

内生真菌对尾巨桉幼苗磷元素吸收的影响

谢安强^{1,2}, 洪伟^{1,2}, 吴承祯^{1,2}

(1. 福建农林大学 森林生态研究所, 福建 福州 350002; 2. 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, 福建 福州 350002)

摘要: 通过菌液浇施的方法接种 10 株桉树内生菌于磷胁迫的尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 幼苗, 接种 30 d 后进行低磷胁迫。在胁迫 15, 30, 45 d 后取样测定酸性磷酸酶活性, 3 个月后收获植株样品进行生物量测定和植株含磷量测定。在正常供磷条件下, 接种真菌菌株 G, 菌株 E 和菌株 J 的根系酸性磷酸酶活性增加了 69.24%, 53.87% 和 53.87%。在磷胁迫处理 1 条件下, 接种菌株 E, 菌株 G 和菌株 J 的根系酸性磷酸酶活性增加了 50.00%, 50.00% 和 27.78%。在磷胁迫处理 2 条件下, 接种菌株 J, 菌株 G 和菌株 E 的根系酸性磷酸酶活性增加了 50.00%, 37.50% 和 25.00%。接种菌株 J, 菌株 E, 菌株 G 的植株全磷增加了 43.92%, 35.14%, 33.78%。接种内生菌株 G, 菌株 J, 菌株 E 的植株总生物量增加了 35.05%, 21.65% 和 20.62%。通过研究发现, 接种真菌菌株 E, 菌株 G, 菌株 J 显著提高了植株磷酸酶的活性, 较大程度地提高了植株磷质量分数。图 1 表 7 参 24

关键词: 植物学; 尾巨桉; 真菌; 磷酸酶; 生物量

中图分类号: Q945.1; S718.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)06-0863-08

Phosphorus absorption with ten fungi inoculants in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*

XIE Anqiang^{1,2}, HONG Wei^{1,2}, WU Chengzhen^{1,2}

(1. Institute of Forest Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Eleven treatments, a control and ten *Eucalyptus*'s endophytic liquid fungi, were inoculated into seedlings of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. After 30 d, an experiment on low phosphorus versus normal stress was conducted. Acid phosphatase activity was measured after 15, 30, and 45 d with biomass, and phosphorus content was measured after 3 months. Results showed that for the normal P treatment, acid phosphatase activity increased in treatment G-69.24%, treatment E-53.87%, and treatment J-53.87%. In P stress treatment one, acid phosphatase activity increased for treatments E-50.00%, G-50.00%, and J-27.78%. In P stress treatment two, acid phosphatase activity increased for treatments J-50.00%, G-37.50%, and E-25.00%. Total phosphatase increased for treatments J-43.92%, E-35.14%, and G-33.78%. Biomass increased in treatments G-35.14%, J-21.65%, and E-20.62%. Thus, acid phosphatase activity increased significantly with fungi E, G, and J with phosphatase content increasing. [Ch, 1 fig. 7 tab. 24 ref.]

Key words: botany; *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*; fungi; acid phosphatase; biomass values

植物主要利用根系从土壤中吸收处于游离态的磷酸根离子而获得磷元素^[1]。大多数土壤并不缺乏磷元素, 土壤中总磷质量分数约为 0.4~2.5 g·kg⁻¹, 但大多数的磷元素为固定态, 难于被植株吸收。土壤中

收稿日期: 2012-12-10; 修回日期: 2013-03-02

基金项目: 教育部博士点学科专项基金(20093515110006); 福建省科学技术重点项目(2008N0004)

作者简介: 谢安强, 讲师, 博士, 从事桉树内生菌研究。E-mail: xieanqiang_001@163.com。通信作者: 洪伟, 教授, 博士生导师, 从事森林生态学研究。E-mail: fjhongwei@126.com

磷元素与铝、铁、钙、镁等成分结合,形成难溶性磷,植物难以吸收利用。同时土壤中还存在相当一部分的磷元素以有机物的形式存在^[2],植物也难以吸收利用。解磷微生物(hosphate-soluble microorganisms, PSMs)是指土壤中的一类微生物,其中包含解磷细菌、解磷真菌和解磷放线菌。这类菌具有把土壤中难溶性磷转化为可以被植物吸收的磷的功能^[3-6]。解磷微生物具有无环境污染,磷吸收效果好,增强植株抗病能力,成本低,可充分利用潜在磷资源等优点。不仅能改善植株对磷元素的吸收和利用,还能在一定程度上促进植株根际微生物的代谢活动,促进对其他营养元素的吸收和利用。中国南方大面积栽植桉树,林地养分缺失是影响桉树生长的重要限制因素。严小龙等^[7]研究表明:目前磷肥的利用率只有0~25%,这意味着75%~90%的磷被转化为难吸收的磷酸盐,土壤已经形成了一个巨大的磷库。因此,磷高效利用成为当今解决土壤磷缺乏的一个重要途径。除了靠施肥提高土壤的磷含量,目前主要采取遗传育种的方法。

