

The Effect of Ectomycorrhizal Fungi on the Growth of *Pinus tabulaeformis* Seedlings and the Activities of Rhizospheric Soil Enzymes of Seedlings on Dump

Yangnan Guo^{1,2,3}, Yongan Qu³, Anmin He^{1,2}, Jianhong Chang^{1,2}, Junting Guo^{2,4}, Yuying Bao^{3*}

¹China Energy Group, Shendong Coal Group Technology Research Institute, Shenmu Shaanxi

²State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, China Energy Group, Beijing

³School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

⁴National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing

Email: guoyangnan@163.com, *ndbyy@imu.edu.cn

Received: May 15th, 2020; accepted: May 29th, 2020; published: Jun. 5th, 2020

Abstract

The construction of dump completely destroyed the ecological environment of mining area, obstructing the process of revegetation. In the study, *Pinus tabulaeformis* seedlings on dump soil were inoculated with *Suillus collinitus*-99 and *S. luteus*. Biomass, chlorophyll content, photosynthetic indexes and the activities of rhizospheric soil enzymes of seedlings were determined for exploring the feasibility of applying ectomycorrhizal biotechnology to revegetation. The survival rate and biomass of seedlings was significantly increased when seedlings are inoculated with *S. luteus*. Moreover, seedlings have more obvious growth chlorophyll content, photosynthetic indexes and the activities of rhizospheric soil enzymes of seedlings ($P < 0.05$). The results show that the growth of seedlings was significantly improved when inoculated with ectomycorrhizal fungi; ectomycorrhizal fungi can accelerate the process of revegetation.

Keywords

Ectomycorrhizal Fungi, *Pinus tabulaeformis* Seedlings, Germinate, Activities of Rhizospheric Soil Enzymes

*通讯作者。

外生菌根真菌对排土场油松幼苗生长和根际土壤酶活性的影响

郭洋楠^{1,2,3}, 屈永安³, 贺安民^{1,2}, 常建鸿^{1,2}, 郭俊庭^{2,4}, 包玉英^{3*}

¹国家能源集团神东技术研究院, 陕西 神木

²国家能源集团煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京

³内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特

⁴国家低碳清洁能源研究院, 北京

Email: guoyangnan@163.com, *ndbyy@imu.edu.cn

收稿日期: 2020年5月15日; 录用日期: 2020年5月29日; 发布日期: 2020年6月5日

摘要

排土场的建设彻底破坏了矿区的生态环境, 阻碍了植被恢复进程。本研究通过向排土场土壤中生长的油松幼苗接种外生菌根真菌牛肝菌-99和褐环乳牛肝菌, 测定油松幼苗的生物量、叶绿素含量、光合指标和根际土壤酶活性的变化, 探究将外生菌根真菌应用到排土场植被复垦中的可行性。结果表明, 接种褐环乳牛肝菌后, 油松幼苗的存活率、生物量明显提高; 幼苗的叶绿素含量和光合指标明显升高; 根际土壤酶活性显著提高($P < 0.05$), 说明接种外生菌根真菌有助于排土场土壤中油松幼苗的生长, 可以促进排土场植被恢复的进程。

关键词

外生菌根真菌, 油松幼苗, 生长, 根际土壤酶活性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿资源开采形成的排土场, 不仅破坏了当地的自然景观、造成土地生产率降低, 而且彻底破坏了原有的生境, 以及空气、水源的长期性破坏[1]。对退化区土地进行植被恢复的目标就是促进土壤形成进程、防止水土流失、积累有机质、促进微生物群落的形成、启动营养循环等[2] [3]。油松(*Pinus tabulaeformis*)是目前在我国植被恢复的主要树种之一。

外生菌根真菌(Ectomycorrhizal fungi, ECM fungi)能够与绝大部分陆上植物形成共生关系, 其有助于宿主植物抵抗来自生物与非生物的胁迫[4]。它在营养循环、种间关系和维护生态系统的物种多样性等方面发挥着主要作用[5]。外生菌根真菌能够促进植物的生长、增强植物对干旱、重金属等逆境环境的耐受力[6]-[12]。

韩桂云等人的研究表明, 接种菌根菌剂可以提高矿区泥岩中生长的植物的存活率, 调控土壤条件[13]。

利用外生菌根真菌对排土场植被恢复的研究相对较少。

本文探究牛肝菌(*Suillus collinitus*)-99、褐环乳牛肝菌(*S. luteus*)对哈尔乌素露天煤矿排土场土壤基质中生长的油松幼苗生长及根际土壤酶活性的影响,探索外生菌根菌剂在矿区排土场复垦中的应用的可行性,为矿区退化土地的植被恢复提供一条新思路。

