

策勒绿洲外围 6 种优势防护林植物对不同灌溉量的光合及水分生理响应

郭自春^{1,2}, 桂东伟¹, 曾凡江^{1*}, 刘波¹, 李尝君^{1,2,3}, 赵生龙^{1,2}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所/新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测试验站/中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室/中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:以策勒绿洲外围 6 种人工栽培的优势防护林植物为研究对象, 在绿洲外围设置 A($0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)、B($0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)、C($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$) 3 个不同灌水量处理实验, 探讨优势防护林植物对不同灌溉量的光合以及水分生理响应特征。结果显示: (1) 在不同灌溉量下 6 种优势防护林植物净光合速率的日变化趋势一致, 均为典型的单峰型变化, 除红枣以外, 其它植物的净光合速率均表现为 $C > B > A$ 。 (2) 随着灌溉量的增加, 植物的蒸腾速率也在逐渐增大, 灌木日蒸腾速率呈不规则的 M 型变化趋势。 (3) 除核桃外, 其它植物清晨水势和正午水势均随着灌溉量的增加而增大, 且均表现为 $B > C > A$ 。 (4) 6 种优势防护林植物在不同的灌溉量下的瞬时水分利用效率日进程基本上一致, 且均表现为 $B > C > A$ 。研究表明, 从水分利用和灌溉量大小的角度来说, 在防护林树种的选择中应该优先选用核桃、红枣、桑树和沙拐枣; 综合考虑节水和植物生长的情况下, 对红枣进行适量灌溉显然比核桃、桑树、怪柳、花棒和沙拐枣更为有效, 所以红枣比其余 5 种植物更适于在策勒绿洲地区节水生长。

关键词:灌溉; 防护林植物; 光合特性; 水分生理

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Response of Photosynthetic Characteristic and Water Physiology of Six Dominant Shelter Plant Species to Different Irrigation Amounts in the Peripheral Regions of Cele Oasis

GUO Zichun^{1,2}, GUI Dongwei¹, ZENG Fanjiang^{1*}, LIU Bo¹, LI Changjun^{1,2,3}, ZHAO Shenglong^{1,2}

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academic of Science/Cele National Field Science Observation and Research Station of Desert Grassland Ecosystem/Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid, Xinjiang Institute of Ecology and Geography/State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, University of Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Artificial cultivation experiment on the photosynthetic characteristic and water physiology of six dominant shelter plant species was carried out under different irrigation amounts [$A(0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$, $B(0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$ and $C(0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$] in the Peripheral Regions of Cele Oasis. The results showed that: (1) Except *Ziziphus jujuba*, the net photosynthetic rate of others showed a similar diurnal tendency and had a single-peaked pattern, and showed: $C > B > A$. (2) The transpiration rate also increased in response to irrigation amounts, but had an irregular M change. (3) Except the *Juglans regia*, the predawn and midday water potential of other plants increased with the increase of irrigation amounts, and were displayed $B > C > A$.

收稿日期: 2014-01-17; **修改稿收到日期:** 2014-05-06

基金项目: 中国科学院西部之光项目(XBBS201105); 自治区科技重大专项(201130106-1); 国家自然科学基金青年基金(31100144)

作者简介: 郭自春(1989—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事荒漠植物的生理生态方面的研究。E-mail: guozichun1989@sina.cn

* 通信作者: 曾凡江, 研究员, 硕、博士生导师, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: fjzeng369@sohu.com

(4) Their diurnal course of instantaneous water use efficiencies were basically identical, all showed $B > C > A$. Says from the perspectives of water use and irrigation amounts, *J. regia*, *Z. jujuba*, *Morus alba*, *Calligonum mongolicum* should be chosen as the dominant shelter plants. *Z. jujuba* was very suited for water-saving in Cele Oasis and is more effective to be used in the shelter plants than the rest of five plants.

Key words: irrigation; shelter plants; photosynthetic characteristic; water physiology

光合作用是植物最重要的生理过程, 光合效率水平是植物生产力高低的决定性因素^[1-2], 是光合系统功能的直接体现, 也是植株光合系统工作正常与否的指标^[3-4]。植物的光合作用和水分代谢特性与植物所生存的环境密切相关^[5-7]。作为植物进行光合作用必不可少的原料之一, 水分对植物光合作用的影响是多方面的。水分亏缺不仅会降低光合速率^[2,8-10]、气孔导度^[11], 也会直接影响植物体内各组成部分间光合产物的分配^[12-14], 甚至会造成植物叶绿体类囊体结构破坏^[15]。由于新疆策勒绿洲降雨量稀少, 蒸发量巨大, 加上水资源量相对贫乏和开发的不协调, 使得策勒绿洲外围生态环境退化日益加剧^[16-17], 而且还存在着植被退化、土地沙漠化、土壤盐渍化等生态问题^[18-20]。该区域近几十年的大量研究^[21-23]表明, 水分是策勒绿洲的主要限制因素, 洪水是该区域天然植被发生的重要原因, 水资源的短缺已成为限制和影响策勒绿洲扩大及稳定的关键制约因素之一。迄今国内外学者对于该区域的植物光合特征^[11,17]、水分生理特征^[20,24-25]进行了大量的研究, 也有学者对于不同防护林的生态适应性的问题进行了探讨^[26-29], 但是对策勒绿洲外围防护林树种在不同灌溉量下的光合以及水分生理特性的研究还未见报道, 而了解树木对水分的适应性对于干旱区、半干旱区造林树种的选择具有重要的意义。

干旱区和半干旱区的造林主要受水分条件的限制, 水资源的短缺严重制约着干旱区大型防护林的建设^[30], 所以造林必须要满足树木的水分需求, 否则造林就会加速荒漠化进程^[31]。绿洲防护林体系是干旱区人工绿洲的重要生态屏障^[32-33], 是绿洲稳定的前提条件^[34], 也是绿洲生态系统的主体, 在保障小气候的稳定、防风固沙和降低自然灾害方面发挥着巨大作用。策勒绿洲外围的防护林多是根据不同风力及地貌等自然环境配置而成, 较多地考虑到了防风固沙的效果, 而没有充分考虑到高效利用水资源、合理灌溉的目标。无论是农田防护林、沙漠防护林, 还是等其他防护林, 大部分研究都是从防护林植物生理生态方面探讨植物的生态适应性, 但是对于在极端干旱的条件下, 都没有从防护林的稳定性

及节约水资源的角度考虑。而如何在保证植物维持较高或者中等生产力水平的前提下, 提高植物对土壤水分的利用效率已经成为农林业发展和防护林建设亟需解决的核心问题^[35]。通过开展灌溉对防护林光合作用和水分生理特性的研究, 特别是在干旱区严重缺水的条件下, 研究绿洲外围防护林优势植物的生理生态特性, 可为更好地选育和鉴定优良的防护林树种提供理论依据。为此, 本研究以策勒绿洲外围 6 种优势防护林植物为研究对象, 在策勒站的控制实验区通过人工栽培的方式, 结合土壤等环境要素的观测, 来考察 6 种优势防护林植物对不同灌溉量的光合以及水分生理响应, 从而为策勒绿洲乃至新疆荒漠地区防护林的恢复和重建、合理高效利用水资源提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验区概况

