

接种福廷瓶头霉对毛棉杜鹃幼苗共生效应及其对加磷的响应

刘永金¹, 徐滔¹, 袁银¹, 刘亚², 洪文君², 庄雪影^{2*}

(1. 深圳市梧桐山风景区管理处, 广东深圳 518000; 2. 华南农业大学林

学与风景园林学院, 广东广州 510642)

摘要 [目的] 研究接种福廷瓶头霉对毛棉杜鹃的共生效应及其对加磷处理的响应。[方法] 采用回接试验法, 设置了4个加磷梯度(P0: 不加磷, 半磷 P1: 0.5 mmol/L, 全磷 P2: 1.0 mmol/L, 高磷 P3: 1.5 mmol/L), 分析了接种福廷瓶头霉及加磷对毛棉杜鹃幼苗生长、根系形态和植物氮、磷吸收效率的作用。[结果] (1) 在不加磷时, 接菌组的苗高、基径、平均冠幅净生长量和叶面积均显著高于CK组; 加磷处理后, 接菌组和CK组对磷浓度变化的生长响应趋势不一致; 加磷处理可促进CK组苗高、冠幅和基径的增长, 叶面积呈现先升后降趋势, 以P1时最大; 加磷对接菌组的苗高影响不显著, 对冠幅和基径的增长具有抑制作用, 叶面积呈现先降后升趋势, 以P2时最低, P0和P3时显著高于P2; (2) 接菌组的生物量显著高于CK组, 增量为22.46%~242.86%; 不加磷时, 毛棉杜鹃对共生体依赖性强(322.1%), 高磷时对共生体依赖性中等(243.1%), 半磷和全磷时对共生体依赖性较弱(124.4%~144.6%)。 (3) 接菌能促进毛棉杜鹃根系的发育, 总根长、总表面积和总体积均显著高于CK组; 加磷可促进其微根和细根体积比例的增加。 (4) 接菌可促进毛棉杜鹃幼苗的氮、磷元素吸收效率, 其氮、磷吸收效率增量分别为59.16%~310.07%和59.44%~197.91%, 在P0和P3条件下, 其促进作用更显著。[结论] 福廷瓶头霉可通过与毛棉杜鹃形成共生体, 促进宿生植物的生长及氮、磷吸收, 也可有效提高毛棉杜鹃耐磷胁迫能力。

关键词 毛棉杜鹃; 福廷瓶头霉; 共生效应; 加磷; 根系形态; 氮、磷吸收

中图分类号 S718.81 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)34-225-04

Symbiotic Effect and Responses to Adding Phosphorus to *Rhododendron moulmainense* Seedling after Inoculated with *Phialocephala fortinii*

LIU Yong-jin¹, XU Tao¹, YUAN Yin¹, ZHUANG Xue-ying^{2*} et al (1. Administrative Office of Wutong Mountain National Park, Shenzhen, Guangdong 518004; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642)

Abstract [Objective] Symbiotic effect and responses to adding phosphorus to *Rhododendron moulmainense* seedling after inoculated with *Phialocephala fortinii* was studied. [Method] Inoculation pot experiment was used. Four concentrations (P0: without adding P, P1: adding 0.5 mmol/L P, P2: adding 1.0 mmol/L P, P3: adding 1.5 mmol/L P) were added. *P. fortinii* from the roots of *R. moulmainense* was used to study the effect on growth, nitrogen (N) and phosphorus (P) absorption and responses to adding phosphorus (P). [Result] (1) The growth, N and P absorption of the inoculated seedlings were better than the control (CK) without adding P. However, the responses to adding P were different between inoculated treatment and control treatment; adding P could enhance the seedling height, crown and basal diameter. The leaf area showed increasing-declining trend with the highest point in P1; adding P didn't have significant effect on seedling height of Pf, but depressed in the basal diameter and crown. The leaf area showed declining-increasing trend with the lowest in P2 and highest points in P0 and P3. (2) The biomass of inoculate seedlings were 22.46%~242.86% higher than CK. The inoculated seedlings had the strong dependency (322.1%) in P0, moderate dependency (243.1%) in P3, and low dependency (124.4%~144.6%) in P1 and P2. (3) Inoculation could facilitate the root development of *R. moulmainense*. Their root length, surface areas and total volumes were significantly higher than CK. Adding P could increase micro and fine root percentage of Pf. (4) Inoculation could increase the absorption of N/P, varying 59.16%~310.07% (N) and 59.44%~197.91% (P), the facilitation effects were higher in P0 and P3. [Conclusion] *P. fortinii* could develop symbionts to enhance seedling growth, N and P absorption of *R. moulmainense*. It could also improve seedling growth under P stress.

