

# 两种水生园艺作物对铝胁迫的生理响应

郑阳霞,贾松涛,向前,赵英鹏,孙远秀,张伟伟

(四川农业大学 园艺学院,四川 雅安 625014)

**摘要:**为了研究豆瓣菜、大聚藻2种水生园艺作物响应铝胁迫的机制及耐铝能力,通过盆栽试验,研究了不同浓度铝处理(0,300,600,900,1 200 mg/kg)对豆瓣菜、大聚藻生长及生理特性的影响。结果表明, $Al^{3+}$ 为300 mg/kg处理下,豆瓣菜根长、地下部干质量均达最大峰值,大聚藻根长及地上部干质量与对照差异不显著;梯度铝处理下,豆瓣菜地上部分干质量、根系活力呈下降趋势,大聚藻铝处理则各组差异不显著。对生理指标的进一步研究发现,随土壤 $Al^{3+}$ 浓度的增加,豆瓣菜膜脂伤害指标丙二醛(MDA)含量呈升高趋势,可溶性蛋白含量(Pr)、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性均呈先升后降的趋势,脯氨酸(Pro)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈降低趋势。大聚藻除Pr含量呈升高趋势,SOD含量呈先升后降趋势外,其他指标与豆瓣菜各生理指标变化趋势相似。综合各指标可知,低浓度的 $Al^{3+}$ (300 mg/kg)处理下,豆瓣菜生长指标所受促进作用较大聚藻明显,随 $Al^{3+}$ 浓度的升高,铝对豆瓣菜根长、干质量、叶绿素含量的促进作用逐渐消失,抑制作用较大聚藻也更明显,即豆瓣菜较大聚藻表现出对铝的敏感性。铝胁迫下,二者生理变化有所差异,但从生长指标上看都表现出对铝胁迫较好的耐受性。

**关键词:**铝胁迫;豆瓣菜;大聚藻;叶绿素;丙二醛;脯氨酸;抗氧化酶

中图分类号:S63.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2015)03-0105-06

doi:10.7668/hbxb.2015.03.019

## The Growth and Physiological Characteristics Response of Two Aquatic Horticultural Seedlings to Treatments with Aluminum

ZHENG Yang-xia, JIA Song-tao, XIANG Qian, ZHAO Ying-peng, SUN Yuan-xiu, ZHANG Wei-wei  
(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

**Abstract:** Our objective was to explore the effects of continued Al stress on growth and physiological characteristics of *Nasturtium officinale* and *Myriophyllum aquaticum* seedlings. *Nasturtium officinale* and *Myriophyllum aquaticum* seedlings were treated with continued  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (0, 300, 600, 900, 1 200 mg/kg) in plastic pots with soil. We studied the effects of continued Al stress on growth and physiological characteristics after 30 days. The results showed that with  $Al^{3+}$  treatment under 300 mg/kg, the *Nasturtium officinale* root length, root biomass, chlorophyll content reached the maximum peak, while the growth of *Myriophyllum aquaticum* was almost not affected by Al. Further study on physiological index found that with the increase of soil aluminum concentration, *Nasturtium officinale* membrane damage of malondialdehyde (MDA) content increased; relating the index of tolerance, with the soil aluminum concentration increasing, ascorbate peroxidase (APX) activity increased, soluble protein content (Pr), peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity were increased first and then decreased; proline (Pro) content, superoxide dismutase (SOD) activity decreased. With the increase of soil aluminum concentration, *Myriophyllum aquaticum* Pr content tended to increase, SOD content increased first and then decreased, the other trend physiological characteristics were similar with *Nasturtium officinale*. The index showed, *Nasturtium officinale* was more sensitive to Al than *Myriophyllum aquaticum*. So there was some difference between *Nasturtium officinale* and *Myriophyllum aquaticum* when response to Al stress, but they have shown good growth characteristics, they have shown for aluminum stress better tolerated.

