

NaCl 对骆驼刺幼苗生长、生理和离子分布特性的影响

曾杰^{①②③}, 曾凡江^{①③}, S. K. Arndt^④, 郭海峰^{①②③}, 闫海龙^{①②③}, 邢文娟^{①②③}, 刘波^{①②③}

① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外观测研究站, 策勒 848300;

④ School of Forest and Ecosystem Science, the University of Melbourne, Water Street Creswick, Vic. 3363 Australia

E-mail: fjzeng369@sohu.com

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 30670386)、中国科学院野外台站基金项目、新疆自治区科技攻关和重点科技项目(编号: 200633130)和新疆自治区科技重大专项(编号: 200733144-2)资助

摘要 结合塔克拉玛干沙漠南缘策勒绿洲外围地下水盐分含量, 于 2006 年 8~10 月在策勒绿洲前沿实验研究了一年生骆驼刺幼苗在不同 NaCl 处理条件下的生理响应和适应性, 探讨了 NaCl 对骆驼刺幼苗生长状况的影响. 研究表明: 随着 NaCl 处理浓度的增加, 骆驼刺幼苗的水势和净光合速率降低, 气孔导度和胞间 CO_2 浓度也表现出相似的变化规律, 而气孔限制值则随处理浓度的增加而增大; 骆驼刺幼苗的生物量随 NaCl 处理浓度的增加而显著减少. NaCl 处理 50 天, Na^+ 在骆驼刺幼苗体内各器官的含量基本为: 小枝>茎>叶>根, Cl^- 在骆驼刺幼苗体内的分布为: 地上部分>根. NaCl 处理 50 天, 水势降低造成的气孔限制仍然是影响骆驼刺幼苗光合作用的主要因素; 随着 NaCl 处理时间的增长, 骆驼刺幼苗的水势和净光合速率总体呈下降趋势; 处理 50 天, 150 和 250 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理水平下骆驼刺幼苗的清晨水势略高于处理 30 天, 这可能是骆驼刺幼苗对盐环境有一定适应的结果. 3 个 NaCl 处理水平下, 骆驼刺幼苗从处理 30 天到 50 天保持较稳定的生长, 其根冠比随处理时间的延长而增大, 但增加的幅度不尽一致, 150 和 250 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理水平下的根冠比相比 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理水平有较大幅度的增加. 结果显示: 骆驼刺幼苗有较强的耐盐性和适盐能力, 能够在中等浓度的盐分环境中生存.

关键词

塔克拉玛干沙漠
盐分
骆驼刺
生长
生理指标
离子分布

盐分是限制植物生长和生产力的主要环境因素^[1], 对于植物的盐分胁迫机理已有很多学者做了大量研究^[2~4]. 植物受盐胁迫后的直接伤害是细胞膜损伤, 原初作用点可能是质膜膜脂物理状态的改变^[5]. 质膜受到伤害后发生一系列的胁变, 其组分、透性、运输、离子流率等都会受到影响而发生变化, 膜透性增大和膜脂过氧化, 从而损害膜的正常生理功能, 进而影响细胞的代谢作用^[6]. 植物细胞代谢失调即引起 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶活性降低, 蛋白质的合成受到破坏, 蛋白质的数量减少, 植物耗能增加, 植物体内积累有毒的代谢产物, 从而影响植物的生长^[7]. Munns^[8]提出了盐影响植物生长的两个阶段假说: 第

一阶段, 盐分胁迫初期由于外界盐分引起土壤水分中可利用水下降, 产生渗透胁迫导致植物生长受抑制, 这个阶段本质上和水分胁迫是一样的; 第二阶段, 植物体内积累大量盐离子, 产生毒害效应以及营养元素缺乏从而影响其生长. 盐离子与各种营养元素相互竞争会打破植物体内的离子平衡, Na^+ 的积累阻碍了植物对 K^+ 和 Ca^{2+} 的吸收和运输, 植物体内过多的 Cl^- 也会抑制植物对 NO_3^- 及 H_2PO_4^- 的吸收^[9]. 目前, 有关盐胁迫机理以及植物的抗盐机制的许多研究还处于探索阶段, 有许多问题仍然存在争议^[10]. 大多数研究认为, 水势降低往往造成气孔与非气孔效应从而影响光合作用^[11], 但 Bethke 等人^[12]的研究发现,

盐胁迫下 *Capsium annuum* 的叶片膨压维持或高于未受盐胁迫的植株, 而且水势的下降与光合速率的下降并不同步, 从而认为叶片水势的降低似乎并不造成气孔关闭. 许多学者研究发现^[13,14], 一些植物通过细胞内累积一些在渗透上有活性, 对原生质无伤害的小分子有机化合物如脯氨酸、甜菜碱、糖醇等降低细胞渗透势, 以便于植物在盐分环境中对水分的吸收. 然而, Liu 等人^[15]的研究发现, 脯氨酸的积累可能是植物受到逆境伤害的征兆, 只是胁迫的结果, 不会提高植物耐盐能力. 一直以来, 有关植物的盐胁迫机理的研究, 由于不同研究者所使用的材料、实验方法的不同, 许多问题尚未达成共识, 因此, 盐分对植物生理特性的影响机理的研究有待加强.

骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* SHAP.)属荒漠、半荒漠区的多年生豆科木质化草本植物. 在塔克拉玛干沙漠南缘绿洲-沙漠过度带, 以骆驼刺为主要建群种的荒漠群落在防风固沙、维护绿洲生态安全中具有重要作用^[16]. 基于骆驼刺的生物生态学特性和功能, 国内外学者对其开展了大量的研究工作^[17-19], 认为骆驼刺有较强的生态适应性, 其生长状况与地下水位的高低具有一定的联系, 其种群性质与草甸植物种类组成特征作为群落演替状态指示物, 对水源及土地利用有一定的应用价值. 长期以来, 骆驼刺的生理生态学特性也一直受到人们关注, 但是大多数研究主要集中在骆驼刺的水分生理方面^[20,21], 有关骆驼刺的盐分生理特性, 尤其是骆驼刺在不同盐分条件下的生长和生理响应的研究方面鲜见报道. 探讨骆驼刺在不同盐分环境中的生理响应与适应规律, 对塔克拉玛干南缘荒漠地区生态保育和人工加速植被恢复, 具有重要的现实意义. 策勒绿洲是塔克拉玛干南缘绿洲沙漠化的典型区域, 土壤盐渍化严重, 地下水矿化度高^[22]. 长期以来, 不合理的利用和牲畜破坏, 使绿洲外围的骆驼刺植被遭到严重破坏, 加快骆驼刺植被的修复, 确保绿洲生态安全刻不容缓^[16]. 由于人工辅助植被恢复大多选用幼苗培育, 本研究以策勒绿洲前沿人工培育的一年生骆驼刺幼苗为研究对象, 并结合策勒绿洲外围地下水及土壤盐分状况, 探讨骆驼刺幼苗在不同盐分环境中的生长和生理变化规律, 为塔克拉玛干南缘植被恢复与重建提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠南缘的策勒绿洲前沿(37°00'N, 80°43'E), 年平均气温 11.9℃, 极端最高气温 41.9℃, 极端最低气温-23.9℃. 年均降水量仅 35.1 mm, 且主要集中在 5 月和 7 月. 年蒸发量高达 2595.3 mm. 年平均风速 119 m·s⁻¹, 风沙灾害是该区域主要的生态灾害. 策勒绿洲有 9 条季节性河流, 洪水季节与枯水季节流量悬殊. 绿洲外围地表以下 1~8 m 间的地下水盐分含量基本为中等浓度(Na⁺含量 40~50 mmol·L⁻¹), Na⁺和 Cl⁻是主要的离子^[22]. 策勒绿洲内植被资源贫乏, 种类成分单一且数量稀少, 植被分布面积小, 植被覆盖度为 5%~20%. 在绿洲-荒漠过渡带, 沿河流、渠系、泉点分布有灌木或半灌木, 骆驼刺、怪柳等是该区域主要建群种.

1.2 研究方法

(i) 实验材料与处理. 本实验在中国科学院策勒荒漠草地生态系统国家野外研究站人工控制实验区进行, 选择人工培育的一年生骆驼刺幼苗(取自策勒荒漠草地生态系统国家野外研究站苗圃)为实验材料. 2006 年 4 月将骆驼刺幼苗移栽至塑料桶中(桶高 55 cm, 上口口径 50 cm, 下口径 45 cm, 下部均匀打孔, 桶埋深 50 cm), 每桶 1 株, 盆栽 30 桶, 栽培用土选自实验区附近荒漠区. 每 10 天每桶灌溉 5 kg 水, 以保幼苗成活和生长良好, 灌溉用水为策勒绿洲外围地下水. 8 月 10 日开始盐分处理, 考虑到保苗灌溉时使用的是矿化度相对较高的、Na⁺浓度在 40~50 mmol·L⁻¹ 之间的地下水, 这种具有一定盐分含量的地下水在当地的植被恢复中普遍使用, 因此将 50 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 处理水平作为对照讨论. 处理溶液: 策勒绿洲外围地下水+NaCl(分析纯); 结合研究区域地下水盐分含量的实际情况, 设 3 个处理为: 50, 150 和 250 mmol·L⁻¹; 电导(EC)值分别为: (1.37 ± 0.06), (6.33 ± 0.15)和(9.52 ± 0.36) ms·cm⁻¹; 每种处理 10 个重复, 每 10 天每桶灌溉 5 kg 处理溶液.

(ii) 生物量的测定. 分别在 NaCl 处理后第 30 和 50 天收集植物样, 每种处理 3 个重复. 植株地上部分采摘后, 用自来水冲洗出全部根系. 地上部分和根系用去离子水冲净, 用吸水纸擦干表面水分, 称其鲜重, 置于 80℃烘箱中烘 48 h 至恒重后称得干重. 将根、茎、叶、小枝组织分开, 分别粉碎后保存以备.

