

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第33卷第19期

2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究
..... 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响
..... 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝桤柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例
..... 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 宗 宁, 石培礼, 蔺 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良, 崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306061367

宋成军, 曲来叶, 马克明, 傅伯杰, 陈玲. AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响. 生态学报, 2013, 33(19): 6121-6128.

Song C J, Qu L Y, Ma K M, Fu B J, Chen L. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of *Bauhinia faberi* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6121-6128.

AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响

宋成军¹, 曲来叶², 马克明^{2,*}, 傅伯杰², 陈 玲¹

(1. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所/农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;

2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100041)

摘要:丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌在退化生态系统恢复与重建实践中具有重要作用。采用盆栽模拟方法, 重点分析不同土壤磷条件下小马安羊蹄甲(*Bauhinia faberi*)幼苗接种 AM 真菌后, 幼苗的形态、生物量积累、菌根侵染率和菌根效应(mycorrhizal growth response, MGR)在一个生长季内的动态变化。结果表明, *Glomus mosseae* 和 *Glomus coronatum* 能较好地侵染幼苗, 两种 AM 真菌显著地增加幼苗根系、叶片数和生物量; 接种 AM 真菌显著影响幼苗的生物量分配, 而土壤磷对幼苗的生物量分配影响不明显, AM 真菌和土壤磷对幼苗生长的交互作用显著; *G. mosseae* 是小马安羊蹄甲的优势 AM 菌, 其接种的幼苗根长、叶片数、生物量、侵染率和菌根效应都显著高于 *G. coronatum* 处理的幼苗; 菌根效应显著, 接种 AM 真菌能有缓解土壤磷素缺乏的限制作用, 且随着苗龄增大促进作用表现更为明显。不同 AM 菌种对小马安羊蹄甲幼苗生长的促进作用表现出的差异, 提示在多元资源限制的干旱贫瘠环境中进行生物修复须为目标恢复物种筛选出高效的 AM 真菌。

关键词:退化生态系统; 丛枝菌根真菌; 多元养分限制; 生长动态; 植被恢复

Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of *Bauhinia faberi* seedlings

SONG Chengjun¹, QU Laiye², MA Keming^{2,*}, FU Bojie², CHEN Ling¹

1 Key Laboratory Of Energy Resource Utilization From Agricultural Residues (MOA), Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agriculture Engineering, Beijing 100125, China

2 Research Centre of Eco-environmental, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100041, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi play key roles in ecological restoration and ecological reconstruction of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. Based on the previous results of limiting soil moisture and soil available phosphorus (AP) deficit in the arid valley of Mingjiang River, which is one of the main branches of Yangtze River and located in the north of the Hengduan Mountain Systems, a full factorial and completely random pot experiment in a greenhouse was designed and conducted to understand the influence of two AM fungi (*Glomus mosseae* and *Glomus coronatum*) on dynamics of *Bauhinia faberi* seedling growth. We calculated biomass production and its partitioning, inoculation rate, and mycorrhizal growth response (MGR) across one growth season with two soil AP concentration (P1: 6.0 and P2: 24.0 mg P/kg soil). The following results were obtained: (1) Irrespective of both low and high soil AP concentration (6.0 mg/kg and 24.0 mg P /kg soil), both AM fungi could well colonized root of *B. faberi* seedlings. Under two soil AP conditions, growth promotion effects on seedling root, leaf number and biomass production were significantly increased marked when inoculating *B. faberi* seedling roots with both AM fungi (*G. mosseae* or *G. coronatum*); (2) inoculation with *G. mosseae* or *G. coronatum* on seedling root significantly impacted on root biomass accumulation and its partitioning ($P < 0.05$). However, soil AP did a little effect on biomass accumulation and its partitioning ($P > 0.05$), the coupling interaction between inoculated with AM fungi and soil AP was obvious ($P < 0.05$) by multivariate analysis of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41101270, 31170581)

收稿日期: 2013-06-06; 修订日期: 2013-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@cees.ac.cn

variance (MANOVA); (3) The inoculation rate of *G. mosseae* ranged from 51% to 71% under low soil AP condition and ranged from 60% to 74% under high soil AP condition, the inoculation rate of *G. coronatum* did from 30% to 31% under low soil AP condition and from 35% to 58% under high soil AP condition. Therefore, seedling inoculated with *G. mosseae* had absolutely higher the root length, leaf number, total biomass, inoculation rate, and MGR than those of seedlings inoculated with *G. coronatum*. The result suggested that *G. mosseae* is the more appropriate host for *B. faberi* in poor arid environment; (4) MGR of *G. mosseae* and *G. coronatum* was marked increasing, Inoculation with AM fungi can decrease the limiting strengthen of soil AP. Moreover, the extent with age of seedlings (both 48 and 86 day) was apparently more stronger than those seedlings of 104 day. However, no significant higher of inoculation rates for both AM fungi under 6.0 and 24.0 mg P/kg soil condition demonstrated that the impacts of soil AP on inoculation rate of AM fungi was weakly. The different abilities of both AM fungi (*G. mosseae* or *G. coronatum*) could improve growth on *B. faberi* seedling, which indicated that it is important and necessary to select beneficial AM fungi for vegetation restoration practice in multi-resource limiting regions.

