

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 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 4 期      2012 年 2 月      (半月刊)

## 目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响.....	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价 .....	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征 .....	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟.....	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应.....	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应 .....	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素.....	田凤霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.....	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程.....	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系 .....	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状.....	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征.....	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响.....	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅.....	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应.....	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局.....	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较.....	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性 .....	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响 .....	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境.....	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系.....	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性.....	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局.....	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立.....	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较.....	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表 .....	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响 .....	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别.....	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO <sub>2</sub> 通量的季节特征.....	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例.....	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
<b>专论与综述</b>		
湿地退化研究进展.....	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评 .....	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
<b>问题讨论</b>		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性 .....	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响 .....	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
<b>研究简报</b>		
祁连山典型灌丛降雨截留特征.....	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法.....	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



**封面图说:** 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才发现的新鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012281867

石松利,王迎春,周红兵,周健华. 濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较. 生态学报, 2012, 32(4): 1163-1173.

Shi S L, Wang Y C, Zhou H B, Zhou J H. Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. . Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1163-1173.

## 濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数 和光合特性的比较

石松利<sup>1,2</sup>, 王迎春<sup>1,\*</sup>, 周红兵<sup>1,2</sup>, 周健华<sup>1,3</sup>

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2. 包头医学院, 包头 014060;

3. 呼伦贝尔市环境监测中心站, 呼伦贝尔 021008)

**摘要:**运用压力室-容积技术(P-V 技术)对西鄂尔多斯地区特有的濒危植物四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)和生长于同一生境的近缘种霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.)的 7 个水分关系参数饱和含水量时最大渗透势( $\Psi_s^{\text{sat}}$ )、初始质壁分离时的渗透势( $\Psi_s^{\text{dp}}$ )、初始质壁分离时渗透水相对含量(ROWC<sup>dp</sup>)、初始质壁分离时的相对含水量(RWC<sup>dp</sup>)、质外体水的相对含量(AWC)、束缚水与自由水的比值( $V_a/V_0$ ),以及细胞最大弹性模量( $\epsilon^{\text{max}}$ )进行了测定,同时利用 Li-6400 光合作用测定系统测定了二者叶片气体交换参数的日变化,从生理生态学角度探讨了二者生存力、适应力的差异。结果表明:1)四合木的  $\epsilon^{\text{max}}$ 、ROWC<sup>dp</sup>值和 RWC<sup>dp</sup>值均显著低于霸王,而  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值  $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值、AWC 和  $V_a/V_0$ 高于霸王。二者保持膨压的能力和方式不同,四合木表现为较小的细胞体积和较强的持水能力,主要以高的组织弹性来保持膨压,而霸王主要以增加细胞质浓度的渗透调节来维持膨压,弹性调节较弱。且四合木保持最大膨压的能力和维持最低膨压的极限渗透势低于霸王,耐旱性弱于霸王。2)自然条件下,四合木和霸王叶片的光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )日进程均呈“双峰”曲线,主峰出现在 11:00 时,次峰出现在 15:00 时左右,光合作用的午间降低是由气孔导度( $G_s$ )降低造成的。二者相比,四合木光合速率和水分利用效率(WUE)低于霸王,光合能力和对干旱环境适应能力弱于霸王。研究表明四合木在生理生态学方面的生存力、适应力弱于霸王。

**关键词:**四合木;霸王;水分关系参数;叶片气体交换参数

### Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.

SHI Songli<sup>1,2</sup>, WANG Yingchun<sup>1,\*</sup>, ZHOU Hongbing<sup>1,2</sup>, ZHOU Jianhua<sup>1,3</sup>

1 College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

2 Baotou Medical College, Inner Mongolia, Baotou 014060, China

3 HunLunbeier Institute of Environmental Science, Inner Mongolia, HunLunbeier 021008, China

**Abstract:** *Tetraena mongolica* Maxim. belongs to a monotypic genus in the *Zygophyllaceae* and is a super xerophyte and a relic subshrub of the Tethys. This species is endemic to a very limited area of West Erosds region in the western part of the Ordos Plateau in China. The limited distribution of this subshrub makes it an important conservation target. It is ranked as a second-class national endangered plant species as defined by China's Red Book (endangered species list) and has been considered unique from both a plant taxonomical and regional systematics points of view. Also, from a practical standpoint, it plays an important role as a windbreaker and stabilizer of sand and contributes to soil conservation and the regulation of

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30460033,30760052)

收稿日期:2010-12-28; 修订日期:2011-08-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ycwang@imu.edu.cn



hydrological regimes. Populations of *T. mongolica* serve as an important element in ecosystem functioning and buffer local ecosystems against desertification. Deterioration of the environment and human activities in recent years have resulted in a high degree of landscape fragmentation and habitat loss in the area. As a result, population size and density of *T. mongolica* have been decreasing dramatically and populations are gradually being replaced by the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. *T. mongolica* has become severely endangered. So research on the conservation biology of this species has attracted attention. A comparative analysis in *T. mongolica* and its relative *Z. xanthoxylon* are ecologically important and will help document the threats to *T. mongolica* and offer a scientific basis for establishing protective measures for this species. One way to show the differentiation of adaptability in different plants is to study the characteristics of photosynthesis and water metabolism in these species. In this paper, seven water relation parameters were measured: osmotic potential at saturated point ( $\Psi_s^{\text{sat}}$ ), osmotic potential at turgor loss point ( $\Psi_s^{\text{tlp}}$ ), relative osmotic water content at turgor loss point (ROWC<sup>tlp</sup>), relative water content at turgor loss point (RWC<sup>tlp</sup>), relative content of apoplastic water (AWC), bound water/free water ( $V_a/V_0$ ), and maximum bulk modulus of elasticity ( $\epsilon^{\text{max}}$ ). The press-volume technique was used and photosynthetic characteristics were measured with a Li-6400 portable photosynthesis system. The goal was to compare the endangered plant *T. mongolica* to its relative *Z. xanthoxylon* to investigate differences in their viability and adaptability. The results show, first, *T. mongolica* had a higher  $\Psi_s^{\text{sat}}$ ,  $\Psi_s^{\text{tlp}}$ , AWC,  $V_a/V_0$  and lower  $\epsilon^{\text{max}}$ , ROWC<sup>tlp</sup>, RWC<sup>tlp</sup> than *Z. xanthoxylon*. The two plants maintained their turgor pressure in different ways. *T. mongolica* maintains turgor pressure by elastic adjustment with small changes in cell volume and a strong ability to retain water. *Z. xanthoxylon* uses osmotic adjustment, which had a weak adjustment ability. *T. mongolica* is less able to maintain turgor pressure and has a lower water potential, which gives it a lower level of drought resistance than *Z. xanthoxylon*. Second, the curves of the diurnal change in the net photosynthetic rates ( $P_n$ ) and transpiration rates ( $T_r$ ) of these two plants had double peaks. The first peak appeared at 11:00 and the second at 15:00 with declines in  $P_n$  and  $T_r$  observed at midday in these two plants. When compared with *Z. xanthoxylon*, *T. mongolica* had lower a  $P_n$  and water use efficiency, which demonstrates its weaker photosynthetic capability and lower adaptability to a drought prone environment. The results revealed the physio-ecological viability and drought adaptability of *T. mongolica* were weaker than *Z. xanthoxylon*.

