

8 个油松种源抗旱性的比较研究

王琰¹, 狄晓艳¹, 马建平², 朱小琪³, 陈建文¹, 王孟本¹

(1. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006; 2. 山西省财政厅, 山西太原, 030006; 3. 山西省统计局, 山西太原 030002)

摘要: 为了鉴别 8 个油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 种源的抗旱性, 以其 3 年生幼苗为研究对象, 进行了控水条件下的盆栽实验(T₁: 土壤含水量为 25%~29%; T₂: 土壤含水量为 19%~22%; T₃: 土壤含水量为 12%~15%); 测定了其净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)等生理生化指标, 并应用 Fuzzy 隶属函数对它们的抗旱性进行了综合评价。结果表明, 在 T₃ 条件下, 8 个种源的 P_n 无显著差异($P > 0.05$); 种源 2 的 T_r 显著高于种源 1, 3, 5($P < 0.05$); 种源 5 的水分利用效率(WUE)显著高于种源 2, 3, 4, 6, 7, 8($P < 0.05$)。与 T₂ 条件相比, 在 T₃ 条件下, 各种源的 SOD 活性均有所增高, 多数种源的 POD 活性均有所增高; 种源 7, 8 膜脂过氧化程度较小, 而种源 1, 3, 4, 5 膜脂过氧化程度较大。8 个种源的抗旱性依次为: 种源 8 > 种源 6 > 种源 1 > 种源 5 > 种源 4 > 种源 3 ≈ 种源 7 > 种源 2。

关键词: 油松; 光合; 保护酶; 抗旱性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)04-0046-05

中图分类号: S791, S718.43

Drought Resistance of Seedlings of Eight Provenances of Chinese Pine

WANG Yan¹, DI Xiaoyan¹, MA Jianping², ZHU Xiaoqi³, CHEN Jianwen¹, WANG Mengben¹

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. Department of Finance of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 3. Statistics Bureau of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: To test the drought resistance of eight provenances (PRs) of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.), a soil water treatment experiment with water gradients (T₁: water content was 25%~29%, T₂: 19%~22%, and T₃: 12%~15%) for 120 potted 3-year-old seedlings was conducted. Some physiological and biochemical indexes such as net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), superoxide dismutase (SOD) activity, and peroxidase (POD) activity were measured and analyzed. Results showed that no significant difference was observed in P_n among the provenances under T₃ ($P > 0.05$). However, PR₂ had significantly higher T_r than PR₁, PR₃, and PR₅; and PR₅ had significantly higher water use efficiency (WUE) than PR₂, PR₃, PR₄, PR₆, PR₇, and PR₈ ($P < 0.05$) under T₃. In comparison with those under T₂, the SOD activity of all provenances and the POD activity of most provenances reached a higher level under T₃. PR₇ and PR₈ had weaker membrane lipid peroxidation and PR₁, PR₃, PR₄, and PR₅ had stronger membrane lipid peroxidation. In terms of the drought resistance of the provenances, the treatments had the following order of PR₈ > PR₆ > PR₁ > PR₅ > PR₄ > PR₃ ≈ PR₇ > PR₂.

Keywords: *Pinus tabulaeformis*; photosynthesis; protective enzyme; drought resistance

油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 是我国特有树种, 具有保持水土, 防风固沙, 涵养水源等作用。因自然环境条件差异和种内遗传变异, 不同油松种源在适应性、生产力等方面具有明显差异。关于油松抗旱性的研究已有若干报道^[1-7], 不仅有对油松这一树种的单独研究, 亦有与其它树种(如刺槐、侧柏等)的比

较研究。但是对不同油松种源抗旱性的比较研究至今鲜有报道。本研究通过盆栽水分处理试验, 对 8 个油松种源幼苗的净光合速率、蒸腾速率及保护酶活性等生理生化参数进行测定, 探讨了不同油松种源幼苗对水分胁迫的响应特点, 揭示其抗旱机理, 为优化油松苗木培育和提高苗木造林成活率提供科学依据。

收稿日期: 2009-01-06

修回日期: 2009-03-08

资助项目: 山西省自然科学基金(2007021032); 山西大学校基金(2006001)

作者简介: 王琰(1973—), 女(汉族), 山西省临猗县人, 硕士, 工程师, 主要从事植物生态学教学和研究工作。E-mail: wylwyh@sxu.edu.cn。