Key Words: degraded ecosystem; arbuscular mycorrhizal fungi; multi-resource limitation; growth dynamics; vegetation restoration

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是自然界中分布极其广泛,农业和生态意义十分重大的一类土壤微生物,它能够与陆地上 90%以上的植物根系形成 AM^[1-3]。AM 不仅能增强寄主植物对土壤中水分和养分的吸收,而且分泌的相关土壤蛋白参与土壤团聚体的形成和稳定,从而促进寄主植物的生长和改善土壤结构,所以在退化生态系统恢复与重建过程中具有重要功能^[4-6],生态恢复中 AM 的作用备受关注。

横断山区干旱河谷是青藏高原特殊气候与地理环境条件下形成的脆弱生境,是我国生态环境综合治理的关键区域,有效促进干旱河谷植被恢复和重建,遏制生态退化,已成为当前一项迫切的任务^[7]。小马鞍羊蹄甲(*Bauhinia faberi*)是该区域现存植被中多年生乡土优势灌木之一,在横断山区干旱河谷区域广为分布,具有较强的耐旱特性和优良的水土保持性能,亦可作为饲料、薪材和药用^[8],小马鞍羊蹄甲植被的恢复会产生很好的生态、社会 and 经济效益,具有巨大的植被恢复潜力。然而,植被调查中并未发现其幼苗的大量存在,严酷的干旱环境和贫瘠的土壤可能严重制约了幼苗的定居。我国退化生态系统中均存在 AM 真菌^[9],球囊霉属(*Glomus*)是干旱生态系统中分布最广泛 AM 真菌,*Glomus mosseae* 则是干旱生态系统中的优势 AM 菌种,豆科植物是其寄生的优势类群^[10]。尽管干旱环境条件下小马鞍羊蹄甲对水分和养分胁迫的适应能力已有所研究和揭示^[8,10-11],而 AM 真菌在干旱和缺磷条件下对本区域优势灌木促生作用一直缺乏必要的研究,缺磷条件下 AM 的形成能否改善小马鞍羊蹄甲适应干旱环境的能力并不清楚。因此,针对该区土壤水分和磷素多元层级的资源限制结构^[11-12],人为接种该区域植被的优势 AM 真菌,假设接种 AM 真菌后菌根效应显著,可以刺激小马鞍羊蹄甲幼苗生长,且不同年龄幼苗对不同 AM 菌种的响应程度不同,使得幼苗能够更好地适应干旱贫瘠环境。为此,本研究采用盆栽方法模拟干旱缺磷环境,重点分析不同磷条件下对两种 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗的促生作用,从而为岷江干旱河谷以乡土灌木为恢复目标的恢复理论与实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

寄主植物 小马鞍羊蹄甲(*Bauhinia faberi* var. *microphylla*)。

供试 AM 菌种 *Glomus mosseae*(*G. mosseae*)和 *Glomus coronatum*(*G. coronatum*)。菌种均由北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室提供,接种剂为高粱繁殖的土沙混合物,内含供试菌种孢子、侵染根段和菌丝片段。*G. mosseae* 从新疆昭苏新疆韭(*Allium coeruleum*)根围分离,为 2857 个孢子/20 mL 菌剂,*G. coronatum* 从蒙伊金霍洛旗沙蒿(*Artemisia destersoru*)根际分离,为 1390 个孢子/20 mL 菌剂。

供试基质 沙土,将沙土过 2 mm 筛子充分混匀备用,基质的 pH 值为 8.8,电导率为 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$,速效磷含量为 5.9 mg/kg,铵态氮为 13.3 mg/kg,硝态氮含量为 4.2 mg/kg,体积含水量为 32%。

1.2 试验设计

2007 年在岷江干旱河谷核心区飞虹乡(四川省茂县,土壤类型为石灰性褐土)采集寄主植物种子,通过筛选、水选与肉眼选择形态大小基本一致,表皮光滑,健康无虫害的种子,晒干后备用。2008 年 7 月 5 日播种,挑选饱满种子,用 20%浓硫酸浸泡 4 h,蒸馏水冲洗干净,并浸泡 24 h。萌发前用 2.5%NaOCl 溶液将种子消毒 10 min,然后在蒸馏水中浸泡 20 min。再把种子铺在垫有滤纸的托盘内,放在培养箱中,黑暗下萌发 7d(60%湿度和 25 $^{\circ}\text{C}$)。接种前,沙土和珍珠岩间歇灭菌 3 次(1.1 kg/ cm^2 , 126 $^{\circ}\text{C}$, 20 min),一次性塑料杯(250 mL)则用 75%酒精消毒。幼苗长出 2 片真叶后,选择发芽一致的幼苗移植(1 株/杯)。植苗时,每

杯先装基质 150 g, 然后放入接种剂 5 g, 再加入 100 g 基质, 最后覆盖一薄层珍珠岩 3.5 g, 以防止基质的水分蒸发。移苗后, 随即按照表 2 中磷的浓度和配比要求, 均匀浇入磷溶液 ($[\text{NaH}_2\text{PO}_4] = 4.9 \text{ mmol/L}$) 和蒸馏水。

试验设置 2 个磷梯度 (6.0 mg P/kg 和 24.0 mg P/kg) 和 2 个菌处理 (*G. mosseae* 和 *G. coronatum*) (表 1)。两个磷梯度可以模拟干旱河谷表层褐土 (0—20 cm) 磷含量的极低值和高值, 32% 的体积含水量则代表干旱河谷生长季表层土壤含水量的平均值^[12]。采用析因试验和对照, 共 6 个处理, 每一处理设置 12 个重复, 共 72 株幼苗。试验在城市与区域国家重点实验室进行, 幼苗置于培养箱内培植, 箱内环境参数为: 夜间长 14 h, 温度为 19 ℃, 相对湿度 88%; 白天持续 10 h, 温度 25 ℃, 相对湿度为 70%。2008 年 7 月 27 日, 开始称重法控制水分, 试验至 11 月 7 日结束。移苗两周后, 每杯每周浇一次无磷 Long Ashton 营养液, 以保证其它营养元素的供应。

表 1 磷肥和 AM 真菌的浓度及其施用配比

Table 1 Concentrations of P fertilizer and AM fungi treatment and their application ratios

处理 Treatments	土壤磷和 AM 真菌的浓度 Concentration of soil phosphorus and AM fungi		NaH ₂ PO ₄ 溶液和 AM 真菌配比 Volume of NaH ₂ PO ₄ solution and AM fungi ratio per kilogram sand
	磷 Phosphorus / (mg/kg)	AM 真菌 Mycorrhizal status/%	/ (mL/g)
LPCK	6.0	0.0	0.0 :0.0
LPGm	6.0	2.0	0.0 :5.0
LPGc	6.0	2.0	0.0 :5.0
HPCK	24.0	0.0	120.0 :0.0
HPGm	24.0	2.0	120.0 :5.0
HPGc	24.0	2.0	120.0 :5.0

LPCK: 低磷处理; LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理; LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理; HPCK: 高磷处理; HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理; HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理

