

不同解磷菌处理下巨尾桉幼苗不同部位干质量及氮、磷、钾含量的变化

林凤莲¹, 张亮¹, 林勇明¹, 吴承祯^{1,2,①}, 谢安强¹, 陈灿¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院, 福建 南平 354300)

摘要: 采用高效解磷菌 P19 和 P7(解无机磷)以及 YP17(解有机磷), 研究不同浓度单一及混合解磷菌处理对巨尾桉(*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake) 幼苗干质量、氮和钾含量的影响以及叶片磷含量的动态变化。结果表明: 用 5×10^6 、 2×10^6 和 1×10^6 CFU · mL⁻¹ 解磷菌单一及混合处理后, 巨尾桉幼苗的地上部分和地下部分干质量、总干质量以及氮含量总体上高于空白对照(CK_B)和供磷对照(CK_P, 添加 18 mg · kg⁻¹ KH₂PO₄), 且总体上差异显著($P < 0.05$), 而仅少数处理组的幼苗钾含量显著高于 CK_B 和 CK_P。随处理时间延长, 不同解磷菌处理组的叶片磷含量呈现不同的变化趋势, 但不同月份间叶片磷含量差异极显著($P < 0.01$); 各处理组的叶片磷含量平均值均高于 CK_B, 且混菌处理组总体上高于单菌处理组。方差分析结果表明: 不同解磷菌和不同菌液浓度对幼苗总干质量的影响效应均有显著差异; 二者对幼苗氮含量有极显著或显著影响, 但二者的交互作用对幼苗氮含量无显著影响($P > 0.05$); 不同解磷菌、不同菌液浓度及二者间的交互作用对幼苗钾含量均有极显著影响; 不同解磷菌、不同菌液浓度、不同时间及三者间的交互作用对叶片磷含量均有极显著影响。多重比较结果表明: P19-YP17、P7-YP17 和 P7-P19 处理对幼苗氮含量和叶片磷含量平均值的提升作用明显, YP17、P19-YP17 和 P7-P19 处理对幼苗总干质量平均值的提升作用明显, 不同解磷菌对幼苗钾含量平均值无显著提升作用; 不同菌液浓度下幼苗的总干质量、氮和钾含量以及叶片磷含量的平均值总体上显著高于 CK_B, 其中, 中浓度(2×10^6 CFU · mL⁻¹) 和低浓度(1×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液处理对叶片磷含量以及幼苗氮和钾含量平均值的提升作用明显。综合分析结果显示: P19-YP17、P7-YP17 和 P19-YP17 解磷菌混合处理对巨尾桉幼苗生长有明显的促进作用, 可作为混合解磷菌剂加以进一步开发研究。

关键词: 土壤解磷菌; 巨尾桉; 植株生长; 叶片磷含量; 植株氮含量; 植株钾含量

中图分类号: Q939.96; S154.3; S792.39 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)02-0023-10
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.02.03

Changes in dry weight and contents of nitrogen, phosphorus and potassium in different parts of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* in different treatments of phosphate-solubilizing bacterium

LIN Fenglian¹, ZHANG Liang¹, LIN Yongming¹, WU Chengzhen^{1,2,①}, XIE Anqiang¹, CHEN Can¹
(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(2): 23-32, 116

Abstract: Taking high-efficiency phosphate-solubilizing bacterium P19 and P7 (solubilizing inorganic phosphorus) and YP17 (solubilizing organic phosphorus), effects of single and mixed treatments of phosphate-solubilizing bacterium on dry weight and contents of nitrogen (N) and potassium (K) in seedling and dynamic change in phosphorus (P) content in leaf of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake were researched. The results show that after treated by single and mixed phosphate-solubilizing bacteria with 5×10^6 , 2×10^6 and 1×10^6 CFU · mL⁻¹, dry weights of above- and under-ground parts, total dry weight, N content in seedling of *E. grandis* × *E. urophylla* are totally

收稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123515110011); 福建省科技厅重大专项项目(2012NZ01)

作者简介: 林凤莲(1991—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事植物地理学方面的研究。

① 通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

higher than those in the blank control (CK_B) and the control supplied with P (CK_P , adding $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$), and differences are totally significant ($P < 0.05$), while K content in seedling in only a few treatment groups is significantly higher than that in CK_B and CK_P . With prolonging of treatment time, change trends of P content in leaf in different treatment groups of phosphate-solubilizing bacterium are different, while there are obviously significant differences ($P < 0.01$) in P content in leaf among different months. The average value of P content in leaf in all treatment groups is higher than that in CK_B , and that in the mixed bacterium treatment group is totally higher than that in the single bacterium treatment group. The result of variance analysis shows that effects of different phosphate-solubilizing bacteria and bacterium concentrations on total dry weight of seedling have significant differences, their effects on N content in seedling are obviously significant or significant, but their interaction on N content in seedling is not significant ($P > 0.05$). Effects of different phosphate-solubilizing bacteria and bacterium concentrations, and their interaction on K content in seedling are obviously significant. Effects of different phosphate-solubilizing bacteria, bacterium concentrations and times, and their interaction on P content in leaf are obviously significant. The result of multiple comparison shows that P19-YP17, P7-YP17 and P7-P19 treatments have obvious promotion effects on average values of N content in seedling and P content in leaf and YP17, P19-YP17 and P7-P19 treatments do on average total dry weight of seedling, and different phosphate-solubilizing bacteria have no significant promotion effect on average K content in seedling. Under different bacterium concentrations, average values of total dry weight, N and K contents in seedling, and P content in leaf are generally significantly higher than those in CK_B , in which, bacterium treatments with middle concentration ($2 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) and low concentration ($1 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) have obvious promotion effect on average values of P content in leaf and N and K contents in seedling. The comprehensive analysis result shows that mixed treatments of phosphate-solubilizing bacterium of P19-YP17, P7-YP17 and P19-YP17 have obvious promotion effect on seedling growth of *E. grandis* × *E. urophylla*, and can be developed as mixed phosphate-solubilizing bacteria and need to be researched deeply.

