

# 3种野生蓼科植物对铝胁迫的生理响应

刘 强 贺根和 龙婉婉 柳正葳

江西省井冈山大学生命科学学院,吉安 343009

**摘要** 用水培法,设置0、25、50、100、400  $\mu\text{mol/L}$  5种  $\text{AlCl}_3$  浓度处理,研究了3种野生蓼科植物酸模叶蓼、杠板归和辣蓼对铝胁迫的生理响应。结果表明:3种蓼科植物相对根系伸长率都随  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加呈递减的趋势,但  $\text{AlCl}_3$  对杠板归根伸长的抑制程度要明显高于酸模叶蓼和辣蓼,表明酸模叶蓼和辣蓼的耐铝性显著高于杠板归;3种蓼科植物根系铝含量和草酸分泌量均随  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加而增加(其中杠板归和辣蓼根系草酸分泌量在  $\text{AlCl}_3$  为 50  $\mu\text{mol/L}$  时达到饱和),但酸模叶蓼和辣蓼根系铝含量显著低于杠板归,而根系草酸分泌量显著高于杠板归;高浓度(400  $\mu\text{mol/L}$ )处理使3种蓼科植物根系活力、叶片过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性显著下降,丙二醛(MDA)含量显著升高,尤以杠板归变化最为明显。而低浓度(25~50  $\mu\text{mol/L}$ )处理时,酸模叶蓼和辣蓼根系活力表现出递增的趋势,叶片脯氨酸含量、过氧化物酶和过氧化氢酶活性较对照显著升高,丙二醛含量显著下降。由此说明,酸模叶蓼和辣蓼在低浓度  $\text{AlCl}_3$  胁迫下可通过外部排斥(铝诱导的根系草酸分泌)和内部解铝毒(提高根系活力、叶片 POD 和 CAT 活性、脯氨酸含量及降低 MDA 含量)2种途径来增强其对铝的耐性。

**关键词** 铝胁迫;蓼科植物;草酸分泌;生理响应;耐性

**中图分类号** Q 945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2011)03-0342-06

随着环境酸化问题的日益严重,尤其是大气污染引起的酸沉降和生理酸性肥料的大量施用,土壤酸化进程加快,造成土壤中可溶性铝的含量显著增加<sup>[1]</sup>。铝毒是公认的制约酸性土壤上作物生长的主要障碍因子之一,其造成的农作物减产和森林退化已引起了世界各国科学家的广泛关注<sup>[2]</sup>。

近几十年来,国内外学者已开展了大量植物铝毒害及耐性机制的研究,但取材大多为农作物<sup>[3-5]</sup>,对野生植物的研究不多。野生植物与农作物相比,没有经过栽培驯化,可能保留了更多的耐性基因,这为更好地阐明植物多重耐铝机制或发现新的耐铝机制提供了良好的研究材料。其中,野生蓼科植物在自然界酸性铝毒土壤上分布极广且生长旺盛,因而必然有其独特的生理生态适应机制。You等<sup>[6]</sup>通过选取南方茶园酸性土壤上生长的蒿蓄、酸模叶蓼和北方耕地中性土壤上生长的本氏蓼研究发现,铝诱导的根系草酸分泌是蒿蓄、酸模叶蓼耐铝性强的主要原因。尽管蒿蓄和酸模叶蓼的耐铝性高于荞麦耐性品种,但其草酸分泌量却远低于荞麦,又表明蓼科植物可能还拥有其他的耐铝机制。对蓼科植物和油

菜根尖细胞壁对铝胁迫反应的比较研究发现,蓼科植物较油菜耐铝性强的重要原因在于其根尖细胞壁果胶、半纤维素1、半纤维素2含量较低且果胶甲基酯化程度较高等因素而降低了铝在根尖的积累<sup>[7]</sup>。然而,上述蓼科植物耐铝性研究仅集中在铝的外部排斥机制,而对铝胁迫下植物的内部解铝毒机制还不清楚。为此,本试验以井冈山红壤地区常见的3种野生蓼科植物酸模叶蓼、杠板归、辣蓼为材料,研究它们在不同浓度铝胁迫下根系有机酸分泌及相关生理指标的变化,明确及丰富蓼科植物耐铝机制,以为酸性土壤地区铝毒的高效、无污染生物治理提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium* L.)、杠板归(*Polygonum perfoliatum* L.)和辣蓼(*Polygonum hydropiper* L.),均采自井冈山大学校园酸性红壤。

