

Study on Tolerance Comparison of Two *Salvia* to CdCl_2 Stress and Its Physiological Mechanism

Shi Feng¹, Yukun Wei¹, Hua Xu^{2*}

¹Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences/Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai

²College of Engineering Technology, Beijing Normal University Zhuhai Campus, Zhuhai Guangdong
Email: fs3584@126.com, *xuhua04@mail.nankai.edu.cn

Received: Jan. 15th, 2019; accepted: Jan. 25th, 2019; published: Feb. 2nd, 2019

Abstract

Through the water cultivation, effects of treatments with different concentrations of CdCl_2 (0, 60, 100, 140 and 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on growth, antioxidant enzyme activities of leaves, activities of H^+ -ATPase and Ca^{2+} -ATPase in the plasma membrane of root, as well as N and P contents of *Salvia meiliensis* and *Salvia cavaleriei* were studied in order to compare the tolerance difference between two *Salvia* to the stress of CaCl_2 and analyze the physiological mechanism. The result showed that: 1) When the concentration of CdCl_2 was 140 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, dry weights of the over ground part, underground part and the plant of *S. cavaleriei* are lower than those in the control; 2) With the increase of CdCl_2 concentration, the accelerating effects on activities of CAT and POD in *S. cavaleriei* had been gradually enhanced, but the accelerating effects on activities of POD and CAT in *S. meiliensis* had been weakened respectively when the concentration of CdCl_2 was 100 and 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 3) The activity of Ca^{2+} -ATPase both in two kinds of salvia was inhibited when the concentration of CdCl_2 was 140 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. But the degree of inhibition on the activity of Ca^{2+} -ATPase in *S. cavaleriei* was less than that in *S. meiliensis*. The activity of H^+ -ATPase in the plasma membrane of *S. cavaleriei* was inhibited when the concentration of CdCl_2 was 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. However, the activity of H^+ -ATPase in the plasma membrane of *S. meiliensis* was inhibited just when the concentration of CdCl_2 was 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 4) N and P contents of *S. cavaleriei* had lower than those in the control when the concentration of CdCl_2 was 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. But N and P contents of *S. meiliensis* were lower than those in the control just when the concentration of CdCl_2 is 140 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. This research shows that the tolerance levels of POD and CAT, these two kinds of antioxidase, in *S. cavaleriei* to the stress of CdCl_2 were very high so that the peroxidation degree of its plasma membrane is lower than that of *S. meiliensis*. Besides, the tolerance of activities of Ca^{2+} -ATPase and H^+ -ATPase in the root plasma membrane of *S. cavaleriei* to the stress of CdCl_2 is very strong so that its degree of inhibition on N and P absorption is lower than that on *S. meiliensis*. It's also the reason why the tolerance of *S. cavaleriei* to the stress of CdCl_2 is higher than that of *S. meiliensis*.

Keywords

CdCl_2 Stress, *Salvia*, N content, P Content, Antioxidase, Plasma Membrane Ca^{2+} -ATPase, Plasma Membrane H^+ -ATPase

*通讯作者。

2种鼠尾草对CdCl₂胁迫的耐受性比较及生理机制的研究

冯 时¹, 魏宇昆¹, 许 华^{2*}

¹中国科学院上海辰山植物科学研究中心/上海辰山植物园, 上海

²北京师范大学珠海分校工程技术学院, 广东 珠海

Email: fs3584@126.com, *xuhua04@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2019年1月15日; 录用日期: 2019年1月25日; 发布日期: 2019年2月2日

摘 要

为了研究2种鼠尾草对CdCl₂胁迫的耐受性差异并分析这种差异的生理机制, 采用水培的方式, 研究不同浓度CdCl₂ (0、60、100、140、180 mg·L⁻¹)处理对美丽鼠尾草(*Salvia meiliensis*)、贵州鼠尾草(*Salvia Cavaleriei*)生长情况、叶片抗氧化酶活性, 根部质膜H⁺-ATP酶和质膜Ca²⁺-ATP酶活性以及氮(N)、磷(P)含量的影响。结果显示: 1) 贵州鼠尾草地上部分、地下部分以及植株的干重在CdCl₂浓度为140 mg·L⁻¹时低于对照, 而美丽鼠尾草地上部分、地下部分以及植株的干重在CdCl₂浓度为100 mg·L⁻¹时就低于对照; 2) 随着CdCl₂浓度的增加, 贵州鼠尾草叶片的过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性受到的促进作用逐渐增强, 而美丽鼠尾草POD和CAT活性所受的促进作用分别在CdCl₂浓度为100、180 mg·L⁻¹时开始减弱; 3) 2种鼠尾草Ca²⁺-ATP酶活性均在CdCl₂浓度为140 mg·L⁻¹时受到抑制, 但是贵州鼠尾草质膜Ca²⁺-ATP酶活性受抑制程度小于美丽鼠尾草, 贵州鼠尾草质膜H⁺-ATP酶活性在CdCl₂浓度为180 mg·L⁻¹时受到抑制, 而美丽鼠尾草质膜H⁺-ATP酶活性在CdCl₂浓度为100 mg·L⁻¹时就受到抑制; 4) 贵州鼠尾草N、P含量在CdCl₂的浓度为180 mg·L⁻¹时低于对照, 而美丽鼠尾草N、P含量在CdCl₂的浓度为140 mg·L⁻¹时就低于对照。研究表明, 贵州鼠尾草POD和CAT这2种抗氧化酶对CdCl₂胁迫的耐受性高, 使其质膜过氧化程度低于美丽鼠尾草, 同时贵州鼠尾草根质膜Ca²⁺-ATP酶和H⁺-ATP酶活性对CdCl₂胁迫的耐受性强, 使其N、P吸收受抑制程度低于美丽鼠尾草; 是贵州鼠尾草对CdCl₂胁迫的耐受性高于美丽鼠尾草的原因。

