

外源水杨酸对镉胁迫下商陆抗氧化能力和镉吸收的影响

康卫龙*, 张鹤缤

中国冶金地质总局第三地质勘查院, 山西 太原
Email: 973946564@qq.com

收稿日期: 2021年7月2日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月10日

摘要

为探讨外施 $2.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 水杨酸(SA)处理对镉胁迫下商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.)叶片可溶性糖(SS)含量、电解质渗漏率(EL)、丙二醛(MDA)、氧化型(GSSG)和还原型(GSH)谷胱甘肽含量、4种抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT、GR)和商陆植株生物量、镉吸收和转运能力的影响。本文采用水培法(1/2 Hoagland溶液)培养商陆, 配制成 $100 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 浓度的营养液进行胁迫。结果表明: 1) 镉胁迫下, 商陆叶片SS、MDA、GSSG和GSH含量和EL升高, SA处理后, SS、MDA含量和EL升高减缓, 而GSSG和GSH含量增加的程度显著升高。2) 镉胁迫下, 4种抗氧化酶中, SOD、POD和GR的活性逐渐升高, 加SA处理后, 与镉处理相比, 更加提高了3种酶的活性, 4天后分别提高了30.23%、33.09%、108.33%; 而CAT的活性在镉胁迫和加SA处理后没有提高活性, 4天后分别降低了26.69%和43.25%。3) 镉胁迫1个月后, 地下和地上部分的干重比对照下降了30.77%和10.56%。SA处理干重比镉胁迫处理提高了5.63%和25.11%, Cd的转移系数提高了0.24, 茎和叶的含量分别提高 $24.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $25.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。结论: SA处理能提高镉胁迫下商陆的抗氧化能力, 提高的 Cd^{2+} 吸收和转运能力。

关键词

商陆, 水杨酸, 镉胁迫, 抗氧化能力, 镉吸收

Effects of Exogenous Salicylic Acid on Physiological Indexes and Cadmium Uptake of *Phytolacca acinosa* under Cadmium Stress

Weilong Kang*, Hebin Zhang

*第一作者。

Abstract

To investigate the soluble sugar (SS) content, electrolyte leakage rate (EL), malondialdehyde (MDA), oxidized and reduced glutathione (GSSG, GSH) content of the *Phytolacca acinosa* leaves treated with 2.0 mmol·L⁻¹ salicylic acid (SA), 4 antioxidant enzyme activities (SOD, POD, CAT, GR) and plant biomass, Cd uptake and metastasis ability. In this study, *Phytolacca acinosa* was cultured by hydroponics (1/2 Hoagland solution), and nutrient solution with a concentration of 100 μmol·L⁻¹ Cd²⁺ was used for stress. The results showed that: 1) Under Cd stress, SS, MDA, GSSG, GSH contents and EL were increased in *Phytolacca acinosa* leaves. After SA treatment, the contents of SS, MDA and EL increased slowly, while the levels of GSSG and GSH increased significantly high. 2) Under Cd stress, the activities of SOD, POD, and GR were gradually increased among the four antioxidant enzymes. After treatment with SA, the activity of the three enzymes was increased compared with that of Cd treatment. The activity of SOD, POD, and GR increased by 30.23%, 33.09%, and 108.33% after 4 days; while CAT activity did not increase activity after Cd stress and SA treatment, and decreased by 26.69% and 43.25% after 4 days, respectively. 3) After 1 month of Cd stress, the dry weight of underground and aerial parts decreased by 30.77% and 10.56% compared with the control. The dry weight of SA treatment was 5.63% and 25.11% higher than that of Cd stress treatments, the Cd transfer coefficient was increased by 0.24, and the stem and leaf contents were increased by 24.94 mg·kg⁻¹ and 25.25 mg·kg⁻¹, respectively. Conclusion: SA treatment can improve the antioxidant capacity of *Phytolacca acinosa* and increase the absorption and transport capacity of Cd²⁺ under Cd stress.

