

铝胁迫对蓼科植物生长和光合、蒸腾特性的影响

刘 强, 尹 丽, 龙婉婉, 肖宜安

(井冈山大学 生命科学学院, 江西 吉安 343009)

摘要: 采用水培试验, 设置5种铝处理浓度, 研究了铝对3种蓼科植物酸模叶蓼、杠板归和辣蓼叶片光合、蒸腾和叶绿素荧光参数的影响。结果表明, 高铝处理($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)显著抑制3种蓼科植物地上部和根系生长, 并且导致3种蓼科植物叶片叶绿素含量、Chla/Chlb、净光合速率(P_n)、水分利用效率(WUE)、PSII光合电子传递量子效率(φ_{PSII})和光化学猝灭系数(qP)显著下降。中低铝处理($25 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)时, 与对照相比, 酸模叶蓼生物量显著增加, 杠板归显著减少, 辣蓼先增加后减少。其中, 酸模叶蓼和辣蓼叶绿素含量、Chla/Chlb、 P_n 、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、 qP 均未发生显著变化, 但辣蓼WUE、 φ_{PSII} 和非光化学猝灭系数(NPQ)显著下降, 酸模叶蓼无显著变化; 而杠板归除 C_i 、 F_v/F_m 外, 其余叶片光合、蒸腾及叶绿素荧光参数均出现显著下降。上述结果表明, 酸模叶蓼在中低铝处理条件下可通过保持较高的叶绿素含量、Chla/Chlb、WUE、 P_n 、PSII反应中心光化学反应效率以及提高非辐射能量耗散来增强其对铝的耐受性。

关键词: 铝胁迫; 蓼科植物; 光合; 蒸腾; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2011)02-0227-06

Effects of aluminum stress on growth and characters of photosynthesis and transpiration in polygonaceae plants

LIU Qiang, YIN Li, LONG Wan-Wan, XIAO Yi-An

(College of Life Sciences, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China)

Abstract: Three polygonaceae plants (*Polygonum lapathiifolium*, *P. perfoliatum* and *P. hydropiper*) were used to study the effects of five aluminum (Al) concentrations ($0, 25, 50, 100, 400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) on leaf photosynthesis, transpiration and chlorophyll fluorescence characteristics with the solution culture method. The results showed that the high Al treatment ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) significantly decreased the growth of aboveground and root system, the leaf chlorophyll content, Chla/Chlb, net photosynthetic rate (P_n), water use efficiency (WUE), quantum yield of electron transport at PSII (φ_{PSII}) and coefficient of photochemical quenching (qP) of three polygonaceae plants. In the low and medium concentrations of Al treatments ($25 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), the biomass was significantly promoted in *P. lapathiifolium*, significantly reduced in *P. perfoliatum*, promoted firstly and then reduced again in *P. hydropiper* compared to the control. Meanwhile, the chlorophyll content, Chla/Chlb, P_n , transpiration rate (Tr), intercellular CO_2 concentration (C_i), maximal photochemical efficiency (F_v/F_m) and qP were not significantly changed in *P. lapathiifolium* and *P. hydropiper*, but WUE, φ_{PSII} and coefficient of photochemical non-quenching (NPQ) were significantly decreased in

收稿日期: 2010-09-16 修回日期: 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(30760108); 江西省自然科学基金(2010GQN0122); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ08419)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(30760108); Natural Science Foundation of Jiangxi(2010GQN0122); Scientific Program of Education Department of Jiangxi Province(GJJ08419)]

作者简介: 刘强(1980-), 男, 江西抚州人, 博士, 副教授, 主要从事植物生理生态的研究, (E-mail) qliu2006@163.com.

P. hydropiper only. However, in *P. perfoliatum*, leaf photosynthesis, transpiration and chlorophyll fluorescence characteristics other than C_i , F_v/F_m , were decreased remarkably. These results indicated that *P. lapathifolium* could enhance the tolerance to Al stress under low and medium Al treatments by maintaining steady chlorophyll content, $Chla/Chlb$, WUE , P_n , photochemical reaction efficiency at PSII and increasing non-radiative dissipation of absorbed excitation energy through NPQ .

