素的合成。与土培中不同,砂培下雪里蕻叶绿素 a、叶绿素b含量在S1处理时即出现大幅下降,分别较 对照降低了24.9%和30.1%。在其他处理中,雪里蕻 叶绿素a、叶绿素b含量呈持续下降的趋势。对比两 种培养方式下Cd、Zn胁迫对雪里蕻叶绿素a、叶绿素 b的影响可看出,土培和砂培的对照处理下雪里蕻叶 绿素a、叶绿素b含量相近,但在重金属胁迫处理下, 土培中雪里蕻叶绿素a、叶绿素b含量普遍高于砂培。 这可能是由于相比砂培中的重金属溶液,土壤结构、 理化性质和土壤微生物等具有缓冲或降低Cd、Zn毒 性的作用^[19]。

可溶性蛋白可指示植物的细胞渗透性和功能蛋白的多少,是植物生理响应的重要指标^[25]。由图3可看出,随着Cd、Zn浓度的增大,土培和砂培中雪里蕻可溶性蛋白含量均呈不断下降趋势。土培雪里蕻植株在T1、T2、T3和T4处理下可溶性蛋白分别较对照降低了3.94%、17.4%、39.2%和56.3%。然而,有研究表明,烟草叶片中可溶性蛋白含量随Cd、Zn处理浓度



国 3 工 4 神砂石 ドヨ主鉄町 万 千町 球系神戸 存住 単口 古重 Figure 3 Chlorophyll and soluble protein contents of potherb mustard under soil and sand cultivation patterns

农业环境科学学报 第39卷第10期

的增加而增加^[22]。砂培雪里蕻植株在 Cd、Zn 胁迫下 可溶性蛋白分别较空白对照降低了 17.3%(S1)、 26.8%(S2)、38.0%(S3)和55.4%(S4)。刘亮^[21]的研究 结果表明,砂培下高浓度 Cd会破坏雪里蕻植株中蛋 白质的合成。在 Martino等^[26]的研究中,植株受 Cd 胁 迫会影响金属结合蛋白的产生,而 Zn 会诱导蛋白质 转化为碱性、低分子量的多肽(如抗氧化酶)并参与重 金属反应,从而导致砂培中雪里蕻植株可溶性蛋白含 量随 Cd、Zn浓度增高而减少。

2.3 雪里蕻叶片中植物酶活性和丙二醛的含量

多酚氧化酶(PPO)是氧化植物体内酚类物质、修 复受损细胞的酶,以氧化的蔬果呈现的褐变反应为特 点,是植物呼吸链末端的氧化酶,在植物呼吸中有着 重要作用^[27]。由图4A可看出,随着Cd、Zn浓度不断 增高,PPO活性呈降低趋势。当Cd浓度为1 mg·L⁻¹、 Zn浓度为20 mg·L⁻¹时(S1),PPO活性下降最快,相比 对照减少了16.9%。随后的处理中,PPO活性下降较 为缓慢,S4处理下PPO活性相比对照降低了36.9%。

过氧化物酶(POD)是通过还原或清除过氧化物, 防止植物受到其损害的酶,除此之外,POD还参与催 化光合作用、呼吸和代谢过程^[28]。由图4B可知,随着 Cd、Zn浓度不断增高,雪里蕻植株内的POD活性呈低 促高抑现象。相比对照,当重金属的浓度Cd≤2 mg· L⁻¹、Zn≤50 mg·L⁻¹时,Cd、Zn 胁迫对POD 活性起促进 作用,并在S1处理时达到最大值656 µg·g⁻¹FW· min⁻¹。当重金属的浓度 Cd>2 mg·L⁻¹、Zn>50 mg·L⁻¹ 时,Cd、Zn胁迫对POD活性起持续抑制作用,在S4处 理达到最低值354 µg·g⁻¹FW·min⁻¹。朱成豪等^[25]发现 随着砂培营养液中Cd²⁺和Zn²⁺的浓度不断增加,麻疯 树幼苗叶片POD活性亦呈先升后降的趋势。我们推 测低 Cd、Zn 浓度下 POD 活性升高的原因是由于 POD 对潜在重金属胁迫存在主动防御机制;过量的Cd会 取代植物 POD 酶巯基的必需金属,从而产生过量 O2 和H₂O₂,造成膜脂过氧化,而过量的Zn会使POD活性 降低或失活,使得植株受到伤害,从而降低POD活 性[5]。

