

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201801029

内生真菌对营养亏缺下金钗石斛幼苗生长的影响*

龚记熠, 李 菲, 孙 威, 唐 靖, 乙 引^{**}

(贵州师范大学, 国家林业局西南喀斯特山地生物多样性保护重点实验室,
贵州省植物生理与发育调控重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

摘要:【目的】探讨营养亏缺下内生真菌对金钗石斛组培苗生长的影响。【方法】金钗石斛组培苗移栽时在其根部分别添加内生真菌37号、117号、120号菌株及无菌水, 然后再分别在1倍、1/2倍、1/4倍和1/8倍Hoagland营养液中培养30 d, 通过测定植株生长特征、生理特性等指标来判定内生真菌在不同稀释倍数营养液中的作用效果。【结果】随着Hoagland营养液逐渐变稀, 各内生真菌处理组的植株干重、叶绿素SPAD值、总生物碱、水溶性多糖和氮磷钾含量增加量显著高于对照组, 根长和根茎比增加量显著小于对照组。3株内生真菌处理间各种指标变化并不完全相同, 37号菌株在增加干重和总生物碱含量上作用最为显著, 而120号菌株在控制根长和根茎比、提高水溶性多糖含量、增加对磷和钾元素的吸收上效果更为突出, 117号菌株在提高叶绿素SPAD值和促进植株吸收氮元素上作用最为明显。【结论】3株菌株均能促进金钗石斛幼苗在营养亏缺下的生长, 但作用效果各不相同, 生产中混合使用效果更佳。

关键词:金钗石斛; 内生真菌; 营养亏缺; 生长特性

中图分类号: S 567.230.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X(2019)01-0110-06

Effects of Endophytic Fungi on the Seedling Growth Characteristics of *Dendrobium nobile* under Nutritional Deficiency

GONG Jiyi, LI Fei, SUN Wei, TANG Jing, YI Yin

(Key Laboratory of State Forestry Administration on Biodiversity Conservation in Karst Mountain Area of Southwest of China, Key Laboratory of Plant Physiology and Developmental Regulation, Guizhou Normal University, Guiyang 55001, China)

Abstract: [Purpose] The effects of No.37, 117 and 120 endophytic fungi strains isolated from *Dendrobium nobile* on the growth and physiological characteristics of *D. nobile* under nutritional deficiency condition were detected in this study. [Method] The endophytic fungi strains No. 37, 117, 120 and distilled water were sprayed on the root of tissue culture regenerated seedlings of *D. nobile*. Each group was cultivated for 30 days with 1, 1/2, 1/4 and 1/8 of Hoagland nutrient solution, respectively. After 30 days, the effect of endophytic fungi inoculation was determined by measuring the plant growth and physiological characteristics. [Results] With the decrease of Hoagland solution concentration, the endophyte treatment groups were significantly higher than the control group (treated with

收稿日期: 2018-01-19 修回日期: 2018-05-02 网络出版时间: 2019-01-11

*基金项目: 贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7764 号); 贵州省教育厅“125”重大专项(黔教合重大专项字[2012]005 号); 教育部创新团队发展计划项目(IRT1227)资助。

作者简介: 龚记熠(1985—), 男, 四川南充人, 硕士, 高级实验师, 主要从事植物生理研究。
E-mail: 583823121@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 乙引(1967—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事植物生理与分子生物学研究。
E-mail: yiying@gznu.edu.cn

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201801029](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201801029)

distilled water) in dry weight, chlorophyll SPAD value, total alkaloids, water-soluble polysaccharides and NPK content. The root length and root shoot ratio increased less than the control group. The changes of various indexes were not completely the same between the three endophytic fungi strain treatments. Strain No.37 treatment showed the most significant ability in dry weight and total alkaloid content increase. Strain No.120 was more prominent in controlling root length and root shoot ratio, promoting water-soluble polysaccharide content and phosphorus and potassium absorption. Strain No.117 showed the most obvious effect on increasing chlorophyll SPAD value and promoting nitrogen absorption. [Conclusion] All of these three endophytic fungi strains can promote the growth of *D. nobile* seedlings under nutrient deficit condition, but they showed different types of effect. Therefore, the combination use of these three endophytic fungi will produce better results.