**Key Words:** *Tetraena mongolica* Maxim., *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim., water related parameters, leaf gas exchange parameters

西鄂尔多斯地区作为我国西部草原化荒漠区的一个特殊区域,因集中分布着一批国家重点保护的珍稀濒危植物而被称为古地中海孑遗植物避难所而备受关注<sup>[1]</sup>。其中四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)为蒺藜科(*Zygophyllaceae*)单种属的超旱生小灌木,国家二级珍稀濒危植物,我国特有和狭域分布种,全世界仅在亚洲荒漠区的西鄂尔多斯地区有少量分布。它的存在对本地区生物多样性起源、古植物区系、生物进化和环境演变研究具有重要的学术价值和诊断意义,受到国内外生物学、生态学和地理学等学科研究者的极大关注。霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.)为蒺藜科霸王属超旱生小灌木,是亚洲中部荒漠区的特有植物属,广泛分布于荒漠、草原化荒漠及荒漠化草原地带,具有重要的生态和饲用价值,作为古老残遗植物有十分重要的研究价值。近年来由于自然环境恶化和人为因素破坏,四合木种群在分布区内破碎化程度逐渐加剧,生境适宜性已明显下降,濒危状况日益严重,因此对该种群的濒危机制及其保护的研究具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

植物种濒危过程是生活史各个环节以及竞争力、适应力等综合生存能力与环境因子相互作用的生态学过程,应该从植物生活史的不同侧面揭示其内在的规律<sup>[3]</sup>。研究濒危植物的竞争力和适应力,特别是以近缘广布种为对照进行比较研究,可为揭示濒危植物内在濒危机制提供重要参考。野外观察显示,四合木景观破碎化后形成的空斑有被其近缘种霸王所占据的趋势。迄今已进行了种群脆弱性分析、濒危种群进化潜能分析、

生活史适应机制、传粉生物学、西鄂尔多斯地区的生境适宜性特征方面的研究<sup>[2,4-7]</sup>,而从生理生态学角度对四合木生存力、适应力研究较少,更缺乏与近缘种霸王的比较研究。

植物生理生态学能够把濒危植物生长的环境因子与其生理过程结合起来,进而从一个侧面揭示其濒危原因和机理。光合作用是植物生长和一切代谢活动的生理基础,影响着生长、发育、生殖等植物个体生理过程和生存竞争、环境适应和演化等植物物种的发展过程。进行植物光合特性与水分代谢特性研究是揭示不同植物对环境生态适应性机制的有效途径。四合木分布区西鄂尔多斯地区是一个集干旱、少雨、风大等多种环境胁迫的综合体,水分缺乏成为植物生存的限制性因子。因此在该区研究植物水分生理生态特征显得尤为重要,在这方面压力-容积(PV)技术有着不可取代的优势<sup>[8-9]</sup>,借此可获得许多有实用价值而用其它方法又不易测得的植物水分指标,这些指标在阐明植物对干旱的适应性以及如何进行渗透调节方面具有重要意义。自王万里<sup>[9]</sup>1984年对PV技术的基本原理、测定方法及绘制方法作了初步报道后,被广泛应用于林木抗旱性研究<sup>[10-13]</sup>。近年来,通过PV技术对荒漠植物耐旱性的研究已经展开<sup>[14-17]</sup>,笔者已运用该技术对四合木的水分参数的季节变化及生境间差异性进行了研究<sup>[18]</sup>。本文在前文<sup>[18]</sup>工作的基础上,通过进一步对四合木和同生境下近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较研究,对二者水分生理生态适应机理做进一步的探讨,以期揭示四合木的濒危机理以及保护措施的制定提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于西鄂尔多斯地区(106°35′—107°25′E, 39°20′—40°15′N),该区大陆性气候明显,为极干旱荒漠区。春季干旱多大风天气,春季降水量只占全年降水量的12%—16%,春旱突出。≥17 m/s的大风日在30 d以上,伴以沙尘天气,加重春旱。夏季短促,多温热天气。平均年降水量为139.8 mm,分配极不均匀,7月和8月两月降水量占全年降水量的47%,平均蒸发量为3127.7 mm,是降水量的23倍。秋季气温骤降,多晴爽天气,冷空气不断南下,加之地面辐射冷却作用,气温下降很快<sup>[2]</sup>。全年日照总时数平均为2792.2 h,年平均温度为9.8℃,极端最高气温达39.4℃,极端最低气温为-32.6℃,地面最高温度达63.4℃;湿润系数为0.13。

### 1.2 样地选择

前期研究中<sup>[18-19]</sup>,选取了分布区内比较有代表性的低山、台地、丘陵、高平原、倾斜平原5个典型生境为研究样地,通过对其不同生境四合木种群特征、土壤理化性质及水分参数研究,发现以不同生境土壤理化性质和水分参数进行聚类分析的结果相一致,低山、台地、丘陵种群为一类(A类),土壤水分和养分较高,耐旱性较弱;高平原、倾斜平原为一类(B类),土壤水分和养分较低,耐旱性较强,优势种为四合木和霸王。因此本文选取四合木和霸王集中生长的B类样地即高平原、倾斜平原研究样区,对二者水分参数和光合特性进行比较研究,样地特征见表1。

表1 样地及其特征

Table 1 Characters in research plots

种群编号 Population No	定位 Location	海拔 Altitude/m	生境特点 Environmental characters
I	N40°14'58" E 107°05'36"	1150	高平原;土壤为沙砾质;优势种为四合木、霸王,伴生种以无芒隐子草 <i>Cleistogenes songarica</i> 、沙生针茅 <i>Stipa glareosa</i> 、绵刺 <i>Potaninia mongolica</i> 和长叶红砂 <i>Reaumuria trigyna</i> 为主
II	N40°09'07" E 106°54'44"	1065	倾斜平原;土壤为沙砾质;优势种为四合木和霸王,伴生种以半日花 <i>Helianthemum soongoricum</i> 、绵刺、蒙古葱 <i>Allium mongolicum</i> 、糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 为主

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 水分参数测定方法

2008年9月中旬在选定的两个样地采集四合木、霸王植株的南端向阳面顶端带叶小枝,每个样地选取3

个 50 m×50 m 的样方,在每个样方内随机取样,各样地样本重复数为 3,每次均为清晨日出前取样。采样后,立即将植物样品放入密封保鲜袋内,并置于保鲜冰盒内(防止水分散失),随即回到室内用精密天平(0.0001/200g)称取鲜重,进行茎干环切处理之后,将小枝切口插入盛有清水的广口瓶放入暗桶,于阴暗高湿的条件下饱和吸水一昼夜。

实验所用压力室为兰州大学研制的 ZLZ-5 型, $P$ - $V$  曲线的制作参照王万里<sup>[9]</sup>介绍的 Hammel 法,以木质部溢出水的体积( $\text{cm}^3$ )为横坐标,平衡压(MPa)的倒数为纵坐标绘图,便得到  $P$ - $V$  曲线图(图 1)。所作  $P$ - $V$  曲线的曲线部分相关系数均在 0.997 以上,直线部分相关系数均在 0.999 以上,并依所绘  $P$ - $V$  曲线求得各水分关系参数: $\Psi_s^{\text{sat}}$ (饱和含水量时的最大渗透势)、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ (初始质壁分离时的渗透势)、 $\text{ROWC}^{\text{dp}}$ (初始质壁分离时渗透水相对含量)、 $\text{RWC}^{\text{dp}}$ (初始质壁分离时的相对含水量)、 $\text{AWC}$ (质外体水的相对含量)、 $V_a/V_0$ (束缚水与自由水的比值)、 $\varepsilon^{\text{max}}$ (细胞最大弹性膜)。本实验的吸水小管重以及样品饱和和重和干重均用 Sartorius 电子分析天平(0.0001/200g)测定。

