

引用格式: 宁可真, 袁学松, 杨忠仁, 等. 肉桂酸和邻苯二甲酸对沙芥属植物幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 0173-0181.  
[NING K Z, YUAN X S, YANG Z R, et al. Effects of cinnamic acid and phthalic acid on photosynthetic characteristics of *Pugionium* Gaertn.  
[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(2): 0173-0181.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20221030

# 肉桂酸和邻苯二甲酸对沙芥属 植物幼苗光合特性的影响

宁可真<sup>1</sup>, 袁学松<sup>1</sup>, 杨忠仁<sup>1,2</sup>, 黄修梅<sup>1</sup>, 郝丽珍<sup>1</sup>, 张凤兰<sup>1\*</sup>

(1 内蒙古农业大学 园艺与植物保护学院 内蒙古自治区野生特有蔬菜种质资源与种质创新重点实验室, 呼和浩特 010011; 2 内蒙古自治区农牧业大数据研究与应用重点实验室, 呼和浩特 010011)

**摘要** 【目的】探讨酚酸类自毒物质对沙芥属植物生长及光合特性的影响, 为沙芥属植物的野生资源保护和开发利用提供理论依据。【方法】以沙芥和斧翅沙芥幼苗为试验材料, 选择肉桂酸和邻苯二甲酸 2 种自毒物质, 采用盆栽试验, 设置 0, 0.01, 0.1, 1, 10 mmol/L 浓度梯度处理, 考察幼苗生长、叶绿素含量、叶绿素荧光参数和气体交换参数的变化特征。【结果】(1) 肉桂酸、邻苯二甲酸对沙芥幼苗生长均表现为低浓度促进高浓度抑制, 而对斧翅沙芥生长则表现为抑制作用, 且均在浓度为 10 mmol/L 时对生长抑制作用最显著。(2) 在不同浓度肉桂酸和邻苯二甲酸处理后, 沙芥和斧翅沙芥幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量均出现不同程度下降。(3) 沙芥和斧翅沙芥叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度在肉桂酸和邻苯二甲酸浓度为 10 mmol/L 显著低于对照, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度此时无显著变化, 其光合速率降低主要由非气孔因素所致。(4) 沙芥和斧翅沙芥的最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 和光化学淬灭系数 ( $qP$ ) 均在肉桂酸和邻苯二甲酸浓度为 10 mmol/L 显著低于对照, 而此时非光化学淬灭系数 (NPQ) 则显著高于对照。【结论】高浓度邻苯二甲酸和肉桂酸抑制沙芥和斧翅沙芥幼苗的光合作用, 降低其光合速率, 导致它们叶片的 PSII 反应中心活性和开放程度受损, 进而影响其正常生长; 肉桂酸和邻苯二甲酸对沙芥属植物光合特性的影响存在差异, 斧翅沙芥幼苗受到影响更大。

**关键词** 沙芥; 斧翅沙芥; 肉桂酸; 邻苯二甲酸; 光合特性

中图分类号 Q945.78; Q945.11 文献标志码 A

## Effects of cinnamic acid and phthalic acid on photosynthetic characteristics of *Pugionium* Gaertn.

NING Kezhen<sup>1</sup>, YUAN Xuesong<sup>1</sup>, YANG Zhongren<sup>1,2</sup>,  
HUANG Xiumei<sup>1</sup>, HAO Lizhen<sup>1</sup>, ZHANG Fenglan<sup>1\*</sup>

(1 Inner Mongolia Key Laboratory of Wild Peculiar Vegetables Germplasm Resources and Germplasm Enhancement, College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 2 Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Big Data Research and Application for Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010011, China)

收稿日期: 2022-12-02; 修改稿收到日期: 2023-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760570); 内蒙古自治区留学回国人员科技活动项目 (启动类); 内蒙古自治区科技计划项目 (2021GG0084); 内蒙古自治区应用技术研究与开发资金项目 (2019GC237); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目 (2021CG0023)

作者简介: 宁可真 (1995-), 女, 在读博士, 主要从事蔬菜种质资源保存与创新研究。E-mail: 2283913905@qq.com

\* 通信作者: 张凤兰, 副教授, 硕士生导师, 主要从事蔬菜种质资源保存与创新研究。E-mail: zhangfenglan041105@163.com

**Abstract** [Objective] In order to explore the effects of phenolic acid self-toxic substances on the growth and photosynthetic characteristics of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim., and to provide a theoretical basis for the protection, development, and utilization of wild resources of *P. cornutum* and *P. dolabratum*. [Methods] A pot experiment was conducted with *P. cornutum* and *P. dolabratum* seedlings. The experiment focused on two self-toxic substances, cinnamic acid and phthalic acid, and the seedlings were treated with varying concentrations of 0, 0.01, 0.1, 1, and 10 mmol/L. The aim was to observe the effects of these concentrations on seedling growth, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and gas exchange parameters. [Results] (1) Cinnamic acid and phthalic acid promoted seedling growth of *P. cornutum* at low concentrations and inhibited seedling growth at high concentrations. The growth of *P. dolabratum* was inhibited. 10 mmol/L cinnamic acid and phthalic acid treatment had the most significant growth inhibition effect on *Pugionium* Gaertn. (2) Chl a, Chl b, and Chl a+b content of these two species were decreased in different degrees after treatment with different concentrations of cinnamic acid and phthalic acid. (3)  $P_n$ ,  $T_r$ , and  $G_s$  of these two species at 10 mmol/L were significantly lower than that of the control, while  $C_i$  had no significant change. The main cause for the reduction of photosynthetic rate was non-stomatal factors. (4)  $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ , and  $qP$  of these two species at 10 mmol/L were significantly lower than that of the control and NPQ was significantly higher than control. [Conclusion] The high concentrations of phthalic acid and cinnamic acid inhibited photosynthesis and reduced photosynthetic rate in seedlings, resulting in the impairment of PS II reaction center activity and opening in leaves of these two species, which affected the growth of *Pugionium* Gaertn.. In addition, the effects of cinnamic acid and phthalic acid on photosynthetic characteristics of *Pugionium* Gaertn. were different, due to different plant and stress types.

