

低磷胁迫下内生真菌对台湾相思叶绿素荧光特性的影响

何晨阳¹, 陈 琰¹, 王耘籽¹, 周艳芬¹, 李 键¹, 吴承祯^{1,2}, 洪 滔^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002;

2. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 为明晰低磷条件下内生真菌对台湾相思(*Acacia confusa*)叶绿素荧光特性的影响, 探讨利用内生真菌提高台湾相思光合特性的可能性, 从台湾相思中分离纯化 4 株强势内生真菌 F(*Filobasidium* sp.)、I(*Penicillium* sp.)、E(*Penicillium* sp.)、N(*Penicillium* sp.) 及 FI 混合菌(质量比 1:1), 并添加于 4 个供磷水平(0, 10, 20, 40 mg/kg)的土培台湾相思幼苗盆钵中。结果表明: 在适量供磷条件下(40 mg/kg), 对照组(未接菌种)的叶绿素含量均总体低于各菌种处理组, 菌株 I、FI 处理组的光合系统 II (PSII) 活性(F_v/F_o)、PSII 最大光能转换效率(F_v/F_m)总体略高于对照组; 轻度磷胁迫下(20 mg/kg), 对照组的叶绿素含量始终低于菌株 E、FI 和 F 处理组, 而不同处理组的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 则总体差异不显著; 重度磷胁迫下(10 mg/kg), 菌株 F、E、N 处理组的叶绿素含量总体较高, 其中菌株 E 处理组的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 始终高于对照组; 无磷处理下(0 mg/kg), 菌株 FI、I 处理组在胁迫中后期的叶绿素含量较高, 菌株 I 处理组的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 始终略高于对照组。综上, 菌株 F、FI 处理对台湾相思叶绿素荧光特性的促进作用最佳, 明确了适合低磷环境促进台湾相思叶绿素荧光特性的菌种, 可为理解内生真菌对台湾相思光合特性的促进机制提供参考, 亦为沿海台湾相思海岸防护林的持续性经营提供新思路。

关键词: 台湾相思; 内生真菌; 低磷; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S 718.81

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2022)05-0872-08

磷元素是植物生命过程中重要的营养元素之一, 其通过参与植物体各部分的生理过程, 调控植物的光合作用^[1], 在碳水化合物、含氮化合物、脂肪、糖类的代谢^[2-4]过程中对植物的信号传导起关键作用, 对植物的生长发育、抗逆性有着重要影响^[5]。现有研究表明磷素的匮乏会导致植物叶片中总氮含量和可溶性蛋白含量下降, 叶片中色素缺乏, 叶绿体结构发生改变^[6], 引起潜在的光氧应激反应, 导致叶绿体中活性氧浓度增加, 损害植物的脂质、蛋白质和核酸, 造成不可逆转的伤害^[7]。人工林因密度种植和连栽^[8], 对土壤有效磷含量需求极大^[9], 而我国南方林区普遍存在土壤磷素矿化现象, 磷素难以被有效利用^[10], 极大地限制了人工林光合效率的提高, 制约着人工林的可持续经营。

台湾相思(*Acacia confusa*)为含羞草科金合欢属常绿乔木, 产于中国台湾, 广泛分布在福建、广东等地

区, 因其具有生长快、耐贫瘠、适应性强的特点, 已取代连栽后防护效益下降的木麻黄林, 逐步成为东南沿海地区海岸防护林的重要改造树种^[11]。现有研究表明, 台湾相思为磷素受限树种^[12], 栽植台湾相思的沙迹地土壤磷素匮乏^[13]。因此, 如何在低磷条件下提高台湾相思对有效磷的利用效率, 以促进其在沿海防护林体系建设中的应用极为重要。

为改善林木应对低磷环境的胁迫, 前人已从植物根系形态^[14]及根系分泌物^[15]、植物生长及生理生化特性^[16]等方面做了大量研究, 虽取得一定成效, 但囿于成本或生境复杂, 目前还未形成低成本的高效方法。因此, 近年来利用微生物与植物互利共生特性来提升植物的环境适应性已成为研究热点, 在杉木筛选及其适应磷胁迫的离子流机制^[17]、丛枝菌根真菌和根际细菌群落的跨界互作网络^[18]、不同混播方式的燕麦

收稿日期: 2021-09-18 录用日期: 2022-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(32071753); 国家重点研发计划(2017YFD0601304); 福建农林大学学科交叉融合推动菌草科学及产业高质量发展项目(XKJC-712021030)

* 通信作者: henrihong@163.com

引文格式: 何晨阳, 陈琰, 王耘籽, 等. 低磷胁迫下内生真菌对台湾相思叶绿素荧光特性的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(5): 872-879.

