

四合木 (*Tetraena mongolica*) 水分参数季节 变化及生境间差异

石松利, 王迎春*, 周健华

(内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 运用 PV 技术对 5 个不同生境四合木水分参数 (Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{dp} 、 $ROWC^{dp}$ 、 RWC^{dp} 、 AWC 、 V_a/V_0 和 ε^{max}) 的季节动态 (5、7、9 月份) 及生境间差异性进行研究。结果表明: (1) 四合木水分参数 Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{dp} 值较低, AWC 、 V_a/V_0 值较高, 体现荒漠灌木四合木较强的干旱适应性特点。 (2) 四合木主要水分参数 Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{dp} 值及 ε^{max} 表现为 5 月份 > 7 月份 > 9 月份, AWC 、 V_a/V_0 表现为 5 月份 < 7 月份 < 9 月份, 四合木耐旱性随 5 月份、7 月份、9 月份递增, 这种季节变化规律与植物生长发育的节律相吻合, 即与物候的进程一致。 (3) 对 5 个生境四合木 (低山、台地、丘陵、高平原、倾斜平原) 耐旱性排序, 得出倾斜平原、高平原 > 丘陵 > 台地 > 低山, 将 3 个月份 5 个不同生境四合木水分参数进行聚类。结果低山、台地、丘陵四合木为一类, 高平原、倾斜平原四合木为一类。方差分析表明: 3 个月份 Ψ_s^{dp} 值、 Ψ_s^{sat} 值和 AWC 值均表现为高平原、倾斜平原四合木显著低于低山、台地、丘陵四合木。不同生境四合木的渗透调节机制不同, 倾斜平原和高平原的四合木其体内通过增加细胞质浓度进行渗透调节能力较强 (较低的 Ψ_s^{dp} 值和 Ψ_s^{sat} 值); 而生境为低山、台地和丘陵四合木抗脱水能力较强 (较大的 AWC 值)。

关键词: 四合木; PV 技术; 水分参数; 季节变化; 不同生境 耐旱性

文章编号: 1000-0933(2008)12-6079-11 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The change of water parameters in *Tetraena mongolica* with season and habitat

SHI Song-Li, WANG Ying-Chun*, ZHOU Jian-Hua

College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6079 ~ 6089.

Abstract: The change of water parameters (Ψ_s^{sat} , Ψ_s^{dp} , $ROWC^{dp}$, RWC^{dp} , AWC , V_a/V_0 and ε^{max}) in *Tetraena mongolica* with season and habitat was studied by means of press-volume technique. The results showed as follows: (1) *Tetraena mongolica* is of low Ψ_s^{sat} , low Ψ_s^{dp} , high AWC and high V_a/V_0 , which shows that *Tetraena mongolica* is of strong ability of drought tolerance. (2) The seasonal change of Ψ_s^{sat} , Ψ_s^{dp} and ε^{max} showed May > July > September. And the AWC , V_a/V_0 showed May < July < September. The drought tolerance of *Tetraena mongolica* continuously enhanced with season. This seasonal change is response to the phenological rhythm of plant. (3) The ordination analysis for drought tolerance of *Tetraena mongolica* in upland, hill, tableland, high plain, terrace was finished. The level of drought-tolerance among the five habitats above decreased in the following order: high plain and terrace > upland > tableland > hill. Based on three measurements of water parameters of *Tetraena mongolica* in five habitats in P-V curves, the cluster analysis of drought tolerance of *Tetraena*

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30460033); 国家重点基础研究发展计划 973 资助项目 (2006CB708404)

收稿日期: 2008-04-16; 修订日期: 2008-09-02

作者简介: 石松利 (1981 ~), 女, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事植物生理生态学研究. E-mail: shisongli122@126.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30460033) and National Key Basic Research Specific Foundation (No. 2006CB708404)

Received date: 2008-04-16; **Accepted date:** 2008-09-02

Biography: SHI Song-Li, Ph. D. candidat, mainly engaged in plant population physiology and ecology. E-mail: shisongli122@126.com

mongolica was finished. *Tetraena mongolica* in five habitats can be classified into two groups; upland, hill and tableland is one group, high plain and terrace is the other group. The variance analysis showed that three measurements of Ψ_s^{sat} , Ψ_s^{tip} and AWC of *Tetraena mongolica* in high plain and terrace is lower than that of upland, hill and tableland. There are difference in osmotic adjustment mechanism among five different habitats. *Tetraena mongolica* in high plain and terrace is of stronger ability of osmosis adjustment by improving the concentration of cellular solute, but *Tetraena mongolica* in upland, hill and tableland is of stronger ability of holding water (high AWC).

Key Words: *Tetraena mongolica*; press-volume technique; water parameters; seasonal change; different habitats; drought tolerance

鄂尔多斯高原作为典型的生态过渡带拥有非常丰富的灌木资源,这在生态学研究具有重要意义^[1]。自高原东部向西,随着降水梯度的逐渐减少,灌木类群生物多样性也逐渐减少^[2]。高原西部因集中分布着一批珍稀物种而有古地中海孑遗植物避难所之称而备受关注。四合木(*Tetraena mongolica*)是蒺藜科超旱生小灌木,古地中海残遗成分,起源于第三纪,典型的西鄂尔多斯特有单属、种和特有群系,是内蒙古高原、亚洲中部荒漠地区特有的 60 个单种属植物之一,在植物分类、植物区系研究上具有重要科学意义^[3],在防风固沙、水土保持方面也发挥十分重要的作用。作为西鄂尔多斯草原化荒漠区的主要建群种和优势种,四合木在这一地区生活了上亿年,植物与环境之间已经形成了一种相互适应的关系,对于干旱高温多风沙的恶劣气候环境具有极强的适应性,因此在自然环境恶劣、降雨稀少而蒸发量大的西鄂尔多斯地区研究四合木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^[4,5],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体水分指标。用来表示植物水分状况的指标有含水量、相对含水量、饱和亏缺和水势等,但它们反映的都是植物的一种现实水分状况,而对于植物组织内部的水分组成、潜在的组织最大渗透势和对水分胁迫的反馈调节能力等,只有通过 PV 曲线求得的水分参数才能加以说明^[6]。

