



## 瘤菌根菌对铁皮石斛根系形态的影响及其共生关系的研究

王伟英, 邹晖, 戴艺民, 林江波

引用本文:

王伟英, 邹晖, 戴艺民, 等. 瘤菌根菌对铁皮石斛根系形态的影响及其共生关系的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(2): 124–130.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4093>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 种植模式对巴戟天生长的影响

Effect of Planting Pattern on the Growth of *Morinda officinalis*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 163–170 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4100>

#### 马齿苋内生菌橘青霉和波兰青霉中抗青枯菌的活性物质

Bioactivity Metabolite from the Endophytes *Penicillium citrinum* and *P. polonicum* of *Portulaca oleracea* Against *Ralstonia solanacearum*

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 731–738 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4065>

#### 桢楠种源幼苗细根形态和生物量研究

Fine Root Morphology and Biomass of *Phoebe zhennan* Provenance Seedlings

热带亚热带植物学报. 2016, 24(2): 208–214 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.012>

#### 番茄‘Ls-89’和‘坂砧2号’幼苗活性氧代谢对南方根结线虫侵染的反应

Reactive Oxygen Metabolism and Response to *Meloidogyne incognita* Infection in Tomato ‘Ls-89’ and ‘Banzhen 2’ Rootstock Seedlings

热带亚热带植物学报. 2016, 24(1): 63–70 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.01.009>

#### 根系盐胁迫对盐生植物和甜土植物的幼苗生长及矿质元素分布的影响

Effects of Root Salt Stress on Growth and Allocation of Mineral Elements in Halophyte and Glycophyte Seedlings

热带亚热带植物学报. 2015(4): 405–412 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.04.007>

# 瘤菌根菌对铁皮石斛根系形态的影响及其共生关系的研究

王伟英, 邹晖, 戴艺民, 林江波\*

(福建省农业科学院亚热带农业研究所, 福建 漳州 363005)

**摘要:** 为了解瘤菌根菌(*Epulorhiza* sp.)与铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)根系的共生关系及其对根系农艺性状的影响, 用液体培养瘤菌根菌浇灌无菌盆栽铁皮石斛苗根部共培养, 观察石斛根的表型和超微结构变化, 并用分子检测鉴定菌丝是否定殖根中。结果表明, 瘤菌根菌菌丝能侵入根的皮层细胞, 诱导生成菌丝团形成共生关系。共生后的菌丝能提高 IAA 含量, 诱导根系结构发生改变生成侧根, 增大了根系体积, 促进根系的生长并显著提高根系活力。瘤菌根菌与铁皮石斛根共培养后建立共生关系形成菌根且能定殖于根中, 诱导根系结构的变化, 侧根的形成对石斛生长具有重要作用。

**关键词:** 铁皮石斛; 瘤菌根菌; 根系形态; 共生关系

doi: 10.11926/jtsb.4093

## Effect of *Epulorhiza* sp. on Root Morphology of *Dendrobium officinale* and Their Symbiotic Relationship

WANG Wei-ying, ZOU Hui, DAI Yi-min, LIN Jiang-bo\*

(Subtropical Agriculture Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Zhangzhou 363005, Fujian, China)

**Abstract:** In order to understand the symbiotic relationship between *Epulorhiza* sp. and the roots of *Dendrobium officinale*, and also to make certain the influence of *Epulorhiza* sp. on root morphology, the roots of *D. officinale* were irrigated with liquid cultured *Epulorhiza* sp., the changes in phenotype and ultrastructure of roots were observed after three months. The results showed that the cortical cells of root were invaded by mycelia, which induced the formation of mycelium group to form a symbiotic relationship between *Epulorhiza* sp. and the roots. The content of IAA in root increased after co-cultured with *Epulorhiza* sp., and the lateral roots were induced for increasing root volume, as well as the root vitality was significantly improved. Therefore, *Epulorhiza* sp. co-cultured with the roots of *D. officinale* not only could generate mycorrhizal to establish a symbiotic relationship, but also the symbiotic mycelium could colonize in roots, induced the changes in root structure, and the formation of lateral root played an important role in growth of *D. officinale*.

