

不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗生长及 C、N、P 和 K 含量的影响

欧阳玉莹^{1a,1b}, 洪滔^{1a,1b}, 洪陈洁^{1a,1b}, 陈欣凡^{1a,1b}, 李彬^{1a,1b},
陈建忠², 吴承祯^{1a,1b,3}, 林晗^{1a,1b,①}

(1. 福建农林大学; a. 林学院, b. 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. 福建建阳市林业局, 福建 南平 354200; 3. 武夷学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: 将分离自千年桐 [*Aleurites montana* (Lour.) Wils.] 体内的 4 种内生真菌优势菌株 [SJ4、SJ3 和 ZG3 菌株 (青霉属 *Penicillium*) 以及 SY1 菌株 (嗜热真菌属 *Thermomyces*)] 接种在其盆栽苗根部, 研究了内生真菌对不同程度缺磷条件下栽培 60 d 后千年桐幼苗生长及叶片和根中营养元素积累的影响。结果表明: 在正常供磷以及轻度、中度和重度缺磷 [供磷量分别为 48、24、12 和 0 mg · kg⁻¹] 条件下, 接菌与未接菌 (对照) 幼苗的各项生长指标均存在不同程度差异; 而随缺磷程度增大, 接菌与未接菌幼苗的各项生长指标也呈现不同的变化趋势。其中, 在正常供磷和轻度缺磷条件下, 接菌幼苗的干质量、地径增长率和株高增长率与对照均无显著差异 ($P>0.05$); 在中度缺磷条件下, 接种 SJ4 菌株的幼苗干质量、地径增长率和株高增长率明显高于对照; 在重度缺磷条件下, 接种 SJ3 菌株的幼苗干质量以及接种 SJ4 菌株的幼苗地径增长率和株高增长率均明显高于对照。在正常供磷条件下, 对照的幼苗叶片和根中 C、N、P 和 K 含量以及 C:N 比总体上高于接菌幼苗或与后者无显著差异; 但在不同程度缺磷条件下, 对照的幼苗叶片和根中 C、N、P 和 K 含量以及 C:N 比总体上降低, 而部分接菌幼苗叶片和根中 C、N、P 和 K 含量以及 C:N 比则不同程度提高。其中, 在重度缺磷条件下, 接种 SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C、P 和 K 含量以及 C:N 比, 接种 SJ4 菌株的幼苗叶片和根中 N、P 和 K 含量以及接种 SY1 菌株的幼苗叶片和根中 N 和 P 含量均显著 ($P<0.05$) 高于对照。综合分析结果表明: 在缺磷条件下, 接种内生真菌均有利于千年桐幼苗生长和营养元素积累, 其中, 青霉菌属菌株的促生效果及其对 K 积累的促进效果总体上优于嗜热真菌属菌株, 但嗜热真菌属菌株对 P 积累的促进效果则优于青霉菌属菌株。

关键词: 缺磷条件; 内生真菌; 千年桐; 生长指标; 养分含量

中图分类号: Q939.96; S154.3; S794 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)04-0032-13
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.04.05

Effects of different endophytic fungi on growth and contents of C, N, P, and K of seedlings of *Aleurites montana* under phosphorus deficiency condition OUYANG Yuying^{1a,1b}, HONG Tao^{1a,1b}, HONG Chenjie^{1a,1b}, CHEN Xinfan^{1a,1b}, LI Bin^{1a,1b}, CHEN Jianzhong², WU Chengzhen^{1a,1b,3}, LIN Han^{1a,1b,①} (1. Fujian Agriculture and Forestry University; a. College of Forestry, b. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 2. Forestry Bureau in Jianyang City of Fujian Province, Nanping 354200, China; 3. Wuyi University, Wuyishan 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(4): 32-44

Abstract: Four dominant endophytic fungus strains [SJ4, SJ3 and ZG3 strains (*Penicillium*), and SY1 strain (*Thermomyces*)] isolated from *Aleurites montana* (Lour.) Wils. were inoculated on root of potted

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家重点科技“十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFD0601304); 国家林业局杉木工程技术研究中心成果孵化基金项目 (6213C011110); 福建省林业厅推广项目 (K8514204A); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2016056)

作者简介: 欧阳玉莹 (1992—), 女, 福建漳浦人, 硕士研究生, 主要从事经济林栽培技术方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjlinhan@163.com

seedlings, and effects of endophytic fungi on growth of seedlings and nutrient element accumulation in leaf and root of *A. montana* after cultivating for 60 d under different degrees of phosphorus deficiency conditions were studied. The results show that there are different degrees of differences in each growth index of seedlings inoculated with or without (the control) fungus strains under conditions of normal phosphorus supply, and light, moderate and severe phosphorus deficiency (48, 24, 12, and 0 mg · kg⁻¹ of phosphorus supply amount, respectively); with increasing of phosphorus deficiency degree, each growth index of seedlings inoculated with or without fungus strains show different variation tendencies. In which, there is no significant difference ($P>0.05$) in dry weight, increasing rates of ground diameter and height of seedlings inoculated with fungus strains and the control under conditions of normal phosphorus supply and light phosphorus deficiency; under moderate phosphorus deficiency condition, above growth indexes of seedlings inoculated with SJ4 strain are obviously higher than those of the control; under severe phosphorus deficiency condition, dry weight of seedlings inoculated with SJ3 strain and increasing rates of ground diameter and height of seedlings inoculated with SJ4 strain are obviously higher than those of the control. Under normal phosphorus supply condition, contents of C, N, P and K, and C:N ratio in leaf and root of seedlings of the control are generally higher than those of seedlings inoculated with fungus strains or show no significant difference with the latter; but under different degrees of phosphorus deficiency conditions, contents of C, N, P and K, and C:N ratio in leaf and root of seedlings of the control decrease in general, while those of some seedlings inoculated with fungus strains increase at different degrees. In which, under severe phosphorus deficiency condition, contents of C, P and K, and C:N ratio in leaf of seedlings inoculated with SJ3 and ZG3 strains, contents of N, P, and K in leaf and root of seedlings inoculated with SJ4 strain, and contents of N and P in leaf and root of seedlings inoculated with SY1 strain are all significantly ($P<0.05$) higher than those of the control. The comprehensive analysis results show that inoculating endophytic fungi are beneficial for growth and nutrient element accumulation of seedlings of *A. montana* under phosphorus deficiency condition, in which, promoting effect on growth and K accumulation of *Penicillium* strains are better than those of *Thermomyces* strains, while promoting effect on P accumulation of *Thermomyces* strains are better than that of *Penicillium* strains.