Citation: HE C Y, CHEN L, WANG Y Z, et al. Effects of endophytic fungi on chlorophyll fluorescence characteristics of *Acacia confusa* under low phosphorus stress[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2022, 61(5): 872-879. (in Chinese)



(*Avena sativa*)与箭筈豌豆(*Vicia sativa*)混植草地对磷利用效率的影响^[19]的研究中,已成功利用微生物提升了磷的利用效率.前人发现利用植物内生真菌能有效提升尾巨桉(*E. urophylla*×*E. grandis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的光合作用效率^[20-22],但对台湾相思是否存在与其内生真菌有互利共生特性,及其对提升植物光合适应性的作用,目前尚未见报道.因此,本研究在前期筛选台湾相思内生真菌^[11]的基础上,通过磷胁迫方式分析台湾相思的光合作用相关指标变化,以解析低磷条件下内生真菌对台湾相思叶绿素荧光特性的影响,初步了解内生真菌与宿主台湾相思协同应对磷素胁迫的生理机制,以期在台湾相思促生工程菌的开发提供参考,亦为东南沿海海岸防护林可持续改造提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 材料

试验用苗为一年生台湾相思幼苗(福建漳州林业局提供),苗木采用土培方式定植于塑料盆(高20 cm、直径21 cm),每盆装3 kg黄壤(土壤类别为二类),等量甲醛熏蒸消毒,定植后缓苗30 d.土壤化学性质经测定,含有机质8.311 mg/g、全氮0.107 mg/g、水解氮0.035 mg/g、全磷0.353 mg/g、有效磷0.019 mg/g、全钾2.889 mg/g、速效钾0.025 mg/g.

试验菌株为前期从台湾相思中筛选并鉴定的溶磷效果较好的4株内生真菌^[11]:丝黑粉菌属F(*Filobasidium* sp.)、青霉属I(*Penicillium* sp.)、青霉属E(*Penicillium* sp.)、青霉属N(*Penicillium* sp.).因预试验中菌株F与I产生较大溶磷圈,故设置菌株FI混合菌组,进一步验证优势菌株结合的溶磷效果.菌种均保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心,F、I、E、N菌种保藏号分别为CGMCC 12102、CGMCC 11914、CGMCC 11913、CGMCC 11907.

1.2 实验设计

1.2.1 菌液制备与接种

将供试菌种F、I、E、N分别接入40 mL的菌液培养基,恒温振荡培养箱中培养48 h,采用血球计数法,用无菌水稀释成密度为 5.5×10^6 mL⁻¹的菌液.FI菌液由F菌液与I菌液按质量比1:1混合制得.连续3 d在苗木根际施加100 mL上述菌液,以加入同体积灭活的稀释培养基溶液为对照(CK),共F、I、E、N、FI、CK 6个处理,每个处理3个重复.

1.2.2 低磷胁迫处理

试验均于玻璃温室内进行,室温18~28℃,湿度75%,光照时长14 h/d.生长季节早晚各淋水1次,每次淋水淋透基质^[23].试验期间均匀浇施1次无磷1/3 Hoagland/7d营养液^[24],每盆每次浇施30 mL^[25].接菌15 d后开始低磷胁迫处理,采用KH₂PO₄作为磷肥,设置4个磷处理水平^[23,26],分别为无磷处理(0 mg/kg)、重度磷胁迫(10 mg/kg)、轻度磷胁迫(20 mg/kg)和适量供磷(40 mg/kg),每个水平3个重复,并分别对应F、I、E、N、FI、CK 6个接菌方式,共计72盆.分别于胁迫30、50、70、90 d时进行叶绿素含量取样测定^[27].

1.3 测定方法

1.3.1 叶绿素含量测定

采用丙酮乙醇提取法测定叶绿素含量^[28],取大小相对一致的健康叶片,洗净吸干水分后,称取0.1 g鲜叶放入试管,加入15 mL混合液(丙酮与乙醇体积比为1:1).在室温下暗反应24 h后,分别于663 nm和645 nm测定上清液的吸光度(A_{663} 和 A_{645}),叶绿素含量(mg/g)计算公式如下:

$$\text{叶绿素含量} = (8.04 \times A_{663} + 20.3 \times A_{645}) \times V / (1000 \times W),$$

式中,V为提取液总体积(mL),W为叶鲜质量(g).各样品重复测定3次后取平均值.

1.3.2 叶绿素荧光特性测定

采用Os-5p型便携式叶绿素荧光仪(Opti-science, USA)于晴朗无云天气连续3 d(上午9:00—11:00)进行3次重复测定:选择植株中上部阳向枝条上展开的叶龄一致的叶片,用暗反应夹对叶片进行暗适应30 min后,测定待测叶片的初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)和可变荧光(F_v),并计算光合系统II(PS II)的活性(F_v/F_0)及最大光能转换效率(F_v/F_m).