Key words: phosphate-solubilizing bacterium in soil; *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*; seedling growth; phosphorus content in leaf; nitrogen content in seedling; potassium content in seedling

氮、磷和钾是植物必需的大量营养元素,在植物生长发育和新陈代谢过程中起重要作用^[1]。中国缺钾土壤占总耕地面积的60%^[2],且约有74%的土壤缺磷^[3],而其中磷素最缺乏的土壤是红壤旱地,其全氮和全磷含量通常仅为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,速效钾含量大多低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[4]。土壤所含磷素95%以上与 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 等结合而丧失其有效性^[5],人工施用磷肥的当季利用率一般只有5%~10%,加上作物对磷的后期吸收效应,总利用率不超过25%,大部分磷肥因吸附和沉淀作用以难溶性磷的形式积累于土壤中^[6]。因而,长期以来,有关磷肥的研究主要集中在无机磷解吸与溶解等化学转化过程。

解磷菌(phosphate-solubilizing bacterium)可将土壤中难溶性磷转化为植物可吸收利用的可溶性磷^[7],从而改善土壤的养分循环,提高植物体对土壤养分的吸收效率,进而促进植物生长,提高植株干质量^[8-10]。目前,解磷菌对土壤难溶性磷的溶解作用逐渐引起国内外学者的重视^[11],但有关解磷菌对植物促生效应的研究则多以农作物为研究对象,如油菜(*Brassica*

campestris Linn.)、玉米(*Zea mays* Linn.)、小麦(*Triticum aestivum* Linn.)、燕麦(*Avena sativa* Linn.)和甘蔗(*Saccharum officinarum* Linn.)等^[12-17],且研究指标主要集中在地径、株高和生物量等方面,而有关解磷菌对高大乔木养分含量影响的研究尚不多见。

巨尾桉(*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake)为桃金娘科(Myrtaceae)落叶乔木,是大桉(*E. grandis* Hill ex Maiden,别名巨桉)和尾叶桉(*E. urophylla* S. T. Blake)杂交的速生树种,能在酸性黄红壤中生长,具有速生丰产、生物量大和轮伐期短(6~7 a)等特点,但其对土壤养分氮、磷、钾的需求量较大。巨尾桉连栽导致地力衰退及其植株品质和产量下降等问题近年来备受学者关注^[18],大多数学者通过施肥、轮作和改变营林格局等措施解决巨尾桉连栽产生的问题,而利用微生物改善土壤养分利用效率、提高巨尾桉养分吸收效率和干质量累积的相关研究较为少见。不合理的营林措施,如滥施肥料不仅造成资源浪费,还可导致土壤酸化、土壤质量下降和环境污染等问题,而解磷微生物不仅具有解磷作

用,还能促进植株对磷元素的吸收和利用,并能分泌生长调节物质,促进根系生长和根际微生物的代谢活动,进而提高植株对其他营养元素的吸收效率,因而,使用解磷微生物具有成本低、无环境污染、有效改良土壤质量和养分循环等优点^[19-20],而研究解磷微生物对植株干质量累积和养分吸收的作用机制,对优化森林施肥措施、促进土壤养分循环以及提高植株生物量和养分吸收效率等具有重要意义。

为了提高巨尾桉林地自身的供磷能力,作者以前期筛选鉴定的3株高效解磷菌为实验菌种,研究不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗不同部位的干质量、氮和钾含量的影响效应以及叶片磷含量的动态变化,旨在改善土壤养分循环,促进巨尾桉幼苗养分吸收和干物质累积,并节约磷肥投入,为巨尾桉人工林可持续经营提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验在福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室的田间试验棚内进行。地理坐标为东经119°14′、北纬26°05′;年均日照时数1 700~1 980 h,年平均气温16℃~20℃,无霜期326 d,年降水量1 342.5 mm,平均空气相对湿度77%;气候温和、雨量充沛,属亚热带海洋性气候。

1.2 材料

供试巨尾桉组培苗由福建省林业科学研究院提供。选取生长良好的外植体,在无菌条件下接种于MS培养基中,于温度(28±2)℃、光照度1 000~1 600 lx、光照时间10 h·d⁻¹、空气相对湿度70%~80%的条件下培养。随机选择生长良好、长势一致、平均株高10 cm并具有2对真叶的试管苗进行实验。

栽培土壤取自福建农林大学北山阔叶林的林下(去除表面土壤),主要覆盖植被为台湾相思(*Acacia confusa* Merr.),为典型南方红壤,偏酸性(pH 4.6),质地较黏重,土壤中的总氮、总磷和总钾含量分别为1.571、0.109和53.199 g·kg⁻¹,有效氮、有效磷和有效钾含量分别为53.199、1.894和83.156 mg·kg⁻¹。

供试菌种为福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室从桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)根际土壤中提取并通过固体和液体培养2种方法筛选和鉴定获得的3株高效解磷菌P7(解无机磷)、P19(解

无机磷)和YP17(解有机磷)^{[21]54-55}。

1.3 方法

1.3.1 实验设计和处理 采用完全随机区组设计。共设7个处理,包括:P19单菌菌液(A1)、P7单菌菌液(A2)、YP17单菌菌液(A3)、P19-YP17混合菌菌液(A4)、P7-YP17混合菌菌液(A5)、P7-P19混合菌菌液(A6)和P7-P19-YP17混合菌菌液(A7)处理,其中混合菌菌液按体积比1:1进行配置,每一菌液处理均设置5×10⁶、2×10⁶和1×10⁶ CFU·mL⁻¹3个浓度;空白对照(CK_B)为蒸馏水,正常供磷对照(CK_P)则添加18 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄。

2012年4月初,将巨尾桉幼苗栽在塑料盆(高27 cm、上外径30 cm、底外径20 cm)中,每盆装土8 kg,每盆均栽1株幼苗,每处理3株,视为3次重复。对巨尾桉幼苗进行养护和恢复性管理,恢复生长1个月后进行菌液浇施处理。每次每盆浇施100 mL,每15天浇施1次,共浇施4次。

1.3.2 指标测定方法 在2012年8月、9月、10月和11月分别采集各处理的叶片,均选择植株东侧从上向下第3至第5片成熟叶,所有叶片于105℃杀青15 min,80℃烘干至恒质量。在11月底分别收集各处理的幼苗,将根、茎和叶片分开,于105℃杀青15 min,80℃烘干至恒质量,分别称量幼苗地上部分和地下部分干质量。将烘干的样品粉碎后过筛(孔径0.2 mm),称取适量粉末样品,用H₂SO₄-H₂O₂消煮;采用钼锑抗比色法^[22]测定叶片中磷含量,用KDN-DI自动定氮仪(上海新嘉电子有限公司)测定幼苗中氮含量,用AA-7000原子吸收分光光度计(北京市东西电子技术研究所)测定幼苗中钾含量。

1.4 数据处理和统计分析

采用EXCEL 2013和SPSS 19.0软件进行数据处理、分析和图形绘制。用双因素方差分析法(two-way ANOVA)进行方差分析,并采用最小显著性差异法(LSD)进行显著性检验和多重比较(P=0.05)。

