DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04146

苗期重金属胁迫下蓖麻生长、生理和重金属积累效应

吕冬梅^{1,2,**} 朱广龙^{1,**,*} 王 玥^{1,**} 施 雨¹ 卢发光¹ 任 桢¹
刘昱茜¹ 顾立峰¹ 卢海潼¹ Irshad Ahmad¹ 焦秀荣¹ 孟天瑶¹
周桂生^{1,*}

¹ 扬州大学教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009; ² 加拿大麦吉尔大学植物科学系, 加拿大蒙特利尔 H9X3V9

摘 要: 农业面源和重金属污染日益加剧, 严重威胁农业生态环境与人类健康。探究作物对重金属的累积效应及生理机制对重金属污染的治理意义重大。本文以淄蓖 5 号为材料, 研究重金属处理下(Cu、Zn、Cd, 处理浓度分别为 0、30、60、120 mg L⁻¹)蓖麻幼苗对各重金属的积累效应及相关生理机制, 为重金属污染土壤的修复与防治奠定基础。重金属处理显著影响蓖麻植株的生长、生理及对重金属的积累。随着重金属浓度的增加, 株高先增后降, 在 60 mg L⁻¹ 时达最大值; 根长、鲜重、干重显著降低。叶片中 SOD 活性先降后增, 在 10 DAS (播种后天数) 120 mg L⁻¹ Cu 和 Zn 处理下活性最高, 分别增加了 45.5% 和 31.8%; POD 活性在 10 DAS 先降后增, 而在 25 DAS 和 45 DAS 显著增加, 且 POD 活性随生长进程的推进增加显著。可溶性蛋白含量仅在 120 mg L⁻¹ Cu 处理下显著增加, 分别增加了 18.8%、66.7% 和 83.3%。MDA 含量随着处理浓度的增加显著增加, 随生育进程的推进而显著降低, 且 Cd 处理下的 MDA 含量显著高于 Cu 和 Zn 处理。蓖麻植株对 Cu、Zn、Cd 的积累量随处理浓度的增加而递增, 在 120 mg L⁻¹ 浓度下积累量最大, 其中对 Zn 的积累量最高, Cd 次之, 各器官对重金属的积累量表现为根>茎>叶。表明蓖麻对重金属具有一定的耐受性, 蓖麻植株主要通过提高抗氧化酶活性缓解重金属胁迫; 蓖麻对不同重金属的积累具有器官特异性; 种植蓖麻可作为修复 Cu、Zn、Cd 等重金属污染土壤的有效途径之一。

关键词: 蓖麻; 重金属胁迫; 生长特性; 重金属积累; 生理机制

Growth, physiological, and heavy metal accumulation traits at seedling stage under heavy metal stress in castor (*Ricinus communis* L.)

LYU Dong-Mei^{1,2,**}, ZHU Guang-Long^{1,**,*}, WANG Yue^{1,**}, SHI Yu¹, LU Fa-Guang¹, REN Zhen¹, LIU Yu-Qian¹, GU Li-Feng¹, LU Hai-Tong¹, Irshad Ahmad¹, JIAO Xiu-Rong¹, MENG Tian-Yao¹, and ZHOU Gui-Sheng^{1,*}

¹ Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, the Ministry of Education, Yangzhou University / Co-Innovation Center for Modern Production Technology in Grain Crops of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; ² Plant Science Department, MacDonald Campus, McGill University, Montreal H9X3V9, Canada

Abstract: Agricultural ecology environment and human health are seriously threatened by aggravating agricultural non-point source and heavy metals pollution. It is of great significance to explore the cumulative effect of crops on heavy metal pollution and its physiological mechanism. A castor (*Ricinus communis* L.) variety Zibi 5 was used to study the accumulation effect of heavy metals and associated physiological mechanism under heavy metals treatments (Cu, Zn and Cd at 0, 30, 60, and 120 mg L⁻¹ concen-

本研究由国家重点研发计划项目(2018YFE0108100, 2018YFD0800201), 扬州大学科技创新培育基金(2019CXJ198), 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2019]47)和扬州市绿扬金凤人才计划(2018)项目资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFE0108100, 2018YFD0800201), the Science and Technology Innovation Cultivating Fund of Yangzhou University (2019CXJ198), the Innovation and Promotion of Forestry Science and Technology Program of Jiangsu Province (LYKJ[2019]47), and the Talent Project of 'LyuYangJinFeng' of Yangzhou Government (2018).

* 通信作者(Corresponding authors): 周桂生, E-mail: gszhou@yzu.edu.cn; 朱广龙, E-mail: zhuguang2007@163.com

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 吕冬梅, E-mail: dongmei.lyu@mail.mcgill.ca; 朱广龙, E-mail: zhuguang2007@163.com

Received (收稿日期): 2020-07-03; Accepted (接受日期): 2020-10-14; Published online (网络出版日期): 2020-11-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201117.1842.002.html>

