

网络出版时间:2020-01-14 17:04 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.07.011
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200114.1125.022.html

NaCl 处理对半高丛越橘叶片形态和 光合生理特性的影响

张晓婷^{1,2}, 韦建辰^{1,2}, 徐振彪^{3,4}, 徐德冰^{2,4}, 王 颖^{1,2}, 吴 林^{1,4}

(1 吉林农业大学 园艺学院, 吉林 长春 130118; 2 吉林省蓝莓研究中心, 吉林 长春 130021;
3 山东理工大学 生命科学院, 山东 淄博 255049; 4 淄博普蓝农业科技有限公司, 山东 淄博 256300)

【摘 要】【目的】研究半高丛越橘的耐盐性和耐盐范围,为其在盐碱地的引种栽培提供参考。【方法】以 2 年生半高丛越橘品种‘北陆’为材料,研究不同 NaCl 处理(0(CK), 30, 60, 90, 120, 150, 180 和 210 mmol/L)对越橘叶片形态、生理生化、叶绿素含量、光合作用参数及荧光参数指标的影响,筛选出越橘的耐盐范围,评估其耐盐性。【结果】(1)越橘植株在 210 mmol/L NaCl 处理下 38 d 失绿;45 d 叶片干枯卷曲,枝条开始失绿;62 d 枝条已基本失绿,植株接近死亡;且解除胁迫换土栽培后,仍无生命迹象。越橘叶片的叶面积、叶长、叶宽、鲜质量和干质量均在 90 mmol/L NaCl 处理下达到最大;相对含水量以 60 mmol/L NaCl 处理最高,且较 CK 显著增加;比叶重在 120 mmol/L NaCl 处理下出现最大值,且与 CK 差异极显著($P < 0.01$)。(2)随着 NaCl 浓度增大,越橘叶片可溶性蛋白含量明显增加, CAT 活性上升, POD 活性表现为先升高后下降,且高浓度(≥ 150 mmol/L) NaCl 处理越橘叶片 Chl a、Chl b 和 Chl 含量降低。(3)NaCl 浓度 ≤ 90 mmol/L 时,越橘叶片 Φ_{PSII} 、 q_p 、NPQ 和 ETR 均高于 CK;NaCl 浓度 > 90 mmol/L 时,各项指标均呈下降趋势,且 180 mmol/L NaCl 处理 F_v/F_m 、 P_n 、 Tr 和 G_s 均下降, C_i 则升高。【结论】越橘品种‘北陆’有一定的耐盐能力,其耐盐浓度为 0~90 mmol/L, 210 mmol/L NaCl 是该品种耐盐最大临界值。

【关键词】半高丛越橘;耐盐性;叶片形态;光合生理;叶绿素荧光

【中图分类号】S663.901

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2020)07-0094-08

Impacts of NaCl treatment on leaf morphology and photosynthetic physiological characteristics of semi-high-bush blueberry seedlings

ZHANG Xiaoting^{1,2}, WEI Jianchen^{1,2}, XU Zhenbiao^{3,4}, XU Debing^{2,4},
WANG Ying^{1,2}, WU Lin^{1,4}

(1 College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China;

2 Jilin Blueberry Research Center, Changchun, Jilin 130021, China;

3 College of Life Sciences, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

4 Zibo Pulan Agricultural Technology Co., Ltd., Zibo, Shandong 256300, China)

Abstract:【Objective】The salt stress and salt stress range of semi-high-bush blueberry were studied to provide reference for the introduction and cultivation in saline-alkali land. 【Method】The 2-year-old *Vaccinium* L. ‘Northland’ seedlings were selected to study the effect of different NaCl concentrations (0 (CK), 30, 60, 90, 120, 150, 180 and 210 mmol/L) on morphology, physiological and biochemical indexes, chlorophyll content, photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence of blueberry leaves. The range

【收稿日期】2019-07-18

【基金项目】吉林省教育科学“十三五”规划项目(GH170250);淄博市科学技术发展计划项目(2017kj080008);淄博市校城融合发展计划项目(2018ZBXC040)

【作者简介】张晓婷(1993—),女,山西朔州人,在读硕士,主要从事果树生理生态及栽培技术研究。E-mail:937571500@qq.com

【通信作者】吴 林(1970—),男,吉林长春人,教授,硕士,主要从事蓝莓等小浆果品种选育、栽培生理和产业经济等全产业链技术研究。E-mail:310710966@qq.com

of salt tolerance was also screened to evaluate its salt tolerance.【Result】(1) The blueberry plants lost green in 38 days,the leaves were dry and curled and the branches began to lose green in 45 days, and the branches basically lost green and plants were nearly dead in 62 days in the 210 mmol/L NaCl treatment. The plants did not come back to life after the stress was released. The leaf area,length,diameter,fresh weight and dry weight of blueberry leaves reached the maximum when the NaCl concentration was 90 mmol/L. The relative water content was the highest when the NaCl concentration was 60 mmol/L,and it was significantly higher than the control. The specific leaf weight reached the maximum when the NaCl concentration was 120 mmol/L,and the difference from control was extremely significant ($P<0.01$). (2) The soluble protein content and CAT of blueberry leaves were increased significantly when the NaCl concentration increased, and the activity of POD was increased firstly before decreasing. When the NaCl concentration was higher than ≥ 150 mmol/L,the Chl a,Chl b and Chl in leaves were significantly reduced. (3) The Φ_{PSII} , q_p , NPQ and ETR of leaves increased in comparison with the control when the NaCl concentration was below 90 mmol/L. They decreased when the NaCl concentration was greater than 90 mmol/L. When the NaCl concentration was 180 mmol/L, Fv/Fm , Pn , Tr and G_s decreased, but C_i increased.【Conclusion】The *Vaccinium* L. ‘Northland’ seedlings had certain ability to adapt NaCl stress,and the salt tolerance range was 0—90 mmol/L NaCl with the maximum of 210 mmol/L NaCl.

