

# 盐胁迫对西瓜幼苗生理生化特性的影响

高博文, 孙德玺, 刘君璞, 袁高鹏, 安国林, 李卫华, 司文静, 朱迎春

(中国农业科学院郑州果树研究所 郑州 450009)

**摘要:**为研究幼苗期西瓜在盐胁迫下的生理生化变化,以4个西瓜品种(中兴红1号、中科6号、郑抗9号、花冠)为试材,在温室水培环境下,分别观察不同浓度盐胁迫下西瓜幼苗的表型并测定盐害指数、鲜质量、光合因子、离子含量、膜透性等指标。结果表明,随着盐浓度的升高,不同品种西瓜幼苗盐害程度不断加深,盐害指数、相对电导率、 $\text{Na}^+$ 含量逐渐增加,鲜质量受到显著抑制。当盐浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,各品种的鲜质量与对照相比分别降低了82.17%、60.29%、57.54%、61.66%;SPAD表现出先增加后降低的趋势,当盐浓度为 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不同品种西瓜的SPAD均达到最大值;净光合速率显著下降,当盐浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,各品种西瓜的净光合速率与对照相比分别降低了90.51%、84.66%、61.87%、80.54%; $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 逐渐下降。鲜质量和净光合速率在不同浓度盐胁迫下受到的抑制作用显著,可以作为后期西瓜耐盐研究的参考指标。

**关键词:**西瓜;盐胁迫;生理生化特性

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2022)08-035-07

## Salt stress affects physiological and biochemical characteristics of watermelon seedlings

GAO Bowen, SUN Dexi, LIU Junpu, YUAN Gaopeng, AN Guolin, LI Weihua, SI Wenjing, ZHU Yingchun

(Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, Henan, China)

**Abstract:** In order to study the physiological and biochemical changes of watermelon under salt stress at seedling stage, 4 watermelon varieties (Zhongxinghong 1, Zhongke 6, Zhengkang 9 and Huaguan) were used as test materials in the greenhouse hydroponic environment to observe the phenotype of watermelon seedlings under different NaCl concentrations and determine their salt injury index, fresh weight, photosynthesis, ions, membrane permeability and other indicators. The results showed that with the increase of salt concentration, the salt injury degree of watermelon seedlings of different varieties deepened, the salt damage index, relative conductivity and  $\text{Na}^+$  content increased gradually, and the fresh weight was significantly inhibited. When salt concentration at  $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , the fresh weight of 4 varieties decreased by 82.17%, 60.29%, 57.54% and 61.66%, compared with the control. SPAD showed a trend of first increasing and then decreasing. When salt concentration at  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , SPAD of different watermelon varieties reached the maximum value. When salt concentration at  $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , the net photosynthetic rate of 4 watermelon varieties decreased by 90.51%, 84.66%, 61.87% and 80.54%, compared with the control, and  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  gradually decreased. The fresh weight and net photosynthetic rate were significantly inhibited under different concentrations of NaCl stress, which could be used as reference indexes for the later study of watermelon salt tolerance.

**Key words:** Watermelon; Salt stress; Physiological and biochemical characteristics

西瓜是世界上最重要的水果之一,其种植面积和产量在世界水果中都位居前列<sup>[1]</sup>。我国作为西瓜最大的生产与消费国,年播种面积约 $154\text{ 万 hm}^2$ ,年总产量达 $6300\text{ 万 t}$ <sup>[2]</sup>。然而土壤盐渍化是制约农业

可持续发展的重大难题。据联合国粮农组织统计,全球盐渍土面积达 $9.5\text{ 亿 hm}^2$ <sup>[3]</sup>,我国盐渍土面积约占全球盐渍土面积的3.8%,位居世界前列<sup>[4]</sup>。由于过度施用化肥和不合理灌溉等,土壤的次生盐渍化

收稿日期:2022-03-14;修回日期:2022-04-29

基金项目:河南省科技攻关项目(202102110194);2020年度基础研究及专用基础研究专项资金(20131415);国家现代农业产业技术体系(CARS-26);中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2021-ZFRI)

作者简介:高博文,女,在读硕士研究生,主要从事西瓜遗传育种研究。E-mail:gaobowen0514@163.com

通信作者:朱迎春,女,副研究员,主要从事西瓜栽培与遗传育种研究。E-mail:zhuyingchun@caas.cn

问题也日益严重。

在农业生产过程中针对提高西瓜耐盐性的研究不在少数,各种新技术、新方法层出不穷,但都相对有限。Romic 等<sup>[5]</sup>研究表明,即使是采用盐水滴灌,也会导致西瓜减产 25%~35%。同时前人针对西瓜自身的耐盐性研究也是多种多样。张振兴<sup>[6]</sup>研究发现盐胁迫下西瓜果实品质受到严重影响:可溶性固形物、可溶性糖、氨基酸含量下降,可滴定酸含量上升。盐胁迫下西瓜 N、P 代谢能力减弱,K 在一定程度上能够参与渗透调节缓解西瓜受到的盐害<sup>[7-8]</sup>。盐胁迫下,西瓜幼苗生物量和生长势均显著下降,光合作用减弱<sup>[9]</sup>。随着盐浓度提高,西瓜幼苗细胞膜结构遭到破坏,质膜相对透性均显著增加<sup>[10]</sup>。王中玉等<sup>[11]</sup>研究发现,低盐胁迫下西瓜净光合速率受气孔因素影响,高盐胁迫下受非气孔因素影响,除此之外,也与电子传递有关。