Key words: aluminum stress; polygonaceae plants; photosynthesis; transpiration; chlorophyll fluorescence characteristics

随着全球范围内酸沉降的日益严重以及酸性肥料在农业中的大量施用,土壤酸化大大加速,造成土壤中可溶性铝的含量显著增加。在热带和亚热带地区,铝毒已成为酸性土壤中限制作物生长的主要因素之一,因此研究植物铝毒害及其抗性机理,筛选抗性较强的植物或通过基因工程手段提高植物抗铝性具有越来越重要的理论意义和现实意义(刘强等, 2004)。

国内外对植物铝毒害及抗铝机理开展了大量研究,但主要集中在种子萌发(孙冬花等, 2006)、根系分泌物(Liu等, 2007)、细胞壁组份变化(Liu等, 2008)和质膜生理活性(马丽等, 2009)等方面,而对铝胁迫与植物叶片光合作用及叶绿素荧光参数之间的关系研究不多。众所周知,光合作用是决定作物产量最重要的因素之一,且叶绿素荧光猝灭分析技术又可无损检测环境胁迫是否对植物光合机构造成伤害(Elsheery等, 2008),因此研究铝胁迫对植物叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响显得尤为必要。近几年来,国内学者已陆续在玉米(许玉凤等, 2005)、大豆(应小芳等, 2005)、山茶属(顾艳红等, 2006)和油菜(刘强等, 2008)等植物上开展了部分该类研究,但较少将铝胁迫下植物叶片光合、蒸腾和叶绿素荧光参数的变化结合起来,且取材大多为农作物,而以野生草本植物为试验材料开展上述研究还未见报道。蓼科植物在南方酸性土壤上广泛分布生长,抗逆性强。You等(2005)对抗铝性差异显著的3种蓼科植物蒺藜、酸模叶蓼和本氏蓼研究发现,铝诱导的根系草酸分泌是蓼科植物的重要抗铝生理机制。然而尽管生长于强酸性土壤上的蒺藜和酸模叶蓼的抗铝性要高于抗性的荞麦品种,但其草酸分泌量和强度却远不及荞麦,又表明草酸分泌不是蓼科植物高抗铝性的唯一机制。蔡妙珍等(2005)报道,铝胁迫下4种蓼科植物荞麦、金荞麦、虎杖、无辣蓼细胞膜透性发生显著变化,并认为这是铝引发其氧化胁迫的一种受损表现。本文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叶片光合、蒸腾和叶绿素荧光参数的变化,为揭示铝毒与植物光合特性之间的关系提供理论基础,进一步丰富蓼科植物铝毒害及抗铝机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

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

1.2 试验设计

将野外采摘的大小较一致的上述幼苗移栽到装有1 L通气的1/5 Hoagland营养液的塑料盆中(6株/盆),恢复生长1周后用于铝处理。试验在井冈山大学生命科学学院实验园内进行,采用水培法,共设5个处理,铝以分析纯的 $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 形态提供,处理浓度分别为0(对照)、25、50、100、400 $\mu mol \cdot L^{-1}$,植物营养以1/5 Hoagland营养液供应。所有处理液均用1 mol $\cdot L^{-1}$ HCl调节pH为4.5,早晚各通气2 h,每3 d更换一次处理液,每个处理重复3次。铝处理15 d后,取植株从上到下第2、3片完全展开叶测定叶绿素含量、叶片光合、蒸腾和叶绿素荧光参数,随后采收,分别测定植株地上部和地下部鲜重。

1.3 测定方法

叶片叶绿素含量测定采用丙酮乙醇混合浸提法(唐延林等, 2004);用便携式Ciras-1型光合仪(英国PP-systems公司)在600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 光强下测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(Tr)等叶片生理参数,并计算水分利用效率 $WUE(P_n/Tr)$;用便携式FMS-2型荧光仪(英国Hansatech公司)测定PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII光合电子传递量子效率(ϕ_{PSII})、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)等叶绿素荧光参数,测定方法和计算方法分别参照胡文海等(2008)和Demmig-Adams等(1996)的方法。

制图采用 KyPlot 软件绘制, 数据采用 SPSS 软件根据最小显著差数法 (LSD 法) 进行差异显著性 ($P < 0.05$) 分析。

2 结果与分析

2.1 铝对蓼科植物地上部和根系生长的影响

图 1 显示了 3 种蓼科植物地上部和根系生物量随外界铝处理浓度的变化。从图中可以看出, 3 种

蓼科植物在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理下地上部和根系生物量均显著下降, 表明该浓度的铝处理已使各类植物处于胁迫状态。而在其它处理条件下, 随铝处理浓度的升高 ($0 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 酸模叶蓼地上部和根系生物量显著增加, 杠板归显著下降, 而辣蓼则先增加后减少, 尤以根系变化更为明显, 说明低浓度的铝处理可在一定程度上促进酸模叶蓼和辣蓼的生长。石贵玉 (2004) 和王芳等 (2006) 用不同浓度铝处理水稻和荞麦幼苗, 也得到类似结果。