**Key words** *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn.; *Pugionium dolabratum* Maxim.; cinnamic acid; phthalic acid; photosynthetic characteristics

沙芥属(*Pugionium* Gaertn.)为蒙古高原沙地的特有属,包括沙芥[*Pugionium cornutum* (L.) Gaertn.]和斧翅沙芥(*Pugionium dolabratum* Maxim.) 2个种,其中沙芥为中国特有种,斧翅沙芥为中国珍稀濒危物种,保护等级为Ⅱ级。该属植物营养价值丰富,具有食用、饲用、药用、保健和防风固沙等功能<sup>[1-2]</sup>,且抗逆性良好<sup>[3]</sup>,具有很高的经济价值和生态价值。但由于生境的恶化和人类的掠夺式开发<sup>[4]</sup>,使其野生植物资源逐年减少,其自身存在的自毒作用加剧了这一问题<sup>[5]</sup>,同时沙芥属植物的自毒作用也使其在引种驯化栽培中出现严重的连作障碍,为其异地保存和人工种植带来很大困难。

自毒作用是植物通过淋溶、残体分解、根系分泌等方式向周围环境释放自毒物质,对植物生长起到阻碍作用的现象<sup>[6-7]</sup>,是连作障碍形成的主要原因之一。自毒作用在植物中较为常见,广泛存在于甜瓜<sup>[8]</sup>、党参<sup>[9]</sup>、芦笋<sup>[10]</sup>、水稻<sup>[11]</sup>等。目前,相关研究表明自毒物质主要包括酚酸类、黄酮类化合物和萜类<sup>[12]</sup>。人们已从果蔬等易发生连作障碍的作物根系分泌物中分离出邻苯二甲酸、肉桂酸等 10 余种酚酸类自毒物质<sup>[6-7,13]</sup>。植物自毒作用的产生机制十分复杂,植物体内的多种生理生化过程均受自毒物

质的影响,如光合作用、酶活性以及膜系统等<sup>[12,14]</sup>,其中备受关注是对光合作用的影响。光合作用对植物生长至关重要,是植物维持生命的基础,当光合作用受到影响时,植物的生长发育和生理生化机制就会同时受到影响<sup>[15-17]</sup>。各种逆境胁迫均会导致植物光合作用紊乱,进而致使叶绿素合成受阻、光合色素降解、气体交换参数改变等<sup>[18]</sup>。已有研究表明,根系自毒物质影响植物光合作用和叶片光合色素的分解与合成,破坏 PS II 反应中心和电子传递,进而引发一系列生理代谢紊乱<sup>[19-20]</sup>。关于对羟基苯甲酸对不同草莓品种光合作用和叶绿素荧光特性影响的研究发现,自毒物质降低了草莓的光合作用,对叶绿素荧光特性存在低浓度促进高浓度抑制的效果<sup>[21]</sup>。化感物质胁迫对木麻黄幼苗小枝 PS II 反应中心造成了破坏,光电子传递速率降低,热耗散途径受阻,影响了激发能在 PS I 和 PS II 的平衡分配<sup>[22]</sup>。而有关自毒物质对沙芥属植物光合作用影响尚鲜见相关报道。

本研究以沙芥和斧翅沙芥幼苗为试材,探讨酚酸类自毒物质肉桂酸和邻苯二甲酸处理对幼苗生长及光合特性的影响,为沙芥属植物的野生资源保护和开发利用提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

供试的沙芥 [*P. cornutum* (L.) Gaertn.] 和斧翅沙芥 (*P. dolabratum* Maxim.) 种子均采自毛乌素沙地。肉桂酸和邻苯二甲酸分别由天津博迪化工股份有限公司和国药集团化学试剂有限公司提供。

### 1.2 试验设计

试验于 2019 年在内蒙古自治区野生特有蔬菜种质资源与种质创新重点实验室温室中进行。沙芥和斧翅沙芥种子经消毒后在 25 °C 恒温箱内催芽,将发芽一致的种子播于营养钵(高 18 cm,直径 15 cm)中,培养基质为体积比 1:1 的蛭石和土壤配成的混合基质,待幼苗子叶展平后,分别用 0(对照),0.01,0.1,1,10 mmol/L 的邻苯二甲酸、肉桂酸溶液处理幼苗,每钵浇灌 100 mL,每隔 3 d 浇灌 1 次。待沙芥和斧翅沙芥长至 6 叶 1 心时,采集幼苗进行各项指标的测定。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 生长指标

用直尺测量叶长(叶柄基部至叶尖的长度);用 1/1000 电子天平分别称量植株叶鲜质量;将叶置于 105 °C 烘箱中杀青 15 min 后,于 60 °C 烘干至恒质量,用 1/1000 电子天平分别称其干质量。

#### 1.3.2 叶绿素含量及比值

取 0.2 g 沙芥与斧翅沙芥叶片,采用分光光度法<sup>[23]</sup>测定叶绿素 a 与叶绿素 b 含量,最后计算叶绿素总量和叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值。

#### 1.3.3 叶绿素荧光参数

使用 FMS-2 (Hansatech, UK), 于晴天上午 9:30—11:00, 选取自基部向上第 3 片叶测定叶绿素荧光参数。测定前叶片暗处理 30 min, 测定初始荧光( $F_0$ ), 随后给叶片施加  $3\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  饱和脉冲光 0.7 s, 测得最大荧光( $F_m$ )。打开作用光 [ $600\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 在荧光下降至施加饱和光前、稳定水平之后 20 s 测得恒态荧光( $F_s$ )。然后计算最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学效率 [ $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F_s)/F_m'$ ]、光化学淬灭系数 [ $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$ ]、非光化学淬灭系数 [ $C_{\text{NPQ}} = (F_m - F_m')/F_m'$ ]。

