

汤智德, 徐彩瑶, 吴承祯, 等. 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗生长及光合作用的影响[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 281–288.



内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗生长及光合作用的影响

汤智德^{1,2}, 徐彩瑶^{1,3}, 吴承祯^{1,2,4}, 洪伟^{1,2}, 谢安强^{1,2*}, 李健^{1,2}, 洪滔^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省高校森林生态系统经营与过程重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 4. 武夷学院, 福建 南平 354300)

摘要: 通过浇施菌液, 接种 5 株内生真菌 NG1、CG5、AJ6、AJ14、AJ13 于低磷胁迫下的杉木幼苗(*Cunninghamia lanceolata*)。接种 15 d 后进行低磷胁迫试验, 测定苗高地径、根冠比、叶绿素含量以及叶绿素荧光等数据, 分析内生真菌对杉木生长和光合作用的影响。结果显示: 5 株内生真菌中, AJ14 菌株对苗高地径和根冠比的综合影响最大, 促生效果最明显; NG1 菌株对根冠比的影响最大。AJ14 菌株在低磷胁迫各个时期提高了杉木幼苗体内的叶绿素含量, 且实际光合效率较高。5 株内生真菌接种的杉木在胁迫后期, F_v/F_m 值小于 CK, 总体减小趋势明显; F_v/F_m 和 F_v/F_m 值高于对照组, 总体升高的趋势明显, 说明内生真菌在促进了植物的光合作用方面有明显优势。结果表明: 5 株内生真菌对杉木的生长和光合作用有较大影响, AJ14、NG1 菌株对杉木的生长和光合作用有明显的促进作用。

关键词: 内生真菌; 杉木; 促生作用; 光合作用; 低磷胁迫

中图分类号: S718.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2019)02-0281-08

The Effect of Endophytic Fungus on the Growth and Photosynthesis of *Cunninghamia lanceolata* under Low Phosphorous Stress

TANG Zhi-de^{1,2}, XU Cai-yao^{1,3}, WU Cheng-zhen^{1,2,4}, HONG Wei^{1,2},
XIE An-qiang^{1,2*}, LI Jian^{1,2}, HONG Tao^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Lab for Forest Ecosystem Processes and Management in Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Wuyi University, Nanping, Fujian 354300, China)

Abstract: Five strains of endophytes fungus, NG1, CG5, AJ6, AJ14, and AJ13 were inoculated into the

收稿日期: 2018-02-21 修回日期: 2018-03-27

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0601304)和福建农林大学科技创新专项基金(118/KFA17048A) Project supported by the National Key Research and Development Program in Thirteen-Five-Year and Fujian Agricultural(2017YFD0601304) and Forestry University Science and Technology Innovation Special Fund Project (KFA17048A)

作者简介: 汤智德(1995—), 男, 硕士生, 主要从事森林培育学研究, 153850426@qq.com; *通信作者: 谢安强, 讲师, 博士, xieanqiang_001@163.com。

seedlings of *Cunninghamia lanceolata* under low-phosphorus stress by spraying with the bacterial liquid. The experiment of low-phosphorus stress was carried out 15 days after inoculation. The data of the seedling-height, diameter, root-shoot ratio, chlorophyll and fluorescence were measured to analyze the effects of the endophytic fungus on the growth and photosynthesis of the seedlings of *C. lanceolata*. The results showed that among the five strains of endophytic fungus, the effect of AJ14 strain on the seedling height and root-shoot ratio of *C. lanceolata* was the most significant, and the effect of promoting growth was the most obvious. The NG1 strain had most significant effect on the shoot-to-shoot ratio of *C. lanceolata*. The AJ14 strain increased the content of chlorophyll in *C. lanceolata* seedlings under low P stress and the photosynthetic efficiency was higher. Inoculated with 5 endophytic fungus F_0 had a decreasing trend at the late stage of stress; and the values of the value of F_0 was lower than that of CK; and the values of F_v/F_0 and F_v/F_m were higher than those of CK. Photosynthesis had obvious advantages. The results showed that: 5 endophytic fungus have a significant impact on the growth and photosynthesis, AJ14 and NG1 strains have an obvious promotion effect on the growth and photosynthesis of *C. lanceolata*.

