

NaCl 胁迫对胡杨幼苗叶主要渗透调节物质的影响

史军辉, 王新英, 刘茂秀, 陈启民

(新疆林业科学院 造林治沙研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:以胡杨幼苗抗盐能力为研究目标,采用盆栽沙培,以2年生胡杨实生苗为试验材料,设置5个NaCl浓度0.3%、0.6%、0.9%、1.2%和2.0%进行盐胁迫试验,在盐处理后的1、5、10 d和20 d采叶样测定胡杨幼苗叶片中脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白、超氧化物歧化酶(SOD)、 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 的含量。通过不同NaCl浓度胁迫下胡杨幼苗叶生理生化指标变化,探讨胡杨幼苗的耐盐生理机制,为胡杨造林与资源的合理利用提供理论依据。结果表明:1)盐胁迫下,胡杨幼苗叶片中Pro含量逐渐增加,在2%盐浓度胁迫下迅速积累,同时,胡杨幼苗叶Pro含量受盐浓度与胁迫时间影响非常显著。2)胡杨幼苗在中、低NaCl盐浓度处理下,SOD活性基本趋于降低的趋势,但2%NaCl盐浓度处理,SOD活性增加显著,胁迫时间对胡杨幼苗叶SOD活性的影响大于盐浓度。3)胡杨幼苗叶片中可溶性蛋白含量在不同胁迫时间下总体随盐浓度的增加呈先降低后增加的趋势。4)盐胁迫下,胡杨幼苗叶片中 K^+ 含量降低, Na^+ 和 Cl^- 含量增加。从浓度与胁迫时间效应分析,胡杨叶片中 K^+ 含量随着胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长呈降低趋势,总体 K^+ 含量的降低幅度不大。 Na^+ 含量在NaCl低浓度胁迫下,随时间效应不显著,在高浓度胁迫下,胁迫时间累积效应显著。盐胁迫下,胡杨叶片中的 Cl^- 含量随着NaCl浓度的增加和胁迫时间的延长而增加,0.3%、0.6%NaCl低盐浓度胁迫时 Cl^- 含量增加幅度较小,2%NaCl盐浓度处理下增加幅度较大。表明胡杨幼苗叶片生理生化过程对盐分具有一定的适应性,通过增加Pro、可溶性蛋白、SOD活性含量,保持较高的 K^+ 的吸收水平,增强了胡杨幼苗抵御盐胁迫的能力;在盐胁迫下,胁迫时间的延长会加重盐胁迫程度,具有累积效应。

关键词:胡杨;NaCl;胁迫时间;渗透调节物质

中图分类号:S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)06-0006-06

Effects of NaCl Stress on Main Osmotic Adjustment Substances in the Seedling Leaves of *Populus euphratica*

SHI Jun-hui, WANG Xin-ying, LIU Mao-xiu, CHEN Qi-min

(Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The two-year seedlings of *Populus euphratica* planted in sand pots were irrigated by water with different concentrations of NaCl: 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2% and 2.0%, respectively, and the no NaCl treatment as controls. The leaves were collected in day 1, 5, 10, and 20 after salt treating to measure the proline(Pro), soluble protein, superoxide dismutase(SOD), Na^+ , K^+ and Cl^- contents for learning the tolerating-salt mechanism of the seedlings. The results are as follows: 1)proline contents in the leaves increased gradually with the increase of salt concentration, and with 2% NaCl treatment, the proline contents increased rapidly. Furthermore, salt concentration was a more important factor than salt-stress time

to affect proline contents. 2) The SOD activity in the leaves decreased under 0.3%, 0.6%, 0.9% NaCl concentration treatments, but it increased significantly under 2% NaCl concentration treatment. Salt-stress time affected SOD activity more significant than that of salt concentration. 3) The soluble protein contents in the leaves decreased at first and then increased with the increase of NaCl concentration. Salt concentration affected soluble protein contents more significant than that of salt-stress time. 4) K^+ content in the leaves decreased gradually with NaCl salinity increasing or salt-stress time prolonging moderately. Otherwise, the Na^+ and Cl^- contents in the leaves increased gradually with NaCl salinity increasing or salt-stress time prolonging moderately. In high salt salinity treatments, the salt stress time was a more important factor affecting Na^+ and Cl^- absorption than that in low concentrations. Therefore, physiological process in the seedling had some ways to adapt to salt stress by increasing proline content, soluble protein content and SOD activity significantly and keeping a high level of K^+ to enhance the seedling ability to enduring salt. Seedlings would be suffered in high salt salinity soil more seriously with salt stress time prolonging.

