

黄土高原陕北丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性研究*

单长卷^{1,2} 梁宗锁^{1**} 韩蕊莲¹ 郝文芳¹

(¹西北农林科技大学,中国科学院·水利部水土保持研究所,杨凌 712100;²河南科技学院 生命科技学院,新乡 453003)

【摘要】 对黄土高原丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性进行了初步研究.结果表明,不同立地刺槐林地 0~500 cm 土壤平均含水量(2003年)分别为阳坡 6.96%、半阳坡 7.62%、半阴坡 8.06%、阴坡 8.87%,阴坡、半阴坡与阳坡差异达极显著,与半阳坡达显著水平,半阳坡与阳坡差异显著,而阴坡与半阴坡差异不显著.不同立地条件下刺槐叶片相对含水量和饱和亏与各立地土壤含水量关系密切,阳坡刺槐叶片相对含水量和叶水势始终维持在较低水平,而半阴坡和阴坡尤其是阴坡维持在较高水平.刺槐日蒸腾平均值大小顺序为阴坡($4.07 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 半阴坡($3.89 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 半阳坡($3.05 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 阳坡($2.70 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),各立地刺槐蒸腾出现较大差异的时间在 11:00 和 13:00.不同立地条件除阳坡外其刺槐蒸腾速率均与光照强度显著相关,各立地均与大气相对湿度显著相关,与土壤水分密切相关.阴坡生物量最高($8.50 \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$),高于其他 3 种立地,阳坡最低($5.79 \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$).

关键词 刺槐 水分生理生态 立地 黄土高原

文章编号 1001-9332(2005)07-1205-08 **中图分类号** S792.27 **文献标识码** A

Characteristics of *Robinia pseudoacacia* water physiological ecology under different habitats in North Shaanxi gully areas of Loess Plateau. SHAN Changjuan^{1,2}, LIANG Zongsuo¹, HAN Ruilian¹, HAO Wenfang¹ (¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; ²Department of Life Sci-Tech, Henan Institution of Sci-Tech, Xinxiang 453003, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(7): 1205~1212.

With locust (*Robinia pseudoacacia*), the main tree species in afforestation, as test material, this paper studied the characteristics of its water physiological ecology and productivity under four habitats, i. e., sunny, shady, semi-sunny and semi-shady hillsides, in the North Shaanxi gully areas of Loess Plateau. The mean water content in 0~500 cm soil layer was 8.87% (shady), 8.06% (semi-shady), 7.62% (semi-sunny), and 6.96% (sunny), respectively. There was a significant discrepancy between shady, semi-shady, semi-sunny and sunny hillsides ($\alpha = 0.01$), and the difference between shady, semi-shady and semi-sunny, as well as between semi-sunny and sunny hillsides was also significant ($\alpha = 0.05$). Remarkable relationships were found between leaf RWC, locus WSD and soil water content (SWC). The leaf RWC and locust water potential under sunny hillside were lower, but those under shady hillside were higher. The daily mean transpiration was in order of shady ($4.07 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > semi-shady ($3.89 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > semi-sunny ($3.05 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > sunny ($2.70 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) hillside. The remarkable difference of transpiration appeared at 11:00 and 13:00, and there existed a remarkable relationship between transpiration and light intensity, RH and soil water content. All of these resulted in a diversity of locust biomass under different habitats, the highest under shady hillside, and the lowest under sunny hillside, and the differences between different habitats were all significant. It could be concluded that soil water content was the main factor affecting locust growth.

Key words *Robinia pseudoacacia*, Water physiological ecology, Habitat, Loess Plateau.

1 引言

水分是黄土高原地区影响植被生长的限制性生态因子^[4,6],因而长期以来水分问题成为黄土高原植被恢复和生态建设研究的主攻方向.刺槐(*Robinia pseudoacacia*)因其抗旱、耐贫瘠等特点而成为黄土高原地区主要的水土保持树种^[2,13],几十年来人工刺槐林得到大面积的营造,但刺槐的耗水性特强,因而伴随而来的是严重的林地土壤水分亏缺,严重制约了黄土高原的植被建设.为寻求解决土壤水分亏缺的理论依据和方法,众多学者对林地水

分进行了广泛的研究^[6,8,9,17,19,24,28],但从生理生态角度进行的研究报道较少.此外,蒸腾耗水是刺槐林地土壤水分消耗的主要方式^[10,12,14,15,21,23],因而对刺槐林地蒸腾速率的研究对探究不同立地条件下刺槐水分关系也具有重大意义.本文选择阳坡、半阳坡、半阴坡和阴坡 4 种典型立地对人工刺槐林地水分生理生态特性及刺槐水分生产力进行了初步研

* 国家自然科学基金项目(90302005)、中国科学院“西部之光”人才基金项目(2001-1)和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX1-06)

** 通讯联系人. E-mail: Liangzs819@163.net

2004-07-02 收稿, 2004-12-20 接受.

究,以便揭示不同立地条件下刺槐生长与土壤水分的关系,为指导黄土高原刺槐人工林建设提供依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 试验区概况

试验区位于陕西省延安市安塞县高桥乡任台流域,属黄土丘陵沟壑区,气候属中温带大陆性季风气候,在植被区划上属于森林草原带。年日照总时数为 2 397.3 h,年辐射总量为 $493 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,年均气温 $8.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $3 824.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $3 524.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 513 mm,年际变率大,枯水年只有 300 mm 左右,丰水年则在 700 mm 以上,年内分配不均,7~9 月的降雨量较集中,年蒸发量大于 1 400 mm。土壤主要为黄绵土。植被类型主要为人工林和天然草地。所选立地为阳坡、半阳坡、半阴坡和阴坡,样地基本情况见表 1。

表 1 立地基本情况

Table 1 Conditions of different habitats

立地 Site types	树龄 Tree age (yr)	海拔 Elevation (m)	坡度 Slope ($^{\circ}$)	林分密度 Density (No. hm^{-2})
阴坡 Shade	12	1 220	25	2 460
半阳坡 Semi-sunny	12	1 200	28	2 800
阳坡 Sunny	12	1 240	26	2 300
半阴坡 Semi-shade	12	1 195	17	3 000