近年来,通过 PV 技术对荒漠植物耐旱性的研究已经展开^[7~9],也对该区的一些建群植物的耐旱力进行了比较系统深入的研究,已初步取得了一些成果^[10~12],本文在以上研究成果的基础上,对荒漠植物水分参数的季节变化和不同生境条件下水分参数的差异性进行研究,将从更深层次探讨荒漠植物的水分利用特征。植物的耐旱性毕竟是一个非常复杂的复合性状。它不仅受到植物本身遗传因素的控制,而且也受到外界自然环境条件的影响,因此在植物的不同生长发育阶段或生长季节里其耐旱特点及耐旱能力可能是不尽相同的,即使同种植物在相同时期处在不同生境条件下的耐旱性和对水分亏缺的敏感程度也不同。鉴于此,本文选取分布区内不同生境的 5 个有代表性的具四合木群落的草原化荒漠区为研究样地,运用 PV 技术对四合木 5 月份、7 月份、9 月份水分参数(Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{tip} 、 $ROWC^{tip}$ 、 RWC^{tip} 、AWC、 V_a/V_0 和 ϵ^{max})的季节变化和生境间差异性进行研究,结合同一项目四合木微生物区系方面的研究成果,从水分参数的角度来探讨荒漠植物对水分胁迫的反应和适应,全面地认识荒漠植物的耐旱性及其机理,从而为综合评价荒漠植物的耐旱能力和濒危植物保护提供更为科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

四合木,强旱生落叶小灌木,株高 40~80cm,老枝红褐色、光滑,1 年生枝灰黄色。复叶,对生或簇生于短枝上,小叶两枚无柄、肉质、两面具毛。花单生于叶腋,花瓣 4,淡黄白色、椭圆形、长约 3mm。子房上位、4 室。果实成熟时裂成 4 分果,分果呈牛角状的中央弯曲,形成四翅。种群的更新以种子为主。6 月上旬初花,6 月底到 7 月初盛花,8 月进入果期,9 月份果实成熟。

1.2 研究区域自然概况

研究区域设在西鄂尔多斯自然保护区境内,四合木局限分布在该区(E 106°35'~107°25', N 39°20'~40°15'),行政划分上该区属于内蒙古乌海市及周边旗县区。该区大陆性气候明显,为极干旱荒漠区。自然环境

十分恶劣,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。 $\geq 17\text{m/s}$ 的大风日在 30d 以上,伴以沙暴天气,加重春旱。夏季短促,多温热天气。平均年降水量为 139.8mm,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 3127.7mm,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^[13]。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。

1.3 样地选择

2006 年多次到野外进行考察,考察路线囊括了四合木分布区的不同地形地貌、土壤类型等生境。为了充分反映分布区内的生境异质性,选择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。每个样地运用 GPS 定位,确定经度、纬度和海拔,记录群落类型和土壤类型(表 1)。

表 1 样地及其特征一览表
Table 1 Characters in research region

样地号 Plot(No.)	定位 Orientation	海拔 Altitude(m)	生境特点 Environmental characters
1	N 39°21'57" E 106°53'43"	1212	低山;土壤为砾石质;主要植被为四合木和红砂,伴生种以草霸王、沙棘、半日花、沙葱为主
2	N 39°22'30" E 106°53'52"	1285	台地;土壤为砾石质;主要植被为四合木,伴生种以针茅、珍珠、狭叶锦鸡儿、无芒隐子草、红砂为主
3	N 39°28'53" E 106°53'31"	1216	丘陵;土壤为砾石质;主要植被为四合木、珍珠和红砂,伴生种以梭梭和隐子草为主
4	N40°14'58" E 107°05'36"	1150	高平原;土壤为沙砾质;主要植被为四合木、霸王,伴生种以隐子草、针茅、绵刺和长叶红砂为主
5	N40°09'07" E 106°54'44"	1065	倾斜平原;土壤为沙砾质;主要植被为四合木和霸王,伴生种以半日花、绵刺、蒙古葱、糙隐子草为主

1.4 样品的采集与处理

采样期选在 2007 年 5 月、7 月、9 月上旬,此时正值四合木营养期、花期和果期。在选定样地分别采集四合木植株的南端向阳面顶端带叶小枝,每个样地选取 3 个 50m×50m 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,使其在阴暗高湿的条件下经一昼夜饱和吸水。野外采集植株的同时,采集相应植株的根际土壤 0~10 cm 和 10~30 cm,重复数为 3,采集土壤样品后放入铝盒内,立即用 1/1000 扭力天平称取土壤鲜重。

1.5 实验方法

采用王万里^[5]介绍的 Hammel 法,用兰州大学 ZLZ-5 型压力室进行实验测定和 P - V 曲线的制作。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: Ψ_s^{sat} (饱和含水量时的最大渗透势)、 Ψ_s^{dp} (初始质壁分离时的渗透势)、 ROWC^{dp} (初始质壁分离时渗透水相对含量)、 RWC^{dp} (初始质壁分离时的相对含水量)、 AWC (质外体水的相对含量)、 V_a/V_0 (束缚水与自由水的比值)、 ε^{max} (细胞最大弹性膜)、 $\mu(\chi)$ (隶属函数)和 FV (模糊综合评判值)。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 One-Way ANOVA 方法进行方差分析,对差异显著的指标运用 S-N-K 检验进行多重比较。

文中 Ψ_s^{sat} 的绝对值、 Ψ_s^{dp} 的绝对值、 AWC 和 V_a/V_0 四个参数与保持膨压的能力呈正相关关系,采用公式^[14,15]: $\mu(\chi_j) = (\chi_j - \chi_{\min}) / (\chi_{\max} - \chi_{\min})$; ROWC^{dp} 、 RWC^{dp} 和 ε^{max} 3 个参数与保持膨压的能力呈负相关关系,采用公式: $\mu(\chi_j) = 1 - (\chi_j - \chi_{\min}) / (\chi_{\max} - \chi_{\min})$,式中 χ_j 表示水分参数, $\mu(\chi_j) \in [0,1]$; $FV = (1/7) \sum \mu(\chi_j)$ 。

本实验在压力室测定中,吸水小管重以及样品饱和重和干重均用 Startprieu 电子分析天平(0.0001/200g)

测定。

2 结果与分析

2.1 各样地四合木根际不同深度土壤含水量随季节的变化

由图 1 可知,5 个样地 0~10cm 和 10~30cm 土壤含水量随季节动态呈现出一致性规律,即 7 月份 > 9 月份 > 5 月份。方差分析表明 7 月显著高于 5 月份和 9 月份 ($P < 0.05$)。据乌海市气象局 2007 年降雨量资料 (4 月份、5 月份分别为 5.17、6.0 mm; 6 月、7 月份分别为 114.2、12.8 mm, 8 月、9 月分别为 37.4、14.4 mm) 显示, 6 月份降雨量为 114.2mm, 达全年降雨量的 50.5%, 导致 7 月份土壤含水量高于 5 月份和 9 月份, 体现出土壤含水量与降雨量的相关性。

