

天然条件下塔克拉玛干沙拐枣对潜水条件变化的生理响应

梁少民^{①②③}, 闫海龙^{①②③}, 张希明^{①③*}, 谢婷婷^{①②}, 朱军涛^{①②}, 张仲伍^{①②}

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科学观测研究站, 策勒 848300

* 联系人: E-mail: zhxm@ms.xjb.ac.cn

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

中国科学院知识创新工程重要方向性项目(编号: KZCX3-SW-342-02)、科技部“西部开发科技行动”重大项目(编号: 2004BA901A21-1)、中国科学院重要方向性项目(编号: KZCX-YW-431-1)、新疆维吾尔自治区科技重大专项(批准号: 200733144-2)和新疆维吾尔自治区科技攻关和重点科技项目(批准号: 200633130)资助

摘要 通过对塔克拉玛干沙漠腹地不同潜水埋深、矿化度条件下特有灌木塔克拉玛干沙拐枣(*Calligonum.taklimakanensis* B.R.Pan et G.M.Shen)水分生理特性的研究. 结果表明: (1) 潜水埋深的变动对塔克拉玛干沙拐枣的水势(清晨、午后)和蒸腾速率的影响比较明显, 二者均随潜水埋深的增大而降低, 气孔导度的变化主要与外界环境温湿条件相关. 渗透势(ψ_{sat} , ψ_{tip}), 相对含水量和相对渗透水含量(RWC_{tip} , $ROWC_{\text{tip}}$)也有随潜水埋深增大而减小的趋势; (2) 潜水矿化度对植物水势的影响比较显著, 对相对含水量影响不显著. 高矿化度对植物生产力降低的影响比较显著; (3) 塔克拉玛干沙拐枣通过高蒸腾降低同化枝的温度, 保持较高的体内水分含量来适应沙漠腹地干旱、高热的气候条件. 另外通过自身调节甚至牺牲生产力来适应沙漠腹地的潜水状况的变化.

关键词

塔克拉玛干沙拐枣
水势
蒸腾速率
渗透势
相对含水量
潜水矿化度
潜水埋深

由于干旱地区降水稀少, 植被对地下水有很强的依赖性^[1]. 同时地下潜水埋深和水质又是决定干旱地区植被分布、生长、种群演替以及荒漠绿洲存亡的主导因子^[2,3]. 因此, 研究干旱地区植被对地下潜水状况的响应, 对认识地下潜水变化与植物群落特征的关系、揭示荒漠生态系统演变的水分调控机制、理解维持荒漠生态系统稳定性的基本条件等均具有重要意义. 国内外在潜水条件对植物水分生理方面所进行的研究, 多集中在潜水埋深对植物生理生态的影响^[4,5]、矿化度与植物水分利用及生长的关系^[6-8]、植物盐胁迫的适应策略和限度^[9,10]等方面, 而且大多是在实验室的模拟实验或对田间人工栽培植物的研究, 以天然植物为对象的研究较少.

塔克拉玛干沙漠气候极端干旱, 这对天然植物的生长极为不利, 水分条件成为影响植物分布和生

长最主要的限制性因子^[11]. 对该区域植物水分关系的研究有利于揭示极端干旱环境下植物适应干旱环境的途径和生存能力. 目前在塔克拉玛干沙漠地区所进行的天然植物水分关系的研究主要集中在塔克拉玛干沙漠南缘荒漠-绿洲过渡带^[11-15], 对沙漠腹地天然植物水分生理的研究尚未见报道. 塔克拉玛干沙拐枣(*Calligonum.taklimakanensis* B.R.Pan et G.M.Shen)是塔克拉玛干沙漠的特有种, 主要分布于塔克拉玛干沙漠内部的丘间洼地、平地及沙丘中下部^[16]. 目前这种植物的天然分布数量极少, 是极为珍稀的植物物种资源, 对其水分生理适应性开展研究具有重要的理论意义和应用价值.

