

科尔沁沙地南缘樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林天然更新障碍

朱教君¹, 康宏樟^{1,2}, 许美玲^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039 ;

3. 山东省临沂出入境检验检疫局, 临沂 276000)

摘要 针对科尔沁沙地南缘樟子松人工林不能天然更新的特征, 从森林天然更新的必要条件出发, 通过种子萌发、幼苗存活与生长所需条件的系列试验, 探讨了科尔沁沙地南缘樟子松人工林不能天然更新的障碍特征。结果表明, 沙地樟子松人工林不能天然更新的主要原因有: (1) 由于土壤的干旱胁迫使沙地樟子松人工林中天然下种的种子很少有萌发的机会, 尤其是在春季; (2) 在水分条件相对充足的季节 (秋季), 樟子松种子能够萌发, 但萌发产生的更新幼苗数量极少, 即便这些更新幼苗得以存活, 但由于沙地表层 (0~5 cm) 与樟子松共生的外生菌根菌几乎不能存活而导致幼苗根系无法形成菌根, 从而致使存活的樟子松幼苗抗旱、抗病能力非常弱, 不能越冬, 即不能更新。

关键词 沙地; 樟子松; 人工林; 衰退; 天然更新

文章编号: 1000-0933 (2007) 10-4086-10 中图分类号: Q145, Q948, S718 文献标识码: A

Natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Keerqin sandy land, China

ZHU Jiao-Jun¹, KANG Hong-Zhang^{1,2}, XU Mei-Ling^{1,3}

¹ Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 110016 Shenyang, China

² Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 100039 Beijing, China

³ Linyi Exit & Entry Inspection & Quarantine Bureau, Linyi 276000, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (10): 4086~4095.

Abstract: As a valuable conifer tree species (cold-resistant, drought-resistant and fast-growing tree), *Pinus sylvestris* var. *mongolica* has become a major tree species on sandy land in arid and semi-arid areas in "Three north" regions (north, northwest and northeast of China). However, the plantations of *P. sylvestris* var. *mongolica* have declined at different degrees in the earliest introduction areas (Keerqin sandy land, which located at Zhangwu county, Liaoning province, northeastern China) since early 1990s. The decline of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land was characterized by two major features, i. e., one is top, needle and twig withered, low growth rate and tree death, the other

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目; 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX3-SW-418); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2002110016)

收稿日期: 2006-05-10; 修订日期: 2007-03-21

作者简介: 朱教君 (1965~), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 主要从事森林生态与经营、防护林生态与管理研究。E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn, zrms29@yahoo.com

Foundation item: The project was financially supported by "the 100-Young-Researcher Project" of Chinese Academy of Sciences, the innovation research project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-418) and National Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 2002110016)

Received date 2006-05-10; **Accepted date** 2007-03-21

Biography: ZHU Jiao-Jun, Ph. D., Professor, mainly engaged in forest ecology and management, protective plantation ecology and management. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn, zrms29@yahoo.com

is no natural regeneration. In order to examine the causes that led to the no natural regeneration in the plantations on sandy land, the conditions for seed germination, seedling survival and growth were tested in both lab and field. In addition, the influences of drought stresses and temperature on the growth of ectomycorrhizal fungi (ECM) strains, which are symbionts with *P. sylvestris* var. *mongolica*, were also examined because *P. sylvestris* var. *mongolica* is an ectomycorrhizal fungi depending species. The results indicated that the germination time of drought stressed seeds was longer than that of the control treatment; the germination percentage and germination rate were lower than those of the control treatment. The heavy drought stress and the extreme temperatures, especially the high temperature (over 37°C or 40°C), made the ECM fatal. Combined the observations of soil water content (soil water potential) and surface temperature in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation sites, we found that the extremely experimental conditions matched the soil water conditions and extreme temperatures within 5 cm soil in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation sites. These suggested that no natural regeneration in the plantations on sandy land were caused by: (1) impact of drought stresses on seed germination; (2) the lack of ectomycorrhizal fungi within surface sand soil (0–5 cm), which led to the root systems of seedlings death without the symbiosis of ectomycorrhizal fungi, and the extreme environmental conditions on the sandy land, which caused the death of new shoots or seedlings.

Key Words: sandy land; Mongolian pine/*Pinus sylvestris* var. *mongolica*; plantation; decline; natural regeneration

樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 的天然分布区为中国大兴安岭山地 (北纬 50° 以北) 和大兴安岭西麓的呼伦贝尔沙地草原 (红花尔基 N47°35′ ~ N48°36′, E118°58′ ~ E120°32′)^[1]。相对于中国主要森林树种, 虽然天然樟子松的林分面积和木材蓄积量较小, 但由于樟子松具有较强的耐寒、耐旱、耐贫瘠土壤和较速生等优良特性, 加之其树干通直, 材质良好, 适生于沙地, 又能起到防风固沙等作用, 在中国北方, 尤其是干旱、半干旱风沙地区, 已经成为营造防风固沙林、农田/草场防护林、水土保持林和用材林的主要树种^[1~6]。

樟子松自 20 世纪 50 年代在辽宁省彰武县章古台 (N42°43.508′, E122°32.89′) 人工引种用于固沙造林试验以来, 人工造林发展迅速, 目前辽宁省彰武县章古台地区的沙地樟子松人工林面积已达 1.5×10^4 hm²。特别是 1978 年“三北”(东北、西北、华北) 防护林体系工程建设启动以来, 先后在辽宁、内蒙古、陕西、甘肃和新疆等 13 个省(自治区) 300 多个县(旗) 引种栽培取得了成功, 并在“三北”风沙区开始大规模引种栽植。据不完全统计, 全国沙地樟子松人工林面积达到 3.0×10^5 hm²。这些樟子松防风固沙林在“三北”广大沙区发挥了巨大的生态、经济与社会效益^[6,7]。然而, 自 20 世纪 90 年代初以来, 最早引种的辽宁省彰武县章古台地区的沙地樟子松人工固沙林出现了叶枝变黄、生长势衰弱、病虫害发生, 继而全株死亡的衰退现象^[8]。已有调查结果显示, 辽宁省 3.83×10^4 hm² 樟子松人工固沙林中已有 2.50×10^4 hm² 发生衰退, 占 65.27%^[9,10]; 其它部分地区也出现了类似情况。樟子松人工固沙林的衰退已严重危害到现存林分的正常生长, 继续发展下去相当部分的沙地樟子松人工林将被毁掉, 尤其是现存植被已产生了巨大变化, 致使部分原已固定的沙地出现了流沙。不仅如此, 目前中国沙地樟子松人工造林仍在北方干旱、半干旱沙区进行^[11]。