2. 材料和方法

2.1. 材料

供试菌株和植物外生菌根真菌菌种由内蒙古农业大学林学院闫伟教授馈赠,油松种子为本实验室保藏。

主要培养基 Pach 固体培养基和 MMN 液体培养基配方[14]。

供试土壤:土壤于 2019 年 5 月采自内蒙古鄂尔多斯准格尔旗哈尔乌素露天煤矿排土场。

2.2. 方法

菌剂的制备:用 Pach 固体培养基对菌种进行活化培养。获得活力旺盛的菌丝体后,于无菌环境将菌丝体接种到装有 MMN 液体培养基的锥形瓶中,在摇床上 120 r/m 培养 15 d,温度为 28℃,备用。

盆栽试验:试验于 2019 年 5 月 30 日至 10 月 30 日,在内蒙古大学菌根生物研究室进行。将挑选出的籽均匀、粒饱满油松种子以 10% NaClO 溶液浸泡 15 min 后,用无菌蒸馏水冲洗干净后催芽。于高 13 cm、直径为 10 cm 装有 1.5 kg 土的花盆中,播种 10 粒萌发的油松种子,共设 4 个梯度:(1) CK:未接种菌剂;(2) M₁:接种菌剂牛肝菌-99;(3) M₂:接种褐环乳牛肝菌;(4) M₁ + M₂:牛肝菌-99、褐环乳牛肝菌(各 2.5 ml)混合接种。未接种处理则注入 5 ml 灭菌培养基,作为对照。每处理重复 5 次。

培养条件为:水分控制在土壤最大持水量的 75%~80%;光周期为 14 L:10 D;培养温度为 27℃;空气湿度为 70%~80%。

2.3. 测定项目

生物量:每处理选取 10 株幼苗进行生物量的测定。

菌根依赖性及菌根侵染率:采用计数统计法测定菌根侵染率,并测定感染级数[15]。将根剪成 1 cm 的根段,每处理随机选取 50 根段。

$$\text{菌根依赖性} = \frac{\text{接菌植株的干重}}{\text{未接菌植株的干重}} \times 100\%$$

$$\text{菌根的侵染率} = \frac{\text{形成外生菌根的根段数}}{\text{观察的总根段}} \times 100\%$$

光合指标:采用 Li-6400P 便携式光合系统测定仪和叶面积仪,于 2013 年 10 月 25 日上午 9:00 测定了植株的光合作用、叶面积等指标,并测定了幼苗的叶绿素含量[16]。

土壤酶活性:将风干土壤过 1 mm 筛,备用。过氧化氢酶活性测定[17],单位为 mg H₂O₂ g⁻¹;脲酶活性测定[18],单位为 mg NH₄⁻-N·g⁻¹·d⁻¹;蔗糖酶活性测定[18],单位为酚 mg·g⁻¹·d⁻¹;碱性磷酸酶活性测定[19],单位为酚 mg·g⁻¹·d⁻¹。

2.4. 数据的处理和统计分析

试验数据的采集及分析通过 Microsoft Excel (version 2007)和 SPSS Statistics (version 20.0 for Windows)软件完成。

3. 结果与分析

3.1. 接菌处理对油松幼苗生物量的影响

接种菌剂组油松幼苗的针叶相较于对照组, 有明显增长, 针叶较为浓绿, 菌剂的促生效果明显。

与对照组相比, 接种菌剂组油松幼苗的存活率显著提高, 成活率提高百分率为: M_2 (48%) > M_1 (37%) > $M_1 + M_2$ (30%)。接种牛肝菌-99 与褐环乳牛肝菌, 均使得油松幼苗的鲜重、干重、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重显著高于对照组 ($P < 0.05$) (表 1)。处理 M_2 相对于 CK, 油松幼苗的鲜重、干重、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重分别提高 160.62 mg、73.59 mg、123.48 mg、37.08 mg、42.69 mg、30.9 mg, 增长率分别达到 136.37%、157.74%、130.54%、160.2%、134.72%、206.41%、32.63%, 根冠比提高 15.4%。处理 M_2 相较于 M_1 与 $M_1 + M_2$, 油松幼苗的生长指标差异显著 ($P < 0.05$)。