### 1.3.2 叶片气体交换特征测定方法

试验于 2008 年 5 月中旬晴朗无风天气进行,在 I 号样地选择 5 株生长良好的活体四合木和霸王成株作为研究材料,每株选取向阳中部正常生长的成熟叶片各 3 片,叶位一致。采用美国 LICOR 公司生产的 LI-6400 便携式光合作用测定系统进行净光合速率( $P_n, \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),蒸腾速率( $T_r, \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、气孔导度( $G_s, \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i, \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )等生理指标测定,叶温( $T_a, ^\circ\text{C}$ )、空气相对湿度( $RH, \%$ )、光合有效辐射( $\text{PAR}, \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、大气相对湿度( $RH, \%$ )、大气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a, \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )、大气水汽压亏缺( $\text{VPD}, \text{KPa}$ )等微气象参数由该仪器同时记录。测定中以空气  $\text{CO}_2$  浓度作为气源,变化范围为 370—400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,温度 12—29  $^\circ\text{C}$ ,湿度 13%—42%。用 LI-3000 型滚动式叶面积仪(LICOR, Inc. Lincoln, NE, USA)测定叶面积。测定时间为每日 7:00—19:00 每 2 h 测量 1 次,中午加密,每一带叶枝条每次测定 5 个重复,数据处理时取其平均值作为该时刻的实测值。

水分利用效率(WUE)根据公式: $\text{WUE} = P_n/T_r$  计算。气孔限制值( $L_s$ , 相对单位)按照 Berry 和 Downton 的方法<sup>[20]</sup>,根据仪器输出的  $C_i$  和  $C_a$  的数值利用公式  $L_s = (C_a - C_i)/C_a$  进行计算。

### 1.4 数据处理

该实验中主要用 Excel2003 软件和 SPSS13.0 软件对各水分关系参数进行求得及处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和新复极差法(Duncan)进行差异显著性比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 四合木和霸王水分参数的比较

#### 2.1.1 饱和含水量时的最大渗透势( $\Psi_s^{\text{sat}}$ )和初始质壁分离时的渗透势( $\Psi_s^{\text{dp}}$ )

饱和含水量时的最大渗透势( $\Psi_s^{\text{sat}}$ )值说明某个生长阶段细胞内可溶性物质所能达到的浓度,与植物的抗旱能力有关。 $\Psi_s^{\text{sat}}$  值越低(绝对值越大),细胞浓度越大,保持最大膨压值能力越强,植物抗旱性越强。图 2 所示,四合木  $\Psi_s^{\text{sat}}$  的平均值为(-1.7846 MPa),霸王为(-2.001 MPa),两种植物相比,两个样地四合木  $\Psi_s^{\text{sat}}$  均高于霸王,经统计学检验差异性均显著( $P < 0.05$ )。表明相同生境下四合木体内细胞质浓度要低于霸王,保持最大膨压的能力弱于霸王。四合木  $\Psi_s^{\text{sat}}$  在两个样地之间表现为 I 号 > II 号,差异性均显著( $P < 0.05$ ),霸王  $\Psi_s^{\text{sat}}$  在两个样地间差异性不显著。

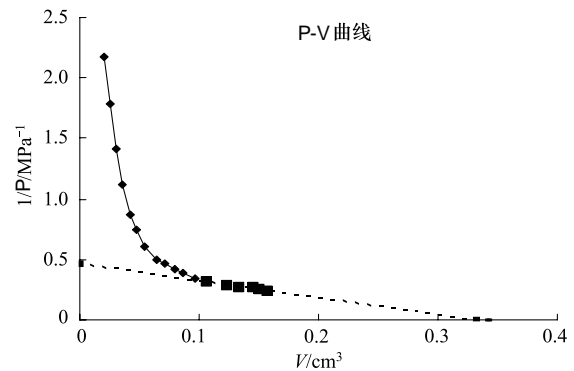


图 1 四合木  $P$ - $V$  曲线图

Fig. 1 A diagram of the Pressure-volume curve of *Tetraena mongolica*

初始质壁分离时的渗透势( $\Psi_s^{dp}$ )亦称为零膨压点时的渗透势,反映了植物维持最低膨压的极限渗透势, $\Psi_s^{dp}$ 值越低(负值),则表明植物叶片能在更严重的干旱胁迫下保持正的膨压。按一般的观点<sup>[8,21]</sup>, $\Psi_s^{dp}$ 值是衡量植物抗旱性的最佳指标, $\Psi_s^{dp}$ 值越低,意味着植物的抗旱性越强。图2所示,四合木 $\Psi_s^{sat}$ 的平均值为(-2.9839 MPa),霸王为(-3.1035 MPa),两种植物相比,两个样地四合木 $\Psi_s^{dp}$ 均高于霸王,经统计学检验差异性均显著( $P < 0.05$ )。说明相同生境下四合木忍耐低水势的能力弱于霸王,四合木能够维持膨压的水势阈值低于霸王。同一植物 $\Psi_s^{dp}$ 在两个样地之间差异性均不显著。

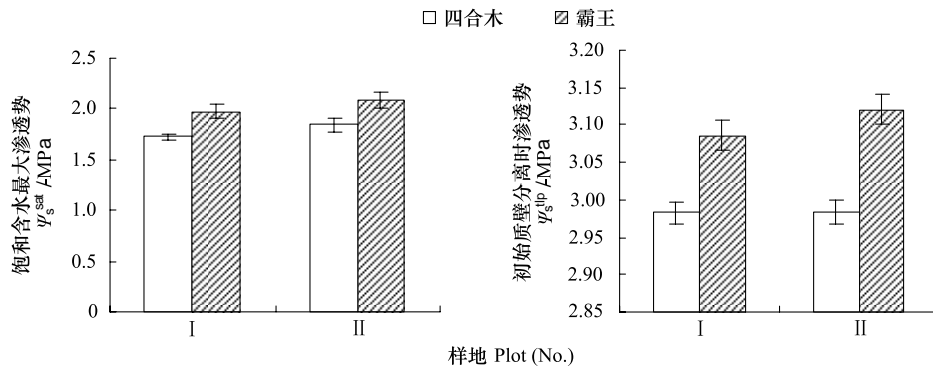


图2 四合木和霸王饱和含水量时的最大渗透势 $\Psi_s^{sat}$ 和初始质壁分离时的渗透势 $\Psi_s^{dp}$

Fig. 2 The  $\Psi_s^{sat}$  and  $\Psi_s^{dp}$  values of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylon*

### 2.1.2 初始质壁分离时渗透水相对含量(RWC<sup>dp</sup>)与相对含水量(RWC<sup>dp</sup>)

RWC<sup>dp</sup>和RWC<sup>dp</sup>表明植物细胞组织在生命临界点时的水分状况,在一定程度上反映了植物组织忍耐脱水的能力<sup>[11]</sup>。一般认为<sup>[21]</sup>,RWC<sup>dp</sup>值和RWC<sup>dp</sup>值越低,表明组织细胞在很低的渗透水下才发生质壁分离,植物忍耐水分胁迫能力越强。由于植物组织代谢所利用的主要是渗透水,因此RWC<sup>dp</sup>值的大小更能客观的反映植物细胞对脱水的忍耐能力<sup>[22]</sup>。图3所示,两种植物相比,两个样地四合木RWC<sup>dp</sup>和RWC<sup>dp</sup>值均低于霸王,经统计学检验差异性均显著( $P < 0.05$ ),说明相同生境下四合木组织细胞忍耐脱水的的能力强于霸王。同一植物RWC<sup>dp</sup>和RWC<sup>dp</sup>值在两个样地之间差异性均不显著。

