

# 铝胁迫对不同耐铝小麦品种 根生理结构及活性氧代谢酶的影响\*

王伟 杨野 郭再华 耿明建 赵竹青\*\*

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

**摘要** 为探讨不同耐铝小麦品种铝胁迫下根尖细胞结构变化及活性氧代谢差异, 选用耐铝型小麦品种 Atlas 66 和铝敏感型品种 Scout 66 进行了试验研究。结果表明: 50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理 24 h, Atlas 66 和 Scout 66 根尖细胞伸长受抑制程度均随胁迫时间延长(6、12 和 24 h)而增强, 根尖细胞相对长度与根相对伸长率呈显著正相关的关系( $R^2=0.919$ ); Atlas 66 和 Scout 66 根尖细胞均受到不同程度的破坏, 具体表现为根尖伸长区皮层细胞变扁平, 细胞间隙变小, Scout 66 受破坏程度比 Atlas 66 显著, 表明根尖细胞结构受损导致细胞伸长受阻, 从而造成根伸长受抑制。50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理 6 h, Atlas 66 和 Scout 66 根尖超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化物酶(POD)和谷胱甘肽还原酶(GR)等酶活性升高, 增幅分别为 8.2%、82.0%、44.0%、25.0%、23.5% 和 23.3%、33.6%、26.9%、32.5%、14.8%, 说明  $\text{AlCl}_3$  处理引起活性氧代谢酶活性的升高, 不同耐铝小麦品种抗氧化胁迫能力差异显著。

**关键词** 小麦; 铝毒; 细胞显微结构; 活性氧代谢酶

**中图分类号** Q 945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2010)06-0715-06

铝是世界上含量最丰富的金属元素, 在酸性 ( $\text{pH} \leq 5.5$ ) 条件下, 主要以  $\text{Al}^{3+}$  形态存在, 具有毒害作用, 影响植物的生长发育<sup>[1]</sup>。近年来, 随着酸雨范围的扩大, 土壤铝活化现象逐渐呈扩大趋势。土壤铝活化对植物的影响受到广泛关注<sup>[2-4]</sup>。大量研究证实铝胁迫能够诱导 SOD、CAT、POD、APX、GR 等酶活性及丙二醛含量的变化、质膜结构的改变、线粒体的损伤甚至细胞的死亡。如 Pan 等<sup>[5]</sup> 研究发现铝通过诱导细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)的累积导致了大麦姐妹染色单体的互换。Panda 等<sup>[6]</sup> 对烟草悬浮细胞的研究证实, 铝胁迫严重损伤线粒体的呼吸功能、改变氧化还原状态, 导致质膜及细胞核的损伤, 甚至细胞的程序性死亡。ROS 是由  $\text{O}_2$  的连续单电子还原产生的一系列毒性中间物, 在植物体中主要包括: 超氧阴离子 ( $\text{O}_2^{\cdot -}$ )、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、氢自由基( $\cdot\text{OH}$ )和单线态氧( $^1\text{O}_2$ )等, 它们是细胞代谢的副产物。SOD、CAT、APX、POD 和 GR 等是植物体内活性氧代谢酶, 其主要功能是清除植物体内 ROS 和过氧化物, 保护植物免受伤害。正常条件下, 细胞内的活性氧

代谢酶, 如 SOD、CAT、POD、APX 及 GR 等能有效地还原细胞内的 ROS, 使细胞内 ROS 的产生和清除维持在一个平衡状态, 避免细胞受伤害。但如果 SOD 变化幅度与 CAT、POD、APX 及 GR 的变化幅度不一致, 如 SOD 分解产生的  $\text{H}_2\text{O}_2$  不能被 CAT、POD、APX 和 GR 等及时清除, 则  $\text{H}_2\text{O}_2$  同  $\text{O}_2^{\cdot -}$  结合会产生毒性更大的  $\cdot\text{OH}$ , 加剧对细胞的伤害作用<sup>[7-9]</sup>。逆境条件下, 如重金属胁迫、温度胁迫、水分胁迫及机械损伤等都会破坏 ROS 产生和清除之间的平衡, 加剧  $\text{O}_2$  的还原, 导致植物细胞中 ROS 的累积, 诱导植物细胞发生氧化胁迫, 从而导致脂类、蛋白质、DNA 等生物大分子的氧化损伤, 甚至引起细胞死亡。Filek 等<sup>[10]</sup> 研究发现, 800  $\mu\text{mol/L}$  Cd 处理能够导致小麦质体脂质的过氧化, 引起质体膜硬化, 流动性变小。Tamas 等<sup>[11]</sup> 研究认为 1 mmol/L Cd 处理便可诱导大麦根尖细胞脂质氧化并抑制根生长。