2.2 研究方法

2003 年在刺槐生长季内对阳坡、半阳坡、半阴坡和阴坡人工刺槐林地水分生理生态特性进行了研究。土壤含水量的测定:生长初期(5 月)、生长中期(7 月)和生长末期(9 月)在阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡样地采用土钻法各测一次土壤含水量,每次 3 次重复,取样深度为 500 cm,每 20 cm 为一层,分别取样测定,烘干法求其土壤含水率;蒸腾速率及相关环境因子的测定:在生长初期(5 月)、生长中期(7 月)和生长末期(9 月)对各样地选择晴朗天气各测一次,从 7:00 测至 19:00,每隔 2 h 测一次,每次 3 次重复,用 Li-1600 型稳态气孔计测定。光照强度(L_i),大气相对湿度(RH, %),气温($^{\circ}\text{C}$)及叶室温度($^{\circ}\text{C}$),用 Li-1600 型稳态气孔计与蒸腾速率的测定同步进行,每次 3 次重复;叶水势、叶片相对含水量和饱和亏的测定:在生长初期、中期和末期对各样地刺槐叶水势、叶片相对含水量和饱和亏进行测定,每个指标均为 3 次重复,具体方法见文献^[3]。数据采用 SAS 软件处理。

3 结果与分析

3.1 不同立地条件下的环境因子

不同立地由于自身立地条件的不同,而使它们在接受太阳辐射、吸收降水量等方面产生差异,形成了各自不同的林内小环境^[2,7]。通过观测发现,不同立地小环境的差异主要体现在大气相对湿度、光照强度和土壤水分上。

图 1 反映了 2003 年 7 月 25 日不同立地大气温度和大气相对湿度的日变化进程。从图 1 可以看出,4 种立地大气温度的日变化均表现为单峰型,在 13:00 时达最高值。4 种立地的大气相对湿度都呈现以下规律:日出后,随时间的推进,各立地大气相对湿度均呈下降趋势,均在 13:00~15:00 时达全天最低值,然后又不同程度地略有升高。最低值(32%)出现在阳坡 13:00。从图 2 可以看出,4 种立地光照强度随着时间的推移而迅速升高,均在 13:00~15:00 之间达到最大值,然后都呈下降趋势。阳坡、半阳坡、半阴坡与阴坡的最大值分别为 $1 410$ 、 $1 355$ 、 $1 100$ 和 $900 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,各坡向光照强度的差异达到极显著水平。表 2 为各立地 7:00~19:00 大气相对湿度日均值差异显著性比较。从表 2 可知,阴坡、半阴坡与阳坡、半阳坡差异极显著,阴坡和半阴坡差异不显著,阳坡和半阳坡差异不显著。阳坡、半阳坡、半阴坡、阴坡的光照强度平均值(表 3)分别为 798、752、732 和 $535 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

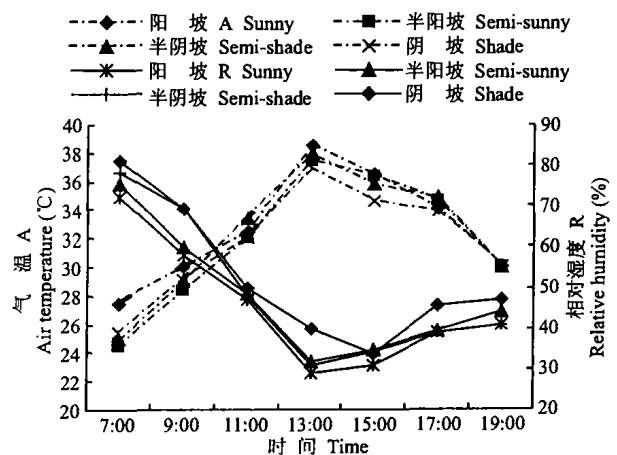


图 1 不同立地刺槐林气温和相对湿度日变化

Fig. 1 Daily variation of temperature and relative humidity in different habitats.

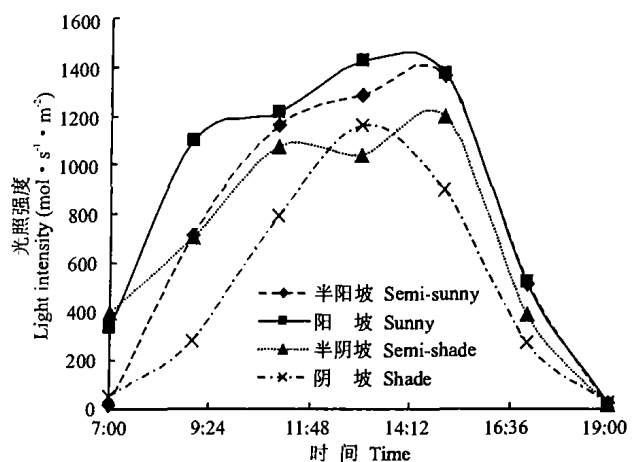


图 2 不同立地刺槐林光照强度日变化

Fig. 2 Daily variation of light intensity in different habitats.

表2 不同立地大气相对湿度日均值差异显著性比较(2003年7月25日)

阴坡 Shade	半阴坡 Semi-shade	半阳坡 Semi-sunny	阳坡 Sunny
51% Aa	49.3% Aa	45.1% Bb	44% Bb

表3 不同立地刺槐林大气相对湿度和光强日均值(2003年7月25日)

立地 Site types	相对湿度 RH (%)	光强 Light intensity ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
阳坡 Sunny	44	798
半阳坡 Semi-sunny	45.1	752
半阴坡 Semi-shade	49.3	732
阴坡 Shade	51	535

从图3可知,在刺槐生长的3个生长时期土壤含水率的大小顺序均为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡.对比图3a和图3c可看出,不同立地从生长初期到生长末期之间其100cm以上的土壤水分均有所增加,这主要与2003年刺槐生长季内降雨量较大且历时较长有关.半阳坡和阳坡在100~400cm土层