关键词

CdCl₂胁迫, 鼠尾草, 氮含量, 磷含量, 抗氧化酶, 质膜Ca²⁺-ATP酶, 质膜H⁺-ATP酶

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

当今社会工农业生产发展迅速, 工业“三废”排放量日益增大, 农业生产中农药化肥的使用量逐步提高, 使土壤中镉(Cadmium, Cd)含量不断上升, Cd污染已经成为最严重的环境污染之一[1]。Cd污染能引起植物的生理代谢紊乱, 抑制其正常生长发育, 从而降低产量与质量[2]。质膜作为植物与周围环境的屏障, 是植物体最早受到重金属影响而引起胁迫反应的部位[3]。Cd²⁺能影响植物抗氧化系统的正常工作, 诱导质膜过氧化, 因此抗氧化酶活性的维持和提高常作为植物耐Cd²⁺胁迫能力的参考[4] [5] [6]。质膜ATP酶是质膜上由

ATP 驱动的阳离子泵, 其群体含有多个与重金属离子跨膜运输有关的酶, 在离子运输(质膜 H^+ -ATP 酶)、信号转导(质膜 Ca^{2+} -ATP 酶)等方面作用显著[7]。多项研究表明, Cd^{2+} 胁迫会抑制质膜 ATP 酶的活性, 但是植物种类的不同, 质膜 ATP 酶活性受抑制的 Cd^{2+} 浓度也不同[8] [9] [10]。 Cd^{2+} 进入植物体内会对营养元素的吸收造成影响, 不同种类植物的 Cd^{2+} 耐受程度不同, 其营养元素的吸收能力受 Cd^{2+} 的影响也存在差异[11]。营养元素的吸收发生变化可以影响到植物的生长情况, 这可以为研究植物对 Cd^{2+} 的耐受能力提供参考。

美丽鼠尾草(*Salvia meiliensis*)和贵州鼠尾草(*Salvia. cavaleriei*)同属于唇形科(Labiatae)鼠尾草属(*Salvia*)荔枝草亚属(Subg. *Sclarea*)丹参组(Sect. *Drymosphace*)中的植物[12]。近年来鼠尾草属植物因其适应性强, 花期长而集中, 被用于道路旁边、河湖岸边、园林等的绿化装饰[12]。美丽鼠尾草和贵州鼠尾草不但有很高的药用价值[12] [13] [14], 而且花期较长、生态适应能力较强, 也可以被引种、栽培和驯化作为观赏性植物。目前, 关于美丽鼠尾草和贵州鼠尾草对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受机制的研究尚未见报道。因此, 本试验以这 2 种鼠尾草为材料, 采用水培方法, 研究不同浓度的 $CdCl_2$ 对这 2 种鼠尾草幼苗的生长、抗氧化酶活性、MDA 含量、根部质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性以及 N、P 含量的影响, 并分析了 2 种鼠尾草对 $CdCl_2$ 耐受性差异的生理机制, 以期对 2 种鼠尾草的引种、栽培等提供一定的理论基础和参考依据。

2. 材料与方 法

2.1. 试验材料

美丽鼠尾草和贵州鼠尾草分别引种自安徽省岳西县郊外和湖南张家界市, 供试材料均为一年生的实生苗, 栽植于北京师范大学珠海分校苗圃。

2.2. 试验方法

选择选择生长良好, 长势基本一致的美丽鼠尾草和贵州鼠尾草各 15 株, 置于水培缸中, 用霍格兰氏(Hoagland)营养液进行培养。待植株恢复生长后, 设 5 个 $CdCl_2$ 处理浓度 0、60、100、140、180 $mg \cdot L^{-1}$, 每个处理 3 次重复, 进行一次性 $CdCl_2$ 处理 20 min。处理后随机排列于温室进行培养, 7 d 后收获不同处理水平下的植株, 测量生长指标, 取 2 种鼠尾草植株第 7 片叶立即测定 MDA 含量, 取第 3 片叶与部分根密封于封口袋后立即保存于 $-70^\circ C$ 冰箱中, 叶片用于测定抗氧化酶活性、根用于测定质膜 H^+ -ATP 酶活性、质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性, 剩下的根烘干后用于测定 N、P 含量。

2.3. 测定方法

2.3.1. 生长指标的测定

将植株分为地上部(叶片、径干)与地下部(根系), 用去离子水清洗, 吸水纸吸干水分后, 在 $103^\circ C$ 烤箱内杀青 30 min, 再在 $75^\circ C$ 下烘干至恒重, 计算单株鼠尾草地上和地下部生物量。

2.3.2. MDA 含量的测定

取叶片 1.0 g, 加入少量石英砂和 10%三氯乙酸 2 ml, 研磨至匀浆, 再加 8 ml 10%三氯乙酸进一步研磨, 匀浆以 4000 r/min 离心 10 min, 其上清液为 MDA 提取液。MDA 含量测定采用 Heath 和 Packer 的方法[15]。提取液与硫代巴比妥酸(TBA)在酸性条件下加热可发生显色反应, 反应溶液在 532 nm、600 nm 和 450 nm 波长处测定吸光度值, 公式:

$$C_{MDA} = 64.5(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}$$

$$MDA \text{ 含量} = [C_{MDA} \times \text{提取液总量}(\text{ml})] / \text{植物组织鲜重}(\text{g})$$

可算出中 MDA 含量($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$)

2.3.3. 抗氧化酶活性的测定

取叶片 1.0 g 置于预冷的研钵中,加入适量预冷的 pH7.0 磷酸缓冲液和少量石英砂冰浴研磨成匀浆后,转入 10 ml 容量瓶中,并用缓冲液冲洗研钵数次,合并冲洗液,并定容到 10 ml。取提取液 5 ml 于离心管中,经 4℃ 冷冻离心机 15,000 ×g 下离心 15 min,上清液为抗氧化酶粗提液,4℃ 下保存备用。CAT 活性采用 Aebi 的紫外吸收法[16]测定,以每分钟内 A_{240} 降低 0.1 的酶量为 1 个酶活单位(u)来表示。POD 活性采用 Polle 的愈创木酚法[17]测定,以每分钟内 A_{470} 变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位(u)表示。