Keywords: endophytic fungus; *Cunninghamia lanceolata*; growth; photosynthesis; low phosphorous stress

磷元素(Phosphorous)在植物体内是磷蛋白和磷脂等化合物及植物生理过程的组成成分,其含量直接影响了植物的生长发育情况和营养代谢过程^[1-2]。我国缺磷土地约占耕地总面积的74%,亚热带土壤存在普遍的缺磷现象^[3]南方地区的酸性红壤和赤红壤缺磷尤为明显,土壤中存在大量难溶性磷盐,植物难以直接吸收利用,植物缺磷后会产生缺磷症状,因此土壤缺磷是限制农林业发展的重要因素^[4-6]。

植物内生真菌(Endophytic fungus)的研究早在20世纪末期就已经开始^[7],已发现固氮、磷、钾以促进植物生长的促生菌^[8],用于森林保护的生防菌^[9],提高植物抗性的益生菌^[10]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)具有生长速率快、成材质量高等特性^[11],是我国南方人工林和经济林的主要树种。为缓解土壤地力衰退、营养缺乏等问题,提高杉木人工林可持续生产力,我国学者从混交、轮栽、改善林地结构、微生物处理和养分管理等展开研究^[12-13]。在低磷胁迫下接种内生真菌对杉木生长和光合作用的影响研究较少,为此,本文选取低磷胁迫下的杉木作为研究对象,通过试验采集苗高、地径、生物量、叶绿素含量以及叶绿素荧光等数据,分析内生真菌对杉木生长以及光合作用的影响,为内生真菌提高植物抗逆性、促进生长和更加充分利用微生物资源提供理论基础。

1 试验地概况

试验于福建农林大学中的福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室田间试验地进行。其位于25°15'~26°39'N, 118°08'~120°31'E,夏季高温多雨,冬季温和少雨,属于亚热带季风气候。年均温20~25℃,年相对湿度约77%,年均降水900~2100mm。极端温度最高42.3℃,最低-2.5℃。

2 材料和方法

2.1 试验材料

试验采用土培盆栽,所用杉木幼苗为福建省林科院提供的3月生杉木组培苗。

2.2 试验方法

选择长势一致的苗木定植于直径15cm,高10cm的塑料盆中,每盆放入经甲醛熏蒸的无菌黄心土约3kg。经过两个月的恢复性生长后在开始接种试验。利用上述试验获得的5个菌种,制备等浓度的100mL菌液连续3d分浇灌杉木根际,设置5个重复,并设置水溶液为空白对照^[14]。接种15d后进行低磷胁迫试验处理。

2.2.1 菌液制备 5株供试菌株:无柄盘菌属 *Pezizula* sp.(NG1),毛霉属 *Mucor* sp.(CG5),拟青霉属 *Paecilomyces* sp.(AJ6),丝蕈霉属 *Papulospora* sp.(AJ14),青霉属 *Penicillium* sp.(AJ13)。其中菌株AJ6已获得国家发明专利,保藏在中国普通微生物菌种保藏管理中心,专利名称:一株能促进杉木磷吸收的内生真菌,保藏编号:No.9186。

制备等浓度的100mL菌液:在50mL的液体培养基中接入上述的供试菌株,经过恒温振荡培养箱培

养72 h,按十倍稀释法将浓度调至 5.5×10^6 cfu/mL。

2.2.2 低磷胁迫设计 低磷胁迫采用 KH_2PO_4 。本试验设计了正常条件48 mg/kg、轻度胁迫24 mg/kg、中度胁迫12 mg/kg、重度胁迫0 mg/kg 4个磷处理水平,对照组浇水,每个水平5个重复^[15]。盆栽基质土壤为黄心土,经测定,PH值为4.50、有机质21.82 mg/g、全氮0.32 mg/g、水解氮0.11 mg/g、全磷0.40 mg/g、有效磷0.004 1 mg/g、全钾12.47 mg/g、速效钾0.03 mg/g。

2.3 生理指标测定方法

2.3.1 苗高地径测定 钢尺测定苗高,数显游标卡尺测定地径。

2.3.2 叶绿素含量测定 叶绿素含量测定参考舒展等^[16]的实验方法。

2.3.3 叶绿素荧光特性测定 叶绿素荧光参数方法参考徐德聪等^[17]的实验方法。

2.3.4 生物量测定 生物量的测定方法参考欧静等^[18]的实验方法。本试验中根冠比指标采用植株干物质的质量比。地面以下,主要是根系,为地下部分;地面以上,主要是茎和叶,为地上部分。

2.4 数据处理分析

数据整理与初步处理采用Excel2010,作图采用Origin9.0,数据的统计分析采用SPSS21.0。

3 结果与分析

3.1 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗生长的影响

从表1中可知,内生真菌对低磷胁迫下杉木的苗高地径有显著影响。正常条件下,接种AJ14菌株的杉木幼苗的苗高和地径在胁迫期间总增长率最大,为10.06%和12.66%。重度胁迫条件下,接种NG1和AJ14菌株的幼苗在胁迫期间对苗高增长率分别为5.64%和4.92%,明显大于其他和对照组;接种AJ6菌株的杉木幼苗在胁迫期间地径的总增长率最大,为7.72%。

