

郑开敏, 肖家昶, 马俊英, 等. 柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长及生理的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2022, 38( 2 ): 476-485.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.023

## 柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长及生理的影响

郑开敏<sup>1</sup>, 肖家昶<sup>1</sup>, 马俊英<sup>1</sup>, 贺茂林<sup>1</sup>, 格桑<sup>2</sup>, 郑阳霞<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130; 2. 西藏自治区山南市农业技术推广中心, 西藏 山南 856000)

**摘要:** 为研究外源柠檬酸对豆瓣菜铝胁迫的缓解作用, 以湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜为试验材料研究了不同质量浓度(0 mg/L、2 mg/L、10 mg/L、25 mg/L、50 mg/L和150 mg/L)柠檬酸对1 mmol/L铝胁迫下豆瓣菜生长及生理特性的影响。结果表明, 铝胁迫抑制了湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜的生长, 减小了植株株高(分别减小44.44%、39.09%)、茎粗(34.49%、5.63%)和根长(44.61%、40.66%), 加剧了叶片膜脂过氧化作用, 渗透调节物质大量积累, 抗氧化酶活性提高, 促进了植株对铝的吸收, 抑制了叶片对N、P、K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu的积累。从生长指标来看, 铝对湖北豆瓣菜的毒害作用大于北京豆瓣菜。外源添加柠檬酸后, 湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜均表现为生长状况有所改善, 丙二醛含量降低, 抗氧化酶活性维持较高水平, 铝含量下降, 并且施用柠檬酸促进了豆瓣菜对各营养元素的吸收。湖北豆瓣菜在2~25 mg/L柠檬酸质量浓度下解毒效果最佳, 在150 mg/L柠檬酸质量浓度下缓解效果受到抑制甚至消失。北京豆瓣菜则在10~50 mg/L柠檬酸质量浓度下解毒效果最佳。所以, 适宜质量浓度的外源柠檬酸能有效缓解铝胁迫下豆瓣菜的生理损伤。

**关键词:** 豆瓣菜; 铝胁迫; 柠檬酸; 生理特性

**中图分类号:** S637 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)02-0476-10

## Effects of exogenous citric acid on growth and physiological characteristics of watercress under aluminum stress

ZHENG Kai-min<sup>1</sup>, XIAO Jia-chang<sup>1</sup>, MA Jun-ying<sup>1</sup>, HE Mao-lin<sup>1</sup>, GE Sang<sup>2</sup>, ZHENG Yang-xia<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Shannan Agricultural Technology Extension Center, Tibet, Shannan 856000, China)

**Abstract:** In order to study the alleviating effect of exogenous citric acid on watercress under aluminum stress. The effects of different mass concentrations of citric acid (0 mg/L, 2 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L and 150 mg/L) on the growth and physiological characteristics of watercress under 1 mmol/L aluminum stress were studied. The results showed that aluminum stress inhibited the growth of watercress from Hubei (HB) and Beijing (BJ), decreased plant height (44.44%, 39.09%), stem diameter (34.49%, 5.63%) and root length (44.61%, 40.66%), intensified leaf membrane lipid peroxidation, accumulated a large amount of osmoregulatory substances, increased antioxidant enzyme activity, promoted the absorption of aluminum in plants and inhibited the accumulation of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn and Cu in watercress leaves. From the perspective of growth index, the toxic effect of aluminum on HB was greater than that on BJ. After exogenous citric acid, the growth conditions of HB and BJ were improved, the content of malondialdehyde decreased, the activity of antioxidant enzymes maintained at a high level, the content of aluminum decreased, and the application of citric acid promoted the absorption of nutrients by watercress. The detoxification effect of HB was the best under the treatment of 2–25 mg/L citric acid, and

the remission effect was inhibited or even disappeared under the treatment of 150 mg/L citric acid. BJ had the best detoxification effect under the treatment of 10–50 mg/L citric acid. Therefore, the appropriate concentration of exogenous citric acid can effectively alleviate the physiological damage of watercress under aluminum stress.

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 四川省科技厅重点项目(2019ZHFP0268)

作者简介: 郑开敏(1997-), 女, 重庆荣昌人, 硕士研究生, 主要从事豆瓣菜逆境生理方面的研究。(E-mail) 3289767501@qq.com

通讯作者: 郑阳霞, (E-mail) 754924349@qq.com

**Key words:** watercress; aluminum stress; citric acid; physiological characteristics

土壤酸化一直是中国主要的生态环境问题之一,中国酸性土壤面积在不断扩大,21 世纪初强酸性土壤 (pH 值<5.5) 的面积已增加到 $1.5\times 10^7$   $\text{hm}^2$ ,南方地区尤为严重<sup>[1]</sup>。铝是自然界中含量最多的金属元素<sup>[2]</sup>,正常土壤中的铝常以难溶性的硅酸盐或氧化铝的形式存在,一般不会对植物、环境造成毒害作用,但酸性土壤中的铝会形成游离态的  $\text{Al}^{3+}$ ,对植物造成铝毒害,成为植物重要的生长限制因素<sup>[3]</sup>。大量研究结果表明,有机酸可以通过外部排斥机制和内部耐受机制缓解铝毒害。如绣球花 [*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.] 叶片中的铝能与柠檬酸形成稳定复合物,有效阻止铝与细胞内物质 (如 ATP、DNA) 形成复合物而起到解铝毒的作用<sup>[4]</sup>。还有研究结果表明,大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 液泡膜上的铝转运蛋白 Hv-ABC25,可以将细胞质中的铝转运到液泡中进行区室化隔离解毒<sup>[5]</sup>。在铝胁迫下,黑麦草 (*Lolium perenne* L.)<sup>[6]</sup>、大豆 ([*Glycine max* (Linn.) Merr.]<sup>[7]</sup>、菜豆 (*Phaseolus vulgaris* L.)<sup>[8]</sup> 和柱花草 (*Stylosanthes* spp.)<sup>[9]</sup> 等可以通过根系分泌有机酸对土壤中的铝离子进行螯合,减少根系对铝吸收,减轻铝对植物的毒害作用,达到外部解铝毒的作用。所以,不管是内部解铝毒机制还是外部解铝毒机制中,柠檬酸均起到不可忽视的作用,且有机酸中属柠檬酸螯合铝的能力最强,是苹果酸的6~8 倍,其次为草酸和苹果酸<sup>[10]</sup>。