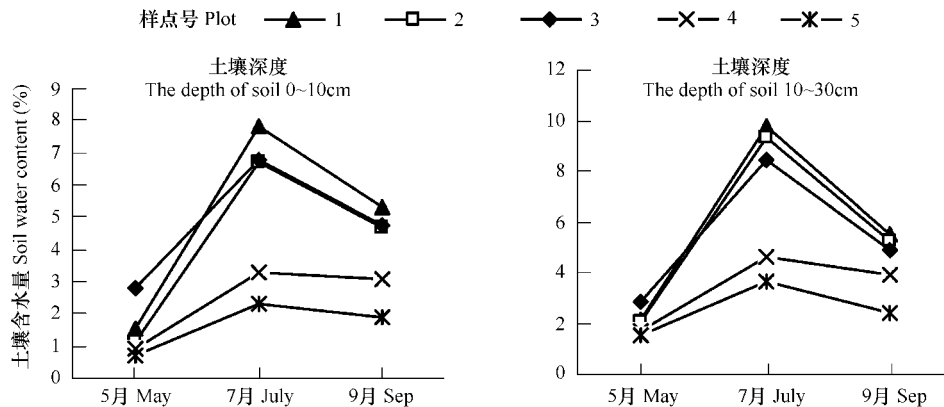


图 1 土壤含水量季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of soil water content

方差分析表明 0~10cm 和 10~30cm 土壤含水量均在样地间差异显著 ($p < 0.05$), 进一步多重比较结果表明: 5 个样地间无论是月份还是土壤深度均呈现出一致性规律, 1 号、2 号、3 号土壤含水量显著高于 4 号、5 号 ($p < 0.05$); 1 号、2 号、3 号之间差异不显著; 4 号、5 号之间差异不显著。这是因为 4 号、5 号样地生境为高平原, 土壤类型为沙砾质, 土壤保水性差, 而 1 号、2 号、3 号样地土壤类型为砾石质, 这对于旱少雨、风大沙多西鄂尔多斯地区, 减少水分蒸发, 提高土壤保水能力非常有利。体现出土壤含水量与生境具有一定的相关性。

2.2 四合木 P-V 曲线水分参数的季节变化

由表 2 可知, 5 个生境四合木水分参数 Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{tlp} 、 $ROWC^{tlp}$ 、 RWC^{tlp} 、 AWC 、 V_a/V_0 和 ϵ^{max} 随 5 月、7 月和 9 月季节动态大体变化趋势一致。因此, 首先不分样地, 以全部测试对象的数据为基础, 用各月四合木水分参数平均值比较四合木水分参数随季节的变化规律。

2.2.1 饱和含水量时的最大渗透势 Ψ_s^{sat}

饱和含水量时的最大渗透势 Ψ_s^{sat} 值可说明某生长阶段细胞中可溶性物质可能达到的浓度, 它与植物的抗旱和抗寒能力有关, Ψ_s^{sat} 值越低, 细胞浓度就越大, 因此, 植物的抗旱性与抗寒性越强。

图 2 表明, 四合木的 Ψ_s^{sat} 值的随季节变化而不断降低表现为: 5 月份 (-1.3031MPa) > 7 月份 (-1.5019MPa) > 9 月份 (-1.6590MPa)。方差分析表明, 3 个月份差异性显著 ($P < 0.05$)。四合木细胞质浓度总体表现为 5 月份 < 7 月份 < 9 月份。四合木保持最大膨压的能力随

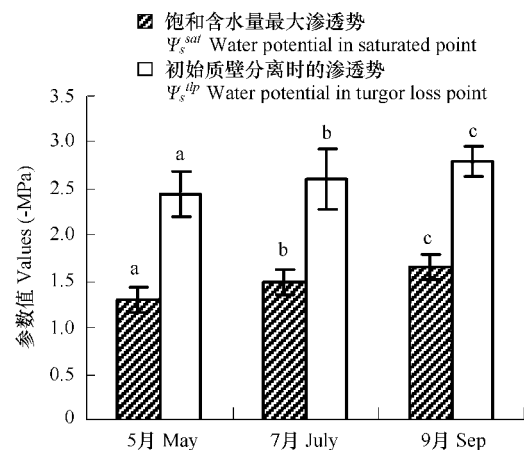


图 2 Ψ_s^{sat} 和 Ψ_s^{tlp} 的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of Ψ_s^{sat} and Ψ_s^{tlp}

(1) Ψ_s^{sat} Water potential in saturated point; (2) Ψ_s^{tlp} Water potential in turgor loss point

5 月份、7 月份、9 月份逐渐增强。

表 2 各样地四合木水分参数的季节变化

Table 2 The seasonal change of water parameters in *Tetraena mongolica* in research region

月份 Month	样地 Plot	Ψ_s^{sat} (-Mpa)	Ψ_s^{dp} (-Mpa)	$ROWC^{dp}$ (%)	RWC^{dp} (%)	AWC (%)	V_a/V_o	ε^{max}
5 月 May	1	1.1206 ± 0.1408c	2.2817 ± 0.1126c	60.96 ± 1.76a	89.53 ± 1.25ab	83.50 ± 2.34a	5.0622 ± 0.4804a	13.8285 ± 1.0328b
	2	1.2837 ± 0.1235b	2.358 ± 0.1012c	53.98 ± 0.98b	91.44 ± 1.44a	73.73 ± 3.58b	4.4169 ± 0.3963b	14.1245 ± 1.1265b
	3	1.2349 ± 0.1421b	2.2424 ± 0.0769c	52.74 ± 1.21b	88.87 ± 0.81b	78.23 ± 2.97b	4.2729 ± 0.3725b	15.2003 ± 0.8874a
	4	1.3958 ± 0.1127a	2.5883 ± 0.0987b	51.85 ± 0.97b	89.34 ± 1.07ab	70.53 ± 2.05c	3.3612 ± 0.2751c	12.9174 ± 0.9547c
	5	1.4804 ± 0.1063a	2.7026 ± 0.0792a	52.50 ± 2.05b	89.55 ± 1.02ab	65.94 ± 1.97d	2.8472 ± 0.3966d	11.3218 ± 0.8247d
7 月 July	1	1.342 ± 0.1392c	2.5285 ± 0.1324c	53.02 ± 0.86a	86.68 ± 1.45b	88.00 ± 2.21a	5.6273 ± 0.8725a	14.4360 ± 0.8435a
	2	1.397 ± 0.1128c	2.5494 ± 0.2125c	49.95 ± 0.73bc	87.45 ± 1.38b	80.71 ± 2.26b	4.4262 ± 0.5784c	10.0590 ± 0.7752c
	3	1.499 ± 0.1085b	2.5217 ± 0.1984c	47.77 ± 1.26c	89.38 ± 1.17a	86.68 ± 1.95a	6.5077 ± 0.7312b	12.1820 ± 0.6941b
	4	1.5667 ± 0.1284b	2.664 ± 0.1027b	46.06 ± 1.07c	83.30 ± 1.34c	73.29 ± 2.67c	2.8931 ± 0.2765d	10.0220 ± 1.0126c
	5	1.7046 ± 0.1418a	2.7923 ± 0.2968a	50.86 ± 0.91b	84.76 ± 0.96c	68.50 ± 2.05c	4.1359 ± 0.4156c	8.9819 ± 0.9219d
9 月 Sep	1	1.5726 ± 0.0943c	2.6995 ± 0.1052b	48.00 ± 1.71a	82.40 ± 1.23b	85.37 ± 2.01a	5.8795 ± 0.5924c	5.0838 ± 0.4463b
	2	1.5451 ± 0.0785c	2.6333 ± 0.1271b	46.72 ± 1.82a	80.30 ± 0.88b	86.85 ± 2.42a	7.4304 ± 0.4359a	9.1545 ± 0.6728a
	3	1.6082 ± 0.0562c	2.6420 ± 0.0879b	46.01 ± 2.03a	85.87 ± 1.07a	88.31 ± 1.71a	7.3985 ± 0.4627a	6.0953 ± 0.3679b
	4	1.7266 ± 0.0926b	2.9834 ± 0.1461a	41.47 ± 1.64b	83.65 ± 1.12b	81.48 ± 2.66b	5.5584 ± 0.3831c	8.9960 ± 0.7425a
	5	1.8426 ± 0.0615a	2.9844 ± 0.2162a	41.07 ± 1.02b	82.82 ± 0.79b	77.93 ± 1.93b	6.5108 ± 0.5716b	8.8772 ± 0.3159a

