

北京杨水分生理生态特性研究

李洪建, 柴宝峰, 王孟本

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要:对北京杨水分生理生态的研究表明,生长期北京杨蒸腾速率的日变化呈早晚低、中午高的抛物线型。生长期北京杨蒸腾速率(Tr)的平均值为 $598.8\text{mg/gld} \cdot \text{h}$ 。蒸腾速率的日变化分别与光照强度(L)及光照强度(L)与气温(T)和相对湿度(H)的复合因子($L \cdot T$; L/H)相关性极显著。生长期北京杨小枝水势(Wp)的平均值为 -1.0506MPa ;早、晚高、午间低。小枝水势日变化与 L 及复合因子 $L \cdot T$ 、 L/H 相关性极显著。 $8\sim 10$ 月光合速率(Pn)的平均值为 $11.94\text{mg/dm}^2 \cdot \text{h}$;光合速率日变化与 L 日变化的关系显著。北京杨饱和含水时的最大渗透势(Ψ^{sat})、膨压为零时的渗透势(Ψ^{tlp})和质外体水相对含量(AWC)的变化规律表现为从生长期初到生长期末(绝对值)逐渐升高的趋势;而膨压为零时的渗透水相对含量($ROWC^{\text{tlp}}$)和膨压为零时的相对含水量(RWC^{tlp})呈波动变化,但仍具有生长活跃期(5、6 和 8 月份)较高的特点。

关键词:蒸腾速率;小枝水势;光合速率;水分参数;北京杨

Study on the water physio-ecological characteristics of *Populus beijingensis*

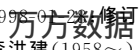
LI Hong-Jian, CHAI Bao-Feng, WANG Meng-Ben (Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The study results on the water physio-ecological characteristics of *Populus beijingensis* showed that; the transpiration rate (Tr) of *Populus beijingensis* was $598.8\text{mg/gld} \cdot \text{h}$ in growing season. The diurnal change of Tr was parabolic shape. The value of Tr was lower in the morning and at nightfall, and higher at noon. The diurnal change in Tr was significantly correlated with light intensity (L), products ($L \cdot T$) of L and temperature (T) and the quotient (L/H) of L and temperature (T) and the quotient (L/H) of L and relative humidity (H). The small branch water potential (Wp) of *Populus beijingensis* was -1.0506MPa in growing season. The correlation between diurnal change in Wp and L , $L \cdot T$ and L/H were significant, respectively. The photosynthesis rate (Pn) of *Populus beijingensis* from August to October was $11.94\text{mg/dm}^2 \cdot \text{h}$. The diurnal change in Pn was significantly correlated with light intensity (L). The seasonal changing trend of osmotic potential at turgor loss point (Ψ^{tlp}), of maximum osmotic potential at water saturation point (Ψ^{sat}), and of relative content of apoplastic water (AWC) were the same; lower (absolute value) at the beginning of the growing season, and higher at the end of growing season. The parameters both relative osmotic water content ($ROWC^{\text{tlp}}$) at turgor loss point and relative water content (RWC^{tlp}) at turgor loss point fluctuated in the growing season, but the higher value during the active periods of the species in growing season (May, June and August) was still obvious.

Key words: transpiration rate; water potential of small branch; photosynthesis rate; water parameters; *Populus beijingensis*

文章编号: 1000-0933(2000)03-0417-06 中图分类号: Q145, Q948 文献标识码: A

近十年来,对植物水分关系的探讨已成为植物生理生态学研究领域的重要课题之一。PV 曲线技术的



应用,为研究树木的水分参数提供了一个新的途径,取得了令人满意的效果^[1~3]。北京杨作为半干旱地区的造林树种,在晋西北地区广泛种植。因此进行其水分生理生态特性的研究是非常必要的。郭连生等对北京杨幼树清晨叶水势与土壤含水量的关系及其抗旱性进行了研究^[4]。然而对北京杨水分生理生态比较全面的研究尚未见报道。本研究在野外条件下对北京杨的蒸腾速率、小枝水势及光合速率的日变化规律及其与环境因子的关系进行了探讨,同时用 PV 曲线技术对其水分参数的季节变化规律进行了测定。其目的是对北京杨的生理生态特征提供一个较为全面的认识,从而为区域植被建设提供科学依据。

