

# 几种引进柏树的抗旱性评价

刘建锋, 史胜青, 江泽平

(中国林业科学研究院 林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**通过植物叶片的保水力、光合速率、蒸腾速率、水分利用效率以及胁迫前后脯氨酸与可溶性糖含量变化等指标对几种引进柏树和国内乡土种(侧柏)的抗旱性强弱进行对比研究。结果表明:在叶片保水力方面,大西洋扁柏(T4)>大阿杂交柏 2(CC5,) >阿拉斯加扁柏(N2)>北美爬地柏(H1)>美国扁柏(L3)>大阿杂交柏 1(CC4)>侧柏(Ce);在光合速率方面, N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4;在蒸腾速率方面, N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4;水分利用效率方面, L3>T4>CC4>H1>Ce>N2>CC5;脯氨酸积累量方面, L3>Ce>CC5>CC4>H1>T4>N2;可溶性糖增加量方面, CC4>CC5>L3>Ce>N2>T4>H1。运用模糊数学的隶属函数法对 7 个引进柏树的抗旱能力做综合评价, 引入种 L3、N2、CC5、T4、CC4 在抗旱能力方面均强于国内乡土种侧柏(Ce), 而 H1 抗旱性弱于侧柏(Ce)。

**关键词:**引进柏树;光合速率;蒸腾速率;脯氨酸;可溶性糖;抗旱性

**中图分类号:**S722.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2011)01-0013-05

## Drought-resistance of Several Exotic Cypress Species

LIU Jian-feng, SHI Sheng-qing, JIANG Ze-ping

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The drought resistance six exotic and one native cypress species were evaluated by comparing related indices, such as leaf water-holding ability, photosynthesis rate, transpiration rate, water use efficiency(WUE), and the accumulating amount of proline and soluble sugar before/after drought stress. The leaf water-holding ability was in the order of *Chamaecyparis thyoides* (T4)> *×C. leylandii*2(CC5)> *C. nootkatensis* (N2)> *Juniperus horizontalis* (H1)> *C. lawsoniana* (L3)> *×C. leylandii* 1(CC4)> *Platycladus orientalis* (Ce), and the order of photosynthesis rate was N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4. The order of transpiration rate was N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4. As WUE, the order was L3>T4>CC4>H1>Ce>N2>CC5. The order of proline and soluble sugar were L3>Ce>CC5>CC4>H1>T4>N2 and CC4>CC5>L3>Ce>N2>T4>H1, respectively. The comprehensive evaluation by subjective function of puzzle mathematics demonstrated that the introduced species L3, N2, CC5, T4 and CC4 had higher drought resistance than native one(Ce), H1, however, had lower drought resistance.

**Key words:** exotic cypress; photosynthesis rate; transpiration rate; proline; soluble sugar; drought-resistance

我国对抗逆性柏树遗传资源的收集与利用重视不够, 只有少数乡土种被用于造林和绿化, 除分类和生态学方面以外, 很少在遗传变异、育种和培育技术

等方面作过系统研究。温带地区引种针叶树开始于 20 世纪初, 但目前还没有一个外来种在生产上得到较多的应用。已引进种的遗传基础十分狭窄, 也没

有开展过遗传改良,重要观赏栽培品种的引进数目极有限<sup>[1]</sup>。国外有大量速生、抗逆性强的优良针叶树种,这些树种的人工栽培历史很长,具有成熟的栽培技术,重要种类作过长期的遗传变异和改良研究。我国现有大面积的造林困难地区,造林树种的缺乏已成为生态环境建设的瓶颈问题,乡土树种因适应性和研究基础差而很难在短期内满足这种需求。对国外优良针叶树种的选择性引种栽培与推广,不仅可以迅速满足我国在该方面的需要,而且可以丰富国内植物资源,扩大基因库。

植物抗旱性是指在干旱条件下,植物具有不但能够生存,而且能维持正常或接近正常的代谢水平以及维持基本正常的生长发育进程的能力<sup>[2]</sup>,Levitt(1980)和 Turner (1983)等将植物的抗旱性划分为避旱性(drought escape)、御旱性(drought avoidance)和耐旱性(drought tolerance)3 种不同类型<sup>[3-4]</sup>。对引入柏树进行先期抗性研究,有利于掌握其内在的生理特征和生活习性;而将其与国内乡土种的抗性进行比较,则有利于进一步的栽培与推广,真正做到适地适树。侧柏(*Platycladus orientalis*)在我国分布范围十分广阔,抗逆性强,本文拟将其作为国内对照种,与引入的 6 种柏树进行抗旱能力方面的比较。

