

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.017

磷添加和接种菌根菌对马尾松不同家系容器苗的生长及磷素利用效应

黄盛怡¹, 吴统贵¹, 楚秀丽², 王 斌^{1*}, 王秀花³, 张东北³, 周志春¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 国家林业局马尾松工程技术研究中心, 浙江 杭州 311400; 2. 上海植物园, 上海 200000; 3. 浙江省庆元县实验林场, 浙江 庆元 323800)

摘要: [目的] 研究不同遗传背景马尾松二代家系容器苗在磷添加和接种菌根菌相互作用下的生长及磷吸收利用差异, 为马尾松优质容器苗精准培育提供科学依据。[方法] 以 3 个具有不同遗传背景的马尾松二代家系容器苗为材料, 在低 P (50 g·m⁻³ 基质) 和高 P (900 g·m⁻³ 基质) 2 个小区内, 分别设置接种和不接种菌根菌 2 个处理, 分析马尾松不同家系容器苗生长及磷素利用差异。[结果] 磷添加对 3 个家系马尾松容器苗各生长指标及各器官 P 吸收利用均有促进作用, 容器苗苗高、地径、整株干质量、整株 P 含量和吸收量高 P 水平较低 P 水平分别增加 8.70%、21.73%、61.62%、30.25% 和 112.08%, 高径比和根冠比降低 10.62% 和 19.82%。接种菌根菌后, 容器苗苗高、地径、整株干质量和整株 P 吸收量相比不接种分别增加 2.34%、6.40%、20.69% 和 18.08%, 高径比、根冠比和整株 P 含量分别降低 4.09%、3.87% 和 3.23%。接种菌根菌可减小马尾松容器苗不同磷添加水平下地径和根冠比的差异, 同时减小不同家系间的生长差异。磷添加 × 接种菌根菌对马尾松容器苗茎和根 P 吸收量有显著促进作用, 高 P 水平下接种菌根菌对生长的促进作用更明显。不同家系对磷添加和菌根处理的生长响应不同, 53 号家系对磷添加最敏感, 15 号家系对接种菌根菌最敏感, 37 号家系较均衡。[结论] 马尾松容器苗磷添加效应较家系和菌根处理明显, 生产中可根据 3 个家系对磷肥的不同响应合理施肥, 同时通过接种菌根菌提高磷肥利用效率。

关键词: 马尾松家系; 容器苗; 磷添加; 菌根

中图分类号: S723.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0142-10

磷是植物生长发育必需的三大营养元素之一, 以多种方式参与植物体内的物质运输、代谢、信号传导及光合调节等生理过程^[1]。我国大部分地区土壤总磷含量较高, 但其中可直接被植物吸收利用的有效磷含量只占很小比例, 难以满足植物生长的需要。磷素在土壤中移动速度很慢, 只有土壤根系表面的磷才能为植物吸收利用, 大部分仍残留于土壤中^[2], 需发挥植物自身利用土壤磷的潜力来增加磷肥利用率^[3-4]。菌根 (mycorrhiza) 是土壤中某些真菌与植物根的共生体, 可增强植物从土壤中吸收水分和养分特别是磷素营养的能力, 分解土壤中复杂

的矿物质和有机质及分泌和产生生长激素, 进而促进植物的生长和提高植物的抗逆性^[3,5-6]。菌根能调控 N、P 添加对树木生长和森林生产力的影响, 然而与丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 和与外生菌根 (ectomycorrhiza, ECM) 真菌共生的两类植物对 N、P 添加响应不同, AMF 对地下部净初级生产力 (NPP) 贡献高于 ECM, 而 ECM 对地上部、主干和枝条 NPP 贡献较大, 且当土壤 P 含量达到饱和时, 可减少甚至消除菌根效应^[7-10]。深入研究菌根与宿主植物的互作效益与机制, 对于促进林木优质高效培育具有重要意义。

收稿日期: 2021-03-18 修回日期: 2021-05-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“马尾松高效培育技术研究”项目“马尾松良种丰产与壮苗繁育技术研究”课题 (2017YFD0600301)

* 通讯作者: 王斌. E-mail: ylwangbin@sina.com

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是我国南方重要工业用材和采脂树种, 具有分布广泛、速生丰产性高和适生能力强等优良特性。马尾松也是专性外生菌根树种。我国南方森林土壤有效磷含量缺乏是影响马尾松生长的主要限制因子^[11], 已有研究表明, 不同种源马尾松幼苗生长对磷肥的响应差异显著^[12], 施用磷肥和接种菌根菌均能显著促进马尾松的生长^[13-15], 但关于马尾松不同种源、磷添加及接种菌根菌三者之间相互影响的研究尚不多。本研究以不同遗传背景的马尾松二代家系为研究对象, 采用可溶性无机肥配水喷施方式设置高磷和低磷2个磷添加梯度, 研究不同无机磷添加量下, 接种菌根菌后不同家系马尾松容器苗的生长及养分吸收利用差异, 以期为马尾松优质容器苗精准培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在浙江省庆元县实验林场 (119°01'25" E, 27°38'48" N) 育苗基地钢构大棚内进行, 该地海拔高度 510 m, 属亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 年平均气温 17.6℃, 年降水量 1 721.3 mm, 无霜期 245 d。供试材料来源于浙江省兰溪市苗圃木荷马尾松国家林木良种基地二代无性系种子园, 从中选择 3 个不同遗传背景的马尾松亲本无性系, 分别为 15 号 (6627 (江西) × 1003 (广东))、37 号 (6627 (江西) × 5163 (浙江)) 和 53 号 (1217 (贵州) × 1121 (广西))。根据课题组前期研究, 与江西、浙江和贵州种源相比, 广东和广西种源具有生长快、多次抽梢的特点, 此外广西、贵州和江西 3 个种源属于较弱耐低磷类型, 浙江和广东种源相对耐低磷^[12]。2018 年 11 月采集 3 个亲本无性系自由授粉的种子备用。