实验于 2012 年 8 月在中国科学院新疆生态与地理研究所策勒国家野外科学观测研究站(简称策勒站)控制实验区进行。策勒站位于塔克拉玛干沙漠南缘中段, 昆仑山北麓($35^{\circ}17'55'' \sim 39^{\circ}30'00''N$, $80^{\circ}03'24'' \sim 82^{\circ}10'34''E$)。该地区属典型的大陆性干旱气候, 年平均温度 $11.9^{\circ}C$; 多年平均降水量仅 35.1 mm , 且主要集中在 5 月和 7 月; 平均蒸发量 $2\,595.3\text{ mm}$, 干燥度 20.8。策勒绿洲河流均发源于昆仑山北坡, 有大小河流 9 条, 年径流量为 5.845 亿 m^3 , 水源主要以冰雪融水和降水为主。策勒绿洲地表径流的多年变化不大, 但是年内分配很不均匀。春季(1~5 月)和秋季(9~12 月)为地表径流的枯水期, 夏季(6~8 月)为洪水期^[36]。由于径流的季节分配不均, 洪枯悬殊较大, 贮洪能力弱, 用水相对紧缺。水资源利用程度较低, 地表水利用率为 36% , 地下水利用率为 14.5% ^[37]。该实验区采用人工灌溉。

1.2 供试材料

本实验选取人工种植、苗龄为 2 年生的人工栽培防护林树种移栽幼苗作为研究对象, 构成防护林的优势植物有乔木核桃(*Juglans regia* Linn.)、红枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)、桑树(*Morus alba* L.),

灌木多枝怪柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et C. A. Mey.)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)等。行距为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,株距为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。

1.3 实验设计

实验于 2012 年 8 月上旬在策勒站控制实验区进行,采用大田小区控水梯度处理,比较不同灌溉量对植物各项指标的影响。灌溉量的大小以自然环境中洪水漫溢量的平均值($0.1\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)为参考,共设置 A(干旱处理, $0\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$,在幼苗移栽培育成活后不灌水)、B(适度灌溉, $0.1\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)、C(充分灌溉, $0.2\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)3 个灌溉梯度,详细描述见 Guo 等^[38]。每种处理的样地面积大小为 84 m^2 ($6\text{ m} \times 14\text{ m}$),每个处理有 3 个重复小区。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤含水量 在灌溉后 24、48、72 h 分别测定土壤含水量,72 h 以后,改成每隔 10 d 测定 1 次,共 6 次。采用土钻取样烘干称重法进行测定,在每个实验小区分别取 3 个不同位置的土样,取样深度为 100 cm 土层,取样间隔为 20 cm。将样品置于烘箱中 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 24 h,待冷却后称土样的干重,计算土壤的质量含水量。在本文中土壤含水量的变化只列出灌溉后 2 d 和 33 d 的。

1.4.2 叶片水势 灌溉 48 h 后,选取生长正常的样株,在每个样株上尽量选取高度一致的带叶小枝,用压力室 PMS(Plant Moisture Stress, Corvallis, Oregon, USA)对 6 种优势沙漠防护林植物的清晨水势和正午水势进行测定,早晨 6 点(6:00)测清晨水势,中午 1 点(13:00)测正午水势。实验时选取生长良好的样株,在每个样株上尽量选取高度一致的带叶小枝,分别测其水势,每种处理 3 个重复。

1.4.3 光合参数 2012 年 9 月上旬,选择在晴朗无云无风的天气下,采用便携式光合测定仪(Li-6400)分别在 08:00、11:00、13:00、16:00、20:00 对 6 种优势防护林植物的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)等指标进行测定。由于该地区风沙降尘较多,所以测定前 1 d,先将待测向阳面叶片表面的尘土用喷水壶洗净、擦干。每个处理下的树种选择 3 株标准样株,测定时读取 5 个测量数据,取平均值作为该时刻的实测值。由于怪柳、沙拐枣叶片退化,因此选择其具有光合作用的同化枝进行测定;花棒叶片极小,选择连同叶轴一起测定。光合测定完毕后,采集测定的叶片、同化枝或叶轴带回实验室进行叶面积分析,怪柳和沙拐枣采集同化枝,花棒小叶连同叶轴

一起采集,其他防护林植物均采集叶片,采集的叶片、同化枝或叶轴用扫描仪扫描后再经 Delta-T Scan 软件(Techne, Cambridge, UK)分析计算实际的光合叶片面积,最后按照实际光合叶片面积回算出实际的各项指标参数。同时,根据公式计算瞬时水分利用效率(WUE)。

$$WUE = P_n / T_r$$

1.5 数据处理与统计分析

所有数据均采用 SPSS 17.0 分析软件进行单因素方差分析,最小显著数法(LSD, $\alpha=0.05$)进行显著性多重比较检验,数据分析以及图表绘制采用 Microsoft Excel 2003 和 Origin Pro 8.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉量对优势防护林植物立地土壤含水量的调控作用

6 种优势防护林植物灌溉 2 d 和 30 d 后各层土壤含水量的变化情况如图 1 所示。其中,表土层至 40 cm 这一段内土壤含水的变化趋势为:乔木树种在 C 和 B 灌水处理下都大于 A,而 B 和 C 处理基本一致,灌木树种均表现为 $C > B > A$;40~80 cm 这一段的土壤含水量除红枣表现为 $B > C > A$,其他植物均表现为 $C > B > A$;80~100 cm 这一段的土壤含水量,6 种优势防护林植物均表现为 $C > B > A$ 。然而桑树在 A 和 B 灌水条件下土壤含水量逐渐减少,最后趋于一致;红枣在 B 和 C 的条件下土壤含水量逐渐增加,最后趋于一致;沙拐枣在 A 和 C 的条件下土壤含水量逐渐增加,最后趋于一致,这可能是因为一定的灌溉量使土壤水分下渗比较快,使得深层土壤的含水量逐渐增加。

表 1 显示,同一树种立地土壤含水量均明显受到灌溉量影响。其中,核桃、红枣、桑树、沙拐枣生长地的土壤含水量在 B 和 C 灌溉量下均与 A 有显著差异,而其在 B 和 C 灌溉量之间则无显著差异;花棒生长地的土壤含水量在 A 和 B 灌溉量条件下无显著差异,而在 A 和 C、B 和 C 灌溉量条件下均具有显著差异;怪柳立地土壤含水量在 3 种灌溉量下都差异显著。此外,在灌溉量相等且灌溉后经过相同时间的条件下,不同树种生长地的土壤含水量存在差异。其中,在 A 和 B 灌溉量条件下,核桃、红枣、沙拐枣生长地的土壤含水量之间差异不显著,怪柳与花棒无差异,而桑树与其他树种间都有显著差异;在 C 灌溉量条件下,除桑树立地土壤含水量与其它树种之间差异显著外,其它树种之间均无差异。