Key words: *Populus euphratica*; NaCl stress; stress time; osmotic adjustment substance

新疆由于其特殊的气候和地理特征,原生与次生盐碱地面积大、类型多、积盐重^[1],盐渍化面积达 1.1×10^7 hm²,约占全国盐渍土面积的 1/3^[2]。因此,开发利用盐碱土地资源是新疆解决人口和环境压力的重要途径,而选择种植耐盐植物是开发大面积盐碱土壤有效的措施之一^[3]。胡杨(*Populus euphratica*)是杨属中最古老的一种,具有耐盐碱、耐高温干旱、耐水湿等突出特征,是新疆塔里木盆地绿洲盐碱风沙区最重要的造林树种之一,胡杨幼苗耐盐性的研究对胡杨林更新和胡杨资源保护具有重要意义。目前,对胡杨抗盐机制的研究主要集中在生长、盐离子的吸收、转运和分配、离子区隔化、渗透调节以及信号转导等方面^[4-8],土壤盐对胡杨幼苗造成渗透胁迫并降低叶面积增长,同时也影响到植物的新陈代谢过程,最终会影响到树木的生长^[9-11]。以胡杨幼苗为研究对象,采用盆栽沙培方法,测定盐胁迫下叶片中脯氨酸(Pro)、超氧化物歧化酶(SOD)、可溶性蛋白、 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 的含量,研究胡杨在盐胁迫下的生理生化指标变化特征;通过盐浓度、胁迫时间对胡杨幼苗生化指标变化特征影响,综合分析胡杨幼苗的耐盐机制,为胡杨造林与资源合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽沙培试验于 2008 年 4—8 月在新疆巴州尉犁县苗圃(41°19'50"N, 86°17'23"E)网室大棚内进行。选用 2 年生健壮实生胡杨苗。为减少不良环境因素对参试植物生长的影响,在试验区外围迎风面搭建防风墙。修建 2 m×2 m×2 m 的蓄水池以保证试验用水供应。2008 年 4 月 10 日将选择好的胡

杨定植至装满河沙的盆(30 cm×25 cm)内培养,栽植后每隔 7 d 以每盆 2.5 L 用量灌溉 1 次保持土壤湿度。5 月 30 日开始,在正常灌溉的基础上每两周灌溉 1 次 1/2 霍格兰完全营养液(每桶 2.5 L),保证植物对营养元素的需求。7 月 4 日,植物生长正常,开始试验。

1.2 试验处理

对胡杨进行为期 20 d 的盐处理。试验以含有 0.0% (CK)、低浓度(0.3%、0.6%)、中浓度(0.9%)、高浓度(1.2%、2.0%)NaCl 的 1/2 霍格兰完全营养液,每隔 7 d 以每盆 2.5 L 的用量浇灌植物,每处理 3 次重复,每次重复 3 盆。NaCl 胁迫后 1、5、10 d 和 20 d 采集植物中上部的幼嫩叶片,采样时每处理为 3 个重复(将每个重复下 3 株样品混为一个样品)。植物叶片采集后一部分放入液氮罐保存,一部分烘干用来测定离子含量。

1.3 测定指标与数据处理

测定指标为脯氨酸(Pro)、超氧化物歧化酶(SOD)、可溶性蛋白、 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 。脯氨酸采用酸性茚三酮比色法、超氧化物歧化酶采用氮蓝四唑(NBT)比色法、可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[12], K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度计法^[13], Cl^- 采用明胶—乙醇水溶液保护剂法^[14]。

对采集的数据用 SPSS18.0 统计软件进行统计分析 & 双因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 NaCl 浓度与胁迫时间对叶脯氨酸含量影响