Key words: semi-high-bush blueberry; salt tolerance; leaf morphology; photosynthetic physiology; chlorophyll fluorescence

越橘,又称蓝莓,系杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium* spp.)植物,原产于北美,我国于 1981 年开始引种^[1]。自 1999 年商业化栽培以来,全国有超过 10 个省份进行了越橘的商业化栽培,国内工商企业和国际金融资本都参与到越橘产业中,使越橘成为我国目前发展最快的新兴果树,具有较高的经济价值^[2]。我国西北、华北、东北和沿海地区存在大量盐渍地,其中盐土含盐量多达 0.4%以上,最高可达 1.5%,严重影响作物生长发育,导致越橘生长受阻,限制其经济效益发挥和栽培区域扩大,抗盐性研究可为解决越橘在盐渍环境中大面积推广提供依据。近年来,国内外针对越橘的干旱胁迫^[3]、土壤改良^[4]以及离子运输^[5]有许多研究,但有关盐胁迫对越橘生理生化特性的影响,以及最佳耐盐范围的相关报道甚少,缺乏对半高丛越橘幼苗的系统研究。故本试验以 2 年生半高丛越橘品种‘北陆’为材料,研究不同浓度 NaCl 处理对其叶片形态、生理生化指标、叶绿素含量、光合作用参数以及荧光参数的影响,进一步鉴定半高丛越橘的耐盐性和耐盐范围,以期对盐碱地区的越橘引种栽培提供依据。

1 试验地概况

试验地位于吉林省长春市南关区,属温带季风气候,地处东经 $125^{\circ}33'$,北纬 $43^{\circ}87'$,海拔 219 m,年平均温度 5.5°C ,年平均降水量 570.3 mm,无霜期

135 d 左右。土壤基质中草炭土:园土为 1:1(体积比),施硫磺粉进行 pH 调节,使其土壤 pH 维持在 5.0 左右,土壤盐度为 0.02%,速效氮含量 79.62 mg/kg,有效磷含量 7.59 mg/kg,速效钾含量 86.84 mg/kg,有机质含量 28.79 g/kg。

2 材料与方法

2.1 材 料

于吉林省白山市普蓝高科靖宇基地内,选取生长势一致、无病虫害的 2 年生半高丛越橘品种‘北陆’作为试验材料,于 2018 年 5 月运回吉林农业大学蓝莓产业化创新科研实践基地进行温室栽培。

2.2 试验处理

2018 年 6 月中旬开始盐(NaCl)处理试验,设置 7 个处理,盐浓度分别为 0(CK),30,60,90,120,150,180 和 210 mmol/L。试验期间,每个花盆(外口径 21 cm,内口径 17.7 cm,高 12 cm,底径 11.5 cm,配有托盘)栽植 1 株越橘试验苗,每处理 10 株,3 次重复。每隔 10 d 每盆施相应浓度 NaCl 溶液 500 mL,共施 5 次。若发现托盘中有渗出溶液,则将其倒回土壤中。试验 50 d 后,分别选取各处理生长势一致的越橘叶片 3 片,自然光下拍摄图片,观察其生长状况,然后测定叶片形态指标、光合作用参数及荧光参数;另取 9~12 片叶片混合剪碎放入铝盒,测其叶绿素含量及生理生化指标,3 次重复。

试验结束后解除盐胁迫,于 2019 年 5 月初进一步记录各处理越橘植株的生长状况,对高浓度(150, 180 和 210 mmol/L) NaCl 处理越橘植株分别更换园土、草炭土、园土:草炭土(体积比 1:1)进行重新栽培,并观察记录植株茎叶生长情况。其中,园土为普通栽培土,含有较丰富的腐殖质,易板结,透水性差;草炭土有机质含量在 30 g/kg 以上,质地松软,保水性差。

2.3 方 法

2.3.1 生长指标测定 叶片长度、宽度用世达(Sa-ta)数显游标卡尺测定,叶面积用比重法^[6]测定,采用梅特勒(Mettler)万分之一天平测定其鲜质量。将叶片置于电热鼓风干燥箱(GZX-9246MBE)烘干后,称其干质量,根据叶面积与叶片干质量计算出比叶重,采取烘干法^[7]测定其相对含水量。

2.3.2 生理生化指标测定 叶片的可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[8]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[9]测定;过氧化氢酶(CAT)活性用紫外吸收法^[10]测定;结合高俊凤^[11]和高晓宇等^[12]的方法测其叶绿素含量,将剪碎的叶片取 0.1 g 加入乙醇-丙酮混合液(1:1,体积比)10 mL 置于具塞刻度试管中,使叶片完全浸入液体中加盖,放于暗处至叶片颜色变白,即可比色出结果。

