

毛竹种子萌发和幼苗生长对铝胁迫的反应

冷华南, 郑康乐, 李国栋, 桂仁意

(浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300)

摘要: 为研究毛竹 *Phyllostachys pubescens* 耐铝性, 以毛竹为材料并对照耐铝性不同的 2 种水稻 *Oryza sativa* 品种(敏感型 IR1552 和耐受型 Azucena), 通过不同铝浓度对毛竹及水稻种子发芽率、根长的影响, 及对其幼苗根伸长量、丙二醛质量摩尔浓度和植物胁迫保护酶超氧化物歧化酶、过氧化物酶的影响, 来确定毛竹耐受性。结果表明, 毛竹种子耐铝浓度为 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 在达到 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 开始出现显著抑制现象, $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到半致死浓度, 种子耐铝程度低于铝敏感型水稻品种 IR1552; 毛竹幼苗在 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度铝处理下, 1 d 即出现根伸长显著被抑制现象, 且 3 d 后抑制加深, 而敏感型 IR1552 则能在第 3 天时恢复生长。毛竹幼苗经铝胁迫 3 d 后超氧化物歧化酶活性变化不显著($P = 0.1531$), 过氧化物酶活性变化显著($P = 0.0180$), 而 2 个品种水稻均为极显著, 且相对于水稻, 在对照未加铝处理的毛竹根系中过氧化物酶活性和丙二醛质量摩尔浓度均较高。总而言之, 毛竹耐铝程度低于水稻敏感型 IR1552, 在植物界中属于中等耐铝水平。图 3 表 3 参 29

关键词: 森林培育学; 铝毒; 毛竹; 发芽率; 耐铝性; 保护酶

中图分类号: S723 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)06-0851-07

Aluminum stress with seed germination and seedling growth in *Phyllostachys pubescens*

LENG Hua-nan, ZHENG Kang-le, LI Guo-dong, GUI Ren-yi

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the effects of different aluminum (Al) concentrations (0, 50, 200, 500, and $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) on seed germination, seedling root growth, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and malondialdehyde (MDA) in *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo), this study determined the level of Al tolerance for moso bamboo through comparison with two rice cultivars: *Oryza sativa* ‘IR1552’ (Al-sensitive) and *Oryza sativa* ‘Azucena’ (Al-tolerant). Results showed that an Al concentration of $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ did not significantly inhibit seed germination of moso bamboo, whereas with $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, germination was inhibited but not significantly. Also, an Al concentration of $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ resulted in 50% survival. For the $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al treatment, seedling root growth was inhibited in 1 d, and with continued Al stress growth within 3 d did not recover. However, with continued Al stress, root growth in ‘IR1552’ recovered within 3 d. Meanwhile, with Al stress for 3 d, there was no significant increase of SOD activity in the root tips of moso bamboo ($P = 0.1531$), but POD activity for moso bamboo ($P = 0.0180$), ‘IR1552’ and ‘Azucena’ ($P < 0.05$) were significant. In addition, POD activity and MDA content in the root tips of moso bamboo were higher than in ‘IR1552’. These results showed that *P. pubescens* had a lower Al-tolerance than ‘IR1552’ indicating a moderate Al-tolerance in plants. [Ch, 3 fig. 3 tab. 29 ref.]

收稿日期: 2010-01-06; 修回日期: 2010-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871116); 浙江省重大科技专项(2006C12061)

作者简介: 冷华南, 从事竹林培育等研究。E-mail: cold318@163.com。通信作者: 桂仁意, 副教授, 博士, 从事竹林培育等研究。E-mail: gry@zjfc.edu.cn

Key words: silviculture; aluminum toxicity; *Phyllostachys pubescens*; germination rate; aluminum-tolerance; protective enzyme

