

马尾松容器苗生长和养分性状对磷添加和接种菌根菌的响应及关联

孙 薇¹, 王 斌^{2*}, 楚秀丽³, 王秀花⁴, 张东北⁴, 吴小林⁴, 周志春²

(1.浙江省临海市自然资源和规划局, 浙江 临海 317099; 2.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, 国家林业和草原局马尾松工程技术研究中心, 浙江 杭州 311400;
3.上海植物园, 上海 200231; 4.浙江省庆元县实验林场, 浙江 庆元 323800)

摘要:【目的】开展马尾松容器苗添加不同水平磷(P)及接种菌根菌互作试验,明确添加不同水平P与接种菌根菌的互作效应。【方法】采用裂区试验设计,主区为菌根菌处理,分为接种与不接种2个处理,接种处理为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;副区为添加P处理,设置以P为主的水溶肥添加梯度共7个水平,样地P添加量介于50~600 g/m³。于7—10月分15次等时间间隔将不同梯度水溶肥溶于水后均匀喷洒在苗木上,分析苗木生长性状和氮(N)、P吸收利用与添加P量及菌根菌的关系。【结果】接种菌根菌后,1年生马尾松容器苗平均苗高、地径、总生物量和根系直径等生长指标比不接种分别增加了9.87%、3.35%、41.50%和12.41%,N、P吸收量和利用指数等养分指标分别增加了5.05%、25.03%、100.36%和70.53%;高径比、总根长、N和P含量分别降低了5.98%、22.47%、24.97%和11.26%,除苗高和N吸收量外各生长和养分性状指标接种前后存在显著差异。随P添加量增加,接种前后马尾松容器苗地径、整株P吸收量均呈增加趋势,高径比呈下降趋势,整株N和P含量呈先增加后降低趋势。不同添加P水平马尾松容器苗地径、总生物量、根系直径、整株P吸收量、N和P利用指数均为接种大于不接种;而高径比、总根长和整株P含量均为不接种大于接种。接种菌根菌和添加P对马尾松容器苗生长和养分性状无显著的互作效应。接种后马尾松容器苗生长性状对整株N含量的变化更敏感,对N、P吸收量和利用指数的响应进一步增强。【结论】接种菌根菌(松乳菇菌)可与马尾松容器苗建立较好的协同共生关系,不仅促进了马尾松容器苗的生长,而且提高了N、P养分利用效率。接种后苗木的高径比降低,N、P利用指数增加,能以较低的营养浓度进行正常的生长和代谢,有助于培育优质马尾松苗木和节约育苗成本。

关键词: 马尾松; 容器苗; 磷添加; 菌根菌; 松乳菇; 生长性状; 养分利用效率

中图分类号: S718

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)01-0226-08



Response and association of the growth and nutrient traits of *Pinus massoniana* container seedlings to phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi

SUN Wei¹, WANG Bin^{2*}, CHU Xiuli³, WANG Xiuhua⁴, ZHANG Dongbei⁴,
WU Xiaolin⁴, ZHOU Zhichun²

(1. Linhai City Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang Province, Linhai 317099, China; 2. 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, China; 3. Shanghai Botanical Garden, Shanghai 200231, China;
4. Qingyuan County Experimental Forest Farm of Zhejiang Province, Qingyuan 323800, China)

Abstract: 【Objective】The aim of this study was to determine the influence of varying phosphorus concentrations and

收稿日期 Received: 2021-11-03

修回日期 Accepted: 2022-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0600301)。

第一作者: 孙薇(lhsunwei@163.com), 高级工程师。*通信作者: 王斌(ylwangbin@sina.com), 副研究员。

引文格式: 孙薇, 王斌, 楚秀丽, 等. 马尾松容器苗生长和养分性状对磷添加和接种菌根菌的响应及关联[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 226-233. SUN W, WANG B, CHU X L, et al. Response and association of the growth and nutrient traits of *Pinus massoniana* container seedlings to phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 226-233. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202111008.