Keywords

Phytolacca acinosa, Salicylic Acid, Cd Stress, Antioxidant Capacity, Cd Absorption

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.)是商陆科多年生草本植物, 聂发辉[1] [2]发现商陆是镉修复植物对镉具有超富集作用, 吴双桃[3]、严明理[4]、Xu [5]等研究证实商陆具有对重金属镉转运能力强、富集总量高、治理效果明显的特点[6], 商陆是实施土壤修复的良好材料。张玉秀等[7]研究表明商陆叶片抗氧化酶产生的活性氧自由基在清除镉毒害和提高镉耐性中有重要作用。这些实验主要研究镉胁迫下商陆的富集、转移和生理指标, 迄今为止很少有通过外源施加物质来增强商陆对镉吸收能力的研究。

水杨酸(Salicylic acid, SA)是植物体内的一种酚类衍生物, 参与调节植物许多生理过程, 能激活植物抗性反应的信号分子调控相关基因表达以提高植物抗性[8]。研究显示 SA 可提高番茄幼苗的耐盐性能[9], 更可有效抵御重金属的毒性[10]。近年有文献报道低浓度 SA 能够缓解铝胁迫的毒害[11], 外施 SA 也可提高鸢尾[12]和小麦[13]对重金属镉的抗性。SA 能提高其它植物对镉的抗性, 但对商陆是否有类似作用的研究却鲜有报道。

本文通过水培法实验, 研究商陆在镉胁迫下 SA 对其生理反应与重金属镉蓄积性能的影响, 探索其在植物修复镉污染中的应用潜力, 为植物修复实践提供一定的理论研究依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料

商陆种子是在川西北地区野外采集, 将种子在水中浸泡一天并用 2% (V/V) 次氯酸钠溶液消毒, 将种子放入铺有润湿滤纸的培养皿, 置于恒温 26°C, 相对湿度 70%~75%, 光照强度为 1200 lux, 光 14 h/暗 10 h 室内进行种子萌发。选萌芽一致种子移栽在盛有沙壤的育苗盘中砂培; 待幼苗长至株高 15 cm 左右, 可供实验使用。

2.2. 方法

2.2.1. 预实验处理

本实验以 50、100、150、200、250、300 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 水培溶液处理, 分析商陆的毒害症状, 发现镉浓度高于 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 叶片出现枯点, 并逐渐扩大至叶片变黄掉落, 毒害特征明显, 商陆无法正常生长, 故实验选择 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉浓度处理商陆。

将商陆叶片电解质渗漏率(EL)作为检测镉胁迫下膜结构破坏程度的指标, 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 喷施 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉浓度胁迫下商陆叶片, 对照组喷洒蒸馏水, 测定 1、2、3、4d 时商陆叶片电解质渗漏率。通过检测分析发现: 在 SA 预处理阶段, 当浓度低于 2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 商陆叶片电解质渗漏率呈下降趋势, 其中 2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 处理电解质渗漏率最低; 3.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 处理时, 商陆叶片电解质渗漏率反而升高; 说明低浓度 SA 可有效缓解镉对商陆的迫害, 较高浓度 SA 反而商陆有伤害。

因此本实验最终选择 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉浓度处理商陆, 2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 作为外源喷施处理, 分析镉胁迫下 SA 对其生理指标及富集特征的影响。

2.2.2. 实验设计

将商陆幼苗从沙壤移出, 用水冲洗至干净。实验作 3 组处理, 每组处理重复 6 次: 第一组为对照组(CK), 只加 1/2 Hoagland 营养液; 第二组为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉胁迫组(Cd); 第三组为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉胁迫下 2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 水杨酸处理组(Cd+SA)。喷施水杨酸 2 次, 间隔 1 天, 对照喷施等量蒸馏水。营养液每 4 d 更换一次, 使用前通气过夜, 用 NaOH 和 HCl 调整营养液 pH 值至 6.5 左右。

实验开始每天任意取商陆完全展叶(从上至下)测定各组叶片可溶性糖(SS)、丙二醛(MDA)氧化型和还原型谷胱甘肽(GSH, GSSG)含量和 4 种抗氧化酶(POD、SOD、CAT 和 GR)活性。

