

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24337

镉胁迫对蓖麻幼苗生理生化特征的影响

王沛琦, 胡尊红, 杨 博, 胡学礼, 杨 谨, 李文昌*

(云南省农业科学院经济作物研究所, 云南 昆明 650205)

摘 要: 为探讨蓖麻在重金属镉 (Cd) 胁迫下的生理响应特征, 采用温室盆栽试验方法研究了不同 Cd 浓度 [0 (对照), 20, 50, 100, 200, 300 mg/kg] 胁迫对蓖麻幼苗光合、保护酶活性和还原型抗坏血酸 (AsA) - 还原型谷胱甘肽 (GSH) 循环的影响。结果表明: 随着 Cd 浓度增加, 光合色素含量变化无明显规律性, 但当 Cd 浓度大于 100 mg/kg 时, 其值显著降低。随着 Cd 浓度增加, 叶片净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、蒸腾速率 (Tr) 及胞间二氧化碳浓度 (Ci) 总体呈现出先升后降的趋势; 当 Cd 浓度达 200 mg/kg 时, 除 Tr 及 Ci 外, 其余指标均较对照显著降低 ($P < 0.05$)。Cd 胁迫导致蓖麻叶片中丙二醛 (MDA) 含量增加、根中 MDA 含量先升后降, 叶片及根中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性呈现先升后降趋势。当 Cd 浓度达到 200 mg/kg 时, 除叶片 POD 活性大于对照外, 其余指标均较对照显著降低。在 AsA-GSH 循环中, 随着 Cd 浓度的增加, 抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性和 AsA、GSH 含量均呈现先升后降的趋势, 当 Cd 浓度达到 200 mg/kg 时, 除叶和根的 AsA 含量及根的 APX 活性低于对照外, 其余指标均较对照增加。研究证明, 低浓度镉胁迫能诱导蓖麻抗氧化系统活性显著增强, 提高其抗氧化能力, 但随着浓度增加, 其抗氧化酶的活性和抗氧化物质含量下降, 植株受毒害, 且在重度胁迫下, 植株主要依赖 AsA-GSH 循环系统来抵御氧自由基的毒害。

关键词: 蓖麻; Cd; 光合作用; 抗氧化酶; 抗坏血酸 - 谷胱甘肽循环

随着城市化及工业化的迅速发展, 工业废水、汽车尾气、城市生活垃圾的超标排放以及化肥和农药的不当使用等, 导致土壤污染日益严重, 进而带来一系列生态系统破坏及人类健康威胁问题^[1-2]。其中镉 (Cd) 毒性较大, 仅次于汞, 其极高的生物毒性、移动性以及植物可利用性被认为是土壤和水体的主要污染物^[3]。Cd 超标的土壤会抑制种子萌发和植株的生长^[4], 引起叶片黄化、生育期推迟、干物质减少等现象^[5], 还会破坏植物光合作用、细胞膜功能等一系列生理生化过程^[6-7]。同时其还可以在植物可食用部分富集, 并通过食物链进入人体, 导致人体 Cd 元素含量超过标准值^[8], 引发多种慢性疾病, 诱导基因发生突变以及癌症等^[9]。因此, 如何有效地控制和治理土壤 Cd 污染已成为当前的重要课题。

近些年来, 研究者们发现了大批高效吸收、转

移和清除 Cd 的超富集植物, 如东南景天^[10]、印度芥菜^[11]、宝山堇菜^[12]、龙葵^[13]等, 但这些超积累植物往往存在个体矮小、生长缓慢、生物量低等问题, 导致修复效果不够显著。蓖麻是一种富集及耐重金属能力强、经济价值高的能源作物, 同时具有很大的生物量及很强的耐旱、耐贫瘠能力, 是理想的重金属土壤修复植物^[14]。目前国内外学者对蓖麻的研究主要集中在耐性和积累能力方面^[15-16], 很少关注重金属 Cd 胁迫对蓖麻抗氧化系统的影响。故本研究以耐 Cd 品种‘滇蓖 2 号’为试验材料, 通过盆栽试验, 研究不同浓度 Cd 胁迫对蓖麻光合作用、抗氧化酶系统、谷胱甘肽循环等的影响, 旨在明确蓖麻响应 Cd 胁迫的生理生化机制, 为蓖麻修复重金属污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为云南省农业科学院经济作物研究所选育的晚熟型宿生蓖麻品种‘滇蓖 2 号’, 试验土壤取自云南省农业科学院试验田, 土壤类型为红壤土, 其基本理化性质见表 1。

收稿日期: 2024-06-25; 录用日期: 2024-08-20

基金项目: 云南省农业联合面上项目 (202301BD070001-089)。

作者简介: 王沛琦 (1989-), 硕士, 助理研究员, 研究方向为蓖麻、红花抗逆性鉴定及污染土壤修复。E-mail: 954485835@qq.com。

通讯作者: 李文昌, E-mail: ynbioenergy@163.com。

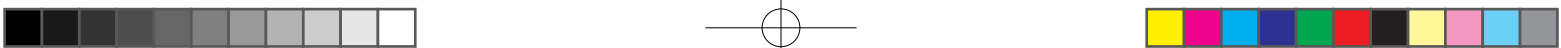


表 1 供试土壤理化性质

pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	水解性氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	镉 (mg/kg)
5.96	113.5	0.206	0.071	1.180	95.9	49.8	262	0.26