本实验的目的: (1) 掌握沙漠腹地天然生条件下塔克拉玛干沙拐枣的水分状况及其变化特点; (2) 探讨天然条件下塔克拉玛干沙拐枣对地下潜水埋深及

矿化度变化的生理响应, 阐明其在水分生理生态方面对生境的适应特点; (3) 为高矿化度水灌溉的沙漠公路防护林树种适应能力提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

实验样地位于塔克拉玛干沙漠腹地的沙漠公路沿线, 所选择的 3 块样地根据矿化度由小到大分别标为 A(40°02'N, 84°18'E), B(38°34'N, 83°17'E) 和 C(40°17'N, 84°19'E) 样地, 均为沙漠生境。其中 A 和 C 两样地为早期的古塔里木河冲积平原区, 流沙连绵高大(5~15 m)复合横向沙垅和新月形沙丘与风蚀沟、风蚀地交错分布; B 样地位于一丘间低地, 四周多为高大流动性复合沙丘, 土壤为流动风沙土, 自然植被种类贫乏, 群落结构简单, 绝大多数地区无植被分布。根据塔中(39°06'N, 83°40'E)气象资料, 这里年平均气温 12.4℃, 平均最高气温 45.6℃, 平均最低气温 -20.2℃, 平均相对湿度为 29.4%, 年平均降水量为 11.05 mm, 而年平均蒸发量为 3638.6 mm, 4~8 月为风季, 大风频繁, 风热同期, 多浮尘扬沙天气。

塔克拉玛干沙漠地下水主要来自周围山地冰雪融化所形成地表径流的下渗, 丰富的地表水下渗补给贮存于第四纪沉积物中, 使得整个沙漠变成潜水的汇集区, 潜水面的强烈蒸发消耗, 导致了浅层地下水矿化度明显高于深层地下水, 卤化物含量增大^[17]。

1.2 实验设计

2005 年 10 月, 在塔克拉玛干沙漠公路沿线, 进行实地考察, 选择土质成分相似, 远离公路且潜水埋深和矿化度有一定梯度的 3 个样地(表 1 和表 2), 通过钻井测定潜水埋深, 并取水样分析水质成分, 样地大小以样地水井位置为中心, 以 30 m 为半径的圆。分别在 2006 年 5, 7, 9 月中下旬各进行一次植物水分生理指标的测定, 同时进行样地潜水埋深测量及矿化度分析, 借以分析沙漠腹地天然生塔克拉玛干沙漠拐枣水分生理指标对地下潜水环境季节变化的响应。

1.3 实验方法

(i) 水势测定。在晴朗的天气, 选择样地正常生长的样株, 用压力室(PMS. Instrument Co. Model 1000, US)在日出前 05:00~06:00 测定带叶小枝或同化枝的清晨水势(ψ_p); 13:00~14:00 测定午后水势(ψ_A), 每

次做 6 个重复。

(ii) 蒸腾速率、气孔导度测定。利用 LI-6400 (Li-cor, USA)便携式光合作用测定仪进行蒸腾速率、气孔导度测定, 实验取同一样地内生长良好、向阳的同化枝进行活体测定。同一天测定均选取 5 个固定样品重复测定。实验结束后将所观测的植物样品剪下, 用扫描仪扫描后, 使用软件 Delta-TScan (Cambridge, CB50EJ, UK)计算叶面积, 按计算后的面积重新计算得出新的气体交换参数。蒸腾速率与水势的测定在同一天进行。

(iii) *P-V* 曲线。*P-V* 曲线的制作采用 Hammel 固定时间逐步升压收集水分的方法, 称重用 1/10000 天平(Sartorius BP211D), 水势采用压力室(PMS. Instrument Co. Model 1000, US)测定, 以渗透水失水量为横坐标, 以平衡压倒数为纵坐标的正位图, 每次测量点数不少于 12 个, 最后取出枝条在 85℃下恒温烘干 48 h, 称干重。实验结束后立即称取测试小枝重量, 以样品测试前后和水分收集器中水分的差值来校正各点的失水量值以减小测定值的误差, 每次做 3 个重复。质壁分离点的确定采用日本九州大学矢幡久先生介绍的方法判定^[18]。根据 *P-V* 曲线结果计算下列水分参数: 饱和渗透势 ψ_{sat} ; 初始质壁分离时的渗透势 ψ_{tip} ; ψ_{sat} 和 ψ_{tip} 的差值; 初始质壁分离的相对含水量 (RWC_{tip}) 和初始质壁分离时相对渗透水含量 ($ROWC_{tip}$)。