#### 1.3.4 光合气体交换参数

使用 Li-6400 便携式光合仪, 于晴天上午 9:30—11:00, 选取自基部向上第 3 片叶, 在光照强度为

1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $\text{CO}_2$  浓度为 400  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  条件下测定不同处理下叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。

### 1.4 数据处理

用 Excel 2010 进行数据处理, SPSS 18.0 软件和 Duncan's 法进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥、斧翅沙芥幼苗生长的影响

沙芥幼苗的叶长、叶鲜质量、叶干质量在 0.01 mmol/L 肉桂酸和邻苯二甲酸处理下均不同程度高于对照(CK), 在其余浓度处理下均低于对照, 两类酚类物质对其生长均表现为低浓度促进高浓度抑制的效应, 且随着浓度增加抑制作用逐渐加强(表 1)。其中, 0.01 mmol/L 肉桂酸处理下沙芥的叶长、叶干质量相较对照分别显著上升 13.1%、37.0%, 0.01 mmol/L 邻苯二甲酸处理下沙芥的叶鲜质量和干质量均比对照显著上升 10.2% ( $P < 0.05$ ); 随肉桂酸与邻苯二甲酸浓度继续上升, 沙芥的叶长、叶鲜质量、叶干质量均逐渐下降, 且在 10.0 mmol/L 浓度下均与对照差异显著 ( $P < 0.05$ )。

与沙芥幼苗的表现不同, 斧翅沙芥幼苗的叶长、叶鲜质量、叶干质量在各浓度肉桂酸与邻苯二甲酸处理下均比对照显著降低, 且抑制作用随浓度的增大而增大, 在 10 mmol/L 肉桂酸处理下分别比对照下降 40.5%、39.4%、77.1%, 在 10 mmol/L 邻苯二甲酸处理下分别比对照下降 46.3%、63.5%、67.3%。由此可见, 沙芥幼苗对肉桂酸、邻苯二甲酸的耐性比斧翅沙芥更强, 但两种沙芥属植物生长在胁迫浓度为 1.0, 10 mmol/L 时均受到显著抑制。

### 2.2 肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥、斧翅沙芥幼苗叶绿素含量的影响

表 2 显示, 沙芥和斧翅沙芥的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量在不同浓度肉桂酸和邻苯二甲酸处理后均呈下降趋势, 但 2 种沙芥的叶绿素 a/b 的变化趋势却不尽相同。其中, 10 mmol/L 肉桂酸处理下, 沙芥的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量相比对照分别下降 9.2%、40.6%、23.5%, 叶绿素 a/b 相比对照上升 21.7%, 但仅叶绿素 b 含量变化显著 ( $P < 0.05$ ); 与此同时, 斧翅沙芥的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量相比对照分别显著下降 52.6%、37.3%、47.1% ( $P < 0.05$ ), 叶绿素 a/b 相比对照显著下降 24.5% ( $P < 0.05$ )。

表 1 肉桂酸和邻苯二甲酸处理下沙芥和斧翅沙芥幼苗生长的变化

Table 1 Growth of seedlings of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. under treatments of cinnamic acid and phthalic acid

材料 Materials	处理浓度 Treatment concentrations/(mmol/L)	叶长 Leaf lengths/cm	叶鲜质量 Fresh masses of leaf/g	叶干质量 Dry masses of leaf/g		
沙芥 <i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.	0 (CK)	19.90±0.80b	2.98±0.30a	0.43±0.02b		
	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	22.50±2.61a	3.38±0.20a	0.59±0.08a	
		0.1	17.83±1.27c	2.38±0.41b	0.42±0.07b	
		1	16.17±1.12d	1.33±0.14c	0.25±0.08c	
		10	11.17±1.41e	0.80±0.15d	0.10±0.03c	
	斧翅沙芥 <i>P. dolabratum</i> Maxim.	0 (CK)	23.10±2.58a	5.28±0.49b	0.88±0.08b	
		邻苯二甲酸 Phthalic acid	0.01	23.55±1.12a	5.82±0.82a	0.97±0.14a
			0.1	22.13±2.36b	5.07±1.78b	0.81±0.30b
			1	20.92±1.51c	4.37±1.62c	0.72±0.27c
			10	15.78±1.55d	3.30±1.00d	0.42±0.17d
沙芥 <i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.		0 (CK)	14.33±2.3a	1.93±0.23a	0.35±0.04a	
		肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	11.58±1.92b	1.76±0.52b	0.26±0.02b
			0.1	10.33±0.72c	1.55±0.27c	0.19±0.07c
			1	9.58±0.77d	1.33±0.14d	0.17±0.08c
			10	8.58±1.30e	1.17±0.34e	0.08±0.03d
	斧翅沙芥 <i>P. dolabratum</i> Maxim.	0 (CK)	20.47±0.87a	3.10±0.65a	0.52±0.11a	
		邻苯二甲酸 Phthalic acid	0.01	18.25±1.99b	2.44±0.39b	0.44±0.07b
			0.1	17.52±2.39c	2.36±0.30b	0.39±0.05b
			1	14.92±0.34d	2.07±0.61c	0.29±0.10c
			10	10.90±1.12e	1.13±0.42d	0.17±0.07d

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column show significant difference at 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below.