2.3.4. 根部质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 活性测定

质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 提取参照 Wang 等[18]的方法,取 0.5 g 根部样品加入 2 倍(m/V)体积预冷的磷酸盐缓冲液(PBS),冰浴研磨。研磨液经 4 层纱布过滤,滤液经 4℃ 冷冻离心机 13,000 ×g 离心 30 min,取上清液测定 ATP 酶活性。参照 Wang 等[18]的方法测定质膜 H^+ -ATP 酶活性($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$);参照 Ohnishi 等[19]的方法测定质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。

2.3.5. 营养元素 N、P 的测定

将烘干至恒重的根部粉碎至粉末,称取 0.5 g 于 250 ml 消煮管,加入 0.2 g 硫酸铜、6 g 硫酸钾及 20 mL 硫酸用消化炉(上海纤检 HYP-320 二十孔智能消化炉)在 200℃~350℃ 消煮至澄清,放冷后,移入 100 mL 容量瓶中定容混匀备用。采用 Anantakrishnan 等[20]的凯氏定氮法利用定氮仪(上海纤检 KDN-103F 凯氏定氮仪)测定 N 含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。采用 María 等[21]的磷钼蓝比色法测定 P 含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

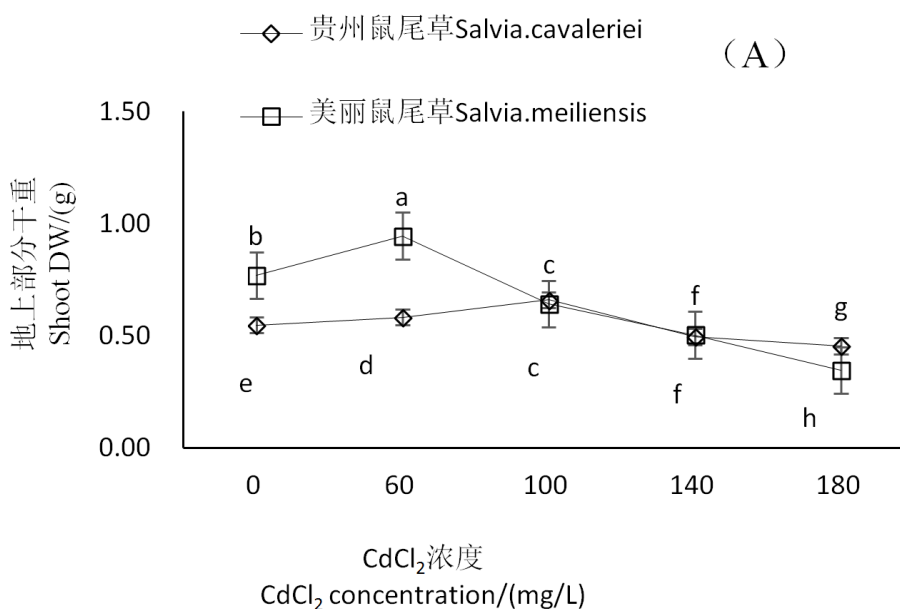
2.4. 数据分析

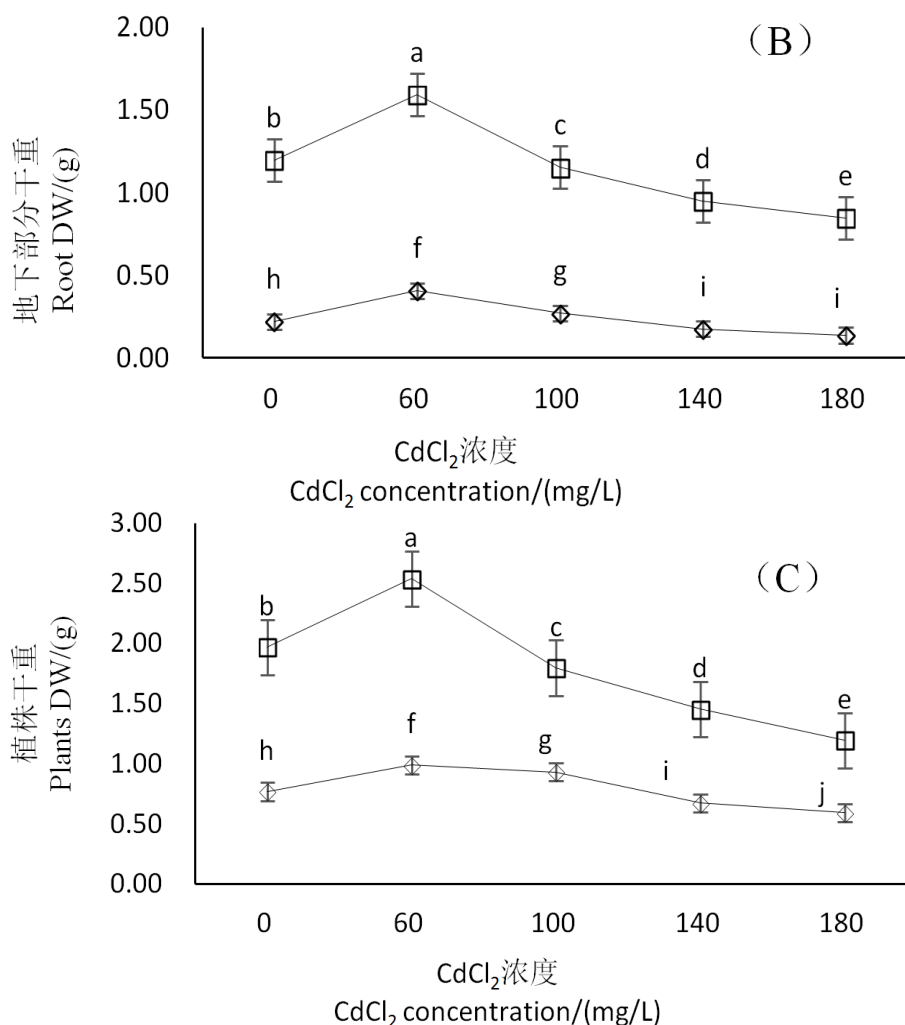
利用 SPSS 22.0 统计软件进行 One-way ANOVA 方差分析,并进行 Duncan 多重比较;对根部质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性与叶片中 N、P 含量进行 Pearson 相关性分析。用 Microsoft Excel 2013 绘制图表。