## 1 材料

全部实验材料来源于从国外引入的柏科树种及作为对照的乡土种(侧柏)2 a 生插条,用 ABT 生根粉处理后(浓度 100 mg · kg<sup>-1</sup>,浸条 4 h),扦插于相同容积大小的塑料盆中(基质为草炭土(6)+蛭石(3)+珍珠岩(1)),并置于中国林业科学研究院科研温室,次年 7 月份开始测定(见表 1)。

## 2 内容与方法

各植物种(或种源)各选 3 株生长状况最佳的个体,每株选择 3 片新生叶(当年生),测定。

### 2.1 叶片保水力

采用自然干燥法。对采集的叶片置于室内自然干燥,在取叶后的 0、2、6、8、20、32、56、128 h 分别用 1/10 000 电子天平称其重量,计算每一时刻失水占鲜重的百分比及恒重时间。

### 2.2 光合/蒸腾特性

2.2.1 光合蒸腾曲线测定 用 Li-6400 光合作用分析系统的人工光源,空气 CO<sub>2</sub> 浓度设定为恒值 370 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,温度为 25±2℃,测定不同光强(3 200、2 600、2 200、1 800、1 500、1 200、900、

600、300、100、0 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)下的光合速率和蒸腾速率。根据图示曲线与 *x* 轴的截距确定光补偿点(内插值法)。

表 1 引进柏树树种与原产地  
Table 1 Description of experimental species

中文种名+拉丁文	代号	原产地/引入地
美国扁柏 ( <i>Chamaecyparis lawsoniana</i> )	L3	美国俄勒冈州 Corvallis
大阿杂交柏 × ( <i>Cupressocyparis leylandii</i> )	CC4	美国缅因州 Portland
大阿杂交柏 × ( <i>Cupressocyparis leylandii</i> )	CC5	美国北卡罗来纳州 Bladen
大西洋扁柏 ( <i>Chamaecyparis thyoides</i> )	T4	美国北卡罗来纳州 Bladen
北美爬地柏 ( <i>Juniperus horizontalis</i> )	H1	美国明尼苏达州 Duluth
阿拉斯加扁柏 ( <i>Chamaecyparis nootkatensis</i> )	N2	美国俄勒冈州 Corvallis
侧柏 ( <i>Platycladus orientalis</i> )	Ce	中国北京

### 2.3 水分利用效率

用 Li-6400 光合作用分析系统,人工光源设定为 900、1 200、1 500、1 800 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,空气 CO<sub>2</sub> 浓度设定为恒值 350 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,温度为 25±2℃,根据系统内置程序测定水分利用效率。

### 2.4 脯氨酸含量

采用酸性茚三酮比色法<sup>[5]</sup>。测定干旱胁迫前后(20 d)脯氨酸积累量的变化。

### 2.5 可溶性糖含量

采用蒽酮比色法<sup>[5]</sup>。测定干旱胁迫前后(20 d)可溶性糖含量的变化。

### 2.6 6 种柏树抗旱能力综合评价

应用模糊数学的隶属函数法<sup>[6]</sup>对引进柏树抗旱能力做综合评价,具体公式如下:

1)如果指标与抗旱性成正相关

$$X(u)=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

2)如果指标与抗旱性成负相关

$$X(u)=1-\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

*X* 为各指标的平均值;*X*<sub>max</sub> 为指标的最大值;*X*<sub>min</sub> 为指标的最小值。

将各指标的抗旱隶属函数值累加起来,求其平均值,平均值越大,抗旱性就越强。

## 3 研究结果与分析

### 3.1 叶片保水力的变化

叶片保持水分的能力对维持植物正常的生理活动很重要。离体叶片的持水量是反映干旱条件下叶

片抗脱水性能的综合指标之一,离体叶片在萎蔫过程中所保持的水分含量可作为叶片保水力的指标,而离体叶片散失某一定量的水分消耗的时间越长,说明该植物保水能力越强。

对各引进柏树不同时段的失水率运用二次植物线模型进行拟合(表 2)。通过对失水率 20%、50%、80%所消耗时间,比较分析各引进柏树保水能力的

强弱:当失水比率达到 20%时,N2 耗时最长,约为 15 h;当失水率达到 50%时,CC4 耗时最长,为 50 h;当失水率达到 80%时,CC5 耗时达到 102 h。总体上,Ce 的保水能力最弱;而 CC5 保水能力最强,说明在该植物保存组织水分能力优于其它几种柏树。