Keywords: *Dendrobium nobile*; endophytic fungi; nutritional deficiency; seedling growth characteristics

金钗石斛 (*Dendrobium nobile* Lindl.) 作为滋阴清热、润肺止咳的重要中药材, 近年来市场需求逐年递增, 价格持续上涨, 贵州省已将其作为主要种植石斛品种, 在赤水、黔东南等全省主要栽培区域大量推广林下岩石附生仿野生栽培^[1-2]。相比其他仿野生栽培方式, 林下岩石附生栽培具有占用耕地资源少、成本小、栽培容易和管理方便的特点, 深受农户欢迎^[3-4]。但是在近几年推广过程中也发现: 由于以岩石为基质, 林下岩石附生栽培保水保肥及肥效释放不如土壤及碎木屑的效果, 经常出现营养亏缺, 药材生长受到抑制, 药材质量不宜控制等问题, 严重影响了药材质量和药农的经济收入^[5-7]。因此, 提高金钗石斛耐瘠性是林下岩石附生栽培中获得高产优质的金钗石斛需解决的关键问题。

已有研究发现: 石斛属植物在生长过程中离不开内生真菌的作用, 从金钗石斛、铁皮石斛、流苏石斛、华石斛等品种中均发现有益内生真菌^[8-9], 并在后续的研究中证明: 石斛属内生真菌对石斛种子萌发、组培苗成活、幼苗生长、次生代谢产物积累等具有明显的促进作用^[10-11]。同时, 在已有研究中发现: 内生真菌能显著提高植物对干旱和高温两种非生物胁迫的抗性^[12-13], 在金钗石斛研究中也有提高抗旱性的报道^[14]。在尾巨桉、早熟禾、玉米等的研究中进一步发现: 内生真菌能促进植株对氮磷元素的吸收和利用、提高植物对营养亏缺环境的耐性^[15-17]。但是, 针对在营养亏缺下内生真菌对金钗石斛的影响研究报道甚少, 因此, 本研究以实验室前期获得的金钗石斛内生

真菌为材料, 测定在营养亏缺下不同内生真菌处理中金钗石斛组培苗的生长速度、生理特性、矿物质含量等生理生化指标的变化, 为解决金钗石斛组培苗林下岩石附生栽培的瓶颈提供理论支撑, 为制作金钗石斛内生真菌制剂提供一定基础, 也为进一步阐明内生真菌在金钗石斛耐瘠性中的作用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试金钗石斛为贵州赤水野生金钗石斛的组培脱毒1代苗, 37、117和120号菌株均从贵州赤水野生金钗石斛根内分离获得。上述试验材料由贵州省植物生理发育与调控重点实验室提供。

1.2 材料培养

挑选37、117和120号菌株菌种在PAD培养基中进行增殖培养, 待菌丝体长后制成0.5 mg/mL的菌丝体悬浮液备用。将适合移栽的组培幼苗清洗根部后移栽至炼苗基质中, 基质由发酵锯末和蛭石按照体积比1:1组成并经过高温高压灭菌。移栽后幼苗放置于温室内培养, 待幼苗移栽成活后, 将37、117和120号菌株菌丝体悬浮液分别浇灌于培养基中, 每隔1周浇灌1次, 共3次, 每次100 mL, 培养15 d后挑选长势一致的幼苗400株清洗基质移至无菌水中培养48 h备用。

1.3 材料处理

设置对照组(无菌液)、37号菌株、117号菌株和120号菌株共4个处理, 每个处理100株幼苗。每个处理组培养液分别设置1倍、1/2倍、

1/4倍和1/8倍Hoagland营养液，每个处理对应每个营养液浓度培养幼苗25株。各处理组采用水培法培养幼苗，记录培养液液面初始位置，每隔7d用无菌水补充溶液消耗量。

1.4 测定方法

干重为全株洗净后在65℃下烘干至恒重后用电子天平称量测定，根长测定采用游标卡尺，根茎比为金钗石斛根及茎干在65℃下烘干至恒重后的比值，叶绿素SPAD值由美能达SPAD-502 Plus手持叶绿素仪测定，总生物碱测定参照刘莉等^[18]的方法，水溶性多糖采用苯酚—硫酸比色法测定^[19]，全氮含量采用H₂SO₄—H₂O₂消煮后用自动定氮仪(阿尔瓦KN520)测定，全磷含量采用H₂SO₄—H₂O₂消煮后钼蓝比色法测定(岛津UV2550)，全钾含量采用H₂SO₄—H₂O₂消煮后火焰光度法测定(日立Z5300)。培养开始前和30d后分别采样测定各项指标。