过氧化氢酶(CAT)是一种存在于生物体内的金属酶,可将对生物体有害的H₂O₂分解为H₂O和O₂。 由图4C可看出,砂培下雪里蕻植株内CAT活性随着Cd、Zn浓度的不断增高而逐渐降低,并在S4处理时达到最低值15.0U·g⁻¹FW·min⁻¹。Feng等^[29]研究表明,当植物中的重金属含量达到一定浓度时,CAT活性实为于植物



Figure 4 Enzymatic activities and malonaldehyde content of potherb mustard

受重金属胁迫的程度。朱成豪等^[25]发现当Cd、Zn浓度尤其是Cd浓度持续增加到一定程度时,麻疯树植株受到毒害作用而产生的过量O₂会使CAT氧化压力增大,失去调节平衡,催化H₂O₂分解的能力减弱,植物细胞可能发生膜脂过氧化,CAT活性降低。

丙二醛(MDA)是植物在逆境条件下发生膜脂过 氧化产生的化学物质,其含量可以反映植物受外界胁 迫下膜脂过氧化的程度^[31]。不同浓度 Cd、Zn处理下 雪里蕻叶片内 MDA 含量变化见图 4D。随着 Cd、Zn 浓度的升高,雪里蕻植株内 MDA 含量不断增高;在 S4 处理下雪里蕻细胞的膜脂过氧化程度最为严重, MDA 含量达到最大值 36.7 μmol·g⁻¹FW。Chen等^[27]发 现毛竹叶片中 MDA 含量随着水培基质中 Cu浓度的 增高而略有提高,在 100 μmol·L⁻¹ Cu处理下最大,但 与对照相比没有达到显著水平;他们推测大部分 Cu 积累于毛竹的根部,因此过量的 Cu 胁迫不会对叶片 造成显著的脂质过氧化反应。

2.4 雪里蕻中Cd、Zn的含量

由图 5 可以看出,无论砂培或土培,雪里蕻茎叶中 Cd和Zn的含量均普遍低于根系(除土培T1、T2处理外),且茎叶、根系中Cd和Zn含量均随着基质中重金属浓度的增高呈线性上升趋势,这与刘周莉等^[32]有关Cd超富集植物忍冬的研究结果相似。

土培试验中(图5A和图5B),T4处理(污染土:干

净土=1:1)植物中重金属含量达到最大值,即Cd为 38.5 mg·kg⁻¹(茎叶)和41.4 mg·kg⁻¹(根系),Zn为 1483 mg·kg⁻¹(茎叶)和1835 mg·kg⁻¹(根系)。根据曾 超珍等^[33]提供的重金属超富集植物临界含量标准,土 培T4处理时Cd、Zn在雪里蕻植株茎叶中的浓度最大 值均未超过Cd和Zn超富集植物标准临界值100 mg· kg⁻¹和10000 mg·kg⁻¹。砂培试验中(图5C和图5D), S4处理植物中重金属含量达到最大值,即Cd为50.4 mg·kg⁻¹(茎叶)和78.9 mg·kg⁻¹(根系),Zn为1624 mg· kg⁻¹(茎叶)和3571 mg·kg⁻¹(根系)。

2.5 雪里蕻Cd、Zn富集和转运能力

生物富集系数(BCF)主要用于评判植物从土壤 中富集重金属的能力,表示植物提取土壤中重金属的 效率。由图 6A 可看出,随着 Cd浓度的升高,BCF变 化不明显。曾超珍等^[33]总结了前人对重金属超富集 植物 BCF 的界定,而本试验各处理下雪里蕻对 Cd 的 BCF 值均大于临界值 1,表示雪里蕻对土壤中 Cd 具有 较好的富集能力。由图 6B 可知,雪里蕻 Zn 的 BCF 在 对照处理时出现最大值 0.801,小于超富集植物 BCF 临界值 1。

转运系数(TF)用于表示植物将重金属从根系转运至地上部分的能力,在一定程度上可以用于判断植物对某种重金属的接受和适应能力^[33]。由图 6A、图 6B 可知,土培下,随着 Cd、Zn 浓度的增大,雪里蕻 Cd



图5 土培和砂培下雪里蕻茎叶和根系中Cd和Zn含量

Figure 5 Cd and Zn contents in leaf and root of potherb mustard under soil and sand cultivation patterns

