

引文格式: 王柏茗, 聂江力, 裴毅, 等. NaCl 与 NaHCO₃ 单盐胁迫下秋萍红树莓的光合及生理指标响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(2): 252–261. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202209037

NaCl 与 NaHCO₃ 单盐胁迫下秋萍红树莓的光合及生理指标响应*

王柏茗, 聂江力**, 裴毅, 苏雅, 钱滢宇

(天津农学院 园艺园林学院, 天津 300392)

摘要: 【目的】研究红树莓品种秋萍对盐碱化土壤栽培的适应力, 为该品种的建园选址和生产提供参考。

【方法】以秋萍红树莓组培苗为材料, 盆栽培养一段时间后, 用不同浓度的中性盐 (NaCl) 和碱性盐 (NaHCO₃) 进行单盐胁迫试验, 再测定其光合特性以及生理指标。【结果】低浓度 (30~60 mmol/L) 盐胁迫处理对秋萍生长有促进作用, 主要表现为净光合速率和气孔导度增大、色素含量增加、落叶减少以及 SOD 和 POD 活性降低; 中等浓度 (90~120 mmol/L) 盐胁迫下, 秋萍植株虽然能生长, 但呈现生理干旱、光合受到抑制、气孔导度减小、CAT 活性升高和脯氨酸含量增加等现象; 高浓度 (150~180 mmol/L) 胁迫下, 秋萍的光合受到强烈抑制, 叶片色素含量降低, 保护酶活性降低, 渗透调节物质含量减少, 180 mmol/L NaCl 胁迫下植株死亡。

【结论】秋萍对 NaHCO₃ 的耐性较 NaCl 强, 能够适应较大浓度范围的盐碱环境, 且轻度盐碱胁迫可促进秋萍生长。

关键词: 红树莓; 秋萍; 盐碱胁迫; 光合特性; 生理指标

中图分类号: S663.201

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 02-0252-10

Response of Photosynthetic and Physiological Characteristics of *Rubus idaeus* L. Variety ‘Qiuping’ to NaCl and NaHCO₃ Single Salt Stress

WANG Baiming, NIE Jiangli, PEI Yi, SU Ya, QIAN Yingyu

(College of Horticulture and Landscape of Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: [Purposes] To study the adaptability of *Rubus idaeus* L. ‘Qiuping’ to stress conditions in saline-alkaline soil cultivation, so as to provide theoretical reference for orchard site selection and production. [Methods] The tissue culture seedlings of Qiuping were used as materials, and after pot culture for a period of time, the single salt stress test was carried out with neutral salt (NaCl) and alkaline salt (NaHCO₃). Photosynthetic characteristics and physiological indexes were determined.

[Results] Low concentration (30-60 mmol/L) stress could promote the growth of Qiuping, mainly including the increase of net photosynthetic rate and stomatal conductance, the increase of pigment

收稿日期: 2022-09-20

修回日期: 2023-03-14

网络首发日期: 2023-04-27

*基金项目: 天津市科技计划项目 (16PTZSTG00020); 天津市津南区国家农业科技园区“一核心三区”专项项目 (20YHXSQ005); 天津市高等学校大学生创新创业训练计划项目 (202010061133, 202010061072); 天津农学院研究生科研创新项目 (2019XY008)。

作者简介: 王柏茗 (1996—), 男, 天津人, 在读硕士研究生, 主要从事果树资源开发与利用研究。

E-mail: tjwangbaiming@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 聂江力 (1972—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 主要从事植物资源与环境生态研究。E-mail: njlnie@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20230426.1858.002.html>



content, the decrease of leaf litter, and the decrease of SOD and POD activities. Under the medium concentration (90-120 mmol/L) stress, Qiuping could grow, but the photosynthesis was inhibited, showing physiological drought, stomatal conductance was decreased, CAT activity was increased, proline content was increased. Under the high concentration (150-180 mmol/L) stress, photosynthesis was strongly inhibited, leaf pigment was decreased, protective enzyme activity was decreased, osmotic regulatory substances were also decreased, and Qiuping died at 180 mmol/L NaCl.

[**Conclusion**] The NaHCO₃ tolerance of Qiuping is stronger than that of NaCl, and it can adapt to saline-alkali environment with a large concentration range. Mild saline-alkali stress can promote the growth of Qiuping.

Keywords: *Rubus idaeus* L.; Qiuping; salt and alkali stress; photosynthetic characteristics; physiological indexes

红树莓 (*Rubus idaeus* L.) 为蔷薇科 (Rosaceae) 悬钩子属 (*Rubus*) 多年生灌木, 其果实具有独特浓郁的香气, 酸甜可口, 含有多种维生素、丰富的酚类和黄酮类物质等, 具有较高的营养价值。其鞣花酸含量高于大多数水果, 该物质具有较强的抗氧化性以及抗肿瘤活性^[1], 其特征性香气成分树莓酮还具有加速脂肪代谢、控制食欲和抑制增重的功效^[2]。红树莓不仅作为鲜食果品供应市场, 其果实、植株和种子的深加工产品还被用于食品工业和医疗保健等领域。截至 2015 年, 世界红树莓果实年产量已达 42.52 万 t, 中国的红树莓产业处于快速增长期, 年产量已达到 7.9 万 t^[3]。京津冀地区消费水平高, 日益注重生活品质的提高, 对新、特水果需求逐渐加大, 红树莓产业在该地区发展前景广阔。天津位于红树莓适生的气候带, 引入和发展红树莓产业有利于调整天津周边地区的农业种植结构, 增加生态效益, 丰富农产品品类, 有助于农民增收和培育壮大特色精品农业。天津曾有红树莓的引种记录, 部分品种如 Tulameen、Reveille 和 Heritage 具有一定适应性^[4], 但现代红树莓品种间遗传背景复杂, 习性差异大。秋萍是中国自主选育的红树莓品种, 前期经过 2 年的引种地栽培观察^[5], 其在天津地区生育良好, 但天津地区面临突出的土壤盐渍化问题, 该品种的耐盐碱性未见报道。对秋萍红树莓的耐盐浓度范围进行研究, 可为其推广和开发提供依据。