因此,西瓜在盐胁迫下的生理变化体现在多个方面,尚不清楚哪个指标受到的影响更大。除此之外,前人的报道多是以单一西瓜品种为研究对象,对于多个西瓜品种的耐盐性研究又往往是在特定盐浓度下进行的。当盐浓度发生变化时,不同品种对盐胁迫做出的响应并不完全相同<sup>[12]</sup>。笔者选择不同西瓜品种分析其在不同盐浓度下的鲜质量、光合因子、离子含量、膜透性等指标的变化,旨在寻找受盐胁迫影响显著的稳定指标,为建立西瓜品种耐盐评价体系及指导盐碱地西瓜生产提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

试验材料中兴红 1 号、中科 6 号、郑抗 9 号、花冠由郑州果树研究所二倍体西瓜遗传育种课题组选育,品种特性见表 1。

表 1 西瓜品种特性

品种名称	品种特性
中兴红 1 号	花皮椭圆果,特早熟,小果型,高番茄红素,耐贮运。
中科 6 号	花皮圆果,早熟,大果型,耐低温弱光,耐裂,耐贮运,田间高抗枯萎病。
郑抗 9 号	纯黑皮椭圆果,中晚熟,特大果型,极耐贮运,田间高抗枯萎病、兼抗病毒病。
花冠	花皮椭圆果,中熟,大果型,耐贮运,耐重茬,抗病性较好。

### 1.2 方 法

1.2.1 前期准备 陶土:直径 2~4 mm 的陶粒。水培盆:规格为 31.5 cm×25.5 cm×10.0 cm,底部和四周粘贴黑色胶带,以保持水培盆中黑暗环境,顶部盖上 31.5 cm×25.5 cm 的聚乙烯塑料板(均匀打

15 个孔,孔距为 5 cm×6 cm)。海绵条:长 5 cm、宽 1 cm。Hoagland's 营养液:配方见表 2。

表 2 Hoagland's 营养液配方

盐种类	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	6.03
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.73
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.27
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.30
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	9.47
EDTA·Na <sub>2</sub>	12.40
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	9.27
KNO <sub>3</sub>	340.00
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	93.33
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	326.67
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	786.67

1.2.2 试验内容 试验于 2021 年 10—11 月在郑州果树研究所智能温室进行。

(1)播前管理:挑选籽粒饱满、大小均匀一致、成熟无霉斑的西瓜种子各 200 粒,55 ℃温水浸种 6 h 后放入恒温箱(30 ℃)催芽 36~48 h。用镊子挑选发芽健硕的西瓜种子小心播种于盛有总容量二分之一的陶土盆中,并覆盖相同厚度的陶土以减少戴帽现象。播种过程要耐心谨慎,喷施充足水分后用无菌保鲜膜密封,温度为白天 20~25 ℃,夜间 15~18 ℃。

(2)幼苗移植:选取子叶展开完好、长势整齐一致的西瓜幼苗,用薄海绵包裹根部向上 1 cm 处,快速移栽至盛有 Hoagland's 营养液的水培盆中,每个品种 150 株。每 2 d 更换 1 次营养液来维持西瓜幼苗的正常供氧和营养,温度为白天 25~28 ℃,夜间 18~20 ℃。

(3)NaCl 胁迫处理:待西瓜幼苗长至 3 叶 1 心时,分别用 0(CK)、50、100、150、200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl (溶于 Hoagland's 营养液中)进行处理,每个处理 30 株幼苗,3 次重复,每次重复 10 株。观察盐处理后西瓜幼苗每天反应以及变化,并记录。

(4)取样:处理后 8 d,从西瓜幼苗上摘取从上往下数第 3 片展开叶,迅速放入冰盒,-80 ℃保存,用于后续试验。由于 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下西瓜幼苗均死亡,因此未进行取样。

### 1.3 测定指标和方法

表型测定使用佳能 EOS 80D 相机对整盆植株进行拍照记录。盐害指数参照刘文革<sup>[13]</sup>的盐害指数分级标准(表 3),盐害指数/%= $\sum(\text{代表级值}\times\text{株数})/(\text{最高级值}\times\text{总株数})\times 100$ 。每处理选择 6 株受胁迫程度一致的西瓜幼苗用清水冲洗干净并迅速擦干,用百分之一电子天平称鲜质量。避开叶脉,采用

表3 盐害指数分级标准

盐害等级	级值	症状
0	0	无盐害症状。
1	1	子叶叶缘焦枯变褐,其他部分完好。
2	3	子叶完全焦枯变褐,真叶完好。
3	5	1~2片真叶叶缘焦枯变褐,心叶完好。
4	7	2片以上真叶完全焦枯变褐,心叶萎蔫。
5	9	整个植株失水萎蔫、干枯以至死亡。