收稿日期:2010-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(30760108)、江西省自然科学基金项目(2010GQN0122)和江西省教育厅科技项目(GJJ08419、GJJ09340)  
刘 强,博士,副教授,研究方向:植物营养逆境生理与分子生物学, E-mail: qliu2006@163.com

### 1.2 试验方法

将野外采摘的大小较一致的幼苗移栽到装有 1 L 通气的 1/5 Hoagland (pH 4.5) 营养液的塑料培养钵中恢复生长 (8 株/钵), 然后进行铝处理试验。试验在井冈山大学生命科学学院实验园内进行, 铝以分析纯的  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  形态提供, 营养液和所有处理液每 3 d 更换 1 次, 早晚各通气 2 h, 每个处理 3 次重复。

1) 根系有机酸分泌。采摘幼苗在 1/5 Hoagland 营养液 (pH 4.5) 中培养 18 d 后, 将营养液更换为 0.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液 (pH 4.5) 洗根 12 h, 然后植物根系再转移至含有不同  $\text{AlCl}_3$  浓度 (25、50、100、400  $\mu\text{mol/L}$ ) 的 0.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液 (pH 4.5), 处理 12 h 后收集根系分泌物。

2) 生理指标。采摘幼苗在 1/5 Hoagland 营养液 (pH 4.5) 中恢复生长 7 d 后用于铝处理试验。试验共设 5 个处理, 处理  $\text{AlCl}_3$  浓度分别为 0 (对照)、25、50、100、400  $\mu\text{mol/L}$ , 植物营养以 1/5 Hoagland 营养液供应, 所有处理液均用 1 mol/L HCl 调节 pH 为 4.5。  $\text{AlCl}_3$  处理 15 d 后, 取植株从上到下第 2、3 片完全展开叶测定丙二醛、脯氨酸含量、过氧化物酶和过氧化氢酶活性; 取根系测定根伸长率、铝含量和根系活力。

### 1.3 测定方法

根系有机酸分泌根据 Liu 等<sup>[8]</sup>的方法测定; 根长测定采用直接测量法, 相对根系伸长率定义为铝处理后主根伸长量除以对照的主根伸长量的百分比; 铝含量采用羊毛铬菁 R 法<sup>[9]</sup>; 丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[10]</sup>; 脯氨酸含量采用酸性茚三酮法<sup>[10]</sup>; 过氧化物酶活性采用愈创木酚法<sup>[10]</sup>; 过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法<sup>[10]</sup>; 根系活力采用 TTC 法<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据分析

数据采用 SPSS 软件利用最小显著差异 (LSD) 检验在  $P < 0.05$  水平上进行分析, 采用 KyPlot 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 铝对蓼科植物相对根系伸长率的影响

铝毒害最明显的症状是对根伸长的抑制<sup>[11]</sup>。从图 1 可以看出, 3 种蓼科植物相对根系伸长率都随着  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加呈依次递减的趋势。400  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  浓度下, 3 种蓼科植物根系相对伸长

率均显著下降, 表明该浓度的铝处理已严重影响到 3 种植物根系的生长。在  $\text{AlCl}_3$  浓度为 25 和 50  $\mu\text{mol/L}$  时酸模叶蓼和辣蓼根的生长并没有受到明显抑制, 反而比对照有所增长; 在  $\text{AlCl}_3$  浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$  时, 辣蓼根的伸长受到显著抑制, 但酸模叶蓼根的伸长比对照仍有所增加; 而杠板归随着  $\text{AlCl}_3$  浓度的递增, 其根的伸长受到显著抑制, 且呈递增趋势。这些结果表明, 低浓度的  $\text{AlCl}_3$  处理可在一定程度上促进酸模叶蓼和辣蓼根的伸长, 且 3 种蓼科植物中酸模叶蓼耐铝性最强, 杠板归最敏感。