(iv) 样地潜水埋深及水质, 在选择样地及每次实验期间利用样地水井进行潜水埋深测量, 并取水样带回实验室进行水质分析。

(v) 数据处理。用 Excel 和 Spss13.0 对数据进行整理和差异显著性分析。

2 实验结果及分析

2.1 塔克拉玛干沙漠拐枣生长状况与生境潜水质、埋深的季节变化

塔克拉玛干沙漠腹地降水稀少, 蒸发强烈, 缺乏地表径流, 植物的生命活动只能依靠地下水维持。表 1、表 2 和图 1 显示了 3 个样地的水质、潜水埋深和塔克拉玛干沙漠拐枣的生长状况。

2.2 植物水势的季节变化

清晨水势(ψ_p)反映植物水分的恢复状况, 午后水势(ψ_A)可以反映植物当天所受水分胁迫的程度^[19]。

表1 各样地地下水离子含量(单位: $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

样地	pH	矿化度	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$
A	7.89	4.96	0.201	1.843	0.983	0.151	0.18	1.228
B	7.76	7.92	0.1375	2.645	2.130	0.375	0.283	1.822
C	7.34	15.63	0.1825	5.475	3.98	0.722	0.512	3.728

表2 各样地塔克拉玛干沙拐枣的生长状况

样地	矿化度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	潜水埋深/m	平均高度/m	冠幅/ m^2	植物生长状况
A	4.96±0.0983	1.09~1.31(0.22)	1.472±0.0985	0.430±0.1250	植株高大粗壮、冠幅大, 同化枝繁茂且颜色鲜嫩, 生长旺盛
B	7.92±0.2567	2.02~2.25(0.23)	1.273±0.1211	0.275±0.065	植株中等, 同化枝较疏, 颜色鲜绿黄色, 生长一般
C	15.63±0.2214	1.16~1.56(0.40)	1.276±0.148	0.156±0.057	植株高度差异大, 冠幅小, 同化枝短细而稀疏且颜色灰暗, 生长不旺盛, 有个别死亡的植株

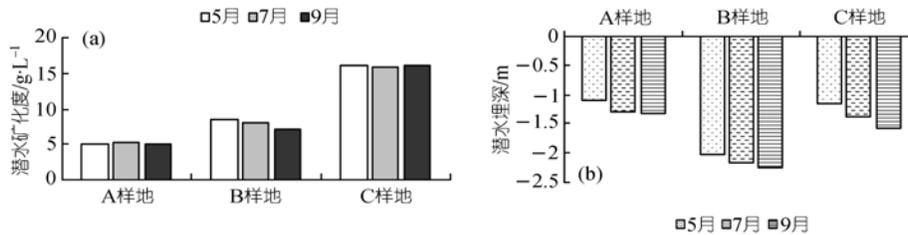


图1 各样地潜水矿化度(a)及潜水埋深(b)的季节变化

由图2知, 各月清晨水势和午后水势的变化趋势相似, 均随矿化度增大而降低. 各个样地水势的季节变化为: A样地在5, 7和9月份之间的清晨水势、午后水势变化趋势一致, 均是7月份最低, 9月份水势开始回升并高于7月; 而B, C两样地的清晨水势、午后水势变化趋势一致, 在5, 7和9月份逐渐降低.

2.3 植物蒸腾速率、气孔导度的日变化

从图3可知, 塔克拉玛干沙拐枣的蒸腾速率的日变化均为单峰型曲线. 各样地植物蒸腾速率均为7月份大于9月份, 且都为单峰型曲线. 7和9月份各样地间蒸腾速率的大小均为: C样地>A样地>B样地. 气孔导度的日变化也为单峰型曲线, C样地的气孔导度9月>7月, A样地的气孔导度7和9月大小交替变动, 无明显规律. 9月份3个样地气孔导度的大小为:C样地最大, A样地与B样地比较接近.