1.5 数据分析

采用SPSS 10.0软件中单因素方差分析ANOVA对获得数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 营养亏缺下内生真菌对金钗石斛干物质量的影响

2.1.1 对干重的调控

由表1可知：在相同稀释倍数的Hoagland营养液处理下，各组间干重30d的增长量差异显著，3个菌株处理组明显优于对照组。随着Hoagland营养液变稀，各组间干重30d的增长量均出现下降趋势，在1/8 Hoagland时下降最为显著，对照组增长量最小，仅有0.5g，37号菌株增长量最大(1.6g)，表明内生真菌有助于营养亏缺下金钗石斛干重的积累，但是不同菌株作用各不相同。

2.1.2 对根长的影响

由表2可知：在相同稀释倍数的Hoagland营养液处理下，各组间根长30d的增长量差异显著，对照组显著大于3个菌株处理组。随着营养液变稀，各组间根长30d的增长量均出现增大的趋势，在1/8 Hoagland时增长最为显著，其中对照组增加3.8cm，为各组间最大，120号菌株增幅最小，仅有2.1cm。

表1 不同菌株处理对干物质量的影响

Tab. 1 Effects of different strains treatment on the dry weight

g

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	3.0 Ba	3.8 Aa	3.5 Aa	3.7 Aa
1/2 Hoagland	2.6 Cb	3.6 Aa	3.0 Bb	3.5 Aa
1/4 Hoagland	1.2 Cc	2.5 Ab	1.9 Bc	2.2 ABb
1/8 Hoagland	0.5 Cd	1.6 Ac	1.0 Bd	0.9 Bc

注：No. 37、No. 117和No. 120为菌株编号；大写字母表示相同稀释倍数下不同处理间在0.05水平的差异显著性；小写字母表示相同处理下不同稀释倍数间在0.05水平的差异显著性；下同。

Note: No. 37, No. 117 and No. 120 are the No. of strains; the uppercase letters indicate the significance of difference between the different treatments at the 0.05 level of the same solution concentrations; the lowercase letters indicate the significance of difference between the different solution concentrations at the 0.05 level of the same treatments; the same as below.

表2 不同菌株处理对根长的影响

Tab. 2 Effects of different strains treatment on the root length

cm

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	1.8 Ad	1.4 Bd	1.7 Ac	1.3 Bc
1/2 Hoagland	2.3 Ac	1.7 Bc	1.9 Bc	1.2 Cc
1/4 Hoagland	2.9 Ab	2.1 Bb	2.4 Bb	1.7 Cb
1/8 Hoagland	3.8 Aa	2.5 Ca	3.1 Ba	2.1 Da

2.1.3 对根茎比的影响

由表3可知：在相同稀释倍数的Hoagland营养液处理下，各组间根茎比30d的增长值差异显著，对照组显著大于3个菌株处理组。随着营养液变稀，各组间根茎比30d的增长量均出现增大的趋势，在1/8 Hoagland时增长最为显著，其中对照组增长量最大，达到36%，120号菌株增长量最小，仅有17%。

表3 不同菌株处理对根茎比的影响

Tab. 3 Effects of different strains treatment on the ratio of root and stem

%

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	15 Ad	11 Bc	14 Ad	10 Bc
1/2 Hoagland	18 Ac	13 Bc	18 Ac	13 Bc
1/4 Hoagland	26 Ab	15 Cb	22 Bb	14 Cb
1/8 Hoagland	36 Aa	19 Ca	26 Ba	17 Ca

2.2 营养亏缺下内生真菌对金钗石斛生理特性的影响

2.2.1 对叶绿素含量的调控

当Hoagland营养液稀释倍数低于1/2时，

3个菌株处理组叶绿素SPAD值30 d的增长量明显优于对照组。随着营养液变稀,各组SPAD增加值均出现下降趋势;在1/8 Hoagland时下降最为显著,其中对照组SPAD增加值最小,仅为1,37号和117号菌株组SPAD增加值最大,达到5(表4)。

表4 不同菌株处理对叶绿素SPAD值的影响

Tab. 4 Effects of different strains treatment on the SPAD value

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	8 Aa	10 Aa	9 Aa	7 Aa
1/2 Hoagland	6 Ba	9 ABa	10 Aa	7 Ba
1/4 Hoagland	2 Cb	6 Ab	7 Ab	4 Bb
1/8 Hoagland	1 Cb	5 Ac	5 Ab	3 Bc