3. 结果与分析

3.1. CdCl_2 胁迫对两种鼠尾草生长的影响

由图 1 可知,在 60、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下促进了贵州鼠尾草的生长,使其地上部分、地下部分以及





注：同一折线上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)，下同。

Figure 1. Growth of *Salvia cavaleriei* and *Salvia meliensis* under CdCl₂ treatments

图 1. 不同浓度 CdCl₂ 处理对贵州鼠尾草和美丽鼠尾草生长发育影响

植株的干重升高，而美丽鼠尾草的生长仅在 CdCl₂ 浓度为 60 mg·L⁻¹ 时受到促进，在 CdCl₂ 浓度为 100 mg·L⁻¹ 时生长受到抑制，其地上部分、地下部分以及植株的干重均显著降低。美丽鼠尾草在 CdCl₂ 浓度为 140 mg·L⁻¹ 时地上部分、地下部分以及植株的干重较对照分别降低 35.06%、20.83%、26.40%，贵州鼠尾草 3 项指标在 CdCl₂ 浓度为 140 mg·L⁻¹ 时较对照分别降低 9.09%、18.18%、13.00%。

3.2. CdCl₂ 胁迫对两种鼠尾草叶片抗氧化酶活性与 MDA 含量的影响

由图 2 可知，CdCl₂ 对 2 种鼠尾草 CAT 与 POD 的活性产生了促进作用。贵州鼠尾草 CAT 与 POD 的活性受到的促进作用随着 CdCl₂ 浓度的升高而增强，而美丽鼠尾草 CAT 活性受到的促进作用在 CdCl₂ 浓度为 180 mg·L⁻¹ 时开始减弱，其 POD 活性受到促进作用在 CdCl₂ 浓度为 100 mg·L⁻¹ 时开始减弱。2 种鼠尾草 MDA 含量随着 CdCl₂ 浓度的增加而逐渐上升，在 CdCl₂ 浓度为 60、100、140、180 mg·L⁻¹ 时美丽鼠尾草 MDA 含量分别比对照高 106.47%、138.81%、236.68%、310.61%，贵州鼠尾草 MDA 含量分别比对照高 77.47%、121.31%、211.23%、245.82%，美丽鼠尾草 MDA 含量的上升幅度在各 CdCl₂ 浓度下均高于贵州鼠尾草。

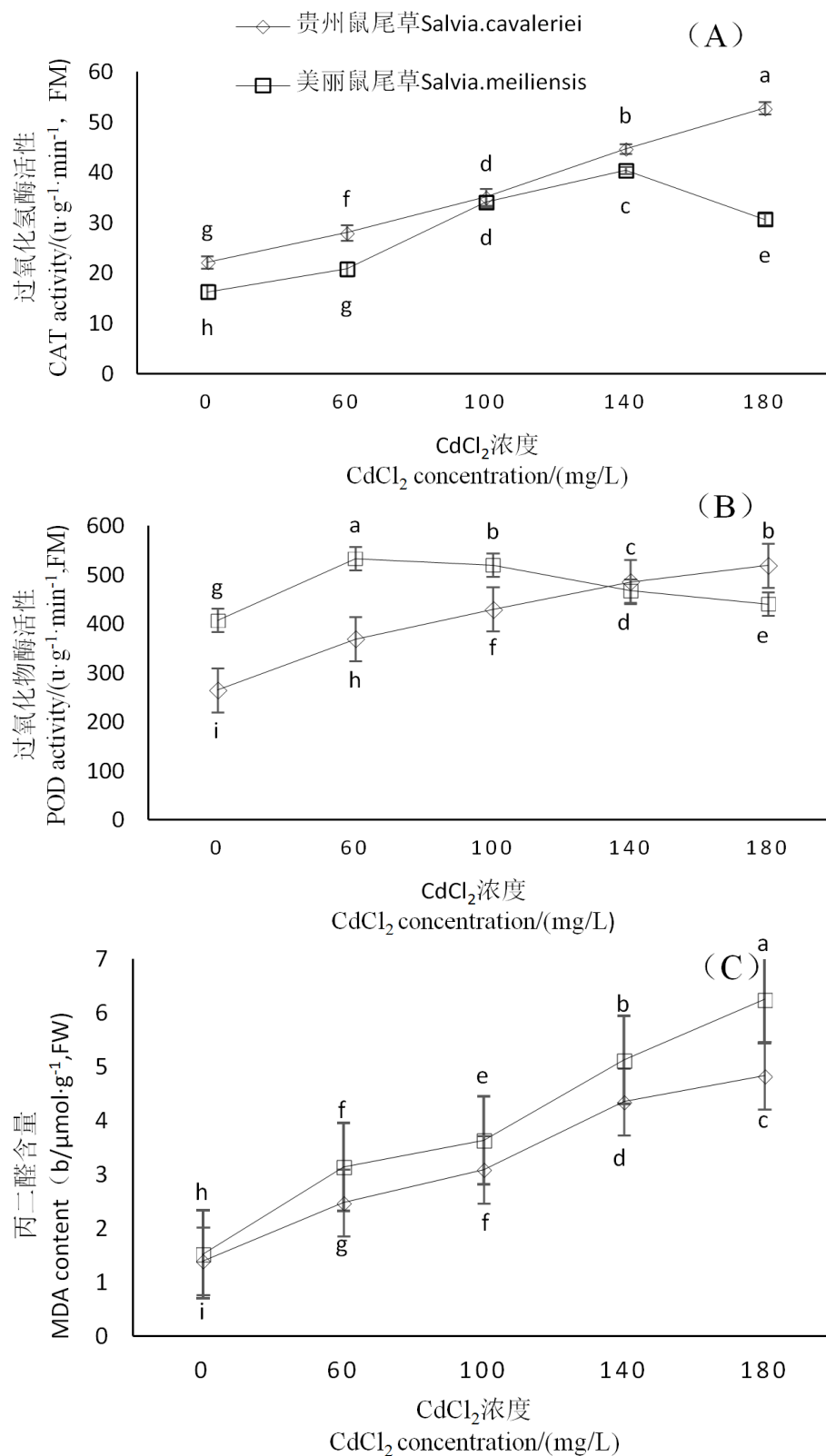


Figure 2. Effects of different concentrations of CdCl₂ on MDA content, POD and CAT activity in leaves of *S. meiliensis* and *S. cavalerier*

