

生物制剂对沙地樟子松苗木成活生长 及生理特征的影响

唐凤德^{1,2}, 蔡天革³, 韩士杰^{2,*}, 黄丽荣¹

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;

3. 辽宁大学生命科学学院, 沈阳 110036)

摘要: 采用 Pt 菌剂、ABT 生根粉、HRC 吸水剂和 GGR 6 植物生长调节剂等生物制剂, 研究了不同生物制剂对 2 年生樟子松苗木田间试验的造林成活率、植株高度、单株生物量、细根量和盆栽试验苗木的叶片光合和水分利用效率等生理特征的影响。结果表明: (1) Pt₃ (3 号菌剂)、ABT (ABT 生根粉) 和 HRC (HRC 吸水剂) 均显著地提高樟子松苗木的成活率, 它们分别比对照处理苗木成活率高 29.3%、23.6% 和 9.4%, 而 GRR (GGR 植物生长调节剂) 和 Pt₁ (1 号菌剂) 处理苗木的造林成活率同对照处理苗木成活率差异不显著; (2) Pt₃、ABT 处理均显著地促进了苗木细根生长, 分别比对照处理多 34.72 和 15.18 cm, 而 HRC、GGR 和 Pt₁ 同对照处理没有显著差异; 回归分析表明细根量与苗木成活率呈显著正相关, 说明生物制剂提高成活率是通过细根量的增加来实现的; (3) Pt₃ 和 ABT 处理的苗木高度比对照多 2.2、1.5 cm 和 1.1 cm, 单株生物量干重分别大 1.73、0.72 g 和 0.33 g, 针叶长度、单个针叶面积和单株植株针叶数量分别多 1.54 和 0.096 cm、0.188 cm² 和 0.116 cm²、31 和 23 束; 而 Pt₁ 和 GGR 处理对苗木高度和单株生物量影响不显著; (4) Pt₃ 和 ABT 处理显著地提高了苗木叶片叶绿素含量和光合速率及水分利用效率等生理指标方面, 而其它生物制剂对苗木生理指标影响不显著。生物制剂通过提高苗木生长量和增强生理活动提高樟子松沙地造林成活率。

关键词: 生物制剂; 樟子松; 沙地; 成活; 生长; 生理特征

文章编号: 1000-0933(2009)05-2294-10 中图分类号: Q142, Q945, Q948 文献标识码: A

The effects of biological agents on survival, growth and physiological characteristics of Mongolian Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) seedlings transplanted on sandy-land

TANG Feng-De^{1,2}, CAI Tian-Ge³, HAN Shi-Jie^{2,*}, HUANG Li-Rong¹

¹ College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China

² Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China

³ College of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang, 110036, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2294 ~ 2303.

Abstract: The experiments were conducted by planting in the field and pot-culturing of 2 year-old Mongolian Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) seedlings processed with Pt mycorrhizal agents, ABT rooting powder, HRC water-absorbing agent and GRR plant development and growth regulator. The effect and function of the biological agents on survival rate of seedlings were studied by measuring height growth, biomass, roots, net photosynthetic rates, transpiration rates and water use efficiency. The results were as follows: (1) Pt₃ (No. 3 mycorrhizal agent), ABT (ABT rooting powder) and HRC (HRC water-absorbing agent) had significantly increased survival rates of seedlings, which were 29.3%, 23.6% and 9.4% higher than that of controlled seedlings, respectively. But the GRR (GRR plant development and growth regulator)

基金项目: 国家科技基础专项“东北森林植物种质资源专项调查”资助项目(2007FY110400); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-416)

收稿日期: 2008-11-30; 修订日期: 2009-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hansj@iae.ac.cn

and Pt_1 (No. 1 mycorrhizal agent) had no significant effects on the survival rate of seedlings comparing that of untreated seedlings; (2) Pt_3 and ABT had enhanced the growth of the fine root ($<2\text{mm}$), which were 34.72 and 15.18 cm longer than that of controlled seedlings; the regression analysis had showed that fine roots quantity was positively related to seedling survival rate, which indicated that enhancing of survival rate of seedlings was achieved by increasing fine roots; (3) The heights of the average individuals with Pt_3 , ABT and HRC were 2.2, 1.5 and 1.1 cm, respectively higher than that of untreated seedlings. The dry biological mass of average seedling was 1.73, 0.72 and 0.33g heavier than that of average untreated seedling. Lengths of needles, the single leaf area and leaf quantity of a single seedling were 1.54cm and 0.096cm, 0.188 and 0.116cm² and 31 and 23 bunches, respectively, higher than those of untreated seedlings, Pt_1 and GRR have no effects on the height and dry biological mass of average seedling; (4) Pt and ABT also improved effectively leaf physiological mechanism of seedlings and increased chlorophyll and photosynthetic capability and water use efficiency, and the other biological agents had no effects on the seedlings. The biological agents enhanced the survival rate of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in the sandy land by increasing the growth and physiological characteristics of the seedling.

Key Words: biological agents; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; sandy land; survival; growth; physiological characteristics