1.4 数据处理与分析

数据整理与作图均采用Excel 2007软件,采用SPSS 20.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同处理之间的方差显著性,并用Duncan法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著.

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫下各菌种对叶绿素含量的影响

各菌株处理后台湾相思随胁迫时间增加,叶绿素

含量变化表现出差异性(表 1):无磷处理下,随胁迫时间增加,菌株 I 处理组的叶绿素含量始终保持上升趋势;菌株 FI 与 E 处理组的叶绿素含量均随胁迫时间增加呈先升后降趋势,70 d 时达最高值;其他处理组的叶绿素含量则均在 50 d 时达最低值。

重度磷胁迫下,菌株 F 与 N 处理组的叶绿素含量始终高于 CK 组,随胁迫时间增加总体呈先升后降趋势,70 d 时达最高值;其余组的叶绿素含量也均在 70 d 时达最高值,且高于 CK 组该时间点的值。

轻度磷胁迫下,菌株 F、E 和 FI 处理组的叶绿素含量始终高于 CK 组,其中菌株 F 与 FI 处理组的叶绿

素含量均在 70 d 时达最高值,菌株 E 处理组的叶绿素含量则在 50 d 时达最低值。

适量供磷下,只有菌株 I、N 和 FI 处理组在 30 d 时叶绿素含量低于 CK 组,其他各处理组在各胁迫时间点的叶绿素含量均高于 CK 组,且除菌株 I 处理组外,均在 70 d 时达最高值;菌株 FI 处理组的叶绿素含量在 70 d 时最高,为 3.543 mg/g,较 CK 组该时间点的值高 73.68%。

菌株 FI 处理组在 50 d 的适量供磷下叶绿素含量高于其他处理组,在 70 d 的无磷处理、轻度磷胁迫及适量供磷下叶绿素含量均高于其他处理组,在 90 d 的轻度磷胁迫和适量供磷下叶绿素含量也高于其他处

表 1 不同内生真菌在不同试验天数及不同磷胁迫下对台湾相思幼苗叶片中叶绿素含量的影响
Tab. 1 Effects of different endophytic fungi on chlorophyll contents in the leaves of *A. confusa* seedlings under different experimental days and different phosphorus stress

胁迫条件	菌株	叶绿素含量/(mg·g ⁻¹)			
		30 d	50 d	70 d	90 d
无磷处理	F	2.672*	1.957	2.774	2.855
	I	1.151	2.126	3.025	3.465
	E	1.634	2.003	3.144	2.729
	N	2.088*	1.700	2.921	2.855
	FI	0.877	1.770	3.304	3.146
	CK	1.738	1.782	2.819	2.810
重度磷胁迫	F	1.841*	2.109*	3.279*	2.914
	I	1.035*	1.748	3.034	2.628
	E	2.768*	2.036*	3.227	2.535
	N	2.064*	2.057*	3.225	3.091
	FI	1.108	1.614	2.831	2.471
	CK	1.572	1.662	2.629	2.670
轻度磷胁迫	F	1.799	2.305*	3.274	2.478
	I	1.473*	1.837	2.538*	2.761
	E	2.988*	1.949	2.927	2.745
	N	2.392	1.874	2.760*	2.302
	FI	2.062	2.074	3.644	2.807
	CK	1.558	1.731	2.672	2.427
适量供磷	F	1.951	1.759	2.711*	2.587*
	I	0.869*	1.908	3.070*	3.112
	E	2.187*	1.608*	2.827	2.631*
	N	1.287	1.733	3.411*	2.624*
	FI	1.084	1.926*	3.543*	3.479*
	CK	1.477	1.532	2.040	2.440

注: * 表示在同一供磷水平下菌株处理组与 CK 组相比存在显著差异($P<0.05$).

理组;菌株 F 处理组在 50 d 的轻、重度磷胁迫下叶绿素含量均高于其他处理组,菌株 FI 处理组在 70 d 的轻度磷胁迫下叶绿素含量最高,为 3.644 mg/g.可见,菌株 FI 在适量供磷条件下整个胁迫期均可促进台湾相思叶绿素含量的提高,而菌株 F 和 FI 在低磷胁迫中后期均表现出明显的促进作用.

2.2 低磷胁迫下各菌种对叶绿素荧光特性的影响

植物叶绿素荧光特性参数包含光合作用中许多重要信息,相较于气体交换指标(净光合速率、蒸腾速

率等),这些参数能迅速并且准确地反映植物光合系统的内在特性^[29-30],被视为无损伤探针,广泛应用于植物逆境生理和光合生理研究^[31-32].