根冠比 = 地下部分干重/地上部分干重.

(iii) 植物体内 Na^+ 和 Cl^- 的测定. 选取 NaCl 处理后第 50 天收集的粉碎植物样进行盐离子分析. Na^+ 分析采用等离子体光谱仪(ICP-AES)的测定方法, Cl^- 分析采用离子色谱法(DX 80 Dionex, Vienna, Austria)进行分析¹⁾.

(iv) 水势的测定. 采用压力室 PMS(Plant Moisture Stress, Corvallis, Oregon, USA)对骆驼刺幼苗的清晨水势和水势日变化进行测定. 在样株同一高度(约 25 cm)选择样枝, 每种处理 4 个重复, 植物的水势日变化从 08:00~20:00 每 2 h 测定一次, 以日出前的水势测定值为植物的清晨水势. 于第一次处理后 10, 30 和 50 天进行测定.

(v) 光合参数日变化的测定. 采用便携式光合测定仪(LI-6400 Portable Photosynthesis System, Lincoln, USA)进行光合作用的测定. 在骆驼刺样株上部向阳面选择叶片较多的同化枝进行测定, 每种处理 3 个重复, 每个样枝读取 5 个测量数据. 光合日变化测定从 08:00~20:00, 每 2 h 测定一次. 测定后截取所测样品, 在扫描仪 (HP ScanJet 3770) 上扫描, 用 Delta-Scan (Cambridge, UK) 软件计算叶面积, 骆驼刺的茎、刺(同化枝)的表面积按叶面积处理. 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)经光合测定系统读出后由所测样枝实际叶面积回算出, 气孔限制值(L_s)根据 Berry 等人^[23]的方法计算: $L_s = 1 - C_i/C_a$ (C_a 为空气中 CO_2 浓度). 光合日变化的测定与水势日变化的测定同步, 光合测定在自然光照下进行, 测定时光合有效辐射为 $0\sim1400 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, CO_2 浓

度为 $360\sim375 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 气温为 $15\sim42^\circ\text{C}$. 由于 3 次测定结果趋势相似, 本文分析采用处理 30 天的测定结果.

(vi) 数据分析处理. 不同处理间骆驼刺幼苗生长和生理指标的差异性采用单因素 ANOVA 分析 LSD 检验, 用 SPSS13.0 (SPSS, USA)完成; 用 excel 2003 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 NaCl 对骆驼刺幼苗生长的影响

随着 NaCl 处理浓度的增加, 骆驼刺幼苗的生物量出现明显减少趋势(图 1), 不同处理间骆驼刺幼苗地上部分和根的生物量都达到显著差异($P < 0.05$). NaCl 处理 30~50 天, 3 个 NaCl 处理水平下骆驼刺幼苗的生物量保持一定的增长, 但其地上部分与根系的增长幅度随处理浓度的不同而不同. 由图 2 可以看出, 处理 30 天, 3 个处理水平下骆驼刺幼苗的根冠比无显著差异($P > 0.05$); 在处理 50 天, 其根冠比相比处理 30 天有一定增加, 在 150 与 $250 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理水平下其根冠比增加的幅度大于 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理水平, 不同处理间骆驼刺幼苗根冠比差异显著($P < 0.05$).

2.2 NaCl 对骆驼刺幼苗水势的影响

从图 3 可以看出, 随着 NaCl 浓度的增加, 骆驼刺幼苗的清晨水势明显下降, 不同处理浓度间骆驼刺幼苗的清晨水势呈显著差异($P < 0.05$). 随着处理时间的增加, 骆驼刺幼苗的清晨水势总体表现出一

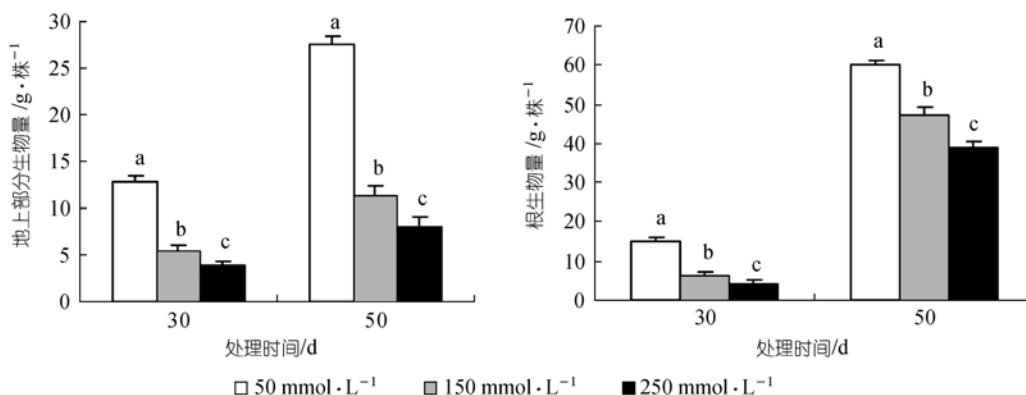


图 1 不同浓度的 NaCl 处理对骆驼刺幼苗生物量的影响

同一处理时间柱上端不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), 小短线表示标准误(下同)