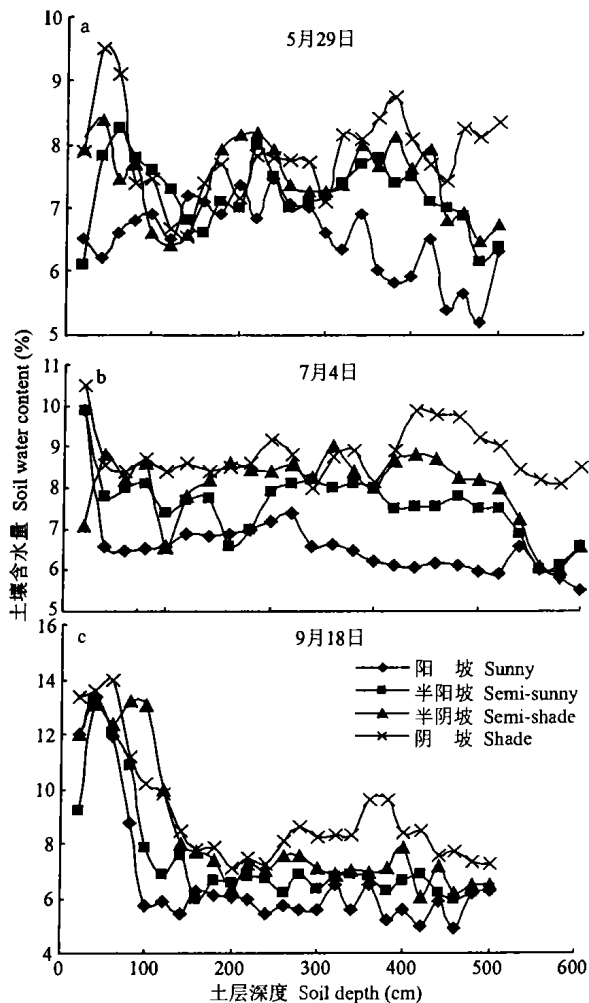


图3 不同立地土壤水分含量(2003)
Fig.3 Soil water content in different habitats.

内土壤水分有所降低,400~500cm之间变化不大;阴坡在0~500cm土层内土壤水分均有所增加;半阴坡除150~250cm之间和300cm左右土壤水分有所降低外,其余各土层均有所增加.不同立地土壤水分在生长季内的上述变化可能与各自刺槐根系的分布特征有关^[1,11,16,30].

不同时期(2003年5~9月)各立地间土壤水分的方差分析见表4.从表4可看出,各时期不同立地土壤平均含水量(0~500cm)间均有极显著差异.尤其是7月4日和9月18日的测定结果,F值分别为15.91**和14.17**(**表示 $\alpha=0.01$ 水平上差异显著,下同).

表4 不同立地条件下土壤含水量方差分析(2003年)

日期 Date	差异源 Variation source	SS	df	MS	F	F _{0.01}
5.29	处理间 Handdled	4.12	3	1.37	12.33**	7.59
	重复间 Random error	0.69	8	0.08		
	总计 Total	4.81	11			
7.4	处理间 Handdled	7.3	3	2.43	15.91**	7.59
	重复间 Random error	1.58	8	0.19		
	总计 Total	8.88	11			
9.18	处理间 Handdled	11.96	3	3.98	14.17**	7.59
	重复间 Random error	2.25	8	0.28		
	总计 Total	14.21	11			

整个生长季节(2003年4~9月)4种立地土壤5m深度的平均含水量分别为:阴坡8.87%,半阴坡8.06%,半阳坡7.62%,阳坡为6.96%.经多重比较发现阴坡、半阴坡与阳坡差异达极显著,与半阳坡达显著水平,半阳坡与阳坡差异极显著,而阴坡与半阴坡差异不显著.造成以上差异的原因,主要与不同立地的坡向有关.各立地坡向不同,使其接受的太阳辐射强度也不相同,造成能量吸收不同,从而导致各立地土壤水分的差异.阴坡与半阴坡差异不显著,可能与两种立地的立地条件和林内小环境相差不大有关.

3.2 叶片相对含水量

图4为2003年刺槐不同生长时期即5月26日、7月26日、9月18日上午10:00不同立地刺槐叶片相对含水量(RWC)的测定值.从图4可以看出,5月26日,阴坡RWC最高,为96%;阳坡最低,为89%,二者差异达显著水平,其它立地类型半阴坡、半阳坡RWC依次为94%、92%,半阴坡与阳坡达显著水平;7月26日,阴坡RWC最高,为94%;阳坡最低,为87%,二者差异达显著水平,半阴坡和半阳坡分别为93%和91%,半阴坡和半阳坡与阳坡差异达显著水平;9月18日,阴坡RWC最高,为92%;阳坡最低,为81%;半阴坡和半阳坡分别为

91%和89%，阴坡、半阴坡与阳坡差异达极显著水平，半阳坡与阳坡差异达显著水平。从图4还可看出，随着生长的进行，各立地刺槐叶片RWC均呈下降趋势。就立地而言，不同生长时期刺槐叶片RWC的大小次序均为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡。由以上分析可知，生长在不同立地上的刺槐由于受到不同土壤水分、光照和温湿度的影响而使得各自水分状况相应地发生了不同程度的改变，这是植物对立地条件的生态生理性反应。

3.3 叶片水分饱和和亏

水分饱和亏(WSD)是植物组织的饱和含水量与实际含水量的差值，以相对于饱和含水量的百分数表示，饱和亏愈大说明水分亏缺愈严重^[3,22]。图5反映了2003年不同生长时期各立地条件下刺槐叶片水分饱和和亏的情况。由图5可知，随着生长时间的推移，各立地刺槐叶片WSD均呈增大趋势。在生长末期，各立地类型刺槐叶片WSD均达最大值，阳坡最大，达到了18%，阴坡最低，为7%，其它立地类型半阳坡为11%，半阴坡为9%。对不同立地刺槐叶片