表 2 几种引进柏树叶片失水率二次曲线模型  
Table 2 Quadratic curve model of leaf-water loss rate among the species

植物种	参数估计					$x$ 值	$x$ 值	$x$ 值
	$R^2$	$p$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	( $y=20\%$ )	( $y=50\%$ )	( $y=80\%$ )
CC4	0.970	0.000	89.131	-1.410	0.006	6.665	32.151	69.704
Ce	0.968	0.000	88.399	-1.655	0.008	5.206	26.630	57.075
H1	0.990	0.000	94.208	-1.194	0.004	12.416	43.309	88.229
L3	0.985	0.000	92.699	-1.174	0.004	11.248	42.535	88.777
CC5	0.974	0.000	91.411	-1.004	0.003	11.780	48.183	102.551
N2	0.996	0.000	95.811	-1.096	0.003	15.046	48.142	92.685
T4	0.992	0.000	94.364	-0.988	0.002	14.994	49.954	92.640

3.2 光合特征比较

3.2.1 光响应曲线 光合作用是植物生长的生理基础,可以作为判断植物生长势和抗逆性强弱的指标,干旱胁迫可以使植物光合速率下降,生长减缓,成为植物分布的限制因子<sup>[7]</sup>。由图 1 可见:在弱光条件下,光强是光合作用的限制因子, $P_n$  随着光强的增加迅速地增大;在低光强下,曲线近似直线;在强光下,随着光强的增加, $P_n$  增大缓慢,慢慢达到饱和状态;继续增大光强, $P_n$  略有下降,表现出光抑制。在一定的  $\text{CO}_2$  浓度和温度下,当光强值为零时, $P_n$  为负值,值的大小代表暗呼吸值。N2、Ce 随

着光强的增加, $P_n$  增长迅速, $P_n$  值明显高于其它树种;CC4 的  $P_n$  值随  $PAR$  增加而增加的趋势最为平缓,说明在相同的环境条件下,其光合能力较低。光补偿点( $Lcp$ )是指净光合速率为零时的光照强度,其生理学意义是表现植物对弱光的利用能力。光补偿点低,说明其利用弱光的能力强,如一般耐阴树种,其  $Lcp$  均较低;同一植株上的阴生叶的  $Lcp$  通常也会低于阳生叶的  $Lcp$ 。在本次测定中,H1 的光补偿点最低( $34.091\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),说明其最能忍受低光照;而 CC5 的  $Lcp$  最高(92.784),说明就低光环境而言,其耐受幅度小于其它树种。

图 1 不同树种的光合曲线(左)和蒸腾曲线(右)

Fig. 1  $P_n$ - $PAR$ (left) and  $Tr$ - $PAR$  (right) curve of different species

3.2.2 光照强度( $PAR$ )与蒸腾速率( $Tr$ )的关系 蒸腾速率是衡量植物水分平衡的一个重要生理指标,可以反映树种调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的能力。在所测定的  $PAR$  范围内,与光合速率相吻合,N2 与 Ce 的蒸腾速率随光强的增加而迅速增加(图 1);而 CC4 与 CC5 的蒸腾速率随光强值的增大而上升的趋势较为平缓;几种引进柏树的蒸腾速率大小依次为  $N2>Ce>L3>H1>T4>$

$CC4>CC5$ ,而前四者在光强达到一定高度时,蒸腾速率均呈现下降趋势,其原因可能是高光强诱导气孔的关闭而导致蒸腾速率的下降。蒸腾速率和叶片保水力都是反映植物减少体内水分损失的能力,但保水能力反映的是叶片非气孔失水,而蒸腾速率反映的是植物气孔失水能力。

3.3 水分利用效率(WUE)

水分利用效率是光合速率与蒸腾速率的比值,

说明植物消耗每单位重量水分所固定的 CO<sub>2</sub> 的数量,它表示植物对环境资源的利用水平。*WUE* 值越大,表明植物节水能力越强,它对植被适应半干旱生态环境有重要意义<sup>[8]</sup>。在 4 种不同的光照强度下,各引进柏树的水分利用效率见图 2。就该指数而言,强弱次序为 T4>L3>H1>CC4>N2>Ce>CC5。

