

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

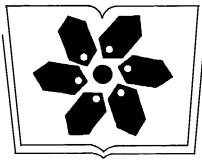
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙,江 洪,陈 健,等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武,王义明,王越雷,等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端,苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容,鄧军锐,莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋,刘万德,苏建荣,等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华,胡 刚,祝介东,等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦,刘金福,何中声,等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪,詹 婧,陈 政,等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山,李 毅,张希明,等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲,冯娟娟,吕素莲,等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟,毕润成,张金屯,等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼,马 丽,孟静静,等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先,师日鹏,韩 坤,等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月,刘雪梅,战丽杰,等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰,张明军,王飞腾,等 (5747)
基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例.....	钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云,邵 晨,颜志刚,等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生,涂小云,陈 超,等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军,郭胜利,南雅芳,等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才,苟亚青,李思远,等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷,李新辉,贾晓平,等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟,曹振东,付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵,陈全震,寿 鹿,等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩,孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏,朱晓东,徐迎碧,等 (5836)
专论与综述	
生态基因组学研究进展.....	施永彬,李钧敏,金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹,殷克东,蔡卫君,等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏,刘 胜,李 涛,等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳,徐继荣,苏建强,等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰,龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪,宋星宇,黄洪辉,等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏,周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍,周 放,覃 玥,等 (5918)
研究简报	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳,俞 霄,曹梦洁,等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民,邱珊莲,林新坚,等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉,李志安,庄 萍,等 (5937)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-09



封面图说: 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种,因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种,因体态优雅、颜色分明,在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征,是传说中的仙鹤,国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征,即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外,全身洁白,头顶皮肤裸露,呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙,只有在日本北海道等地是留鸟,不进行迁徙,这可能与冬季当地人有组织地投喂食物,食物来源充足有关。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108011125

单立山, 李毅, 张希明, 王蕙. 灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响. 生态学报, 2012, 32(18): 5692-5702.

Shan L S, Li Y, Zhang X M, Wang H. Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5692-5702.

灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响

单立山¹, 李 毅^{1,*}, 张希明², 王 蕙¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:利用热平衡式茎流计和压力室对塔里木沙漠公路防护林不同灌溉量条件下 3 种荒漠植物多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 和乔木状沙拐枣 (*Calligonum arborescens*) 的液流变化、水势进行了测定。研究结果表明: (1) 茎干液流速率因灌溉量和物种的不同而异, 同一灌溉量条件下不同物种间表现为多枝怪柳 > 乔木状沙拐枣 > 梭梭, 不同灌溉量条件下 3 种荒漠植物的茎干液流速率均随灌溉量的减少而显著降低。3 种荒漠植物的夜间蒸腾占有一定比例, 表现为梭梭 (18.68%) > 乔木状沙拐枣 (17.48%) > 多枝怪柳 (12.82%), 表明 3 种灌木均可通过夜间液流以补充植物体白天的水分消耗, 表现出较强的抗旱性, 但梭梭形成的叶片-冠-根的水势差相对较大, 夜间补偿流较多, 表现出更强的抗旱性。多枝怪柳和乔木状沙拐枣茎干液流日变化趋势基本相同, 在灌溉量为 35 kg·株⁻¹·次⁻¹ 和 28 kg·株⁻¹·次⁻¹ 时均呈单峰曲线, 液流速率较高且变化幅度较大, 而灌溉量为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹ 时呈双峰曲线, 液流速率较低; 梭梭在不同灌溉量条件下其变化均呈单峰曲线, 即当灌溉量降低到 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹ 时多枝怪柳和乔木状沙拐枣可能出现了水分亏缺, 通过调节气孔张开度或部分关闭降低蒸腾来适应其胁迫条件, 但该灌溉条件下梭梭并没有出现水分亏缺, 表明出较强的抗旱性。 (2) 相同时间不同灌溉量条件下, 3 种荒漠植物的清晨水势和午后水势均随着灌溉量的减少而降低; 整个生长季相同时间同一灌溉量条件下, 3 种防护林植物的清晨、午后水势表现为乔木状沙拐枣 > 多枝怪柳 > 梭梭, 表明 3 种荒漠植物在相同的灌溉条件下梭梭因保持较低的水势表现出较强的抗旱性。 (3) 相同时间不同灌溉量条件下, 3 种荒漠植物单株日耗水量均随着灌溉量的减少而减少, 整个生长季各处理日平均耗水量的动态变化趋势均为单峰型, 7 月份耗水量最大, 表明在塔克拉玛干沙漠腹地最炎热的 7 月份, 3 种防护林植物可以通过增加其蒸腾耗水量来适应干旱的环境条件。

关键词:塔里木沙漠公路; 液流速率; 水势; 耗水量

Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species

SHAN Lishan¹, LI Yi^{1,*}, ZHANG Ximing², WANG Hui¹

1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography; CAS, Urumqi 830011, China

Abstract: The sap flow velocity and leaf water potential of three desert shrubs (*Tamarix ramosissima*, *Haloxylon ammodendron*, and *Calligonum arborescens*), grown under three different volumes of irrigation water in the Tarim Desert Highway shelterbelt, which is located at Taklimakan Desert of China, were measured using a heat-balance stem flow gauge and press chamber. The sap flow velocity differed among the species and among the irrigation volume treatments. Under the same irrigation volume, the sap flow velocity of the three species followed the rank order *T. ramosissima* > *C. arborescens* > *H. ammodendron*. The sap flow velocity of the same species decreased significantly with reduction in irrigation volume. The

基金项目:国家国际科技合作专项(2012DFR30830); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-342-02); 科技部农业科技成果转化资金项目(2009GB2G100375)