mycorrhizal fungi on *Pinus massoniana* container seedlings.【Method】A split-plot experimental design was adopted. The main plot was the mycorrhizal fungi treatment with two treatment levels: inoculation and non-inoculation. The inoculation treatment involved placing 0.3 g of solid preparation made of vermiculite and *Lactarius deliciosus* mycelium suspension under the planting hole during sowing. The sub-plot was the phosphorus addition treatment, which set a P-based water-soluble fertilizer of seven treatment levels. The amount of phosphorus added ranged between 50 and 600 g/m³. From July to October, water-soluble fertilizers of different gradients were dissolved in water for 15 times at equal intervals, and then evenly sprayed on the seedlings. Once this was done, growth was analyzed in relation to N and P uptake, the use of phosphorus and mycorrhizal fungi.【Result】After inoculation with mycorrhizal fungi, compared with the non-inoculation treatment, the average seedling height, caliper, total biomass and root diameter of 1-year-old *P. massoniana* container seedlings increased by 9.87%, 3.35%, 41.50% and 12.41%, respectively, whereas nutrient indices such as N and P uptake and utilization index increased by 5.05%, 25.03%, 100.36% and 70.53%, respectively. The height-to-diameter ratio, total root length, and N and P contents decreased by 5.98%, 22.47%, 24.97%, and 11.26%, respectively. There were significant differences in growth and nutrient traits, except for seedling height and N uptake, before and after inoculation. Along with the increase in P content, the caliper and P uptake of the whole plant increased before and after inoculation, the height-diameter ratio decreased, and the N and P content of the whole plant initially increased and then decreased. For the caliper, total biomass, root diameter, P uptake of the whole plant, and N and P utilization index of different P addition gradients, the values of the inoculated treatment were greater than those of the non-inoculated treatment. As for the height-diameter ratio, total root length, and P content of the whole plant, the non-inoculated values were greater than the inoculated values. Inoculation with mycorrhizal fungi and P addition had no significant interaction effect on the growth and nutrient traits of *P. massoniana* container seedlings. After inoculation, the growth traits of *P. massoniana* container seedlings were more sensitive to changes in N content in the whole plant, and the response to N and P uptake and utilization indices was further enhanced.【Conclusion】Inoculation of mycorrhizal fungi (*L. deliciosus*) can establish a good synergistic symbiotic relationship with container seedlings of *P. massoniana*, which not only promoted the growth of *P. massoniana* container seedlings but also improved the nutrient utilization efficiency of N and P. After inoculation, the height-diameter ratio of seedlings decreased, their utilization index of N and P increased, and the seedlings could experience normal growth and metabolism under low nutrient concentrations, which is vital for cultivating high-quality seedlings while reducing seedling cost.

Keywords: *Pinus massoniana*; container seedling; phosphorus addition; mycorrhizal fungi; *Lactarius deliciosus*; growth trait; nutrient use efficiency

在影响植物生长的环境要素中,土壤养分[氮(N)和磷(P)]及土壤微生物对植物生长起着至关重要的作用^[1-2]。土壤中某些真菌与植物根的共生体——菌根,可以扩大植物根系吸收面,增加对原根毛吸收范围外的元素(特别是P)的吸收能力。对紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和花生(*Arachis hypogaea*)等植物的研究表明,适宜的P添加量可显著影响植物的生长性状^[3-4],低P条件下接种外生菌根菌能促进植物对养分的吸收^[5-6]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是营建针阔混交林的首选树种,而南方森林土壤有效磷缺乏成为影响马尾松生长的主要限制因子,有关学者针对性地开展了不同磷环境下马尾松幼苗的生长表现与适应机制研究^[7-9]。同时,马尾松是外生菌根专性树种,菌根对马尾松生长发育有着重要意义。前期研究证实,接种彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)对马尾松幼树生长有显著增益^[10]。然而关于不同磷环境下菌根作用的有效性,及其对植物生长和养分性