铝是自然界含量最多的金属元素，占地壳总质量的7.45%^[1]。研究表明，即便是浓度在微摩尔级别的铝离子也会对植物产生毒害作用^[2]。不过通常土壤中的铝总是以难溶性的硅酸盐或氧化铝形式存在，可溶性的铝离子浓度很低。但当土壤的pH值低于5.0时，铝的可溶性状态便会增强，形成Al³⁺，Al(OH)⁺和Al(OH)²⁺等离子，对植物产生毒害作用^[3]。近年来，随着环境酸化问题的日益严重，尤其是酸雨的频繁沉降和生理酸性肥料的施用，土壤酸化加剧，铝溶出增加，严重制约了植物的生长^[4-5]。目前，中国的竹产业发展迅猛，产值连年升高。毛竹 *Phyllostachys pubescens*，材笋两用，经济价值高。在中国所有竹类植物48属500余种的720多万亩竹林面积中，毛竹占地高达300万亩^[6-7]。所以，对毛竹进行研究是发展竹产业的迫切需要。而现行的集约经营方式使得目前浙江省的毛竹林地土壤pH值在4.8左右^[8]，已有明显导致土壤铝活化的趋势^[9]。因此，对毛竹铝毒害方面的研究在当前具有较强的实际意义。中国是毛竹的原产国，也是世界上最大的毛竹生产、消费和出口国^[10]，所以，目前对毛竹铝毒害的研究也都主要集中在国内，仅限于对笋品质影响等进行研究^[11]，尚未系统深入。与毛竹同属于禾本科的水稻 *Oryza sativa*，已有了大量铝毒方面的研究。如在铝胁迫时，水稻抗性品种能更有效地提高根际pH值，减少根对铝的吸收，减轻铝毒害^[12]。同时，铝能诱导水稻根尖分泌大量苹果酸和柠檬酸^[13]等。目前，国内外的学者分别从组织、细胞、基因等水平上分别研究了水稻耐铝的生理、生化、遗传等方面的机制^[14]。本试验采用耐铝性不同的2个水稻品种作为对照，研究铝对毛竹的毒害及其耐受性。了解铝胁迫对毛竹种子萌发及幼苗生长的影响，并通过测定生理生化指标的变化，以寻找毛竹耐铝机制及生理生化指标的变化规律，旨在为今后毛竹生态高效培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试毛竹种子2006年采自广西桂林，种子净度为91.08%，千粒质量为28.35 g，含水率为12.1%。采后存放于密封袋中，于4.0℃冰箱中保存。实验选择水稻作为对照，选取的2种水稻品种：敏感型IR1552和耐受型Azucena均为研究铝毒最常用且研究较深入的水稻品种^[15-17]。水稻种子由中国水稻研究所提供。

1.2 方法

1.2.1 毛竹种子发芽率测定 选取大小均匀，健康饱满的毛竹和水稻种子，经2 g·kg⁻¹高锰酸钾表面消毒30 min，在室温(25.0℃)下用去离子水浸种24 h，再将种子均匀放置在铺有双层滤纸并加入10 mL培养液的灭菌培养皿中，置于相对湿度为95%和温度为25.0℃的人工气候箱内培养。

培养液采用AlCl₃·6H₂O配制。分别配制：0, 50, 200, 500, 2 000 μmol·L⁻¹浓度的氯化铝溶液(由预实验得知：200 μmol·L⁻¹浓度下毛竹能正常发芽和生长，500 μmol·L⁻¹浓度下毛竹发芽和生长开始有明显的抑制，2 000 μmol·L⁻¹浓度为毛竹发芽率统计中的半致死浓度，结果尚未发表)。用浓度为0.1 mol·L⁻¹盐酸和氢氧化钠将所有培养液pH值调至4.5。整个实验共设置5个处理，重复3次·处理⁻¹，播种50粒·重复⁻¹。培养过程中，隔2 d更换1次滤纸及溶液，每天记录实验数据。

种子发芽以种子的胚根长度达到种子长度为标准。毛竹发芽高峰出现在第6天，水稻则在第4天达到高峰。相关指标计算方法如下：发芽势(G_v) = 1~n d发芽种子粒数/供试种子总粒数 × 100(n为发芽高峰天数)。发芽率(G) = 全部发芽种子粒数/供试种子粒数 × 100。