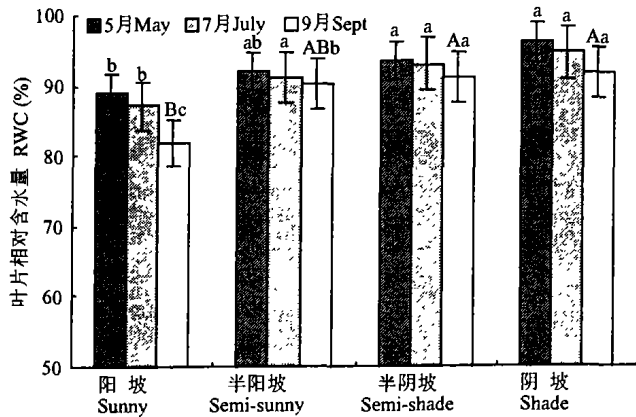


图4 不同生长时期刺槐叶片相对含水量(2003)
Fig.4 Leaf relative water content of locust in different growth period. 大写母为 $\alpha = 0.01$ 水平差异显著, 小写字母为 $\alpha = 0.05$ 水平差异显著 Capital and small letters represent significant difference at 1% and 5% level, respectively. 下同 The same below.

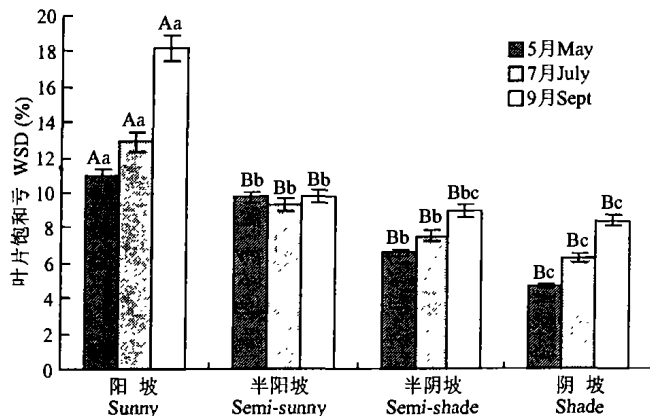


图5 不同生长时期刺槐叶片水分饱和和亏(2003年)
Fig.5 Leaf water saturated deficit of locust in different growth period.

WSD进行多重差异显著性比较,结果表明,阳坡叶片WSD与其它立地差异均达极显著水平,阴坡与半阳坡差异达显著水平。

3.4 不同立地条件下刺槐叶水势的对比

叶水势是反映植物水分状况的重要水分生理指标^[5,26]。从图6可看出,在一天内,不同立地条件下刺槐叶水势的变化规律相同,均是上午最高,中午最低,下午又有所回升。但就立地之间来看,在一天之内,叶水势的大小顺序均为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡。结合不同立地的水分条件可知,不同立地叶水势的上述差异是因各立地水分条件不同所致。

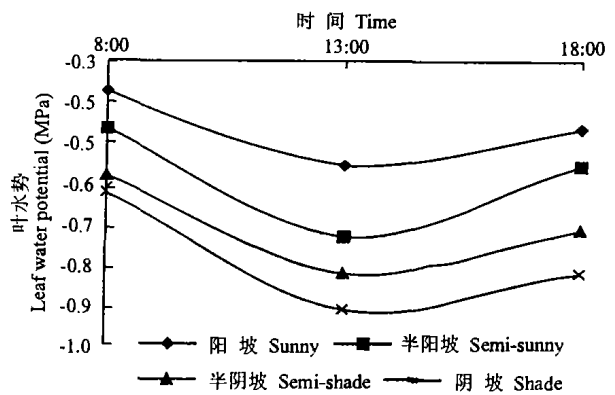


图6 不同立地刺槐叶水势日变化
Fig.6 Daily variation of leaf water potential of locust in different habitats.

3.5 刺槐蒸腾速率

图7是2003年7月25日不同立地刺槐蒸腾速率日变化趋势图。半阴坡清晨接受太阳辐射能较多,蒸腾较其他立地要强烈,蒸腾速率达到 $2.18 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在9:00~13:00之间,各立地蒸腾速率均呈上升趋势,除阴坡外,其他立地均在13:00时达最大值,阳坡、半阳坡、半阴坡分别为 6.51 、 6.62 和 $8.19 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,阴坡由于水分条件较好,能够较长维持保卫细胞膨压,因此,阴坡在11:00~13:00之间,其蒸腾速率较其他立地都为强烈。在

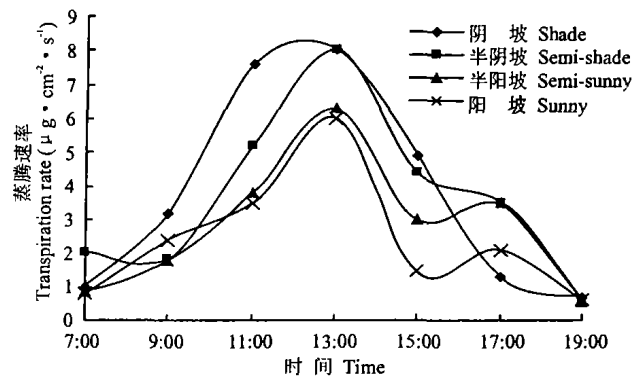


图7 不同立地刺槐蒸腾速率(2003.7.25)
Fig.7 Daily variation of transpiration rate of locust in different habitats in July.

13:00~19:00 之间,阴坡和半阴坡都呈下降趋势.阳坡、半阳坡在 13:00 以后,蒸腾速率呈下降趋势,在 17:00 时又有所回升,这可能与叶片水势经过一段时间恢复有所升高有关.图 8 为 2003 年 7 月 25 日不同立地刺槐蒸腾速率日均值,阳坡、半阳坡、半阴坡和阴坡的蒸腾速率分别为 2.70、3.05、3.89 和 4.07 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.其中,阴坡、半阴坡与阳坡、半阳坡差异显著,阴坡和半阴坡差异不显著,阳坡和半阳坡差异不显著.