状的影响研究甚少。幼苗是植物生长历程中最敏感的阶段,其功能性状在适应环境因子的变化过程中表现出一定的可塑性,对于研究植物在养分环境下的适应机制具有指示性^[11-12]。本研究以1年生马尾松容器苗为对象,研究其在不同P添加量及接种菌根菌相互作用下的生长性状及氮、磷养分利用效益差异,为优质马尾松容器苗培育提供理论依据。

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,海拔510 m,属亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明,年均气温17.6℃,年均降水量1721.3 mm,无霜期245 d。供试材料来源于浙江省兰溪市苗圃木荷(*Schima superba*)马尾松国家林木良种基地二代无性系种子园,选择的马尾松亲本无性系为53号

[1217(贵州)×1121(广西)]。

育苗基质为泥炭、谷壳和珍珠岩按体积比 5:3:2 配制而成。泥炭全 N、全 P 和全 K 含量分别为 14.2、0.7 和 2.7 g/kg, pH 为 5.8。谷壳和珍珠岩在育苗期间主要发挥疏松基质作用,基本无分解。育苗容器规格为 4.5 cm(直径)×10 cm(高)的无纺布网袋。所用菌种松乳菇(*Lactarius deliciosus*)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进行生物学分类鉴定。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计,主区为菌根菌处理,分为接种(编号 LM)(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成的固体菌剂 0.3 g)与不接种(编号 NM)2 个处理。副区样地为磷添加处理,在保持有效氮和有效钾添加量(添加量分别为 900 g/m³ 和 420 g/m³)相同条件下,设置 7 个磷添加水平:P1(50 g/m³)、P2(100 g/m³)、P3(150 g/m³)、P4(200 g/m³)、P5(300 g/m³)、P6(450 g/m³)和 P7(600 g/m³),每水平 80 袋,重复 3 次。不同水平无机肥通过 CH₄N₂O、KH₂PO₄、(NH₄)₂HPO₄、K₂SO₄、KNO₃与(NH₄)₂SO₄不同比例混合而成,换算后容器苗有效 N 和有效 K 平均添加量分别为 143 mg/株和 67 mg/株,有效 P 为 8~95 mg/株。马尾松种子经水选后,取大小均一、无病虫害种子,用清水浸泡 24 h 后捞出阴干,2019 年 3 月下旬对育苗容器进行点播育苗后,将盛放育苗容器的托盘置于配置有遮阳网和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)等量将以上氮、磷和钾肥溶于水后均匀喷洒在苗木上。其他苗木管理同一般生产性轻基质网

袋容器苗培育。育苗期间及时喷水和控水,保持基质湿润,每周调换各处理苗盘位置,以消除边缘效应。

1.3 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^[13]、生物量和养分测定。应用 Epson 根系扫描仪对不同处理后的根系进行扫描,获得根长和根系直径数据。苗木高径比为苗高(cm)与地径(cm)的比值,N 和 P 含量及吸收量(整株 N、P 含量)计算参照文献[14],养分利用指数采用苗木生物量占叶片养分含量来衡量^[15]。采用 EXCEL 2017 进行数据处理及相关图形制作,利用 SPSS 20.0 软件进行双因素方差分析和 Duncan's 检验(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下马尾松容器苗生长和养分性状方差分析

接种菌根菌(LM)后分析发现(表 1),1 年生马尾松容器苗平均苗高、地径、总生物量和根系直径等生长指标相比不接种(NM)分别增加了 9.87%、3.35%、41.50%和 12.41%,高径比和总根长分别降低了 5.98%和 22.47%(表 1);N、P 吸收量和利用指数等养分指标分别增加了 5.05%、25.03%、100.36%和 70.53%,N 和 P 含量分别降低了 24.97%和 11.26%(表 2)。从变异系数来看,接种前后苗高、高径比和根系直径变异相对较小(<10%),N 和 P 利用指数变异相对较大(>20%)。