SPAD-502 叶绿素含量测定仪分别测定新鲜叶片的左、右、上部 3 个位置的读数,取平均值作为该叶片的 SPAD 值。09:00—11:30 采用 LI-6400 便携式手持光合仪测定净光合速率,测定环境为:叶室面积为  $6.25 \text{ cm}^2$ ,叶片温度为  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ,叶片表面有效光辐射为  $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相对湿度为 75%,周围  $\text{CO}_2$  浓度为  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,每个处理测定 10 次。采用相对电导法测定相对电导率<sup>[14]</sup>,取待测叶片  $0.3 \text{ g}$ ,放入玻璃试管,加  $20 \text{ mL}$  蒸馏水,另外设一组对照,每处理 3 次重复; $25 \text{ }^\circ\text{C}$  室温下浸泡 24 h,用电导率仪(雷磁 DDS-307)测电导率值( $R_1$ );之后将试管放入沸水中加热  $20 \text{ min}$ ,冷却至室温再次测电导率值( $R_2$ ),相对电导率/ $\% = R_1/R_2 \times 100$ 。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量采用试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)测定,使用酶标免疫分析仪(SpectraMax i3x)进行读数。

#### 1.4 数据处理与分析

采用 Adobe Photoshop CC 2017 进行照片处理与排版,采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理,采用 SPSS 19.0 的 Duncan 法对同一西瓜品种在不同

盐浓度下的盐胁迫指标进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 NaCl 对西瓜幼苗整体生长的影响

如图 1 所示,盐胁迫 8 d 后,与对照相比,不同处理下的西瓜幼苗植株在株高、茎粗、叶片枯萎程度以及叶片数量等方面均受到影响,表明盐胁迫对西瓜幼苗的生长具有抑制作用。与未进行盐处理的西瓜幼苗相比,随着盐浓度的增加,西瓜幼苗的盐害程度不断加深,具体表现为:当  $\text{NaCl}$  浓度为  $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗的叶面积减少,植株生长开始减慢,茎粗、株高以及根系茂密度都开始下降;当  $\text{NaCl}$  浓度为  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗的株高明显降低、叶面积明显减小并有部分叶片开始发黄和卷曲,株型更加紧凑,整体萎蔫程度加剧;当  $\text{NaCl}$  浓度为  $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗生长停滞,叶片表现出明显的卷曲、萎蔫甚至焦枯,与盐处理前相比,西瓜叶片数量未见明显增加,株高未见明显升高,茎部纤细、颜色加深,根系伴有腐烂;当  $\text{NaCl}$  浓度为  $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗植株已全部死亡。

由图 2 可知,随着盐浓度的增加,西瓜幼苗的盐害指数逐渐增大。当  $\text{NaCl}$  浓度为  $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗的盐害指数为 0(表型见图 1);当  $\text{NaCl}$  浓度为  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,西瓜幼苗的盐害指数均低于 25%,不同品种的盐害指数已经出现分级,中兴红 1 号的盐害指数变化最为明显,花冠和中科 6 号的盐害指数趋于一致,郑抗 9 号变化最

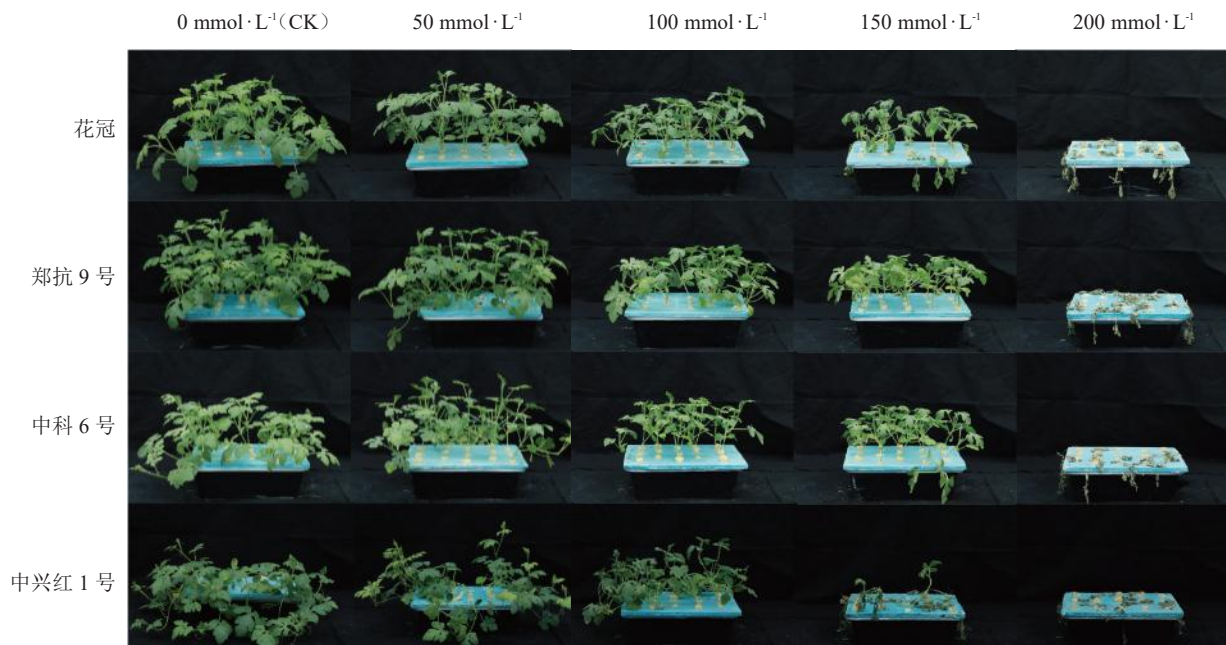
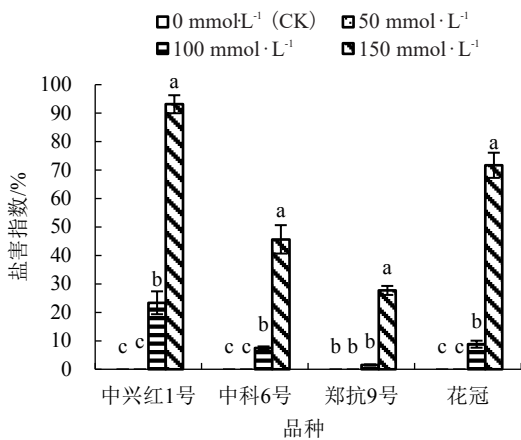