通信作者: 王孟本(1954—), 男(汉族), 山西省万荣县人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生态学教学和研究工作。E-mail: mbwang@sxu.edu.cn。

1 材料与方方法

1.1 材料与水分处理

试验以 8 个油松种源的 3 年生幼苗为材料, 种源地概况见表 1。2002 年分赴各种源地采集油松天然林种子, 2003 年在自控温室内的苗盘中播种育苗, 2005 年移栽于室外苗圃。2006 年 8 月移植盆栽, 每个种源为一组, 每组 15 盆, 每盆 1 株, 在室内进行正常苗期管理。花盆上径 19 cm, 下径 13 cm, 高 12.5 cm。将花盆称重后, 盆内土壤按泥炭土: 苗圃地土=1: 1(体积: 体积)的比例添加, 土壤的最大持水量为 38%。2006 年 9 月进行水分处理试验^[3,4], 首先对苗

木一次性充分浇水, 然后让花盆在室内自然失水。分别于第 5 天、第 10 天和第 15 天的 7:00—8:00 测定花盆总重(花盆+ 苗+ 土壤+ 水), 并于当天测定油松幼苗的各种生理生化参数(详见下节)。在实验结束时(第 16 天)测定花盆总重、苗木鲜重、土壤湿重, 并以烘干法测定土壤干重。因为苗木较小, 可以假定其重量在处理期间没有变化, 根据土壤含水量=(总称重- 花盆重- 苗重- 干土重)/干土重, 便可求得各测定日土壤含水量。

在本实验中, 借自然失水而形成的土壤水分梯度为: T_1 (土壤含水量为 25%~ 29%); T_2 (土壤含水量为 19%~ 22%) 和 T_3 (土壤含水量为 12%~ 15%)。

表 1 油松种源地概况

种源号	1	2	3	4	5	6	7	8
种源地	山西中条山	山西吕梁山	陕西洛南	陕西桥山	山西灵空山	辽宁千山	河北雾灵山	山西芦芽山
经度	110° 59'	110° 18'	110° 20'	109° 45'	112° 13'	123° 4'	117° 25'	111° 53'
纬度	35° 34'	36° 33'	34° 20'	35° 48'	36° 37'	41° 18'	40° 33'	38° 35'
年均温/ °C	12	3	12	8.6	8	8.8	7.6	6
年降水量/ mm	600~ 800	600~ 800	850~ 900	500~ 750	600~ 650	600~ 800	700~ 900	350~ 500

1.2 生理生化参数测定

采用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(LI-COR, U. S.), 于测定日的 9:00—11:00 取植株同一部位的 5 束当年生油松针叶, 测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s), 以及相应的环境因子。在每个土壤水分梯度下, 每个种源设 5 个重复(各 1 个植株), 每个重复记录 10 个数据。叶面积参考李轩然^[8]的计算方法, 按两针一束叶片合拢起来横切面更接近于椭圆形计算。借助室内空调和人工光源, 实验期间环境条件相对稳定, 气温 24 ± 0.5 °C, 空气相对湿度 $49 \pm 1\%$, 光照 $1000 \pm 50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

参考罗广华、王爱国^[9]的方法提取酶液; 采用氯化硝四氮唑蓝(NBT, Nitro blue tetrazolion)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[11-12], 以抑制 NBT 光化学还原的 50% 为 1 个酶活力单位(1U); 愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性^[11-12], 以每分钟 OD_{470} 变化 0.01 为 1U; 双组分分光光度计法测定丙二醛(MDA)含量^[10]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对气体交换参数的影响

随着土壤含水量的降低, 种源 1, 3, 4, 8 的 P_n 呈下降趋势; 种源 2, 5, 7 呈上升一下降趋势, 但种源 6 呈上升趋势。在 T_1 条件下, 种源 1 的 P_n 最高

$[9.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, 而种源 6 最低 $[2.89 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, 这 2 者之间及其与其它种源之间差异显著($P < 0.05$)。在 T_2 和 T_3 下, 各种源的 P_n 无显著差异($P > 0.05$)(图 1)。