表 1 马尾松容器苗生长性状及方差分析
Table 1 Variance analysis of growth traits of *Pinus massoniana* container seedlings

项目 index	苗高/cm seedling height	地径/mm caliper	高径比 height- diameter ratio	单株总生物量/ (g·株 ⁻¹) total biomass	总根长/cm total root length	根系直径 /mm root diameter
不接种 non-inoculated(NM)	18.457±1.654	3.081±0.355	60.191±4.164	1.364±0.232	158.154±32.950	0.137±0.009
接种 inoculated(LM)	19.076±1.550	3.385±0.366	56.590±3.508	1.930±0.424	122.622±14.739	0.154±0.013
接种处理(M) mycorrhizal	2.198	16.519***	12.077**	40.052***	19.557***	22.265***
F 添加 P 处理(P) P addition	4.157**	9.324***	3.595**	2.858*	1.04	1.15
M × P	0.533	0.7	0.501	1.76	0.7	0.418

注:***.P<0.001,**.P<0.01,*P<0.05.下同。The same below.

表 2 马尾松容器苗养分性状及方差分析

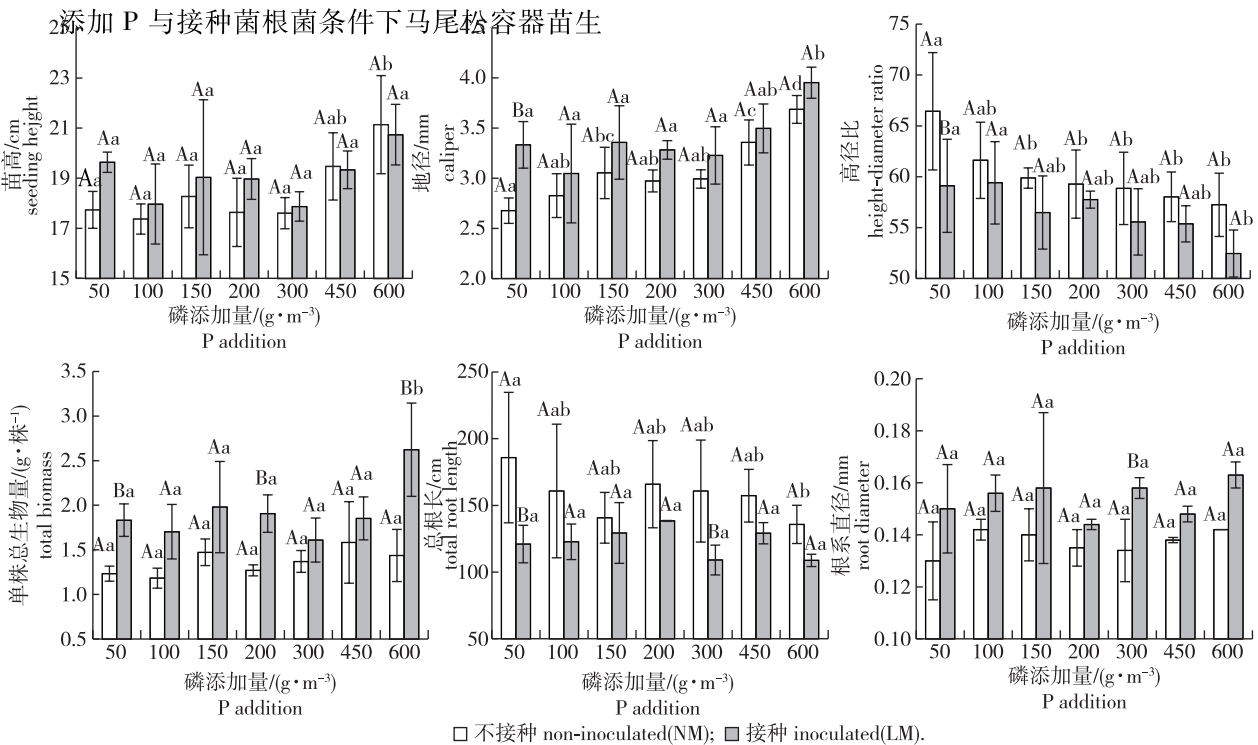
Table 2 Variance analysis of nutrient traits of *Pinus massoniana* container seedlings