30 d 后收获, 用双重蒸馏水清洗, 样品依次分为根、茎、叶。放入烘箱 105°C 烘至恒重, 测定商陆各部分的生物量和各组织镉蓄积量。

2.3. 样品中各指标的测定方法

2.3.1. 商陆各生理指标的测定

可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法[14]测定; 电解质渗漏率按李锦树等[15]方法测定。丙二醛(MDA)含量参照 Velikova 等[16]硫代巴比妥酸检测法测定; 采用 Griffith [17]的方法测定还原型谷胱甘肽含量, Kosugi 等[18]的方法测定总谷胱甘肽(GSH)含量, 利用总谷胱甘肽含量与还原型谷胱甘肽含量的差值, 计算出氧化型谷胱甘肽(GSSG)含量。

2.3.2. 商陆 4 种酶活性的测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性力采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定[19]; 过氧化物酶(POD)活性力采用愈创木酚法测定[14]; 过氧化氢酶(CAT)活性力采用过氧化氢法测定[20]; 谷胱甘肽还原酶(GR)活性检测如 Duarte 等[21]所述。

2.3.3. 商陆重金属镉的测定

商陆用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解后, 重金属镉的含量采用原子吸收分光光度法[22] (TA-990 型原子吸收分光光度计), 重金属镉转移系数(TF) = S/R (S 和 R 分别指植物地上部和根部重金属浓度) [23]。

2.4. 数据处理

利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行实验数据的统计分析。

3. 结果与分析

3.1. SA 处理对商陆叶片可溶性糖含量的影响

植物体内的可溶性糖参与渗透调节, 在受到重金属等逆境胁迫时, 其含量升高, 在一定范围内减轻植物的受害程度。如表 1 所示, 受 Cd 胁迫的处理组可溶性糖含量明显高于对照组, 用 SA 处理后, 可溶性糖含量在逐渐降低, 在第 4 d 接近对照组水平, 说明 SA 能有效降低受 Cd 胁迫商陆叶片中可溶性糖含量。

Table 1. Effects of SA on physiological indexes of *Phytolacca acinosa* under Cd stress

表 1. 水杨酸在镉胁迫下商陆生理指标的影响

指标 Index	处理 Treatments	镉胁迫处理时间 Cd stress treatment time/d			
		1	2	3	4
可溶性糖(%) Soluble sugar (SS)	CK	2.56 ± 0.37 b	2.67 ± 0.21 b	2.43 ± 0.23 c	2.72 ± 0.07 b
	Cd	4.43 ± 0.46 a	4.85 ± 0.15 a	4.46 ± 0.17 a	4.33 ± 0.12 a
	Cd + SA	4.02 ± 0.29 a	3.24 ± 0.14 b	2.86 ± 0.18 b	2.37 ± 0.03 c
电解质渗漏率(%) Electrolyte leakage (EL)	CK	9.06 ± 0.11 b	10.12 ± 0.19 b	10.23 ± 0.23 c	9.84 ± 0.57 c
	Cd	13.62 ± 0.42 a	15.64 ± 0.29 a	18.27 ± 0.49 a	26.45 ± 0.90 a
	Cd + SA	12.84 ± 0.98 a	13.43 ± 0.83 a	15.22 ± 0.20 b	16.17 ± 0.67 b
丙二醛(MDA) Malonyldialdehyde content ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)	CK	0.36 ± 0.05 a	0.38 ± 0.08 b	0.42 ± 0.05 c	0.39 ± 0.02 c
	Cd	0.51 ± 0.09 a	0.64 ± 0.06 a	0.72 ± 0.03 a	0.81 ± 0.05 a
	Cd + SA	0.46 ± 0.08 a	0.53 ± 0.07 a	0.58 ± 0.03 b	0.62 ± 0.04 b
还原型谷胱甘肽 GSH ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	CK	1.46 ± 0.39 a	1.52 ± 0.22 c	1.43 ± 0.09 c	1.48 ± 0.07 c
	Cd	1.92 ± 0.37 a	2.04 ± 0.11 b	2.09 ± 0.14 b	1.89 ± 0.07 b
	Cd + SA	2.48 ± 0.35 a	2.57 ± 0.06 a	2.52 ± 0.08 a	2.49 ± 0.07 a
氧化型谷胱甘肽 GSSG ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	CK	0.64 ± 0.06 a	0.64 ± 0.03 c	0.68 ± 0.04 b	0.63 ± 0.03 c
	Cd	0.78 ± 0.06 a	0.82 ± 0.03 b	0.81 ± 0.05 b	0.78 ± 0.03 b
	Cd + SA	1.12 ± 0.13 a	1.16 ± 0.03 a	1.21 ± 0.13 a	1.14 ± 0.04 a