1 研究区自然条件及研究方法

1.1 研究区自然条件

研究区位于山西省河曲县砖窑沟流域。曾是国家“七五”科技攻关项目“黄土高原综合治理”的试验示范区之一。本区属典型黄土丘陵沟壑区。年平均气温 8.8℃;年平均降水量 447.5mm;其中生长期 4~10 月份为 393.7mm;年平均相对湿度 48%^[5]。测定 1994 年和 1995 年 4~10 月份的降水量分别为 338.5mm 和 651.6mm,分别为偏旱和特涝年份。本区土壤水分的季节动态主要受降水量及其分配的影响。

1.2 供试林概况

试验用北京杨(*Populus beijingensis*)林栽植于 1985 年,位于流域中部沙坪村北,面积 0.8hm²;海拔 1100m;坡向正北,坡度 25 度。林分密度为 2465 株/hm²;平均株高 4.27m;平均胸径 4.17cm。林下草本植物 10 余种,零星分布,以茵陈蒿、披针叶黄花、阿尔泰狗娃花等类为多见。林地土壤为砂土,养分贫乏;0~60cm 全氮平均 0.03%,有机质 0.14%。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 蒸腾速率(Tr) 用 299-9829/A 型万分之一电子天平,以快速称重法测定。1994 年和 1995 年 5~10 月份每月选定一个标准日测定一个日进程,从 7:00 到 19:00,每 2h 测定 1 次;每次均为 3 个重复。叶片取自树冠中部向阳方向,样品重 2g 左右,约 3~4 片叶。

1.3.2 小枝水势(Wp) 用 ZLZ-4 型植物水分状况仪测定。样枝取自树冠中部向阳方向的枝端小枝,长约 10cm。1994 年(6 月份除外),均与蒸腾速率测定同日同步测定。1995 年小枝水势的测定只在清晨(7:00)和午间(13:00)与蒸腾速率同步进行。

1.3.3 光合速率(Pn) 用 GXH-305 型红外线 CO₂ 气体分析仪测定树冠中部向阳方向连枝叶片的净光合速率。测定时间为 1994 年 8~10 月份。与蒸腾速率和小枝水势的测定时间同步。

1.3.4 环境因子 用 DYM3 型气压表测定大气气压;用照度计和自记温度、湿度计测定光照强度(L , klx)、气温(T ,℃)和大气相对湿度(H ,%)。降水量用简易雨量筒测定。土壤含水率用烘干法测定。测定时间 4~10 月份,在蒸腾和水势测定的当天或前后一天进行,测定深度 300cm。

1.3.5 水分参数 用 PV 曲线技术分析小枝饱和含水时的最大渗透势(Ψ^{sat})、膨压为零时的渗透势(Ψ^{tlp})、膨压为零时的渗透水相对含量($ROWC^{tlp}$)和相对含水量(RWC^{tlp})以及质外体水相对含量(AWC)。

2 试验结果与分析

2.1 蒸腾速率日变化及其与环境因子日变化的关系

2.1.1 蒸腾速率及其环境因子的日变化特征 表 1 为北京杨 1994 年和 1995 年生长期 5~10 月份的蒸腾速率和环境因子的日变化情况。蒸腾速率的日变化均呈单峰型;清晨较低,日最大值 1994 年在 13:00,而 1995 年在 11:00,之后逐渐下降至傍晚的最低值。光照强度和气温的日变化趋势与蒸腾速率的日变化趋势相同;只是光照强度最大值出现的时间 1994 年在 11:00;1995 年在 13:00。而气温的最大值则滞后蒸腾速率最大值所对应的时间,均在 15:00。蒸腾速率最大时对应的光照强度和气温分别为 68.4、78.2klx 和 24.6、21.9℃。而相对湿度的日进程与蒸腾速率的日进程相反,清晨最大,然后逐渐下降,15:00 均降至最低值,分别为 26.1%和 33.0%;相对湿度最小值出现的时间与气温最大值的时间对应。15:00 后,蒸腾速率值下降,而相对湿度上升。蒸腾速率的日变化受光照强度、气温和相对湿度日变化的影响。

表 1 生长期北京杨蒸腾速率与环境因子的日变化(1994~1995 年)

Table 1 Diurnal changes of transpiration rate of *Populus bejinensis* and related environmental factors in 1994 and 1995 during growing season