1.2 试验方法

盆栽试验于 2023 年 4—7 月在云南省农业科学院温室内进行。选取成熟饱满的蓖麻种子经次氯酸钠消毒后用温水浸泡 24 h，于 2023 年 4 月中旬将其播种于添加有不同 Cd 浓度 [0 (对照)、20、50、100、200、300 mg/kg] 的土壤中，每个处理重复 3 次，每个重复 1 盆，共 18 盆，每盆播种 15 粒，待出苗两片叶子展开时，每盆定苗 5 株，正常水肥管理。盆钵直径 50 cm，高 30 cm，每盆装有过筛风干土 20 kg。Cd 胁迫 60 d 后，选取健康生长的功能叶测定叶绿素含量及光合参数。取不同浓度处理下蓖麻形态学一致的植株上的第 3 片叶片及主根系，先用自来水洗净后用去离子水冲洗，滤纸吸干水分后置于液氮罐中速冻，带回实验室用于测定相关生理指标。

1.3 指标测定

1.3.1 光合作用相关指标测定

叶绿素含量采用乙醇法测定^[17]。气体交换参数由 LI-6400XT 便携式光合作用测定仪测定，检测时选择晴天 9:00—11:00，选择受光方向相同且生长一致的植株叶片（从第一片展开叶向下数第 3 片叶），测定净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、蒸腾速率（Tr）和胞间二氧化碳浓度（Ci）4 项光合指标，设定光强为 1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；不同处理下，每个样本测量 6 次，测量时避开叶脉。

1.3.2 生理生化指标测定

称取去叶脉的干净叶片和根 0.5 g，加入 pH 为 7.8 的磷酸缓冲液（0.05 mol/L）5 mL，在冰浴

上研磨成浆，然后转入离心管中，再分别用缓冲液冲洗研钵，冲洗液全部转入离心管中，然后 10000 r/min 离心 20 min，取上清液适当稀释，于 4℃ 下低温保存，作为待测液。丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[17]；超氧化物歧化酶（SOD）活性采用氮蓝四唑法测定^[17]；过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定^[18]；过氧化氢酶（CAT）活性采用紫外吸收法测定^[19]；抗坏血酸过氧化物酶（APX）活性测定参照沈文彪等^[20]的方法；谷胱甘肽还原酶（GR）活性测定参照 Ma 等^[21]的方法；还原型抗坏血酸（AsA）含量采用 2,4-二硝基苯肼法测定；还原型谷胱甘肽（GSH）含量采用 DTNB 法^[22]测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 及 SPSS 20.0 进行处理，差异显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对蓖麻幼苗光合色素含量的影响

由表 2 可知，随着 Cd 浓度增加，光合色素含量变化无明显规律性。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时叶绿素 a、叶绿素（a+b）及类胡萝卜素含量达到最大值，与其他处理差异显著（ $P<0.05$ ）；叶绿素 b 在 Cd 浓度为 0 时最大，显著高于其他处理（ $P<0.05$ ）。当 Cd 浓度达 100 mg/kg 时，叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素（a+b）及类胡萝卜素含量显著降低，且显著低于对照（ $P<0.05$ ）。

表 2 Cd 胁迫对蓖麻叶片光合色素含量变化的影响

Cd 浓度 (mg/kg)	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	叶绿素 (a+b) (mg/g)	类胡萝卜素 (mg/g)
0	1.48 ± 0.07b	0.67 ± 0.02a	2.14 ± 0.05b	0.45 ± 0.03b
20	1.42 ± 0.01b	0.58 ± 0.01c	2.00 ± 0.02c	0.44 ± 0.02bc
50	1.78 ± 0.02a	0.64 ± 0.02b	2.44 ± 0.04a	0.53 ± 0.03a
100	1.17 ± 0.05c	0.41 ± 0.00d	1.58 ± 0.05d	0.41 ± 0.02c
200	0.69 ± 0.01d	0.28 ± 0.00e	0.97 ± 0.01e	0.27 ± 0.01d
300	0.43 ± 0.01e	0.12 ± 0.01f	0.55 ± 0.01f	0.24 ± 0.02e

注：表中数值为平均值 ± 标准差。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

2.2 Cd胁迫对蓖麻幼苗光合特性的影响

从表3可知，Pn、Gs和Tr变化趋势为先升后降，Ci变化趋势为先升后降再升又降。其中Pn和Gs在Cd浓度为20 mg/kg时达到峰值，分别较对照增加57.36%和111.11%；Tr在Cd浓度为50 mg/kg时达到峰值，较对照增加76.00%；当Cd浓度小