Key words: phosphorus deficiency condition; endophytic fungus; *Aleurites montana* (Lour.) Wils.; growth index; nutrient content

磷是植物生长发育必须的营养元素之一,但在总磷含量达 500~2 000 mg · kg⁻¹ 的土壤中被植物吸收利用的有效磷含量却很低,且国内大部分的农林用地严重缺磷^[1],所以提高磷利用率的相关研究备受关注。已有研究结果^[2-9]表明:植物在形态、生理和生化等方面对环境中的磷条件的差异会发生适应性的变化。

植物内生真菌是指寄生在健康植物各组织器官内部的真菌,与宿主植物存在共生关系,而宿主植物通常被感染后不会有明显的外在病症^[10-12]。研究表明:植物内生真菌不仅可以促进禾草类植物的生长,提高植物抗逆性^[13],还可以促进马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)的产油脂效果^[14],并有效缓解化感物质对木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.)的胁迫效应^[15],影响杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]幼苗生长及其叶绿素荧光特性^[16],增强杨属(*Populus* Linn.)植物对溃疡病病原菌的拮抗

作用^[17],提高重阳木[*Bischofia polycarpa* (Lévl.) Airy Shaw]体内的酶活性^[18]等。

千年桐[*Aleurites montana* (Lour.) Wils.]为大戟科(Euphorbiaceae)落叶阔叶乔木,其种仁含油率高达60%~70%,在工业、农业、渔业、军事和医药等方面均有广泛应用,可以作为生物质柴油及其他工业原料,是优良的木本油料树种;其木材可制作中纤板,在中国南方特别是福建省大量推广种植^[19]。由于福建省山地丘陵土壤的富铝化作用,使土壤中的磷形成磷酸铁、磷酸铝和闭蓄态磷,加之林木经营集约度提高,导致土壤有效磷缺乏^[20]。如何在低磷环境中提高千年桐的生长及养分利用能力,进而提高林分生产力是千年桐人工林经营中亟待解决的问题之一。

作者前期从千年桐不同器官中分离鉴定出大量的内生真菌,发现其中几种内生真菌对千年桐幼苗生长具有显著的促生作用。为进一步明确在土壤缺磷条件下内生真菌对千年桐幼苗生长和养分积累的影

响效应及其作用机制,作者通过菌液浇施法在幼苗根部接种4种内生真菌,并设置4个土壤磷水平(包括正常供磷和3个缺磷处理),比较了千年桐幼苗的干质量、地径和株高以及根和叶片中C、N、P和K含量的差异,以期筛选出有利于千年桐养分吸收的优良内生真菌菌株,为千年桐人工林的栽培和抚育提供新思路。

1 研究地概况和实验方法

1.1 研究地概况

研究地位于福建农林大学福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室的实验地,地理坐标为东经118°08′~120°31′、北纬25°15′~26°39′;属典型的亚热带季风气候,温暖湿润、雨量充沛、少霜无雪、夏长冬短。年均温20℃~25℃;最冷月在1月至2月,平均气温6℃~10℃;最热月在7月至8月,平均气温33.7℃;极端高温42.3℃,极端低温-2.5℃。年均日照时数1700~1980h,年均降水量900~2100mm,年均空气相对湿度约77%,无霜期326d。

1.2 材料

1.2.1 供试菌种来源和菌液制备 供试的4种内生真菌优势菌株均分离自千年桐植株体内,由本实验室前期实验获得,分别记为SJ4、SJ3、ZG3和SY1;其中,SJ4、SJ3和ZG3菌株属于青霉属(*Penicillium*),SY1菌株属于嗜热真菌属(*Thermomyces*),以上菌株均保存在中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心(CGMCC),菌株保存号为CGMCC10466—CGMCC10469。

将供试菌株接入50mL无机磷液体培养基(NBRIP)中,然后置于恒温振荡培养箱(上海智城分析仪器制造有限公司),于160r·min⁻¹、温度30℃条件下培养72h。用无菌的质量体积分数0.9%NaCl溶液按10倍稀释法稀释菌液,并利用血球计数板测算菌液浓度,配制成浓度 5.5×10^6 CFU·mL⁻¹的菌液^[21],备用。

1.2.2 供试苗木及土壤养分概况 实验所用千年桐幼苗为福建省建阳市林业局提供的1年生实生苗。于2014年5月选择长势一致的幼苗定植于塑料盆(上口径15.0cm、下口径12.5cm、高10.0cm)中,每盆均装入3kg黄心土,恢复性生长2个月后,供试。

实验所用土壤均经过严格熏蒸灭菌,土壤中有有机

质含量为8.2461mg·g⁻¹;全氮和水解氮含量分别为0.1738和0.0571mg·g⁻¹;全磷和有效磷含量分别为0.3476和0.0131mg·g⁻¹;全钾和速效钾含量分别为7.8992和0.0202mg·g⁻¹。

1.3 实验方法

1.3.1 内生真菌接种方法 取上述盆栽苗,采用菌液浇施法^[21],分别在每株幼苗根际浇施浓度 5.5×10^6 CFU·mL⁻¹的SJ4、SJ3、ZG3和SY1菌液各100mL,对照(CK)则施入无菌的质量体积分数0.9%NaCl溶液100mL,连续浇施3d。共4个处理组,每处理组10株幼苗,3次重复。

1.3.2 缺磷处理方法 在接菌15d后对供试幼苗进行缺磷胁迫处理。共设置4个磷处理水平,即正常供磷(供磷量48mg·kg⁻¹)、轻度缺磷(供磷量24mg·kg⁻¹)、中度缺磷(供磷量12mg·kg⁻¹)和重度缺磷(供磷量0mg·kg⁻¹),以KH₂PO₄形式供磷(将KH₂PO₄配成质量浓度360mg·L⁻¹的溶液,分批次施入土壤,每株每次100mL,按供磷量从高到低分别施4、2、1和0次),每处理组5株幼苗,重复3次,共60株。定期施氮肥、钾肥及其他微量元素,并根据天气状况及时补充水分。胁迫60d后测定植株的相关生长指标和植物养分。

1.3.3 生长指标测定 缺磷胁迫前,用电子游标卡尺(精度0.01cm)测量所有供试幼苗的初始地径(D_0),用卷尺(精度0.1cm)测量所有供试幼苗的初始株高(H_0);缺磷胁迫60d后,同法测量所有供试幼苗的地径(D)和株高(H)。分别根据公式“地径增长率= $[(D-D_0)/D_0] \times 100\%$ ”和“株高增长率= $[(H-H_0)/H_0] \times 100\%$ ”计算幼苗的地径增长率和株高增长率。

缺磷胁迫60d后,每处理随机取3株幼苗洗净并吸干表面水分。将幼苗的地上部(茎和叶)和地下部(根)分开,分别标记后放入已知质量(m_1)的铝盒中,先于105℃条件下杀青30min,然后于70℃条件下烘干至恒质量,冷却后,用电子分析天平(精度0.0001g)称取铝盒和样品的总质量(m_2)。分别根据公式“干质量= m_2-m_1 ”和“根冠比=地上部干质量/地下部干质量”计算地上部(或地下部)干质量和根冠比。

1.3.4 幼苗养分元素含量测定 缺磷胁迫60d后,每处理组随机取3株幼苗,并在每株幼苗上分别随机剪取从植株顶端起第3枚以下的完整健康叶片以及

生长正常的根,每处理组共取叶片 10 枚和根样品 10 个,烘干备用。

参考《森林土壤分析方法》^[22],将烘干的叶片和根样品用万能不锈钢粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)粉碎并过 100 目筛,分别用于测定叶片和根中 C、N、P 和 K 含量。采用减量法在电子分析天平(精度 0.000 1 g)上称量样品。称量 0.02 g 样品,采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定 C(即有机质)含量;称量 0.80 g 样品,用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮法制备待测液,用于 N、P 和 K 含量的测定,采用凯氏定氮法测定 N 含量,采用钼锑抗比色法测定 P 含量,采用原子吸收分光光度法测定 K 含量。根据 C 和 N 含量计算 C:N 比。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 2016 软件进行数据处理和制表,采用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行多重比较和统计分析。