2.3.3 光合参数及荧光参数测定 选取晴朗无风

天气,随机选取植株,于上午 09:00—11:00 用 CIR-AS-2 光合仪(PP systems USA),在枝条第 3~6 片叶中任意取一片测其净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(G_s),并计算叶片水分利用效率(WUE)和气孔限制值(L_s)^[13]等光合参数。随机选取同一处理下的 3 株半高丛越橘,在枝条第 3~6 片叶中任意取一片,采用 FmS2 型脉冲调制式叶绿素荧光仪(英国 Hansatech 公司生产),测叶片光适应下的最小荧光(F_o')、最大荧光(F_m')、稳态荧光(F')和可变荧光(F_v')。之后进行充分暗适应 30 min,再测其初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v),并计算 PS II 光化学效率(F_v/F_m)、PS II 光量子产量(Φ_{PSII})、光化学猝灭系数(q_p)、非光化学猝灭(NPQ)和表观光合电子传递速率(ETR)^[14-16]等荧光参数。

2.4 数据整理与分析

采用 Excel 和 SPSS 软件对试验数据进行处理及分析。

3 结果与分析

3.1 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片形态的影响
试验处理 50 d 时,每处理随机选取 3 片越橘叶片于自然光下拍摄,不同浓度 NaCl 处理下越橘叶片的生长状况如图 1 所示。

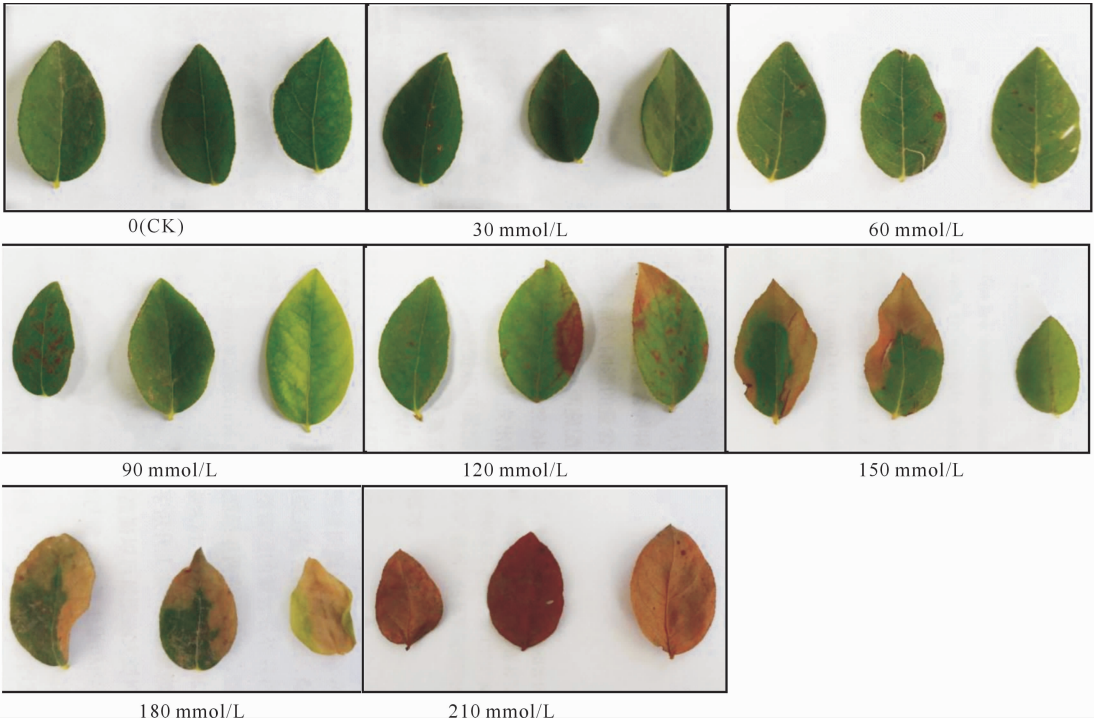


图 1 不同浓度 NaCl 处理下越橘叶片的生长状况比较

Fig. 1 Comparison of the growth of blueberry leaves with different concentrations of NaCl

结果(图 1)显示,随着 NaCl 浓度不断增大,越橘叶片逐渐失绿。连续观察发现,210 mmol/L NaCl 处理越橘植株 38 d 时失绿;45 d 叶片干枯卷曲,枝条开始失绿;62 d 枝条已基本失绿,植株接近死亡。说明 210 mmol/L NaCl 为越橘植株的临界耐盐浓度,后续试验不再测定该处理各项指标。

解除盐胁迫后低浓度 NaCl 处理越橘植株的生

长状况(表 1)显示,60 和 90 mmol/L NaCl 处理越橘植株生长势较强。换土栽培后高浓度(150,180 和 210 mmol/L)NaCl 处理越橘植株的生长状况(表 2)表明,210 mmol/L NaCl 处理植株在不同土壤下均无生命迹象,进一步证明 210 mmol/L NaCl 为越橘的临界耐盐浓度。由表 2 可知,以草炭土进行越橘缓苗的效果最佳。