项目 index	N 含量/ (g·kg ⁻¹) N content	P 含量/ (g·kg ⁻¹) P content	N 吸收量/ (g·株 ⁻¹) N uptake	P 吸收量/ (g·株 ⁻¹) P uptake	N 利用指数/g N utilization index	P 利用指数/g P utilization index
不接种 non-inoculated (NM)	12.918±1.312	2.292±0.229	17.563±2.986	3.124±0.573	0.836±0.188	5.473±1.130
接种 inoculated (LM)	9.693±1.121	2.034±0.294	18.450±3.147	3.906±0.930	1.675±0.561	9.333±3.088
接种处理(M)mycorrhizal	103.137***	20.619***	1.351	26.200***	54.238***	33.815***
F 添加 P 处理(P)P addition	2.778*	6.941***	3.852**	9.224***	2.128	1.667
M×P	1.927	2.086	1.744	2.337	1.755	1.457

方差分析表明,接种菌根菌对马尾松容器苗地径、高径比、单株总生物量、总根长和根系直径等生长性状有显著影响,对整株 N 和 P 含量、P 吸收量、N 和 P 利用指数等养分性状有显著影响 ($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。添加 P 对马尾松容器苗苗高、地径、高径比和单株总生物量等生长性状有显著影响,对整株 N、P 含量和吸收量等养分性状有显著影响 ($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。接种菌根菌和添加 P 对马尾松容器苗生长和养分性状无显著的互作效应。

2.2 马尾松容器苗生长性状对磷添加和接种菌根菌的响应

长性状见图 1。由图 1 看出,马尾松容器苗地径、总生物量和根系直径在不同添加 P 水平均为接种(LM) > 不接种(NM);高径比和总根长均为 NM > LM;苗高在 P1—P5 水平下以 LM 高于 NM, P6—P7 水平下则 LM 低于 NM。无论是否接种菌根菌,随 P 添加量增加,地径呈增加趋势,高径比呈下降趋势,总根长除 P1 水平 (50 g/m³) 外略呈先增加后降低趋势,苗高、根系直径和总生物量无明显变化规律,但 LM 处理下 P7 水平 (600 g/m³) 时总容器苗生物量增加显著。



不同大写字母表示相同 P 添加处理下菌根处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示相同菌根菌处理下 P 添加处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Different uppercase letters indicated significant differences between different mycorrhizal fungi treatment under the same P addition treatment ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicated significant differences between different P addition treatment under the same mycorrhizal fungi treatment ($P < 0.05$). The same below.

图 1 磷添加与接种菌根菌条件下马尾松容器苗生长差异

Fig.1 Growth difference of *Pinus massoniana* container seedlings under phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi

NM 处理下,马尾松容器苗苗高以 P7 显著高于 P1~P5 水平;地径 P7 显著高于 P1—P6 水平;高径比 P1 显著高于 P3—P7 水平;单株总生物量以 P6 水平最大(1.583 g/株),不同 P 添加水平之间无显著差异。LM 处理下,苗高在不同 P 添加水平之间无显著差异;地径 P7 水平显著高于 P1—P5 水平;高径比 P1—P6 水平之间无显著差异, P7 显著低于 P1 和 P2 水平;单株总生物量 P7 显著高于 P1—P6 水平。相同 P 添加水平下,接种前后地径和高径比以 P1 水平时差异显著,单株总生物量以 P1、P4 和 P7 水平时差异显著。

