

## 土壤干旱对刺槐蒸腾变化及抗旱性研究

杨建伟<sup>1,2</sup>, 周 索<sup>1</sup>, 韩蕊莲<sup>2</sup>, 梁宗锁<sup>2</sup>

(1. 南阳师范学院, 河南 南阳 473061; 2. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**在适宜土壤水分(70% $\theta_f$ )、中度干旱(50% $\theta_f$ )和严重干旱(30% $\theta_f$ )等3种土壤水分条件下,研究黄土高原常见造林树种刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的蒸腾特性及抗旱适应性。结果表明,刺槐的蒸腾速率与土壤含水量密切相关,其总耗水量、总生物量的大小均为适宜土壤水分 > 中度干旱 > 严重干旱,但总 WUE 在中度干旱下最高,严重干旱下最低;刺槐蒸腾速率的日变化是环境因子综合作用的结果,其中大气因子对刺槐蒸腾速率的影响主要受土壤水分含量的控制。在干旱条件下刺槐的抗旱性与 SOD 活性有一定的关系,但与 K<sup>+</sup>含量之间无明显对应关系。刺槐属于耐旱性强的耗水树种。

**关键词:**刺槐; 土壤水分; 蒸腾速率; 抗旱性

**中图分类号:**S718.43

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-7461(2006)05-0032-05

### Transpiration and Drought Resistance of *Robinia pseudoacacia* Under Differnt Soil Drought Levels

YANG Jian-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Suo<sup>1</sup>, HAN Rui-lian<sup>2</sup>, LIANG Zong-sou<sup>2</sup>

万方数据

(1. Nanyang Teacher's College, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Transpiration and drought resistance of locust (*Robinia pseudoacacia*), a common afforestation tree species an the Loess plateau were studied under 3 soil water treatments: suitable, medium drought and severe drought accounting for about 70%, 50% and 30% of field capacity ( $\theta_f$ ) respectively, the results showed the transpiration rate of locust leaves was closely related to the soil water content. The total water consumption and to tall biomass in 3 soil water treatments were in the order of suitable water content > medium drought > severe drought. The total water use efficiency however, was the highest in medium drought treatment, the lowest in severe one. Changes of transpiration rate were the results of combined actions of environmental factors in the daytime, among them, the effect of atmospheric factor on the transpiration was controlled by soil water content. Under drought conditions, the drought resistance of locust was correlated with superoxide dismutase activity in a certain extent but not with the content of potassium ion. It was concluded that locust was not a suitable tree species to be planted widely on the Loess Plateau, but suitable in the soil with favorable water condition.

**Key words:** *Robinia pseudoacacia*; soil water content; transpiration rate; drought resistance

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是我国三北地区的主要防护林树种,尤其是黄土高原地区主要造林树种,由于其繁殖快、生长快、适应能力强等特点,成为我国水土保持林的先锋树种,但在我国北方,特别是

在西北的干旱、半干旱地区刺槐只能够依靠当年的降雨和灌溉维持生长,在没有灌溉条件的地方,刺槐的生长受到严重的抑制,造成目前在黄土高原出现了大面积的“小老树”,加上刺槐对水分需要量

收稿日期:2005-07-26 修回日期:2006-05-09

基金项目:国家自然科学基金(90302005)、中国科学院知识创新基金(KZCX1-06)

作者简介:杨建伟(1965—),女,河南西峡人,教授,硕士,主要从事植物生理生态研究工作。

大<sup>[1,2]</sup>,经过多年生长后,刺槐林下形成了极其严重的“土壤干层”。关于黄土高原刺槐林的研究有很多报道<sup>[3~6]</sup>。但目前仍不能全面地了解刺槐在不同立地条件下的生长、水分利用特性和抗旱适应性,为此以黄土高原已经大面积造林的刺槐为试验材料,利用陕北黄土高原的黄绵土,在盆栽条件下控制土壤水分含量,模拟该树种生存的土壤水分条件,探讨在不同土壤水分条件下该树种的蒸腾特征以及抗旱性,为将刺槐营造在更适合自身生长环境提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与土壤水分胁迫处理