trations). The results showed that seedling growth, physiological traits and heavy metals accumulation significantly affected by heavy metal treatments. Plant height was increased to the maximum with 60 mg L^{-1} and then decreased. However, root length, fresh weight and dry weight were all decreased under heavy metal treatments. In general, SOD activity was decreased at low treatment concentration but increased at high treatment concentration, the highest activity was showed at 120 mg L^{-1} under Cu and Zn treatments at 10 DAS (days after sowing), which were 45.5% and 31.8% higher than that under CK, respectively. POD activity was first decreased and then increased on 10 DAS, but significantly increased in both 25 DAS and 45 DAS, as well as prominently increased with prolonged the growth periods. Soluble protein was only significantly increased under 120 mg L^{-1} Cu treatment, and increased by 18.8%, 66.7%, and 83.3% at each growth stage, respectively. MDA content was significantly increased with the increase of treatment concentration and significantly decreased with prolonged the growth periods, and MDA content was significant higher under Cd treatment than that under Cu and Zn treatments. The accumulation contents of Cu, Zn, and Cd in castor plant were gradually increased with the increase of treatment concentration, and the maximum accumulation was at 120 mg L^{-1} concentration. Among of them, the accumulation of treatment concentration increased, and the maximum accumulation showed at 120 mg L^{-1} concentration. Among them, the accumulation of Zn was the highest, followed by Cd. The accumulation content of heavy metals in each organ was shown as root > stem > leaf. This study suggested that castor has a certain tolerance to heavy metals, which was increased the antioxidase activity to alleviate heavy metals stress. The castor has organ specificity in heavy metals accumulation. It is an effective approach to plant castor to repair soil pollution by heavy metals such as Cu, Zn, and Cd.

Keywords: castor; heavy metal stress; growth trait; heavy metal accumulation; physiological mechanism

近些年, 因农业化肥的不当施用、化工废弃物与生活废水的排放等因素导致的全球农业面源和土壤重金属污染日益加剧^[1]。地表水作为农业生产灌溉的主要水源, 富含植物所需的多种养分, 同时也是各种重金属的储存库, 是农田重金属污染的重要污染源与迁移载体^[2]。土壤中的重金属对作物的出苗和立苗会造成一定程度的影响, 且随食物链的迁移, 其对生态环境和人类健康也会造成潜在或直接的危害^[3-4]。因人口的激增, 我国所面临的能源短缺和环境污染等问题日益严重。发展生物质能源、修复土壤重金属污染是缓解我国能源短缺、改善生态环境和提高农业生产的重要途径^[5]。

蓖麻(*Ricinus communis* L.)属大戟科蓖麻属植物, 分布广、适应性强, 主要在我国东北、西北、华北等地区种植。蓖麻种子含油量高达 50%左右, 且蓖麻籽油理化性质稳定, 巴西、印度等国已将蓖麻籽作为工业原料生产生物柴油并商业化^[6]。大量研究显示, 蓖麻对多种重金属具有一定的耐受性, 其耐受能力因重金属的类型和污染程度而异。Huang 等^[7]研究发现, 蓖麻对 Cu 积累能力较高, 其根系分泌的酒石酸、柠檬酸等有助于增强植株对 Cu 胁迫的耐受性。当土壤中 Cd 浓度低于 40 mg kg^{-1} 时, 可促进蓖麻植株的生长; 当 Cd 浓度超过 200 mg kg^{-1} 时, 蓖麻生长受到抑制但仍未致死, 表明蓖麻对高浓度 Cd 污染具有一定的耐受性^[8]。重金属在植物体内的积累程度因植物和重金属的种类而异。就同一作物而言, 不同重金属在各器官的积累浓度也不同^[9]。易心钰等^[10]研究发现, 不同金属离子在蓖麻体内的积累浓

度不同, 表现为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$ 。陆晓怡等^[11]的研究也表明, 蓖麻对 Zn 污染土壤的修复效果较好。

重金属是一种逆境胁迫因子, 重金属胁迫下诱导产生的活性氧(reactive oxygen species, ROS)会破坏细胞生长与分裂过程, 紊乱各种代谢活动, 进而影响植株生长甚至致死^[12]。高等植物对重金属胁迫的第一防御系统由各种抗氧化剂(主要为抗氧化酶)构成, 以分解或中和产生的活性氧^[13]。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)是植物体重要的抗氧化保护酶, 其活性的强弱反映了植物组织对超氧化物、过氧化物和有害离子的清除能力, 体现植物对逆境胁迫的抗性^[14]。此外, 植物体内产生的可溶性蛋白等渗透调节物质也可缓解重金属胁迫。上述研究主要集中于蓖麻对不同重金属累积效应方面, 关于蓖麻植株不同器官对各重金属累积效应及相关生理机制方面的研究罕见报道。本研究设置 Cu、Zn、Cd 3 种重金属处理, 研究不同重金属胁迫对蓖麻幼苗生长的影响, 探究蓖麻不同器官对重金属积累的差异及相关生理机制, 以期为重金属污染土壤中蓖麻的种植和土壤修复提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年在扬州大学农业部农业与农产品安全国际合作联合实验室进行。试验材料为淄蓖 5 号, 种子由山东省淄博市农科院提供。试验选用内径 15.0 cm、下径 12.0 cm、高为 7.5 cm 盆底无孔的

育苗专用塑料盆进行盆栽实验。采用单因素随机区组试验设计,以重金属 Cu、Zn、Cd 为处理因子,每个处理因子设置 0 (对照)、30、60 和 120 mg L⁻¹ 4 个浓度梯度,每个处理 3 个重复,每个重复种植 5 盆。播种基质为细沙,经纯水洗净后高温消毒干燥,每盆装细沙 400 g,与 90 mL 各浓度重金属溶液充分混匀后播种,对照组加入超纯水与细沙混合。

播种前将蓖麻种子用 75℃ 温水浸泡 15 min,每盆播种 10 粒,然后覆盖细沙约 2.0 cm 厚。播完后,将塑料盆置于培养箱中发芽出苗,培养条件为:温度 20℃,湿度为 60%~70%,光照时长 16 h,光照强度 500 μmol m⁻² s⁻¹。在蓖麻幼苗生长期间,每隔 7 d 加入 Hoagland^[15] 营养液 50 mL,以保证蓖麻幼苗生长所需的营养物质摄入。