1.2.2 毛竹幼苗根伸长生长测定 同1.2.1中的培养条件用去离子水培养毛竹和水稻种子。用水培方式在培养液中培养10~14 d后选取生长健康，均匀一致，根长3~5 cm的幼苗，在相对湿度为95%，温度为25.0℃的人工气候箱内同样用灭菌后铺有双层滤纸的培养皿进行铝胁迫水培。设置同1.2.1中的5个处理，幼苗10株·处理⁻¹。隔24 h测定1次根长，连续进行3 d测量，计算根伸长量，分别记为D₁, D₂, D₃。24 h根伸长量(mm) = 24 h后根长(mm) - 0 h根长(mm)。

$$\text{根相对伸长率}(\%) = \frac{\text{铝处理 } 24 \text{ h 根伸长量}}{\text{对照组(ck)无铝 } 24 \text{ h 根伸长量}} \times 100^{[18-19]}。$$

1.2.3 毛竹幼苗铝胁迫下生理生化指标检测 采用同 1.2.2 的毛竹及水稻幼苗 5 个处理, 每个处理 10 株幼苗。经铝胁迫 72 h 后检测其生理生化指标。超氧化物歧化酶活性测定: 氮蓝四唑(NBT)光化还原法, 以每克鲜根抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位 ($16.67 \text{ nkat} \cdot \text{g}^{-1}$); 过氧化物酶活性用愈创木酚法测定; 丙二醛质量摩尔浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$) 用硫代巴比妥酸(TBA)法^[20]测定。

1.2.4 数据分析

用 DPS 软件对数据进行方差分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 铝胁迫对毛竹和水稻种子的发芽率及发芽势的影响

从表 1 可见, 铝浓度为 0, 50, 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 毛竹种子的发芽率和发芽势比较接近, 铝浓度为 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时发芽率和发芽势开始被抑制, 但不显著。当铝浓度提高到 2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 毛竹发芽率被显著抑制, 降到了对照的一半。2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 为半致死剂量。

而 2 种水稻在发芽率上没有明显的被抑制, 但在发芽势上, 敏感型水稻 IR1552 在 2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下被显著抑制。

表 1 铝胁迫对毛竹种子发芽率、发芽势的影响

Table 1 Effects of Al stress on the germination rate and germination potential of *Phyllostachys pubescens*

铝浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	水稻 IR1552		水稻 Azucena		毛竹	
	发芽势/%	发芽率/%	发芽势/%	发芽率/%	发芽势/%	发芽率/%
0	55.33 ± 9.87 aA	84.67 ± 5.03 aA	49.33 ± 9.45 aA	80.00 ± 5.29 aA	15.33 ± 5.03 abAB	57.33 ± 6.11 aA
50	55.33 ± 6.43 aA	86.67 ± 2.31 aA	48.00 ± 8.00 aA	80.67 ± 1.15 aA	26.00 ± 5.29 aA	60.00 ± 12.17 aA
200	54.00 ± 9.17 aA	80.67 ± 4.16 aA	42.67 ± 9.24 aA	82.00 ± 4.00 aA	20.67 ± 9.87 aA	56.00 ± 8.72 aA
500	54.67 ± 13.32 aA	84.00 ± 2.00 aA	38.67 ± 2.31 aA	75.33 ± 6.43 aA	16.67 ± 5.03 aAB	53.33 ± 7.57 aAB
2 000	2.00 ± 2.00 bB	84.67 ± 6.43 aA	40.00 ± 9.17 aA	76.00 ± 4.00 aA	4.67 ± 3.06 bB	33.33 ± 4.16 bB

说明: 小写字母表示达到显著水平 ($0.01 < P < 0.05$), 大写字母表示达到极显著水平 ($P \leq 0.01$)。

表 2 表明, 外界铝胁迫与水稻 IR1552 的发芽势有极显著关系, 相关系数绝对值接近 1, 这体现出水稻 IR1552 的铝敏感性。但铝浓度与水稻 IR1552 的发芽率无显著性关系, 相关系数绝对值也较小, 也说明水稻 IR1552 在铝毒害环境中, 种子有较强的恢复能力, 可以在铝胁迫环境中继续发芽生长。铝胁迫与水稻 Azucena 的发芽率和发芽势之间均无显著性关系, 且相关系数绝对值均较小, 体现出其耐铝性。铝胁迫与毛竹的发芽势和发芽率均出现了显著性关系, 体现出毛竹相对于这两种水稻属于敏感型植物, 且其恢复能力低于水稻 IR1552。