1) Na^+ 和 Cl^- 分析结果由 University of Melbourne 提供

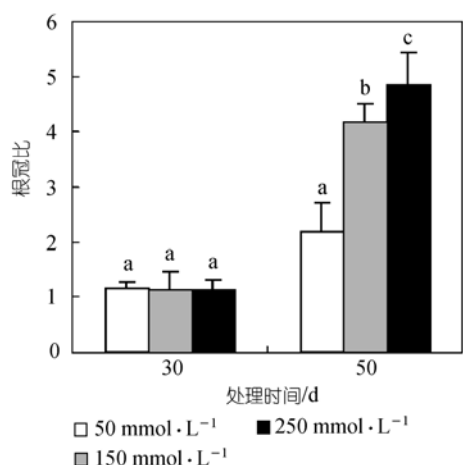


图2 不同浓度的 NaCl 处理对骆驼刺幼苗根冠比的影响

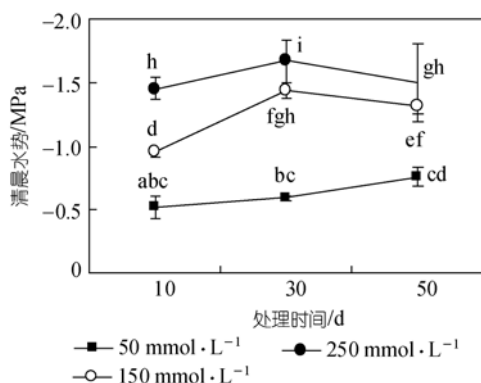


图3 NaCl 处理对骆驼刺幼苗清晨水势的影响

定的下降趋势,不同处理时间之间骆驼刺幼苗的清晨水势基本没有显著差异。在 150 和 250 mmol·L⁻¹ 两个 NaCl 处理水平下,骆驼刺幼苗的清晨水势在处理 50 天略高于处理 30 天。随着 NaCl 处理浓度的增加,骆驼刺幼苗全天的水势明显降低,3 次测定的水势下降趋势基本一致。随着盐处理时间的增加,骆驼刺幼苗全天的水势基本也呈下降趋势,处理间差异显著($P < 0.05$)(图 4)。各处理水平下的骆驼刺幼苗的水势日变化并不完全呈现出单峰特征,水势在日出前最高,基本在 12:00~16:00 达到最低值,但期间大部分出现一定的回升,其后开始缓慢恢复。

2.3 NaCl 对骆驼刺幼苗光合特性的影响

图 5 所示为主要环境因子在第一次处理后第 30 天的日变化情况,光照强度和空气温度均表现为日出后逐渐增加,在 14:00 时达到最大值,之后又逐渐降低;空气相对湿度在 10:00 前较高,之后逐渐降低,在 14:00 达到最低值后逐渐增加。

由图 6 可以看出,NaCl 处理 30 天,3 个 NaCl 处理水平下的骆驼刺幼苗光合日变化表现出一致的变化特征,其光合日变化曲线呈现单峰型,峰值出现在 14:00,不同处理间骆驼刺幼苗的各光合指标基本在其峰值前后表现出显著差异($P < 0.05$)。在 08:00 时骆驼刺幼苗还未进行光合作用,之后其净光合速率逐渐增加,但不同处理间的增加幅度各异,50 mmol·L⁻¹ 处理水平下骆驼刺幼苗的净光合速率较另外两种处理水平有更大的增幅。随着盐分浓度的增加,骆驼刺幼苗全天的净光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度呈下降趋势,而其气孔限制值随盐分浓度的增加而增加。在 NaCl 处理 10 和 50 天,骆驼刺幼苗的光合日变化趋势与处理 30 天有相似的结果。随着 NaCl 胁迫时间的增加,较高盐浓度处理下骆驼刺幼苗的净光合速率基本呈下降趋势(如:250 mmol·L⁻¹ 处理水平下,骆驼刺的净光合速率日均值在处理 10, 30, 50 天分别为 (5.56 ± 0.47) , (5.47 ± 0.19) 和 (3.92 ± 0.32) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1} (\text{CO}_2)$)。

2.4 Na⁺, Cl⁻ 在骆驼刺幼苗体内的分布

在不同的 NaCl 处理水平下,Na⁺和 Cl⁻在骆驼刺幼苗各器官的分布各异(图 7)。Na⁺在骆驼刺幼苗各器官的含量分布基本为:小枝>茎>叶>根;Cl⁻在骆驼刺幼苗体内的含量明显表现出:地上部分>根,但 Cl⁻在天上部分各器官中的分布无明显规律。在 3 个 NaCl 处理水平条件下,在骆驼刺幼苗根中盐离子的含量随着处理浓度的增加呈上升趋势,而地上部分各器官中盐离子的含量在 150 mmol·L⁻¹ 处理条件下最高,在 50 mmol·L⁻¹ 处理条件下含量最低。