图1 盐胁迫对西瓜幼苗表型的影响



注:不同小写字母表示同一品种的不同盐浓度处理在 0.05 水平差异显著。下同。

图2 盐胁迫对西瓜幼苗盐害指数的影响

小;当 NaCl 浓度为 150 mmol·L<sup>-1</sup> 时,各西瓜品种幼苗的盐害指数均达到最大,与对照相比差异显著,并产生明显分级,分别为中兴红 1 号 94.07%、中科 6 号 45.19%、郑抗 9 号 27.78% 和花冠 71.85%。

受西瓜自身基因型以及生理特性的影响,在同一盐浓度下,不同西瓜品种的盐害程度存在一定的差异。尤其当 NaCl 浓度达到 150 mmol·L<sup>-1</sup> 时,4 个西瓜品种的盐害表现差异达到最大程度,如中兴红 1 号在各形态指标下的盐害程度要远比其他 3 个品种大,NaCl 浓度为 150 mmol·L<sup>-1</sup> 下的死亡率要大于其他 3 个品种。而中科 6 号相较于郑抗 9 号,虽整体表现上差异不大,但从叶片的枯萎程度、卷叶率等单个形态指标的评判标准上还是有着或多或少的差别。

### 2.2 不同浓度 NaCl 对西瓜幼苗鲜质量的影响

由图 3 可知,随着 NaCl 浓度的升高,不同品种的西瓜幼苗鲜质量与对照相比均显著下降。当盐

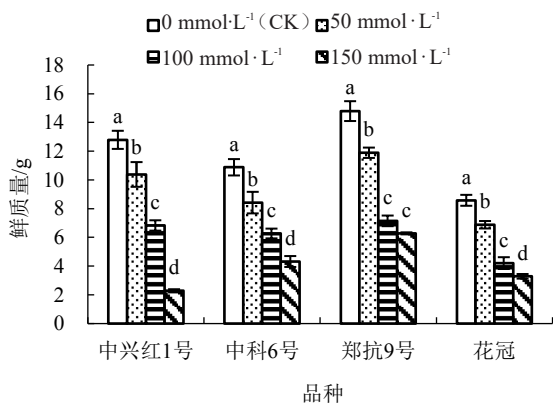


图3 盐胁迫对西瓜幼苗鲜质量的影响

浓度为 150 mmol·L<sup>-1</sup> 时,中兴红 1 号、中科 6 号、郑抗 9 号、花冠的鲜质量与对照相比分别降低了 82.17%、60.29%、57.54%、61.66%。然而不同品种间西瓜幼苗的鲜质量有所不同,以郑抗 9 号为例,其鲜质量在所有 4 个品种中不同 NaCl 浓度下均最高,但在 100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 下鲜质量与中兴红 1 号和中科 6 号的差异逐渐缩小。

### 2.3 不同浓度 NaCl 对西瓜幼苗光合因子的影响

由图 4 可知,随着盐浓度的增加,西瓜 SPAD 呈现出先升高后降低的变化趋势。当盐浓度为 100 mmol·L<sup>-1</sup> 时,中兴红 1 号、中科 6 号、郑抗 9 号、花冠的 SPAD 值均达到最大,与对照相比分别显著增加了 16.60%、8.38%、10.34%、6.45%。当盐浓度为 150 mmol·L<sup>-1</sup> 时,各品种西瓜幼苗的 SPAD 值与 100 mmol·L<sup>-1</sup> 时相比有所下降;与对照相比,中兴红 1 号和花冠的 SPAD 值分别降低了 29.42%、2.07%,中科 6 号和郑抗 9 号的 SPAD 值分别增加了 2.62%、9.23%。这说明盐胁迫对西瓜叶绿素合成有一定的调控作用。