于300 mg/kg时，Ci均高于对照，在Cd浓度为200 mg/kg时达到峰值，较对照增加19.89%。当Cd浓度达到300 mg/kg，各项光合指标降到最低值，Pn、Gs、Tr和Ci分别较对照降低了70.47%、59.26%、33.11%和8.77%。

表3 Cd对蓖麻叶片气体交换参数的影响

Cd 浓度 (mg/kg)	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间二氧化碳浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
0	12.36 ± 0.34c	0.27 ± 0.03d	4.50 ± 0.17d	254.67 ± 9.61c
20	19.45 ± 0.65a	0.57 ± 0.04a	7.60 ± 0.08b	289.33 ± 5.86b
50	15.68 ± 0.22b	0.42 ± 0.01b	7.92 ± 0.05a	295.67 ± 5.69ab
100	9.63 ± 0.74d	0.36 ± 0.01c	7.18 ± 0.16c	263.00 ± 4.00c
200	4.49 ± 0.35e	0.21 ± 0.01e	7.06 ± 0.21c	305.33 ± 3.21a
300	3.65 ± 0.15f	0.11 ± 0.01f	3.01 ± 0.07e	232.33 ± 7.23d

2.3 Cd胁迫对蓖麻幼苗丙二醛含量的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根丙二醛(MDA)含量的影响如图1所示。蓖麻叶中MDA含量随着Cd浓度的增加而逐渐增加，当Cd浓度达到300 mg/kg时达到峰值，较对照增加99.52%。蓖麻根中MDA含量随着Cd浓度增加总体呈现出先增加后降低的趋势，当Cd浓度为200 mg/kg时MDA含量达到峰值，较对照增加76.12%；当Cd浓度为300 mg/kg时MDA含量降低，但大于对照，较对照增加22.39%。

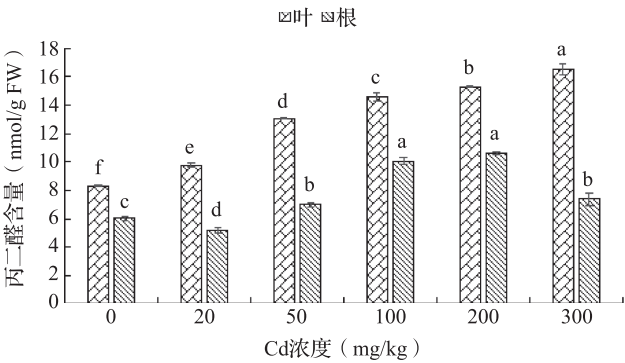


图1 Cd胁迫对蓖麻幼苗丙二醛含量的影响
注：小写字母不同表示相同部位不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.4 Cb胁迫对蓖麻幼苗抗氧化酶活性的影响

2.4.1 Cd胁迫对蓖麻超氧化物歧化酶活性的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根SOD活性的影响如图2所示。蓖麻叶及根中SOD活性随着Cd浓度的增

加呈现出先升高后降低的趋势，各处理间差异显著(P<0.05)。当Cd浓度为100 mg/kg时达到峰值，叶及根中SOD活性分别较对照增加34.24%和39.89%；当Cd浓度大于100 mg/kg时SOD活性逐渐降低，在300 mg/kg下叶及根中SOD活性最低，分别较对照减少28.61%和1.55%。

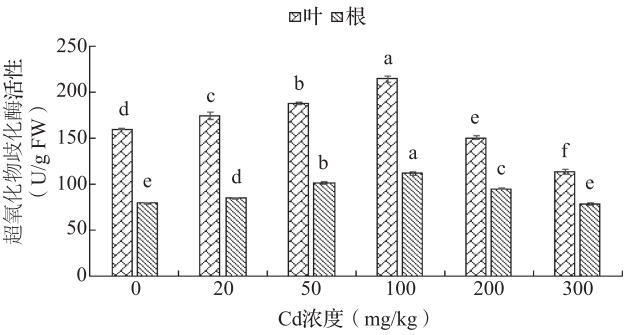
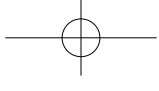


图2 Cd胁迫对蓖麻幼苗超氧化物歧化酶活性的影响

2.4.2 Cd胁迫对蓖麻过氧化物酶活性的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根POD活性的影响如图3所示。蓖麻叶及根中POD活性随着Cd浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势，各处理间差异显著(P<0.05)。当Cd浓度为50 mg/kg时，POD的活性达到峰值，叶及根中POD活性分别较对照增加31.63%和15.49%；当Cd浓度大于50 mg/kg，POD活性逐渐下降，在Cd浓度为200 mg/kg时，叶中POD活性仍然大于对照，在300 mg/kg浓度下