3 讨论与结论

3.1 NaCl 对骆驼刺幼苗生长的影响

植物的生长状况是植物对盐分胁迫响应的综合体现^[24]。本研究发现,NaCl 处理 30 天,骆驼刺幼苗地上部分和根系的生物量都随处理浓度的增加而明显减少。结果表明,相比 50 mmol·L⁻¹ 处理水平,150 和 250 mmol·L⁻¹ 处理水平下骆驼刺幼苗的生长明显受到抑制。在处理 30~50 天,3 个 NaCl 处理水平下的骆驼刺幼苗的生物量都保持相对稳定的增长,其根冠比在处理 50 天较处理 30 天有明显的增加,但不同处理下其增加幅度不尽一致。根冠比的增加有利于提高植物对水分和养分的吸收能力,对植物适应外界不良环境有重要作用^[25,26]。骆驼刺幼苗在不同浓度

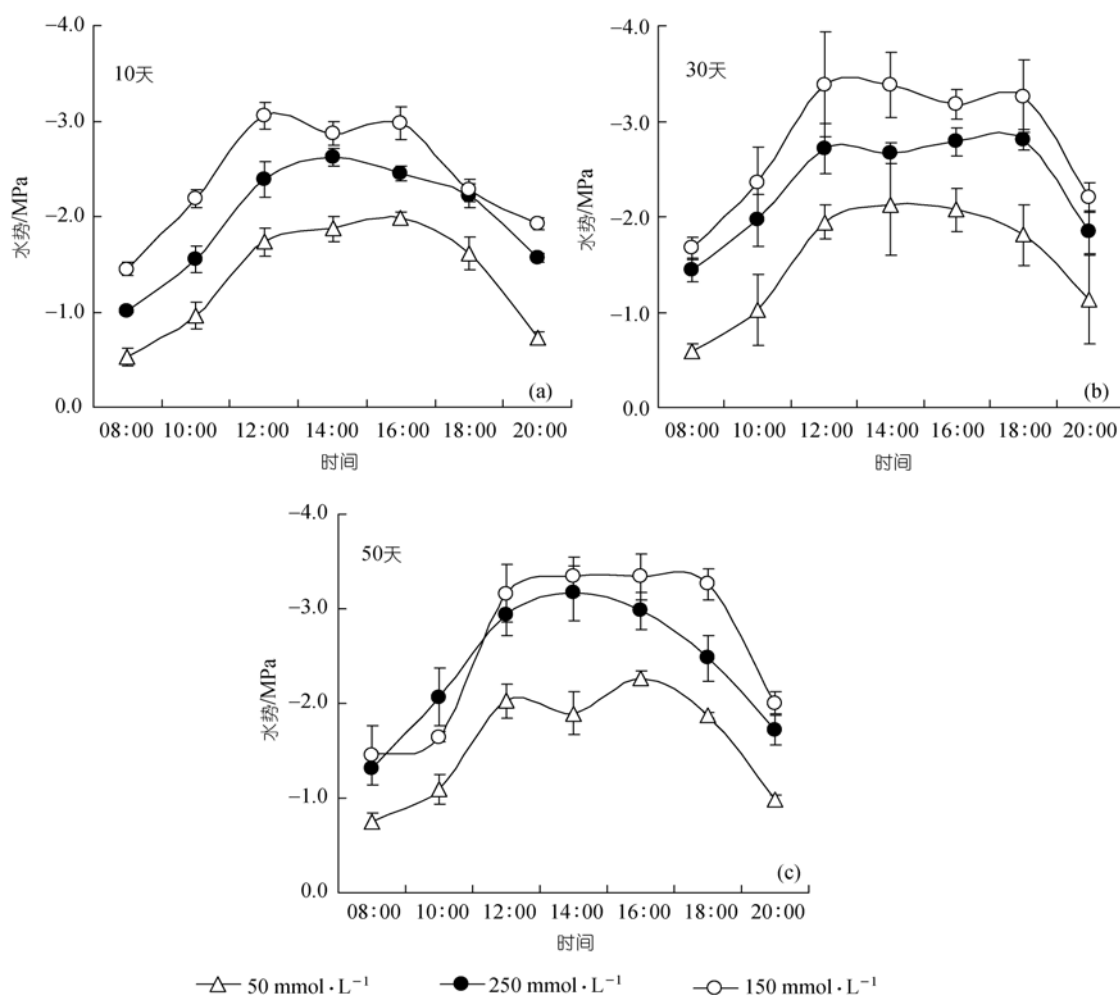


图4 NaCl处理对骆驼刺幼苗水势日变化的影响

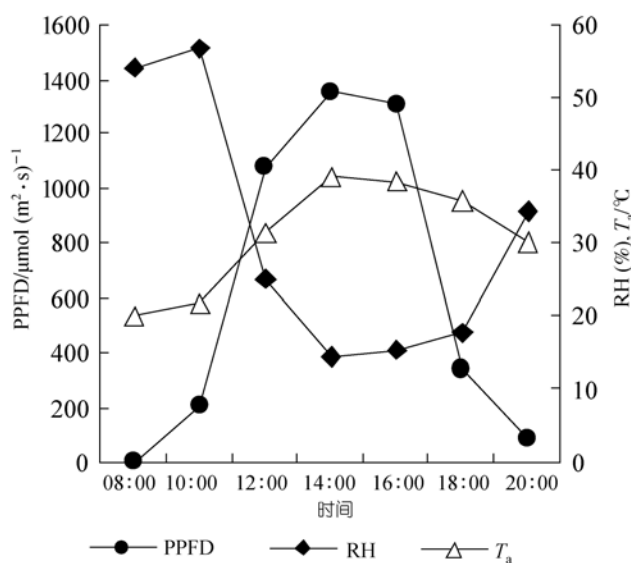


图5 NaCl处理30天主要环境因子的日变化

的NaCl处理下,其根冠比的变化表明骆驼刺具有较好的适盐能力。

3.2 NaCl对骆驼刺幼苗水分状况的影响

水势是衡量植物水分状况的重要指标^[27]。Romero-Aranda 等人^[28]研究发现,在盐分环境中,植物受到渗透胁迫会导致水势下降。本研究结果也表明,随着NaCl浓度的增加,骆驼刺幼苗的水势降低;随着处理时间的增加,骆驼刺幼苗的水势也呈整体降低的趋势。植物的清晨水势能很好地反映出植物的水分供应状况,可用于判断植物水分的亏缺程度^[27]。本研究表明,在150和250 mmol·L⁻¹处理水平下,骆驼刺幼苗的清晨水势在处理50天分别为-1.31和-1.46 MPa;在处理30天分别为-1.44和-1.67 MPa。骆驼刺幼苗的水分供应受NaCl影响,其清晨水势随处理浓度的增加而降低,而处理50天的清晨水势要