随着 NaCl 浓度的增加,脯氨酸含量在各胁迫时间与下 & 对照相比均有不同程度地增加(图 1)。随着胁迫时间的延长,叶片中脯氨酸含量 2%NaCl 处

理比对照分别增加 180.51%、382.23%、378.13% 和 301.07%。各胁迫时间下,低浓度 NaCl 处理时脯氨酸含量增加幅度较小,而在中高浓度 NaCl 处理时急剧增加。采用交互作用双因素方差分析表明,NaCl 浓度 ($F_{5,48} = 1\,314.93, p < 0.01$)、胁迫时间 ($F_{3,48} = 918.01, p < 0.01$) 及 NaCl 浓度与胁迫时间的交互作用 ($F_{15,48} = 88.99, p < 0.01$) 对脯氨酸含量均有极显著影响。

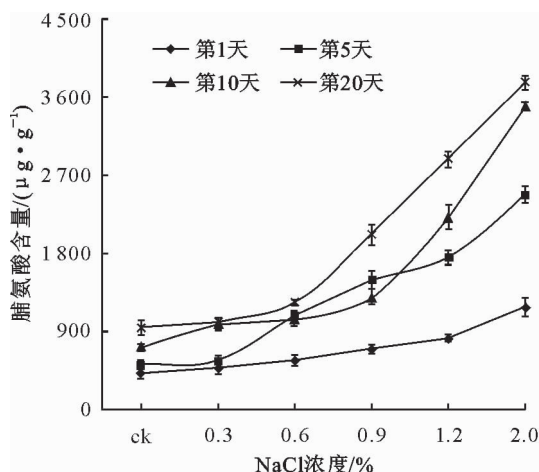


图 1 不同 NaCl 浓度及胁迫时间对胡杨叶片中脯氨酸的影响

Fig. 1 The effect of different NaCl concentrations and stress time on proline content in the leaves

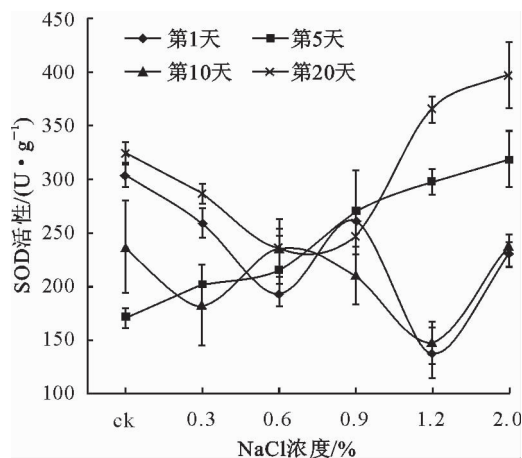


图 2 不同 NaCl 浓度及胁迫时间对胡杨叶片中 SOD 活性的影响

Fig. 2 The effect of different NaCl concentrations and stress time on SOD activity in the leaves

2.2 NaCl 浓度与胁迫时间对叶 SOD 活性影响

NaCl 胁迫后,胡杨叶片中 SOD 活性在中高浓度处理下随胁迫时间的延长变化趋势较为复杂(图 2)。随着盐分浓度的增加,各胁迫时间下 SOD 活性表现出不同变化规律。胁迫第 1 天和第 10 天时, SOD 活性随着盐浓度的增加的变化趋势相似,均呈

“W”型,且除第 10 天在 2.0% 处理下略高于 CK 处理外,其余处理 SOD 活性均低于 CK 处理。胁迫第 5 天时,SOD 活性随着盐分浓度的增加而增加,各浓度由低到高分别比 CK 处理增加了 17.32%、25.82%、57.84%、74.51% 和 86.62%。胁迫第 20 天时,SOD 活性随盐浓度的增加呈先下降后增强的趋势,在 2.0% 处理下达最高值 ($397.49 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$), 0.6% 处理下活性达到最低值,仅为最高值的 59.09%。交互作用双因素方差分析表明,NaCl 浓度 ($F_{5,48} = 17.03, p < 0.01$)、胁迫时间 ($F_{3,48} = 65.87, p < 0.01$) 及 NaCl 浓度与胁迫时间的交互作用 ($F_{15,48} = 18.69, p < 0.01$) 对胡杨叶片中 SOD 活性具有极显著影响。对浓度、胁迫时间和浓度与胁迫时间的均方比值进行分析,胁迫时间对 SOD 活性的影响大于 NaCl 浓度及 NaCl 浓度与胁迫时间的交互作用。