同一列不同小写字母表示月份间差异显著 ($P < 0.05$), 以上数据均为 3 条 P -曲线所得参数的平均值 $\pm$ 标准误 (Mean $\pm$ SE) Averages followed by the same letters in the same column are not significantly different ($P < 0.05$), and the Values in table are averages of parameters derived from P -V curve

Ψ_s^{sat} 饱和含水量时的最大渗透势; Water potential in saturated point Ψ_s^{dp} 初始质壁分离时的渗透势; Water potential in turgor loss point $ROWC^{dp}$ 初始质壁分离时的相对渗透水含量; Relative osmotic water content in turgor loss point RWC^{dp} 初始质壁分离时的渗透水相对含水量; Relative water content in turgor loss point AWC 质外体水的相对含量; Relative content of apoplastic water V_a/V_o 束缚水与自由水的比值; bound water/ free water ε^{max} 细胞最大弹性模量 Maximum hulk modulus of elasticity

2.2.2 初始质壁分离时的渗透势 Ψ_s^{dp}

初始质壁分离时的渗透势 Ψ_s^{dp} 亦称为零膨压点时的渗透势, Ψ_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^[4,6], Ψ_s^{dp} 值是衡量植物抗旱性的最佳指标, Ψ_s^{dp} 值越低, 意味着植物的抗旱性越强。 Ψ_s^{dp} 值反映了组织细胞内部忍耐低水势的能力。

由图 2 可知, 初始质壁分离时的渗透势 Ψ_s^{dp} 值的季节变化趋势与 Ψ_s^{sat} 值呈现一致性规律表现为: 5 月份 (-2.4346MPa) $>$ 7 月份 (-2.6112MPa) $>$ 9 月份 (-2.7885MPa)。经方差分析表明, 3 个月份 Ψ_s^{dp} 值差异性显著 ($P < 0.05$)。四合木组织细胞内部忍耐低水势的能力随 5 月、7 月、9 月份逐渐增强。依照 Ψ_s^{dp} 值进行耐旱性强弱排序: 四合木耐旱性 9 月 $>$ 7 月 $>$ 5 月份。

2.2.3 初始质壁分离时渗透水相对含量 ($ROWC^{dp}$) 与相对含水量 (RWC^{dp})

$ROWC^{dp}$ 和 RWC^{dp} 是两个相互联系的水分状况指标。一般认为^[6], 初始质壁分离时渗透水相对含量 $ROWC^{dp}$ 值和相对含水量 RWC^{dp} 值越低, 表明植物忍耐水分胁迫能力越强。 $ROWC^{dp}$ 值和 RWC^{dp} 值体现了植物组织细胞发生质壁分离时的含水量, 在一定程度上反映了植物组织细胞忍耐脱水的能力^[16]。

由图 3 可知, 这两个参数值随季节变化趋势相同,

- 初始质壁分离时渗透水相对含量
 $ROWC^{dp}$ Relative osmotic water content in turgor loss point
- 初始质壁分离时相对含水量
 RWC^{dp} Relative water content in turgor loss point

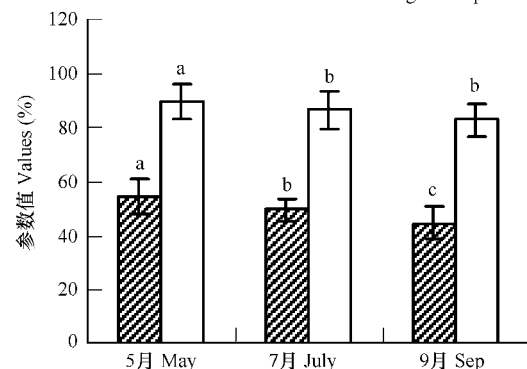


图 3 $ROWC^{dp}$ 和 RWC^{dp} 的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of $ROWC^{dp}$ and RWC^{dp}

- (1) $ROWC^{dp}$ Relative osmotic water content in turgor loss point; (2) RWC^{dp} Relative water content in turgor loss point

随季节变化呈下降趋势。 $ROWC^{dp}$ 值表现为5月份(54.40%)>7月份(49.53%)>9月份(44.65%); RWC^{dp} 值5月份(89.75%)>7月份(86.31%)>9月份(83.01%)。经方差分析表明, $ROWC^{dp}$ 值在3个月份间差异性显著, RWC^{dp} 值5月份与7月份、9月份差异显著($P<0.05$)但7月和9月份不显著。在5月份营养期, $ROWC^{dp}$ 和 RWC^{dp} 值均为生长季最高值,对应于此期最高的 Ψ_s^{dp} 值,指示了较低的细胞渗透溶质含量和较低的耐旱能力。而随生长发育进程的加剧, $ROWC^{dp}$ 值呈下降趋势,指示细胞渗透溶质含量逐渐增加,耐旱能力逐渐增强。但根据有关报道^[17], $ROWC^{dp}$ 和 RWC^{dp} 值指标测定误差较大,若作为评价植物耐旱性强弱的指标应慎重。

