

Al 胁迫下油菜生物量 Al 积累及保护酶系统的响应

韦冬萍^{1,2,3}, 刘 鹏¹, 徐根娣¹, 蔡妙珍¹, 韦剑锋⁴

(1.浙江师范大学植物学实验室, 浙江 金华 321004; 2.广西大学农学院, 广西 南宁 530005; 3.广西工学院鹿山学院, 广西 柳州 545616; 4.广西工学院, 广西 柳州 545006)

摘 要:采用水培法,研究了油菜湘杂油二号(耐 Al 型)和浙双 758(Al 敏感型)的生物量、根尖 Al 含量及叶片保护酶活性、叶片 MDA 和 Pro 含量对 Al 胁迫的响应。结果表明,胁迫 7 d 时,湘杂油二号根系、地上部和总生物量下降率(13%~36%、13%~36%、5%~17%)均小于浙双 758(30%~53%、12%~20%、16%~28%)。胁迫 14 d 生物量下降比胁迫 7 d 时明显,根冠比也随 Al³⁺浓度增加和时间延长而下降;同时,株高变化趋势与生物量变化趋势基本一致。胁迫 7 d 下,湘杂油二号根尖 Al 含量在 3.94~5.88 μg·g⁻¹ 之间,浙双 758 在 4.96~7.54 μg·g⁻¹ 之间,胁迫 14 d 时根尖 Al 积累进一步增加。Al³⁺对叶片 SOD、CAT 和 POD 具有激活效应,SOD 上升幅度较为明显,胁迫 7 d 和 14 d 时,200 μmol·L⁻¹ Al³⁺浓度下湘杂油二号分别增加 2.50 倍和 2.03 倍,浙双 758 分别增加 2.02 倍和 1.83 倍,Al³⁺对 CAT 和 POD 的诱导效应小于 SOD;从时间差异看,SOD、CAT 的绝对活性和增幅在胁迫 14 d 时小于胁迫 7 d,POD 相反。叶片 MDA 和脯氨酸含量均随 Al³⁺浓度增加和时间延长而升高,MDA 含量在湘杂油二号中低于浙双 758,而脯氨酸含量是湘杂油二号高于浙双 758。研究认为,湘杂油二号根尖排斥 Al 的能力较强,且叶片能够维持较高的保护酶活性和较高的脯氨酸含量,因而其耐 Al 性强于浙双 758。

关键词:Al;胁迫;油菜;生物量;保护酶

中图分类号:Q945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2351-06

Response of Biomass, Al-accumulation and Protective Enzyme System of Oilseed Rape to Aluminum Stress

WEI Dong-ping^{1,2,3}, LIU Peng¹, XU Gen-di¹, CAI Miao-zhen¹, WEI Jian-feng⁴

(1.Key Lab of Botany, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 535005, China; 3.Lushan College of Guangxi University of Technology, Liuzhou 545616, China; 4.Guangxi University of Technology, Liuzhou, 545006, China)

Abstract: A solution culture was conducted to study the effect of aluminum (Al) on a tolerant genotype (XZY2) and a sensitive genotype (ZS758) of oilseed rape. The biomass growths, Al-accumulations, activities of protective enzymes and contents of MDA and proline in leaves of oilseed rape seedlings were investigated. The results showed, after being treated 7 d, the dry weight of root and shoot and biomass of XZY2 decreased significantly by 13%~36%, 13%~36% and 5%~17%, the corresponding decrease for ZS758 were 30%~53%, 12%~20% and 16%~28%, respectively. The decrease of biomass was more significant in 7 d treatment than in 14 d treatment and the ratio of root/shoot decreased with the increasing Al³⁺ in culture solution and treated time and the plant height decreased simultaneously with the same trends. Al contents in roots of both varieties increased under Al stress, which were much higher in Al-sensitive genotypes XZY2 (3.94~5.88 μg·g⁻¹) than in Al-tolerant ZS758 (4.96~7.54 μg·g⁻¹) in 7 d treatments, and were even higher after being treated for 14 d. The protective enzymes were activated by Al, especially the SOD, after being treated by 200 μmol·L⁻¹ Al³⁺ for 7 d and 14 d, the SOD activities increased 2.50 times and 2.03 times in XZY2 and 2.02 times and 1.83 times in ZS758, respectively; In contrast to SOD, CAT and POD were less affected by Al stress. In addition, compared to 7 d treatment, the activities of SOD and CAT decreased but that of POD increased after 14 d treatment. With the increased Al³⁺ concentrations in culture media, the content of MDA in leaves was lower in the XZY2 than in ZS758, while higher content of proline were observed in XZY2. It suggested that tolerance of XZY2 to Al than ZS758 was partially achieved by excluding Al from root tip and increasing the protective enzymes activity or proline contents in leaves of oilseed rape.