我国是世界上荒漠化危害最为严重的国家之一,荒漠化总土地面积占全国总土地面积的 27.3%,其中的 78.8% 分布在干旱半干旱地区^[1]。在干旱半干旱区内,荒漠化草地面积约占草地的总面积的 56.6%^[1~3]。长期以来,由于人们的不合理开发利用,使该地区本来就脆弱的生态环境更加恶化,加剧了风沙干旱、水土流失、草场退化的趋势;导致草原植物生产力下降,盐渍化和地下水降低极为明显^[1,2,3]。加强林业生态建设是该地区改善生态环境,实现社会、经济、环境和资源可持续发展的最有效措施之一,而防护林体系的营建则是该地区改善生态环境,加强林业建设的最为有效的手段。营建防护林体系的核心问题就是造林成活,因此在适地适树的造林原则基础上,如何提高苗木造林成活已成为该地区生态环境建设的迫切任务和重要研究课题^[4,5]。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国三北地区防护林的重要造林树种之一,具有耐干旱、耐瘠薄、耐沙压、根系发达等特征^[5~9]。但由于各处沙地条件不一,差异较大,因而营造樟子松防护林过程中时有失败^[5~10]。而本研究是在科尔沁沙地西北延伸地的干旱草原区开展的,该地区属典型大陆干旱性季风气候,年蒸发量是年降雨量的 6 倍以上,春季大风干旱,温度骤然升降,土壤贫瘠,这些都成为樟子松造林成活的主要限制因素。该地区过去采用裸根小苗或移植大苗进行樟子松人工防护林营建,前者成活率保存率低,后者成本高,加之该地区无成功针叶树造林经验,保障樟子松造林成活也就显得更加困难^[3,5]。菌根、ABT 生根粉、吸水保水剂和植物生长调节剂等生物制剂已经在针叶树苗木培育和造林中得到广泛应用^[11~34]。这些研究表明,生物制剂对提高针叶树苗木造林成活和促进造林苗木生长等方面的效果比较显著。然而,这些研究的绝大多数只对造林苗木成活率、苗木高生长和生物量等方面进行了调查研究,并没有深入开展造林成活的相应机理方面的探讨。为了更好地探讨生物制剂在沙地樟子松造林方面的应用效果,本研究比较 Pt 菌根剂、ABT 生根粉、高分子吸水保水剂和植物生长调节剂提高樟子松沙地造林成活方面的作用效应,并初步揭示其相关的作用机理,为草原荒漠化地区大面积营造樟子松生态防护林的营造技术提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

试验地选设在内蒙古赤峰市巴林右旗胡日哈苏木的草原站东南侧,为科尔沁沙地的西北延伸区,是典型的农牧交错区。海拔 650m 左右,地理坐标为 43°13'05"N、180°12'13"E,属半干旱大陆性气候。年平均气温 3.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 2996℃,年平均风速为 3.4ms⁻¹,年平均降水量 344mm,年际降水量在 200~400mm 之间变动,年蒸发量 2200mm,降水主要集中在夏季,占全年降雨量的 75% 以上。土壤为风沙土,土壤有机质含量

为 0.615%, 全 N 含量 0.0331%, 全 P 为 0.0138%, 容重为 1.654 g cm^{-3} 饱和含水量 19.33%, 田间持水量 15.85%, 毛管孔隙度 26.23%, 总空隙度为 32.27%。主要植被有柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinski*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、白草 (*Pennisetum centrale*)、羊草 (*Aeluropus chinensis*)、沙生针茅 (*Stipa glareosa*)、嗟不嘎蒿 (*Artemisia lavandulifolia*)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 和沙柳 (*Salix pammophila*) 等旱生植物。

1.2 研究方法

1.2.1 田间试验

在 2006 年 4 月从中国林业科学研究院获得本试验所需的 Pt 菌根剂 (1、3 号)、ABT 3 号生根粉和 GGR6 植物生长调节剂, 从黑龙江省林业科学研究院获得本实验所需的 HRC 吸水保水剂。Pt 菌根剂与草炭土混合, 搅拌成泥浆蘸根; ABT 3 号生根粉配成 500 mg/kg 蘸根溶液; HRC 吸水保水剂稀释成浓度为 100 mg/kg 的处理液; GGR6 植物生长调节剂由冷开水稀释成为 100 mg/kg 为蘸根液。Pt 菌根剂 (1、3 号)、ABT 3 号生根粉 HRC 吸水剂、GGR6 植物生长调节剂和自来水做空白为对照, 记作: Pt₁、Pt₃、ABT、HRC、GGR 和 CK。

试验所需的 2 年生苗木为来自距试验区 100 km 的辽宁省固沙造林研究所实验林场苗圃, 试验所选取的苗木生长状况一致, 其中苗木平均高为 15.6 cm, 平均地径为一级侧根数为 8~10, 主根平均长 12.3 cm。

同年 4 月末进行整地和造林试验。田间试验设计采用随机区组法进行, 3 个重复, 5 个处理, 共 15 个试验小区, 每个试验小区的面积为 600 m^2 ; 整地方式采用局部带状开沟, 沟深为 25 cm, 呈梯形, 上口宽 30 cm, 底宽 20 cm, 沟间距 3 m, 沟为南北走向。按照试验设计配置对不同生物制剂处理苗木进行栽植。植苗方法为穴植法, 苗木处理后及时栽植, 以确保成活。

1.2.2 盆栽试验

盆栽试验与田间试验同步进行, 试验地点在巴林右旗胡日哈苏木的草原站院内, 试验所需生物制剂和苗木与田间试验相同。盆栽所用的基质为风沙土, 并混入少量的泥炭土, 盆栽所需的花盆高为 35 cm, 上口直径约为 30 cm, 下口直径为 20 cm, 盆底有直径为 1 cm 孔利于透水。每个处理分别栽 5 个花盆, 每盆 3 株, 每处理为 15 株。测定苗木的地茎、高、针叶长、侧根数、主根长等。及时浇水直至苗木成活。

1.2.3 主要测定项目

生长指标: 对田间试验的造林苗木进行生长指标的测定, 主要生长指标包括苗木高 (cm)、地径 (cm)、主根长 (cm)、粗根 ($>2 \text{ cm}$) 和细根 ($\leq 2 \text{ cm}$), 根据试验小区内的苗木平均高和平均地径数值, 选 30 株苗木进行测定主根长、粗根长、细根长、针叶长度 (cm) 和针叶宽度 (cm) 及樟子松造林苗木的地上、地下和整株干物质重 (g dry), 这些指标的测定是在生长季节结束后的 10 月初进行的。

生理指标: 对盆栽试验的苗木进行生理指标的测定, 9 月中旬采摘健康针叶进行叶绿素含量测定, 测定方法为乙醇丙酮混合液法^[35]; 采用 Li-6400 便携式光合作用测定分析仪 (美国 LI-COR 公司生产) 对当年生生理成熟的针叶进行净光合速率 ($P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和蒸腾速率 ($Tr, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测定, 选 8 月下旬到 9 月上旬的晴朗天气进行光合蒸腾速率的日变化测定, 日变化时间选定为 8:00~16:00, 时间间隔为 2 h, 光源为人工光源, 光合有效辐射为 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 相对湿度为 60%~70%, 温度设定为 23~25℃ 之间, CO_2 浓度为 $360 \sim 370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; 每次测定 3~5 片针叶, 每次测定重复 3 次; 针叶叶面积采用排水体积法测定^[9], 其公式为:

$$A_L = 2L(1 + \pi/n) \sqrt{(nV/\pi L)}$$

式中, A_L 为叶面积 (cm^2), L 为针叶长度 (cm), n 为每束针叶的根数, $n=2$, V 为针叶体积 (cm^3)。其中针叶长度 L 采用游标卡尺测定, 体积 V 具体测定方法采用相关文献^[9]。