2.2.1 对 PSⅡ F_v/F_o 的影响

低磷胁迫下,各菌种处理组幼苗叶片的 PSⅡ F_v/F_o .在相同时间点未产生显著差异($P>0.05$),说明各菌种对 PSⅡ F_v/F_o 的影响较小;在不同的低磷胁迫下,各菌种处理组 50 d 时的 F_v/F_o 最大,且与 30,70 和 90 d 时的 F_v/F_o 相比差异显著($P<0.05$),说明 50 d 时各菌种对 PSⅡ F_v/F_o 的干扰效应最强(表 2).

表 2 不同内生真菌在不同试验天数及不同磷胁迫下对台湾相思幼苗叶片 PSⅡ F_v/F_o 的影响
Tab. 2 Effects of different endophytic fungi on PSⅡ F_v/F_o in the leaves of *A. confusa* seedlings under different experimental days and different phosphorus stress

胁迫	菌株	F_v/F_o			
		30 d	50 d	70 d	90 d
无磷处理	F	4.539 ^{Ca}	6.721 ^{Aa}	4.862 ^{BCa}	5.374 ^{Ba}
	I	4.638 ^{Ca}	6.601 ^{Aa}	5.339 ^{BCa}	5.500 ^{Ba}
	E	4.392 ^{Ba}	6.461 ^{Aa}	4.992 ^{Ba}	5.306 ^{Ba}
	N	4.645 ^{Ba}	6.708 ^{Aa}	5.216 ^{Ba}	5.192 ^{Ba}
	FI	4.474 ^{Ca}	6.852 ^{Aa}	4.985 ^{BCa}	5.539 ^{Ba}
	CK	4.630 ^{Ca}	6.426 ^{Aa}	5.319 ^{Ba}	5.202 ^{Ba}
重度磷胁迫	F	4.670 ^{Ba}	6.553 ^{Aa}	5.242 ^{Ba}	5.023 ^{Bb}
	I	4.491 ^{Ca}	6.529 ^{Aa}	5.067 ^{Ba}	5.429 ^{Bab}
	E	4.785 ^{Ca}	6.662 ^{Aa}	5.337 ^{Ba}	5.423 ^{Bab}
	N	4.546 ^{Ca}	6.686 ^{Aa}	5.339 ^{Ba}	5.509 ^{Ba}
	FI	4.496 ^{Ca}	6.589 ^{Aa}	5.230 ^{BCa}	5.498 ^{Ba}
	CK	4.745 ^{Ba}	6.658 ^{Aa}	4.988 ^{Ba}	5.350 ^{Bab}
轻度磷胁迫	F	4.611 ^{Ca}	6.521 ^{Aab}	4.754 ^{Ca}	5.469 ^{Ba}
	I	4.560 ^{Ca}	6.302 ^{Ab}	5.296 ^{BCa}	5.472 ^{Ba}
	E	4.579 ^{Ca}	6.718 ^{Aa}	5.331 ^{Ba}	5.302 ^{Ba}
	N	4.515 ^{Ba}	6.775 ^{Aa}	4.983 ^{Ba}	5.071 ^{Ba}
	FI	4.524 ^{Ba}	6.691 ^{Aa}	4.930 ^{Ba}	5.330 ^{Ba}
	CK	4.416 ^{Ca}	6.499 ^{Aab}	5.278 ^{Ba}	5.368 ^{Ba}
适量供磷	F	4.803 ^{Ba}	6.619 ^{Aab}	4.749 ^{Ba}	5.111 ^{Ba}
	I	4.423 ^{Ca}	6.713 ^{Aab}	5.340 ^{Ba}	5.448 ^{Ba}
	E	4.479 ^{Ba}	6.660 ^{Aab}	5.342 ^{Ba}	5.251 ^{Ba}
	N	4.528 ^{Ba}	6.953 ^{Aab}	5.332 ^{Ba}	5.285 ^{Ba}
	FI	4.571 ^{Ca}	6.738 ^{Aab}	5.318 ^{Ba}	5.558 ^{Ba}
	CK	4.426 ^{Ba}	6.284 ^{Ab}	5.100 ^{Ba}	5.344 ^{Ba}

注:表中数据为 3 个重复的平均值,不同大写字母表示相同菌种在不同时间差异显著,不同小写字母表示不同菌种在相同时间差异显著($P<0.05$),表 3 同.