2 结果和分析

2.1 不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗干质量的影响

不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗地上部分、地下部分以及总干质量的影响见表1。

2.1.1 对地上部分干质量的影响 由表1的实验数据可见:当菌液浓度为5×10⁶ CFU·mL⁻¹时,各处理组

按照巨尾桉幼苗地上部分干质量由高至低依次排序为 P7-P19、P19-YP17、YP17、P7-YP17、P7-P19-YP17、P7、P19、CK_p (供磷对照)、CK_B (空白对照), 其中, P19 与 P7、YP17 与 P19-YP17、P7-YP17 与 P7-P19-YP17 处理组间幼苗地上部分干质量无显著差异 ($P>0.05$), 其他处理组间则差异显著 ($P<0.05$)。与 CK_B 和 CK_p 相比, 经解磷菌处理后巨尾桉幼苗的地上部分干质量均显著提高, 其中, P7-P19、P19-YP17 和 YP17 处理组的幼苗地上部分干质量分别较 CK_B 提高 108.74%、80.39% 和 74.46%。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹ 时, 各处理组按照巨尾桉幼苗地上部分干质量由高至低依次排序为 P7-P19、P7-YP17、P7-P19-YP17、P19-YP17、YP17、P7、P19、CK_p、CK_B, 其中, P19 与 P7、YP17 与 P19-YP17、P7-YP17 与 P7-P19-YP17 处理组间地上部分干质量无显著差异, 而其他处理组间则有显著差异。与 CK_B 和 CK_p 相比, 经解磷菌处理后巨尾桉幼苗地上部分干质量均显著提高, 其中, P7-P19、P7-YP17 和 P7-P19-YP17 处理组的地上部分干质量分别较 CK_B 提高 77.43%、65.95% 和 63.18%。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹ 时, 各处理组按照巨尾桉幼苗地上部分干质量由高至低依次排序为 P19-YP17、P7-P19、YP17、P7-YP17、P19、P7、P7-P19-YP17、CK_p、CK_B, 其中, P19 与 P7、P19 与 P7-YP17、P7 与 P7-P19-YP17 处理组间地上部分干质量无显著差异, 而其他处理组间则有显著差异。与 CK_B 和 CK_p 相比, 经解磷菌处理后巨尾桉幼苗地上部分干质量均显著提高, 其中, P19-YP17、P7-P19 和 YP17 处理组的地上部分干质量分别较 CK_B 提高 93.44%、90.88% 和 69.27%。

2.1.2 对地下部分干质量的影响 由表 1 的实验数据还可见: 当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹ 时, 各处理组按照巨尾桉幼苗地下部分干质量由高至低依次排序为 P7-P19、P7-YP17、P19-YP17、YP17、P7-P19-YP17、P7、CK_p、P19、CK_B, 其中, P19 与 CK_B、P7 与 CK_p 处理组间地下部分干质量无显著差异, 其他处理组间则有显著差异。除 P19 和 P7 处理组外, 其他解磷菌处理组的巨尾桉幼苗地下部分干质量均显著高于 CK_B 和 CK_p, 其中, P7-P19、P7-YP17 和 P19-YP17 处理组的地下部分干质量分别较 CK_B 提高 258.26%、189.00% 和 149.43%。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹ 时, 各处理组按

照巨尾桉幼苗地下部分干质量由高至低依次排序为 P7-P19、P7-YP17、P7-P19-YP17、P19-YP17、P19、P7、YP17、CK_p、CK_B, 其中, P19-YP17 与 P19、P19 和 P7 与 YP17 处理组间地下部分干质量无显著差异, 其他处理组间则有显著差异。与 CK_B 和 CK_p 相比, 各解磷菌处理组的巨尾桉幼苗地下部分干质量均显著提高,

表 1 不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗干质量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)
Table 1 Effect of different treatments of phosphate-solubilizing bacterium on dry weight of seedling of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden \times *E. urophylla* S. T. Blake ($\bar{X} \pm SD$)

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	不同浓度处理组幼苗地上部分干质量 ^{2)/g} Dry weight of above-ground part of seedling in different concentration treatment groups ²⁾		
	5×10^6 CFU · mL ⁻¹	2×10^6 CFU · mL ⁻¹	1×10^6 CFU · mL ⁻¹
P19	33.793±0.975d	34.673±0.457d	38.227±1.085cd
P7	35.630±2.057d	35.497±1.222d	36.127±0.972de
YP17	45.947±1.544b	38.110±1.050c	44.580±1.211b
P19-YP17	47.510±1.149b	39.983±1.538c	50.947±2.183a
P7-YP17	40.357±0.845c	43.707±1.989b	38.770±1.031c
P7-P19	54.977±1.792a	46.730±0.592a	50.273±2.095a
P7-P19-YP17	40.170±2.151c	42.977±1.720b	35.370±1.280e
CK _B	26.337±0.997f	26.337±0.997f	26.337±0.997g
CK _p	28.937±1.095e	28.937±1.095e	28.937±1.095f

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	不同浓度处理组幼苗地下部分干质量 ^{2)/g} Dry weight of under-ground part of seedling in different concentration treatment groups ²⁾		
	5×10^6 CFU · mL ⁻¹	2×10^6 CFU · mL ⁻¹	1×10^6 CFU · mL ⁻¹
P19	2.550±0.130g	3.890±0.079de	5.347±0.122b
P7	3.530±0.410f	3.763±0.358e	3.520±0.140e
YP17	5.047±0.379d	3.633±0.155e	4.490±0.357c
P19-YP17	5.737±0.133c	4.080±0.030d	5.780±0.187a
P7-YP17	6.647±0.432b	6.450±0.130b	3.750±0.020de
P7-P19	8.240±0.318a	7.757±0.099a	6.053±0.293a
P7-P19-YP17	4.187±0.129e	4.447±0.095c	3.860±0.106d
CK _B	2.300±0.114g	2.300±0.114g	2.300±0.114g
CK _p	3.103±0.129f	3.103±0.129f	3.103±0.129f

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	不同浓度处理组幼苗总干质量 ^{2)/g} Total dry weight of seedling in different concentration treatment groups ²⁾		
	5×10^6 CFU · mL ⁻¹	2×10^6 CFU · mL ⁻¹	1×10^6 CFU · mL ⁻¹
P19	36.343±1.048f	38.563±0.385f	43.573±1.130c
P7	39.160±1.868e	39.260±1.336f	39.647±0.970d
YP17	50.993±1.718b	41.743±1.113e	49.070±1.497b
P19-YP17	53.247±1.017b	44.063±1.015d	56.727±2.026a
P7-YP17	47.003±1.019c	50.157±1.861b	42.520±1.025c
P7-P19	63.217±1.476a	54.487±0.686a	56.327±2.027a
P7-P19-YP17	44.357±2.180d	47.423±1.655c	39.230±1.382d
CK _B	28.637±1.109h	28.637±1.109h	28.637±1.109f
CK _p	32.040±1.221g	32.040±1.221g	32.040±1.221e

¹⁾ P19, P7: 无机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to inorganic phosphorus; YP17: 有机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to organic phosphorus; CK_B: 空白对照 The blank control; CK_p: 供磷对照 (添加 18 mg · kg⁻¹ KH₂PO₄) The control supplied with phosphorus (adding 18 mg · kg⁻¹ KH₂PO₄).

²⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P<0.05$).

其中,P7-P19、P7-YP17和P7-P19-YP17处理组的地下部分干质量分别较CK_B提高237.26%、180.43%和93.35%。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗地下部分干质量由高至低依次排序为P7-P19、P19-YP17、P19、YP17、P7-P19-YP17、P7-YP17、P7、CK_P、CK_B,其中,P19-YP17与P7-P19、P7-YP17与P7-P19-YP17、P7与P7-YP17处理组间地下部分干质量无显著差异,其他处理组间则有显著差异。与CK_B和CK_P相比,各解磷菌处理组的巨尾桉幼苗地下部分干质量均显著提高,其中,P7-P19、P19-YP17和P19处理组的地下部分干质量分别较CK_B提高163.17%、151.30%和132.48%。

2.1.3 对总干质量的影响 由表1的实验数据还可见:当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗总干质量由高至低依次排序为P7-P19、P19-YP17、YP17、P7-YP17、P7-P19-YP17、P7、P19、CK_P、CK_B,其中,仅YP17和P19-YP17处理组间幼苗总干质量无显著差异,其他处理组间均有显著差异。与CK_B和CK_P相比,各解磷菌处理组的幼苗总干质量均显著提高,其中,P7-P19、P19-YP17和YP17处理组的幼苗总干质量分别较CK_B提高120.75%、85.94%和78.07%。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗总干质量由高至低依次排序为P7-P19、P7-YP17、P7-P19-YP17、P19-YP17、YP17、P7、P19、CK_P、CK_B,其中,仅P19和P7处理组间幼苗总干质量无显著差异,其他处理组间均有显著差异。与CK_B和CK_P相比,各解磷菌处理组幼苗总干质量均显著提高,其中,P7-P19、P7-YP17和P7-P19-YP17处理组的幼苗总干质量分别较CK_B提高90.27%、75.15%和65.60%。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗总干质量由高至低依次排序为P19-YP17、P7-P19、YP17、P19、P7-YP17、P7、P7-P19-YP17、CK_P、CK_B。与CK_B和CK_P相比,各解磷菌处理组幼苗总干质量均显著提高,其中,P19-YP17、P7-P19和YP17处理组的幼苗总干质量分别较CK_B提高98.09%、96.69%和71.35%。

方差分析结果表明:不同解磷菌和不同菌液浓度对巨尾桉幼苗总干质量的影响效应均有显著差异($P < 0.05$)。

2.2 不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗氮和钾含量的影响

不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗氮和钾含量的影响见表2。

2.2.1 对幼苗氮含量的影响 由表2的实验数据可以看出:当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗氮含量由高至低依次排序为P7-P19、P7-P19-YP17、P7、YP17、P7-YP17、P19-YP17、CK_P、P19、CK_B。除P19处理组外,其他解磷菌处理组幼苗的氮含量均显著高于CK_B,其中,P7-P19和P7-P19-YP17处理组幼苗的氮含量分别较CK_B提高88.99%和79.00%。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗氮含量由高至低依次排序为P7-P19、P19、P7-P19-YP17、P19-YP17、P7-YP17、YP17、P7、CK_P、CK_B。与CK_B和CK_P相比,各解磷菌处理组的幼苗氮含量均不同程度提高,且总体上混菌处理组优于单菌处理组;其中,P7-P19、P19、P7-P19-YP17、P19-YP17和P7-YP17处理组间的幼苗氮含量无显著差异,P7-P19、P19和P7-P19-YP17处理组的幼苗氮含量分别较CK_B提高73.51%、72.45%和71.46%,差异达显著水平。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗氮含量由高至低依次排序为P7-YP17、P19-YP17、P7-P19、YP17、P7、P7-P19-YP17、CK_P、CK_B、P19。除P19处理组外,其他解磷菌处理组的幼苗氮含量均不同程度高于CK_B和CK_P,且总体上混菌处理组优于单菌处理组;其中,P7-YP17、P19-YP17和P7-P19处理组幼苗氮含量分别较CK_B提高123.02%、122.71%和88.85%,差异达显著水平。

方差分析结果表明:不同解磷菌对巨尾桉幼苗氮含量有极显著影响($P < 0.01$),不同菌液浓度对其幼苗氮含量也有显著影响($P < 0.05$),而不同解磷菌与不同菌液浓度间的交互作用对幼苗氮含量则无显著影响($P > 0.05$)。

2.2.2 对幼苗钾含量的影响 由表2的实验数据还可以看出:当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉幼苗钾含量由高至低依次排序为P7-P19-YP17、P7、P19、CK_P、CK_B、P19-YP17、P7-YP17、YP17、P7-P19。其中,仅P7-P19-YP17和P7处理组的幼苗钾含量显著高于CK_B和CK_P,且分别较CK_B提高26.79%和20.10%。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,各处理组按照巨尾桉幼苗钾含量由高至低依次排序为 P7、P19-YP17、P19、YP17、CK_p、P7-P19-YP17、CK_B、P7-P19、P7-YP17。其中,仅 P7 和 P19-YP17 处理组幼苗钾含量显著高于 CK_B,分别较 CK_B 提高 16.00% 和 13.35%。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,各处理组按照巨尾桉幼苗钾含量由高至低依次排序为 P7-P19-

YP17、P19、YP17、CK_p、CK_B、P19-YP17、P7、P7-YP17、P7-P19。其中,仅 P7-P19-YP17 和 P19 处理组幼苗钾含量显著高于 CK_B,分别较 CK_B 提高 63.58% 和 18.91%。

方差分析结果表明:不同解磷菌、不同菌液浓度及二者间的交互作用对巨尾桉幼苗钾含量均有极显著影响($P < 0.01$)。

表 2 不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗氮(N)和钾(K)含量的影响($\bar{X} \pm SD$)

Table 2 Effect of different treatments of phosphate-solubilizing bacterium on nitrogen (N) and potassium (K) contents in seedling of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake ($\bar{X} \pm SD$)