表 2 肉桂酸和邻苯二甲酸处理下沙芥和斧翅沙芥幼苗叶片叶绿素含量的变化

Table 2 Chlorophyll content in leaves of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. seedling treated by cinnamic acid and phthalic acid

材料 Materials	处理浓度 Treatment concentrations/(mmol/L)	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a+b Chl a+Chl b	叶绿素 a/b Chl a/Chl b		
沙芥 <i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.	0	5.13±0.22a	4.29±0.54a	9.42±0.19a	1.20±0.12b		
	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	4.86±0.72a	3.45±0.27ab	8.30±0.24a	1.41±0.13b	
		0.1	4.86±0.22a	2.69±0.25b	7.55±0.04a	1.81±0.15a	
		1	4.43±0.43a	2.72±0.05b	7.15±0.15a	1.72±0.57a	
		10	4.66±0.38a	2.55±0.37b	7.21±0.32a	1.46±0.24b	
	斧翅沙芥 <i>P. dolabratum</i> Maxim.	0	4.15±0.82a	3.73±0.37a	7.88±0.69a	1.11±0.31a	
		邻苯二甲酸 Phthalic acid	0.01	4.08±0.10a	3.53±0.25a	7.61±0.34a	1.16±0.06a
			0.1	4.03±0.17ab	3.24±0.44ab	7.27±0.40a	1.26±0.18a
			1	3.26±0.43bc	2.71±0.39b	5.97±0.78b	1.21±0.12a
			10	3.02±0.14c	2.68±0.07b	5.70±0.20b	1.13±0.04a
沙芥 <i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.		0	5.44±0.82a	2.95±0.15a	8.39±0.24a	1.84±0.03a	
		肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	5.02±0.37a	2.71±0.32a	7.74±0.37a	1.85±0.06a
			0.1	4.52±0.24a	2.52±0.21a	7.04±0.38a	1.79±0.02a
			1	2.39±0.25b	1.77±0.24b	4.17±0.32b	1.33±0.14b
			10	2.58±0.19b	1.85±0.16b	4.44±0.35b	1.39±0.05b
	斧翅沙芥 <i>P. dolabratum</i> Maxim.	0	4.46±0.18a	3.56±0.09a	8.02±0.26a	1.25±0.03b	
		邻苯二甲酸 Phthalic acid	0.01	4.15±0.27a	3.55±0.16a	7.70±0.33a	1.17±0.09bc
			0.1	4.11±0.65a	2.41±0.27b	6.52±0.81b	1.71±0.24a
			1	1.82±0.15b	2.19±0.22b	4.01±0.36c	0.82±0.04d
			10	1.45±0.19b	1.54±0.177c	2.99±0.28d	0.95±0.16cd

在 10 mmol/L 邻苯二甲酸处理下,沙芥的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量相比对照分别显著下降 51.3%、28.2%、27.7%,叶绿素 a/b 相比对照稍有上升( $P>0.05$ );此时斧翅沙芥的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、叶绿素 a/b 相比对照分别下降 67.5%、56.7%、62.5%、24.0% ( $P<0.05$ )。可见,2 种沙芥叶绿素含量均受到肉桂酸和邻苯二甲酸的抑制,斧翅沙芥受到抑制的程度比沙芥更重。

### 2.3 肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥、斧翅沙芥幼苗叶绿素荧光参数的影响

由表 3 可知,随着肉桂酸和邻苯二甲酸处理浓度的增加,沙芥和斧翅沙芥的  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  均

逐渐降低,而 NPQ 均逐渐上升,且与对照相比各浓度处理升降幅度大多达到显著水平。其中,在 10 mmol/L 肉桂酸处理下,沙芥  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  相比对照分别显著下降 33.5%、59.7%、47.8%,相应的斧翅沙芥相比对照分别显著下降 44.9%、67.1%、68.8%,此时沙芥和斧翅沙芥 NPQ 值分别比对照显著升高 129.2%、111.7% ( $P<0.05$ )。在 10 mmol/L 邻苯二甲酸处理下,沙芥  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  相比对照分别显著下降 33.6%、60.5%、63.9%,相应的斧翅沙芥相比对照分别显著下降 58.4%、69.2%、71.7%,此时沙芥和斧翅沙芥 NPQ 分别比对照显著升高 179.7%、160.6% ( $P<0.05$ )。

表 3 肉桂酸和邻苯二甲酸处理下沙芥和斧翅沙芥幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化

Table 3 Chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. under treatment of cinnamic acid and phthalic acid

材料 Materials	处理浓度 Treatment concentrations (mmol/L)	最大光化学效率 $F_v/F_m$	实际光化学效率 $\Phi_{PSII}$	光化学淬灭系数 $qP$	非光化学淬灭系数 NPQ	
<i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.	0	0.841±0.006a	0.615±0.028a	0.647±0.017a	0.226±0.011c	
	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	0.767±0.019b	0.586±0.006a	0.613±0.006a	0.334±0.002b
		0.1	0.668±0.036c	0.471±0.014b	0.504±0.027b	0.472±0.029a
		1	0.607±0.005d	0.390±0.010c	0.432±0.033c	0.490±0.009a
		10	0.559±0.008e	0.284±0.018d	0.338±0.033d	0.518±0.008a
	邻苯二甲酸 Phthalic acid	0	0.839±0.010a	0.575±0.01a	0.635±0.008a	0.433±0.052d
		0.01	0.731±0.067b	0.499±0.014b	0.548±0.015b	0.650±0.106c
		0.1	0.685±0.035b	0.413±0.011c	0.447±0.012c	1.005±0.044b
		1	0.625±0.014c	0.337±0.038d	0.358±0.042d	1.131±0.123ab
		10	0.557±0.021d	0.227±0.018e	0.229±0.019e	1.221±0.023a
0		0.821±0.065a	0.674±0.042a	0.736±0.039a	0.255±0.011d	
<i>P. dolabratum</i> Maxim.	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	0.683±0.041b	0.578±0.010b	0.630±0.005b	0.365±0.007c
		0.1	0.611±0.005b	0.527±0.034b	0.556±0.044b	0.440±0.043b
		1	0.594±0.004b	0.430±0.010c	0.440±0.008c	0.481±0.002b
		10	0.452±0.003c	0.222±0.040d	0.230±0.043d	0.540±0.010a
	邻苯二甲酸 Phthalic acid	0	0.846±0.014a	0.549±0.054a	0.601±0.053a	0.307±0.028b
		0.01	0.663±0.021b	0.423±0.040b	0.461±0.040b	0.363±0.087b
		0.1	0.609±0.011b	0.406±0.050b	0.434±0.058b	0.616±0.030a
		1	0.530±0.022c	0.363±0.040b	0.381±0.045b	0.669±0.163a
		10	0.352±0.038d	0.169±0.019c	0.170±0.019c	0.700±0.017a