表 1 低浓度 NaCl 处理下越橘植株的生长状况

Table 1 Growth status of blueberry plants under low NaCl treatments

NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	越橘植株生长状况 Growth status of blueberry plants
0	植株生长势良好,其枝条数量和叶片数量均增加,同时植株增高 Plant growth potential is good,the numbers of branches and leaves are increased,and the plant height increased
30	植株生长势良好,其生长状况与 CK 相近 Plant growth potential is good and its growth status is similar to CK
60	植株生长势较强,其生长状况优于 CK Plant growth potential is strong,and its growth status is better than CK
90	植株生长势较强,其枝条数量较 CK 少,但枝条长度较 CK 长 Plant growth potential is strong,and its number of branches is less than CK,but the length of branches is longer than CK
120	植株生长势良好,其枝条和叶片均呈现绿色,但生长情况劣于 CK Plant growth potential is good, its branches and leaves are green,but the growth status is inferior to CK

表 2 高浓度 NaCl 处理越橘植株更换土壤后的生长状况

Table 2 Growth status of blueberry plants under high NaCl treatments after replacement of different soils

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	园土 Garden soil	草炭土 Grass charcoal	园土/草炭土 Garden soil/Grass charcoal
150	植株生长势一般,其茎呈现绿色,未出现新枝条 Plant has a general growth potential,its stems are green and no new branches appear	植株生长势一般,其茎呈现绿色,长出新的枝条和叶片 Plant has a general growth potential, its stems appear green, and its new branches and leaves are growing	植株生长势一般,其茎呈现绿色,长出新的枝条 Plant has a general growth potential, its stems appear green, and its new branches are growing
180	植株无生命迹象 Plants have no sign of life	植株生长势较弱,其茎呈现绿色,长出 3~5 个新枝条 Plant has a weak growth potential, its stems are green with 3—5 new branches	植株生长势较弱,其茎呈现绿色,长出 2~3 个新枝条 Plant has a weak growth potential, its stems are green with 2—3 new branches
210	植株无生命迹象 Plants have no sign of life	植株无生命迹象 Plants have no sign of life	植株无生命迹象 Plants have no signif life

表 3 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片形态的影响

Table 3 Effect of different NaCl concentrations on morphology of blueberry leaves

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	叶面积/cm ² Area	叶长/mm Length	叶宽/mm Diameter	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	相对含水量/% Relative water content	比叶重/(g · cm ⁻²) Specific leaf weight
0	8.25±0.58 dC	43.58±1.05 dCD	26.89±0.58 cB	0.10±0.00 dD	0.03±0.00 eC	57.19±4.58 bBC	3.79±0.32 bcB
30	9.41±0.25 cB	46.40±1.35 cBC	27.71±0.66 bcAB	0.12±0.00 eC	0.03±0.00 dC	62.69±4.39 bB	3.60±0.24 cB
60	10.72±0.14 bA	49.09±0.60 bAB	29.48±0.87 abAB	0.13±0.00 bB	0.04±0.00 bA	75.25±1.95 aA	4.09±0.11 bcAB
90	11.62±0.25 aA	51.39±0.56 aA	29.94±1.35 aA	0.14±0.00 aA	0.05±0.00 aA	58.16±2.78 bBC	4.05±0.09 bcAB
120	7.83±0.88 dC	40.91±1.86 eD	23.97±0.76 dC	0.09±0.00 eE	0.04±0.00 cB	51.35±2.47 eC	5.04±0.38 aA
150	5.88±0.44 eD	34.20±0.86 fE	21.53±1.05 eC	0.08±0.01 fF	0.03±0.00 fD	41.81±2.79 dD	4.59±0.79 abAB
180	3.75±0.56 fE	31.16±0.47 gF	15.38±1.41 fD	0.05±0.00 gG	0.01±0.00 gE	24.60±3.94 eE	3.89±0.61 bcAB

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$), $n=5$ 。下表同。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$),and different uppercase letters indicate extremely significant difference ($P<0.01$), $n=5$. The same below.

从表 3 可以看出,随着 NaCl 浓度的增加,越橘叶片的叶面积、叶长和叶宽均呈先升高后下降的趋

势,且均在 90 mmol/L NaCl 处理下达到最大值,并与 CK 差异极显著($P<0.01$)。越橘叶片鲜质量在

各处理间差异均极显著($P<0.01$),干质量各处理间差异显著($P<0.05$),最大为 90 mmol/L NaCl 处理。越橘叶片相对含水量以 60 mmol/L NaCl 处理最高,较 CK 提高 33.62%;180 mmol/L NaCl 处理最低,较 CK 降低 57.89%。越橘叶片比叶重以 120 mmol/L NaCl 处理最大,且与 CK 差异极显著。

3.2 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片生理生化指标的影响

不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片生理生化指标的影响如表 4 所示。由表 4 可知,随着 NaCl 浓度的

不断增大,越橘叶片可溶性蛋白质含量表现为先升高后下降,在 90 mmol/L NaCl 处理下达到最大值,150 mmol/L NaCl 处理可溶性蛋白质含量下降明显,说明植株生长受到明显抑制作用。越橘叶片 CAT 活性在 30~90 mmol/L NaCl 处理下变化明显,表现为随着 NaCl 浓度的不断增大整体呈上升趋势;在 90~150 mmol/L NaCl 处理下趋于平稳。越橘叶片 POD 活性随着 NaCl 浓度的不断增大表现为先上升后下降,以 60 mmol/L NaCl 处理最大,之后持续呈下降趋势。

表 4 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片生理生化指标的影响

Table 4 Effects of different NaCl concentrations on physiological and biochemical characteristics of blueberry leaves

