

外生菌对植物光合日变化的通径分析——以樟子松为例

申慧慧, 毕银丽*, 王志刚, 赵新伟, 庄超然 (中国矿业大学(北京), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 [目的]揭示樟子松光合日变化特征及影响因子之间的作用关系。[方法]通过研究4年树龄的樟子松光合日变化特征,设置接种彩色豆马勃菌 [*Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker & Couch] (接菌组) 和不接菌 (对照组) 2种处理,采用便携式光合测定仪测定樟子松 08:00—18:00 的净光合速率 (Pn) 及其参数,研究其光合日变化特征。[结果]对照组和接菌组的 Pn 日变化绘制的都是“双峰”曲线。对照组的 Pn 是 0.89~6.67 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 接菌组的 Pn 是 0.51~10.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值均出现在 18:00, 最大值均出现在 09:00。接菌组 Pn 的日均值显著大于对照组。影响 Pn 的环境因子存在共线关系。得到多元逐步线性回归方程, 对照组: $P_n = -120.96 + 63.083\text{Cond} - 0.157\text{Ta} + 8.06\text{Ls} + 0.001\text{PAR} - 0.05\text{Ca} + 1.644\text{RH}$ ($R^2 = 82.9, F = 161\ 279.83$); 接菌组: $P_n = 5\ 910.823 + 92.104\text{Cond} - 11.807\text{Ta} + 12.622\text{Ls} - 0.006\text{PAR}$ ($R^2 = 0.92, F = 2\ 045.23$)。通过通径分析得到对照组环境因子对 Pn 的通径系数 (直接作用) 的顺序是 $\text{Cond} > \text{Ta} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ca} > \text{RH}$, 间接通径系数 (间接作用) 的顺序是 $\text{RH} > \text{PAR} > \text{Ta} > \text{Ca} > \text{Ls} > \text{Cond}$; 接菌组环境因子对 Pn 的通径系数大小顺序是 $\text{Cond} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ta}$; 间接通径系数顺序是 $\text{Ls} > \text{PAR} > \text{Cond} > \text{Ta}$ 。接菌组 RH, Ca 不是限制因子。[结论]试验结果为不同处理下影响 Pn 的主导因素研究提供了参考。

关键词 樟子松; 光合日变化; 彩色豆马勃菌; 多元线性回归; 通径分析

中图分类号 X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)13-0001-03

Path Analysis of Diurnal Variation of Photosynthesis in Plants with Ectomycorrhizal Fungi—For Example *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.

SHEN Hui-hui, BI Yin-li*, WANG Zhi-gang et al (State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract [Objective] The aim was to reveal the relationship between diurnal variation of photosynthesis in *Pinus sylvestris* and impact factors. [Method] We used portable Pn instrument to determinate the net photosynthetic rate and its parameters of 4 years old *Pinus sylvestris* var. *mongolica* between 08:00 and 18:00, and studied the photosynthetic diurnal variation characteristics of natural group and inoculated with *Pisolithus tinctorius* group. [Result] The photosynthetic diurnal variation characteristics of the control group and the bacteria group were “bimodal curve”. The Pn range of the control group was 0.89–6.67 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and the range of Pn was 0.51–10.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; the minimum value appeared at 18:00, and the maximum value appeared at 09:00. There were collinear relationship of the environmental factors that effected Pn. Multiple linear regression equations for the control group was: $P_n = -120.96 + 63.083\text{Cond} - 0.157\text{Ta} + 8.06\text{Ls} + 0.001\text{PAR} - 0.05\text{Ca} + 1.644\text{RH}$ ($R^2 = 0.92, F = 161\ 279.83$), and the inoculated with *Pisolithus tinctorius* group was: $P_n = 5\ 910.823 + 92.104\text{Cond} - 11.807\text{Ta} + 12.622\text{Ls} - 0.006\text{PAR}$ ($R^2 = 0.997, F = 2\ 045.23$). Through path analysis about the impact of environmental factors on net photosynthesis rate could get the order of path coefficient for the control group was $\text{Cond} > \text{Ta} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ca} > \text{RH}$, and the order of indirect path coefficient was $\text{RH} > \text{PAR} > \text{Ta} > \text{Ca} > \text{Ls} > \text{Cond}$; the order of path coefficient for the inoculated with *Pisolithus tinctorius* group was $\text{Cond} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ta}$, and the order of indirect path coefficient was $\text{Ls} > \text{PAR} > \text{Cond} > \text{Ta}$. The RH and Ca of *Pisolithus tinctorius* group were not limiting factors. [Conclusion] The results provide reference for study on dominant impact factor of Pn under different treatments.