### 2.4 肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥、斧翅沙芥幼苗气体交换参数的影响

如表 4 所示,随肉桂酸处理浓度的升高,沙芥幼苗的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  均逐渐下降,且均与对照差异显著,其  $C_i$  先降后升,且在 10 mmol/L 时达到最大值;在

10 mmol/L 肉桂酸处理下,沙芥  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  相比对照分别下降 53.5%、32.7%、37.6%,其  $C_i$  相比对照显著上升 16.5% ( $P<0.05$ )。斧翅沙芥  $P_n$  在 0.01 mmol/L 肉桂酸处理下比对照稍有上升 ( $P>0.05$ ),在其余浓度处理下均比对照显著降低,10



mmol/L时达到最低,相比对照显著下降 52.4% ( $P < 0.05$ ); 斧翅沙芥的  $T_r$ 、 $G_s$  均随肉桂酸浓度升高逐渐降低,在 10 mmol/L 肉桂酸处理下相比对照分别显著下降 36.3%、37.5% ( $P < 0.05$ ),其  $C_i$  表现出先降后升的趋势,但均与对照差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

同时,沙芥、斧翅沙芥幼苗的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  在 0.01 mmol/L 邻苯二甲酸处理下比对照有小幅升

高 ( $P > 0.05$ ),后均随邻苯二甲酸浓度升高开始逐渐下降,在浓度为 10 mmol/L 时,沙芥  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  相比对照分别显著下降 31.6%、21.4%、37.6%,而斧翅沙芥分别相应显著下降 21.6%、33.8%、35.9% ( $P < 0.05$ ); 沙芥、斧翅沙芥幼苗  $C_i$  在邻苯二甲酸处理下逐渐升高,在浓度为 10 mmol/L 时相比对照分别显著上升 16.8% 和 19.9% ( $P < 0.05$ )。

表 4 肉桂酸和邻苯二甲酸处理下沙芥和斧翅沙芥气体交换参数的变化

Table 4 Gas exchange parameters of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. under treatment of cinnamic acid and phthalic acid

材料 Materials	处理浓度 Treatment concentrations (mmol/L)	净光合速率 $P_n$ / [ $\mu\text{mol}(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率 $T_r$ / [ $\text{mmol}(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 $G_s$ / [ $\text{mol}(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ / ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	
沙芥 <i>P. cornutum</i> (L.) Gaertn.	0	21.50 ± 0.80a	13.67 ± 0.60a	0.585 ± 0.01a	393.32 ± 3.39bc	
	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	19.97 ± 0.44b	12.07 ± 0.29b	0.544 ± 0.02b	387.33 ± 6.35bc
		0.1	18.70 ± 0.32b	10.80 ± 0.39c	0.484 ± 0.01c	377.29 ± 2.73c
		1	15.27 ± 1.03c	9.97 ± 0.42d	0.456 ± 0.02d	415.00 ± 16.78b
		10	10.00 ± 0.39d	9.20 ± 0.24d	0.365 ± 0.02e	458.35 ± 29.18a
	邻苯二甲酸 Phthalic acid	0	15.20 ± 0.75a	9.83 ± 0.71a	0.572 ± 0.022a	341.32 ± 39.6b
		0.01	15.30 ± 0.51a	10.30 ± 0.76a	0.577 ± 0.018a	350.60 ± 13.1b
		0.1	14.10 ± 0.91ab	9.41 ± 0.49ab	0.472 ± 0.042b	359.24 ± 10.5b
		1	13.57 ± 0.61b	8.43 ± 0.5bc	0.444 ± 0.023b	375.61 ± 12.8ab
		10	10.40 ± 0.63c	7.73 ± 0.47c	0.357 ± 0.021c	398.72 ± 23.4a
斧翅沙芥 <i>P. dolabratum</i> Maxim.		0	19.13 ± 0.90a	12.87 ± 0.49a	0.56 ± 0.04a	365.28 ± 19.79a
	肉桂酸 Cinnamic acid	0.01	19.83 ± 0.32a	11.37 ± 1.12b	0.53 ± 0.01a	351.00 ± 33.98a
		0.1	17.63 ± 0.44b	10.17 ± 0.67bc	0.45 ± 0.04b	357.33 ± 8.31a
		1	15.27 ± 1.21c	9.07 ± 0.22cd	0.43 ± 0.02b	366.00 ± 22.25a
		10	9.10 ± 0.32d	8.20 ± 0.78d	0.35 ± 0.04c	371.67 ± 25.08a
	邻苯二甲酸 Phthalic acid	0	14.10 ± 0.20a	11.53 ± 1.30a	0.527 ± 0.034a	325.62 ± 17.16c
		0.01	14.30 ± 0.26a	11.80 ± 0.36a	0.531 ± 0.006a	329.53 ± 15.39c
		0.1	13.27 ± 0.25b	10.26 ± 0.90a	0.448 ± 0.058b	347.60 ± 5.68bc
		1	12.83 ± 0.31c	8.36 ± 0.55b	0.424 ± 0.008b	360.36 ± 10.11b
		10	11.06 ± 0.25c	7.63 ± 1.01b	0.338 ± 0.029c	390.32 ± 8.32a