Key words *Rhododendron moulmainense*; *Phialocephala fortinii*; Symbiotic effect; Adding phosphorus; Root morphology; N/P absorption

在自然界中, 杜鹃属植物根内具有丰富的内生真菌^[1-2]。近年的研究表明, 接种内生真菌对云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)^[3-4]、锦绣杜鹃(*R. pulchrum*)^[5-6]、桃叶杜鹃(*R. anne*)^[7-8]等常绿高山杜鹃生长有较好的促进作用。福廷瓶头霉(*Phialocephala fortinii*)是一种可与植物共生, 在根内形成黑色有隔菌丝结构的内生真菌(Dark Separate Endophytes, DSE)。已有研究报道DSE对黑海杜鹃(*R. ponticum*)、树枫杜鹃(*R. changii*)等植物的生长有显著促进作用^[9-11]。

毛棉杜鹃(*R. moulmainense*)为杜鹃花科杜鹃属植物, 树形优雅, 具有较高观赏价值, 主要分布于我国江西、福建、湖南、广东和云南等省^[12]。杜鹃花属为菌根依赖型植物, 菌根

对杜鹃花类植物的营养吸收、增强对逆境因子的抗性等方面具有促进作用。前期研究结果揭示了毛棉杜鹃根内具有丰富的内生真菌^[13], 包括福廷瓶头霉, 但该菌对毛棉杜鹃幼苗生长、根系发育及其氮、磷吸收功能的影响尚不清楚。该研究应用回接技术, 探讨了接种福廷瓶头霉对毛棉杜鹃幼苗在不同磷浓度下, 其接菌苗生长、生物量、根系形态及氮、磷吸收效率, 拟为菌根接种技术的应用及杜鹃属植物优良菌株的筛选提供技术基础。

1 材料与方法

1.1 试验地及试验材料 试验地位于深圳市梧桐山风景区苗圃温室(23°36'28" N, 113°18'46" E), 通过喷灌系统调整温室温度25~35℃。深圳市地处南亚热带季风区, 年平均气温为21.8℃, 年平均降雨量为1 623.6~1 899.8 mm。试验苗为2个月实生苗, 选择长势均匀的毛棉杜鹃实生苗, 平均苗高为1.1 cm, 平均基径为0.6 mm, 2014年5月移栽于容器穴盘(高0.42 cm, 底部直径13 mm), 以V(泥炭土): V(珍珠岩)=3:1作为基质, 供试的土壤基质均经0.1% K₂MO₄ 灭

基金项目 深圳市城管局科研项目(201408)。

作者简介 刘永金(1964-), 男, 广东电白人, 教授级高级工程师, 硕士, 从事风景园林研究。*通讯作者, 教授, 博士, 从事植物学研究。

收稿日期 2015-11-11

菌。基质土壤自然含水量为 87.07 g/kg, pH 为 5.1, 土壤有机质含量为 141.8 g/kg, 全氮、全磷和全钾含量分别为 2.7、0.4 和 12.4 g/kg, 有效氮、有效磷和速效钾含量分别为 180.7、17.6 和 55.3 mg/kg。试验期间保持一致的日常生长管理。

1.2 苗木接种技术及试验设计 供试菌株福廷瓶头霉是从毛棉杜鹃野生植株根中分离获得, 采用摇床发酵培养制备菌剂, 2014 年 4 月开始培养, 培养 20 d。2014 年 5 月初开始, 采用在穴盘孔的两个对角打孔注入菌剂的方式, 每株根施 2 ml, 每隔 15 d 施菌 1 次, 连续施菌 3 次, 以不施菌为对照组, 施菌组和对照组编号分别为 Pf 和 CK。2014 年 6 月 15 日开始对加菌组和不加菌组进行磷浓度处理, 对幼苗浇灌含不同磷浓度的 Hoagland 营养液, 以 $K_2HP_3O_4$ 调节磷浓度。磷浓度分别为 0 mmol/L (P0, 缺磷)、0.5 mmol/L (P1, 半磷)、1.0 mmol/L (P2, 全磷) 和 1.5 mmol/L (P3, 高磷), 每个处理 30 株, 设置 3 个重复。每隔 30 d 测量幼苗苗高、基径和冠幅。

