

# 黄土高原乡土树种光合作用及抗旱性研究

王乃江<sup>1</sup>, 侯庆春<sup>2</sup>, 张文辉<sup>1</sup>, 侯娜<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100 2. 中国科学院、水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:**对黄土高原乡土树种油松、刺槐、侧柏、山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香、臭柏、金银花等10个树种的光合作用和抗旱性指标进行了测定和比较。结果表明,丁香、侧柏和刺槐具有极强的利用太阳光的能力,耐荫性较差,金银花耐荫性最强。与侧柏和刺槐相比,油松的耐荫性较强。金银花、山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香、臭柏、油松、侧柏、刺槐的耐荫性依次降低。另外,辽东栎、文冠果、臭柏和金银花对弱光的利用率较高,可以适应一定的较弱光照环境。丁香、刺槐和侧柏为典型的阳性树种,金银花为典型的阴性树种,辽东栎、文冠果、臭柏、油松、山杏和连翘既可以适应弱光条件,也可以在一定的强光照条件下生长。10个树种在脯氨酸、可溶性糖含量、电导率及水分特性上有差异,其抗旱机制各不相同,但它们都具有较强的抗旱能力,适宜黄土高原干旱的自然条件。

**关键词:**黄土高原;乡土树种;光合特性;抗旱性

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-7461(2006)03-0026-04

## Photosynthesis and Drought Resistance of the Native Species in Loess Plateau

WANG Nai-jiang<sup>1</sup>, HOU Qing-chun<sup>2</sup>, ZHANG Wen-hui<sup>1</sup>, HOU Na<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The photosynthesis and drought resistance of ten tree species were measured and compared each other in loess plateau, such as *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudacacia*, *Platycladus orientalis*, *Prunus armeniaca*, *Forsythia suspensa*, *Quercus liaotungensis*, *Xanthoceras sobifolia*, *Syringa oblata*, *Sabina vulgaris* and *Lonicera japonica*. It was found that *P. orientalis*, *S. oblata* and *R. pseudoacacia* had the higher capacity to absorb and utilize the sun light, and these were shade intolerant tree species. But *L. japonica* was a shade-tolerant one. For these main forestation tree species, *P. tabulaeformis* was better to tolerate the shade condition than *R. pseudoacacia* and *P. orientalis*. The order of shade-tolerance from higher to lower was *L. japonica*, *P. armeniaca*, *F. susoensa*, *Q. liaotungensis*, *X. sobifolia*, *S. oblata*, *S. vulgaris*, *P. tabulaeformis*, *R. pseudoacacia* and *P. orientalis*. In addition, all of these three tree species, *Q. liaotungensis*, *X. sobifolia*, *S. vulgaris* and *L. japonica* could adapt to lower light intensity. But these six tree species, *Q. liaotungensis*, *X. sobifolia*, *S. vulgaris*, *P. tabulaeformis*, *P. armeniaca* and *F. susoensa*, could grow better either shade condition or not. On the other hand, although these ten tree species had different mechanism of drought stress, they all had higher drought resistance and could suit to drought condition on loess plateau.

**Key words:** loess plateau; native species; photosynthesis; drought resistance

由于黄土高原干旱、寒冷、土壤瘠薄,多数地区立地条件极差,提高造林成活率已成为人工林培育

收稿日期: 2005-03-15 修回日期: 2005-10-24

基金项目: 中国科学院“西部行动计划”项目“黄土高原植被建设模式与快速绿化技术研究”(KZCX1-06-03); 中国科学院知识创新工程重点项目“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究”。

