

孙彤彤, 武春成, 宋士清. 外源水杨酸(SA)、油菜素内酯(BR)浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗光合特性及叶片解剖结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1184-1190.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.026

## 外源水杨酸(SA)、油菜素内酯(BR)浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗光合特性及叶片解剖结构的影响

孙彤彤, 武春成, 宋士清

(河北科技师范学院, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 为了探索外源水杨酸(Salicylic acid, SA)、油菜素内酯(Brassinosteroids, BR)对黄瓜幼苗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫的诱抗作用,以绿岛7号为试材,采用基质培养的方法,研究了外源SA浸种、BR浸种、SA+BR复配浸种对60 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗生长、光合特性和叶片解剖结构的影响。结果表明:外源SA浸种、BR浸种、SA+BR复配浸种均增加了黄瓜幼苗光合色素含量,提高了光合速率,促进了气孔开放,提升了栅栏组织厚度/海绵组织厚度比值。说明SA和BR浸种都能诱导黄瓜幼苗产生耐盐性,缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制作用,其中以SA浸种处理作用效果最明显。

**关键词:** 黄瓜; 水杨酸; 油菜素内酯;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫; 光合特性; 叶片解剖结构

**中图分类号:** S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1184-07

## Effects of exogenous salicylic acid(SA) and brassinosteroids(BR) soaking on photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of cucumber seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress

SUN Tong-tong, WU Chun-cheng, SONG Shi-qing

(Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** To explore the inhibitory effect of exogenous salicylic acid (SA) and brassinosteroids (BR) on  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress cucumber seedlings, the effects of exogenous SA soaking, BR soaking and SA+BR soaking on the growth, photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of cucumber seedlings under  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (60 mmol/L) stress were studied using Lyudao No.7 as the test material and using the method of matrix culture. The results showed that the treatment of exogenous SA soaking, BR soaking and SA+BR complex soaking increased the photosynthetic pigment content and the photosynthetic rate, promoted stomatal opening, and increased the ratio of palisade tissue thickness to sponge tissue thickness. It indicates that both SA and BR soaking seeds can induce salt-tolerance of cucumber seedlings and alleviate the inhibitory effect of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress on the growth of cucumber seedlings. Furthermore, the effect of SA soaking treatment is the most obvious.

**Key words:** cucumber; salicylic acid;

brassinosteroids;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress; photosynthetic characteristics; leaf anatomical structure

收稿日期: 2019-04-25

**基金项目:** 河北省自然科学基金项目(C2016407101); 河北省科技计划项目(16236901D-03); 河北省现代农业产业技术体系项目(HBCT2018030209)

**作者简介:** 孙彤彤(1993-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事设施蔬菜栽培及其逆境生理研究。(E-mail) 13292940522@163.com

**通讯作者:** 宋士清, (E-mail) qhdsuq@163.com

土壤次生盐渍化能够抑制植物的生长发育, 影响其品质及产量, 严重时甚至会造成植株死亡<sup>[1]</sup>。黄瓜(*Cucumis sativus* L.) 是重要的设施栽培蔬菜之

一,黄瓜种植对蔬菜的周年供应发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。在设施栽培中易发生连作障碍,加剧土壤盐渍化程度,造成黄瓜减产。因此,研究黄瓜的抗盐性对黄瓜生产具有重要意义。

大量研究结果表明,施用外源化学物质水杨酸(Salicylic acid, SA)和油菜素内酯(Brassinosteroids, BR)能够诱导植物产生抗性。SA能够通过调节作物的生理生化过程,如气孔关闭、光合作用等,降低逆境环境对作物造成的危害,增强作物的耐逆性<sup>[3-8]</sup>。BR可以通过参与调节植物的生长发育过程,如叶片衰老、气孔关闭等,提高植物的抗逆性<sup>[9-11]</sup>。