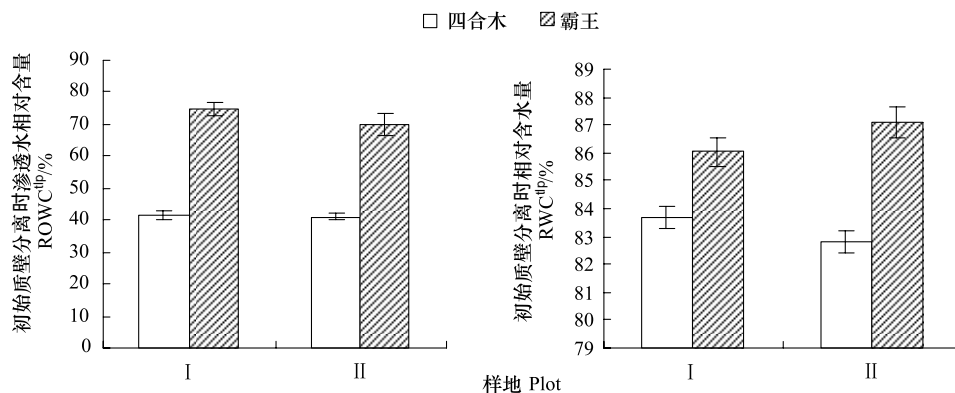


图3 四合木和霸王初始质壁分离时渗透水相对含量RWC<sup>dp</sup>与相对含水量RWC<sup>dp</sup>

Fig. 3 The RWC and RWC values in *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylon*

### 2.1.3 质外体水的相对含量(AWC)和束缚水与自由水的比值( $V_a/V_o$ )

AWC是指原生质体以外的水分,又称束缚水,与其相对应的是存在于细胞质和液胞中的渗透水(自由水)。质外体水主要与某些大分子物质结合或存或存在于细胞壁中。通常认为<sup>[21]</sup>,在溶质含量不变的情况下,AWC值越大,组织的渗透势也越低,吸水和保水能力也越强,植物的抗旱性也越强。在细胞总水量一定



时,渗透调节也可以通过自由水与束缚水相互转化的方式来实现。一般认为,束缚水与自由水比值( $V_a/V_o$ )大的植物耐旱性强,旱生植物具有较高的束缚水与自由水比值<sup>[23]</sup>。图4所示,两种植物相比,两个样地四合木 AWC 和  $V_a/V_o$  值均高于霸王,经统计学检验差异性均显著( $P<0.05$ ),说明相同生境下四合木较霸王有更大的质外体水相对含量,具有较强的持水能力。四合木  $V_a/V_o$  值在两个样地之间表现为 I 号 $<$ II 号,差异性显著( $P<0.05$ ),霸王  $V_a/V_o$  值在两个样地间差异性不显著。

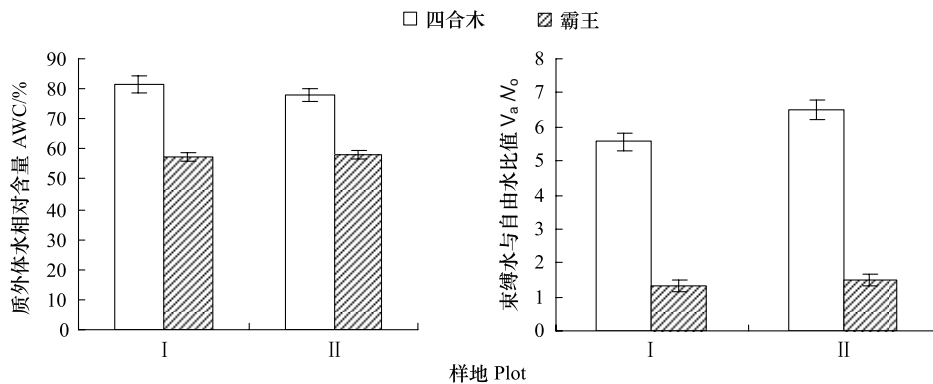


图4 四合木和霸王质外体水相对含量 AWC 和束缚水与自由水比值  $V_a/V_o$

Fig. 4 AWC and  $V_a/V_o$  in *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylon*

#### 2.1.4 细胞最大弹性模量( $\epsilon^{\max}$ )

细胞壁的坚硬程度可用容积弹性模量  $\epsilon$  表示, $\epsilon$  不是一个常数,故在分析中常取最大体积弹性模量( $\epsilon^{\max}$ )来表示细胞壁的物理特性<sup>[24]</sup>。 $\epsilon^{\max}$  值越高,表示细胞壁越坚硬,弹性越小;反之,则说明细胞越柔软,弹性越大。图5所示,两种植物相比,两个样地四合木最大弹性模量  $\epsilon^{\max}$  均低于霸王,经统计学检验差异性均显著( $P<0.05$ )。说明与霸王相比,四合木具有较柔软细胞壁,细胞的弹性较大。同一植物最大弹性模量  $\epsilon^{\max}$  在两个样地之间差异性均不显著。

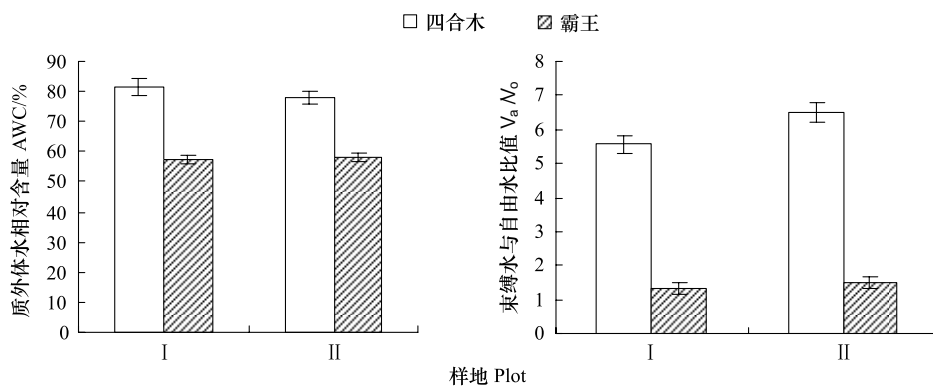


图5 四合木和霸王最大弹性模量  $\epsilon^{\max}$

Fig. 5 The  $\epsilon^{\max}$  values of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylon*

#### 2.2 四合木和霸王净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和水分利用效率(WUE)的日变化

由图6可知,自然条件下,四合木和霸王叶片的  $P_n$  日变化均呈“双峰”曲线,午休”现象明显。早晨 7:00 时开始净光合速率逐步增加,第一个主峰值均出现在 11:00 时左右,四合木和霸王  $P_n$  分别为  $5.75$ 、 $7.84$   $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此后开始下降,14:00 时左右达最低值,出现明显的午休现象。之后净光合速率均再次出现增长的趋势,并在 15:00 时左右出现第二个高峰,四合木和霸王分别为  $2.85$   $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $5.03$   $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为第一峰值的 64.2% 和 49.6%,此后 15:00—19:00  $P_n$  逐渐降低。两种植物上午的光合速率明