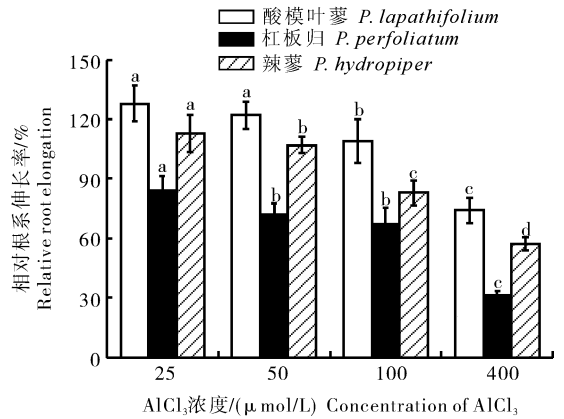


图 1 铝对 3 种蓼科植物相对根系伸长率的影响  
Fig. 1 Effects of aluminum on relative root elongation of 3 Polygonaceae plants

### 2.2 铝对蓼科植物根系铝积累的影响

由图 2 可以看出, 3 种蓼科植物根系积累的铝均随着  $\text{AlCl}_3$  处理浓度的增加而显著增加, 且在 400  $\mu\text{mol/L}$  时根系铝含量达到最大值。但在相同  $\text{AlCl}_3$  处理浓度下杠板归根系铝含量最高, 其次为辣蓼, 酸模叶蓼最低, 表明酸模叶蓼和辣蓼的耐铝性与其根系较低的铝含量有关。

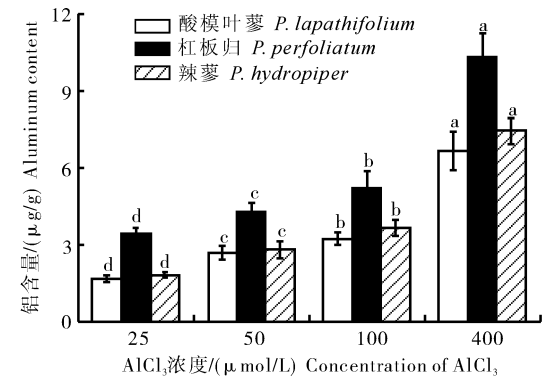


图 2 铝胁迫下 3 种蓼科植物根系铝的积累  
Fig. 2 Aluminum accumulation in roots of 3 Polygonaceae plants under aluminum stress

## 2.3 铝对蓼科植物根系草酸分泌的影响

铝诱导的根系有机酸分泌被广泛认为是植物重要的耐铝机制之一<sup>[12]</sup>。本研究也发现,铝胁迫下 3 种蓼科植物根系均能分泌草酸,但酸模叶蓼和辣蓼根系草酸分泌量在所有供试  $\text{AlCl}_3$  下都显著高于杠板归。此外,杠板归和辣蓼根系草酸分泌量均在  $50 \mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  下达到饱和,这与 Zheng 等<sup>[13]</sup> 研究荞麦根系草酸分泌量在一定  $\text{AlCl}_3$  下出现饱和的趋势相一致,而酸模叶蓼则随铝处理浓度的增加而增加,并在  $\text{AlCl}_3$  浓度为  $400 \mu\text{mol/L}$  时根系草酸分泌量达到最高(图 3)。