NaCl 浓度/(mmol·L ⁻¹) NaCl concentration	可溶性蛋白质含量/(mg·g ⁻¹) Soluble protein content	CAT 活性/(mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹) CAT activity	POD 活性/(mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹) POD activity
0	496.89±4.53 cdBC	353.00±20.15 dD	28.80±3.63 cB
30	550.51±78.75 cB	392.21±8.21 cC	34.00±3.16 bB
60	734.57±18.95 abA	405.17±0.64 cC	44.80±5.59 aA
90	781.67±34.67 cdA	449.67±18.19 bB	34.40±4.34 bB
120	691.81±60.34 bA	447.00±0.87 bB	18.00±2.00 dC
150	450.51±3.32 deBC	469.70±3.85 bAB	12.40±1.67 eCD
180	395.43±6.52 eC	494.45±14.77 aAB	6.80±2.28 fD

3.3 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片叶绿素含量的影响

由表 5 可知,随着 NaCl 浓度的不断增大,越橘叶片叶绿素含量呈下降趋势。当 NaCl 浓度为 180 mmol/L 时,越橘叶片 Chl a 和 Chl b 含量最低,较

CK 分别降低 52.78% 和 50.52%。30~150 mmol/L NaCl 处理越橘叶片 Chl a/Chl b 均高于 CK,仅 180 mmol/L NaCl 处理 Chl a/Chl b 稍低于 CK,但均与 CK 差异不显著。

表 5 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片叶绿素含量的影响

Table 5 Effect of different NaCl concentrations on chlorophyll contents of blueberry leaves

NaCl 浓度 / (mmol·L ⁻¹) NaCl concentration	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹) Chl a	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹) Chl b	总叶绿素/(mg·g ⁻¹) Chl	叶绿素 a/b Chl a/Chl b
0	1.04±0.09 aA	0.41±0.03 aA	1.45±0.12 aA	2.52±0.03 aA
30	0.98±0.06 aA	0.37±0.03 aA	1.35±0.09 aA	2.67±0.08 aA
60	0.72±0.02 bB	0.27±0.02 bB	1.00±0.03 bB	2.67±0.24 aA
90	0.65±0.13 bcBC	0.25±0.04 bcB	0.90±0.17 bcBC	2.60±0.16 aA
120	0.64±0.05 bcBC	0.23±0.03 bcB	0.87±0.07 bcBC	2.73±0.20 aA
150	0.55±0.06 cdBC	0.20±0.03 cB	0.75±0.09 cdBC	2.68±0.11 aA
180	0.49±0.04 dC	0.20±0.02 cB	0.69±0.11 dC	2.42±0.21 aA

3.4 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片光合作用参数的影响

由表 6 可知,越橘叶片 P_n 在 30~90 mmol/L NaCl 处理下明显增强,在 120~180 mmol/L NaCl 处理下明显降低。当 NaCl 浓度为 90 mmol/L 时,越橘叶片 P_n 和 G_s 最大,较 CK 分别增加 28.19% 和 27.13%;当 NaCl 浓度高于 90 mmol/L 时,越橘叶片 G_s 和 Tr 明显降低,且 G_s 低于 CK,各处理间差异显著($P<0.05$)。高浓度(150,180 mmol/L) NaCl 处理越橘叶片 C_i 升高,且不同处理间差异极

显著($P<0.01$)。越橘叶片 WUE 和 L_s 随着 NaCl 浓度的增大先升后降,150 mmol/L NaCl 处理均最大,分别较 CK 升高 70.98% 和 44.63%。

由表 7 可知,随着 NaCl 浓度增大,越橘叶片初始荧光(F_o)和最大荧光(F_m)均呈先升高后下降的趋势。不同浓度 NaCl 处理越橘叶片的 F_o 值均略高于 CK,且各处理间差异显著($P<0.05$)。当 NaCl 浓度为 30~90 mmol/L 时 F_m 明显升高,且均极显著高于 CK;之后开始下降,180 mmol/L NaCl 处理较 CK 降低 25.13%。越橘叶片 F_v/F_m 和 F_v/F_o

均随着 NaCl 浓度的增大而降低,180 mmol/L NaCl 处理分别较 CK 下降 21.77%和34.50%。

表 6 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片光合作用参数的影响

Table 6 Effect of different NaCl concentrations on photosynthesis parameters of blueberry leaves						
NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	<i>Pn</i> / (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	<i>Gs</i> / (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	<i>Ci</i> / (μmolmol ⁻¹)	<i>Tr</i> / (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	<i>WUE</i> / (μmol · mmol ⁻¹)	<i>Ls</i> / %
0	6.70±0.46 cC	125.33±6.18 dC	282.00±2.65 dC	0.87±0.06 eD	3.47±0.27 fD	0.21±0.01 gE
30	7.87±0.40 bB	139.67±1.70 cBC	272.00±3.61 eCD	1.17±0.06 dC	4.92±0.07 efD	0.24±0.01 fD
60	8.77±0.15 aAB	153.00±4.55 bB	262.33±3.06 fD	1.60±0.10 bB	6.42±0.17 deCD	0.26±0.01 eD
90	9.33±0.49aA	172.00±6.16 aA	251.33±5.51 gE	1.93±0.15 aA	8.01±0.44 cdBC	0.30±0.01 dC
120	7.93±0.38 bB	83.00±4.90 eD	297.00±2.00 cB	1.37±0.06 cC	9.16±0.19 bcABC	0.32±0.01 cBC
150	6.13±0.32 cC	67.67±3.40 fD	304.67±3.79 bB	0.57±0.06 fE	11.97±2.12 aA	0.37±0.01 aA
180	3.93±0.47 dD	40.33±6.34 gE	317.67±5.86 aA	0.33±0.06 gF	10.94±1.78 abAB	0.34±0.01 bB