2.2.2 对 PS II F_v/F_m 的影响

各处理组 F_v/F_m 在低磷胁迫下的表现如表 3 所示;无磷处理下,菌株 F、N、FI 处理组在 50 d 时 F_v/F_m 显著高于 CK 组($P<0.05$);重度磷胁迫下,仅菌株 FI 处理组在 70 d 时 F_v/F_m 显著高于 CK 组($P<0.05$);轻度磷胁迫下,仅菌株 F 处理组在 70 d 时 F_v/F_m 显著

低于 CK 组($P<0.05$);适量供磷下,菌株 E、N 处理组在 50 和 70 d 时 F_v/F_m 显著高于 CK 组($P<0.05$).
结果表明,接种菌株 N 在无磷处理和适量供磷的中前期对提高台湾相思 PS II F_v/F_m 有明显的促进作用,接种菌株 FI 则在重度磷胁迫的中后期有明显的促进作用.

表 3 不同内生真菌在不同试验天数及不同磷胁迫下对台湾相思幼苗叶片 PS II F_v/F_m 的影响
Tab. 3 Effects of different endophytic fungi on the PS II F_v/F_m in the leaves of *A. confusa* seedlings under different experimental days and different phosphorus stress

胁迫条件	菌株	F_v/F_m			
		30 d	50 d	70 d	90 d
无磷处理	F	0.819 ^{Cab}	0.852 ^{Aab}	0.834 ^{Ba}	0.842 ^{Ba}
	I	0.828 ^{Bab}	0.848 ^{Abc}	0.848 ^{Aa}	0.846 ^{Aa}
	E	0.814 ^{Bb}	0.844 ^{Ac}	0.846 ^{Aa}	0.844 ^{Aa}
	N	0.830 ^{Ca}	0.855 ^{Aa}	0.838 ^{BCa}	0.843 ^{Ba}
	FI	0.826 ^{Bab}	0.854 ^{Aab}	0.831 ^{Ba}	0.846 ^{Aa}
	CK	0.822 ^{Bab}	0.844 ^{Ac}	0.841 ^{Aa}	0.838 ^{Aa}
重度磷胁迫	F	0.829 ^{Bab}	0.847 ^{Aa}	0.838 ^{ABab}	0.833 ^{Bb}
	I	0.820 ^{Bab}	0.846 ^{Aa}	0.841 ^{Aab}	0.844 ^{Aa}
	E	0.840 ^{Ba}	0.852 ^{Aa}	0.845 ^{ABab}	0.843 ^{Ba}
	N	0.832 ^{Cab}	0.850 ^{Aa}	0.842 ^{Bab}	0.846 ^{ABa}
	FI	0.816 ^{Bb}	0.848 ^{Aa}	0.847 ^{Aa}	0.845 ^{Aa}
	CK	0.824 ^{Aab}	0.849 ^{Aa}	0.831 ^{Ab}	0.841 ^{Aab}
轻度磷胁迫	F	0.830 ^{Ba}	0.846 ^{Aab}	0.825 ^{Bb}	0.845 ^{Aab}
	I	0.829 ^{Ba}	0.841 ^{Ab}	0.843 ^{Aa}	0.845 ^{Aab}
	E	0.830 ^{Ca}	0.851 ^{Aa}	0.846 ^{ABa}	0.840 ^{Bb}
	N	0.830 ^{Ba}	0.852 ^{Aa}	0.841 ^{ABa}	0.849 ^{Aa}
	FI	0.831 ^{Ca}	0.850 ^{Aa}	0.842 ^{Ba}	0.842 ^{Bb}
	CK	0.823 ^{Ba}	0.846 ^{Aab}	0.840 ^{Aa}	0.843 ^{Aab}
适量供磷	F	0.827 ^{Ba}	0.848 ^{Aab}	0.836 ^{ABab}	0.835 ^{ABa}
	I	0.823 ^{Ba}	0.851 ^{Aab}	0.842 ^{Aab}	0.844 ^{Aa}
	E	0.829 ^{Ca}	0.853 ^{Aa}	0.849 ^{Aa}	0.839 ^{Ba}
	N	0.830 ^{Ca}	0.856 ^{Aa}	0.848 ^{ABa}	0.840 ^{BCa}
	FI	0.830 ^{Ba}	0.851 ^{Aab}	0.841 ^{ABab}	0.847 ^{Aa}
	CK	0.814 ^{Ba}	0.840 ^{Ab}	0.825 ^{ABb}	0.842 ^{Aa}

2.3 不同叶绿素含量和叶绿素荧光参数的多因素方差分析

以菌株种类、试验天数和胁迫条件为处理因子,对台湾相思的叶绿素含量、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 进行多因素方差分析,结果见表 4:对于叶绿素含量,胁迫条件、菌株种

类与试验天数的两两交互作用均有显著影响($P<0.05$);对于 F_v/F_o ,除试验天数有极显著影响($P<0.01$)外,其他因素均无显著影响;对于 F_v/F_m ,菌株种类和试验天数有极显著影响($P<0.01$),三者交互作用有极显著影响($P<0.05$),其他因素则均无显著影响.