收稿日期: 2011-08-01; 修订日期: 2012-02-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyi@gsau.edu.cn

night-time transpiration of the three species as a proportion of total diurnal transpiration followed the order *H. ammodendron* (18.68%) > *C. arborescens* (17.48%) > *T. ramosissima* (12.82%). These results indicate that the water consumption of the three species during the day can be supplemented through the sap flow at night, which results in increased drought resistance. The water potential of leaf-canopy-root of *H. ammodendron* was higher, and the compensatory sap flow at night was higher, than that of the other species and thus conferred stronger drought resistance. The diurnal variations in sap flow velocity of *T. ramosissima* and *C. arborescens* were similar. In both species, the diurnal variation in sap flow velocity was represented by a single-peaked curve, the sap flow velocity values were higher and the extent of variation was wider under irrigation volumes of 35 and 28 kg·plant⁻¹·time⁻¹. With an irrigation volume of 17.5 kg·plant⁻¹·time⁻¹ the diurnal variation in sap flow velocity was represented by a two-peaked curve and the sap flow velocity values were lower than those of the other treatments. The diurnal variation in stem sap flow velocity of *H. ammodendron* showed a single-peaked curve under each of the irrigation volume treatments. These results indicate that water deficit occurs in *T. ramosissima* and *C. arborescens* when irrigation volume decreased to 17.5 kg·plant⁻¹·time⁻¹, and the species adapt to drought stress by adjustment of stomatal conductance. However, water deficit is not found in *H. ammodendron* at an irrigation volume of 17.5 kg·plant⁻¹·time⁻¹ and this species exhibits greater drought resistance. With decreasing irrigation volume, the predawn and midday water potentials of the three species gradually decreased at the same sampling time. The rank order of the three species in terms of their predawn and midday water potential under the same irrigation volumes applied simultaneously was *C. arborescens* > *T. ramosissima* > *H. ammodendron*, which indicated *H. ammodendron* possessed stronger drought resistance because of its lower water potential. With decreasing irrigation volume, the daily water consumption of the three species decreased gradually at the same sampling time. The dynamics of variation in average daily water consumption showed a single curve during the growth period for each species and maximal water-consumption values were recorded in July. These results indicate that the three species can increase their water consumption in July in the hinterland of the Taklimakan Desert, and thus adapt to the arid conditions.

Key Words: Tarim Desert Highway Shelterbelt; sap flow rate; water potential; water consumption

植物的蒸腾作用在植物生命过程中发挥重要的作用,也是植物耗水的重要途径。蒸腾速率是衡量植物水分平衡的重要生理指标,可以反映树种调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的能力,其作为树木的一个重要水分参数,早已受到广大学者的关注,并取得了很多研究成果^[1-4]。然而,水分供应的改变会影响到植物的生理活动、个体形态和适应策略。不同水分状况下许多树木蒸腾速率的研究表明,蒸腾作用随着干旱胁迫的发展而降低,叶片水势与土壤含水量也随干旱胁迫的发展而降低,这是植物适应干旱的重要机制,但不同植物对水分变化的适应性可能有较大不同^[5-6]。

多枝怪柳(*T. ramosissima*)、梭梭(*H. ammodendron*)、乔木状沙拐枣(*C. arborescens*)为荒漠生态系统的优势种,这类植物因长期生长于干旱荒漠环境中,形成了自己独特的生理生态适应特性,可通过根系形态分布的变化^[7-10]、生理生化过程的调节^[11-15]、地上/地下生物量分配及外部形态的改变^[16-17]完成逆境中的生存和繁殖,因此成为塔里木沙漠公路防护林重要物种。防护林自修建以来为沙漠公路竖起了一道绿色屏障,但人工防护林在其生长季节主要靠地下咸水灌溉来维持其水分需求,因此,地下水资源的合理利用、防护林的可持续问题、不同物种采用何种灌溉制度等方面的研究引起人们的广泛关注。塔里木沙漠公路防护林3种荒漠植物自建设以来一直采用相同的灌溉制度,虽然前人对相同灌溉条件下塔里木沙漠公路3种荒漠植物的耗水特性进行了研究^[18],而灌溉量的变化是如何影响防护林植物蒸腾耗水以及不同物种对水分变化是如何适应报道较少,本研究通过对不同灌溉量条件下3种防护林植物蒸腾耗水特性和水势进行对比研究,指出3种荒漠植物对水分变化的适应策略,为塔里木沙漠公路防护林不同物种采用不同灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木沙漠公路沙漠段介于 37°—42°N 和 82°—85°E 之间,基本呈南北向约沿 84°E 穿行于塔克拉玛干沙漠之中。沙漠公路修通后,因风沙活动频繁,沙漠公路将面临流沙侵蚀和流沙掩埋路面等问题,1994 年开始在沙漠油田基地开展防沙绿化先导试验,成功地寻找到就地利用高矿化度地下水进行造林绿化的途径,并筛选出一批适应沙漠环境的防护林植物种。目前主要采用了怪柳、梭梭和沙拐枣 3 种植物作为防护林的主要造林植物种,防护林带全长 436 km,总体宽 72—78 m,林带总面积 3128 hm²,栽植苗木总量 1800 余万株,是世界上第一条建设在大沙漠中的绿色长城。

本研究试验地位于中国科学院新疆生态与地理研究所塔中沙漠研究站(39°06'N,83°40'E)东南的防护林带,该区年平均气温 12.4℃,一年中最热月为 7 月份,月平均气温 28.2℃,最冷月为 12 月份,月平均气温 -8.1℃,极端最高气温 45.6℃,极端最低气温 -22.2℃,全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4621.8℃,无霜期为 283 d,年日照时数 2571.3 h,年降水量 36.6 mm。平均相对湿度 29.4%,潜在蒸发量为 3638.6 mm,平均风速 2.5 m/s,最大瞬时风速为 24.0 m/s。4—8 月为风季,平均风速为 3.2 m/s,大风频繁,风热同期,浮尘扬沙天气十分频繁,这种气候特点导致高温低湿型与大风低湿型干热风并发危害,对人工防护林的成活与生长极为不利。地面景观为流动性高大复合沙垄。土壤特征随地貌不同而有所差异,绝大部分为流动风沙土,盐分含量为 1.26—1.63 g/kg,在下层偶尔出现亚粘土,夹杂在风沙土中间,一般只有 20—60 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地及样株的选择

试验对象为 2001 年种植的防护林带,其构成植物种为多枝怪柳(*T. ramosissima*)、梭梭(*H. ammodendron*)、乔木状沙拐枣(*C. arborescens*),林带为 1 m×2 m 行间混交。在考虑地形及植物生长状况的条件下,选取 3 块样地进行不同的灌溉量处理,防护林主要靠抽取地下咸水进行滴灌灌溉,以维持其正常生长。

1.2.2 试验设计

试验设计包括 3 种灌溉量,每个样地采用 1 种灌溉量形成 3 个处理,处理 1 和处理 2 的灌溉量分别为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹(W1)和 28 kg·株⁻¹·次⁻¹(W2),处理 3 以现行沙漠公路的灌溉管理量为基础,灌溉量为 35 kg·株⁻¹·次⁻¹(W3)。灌溉周期为 5、6、9、10 各月间隔 15d 灌溉 1 次;7、8 月份由于环境条件的恶劣,各月间隔 10d 灌溉 1 次。