通过与天然沙地樟子松林比较, 发现科尔沁沙地南缘樟子松人工林的衰退表现出以下两大明显特征: 一是相对于沙地樟子松人工林初期的快速生长, 其后期生长量下降, 枯梢、枯枝、落叶、病虫害, 最后死亡; 二是不能进行天然更新。

有关沙地樟子松衰退的第一个特征(生长量下降与枯梢死亡), 国内已有研究报道, 如焦树仁^[8]通过对 17a 定位观测资料的分析认为, 章古台沙地樟子松人工林提早衰弱的原因主要是由于引种地区纬度跨越大, 水分、热量比原分布区充足, 引起了樟子松自身生长规律的变化, 高峰生长期提前、峰值高、峰期短, 旺盛生长期缩短等^[1,6,8]。另外, 该研究者还认为, 由于当地 5、6 月份降水量少, 在干旱年使林分出现水分亏缺, 7、8 月份降水集中, 又造成林分高温高湿的环境条件, 在这种水热条件作用下, 当林分生长势降低时, 便感染枯梢病。由于干旱和枯梢病的影响, 林分进一步提早衰弱^[8]。

针对沙地樟子松衰退的第二种表现(不能天然更新),曾德慧等^[12]对沙地樟子松人工林天然更新障碍进行了分析,发现总体上沙地樟子松人工林从北向南,即从沙地樟子松原始林红花尔基到各个引种区,由高纬度、高海拔地区到低纬度、低海拔地区,沙地樟子松的天然更新越来越困难,当达到一定纬度时($N42^{\circ}40'$, $E122^{\circ}22'$)则没有发现天然更新幼树^[12,13]。

科尔沁沙地南缘樟子松人工林在引种初期表现较好^[6],沙地樟子松人工林正常林分生长分析表明,其数量成熟应在43a以后,与天然沙地樟子松的数量成熟(102a)相比早59a。而天然沙地樟子松的自然成熟(一般所称的过熟)比其数量要多约20a,即平均为120a(100~140a^[14]),这说明天然沙地樟子松的自然成熟龄约为数量成熟龄的120%~140%,如果按此比例,可以推断,沙地樟子松人工林的自然成熟龄应在52~60a。同样,Zhu等^[15]对天然沙地樟子松更新特征与分布格局进行的研究结果表明,红花尔基沙地樟子松天然林的天然更新在50a前是不能进行的(约相当于其寿命的1/3),只有50a以后才有天然更新,其更新的高峰期在80a以后(约相当于其寿命的2/3左右)^[15]。依此类推,对于科尔沁沙地南缘正常生长的沙地樟子松人工林林分,其天然更新的开始年龄应在20a左右,更新的高峰期应在35~40a。如果科尔沁沙地南缘樟子松人工林能够天然更新,即使其自然寿命短(相对于天然沙地樟子松),也不影响其固沙效果。而实际上,科尔沁沙地南缘樟子松人工林中任何年龄的林分都不能进行天然更新,仅能在每年的9月末天然下种后发现一些当年生的樟子松幼苗,而在翌年的生长季节却很难再见到樟子松幼苗。

调查发现,沙地樟子松人工林13~14a开始结实,几年后即达到结实高峰,在没有人为采种的条件下,樟子松人工林所产生的种源可满足天然更新的需要^[13]。科尔沁沙地南缘的沙地樟子松人工林不能天然更新的障碍到底出在哪里?根据森林天然更新的理论,树木有性繁殖更新除有充足的、有活力的种源外,必须具备适宜的种子萌发条件和幼苗的生长存活、幼树生长及形成的环境^[16~18]。

为此,假设:(1)沙地樟子松人工林中大部分天然下种的种子由于干旱胁迫不能萌发;(2)即使种子萌发成为幼苗,并且幼苗在水分条件相对充足的条件下得以生长,但由于沙地表层外生菌根菌缺少导致幼苗根系不能形成菌根,从而致使当年生天然更新的樟子松幼苗在严酷的自然环境条件下难以成活。在此假设的基础上,设计了从沙地樟子松人工林种子的萌发,到幼苗成活所需条件的系列试验,以期明确科尔沁沙地南缘樟子松人工林衰退的天然更新障碍特征。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市彰武县章古台镇($N42^{\circ}39.7'$, $E122^{\circ}33.6'$, 海拔247.6 m)和中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站($N42^{\circ}52'$, $E122^{\circ}55'$, 海拔267.3 m),自然区域均属于科尔沁沙地的东南边缘,这里是我国最早引种沙地樟子松造林区。本区属于亚湿润干旱区,年平均气温 5.9°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 2890°C ,年平均降水量496 mm,年平均潜在蒸发量1700 mm左右,相对湿度为58%,干燥度为3.643,平均地下水位约为5.3 m,平均风速为 3.7 m s^{-1} ,春季主风向为西南风,冬季为西北风,极端最低温 -33.4°C ,极端最高温 43.2°C 。无霜期约154 d^[6,11,19]。沙地樟子松人工林内主要植被有:黄蒿(*Artemisia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、莓叶委陵菜(*Potentilla fragarioides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、细叶胡枝子(*Lespedeza hedysaroides*)、鸡眼草(*Kummerowia striata*)、大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、蔓麦瓶草(*Silene koreana*)、米口袋(*Amblytropis pauciflora*)等^[9,19]。