随着土壤含水量的降低, 种源 1 和 3 的 T_r 呈下降趋势, 而其余种源呈上升一下降趋势。在 T_1 和 T_3 条件下, 各种源的 T_r 差异显著($P < 0.05$)(图 1)。在 T_3 下, 各种源 T_r 均有一定程度的下降, 表明它们均通过减少水分散失来抵御干旱胁迫; T_r 排序为: 种源 2 > 种源 8 > 种源 4 ~ 种源 6 > 种源 7 > 种源 3 > 种源 1 > 种源 5, 种源 2 的 T_r $[1.23 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 显著高于种源 1, 3, 5; 分别为后者 T_r 的 2.29, 1.74 和 4.44 倍, 表明种源 2 调节水分蒸腾的能力较差。种源 5 的 T_r 仅为 $0.276 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 显著低于其它种源, 其通过减少水分散失来抵御干旱胁迫的能力较强。

随着土壤含水量的降低, 尤其是从条件 T_2 到条件 T_3 , 种源 1, 3, 4, 5, 7 和 8 的 G_s 下降幅度较大, 对土壤水分胁迫的响应比较敏感。说明当水分亏缺时, 它们通过降低气孔导度来抵御干旱的能力较强。从条件 T_2 到条件 T_3 , 种源 2 和 6 的 G_s 没有明显变化, 表明其通过气孔调节来抵御干旱的能力较弱。

在 3 个梯度下, 8 个种源的 WUE 差异显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。在 T_3 条件下, WUE 排序为: 种源 5 > 种源 1 > 种源 6 ~ 种源 8 ~ 种源 4 ~

种源 7 > 种源 3 ≈ 种源 2。种源 5 的 WUE 显著高于种源 2, 3, 4, 6, 7, 8 ($P < 0.05$), 在水分胁迫下经济利

用水分的能力最强。与 T_2 条件相比, 在 T_3 时, 大多数种源的 WUE 升高(种源 2 除外)。

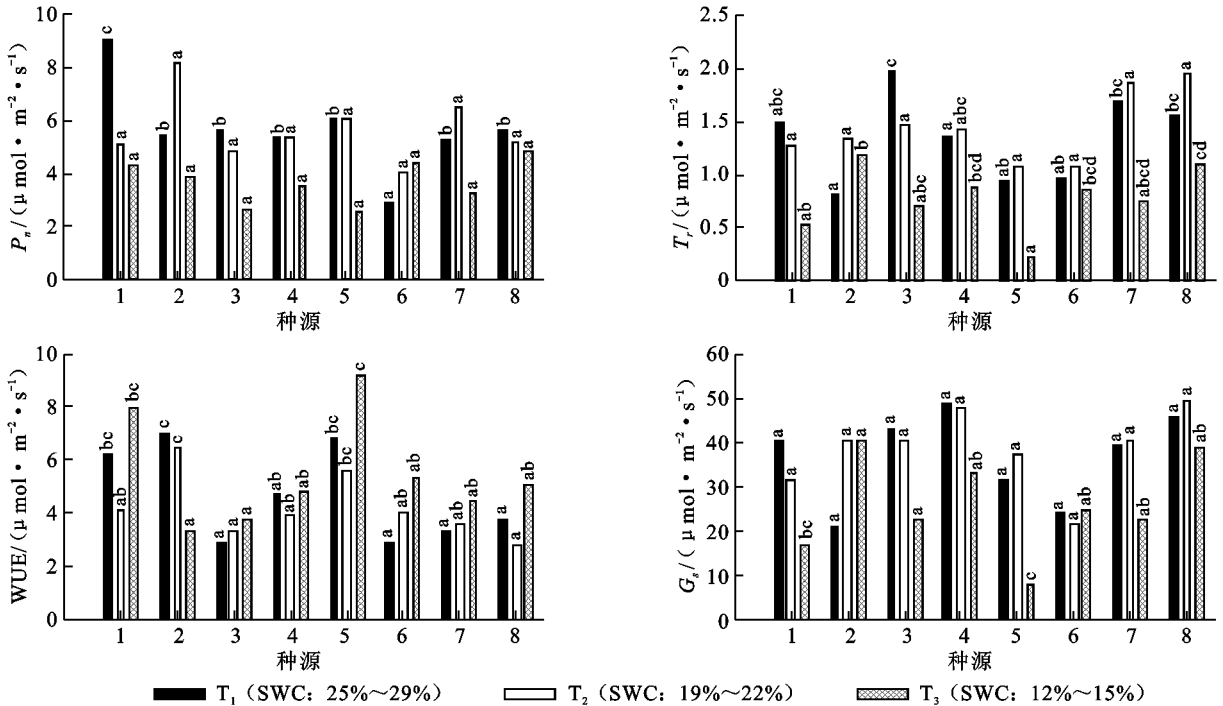


图 1 不同土壤水分含量下 8 个种源油松的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)和气孔导度(G_s)