因此, 总的来说, 毛竹铝耐受程度与水稻 IR1552 较接近, 相对于水稻来说毛竹属于铝敏感型植物。

2.2 铝胁迫对毛竹幼苗根生长的影响

表 3 显示, 处理初期(1 d), 敏感型水稻 IR1552 的根长伸长情况与毛竹幼苗相似, 出现高浓度抑

表 2 铝处理浓度与毛竹种子发芽率和发芽势的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of germination rate and germination potential of *P. pubescens*

项目	不同铝浓度的相关系数		
	水稻 IR1552	水稻 Azucena	毛竹
发芽率	0.595	-0.631	-0.864*
发芽势	-0.974**	-0.668	-0.993*

说明: ** 表示 0.01 水平上显著相关; * 表示 0.05 水平上显著相关。

制($>200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。耐受型水稻Azucena同样有高浓度抑制现象,但在 $200\sim2000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下,根伸长抑制明显减少,体现出其耐受性的一面。随处理时间增加(2~3 d),2种水稻的根生长能力均有不同程度的恢复,尤其是水稻Azucena。但在毛竹上,初期根抑制程度不及水稻IR1552,但随时间推移其抑制程度加深。因此,相比水稻,毛竹的耐铝程度与敏感型水稻IR1552相类似,甚至更低。

表3 铝胁迫对毛竹幼苗根相对伸长率的影响

Table 3 Effects of Al stress on the root relative growth of *Phyllostachys pubescens*

处理时间/d	铝浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	根相对伸长率/%		
		水稻IR1552	水稻Azucena	毛竹
1	0	100 ± 29.33 aA	100 ± 42.16 bAB	100 ± 26.08 aA
	50	88.51 ± 32.98 aA	166.67 ± 66.67 aA	83.17 ± 37.39 abAB
	200	72.41 ± 39.42 aAB	50 ± 35.63 cB	84.16 ± 17.93 abAB
	500	32.18 ± 12.46 bBC	90.48 ± 37.09 bcB	71.29 ± 32.66 bAB
	2 000	20.69 ± 9.12 bC	79.17 ± 35.36 bcB	57.71 ± 15.65 bB
	0	100 ± 38.03 abAB	100 ± 35.95 bB	100 ± 31 abA
2	50	136.36 ± 22.73 aA	151.79 ± 28.51 aA	107.76 ± 19.64 aA
	200	87.12 ± 33.45 bBC	51.02 ± 28.4 cC	83.27 ± 32.13 abA
	500	45.45 ± 18.56 cCD	46.03 ± 22.34 cC	74.29 ± 31.3 bAB
	2 000	22.73 ± 16.07 cD	25.4 ± 18.6 cC	38.1 ± 17.14 cB
3	0	100 ± 48.1 aA	100 ± 36.25 abAB	100 ± 7.09 aA
	50	99.26 ± 45.52 aA	128.57 ± 25.94 aA	72.89 ± 15.37 bB
	200	75.37 ± 38.06 aAB	76.36 ± 43.76 bcABC	60.29 ± 23.53 bB
	500	36.76 ± 18.67 bBC	40.91 ± 28.23 cC	35.7 ± 22.05 cC
	2 000	22.06 ± 12.3 bC	57.95 ± 27.03 cBC	11.97 ± 4.65 dD

说明: 小写字母表示达到显著水平($0.01 < P < 0.05$), 大写字母表示达到极显著水平($P \leq 0.01$)。

2.3 毛竹幼苗铝胁迫3 d后超氧化物歧化酶、过氧化物酶和丙二醛的变化

超氧化物歧化酶是植物保护系统中的重要酶,在植物抗逆境胁迫中有着非常重要的作用。当植物处于逆境时,超氧化物歧化酶能有效地消除过氧化所产生的活性氧物质,防御植物细胞膜过氧化,降低植物细胞受伤害的程度。图1表明,水稻IR1552在铝浓度升高的过程中,出现了“高—低—高”的过程。水稻Azucena则明显随着铝浓度升高而升高,2种水稻均为极显著($P = 0$)。而毛竹的超氧化物歧化酶值变化不大,不显著($P = 0.1531$),即毛竹超氧化物歧化酶对外界铝胁迫的变化反应不大。