1.2 研究方法

1.2.1 环境因子观测试验

对调查区典型林地环境因子,包括土壤含水量(土壤水分应用时域反射仪 TDR, Trime-HD, Germany 与烘干法相结合的方法进行测定,每月测量两次,遇雨推迟3d)、地表温度(采用每日4次:2:00、8:00、14:00、20:00,观测0、5、10、15、20、40 cm等深度)等进行详细测定与分析。同时对影响种子发芽、成活与生长所需条

件进行室内模拟试验,并与野外环境因子比较。

1.2.2 影响种子发芽试验

为了探讨沙地樟子松种子萌发与水分之间的关系,在实验室条件下通过聚乙二醇 (PEG 6000) 模拟水分胁迫^[20],对天然沙地樟子松种子与人工沙地樟子松种子萌发、生长对水分胁迫反应的异同进行试验。

沙地樟子松天然林种子取自红花尔基,人工林种子取自科尔沁沙地东南缘,种子均在 2003 年 9 月末采集。在试验前,种子保存在 4℃ 左右的不透明纸袋里。试验时选择成熟、饱满且大小适中、均匀一致的种子作为萌发实验材料。实验开始前将樟子松种子用 5‰ 的高锰酸钾溶液浸种半小时,对种子进行消毒。实验所用培养皿用烘箱进行消毒 (105℃ 2 h)。试验共设 6 种水分胁迫梯度,即 PEG 浓度分别为 100 g L⁻¹、150 g L⁻¹、200 g L⁻¹、250 g L⁻¹、300 g L⁻¹ 以及对照 (CK, 以蒸馏水代替 PEG),与之相对应的溶液水势约为 -0.20、-0.40、-0.75、-1.35、-1.53、-0.02 MPa 由水势测定仪 (Wescor, Inc, USA) 确定。

1.2.3 影响外生菌根菌 (幼苗根系) 存活与生长试验

由于樟子松是外生菌根菌依赖性很强的树种,因此,于 2004 年 7 月~10 月,在调查林地内采集外生菌根菌子实体^[21],根据《东北防护林大型真菌图志》鉴定其种类^[22],并在无菌操作室进行分离和接种培养。共选取了 4 种外生菌根菌,即高环柄菇 (*Macrolepiota procera*)、松乳菇 (*Lactarius deliciosus*)、牛肝菌 (*Boletus* sp.) 和乳菇 (*Lactarius* sp.)。为测试外生菌根菌对温度与干旱的响应,将上述 4 种分离的菌株分别接种到固体和液体 MMN 培养基上,试验设置温度为 5℃、10℃、20℃、25℃、28℃、30℃、37℃、40℃,黑暗中置于恒温箱中培养。培养 2 周后测量各处理菌落的生长直径,每个处理均重复 3 次。同时由 PEG 溶液产生浓度分别为 0%、10%、20%、25%、30% (与之相对应的溶液水势约为 0、-0.20、-0.60、-0.90、-1.20 MPa) 培养基的水势 (由于培养基的介质不同,相同浓度的 PEG 产生的水势与 1.2.2 中有所不同),首先在培养皿底部铺沙砾,沙砾上铺一张滤纸,每皿中注入 25ml 培养基 (加琼脂),刚好没过滤纸,将直径为 4mm 的菌块接种到调节好水势的 MMN 培养基上,一定时间间隔向培养皿补充因蒸发而失去的水分以保持浓度不变。放在 25℃ 下培养 2 周后测量各处理菌落的生长直径,每个处理均重复 3 次^[21,23]。

2 结果与分析

2.1 沙地樟子松人工林区环境因子

2.1.1 土壤水分变化

2004 与 2005 年对 27~28a 沙地樟子松林地土壤水分观测结果如图 1 (图 1A、B)。表层土壤含水量在生长季节一般会出现低于 30 g kg⁻¹ 的时间。但在降水较多的年份,表层土壤含水量在雨季也有较高的时候,如 2004 年,年降水量达 500 mm,6~10 月份表层土壤含水量一直维持较高水平 (>60 g kg⁻¹)。

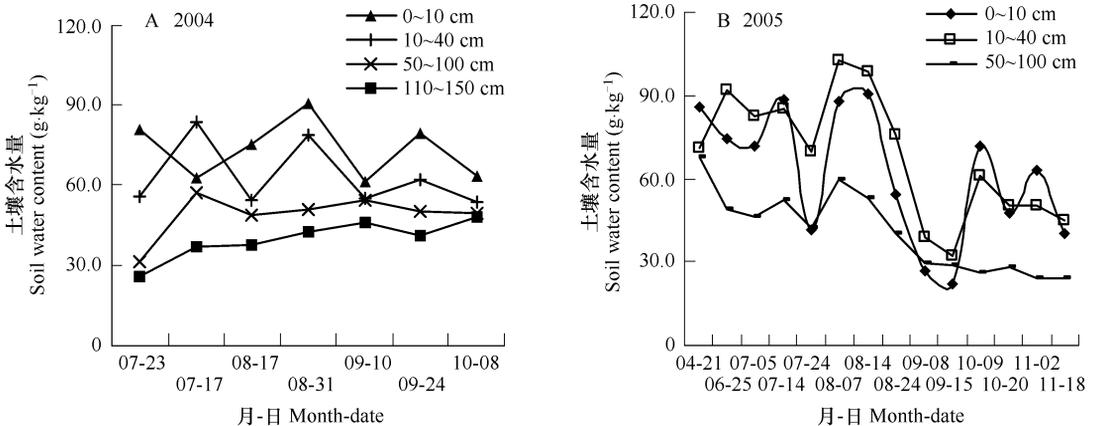


图 1 沙地樟子松人工林土壤水分变化图

Fig. 1 Soil water contents in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations

2.1.2 地表温度变化

地表温度数据取自辽宁省风沙地农业研究所 1982 到 1984 年于试验区附近观测结果。由于地表温度 (最高温度) 主要对更新幼苗及其在地表层与根系形成的外生菌根菌产生影响, 根据引种区沙地樟子松人工林地天然更新苗木调查, 樟子松种子萌发后, 天然更新幼苗根系平均长度为 $1.88 \text{ cm} \pm 0.28 \text{ cm}$ (2006 年 10 月 15 ~ 16 日调查结果)。从实地调查数据看, 调查的所有更新苗木根系长均 $< 5 \text{ cm}$, 即当根系还没有长到 5 cm 时, 天然更新的樟子松幼苗就已经死亡。另外, 根据该区长期温度观测结果^[11, 24], 试验区年平均最高温度出现在 7 月。因此, 图 2 列出 1982 ~ 1984 年 7 月份沙地表层 0 和 5 cm 两个深度 14 00 观测的温度。图 2 显示, 表层土壤 (0 cm) 温度大于 37°C 平均为 20 d (16 ~ 23 d), 大于 40°C 平均为 18.7 d (15 ~ 20 d), 5 cm 层土壤温度大于 37°C 平均为 6 d (2 ~ 10 d), 大于 40°C 平均为 2 d (0 ~ 4 d)。

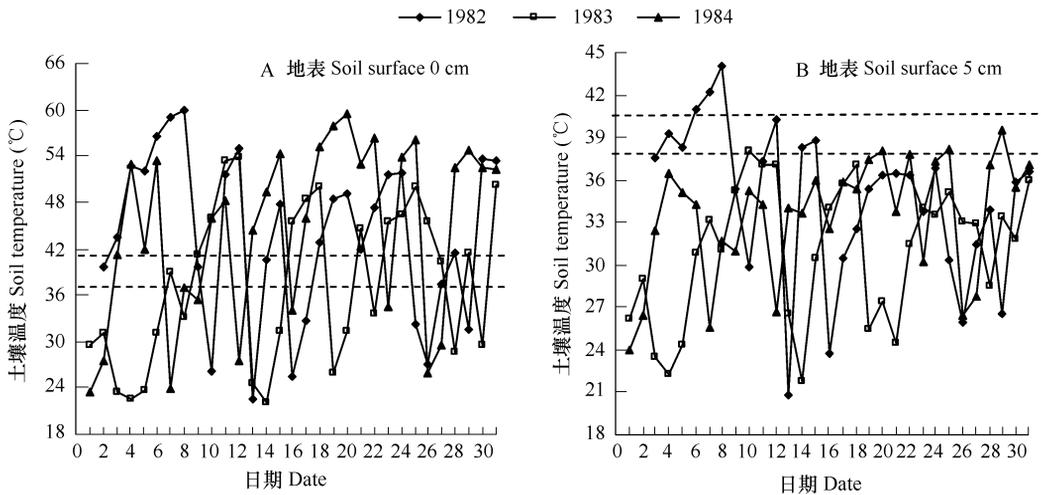


图 2 7 月份表层土壤温度变化图
Fig. 2 Soil temperatures in July

2.2 水分胁迫对樟子松种子萌发影响

图 3 为不同起源沙地樟子松种子发芽参数随不同浓度 PEG 胁迫处理对种子萌发的开始、结束时间均有一定的延缓作用 (图 3A)。来自不同起源的沙地樟子松种子在 25% PEG 胁迫处理 (相当于 -1.35 MPa 水势) 下均不能萌发。10% PEG 处理的天然林种子发芽率较其它处理有所增加 (不显著 $p < 0.05$), 不同起源的种子之间也没有显著差异 (图 3B)。不同起源的种子的平均发芽时间随 PEG 浓度变化呈相似趋势, 即 PEG 浓度增加使平均发芽时间显著滞后 ($p < 0.05$), 而且在同一水平 PEG 处理中, 人工林种子显著晚于天然林种子 ($p < 0.05$), 平均晚 5 d (图 3C)。当 PEG 浓度低于 20% 时, 不同起源的种子之间的发芽势表现出不同的变化趋势, 天然林种子显著高于人工林种子 ($p < 0.05$) (图 3D)。综合沙地樟子松种子发芽参数可以看出, 人工林种子对水分胁迫较天然林更敏感; 当土壤水势低于 -1.35 MPa 时, 无论天然林还是人工林种子均不能萌发。

2.3 胁迫条件对外生菌根菌存活生长影响

2.3.1 水分胁迫对外生菌根菌存活生长影响

图 4 表明, 当 PEG 模拟干旱的浓度在 10% (相当于 -0.20 MPa) 时, 4 种外生菌根菌的生长不但未受到限制, 而且都有不同程度的增加, 但与对照相比没有显著差异 ($p < 0.05$)。随着 PEG 模拟干旱的加剧, 松乳菇和美味牛肝菌的生长下降较快 (图 4), PEG 浓度达到 30% 时, 4 种外生菌根菌均不能生长。

2.3.2 温度对外生菌根菌存活生长影响

图 5 表明, 4 种外生菌根菌在低于 5°C 时全部不能生长 (图 5)。当温度达到 37°C 时, 仅有美味牛肝菌能维持很低的生长; 另外 3 种外生菌根菌几乎不能生长; 当温度达到 40°C 时, 试验所用的 4 种的外生菌根菌均不