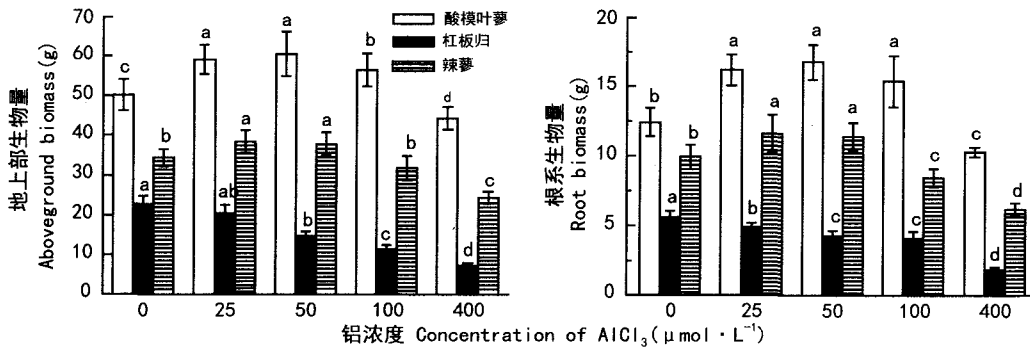


图 1 铝对 3 种蓼科植物地上部和地下部生物量的影响

Fig. 1 Effects of aluminum on aboveground and underground biomass of 3 Polygonaceae plants

不同字母表示同一植物各处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

Data with different letters within a plant indicated significant differences at 0.05 level

表 1 铝对 3 种蓼科植物叶片叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of aluminum on chlorophyll contents in leaves of 3 Polygonaceae plants

叶绿素 Chl ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	植物种类 Plant species	铝浓度 Concentration of AlCl_3 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)				
		0	25	50	100	400
叶绿素 a Chla	酸模叶蓼	$1.98 \pm 0.14\text{a}$	$1.96 \pm 0.12\text{a}$	$1.93 \pm 0.21\text{a}$	$1.83 \pm 0.20\text{a}$	$1.59 \pm 0.15\text{b}$
	杠板归	$0.98 \pm 0.08\text{a}$	$0.93 \pm 0.06\text{a}$	$0.82 \pm 0.08\text{b}$	$0.79 \pm 0.04\text{bc}$	$0.66 \pm 0.04\text{c}$
	辣蓼	$1.51 \pm 0.23\text{a}$	$1.46 \pm 0.12\text{a}$	$1.44 \pm 0.12\text{a}$	$1.41 \pm 0.17\text{a}$	$1.31 \pm 0.13\text{b}$
叶绿素 b Chlb	酸模叶蓼	$0.72 \pm 0.05\text{a}$	$0.71 \pm 0.03\text{a}$	$0.71 \pm 0.05\text{a}$	$0.69 \pm 0.07\text{a}$	$0.63 \pm 0.04\text{b}$
	杠板归	$0.45 \pm 0.01\text{a}$	$0.45 \pm 0.03\text{a}$	$0.44 \pm 0.02\text{a}$	$0.41 \pm 0.02\text{ab}$	$0.39 \pm 0.02\text{b}$
	辣蓼	$0.56 \pm 0.03\text{a}$	$0.55 \pm 0.02\text{a}$	$0.56 \pm 0.03\text{a}$	$0.54 \pm 0.03\text{a}$	$0.55 \pm 0.01\text{a}$
总叶绿素 Total chl	酸模叶蓼	$2.70 \pm 0.19\text{a}$	$2.68 \pm 0.16\text{a}$	$2.64 \pm 0.26\text{a}$	$2.52 \pm 0.27\text{a}$	$2.22 \pm 0.19\text{b}$
	杠板归	$1.44 \pm 0.10\text{a}$	$1.38 \pm 0.08\text{a}$	$1.26 \pm 0.09\text{ab}$	$1.20 \pm 0.06\text{b}$	$1.05 \pm 0.05\text{c}$
	辣蓼	$2.07 \pm 0.26\text{a}$	$2.01 \pm 0.14\text{a}$	$2.00 \pm 0.15\text{a}$	$1.95 \pm 0.20\text{ab}$	$1.86 \pm 0.14\text{b}$
叶绿素 a/b Chla/Chlb	酸模叶蓼	$2.77 \pm 0.21\text{a}$	$2.75 \pm 0.15\text{a}$	$2.72 \pm 0.24\text{a}$	$2.66 \pm 0.21\text{a}$	$2.51 \pm 0.18\text{b}$
	杠板归	$2.17 \pm 0.10\text{a}$	$2.06 \pm 0.12\text{a}$	$1.89 \pm 0.14\text{b}$	$1.81 \pm 0.07\text{b}$	$1.72 \pm 0.05\text{c}$
	辣蓼	$2.68 \pm 0.26\text{a}$	$2.67 \pm 0.18\text{a}$	$2.59 \pm 0.15\text{a}$	$2.63 \pm 0.20\text{a}$	$2.38 \pm 0.15\text{b}$

注: 同一行数据, 右侧不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: In the same row, different letters indicated significant differences at 0.05 level. The same below.