叶及根 POD 活性最低, 分别较对照减少 11.04% 和 19.28%。

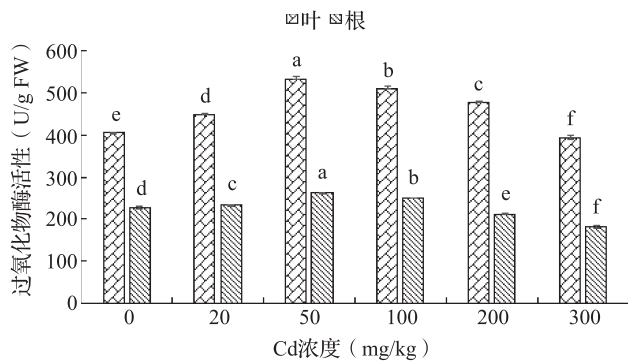


图3 Cd胁迫对蓖麻幼苗过氧化物酶活性的影响

2.4.3 Cd胁迫对蓖麻过氧化氢酶活性的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根CAT活性的影响如图4所示。蓖麻叶及根中CAT活性随着Cd浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。当Cd浓度为50 mg/kg时, CAT的活性达到峰值, 叶及根中CAT活性分别较对照增加了45.83%和83.60%; 当Cd浓度大于50 mg/kg, CAT活性逐渐下降, 在Cd浓度为300 mg/kg, 叶及根中CAT活性最低, 分别较对照减少30.03%和4.52%。

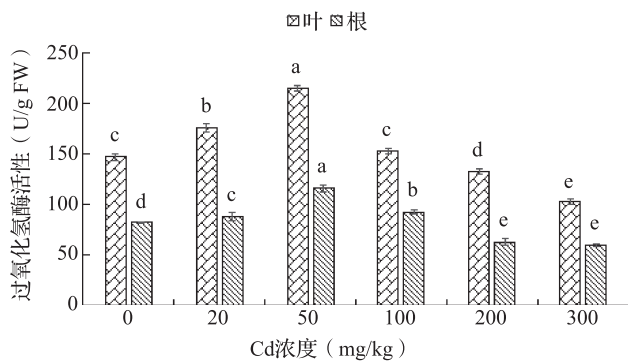


图4 Cd胁迫对蓖麻幼苗过氧化氢酶活性的影响

2.5 Cd胁迫对蓖麻幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响

2.5.1 Cd胁迫对蓖麻抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根APX活性的影响如图5所示。蓖麻叶及根中APX活性随着Cd浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。从叶片来看, 当Cd浓度为100 mg/kg时, APX的活性最大, 较对照增加185.91%; 当Cd浓度大于100 mg/kg, APX

活性逐渐下降; 但在Cd浓度为200 mg/kg时, APX活性还大于对照; 当Cd浓度达到300 mg/kg时, APX活性最低, 较对照减少36.50%。从根来看, 当Cd浓度为50 mg/kg时, APX的活性达到最大值, 较对照增加83.60%; 当处理浓度大于50 mg/kg, APX活性逐渐下降, 但在Cd浓度为100 mg/kg时, APX活性仍然大于对照; 当Cd浓度达到300 mg/kg时, APX活性最低, 较对照减少48.72%。

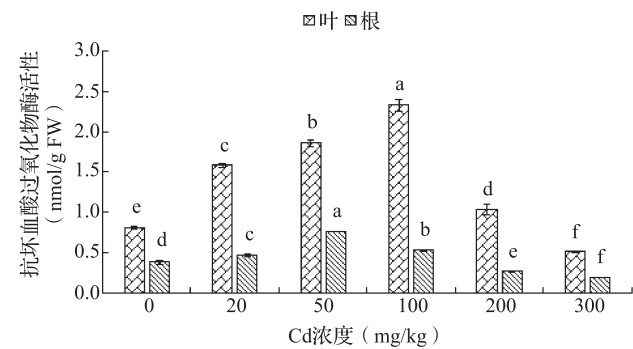


图5 Cd胁迫对蓖麻幼苗抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

2.5.2 Cd胁迫对蓖麻谷胱甘肽还原酶活性的影响

Cd胁迫对蓖麻叶、根GR活性的影响如图6所示。蓖麻叶及根中GR活性随着Cd浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。当Cd浓度为100 mg/kg时, GR活性达到峰值, 叶及根中GR活性分别较对照增加94.94%和54.32%; 当Cd浓度大于100 mg/kg, GR活性逐渐下降, 但在Cd浓度为200 mg/kg时, 叶及根中GR活性仍然大于对照; 当Cd浓度为300 mg/kg, 叶及根中GR活性最低, 分别较对照减少8.70%和22.10%。