注: 1) 同列不同小写字母分别表示处理间差异显著性($p < 0.05$); 2) 数值为 3 个重复的平均值 ± 标准差, 下同。

3.2. SA 处理对商陆叶片中丙二醛和电解质渗漏率含量的影响

丙二醛是植物细胞膜不饱和脂肪酸过氧化的产物, 是受到氧化伤害的重要标志, 电解质渗漏率反映细胞受到重金属胁迫后膜结构的破坏程度。在 Cd 胁迫 1、2、3、4 d 后, Cd 胁迫的 MDA 含量相对 CK 的增加量分别为 0.15、0.26、0.30、0.42 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$, 电解质渗漏率分别增加 50.33%、54.55%、78.59%、

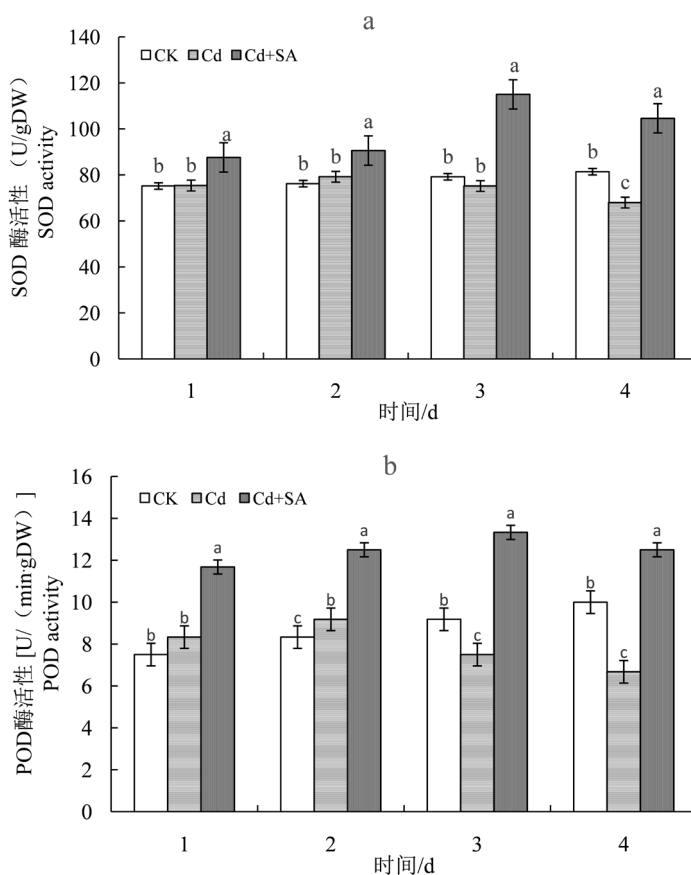
168.81%; SA 处理商陆植株后, MDA 含量相对于 CK 的增加量则分别为 0.10、0.15、0.16、0.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$, 电解质渗漏率分别增加 41.72%、32.71%、48.77%、64.33%, 比同期受到镉胁迫的植株分别下降 8.61%、21.84%、48.78%、64.33% (表 1)。这些数据显示, 商陆叶片 MDA 含量和电解质渗漏率随 Cd 胁迫时间延长而增加, 细胞质膜过氧化作用加强, 完整性遭到破坏; SA 处理后提高了商陆细胞膜的稳定性和完整性, 减轻了因 Cd 胁迫引起膜脂过氧化和细胞内电解质的外泄, 说明 SA 提高植物抗重金属胁迫的能力。