铝胁迫下不同耐铝植物品种间根生长差异显著, 根相对伸长率被广泛作为衡量植物耐铝的指标<sup>[12]</sup>。植物通过根系分泌有机酸解铝毒是植物抗

收稿日期: 2009-12-07; 修回日期: 2010-03-31

\* 国家自然科学基金项目(30571115)资助

\*\* 通讯作者. E-mail: zzq@mail.hzau.edu.cn

王伟, 男, 1982 年生, 硕士研究生. 研究方向: 植物逆境生理. E-mail: wangwei\_victory@webmail.hzau.edu.cn

铝机制之一<sup>[13]</sup>,不同耐铝品种间有机酸分泌量差异机制已得到了深入研究<sup>[14]</sup>。但铝胁迫下根尖活性氧代谢酶活性的差异与不同耐铝品种耐铝差异的关系还不是很清楚,因此,本研究以不同耐铝小麦品种为试验材料,探讨铝胁迫下不同耐铝小麦品种根尖活性氧代谢的差异。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

小麦(*Triticum aestivum* L.)耐铝型品种 Atlas 66、铝敏感型品种 Scout 66,由日本冈山大学提供。

### 1.2 试验材料培养

种子经质量分数 0.5% 的 NaClO 表面消毒 20 min,用去离子水冲洗 5 次,25℃避光浸种 12 h,然后转移到垫有浸湿滤纸的玻璃培养皿上,25℃黑暗条件下催芽 24 h。将露白发芽的种子转移到 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液中培养 4 d,每天定时更换溶液。人工气候室培养幼苗,生长条件为:昼/夜光照 14 h/10 h,温度 25℃/20℃,光照 250 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。处理前将 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液调至 pH 4.5,平衡 12 h。

### 1.3 根尖活性氧代谢酶活性的测定

小麦幼苗培养方法同本文“1.2”,处理时将 15 株 4 d 的小麦幼苗培养在含 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> (pH 4.5) 的 AlCl<sub>3</sub> 溶液中,AlCl<sub>3</sub> 的浓度为 0、50 μmol/L,处理时间为 6 h。处理后,先用去离子水冲洗 3 min,挑选每株苗最长的 3 条根,切取根尖 0~1 cm 段,共 3 个重复。试材经液氮处理后放入-70℃冰箱中贮存,用于酶活性的测定。SOD、CAT、POD、APX、GR 活性测定按照郑炳松<sup>[15]</sup>的方法。

### 1.4 根相对伸长量的测定

将 15 株生长 4 d 的小麦幼苗培养在含 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> (pH 4.5) 的 AlCl<sub>3</sub> 溶液中 24 h,AlCl<sub>3</sub> 的浓度设置为 0、10、20、50 和 100 μmol/L,在培养前及培养后分别测量主根长,其差为不同 AlCl<sub>3</sub> 处理的根相对伸长量。

将 15 株生长 4 d 的小麦幼苗转移到含 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> (pH 4.5) 的 AlCl<sub>3</sub> 溶液中,AlCl<sub>3</sub> 的浓度为 0、50 μmol/L,分别培养 6、12 和 24 h。处理前后分别测量主根长度,其差为根相对伸长量。根相对伸长率(relative root elongation, RRE)为 AlCl<sub>3</sub> 处理与无 AlCl<sub>3</sub> 处理的根相对伸长量的百

分比。

$$\text{根相对伸长率} = \frac{\text{AlCl}_3 \text{ 处理根相对伸长量}}{\text{无 AlCl}_3 \text{ 处理根相对伸长量}} \times 100\%$$