作者简介: 王乃江(1966-),男,陕西岐山人,副教授,在读博士,从事黄土高原人工植被建设及天然林保护研究。

http://www.cnki.net

的重要问题之一。除刺槐外,山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香、臭柏、金银花、油松、侧柏等树种是生长在黄土高原的常见乡土树种。近年来,这些树种在荒山造林中已普遍应用,但研究甚少。因此,开展连翘、文冠果、金银花、油松、侧柏和刺槐等树种在光合作用和抗旱性方面的研究对造林树种的选择及提高造林成活率,推动造林工作有一定的现实意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地位于陕西省延安市燕沟试验小区,属典型的黄土高原丘陵区,处于暖温带半干旱区向半湿润区的过渡带,年平均气温 9.2℃, 10℃ 的活动积温 3 350℃, 年日照时数 2 436 h, 年平均降水量 563.5 mm, 降水量的年际变化大, 季节分配不均。成土母质以第四纪黄土为主, 主要土类为黄绵土, 其次是冲积土、红黏土、二色土和粗骨土。土壤有机质含量低于 1%。试验地处于森林带与森林草原的过渡地带, 森林植被稀少。主要树种有刺槐、杨树、柠条、沙棘, 另外还有油松、侧柏、连翘和火炬树; 人工草种有沙打旺、苜蓿等, 经济林树种有苹果、梨、枣、葡萄、山杏、仁用杏等。

### 1.2 材料

供试树种为延安市宝塔区燕沟 2 a 生的山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香、臭柏、金银花、油松、侧柏、刺槐。

### 1.3 方法

6 月中旬, 选择晴天 8:00~9:00 进行采样。对

盆栽的 10 种树种分别选取同方向的 1 a 生枝条第 8~10 片叶片, 迅速带回实验室测定叶绿素、脯氨酸、可溶性糖、电导率和叶水分等生理指标, 在树体上直接测定光合和呼吸指标。叶片相对含水量采用称重法, 自由水和束缚水含量采用马林契克法, 脯氨酸含量采用酸性茚酮法, 可溶性糖含量采用蒽酮法, 电导率采用电流法, 叶绿素含量采用直接浸提法。

用 Li-6400 便携式光合作用测定系统测定 10 个树种的光合速率、气孔导度、扩散阻力( $CO_2$ )、胞间  $CO_2$  浓度及蒸腾速率。用 SPSS 软件拟合光合速率与辐射强度曲线, 求导、计算光饱和点、光补偿点、光饱和点和光补偿点时的光合速率、蒸腾速率。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同树种的光合作用特征

2.1.1 不同树种的光饱和点和光补偿点 从表 1 可看出, 植物对光的适应性的多样性, 表现在不同树种其光合作用特征不同, 即不同树种表现出不同的光饱和点和光补偿点。丁香的光饱和点最高, 为 1 937.5 lx, 侧柏、刺槐次之, 山杏、连翘、辽东栎、文冠果、臭柏处于一般水平, 金银花最低; 金银花和臭柏光补偿点最低, 仅为 9.70 lx 和 11.70 lx, 刺槐的光补偿点最高, 为 187.5 lx, 远远大于其他树种。文冠果、辽东栎、侧柏和山杏的光补偿点都小于 50 lx, 经过相关分析, 光饱和点和光补偿点的相关系数仅为 31.6%, 它们之间没有明显的相关关系(表 1)。比较而言, 丁香的光饱和点高, 而光补偿点并未达到最高; 臭柏的光补偿点最低, 光饱和点居于中间水平。

表 1 10 种树种的光合特性<sup>①</sup>

Table 1 The characteristics of photosynthesis of ten species

树种	光合速率-光照强度模型	光饱和点 /lx	光补偿点 /lx	光补偿点/ 光饱和点 /%	光饱和点 时光合速率 / $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	光饱和点时 呼吸速率 / $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	光饱和点时 水分利用效率 /%	光补偿点时 光合速率 / $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
山杏	$y = -2E-06x^2 + 0.0052x - 0.1509$	1 300.0	42.2	3.2	6.58	0.17	2.63	0.11
连翘	$y = -8E-06x^2 + 0.0214x + 0.6483$	1 337.5	60.0	4.5	29.26	2.78	9.51	1.45
辽东栎	$y = -4E-06x^2 + 0.0108x + 0.1678$	1 350.0	25.3	1.9	14.69	1.12	7.60	0.25
文冠果	$y = -1E-05x^2 + 0.0281x + 0.3213$	1 405.0	16.2	1.2	39.66	1.79	4.51	0.24
丁香	$y = -4E-06x^2 + 0.0155x - 0.7283$	1 937.5	70.5	3.6	29.30	3.06	10.45	0.53
臭柏	$y = -3E-06x^2 + 0.0082x + 0.7617$	1 366.7	11.7	0.9	7.23	0.40	5.48	0.05
金银花	$y = -1E-05x^2 + 0.0248x - 0.2097$	1 240.0	9.7	0.8	30.42	2.78	9.13	0.27
油松	$y = -5E-06x^2 + 0.0128x - 2.3742$	1 280.0	57.8	4.5	16.00	0.53	3.29	0.16
侧柏	$y = -4E-06x^2 + 0.0096x + 0.0334$	1 798.5	33.8	1.9	7.44	0.23	3.06	0.03
刺槐	$y = -1E-05x^2 + 0.0314x - 4.6035$	1 570.0	187.5	11.9	44.54	1.44	3.23	0.33