2.2 铝对蓼科植物叶片叶绿素含量的影响

从表 1 可以看出, 随铝处理浓度从 0 升至 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 种蓼科植物叶片叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb) 和总叶绿素含量出现了不同程度的下降。其中酸模叶蓼在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时,

Chla、Chlb 和总叶绿素含量与对照相比, 差异达到显著水平; 杠板归 Chla、总叶绿素含量和 Chlb 分别在 50、100、 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时, 与对照相比差异显著; 而辣蓼 Chla 和总叶绿素含量在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时显著下降, Chlb 在各铝处理条件下没

有显著性差异。上述试验结果说明,低浓度铝处理对蓼科植物叶片叶绿素含量影响不大,但高浓度铝处理显著降低蓼科植物叶片叶绿素含量,尤以杠板归下降幅度最大。此外,Chla下降幅度总体较Chlb大,表现为Chla/Chlb随铝处理浓度的升高而不断下降(表1)。这与以往在研究玉米(许玉凤等,2005)和大豆(俞慧娜等,2007)幼苗遭受铝胁迫时取得的结果相一致。

2.3 铝对蓼科植物叶片光合特性的影响

由表2可以看出,3种蓼科植物在 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理条件下叶片净光合速率(P_n)显著下降,胞

间 CO_2 浓度(C_i)变化不明显,气孔导度(G_s)只有杠板归显著下降。当铝处理浓度从0升高至 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,酸模叶蓼和辣蓼叶片 P_n 无显著变化,而杠板归在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理时开始显著下降;酸模叶蓼 G_s 无显著变化,杠板归在 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理时显著下降,辣蓼则先升高后下降;酸模叶蓼和辣蓼 C_i 无显著变化,杠板归则先下降后升高(表2)。这些结果表明,中低浓度铝处理($25\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对酸模叶蓼和辣蓼叶片 P_n 无明显影响,而高浓度铝处理($400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)则显著降低了3种蓼科植物叶片 P_n 。

表2 铝对3种蓼科植物叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of aluminum on photosynthetic parameters in leaves of 3 Polygonaceae plants

光合特性 Photosynthetic parameters	植物种类 Plant species	铝浓度 Concentration of AlCl_3 ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)				
		0	25	50	100	400
净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	酸模叶蓼	20.8±2.21a	21.1±1.37a	20.4±1.91a	19.8±1.67a	17.3±1.12b
	杠板归	13.7±1.12a	10.4±0.96b	9.89±0.75b	8.64±0.47c	6.84±0.54d
	辣蓼	16.5±1.01a	16.9±1.25a	17.8±0.85a	16.4±1.34a	13.3±1.11b
气孔导度 G_s ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	酸模叶蓼	318.9±22.1a	321.6±19.4a	313.6±16.7a	302.9±16.2a	341.7±27.4a
	杠板归	376.7±28.6a	323.1±31.7ab	354.6±27.6a	299.2±15.2b	231.9±11.9c
	辣蓼	303.4±17.9c	356.7±28.4b	383.4±34.6a	314.2±14.9c	316.5±23.3c
胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	酸模叶蓼	239.1±12.7a	243.4±21.4a	256.3±14.4a	245.3±27.3a	246.2±23.9a
	杠板归	267.1±12.1a	236.2±9.87b	268.5±16.4a	241.7±17.5ab	250.3±14.1ab
	辣蓼	247.4±26.3a	252.6±31.2a	258.4±13.8a	245.9±11.5a	252.1±23.1a

表3 铝对3种蓼科植物叶片蒸腾速率和水分利用效率的影响

Table 3 Effects of aluminum on transpiration rate and water use efficiency in leaves of 3 Polygonaceae plants

项目 Item	植物种类 Plant species	铝浓度 Concentration of AlCl_3 ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)				
		0	25	50	100	400
蒸腾速率 Tr ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	酸模叶蓼	7.01±0.44a	6.94±0.31a	7.03±0.45a	6.92±0.68a	7.45±0.84a
	杠板归	6.76±0.34a	6.21±0.46a	6.17±0.82a	5.72±0.76b	4.69±0.31c
	辣蓼	5.10±0.47b	5.36±0.59b	5.89±0.44ab	5.82±0.71ab	6.35±0.68a
水分利用效率 WUE ($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	酸模叶蓼	2.97±0.17a	3.04±0.24a	2.90±0.19a	2.86±0.23a	2.32±0.12b
	杠板归	2.03±0.11a	1.67±0.13b	1.60±0.08b	1.51±0.12bc	1.46±0.07c
	辣蓼	3.24±0.24a	3.25±0.32a	3.02±0.24ab	2.82±0.21b	2.09±0.15c