收稿日期:2015-03-11

基金项目:四川省教育厅重点项目(11ZA075)

作者简介:郑阳霞(1977-),女,山西晋城人,副教授,博士,主要从事蔬菜作物的逆境生理生态研究。

**Key words:** Aluminum stress; *Nasturtium officinale* R. Br.; *Myriophyllum aquaticum*; Chlorophyll; Malondialdehyde; Proline; Antioxidase

我国酸性土壤占全国总面积的 21%, 主要分布在南方 15 省区, 铝毒害是酸性土壤中制约作物生产的重要障碍因子<sup>[1]</sup>。设施生产中因其复种指数高、施肥用量大等特点也极易出现土壤退化, 土壤酸化导致的活性铝含量升高、土壤缓冲性能降低则是导致设施土壤退化的重要原因之一<sup>[2]</sup>。水旱轮作作为一种可以改良土壤达到免耕效果的农业技术长期应用在农业生产当中, 水稻-蔬菜模式是水旱轮作的模式之一。长期生产实践及研究认为淹水对于土壤的理化均有改良, 可使土壤 pH 趋于中性<sup>[3]</sup>。

豆瓣菜(*Nasturtium officinale* R. Br.), 又称西洋菜、水田芥, 属多年生十字花科挺水草本植物<sup>[4]</sup>。豆瓣菜作为蔬菜作物在长江流域和西南各地均有栽培, 具有重要的营养价值和药用价值<sup>[5-6]</sup>。大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*), 小二仙草科狐尾藻属, 多年生挺水或沉水草本植物。作为观赏园艺植物, 现于室内、室外均有应用, 由于其具有很强的适应力<sup>[7]</sup>, 无需复杂的培育技术就能在各种环境中强势生长, 发苗迅速, 生长势旺盛, 因此, 近来开始被大量用作岸地、湿地绿化地被植物。蔬菜从业学者对水生蔬菜-旱生蔬菜轮作模式改良设施土壤进行了生产上的探索, 使用水生蔬菜如浅水芹、茭白、豆瓣菜等<sup>[8-10]</sup>。本试验旨在研究豆瓣菜、大聚藻 2 种水生园艺作物响应铝胁迫的机制, 同时也为设施地能否利用此 2 种水生园艺作物进行水旱轮作的可行性探索奠定相关理论基础, 也为湿地建设治理改善生态环境问题使用材料的选取及合理利用提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料来源及准备

本试验所用豆瓣菜、大聚藻采集于四川农业大学农场。采集自然生长健壮的豆瓣菜、大聚藻幼苗待驯化后分别选取长势一致的幼苗进行不同浓度的铝盆栽控制性试验。

### 1.2 试验设计

试验于 2013 年 9-10 月在四川农业大学雅安校区农场进行。将土壤风干压碎、过 5 mm 筛后, 分别称取 2.5 kg 装于 15 cm × 25 cm (高 × 直径) 的塑料盆内, 加入分析纯  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  配制的溶液, 使其与土壤充分混匀, 保持淹水状态, 自然放置平衡 15 d 后再次混匀备用。土壤中加入的  $\text{Al}^{3+}$  浓度分别为 0, 300, 600, 900, 1 200 mg/kg, 将所选长势

一致(豆瓣菜高约 3 cm, 大聚藻高约 5 cm)的幼苗分别扦插至盆中, 每盆种植 2 株, 每个处理重复 20 盆。在整个生长过程中不定期的交换盆与盆的位置以减弱边际效应的影响, 并及时去除其他杂草。

### 1.3 测定项目与方法

待植物生长 30 d 后, 整株收获。用直尺测量最长根长度; 地下部和地上部分分别用自来水洗净, 再用去离子水冲洗 3 次, 将地下部和地上部分于 110 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重测定干质量。称取新鲜叶片测定相关生理指标: 丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥氨酸法测定<sup>[11]</sup>; 可溶性蛋白测定采用考马斯亮蓝法<sup>[12]</sup>; 脯氨酸(Pro)含量用酸性茚三酮法测定<sup>[11]</sup>; 叶绿素含量测定采用分光光度法, 以 95% 乙醇为提取液<sup>[11]</sup>; 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法<sup>[11]</sup>, 520 nm 波长下测定吸光度; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定<sup>[11]</sup>, 以单位质量新鲜样品 1 min 吸光度变化值表示酶活性大小, 单位为  $\Delta\text{A}470/(\text{g} \cdot \text{min})$ ; 用分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据处理方法

数据采用 SPSS 软件系统进行方差分析, Microsoft Excel 制表作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 $\text{Al}^{3+}$ 浓度对豆瓣菜根长和干质量的影响