显高于下午。比较发现霸王的  $P_n$  值全天均高于四合木,其主峰值 ( $7.84 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 比四合木 ( $5.75 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 高出 36.41%,霸王  $P_n$  日均值 ( $4.47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 比四合木 ( $3.05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 高 46.64%。

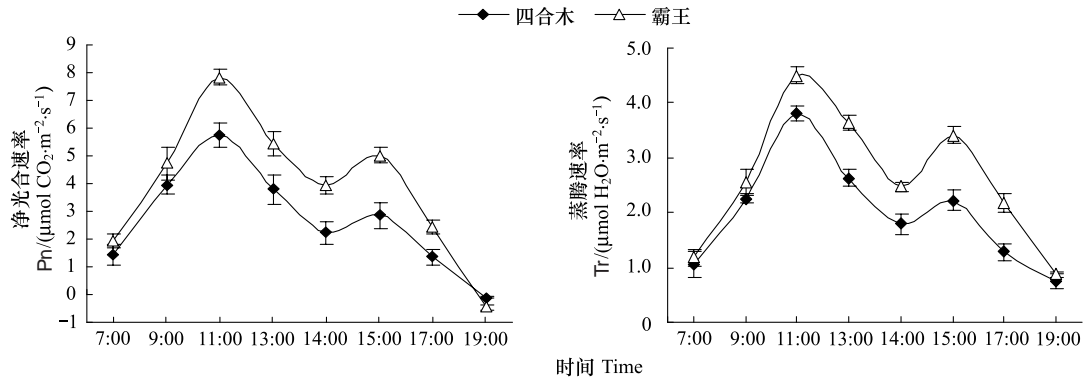


图 6 净光合速率、蒸腾速率日变化

Fig. 6 Diurnal changes of net photosynthetic rate and transpiration rate

蒸腾速率是植物水分状况最重要的生理指标,可表明植物蒸腾作用的强弱。研究表明(图 6)四合木和霸王叶片的  $Tr$  日变化均呈“双峰”曲线,最大峰值均出现在 11:00 时左右,分别为  $3.81$ 、 $4.51 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此后开始下降,14:00 时左右达最低值,第二个高峰出现在 15:00 时左右,其值四合木 ( $2.22 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、霸王 ( $3.40 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 分别为第一峰值的 75.6% 和 26.3%。比较发现霸王的  $Tr$  值全天均高于四合木,其主峰值比四合木高出 23.7%,就  $Tr$  日平均值而言,霸王日均值 ( $2.60 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 比四合木 ( $1.97 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 高出 31.70%。

水分利用效率 (WUE) 以光合速率与蒸腾速率的比值表示,是一项评价植物对水分利用效率的指标。图 7 所示,四合木和霸王 WUE 日变化呈现不同变化趋势,二者 WUE 最高值均出现在 9:00 左右,且上午的 WUE 高于下午,之后四合木日间不断降低,而霸王在 13:00 左右出现低谷。二者两者相比,霸王的 WUE 全天均高于四合木,霸王 WUE 日均值 ( $1.56 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ) 比四合木 ( $1.38 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ) 高出 14.26%。

### 2.3 四合木和霸王气孔导度 ( $G_s$ )、细胞间隙 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $C_i$ ) 和气孔限制值 ( $L_s$ ) 的日变化

气孔是气体进出植物体的主要通道,光合作用需要的  $\text{CO}_2$  和蒸腾作用放出的水蒸汽都是通过气孔实现的。

因此气孔开度,即气孔导度 ( $G_s$ ) 和气孔限制值 ( $L_s$ ) 的高低,对于  $P_n$  和  $Tr$  都有一定制约,进而影响 WUE。

气孔导度是反映气孔开度的一个重要指标<sup>[25]</sup>。气孔导度受叶片蒸腾作用影响,气孔导度的变化又对叶片蒸腾作用产生反馈调节作用<sup>[26]</sup>。从图 8 可以看出,四合木和霸王气孔导度的日变化曲线均表现为明显的双峰曲线,与  $P_n$  与  $Tr$  的变化趋势基本相似,从 9:00 开始叶片气孔导度逐渐增大(光合作用加强), $G_s$  在 11:00 左右达到峰值( $P_n$  也初次达到峰值)。之后开始下降,在 14:00 左右出现明显的低谷,这可能与中午光合有效辐射加强,大气相对湿度 ( $RH$ ) 降低和叶温下水汽压亏缺 ( $V_{pd}$ ) 增强,叶片蒸腾失水强烈引起的气孔开度降低有关。下午  $G_s$  又有所回升,15:00 左右出现第二峰值,这可能与光照及湿度等环境因子胁迫有所缓和有关,

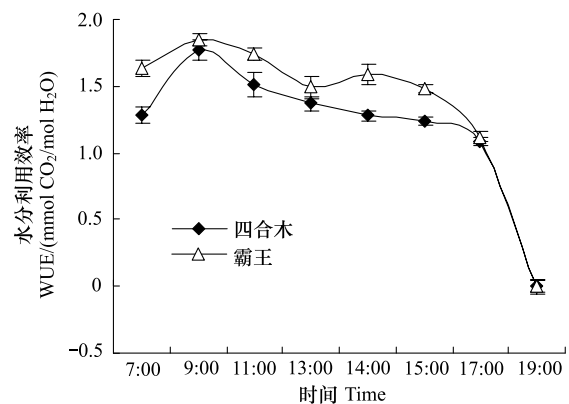


图 7 水分利用效率的日变化

Fig. 7 Diurnal changes of water use efficiency

傍晚时降到最低。二者相比,上午霸王的  $G_s$  要明显高于四合木,但下午的稍低于四合木。霸王和四合木  $G_s$  的日均值分别为  $0.146$ 、 $0.137 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,霸王高出四合木  $6.5\%$ 。

根据 Farquhar 和 Sharkey 提出的气孔限制值的观点<sup>[27]</sup>和目前国内外学者常用的分析光合速率降低的方法<sup>[28]</sup>,引起叶片光合速率降低的因素主要有气孔的部分关闭(气孔限制)和叶肉细胞的活性下降(非气孔限制)两类,前者使  $C_i$  降低,后者使  $C_i$  升高。判断引起光合速率降低的主要原因是气孔因素还是非气孔因素的两个可靠判据是  $C_i$  和  $L_s$  的变化方向: $C_i$  降低和  $L_s$  升高表明气孔导度降低是主要原因,相反  $C_i$  增高和  $L_s$  降低则表明主要原因是非气孔因素。图 9 显示了四合木和霸王的胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和气孔限制值( $L_s$ )的日变化。二者的  $C_i$  的日变化趋势均为一凹的抛物线,早晨为一天中最大值然后开始逐渐下降,在 14:00 左右出现低谷,然后又逐渐回升。二者  $L_s$  的日变化曲线均为一单峰曲线,和  $C_i$  的变化趋势相反,早上为一天最低值,日间不断增大,在 14:00 左右出现峰值,然后下午逐渐下降。据此判断四合木和霸王午间光合速率降低的同时伴随着  $C_i$  的降低和  $L_s$  的升高,原因主要是由气孔导度降低引起的。而 15:00—19:00 光合速率呈下降趋势,对应了  $C_i$  上升和  $L_s$  降低表明主要原因是非气孔因素叶肉细胞光合活性决定的。