1.2.3 参数测定

(1) 茎干液流的测定

本试验采用美国 Dynamax 公司的 Flow32 茎流测定系统测定茎干液流,其测定原理是热平衡法。热平衡法原理及仪器的安装调试见参考文献^[19]。本试验设置每 15 min 记录 1 次液流速率读数,从 4 月 22 日开始对 3 种防护林植物的茎干液流进行连续测量,至 10 月 18 日结束,每处理测定 3 株。

(2) 水势的测定

采用压力室(PMS. Instrument Co. Model 1000, USA)测定植株上部带叶小枝和同化枝的水势,3 种植物每种每次测定 6 株,每株 3 个重复。5—10 月每次灌水之后分别于 6:00 和 14:00 测定一次清晨和午后水势。

(3) 蒸腾耗水量的确定

通过测定某一时段内某植物茎干液流的平均液流通量 F_d (g·cm⁻²·h⁻¹),依据液流通量和茎干截面积 S ,可以计算出某一时段(H)内的单株耗水量:

$$Q = S \times F_d \times H$$

(4) 土壤含水量的测定

5—10 月每次灌水 3 d 后采用土钻取样烘干称重法测定土壤含水量,首先在表土层(≤ 5 cm)直接取样;表土层以下至 300 cm 采用土钻取土样,共分 15 个土层,其中表层以下至 20 cm 为一层,20—300 cm 每 20 cm

为一层共计 14 层。每层重复 3 次,取平均值。

1.3 数据处理

采用统计分析软件 SPSS 进行方差分析,用 Duncan 法进行多重比较,并用字母法标记。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量在供水量之间的差异

图 1 为整个生长季每次灌溉 3d 后各层土壤重量含水量平均值,从图中可以看出,各处理条件下土壤含水量的变化趋势基本相似,表土层至 100 cm 这一段土壤含水量的变化幅度较大,100—300 cm 这一段土壤含水量变化较平缓。土壤含水量最高点都出现在 20—40 cm 这一层。方差分析表明,处理 1 的平均土壤含水量显著低于处理 2 和处理 3 的平均土壤含水量,而处理 2 与处理 3 差异性不显著 ($P < 0.05$ $df = 4$)。对各处理条件下同层的土壤含水量进行方差分析,结果表明:表土层和表土层至 20 cm 这二层各处理间的土壤含水量差异性都不显著,这可能是因为在塔克拉玛干沙漠这一极

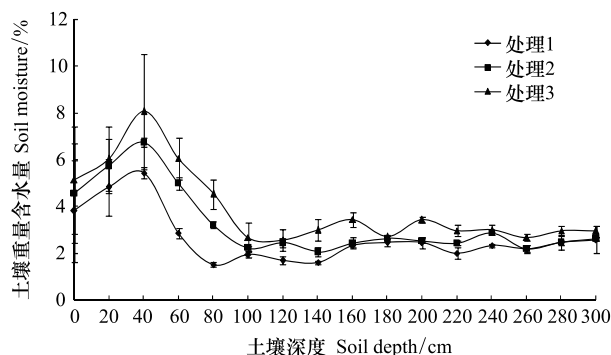


图 1 不同处理土壤重量含水量的变化曲线

Fig. 1 Vertical distribution curve of soil moisture under different treatment

端干旱环境中,由于气温和光照强度较大,沙层表面蒸发强烈,从而使得这一段土壤含水量的差异性不显著。100 cm 以下,各处理条件下同层土壤含水量的差异性也基本不显著,这可能是因为防护林灌溉采取的是滴灌方式,灌溉对 100 cm 以下深层的土壤中水分影响不大,从而使得相同立地条件下深层土壤含水量变化不大。但在 20—40 cm 这一段土层处理 1 和处理 2 的土壤含水量显著低于处理 3 的土壤含水量;40—60 cm 这一段各处理之间都存在显著差异;60—80 cm 这一段处理 1 显著低于处理 2 和处理 3 ($P < 0.05$ $df = 4$)。

2.2 茎干液流在物种及灌溉量之间的差异

表 1 为 7 月上旬连续 3 d 平均茎干液流速率在物种和灌溉量之间的差异,从中可以看出,物种、处理及物种和处理的交互作用对茎干液流均有显著影响,且差异显著。在物种间多枝怪柳和乔木状沙拐枣茎干液流速率无显著差异,但两者均显著大于梭梭;不同灌溉条件下液流速率有显著差异,茎干液流总的趋势是随灌溉量的减少而显著降低,且 3 种荒漠植物在各灌溉量条件下液流速率也有显著差异,均随灌溉量的减少而显著减少。但物种不同液流速率随灌溉量减少幅度有所差异,梭梭随灌溉量的减少其液流速率减少得较大,处理 3 的液流速率比处理 1 减少了 70%,乔木状沙拐枣和多枝怪柳的液流速率随灌溉量的减少幅度相对较小些。

表 1 植物种类及灌溉量对茎干液流速率的影响

Table 1 Effects of plant species and irrigation amounts on stem sap flow velocity

影响因子 Factor	平均茎干液流速率/($\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) Means stem sap flow velocity	df	F	Sig
物种 Species	多枝怪柳 <i>T. ramosissima</i>	2	153.5	0.000 *
	乔木状沙拐枣 <i>C. arborescens</i>			
	梭梭 <i>H. ammodendron</i>			
处理 Treatment	W1	2	153.5	0.000 *
	W2			
	W3			
物种×处理 Species×Treatment		4	6.96	0.000 *

表中数据为平均值±标准误;显著水平 * $P < 0.05$,经 Duncan 多重比较检验,不同字母表示差异显著 ($P = 0.05$),a 依次显著大于 b, c, d;表中 W1 为处理 1 其灌溉量为 $17.5 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{次}^{-1}$,W2 为处理 2 其灌溉量为 $28 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{次}^{-1}$,W3 为处理 3 其灌溉量为 $35 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{次}^{-1}$

2.3 茎干液流的昼夜变化

表 2 为 7 月上旬不同灌溉条件下 3 种荒漠植物茎干液流连续 3 d 白天(6:00—20:00)与夜间(20:00—

6:00)的累计量,从表可以看出,3种荒漠植物夜间蒸腾占有一定比例,表现为梭梭(18.68%)>乔木状沙拐枣(17.48%)>多枝怪柳(12.82%);且同一灌溉量条件下物种之间有差异,也表现为梭梭>乔木状沙拐枣>多枝怪柳,同一物种不同灌溉量的植物之间也存在明显差异,随灌溉量的增加呈增加趋势。