2 结果和分析

2.1 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗生长的影响

2.1.1 对幼苗干质量的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗干质量的影响见表 1。由表 1 可见:接种不同内生真菌后,在正常供磷(供磷量 48 mg·kg⁻¹)和轻度缺磷(供磷量 24 mg·kg⁻¹)条件下幼苗干质量均高于未接菌(对照),但均无显著差异($P>0.05$);在中度缺磷(供磷量 12 mg·kg⁻¹)条件下,接菌幼苗的干质量总体上与对照无显著差异,仅接种 SJ4 菌株的幼苗干质量显著($P<0.05$)高于对照及其他处理组;而在重度缺磷(供磷量 0 mg·kg⁻¹)条件下,各处理组间的幼苗干质量均无显著差异,其中,仅接种 SJ3 菌株的幼苗干质量高于对照。整体上看,以接种 SJ4 菌株的幼苗干质量最高。

表 1 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗干质量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 1 Effects of different endophytic fungi on dry weight of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg·kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗的干质量/g ³⁾ Dry weight of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	1.573±0.400Aa	2.110±0.728ABa	1.983±1.019Aa	2.213±0.854Aa	1.977±0.499Aa
T2	24	1.353±0.223Aa	1.765±0.205Ba	1.625±0.247Aa	1.730±0.198Aa	1.435±0.177Aa
T3	12	1.585±0.559Ab	3.190±0.229Aa	1.763±0.700Ab	0.895±0.262Ab	1.410±0.608Ab
T4	0	1.880±0.212Aa	1.715±0.191Ba	2.340±0.665Aa	1.565±0.049Aa	1.670±0.665Aa

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).
²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.
³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4、SJ3、ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

由表 1 还可见:随供磷量的降低,对照和接种 SJ3 菌株的幼苗干质量随供磷量的降低呈先降低后升高的趋势,在重度缺磷条件下其干质量最大;接种 SJ4 菌株的幼苗干质量随供磷量的降低呈波动的趋势,且中度缺磷处理组的幼苗干质量高于正常供磷、轻度缺磷和重度缺磷处理组;接种 ZG3 和 SY1 菌株的幼苗干质量随供磷量的降低也呈先降低后升高的趋势,但均在正常供磷条件下最高,在中度缺磷条件下最低。多重比较结果显示:在不同程度缺磷条件下,对照以及接种 SJ3、ZG3 和 SY1 菌株的幼苗干质量均无显著差异,仅接种 SJ4 菌株的幼苗干质量在中度缺磷条件

下显著高于其他缺磷处理组。
2.1.2 对幼苗地径增长率的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗地径增长率的影响见表 2。由表 2 可见:在正常供磷和轻度缺磷条件下,接种 SY1 菌株的幼苗地径增长率均最高;在中度和重度缺磷条件下,接种 SJ4 菌株的幼苗地径增长率均最高。整体上看,接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗地径增长率相对较高。多重比较结果表明:在正常供磷、轻度缺磷和重度缺磷条件下,各处理组间的幼苗地径增长率均无显著差异,仅中度缺磷条件下接种 SJ4 菌株的幼苗地径增长率显著高于未接菌(对照)。

由表 2 还可见:随供磷量的降低,对照和接种 SJ4 菌株的幼苗地径增长率呈先降低后升高的趋势,并均在重度缺磷条件下达到最高;接种 SJ3 和 SY1 菌株的幼苗地径增长率随供磷量的降低呈先升高后降低的趋势,分别在中度和轻度缺磷条件下达到最高;接种

ZG3 菌株的幼苗地径增长率随供磷量的降低呈波动的趋势,并在中度缺磷条件下达到最高。多重比较结果显示:在不同程度缺磷条件下,对照以及接种 SJ4、SJ3、ZG3 和 SY1 菌株的幼苗地径增长率均无显著差异。

表 2 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗地径增长率的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of different endophytic fungi on increasing rate of ground diameter of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗的地径增长率/% ³⁾ Increasing rate of ground diameter of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	19.981±8.512Aa	20.090±8.104Aa	19.523±8.517Aa	16.196±6.399Aa	24.102±1.920Aa
T2	24	15.116±7.584Aa	19.044±7.338Aa	21.900±12.920Aa	8.099±0.020Aa	30.300±3.060Aa
T3	12	16.197±4.026Ab	36.787±7.633Aa	27.022±6.934Aab	36.477±8.067Aab	28.733±3.669Aab
T4	0	38.806±11.717Aa	41.942±5.939Aa	25.130±1.925Aa	21.927±3.498Aa	19.007±3.445Aa

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.

³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

2.1.3 对幼苗株高增长率的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗株高增长率的影响见表 3。由表 3 可见:在正常供磷条件下,各接菌幼苗的株高增长率均高于未接菌(对照),且以接种 SJ3 菌株的幼苗最高;在轻度和中度缺磷胁迫条件下,仅接种 SJ4 菌株的幼苗株高增长率高于对照;在重度缺磷条件下,接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗株高增长率均高于对照。整体上看,接种 SJ4 菌株的幼苗株高增长率最高。多重比较结果显示:在正常供磷和轻度缺磷条件下,各处理组间的幼苗株高增长率均无显著差异;在

中度缺磷条件下,仅接种 SJ4 菌株的幼苗株高增长率与接种 ZG3 和 SY1 菌株的幼苗差异显著;在重度缺磷条件下,仅接种 SJ4 菌株的幼苗株高增长率显著高于其他处理组。

由表 3 还可见:随供磷量的降低,对照的幼苗株高增长率呈先逐渐升高后降低的趋势,并在中度缺磷条件下达到最高;接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗株高增长率随供磷量的降低呈先降低后升高的趋势,均在重度缺磷条件下达到最高;接种 SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗株高增长率随供磷量的降低呈波动的趋势,但均以正

表 3 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗株高增长率的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of different endophytic fungi on increasing rate of height of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗的株高增长率/% ³⁾ Increasing rate of height of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	14.332±12.961Aa	28.184±9.381Aa	29.884±4.774Aa	19.128±8.975Aa	17.666±10.524Aa
T2	24	14.638±4.174Aa	17.264±8.810Aa	13.543±2.540Ba	9.463±0.011Ba	14.286±5.331Aa
T3	12	21.536±5.716Aab	25.880±6.670Aa	16.845±5.925ABab	9.551±4.087ABb	11.981±0.954Ab
T4	0	15.432±5.251Ab	38.241±5.632Aa	12.353±8.228Bb	7.994±8.312ABb	17.755±3.904Ab

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.