2.3 NaCl 浓度与胁迫时间对叶可溶性蛋白含量影响

胡杨叶片中可溶性蛋白含量在不同胁迫时间下总体上表现出随胁迫浓度的增加呈先降低后增加的趋势,均在 0.9% 处理下达到最低值(图 3)。低盐浓度(0.3%、0.6%)处理时,胡杨叶片中可溶性蛋白含量随胁迫时间的延长而降低,第 20 天比第 1 天分别降低了 46.44% 和 43.71%;而在高浓度(2.0%)处理下表现相反,可溶性蛋白含量随着胁迫时间的延长而增加,第 20 天比第 1 天增加了 32.01%。交互作用双因素方差分析,NaCl 浓度 ($F_{5,48} = 539.62, p < 0.01$)、胁迫时间 ($F_{3,48} = 99.68, p < 0.01$) 及浓度与胁迫时间的交互作用 ($F_{15,48} = 39.11, p < 0.01$) 对胡杨叶片中可溶性蛋白含量具有极显著影响。通过均方比值分析,NaCl 浓度对可溶性蛋白含量的影响大于胁迫时间及 NaCl 浓度与胁迫时间的交互作用。

2.4 NaCl 浓度与胁迫时间对叶无机离子含量的影响

2.4.1 K^+ 、 Na^+ 含量 盐胁迫下,胡杨叶片中 K^+ 含量随着 NaCl 胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长呈降低趋势。在 NaCl 中高浓度胁迫下, K^+ 含量在第 1 天至第 5 天时差异显著,各浓度第 5 天比第 1 天分别降低了 6.47%、9.29% 和 10.42%;其余各胁迫时间之间差异不显著。总体而言,在不同胁迫浓度下随着胁迫时间的延长, K^+ 含量的降低幅度不大,各浓度下胁迫第 20 天比第 1 天分别降低了 2.82%、7.99%、13.93%、15.62% 和 11.91%。交互作用双因素方差分析,NaCl 浓度 ($F_{5,48} = 78.93,$

$p<0.01$)和胁迫时间($F_{3,48}=28.71, p<0.01$)对胡杨叶片中 K^+ 含量具有极显著影响,并且 NaCl 浓度对 K^+ 含量的影响大于胁迫时间;浓度与胁迫时间的交互作用($F_{15,48}=1.37, p>0.10$)对胡杨叶片中 K^+ 含量影响不显著(图 4)。

胡杨叶片中 Na^+ 含量随着 NaCl 胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长呈增加趋势(0.6%处理除外)。 Na^+ 含量在 NaCl 低浓度胁迫下,各胁迫时间之间差异不显著,NaCl 中浓度胁迫下,第 1、5 天与第 10、20 天之间差异显著,NaCl 高浓度胁迫下,各胁迫时间之间除第 1 天和第 5 天差异不显著外,其余胁迫时间之间均差异显著,并且在不同胁迫浓度下随着胁迫时间的延长, Na^+ 含量的增加幅度也在增大(0.6%处理除外),各浓度下胁迫第 20 天比第 1 天分别增加了 6.44%、21.50%、32.53% 和 35.88%。交互作用双因素方差分析,NaCl 浓度($F_{5,48}=494.91, p<0.01$)、胁迫时间($F_{3,48}=50.22, p<0.01$)及浓度与胁迫时间的交互作用($F_{15,48}=10.90, p<0.01$)对胡杨叶片中 Na^+ 含量具有极显

著影响。比较均方比值,NaCl 浓度对 Na^+ 含量的影响大于胁迫时间及浓度与胁迫时间的交互作用。

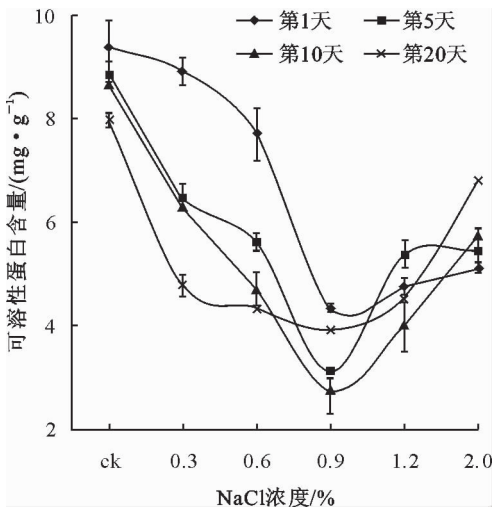


图 3 不同 NaCl 浓度及胁迫时间对胡杨叶片中可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3 The effect of different NaCl concentrations and stress time on soluble protein content in the leaves