土壤盐渍化是制约农业发展的重要非生物因素之一。天津属于典型的土壤盐渍化区域, 并伴有不同程度的次生碱化, 盐渍化土壤面积占全市土地面积的 65.7%, 其敏感区主要分布于除北部山区和洪积冲积平原区以外的广大海积平原和洼

地^[6-7]。土壤盐渍化虽然危害农业生产, 但合理利用盐碱地对一些特定的农业生产反而有利, 在一定的范围内, 盐碱胁迫有助于改善产品风味^[8]。本研究以秋萍红树莓的组培苗为试验材料, 探讨其在盐碱胁迫过程中光合特性与生理指标的变化规律, 以为秋萍红树莓在盐渍化地区的建园选址和推广生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 秋萍红树莓的栽培

试验地位于天津农学院东校区试验田内 (N39°05', E117°06', 海拔 4 m)。将秋萍红树莓组培苗 (高约 10 cm) 栽入双色育苗杯 (上直径 19 cm, 下直径 17 cm) 中, 将基质 ($V_{\text{泥炭}}:V_{\text{珍珠岩}}:V_{\text{蛭石}}=2:1:1$) 装入盆中, 每盆加入有机肥 30 g, 每盆 1 株组培苗, 共计 50 盆, 浇透水。每周浇水 1 次; 每月追肥 (1000 倍水溶肥液) 2 次, 每次 500 mL; 培养 3 个月, 待苗高 80~100 cm 时进行单盐胁迫试验。

1.2 盐胁迫试验

分别用 NaCl 和 NaHCO₃ 对试验材料进行单盐胁迫。选取生长良好且整齐的秋萍红树莓 39 株, 设置 1 个对照组 (CK) 和 2 个盐胁迫组, 其中 CK 组浇灌蒸馏水, 盐胁迫组各设置 6 个浓度梯度 (30、60、90、120、150 和 180 mmol/L) 的盐溶液。每处理设 3 次重复, 每 5 d 浇灌对应溶液 1 次, 每次 500 mL, 共计 3 次。

1.3 形态观测和指标测定

(1) 表观形态的观测

肉眼观察植株生长情况、叶片颜色变化及症状表现, 统计落叶数。

(2) 光合特性测定

于 10:00 前后, 每个处理随机选取植株中上部等位健康叶片 3 枚, 采用 GFS-3000 便携式光合仪测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度, 每 5 d 测定 1 轮。测定时采用光合仪控制光强和温度: 叶片温度依照环境温度设定为 28 ℃; 光源采用补充光源, 光强设置为 900 μmol/(m²·s)^[9]。

(3) 生理指标测定

胁迫处理 15 d 后, 遵循等位取样的原则取每株中上部等位功能叶若干备用, 测定时去除叶柄和中脉^[10]。采用磺基水杨酸提取和酸性茚三酮染色法测定游离脯氨酸含量; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量; 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量; 采用 SOD 抑制氮蓝四唑 (NBT) 光化学还原法测定 SOD 活性; 采用愈创木酚显色法测定 POD 活性; 采用紫外吸收法测定 CAT 活性^[11-12]; 采用日立 UH5300 紫外分光光度计测定叶片叶绿素和类胡萝卜素含量。每个指标重复测定 3 次。

1.4 数据分析

数据均采用 WPS 软件统计并制图; 采用 SPSS 17.0 统计分析软件对不同处理下的各项指标进行差异显著性分析; 采用 Duncan 氏新复极差法评估处理效果。

2 结果与分析

2.1 表观形态变化

单盐胁迫处理 6 d 后, 部分秋萍红树莓叶色出现变化, 下部叶干枯脱落, 但不同盐处理的表现有所差异。NaCl 胁迫后, 植株下部叶发黄并脱落, 中上部叶颜色无明显变化; 90~180 mmol/L NaCl 处理下, 随着溶液浓度的升高, 落叶数增加(表 1), 且高浓度处理组的嫩叶边缘出现不规则且边界不清晰的坏死现象, 部分叶片的中部坏死; 180 mmol/L NaCl 处理下, 秋萍植株死亡 2 株, 占该组的 66.7%。此外, 随着 NaHCO₃ 浓度的升高, 秋萍植株叶片颜色先变绿再变黄, 落叶数先减后增; 其中, 30 mmol/L NaHCO₃ 处理组生长旺盛, 叶色较对照处理深, 落叶数最少; 当 NaHCO₃ 浓度大于 90 mmol/L 时, 随着 NaHCO₃ 浓度的升高, 全株叶片逐渐黄化, 落叶数增加, 中下部叶产生由支脉围合、边界明显的褐色斑点; 180 mmol/L NaHCO₃ 处理下植株完全停止生长。

表 1 2 种钠盐胁迫下秋萍的落叶数

Tab. 1 Numbers of fallen leaves of Qiuping under two kinds of sodium salt stress

<i>c</i> /(mmol·L ⁻¹)	NaCl胁迫 NaCl stress	NaHCO ₃ 胁迫 NaHCO ₃ stress
0 (CK)	2.00±0.00 d	2.00±0.00 ab
30	0.67±0.33 e	1.00±0.58 c
60	1.67±0.33 de	1.67±0.33 ab
90	2.67±0.33 cd	2.00±0.00 ab
120	3.33±0.33 bc	2.33±0.67 b
150	4.00±0.58 b	3.67±0.33 a
180	5.33±0.67 a	4.00±0.00 a

注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$).