1.2 参数测定及方法

1.2.1 株高、根长、鲜重和干重 播种后第 10 天和第 25 天,每个处理每个重复取 5 株幼苗,称量鲜重后分为根和茎叶两部分,测定株高及根长。再将样品放入烘箱以 105℃ 杀青 30 min,然后 80℃ 烘干至恒重,分别称取根和茎叶的干重,并计算整株干重。

1.2.2 SOD、POD、MDA 及可溶性蛋白 播种后第 10、25 和 45 天分别摘取蓖麻植株最上部叶片,液氮冷冻后贮藏于-80℃ 超低温冰箱,测定超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,以及可溶性蛋白和丙二醛(MDA)含量。

采用氯化硝基四氮唑蓝光还原法^[15]测定 SOD 和 POD 活性,采用硫代巴比妥酸比色法^[16]测定 MDA 含量,采用考马斯亮蓝法^[16]测定可溶性蛋白含量。

1.2.3 重金属元素吸收积累量 播种后第 10、25 和 45 天,每个处理每个重复随机取 5 株幼苗,测定重金属元素的积累量。第 10 天和第 25 天因幼苗较小用植株整体测定,第 45 天将植株分为根、茎、叶分别测定。采用原子吸收光谱法^[17-18]测 Cu²⁺、Zn²⁺ 和 Cd²⁺ 含量。

1.3 数据分析

采用 Statistix 9 统计分析数据,最小显著差异法(LSD_{0.05})进行多重比较, SigmaPlot 10.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 重金属对蓖麻幼苗株高、根长、鲜重和干重的影响

重金属处理显著影响蓖麻的株高。在 Cu 和 Zn 处理下,随处理浓度的增加,蓖麻 10 DAS 和 25 DAS 的株高先增后降,在处理浓度为 60 mg L⁻¹ 时达最大值(图 1)。与对照相比,30、60 和 120 mg L⁻¹ 浓度 Cu 处理下,10 DAS 和 25 DAS 株高分别增加了 12.5%、46.3%、-5.2%和 8.0%、20.0%、7.0%, Zn 处理下株高增加了 9.8%、9.8%、-2.5%和 2.0%、20.0%、-12.0%。而在 Cd 处理下,随处理浓度的增加,蓖麻 10 DAS 的株高在处理浓度为 30 mg L⁻¹ 时株高最大,与对照相比增加了 7.3%;而在 25 DAS,株高随处理浓度的增加而降低,与对照相比分别下降了 5.0%、11.9%和 7.9% (图 1)。

根长对 3 种重金属胁迫的反应各异。Cu 处理下,10 DAS 根长随处理浓度增加略微下降但不显著,25 DAS 根长先增后降,与对照相比,在 60 mg L⁻¹ 和 120 mg L⁻¹ 处理浓度下分别降低了 14.2%和 14.8%。Zn 处理下,10 DAS 根长先降后增,与对照相比,

图 1 重金属处理下蓖麻幼苗株高的变化

Fig. 1 Variation of plant height of castor seedlings under different heavy metals treatments

10 DAS: 播种后第 10 天; 25 DAS: 播种后第 25 天。柱上同一时期不同大、小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

10 DAS: 10 days after seeding; 25 DAS: 25 days after seeding. Values followed by different capital and small letters above the bar at same growth periods are significantly different among treatments at the 0.05 probability level.

10 DAS 根长在 30 mg L^{-1} 处理下降低了 6.5%, 而在 60 和 120 mg L^{-1} 处理下分别增加了 14.5%和 9.7%; 而 25 DAS 根长逐渐降低, 与对照相比分别下降了 9.3%、0.6%和 12.3%。Cd 处理下, 10 DAS 根长呈增加的趋势, 与对照相比分别增加了 22.6%、6.5%和 9.7%; 相反的, 25 DAS 根长逐渐下降, 分别降低了 14.8%、13.6%和 18.5% (图 2)。

3 种重金属处理下, 蓖麻 10 DAS 的植株鲜重和干重显著降低, 25 DAS 的鲜重和干重仅在 Cd 处理下减小, 而 Cu 和 Zn 处理下无显著规律(表 1)。与对照相比, 10 DAS Cu 处理下蓖麻鲜重和干重分别下降了 12.6%、36.9%、21.0%和 30.0%、13.3%、20.0%;

Zn 处理下鲜重和干重分别降低了 24.8%、5.1%、39.7%和 13.3%、3.3%、33.3%; Cd 处理下分别降低了 12.1%、51.4%、19.6%和 26.7%、53.3%、13.3%。25 DAS Cd 处理下鲜重和干重分别降低了 40.2%、30.9%、21.2%和 11.5%、8.2%、6.6% (表 1)。

2.2 蓖麻幼苗对重金属元素的吸收与积累

蓖麻植株对 Cu、Zn、Cd 3 种重金属元素的积累量随处理浓度的增加而递增, 除 25 DAS 的 Cu 外, 均在 120 mg L^{-1} 浓度下积累量最高, 其中对 Zn 的吸收量最高, Cd 次之。与对照相比, 10 DAS 各浓度处理下, Cu、Zn、Cd 的积累量分别增加了 22.2%、133.3%、288.9%、59.5%、86.5%、345.9%和 1125.0%、

图 2 重金属处理下蓖麻幼苗的根长变化

Fig. 2 Variation of root length of castor seedlings under different heavy metals treatments

10 DAS: 播种后第 10 天; 25 DAS: 播种后第 25 天。柱上同一时期不同大、小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。
10 DAS: 10 days after seeding; 25 DAS: 25 days after seeding. Values followed by different capital and small letters above the bar at same growth periods are significantly different among treatments at the 0.05 probability level.