时间 O'clock	蒸腾速率		光照强度		气温		相对湿度	
	Transpiration rate		Light intensity		Air temperature		Relative	
	(mg/gld·h)		(L,klx)		(T,℃)		humidity (H,%)	
	1994	1995	1994	1995	1994	1995	1994	1995
7:00	539.2	356.6	10.6	15.1	15.2	15.0	62.9	79.2
9:00	625.0	579.5	46.1	52.8	20.0	18.4	50.9	67.2
11:00	811.0	815.5	70.8	78.2	22.6	21.9	39.5	54.1
13:00	1080.4	711.9	68.4	86.7	24.6	23.8	32.1	43.3
15:00	705.4	772.4	51.0	62.7	26.2	25.0	26.1	33.0
17:00	445.4	497.5	10.5	23.3	23.3	23.9	33.2	33.4
19:00	190.7	192.0	2.0	1.8	20.3	21.7	42.0	39.8

2.1.2 蒸腾速率(Tr ,mg/gld·h)日变化与光照强度(L ,klx)、气温(T ,℃)和相对温度(H ,%)日变化的相关分析 分别用蒸腾速率日进程的 7 组数据与环境因子光照强度、气温和相对温度的对应值进行简单相关分析。结果表明,蒸腾速率与光照强度达极显著相关;蒸腾速率与气温及相对温度的相关性不显著。进一步分析表明,蒸腾速率与光照强度和气温、光照强度和相对温度的复合因子($L\cdot T$, L/H)的相关关系均达极显著水平(表 2)。这一结果表明蒸腾速率的日进程是环境因子综合作用的结果。因为环境因子之间存在着相互联系、相互制约的关系;清晨随光照强度增加,气温上升,相对温度降低。同时说明光照强度在 3 个环境因子中的主导地位。

表 2 蒸腾速率(Tr)日变化与环境因子日变化的相关分析

Table 2 Analysis between transpiration rate and light intensity (L),temperature (T) and humidity (H) respectively

系数 Coefficient	$Tr(x)$	A	$B(x)$	r
单因子 Single factor	L	304.67/253.10	8.74/6.91	0.897**/0.957**
	T	-92.97/-105.87	33.28/31.61	0.434/0.472
	H	907.43/695.82	-6.82/-2.53	-0.304/-0.189
复合因子 Intersected factor	$L\cdot T$	321.33/274.44	0.36/0.29	0.902**/0.958**
	L/H	340.00/285.02	275.80/282.03	0.882**/0.937**

1994 年/1995 年: ** $P<0.01$; $df=1,5$

2.1.3 蒸腾速率季节变化和土壤水分季节变化的关系 北京杨生长季 5~10 月各月的平均蒸腾速率排序 1994 年为 9 月(943.3mg/gld·h;单位下同)、8 月(674.0)、5 月(643.0)、7 月(611.7)、6 月(523.4)和 10 月(367.4)。1995 年则为 6 月(983.1)、7 月(726.6)、5 月(606.5)、8 月(473.7)、9 月(413.9)和 10 月(212.3)。1994 年为偏旱年份,并且上一年为特旱年份,4~6 月下旬的降水量仅 38.7mm,此间土壤水分一直呈下降趋势。土壤水分(0~2m)含量排序为 8 月(7.41%;单位下同)、5 月(4.58)、9 月(4.50)、7 月(4.24)、10 月(3.96)和 6 月(3.88)。6 月份的土壤水分是全年的最差时期,其蒸腾速率亦小。7 月上旬开始土壤水分逐渐改善,蒸腾速率亦开始上升。8 月份土壤水分最好,蒸腾速率很大。但对于最大值出现在 9 月份这一现象还难以找到满意的解释,因为 9 月份开始,树木的生理机能已趋于衰退,蒸腾速率理应减小。与 1994 年不同,1995 年为极端丰水年,降水对土壤水分的补充 6 月上旬即开始,9 月份达最大值。土壤水分(0~2m)含量排序为 9 月(10.63)、8 月(8.87)、10 月(7.77)、7 月(5.71)、6 月(4.32)和 5 月(3.37)。蒸腾速率 6 月份最大,7 月份次之,5 月份亦较大。8 月份尽管土壤水分条件很好,但过多的降水量使空气湿度增加、气温降低,从而蒸腾速率并未提高。9、10 月份蒸腾速率一致下降。由此说明,蒸腾速率的季节变化不仅与土壤水分和环境因子有关,而且受林木自身的生长发育节律所制约。同时表明,研究蒸腾速率的季节变