2.2 光合特性分析

2.2.1 NaCl 胁迫下光合特性的变化

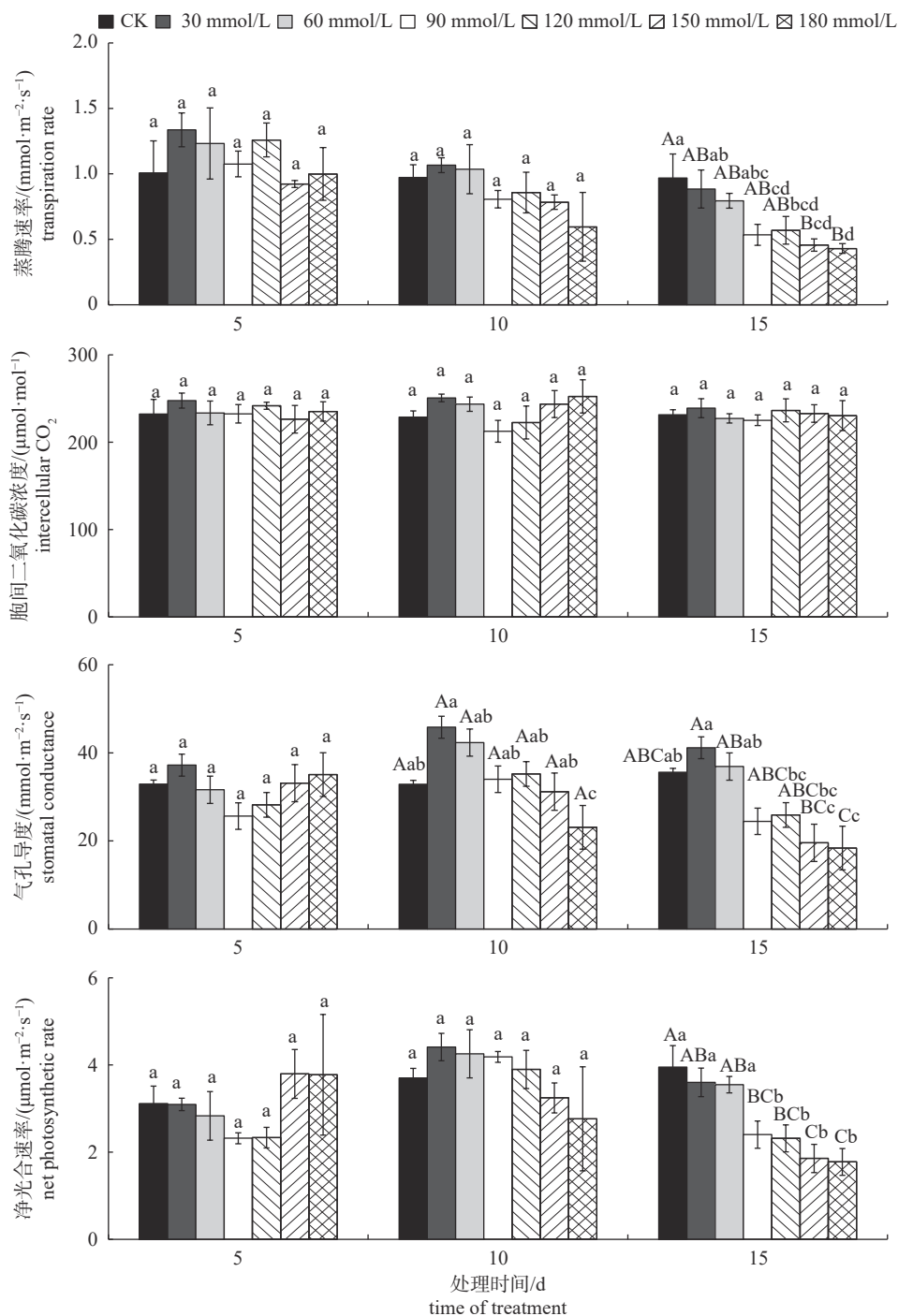
由图 1 可知: NaCl 胁迫下, 随着溶液浓度的升高, 第 5 和 10 天各组间蒸腾速率呈升—降—升—降的变化趋势, 30 和 120 mmol/L NaCl 胁迫的蒸腾速率较高; 随着胁迫时间的延长, 第 15 天各组间蒸腾速率呈降—升—降的变化趋势。NaCl 胁迫对气孔导度有明显影响, 随着溶液浓度的升高, 胁迫第 10~15 天气孔导度逐渐降低, 表现为严重的生理干旱现象。处理 5 d 时, 净光合速率呈低浓度 NaCl 胁迫下降低而高浓度 NaCl 胁迫下升高的变化趋势, 且在 150~180 mmol/L NaCl 处理时最高; 处理 10 d 时, 净光合速率呈先升高后降低的变化趋势, 且各组间差异不显著; 处理 15 d 时, 90~180 mmol/L NaCl 胁迫组的净光合速率极显著降低, 表明持续的高浓度 NaCl 胁迫已对净光合速率造成了抑制。胞间二氧化碳浓度几乎不受胁迫浓度和时间影响, 各组间无显著差异。

2.2.2 NaHCO₃ 胁迫下光合特性的变化

由图 2 可知: 处理 5 d 时, 随着 NaHCO₃ 浓度的升高, 蒸腾速率、气孔导度和净光合速率总体均呈先增高后降低的变化趋势; 120 mmol/L~180 mmol/L NaHCO₃ 胁迫下, 随着胁迫时间的延长, 胞间二氧化碳浓度先减小后增大, 气孔导度降低, 净光合速率减弱。

2.3 光合色素的变化

由图 3 可知: 叶绿素含量随 NaCl 浓度的升高呈升高—降低—升高的变化趋势, 120 mmol/L NaCl 胁迫时叶绿素含量最低, 叶片均为青绿色; 此外, 叶绿素含量随 NaHCO₃ 浓度的升高呈先升后降的单峰曲线变化, 但各处理组间的总叶绿



注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$); 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$), different uppercase letters indicate extremely significant difference among different treatments ($P < 0.01$); the same as below.

图 1 不同浓度 NaCl 胁迫对秋萍植株光合特性的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of NaCl stress on the photosynthetic characteristics of Qiuping

素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均无显著差异, 60 mmol/L 组的总叶绿素和叶绿素 a 含量最高, 90 mmol/L 组的叶绿素 b 含量最高。结果印证了表观叶色的变化趋势, 即随着盐浓度的升高, 叶