1.3 测量指标及方法

1.3.1 苗木生长。 苗高(基径、冠幅)净生长量(9月) = 收获时生长量 - 初始生长量(5月)。并对叶面积进行了测定。

1.3.2 生物量和根冠比检测。 幼苗经 105 °C 的烘箱中烘 15 min 杀青后, 置于 70 °C 烘干 24 h, 测定地上部、地下部生物量和总生物量, 并计算根冠比和菌根依赖性指标。

根冠比 = 地下部生物量/地上部生物量; 菌根依赖性 = 处理组植株的干重/对照植株干重 × 100%。菌根依赖性 < 200%, 为弱依赖性; 200% < 菌根依赖性 < 300%, 为中等依赖性; 菌根依赖性 > 300%, 为强依赖性^[14]。

1.3.3 根系性状指标。 用根系扫描仪 Win-Rhizo 2007c 对根

系扫描, 分析根系性状指标(总根长、总根表面积、总根体积和平均根系直径), 并将根系直径划分为微细根 $d1 < 0.5$ mm、细根 $0.5 \text{ mm} \leq d2 < 1.0$ mm 和粗根 $d3 \geq 1$ mm。

1.3.4 磷、氮元素吸收效率。 对收获植株, 采用氢氧化钠熔融 - 钼锑抗比色法测定全磷含量, 采用凯氏定氮法测定全氮含量, 并计算植株的氮、磷元素积累量求得氮、磷吸收效率。

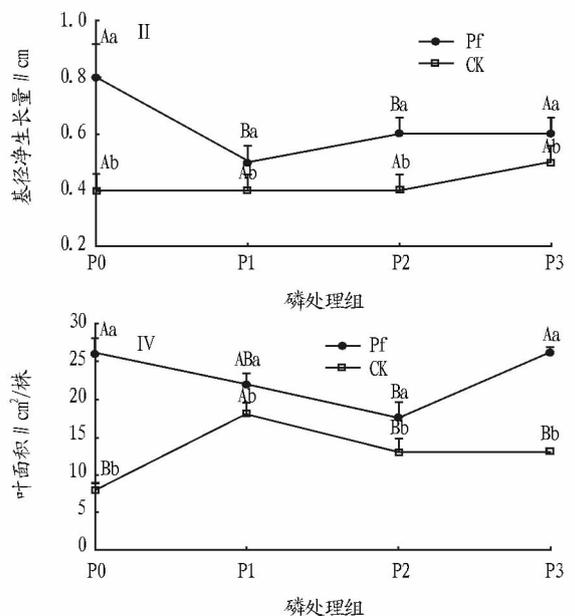
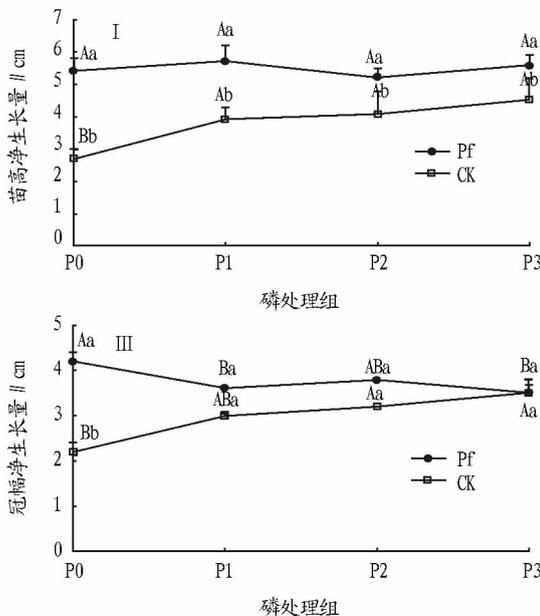
磷吸收效率 (mg/株) = 各部分磷含量 × 各部分干重再相加^[15]