### 3 讨论

生物量是评估植物遭受胁迫程度与抗逆能力的重要指标。研究表明,多种植物腐解物或分泌物中均含有自毒物质<sup>[24]</sup>,这些物质通过多种方式对植物生长发育产生影响<sup>[25]</sup>。Jefferson 等研究发现,自毒物质在低浓度下促进植株幼苗生长,在高浓度下抑制幼苗生长<sup>[26]</sup>。本研究发现,肉桂酸、邻苯二甲酸处理沙芥幼苗后,在较低浓度下对幼苗生长具有一定促进作用,而高浓度则产生抑制作用,这与 Jefferson 等的研究结果一致。另外,本试验中 10 mmol/L

肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥和斧翅沙芥幼苗生长发育具有明显抑制作用,这与孟鑫等自毒物质胁迫对黄瓜幼苗的生长影响研究结果<sup>[27]</sup>一致。

光合作用作为植物维持生命的最基本活动,为植物的生存提供物质基础和能量来源。有研究表明,影响植物光合作用效率的因素包括气孔限制和非气孔限制<sup>[28]</sup>。当  $G_s$  与  $C_i$  同时下降时, $P_n$  下降主要是由气孔限制因素引起的,如果  $P_n$  降低伴随着  $C_i$  升高,则光合作用的主要限制因素是非气孔因素<sup>[29]</sup>。本研究发现,随着肉桂酸和邻苯二甲酸浓度的增加沙芥和斧翅沙芥幼苗的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  均在

10 mmol/L 时达到最低,而  $C_i$  略有升高,推测是由于非气孔限制因素使植物体消耗的  $CO_2$  量减少,导致  $CO_2$  在细胞内大量积累,表明沙芥和斧翅沙芥幼苗在肉桂酸和邻苯二甲酸胁迫下光合速率降低的原因是由于非气孔限制导致,这与朱珊珊等<sup>[20]</sup> 研究结果相类似。

光合色素在植物光合作用能量转化过程中担负着重要作用,植物生长动态与其含量高低有一定的联系,是影响光合作用强弱的重要因素之一<sup>[30]</sup>。Einhellig 等发现咖啡酸、香草酸和阿魏酸等自毒物质可以通过影响叶片叶绿素含量、光合作用等生理指标来抑制植物的生长发育<sup>[31]</sup>。N-苯基-2-萘胺对拟柱胞藻叶绿素合成也表现出明显的抑制作用<sup>[32]</sup>。孟鑫等<sup>[27]</sup> 研究发现肉桂酸处理对黄瓜叶片叶绿素含量有显著抑制的效果,降低了幼苗的光合能力。本试验结果表明,10 mmol/L 肉桂酸处理下沙芥叶绿素 b 含量显著低于对照,10 mmol/L 邻苯二甲酸处理下沙芥和斧翅沙芥叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量均显著下降,说明肉桂酸和邻苯二甲酸胁迫能够抑制沙芥和斧翅沙芥叶片光合色素合成,不利于幼苗的光合作用,这与前人的研究结果基本一致。

植物对光能的利用效率可以通过叶绿素荧光参数体现,可以反映植物对逆境胁迫的响应程度<sup>[33]</sup>。叶绿素荧光参数中,  $F_v/F_m$  表示 PS II 的最大光化学效率,是衡量 PS II 光抑制程度的重要指标<sup>[34]</sup>。在逆境胁迫条件下,叶绿体构型混乱造成植物叶片 PS II 的实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 和最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 的降低,导致用于碳同化积累的能量和光能转化利用效率降低<sup>[35]</sup>。  $qP$  是光化学淬灭系数,反映了 PS II 用于光化学电子传输的光能所占天然色素吸收光能的比例,能代表 PS II 反应中心的开放

程度<sup>[36]</sup>。非光化学淬灭系数 NPQ 可以反映植物热耗散能力的变化<sup>[37]</sup>, NPQ 越大,对 PS II 反应中心的损伤越小<sup>[38]</sup>。有研究表明逆境胁迫会降低  $F_v/F_m$ , 抑制 PS II 活性,降低植物叶片  $qP$  和光能利用率<sup>[39-40]</sup>。本研究中,沙芥和斧翅沙芥幼苗的  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$  和  $qP$  随肉桂酸和邻苯二甲酸浓度的升高均呈现下降趋势, NPQ 显著上升,说明肉桂酸和邻苯二甲酸胁迫导致沙芥和斧翅沙芥叶片的 PS II 反应中心活性和开放程度受损,能量耗散途径受到促进,减少光抑制,减轻胁迫对沙芥和斧翅沙芥叶片光合机构的伤害,这与洪立洲等<sup>[41]</sup>、苏兰茜等<sup>[42]</sup> 的研究结果一致。有研究表明,外源硅胁迫增加了黄瓜叶片 NPQ,缓解了光合系统的运转<sup>[43]</sup>。本试验通过研究不同浓度肉桂酸和邻苯二甲酸处理对沙芥和斧翅沙芥叶绿素荧光参数的影响,得出与前人<sup>[43]</sup> 相同的结果。由此可见,肉桂酸、邻苯二甲酸通过抑制沙芥、斧翅沙芥 PS II 原初光能转化效率及其潜在活性,进一步影响其碳同化运转和有机物积累,沙芥、斧翅沙芥对胁迫环境表现出一定的耐受能力。但沙芥、斧翅沙芥受抑制作用强度各异,可能是由于植物类型和胁迫类型不同而表现出不同的变化趋势。

## 4 结 论

低浓度肉桂酸和邻苯二甲酸促进沙芥和斧翅沙芥幼苗的生长,而高浓度胁迫抑制沙芥和斧翅沙芥幼苗的生长,降低了幼苗的光合速率,抑制叶片光合色素合成,导致叶片的 PS II 反应中心活性和开放程度受损,改变植株光合能力,并具有浓度效应,并在 10 mmol/L 时抑制作用最明显,且沙芥和斧翅沙芥受抑制作用强度不同,斧翅沙芥幼苗受到影响更大。

## 参考文献:

[1] 史文中,黄培建,阮静雅,等. 传统沙生蒙药沙芥的化学成分研究[J]. 天津中医药大学学报, 2019, 38(1): 74-77.  
SHI W Z, HUANG P J, RUAN J Y, et al. Study on the constituents of traditional arenicolous Mongolian medicine *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. [J]. *Journal of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine*, 2019, 38(1): 74-77.