Key words *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.; Photosynthetic diurnal variation; *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker & Couch; Multiple linear regression; Path analysis

光合作用是植物最基本的生命活动,对植物光合的研究势必成为人类的重要课题^[1]。在陕西省神木县大柳塔镇,采煤活动造成的沉陷地土壤结构不良,水分短缺,养分贫瘠,原有立地条件遭到极大破坏^[2]。改善采煤沉陷地的植物及其功能成为迫在眉睫的任务^[3-4]。樟子松与外生菌根菌联系十分紧密,在自然状态下,樟子松在没有外生菌根的状态下是无法生存的^[5]。自1955年在科尔沁沙地南缘成功人工引种樟子松造林以来^[5],樟子松以其耐寒、抗旱、耐贫瘠、常绿及防风等生长特性,而且是材质佳的木材,针叶有较高的营养价值等经济特性,使其成为我国干旱半干旱地区重要的造林树种之一^[6-7]。人们已对人工种植的樟子松进行了广泛的研究,主要从林下植被^[7]、蒸腾作用^[8-9]、土壤理化性质^[7]、光合生理^[6]、微环境改良^[10]、光合生产^[11]、耐旱生理^[12]、生境差异^[13]等角度进行探讨。目前,人们对影响植物

净光合速率研究方法也不仅仅局限在相关性分析、回归方程的建立上,而是将净光合速率与环境因子、生态参数之间的关系通过更具体的数据表达出来,如灰色关联度分析^[14]、通径分析^[15]和主成分分析等。笔者将复垦植被樟子松作为研究对象,通过通径分析方法对樟子松日光合特征及主要环境因子进行了研究,得到具有环境因子对樟子松净光合速率的直接和间接作用系数,揭示了其光合日变化特征及影响因子之间的作用关系,以期对樟子松光合作用研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验基地在陕西省榆林市神木县大柳塔镇东山煤矿开采沉陷区,处于黄土高原沟壑区向毛乌素沙漠的过渡地带。地理坐标为 110°16'44" E, 39°17'49" N, 平均海拔 1 255 m, 年均气温 7.3 °C, 年降水量 368 mm 左右,主要集中在 7—9 月, 年均蒸发量 1 319 mm, 属于干旱半干旱地区^[3]。2012 年 4 月人工种植的樟子松 (株高 1 m, 3 m × 2 m) 4 hm², 分别设不接菌 (对照组) 和接菌彩色豆马勃菌 [*Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker & Couch] (接菌组) 2 种处理。

对比樟子松对照组和接菌组的土壤和植物根系的基本

基金项目 国家自然科学基金项目 (51574253)。

作者简介 申慧慧 (1990—), 女, 河南新密人, 硕士研究生, 研究方向: 矿山环境修复与土地复垦。* 通讯作者, 博士生导师, 从事微生物在矿区生态重建研究。

收稿日期 2017-03-24

指标(表1),接菌组接种彩色豆马勃菌的菌根侵染率和菌丝密度显著大于对照组。接菌组 pH 显著小于对照组,因为菌根可以弱化土壤的碱性环境。电导率、速效磷、土壤含水量、