过氧化物酶也是植物体内清除过氧化物的一种保护酶。图2可见,水稻IR1552的过氧化物酶值与超氧化物歧化酶值趋势相似,依然是“高—低—高”呈极显著性相关($P = 0.0002$)。水稻Azucena的过氧化物酶与其超氧化物歧化酶也类似,逐步随着铝浓度升高而升高,呈极显著相关($P = 0.0084$)。毛竹在过氧化物酶上也出现了显著升高($P = 0.0180$)。说明相对于超氧化物歧化酶,过氧化物酶在毛竹中对于铝胁迫的抗性起的作用更大。

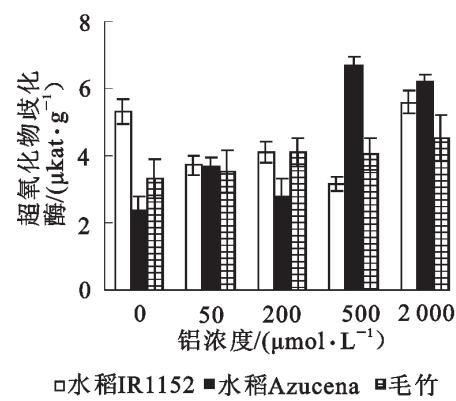


图1 铝胁迫对毛竹幼苗根系超氧化物歧化酶活性的影响

Figure 1 Effects of Al stress on activity of SOD in the seedling roots of *P. pubescens*

丙二醛是细胞膜脂过氧化的主要产物之一, 可以表示细胞伤害的程度, 也可以衡量植物对外界逆境的抵御能力。图 3 中毛竹和水稻 IR1552 均显现出“高—低—高”的趋势, 其中毛竹苗根系中丙二醛的质量摩尔浓度要高于水稻 IR1552; 水稻 Azucena 的丙二醛的质量摩尔浓度始终处在较稳定的状态, 体现其受铝胁迫影响较小。

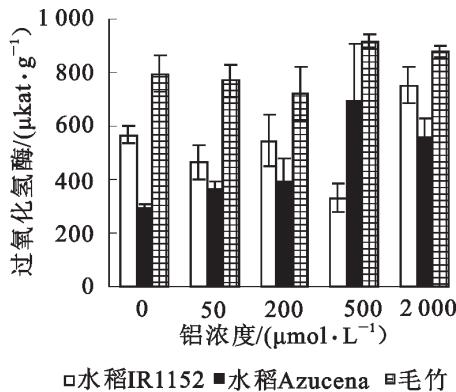


图 2 铝胁迫对毛竹幼苗根系过氧化物酶活性的影响

Figure 2 Effects of Al stress on activity of POD in the seedling roots of *P. pubescens*

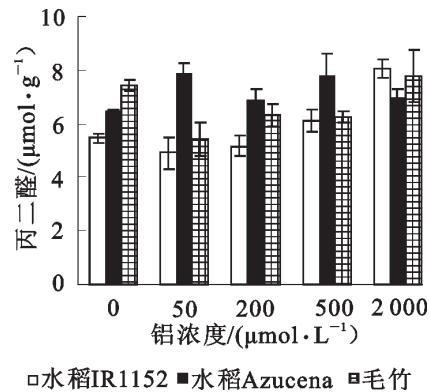


图 3 铝胁迫对毛竹幼苗根系丙二醛的影响

Figure 3 Effects of Al stress on concentration of MDA in the seedling roots of *P. pubescens*

3 小结与讨论

3.1 毛竹的耐铝性

铝对植物种子萌发的影响, 植物种类不同, 研究的结果也各不相同。研究表明, 铝浓度为 $0.50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 即会对油菜 *Brassica campestris* 种子发芽起抑制作用^[21], 而益母草 *Leonurus heterophyllus* 则能耐受至 $1.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝浓度^[22]; 有时相对较低浓度的铝胁迫反而能促进某些植物生长, 譬如 $0.37 \sim 3.70 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝浓度处理可提高荞麦 *Fagopyrum esculentum* 种子的萌发率及其种子萌发后根的生长, 当铝浓度大于 $37.00 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后开始出现抑制作用^[23]。对于毛竹种子来说, 铝胁迫浓度大于 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 开始出现根生长抑制的情况。因此, 相比水稻, 毛竹种子对铝比较敏感, 但在植物界中属于中等耐受水平。