1 试验地点

试验地在福建农林大学校内福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室苗圃内进行。试验地位于25°15'~26°39'N,118°08'~120°31'E,属于亚热带海洋性气候,年平均气温为19.6℃,无霜期326 d,年平均降水量1 342.5 mm,年平均相对湿度77%。气候温和,雨水充沛。

2 试验方法

2.1 低磷胁迫试验设计

试验所用材料为福建省林业科学研究院提供的尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 组培苗3229,随机选择生长状态良好,长势均匀一致,含有2对真叶的小苗。

根据相关研究资料,设计了3个磷处理水平:18 mg·L⁻¹(正常供磷处理),6 mg·L⁻¹(磷胁迫处理1),0 mg·L⁻¹(磷胁迫处理2)。3个重复·水平⁻¹,10株真菌和1个空白处理,总共99盆试验苗木。盆栽试验土壤的基质为黄心土(酸性贫瘠缺磷黄壤)。经测定其pH 4.15,土壤有机质为0.315 g·kg⁻¹,全氮为0.151 mg·kg⁻¹,全磷为0.088 g·kg⁻¹,全钾为1.998 g·kg⁻¹,有效磷为0.360 mg·kg⁻¹。盆子规格为34 cm×40 cm。称取16 kg黄心土装盆,2009年3月定植桉树苗,待其生长1个月后进行3个等级的磷胁迫处理^[8-10]。

磷肥采用磷酸二氢钾(KH₂PO₄),定期施氮、钾肥和其他微量元素,直至收获。磷胁迫于2009年4月15号开始进行,集中施肥1次,同时在植株根际接种桉树内生真菌。

2.2 接种试验

在低磷胁迫处理的同时将10株内生真菌菌株(表1)接入等体积的液体培养基,经过24 h的培养,利用血球计数板计算菌液浓度,将菌液共同用水溶液稀释成5.0×10⁹个·L⁻¹,连续3 d在树冠周围均匀施入相同体积相同浓度的100 mL菌液。将浇施水溶液的植株作为空白对照。

表1 10株菌株

Table 1 Ten fungi inoculants

| 菌株编号 | 菌种 | 菌种编号 | 菌种 |
|------|----------------------------|------|------------------------------|
| 菌株A | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. | 菌株F | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. |
| 菌株B | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. | 菌株G | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. |
| 菌株C | 曲霉属 <i>Aspergillus</i> sp. | 菌株H | 叶点霉属 <i>Phyllosticta</i> sp. |
| 菌株D | 曲霉属 <i>Aspergillus</i> sp. | 菌株I | 半壳霉属 <i>Leptostroma</i> sp. |
| 菌株E | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. | 菌株J | 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. |

说明:10株内生菌由桉树植株提取,并且菌株G已申报国家发明专利,保存在中国普通微生物菌种保藏管理中心,编号4055。

2.3 测定方法

在胁迫15,30,45 d后取样测定酸性磷酸酶(APA)活性,3个月后收获植株和土壤样品进行生物量测定、植株含磷量和土壤化学性质。

2.3.1 根系酸性磷酸酶(APA)活性测定 根系酸性磷酸酶(APA)活性测定参考《现代植物生理学实验指南》^[11]中, 酶的分离提纯与活力测定结合陈润政^[12]的方法并加以修改。

2.3.2 植株生物量测定 将植株的不同部位分别标号放入已知质量的铝盒(质量为 W_1)中, 然后放入烘箱中, 105 ℃烘干0.5 h(钝化酶), 然后在70 ℃下烘干, 经过10 h后, 取出铝盒放入干燥箱中冷却至室温, 称量后再放入烘箱中, 重复测定直至恒量为止。称得铝盒和样品的总质量为 W_2 。则材料干质量= W_2-W_1 。

2.3.3 植株磷质量分数测定 参考森林土壤分析方法^[13]。

3 结果分析

3.1 内生真菌对桉树低磷胁迫下根系酸性磷酸酶活性的影响

植物酸性磷酸酶主要分布于叶的下表面和植物的根, 或由根系分泌在土壤中^[14]。磷酸酶作为一类水解磷酸单酯键的水解酶, 与细胞的许多生理生化过程相关, 包括细胞防御、细胞质 PO_4^{3-} 库的维持等。它是一种在低磷状况下表达的诱导酶, 其活性受植株供磷状况的影响。它是植株在低磷条件下表达最早和最剧烈的反应之一^[15]。