碱解氮和有机质等指标,接菌组均大于对照组。接种彩色豆马勃菌不仅提高了对樟子松生存必需的外生菌的数量,还改善了贫瘠的土壤质量,利于樟子松及其林下植物的生长。

表1 土壤和根系的基本情况

Table 1 The basic information of the soil and root

分组 Groups	侵染率 Infection rate %	菌丝密度 Mycelium density m/g	pH	电导率 Electrical conductivity $\mu\text{s}/\text{cm}$	速效磷 Available P mg/kg	土壤含水量 Soil moisture content // %	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen // mg/kg	有机质 Organic matter g/kg
对照组 Control group	38.89 a	1.92 a	7.99 a	51.98 a	2.79	3.24 a	15.08 a	1.66 a
接菌组 <i>Pisolithus tinctorius</i> group	47.78 b	5.02 b	7.74 b	54.08 a	3.23	10.04 b	12.92 a	2.61 b

注:同列数据后不同小写字母表示组间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

1.2 方法

1.2.1 试验设计。2016年4月27日,使用便携式光合测定仪 Li-6400(COR, USA) 2 cm × 6 cm 的透明叶室,监测樟子松叶片光合及各参数。气体 Flow 值为 500 mmol/s。在同天同时段测 2 块样地樟子松的光合日动态,分别测定 2 株的上下共 6 片叶,为了避免植物叶片遮挡光源,测定时尽量保持叶室与自然光线垂直,每次测定结束挂牌标记,便于下次测定。由于樟子松是针状叶片,测定时保持叶片平铺,避免叶片在叶室内互相遮挡,造成结果的巨大误差^[15]。测量结束后,摘取叶片,用方格纸测定叶面积,对光合参数进行计算,得到真实叶片面积对应的净光合速率及各参数。测定的主要参数:樟子松光合特征因子包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Cond)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)、叶片温度(Tleaf);环境因子包括空气温度(Ta)、空气 CO₂ 浓度(Ca)、空气相对湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)。根据光合特征因子和环境因子可计算水分利用效率(WUE) = Pn/Tr 和气孔限制值(Ls) = 1 - Ci/Ca。试验时间是 08:00—18:00,试验测定步长 1 h。

1.2.2 测试方法。在对照组和接菌组光合指标测定结束后,采集樟子松细小根系,由于外生菌根在 20~40 cm 的土壤水热条件下存活,所以采集这部分土壤,分别测定其菌根侵染率和菌丝密度。

1.3 数据处理 利用 SPSS 19.0 对樟子松净光合速率的日变化与参数进行相关性检验;对光合参数进行 One-way ANOVA 比较;对樟子松净光合速率的日变化与参数进行多元逐步线性回归,得到净光合速率与其参数的回归方程,最后通过通径分析,明确各环境因子对净光合速率的直接和间接影响的系数大小关系。所有图表的绘制均由 Excel 2007 软件完成。

2 结果与分析

2.1 樟子松人工林的净光合速率日变化 由图 1 可知,对照组和接菌组的 Pn 日变化绘制出来的曲线都是“双峰”,且峰值和峰谷出现的时间一致。监测区间内,对照组和接菌组的均是 09:00 出现第 1 个峰值,之后开始下降,13:00 到达峰谷,出现“午休”现象;13:00 以后开始增加,在 16:00 出现第 2 个峰值,此后一直下降。对照组和接菌组 Pn 在第 1 个峰值

分别是 6.67 和 10.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对照组和接菌组最小 Pn 分别是 0.89 和 0.51 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在 16:00 出现第 2 个峰值,对照组和接菌组的 Pn 分别是 3.32 和 5.05 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

对照组和接菌组的 Pn 日均值分别为 3.73 和 4.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,接菌组的 Pn 日均值显著大于对照组 ($P < 0.05$)。在 13:00 和 18:00 对照组的 Pn 大于接菌组。其他时间均是接菌组大于对照组。研究认为,接菌组在峰谷时,影响因子限制植物光合的程度大于对照组。接菌组在 09:00 出现第 1 峰值,Pn 显著大于对照组,该点是植物光合速率测定最佳时间,也是植物光合作用的最佳时段,接菌组和对照组环境因子的微小差异可能造成 Pn 的显著差异。因此,应分析 Pn 与环境因子之间的关系。