抑制植株根生长是铝毒害的主要表现性状^[24]。研究表明, 火炬松 *Pinus taeda* 是一种较耐铝的植物, $40.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度以下根生长没有被抑制, 在 $580.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 被抑制 30% ^[25]; 大豆 *Glycine max* 属铝敏感型植物, 在 $5.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度下就显示出了根长生长的抑制^[26]; 同属于敏感型植物木豆 *Cajanus cajan* 在铝离子达到 $20.00 \sim 30.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度时开始被抑制^[27]; 对于跟毛竹一样属于禾本科的水稻来说, 目前已知的耐受性因其品种而异, 且差异较大, 一般在 $70.00 \sim 1100.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相对本试验而言, 毛竹幼苗根系的耐铝性与发芽率相似, 在浓度大于 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后开始抑制, $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 1 d 即开始出现根生长被抑制大约 29% 的情况。相对于对照水稻 IR1552 和水稻 Azucenat 等 2 种水稻来说, 毛竹属于偏敏感型的植物, 但从整个植物界看, 仍属于中等耐受水平, 具有一定的耐铝胁迫性。

因此, 从种子发芽率和幼苗根伸长抑制 2 个试验结果来看, 毛竹的耐铝性均低于铝敏感水稻 IR1552, 在植物界中属于中等水平。

3.2 毛竹幼苗对铝的生理生化响应

活性氧是机体代谢过程中产生的重要自由基, 在生物体内具有很强的毒害作用。正常条件下, 植物体内的活性氧的产生和清除处于相对动态平衡中, 但在逆境下体内活性氧自由基产生的速度超出了植物清除自由基的能力, 就会引起伤害。植物体内清除自由基主要由超氧化物歧化酶和过氧化物酶等酶系统和抗氧化物质来完成^[28]。相比水稻, 毛竹幼苗根尖中超氧化物歧化酶活性与铝胁迫无显著关系,

即超氧化物歧化酶不参与毛竹在铝胁迫下的体内多增加的活性氧的清除。过氧化物酶活性则与铝胁迫有显著关系，过氧化物酶可能参与其中。与水稻IR1552相同，毛竹的过氧化物酶出现了随着铝浓度逐步升高而“高—低—高”的走势。这说明毛竹和水稻IR1552受铝胁迫的影响随着铝浓度逐步增强而增大，其活性氧清除能力先是显著下降，直到后来胁迫进一步加强，激活其某种耐铝机制，促使过氧化物酶合成加快，才使得过氧化物酶上升。相比之下，耐铝型水稻Azucena的过氧化物酶则从开始就出现过氧化物酶合成加快，且随着铝浓度升高而进一步加快，体现出了其耐铝的特性。从显著性分析来看，2个水稻品种都是极显著，而毛竹仅为显著，更说明毛竹幼苗的过氧化物酶对铝胁迫反应的程度低于这2种水稻，体现出毛竹幼苗耐铝性低于水稻的一个因素。

对于丙二醛而言，除水稻Azucena外，低浓度的铝处理($50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)使水稻IR1552和毛竹根系丙二醛质量摩尔浓度较对照都有所降低。而随着铝浓度的增加，丙二醛相应增加，达到极显著水平($P<0.01$)。而对于水稻Azucena，则是处在显著水平($P<0.05$)。所以，外界铝胁迫对水稻Azucena的丙二醛质量摩尔浓度有一定影响，而对毛竹和水稻IR1552的影响则非常大，即表明在严重铝胁迫下脂质过氧化加剧，毛竹和水稻IR1552比水稻Azucena容易出现保护酶系统不足以抵御胁迫而使细胞受到严重伤害现象。