[2] 郑清岭,杨冬艳,刘建文,等. 干旱胁迫对沙芥和斧形沙芥幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(4): 600-608.  
ZHENG Q L, YANG D Y, LIU J W, et al. Effects of drought stress on growth and antioxidant system of *Pugio-*

*nium cornutum* and *Pugionium dolabratum* seedlings [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(4): 600-608.

[3] 宋兆伟,郝丽珍,黄振英,等. 光照和温度对沙芥和斧翅沙芥植物种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2562-2568.  
SONG Z W, HAO L Z, HUANG Z Y, et al. Effects of light and temperature on the germination of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and *Pugionium dolabratum* Maxim. seeds [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2562-2568.

[4] 张卫华,郝丽珍,王彦华,等. 沙芥种子吸水和发芽过程中几种贮藏物质的含量变化[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(4): 528-530.  
ZHANG W H, HAO L Z, WANG Y H, et al. Changes in

- some storage substances in seeds during the water uptake and germination of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. [J]. *Plant Physiology Communications*, 2005, 41(4): 528-530.
- [5] 鲍红春, 郝丽珍, 张凤兰, 等. 沙芥果皮浸提液对白菜种子化感作用及其化感物质分析[J]. 北方农业学报, 2019, 47(4): 8-14. BAO H C, HAO L Z, ZHANG F L, *et al.* Allelopathy of cabbage seeds soaked from the extraction of peels of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and analysis of its allelochemicals[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(4): 8-14.
- [6] LI Z F, YANG Y Q, XIE D F, *et al.* Identification of autotoxic compounds in fibrous roots of *Rehmannia glutinosa* Libosch. [J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e28806.
- [7] CHEN S L, ZHOU B L, LIN S S, *et al.* Accumulation of cinnamic acid and vanillin in eggplant root exudates and the relationship with continuous cropping obstacle[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(14): 2659-2665.
- [8] YU J Q, SHOU S Y, QIAN Y R, *et al.* Autotoxic potential of cucurbit crops[J]. *Plant and Soil*, 2000, 223(1): 149-153.
- [9] 杜毛笑, 邱黛玉, 任凤英, 等. 间作植物和茬口对连作党参生长和品质产量的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(11): 1884-1892. DU M X, QIU D Y, REN F Y, *et al.* Effects of intercropping crops and stubbles on growth, yield and quality of *Codonopsis pilosula* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(11): 1884-1892.
- [10] KATO-NOGUCHI H, NAKAMURA K, OHNO O, *et al.* *Asparagus* decline: Autotoxicity and autotoxic compounds in *Asparagus* rhizomes [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 213: 23-29.
- [11] CHI W C, CHEN Y N, HSIUNG Y C, *et al.* Autotoxicity mechanism of *Oryza sativa*: Transcriptome response in rice roots exposed to ferulic acid[J]. *BMC Genomics*, 2013, 14: 351.
- [12] 拱健婷, 张子龙. 植物化感作用影响因素研究进展[J]. 生物化学杂志, 2015, 32(3): 73-77. GONG J T, ZHANG Z L. Research advance on influencing factors of plant allelopathy[J]. *Journal of Biology*, 2015, 32(3): 73-77.
- [13] WU Z J, YANG L, WANG R Y, *et al.* *In vitro* study of the growth, development and pathogenicity responses of *Fusarium oxysporum* to phthalic acid, an autotoxin from Lanzhou lily[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 31(8): 1227-1234.
- [14] 安志刚, 郭凤霞, 陈垣, 等. 连作自毒物质与根际微生物相互作用研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 750-756. AN Z G, GUO F X, CHEN Y, *et al.* Advances in interactions between autotoxic compounds and rhizosphere microbes in continuous cropping obstacles[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3): 750-756.
- [15] 刘鑫, 付丽娟, 于静, 等. 5种外源物质对干旱胁迫下笔筒树幼苗生长的缓解效应[J]. 西北植物学报, 2022, 42(7): 1169-1179. LIU X, FU L J, YU J, *et al.* Alleviation effect of five exogenous substances on *Sphaeropteris lepifera* seedlings under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(7): 1169-1179.
- [16] ABDELAAL K A A, MAZROU Y S A, HAFEZ Y M. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield [J]. *Plants* (Basel, Switzerland), 2020, 9(6): 733.
- [17] YANG M H, ZHANG L, XU S T, *et al.* Effect of water soluble humic acid applied to potato foliage on plant growth, photosynthesis characteristics and fresh tuber yield under different water deficits[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7854.
- [18] ASHRAF M, HARRIS P J C. Photosynthesis under stressful environments: An overview[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(2): 163-190.
- [19] STUPNICKA-RODZYKIEWICZ E, DABROWSKA T, STOKLOSA A, *et al.* The effect of selected phenolic compounds on the initial growth of four weed species[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection, Supplement*, 2006(20): 479-486.
- [20] 朱珊珊, 米俊珍, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下喷施黄腐酸对燕麦光合及其抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(11): 1902-1909. ZHU S S, MI J Z, ZHAO B P, *et al.* Effects of spraying fulvic acid on photosynthesis and antioxidant enzyme activity of oat under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(11): 1902-1909.
- [21] 赵绪生, 齐永志, 甄文超. 不同抗连作障碍品种草莓根系分泌物化感物质差异分析及其化感效应[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(3): 100-105. ZHAO X S, QI Y Z, ZHEN W C. Allelochemicals and allelopathy of the root exudates of different resistant strawberry cultivars to replant disease[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2012, 35(3): 100-105.
- [22] 李键, 刘奕, 吴承祯, 等. 木麻黄的2种化感物质对其水培幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(5): 781-786. LI J, LIU Y, WU C Z, *et al.* Effect of two allelochemicals of *Casuarina equisetifolia* L. on chlorophyll fluorescence parameters in hydroponically cultured seedling [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(5): 781-786.
- [23] 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.
- [24] 齐永志, 甄文超. 对羟基苯甲酸胁迫对不同草莓品种光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(6): 1157-1166. QI Y Z, ZHEN W C. Impacts of 4-hydroxybenzoic acid on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of different strawberry cultivars[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(6): 1157-1166.
- [25] 张学文, 刘亦学, 刘万学, 等. 植物化感物质及其释放途径[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 295-297. ZHANG X W, LIU Y X, LIU W X, *et al.* Allelochemicals