**Key words:** *Dendrobium officinale*; *Epulorhiza* sp.; Root morphology; Symbiotic relationship

铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)是具有药用和保健双重功效的名贵中药材, 在增强免疫力、抗肿瘤、降血糖和美容养颜上有很大的应用价值。铁皮石斛是一种典型的内生菌根植物, 需要与合适的真

菌共生才能完成其生活史<sup>[1]</sup>。

菌根真菌参与兰科植物生长发育过程, 对种子萌发、植株营养生长、生殖繁育具有促进作用<sup>[2-4]</sup>。内生菌根的形成标志着内生真菌与植物根系建立

收稿日期: 2019-05-14 接受日期: 2019-07-14

基金项目: 福建省农业科学院科技创新基金(PC2018-13); 福建省科技厅公益类项目(2016R1012-5)资助

This work was supported by the Project for Science and Technology Innovation of Fujian Academy of Agricultural Sciences (Grant No. PC2018-13), and the Public Welfare Projects of Fujian Science and Technology Department (Grant No. 2016R1012-5).

作者简介: 王伟英(1980~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物逆境生理和分子生物学研究。E-mail: weiyangwang178@126.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 345953257@qq.com

了共生关系<sup>[5-6]</sup>, 即菌根真菌与植物根系协同演化, 在演化过程中二者形成了互惠共生关系。有研究<sup>[7-8]</sup>表明根菌菌丝能帮助根系增加吸收面积, 菌丝通过消化吸收周围环境的有机物, 产生葡萄糖、核糖和其他营养物质, 除维持自身生长外, 把剩余营养物质通过侵染的真菌菌丝释放到兰科植物细胞内供其生长所需。

根是植物的三大营养器官之一, 在植物生长发育过程中起着极为重要的作用, 具有吸收、输送、贮藏、固着、分泌和合成的功能, 整个植物的生命活动与根的活动紧密相联<sup>[9]</sup>。不同的植物有不同的根系构型, 构型的变化影响着植物的养分吸收和生长发育<sup>[10-11]</sup>。侧根是根系构型的基础, 侧根的分支角度和数量决定了根系的构型<sup>[12]</sup>。铁皮石斛根系为须根系, 只是在茎基部上会长出有数条不定根, 能在不定根上长出侧根和根毛的现象比较罕见。

瘤菌根菌属于瘤菌根菌属(*Epulorhiza*), 存在于多种兰科植物中, 在石斛的生长发育中起着促进生长的作用<sup>[13]</sup>, 朱鑫敏等<sup>[14]</sup>报道瘤菌根菌可极大地促进铁皮石斛组培苗的生长。目前对瘤菌根菌的研究主要集中在组培苗和地上部的相关研究上<sup>[15]</sup>, 而对栽培苗及其根系的研究还较少。本研究前期已开展了瘤菌根菌的分离纯化、鉴定及其对石斛株型的影响研究, 认为瘤菌根菌对石斛的生长具有促进效果。本研究通过对铁皮石斛根系浇灌瘤菌根菌菌液进行共培养来研究根菌与铁皮石斛根系是否能形成共生关系, 为内生真菌在铁皮石斛的人工栽培、引种驯化以及资源再生和保护等方面的应用奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试材料为冠豸山野生铁皮石斛(*Dendrobium officinale*), 瘤菌根菌(*Epulorhiza* sp.)菌株为福建省农业科学院亚热带农业研究所提供。

### 1.2 方法

**石斛盆栽苗的准备** 泥炭土高温灭菌后装入未使用过的花盆, 将铁皮石斛组培苗种在花盆中, 每盆种3丛, 每丛3株。

**菌液培育与接菌处理** 配制液体PDA培养液, 接入瘤菌根菌, 放入摇床, 在180 r/min 28℃震

荡培育7 d后, 用粉碎机搅碎大块菌丝至均匀, 用5 mL移液枪将菌液接种在石斛的根基部, 每丛分3点各接5 mL, 接12盆。接菌的为处理组(T), 未接菌的为对照组(CK)。每月接菌1次, 总共接菌3次, 第3次接菌后2周对根系进行取样。