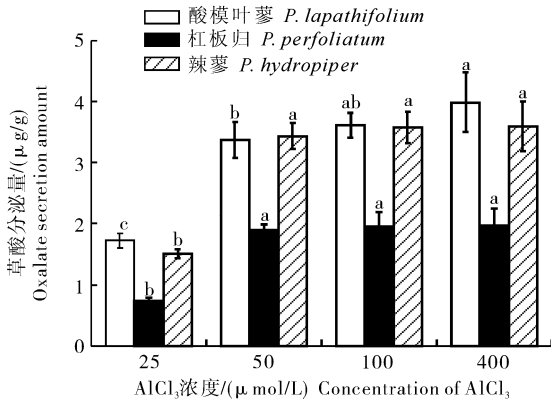


图 3 铝对 3 种蓼科植物根系草酸分泌的影响  
Fig. 3 Effects of aluminum on oxalate secretion from roots of 3 Polygonaceae plants

## 2.4 铝对蓼科植物根系活力的影响

作物根系不但是吸收水分和无机盐、而且也是多种物质合成和转化的器官,因此,根系活力的强弱将影响到整个植株的生长发育<sup>[14]</sup>。从图 4 可以看出,随  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加,酸模叶蓼和辣蓼根系活力

先升高后下降,且都在  $\text{AlCl}_3$  为  $50 \mu\text{mol/L}$  时达到最高,而杠板归则随  $\text{AlCl}_3$  浓度的升高根系活力不断下降,至  $400 \mu\text{mol/L}$  时,酸模叶蓼、辣蓼和杠板归根系活力较对照分别下降了 32.1%、39.1% 和 41.9%。

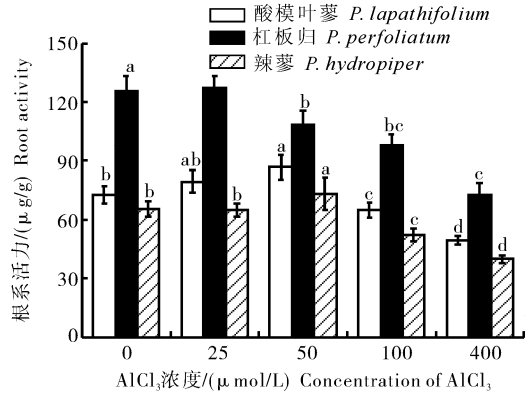


图 4 铝对 3 种蓼科植物根系活力的影响  
Fig. 4 Effects of aluminum on root activity of 3 Polygonaceae plants

## 2.5 铝对蓼科植物叶片生理指标的影响

1) 铝对蓼科植物叶片游离脯氨酸含量的影响。植物体内游离脯氨酸(Pro)含量的增加,是植物对不良环境的一种适应性反应。由表 1 可以看出,随着  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加,酸模叶蓼和辣蓼叶片 Pro 含量表现出先升高后下降的趋势;杠板归在低浓度( $25$ 、 $50 \mu\text{mol/L}$ )处理时叶片 Pro 含量与对照保持在同一水平,当  $\text{AlCl}_3$  为  $400 \mu\text{mol/L}$  时,叶片 Pro 含量较对照显著下降。此外,3 种植物叶片 Pro 含量均在  $100 \mu\text{mol/L}$  处理时达到最高,与对照相比差异显著,较对照分别升高 60.6%、25.5% 和 13.8%。

表 1  $\text{AlCl}_3$  处理对 3 种蓼科植物叶片脯氨酸含量的影响

Table 1 Effects of  $\text{AlCl}_3$  on leaf proline content of 3 Polygonaceae plants

植物种类 Plant species	$\text{AlCl}_3$ 浓度 / ( $\mu\text{mol/L}$ ) Concentration of $\text{AlCl}_3$				
	0	25	50	100	400
酸模叶蓼 <i>P. lapathifolium</i>	80.7 ± 7.28 c	103.5 ± 10.4 b	106.8 ± 10.5 b	129.6 ± 10.3 a	89.7 ± 4.91 c
杠板归 <i>P. perfoliatum</i>	75.9 ± 6.36 b	72.2 ± 5.56 b	75.5 ± 4.81 b	86.4 ± 7.15 a	62.1 ± 3.32 c
辣蓼 <i>P. hydropiper</i>	71.5 ± 7.11 b	82.1 ± 7.14 a	85.6 ± 6.56 a	89.7 ± 8.13 a	80.5 ± 5.73 ab