在植物抗盐性研究中,多数学者以NaCl作为盐胁迫因子,但是温室土壤盐离子组成与露地不同,露地以Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>为主,而温室以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>为主<sup>[12]</sup>,因此本试验选用Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>作为盐胁迫因子。虽然有学者研究发现SA、BR单一浸种均能够增强植物的耐盐性<sup>[13-14]</sup>,但是关于SA+BR复配浸种对盐胁迫下黄瓜幼苗影响的研究尚未见报道。本试验以绿岛7号黄瓜品种为试材,通过研究SA浸种、BR浸种、SA+BR复配浸种对Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫下黄瓜幼苗光合特性和叶片解剖结构的变化,比较3种处理方式的诱抗效果,为设施栽培中Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>盐胁迫下黄瓜生产提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料:绿岛7号黄瓜品种,由河北科技师范学院黄瓜育种组提供。

供试药品:SA购自天津市风船化学试剂科技有限公司,AR≥99.5%;BR购自上海源叶生物科技有限公司,HPLC≥95.0%;Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>购自天津欧博凯化工有限公司,AR≥99.0%。

### 1.2 试验方法

试验于2018年5-6月在河北科技师范学院园艺科技学院日光温室及生理实验室进行,设置5个处理(表1)。SA浸种质量浓度由预备试验确定,BR浸种质量浓度、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫浓度根据前人<sup>[15]</sup>研究结果确定,并进行了试验验证。

选用籽粒饱满、大小一致的黄瓜种子,按照表1试验设计进行温汤浸种。种子发芽后播种于营养钵(基质为草炭:蛭石=2:1,质量比)中,每钵1粒。

幼苗长至2叶1心时,进行盐胁迫处理,距根部约1 cm处用注射器将40 ml 60 mmol/L Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液缓慢注入根际基质中,CK1注入等量的水,确保溶液不渗出营养钵。采用随机区组设计,每个处理15个营养钵,3次重复。盐胁迫处理20 d时,每个处理随机选取3株植株进行各指标的测定。

表1 试验设计

Table 1 Design of the test

处理	80 mg/L SA 浸种	0.01 mg/L BR 浸种	60 mmol/L Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 胁迫
CK1	0	0	0
CK2	0	0	+
T1	+	0	+
T2	0	+	+
T3	+	+	+

CK1为清水对照,CK2为Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫对照。“0”代表用等量蒸馏水代替相应药品。

### 1.3 测定指标

1.3.1 生长指标 测量植株株高(子叶节至幼苗生长点)、茎粗(子叶节下1 cm处)、地下部和地上部鲜质量(用分度值0.001 g的电子天平称量)、地下部与地上部干质量(用分度值0.000 1 g的分析天平称量),并计算壮苗指数。

1.3.2 叶绿素含量 采用郝建军等<sup>[16]</sup>方法测定,并根据Liehtenthaler等<sup>[17]</sup>修正后的公式计算叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量。

1.3.3 光合参数 选取幼苗生长点以下第2片完全展开叶,使用便携式GFS-3000光合仪测定其净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )。

1.3.4 气孔观察 采用指甲油印迹法<sup>[18]</sup>制片,置于显微镜下观察、拍照。用Auto CAD-2016软件测量气孔长度、宽度以及气孔开放口长度、宽度,并计算气孔密度(单位面积气孔数量)。每个处理观察6张切片,每张切片观察3个视野。

1.3.5 叶片横切面结构 采用石蜡切片法<sup>[19]</sup>制片,置于显微镜下观察、拍照。用Auto CAD-2016软件测量叶片厚度、表皮厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度,并计算栅海比。每个处理观察6张切片,每张切片观察3个视野。

### 1.4 数据分析

用Excel 2007软件对试验数据进行统计制表,

采用 SPSS 20 软件进行显著性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 外源 SA、BR 浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

由表 2 可知,与 CK1 相比,CK2 处理显著抑制了黄瓜幼苗的生长。经 SA、BR 浸种处理后缓解了

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  胁迫对黄瓜幼苗的抑制作用,且不同药剂不同施用方式作用效果不同,其中以 T1 处理促进效果最大。与 CK2 处理相比,T1 处理的幼苗株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、壮苗指数分别显著提高了 41.41%、17.20%、48.54%、71.07%、53.99%、78.38%、30.77%。