- and its releasing modes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 295-297.
- [26] JEFFERSON L V, PENNACCHIO M. Allelopathic effects of foliage extracts from four Chenopodiaceae species on seed germination[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(2): 275-285.
- [27] 孟鑫, 郁继华, 颀建明, 等. 外源硅对自毒作用下黄瓜幼苗生长及光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(10): 1688-1697.
- MENG X, YU J H, XIE J M, *et al.* Effect of exogenous silicon on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of cucumber seedlings under autotoxicity[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(10): 1688-1697.
- [28] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [29] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 241-244.
- XU D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis [J]. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4): 241-244.
- [30] 李菁, 闫岩, 魏韬书, 等. 硅对 NaCl 胁迫下柳枝稷叶片光合色素及气体交换特性的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(11): 2283-2290.
- LI J, YAN Y, WEI T S, *et al.* Effect of silicon on chlorophyll content and gas exchange characteristics of switchgrass under NaCl stress[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2283-2290.
- [31] EINHELLIG F A, RASMUSSEN J A. Effects of three phenolic acids on chlorophyll content and growth of soybean and grain sorghum seedlings[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1979, 5(5): 815-824.
- [32] 刘瑞, 白芳, 冉小飞, 等. *N*-苯基-2-萘胺对拟柱胞藻生长、抗氧化酶及光合系统 II 的影响[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(4): 774-781.
- LIU R, BAI F, RAN X F, *et al.* Effect of *N*-phenyl-2-naphthylamine on the growth, antioxidative enzyme and PS II in *Cylindropermopsis raciborskii* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(4): 774-781.
- [33] 周君, 肖伟, 陈修德, 等. 喷施氨基酸钙对黄金梨光合性能、果实钙含量及品质的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(4): 551-555.
- ZHOU J, XIAO W, CHEN X D, *et al.* Effect of spraying amino acid-Ca on photosynthetic characteristics, calcium content and quality of 'Whangkeumbae' pear[J]. *Journal of Shandong Agricultural University* (Natural Science Edition), 2018, 49(4): 551-555.
- [34] CSINTALAN Z, PROCTOR M C F, TUBA Z. Chlorophyll fluorescence during drying and rehydration in the mosses *Rhytidiadelphus loreus* (Hedw.) Warnst., *Anomodon viticulosus* (Hedw.) Hook. & Tayl. and *Grimmia pulvinata* (Hedw.) Sm. [J]. *Annals of Botany*, 1999, 84(2): 235-244.
- [35] 王阳. 外源亚精胺对盐胁迫下薄壳山核桃和山核桃嫁接苗生理生化特性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [36] KOOTEN O, SNEL J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 25(3): 147-150.
- [37] 岑海燕, 姚洁妮, 翁海勇, 等. 叶绿素荧光技术在植物表型分析的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(12): 3773-3779.
- CEN H Y, YAO J N, WENG H Y, *et al.* Applications of chlorophyll fluorescence in plant phenotyping: A review[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(12): 3773-3779.
- [38] 巩擎柱, 吕金印, 徐炳成, 等. 水分胁迫和种植方式对小麦叶绿素荧光参数及水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(5): 83-87.
- GONG Q Z, LÜ J Y, XU B C, *et al.* Effect of water stress on chlorophyll fluorescence parameters and WUE of wheat under different planting models[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science Edition), 2006, 34(5): 83-87.
- [39] 李汉美, 何勇. NaCl 胁迫对番茄嫁接苗光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(3): 131-134.
- LI H M, HE Y. Effects of NaCl stress on photosynthetic and fluorescence parameters in grafted tomato seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(3): 131-134.
- [40] 高秀瑞, 李冰, 高洪波, 等. 低温胁迫对茄子幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *河北农业科学*, 2012, 16(10): 40-43.
- GAO X R, LI B, GAO H B, *et al.* Effects of low temperature stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of eggplant seedlings[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2012, 16(10): 40-43.
- [41] 洪立洲, 王茂文, 丁海荣, 等. NaCl 胁迫对马齿苋光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(12): 2516-2521.
- HONG L Z, WANG M W, DING H R, *et al.* Characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Portulaca oleracea* under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(12): 2516-2521.
- [42] 苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 等. 盐胁迫对 2 种菠萝蜜属植物幼苗生长及光合荧光特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2140-2150.
- SU L X, BAI T Y, YU H, *et al.* Effects of salt stress on seedlings growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of two species of *Artocarpus* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2140-2150.
- [43] 周秀杰, 赵红波, 马成仓. 硅对严重干旱胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(5): 79-81.
- ZHOU X J, ZHAO H B, MA C C. Effects of silicon on chlorophyll fluorescence of cucumber seedlings under severe drought stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(5): 79-81.