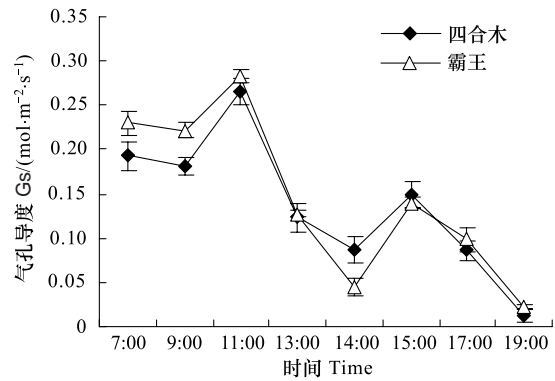


图 8 气孔导度的日变化

Fig. 8 Diurnal change of stomatal conductance

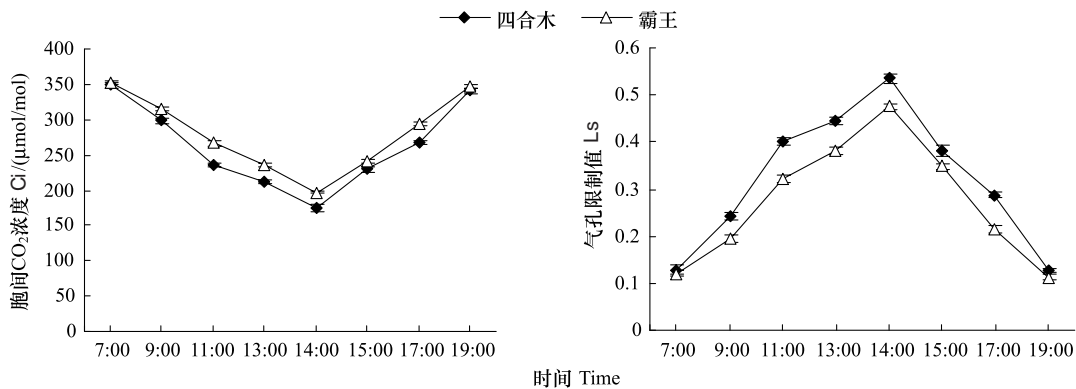


图 9 胞间  $\text{CO}_2$  和气孔限制值的日变化

Fig. 9 Diurnal changes of inter cellular  $\text{CO}_2$  concentration stomatal limitation

### 3 讨论

#### 3.1 四合木与近缘种霸王水分参数特征探讨

植物的抗旱方式主要表现为延迟脱水或忍耐脱水。在干旱胁迫条件下,旱生植物只有保持一定的膨压,才能获得生长的物理力量。当环境中的水势下降时有两个过程在保持膨压方面发挥了积极作用:植物的渗透调节和高的组织弹性<sup>[29-30]</sup>。

本文运用  $P-V$  技术研究了濒危种四合木与近缘种霸王对水分胁迫的反应和适应,比较两种植物在水分生理生态学方面适应力差异。前文运用  $PV$  技术对四合木水分参数季节变化和生境间差异<sup>[18]</sup>表明,四合木耐旱性随 5 月、7 月、9 月逐渐增强,B 类即本文的倾斜平原和高平原样地四合木耐旱性较强。因此本文选择在生长期末四合木耐旱性最强的 9 月份对该类样地优势种四合木和霸王水分参数进行比较研究,发现在两个样地同一生境四合木和霸王的水分参数呈现出相同变化规律,而霸王所测 7 个水分参数以及四合木主要水分参数  $\Psi_s^{\text{dp}}$ 、 $\text{ROWC}^{\text{dp}}$ 、 $\text{RWC}^{\text{dp}}$ 、 $\text{AWC}$ 、 $V_a/V_o$  和  $\varepsilon^{\text{max}}$  在两个样地差异性均不显著,这与许多其它  $PV$  曲线具有良好重复性

的研究结果一致<sup>[11,16]</sup>,也进一步证明了9月份耐旱性最强的时期进行此研究的可靠性。

二者比较分析表明,同生境四合木的  $\varepsilon^{\max}$ 、ROWC<sup>dp</sup>值和 RWC<sup>dp</sup>值均显著低于霸王,而  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值、AWC 和  $V_a/V_o$  高于霸王。四合木低的  $\varepsilon^{\max}$ 说明具有柔软而富有弹性的细胞壁,高弹性细胞壁的植物细胞在环境胁迫下能较快地收缩,从而使细胞能够维持高的膨压并防止细胞破裂;四合木低的 ROWC<sup>dp</sup>值,能在较低的渗透水含量下维持组织的紧张状态,保持正常的生理活动,在一定程度上反映其组织细胞具有较强的延迟脱水能力;而高的 AWC 和  $V_a/V_o$  表明四合木组织对水分的束缚能力强,保持水分的能力大,在持续的干旱期,具有较强的持水能力。刘果厚等<sup>[31]</sup>对四合木水分代谢特征的初步研究表明,四合木离体组织分3次失水,具有较强的持水能力和抗脱水能力,这可能与四合木具有较大 AWC 和  $V_a/V_o$  值有关。以上表明二者具有不同的耐旱机理,各自以不同的方式保持膨压:四合木表现为较小的细胞体积和较强的持水能力,主要以高的组织弹性来保持膨压,总体上四合木表现为细胞壁弹性大、细胞束缚水含量高、细胞持水力强的延迟脱水特性;而霸王具有低的  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值和高的  $\varepsilon^{\max}$ ,主要通过增加细胞质浓度的渗透调节来维持膨压,弹性调节较弱,总体体现为充分膨胀细胞浓度高、零膨压渗透势低、细胞坚硬厚实等低水势忍耐脱水的特性。

研究结果显示霸王的  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值(-2.001 MPa)、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值(-3.1035 MPa)分别低于四合木  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值(-1.7846 MPa)、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值(-2.9839 MPa),说明霸王保持最大膨压和维持最低膨压的水势阈值强于四合木。这与董学军等<sup>[16]</sup>研究结果旱生灌木所测霸王  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值(-1.79 MPa)、 $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值(-3.26 MPa)分别低于四合木的  $\Psi_s^{\text{sat}}$ 值(-1.61 MPa)  $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值(-2.58 MPa)的结果相一致。在运用 P-V 技术所测的所有指标中初始质壁分离时的渗透势  $\Psi_s^{\text{dp}}$ 值是用其它方法又不易测得的植物体水分指标,被认为是衡量植物抗旱性的最佳指标<sup>[8,21]</sup>,该值越低,意味着植物的抗旱性越强。据此得出霸王的耐旱性强于四合木。