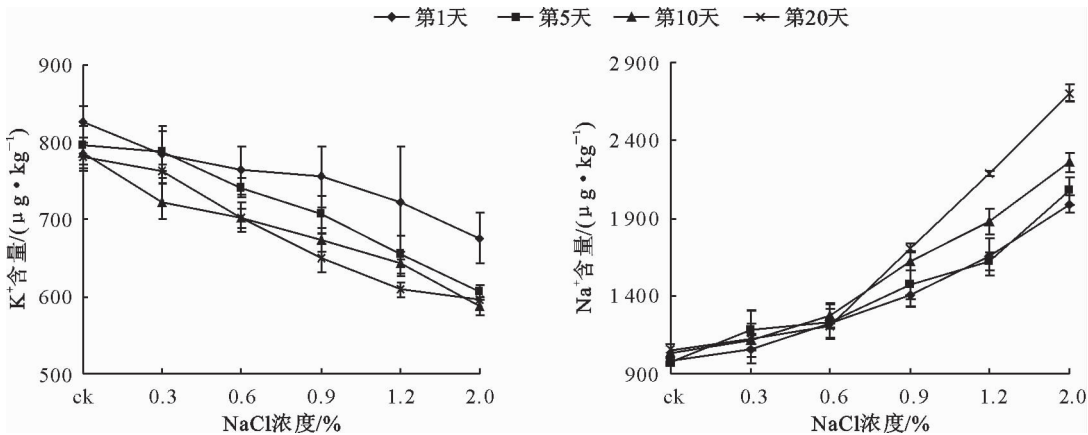


图 4 不同 NaCl 浓度及胁迫时间对胡杨叶片中 K^+ 、 Na^+ 含量的影响

Fig. 4 The effect of different NaCl concentrations and stress time on K^+ , Na^+ contents in the leaves

2.4.2 Cl^- 含量 盐胁迫下,胡杨叶片中的 Cl^- 含量随着 NaCl 浓度的增加和胁迫时间的延长而增加。各浓度相比,低 NaCl 浓度胁迫时 Cl^- 含量增加幅度较小,高 NaCl 浓度增加幅度较大,各浓度(由低到高)分别比对照增加了 13.61%、21.96%、71.40%、135.25%和 213.51%。相同浓度下,随着胁迫时间的延长, Cl^- 含量增加幅度均较小。交互作用双因素方差分析,NaCl 浓度($F_{5,48}=1\ 122.31, p<0.01$)、胁迫时间($F_{3,48}=91.36, p<0.01$)及浓度与胁迫时间的交互作用($F_{15,48}=12.86, p<0.01$)对胡杨叶片中 Cl^- 含量具有极显著影响,并且 NaCl 浓度对 Cl^- 含量的影响大于胁迫时间及浓度与胁迫时间的交互作用(图 5)。

3 结论与讨论

3.1 盐浓度、胁迫时间及浓度与胁迫时间对脯氨酸影响

脯氨酸是植物体内重要的渗透调节剂,盐胁迫下,植物体内蛋白质合成受抑制,而分解被促进,使氨基酸含量上升,其中最突出的就是脯氨酸含量的上升^[15]。盐对植物生长的影响随浓度的升高和胁迫时间的延长而增加^[16],盐浓度与胁迫时间对木栓榆脯氨酸含量影响显著^[17]。NaCl 处理下胡杨幼苗叶片中脯氨酸含量逐渐增加,并在高盐胁迫下迅速积累,这与干旱荒漠耐盐植物四翅滨藜在高盐浓度下,叶片内脯氨酸含量增加并保持一个较高的水平

特征一致^[18]。胡杨幼苗叶脯氨酸含量受盐浓度与胁迫时间影响非常显著,同时,盐浓度对脯氨酸影响效应超过胁迫时间,而孙海菁^[19]等研究胁迫时间对旱柳脯氨酸影响超过盐浓度,这是否与植物生态生理特征有关,值得进一步探讨。