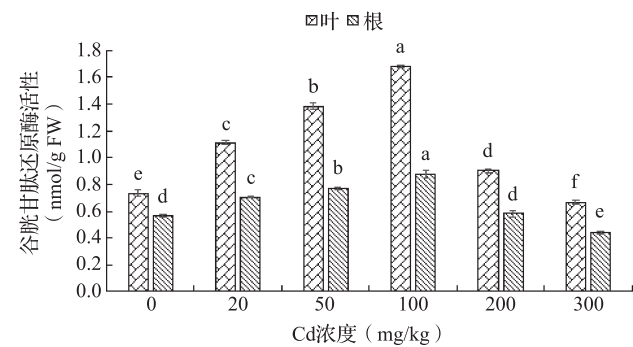


图6 Cd胁迫对蓖麻幼苗谷胱甘肽还原酶活性的影响

2.5.3 Cd胁迫对蓖麻还原型抗坏血酸含量的影响

Cd胁迫下对蓖麻叶、根 AsA 含量的影响如图 7 所示。蓖麻叶及根中 AsA 含量随着 Cd 浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。从叶片来看,当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时,AsA 的含量达最大值,较对照增加 43.48%;当 Cd 浓度大于 50 mg/kg,AsA 含量逐渐下降;但在 Cd 浓度为 100 mg/kg 时,AsA 含量大于对照;当 Cd 浓度为 300 mg/kg 时,AsA 含量达最低值,较对照减少 29.88%。从根来看,当 Cd 浓度为 20 mg/kg,AsA 含量达到最大值,较对照增加 38.47%;当 Cd 浓度大于 20 mg/kg 时,AsA 含量逐渐下降;但在 Cd 浓度为 100 mg/kg 时,AsA 含量仍然大于对照;当 Cd 浓度为 300 mg/kg 时,AsA 含量达最低值,较对照减少 35.41%。

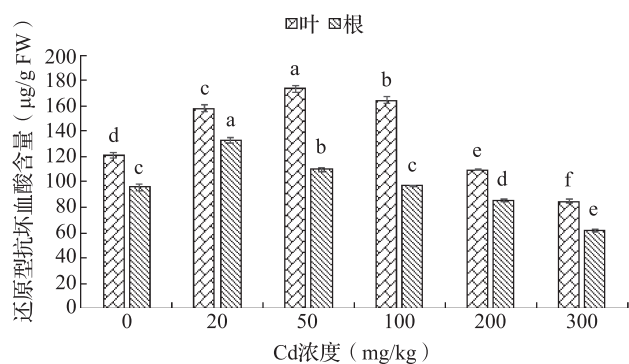


图 7 Cd胁迫对蓖麻幼苗还原型抗坏血酸含量的影响

2.5.4 Cd胁迫对蓖麻还原型谷胱甘肽含量的影响

Cd胁迫下对蓖麻叶、根 GSH 含量的影响如图 8 所示。蓖麻叶及根中 GSH 含量随着 Cd 浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。从叶片来看,当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时,GSH 的含量达最大值,较对照增加 170.97%;当 Cd 浓度大于 50 mg/kg 时,GSH 含量逐渐下降;但在 Cd 浓度为 200 mg/kg 时,GSH 含量大于对照;当 Cd 浓度达到 300 mg/kg 时,GSH 含量达最低值,较对照减少 35.48%。从根来看,当 Cd 浓度为 100 mg/kg 时,GSH 的含量达到最大值,较对照增加 143.90%;当 Cd 浓度大于 100 mg/kg,GSH 含量逐渐下降;当 Cd 浓度为 300 mg/kg 时,GSH 含量大于对照,较对照增加 7.77%。

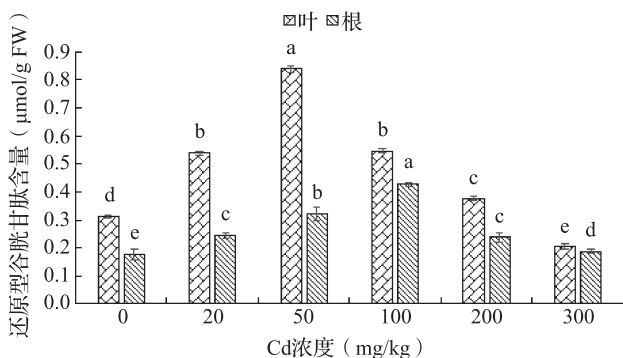


图 8 Cd胁迫对蓖麻幼苗还原型谷胱甘肽含量的影响

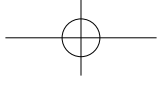
3 讨论

3.1 Cd胁迫对蓖麻幼苗光合色素含量的影响

光合色素参与植物的光合作用,可以吸收、传递光能,植物在逆境下光合色素含量会发生变化,一定程度下可以反应植物所遭受的危害程度^[23]。本研究中叶片光合色素在各处理中存在差异,但没有一致的递增或者递减规律,且其在高浓度 Cd 胁迫下蓖麻的光合色素合成会受到抑制,这与前人对印度芥菜^[24]及大豆^[25]的研究结果相一致。这可能是因为高浓度镉损害了叶绿体中类囊体结构,同时抑制了原叶绿素酸酯还原酶等叶绿素合成所需酶的活性,从而使光合色素含量下降。