本试验采用黄土高原常见的造林树种刺槐,由中国科学院安塞生态试验站提供1年生的实生苗。试验用土采用安塞生态站的黄绵土,田间持水量为21.5%,盆栽条件下对刺槐分别设置3个供水水平:适宜水分、中度干旱、严重干旱,即分别是土壤持水量的70%~80%、50%~60%、30%~40%,各处理分别设置15~20盆重复,每盆栽植3~4株苗,待成活后选择大小基本一致的苗木保留2株,各苗木于3月上旬植入口径30 cm高50 cm的生长钵内。生长钵放置于中国科学院水土保持研究所的可移动模拟干旱防雨棚内,雨天用防雨棚遮雨,晴天露地生长。从移栽次日开始,每天定时用电子秤(最大称量15 kg,最小感量5 g)称重控制土壤含水量,并加水补充其蒸腾损失,为排除土壤蒸发用塑料薄膜覆盖盆面裸土。整个试验持续至10月中旬结束。

### 1.2 测定项目及方法

1.2.1 蒸腾速率日变化的测定 在生长季每月选择晴朗天气,从7:00~19:00每隔2 h,选取各水分条件下生长正常的功能叶5~6片,利用Licor-1600稳态气孔计测定。

1.2.2 光照强度、大气温度、相对湿度因子的测定

利用Licor-1600稳态气孔计测定蒸腾速率,同时记录。

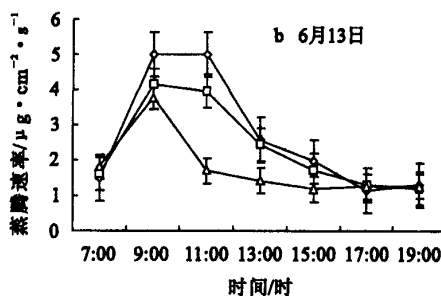
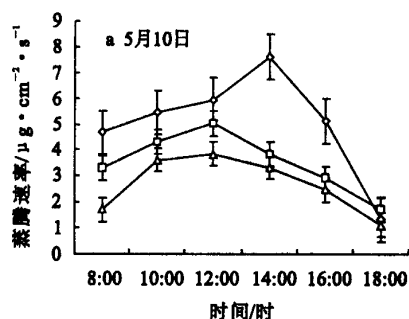
1.2.3 SOD活性的测定 每月选择晴朗无云的天气于8:00~10:00采样低温保存,待实验结束时统一用分光光度法测定,每处理重复测定3次。

1.2.4 K<sup>+</sup>含量的测定 每月选择晴朗无云的天气于8:00~10:00取样烘干保存,待实验结束时统一用火焰分光光度法测定,每处理重复测定3次。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤水分下刺槐各月份蒸腾速率的日变化

蒸腾作用是植物水分代谢的反映,在排除了土壤蒸发后,各种植物耗水量出现差异的原因,主要是植物的蒸腾速率差异所引起(图1)。5月份(图1a)和6月(图1b)刺槐蒸腾速率为单峰曲线,但5月份的蒸腾高峰除了适宜水分(蒸腾高峰在14:00)外,中度干旱和严重干旱下的蒸腾峰值不明显。6月份的蒸腾速率在一天中变化幅度较大,峰值明显(峰值在11:00左右)。7月份(图1c)的蒸腾日进程为双峰曲线,其第一个峰值分别在9:00(严重干旱下)和11:00(适宜水分和中度干旱下),第二个峰值15:00(适宜水分下)和17:00(中度干旱和严重干旱下)左右,可以看出,在7月份,刺槐叶片存在蒸腾午休现象,并且随着土壤干旱的加剧,蒸腾午休时间延长。8月(图1d)与7月相比,在含水量较高的适宜水分与中度干旱下15:00左右仍然可以看出存在蒸腾午休现象,严重干旱下无蒸腾午休并且蒸腾峰值不显著,表明随着干旱时间的延长,气孔的自动调节能力会受到一定的影响。9月的蒸腾(图1e)在3种土壤水分下均为单峰曲线,其峰值在12:00~14:00之间,但在严重干旱下其蒸腾峰值不显著。