表 2 外源 SA、BR 浸种对  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

Table 2 Effects of exogenous salicylic acid (SA) and brassinosteroids (BR) soaking seeds on growth of cucumber seedlings under  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	地上部鲜质量 (g)	地下部鲜质量 (g)	地上部干质量 (g)	地下部干质量 (g)	壮苗指数
CK1	20.2±0.3a	6.53±0.30a	22.084±1.593a	3.695±0.219a	1.910 4±0.064 2a	0.436 3±0.035 8a	7.598 4±0.544 6a
CK2	12.8±0.4d	5.29±0.15c	12.624±1.131c	1.535±0.073c	1.115 6±0.068 4d	0.185 0±0.009 5d	5.384 9±0.202 6c
T1	18.1±1.5b	6.20±0.21ab	18.752±2.164ab	2.626±0.271b	1.717 9±0.099 8ab	0.330 0±0.032 0b	7.041 7±0.161 5ab
T2	15.8±0.7c	5.72±0.51bc	17.411±3.011abc	2.180±0.616b	1.529 6±0.014 6bc	0.257 4±0.063 6c	6.544 4±0.417 7b
T3	15.6±1.6c	5.87±0.44abc	16.075±4.439bc	2.321±0.152b	1.404 6±0.206 4c	0.277 0±0.013 5bc	6.245 1±0.784 4bc

各处理见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

### 2.2 外源 SA、BR 浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜叶片光合色素含量的影响

由表 3 可知,与 CK1 处理相比,CK2 处理显著降低了黄瓜叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量。经 SA、BR 浸种处理后叶片叶绿素 a、总叶绿素含量显著提高,其中 T1 处理提高幅度最

大,分别比 CK2 处理提高了 38.13%、45.89%。T1、T3 处理叶片叶绿素 b 含量比 CK2 处理显著提高了 119.87%、117.91%,T2 处理与 CK2 处理的叶片叶绿素 b 含量无显著性差异。T1、T2、T3 处理叶片类胡萝卜素含量均与 CK2 处理无显著性差异。

表 3 外源 SA、BR 浸种对  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  胁迫下黄瓜叶片光合色素含量的影响

Table 3 Effects of exogenous SA and BR soaking seeds on photosynthetic pigment content of cucumber leaves under  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress

处理	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)
CK1	2.380 1±0.086 3a	0.406 0±0.018 3a	2.786 2±0.100 2a	0.706 3±0.050 9a
CK2	1.459 3±0.047 7d	0.153 0±0.061 7b	1.612 3±0.108 7d	0.630 6±0.053 9b
T1	2.015 8±0.032 4b	0.336 4±0.038 3a	2.352 2±0.070 1b	0.671 1±0.033 8ab
T2	1.796 6±0.024 1c	0.283 5±0.140 6ab	2.120 6±0.175 7c	0.659 9±0.008 5ab
T3	1.837 2±0.037 8c	0.333 4±0.068 7a	2.130 0±0.092 6c	0.652 8±0.022 9ab

各处理见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

### 2.3 外源 SA、BR 浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜叶片光合参数的影响

如图 1 所示,CK2 处理黄瓜幼苗的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度比 CK1 处理分别显著下降 22.91%、32.26%、37.44%、32.42%。经 SA、BR 浸种处理后黄瓜幼苗的净光合率、蒸腾速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度均比 CK2 处理显著提高,其中 T1 处理提高幅度最大,分别提高了