铝对植物毒害作用的最典型症状表现在对根伸长的抑制作用。由表 1 可知, 豆瓣菜、大聚藻的根长均随  $\text{Al}^{3+}$  浓度的升高呈先增后降的趋势。二者根长均在  $\text{Al}^{3+}$  为 300 mg/kg 处理下达最大值, 显著高于其他处理组, 可见较低浓度铝处理(300 mg/kg)对此 2 种水生园艺作物根长生长均有一定的促进作用。随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高, 豆瓣菜地下部干质量呈先升后降的趋势, 且在  $\text{Al}^{3+}$  为 300 mg/kg 处理时达显著水平; 大聚藻则在最低浓度(300 mg/kg)的铝处理下地下部干质量与对照差异不显著, 随着浓度升高, 600 ~ 1 200 mg/kg 铝处理浓度下各组地下部干质量均显著低于对照。豆瓣菜根系活力随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高而降低,  $\text{Al}^{3+}$  为 300 mg/kg 处理下即呈显著降低; 大聚藻根系活力各个处理组间差异不显著。可见二者地下部分形态指标在  $\text{Al}^{3+}$  处理下均受到不同程度的影响, 但大聚藻根系活力受影响较小。豆瓣菜地上部干质量则随  $\text{Al}^{3+}$  浓度的升高而逐渐降低, 且

各处理均显著低于对照,降幅为 11.3%~78.9%;大聚藻地上部干质量各个处理组间差异不显著。铝处理对豆瓣菜地上部呈抑制的作用,可见豆瓣菜营养

的吸收、运输、物质的分配受  $\text{Al}^{3+}$  影响程度大于大聚藻。

表 1 不同浓度铝处理对 2 种植物根长和干质量的影响

Tab.1 Effects of root length,biomass of two plants under different $\text{Al}^{3+}$ concentration treatments					
植物 Plant	$\text{Al}^{3+}$ 浓度/(mg/kg) Concentration of Aluminum	根长/cm Root length	地下部干质量/g Root dry weight	地上部干质量/g Aerial part dry weight	根系活力 /( $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ) Root vigor
豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i> R. Br.	CK	20.0 ± 1.63bc	0.42 ± 0.037bc	5.30 ± 0.33a	23.6 ± 2.42a
	300	27.3 ± 2.87a	0.60 ± 0.049a	4.20 ± 0.41b	17.7 ± 1.51b
	600	22.0 ± 1.63b	0.45 ± 0.033b	2.10 ± 0.24c	14.4 ± 0.59c
	900	17.0 ± 0.82cd	0.35 ± 0.024cd	1.50 ± 0.12d	11.8 ± 0.88cd
	1 200	14.0 ± 1.63d	0.27 ± 0.024d	1.00 ± 0.10e	9.4 ± 0.88d
大聚藻 <i>Myriophyllum aquaticum</i>	CK	29.8 ± 3.28ab	0.33 ± 0.079a	0.45 ± 0.075a	7.2 ± 1.16a
	300	38.0 ± 5.89a	0.35 ± 0.015a	0.44 ± 0.062a	8.1 ± 0.51a
	600	26.7 ± 4.64bc	0.19 ± 0.004b	0.48 ± 0.088a	7.8 ± 0.72a
	900	23.7 ± 2.62bc	0.16 ± 0.019b	0.41 ± 0.089a	7.6 ± 0.31a
	1 200	21.0 ± 1.41c	0.14 ± 0.037b	0.43 ± 0.097a	6.8 ± 0.22a

注:同一品种不同处理间小写字母不同表示两者差异达显著水平( $P<0.05$ )。表 2,图 1~7 同。  
Note:The differences between the the treatments(of same variety)with the different small letters were significant( $P<0.05$ ). The same as Tab.2, Fig.1~7.

表 2 不同浓度铝处理对 2 种植物叶绿素的影响

Tab.2 Effects of chlorophyll of two plants under different $\text{Al}^{3+}$ concentration treatments				
植物 Plant	$\text{Al}^{3+}$ 浓度/(mg/kg) Concentration of Aluminum	叶绿素 a 含量 /(mg/g) Chlorophyll a contents	叶绿素 b 含量 /(mg/g) Chlorophyll b contents	叶绿素 a/叶绿素 b Chlorophyll a /chlorophyll b
豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i> R. Br.	CK	4.92 ± 0.164b	5.11 ± 0.237b	0.96 ± 0.013a
	300	5.45 ± 0.026a	5.65 ± 0.082a	0.96 ± 0.009a
	600	4.34 ± 0.029c	4.45 ± 0.020c	0.98 ± 0.002a
	900	4.21 ± 0.049c	4.31 ± 0.122c	0.98 ± 0.016a
	1 200	4.19 ± 0.054c	4.25 ± 0.195c	0.99 ± 0.033a
大聚藻 <i>Myriophyllum aquaticum</i>	CK	2.09 ± 0.100c	0.99 ± 0.067b	0.49 ± 0.033a
	300	2.32 ± 0.205c	1.00 ± 0.075b	0.45 ± 0.032ab
	600	2.79 ± 0.087a	1.27 ± 0.087a	0.47 ± 0.031ab
	900	2.69 ± 0.143ab	1.17 ± 0.070a	0.45 ± 0.026ab
	1 200	2.37 ± 0.167bc	0.98 ± 0.043b	0.42 ± 0.018b