图 2 不同光照强度的水分利用效率比较

Fig. 2 Comparison of *WUE* under various *PAR* among the species

3.4 脯氨酸含量变化

干旱对植物氮代谢产生重要影响,水分胁迫可以诱导蛋白质的水解和氨基酸的积累,刺激谷氨酸(Glu)合成脯氨酸(Pro)及其化合物,同时抑制其氧化和蛋白质的合成。脯氨酸是水溶性最大的氨基酸,亲水性强,具有较强的水合能力,是分布最广的渗透剂<sup>[9]</sup>。有报道表明,脯氨酸在干旱环境中具有较高的含量,抗旱性强的品种的渗透调节能力大于

抗旱性弱的品种,并且随着干旱胁迫程度的加剧脯氨酸含量升高,脯氨酸含量的积累对植物抗旱具有重要的意义<sup>[10-11]</sup>。

从试验获得的数据可见,不同的树种在受到相同时间段(20 d)的干旱胁迫后,植物体内脯氨酸积累量不相同(图 3),L3 脯氨酸积累量最大(24.377),接近于胁迫前脯氨酸积累量的 8 倍,依次为 Ce(10.987)、CC5(9.588)、CC4(3.452)、H1(1.639),而 T4(-0.899)和 N2(-1.413)则出现脯氨酸积累量下降的现象。

3.5 可溶性糖含量的变化

在水分胁迫下,植物体内可溶性糖积累,使细胞渗透势下降,这样就可以从外界继续吸水,保持细胞膨压,使体内各种代谢过程正常进行,即可溶性糖在干旱胁迫时可作为渗透调节物质,因而多被用于评价植物抗旱的生理指标之一。

与脯氨酸含量相类似,不同植物种在胁迫前后可溶性糖含量变化差异显著(见图 3),如胁迫发生后,CC4 可溶性糖含量增加值最大,达到 29.784,是胁迫前的 2 倍,然后依次是 CC5(28.282)、L3(23.336)、Ce(22.035)、N2(5.961)、T4(2.199),而 H1(-15.253)则出现体内可溶性糖含量下降的现象。一般认为,抗旱性强的植物在干旱胁迫下可溶性糖含量增加的幅度大于抗旱性弱的植物,因此,在该指数下,几种引进柏树抗旱强弱次序为:CC4>CC5>L3>Ce>N2>T4>>H1。

图 3 干旱胁迫(20 d)前后脯氨酸(左)和可溶性糖(右)变化

Fig. 3 Variation of proline (left) and soluble sugar (right) contents in before and after 20-d drought-stress

3.6 7 种柏树抗旱能力的综合评价

植物的抗旱机理十分复杂,抗旱性是受许多形态、解剖和生理生化特性控制的复合性状。单一的抗旱性鉴定指标,难以充分反映出植物对干旱的综合适应能力,因此,许多学者认为只有采用多项指标的综合评价,才能准确地反映出植物的抗旱水平。此处运用模糊数学的隶属函数法对 7 个柏树的抗旱能力做综合评价(表 3),结果表明:L3 的抗旱能力最强,具有较强的水分利用效率和渗透调节能力;

H1 的抗旱能力最弱,其余柏树抗旱能力由强至弱依次为:N2>CC5>T4>CC4>Ce。

以 7 树种各指标隶属函数平均值占有所有指标隶属函数平均值总和的百分比评估各指标在抗旱性评价中的可靠性。可溶性糖、叶片保水力、蒸腾速率所占比例最大,达 18.2%~20.8%,说明二者在 7 种柏树的抗旱性鉴定中具有较高的可靠性;其次是水分利用效率、光合速率,为 14.1%~16.0%,说明其可靠性一般;可靠性最差的是脯氨酸,仅 10.3%。

表 3 引进柏抗旱性指标隶属函数平均值及抗旱能力综合评价  
Table 3 Comprehensive evaluation of drought resistance among the species

指标	T4	CC4	Ce	L3	CC5	H1	N2	平均	%
可溶性糖	0.388	1.000	0.828	0.857	0.967	0.000	0.471	0.644	20.8
脯氨酸	0.020	0.189	0.481	1.000	0.427	0.118	0.000	0.319	10.3
水分利用效率	0.904	0.471	0.356	1.000	0.000	0.455	0.297	0.498	16.0
光合速率	0.209	0.000	0.891	0.327	0.172	0.454	1.000	0.436	14.1
蒸腾速率	0.791	1.000	0.109	0.673	0.828	0.546	0.000	0.564	18.2
叶片保水力	1.000	0.237	0.000	0.682	0.924	0.715	0.922	0.640	20.6
平均	0.552	0.483	0.444	0.756	0.553	0.381	0.448		
综合评价	3	4	6	1	2	7	5		