图 2. CdCl₂胁迫对美丽鼠尾草和贵州鼠尾草叶片 MDA 含量以及 POD 和 CAT 活性的影响

3.3. CdCl₂ 胁迫对两种鼠尾草根部分膜 H⁺-ATP 酶和质膜 Ca²⁺-ATP 酶活性的影响

由图 3 可知, 随着 CdCl₂ 浓度升高, 2 种鼠尾草根部分膜 H⁺-ATP 酶和质膜 Ca²⁺-ATP 酶活性先受到促进后受到抑制。在 CdCl₂ 浓度为 60、100、140 mg·L⁻¹ 时贵州鼠尾草质膜 H⁺-ATP 酶活性受到不同程度的促进, 而美丽鼠尾草质膜 H⁺-ATP 酶活性仅在 CdCl₂ 浓度为 60 mg·L⁻¹ 时受到促进。在 CdCl₂ 浓度为 60、100 mg·L⁻¹ 时, 2 种鼠尾草质膜 Ca²⁺-ATP 酶活性均受到促进, 在 CdCl₂ 浓度为 140 mg·L⁻¹ 时, 2 种鼠尾草 Ca²⁺-ATP 酶活性均开始受到抑制, 但是美丽鼠尾草质膜 Ca²⁺-ATP 酶活性所受抑制程度高于贵州鼠尾草。

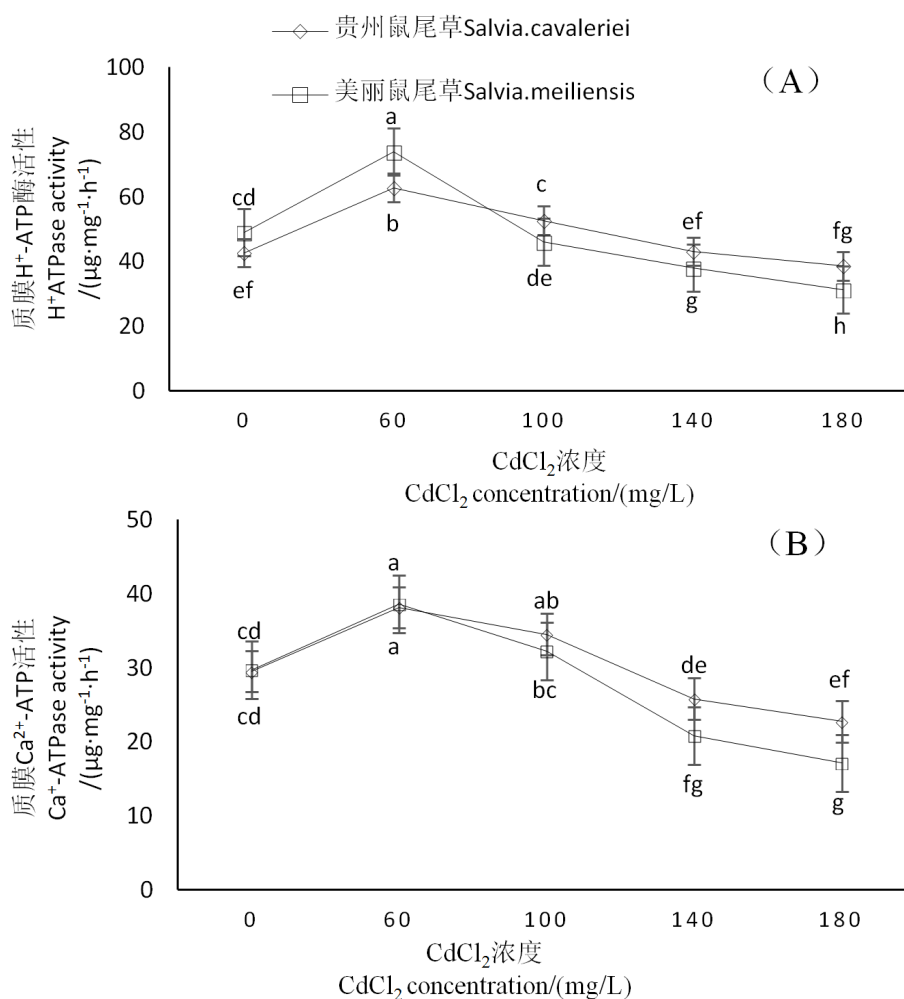


Figure 3. Effects of different concentrations of CdCl₂ on Ca²⁺-ATPase and H⁺-ATPase activities in root of *S. meiliensis* and *S. cavalerier*

图 3. 不同浓度 CdCl₂ 胁迫对美丽鼠尾草和贵州鼠尾草根部分膜 Ca²⁺-ATP 酶与 H⁺-ATP 酶活性的影响

3.4. CdCl₂ 胁迫对两种鼠尾草根部分 N、P 含量的影响

由图 4 可知, 随着 CdCl₂ 浓度的增加, 2 种鼠尾草 N、P 的含量均先升高后降低。贵州鼠尾草 N 含量在 CdCl₂ 浓度为 100 mg·L⁻¹ 时最大, P 含量在 CdCl₂ 浓度为 60 mg·L⁻¹ 时最大, 其 N 与 P 的含量在 CdCl₂ 浓度为 180 mg·L⁻¹ 时才低于对照。美丽鼠尾草 N、P 的含量在 CdCl₂ 浓度为 60 mg·L⁻¹ 时最大, 在 CdCl₂ 浓度为 140 mg·L⁻¹ 时就低于对照。在 CdCl₂ 浓度为 140 mg·L⁻¹ 时, 贵州鼠尾草 N、P 含量分别比对照高