2) 铝对蓼科植物叶片丙二醛含量的影响。丙二醛(MDA)是植物细胞膜过氧化产物,是氧化伤害的生理指标。从表 2 可知,在低浓度( $25$ 、 $50 \mu\text{mol/L}$ )  $\text{AlCl}_3$  处理时,3 种植物叶片 MDA 含量均较对照减少,其中酸模叶蓼和辣蓼与对照相比差异显著。随着  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加,酸模叶蓼、辣蓼和杠板归叶片

MDA 含量显著增加,至  $400 \mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理时达到最高,较对照分别增加 33.1%、66.2% 和 65.9%。上述结果表明,低浓度的  $\text{AlCl}_3$  有利于保持 3 种蓼科植物叶片细胞膜的稳定性,而高浓度的  $\text{AlCl}_3$  将诱导细胞膜中的不饱和脂肪酸发生过氧化作用,导致 MDA 在叶片内累积,造成细胞膜伤害。

表 2 AlCl<sub>3</sub> 对 3 种蓼科植物叶片丙二醛含量的影响  
Table 2 Effects of AlCl<sub>3</sub> on leaf MDA content of 3 Polygonaceae plants nmol/g

植物种类 Plant species	AlCl <sub>3</sub> 浓度 / (μmol/L) Concentration of AlCl <sub>3</sub>				
	0	25	50	100	400
酸模叶蓼 <i>P. lapathifolium</i>	16.3 ± 1.29 b	12.8 ± 1.34 c	13.2 ± 1.58 c	18.4 ± 1.31 ab	21.7 ± 1.81 a
杠板归 <i>P. perfoliatum</i>	12.6 ± 1.16 c	11.9 ± 0.84 c	12.4 ± 0.78 c	17.5 ± 1.04 b	20.9 ± 1.61 a
辣蓼 <i>P. hydropi-per</i>	20.4 ± 2.13 c	16.7 ± 1.23 d	17.1 ± 1.78 d	25.4 ± 2.42 b	33.9 ± 2.71 a

3) 铝对蓼科植物叶片过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响。过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 是植物保护系统中非常重要的抗氧化酶, 它们通过协同作用可有效清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ·、·OH 等活性氧自由基, 从而维持细胞的正常代谢活动<sup>[15]</sup>。由表 3 可以看出, 随着 AlCl<sub>3</sub> 浓度从 0 增至 50

μmol/L, 酸模叶蓼和辣蓼叶片 POD 和 CAT 活性逐渐增加, 与对照相比差异均达到显著水平, 而杠板归叶片 POD 活性无显著变化且 CAT 活性在 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 时已显著下降。当 AlCl<sub>3</sub> 浓度进一步升高至 400 μmol/L 时, 3 种植物叶片 POD 和 CAT 活性均显著下降, 尤以杠板归下降幅度最为明显。

表 3 AlCl<sub>3</sub> 对 3 种蓼科植物叶片过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响  
Table 3 Effects of AlCl<sub>3</sub> on leaf POD and CAT activity of 3 Polygonaceae plants

植物种类 Plant species	项目 Item	AlCl <sub>3</sub> 浓度 / (μmol/L) Concentration of AlCl <sub>3</sub> / (μmol/L)				
		0	25	50	100	400
酸模叶蓼 <i>P. lapathifolium</i> 杠板归 <i>P. perfoliatum</i> 辣蓼 <i>P. hydropi-per</i>	过氧化物酶 / (U / (min · g)) Peroxidases	1.89 ± 0.19 b	2.23 ± 0.23 a	2.39 ± 0.15 a	1.79 ± 0.18 b	1.26 ± 0.13 c
		1.54 ± 0.13 a	1.62 ± 0.11 a	1.69 ± 0.21 a	1.36 ± 0.09 b	0.74 ± 0.06 c
		1.67 ± 0.18 b	1.78 ± 0.21 ab	1.84 ± 0.19 a	1.45 ± 0.21 c	0.83 ± 0.07 d
酸模叶蓼 <i>P. lapathifolium</i> 杠板归 <i>P. perfoliatum</i> 辣蓼 <i>P. hydropi-per</i>	过氧化氢酶 / (mg / (min · g)) Catalase	16.9 ± 1.23	21.6 ± 1.68 a	23.2 ± 1.99 a	18.7 ± 1.81 b	13.3 ± 1.03 d
		19.4 ± 1.13 a	20.5 ± 1.46 a	18.2 ± 0.98 b	16.3 ± 1.58 c	11.7 ± 1.18 d
		18.3 ± 1.84 b	19.5 ± 1.91 ab	20.1 ± 1.96 a	17.2 ± 1.22 b	12.1 ± 1.07 c