2.2 不同灌溉量对优势防护林植物叶水势的影响

从图 2 中可以看出,6 种优势防护林植物叶片的清晨水势和正午水势随着灌溉量和物种的不同而异,并且清晨水势和正午水势差距较大,这是因为实验区夜间空气比较湿润,气孔关闭,蒸腾基本停止,

植物在夜间通过根系从土壤中吸收了一定的水分,得到了很好的恢复,所以清晨植物的水分并不亏缺;而正午水势降低是因为该区域白天植物水分的蒸腾损失很大。其中,红枣、柽柳和花棒的清晨水势、正午水势均表现为随着灌溉量的增加而增大;桑树和

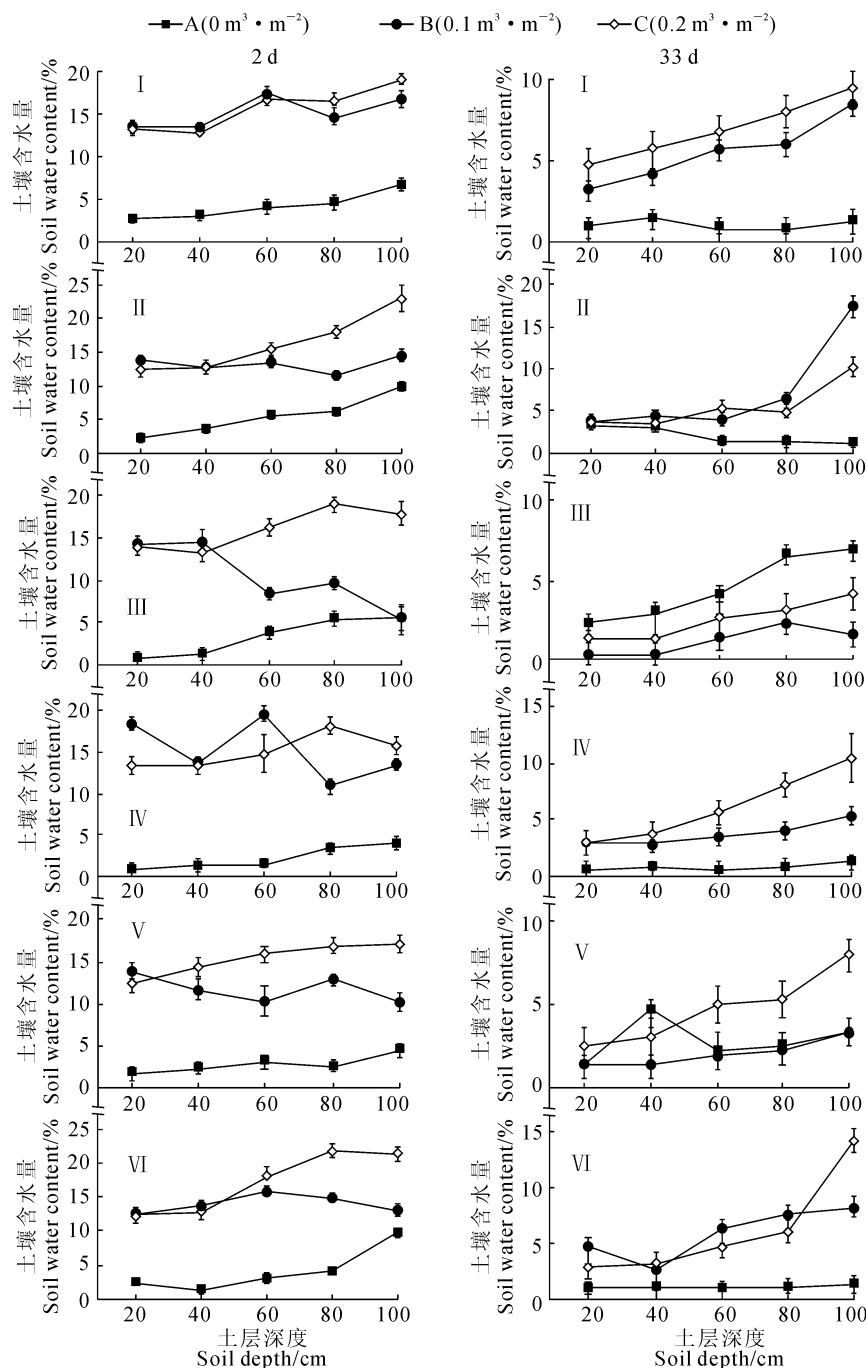


图 1 不同灌溉量下 6 种优势防护林植物生长地的土壤含水量随土层深度的变化(平均值±标准差)

I. 核桃; II. 红枣; III. 桑树; IV. 灌木多枝柽柳; V. 花棒; VI. 沙拐枣; 下同

Fig. 1 The change of soil water content of six shelter plant species under different irrigation amounts and soil depths(mean±SD)

I. *J. regia* Linn.; II. *Z. jujuba* Mill.; III. *M. alba* L.; IV. *T. ramosissima* Ledeb.; V. *H. scoparium* Fisch. et C. A. Mey.; VI. *C. mongolicum* Turcz.; The same as below

沙拐枣的清晨水势和正午水势均表现为: $B > C > A$, 且处理之间差异不显著 ($P > 0.05$); 核桃的清晨水势表现为: $B > C > A$, 其中 B 与 C 差异不显著 ($P > 0.05$), 但与 A 差异显著 ($P < 0.05$), 而正午水势随着灌溉量的增加而逐渐减小。

2.3 不同灌溉量对优势防护林植物净光合速率和蒸腾速率的影响

由图 3 可以看出, 6 种优势防护林植物在 3 种

不同灌溉量下其净光合速率的日变化趋势基本一致, 均为典型的单峰型变化, 都在 14:00 时达到净光合速率的最大值; 除红枣的净光合速率表现为: $B > C > A$ 外, 其它植物的净光合速率均表现为 $C > B > A$, 即随着灌溉量的增加而增大。灌溉量明显影响着 6 种优势防护林植物的净光合速率 ($P < 0.05$, 表 2), 补充灌溉有利于提高植物的光合速率。

由图 4 可以看出, 核桃和桑树的蒸腾速率始终

表 1 不同灌溉量下 6 种优势沙漠防护林植物生长地土壤含水量的差异(平均值±标准差)

Table 1 Variance of soil water content in different irrigation amounts(mean±SD)