水分利用效率是根据光合和蒸腾速率测定的结果计算: $WUE = P_n/Tr$ ^[36]。

1.2.4 统计分析

数据统计分析和绘图采用 Microsoft Excel 和 SPSS13.0 软件结合进行, 方差分析和多重比较分别采用单因

素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 多重比较(Duncan's multiple range test)法。

2 结果与分析

2.1 不同制剂对造林成活率的影响

由于苗木成活率表达为百分数,其不符合数理统计分析的要求,对其进行反正弦 $x'_{ij} = \arcsin \sqrt{x_{ij}}$ 数据转换^[37]。根据转换后的成活率进行方差分析和比较(表 1)。方差分析表明,不同制剂出处理对樟子松苗木造林成活率有显著影响。Pt₃ 处理的苗木成活率最高,除与 ABT 处理成活率差异不显著外,则与其它制剂处理均达到极显著水平($P \leq 0.01$);ABT 同 HRC 处理间差异达到显著水平($P \leq 0.05$),而同 CK、GGR 和 Pt₁ 处理差异达到极显著水平;CK、GGR 和 Pt₁ 处理之间的苗木成活率没有显著差异。其中 Pt₃ 和 ABT 处理的苗木成活率分别比对照处理高 29.3% 和 23.6%。这样的结果与采用生物制剂提高其它针叶树造林成活率有相似的效果^[9,20,24,25]。

表 1 不同制剂处理的田间试验樟子松苗木造林成活率及变异系数

Table 1 The survival rate ($\bar{X}$) and coefficient variation CV of seedlings with different biological agents in the field

处理 Treatment	Pt ₃	ABT	HRC	CK	Pt ₁	GGR
$\bar{X}$	59.37 ± 8.36aA	55.56 ± 6.51aA	51.17 ± 7.30bB	41.60 ± 6.11cC	40.96 ± 5.58cC	40.69 ± 6.74cC
CV	8.63	7.65	10.21	9.46	7.56	9.84

$\bar{X}$:平均成活率 Average survival rate;CV:变异系数 Coefficient variation;Pt₃:Pt₃ 菌根剂 Pt₃ ectomycorrhizal fungi agent;ABT:ABT 生根粉 ABT rooting powder;HRC:HRC 吸水剂处理 HRC water-absorbing agent;CK:对照 Control;Pt₁:Pt₁ 菌根剂 Pt₁ ectomycorrhizal fungi agent;GGR:GGR 植物生长调节剂 GGR plant development and growth regulator;同行不同小写字母表示处理间差异达到显著($P < 0.05$) Different small letters within a row indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$),同行不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$) Different big letters within a row indicate very significant difference among different treatments ($P < 0.01$);表 4 和 5 相同 the same 4th and 5th table below

2.2 不同制剂对苗木生长的影响

2.2.1 对地下根系生长影响

表 2 表明,Pt₃ 菌根剂处理的樟子松苗木的细根生长量同其它所有处理相比均达到极显著水平,而 ABT 生根粉同 HRC、CK 和 GGR 等处理差异达到显著水平,这个规律和成活率的规律相同。由此可见,生物制剂对苗木造林成活率的影响是通过对根系生长的影响来实现的,主要与细根的生长有密切关系。细根的多少决定着苗木的质量,也决定着造林苗木的成活保存率与生长量^[38]。

为了更好地分析根系对苗木成活率的影响,选主根长度($\bar{X}_1$)、粗根长度($\bar{X}_2$)和细根长度($\bar{X}_3$)作为自变量,以成活率(Y)为因变量作多元回归分析(表 3)。主根长与成活率呈负相关,但相关不显著;粗根长和细根长与成活率呈正相关,但粗根长度的相关性不显著,而细根长对成活率的影响在 5% 水平上显著。这因为细根是根系养分和水分吸收的主要器官,细根数量的增加也增强了对水分和养分的吸收,促进了苗木对水分和养分的吸收,提高了植物的光合作用,增强了营养物质的积累。

表 2 不同制剂处理的田间试验樟子松苗木细根生长量与变异差异

Table 2 The length and coefficient variation CW of seedlings with different biological agents in the field

处理 Treatment	Pt ₃	ABT	HRC	CK	Pt ₁	GGR
$\bar{X}$	155.57 ± 28.32aA	136.03 ± 26.51bB	121.57 ± 19.30cB	120.85 ± 20.11cB	115.70 ± 15.88cB	110.16 ± 18.34cB
CV	10.63	8.56	9.29	9.21	6.81	8.37

2.2.2 对苗木生长量的影响

表 4 表明,不同制剂处理苗木在高、地径、针叶长度、单个针叶面积和苗木的针叶数量方面均有较大差异。在苗木高生长方面,Pt₃ 处理是表现最好的,其次是 ABT 和 HRC 处理,Pt₃ 除与 ABT 处理差异不显著外,同其它处理差异均达到显著或极显著水平,Pt₃ 与 ABT 处理分别比对照处理植株高度高 2.2 cm 和 1.5cm;在地径指标方面,Pt₃ 处理同其它所有处理均达到显著水平,生长最差的是 Pt₁ 处理,与各处理差异都达到显著水平;