<sup>①</sup>表中光饱和点和光补偿点的相关系数为 31.6%。

根据光照强度和植物耐荫性之间的关系,可以看出,丁香、侧柏和刺槐的光饱和点和光补偿点都比较高,具有极强的利用太阳光的能力,耐荫性较差;相反,金银花的光饱和点和光补偿点都比较低,其耐荫性最强。与侧柏和刺槐相比,油松的耐荫程度则较强,但山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香和臭柏等树种均比油松的耐荫性差,它们是仅次于刺槐和侧柏的阳性树种。就对光的利用范围而言,丁香和侧柏对光的适应范围比较广,文冠果、刺槐、臭柏和辽东栎次之,连翘、山杏较低,油松和金银花对光的适应范围则最小。在光补偿点与光饱和点的比值方面,刺槐达到最大值(11.9%),山杏、连翘、丁香和油松高于3.0%,辽东栎和侧柏接近2.0%,文冠果、臭柏和金银花维持在1.0%左右(表1)。综上所述,除金银花外,其他9个树种对强光有一定的适应能力,可适应较强的光照环境。辽东栎、文冠果、臭柏和金银花对弱光的利用率较高,可以适应一定的较弱光照环境。相比较而言,丁香、刺槐和侧柏为比较典型的阳性树种,金银花为典型的阴性树种,辽东栎、文冠果、臭柏、油松、山杏和连翘既可以适应弱光条件,也可以在一定的强光照条件下生长。这一结果与这些树种在黄土高原丘陵区自然分布格局正好吻合,侧柏多分布于阳坡和油松多分布于阴坡的自然植被分布特点,以及安塞县纸房沟刺槐与连翘混交成功的实例,进一步证明了光照强度和植物耐荫性之间的关系。这一结果对黄土高原人工林的营造有一定的参考价值。

2.1.2 不同树种的光合作用特征 光合作用过程中,不同树种由于叶片结构、叶绿素含量和生理特征的差异<sup>[16]</sup>,其光合速率具有一定的差异。由表1可以看出,光达到饱和时,不同树种的光合速率有明显的差异。光饱和时,文冠果和刺槐的光合速率维持在较高的水平上,达到 $40.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,连翘、

丁香和金银花基本一致,光合速率略低于 $30.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而山杏、臭柏和侧柏的光合速率最低,波动在 $7.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

同样,光达到饱和时,不同树种的呼吸速率也有明显的差异。连翘、丁香和金银花的呼吸速率比较高,达到 $2.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,辽东栎、文冠果和刺槐处于中间水平,维持在 $1.12 \sim 1.79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而山杏、臭柏、油松和侧柏则较低,其呼吸速率在 $0.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。光饱和时树种间呼吸速率的差异与光合速率相似。测定结果表明,连翘和金银花的光合速率及呼吸速率都比较高,辽东栎处于中间水平,而山杏、臭柏和侧柏则较低。

各树种水分利用率存在差异。达到光饱和点时,连翘、辽东栎、丁香和金银花的水分利用率比较高,保持在7.60%~10.45%,臭柏和文冠果次之,油松、侧柏、刺槐和山杏则较低,为2.63%~3.23%。

从表1可看出,在光补偿点时,不同树种的光合速率也有差异。连翘的光合速率在光补偿点时,保持在 $1.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平上,而臭柏和侧柏的光合速率仅为 $0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他树种的光合速率都较低,波动于 $2.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