2.2.2 对总生物碱含量的影响

研究结果表明:在相同稀释倍数Hoagland营养液下,3个菌株处理同对照组间总生物碱30 d的增长量差异显著。随着Hoagland营养液变稀,各组总生物碱30 d的增长量均呈现下降的趋势;1/8 Hoagland时,对照组总生物碱增长量最小,仅有0.02 g,37号菌株处理下总生物碱增长量最大,达到0.11 g(表5)。

表5 不同菌株处理对总生物碱含量的影响(干重)

Tab. 5 Effects of different strains treatment on the total alkaloids (dry weight) g

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	0.20 Ca	0.28 Aa	0.21 Ca	0.25 Ba
1/2 Hoagland	0.16 Cb	0.26 Aa	0.17 Cb	0.21 Bb
1/4 Hoagland	0.04 Dc	0.18 Ab	0.11 Cc	0.15 Bc
1/8 Hoagland	0.02 Cd	0.11 Ac	0.05 Bd	0.09 Ad

2.2.3 对水溶性多糖含量的影响

在相同稀释倍数Hoagland营养液下,3个菌株处理同对照组间水溶性多糖30 d的增长量差异显著。随着Hoagland营养液变稀,各组水溶性多糖30 d的增长量均呈现下降的趋势;1/8 Hoagland时,对照组下降幅度最大,增长量仅有0.5 g,120号菌株处理下降幅度最小,增长量达到1.7 g(表6)。

2.3 营养亏缺下内生真菌对金钗石斛矿质元素含量的影响

2.3.1 对全氮含量的影响

在相同稀释倍数Hoagland营养液下,3个菌

株处理同对照组间全氮30 d的增长量差异显著,且117号菌株处理组显著优于其他处理组。随着Hoagland营养液变稀,各组全氮30 d的增长量均呈现下降的趋势;1/8 Hoagland时,对照组下降幅度最大,增长量仅有1 mg/g,117号菌株处理下降幅度最小,增长量达到15 mg/g(表7)。

表6 不同菌株处理对水溶性多糖含量的影响(干重)

Tab. 6 Effects of different strains treatment on the water soluble polysaccharides (dry weight) g

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	2.1 Ba	2.2 Ba	2.0 Ba	2.6 Aa
1/2 Hoagland	1.9 BCb	2.1 Ba	1.7 Cb	2.4 Aab
1/4 Hoagland	1.4 Cc	1.8 Bb	1.2 Cc	2.1 Ab
1/8 Hoagland	0.5 Cd	1.4 Bc	0.7 Cd	1.7 Ac

表7 不同菌株处理对全氮含量的影响

Tab. 7 Effects of different strains treatment on the total nitrogen content mg/g

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	14 Ba	17 Ba	22 Aa	16 Ba
1/2 Hoagland	11 Cb	16 Ba	23 Aa	14 Ba
1/4 Hoagland	6 Cc	14 Bab	18 Ab	12 Bab
1/8 Hoagland	1 Dd	10 Bb	15 Ac	7 Cb

2.3.2 对全磷含量的影响

在相同稀释倍数Hoagland营养液下,3个菌株处理同对照组间全磷30 d的增长量差异显著,且120号菌株处理组显著优于其他处理组。随着Hoagland营养液变稀,各组全磷30 d的增长量均呈现下降的趋势;1/8 Hoagland时,对照组下降幅度最大,增长量仅有0.3 mg/g,120号菌株处理下降幅度最小,增长量达到3 mg/g(表8)。

表8 不同菌株处理对全磷含量的影响

Tab. 8 Effects of different strains treatment on the total phosphorus content mg/g

处理 treatment	CK	No. 37	No. 117	No. 120
1 Hoagland	6 Ba	8 ABa	9 Aa	10 Aa
1/2 Hoagland	4 Bb	6 Bb	5 Bb	8 Aab
1/4 Hoagland	1 Cc	3 Bc	2 BCc	6 Ab
1/8 Hoagland	0.3 Cd	0.9 Bd	1 Bd	3 Ac