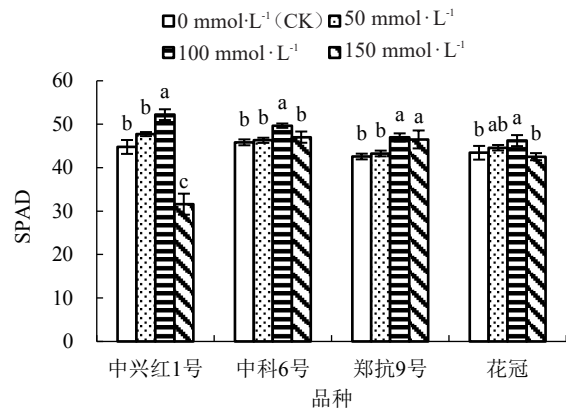


图4 盐胁迫对西瓜幼苗 SPAD 的影响

但是,各品种在不同 NaCl 浓度下的差异性变化依然显著。如中兴红 1 号相较于中科 6 号,当 NaCl 浓度小于 100 mmol·L<sup>-1</sup> 时,中兴红 1 号的 SPAD 增幅要大于中科 6 号,当 NaCl 浓度大于 100 mmol·L<sup>-1</sup> 时,中兴红 1 号的 SPAD 降幅也同样大于中科 6 号,所以在先增加后减少的变化大趋势下,个体差异所带来的浮动变化也比较明显。

由图 5 可知,随着盐浓度的增加,所有品种的西瓜幼苗净光合速率均显著降低的趋势。当盐浓度为 150 mmol·L<sup>-1</sup> 时,中兴红 1 号、中科 6 号、郑抗 9 号、花冠的净光合速率与对照相比分别降低了 90.51%、84.66%、61.87%、80.54%。这说明盐胁迫对西瓜幼苗的净光合速率抑制作用较强。

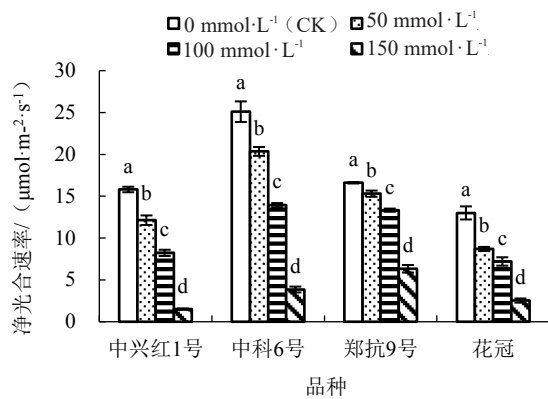


图5 盐胁迫对西瓜幼苗净光合速率的影响

2.4 不同浓度NaCl对西瓜幼苗相对电导率的影响

由图6可知,随着NaCl浓度的增加,各品种西瓜幼苗整体的相对电导率呈逐渐上升的趋势。当NaCl浓度为50 mmol·L<sup>-1</sup>时,中科6号、郑抗9号和花冠与对照相比差异不显著,说明50 mmol·L<sup>-1</sup>的NaCl胁迫对西瓜幼苗细胞膜透性的影响相对较小;当NaCl浓度为150 mmol·L<sup>-1</sup>时,中兴红1号、中科6号、郑抗9号和花冠与对照相比显著增加了168.19%、50.78%、46.18%、55.66%。这说明不同西瓜品种在NaCl胁迫下相对电导率变化存在明显差异。同时各个品种在不同浓度NaCl胁迫下自身表现也有差别,如中兴红1号在NaCl浓度为0~50 mmol·L<sup>-1</sup>时,变化趋于平稳,且变化较小,当NaCl浓度为50~100 mmol·L<sup>-1</sup>时,数值上升,电导率增加,变化显著。当NaCl浓度为100~150 mmol·L<sup>-1</sup>时,数值变化又呈现平缓发展趋势,变化减小。这说明中兴红1号在NaCl胁迫浓度为50~100 mmol·L<sup>-1</sup>时有显著反应。再比如,郑抗9号与花冠西瓜幼苗的相对电导率显著变化范围出现在NaCl浓度为100~150 mmol·L<sup>-1</sup>时。但是各品种整体相对电导率变化幅度之间却存在差异,郑抗9号的整体变化幅度较小,而花冠的整