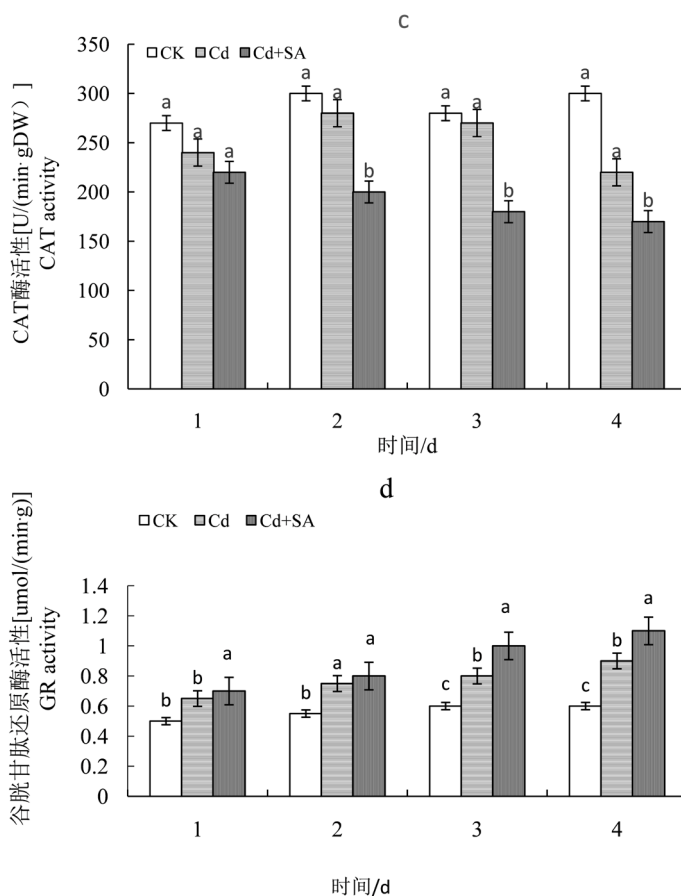
3.3. SA 处理对商陆叶片中谷胱甘肽含量的影响

谷胱甘肽是小分子的抗氧化剂, 可以结合重金属离子, 减轻毒害。表 1 显示, 受到 Cd 胁迫后, GSH 和 GSSG 含量比 CK 提高了 31.51%、34.21%、46.15%、27.70% 和 21.86%、28.13%、19.12%、23.81%, SA 处理后, GSH 和 GSSG 含量的变化趋势相同, 但含量增加的程度显著升高, 4 d 的测定结果比 CK 的增加值分别为 69.86%、69.08%、76.22%、68.24% 和 75.00%、81.25%、77.94%、80.95%, 与 CK 和 Cd 胁迫比较, 均达到显著水平。

3.4. SA 处理对商陆叶片抗氧化酶的影响

SOD、POD、CAT 是植物体内 3 种重要的抗氧化酶, 能清除活性氧自由基, 如羟基自由基($\cdot\text{HO}$), 过氧化氢(H_2O_2)、超氧自由基($\cdot\text{O}^2$)。它们活性直接反映植物细胞抵御活性氧伤害的能力[15], GR 是催化生成 GSH 的重要酶, 生成谷胱甘肽是小分子的抗氧化剂。从图 1 可以看出: Cd 胁迫后 SOD、POD 和 GR 的活性逐渐升高, 加 SA 处理后, 与 Cd 处理相比, 更加提高了 3 种酶的活性, 4 d 后分别提高了 30.23%、33.09%、108.33%; 而 CAT 的活性在 Cd 胁迫和加 SA 处理后没有提高活性, 4 d 后分别降低了 26.69% 和 43.25%。





注：图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

Figure 1. Effects of exogenous SA treatment on activity of SOD (a); POD (b); CAT (c) and GR (d)