表 4 菌株种类、试验天数和胁迫条件对台湾相思叶绿素含量和叶绿素荧光参数影响的多因素方差分析
Tab. 4 Multivariate analysis of the influence of strain types, test days and stress conditions on the chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence parameters of *A. confusa*

测定指标	F						
	菌株 种类	试验 天数	胁迫 条件	菌株 种类× 试验 天数	菌株× 胁迫 种类× 条件	试验× 胁迫 天数× 条件	试验× 菌株× 胁迫 天数× 种类× 条件
叶绿素含量	5.372**	144.493**	1.781	5.194**	2.107*	2.198*	1.139
F_v/F_o	0.528	289.758**	0.291	0.760	0.383	0.093	0.339
F_v/F_m	8.054**	132.517**	0.327	1.573	1.344	0.910	1.453*

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$.

3 讨论与结论

长期处于低磷胁迫条件下的植物,为维持叶光合作用等生理功能,通过优化叶绿素含量等磷利用机制来适应土壤低磷环境^[33],而叶绿素含量、叶绿素荧光参数是直接影响植物光合作用最重要的生理指标^[34]. 本研究中接种内生真菌能有效缓解低磷条件给台湾相思带来的不良影响,不同程度促进台湾相思幼苗的叶绿素含量增加,其中菌株 F 和 FI 作用相对明显,说明内生真菌可缓解低磷胁迫对台湾相思幼苗叶绿素合成的抑制,通过提高合成叶绿素的能力增强光合作用,这与汤智德等^[21]在低磷胁迫下内生真菌对植物生长及光合作用有正向影响的研究结论相同,暗示内生真菌具有与植物通过互作促进光合作用的能力^[35]. 另有研究表明杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和水稻(*Oryza sativa*)等植物在低磷条件下,接菌苗较无菌苗叶片的叶绿素含量也均有明显提高^[36-37]. 本研究所用的内生真菌是否有助于增加植物表面积吸收磷量,从而增强植物吸收含磷肥料的能力还有待进一步研究.

低磷胁迫对植物光合作用的影响不存在一致性规律,但内生真菌可使宿主所在土壤内的磷元素转化为可利用形式以提高植物抗性^[38]. 本研究中,不同低磷胁迫下,各菌株处理组台湾相思幼苗的 F_v/F_o 无明显差异,但重度磷胁迫下 70 和 90 d 时各菌株处理组的 F_v/F_o 基本大于对照组,可能是 50 d 后各菌株开始发挥明显作用;除适量供磷条件外,90 d 时各菌株处理组的 F_v/F_m 大部分高于对照组,表明接种内生真菌可以缓解低磷胁迫下台湾相思幼苗 PSII 受到的损伤,进而提高光能转化效率. 这与高婷^[39]研究内生真菌感染水稻幼苗后叶片的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 均提高的结果相

似. 已有研究发现非胁迫条件下, F_v/F_m 值的变化很小,一般为 0.75~0.85^[40],本研究中台湾相思幼苗的 F_v/F_m 值范围为 0.814~0.856,且在不同低磷胁迫下变化不大,说明磷缺乏对台湾相思光合特性的影响相对较小,与前人研究磷缺乏对落叶松(*Larix gmelinii*) F_v/F_m 值影响不大的结论一致^[41];但也存在低磷胁迫下杉木 F_v/F_m 值明显升高的报道^[21]. 可见不同树种在缺磷环境下代谢调节能力存在差异,如不同树种磷酸丙糖的转化能力直接影响卡尔文循环中二磷酸核酮糖再生环节^[42]. 通常 F_v/F_m 值降低被认为光合作用受光抑制^[43],而本研究中 F_v/F_m 值未产生明显降低趋势,表明缺磷环境未对台湾相思幼苗产生光抑制作用.

本研究通过内生真菌回接不同低磷处理的台湾相思幼苗,对内生真菌与台湾相思共生体的叶绿素含量和叶绿素荧光参数进行测定分析,明晰了台湾相思中 4 种优势内生真菌对低磷胁迫下台湾相思叶绿素荧光特性的影响有所差异,其中菌株 F、FI 的促进作用最佳,可为改良台湾相思林分生长提供参考. 然而,仅从优势内生真菌对台湾相思光合特性促进角度开展研究并不能系统地改良我国南方低磷生境中台湾相思的生长状况,进一步分析内生真菌对台湾相思根际酸度、有机酸分泌、磷酸酶释放及其对土壤磷活化的促进机制是后续研究的重点.

参考文献:

[1] 王春雪,何光熊,宋子波,等. 元江元谋干热河谷土壤氮磷水平对酸角叶片氮磷含量及光合的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(3):710-718.