4 小结与讨论

本文通过植物叶片保水力、光合速率、蒸腾速率、水分利用效率以及胁迫前后脯氨酸与可溶性糖含量变化等方面对几种引进柏树和国内土著种在抗旱性强弱进行对比研究:在叶片保水力方面,T4>CC5>N2>H1>L3>CC4>Ce;在光合速率方面,N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4;在蒸腾速率方面,N2>Ce>H1>L3>T4>CC5>CC4;水分利用效率方面,L3>T4>CC4>H1>Ce>N2>CC5;脯氨酸积累量方面,L3>Ce>CC5>CC4>H1>T4>N2;可溶性糖增加量方面,CC4>CC5>L3>Ce>N2>T4>H1。运用模糊数学的隶属函数法对 7 个引进柏树的抗旱能力做综合评价,表明:引入种 L3、N2、CC5、T4、CC4 在抗旱能力方面均强于国内土著种侧柏(Ce),而 H1 抗旱性弱于侧柏(Ce)。

通过对 7 种柏树的抗旱能力进行综合评价的结果进一步表明树木的抗旱性是由多个抗旱特征共同反映的。某一个测定指标值的高低并不能充分反映出物种的抗旱能力。尽管本文应用了 6 个指数对目标植物的抗旱性进行了初步的综合评价,但植物的抗旱生理生化及其诱导信息的传导存在多样化,如何对不同树种选择具有代表性的抗旱评价指标,或者尽可能创建一种具有广泛适用性的抗旱指标评价体系就显得尤为重要。这也是近些年许多抗逆生理生态学领域的专家们研究的热点问题<sup>[12-14]</sup>。另外,本研究结果表明,脯氨酸在抗旱性综合评价中可靠性最差。脯氨酸含量对于干旱胁迫的响应程度虽已广泛应用于植物抗旱性评价<sup>[15-17]</sup>,但也有研究指出,对于耐旱性强的植物,脯氨酸积累并不明显;而对水分亏缺敏感的植物则表现出脯氨酸的大量累积<sup>[18]</sup>。因而,植物抗旱性评价中对该指标的选择需慎重。

参考文献:

[1] 吴中伦. 国外树种引种概论[M]. 北京:科学出版社,1983.  
[2] 武维华. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2003.  
[3] LEVITT J. Response of plants to environmental stress[M].

2nd ed, New York: Academic Press,1980.  
[4] TURNER N C. Adaptation to water deficit: A changing perspective[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1983 (13):175-190.  
[5] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.  
[6] 魏永胜,梁宗锁. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. 草业科学,2005,22(6):33-36.  
WEI Y S, LIANG Z S. Comprehensive evaluation on alfalfa drought resistance traits by subordinate function values analysis[J]. Pratacult Science, 2005, 22(6): 33-36.  
[7] 窦新永, 吴国江, 黄红英, 等. 麻疯树幼苗对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1425-1430.  
DOU X Y, WU G J, HUANG H Y, *et al.* Responses of *Jatropha curcas* L. seedlings to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1425-1430.  
[8] 李荣生, 许煌灿, 尹光天, 等. 植物水分利用效率的研究进展[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 366-371.  
LI R S, XU H C, YIN G T, *et al.* Advances in the water use efficiency of plant[J]. Forest Research, 2003, 16(3): 366-371.  
[9] 李玲, 余光辉, 曾富华. 水分胁迫下植物脯氨酸累积的分子机理[J]. 华南师范大学学报:自然科学版, 2003(1): 126-134.  
LI L, YU G H, ZENG F H. The plant molecular mechanism of proline accumulation under water stress[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2003(1): 126-134.  
[10] 李德全. 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.  
[11] 王玮, 李德全, 李春香, 等. 水分胁迫对抗旱性不同的玉米品种根、叶渗透调节能力机渗透调节物质的影响[J]. 华北农学报, 2000, 15(增刊): 8-15.  
WANG W, LI D Q, LI C X, *et al.* Effects of water stress on osmotic adjustment of leaves and roots of Maize with different drought resistance [J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2000, 15(sp. ): 8-15.  
[12] 白冰冰, 王志刚, 陈飞, 等. 食松、油松和樟子松抗旱水分生理比较研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 10-13.  
BAI B B, WANG Z G, CHEN F, *et al.* Water physiology of *Pinus edulis* Engelm., *P. tabulaeformis* and *P. sylvestris* var. *mongolica* under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 10-13.