豆瓣菜 (*Nasturtium officinale* R.B.), 又名西洋菜、水田芥,为十字花科豆瓣菜属,是中国南方重要的一、二年生草本植物,具有较高的营养价值和药用价值<sup>[11]</sup>。本试验通过研究外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长状况、生理特性以及营养元素吸收等的影响,以期为进一步探讨缓解豆瓣菜铝胁迫提供可行性方案,为豆瓣菜耐铝机制的研究及高产优质栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料:湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜,采集自然生长健壮的豆瓣菜幼苗,扦插繁殖 2 次驯化幼苗,挑选第 2 次繁殖后长势一致的幼苗进行扦插处理。试验试剂:十八水合硫酸铝 [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ], 分析纯;无水柠檬酸 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ), 分析纯。

### 1.2 试验设计

选择大小一致、圆润饱满的豆瓣菜种子,播种于 72 孔穴盘中,采用经高温消毒的蛭石、草炭和珍珠岩的复合基质 (体积比为 1 : 1 : 1)。豆瓣菜长出 7、8 片真叶,移栽至盛有营养液的 12 孔水培箱 (长宽为 38 cm×28 cm×14 cm) 中,生长 30 d 后剪取相同大小的茎节培养,每个扦插苗保留 2~3 个芽点,营养液均为华南农业大学叶菜类 B 配方完全培养液<sup>[12]</sup>。营养液处理 20 d 后开始施加  $\text{Al}^{3+}$  和不同浓度的柠檬酸, $\text{Al}^{3+}$  的浓度为 1 mmol/L,柠檬酸质量浓度为 0 mg/L ( $\text{N}_0$ )、2 mg/L ( $\text{N}_2$ )、10 mg/L ( $\text{N}_{10}$ )、25 mg/L ( $\text{N}_{25}$ )、50 mg/L ( $\text{N}_{50}$ ) 和 150 mg/L ( $\text{N}_{150}$ ),用 HCl 和 NaOH 调节各处理浓度的营养液 pH 至 4.5。每 5 d 更换一次处理液,每天上午、下午充氧 2 h。每个豆瓣菜品种进行相同的 7 个处理,每个处理 12 株,3 次重复。在处理第 21 d 测定生长指标,第 7 d、14 d、21 d 进行各项生理指标的测定。

### 1.3 测定项目与方法

在处理第 7 d、14 d、21 d 随机采集长势相近的叶片 (从上至下第 4~6 片叶),测定丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性<sup>[13]</sup>。在第 21 d 采用 TTC 法<sup>[14]</sup>测定根系活力,采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸 (Pro) 含量<sup>[14]</sup>,考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白质含量<sup>[14]</sup>,蒽酮比色法测定可溶性糖含量<sup>[14]</sup>。

第 21 d 测定株高、茎粗、根长及干鲜质量。株高、根长用直尺 (精确到 0.01 cm) 测量,茎粗 (水面以上 1 cm 处) 用游标卡尺 (精确到 0.01 mm) 测量。干鲜质量测定:将植株根、茎、叶分开称取鲜质量后,在 105 °C 烘箱中杀青 30 min,转入 60 °C 下烘干至恒质量,分别称取干质量。将干样粉碎后,用硝酸+高氯酸 (体积比 9 : 1) 进行湿式消解法消解,Al 含量测定采用铝试剂比色法<sup>[15]</sup>,转运系数=植株地上部铝元素含量/植株地下部铝元素含量。K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu 元素含量用原子吸收分光光度计测定,N 元素含量采用凯氏定氮法测定<sup>[16]</sup>,P 元素测定采用钒钼黄比色法<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

试验数据采用 SPSS20.0 软件进行统计分析,采用 Excel 2013 软件作图。使用 Duncan's 新复极差

法进行方差分析,图表中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长的影响

由表 1 可知,湖北豆瓣菜  $Al_1N_0$  处理的根长、株高、茎粗、地上部干质量、地下部干质量较  $Al_0N_0$  处理分别降低 44.61%、44.44%、34.49%、54.89%、19.37%,北京豆瓣菜  $Al_1N_0$  处理的根长、株高、茎粗、地上部干质量、地下部干质量较  $Al_0N_0$  分别降低 40.66%、39.09%、5.63%、34.99%、14.52%,可见,铝胁迫抑制了豆瓣菜的生长,且湖北豆瓣菜比北京豆瓣菜受到的铝毒害更严重。 $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$  处理,

湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜铝毒害均得到缓解,但缓解的程度有一定的差异。与  $Al_1N_0$  处理相比,湖北豆瓣菜株高、根长、地上部干质量  $Al_1N_2$  处理达到最大值,根干质量和茎粗分别在  $Al_1N_{10}$ 、 $Al_1N_{25}$  处理达到最大值;北京豆瓣菜  $Al_1N_{50}$  处理茎粗、株高、根干质量和地上部干质量达到最大值,根长  $Al_1N_{25}$  处理达到最大值。 $Al_1N_{150}$  处理湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜各项生长指标均低于  $Al_1N_0$ 。说明湖北豆瓣菜在柠檬酸质量浓度为 2~25 mg/L 时铝毒害缓解效果较好,北京豆瓣菜在柠檬酸质量浓度为 25~50 mg/L 时缓解效果较好,当柠檬酸质量浓度为 150 mg/L 时,二者铝毒害均未得到缓解,甚至有加重的趋势。

表 1 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长的影响

Table 1 Effects of exogenous citric acid on the growth of watercress under aluminum stress

品种	处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	根长 (cm)	地上部干质量 (g)	根干质量 (g)	根系活力 [ $\mu g/(g \cdot h)$ ]
湖北豆瓣菜	$Al_0N_0$	18.30±2.74a	5.74±0.24a	32.13±2.97a	1.81±0.04a	0.31±0.05a	36.54±5.76a
	$Al_1N_0$	10.17±0.64c	3.76±0.11bc	17.80±1.56bc	0.82±0.01cd	0.25±0.05b	22.40±1.00b
	$Al_1N_2$	13.73±0.84b	3.81±0.51bc	21.15±1.48b	1.07±0.13b	0.28±0.02ab	36.51±2.05a
	$Al_1N_{10}$	11.70±1.37bc	3.86±0.31bc	19.95±0.78b	1.03±0.01b	0.31±0.01a	33.76±3.04a
	$Al_1N_{25}$	11.15±1.91bc	4.09±0.54b	19.10±1.13bc	1.06±0.14b	0.29±0.04ab	31.55±3.81a
	$Al_1N_{50}$	10.10±1.16c	3.91±0.18bc	20.93±1.99b	0.96±0.02bc	0.31±0.03ab	22.59±3.49b
	$Al_1N_{150}$	10.04±1.49c	3.22±0.26c	15.57±0.61c	0.68±0.11d	0.20±0.02c	22.43±2.46b
北京豆瓣菜	$Al_0N_0$	20.63±2.14a	4.18±0.40a	33.45±5.07a	1.42±0.09a	0.27±0.02ab	31.68±1.02b
	$Al_1N_0$	12.57±1.17b	3.94±0.03a	19.85±0.21bc	0.92±0.06d	0.23±0.01b	18.42±2.17d
	$Al_1N_2$	12.68±1.53b	3.95±0.29a	22.85±1.48b	1.02±0.07bcd	0.24±0.03ab	25.66±3.38c
	$Al_1N_{10}$	12.70±1.84b	4.07±0.04a	22.6±2.137b	1.10±0.14bc	0.28±0.03a	25.62±2.45c
	$Al_1N_{25}$	12.70±0.53b	4.09±0.29a	23.37±1.97b	0.97±0.05cd	0.23±0.01b	29.91±4.88bc
	$Al_1N_{50}$	13.30±1.84b	4.17±0.52a	20.60±2.43bc	1.16±0.03b	0.29±0.03a	38.83±3.48a
	$Al_1N_{150}$	11.75±1.34b	2.96±0.31b	15.22±1.73c	0.64±0.08e	0.19±0.01c	31.67±2.85b