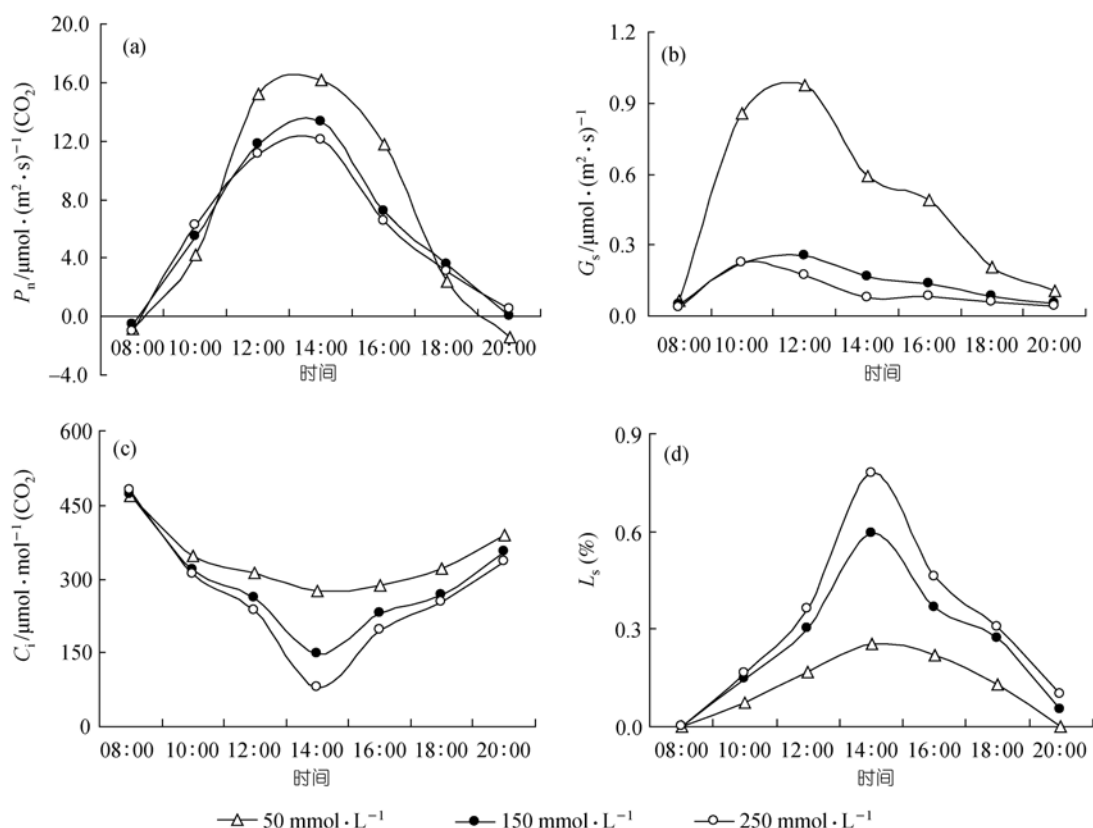


图 6 NaCl 对骆驼刺幼苗净光合速率(a)、气孔导度(b)、胞间 CO_2 浓度(c)及气孔限制值(d)的影响

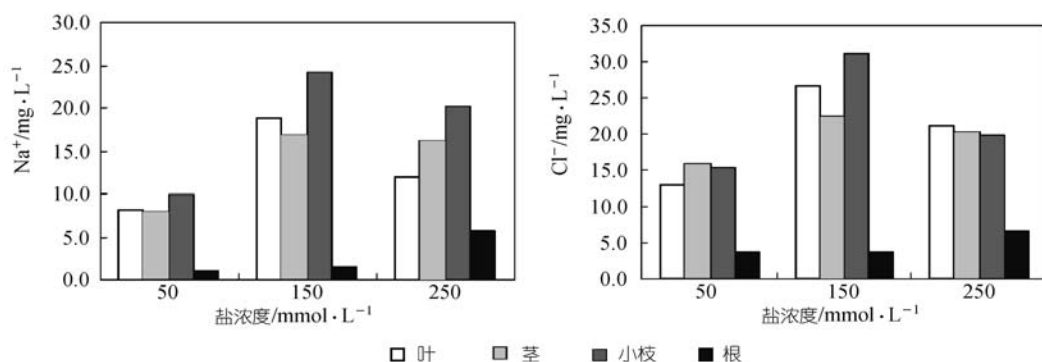


图 7 不同 NaCl 处理水平下盐离子在骆驼刺幼苗各器官的含量分布

略高于处理 30 天, 这可能是在较高浓度的盐处理下骆驼刺幼苗出现盐激反应再逐步适应的原因。

3.3 NaCl 对骆驼刺幼苗光合特性的影响

随着 NaCl 处理浓度的增加, 骆驼刺幼苗的净光合速率呈下降趋势, 胞间 CO_2 浓度表现出相同的变化特征, 而气孔限制值随着盐浓度的增加而增加, 3 次测定表现出一致的结果。研究结果还显示, 骆驼刺幼苗的光合日变化与同步测定的水势日变化随处理

梯度的变化趋势基本一致。根据 Matthews 等人^[29]的研究发现, 在盐分胁迫的最初阶段, 渗透胁迫起主要作用, 渗透胁迫造成植物光合速率下降主要有气孔限制和非气孔限制两个因素。气孔限制表现为气孔导度降低导致胞间 CO_2 浓度下降, 从而影响叶绿体内 CO_2 的供应^[30]。本研究结果说明, NaCl 处理 10、30 和 50 天, 渗透胁迫导致的气孔效应限制是影响骆驼刺幼苗光合作用的主要因素。在较高浓度的 NaCl 处

理水平下,随着胁迫时间的增加,骆驼刺幼苗的净光合速率呈降低趋势(如:在 $250\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理水平下,骆驼刺幼苗的净光合速率日均值在处理 