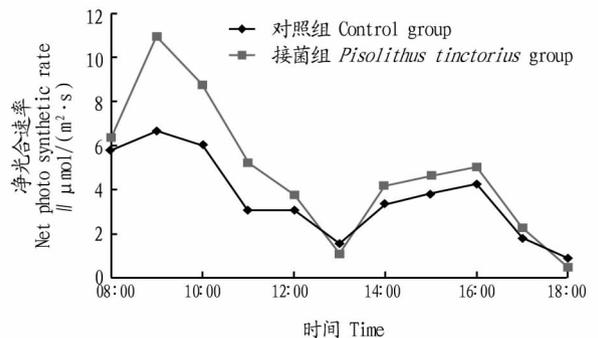


图1 樟子松净光合速率日变化

Fig. 1 Net photosynthetic rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in spring

2.2 影响因子及其相互关系 由相关性分析可知,各环境因子与接菌处理的相关性达显著水平。对照组和接菌组的 Pn 与相应的环境因子(Cond、Ci、Ta、Tr、Tleaf、Ca、RH、PAR、Ls、WUE)之间均存在极显著相关性,各环境因子间也存在极显著相关性。Ta 与 Cond 的相关系数为 0.635, Ls 与 Ci 的相关系数达 0.999, Tleaf 与 Tr 的相关系数达 0.997, RH 影响 Tr 与 Tleaf 的系数均在 0.9 以上。因此,彩色豆马勃菌影响各环境因子,各环境因子之间存在共线性关系。

2.3 多元线性逐步回归分析 通过多元逐步回归分析,剔除对 Pn 解释程度较低的因子,得到最优组合共同解释 Pn。Pn 与 Cond、Ta、Ls、Ca、RH、PAR 的线性回归方程见表 2。F 检验表明,不同样地回归模型的 P 均小于 0.001。由表 2 可

知,对照组和接菌组的回归方程存在差异。对照组的 P_n 由 Cond、Ta、Ls、Ca、RH、PAR 决定,接菌组由 Cond、Ta、Ls、PAR 决定。Cond、Ta、Ls 在 2 个组别里对 P_n 的回归系数都是一致的,分别是正、负、正;而 PAR 在 2 个组别里的回归系数分别是正、负,说明同一个环境因子在不同实地条件下对 P_n 的回

归系数有正有负,可能造成同种植物在同一时间不同处理下 P_n 的差异。对照组的环境因素可以解释 82.9% 的 P_n 变异,接菌组的环境因素可以解释 92.7% 的 P_n 变异。由决定系数可知,接菌组植物叶片光合能力随环境变化的自我调节能力好于对照组,环境解释量高于对照组。

表 2 不同样地净光合速率多元线性回归方程

Table 2 Multiple linear regression equations for net photosynthesis rate in different sites

样地 Sites	回归方程 Regression equations	R^2	F	P
对照组 Control group	$P_n = -120.96 + 63.083\text{Cond} - 0.157\text{Ta} + 8.06\text{Ls} + 0.001\text{PAR} - 0.05\text{Ca} + 1.644\text{RH}$	0.829	161 279.83	0.000
接菌组 <i>Pisolithus tinctorius</i> group	$P_n = 5 910.823 + 92.104\text{Cond} - 11.807\text{Ta} + 12.622\text{Ls} - 0.006\text{PAR}$	0.927	2 045.23	0.000

2.4 通径分析 由“2.2”和“2.3”分析可知, P_n 与各影响因子之间的关系复杂,各影响因子之间存在共线关系,不能用一两种因子简单解释。在相关分析和多元线性回归分析的基础上,将 2 个分析结果结合起来进行通径分析,将影响因子与 P_n 的直接作用和间接作用通过数据清晰地表达出来。