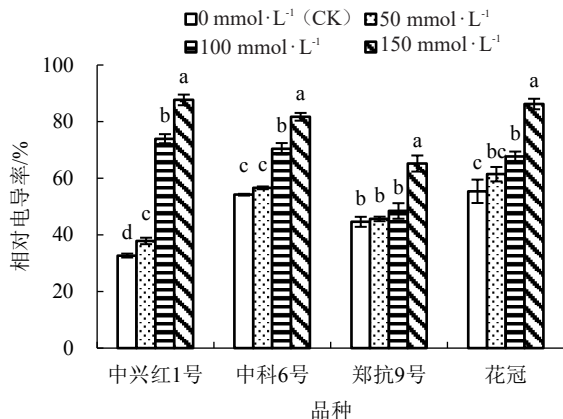


图6 盐胁迫对西瓜幼苗相对电导率的影响

体变化幅度较大。综上所述,在不同浓度NaCl胁迫下各品种之间相对电导率存在着共同上升趋势,但品种之间存在差异,其敏感浓度范围有所不同,变化幅度也存在不同。

2.5 不同浓度NaCl对西瓜幼苗离子含量的影响

由图7可知,随着盐浓度的增加,各品种西瓜幼苗的Na<sup>+</sup>含量整体呈逐渐上升的趋势。当NaCl浓度为50 mmol·L<sup>-1</sup>时,除花冠外其余品种西瓜幼苗的Na<sup>+</sup>含量与对照相比差异显著;当NaCl浓度为100 mmol·L<sup>-1</sup>时,各品种西瓜幼苗的Na<sup>+</sup>含量与对照相比均差异显著;当NaCl浓度为150 mmol·L<sup>-1</sup>时,中兴红1号、中科6号、郑抗9号和花冠的Na<sup>+</sup>含量与对照相比显著增加了157.97%、45.47%、25.27%、和114.04%,品种间Na<sup>+</sup>含量存在着较大差异。而在0、50 mmol·L<sup>-1</sup>的NaCl处理下,4个西瓜品种间的Na<sup>+</sup>含量趋于一致。这说明盐胁迫下不同品种西瓜对Na<sup>+</sup>的吸收能力存在差异。

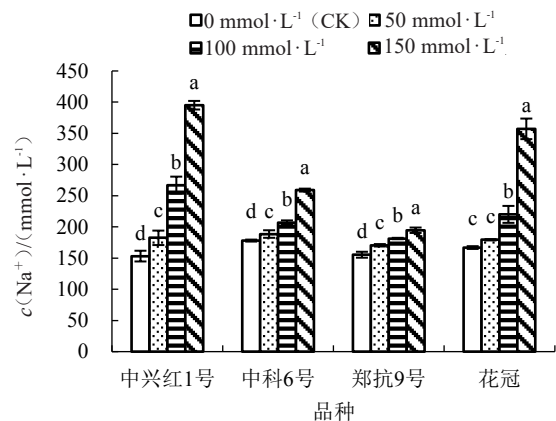


图7 盐胁迫对西瓜幼苗Na<sup>+</sup>含量的影响

由图8可知,随着NaCl浓度的增加,西瓜幼苗的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>整体呈现逐渐下降的变化趋势。例如:当盐浓度为150 mmol·L<sup>-1</sup>时,中兴红1号、中科6号、郑抗9号、花冠的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>与对照相比分别降低了

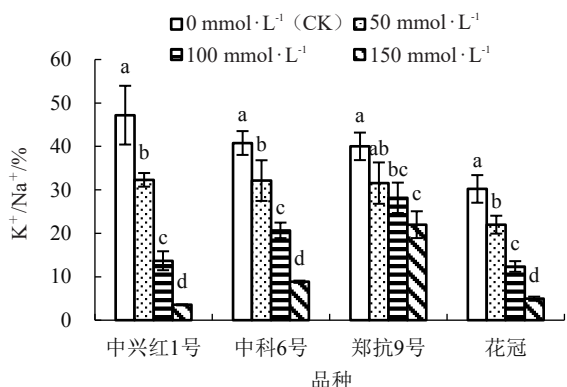


图8 盐胁迫对西瓜幼苗K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>的影响

92.52%、78.30%、45.06%、83.65%。中兴红1号在NaCl浓度逐渐增加的情况下,下降趋势最为明显。而郑抗9号下降趋势较为平缓。说明在大趋势不变的情况下,不同品种间的变化差异依然存在。

### 3 讨论与结论

笔者以郑州果树研究所二倍体西瓜遗传育种课题组提供的不同果型的西瓜品种为试材,从表型、鲜质量、光合因子、细胞膜透性以及离子含量方面,探究不同浓度盐胁迫对西瓜幼苗的影响。

研究表明,盐胁迫抑制西瓜幼苗的表型变化,盐浓度越大,西瓜幼苗整体表型与对照相比反差越大。当NaCl浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,出现大面积幼苗植株萎蔫现象,在NaCl浓度为 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,西瓜幼苗植株全部死亡,说明西瓜幼苗植株的耐盐临界范围在 $150\sim 200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,相似的结论在前人的研究中也有报道<sup>[9]</sup>。除此之外,西瓜幼苗总根长、主根长、根表面积、根体积、根尖数、根平均直径等根系形态指标也会受到盐胁迫的显著抑制<sup>[15]</sup>。盐害指数作为耐盐鉴定的形态指标,简单易行,结果可靠,被广泛应用于玉米<sup>[16]</sup>、葡萄<sup>[17]</sup>、白菜<sup>[18]</sup>、南瓜<sup>[19]</sup>等作物的耐盐研究中。试验中参照刘文革<sup>[13]</sup>提出的盐害分级方法,对西瓜进行盐害指数测定,结果表明随着盐浓度的增加,西瓜幼苗的盐害指数呈现逐渐增加的趋势,进一步佐证了整体表型与盐浓度之间的正向关系。