2.2 不同  $\text{Al}^{3+}$  浓度对豆瓣菜叶绿素影响

叶绿素是光合作用过程中最重要的色素,在植物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,其含量高低与光合作用密切相关<sup>[13]</sup>。表 2 结果表明,随着  $\text{Al}^{3+}$  浓度的升高,豆瓣菜、大聚藻叶片叶绿素 a、b 含量均呈先上升后下降的趋势。豆瓣菜叶绿素 a、b 含量均在  $\text{Al}^{3+}$  浓度为 300 mg/kg 处理下达到最大值, $\text{Al}^{3+} \geq 600$  mg/kg 处理下叶绿素 a、b 含量均显著小于对照;大聚藻叶绿素 a、b 含量在  $\text{Al}^{3+}$  浓度为 600,900 mg/kg 处理下均显著高于对照。表明适宜浓度的铝处理下会导致单位质量叶片内叶绿素含量的升高。随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高豆瓣菜叶绿素 a/b 变化在各处理间差异不显著,大聚藻铝处理各组叶绿素 a/b 均小于对照,仅  $\text{Al}^{3+}$  浓度为

1 200 mg/kg 下达显著水平。  
2.3 不同  $\text{Al}^{3+}$  浓度对豆瓣菜叶片内丙二醛含量的影响

逆境下植物体内产生的过剩活性氧自由基会造成膜脂过氧化而产生丙二醛(MDA),MDA是膜脂

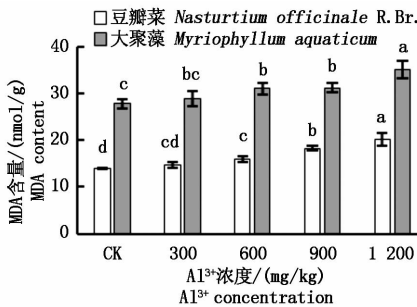


图 1 铝对叶片内 MDA 含量的影响  
Fig.1 Effects of Aluminum on MDA content of leaf

过氧化的主要产物之一<sup>[14-15]</sup>。由图 1 可知,随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高,豆瓣菜、大聚藻叶片 MDA 含量呈升高趋势。 $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  处理下,此 2 种水生园艺作物叶片 MDA 含量均显著高于对照;其中豆瓣菜叶片 MDA 含量增幅为 14.3%~43.6%,大聚藻叶片 MDA 含量增幅为 11.7%~26.2%。

## 2.4 不同 $\text{Al}^{3+}$ 浓度对豆瓣菜叶片非酶保护系统 (Pr、Pro) 的影响

可溶性蛋白 (Pr) 是以小分子状态溶于水或其他溶剂的蛋白,其含量的增加是胁迫环境下植物渗透调节的重要手段<sup>[16]</sup>。脯氨酸 (Pro) 是植物维持原生质稳态的重要分子,可以反映植物耐铝的能力<sup>[17]</sup>。由图 2 可知,随  $\text{Al}^{3+}$  浓度的升高,豆瓣菜叶片可溶性蛋白含量呈先增后减的变化趋势, $\text{Al}^{3+} = 900 \text{ mg/kg}$  时显著高于对照 (增幅 17.3%),其他各处理与对照差异不显著;大聚藻叶片可溶性蛋白呈上升的趋势, $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  各处理组均显著高于对照。由图 3 表明, $\text{Al}^{3+} = 300 \text{ mg/kg}$  处理下豆瓣菜叶片 Pro 含量与对照差异不显著,而后随浓度升高 Pro 含量呈下降的趋势, $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  各处理组均显著低于对照,600,900,1 200  $\text{mg/kg}$  处理下分别为对照的 69.6%,62.7%,46.8%;大聚藻叶片 Pro 含量随铝处理浓度的升高呈下降趋势,各处理组均达显著水平,降幅为 27.4%~47.5%。