表 7 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片荧光参数的影响

Table 7 Effects of different concentrations of NaCl on fluorecence parameters of blueberry leaves				
NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	<i>Fo</i>	<i>Fm</i>	<i>Fv/Fm</i>	<i>Fv/Fo</i>
0	124.00±1.00 fE	772.33±7.09 eD	0.83±0.01 aA	5.23±0.09 aA
30	135.00±1.00 dC	795.67±3.01 dC	0.79±0.01 bB	4.89±0.03 bB
60	144.67±2.52 cB	833.33±6.43 bB	0.78±0.00 cBC	4.76±0.06 cBC
90	155.00±2.65 aA	871.33±2.52 aA	0.76±0.00 cC	4.62±0.10 dCD
120	147.67±1.53 bB	808.67±7.09 cC	0.74±0.02 dD	4.48±0.04 eDE
150	137.67±1.53 dC	734.67±7.64 fE	0.68±0.01 eE	4.34±0.12 fE
180	130.67±2.52 eD	578.00±8.19 gF	0.65±0.01 fF	3.42±0.11 gF

由表 8 可知,NaCl 浓度低于 150 mmol/L 时,越橘叶片 Φ_{PSII} 未受明显影响;而 150 和 180 mmol/L NaCl 处理越橘叶片 Φ_{PSII} 较 CK 均显著降低。180 mmol/L NaCl 处理越橘叶片 q_p 较 CK 下降 34.50%。越橘叶片 NPQ 和 ETR 随着 NaCl 浓度的不断增大呈先升高后下降的趋势,NaCl 浓度低于 150 mmol/L 时波动较小,180 mmol/L NaCl 处理下波动较大,较 CK 分别下降了 29.72%和 35.79%。

表 8 不同浓度 NaCl 处理对越橘叶片 Φ_{PSII} 、 q_p 、 NPQ 和 ETR 的影响

Table 8 Effect of different concentrations of NaCl on Φ_{PSII} , q_p , NPQ and ETR of blueberry leaves				
NaCl 浓度 / (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	Φ_{PSII}	q_p	NPQ	ETR
0	0.20±0.01 cC	0.37±0.01 cB	3.02±0.08 eD	122.23±3.70 cC
30	0.21±0.00 bBC	0.40±0.01 bB	3.99±0.06 cC	128.57±1.28 bBC
60	0.22±0.00 bAB	0.45±0.02 aA	4.41±0.06 bB	133.88±1.54 bAB
90	0.23±0.003 aA	0.47±0.01 aA	4.90±0.12 aA	140.83±2.48 aA
120	0.17±0.01 dD	0.33±0.023 dC	3.91±0.14 cC	105.27±4.31 dD
150	0.15±0.01 eE	0.29±0.02 cC	3.21±0.05 dD	90.75±4.29 eE
180	0.13±0.01 fF	0.24±0.01 fD	2.12±0.03 fE	78.49±4.02 fF

4 结论与讨论

生长形态变化和生理变化是植物对盐胁迫敏感性的主要表现方式^[17]。随着 NaCl 浓度的增大,榆树幼苗的叶片数和叶面积均下降^[18],沙棘幼苗叶片相对含水量逐渐下降^[19]。而本研究中随着 NaCl 浓度增大,越橘叶片生长指标呈先升高后下降的趋势,研究结果差异可能因试验材料对 NaCl 浓度敏感性不同所致。本试验结果表明,210 mmol/L NaCl 为

越橘植株的临界耐盐浓度,且以草炭土的缓苗效果更佳,但其成本较高,故大田试验中以园土/草炭土 1:1(体积比)更为适宜。可溶性蛋白质含量增加会增强植物的耐盐性,张海燕等^[20]对盐地碱蓬幼苗的试验得出,植物体内可溶性蛋白含量随着 NaCl 浓度的增大明显增加,与本研究结论相似。植物保护酶系统是植物抵御逆境的防御机制^[21],本研究中随着 NaCl 浓度增大,越橘叶片 CAT 活性上升,POD 活性先升高后下降,与李全超等^[22]的研究结果一

致。叶绿素含量为衡量植物耐盐性的重要指标之一^[23],且 Chl b 含量降低会限制捕光色素蛋白对光能的捕获,减少活性氧的产生,缓解酶抑制及蛋白质降解,从而增强植物的耐盐性。本研究显示,高浓度 NaCl 处理下越橘叶片 Chl a、Chl b 和 Chl 含量降低,但在水稻^[24]和芙蓉菊^[25]研究中得到了不同的结果,前者表现为叶绿素含量先升后降,后者则随着盐浓度的增大而增加。