$Al_0N_0$ : 0 mmol/L  $Al^{3+}$  + 0 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_0$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 0 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_2$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 2 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_{10}$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 10 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_{25}$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 25 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_{50}$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 50 mg/L 柠檬酸;  $Al_1N_{150}$ : 1 mmol/L  $Al^{3+}$  + 150 mg/L 柠檬酸。相同品种不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由表 1 还可知,  $Al_1N_0$  处理下湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜根系活力较  $Al_0N_0$  处理分别显著下降 38.70%、41.85%。在施用柠檬酸处理中,湖北豆瓣菜根系活力随柠檬酸质量浓度的增加而降低,在  $Al_1N_2$ 、 $Al_1N_{10}$ 、 $Al_1N_{25}$  处理下显著高于  $Al_1N_0$ ; 北京豆瓣菜根系活力在各柠檬酸质量浓度处理下均显著高于  $Al_1N_0$ , 且随柠檬酸质量浓度的增高总体呈现先升高后降低的趋势。

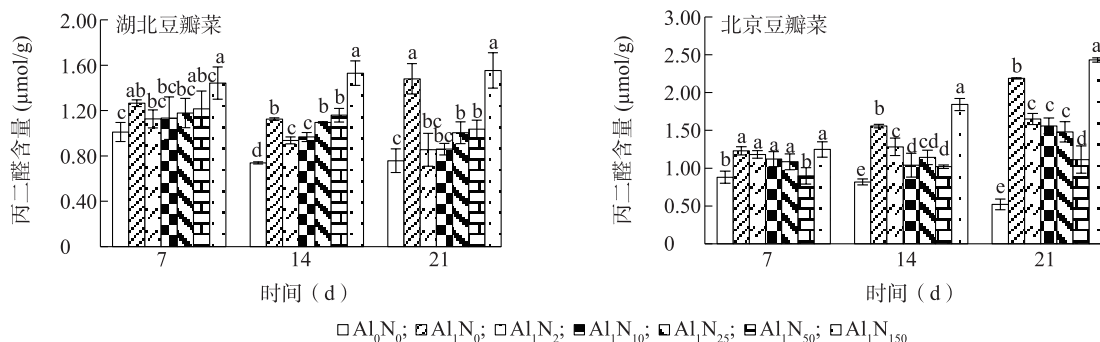
### 2.2 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 1 可知,  $Al_1N_0$  处理下 2 个豆瓣菜品种 MDA

含量均显著高于  $Al_0N_0$  处理,可见铝对豆瓣菜叶片细胞膜系统损伤严重。施用柠檬酸后,  $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$  处理 2 个豆瓣菜品种叶片 MDA 含量均低于  $Al_1N_0$  处理,湖北豆瓣菜叶片 MDA 含量随柠檬酸质量浓度升高而增加,并随处理时间的增长而降低,北京豆瓣菜叶片 MDA 含量则总体上随柠檬酸质量浓度增加而降低,随处理时间的增长而增加。第 21 d,  $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$  处理湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片 MDA 含量均与  $Al_1N_0$  处理具有显著差异,  $Al_1N_2$  处理湖北豆瓣菜 MDA 含量达到最低,较  $Al_1N_0$  处理降低 42.29%,  $Al_1N_{50}$  处理北京豆瓣菜叶片 MDA 含量达到最低,较  $Al_1N_0$  处理降低 49.06%。可见

在最有效缓解铝毒害方面,北京豆瓣菜比湖北豆瓣菜需要较高质量浓度的柠檬酸。 $Al_1N_{150}$ 处理2个豆瓣菜

品种叶片MDA含量均高于 $Al_1N_0$ 处理,可见柠檬酸质量浓度过高会加重豆瓣菜叶片的膜脂过氧化作用。



各处理见表1注。相同时间不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

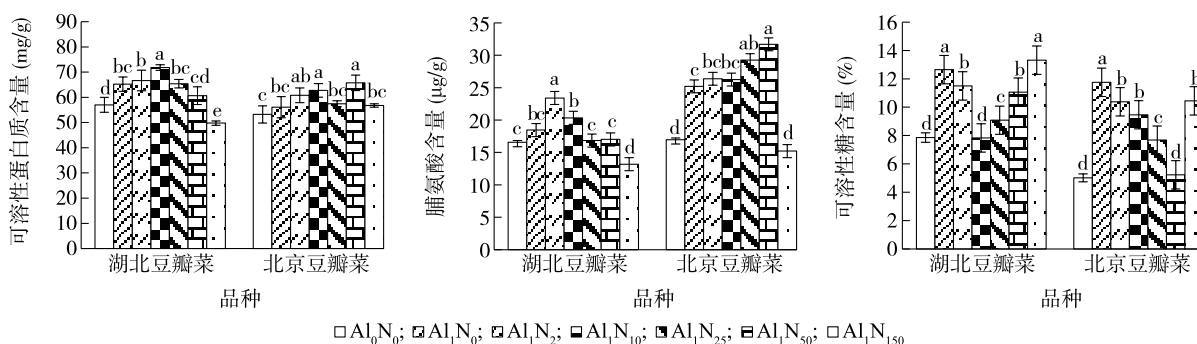
图1 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜丙二醛含量的影响

Fig.1 Effects of exogenous citric acid on malondialdehyde (MDA) content of watercress under aluminum stress