³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

常供磷条件下最高。多重比较结果显示:在不同程度缺磷条件下,对照以及接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗株高增长率均无显著差异;接种 SJ3 菌株的幼苗株高增长率仅在正常供磷条件下与轻度和重度缺磷处理组差异显著;而接种 ZG3 菌株的幼苗株高增长率仅在正常供磷条件下与轻度缺磷处理组差异显著。

2.1.4 对幼苗根冠比的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗根冠比的影响见表 4。由表 4 可见:在正常供磷条件下,仅接种 ZG3 菌株的幼苗根冠比高于未接菌(对照);在轻度缺磷条件下,接种 ZG3 和 SY1 菌株的幼苗根冠比均高于对照;在中度缺磷条件下,接种 SJ3、ZG3 和 SY1 菌株的幼苗根冠比均高于对照;在重度缺磷条件下,各接菌幼苗的根冠比均高于对照。整体上看,接种 ZG3 菌株的幼苗根冠比相对较高。多重比较结果显示:在正常供磷以及轻

度、中度和重度缺磷条件下,各接菌处理组的幼苗根冠比与对照均无显著差异,且各接菌处理组间也无显著差异。

由表 4 还可见:在不同程度缺磷条件下,接种 SJ4、SJ3、ZG3 和 SY1 菌株的幼苗根冠比均大于正常供磷处理组。随供磷量的降低,对照的幼苗根冠比呈先升高后降低的趋势,在轻度缺磷条件下达到最高;接种 SJ4 和 ZG3 菌株的幼苗根冠比随供磷量的降低呈波动的趋势,分别在重度和轻度缺磷条件下达到最高;接种 SJ3 和 SY1 菌株的幼苗根冠比随供磷量的降低呈先升高后降低的趋势,分别在中度和轻度缺磷条件下达到最高。多重比较结果显示:在不同程度缺磷条件下,接种 SJ4、SJ3、ZG3 和 SY1 菌株的幼苗根冠比均无显著差异;仅对照的幼苗根冠比在轻度缺磷条件下与重度缺磷处理组差异显著。

表 4 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗根冠比的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 4 Effects of different endophytic fungi on root/shoot ratio of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗的根冠比 ³⁾ Root/shoot ratio of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	0.904±0.433ABa	0.701±0.149Aa	0.762±0.091Aa	1.028±0.135Aa	0.901±0.047Aa
T2	24	1.450±0.266Aa	1.073±0.103Aa	1.039±0.221Aa	1.985±0.021Aa	1.535±0.154Aa
T3	12	1.116±0.013ABa	0.896±0.064Aa	1.259±0.203Aa	1.178±0.199Aa	1.203±0.450Aa
T4	0	0.736±0.216Ba	1.835±0.514Aa	0.962±0.337Aa	1.270±0.068Aa	0.985±0.312Aa

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).
²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.
³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4、SJ3、ZG3、SY1: 分别接种 SJ4、SJ3、ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

2.2 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中营养元素含量的影响

2.2.1 对幼苗叶片和根中 C 含量的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 C 含量的影响见表 5。由表 5 可见:在正常供磷条件下,各接菌幼苗的叶片和根中 C 含量均低于未接菌(对照),且除接种 SJ4 菌株的幼苗根外,其他接菌处理组与对照均有显著差异 ($P<0.05$)。在轻度缺磷条件下,接种 SJ4、SJ3 和 SY1 菌株的幼苗叶片中 C 含量均显著高于对照,而接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C 含量显著低于对照;仅接种 SJ3 菌株的幼苗根中 C 含量显著高于对照,其他处理组与对照均无显著差异 ($P>0.05$)。在中度缺磷条件下,仅接种 SY1 菌株的幼苗

叶片中 C 含量显著高于对照和其他处理组;接种 ZG3 菌株的幼苗根中 C 含量显著高于对照和其他处理组。在重度缺磷条件下,除接种 SY1 菌株的幼苗外,其他接菌处理组的幼苗叶片和根中 C 含量均高于对照,其中,接种 SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C 含量显著高于对照。

由表 5 还可见:随供磷量的降低,对照的幼苗叶片和根中 C 含量均大幅度降低,并在重度缺磷条件下达到最低,且与正常供磷处理组均有显著差异。随供磷量的降低,接种 SJ4 菌株的幼苗叶片中 C 含量呈先升高后降低的趋势,而其根中 C 含量则呈先降低后升高的趋势;其中,在轻度和中度缺磷条件下其叶片中 C 含量显著高于正常供磷和重度缺磷处理组,

而在正常供磷条件下其根中 C 含量高于其他缺磷处理组,且与轻度缺磷处理组有显著差异。随供磷量的降低,接种 SJ3 菌株的幼苗叶片中 C 含量呈波动的趋势,而其根中 C 含量则呈先升高后降低的趋势;其中,在重度缺磷条件下其叶片中 C 含量最高,在轻度缺磷条件下其根中 C 含量最高,且与其他处理组均有显著差异。随供磷量的降低,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C 含量呈先降低后升高的趋势;而其根中

C 含量呈波动的趋势;其中,在重度缺磷条件下其叶片中 C 含量最高,在中度缺磷条件下其根中 C 含量最高,且与其他处理组均有显著差异。随供磷量的降低,接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 C 含量呈先升高后降低的趋势,且在中度缺磷条件下显著高于其他处理组;而其根中 C 含量总体变化幅度不大,仅在中度缺磷条件下有较大幅度提高,但在各缺磷处理组间无显著差异。

表 5 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 C 含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effects of different endophytic fungi on C content in leaf and root of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗叶片中 C 含量/g · kg ⁻¹³⁾ C content in leaf of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	472.747±54.545Aa	112.044±19.973Cc	233.515±47.232Cb	141.777±45.228Bc	243.973±34.654Bb
T2	24	239.104±29.172Bc	362.511±23.281Aab	365.064±43.210Ba	105.184±12.123Bd	310.002±32.534Bb
T3	12	291.530±21.332Bb	283.581±24.824Bb	134.907±32.967Dc	155.438±23.134Bc	403.718±63.121Aa
T4	0	132.835±12.808Cc	148.894±21.122Cc	490.656±32.766Aa	366.615±22.344Ab	144.585±45.444Cc

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗根中 C 含量/g · kg ⁻¹³⁾ C content in root of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	278.266±34.123Aa	261.435±23.123Aa	168.258±32.432Cb	159.744±63.242Bb	157.776±21.233Ab
T2	24	217.614±62.467ABb	151.757±32.207Bb	324.489±21.076Aa	154.620±29.769Bb	151.033±53.679Ab
T3	12	199.311±32.654ABb	210.540±67.345ABb	248.156±22.754Bb	349.815±32.143Aa	202.458±24.254Ab
T4	0	175.976±21.213Bab	222.286±28.977ABa	223.964±54.045BCa	180.696±34.233Bab	155.438±32.126Ab

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.

³⁾ CK: 未接种(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

2.2.2 对幼苗叶片和根中 N 含量的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 N 含量的影响见表 6。由表 6 可见:在正常供磷条件下,各接菌幼苗的叶片和根中 N 含量与未接菌(对照)均无显著差异。在轻度缺磷条件下,接种 SJ3 菌株的幼苗叶片中 N 含量最高,但与其他处理组均无显著差异;接种 SY1 菌株的幼苗根中 N 含量最高,且与对照和接种 ZG3 菌株的幼苗有显著差异。在中度缺磷条件下,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 N 含量最高,但与其他处理组均无显著差异;接种 SY1 菌株的幼苗根中 N 含量最高,且仅与接种 SJ3 菌株的幼苗有显著差异。在重度缺磷条件下,各接菌幼苗的叶片和根中 N 含量均高于对照;其中,接种 SJ4, ZG3 和 SY1 菌株的幼苗叶片中 N 含量均显著高于对照;接种 SJ4 菌株的幼

苗根中 N 含量最高,且与对照和接种 SJ3 的幼苗有显著差异。

由表 6 还可见:随供磷量的降低,对照的幼苗叶片和根中 N 含量均不同程度的降低,但仅重度缺磷处理组与正常供磷处理组差异显著。随缺磷程度的增大,各接菌幼苗叶片中 N 含量均小幅波动,整体上均无显著差异;仅接种 SJ3 菌株的幼苗在轻度和中度缺磷处理组间差异显著。在不同程度缺磷条件下,接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗根中 N 含量与正常供磷处理组间总体无显著差异,但均以重度供磷处理组最高;接种 ZG3 菌株的幼苗根中 N 含量仅在轻度缺磷条件下显著低于正常供磷处理,以重度缺磷处理组最高;而接种 SJ3 菌株的幼苗根中 N 含量仅在中度缺磷条件下显著低于正常供磷处理,但以轻度缺磷处理组最高。