在非胁迫条件下，毛竹过氧化物酶和丙二醛比2种水稻的都高，而超氧化物歧化酶又对毛竹的作用不大。表明在平时毛竹根系就易产生活性氧，容易膜脂过氧化，需要有较高的保护酶活性来保持细胞正常生长能力，从侧面反映出其质膜稳定性差^[29]。这一结果从侧面印证了相比两种水稻，毛竹属于铝敏感型植物。

参考文献：

- [1] 何龙飞, 沈振国, 刘友良, 等. 植物铝毒害机理的研究[J]. 广西农业生物科学, 2002, **21** (3): 188–194.
HE Longfei, SHEN Zhenguo, LIU Youliang, et al. Studies on the mechanisms of aluminum toxicity in higher plant [J]. *J Guangxi Agric Biol Sci*, 2002, **21** (3): 188–194.
- [2] KINRAIDE T B, ARNOLD R C, BALIGAR V C. A rapid assay for aluminum phytotoxicity at submicromolar concentrations [J]. *Plant Physiol*, 1985, **65**: 245–250.
- [3] MAGALY R, ROBERT A G. Aluminum partitioning in intact roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars [J]. *Plant Physiol*, 1992, **99**: 1021–1028.
- [4] GUNSE B, POSCHENIEDER C, BARCELO J. Water transport properties of roots and cortical cells in proton and Al stress maize varieties [J]. *Plant Physiol*, 1997, **113**: 595–602.
- [5] 中国农学会. 酸雨与农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [6] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 9.
- [7] 张齐生. 我国竹材加工利用要重现科学和创新[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (1): 1–4.
ZHANG Qisheng. Attaching importance to science and innovation in the proceeding and utilization of bamboo timber in China [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (1): 1–4.
- [8] 徐筱雯, 崔会平, 吴家胜, 等. 毛竹林模式施肥生态效应评价[J]. 浙江林业科技, 2008, **28** (1): 38–42.
XU Xiaowen, CUI Huiping, WU Jiasheng, et al. Evaluation of ecology impact of bamboo forest with model fertilizing [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, **28** (1): 38–42.
- [9] GUI Renyi, LI Guodong, FANG Wei, et al. Iron and aluminum forms of the soil in moso-bamboo stands under the extensive and integrated culture management [J]. *Bamboo J*, 2008, **25**: 26–31.
- [10] 徐金梅, 赵荣军, 费本华. 我国竹材特性与加工利用研究新进展[J]. 木材加工机械, 2007 (3): 39–42.
XU Jinmei, ZHAO Rongjun, FEI Benhua. Research on properties and utilization of bamboo in China [J]. *Wood Process Mach*, 2007 (3): 39–42.
- [11] 洪伟, 林存炎, 吴承祯, 等. 不同铝毒害对毛竹笋营养品质影响的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008, **27** (2): 13–18.
HONG Wei, LIN Cunyan, WU Chengzhen, et al. Effects of different aluminum toxicity on nutritional quality of bamboo shoots in moso bamboo [J]. *J Bamboo Res*, 2008, **27** (2): 13–18.
- [12] GANESAN K, SANKARANARAYANAN C, BALAKUMAR T. Physiological basis of differential aluminum tolerance in rice genotypes [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1993, **24**: 2179–2191.