Keywords: aluminum; stress; oilseed rape (*Brassica napus* L.); biomass; protective enzyme

收稿日期: 2008-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(30540056); 浙江省自然科学基金(504135)

作者简介: 韦冬萍(1982—), 女, 广西柳州人, 硕士研究生, 主要从事植物营养和生理生态研究。

通讯作者: 刘 鹏 E-mail: sky79@zjnu.cn

我国已成为继北欧和北美之后出现的世界第三大酸雨区,酸性土壤比例增加到全国土地总面积的30%,且呈长江以南地区大幅度向西北移动的趋势^[1]。南方的红黄壤是典型的酸性土壤,不仅有机质贫乏,养分含量低,且交换性 Al 占阳离子交换量的20%~80%^[2],过量的 Al 胁迫已成为许多酸性土壤上作物生长的重要限制因子。油菜(*Brassica napus* L.)属于十字花科芸苔属(*Brassica*)的油料作物,栽培面积在世界四大油料作物中居第二位。其适宜生长的土壤 pH 范围为6~7,对土壤酸度反应很敏感^[3]。我国是油菜生产大国,产量占世界第一位^[4],主要栽培于长江以南,属于酸 Al 危害较为严重的区域。目前关于环境因素对油菜品质的研究较多,而对于其影响机理方面的研究多被忽略,国内鲜见关于 Al 胁迫对油菜生理影响的报道。本试验以耐 Al 性不同的两个甘蓝型油菜品种为材料,通过对油菜生物量、叶片保护酶活性、膜脂过氧化及脯氨酸含量的测定,研究不同 Al 水平和两个 Al 处理时间下两品种油菜对 Al 响应的生理差异性,为油菜耐 Al 的生理生化机制提供基础理论。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

运用相对根长法,以150和300 μmol·L⁻¹的 Al³⁺对24个甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)品种进行筛选,得出湘杂油二号(XZY2)为耐 Al 基因型,浙双 758(ZS758)为 Al 敏感基因型(数据未列出)。

1.2 幼苗培养和处理

选择大小一致、圆润饱满的油菜种子,经常规方法浸种、消毒和催芽,于土钵中育苗。两片真叶的幼苗在含有 Hoagland 完全营养液的 2 L 水桶中适应 15 d 后,添加含有不同浓度 Al 液的完全营养液,每桶 4 个孔,每孔两株苗。试验设 4 个 Al³⁺浓度:0、50、100、200 μmol·L⁻¹,以 AlCl₃·6H₂O 形态供应,Hoagland 完全营养液 pH 调为 4.5,重复 3 次。3 d 换一次处理液,每天上午和下午各通气 2 h。在 Al 处理的第 7 和第 14 d 早上 7:00~8:00,用薄刀片在冰浴中切取根尖 1 cm 根段和新长出的第一片完全展开叶进行生理生化分析。

1.3 测定方法和统计分析

植株株高用直尺直接测量,干质量(DW)测定把植株分成根部和地上部,105 ℃杀青 15 min,80 ℃烘干,称重;每重复取 15 株,计算单株株高、干质量及根系/地上部干质量比值。Al 含量测定采用羊毛铬菁 R 分光光度法^[5];超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用

氮蓝四唑(NBT)显色法^[6],以抑制 NBT 光氧化还原 50%的酶量为一个酶活性单位;过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[7],以每分钟吸光度变化值表示酶活性大小;过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用 Na₂S₂O₃ 滴定法^[8],以 1 min 酶分解 1 mg H₂O₂ 表示酶活性大小;MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[7];游离脯氨酸(Pro)含量测定采用酸性茚三酮显色法^[7]。

实验数据用 Microsoft Excel 2003 处理和 SAS V6.12 统计软件进行邓肯氏法多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Al 对油菜生物量和株高的影响