表 6 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 N 含量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 6 Effects of different endophytic fungi on N content in leaf and root of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗叶片中 N 含量/g · kg ⁻¹³⁾ N content in leaf of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	9.281±1.332Aa	9.545±1.240Aa	8.590±1.093ABa	9.298±1.879Aa	9.837±0.600Aa
T2	24	9.021±0.946ABa	10.004±1.285Aa	10.499±0.285Aa	9.163±1.521Aa	9.857±0.390Aa
T3	12	7.781±0.679ABa	8.651±1.065Aa	7.636±1.439Ba	9.581±0.877Aa	8.766±1.098Aa
T4	0	6.681±1.630Bb	9.913±0.970Aa	8.590±1.412ABab	9.300±0.706Aa	10.318±1.321Aa

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗根中 N 含量/g · kg ⁻¹³⁾ N content in root of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	11.232±1.018Aab	10.691±1.088ABab	9.997±0.710Ab	11.820±0.821Aa	10.028±0.859Ab
T2	24	9.778±1.242ABb	10.251±0.491Bab	10.151±0.999Aab	9.044±0.949Bb	11.764±0.803Aa
T3	12	9.378±1.003ABab	9.240±1.667Bab	7.452±0.487Bb	10.141±1.274ABa	10.179±1.619Aa
T4	0	8.078±1.149Bc	12.409±0.511Aa	9.987±1.412Abc	12.060±0.810Aab	11.956±1.612Aab

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).
²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.
³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

2.2.3 对幼苗叶片和根中 C:N 比的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 C:N 比的影响见表7。由表 7 可见:在正常供磷条件下,各接菌幼苗的叶片和根中 C:N 比均低于未接菌(对照),其中除接种 SJ4 菌株的幼苗根外,其他接菌处理组与对照均有显著差异。在轻度缺磷条件下,接种 SJ4、SJ3 和 SY1 菌株的幼苗叶片中 C:N 比均高于对照,但差异不显著,仅接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C:N 比显著低于其他处理组;而各接菌幼苗根中 C:N 比与对照均无显著差异,但接种 SJ3 菌株的幼苗根中

表 7 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 C:N 比的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 7 Effects of different endophytic fungi on C:N ratio in leaf and root of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗叶片中 C:N 比 ³⁾ C:N ratio in leaf of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	51.922±12.035Aa	12.010±3.586Bc	27.481±6.899Bb	16.422±8.764Bbc	24.982±4.775BCbc
T2	24	26.936±6.171BCa	36.869±7.400Aa	34.769±4.025Ba	11.700±2.506Bb	31.546±4.244Ba
T3	12	37.777±5.795ABab	33.092±4.908Ab	18.695±8.385Bc	16.449±3.802Bc	46.379±8.302Aa
T4	0	20.867±6.177Cc	15.199±3.361Bc	58.573±13.745Aa	39.696±5.450Ab	14.532±6.182Cc

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/mg · kg ⁻¹ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗根中 C:N 比 ³⁾ C:N ratio in root of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	25.070±5.050Aa	24.742±4.561Aa	16.734±2.061Bb	13.653±5.582Bb	15.895±3.129Ab
T2	24	23.058±9.480Aab	14.920±3.861Ab	32.237±4.635Aa	17.462±5.235Bb	13.032±5.406Ab
T3	12	21.210±2.057Ab	24.261±12.329Aab	33.362±3.370Aa	34.675±2.974Aa	20.402±5.015Ab
T4	0	22.358±6.078Aab	17.901±2.101Aab	22.614±6.034Ba	15.107±3.662Bab	13.285±4.147Ab

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).
²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.
³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

C:N 比显著高于其他接菌处理组。在中度缺磷条件下,仅接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 C:N 比高于对照,但差异不显著;接种 SJ4、SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗根中 C:N 比均高于对照,但仅后二者与对照差异显著。在重度缺磷条件下,仅接种 SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C:N 比高于对照且差异显著;接种 SJ3 菌株的幼苗根中 C:N 比最高,但各接菌幼苗根中 C:N 比与对照均无显著差异。

由表 7 还可见:在不同程度缺磷条件下,对照的幼苗叶片中 C:N 比均低于正常供磷处理组,其中轻度和重度缺磷处理组与正常供磷处理组差异显著;根中 C:N 比也均低于正常供磷处理组,但无显著差异。与正常供磷处理组相比,在不同程度缺磷条件下接种 SJ4 菌株的幼苗叶片中 C:N 比均升高,且轻度和中度缺磷处理组与正常供磷和重度缺磷处理组差异显著;而根中 C:N 比均不同程度降低但均无显著差异。与正常供磷处理组相比,接种 SJ3 菌株的幼苗叶片中 C:N 比仅在重度缺磷条件下显著升高,而其根中 C:N 比则在轻度和中度缺磷条件下显著升高。与正常供磷处理组相比,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 C:N 比仅在重度缺磷条件下显著升高,而根中 C:N 比则仅在中度缺磷条件下显著升高。与正常供磷处理组相比,接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 C:N 比在中度缺磷

条件下显著升高,且显著高于轻度和重度缺磷处理组;而其根中 C:N 比在各处理组间均无显著差异,且仅在中度缺磷条件下升高。

2.2.4 对幼苗叶片和根中 P 含量的影响 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 P 含量的影响见表 8。由表 8 可见:在正常供磷条件下,各接菌幼苗的叶片和根中 P 含量总体上均显著低于未接菌(对照)。在轻度缺磷条件下,仅接种 SJ3 菌株的幼苗叶片和根中 P 含量显著高于对照,而接种 SJ4 菌株的幼苗根中 P 含量也显著高于对照。在中度缺磷条件下,仅接种 ZG3 菌株的幼苗叶片和根中 P 含量显著高于对照,而接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 P 含量也显著高于对照。在重度缺磷条件下,各接菌幼苗叶片中 P 含量均显著高于对照;而各接菌幼苗根中 P 含量也与对照差异显著,其中,接种 SJ3 菌株的幼苗根中 P 含量小于对照,而其他接菌处理组的幼苗根中 P 含量均高于对照。

由表 8 还可见:在不同程度缺磷条件下,对照的幼苗叶片和根中 P 含量总体上低于正常供磷处理组;其中,叶片中 P 含量仅在重度缺磷条件下显著降低,而根中 P 含量在不同程度缺磷条件下均显著降低。与正常供磷处理组相比,在不同程度缺磷条件下接种 SJ4 菌株的幼苗叶片中 P 含量均显著升高,其中,