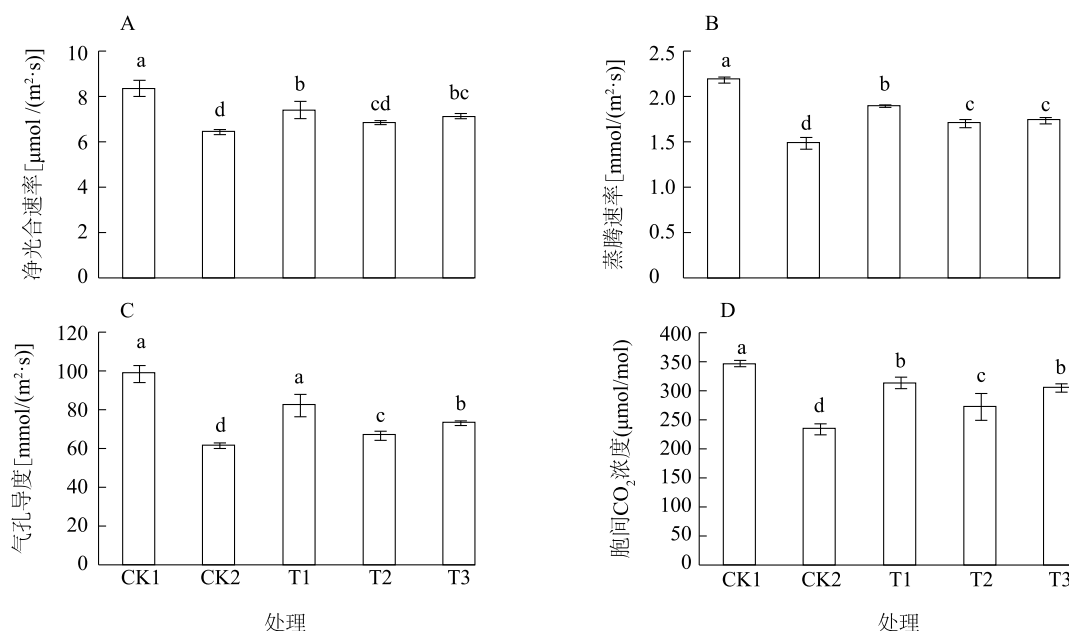
15.02%、27.89%、33.49%、33.44%。

### 2.4 外源 SA、BR 浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗气孔结构的影响

由图 2 可知,气孔散生在黄瓜叶片下表皮,由一对类似于肾形的保卫细胞组成。5 个处理的黄瓜叶片气孔特征存在差异(表 4)。由表 4 可知,CK2 处理黄瓜叶片气孔大小和气孔开度均比 CK1 显著降低,气孔密度显著提高。T1、T3 处理叶片气孔长度

分别比 CK2 处理显著提高了 44.74%、20.74%, T2 处理与 CK2 处理无显著性差异。T1 处理比 CK2 处理叶片气孔宽度显著提高了 17.27%, T2、T3 处理与 CK2 处理无显著性差异。T1、T3 处理气孔开度长分别比 CK2 处理显著提高了 24.42%、18.92%, T2 处

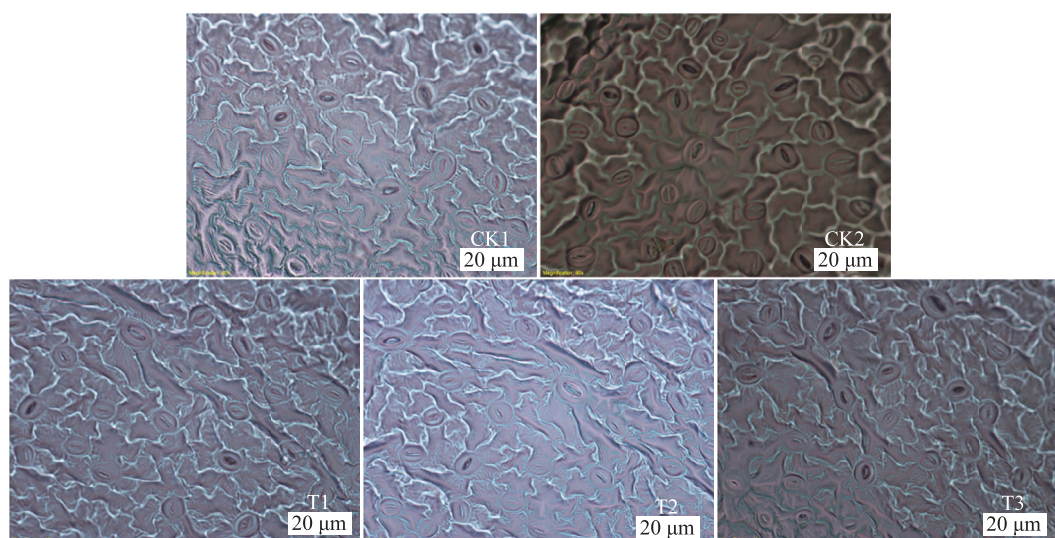
理与 CK2 处理无显著性差异。T1、T2、T3 处理叶片气孔开度宽均与 CK2 处理间无显著性差异。T1、T2、T3 处理叶片气孔密度分别比 CK2 处理显著降低了 34.31%、17.65%、25.49%。



各处理见表 1。不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

图 1 外源 SA、BR 浸种对Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫下黄瓜叶片光合参数的影响