注: 不同字母表示同一水分梯度下不同种源间差异显著($P < 0.05$), 相同字母表示它们差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 土壤水分对抗氧化酶活性的影响

SOD 能与超氧自由基(O_2^-)作用生成 H_2O_2 , 而 POD 进一步将 H_2O_2 分解为 H_2O , 对细胞具有保护作用。

由表 2 可见, 8 个种源的 SOD 活性在 T_1 和 T_3 下差异极显著($P < 0.01$); POD 含量在 3 个梯度下均有极显著差异($P < 0.01$)。与 T_2 条件时相比, 在 T_3 条件下, 各种源的 SOD 活性均有所增高, 多数种源的

POD 活性有所增高, 这有利于清除自由基, 降低膜脂过氧化水平, 从而减轻膜的伤害程度。从条件 T_2 到条件 T_3 , 种源 2 和 8 的 SOD 活性明显增强, 分别增加了 123.97 和 128.46 $U/\mu\text{g}$ 蛋白, 而种源 5 的变化最小, 仅增加了 28.89 $U/\mu\text{g}$ 蛋白。种源 4 的 POD 活性变化最大, 提高了 3 $U/\mu\text{g}$ 蛋白, 而种源 2 则仅略有提高。这表明各种源清除 O_2^- 的能力普遍有所提高, 但不同种源之间仍存在一定差异。

表 2 在 3 个土壤水分梯度下 8 个油松种源的 SOD 活性、POD 活性、MDA 含量的多重比较

参数	水分梯度	种源 1	种源 2	种源 3	种源 4	种源 5	种源 6	种源 7	种源 8
SOD 活性/ ($U \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 蛋白)	T_1	85.54 ^a	86.50 ^a	138.7 ^{abc}	189.28 ^c	176.57 ^c	172.62 ^c	111.70 ^{ab}	149.40 ^{bc}
	T_2	106.00 ^a	94.87 ^a	126.17 ^a	104.90 ^a	120.22 ^a	134.18 ^a	91.26 ^a	69.34 ^a
	T_3	173.70 ^{ab}	218.84 ^{de}	193.20 ^{bc}	217.50 ^{cde}	149.11 ^a	234.83 ^c	167.77 ^a	197.80 ^{bcd}
POD 活性/ ($U \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 蛋白)	T_1	2.27 ^b	0.48 ^a	5.10 ^c	5.03 ^c	4.12 ^c	0.45 ^a	3.69 ^c	6.56 ^d
	T_2	3.44 ^{bc}	1.66 ^a	7.30 ^d	1.31 ^a	2.81 ^b	0.87 ^a	4.12 ^c	2.86 ^b
	T_3	2.01 ^a	1.68 ^a	8.35 ^d	4.31 ^c	3.97 ^{bc}	2.21 ^a	3.18 ^b	4.70 ^c
MDA 含量/ ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 蛋白)	T_1	1.31 ^d	1.28 ^c	1.57 ^g	1.14 ^b	1.12 ^a	1.49 ^f	1.45 ^e	1.54 ^f
	T_2	1.46 ^f	1.57 ^g	1.42 ^e	1.21 ^a	1.47 ^f	1.37 ^d	1.31 ^c	1.27 ^b
	T_3	1.20 ^c	1.02 ^b	1.15 ^e	1.15 ^e	1.17 ^c	1.01 ^b	0.94 ^a	0.89 ^a

注: 不同字母表示同一水分梯度下不同种源间差异显著($P < 0.05$), 相同字母表示它们差异不显著($P > 0.05$)。

由表 2 可见, 在 3 个水分梯度下, 8 个种源的丙二醛(MDA)含量均有极显著差异($P < 0.01$)。在 T_3 下,

各种源 MDA 含量均比较小, 这可能是由于植物体内清除自由基的保护酶活性增加, 控制了细胞膜脂的过

氧化变化, 保护了细胞膜系统免受伤害。它们的膜脂过氧化程度由高到低依次为: 种源 1 \approx 种源 5 \approx 种源 4 \approx 种源 3 $>$ 种源 2 \approx 种源 6 $>$ 种源 7 \approx 种源 8, 其中种源 7 和 8 膜脂过氧化程度最小, 而种源 1, 3, 4 和 5 最大。