### 3 讨 论

铝胁迫下植物根系伸长受到抑制, 因而相对根系伸长速率常用于评价铝毒及植物耐铝性差异<sup>[16]</sup>。虽然铝对植物是一种毒性元素, 但前人<sup>[17-18]</sup>研究发现低浓度的铝可以促进植物的生长, 超过一定浓度则表现出抑制作用, 即铝对植物的毒害都有一个临界值。在临界值之下, 铝可以促进或刺激植物生长, 当铝浓度超过临界值就会对植物产生伤害。本试验发现, 杠板归、辣蓼和酸模叶蓼分别在 25、100 和 400 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理下相对根系伸长率较对照显著下降 (图 1), 表明 3 种蓼科植物中 AlCl<sub>3</sub> 浓度临界值以酸模叶蓼最高、其次是辣蓼, 杠板归最低, 也就是说酸模叶蓼耐铝性最强, 杠板归最敏感。

一般认为, 根系是铝积累的主要部位, 也是铝毒害的最初作用部位<sup>[11]</sup>。不同浓度 AlCl<sub>3</sub> 处理下, 酸模叶蓼和辣蓼的根系铝含量明显低于杠板归, 表明酸模叶蓼和辣蓼的耐铝性与根系对铝的排除有关。在铝的外部排斥机制中, 铝诱导根系有机酸分泌并通过螯合铝离子使之无毒化是一种被广泛认可的耐

铝机制<sup>[12]</sup>。本研究也发现, 铝胁迫下 3 种蓼科植物根系均能分泌草酸, 但酸模叶蓼和辣蓼草酸分泌量要显著高于杠板归, 进一步说明耐铝性强的酸模叶蓼和辣蓼是通过草酸的大量分泌将铝排除在体外, 从而保护根系免遭铝毒害。

根系活力是反映根系新陈代谢活动强弱的生理指标, 同时也是衡量根系逆境伤害程度的重要参数<sup>[14]</sup>。本试验中, 酸模叶蓼和辣蓼在低浓度 (25、50 μmol/L) AlCl<sub>3</sub> 处理时, 其根系活力不但没有降低, 反而在 50 μmol/L AlCl<sub>3</sub> 处理时与对照相比显著提高, 而杠板归则表现出逐级递减的趋势; 当 AlCl<sub>3</sub> 浓度进一步升高至 400 μmol/L 时, 3 种蓼科植物根系活力均显著下降, 但以杠板归和辣蓼的下降幅度最大 (图 4)。上述结果表明, 低浓度铝胁迫下酸模叶蓼和辣蓼可通过提高根系活力来抵御铝毒, 而高浓度铝胁迫下辣蓼和杠板归的根系活力较酸模叶蓼更易受到铝毒害的影响。