对不同磷胁迫处理根系酸性磷酸酶活性进行方差分析(表2), 表明在不同磷胁迫处理下, 不同菌种间及不同处理天数之间的差异均达到极显著水平。这表明在磷胁迫的条件下, 不同菌种对植株生理产生了一定的影响, 并随着胁迫的加深和处理天数的增加而发生变化。对不同菌种各种磷处理的均值进行方差分析, 不同菌种处理间差异达到极显著水平, 不同磷处理间的差异也达到极显著水平。综上所述, 不同菌种处理在不同磷处理条件下根系酸性磷酸酶活性存在显著差异, 并且随着处理天数的变化而发生变化, 存在显著差异。

表2 不同内生真菌处理和不同磷胁迫处理根系酸性磷酸酶活性的方差分析表

Table 2 Variance analysis of root HosHatase content in different P treatments and ten fungi inoculants treatments

| 处理 | 变异来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F值 | α值 |
|--------|---------|---------|-----|---------|----------|------|
| 正常供磷 | 不同菌种处理间 | 0.382 4 | 10 | 0.038 2 | 12.135** | 0.01 |
| | 不同处理天数间 | 0.023 6 | 2 | 0.011 8 | 3.750* | 0.05 |
| | 误差 | 0.063 0 | 20 | 0.003 2 | | |
| | 总变异 | 0.469 1 | 32 | | | |
| 磷胁迫处理1 | 不同菌种处理间 | 0.389 1 | 10 | 0.038 9 | 8.392** | 0.01 |
| | 不同处理天数间 | 0.200 6 | 2 | 0.100 3 | 21.634** | 0.01 |
| | 误差 | 0.092 7 | 20 | 0.004 6 | | |
| | 总变异 | 0.682 4 | 32 | | | |
| 磷胁迫处理2 | 不同菌种处理间 | 0.840 6 | 10 | 0.084 1 | 4.824** | 0.01 |
| | 不同处理天数间 | 0.331 5 | 2 | 0.165 8 | 9.513** | 0.01 |
| | 误差 | 0.348 5 | 20 | 0.017 4 | | |
| | 总变异 | 1.520 6 | 32 | | | |
| 不同磷处理间 | 不同菌种处理间 | 0.425 5 | 10 | 0.042 5 | 7.312** | 0.01 |
| | 不同磷处理间 | 0.383 6 | 2 | 0.191 8 | 32.969** | 0.01 |
| | 误差 | 0.116 4 | 20 | 0.005 8 | | |
| | 总变异 | 0.925 5 | 32 | | | |

说明: *代表与对照相比差异显著, **代表与对照相比差异极显著。

对不同磷胁迫处理根系酸性磷酸酶活性进行最小显著差法(LSD)多重比较分析(表3)。在正常供磷条件下, 与对照相比, 菌株C, 菌株D, 菌株E, 菌株F, 菌株G, 菌株H, 菌株I, 菌株J达到极显著水平。就胁迫时间而言, 与胁迫15 d处理相比, 胁迫30 d处理达到显著水平, 胁迫45 d处理未达到显著水平。在磷胁迫处理1条件下, 与对照相比, 菌株E, 菌株F, 菌株G, 菌株H, 菌株I, 菌株J处理

达到极显著水平。纵向对比,与胁迫15 d处理相比,胁迫30 d处理和胁迫45 d处理达到极显著水平。在磷胁迫处理2条件下,与对照相比,菌株G达到显著水平,菌株J达到极显著水平。纵向对比,与胁迫15 d处理相比,胁迫30 d处理达到显著水平,胁迫45 d处理达到极显著水平。在不同磷处理均值比较条件下,与对照相比,菌株F和菌株I达到显著水平,菌株E,菌株G,菌株J达到极显著水平。就胁迫时间而言,与正常供磷处理相比,低磷处理1和低磷处理2达到极显著水平。综上所述,在正常供磷条件下,植株体内根系酸性磷酸酶活性存在显著的变化。随着胁迫的加深,植株反应进一步加强,植株体内根系酸性磷酸酶活性变化明显。