的 TF 先增高后降低, Zn 的 TF 则呈现波动趋势。Cd 的TF在T1、T2处理(污染土:干净土≤1:9)时大于1. 表明雪里蕻从土壤中吸收的 Cd 主要累积在茎叶部 分。随着Cd、Zn浓度进一步增大,雪里蕻对Cd的转 运能力有所下降;而Zn的TF始终小于1,表明Zn主 要在根系累积。砂培下,Cd、Zn的TF均随着生长基 质中浓度的升高而降低,但降低幅度较小,且均小于 1(图 6C、图 6D)。雪里蕻在砂培下对 Cd、Zn 的累积 主要集中在根系,且Cd、Zn胁迫越强根系Cd、Zn占 比越大。土培下雪里蕻对Cd、Zn胁迫具有更强的耐 受性,这可能与土壤的理化性质及土壤中能够与雪 里蕻产生共生关系的微生物有关[19],有利于植物根 部对土壤中重金属的吸收,进而转运到植物地上部 分;而在砂培Cd、Zn的直接胁迫下,雪里蕻启动自主 防御机制,进入根系的Cd、Zn首先被根部细胞壁及 碳水化合物固定,被束缚于果胶位点^[34],使得Cd、Zn 的转运系数降低。

金属提取量(MEA)用于评价植物所能提取的重 金属总量,是基于生物量对植物修复潜力的评判指 标。土培中,随着Cd、Zn浓度的升高,雪里蕻Cd、Zn 的MEA均呈先增加后减小的趋势(图6A、图6B),这 与康红等^[35]对印度芥菜金属提取量的研究结果变化 趋势相似。MEA在T2处理时达到最大值,分别为 63.8 µg·pot⁻¹(Cd)和3181 µg·pot⁻¹(Zn)。可见若以 MEA作为植物修复潜力的评判指标,雪里蕻适宜修 复中、低重金属污染程度土壤。砂培下,随着Cd、Zn 浓度的升高,雪里蕻Cd、Zn的MEA均呈不断升高的 趋势(图6C、图6D);在S4处理时达到最大值,分别为 102 µg·pot⁻¹(Cd)和3612 µg·pot⁻¹(Zn)。结合图2各 处理下雪里蕻的生长情况可知,随着Cd、Zn浓度的升 高,雪里蕻虽然表现出毒性症状,但并没有死亡。雪 里蕻生长快、根系发达且对重金属具有较强的吸收和 富集能力,说明雪里蕻具有作为重金属提取植物的潜 力,可为植物修复重金属污染土壤提供参考。

2.6 雪里蕻种子对于Cd、Zn胁迫的耐受性

发芽率是检测种子质量及萌发状况的重要指标 之一;发芽势是种子发芽高峰时段内种子发芽数占测 试种子总数的百分比,是判断种子优劣、出苗是否整 齐、幼苗强弱及生物量的重要指标^[36]。由图7可知, Cd、Zn胁迫对雪里蕻种子发芽率和发芽势有不同程 度的影响。其中,发芽率在低浓度(Cd 2 mg·L⁻¹、Zn 100 mg·L⁻¹)时趋于平稳;后随重金属Cd、Zn浓度升高









图 7 Cd、Zn 胁迫下雪里蕻种子的发芽势和发芽率 Figure 7 Germination potential and germination rate of potherb mustard seed under Cd and Zn stress

呈不断降低趋势,并在 G4 处理下达到最低,为 18.3%,较对照降低了 19.5%。这表明雪里蕻种子对 低浓度 Cd、Zn具有一定的耐受性,而当超出该浓度范 围后,雪里蕻种子的萌发会受到重金属 Cd、Zn胁迫的 抑制。当 Cd≥5 mg·L⁻¹、Zn≥250 mg·L⁻¹时,发芽势呈不 断降低趋势,在 G4 时达最低,为6.70%,较对照降低 了 8.30%。我们推测较低 Cd、Zn浓度处理有利于提 高雪里蕻胚的生理活性,从而加速雪里蕻种子的萌 发^[37],而当超出一定浓度范围后,Cd、Zn胁迫会抑制 种子内酶(如 POD 等)活性^[38],抑制种子内大分子营养 物质和有毒害作用的过氧化物的分解,从而影响种子的萌发^[37]。胡娜等^[16]研究表明,由于Zn属于植物生长发育必需的微量元素,植物对Zn的需求量较其他微量元素大;但当土壤中Zn超出植物维持生长所需含量后则会对植物造成毒害作用。Cd会破坏植物线粒体等细胞器,对植物产生较明显的毒害作用。该结果说明,适度的重金属Cd、Zn对雪里蕻种子的萌发有一定的促进作用,而高浓度重金属(Cd>5 mg·L⁻¹、Zn>250 mg·L⁻¹)会超出雪里蕻种子的耐受性,抑制种子萌发。