盐胁迫下植物生长减缓、物质代谢消耗大量能量、生物量分配格局发生改变,最终导致生物量的变化<sup>[20]</sup>。研究表明,随着盐浓度的增加,西瓜幼苗鲜质量受到的抑制程度逐渐加大。前人研究表明,鲜质量与植物耐盐性在一定范围内成反比<sup>[21]</sup>。相对电导率是反映植物在逆境环境下细胞膜系统受损程度的重要生理指标<sup>[22-23]</sup>。研究表明,盐胁迫下西瓜幼苗的相对电导率不断上升,这与前人的研究结果相同<sup>[24]</sup>。

作为西瓜幼苗生命活动的重要组成部分,光合作用能为其提供必要的物质和能量<sup>[25]</sup>。叶绿素是光合作用中的重要物质组成,可以在一定程度上反映植物的光合能力<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,西瓜幼苗SPAD在NaCl浓度为 $0\sim 100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时逐渐上升,在NaCl浓度为 $100\sim 150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时下降。净光合速率直接反映了西瓜幼苗光合能力的强弱。所以探究不同NaCl浓度下的净光合速率变化,更能体现光合作用在盐胁迫下的表现。本研究发现随着

盐浓度的增加,所有品种的西瓜幼苗净光合速率呈持续降低的趋势。前人研究表明,光合作用效率下降的原因包括气孔因素和非气孔因素。气孔因素<sup>[27]</sup>指盐胁迫下气孔导度降低,导致 $\text{CO}_2$ 向叶绿体运输受阻;非气孔因素包括光合系统、 $\text{CO}_2$ 固定能力、光合色素含量等<sup>[28]</sup>。有报道<sup>[29]</sup>称当盐浓度小于 $75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,西瓜幼苗由于气孔因素导致光合速率降低,当盐浓度大于 $75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,光合速率降低的主要原因为非气孔因素。本研究中西瓜幼苗叶绿素含量波动并未影响到整体光合速率的下降趋势,表明盐胁迫下西瓜幼苗光合速率的降低并非是由光合色素含量的变化导致的。

$\text{Na}^+$ 是盐胁迫的主要毒害离子,叶片 $\text{Na}^+$ 含量可以体现植物的耐盐能力<sup>[30]</sup>。与此同时,在NaCl胁迫的过程中,由于 $\text{K}^+$ 与 $\text{Na}^+$ 结构相似,因此 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 发生竞争导致细胞代谢活动受到抑制<sup>[31]</sup>。所以探究西瓜幼苗植株中的 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 变化趋势同样可以反映西瓜幼苗植株中盐害规律。本研究结果表明,西瓜幼苗在不同浓度的盐胁迫下,叶片 $\text{Na}^+$ 含量逐渐积累,叶片 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 逐渐下降,这与陆安桥<sup>[32]</sup>的研究结果一致。

值得注意的是,当NaCl浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,西瓜幼苗的盐害指数达到最大,同时植株鲜质量、净光合速率和 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 的变化幅度与对照相比明显高于其他指标,说明在高盐浓度下西瓜幼苗盐害程度的加深,主要表现在西瓜幼苗的鲜质量、光合作用、 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 方面。有趣的是,此时各西瓜品种的盐害指数表现出显著差异,表明不同西瓜幼苗在盐胁迫下的响应机制存在差异,这有待进一步研究。

高温条件下,植物的盐害反应加剧<sup>[33]</sup>。为排除高温对试验结果准确性的影响,本研究选择在10—11月进行。然而西瓜苗期生长的正常时间在3—4月<sup>[34]</sup>。为进一步增强试验结果的可靠性,今后应在春季补充苗期耐盐试验做进一步研究。

综上所述,西瓜幼苗鲜质量和净光合速率受盐胁迫的影响最大。本研究为后期进行西瓜耐盐种质鉴定和耐盐分子机制解析提供了理论基础。

### 参考文献

- [1] 杨念.我国西瓜甜瓜生产及全要素生产率研究[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [2] 王晓君,杨玉莹,孙立新,等.新冠肺炎疫情对我国西瓜甜瓜产业的影响及后疫情时期发展建议[J].中国瓜菜,2021,34(5):125-131.
- [3] 于菲,赵硕,赵影,等.长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土