表3 不同内生真菌处理和不同磷胁迫根系酸性磷酸酶活性的最小显著差法(LSD)多重比较分析

Table 3 Multiple comparison analysis of root HosHastase in different P treatments and ten fungi inoculants treatments

| 处理 | 酸性磷酸酶活性 | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|----|---|-----|-----|---|----|-----|---|-----|------|
| | 正常供磷 | | | 磷胁迫处理1 | | | 磷胁迫处理2 | | | 不同磷处理间 | | |
| | 均值/ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) | 5% | 1% | 均值/ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) | 5% | 1% | 均值/ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) | 5% | 1% | 均值/ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) | 5% | 1% |
| 对照 | 0.433 | cd | DE | 0.600 | e | D | 0.800 | bc | BCD | 0.600 | ef | CD |
| 菌株A | 0.500 | bc | CD | 0.633 | de | CD | 0.833 | bc | BCD | 0.633 | def | CD |
| 菌株B | 0.367 | d | E | 0.600 | e | D | 0.733 | c | CD | 0.567 | f | D |
| 菌株C | 0.567 | b | BC | 0.600 | e | D | 0.667 | c | D | 0.633 | def | CD |
| 菌株D | 0.567 | b | BC | 0.667 | cde | BCD | 0.767 | c | CD | 0.700 | cde | BCD |
| 菌株E | 0.667 | a | AB | 0.900 | a | A | 1.000 | ab | ABC | 0.867 | ab | AB |
| 菌株F | 0.667 | a | AB | 0.733 | bcd | BCD | 0.800 | bc | BCD | 0.733 | cd | ABCD |
| 菌株G | 0.733 | a | A | 0.900 | a | A | 1.100 | a | AB | 0.900 | a | A |
| 菌株H | 0.567 | b | BC | 0.667 | cde | BCD | 0.767 | c | CD | 0.700 | cde | BCD |
| 菌株I | 0.667 | a | AB | 0.800 | ab | AB | 0.767 | c | CD | 0.767 | bc | ABC |
| 菌株J | 0.667 | a | AB | 0.767 | bc | ABC | 1.200 | a | A | 0.900 | a | A |
| 胁迫15 d | 0.546 | b | A | 0.618 | c | C | 0.736 | c | B | 0.600 | c | C |
| 胁迫30 d | 0.609 | a | A | 0.718 | b | B | 0.855 | b | AB | 0.718 | b | B |
| 胁迫45 d | 0.591 | ab | A | 0.809 | a | A | 0.982 | a | A | 0.864 | a | A |

说明:同一列中不同小写字母代表不同处理间有显著差异($P<0.05$),同一列中不同大写字母代表不同处理间有极显著差异($P<0.01$)。

在正常供磷条件下,与对照处理相比较,菌株G,菌株E,菌株F,菌株I,菌株J,菌株C,菌株D,菌株H和菌株A的根系酸性磷酸酶活性增加了69.24%,53.87%,53.87%,53.87%,53.87%,30.79%,30.79%,30.79%和15.39%,菌株B的根系磷酸酶活性减少了15.37%。在磷胁迫处理1条件下,与对照处理相比较,菌株E,菌株G,菌株I,菌株J,菌株F,菌株D,菌株H和菌株A的根系磷酸酶活性增加了50.00%,50.00%,33.33%,27.78%,22.22%,11.12%,11.12%和5.55%,菌株B和菌株C的根系磷酸酶活性与对照处理相同。在磷胁迫处理2条件下,与对照处理相比较,菌株J,菌株G,菌株E和菌株A的根系磷酸酶活性增加了50.00%,37.50%,25.00%和4.16%,菌株F和对照处理相同,菌株C,菌株B,菌株I,菌株H和菌株D的根系磷酸酶活性减少了16.66%,8.34%,4.16%,4.16%和4.16%。这表明不同菌种处理的植株根系磷酸酶活性具有比较明显的差异,菌株对植株根系磷酸酶的分泌产生了显著的影响。在正常条件下大大促进了根系磷酸酶的分泌,随着胁迫的加深,根系磷酸酶的分泌逐渐减少。这可能是由于随着胁迫的加深,植株生长受到了一定程度的抑制,从而抑制了植株体内内生菌的活性,根系磷酸酶的分泌量也逐渐减少。

3.2 内生真菌对桉树低磷胁迫下植株全磷质量分数的影响

在缺磷条件下植物对磷的利用率明显提高,主要是由于缺磷诱导了植物根系酸性磷酸酶活性的显著提高,从而促进了植株磷的吸收^[16];也可能是植物细胞内的酸性磷酸酶参与了细胞磷的转运^[17];也可能是在缺磷条件下,磷酸酶使植株体内仅有的磷重复利用,从而提高磷利用效率^[18]。