## 2.2 不同树种叶绿素含量的比较

由表2可看出,10个树种的叶绿素含量差异明显,山杏的叶绿素含量最高,为2.650%,远远超出其他树种,是油松叶绿素含量的16倍。臭柏、金银花、油松和侧柏的叶绿素含量比较低,在0.304%以下,连翘、辽东栎、文冠果、丁香和刺槐的叶绿素含量在0.530%~1.172%之间。同时,文冠果和连翘其单位鲜叶重量的叶绿素含量高,而叶绿素a/b值则较低。根据叶绿素含量与耐荫性之间的关系,叶绿素含量越高,其耐荫程度较强<sup>[11]</sup>,可以说明文冠果和连翘的具有较强的耐荫性。

表2 不同树种的叶绿素含量

Table 2 The contents of chlorophyll of ten tree species

指标	山杏	连翘	辽东栎	文冠果	丁香	臭柏	金银花	油松	侧柏	刺槐
叶绿素含量/%	2.650	1.048	0.530	1.172	0.844	0.304	0.300	0.165	0.189	0.800
叶绿素 <sub>a</sub> /叶绿素 <sub>b</sub>	7.25	2.06	2.87	3.26	5.37	4.56	3.14	47.39	7.33	3.19

叶绿素a/b比值较小,说明叶绿素b的含量相对较多,从叶绿素b吸收光谱看,叶绿素在蓝紫光部分的吸收带较宽,对蓝光的利用率高<sup>[5]</sup>。根据测定结果,不同树种间叶绿素a/b值存在显著差异,这种差异与叶绿素含量的差异无一致性。在10个树种中,油松的叶绿素a/b值最大,为其他树种平均值的11

倍,侧柏、山杏、丁香和臭柏次之,其比值变化于4.56~7.33之间,连翘、辽东栎、文冠果、金银花和刺槐等树种最低(表2)。这些叶绿素a/b值较低的树种中,除刺槐外,大多数能更好的利用蓝紫光,从而适应于在背光遮荫处生长,这一结果与树种耐荫性研究结果基本一致。

### 2.3 不同树种叶片水分含量的比较

水在植物体内的作用,不但与其数量有关,也与它存在状态有关。植物组织含水量、相对含水量是反映植物水分状况的重要指标。由表3可知,油松、金银花、辽东栎和刺槐等树种的相对含水量较高,达

表3 不同树种的叶水分含量

Table 3 The contents of water in the leaves of ten tree species

指标	山杏	连翘	辽东栎	文冠果	丁香	臭柏	金银花	油松	侧柏	刺槐
相对含水量/%	82.91	87.21	91.8	86.60	67.52	85.6	93.69	96.37	82.24	92.50
自由水/%	54.72	46.43	29.52	31.66	58.83	37.13	46.82	20.1	19.31	32.64
束缚水/%	19.08	27.44	20.0	31.22	6.41	21.10	22.62	37.36	41.08	10.57
自由水/束缚水	3.21	1.69	1.48	1.01	9.18	1.16	2.07	0.54	0.47	3.01

由于自由水直接参与植物的生理过程和生化反应,因此,自由水/束缚水比值较高时,植物代谢活跃,生长较快;反之,自由水/束缚水比值较低时,植物代谢活性低,生长缓慢,但抗逆性较强<sup>[13,14]</sup>。这些耐旱植物的细胞汁液浓度高,束缚水含量高,因而细胞和原生质的弹性强,原生质粘性大,细胞及组织的保水能力强<sup>[13]</sup>。由表3可以看出,丁香的自由水/束缚水比值最高,远远超过其他树种,山杏、刺槐和金银花次之,其他灌木树种(连翘、文冠果、臭柏)和辽东栎、油松、侧柏的自由水/束缚水比值最低。根据植物组织自由水/束缚水比值和抗逆性之间的关系,可以推断,连翘、文冠果、臭柏和辽东栎、油松、侧柏等树种的抗旱性相对较高,抗逆性强,而丁香、山杏、刺

表4 不同树种的抗旱生理指标

Table 4 The physiological index of drought resistance

生理指标	山杏	连翘	辽东栎	文冠果	丁香	臭柏	金银花	油松	侧柏	刺槐
脯氨酸/%	0.009	0.002	0.005	0.028	0.002	0.003	0.003	0.005	0.014	0.032
可溶性糖/%	0.077	0.063	0.329	0.090	0.095	0.082	0.143	0.070	0.026	0.054
细胞膜透性/%	17.38	10.47	20.98	18.75	8.18	32.73	17.34	25.59	11.06	8.40