Fig.1 Effects of exogenous SA, BR soaking seeds on photosynthetic parameter in cucumber leaves under Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> stress



CK1、CK2、T1、T2、T3 处理见表 1。

图 2 外源 SA、BR 浸种对Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫下黄瓜叶片气孔结构的影响

Fig.2 Effects of exogenous SA and BR soaking seeds on the stomatal structure of cucumber leaves under Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> stress



表 4 外源 SA、BR 浸种对  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  胁迫下黄瓜叶片气孔结构的影响Table 4 Effects of exogenous SA and BR soaking seeds on the stomatal structure of cucumber leaves under  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress

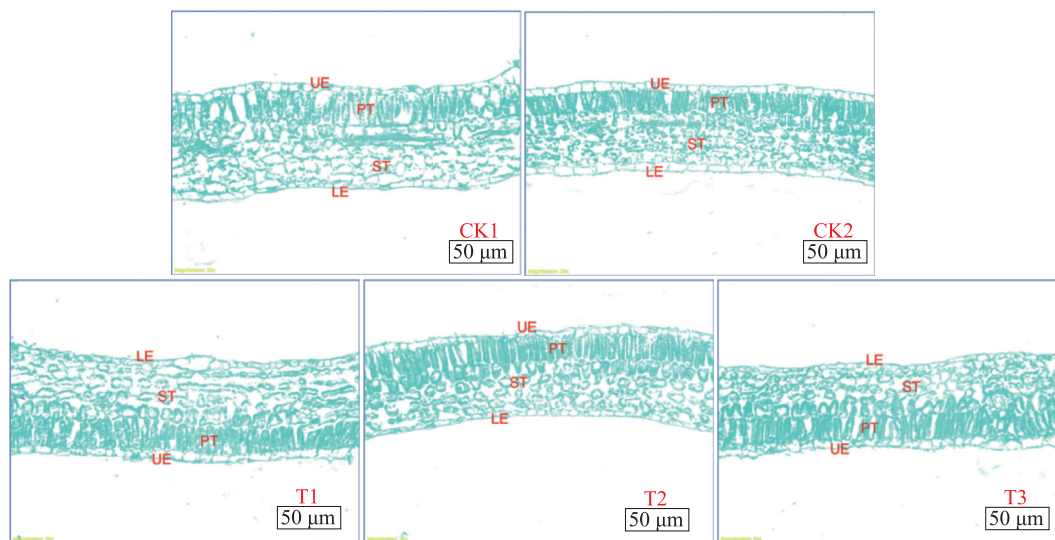
处理	气孔大小 ( $\mu\text{m}$ )		气孔开度 ( $\mu\text{m}$ )		密度 (个, $1\text{ mm}^2$ )
	长	宽	长	宽	
CK1	$19.161 \pm 1.764\text{ab}$	$14.578 \pm 1.351\text{a}$	$11.081 \pm 0.665\text{a}$	$5.567 \pm 1.005\text{a}$	$565.616 \pm 28.280\text{ 8e}$
CK2	$14.521 \pm 0.700\text{d}$	$11.677 \pm 0.939\text{c}$	$8.320 \pm 0.127\text{c}$	$4.189 \pm 0.336\text{b}$	$961.5486 \pm 28.280\text{ 9a}$
T1	$21.018 \pm 0.472\text{a}$	$13.694 \pm 0.324\text{ab}$	$10.352 \pm 0.778\text{a}$	$5.113 \pm 0.597\text{ab}$	$631.605 \pm 43.199\text{ 7d}$
T2	$15.850 \pm 0.999\text{cd}$	$12.372 \pm 0.350\text{ac}$	$9.071 \pm 0.797\text{bc}$	$4.820 \pm 0.293\text{ab}$	$791.863 \pm 5 \pm 28.280\text{ 8b}$
T3	$17.533 \pm 0.855\text{bc}$	$13.096 \pm 0.358\text{abc}$	$9.894 \pm 0.698\text{ab}$	$4.734 \pm 0.245\text{ab}$	$716.448 \pm 0 \pm 43.199\text{ 7c}$