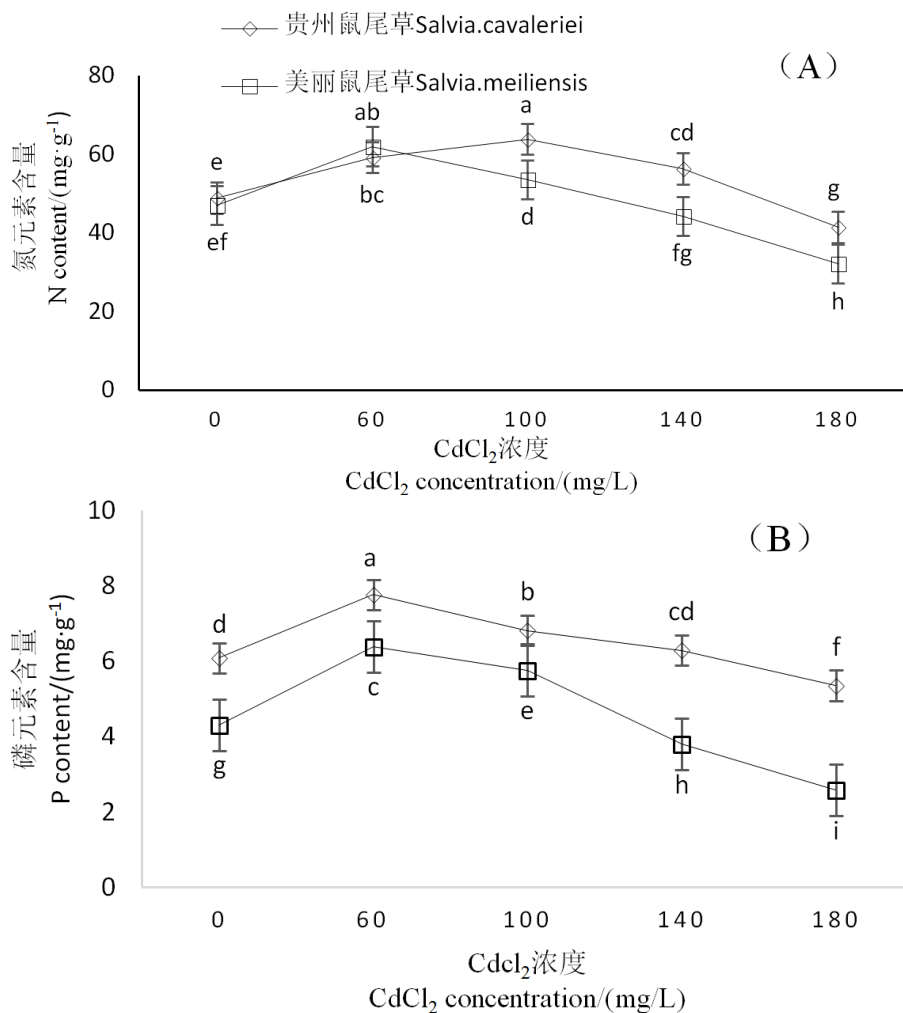


Figure 4. Effects of different concentrations of Cd on N and P in root *S. meiliensis* and *S. cavalerier*
图 4. 不同浓度 CdCl₂ 胁迫对美丽鼠尾草和贵州鼠尾草根部 N、P 含量的影响

13.23%、3.28%，美丽鼠尾草 N、P 含量分别比对照低 5.95%、11.60%。

3.5.2 种鼠尾草根质膜 H⁺-ATP 酶活性、Ca²⁺-ATP 酶活性、N 含量以及 P 含量之间的相关性分析

Table 1. Correlation analysis between plasma membrane H⁺-ATPase, Ca²⁺-ATPase activity, N content and P content in two *Salvia* species (n = 30)

表 1. 2 种鼠尾草根质膜 H⁺-ATP 酶、Ca²⁺-ATP 酶活性、N 含量以及 P 含量之间的相关性分析 (n = 30)

指标	氮含量	磷含量	质膜 H ⁺ -ATP 酶活性	质膜 Ca ²⁺ -ATP 酶活性
氮含量	1	0.857**	0.783**	0.839**
磷含量		1	0.679**	0.794**
质膜 H ⁺ -ATP 酶活性			1	0.864**
质膜 Ca ²⁺ -ATP 酶活性				1

注：表中“**”表示在 0.01 水平显著相关。

从表 1 可知, 2 种鼠尾草根质膜 H^+ -ATP 酶活性、 Ca^{2+} -ATP 酶活性、N 含量以及 P 含量之间均呈极显著正相关($P < 0.01$)。

4. 讨论与结论

MDA 含量常被作为植物细胞过氧化水平和受损程度的判断指标[22] [23] [24]。CAT 和 POD 是细胞中重要的抗氧化酶, 它们可以将 H_2O_2 转化为 H_2O , 从而有效阻止 H_2O_2 的积累, 防止质膜过氧化[25] [26] [27]。有研究表明, 植物细胞内活性氧的产生速率超过了活性氧的清除速率, 会使得植物膜质过氧化程度加重, MDA 含量上升[28]。本研究, 贵州鼠尾草和美丽鼠尾草 MDA 含量随着 $CdCl_2$ 浓度的增加而持续升高, 表明 2 种鼠尾草细胞内 H_2O_2 的清除速率小于 H_2O_2 的生成速率, 导致 2 种鼠尾草质膜受到伤害程度逐渐加大。随着 $CdCl_2$ 浓度增加, 贵州鼠尾草 POD 和 CAT 活性受到的促进作用逐渐增强, 但美丽鼠尾草 POD 和 CAT 活性所受的促进作用分别在 $CdCl_2$ 浓度为 100、180 $mg \cdot L^{-1}$ 时开始减弱。表明贵州鼠尾草 POD 和 CAT 这 2 种抗氧化酶对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受性高, 使得贵州鼠尾草质膜过氧化程度低于美丽鼠尾草, MDA 含量的上升幅度小于美丽鼠尾草。