片颜色先变深再变浅。

由图 3 还可知: 2 种盐胁迫下类胡萝卜素含量呈先升高后降低的变化趋势。NaCl 胁迫下, 30 mmol/L 组的类胡萝卜素含量最高, 约为 CK

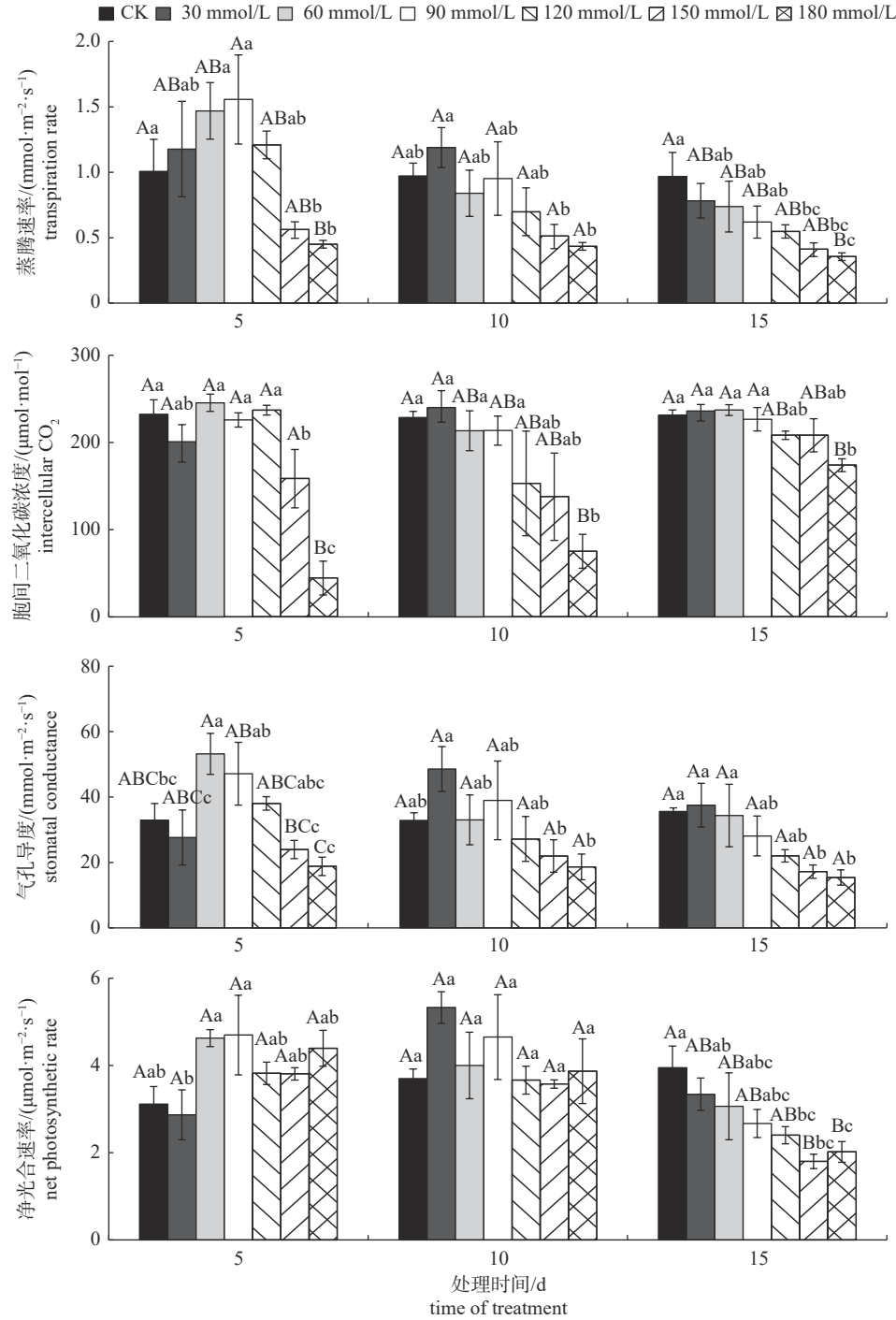


图 2 不同浓度 NaHCO_3 胁迫对秋萍植株光合特性的影响

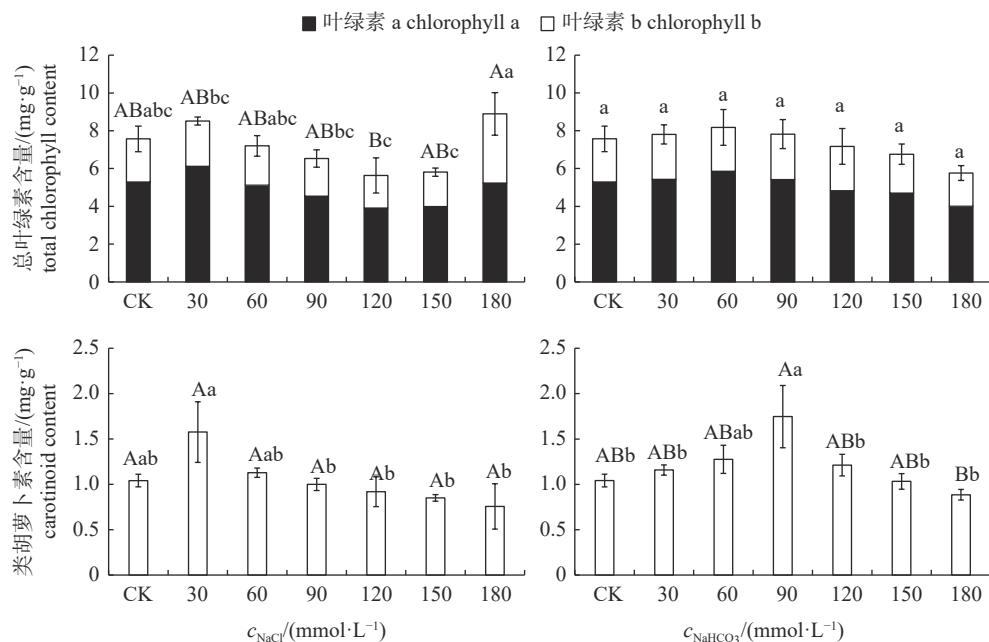
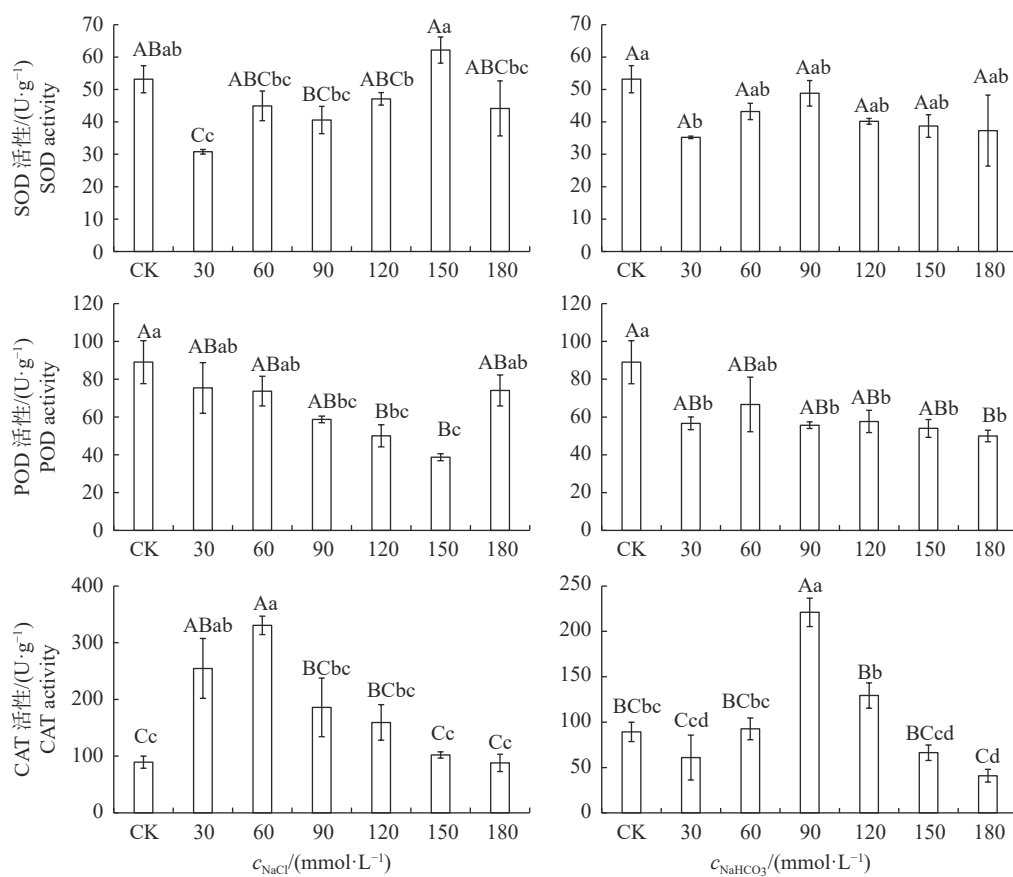
Fig. 2 Effects of different concentrations of NaHCO_3 stress on the photosynthetic characteristics of Qiuping