在针叶长度方面, Pt_3 处理优于其它处理, 与 HRC、GGR、CK 和 Pt_1 处理差异达到显著或极显著水平, 而 HRC、GGR、CK 和 Pt_1 处理之间差异不显著, 其中 Pt_3 与 ABT 处理分别比对照大 1.54cm 和 0.96cm; 叶面积指标以 Pt_3 处理为最好, 与 Pt_1 处理差异达到显著水平, 单个针叶面积多 0.204cm², 其它指标差异不显著; 在针叶数量方面, Pt_3 、ABT、HRC 和 CK 处理与 Pt_1 和 GGR 差异达到显著水平; 在生物量方面, Pt_3 处理同所有的处理差异均达到极显著水平, ABT 和 HRC 处理间没有显著差异, 但它们同 CK、 Pt_1 和 GGR 处理差异达到极显著水平, 而 CK、 Pt_1 和 GGR 处理间差异不显著。

表 3 田间试验樟子松苗木不同根系与成活率回归分析表

Table 3 The regression analysis between survival rate and different type roots in diameter on seedlings planted in the field

模型 Model	$Y = B_0 + B_1\bar{X}_1 + B_2\bar{X}_2 + B_3\bar{X}_3$			
系数 Coefficient	$B_0 = -30.1416$	$B_1 = -0.8820$	$B_2 = -0.1489$	$B_3 = 0.7951$
相关系数 Correlation coefficients	复相关系数 Duplicate coefficients	$R = 0.8861$		$R_{0.01}(3, 8) = 0.836$
		$r_{(01)} = -0.0115$		$t_1 = -0.0326$
	偏相关系数 Deflective correlation coefficients	$r_{(02)} = 0.1615$		$t_2 = 0.0563$
		$r_{(03)} = 0.6741$		$t_3 = 2.5815^*$
$t_{0.05}(8) = 2.306, t_{0.01}(8) = 3.355$				

表 4 不同处理对田间试验苗木地上生长指标和生物量影响的比较分析表

Table 4 The comparative table on above-ground growth indexes and biological mass of seedlings planted in the field with different biological agents

项目 Items	Pt_3	ABT	HRC	CK	Pt_1	GGR
$\bar{X}_1$ (cm)	16.58 ± 2.33aA	15.84 ± 2.40aA	15.47 ± 1.97abA	14.34 ± 2.09bA	13.44 ± 1.87bB	11.32 ± 1.73bB
$\bar{X}_2$ (cm)	0.546 ± 0.153a	0.498 ± 0.129ab	0.458 ± 0.105ab	0.454 ± 0.134ab	0.371 ± 0.108b	0.408 ± 0.095ab
$\bar{X}_3$ (cm)	6.48 ± 0.93aA	5.90 ± 1.05aA	5.14 ± 0.78bB	4.94 ± 1.11bB	4.74 ± 0.98cB	4.97 ± 0.85bB
$\bar{X}_4$ (cm ²)	0.656 ± 0.108aA	0.584 ± 0.086abA	0.486 ± 0.052bB	0.468 ± 0.074bB	0.436 ± 0.084bB	0.452 ± 0.092bB
$\bar{X}_5$ Bundles	68.2 ± 7.6aA	60.6 ± 4.1abA	52.0 ± 6.6bcA	37.1b ± 1.5cdB	34.6 ± 3.2dB	39.6 ± 8.1cB
$\bar{X}_6$ (g dry)	5.49 ± 0.77A	4.48 ± 0.65aB	4.09 ± 0.86aB	3.76 ± 0.90bC	3.61 ± 0.62bC	3.68 ± 0.73bC

$\bar{X}_1$ 苗木高度 average growth height of seedling, $\bar{X}_2$ 地面直径 radical diameter of seedling, $\bar{X}_3$ 针叶长度 average length of a needle, $\bar{X}_4$ 针叶面积 leaf area of an average needle, $\bar{X}_5$ 单株针叶束数 bundles of an average seedling, $\bar{X}_6$ 单株苗木的生物量干重 dry biological mass of average seedling

2.3 对苗木生理指标的影响

2.3.1 对叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要器官, 叶绿素含量直接影响着植株的光合作用强弱, 进而影响植物的成活生长。表 5 表明, 不同生物制剂对樟子松针叶叶绿素含量的影响是不同的。 Pt_3 处理苗木针叶的总叶绿

表 5 不同生物制剂处理盆栽苗木叶绿素含量分析比较表

Table 5 The table of comparison and analysis on needle chlorophyll content of seedlings cultured in the pot with the different biological agents

处理 Treatments	Pt_3	ABT	HRC	CK	Pt_1	GGR
总叶绿素含量 Total chlorophyll content (mg g ⁻¹ fw)	2.092 ± 0.344 a	1.919 ± 0.295 a	1.688 ± 0.201 b	1.663 ± 0.190 b	1.697 ± 0.219 b	1.868 ± 0.229 a
叶绿素含量 a Chlorophyll a content (mg g ⁻¹ fw)	1.153 ± 0.229 a	1.104 ± 0.198 a	0.942 ± 0.133 b	0.931 ± 0.107 b	0.945 ± 0.138 b	1.121 ± 0.180 a
叶绿素含量 b Chlorophyll b content (mg g ⁻¹ fw)	0.854 ± 0.117	0.880 ± 0.074	0.759 ± 0.091	0.749 ± 0.087	0.768 ± 0.078	0.747 ± 0.140
叶绿素 a/b Chlorophyll a/b ratio	1.483 ± 0.142	1.346 ± 0.117	1.240 ± 0.122	1.236 ± 0.097	1.241 ± 0.129	1.291 ± 0.097

素含量达到 $2.092\text{mg g}^{-1}\text{fw}$,是所有处理中处于最高值,它同 ABT 和 GGR 处理差异不显著,但它们都同 HRC、CK 与 Pt_1 处理差异达到显著水平。叶绿素 a 含量方面,不同制剂处理的变化规律与总叶绿素含量相同;在叶绿素 b 含量方面,各处理差异不显著,但规律同总叶绿素相同。不同生物制剂对叶绿素 a 与 b 的比值影响不大,相互间差异没有达到显著水平,但变化规律也同总叶绿素含量的变化规律相似。