育苗容器规格为 4.5 cm × 10 cm (直径 × 高) 的无纺布网袋。育苗基质为泥炭、谷壳和珍珠岩 (体积比为 5 : 3 : 2)。泥炭全氮、全磷和全钾含量分别为 14.2、0.7 和 2.7 g·kg⁻¹, pH 值 5.8。所用菌种松乳菇 (*Lactarius deliciosus* (L. Fr.) Gray) 从重庆市缙云山马尾松林下的酸性黄壤中分离获得, 由西南大学菌根研究室辜夕容教授分类鉴定并提供。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计, 主区为磷添加处理, 在保

持有效氮、有效钾添加量 (分别为 900、420 g·m⁻³ 基质) 相同的条件下, 设置 2 个磷添加水平 (低 P: 50 g·m⁻³ 基质, 高 P: 900 g·m⁻³ 基质)。副区为菌根处理, 分为接种菌根菌 (LM) 与不接种菌根菌 (NM) 2 个处理, 每水平 80 株, 重复 3 次。以上不同梯度无机肥通过 CH₄N₂O、KH₂PO₄、(NH₄)₂HPO₄、K₂SO₄、KNO₃ 与 (NH₄)₂SO₄ 不同比例混合而成, 平均到每株容器苗有效氮、有效钾添加量分别为 143、67 mg·株⁻¹, 有效磷低 P 水平为 8 mg·株⁻¹, 高 P 水平为 143 mg·株⁻¹。

1.3 苗木培育

2019 年 3 月下旬播种, 播种前按照生产性流程进行种子消毒和浸种处理, 播种时在播种穴下方置入由蛭石与松乳菇菌丝体悬浮液制作成的固体菌剂 0.3 g。播种后的育苗容器置于覆盖有遮阳网、配置自动喷灌系统的钢构大棚内覆有地布的苗床上。于 7—10 月分 15 次等时间间隔 (7 月 4 次、8 月 4 次、9 月 4 次、10 月 3 次) 等量将氮、磷和钾肥溶于水后均匀喷洒在苗木上。其它苗木管理同一般生产性轻基质网袋容器苗培育。育苗期间及时喷水及控水, 保持基质湿润, 每周调换各处理苗盘位置, 以消除边缘效应。

1.4 数据调查与分析

于 2019 年 10 月底 (生长季末), 从每重复小区随机选取 30 株生长正常的容器苗, 分别用钢卷尺和游标卡尺测量苗高和地径, 分别精确至 0.1 cm 和 0.01 mm。之后再分别从每重复小区随机选取 10 株生长正常的容器苗进行菌根侵染率、生物量和养分测定。随机选取容器苗细根根段, 以形成外生菌根的根段数占观察的总根段数的百分比作为菌根侵染率^[16]。将植株叶、茎和根各器官置于 105℃ 烘箱中杀青 30 min, 再在 68℃ 下烘至恒质量, 测定各器官干质量, 各器官质量之和为整株干质量。称取各器官干样, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮, 分别采用凯氏定氮法和 ICP-OES 光谱仪 (Vista-Mpx, 美国 Varian 公司) 测定其磷含量。

高径比 = 苗高/地径

根冠比 = 根干质量/(叶干质量 + 茎干质量)

整株 P 含量 = (叶磷含量 × 叶干质量 + 茎磷含量 × 茎干质量 + 根磷含量 × 根干质量) / (叶干质量 + 茎干质量 + 根干质量)

叶 (茎或根) P 吸收量 = 叶 (茎或根) P 含量 × 叶 (茎或根) 干质量

整株 P 吸收量 = 整株 P 含量 × (叶干质量 + 茎干质量 + 根干质量)

采用 Excel 2017 软件进行数据处理及相关图形制作, 利用 SPSS 20.0 软件进行多因素方差分析和 Duncan's 检验 ($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 磷添加和接种菌根菌对马尾松不同家系容器苗生长的影响

方差分析表明 (表 1), 磷添加对马尾松容器

苗生长有显著影响 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$), 3 个家系苗高和地径高 P 水平较低 P 水平分别增加 8.70% 和 21.73%, 高径比降低 10.62%。接种菌根菌对马尾松容器苗苗高和高径比无显著影响, 对地径有显著影响 ($P < 0.05$), 接种后 3 个家系苗高和地径较不接种增加 2.34% 和 6.40%, 高径比降低 4.09%。菌根 × 家系的交互作用显著影响马尾松容器苗地径生长 ($P < 0.05$)。磷添加 × 菌根、磷添加 × 家系和磷添加 × 菌根 × 家系的交互作用对马尾松容器苗生长指标无显著影响。

表 1 马尾松容器苗生长和干质量方差分析

Table 1 Variance analysis of growth and dry matter of masson pine container seedlings