图2为7月上旬连续3d不同灌溉量条件下3种植物茎干液流速率昼夜变化,从图中可以看出,不同物种和水分处理具有不同的茎干液流速率昼夜动态格局,在灌溉量较大的情况下(处理2和处理3)多枝怪柳和乔木状沙拐枣茎干液流速率日变化趋势相同,呈单峰曲线,其液流速率都较高且变化陡峭,从8:00开始液流速率逐渐上升,中午左右达到高峰后开始逐渐降低,夜间均具有一定的液流速率;在灌溉量较小的情况下(处理1),两种灌木的液流速率较低,但日变幅较大,8:00液流速率开始上升,中午左右达到第一个高峰,然后开始逐渐下降,至19:00左右液流速率又略有回升,构成不明显的双峰型曲线,且夜间也保持一定的液流速率。不同灌溉量条件下梭梭茎干液流速率日变化规律基本一致,即从8:00时液流速率开始上升,14:00左右达到高峰,21:00以后降至最低,构成单峰型曲线。

表2 不同灌溉条件下3种荒漠植物的昼夜蒸腾特征

Table 2 Transpiration characteristics under different irrigation amounts day and night

特征 Characteristics	多枝怪柳 <i>T. ramosissima</i>			沙拐枣 <i>C. arborescens</i>			梭梭 <i>H. ammodendron</i>		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
白天液流累计量/(g/cm ²) Quantity of sap flow accumulation in the daytime	932.13	1833.32	2170.62	807.81	1522.12	2036.80	209.64	479.91	679.76
白天液流速率/(g·h ⁻¹ ·cm ⁻²) Sap flow velocity in the daytime	66.58	130.95	155.04	57.70	108.72	145.49	14.97	34.28	48.55
夜间液流累计量/(g/cm ²) Quantity of sap flow accumulation in the night time	124.26	251.66	371.82	163.74	324.70	447.19	43.29	113.89	167.09
夜间液流速率/(g·h ⁻¹ ·cm ⁻²) Sap flow velocity in the night time	12.43	25.17	37.18	16.37	32.47	44.72	4.33	11.39	16.71
夜间液流累积量占全天的比例/% Percent of quantity of sap flow accumulation in the night time to that in the whole day	11.76	12.07	14.62	16.85	17.58	18.00	17.12	19.18	19.73

W1:处理1其灌溉量为17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹; W2:处理2其灌溉量28 kg·株⁻¹·次⁻¹; W3:处理3其灌溉量为35 kg·株⁻¹·次⁻¹

2.4 不同灌溉量条件下3种植物水势的变化规律

从表3中可以看出,清晨、午后水势随灌溉量、季节及物种的不同而异。相同时间不同灌溉量条件下,3种植物的清晨、午后水势均表现为随着灌溉量的减少而降低,且整个生长季3种植物相同时间处理1的水势均显著小于处理3。同一灌溉量条件下,3种植物的清晨、午后水势随季节的变化表现为先减少后增加的变化过程,7月份水势降到最低。从表3中还可以看出,同一灌溉量相同时间不同物种的清晨、午后水势表现为乔木状沙拐枣>多枝怪柳>梭梭。

2.5 不同灌溉量条件下3种植物日耗水量的变化规律

从图3可以看出,在整个生长季,相同时间不同灌溉量条件下3种防护林植物单株日耗水量均随着灌溉量的减少而减小;方差分析表明:多枝怪柳在不同月份单株日耗水量均存在显著差异,10月份处理1的单株日耗水量显著低于处理2和处理3。乔木状沙拐枣在5—9月份单株日耗水量也均存在显著差异,但10月份3种处理差异性都不显著。这可能是因为10月份乔木状沙拐枣已经开始落叶,进入生长末期,灌溉量对其耗水量影响不大。梭梭在整个生长季内各月单株日耗水量差异性比较复杂,在5、9、10月份处理1与处理2、处理3存在显著差异,处理2与处理3不存在显著差异;6、7、8月份3种处理间都存在显著差异。从图3还可以看出,同一灌溉量条件下,不同时期3种防护林植物单株日耗水量的动态变化均为单峰型曲线,7月份耗水量最大。

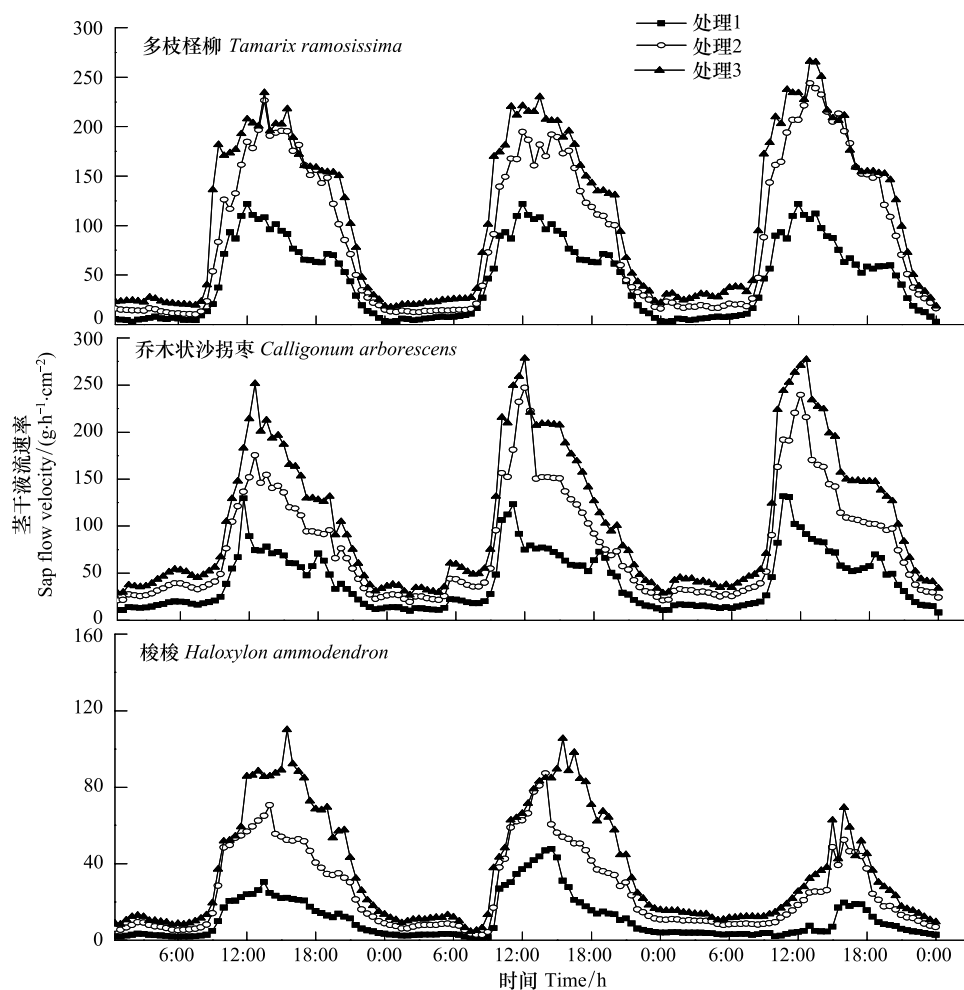


图2 不同灌溉量条件下3种植物茎干液流速率昼夜变化

Fig.2 Diurnal variation of stem sap flow velocity of three plants under different irrigation amounts