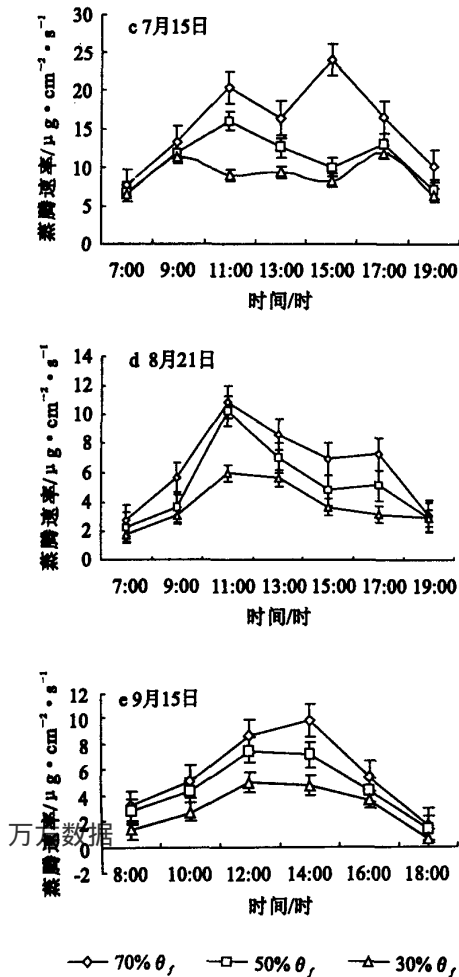


图1 3种土壤水分下刺槐在各月的蒸腾速率日变化

Fig.1 The daily variation of the transpiration rate of locust on May 10, June 3, July 31, August 21 and September 15 under 3 soil water treatments

从5~9月各月蒸腾速率测定结果可以看出,在3种土壤水分下,刺槐的蒸腾速率表现为适宜土壤水分下最高,在严重干旱下最低。

## 2.2 环境因子与刺槐蒸腾速率日进程的相关性

树种的蒸腾作用与环境因子之间密切相关,在环境因子中,气象因子(光照强度、大气温度、大气空气相对湿度)和土壤水分含量对刺槐蒸腾速率的影响各不相同。

以5~9月所测定的蒸腾速率日变化和同时测定的光照强度、气温、空气相对湿度(5个测定日,每个测定日从早到晚7个时间段7组数据,每个处理共35组数据)的对应值进行简单相关性分析(表1)。从表1可以看出,在适宜土壤水分下,蒸腾速率

与光照强度有80%的数据达显著相关以上(其中40%为极显著相关)。在中度干旱下蒸腾速率与光照强度有60%的数据达显著相关以上(其中20%为极显著相关)。在严重干旱下蒸腾速率与光照强度只有20%的数据达极显著相关,其余相关不显著。

在适宜土壤水分下,蒸腾速率与气温有40%的数据显著相关,在中度干旱和严重干旱下蒸腾速率与气温均只有20%的数据达显著相关;蒸腾速率与空气相对湿度有73%的数据呈负相关,但相关性均不显著。

进一步对刺槐的蒸腾速率与光照强度和气温、光照强度和空气相对湿度的复合因子相关性分析表明,蒸腾速率与光照强度和气温的相关性表现为:在适宜土壤水分下有80%的数据达显著相关(其中60%数据达极显著相关),在中度干旱下有60%数据达显著相关(其中20%数据达极显著相关),在严重干旱下有40%的数据达显著相关(其中20%数据达极显著相关)。蒸腾速率与光照强度和空气相对湿度的相关性为:在适宜土壤水分下有80%的数据达显著相关(其中60%数据达极显著相关),在中度干旱下有20%的数据达极显著相关,在严重干旱下40%的数据显示显著相关,其余相关不显著。