NM 处理下,马尾松容器苗总根长 P1 水平下最大,比 P7 水平下高 36.85% ($P<0.05$); LM 处理下,总根长 P4 水平下最大(138.381 cm),各梯度之间无显著差异。无论是否接种菌根菌,不同 P 添加水平之间马尾松容器苗根系直径均无显著差异。相同 P 添加水平下,接种前后马尾松容器苗总根

长 P1 和 P5 水平时差异显著,根系直径 P5 水平时差异显著。

2.3 马尾松容器苗养分性状对磷添加和接种菌根菌的响应

添加 P 与接种菌根菌条件下马尾松容器苗氮和磷吸收利用差异见图 2,由图 2 可知,LM 处理后马尾松容器苗整株 N 含量在不同 P 添加水平均为 NM>LM,整株 P 含量除 P6 水平外均为 NM>LM;整株 P 吸收量、N 和 P 利用指数均为 LM>NM。接种前后整株 N 吸收量 P1—P6 水平无显著差异,在 P7 水平接种比不接种高 30.48% ($P<0.05$)。无论是否接种菌根菌,随 P 添加量增加,马尾松容器苗整株 N 和 P 含量呈先增加后降低趋势,整株 P 吸收量略呈增加趋势,整株 N 吸收量无明显变化规律。NM 处理下整株 N 和 P 利用指数随 P 添加量增加无明显变化规律, LM 处理后略呈先降低后增加趋势。