2.3.3 对全钾含量的影响

在相同稀释倍数Hoagland营养液下,3个菌株处理同对照组间全钾30 d的增长量差异显著,且120号菌株处理组显著优于其他处理组。随着

Hoagland 营养液变稀，各组全钾 30 d 的增长量均呈现下降的趋势；1/8 Hoagland 时，对照组下降幅度最大，增长量仅有 3 mg/g，120 号菌株处理下降幅度最小，增长量达到 13 mg/g（表 9）。

表 9 不同菌株处理对全钾含量的影响
Tab. 9 Effects of different strains treatment on the

处理 treatment	CK	total potassium content			mg/g
		No. 37	No. 117	No. 120	
1 Hoagland	16 Ba	19 Aa	18 Aa	21 Aa	
1/2 Hoagland	13 Cb	17 Ba	15 BCb	19 Ab	
1/4 Hoagland	8 Cc	13 Bb	11 Bc	15 Ac	
1/8 Hoagland	3 Dd	8 Bc	6 Cd	13 Ad	

3 讨论

金钗石斛林下岩石附生栽培中由于岩石基质释放营养十分稀少，同时对人工施加营养吸附不够，因此金钗石斛需要提高自身耐瘠性，以便适应营养亏缺的逆境。研究中以不同稀释倍数的 Hoagland 营养液模拟营养亏缺，通过不同处理组的金钗石斛组培苗在经过 30 d 的胁迫后，生长速度、生物碱、多糖及矿质元素的含量来判断内生真菌是否具有促进其生长的作用以及不同内生真菌之间的差异。结果表明：在不同稀释倍数 Hoagland 营养液处理下，内生真菌处理组在抑制根长、控制根茎中有机物的分配上显著优于对照组，同时内生真菌组能减少金钗石斛幼苗叶绿素 SPAD 值的降低，保证光合作用有序进行，促进有机物的合成，增加干物质量，该结果与已有研究^[20]一致；内生真菌处理下总生物碱及水溶性多糖含量等生理特性显著优于对照组，在促进植株对氮磷钾等矿质元素吸收上作用效果也较对照组更优，这一现象与内生真菌能促进金钗石斛幼苗生长、对有机氮的利用、增加石斛碱及多糖的含量的研究结果^[21]相似。在其他兰科植物的研究也发现内生真菌通过自身代谢产生的酶和酸等来分解、吸收和转运土壤中的有机氮及无机氮以供幼苗生长^[11, 22]；AIEXANDER 等^[23]和陈连庆等^[24]发现内生真菌能促使兰科植物对磷的吸收速率提高 100 倍，通常内生真菌通过体外的基质菌丝体上的磷转运蛋白来吸收磷酸盐，转运到根部内供兰科植物吸收利用。

虽然内生真菌整体上能提高植株耐瘠性，但是不同内生真菌在营养亏缺下的作用效果却各不

相同。研究表明：37 号菌株在增加干重和总生物碱含量上显著优于 117 号和 120 号菌株，而 120 号菌株在控制根长和根茎比、提高水溶性多糖含量、增加对磷和钾元素的吸收上效果更为显著，117 号菌株在提高叶绿素 SPAD 值和促进植株吸收氮元素上作用最为明显。表明不同内生真菌在提高金钗石斛耐瘠性上所采用的策略并不完全一致，也说明耐瘠性的提高不是由单一种类的内生真菌来实现的，而是多种真菌共同作用的结果，因此在生产中要采用多种内生真菌混合液来浇灌或喷洒金钗石斛以提高耐瘠性。这与内生真菌对氮、磷的吸收类似。不同内生真菌对氮元素的吸收能力不一致，有些菌株通过吸收铵盐、硝酸盐等无机氮，而有些则专门分解枯枝落叶中的有机氮供植株使用^[25-27]；在磷的吸收上也有类似的专一性，不同的磷酸盐也对应了不同的分解吸收内生真菌。

[参考文献]