Table 1. The effect of mycorrhiza on the growth of *P. tabulaeformis* seedlings

表 1. 接菌处理对油松幼苗生长的影响

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight (mg)	干重 Dry weight (mg)	地上部鲜重 Shoot fresh weight/(mg)	地下部鲜重 Root fresh weight/(mg)	地上部干重 Shoot dry weight/(mg)	地下部干重 Root dry weight (mg)	根冠比 Root/shoot (%)
CK	117.72 ± 3.32c	46.73 ± 3.32c	94.63 ± 3.32c	23.14 ± 1.71c	31.73 ± 2.02c	15.01 ± 1.52c	47.21 ± 3.63ab
M_1	198.53 ± 15.21b	85.01 ± 3.61b	152.73 ± 14.91b	45.83 ± 0.42b	56.74 ± 2.91b	28.42 ± 2.01b	50.71 ± 4.54ab
M_2	278.34 ± 10.93a	120.32 ± 3.42a	218.11 ± 8.0a	60.22 ± 3.43a	74.42 ± 2.15a	45.91 ± 4.81a	61.69 ± 8.52a
$M_1 + M_2$	218.61 ± 6.30b	84.32 ± 4.01b	178.32 ± 5.4b	40.21 ± 2.01b	58.53 ± 1.53b	25.82 ± 2.82b	43.92 ± 4.01b

注: 平均值 ± 标准误。同列中不同字母表示不同处理间的同一指标数据存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3.2. 接菌处理对油松幼苗菌根依赖性及菌根侵染率的影响

菌根依赖性(MD)被用来衡量植物对菌根菌依赖程度的大小, 也可以指示菌根真菌与植物的共生效果、促生作用[20]。油松幼苗的 MD 为 $M_2 > M_1 > M_1 + M_2$, 分别为 257%、182%、181%。因此油松幼苗对与褐环乳牛肝菌形成的菌根有中等强度的依赖性, 对与牛肝菌-99 形成的菌根依赖性较弱。

接菌油松幼苗根部, 均有外生菌根真菌侵染, 感染级数均已达到 5 级; 侵染率自大到小为 M_2 (96%) > M_1 (80%) > $M_1 + M_2$ (75%) > CK。各接种组与 CK 间的侵染率差异显著, M_2 与 M_1 、 $M_1 + M_2$ 侵染率存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3.3. 接菌处理对油松幼苗光合指标的影响

与 CK 相比, 接菌显著提高了油松幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素的含量 ($P < 0.05$) (表 2)。接种处理间叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的含量存在差异显著, M_2 最高, 分别达到 1.26、0.36、1.62 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 较对照提高 41%、50%、43%, 其次是 M_1 、 $M_1 + M_2$ 。处理 M_2 、 M_1 与处理 $M_1 + M_2$ 和 CK 的类胡萝卜素的含量(表 2)表现出显著差异。

M_2 、 M_1 与 CK 的叶面积存在显著差异 ($P < 0.05$), 分别高于 CK 0.11、0.1 cm^2 , 接种组间不存在显著差异(表 2)。 M_2 、 M_1 、 $M_1 + M_2$ 与 CK 的净光合速率间存在显著差异 ($P < 0.05$), $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > \text{CK}$, 分别较对照提高了 86.35、75.03、47.72 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明接种褐环乳牛肝菌与牛肝菌-99 提高了油松幼苗进行光合作用的速率(表 2)。接种组间也存在显著差异。

接种处理的气孔导度差异显著(表 3), M_2 最大, 较对照增加了 7.81 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 接种组间差异不显著 ($P < 0.05$)。说明接种褐环乳牛肝菌与牛肝菌-99 可以影响油松幼苗调节叶片气孔的张开程度, 进

而调节油松幼苗的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用。

Table 2. The effect of mycorrhiza on the chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *P. tabulaeformis* seedlings
表 2. 接菌处理对油松幼苗叶绿素含量和光合特性的影响

处理 Treatment	叶绿素 a Chl a (mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 b Chl b (mg·g ⁻¹ FW)	类胡萝卜素 Car Chl (mg·g ⁻¹ FW)	总叶绿素 Total Chl (mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 a/b Chl a/ Chl b	叶面积 Leaf area (cm ²)	净光合速率 P _n (μmol CO ₂ m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 Cond (mmol H ₂ O m ⁻² ·s ⁻¹)	蒸腾速率 Tr (mmol H ₂ O m ⁻² ·s ⁻¹)
CK	0.89 ± 0.01d	0.24 ± 0.01d	0.21 ± 0.02b	1.13 ± 0.01d	3.66 ± 0.01b	0.36 ± 0.03b	5.54 ± 0.21d	0.48 ± 0.09b	0.02 ± 0.04c
M ₁	1.20 ± 0.02b	0.32 ± 0.02b	0.26 ± 0.01a	1.51 ± 0.01b	3.74 ± 0.01c	0.46 ± 0.001a	80.57 ± 4.04b	7.58 ± 0.6a	0.31 ± 0.02ab
M ₂	1.26 ± 0.02a	0.36 ± 0.01a	0.28 ± 0.02a	1.62 ± 0.01a	3.51 ± 0.33a	0.47 ± 0.03a	91.89 ± 3.51a	8.29 ± 0.71a	0.34 ± 0.03a
M ₁ + M ₂	1.10 ± 0.15c	0.30 ± 0.03c	0.22 ± 0.01b	1.36 ± 0.01c	3.50 ± 0.02c	0.40 ± 0.02ab	53.26 ± 3.67c	6.37 ± 0.88a	0.23 ± 0.03b