### 1.5 根尖铝含量的测定

试材处理同本文“1.4”,不同浓度 AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h 后,用 0.5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液冲洗 3 次,切取根尖 0~1 cm 段,转移至 1.5 mL 的离心管中,管中加入 1 mL 2 mol/L HCl 溶液,恒温 25℃、20 r/min 振荡 24 h,提取液经适当稀释后,石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)(Varian GTA120,U. S. A.)测根尖 Al 含量。

### 1.6 根尖细胞石蜡切片的制作观察

试材处理同本文“1.4”,处理不同时间后,先用去离子水冲洗 3 min,然后切取根尖 0~1 cm,迅速固定于 FAA (90 mL 70%酒精+5 mL 福尔马林+5 mL 冰醋酸)固定液中,抽气,24 h 后梯度乙醇脱水,制作石蜡切片,对根尖材料纵切,切片厚度 8 μm,番红-固绿对染。Olympus BH<sub>2</sub> 镜检照相。在伸长区选择中柱细胞暴露最完全的根作为测定材料,从表皮细胞向内数到第 3 层,从第 3 层的第 1 个等径细胞开始计数。利用电子测量软件 Simple PCI 测定 10 个细胞的长度,每个处理共重复测定 10 条根,最后求得每个细胞长度的平均值。细胞相对长度(relative cell length, RCL)为 AlCl<sub>3</sub> 处理与无 AlCl<sub>3</sub> 处理的细胞平均长度的百分比。

$$\text{细胞相对长度} = \frac{\text{AlCl}_3 \text{ 处理细胞长度}}{\text{无 AlCl}_3 \text{ 处理细胞长度}} \times 100\%$$

### 1.7 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理及制图,用 DPS v7.05 统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),所有结果均用 LSD 法检验  $P < 0.05$  水平上的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 AlCl<sub>3</sub> 处理对根相对伸长率、根尖铝含量及细胞相对长度的影响

不同耐铝小麦品种经 AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h,根相对伸长率变化如图 1-A 所示。10 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理显著抑制 Scout 66 根伸长生长,根相对伸长率为 56.7%;相同处理下 Atlas 66 根相对伸长率为 75.1%。Atlas 66 和 Scout 66 根相对伸长率均随 AlCl<sub>3</sub> 浓度的升高而变小,但在相同处理条件下 Atlas 66 根相对伸长率显著高于 Scout 66,表明 Atlas 66 耐铝性显著高于 Scout 66。AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h

不同耐铝小麦品种根尖(0~1 cm)铝含量变化如图 1-B 所示。20  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理下,Atlas 66 和 Scout 66 根尖铝含量分别为 0.06 和 0.24  $\mu\text{g}$ ,100  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理下 0~1 cm 根尖铝含量分别为 0.16、0.45  $\mu\text{g}$ ,表明根尖铝含量随培养液  $\text{AlCl}_3$  浓度的升高而增加,相同处理条件下,Scout 66 根尖铝

含量显著高于 Atlas 66,说明 Atlas 66 对铝的排斥能力显著强于 Scout 66。根尖(0~1 cm)铝含量与根相对伸长率相关性(图 1-C)表明:小麦根尖铝含量与根相对伸长率呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),即根尖铝含量越低,其根相对伸长率越高,根伸长生长受抑制越轻。