2.2.4 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)

质外体水的相对含量 AWC 是一个比较独立的指标^[6]。AWC 值是一个反映植物抗旱性的重要指标,依据李庆梅的观点^[6],在溶质含量不变的情况下,AWC 值越大,组织的渗透势也越低,吸水能力也越强,植物的抗旱性也越强。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^[18]。

由图4可知,AWC 值和 V_a/V_o 值的季节变化具有一致性,其值随季节变化均呈上升的趋势:AWC 值表现为5月份(74.39%)<7月份(79.43%)<9月份(83.99%), V_a/V_o 表现为5月份(3.9921)<7月份(4.7180)<9月份(6.5555)。经方差分析表明,AWC 值3个月份差异性均显著, V_a/V_o 值3个月份差异均显著($P<0.05$)。这说明质外体水相对含量 AWC 和束缚水与自由水比值 V_a/V_o 值随5月份、7月份、9月份逐渐增大,抗旱性逐渐增强。9月份植物具有最大的质外体水相对含量和最高的束缚水与自由水比值,这有利于植物组织水分的保持,提高抗旱能力。

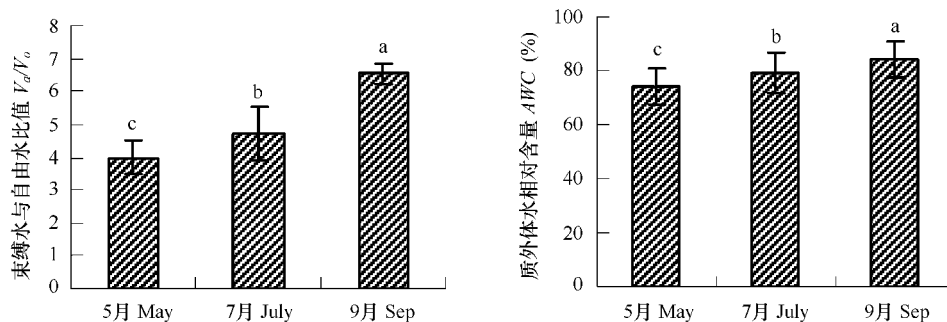


图4 AWC 和 V_a/V_o 的季节动态

Fig.4 Seasonal changes of AWC and V_a/V_o .

AWC Relative content of apoplastic water; V_a/V_o Bound water/ free water

2.2.5 细胞最大弹性模量

细胞壁的坚硬程度可用容积弹性模量 ϵ 表示, ϵ 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^[19]。 $\epsilon^{\max}$ 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。

由图5可以看出,四合木 $\epsilon^{\max}$ 量值随着季节变化逐渐减小,表现为5月份(13.4785)>7月份(11.1361)>9月份(7.6414),经方差分析表明, $\epsilon^{\max}$ 量3个月份差异性均显著($P<0.05$)。说明四合木的组织弹性随5月、7月和9月份季节变化提高了,保持膨压的能力增强了。

2.3 四合木 P-V 曲线水分参数生境间差异性研究

在以上系统研究四合木各水分参数季节变化的基础上比较不同生境各时期水分参数的差异性。分别对5月份、7月份、9月份不同生境条件下四合木各水分参数的变化情况进行方差分析。结果表明,5月份、7月份、9月份水分参数 Ψ_s^{sat} 、 Ψ_s^{dp} 、 $ROWC^{dp}$ 、 RWC^{dp} 、AWC、 V_a/V_o 、 $\epsilon^{\max}$ 在生境间差异性均显著($P<0.05$)。进一步的多重比较结果(表2)表明5个样地四合木水分参数上存在着差异。为了全面而客观的评价不同生境四合木

的水分参数差异,采用了模糊数学隶属函数方法对 5 个样地四合木耐旱性综合评价,该方法可计算每个水分参数在保持膨压方面的贡献大小。由表 3 可知,5 个样地四合木,保持膨压能力表现为:5 月份,5 号>4 号>3 号>2 号>1 号;7 月份,5 号>4 号>3 号>2 号>1 号;9 月份,4 号>5 号>3 号>2 号>1 号。可见,3 个月份均得到一致性结果,5 号、4 号>3 号>2 号>1 号。即倾斜平原、高平原>丘陵>台地>低山。

将表 2 中 5 月、7 月、9 月的水分参数根据数理统计进行聚类分析,在 3 个月份均取得一致性结果,都将其聚为两个类:1 号、2 号、3 号为一类,简称为 A 类;4 号、5 号为一类,简称为 B 类(图 6 所示)。分析发现 A 类样地所处生境存在以下共同点:土壤类型均为砾石质;群落类型均为四合木群落;海拔相对较高均在 1212m 以上。B 类样地所处生境存在以下共同点:土壤类型为沙砾质;群落类型都为四合木+霸王群落,海拔相对较低均在 1150m 以下。

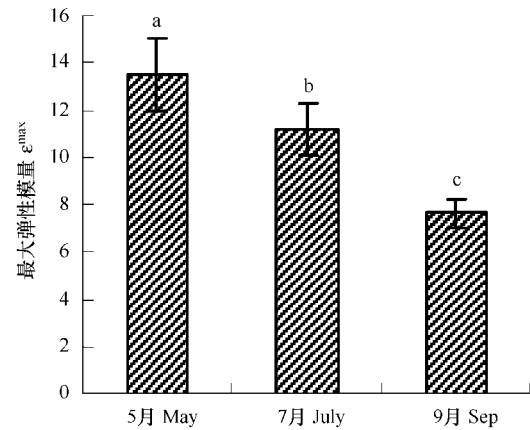


图 5 $\varepsilon^{\max}$ 的季节动态

Fig. 5 Seasonal changes of $\varepsilon^{\max}$

$\varepsilon^{\max}$ Maximum bulk modulus of elasticity

表 3 各月份水分参数模糊综合评判结果

Table 3 The comprehensive appraisal of water parameters in three months

月份 Month	项目 Item	样地 Plot(No.)				
		1	2	3	4	5
5 月 May	模糊综合评判值(FV)	0.4546	0.4968	0.5090	0.6307	0.6666
	保持膨压能力(排序)	5	4	3	2	1
7 月 July	模糊综合评判值(FV)	0.3527	0.3814	0.4384	0.6001	0.6077
	保持膨压能力(排序)	5	4	3	2	1
9 月 Sep	模糊综合评判值(FV)	0.3989	0.4350	0.4655	0.6111	0.5892
	保持膨压能力(排序)	5	4	3	1	2