1.3 样品分析

在苗龄第 48 天、86 天和 104 天时分别收割幼苗, 每个处理每次收割 3 株幼苗。试验结束时登记所有死苗。收割前, 分别测定基径、茎总长、株高、叶片数等 4 个生长指标; 收割后, 清洗根系, 取少量根系进行其他测定。自然晾干后, 按照叶、茎、细根和粗根将植株分开, 测量各部分鲜重和细根总长度, 然后在 68 ℃ 烘箱中烘至恒重, 在万分之一分析天平 (Mettler-Toledo AL204) 上称量, 即得各器官生物生产量。幼苗由于样品量小, 磨碎后全部用于元素分析。依据 Phillips 和 Hayman^[13] 描述的方法染色, 侵染率 (IR) 采用侵染频度 (IF%) 表示, 计算公式为: $IF\% = (\text{侵染根段数} / \text{总根数}) \times 100$ ^[14]; 菌根效应 (MGR) 计算公式为: $MGR(\%) = (\text{菌根植物干重} - \text{不接种植物干重}) / \text{菌根植物干重} \times 100\%$ ^[15]。根长用卷尺测量, 根面积用面积测定仪 (Honggu, Akinori MYKA. Lab. 1.01 Ver) 测定。

1.4 数据处理

基于多元方差分析 (MANOVA) 来分析和评价 AM 真菌和土壤磷对幼苗根系、叶片、生物量等多个指标的综合影响。第一步, 采用 MANOVA 来评定 AM 真菌和磷处理的主效应和交互作用; 第二步: 采用 Tukey's HSD 方法进行多重比较, 采用皮尔逊相关分析法对各处理下幼苗的生长参数进行相关分析。方差分析前, 所有实测数据进行正态检验, 必要时用对数转换, 以保证数据服从正态分布和方差齐性。分析统计均在 SPSS13.0 软件 (Standard released version 13 for Windows, SPSS Inc., IL. Chicago, USA) 上完成。

2 结果

2.1 不同磷条件下 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗生长的主效应和交互作用

两种土壤磷条件下, 接种 *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 后, AM 真菌对小马鞍羊蹄幼苗根系有较好地侵染, *G. mosseae* 的侵染率显著高于 *G. coronatum* 的侵染率, 不同苗龄间菌根侵染率相差不大, 低磷条件下 *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 对根系的侵染率分别处在 51%—71% 和 30%—31% 之间, 高磷条件下 *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 对根系的侵染率分别处在 60%—74% 和 35%—58% 之间 (图 1)。

表 2 表明: 多元方差分析模型适用于该研究 ($P < 0.001$), 土壤磷对幼苗生长的主效应不显著, AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗生长的主效应显著, 磷和 AM 对幼苗生长交互作用影响不明显。

2.2 不同磷条件下接种 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗生长的动态影响

不同土壤磷条件下, 接种 *G. mosseae* 或 *G. coronatum* 对幼苗的根系生长都有显著促进作用, 菌根对 86d 和 104d 的幼苗的促进作用明显高于 48d 的幼苗。由图 2 可见, 48d 的幼苗在 HPGm 处理下, 根长比 LPCK 处理增加了 57%, 在 HPGc 处理下, 根长比 LPCK 处理增加了 8%; 86d 的幼苗, LPGm 处理下根长比 LPGc 处理增加了 33%, 且 LPGm 和 LPGc 处理的根长分别比 LPCK

处理增加了 104%和 53%,HPGm 处理的根长比 HPGc 处理增加了 43%,且 HPGm 和 HPGc 处理的根长分别比 HPCK 处理增加了 131%和 62%;104d 的幼苗,LPGm 处理下根长比 LPGc 处理增加了 15%,且在 LPGm 和 LPGc 处理下,根长分别比 LPCK 处理增加了 77%和 55%,HPGm 处理的根长比 HPGc 处理增加了 10%,且在 HPGm 和 HPGc 处理下,根长分别比 HPCK 处理增加了 89%和 72%。另外,在 3 个苗龄阶段,幼苗在 HPCK 处理下,根长分别比 LPCK 处理增加了 15%、13%和 16%,在 HPGm 处理下,根长分别比 LPGc 处理增加了 36%、29%和 24%,在 HPGc 处理下,根长分别比 LPGc 处理增加了 12%、20%和 29%。

表 2 不同磷条件下 AM 真菌对小鼠蹄羊蹄甲幼苗生长影响的多元方差分析

Table 2 Multivariate analysis of variance on effects of AM fungi on growth characteristic of *B. faberi* seedlings under different soil phosphorus

效应 Effect	<i>T</i> Wilks' lambda <i>T</i> value	假设检验自由度 Hypothesis df	<i>df</i>	<i>F</i>	显著性 Sig.
截距 Intercept	0.004	8.000	11.000	355.300	0.000 ***
磷肥 P fertilizer	0.442	8.000	11.000	1.735	0.195
菌种 AM fungi	0.012	16.000	22.000	11.282	0.000 ***
磷肥×菌种 P×AM	0.228	16.000	22.000	1.506	0.184

*** 代表 0.1%水平上的差异显著性

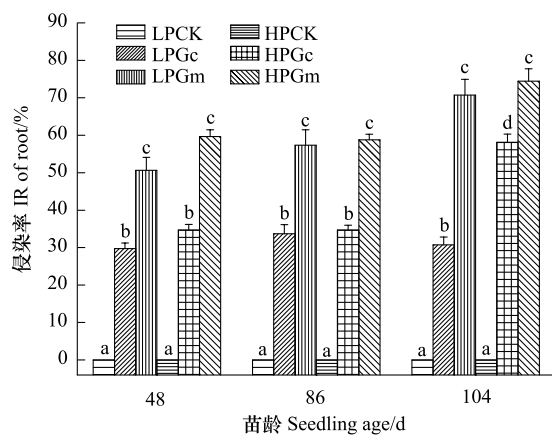


图 1 生长季内不同磷和 AM 菌种侵染下的小马蹄羊蹄甲幼苗根系的菌根侵染率

Fig.1 Change in infection frequency of *B. faberi* seedlings differing in mycorrhizal status and soil AP concentration in growing season