由图1可知,在低磷胁迫下,内生真菌对植物的生物量有明显的影响。根系是植物面对胁迫环境最先进行反应的器官,笔者通过测定根系生物量来分析植物根系在低磷胁迫下的适应机制^[19]。在胁迫阶段,CK根系生物量呈现上升再下降的趋势,在重度胁迫下有明显下降。生长初期,接种NG1的植株根系反应明显,其值高于CK;在重度胁迫阶段,接种内生真菌的植株高于CK。试验表明,内生真菌积极参与了植株对抗胁迫环境,对生物量的分布也有相应影响。接种NG1和AJ13菌株的幼苗在胁迫期间根冠比随着胁迫程度加重而逐渐变大说明其能够有效促使根系生长以便在环境恶劣情况下获取更多的养分;接种AJ14菌株的幼苗在胁迫期间根冠比较稳定的高于对照组,有逐渐增大的趋势;接种CG5和AJ6菌株的幼苗在胁迫期间根冠比随着胁迫程度加重而呈现波动变化,与对照组差别不大,缓解植物抗低磷环境能力较弱。

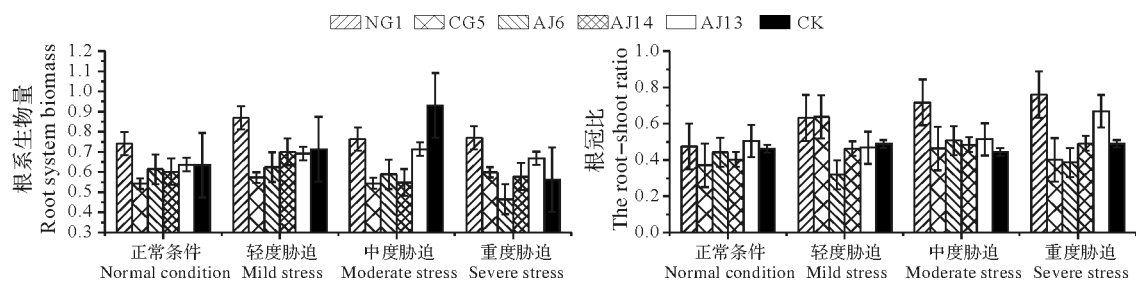


图1 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗根系生物量和根冠比的影响

Fig.1 Effects of different endophytic fungus on root system biomass and the root-shoot ratio in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress

3.2 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素含量的影响

由图2表明,在低磷胁迫过程中,叶绿素含量总体变化趋势是杉木幼苗随着胁迫时间的延长和胁迫程度的加重呈现出先上升再下降的变化趋势。正常条件下,接种AJ13菌株的杉木在胁迫初期效果显著,而接种NG1和AJ14菌株的杉木在胁迫中后期发挥了较好的促进作用,这3种内生真菌促进叶片叶绿素含量的提高且明显高于对照。轻度胁迫过程中,接种AJ14、AJ13菌株的杉木幼苗叶绿素含量高于对照。中度胁迫过程中,接种AJ14菌株的杉木幼苗叶绿素含量高于对照组。重度胁迫中后期,接种AJ14菌株的杉木叶绿素含量高于对照,对胁迫有缓解作用。

表 1 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗苗高地径的平均增长率

Tab.1 Effects of different endophytic fungus on the average increase rate of height and ground diameter in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress

%

胁迫 Stress	菌株号 No.	苗高 Height				地径 Ground diameter			
		正常条件	轻度胁迫	中度胁迫	重度胁迫	正常条件	轻度胁迫	中度胁迫	重度胁迫
		Normal condition	Mild stress	Moderate stress	Severe stress	Normal condition	Mild stress	Moderate stress	Severe stress
胁迫 30 d 30 days of stress	NG1	3.66	3.06	2.15	2.06	2.77	3.31	1.82	0.66
	CG5	1.16	1.06	0.71	0.99	1.76	2.34	1.37	2.30
	AJ6	1.54	0.98	0.51	1.59	3.32	3.80	1.28	3.32
	AJ14	3.90	2.15	0.75	1.85	5.41	2.97	1.47	0.90
	AJ13	2.42	2.83	0.32	0.59	0.74	1.19	2.49	1.78
	CK	3.12	1.53	1.09	0.50	3.98	3.81	2.63	0.97
胁迫 45 d 45 days of stress	NG1	3.53	2.97	2.11	2.08	2.70	2.97	1.34	1.30
	CG5	1.15	1.05	0.28	2.43	1.95	2.28	1.12	2.04
	AJ6	1.52	0.97	0.12	1.56	3.22	3.66	1.26	3.21
	AJ14	3.75	0.87	0.39	1.81	4.91	2.47	1.45	0.67
	AJ13	2.37	2.75	0.32	0.59	0.73	1.17	1.22	1.75
	CK	3.19	0.98	0.81	0.80	3.83	3.91	2.56	1.20
胁迫 60 d 60 days of stress	NG1	2.76	1.93	1.88	1.50	2.19	2.00	0.66	0.43
	CG5	1.14	1.25	1.26	1.06	1.06	1.12	1.11	2.00
	AJ6	1.10	0.96	1.23	1.21	1.20	1.10	1.25	1.20
	AJ14	2.41	1.38	0.75	1.26	2.34	2.21	1.02	1.11
	AJ13	1.14	1.06	1.21	1.03	1.21	0.93	1.20	1.23
	CK	2.67	1.60	1.90	1.49	1.15	1.18	1.14	1.19
合计 Total	NG1	9.94	7.95	6.14	5.64	7.66	8.28	3.82	2.38
	CG5	3.45	3.37	2.26	4.49	4.77	5.74	3.60	6.34
	AJ6	4.16	2.92	1.86	4.36	7.74	8.57	3.79	7.72
	AJ14	10.06	4.39	1.89	4.92	12.66	7.64	3.93	2.69
	AJ13	5.92	6.64	1.85	2.21	2.67	3.29	4.91	4.76
	CK	8.97	4.10	3.80	2.79	8.96	8.90	6.33	3.37

平均增长率(%)=(该时期的测定平均值-前一时期的测定平均值)/前一时期的测定平均值×100%

Average increase rate = (average date of determined stage-average value of the last stage)/average value of the last stage×100%

试验数据表明,接种 AJ14 菌株的杉木在整个胁迫期间对提高其叶绿素含量有明显的促进作用,在正常条件、重度胁迫的中后期和轻度胁迫、中度胁迫中作用显著,CG5 菌株则在重度胁迫的中后期有促进作用。

3.3 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素荧光的影响

如图 3 所示,在不同低磷胁迫下,对照的初始荧光参数 F_0 一致呈现不断上升的变化趋势,接种不同菌株幼苗的初始荧光参数 F_0 均呈先上升后下降的变化趋势。说明在整个胁迫期间对照组受光抑制程度越来越严重,而接种不同菌株的幼苗受抑制程度在胁迫中前期较对照严重,在胁迫后期逐渐得到显著缓解。接种 NG1、AJ13 菌株的杉木幼苗的初始荧光参数 F_0 在胁迫后期低于对照和其他组,能够有效缓解光抑制程度;接种 AJ14 菌株的杉木幼苗的初始荧光参数 F_0 在胁迫后期低于对照,作用稳定,也能够有效缓解光抑制程度。该试验 5 种内生真菌在胁迫后期都能有效缓解光抑制程度,提高杉木幼苗的抗逆性。