氮吸收效率 (mg/株) = 各部分氮含量 × 各部分干重再相加^[16]

1.4 数据分析方法 试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 软件进行统计分析。用单因素方差分析法 one-way ANOVA 分析差异显著性。

2 结果与分析

2.1 加磷处理对接种菌苗生长的影响 生长检测结果表明, 无论是加磷还是不加磷处理, 接种组 (Pf) 的苗高、基径、冠幅的净生长量和叶面积均高于 CK 组 (图 1)。在不加磷 (P0) 时, Pf 组的苗高、基径和冠幅净生长量显著高于 CK 组; 加磷后, CK 组的苗高和冠幅生长随着磷浓度上升呈上升趋势, 基径在 P3 (高磷) 时出现显著上升, 叶面积在 P1 (半磷) 时呈现最大值。随着磷浓度的增加, 叶面积下降, 反映了过高的磷浓度对非接种苗的叶面积有抑制作用。与 CK 组相比, 接种 Pf 组的苗高和冠幅变化对加磷浓度处理组变化不显著, 基径和叶面积呈下降趋势, 但在高磷处理时与 P0 相近。



注: 图中不同大写字母表示同一菌剂在不同磷浓度上的差异极显著 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示不同菌剂在同一磷浓度的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同磷浓度条件下幼苗生长比较

2.2 加磷对接种菌苗生物量和根冠比的影响 生物量检测结果表明, 无论是加磷处理还是不加磷处理, 接种 Pf 处理组的生物量均高于 CK 组, 在 P2 条件下, 接种 Pf 组小于 CK 组,

但幼苗的根冠比在 P2 浓度时低于 CK 组 (表 1)。在 P0 和 P3 浓度下, 接种 Pf 组幼苗的生物量显著高于 CK 组, 分别比 CK 组增加 242.86% 和 127.27%, P1、P2 组与 CK 组生物量的差

异不显著,反映了毛棉杜鹃在半磷和高磷时,接菌苗的共生效应发挥作用更显著。接菌后,Pf 组幼苗的根冠比在 P1 浓

度时显著高于 P0 和 P3 组,但 CK 组幼苗根冠比在不同磷浓度间的差异不显著。

表 1 不同磷浓度下幼苗生物量和根冠比比较

磷浓度	处理	生物量//g/株	增量//%	根冠比	增量//%	共生体依赖性//%
P0	Pf	0.24 ± 0.01	242.86 ± 23.56	0.22 ± 0.02	15.79 ± 1.46	322.1
	CK	0.07 ± 0.01		0.19 ± 0.02		
P1	Pf	0.18 ± 0.02	22.46 ± 1.89	0.38 ± 0.03	245.45 ± 24.63	124.4
	CK	0.15 ± 0.05		0.11 ± 0.03		
P2	Pf	0.15 ± 0.01	51.44 ± 8.35	0.13 ± 0.02	-35.25 ± 4.67	144.6
	CK	0.10 ± 0.06		0.20 ± 0.04		
P3	Pf	0.25 ± 0.02	127.27 ± 11.35	0.22 ± 0.03	22.25 ± 2.89	243.1
	CK	0.11 ± 0.03		0.18 ± 0.04		

2.3 加磷对接种菌苗根系形态特征的影响 根系形态检测结果表明,接种 Pf 菌能显著促进毛棉杜鹃幼苗根系发育。无论是加磷还是不加磷,接种 Pf 处理组的根系总根长、根表面积和根体积均显著高于 CK 组(表 2)。随着磷浓度的增大,CK 组幼苗的总根长、根表面积和根体积呈上升趋势,但

Pf 处理组的总根长和根表面积呈先上升后下降趋势,根系总根长和总根表面积均在 P1 浓度时最高,分别为 712.85 cm 和 79.82 cm²,总根体积和根系直径均以 P3 浓度时较高,但不同组间的差异不显著。