指标 Index	低磷 Low P		高磷 High P		F值 F value						
	NM	LM	NM	LM	磷添加 P addition (P)	菌根 Mycorrhizal (M)	家系 Family (F)	P × M	P × F	M × F	P × M × F
苗高 Seedling height/cm	18.250 ± 0.741	19.489 ± 1.232	20.678 ± 1.471	20.433 ± 1.483	8.851**	0.210	0.825	0.953	0.759	2.992	1.736
地径 Caliper/mm	2.939 ± 0.247	3.263 ± 0.204	3.726 ± 0.332	3.859 ± 0.249	66.071***	5.910*	2.745	0.620	0.007	3.730*	2.028
高径比 height-diameter ratio	62.402 ± 4.716	59.772 ± 2.708	55.712 ± 3.841	53.192 ± 5.625	22.023***	3.663	1.722	0.036	0.372	0.251	1.261
叶干质量 Leaf dry matter/(g·plant ⁻¹)	0.674 ± 0.086	0.888 ± 0.104	1.266 ± 0.178	1.473 ± 0.151	154.656***	18.330***	0.188	0.042	1.057	2.583	0.290
茎干质量 Stem dry matter/(g·plant ⁻¹)	0.360 ± 0.041	0.454 ± 0.073	0.590 ± 0.095	0.692 ± 0.100	71.624***	10.687**	0.910	0.432	0.794	5.154*	1.907
根干质量 Root dry matter/(g·plant ⁻¹)	0.309 ± 0.047	0.341 ± 0.052	0.391 ± 0.077	0.503 ± 0.094	25.296***	7.166*	8.653**	6.157*	2.159	0.499	1.719
整株干质量 Whole plant dry matter/(g·plant ⁻¹)	1.342 ± 0.157	1.683 ± 0.192	2.247 ± 0.323	2.668 ± 0.236	126.454***	17.980***	1.592	0.993	1.473	2.969	0.865
根冠比 Root-shoot ratio	0.299 ± 0.033	0.256 ± 0.039	0.210 ± 0.029	0.233 ± 0.047	31.783***	1.830	9.995***	12.401	0.414	1.166	0.594

注: ***, **和*表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著。下同。

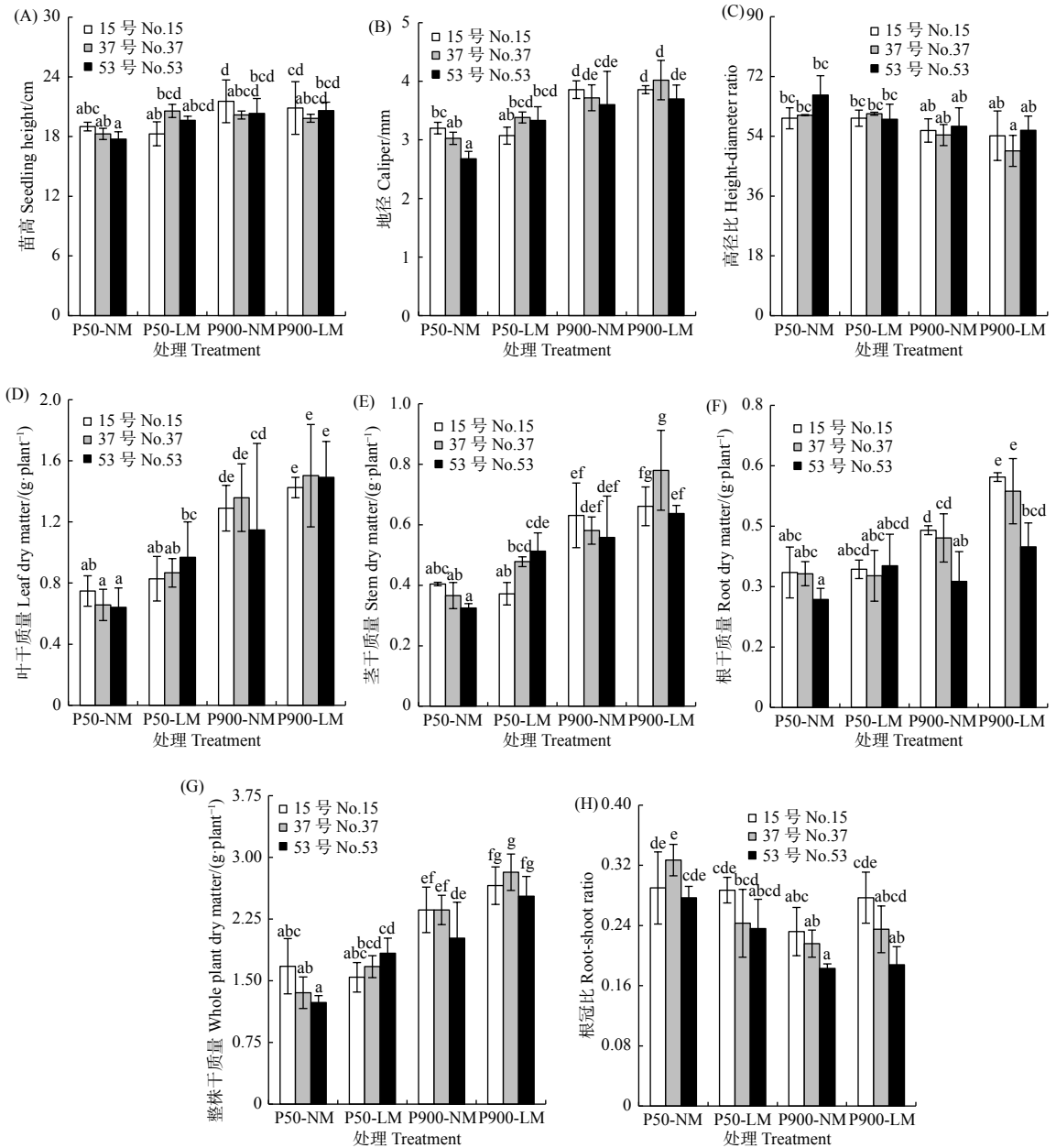
Note: ***, **, and * indicate significant in $P < 0.001$, $P < 0.01$ and $P < 0.05$. The same below.