随着低磷胁迫的加深,植株全磷质量分数逐渐减少(图1)。对不同磷胁迫处理植株全磷质量分数进

行方差分析表明(表4), 不同菌种和不同磷处理间均达到极显著水平。与对照相比, 菌株E, 菌株G, 菌株J达到极显著水平。与正常供磷处理对比, 低磷处理1达到显著水平, 低磷处理2达到极显著水平。对不同磷胁迫处理植株全磷质量分数进行LSD多重比较分析表明(表5), 与对照处理相比较, 菌株J, 菌株E, 菌株G, 菌株D, 菌株H, 菌株F, 菌株B和菌株I的植株磷质量分数增加了43.92%, 35.14%, 33.78%, 16.22%, 11.49%, 10.14%, 5.41%和4.73%, 菌株C和菌株A的植株磷质量分数减少了6.76%和19.59%。表明不同菌种处理的植株的全磷质量分数出现了显著的差异性。这可能是由于内生菌种的接种在一定程度上促进了植株磷吸收的能力。

表4 不同内生真菌处理和不同磷胁迫处理植株全磷质量分数的方差分析表

Table 4 Variance analysis of P content in different P treatments and ten fungi inculants treatments

| 变异来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F值 | α 值 |
|---------|-----------|-----|----------|-----------|------------|
| 不同菌种处理间 | 26.576 4 | 10 | 2.657 6 | 7.231** | 0.01 |
| 不同磷处理间 | 134.969 1 | 2 | 67.484 5 | 183.609** | 0.01 |
| 误差 | 7.350 9 | 20 | 0.367 5 | | |
| 总变异 | 168.896 4 | 32 | | | |

说明: **代表与对照相比差异极显著。

表5 不同内生真菌处理和不同磷胁迫处理植株全磷质量分数的LSD多重比较分析

Table 5 Multiple comparison analysis of P content in different P treatments and ten fungi inculants treatments

| 处理 | 均值/(mg·g ⁻¹) | 5%显著水平 | 1%极显著水平 | 处理 | 均值/(mg·g ⁻¹) | 5%显著水平 | 1%极显著水平 |
|-----|--------------------------|--------|---------|-------|--------------------------|--------|---------|
| 对照 | 4.93 | cde | DE | 菌株G | 6.60 | ab | ABC |
| 菌株A | 3.97 | e | E | 菌株H | 5.50 | cd | BCD |
| 菌株B | 5.20 | cd | CDE | 菌株I | 5.17 | cd | DE |
| 菌株C | 4.60 | de | DE | 菌株J | 7.10 | a | A |
| 菌株D | 5.73 | bc | ABCD | 正常供磷 | 7.27 | a | A |
| 菌株E | 6.67 | ab | AB | 低磷处理1 | 6.64 | b | A |
| 菌株F | 5.43 | cd | BCD | 低磷处理2 | 2.70 | c | B |

说明: 同一列中不同小写字母代表不同处理间有显著差异($P<0.05$), 同一列中不同大写字母代表不同处理间有极显著差异($P<0.01$)。

3.3 内生真菌对桉树低磷胁迫下植株生物量的影响

对不同磷胁迫处理植株生物量进行方差分析表明(表6), 植株的总生物量在不同菌种间的差异达到极显著水平, 不同磷处理间差异未达到显著水平。植株根生物量在不同菌种和不同磷处理间均未达到显著水平。植株茎生物量在不同菌种处理间达到显著水平, 不同磷处理间差异未达到显著水平。植株叶生物量在不同菌种处理间达到极显著水平, 不同磷处理间差异未达到显著水平。

对不同接种处理植株生物量进行最小显著差法(LSD)多重比较分析表明(表7), 就植株全株生物量而言, 与对照相比, 菌株E和菌株J达到显著水平, 菌株G达到极显著水平。就植株叶生物量而言, 与对照相比, 菌株C达到显著水平, 菌株E, 菌株G和菌株J达到极显著水平。与正常供磷相比, 低磷处理1达到显著水平, 低磷处理2未达到显著水平。

与对照处理相比较, 接种内生真菌菌株G, 菌株J和菌株E的植株总生物量增加了35.05%, 21.65%和20.62%, 接种内生真菌菌株C, 菌株I, 菌株D, 菌株F, 菌株H, 菌株A和菌株B的植株总生物量减少了17.52%, 9.28%, 8.25%, 7.22%, 6.19%, 5.15%和3.09%。植株的叶生物量分析表明, 与对照相比较, 接种内生真菌菌株G, 菌株J和菌株E的叶生物量增加了48.84%, 32.56%和27.91%, 接