2.3.2 对光合蒸腾速率的影响

不同生物制剂处理的樟子松苗木的光合速率日变化比较复杂(图 1)。从图 1 可以看出,各处理苗木的净光合速率达到最高值在 12:00,而对照处理苗木则出现在 10:00。不同生物制剂处理苗木的光合速率最大值不同,其中 Pt_3 处理苗木最大净光合速率为最高,达到了 $10.2\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$;其次为 ABT 处理,最大光合速率为 $6.81\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。而 Pt_1 处理苗木的最大光合速率同 CK 处理相差不大,HRC、GGR 处理苗木的最大光合速率均高于 CK 处理,分别为 $5.63\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $5.72\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。不同处理苗木光合速率达到最大值后下降程度不同,其中 Pt_3 处理苗木在达到最大光合速率后仍然维持较高水平,在 14:00 和 16:00 苗木的光合速率分别为 $8.45\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $5.52\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$;其次为 ABT、HRC 和 GGR 处理,它们在 14:00 和 16:00 光合速率分别为 3.14 、 3.23 、 $2.15\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 1.28 、 1.56 、 $1.54\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$;而 Pt_1 和 CK 处理维持水平较低,在 14:00 和 16:00 光合速率分别为 2.17 、 $1.09\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 0.75 、 $0.69\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

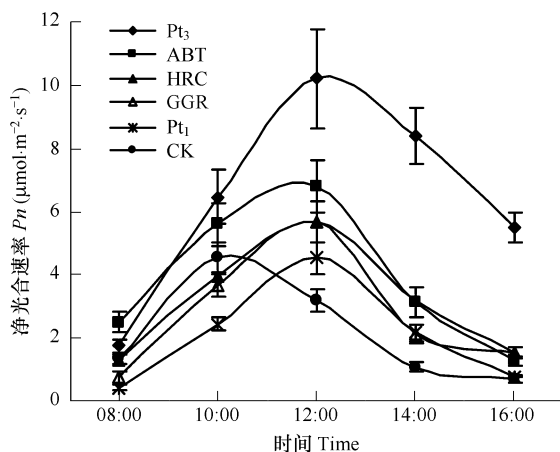


图 1 不同生物制剂处理的盆栽樟子松苗木净光合速率的日变化
Fig.1 Diurnal variation of net photosynthetic rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings cultured in the pot with different biological agents

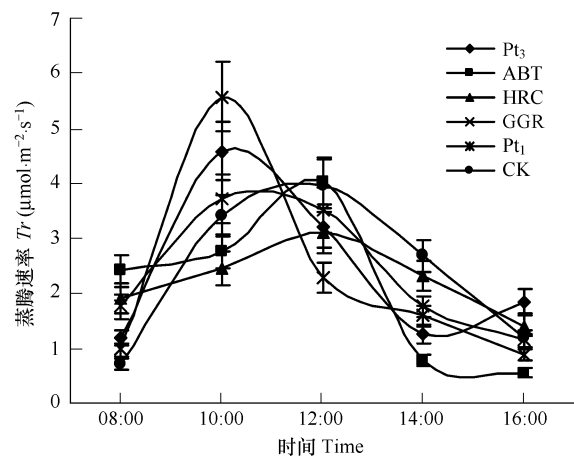


图 2 不同生物制剂处理的盆栽樟子松苗木蒸腾速率的日变化
Fig.2 Diurnal variation of transpiration rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings cultured in the pot with different biological agents

图 2 表明不同生物制剂处理的樟子松苗木蒸腾速率日变化比较复杂。 Pt_3 、HRC 和 Pt_1 处理的苗木蒸腾速率在 10:00 达到最大,分别为 4.59 、 $3.72\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $5.57\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$;而 ABT、GGR 和 CK 处理的苗木在 12 时上升到最大,它们分别为 4.02 、 $3.11\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $3.96\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。各处理苗木蒸腾速率在达到最大值后,均开始下降,GGR 和 ABT 处理苗木下降幅度较小,分别为 $3.53\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $3.22\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$;而 CK、HRC 和 Pt_1 处理苗木蒸腾速率分别为 2.69 、 $2.31\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $2.29\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$;ABT 处理苗木蒸腾速率下降最大。

2.3.3 对水分利用效率的影响

水分利用效率就是指消耗单位水分所产出的同化量,叶片水平的水分利用效率通常用净光合速率与蒸腾速率的比值表示,它是衡量植物耐旱的一项重要生理指标。其值越高,表示植物节水能力越大,因而对于干旱胁迫的适应能力越强。

本试验表明,5 种生物制剂处理樟子松苗木的平均水分利用效率为 $1.75 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 而 CK 处理的平均水分利用效率为 $0.98 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$; 其中 Pt_3 处理苗木水分利用效率最高, 为 $3.24 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 为 CK 处理平均水分利用效率的 3.31 倍; Pt_1 处理苗木水分利用效率最低, 为 $0.96 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 同 CK 处理水分利用效率相差不大。ABT、HRC 和 GGR 处理的平均水分利用效率为 $1.11 \sim 2.18 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 高于 CK 处理水分利用效率平均水平。不同处理水分利用效率的日变化比较复杂, Pt_3 和 ABT 处理苗木水分利用效率不断升高, 在 14 时达到最大值, 分别为 6.72 和 $3.97 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 而后下降; 而 HRC、GGR 和 Pt_1 处理苗木的水分利用效率从开始不断上升, 在中午 12:00 达到最大, 分别为 1.83 、 $1.60 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和 $1.98 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 随后水分利用效率下降。CK 处理苗木的水分利用效率在 8:00 达到最大, 为 $1.86 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, 随后不断下降, 而在 16:00 水分利用效率稍有上升。

表 6 不同生物制剂处理的盆栽苗木水分利用效率比较分析表

Table 6 The table of comparison and analysis on water usage efficiency of seedlings cultured in the pot with different biological agent ($\mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)