不同 P 添加水平下, 除 53 号家系地径低 P 水平下接种菌根菌后增加 24.51% 外 (图 1B, $P < 0.05$), 3 个家系接种前后苗高、地径和高径比无显著差异。NM 处理下, P 增加后 53 号家系苗高和地径增长最大, 高 P 水平较低 P 水平分别增加 14.66% 和 34.59% (图 1A、B, $P < 0.05$)。LM 处理下, 15 号家系苗高和地径增长最大, 高 P 水平较低 P 水平分别增加 14.23% 和 25.51% (图 1A、B, $P < 0.05$)。NM 处理下 3 个家系地径均表现为高 P > 低 P ($P < 0.05$), LM 处理下仅 15 号家系地径高 P > 低 P (图 1B, $P < 0.05$), 表明接种菌根能缩小马尾松容器苗不同 P 水平下地径的生长差异。3 个家系高径比均为高 P < 低 P (图 1C), 表明增施磷肥有利

于促进苗木均匀生长, 提高马尾松容器苗质量。

2.2 磷添加和接种菌根菌对马尾松不同家系容器苗干质量的影响

方差分析表明 (表 1), 磷添加和接种菌根菌对马尾松容器苗干质量积累均有显著影响 ($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 或 $P < 0.001$)。高 P 水平下 3 个家系整体叶、茎和根干质量及整株干质量较低 P 水平分别增加 74.46%、56.55%、37.05% 和 61.62%, 根冠比降低 19.82%。接种菌根菌后 3 个家系叶、茎和根干质量及整株干质量较不接种分别增加 21.24%、20.11%、19.96% 和 20.69%, 根冠比降低 3.87% (其中低 P 水平降低 14.32%, 高 P 水平增加 10.94%)。不同家系间根干质量 ($P < 0.01$) 和根冠比 ($P < 0.001$)



注: P50-NM、P50-LM、P900-NM 和 P900-LM 分别表示低 P 水平下不接种、低 P 水平下接种、高 P 水平下不接种和高 P 水平下接种松乳菇; 柱上不同小写字母表示不同磷添加和接种菌根菌处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: P50-NM indicate low P level and non-inoculation of *L. delicosus*. P50-LM indicate low P level and inoculation of *L. delicosus*. P900-NM indicate high P level and non-inoculation of *L. delicosus*. P900-LM indicate high P level and inoculation of *L. delicosus*. Different lowercase letters above the bars indicate the significant difference among different phosphorus addition and mycorrhizal fungi treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 磷添加和接种菌根菌对马尾松容器苗生长和干质量的影响

Fig. 1 Effects of phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi on the growth and dry matter of masson pine container seedlings

有显著差异, 15 号家系平均根干质量 ($0.423 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$) 和根冠比 (0.272) 较 37 号家系分别高 4.70% 和 6.67%, 较 53 号家系分别高 27.03% 和 23.08%。磷添加 \times 菌根的交互作用显著影响马尾松容器苗根干质量 ($P < 0.05$), 菌根 \times 家系的交互作用显著影响马尾松容器苗茎干质量 ($P < 0.05$)。磷添加 \times 家系

和磷添加 \times 菌根 \times 家系的交互作用对马尾松容器苗干质量无显著影响。

不同 P 添加水平下, 3 个家系接种后干质量总体呈增加趋势, 根冠比低 P 水平呈下降趋势, 高 P 水平呈增加趋势。低 P 水平下 LM 处理, 53 号家系叶、茎和根干质量及整株干质量增加最大, 分

别较 NM 处理增加 51.17%、57.85%、31.34% 和 48.50% (图 1D、E、F、G, $P < 0.05$)。高 P 水平下 37 号家系叶干质量累积增长最大, NM 和 LM 处理分别较低 P 增长 106.85% 和 73.36% (图 1D, $P < 0.05$)。3 个家系根冠比均为高 P < 低 P (图 1H), 且在 NM 处理时差异显著, 说明施磷肥可调节马尾松容器苗干质量的分配, 提高地上部分干质量的累积, 且接种菌根菌可以缩小容器苗不同 P 添加水平下干质量分配的差异。

2.3 磷添加和接种菌根对马尾松不同家系容器苗磷吸收利用的影响

方差分析表明 (表 2), 磷添加对马尾松容器苗各器官及整株 P 含量和吸收量有极显著影响 ($P < 0.001$), 高 P 水平下 3 个家系整体叶、茎、根及整株 P 含量较低 P 水平分别增加 35.65%、20.62%、16.52% 和 30.25%, 叶、茎、根及整株 P 吸收量分别增加 138.65%、90.89%、60.10% 和 112.08%。接

种菌根菌对马尾松容器苗 P 含量无显著影响, 但显著增加 P 吸收量 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.001$)。接种后 3 个家系叶、根及整株 P 含量较不接种分别降低 3.72%、4.08% 和 3.23%, 茎 P 含量增加 0.38%; 叶、茎、根及整株 P 吸收量较不接种分别增加 16.85%、22.09%、17.42% 和 18.08%。不同家系间根 P 含量 ($P < 0.01$) 和吸收量 ($P < 0.05$) 有显著差异, 53 号家系根 P 含量和 37 号家系根 P 吸收量最高, 分别为 $1.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。磷添加 \times 菌根的交互作用显著影响马尾松容器苗茎、根和整株 P 吸收量 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.001$), 磷添加 \times 家系的交互作用显著影响根 P 含量和吸收量及整株 P 吸收量 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 磷添加 \times 菌根 \times 家系的交互作用显著影响叶 P 含量和根 P 吸收量 ($P < 0.05$)。菌根 \times 家系的交互作用对马尾松容器苗磷吸收利用无显著影响。

表 2 马尾松容器苗磷吸收利用方差分析

Table 2 Variance analysis of phosphorus absorption and utilization of masson pine container seedlings