LPCK: 低磷处理;LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理;LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理;HPCK: 高磷处理;HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理;HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理;不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

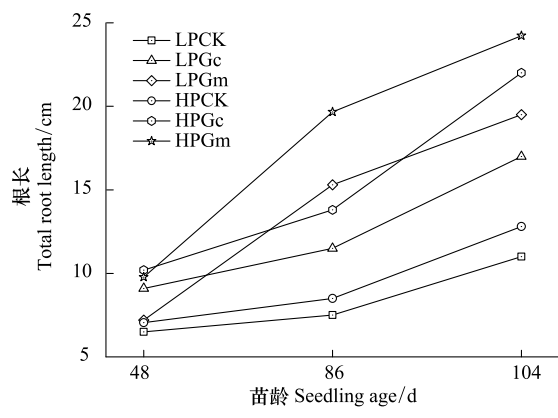


图 2 生长季内不同磷条件下小鼠蹄羊蹄甲幼苗根长随接种 AM 真菌的变化

Fig.2 Change in total root length of *B. faberi* seedlings inoculated with two AM fungi differing in soil AP concentration during one growing season

LPCK: 低磷处理;LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理;LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理;HPCK: 高磷处理;HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理;HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理

不同土壤磷条件下,接种 *G. mosseae* 或 *G. coronatum* 对幼苗的叶片数量都有显著增加作用,菌根对 86d 和 104d 的幼苗的促进作用明显高于 48d 的幼苗。由图 3 可见,48d 的幼苗在 HPGm 处理下,叶片数比 LPCK 处理增加了 281%,在 HPGc 处理下,叶片数比 LPCK 处理增加了 17%;86d 的幼苗,LPGm 处理下叶片数比 LPGc 处理增加了 15%,且 LPGm 和 LPGc 处理的叶片数分别比 LPCK 处理增加了 533%和 450%,HPGm 处理的叶片数比 HPGc 处理增加了 54%,且 HPGm 和 HPGc 处理的叶片数分别比 HPCK 处理增加了 433%和 247%;104d 的幼苗,LPGm 处理下叶片数比 LPGc 处理增加了 29%,且在 LPGm 和 LPGc 处理下,叶片数分别比 LPCK 处理增加了 471%和 373%,HPGm 处理的叶片数比 HPGc 处理增加了 5%,且在 HPGm 和 HPGc 处理下,叶片数分别比 HPCK 处理增加了 461%和 433%。另外,在 3 个苗龄阶段,幼苗在 HPCK 处理下,叶片数分别比 LPCK 处理增加了 17%、25%和 10%,在 HPGm 处理下,叶片数分别比 LPGc 处理增加了 205%、5%和 8%,在 HPGc 处理下,叶片数分别比 LPGc 处理增加了 30%、-21%和 24%。

不同土壤磷条件下,接种 *G. mosseae* 或 *G. coronatum* 对植株生物量均有明显的提高作用,菌根对 86d 和 104d 的幼苗的促进作用明显高于 48d 的幼苗。由图 4 可知,48d 的幼苗在 HPGm 处理下,生物量比 LPCK 处理增加了 156%,在 HPGc 处理下,生物量比 LPCK 处理增加了 22%;86d 的幼苗在 LPGm 处理下,生物量比 LPGc 处理增加了 12%,且在 LPGm 和 LPGc 处理下,生物量

分别比 LPCK 处理增加了 19%和 6%,HPGm 处理的生物量比 HPGc 处理增加了 7%,且在 HPGm 和 HPGc 处理下,生物量分别比 HPCK 处理增加了 36%和 27%;104d 的幼苗在 LPGm 处理下,生物量比 LPGc 处理增加了 15%,且在 LPGm 和 LPGc 处理下,生物量分别比 LPCK 处理增加了 45%和 26%,HPGm 处理的生物量比 HPGc 处理增加了 23%,且在 HPGm 和 HPGc 处理下,生物量分别比 HPCK 处理增加了 68%和 37%。另外,在 3 个苗龄阶段,幼苗在 HPCK 处理下,生物量分别比 LPCK 处理增加了 22%、3%和 15%,在 HPGm 处理下,生物量分别较 LPGm 处理增加了 36%、29%和 24%,在 HPGc 处理下,生物量分别较 LPGc 处理增加了 12%、20%和 29%。

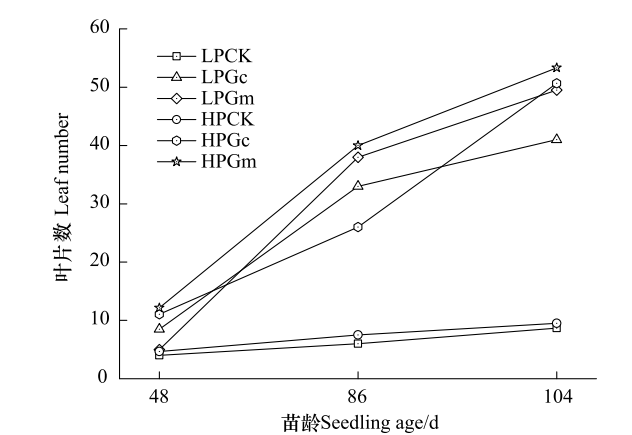


图 3 生长季内不同磷条件下小马鞍羊蹄甲幼苗叶片数随接种 AM 真菌的变化

Fig.3 Change in leaf number of *B. faberi* seedlings inoculated with two AM fungi differing in soil AP concentration during one growing season

LPCK: 低磷处理;LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理;LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理;HPCK: 高磷处理;HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理;HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理