Al 对植物产生毒害,直观表现为植物生物量和株高的降低。图 1 可知,两个油菜品种的生物量均随着 Al 胁迫浓度的增加而逐渐下降,胁迫 7 d 时,湘杂油二号根系干质量下降在 13%~36%之间,地上部干重下降在 2%~11%之间,总生物量下降在 5%~17%之间;浙双 758 根系干质量下降在 30%~53%之间,地上部干质量下降在 12%~20%之间,总生物量下降在 16%~28%之间。可以看出,耐 Al 性差的浙双 758 生物量下降速度要比耐 Al 性强的湘杂油二号生物量下降速度迅速,并且油菜根系对 Al 敏感程度大于地上部分。胁迫 14 d 时,两个油菜品种的根干质量、地上部干质量和总生物量更为明显,下降率均大于胁迫 7 d 时的下降率。对总生物量的显著性分析表明,50 μmol·L⁻¹ Al³⁺处理对湘杂油二号总生物量没有显著影响,其他处理与对照比较都达到显著差异水平。从图 2 中可以看出,随着 Al 浓度的增加,油菜根/冠比呈现

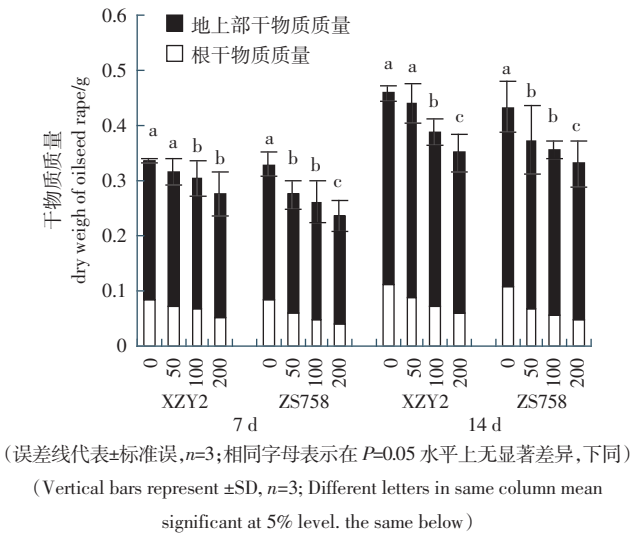


图 1 Al 胁迫对油菜植株干物质质量的影响
Figure 1 Effect of aluminum stress on dry weight of oilseed rape

下降趋势, 湘杂油二号的根/冠比下降速度小于浙双 758, 胁迫 14 d 的下降速度大于胁迫 7 d。图 3 可知, 油菜株高对 Al 胁迫的响应与油菜生物量变化趋势基本一致。表明 Al 胁迫浓度的增加和时间的延长对油菜生长产生不利影响。

2.2 Al 对油菜根尖 Al 含量的影响

Al 对植物根系的毒害最为明显, 根尖 Al 含量能够表明根系受害的程度。图 4 表明, 油菜受 Al 毒害后, 根尖 Al 含量持续上升。处理 7 d 时, 湘杂油二号在 $50\sim 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al^{3+} 浓度时根尖 Al 含量在 $3.94\sim 5.88\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 胁迫 14 d 时, 同一浓度下分别上升 22%、32%、38%; 浙双 758 在胁迫 7 d 时根尖 Al 含量在 $4.96\sim 7.54\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 胁迫 14 d 时, 同一浓度下分别上升 25%、36%、40%。从中看出, 胁迫时间延长到 14 d 时, 相同浓度 Al 胁迫下浙双 758 品种根尖 Al 含量的上升速率要大于湘杂油二号。从品种间比较来看, 耐 Al 性强的湘杂油二号在胁迫 7 和 14 d 时根尖