注: 平均值 ± 标准误。同列中不同字母表示不同处理间的同一指标数据存在显著差异($P < 0.05$)。

Table 3. The effect of mycorrhiza on the activity of rhizospheric soil enzymes of *P. tabulaeformis* seedlings
表 3. 接菌对油松幼苗根际土壤酶活性的影响

	脲酶 Urease (mg NH ₄ ⁺ -N/(100 g·3 h))	过氧化氢酶 Catalase (mg H ₂ O ₂ g ⁻¹)	蔗糖酶 Saccharase (酚 mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase (酚 mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	总磷酸酶 Total phosphatase (酚 mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
Ck	4.77 ± 0.17c	0.33 ± 0.01d	3.70 ± 0.03d	2.58 ± 0.15d	2.78 ± 0.11d
M ₁	5.71 ± 0.06b	0.68 ± 0.01b	4.54 ± 0.06b	4.11 ± 0.02b	4.60 ± 0.03b
M ₂	7.72 ± 0.44a	0.93 ± 0.01a	6.45 ± 0.07a	5.37 ± 0.07a	5.91 ± 0.11a
M ₁ + M ₂	5.54 ± 0.11bc	0.49 ± 0.02c	4.24 ± 0.05c	3.41 ± 0.09c	3.59 ± 0.04c

注: 平均值 ± 标准误。同列中不同字母表示不同处理间的同一指标数据存在显著差异($P < 0.05$)。

接种菌剂褐环乳牛肝菌与牛肝菌-99 显著提高了油松幼苗的蒸腾速率, $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > CK$, 较对照分别提高了 0.32、0.29、0.21 mmol H₂O m⁻²·s⁻¹, 说明接种外生菌根真菌可以提高油松幼苗的蒸腾速率, 促进植株的蒸腾作用。

3.4. 接菌处理对油松幼苗根际土壤酶活性的影响

土壤脲酶活性在不同接菌处理间差异显著, 处理 M₂ 显著高于其他处理。脲酶的活性: $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > CK$, 分别为: 7.7167、5.7133、5.5467、4.7733 mg NH₄⁺-N·g⁻¹·d⁻¹; 脲酶活性提高率为: 16%~62%。过氧化氢酶的活性: $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > CK$, 分别为: 0.9304、0.6838、0.4986、0.3337 mg H₂O₂ g⁻¹; M₂ 比对照提高了 178.85%, 其他接种处理提高率为: 49%~104%。

蔗糖酶的活性: $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > CK$, 分别为: 6.4523、4.537、4.2412、3.6965 mg 葡萄糖·24 h, 接种处理提高率为: 74.55%、22.74%和 14.74%。碱性磷酸酶的活性为: $M_2 > M_1 > M_1 + M_2 > CK$, 分别为 5.3269、4.1137、3.4087、2.5832 mg/g。接种处理提高率为: 106.2%、59.24%和 31.95%。

4. 讨论

排土场的植被恢复受到多方面因素的制约。排土场的建设彻底改变了矿区的土壤结构, 土壤养分和土壤酶活性极低, 不利于复垦植物的生长。

接种牛肝菌-99、褐环乳牛肝菌提高了排土场土壤中油松幼苗的存活率、生物量, 促进幼苗的生长, 增加植物体内干物质的积累, 这与韩桂云等(2002)、王艺(2013)、张文泉等(2013)的研究结果相似。其中,

褐环乳牛肝菌的促生作用较为明显，油松幼苗对其具的菌根依赖性较高。

接菌处理显著提高了油松幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素的含量，增加了幼苗叶片中的光合色素含量。同时，两种外生菌根真菌还提高了幼苗的叶面积、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，有利于植物进行光合作用。这与高悦等(2010) [21]、Choi DS (2005) [22] 和宋薇(2011) [23]的研究结果基本一致。