各处理见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

## 2.5 外源 SA、BR 浸种对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜叶片解剖结构的影响

由图 3 可知,黄瓜叶肉组织有栅栏组织和海绵组织的分化,属于典型的异面叶。栅栏组织细胞为长柱形,海绵组织细胞为椭球状或短柱形,排列紧密疏松程度不一。5 个处理黄瓜叶片的横切面解剖结构存在差异(表 5)。由表 5 可知,CK2 处理黄瓜叶片厚度、栅栏组织厚度、栅海比均比 CK1 处理显著降低,海绵组织厚度显著提高。T1 处理比 CK2 处理叶片厚度显著提高了 12.85%,T2、T3 处理与 CK2

处理间无显著性差异。T3 处理比 CK2 处理叶片上表皮厚度显著提高了 29.92%,T1、T2 处理与 CK2 处理间无显著性差异。5 个处理叶片下表皮厚度彼此间均无显著性差异。T1、T2、T3 处理叶片栅栏组织厚度分别比 CK2 处理显著提高了 27.67%、23.79%、26.87%。T1、T2、T3 处理叶片海绵组织厚度与 CK2 处理间无显著性差异。T1、T2、T3 处理叶片栅海比分别比 CK2 处理显著提高了 42.11%、28.95%、34.21%。



CK1、CK2、T1、T2、T3 处理见表 1。UE:上表皮;LE:下表皮;PT:栅栏组织;ST:海绵组织。

图 3 外源 SA、BR 浸种对  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  胁迫下黄瓜叶片解剖结构的影响Fig.3 Effects of exogenous SA and BR soaking seeds on the anatomical structure of cucumber leaves under  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  stress

表 5 外源 SA、BR 浸种对Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫下黄瓜叶片解剖结构的影响

Table 5 Effects of exogenous SA and BR soaking seeds on the anatomical structure of cucumber leaves under Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> stress

处理	叶片厚度 (μm)	上表皮厚度 (μm)	下表皮厚度 (μm)	栅栏组织厚度 (μm)	海绵组织厚度 (μm)	栅栏组织厚度/ 海绵组织厚度比值
CK1	134.17±7.12a	10.18±0.24b	9.68±2.64a	35.09±2.01a	53.77±3.77b	0.65±0.05a
CK2	109.89±1.35c	9.09±1.08b	8.67±2.85a	24.97±2.01b	66.14±0.47a	0.38±0.03c
T1	124.01±0.55b	10.97±1.18ab	8.49±1.21a	31.88±6.12a	59.44±3.60ab	0.54±0.07b
T2	113.42±3.09c	8.74±0.89b	8.48±1.07a	30.91±1.60a	63.51±6.53a	0.49±0.04b
T3	115.56±1.23c	11.81±2.44a	7.87±0.87a	31.68±1.71a	61.75±1.76a	0.51±0.04b

各处理见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

3 讨论

盐胁迫可以对植物细胞生理产生巨大的影响,包括能量转化、物质代谢、细胞代谢、生长发育等过程<sup>[20]</sup>。本试验结果表明,60 mmol/L Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫处理抑制了黄瓜幼苗生长,而外施 SA 缓解了盐胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制作用,这与前人在黄瓜<sup>[21]</sup>和花椰菜<sup>[22]</sup>上的研究结果相似,但不同的是他们是以 NaCl 为盐胁迫因子。

光合色素是绿色植物光合作用的基础。研究结果表明,叶绿素含量与光合作用呈正相关关系,即叶绿素含量越高,光合作用越强,植物产量越高<sup>[23-24]</sup>。类胡萝卜素除具有吸收、传递光能的功能外,还具有保护叶绿素免受光氧化的功能<sup>[25]</sup>。本试验结果表明,Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>盐胁迫下黄瓜叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量显著降低,与郁继华等<sup>[26]</sup>对 NaCl 胁迫下黄瓜光合色素含量变化的研究结果一致。SA 浸种、BR 浸种、SA+BR 复配浸种处理提高了黄瓜幼苗叶绿素含量和类胡萝卜素含量,提高了植物耐盐性,其机理可能是通过减少活性氧(ROS)而保护光合作用细胞器。