**生长指标测定** 铁皮石斛茎干封顶(停止生长)后测量生长指标, 每个根拉直后的长度为根长; 采用排水法测定根体积; 统计一级侧根和根尖的数量; 长度大于5 cm的铁皮石斛茎干为有效茎干, 统计每盆中的有效茎干数, 取平均值; 称量每盆的有效茎干总质量, 取平均值; 参照TTC法<sup>[18]</sup>测定根系活力测定; 参照周燮的酶联免疫吸附(ELISA)法<sup>[19]</sup>略作修改测定IAA含量, 样品0.5 g用5 mL 80%甲醇提取, 弱光下冰浴匀浆, 低温离心(4 000×g)10 min, 上清液过C<sub>18</sub>柱, 取200 μL样液, 真空离心抽干。以上指标测定均3次重复。

**电镜观察** 用甲醛固定后经一系列规范的制样方法<sup>[16-17]</sup>, 包埋用Epon812, 用LKB型超薄切片机切片, 经醋酸双氧铀和柠檬酸铅染色后, 于JEM-1010型电镜下观察、拍照。

**侵染根的分子验证** 采用CTAB法提取内生真菌基因组DNA, 采用真菌ITS序列通用引物ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')扩增5.8S rDNA-ITS基因片段。PCR扩增程序: 94℃预变性5 min, 94℃变性30 s, 50℃退火30 s, 72℃延伸45 s, 30个循环, 最后72℃延伸10 min。PCR产物经1.2%琼脂糖凝胶电泳后, 切胶回收目的片断, 检验产物胶回收情况。将PCR产物送上海生工生物工程技术服务有限公司测序, 与瘤菌根菌的序列比较。

### 1.3 数据处理

采用DPS对数据进行统计处理和显著性检验分析, 显著水平为0.05。

## 2 结果和分析

### 2.1 瘤菌根菌对铁皮石斛根形态的影响

用菌液侵染石斛根基部后, 经过3次接菌后(图1), 接菌处理的铁皮石斛在原不定根上长出多条侧根, 而未接菌的对照没有长出侧根; 接菌后的根系上长出浓密的根毛(图2: G), 且还具有一层粘性物质。这说明接种瘤菌根菌后诱发了根系形态变

化, 诱导侧根和根毛的生成, 且当侧根长到一定长度时又会形成二级侧根, 从而形成较为发达的根

系, 使其能更好的从土壤四周吸收营养和水分供植株生长。



图 1 瘤菌根菌对铁皮石斛根形态的影响。CK: 对照; T: 处理。以下图表同。

Fig. 1 Effect of *Epulorhiza* sp. on root morphology of *Dendrobium officinale*. CK: Control roots; T: Treatment roots. The same is following Tables and Figures.

## 2.2 瘤菌根菌对根系结构的影响

主根长和侧根数是重要的根系性状, 接菌共培养后引起根系结构发生改变使原有的不定根变成了主根并在主根上长出侧根, 有的侧根数多达十几根, 与对照有显著差异。根尖数与侧根数呈正相关, 侧根数越多, 其根尖数越多, 对照没有侧根长出, 与接菌根呈显著差异。由于主根上长出侧根, 使其自身的生长速度较慢以至于根长度较短, 而对照只有 1 根且较长, 说明侧根的形成影响了主根的营养生长, 即侧根的生长消耗和分散了主根的营养, 使主根生长缓慢甚至停止生长, 因此接菌后的主根长比对照短, 与对照呈显著差

异。尽管接菌后的主根长度比对照短, 但其根系体积却大于对照且呈显著差异, 因为单根的主根和侧根相加后的总根长比对照长, 使得其根体积也较大。

## 2.3 瘤菌根菌对根系活力的影响

根系活力是指根系新陈代谢活动的强弱, 是反映根系吸收功能的一项综合指标。从表 2 可见, 接菌后的根系活力较强, 是对照的 1.8 倍, 差异显著, 这可能与真菌侵染后长出较多的新根数有密切关系, 也说明了接菌后根的吸收能力较强, 这对于地上部的生长具有重要的作用。

表 1 瘤菌根菌对铁皮石斛根的影响

Table 1 Effect of *Epulorhiza* sp. on root of *Dendrobium officinale*

	侧根数 Lateral root number	主根长 (cm) Main root length	根尖数 Root tip number	根体积 (cm <sup>3</sup> ) Root volume
CK	0.00 ± 0.00b	8.16 ± 0.53a	1.00 ± 0.00b	1.08 ± 0.41b
T	3.58 ± 0.97a	5.81 ± 0.39b	4.29 ± 0.98a	1.44 ± 0.29a

同列数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。

Date followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Tables.