表 1 重金属处理下蓖麻幼苗植株的鲜重和干重变化

Table 1 Variation of fresh and dry weight under different heavy metals treatments in castor seedlings

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg L^{-1})	10 DAS		25 DAS	
		鲜重 Fresh weight (g plant^{-1})	干重 Dry weight (g plant^{-1})	鲜重 Fresh weight (g plant^{-1})	干重 Dry weight (g plant^{-1})
Cu	0	2.14 a	0.30 a	3.11 c	0.61 c
	30	1.87 b	0.21 d	3.33 b	0.71 b
	60	1.35 d	0.26 b	3.00 d	0.55 d
	120	1.69 c	0.24 c	3.75 a	0.81 a
Zn	0	2.14 a	0.30 a	3.11 b	0.61 a
	30	1.61 c	0.26 b	2.79 c	0.42 cd
	60	2.03 b	0.29 a	3.28 a	0.55 b
	120	1.29 d	0.20 c	3.08 bc	0.47 c
Cd	0	2.14 a	0.30 a	3.11 a	0.61 a
	30	1.88 b	0.22 c	1.86 d	0.54 b
	60	1.04 d	0.14 d	2.15 c	0.56 b
	120	1.72 c	0.26 b	2.45 b	0.57 b

DAS: 播种后天数。表中同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

DAS: days after seeding. Values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level.

1025.0%、1225.0%; 而 25 DAS 的积累量分别增加了 725.0%、575.0%、425.0%、150.0%、681.8%、754.5% 和 1320.0%、1360.0%、3240.0% (图 3)。

Cu、Zn、Cd 3 种重金属元素在蓖麻植株各部位的分布相差较大, 总体表现为根 > 茎 > 叶, 且根茎叶中 Zn 的积累量显著高于 Cu 和 Cd (图 4)。随处理浓度的增加, 各重金属元素的积累量显著增加, 与对照相比, 各浓度处理下根系中 Cu 分别增加了 4.5、7.2 和 7.0 倍, Zn 增加了 0.7、5.1 和 6.1 倍, Cd 增加了 6.9、8.0、10.3 倍, 增幅最大; 而茎秆中 Zn 和 Cd 增幅较大, 分别增加了 0.67、1.33、1.93 倍和 7.5、12.5、19.0 倍; 叶片中 Zn 的积累量是 Cu 和 Cd 的 3~6 倍, 与对照相比各浓度下 Zn 分别增加了 10.0%、50.0%和 121.0% (图 4)。

2.3 不同重金属及浓度对蓖麻幼苗抗氧化酶活性的影响

3 种重金属处理下, 叶片中 SOD 的活性总体呈先降后增的趋势, 10 DAS 和 45 DAS 的 SOD 活性显著高于 25 DAS (图 5)。Cu 和 Zn 处理下, 10 DAS 120 mg L⁻¹ 浓度处理下叶片 SOD 活性最高, 分别比对照高出 45.5%和 31.8%; 而 25 DAS 叶片 SOD 活性呈先升后降的趋势, 在 30 mg L⁻¹ 处理下 SOD 活性最高, 分别比对照增加了 11.4%和 17.1%。Cd 处理下, 10 DAS 的 SOD 活性随处理浓度的增加而依次显著降低, 与对照相比分别下降了 18.2%、31.8%和 65.5%; 而 45 DAS, 30 mg L⁻¹ 处理下 SOD 活性显著降低, 与对照相比下降了 21.3%, 在 60 mg L⁻¹ 和 120 mg L⁻¹ 处理下 SOD 活性显著升高, 分别增加了 18.8%和 12.5% (图 5)。

图 3 重金属处理下蓖麻植株中铜、锌、镉的积累量

Fig. 3 Accumulation of Cu, Zn, and Cd under different heavy metals treatments in seedlings

10 DAS: 播种后第 10 天; 25 DAS: 播种后第 25 天。柱上同一时期不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

10 DAS: 10 days after seeding; 25 DAS: 25 days after seeding. Values followed by different small letters above the bar at same growth periods are significantly different at the 0.05 probability level.

图 4 重金属胁迫下蓖麻根、茎、叶积累的重金属含量变化

Fig. 4 Concentration of heavy metals (Cu, Zn, and Cd) in roots, stems, and leaves under different heavy metals treatments in castor

柱上同一时期不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。 Values followed by different small letters above the bar at same growth periods are significantly different at the 0.05 probability level.

图 5 重金属处理下不同时期蓖麻植株叶片的 SOD 活性变化
Fig. 5 Variation of SOD activity at different growth periods under different heavy metals concentration in castor
柱上同一时期不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。DAS: 播种后天数。
Values followed by different small letters above the bar at same growth periods are significantly different at the 0.05 probability level. DAS: days after seeding.

3 种重金属处理下, 叶片中 POD 的活性在 10 DAS 先降后增、在 25 DAS 和 45 DAS 显著增加, 且随生长时期的推进活性显著增加(表 2)。Cu 和 Zn 处理下 POD 活性的变化趋势相似, 在 10 DAS 120 mg L⁻¹ 处理下活性最高, 分别比对照高出 11.7%和 60.9%; 在 25 DAS 和 45 DAS, POD 活性随处理浓度递增逐渐增加, 且均在 120 mg L⁻¹ 处理下活性最高, 比对照增加了 56.5%和 208.3% (Cu 处理), 85.7%和 168.5% (Zn 处理)。Cd 处理下, 10 DAS POD 活性随处理浓度先降后升, 在 30 mg L⁻¹ 和 60 mg L⁻¹ 处理下活性低于对照, 分别降低了 44.4%和 20.4%, 而在 120 mg L⁻¹ 处理下活性显著增加, 高于对照 40.2%; 而在 25 DAS 和 45 DAS, 各处理浓度下 POD 活性均高于对照, 且在 60 mg L⁻¹ 处理下活性最高, 此浓度下比对照分别增加了 54.1%和