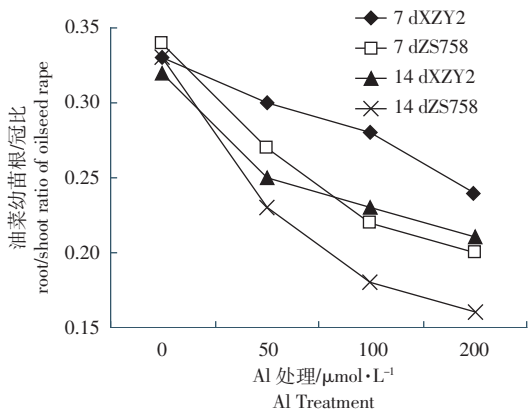


图 2 Al 胁迫对油菜根/冠干物质比的影响

Figure 2 Effect of aluminum stress on root/shoot ratio of oilseed rape

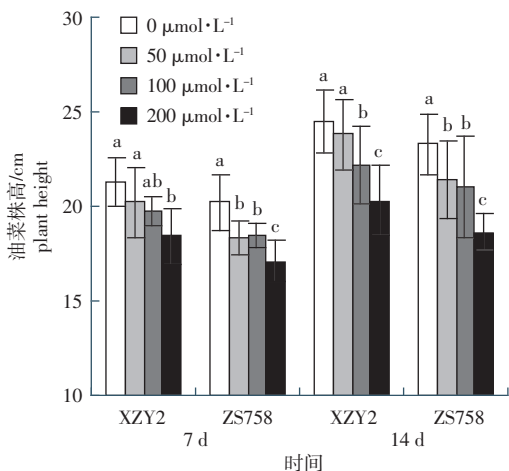


图 3 Al 胁迫对油菜株高的影响

Figure 3 Effect of aluminum on plant height of oilseed rape

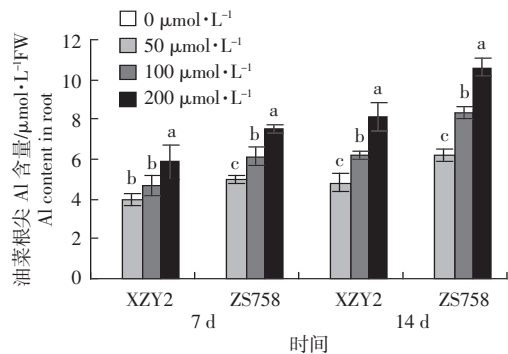


图 4 Al 胁迫对油菜根尖 Al 的影响

Figure 4 Effect of aluminum on content of Al in root of oilseed rape

Al 含量均低于 Al 敏感性的浙双 758 品种。

2.3 Al 对油菜叶片保护酶活性的影响

SOD 可以将植物体内的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 歧化为 H_2O_2 , 在各种酶促 AOS 清除系统中处于第一道防线^[9], CAT 和 POD 一起, 把 SOD 歧化产生的 H_2O_2 进一步还原为 H_2O 和 O_2 ^[10], 这 3 酶活协同作用, 组成一个有效的活性氧清除系统。图 5~图 7 表明, 油菜在受到 Al 胁迫后, 叶片中 SOD、CAT 和 POD 被不同程度的激活, SOD (图 5) 的上升幅度较为明显, 胁迫 7 和 14 d 时, $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al^{3+} 浓度下湘杂油二号分别增加 2.50 倍和 2.03 倍, 浙双 758 分别增加 2.02 倍和 1.83 倍; CAT (图 6) 随着 Al 浓度的升高, 上升幅度没有 SOD 明显, 浙双 758 在胁迫 7 d 时 CAT 活性先升后降, $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al^{3+} 浓度时比 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al^{3+} 浓度时下降了 18%; 同样, Al 也使油菜叶片中 POD (图 7) 活性上升, 湘杂油二号在胁迫 14 d 时 POD 活性明显高于对照, 呈现先升后降趋势。从胁迫时间来看, SOD 和 CAT 活性在胁迫 7 d 时活性要高于胁迫 14 d, 而 POD 活性则相反, 在胁迫 7 d 时的活性小于胁迫 14 d。从品种基因型差异来看,