灌溉量 Irrigation amounts ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	核桃 <i>J. regia</i>	红枣 <i>Z. jujuba</i>	桑树 <i>M. alba</i>	柽柳 <i>T. ramosissima</i>	花棒 <i>H. scoparium</i>	沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>
0(A)	$1.07 \pm 0.28\text{bA}$	$2.07 \pm 0.16\text{bA}$	$0.57 \pm 0.45\text{bC}$	$0.80 \pm 0.13\text{cB}$	$0.90 \pm 0.38\text{bB}$	$1.13 \pm 0.38\text{bA}$
0.1(B)	$5.59 \pm 0.04\text{aA}$	$5.16 \pm 1.40\text{aA}$	$1.21 \pm 0.01\text{aC}$	$3.65 \pm 0.26\text{bB}$	$2.21 \pm 0.34\text{bBC}$	$6.02 \pm 0.54\text{aA}$
0.2(C)	$6.79 \pm 0.83\text{aA}$	$7.54 \pm 1.49\text{aA}$	$2.55 \pm 0.56\text{aB}$	$6.16 \pm 0.38\text{aA}$	$4.78 \pm 0.50\text{aA}$	$6.28 \pm 0.34\text{aA}$

注:不同大写和小写字母分别表示相同灌溉量不同树种间和相同树种不同灌溉量间在 0.05 水平存在显著性差异。
Note: Different capital and normal letters indicate significant difference among different plant species in the same irrigation and different irrigation amounts in the same species at 0.05 levels, respectively.

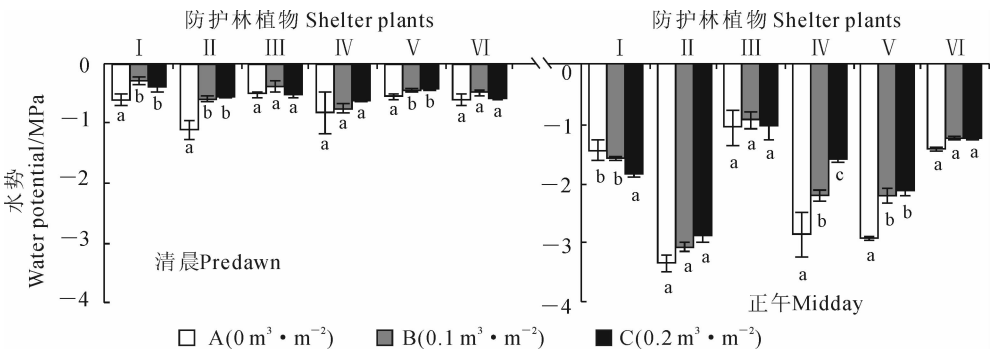


图 2 不同灌溉量下 6 种优势防护林植物叶水势的变化(平均值±标准差)

Fig. 2 Changes of photosynthetic organs water potential of six shelter plant species under different irrigation amounts(mean±SD)

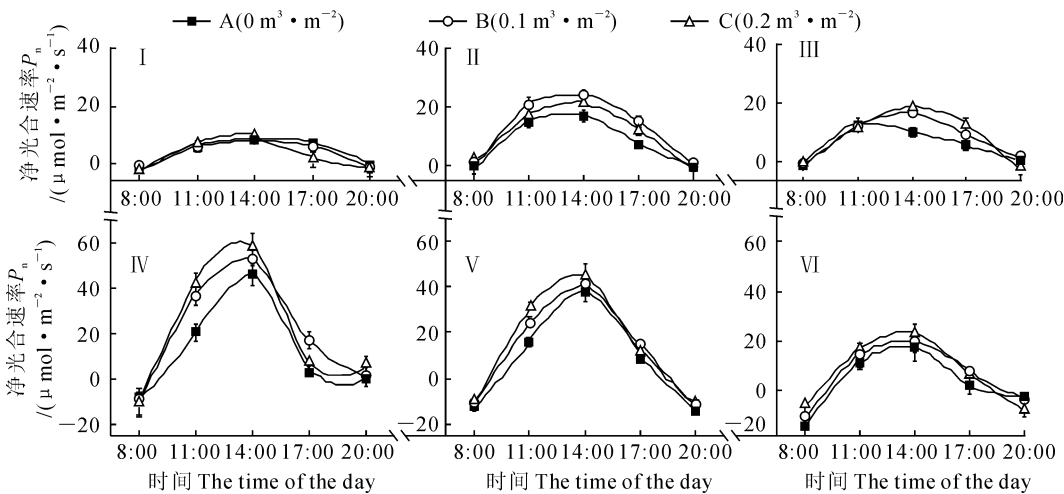


图 3 不同灌溉量下 6 种优势防护林植物净光合速率的日变化(平均值±标准差)

Fig. 3 Changes of photosynthetic rate of six of shelter plant species under different irrigation amounts(mean±SD)

表现为: C>B>A, 而核桃蒸腾速率的变化曲线为 M 型, 桑树的为单峰型曲线变化; 红枣的蒸腾速率始终表现为: B>C>A, 即适度灌溉>充分灌溉>干旱处理。柽柳、花棒和沙拐枣 3 种防护林灌木蒸腾速率呈不规则的 M 型变化趋势。其中, 在 14:00 以前, 柽柳蒸腾速率表现为 B>C>A, 而花棒和沙拐枣则表现为 A>C>B; 在 14:00 以后, 柽柳蒸腾速率表现为: A>C>B, 而花棒和沙拐枣则表现为 C>A>B。由此可见, 灌溉量对 6 种优势防护林植物的蒸腾速率的影响程度各不相同(表 2), 并不一定都是负面的。

2.4 不同灌溉量对优势防护林植物瞬时水分利用效率的影响

由图 5 可以看出, 6 种优势防护林植物在不同灌溉量下、单叶水平上的瞬时水分利用效率日进程

基本上一致, 均呈单峰型变化, 均表现为 B>C>A; 核桃和柽柳各灌溉量处理的瞬时水分利用效率均在 14:00 时达到最大值, 而其它植物均在 11:00 达到最大值。柽柳、花棒、沙拐枣这些防风固沙树种的水分利用效率均表现为: B>C>A, 且处理间差别较大(表 2), 这说明这些树种在适度灌溉的水分处理下可以更加有效地利用水资源; 而核桃、红枣、桑树这些经济树种在 3 种不同灌溉量下的水分效率基本一致。

3 讨论

干旱是全球气候变化的主要结果, 也是全球变化的主要表现之一^[37]。随着全球变化的逐年加剧, 干旱发生的频率和强度都在急剧增加。干旱作为植物所遭受的所有非生物胁迫中最为严重的不利因素

表 2 不同灌溉量下 6 种优势沙漠防护林植物光合参数日平均值的差异

Table 2 Daily means difference of photosynthetic parameters of six shelter plant species in different irrigation amounts