分析结果显示,刺槐的蒸腾速率与光强、气温和大气空气相对湿度3个单因子的相关性中,蒸腾速率与光强的相关性最大,但二者的相关性是随土壤含水量的下降而下降,其次的影响为大气温度,空气相对湿度的影响最小。各环境因子之间存在着相互联系,相互制约的关系,一天之中,随着光照强度的上升,温度上升,空气相对湿度下降,同时表明,在含水量较高的土壤中(适宜水分和轻度干旱下),光照强度在各气象因子中处于主导地位,在严重土壤干旱下光照强度与蒸腾速率的相关性显著下降。表明光照强度对蒸腾速率的影响受土壤水分含量的控制。将5~9月所测定的蒸腾速率日平均值与土壤水分含量进行简单相关性分析(5个蒸腾日进程,每个日进程7组数据,共35组数据),结果表明,各月测定的日蒸腾速率全部数据与土壤水分含量的相关性均达到极显著水平(5月10日、6月3日、7月31日、8月21日和9月15日的 $r$ 值分别为0.993 7\*\*、0.984 2\*\*、0.973 6\*\*、0.974 5\*\*、0.992 6\*\* )。

表 1  3 种土壤水分下刺槐蒸腾速率与环境因子日变化的相关性(*r*)分析  
Table 1  Correlation analysis of transpiration rate and the daily variation of  
the environmental factors of locust under 3 soil water treatments (*r*)

月—日	单因子								
	光照强度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			气温/ $^{\circ}\text{C}$			空气相对湿度/%		
	70% $\theta_f$	50% $\theta_f$	30% $\theta_f$	70% $\theta_f$	50% $\theta_f$	30% $\theta_f$	70% $\theta_f$	50% $\theta_f$	30% $\theta_f$
05—10	0.919 4**	0.905 3**	0.937 3**	0.265 4	0.027 9	0.524 9	−0.313 6	0.056 3	−0.416 8
06—13	0.541 3	0.684 6	0.290 4	0.078 9	−0.041 2	−0.382 4	0.180 1	0.271 2	0.515 6
07—15	0.871 5*	0.688 1	0.539 4	0.825 6*	0.460 9	0.388 2	−0.666 9	−0.241 2	−0.251 6
08—21	0.915 1**	0.775 9*	0.737 8	0.761 4*	0.506 9	0.573 6	−0.771 9	−0.505 9	−0.545 0
09—15	0.841 2*	0.793 4*	0.651 1	0.771 8	0.774 5*	0.886 1**	−0.778 3	−0.758 5	−0.862 1

月—日	复合因子					
	光照强度—气温			光照强度—空气相对湿度		
	70% $\theta_f$	50% $\theta_f$	30% $\theta_f$	70% $\theta_f$	50% $\theta_f$	30% $\theta_f$
05—10	0.877 3*	0.812 1*	0.958 7**	0.867 7*	0.598 6	0.869 5*
06—13	0.476 9	0.608 2	0.148 3	0.186 2	0.344 9	−0.203 8
07—15	0.922 5**	0.632 3	0.475 5	0.920 5**	0.534 0	0.489 2
08—21	0.908 1**	0.782 2*	0.719 8	0.880 9**	0.719 3	0.669 3
09—15	0.948 7**	0.936 6**	0.815 2*	0.969 9**	0.964 3**	0.859 3*

\* : $p<0.05$ ; \*\* : $p<0.01$

**2.3 土壤水分对刺槐根系干重、根冠比、总生物量、总耗水量及总水分利用率的影响**

根系的生长是反映植物忍耐干旱胁迫的一个重要的指标,从表 2 可以看出,随着土壤含水量的下降,刺槐在整个生长季中根干重、茎叶干重下降显著。其根干重和茎叶干重均表现为适宜土壤水分下最高,严重干旱下最低,但根冠比却是在严重干旱下最高,适宜水分下最低,每 3 种处理之间的差异性均达到极显著水平,表明在干旱胁迫下刺槐根的生长和茎叶生长受到显著抑制,但茎叶生长受到的影响比根大。在适宜水分的总耗水量分别是中度干旱和严重干旱下的 1.49、2.93 倍,在适宜水分下总生物量分别是中度干旱和严重干旱下的 1.36、3.24 倍。方差分析其差异性均达极显著水平。刺槐总耗水量和总生物量的高低和土壤水分含量之间密切相关;但刺槐的总水分利用率则为中度干旱时最高,严重干旱下最低,与韩蕊莲等人对沙棘的研究结果相一致<sup>[7]</sup>。