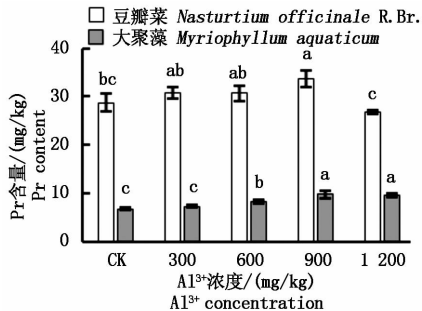


图 2 铝对叶片 Pr 含量的影响

Fig. 2 Effects of Aluminum on Pr content of leaf

## 2.5 不同 $\text{Al}^{3+}$ 浓度对叶片 3 种抗氧化酶 (SOD、POD、CAT) 活性的影响

铝胁迫能够引发氧化胁迫,使活性氧物质如超氧阴离子自由基 ( $\text{O}_2^-$ )、过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 等产生。SOD、CAT、POD、APX、GPX 等是植物体内重要的活性氧代谢酶,能够有效清除活性氧。由图 4 可知,随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高,豆瓣菜叶片 SOD 活性呈下降趋势, $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  处理下 SOD 活性均显著低于对照,降幅为 9.1%~29.9%。大聚藻叶片 SOD 活性随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高呈先升后降的趋势,在  $\text{Al}^{3+} = 300 \text{ mg/kg}$  处理下显著高于对照,增幅 35.0%, $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  处理下 SOD 活性均显著低于对照,降幅

为 47.5%~57.4%。

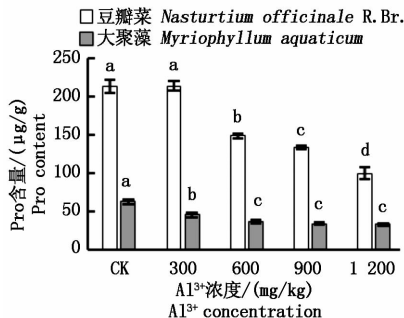


图 3 铝对叶片 Pro 含量的影响

Fig. 3 Effects of Aluminum on Pro content of leaf

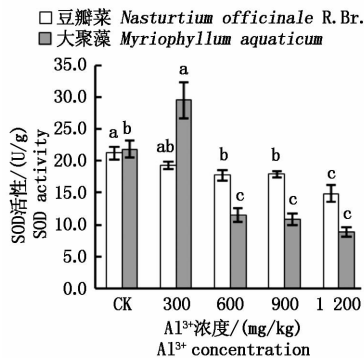


图 4 铝对叶片 SOD 活性的影响

Fig. 4 Effects of Aluminum on SOD activity of leaf

由图 5,6 可知,豆瓣菜、大聚藻叶片 POD 活性随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高均呈先升后降的趋势,其中 300, 600  $\text{mg/kg}$  浓度处理下与高于对照达显著水平。豆瓣菜  $\text{Al}^{3+}$  处理组叶片 POD 活性均大于对照;大聚藻在  $\text{Al}^{3+} \geq 900 \text{ mg/kg}$  浓度下叶片 POD 活性显著低于对照。

由图 7 可知,豆瓣菜、大聚藻叶片 CAT 活性均随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高均呈先升后降的趋势。豆瓣菜在  $\text{Al}^{3+}$  浓度为 600,900  $\text{mg/kg}$  浓度下显著高于对照,较对照增幅分别为 14.4%,24.2%;大聚藻各处理 CAT 活性均高于对照,较对照增幅为 6.2%~18.5%,仅  $\text{Al}^{3+}$  浓度为 300  $\text{mg/kg}$  铝处理下显著高于对照。

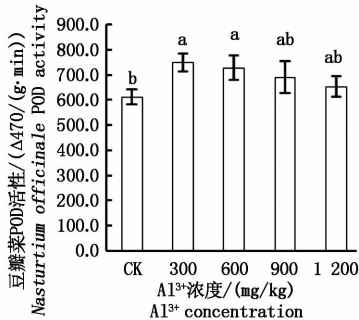


图 5 铝对豆瓣菜叶片 POD 活性的影响

Fig. 5 Effects of Aluminum on POD activity of *Nasturtium officinale* R. Br. leaf