3 抗旱性综合评价

应用 Fuzzy 隶属函数法对 8 个种源的抗旱性进行综合评价, 与抗旱性呈正相关的 P_n , WUE, SOD 活

性和 POD 活性采用公式 $U(X_{jk}) = (X_{jk} - X_{kmin}) / (X_{kmax} - X_{kmin})$ 进行转换, 呈负相关的 T_r 和 MDA 含量, 采用公式 $U(X_{jk}) = 1 - (X_{jk} - X_{kmin}) / (X_{kmax} - X_{kmin})$ 进行转换, 并采用水分含量最低(T_3)时的各项指标的隶属度作为抗旱性综合评判标准(表 3)。

8 个种源的抗旱性顺序为: 种源 8 $>$ 种源 6 $>$ 种源 1 $>$ 种源 5 $>$ 种源 4 $>$ 种源 3 \approx 种源 7 $>$ 种源 2。种源 8 和 6 的抗旱性最强, 种源 2 的抗旱性最弱。

表 3 不同种源油松抗旱性综合评价

种源	净光合速率	水分利用效率	SOD 活性	POD 活性	MDA 含量	蒸腾速率	综合评价指数	抗旱性排序
1	0.754	0.793	0.287	0.049	0.000	0.676	0.427	3
2	0.563	0.000	0.813	0.000	0.603	0.000	0.330	8
3	0.025	0.069	0.514	1.000	0.154	0.499	0.377	6
4	0.429	0.252	0.798	0.395	0.155	0.318	0.391	5
5	0.000	1.000	0.000	0.344	0.099	1.000	0.407	4
6	0.820	0.346	1.000	0.079	0.607	0.338	0.532	2
7	0.322	0.194	0.218	0.225	0.842	0.451	0.375	7
8	1.000	0.295	0.568	0.452	1.000	0.075	0.565	1

4 讨论

水分是制约植物生长发育的重要因素。本研究中随着土壤含水量的降低, 各种源的 P_n 和 T_r 基本呈降低或先升高后降低的趋势, WUE 基本呈上升或先上升后降低的趋势, 这与已有的研究结果^[1-3, 13-14]基本一致。虽然种源 6(即辽宁千山种源)的 P_n 随水分胁迫的增强逐渐升高, 但其 P_n 自始至终均比较低。意味着种源 6 可能属于强抗旱、低光合类型。这可能与其长期与当地气候条件的适应性有关。种源 2 的 WUE 随水分胁迫的增强逐渐降低, 这与其在水分胁迫下气孔导度较大导致的蒸腾速率较大有关, 表明其在水分胁迫下水分利用效率较低, 抗旱适应性较弱。种源 5 在 T_3 条件下 P_n 和 T_r 最小, WUE 最大, 表明其能更经济的利用水分, 但抗旱生产力最弱。

SOD 和 POD 是细胞内清除活性氧的两种重要保护酶。在水分干旱胁迫下, 植物体水分平衡受到干扰时, 会造成活性氧累积, 并可能导致膜脂过氧化而造成整体膜的损伤。与此同时, SOD 和 POD 等构成的保护酶系统亦可迅速响应, 以降低活性氧可能带来的伤害。因此, SOD 和 POD 活性的变化可以反映细胞清除活性氧的能力^[15-16]。在进行干旱胁迫实验时, 测定植物的膜脂过氧化及保护酶系统参数已成为评价植物抗旱性的重要手段^[4, 5, 15, 17]。本研究中, 与 T_2 条件时相比, 在 T_3 条件下, 各种源的 SOD 活性均有

所增高, 多数种源的 POD 活性有所增高。在 T_3 条件下种源 1 和 7 的 POD 活性略有降低, 可能是其他可以清除 H_2O_2 的酶(如 CAT)或清除剂在此时的活性有更大的提高, 可以起到 POD 的作用, 从而使 POD 活性维持在较低水平。

一般情况下, 随着水分胁迫加剧, 膜脂过氧化程度加深, MDA 含量增多。而本实验中不同种源的 MDA 含量随干旱胁迫加深而降低, 这与黄华等^[3]研究结果相似。其原因可能是在严重干旱胁迫下, 油松形成了一定的耐旱机制, 保护酶系统活性维持较高的水平, 使活性氧代谢处于一定的平衡状态, 避免了活性氧和氧自由基的大量积累, 从而减轻了质膜的过氧化作用, 降低了质膜的破坏程度。