化每月测定一次远远不够。

2.2 小枝水势日变化特点及其与环境因子的关系

2.2.1 小枝水势及环境因子的日变化特征及其关系分析 从表 3 可以看出,生长期北京杨小枝水势的日进程为较对称的抛物线型。7:00 水势较高,13:00 达最低值,之后逐渐上升至最大值。生长期北京杨的平均水势为-1.0506MPa。光照强度和气温的日进程变化趋势与小枝水势相一致,光照强度的最大值出现在 11:00;而气温的最大值出现在 15:00;分别提前和滞后小枝水势最低值 1 个测时。相对湿度则与小枝水势的变化趋势相反。7:00~15:00 时相对湿度下降,小枝水势的绝对值上升;15:00 后相对湿度上升,小枝水势的绝对值下降。

表 3 生长期北京杨小枝水势与环境因子的日变化(1994 年)

Table 3 Diurnal changes of water potential of *Populus beijingensis* and related environmental factors in 1994 during growing season

时间	小枝水势	光照强度	气温	相对湿度
O'clock	Water potential	Light intensity	Air temperature	Relative humidity
	(-MPa)	(L,klx)	(T,℃)	(H,%)
7:00	0.786	9.12	15.33	61.92
9:00	0.957	36.83	19.50	50.42
11:00	1.311	60.42	22.25	40.25
13:00	1.367	57.83	23.83	32.50
15:00	1.267	40.78	25.08	29.42
17:00	1.072	11.47	23.25	34.58
19:00	0.594	2.03	20.58	41.58

表 4 小枝水势与环境因子的相关分析
Table 4 Analysis between water potential and light intensity (L), temperature (T) and humidity (H) respectively

系数	Coefficient	Wp(x)	A	B(x)	r
单因子 Single factor	L		0.7185	0.0106	0.877**
	T		-0.2671	0.0616	0.699
	H		1.7065	-0.0158	-0.620
复合因子 Intersected factor	L·T		0.7244	0.0005	0.907**
	L/H		0.7307	0.3780	0.923**

* * P<0.01;df=1,5

小枝水势主要由林木经过一个夜间的水分恢复状况所决定,或者说主要由土壤水分所决定。因此可以通过测定清晨小枝水势来了解土壤的水分状况。但是对二者的相关关系应进一步深入研究。

表 5 北京杨小枝水势与土壤水分的季节变化(1995 年)

Table 5 Seasonal Changes between water potential of *Populus beijingensis* and soil water content in 1995

月份 Month		4 April	5 May	6 June	7 July	8 Aug.	9 Sept.	10 Oct.
土壤水分(0~2m,%)	Soil water content	3.44	3.37	4.32	5.71	8.87	10.63	7.77
清晨水势(-MPa)	Morning water potential	0.3107	0.1858	0.2872	0.2972	0.1418	0.1241	0.7025
午间水势(-MPa)	Noon water potential	0.2905	0.7092	1.1111	1.4016	0.8612	0.8511	0.9575

2.3 光合速率日变化与光照强度日变化的关系

表 6 为万寿菊的光合速率和光照强度的日进程。可以看出,光合速率和光照强度的变化趋势相同。早、晚较小;最大值在 11:00;之后一直减少到 19:00 的最小值。8~10 月光合速率的平均值为

11.94mg/dm²·h。以光合速率(P_n ,mg/dm²·h)日变化为因变量,光照强度(L ,klx)日变化为自变量进行相关分析,其关系方程为: $P_n=3.8396\text{Ln}(L)-0.0234$,相关系数 $r=0.946(P<0.01;df=1,5)$,为极显著相关。同时发现,在光照强度基本相同的情况下(7:00,12.5klx 和 17:00,13.5klx)光合速率相差较大(11.38 和 9.12mg/dm²·h)。说明在相同条件下,清晨的光合作用大于傍晚。

表 6 光合速率与光照强度日变化的关系

Table 6 Diurnal changes of photosynthesis rate of *Populus beijingensis* and light intensity

时间 O'clock	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
光合速率 Photosynthesis rate (mg/dm ² ·h)	11.38	15.93	17.71	14.05	13.38	9.12	2.0
光照强度 Light intensity (klx)	12.5	38.1	69.0	68.3	49.2	13.5	2.0