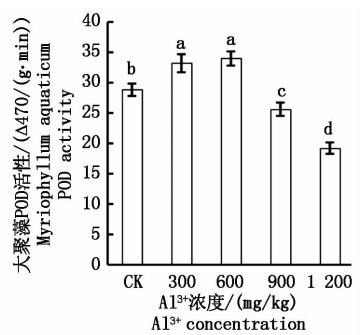


图6 铝对大聚藻叶片 POD 活性的影响

Fig. 6 Effects of Aluminum on POD activity of

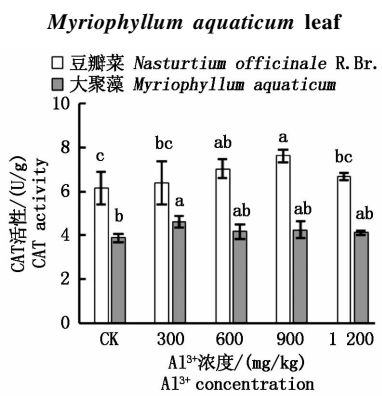


图7 铝对叶片 CAT 活性的影响

Fig. 7 Effects of Aluminum on CAT activity of leaf

### 3 讨论与结论

根系是植物最先感受土壤中逆境的器官,根长一直被用作鉴定植物耐铝性的重要的指标,干质量也可直观反应植物对逆境的耐受能力<sup>[18]</sup>。从根长、地下部干质量结果来看,本试验中  $\text{Al}^{3+} = 300 \text{ mg/kg}$  的铝处理可以显著促进豆瓣菜根系的生长,对大聚藻根长生长的促进作用较小;随着铝处理浓度升高,2 种水生园艺作物根长及地下部干质量均受到抑制作用。就根系活力来看,铝处理对大聚藻根系活力影响不大,而豆瓣菜根系活力随铝胁迫浓度升高而下降显著。铝胁迫下大聚藻地上部干质量各处理组差异不大,豆瓣菜地上部干质量则随铝处理浓度升高而降低,  $\text{Al}^{3+} = 300 \text{ mg/kg}$  下即达显著水平。综合 3 个地下部分指标及地上部干质量可知豆瓣菜较大聚藻对铝胁迫更敏感。大聚藻地下部较地上部生长指标受铝胁迫严重,其原因可能是铝处理影响了地下部生长,但还未对植物体内物质的分配与运输造成严重影响,因此对地上部生长影响不大。

叶绿素含量可以反映植物的同化能力,植物受到逆境胁迫时,植物叶片中的叶绿素含量以及叶绿素 a/b 的比值均会发生变化<sup>[19]</sup>。诸多研究表明铝胁迫会导致植物叶绿素含量明显下降,叶绿素 a/b 的比值减少<sup>[20]</sup>。本试验中,梯度浓度的  $\text{Al}^{3+}$  处理下

豆瓣菜、大聚藻叶片中叶绿素 a、b 含量均呈先增后减的趋势,而含量达最大峰值时的  $\text{Al}^{3+}$  浓度不同,分别为 300, 600 mg/kg,可见大聚藻在较高的铝胁迫下仍然可以进行较多的光合产物积累,而  $\text{Al}^{3+}$  浓度  $\geq 600 \text{ mg/kg}$  处理下豆瓣菜光合产物积累会受到显著影响。随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高,豆瓣菜叶绿素 a/b 比值变化组间差异不大,而大聚藻叶绿素 a/b 呈下降趋势,  $\text{Al}^{3+} = 1\,200 \text{ mg/kg}$  浓度下达显著水平。叶绿素 a/b 降低对于大聚藻吸收短波光较有利,这也可能是大聚藻应对铝胁迫的一种适应性改变。

本试验中随铝处理浓度升高,2 种水生园艺作物的叶片 MDA 含量均呈升高趋势。MDA 是植物逆境伤害的重要指标,逆境下膜脂伤害会导致 MDA 的积累。可见铝处理影响植物叶片膜脂稳定性,随  $\text{Al}^{3+}$  浓度的升高,膜伤害增大,MDA 含量升高,600 mg/kg 下 2 种植物叶片 MDA 含量高于对照均达显著水平,可见  $\text{Al}^{3+}$  浓度  $\geq 600 \text{ mg/kg}$  的铝处理对此 2 种植物叶片膜稳定产生了显著影响。