### 3.2 四合木与近缘种霸王光合特性探讨

植物的适应性是植物对外界环境长期适应的结果。光合作用是植物体内极为重要的代谢过程,光合作用的强弱对于植物的生长、产量及其抗逆性都具有十分重要的影响,因而,光合作用可作为判断植物生长和抗逆性的指标。四合木和霸王净光合速率日均值分别为  $3.05 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $4.5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显低于农作物小麦( $21.3 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>、玉米( $26.6 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[33]</sup>,而与沙漠植物沙冬青( $5.97 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[34]</sup>、荒漠灌木半日花( $2.7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[35]</sup>相近。自然条件下,四合木和霸王叶片的光合速率、蒸腾速率日进程均呈“双峰”曲线,峰值分别出现在 11:00 时和 15:00 时,具有明显的“午休”现象。说明在相同或相近的选择压力下,二者呈现出干旱荒漠环境中植物类群的趋同适应现象。光合速率午间降低的原因主要是由气孔因素即孔导度降低造成的,这是午间强光和高温条件下避免过度的水分散失和光合机构遭受破坏的有效途径,体现出荒漠植物植物在长期进化过程中形成的对付环境胁迫的一种对策,与谭会娟等<sup>[32]</sup>研究结果相一致。四合木和霸王气孔导度在 14:00 时出现明显的低谷,表明午间强光高温的影响下,二者通过降低气孔导度减少蒸腾来适应干旱环境。四合木和霸王的最大和日均  $T_r$  比沙冬青<sup>[34]</sup>、半日花<sup>[35]</sup>小的多。从蒸腾特征上分析,四合木和霸王更适应西鄂尔多斯干旱缺水的生态环境。

水分利用效率是评价植物对环境适应能力的综合指标。在同样的环境条件下,WUE 值越大,表明固定单位质量 CO<sub>2</sub>所需的水分越少,植物耐旱能力越强<sup>[36]</sup>。研究结果表明四合木、霸王的上半的水分利用效率高于下午,这与一般植物的水分利用效率相同。通过两种荒漠植物光合特征参数的比较可知,同生境下四合木的净光合速率、蒸腾速率低于霸王,水分利用效率低于霸王。表明在二者混生的环境下,四合木光合能力及对干旱环境适应性弱于霸王。四合木长期生存于干旱少雨风大沙多的西鄂尔多斯地区的特殊化环境中,形成了低蒸腾,以提高水分利用效率的固有特性。高强等<sup>[37]</sup>在研究该区 17 种荒漠植物形态结构及其与环境适应性显示,与其他植物相比,霸王的适应特征更为广泛,竞争优势最大,其栅栏组织/海绵组织(1.04:1)显著高于四合木(0.9:1),从形态结构得出霸王的光合效率及对旱生环境的适应性强于四合木。这与本文研究结果四合木光合能力、水分利用效率弱于霸王,耐旱性弱于霸王的结果相一致。说明四合木在生理生态学方面存在生存力、适应力差的特性,这些可能是四合木逐渐被霸王取代及濒危的重要内在原因之一。

## References:

- [ 1 ] The Inner mongolica and Ningxie Research Expedition Team of Chinese Academy of sciences. Inner Mongolica Vegetation. Beijing: Science Press, 1985: 332-367, 476-477, 684-686.
- [ 2 ] Yang C, Wang Y C, Liu Q, Zhang Y F, Zhang Y J. Conservation Biology of *Tetraena mongolica*. Beijing: Science Press, 2002: 52-56, 141-150.
- [ 3 ] Zhang W H, Zu Y G, Ma K M. Analysis on the fractal character of distribution patterns of *Adenophora lobophylla* and *A. Potaninii*. Acta Phytoecologica Sinica, 1999, 23(1): 31-39.
- [ 4 ] Wang Y C, Hou Y W, Zhang Y J, Yang C. Reproductive strategies of *Tetraena mongolica* Maxim. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(6): 699-703.
- [ 5 ] Zhang Y J, Yang C. Population genetic diversity and differentiation of endemic species *Tetraena mongolica* on the Western Ordos. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 506-511.
- [ 6 ] Zhang Y J, Yang C. Comparative analysis of genetic diversity in the endangered shrub *Tetraena mongolica* and its related congener *Zygophyllum xanthoxylon*. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(4): 425-429.
- [ 7 ] Yang C, Zhi Y B, Zheng R. An analysis of ecological adaptability on *Tetraena mongolica* Maxim populations. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 91-96.
- [ 8 ] Cheung Y N S, Tyree M T, Dainty J. Water relations parameters on single leaves obtained in a pressure bomb and some ecological interpretations. Canadian Journal of Botany, 1975, 53(13): 1342-1346.
- [ 9 ] Wang W L. The application of pressure chamber in the study of water situation in plant. Plant Physiology Communication, 1984, (3): 52-57.
- [ 10 ] Zhang J G, Li J Y, Jiang J P. A study on water parameters of plantations in mountain areas of west Beijing ( III ). Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(4): 46-53.
- [ 11 ] Yang M S, Pei B H, Yu D M. Influence of water stress on the abilities to maintain turgor and adjust osmosis in seedlings of hybrid clones of *Populus tomentosa*. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(4): 364-370.
- [ 12 ] Chai B F, Li H J, Wang M B. A study on water physiology and quantity of drought resistance of several trees in the hilly loess region in the west of Shanxi province. Bulletin of Botanica Research, 2000, 20(1): 79-85.
- [ 13 ] Guo L S, Tian Y L. Study on drought-resistance evaluation of common afforestation species in North China by PV technique. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1998, 20(3): 1-8.
- [ 14 ] Yang W B, Bao X F, Yang M R, Yang M. Study on relationship of physio-ecological water to drought resistance for saxaul. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 1996, (Z1): 58-63.
- [ 15 ] Wang M B, Li H J, Chai B F. Water ecophysiological characteristics of *Caragana korshinskii*. Acta Phytoecologica Sinica, 1996, 28(6): 494-501.
- [ 16 ] Dong X J. Experimental measurement of the water relations parameters of nine shrubs and some ecological interpretations. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(7): 657-664.
- [ 17 ] Siqinbater, Xiu M. Hydrological characteristic of the desert plant *Prunus mongolica* on the Mongolian plateau of China. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 484-489.
- [ 18 ] Shi S L, Wang Y C, Zhou J H. The change of water parameters in *Tetraena mongolica* with season and habitat. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6079-6089.
- [ 19 ] Shi S L, Wang Y C, Zhou J H. The seasonal change of endogenous phytohormone and differentiation of populations in *Tetraena mongolica* in different habitats. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2252-2262.
- [ 20 ] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis//Govindjee, ed. Photo-Synthesis, Vol II. New York: Academia Press, 1982: 263-343.
- [ 21 ] Li Q M, Xu H C. The changes of main water parameters in *pinus tabulaeformis* with season and provenance. Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica, 1992, 16(4): 326-335.
- [ 22 ] Wang M B, Li H J. Study on of plantations in Loess Plateau. Beijing: China Forestry Press, 2001: 106-118.
- [ 23 ] Zhang Y J. A preliminary study on hydrologic physioecologic characters of *Elaeagnus angustifolia* L. in a semi-arid environment in northwestern China. Acta Botanica Sinica, 1981, 23(5): 393-399.
- [ 24 ] Li J Y. An application of PV technique to study drought resistance of *Pinus tabulaeformis* and *Platyclusus orientalis* seedlings. Journal of Beijing Forestry University, 1989, 11(1): 3-11.
- [ 25 ] Zhang C X, Zhang Q L, Chang J B. Diurnal variations of moisture physiology characteristic of a few plants in Hobq Desert. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2007, 31(4): 81-84.
- [ 26 ] Zhang Y H, Wang H T, Qi L Y, Zhao W F, Wang Y. Influence of soil moisture on transpiration water consumption of three lianas. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005, 27(5): 724-728.
- [ 27 ] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [ 28 ] Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. Plant Physiology Communications, 1997, 33(4): 241-244.
- [ 29 ] Lemcoff J H, Guamaschelli A B, Garau A M, Prystupa P. Elastic and osmotic adjustments in rooted cuttings of several clones of *Eucalyptus*