光合指标是鉴定植物抗盐能力的有效生理指标,其中 P_n 可直接反映光合作用能力,而盐胁迫会显著降低植物的净光合速率^[26]。本研究证明,低浓度 NaCl(30~90 mmol/L)处理可促进越橘叶片的光合作用,但 NaCl 浓度再升高时,越橘叶片 P_n 值下降。类似的研究结果也出现于菊芋^[27]和甘草^[28]上,同时,高浓度(150,180 mmol/L)NaCl 处理下越橘叶片的 P_n 、 G_s 和 Tr 均下降, C_i 先升后降。低浓度 NaCl 处理下,植物为了维持细胞内离子运输和保持细胞内离子不平衡分布的能量所需,会将部分用于生产、生长和竞争能力的同化物转向用于形成能量,即越橘幼苗叶片的 P_n 增加有利于同化物的积累,从而抑制盐离子进入细胞内,维持细胞稳态。高浓度 NaCl 处理下,大量盐离子进入细胞类囊体膜中,抑制光系统活性,导致光系统活力下降,从而抑制光合作用。荧光参数为反映植物光合作的指标^[29],盐胁迫会导致植物的 Rubisco 活性和含量降低,影响叶绿体捕获光能,降低植物光合速率。本研究发现,越橘叶片的 F_o 和 F_m 在 NaCl 浓度为 90 mmol/L 时达到最大值;NaCl 浓度小于 90 mmol/L 时,越橘叶片 Φ_{PSII} 、 q_p 、 NPQ 和 ETR 均高于 CK;NaCl 浓度大于 90 mmol/L 时,各项指标均呈下降趋势,且 180 mmol/L NaCl 处理 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 均显著下降,与前人研究结果^[30]相同,表明高浓度 NaCl 处理越橘幼苗的光能转换效率下降,电子传递能力下降,导致用于 CO_2 同化的能量减少,使得植株发生明显的光抑制,生长受阻。

综上所述,越橘幼苗‘北陆’有一定的耐盐能力,其耐盐(NaCl)浓度为 0~90 mmol/L。低浓度 NaCl 处理会提高越橘叶片的光合速率,而高浓度(150,180 和 210 mmol/L)NaCl 处理则会抑制越橘叶片的光合作用,且 210 mmol/L NaCl 是越橘的耐盐临界值。

[参考文献]

[1] 吴林. 中国蓝莓 35 年:科学研究与产业发展[J]. 吉林农业

大学学报,2016,38(1):1-11.
Wu L. 35 years of Chinese blueberry:scientific research and industrial development [J]. Journal of Jilin Agricultural University,2016,38(1):1-11.
[2] 李亚东,刘海广,张志东,等. 世界蓝莓生产和进出口贸易 [J]. 中国果树,2010(2):72-75.
Li Y D,Liu H G,Zhang Z D,et al. World blueberry production and import and export trade [J]. Chinese Fruit Tree,2010(2):72-75.
[3] 古丽江·许库尔汗,孙雅丽,阿依古丽·铁木儿,等. 不同越橘品种在新疆干旱条件下的光合生理响应 [J]. 南方农业学报,2015,46(12):2153-2158.
Gu L J·Xu K E H,Sun Y L,A Y G L·Tie M E,et al. Photosynthetic physiological responses of different blueberry varieties under drought conditions in Xinjiang [J]. Southern Agricultural Journal,2015,46(12):2153-2158.
[4] 申健,杨国亭,刘德江. 木醋及松针对越橘栽培土壤改良的影响 [J]. 土壤,2014,46(2):325-329.
Shen J,Yang G T,Liu D J. Effects of wood vinegar and pine on soil improvement of blueberry cultivation [J]. Soil,2014,46(2):325-329.
[5] 乌凤章,朱心慰,胡锐锋,等. NaCl 胁迫对 2 个蓝莓品种幼苗生长及离子吸收、运输和分配的影响 [J]. 林业科学,2017,53(10):40-49.
Wu F Z,Zhu X W,Hu R F,et al. Effects of NaCl stress on growth,ion absorption,transportation and distribution of seedlings of two blueberry cultivars [J]. Scientia Silvae Sinica,2017,53(10):40-49.
[6] 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.
Cao J K,Jiang W B,Zhao Y M. Physiological and biochemical experiment guidance for postharvest fruits and vegetables [M]. Beijing:China Light Industry Press,2007.
[7] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:22-108.
Hao Z B,Cang J,Xu Z. Plant physiology experiment [M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press,2004:22-108.
[8] 张治安,陈展宇. 植物生理学试验技术 [M]. 长春:吉林大学出版社,2008.
Zhang Z A,Chen Z Y. Experimental techniques of plant physiology [M]. Changchun:Jilin University Press,2008.
[9] 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,2000:184-263.
Li H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press,2000:184-263.
[10] 杨磊,贾佳,祖元刚. 蓝莓总花色苷匀浆的提取条件优化及抗氧化活性 [J]. 食品科学,2009,30(20):27-33.
Yang L,Jia J,Zu Y G. Optimization of extraction conditions and antioxidant activity of blueberry total anthocyanin homogenate [J]. Food Science,2009,30(20):27-33.
[11] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 西安:世界图书出版公