3.2 Cd胁迫对蓖麻幼苗光合特性的影响

光合作用是植物生长的基础,植物在 Cd 胁迫下光合气体交换参数会受到影响。一般认为,导致光合作用降低包括气孔限制和非气孔限制两个原因,Ci 的变化趋势可以作为评判气孔限制和非气孔限制的依据^[26-27]。本研究中,当 Cd 浓度小于 200 mg/kg 时,Cd 对蓖麻光合作用呈现低促高抑的现象,与姚俊修等^[28]研究结果一致;同时植物的光合气体交换参数表现出相同的变化趋势,表明此时主要是气孔导度的降低导致光合作用下降。当 Cd 浓度大于 100 mg/kg 时,植物的 Pn 和 Gs 逐渐降低,而 Ci 则逐渐升高,表明此时主要是非气孔因素阻碍了光合作用,这与对苧麻^[29]及超富集植物圆叶锦葵^[30]的研究结果一致。当 Cd 浓度为 300 mg/kg 时,各光合气体交换参数为最低值,且蓖麻生长受抑制存活率下降。造成上述结果的原因可能是高浓度 Cd 胁迫会导致蓖麻叶片气孔开度减少甚至关闭,二氧化碳供应不足,叶片内淀粉的水解作用加强,



光合产物运出缓慢,同时暗反应的酶活性受影响,最终导致光合速率降低,影响了植物生长^[31]。

同时,研究还发现当Cd浓度小于100 mg/kg时,光合参数均较对照增大,这表明蓖麻在中、低浓度Cd胁迫下还可以保持较高的蒸腾作用,促进根部吸收营养元素参与代谢活动,这可能也是蓖麻耐Cd的原因之一。

3.3 Cd胁迫对蓖麻幼苗丙二醛含量的影响

MDA含量常作为植物细胞膜脂过氧化程度的指标,根据质膜透性的变化可以反映植物遭受逆境伤害的程度。本研究中,叶片的MDA含量随Cd浓度的增加不断增加,导致膜脂过氧化程度加剧,使膜的受伤程度加深,让细胞膜透性增大,最终导致植物的抗逆能力减弱,这与苏明杰等^[32]对苦楝的研究结果相一致;而根的MDA含量随Cd浓度的增加总体呈现先升高后下降的趋势,这与Maria等^[33]对东北蒲公英的研究结果一致,其原因可能是在高浓度Cd胁迫下,蓖麻根系富集太多Cd,导致其细胞的耐受能力较低,甚至部分细胞死亡。

3.4 Cd胁迫对蓖麻幼苗抗氧化酶活性的影响

植物在重金属胁迫下会产生一类活性氧类物质,对植物体内的细胞膜或蛋白分子产生破坏,造成氧化伤害,而抗氧化系统中3种主要酶(SOD、POD和CAT)可以相互配合使植物体内的活性氧类物质维持在较低水平,从而减轻对植物的伤害^[34-35]。本研究发现,蓖麻叶及根的SOD、POD和CAT活性随着Cd浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势,这表明蓖麻具有一定的抗逆能力,但其保护作用有一定限度,这与低浓度下小桐子^[36]、紫花苜蓿^[37]和木槿^[38]等植物组织内的3种酶活性升高,但较高浓度胁迫则使其组织内3种酶活性降低的研究结果一致。在最高胁迫浓度(300 mg/kg)下蓖麻叶及根的3种酶活性为最低值,较对照显著下降,原因可能是蓖麻体内防御系统受到高浓度Cd的抑制,不断增加的活性氧自由基已超出抗氧化酶系统的清除能力,已不能阻止自由基在植物细胞内的累积,细胞膜脂过氧化严重,植物细胞结构和功能受到损伤,导致抗氧化酶的合成受阻致使其活性显著降低^[39]。

3.5 Cd胁迫对蓖麻幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响

抗坏血酸-谷胱甘肽循环是维持细胞内氧化还原平衡状态的核心机制,主要由抗氧化物质AsA和

GSH与关键酶APX和GR组成,APX以AsA为底物将H₂O₂还原为H₂O,GR是保证GSH含量的关键酶,四者共同作用,在抵抗环境胁迫、清除活性氧积累等方面发挥重要的作用^[40]。本研究中,APX、GR活性和AsA、GSH含量均随着Cd浓度的升高呈先上升后下降的趋势,这与苦楝^[40]和石竹^[41]等在Cd胁迫下的研究结果一致。蓖麻叶的APX和GR活性在Cd浓度为100 mg/kg时达到峰值,根的APX和GR活性分别在Cd浓度为50和100 mg/kg时达到峰值;蓖麻叶的AsA和GSH含量在Cd浓度为50 mg/kg时达到峰值,根的AsA和GSH含量分别在Cd浓度为20和100 mg/kg时达到峰值;表明在中、低浓度Cd胁迫下AsA-GSH循环处于高效工作状态。无论根还是叶APX活性达到峰值时的胁迫浓度较AsA含量达到峰值的胁迫浓度高,这可能是由于APX活性的升高加速了对AsA的分解,从而将H₂O₂还原,缓解蓖麻的过氧化进程;GR活性与GSH含量达到峰值的胁迫浓度基本一致,进一步证实了GR是保证GSH含量的关键酶类。当Cd浓度达到200 mg/kg时,四者的值逐渐下降,但除叶和根的AsA含量及根的APX活性低于对照外,其余指标均大于对照,表明在高浓度(200~300 mg/kg)Cd胁迫下,蓖麻依然主要靠AsA-GSH循环清除体内逐渐增多的活性氧。