2.4 小枝水势日变化与光合速率和蒸腾速率日变化的关系

从小枝水势(表 2)、蒸腾速率(表 1)和光合速率(表 6)日变化规律可以看出,蒸腾速率(1994 年)的最大值与小枝水势的最低值出现的时间相同,均为 13:00,而光合速率的最大值出现在 11:00。1994 年生长期 5~10 月份小枝水势日变化与蒸腾速率日变化的关系为显著相关, r 为 0.873($P<0.05;df=1,5$)。用 1994 年 8~10 月份 3 次的小枝水势平均值与相应时间的蒸腾速率和光合速率值进行相关分析, r 分别为 0.847($P<0.05;df=1,5$)和 0.648。小枝水势与蒸腾速率的相关系数大于它与光合速率的相关系数,这一结果和周海燕等^[6]对 3 种沙生植物测定的结果相一致。虽然小枝水势与光合速率的相关性达不到显著水平,但它对光合速率仍有较大影响。上节提到的在相同光照条件下,清晨光合速率大于傍晚,明显是水势在起作用。因为清晨(7:00)气温和光照明显低于傍晚(17:00),而水势相差则较大(−0.781 和 −1.031MPa),显然是由于一夜的水分恢复,清晨树木的水分状况较好,从而使得清晨的光合速率大于傍晚。

2.5 PV 曲线主要水分参数的季节变化

2.5.1 膨压为零时的渗透势(Ψ^{tlp})和饱和含水量时的最大渗透势(Ψ^{sat}) 膨压为零时的渗透势和饱和含水量时的最大渗透势作为一类衡量植物抗旱性能强弱的指标已得到一致认可;其值愈低,植物的抗旱性愈强^[2]。从图 1(左)可看出,生长期 5~9 月份,除 8 月份其值略有波动外,它们的绝对值总体呈上升趋势。这种变化趋势与其本身的发育节律相一致。5、6 月份正值北京杨新枝生长和放叶时期,尽管此时土壤水分条件较差,但其生理活动仍较强烈, Ψ^{tlp} 和 Ψ^{sat} 较高,植物抗旱性较弱。此后,随着新枝的木质化和新叶的革质化以及植物的耐旱锻炼, Ψ^{tlp} 和 Ψ^{sat} 逐渐减低,抗旱性逐渐提高;7 月下旬后,雨季来临,尽管此时树木的木质化程度增加,但伴其而来的土壤水分的极大改善,使树木进入第二个生长活跃期, Ψ^{tlp} 和 Ψ^{sat} 又有所增加(8 月份);进入生长期末(9 月中、下旬),随着当年新枝的完全木质化和新叶的完全革质化, Ψ^{tlp} 和 Ψ^{sat} 达最低值,其抗旱性进一步增强。但是对于 10 月份 Ψ^{tlp} 和 Ψ^{sat} 升高这一事实,有待进一步研究。因为本次测定在 10 月 11 日进行,可以说在晋西北此时北京杨的生长期已经或将近结束。此时,北京杨大部分树叶已经脱落,剩余部分已全部发黄,树木的生理活动正处于一个交替的特殊时期。本次的测定结果更接近于 11 月份的测定结果。因此有待进一步深入研究。

2.5.2 膨压为零时的渗透水相对含量(ROWC^{tlp})和相对含水量(RWC^{tlp}) 作为另一类与植物耐水分胁迫能力有关的指标,一般认为膨压为零时的渗透水相对含量和相对含水量和植物的耐水分胁迫能力呈负关联,其值愈大,植物耐水分胁迫的能力愈弱,反之则强。而且它们也是随季节和新枝叶的发育程度而变化的一对指标^[3]。从图 1(中)可看出,北京杨的膨压为零时的渗透水相对含量和相对含水量的季节变化呈波动性,但变幅并不大。生长期初 5、6 和 8 月份是北京杨的生长活跃期,其值相对较大;7 月份土壤水分条件较差,又值高温、低湿时期,其值较低;生长期末的 9、10 月份其值降至全年最低,其耐水分胁迫能力提高。