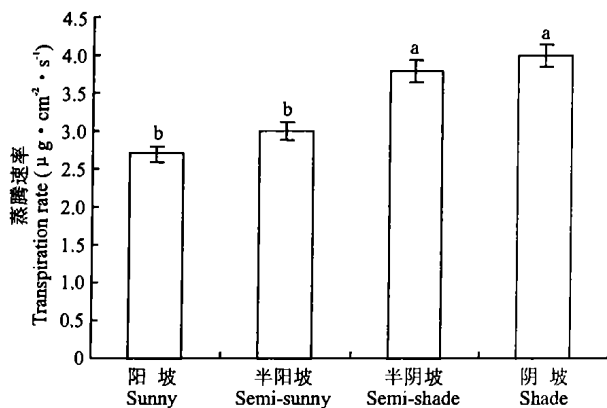


图 8 不同立地刺槐蒸腾速率日均值(2003.7.25)

Fig. 8 Mean value of daily transpiration rate of locust in different habitats in July.

表 5 为不同立地条件下刺槐蒸腾速率全天不同时间差异显著性比较表.从表 5 可看出,在 7:00 时半阴坡和阴坡之间差异不显著,半阳坡和阳坡之间差异不显著,半阴坡、阴坡与半阳坡和阳坡差异显著.9:00 时半阴坡、阴坡和半阳坡 3 种立地之间的蒸腾差异不显著,半阴坡、阴坡和半阳坡与阳坡差异显著.在 11:00 时,阴坡与半阴坡、半阳坡、阳坡之间差异显著,后三者之间则差异不显著.各立地刺槐蒸腾出现较大差异的时间在 13:00 时,在 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 水平上各立地之间差异均较明显,此时各立地正处在刺槐蒸腾较强烈的时期,由于各立地土壤水分状况、空气相对湿度及气温各不相同,因此,此

表 5 不同立地条件下刺槐蒸腾速率(2003 年 7 月)全天差异显著性比较

Table 5 Difference of transpiration rate of locust in different habitats

时间 Time	阴坡 Shade	半阴坡 Semi-shade	半阳坡 Semi-sunny	阳坡 Sunny
7:00	1.901a	2.183a	1.370b	1.170b
9:00	3.213Aa	3.232Aa	2.385Aa	1.572Ab
11:00	8.200Aa	3.296Abc	3.460Ab	3.232Abc
13:00	4.782Bb	8.000Aa	3.897BbCc2	6.45BbCcDd
15:00	4.924a	4.469a	1.229bc	1.338b
17:00	1.210ab	3.758a	2.314ab	2.098ab
19:00	0.659a	1.011a	0.994a	0.840a

注:大写字母为 $\alpha=0.01$ 水平差异显著,小写字母为 $\alpha=0.05$ 水平差异显著 Capital and small letters represent significant difference at 1% and 5% level, respectively.下同 The same below.

时各立地蒸腾差异较大.15:00 时,阴坡和半阴坡与阳坡、半阳坡之间差异显著,而阴坡和半阴坡之间、半阳坡和阳坡之间差异不显著.在 17:00,半阴坡与阳坡之间差异显著,与半阳坡和阴坡之间差异不显著.在 19:00 时,各立地蒸腾速率差异均不显著.从全天各立地蒸腾速率的日进程比较可知,土壤水分条件是影响蒸腾速率高低的主要因素之一.

3.6 气孔扩散阻力

图 9 表明,不同立地刺槐气孔扩散阻力均随时间而呈升高趋势,而且午后 15:00 以前各立地差别不大,15:00 时,阴坡和半阴坡气孔扩散阻力与阳坡和半阳坡差别较大,15:00 以后,半阴坡气孔扩散阻力明显小于其他立地.图 10 为不同立地条件下气孔扩散阻力日均值,半阴坡最小,为 8.07 $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$,其次为阴坡,再次为半阳坡,阳坡最大,为 10.70 $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$.从图 10 可以看出,各立地气孔扩散阻力的变化规律与蒸腾速率的变化趋势呈负相关关系.

3.7 不同立地条件下刺槐生长与生产力

黄土高原人工刺槐林营造的成功与否,主要体现在刺槐生长状况和生产力上,只有生长良好的刺槐林才能够郁闭成林,真正发挥水土保持林的生态

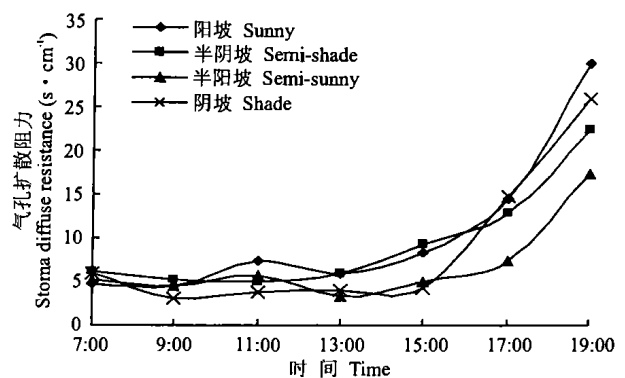


图 9 不同立地刺槐叶片气孔扩散阻力(2003.8.20)

Fig. 9 Daily variation of leaf stoma diffuse resistance of locust in different habitats in August.

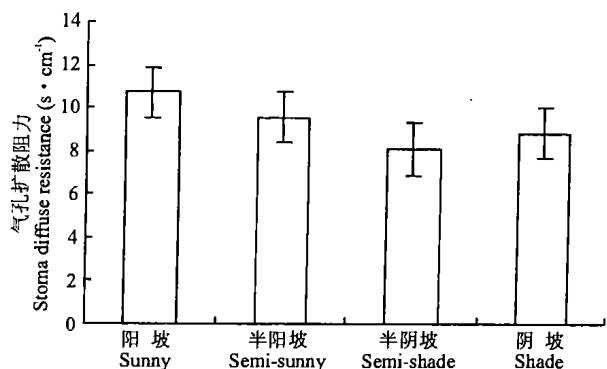


图 10 不同立地刺槐叶片气孔扩散阻力日均值(2003.8.20)

Fig. 10 Mean value of leaf stoma diffuse resistance of locust in different habitats in August.

效益.因此,在分析不同立地条件下刺槐水分关系的基础上,对刺槐生长状况和生产力进行研究是十分必要的.本试验对4种立地条件下2003年生长季末12年生刺槐株高、胸径和地上部生物量进行了观测,并分析了其生理生态原因.