表 2 不同磷浓度下幼苗根系形态特征比较

磷浓度	处理	总根长//cm	根表面积//cm ²	根体积//cm ³	根系直径//mm
P0	Pf	610.61 ± 23.81ABa	64.79 ± 5.62Ba	0.55 ± 0.11Ba	0.34 ± 0.04Aa
	CK	222.64 ± 47.99Bb	14.34 ± 2.17Cb	0.08 ± 0.01Bb	0.28 ± 0.09Ba
P1	Pf	712.85 ± 99.93Aa	79.82 ± 5.76Aa	0.73 ± 0.20Aa	0.36 ± 0.08Aa
	CK	211.30 ± 75.01Bb	16.09 ± 5.75Cb	0.10 ± 0.04Bb	0.24 ± 0.01Bb
P2	Pf	523.31 ± 41.53Ba	54.39 ± 0.83Ba	0.42 ± 0.03Ba	0.36 ± 0.03Aa
	CK	306.93 ± 50.36Ab	25.57 ± 9.71Bb	0.18 ± 0.11ABb	0.26 ± 0.06Bb
P3	Pf	537.55 ± 103.71Ba	73.57 ± 32.49Aa	1.07 ± 0.57Aa	0.42 ± 0.11Aa
	CK	368.35 ± 36.10Ab	33.72 ± 1.75Ab	0.26 ± 0.06Ab	0.40 ± 0.17Aa

从不同根系直径的比例来看,在不加磷时,Pf 组的根系直径 *d*₁、*d*₂ 和 *d*₃ 的根段占总根长比例和总根表面积与 CK 组的差异不大(表 3)。加磷处理后,在 P1 和 P3 浓度时,Pf 组微细根 *d*₁ 根段占总根表面积比例(50.55% ~ 55.75%)显著高于 CK 组(39.05% ~ 40.04%),粗根 *d*₃ 占总根表面积比

例(19.02% ~ 24.95%)显著低于 CK 组(34.86% ~ 35.52%)。整体来看,Pf 组对加磷处理的响应较为明显,除 P2 浓度外,其细根 *d*₂ 体积比例在 P1 和 P3 浓度时显著高于 CK 组,反映了接菌苗组根系结构对土壤磷胁迫变化的响应比较敏感。

表 3 不同磷浓度下幼苗根系形态在不同径阶比例的比较

磷浓度	处理	占总根长比例//%			占总根表面积比例//%			占总根体积比例//%		
		<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃
P0	Pf	87.40Aa	9.49Aa	3.13Aa	45.21Ba	25.74Aa	29.03Aa	6.86Bb	14.76Bb	78.37Aa
	CK	87.85Aa	9.10Aa	3.03Aa	47.94Ba	25.61Aa	26.44Aa	13.83Ba	26.76Aa	59.40Bb
P1	Pf	90.41Aa	7.51Bb	2.06Ab	55.75Aa	25.22Aa	19.02Bb	15.37Ba	26.92Aa	58.33Bb
	CK	85.62Ab	10.24Aa	4.13Aa	40.04Bb	24.42Aa	35.52Aa	6.21Bb	13.64Bb	80.14Aa
P2	Pf	90.17Aa	7.37Aa	1.45Ba	54.27Aa	28.19Aa	17.52Ba	27.13Aa	46.30Aa	25.56Ca
	CK	90.75Aa	7.68Aa	1.55Ba	59.55Aa	26.91Aa	13.53Ba	20.41Aa	35.69Aa	43.89Ba
P3	Pf	90.31Aa	7.51Ba	2.16Aa	50.55Aa	24.48Aa	24.95Ab	21.82Aa	36.28Aa	41.88Bb
	CK	87.66Aa	9.14Aa	3.19Aa	39.05Bb	26.07Aa	34.86Aa	6.38Bb	13.64Bb	79.96Aa

2.4 接种福廷瓶头霉对毛棉杜鹃幼苗氮、磷素吸收效率影响 无论是加磷还是不加磷处理,Pf 组幼苗的氮、磷吸收效率均较高(表 4)。在不加磷时,CK 组幼苗的氮和磷吸收效率较低,而接菌苗的氮、磷吸收效率分别比 CK 组增加了 231.16% 和 195.14%。加磷处理后,CK 组幼苗的吸收效率

呈先上升后下降趋势,接菌苗的氮、磷吸收效率随着磷浓度增大呈上升趋势,在 P3 浓度时达到最高,分别比 CK 组增加 310.07% 和 197.91%。反映了加磷可有效促进毛棉杜鹃幼苗根系共生体的发育,扩大根系营养吸收面积和能力。