光合作用是绿色植物生长发育的基础。有研究结果<sup>[27-28]</sup>表明,盐胁迫下黄瓜幼苗光合速率下降主要是由非气孔因素导致的。本试验结果表明盐胁迫下黄瓜幼苗光合速率下降主要是由气孔因素导致的,这与张志刚等<sup>[29]</sup>、张淑红等<sup>[30]</sup>对盐胁迫下黄瓜幼苗的研究结果一致。原因可能是黄瓜品种、盐浓度、处理方式存在差异。SA 浸种、BR 浸种、SA+BR 复配浸种处理提高了黄瓜幼苗净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度,增强了黄瓜幼苗耐盐性,其机理可能是由于改变了气孔因素,从而提高了光合作用。

叶片包括表皮、叶肉和叶脉,是植物进行光合作

用的主要场所。叶表皮上分布着许多气孔,气孔的开闭直接影响光合作用<sup>[25]</sup>。叶肉包括栅栏组织和海绵组织,陈碧珍<sup>[31]</sup>的研究结果表明,栅栏组织厚度与海绵组织厚度比值越高,光能利用水平越高,其光能利用率越高。王晓黎等<sup>[32]</sup>用外源 SA 处理黄瓜子叶表皮后,气孔开度缩小。高春娟等<sup>[33]</sup>研究发现,低浓度的外源 BR 能够抑制气孔关闭并促进气孔张开,反之,高浓度的外源 BR 能够抑制气孔开张并促进气孔关闭。本试验结果表明,SA 浸种、BR 浸种、SA+BR 复配浸种处理均抑制了气孔关闭,降低了气孔密度,从而提高了耐盐性。盐胁迫下黄瓜叶片变薄,栅海比减小,这与吴丽君等<sup>[34]</sup>对赤皮青冈的研究结果一致,但与王贝贝等<sup>[35]</sup>对荆芥和葡枝委陵菜的研究结果相反,这可能是由不同胁迫、不同植物引起的。经 SA 浸种、BR 浸种、SA+BR 复配浸种处理后,黄瓜叶片厚度、栅海比均提高了。高凌娜等<sup>[36]</sup>研究结果表明栅海比越大,黄瓜越耐弱光,反之,黄瓜越不耐弱光。本研究中栅海比越高黄瓜耐盐性越强,反之,黄瓜越不耐盐。由于本试验只研究了 1 种黄瓜品种,所得结果还需要验证,关于耐盐性机理与叶片解剖结构的关系还需进一步深入研究。

综上所述,SA 浸种、BR 浸种、SA+BR 复配浸种处理都诱导了黄瓜幼苗的耐盐性,改善了黄瓜幼苗的生长状况。通过对黄瓜幼苗生长、光合参数、气孔参数、叶片解剖结构等指标的综合分析,发现 SA 浸种处理对盐胁迫下黄瓜幼苗耐盐性的诱导作用最明显,而 SA+BR 复配浸种处理的作用效果介于 SA 浸种和 BR 浸种之间,表明 SA 和 BR 复配浸种表现为拮抗作用,这可能是由于这两种生物诱抗剂生物活性不同,对植物抗逆性的诱导存在不同甚至相互削弱的作用途径或机制,也可能是融合在一起后 pH 值、溶解度、电导率等理化性质发生了变化,具体机