模糊综合评判值 Fuzzy comprehensive value(FV);保持膨压能力(排序)Ability to maintain turgor (Sequence)

对 5 月份、7 月份和 9 月份各水分参数(表 2)在两个类群间进行方差分析,结果表明:3 个月份 Ψ_s^{ip} 值、 Ψ_s^{at} 值及 AWC 值均表现为 B 类显著低于 A 类,5 月份 B 类 V_o/V_s 显著低于 A 类,7 月份 B 类 RWC^{ip} 显著低于 A 类,9 月份 B 类 $ROWC^{ip}$ 显著低于 A 类。根据各水分参数所指示意义可知,B 类样地四合木组织细胞保持最大膨压和忍耐低水势的能力强于 A 类。而 A 类样地较 B 类样地具有更大的质外体水相对含量。

3 讨论

3.1 四合木水分参数季节间差异性探讨

自然界中存在的植物往往是同时或相继经受多种环境胁迫。西鄂尔多斯地区就是一个集干旱高温多风沙的恶劣气候环境的一个多种胁迫的综合体,该区年均降雨量稀少,仅为 139.8 mm,而平均蒸发量为 3217.7mm,是降雨量的 23 倍之多。这就使得水分成为植物生存的限制性因子,如果植物不能有效的节水、保水和吸水,植物就会面临“死亡”。因此如何在生长发育过程中有效的改善体内组织间的水分分配,形成最佳的耐旱适应方式,对于生存、繁衍具有决定意义。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^[20,21]。

一般把水分胁迫使溶质积累或共质体水与非共质体水之间的转换而引起的渗透势下降称之为渗透调节^[22,23]。饱和含水量时的最大渗透势 Ψ_s^{at} 值和初始质壁分离时的渗透势 Ψ_s^{ip} 反映了植物组织细胞中可溶性

物质可能达到的浓度以及组织细胞忍耐低水势的能力,研究表明,四合木的 Ψ_s^{sat} 值和 Ψ_s^{dp} 值随 5 月、7 月、9 月不断降低,9 月份所测四合木 Ψ_s^{sat} 值(-1.5451 ~ -1.8426 MPa)、 Ψ_s^{dp} 值(-2.6333 ~ -2.9844 MPa)最低,这与董学军^[9]在研究毛乌素沙地 9 种沙生灌木的水分关系参数时 Ψ_s^{sat} 值和 Ψ_s^{dp} 值相比,与所测荒漠灌木四合木的 Ψ_s^{sat} 值(-1.61 MPa)和 Ψ_s^{dp} 值(-2.58 MPa)相近,而与沙生灌木沙柳、黑沙蒿、籽蒿、中间锦鸡儿、蒙古岩黄芪、沙地柏、沙冬青这两个值相比明显偏低。与杨文斌等^[24]在研究干旱半干旱地区重要的固沙灌木柠条锦鸡儿的水分关系时 Ψ_s^{sat} 值(-1.43 MPa)、 Ψ_s^{dp} 值(-1.8 MPa)相比也明显偏低,这说明四合木保持最大膨压和忍耐低水势的能力较强,这说明四合木具有较强的干旱适应性特点。5 月初气温较低,春旱突出,降雨量稀少,土壤含水量为最低值,而四合木正处于营养期, Ψ_s^{sat} 值是整个生长季的最高值,这一时期植物体内代谢旺盛,较高的 Ψ_s^{sat} 值意味着潜在的细胞质浓度较低,渗透水比例较高,以保证植物分生组织中各种与生长有关的生理过程的进行。7 月份气温升高,降雨量增加,土壤含水量为生长季最高值,此时植物正值花期,光合和蒸腾作用加强, Ψ_s^{sat} 值有所降低,细胞质浓度增加。9 月份随着生长发育进程的加剧,植物进入果期,细胞中积累的溶质增多,因而 Ψ_s^{sat} 值降低。对旱生植物而言,植物可溶性物质主要指渗透调节物质(如可溶性糖、脯氨酸、无机离子等)。在对四合木可溶性糖研究结果(另行发表)发现,9 月份可溶性糖含量在四合木体内积累量均大于 7 月份和 5 月份。由此推测,可溶性糖的积累可能是造成四合木体内可溶性物质浓度在 9 月份最高即 Ψ_s^{sat} 最低的原因之一。另一方面,四合木 AWC 值和 V_a/V_o 的季节变化具有一致性,AWC 值表现为 5 月份(74.39%) < 7 月份(79.43%) < 9 月份(83.99%), V_a/V_o 表现为 5 月份(3.9921) < 7 月份(5.5180) < 9 月份(6.5555)。这与李吉跃等^[19]在研究油松 AWC 值(45%)和侧柏 AWC 值(17.2%)相比明显较高,与李骁等^[11]在研究西鄂尔多斯强旱生小灌木水分参数时绵刺 AWC、 V_a/V_o 值(59.51%, 1.4872)、霸王 AWC、 V_a/V_o 值(51.99%, 1.3047)相比也明显较高,这说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和抗脱水能力,表明四合木同化枝的细胞原生质粘滞性及原生质体的亲水特性,具有较强的干旱适应性特点。由于这两个参数值越大,植物的耐旱性越强。5 月份植物处于营养期,AWC 值和 V_a/V_o 值处于生长季最低值,对应于此期较高的 Ψ_s^{sat} 值,以后随着生长进程的加剧值不断升高,到生长季末,各种生理活动降到最低水平,AWC 值和 V_a/V_o 值增大到最高值,此时由于内质体水的减少,原生质浓度增大,粘滞性增强,这对植物度过不良环境非常有利。说明在生长发育过程中,四合木还可以靠内质体水向质外体水的转化来进行渗透调节,提高其抗旱能力。

Noy-Meir 和 Ginzburg 及 Weatherley 指出,随着组织含水量和水势的下降,高弹性的组织较低弹性组织具有更大的保持膨压的能力^[19,25]。 ϵ^{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。四合木 ϵ^{max} 的季节变化总趋势是,5 月份 > 7 月份 > 9 月份,即随着季节变化逐渐减小,四合木的组织弹性随季节变化提高了,保持膨压的能力增强了。5 月份四合木处于营养生长期 ϵ^{max} 最大,细胞壁坚硬,组织弹性最低,保持膨压的能力最弱,随着生长发与进程的加剧,组织弹性不断升高,9 月份生长季末细胞具有柔软的细胞壁和高的组织弹性,这有利于植物细胞在环境胁迫下能够较快地收缩,从而使细胞能够维持高的膨压并