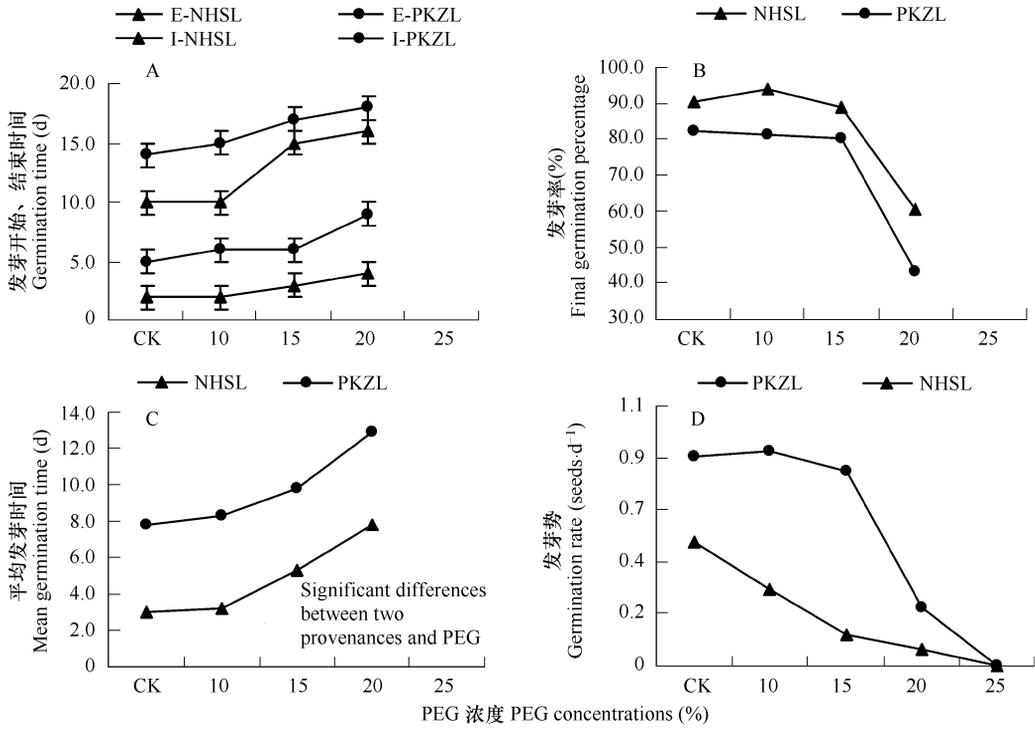


图3 PEG 模拟水分胁迫对不同起源沙地樟子松种子发芽指标的影响

Fig. 3 Effects of PEG stresses on germination parameters

I-NHSL :天然林种子开始发芽时间 initial germination time of seeds from natural forests ;E-NHSL :天然林种子结束发芽时间 end germination time of seeds from natural forests ;I-PKZL :人工林种子开始发芽时间 initial germination time of seeds from plantations ;E-PKZL :人工林种子结束发芽时间 end germination time of seeds from plantations ;NHSL :天然林种子 seeds from natural forests ;PKZL :人工林种子 seeds from plantations

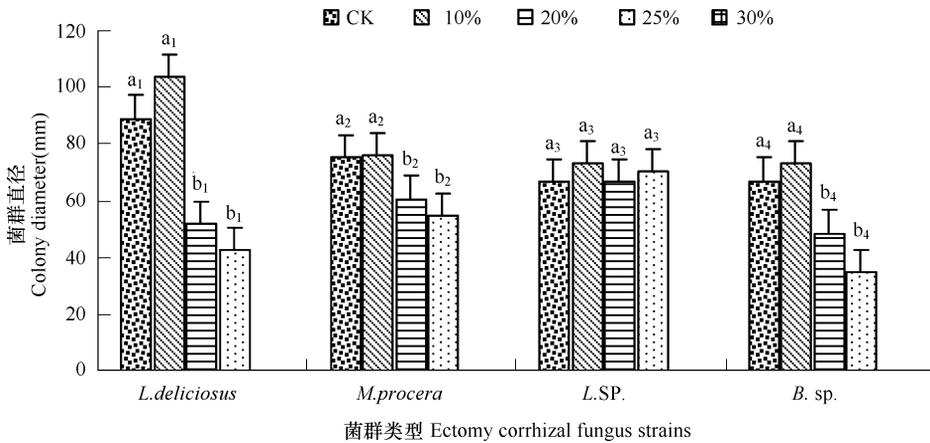


图4 不同浓度 PEG 胁迫对外生菌根菌生长的影响

Fig. 4 Effects of drought stresses by PEG on the growth of the three ectomycorrhizal fungi

图上垂线为标准差 ;每种外生菌根菌生长数据不同字母表示存在显著差异 ($p < 0.05$) ; Vertical bar indicated the standard errors. Different letters above the histogram indicated the significant difference among various PEG concentrations ($p < 0.05$)

能生长。将不同温度处理下的外生菌根菌进行适宜条件培养发现 ,低于 5℃ 时不能生长的外生菌根菌均能正常生长 ,而在高温 (37℃ 和 40℃)的外生菌根菌则不能再存活。

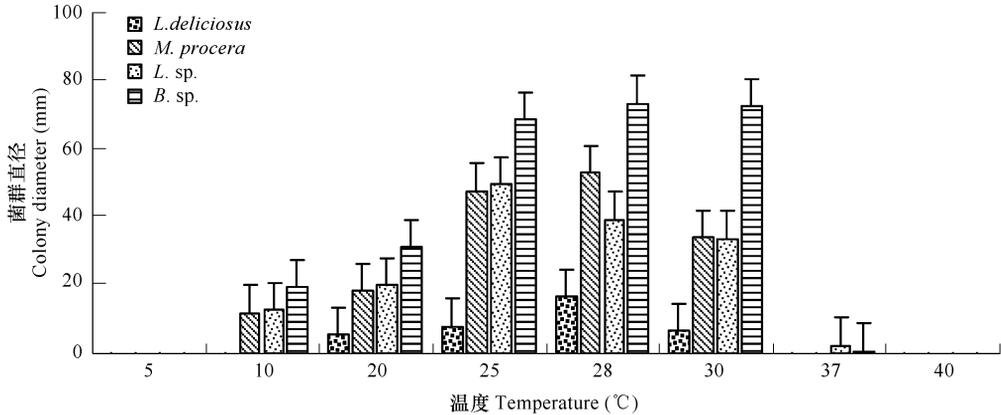


图5 温度对外生菌根菌存活与生长的影响

Fig. 5 Effects of temperature conditions on growth of the four ectomycorrhizal fungi