处理 Treatments	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
Pt_3	$1.48 \pm 0.31 \text{ a}$	$1.41 \pm 0.49 \text{ a}$	$3.17 \pm 0.94 \text{ a}$	$6.72 \pm 1.17 \text{ a}$	$2.96 \pm 0.85 \text{ a}$
ABT	$1.04 \pm 0.45 \text{ a}$	$2.01 \pm 0.56 \text{ a}$	$1.69 \pm 0.64 \text{ b}$	$3.97 \pm 0.92 \text{ b}$	$2.29 \pm 0.71 \text{ a}$
HRC	$0.69 \pm 0.32 \text{ c}$	$1.28 \pm 0.49 \text{ a}$	$1.83 \pm 0.80 \text{ b}$	$1.39 \pm 0.35 \text{ a}$	$1.11 \pm 0.23 \text{ a}$
GGR	$0.41 \pm 0.11 \text{ a}$	$0.98 \pm 0.35 \text{ b}$	$1.60 \pm 0.53 \text{ b}$	$1.22 \pm 0.31 \text{ a}$	$1.34 \pm 0.47 \text{ a}$
Pt_1	$0.44 \pm 0.18 \text{ b}$	$0.44 \pm 0.23 \text{ c}$	$1.98 \pm 0.63 \text{ b}$	$1.16 \pm 0.49 \text{ a}$	$0.82 \pm 0.39 \text{ a}$
CK	1.86 ± 0.68	$1.33 \pm 0.51 \text{ a}$	$0.81 \pm 0.39 \text{ c}$	$0.41 \pm 0.11 \text{ a}$	$0.58 \pm 0.17 \text{ a}$

同列中小写字母不同表示处理间差异显著 Different small letters within a column indicate the significantly difference among the treatments ($P < 0.05$), means $\pm$ SE, $n = 16$

3 讨论

利用菌根提高树木和森林生态系统生产力是提高林业生产力的一条可持续发展的途径。Pt 菌根菌是最适合松树的广谱性的彩色豆马勃菌^[39], Pt_3 菌根在樟子松沙地造林中应用取得良好的效果, 提高了造林成活率, 增强了樟子松在半干旱草原地区的苗高、地径、细根和干生物量。菌根有大量的菌丝伸展在植物根系土壤中形成密集的菌丝网络, 可代替植物根毛吸收养分, 扩大了植物的吸收面积^[40]。同时, 菌根真菌能够加速对沙土中有机质的分解, 提高养分的有效性, 增强了对 N、P 和微量元素 Cu、Zn 等的吸收能力^[38]; 使叶绿素含量增高, 净光合速率增大, 叶片气孔导度减小, 减小了蒸腾作用, 最终提高了苗木的水分有效利用率。同时菌根真菌能产生生长激素, 促进植物生根、萌发和生长, 提高了生物量的积累^[18]。提高植物抗病能力和对干旱等不良环境的抵抗能力^[21]。这些都为樟子松在沙地造林成活的提高和生长提供良好的基础。 Pt_1 处理苗木的成活率、生长和生理特征等方面不及 Pt_3 处理, 可能 Pt_1 菌剂与樟子松幼苗形成菌根的能力较差, 因此就没有形成菌根, 不能够为樟子松生长提供较多的水分和养分。

吸水保水剂是一种具有优质吸水性、保水性、释水性、无毒无味的功能性高分子材料。这种高分子材料含有大量结构特异的强吸水基团, 可以在根系周围形成一个水分集中区域, 由于树木根系吸水力大于吸水保水剂的吸水力, 因而树木根系能够直接吸收储存在吸水保水剂中的水分^[26]。吸水保水剂提高了青杨和榆树等树种造林成活率达 4% ~ 10%^[30]。吸水保水剂应用在模拟的沙化土地, 其能够降低显著地降低土壤密度, 提高土壤持水能力, 为提高造林苗木的成活率和保存率奠定了基础^[41]。

ABT 生根粉为高效广谱型植物生长调节剂, 通过 ABT 生根粉和植物生长调节剂, 能够诱导不定根的形成, 调节植物代谢强度, 促进植物生长, 增强植物抗性, 达到提高造林成活和生长量的目的^[42]。在油松造林成活率、新根数和新梢生长量方面, ABT 生根粉同对照相比分别提高了 11.5%、14.5% 和 29%^[43], ABT 生根粉也提高了沙地樟子松造林成活率和生长量^[25]。

GGR 是非激素型绿色植物生长调节剂, 植物繁殖材料吸收后表现出了易生根成活, 抗逆性强等特征。相

关研究表明,GGR 应用到油松育苗和红豆杉扦插等方面,可以促进种子萌发和苗木高生长,提高了移栽成活率和增加了苗木的生物量^[33,34]。本试验结果表明,GGR 植物生长调节剂具有一定的效果,但同对照相比相差不大。这可能是由于处理樟子松苗木根系的溶液浓度比较高的缘故而没有达到应有的效果,这与他人在油松的试验结果相似^[34]。

4 结论

在干旱半干旱瘠薄的风沙土上,Pt₃ 菌剂、ABT 生根粉和 HRC 吸水剂都促进了细根生长,扩大了樟子松苗木对水分和养分的吸收面积,有利地提高了造林成活率。通过多元回归分析证明,细根长度与苗木成活率呈正相关,并达到显著水平,而主根长度、粗根长度与成活率相关不显著。

Pt₃ 菌剂、ABT 生根粉和 HRC 吸水剂增加了单株苗木的单个针叶叶面积和针叶数量,扩大了苗木接受光能的有效面积和叶面积指数,为光合生产力的提高提供有利条件。Pt₃ 菌剂、ABT 生根粉生物制剂促进了樟子松苗木的光合作用能力,提高了苗木有机物质的合成能力和水分利用效率,为苗木在干旱瘠薄的沙地上成活和生长提供物质基础。

本试验只对 Pt 菌剂、ABT 生根粉、HRC 吸水剂和 GGR 植物生长调节剂等生物制剂对 2 年生樟子松苗木沙地造林成活、生长和生理特征的影响进行田间实验与栽培试验研究,所做的分析和结论是初步的。这些制剂在不同干旱胁迫条件下的作用效果及机理有待于进行深入研究和探索。本试验为在沙地造林促进苗木成活提供了技术借鉴,并为进行此方面深入研究打下了一个基础,可以在此基础上继续对诸如 Pt 菌剂、ABT 生根粉等生物制剂在不同干旱胁迫下对光合、蒸腾、叶水势等生理机能等方面的影响进行更深入的研究,为研究沙地造林技术措施提供理论依据。

References:

- [1] Dong R G, Wu B, Ci L J, *et al.* Present situation, cause and control way of desertification in China. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 317—332.
- [2] Lu Q. Global desertification courses and future trends. *World Forestry Research*, 1997, 3:35—43.
- [3] Shang L S, Liu X H. *Silviculture of Grassland Regions: Theory and Practice of Forestation on Arid- grassland*. Beijing: China Forestry Press, 1994, 23—98
- [4] Li B X. *Silviculture of Managing and Controlling Sand*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1990.
- [5] Hong Y, Guo L S, De Y J. Study on afforestation technology of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in Keerqin sandy land. *Journal of Inner Mongolian Agriculture University*, 2003, 24 (2):33—39.
- [6] Zhu J J, Kang H Z, Xu M L. Natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Keerqin sandy land, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4086—4095.
- [7] Zeng D H, You W Z, Fan Z P, *et al.* Analysis of natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 257—261.
- [8] Chen F S, Zeng D H, Zhou B, *et al.* Seasonal variation in soil nitrogen availability under the Mongolian pine in Keerqin Sand Lands China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(2): 226—239.
- [9] Zhu J J, Kang H Z, Li Z H, *et al.* Impact of water stress on survival and photosynthesis of Mongolian pine seedlings on sandy land. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10):2527—2533.
- [10] Kang H Z, Zhu J J, Xu M L. Silviculture of mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations on sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7):799—806.
- [11] Zhu J J, Li F Q, Xu M L, *et al.* The role of ectomycorrhizal fungi in alleviating pine decline in semiarid sandy soil of northern China: an experimental approach. *Annals of Forest Science*, 2008, 65(3):1—12.
- [12] Baar J, Horton T R, Kretzer AM, *et al.* Mycorrhizal colonization of *Pinus muricata* from resistant propagules after a stand replacing wildfire, *New Phytologist*, 1999, 143: 409—418.
- [13] Bidartondo M I, Baar J, Bruns T D. Low ectomycorrhizal inoculum potential and diversity from soils in and near ancient forests of bristlecone pine (*Pinus longaeva*). *Canadian Journal of Botany*, 2001, 79: 293—299.
- [14] Dixon R K. Comparative water relation of container-grow and bare-root ectomycorrhizal and nonmycorrhizal *Quercus velutina* seedlings. *Canada*

- Journal Botany, 1983, 61:1559—1565.
- [15] Gong M Q, Chen Y L, Zhong C L. Research and Application on Ectomycorrhizae. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1997.
- [16] Jia H J, Zheng H M, Li J N, *et al.* Application of steady-state nutrition and *Pisolithus tinctorius* Mycorrhiza to *Pinus elliottii* nursery land. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(1):41—46.
- [17] Sun M Q, Wu X Q, Ye J R. Effects of ectomycorrhizal Fungi on germination and growth of Pines. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(5):39—43.
- [18] Wang L H, Han G Y, Li L, *et al.* Applying research of mycorrhizae technology in the restoration of sand vegetation. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5):236—240.
- [19] Wei Y, Zhang J C, Yin X Y, *et al.* Characteristics of Drought Tolerance in Mycorrhizal Fungi Seedlings of *Pinus armandii* Franch. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(4):69—72.
- [20] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, *et al.* Effects of drought stresses induced by polythelene glycol on germination of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seeds from natural and plantation forests on sandy land. *Journal of Forest Research*, 2006, 11(5):319—328.
- [21] Zhu J J, Kang H Z, Xu M L, *et al.* Effects of ectomycorrhizal fungi on alleviating the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2693—2698.
- [22] Zhu J J, Xu H, Xu M L, *et al.* Review on the ecological relationships between forest trees and ectomycorrhizal fungi. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(6):70—76.
- [23] Zhang X L, Zhang H, Zhang X, *et al.* Study on the Effects of Ectomycorrhizal Preparation on Seedling Growth of *Pinus bungeana*. *Forestry Research*, 2005, 18(2):133—136.
- [24] Wang J L. Application of Pt mycorrhizal agent in *Pinus tabulaeformis* plantations, *Practical Forestry Technology*, 2006, 4:14—15.
- [25] Dai J X. Effects of ABT growing-root powder on the rate of conservation in next year and height growth of seedlings transplanted during last growth season. *Forestry Science and Technology*, 1998, 2:24—27.
- [26] Luo Z B, Ma H C, Rao C B. Water retaining agent and its application in forestry. *Forest Research*, 2002, 15(5):620—626.
- [27] Yin G P, Nong R G, Liu G N. Advances in the Research and Utilization of Water-absorbing Polymer in Forestry in China. *World Forestry Research*, 2001, 14(2):50—54.
- [28] Zhang H Z, Song X D, Zhai L P. Experiments on using water - absorbing powder in planting *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Jinlin Forestry Science and Technology*, 2001, 30(4):60—62.
- [29] Ding S X, Yang W, Shi Z B, *et al.* Application of water absorbent in afforestation of slop-protecting on sandy road bed. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, 18(1):102—103.
- [30] Wei H P. Analysis of effects of application on absorbing-water and bounding-water new materials in afforestation and anti-drought, *Practical Forestry Technology*, 2005, 7:11—12.
- [31] Huang Y, Jiang X Y, Liang Z C, *et al.* Effect of ectomycorrhizal fungion growth and physiology of *Pinus tabulaeformis* seedlings under saline stress. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1475—1480.
- [32] Wang B R, He K N, Shi C Q. Application of water retaining agent in forestation. *Soil and Water Conservation in China*, 2000, 4:22—24.
- [33] Liu G F, Song X B, Xu Y H, *et al.* Effects of GGR6 in seedling-raising of *Taxus Chinese* var. *mairei*. *Forest Research*, 2005, 18(6):730—733.
- [34] Song X B, Cao Z M, Zhang X B, *et al.* Role of GGR6 in seedling-raising of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry(Natural Sciences Edition)*, 2004, 32(10):107—110.
- [35] Zhang X Z. *Experimental Technology on Plant Physiology*, Shenyang: Liaoning Science & Technology Press, 2007. 7.
- [36] Yang J W, Liang Z S, Han R L. Water use efficiency characteristics of four tree species under different soil water condition in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):558—565.
- [37] Jia N G. *Mathematical Statistics*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1990.
- [38] Kou J L, Lin P. Study on the root growth of seedling transplanted in the field. *Forest Science and Technology*, 1998, 2:8—11.
- [39] Hua X M. *Biological engineering on Forest Mycorrhizae*. *World Forestry Research*, 2001, 14(1):22—29.
- [40] Yuan L, Fang D H, Wang Z H, *et al.* Effects of K on secretion operation and contents of N, P and K of ectomycorrhizal fungi. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):254—258.
- [41] Wang Z Y, Bao Y H, Jin Z Y, *et al.* The control effects of bioactive water retaining agent on desertified land. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 3:27—28.
- [42] Wang T. *Study works on organic regulators of plant growth and development*. Beijing: Chinese Forestry Press, 2000. 555—563.
- [43] Han E X, Han G, Bo H S, *et al.* Application of rooting powder in the afforestation of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 19(4):59—60.