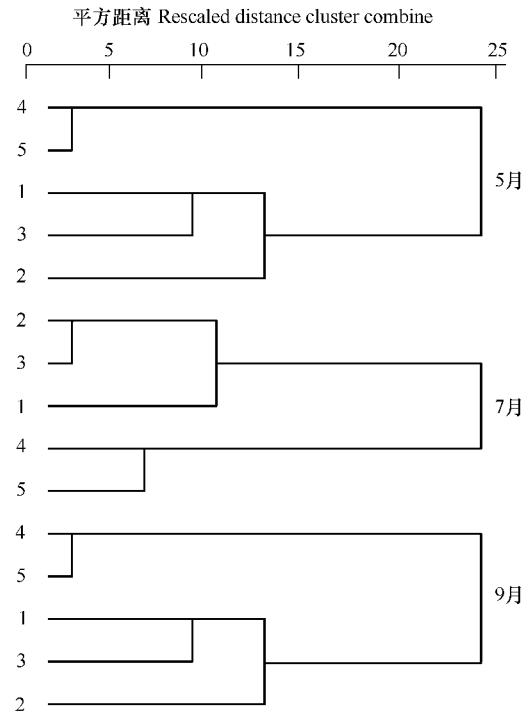


图6 不同生境四合木不同种群保持膨压能力系统聚类图

Fig. 6 System cluster of qp capacity of *Tetraena mongolica* in different habitats

防止细胞壁破裂。

综上所述,由四合木体内水分参数 Ψ_s^{dp} 值和 Ψ_s^{sat} 值、AWC 值、 V_a/V_o 以及 ε^{max} 的季节性变化规律可知,其耐旱性随着 5 月份、7 月份、9 月份逐渐递增,保持膨压能力逐渐增强。并且这种节律性变化与植物生长发育的节律相吻合,即与物候的进程一致,而与外界土壤水分状况的变化进程(7 月份 > 9 月份 > 5 月份)没有明显的关系。这一研究结果与李吉跃等^[19]在研究了京西山区油松、侧柏、白皮松等 7 种人工林树种的水分参数其 Ψ_s^{dp} 值和 Ψ_s^{sat} 值都有其季节性变化规律且这种变化规律主要与树木的物候特点有关的结果相一致。另一方面,5 月份春旱比较突出,土壤含水量处于生长季最低值,此时四合木正值营养生长期,其耐旱能力表现的最弱,加之其分布区恶劣气候环境的影响,可能也是导致四合木种群更新比较困难的重要原因之一。

3.2 四合木水分参数生境间差异性探讨

四合木为古地中海孑遗植物,主要生于海拔 1000 ~ 1300m 处的石质低山、砂砾高地和山前洪积扇地,仅局限分布于西鄂尔多斯地区,在这一地区已生活了上亿年,植物与环境之间已形成了一种相互适应的关系。野外调查发现,四合木群落多出现在地形较高的砾质和沙质高原上,地表多砾石,也出现在覆沙地和丘间壤质土壤上,在四合木的建群作用下,群落中伴生灌木种较多,如霸王、沙冬青、绵刺等。

本文选取低山、台地、丘陵、高平原、倾斜平原 5 个不同生境四合木为研究对象,采用模糊数学隶属函数方法对 5 个样地四合木 5 月份、7 月份和 9 月份 3 次测得水分参数耐旱性综合评价,得出一致性结论 5 号、4 号 > 3 号 > 2 号 > 1 号,这说明四合木水分参数在生境间存在差异,即 5 个生境四合木耐旱性顺序为:倾斜平原、高平原 > 丘陵 > 台地 > 低山。将 5 月份、7 月份和 9 月份 3 次测得水分参数分别进行聚类结果表明:低山、丘陵、台地为一类(A 类),耐旱性较弱;倾斜平原、高平原为一类(B 类),耐旱性较强。方差结果显示,3 个月份 Ψ_s^{dp} 值、 Ψ_s^{sat} 值及 AWC 值均表现为 B 类显著低于 A 类,5 月份 B 类 V_a/V_o 显著低于 A 类。这说明不同生境四合木的渗透调节机制和能力不同,生境为倾斜平原和高平原的四合木组织细胞保持最大膨压和忍耐低水势的能力强,其体内通过增加细胞质浓度进行渗透调节的能力较强;而生境为低山、丘陵和台地的四合木具有更大的质外体水相对含量,具有较强的持水能力和抗脱水能力。

本文对 5 个样地土壤含水量的结果 5 月份、7 月份和 9 月份 3 次测定结果无论是 0 ~ 10cm 和 10 ~ 30cm 均表现为:1 号、2 号、3 号显著高于 4 号、5 号,即 A 类样地显著高于 B 类;结合同一项目四合木根际土壤微生物区系的研究成果^①,A 类样地在土壤营养元素、微量元素、土壤有机质含量及土壤微生物数量方面等都显著高于 B 类样地。这说明 A 类样地的土壤水分和养分都要高于 B 类样地。

进化适应是植物在自然界不断完善其生存、繁衍能力的基本过程。不同生境四合木耐旱性和渗透调节机制不同的原因可能与海拔高度、土壤类型、气候等生态因子存在密切的关系,5 个四合木种群由于所处生境的地形地貌、土壤类型、海拔的不同,导致了土壤温度、土壤水分、土壤养分等环境因子的不同。A 类样地地形为低山、台地和丘陵,群落类型均为四合木群落,海拔相对较高,其土壤类型均为砾石质这在于干旱少雨、风大沙多、土壤含水量非常低的西鄂尔多斯地区,能够减少水分蒸发,提高土壤保水能力,有利于土壤养分转化与循环,从而有效的被植物吸收是非常有利的。B 类样地地形为平原,群落类型为四合木和霸王群落,土壤类型均为沙砾质,蒸发快,土壤保水性差,不利于土壤水分和养分的保持。因此 B 类样地四合木根际土壤干旱程度较高,即 B 类样地所受的干旱胁迫程度大于 A 类样地。为了应对相对严重的土壤干旱胁迫,B 类样地四合木种群体内均有提高一定幅度渗透调节和维持膨压的能力。已有的研究^[26]采用 MPH 技术提取和区分西鄂尔多斯珍稀植物生存生境的地貌、土壤等相关条件的相关性和其组合特征,通过三维图分析揭示了植物的空间分布规律,认为干旱、半干旱荒漠、半荒漠地区土壤分带性依赖于地形地貌景观类型,所以群落的垂直分带性比较明显,土壤为砾石质土,主要建群植被为四合木群落;沙砾质为霸王群落;石质残丘为半日花群落。杨持等^[27]通过四合木异地播种生长量比较以及四合木对土壤的适应性和对水热综合因子的适应性分析认为适