142.3% (表 2)。
2.4 不同重金属对蓖麻幼苗可溶性蛋白及丙二醛含量的影响
在各生长阶段, Cu 处理下可溶性蛋白含量仅在 120 mg L⁻¹ 显著增加, 与对照相比分别增加 18.8%、66.7%和 83.3%。Zn 处理下, 可溶性蛋白含量仅在 10 DAS 60 mg L⁻¹ 和 120 mg L⁻¹ 浓度下显著增加, 分别增加了 7.1%和 3.6%, 而在 25 DAS 无显著变化、45 DAS 显著降低。Cd 处理下, 可溶性蛋白含量在 10 DAS 和 25 DAS 无显著变化, 而在 45 DAS 120 mg L⁻¹ 浓度下显著增加, 比对照增加了 14.2% (图 6)。
3 种重金属处理下, MDA 含量随处理浓度的增大显著增加、随生育进程的推进而显著降低, 且 Cd 处理下的 MDA 含量显著高于 Cu 和 Zn 处理(表 3)。Cu 处理下, 各处理浓度的 MDA 与对照相比, 在

表 2 重金属处理下不同时期蓖麻植株叶片的 POD 活性的变化
Table 2 Variation of POD activity in leaf at different growth stages under different heavy metals treatments in castor seedlings

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg L ⁻¹)	POD (U g ⁻¹ FW)		
		10 DAS	25 DAS	45 DAS
Cu	0	51.5 b	50.8 c	89.2 d
	30	39.7 d	64.1 b	125.5 c
	60	49.8 c	74.3 ab	166.0 b
	120	57.5 a	79.5 a	275.0 a
Zn	0	46.8 c	49.8 d	156.3 d
	30	32.0 d	70.7 c	175.9 c
	60	60.9 b	79.8 b	269.2 b
	120	75.3 a	92.5 a	419.0 a
Cd	0	47.5 b	53.2 d	135.1 d
	30	26.4 d	59.4 c	246.1 c
	60	37.8 c	82.0 a	327.4 a
	120	66.6 a	80.2 b	260.2 b

DAS: 播种后天数。表中同一列同一金属处理下各浓度后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
DAS: days after seeding. Values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level.

图 6 重金属处理下不同时期蓖麻植株叶片的可溶性蛋白

Fig. 6 Content of soluble protein in leaf at different growth periods under different heavy metals concentration in castor bean
柱上同一时期不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。DAS: 播种后天数。

Values followed by different small letters above the bar at same growth periods are significantly different at the 0.05 probability level. DAS: days after seeding.

10 DAS 分别增加了 1.96、2.50 和 2.84 倍, 25 DAS 增加了 1.66、2.66 和 3.38 倍, 而在 45 DAS 增加了 1.57、2.33 和 3.15 倍。Zn 溶液处理下的各生长阶段的 MDA 含量分别增加了 2.24、3.12、3.90 倍, 1.72、

2.78、3.69 倍和 1.29、2.14、3.06 倍。Cd 处理下 MDA 的增幅最大, 尤其在 120 mg L⁻¹ 处理浓度下在 10 DAS、25 DAS 和 45 DAS 分别比对照增加了 6.35、5.23 和 4.02 倍(表 3)。

表 3 不同重金属处理下各时期蓖麻叶片的丙二醛含量

Table 3 Content of MDA in leaf at different growth periods under different heavy metals concentration in castor

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg L ⁻¹)	MDA (μmol g ⁻¹ FW)		
		10 DAS	25 DAS	45 DAS
Cu	0	38.5 d	26.2 d	21.2 d
	30	75.3 c	43.6 c	33.3 c
	60	96.4 b	69.7 b	49.5 b
	120	109.5 a	88.5 a	66.8 a
Zn	0	25.2 d	20.6 d	15.3 d
	30	56.4 c	35.4 c	19.8 c
	60	78.6 b	57.3 b	32.7 b
	120	98.2 a	76.1 a	46.8 a
Cd	0	27.4 d	22.4 d	18.3 d
	30	83.3 c	41.8 c	27.3 c
	60	126.4 b	88.6 b	42.7 b
	120	174.1 a	117.2 a	73.6 a

表中各时期同一种金属处理下各浓度后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。DAS: 播种后天数。

Values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. DAS: days after seeding.

3 讨论

3.1 重金属处理对蓖麻幼苗生长的影响

重金属污染已成为威胁农业生产与农产品安全的重要环境因素, 重金属对作物的毒理作用主要表现为抑制吸水萌发、生根、幼苗生长和促进坏死^[19]。本研究表明, 重金属胁迫显著影响蓖麻生长, 植株的根长、鲜重、干重显著降低, 这与宋清梅等^[20]、姚俊修等^[21]的研究结果一致。这说明重金属胁迫抑制了植物光合产物的合成与积累, 这种抑制作用一

方面可能来自于对重金属吸收富集毒性的直接作用, 如降解光合色素、抑制细胞分裂等, 重金属胁迫会通过降低植物叶片的气孔导度和胞间二氧化碳浓度从而降低净光合速率^[22], 另一方面也可来自于对微量元素、水分获取能力抑制的间接作用^[23]。此外, 重金属对蓖麻株高的影响表现为低浓度促进、高浓度抑制的现象, 姚俊修等^[21]和宋洁等^[24]的研究也发现, 低浓度的 Pb 和 Cd 对植物的生长和光合作用具有促进作用, 而高浓度重金属处理时表现为抑制现象。其可能的原因是低浓度的重金属胁迫可促进植株叶