光合参数 Photosynthetic parameter	灌溉量 Irrigation amounts /(m ³ ·m ⁻²)	防护林植物 Shelter plant species					
		核桃 <i>J. regia</i>	红枣 <i>Z. jujuba</i>	桑树 <i>M. alba</i>	柽柳 <i>T. ramosissima</i>	花棒 <i>H. scoparium</i>	沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>
净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0(A)	2.23a	7.27c	5.16b	12.56b	7.92b	2.53b
	0.1(B)	2.95a	11.10a	7.16a	19.22a	10.79a	4.98a
	0.2(C)	3.35a	9.59b	7.36a	20.60a	12.34a	6.44a
蒸腾速率 T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0(A)	1.59b	3.46c	3.26b	7.73b	7.58a	3.95a
	0.1(B)	3.24a	6.38a	5.29a	8.71a	4.85b	3.03a
	0.2(C)	3.52a	5.46b	5.94a	8.55a	7.29a	3.75a
瞬时水分利用效率 WUE /($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	0(A)	-0.23b	0.56b	0.59b	1.17c	-1.25b	1.08a
	0.1(B)	0.70a	1.23a	0.86a	2.64a	-1.52b	1.61a
	0.2(C)	0.54a	1.04a	0.94a	1.83b	-2.78a	0.76b

注: 不同小写字母表示同一树种不同灌溉量间在 0.05 水平存在显著性差异。
Note: Different normal letters indicate significant difference among different irrigation amounts in the same plant species at 0.05 levels.

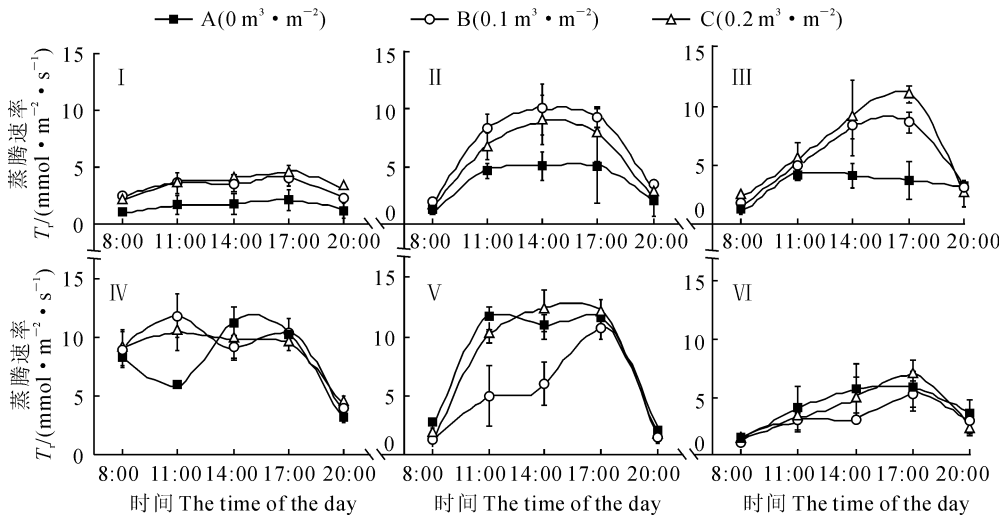


图 4 不同灌溉量下 6 种优势防护林植物日蒸腾速率的变化(平均值±标准差)

Fig. 4 Changes of transpiration rate of six shelter plant species under different irrigation amounts(mean±SD)

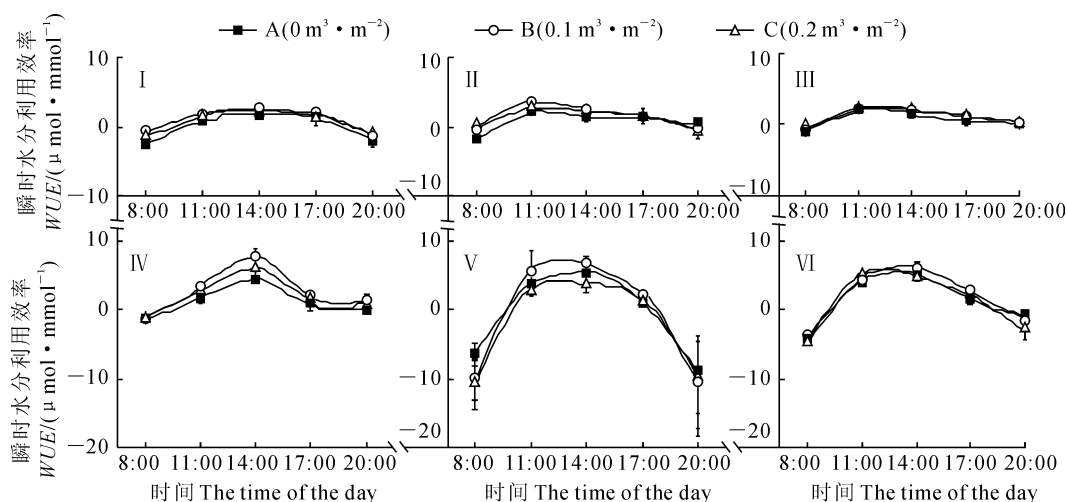


图 5 不同灌溉量下 6 种优势防护林植物瞬时水分利用效率的变化(平均值±标准差)

Fig. 5 Changes of instantaneous water use efficiency of six

shelter plant species under different irrigation amounts(mean±SD)

之一,在很大程度上影响了植物的生长与代谢。生长在干旱、半干旱区的植物尤其是树木常常由于土壤供水不足而使其自然分布状况和生长受到限制^[18];干旱对植物生长分布的影响不仅仅局限于水分亏缺对植物所造成的影响,而且由于干旱区蒸发比较强烈,由干旱造成的土壤次生盐渍化胁迫也是限制植物生长的重要因素^[39]。策勒绿洲属于干旱半干旱区的过渡带,这里的农、林、牧生产均依赖于引洪灌溉,而大部分的水资源都主要用于农业方面,随着沙地开发的利用和防护林的建设,水资源明显不足,所以防护林建设的一个重要思想就是建立在提高水分利用率的基础上,而不是通过充分灌水来发展防护林,更何况防护林建设本身就会伴随着牺牲水分的代价。

3.1 6 种优势防护林植物光合特性对灌溉量的响应特征

植物光合速率和水分存在着密切关系^[40]。柯玉琴等^[9]对田间栽培的 2 年生铁观音茶树研究发现,植物的净光合速率随着灌溉量的增加有先上升后下降的趋势;王克勤等^[8]通过对 7 年生田间和 2 年生盆栽金矮生苹果进行不同土壤水分和光照条件下叶片光合速率测定发现,当灌溉量在田间持水量的 15%~5% 时,金矮生苹果净光合速率随着土壤含水量的增加而增加,当灌溉超过 75% 时,随着土壤含水量的提高,净光合速率反而有下降趋势。本研究发现优势防护林植物核桃、桑树、柽柳、花棒和沙拐枣的净光合速率均表现为充分灌溉($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$) > 适度灌溉($0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$) > 干旱胁迫($0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$),而红枣则表现为:适度灌溉 > 充分灌溉 > 干