- [13] SATORU I, TADAO W, RYOUICHI S, et al. Comparison of the amount of citric and malic acids in Al media of seven plant species and two cultivars each in five plant species [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2000, **46** (3): 751 – 758.
- [14] 陈荣府, 沈仁芳. 水稻(*Oryza sativa* L.)铝毒害与耐性机制及铝毒害的缓解作用[J]. 土壤, 2004, **36** (5): 481 – 491.
CHEN Rongfu, SHEN Renfang. Mechanisms of aluminium toxicity to and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) and catabolism of al stress in acid soils [J]. *Soils*, 2004, **36** (5): 481 – 491.
- [15] 邓国富. 水稻紫叶性状遗传和基因定位的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
DENG Guofu. *Study on Inheritance and Gene Location of Purple Leaf Character of Rice (Oryza sativa L.)* [D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [16] 马宝慧. 水稻(*Oryza sativa* L.)铝毒害及耐性机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
MA Baohui. *The Mechanisms of Aluminum Toxicity and Tolerance in Rice (Oryza sativa L.)* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [17] 沈晓莹. 水稻抗铝毒害分子机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
SHEN Xiaoying. *The Molecular Biology of Aluminium Resistance in Rice (Oryza sativa L.)* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [18] 李刚, 徐芳杰, 张奇春, 等. 铝胁迫对不同耐铝性小麦基因型根尖抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, **35** (6): 619 – 625.
LI Gang, XU Fangjie, ZHANG Qichun, et al. Effects of aluminum stress on antioxidant enzyme activity in root tips of wheat genotypes differing in aluminum tolerance [J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2009, **35** (6): 619 – 625.
- [19] 何丽烂, 喻敏, 王惠珍, 等. 豌豆根尖铝毒的敏感浓度探讨[J]. 华中农业大学学报, 2010, **29** (1): 45 – 47.
HE Lilan, YU Min, WANG Huizhen, et al. Sensitive concentration of Al^{3+} to root tip of pea (*Pisum sativum*) [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2010, **29** (1): 45 – 47.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 刘强, 龙婉婉, 胡萃, 等. 铝胁迫对油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子, 2009, **28** (7): 5 – 10.
LIU Qiang, LONG Wanwan, HU Cui, et al. Effects of aluminium stress on *Brassica campestris* L. seeds germination and seedlings growth [J]. *Seed*, 2009, **28** (7): 5 – 10.
- [22] 陈建华, 叶灵静, 刘鹏. 铝对益母草种子萌发的影响[J]. 种子, 2006, **25** (1): 11 – 13.
CHEN Jianhua, YE Lingjing, LIU Peng. The effect of aluminum on germination of motherwort seeds and roots growth of motherwort herb [J]. *Seed*, 2006, **25** (1): 11 – 13.
- [23] 李朝苏, 刘鹏, 徐根娣, 等. 酸铝浸种对荞麦种子萌发的影响[J]. 种子, 2004, **23** (12): 11 – 13.
LI Chaosu, LIU Peng, XU Gendi, et al. Effect of acid-Al on the germination of soaked buckwheat seeds [J]. *Seed*, 2004, **23** (12): 11 – 13.
- [24] CHARLOTTE P, BENET G, ISABEL C, et al. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants [J]. *Sci Total Environ*, 2008, **400**: 356 – 368.
- [25] MOYER-HENRY K, SILVA I, MACFALL J, et al. Accumulation and localization of aluminium in root tips of loblolly pine seedlings and the associated ectomycorrhiza *Pisolithus tinctorius* [J]. *Plant Cell & Environ*, 2005, **28**: 111 – 120.
- [26] SILVA I R, SMYTH T J, RAPER C D, et al. Differential aluminum tolerance in soybean: An evaluation of the role of organic acids [J]. *Plant Physiol*, 2001, **112** (2): 200 – 210.
- [27] 黎晓峰, 秦丽凤, 李耀燕, 等. 不同木豆品种耐铝性的基因型差异及其机理研究[J]. 生态环境, 2005, **14** (5): 690 – 694.
LI Xiaofeng, QIN Lifeng, LI Yaoyan, et al. Genotypic variation of Al-tolerance and corresponded mechanism in different cultivars of pigeon pea [J]. *Ecol Environ Sci*, 2005, **14** (5): 690 – 694.
- [28] 赵胡, 郑文教, 陈杰. 土壤镉污染对大蒜幼苗生长及根系抗氧化系统的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (5): 771 – 775.
ZHAO Hu, ZHENG Wenjiao, CHEN Jie. Effects of soil cadmium pollution on *Allium sativum* seedling growth and root antioxidant system [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (5): 771 – 775.
- [29] 何龙飞, 沈振国, 刘友良. 铝胁迫下钙对小麦根系细胞质膜 ATP 酶活性和膜脂组成的影响[J]. 中国农业科学, 2003, **36** (10): 139 – 142.
HE Longfei, SHEN Zhenguo, LIU Youliang. Effects of calcium on ATPase activity and lipid composition of plasma membranes of wheat roots under aluminum stress [J]. *Sci Agric Sin*, 2003, **36** (10): 139 – 142.