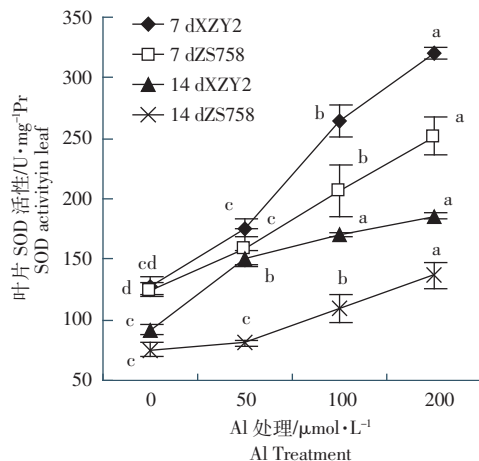


图 5 Al 对油菜叶片 SOD 活性的影响

Figure 5 Effect of aluminum on SOD activity in leaves of oilseed rape

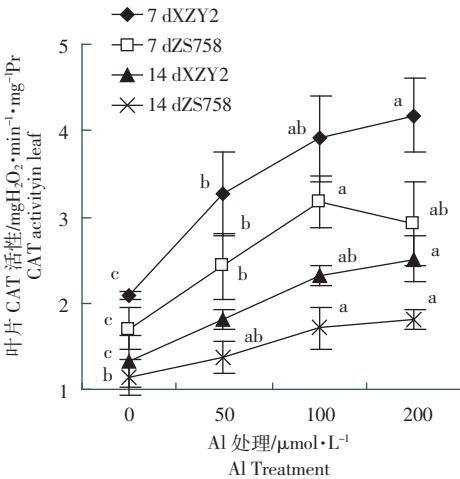


图 6 Al 对油菜叶片 CAT 活性的影响
Figure 6 Effect of aluminum on CAT activity in leaves of oilseed rape

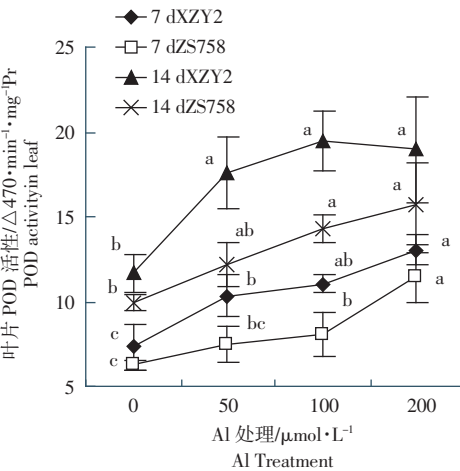


图 7 Al 对油菜叶片 POD 活性的影响
Figure 7 Effect of aluminum on POD in leaves of oilseed rape

无论在哪个浓度或者哪个阶段中,湘杂油二号的酶活性都要高于浙双 758 活性。

2.4 Al 对油菜叶片 MDA、脯氨酸含量的影响

表 1 显示,油菜叶片 MDA 含量随着 Al³⁺浓度增加而上升,均在 200 μmol·L⁻¹ Al³⁺处达到最大值,湘杂油二号和浙双 758 MDA 含量在胁迫 7 d 时比对照分别增加了 30%和 40%,胁迫 14 d 时分别增加了 41%和 52%;从基因型差异看,湘杂油二号叶片 MDA 含量在处理 7 d 时保持在较低水平,处理与对照差异不显著,随胁迫浓度增加和时间延长 MDA 增幅也小于浙双 758。油菜叶片脯氨酸与 MDA 变化趋势相似,随着 Al³⁺浓度的增加基本呈上升趋势,胁迫 7 d 时,耐 Al 型湘杂油二号比对照分别显著增加 21%、42%、50%,浙双 758 分别显著增加 19%、18%、42%;胁迫 14 d 时,50 μmol·L⁻¹ Al³⁺浓度时脯氨酸含量与对照比较增加明显,湘杂油二号和浙双 758 比对照分别显著增加 34%和 29%,但 100、200 μmol·L⁻¹ Al³⁺浓度时脯氨酸的增加率与胁迫 7 d 时接近。

3 讨论

生物量和株高是反映植株生长状况的直观指标,在生产实践中具有一定的意义。Al 胁迫显著抑制大麦^[11]和水稻^[12]根系、地上部的伸长和生长,但其程度因基因型而异。随着 Al 处理时间的增长,两玉米自交系根系生物量和体积均受到不同程度的抑制,耐 Al 自交系受抑制程度始终较敏感自交系轻^[13]。本试验中,Al 胁迫同样抑制了油菜的生物量和株高生长,耐 Al 性较强的湘杂油二号受到的抑制程度轻于耐 Al 性差的浙双 758。对干物质积累的相对抑制程度上比较,根系比地上部敏感,两个基因型之间的差异随着处理时间延长而加大,可以依据根冠比大小反映出来。根冠比是一个反映植物地上部分与地下部分保持平衡的

表 1 Al 胁迫对油菜叶片丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量的影响
Table 1 Effect of aluminum on MDA and proline contents in leaves of oilseed rape