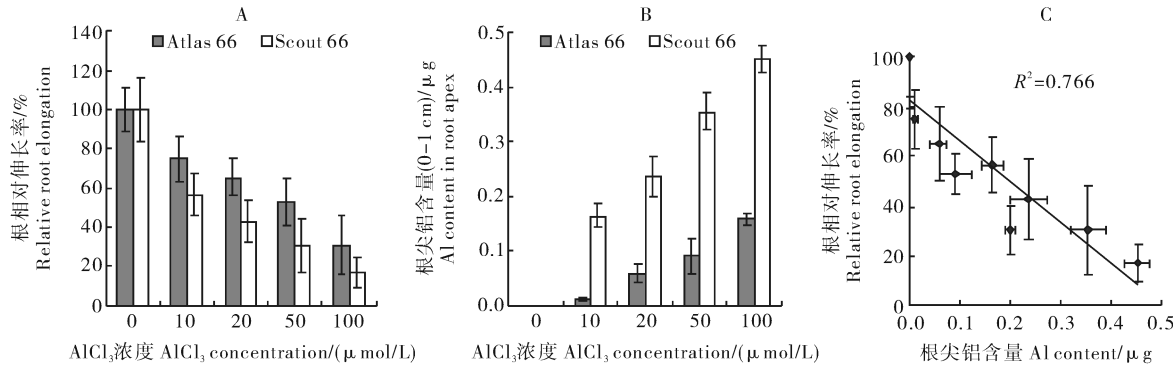


图 1 不同浓度  $\text{AlCl}_3$  处理 24 h 不同耐铝小麦品种根相对伸长率(A)、根尖铝含量(0~1 cm) (B) 及两者相关性(C)  
Fig.1 Relative root elongation(A),Al content in root apex (0-1 cm) (B) and correlation between relative root elongation and Al content in root apex of wheat (C) after 24 h exposure to different  $\text{AlCl}_3$  concentrations

50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理 6、12 和 24 h,Atlas 66 和 Scout 66 根相对伸长率分别为 75.2%、65.8%、49.6%和 70.0%、48.3%、30.5%,表明小麦根生长随处理时间的延长而显著受抑制(图 2-A)。随处理时间的延长(6、12 和 24 h),Atlas 66 和 Scout 66 细胞相对长度分别为 84.8%、77.2%、61.4%和

81.1%、71.1%、53.2%,根尖细胞相对长度显著下降,Scout 66 细胞相对长度显著小于 Atlas 66 (图 2-B),表明 Scout 66 受抑制程度较 Atlas 66 显著。根相对伸长率和根尖细胞相对长度相关性分析(图 2-C)表明,两者呈极显著正相关( $P<0.01$ )关系,说明根伸长受抑制由根尖细胞伸长受抑制引起。

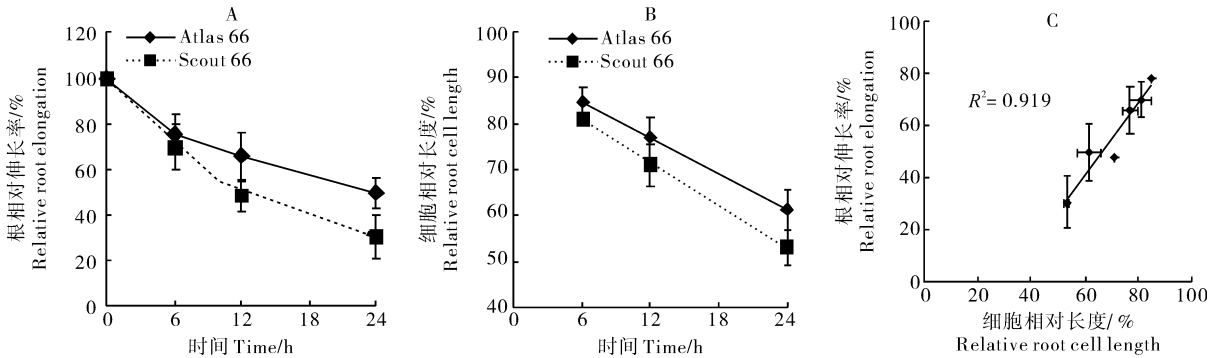


图 2 50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理不同时间不同耐铝小麦品种根相对伸长率(A)、细胞相对长度(B)及两者相关性(C)  
Fig.2 Relative root elongation(A),relative root cell length(B) and correlation between relative root elongation and relative root cell length(C) of wheat after 6 h,12 h and 24 h exposure to 50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$

2.2  $\text{AlCl}_3$ 处理对根尖细胞显微结构的影响

无  $\text{AlCl}_3$  处理的 Atlas 66 (图 3-A,B)和 Scout 66 (图3-C,D)根尖分生区及伸长区细胞较小,排列紧密有序,成熟区细胞饱满,形状规则;而经  $\text{AlCl}_3$  处理 24 h,Atlas 66 (图 3-A',B')和 Scout 66 (图 3-