图 1. SA 处理对 4 种酶活性的影响。(a) SOD 酶活性的变化；(b) POD 酶活性的变化；(c) CAT 酶活性的变化；(d) GR 酶活性的变化

3.5. 二级标题 SA 处理对商陆生物量和各组织镉蓄积量的影响

如表 2 所示, 与 CK 相比, Cd 处理后, 地下和地上部分的干重显著下降, 分别比对照下降了 14.10% 和 10.56%, 地下部分的生长对 Cd 处理更加敏感; SA 处理可以显著改善 Cd 胁迫, 地上和地下干重分别提高了 6.30% 和 13.43%。同时, Cd 的转移增加了, 30 d 后测定, Cd 的转移系数提高了 0.26, Cd 向商陆茎和叶中转移, 含量分别提高 23.94 和 25.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著大于根中重金属提高程度。

Table 2. Effects of SA on *Phytolacca acinosa* biomass and heavy metal contents in tissues under Cd stress

表 2. SA 在镉胁迫下商陆生物量和各组织重金属含量的影响

处理 Treatments	生物量 Biomass		各组织重金属含量 Heavy metal content in tissues			转运系数 Translocation factor
	地上部分干重 Aboveground part dry weight/g·株 ⁻¹	地下部分干重 Belowground part dry weight/g·株 ⁻¹	根 mg·kg ⁻¹	茎 mg·kg ⁻¹	叶 mg·kg ⁻¹	
CK	1.42 ± 0.02 a	0.78 ± 0.02 a	—	—	—	—
Cd	1.27 ± 0.02 c	0.67 ± 0.03 b	45.53 ± 2.86 b	27.69 ± 1.2 b	29.38 ± 2.10 b	1.20 ± 0.09 a
Cd + SA	1.35 ± 0.02 b	0.76 ± 0.02 a	65.38 ± 3.30 a	51.63 ± 3.4 a	54.63 ± 3.56 a	1.44 ± 0.08 a

注：“—”含量未检测出。

4. 讨论

商陆是镉的超富集植物[3] [4], 但不同地域分布的商陆(居群), 其对镉的耐性有差异。张玉秀等报道, 水培采用 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉胁迫仍然正常生长, 本实验采用的商陆只能在 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉胁迫浓度下生长, 说明商陆不同的居群对镉的耐受性不同。

本研究表明, 商陆植株受到 Cd^{2+} 等金属离子胁迫后, 细胞受到伤害, 表现为膜脂过氧化, 产生大量的活性氧自由基(ROS), 丙二醛含量、电解质渗漏率升高(表 1), 这和以前报道的结果是一致的[7] [8] [9]。植物体为了抵御伤害, 在体内形成酶性的和非酶性的抗氧化防御系统来保护自身细胞免遭伤害[8]。本实验中, 受到镉胁迫后, 商陆叶片中 POD、SOD 和 GR 活性增强, 可溶性糖、氧化型和还原性谷胱甘肽含量增加来缓解胁迫伤害。

水杨酸及其系列衍生物可以影响植物的生理生化代谢, 也可缓解植物重金属毒害, 如八仙花[11]、路易斯安娜鸚尾[12]和小麦[13]。本实验结果表明: 超富集植物商陆经 SA 处理后, POD、SOD 和 GR 活性持续上升, 而 CAT 的活性下降, 这和韩鹰等报道结果一致[12]。一方面 POD、SOD 的活性提高有利于清除活性氧, 但更重要的方面是产生 GSH, 螯合更多的 Cd^{2+} , 转运到其它部位, 消除局部重金属离子的毒害, 所以本实验中氧化型和还原性谷胱甘肽含量增加, 根、茎、叶 Cd 的含量增加, 且转运系数提高。朱守晶等在苎麻研究发现, CdCl_2 和水杨酸可以诱导 GR 的基因上调表达[24], 商陆是否产生类似结果, 有待于进一步研究。

5. 结论

总之, 商陆在受到 Cd 胁迫时, 植物体全面启动防御系统, 以解除毒害。本实验表明: SA 能提高商陆镉胁迫下的抗氧化能力, 提高镉吸收和转运能力, 但其机理尚需进一步研究。