2.4 植物P-V参数的季节变化

(i) 饱和和渗透势(ψ_{sat})、初始质壁分离时的渗透势(ψ_{tlp})及 $|\psi_{\text{sat}} - \psi_{\text{tlp}}|$. 渗透势 ψ_{sat} 和 ψ_{tlp} 与植物的抗旱性和植物水分供应状况密切相关^[20], ψ_{sat} 值越低, 表明植物从土壤中吸收水分的潜势越大, 耐旱性就越

强^[21]. 由图4可知, 渗透势 ψ_{sat} 和 ψ_{tlp} 的变化规律基本一致. 从每个样地的 ψ_{sat} 和 ψ_{tlp} 季节变化来看, 各样地的渗透势变化与其水势变化完全一致. 分析相同月份不同样地间 ψ_{sat} 和 ψ_{tlp} 差异性为: 5, 7月份各样地间的 ψ_{sat} 和 ψ_{tlp} 无显著性差异($P < 0.05$), 但均是B样地的值最低, 这主要是B样地潜水位最低. 9月份的 ψ_{sat} 表现为: A样地与B, C两个样地间差异性显著($p < 0.05$), 9月份的 ψ_{tlp} 只有C样地与A样地之间差异性显著($P < 0.05$), 且都是C样地的值最低. 这是由于9月环境气温的降低导致蒸腾减弱, 对渗透势影响最主要的因素变为潜水矿化度.

$|\psi_{\text{sat}} - \psi_{\text{tlp}}|$ 值代表了植物从水分饱和到水分亏缺过程中渗透势降低的幅度, 其值与植物在失水状态下对气孔阈值调节能力的大小密切相关, 其值高有利于植物在干旱下维持气孔的开放^[22]. 从图4来看, 5月份各样地 $|\psi_{\text{sat}} - \psi_{\text{tlp}}|$ 值均较小, 在0.1与0.2之间, 9月份有一定程度增大, 但都在0.5以下. 塔克拉玛干沙拐枣的 $|\psi_{\text{sat}} - \psi_{\text{tlp}}|$ 值较小表明在水分缺失情况下植物膨压会很快消失, 无法维持气孔的开放, 这却有利于植物停止或减少蒸腾作用保持体内的水分. 从植物蒸腾速率和气孔导度的变化可知植物没有表现出显著的水分缺失.

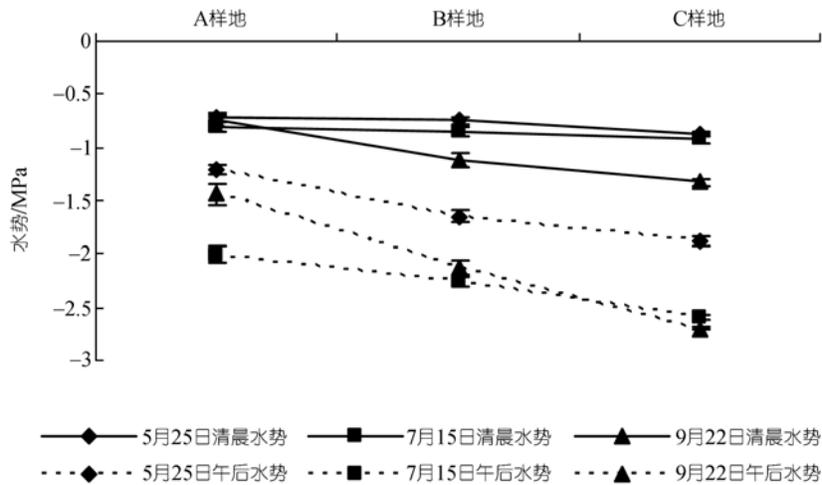


图 2 各样地植物清晨水势(ψ_p)和午后水势(ψ_A)的季节变化

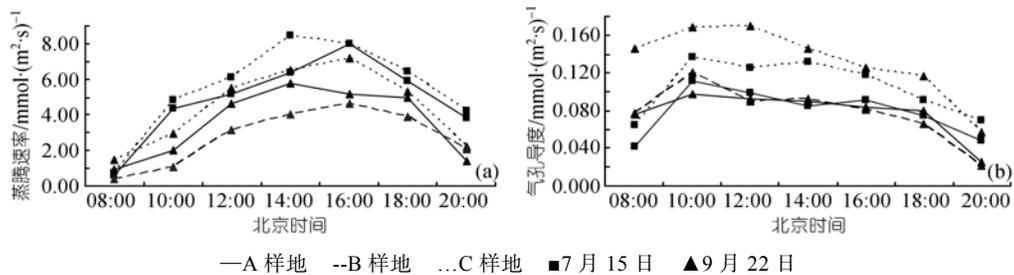


图 3 植物蒸腾速率(a)和气孔导度变化图(b)(5月份因仪器故障没有数据)