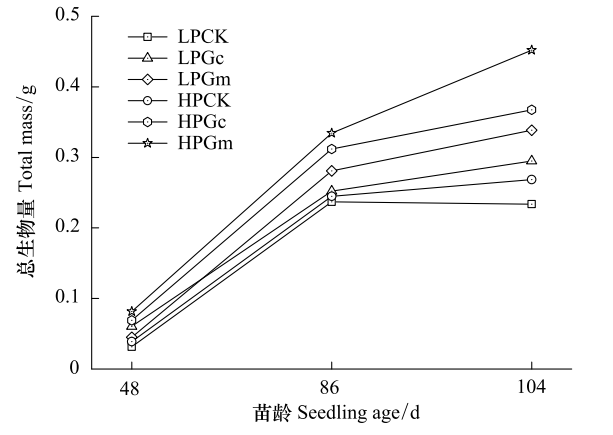


图 4 生长季内不同磷条件下小马鞍羊蹄甲幼苗总生物量随接种 AM 真菌的变化

Fig.4 Change in total biomass of *B. faberi* seedlings inoculated with two AM fungi differing in soil AP concentration during one growing season

LPCK: 低磷处理;LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理;LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理;HPCK: 高磷处理;HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理;HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理

2.3 不同磷条件下接种 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗生物量积累与分配的影响

由表 3 可知,接种 AM 真菌对幼苗的生物量积累及分配有显著影响 ($P<0.05$),但土壤磷素对幼苗生物量积累及分配的影响

表 3 不同处理小马鞍羊蹄甲幼苗生物量在各器官中的积累与分配

Table 3 Accumulation and partition of biomass of *b. faberi* seedlings under different treatments (mean $\pm$ SE)

处理 Treatments	叶质量 Leaf dry mass / g	茎质量 Stem dry mass / g	粗根质量 Coarse root dry mass/ g	细根质量 Fine root dry mass/ g	地上生物量 Aboveground biomass/ g	地下生物量 Belowground biomass/ g	总生物量 Total biomass / g
LPCK	0.023 $\pm$ 0.007 9.83%	0.045 $\pm$ 0.008 19.23%	0.117 $\pm$ 0.018 50.00%	0.049 $\pm$ 0.010 20.94%	0.068 $\pm$ 0.008 29.06%	0.166 $\pm$ 0.041 70.94%	0.234 $\pm$ 0.035 100.00%
LPGm	0.083 $\pm$ 0.027 24.48%	0.109 $\pm$ 0.007 32.15%	0.094 $\pm$ 0.020 27.73%	0.093 $\pm$ 0.009 15.63%	0.192 $\pm$ 0.012 56.64%	0.147 $\pm$ 0.020 43.36%	0.339 $\pm$ 0.035 100.00%
LPGc	0.036 $\pm$ 0.012 12.20%	0.055 $\pm$ 0.015 18.64%	0.127 $\pm$ 0.036 43.05%	0.077 $\pm$ 0.012 26.10%	0.091 $\pm$ 0.013 30.85%	0.204 $\pm$ 0.018 69.15%	0.295 $\pm$ 0.029 100.00%
HPCK	0.041 $\pm$ 0.024 15.24%	0.068 $\pm$ 0.006 25.28%	0.128 $\pm$ 0.056 47.58%	0.032 $\pm$ 0.013 11.90%	0.109 $\pm$ 0.014 40.52%	0.160 $\pm$ 0.035 59.48%	0.269 $\pm$ 0.028 100.00%
HPGm	0.129 $\pm$ 0.025 28.54%	0.124 $\pm$ 0.017 27.43%	0.123 $\pm$ 0.035 27.21%	0.076 $\pm$ 0.010 16.81%	0.253 $\pm$ 0.039 55.97%	0.199 $\pm$ 0.028 44.03%	0.452 $\pm$ 0.041 100.00%
HPGc	0.097 $\pm$ 0.018 26.36%	0.106 $\pm$ 0.022 28.80%	0.105 $\pm$ 0.025 28.53%	0.060 $\pm$ 0.014 16.30%	0.203 $\pm$ 0.011 55.16%	0.165 $\pm$ 0.021 44.84%	0.368 $\pm$ 0.034 100.00%
F_P	1.941	1.158	3.684	0.051	1.445	4.774	7.937
$F_{\text{菌}}$	8.837 *	3.357 *	2.878	2.678 *	5.036 *	9.294 *	9.351 *
$F_{P \times \text{菌}}$	0.762	3.779 *	0.641	2.446 *	2.409 *	0.369 *	0.796 *

LPCK: 低磷处理;LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理;LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理;HPCK: 高磷处理;HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理;HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理; * 代表 5%水平上的差异显著性

响不显著 ($P>0.05$), 且磷和 AM 真菌处理交互作用显著 ($P<0.05$)。在 LPGm 处理下, 幼苗的总生物量、叶生物量、茎生物量和细根生物量分别比 LPGc 处理增加了 15%、131%、98% 和 21%, 且地上生物量增加了 111% 而地下生物量下降了 28%, LPGm 处理下叶片质量分数从 12% 增加到 24%, 比 LPCK 处理增加了 149%; 在 HPGm 处理下, 幼苗的总生物量、叶生物量、茎生物量和细根生物量分别比 HPGc 处理增加了 23%、33%、17% 和 27%, 且地上部生物量增加了 25% 而地下部生物量下降了 21%, HPGm 处理下叶片质量分数从 26% 增加到 29%, 比 HPCK 处理增加了 87%。

2.4 相关性分析

AM 真菌侵染率与小马鞍羊蹄甲生长参数的相关性十分明显 (表 4)。侵染率与基茎、茎总长、株高、叶片数、总生物量等参数呈显著正相关, 而与根茎比显著负相关, 与细根长负相关但不显著; 小马鞍羊蹄甲幼苗的根茎比和基茎、茎总长、株高、叶片数显著负相关; 小马鞍羊蹄甲幼苗的总生物量与基茎、茎总长、株高、叶片数显著正相关, 与叶片数正相关。

表 4 不同处理小马鞍羊蹄甲幼苗生长参数和侵染率的相关关系

Table 4 Correlation between growth parameters and infection rate for *B. faberi* seedlings under different treatments