表 2  生长季不同土壤水分含量下刺槐单株根冠比、总生物量增量、总耗水量及总水分利用率的比较  
Table 2  Comparison of root to shoot ratio, total biomass increment, total water consumption and total water use  
efficiency of individual locust single plant under 3 soil water treatments in growing season

土壤含水量	成活率	根系生物量	地上生物量	根冠比	总生物量	总耗水量	总水分利用率
	/%	/g	/g		增量/g	/kg	/g·kg <sup>−1</sup>
70% $\theta_f$	100.00	71.21A	90.89A	0.79C	153.10A	33.65A	6.24B
55% $\theta_f$	91.70	55.68B	64.72B	0.86A	112.20B	23.99B	6.78A
40% $\theta_f$	42.90	28.03C	27.73C	1.01B	47.23C	15.98C	5.66C

注:表中英文字母表示同列方差分析,同列字母相同表示差异不显著,同列字母不同表示差异极显著;小写示 $\alpha=0.05$ 水平,大写示 $\alpha=0.01$ 水平(SSR 检验)。

**2.4 不同土壤水分条件下刺槐 SOD 活性及 K<sup>+</sup>含量的变化**

SOD 活性的高低是植物抗旱性的重要指标,它可将 O<sub>2</sub> 歧化成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,在保护系统中处于核心地位。我们从 5 月树叶完全展开到 10 月落叶之前对刺槐在不同土壤水分下的 SOD 活性(图 2)和 K<sup>+</sup>含量进行测定,结果发现,SOD 活性在不同土壤水分下的变化不同,在适宜水分下,SOD 活性的变化幅度比较小,曲线平缓,其 SOD 活性始终维持在 1 693~1 480  $\mu\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间;在中度干旱下,SOD 活性变化比较大,随胁迫时间的增加 SOD 活性逐渐上升,至胁迫中期(约 60 d)SOD 活性达最高值 2 438  $\mu\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ;在严重干旱下,其 SOD 活性与中度干旱下有明显区别,在胁迫前期 SOD 活性急剧上升,

约 40 d 左右达最高值  $1\,909\ \mu\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 然后急剧下降, 其 SOD 活性高峰维持时间比中度干旱下短, 表明长期严重干旱导致酶活性下降。从图 3 可以看出, 在适宜水分下,  $\text{K}^+$  含量在生长初期有所上升, 然后下降。在中度干旱和严重干旱胁迫下, 刺槐在胁迫前期(50 d 左右)  $\text{K}^+$  含量急剧上升, 胁迫中期(70 d 左右)均下降, 但是中度干旱下降幅度比严重干旱的小, 如果从胁迫初期和胁迫末期  $\text{K}^+$  积累的绝对值上看, 在适宜水分、中度干旱和严重干旱下,  $\text{K}^+$  含量均比初期低, 试验结果说明刺槐的抗旱性可能与  $\text{K}^+$  含量之间关系不大。

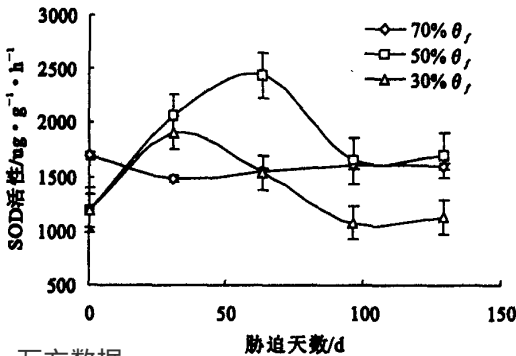


图 2 不同土壤水分含量对刺槐 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effect of drought stress on SOD activity in the leaves of locust under different soil water contents

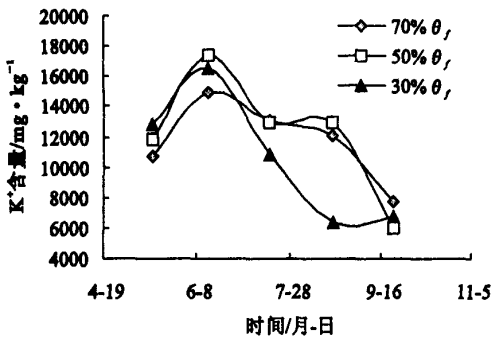


图 3 3 种土壤水分下刺槐叶片  $\text{K}^+$  含量变化

Fig. 3 Change of  $\text{K}^+$  content in locust leaves under 3 soil water contents