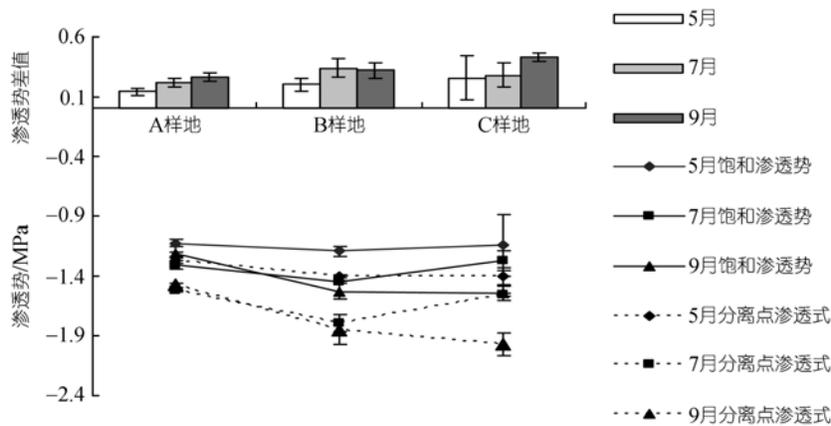


图 4 饱和渗透势(ψ_{sat})、初始质壁分离点时渗透势(ψ_{tlp})及 $|\psi_{sat}-\psi_{tlp}|$ 差的季节变化图

(ii) 初始质壁分离点的相对渗透水含量($ROWC_{tlp}$)和相对含水量(RWC_{tlp})。初始质壁分离点的相对渗透水含量($ROWC_{tlp}$)是反映植物水分亏缺程度的重要指标^[23], 这个指标与外界水分状况密切相关, 在水分亏缺严重时, 其值也下降^[24,25]。初始质壁分离点的相

对含水量(RWC_{tlp})反映了植物在膨压消失时水分亏缺的情况^[14]。在整个生长季节, 各样地 RWC_{tlp} 与 $ROWC_{tlp}$ 的变化规律一致, 都在逐渐减小, 但每个样地不同月份之间的差异性均不显著。各个月份 3 个样地间 RWC_{tlp} 与 $ROWC_{tlp}$ 值差异性也不显著, 除 9 月份

C样地的 $ROWC_{tp}$ 值为 78.18% 外, 3个样地其他月份的 $ROWC_{tp}$ 值均在 81% 以上(图 5). 这表明植物一直维持着很高的体内水分含量, 这对植物存活很有利, 是植物对沙漠腹地水分环境和气候条件的适应方式, 这一点与李向义等人^[12]对塔干南缘头状沙拐枣的研究结论一致.