表4 不同磷浓度下幼苗氮、磷吸收效率比较

磷浓度	氮吸收效率			磷吸收效率		
	Pf//mg/株	CK//mg/株	增量//%	Pf//mg/株	CK//mg/株	增量//%
P0	32.22 ± 1.50b	9.71 ± 0.53b	231.16 ± 14.25b	25.53 ± 1.31b	8.65 ± 0.88b	195.14 ± 20.42a
P1	29.19 ± 1.34b	18.34 ± 0.93a	59.16 ± 2.46c	29.37 ± 2.05b	18.42 ± 1.22a	59.44 ± 3.54b
P2	39.33 ± 1.24a	13.46 ± 1.12b	192.19 ± 8.98b	31.32 ± 1.16b	17.64 ± 1.18a	77.55 ± 2.44b
P3	42.32 ± 1.63a	10.32 ± 0.46b	310.07 ± 32.45a	42.81 ± 1.62a	14.37 ± 1.31ab	197.91 ± 12.93a

3 结论与讨论

3.1 毛棉杜鹃接种福廷瓶头霉菌根的促生评价 福廷瓶头霉为深色有隔类内生真菌,能够与植物根部形成共生体,对宿主无致病性^[11]。欧静^[18]和Guo等^[17]研究结果揭示该菌可与杜鹃花属植物形成共生体,共生体的形成有利于植物生长。谢玲等^[18-19]研究结果也表明,接种 *Phialocephala fortinii*、*P. finlandia* 和 *Meliniomyces variabilis* 等内生真菌均可显著促进铁皮石斛 (*Dendrobium candidum*) 和甘蔗 (*Sugarcane rhizosphere*) 生长。该研究表明,与 CK 组相比,接种福廷瓶头霉能促进毛棉杜鹃幼苗共生效应,对其幼苗的苗高、基径净生长量具有较好的促进作用。此外,该研究还表明,接菌苗可通过调整根系形态来适应磷胁迫环境。因此,接种该内生真菌有利于解决毛棉杜鹃苗期生长过慢的问题。

3.2 磷浓度对毛棉杜鹃幼苗菌根效应的探讨 磷元素是植物生长三要素之一,而华南地区土壤普遍为砖红壤,缺磷严重。在一定范围内增加磷供应量可促进植物的生长,而磷浓度过高不利于植物生长^[19-22]。因此,菌根菌与植物的正常共生状态需一个最佳的土壤磷素营养环境。该研究表明,无论是加磷还是不加磷处理,接菌苗的生长及氮、磷吸收效率均显著高于非接菌的对照组;虽然加磷处理对 CK 组苗高和冠幅生长有促进作用,但高磷对其叶面积有抑制作用。与 CK 组相比,加磷处理会抑制接菌苗的生长,可能是磷含量的增加不利于内生菌的生长,从而抑制了其共生效应。但在缺磷(P0)和半磷(P1)浓度时,接菌组幼苗的氮、磷吸收效率并不最佳,其具体机理还需进一步研究。

参考文献

- [1] USUKI F, ABE J P, KAKISHIMA M. Diversity of ericoid mycorrhizal fungi isolated from hair roots of *Rhododendron obtusum* var. *kaempferi* in a Japanese red pine forest [J]. *Mycoscience*, 2003, 44: 97 - 102.
- [2] ZHANG C Y, YIN L J, DAI S L. Diversity of root-associated fungal endophytes in *Rhododendron fortunei* in subtropical forests of China [J]. *Mycorrhiza*, 2009, 19: 417 - 423.
- [3] 尹丽娟, 张春英, 杨兵. 云锦杜鹃 ERM 真菌氮源吸收特性及其接种效应[J]. *园林科技*, 2010, 43(4): 7 - 9.