3 结论

(1)随着生长基质中Cd、Zn浓度的不断升高,土 培中雪里蕻生物量呈先增长后降低的趋势,而砂培中 生物量则不断降低;土培和砂培中雪里蕻叶绿素和可 溶性蛋白含量均呈下降趋势;雪里蕻体内多酚氧化酶 和过氧化氢酶活性呈不断降低趋势,而过氧化物酶活 性呈低促高抑现象,表明雪里蕻通过调节体内酶防御 系统降低Cd、Zn胁迫;丙二醛含量则不断升高,表明 逐渐升高的Cd、Zn胁迫导致活性氧在植物内的积累 和氧化胁迫的发生。

(2)雪里蕻植株体内重金属含量随生长基质中 Cd、Zn浓度升高而呈线性上升趋势。根据耐性系数、 富集系数、转运系数和金属提取量计算结果,雪里蕻对Cd、Zn胁迫具有较强的耐受性和富集、转运能力(且Cd>Zn),具有较大的潜力作为修复植物应用于Cd/Zn中、低污染程度的土壤。

(3)随着生长基质中Cd、Zn浓度的不断升高,雪 里蕻种子发芽率呈现先平稳后不断降低的趋势。表 明雪里蕻种子对低浓度的Cd、Zn有一定的耐受性, 而当Cd、Zn浓度不断增高,雪里蕻种子的萌发会受 到抑制。

参考文献:

- Khalid S, Shahid M, Niazi N K, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Geochemi*cal Exploration, 2017, 182:247-268.
- [2] 孟德佳, 刘杰, 俞果, 等. 锰对超富集植物青葙镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5):1017-1025.
 MENG De-jia, LIU Jie, YU Guo, et al. Effect of manganese on cadmi-

um accumulation in *Celosia argentea* Linn., a hyperaccumulator[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5):1017-1025.

- [3] 刘勇, 刘燕, 杨丹, 等. 三叶草(*Trifolium repens*)用于土壤镉污染的 修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2226-2232.
 LIU Yong, LIU Yan, YANG Dan, et al. Remediation potential of *Trifolium repens* used in cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2226-2232.
- [4] Ran X, Feng S, Juan D, et al. Screening of native plants from wasteland surrounding a Zn smelter in Feng County China, for phytoremediation
 [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2018, 162:178–183.
- [5] Guo D, Ali A, Ren C, et al. EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss) and evaluation of its bioindicators[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 167:396–403.
- [6] 黄建洪,伏江丽,严鑫睿,等.羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋 植物潜力[J].环境科学,2020,41(8):3829-3835.
 HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, et al. Acid mine wasteland reclamation by *Juncus ochraceus* buchen as a potential pioneer

plant[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3829–3835.

- [7] 叶文玲,陈增,徐晓燕.铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J].环境科学与技术,2015,38(5):11-14,20.
 YE Wen-ling, CHEN Zeng, XU Xiao-yan. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in copper mine tailings in Tongling of Anhui Province[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(5):11-14, 20.
- [8] 薛清泼, 魏浩, 张国瑞, 等. 某铀矿周边土壤典型重金属污染特征及 植物筛选[J]. 中国矿业, 2019, 28(6):81-88.

XUE Qing-po, WEI Hao, ZHANG Guo-rui, et al. Pollution characteristics of typical heavy metals in soil and plant screening around a uranium mine[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(6):81–88.

[9] 沈锋.典型铅锌冶炼区农田土壤重金属污染及植物化学联合修复 研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.

SHEN Feng. Heavy metal pollution of farmland soil in a typical Pb/Zn

smelting area and phyto-chemistry combined remediation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.

[10] 田晔. 里氏木霉 FS10-C强化修复铜污染土壤的研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2012.

TIAN Ye. Enhanced remediation of copper contaminated soil by *Trichoderma reesei* FS10-C[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012.