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	不同浓度处理组幼苗 N 含量 ²⁾ / g · kg ⁻¹			不同浓度处理组幼苗 K 含量 ²⁾ / g · kg ⁻¹		
	N content in seedling in different concentration treatment groups ²⁾			K content in seedling in different concentration treatment groups ²⁾		
	5 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹	2 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹	1 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹	5 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹	2 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹	1 × 10 ⁶ CFU · mL ⁻¹
P19	5.806 ± 0.182cd	9.402 ± 0.999a	4.606 ± 0.815e	7.972 ± 0.167b	8.180 ± 0.622abc	8.803 ± 0.765b
P7	9.220 ± 0.176ab	6.648 ± 0.279bc	8.083 ± 0.463bcd	8.891 ± 0.236a	8.587 ± 0.136a	6.899 ± 1.575c
YP17	9.166 ± 0.193ab	7.004 ± 0.320b	8.316 ± 0.671bc	6.720 ± 0.243d	7.991 ± 0.228abc	7.787 ± 0.408bc
P19-YP17	6.693 ± 0.431c	9.164 ± 0.331a	12.142 ± 1.111a	7.180 ± 0.234cd	8.391 ± 0.695ab	7.103 ± 0.227c
P7-YP17	8.919 ± 0.275b	9.164 ± 0.402a	12.159 ± 0.028a	6.765 ± 0.134d	6.293 ± 0.773e	6.802 ± 0.402c
P7-P19	10.304 ± 0.202a	9.460 ± 0.417a	10.296 ± 0.071ab	4.782 ± 0.399e	7.023 ± 0.239de	6.613 ± 0.448c
P7-P19-YP17	9.759 ± 0.524ab	9.348 ± 0.746a	7.913 ± 0.202bcd	9.386 ± 0.428a	7.403 ± 0.742cd	12.110 ± 0.507a
CK _B	5.452 ± 0.465d	5.452 ± 0.465d	5.452 ± 0.465d	7.403 ± 0.401bc	7.403 ± 0.401cd	7.403 ± 0.401c
CK _p	6.343 ± 0.033cd	6.343 ± 0.033cd	6.343 ± 0.033cd	7.642 ± 0.377bc	7.642 ± 0.377bcd	7.642 ± 0.377bc

¹⁾ P19, P7: 无机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to inorganic phosphorus; YP17: 有机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to organic phosphorus; CK_B: 空白对照 The blank control; CK_p: 供磷对照 (添加 18 mg · kg⁻¹ KH₂PO₄) The control supplied with phosphorus (adding 18 mg · kg⁻¹ KH₂PO₄).

²⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

2.3 不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗叶片磷含量的影响

随处理时间延长,不同浓度解磷菌处理组中巨尾桉幼苗叶片磷含量的变化以及不同处理组间叶片磷含量平均值的比较结果见表 3。

2.3.1 叶片磷含量的变化 由表 3 的实验数据可以看出:当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,仅 P7-P19-YP17 处理组的叶片磷含量呈逐渐下降的趋势;其他解磷菌处理组的叶片磷含量均随处理时间的延长呈先低后高的变化趋势,且均在 10 月份降至最低。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,随着时间的延长,P19、P7 和 P19-YP17 处理组的叶片磷含量均呈先低后高的变化趋势,且均在 10 月份降至最低;YP17 处理组的叶片磷含量也呈先低后高的变化趋势,但在 9 月份降至最低;P7-YP17 处理组的叶片磷含量呈逐渐升高的变化趋势;而 P7-P19 和 P7-P19-YP17 处理组的叶片磷含量则均呈逐渐降低的变化趋势。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,P19、P7、YP17 和 P7-P19-YP17 处理组的叶片磷含量均在 9 月份达到最高,且总体上随处理时间的延长呈先高后低的变化趋势;而 P19-YP17、P7-YP17 和 P7-P19 处理组的叶片磷含量则总体上随时间的延长呈逐渐降低的变化趋势。

方差分析结果表明:不同月份间巨尾桉幼苗叶片磷含量的差异极显著 ($P < 0.01$),且叶片中磷含量由高到低依次为 8 月、9 月、10 月、11 月;而不同解磷菌、不同菌液浓度、不同时间及三者间的交互作用对巨尾桉幼苗叶片磷含量的影响效应均达极显著水平 ($P < 0.01$)。

2.3.2 叶片磷含量平均值的比较 由表 3 的实验数据还可以看出:当菌液浓度为 5×10^6 CFU · mL⁻¹ 时,各处理组按照巨尾桉叶片磷含量平均值由高至低依次排序为 P7-P19、CK_p (供磷对照)、P7、P7-YP17、P19、YP17、P19-YP17、P7-P19-YP17、CK_B (空白对照)。

经不同解磷菌处理后叶片磷含量平均值均不同程度高于CK_B,其中,P7-P19和P7处理组的叶片磷含量平均值分别较CK_B提高106.28%和41.87%,差异显著。此外,CK_P的叶片磷含量平均值较CK_B提高77.82%,且显著高于除P7-P19处理组外的其他解磷菌处理组。

当菌液浓度为 2×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉叶片磷含量平均值由高至低依次排序为P7-P19、CK_P、P19-YP17、P7-YP17、P7、P19、YP17、P7-P19-YP17、CK_B。与CK_B相比,不同解磷菌处理组的叶片磷含量平均值均不同程度提高,且混菌处理组总体上优于单菌处理组;其中,P7-P19和P19-YP17

处理组叶片磷含量平均值分别较CK_B提高96.77%和71.16%,差异极显著。此外,CK_P的叶片磷含量也显著高于除P7-P19处理组外的其他解磷菌处理组。

当菌液浓度为 1×10^6 CFU · mL⁻¹时,各处理组按照巨尾桉叶片磷含量平均值由高至低依次排序为P19-YP17、CK_P、P7-YP17、P7-P19-YP17、YP17、P7、P19、P7-P19、CK_B。与CK_B相比,不同解磷菌处理组叶片磷含量平均值均不同程度提高,且混菌处理组总体上优于单菌处理组;其中,P19-YP17和P7-YP17处理组的叶片磷含量平均值分别较CK_B提高87.25%和35.86%,差异显著。此外,CK_P的叶片磷含量也显著高于除P19-YP17处理组外的其他解磷菌处理组;

表3 不同解磷菌处理下巨尾桉幼苗叶片磷(P)含量的动态变化($\bar{X} \pm SD$)

Table 3 Dynamic change of phosphorus (P) content in leaf of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake seedling in different treatments of phosphate-solubilizing bacterium ($\bar{X} \pm SD$)