表3 不同灌溉量条件下3种植物水势差异性比较/MPa

Table 3 Compared of discrepancy of three plants' leaf water potential under different irrigation amounts

		月份 Month	W1	W2	W3
清晨水势 Predawn water potential	多枝怪柳 <i>T. ramosissima</i>	5	-1.59±0.04 c	-1.34±0.07 b	-1.18±0.04 a
		6	-1.88±0.08 c	-1.53±0.04 b	-1.27±0.07 a
		7	-3.12±0.27 c	-2.83±0.04 b	-2.51±0.07 a
		8	-2.69±0.13 c	-2.29±0.07 b	-1.92±0.06 a
		9	-1.88±0.06 c	-1.67±0.08 b	-1.48±0.04 a
	乔木状沙拐枣 <i>C. arborescens</i>	5	-1.30±0.08 b	-1.16±0.07 ab	-1.14±0.03a
		6	-1.31±0.08 b	-1.22±0.03 ab	-1.20±0.07 a
		7	-1.88±0.06 c	-1.67±0.08 b	-1.48±0.04 a
		8	-1.59±0.02 c	-1.48±0.06 b	-1.38±0.01 a
		9	-1.53±0.04 b	-1.45±0.03 a	-1.37±0.21 a
	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	5	-3.58±0.04 c	-3.36±0.07 b	-3.16±0.04 a
		6	-3.73±0.06 b	-3.57±0.05 ab	-3.43±0.04 a
		7	-4.14±0.08 b	-3.93±0.06 a	-3.81±0.04 a
		8	-4.12±0.05 b	-3.91±0.04 ab	-3.75±0.03 a
		9	-4.00±0.06 c	-3.83±0.03 b	-3.33±0.06 a

续表

		月份 Month	W1	W2	W3
午后水势 Midday water potential	多枝怪柳 <i>T. ramosissima</i>	5	-3.09±0.09 b	-2.96±0.05 ab	-2.45±0.05 a
		6	-3.39±0.04 b	-3.12±0.15 ab	-2.85±0.08 a
		7	-4.19±0.14 b	-3.74±0.07 ab	-3.53±0.09 a
	乔木状沙拐枣 <i>T. ramosissima</i>	8	-3.98±0.02 c	-3.73±0.04 b	-3.48±0.04 a
		9	-3.83±0.04 c	-3.69±0.07 b	-3.39±0.10 a
		5	-2.27±0.06 b	-2.15±0.05 ab	-2.10±0.04 a
	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	6	-2.39±0.04 b	-2.34±0.04 ab	-2.25±0.05 a
		7	-2.56±0.02 b	-2.38±0.07 a	-2.33±0.02 a
		8	-2.52±0.03 b	-2.34±0.02 a	-2.28±0.02 a
		9	-2.48±0.06 b	-2.17±0.05 a	-2.09±0.03 a
		5	-4.06±0.10 b	-3.99±0.10 ab	-3.70±0.14 a
		6	-4.83±0.04 c	-4.63±0.02 b	-4.38±0.10 a
		7	-5.85±0.03 c	-5.58±0.02 b	-5.35±0.03 a
		8	-5.67±0.06 c	-5.53±0.03 b	-5.33±0.02 a
		9	-5.08±0.04 c	-4.90±0.03 b	-4.65±0.04 a

表中数据为平均值±标准误;经 Duncan 多重比较检验,不同字母表示差异显著($P=0.05$),a 依次显著大于 b, c, d;W1 为处理 1 其灌溉量为 $17.5\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{次}^{-1}$,W2 为处理 2 其灌溉量 $28\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{次}^{-1}$,W3 为处理 3 其灌溉量为 $35\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{次}^{-1}$

3 讨论

茎干液流是植物在蒸腾拉力的作用下产生的,因此茎干液流也就是蒸腾流,其变化能够反映出植物蒸腾作用的过程。在不同灌溉量条件下,3 种荒漠植物的茎干液流均表现为随灌溉量的减少而降低,且差异显著,这与郭卫华^[6]等在干旱胁迫下沙棘与中间锦鸡儿的蒸腾速率随干旱胁迫的增强而降低的结果一致;但不同物种的变化幅度各不相同,且物种之间表现出差异,梭梭的茎干液流速率显著小于多枝怪柳和乔木状沙拐枣。

许多研究表明在研究植物的蒸腾特征、尤其是在计算植物的蒸腾总量时,往往把夜间的蒸腾视为零或忽略夜间蒸腾^[20-21],然而岳广阳等^[22]研究发现在科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿两种灌木在夜间均出现了明显的茎干液流活动现象,并且认为这种吸水特性对干旱沙区的两种灌木生长存活有着更加重要的生理意义。郭卫华等^[6]也发现沙棘和中间锦鸡儿夜间的蒸腾占相当大的比例,且物种不同、供水量不同夜间蒸腾存在明显差异,越干旱的环境,植物夜间蒸腾所占的比例趋向越大。对于夜间存在上升液流,不同的学者有不同的解释,一般认为白天树冠蒸腾主要是由于气孔开放,形成了叶片-冠-根的水势差,日落后气孔关闭,此时水势梯度并不立即消失,由于水势差的存在,仍会有部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干及叶,形成夜间补偿流,使树干部位的水分储存得以恢复^[23];并且岳广阳等^[22]认为沙区植被白天蒸腾强烈,植物体往往处于过度失水状态,所以在夜间保持较大的液流活动,可以弥补植物体内的水分匮乏,及时恢复白天过度蒸腾受损细胞的生理机能,增强了耐旱能力。本研究测定了塔里木沙漠公路防护林 3 种荒漠植物的昼夜液流进程,发现 3 种灌木的夜间蒸腾占有一定比例,表现为梭梭(18.68%)>乔木状沙拐枣(17.48%)>多枝怪柳(12.82%),表明在塔克拉玛干沙漠极端干旱的气候条件,白天失去的水分无法及时补充,在夜间仍然有一定的液流以补充植物体白天的水分消耗,均表现出较强的抗旱性,但在相同的灌溉量和环境条件下梭梭的水势最低(表 3),则