绿素的合成, 提高细胞内酶的活性, 进而提高光合速率、增加光合产物的积累以促进植物生长; Cu 和 Zn 是植物生长所必需的微量元素, 适当的浓度可促进幼苗根的生长; Cd 虽然不是植物生长所必需的元素, 但 Cd 对一些植物生长存在剂量效应, 低浓度 Cd 可以提高或加速某些生理生化反应, 从而促进根的生长^[25-26]。当重金属浓度过高时, 叶绿体蛋白质疏基上的 Fe、Mg 等离子被重金属所替代, 降低叶绿素酶活性, 阻断叶绿素的合成, 导致光合速率下降, 致使植物生长受抑或死亡^[21]。重金属对根生长的影响主要通过抑制有丝分裂过程实现, 重金属浓度过高或根部积累的重金属含量积累至一定水平时, 有丝分裂过程减缓, 表现为根系生长缓慢或停止生长^[27]。

3.2 蓖麻幼苗对重金属处理的生理响应

重金属等逆境胁迫下植物生长抑制的另一原因是植物体内产生大量的活性氧(ROS), 引发膜脂过氧化反应和脱酰化, 直接破坏核酸和蛋白质等代谢活动所致^[15]。MDA 是脂质过氧化的产物, 其含量是反映细胞膜损坏程度的重要指标。本试验研究发现, MDA 含量随处理浓度的增加显著增加、随生育进程的推进而显著降低, 且 Cd 处理下的 MDA 含量显著高于 Cu 和 Zn 处理。这表明蓖麻植株随重金属处理浓度的增大细胞膜损伤逐渐加剧, 且 Cd 对植株的毒害程度显著高于 Cu 和 Zn 处理, 随植株的生长抗逆性增强。植物通过抗氧化酶系统和非酶系统来降低或清除 ROS 的毒害^[15]。本研究中发现, 抗氧化酶系统中 SOD 活性总体先降后增, 在 10 DAS 120 mg L⁻¹ Cu 和 Zn 处理下 SOD 活性最高; POD 活性在 10 DAS 先降后增、在 25 DAS 和 45 DAS 显著增加, 且随生长时期的推进 POD 活性增加显著。这说明蓖麻植株通过增加保护酶活性来降低重金属胁迫的危害, 在植物的不同生长阶段 SOD 和 POD 在清除 ROS 中发挥的作用不同。SOD 可将(O₂⁻)歧化成 H₂O₂ 和 O₂, H₂O₂ 再通过 CAT 和 POD 的作用被分解为无毒害的 H₂O 和 O₂, 从而使植株免受伤害^[28]。可溶性蛋白含量仅在 120 mg L⁻¹ Cu 处理下显著增加, 表明蓖麻仅在高浓度 Cu 污染条件下强化非酶系统的渗透调节功能缓解重金属的损伤^[29], 同时也反映出重金属环境中蓖麻主要通过抗氧化酶系统来缓解逆境胁迫。

3.3 蓖麻幼苗对重金属的吸收和积累

2016 年中央一号文件提出“藏粮于地、藏粮于技”的科技战略, 其中提高耕地质量和土壤健康是藏粮于地的基础, 因此重金属污染土壤的修复意义重

大。利用重金属超富集植物清理移除土壤中的重金属污染物是一种生态环保、高效易行的土壤修复方法^[30]。本研究发现, 蓖麻植株对 Cu、Zn、Cd 的积累量随处理浓度的增加而递增, 其中对 Zn 的积累量最高, Cd 次之, 这与夏雪姣等^[18]的研究结果一致。植物根系的细胞壁、细胞膜和细胞器对 Zn、Cd 具有识别能力, 能通过沉淀、络合、区域化等作用, 将其固定于根内, 继而抑制其向地上部分转运, 这也是缓解植物的光合作用及新陈代谢毒害的策略^[17]。随着重金属在植株中的不断迁移, 根、茎、叶所积累的重金属含量也随之递减, 即蓖麻幼苗各部位对重金属的积累能力表现为根>茎>叶。这一发现与莫争等^[31]对水稻的研究发现类似, 即重金属在水稻植株不同部位的积累分布呈根>主茎>穗>籽粒>叶, 但与小麦^[32]和大豆^[33]各部位的重金属积累能力则有所不同, 这一差异的产生可能是由于品种类型、遗传背景及重金属间的互作效应^[34]。与此同时, 本研究还发现, 蓖麻不同部位对不同重金属的积累能力有所差异, 整体表现为: 根和茎对重金属的吸收和积累量呈 Zn > Cd > Cu; 叶片对重金属的吸收和积累能力则表现为 Zn > Cu > Cd, 这表明幼苗期的蓖麻对 Zn 的吸收和积累能力显著强于对 Cu 和 Cd 的吸收和积累能力。此外, Zn 是植物生长必需的微量元素, 因此蓖麻对 Zn 的吸收量高于其他两种重金属元素, 这也是蓖麻维持正常生长和代谢所需。由此可见, 种植蓖麻可作为修复重金属污染土壤的有效途径之一, 收割蓖麻的不同部位可清除特定的重金属污染物。

4 结论

重金属胁迫显著抑制蓖麻的生长, 蓖麻对重金属具有一定的耐受性, 主要通过提高抗氧化酶活性缓解重金属胁迫。蓖麻植株对 Cu、Zn、Cd 的积累量随处理浓度的增加而递增, 其中对 Zn 的积累量最高, Cd 次之。蓖麻对不同重金属的积累具有器官特异性, 对重金属的积累量表现为根 > 茎 > 叶。种植蓖麻可作为修复 Cu、Zn、Cd 等重金属污染土壤的有效途径之一。