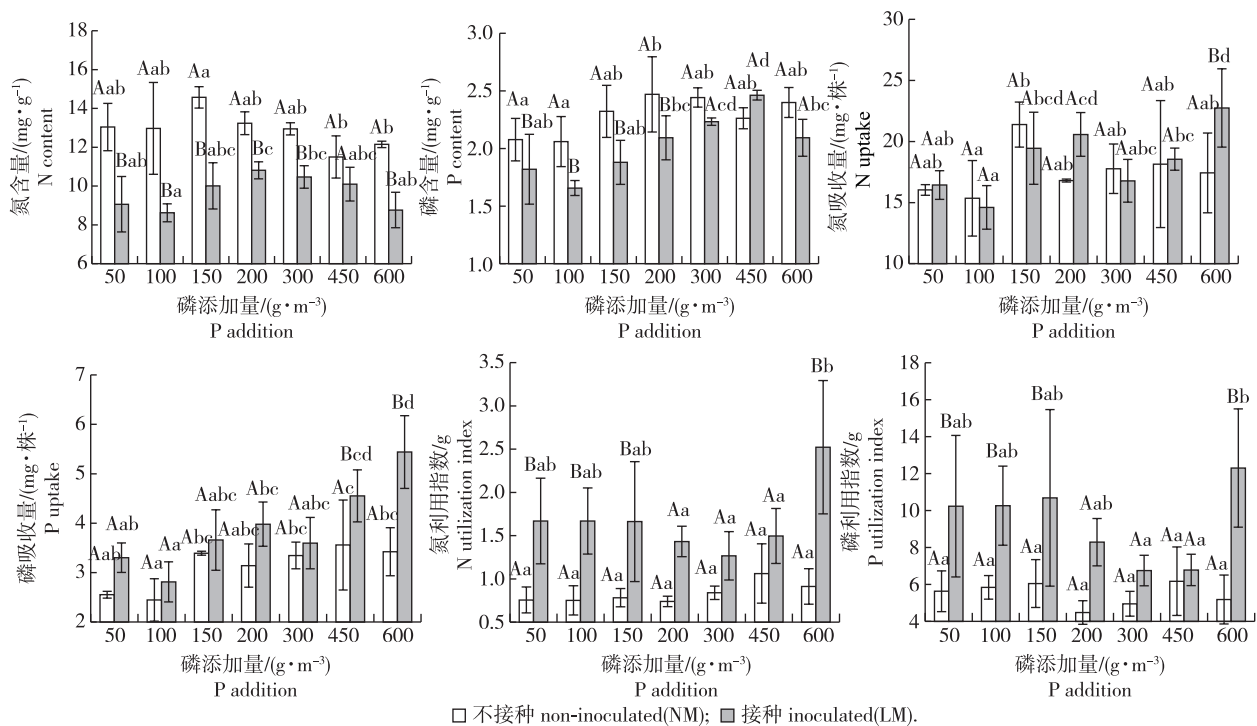


图2 磷添加与接种菌根菌条件下马尾松容器苗氮和磷吸收利用差异

Fig.2 N, P uptake and utilization difference of *Pinus massoniana* container seedlings under phosphorus addition and inoculation of mycorrhizal fungi

NM 处理下,马尾松容器苗整株 N 含量以 P3 显著高于 P6 和 P7 水平;整株 P 含量 P4 显著高于 P1 和 P2 水平;整株 N 吸收量以 P3 水平最大,比 P2 水平高 39.30% ($P<0.05$);整株 P 吸收量 P6 显著高于 P1 和 P2 水平;整株 N 和 P 利用指数 P6 水平最高,分别为 1.06 g 和 6.18 g,不同 P 添加水平之间无显著差异。

LM 处理下,整株 N 含量 P4 显著高于 P1、P2 和 P7 水平;整株 P 含量 P6 显著高于 P1—P4 和 P7 水平;整株 N 吸收量 P7 显著高于 P1、P2、P5 和 P6 水平;整株 P 吸收量 P7 显著高于 P1—P5 水平;整株 N 利用指数 P7 显著高于 P4—P6 水平;P 利用指数 P7 显著高于 P5 和 P6 水平。相同添加 P 水平下,接种前后整株 P 含量 P1—P4 水平差异显

著,整株 P 吸收量 P6 和 P7 水平差异显著,整株 N 和 P 利用指数 P1—P3 水平和 P7 水平差异显著。

2.4 不同处理下马尾松容器苗生长性状和养分性状之间的关联

不同处理下马尾松容器苗生长性状和养分性状之间的相关性分析表明(表 3),NM 处理下马尾松容器苗高径比与 P 含量呈显著负相关,其他生长指标与整株 N 和 P 含量相关性不显著;LM 处理后容器苗各生长指标与 N 含量相关性增加,其中苗高、地径和总生物量与 N 含量呈显著负相关,高径比与 P 含量相关性不显著,可见接种菌根菌后马尾松容器苗生长性状对 N 含量的变化更敏感,

整株 N 含量越低,容器苗苗高、地径和干物质积累越大。NM 处理下马尾松容器苗苗高、地径和总生物量与 N、P 吸收量和利用指数呈正相关关系,LM 处理后这种相关性进一步增加,说明接种菌根菌能提高容器苗生长性状对 N 和 P 吸收和利用的响应,这对容器苗生长和干物质积累有着积极意义。LM 处理后马尾松容器苗总根长与 N 利用指数呈显著负相关,根系直径与 N 和 P 利用指数呈极显著正相关,可见接种菌根菌改变了根系性状与 N 和 P 利用指数之间的关联,接种后容器苗总根长越短,根系直径越大,N 和 P 利用指数越高。

表 3 马尾松容器苗生长性状与养分性状相关性分析
Table 3 Correlation analysis of growth and nutrient traits of *Pinus massoniana* container seedlings