的 1.5 倍； NaHCO_3 胁迫下，类胡萝卜素含量随 NaHCO_3 浓度的升高而先升高后降低，且 90 mmol/L 组的类胡萝卜素含量显著高于 CK，极显著高于 180 mmol/L 组。

2.4 保护酶活性的变化

由图 4 可知： NaCl 胁迫下，150 mmol/L NaCl

处理的秋萍叶片 SOD 活性最高，较 CK 高 17%，且显著高于 120 和 180 mmol/L 组，30 mmol/L 组活性最弱； NaHCO_3 胁迫下，秋萍叶片 SOD 活性随 NaHCO_3 浓度的升高呈先降后升再降的变化趋势，30 mmol/L 组显著低于 CK 处理，且各处理组的 SOD 活性均小于 CK 处理，组间差异未达到

图3 不同浓度 NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对秋萍叶片光合色素含量的影响Fig. 3 Effects of different concentrations of NaCl and NaHCO₃ stress on the photosynthetic pigments of Qiuping图4 不同浓度 NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对秋萍叶片保护酶活性的影响Fig. 4 Effects of different concentrations of NaCl and NaHCO₃ stress on the leaf protective enzyme activity of Qiuping

极显著水平。NaCl 胁迫下, POD 活性随 NaCl 浓度的升高 (0~150 mmol/L) 逐渐降低, 但 180 mmol/L NaCl 处理时其活性显著增高; NaHCO₃ 胁迫下, 各处理组的 POD 活性均低于对照组, 呈微弱的先增高后降低的趋势, 30~180 mmol/L 各处理组间差异均不显著。NaCl 胁迫下, CAT 活性呈单峰变化曲线, 且 60 mmol/L NaCl 处理时最高, 约为 CK 和 180 mmol/L 组的 3.70 倍; NaHCO₃ 胁迫下, 随着 NaHCO₃ 浓度的升高, CAT 活性呈降低—升高—降低的变化趋势, 且 90 mmol/L NaHCO₃ 组极显著高于其他组, 约为对照组的 2.47 倍。

2.5 渗透调节物质的变化

由图 5 可知: NaCl 胁迫下, 可溶性糖含量先增加后减少, 各处理组间无显著差异; NaHCO₃ 胁迫下, 随着 NaHCO₃ 浓度的升高, 可溶性糖含量呈先缓慢上升后下降的趋势, 30~90 mmol/L NaHCO₃ 范围内平缓上升, 在 120 mmol/L NaHCO₃ 处理达到最大值, 且极显著高于 CK 组, 约为

CK 组的 3 倍。NaCl 胁迫下, 秋萍的可溶性蛋白含量在 120 mmol/L 组最高, 且极显著高于 CK 组, 约为 CK 组的 1.86 倍; NaHCO₃ 胁迫下, 秋萍的可溶性蛋白含量呈先升高后降低的变化趋势, 60~120 mmol/L NaHCO₃ 处理时其含量极显著高于 CK 组。秋萍受到 NaCl 胁迫后, 其脯氨酸含量呈降低—升高—降低的变化趋势, 且 30 mmol/L NaCl 处理时最低, 120 mmol/L NaCl 处理时最高; 当秋萍受到 NaHCO₃ 胁迫后, 其脯氨酸含量呈先降后升的变化趋势, 30、60 和 90 mmol/L 处理组的脯氨酸含量分别为 CK 组的 53.07%、64.76% 和 68.38%。

2.6 丙二醛含量的变化

由图 6 可知: NaCl 胁迫下, 随着溶液浓度的升高, 丙二醛含量呈波动变化的趋势, 且 90 mmol/L NaCl 处理的丙二醛含量极显著高于其他处理; NaHCO₃ 胁迫下, 随着溶液浓度的升高, 丙二醛含量也呈波动变化的趋势, 120~180 mmol/L NaHCO₃ 处理的丙二醛含量均显著低于 CK。此外, NaCl