	基茎 Basal radium / mm	茎总长 Total stem length / cm	细根长 Fine root length / cm	株高 Height / cm	叶片数 Leaf number	总生物量 Total biomass / g	根茎比 Root/shoot ratio	侵染率 Infection rate /%
茎总长 Basal radium /mm	0.83 *	1						
细根长 Fine root length /cm	0.04	-0.08	1					
株高 Height /cm	0.84 **	0.92 **	0.01	1				
叶片数 Leaf number	0.74 *	0.65	-0.20	0.84 **	1			
总生物量 Total biomass /g	0.87 **	0.77 *	0.26	0.75 *	0.56	1		
根茎比 Root/shoot ratio	-0.82 *	-0.77 *	0.08	-0.84 **	-0.67 *	-0.53	1	
侵染率 Infection rate /%	0.76 *	0.88 **	-0.29	0.84 **	0.75 *	0.49 *	-0.88 **	1

*, ** 分别代表 5%、1% 水平的差异显著性

3 讨论

土壤水分和有效磷是干旱生态系统植被恢复的关键限制性资源^[16-17], 并在空间和时间分布上具有强烈的异质性^[11,18]。小马鞍羊蹄甲作为岷江干旱河谷一种优势乡土豆科灌木, 其植被生长和空间格局必然受到土壤干旱胁迫和磷分缺乏的共同限制,。同时, AM 真菌作为直接联系土壤和植物根系的一类微生物, AM 真菌与植物共生可以改善植物的磷营养, 增强植物抵御干旱的危害, 提高植物在逆境中的生存能力^[19]。因此, 需要深入认识干旱缺磷条件下接种 AM 真菌对优势灌木幼苗更新和生长的影响过程。本文应用盆栽试验研究了目标恢复物种 (target species)——小马鞍羊蹄甲幼苗在干旱和缺磷条件下接种两种干旱区豆科灌木优势 AM 真菌 (*G. mosseae* 和 *G. coronatum*) 对其幼苗生长动态的影响。试验中, 当年生幼苗株高在 6—25 cm 之间, 单株生物量为 0.1—0.5 mg, 幼苗表现出一定的死亡率, 多元方差分析结果表明, 土壤有效磷和 AM 真菌对幼苗生长的交互作用明显, 即不同土壤磷条件下幼苗接种 AM 真菌对生物量积累及分配有显著影响 (表 3)。以上结果证明了干旱河谷恶劣的水分和养分胁迫严重限制了幼苗的定植和生长, 也证实小马鞍羊蹄甲具有较强的适应本地严酷环境的适应能力, 具备了选作干旱河谷植被恢复物种的潜力。因此, 在岷江干旱河谷缺水少磷的自然环境中, 研究小马鞍羊蹄甲幼苗生长在不同土壤磷素条件下对接不同 AM 真菌的响应, 可以加深理解小马鞍羊蹄甲种群的自然恢复机制, 同时为人工恢复提供技术支撑。

本研究表明 *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 能较好地侵染小马鞍羊蹄甲幼苗根系。试验中, *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 在不同苗龄时均可有效侵染小马鞍羊蹄甲幼苗, 即便在土壤磷素极低条件下, *G. mosseae* 对小马鞍羊蹄甲幼苗根系的侵染率区间亦达到 51%—71%, *G. coronatum* 对幼苗的侵染率为 30%—310%, 而在高磷条件下, *G. mosseae* 对小马鞍羊蹄甲幼苗根系的侵染率为 60%—74%, *G. coronatum* 的侵染率为 35%—58%, 可见土壤极低磷和高磷条件下, AM 真菌对小马鞍羊蹄甲根系的侵染差别不大。这一结果表明两种 AM 真菌都能有效地侵染小马鞍羊蹄甲幼苗根系, 侵染率差异不明显则表明土壤磷素对 AM 真菌侵染小马鞍羊蹄甲幼苗的影响较弱 (图 1)。这与附近区域的野外调查分析结果一致, 蔡晓布等^[20] 调查分析了环境因子对西藏高原草地植物 AM 真菌的影响, 发现土壤有效磷在 ≤ 24 mg/kg 范围内, AM 真菌侵染率和土壤有效磷几乎没有相关性。但在土壤磷极低条件下, 接种 AM 真菌的小马鞍羊蹄甲幼苗表现出的菌根效应较高磷条件下的幼苗所表现出的菌根效应明显增大, 这可能是由于侵染率的提高可以显著增加植物根系从土壤中获取水分和磷素的能力^[21-23], 因为大量研究表明, 干旱条件下接种 AM 真菌能提高幼苗和植被吸收利用难移动的和易移动土壤养分元素^[24-25]。所以, 在土壤磷素缺乏的岷江干旱环境中, 为幼苗接种 AM 真菌是一种缓解多元资源限制的有效措施。

AM 真菌侵染小马鞍羊蹄甲幼苗根系后, AM 真菌的菌根效应明显, *G. mosseae* 产生的菌根效应显著高于 *G. coronatum*, 这暗示前者是小马鞍羊蹄甲的优势共生 AM 菌种。实际上, *G. mosseae* 适应范围更广^[26], 共生植物较副冠球囊霉属多, 本研究结果

也与秦晓峰^[27]的野外调查结果一致。另外,小马鞍羊蹄甲幼苗在不同苗龄时对 AM 真菌的响应有明显差异。在 48d 和 86d 苗龄时,无论土壤磷条件如何,两种 AM 真菌的菌根效应相差不明显,比如,在土壤极低磷条件下,*G. mosseae* 侵染后,48d 的幼苗菌根效应变动范围为 26%—30%,86d 的幼苗菌根效应约为 6%,在土壤高磷条件下,*G. mosseae* 侵染后,48d 的幼苗菌根效应变动范围为 16%—17%,*G. coronatum* 侵染后菌根效应在 2%—4% 内波动,但生长季末(即苗龄 104d) *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 侵染后表现出的菌根效应显著高于前 2 两个阶段的幼苗(图 5)。