### 2.3 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜渗透调节物质含量的影响

由图2可知,与 $Al_0N_0$ 处理相比, $Al_1N_0$ 处理2个豆瓣菜品种叶片可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量均升高。施用柠檬酸后, $Al_1N_2$ 处理湖北豆瓣菜叶片脯氨酸含量达到最大值,较 $Al_1N_0$ 处理增加26.82%,且随柠檬酸质量浓度的升高逐渐降低;北京豆瓣菜叶片脯氨酸含量随柠檬酸质量浓度增加而先升高后下降,在 $Al_1N_{50}$ 处理下达到最大值,较 $Al_1N_0$ 处理增加25.71%。 $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$ 处理湖北豆

瓣菜和北京豆瓣菜叶片可溶性糖含量均显著低于 $Al_1N_0$ 处理,分别为 $Al_1N_{10}$ 、 $Al_1N_{50}$ 处理达到最小值,降幅分别为38.05%、55.48%。与 $Al_1N_0$ 处理相比,湖北豆瓣菜叶片可溶性蛋白质含量随柠檬酸质量浓度增高而先增加后降低,在 $Al_1N_{10}$ 处理下达到最大值,增幅为10.03%;在各柠檬酸质量浓度处理下北京豆瓣菜叶片可溶性蛋白质含量均有所提高,且在 $Al_1N_{50}$ 处理下达到最大值,增幅为17.18%。说明柠檬酸处理能通过影响可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量来缓解豆瓣菜铝毒害。



各处理见表1注。相同品种不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图2 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片可溶性蛋白质含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量的影响

Fig.2 Effects of exogenous citric acid on soluble protein content, proline content and soluble sugar content of watercress leaves under aluminum stress

### 2.4 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片抗氧化酶活性影响

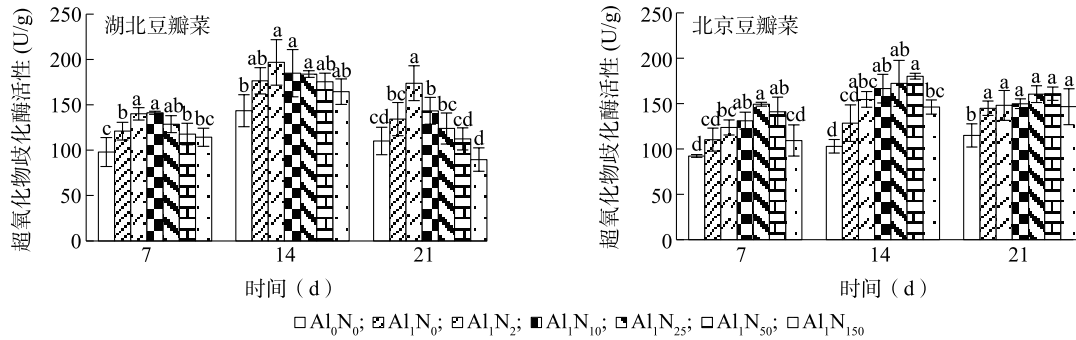
由图3可知,铝胁迫下2个豆瓣菜品种叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性均高于 $Al_0N_0$ 处理。施用柠檬酸后,与 $Al_1N_0$ 处理相比,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片SOD活性均随柠檬酸质量浓度的增加而

先升高后下降,随柠檬酸处理时间的延长而呈现先增加后降低的趋势。第7 d, $Al_1N_2$ 、 $Al_1N_{10}$ 处理湖北豆瓣菜叶片SOD活性比 $Al_1N_0$ 处理分别显著增加15.77%、16.71%;第14 d、21 d, $Al_1N_2$ 处理湖北豆瓣菜叶片SOD活性达到最大值,分别较 $Al_1N_0$ 处理增加11.46%、29.38%, $Al_1N_{50}$ 、 $Al_1N_{150}$ 处理湖北豆瓣菜



叶片 *SOD* 活性始终低于  $Al_1N_0$  处理。 $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$  处理北京豆瓣菜叶片 *SOD* 活性始终大于  $Al_1N_0$  处理,第 7 d  $Al_1N_{25}$  处理叶片 *SOD* 活性达到最大值,较  $Al_1N_0$  处理增加 35.37%,具有显著性差异;第 14 d、21 d  $Al_1N_{50}$  处理叶片 *SOD* 活性均达到最大值,分别

较  $Al_1N_0$  处理增加 40.26%、11.05%, $Al_1N_{150}$  处理叶片 *SOD* 活性与  $Al_1N_0$  处理无显著变化。说明外源柠檬酸质量浓度为 150 mg/L 时,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片抗氧化酶活性受到不同程度的抑制。



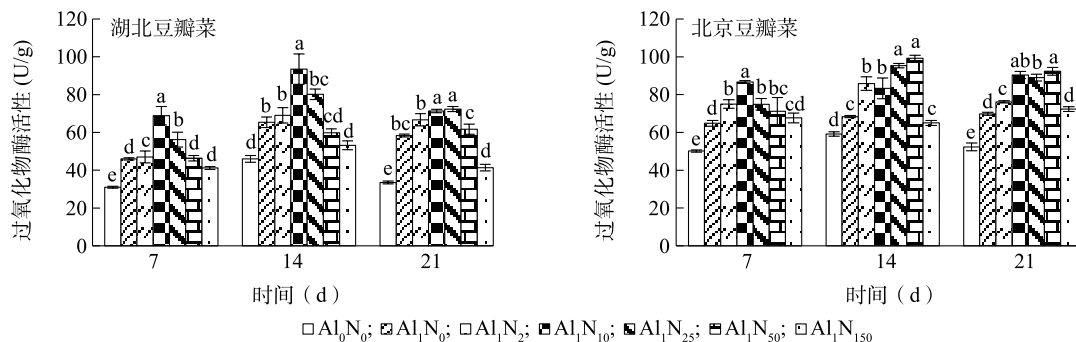
各处理见表 1 注。相同时间不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片 *SOD* 活性的影响

Fig.3 Effects of exogenous citric acid on superoxide dismutase (*SOD*) activity of watercress leaves under aluminum stress

由图 4 可知,铝胁迫显著增加了 2 个豆瓣菜品种的过氧化物酶 (*POD*) 活性。加入柠檬酸后湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片 *POD* 活性随处理时间的延长大致上呈现先升高再下降的趋势。与  $Al_1N_0$  处理相比,湖北豆瓣菜叶片 *POD* 活性随柠檬酸质量浓度的增加表现为先升高后降低,在第 7 d、14 d、21 d, $Al_1N_{10}$  处理湖北豆瓣菜叶片 *POD* 活性均显著高于  $Al_1N_0$  处理,增幅分别为 23.72%、46.38%、