2.4 铝对蓼科植物叶片蒸腾速率和水分利用效率的影响

由表3可知, $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下3种蓼科植物水分利用效率(WUE)均显著下降,蒸腾速率(Tr)只有杠板归显著下降。而当铝处理浓度从0增至 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,酸模叶蓼 WUE 无显著变化,杠板归和辣蓼 WUE 分别在 25 、 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理时开始显著下降;酸模叶蓼和辣蓼 Tr 变化不明显,杠板归在 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理时显著下降(表3),表明铝处理降低了3种蓼科植物 WUE ,其中又以酸模叶蓼降低幅度最小。

2.5 铝对蓼科植物叶片叶绿素荧光参数的影响

由表4可以看出,3种蓼科植物PSII最大光化学效率(F_v/F_m)在所有铝处理间没有显著性差异,说明3种蓼科植物叶片在所有供试铝处理浓度下没有产生光抑制。 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理条件下,3种蓼科植物PSII光合电子传递量子效率(ϕPSII)和光化学猝灭系数(qP)均显著下降,表明高浓度铝胁迫在一定程度上降低了PSII反应中心光化学反应效率及其开放程度。而在其它铝处理下,随铝处理浓度从0增至 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,酸模叶蓼 ϕPSII 和 qP 各铝处理间没有显著性差异,杠板归 ϕPSII 和 qP

分别在 50、100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时开始显著下降, 而辣蓼 φPSII 和 qP 分别在 100、400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时, 与对照相比开始显著下降。酸模叶蓼非光化学猝灭系数 (NPQ) 在所有铝处理间无明显变化, 杠

板归和辣蓼 NPQ 随铝处理浓度的升高而逐渐降低, 并均在 $\geq 50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时与对照相比差异显著 (表 4), 说明杠板归和辣蓼在铝胁迫下 PSII 的热耗散能力受到影响, 即其保护自身光合机构免

表 4 铝对 3 种蓼科植物叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of aluminum on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of 3 Polygonaceae plants

项目 Item	植物种类 Plant species	铝浓度 Concentration of AlCl_3 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)				
		0	25	50	100	400
PSII 最大 光化学效率	酸模叶蓼	0.837±0.021a	0.833±0.012a	0.831±0.026a	0.829±0.009a	0.833±0.011a
F_v/F_m	杠板归	0.841±0.013a	0.843±0.008a	0.844±0.007a	0.822±0.023a	0.828±0.034a
PSII 光合电子 传递量子效率	辣蓼	0.851±0.037a	0.849±0.046a	0.853±0.062a	0.848±0.018a	0.828±0.015a
φPSII	酸模叶蓼	0.768±0.034a	0.736±0.081a	0.757±0.016a	0.754±0.025a	0.658±0.031b
光化学 猝灭系数	杠板归	0.734±0.051a	0.702±0.077a	0.630±0.033b	0.563±0.042c	0.402±0.015d
qP	辣蓼	0.639±0.023a	0.634±0.054a	0.631±0.041a	0.554±0.053b	0.461±0.018c
非光化学 猝灭系数	酸模叶蓼	0.986±0.048a	0.929±0.041a	0.943±0.035a	0.996±0.126a	0.943±0.012a
NPQ	杠板归	0.969±0.016a	0.916±0.076a	0.971±0.078a	0.865±0.034b	0.779±0.064c
	辣蓼	0.961±0.034a	0.963±0.116a	0.978±0.077a	0.874±0.075ab	0.756±0.036b
	酸模叶蓼	0.311±0.012a	0.321±0.017a	0.322±0.008a	0.331±0.041a	0.337±0.023a
	杠板归	0.276±0.031a	0.274±0.015a	0.223±0.006b	0.214±0.008b	0.204±0.261b
	辣蓼	0.414±0.029a	0.398±0.042a	0.357±0.047b	0.341±0.039b	0.289±0.021c

遭破坏的能力较差。

3 讨论

虽然铝对植物是一种毒性元素, 但一些研究发现低浓度铝可以促进多种植物的生长, 超过一定浓度则表现出抑制作用 (石贵玉, 2004; 罗亮等, 2006; 李朝苏等, 2006), 即铝毒对植物的影响都有一个临界值。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。本试验结果发现, 酸模叶蓼在 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理下根系和地上部生物量显著下降, 而杠板归和辣蓼分别在 25、100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理下根系生长受到显著抑制 (图 1), 表明 3 种蓼科植物铝的临界值排列顺序为: 酸模叶蓼 > 辣蓼 > 杠板归, 即酸模叶蓼抗铝性最强, 杠板归对铝最敏感。