处理 ¹⁾ Treatment ¹⁾	不同月份叶片P含量 ²⁾ /g · kg ⁻¹ P content in leaf at different months ²⁾				
	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November	平均值 Average
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19	1.453±0.101c	1.350±0.007e	0.830±0.050c	1.181±0.138d	1.204c
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7	1.569±0.039b	1.538±0.038c	1.167±0.554b	1.865±0.035a	1.535b
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ YP17	1.382±0.027c	1.467±0.017d	0.932±0.032bc	1.030±0.016e	1.203c
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19-YP17	1.278±0.098d	1.067±0.038h	1.015±0.085bc	1.398±0.065c	1.190c
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-YP17	1.564±0.036b	1.136±0.008g	0.890±0.010bc	1.454±0.045c	1.261bc
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19	2.684±0.054a	2.347±0.053a	2.258±0.012a	1.637±0.039b	2.232a
5×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19-YP17	1.636±0.008b	1.247±0.005f	1.047±0.024bc	0.676±0.092g	1.152cd
CK _B	1.211±0.009d	1.201±0.008f	1.050±0.004bc	0.865±0.115f	1.082d
CK _P	2.610±0.252a	1.884±0.015b	1.992±0.024a	1.209±0.027d	1.924a
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19	1.413±0.024d	1.212±0.194c	0.918±0.007e	1.680±0.050bc	1.306d
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7	2.160±0.070b	1.912±0.094b	1.230±0.031c	1.691±0.106bc	1.748c
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ YP17	1.185±0.092e	1.167±0.038c	1.256±0.116c	1.300±0.027cd	1.227de
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19-YP17	1.654±0.097c	1.251±0.119c	1.163±0.004cd	3.340±1.435a	1.852b
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-YP17	1.288±0.083e	1.809±0.107b	1.882±0.007b	2.299±0.248b	1.820b
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19	2.550±0.059a	2.409±0.400a	2.293±0.165a	1.265±0.106cd	2.129a
2×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19-YP17	1.369±0.059de	1.230±0.098c	1.090±0.093d	0.748±0.012d	1.111ef
CK _B	1.211±0.009e	1.201±0.008c	1.050±0.004d	0.865±0.115cd	1.082f
CK _P	2.610±0.252a	1.884±0.015b	1.992±0.024b	1.209±0.027cd	1.924ab
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19	1.259±0.249d	1.790±0.010c	1.134±0.007e	1.028±0.190cd	1.303c
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7	1.389±0.019d	1.620±0.087d	1.058±0.061f	1.205±0.091b	1.318c
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ YP17	1.650±0.093c	1.960±0.110b	0.867±0.033g	1.132±0.103bc	1.402bc
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P19-YP17	2.558±0.103a	2.119±0.132a	1.569±0.059b	1.857±0.109a	2.026a
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-YP17	1.929±0.107b	1.482±0.108de	1.355±0.014d	1.112±0.094bc	1.470b
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19	1.780±0.104bc	1.343±0.110e	0.911±0.014g	0.694±0.011e	1.182d
1×10^6 CFU · mL ⁻¹ P7-P19-YP17	1.250±0.221d	1.700±0.096cd	1.486±0.008c	1.203±0.020b	1.410bc
CK _B	1.211±0.009d	1.201±0.008e	1.050±0.004f	0.865±0.115d	1.082d
CK _P	2.610±0.252a	1.884±0.015bc	1.992±0.024a	1.209±0.027b	1.924a

¹⁾ P19, P7: 无机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to inorganic phosphorus; YP17: 有机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to organic phosphorus; CK_B: 空白对照 The blank control; CK_P: 供磷对照(添加 $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$) The control supplied with phosphorus (adding $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$).

²⁾ 同列中不同的小写字母表示同一月份同一浓度各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups in the same concentration at the same month ($P < 0.05$).

而除 P7-P19 处理组外,其他解磷菌处理组的叶片磷含量平均值均显著高于 CK_B。

2.4 巨尾桉幼苗总干质量、氮和钾含量及叶片磷含量的多重比较分析

在不同解磷菌处理组间以及不同浓度处理组间巨尾桉幼苗总干质量、氮和钾含量及叶片磷含量平均值的多重比较分析结果分别见表 4 和表 5。

不同解磷菌和不同菌液浓度对巨尾桉幼苗总干质量平均值的累积作用显著优于 CK_B 和 CK_P,且混合菌处理组优于单菌处理组;其中,在不同菌液浓度下,P7-P19 和 P19-YP17 处理组对幼苗总干质量平均值有较大促进作用。

不同解磷菌和不同菌液浓度下,巨尾桉的叶片磷含量平均值均较 CK_B 不同程度提高,且整体上混菌处理组优于单菌处理组;与高浓度(5×10^6 CFU · mL⁻¹) 和低浓度(1×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液相比,中浓度(2×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液对提高巨尾桉的叶片磷含量

平均值有较大的促进作用;其中,在不同菌液浓度下,P7-P19 和 P19-YP17 处理组对提高巨尾桉叶片磷含量平均值有较大促进作用。

不同解磷菌和不同菌液浓度下,巨尾桉幼苗氮含量平均值较 CK_B 和 CK_P 均不同程度提高,且混菌处理组优于单菌处理组;与高浓度(5×10^6 CFU · mL⁻¹) 和中浓度(2×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液相比,低浓度(1×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液对提高巨尾桉幼苗氮含量平均值有较大的促进作用;其中,在不同菌液浓度下,P7-P19 和 P7-YP17 处理组对提高巨尾桉幼苗氮含量平均值有较大促进作用,其次则为 P19-YP17 和 P7-P19-YP17 处理组。

不同解磷菌对巨尾桉幼苗钾含量平均值的促进作用较小;与高浓度(5×10^6 CFU · mL⁻¹) 和中浓度(2×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液相比,低浓度(1×10^6 CFU · mL⁻¹) 菌液对提高巨尾桉幼苗钾含量平均值有较大的促进作用;其中,在不同菌液浓度下,P7-P19-