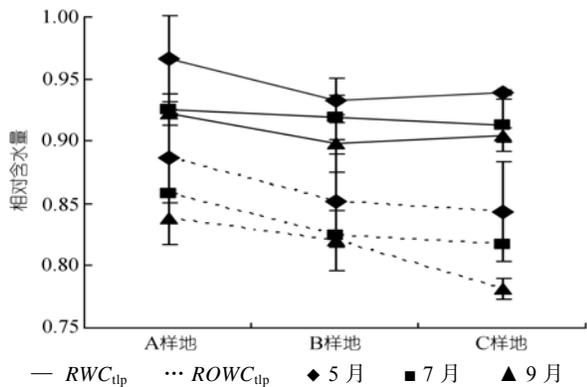


图 5 初始质壁分离点的相对含水量(RWC_{tp})和相对渗透水含量($ROWC_{tp}$)变化图

3 讨论

3.1 塔克拉玛干沙拐枣水分生理对潜水埋深变化的生理响应

水势是植物水分生理状况的重要指标之一, 在水分亏缺条件下植物的清晨水势会发生明显下降^[26]. 由于地下潜水埋深随季节变化而不断增大(图 1), 塔克拉玛干沙拐枣又是浅根型灌木. 塔克拉玛干沙拐枣水势(清晨、午后)有随潜水埋深增大而减小的趋势. A样地在 5~9月之间水势差异性不显著($P < 0.05$), 因为尽管该样地潜水埋深下增加了 0.22 m, 但是潜水埋深只有 1.31 m(图 1). B样地与 C样地在 5~9月之间清晨水势、午后水势都在降低, 且 5~9月份之间的差异性显著($P < 0.05$), 这是由于 B样地虽然潜水埋深只增加了 0.23 m, 但其潜水埋深已经达到 2.25 m. C样地潜水埋深虽只有 1.56 m, 但其增大了 0.40 m(图 1), 这表明潜水埋深的增大会影响植物的水势. 这与 Horton 等人^[27,28]的研究结果相似, 即随着潜水埋深的增大, 植物叶片清晨水势逐渐下降.

植物渗透势的变化与其受胁迫程度和承受胁迫能力密切相关^[29]. 有研究证明, 在干旱条件下植物的渗透势会降低^[11], ψ_{tp} 的降低, 有助于植物在低水势下保持膨压和从土壤中吸收水分. 从每个样地的 ψ_{sat}

和 ψ_{tp} 季节变化来看, B和 C样地均是逐渐降低, 而 A样地则是 9月份高于 7月份, 这与水势变化规律一致.

初始质壁分离点的相对含水量(RWC_{tp})和相对渗透水含量($ROWC_{tp}$)反映植物水分的供应状况^[18]. 李庆梅等人^[24]在研究油松时发现, 在高温干旱或严冬土壤冻结的时期, RWC_{tp} 值就下降. 图 5 表明, 各样地的 RWC_{tp} 与 $ROWC_{tp}$ 都不同程度地随着潜水埋深的增大而减少, 但差异性均不显著.

蒸腾速率和气孔导度的变动特征在一定程度上反映了植物的生存环境和体内水分状况^[30]. 招礼军等人^[31]认为: 在水分正常的条件下, 植物的蒸腾速率呈明显的“单峰型”, 在干旱胁迫下, 蒸腾速率日变幅变平缓, “单峰型”规律不明显, 并出现了“双峰型”. 从图 3 可知, 各样地塔克拉玛干沙拐枣蒸腾速率的日变化均为单峰型曲线, 这与邓雄等人^[13]在塔克拉玛干南部绿洲边缘对头状沙拐枣(*Caliginous caputmedusae* Schrenk)和龚吉蕊等人^[32]对灌木沙拐枣的研究结果一致. 各样地植物蒸腾速率均为 7月份大于 9月份(由于天气原因 B样地 7月份没有测定), 这是植物对外界高温高热环境的响应. 据龚吉蕊等人^[32]的研究, 高蒸腾是沙拐枣的一种免受高温伤害的保护和适应机制. 各样地 9月份的蒸腾速率表现为: B样地的矿化度介于 C样地和 A样地之间, 但它的蒸腾速率最小, 其根本原因是 B样地潜水埋深最大(2.25 m), 由此看来潜水埋深是影响植物蒸腾速率的重要因素.

本研究表明, 塔克拉玛干沙拐枣通过水势、渗透势和相对含水量的降低应对沙漠腹地潜水埋深的增大, 以高蒸腾降低同化枝的温度, 减轻高温、高热的胁迫, 保持较高的体内水分含量是其适应沙漠腹地水分环境和气候条件的适应途径. 这是其对沙漠腹地潜水条件长期适应与进化的结果.

3.2 塔克拉玛干沙拐枣水分生理对潜水矿化度的响应

植物对潜水矿化度也有适应范围, 超出此范围就会衰败^[8,33]. 塔里木河干流区植物生长良好的潜水矿化度一般不超过 $3\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 生长较好的潜水矿化度一般不超过 $5\sim 8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 大于 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 绝大多数枯萎死亡^[34].

从整个生长季节的植物水势(清晨、午后)分析, 塔克拉玛干沙拐枣的水势与潜水的矿化度呈负相关系. 对比潜水埋深相近而矿化度差别较大的 A样地与 C样

地的塔克拉玛干沙拐枣的水势变化, A 样地、C 样地清晨水势和午后水势最低值分别为-0.80 和-2.0 MPa, -1.33 和-2.69 MPa, 且 5~9 月份 A 样地与 C 样地的清晨水势、午后水势差异性均显著($p < 0.05$), 且 C 样地水势较低, 这表明高矿化度对植物水势的降低有显著影响. 比较 B 样地和 C 样地的植物水势, 尽管 B 样地潜水埋深最深(2.25 m), 但各个月份植物水势均为 B 样地高于 C 样地, 这是由于 B 样地比 C 样地矿化度小 7.71 的原因.