表 2 瘤菌根菌对铁皮石斛根系活力、IAA 含量、有效茎干数和有效茎干总质量的影响

Table 2 Effect of *Epulorhiza* sp. on root activity, IAA content, effective stem number and weight of *Dendrobium officinale*

	根系活力 Root activity (μg/L)	IAA (mg/g)	有效茎干数 Effective stem number	有效茎干质量 Weight of effective stem (g)
CK	528.55 ± 18.24b	5.37 ± 0.42b	5.56 ± 0.53b	10.86 ± 0.65b
T	956.69 ± 23.23a	9.78 ± 0.68a	10.82 ± 0.94a	29.34 ± 2.59a

## 2.4 瘤菌根菌对 IAA 含量的影响

由表 2 可见, 接种瘤菌根菌后提高了 IAA 的含量, 增幅为 82.12%, 与对照间的差异显著。这是因

为合成生长素最活跃的部位是分生组织, 即生长素大都集中在生长旺盛的部位, 如根尖、芽尖、形成层、幼嫩种子等, 且接菌后的根尖数较多, 因此在

根尖的 IAA 含量相应提高。

### 2.5 瘤菌根菌对根的侵染

对盆栽铁皮石斛苗根部接菌后共培养, 剪取根尖进行电镜扫描观察。结果表明, 未接菌的对照根皮层没有菌丝分布(图 2: A), 没有菌丝侵入到细胞

内(图 2: C); 接菌后在根的表皮层和根毛上都有许多菌丝附着(图 2: B), 且菌丝侵入根皮层细胞后, 在细胞腔内形成螺旋状或弹簧状的菌丝团, 菌丝团占据了细胞的大部分空间, 有的甚至充满整个细胞(图 2: D)。菌丝侵入皮层细胞是随机的, 通过形成吸器穿破皮层细胞质膜(图 2: E), 菌丝在细胞内通过营