### 3 结论与讨论

在黄土高原不同的树种耗水量差异显著。韩蕊莲等曾证明 6 个树种的耗水量在适宜土壤水分下(70%土壤持水量)各不相同, 并且提出刺槐和杨树属于高耗水树种, 与低耗水树种(沙棘、侧柏、油松)之间差异达 4~5 倍<sup>[1,7]</sup>。树种之间耗水量出现差异的原因主要是各树种蒸腾速率的不同所造成。刺槐

在不同土壤水分下, 其日蒸腾速率动态变化有明显差异, 在生长季的 5、6、9 月的 3 个月所测定日蒸腾速率进程表现为在适宜水分和中度水分亏缺下是单峰曲线, 而在温度和光强都较高的 7、8 月份, 其蒸腾速率日变化在这 2 种土壤水分下均呈双峰曲线, 在严重干旱下的蒸腾高峰却在早晚 2 个时间段, 表明土壤干旱使刺槐叶片的日蒸腾特征发生变化。在 3 种土壤水分下, 刺槐的蒸腾速率日进程, 均表现为随着土壤水分含量的下降而下降。方差分析其差异性达极显著水平。

蒸腾速率的日变化与环境因子紧密相关<sup>[8]</sup>, 是环境因子综合作用的结果。在土壤含水量和大气因子 2 个环境因子与蒸腾速率相关性中, 土壤水分占主导地位, 而在大气因子中, 在含水量较高土壤中刺槐蒸腾速率与光照相关性较大, 其次为温度, 表明大气因子对刺槐蒸腾速率的影响主要受土壤水分含量的控制。

SOD 是植物体内消除氧自由基的重要保护酶, 有研究证明, 在干旱胁迫下 SOD 活性上升<sup>[9,10]</sup>。刺槐在适宜水分下 SOD 活性变化幅度较小, 在中度干旱和严重干旱土壤水分下 SOD 活性均为先升后降, 但在中度干旱下刺槐的 SOD 活性维持高峰的时间比严重干旱下长, 表明刺槐能够较长时间忍耐中度干旱土壤水分条件, 刺槐属于耐旱性较强的树种之一。  $\text{K}^+$  是渗透调节物质中的一种重要的无机离子<sup>[11]</sup>, 刺槐在各种土壤水分下其  $\text{K}^+$  含量均比初期低。表明刺槐的抗旱性与 SOD 活性有一定的关系但与  $\text{K}^+$  含量之间无明显对应关系。

刺槐生物量的累积和土壤水分含量的高低有显著的一致性, 随着土壤水分含量的下降, 虽然根冠比表现为上升趋势, 但由于光合速率下降显著, 导致枝条生长速率、根系生物量、茎叶生物量积累下降明显。试验中发现刺槐在整个生长季中其枝条快速生长和干物质增加主要集中在 4~6 月和 5、6 月, 7 月以后枝条生长和干物质积累减慢, 在黄土高原地区干旱缺水, 4~6 月的水分条件不能满足刺槐快速生长的需要, 这也许正是造成黄土高原刺槐林生长发育不良, 而形成大面积“小老树”的主要原因。

利用生长季总生物量增量与生长季总耗水量比值计算的总 WUE, 在中度干旱下刺槐的总水分利用率最高, 严重干旱下刺槐生长受到显著抑制, 总水

(下转第 73 页)

3.2.3 在稳定性方面的样地分布 计算各个样地稳定度指数的平均值 $\bar{X}$ 和标准差 $S$ ,并计算出标准误差 $S_{\bar{X}}$ <sup>[11]</sup>。

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$
 ( $n$ 为样方总数,这里 $n = 32$ ) (4)

以95.45%的可靠性将稳定度指数划分为4个区间:稳定度指数大于 $\bar{X} + 2S_{\bar{X}}$ 的稳定性为强,介于 $\bar{X} \sim \bar{X} + 2S_{\bar{X}}$ 之间的为较强,介于 $\bar{X} - 2S_{\bar{X}} \sim \bar{X}$ 之间的为中,小于 $\bar{X} - 2S_{\bar{X}}$ 的为差。