不同油松种源在 P_n , T_r , WUE, SOD 活性, POD 活性和 MDA 含量等方面表现出的对土壤水分胁迫的响应特点说明, 在长期与所在地水分和热量等环境条件的适应过程中, 各个油松种源形成了各自特殊的耐旱机理。因此, 用单一生理生化指标较难判断植物对干旱的综合适应能力^[17]。本研究应用 Fuzzy 数学隶属函数综合评判法, 根据测得的多种生理生化参数, 对各个油松种源的抗旱性进行综合评价, 这无疑有助于在总体上认识不同种源对干旱环境的适应能力。本研究中, 8 个种源的抗旱性依次为: 种源 8 $>$ 种源 6 $>$ 种源 1 $>$ 种源 5 $>$ 种源 4 $>$ 种源 3 \approx 种源 7 $>$ 种源 2。种源 8 和 6 抗旱性最强, 而种源 2 抗旱性最弱。这与种源地的环境条件和针叶的解剖结构可能

具有很大关系。例如,已有研究将油松种源分为 7 个生态型,本研究中的种源 6 位于辽东地区,属于东部型,其针叶短、窄且表皮和皮下组织厚,而种源 3 位于陕南地区,属于南部型,其针叶长、宽且表皮及皮下组织薄^[18]。

油松分布区域较广,由于生境条件的差异,在长期的进化适应过程中,与当地的水分季节变化和极端环境相适应,各个种源在水分关系方面已经表现出独特的、比较复杂的调节机制。进一步从生理生态、分子生态及生物进化的角度对各个种源的抗旱机理进行深入研究,将对合理利用油松种质资源具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 张卫强,贺康宁,王正宁,等. 光辐射强度对侧柏油松幼苗光合特性与水分利用效率的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 108-113.
- [2] 田有亮,郭连生. 呼和浩特地区不同种源油松个体光合和水分生理特征的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 8(3): 96-101.
- [3] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同土壤水分下刺槐和油松的生理特征[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 12-17.
- [4] 黄华,梁宗锁,韩蕊莲,等. 干旱胁迫条件下油松幼苗生长及抗旱性研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 1-4.
- [5] 吴俊林,张社奇,孙润广. 激光对油松在干旱胁迫下萌发及酶活性的影响[J]. 应用激光, 2005, 25(12): 408-410, 420.
- [6] Rajesh K T, Praveen K, Neeraj T, et al. Macronutrient deficiencies and differential antioxidant responses influence on the activity and expression of superoxide dismutase in maize[J]. Plant Science, 2004, 166: 687-694.
- [7] Wei Jing, Wu Gang. Hydro-ecological effects of artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Hippophae rhamnoides* woods in the low mountainous upland of Western Liaoning Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2087-2092.
- [8] 李轩然,刘琪璟,蔡哲,等. 湿地松林叶面积指数测算[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4009-4105.
- [9] 罗广华,王爱国. 植物 SOD 同工酶活性显示的某些干扰[J]. 植物生理学通讯, 1993, 29(2): 119-122.
- [10] 王爱国,邵从本,罗广华. 丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J]. 植物生理学通讯, 1986, (2): 55-57.
- [11] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1998: 152-154.
- [12] 余冰宾. 生物化学实验指导[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 131-140.
- [13] 招礼军,李吉跃,于界芬,等. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水日变化的影响[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(3): 42-47.
- [14] 茹广欣,郝绍菊,茹桃勤,等. 干旱梯度下刺槐无性系生理指标的变化与品种抗旱性关系的研究[J]. 河南科技学院学报:自然科学版, 2006, 34(1): 37-40.
- [15] 王霞,侯平,尹林克,等. 土壤水分胁迫对柽柳体内膜保护酶及膜脂过氧化的影响[J]. 干旱区研究, 2002, 19(3): 17-20.
- [16] 王孟本,冯彩平. 树种保护酶活性与 PV 曲线水分参数变化的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 173-176.
- [17] 张文辉,段宝利,周建云,等. 不同种源栓皮栎幼苗叶片水分关系和保护酶活性对干旱胁迫的响应[J]. 植物生态学报 2004, 28(24): 483-490.
- [18] 唐季林,徐化成. 油松不同种源在北京地区水势和蒸腾速率的研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(2): 97-107.