参考文献:

- [1] 董光荣,吴波,慈龙骏,等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策. 中国沙漠,1999,19(4):317~332.
- [2] 卢琦. 全球防治荒漠化进程及其未来走向. 世界林业研究,1997,3:35~43.
- [3] 尚龙山,刘新华. 草原区造林:干旱草原造林实践与理论. 北京:中国林业出版社,1994. 23~98.
- [4] 李滨生. 治沙造林学. 北京:中国林业出版社,1990.
- [5] 红玉,郭连生,德永军. 樟子松在科尔沁沙地造林技术的研究. 内蒙古农业大学学报,2003,24(2):33~39.
- [6] 朱教君,康宏樟,许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林天然更新障碍. 生态学报,2007,27(10):4086~4095.
- [7] 曾德慧,尤文忠,范志平,等. 樟子松人工固沙林天然更新障碍因子分析. 应用生态学报,2002,13(3):257~261.
- [9] 朱教君,康宏樟,李智辉,等. 水分胁迫对不同年龄樟子松幼苗存活与光合特性影响. 生态学报,2005,25(10):2527~2533.
- [10] 康宏樟,朱教君,许美玲. 沙地樟子松人工林营林技术研究进展. 生态学杂志,2005,24(7):799~806.
- [15] 弓明钦,陈应龙,仲崇禄. 菌根研究及应用. 北京:中国林业出版社,1997. 51~60.
- [16] 贾慧君,郑槐明,李江南,等. 稳态营养与 *Pt* 菌根化在湿地松育苗中的应用. 林业科学,2004,40(1):41~46.
- [17] 孙民琴,吴小芹,叶建仁. 外生菌根真菌对不同松树出苗和生长的影响. 南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(5):39~43.
- [18] 王力华,韩桂云,李琳,等. 菌根技术在沙地植被恢复中的研究. 生态学杂志,2004,23(5):236~240.
- [19] 魏媛,张金池,尹晓阳,等. 华山松菌根化幼苗的抗旱特性. 南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(4):69~72.
- [21] 朱教君,康宏樟,许美玲. 外生菌根真菌对科尔沁沙地樟子松人工林衰退的影响. 应用生态学报,2007,18(12):2693~2698.
- [22] 朱教君,徐慧,许美玲. 外生菌根菌与森林树木的相互关系. 生态学杂志,2003,22(6):70~76.
- [23] 张小龙,张洪,张香,等. 外生菌根菌剂对白皮松幼苗生长效应研究. 林业科学研究,2005,18(2):133~136.
- [24] 王景利. *Pt* 菌根在油松造林中的应用研究. 林业实用技术,2006,4:14~15.
- [25] 戴继先. *ABT* 生根粉对樟子松生长季造林翌年保存率和高生长的影响. 林业科技通讯,1998,2:21~24.
- [26] 罗志斌,马煥成,饶成兵. 保水剂及其在林业上的应用研究进展. 林业科学研究,2002,15(5):620~626.
- [27] 尹国平,衣初钢,刘革宁. 高吸水剂在我国林业上的应用研究进展. 世界林业研究,2001,14(2):50~54.
- [28] 张海忠,宋晓冬,翟丽平. 吸水剂在樟子松造林中的应用. 吉林林业科技,2001,30(4):60~62.
- [29] 丁书侠,杨伟,施智宝,等. *OASIS* 吸水剂在风沙路边护坡造林中的应用. 西北林学院学报,2003,18(1):102~103.
- [30] 魏海平. 应用吸水保水剂、干水等抗旱造林新材料效果分析. 林业实用技术,2005,7:11~12.
- [31] 黄艺,姜学艳,梁振春,等. 盐胁迫下外生菌根真菌对油松生长及生理的影响. 农业环境科学学报,2006,25(6):1475~1480.
- [32] 王斌瑞,贺康宁,史长青. 保水剂在造林绿化中的应用. 中国水土保持,2000,4:22~24.
- [33] 刘戈飞,宋晓斌,徐永慧,等. *GGR6* 在南方红豆杉扦插育苗中的作用研究. 林业科学研究,2005,18(6):730~733.
- [34] 宋晓斌,曹支敏,张学武,等. 双吉尔 *GGR6* 对油松育苗的作用. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(10):107~110.
- [35] 张宪政. 植物生理学实验技术. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1989,75~77.
- [36] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲. 黄土高原常用造林树种水分利用特征. 生态学报,2006,26(2):558~565.
- [37] 贾乃光. 数理统计. 北京:中国林业出版社,1990.
- [38] 寇纪烈,林平. 造林苗木生根问题的研究. 林业科技通讯,1998,2:8~11.
- [39] 花晓梅. 林木菌根生物工程. 世界林业研究,2001,14(1):22~29.
- [40] 袁岭,方德华,汪智慧,等. 钾对外生菌根真菌的分泌作用及氮磷钾含量的影响. 生态学报,2001,21(2):254~258.
- [41] 王振宇,包怡红,金钟跃,等. 生物活性保水剂对模拟沙化土地治理效果的分析. 东北林业大学学报,2003,3:27~28.
- [42] 王涛. 绿色植物生长调节剂应用技术论文集. 北京:中国林业出版社,2000,555~563.
- [43] 韩恩贤,韩刚,薄颖生,等. *ABT* 生根粉油松菌根造林试验研究. 西北林学院学报,2004,19(4):59~60.