表6为不同立地下3个指标方差分析及多重比较结果.从表6可以看出,阴坡与阳坡、半阳坡差异极显著,与半阴坡差异不显著;半阳坡、阳坡和半阴坡差异不显著.表6表明,胸径愈大,刺槐生长愈旺盛.从表6还可看出,阴坡和半阴坡的胸径最大,半阳坡次之,阳坡的胸径最小,其中,阴坡与半阳坡、阳坡差异极显著,与半阴坡差异不显著,半阴坡与阳坡差异极显著,与半阳坡差异不显著,半阳坡与阳坡差异不显著.从而可以得出,阴坡、半阴坡刺槐生长状况要好于阳坡,半阳坡的生长状况居中.

表6 不同立地条件下刺槐地上株高、胸径、生物量多重比较(2003年)

Table 6 Height and diameter at breast height and biomass of locust in different habitats

立地类型 Site type	株高均值 Height(m)	胸径均值 DBH(cm)	生物量均值 Biomass(kg)
阳坡 Sunny	5.33 ± 0.20Bb	5.40 ± 0.10Cc	5.79 ± 0.27Cc
半阳坡 Semi-sunny	5.91 ± 0.23Bb	6.06 ± 0.13BCbc	6.46 ± 0.18BCc
半阴坡 Semi-shade	6.40 ± 0.22ABab	6.80 ± 0.12ABab	7.12 ± 0.16Bb
阴坡 Shade	7.10 ± 0.19Aa	7.30 ± 0.15Aa	8.50 ± 0.30Aa

图11是不同立地刺槐新枝长度和新枝基部粗度在2003年生长季内的生长曲线.由图11可知,不论新枝长度还是新枝基部粗度都随生长的进行,其生长速率逐渐减小,尤其是在生长中期即7月以后.各立地刺槐新枝生长速率变化的趋势基本相同,各立地刺槐新枝长度和粗度在生长初期即4月17日至6月份左右,其生长速率均最快,随时间的推进,生长速率均逐渐变慢,这与刺槐生长节律相符.就新枝长度生长的快慢而言,在5月25日以前各立地生长速率基本相同,此后各立地新枝长度的生长速率逐渐变慢,但变慢的程度各不相同,阴坡和半阴坡变慢较缓,半阳坡和阳坡变慢较快,在7月份以后,半阳坡和阳坡新枝长度生长很缓慢,增长不大,阴坡和

表7 不同生长时期不同立地条件下刺槐新枝长度及粗度多重比较

Table 7 Twig length and twig diameter at bottom of locust under different habitats in different growth stages

测定指标 Test index	生长时期 Growth stages	阴坡 Shade	半阴坡 Semi-shade	半阳坡 Semi-sunny	阳坡 Sunny
新枝长度 Twig length	5月 May	25.30 ± 1.92a	22.00 ± 1.30b	21.50 ± 1.50b	20.70 ± 1.15b
	7月 July	39.10 ± 1.87Aa	37.00 ± 2.00Aa	31.10 ± 1.69Bb	27.90 ± 1.90Bc
	9月 Sept.	48.20 ± 2.19Aa	43.80 ± 1.99Aa	33.30 ± 1.31Bb	29.50 ± 1.76Bb
新枝粗度 Twig diameter at bottom	5月 May	0.320 ± 0.005Aa	0.303 ± 0.007Aa	0.277 ± 0.003Bb	0.250 ± 0.005Bc
	7月 July	0.374 ± 0.004Aa	0.350 ± 0.008Aa	0.324 ± 0.006Bb	0.277 ± 0.007Cc
	9月 Sept.	0.395 ± 0.009Aa	0.372 ± 0.006Aa	0.344 ± 0.007Bb	0.287 ± 0.006Cc

半阴坡,尤其是阴坡则还保持一定的生长速率,其生长速率减慢较阳坡和半阳坡为缓.就新枝粗度而言,在5月25日以前各立地生长速率基本相同,此后各立地新枝粗度生长速率均变缓,阳坡减慢速率较其它立地都快,在7月份以后其粗度生长基本停止;半阴坡和阴坡减慢的程度最小,半阳坡次之.

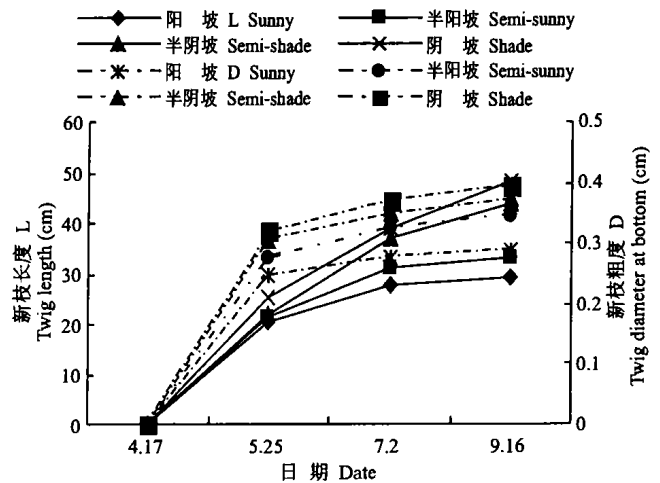


图11 不同立地刺槐新枝长度和新枝粗度生长曲线

Fig. 11 Growth curve of twig length and diameter at bottom of locust in different habitats.