References

- [1] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 鲁洪娟, 张颖慧, 李定心, 唐子阳, 马友华. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究. 生态环境学报, 2013, 22: 1727-1736.
Fan T, Ye W L, Chen H Y, Lu H J, Zhang Y H, Li D X, Tang Z Y, Ma Y H. Study on heavy metal pollution and rehabilitation

- techniques in farmland soil. *J Ecol Environ*, 2013, 22: 1727–1736 (in Chinese with English abstract).
- [2] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol Evol*, 2009, 24: 201–207.
- [3] 马敏, 龚惠红, 邓泓. 重金属对 8 种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响. *中国农学通报*, 2012, 28(22): 206–211.
Ma M, Gong H H, Deng H. Effects of heavy metals on seed germination and seedling growth of 8 garden plants. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(22): 206–211 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王利宝, 朱宁华, 鄂建华. Pb、Zn 等重金属对樟树、栎树幼苗生长的影响. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(2): 44–47.
Wang L B, Zhu N H, E J H. Effects of Pb, Zn and other heavy metals on the growth of camphor and Luan seedlings. *J Central South Univ For Technol*, 2010, 30(2): 44–47 (in Chinese with English abstract).
- [5] 邱丽俊, 刘爱忠. 我国优势油脂类生物柴油植物蓖麻的种质资源发掘和生物柴油利用. *生命科学*, 2014, 26: 503–508.
Qiu L J, Liu A Z. Germplasm resources exploitation and biodiesel utilization of *Ricinus communis*, a dominant oil biodiesel plant in China. *Chin Bull Life Sci*, 2014, 26: 503–508 (in Chinese with English abstract).
- [6] Scholz V, Silva J N D. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass Bioenergy*, 2008, 32: 95–100.
- [7] Huang G, Guo G, Yao S, Zhang N, Hu H. Organic acids, amino acids compositions in the root exudates and Cu-accumulation in castor (*Ricinus communis* L.) under Cu stress. *Int J Phytoremed*, 2016, 18: 33–40.
- [8] Niu Z X, Sun L N, Sun T H. Response of root and aerial biomass to phytoextraction of Cd and Pb by sunflower, castor bean, alfalfa and mustard. *Adv Environ Biol*, 2009, 3: 255.
- [9] Kabir M, Iqbal M Z, Shafiq M, Farooqi Z R. Effects of lead on seedling growth of *Thespesia populnea* L. *Plant Soil Environ*, 2010, 56: 194–199.
- [10] 易心钰, 蒋丽娟, 易诗明, 陈景震, 刘强. 铅锌矿渣对蓖麻生长、重金属累积及其对矿质元素吸收的影响. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(3): 116–122.
Yi X Y, Jiang L J, Yi S M, Chen J Z, Liu Q. Effects of lead-zinc slag on growth, accumulation of heavy metals and absorption of mineral elements of castor bean. *J Central South Univ For Technol*, 2017, 37(3): 116–122 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属 Cd 的耐性与吸收积累研究. *农业环境科学学报*, 2005, 24: 674–677.
Lu X Y, He C Q. Studies on the tolerance, uptake and accumulation of heavy metal Cd by castor bean. *J Agric Environ Sci*, 2005, 24: 674–677 (in Chinese with English abstract).
- [12] Lu X Y, He C Q. Tolerance, uptake and accumulation of cadmium by *Ricinus communis* L. *J Agro-Environ Sci*, 2005, 24: 674–677.
- [13] Begonia G B, Davis C D, Begonia M F T, Gray C N. Growth responses of Indian mustard [*Brassica juncea*, (L.) Czern.] and its phytoextraction of lead from a contaminated soil. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1998, 61: 38–43.
- [14] 邹京南, 于奇, 金喜军, 王明瑶, 秦彬, 任春元, 王孟雪, 张玉先. 外源褪黑素对干旱胁迫下大豆鼓粒期生理和产量的影响. *作物学报*, 2020, 46: 745–758.
Zou J N, Yu Q, Jin X J, Wang M Y, Qin B, Ren C Y, Wang M X, Zhang Y X. Effects of exogenous melatonin on physiology and yield of soybean during seed filling stage under drought stress. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 745–758 (in Chinese with English abstract).
- [15] 朱广龙, 宋成钰, 于林林, 陈许兵, 智文芳, 刘家玮, 焦秀荣, 周桂生. 外源生长调节物质对甜高粱种子萌发过程中盐分胁迫的缓解效应及其生理机制. *作物学报*, 2018, 44: 1713–1724.
Zhu G L, Song C Y, Yu L L, Chen X B, Zhi W F, Liu J W, Jiao X R, Zhou G S. Alleviation effects of exogenous growth regulators on seed germination of sweet sorghum under salt stress and its physiological basis. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1713–1724 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张海燕, 汪宝卿, 冯向阳, 李广亮, 解备涛, 董顺旭, 段文学, 张立明. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响. *作物学报*, 2020, 46: 1760–1770.
Zhang H Y, Wang B Q, Feng X Y, Li G L, Xie B T, Dong S X, Duan W X, Zhang L M. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1760–1770 (in Chinese with English abstract).
- [17] 毛雪飞, 杨洁. 镉胁迫下 4 种农田杂草生理生化特性及对重金属的累积特征. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, 39(6): 9–18.
Mao X F, Yang J. Physiological and biochemical characteristics of 4 farmland weeds under Zn and Cd stress and accumulation characteristics of heavy metals. *J Southwest For Univ (Nat Sci)*, 2019, 39(6): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- [18] 夏雪姣. 镉、铅胁迫对小麦形态发育和生理代谢的影响及富集特性研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2018.
Xia X J. Effects of Cadmium, Lead Stress on Morphological Development and Physiological Metabolism and Research on Their Accumulation in Wheat. MS Thesis of Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [19] Hossain M A, Piyatida P, Da Silva J A T, Fujita M. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J Bot*, 2012, 2012: 872–875.
- [20] 宋清梅, 蔡信德, 吴颖欣, 吴嘉慧, 陈显斌, 吴文成. 香根草对污染土壤水溶态重金属组分胁迫响应研究. *农业环境科学学报*, 2019, 38: 2715–2722.
Song Q M, Cai X D, Wu Y X, Wu J H, Chen X B, Wu W C. Response of *Vetiveria zizanioides* to the stress of water-soluble components of heavy metals in contaminated soil. *J Agro-Environ Sci*, 2019, 38: 2715–2722 (in Chinese with English abstract).
- [21] 姚俊修, 乔艳辉, 杨庆山, 仲伟国, 李庆华, 董玉峰, 李善文, 吴德军. 重金属镉胁迫对黑杨派无性系光合生理及生长的影响. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 40–46.
Yao J X, Qiao Y H, Yang Q S, Zhong W G, Li Q H, Dong Y F, Li S W, Wu D J. Effects of cadmium stress on the growth and photosynthesis of aigeiros clones. *J North For Univ*, 2020, 35(2): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- [22] 明华, 曹莹, 胡春胜, 张玉铭, 程一松. 铅胁迫对玉米光合特性及产量的影响. *玉米科学*, 2008, 16(1): 74–78.
Ming H, Cao Y, Hu C S, Zhang Y M, Cheng Y S. Effect of lead stress on the photosynthetic characteristics and yield of maize. *J*