植物组织在逆境条件下,细胞膜的结构和功能受到破坏,细胞膜透性增强<sup>[13]</sup>。由表4可以看出,臭柏、油松、辽东栎、文冠果、山杏、金银花、侧柏、连翘、刺槐、丁香的电导率依次降低(表4)。根据以往的研究成果,水分胁迫时原生质膜首先遭到破坏,膜的透性增强,同时细胞内生物酶的空间间隔也遭到破坏<sup>[13]</sup>,组织的电导率增加。由此说明不同树种的细胞膜在干旱条件下受害程度各异,抗旱机制各不相同。

脯氨酸、可溶性糖、电导率的含量是植物抗旱性的3个生理指标,脯氨酸的含量测定是抗旱指标中的最主要的一个指标<sup>[1]</sup>。通过对这3个指标的比较,

到90%以上,同样条件下,山杏、连翘、文冠果、臭柏和侧柏的相对含水量较低,而丁香的相对含水量则最低,仅为67.52%。这说明在一般水分条件下,油松、金银花、辽东栎和刺槐等树种的相对含水量维持在较高的水平上,具有抵抗不良环境的能力。

槐、金银花的抗旱性相对较弱。

### 2.4 不同树种抗旱生理指标的比较

在正常条件下,植物体内的脯氨酸含量较低,但在逆境条件下,植物体内的游离脯氨酸含量会增加10~100倍<sup>[13]</sup>。脯氨酸是植物细胞中的渗透调节物质,当植物在逆境条件下其含量明显增加,以增加对环境的适应能力<sup>[9]</sup>。根据测定结果,刺槐和文冠果的脯氨酸含量最大,分别为0.032%和0.028%,高于其他树种,侧柏、山杏次之,连翘、辽东栎、丁香、臭柏、金银花和油松基本一致(表4)。

根据研究结果(表4),辽东栎和金银花叶的可溶性糖含量较高,分别为0.329%和0.143%,侧柏的可溶性糖的含量最低。

可以看出,尽管这些树种在脯氨酸、可溶性糖、电导率的含量及水分特性有差异,其抗旱性各有不同,但它们都具有较强的抗旱能力,能很好地适应黄土高原干旱的生态环境,适合在该地的立地条件。

## 3 结论与讨论

丁香、侧柏和刺槐具有很强的利用太阳光的能力,耐荫性较差,金银花耐荫性最强。与侧柏和刺槐相比,油松的耐荫性较强。金银花、山杏、连翘、辽东栎、文冠果、丁香、臭柏、油松、侧柏、刺槐的耐荫性依次降低。

(下转第44页)

数呈负相关,提示杜仲胶的积累及含胶细胞的发育均需要光照,但光照时数超过某一阈值后,光照就对杜仲胶的形成起负调控作用。至于光照对杜仲胶合成的具体影响,有待于进一步深入研究杜仲胶合成的分子机制。此外,目前尚未见到有关不同光质对杜仲胶积累影响方面的报道。

据杜红岩报道<sup>[11]</sup>,杜仲含胶细胞在幼茎中分散存在于皮层薄壁组织和初生韧皮部中,髓部极少。本试验较准确地观察到,含胶细胞在幼茎中主要分布在初生韧皮部内侧并靠近形成层的部位,髓部几乎没有,皮层薄壁组织中也极少,这可能与试验所用幼茎的年龄有一定关系。

Takeshi 等<sup>[12]</sup>曾用 FT-IR 法和组织化学法研究发现,杜仲胶一般在形成层附近积累,与本文观察到的含胶细胞在幼茎的定位一致。

#### 参考文献:

- [1] 方世壁. 杜仲胶的研究与开发[J]. 中外科技信息, 1998(8): 10-11.
- [2] 苏印泉. 杜仲研究开发评述[J]. 西北林学院学报, 1996, 6(2): 94-100.