表7是不同生长时期各立地条件下刺槐新枝长度和粗度多重比较结果.由表7可知,在5月份,阴坡与半阴坡、半阳坡、阳坡差异显著,其它立地间差异均不显著;7月份,阴坡、半阴坡与半阳坡、阳坡差异极显著,半阳坡与阳坡差异显著;9月份,阴坡、半阴坡与半阳坡、阳坡差异极显著,阴坡和半阴坡差异不显著,半阳坡和阳坡差异不显著.从刺槐新枝基径粗度多重比较结果中可知,5月份,阴坡、半阴坡与半阳坡、阳坡差异极显著,半阳坡与阳坡差异显著;7月份和9月份,阴坡、半阴坡与半阳坡、阳坡差异均达极显著水平,半阳坡与阳坡差异也达极显著水平.造成各立地新枝长度、粗度这种差异的主要原因是各立地自身土壤水分状况的优劣.分析不同立地2003年生长季末刺槐地上生物量表明,阴坡生物量大于半阴坡、半阳坡和阳坡,与这3种立地下刺槐生物量差异均达极显著水平,阴坡平均生物量(干重)

达 $8.50 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 半阴坡、半阳坡和阳坡则分别为 7.12 、 6.46 、 $5.79 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 半阴坡与半阳坡达显著水平, 与阳坡达极显著水平(表 6)。这说明不同立地条件下刺槐林内环境因子的差异造成了刺槐生理水平上的差异, 这种差异最终在生产力上反映出来, 从而使各立地刺槐生物量积累产生了重大差异。

4 讨 论

本试验测定的 2003 年各立地刺槐林地 5 m 土壤平均含水量分别为阳坡 6.96%、半阳坡 7.62%、半阴坡 8.06%、阴坡 8.87%, 阴坡、半阴坡与阳坡差异极显著, 与半阳坡差异显著, 半阳坡与阳坡差异显著, 阴坡与半阴坡差异不显著, 这与以前学者的研究结果基本一致^[2,9,14]。

蒸腾是叶片水分散失的过程, 整个过程受到环境因子和自身体内水分状况的影响。通过对不同立地条件下环境因子与蒸腾速率的相关性分析得知: (1)除阳坡外, 其它立地的蒸腾速率均与光照强度呈正相关关系, 且达极显著水平(相关系数 r 分别为阴坡 0.84^{**} , 半阴坡 0.86^{**} , 半阳坡 0.91^{**} , 阳坡 0.68^{**}), 说明除阳坡外其它立地蒸腾速率日变化与各立地光照强度日变化趋势基本一致。阳坡蒸腾速率与光照强度相关关系不显著, 与其土壤水分条件较差有关, 植物体为避免体内水分的过度消耗和维持体内水分平衡, 在光照强度逐渐增强时, 通过减小气孔开度来减少水分散失^[27], 而使蒸腾速率下降。(2)各立地刺槐蒸腾速率均与大气相对湿度呈负相关, 且均达显著水平(相关系数 r 分别为阴坡 0.75^* , 半阴坡 0.74^* , 半阳坡 0.73^* , 阳坡 0.77^*)。 (3)叶面蒸腾在很大程度上依赖于根系供水状况, 阴坡和半阴坡林地土壤含水量较高, 刺槐可利用水分较为充足, 植株本身能够保持较高的蒸腾速率与较活跃的生理水平; 阳坡和半阳坡土壤含水量较低, 尤其是阳坡, 使得该立地刺槐为维持自身的水分平衡, 气孔开度减小, 气孔扩散阻力变大, 蒸腾速率处于较低水平, 阻碍进一步失水, 这是植物对水分不足的一种适应性水分生理调节现象^[23,24]。此外, 不同立地条件下刺槐叶片相对含水量、饱和亏和叶水势与各立地土壤含水量关系密切, 叶水势尤能反映这种情况。土壤水分条件较好的阴坡维持较高的叶水势, 土壤水分条件较差的阳坡维持较低的叶水势。对阳坡而言, 维持较低叶水势有利于形成较大的水势梯度, 以便植物从土壤中吸取水分, 从而缓解水分不足对树木带来的负面影响, 这是树木对于干旱胁迫的一种适应

性反映^[20,29]。由此可知, 光强、大气相对湿度和土壤水分是影响各立地刺槐蒸腾的主要环境因子。但本试验仅对蒸腾、叶水势、叶相对含水量和饱和亏等生理指标进行了研究, 对各立地刺槐的光合能力并未进行研究, 这对深入研究不同立地条件下刺槐水分关系具有重要意义。

生长行为是植物受多种环境因子综合作用的结果^[25]。黄土高原地貌类型多样, 不同立地环境因子如光照、大气相对湿度和土壤水分等差异较大。在诸多环境因子中, 是否存在一个制约刺槐生长及生产力高低的关键因素。本试验结果表明, 阴坡刺槐生物量明显高于其他 3 种立地, 半阴坡次之, 再次为半阳坡, 阳坡生物量最低。这说明水分条件较好的立地其生物量也较高, 光照较强的阳坡和半阳坡刺槐生物量较低, 这是由于阳坡光照强、湿度小, 导致气孔开度减小, 影响到光合作用的进行, 使有机物的积累相应减少。因此, 可以认为, 不同立地条件下土壤水分是影响刺槐林生产力高低的关键性因素。

本试验结果表明, 不同立地条件下刺槐株高存在差异, 造成不同立地株高差异的主要原因是各立地土壤水分不同。但从株高的差异并不能完全反映刺槐的生长情况, 因为除了水分状况的影响外, 不同立地林内小环境和林分密度对株高也有一定影响, 尤其是密度。密度效应一直是生态学家所关注的问题^[18], 不同种植密度对植物所造成的影响主要是因为植株之间相互竞争环境资源, 如阳光、水分和 CO_2 等, 从而造成资源压力。密度对刺槐生长的影响, 以往大多集中在同一立地条件下林分密度对刺槐林生长影响的研究上, 但对不同立地条件下刺槐良好生长的适宜密度问题并未开展研究, 此项研究将为黄土高原地区人工刺槐林的营造提供重要的理论依据。

参考文献

- 1 Bauhus J, Bartsch N. 1996. Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. *Can J For Res*, 26:2153~2159
- 2 Chen Y-E(陈一鹏), Liu K(刘康). 1993. Study on the stand characteristics and its influence on locust growth in gully region of the Loess Plateau. *Bull Soil Water Cons*(水土保持通报), 13(5): 28~33(in Chinese)
- 3 Gao J-F(高俊凤). 2000. Plant Physiology Experiment Technology. Xi'an: World Books Publication Company. 36.
- 4 Han R-L(韩蕊莲), Liang Z-S(梁宗锁). 1994. Water consumption properties of adaptable nursery stocks on Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 5(2):210~213(in Chinese)
- 5 Hou F-L(侯凤莲), Wang W-Z(王文章), Feng Y-L(冯玉龙), et al. 1996. Study on physiological ecological characteristics of *Populus pseud-simonii*. *Bull Bot Res*(植物研究), 16(2):208~213(in Chinese)