12.94%。随着柠檬酸处理时间的延长, $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$  处理北京豆瓣菜叶片 *POD* 活性均显著高于  $Al_1N_0$  处理,第 7 d  $Al_1N_{10}$  处理北京豆瓣菜叶片 *POD* 活性达到最大值,较  $Al_1N_0$  处理增加 33.68%,第 14 d、21 d, $Al_1N_{50}$  处理叶片 *POD* 活性达到最大值,分别较  $Al_1N_0$  处理增加 45.12%、32.22%, $Al_1N_{150}$  处理北京豆瓣菜叶片 *POD* 活性与  $Al_1N_0$  处理无显著变化。



各处理见表 1 注。相同时间不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片 *POD* 活性的影响

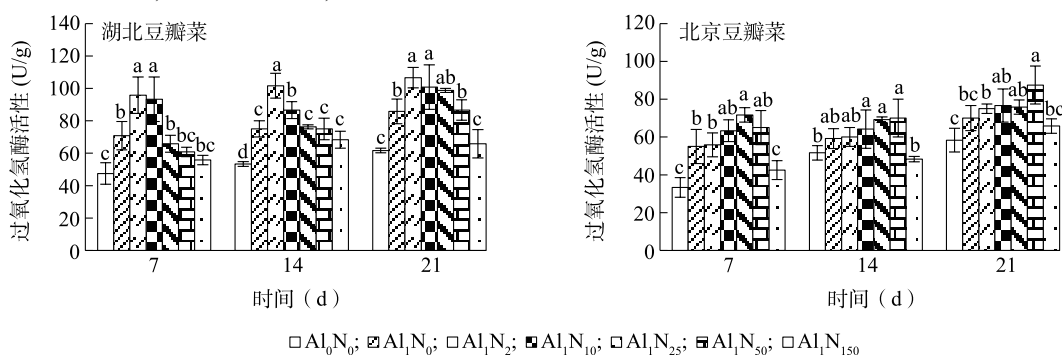
Fig.4 Effects of exogenous citric acid on peroxidase (*POD*) activity of watercress leaves under aluminum stress

由图 5 可知,铝胁迫下 2 个豆瓣菜品种过氧化物酶 (*CAT*) 活性均升高。施用柠檬酸后,随着柠檬酸处理时间的延长, $Al_1N_2$ 、 $Al_1N_{10}$  处理湖北豆瓣菜叶片 *CAT* 活性始终显著大于  $Al_1N_0$  处理, $Al_1N_{25}$ 、 $Al_1N_{50}$  处理叶片 *CAT* 活性与  $Al_1N_0$  处理无显著差异,

$Al_1N_{150}$  处理叶片 *CAT* 活性在第 21 d 显著低于  $Al_1N_0$  处理,且在第 7 d、14 d、21 d, $Al_1N_2$  处理湖北豆瓣菜叶片 *CAT* 活性均达到最大值,分别较  $Al_1N_0$  处理增加 35.29%、35.56%、24.27%。北京豆瓣菜叶片 *CAT* 活性随柠檬酸质量浓度的增加大致呈现先升高

后下降的趋势,随处理时间的延长总体上逐渐升高,且 $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$ 处理叶片CAT活性始终大于 $Al_1N_0$ 处理;第7 d  $Al_1N_{25}$ 处理叶片CAT活性达到最大值,较 $Al_1N_0$ 增加30.30%,第14 d、21 d,北京豆瓣菜叶

片CAT活性均为 $Al_1N_{50}$ 处理达到最大值,分别较 $Al_1N_0$ 处理增加18.31%、25.00%,而 $Al_1N_{150}$ 处理北京豆瓣菜叶片CAT活性则低于 $Al_1N_0$ 处理。



各处理见表1注。相同时间不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片CAT活性的影响

Fig.5 Effects of exogenous citric acid on catalase (CAT) activity of watercress leaves under aluminum stress

## 2.5 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜根、茎、叶中铝含量的影响

由表2可知,铝胁迫下2个豆瓣菜品种根、茎、叶中铝含量均高于 $Al_0N_0$ 处理。施用柠檬酸后,湖北豆瓣菜根、茎、叶和地上部铝含量随柠檬酸质量浓度的增加呈现先降低后升高的趋势,根系铝含量 $Al_1N_{10}$ 处理达到最小值,较 $Al_1N_0$ 处理降低6.80%,茎、叶和地上部铝含量 $Al_1N_2$ 处理达到最小值,分别较 $Al_1N_0$ 处理降低7.66%、9.36%、8.49%, $Al_1N_2 \sim Al_1N_{25}$ 处理,湖

北豆瓣菜地上部转运系数均低于 $Al_1N_0$ 处理, $Al_1N_2$ 处理最小,为0.763。与 $Al_1N_0$ 处理相比, $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$ 处理北京豆瓣菜根、茎、叶和地上部铝含量均降低, $Al_1N_{50}$ 处理达到最小值,降幅分别为4.38%、21.69%、7.55%、16.19%;且 $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$ 处理北京豆瓣菜地上部转运系数均低于 $Al_1N_0$ 处理, $Al_1N_{50}$ 处理最小,为0.498。说明铝胁迫下柠檬酸可以通过影响豆瓣菜根、茎、叶对铝的吸收,减少铝元素在地上部的积累来缓解铝毒害。

表2 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜根、茎、叶中铝含量的影响

Table 2 Effects of exogenous citric acid on aluminum content in root, stem and leaf of watercress under aluminum stress

品种	处理	铝含量(mg/g)				转运系数
		根	茎	叶	地上部	
湖北豆瓣菜	$Al_0N_0$	0.653±0.019c	0.603±0.023e	0.425±0.021b	1.028±0.017d	1.576
	$Al_1N_0$	1.545±0.023ab	0.666±0.015c	0.534±0.079a	1.201±0.094bc	0.777
	$Al_1N_2$	1.444±0.065b	0.615±0.012de	0.484±0.022ab	1.099±0.012cd	0.763
	$Al_1N_{10}$	1.440±0.012b	0.626±0.006de	0.490±0.007ab	1.116±0.003cd	0.775
	$Al_1N_{25}$	1.513±0.003ab	0.643±0.021cd	0.517±0.006ab	1.160±0.023c	0.767
	$Al_1N_{50}$	1.585±0.259ab	0.781±0.015b	0.542±0.096a	1.287±0.012ab	0.828
	$Al_1N_{150}$	1.718±0.154a	0.812±0.019a	0.442±0.006ab	1.354±0.112a	0.789
北京豆瓣菜	$Al_0N_0$	0.674±0.028b	0.597±0.021c	0.442±0.015d	1.040±0.035e	1.543
	$Al_1N_0$	2.217±0.032a	0.770±0.055b	0.490±0.023ab	1.260±0.038b	0.568
	$Al_1N_2$	2.189±0.043a	0.668±0.070c	0.461±0.009bcd	1.130±0.070c	0.516
	$Al_1N_{10}$	2.198±0.058a	0.657±0.029c	0.462±0.009bcd	1.119±0.033cd	0.510
	$Al_1N_{25}$	2.139±0.068a	0.654±0.019c	0.480±0.014abc	1.134±0.025c	0.530
	$Al_1N_{50}$	2.120±0.050a	0.603±0.006c	0.453±0.027cd	1.056±0.029de	0.498
	$Al_1N_{150}$	2.229±0.270a	0.864±0.019a	0.498±0.018a	1.361±0.010a	0.617