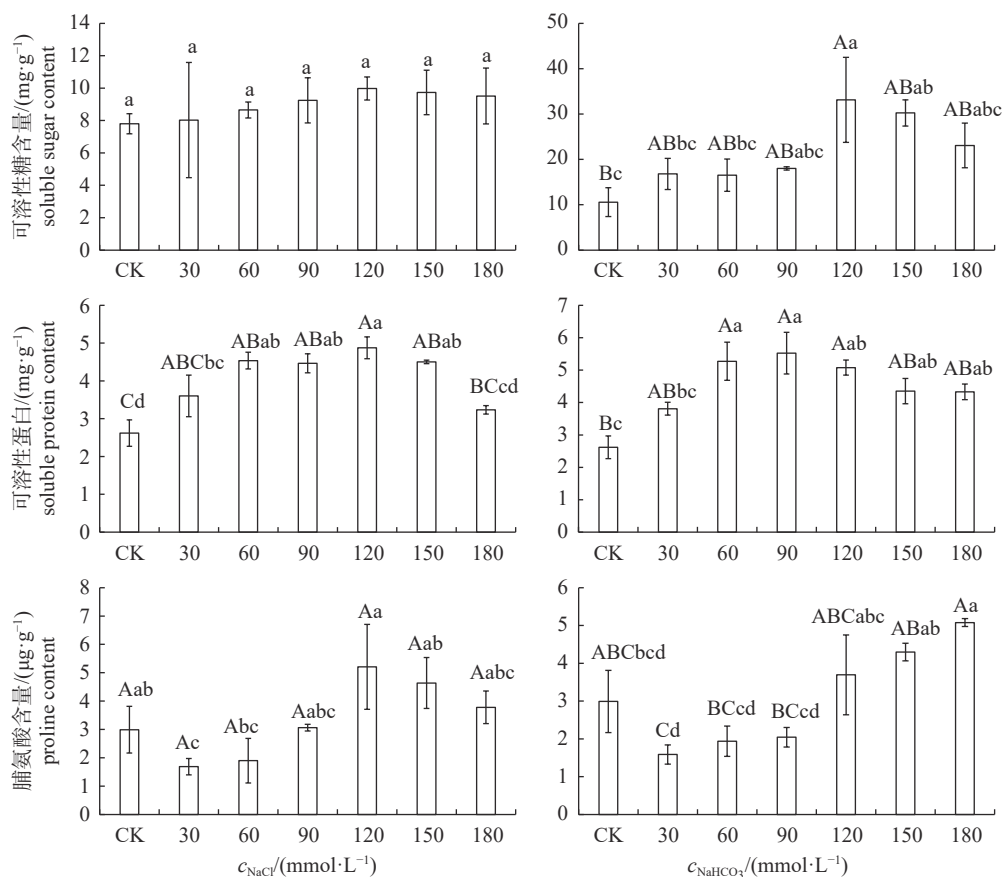


图 5 不同浓度 NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对秋萍叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of NaCl and NaHCO₃ stress on the leaf osmotic adjustment substances of Qiuping

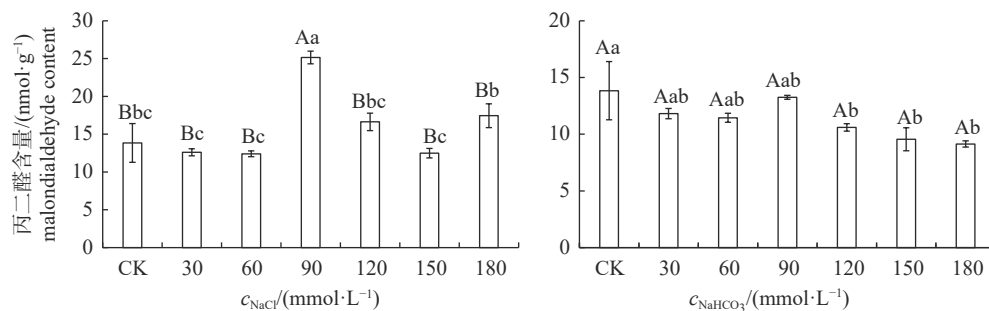


图6 不同浓度 NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对秋萍叶片丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of NaCl and NaHCO₃ stress on the leave malondialdehyde content of Qiuping

胁迫下丙二醛含量的最大值高于 NaHCO₃ 胁迫下的最大值。

3 讨论

红树莓组培苗具有栽后生长整齐、旺盛的特点, 明显优于根蘖苗, 为建园生产首选苗木类型。该特性有助于减轻非试验因素的影响, 故本研究选择组培苗作为试验材料, 盆栽培养到合适大小后进行试验。

本研究表明: 低浓度 NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对秋萍生长具有促进作用, 表现为叶色较深, 光合色素含量增加, 积累渗透调节物质, SOD 和 POD 活性降低, CAT 活性升高, 下部叶脱落少; 中、高浓度盐胁迫的抑制作用体现在既可直接影响植物生长, 也可通过抑制净光合速率和气孔导度影响物质合成, 从而间接影响生长, 且盐度越大、作用时间越长越明显^[13]。处理组植株在应对较高浓度 (>120 mmol/L) 盐胁迫时, 叶片脱落增加, 可能以此排出盐分, 这与同属蔷薇科的紫穗槐表现^[14]相似。盐碱胁迫导致生理干旱, 引发离子胁迫和渗透胁迫, 碱性盐还会造成高 pH 胁迫。本研究中, NaCl 组有较明显的叶片症状, 如发黄、边界不明、产生不规则斑点以及由下向上干枯脱落, 高浓度组上部叶边缘枯死, 有失绿斑点; 而 NaHCO₃ 组则表现为全株叶片逐渐偏黄, 这些现象与光合作用受到抑制、叶片气体交换量大幅降低有关^[15]。

在光合作用和光合色素含量方面, 除胞间二氧化碳浓度外, 2 种盐胁迫下光合指标均随盐浓度的升高整体呈下降的趋势, 随着处理时间的延长, 碱性盐胁迫条件下的降低幅度大于中性盐胁迫, 这与苦楝^[16]和油莎豆^[17]受到中性盐和碱性盐