处理天数/d Treatment Days	Al ³⁺ 浓度/μmol·L ⁻¹ Concentration	湘杂油二号 XZY2		浙双 758 ZS758	
		MDA/μg·g ⁻¹ FW	Pro/μg·g ⁻¹ FW	MDA/μg·g ⁻¹ FW	Pro/μg·g ⁻¹ FW
7 d	0	5.17±1.02a	100.12±0.99d	5.57±1.17b	93.73±2.34c
	50	6.44±0.29a	127.45±8.68c	7.64±0.74ab	115.57±4.15b
	100	6.18±1.06a	171.23±7.75b	7.94±0.73ab	113.92±3.38b
	200	7.36±0.52a	198.99±6.91a	9.23±1.23a	160.42±7.30a
14 d	0	9.16±1.23b	165.41±7.84c	8.55±1.32c	142.9±1.77c
	50	11.13±1.29b	251.40±11.76b	10.78±1.41c	202.15±5.05b
	100	11.58±0.71b	291.78±5.25a	14.60±3.44b	196.54±9.59b
	200	15.13±0.93a	309.35±8.14a	17.86±2.29a	240.14±6.47a

注:表中数据为 3 次重复的平均值±标准差;不同字母表示差异达 5% 显著水平。
Note: Data in the table are average of 3 repetition ± standard error; Different letters in same column mean significant at 5% level.

参数。随着 Al 胁迫浓度的加深,根冠比逐渐下降,说明油菜根系受到的伤害大于植株地上部分,不利于油菜根系和地上部对水分和营养的吸收平衡。在胁迫时间延长到 14 d 时,由于根系得不到大量的同化物,根冠比更加失调,而使长期胁迫的根冠比小于短期胁迫处理。

根尖是 Al 的积累和 Al 毒表达的主要部位,常比成熟的根部组织积累更多的 Al,被认为是 Al 毒害的最初作用部位^[14]。研究表明,植物对 Al 的敏感性与 Al 在植物根尖的积累有关,根尖 Al 的积累量与根系伸长率之间呈显著负相关^[15-16]。本试验中,未经过 Al 处理的油菜根尖 Al 含量极低,可忽略不计,而经过 Al 胁迫后根尖 Al 含量随着 Al^{3+} 浓度的升高而逐渐上升,与前人在玉米^[17]、小麦^[18]及龙眼^[19]等作物上的研究结论一致。李海生^[20]认为,Al 主要沉积在根部,这与离子被根部吸收的特殊的机制有关。在高质量浓度 Al 处理下,被根部吸收的 Al 趋向于滞留于根部,可能是植物对金属的耐性机制之一。当植物被迫吸收了过量的金属后,通过把他们固定在根部,以减少向茎、叶的运输,从而避免对茎、叶生长的毒害,提高植物对金属的耐性。相对耐 Al 的湘杂油二号根尖 Al 含量及上升速率都低于浙双 758,这可能是由于耐 Al 基因型具有一种选择性机制少吸收 Al 或具有较强的外排 Al 能力,如根尖分泌有机酸到根细胞外来螯合 Al 离子,以此保证植株体内较低的 Al 水平,维持正常的细胞离子环境。

研究表明^[21-23],Al 胁迫下植物体内保护酶(如 POD、CAT、SOD)的活性高低与植物 Al 毒耐性成正相关。保护酶活性较高表明植物体内氧自由基清除能力较强,膜脂过氧化水平稳定,植物耐 Al 性好,反之,如果保护酶活性下降,导致植物体内活性氧的过量积累而诱发膜脂过氧化作用,使植物正常生理功能受到影响。另外脯氨酸是重要的渗透调节物质^[24]和抗氧化物质^[25],既能降低叶片的渗透势,防止细胞脱水,保护细胞内酶蛋白结构的稳定性,又能清除体内活性氧,稳定生物大分子的结构,降低细胞酸性以及解除氨毒等。一般情况下,叶片脯氨酸含量会随逆境胁迫的加剧而升高,在大豆和玉米^[26]等作物上得到证实。本试验中,随着 Al^{3+} 胁迫浓度的增加,油菜叶片中的 SOD、CAT 和 POD 活性随之升高,是油菜对 Al 胁迫的适应性反应,对于降低体内活性氧自由基毒害、保护膜结构完整性有积极作用,在一定程度上忍耐、减缓或抵抗 Al 胁迫。从胁迫 7 d 和胁迫 14 d 比较来看,保护酶