根据表 2 的对照组可得,各环境因子对 P_n 的相关性是 $\text{Ta} > \text{RH} > \text{Cond} > \text{PAR} > \text{Ca} > \text{Ls}$,其中 Ta、PAR 与 P_n 呈显著负相关,其他 4 个因子与 P_n 呈显著正相关;从第 4 列可以得到各因子对 P_n 的直接作用顺序是 $\text{Cond} > \text{Ta} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ca} > \text{RH}$,从第 11 列可得对 P_n 的间接作用顺序是 $\text{RH} > \text{PAR} > \text{Ta} > \text{Ca} > \text{Ls} > \text{Cond}$ 。在间接作用中,Cond 对 P_n 的间接作用主要通过 Ta 实现,Ta 对 Cond 是正向促进;Ls、Ta、PAR 对 P_n 的间接作用主要通过 Cond 实现,Cond 对其是起滞后作用;RH 对 P_n 的间接作用主要通过 Cond、Ta 实现,Cond、Ta 对 RH 是正向促进,而 Ca 起滞后作用;Ca 对 P_n 的间接作用主要通过 Ta 实现,Ta 对 Ca 是正向促进。Cond、Ls、Ta 对 P_n 的直接作用大于间接作用,较多地直接对 P_n 产生影响;而 PAR、RH、Ca 是间接作用大于直接作用,多通过影响其他环境因子间接作用于 P_n 。Cond 是直接作用最显著的因子,同时对其他因子间接影响巨大。RH 是间接作用最显著的因子,正向促进 Cond,抑制 Ta。根据表 3 的接菌组可得,各环

境因子对 P_n 的相关性强弱顺序是 $\text{Cond} > \text{PAR} > \text{Ls} > \text{Ta}$,其中 Cond 与 P_n 呈显著正相关,Ls、Ta、PAR 与 P_n 呈显著负相关。接菌组环境因子对 P_n 的直接作用顺序是 $\text{Cond} > \text{Ls} > \text{PAR} > \text{Ta}$;间接作用顺序是 $\text{Ls} > \text{PAR} > \text{Cond} > \text{Ta}$ 。在间接作用中,Cond 对 P_n 的间接作用主要通过 PAR 实现,PAR 对 Cond 正向促进;Ls 对 P_n 的间接作用主要通过 Cond 实现,Cond 对 Ls 是正向促进;Ta 对 P_n 的间接作用主要通过 Ls 实现,Ls 起滞后作用;PAR 对 P_n 的间接作用主要通过 Cond 实现,Cond 对 PAR 起滞后作用。Cond 对 P_n 的直接作用大于间接作用,较多地直接对 P_n 产生影响;而 Ls、Ta、PAR 是间接作用大于直接作用,间接作用更突出,多通过影响其他环境因子间接作用于 P_n 。Cond 是直接作用最显著的因子,同时对其他因子间接影响巨大。Ls 是间接作用最显著的因子,正向促进 Ta,抑制 Cond。

综上所述可知,对照组 P_n 的主导因子是 Cond 与 RH,而接菌组 P_n 的主导因子是 Cond 与 Ls。可见,不同生境 P_n 的主导因子可能不同,而主导因子可能造成了生境 P_n 的差异。对照组比接菌组的限制因子多 RH 和 Ca,但对对照组环境因子的解释程度小于接菌组。说明在接菌组 RH 与 Ca 不是限制因子,而对对照组的 RH 与 Ca 在光合作用中仍然发挥作用,影响对照组 P_n 的变化。

表 3 环境因子对净光合速率作用的通径分析

Table 3 Path analysis about the impact of environmental factors on net photosynthesis rate

样地 Sites	变量 Variable	与 P_n 的简单相关系数 The simple correlation coefficient with P_n	通径系数 (直接作用) Path coefficient	间接通径系数(间接作用) Indirect path coefficients						合计 Total
				Cond	Ls	Ta	PAR	RH	Ca	
对照组 Control group	Cond	0.804	0.740							0.064
	Ls	0.064	0.290	-0.384	-0.150	0.071	-0.172	0.115	0.024	-0.226
	Ta	-0.945	-0.487	-0.498	-0.042	0.071	-0.053	0.064		-0.458
	PAR	-0.494	0.200	-0.637	0.187	-0.172		-0.019	-0.052	-0.694
	RH	0.826	0.060	0.425	0.047	0.429	-0.063		-0.072	0.766
接菌组 <i>Pisolithus tinctorius</i> group	Ca	0.180	-0.136	-0.130	0.110	0.229	0.077	0.032		0.316
	Cond	0.905	0.745		0.061	0.001	0.098			0.160
	Ls	-0.588	0.272	0.167		0.052	0.097			-0.860
	Ta	-0.234	-0.111	-0.010	-0.128		0.014			-0.123
	PAR	-0.686	-0.201	-0.361	-0.131	0.008				-0.485