4 结论

本研究以‘滇蓖2号’为试验材料,探究不同浓度Cd胁迫对蓖麻幼苗叶和根各项生理生化指标的影响。结果表明,蓖麻幼苗在低浓度Cd胁迫下,细胞内抗氧化酶活性增强,提高了植株的抗氧化能力,但随着浓度的增加,其光合作用受到抑制,抗氧化酶活性下降,抗氧化剂含量也下降,植株受到氧化胁迫表现出毒害现象,且在重度胁迫下,植株主要依赖抗坏血酸-谷胱甘肽循环系统来抵御氧自由基的毒害。

参考文献:

- [1] Cao H C, Luan Z Q, Wang J D, et al. Potential ecological risk of cadmium, lead and arsenic in agricultural black soil in Jilin Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23 (1): 57-64.
- [2] Raymond A W, Okieimen F E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation [J]. International Scholarly Research

- Network, 2011, 10: 1–20.
- [3] 马君贤. 重金属镉的环境污染化学 [J]. 当代化工, 2007, 36 (2): 192–193.
- [4] 罗晟, 赵译文, 任新宇, 等. 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 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (9): 1888–1899.
- [5] 朱志勇, 李友军, 郝玉芬, 等. 镉对小麦 (*Triticum aestivum*) 干物质积累、转移及籽粒产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012 (2): 252–258.
- [6] 董袁媛, 孙竹, 杨洋, 等. 镉胁迫对黄麻光合作用及镉积累的影响 [J]. 核农学报, 2017, 31 (8): 1640–1646.
- [7] 刘朋虎, 陈华, 李波, 等. 镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (8): 1675–1682.
- [8] Faraz A, Faizan M, Sami F, et al. Supplementation of salicylic acid and citric acid for alleviation of cadmium toxicity to *Brassica juncea* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39 (2): 1–15.
- [9] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49 (2): 750–759.
- [10] 罗庆, 孙丽娜, 胡筱敏. 镉超富集植物东南景天根系分泌物的代谢组学研究 [J]. 分析化学, 2015, 43 (1): 7–12.
- [11] 杨卓, 陈婧, 李博文. 印度芥菜生理生化特性及其根区土壤中微生物对 Cd 胁迫的响应 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (12): 2428–2433.
- [12] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*) 一种新的镉超富集植物 [J]. 2003, 48 (19): 2046–2049.
- [13] 周启星, 王新, 张凯松, 等. 一种新发现的镉超集植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49 (24): 2568–2573.
- [14] Wang C, Li G R, Zhang Z Y, et al. Genetic diversity of castor bean (*Ricinus communis* L.) in Northeast China revealed by ISSR markers [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2013, 51: 301–307.
- [15] 李君, 潘新星, 王明新, 等. 外源硫对蓖麻镉胁迫与积累的调控作用 [J]. 环境化学, 2015, 34 (5): 1014–1016.
- [16] 王沛琦, 高梅, 刘旭云, 等. 5 个蓖麻品种对土壤中镉富集的差异 [J]. 核农学报, 2021, 35 (6): 1433–1439.
- [17] 沈文飏, 徐朗莱, 叶茂炳, 等. 氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的适宜条件 [J]. 南京农业大学学报, 1996, 19 (2): 101–102.
- [18] 李合生. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 刘建新, 赵国林, 王毅民. Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (1): 54–58.
- [20] 沈文飏, 徐朗莱, 叶茂炳, 等. 抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨 [J]. 植物生理学通讯, 1997, 1996 (3): 203–205.
- [21] Ma F W, Cheng L L. The sun-exposed peel of apple fruit has higher xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and antioxidants of the ascorbate–glutathione pathway than the shaded peel [J]. Plant Science, 2003, 165 (4): 1038–1048.
- [22] 赵肖琼, 梁泰帅, 赵润柱. 壳寡糖对 PEG 胁迫下小麦叶片 AsA–GSH 循环的影响 [J]. 河南农业科学, 2017, 46 (12): 8–12.
- [23] 鲁先文, 宋小龙, 王三应. 重金属铅对小麦叶绿素合成的影响 [J]. 潍坊教育学院学报, 2008, 21 (2): 47–49.
- [24] 冯慧敏, 李海渤, 万正杰, 等. 不同芥菜品种 (系) 对镉胁迫的响应 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (5): 214–222.
- [25] 韩俊艳, 王敬言, 刘诗琦, 等. 重金属镉胁迫对大豆种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2023, 35 (2): 108–115.
- [26] Gao H, Liu J, Zheng Q, et al. Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress [J]. Acta Ecology Sinica, 2013, 33 (6): 1935–1943.
- [27] 周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 等. Cd 胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (1): 26–34.
- [28] 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.
- [29] 简敏菲, 杨叶萍, 余厚平, 等. 不同浓度 Cd^{2+} 胁迫对苧麻叶绿素及其光合荧光特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51 (8): 1331–1338.
- [30] 罗巧, 邬梦晔, 龙月, 等. 圆叶锦葵对 Cd 处理的光合生理响应及 Cd 富集特征 [J]. 核农学报, 2019, 33 (7): 1415–1422.
- [31] 燕辉, 王雪芹, 代智光. 镉胁迫对大豆幼苗生理特性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 269–275.
- [32] 苏明洁, 廖源林, 叶充, 等. 镉胁迫下苦楝 (*Melia azedarach* L.) 幼苗的生长及生理响应 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (11): 2086–2093.
- [33] Maria rodriguez-serrano, Maria C Romero-puertas, Sparkesi, et al. Peroxisome dynamics in Arabidopsis plants under oxidative stress induce by cadmium [J]. Free Radical Biology & Medicine, 2009, 47 (11): 1632–1639.
- [34] Israr M, Jewell A, Kumar D, et al. Interactive effects of lead, copper, nickel and zinc on growth, metal uptake and antioxidative metabolism of *Sesbania drummondii* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186: 1520–1526.
- [35] Zou J, Zhang Y, Li X, et al. Sexual differences in root growth and antioxidant Characteristics in *Salix viminalis* exposed to cadmium stress [J]. International Journal of Phytoremediation, 2021, 23 (14): 1466–1475.
- [36] 王欣欣, 邓明华, 龚明, 等. Cd^{2+} 胁迫对小桐子幼苗叶片抗氧化系统的影响 [J]. 西北植物学报, 2016, 36 (3): 527–533.
- [37] 陈银萍, 赵镇贤, 丁浚刚, 等. 土壤 Cd 胁迫条件下外