- camaldulensis Dehnh. from southeastern Australia after a drought. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2002, 197(2): 134-142.
- [30] Martinez J P, Lotts S, Schanck A, Bajji M, Kinet J M. Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus*. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(9): 1041-1051.
- [31] Liu G H, Zhou S Q, Zhang L, Lin F J, R L. Preliminary study on the water metabolism characters of *Tetraena mongolica*. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1993, 7(2): 100-105.
- [32] Liao J X, Wang G X. Effects of drought, CO<sub>2</sub> concentration and temperature increasing on photosynthesis rate, evapotranspiration, and water use efficiency of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 547-550.
- [33] Zhao M, Li S K, Wang M Y. Stomatal resistance of maize leaf and its relationship with photosynthesis and transpiration under different field conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5): 481-485.
- [34] Feng J C, Zhou Y J, Zhou H Y, Zhang J G. Physiological responses of *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim) to change of soil moisture. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(3): 223-226.
- [35] Tan H J, Zhou H Y, Li X R, Zhang Z S. Primary studies on daily photosynthetic changes of rare and endangered plant *Helianthemum soongoricum*. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2): 262-267.
- [36] Ueda Y, Nishihara S, Tomita H, Oda Y. Photosynthetic response of Japanese rose species *Rosa bracteata* and *Rosa rugosa* to temperature and light. *Scientia Horticulturae*, 2000, 84(3/4): 365-371.
- [37] Gao Q. Adaptability Research of Morphological Structure to the Desert Plants and Environment [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.

#### 参考文献:

- [1] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985: 332-367, 476-477, 684-686.
- [2] 杨持, 王迎春, 刘强, 张云飞, 张颖娟. 四合木保护生物学. 北京: 科学出版社, 2002: 52-56, 141-150.
- [3] 张文辉, 祖元刚, 马克明. 裂叶沙参与泡沙参种群分布格局分形特征的分析. *植物生态报*, 1999, 23(1): 31-39.
- [4] 王迎春, 侯艳伟, 张颖娟, 杨持. 四合木种群生殖对策的研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 699-703.
- [5] 张颖娟, 杨持. 西鄂尔多斯特有种四合木种群遗传多样性及遗传分化研究. *生态学报*, 2001, 21(3): 506-511.
- [6] 张颖娟, 杨持. 濒危物种四合木与其近缘种霸王遗传多样性的比较研究. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 425-429.
- [7] 杨持, 智颖娟, 征荣. 四合木种群的生态适应性. *生态学报*, 2006, 26(1): 91-96.
- [9] 王万里. 压力室 (pressure chamber) 在植物水分状况研究中的应用. *植物生理学通讯*, 1984, (3): 52-57.
- [10] 张建国, 李吉跃, 姜金璞. 京西山区人工林水分参数的研究 (III). *北京林业大学学报*, 1994, 16(4): 46-53.
- [11] 杨敏生, 裴保华, 于冬梅. 水分胁迫对毛白杨杂种无性系苗木维持膨压和渗透调节能力的影响. *生态学报*, 1997, 17(4): 364-370.
- [12] 柴宝峰, 李洪建, 王孟本. 晋西黄土丘陵区若干树种水分生理及抗旱性量化研究. *植物研究*, 2000, 20(1): 79-85.
- [13] 郭连生, 田有亮. 运用 PV 技术对华北常见造林树种耐旱性评价的研究. *内蒙古林学院学报*, 1998, 20(3): 1-8.
- [14] 杨文斌, 包雪峰, 杨茂仁, 杨明. 梭梭抗旱的生理生态水分关系研究. *内蒙古林业科技*, 1996, (Z1): 58-63.
- [15] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条 (*Caragana korshinskii*) 的水分生理生态学特性. *植物生态学报*, 1996, 28(6): 494-501.
- [16] 董学军. 九种沙生灌木水分关系参数的实验测定及生态意义. *植物学报*, 1998, 40(7): 657-664.
- [17] 斯琴巴特尔, 秀敏. 荒漠植物蒙古扁桃水分生理特征. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 484-489.
- [18] 石松利, 王迎春, 周健华. 四合木 (*Tetraena mongolica*) 水分参数季节变化及生境间差异. *生态学报*, 2008, 28(12): 6079-6089.
- [19] 石松利, 王迎春, 周健华. 不同生境条件四合木 (*Tetraena mongolica*) 内源激素季节变化及种群差异. *生态学报*, 2009, 29(5): 2252-2262.
- [21] 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.
- [22] 王孟本, 李洪建. 黄土高原人工林水分生态研究. 北京: 中国林业出版社, 2001: 106-118.
- [23] 张耀甲. 甘肃民勤地区沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 等植物生理生态学特性的初步研究. *植物学报*, 1981, 23(5): 393-399.
- [24] 李吉跃. PV 技术在油松侧柏苗木抗旱特性研究中的应用. *北京林业大学学报*, 1989, 11(1): 3-11.
- [25] 张翠霞, 张秋良, 常金宝. 库布其沙漠几种植物的光合蒸腾及水分利用效率. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(4): 81-84.
- [26] 张迎辉, 王华田, 亓立云, 赵文飞, 王迎. 水分胁迫对 3 个藤本树种蒸腾耗水性的影响. *江西农业大学学报*, 2005, 27(5): 724-728.
- [28] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 241-244.
- [31] 刘果厚, 周世权, 张力, 蔺福金, 任林. 四合木水分代谢特征的初步研究. *干旱区资源与环境*, 1993, 7(2): 100-105.
- [32] 廖建雄, 王根轩. 干旱、CO<sub>2</sub> 和温度升高对春小麦光合、蒸腾及水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 547-550.
- [33] 赵明, 李少昆, 王美云. 田间不同条件下玉米叶片的气孔阻力及与光合、蒸腾作用的关系. *应用生态学报*, 1997, 8(5): 481-485.
- [34] 冯金朝, 周宜君, 周海燕, 张景光. 沙冬青对土壤水分变化的生理响应. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 223-226.
- [35] 谭会娟, 周海燕, 李新荣, 张志山. 珍稀濒危植物半日花光合作用日动态变化的初步研究. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 262-267.
- [37] 高强. 17 种荒漠植物形态结构与环境的适应性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)  
CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat ..... MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique ..... SUN Caizhi, YANG Lei (1016)

Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing ..... HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)

The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy ..... GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)

Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes ..... SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors ..... TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains ..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China ..... SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)

Analysis of a dust case using lidar in Shanghai ..... MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)

Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses ..... TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)

Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ..... ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* ..... LI Hui, WANG Jiangtao (1115)

Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species ..... WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)

On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures ..... WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)

Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China ..... CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)

The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern ..... TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. .... SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress ..... SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)

The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China ..... XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ..... ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district ..... GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)

Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau ..... LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)

Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ..... ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)

The evaluation system of strength of winteriness in wheat ..... WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China ..... LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants ..... CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ..... ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)

Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing ..... XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)

Seasonal characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China ..... SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)

Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County ..... WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)

**Review and Monograph**

Recent advances in wetland degradation research ..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis ..... YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)

**Discussion**

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* ..... TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* ..... YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

**Scientific Note**

Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain ..... LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)

Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* ..... YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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