10、30 和 50 天分别为 (5.56 ± 0.47) , (5.47 ± 0.19) 和 $(3.92 \pm 0.32)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (CO_2)),这与许多学者对其他植物种的研究结果基本一致^[31~33]。

3.4 盐离子在骆驼刺幼苗体内的分布

长期处于盐环境中的植物对于离子的吸收与分配有不同的机制^[34,35]。Arndt 等人^[36]认为,骆驼刺有很强的离子选择吸收能力,大多数盐离子不被其根系吸收,所以其叶片中盐离子含量较少。本研究发现,NaCl 处理 50 天,随着处理浓度的增加,盐离子在骆

驼刺幼苗根系中的含量逐渐增加,但 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理水平下骆驼刺幼苗地上部分各组织中 Na^+ 和 Cl^- 的含量比 $250\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理水平下的高,这可能是盐分胁迫下骆驼刺幼苗自我调节的结果。金启宏^[37]研究发现,自然条件下多年生骆驼刺体内 Na^+ 的分布为:根>茎>叶。在 NaCl 处理 50 天后,一年生骆驼刺幼苗各器官中 Na^+ 的含量基本为:小枝>茎>叶>根。Na 元素从土壤中进入根部的过程生物控制较少,而从根向茎、叶的转运则有较多的生物控制参与^[37],多年生骆驼刺相比一年生幼苗其根系对于 Na^+ 有较强的容留能力。因此,成年骆驼刺比骆驼刺幼苗表现出更强的耐盐能力。