图上垂线为标准差 Vertical bar indicated the standard errors

3 讨论与结论

3.1 水分条件与樟子松种子萌发

种子发芽由环境条件和种子的活力决定^[12, 16, 25-27]。经过室内种子发芽试验发现,与天然樟子松林种子相比,科尔沁沙地东南缘人工樟子松林种子发芽率低(图3),但统计分析表明差异不显著($p > 0.05$)。这表明种子发芽率与种子产地差异关系不大;另外,也证明沙地樟子松人工林种源在没有人采摘的条件下不是天然更新的障碍因子^[12, 13, 19, 25]。同一水平PEG处理中,人工林种子平均发芽时间显著晚于天然林种子($p < 0.05$),平均晚5 d(图3C)。不同起源的沙地樟子松种子在25%PEG胁迫处理(相当于-1.35MPa水势)下均不能萌发。综合沙地樟子松种子发芽参数可以看出,人工林种子对水分胁迫较天然林更敏感。从2004、2005年的土壤水分数据可知(图1),沙地樟子松人工林内的土壤水分条件(0~10 cm 2004年6~10月,2005年4~11月)对所观测时期的种子发芽中只有在2005年9月阻碍了种子的发芽,而其它时间土壤水分条件均不对种子发芽造成胁迫。但本次试验仅观测了0~10 cm土壤含水量的平均值,没有观测0~5 cm处的土壤含水量,而这一层的土壤含水量变动幅度大,土壤水分容易蒸发。据白雪峰等^[28]于1998年5月观测的地表土壤含水量(28.5 g kg⁻¹,相当于-1.67MPa水势),这完全抑止了沙地樟子松种子的萌发。另外,值得说明的是,目前所观测的土壤水分含量均为瞬间值,即仅测得某一天的某一时刻的土壤水分含量,而沙地土壤水分,尤其是地表(0~5 cm)在一天内的变化幅度是非常大的,根据现场观察,即使在雨后,沙地表层(0~5 cm)土壤水分含量在3d内降至30 g kg⁻¹(相当于-1.48MPa水势)。因此,由于受到水分胁迫的影响,沙地樟子松人工林中大部分天然下种的种子不能萌发,这与Zhu等^[27]指出干旱胁迫是导致科尔沁沙地引种区不能天然更新的原因之一结论一致。

3.2 温度、水分条件与外生菌根菌存活生长

樟子松是外生菌根菌依赖树种,在天然林中,外生菌根菌不仅能够增加根系对营养的吸收,而且能运输植物不能传送的养分到寄主植物。另外,菌根还能增强寄主植物对病原病害的拮抗作用、增强寄主植物对干旱、寒冷等逆境生理状态的物理保护^[11, 29]。一般认为,环境因子,如土壤特性、温度、水分等对外生菌根真菌的状态和生长产生影响^[30, 31]。实验室内不同水分胁迫条件对外生菌根真菌影响表明,当PEG模拟干旱的浓度在10%时(相当于-0.20 MPa)时4种外生菌根菌的生长均未受到限制;但是,当PEG浓度为30%时(相当于-1.20 MPa的水势)4种外生菌根菌的生长量均为0,即外生菌根菌的生长完全受到限制。虽然2004、2005年的土壤水分数据表明(图1),沙地樟子松人工林内的土壤水分条件在所观测期间外生菌根菌生长没有被限制,但由于本次试验没有观测0~5 cm处的土壤含水量,因此,在0~5 cm层土壤内外生菌根菌的生长是否受到限制并不是十分清楚。根据2004、2005年的土壤水分数据,可以肯定的是,外生菌根菌在10 cm及以下土

壤内的生长应该是不受土壤水分胁迫影响的 (110 cm 以下土壤水分条件则限制外生菌根菌的生长, 图 1)。由于沙质土壤中外生菌根菌的种类、数量及侵染率都相对较低^[2], 一旦遭遇水分胁迫, 外生菌根菌的数量将更少, 因此使沙地的外生菌根菌依赖树种的生存、生长受到影响。

温度是影响外生菌根菌生长及菌丝体代谢的最重要环境因子之一, 许多外生菌根菌都能在不良环境中生存, 同时也可以极大地提高树木对不良环境的适应能力^[29, 32~34]。但当环境条件特别严酷时, 在沙地, 尤其是温度对外生菌根菌的生长与存活影响极大^[35, 36]。供试的 4 种外生菌根菌在高于 37℃ 或 40℃ 条件下均不能生长, 而且表现出永久性死亡。虽然温度数据是在试验地林缘附近的草地上观测所得 (图 2), 但从中可以看出沙地在 7 月份 (当地最高气温月) 严酷的温度条件: 7 月份 14:00 时土壤表层温度超过 37℃ 和 40℃ 的日数平均分别为 20 d 和 18.7 d (由于仪器观测原因, 未能获得近年来观测数据; 虽然观测数据为 1982~1984 进行, 由于土壤温度或气温在 20a 内不会有大幅度变动, 因此可以