指标 Index	低磷 Low P		高磷 High P		F值 F value						
	NM	LM	NM	LM	磷添加 P addition (P)	菌根 Mycorrhizal (M)	家系 Family (F)	P \times M	P \times F	M \times F	P \times M \times F
叶P含量 Leaf P content/(mg·g ⁻¹)	2.191 \pm 0.301	2.003 \pm 0.284	2.838 \pm 0.210	2.806 \pm 0.271	81.774***	2.089	1.087	1.083	0.352	2.413	3.692*
茎P含量 Stem P content/(mg·g ⁻¹)	1.774 \pm 0.300	1.619 \pm 0.274	1.959 \pm 0.243	2.100 \pm 0.163	18.995***	0.025	0.967	2.514	0.029	1.998	2.194
根P含量 Root P content/(mg·g ⁻¹)	1.804 \pm 0.212	1.584 \pm 0.384	1.940 \pm 0.232	1.999 \pm 0.167	19.229***	0.884	9.223**	3.321	3.453*	1.084	2.100
整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	1.990 \pm 0.179	1.810 \pm 0.194	2.452 \pm 0.130	2.464 \pm 0.164	120.227***	2.063	0.826	2.760	0.741	1.916	3.195
叶P吸收量 Leaf P uptake/(mg·plant ⁻¹)	1.473 \pm 0.268	1.769 \pm 0.272	3.586 \pm 0.540	4.133 \pm 0.567	232.119***	7.211*	1.732	1.197	1.533	0.638	0.824
茎P吸收量 Stem P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.632 \pm 0.081	0.727 \pm 0.124	1.147 \pm 0.186	1.443 \pm 0.130	156.599***	14.522***	0.073	5.423*	0.380	1.471	0.797
根P吸收量 Root P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.556 \pm 0.107	0.538 \pm 0.147	0.753 \pm 0.146	1.004 \pm 0.199	67.985***	6.925*	4.221*	15.308***	7.912**	1.717	4.658*
整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	2.660 \pm 0.314	3.033 \pm 0.368	5.485 \pm 0.670	6.580 \pm 0.759	339.861***	15.782***	2.766	6.159*	3.404*	1.557	1.562

低 P 水平下, 除 15 号家系根 P 含量 LM 处理较 NM 处理低 31.585% 外 (图 2C, $P < 0.05$), 3 个家系其余 P 含量和吸收量无显著差异。15 号家系低 P 水平下 LM 处理显著降低了其根 P 含量, 说明养分不足时接种菌根菌有助于提高其养分利用效率。高 P 水平下, 53 号家系茎 P 吸收量和 15 号家系根 P 吸收量 LM 处理较 NM 处理分别高 25.14% 和 36.48%, 37 号家系叶、茎、根 P 吸收量 LM 处

理较 NM 处理分别高 27.20%、42.45% 和 33.30% (图 2E、F、G, $P < 0.05$), 表明菌根处理对高 P 水平下 P 吸收量尤其 37 号家系的 P 吸收量有显著促进作用。

无论是否接种菌根菌, 15 号和 37 号家系叶、茎、根及整株 P 含量均表现为高 P > 低 P, 53 号家系除根 P 含量在 LM 处理下高 P 水平较低 P 水平降低 0.505% 外, 其余均表现为高 P > 低 P (图 2A、