活性在胁迫 7 d 时的上升幅度要大于胁迫 14 d 时的上升幅度,此时,叶片 MDA 含量与保护酶活性变化相反,在胁迫 7 d 时的含量和增幅要小于胁迫 14 d。这符合了上述所说的高活性的保护酶能够降低膜脂过氧化作用,与前人的研究结论相一致。胁迫 14 d 时,由于保护酶活性增幅减少,防御能力降低,油菜同时提高了叶片脯氨酸含量,以此补充叶片对活性氧自由基的防御功能,而耐 Al 性较强的湘杂油二号叶片中脯氨酸含量要大大高于耐 Al 性较差的浙双 758。但即使如此,油菜叶片中的 MDA 含量仍然大于胁迫 7 d,表明保护酶和脯氨酸对 Al 引起的膜脂过氧化及自由基毒害的保护能力是有限的。另一方面,SOD 和 CAT 活性的增幅和绝对活性在胁迫 7 d 时大于胁迫 14 d,而 POD 恰好相反。POD 活性在胁迫 14 d 时大大增强但并没有起到有效的保护作用,可能是单一保护酶对清除自由基毒害的能力较弱,也可能与 POD 功能多样性有关。目前认为 POD 在分解 H_2O_2 、消除细胞内过多活性氧的同时,还可催化脂肪酸、芳香胺和酚类物质等的氧化,参与乙烯的合成,催化木质素前体的形成以及细胞壁碳水化合物与蛋白质共价键的形成,对植物正常生理代谢造成负面影响^[27-28]。POD 活性的增强是否促进了油菜叶片的衰老,加速了氧离子自由基的毒害,有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘 彬. 酸雨的形成、危害及防治对策[J]. 环境科学与技术, 2001, 4: 21-23.
LIU Bin. Formation, harm and prevention of acid rain[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 4: 21-23.
- [2] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 121-122.
LI Qing-kui. Red Soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1983. 121-122.
- [3] 武 际, 郭熙盛, 王文军, 等. 施用白云石粉对黄红壤酸度和油菜产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 55-58.
WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Wen-jun, et al. Effect of dolomite application on soil acidity and yield of rapeseed on yellow-red soil[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1): 55-58.
- [4] 余礼明, 伍冬生, 文友先, 等. 油菜籽脱壳与分离设备研究[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(5): 40-43.
YU Li-ming, WU Dong-sheng, WEN You-xian, et al. Developing equipment for dehulling and separation of rapeseed[J]. *Chinese Cereals and Oils Association*, 2002, 17(5): 40-43.
- [5] 邱光葵, 庞叔薇. 羊毛铬青分光光度法测定土壤中的活性铝[J]. 分析测试通报, 1989, 8(4): 68-71.
QIU Guang-kui, PANG Shu-wei. Spectrophotometric determination of activated aluminum in soil using eriochrome cyanine R[J]. *Journal of*

Instrumental Analysis, 1989, 8(4):68–71.

[6] 白宝璋, 汤学军. 植物生理学测试技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 73–157.

BAI Bao-zhang, TANG Xue-jun. Test Techniques of Plant Physiology[M]. Beijing: Chinese Sci-Tech Press, 1993. 73–157.

[7] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.

Shanghai Institute of Plant Physiology of Chinese Academy of Sciences, Shanghai Academy of Plant Physiology. Modern Plant Physiology Laboratory Manual[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[8] 曾韶西, 王以柔, 刘鸿先. 低温光照下与黄瓜子叶叶片叶绿素降低有关的酶促反应[J]. 植物生理学报, 1991, 17: 177–182.

ZENG Shan-xi, WANG Yi-rou, LIU Hong-xian. Some enzymatic reactions related to chlorophyll degradation in cucumber cotyledons under chilling in the Light[J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 1991, 17: 177–182.

[9] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U, et al. Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Physiol Plant*, 2000, 109: 435–442.

[10] Fridovich I. Biological effects of the superoxide radical Arch [J]. *Biochem Biophys*, 1986, 247: 1–11.

[11] 郭天荣, 张国平, 卢王印, 等. 铝胁迫对不同耐铝大麦基因型干物质积累与铝和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 324–333.

GUO Tian-rong, Zhang Guo-ping, LU Wang-yin, et al. Effect of Al on dry matter accumulation and Al and nutrition contents of barleys differing in Al tolerance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2003, 9(3): 324–333.