- 肥力和玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(2):172-180.
- [4] 陈炜韬,王鹰,王明年,等.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2343-2347.
- [5] ROMIC D, ONDRASEK G, ROMIC M, et al. Salinity and irrigation method affect crop yield and soil quality in watermelon (*Citrullus lanatus* L.) growing[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 57(4):463-469.
- [6] 张振兴.钙提高西瓜植株耐盐性的生理机制及其对果实品质的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- [7] LISSBRANT S, STRATTON S, CUNNINGHAM S M, et al. Impact of long-term phosphorus and potassium fertilization on alfalfa nutritive value-yield relationships[J]. Crop Science, 2009, 49(3):1116-1124.
- [8] 孙小妹,陈思瑾,杨柳燕,等.盐胁迫对嫁接西瓜幼苗生长及碳、氮、磷、钾化学计量特征的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):170-176.
- [9] 韩志平.盐胁迫对小型西瓜生长、生理代谢的影响及外源钙和腐胺的缓解效应研究[D].南京:南京农业大学,2008.
- [10] 韩志平,郭世荣,尤秀娜,等.盐胁迫对西瓜幼苗活性氧代谢和渗透调节物质含量的影响[J].西北植物学报,2010,30(11):2210-2218.
- [11] 王中玉,逯昀,陈昆.NaCl胁迫对西瓜幼苗叶绿素荧光、光合特性、渗透调节及酶活性的影响[J].山西农业科学,2020,48(12):1909-1912.
- [12] 余世洲.普通小麦种质资源耐盐性鉴定及相关基因挖掘[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [13] 刘文革.不同染色体倍性西瓜(*Citrullus lanatus*)的遗传变异和抗逆机理研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [14] 李锦树,王洪春,王文英,等.干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响[J].植物生理学报,1983,9(3):223-229.
- [15] 王策,谢宏鑫,刘润进,等.丛枝菌根真菌调控根系构型与矿质元素平衡提高西瓜植株耐盐性的研究[J].菌物学报,2021,40(10):2800-2810.
- [16] 柳斌辉,张文英,栗雨勤.玉米耐盐性的鉴定评价[J].华北农学报,2012,27(S1):101-105.
- [17] 夏思哲,李铁梅,李凤菊,等.野生葡萄‘燕山-1’×‘河岸-3’种间杂交F<sub>1</sub>代植株耐盐性鉴定[J].西北林学院学报,2017,32(1):150-156.
- [18] 杨飞,朱家骝,殷武平,等.海水胁迫下白菜幼苗的生长与生理适应性研究[J].西南农业学报,2016,29(5):1057-1062.
- [19] 王丽萍.砧用南瓜提高黄瓜嫁接苗耐盐性的生理机制及蛋白质组学研究[D].南京:南京农业大学,2012.
- [20] 王丽萍,孙锦,郭世荣,等.等渗Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和NaCl胁迫对黄瓜砧用南瓜幼苗生长和活性氧代谢的影响[J].西北植物学报,2011,31(10):2045-2051.
- [21] 艾尔买克·才卡斯木,钟海霞,张雯,等.EM菌对NaCl胁迫下核桃幼苗生长、光合特性及抗氧化系统的影响[J].新疆农业科学,2018,55(10):1803-1809.
- [22] 戴海根,董文科,柴澍杰,等.模拟干旱胁迫下鹰嘴紫云英幼苗生长及生理特性[J].中国草地学报,2021,43(10):63-75.
- [23] 杜蕾,杨建宁,王星星,等.外源H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对盐碱胁迫下苹果矮化砧木幼苗生理特性的影响[J].西北植物学报,2021,41(10):1700-1710.
- [24] 陈奋奇,方鹏,白明兴,等.外源脯氨酸缓解玉米幼苗盐胁迫的效应[J].草业科学,2022,39(4):747-755.
- [25] 杨发荣,刘文瑜,黄杰,等.不同藜麦品种对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J].草业学报,2017,26(12):77-88.
- [26] 王弼垠,于德彬,赵洪颜,等.超高产大豆发育期不同节位叶片净光合速率与SPAD值变化分析[J].大豆科学,2022,41(2):172-178.
- [27] 王素平,李娟,郭世荣,等.NaCl胁迫对黄瓜幼苗植株生长和光合特性的影响[J].西北植物学报,2006,26(3):455-461.
- [28] 贺军民,余小平,刘成,等.增强UV-B辐射和NaCl复合胁迫下绿豆光合作用的气孔和非气孔限制[J].植物生理与分子生物学报,2004,30(1):53-58.
- [29] 韩志平,郭世荣,焦彦生,等.NaCl胁迫对西瓜幼苗生长和光合气体交换参数的影响[J].西北植物学报,2008,28(4):745-751.
- [30] 贾邱颖,吴晓蕾,冀胜鑫,等.盐胁迫下番茄砧木对嫁接苗生物量、氨基酸含量和活性氧代谢的影响[J].应用生态学报,2020,31(9):3075-3084.
- [31] 韩志平,郭世荣,郑瑞娜,等.盐胁迫对小型西瓜幼苗体内离子分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):908-917.
- [32] 陆安桥,张峰举,王学琴,等.盐胁迫对苗期湖南稷子K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>含量与分布的影响[J].浙江农业学报,2021,33(3):396-403.
- [33] 王建飞,陈宏友,杨庆利,等.盐胁迫浓度和胁迫时的温度对水稻耐盐性的影响[J].中国水稻科学,2004,18(5):449-454.
- [34] 刘继秀.大棚西瓜高产栽培技术探讨[J].现代农业研究,2021,27(11):135-136.