(上接第 29 页)

丁香和侧柏对光的适应范围比较广,文冠果、刺槐、臭柏和辽东栎次之,连翘、山杏较低,油松和金银花对光的适应范围则小。除金银花外,其他 9 个树种对强光有一定的适应能力,可适应较强的光照环境。辽东栎、文冠果、臭柏和金银花对弱光的利用率较高,可以适应一定的较弱光照环境。相比较而言,丁香、刺槐和侧柏为比较典型的阳性树种,金银花为典型的阴性树种,辽东栎、文冠果、臭柏、油松、山杏和连翘既可以适应弱光条件,也可以在一定的强光照条件下生长。

10 个树种在脯氨酸、可溶性糖含量、电导率及水分特性上各有差异,其抗旱机制各不相同,但它们都具有较强的抗旱能力,适宜黄土高原干旱的自然条件。

#### 参考文献:

- [1] 王乃江,赵忠. 三种杏抗旱生理特性比较研究[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(1): 1-4.
- [2] 胡新生,王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望[J]. 林业科学, 1998, 34(2): 80.
- [3] 刘建伟,刘亚荣. 不同杨树无性系光合作用和抗旱能力的研究[J]. 林业科学研究, 1994, 30(1): 85-87.
- [4] 刘爱琴,马祥庆. 干旱胁迫对杉木无性系光合特性的影响[J]. 福建林学院学报, 1998, 18(3): 238-241.

- [3] 田兰馨,卢敏,胡正海. 杜仲含胶细胞发生和发育的研究[J]. 植物学通报, 1990, 7(1): 1-6.
- [4] 杜红岩,谢碧霞,邵松梅. 杜仲胶研究的进展与发展前景[J]. 中南林学院学报, 2003, 23(4): 95-99.
- [5] 崔跃华,汪矛,孙克莲. 杜仲含胶细胞的形态学研究[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 439-443.
- [6] 周莉英,黎斌,苏印泉. 杜仲含胶细胞形态特征的研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(3): 566-569.
- [7] 杜红岩,杜兰英,李芳东,等. 杜仲果实含胶特性的个体变异规律[J]. 林业科学研究, 2004, 47(6): 706-710.
- [8] 杜红岩,杜兰英,李芳东,等. 杜仲果实内杜仲胶形成规律[J]. 林业科学研究, 2004, 17(2): 185-191.
- [9] 杜红岩. 杜仲含胶特性及其变异规律与无性系选择的研究[D]. 湖南株洲: 中南林学院, 2003. 7.
- [10] 杜红岩,杜兰英,李福海. 不同产地杜仲树皮含胶特性的变异规律[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 186-190.
- [11] 李琰. 杜仲愈伤组织培养及次生代谢产物含量的研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2003. 42.
- [12] Bamba T, Fukusaki E, Yoshihisa, et al. In situ chemical analyses of trans-polyisoprene by histochemical staining and Fourier transform infrared microscopetecopy in a rubber-producing plant *Eucommia ulmoides* oliver[J]. Planta, 2002, 215(6): 934-939.

- [5] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 89-121.
- [6] 廖祥儒,高俊凤,梁宗瑛,等. 渭北地区干旱条件下不同品种小麦生长情况分析[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(4): 87-95.
- [7] 杨敏生,裴保华,张树常. 树木抗旱性研究进展[J]. 河北林果研究, 1997, 12(1): 88-89.
- [8] 李慧卿,马文元. 沙生植物抗旱性比较的主要指标及分析方法[J]. 干旱区研究, 1998, 15(4): 13-15.
- [9] 潘瑞炽,黄一得. 植物生理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 113.
- [10] 阚文靖,邱运亮,刘国民. 几种桉树光合特性的研究[J]. 湖南林业科技, 1995, 22(1): 5-9.
- [11] 冷平生,杨晓红,胡悦,等. 5 种园林树木的光合和蒸腾特性的研究[J]. 北京农学院学报, 2000, 15(4): 13-18.
- [12] 白伟岚,任建武,高永伟,等. 园林植物的耐荫性研究[J]. 林业科技通讯, 1999(2): 12-14.
- [13] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 世界图书出版社, 1999. 223-230.
- [14] 刘祖祺,张石城. 植物抗性生理学[J]. 北京: 中国农业出版社, 1994. 125-130.
- [15] 傅瑞树. 苏铁抗寒生理特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 120-121.
- [16] 孙书存,陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 212-217.
- [17] 简琛,马钦彦,韩海荣,等. 山西太岳山辽东栎的光合特性[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1399-1406.