[11] Tauqeer H M, Ali S, Rizwan M, et al. Phytoremediation of heavy metals by Alternanthera bettzickiana: Growth and physiological response [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2016, 126:138–146.

- [12] Zheng W, Fei Y, Huang Y. Soluble protein and acid phosphatase exuded by ectomycorrhizal fungi and seedlings in response to excessive Cu and Cd[J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, 21:1667– 1672.
- [13] 陈顺钰, 韩航, 陈加松, 等. 柳叶箬对 Pb 胁迫的生理响应及其体内 Pb 的亚细胞分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):884-890.

CHEN Shun-yu, HAN Hang, CHEN Jia-song, et al. Effects of Pb stress on physiological characteristics and subcellular distribution of Pb in *Isachne globose*[J]. *Journal of Agro – Environmental Science*, 2017, 36(5):884–890.

[14] 谢建治,张书廷,赵新华,等. 潮褐土镉锌复合污染对小白菜生长的影响[J]. 天津大学学报, 2005, 38(5);426-431.

XIE Jian-zhi, ZHANG Shu-ting, ZHAO Xin-hua, et al. Effects of cadmium and zinc compound pollution on the growth of non-heading Chinese cabbage in cinnamon soil[J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(5):426-431.

[15]杨红霞,陈俊良,刘崴.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 Hong-xia, CHEN Jun-liang, LIU Wei. Advances in studies on the toxicity and detoxification mechanism of cadmium to plants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(2):1-8.

[16] 胡娜,李葆春,姚立蓉,等.不同重金属胁迫对盐生草种子萌发特性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(6):66-81.
HU Na, LI Bao-chun, YAO Li-rong, et al. Effects of different heavy metal on the seed germination and establishment of *Halogeton glmera*-

tus[J]. Pratacultural Science, 2019, 28(6):66-81.

[17] 王慧忠,何翠屏,赵楠. 镉对草坪植物生长特性及生物量的影响[J]. 草业科学, 2003, 20(5):32-34.

WANG Hui-zhong, HE Cui-ping, ZHAO Nan. The effects of cadmium on turfgrass growth characteristics and biomass[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(5):32-34.

[18] 田晓锋,魏虹,贾中民,等.重金属镉(Cd²⁺)对梧桐幼苗根生长及 根系形态的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2008,33 (2):93-98.

TIAN Xiao-feng, WEI Hong, JIA Zhong-min, et al. Effects of cadmium on growth and root's forms of *Firmiana platanifolia* seedlings[J]. *Journal of Southwest China Normal University* (*Natural Science Edition*), 2008, 33(2):93–98.

[19] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environmental International*, 2020, 134:105046.

[20] 杜建雄, 李剑峰, 张淑卿, 等. 汞胁迫对 4 个草坪草品种幼苗生理

2020年10月 郭堤,等:雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究

特性及养分积累的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8):1767-772. DU Jian-xiong, LI Jian-feng, ZHANG Shu-qing, et al. Effects of Hg²⁺ stress on physiological characteristics and nutrient accumulation of four turfgrass varieties at seedling stage[J]. *Southwest China Journal* of Agricultural Sciences, 2019, 32(8):1767-772.

[21] 刘亮. 镉对芥菜的毒害及磷供应对作物镉吸收的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.

LIU Liang. Cadmium toxicity of *Brassica juncea* (L.) Coss. and the effects of exogenous phosphorus on the plant cadmium absorption[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2007.