正常情况下, 细胞内活性氧自由基的产生和清除处于动态平衡, 活性氧自由基水平很低, 不会伤害细胞。但当植物遭受逆境胁迫时, 该平衡就被打破,



活性氧自由基在细胞内大量积累,极易导致膜脂过氧化作用、蛋白质变性等生理生化紊乱现象,影响植物的正常生长<sup>[19]</sup>。本研究中,3种蓼科植物叶片MDA含量在低浓度(25、50  $\mu\text{mol/L}$ )  $\text{AlCl}_3$  处理下均有所下降,而在400  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理时均显著升高,尤以辣蓼和杠板归升幅最为显著(表2),此时根系伸长也受到显著抑制(图1)。由于MDA是活性氧自由基攻击膜脂过氧化作用的主要降解产物<sup>[3]</sup>,表明铝胁迫下蓼科植物受到的伤害与细胞内活性氧自由基的积累有关,且低浓度铝胁迫下细胞内产生的活性氧自由基可被有效清除,而高浓度铝胁迫下自由基的产生大大高于其清除速率,从而使叶片MDA含量显著升高。

植物在长期的进化过程中相应形成了保护酶系统(如POD和CAT)和非酶保护系统(如Pro),这对于及时清除细胞内活性氧自由基,保护细胞膜的结构稳定性具有重要意义<sup>[15]</sup>。POD和CAT是植物在逆境胁迫下2种重要的保护酶,它们可有效分解细胞内的 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,降低其对膜脂的破坏。低浓度(25、50  $\mu\text{mol/L}$ )  $\text{AlCl}_3$  处理时,酸模叶蓼和辣蓼叶片POD和CAT活性不断升高而MDA含量不断下降(表2、表3),说明叶片POD和CAT活性的升高能够有效降低酸模叶蓼和辣蓼体内现活性氧自由基的大量积累。Pro可以专一性地分解细胞内 $\cdot\text{OH}$ 和 $^1\text{O}_2$ ,且可降低细胞渗透势,增加细胞的保水性,以保证细胞膜的正常功能<sup>[20]</sup>。本试验中,低浓度(25、50  $\mu\text{mol/L}$ )  $\text{AlCl}_3$  处理显著提高酸模叶蓼和辣蓼叶片Pro含量,而对杠板归影响较小;随着 $\text{AlCl}_3$  处理浓度(100、400  $\mu\text{mol/L}$ )的进一步增加,3种蓼科植物叶片Pro含量均表现出先升高后下降的趋势(表1),说明400  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  处理已对叶片产生伤害,使Pro合成受到影响,保护机制不能正常启动。

综上所述,3种野生蓼科植物中以酸模叶蓼耐铝性最强,其次为辣蓼,杠板归最敏感。相对杠板归而言,酸模叶蓼和辣蓼在低浓度(25、50  $\mu\text{mol/L}$ )  $\text{AlCl}_3$  胁迫下可同时通过外部排斥(铝诱导的根系草酸分泌)和内部解铝毒(提高根系活力、叶片的POD和CAT活性、Pro含量及降低MDA含量)2种机制来增强其对铝的耐性。