理还需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] MELONI D A, OLIVA M A, MARTINEZ C A, et al. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress[J]. Environ Exp Bot, 2003, 49(1): 69-76.
- [2] 王田利. 我国黄瓜生产的发展变化历程[J]. 西北园艺(蔬菜), 2015(6): 4-6.
- [3] 孙玉珺, 秦东玲, 伊凡, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 726-734.
- [4] 徐萍, 李进, 吕海英, 等. 干旱胁迫下水杨酸对银沙槐子叶表皮气孔开度的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(4): 510-518.
- [5] 张帆, 李景富, 姜景彬, 等. 外源水杨酸诱导对番茄幼苗抗冷性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 91-94.
- [6] 唐艳萍, 文涛, 孙歆, 等. 水杨酸对植物光合作用影响的研究进展[J]. 西北植物学报, 2015, 35(8): 1701-1708.
- [7] 赵艳侠, 亓桂梅, 王咏梅. 水杨酸对葡萄抗逆性调控的研究进展[J]. 山东农业科学, 2017, 49(11): 146-150.
- [8] 周丽霞, 曹红星, 肖勇. 外源水杨酸对低温胁迫椰子幼苗生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(11): 2039-2045.
- [9] 卢泽绵. 24-表油菜素内酯对采后猕猴桃衰老进程的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [10] 高春娟. 油菜素内酯(BR)对番茄叶片气孔运动的影响及其调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [11] 王传凯, 郭森. 油菜素内酯对裸燕麦常温和高温胁迫下生长形态及生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7): 1173-1177.
- [12] 陆晓民, 高青海. 油菜素内酯对硝酸钙胁迫下黄瓜幼苗生长及其抗氧化酶同工酶表达的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(11): 2104-2108.
- [13] 韩海霞, 姚岭柏, 唐亚楠. 外源水杨酸对盐胁迫黄瓜生长及过氧化物酶活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 69-71.
- [14] 李悦, 宋士清, 王久兴. 不同BR施用方式诱导黄瓜幼苗对Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫抗性的研究[J]. 西北植物学报, 2016, 36(2): 377-382.
- [15] 李悦. 外源BR诱导黄瓜种子及幼苗Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>胁迫抗性的研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2015.
- [16] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 2007: 68-72.
- [17] LICHTENTHALER H K, WELLBURN A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents[J]. Analysis Peach, 1983, 11(5): 591-592.
- [18] 张秀芳, 石东里, 张兰. 观察植物气孔结构的简易方法[J]. 生物学通报, 2002, 37(6): 42-43.
- [19] 李正理. 植物制片技术[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 129-137.
- [20] KHAN M N, SIDDIQUI M H, MOHAMMAD F, et al. Interactive role of nitric oxide and calcium chlorid in enhancing toleration to salt stress[J]. Nitric Oxide, 2012, 27(4): 210-218.
- [21] 余小平, 贺军民, 张键, 等. 水杨酸对盐胁迫下黄瓜幼苗生长抑制的缓解效应[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 193-197.
- [22] 王玉萍, 董雯, 张鑫, 等. 水杨酸对盐胁迫下花椰菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 213-219.
- [23] 刘贞琦, 刘振业, 马达鹏, 等. 水稻叶绿素含量及其与光合速率关系的研究[J]. 作物学报, 1984, 10(1): 57-62.
- [24] 李军, 高新昊, 郭世荣, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下黄瓜幼苗光合作用的影响[J]. 生态学杂志, 2007(10): 1595-1599.
- [25] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] 郁继华, 杨秀玲, 许耀照, 等. NaCl胁迫对黄瓜自根苗和嫁接苗光合速率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 554-556.
- [27] 朱进, 别之龙, 李娅娜. 盐胁迫对不同基因型黄瓜幼苗生长和光合作用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 476-478.
- [28] 钱琼秋, 魏国强, 朱祝军, 等. 不同品种黄瓜幼苗光合机构对盐胁迫的响应[J]. 科技通报, 2004(5): 459-463.
- [29] 张志刚, 尚庆茂. 水杨酸、壳聚糖对盐胁迫下黄瓜叶片光合参数的调节作用[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 174-178.
- [30] 张淑红, 张恩平, 庞金安, 等. NaCl胁迫对黄瓜幼苗光合特性及水分利用率的影响[J]. 中国蔬菜, 2005(1): 15-17.
- [31] 陈碧珍. 烤烟不同品种叶片结构的解剖观察[J]. 福建农学院学报, 1993, 22(2): 241-246.
- [32] 王晓黎, 崔世茂, 张志刚, 等. 水杨酸对黄瓜子叶表皮气孔开度的调节作用[J]. 西北植物学报, 2011, 31(2): 305-314.
- [33] 高春娟. 油菜素内酯(BR)对番茄叶片气孔运动的影响及其调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [34] 吴丽君, 李志辉, 杨模华, 等. 赤皮青冈幼苗叶片解剖结构对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3619-3626.
- [35] 王贝贝, 孙虹豆, 江文, 等. 两种地被植物生长、叶片解剖结构及光合特性对干旱胁迫的响应[J]. 天津农业科学, 2017, 23(3): 1-5.
- [36] 高凌娜, 司龙亭, 李丹丹, 等. 弱光胁迫下黄瓜幼苗叶片解剖结构及光合特性研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(6): 1011-1015.

(责任编辑: 张震林)