用来说明温度对外生菌根菌的影响); 土壤 5 cm 层温度超过 37℃ 和 40℃ 的日数平均分别为 6 d 和 1.3 d (图 2B)。根据 2006 年生长季节观测的林内与林外草地 5 cm 温度数据, 得出林内与林外草地温度的相关关系: $T_{\text{林外草地}} = 0.6168 T_{\text{林内}} + 18.045$ ($R^2 = 0.8218$, $T_{\text{林内}} > 25^\circ\text{C}$, $T_{\text{林外草地}} > 30^\circ\text{C}$) (图 6); 由此可以推断, 在沙地樟子松人工林所在地的土壤表层 (0~5 cm) 由于高温作用, 几乎没有外生菌根菌存在 (至少没有试验所测试的 4 种外生菌根菌) 即使存在, 到每年的 7 月份也会永久性死亡。考虑到沙地樟子松人工林种子发芽后生长的条件, 即使种子能够萌发或发芽, 而后期的生长由于 0~5 cm 土壤层内很少有与幼苗根系结合的外生菌根菌而无法形成菌根。

这种推论被引种区沙地樟子松人工林天然更新调查结果所证明, 即樟子松种子萌发后 (在 9 月末至 10 月下旬), 天然更新幼苗根系平均长度为 $1.88\text{cm} \pm 0.28\text{cm}$, 几乎没有更新幼苗根系达到 5 cm; 而且在所有幼苗根系上没有发现与外生菌根菌形成的菌根。

综上试验结果与分析, 由于沙地樟子松人工林所处立地的严酷性, 即沙地表层土壤的水、温条件, 既影响种子的萌发, 又阻碍发芽后幼苗的生长。尤其是表层 (0~5 cm) 土壤的温度使樟子松赖以生存的外生菌根菌几乎不能存活, 这严重阻碍了沙地樟子松人工林内幼苗的形成。因此, 可以推断 科尔沁沙地南缘樟子松人工林衰退的天然更新障碍主要特征为: (1) 由于土壤的干旱胁迫使沙地樟子松人工林中天然下种的种子有很少的萌发机会; (2) 即便在水分条件相对充足的季节 (如秋季) 樟子松种子能够萌发, 但萌发产生的更新幼苗数量极少 (< 20 株/ hm^2), 即便这些更新幼苗在萌发后得以存活, 但由于沙地表层 (0~5 cm) 与樟子松共生的外生菌根菌几乎不能存活而导致幼苗根系无法形成菌根, 导致当年生樟子松幼苗抗旱、抗病能力非常弱, 从而不能越冬或不能更新。

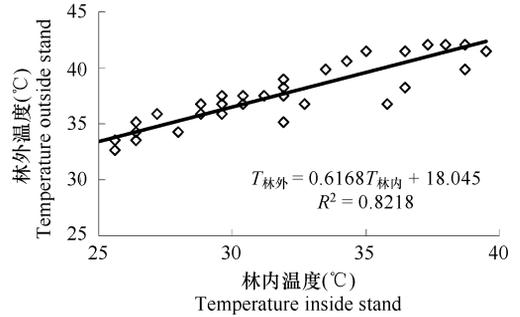


图 6 2006 年生长季节林内与林外草地地表 5 cm 深度土壤温度的相关关系

Fig. 6 Regression of temperatures inside and outside the plantation stands in 2006

References :

[1] Zhu J J, Li Z H, Kang H Z, et al. Effects of polyethylene glycol (PEG)-simulated drought stress on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seed germination on sandyland. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (5) : 801 - 804.

[2] Li S G. A preliminary study on adaptation of Mongolian scotch pine to sandy land at Naiman. Inner Mongolia. Journal of Desert Research, 1994, 14 (1) : 60 - 67.

[3] Liu M G, Su F L, Ma D R, et al. Decline reasons of *Pinus slyvestris* var. *mongolica* and soil fertility. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33 (4) : 274 - 277.

- [4] Kang H Z, Zhu J J, Li Z H, *et al.* Natural distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land and its cultivation as an exotic species. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (7): 799—806.
- [5] 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.
- [6] Zhu J J, Fan Z P, Zeng D H, *et al.* Comparison of stand structure and growth between plantation and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land. *Journal of forestry Research*, 2003, 14: 103—111.
- [7] Xing Z K, Jiao S R. Techniques for Sand Fixation and Afforestation at Zhanggutai and Effect Evaluation. *Journal of Desert Research*, 1999, 19 (2): 179—183.
- [8] Jiao S R. Report on the causes of the early decline of *Pinus slyvestris* var. *Mongolica* Shelterbelt and its preventative and control measures in Zhanggutai of Liaoning Province. *Scientia Silve Sinicae*, 2001, 37 (2): 131—138.
- [9] Wu X Y, Jiang F Q, Li X D. Major features of decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (12): 2221—2224.
- [10] Wu X Y, Jiang F Q, Li X D. Decline regularity and causes of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (12): 2225—2228.
- [11] Zhu J J, Zeng D H, Kang H Z, *et al.* Decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation Forests on Sandy Land. China Forest Publishing Company, 2005. 264.
- [12] 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.
- [13] Zeng D H, You W Z, Fan Z P, *et al.* Natural regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (1): 1—5.
- [14] Zhao X L and Li W Y. *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. Beijing: Agriculture Publishing Company, 1963. 154.
- [15] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, *et al.* Natural regeneration characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests on sandy land in Honghuaerji. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16: 253—259.
- [16] Bailey J D, Covington W W. Evaluating ponderosa pine regeneration rates following ecological restoration treatments in northern Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155: 271—278.
- [17] Gong Y L, Swqine M D, Miler H G. Effects of fencing and ground preparation on natural regeneration of native pinewood over 12 years in Glen Tanar, Aberdeenshire. *Forestry*, 1999, 64: 157—168.
- [18] Zhu J J, Matsuzaki T, Li F Q, *et al.* Effects of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182: 339—354.
- [19] Jiang F Q, Zeng D H, Zhu J J. Fundamentals and technical strategy of sand-fixation forest management. *Journal of Desert Research*, 1997, 17: 250—254.
- [20] Yu X J, Wang Y R, Zeng Y J, *et al.* Effects of temperature and osmotic potential on seed germination of *Cleistogenes songorica* and *Plantago lessingii*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (5): 883—887.
- [21] Zhu J J, Xu M L, Kang H Z, *et al.* Effects of temperature, pH and drought stress on ectomycorrhizal fungi growth in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (12): 810—804.
- [22] Zhang H S. Pictorial flora of *macrofungi* in the northeastern shelterbelt. Liaoning Science and Technology Press, 1989. 189.
- [23] 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.
- [24] Jiao S R. Structure and function of Mongolian pine plantation for sand fixation in Zhanggutai. Shenyang, Liaoning Science and Technology Press, 1989. 114.
- [25] Han G, Zhang G F, Yang W B. Quantitative analysis on principle eco climatic factors of limiting natural reforestation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land. *Scientia Silve Sinicae*, 1999, 35 (5): 22—27.
- [26] Zhu J J, Li F Q, Matsuzaki T, *et al.* Influence of thinning on regeneration in a coastal *Pinus thunbergii* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (11): 1361—1367.
- [27] 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.
- [28] Bai X F, Wang G C, Zhang R S, *et al.* Soil water dynamics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands in Zhanggutai areas. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2004, 29 (2): 11—13.
- [29] Zhou Y Z, Han G Y, Qi Y C, *et al.* Choiceness of ectomycorrhizal fungi for larch trees and the application in afforestation. *Forest Science*