盐分改变植物水分关系主要通过渗透调节实现^[35], 盐分胁迫下植物的渗透势会降低^[36]. 由图 4 可知, 决定渗透势高低的主要因素是潜水埋深, 当潜水埋深相近时矿化度才是影响渗透势大小的主要因子. 相对含水量也随着矿化度的增大而减小, 但其差异性不显著($P < 0.05$), 且 3 个样地植物均保持较高的相对含水量, 这是植物对生境长期适应的结果.

从图 3 知, 蒸腾速率、气孔导度与潜水矿化度之间没有规律性. 这与一些研究所得到的高盐分处

理能降低植物蒸腾速率的结果不同^[36,37]. 有的研究也表明盐水灌溉对植物蒸腾的影响不显著^[38]. 由此看来盐分对植物蒸腾速率、气孔导度的影响会因盐分的高低、植物种类和生存环境不同有差异.

一般地盐分会导致植物生长降低^[39], 这种降低是几种生理变化的结果, 其中包括离子的动态平衡、水势、蒸腾和气孔运动等^[40]. 虽然植物通过这些生理调节可以延迟或者减轻不利环境的影响, 但是在严酷的环境下这种调节不能促进生长或者提高生产力^[34], 只有通过牺牲一定限度的生产力来保证植物的生存. 从 A 和 C 两个样地植物生长状况(表 2)看, 矿化度对植物的生长有显著的影响. 这也是塔克拉玛干沙拐枣在生长方面对沙漠腹地水环境做出的适应性调节.

综上所述, 植物水分生理的变化和生长状况是对潜水埋深和矿化度的综合响应. 在沙漠腹地环境, 塔克拉玛干沙拐枣依靠水势、渗透势、蒸腾和气孔特征的相互作用达到自我平衡的状态, 这也是其对该环境长期适应与进化的结果.

致谢 本实验得到了新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站、塔中沙漠植物园和沙漠公路沿线井房职工的大力帮助和支持, 在此对他们深表谢意.

参考文献

- 1 钟华平, 刘恒. 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系. 水科学进展, 2002, 13(2): 223—228
- 2 赵文智, 常学礼. 荒漠绿洲区芦苇种群构件生物量与地下水埋深关系. 生态学报, 2003, 23(6): 1138—1146
- 3 樊自立, 马英杰. 塔里木河流域生态地下水水位及其合理深度确定. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8—13
- 4 Jonathan L H, Janelle L C. Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings. For Ecol Manage, 2001, 140: 239—247
- 5 Sepaskhah A R, Karimi-Goghari Sh. Shallow groundwater contribution to pistachio water use. Agric Water Manag, 2005, 72: 69—80
- 6 Delucia E H, Heckathorn S A. The effect of soil drought on water-use efficiency in a contrasting Great Basin desert and Sierran montane species. Plant Cell Environ, 1989, 12: 935—941
- 7 李生宇, 李红忠. 塔克拉玛干沙漠不同立地条件下咸水滴灌苗木的生长差异. 水土保持学报, 2004, 18(3): 118—122
- 8 周茅先, 肖洪浪. 额济纳三角洲地下水水盐特征与植被生长的相关研究. 中国沙漠, 2004, 24(4): 431—436
- 9 Maria B G, Jose M F. Strategies underlying salt tolerance in halophytes are present in *Cynara cardunculus*. Plant Sci, 2005, 168: 653—659
- 10 Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ, 2002, 25: 239—250
- 11 李向义, 张希明, 何兴元. 沙漠-绿洲过渡带四种多年生植物水分关系特征. 生态学报, 2004, 24(6): 1165—1171
- 12 李向义, Frank M, Thomas F M. 自然状况下头状沙拐枣对水分条件变化的响应. 植物生态学报, 2003, 27(4): 516—521
- 13 邓雄, 李小明, 张希明. 4 种荒漠植物气体交换特征的研究. 植物生态学报, 2002, 26(5): 605—612
- 14 李向义, 张希明, 曾凡江, 等. 塔干南缘骆驼刺植被水分关系的研究. 植物学报, 2002, 44(7): 1219—1224
- 15 李小明, 张希明. 塔克拉玛干沙漠南缘自然植被的水分状况及其恢复. 生态学报, 2003, 23(7): 1449—1453
- 16 潘伯荣, 沈观冕. 新疆沙拐枣属的特有成分与新记录种. 见: 中国植物学会七十周年年会论文摘要汇编. 北京: 高等教育出版社, 2003. 51