率减少实验误差。

参考文献：

[1] 沙晋明,陈鹏程,陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究[J]. 水土保持研究,2003,10(2):21-25.  
SHA J M, CHEN P C, CHEN S L. Characteristics analysis of soil spectrum response resulted from organic material[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(2): 21-25.

[2] 吴昫昭,田庆久,季峻峰,等. 土壤光学遥感的理论、方法及应用[J]. 遥感信息,2003(1):40-47.  
WU Y Z, TIAN Q J, JI J F. Theory, Means and uses of soil remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2003(1): 40-47.

[3] 何挺,王静,程烨,等. 土壤氧化铁光谱特征研究[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(2):30-34.  
HE T, WANG J, CHENG Y. Study on soil ferric oxide[J]. Geography and GIS Information Science, 2006, 22(2): 30-34.

[4] 吕国楷,洪启旺,郝允充,等. 遥感概论[M]. 北京:高等教育出版社,1995:159-165.

[5] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992:8.

[6] HUNT G R. Near-infrared(1.3~2.4 mm) spectral of alteration minerals-potential for use in remote sensing [J]. Geophysics, 1979, 44 (12): 1974-1986.

[7] 齐雁冰. 高寒地区荒漠化土壤发生特性及其形成演变研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2003.

[8] 刘庆生,王志刚,荆林海. 岩石实验室光谱对应分析[J]. 遥感学报, 1999, 3(2): 153.  
LIU Q S, WANG Z G, JING L H. Correspondence analysis of laboratory spectra of rock[J]. Journal of Remote Sensing,

1999, 3(2): 153.

[9] 徐彬彬,戴昌达. 南疆土壤光谱反射特性与有机质含量的相关分析[J]. 科学通报, 1980, 25(6): 282-284.  
XU B B, DAI C D. Relationship between soil reflectance characteristics and SOM content in south area of Xinjiang Province [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(6): 282-284.

[10] 朱永豪,邓仁达,卢亚非,等. 不同湿度条件黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义[J]. 土壤学报, 1984, 21 (4): 194-202.  
ZHU Y H, DENG R D, LU Y F, *et al.* Yellow brown soil spectral characteristics in different water condition and remote sense mening[J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21 (4): 194-202.

[11] 尹殿奎,冯君,杨志超. 长春市主要土壤类型光谱特性的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1998, 20(3): 57-59.  
YI D K, FENG J, YANG Z C. Soil spectral characteristics in Changchun city[J]. Journals of Jilin Agriculture University, 1998, 20(3): 57-59.

[12] 季耿善,徐彬彬. 土壤粘土矿物反射特性及其在土壤学上的应用[J]. 土壤学报, 1987, 24 (1): 67-76.  
JI G S, XU B B. Spectral characteristics of clay mineral and uses in soil science[J]. Acta Pedologica Sinica, 1987, 24 (1): 67-76.

[13] 常庆瑞,蒋平安,周勇,等. 遥感技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 162-164.

[14] GALVAO L S, V ITO RELLO I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of brazilian tropical soils[J]. Int. J. RemoteSens, 1998 (19) : 1969-1979.

(上接第 17 页)

[13] 王乃江,侯庆春,张文辉,等. 黄土高原乡土树种光合作用及抗旱性研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(3): 26-29.  
WANG N J, HOU Q C, ZHANG W H, *et al.* Photosynthesis and drought resistance of the native species in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21 (3): 26-29.

[14] 王改萍,岑显超,彭方仁,等. 不同楸树品种的抗旱性鉴定[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 815-821.  
WANG G P, CEN X C, PENG F R, *et al.* Drought resistance in seedlings of *Catalpa bungei* cultivars[J]. Journal of Zhejiang Forestry college, 2009, 26(6): 815-821.

[15] 许桂芳. 2 种过路黄抗旱生理特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 12-14.  
XU G F. Physiological process of drought resistance of two *Lysimachia* species[J]. Journal of Northwest Forestry Uni-

versity, 2007, 22(5): 12-14.

[16] 吴涛,陈少瑜,彭明俊,等. 不同种源膏桐在干旱胁迫下生理指标的变化[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 7-11.  
WU T, CHEN S Y, PENG M J, *et al.* Changes of physiological indices of *Jatropha curcas* from different provenances under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 7-11

[17] 吉增宝,王进鑫. 干旱胁迫对侧柏幼树某些生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 6-9.  
JI Z B, WANG J X. The effect of drought stress on some physiological characters of *Platycladus orientalis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 6-9.

[18] 张建国,李吉跃,沈国防,等. 树木耐旱特性及其机理研究[M]. 北京:中国林业出版社, 2000.