① 李骁,珍稀植物四合木分布区特有微生物区系研究. 内蒙古大学博士学位论文,2007

宜的气候条件加上肥沃的土壤条件是保证四合木生存的环境。

综上所述,生境不同,四合木的渗透调节机制和耐旱性强弱不同,由于四合木分布区存在较大的生境异质性,在其长期适应过程中,生境条件差异导致了植物在生理生态方面的分化,不同生境四合木的水分平衡机制与当地水分条件和极端状况相适应,形成自身独特的水分平衡和保护机制,这是长期进化适应的结果。

References:

- [1] Zhang X S. Principles and optima models for development of maowusu sandy grassland. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1994, 18(1):1—16.
- [2] Li X R, Zhang X S. Biodiversity of shrub community in desert steppe and steppe desert on Erdos Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6):665—669.
- [3] Ma Y Q, Zhang S Z. The phylogeny status of *Tetraena mongolica* Maxim. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1990, 28(2):89—95.
- [4] Cheung Y N S, Tyree M T, Dainty J. water relations parameters on single leaves obtained in a pressure bomb and some ecological interpretations. *Can. J. Bot.*, 1975, 53:1342—1346.
- [5] Wang W L. The application of pressure chamber in the study of water situation in plant. *Plant Physiology Communication*, 1984, (3):52—57.
- [6] Li Q M, Xu H C. The changes of main water parameter in *Pinus tabulaeformis* with season and provenance. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(4):326—335.
- [7] Yang W B. Study on relationship of physio-ecological water to drought resistance for saxaul. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 1996, (3,4):58—63.
- [8] Wang M B, Li H J, Chai B F. Water ecophysiological characteristics of *Caragana korshinskii*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, 28(6):494—501.
- [9] 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.
- [10] Li X, Wang Y C, Zheng R. Water parameters of xeric shrubs in west erdos region(I). *Journal of Desert Research*, 25(4):581—586.
- [11] Li X, Wang Y C, Zheng R. Water parameters of xeric shrubs in west erdos region(II). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5):963—967.
- [12] Wang Y C, Li X. Water characteristics of the xerophytic shrublet *Potania mongolica* during fissurate growth. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):476—483.
- [13] Yang C, Wang Y C, Liu Q, et al. Conservation biology of *Tetraena mongolica*. Beijing: Science Press, 2002. 1—8
- [14] Chen Y Y. Fuzzy Math. Wuhan: Hua zhong Industry Institute Press, 1992. 41—51.
- [15] Zhang J G, Li J Y. A study on water parameters of plantation in areas of west Beijing (III). *Journal of Beijing Forestry University*, 1994, 16(4):46—53.
- [16] 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.
- [17] Guo L S, Tian Y L. Study on drought-resistance evaluation common afforestation species in North China by PV technique. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, *Acta Botanica Sinica*, 1998, 20(3):1—8.
- [18] 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.
- [19] Li J Y. An application of PV technique to study drought resistance of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedling. *Journal of Beijing Forestry University*, 1989, 11(1):3—11.
- [20] Lemcoff J H, Guamaschelli A B, Garau A M, Prystupa P. Elastic and osmotic adjustment in rooted cuttings of several clones of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. from southeast Australia after a drought. *Flora*, 2002, 197:134—142.
- [21] Martinez, Lotts S, Schanck A, Bajji M, Kinet J M. Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161:1041—1051.
- [22] Tyree M T, Jarvis P G. Water in tissues and cells. In: Lange O L, Nobel P S, Osmond C B, Ziegler H eds. *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, Volume 12 B. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982. 35—77.
- [23] Tumer N C, Jones M M. Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. In: Tumer N C, Kramer P J eds. *Adaptation of Plant to Water and High Temperature Stress*. John Wiley & Sons, New York, 1980. 87—89.
- [24] Yang W B, Ren J M, Jia C P. Studied on the Relationship Between Physiological Ecology of Drought-resistance in *Caragana Korshinskii* and Soil Water. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3):239—244.

- [25] Jone M M, Tumer N C, Osmand C B. Mechanism of drought resistance. In: Palag LG, Aspinall D. eds. Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in plants. Academic Press, Sydney, 1981. 15—37
- [26] Han X Z, Ma J W, BAO Buheasier, et al. The Application of ETM and Sample Siets Statistic Data to Study the Distribution Pattern of Endangered Rare Plants in West Ordos Plateau. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(2): 136—141.
- [27] 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.

参考文献:

- [1] 张新时. 毛乌素沙地生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1~16.
- [2] 李新荣, 张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性的研究. 应用生态学报, 1999, 10(6): 665~669.
- [3] 马毓泉, 张寿洲. 四合木系统地位的研究. 植物分类学报, 1990, 28(2): 89~95.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 杨文斌, 包雪峰, 杨茂仁. 梭梭抗旱的生理生态水分关系研究. 内蒙古林业科技, 1996, (3, 4): 58~63.
- [8] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条的水分生理生态学特性. 植物生态学报, 1996, 28(6): 494~501.
- [9] 董学军. 九种沙生灌木水分参数的实验测定及生态意义. 植物学报, 1998, 40(7): 657~664.
- [10] 李骁, 王迎春, 征荣. 西鄂尔多斯地区强旱生小灌木水分参数的研究 (I). 中国沙漠, 25(4): 581~586.
- [11] 李骁, 王迎春, 征荣. 西鄂尔多斯地区强旱生小灌木的水分关系参数 (II). 应用生态学报, 2007, 18(5): 963~967.
- [12] 王迎春, 李骁. 强旱生小灌木绵刺劈裂生长过程中的水分特征. 植物生态学报, 2007, 31(3): 476~483.
- [13] 杨持, 王迎春, 刘强等. 四合木保护生物学. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 陈贻源. 模糊数学. 武汉: 华中工学院出版社, 1992.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张耀甲. 甘肃民勤地区沙枣等植物生理生态学特性的初步研究. 植物学报, 1981, 23(5): 393~399.
- [19] 李吉跃. PV 技术在油松侧柏苗木抗旱特征研究中的应用. 北京林业大学学报, 1989, 11(1): 3~11.
- [24] 杨文斌, 任建民, 贾翠萍. 柠条抗旱的生理生态与土壤水分关系的研究. 生态学报, 1997, 17(3): 239~244.
- [26] 韩秀珍, 马建文, 布和敖斯尔, 等. 利用卫星 ETM 与样方统计数据研究西鄂尔多斯珍稀濒危植物种群分布规律. 遥感学报, 2002, 6(2): 136~141.
- [27] 杨持, 智颖颀, 征荣. 四合木种群的生态适应性. 生态学报, 2006, 26(1): 91~96.