3 结论

通过分析樟子松人工林光合日变化及环境因子之间相关关系、多元回归方程和通径分析,得到以下结论:①对照组和接菌组的 P_n 日变化是“双峰”曲线。对照组、接菌组的 P_n

日均值分别是 3.73、4.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。接菌组 P_n 日均值显著大于对照组。②日变化中的环境因子存在共线关系。对照组多元线性回归方程是: $P_n = -120.96 + 63.083\text{Cond} -$

表2 凉水国家级自然保护区白腐真菌优势科统计

Table 2 List of dominant family of white rot fungi in Liangshui National Reserve

科 Family	种数 Species number	种数所占比例 The proportion of species // %
韧革菌科 Stereaceae	5	7.35
刺革菌科 Hymenochaetaceae	1	1.49
灵芝菌科 Ganodermataceae	2	2.99
猴头菌科 Hericiaceae	3	4.48
多孔菌科 Polyporaceae	36	53.73
齿菌科 Hydnaceae	2	2.99
侧耳科 Pleurotaceae	4	5.97
光柄菇科 Pluteaceae	2	2.99
球盖菇科 Strophariaceae	4	5.97
蘑菇科 Psathyrellaceae	1	1.49
银耳科 Tremellaceae	2	2.99
黑胶菌科 Exidia	1	1.49
鬼伞科 Psathyrellaceae	1	1.49
灰锤科 Tulostomataceae	3	4.48
总计 Total	67	100

2.3 凉水国家级自然保护区不同林型中白腐真菌的分布 从白腐真菌分布的植被类型(阔叶林、混交林、针叶林、草地、灌丛)等方面进行统计表明,凉水国家级自然保护区的白腐真菌多数分布在阔叶林、针叶林和混交林中,发生于草地和灌丛的白腐真菌较少。其中,阔叶林中白腐真菌数量和种类最多,有29种,占总数的43.28%;有15种分布在针叶林中,占总数的22.39%;有12种分布在混交林中,占总数的17.91%(图1)。

3 结论与讨论

凉水国家级自然保护区属于初生、次生混交林,为白腐真菌生长提供了良好的环境。凉水国家级自然保护区不同林型环境中的土壤湿度和光照强度有所不同,导致不同林型生长的白腐真菌的种类和数量截然不同,习性相近的白腐真菌常发生于相同林型。凉水国家级自然保护区白腐真菌多分布于阔叶林,其次是混交林和针叶林,上述3种林生长的白腐真菌种类及数量占优势,是白腐真菌的优先选择寄主,而灌丛和林缘草

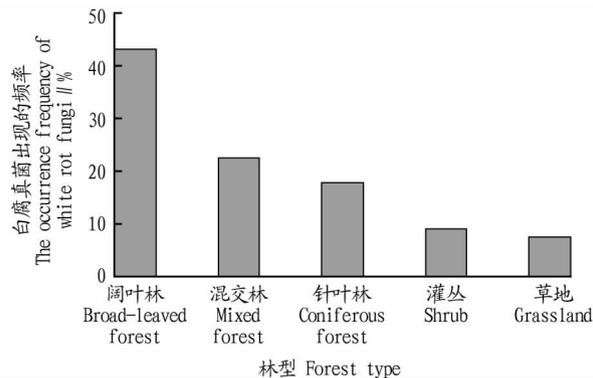


图1 凉水保护区不同林型中白腐真菌生态分布

Fig.1 Ecological distribution of white rot fungi of different forest types in Liangshui National Reserve

地生长的白腐真菌相对较少;凉水国家级自然保护区白腐真菌多样性较高,合理开发出高产漆酶的优良品种,应用于难降解污染物的治理工作中,对促进生态平衡发展将具有重要意义。另外,人类对自然资源的开发活动日益加剧,导致当地生态环境发生变化,直接影响保护区白腐真菌的种质资源。在开发建设进程中,要以“持续发展”为原则,持续利用,采取措施加强对白腐真菌生态环境的保护。