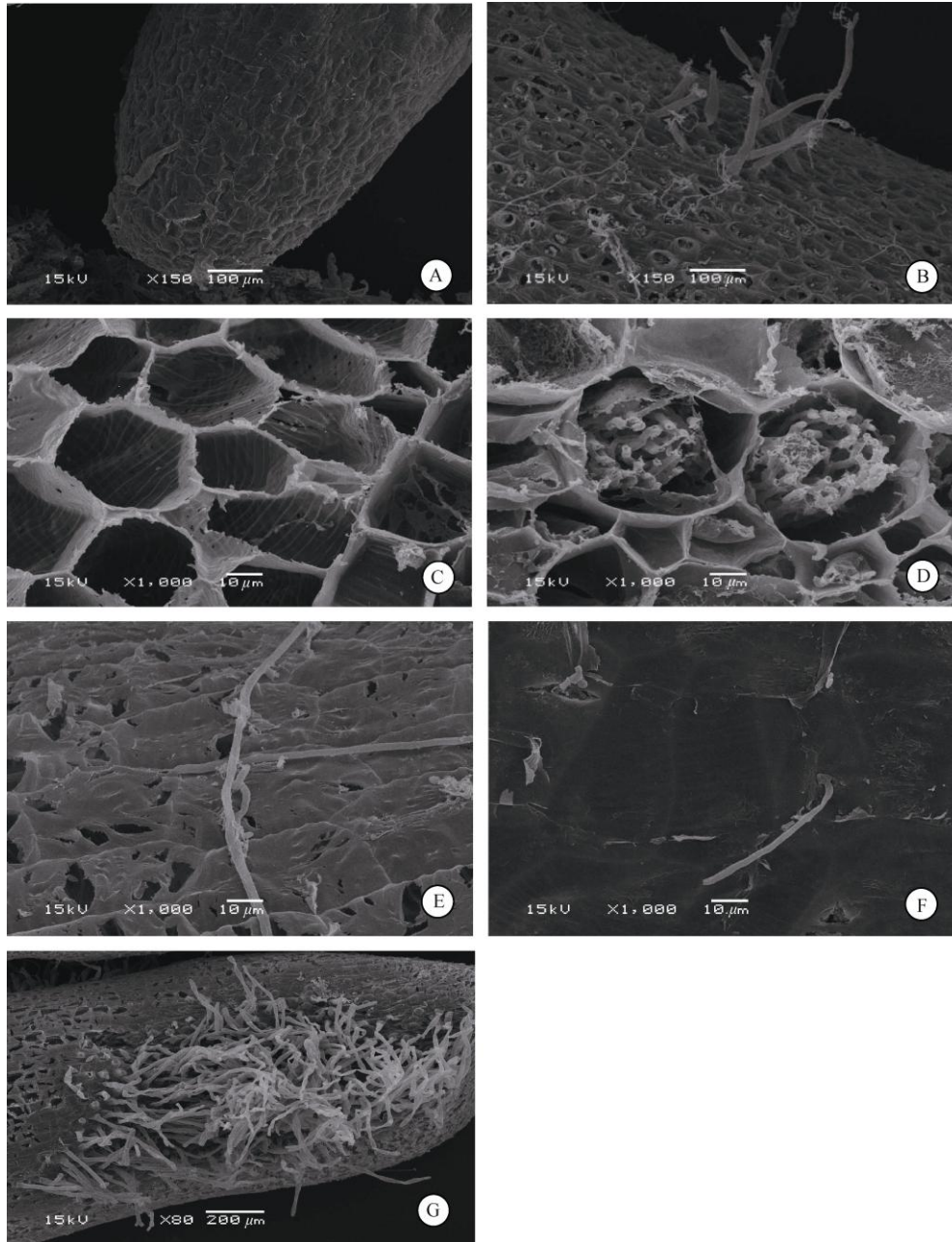


图2 瘤菌根菌对铁皮石斛根的侵染。A: 对照根表面; B: 接菌后的根表面; C: 对照的根细胞; D: 接菌后的根细胞; E: 菌丝从根表皮穿破质膜侵入细胞; F: 菌丝从根细胞穿出根表层; G: 接菌后根表面的根毛。

Fig. 2 Infection of *Epulorhiza* sp. on root of *Dendrobium officinale*. A: Surface of control root; B: Root surface after inoculation; C: Cell of control root; D: Root cell after inoculation; E: Mycelium penetrate cell plasma membrane into Cell; F: Mycelium emerge from cell to root surface; G: Root hair on surface after inoculation.



养生长形成了菌丝团, 菌丝也可以从细胞内穿破质膜生长到表皮层(图 2: F)。菌丝和菌丝团在皮层组织中分布不均匀, 菌丝团的出现, 标志着菌丝与石斛根已形成了共生关系。

## 2.6 PCR 验证

分别以瘤菌根菌菌株、铁皮石斛未接菌根和接菌根的 DNA 为模板进行 *ITS* 序列扩增, 结果表明(图 3), 未接菌的对照根没有出现条带, 而接菌根的 PCR 扩增产物在约 630 bp 处有清晰条带出现, 与瘤菌根菌 DNA 条带大小相同。PCR 产物送上海生工测序, 通过序列比对同源性达 100%, 说明接菌后瘤菌根菌菌丝已侵入并定植石斛根中, 有效共生并形成了菌根。

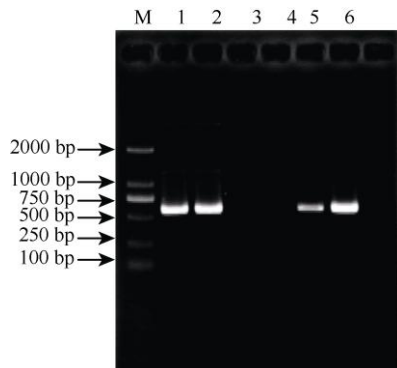


图 3 PCR 扩增产物电泳。M: DNA Marker; 1~2: 瘤菌根菌菌株; 3~4: 对照根; 5~6: 接菌根。

Fig. 3 Electrophoresis of PCR amplification. M: DNA Marker; 1-2: *Epulorhiza* sp.; 3-4: Control root; 5-6: Inoculated root.