质膜 H^+ -ATP 酶是细胞上重要的功能蛋白, 它能为物质跨膜转运提供驱动力, 带动一系列次级运输体系对各种营养物质、离子的转运[29] [30] [31]。质膜 Ca^{2+} -ATP 酶能对细胞内 Ca^{2+} 平衡起微调作用, Ca^{2+} 可以通过信号传递影响质膜 H^+ -ATP 酶活性[7] [10]。有研究表明, Cd^{2+} 进入植物细胞会造成 Ca^{2+} 浓度上升, 同时使质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性下降, Ca^{2+} 无法有效泵出细胞, 于是通过信号传递降低质膜 H^+ -ATP 酶 mRNA 的转录水平, 导致质膜 H^+ -ATP 酶活性降低[10]。本研究的结果证实了上述结论, 2 种鼠尾草质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性和质膜 H^+ -ATP 酶活性呈极显著正相关, 质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性和质膜 H^+ -ATP 酶活性与 N、P 的含量也呈极显著正相关。2 种鼠尾草质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性在 $CdCl_2$ 浓度为 140 $mg \cdot L^{-1}$ 时受到抑制, 但是贵州鼠尾草 Ca^{2+} -ATP 酶活性受抑制程度小于美丽鼠尾草, 这说明贵州鼠尾草质膜 Ca^{2+} -ATP 酶对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受性强。贵州鼠尾草质膜 H^+ -ATP 酶活性在 $CdCl_2$ 浓度为 100 $mg \cdot L^{-1}$ 时仍受促进, 但美丽鼠尾草质膜 H^+ -ATP 酶活性在此浓度下已受到抑制, 这说明贵州鼠尾草质膜 H^+ -ATP 酶对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受性强于美丽鼠尾草, 因此表现为贵州鼠尾草 N、P 含量在 $CdCl_2$ 浓度为 180 $mg \cdot L^{-1}$ 时才低于对照, 而美丽鼠尾草 N、P 含量在 $CdCl_2$ 浓度为 140 $mg \cdot L^{-1}$ 时就低于对照; 在生长上表现为贵州鼠尾草地上部分、地下部分以及植株的干重在 $CdCl_2$ 浓度为 140 $mg \cdot L^{-1}$ 低于对照, 美丽鼠尾草地上部分、地下部分以及植株的干重在 $CdCl_2$ 浓度为 100 $mg \cdot L^{-1}$ 时就低于对照。2 种鼠尾草根质膜 H^+ -ATP 酶活性、质膜 Ca^{2+} -ATP 酶活性、N 含量、P 含量以及地上部分、地下部分和植株的干重所受抑制时的 $CdCl_2$ 浓度并未完全吻合, 说明质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 酶的活性只是影响植物 N、P 吸收的一部分原因, 并且 N、P 的含量也只是影响植物生长的一部分原因。

综上所述, 美丽鼠尾草 POD 和 CAT 这两种抗氧化酶对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受性低于贵州鼠尾草, 使其质膜过氧化程度高于贵州鼠尾草, 这是美丽鼠尾草对 $CdCl_2$ 耐受性低于贵州鼠尾草的原因之一; 美丽鼠尾草质膜 H^+ -ATP 酶和质膜 Ca^{2+} -ATP 酶对 $CdCl_2$ 胁迫耐受性低于贵州鼠尾草, 使其对 N、P 的吸收更容易受到抑制, 这是美丽鼠尾草对 $CdCl_2$ 胁迫的耐受性低于贵州鼠尾草的原因之一。本研究初步比较了 2 种鼠尾草对 $CdCl_2$ 胁迫耐受差异, 为这 2 种鼠尾草作为观赏植物进行引种、栽培提供了参考。基于贵州鼠尾草对 $CdCl_2$ 胁迫有着较高的耐受性, 可以进一步研究其对 Cd^{2+} 的吸收、解毒机理以及相关抗逆性基因的表达, 探究其能否作为一种 Cd 超积累植物, 用于对土壤 Cd 污染的修复。