参考文献

- [1] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 303-306.
- [2] 聂发辉, 吴彩斌, 吴双桃. 商陆对镉的富集特征[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(4): 400-405.
- [3] 吴双桃, 朱慧. 商陆修复镉污染土壤初探[J]. 河北化工, 2006, 29(11): 58-60.
- [4] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 向言词, 冯涛. 3 种植物对红壤中镉的富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 72-77.
- [5] Xu, X.X., Zhang, S.R., Xie, S.S., et al. (2012) Effect of Cadmium Stress on Growth Response and Accumulation Characteristics of *Phytolacca americana* L. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, **25**, 1358-1362.
- [6] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 陈少瑾, 胡劲召, 陈宜菲, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 156-157, 160.
- [7] 张玉秀, 张红梅, 黄智博, 李林峰, 刘金光, 李霞, 等. 商陆耐重金属 Cd 关键酶抗氧化酶的研究[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 896-900.
- [8] 罗明华, 罗英, 王璞. 水杨酸处理对干旱胁迫下丹参幼苗抗氧化能力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 102-105.
- [9] 孙德智, 韩晓日, 彭靖, 范富, 杨恒山, 马玉露, 等. 外源水杨酸和一氧化氮对盐胁迫番茄幼苗光系统II功能及激发能分配利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 170-178.
- [10] Xu, L.L., Fan, Z.Y., Dong, Y.J., Kong, J. and Bai, X.Y. (2015) Effects of Exogenous Salicylic Acid and Nitric Oxide on Physiological Characteristics of Two Peanut Cultivars under Cadmium Stress. *Biologia Plantarum*, **59**, 171-182. <https://doi.org/10.1007/s10535-014-0475-9>
- [11] 陈海霞, 张琥峰, 蒋辉. 水杨酸对八仙花组培苗铝胁迫的缓解效应[J]. 湖南生态科学学报, 2018, 5(1): 1-6.
- [12] 韩鹰, 邓鹏, 陈刚. 外源水杨酸改善 Cd 胁迫下路易斯安娜鸚尾的生长和养分吸收[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3153-3159.
- [13] 王瑞波. 水杨酸对镉胁迫小麦叶绿素荧光参数的影响[J]. 生物技术通报, 2017, 33(7): 96-99.

- [14] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理实验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] 李锦树, 王洪春, 王文英, 朱亚芳. 干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响[J]. 植物生理学报, 1983, 9(3): 223-229.
- [16] Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. (2000) Oxidative Stress and Some Antioxidant Systems in Acid Rain-Treated Bean Plants Protective Role of Exogenous Polyamines. *Plant Science*, **151**, 59-64. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
- [17] Griffith, O.W. (1980) Determination of Glutathione and Glutathione Disulfide Using Glutathione Reductase and 2-Vinylpyridine. *Analytical Biochemistry*, **106**, 207-212. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(80\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0003-2697(80)90139-6)
- [18] Kosugi, H. and Kikugawa, K. (1985) Thiobarbituric Acid Reaction of Aldehydes and Oxidized Lipids in Glacial Acetic acid. *Lipids*, **20**, 915-921. <https://doi.org/10.1007/BF02534777>
- [19] Giannoplities, C.N. and Ries, S.K. (1977) Superoxide Dismutase Purification and Quantitative Relationship with Water-Soluble Protein in Seedling. *Plant Physiology*, **59**, 315-318. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.315>
- [20] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [21] Duarte, B., Caetano, M., Almeida, P.R., Vale, C. and Caçador, I. (2010) Accumulation and Biological Cycling of Heavy Metal in Four Salt Marsh Species, from Tagus Estuary (Portugal). *Environmental Pollution*, **158**, 1661-1668.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.004>
- [23] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 徐圣友, 王远鹏. 中国首次发现的锰超积累植物——商陆[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 935-937.
- [24] 朱守晶 余伟林 石朝燕, 揭雨成. 苧麻谷胱甘肽还原酶基因(BnGR1)的克隆和表达分析[J]. 农业生物技术学报, 2015, 23(10): 1318-1326.