C',D')根尖分生区及伸长区细胞排列疏松,伸长区皮层细胞变扁平,细胞间隙变小,细胞壁褶皱不平,相邻细胞相互交合,Scout 66 根尖细胞结构受损害较 Atlas 66 显著。这些结构变化表明, $\text{AlCl}_3$  处理改变根尖细胞形状,破坏根尖细胞正常生理结构。

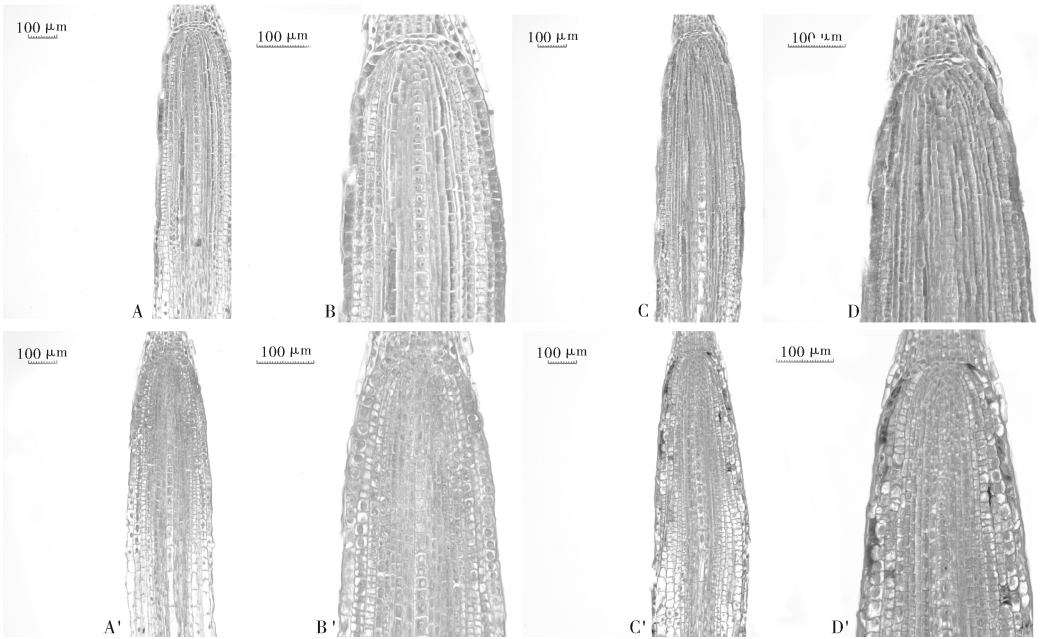


图 3 Atlas 66(A,B)、Scout 66(C,D)无 AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h 和 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 Atlas 66(A',B')、Scout 66(C',D') 24 h 根尖显微结构 (Bar=100 μm)

Fig. 3 A,B and C,D were the control treatment of Atlas 66 and Scout 66 respectively, which were treated for 24 h. A',B' and C',D' were Atlas 66 and Scout 66 treated with 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> for 24 h respectively (Bar=100 μm)

2.3 AlCl<sub>3</sub>处理对根尖 SOD、CAT、APX、POD 和 GR 酶活性的影响

50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 6 h, Atlas 66 和 Scout 66 根尖 SOD、CAT、APX、POD 和 GR 活性均有不同程度上升(表 1)。Atlas 66 和 Scout 66 的活性氧代谢酶活性经 AlCl<sub>3</sub> 处理同无 AlCl<sub>3</sub> 处理相比变化分别为: SOD 活性分别增加 8.2% 和 23.3%, CAT 活性分别增加 82.0% 和 33.6%, APX 活性分别增加 44.0% 和 26.9%, POD 活性分别增加 25.0% 和 32.5%, GR 活性增量分别为 23.5% 和 14.8%。AlCl<sub>3</sub> 处理后, Atlas 66 和 Scout 66 活性氧代谢酶活性增量均存在显著差异, 说明 AlCl<sub>3</sub> 处理后不同耐铝小麦品种间活性氧代谢酶活性差异显著。