## 2.7 瘤菌根菌对铁皮石斛地上部分的影响

由图 4 可以看出, 对照的铁皮石斛苗生长速度较慢, 植株较短, 且有效茎干数较少, 茎干总质量较轻; 而接菌的铁皮石斛苗生长旺盛, 植株较高, 有效茎干数较多, 茎干总质量是对照的 2.7 倍, 与对照呈显著差异, 说明用瘤菌根菌能促进铁皮石斛植株的生长, 提高有效茎干数, 增加了茎干的总质量。

## 3 讨论

植物通过根系从土壤中获取水分、养分以及能源供给自身生长。根系与土壤之间也在随时进行物质和能量交换。根长、根体积、根尖数的增加以及根毛的形成都有利于增大根表面与养分和水分的接触, 使根系从更深和更广的土层中吸收水分和养分, 提高水分和养分的利用率。

针对根菌对根侵染过程, 吴静萍等<sup>[20]</sup>的研究表明真菌菌丝从植物根毛或表皮细胞进入植物体内, 即通过外皮层通道细胞侵入皮层细胞, 形成菌丝圈和菌丝结。武静宇等<sup>[21]</sup>的研究表明真菌菌丝进入表皮并在细胞腔内形成螺旋状或弹簧状的菌丝附着物, 这些菌丝圈和附着物结构统称为胞内菌丝团, 菌丝团的出现是兰科菌根形成的标志。本研究中的瘤菌根菌在侵入铁皮石斛的根皮层细胞后, 在细胞内出现菌丝团, 说明瘤菌根菌与铁皮石斛根形成了菌根, 并建立起共生关系, 通过 ITS 鉴定后该菌已成功定殖于根中。



图 4 瘤菌根菌对铁皮石斛的地上部生长的影响。A: 幼苗; B: 有效茎干。

Fig. 4 Effect of *Epulorhiza* sp. on aboveground growth of *Dendrobium officinale*. A: Seedlings; B: Effective stems.

菌根真菌与根系建立共生关系后, 菌丝圈和菌丝结逐渐降解, 菌体的营养物质被植物吸收利用, 能为植物提供维生素 B<sub>1</sub>、维生素的前体 PABA 氨基酸、生长调节剂和生长所需的多种微量元素<sup>[22]</sup>。金辉等<sup>[6]</sup>的研究表明瘤菌根菌菌株可与铁皮石斛组培苗有效共生菌根, 使接菌的铁皮石斛苗生长势旺盛, 苗色浓绿, 茎粗壮呈红紫色, 产生新根多, 根系发达。本研究中的瘤菌根菌与石斛根形成共生关系后, 使原本只有一条主根的根系结构发生了变化, 主根上长出许多侧根和根毛, 侧根上还会形成二级侧根, 增加了根尖数和根体积, 也提高了根系活力和 IAA 含量。大量的研究证明生长素可以促进侧根的发生, 而促进侧根的发生也被认为是生长素的特性之一<sup>[23]</sup>, 至于瘤菌根菌是通过何种途径诱导铁皮石斛根系中 IAA 含量提高的, 并促进其侧根形成还需进一步研究。

本研究中的瘤菌根菌能通过侵入根表层细胞进入并定殖于细胞内, 形成共生菌根和建立互惠共生关系。铁皮石斛成为瘤菌根菌的寄主植物, 而瘤菌根菌促进了石斛根系侧根和根毛的生成, 从而增加了根尖数、根体积和表面积, 形成了发达的地下部系统, 能更好地吸收水分和营养成分以供地上部的生长, 这为下一步对其地上部的生长和营养品质的研究奠定基础。同时具有促进植物生长的内生真菌在农业生产上具有重要的意义, 可以减少化学农药和化肥的使用, 从而降低环境污染和农产品的农药残留, 这对于铁皮石斛的人工种植和有机种植都有重要的应用价值。