[2] 黄怡,高保燕,王飞飞,等. 不同磷、硫及二氧化碳浓度对标志链带藻生长和碳水化合物积累的影响[J]. 微生物学报,2019,59(10):1915-1926.

- [3] 李志刚,谢甫绋,张玉铃,等. 磷胁迫对大豆不同磷素基因型光合作用的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2004,19(3):297-299,309.
- [4] 梁秀兰,林英春,年海,等. 低磷胁迫对不同基因型玉米主要生理生化特性的影响[J]. 作物学报,2005,31(5):667-669.
- [5] 林郑和,陈荣冰,郭少平. 植物对缺磷的生理适应机制研究进展[J]. 作物杂志,2010(5):5-9.
- [6] 曹升,胡华英,张虹,等. 我国南方人工林土壤有效磷匮乏原因及对策分析[J]. 世界林业研究,2019,32(3):78-84.
- [7] HERNÁNDEZ I, MUNNÉ-BOSCH S. Linking phosphorus availability with photo-oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany,2015,66(10):2889-2900.
- [8] 魏晓骁,陈爱玲,王士亚,等. 杉木连栽林土壤微生物碳源利用比较[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(3):518-523.
- [9] 贝昭贤,张秋芳,郑蔚,等. 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响[J]. 生态学报,2018,38(3):1106-1113.
- [10] 陈晓芬,吴萌,江春玉,等. 不同培养温度下长期施肥红壤水稻土有机碳矿化特征研究[J]. 土壤,2019,51(5):864-870.
- [11] 陈志为,周艳芬,樊月,等. 台湾相思内生真菌的分离筛选及其对幼苗生长的影响[J]. 东北林业大学学报,2019,47(1):61-64,75.
- [12] 谭忠奇. 台湾相思叶状柄衰老过程中氮磷内吸收变化研究[J]. 亚热带植物科学,2010,39(3):18-20,78.
- [13] 叶功富,黄雍容,卢昌义,等. 海岸带木麻黄林生态系统过程与可持续管理[J]. 世界林业研究,2012,25(3):32-37.
- [14] 宋平,张一,张蕊,等. 低磷胁迫下马尾松无性系磷效率性状对氮沉降的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):502-511.
- [15] 于姣姣,殷丹阳,吴佳美,等. 林木低磷胁迫适应机制研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(1):18-23.
- [16] 刘春花,谢富,宋岩,等. 植物生长及生理生化特性对低磷胁迫的响应研究进展[J]. 江西农业学报,2020,32(2):71-75.
- [17] 陈奶莲. 不同磷利用效率杉木筛选及其适应磷胁迫的离子流机制[D]. 福州:福建农林大学,2015.
- [18] 唐浩琪,张娜,孙波,等. 典型农田土壤中丛枝菌根真菌-根际细菌互作及与氮磷利用的关系[J]. 微生物学报,2020,60(6):1117-1129.
- [19] 关正翹,娜尔克孜,朱亚琼,等. 不同混播方式下燕麦+箭筈豌豆混播草地的生产性能及土壤养分特征[J]. 草业科学,2019,36(3):772-784.
- [20] 谢安强,洪伟,吴承祯,等. 10 株桉树内生真菌对尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*) 光合作用的影响[J]. 福建林学院学报,2011,31(1):31-37.
- [21] 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):281-288,307.
- [22] 李芳,李彦忠,段廷玉. 禾草内生真菌与 2 种 AM 真菌互作对黑麦草生长的影响[J]. 草业学报,2017,26(9):132-140.
- [23] 杜铃,孙利娜,廖美兰,等. 台湾相思容器育苗技术[J]. 黑龙江农业科学,2013(11):160-161.
- [24] 孙德智,韩晓日,彭靖,等. 外源 NO 和水杨酸对盐胁迫下番茄幼苗光合机构的保护作用[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(3):457-464.
- [25] 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.
- [26] 刘攀道,郇恒福,刘一明,等. 低磷胁迫对太空诱变耐低磷柱花草酸性磷酸酶活性和磷效率的影响[J]. 草业学报,2018,27(8):78-85.
- [27] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等. 甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1494-1501.
- [28] 孙金伟,吴家兵,任亮,等. 氮添加对长白山阔叶红松林 2 种树木幼苗光合生理生态特征的影响[J]. 生态学报,2016,36(21):6777-6785.
- [29] 王通明,陈伟,潘文杰,等. 有机肥和化肥对烟叶气体交换、叶绿素荧光特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):517-526.
- [30] 陈敬华,王绍强,李悦,等. 亚热带人工针叶林叶绿素荧光参数日变化及其与植被生产力的关系[J]. 生态学报,2019,39(15):5603-5615.
- [31] 王淑智,李利,张道勇,等. NaCl 与 Cd 对小球藻光系统 II (PSII) 活性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(6):839-846.
- [32] TAUSZ M, WARREN C R, ADAMS M A. Dynamic light use and protection from excess light in upper canopy and coppice leaves of *Nothofagus cunninghamii* in an old growth, cool temperate rainforest in Victoria, Australia[J]. New Phytologist,2005,165(1):143-155.
- [33] 陈轶群,王文娟,黄荣银,等. 热带次生林两种林下植物叶片生理特性对氮磷添加的响应[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(3):626-633.
- [34] 李泽,谭晓风,卢锟,等. 供镁水平对油桐幼苗生长及光合特性的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(9):2440-2447.
- [35] 林燕青,谢安强,林晗,等. 木麻黄内生真菌对其幼苗叶绿素相对含量及荧光参数的影响[J]. 四川农业大学学报,2019,37(5):644-652,662.
- [36] 陈智裕,李琦,邹显花,等. 邻株竞争对低磷环境杉木幼苗光合特性及生物量分配的影响[J]. 植物生态学报,