土壤酶活性常被用来表征土壤养分状况、微生物代谢活动等。退化土壤中土壤酶活性的变化可以反映土壤的熟化程度。本研究发现幼苗根际的土壤酶活性在接菌组中显著提高，其中过氧化氢酶活性提高率最高，为 49%~104%，其次为碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶。M₂ 接种效果最好，对土壤酶活性的提高最显著。排土场土壤中生长的油松幼苗根际的土壤酶活性的提高，可以说明这两种外生菌根真菌有助于改善排土场土壤环境，促进土壤熟化。

5. 结论

本研究发现接种褐环乳牛肝菌后，较对照比较，油松幼苗的存活率提高了 30%~48%、生物量提高了 30.92 mg~160.56 mg；幼苗的叶绿素含量提高了 41%、50%、43%；净光合速率明显升高了 86.35、75.03、47.72 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；蒸腾速率分别提高了 0.21~0.29 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；根际土壤酶活性显著提高，脲酶活性提高率为 16%~62%。过氧化氢酶的活性提高了 49%~178.85%。蔗糖酶的活性提高了 14.74%~74.55%。碱性磷酸酶的活性提高了 31.95%~106.2%。说明接种外生菌根真菌有助于排土场土壤中油松幼苗的生长，可以促进排土场植被恢复的进程。

基金项目

国家重点研发计划课题：深部煤矿安全绿色开采理论与技术(2016YFC0600708)；国家能源集团科技创新项目：“煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室—神东矿区采动破坏岩土的自修复及其环境效应(GJNY-18-77)；神东科技创新项目：神东采煤沉陷区生态系统稳定性研究(201691548939)。

参考文献

- [1] Mukhopadhyay, S., Maiti, S.K. and Mastro, R.E. (2013) Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for Screening of Tree Species for Reclamation of Coal Mine Degraded Land. *Ecological Engineering*, **57**, 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.017>
- [2] Josa, R., Jorba, M. and Vallejo, V.R. (2012) Opencast Mine Restoration in a Mediterranean Semi-Arid Environment: Failure of Some Common Practices. *Ecological Engineering*, **42**, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.020>
- [3] Zhao, Z., Bai, Z., Zhang, Z., et al. (2012) Population Structure and Spatial Distributions Patterns of 17 Years Old Plantation in a Reclaimed Spoil of Pingshuo Opencast Mine, China. *Ecological Engineering*, **44**, 147-151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.018>
- [4] Smith, S.E. and Read, D.J. (2008) Mycorrhizal Symbiosis. 3rd Edition, Academic Press, New York.
- [5] Simard, S.W., Perry, D.A., Jones, M.D., et al. (1997) Net Transfer of Carbon between Ectomycorrhizal Tree Species in the Field. *Nature*, **388**, 579-582. <https://doi.org/10.1038/41557>
- [6] 张文泉, 闫伟. 外生菌根菌对樟子松苗木生长的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(5): 998-1003.
- [7] 王艺, 丁贵杰. 水分胁迫下外生菌根对马尾松幼苗养分吸收的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 227-233.
- [8] 汤跳华. 接种外生菌根菌对白皮松生长促进作用的研究(英文) [J]. 农业科学与技术(英文版), 2013, 14(7): 1005-1007+1020.
- [9] 王艺, 丁贵杰. 外生菌根对马尾松幼苗生长、生理特征和养分的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 97-102.
- [10] 张妍. 外生菌根菌在杨树生产中的研究现状[J]. 中国林副特产, 2020(2): 80-82.
- [11] 黄艺, 姜学艳, 梁振春, 等. 外生菌根真菌接种和施磷对油松苗木抗盐性的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(4):

622-625+640.

- [12] 王明霞, 黄建国, 袁玲, 等. 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3675-3679.
- [13] 韩桂云, 孙铁珩, 李培军, 等. 外生菌根真菌在大型露天煤矿生态修复中的应用研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1150-1152.
- [14] 李敏, 闫伟. 褐环乳牛肝菌在液体摇瓶培养过程中菌丝体活力指标的筛选研究[J]. 华北农学报, 2007, 22(5): 176-179.
- [15] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇禄. 菌根研究及应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [16] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [18] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
- [20] 弓明钦, 王凤珍, 羽陈, 等. 西南桦对菌根的依赖性及其接种效应研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(1): 8-14.
- [21] 悦高, 吴小芹. 6种外生菌根菌对3种松苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 10-12.
- [22] Choi, D.S., Quoreshi, A.M., Maruyama, Y., *et al.* (2005) Effect of Ectomycorrhizal Infection on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Pinus densiflora* Seedlings Grown under Elevated CO₂ Concentrations. *Photosynthetica*, **43**, 223-229. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0037-7>
- [23] 宋微, 吴小芹. 外生菌根真菌对-NL-895 杨_光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1474-1478.