## 参考文献

- [1] SONG Z. Research on symbiotic relationship of *Dendrobium* sp. and *Tulasnella calospora* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017: 11–17.  
宋争. 石斛与美孢胶膜菌共生关系研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017: 11–17.
- [2] YU J, JIANG H X, ZHANG B Q, et al. Characterization of endophytic fungi from *Dendrobium officinale* and study of their influence on growth of seedling and protocorm [J]. Acta Phytopathol Sin, 2017, 47(4): 541–550. doi: 10.13926/j.cnki.apps.000062.  
喻静, 蒋海侠, 张保钱, 等. 两株铁皮石斛内生真菌对组培苗和原球茎生长的影响 [J]. 植物病理学报, 2017, 47(4): 541–550. doi: 10.13926/j.cnki.apps.000062.
- [3] LI M. The characteristics of orchidaceous mycorrhiza and application of mycorrhizal fungi in orchid culture [J]. J Yunnan Norm Univ, 2001, 21(4): 68–71.  
李明. 兰科菌根的特点及其菌根真菌在兰花培育中的应用 [J]. 云南师范大学学报, 2001, 21(4): 68–71.
- [4] GAI X G, XING X K, GUO S X. Ecological research of orchid mycorrhizae: A review [J]. Mycosystema, 2014, 33(4): 753–767. doi: 10.13346/j.mycosystema.140024.  
盖雪鸽, 邢晓科, 郭顺星. 兰科菌根的生态学研究进展 [J]. 菌物学报, 2014, 33(4): 753–767. doi: 10.13346/j.mycosystema.140024.
- [5] XU L, TIAN J N, WANG T, et al. Symbiosis established between orchid and *Tulasnella* spp. fungi [J]. J Nucl Agric Sci, 2017, 31(5): 876–883. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.05.0876.  
许璐, 田佳妮, 王涛, 等. 胶膜菌属真菌与兰科植物的共生体系建立 [J]. 核农学报, 2017, 31(5): 876–883. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.05.0876.
- [6] JIN H, XU Z X, CHEN J H, et al. Interaction between tissue-cultured seedlings of *Dendrobium officinale* and mycorrhizal fungus (*Epulorhiza* sp.) during symbiotic culture [J]. Chin J Plant Ecol, 2009, 33(3): 433–441. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.03.002.  
金辉, 许忠祥, 陈金花, 等. 铁皮石斛组培苗与菌根真菌共培养过程中的相互作用 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 433–441. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.03.002.
- [7] ZHU B, LIU J J, SI J P, et al. Effects of endophytic fungi from *Dendrobium officinale* on host growth and components metabolism of tissue culture seedlings [J]. Chin J Chin Mat Med, 2016, 41(9): 1602–1607. doi: 10.4268/cjcm20160906.  
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): 1602–1607. doi: 10.4268/cjcm20160906.
- [8] LIU H X, LUO Y B, LIU H. Studies of mycorrhizal fungi of Chinese orchids and their role in orchid conservation in China: A review [J]. Bot Rev, 2010, 76(2): 241–262. doi: 10.1007/s12229-010-9045-9.
- [9] WEI X W, LÜ J, WU H, et al. Research advances on plant roots [J]. N Hort, 2012(18): 206–209.  
未晓巍, 吕杰, 武慧, 等. 植物根系研究进展 [J]. 北方园艺, 2012(18): 206–209.
- [10] MALAMY J E. Lateral root formation [J]. Ann Plant Rev, 2009, 37: 479–480.
- [11] YU P, GUTJAHR C, LI C J, et al. Genetic control of lateral root formation in cereals [J]. Trends Plant Sci, 2016, 21(11): 951–961. doi: 10.1016/j.tplants.2016.07.011.
- [12] LIANG H Z, DONG W, XU L J, et al. QTL mapping for main root length and lateral root number in soybean at the seedling stage in