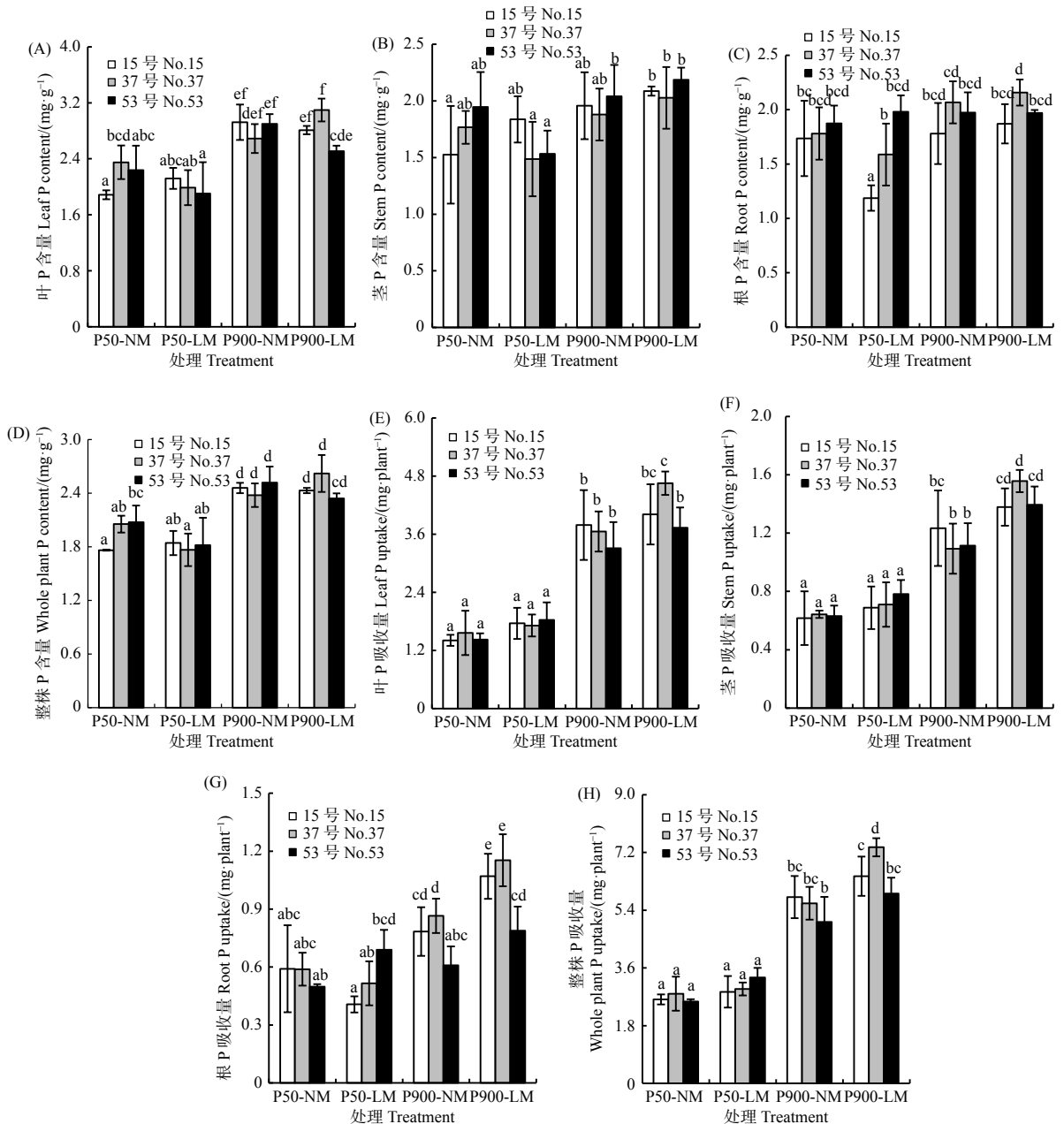


图 2 磷添加和接种菌根菌对马尾松容器苗磷吸收利用的影响

Fig. 2 Effects of phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi on the phosphorus absorption and utilization of masson pine container seedlings

B、C、D)。37号家系 LM 处理下叶、茎及整株 P 含量增长最大, 高 P 水平较低 P 水平分别增长 55.86%、36.32% 和 48.33% ($P < 0.05$); 15号家系 LM 处理下根 P 含量增长最大, 高 P 水平较低 P 水平增长 57.54% ($P < 0.05$)。无论是否接种菌根菌, 3 个家系叶、茎、根及整株 P 吸收量均表现为高 P > 低 P (图 2E、F、G、H)。15号家系 NM 处理下叶 P 吸收量和 LM 处理下根 P 吸收量增长最大, 高 P 水平较低 P 水平分别增长 168.72% 和 162.90%

(图 2E、G, $P < 0.05$), 37号家系 LM 处理下茎 P 吸收量和整株 P 吸收量增长最大, 高 P 水平较低 P 水平分别增长 119.30% 和 150.19% (图 2F、H, $P < 0.05$)。

2.4 接种前后不同家系容器苗生长和干质量与磷含量和吸收量的相关性

相关性分析表明 (表 3), 接种前 37号家系容器苗生长和干质量与整株 P 含量和吸收量相关性较高, 其次是 15 号和 53 号家系。接种后 15 号家

系容器苗生长和干质量与整株 P 含量和吸收量相关性增加, 37 号和 53 号则减弱, 即 3 个家系表现出了不同的响应特征。NM 处理下, 37 号和 53 号家系苗高、地径、叶干质量、茎干质量和根冠比与整株 P 吸收量有显著相关性, 表明 P 吸收量对 2 个家系干质量累积影响较大。LM 处理下, 15 号家系茎和根干质量与整株 P 含量和吸收量相关性增加 ($P < 0.01$), 37 号和 53 号家系各指标与 P 含量和吸收量相关性降低, 表明接种菌根菌提高了 15 号

家系干质量累积对 P 含量和吸收量的响应, 降低了 37 号和 53 号家系对 P 含量和吸收量的响应。此外, 37 号家系在 NM 处理下高径比与 P 含量和吸收量呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著负相关性 ($P < 0.01$), 在 LM 处理下与 P 吸收量呈极显著负相关 ($P < 0.05$), 表明不接种时, 37 号家系 P 含量越高高径比越小, 苗木形态发育越好, 而无论是否接种菌根菌, 37 号家系 P 吸收量越高, 苗木形态发育越好。

表 3 马尾松容器苗生长和干质量与 P 含量和吸收量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between growth and dry matter and phosphorus content and uptake of masson pine container seedlings

家系 Family	菌根处理 Mycorrhiza treatment	指标 Index	苗高 Seedling height/ cm	地径 Caliper/ mm	高径比 Height- diameter ratio	叶干质量 Leaf dry matter/ (g·plant ⁻¹)	茎干质量 Stem dry matter/ (g·plant ⁻¹)	根干质量 Root dry matter/ (g·plant ⁻¹)	整株干质量 Whole plant dry matter/ (g·plant ⁻¹)	根冠比 Root-shoot ratio
15	NM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	0.616	0.932*	-0.616	0.919*	0.828	0.853	0.910*	-0.698
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.782	0.989**	-0.458	0.992**	0.946*	0.864	0.989**	-0.774
	LM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	0.651	0.997**	-0.483	0.928**	0.956**	0.977**	0.962**	-0.317
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.665	0.982**	-0.457	0.982**	0.981**	0.975**	0.997**	-0.445
37	NM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	0.814*	0.899*	-0.890*	0.918**	0.807	0.717	0.889*	-0.905*
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.945**	0.985**	-0.925**	0.998**	0.951**	0.875*	0.993**	-0.937**
	LM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	-0.353	0.809	-0.797	0.867*	0.707	0.775	0.834*	-0.045
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	-0.598	0.885*	-0.922**	0.979**	0.869*	0.903*	0.967**	-0.044
53	NM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	0.462	0.450	-0.413	0.523	0.471	-0.060	0.455	-0.891*
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.934**	0.922**	-0.780	0.982**	0.964**	0.692	0.966**	-0.909*
	LM	整株P含量 Whole plant P content/(mg·g ⁻¹)	0.675	0.326	0.012	0.657	0.478	-0.071	0.569	-0.830*
		整株P吸收量 Whole plant P uptake/(mg·plant ⁻¹)	0.543	0.660	-0.433	0.939**	0.802	0.386	0.913*	-0.703

注: 表中数值均为 F 值, **和*分别表示 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著。

Note: the values in the table are F values. ** and * indicate significant in $P < 0.01$ and $P < 0.05$.