- [4] 张春英, 陈真, 于芳, 等. 云锦杜鹃 ERM 真菌接种效应研究及优良菌株筛选[J]. *上海农业学报*, 2010, 26(2): 38 - 41.
- [5] ECCHER T, NOE N, BACCHETTA M. The influence of ericoid endomycorrhizae and mineral nutrition on the growth of micropropagated plants of *Vaccinium corymbosum* [C]//VIII International Symposium on Vaccinium Culture. Sevilla, Spain, 2006: 411 - 416.
- [6] 陈真, 杨兵, 张春英, 等. 锦绣杜鹃菌根真菌 rDNA - ITS 序列分析及接种效应研究[J]. *菌物学报*, 2011, 30(5): 729 - 737.
- [7] JANSÁ J, VOSATKA M. In vitro and post vitro inoculation of micropropagated *Rhododendrons* with ericoid mycorrhizal fungi [J]. *Applied soil ecology*, 2000, 15(2): 125 - 136.
- [8] 欧静, 韦小丽, 何跃军, 等. 接种 ERM 真菌对桃叶杜鹃幼苗的促生效应及生理生化影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(7): 48 - 56.
- [9] VOHNÍK M, ALBRECHTOVÁ J. The co-occurrence and morphological continuum between ericoid mycorrhiza and dark septate endophytes in roots of six European *Rhododendron* species [J]. *Folia geobot*, 2011, 46: 373 - 386.
- [10] 刘振华, 姚娜, 杨凯, 等. 树根杜鹃菌根真菌分离与鉴定[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(6): 795 - 797.
- [11] 刘茂军, 张兴涛, 赵之伟. 深色有隔内生真菌(DSE)研究进展[J]. *菌物学报*, 2009, 28(6): 888 - 894.
- [12] WU Z Y, HONG D Y. *Flora of China*: Vol. 14 [M]. Beijing: Science Press, 2005: 427.
- [13] 刘亚, 张国强, 洪文君, 等. 深圳梧桐山毛棉杜鹃根内真菌的分离与鉴定[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(29): 9 - 12.
- [14] 弓明钦. 菌根研究及应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 30 - 32.
- [15] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 半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.
- [16] 黄乙, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型大麦氮素转移及氮形态组分特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(6): 1151 - 1161.
- [17] GUO B, STILES A R, LIU C Z. Changes in endogenous hormones and oxidative burst as the biochemical basis for enhanced shoot or GA₃ organogenesis in cold treated *Saussurea involucreta* explants [J]. *Acta physiologiae plantarum*, 2012, 35(1): 283 - 287.
- [18] 谢玲, 张雯龙, 覃丽萍, 等. 深色有隔内生真菌(DSE)引进菌株对铁皮石斛的接种效应[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(6): 1010 - 1014.
- [19] 谢玲, 张雯龙, 覃丽萍, 等. 深色有隔内生真菌(DSE)对甘蔗苗生长影响初探[J]. *南方农业学报*, 2013, 44(11): 1827 - 1830.
- [20] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 86 - 149.
- [21] 高艳. 两种苜蓿对半磷胁迫的响应和生理适应机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 10 - 32.
- [22] 袁军, 谭晓风, 叶思诚, 等. 不同磷源对酸性红壤养分及油茶幼苗生长的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 155 - 160.

(上接第 105 页)

参考文献

- [1] 邢光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 16 - 50.
- [3] 侯福林. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 向荣, 王鼎年. 过氧化脂质硫代巴比妥酸分光光度法的改进[J]. *生物化学与生物物理进展*, 1990, 17(3): 241 - 242.
- [5] 王启明. 镉胁迫对大豆种子萌发中膜脂过氧化作用及体内保护酶活性的影响[J]. *种子*, 2006, 25(3): 15 - 18.

- [6] 郝再彬, 仓晶, 徐仲. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [7] 张春荣, 李红, 夏立江, 等. 镉、锌对紫花苜蓿种子萌发及幼苗的影响[J]. *华北农学报*, 2005, 20(1): 96 - 99.
- [8] 丁圆, 谢海荣. 重金属胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响[J]. *南昌航空工业学院学报*, 2004, 18(4): 45 - 47.
- [9] 刘波, 吕宪国, 姜明, 等. 光照、水深交互作用对松嫩湿地芦苇种子萌发的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 616 - 620.
- [10] 张凤琴, 王友绍, 董俊德, 等. 重金属污水对木樨幼苗几种保护酶及膜脂质过氧化作用的影响[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(2): 66 - 70.
- [11] 王玖林, 耿明建, 刘武定. 外源多胺和硼对油菜苗期生长和膜质过氧化的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(2): 217 - 219.