豆瓣菜 Pr 含量随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高呈先增后减的趋势,这与刘鹏课题组对油菜铝胁迫 14 d 及张华宁等铝胁迫处理大麦 20 d 的研究结果相一致<sup>[21-22]</sup>。大聚藻叶片 Pr 含量随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高呈上升趋势,可溶性蛋白增加利于维持细胞正常的渗透势,可溶性蛋白质含量与植物抗逆性的形成也有关<sup>[23]</sup>。说明豆瓣菜、大聚藻都可以通过产生较多 Pr 以调节铝胁迫造成的渗透失调症状;而  $\text{Al}^{3+}$  达 1 200 mg/kg 铝处理可能已经超出豆瓣菜响应范围,可溶性蛋白被消耗或者调节产生可溶性蛋白的机制被破坏,从而导致可溶性蛋白较低浓度 (300 ~ 600 mg/kg) 铝处理显著降低。脯氨酸是重要的渗透调节物质和抗氧化物质,也常被作为反映植物耐铝性的一个重要指标<sup>[24-25]</sup>。而本试验豆瓣菜、大聚藻叶片 Pro 含量随  $\text{Al}^{3+}$  浓度升高均呈降低趋势,可能是随铝处理浓度升高游离脯氨酸合成受阻而消耗却加剧。尽管游离脯氨酸的积累在一定程度上可以缓解  $\text{Al}^{3+}$  对作物造成的毒害,但一般认为游离脯氨酸的积累可能是作物对铝胁迫的间接反应,而不是对铝毒的直接耐性机制<sup>[21]</sup>。根据试验结果可以认为,Pro 含量变化不能作为此 2 种水生园艺作物的耐性指标。

活性氧自由基的产生是铝毒害的原因之一,铝胁迫能够引发氧化胁迫使活性氧产生,激活抗氧化酶的编码基因启动酶促反应,非生物胁迫导致植物体内活性氧含量上升<sup>[26-27]</sup>。抗氧化酶系统中 SOD 专一清除  $\text{O}_2^{\cdot-}$ ,其产物  $\text{H}_2\text{O}_2$  则由 POD 和 CAT 清除。许多研究都表明,一定浓度铝胁迫可以激发植

物 SOD 酶活性的升高<sup>[28-29]</sup>。本研究中,大聚藻在  $\text{Al}^{3+} = 300 \text{ mg/kg}$  铝处理下 SOD 活性显著高于对照,其余处理组均低于对照;豆瓣菜各处理组均低于对照。研究表明,POD 可在逆境初期表达,清除  $\text{H}_2\text{O}_2$  表现为对植物的保护效应<sup>[30]</sup>。一定浓度及时间的铝处理下,豆瓣菜、大聚藻叶片 POD 活性均呈先增后减的趋势。而高浓度的铝处理下 ( $\text{Al}^{3+}$  浓度  $\geq 900 \text{ mg/kg}$ ) 大聚藻叶片 POD 活性较对照下降明显。可见,豆瓣菜和大聚藻 SOD、POD 酶活性在铝的反应上存在差异。本研究中在铝处理下豆瓣菜、大聚藻叶片 CAT 活性整体都呈先增后减的趋势,且 2 个品种,铝处理组叶片 CAT 活性均高于对照。POD、CAT 变化趋势与刘鹏等<sup>[31]</sup>对大豆铝胁迫下的研究结果相一致。而抗氧化酶的表达机制十分复杂,遗传信息、生长期及处理条件等内外因素的差异均会造成结果的差异,因此,对于铝胁迫中抗氧化酶活性变化可以作为此两品种耐铝性比较的重要参考,但具体清除活性氧的机制有待进一步进行全面而深入的研究与探讨。

综合各个指标可以得出,大聚藻对铝胁迫适应性优于豆瓣菜,从生长指标看二者对铝胁迫均有较好耐受性; $\text{Al}^{3+} \geq 600 \text{ mg/kg}$  的铝胁迫下,2 种水生园艺作物均有逆境反映,而豆瓣菜根长、干质量、光合色素受影响较大聚藻更为严重,膜质过氧化严重,二者脯氨酸均显著下降;大聚藻 3 种活性氧清除酶在梯度铝胁迫下均呈先增后减的趋势,整体较豆瓣菜活性氧清除体系的 3 种酶表现更好。