表6 栎类天然次生林群落稳定性分析

Table 6 Analysis of communit stability of okanatural secondary forest

群落稳定性	强	较强	中	差
样地数目	14	3	0	15

由表6知,群落稳定性强和较强的样地数目占53%,稳定性中等及较差的占47%。

4 结 论

由平均稳定度指数知锐齿栎+三桠乌药的组成树种稳定性最好,锐齿栎+化香较差。

从海拔高度看,从1250 m向上稳定性呈增强趋势。

样地稳定性在中等以上的占53%,中等及较差

的占47%。  
本文采用建立群落稳定性评价指标体系及稳定度指数计算的方法,考虑了多因素影响,但还有待进一步完善。

参考文献:

[1] 毕晓丽,洪伟,吴承祯,等.珍稀植物群落多样性及稳定性分析[J].福建林学院学报,2003,23(4):301-304.  
[2] 彭少麟.森林群落稳定性与动态测度[J].广西植物,1987,7(1):67-72.  
[3] 阳含熙,潘愉德,任业钢,等.长白山阔叶红松林马氏链模型[J].生态学报,1988,8(3):211-219.  
[4] 史作民,刘世荣,王正用.河南宝天曼种子植物区系特征[J].西北植物学报,1996,16(3):329-335.  
[5] 史作民,刘世荣,程瑞梅,等.河南宝天曼植物群落数量分类与排序[J].林业科学,2000,36(6):20-27.  
[6] 宋朝枢.宝天曼自然保护区科学考察集[M].北京:中国林业出版社,1994.  
[7] 王国宏.再论生物多样性与生态系统的稳定性[J].生物多样性,2001,10(1):126-134.  
[8] 郑元润.森林群落稳定性研究方法初探[J].林业科学,2000,36(5):38-32.  
[9] 巩文.洮河林区云、冷杉林分类型的多样性及稳定性[J].中南林学院学报,2003,23(2):71-75.  
[10] 张忠义.生物资源抽样调查技术[M].北京:气象出版社,1996.  
[11] 张文彤.SPSS11.0统计分析教程[M].北京:北京希望电子出版社,2002.

(上接第36页)

分利用率为最低。从此结果可以表明,在我国其他缺水地区可通过控制含水量在田间持水量在中度干旱范围内,能将当地有限的水资源做最优化配置。

参考文献:

[1] 韩蕊莲,梁宗锁.黄土高原适生树种苗木的耗水特性[J].应用生态学报,1994,5(2):210-213.  
[2] 郭小平,朱金兆,余新晓,等.论黄土高原低效刺槐林改造问题[J].水土保持研究,1998,5(4):77-81.  
[3] 卫三平,卫正新,李树怀,等.晋西黄土丘陵沟壑区刺槐林适宜性调查研究[J].山西水土保持科技,2001,(2):36-39.  
[4] 魏天兴,余金兆,张学培,等.晋西南黄土区刺槐油松林耗水规律的研究[J].北京林业大学学报,1998,20(4):36-40.  
[5] 田晶会,王百田.黄土半干旱区刺槐林水分与生长关系研究[J].水土保持学报,2002,16(5):61-63,121.

[6] 王克勤,王斌瑞.黄土高原刺槐林间伐改造研究[J].应用生态学报,2002,13(1):11-15.  
[7] 韩蕊莲,梁宗锁,邹厚远.在土壤不同干旱条件下沙棘耗水特性的初步研究[J].沙棘,1991,(4):33-35,38.  
[8] 李洪建,柴宝峰,王孟本.北京杨水分生理生态研究[J].生态学报,2000,20(3):417-422.  
[9] 左仲武,刘彦超,刘志龙.水分胁迫下水杨酸对油松幼苗叶片膜脂过氧化作用的影响[J].西北林学院学报,2003,18(4):24-25.  
[10] Bowlter C, Van M. M, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. [J]. 1992. 43:83-116.  
[11] 李德全,邹琦,程炳高.土壤干旱下不同抗旱性小麦品种的渗透调节和渗透调节物质[J].植物生理学报,1992,18(1):37-44.