细胞内活性氧代谢系统一般处于动态平衡状态, 如果这种平衡被打破, 活性氧防御系统失衡, 会加剧膜脂的过氧化, 从而导致对植株的伤害。SOD 活性与其他 4 种酶活性关系反应活性氧代谢的平衡状态。表 2 表明, 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 6 h 后, Atlas 66 根尖中 SOD 活性增量同其他酶活性增量的比值(ΔSOD/ΔCAT、ΔSOD/ΔPOD、ΔSOD/ΔAPX 和 ΔSOD/ΔGR)显著低于 Scout 66。说明同 Scout 66 相比, Atlas 66 根尖细胞 SOD 分解产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 可以及时被 CAT、POD、APX 和 GR 等酶清除, 减少了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 同 O<sub>2</sub><sup>-•</sup> 的结合, 降低了 •OH 对细胞的伤害作用, 表明 Atlas 66 活性氧代谢系统比 Scout 66 稳定。

表 1 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 6 h 根尖(0~1 cm) SOD、CAT、APX、POD 和 GR 活性变化<sup>1)</sup>

Table 1 Activity changes of SOD,CAT,APX,POD and GR in wheat root apices (0-1 cm) of different Al-tolerant cultivars exposed to 50 μmol/L AlCl <sub>3</sub> for 6 h		μmol/(min · mg)				
品种 Cultivar	AlCl <sub>3</sub> / (μmol/L)	活性氧代谢酶活性 Activity of enzyme				
		SOD	CAT	APX	POD	GR
Atlas 66	0	3.61±0.14 b	3.33±0.071 b	0.10±0.003 c	7.95±0.072 c	0.05±0.005 c
	50	3.91±0.17 b	6.05±0.579 a	0.14±0.008 b	9.93±0.150 b	0.06±0.001 c
Scout 66	0	3.62±0.19 b	2.80±0.154 b	0.16±0.018 b	10.91±0.732 b	0.13±0.012 b
	50	4.47±0.09 a	3.74±0.402 b	0.20±0.003 a	14.46±1.114 a	0.14±0.009 a

1)表中数据是 3 次重复的平均值±标准误,同一列的不同英文字母表示 P<0.05 水平上差异显著。Date in the column show means±SD of three repetitions. Different letters within the same column indicate significant differences at P<0.05.



表 2 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 6 h 对 SOD 活性增量和其他酶活性增量比值的影响

Table 2 Effect of 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> treatments for 6 h on the ratio of increments between SOD and other enzymes

品种 Cultivar	ΔSOD/ ΔCAT	ΔSOD/ ΔPOD	ΔSOD/ ΔAPX	ΔSOD/ ΔGR
Atlas 66	0.11	0.15	6.86	26.80
Scout 66	0.89	0.24	19.90	45.50

3 讨 论

根生长受抑制是植物受铝胁迫最典型的症状。Tabuchi<sup>[16]</sup>等发现,经 20 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 8 h, Scout 66 根伸长抑制率为 74%,而 Atlas 66 则稍受抑制,表明 Atlas 66 的耐铝性显著高于 Scout 66,这一结果在本研究中得到证实(图 1-A)。Al<sup>3+</sup> 能够进入根尖细胞,影响根正常生长,同 Zhao 等<sup>[12]</sup> 结论一致,本试验中根尖铝含量同根相对伸长率间存在极显著负相关的关系(图 1-C)。铝主要结合于根尖伸长区,对伸长细胞产生毒害作用<sup>[16-17]</sup>。而根的生长主要通过根尖细胞的分化和伸长实现,铝胁迫能够破坏细胞结构,从而影响根的生长。如 Konarska<sup>[18]</sup> 研究发现,40 mg/L 铝胁迫红辣椒 14 d 后,根尖伸长区皮层细胞严重变形,分生区和伸长区细胞变短。本研究中 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h, Atlas 66 和 Scout 66 根尖细胞形态、结构的变化与 Konarska 等<sup>[18]</sup> 研究结果一致(图 3),相同胁迫条件下 Scout 66 受破坏程度较 Atlas 66 显著。Sasaki 等<sup>[19]</sup> 在对 Atlas 66 的研究中发现,无铝胁迫根尖细胞的纵向长度与横向长度的比值约为 20 μmol/L 铝胁迫下比值的 3~4 倍。本研究中 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理 24 h, Atlas 66 根尖细胞相对长度显著高于 Scout 66 (图 2-B),根相对伸长率与根尖细胞相对长度间极显著的正相关关系(图 2-C)表明,根尖细胞结构受损能够导致细胞伸长受阻及根伸长受抑制。