3 讨论

磷能促进植物幼苗生长和生物量的积累, 提高幼苗叶片磷含量, 降低根冠比^[17-18], 基质磷浓度能显著影响植株对磷元素的吸收利用效率^[19]。本研究结果中磷添加对马尾松容器苗生长和干质量累积及各器官 P 含量和吸收量均有促进作用, 且高 P 水平显著提高了马尾松容器苗叶和茎的干质量累积、P 含量和吸收量。同时, 高 P 处理时根冠比较低,

说明磷添加可以调节马尾松容器苗干质量的分配, P 缺乏时 P 主要供根系生长发育, P 充足时 P 更多是促进地上部分生长, 与磷添加倾向于降低植物的地下生产力和地下部分与地上部分生物量之比(即根冠比)结论一致^[20-23]。接种菌根菌能显著促进马尾松苗木生长, 苗高、地径和干质量积累量均有显著提高^[15]。本研究 3 个家系菌根侵染率均在 50% 左右, 相对于磷添加, 接种菌根菌对容器苗影响较

小,仅地径、各器官干质量和P吸收量有所提高。接种菌根菌后,地径和根冠比高P与低P水平差异变化不显著,说明接种菌根菌可减小不同磷添加水平下地径和根冠比的差异;同时,对3个家系整体生长指标标准差的分析表明,接种后苗高、地径和高径比的标准差较不接种分别降低32.80%、21.42%和3.12%,即接种菌根菌减小了不同家系间的生长差异,增强了马尾松容器苗的整齐一致性。

本研究磷添加和接种菌根菌均能促进马尾松容器苗的生长,且磷添加×接种菌根菌对茎、根和整株P吸收量有显著促进作用,表明接种菌根菌配合无机肥配水喷洒能发挥一定的菌根效应。当植株生长受到磷限制时,磷添加会促进植株生长和养分吸收率,而当植株所处环境P含量达到饱和时,植株生长会随磷添加量的增加而受到抑制,单位根干物质对营养物质的吸收降低,同时减少甚至消除菌根效应^[24-26]。本研究高P水平下菌根处理促进容器苗生长的效果显著,没有表现出抑制效应,可能因为P添加量分次喷施,单次喷施的P含量并不高,一定程度上减少了消除菌根效应的发生。有研究表明缺磷条件下P添加对ECM树种的生长表现为抑制^[9],本研究低P水平下马尾松容器苗生长和干质量积累在接种菌根菌后未表现出明显的受抑制现象,可能是设置的低磷水平相比缺磷条件还偏高。

通常情况下,植物生长的遗传效应大于水肥等环境效应^[27]。本研究3个家系容器苗的磷添加效应大于家系效应,造成该现象的原因可能是马尾松容器苗早期生长更受制于环境养分状况,家系效应可能在后期的生长中才有更明显的优势^[11],该现象也表明苗期磷元素养分供应水平对优质容器苗培育至关重要。3个家系生长及干质量积累对P含量和吸收量的响应不同,这主要与3个家系母本和父本种源差异有关。来自广西、贵州和江西的种源耐低磷能力较弱,来自浙江和广东的种源相对耐低磷,且广东种源为磷肥敏感性较低的优良种源,具有生长指标及树干生物量增长快速的特点^[12,28-29],对应本研究3个家系苗高和地径来看,具有贵州和广西遗传背景的53号家系对磷添加最敏感,不接种处理下P增加后苗高和地径增加显著。此外,具有江西和广东遗传背景的15号家系对接种菌根菌最敏感,接种后苗高和地径高P水平较低P水平增加显著;37号家系仅不接种处理下P增加后地径显著增加,表现较均衡。

4 结论

施用磷肥、接种菌根菌和应用良种均为实现马尾松容器苗精细化培育的重要技术途径,本研究中,磷添加和接种菌根菌均能促进马尾松容器苗的生长,且不同家系对磷添加和接种菌根菌的响应不同。总体而言,磷添加对容器苗生长影响较大,接种菌根菌对容器苗生长影响相对较小,但接种菌根菌可减小不同磷添加水平下地径和根冠比的差异,同时减小不同家系间的生长差异,这对培育统一规格的马尾松容器苗具有一定意义。育苗工作中可根据家系对磷肥的不同响应施用不同量的磷肥,同时通过接种菌根菌缩小苗木间的生长差异并提高磷肥利用效率,以进一步提高马尾松容器苗精细化培育水平。

参考文献:

- [1] 林郑和,陈荣冰,郭少平.植物对缺磷的生理适应机制研究进展[J].作物杂志,2010,138(5):5-9.
- [2] 鲁如坤.我国土壤氮、磷、钾的基本状况[J].土壤学报,1989,26(3):280-286.
- [3] 薛小平,杨勇,黄建国.外生菌根促进植物磷素营养研究进展[J].中国食用菌,2006,25(6):3-4.
- [4] 薛英龙,李春越,王苻蓉,等.丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制[J].水土保持学报,2019,33(6):10-20.
- [5] 王艺,丁贵杰.外生菌根对马尾松幼苗生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2011,31(4):74-78.
- [6] 王艺,丁贵杰.外生菌根对马尾松幼苗生长、生理特征和养分的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):97-102.
- [7] Thomas R Q, Canham C D, Weathers K C, et al. Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(1): 13-17.
- [8] Averill C, Dietze M C, Bhatnagar J M. Continental-scale nitrogen pollution is shifting forest mycorrhizal associations and soil carbon stocks[J]. Global Change Biology, 2018, 24(9): 4544-4553.
- [9] Deforest J L, Snell R S. Tree growth response to shifting soil nutrient economy depends on mycorrhizal associations[J]. New Phytologist, 2020, 225(6): 2557-2566.
- [10] 石兆勇,刘德鸿,王发园,等.菌根类型对森林树木净初级生产力的影响[J].生态环境学报,2012,21(3):404-408.
- [11] 张东北,王秀花,周生财,等.不同家系马尾松容器苗对基质配比及控释肥的响应[J].浙江农林大学学报,2019,36(5):1044-1050.
- [12] 赵颖,周志春,吴吉富,等.马尾松优良种源对磷肥的生长反应和肥效持续性[J].林业科学,2007,43(10):64-70.
- [13] 谌红辉,温恒辉.马尾松人工幼林施肥肥效与增益持续性研究[J].林业科学研究,2000,13(6):652-658.