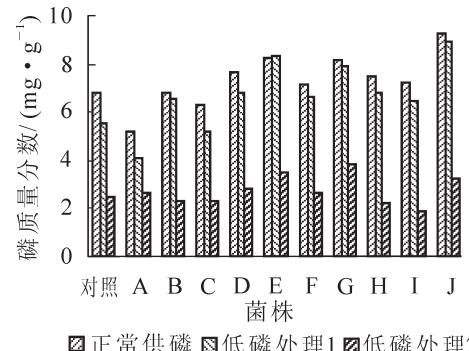


图1 不同内生真菌种处理的植株全磷质量分数变化
Figure 1 Diagrams of P content in ten fungi inculants treatments

表6 不同内生真菌处理和不同磷胁迫处理植株生物量的方差分析表

Table 6 Variance analysis of biomass in different P treatments and ten fungi inculants treatments

| | 变异来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F值 | α值 |
|----|---------|----------|-----|---------|----------|------|
| 全株 | 不同菌种处理间 | 8.378 8 | 10 | 0.837 9 | 7.005** | 0.01 |
| | 不同磷处理间 | 0.407 9 | 2 | 0.203 9 | 1.705 | |
| | 误差 | 2.392 1 | 20 | 0.119 6 | | |
| | 总变异 | 11.178 8 | 32 | | | |
| 根 | 不同菌种处理间 | 0.133 9 | 10 | 0.013 4 | 0.961 | |
| | 不同磷处理间 | 0.007 9 | 2 | 0.003 9 | 0.283 | |
| | 误差 | 0.278 8 | 20 | 0.013 9 | | |
| | 总变异 | 0.420 6 | 32 | | | |
| 茎 | 不同菌种处理间 | 1.075 8 | 10 | 0.107 6 | 3.063* | 0.05 |
| | 不同磷处理间 | 0.044 2 | 2 | 0.022 1 | 0.630 | |
| | 误差 | 0.702 4 | 20 | 0.035 1 | | |
| | 总变异 | 1.822 4 | 32 | | | |
| 叶 | 不同菌种处理间 | 3.075 8 | 10 | 0.307 6 | 10.628** | 0.01 |
| | 不同磷处理间 | 0.147 9 | 2 | 0.073 9 | 2.555 | |
| | 误差 | 0.578 8 | 20 | 0.028 9 | | |
| | 总变异 | 3.802 4 | 32 | | | |

说明: * 代表与对照相比差异显著, ** 代表与对照相比差异极显著。

种内生真菌菌株 C, 菌株 I, 菌株 A, 菌株 H, 菌株 F, 菌株 D 和菌株 B 的叶生物量减少了 23.25%, 9.30%, 9.30%, 6.98%, 6.98%, 6.98% 和 6.98%。这表明植株在低磷条件下生长受到了一定程度的抑制, 但由于内生真菌的接种, 在一定程度上提高了体内各项抵御低磷伤害的指标, 促进了植株的生长, 个别菌种处理的植株的生物量与对照相比产生了较大的差异性, 促进了植株磷的吸收, 从而达到促进植株生长的目的。

表7 不同内生真菌处理植株生物量的 LSD 多重比较分析

Table 7 Multiple comparison analysis of biomass in different P treatments and ten fungi inculants treatments

| 接种菌株 | 总生物量 | | | 叶生物量 | | |
|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| | 均值/g | 5%显著 | 1%极显著 | 均值/g | 5%显著 | 1%极显著 |
| 对照 | 3.233 | b | BC | 1.433 | c | B |
| 菌株 A | 3.067 | b | C | 1.300 | cd | B |
| 菌株 B | 3.133 | b | BC | 1.333 | cd | B |
| 菌株 C | 2.667 | b | C | 1.100 | d | B |
| 菌株 D | 2.967 | b | C | 1.333 | cd | B |
| 菌株 E | 3.900 | a | AB | 1.833 | b | A |
| 菌株 F | 3.000 | b | C | 1.333 | cd | B |
| 菌株 G | 4.367 | a | A | 2.133 | a | A |
| 菌株 H | 3.033 | b | C | 1.333 | cd | B |
| 菌株 I | 2.933 | b | C | 1.300 | cd | B |
| 菌株 J | 3.933 | a | AB | 1.900 | ab | A |