干旱环境中,在不同土壤磷条件下,接种 AM 真菌能缓解磷限制和显著促进幼苗生长,增加其环境适应性。LPCK 处理下,幼苗根长、叶片数量和总生物量分别为 HPCK 处理的 87%、91% 和 85%(图 2—图 4),这一结果表明小马鞍羊蹄甲幼苗在生长季内明显受到土壤磷素的强烈限制,但是 LPCK 和 HPCK 处理下的幼苗根长、叶片数、叶生物量、茎生物量、细根生物量和总生物量明显小于接种 AM 真菌幼苗,这又说明接种 AM 真菌能有缓解土壤磷素缺乏的限制作用,并且随着苗龄增大促进作用表现更为明显,蔡晓布等^[20]和张燕等^[28]也得到了类似研究结果。接种 *G. mosseae* 和 *G. coronatum* 显著提高小马鞍羊蹄甲幼苗的总生物量积累(分别增加了地上生物量和地下生物量)的同时,明显增加了地上生物量在总生物量中的分配比例,降低了幼苗的根茎比,这表明 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲地上部生长的促进作用较根系更为强烈,幼苗叶片数与 AM 真菌侵染率呈显著正相关而与根茎比呈显著负相关也表明了这一结果(表 4)。可见,接种 AM 真菌既能满足幼苗生长对磷素的需要,又可提高幼苗的光合作用面积和光合效率,从而在一定程度上缓解养分胁迫,反过来又促进幼苗生长。因此,生物修复是干旱生态系统植被恢复与重建的最为有效手段之一^[29-30]。研究表明在干旱河谷调查土壤 AM 真菌时发现该区域植被被球囊霉属 AM 真菌普遍侵染,AM 侵染率高达 92%,球囊霉属占有 AM 真菌种类的 74%^[31],实际上,自然恢复过程中横断山区干旱河谷植被本身具有很高的 AM 真菌生物多样性和 AM 真菌侵染率^[32-34],盆栽试验结果和野外调查表明应用 AM 真菌进行植被恢复具有现实意义。

在干旱胁迫和磷限制环境中,两种 AM 菌种对生长效应表现出差异性是在沙土盆栽试验条件下获得的,乡土目标恢复物种仅为小马鞍羊蹄甲一种,观察时间仅为一个生长季,因此,在将 AM 真菌用于研究区域植被恢复时,有必要进一步在原土栽培条件下,尤其是野外环境中开展较长时间的生长状况监测,定量研究植物生长、土壤养分和 AM 真菌之间的相互作用,深入揭示 AM 真菌对土壤—植被系统恢复的作用方式,从而提高多元资源限制环境中植被恢复效率。

致谢:感谢李芳兰、田宜水、陈羚等对论文写作和修改的帮助。

References:

- [1] Pennisi E. The secret life of fungi. Science, 2004, 304(5677): 1620-1622.
- [2] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal Symbiosis. 3rd ed. London: Academic, 2008: 105-109.
- [3] Clossa I, Goicoechea N. Infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in naturally regenerating, unmanaged and clear-cut beech forests. Pedosphere, 2011, 21(1): 65-74.
- [4] Liang Y, Guo L H, Ma K P. The role of mycorrhizal fungi in ecosystems. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(6): 739-745.
- [5] Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, Turnau K, Barea J M. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37(1): 1-16.
- [6] Dhillion S S, Gardsjord T L. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity, productivity, and nutrients in boreal grasslands. Canadian Journal of Botany, 2004, 82(1): 104-114.
- [7] Wu F Z, Bao W K, Wu N. Growth, accumulation and partitioning of biomass, C, N and P *Sophora davidii* seedlings in response to N supply in dry valley of upper Minjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3817-3824.
- [8] Li F L, Bao W K, Wu N, You C. Growth, biomass partitioning, and water-use efficiency of a leguminous shrub (*Bauhinia faberi* var. *micophylla*) in response to various water availabilities. New Forests, 2008, 36(1): 53-65.
- [9] Liu R J, Liu P Q, Xu K, Lü Z F. Ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in saline alkaline soils of China. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(6): 721-724.
- [10] Shi Z Y, Gao S C, Wang F Y. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in desert ecosystems. Arid Zone Research, 2008, 11(6): 783-789.
- [11] Song C J, Ma K M, Fu B J, Qu L Y, Liu Y, Zhong J F. Influence of soil moisture, nitrogen and phosphorus contents on *Bauhinia faberi* seedlings

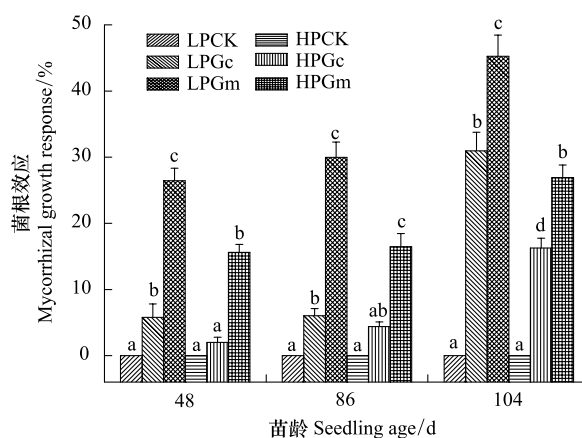


图 5 生长季内不同磷和 AM 真菌侵染条件下的小马鞍羊蹄甲幼苗生长的菌根效应

Fig.5 Change in mycorrhizal growth response of *B. faberi* seedlings differing in mycorrhizal status and soil AP concentration during one growing season

LPCK: 低磷处理; LPGc: 低磷+接种 *G. coronatum* 处理; LPGm: 低磷+接种 *G. mosseae* 处理; HPCK: 高磷处理; HPGc: 高磷+接种 *G. coronatum* 处理; HPGm: 高磷+接种 *G. mosseae* 处理; 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