致谢 感谢张希明研究员对实验设计的指导和建议。

参考文献

- Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2005, 60: 324—349
- Munns R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ*, 1993, 16: 15—24
- Mehari A, Ericsson T, Weih M. Effects of NaCl on seedling growth, biomass production and water status of *Acacia nilotica* and *A. Tortilis*. *J Arid Environ*, 2005, 62: 343—349
- 郭书奎, 赵可夫. NaCl 胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理. *植物生理学报*, 2001, 27(6): 461—466
- 王宝山, 赵可夫. NaCl 胁迫对玉米根质膜 H^+ 分泌和氧化还原系统的影响. *植物学报*, 1997, 39(4): 341—346
- Hasegawa P M, Bressan P A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular response to high salinity. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol*, 2000, 51: 463—499
- 杨月红, 孙庆艳, 沈浩. 植物的盐害和抗盐性. *生物学教学*, 2002, 27(11): 1—2
- Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ*, 2002, 25: 239—250
- Brown C E, Pezeshki S R, Delaune R D. The effects of salinity and soil drying on nutrient uptake and growth of *Spartina alterniflora* in a simulated tidal system. *Environ Exper Bot*, 2005: 1—9
- 陶晶, 李铁, 孙长彬, 等. 植物盐胁迫研究进展. *吉林林业科技*, 2003, 32(5): 1—6
- Matthews M A, Boyer J S. Acclimation of photosynthesis to low leaf water potentials. *Plant Physiol*, 1984, 74: 161—166
- Bethke P C, Drew M C. Stomatal and nonstomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity. *Plant Physiol*, 1992, (99): 219—226
- Heidari-Sharifabada H, Mirzaie-Nodoushan H. Salinity-induced growth and some metabolic changes in three *Salsola* species. *J Arid Environ*, 2006(67): 715—720
- Shin W, Katsumi K, Yu J, et al. Effects of saline and osmotic stress on proline and sugar accumulation in *Populus euphratica* in vitro. *Plant Cell Tiss Org Cult*, 2000, 63: 199—206
- Liu J P, Zhu J K. Proline accumulation and Salt-Stress-Induced gene expression in a salt-hypersensitive mutant of *Arabidopsis*. *Plant Physiol*, 1997, 114: 591—596
- 曾凡江, 张希明, 李小明. 骆驼刺植被及其资源保护与开发的意义. *干旱区地理*, 2002, 25: 286—288
- 金启宏. 疏叶骆驼刺种群性质与植物群落演替. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 255—260
- 张立运, 买买提. 夏季灌溉对骆驼刺形态学特征、群落生态结构和天然更新的影响. *干旱区研究*, 1995, 12(4): 34—40
- Zakeri A, Banihashemi Z. The role of weeds in cultivated and virgin soils on activity and perpetuation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* in Fars Province. *Iran J Plant Pathol*, 1996, 32(1): 28—39

- 20 Li X Y, Zhang X M, Zeng F J, et al. Water relations on alhagi sparsifolia in the southern fringe of Taklamakan Desert. *Acta Bot Sin*, 2002, 44(10): 1219—1224
- 21 朱永华, 仵彦卿. 干旱荒漠区植物骆驼刺的耗水规律. *水土保持通报*, 2003, 23(4): 43—65
- 22 张希明, Runge M. 塔克拉玛干沙漠边缘植被可持续管理的生态学基础. 北京: 科学出版社, 2006. 53—84, 129—130
- 23 Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis. In: Govind J, ed. *Photosynthesis(Vol III)*. New York: Academic Press, 1982. 263—345
- 24 Wilson C, Liu X, Scott M, et al. Growth response of major USA cowpea cultivars. II. Effect of salinity on leaf gas exchange. *Clyde Plant Sci*, 2006, 170: 1095—1101
- 25 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. *西北植物学报*, 2006, 26(3): 0455—0461
- 26 郁万文, 曹帮华, 吴丽云. 盐胁迫下刺槐无性系生长和矿质营养平衡研究. *西北植物学报*, 2005, 25(10): 2097—2102
- 27 曾凡江, 张希明, 李向义, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘柽柳和胡杨水势季节变化研究. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1389—1393
- 28 Romero-Aranda R, Soria T, Cuartero J. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Sci*, 2001, 160: 265—272
- 29 Matthews M A, Boyer J S. Acclimation of photosynthesis to low leaf water potentials. *Plant Physiol*, 1984, 74: 161—166
- 30 惠红霞, 许兴, 李守明. 盐胁迫抑制枸杞光合作用的可能机理. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 5—9
- 31 郑国琦, 许兴, 徐兆楨, 等. 盐胁迫对枸杞光合作用的气孔与非气孔限制. *西北植物学报*, 2002, 22(6): 1355—1359
- 32 Jiany Q Z, Roche D, Monaco T A, et al. Gas exchange, chlorophyll fluorescence parameters and carbon isotope discrimination of 14 barley genetic lines in response to salinity. *Field Crops Res*, 2006, 96: 269—278
- 33 高光林, 姜卫兵, 俞开锦, 等. 盐胁迫对果树光合生理的影响. *果树学报*, 2003, 20(6): 493—497
- 34 田野, 张焕朝, 方升佐, 等. 盐胁迫下杨树根际系统盐分离子分布特性. *植物资源与环境学报*, 2003, 2(3): 11—15
- 35 Greenway H, Munns R, Wolfe J, et al. Interaction between growth, Cl^- and Na^+ uptake, and water relations of plants in saline environments. *Plant Cell Environ*, 1983, 6: 567—574
- 36 Arndt S K, Arampatsis C, Foetzki A, et al. Contrasting patterns of leaf solute accumulation and salt adaptation in four phreatophytic desert plants in a hyperarid desert with saline groundwater. *J Arid Environ*, 2004, 59: 259—270
- 37 金启宏. K, Na, Ca, Mg 4 种元素在疏叶骆驼刺体内含量分布特点的研究. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 80—84