旱胁迫,这可能是因为当灌溉量达到充分灌溉时,核桃、桑树、柽柳、花棒和沙拐枣的土壤含水量还未达到最适合这 5 种植物生长的水平,而当灌溉量达到适度灌溉时,红枣的土壤含水量已经达到了最适宜红枣生长的水平,随着灌溉和土壤含水量的继续增大,过多的水分反而对红枣的净光合速率产生不利影响并限制红枣的生长,该研究与淹水能够降低池杉和栓皮栎净光合速率的结论一致^[41];同时,该结论还说明在同等灌溉条件下,红枣的土壤含水量最容易达到适宜植物生长的范围;若在综合考虑节水和植物生长的情况下,对红枣进行适量的灌溉显然比核桃、桑树、柽柳、花棒和沙拐枣来得更为有效。

蒸腾是植物水分消耗的最主要途径,水分蒸腾的速率直接决定了植物体内的水分平衡,并影响植物水分利用效率^[42]。植物的蒸腾作用在植物水分代谢中起着重要的调节支配作用,可以反映植物调节自身水分的水平及适应干旱的能力^[43-44]。有学者认为,植物的蒸腾作用不仅与环境因子有关系,而且与土壤对植物的供水情况有着密切的关系,当土壤水分状况良好时,蒸腾速率日进程的变化趋势呈单峰型;当土壤供水不足时,蒸腾速率日进程的变化趋势呈双峰型^[45]。朱军涛等^[11]研究了不同灌溉梯度对疏叶骆驼刺光合生理指标及渗透物质的影响后发现,随着灌水量的增加,疏叶骆驼刺的蒸腾速率也显著增大,两者之间呈现很好的正相关关系。孙东宝等通过对苜蓿进行不同水分处理后发现,随着灌水量的增加,苜蓿的蒸腾速率日进程不仅显著增大,而且从灌水量较小时的单峰型变为灌水量较大时的双峰型,表明了植物体内的水分状况从受明显的胁迫

到适宜于植物生长良好状态转变^[10]。但也有研究表明,灌溉对植物蒸腾速率的影响并不一直都是正面的,当土壤含水量在一定阈值以内,随着灌溉量的增加,植物蒸腾速率会增大;当灌溉量超过最适宜植物生长的阈值时,过多的水分反而作为水涝胁迫对植物生长产生抑制,植物的蒸腾速率也随之降低^[8,40]。

本研究发现,在适度灌溉条件下,6种优势防护林植物的蒸腾速率日进程都显示出一定的单峰型曲线,表明在不同灌溉处理下,各种植物均受到了一定的水分胁迫。而随着灌水量的增加,6种植物蒸腾速率表现出了不同的变化趋势,其中核桃、桤柳、花棒和沙拐枣蒸腾速率均随着灌水量的增加而增加并且显示为双峰曲线,表明灌溉虽然能够改善这4种植物的水分状况,但是即使在灌溉量达到充分灌溉的情况下也未能达到植物生长的最适土壤含水量值,该研究与朱军涛^[11]的研究结果一致;桑树的蒸腾速率日进程随水分的增加显示为单峰型曲线,并且随着灌水量的增加而增大,说明桑树桑树在补充水分之后,能够较快地达到较适宜于自身生长的土壤水分状态,使得植物体内没有感受到明显的胁迫,但是在灌溉量达到充分灌溉的情况下,桑树的生长状况也未能达到最佳,该研究与孙东宝等^[10]的研究结果一致;而灌溉量为适度灌溉和充分灌溉时,红枣的蒸腾速率日进程均表现为单峰型曲线,并且在灌溉量达到适度灌溉时,植物蒸腾速率已达最大值,随着灌溉量继续增大到充分灌溉时,蒸腾速率反而有所下降,表明灌溉量为充分灌溉的水分处理已经超过最适合红枣生长的土壤含水量阈值,适度灌溉已经达到红枣生长的适宜土壤水分状态,过多的水分灌溉对红枣生长并没有实质性的帮助反而会抑制其生长,因此,相比于其余5种植物,红枣更适宜于在策勒绿洲的节水环境下生长。

3.2 6种优势防护林植物水分生理特性对灌溉量的响应特征

植物水势是植物水分状况的重要指标之一^[46-47],它是反映植物吸水能力与保水能力大小的综合指标,其变化状况可以从侧面较为客观地反映植物体内水分运转及平衡状况^[27]。清晨水势可以反映植物水分亏缺的程度^[48],正午水势可以反映水分亏缺的最大值。Sobrado等^[49]认为,植物在受到水分胁迫时,其清晨水势会发生明显的下降;清晨水势高表明植物得到了良好的水分供应,清晨水势发生明显下降则表现为植物受到了水分的胁迫^[25]。本研究发现,红枣、桤柳和花棒叶片的清晨

水势、正午水势均表现为随着灌溉量的增加而增加,这与以前学者的研究结果基本一致^[14,24]。郭连生等^[50]通过盆栽的8种针阔叶幼树的研究发现,当灌溉水量适度时,幼树的叶水势随着灌水量的增加而增加。本研究中,桑树和沙拐枣叶片的清晨水势和正午水势均表现为:适度灌溉>充分灌溉>干旱胁迫,与郭连生和田有亮的研究结果基本一致。而在本研究中,核桃叶片的清晨水势表现为适度灌溉>充分灌溉>干旱胁迫,而正午水势却随着灌溉量的增加而逐渐减小,这可能是因为当遭受严重土壤干旱胁迫时,核桃植株无法通过水流阻力的调节来满足蒸腾的需要,此时叶水势就会降低得比较快,以便形成较大的水势梯度,从而在土壤中吸收一定的水分来补充体内的水分,这也是树木对干旱胁迫的适应性反应^[12]。

植物水分利用效率指植物消耗单位水分所生产的同化物质的量,它实质上反映了植物耗水与其干物质生产之间的关系,是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标^[51]。在单叶水平上的水分利用效率(WUE)一般采用光合速率与蒸腾速率之比来表示植物的水分利用效率。有研究表明土壤干旱会导致植物光合速率、蒸腾速率均下降,当水分受限制时,一些植物的气孔导度降低,伴随着蒸腾速率与光合速率的降低,但由于蒸腾速率下降幅度大于光合速率下降幅度,使单叶水平上的光合速率与蒸腾速率的比值增大^[52-53],使得植物叶片的水分利用效率提高^[13,54-55]。而在严重水分胁迫时,由于植物的光胁迫出现较早^[8],严重影响了光合作用,使得光合速率的下降速率比蒸腾速率更快,在光合有效辐射不高时便出现了WUE急剧下降的现象,严重影响了WUE的提高,因此严重的水分胁迫也会降低植物的水分利用效率^[40]。但也有研究表明,随着土壤干旱的加剧,植物的光合速率和单叶WUE也随之下降,其顺序是适宜水分>中度干旱>重度干旱,WUE与土壤含水量呈较好的正相关^[13]。