Research, 1994, 7 (2): 206-209.

- [30] Johansson J F. Belowground ectomycorrhizal community structure along a local nutrient gradient in a boreal forest in Northern Sweden. Swedish University African. Science, Uppsala, 2002, 1-26.
- [31] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1997. 164.
- [32] Lilleskov E A, Bruns T D. Nitrogen and ectomycorrhizal fungal communities: what we know, what we need to know. New Phytologist, 2001, 149: 154-158.
- [33] Parke J L, Linderman R G, Black C H. The role of ectomycorrhizas in drought tolerance of Douglas-fir seedlings. New Phytologist, 1983, 95: 83-95.
- [34] Theodorou C, Bowenm G D. Mycorrhizal responses of radiata pine in experiments with different fungi. Australian Forestry, 1970, 34: 183-191.
- [35] Baum C, Weih M, Verwijstb T, et al. The effects of nitrogen fertilization and soil properties on mycorrhizal formation of *Salix viminalis*. Forest Ecology and Management, 2002, 160: 35-43.
- [36] Vonderwell J D, Enebak S A. Differential effects of rhizobacterial strain and dose on the ectomycorrhizal colonization of loblolly pine seedlings. Forest Science, 2000, 46: 437-441.

参考文献:

- [1] 朱教君, 李智辉, 康宏樟, 等. 聚乙二醇 (PEG) 模拟水分胁迫对沙地樟子松种子萌发影响研究. 应用生态学报, 2005, 16 (5): 801-804.
- [2] 李胜功. 樟子松沙地适应性的初步研究. 中国沙漠, 1994, 14 (1): 60-67.
- [3] 刘明国, 苏芳莉, 马殿荣, 等. 多年生樟子松人工纯林生长衰退及地力衰退原因分析. 沈阳农业大学学报, 2002, 33 (4): 274-277.
- [4] 康宏樟, 朱教君, 李智辉, 等. 沙地樟子松天然分布与引种栽培. 生态学杂志, 2004, 23 (5): 134-139.
- [5] 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 (5): 212-217.
- [7] 邢兆凯, 焦树仁. 章古台固沙造林技术与效益评价. 中国沙漠, 1999, 19 (2): 179-183.
- [8] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施. 林业科学, 2001, 37 (2): 131-138.
- [9] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹. 樟子松人工固沙林衰退的主要特征. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2221-2224.
- [10] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2225-2228.
- [11] 朱教君, 曾德慧, 康宏樟, 等. 沙地樟子松人工林衰退机制. 中国林业出版社, 2005. 264.
- [12] 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.
- [13] 曾德慧, 尤文忠, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林天然更新特征. 应用生态学报, 2002, 13 (1): 1-5.
- [14] 赵兴梁, 李万英. 樟子松. 北京: 农业出版社, 1963. 154.
- [19] 姜凤岐, 曾德慧, 朱教君. 防风固沙林基础理论与技术. 中国沙漠, 1997, 17: 250-254.
- [20] 鱼小军, 王彦荣, 曾彦军, 等. 温度和水分对无芒隐子草和条叶车前种子萌发的影响. 生态学报, 2004, 24 (5): 883-887.
- [21] 朱教君, 许美玲, 康宏樟, 等. 温度、pH 及干旱胁迫对沙地樟子松外生菌根菌生长影响. 生态学杂志, 2005, 24 (12): 810-804.
- [22] 章荷生. 东北防护林大型真菌图志. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1989. 189.
- [23] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响. 生态学报, 2005, 25 (10): 2527-2533.
- [24] 焦树仁. 章古台固沙林生态系统的结构与功能. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1989. 114.
- [25] 韩广, 张桂芳, 杨文斌. 影响沙地樟子松天然更新的主要生态气候因子的定量分析. 林业科学, 1999, 35 (5): 22-27.
- [26] 朱教君, 李凤芹, 松崎健, 等. 间伐对黑松海岸林更新的影响. 应用生态学报, 2002, 13 (11): 1361-1367.
- [28] 白雪峰, 王国晨, 张日升, 等. 章古台沙地樟子松人工林土壤水分动态研究. 辽宁林业科技, 2004, 29 (2): 11-13.
- [29] 周玉芝, 韩桂云, 齐玉臣, 等. 落叶松外生菌根真菌优良菌株筛选及其在造林中的应用. 林业科学研究. 1994, 7 (2): 206-209.