各处理见表1注。相同品种不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2.6 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片中常量元素含量的影响

由表 3 可知,在铝胁迫下湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片对 N、P、K、Ca、Mg 元素的吸收受到明显抑制。施用柠檬酸后,与  $Al_1N_0$  处理相比,湖北豆瓣菜叶片中 N、P、K、Ca、Mg 元素含量在较低柠檬酸质量浓度 ( $Al_1N_2 \sim Al_1N_{50}$ ) 范围内有所增加,北京豆瓣菜

叶片中 N、P、K、Ca、Mg 元素含量在较高柠檬酸质量浓度 ( $Al_1N_{10} \sim Al_1N_{50}$ ) 范围内增加。 $Al_1N_{150}$  处理,湖北豆瓣菜叶片中 N、P、K、Ca、Mg 元素含量与  $Al_1N_0$  处理相比均有所降低,北京豆瓣菜叶片中 P、Mg 元素含量高于  $Al_1N_0$  处理, N、K、Ca 元素含量则与  $Al_1N_0$  处理无明显变化。

表 3 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片中常量元素含量的影响

Table 3 Effects of exogenous citric acid on contents of major elements in leaves of watercress under aluminum stress

品种	处理	N 元素含量 (mg/g)	P 元素含量 (mg/g)	K 元素含量 (mg/g)	Ca 元素含量 (mg/g)	Mg 元素含量 (mg/g)
湖北豆瓣菜	$Al_0N_0$	73.374±1.593a	11.724±0.372a	62.005±0.060a	52.913±7.813a	13.500±0.500b
	$Al_1N_0$	39.825±1.688c	2.361±0.023d	46.240±1.915de	40.825±1.100bc	11.650±0.200c
	$Al_1N_2$	40.547±0.955c	2.407±0.070d	46.743±2.783d	50.538±1.013a	14.538±0.363a
	$Al_1N_{10}$	48.565±0.303b	3.220±0.186c	52.055±0.180c	42.713±0.413b	14.563±0.563a
	$Al_1N_{25}$	46.514±2.388b	3.987±0.163b	54.888±0.563b	49.513±2.113a	15.188±1.038a
	$Al_1N_{50}$	40.573±4.078c	2.361±0.023d	47.570±0.050d	49.425±1.200a	11.775±0.375c
	$Al_1N_{150}$	37.498±1.178c	2.035±0.349d	44.283±0.488e	36.100±1.350c	10.638±0.988c
北京豆瓣菜	$Al_0N_0$	72.700±0.398a	11.283±0.163a	55.830±0.290a	49.288±0.488a	10.938±0.088a
	$Al_1N_0$	46.800±0.459c	2.337±0.047f	46.248±0.843c	45.300±0.250c	9.250±0.100d
	$Al_1N_2$	46.211±2.241c	2.872±0.395e	45.575±0.845c	46.450±1.375bc	9.450±0.075cd
	$Al_1N_{10}$	48.937±3.911c	3.824±0.465d	46.345±0.485c	46.013±0.288bc	10.175±0.075b
	$Al_1N_{25}$	48.020±2.267c	5.009±0.256c	54.878±2.608ab	46.288±0.363bc	10.288±0.038b
	$Al_1N_{50}$	55.921±0.597b	6.125±0.163b	53.120±0.520b	46.963±0.088b	11.075±0.175a
	$Al_1N_{150}$	45.176±2.106c	3.220±0.279e	46.390±0.815c	45.863±0.413bc	9.700±0.475c

各处理见表 1 注。相同品种不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.7 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片中微量元素含量的影响

由表 4 可知,铝胁迫下 2 个品种豆瓣菜叶片中 Fe、Cu、Zn 元素含量均显著降低,湖北豆瓣菜叶片中 Fe、Cu、Zn 元素含量较  $Al_0N_0$  处理分别降低 19.55%、15.38%、35.54%,北京豆瓣菜叶片中 Fe、Cu、Zn 元素含量较  $Al_0N_0$  处理分别降低 16.04%、12.82%、32.75%。施用柠檬酸后,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片中 Fe、Cu、Zn 元素含量均随柠檬酸质量浓度的增加表现为先增加后降低的趋势, $Al_1N_{25}$  处理湖北豆瓣菜叶片中 Fe、Cu 元素含量达到最大值, $Al_1N_{10}$  处理 Zn 元素含量达到最大值,均与  $Al_1N_0$  处理具有显著性差异; $Al_1N_{50}$  处理北京豆瓣菜叶片中 Fe、Cu、Zn 元素含量均达到最大值,与  $Al_1N_0$  处理具有显著性差异。

## 3 讨论

根尖是植物根系吸收积累铝的主要部位,且铝对植物的毒害作用最先从根系表现出来<sup>[17]</sup>。本试验中,铝胁迫下豆瓣菜根系铝离子含量显著增加,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜根长、株高和茎粗受到抑制,生物量和根系活力显著下降,这与郑阳霞等<sup>[18]</sup>的研究结果相符。施用适宜质量浓度柠檬酸后,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜生长抑制现象和根系活力得到不同程度的改善,且随根系铝含量的增加而减弱缓解效果。此外研究还发现,高质量浓度柠檬酸增加了豆瓣菜根、茎、叶中铝含量,明显抑制了植株的生长,其原因可能是高质量浓度的有机酸降低了豆瓣菜根际的 pH 值,增强了可溶性铝的活性,使豆瓣菜铝毒害进一步加深<sup>[19]</sup>。

表 4 外源柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜叶片中微量元素含量的影响

Table 4 Effects of exogenous citric acid on the contents of trace elements in leaves of watercress under aluminum stress