## 参考文献:

- [1] 翁建华,黄连芬,刘晓茹,等. 土壤酸化及天然土壤溶液中铝的形态[J]. 中国环境科学,2000,20(6):501-505.
- [2] 何传龙,徐继平,王世祥,等. 大棚土壤障碍因子形成及调控技术的研究进展[J]. 安徽农业科学,2003,31(6):1040-1042.
- [3] 范明生,江荣凤,张福锁,等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报,2008,19(2):424-432.
- [4] 赵有为. 中国水生蔬菜[M]. 北京:中国农业出版社,1999:162-167.
- [5] 江解增,张卫平,曹磊生,等. 豆瓣菜产量构成因子及品质成分的分析[J]. 上海蔬菜,2000(3):37-38.
- [6] 曹 华. 西洋菜的栽培技术[J]. 农村科学实验,2000(7):12.
- [7] 高 莹,余小敏,刘 杰,等. 狐尾藻断枝上不定根与芽发生的初步研究[J]. 水生生物学报,2007,31(5):726-730.
- [8] 赵 萌,李 敏,王森焱,等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报,2008,35(8):1251-1254.
- [9] 江解增,缪旻珉,曾晓萍,等. 设施内蔬菜水旱轮作新模式[J]. 中国蔬菜,2011(9):46-49.
- [10] 帅建华,王辉琼,睦辉金,等. 豆瓣菜水旱轮作设施生态栽培技术[J]. 长江蔬菜,2011(13):18-19.
- [11] 刘家尧,刘 新. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [12] 张以顺,黄 霞,陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [13] 俞慧娜,刘 鹏,徐根娣. 大豆生长及叶绿素荧光特性对铝胁迫的反应[J]. 中国油料作物学报,2007,29(3):257-265.
- [14] 王 芳,刘 鹏,徐根娣,等. 铝对荞麦生理影响的研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(4):678-681.
- [15] Shahnaz G, Shekoofeh E, Kourosh D A. Interactive effects of Silicon and Aluminum on the malondialdehyde (MDA), proline, protein and phenolic compounds in *Borago officinalis* L. [J]. Journal of Medicinal Plants Research,2011,5(24):5818-5827.
- [16] Schober B, Tschesche H. Unusual properties of proline and its interaction with proteins [J]. Biochimica Biophysica Acta,1978,541:270-277.
- [17] 林咸永,章永松,罗安程. 不同小麦基因型耐铝性的差异及筛选方法的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(1):64-70.
- [18] 马 光,郭继平,崔兴国,等. 不同逆境因子对吊兰叶绿体色素含量的影响[J]. 北方园艺,2010(22):94-95.
- [19] 肖祥希,刘星辉,杨宗武,等. 铝胁迫对龙眼幼苗光合作用的影响[J]. 热带作物学报,2005,26(1):63-69.
- [20] 应小芳,刘 鹏. 铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(1):166-170.
- [21] 周 楠,韦冬萍,刘 鹏,等. 铝毒胁迫对两种基因型油菜苗期根系形态及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报,2008,30(4):443-449.
- [22] 张华宁,姜 泽,王春利. 铝胁迫对大麦可溶性蛋白含量的影响[J]. 现代农业科技,2013(16):14-15.
- [23] 李冬香,李光德,张 华,等. 硅作用下镉对小麦幼苗生理生化指标的影响研究[J]. 中国农学通报,2013,29(36):84-90.
- [24] Handa S, Handa A K, Hasegawa P M, et al. Proline accumulation and the adaptation of cultured Plant-cells to water-stress [J]. Plant Physiology, 1986, 80(4):938-945.
- [25] Saradhi P P, Alia Arora S, et al. Biochem Biophys Proline accumulates in plants exposed to UV radiation and protects them against UV induced peroxidation [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1995,209:1-5.
- [26] Ezaki B, Suzuki M, Motoda H, et al. Mechanism of gene expression of Arabidopsis glutathione S-transferase, AtGST1, and AtGST11 in response to Aluminum stress [J]. Plant Physiology, 2004, 134(4):1672-1682.
- [27] 任立民,刘 鹏,谢忠雷,等. 植物对铝毒害的抗逆性研究进展[J]. 土壤通报,2008,39(1):177-181.
- [28] Pereira L B, Mazzanti C M, Rossato L V, et al. Differential responses of oat genotypes: oxidative stress provoked by Aluminum [J]. BioMetals, 2011, 24(1):73-83.
- [29] Ma B H, Gao L, Zhang H X, et al. Aluminum-induced oxidative stress and changes in antioxidant defenses in the roots of rice varieties differing in Al tolerance [J]. Plant Cell Reports, 2012, 31(4):687-696.
- [30] 尹永强,胡建斌,邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 中国农学通报, 2007,23(1):105-110.
- [31] 刘 鹏,应小芳,徐根娣,等. 铝对大豆质膜透性和 POD、CAT 活性的影响[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,2005,28(3):300-303.