胁迫的反应规律相似, 也与盐碱胁迫下砂糖橘叶片相对含水量、叶绿素含量、光合速率、蒸腾速率和气孔导度明显降低的情况^[18]相似。净光合速率和气孔导度的变化规律与鄞红葡萄受 NaCl 胁迫的变化^[19]一致, 但胞间二氧化碳浓度的变化规律与鄞红葡萄^[19]不完全相同; NaHCO₃ 胁迫 15 d, 各处理组秋萍红树莓的蒸腾速率均为递减, 这与速生白榆^[20]的表现相似, 也与苦楝幼苗的净光合速率和蒸腾速率随中性盐和碱性盐浓度的提高显著降低^[16]的表现相似。低浓度 (30~60 mmol/L) 的 2 种单盐胁迫至 10 d 时, 均能促进秋萍增加气体交换, 提高光合速率; 中等浓度 (90~120 mmol/L) 胁迫下气孔导度相持平, 说明气孔因素在此时不是光合速率的限制因子; 而达到较高浓度 (150~180 mmol/L) 时, 非气孔因素成为抑制的主导因素。中、高浓度胁迫时净光合速率下降的原因主要与气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量下降有关, 与 Heritage 和 Meek 红树莓受到干旱胁迫时净光合速率和气体交换量的变化规律以及大量积累可溶性糖和脯氨酸的现象^[21]相吻合。结合叶绿素含量和净光合速率持续降低以及 180 mmol/L NaCl 组 2 株秋萍死亡的现象, 说明秋萍植株已达到耐盐的极限。随着盐浓度的升高, 胞间二氧化碳浓度的变化规律与其亲本 Autumn Bliss^[22]相同, 无显著差异; 其他指标则与玉米^[13]和棉花^[23]受到盐胁迫时的变化相近。秋萍的总叶绿素和类胡萝卜素含量均随着盐胁迫浓度的增加呈先升高后降低的变化, 但在 150~180 mmol/L NaCl 胁迫时总叶绿素含量出现反常的增高, 推测其原因可能与以下因素相关: 叶片细胞结构遭破坏, 失水造成其相对含量增加; 加速合成叶绿素以应对 RuBP 羧化酶活性的降低; 加速合成叶绿

素以抵抗活性氧的漂白作用。高浓度 NaHCO_3 胁迫虽无秋萍植株死亡,但达到中等浓度后,总叶绿素含量降低,植株叶片逐渐整体偏黄绿色,有缺素症状(缺铁黄化),生长缓慢至停止,这可能与碱胁迫使 PS II 反应中心被破坏以致同化能力下降^[24]有关。

胁迫条件下,植物体内产生大量具有高活性和毒性的活性氧,对植物生长发育产生不利影响。当植物受到胁迫后,其体内会启动清除活性氧的酶系统,它们相互协调,共同作用,保护膜结构稳定^[25-26]。2 种单盐胁迫条件下,秋萍 SOD 活性呈降低—升高—降低的变化趋势,这与对石榴^[27]和文冠果^[28]的研究结果相同。30~150 mmol/L NaCl 胁迫下,POD 活性受到抑制并逐渐降低,180 mmol/L NaCl 时 POD 活性骤升;而 CAT 活性随 NaCl 浓度的增加呈先升后降的变化趋势,180 mmol/L NaCl 时最低,结合植株出现死亡的现象,说明 180 mmol/L NaCl 的胁迫已严重导致其生理紊乱。 NaHCO_3 胁迫下,各胁迫组 SOD 和 POD 活性均不及 CK 处理,说明 SOD 和 POD 活性不可单独作为衡量胁迫程度的指标;而 CAT 活性发生了极显著的变化,是主要调节酶。30~60 mmol/L NaHCO_3 胁迫下,CAT 活性均低于对照,结合其他指标的变化,说明秋萍可以适应一定程度的碱性盐胁迫,且能促进生长,这与“黄秋葵种子低浓度碱胁迫促进萌发,CAT 活性变化幅度大”的研究结果^[29]相同。

胁迫会打破原有的活性氧产生与清除的动态平衡,导致细胞膜脂过氧化作用加强,膜系统受损。丙二醛的变化可反映膜系统的受损程度,2 种单盐胁迫下秋萍的丙二醛含量变化规律与同属植物牛叠肚^[30]一致,故推测丙二醛呈现间断积累的现象是此类植物的特性。胁迫对植物渗透调节物质的积累也有显著影响。可溶性糖是植物光合作用的主要产物之一,具有存贮能量的功能,是重要的渗透调节物质^[31-32]。本研究中,NaCl 胁迫下秋萍的可溶性糖含量变化趋势并不显著,而可溶性蛋白和脯氨酸含量均有显著的变化,尤其是脯氨酸含量差异达到数倍,说明 NaCl 胁迫下可溶性糖并非主要的渗透调节物质,而是以脯氨酸与可溶性蛋白调节为主; NaHCO_3 胁迫下,可溶性糖和脯氨酸含量均在 120 mmol/L 处理时升高,说明 30~90 mmol/L NaHCO_3 时主要由可溶

性蛋白进行调节,120 mmol/L NaHCO_3 时由三者共同发挥调节作用。郭书奎等^[13]认为脯氨酸积累与叶绿素含量正相关,但本研究 2 种盐胁迫下脯氨酸的变化趋势不同,具体机制还有待进一步研究。碱性盐胁迫还会造成高 pH 胁迫,高 pH 胁迫会显著抑制 Mg、Fe 和 Cu 元素的吸收,同时抑制糖类和氨基酸的合成与积累^[33],导致高浓度组渗透调节物质含量降低。试验期间还发现夜蛾类首选 90~120 mmol/L 盐胁迫的植株产卵,说明盐碱胁迫还会对昆虫的行为存在互作关系,如不同浓度的盐胁迫影响褐飞虱的取食偏好、寄主偏好和繁殖率,呈现盐度依赖效应^[34],秋萍作为寄主植物对昆虫寄主选择的调控作用还需要进一步研究。

4 结论

低浓度 NaCl 和 NaHCO_3 胁迫可促进秋萍生长;中等浓度下,秋萍表观症状轻,可正常生长,生理干旱现象较轻;高浓度胁迫下,秋萍表观特性和多个生理指标受到严重影响,并出现死亡现象。秋萍对 NaHCO_3 的耐性较 NaCl 强,对 NaCl 胁迫的适应极限为 150~180 mmol/L,而对 NaHCO_3 胁迫的耐性可达 180 mmol/L 以上。秋萍对盐碱胁迫适应性较强,适应范围较宽,适宜在盐碱地区推广,具有良好的经济和生态价值。