- Maize Sci*, 2008, 16(1): 74–78 (in Chinese with English abstract).
- [23] Aibibu N, Liu Y G, Zeng G M, Wang X, Chen B B, Song H X, Xu L. Cadmium accumulation in vetiveria zizanioides and its effects on growth, physiological and biochemical characters. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 6297–6303.
- [24] 宋洁, 郭华春, 李俊, 张光海, 思玲超. 铅胁迫对马铃薯幼苗生长形态及内源激素的影响. *西北农业学报*, 2019, 28: 1830–1835.
- Song J, Guo H C, Li J, Zhang G H, Si L C. Effect of lead stress on growth morphology and endogenous hormone of potato seedlings. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2019, 28: 1830–1835 (in Chinese with English abstract).
- [25] 汤文光, 肖小平, 张海林, 黄桂林, 唐海明, 李超, 刘胜利, 汪柯. 轮耕对双季稻田耕层土壤养分库容及 Cd 含量的影响. *作物学报*, 2018, 44: 105–114.
- Tang W G, Xiao X P, Zhang H L, Huang G L, Tang H M, Li C, Liu S L, Wang K. Effects of rotational tillage on nutrient storage capacity and Cd content in tilth soil of double-cropping rice region. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 105–114 (in Chinese with English abstract).
- [26] Islam K R. Response of rice seedlings to copper toxicity and acidity. *J Plant Nutr*, 2006, 29: 943–957.
- [27] Nyitrai P, Bóka K, Gáspár L, Sárvári É, Lenti K, Keresztes Á. Characterization of the stimulating effect of low-dose stressors in maize and bean seedlings. *J Plant Physiol*, 2003, 160: 1175–1183.
- [28] Gong J, Zhao A, Zhang L, Zhang X. A comparative study on anti-oxidative ability of several desert plants under drought stress. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2004, 24: 1570–1577.
- [29] Cervilla L M, Blasco B, Ríos J J, Romero L, Ruiz J M. Oxidative stress and antioxidants in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants subjected to boron toxicity. *Anal Bot*, 2007, 100: 747–756.
- [30] 赵会君, 梁昕昕, 魏玉清. 不同浓度的 Cu、Mn、Zn 胁迫对商陆叶片光合系统参数及抗氧化酶系统的影响. *北方园艺*, 2020, (3): 120–127.
- Zhao H J, Liang X X, Wei Y Q. Effect of different concentrations of Cu, Zn, and Mn on the photosynthetic and antioxidative system of *Phytolacca americana*. *Northern Hortic*, 2020, (3): 120–127 (in Chinese with English abstract).
- [31] 莫争, 王春霞, 陈琴, 王海, 薛传金, 王子健. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 在水稻植株中的富集和分布. *环境化学*, 2002, 21(2): 110–116.
- Mo Z, Wang C X, Chen Q, Wang H, Xue C J, Wang Z J. Enrichment and distribution of heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Cd in rice plants. *Environ Chem*, 2002, 21(2): 110–116 (in Chinese with English abstract).
- [32] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟. *环境科学*, 2016, 37: 3996–4003.
- Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, Wang C H, Chen H. Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system. *Environ Sci*, 2016, 37: 3996–4003 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 于淼, 徐景钢. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33: 352–357.
- Li S Q, Tian Z H, Jin H X, Yu M, Xu J G. Effects of municipal sludge composting on heavy metal accumulation in soil and soybean organs. *J Agric Environ Sci*, 2014, 33: 352–357 (in Chinese with English abstract).
- [34] 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如. 不同水稻品种对重金属的积累特性. *环境科学*, 2018, 11: 5198–5206.
- Lin X B, Zhou L J, Wang H M, Liu H, Wu L, Yu Y, Hu M, He B, Zhou Q H, Huang Q R. Accumulation characteristics of heavy metals in different rice varieties. *Environ Sci*, 2018, 11: 5198–5206 (in Chinese with English abstract).