- 司,2000;101-103.
- Gao J F. Experimental techniques of plant physiology [M]. Xi'an: World Book Publishing Company,2000;101-103.
- [12] 高晓宇,邓 浪,付开强,等.‘巍山红雪梨’和‘美人酥’叶绿素、花色苷和类黄酮的动态变化分析 [J]. 果树学报,2016,33(S1):83-89.
- Gao X Y,Deng L,Fu K Q,et al. Dynamic analysis of chlorophyll,anthocyanins and flavonoids in ‘Lushan Red Sydney’ and ‘Beauty Crisp’ [J]. Journal of Fruit Science,2016,33(S1):83-89.
- [13] Simioni G,Roux X L,Gignoux J,et al. Leaf gas exchange characteristics and water- and nitrogen-use efficiencies of dominant grass and tree species in a West African savanna [J]. Plant Ecology,2004,173(2):233-246.
- [14] Bilger W,BjRkman O. Role of the xanthophyll cycle in photo-protection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis* [J]. Photosynthesis Research,1990,25(3):173-185.
- [15] 冯立田,赵可夫. 活体叶绿素荧光与耐盐作物筛选 [J]. 山东师大学报(自然科学版),1997,12(4):77-80.
- Feng L T,Zhao K F. Live chlorophyll fluorescence and screening of salt-tolerant crops [J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science Edition),1997,12(4):77-80.
- [16] 黄有总,张国平. 叶绿素荧光测定技术在麦类作物耐盐性鉴定中的应用 [J]. 麦类作物学报,2004,24(3):114-116.
- Huang Y Z,Zhang G P. Application of chlorophyll fluorescence assay in identification of salt tolerance in wheat crops [J]. Journal of Wheat Crops,2004,24(3):114-116.
- [17] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant,Cell & Environment,2002,25(2):239-250.
- [18] Feng Z T,Deng Y Q,Fan H,et al. Effects of NaCl stress on the growth and photosynthetic characteristics of *Ulmus pumila* L. seedlings in sand culture [J]. Photosynthetica,2014,52(2):313-320.
- [19] 秦 景,董雯怡,贺康宁,等. 盐胁迫对沙棘幼苗生长与光合生理特征的影响 [J]. 生态环境学报,2009,18(3):1031-1036.
- Qin J,Dong W Y,He K N,et al. Effects of salt stress on growth and photosynthetic characteristics of *Hippophae rhamnoides* L. seedlings [J]. Journal of Ecology and Environment,2009,18(3):1031-1036.
- [20] 张海燕,赵可夫. 盐分和水势胁迫对盐地碱蓬幼苗渗透调节效应的研究 [J]. 植物学报,1998,40(1):61-66.
- Zhang H Y,Zhao K F. Study on the effect of salt and water stress on the osmotic adjustment of *Suaeda salsa* L. seedlings [J]. Acta Botanica Sinica,1998,40(1):61-66.
- [21] Garratt L,Janagoundar B S,Lowe K C,et al. Salinity tolerance and antioxidant status in cotton cultures [J]. Free Radicals and Molecular Biology,2002,33:502-511.
- [22] 李全超,刘 洋,肖瑶宇,等. 盐胁迫对多花水仙部分生理特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(2):161-167.
- Li Q C,Liu Y,Xiao Y Y,et al. Effects of salt stress on some physiological characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of daffodil [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2019,48(2):161-167.
- [23] 张华新,宋 丹,刘正祥. 盐胁迫下 11 个树种生理特性及其耐盐性研究 [J]. 林业科学研究,2008(2):168-175.
- Zhang H X,Song D,Liu Z X. Study on physiological characteristics and salt tolerance of 11 tree species under salt stress [J]. Forestry Science Research,2008(2):168-175.
- [24] 王仁雷,华 春,刘友良. 盐胁迫对水稻光合特性的影响 [J]. 南京农业大学学报,2002,25(4):11-14.
- Wang R L,Hua C,Liu Y L. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics of rice [J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2002,25(4):11-14.
- [25] 黄有军,夏国华,郑炳松,等. 芙蓉菊盐胁迫下的生长表现和生理响应 [J]. 江西农业大学学报,2007,29(3):389-392.
- Huang Y J,Xia G H,Zheng B S,et al. Growth performance and physiological response of hibiscus under salt stress [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University,2007,29(3):389-392.
- [26] Mehta P,Jajoo A,Mathur S,et al. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves [J]. Plant Physiology and Biochemistry,2010,48(1):16-20.
- [27] Huang Z,Long X,Wang L,et al. Growth,photosynthesis and H^+ -ATPase activity in two *Jerusalem artichoke* varieties under NaCl-induced stress [J]. Process Biochemistry,2012,47(4):591-596.
- [28] 王 丹,万春阳,侯俊玲,等. 盐胁迫对甘草叶片光合色素含量和光合生理特性的影响 [J]. 热带作物学报,2014,35(5):957-961.
- Wang D,Wan C Y,Hou J L,et al. Effects of salt stress on photosynthetic pigment content and photosynthetic physiological characteristics of licorice leaves [J]. Tropical Crops,2014,35(5):957-961.
- [29] Hendrickson L,Furbank R T,Chow W S. A simple alternative approach to assessing the fate of absorbed light energy using chlorophyll fluorescence [J]. Photosynthesis Research,2004,82(1):73-81.
- [30] 杜美娥,王红霞,张 伟,等. 盐胁迫对金叶榆幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. 北方园艺,2019(5):90-94.
- Du M E,Wang H X,Zhang W,et al. Effects of salt stress on chlorophyll fluorescence parameters of *Ulmus pumila* L. seedlings [J]. Northern Horticulture,2019(5):90-94.