Yamamoto 等<sup>[20]</sup> 研究认为铝胁迫影响线粒体功能,导致 ROS 的产生,从而抑制细胞的生长。但植物体可通过活性氧代谢系统清除 ROS,减轻其对细胞的损伤。SOD、CAT、APX、POD、GR 等酶是植物体内重要的活性氧代谢酶。SOD 主要存在于细胞质、叶绿体和线粒体内,是植物体内抵御氧化胁迫的第一道防线。当植物受胁迫,活性氧增加时,SOD 的合成表达便会增强<sup>[21]</sup>,催化 O<sub>2</sub><sup>-</sup>· 转化为 O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,以清除胁迫产生的过多的 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·。同时 CAT、POD、APX、GR 在植物组织中广泛存在,能够

清除细胞内由 SOD 产生的过多的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,以维持细胞 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的正常水平,从而保护膜结构。同 Yamamoto 等<sup>[20]</sup> 试验结果一样,本试验中活性氧代谢酶活性在 AlCl<sub>3</sub> 处理后均表现出不同程度的增强,说明 AlCl<sub>3</sub> 处理造成了根尖细胞内活性氧的增加,从而对根尖细胞造成伤害。细胞内活性氧代谢酶在清除活性氧的同时相互间还保持着协调性,如果这种协调性被打破,活性氧防御系统便会失衡,加剧膜脂的过氧化,从而加剧对细胞的伤害。如 AlCl<sub>3</sub> 胁迫条件下,当 SOD 增加幅度大于 CAT、POD、APX 及 GR 的增长幅度后,SOD 分解产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 则无法被及时清除,当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 同 O<sub>2</sub><sup>-</sup>· 结合后会产生毒性更大的·OH,增加对细胞的伤害作用<sup>[7-9]</sup>。本试验中 Atlas 66 中 ΔSOD/ΔCAT、ΔSOD/ΔPOD、ΔSOD/ΔAPX 和 ΔSOD/ΔGR 活性增量的比值均低于铝敏感品种 Scout 66,说明在相同胁迫条件下 Atlas 66 可有效清除 SOD 分解产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,避免了·OH 的毒害作用,减轻细胞结构受到的伤害,而铝敏感品种 Scout 66 根尖细胞则因 SOD 产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 无法被及时清除而受到破坏,表明 Atlas 66 活性氧代谢系统效率高于 Scout 66。综上所述:铝胁迫诱导产生的 ROS 抑制小麦根生长。不同耐铝品种间活性氧代谢差异能够造成小麦品种耐铝的差异。

参 考 文 献

[1] 李德华,贺立源,李建生,等. 不同基因型玉米根系对铝胁迫反应的差异研究[J]. 华中农业大学学报,2003,22(4):365-369.

[2] 赵会娥,贺立源,章爱群,等. 铝胁迫对植物光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 华中农业大学学报,2008,27(1):155-160.

[3] 冯英明,喻敏,王昌全,等. 铝毒诱导植物细胞反应研究进展[J]. 华中农业大学学报,2004,24(6):320-324.

[4] 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.

[5] PAN J W, ZHENG K, YE D, et al. Aluminum-induced ultra-weak luminescence changes and sister-chromatid exchanges in root tip cells of barley[J]. Plant Science,2004,167:1391-1399.

[6] PANDA S K, YAMAMOTO Y, KONDO H, et al. Mitochondrial alterations related to programmed cell death in tobacco cells under aluminium stress[J]. Comptes Rendus Biologies, 2008,331:597-610.

[7] 刘鹏,徐根娣,姜雪梅,等. 铝对大豆幼苗膜脂过氧化和体内保护系统的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1):51-54.

[8] 王松华,杨志敏,吕波,等. 印度芥菜对 Cu 诱导的氧化胁迫响应[J]. 南京农业大学学报,2004,27(1):24-27.

[9] SHAH K,KUMAR R G,VERMA S,et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science,2001,161:1135-1144.