品种	处理	Fe 元素含量 (mg/kg)	Cu 元素含量 (mg/kg)	Zn 元素含量 (mg/kg)
湖北豆瓣菜	Al <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	304.375±0.017a	24.375±1.125a	51.000±3.000a
	Al <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	244.875±5.875c	20.625±0.375bc	32.875±0.875c
	Al <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	256.000±11.000c	21.500±0.750b	44.125±1.125b
	Al <sub>1</sub> N <sub>10</sub>	278.375±19.875b	23.375±0.125a	50.250±1.500a
	Al <sub>1</sub> N <sub>25</sub>	292.625±6.125ab	24.000±1.000a	49.250±5.000a
	Al <sub>1</sub> N <sub>50</sub>	276.375±4.875b	23.750±1.000a	43.625±2.875b
	Al <sub>1</sub> N <sub>150</sub>	228.250±0.500c	19.750±0.500c	32.375±2.750b
北京豆瓣菜	Al <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	244.750±8.500a	28.250±0.500a	50.375±2.875a
	Al <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	205.500±1.000cd	24.625±1.375c	33.875±1.375d
	Al <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	194.625±5.625d	25.125±0.625c	33.500±2.250d
	Al <sub>1</sub> N <sub>10</sub>	199.750±2.750d	25.250±0.500c	36.625±0.125c
	Al <sub>1</sub> N <sub>25</sub>	214.125±2.875c	26.625±0.625b	39.000±0.500c
	Al <sub>1</sub> N <sub>50</sub>	227.500±10.750b	27.750±0.001ab	44.250±0.750b
	Al <sub>1</sub> N <sub>150</sub>	195.000±3.000d	23.875±0.875c	33.000±1.000d

各处理见表 1 注。相同品种不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖是植物体内的主要渗透调节物质,在逆境条件下可以维持细胞的渗透平衡,保护质膜结构的完整性<sup>[20-21]</sup>。铝胁迫下,2 个品种豆瓣菜叶片可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量均增加。其原因可能是豆瓣菜在铝胁迫下启动了自我保护机制,促使其叶片大量合成和积累可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸。施用柠檬酸后,湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜在低质量浓度柠檬酸下可以通过增加可溶性蛋白质和脯氨酸含量以维持水分和渗透平衡,提高植物对逆境的抵抗力。可溶性糖含量下降,与陈海霞等<sup>[22]</sup>施用外源水杨酸缓解八仙花铝毒害结果一致。可能是因为可溶性糖能为细胞提供能量,在逆境胁迫下作为能源物质被植物大量吸收利用,导致其含量下降<sup>[23]</sup>。

MDA 是膜脂氧化的最终产物,其含量通常被用来表示逆境胁迫下生物膜系统损伤的程度<sup>[24-26]</sup>。铝胁迫下豆瓣菜 MDA 含量显著升高,说明豆瓣菜细胞膜系统遭到铝毒害的破坏。加入柠檬酸后,豆瓣菜叶片 MDA 含量下降,缓解了豆瓣菜叶片细胞膜受到的伤害。抗氧化酶是植物体内清除活性氧的重要酶类,对清除活性氧起着重要作用,能防止植物细胞膜膜脂过氧化<sup>[27]</sup>。在油菜 (*Brassica napus* L.)<sup>[28]</sup>、金花菜 (*Medicago polymorpha* L.)<sup>[29]</sup>、茄子 (*Solanum melongena* L.)<sup>[30]</sup>、水稻 (*Oryza sativa*

L.)<sup>[31]</sup>等研究中发现,逆境胁迫下植株可以通过提高 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性清除活性氧 (ROS),从而减轻逆境胁迫对植物的伤害程度。本试验中,铝胁迫刺激了豆瓣菜产生应激生理响应,*SOD*、*POD*、*CAT* 等抗氧化酶活性急剧上升,且湖北豆瓣菜抗氧化酶活性增加的幅度大于北京豆瓣菜,说明湖北豆瓣菜对铝胁迫的反应更加敏感。施用柠檬酸后,低质量浓度柠檬酸对铝胁迫下湖北豆瓣菜和北京豆瓣菜叶片 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性具有增强作用,且湖北豆瓣菜在较低质量浓度时缓解作用达到最大,对柠檬酸敏感性比北京豆瓣菜强,这与姚虹宇等<sup>[32]</sup>研究结果相似,适宜质量浓度柠檬酸能有效增强抗氧化酶活性,清除体内过量的  $O_2^-$  和  $H_2O_2$ ,增强植物的抗氧化胁迫能力。当柠檬酸质量浓度过高时,豆瓣菜叶片 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性受到抑制,可能是因为高质量浓度的柠檬酸降低了豆瓣菜生长环境的 pH 值,导致相应酶活性降低,也可能是高质量浓度柠檬酸加强了铝毒害作用,抑制植物清除活性氧自由基的能力,导致活性氧的积累。

铝毒害最明显的特征就是抑制植物根系的生长,阻碍根系对水分和矿物质元素的吸收,导致地上部出现与缺素类似的症状<sup>[33]</sup>。N、P、K 元素是植物生长最重要的大量元素<sup>[34]</sup>,本试验中,铝胁迫抑制了 2 种豆瓣菜叶片对 N、P、K 元素的积累,这可能是



铝胁迫下植物鲜质量低下的首要原因。在西瓜<sup>[20]</sup>、荞麦<sup>[35]</sup>等研究中发现,铝胁迫促进了植物对铝的积累,抑制了植物叶片对营养元素的积累。本试验也得到相似结论,铝胁迫下,2种豆瓣菜叶片中铝含量增加,Ca、Mg、Fe、Cu、Zn元素含量均显著降低,推测原因可能是铝阻塞了阳离子通道,同时高浓度铝离子与质外体上阳离子竞争结合位点,导致作物对阳离子的运载量减少<sup>[36-37]</sup>。微量元素是电子传递体的重要成分,在蛋白质合成和代谢等方面具有重要作用,Cu和Zn也是活性氧清除剂-超氧化物歧化酶的重要成分,这些抗氧化酶活性的升高,可以减缓铝对植物的毒害<sup>[38-39]</sup>。研究结果表明,适宜柠檬酸质量浓度促进湖北豆瓣菜(2~25 mg/L)和北京豆瓣菜(25~50 mg/L)叶片对N、P、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn元素的积累,抑制铝元素的累积。由此可以推测,柠檬酸可以通过调节可溶性蛋白质含量和抗氧化酶活性来缓解豆瓣菜铝毒害。