- 源 NO 与 EDDS 复合处理对紫苜蓿生长、生理和 Cd 积累的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31 (6): 1–14.
- [38] 曹琼月, 孙佳柠, 尹雨桐, 等. Cd 胁迫下木槿两年生苗的生理及富集特征 [J]. 中国野生植物资源, 2021, 40 (12): 13–18.
- [39] 高秋, 吴菲菲, 刘芳, 等. 镉对不同品种白三叶 (*Trifolium repens* L.) 种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 草地学报, 2023, 31 (6): 1772–1779.
- [40] 龙聪颖, 邓辉茗, 苏明洁, 等. 镉和模拟酸雨胁迫对苦楝幼苗镉含量及叶片抗氧化系统的影响 [J]. 核农学报, 2020, 34 (1): 186–194.
- [41] 丁继军, 潘远智, 刘柿良, 等. 土壤重金属镉胁迫对石竹幼苗生长的影响及其机理 [J]. 草业学报, 2013, 22 (6): 77–85.

Effects of cadmium stress on physiological and biochemical characteristics of castor seedlings (*Ricinus communis* L.)

WANG Pei-qi, HU Zun-hong, YANG Bo, HU Xue-li, YANG Jin, LI Wen-chang* (Industrial Crop Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming Yunnan 650205)

Abstract: In order to investigate the physiological responses of castor bean under heavy metal Cd stress, a greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effects of the different concentrations of Cd²⁺ (0, 20, 50, 90, 100, 200 and 300 mg/kg) on the photosynthesis, the activity of protective enzymes (SOD, POD and CAT) and the ascorbic acid-glutathione (AsA-GSH) cycle in castor bean seedlings under stress. The results showed that the change of chlorophyll content had no obvious regularity with the increase of Cd concentration, but when the Cd concentration was more than 100 mg/kg, its value decreased significantly; As the Cd concentration increased, the photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr) and intercellular CO₂ concentration (Ci) all showed a trend of first increasing and then decreasing. When the Cd concentration reached 200 mg/kg, except for Tr and Ci, all other indicators were decreased significantly compared to the control ($P<0.05$). Cd stress led to the increase in the content of Malondialdehyde (MDA) in the leaves of castor, and the content of MDA in the roots increased first and then decreased. The activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in leaves and roots increased first and then decreased. When the Cd concentration reached 200 mg/kg, except that the POD of leaves was higher than the control, the other indicators were lower than the control. In the AsA-GSH cycle, with the increase of Cd concentration, the activities of ascorbate peroxidase (APX), glutathione reductase (GR) and the contents of AsA, GSH increased first and then decreased. When the Cd concentration reached 200 mg/kg, except the AsA content in leaves and roots and the APX activity in roots were lower than the control, the other indexes were higher than the control. Results indicated that Cd stress induced a significant increase in the antioxidant system activity, improving their antioxidant capacity of castor. However, as the concentration increased, the activity of antioxidant enzymes and the content of antioxidant substances decreased, causing toxicity to the plants. Moreover, plants mainly depended on AsA-GSH cycle to resist the toxicity of ROS under severe stress.

Key words: castor; Cd; photosynthesis; antioxidant enzymes; AsA-GSH cycle