- different N, P and K environments [J]. *Sci Agric Sin*, 2017, 50(18): 3450–3460. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.18.002.
- 梁慧珍, 董薇, 许兰杰, 等. 不同氮磷钾处理大豆苗期主根长和侧根数的 QTL 定位分析 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3450–3460. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.18.002.
- [13] YAN N, WANG Q X, JI D G, et al. The invention relates to a tubercular mycorrhizal strain and its application and a mycorrhizal fungus inoculation method: CN, 201310467768.5 [P]. 2014-01-08.
- 严宁, 王秋霞, 纪大千, 等. 一种瘤菌根菌菌株及其应用和菌根真菌接种法: 中国, 201310467768.5 [P]. 2014-01-08.
- [14] ZHU X M, HU H, LI S Y, et al. Interaction between endophytic fungi and seedlings of two species of *Paphiopedilum* during symbiotic culture [J]. *Plant Div Resour*, 2012, 34(2): 171–178. doi: 10.3724/SP.J.1143.2012.11144.
- 朱鑫敏, 胡虹, 李树云, 等. 内生真菌与两种兜兰共培养过程中的相互作用 [J]. *植物分类与资源学报*, 2012, 34(2): 171–178. doi: 10.3724/SP.J.1143.2012.11144.
- [15] YAN H L, CHEN X M, LIAO F H, et al. Effects of mycorrhizal fungi on the growth and dendrobine and polysaccharide accumulation of *Dendrobium nobile* Lindl. seedlings [J]. *Chin Pharm J*, 2016, 51(17): 1450–1454.
- 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]. *中国药理学杂志*, 2016, 51(17): 1450–1454.
- [16] LI Z T, ZHOU Y. *Plant Hormones and their Immunoassays* [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1996: 1–345.
- 李宗霆, 周燮. 植物激素及其免疫检测技术 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996: 1–345.
- [17] WANG W Y, QIU Y X, QIU S L, et al. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of sweet potato leaves infected by *Ralstonia solanacearum* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2014, 22(6): 610–616. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2014.06.009.
- 王伟英, 邱永祥, 邱珊莲, 等. 薯瘟菌对甘薯叶片光合特性及叶绿体结构的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2014, 22(6): 610–616. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2014.06.009.
- [18] ZOU Q. *Guidance for Plant Physiological and Biochemical Experiments* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 261–263.
- 邹琦. 植物生理生化实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 261–263.
- [19] SU J W, WANG X P. Cadmium-induced membrane lipid peroxidation and programmed cell death in tea seedling [J]. *J Plant Physiol Mol Biol*, 2002, 28(4): 292–298. doi: 10.3321/j.issn:1671-3877.2002.04.008.
- 苏金为, 王湘平. 镉诱导的茶树苗膜脂过氧化和细胞程序性死亡 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2002, 28(4): 292–298. doi: 10.3321/j.issn:1671-3877.2002.04.008.
- [20] WU J P, QIAN J, ZHENG S Z. A preliminary study on ingredient of secretion from fungi of orchid mycorrhiza [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(7): 845–848.
- 吴静萍, 钱吉, 郑师章. 兰花菌根菌分泌物成分的初步分析 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 845–848.
- [21] WU J Y, HU T, YANG S Z, et al. rDNA ITS analysis and preliminary study in the specificity for the symbiotic mycorrhizal fungi of *Cymbidium goeringii* and *Cymbidium faberi* [J]. *Ecol Sci*, 2009, 28(2): 134–138. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.02.008.
- 武静宇, 胡陶, 杨淑贞, 等. 春兰和蕙兰菌根真菌 rDNA ITS 序列及共生专一性分析 [J]. *生态科学*, 2009, 28(2): 134–138. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.02.008.
- [22] SHUAI H Y. Studies on isolation, identification and bioactivity of endophytic fungi from *Dendrobium candidum* grew in Huanjiang of Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2008: 3–8.
- 帅红艳. 广西环江产铁皮石斛内生真菌的分离鉴定及其生物活性的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2008: 3–8.
- [23] XING G F, FENG W J, NIU X L, et al. Physiological mechanisms in phytohormone regulation of plant lateral root development [J]. *Plant Physiol J*, 2015(12): 2101–2108. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2015.0560.
- 邢国芳, 冯万军, 牛旭龙, 等. 植物激素调控侧根发育的生理机制 [J]. *植物生理学报*, 2015(12): 2101–2108. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2015.0560.