参考文献

- [1] 许云贺,张莉力,王凤娥,等.白腐真菌研究进展[J].畜牧兽医科技信息,2007(12):11-12.
- [2] 黎如.小兴安岭原始阔叶红松林生物量及其空间分布格局[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [3] 余盼,徐锐,赵国柱,等.内蒙古旺业甸林场大型真菌资源调查及其多样性[J].北京林业大学学报,2013,35(6):87-95.
- [4] KIRK P M, CANON P F, MINTER D W, et al. Ainsworth and bisby's dictionary of the fungi[M]. Kew, Surrey: Commonwealth Mycological Institute, 2008:17-19.
- [5] 林晓民,李振岐,侯军.中国大型真菌的多样性[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [6] 卯晓岚.中国大型真菌[M].郑州:河南科学技术出版社,2000.
- [7] 袁明生,孙佩琼.中国大型真菌彩色图谱[M].成都:四川科学技术出版社,2013.
- [8] 林衰退的影响[J].应用生态学报,2007,18(12):2693-2698.
- [9] 吴春荣,金红喜,严子柱,等.樟子松在西北干旱沙区的光合日变化特征[J].干旱区资源与环境,2003,17(6):144-146.
- [10] 林贵刚,赵琼,赵蕾,等.林下植被去除与氮添加对樟子松人工林土壤化学和生物学性质的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1188-1194.
- [11] 赵文智,常学礼.樟子松针叶气孔运动与蒸腾强度关系研究[J].中国沙漠,1995,15(3):241-243.
- [12] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.风沙流持续侵袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响[J].生态学报,2015,35(20):6678-6685.
- [13] 黄刚,赵学勇,苏延桂,等.科尔沁沙地樟子松人工林对微环境改良效果的评价[J].干旱区研究,2008,25(2):212-218.
- [14] 孟鹏,李玉灵,尤国春,等.彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性[J].生态学报,2012,32(10):3050-3060.
- [15] 孟鹏,李玉灵,张柏习,等.沙地彰武松与樟子松苗木抗旱生理特性比较[J].林业科学,2010,46(12):56-63.
- [16] 贾宏涛,赵成义,盛钰,等.干旱地区紫花苜蓿光合日变化规律研究[J].草业科学,2009,26(7):56-60.
- [17] 孙猛,吕德国,刘威生,等.杏净光合速率与相关生理生态参数的灰色关联分析[J].北方园艺,2015,39(16):33-35.
- [18] 靳甜甜,傅伯杰,刘国华,等.不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J].生态学报,2011,31(7):1783-1793.

(上接第3页)

0.157Ta + 8.06Ls + 0.001PAR - 0.05Ca + 1.644RH ($R^2 = 0.829$, $F = 161.279.83$); 接菌组: $P_n = 5.910.823 + 92.104Cond - 11.807Ta + 12.622Ls - 0.006PAR$ ($R^2 = 0.927$, $F = 2.045.23$)。③对照组环境因子与 P_n 相关性最大的是 Ta, 直接作用最大的是 Cond, 间接作用最大的是 RH; 接菌组环境因子与 P_n 的相关性最大的是 Cond, 直接作用最大的是 Cond, 间接作用最大的是 Ls。

参考文献

- [1] 杨雨华,宗建伟,杨风岭.不同生长势马尾松光合日变化研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(8):25-29.
- [2] 毕丽银,邹慧,彭超,等.采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J].煤炭学报,2014,39(S2):490-496.
- [3] 于淼.采煤沉陷区生态演替规律及菌根修复作用与后效研究[D].北京:中国矿业大学,2014:15-69.
- [4] 李林霞,王瑞君,章彬,等.海岛矿区岩质边坡植物群落演替中物种多样性的变化[J].生态学杂志,2014,33(7):1741-1747.
- [5] 朱教君,康宏樟,许美玲,等.外生菌根真菌对科尔沁沙地樟子松人工