表 8 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 P 含量的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 8 Effects of different endophytic fungi on P content in leaf and root of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗叶片中 P 含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-13)$ P content in leaf of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	13.220 $\pm$ 0.630Aa	7.432 $\pm$ 1.014Cc	9.214 $\pm$ 0.724Bb	10.615 $\pm$ 0.711Bb	10.556 $\pm$ 1.311Bb
T2	24	13.230 $\pm$ 1.239Abc	12.012 $\pm$ 1.093Acd	16.050 $\pm$ 1.312Aa	14.782 $\pm$ 0.816Aab	10.269 $\pm$ 1.295Bd
T3	12	12.855 $\pm$ 0.794Ab	12.397 $\pm$ 0.816Ab	10.767 $\pm$ 1.085Bc	15.058 $\pm$ 0.487Aa	16.431 $\pm$ 0.580Aa
T4	0	7.123 $\pm$ 1.014Bb	9.390 $\pm$ 0.585Ba	9.573 $\pm$ 0.712Ba	9.757 $\pm$ 1.124Ba	10.361 $\pm$ 0.816Ba

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗根中 P 含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-13)$ P content in root of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	16.943 $\pm$ 0.487Aa	13.492 $\pm$ 0.724Bc	15.750 $\pm$ 1.311Bab	14.567 $\pm$ 0.630BCbc	11.708 $\pm$ 1.085Bd
T2	24	13.539 $\pm$ 0.794Bb	17.861 $\pm$ 1.239Aa	19.344 $\pm$ 1.093Aa	12.159 $\pm$ 1.312Cb	12.996 $\pm$ 0.816Bb
T3	12	12.980 $\pm$ 0.711BCb	9.966 $\pm$ 0.585Cc	9.362 $\pm$ 0.712Cc	18.165 $\pm$ 1.124Aa	13.100 $\pm$ 1.295Bb
T4	0	11.747 $\pm$ 1.098Cc	16.723 $\pm$ 0.580Ab	6.789 $\pm$ 0.987Dd	15.758 $\pm$ 2.109ABb	19.829 $\pm$ 2.313Aa

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.

³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

轻度和中度缺磷处理组显著高于重度缺磷处理组;而其根中 P 含量则在轻度和重度缺磷条件下显著升高,在中度缺磷条件下则显著降低。与正常供磷处理组相比,接种 SJ3 菌株的幼苗叶片中 P 含量在不同程度缺磷条件下均升高,但仅在轻度缺磷条件下有显著差异;而其根中 P 含量则在轻度缺磷条件下显著升高,在中度和重度缺磷条件下显著降低。与正常供磷处理组相比,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 P 含量在轻度和中度缺磷条件下均显著升高;而其根中 P 含量仅在中度缺磷条件下显著升高。与正常供磷处理组相比,接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 P 含量在中度缺磷条件下显著升高,而其根中 P 含量在重度缺磷条件下显著升高。

2.2.5 对幼苗叶片和根中 K 含量的影响 不同内

生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 K 含量的影响见表 9。由表 9 可见:在正常供磷条件下,仅接种 ZG3 菌株的幼苗叶片和根中 K 含量以及接种 SY1 菌株的幼苗根中 K 含量显著低于未接菌(对照),其他接菌处理组与对照均无显著差异。在轻度缺磷条件下,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 K 含量以及接种 SY1 菌株的幼苗根中 K 含量显著高于对照,而接种 SJ3 和 ZG3 菌株的幼苗根中 K 含量显著低于对照。在中度缺磷条件下,各接菌幼苗叶片和根中 K 含量均低于对照,且总体上差异显著。在重度缺磷条件下,各接菌幼苗叶片中 K 含量均高于对照且总体上差异显著;而根中 K 含量仅接种 SJ4 菌株的幼苗显著高于对照,其他接菌处理组的幼苗根中 K 含量与对照均无显著差异。

表 9 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗叶片和根中 K 含量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 9 Effects of different endophytic fungi on K content in leaf and root of seedlings of *Aleurites montana* (Lour.) Wils. under phosphorus deficiency condition ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	供磷量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗叶片中 K 含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-13)$ K content in leaf of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	15.502±1.160Bab	16.696±2.014Aa	14.583±1.285ABab	10.581±1.240Cc	13.007±1.093Bbc
T2	24	14.210±1.485Bbc	15.364±1.630Ab	12.447±1.424BCc	21.690±0.894Aa	12.569±0.711Bc
T3	12	18.745±1.361Aa	14.316±0.580Ab	15.234±1.439Ab	17.965±0.912Ba	15.755±1.295Ab
T4	0	7.388±1.093Cd	14.254±0.819Ab	11.619±1.412Cc	18.573±1.211Ba	9.222±1.240Cd

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	供磷量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Phosphorus supply amount	接种不同内生真菌后幼苗根中 K 含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-13)$ K content in root of seedlings after inoculated with different endophytic fungi ³⁾				
		CK	SJ4	SJ3	ZG3	SY1
T1	48	16.737±1.630ABa	18.363±2.014Aa	18.608±1.285Aa	12.669±0.912BCb	13.348±1.295Bb
T2	24	13.962±1.361BCb	15.973±1.160Ab	8.870±0.711Cc	10.953±1.485Cc	18.088±0.894Aa
T3	12	18.717±1.424Aa	16.706±0.819Aab	12.537±1.412Bc	16.481±0.580Ab	13.266±1.439Bc
T4	0	12.706±2.507Cb	16.475±1.211Aa	13.574±1.540Bb	13.523±0.987Bb	12.106±0.623Bb

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).
²⁾ T1: 正常供磷 Normal phosphorus supply; T2: 轻度缺磷 Light phosphorus deficiency; T3: 中度缺磷 Moderate phosphorus deficiency; T4: 重度缺磷 Severe phosphorus deficiency.
³⁾ CK: 未接菌(对照) Not inoculated with endophytic fungus (the control); SJ4, SJ3, ZG3, SY1: 分别接种 SJ4, SJ3, ZG3 和 SY1 菌株 Inoculated with SJ4, SJ3, ZG3, and SY1 strains, respectively.

由表 9 还可见:在不同程度缺磷条件下,对照的幼苗叶片中 K 含量在中度缺磷条件下显著升高,在重度缺磷条件下显著降低;而其根中 K 含量仅在重度缺磷条件下显著降低。与正常供磷处理组相比,接种 SJ4 菌株的幼苗叶片和根中 K 含量在不同程度缺磷条件下均降低,但均无显著差异。与正常供磷处理组相比,接种 SJ3 菌株的幼苗叶片中 K 含量仅在中度缺磷条件下升高但差异不显著,在重度缺磷条件下显

著降低;而其根中 K 含量在不同程度缺磷条件下均显著降低。与正常供磷处理组相比,接种 ZG3 菌株的幼苗叶片中 K 含量在不同程度缺磷条件下均显著升高,而其根中 K 含量则在中度缺磷条件下显著升高。与正常供磷处理组相比,接种 SY1 菌株的幼苗叶片中 K 含量在中度缺磷条件下显著升高,在重度缺磷条件下显著降低;而其根中 K 含量在轻度缺磷条件下显著升高,并显著高于其他缺磷处理组。