铝对植物叶片叶绿素含量和光合速率的影响是铝对植物生长影响的重要生理原因。本研究结果表明, 除杠板归外, 中低浓度铝处理 (25~100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 对酸模叶蓼和辣蓼叶片叶绿素含量和光合速率影响不明显, 而高浓度铝处理 (400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 3 种蓼科植物上述生理指标均显著下降 (表 1, 表 2), 这与应小芳等 (2005) 研究大豆受铝胁迫时叶片叶绿素含量和光合速率显著降低的结果一致。叶绿素是光合作用过程中最重要的色素, 在植物的光合作用中

对光能的吸收、传递和转化起着极为重要的作用, 其含量下降势必对光合速率产生显著影响。至于铝导致蓼科植物叶片叶绿素含量降低的原因可能与铝在根质外体和植物体内竞争取代 Mg^{2+} , 使植物缺镁, 从而抑制叶绿素的合成有关 (应小芳等, 2005), 但具体机制有待进一步研究。此外, 高浓度铝处理下叶片 Chla/Chlb 显著下降在一定程度上也会降低 3 种蓼科植物叶片的光合速率。 Chla/Chlb 的比值代表着类囊体的垛叠程度, 类囊体的垛叠程度越小, 表明其转化光能的能力越弱或光抑制越强 (郭书奎等, 2001), 这都将在一定程度上抑制了蓼科植物光合作用的正常进行。

在分析气孔对净光合速率的影响时, 只有当胞间 CO_2 浓度 (C_i) 降低和气孔导度减小时, 才可认为光合速率的降低是由于气孔限制所引起的; 相反, 如果光合速率的降低伴随着 C_i 浓度的提高, 那么光合作用的主要限制因素可能是非气孔因素, 即叶肉细胞光合活性下降 (许大全, 2002)。本试验中, 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理显著抑制 3 种蓼科植物 P_n 但 C_i 并没有发生显著变化, 表明高铝浓度的影响可能是由于非气孔因素引起的。植物水分利用效率 (WUE) 表示消耗单位水量所能固定的 CO_2 量, 是衡量植物生长的重要指标之一。杠板归、辣蓼和酸模叶蓼分别在铝处理浓度为 25、100、400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水分利用效率和根系生物量开始显著下降, 表明

铝胁迫降低了3种蓼科植物利用水分的能力,从而对植物根系的生长产生了明显不利的影响,尤以杠板归所受影响最大。

叶绿素荧光参数可灵敏地探测植物叶片光合机构的运转状况,其中 F_v/F_m 可用于表征 PSII 原初光能转换效率的高低(Krause & Weis, 1991)。本试验中3种蓼科植物 F_v/F_m 在不同铝浓度处理间无显著差异,表明铝胁迫没有导致3种蓼科植物产生光抑制,这与俞慧娜等(2007)研究铝胁迫下大豆上取得的结果不一致,原因可能与野生蓼科植物抗铝性、活性氧清除系统或天线色素热耗散能力高于大豆有关,当然这还需进一步研究。PSII 光合电子传递量子效率(ϕ PSII)反映了 PSII 反应中心的光合电子传递速率(Demmig-Adams 等, 1996)。本试验发现杠板归和辣蓼分别在 50 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理时, ϕ PSII 开始显著下降,而酸模叶蓼只在高浓度铝处理($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)时, ϕ PSII 才有显著变化,这表明铝胁迫抑制了蓼科植物光合电子传递速率,并且对杠板归的抑制程度最大。光化学猝灭系数(qP)在一定程度上反映了 PSII 反应中心的开放程度(Demmig-Adams 等, 1996)。本研究发现, $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理显著降低了杠板归和辣蓼 qP , 而对酸模叶蓼无明显影响,说明高浓度铝胁迫导致了杠板归和辣蓼 PSII 的部分关闭。 NPQ 是光合过程中的能量耗散指标,植物的一种自我保护机制,保护光合机构(Quilliam 等, 2006)。本研究中,酸模叶蓼 NPQ 随铝处理浓度的升高而逐渐增强,而杠板归和辣蓼呈现逐渐降低的趋势表明酸模叶蓼具有较强的保护自身光合机构不受铝胁迫破坏的能力,而杠板归和辣蓼则较弱。

综上所述,高浓度铝胁迫下3种蓼科植物光合作用下降的主要原因可能为非气孔限制。3种野生蓼科植物中酸模叶蓼抗铝性最强,杠板归最敏感。相对杠板归而言,酸模叶蓼可通过①保持较高的水分利用效率,②提高天线色素热耗散能力保护光合机构免受伤害,③保持相对较高的叶绿素含量、 $Chla/Chlb$ 及 PSII 反应中心光化学反应效率,从而维持相对较高的光合作用等途径来减轻铝胁迫对植物的伤害。

参考文献:

许大全. 2002. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社:9-19
Cao MZ(蔡妙珍), Liu P(刘鹏), Xu GD(徐根娣), et al. 2005.