- 17 何兴东. 塔克拉玛干沙漠腹地天然植被调查研究. 中国沙漠, 1997, 17(2): 144—148
- 18 苏印泉, 李瀚, 李际红. 林木体内水分状况测定——*P-V*曲线的制作及其应用. 西北林学院学报, 1989, 4(2): 35—38
- 19 Pelaez D V, Boo R M. Plant water potential for shrubs in Argentina. J Range Manage, 1987, 40(1): 6—9
- 20 Gross K, Koch W. Water relations of Picea abies I Comparison of water relations parameters of spruce shoots examined at the end of the vegetation period and in winter. Physiol Plant, 1991, 83: 290—295
- 21 陈清惠, 何纪星. 喀斯特森林树种 *P-V* 曲线特征研究. 贵州农学院学报, 1996, 15(2): 11—16
- 22 Losch R. Plant water relations. Progress in Botany 54. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1993. 102—133
- 23 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 祁连山水源区主要树种耐旱性研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2241—2247
- 24 李庆梅, 徐化成. 油松 *P-V* 曲线主要水分参数随季节和种源的变化. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(4): 326—335
- 25 Lenz T I, Wright I J, Mark W. Interrelations among pressure—Volume curve traits across species and water availability gradients. Physiol Plant, 2006, 127: 423—433
- 26 Sobrado M A, Turner N C. A comparison of the water relations characteristics of *Helianthus annuus* and *Helianthus petiolaris* when subjected to water stress. Oecologia, 1983, 58: 309—313
- 27 Horton J L, Thoums E K, Stephen C H. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. Ecol Appl, 2001, 11(4): 1046—1059
- 28 Horton J L, Clark J L. Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings. For Ecol Manage, 2001, 140: 239—247
- 29 Dichio B, Xiloyannis C, Angelopoulos K, et al. Drought-induced variations of water relations parameters in *olea europaea*. Plant Soil, 2003, 257: 381—389
- 30 陈家宙, 吕国安, 何圆球. 土壤水分状况对花生和早稻叶片气体交换的影响. 应用生态学报, 2005, 16(1): 105—110
- 31 招礼军, 李吉跃, 于界芬, 等. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水日变化的影响. 北京林业大学学报, 2005, 25(3): 42—47
- 32 龚吉蕊, 赵爱芬, 张新时. 多浆荒漠植物与中生植物对干旱胁迫反应的比较研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 194—198
- 33 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标. 水文地质工程地质, 2003, 3: 6—10
- 34 Larcher W. Physiological Plant Ecology. 3 ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1995. 252—260
- 35 Houchi R A, Morant A. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on water relations of *Plantago maritima* and *Plantago lanceolata*. Biol Plant, 1988, 30: 457—460
- 36 Koyro H W. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus*. Environ Exp Bot, 2006, 56: 136—146
- 37 Flanagan L B, Jefferies R L. Effect of increased salinity of carbon dioxide assimilation, oxygen evolution and the isotopic ratio values of leaves of *Plantago maritima* developed at low and high sodium chloride. Planta, 1989, 178: 377—384
- 38 Jiftah B A, Itaru T. Irrigation of grapevines with saline water. I. Leaf area index, stomatal conductance, transpiration and photosynthesis. Agric Water Manage, 2006, 83: 13—21
- 39 Shaheen R, Rebecca C. Hood-Nowotny. Effect of drought and salinity on carbon isotope discrimination in wheat cultivars. Plant Sci, 2005, 168: 901—909
- 40 Yeo A R. Salinity resistance physiology and prices Physiol. Plantarum, 1983, 58: 214—222