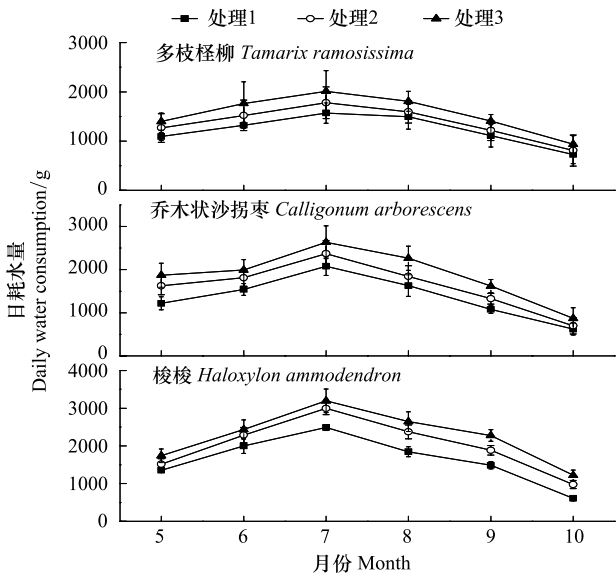


图3 不同灌溉量条件下3种植物日耗水量的月变化
Fig. 3 Monthly variation of daily water consumption of three plants under different irrigation amounts

对于夜间存在上升液流,不同的学者有不同的解释,一般认为白天树冠蒸腾主要是由于气孔开放,形成了叶片-冠-根的水势差,日落后气孔关闭,此时水势梯度并不立即消失,由于水势差的存在,仍会有部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干及叶,形成夜间补偿流,使树干部位的水分储存得以恢复^[23];并且岳广阳等^[22]认为沙区植被白天蒸腾强烈,植物体往往处于过度失水状态,所以在夜间保持较大的液流活动,可以弥补植物体内的水分匮乏,及时恢复白天过度蒸腾受损细胞的生理机能,增强了耐旱能力。本研究测定了塔里木沙漠公路防护林 3 种荒漠植物的昼夜液流进程,发现 3 种灌木的夜间蒸腾占有一定比例,表现为梭梭(18.68%)>乔木状沙拐枣(17.48%)>多枝怪柳(12.82%),表明在塔克拉玛干沙漠极端干旱的气候条件,白天失去的水分无法及时补充,在夜间仍然有一定的液流以补充植物体白天的水分消耗,均表现出较强的抗旱性,但在相同的灌溉量和环境条件下梭梭的水势最低(表 3),则

形成的叶片-冠-根的水势差越大,夜间补偿流越多,弥补了植物体内的水分匮乏,表现出较强的抗旱性。

一般认为,在生长季节,植物蒸腾的昼夜进程,一方面受气象因子昼夜变化的影响,另一方面也与土壤的供水情况密切相关。在土壤供水良好时,蒸腾昼夜变化呈单峰曲线;在土壤供水不足时,植物每日的总蒸腾量减少,并且蒸腾曲线呈双峰形式。原因是土壤水分不足时,叶部水分亏缺提早出现,在中午之前叶肉细胞间隙的水气饱和程度就明显降低,气孔张开度显著减小或部分关闭,蒸腾强度因之大幅度下降^[24]。已有的研究发现在良好的水分条件下,蒸腾速率较高,在中午出现峰值,而在水分亏缺时,植物的蒸腾曲线会出现 2 个峰值^[25-27];李丽霞、杨建伟对沙棘的研究表明,植物的蒸腾速率随着干旱胁迫程度的加重而降低,而蒸腾日进程均呈单峰型曲线^[28-29]。杨鑫光对刺槐的研究发现,植物的蒸腾速率也随着干旱胁迫程度的加重而降低,但其日变化均呈双峰型^[30]。徐先英等^[31]认为干旱胁迫下植物液流流速日变化具有双峰或多峰特性,存在“午休”现象。本研究发现多枝怪柳和乔木状沙拐枣茎干液流日变化在灌溉量为 35 和 28 kg·株⁻¹·次⁻¹ 条件下呈单峰型曲线,无午休现象,说明植物的生长未受到水分胁迫,即该两种灌溉量条件下已能满足两种灌木现阶段生长的需要,从节约水资源的角度出发应该在现行灌溉的基础上适当的降低灌溉量;但该两种灌木在灌溉量为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹ 条件下茎干液流日变化呈双峰型曲线,出现了午休现象,其生长受到了胁迫,因此,在进行该两种灌木灌溉时其灌溉量不能低于 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹。梭梭在 3 种灌溉量条件下茎干液流日变化都呈单峰型曲线,无午休现象,说明梭梭的生长未受到水分胁迫,即在 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹ 灌溉量下已能满足其现阶段生长的需要。

水势是表示植物水分状况的一个指标,它的高低表明植物从土壤或相邻细胞中吸收水分以确保能进行正常的生理活动。清晨水势可以反映植物水分的恢复情况,午后水势可以反映植物受水分胁迫的程度。相同时间不同灌溉量条件下 3 种防护林植物清晨水势和午后水势都表现为:随着灌溉量的减少而降低,这符合植物水分状况的普遍规律,与前人对不同土壤含水量条件下的叶水势随着水分胁迫程度的增加而降低的结果一致^[30]。且灌溉量为 35 kg·株⁻¹·次⁻¹ 的清晨水势显著大于灌溉量为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹,这说明在塔克拉玛干沙漠腹地极端环境条件下,植物在经过一天强蒸腾耗水以后,夜间由于灌溉量较大其土壤水分条件越较好,植物能更好的吸收土壤中的水分来平衡其体内水分的散失,植物水分状况恢复越好;午后水势也表现为灌溉量为 35 kg·株⁻¹·次⁻¹ 显著大于灌溉量为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹,这说明相同环境条件下,灌溉量越少土壤水分条件越差,植物在中午时分强烈的光照以及高温下所能吸收的水分就越少,其水势下降得越大,所受的水分胁迫也就越大。表明在降雨稀少的塔克拉玛干沙漠腹地,由于灌溉量的减少,土壤水分条件的变差,3 种防护林植物为适应这种土壤水分亏缺的环境条件,可以通过降低水势来平衡体内水分。不同灌溉量条件下,3 种防护林植物在整个生长季清晨水势和午后水势表现为先降低后逐渐回升的变化趋势,7 月份水势最低;这主要是因为 5、6 月份各种环境因子相对较好,植物水分条件较好,水势较高;7 月份塔克拉玛干沙漠中环境条件最恶劣,植物水分条件变差,水势降低,8 月份以后,环境条件有所好转,植物的水分状况就有所恢复,水势又升高。在相同的灌溉量和环境条件下,3 种防护林植物的清晨、午后水势表现为乔木状沙拐枣>多枝怪柳>梭梭,表明梭梭持水力越强,抗旱性能越强。