- 6 Hu L-J(胡良军), Shao M-A(邵明安). 2002. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(8):1045~1048(in Chinese)
- 7 Jackson RB, Canadell J, Mooney HA. 1996. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia*, 180:389~411
- 8 Li H-J(李洪建), Wang M-B(王孟本), Chai B-F(柴宝峰). 2001. Study on the water relationship in tree species in the extra drought press of soil water. *J Shanxi Univ* (山西大学学报), 24(4):352~356(in Chinese)
- 9 Li H-J(李洪建), Wang M-B(王孟本), Chen L-F(陈良富), et al. 1996. Study on water eco-environment of black locust forest. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 20(2):151~158(in Chinese)
- 10 Li K-R(李凯荣), Wang Y-M(王佑民), Feng T(冯汀). 1989. Transpiration of the black locust plantation in the gully area of the Loess Plateau. *Shaanxi For Sci Technol* (陕西林业科技), (4):12~17(in Chinese)
- 11 Li P(李鹏), Li Z-B(李占斌), Zhao Z(赵忠), et al. 2002. Researches on root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in Weibei Loess Plateau. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), 22(5):15~19(in Chinese)
- 12 Li S-Y(李生英), Lan R-G(兰荣光), Xu T-Y(许童羽), et al. 1998. The physio-ecological characteristics of different poplar tree varieties and their relation to growth. *J Shenyang Agric Univ* (沈阳农业大学学报), 29(1):47~52(in Chinese)
- 13 Liu K(刘康), Chen Y-E(陈一鹏). 1990. A study on the water dynamics and productivity of locust plantation in the gully area of the Loess Plateau. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), 10(9):67~68(in Chinese)
- 14 Ma Y-X(马玉玺), Yang W-Z(杨文治), Yang X-M(杨新民). 1990. Water condition and productivity of the black locust plantation in the gully area of the Loess Plateau. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), 10(6):71~77(in Chinese)
- 15 Ruan C-J(阮成江), Li D-Q(李代琼), Jiang J(姜峻), et al. 2000. Study on the characteristics of water physiological ecology of seabuckthorn and the communities in the semiarid loess hilly region. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), 20(4):621~627(in Chinese)
- 16 Stone EL, Kalisz PJ. 1991. On the maximum extent of tree roots. *For Ecol Man*, 46:59~102
- 17 Sun C-Z(孙长忠), Huang B-L(黄宝龙), Chen H-B(陈海滨). 1998. Interaction between water environment and artificial vegetation in the Loess region. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 20(3):7~14(in Chinese)
- 18 Wang K-Q(王克勤), Wang B-T(王百田), Wang B-R(王斌瑞), et al. 2002. Studies on the growth of forests with different density in the system of afforestation by water-harvesting. *Sci Silvae Sin* (林业科学), 38(2):55~60(in Chinese)
- 19 Wang L(王力), Shao M-A(邵明安), Hou Q-C(侯庆春). 2001. The analysis of dried soil layer of artificial *Robinia pseudoacacia* forestry land in the Yan'an experimental area. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), 21(1):101~106(in Chinese)
- 20 Wang M(王森), Dai L-M(代力民), Ji L-Z(姬兰柱), et al. 2002. Effect of soil moisture status on some eco-physiological indexes of dominant tree species in the pine broadleaf forest of Changbai mountain. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 21(1):1~5(in Chinese)
- 21 Wang M-B(王孟本), Li H-J(李洪建), Chai B-F(柴宝峰). 1996. Study on water physiological ecological characteristics of *Caragana korshinskii*. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 20(6):494~501(in Chinese)
- 22 Wang N-J(王乃江), Zhao Z(赵忠). 2001. Comparison of drought resistance and photosynthesis of three apricot varieties. *J Northwest For Univ* (西北林学院学报), 16(1):1~4(in Chinese)
- 23 Wei G-D(魏冠东), Hou Q-C(侯庆春). 1990. Transpiration and water change of the bushes in the Shanghuang experimental site. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), 10(6):104~107(in Chinese)
- 24 Wei T-X(魏天兴), Yu X-X(余新晓), Zhu J-Z(朱金兆), et al. 2001. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in Loess of Western Shanxi Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 12(2):185~189(in Chinese)
- 25 Wei Y-K(魏宇昆), Liang Z-S(梁宗锁), Cui L-J(崔浪军), et al. 2004. Relationships between water and productivity of seabuckthorn (*Hippophae*) in different habitats of the Loess Plateau, China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 15(2):195~200(in Chinese)
- 26 Xie Y-F(谢演峰), Shen H-J(沈惠娟), Luo A-Z(罗爱珍), et al. 1999. Comparison of drought resistance indexes of seven planting tree species seedling in the South of China. *J Nanjing For Univ* (南京林业大学学报), 23(4):13~16(in Chinese)
- 27 Yan C-R(严昌荣), Han X-G(韩兴国), Chen L-Z(陈灵芝). 2000. The relationship between the ecophysiological feature leaf characteristics of some woody plants in Beijing Mountain Zone. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 20(1):53~60(in Chinese)
- 28 Yang W-X(杨维西). 1996. The study on dried soil layer of artificial vegetation in the north of China. *Sci Silvae Sin* (林业科学), 32(1):79~85(in Chinese)
- 29 Zeng F-J(曾凡江), Foetzki A, Li X-Y(李向义), et al. 2002. A preliminary study on the effect of irrigation on water physiology of *Tamarix ramosissima* in Cele oasis. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(7):849~853(in Chinese)
- 30 Zhao Z(赵忠), Li P(李鹏), Wang N-J(王乃江), et al. 2000. Distribution patterns of root distribution characters of main planting tree species in Weibei Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 11(1):37~39(in Chinese)

作者简介 单长卷,男,1978年生,硕士,助教.主要从事植物水分生理、生态方面研究,发表论文3篇. E-mail: Liangzs819@163.net