## 4 结论

综上所述,适宜质量浓度的柠檬酸能够有效缓解铝胁迫对豆瓣菜的伤害作用,降低豆瓣菜叶片和根系中的铝离子含量,通过调节叶片中的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量增强豆瓣菜叶片中的抗氧化酶活性来减轻质膜过氧化损伤,从而促进豆瓣菜叶片对营养元素的积累,缓解铝胁迫对豆瓣菜生长的抑制。150 mg/L柠檬酸处理则会加深对豆瓣菜生长的抑制作用。综合来看,当柠檬酸质量浓度≤50 mg/L时豆瓣菜铝毒害得到改善,且在铝胁迫下湖北豆瓣菜的生长受铝胁迫危害程度大于北京豆瓣菜,外源柠檬酸对其的缓解效果也相对比较明显。

## 参考文献:

- [1] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.
- [2] 何龙飞,沈振国,刘友良,等. 植物铝毒害机理的研究[J]. 广西农业生物科学,2002(3):188-194.
- [3] KOCHIAN L V, PIEROS M A, HOEKENGA O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity[J]. Plant and Soil, 2005, 274(1):175-195.
- [4] EIJI T, HIROYUKI K, TETSUO H. Organic acid metabolism in aluminum-phosphate utilizing cells of carrot (*Daucus carota* L.) [J]. Plant & Cell Physiology, 1999(5):489-495.
- [5] 刘文星. 西藏野生大麦耐(酸)铝的离子机制和相关基因 *Hv-ABC25*、*HvEXPA1* 的功能鉴定[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [6] 吴柳杰,张永先,凌桂芝,等. 铝胁迫下黑麦和小麦根尖分泌有机酸的研究[J]. 广西植物,2014,34(4):455-459.
- [7] 杨列耿,杨曙,张永先,等. 铝离子胁迫下大豆根尖柠檬酸的分泌及 *SGA1* 基因的表达[J]. 作物学报,2015,41(4):666-670.
- [8] 沈宏,严小龙. 低磷和铝毒胁迫条件下菜豆有机酸的分泌与累积[J]. 生态学报,2002,22(3):387-394.
- [9] 左方华,凌桂芝,唐新莲,等. 铝胁迫诱导柱花草根系分泌柠檬酸[J]. 中国农业科学,2010,43(1):59-64.
- [10] IVANO B, CHRISTOPH S. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2013(4):172.
- [11] 杨乾展,赵浩如,程景才,等. 西洋菜的研究进展[J]. 河北农业科学,2008(4):22-24.
- [12] 陈晓红,李换平,江解增,等. 不同营养液配方对秋冬季豆瓣菜产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学,2017,56(8):1450-1452.
- [13] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川出版集团,2003.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [15] 李卫群,朱慧,池青,等. 铝试剂分光光度法测定食品中铝的含量[J]. 中国食品添加剂,2007(5):161-163.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [17] MATSUMOTO H, MOTODA H. Oxidative stress is associated with aluminum toxicity recovery in apex of pea root [J]. Plant and Soil, 2012,363(1/2):399-410.
- [18] 郑阳霞,赵善梅,向前,等. 铝胁迫对豆瓣菜生理特性及营养元素吸收的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):83-91.
- [19] 孙远秀,邱爽,张伟伟,等. 柠檬酸对西瓜幼苗铝毒害的缓解作用[J]. 核农学报,2016,30(10):2072-2079.
- [20] 肖家昶,郑开敏,马俊英,等. 外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2021,40(8):1-12.
- [21] SHI X L, XUE L, REN X R, et al. Preliminary study on drought resistance of four broadleaved seedlings under water stress in south china [J]. Forest Research, 2011, 24(6):760-767.
- [22] 陈海霞,张斌峰,蒋辉. 水杨酸对八仙花组培苗铝胁迫的缓解效应[J]. 湖南生态科学学报,2018,5(1):1-6.
- [23] 张盛楠,刘亚敏,刘玉民,等. 马尾松幼苗生长及生理特性对铝胁迫的响应[J]. 西北植物学报,2016,36(10):2022-2029.
- [24] 李冬,王艳芳,王悦华,等. 外源褪黑素对镉胁迫下豌豆种子萌发、幼苗抗性生理及镉含量的影响[J]. 核农学报,2019,33(11):2271-2279.
- [25] 刘玲,杨俊文,陈成,等. 羧基化多壁碳纳米管单一及其与镉复合处理对水稻幼苗叶片毒性效应的研究[J]. 植物资源与环境学报,2020,29(1):37-43.
- [26] 张俊波,李志怡,孙清,等. 高温胁迫对野扇花植株生长及叶中生理生化指标和极性代谢产物的影响[J]. 植物资源与环境

- 学报, 2021, 30(2):52-58.
- [27] 王志颖, 刘 鹏. 柠檬酸抑制剂对铝胁迫下油菜抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(5):957-966.
- [28] 熊 洁, 丁 戈, 陈伦林, 等. 铝胁迫对两个油菜品种生理特性及产量构成因素的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(5):43-50.
- [29] 赵 嫚, 陈仕勇, 李亚萍, 等. 外源 GABA 对盐胁迫下金花菜种子萌发及幼苗抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2):310-316.
- [30] 吴雪霞, 张圣美, 张爱冬, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下茄子幼苗光合和生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(1):49-60.
- [31] 周小华, 周泽仪, 李昆志. 铝胁迫下外源抗坏血酸对水稻幼苗抗氧化性能的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(10):2368-2375.
- [32] 姚虹宇, 刘亚敏, 张盛楠, 等. 外源柠檬酸对铝胁迫下马尾松生理特性的影响[J]. 林业科学, 2018, 54(7):155-164.
- [33] HE H, LI Y, HE L F. Aluminum toxicity and tolerance in solanaceae plants[J]. South African Journal of Botany, 2019, 123:23-29.
- [34] 候丽丽, 王 伟, 崔新菊, 等. 氮磷钾肥对玉米农艺性状、叶绿素及产量的影响[J]. 天津农业科学, 2021, 27(5):8-11, 15.
- [35] 陈文荣, 刘 鹏, 黄朝表, 等. 铝对荞麦铝和其他营养元素运输的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):173-176, 186.
- [36] 王晓锋, 罗 珍, 刘晓燕, 等. 钙磷对紫花苜蓿根瘤菌体系铝胁迫的修复效应[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(5):137-144.
- [37] RENGEL Z. Uptake of aluminium by plant cells [J]. New Phytologist, 1996, 134(3):389-406.
- [38] 朱 静, 樊 月, 欧阳玉莹, 等. 铝胁迫对千年桐吸收和运输微量元素的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(3):234-241.
- [39] 张正仁, 宋长铎. 微量元素在植物生命活动中的作用[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1991(3):530-539.

(责任编辑:张震林)