不同灌溉量条件下,3 种植物各月单株日耗水量的变化均表现为:灌溉量为 35 kg·株⁻¹·次⁻¹>灌溉量为 28 kg·株⁻¹·次⁻¹>灌溉量为 17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹,即随着灌溉量的减少,3 种防护林植物的单株日耗水量也减少。这与前人对干旱胁迫下一些树木的单株耗水量的研究结果基本一致^[32]。不同灌溉量条件下,3 种防护林植物在其整个生长季日平均耗水量的动态变化趋势均为单峰型。各灌溉量条件下,7 月份是耗水量最大的月份,因为 7 月份是塔克拉玛干沙漠 1a 内最热的时候,这个时候环境条件最恶劣,植物可以通过增加其蒸腾耗水量来适应干旱的环境条件,研究也发现这一时期植物的水势最低,所受胁迫最大,10 月份以后植物单株日耗水量开始降低,这可能是因为植物在这个时间已经进入了其整个生长季的末期,植物叶片开始枯黄凋落,对水分的需求较小,并且在这一时段各种环境因子也都有所好转,使得植物的蒸腾耗水量降低。

4 结论

夜间液流有助于树木物质运输及其体内水分的补充,它不仅对植物的生长发育具有重要的生理生态学意

义,而且对大尺度植物蒸腾耗水的估算可能产生重要影响^[33]。本研究发现塔里木沙漠公路3种主要荒漠植物夜间蒸腾均占有一并比例,但物种不同又有所差别,梭梭夜间液流量最大,且在相同的灌溉量下其水势最低,这表明相同的环境条件,梭梭比乔木状沙拐枣和多枝怪柳表现出较好的抗旱性。通过前期的研究发现现行灌溉管理模式还存在进行优化的可能性,还有较大的节水空间^[18],且不同植物对水分需求可能有较大不同。马建新等^[34]认为植物在水分胁迫和非胁迫状态下表现出单峰型和双峰型或多峰型不同液流流速变化特征可用于精确确定树木最适灌溉量。对塔里木沙漠防护林物种多枝怪柳和乔木状沙拐枣来讲,在灌溉量为35和28 kg·株⁻¹·次⁻¹时液流流速变化为单峰型,而当灌溉量为17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹其液流流速变化为双峰型,其生长受到胁迫,因此该两种灌木应该降低现行的灌溉量但最低不能低于17.5 kg·株⁻¹·次⁻¹;而对于梭梭而言,3种灌溉量下其液流流速变化均为单峰型,生长没有受到胁迫,其节水空间更大,但在实现灌溉制度的优化的同时一定要保其防护功能的正常发挥。

致谢:感谢塔中沙漠研究站工作人员在实验过程中给予的帮助。

References:

- [1] Levitt J. Responses of Plant to Environment Stresses. New York: Academic Press, 1972, 1: 33-42.
- [2] Philip J R. Plant water relations: some physical aspects. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17(1): 245-268.
- [3] Wang M B, Li H J, Chai B F, Fong C P. A comparison of transpiration, photosynthesis and transpiration efficiency in four tree species in the loess region. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(5): 401-406.
- [4] Ju G S, Liu F J, Zheng S K, Wu X C, Ru C X. A comparison on the transpiration values measured with steady state porometer and other three methods. Forest Research, 2000, 13(4): 360-365.
- [5] Li J Y, Zhou P, Zhao L J. Influence of drought stress on transpiring water-consumption of seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(9): 1380-1386.
- [6] Guo W H, Li B, Zhang X S, Wang R Q. The impact of water stress on transpiration indices in *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia*. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4132-4140.
- [7] Noble P S. Root distribution and seasonal production in the northwestern Sonoran Desert for a C₃ subshrub, a C₄ bunchgrass, and a CAM leaf succulent. American Journal of Botany, 1997, 84(7): 949-955.
- [8] Xu H, Li Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events. Plant and Soil, 2006, 285(1/2): 5-17.
- [9] Shan L S, Zhang X M, Chai Z P, Wei J, Yan H L, Xu H. Response of the distribution of roots of *Tamarix ramosissima* seedlings to irrigation with different volumes. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 213-218.
- [10] Yang X L, Zhang X M, Li Y L, Li S C, Sun H L. Analysis of root architecture and root adaptive strategy in the Taklimakan Desert Area of China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1268-1276.
- [11] Deng X, Li X M, Zhang X M, Ye W H. A study of the gas exchange characteristics of four desert plants. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(5): 605-612.
- [12] Su P X, Zhao A F, Zhang L X, Du M W, Chen H S. Characteristic in photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* of desert species. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(1): 11-17.
- [13] Gong J R, Zhao A F, Huang Y M, Zhang X S, Zhang C L. Water relations, gas exchange, photochemical efficiency, and peroxidative stress of four plant species in the Heihe drainage basin of Northern China. Photosynthetica, 2006, 44(3): 355-364.
- [14] Yan H L, Zhang X M, Xu H, Yao S J. Responses of *Calligonum arborescens* photosynthesis to water stress in Tarim Highway Shelterbelt. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 460-465.
- [15] Yan Q D, Su P X, Chen H B, Zhang L M. Comparative studies on crystal idioblasts of five desert C₄ plants. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(4): 873-882.
- [16] Wei J, Zhang X M, Shan L S, Yan H L, Liang S M. Seedling growth dynamic of *Haloxylon ammodendron* and its adaptation strategy to habitat condition in hinterland of desert. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2007, 50(Suppl I): 107-114.
- [17] Xu H, Li Y, Xu G Q, Zou T. Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. Plant, Cell and Environment, 2007, 30(4): 399-409.
- [18] Xu H, Zhang X M, Yan H L, Liang S M, Shan L S. Plants water status of the shelterbelt along the Tarim Desert Highway. Chinese Science