- Comparism of plasma membrane response to Al^{3+} stress between polygonaceae plants and gramineae plants(蓼科、禾本科植物细胞膜对铝胁迫反应的比较研究)[J]. *J Soil Wat Conser* (水土保持学报), **19**(6):122-125
- Demming-Adams B, Adams WW, Barker DH, et al. 1996. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation[J]. *Physiol Plant*, **98**(2):253-264
- Elsheery NI, Wilske B, Cao KF(曹坤芳). 2008. The effect of night chilling on gas exchange and chlorophyll fluorescence of two mango cultivars growing under two Irradiances[J]. *Acta Bot Yunnan*(云南植物研究), **30**(4):447-456
- Gu YH(顾艳红), Liu P(刘鹏), Xu GD(徐根娣), et al. 2006. Aluminum toxicity in photosynthetic characters of *Camellia* leaf(铝胁迫对山茶属植物光合特性的影响)[J]. *J Zhejiang For Sci Tech* (浙江林业科技), **26**(4):15-18
- Guo SK(郭书奎), Zhao KF(赵可夫). 2001. The possible mechanisms of NaCl inhibit photosynthesis of maize seedlings(NaCl胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理)[J]. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报), **27**(6):461-466
- Hu WH(胡文海), Zeng JJ(曾建军), Cao YL(曹玉林), et al. 2008. Effects of drought stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of two pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties(干旱胁迫对两种辣椒叶片气体交换和叶绿素荧光特性的影响)[J]. *Agric Res Arid Areas*(干旱地区农业研究), **26**(5):156-159
- Krause GH, Weis E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, **42**:313-349
- Li CS(李朝苏), Liu P(刘鹏), Xu GD(徐根娣), et al. 2006. Effect of seed soaking with aluminum on seed germination and seedling physiology of buckwheat(铝浸种对荞麦种子萌发和幼苗生理的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **26**(6):2 041-2 047
- Liu Q, He LS, Wang ZY, et al. 2007. Differential aluminum resistance and organic acid anions secretion in triticale[J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, **38**(15):1 991-2 004
- Liu Q(刘强), Li XH(李晓红), Li Y(李蕴), et al. 2008. Effects of aluminum stress on photosynthetic characters of rape leaves(铝胁迫对油菜叶片光合特性的影响)[J]. *J Jinggangshan Univ*(井冈山学院学报), **29**(2):14-16
- Liu Q, Yang JL, He LS, et al. 2008. Effect of aluminum on cell wall, plasma membrane, antioxidants and root elongation in triticale[J]. *Biol Plant*, **52**(1):87-92
- Liu Q(刘强), Zheng SJ(郑绍建), Lin XY(林咸永). 2004. Plant physiological and molecular biological mechanism in response to aluminium toxicity(植物适应铝毒胁迫的生理及分子生物学机理)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **15**(9):1 641-1 649
- Luo L(罗亮), Xie ZL(谢忠雷), Liu P(刘鹏), et al. 2006. Physiological response of tea plant to aluminum toxicity(茶树对铝毒生理响应的研究)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **25**(2):305-308
- Ma L(马丽), Yang SC(杨盛昌). 2009. Effect of aluminium on protection enzyme system and praline of *Brugiera sexangla* seedlings(铝胁迫对海莲幼苗保护酶系统及脯氨酸含量的影

(下转第 284 页 Continue on page 284)

为:新叶>二年生叶>一年生叶。其它种类金花茶叶总黄酮含量次序为:新叶>一年生叶>二年生叶。平果金花茶和柠檬黄金花茶叶中黄酮含量较高,具有潜在的研究与开发价值。

参考文献:

- 张宁,马建芳. 2003. 葛根素的临床应用[J]. 海峡药学,15(5): 93-95
- 张宏达,任善湘. 1998. 中国植物志(第49卷第3分册)[M]. 北京:科学出版社:101-112
- 陈全斌,湛志华,张巧云,等. 2005. 金花茶叶中黄酮甙元的分离提纯及其表征[J]. 广西热带农业,101(6):10-11
- 黄永林,文永新,刘金磊,等. 2009. 5种金花茶中总黄酮含量的测定[J]. 中国中医药科技,16(1):38-39
- 杨宏,秦小明,宁恩创. 2005. 金花茶浓缩饮液加工工艺研究[J]. 广西热带农业,98(3):38-39
- 梁盛业. 1993. 金花茶[M]. 北京:中国林业出版社:1-5
- Bin XY(宾晓芸), Tang SQ(唐绍清), Zhou JY(周俊亚), et al. 2005. ISSR analysis on genetic diversity of *Camellia nitidissima* Chi(Theaceae) in China(金花茶遗传多样性的 ISSR 分析)[J]. *J Wuhan Bot Res*(武汉植物研究),23(1):20-26
- Li DZ(李大枝), Xiao ZF(肖忠峰), Xie Y(谢彦), et al. 2008. Solvothermal extraction of flavones from *Ginkgo* leaves(溶剂热法从银杏叶中提取银杏黄酮的研究)[J]. *J Shandong Univ: Nat Sci*(山东大学学报·理学版),43(3):13-15
- Hu WB(胡文波), Shi SL(石森林), Gao M(高敏), et al. 2008. Determination of flavonoids in different parts of *Lespedeza formosa*(美丽胡枝子不同部位总黄酮含量测定)[J]. *Chin J Mod Appl Pharm*(中国现代应用药学),25(6):542-544
- Wang DW(王德伟), Zhu H(朱红), Gao E(高尔). 2006. Pharmacological action and clinical application on total *Ginkgo flavone glycosides*(银杏黄酮的药理作用和临床应用)[J]. *Food and Drug*(食品与药品),8(6):7-9
- Wei L(韦璐), Qin XM(秦小明), Huang RQ(黄日秋), et al. 2007. Study on tea polysaccharide from the leave of *Camellia chrysantha* by the ultrasonic extraction process(超声波提取金花茶多糖的工艺研究)[J]. *Food Sci Tech*(食品科技), (11):100-102
- Wei X(韦霄), Wei JQ(韦记青), Jiang SY(蒋水元), et al. 2005. Genetic diversity evaluation of ex-situ populations of *Camellia nitidissima*, detected by ISSR markers(迁地保护的金花茶遗传多样性评价)[J]. *Guihaia*(广西植物),25(3):215-218
- Zhang HD(张宏达). 1979. *Chrysantha*, a section of golden camellias from Cataysian flora(华夏植物区系的金花茶组)[J]. *Acta Univ Sunyatseni: Sci Nat Edi*(中山大学学报·自然科学版),18(3):69-74
-
- (上接第232页 Continue from page 232)
- 响)[J]. *Guihaia*(广西植物),29(5):648-652
- Quilliam RS, Swarbrick PJ, Scholes JD, et al. 2006. Imaging photosynthesis in wounded leaves of *Arabidopsis thaliana* [J]. *J Exp Bot*,57(1):55-69
- Shi GY(石贵玉). 2004. Effect of aluminium on growth and some physiological function of rice seedlings(铝对水稻幼苗生长和生理的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物),24(1):77-80
- Sun DH(孙冬花), Tian QY(田秋英), Zhang WH(张文浩). 2006. The effects of aluminium on the seed germination and seedling growth in *Hibiscus moscheutos* (Malvaceae) and wheat(*Triticum aestivaum*, Gramineae)[J]. *Acta Bot Yunnan*(云南植物研究),28(5):523-528
- Tang YL(唐延林), Huang JF(黄敬峰), Wang RC(王人潮). 2004. Change law of hyperspectral data with chlorophyll and carotenoid for rice at different developmental stages(水稻不同发育期高光谱与叶绿素和类胡萝卜素的变化规律)[J]. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学),18(1):59-66
- Wang F(王芳), Liu P(刘鹏), Xu GD(徐根娣), et al. 2006. Effects of aluminium amount in soil on the root growth of buckwheat(铝对荞麦根系的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物),26(3):321-324
- Xu YF(许玉凤), Cao MJ(曹敏建), Wang WH(王文和), et al. 2005. Effect of aluminum on photosynthetic characteristics of different genotypes of maize seedling(铝胁迫对耐性不同的玉米基因型幼苗光合特性的影响)[J]. *J Maize Sci*(玉米科学),13(1):79-82
- Ying XF(应小芳), Liu P(刘鹏). 2005. Effects of aluminum stress on photosynthetic characters of soybean(铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报),16(1):166-170
- You JF, He YF, Yang JL, et al. 2005. A comparison of aluminum resistance among *Polygonum* species originating on strongly acidic and neutral soils[J]. *Plant Soil*,276(1):143-151
- Yu HN(俞慧娜), Liu P(刘鹏), Xu GD(徐根娣). 2007. Responses of growth and chlorophyll fluorescence characteristics of soybean to aluminum treatment(大豆生长及叶绿素荧光特性对铝胁迫的反应)[J]. *Chin J Oil Crop Sci*(中国油料作物学报),29(3):257-265