3 讨论和结论

本研究中,不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗的生长具有不同程度的影响。与正常供磷处理组相比,在中度缺磷条件下接种内生真菌的千年桐幼苗的地径增长率明显升高,对地径的促生作用有利于提高其幼苗的成活率,以及在极端气候条件下的保存率。接种嗜热真菌属 SY1 菌株的幼苗地径增长率在轻度和中度缺磷条件下均明显高于未接菌(对照)幼苗,而其株高增长率仅在重度缺磷条件下略高于未接菌幼苗。其原因可能有以下 3 点:第一,内生真菌在胁迫条件下会引起植株体内内源激素的变化,增加生长素的分泌^[13,23];生长素浓度适中则可促进植物的高生长,但浓度过高则抑制植株生长。第二,内生真菌影响了生长素的分配^[24],促使生长素向根系运输的速度和数量增加,导致侧根数量增加^[25];而低磷胁迫也有同样的作用^[26],因而更加促进幼苗根系生长;生长素向根系运输导致地上部分生长素减少,从而减弱了对地上部分生长的促进作用,本研究中接菌幼苗的根冠比在重度缺磷条件下明显高于未接菌幼苗,也印证了这一原因。第三,内生真菌在宿主体内的分布具有专一性和差异性^[27],在植物组织中内生真菌的种类和数量的差异也可能造成宿主植物的株高和地径增长的差异。由本研究结果还可见:在 4 种供磷条件下,接种青霉菌属 SJ4 菌株的幼苗的地径和株高增长率均高于未接菌幼苗,且在重度缺磷条件下其根冠比也明显高于未接菌幼苗,其原因可能为相对于植株的地上部分,其地下部分对土壤中磷的缺乏更为敏感,为了适应低磷环境,植株对干物质进行调整及重新分配从而改变了植株的根冠比^[28-29]。

在正常供磷和轻度缺磷条件下,接种内生真菌的千年桐幼苗干质量均高于未接菌幼苗,说明接种内生真菌对千年桐植株干物质的积累有一定的促进作用;但在轻度缺磷条件下幼苗干质量均较正常供磷条件下有所降低,说明土壤磷缺乏对千年桐幼苗干物质的积累有一定的影响。在缺磷条件下,接种青霉菌属 SJ3 菌株的千年桐幼苗干质量随缺磷程度增大而升高,并在重度缺磷条件下达到最大;接种青霉菌属 SJ4 菌株的幼苗干质量则在中度缺磷条件下达到最高且差异显著。多数研究已证实,宿主植物为内生真菌提供碳源及营养物质,内生真菌则分泌代谢物促进

宿主植物生长和调节宿主植物的代谢,以增强宿主植物对逆境胁迫的抗性^[30],从而维持宿主植物的生长。本研究中,在不同程度缺磷条件下,接种嗜热真菌属 SY1 菌株的幼苗干质量无显著差异,说明在缺磷胁迫下,与嗜热真菌属相比,青霉菌属菌株对幼苗干质量的影响更大。对禾草类植物的研究结果表明:一部分内生真菌可以通过维持甚至减少宿主植物的生长使其适应逆境,直至逆境消除便能迅速恢复生长^[31],嗜热真菌属可能属于这类在胁迫环境中具有防御性机制的内生真菌^[32-33]。

在重度缺磷条件下,接种内生真菌的千年桐幼苗叶片中 C、N、P 和 K 含量均大于未接菌幼苗,其中,青霉菌属 SJ3、SJ4 和 ZG3 菌株对叶片中 K 含量的提升作用显著高于嗜热菌属 SY1 菌株;接种 4 种内生真菌的幼苗叶片中 P 含量也均显著大于对照。内生真菌可以提高植物生长激素(如 IAA)等内源物质的分泌,促进植株对 N 和 P 等营养元素的吸收^[13,23];而且,真菌在土壤中的解磷效果较强,其中青霉菌属真菌的溶磷能力较细菌高 10 倍以上^[34-35],从而可以在严重缺磷条件下促进植株对土壤中 P 的有效利用。

内生真菌对宿主植株叶片和根中养分利用具有不同程度的影响,依宿主、环境以及养分元素的不同可能存在差异。例如,在重度缺磷条件下,接种内生真菌的幼苗根中 N 含量均大于其叶片中 N 含量;而接种 SJ4 和 SY1 菌株的幼苗在不同缺磷条件下根中 N 含量均大于叶片中 N 含量。在缺磷条件下,随缺磷程度增大,接种 SJ4 菌株的幼苗根中 C 含量由明显低于叶片变为明显高于叶片。Redman 等^[36]的研究结果表明:受内生真菌影响,水稻(*Oryza sativa* Linn.)植株的养分会优先分配到根中;Upton 等^[37]认为,植物体内的深色有隔内生真菌(DSE)会分泌一些胞外酶以改变宿主植物的根系环境,促进根对 C、N 和 P 等养分的吸收。内生真菌也可以通过增加与矿质元素代谢有关的微生物来改变宿主植物根际土壤微生物群落^[12]。本研究中,接种青霉菌属 ZG3 菌株的千年桐幼苗根中 K 含量在正常供磷条件下高于叶片,但在缺磷条件下则均低于叶片;在重度缺磷条件下其根中 C 含量也低于叶片。赵杨景等^[38]的研究结果也表明:受内生真菌的影响,兰科(Orchidaceae)植物地上部分的养分吸收能力大于地下部分。可能是由于光照充足时叶片的矿质元素含量与其光合作用水平成正比^[39],而内生真菌可以促进宿主植物叶绿

素含量的增加,从而促进宿主植物的光合作用^[40]。

综合分析结果表明:不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗的生长和养分分配具有不同程度的影响效应。在供试的4种内生真菌菌株中,青霉菌属菌株的促生效果显著,在轻度缺磷条件下可明显促进幼苗干质量的提高,在中度缺磷条件下可明显促进幼苗地径增长率的增大,在重度缺磷条件下可明显促进幼苗根冠比的增大。在重度缺磷条件下,内生真菌有利于千年桐幼苗对N、P和K的吸收及积累;与叶片相比,内生真菌更有利于千年桐幼苗根中N积累。从不同菌种看,青霉菌属菌株对其叶片和根中K积累的促进效果较嗜热菌属菌株更明显,但嗜热菌属菌株对其P积累的促进效果则较青霉菌属菌株更强。