[12] 谢国生, 范雪莲, 师瑞红. 等. 铝胁迫对水稻幼苗生理变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 34–38.

XIE Guo-sheng, Fan Xue-lian, Shi Rui-hong, et al. Change of the physiological characteristics of rice seedlings in response to aluminum stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 34–38.

[13] 李德华, 贺立源, 刘武定. 玉米自交系耐铝性评价及根系形态解剖特征[J]. 作物学报, 2004, 30(9): 947–952.

LI De-hua, HE Li-yuan, LIU Wu-ding. The Al-tolerance evaluation and anatomical characteristics of roots in inbred lines of maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(9): 947–952.

[14] Delhaize E, Ryan P R. Update on environmental stress: Aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. *Plant Physiol*, 1995, 107: 315–321.

[15] Delhaize E, Craig S, Bennet R J, et al. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) I. Uptake and distribution of aluminum in root apices[J]. *Plant Physiol*, 1993, 103: 685–693.

[16] Rincon M R A, Gonzales R. Aluminum partitioning in intact roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Plant Physiol*, 1992, 99: 1021–1028.

[17] 李德华, 贺立源, 李建生, 等. 不同耐铝性玉米自交系的营养特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 374–379.

LI De-hua, HE Li-yuan, LI Jian-sheng, et al. The characteristics of nutrition in maize with different Al-tolerant[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(4): 374–379.

[18] 李洋, 罗立廷, 杨广笑, 等. 不同小麦品种耐铝性差异的比较研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 79–83.

LI Yang, LUO Li-ting, YANG Guang-xiao, et al. Comparative study of aluminum tolerance in different wheat cultivars[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(5): 79–83.

[19] 肖祥希. 龙眼幼苗铝吸收特性的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 43–47.

XIAO Xiang-xi. Characteristics of aluminum absorption by Longan (*Diospyros longan*) seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3): 43–47.

[20] 李海生, 张志权. 不同铝水平下茶对铝及矿质养分的吸收与累积[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 186–190.

LI Hai-sheng, ZHANG Zhi-quan. The absorption and accumulation of aluminum and mineral nutrient in tea (*Camellia sinensis*) under different Al levels[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 186–190.

[21] Dong B, Sang W L, Jiang X, et al. Effects of aluminum on physiological metabolism and antioxidant system of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2002, 47(1): 87–92.

[22] Devi S R, Yamamoto Y, Matsumoto H. An intracellular mechanism of aluminum tolerance associated with high antioxidant status in cultured tobacco cells[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2003, 97(1): 59–68.

[23] 刘鹏, Yang Y S, 徐根娣, 等. 南方 4 种草本植物对铝胁迫生理响应的研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 644–651.

LIU Peng, Yang Y S, XU Gen-di, et al. Physiological response of four southern herbaceous plants to aluminum stress[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4): 644–651.

[24] 高洁, 曹坤芳, 王焕校. 干热河谷 9 种造林树种在旱季的水分关系和气孔导度[J]. 植物生态学报, 2004, 25(2): 186–190.

GAO Jie, CAO Kun-fang, WANG Huan-jiao. Water relations and stomatal conductance in nine tree species during a dry period grown in a hot and dry valley[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 25(2): 186–190.

[25] 樊怀福, 郭世荣, 焦彦生, 等. 外源-氧化氮对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 546–553.

FAN Huai-fu, GUO Shi-rong, JIAO Yan-sheng, et al. The effects of exogenous nitric oxide on growth, active oxygen metabolism and photosynthetic characteristics in cucumber seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 546–553.

[26] 彭嘉桂, 陈成榕, 卢和顶, 等. 铝(Al)对不同耐性作物品种形态和生理特性的影响[J]. 生态学报, 1995, 15(1): 104–107.

PENG Jia-gui, CHEN Cheng-rong, LU He-ding, et al. Effect of on the morphological and physiological characters of crop varieties with different tolerances[J]. *Ecologica Sinica*, 1995, 15(1): 104–107.

[27] Wang C Y, Ma Y X, Zhou S M, et al. Effects of water logging on the metabolism of active oxygen and the physiological activities of wheat root systems[J]. *Acta Agronomica Sin*, 1996, 22(6): 712–719.

[28] Wang A G. Activate oxygen metabolism of plant. Plant physiology and molecular biology[M]. Beijing: Science Press, 2001. 366–389.