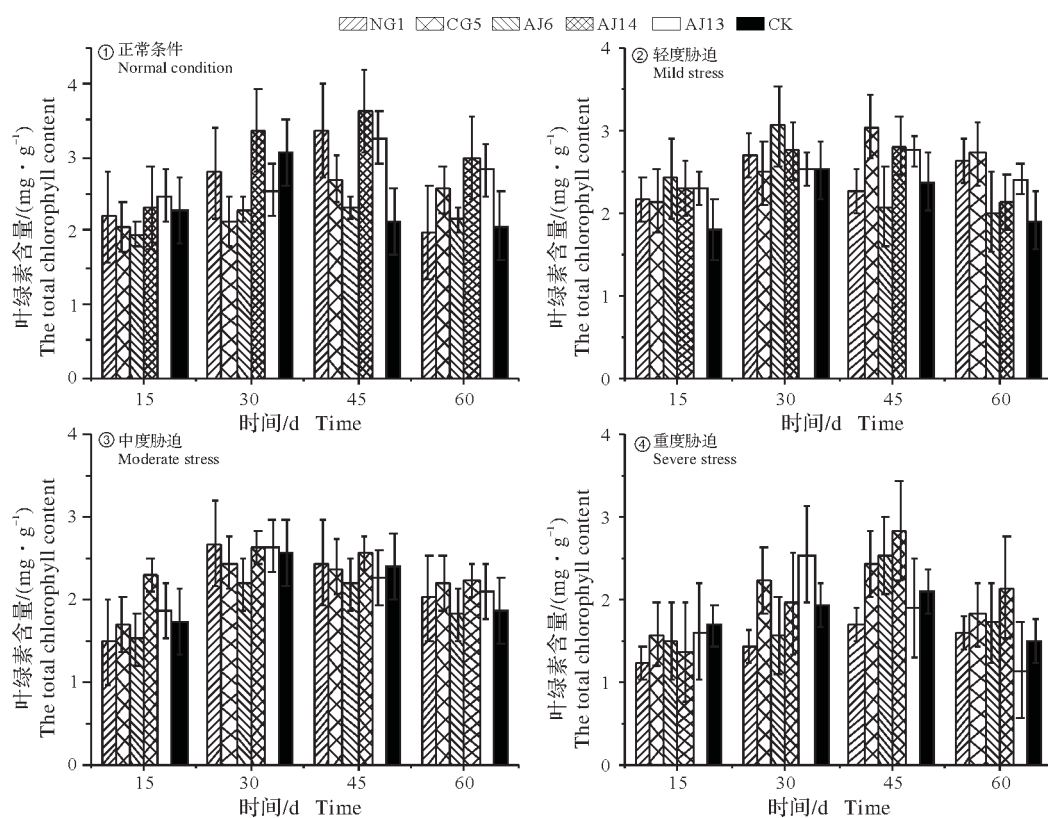
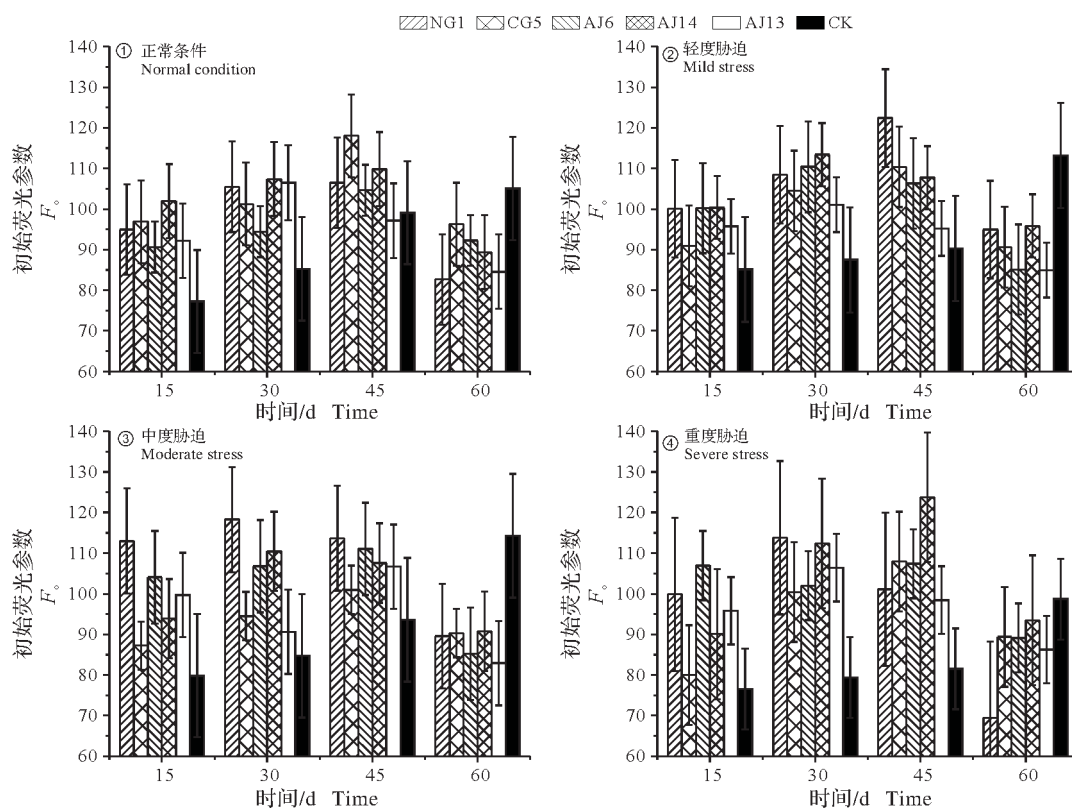


图2 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of different endophytic fungus on the chlorophyll in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress图3 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素荧光参数 F_0 的影响Fig.3 Effects of different endophytic fungus on the F_0 in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress

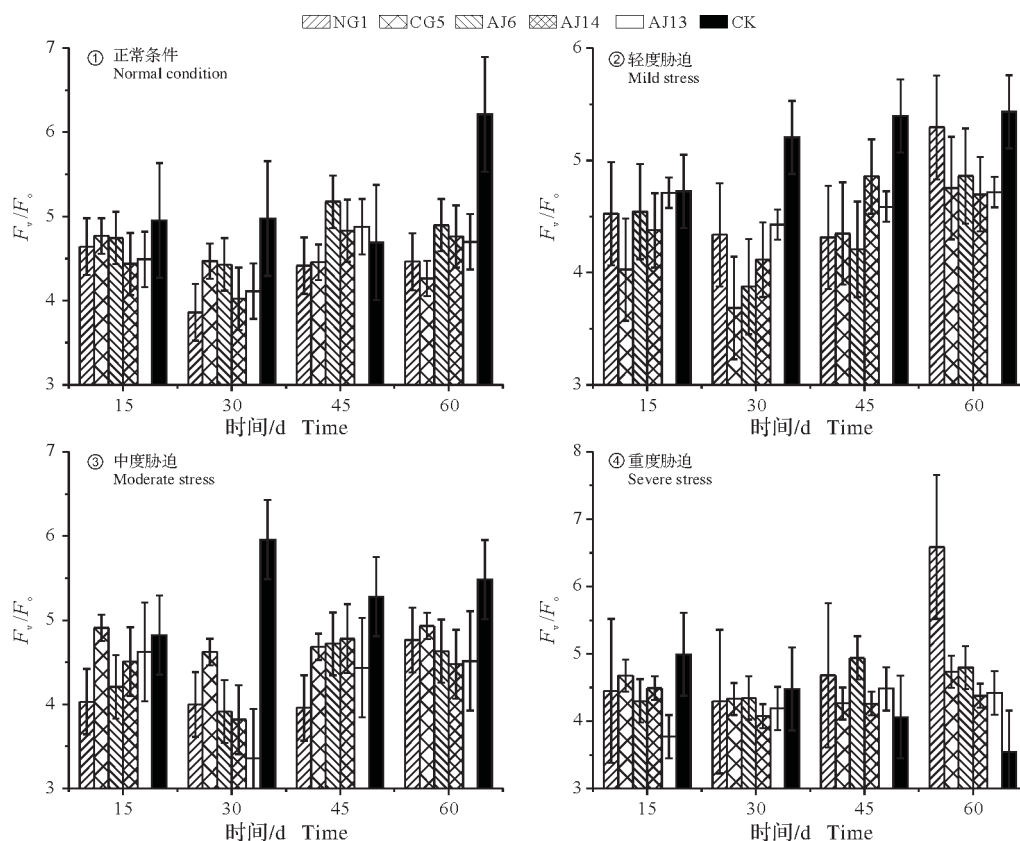


图 4 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素荧光参数 F_v/F_o 的影响

Fig.4 Effects of different endophytic fungus on the F_v/F_o in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress

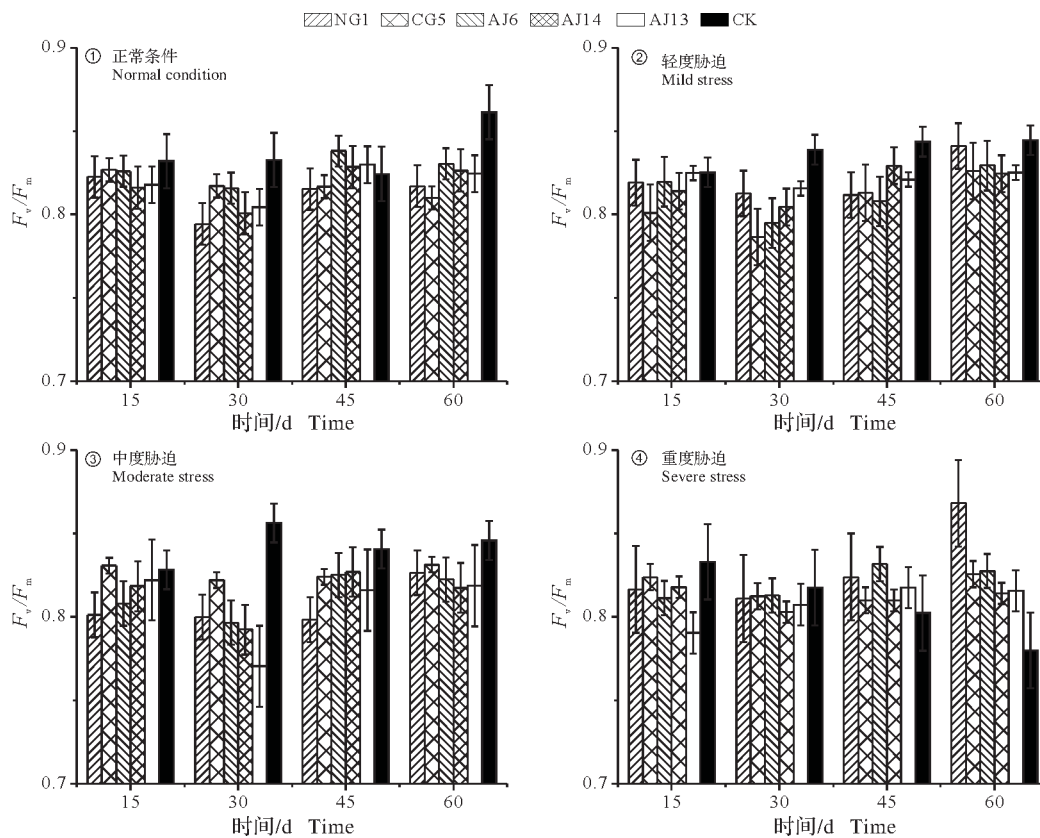


图 5 内生真菌对低磷胁迫下杉木幼苗叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的影响

Fig.5 Effects of different endophytic fungus on the F_v/F_m in *Cunninghamia lanceolata* under low phosphorous stress

如图4和图5所示,在正常条件、轻度胁迫和中度胁迫的情况下,随着胁迫的时间变化,对照组的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 呈现上升趋势,但是在重度胁迫情况下,对照组的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 呈现急速下降趋势,光化学反应受到严重的抑制。与对照相比,接种菌株的幼苗在胁迫前期情况下 F_v/F_o 和 F_v/F_m 都较低,但是试验中使用的5种内生真菌在胁迫过程中呈现上升趋势,重度胁迫的中后期, F_v/F_o 和 F_v/F_m 值比对照组高,说明此时内生真菌促进杉木幼苗光化学反应作用最为显著。

4 讨论和结论

根据前人的大量研究表明,接种内生真菌的植物在促进植物生长和抗逆性方面有明显优势。有菌根的植物比正常生长的更能促进根系对磷元素的吸收,此外真菌比细菌更能有效的将全磷转化为植物能利用的有效磷。例如王莉晶等^[20]研究表明,植物内生真菌可以加速溶解土壤中的全磷,促进植物吸收可溶性磷。方爱国^[21]研究发现,受内生真菌侵染的宿主植物可以提高生长效率和抗逆性,同时受内生真菌侵染的野大麦对氮、磷的吸收和累积有显著的促进作用。本研究发现的结论与上述研究相符。

苗高地径直观的反映出植物受影响程度和生长状况;生物量的分配模式也反映了植物面对胁迫环境,通过调整有机物的比例以适应环境的生存方式^[22]。根系可以在胁迫初期便对缺素进行响应,可以通过自身的生理调节轻微缓解胁迫对植物的危害,但重度胁迫时,接种内生真菌的苗木的值高于CK,说明受内生真菌的影响,苗木可以增强面对胁迫环境的竞争能力。本研究得出,AJ14菌株在低磷胁迫情况下,对促进植物生长综合效果最明显;NG1和AJ13菌株在低磷胁迫下,对根系生长影响显著,提高苗木的根冠比,使苗木及时调整物质的分配,以适应环境提高抗性。

叶绿素含量和叶绿素荧光技术被广泛用于衡量植物的光合作用能力。叶绿素的含量直接影响光合效率和有机物的积累。初始荧光 F_o 的变化情况,可以反映PS II反应中心情况和可能出现的光保护机制^[23]。本试验中5个菌株在低磷胁迫后期的 F_o 值均小于CK,呈现减小趋势,而CK的 F_o 值在增大,说明内生真菌的使用可以影响PSII反应中心活性,提高光合电子的传递速率。 F_v/F_o 用于度量PSII的光能潜在活性, F_v/F_m 是最大光化学效率,在胁迫条件下显著降低,植物对缺素的抗逆性越高, F_v/F_o 和 F_v/F_m 值也越高。本次试验中,5种内生真菌在胁迫后期的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 值均高于对照组,升高的趋势明显,说明接种内生真菌的杉木对低磷胁迫的抗性逐渐增加。NG1菌株显著提升了 F_v/F_o 和 F_v/F_m 值,说明该菌株对杉木提高光合作用有明显效果;AJ14菌株同样有效。但是在胁迫初期和中期其值和CK相近,或许是内生真菌与植物之间的共生关系的建立或者新功能的形成需要一定的时间,在内生真菌与植物的共生关系、内生真菌对促进植物生长和光合作用的作用机制有待进一步的研究探讨。

本试验主要是接种内生真菌在低磷胁迫下对杉木幼苗的生长和光合作用进行研究,后期可以进一步通过对相对电导率、MDA、POD、SOD等生理特性和根系活力、根系有机酸等根系特性的测定,进一步研究内生真菌对植物的影响。

参考文献:

- [1] 陈智裕,吴鹏飞,邹显花,等.低磷胁迫下杉木幼苗生长特性与内源激素的关系[J].林业科学,2016,52(2):57-66.
Chen Z Y, Wu P F, Zou X H, et al. Relationship between growth and endogenous hormones of *Chinese fir* seedlings under low phosphorus stress[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(2): 57-66.
- [2] 俞元春,余健,房莉,等.缺磷胁迫下马尾松和杉木苗根系有机酸的分泌[J].南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(2):9-12.
Yu Y C, Yu J, Fang L, et al. Organic acids exudation from the roots of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* seedlings under low phosphorus stress[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(2): 9-12.
- [3] 刘顺,盛可银,云哲,等.不同林龄陈山红心杉根际与非根际土壤碳、氮、磷化学计量特征[J].江西农业大学学报,2018,40(4):725-733.
Liu S, Shen K Y, Yun Z, et al. Ecological stoichiometry of rhizosphere and non-rhizosphere soil C, N and P of Chenshan-red-heart chinese fir of different stand ages[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(4): 725-733.
- [4] 余利平,田立荣,张春雷,等.低磷胁迫对油菜不同生育期叶片光合作用的影响[J].中国农学通报,2008,24(12):232-236.

- Yu L P, Tian L R, Zhang C L, et al. Effects of low phosphorus stress on photosynthesis of rapeseed leaves in different periods [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(12): 232-236.
- [5] 谢安强, 洪伟, 吴承祯. 内生真菌对尾巨桉幼苗磷元素吸收的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(6): 863-870.
- Xie A Q, Hong W, Wu C Z. Phosphorus absorption with ten fungi inoculants in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(6): 863-870.
- [6] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5578-5587.
- Qiao Z J, Cai K Z, Luo S M. Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5578-5587.
- [7] 王志伟, 纪燕玲, 陈永敢. 植物内生菌研究及其科学意义[J]. 微生物学通报, 2015, 42(2): 349-363.
- Wang Z W, Ji Y L, Chen Y G. Studies and biological significances of plant endophytes [J]. Microbiology China, 2015, 42(2): 349-363.
- [8] Hong L, Zou W X, Meng J C, et al. New bioactive metabolites produced by *Colletotrichum* sp., an endophytic fungus in *Artemisia annua* [J]. Plant Science, 2000, 151(1): 67-73.
- [9] Faissal A, Ouazzani N, Parrado J R, et al. Impact of fertilization by natural manure on the microbial quality of soil: Molecular approach [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2017, 24(6): 1437.
- [10] 李东伟, 徐红梅, 梅涛, 等. 云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2288-2293.
- Li D W, Xu H M, Mei T, et al. Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2288-2293.
- [11] 刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4692-4706.
- Liu L, Xu M K, Wang S L, et al. Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4692-4706.
- [12] 周霆. 中国人工林可持续经营[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- Zhou T. Sustainable management of planted forest in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008.
- [13] 孟庆权, 葛露露, 林宇, 等. 杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1155-1162.
- Meng Q Q, Ge L L, Lin Y, et al. The stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in artificial *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(6): 1155-1162.
- [14] 栗振义, 张绮芯, 全宗永, 等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3898-3907.
- Li Z Y, Zhang Q X, Tong Z Y, et al. Analysis of morphological and physiological responses to low Pi stress in different alfalfas [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3898-3907.
- [15] 韦如萍, 胡德活, 陈金慧, 等. 低磷胁迫下杉木无性系根系形态及养分利用响应研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 1-8.
- Wei R P, Hu D H, Chen J H, et al. Responses of roots morphological characteristics and nutrient utilization to low phosphorus stress among five clones of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(2): 1-8.
- [16] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399-402.
- Shu Z, Zhang X S, Chen J, et al. The simplification of chlorophyll content measurement [J]. Plant Physiology Journal, 2010, 46(4): 399-402.
- [17] 徐德聪, 吕芳德, 刘小阳, 等. 叶绿素荧光测定技术的研究[J]. 安徽农业科学, 2007(35): 11335-11337.
- Xu D C, Lv F D, Liu X Y, et al. Studies on the determination technique of chlorophyll fluorescence [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(35): 11335-11337.
- [18] 欧静, 何跃军, 刘仁阳, 等. 杜鹃花类菌根真菌对桃叶杜鹃幼苗光合性能及叶绿素荧光参数的影响[J]. 微生物学通报, 2013, 40(8): 1423-1436.
- Ou J, He Y J, Liu R Y, et al. Effects of inoculation with different ERM isolates on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameter of *Rhododendron annae* Franch. seedlings [J]. Microbiology China, 2013, 40(8): 1423-1436.