[10] FILEK M,ZEMBALA M,HARTIKAINENE H, et al. Changes in wheat plastid membrane properties induced by cadmium and selenium in presence/absence of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture,2009,96:19-28.

[11] TAMAS L,DUDIKOVA J,DUCKREKOVA K,et al. Effect of cadmium and temperature on the lipoxygenase activity in barley root tip[J]. Protoplasma,2009,235:17-25.

[12] ZHAO Z Q,MA J F,SATO K,et al. Differential Al resistance and citrate secretion in barley(*Hordeum vulgare* L.)[J]. Planta,2003,217:794-800.

[13] 黄宇,张海伟,徐芳森. 植物酸性磷酸酶的研究进展[J]. 华中农业大学学报,2008,27(1):148-154.

[14] MA J F,FURUKAWA J. Recent progress in the research of external Al detoxification in higher plants: a minireview[J]. Journal of Inorganic Biochemistry,2003,97:46-51.

[15] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京:气象出版社,2006.

[16] TABUCHI A,KIKUI S,MATSUMOTO H. Differential effects of aluminium on osmotic potential and sugar accumulation in the root cells of Al-resistant and Al-sensitive wheat[J]. Physiologia Plantarum,2004,120:106-112.

[17] RANGEL A F,RAO M,HORST W J. Spatial aluminium sensitivity of root apices of two common bean(*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes with contrasting aluminium resistance[J]. Journal of Experiment Botany,2007,58:3895-3904.

[18] KONARSKA A. Toxicity influence of aluminum on root microstructure of red pepper(*Capsicum annuum* L.)[J]. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities,2008,11:4.

[19] SASAKI M,YAMAMOTO Y,MATSUMOTO H. Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots[J]. Physiologia Plantarum,1996,96(2):193-198.

[20] YAMAMOTO Y,KOBAYASHI Y,DEVI S R,et al. Oxidative stress triggered by aluminum in plant roots[J]. Plant and Soil,2003,255:239-243.

[21] BASU U,GOOD A G,TAYLOR G J. Transgenic *Brassica napus* plants overexpressing aluminum-induced mitochondrial manganese superoxide dismutase cDNA are resistant to aluminum[J]. Plant and Cell Environment,2001,24:1269-1278.

Effects of Aluminum Stress on Physiological Structure and Enzymes in ROS Metabolism in the Root of Different Al-Tolerant Wheat

WANG Wei YANG Ye GUO Zai-hua GENG Ming-jian ZHAO Zhu-qing

College of Resources and Environment ,Huazhong Agricultural University ,Wuhan 430070,China

**Abstract** Al-tolerant wheat (*Triticum aestivum* L.) Atlas 66 and Al-sensitive wheat Scout 66 were studied to elucidate the differences on cell structure and ROS metabolism in root tip under Al stress. The results showed that both Atlas 66 and Scout 66 showed a retardation of root cell elongation after treated with 50.0 μmol/L Al for 6,12 and 24 h. RRE (relative root elongation) and RCL (relative cell length) was well correlated ( $R^2=0.919$ ). Root tip cells of Atlas 66 and Scout 66 were damaged with different degree;Longitudinal sections revealed that the epidermal cells in the elongation zone became flat,inter-cellular space decreased after 24 h of 50.0 μmol/L AlCl<sub>3</sub> treatment. Damages to cell structure on Scout 66 were more serious than that on Atlas 66. The results indicated that the inhibition of cell elongation was due to the damage of cell structure,thus inhibited the elongation of root. After the treatment of 50.0 μmol/L AlCl<sub>3</sub> for 24 h,the activity of superoxide dismutases (SOD),catalase (CAT),ascorbate peroxidase (APX),peroxidases (POD) and glutathionereductase (GR) in Atlas 66 and Scout 66 increased by 8.2%,82.0%,44.0%,25.0%,23.5% and 23.3%,33.6%,26.9%,32.5%,14.8%,respectively. The results indicated that increased activities of enzymes in ROS metabolism were induced by the application of Al and that difference in ROS metabolism can cause the Al-tolerant difference among different Al-tolerant wheat varieties.

**Key words** wheat(*Triticum aestivum* L.); aluminum toxicity; cell microstructure; ROS metabolism enzymes

(责任编辑:张志钰)