- [1] 乙引, 陈玲, 张习敏. 金钗石斛研究[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 付芳婧, 刘政. 金钗石斛优良种源的适生条件及仿野生栽培的关键技术[J]. 种子, 2012, 31(7): 137. DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2012.07.078.
- [3] 梁洁, 滕建北, 劳文然. 不同栽培方法和生长时间的美花石斛中多糖含量的比较[J]. 华西药学杂志, 2010, 25(1): 063.
- [4] 江爱明, 曹俊, 蔡高磊. 秦巴山区石斛属亲缘关系及金钗石斛遗传多样性 ISSR 分析[J]. 西北植物学报, 2016, 36(10): 1977.
- [5] 唐德英, 李荣英, 李学兰, 等. 金钗石斛试管苗仿野生栽培技术研究[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(10): 1208.
- [6] 王再花, 朱根发, 操君喜, 等. 不同 N、P、K 水平施肥对春石斛营养生长和开花的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(16): 248.
- [7] 罗剑飘, 谭嘉娜, 杨俊贤, 等. 不同氮磷钾营养水平对铁皮石斛组培苗生长的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(3): 481.
- [8] 徐焰平. 铁皮石斛内生真菌研究进展[J]. 微生物学杂志, 2015, 35(5): 108.
- [9] 黄晖, 邵士成, 高江云. 不同内生真菌对齿瓣石斛幼苗生长的效应[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(11): 2019.
- [10] 谢玲, 张雯龙, 蓝桃菊, 等. 1 株内生真菌的分离鉴定及其对铁皮石斛的促生作用[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(3): 83.
- [11] 朱波, 刘京晶, 斯金平, 等. 铁皮石斛内生真菌对宿主组培苗生长与代谢成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(9): 1602.
- [12] 梁宇, 高玉葆. 内生真菌对植物生长发育及抗逆性的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(1): 52.

- [13] 刘润进, 唐明, 陈应龙. 菌根真菌与植物抗逆性研究进展[J]. 菌物研究, 2017, 15(1): 70.
- [14] 龚记熠, 刘杰, 李菲, 等. 内生真菌对干旱胁迫下金钗石斛生理生化特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 156. DOI: [10.13610/j.cnki.1672-352x.20180302.001](https://doi.org/10.13610/j.cnki.1672-352x.20180302.001).
- [15] 谢安强, 洪伟, 吴承祯, 等. 内生真菌对低磷胁迫下尾巨桉生理及土壤特性的影响[J]. 西南林业大学学报, 2013, 33(3): 1.
- [16] LLEDÓ S, RODRIGO S, POBLACIONES M J, et al. Biomass yield, mineral content, and nutritive value of *Poa pratensis* as affected by non-clavicipitaceous fungal endophytes[J]. Mycological Progress, 2015, 14(9): 67. DOI: [10.1007/s11557-015-1093-4](https://doi.org/10.1007/s11557-015-1093-4).
- [17] GOSAL S K, BADDESHA H S, KALIA A, et al. Role of endophytic fungus *Piriformospora indica* in nutrient acquisition and improving grain yield of maize in phosphorus deficient soil under field conditions[J]. Environment and Ecology, 2008, 26(4b): 2172.
- [18] 刘莉, 钱均祥, 萧凤回, 等. 快速测定铁皮石斛总生物碱含量方法的优化[J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 575. DOI: [10.16213/j.cnki.scjas.2015.02.023](https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2015.02.023).
- [19] 中科院植生所上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] 赵杨景, 郭顺星, 高薇薇, 等. 三种内生真菌与大花蕙兰共生对矿质元素营养吸收的影响[J]. 园艺学报, 1999, 26(2): 110.
- [21] 闫浩利, 陈晓梅, 廖方华, 等. 菌根真菌对金钗石斛幼苗生长及石斛碱和多糖积累的影响[J]. 中国药学杂志, 2016, 51(17): 1450.
- [22] 陈连庆, 王小明, 裴致达. 石斛菌根化组培苗对N素的吸收利用[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 48.
- [23] ALEXANDER C, ALEXANDER I J, HADLEY G. Phosphate uptake by *Goodyera repens* in relation to mycorrhizal infection[J]. New Phytologist, 1984, 97(3): 401. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1984.tb03606.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1984.tb03606.x).
- [24] 陈连庆, 王小明, 裴致达. 石斛菌根化组培苗对P素吸收利用的研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(2): 163. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.2005.02.011](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2005.02.011).
- [25] 杨建文, 凌鸿, 张盈, 等. 内生真菌对兰科药用植物种子萌发作用研究进展[J]. 菌物学报, 2018, 37(1): 22. DOI: [10.13346/j.mycosistema.170198](https://doi.org/10.13346/j.mycosistema.170198).
- [26] JOHRI A K, OELMÜLLER R, DUA M, et al. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6(3): 984. DOI: [10.3389/fmicb.2015.00984](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00984).
- [27] 王秋霞, 严宁, 纪大干. 菌根真菌促进金钗石斛的生长及氮利用[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(3): 321.

责任编辑: 何馨成