[参考文献]

- [1] 张琪. 不同树莓品种光合特性及耐高温研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [2] HAO L H, BELLO N T. Reduced body fat and epididymal adipose apelin expression associated with raspberry ketone [4-(4-hydroxyphenyl)-2-butanone] weight gain prevention in high-fat-diet fed mice[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 771816. DOI: [10.3389/fphys.2021.771816](https://doi.org/10.3389/fphys.2021.771816).
- [3] 张岩. 黑龙江省树莓产业发展现状及对策[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [4] 杨丽维, 张志军, 田淑芬, 等. 五个树莓品种在天津地区的表现[J]. *北方园艺*, 2008(4): 46.
- [5] 王柏茗, 聂江力, 苏雅, 等. ‘秋萍’红树莓在天津地区引种试验[J]. *经济林研究*, 2021, 39(3): 227. DOI: [10.14067/j.cnki.1003-8981.2021.03.026](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2021.03.026).
- [6] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.010).
- [7] 张征云, 孙贻超, 孙静, 等. 天津市土壤盐渍化现状与敏感性评价[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 954. DOI: [10.3321/j.issn:1672-2043.2006.04.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-2043.2006.04.027).

- [8] 位杰,王合理,吴翠云,等.复合盐碱胁迫对灰枣果实内在品质的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):144. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2015.03.23.
- [9] 程云清,耿婉婷,张会弟,等.不同树莓品种光合特征[J].东北林业大学学报,2015,43(5):23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2015.05.005.
- [10] 刘攀,耿兴敏,赵晖.碱胁迫下杜鹃花抗氧化体系的响应及亚细胞分布[J].园艺学报,2020,47(5):916. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0314.
- [11] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [12] 苏雅,裴毅,何松燕,等.蓝果忍冬对盐胁迫的生理响应研究[J].天津农林科技,2021(1):1. DOI: 10.16013/j.cnki.1002-0659.2021.0001.
- [13] 郭书奎,赵可夫.NaCl胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理[J].植物生理学报,2001,27(6):461. DOI: 10.3321/j.issn:1671-3877.2001.06.004.
- [14] 闫永庆,朱虹,刘兴亮,等.盐胁迫对紫穗槐生长发育及生理特性的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(12):31. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9369.2008.12.008.
- [15] RIBEIRO R R, SPÓSITO M B. Interference of late rust associated with water deficit in the primary metabolism of raspberries[J]. European Journal of Plant Pathology, 2022, 163(2): 279. DOI: 10.1007/s10658-022-02476-z.
- [16] 张远兰,胡鑫,蔡金峰,等.Na₂SO₄和Na₂CO₃胁迫下苦楝幼苗的形态及光合生理特性[J].广西植物,2021,41(2):195. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201910022.
- [17] 唐榕,郭晨荔,梁培鑫,等.油莎豆幼苗应对盐碱胁迫的光合生理响应机制[J].中国油料作物学报,2022,44(3):632. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2021086.
- [18] 郭雁君,吉前华,杜鹏飞,等.盐碱胁迫对砂糖橘叶片水分亏缺、气体交换及矿质元素微域分布的影响[J].果树学报,2022,39(6):1029. DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.20210505.
- [19] 李学孚,倪智敏,吴月燕,等.盐胁迫对‘鄞红’葡萄光合特性及叶片细胞结构的影响[J].生态学报,2015,35(13):4436. DOI: 10.5846/stxb201409141821.
- [20] 周丹丹,刘德玺,李存华,等.盐胁迫对朴树和速生白榆幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J].西北植物学报,2016,36(5):1004. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.05.1004.
- [21] MORALES C G, PINO M T, DEL POZO A. Phenological and physiological responses to drought stress and subsequent rehydration cycles in two raspberry cultivars[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 162(3): 234. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.07.025.
- [22] NEOCLEOUS D, VASILAKAKIS M. Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. ‘Autumn Bliss’)[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(3): 282. DOI: 10.1016/j.scienta.2006.12.025.
- [23] KADER M H A, 申孝军,陈津赛,等.水盐胁迫下棉花叶片光合的气孔与非气孔限制[J].灌溉排水学报,2020,39(11):13. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020173.
- [24] 王晓,冉馨,高小宽,等.碱胁迫对白柳根系生长及光合特征参数的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):119. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2021.06.016.
- [25] 易善军,孙振元,韩蕾,等.植物耐碱机理及相关基因研究进展[J].世界林业研究,2011,24(1):28. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2011.01.004.
- [26] 张婷,徐捷,李名扬,等.4种野生百合对盐碱胁迫生理响应的初步研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(6):22. DOI: 10.11929/j.swfu.202006051.
- [27] 董建梅,刘翠玉,赵玉洁,等.盐胁迫对石榴生长与生理生化特性的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(1):47. DOI: 10.11929/j.swfu.201912009.
- [28] 张晓燕,黄雅茹,马迎宾,等.采煤沉陷区NaHCO₃盐胁迫对文冠果叶片生理特性的影响[J].中国水土保持,2020(6):37. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.20200610.001.
- [29] 曹亚萍,陈昭昱,王勇飞,等.Na₂CO₃对黄秋葵种子萌发及生理特性的影响[J].种子,2020,39(3):24. DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2020.03.024.
- [30] 李玉梅.牛叠肚幼苗对盐碱胁迫的生理响应机制研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [31] 王珊,李静,吴玉洁,等.盐胁迫对罗布麻生长和生理的影响[J].草业科学,2022,39(9):1832. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0055.
- [32] 张璐,刘炳响,牟洪香,等.干旱胁迫下文冠果耐盐生理生化特性研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(4):63. DOI: 10.11929/j.swfu.202004041.
- [33] 郭瑞,周际,杨帆,等.小麦根系在碱胁迫下的生理代谢反应[J].植物生态学报,2017,41(6):683. DOI: 10.17521/cjpe.2016.0136.
- [34] MD KHAIRUL Q. 盐胁迫对水稻与褐飞虱互作的影响[D].杭州:浙江大学,2020.

责任编辑:何馨成