基金项目

本研究由 1、中国科学院战略生物资源科技支撑体系运行专项(CZBZX-1); 2、上海市绿化和市容局辰山专项课题(G172410, G182409)资助。

参考文献

- [1] Wagner, G.J. (1992) Accumulation of Cadmium in Crop Plants and Its Consequences to Human Health. *Advances in Agronomy*, **51**, 173-212. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60593-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60593-3)
- [2] Prasad, M.N.V. (1995) Cadmium Toxicity and Tolerance in Vascular Plants. *Environmental and Experimental Botany*, **35**, 525-545. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0098-8472(95)00024-0)
- [3] Kudo, H., Kudo, K., Ambo, H., *et al.* (2011) Cadmium Sorption to Plasma Membrane Isolated from Barley Roots Is Impeded by Copper Association onto Membranes. *Plant Science An International Journal of Experimental Plant Biology*, **180**, 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.09.008>
- [4] Małgorzata, J.-R., Katarzyna, K. and Marek, B. (2012) Different Effect of Cadmium and Copper on H⁺-ATPase Activity in Plasma Membrane Vesicles from Cucumis sativus Roots. *Journal of Experimental Botany*, **63**, 4133-4142. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers097>
- [5] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 522-528.
- [6] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 等. 镉胁迫下 3 种藓类植物抗氧化酶活性变化的比较研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(9): 1765-1771.
- [7] Liu, S.L., Yang, R.J., Ma, M.D., Dan, F., Zhao, Y., Jiang, P. and Wang, M.H. (2015) Effects of Exogenous NO on the Growth, Mineral Nutrient Content, Antioxidant System, and ATPase Activities of *Trifolium repens* L. Plants under Cadmium Stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, **37**, e1721. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1721-7>
- [8] Wang, Q., Liang, X., Dong, Y., *et al.* (2012) Effects of Exogenous Nitric Oxide on Cadmium Toxicity, Element Contents and Antioxidative System in Perennial Ryegrass. *Plant Growth Regulation*, **69**, 11-20. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9742-y>
- [9] Xu, L., Dong, Y., Kong, J., *et al.* (2014) Effects of Root and Foliar Applications of Exogenous NO on Alleviating Cadmium Toxicity in Lettuce Seedlings. *Plant Growth Regulation*, **72**, 39-50. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9834-3>
- [10] Burzyński, M. and Kolano, E. (2003) *In Vivo* and *In Vitro* Effects of Copper and Cadmium on Plasma Membrane H⁺-ATPase from Cucumber (*Cucumis sativus* L.) and Maize (*Zea mays* L.) Roots. *Acta Physiologiae Plantarum*, **25**, 39-45. <https://doi.org/10.1007/s11738-003-0034-z>
- [11] Kováčik, J., Babula, P., Klejdus, B., *et al.* (2014) Unexpected Behavior of Some Nitric Oxide Modulators under Cadmium Excess in Plant Tissue. *PLoS ONE*, **9**, e91685-e91685. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091685>
- [12] 王涛. 川西鼠尾草属植物观赏资源调查与引种及果实和叶片形态学研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [13] 赵宝林, 刘学医, 刘宏, 钱枫. 安徽药用丹参资源调查研究[J]. 现代中药研究与实践, 2010(5): 31-32.
- [14] 王和英, 胡德禹, 薛伟, 杨松, 宋宝安. 贵州鼠尾草化学成分的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2011, 23(1): 63-65.
- [15] Heath, R.L. and Packer, L. (1968) Photoperoxidation in Isolated Chloroplasts: I. Kinetics and Stoichiometry of Fatty Acid Peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **125**, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- [16] Aebi, H. (1984) Catalase *in Vitro*. *Methods in Enzymology*, **105**, 121-126.
- [17] Polle, A., Otter, T. and Seifert, F. (1994) Apoplastic Peroxidases and Lignification in Needles of Norway Spruce (*Picea abies* L.). *Plant Physiology*, **106**, 53-60. <https://doi.org/10.1104/pp.106.1.53>
- [18] Wang, Y. and Sze, H. (1985) Similarities and Differences between the Tonoplast-Type and the Mitochondrial H⁺-ATPases of Oat Roots. *Journal of Biological Chemistry*, **260**, 10434-10443.
- [19] Ohnishi, T., Gall, R.S. and Mayer, M.L. (1975) An Improved Assay of Inorganic Phosphate in the Presence of Extracellular Phosphate Compounds: Application to the ATPase Assay in the Presence of Phosphocreatine. *Analytical Biochemistry*, **69**, 261-267. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(75\)90585-0](https://doi.org/10.1016/0003-2697(75)90585-0)
- [20] Anantkrishnan, S.V. and Pai, K.V.S. (1952) The Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section A*, **36**, 299-305. <https://doi.org/10.1007/BF03172239>
- [21] Hurtado, M.D., Carmona, S. and Delgado, A. (2008) Automated Modification of the Molybdenum Blue Colorimetric Method for Phosphorus Determination in Soil Extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **39**, 2250-2257.
- [22] Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., *et al.* (2006) Phytochelatin Synthesis and Response of Antioxidants during Cadmium Stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, **44**, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.01.007>

- [23] Becana, M., Dalton, D.A., Moran, J.F., *et al.* (2000) Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Legume Nodules. *Physiologia Plantarum*, **109**, 372-381. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2000.100402.x>
- [24] Verma, K., Mehta, S.K. and Shekhawat, G.S. (2013) Nitric Oxide (NO) Counteracts Cadmium Induced Cytotoxic Processes Mediated by Reactive Oxygen Species (ROS) in *Brassica juncea*: Cross-Talk between ROS, NO and Antioxidant Responses. *Biology of Metals*, **26**, 255-269.
- [25] Willekens, H.S., Chamnongpol, S., Davey, M., *et al.* (1997) Catalase Is a Sink for H₂O₂ and Is Indispensable for Stress Defense in C3 Plants. *The EMBO Journal*, **16**, 4806-4816. <https://doi.org/10.1093/emboj/16.16.4806>
- [26] Pereira, G.J.G., Molina, S.M.G., Lea, P.J., *et al.* (2002) Activity of Antioxidant Enzymes in Response to Cadmium in *Crotalaria juncea*. *Plant and Soil*, **239**, 123-132. <https://doi.org/10.1023/A:1014951524286>
- [27] Hideg, E. (2004) Detection of Free Radicals and Reactive Oxygen Species. *Methods in Molecular Biology*, **274**, 249-260.
- [28] 费伟, 陈火英, 曹忠, 等. 盐胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2005, 23(1): 5-9.
- [29] Sondergaard, T.E., Schulz, A. and Palmgren, M.G. (2004) Energization of Transport Processes in Plants Roles of the Plasma Membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology*, **136**, 2475-2482. <https://doi.org/10.1104/pp.104.048231>
- [30] Rudashevskaya, E.L., Kirpichnikova, A.A. and Shishova, M.F. (2005) Activity of Plasma Membrane H⁺-ATPase in Coleoptile Cells during Development of Maize Seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, **52**, 504-510. <https://doi.org/10.1007/s11183-005-0074-x>
- [31] Perez, C., Michelet, B., Ferrant, V., *et al.* (1992) Differential Expression within a Three-Gene Subfamily Encoding a Plasma Membrane H(+)-ATPase in *Nicotiana plumbaginifolia*. *Journal of Biological Chemistry*, **267**, 1204-1211.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5665, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: br@hanspub.org