2016,40(2):177-186.

[37] TAYIBE S, IDHAN A, NOERFITRYAN I, et al. Paddy chlorophyll concentrations in drought stress condition and endophytic fungi application[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 156(1): 012040.

[38] 刘燕霞, 龙俊萌, 王静茹, 等. 五种漠境深色有隔内生真菌对小麦促生抗旱效应研究[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(9): 1339-1349.

[39] 高婷. 内生真菌侵染对铝和/或镉胁迫下水稻幼苗光合特性及碳氮代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021: 1-66.

[40] 刘平, 宋岩, 陆秀君, 等. 美国红枫和元宝枫幼叶春季转色期生理特性研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 452-458.

[41] 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 等. 落叶松幼苗光合特性对氮和磷缺乏的响应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 589-594.

[42] DEMMIG A B, ADAMS W W III. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 599-626.

[43] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 等. 低磷胁迫对磷不同利用效率玉米叶绿素荧光参数的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(4): 365-370.

Effects of endophytic fungi on chlorophyll fluorescence characteristics of *Acacia confusa* under low phosphorus stress

HE Chenyang¹, CHEN Long¹, WANG Yunzi¹, ZHOU Yanfen¹,
LI Jian¹, WU Chengzhen^{1,2}, HONG Tao^{1*}

(1. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China)

Abstract: To clarify the effect of endophytic fungi on the chlorophyll fluorescence characteristics of *Acacia confusa* under low-phosphorus conditions, and to explore the possibility of using endophytic fungi to improve the photosynthetic characteristics of *A. confusa*, 4 strains of powerful endophytic fungi F (*Filobasidium* sp.), I (*Penicillium* sp.), E (*Penicillium* sp.), N (*Penicillium* sp.) and FI mixed bacteria (1 : 1) were isolated and purified from *A. confusa*, and added to 4 phosphorus levels (0, 10, 20, 40 mg/kg) soil culture of *A. confusa* seedlings in pots. The results showed that under an appropriate amount of phosphorus supply (40 mg/kg), the chlorophyll content of the control group (non-inoculated) was overall lower than that of each strain treatment group, and the photosynthetic system II (PSII) activity (F_v/F_o) and PSII maximum light energy conversion efficiency (F_v/F_m) of the strain I and FI treatment groups were slightly higher than those of the control group. Under mild phosphorus stress (20 mg/kg), the chlorophyll content of the control group was lower than that of the strain E, FI and F treatment groups, while the F_v/F_o and F_v/F_m were not significantly different among different treatment groups. Under severe phosphorus stress (10 mg/kg), the chlorophyll contents of the strain F, E and N treatment groups were overall higher. For the strain E treatment group, the F_v/F_o and F_v/F_m were higher than those of the control group. Under the treatment group without phosphorus (0 mg/kg), the chlorophyll contents of the strain FI and I treatment groups were higher at the middle and late stage of stress, and the F_v/F_o and F_v/F_m of the strain I treatment group were higher than those of the control group. In summary, strain F and FI show the best effect in promoting the chlorophyll fluorescence characteristics, and it is clear about the bacteria species suitable for low-phosphorus environment to promote chlorophyll fluorescence characteristics of *A. confusa*. These results provide a basis for understanding the promotion mechanism of endophytic fungi on photosynthetic characteristics of *A. confusa*, and also provide new ideas for sustainable management of *A. confusa* coastal protection forests.

Keywords: *Acacia confusa*; endophytic fungus; low phosphorus; chlorophyll fluorescence parameter

(责任编辑: 徐婷婷)