本研究有结果显示,6种优势防护林植物在不同的灌溉量条件下,其单叶瞬时水分利用效率日进程变化趋势基本上一致,且均表现为适度灌溉>充分灌溉>干旱胁迫。这说明在干旱处理下,6种植物植物的水分利用效率严重下降,这也可以从干旱处理的6种植物光合速率均显著小于适度灌溉和充分灌溉的光合速率看出;而随着灌水量的增加,6种植物的严重水分胁迫得到解除,在轻度水分胁迫或适度水分条件下,随着灌水量的增加,6种植物的水

分利用效率均有所降低,该研究结果与中国沙棘水分利用效率随着土壤水分条件的改善而降低的结论一致。因此,适度灌溉处理的 6 种植物水分利用效

率的表现对于策勒绿洲的节水灌溉工程具有更为重要的参考价值。

参考文献:

- [1] XU D Q(许大全). Photosynthetic efficiency[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1988, **5**(1): 7 (in Chinese).
- [2] WANG R R(王荣荣), XIA J B(夏江宝), YANG J H(杨吉华), *et al.* Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2013, **33**(19): 6 088—6 096 (in Chinese).
- [3] ZHOU J(周建), YANG L F(杨立峰), HAO F G(郝峰鸽), *et al.* Photosynthesis and chlorophyll-fluorescence of *Magnolia grandiflora* seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2009, **29**(1): 136—142 (in Chinese).
- [4] SHAO Y R(邵怡若), XU J X(许建新), XUE L(薛立), *et al.* Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2013, **33**(14): 4 237—4 247 (in Chinese).
- [5] BOARDMAN N K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1977, **28**(1): 355—377.
- [6] FARQUHAR G D, CAEMMERER S V. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions[M]// *Physiological Plant Ecology II*. Springer Berlin Heidelberg, 1982: 549—587.
- [7] CUI X Y(崔晓勇), DU ZH CH(杜占池), WANG Y F(王艳芬). Photosynthetic characteristics of a semi-arid sandy grassland community in Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 541—546 (in Chinese).
- [8] WANG K Q(王克勤), WANG B R(王斌瑞). The effect of soil moisture upon net photosynthetic rate of the Goldspur apple tree[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2002, **22**(2): 206—214 (in Chinese).
- [9] KE Y Q(柯玉琴), ZHUANG ZH G(庄重光), HE H Q(何华勤), *et al.* Effects of different irrigation treatments on photosynthesis of Tieguanyin tea plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(10): 2 132—2 136 (in Chinese).
- [10] SUN D B(孙东宝), WANG Q S(王庆锁). Effects of water on the photosynthetic characteristics of alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2012, **36**(1): 72—80 (in Chinese).
- [11] ZHU J T(朱军涛), LI X Y(李向义), ZHANG X M(张希明), *et al.* Effect of irrigation on photosynthetic physiology characteristics and Osmolytes of *Alhagi sparsifolia* [J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2009, **29**(4): 697—702 (in Chinese).
- [12] YU F Y(喻方圆), XU X Z(徐锡增), ROBERT D G. Effects of water and heat stress on the seedling height growth and biomass of five trees[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Nat. Sci. Ed.) (南京林业大学学报·自然科学版), 2003, **27**(4): 10—15 (in Chinese).
- [13] YANG J W(杨建伟), LIANG Z S(梁宗锁), HAN R L(韩蕊莲), *et al.* Water use efficiency and water consumption characteristics of poplar under soil drought conditions[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(5): 630—636 (in Chinese).
- [14] YANG X G(杨鑫光), FU H(傅华), ZHANG H R(张洪荣), *et al.* Effects of soil water stress on leaf water potential and biomass of *Zygophyllum xanthoxylum* during seedling stage[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2006, **15**(2): 37—41 (in Chinese).
- [15] HU H M R(呼和牧仁), ZHOU M(周梅), QU H B(瞿洪波), *et al.* Research process on factors affecting photosynthesis in tree[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (内蒙古农业大学学报), 2009, **30**(2): 287—291 (in Chinese).
- [16] GAO Q ZH(高前兆). Water resources and construction strategy of ecological environment in the edge of the Tarim Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川与冻土), 2000, **22**(4): 298—308 (in Chinese).
- [17] DAI SH Y(代述勇), LEI J Q(雷加强), *et al.* Groundwater characteristics and their effects to eco-environmental of desert-oasis transitional zone in western Qira[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2009, **23**(8): 99—103 (in Chinese).
- [18] LIU Y H(刘钰华). Oasis shelter systems in Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resource and Environment* (干旱区资源与环境), 1995, **9**(4): 107—192 (in Chinese).
- [19] ZHANG H N(张鹤年), MAI M T A T(买买提·艾提). The relationship between natural vegetation and soil moisture in the peripheral of Qira oasis[J]. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 1995, **12**(4): 41—43 (in Chinese).
- [20] LI X M(李小明), ZHANG X M(张希明). Water condition and restoration of natural vegetation in the southern margin of the Taklimakan Desert[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2003, **23**(7): 1 449—1 453 (in Chinese).
- [21] GRIES D, ZENG F, FOETZKI A, *et al.* Growth and water relation of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan Desert dunes in relation to depth to a permanent water table[J]. *Plant Cell Environ*, 2003, **26**: 725—736.
- [22] 张希明, MICHAEL R. 塔克拉玛干沙漠边缘植被可持续管理的生态学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] GUO H F(郭海峰), ZENG F J(曾凡江), ARNDT S K, *et al.* Effects of flooding irrigation on the dominant plants and habitat in the Qira oasis[J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2008, **53**: 140—146 (in Chinese).
- [24] ZENG F J(曾凡江), ANDREA F, LI X Y(李向义), *et al.* A preliminary study on the effect of irrigation on water physiology *Tamarix ramosissima* in Cele oasis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(7): 849—853 (in Chinese).
- [25] ZENG F J(曾凡江), ZHANG X M(张希明), *et al.* Seasonal variation of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* water potentials in southern fringe of Taklamakan Desert[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(8): 1 389—1 393 (in Chinese).
- [26] LI Y F(李银芳), YANG Y(杨戈), JIANG J(蒋进). Analyses of water physiology of shelterbelt on farmland of *Populus nigra* var. *thevestina* under rational irrigation[J]. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 1997, **1**: 7—12 (in Chinese).
- [27] XIE T T(谢婷婷), ZHANG X M(张希明), *et al.* Effects of different irrigation on the physiology characteristics of *Haloxylon ammoden-*