4 结论和讨论

本研究发现: 菌株 E, 菌株 G 和菌株 J 相对比较大幅度地提高了植株磷酸酶和土壤磷酸酶的活性, 降低了土壤根际 pH 值, 较大程度地提高了植株磷利用率。今后需进一步研究菌株植株间的影响的内在机制, 以便考虑在生产实践中利用内生真菌或内生真菌与解磷混合菌进一步提高植株在低磷土壤中对磷

的利用率。

前人通过大量研究发现: 植株在胁迫条件下分泌的有机酸、质子和酸性磷酸酶会影响土壤酶的有效性, 影响植株对磷的吸收^[19-20]。在缺磷条件下植株能通过调节根际生理生化, 增加磷吸收的有效性。pH值的降低, 一方面会促进土壤难溶性磷的溶解, 一方面还可活化磷的有效性。

王莉晶等^[21]研究真菌在土壤中的解磷效果发现: 真菌的解磷效果比较强。Asea等^[22]发现青霉菌具有溶磷能力。Kucey等^[23]发现青霉菌的解磷能力比细菌高10倍多。Souchie等^[24]对6种土壤的溶磷菌进行研究发现, 具有溶磷能力的菌种主要是曲霉属和青霉属。本研究发现, 菌株E, 菌株G和菌株J的解磷能力比较强, 均为青霉属菌株, 与上述研究结果相似。

在低磷胁迫下, 植株本身的低磷反应基因调控系统将发生作用。目前, 人们已经分离了许多低磷诱导的基因。在缺磷条件下, 植株体内的磷转运子、核糖核酸酶, 磷酸酶及磷酸烯醇式丙酮酸(RFP)羧化酶等许多蛋白质明显增加, 多种基因增强表达或开始表达。本试验在内生真菌的影响下, 植株本身会产生低磷反应基因调控系统, 还有待于进一步通过试验证实。

参考文献:

- [1] SMITH W F, MUDGE R S, RAE L A, *et al*. Phosphate transport in plants[J]. *Plant Soil*, 2003, **248**: 71 – 83.
- [2] RAGHOTHAMA K G. Phosphate acquisition [J]. *Ann Rev Plant Biol*, 1999, **50**: 665 – 693.
- [3] RIVAS R, PEIX A, MATEOS P F, *et al*. Biodiversity of populations of phosphate solubilizing rhizobiathnodulates chickpeain different Spanish soils [J]. *Plant and Soil*, 2006, **287**(1/2): 23 – 33.
- [4] SON H J, PARK G T, CHATS X, *et al*. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by a novel salt and Ph-tolerant pantoeaaggglomeransR-42 isolated from soybean rhizosphere [J]. *Loresour Technol*, 2006, **97**(2): 204 – 210.
- [5] SPERBER J I. Solution of minera phosphates by soil bacteria [J]. *Nature*, 1957, **180**(4593): 994 – 995.
- [6] RAO A V, VENKATESWARLU B, ICAUL P. Isolation of a phosphate dissolving soil actinomycete [J]. *Curr Sci*, 1982, **51**(23): 1117 – 1118.
- [7] 严小龙, 廖红, 戈振杨, 等. 植物根结构特性与磷吸收效率[J]. 植物学通报, 2000, **17**(6): 511 – 519.
YAN Xiaolong, LIAO Hong, GE Zhenyang, *et al*. Root architectural characteristics and phosphorus acquisition efficiency in plants [J]. *Chin Bull Bot*, 2000, **17**(6): 511 – 519.
- [8] 杨曾奖, 周文龙. 桉树苗期缺素症状的研究[J]. 林业科学, 1992, **5**(6): 646 – 650.
YANG Zengjiang, ZHOU Wenlong. A study on nutrient deficiency symptom of *Eucalyptus* seedlings [J]. *For Res*, 1992, **5**(6): 646 – 650.
- [9] 徐大平. 不同磷水平对不同种源尾叶桉的生长和养分吸收的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, **6**(2): 76 – 81.
XU Daping. Genotypic variations in growth and P and N uptake of *Eucalyptus utophylla*: effects of soil P supply [J]. *Trop Subtrop Soil Sci*, 1997, **6**(2): 76 – 81.
- [10] 黄勇. 不同桉树品种适应磷胁迫的生理学机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
HUANG Yong. *Physiological Mechanism of Different Eucalyptus Varieties to Low Phosphorus Stress* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [11] 中国科学院上海植物生理研究所. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [12] 陈润政. 种子中酸性磷酸酶活性的测定[J]. 种子, 1986(4): 79, 53.
CHEN Runzheng. The determination of acid phosphatase activity in seed [J]. *Seed*, 1986(4): 79, 53.
- [13] 国家林业局. 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [14] 宋克敏, 焦新之, 李琳, 等. 磷酸饥饿时番茄幼苗酸性磷酸酶活性的变化与Pi吸收的关系[J]. 云南植物研究, 1999, **21**(1): 101 – 108.
SONG Kemin, JIAO Xinzhi, LI Lin, *et al*. Relationship between the changes of acid phosphatase activities and Pi uptake of tomato seedlings during phosphate starvation [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1999, **21**(1): 101 – 108.
- [15] DRACUP M N H, BRRETT-LENNARE E G, GREENWAY H, *et al*. Effect of phosphorus deficiency on phosphatase activity of cell walls from roots of subterranean clover [J]. *J Exp Bot*, 1984, **35**: 466 – 480.
- [16] HELA H M. Varietal differences in roots phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates[G]//