表 4 不同解磷菌对巨尾桉幼苗总干质量、氮(N)和钾(K)含量及叶片磷(P)含量平均值的影响效应的多重比较结果($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Multiply comparison result on effect of different phosphate-solubilizing bacteria on average values of total dry weight, nitrogen (N) and potassium (K) contents in seedling and phosphorus (P) content in leaf of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	平均总干质量/g Average of total dry weight	平均 N 含量/g · kg ⁻¹ Average of N content	平均 K 含量/g · kg ⁻¹ Average of K content	平均 P 含量/g · kg ⁻¹ Average of P content
P19	39.493±3.704f	6.605±2.495d	8.318±0.250b	1.271±0.058d
P7	39.356±0.257f	7.984±1.289c	8.126±0.620bc	1.534±0.215c
YP17	47.269±4.736c	8.162±1.089c	7.499±0.394cd	1.277±0.109d
P19-YP17	51.346±6.543b	9.355±2.696b	7.558±0.417c	1.689±0.441b
P7-YP17	46.560±3.838d	10.081±1.804a	6.620±0.164e	1.517±0.282c
P7-P19	58.010±4.602a	10.020±0.485a	6.139±0.689f	1.848±0.579a
P7-P19-YP17	43.670±4.140e	9.007±0.969b	9.633±1.364a	1.224±0.162d
CK _B	28.637±1.109h	5.452±0.465e	7.403±0.401cd	1.082±0.162e
CK _P	32.040±1.221g	6.343±0.033d	7.642±0.377c	1.924±0.574a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ P19, P7: 无机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to inorganic phosphorus; YP17: 有机磷高效解磷菌 High-efficiency phosphate-solubilizing bacterium to organic phosphorus; CK_B: 空白对照 The blank control; CK_P: 供磷对照(添加 $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$) The control supplied with phosphorus (adding $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$).

表 5 不同浓度菌液对巨尾桉幼苗总干质量、氮(N)和钾(K)含量及叶片磷(P)含量平均值的影响效应的多重比较结果($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Multiply comparison result on effect of different concentrations of bacterium solution on average values of total dry weight, nitrogen (N) and potassium (K) contents in seedling and phosphorus (P) content in leaf of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

浓度/CFU · mL ⁻¹ Concentration	平均总干质量/g Average of total dry weight	平均 N 含量/g · kg ⁻¹ Average of N content	平均 K 含量/g · kg ⁻¹ Average of K content	平均 P 含量/g · kg ⁻¹ Average of P content
5×10^6	43.889±9.092a	8.562±1.645b	7.385±1.542c	1.396±0.390b
2×10^6	41.819±5.868b	8.599±1.220b	7.695±0.827b	1.599±0.383a
1×10^6	43.086±7.434ab	9.074±2.686a	8.017±1.956a	1.444±0.273b
0(CK _B) ²⁾	28.637±1.109c	5.452±0.465c	7.403±0.401b	1.082±0.162c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ CK_B: 空白对照 The blank control.

YP17 处理组对提高巨尾桉幼苗钾含量平均值有的较大促进作用,其次则为 P19 处理组。

3 讨论和结论

根据相关文献^[23-25],解磷菌的解磷机制可能是解磷微生物通过代谢产生多种酸性物质,并降低土壤 pH 值及磷离子与铁、铝、钙等金属离子的螯合度,从而将难溶态磷转化为可溶性磷。本研究中,不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗的总干质量和氮含量以及叶片磷含量的促进效应总体上显著优于空白对照,供试的高效解磷菌 P19、P7 和 YP17 均对土壤中难溶态磷有较高的转化能力,从而可促进植株对磷和氮的吸收以及地下部分和地上部分的干物质累积,这与冯瑞章等^[15]和刘微等^[26]的“浇施解磷菌能显著促进植物干物质以及全磷和全氮含量增加”的研究结论相似。由于解磷菌能明显提高巨尾桉种植土壤中的有效磷含量^[27],并提高脲酶和磷酸酶活性,进而促进土壤有效磷的转化和氮含量的增加^[17],因此解磷菌能改变土壤磷的存在形态、改善土壤的养分循环并提高土壤的养分供给力,从而促进巨尾桉对土壤养分的吸收。此外,土壤微生物不仅可以直接作用于土壤和植物根系,微生物的代谢活动和分泌的促生物质还可以促进植物根系的生长,并提升植株对土壤养分的吸收效率,从而促进植物整体的生长发育,显著提高植株体内的全磷和全氮含量以及不同部位的干物质积累。

本研究中,用混合解磷菌处理的巨尾桉幼苗的总干质量和氮含量以及叶片磷含量的提升效果优于单一解磷菌处理,与刘江等^[13]、俞新玲^{[21]66-67}和崔邢等^[27]的相关研究结论一致,表明不同菌株的协同作用更有利于土壤中难溶性磷的降解。一方面,可能是由于不同菌株混合时,分泌的多种分泌物更有利于菌株的繁殖生长及对难溶性磷的降解;另一方面,可能是因为土壤中的磷素包括无机磷和有机磷,磷源成分复杂且结构差异大,加之解磷菌复杂的溶磷机制,多种因素导致不同解磷菌株对不同磷源成分的解磷效果差异很大^[28-29],因此,相对而言,用解无机磷菌和解有机磷菌配置的混合菌液解磷效果较佳。然而,本研究中,除 P7-P19-YP17 处理组外,P19-YP17、P7-YP17 和 P7-P19 混合解磷菌处理对巨尾桉幼苗钾含量的提升效果并不显著,且 P7-YP17 和 P7-P19 处理组的幼苗钾含量低于空白对照,这与郜春花等^[16]得

出的“解磷菌菌剂能提高作物中磷和钾含量”的结论存在差异。由于解磷菌的作用机制比较复杂,容易受到土壤类型、立地条件、培养方式和植物类型等因素的影响,推测造成本研究与郜春花等^[16]的研究结论存在差异的原因,一方面可能为选用的解磷菌菌株不同,不同菌株的解磷机制和解磷能力不一致;另一方面可能为解磷菌对草本植物和高大乔木的促进效应存在差异。

上述研究结果表明:不同菌液浓度对巨尾桉幼苗的氮和钾含量以及叶片磷含量的影响效应存在显著差异,低浓度(1×10^6 CFU · mL⁻¹)和中浓度(2×10^6 CFU · mL⁻¹)菌液对植株体内磷、氮、钾含量的提升效果较好。一方面是由于高浓度(5×10^6 CFU · mL⁻¹)菌液中解磷菌数量较多,生存竞争加剧,导致土壤环境无法满足众多解磷菌的生长繁殖需求,进而降低了解磷菌的解磷能力;另一方面也可能是由于高浓度和中浓度菌液中解磷菌数量较多,固持的磷酸盐也较多,导致磷的固定作用大于磷的矿化作用,使土壤中可被植物吸收的有效磷水平降低,因而植株体内的磷含量相对较低^[30]。为进一步提高解磷菌的解磷能力,应对浓度 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ CFU · mL⁻¹ 菌液进行更细致的研究,从而确定适宜于巨尾桉幼苗生长的最优解磷菌浓度。