- dron in Taklimakan Desert hinterland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 711–716 (in Chinese).
- [28] YAN H L (闫海龙), ZHANG X M (张希明), XU H (许 浩), *et al.* Photosynthetic characteristics response of three plants to drought in Tarim Desert highway shelter belt[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2010, **30**(10): 2 519–2 528 (in Chinese).
- [29] SHAN L SH (单立山), LI Y (李 毅), ZHANG X M (张希明), *et al.* Research on water-consumption characteristics of *Calligonum arborescens* under different irrigation amounts[J]. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2012, **27**(3): 440–449 (in Chinese).
- [30] ZHAO X F (赵新风), XU H L (徐海量), LIU X H (刘新华), *et al.* Characteristics of the root of drip irrigated *Elaeagnus angustifolia* with different irrigation amounts in extremely arid areas[J]. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2012, **31**(5): 646–654 (in Chinese).
- [31] WEN D X (文东新). Improper afforestation in arid and semiarid accelerating desertification[J]. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2002, **15**(4): 76–79 (in Chinese).
- [32] HAO Y G (郝玉光), BAO Y X (包耀贤), LIU M H (刘明虎), *et al.* Studies on the patten and management evaluation of shelterbelt in arid sandy area[J]. *Journal of Arid Land Resource and Environment* (干旱区资源与环境), 2005, **19**(5): 199–203 (in Chinese).
- [33] YUAN S F (袁素芳), CHEN Y N (陈亚宁), LI W H (李卫红). Protective effect of shelterbelts in new-cultivated oasis of arid area: Case study in Karamay agriculture development region[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2007, **27**(4): 600–607 (in Chinese).
- [34] WU L Y (武利玉), WANG H (王 辉), SU D R (苏德荣). Stability evaluation of protection forest system in artificial oasis[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2007, **27**(6): 1 033–1 039 (in Chinese).
- [35] DU Y D (杜尧东), SONG L L (宋丽莉), LIU Z X (刘作新). An overview on the theoretic research of high efficient water use in agriculture[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(5): 808–812 (in Chinese).
- [36] 海米提·依米提, 塔西甫拉提·特依拜, 亚力昆·马合木提. 策勒绿洲地表水资源形成及其变化过程研究[C]//中国科协 2001 年学术年会. 新疆资源环境与可持续发展, 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2001: 14–201.
- [37] TRENBERTH K. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change[J]. *Climatic Change*, 1998, **39**: 667–694.
- [38] GUO H F, ZENG F J, ARNDT S K, *et al.* Influence of floodwater irrigation on vegetation composition and vegetation regeneration in a Taklimakan desert oasis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(2): 156–163.
- [39] GUO Q E (郭全恩), WANG Y Q (王益权), GUO T W (郭天文), *et al.* Correlation of soil salt ions in orchard in semiarid saline regions[J]. *Soils* (土壤), 2009, **41**(4): 664–669 (in Chinese).
- [40] WANG K Q (王克勤), WANG B R (王斌瑞), WANG ZH H (王震洪). The water use efficiency of the Goldspur apple tree[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2002, **22**(5): 723–728 (in Chinese).
- [41] YI Y H (衣英华), FAN D Y (樊大勇), *et al.* The effects of water logging on photosynthesis-related eco-physiological processes in the seedlings of *Quercus variabilis* and *Taxodium ascendens*[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2008, **28**(12): 6 025–6 033 (in Chinese).
- [42] LIU M H (刘明虎), XIN ZH M (辛智鸣), XU J (徐 军), *et al.* Influence of leaf of plant on leaf transpiration and temperature in arid regions[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2013, **37**(5): 436–442 (in Chinese).
- [43] GAO L (高 丽), YANG J (杨 劼), *et al.* Effects of soil moisture levels on photosynthesis transpiration, and moisture use efficiency of female and male plants of *Hippophae rhamnides* subsp. *sinensis*[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2009, **29**(11): 6 025–6 034 (in Chinese).
- [44] PENG S Q (彭素琴), LIU Y L (刘郁林), XIE SH X (谢双喜). Effects of soil drought to stress on water balance maintaining of different varieties of *Flos Ionicerae*[J]. *Hubei Agriculture Science* (湖北农业科学), 2011, **50**(6): 1 119–1 121 (in Chinese).
- [45] KANG H ZH (康宏樟), ZHU J J (朱教君), XU M L (许美玲). Study on water physiological properties of the artificially-planned saplings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Horqin Sandland[J]. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2007, **24**(1): 15–22 (in Chinese).
- [46] ZHANG D Y (张道远), YIN L K (尹林克), PAN B R (潘伯荣). Study on drought-resisting mechanism of *Tamrix* L. and assessing of its potential application[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2003, **23**(3): 252–256 (in Chinese).
- [47] SONG Y X (宋耀选), ZHOU M X (周茂先), ZHANG X Y (张小由), *et al.* Relationship of water potential for dominant plant species in Ejina oasis to environmental factors[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2005, **25**(4): 496–499 (in Chinese).
- [48] PELAEZ D V, BOO R M. Plant water potential for shrubs in Argentina[J]. *Journal of Range Manage.* 1987, **40**(1): 6–9.
- [49] SOBRADO M A, TURNER N C. Comparison of the water relations characteristics of *Heilianthus annuus* and *Heilianthus petiolaris* when subjected to water deficits[J]. *Oecologia*, 1983, **58**: 309–313.
- [50] GUO L SH (郭连生), TIAN Y L (田有亮). Relationship between leaf water potential of eight broadleaved and coniferous young trees in early morning and soil moisture content and drought resistance of three trees[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 1992, **11**(2): 4–7 (in Chinese).
- [51] ZHANG S Q (张岁岐), SHAN L (山 仑). Research progress on water use efficiency of plant[J]. *Agriculture Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2002, **20**(4): 1–5 (in Chinese).
- [52] EHRLINGER J R. Variation in gas exchange characteristics among desert plants[M]//Ecophysiology of photosynthesis. Springer Berlin Heidelberg, 1995: 361–392.
- [53] ZHOU Y D (周雅聃), CHEN SH P (陈世苹), SONG W M (宋维民), *et al.* Water-use strategies of two desert plants along a precipitation gradient in Northwestern China[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2011, **35**(8): 789–800 (in Chinese).
- [54] THOMAS H. Water use characteristics of *Dactylis glomerata* L., *Lolium perenne* L. and *L. multiflorum* Lam. plants[J]. *Annals of Botany*, 1986, **57**(2): 211–223.
- [55] MORECROFT M D, WOODWARD F I. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1990, **41**(10): 1 303–1 308.