BASSAM N E. *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1990: 103 – 105.

[17] DUFF S M, SARATH G, PLAXTON W C. The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism [J]. *Physiol Plan*, 1994, **90**: 791 – 800.

[18] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 154 – 156.

[19] 谢钰容, 周志春, 金国庆, 等. 马尾松不同种源 P 素吸收动力学特征[J]. 林业科学, 2003, **16**(5): 548 – 553.

XIE Yurong, ZHOU Zhichun, JIN Guoqing, et al. Kinetics of phosphorus uptake by different provenances of masson pine under low phosphorus stress[J]. *For Res*, 2003, **16**(5): 548 – 553.

[20] 张焕朝, 王改萍, 徐锡增. 杨树无性系根系吸收 $H_2PO_4^-$ 动力学特征与磷营养效率[J]. 林业科学, 2003, **39**(6): 40 – 46.

ZHANG Huanchao, WANG Gaiping, XU Xizeng. Phosphate uptake characteristics of kinetics and phosphorus efficiency in clones of poplar [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39**(6): 40 – 46.

[21] 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.

WANG Lijing, GAO Xiaorong, LÜ Jun, et al. Phosphate-solubilizing mechanism of C2' and its actual phosphate-solubilizing effect in soil[J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40**(4): 771 – 775.

[22] ASEA P E A, KUCEY R M N, STEW J W R. Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, **20**(4): 459 – 464.

[23] KUCEY R M N, JANZEN H H, LEGGETT M E. *Inorganic Phosphate Solubilizing Microorganisms Microbially Mediated Increases in Plant Available Phosphorus* [M]. London: Academic Press Inc, 1989: 202 – 220.

[24] SOUCHIE E L, ABOUD A C S. Phosphate solubilization by micro-organisms from the rhizosphere of *Pigeonpea genotypes* grown in different soil classes [J]. *Semin Cienc Agrar*, 2007, **28**(1): 11 – 18.

《浙江农林大学学报》2014年征订启事

《浙江农林大学学报》是浙江农林大学主办的学术期刊, 连续6次入选全国中文核心期刊, RCCSE中国核心学术期刊, 荣获第二届国家期刊奖百种重点期刊奖, 首届浙江省优秀科技期刊二等奖, 第二届浙江省优秀科技期刊一等奖, 浙江省精品科技期刊, 首届和第二届全国优秀科技期刊三等奖, 全国高校优秀科技期刊一等奖。

《浙江农林大学学报》主要报道农林基础学科、森林培育学、森林经理学、经济林学、林业工程、植物保护学、林木遗传育种、植物学、生态学、动物学、生物技术、环境保护学、园林学和园艺学等学科的学术论文、问题讨论和研究简报等。供农林科技工作者、园林绿化和规划设计人员、环保工作者、大专院校师生、基层干部、农林科技专业户及科技信息人员参阅。双月刊, 大16开本, 158页·期⁻¹。国内外公开发行。ISSN 2095-0756, CN 33-1370/S。所刊文章被国内外30多种文摘刊物和数据库收录。附英文目次和英文摘要。

定价: 20.00元·册⁻¹, 全年120.00元·份⁻¹。国内订户请向全国非邮发报刊联合发行部订阅, 地址: 300381 天津市大寺泉集北里别墅17号。电话: 022-23973378。E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn。也可直接向浙江农林大学学报编辑部汇款订购。邮汇: 311300 浙江省临安市环城北路88号浙江农林大学学报编辑部。电话: 0571-63732749。E-mail: zlxz@zafu.edu.cn。银行汇款: 建行临安市支行营业部。账号: 33001617335050018761。户名: 浙江农林大学。

国外读者请向中国出版对外贸易总公司办理订阅手续。地址: 100011 北京 782 信箱。