- [14] 湛红辉, 温恒辉. 马尾松人工中龄林施肥肥效与增益持续性研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14 (5): 533-539.
- [15] 陈连庆, 裴致达. 马尾松容器育苗菌根化对苗木生长及基质的影响[J]. 林业科学研究, 1995, 8 (1): 44-47.
- [16] 阎秀峰, 王 琴. 两种外生菌根真菌在辽东栎幼苗上的混合接种效应[J]. 植物生态学报, 2004, 28 (1): 17-23.
- [17] 王 刚, 郑苍松, 李鹏程, 等. 土壤有效磷含量对棉花幼苗干物质积累和碳氮代谢的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28 (6): 609-618.
- [18] 赵 霞, 徐大平, 刘小金, 等. 磷素营养对降香黄檀幼苗生长及叶片养分状况的影响[J]. 植物研究, 2018, 38 (2): 218-224.
- [19] 李诗奇, 李 政, 王仙宁, 等. 植物对氮磷元素吸收利用的生理生态学过程研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51 (3): 151-157.
- [20] Janssens I A, Dieleman W, Luysaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [21] Lu M, Zhou X H, Luo Y Q, *et al.* Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1-2): 234-244.
- [22] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 934-943.
- [23] Peng Y F, Yang Y H. Allometric biomass partitioning under nitrogen enrichment: evidence from manipulative experiments around the world[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 664-676.
- [24] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 238-253.
- [25] Azcón R, Ambrosano E, Charest C. Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorus and nitrogen concentration[J]. *Plant Science*, 2003, 165(5): 1137-1145.
- [26] 翟占伟, 龚吉蕊, 罗亲普, 等. 氮添加对内蒙古温带草原羊草光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2017, 41 (2): 196-208.
- [27] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究[J]. 林业科学, 2005, 41 (4): 25-30.
- [28] 崔博文, 乔 光, 范付华, 等. 不同种源马尾松种质耐低磷的主成分与灰色关联度分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39 (8): 49-56.
- [29] 张 振, 金国庆, 周志春, 等. 马尾松广东种源与湖北种源的人工林生物量分配差异[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36 (2): 271-278.

Effects of Phosphorus Addition and Inoculation of Mycorrhizal Fungi on the Growth and Phosphorus Utilization of Masson Pine Container Seedlings from Different Families

HUANG Sheng-yi¹, WU Tong-gui¹, CHU Xiu-li², WANG Bin¹,
WANG Xiu-hua³, ZHANG Dong-bei³, ZHOU Zhi-chun¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Tree Breeding, Masson Pine Engineering Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Shanghai Botanical Garden, Shanghai 200000, China; 3. Qingyuan County Experimental Forest Farm, Qingyuan 323800, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To study the differences of growth and phosphorus absorption and utilization of second-generation families of masson pine (*Pinus massoniana*) container seedlings with different genetic background under the interaction of different phosphorus addition amount and inoculation of mycorrhizal fungi so as to provide guidance for precise cultivation of high-quality *P. massoniana* container seedlings. [Method] Three second-generation families of *P. massoniana* with different genetic backgrounds were used as materials to observe and analyze the differences in growth and phosphorus utilization of different families of *P. massoniana* under two phosphorus addition levels (low P: 50 g·m⁻³ substrate, high P: 900 g·m⁻³ substrate) in two plots inoculated with mycorrhizal fungi and without inoculation. [Result] The results showed that phosphorus addition promoted the growth, P content and P uptake in all organs of *P. massoniana* container seedlings from three families. The seeding height, caliper, whole plant dry matter, whole plant P content and P uptake of container seedlings with high P level were 8.70%, 21.73%, 61.62%, 30.25% and 112.08% higher than those with low P level, while the height-diameter ratio and root-shoot ratio were 10.62% and 19.82% lower. After inoculation, the seedling height, caliper, whole plant dry matter and whole plant P uptake increased by 2.34%, 6.40%, 20.69% and 18.08%, while the height-diameter ratio, root-shoot ratio and whole plant P content decreased by 4.09%, 3.87% and 3.23% respectively. Mycorrhizal fungi could reduce the differences of caliper and root-shoot ratio among different phosphorus addition levels, and the growth differences among families. The interaction of phosphorus addition and mycorrhizal fungi significantly promoted the P uptake of container seedlings stem and root, and mycorrhizal fungi promoted the growth of *P. massoniana* container seedlings more significantly at high P levels. The growth responses of different families to different phosphorus addition and mycorrhizal treatments were different. The effect of phosphorus addition on family No. 15 was the most significant, and that of mycorrhizal inoculation on family No. 53 was the most significant. Family No.37 was more balanced. [Conclusion] The effect of phosphorus addition is more obvious than that of families and mycorrhizal treatments. In order to further improve the cultivation level of *P. massoniana* container seedlings, reasonable fertilization should be carried out according to the different responses of three families to phosphorus fertilizer, and the P utilization efficiency can be improved by inoculating mycorrhizal fungi.

Keywords: *Pinus massoniana* family; container seedlings; phosphorus addition; mycorrhizal fungi

(责任编辑: 金立新)