- growth characteristics in arid valley of Minjiang River. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1797-1804.
- [12] Song C J, Ma K M, Qu L Y, Liu Y, Xu X L, Fu B J, Zhong J F. Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings. Journal of Arid Environment, 2010, 74(9): 1003-1012.
- [13] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-160.
- [14] Trouvelot A, Kough J L, Gianinazzi-Pearson V. *Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire*. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle // Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S, eds. "Physiological and genetical aspects of mycorrhizae". Paris: INRA, 1985; 217-221.
- [15] Cavagnaro T R, Smith F A, Ayling S M, Smith S E. Growth and phosphorus nutrition of a Paris-type arbuscular mycorrhizal symbiosis. New Phytologist, 2003, 157(1): 127-134.
- [16] James J J, Tiller R L, Richards J H. Multiple resources limit plant growth and function in a saline-alkaline desert community. Journal of Ecology, 2005, 93(1): 113-126.
- [17] Song C J, Ma K M, Fu B J, Qu L Y, Xu X L, Liu Y, Zhong J F. Distribution patterns of shrubby N-fixers and non-N fixers in an arid valley in Southwest China; implications for ecological restoration. Ecological Research, 2010, 25(3): 553-564.
- [18] Xu X L, Ma K M, Fu B J, Song C J, Liu W. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry-warm river valley, SW China. Catena, 2008, 75(2): 138-145.
- [19] Peng S L, Shen H, Yuan J J, Wei C F, Guo T. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 498-505.
- [20] Cai X B, Qian C, Peng Y L, Feng G, Gai J P. Effects of environmental factors on AM fungi around steppe plant roots in Tibet Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 859-864.
- [21] Colpaert J V, van Tichelen K K, van Assche J A, van Laere A. Short-term phosphorus uptake rates in mycorrhizal and non-mycorrhizal roots of intact *Pinus sylvestris* seedlings. New Phytologist, 1999, 143(3): 589-597.
- [22] Augé R M. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. Canadian Journal of Soil Science, 2004, 84(4): 373-381.
- [23] Zhu X C, Song F B, Liu S Q, Liu T D, Zhou X. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress. Plant Soil and Environment, 2012, 58(4): 186-191.
- [24] Rowe H I, Brown C S, Claassen V P. Comparisons of mycorrhizal responsiveness with field soil and commercial inoculum for six native montane species and *Bromus tectorum*. Restoration Ecology, 2007, 15(1): 44-52.
- [25] Smith S E, Facelli E, Pope S, Smith F A. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. Plant and Soil, 2010, 326(1/2): 3-20.
- [26] Zhao H M. On ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. Journal of Heze University, 2007, 29(5): 87-90.
- [27] Qin X F. Survey of VA mycorrhizal fungi of several xerophytes in Dingxi. Gansu Science and Technology, 2007, 23(5): 205-207.
- [28] Zhang Y, Guo L D, Liu R J. Diversity and ecology of arbuscular mycorrhizal fungi in Dujiangyan. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(4): 537-544.
- [29] Lin X M, Li Z Q, Han D J, Hou J. Mycorrhiza and restoration of vegetation. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(2): 167-170.
- [30] de Deyn G B, Raaijmakers C E, Zoomer H R, Berg M P, de Ruiter P C, Verhoef H A, Bezemer T M, van der Putten W H. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity. Nature, 2003, 422(6933): 711-713.
- [31] Zhang Y, Li J, Yao Q, Chen J Z, Hu Y L, Liu X Y, Huang Y J. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of *Eriobotrya japonica* plants under different water regimes. Acta Horticulturae Sinica, 2012, 39(4): 757-762.
- [32] Liang Y, Guo L D, Ma K P. Spatial pattern of the most common late-stage ectomycorrhizal fungi in a subtropical forest in Dujiangyan, Southwest of China. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(1): 29-34.
- [33] Li T, Li J P, Zhao Z W. Arbuscular mycorrhizas in a valley-type savanna in southwest China. Mycorrhiza, 2004, 14(5): 323-327.
- [34] Gai J P, Feng G, Cai X B, Christie P, Li X L. A preliminary survey of the arbuscular mycorrhizal status of grassland plants in southern Tibet. Mycorrhiza, 2006, 16(3): 191-196.

参考文献:

- [4] 梁宇, 郭良栋, 马克平. 菌根真菌在生态系统中的作用. 植物生态学报, 2002, 26(6): 739-745.
- [7] 吴福忠, 包维楷, 吴宁. 外源施氮对于旱河谷白刺花(*Sophora davidii*)、幼苗生长、生物量及 C、N、P 积累与分配的影响. 生态学报, 2008, 28(8): 3817-3821.
- [9] 刘润进, 刘鹏起, 徐坤, 吕志范. 中国盐碱土壤中 AM 菌的生态分布. 应用生态学报, 1999, 10(6): 721-724.
- [10] 石兆勇, 高双成, 王发园. 荒漠生态系统中丛枝菌根真菌多样性. 干旱区研究, 2008, 25(6): 783-789.
- [11] 宋成军, 马克明, 傅伯杰, 曲来叶, 刘扬, 钟剑飞. 岷江干旱河谷土壤水、氮和磷对小马鞍羊蹄甲幼苗生长的影响. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1797-1804.
- [19] 彭思利, 申涛, 袁俊吉, 魏朝富, 郭涛. 丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响. 生态学报, 2011, 31(2): 498-505.
- [20] 蔡晓布, 钱成, 彭岳林, 冯固, 盖京平. 环境因子对西藏高原草地植物丛枝菌根的影响. 应用生态学报, 2005, 16(5): 859-864.
- [26] 赵慧敏. 丛枝菌根真菌的生态分布. 菏泽学院学报, 2007, 29(5): 87-90.
- [27] 秦晓峰. 定西几种旱生植物 VA 菌根真菌调查. 甘肃科技, 2007, 23(5): 205-207.
- [28] 张英, 郭良栋, 刘润进. 都江堰地区丛枝菌根真菌多样性与生态研究. 植物生态学报, 2003, 27(4): 537-544.
- [29] 林晓民, 李振岐, 韩德俊, 侯军. 菌根与植被恢复. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 167-170.
- [31] 张燕, 李娟, 姚青, 陈杰忠, 胡又厘, 刘翔宇, 黄永敬. 丛枝菌根真菌对水分胁迫下枇杷实生苗生长和养分吸收的影响. 园艺学报, 2012, 39(4): 757-762.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

A review of ecosystem services and research perspectives	MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
Sexual interference in non-human primates	YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review	HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
Proximate and ultimate determinants of food chain length	WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi	LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen	XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve	ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress	WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings	YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area	MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells	WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants	TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages	YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta	PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings	SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity	ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO ₂	SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation	LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi	QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China	YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River	HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau	ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元