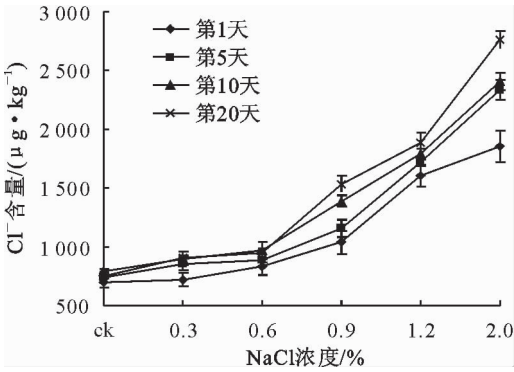


图 5 不同 NaCl 浓度及胁迫时间对胡杨叶片中 Cl⁻ 含量的影响

Fig. 5 The effect of different NaCl concentrations and stress time on Cl⁻ content in the leaves

3.2 盐浓度、胁迫时间及浓度与胁迫时间对 SOD 影响

植物在受到盐胁迫时,细胞中产生大量的活性氧会对细胞产生氧化伤害,盐生植物保护酶系统中的 SOD 对抵御和清除活性氧,阻抑膜质氧化,维持膜系统的稳定性起着重要作用^[2]。不同植物种类对 SOD 活性受盐胁迫时间影响效应不一致,旱柳 SOD 活性随胁迫时间的延长表现出逐渐增加的趋势^[19],而胡杨幼苗盐胁迫初期,SOD 活性增加,随盐胁迫时间的延长,SOD 活性呈下降趋势,而对照与盐处理差异不大^[4,20]。胡杨幼苗 SOD 活性与盐浓度关系密切,胡杨幼苗在中低盐浓度处理下,SOD 活性基本趋于降低的趋势,但高浓度处理,SOD 活性增加显著,胁迫时间对胡杨幼苗叶 SOD 活性的影响远大于盐浓度,这与朱会娟^[4]、王瑞刚^[20]等研究结果有所差异。

3.3 盐浓度、胁迫时间及浓度与胁迫时间对可溶性蛋白影响

可溶性蛋白是盐分胁迫条件下植物细胞内重要的渗透调节剂之一,可溶性蛋白在细胞内的积累对于降低细胞内溶质的渗透势,平衡原生质体内外的渗透压等具有重要作用^[16]。不同植物叶可溶性蛋白含量对土壤盐分浓度响应有一定差异,盐生植物灰绿藜在 1~20 d 盐胁迫期间,可溶性蛋白含量随盐胁迫浓度的升高而增加,而胁迫 30 d,可溶性蛋白含量随盐胁迫浓度的升高而降低^[21];禾本科植物大米草随着盐胁迫时间的延长,叶可溶性蛋白含量呈

先降后升再降,逐渐趋于稳定^[22]。胡杨幼苗叶片中可溶性蛋白含量在不同胁迫时间下总体上表现出随盐浓度的增加呈先降低后增加的趋势,同时,发现 NaCl 浓度对可溶性蛋白含量影响远大于胁迫时间及 NaCl 浓度与胁迫时间的交互作用,这与秦丽凤^[22]等研究大米草的结果相同。

3.4 盐浓度、胁迫时间及浓度与胁迫时间对无机离子的影响

植物的耐盐性在很大程度上取决于植株体内离子的平衡。盐生植物主要以无机离子作为渗透调节剂,液泡中封存的大量 Na⁺ 和 Cl⁻ 对渗透调节贡献最大,显著高于其他离子贡献的总和^[23]。NaCl 胁迫下,胡杨幼苗叶片中 K⁺ 含量降低,Na⁺ 和 Cl⁻ 含量增加,这与外界盐分含量较高时,胡杨幼苗被动吸收盐离子并在体内积累有关。Na⁺ 和 K⁺ 的离子半径和水合能相似,Na⁺ 竞争 K⁺ 的吸收点位及活性点位,导致胡杨幼苗叶片中 K⁺ 吸收减少。从浓度与胁迫时间效应分析,胡杨叶片中 K⁺ 含量随着胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长呈降低趋势,总体 K⁺ 含量的降低幅度不大,在中高浓度胁迫下表现出一定的差异。胡杨叶片中 Na⁺ 含量随着胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长呈增加趋势,Na⁺ 含量在低浓度胁迫下,胁迫时间效应不显著,在高浓度胁迫下,胁迫时间累积效应显著。盐胁迫下,胡杨叶片中的 Cl⁻ 含量随着 NaCl 浓度的增加和胁迫时间的延长而增加,低浓度胁迫时 Cl⁻ 含量增加幅度较小,高浓度增加幅度较大。可以看出,胡杨幼苗叶具有较强的离子区域化作用,在盐胁迫下,Na⁺ 和 Cl⁻ 积累在细胞液泡中作为渗压剂,参与渗透调节,适应盐胁迫环境。