2.5.3 质外体水相对含量(AWC) 与前二类水分参数相比,它的季节变化过程与膨压为零时的渗透势和饱和含水量时的最大渗透势更具有-致性,呈总体上升趋势(图 1,E)。5~8 月份 AWC 变化幅度较小,在 0.22~0.30 之间;进入 9 月份,其值明显增加,10 月份继续上升到最大值。 AWC 愈大,组织的渗透势愈大,植物的抗旱性愈强。因此 AWC 所反映的北京杨耐旱能力季节变化特点与膨压为零时的渗透势和饱和含水量时的最大渗透势所反映的规律其本一致;生长期初,抗旱性较差,生长期末,其生理活动降至最低

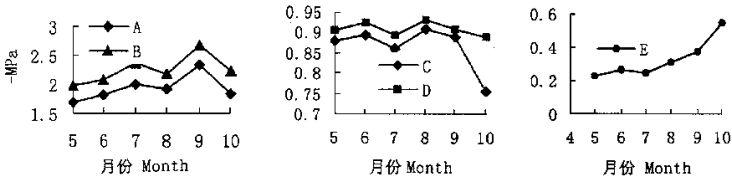


图1 北京杨 PV 曲线主要水分参数的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of main parameters on PV curves of *Populus beijingensis*

A 饱和含水时的最大渗透势 (Ψ^{sat}) Maximum osmotic potential at water saturation point, B 膨压为零时的渗透势 (Ψ^{tlp}) Osmotic potential at turgor loss point, C 膨压为零时的渗透水相对含量 (ROWC^{tlp}) Relative osmotic water content at loss point, D 膨压为零时的相对含水量 (RWC^{tlp}) Relative water content at loss point, E 质外体水相对含量 (AWC) Relative content of apoplastic water

水平,抗旱性相应提高。

3 小结

3.1 北京杨 5~10 月份蒸腾速率的平均值为 $598.8 \text{ mg/gld} \cdot \text{h}$ 。日变化规律呈单峰型;但个别测定日(如 1994 年 6 月份、1995 年 7 月份)蒸腾速率的日变化呈“双峰”型,但下降幅度较小。蒸腾速率的日变化是环境因子综合作用的结果,光照对其影响最大。蒸腾速率的季节变化受土壤水分、气候条件和树木自身的生长发育节律影响。

3.2 北京杨 1994 年 5~10 月份小枝水势的平均值为 -1.0506 MPa 。日变化规律呈较对称的抛物线型。光照对小枝水势影响较大。小枝水势作为林木本身水分状况的反映,对蒸腾速率和光合速率都有一定影响;水势对蒸腾速率影响大于它对光合速率的影响。生长期 6~9 月份清晨水势季节变化与土壤水分的关系明显。

3.3 光合速率的日变化呈明显的偏态分布;8~10 月份光合速率 (P_n) 的平均值为 $11.94 \text{ mgCO}_2/\text{dm}^2 \cdot \text{h}$ 。其最大值出现在 11:00,午后有明显减低现象(8 月份和 10 月份)。相同光照条件下,清晨的光合速率明显大于傍晚的光合速率,与清晨树木本身的水分状况较好有很大关系。

3.4 3 类水分参数 (Ψ^{tlp} 、 Ψ^{sat} 、 ROWC^{tlp} 、 RWC^{tlp} 和 AWC) 季节变化过程,不仅和树木本身生长发育节律相一致,而且与土壤水分的季节变化有较大关系。但不同时期影响水分参数主导因子不同;生长期初、末树木本身的发育节律起主导作用;而 6~9 月份,土壤水分对水分参数有较大影响。从 3 类水分参数看,膨压为零时渗透势和饱和含水量时最大渗透势和质外体水相对含量两类能更好地对北京杨的抗旱性进行评价。

参考文献

- [1] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究(3). 北京林业大学学报, 1991, 13(增 2): 230~239.
- [2] 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): 326~333.
- [3] 郭连生, 田有亮. 对几种针阔叶树木耐旱性生理指标的研究. 林业科学, 1989, 25(5): 389~394.
- [4] 郭连生, 田有亮. 八种针阔叶幼树清晨叶水势与土壤含水量的关系及其抗旱性研究. 生态学杂志, 1992, 11(2): 4~7.
- [5] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条 (*Garagana Korshinskii*) 的水分生理生态学特性. 植物生态学报, 1996, 20(6): 486~501.
- [6] 周海燕, 黄子琛. 不同时期毛乌素沙区主要植物种光合作用和蒸腾作用的变化. 植物生态学报, 1996, 20(2): 120~131.