- Bulletin, 2008, 53(Suppl II): 146-155.
- [19] Xu H, Zhang X M, Wang Y D, Wei J, Liang S M. Study on water consumption of *Calligonum arborescens* Litv. in shelterbelts along the Tarim Desert Highway. Arid Zone Research, 2006, 23(2): 216-222.
- [20] Hebert M T, Jack S B. Leaf area index and site water balance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) across a precipitation gradient in East Texas. Forest Ecology and Management, 1998, 105(1/3): 273-282.
- [21] Xiao C W, Zhou G S. Study on the water balance in three dominant plants with simulated precipitation change in Maowusu Sandland. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(1): 82-88.
- [22] Yue G Y, Zhang T H, Zhao H L, Niu L, Liu X P, Huang G. Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3205-3213.
- [23] Li H T, Xiang L, Xia J, Lin Y M, Liang T. Applying the heat dissipation technique to study the sap flow of *Pinus elliottii* in the red earth area of subtropical China. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10): 31-38.
- [24] Kang H Z, Zhu J J, Xu M L. Study on water physiological properties of the artificially-planned saplings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Horqin Sandland. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 15-22.
- [25] Walter H, Box E O. The Desert of Central Asia. Elsevier, 1982: 193-236.
- [26] Xu H, Zhang X M, Yan H L, Yao S J. Stem sap flow and water consumption of *Tamarix ramosissima* in hinterland of Taklimakan Desert. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 735-741.
- [27] Zhang D Y, Yin L K, Pan B R. Study on drought-resisting mechanism of *Tamrix* L. and assessing of its potential application. Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 252-256.
- [28] Li L X, Liang Z S, Han R L. Effect of soil drought on the growth and water use efficiency of *Seabuckthorn*. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 296-302.
- [29] Yang J W, Han R L, Wei Y K, Sun Q, Liang Z S. Water relation and growth of *Seabuckthorn* and *Poplar* under different soil water content. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(3): 579-586.
- [30] Yang X G, Fu H, Zhang H R, Zhao J D. Effect of soil water stress on leaf water potential and biomass of *Zygophyllum xanthoxylum* during seedling stage. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(2): 37-41.
- [31] Xu X Y, Sun B P, Ding G D, Guo S J, Chai C W. Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895-905.
- [32] Shan C J, Hao W F, Liang Z S, Han R L. Effect of different droughty soil on water physiology and growth index of locust seedling. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 14(2): 44-49.
- [33] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, Zhang W J, Zhang X F, Dong K Y, Wang G Y. Nocturnal sap flow of four urban greening tree species in Dalian, Liaoning Province, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 535-546.
- [34] Ma J X, Chen Y N, Li W H, Huang X. Characteristics of sap flow of 4 typical shelter-belt tree species and it's relationships with environmental factors in the desert region of Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 579-586.

参考文献:

- [3] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 冯彩平. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401-406.
- [4] 巨关升, 刘奉觉, 郑世锴, 吴晓春, 汝成祥. 稳态气孔计与其它3种方法蒸腾测值的比较研究. 林业科学研究, 2000, 13(4): 360-365.
- [5] 李吉跃, 周平, 招礼军. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水的影响. 生态学报, 2002, 22(9): 1380-1386.
- [6] 郭卫华, 李波, 张新时, 王仁卿. 水分胁迫对沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 和中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 蒸腾作用影响的比较. 生态学报, 2007, 27(10): 4132-4140.
- [9] 单立山, 张希明, 柴仲平, 魏疆, 闫海龙, 许浩. 多枝怪柳幼苗根系分布对灌溉量的响应. 干旱区研究, 2007, 24(2): 213-218.
- [10] 杨小林, 张希明, 李义玲, 李绍才, 孙海龙. 塔克拉玛干沙漠腹地3种植物根系构型及其生境适应策略. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1268-1276.
- [11] 邓雄, 李小明, 张希明, 叶万辉. 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.
- [12] 苏培玺, 赵爱芬, 张立新, 杜明武, 陈怀顺. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. 西北植物学报, 2003, 23(1): 11-17.
- [14] 闫海龙, 张希明, 许浩, 姚世军. 塔里木沙漠公路防护林植物沙拐枣气体交换特性对干旱胁迫的响应. 中国沙漠, 2007, 27(3): 460-465.
- [15] 严巧娣, 苏培玺, 陈宏彬, 张岭梅. 五种C₄荒漠植物光合器官中含晶细胞的比较分析. 植物生态学报, 2008, 32(4): 873-882.
- [19] 许浩, 张希明, 王永东, 魏疆, 梁少民. 塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣耗水特性. 干旱区研究, 2006, 23(2): 216-222.

- [22] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 牛丽, 刘新平, 黄刚. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征. 生态学报, 2006, 26(10): 3205-3213.
- [23] 李海涛, 向乐, 夏军, 林耀明, 梁涛. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究. 林业科学, 2000, 42(10): 31-38.
- [24] 康宏樟, 朱教君, 许美玲. 科尔沁沙地樟子松人工林幼树水分生理生态特性. 干旱区研究, 2007, 24(1): 15-22.
- [26] 许浩, 张希明, 闫海龙, 姚世军. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝怪柳茎干液流及耗水量. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735-741.
- [27] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 怪柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价. 中国沙漠, 2003, 23(3): 252-256.
- [28] 李丽霞, 梁宗锁, 韩蕊莲. 土壤干旱对沙棘苗木生长及水分利用的影响. 西北植物学报, 2002, 22(2): 296-302.
- [29] 杨建伟, 韩蕊莲, 魏宇昆, 孙群, 梁宗锁. 不同土壤水分状况对杨树、沙棘水分关系及生长的影响. 西北植物学报, 2002, 22(3): 579-586.
- [30] 杨鑫光, 傅华, 张洪荣, 赵纪东. 水分胁迫对霸王苗期叶水势和生物量的影响. 草业学报, 2006, 15(2): 37-41.
- [31] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 郭树江, 柴成武. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- [32] 单长卷, 郝文芳, 梁宗锁, 韩蕊莲. 不同土壤干旱程度对刺槐幼苗水分生理和生长指标的影响. 西北农业学报, 2005, 14(2): 44-49.
- [33] 陈立欣, 张志强, 李湛东, 张文娟, 张晓放, 董克宇, 王国玉. 大连4种城市绿化乔木树种夜间液流活动特征. 植物生态学报, 2010, 34(5): 535-546.
- [34] 马建新, 陈亚宁, 李卫红, 黄湘. 荒漠防护林典型树种液流特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2010, 30(3): 579-586.

CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs (<i>Paa spinosa</i>)	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i>	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
Review and Monograph	
Advances in ecological genomics	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i>	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal)	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
Scientific Note	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i>	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinjian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元