参考文献:

[1] 新疆荒地资源综合考察队. 新疆重点地区荒地资源合理利用 [M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985:42,47.

[2] 孙黎,刘士辉,师向东,等. 10 种藜科盐生植物的抗盐生理生化特征[J]. 干旱区研究,2006,23(2):309-313.

SUN L, LIU S H, SHI X D, *et al.* Salt-tolerant physiological and biochemical properties of ten species of Chenopodiaceae halophytes growing in deserts, Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2006,23(2):309-313. (in Chinese)

[3] 罗延彬,任薇,谢春虹. 新疆盐碱地生物改良的必要性与可行性 [J]. 干旱区研究,2001,18(1):46-48.

LUO Y B,REN W,XIE C H. Necessity and feasibility of biotic improving the saline and alkaline land in Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2001,18(1):46-48. (in Chinese)

[4] 朱会娟,王瑞刚,陈少良,等. NaCl 胁迫下胡杨和群众杨抗氧化能力及耐盐性[J]. 生态学报,2007,27(10):4113-4121.

ZHU H J, WANG R G, CHEN S L, *et al.* Genotypic differ-

ences between *Populus euphratica* and *P. popularis* in antio-
xidative ability and salt tolerance under NaCl stress[J]. *Acta*
Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4113-4121. (in Chinese)

[5] 戴松香, 陈少良, EBERHARD F., 等. 盐胁迫下胡杨和毛白杨
叶细胞中的离子区隔化[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2):
1-5.
DAI S X, CHEN S L, EBERHARD F., *et al.* Ion compartmen-
tation in leaf cells of *Populus euphratica* and *P. tomentosa* un-
der salt stress[J]. *Journal of Beijing Forestry University*,
2006, 28(2): 1-5. (in Chinese)

[6] 陈少良, 李金克, 伊伟伦, 等. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中
钾、钙、镁的变化[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 84-
88.
CHEN S L, LI J K, YIN W L, *et al.* Tissue and cellular K⁺,
Ca²⁺ and Mg²⁺ of poplar under saline salt dtress conditions
[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 84-
88. (in Chinese)

[7] 马挺军, 李卓, 张旭家, 等. 胡杨液泡膜 H⁺-ATPase 的部分纯
化及耐盐性研究[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(7): 1246-1249.
MA T J, LI Z, ZHANG X J, *et al.* Studies on purification of
tonoplast H⁺-ATPase from *Populus euphratica* and its salt
tolerance[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2004, 24(7):
1246-1249. (in Chinese)

[8] 杨升, 张华新, 张 丽. 植物耐盐生理生化指标及耐盐植物筛选
综述[J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(3): 59-65.
YANG S, ZHANG H X, ZHANG L. Physiological and bio-
chemical indices of salt tolerance and scanning of salt-tolerance
plants: a review[J]. *Journal of Northwest Forestry Universi-*
ty, 2010, 25(3): 59-65. (in Chinese)

[9] 李菊艳, 赵成义, 闫映宇, 等. 盐分对胡杨幼苗生长及光合特性
的影响[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(1): 80-86.
LI J Y, ZHAO C Y, YAN Y Y, *et al.* Effects of salt on the
growth and photosynthetic characteristics of *Populus euphrat-*
ica seedlings[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(1): 80-
86. (in Chinese)

[10] 张华新, 刘正祥, 刘秋芳. 盐胁迫下树种幼苗生长及其耐盐性
[J]. *生态学报*, 29(5): 2263-2271.
HANG H X, LIU Z X, LIU Q F. Seedling growth and salt
tolerance of tree species under NaCl stress[J]. *Acta Ecologica*
Sinica, 29(5): 2263-2271. (in Chinese)

[11] 李向应, 韩亚琦, 唐宇丹. 榲桲 2 变种对盐胁迫的响应[J]. *西*
北林学院学报, 2012, 27(6): 33-37.
LI X Y, HAN Y Q, TANG Y D. Physiology response of two
varieties of *Quercus aliena* under salt stress[J]. *Journal of*
Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 33-37. (in Chi-
nese)

[12] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社,
2008: 129-130, 161-162, 163-165, 173-174.