土壤肥力是指土壤供给养分的能力,主要包括土壤中养分的含量、存在形态、对植物的有效性和供给力^[31]。戴开结等^[32]和蔡秋燕等^[33]认为,施加磷肥可促进植株的磷吸收量,尤以无机磷(KH_2PO_4)的促进效果最好。本研究中,不同解磷菌处理对巨尾桉幼苗氮含量的促进效果优于供磷对照(添加 $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ KH_2PO_4),但各解磷菌处理组的叶片磷含量均低于供磷对照,主要是因为增施磷肥后短期内巨尾桉幼苗可保持体内较高的磷含量;但随时间推移,解磷菌处理的土壤可稳定持续供磷,因而叶片中磷含量的下降速率低于供磷对照,因此,浇施解磷菌可以改变土壤中磷的形态,进而增强土壤对植物养分供给的有效性和持续性,解决磷肥施用后利用效率低的问题。此外,解磷菌不仅可以使土壤中难溶态磷转化为植株可吸收态磷,还会影响施入后被矿化的部分磷肥,而有机肥可以为解磷菌生长繁殖提供更多营养,有利于解磷菌更充分发挥解磷功效,因此,加强对有机肥和解磷菌最优配比的研究,可以更好地改善土壤养分循环,进而促进植物生长发育。刘江等^[13]、冯瑞章等^[15]、郜

春花等^[16]和朱培森等^[34]的研究结果均表明,解磷菌与有机肥共同作用在促进植株吸磷量和生物量方面效果更佳,解磷菌与磷肥组合处理对巨尾桉幼苗的养分吸收是否也有同样的作用,还需进一步研究。

中国南方的红壤面积占全国土地总面积的1/5,耕地面积占全国耕地总面积的30%,南方红壤的改良对于中国的农业乃至整个国民经济的持续发展具有重要意义^[35]。红壤中全磷和有效磷含量都很低,施入的磷肥易被土壤中 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 等金属离子固定,大部分磷肥以难溶态磷形式积累于土壤中,磷肥施用时间越久其肥效愈低^[36]。桉树因其速生、丰产、优质的特点已成为中国南方人工经济林的战略树种,桉树人工林面积占南方全部人工林面积的20%^[37-38]。巨尾桉连栽人工林具有速生丰产的特点,对养分需求极大,且容易导致土壤地力衰退和巨尾桉品质和产量下降等问题。而高效解磷菌可以将土壤中难溶态磷转化为有效态磷,提高土壤中磷的利用效率,促进土壤养分的转化吸收,改善土壤养分循环,有效解决人工林地力衰退等问题,并可以节约磷肥投入,保护土壤原性状;同时,解磷菌还可提升巨尾桉吸收氮、磷、钾等养分的能力,提高植物中养分含量和植株的干物质积累,进而促进植物的生长发育和新陈代谢。

综上所述:P19-YPI7、P7-YPI7和P19-YPI7解磷菌混合处理对巨尾桉幼苗生长有明显的促进作用,可作为适合于南方典型红壤的混合解磷菌剂加以进一步开发研究。

参考文献:

- [1] 吴平, 印莉萍, 张立平. 植物营养分子生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1, 103, 163.
- [2] 季鹏章. 生物钾肥及其在农业上的应用[J]. 云南热作科技, 1999, 22(1): 45-46.
- [3] 刘世亮, 介晓磊, 翟东明, 等. 不同磷源在玉米根际的形态转化及有效性研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2003, 24(2): 54-58.
- [4] 曾希柏, 李菊梅, 徐明岗, 等. 红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 434-437.
- [5] 王光华, 周可琴, 金剑, 等. 不同碳源对三种溶磷真菌溶磷解磷能力的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 32-36.
- [6] ABD-ALLA M H. Phosphatases and the utilization of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar viceae[J]. Letters in Applied Microbiology, 1994, 18: 294-296.
- [7] 吴鹏飞, 张冬明, 郝丽虹, 等. 解磷微生物研究现状及展望[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(3): 40-46.
- [8] BIANCO C, DEFEZ R. Improvement of phosphate solubilization and medicago plant yield by an indole-3-acetic acid-overproducing strain of *Sinorhizobium meliloti*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76: 4626-4632.
- [9] MEHTA P, WALIA A, CHAUHAN A, et al. Plant growth promoting traits of phosphate-solubilizing rhizobacteria isolated from apple trees in trans Himalayan region of Himachal Pradesh[J]. Archives of Microbiology, 2013, 195: 357-369.
- [10] PANHWAR Q A, JUSOP S, NAHER U A, et al. Application of potential phosphate-solubilizing bacteria and organic acids on phosphate solubilization from phosphate rock in aerobic rice[J]. The Scientific World Journal, 2013: 272409.
- [11] 张宇龙, 卢小良, 杨成德. 东祁连山高寒草地土壤无机磷溶解菌分离及溶磷能力初探[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 560-564.
- [12] 张彦丽, 王伟鹏, 闫琰, 等. 施用接种解磷真菌的壮秧剂对水稻秧苗生长特性及磷素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(1): 69-72.
- [13] 刘江, 黄学跃, 李天飞, 等. VA菌根真菌与根瘤菌和溶磷菌双接种对烟苗生长的影响[J]. 烟草科技, 2000(2): 43-44.
- [14] 张健, 洪坚平, 郝晶, 等. 不同解磷菌群在石灰性土壤中对油菜产量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报, 2006, 26(2): 149-151.
- [15] 冯瑞章, 姚拓, 周万海, 等. 溶磷菌对燕麦生物量及植株氮、磷含量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 188-192.
- [16] 郝春花, 卢朝东, 张强. 解磷菌剂对作物生长和土壤磷素的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 54-57.
- [17] 洪坚平, 郝晶, 毕理智, 等. 不同解磷菌群对油菜土壤养分与酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 51-54.
- [18] 谭宏伟, 杨尚东, 吴俊, 等. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 575-584.
- [19] NEFF J C, TOWNSEND A R, GLEIXNER G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. Nature, 2002, 419: 915-917.
- [20] 谢安强, 洪伟, 吴承祯. 内生真菌对尾巨桉幼苗磷元素吸收的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(6): 863-870.
- [21] 俞新玲. 桉树土壤高效解磷菌的筛选及其对桉树生长的影响[D]. 福州: 福建农林大学林学院, 2011.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 302-316.
- [23] 千淋兆, 龚明波, 顾金刚, 等. 溶磷微生物菌剂对土壤营养元素及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(5): 425-431.
- [24] HINSINGER P, GOBRAN G R, GREGORY P J, et al. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes[J]. New Phytologist, 2005, 168: 293-303.