- [22] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd、Fe及其复合污染对烟草叶片几项生理 指标的影响[J]. 生态学报, 1992, 12(2):147-154.
 LI Yuan, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Effects of Cd, Fe and their combined pollutions on several physiological indexes of tobacco leaves
 [J]. Acta Ecologica Sinica, 1992, 12(2):147-154.
- [23] 孙静克,宗良纲,付世景,等.不同施肥处理对镉污染土壤雪里蕻 光合特性的影响[J].南京农业大学学报,2007,30(4):82-86. SUN Jing-ke, ZONG Liang-gang, FU Shi-jing, et al. Effects of different fertilizations on photosynthetic characteristics of potherb mustard on Cd-contaminated soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2007, 30(4):82-86.
- [24] 姚俊修,乔艳辉,杨庆山,等.重金属镉胁迫对黑杨派无性系光合 生理及生长的影响[J].西北林学院学报,2020,35(2):40-46.
 YAO Jun-xiu, QIAO Yan-hui, YANG Qing-shan, et al. Effects of cadmium stress on the growth and photosynthesis of *Aigeiros* clones
 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2):40-46.
- [25] 朱成豪, 唐健民, 高丽梅, 等. 重金属铜、锌、镉复合胁迫对麻疯树 幼苗生理生化的影响[J]. 广西植物, 2019, 39(6):752-760. ZHU Cheng-hao, TANG Jian-min, GAO Li-mei, et al. Effects of combined stress of heavy metals Cu, Zn and Cd on physiology and biochemistry of *Jatropha curcas* seedlings[J]. *Guihaia*, 2019, 39(6):752-760.
- [26] Martino E, Franco B, Piccoli G, et al. Influence of zinc ions on protein secretion in a heavy metal tolerant strain of the ericoid mycorrhizal fungus *Oidiodendron maius*[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2002, 231(1/2):179–185.
- [27] Chen J, Shafi M, Li S, et al. Copper induced oxidative stresses, antioxidant responses and phytoremediation potential of *Moso bamboo(Phyl-lostachys pubescens)*[J]. Scientific Reports, 2015, 5:13554.
- [28] Cheng J, Qiu H, Chang Z, et al. The effect of cadmium on the growth and antioxidant response for freshwater algae *Chlorella vulgaris*[J]. *Springerplus*, 2016, 5:1290.
- [29] Feng M, Yin H, Peng H, et al. Hexavalent chromium induced oxidative stress and apoptosis in *Pycnoporus sanguineus*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228:128–139.
- [30] Chen M, Zhang L L, Li J, et al. Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to toxic metal lead[J]. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2015, 122: 313-321.

[31] 徐金波, 徐迎春, 赵慧, 等. Pb 胁迫条件下狭叶香蒲种子的萌发特 性及其幼苗的生理响应[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 74-80.

XU Jin-bo, XU Ying-chun, ZHAO Hui, et al. Seed germination characteristics and seedling physiological response of *Typha angustifolia* under Pb stress[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(3):74-80.

[32] 刘周莉,何兴元,陈玮.忍冬:种新发现的镉超富集植物[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4):666-670.
 LIU Zhou-li, HE Xing-yuan, CHEN Wei. *Lonicera japonica* Thunb.:

A newly discovered Cd hyper-accumulator[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4):666-670.

 [33] 曾超珍, 严明理, 刘志祥. 重金属超积累植物及其进化: 事实与争 议[J]. 植物生理学报, 2019, 55(8): 1063-1074.
 ZENG Chao-zhen, YAN Ming-li, LIU Zhi-xiang. Heavy metal hyper-

accumulators and their evolution: Facts and controversies[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(8):1063–1074.

- [34] 晋海军,王海霞. 植物对重金属镉的吸收与耐受机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(24):52-57.
 JIN Hai-jun, WANG Hai-xia. Plant absorption and tolerance mechanism to heavy metal cadmium: Research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(24):52-57.
- [35] 康红,杨卓,王海林,等.印度芥菜对土壤中重金属Pb、Cd、Zn的吸收与积累特性研究[J].安徽农业科学,2010,38(34):19378-19381. KANG Hong, YANG Zhuo, WANG Hai-lin, et al. Study on the absorption and accumulation characteristics of Indian mustard to heavy metals Pb, Cd and Zn in soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(34):19378-19381.
- [36] 唐蛟, 马学军, 霍继鹏, 等. 重金属 Cr、Hg胁迫对油白菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2019, 47 (2):8-13.

TANG Jiao, MA Xue-jun, HUO Ji-peng, et al. Effects of heavy metal Cr and Hg stress on seed germination and seedling growth of *Brassica* chinensis var. oleifera[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(2):8–13.

- [37] 陈丽丽, 付媛媛, 王艳萍, 等. 镉锌胁迫对小麦和2种杂草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报, 2019, 29(1):50-57. CHEN Li-li, FU Yuan-yuan, WANG Yan-ping, et al. Effects of Cd²⁺ and Zn²⁺ on seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* and 2 weed species[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2019, 29(1):50-57.
- [38] 陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 等. Pb、Cd和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗 生长及体内抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (4):647-655.

CHEN Shun-yu, HAN Hang, XUE Ling-yun, et al. Effects of Pb, Cd, and acid stress on seed germination, seedling growth, and antioxidant enzyme activities of *Liquidambar formosana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4):647-655.