[13] 汪贵斌, 曹福亮, 游庆方, 等. 盐胁迫对 4 树种叶片中 K⁺ 和
Na⁺ 的影响及其耐盐能力的评价[J]. *植物资源与环境学报*,
2001, 10(1): 30-34.
WANG G B, CAO F L, YOU Q F, *et al.* Effects of salt
stress on concentrations of Na⁺, K⁺ and Na⁺/K⁺ in the
leaves of four tree species and evaluation of salt tolerance[J].
Journal of Plant Resources and Environment, 2001, 10(1):
30-34. (in Chinese)

[14] 周强, 李萍, 曹金花, 等. 测定植物体内氯离子含量的滴定法
和分光光度法比较[J]. *植物生理学通讯*, 2007, 43(6): 1163-
1166.
ZHOU Q LI P, CAO J H, *et al.* Comparison on titration and
spectrophotometric methods for determination of chloride
content in plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2007, 43(6):
1163-1166. (in Chinese)

[15] 廖岩, 彭友贵, 陈桂珠. 植物耐盐性机理研究进展[J]. *生态学*
报, 2007, 27(5): 2077-2088.
LIAO Y, PENG Y G, CHEN G Z. Research advances in
plant salt-tolerance mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*,
2007, 27(5): 2077-2088. (in Chinese)

[16] 裘丽珍, 黄有军, 黄坚钦, 等. 不同耐盐性植物在盐胁迫下的生
长与生理特性比较研究[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学*
版, 2006, 32(4): 420-427.
QIU L Z, HUANG Y J, HUANG J Q, *et al.* Comparative
study on vegetal and physiological characteristics of different
salt tolerant plants under salt stress[J]. *Journal of Zhejiang*
University: Agric. & Life Sci., 2006, 32(4): 420-427. (in
Chinese)

[17] 夏尚光, 张金池, 梁淑英. NaCl 胁迫对 3 种榆树幼苗生理特性
的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2008, 31(2): 52-56.
XIA S G, ZHANG J C, LIANG S Y. Effect of NaCl stress on
physiological characteristics of three elm species seedlings
[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2008, 31
(2): 52-56. (in Chinese)

[18] 雷钧杰, 聂新辉, 尤春源, 等. 四翅滨藜耐盐生理指标的测定及
分析[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(10): 2112-2116.

[19] 孙海菁, 王树凤, 陈益泰. 盐胁迫对 6 个树种的生长及生理指
标的影响[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(3): 315-324.
SUN H J, WANG S F, CHEN Y T. Effects of salt stress on
growth and physiological index of 6 tree species[J]. *Forest*
Research, 2009, 22(3): 315-324. (in Chinese)

[20] 王瑞刚, 陈少良, 刘力源, 等. 盐胁迫下 3 种杨树的抗氧化能力
与耐盐性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 46-52.
WANG R G, CHEN S L, LIU L Y, *et al.* Genotypic differ-
ences in antioxidative ability and salt tolerance of three pop-
lars under salt stress[J]. *Journal of Beijing Forestry Universi-*
ty, 2005, 27(3): 46-52. (in Chinese)

[21] 杨洁, 胡云云, 李应丽, 等. NaCl 胁迫对灰绿藜中有机渗透调
节物质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(6): 2358-2362.

[22] 秦丽风, 石贵玉, 李佳枚, 等. 盐胁迫对大米草幼苗某些生理
指标的影响[J]. *广西植物*, 2010, 30(2): 265-268.
QIN L F, SHI G Y, LI J M, *et al.* Effects of salt stress on
some physiological characteristics of *Spartina anglica* seed-
ling[J]. *Guihaia*, 2010, 30(2): 265-268. (in Chinese)

[23] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999:
20.