## 参 考 文 献

[1] ZHENG S J, YANG J L. Target sites of aluminum phytotoxicity

- [J]. *Biol Plant*, 2005, 49(3): 321-331.
- [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制的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2008, 27(1): 155-160.
- [3] 王伟, 杨野, 郭再华, 等. 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[J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29(6): 715-720.
- [4] 甄畅迪, 喻敏, 萧洪东, 等. 铝硼对豌豆原位根边缘细胞粘胶层厚度的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(1): 35-38.
- [5] LI X F, MA J F, MATSUMOTO H. Pattern of aluminum-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat[J]. *Plant Physiol*, 2000, 123(4): 1537-1544.
- [6] YOU J F, HE Y F, YANG J L, et al. A comparison of aluminum resistance among *Polygonum* species originating on strongly acidic and neutral soils[J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1): 143-151.
- [7] 刘强, 刘先贵, 郭智慧, 等. 蓼科植物和油菜根尖细胞壁对铝胁迫反应的比较研究[J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(2): 260-264.
- [8] LIU Q, HE L S, WANG Z Y, et al. Differential aluminum resistance and organic acid anions secretion in triticale[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2007, 38(15): 1991-2004.
- [9] 邱光葵, 庞权薇. 羊毛络菁R分光光度法测定土壤中的活性铝[J]. *分析测试学报*, 1989, 8(4): 68-71.
- [10] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [11] 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.
- [12] MA J F. Role of organic acid in detoxification of aluminum in higher plants[J]. *Plant Cell Physiol*, 2000, 41(4): 383-390.
- [13] ZHENG S J, YANG J L, HE Y F, et al. Immobilization of aluminum with phosphorous in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat[J]. *Plant Physiol*, 2005, 138(1): 297-303.
- [14] 黄益宗, 张文强, 招礼军, 等. Si对盐胁迫下水稻根系活力、丙二醛和营养元素含量的影响[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(6): 860-866.
- [15] 刘鹏, 杨玉爱. 铝、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. *植物学报*, 2000, 42(5): 461-466.
- [16] 刘强, 郑绍建, 林咸永. 植物适应铝毒胁迫的生理及分子生物学机理[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1641-1649.
- [17] 罗亮, 谢忠雷, 刘鹏, 等. 茶树对铝毒生理响应的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 305-308.
- [18] 周楠, 刘鹏, 徐根娣, 等. 四种常见杂草根系及根边缘细胞对铝胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6512-6518.
- [19] LIU Q, YANG J L, HE L S, et al. Effect of aluminum on cell wall, plasma membrane, antioxidants and root elongation in triticale[J]. *Biol Plant*, 2008, 52(1): 87-92.
- [20] 蒋明义, 郭少川, 张学明. 氧化胁迫下稻苗体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. *植物生理学报*, 1997, 23(4): 347-352.

## Physiological responses of three wild Polygonaceae plants to aluminum stress

LIU Qiang HE Gen-he LONG Wan-wan LIU Zheng-wei

College of Life Science, Jinggangshan University, Jiangxi Province, Ji'an 343009, China

**Abstract** Three wild polygonaceae plants, *Polygonum lapathifolium*, *Polygonum perfoliatum* and *Polygonum hydropiper*, were used to study the physiological responses under five aluminum ( $\text{AlCl}_3$ ) concentrations (0, 25, 50, 100, 400  $\mu\text{mol/L}$ ) with solution culture method. It was found that relative root elongation was decreased with the increase of  $\text{AlCl}_3$  concentrations in polygonaceae plants, but the magnitude of decrease was higher in *Polygonum perfoliatum* than that in *Polygonum lapathifolium* and *Polygonum hydropiper*, suggesting that *Polygonum lapathifolium* and *Polygonum hydropiper* were much more tolerant to Al than *Polygonum perfoliatum* was. Al contents and oxalate secretion in roots of three polygonaceae plants were increased with increase of  $\text{AlCl}_3$  concentrations and oxalate secretion showed that a saturating phenomenon at approximately 50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  in *Polygonum hydropiper* and *Polygonum perfoliatum*, while Al contents were significantly lower and the amount of oxalate secretion significantly higher in *Polygonum lapathifolium* and *Polygonum hydropiper* than that in *Polygonum perfoliatum*. When compared with the control, high  $\text{AlCl}_3$  treatment (400  $\mu\text{mol/L}$ ) significantly decreased root activity, leaf activities of peroxides (POD) and catalase (CAT), increased malondialdehyde (MDA) content of three polygonaceae plants, especially in *Polygonum perfoliatum*. In the low concentration of  $\text{AlCl}_3$  treatments (25-50  $\mu\text{mol/L}$ ), root activity in *Polygonum lapathifolium* and *Polygonum hydropiper* showed an increasing trend, and leaf proline content, activities of POD and CAT significantly increased, MDA content significantly decreased compared with the control. These findings suggested that *Polygonum lapathifolium* and *Polygonum hydropiper* could enhance the tolerance to Al stress by increasing Al-induced oxalate secretion and maintaining higher proline content, higher activities of POD and CAT, lower MDA content under the low  $\text{AlCl}_3$  concentration.

**Key words** aluminum stress; Polygonaceae plants; oxalate secretion; physiological response; tolerance

(责任编辑:张志钰)