由于林木的生长周期长,与禾草类植物的内生真菌相比,林木内生真菌的研究仍然处于较为基础的阶段。对于林木与内生真菌共生关系的长期性和稳定性,多种内生真菌复合作用的协同性和拮抗性,以及不同环境下内生真菌对不同宿主的作用机制等方面还需更进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] FANG Z Y, SHAO C, MENG Y J, et al. Phosphate signaling in *Arabidopsis* and *Oryza sativa* [J]. Plant Science, 2009, 176: 170-180.
- [3] 张振海,陈琰,韩胜芳,等. 低磷胁迫对大豆根系生长特性及分泌H⁺和有机酸的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(2): 135-140.
- [4] 丁广大,陈水森,石磊,等. 植物耐低磷胁迫的遗传调控机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 733-744.
- [5] BALDWIN J C, KARTHIKEYAN A S, RAGHOTHAMA K G. LEPS 2, a phosphorus starvation-induced novel acid phosphatase from tomato[J]. Plant Physiology, 2001, 125: 728-737.
- [6] 余利平,田立荣,张春雷,等. 低磷胁迫对油菜不同生育期叶片光合作用的影响[J]. 植物生理科学, 2008, 24(12): 232-236.
- [7] 曹翠玲,毛圆辉,曹鹏涛,等. 低磷胁迫对豇豆幼苗叶片光合特性及根系生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1373-1378.
- [8] 陈佩琳,连丽君,张可伟. 低磷和高照度光下两种不同磷效率玉米幼苗的几种光合参数变化[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(3): 459-464.
- [9] RAO I M, FREEDEN A L, TERRY N. Influence of phosphorus limitation on photosynthesis, carbon allocation and partitioning in sugar beet soybean grown with a short photoperiod [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1993, 31: 223-231.
- [10] GANLEY R J, BRUNSFELD S J, NEWCOMBE G. A community of unknown, endophytic fungi in western white pine [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101: 10107-10112.
- [11] 臧威,何旭,孙剑秋,等. 桦木内生真菌的分离与代谢产物的抑菌活性[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 661-665.
- [12] 杨波,陈晏,李霞,等. 植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2656-2664.
- [13] 任安芝,高玉葆. 禾草类内生真菌的研究进展[J]. 微生物学通报, 2004, 31(2): 130-133.
- [14] DENG H H, HONG T, WU C Z, et al. Application of endophytic fungi isolated from *Pinus massoniana* Lamb. in resin tapping [J]. Bangladesh Journal of Botany, 2015, 44: 753-758.
- [15] 龙凤,洪滔,林勇明,等. 2种化感物质胁迫下内生真菌感染对木麻黄幼苗小枝活性氧代谢和清除系统的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 462-472.
- [16] 徐欢,徐彩瑶,林勇明,等. 5株内生真菌对杉木幼苗生长的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(4): 685-689.
- [17] 杨蕾,周国英,梁军,等. 防治杨树溃疡病内生菌的分离筛选及鉴定[J]. 植物保护学报, 2014, 41(4): 438-446.
- [18] 史央,戴传超,陆玲,等. 大戟科4种药用植物内生真菌3种胞外酶活性的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(2): 17-20.
- [19] 林晗,洪陈洁,洪滔,等. 不同内生真菌对千年桐幼苗生长及主要矿质元素的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(9): 1799-1804.
- [20] 张鼎华,涂传进,沈兵松,等. 福建山地几种主要土类土壤磷的研究[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 29-36.
- [21] 谢安强,洪伟,吴承祯. 桉树内生菌对尾巨桉幼苗抗寒生理指标的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(6): 170-174.
- [22] 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1271—1999 森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定[S]//国家林业局. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999: 295-297.
- [23] WAQAS M, KHAN A L, SHAHZAD R, et al. Mutualistic fungal endophytes produce phytohormones and organic acids that promote japonica rice plant growth under prolonged heat stress[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B (Biomedicine and Biotechnology), 2015, 16: 1011-1018.
- [24] WHITE J F, BELANGER F, MEYER W, et al. Clavicipitalean fungal epibionts and endophytes-development of symbiotic interactions with plants[J]. Symbiosis, 2002, 33: 201-213.
- [25] 袁志林. 一株广谱内生真菌B3对水稻生长及生理影响研究[D]. 南京: 南京师范大学生命科学学院, 2005: 33-34.
- [26] 郭玉春,徐惠龙,陈芳育,等. 磷高效水稻根系对低磷胁迫响应的差异蛋白分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3231-3238.
- [27] 吴晓茜,李文超,秦路平. 天目山山胡椒不同部位内生真菌组成及多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2):

- 107-113.
- [28] 吴 楚, 范志强, 王政权. 磷胁迫对水曲柳幼苗叶绿素合成、光合作用和生物量分配格局的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 935-940.
- [29] 张 瑜, 刘海涛, 周亚平, 等. 田间玉米和蚕豆对低磷胁迫响应的差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 911-919.
- [30] LEWIS G C. Effects of biotic and abiotic stress on the growth of three genotypes of *Lolium perenne* with and without infection by the fungal endophyte *Neotyphodium lolii* [J]. Annals of Applied Biology, 2004, 144: 53-63.
- [31] MALINOWSKI D P, BELESKY D P. Adaptations of endophyte-infected cool-season grasses to environmental stresses: mechanisms of drought and mineral stress tolerance[J]. Crop Science, 2000, 40: 923-940.
- [32] 韩 荣, 李 夏, 任安芝, 等. 干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2115-2123.
- [33] RODRIGUEZ R, REDMAN R. More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis[J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59: 1109-1114.
- [34] 王莉晶, 高晓蓉, 吕 军, 等. 解磷真菌 C2' 的分离鉴定及其在土壤中实际解磷效果的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 771-775.
- [35] SOUCHIE E L, ABBOUD A C S. Phosphate solubilization by microorganisms from the rhizosphere of Pigeonpea genotypes grown in different soil classes[J]. Seminar Ciencias Agrarias, 2007, 28: 11-18.
- [36] REDMAN R S, KIM Y O, WOODWARD C J D A, et al. Increased fitness of rice plants to abiotic stress via habitat adapted symbiosis: a strategy for mitigating impacts of climate change[J]. PLoS One, 2011, 6: e14823.
- [37] UPSON R, READ D J, NEWSHAM K K. Nitrogen form influences the response of *Deschampsia antarctica* to dark septate root endophytes[J]. Mycorrhiza, 2009, 20: 1-11.
- [38] 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营养吸收的影响[J]. 园艺学报, 1999, 26(2): 110-115.
- [39] WARREN C R, DREYER E, ADAMS M A. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores[J]. Trees, 2003, 17: 359-366.
- [40] 史 央, 戴传超, 吴耀春, 等. 植物内生真菌强化还田秸秆降解的研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 144-149.

(责任编辑: 郭严冬)

欢迎订阅 2018 年《植物科学学报》

《植物科学学报》是中国科学院主管、中国科学院武汉植物园主办、科学出版社出版、国内外公开发行的植物学综合性学术期刊, 主要刊载植物学及各分支学科的原始研究论文。

本刊为中国自然科学核心期刊, 已被中国科学引文数据库核心库、《中文核心期刊要目总览》、中国科技论文与引文数据库、中国生物文献数据库、中国核心期刊(遴选)数据库、中国知识资源总库《中国科技期刊精品数据库》、中国期刊全文数据库、《中国药学文摘》、美国《化学文摘》、美国《生物学文摘》、美国《剑桥科学文摘: 自然科学》、俄罗斯《文摘杂志》、日本《科学技术文献速报》、英国《国际农业与生物科学研究中心》文摘、波兰《哥白尼索引》、万方数据——数字化期刊群和中国学术期刊(光盘版)等 20 多种国内外检索期刊、数据库作为核心期刊或统计源期刊收录。本刊相继获全国优秀科技期刊奖、中国科学院优秀期刊奖和湖北省优秀期刊奖。

栏目设置: 特邀综述、系统与进化、生态与生物地理、遗传与育种、生理与发育、资源与植物化学、技术与方法、研究快

报、学术讨论、重要书刊评介和学术动态等。读者对象: 科研院所和高等院校从事植物科学研究的科研人员、教师和研究者, 以及相关学科、交叉学科的科技工作者。

本刊已开通了网站和远程稿件管理系统(<http://www.plantscience.cn>), 所有过刊及现刊均已全部上网, 欢迎广大新老作者和读者在线投稿、查询及下载使用过刊。

本刊为双月刊, 大 16 开本; CN 42-1817/Q, ISSN 2095-0837; 国内邮发代号 38-103, 国外发行代号 BM872; 国内每期定价 50 元, 全年定价 300 元。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与本刊编辑部联系订阅(免收邮挂费)。地址: 湖北省武汉市武昌磨山 中国科学院武汉植物园内《植物科学学报》编辑部(邮编 430074)。电话: 027-87510755, 87510579; QQ: 424353337; E-mail: editor@wbgcas.cn, zwkxbjb@wbgcas.cn; 网址: <http://www.plantscience.cn>。

欢迎订阅! 欢迎赐稿!