处理 treatment	性状 traits	苗高 seedling height	地径 caliper	高径比 height- diameter ratio	总生物量 total biomass	总根长 total root length	根系直径 root diameter
不接种 non-inoculated (NM)	N 含量 N content	-0.307	-0.249	-0.011	-0.202	-0.185	-0.073
	P 含量 P content	-0.077	0.248	-0.560 **	-0.039	-0.248	-0.115
	N 吸收量 N uptake	0.425	0.446 *	-0.236	0.820 **	-0.400	0.130
	P 吸收量 P uptake	0.535 *	0.679 **	-0.489 *	0.863 **	-0.400	0.084
	N 利用指数 N utilization index	0.614 **	0.555 **	-0.141	0.873 **	-0.164	0.160
	P 利用指数 P utilization index	0.395	0.228	0.130	0.718 **	-0.168	0.316
接种 inoculated (LM)	N 含量 N content	-0.505 *	-0.437 *	0.051	-0.565 **	0.358	-0.421
	P 含量 P content	-0.097	0.073	-0.270	-0.167	0.152	-0.368
	N 吸收量 N uptake	0.681 **	0.741 **	-0.404	0.831 **	-0.099	0.217
	P 吸收量 P uptake	0.674 **	0.807 **	-0.508 *	0.803 **	-0.167	0.140
	N 利用指数 N utilization index	0.757 **	0.761 **	-0.307	0.934 **	-0.440 *	0.553 **
	P 利用指数 P utilization index	0.640 **	0.583 **	-0.164	0.776 **	-0.421	0.665 **

3 讨 论

大部分研究表明接种外生菌根真菌后植株的苗高、地径和总生物量显著增加^[16-19],但也有研究显示,接种后苗高显著增加,对地径的促进作用不显著^[20],又或者地径和总生物量增加,苗高却降低^[21]。本研究中马尾松容器苗接种菌根松乳菇菌后地径和单株总生物量高于不接种,苗高在磷添加量为 P1—P5 水平时高于不接种,与马琼等^[22]、王艺等^[23]关于外生菌根菌促进马尾松幼苗生长的结论一致;磷添加量为 P6—P7 水平时,接种后容器苗苗高低于不接种,说明在基质 P 添加量较低(≤ 300 g/m³)的时候,接种对马尾松容器苗苗高有促进作用,当基质 P 添加量较高(≥ 450 g/m³)的时候,接种会抑制苗木生长,但磷添加量高时苗木地径和总生物量仍在增加,并且高径比持续下降,说

明在本研究设置的磷添加水平范围内,接种菌根菌不仅促进了马尾松容器苗的生长,而且有利于优质苗木的培育。本研究马尾松容器苗接种后根系直径高于不接种,与 1 年生樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)研究结果一致^[24];总根长低于不接种,与 1 年生生长白落叶松(*Larix olgensis*)研究结果一致^[25]。推测接种菌根菌后马尾松容器苗的生长策略是减少根长从而降低根系分布的范围,增加根系直径从而增强根系的吸收能力。研究表明,氮的供应水平对苗木根系构型的影响更大一些。

菌根可以促进植物 N、P 吸收,但因试验设计、菌种类、宿主植物及生长环境不同,研究结果有差异^[26-27]。已有研究表明,接种外生菌根菌后马尾松幼苗 N、P 养分含量及吸收量均有不同程度增加^[22-23]。本研究中马尾松容器苗接菌后 N 含量降低,P 含量除 P6 水平(450 g/m³)高于不接种外,其

他磷添加梯度均低于不接菌,总的来说接种后整株 N、P 含量降低。分析其原因,可能是本研究育苗基质选用的泥炭养分含量远高于马琼等^[22]研究所选的黄沙壤,以及王艺等^[23]研究所选的黄壤,不同的土壤养分环境形成了马尾松幼苗不同的生长策略。与此同时,本研究接菌后 P 吸收量、N 和 P 利用指数高于不接种,说明接种后容器苗能以较低的养分浓度进行正常生长和代谢,即接种提高了养分利用效率。可能是,当土壤养分供应不足时,菌根菌帮助容器苗获取更多的养分以满足植物生长需求,因此接种比不接种整株 N、P 养分含量高;当土壤养分供应充足时,依靠菌根菌的协同,容器苗将 N、P 养分含量维持在相对低的水平,多余的养分用于促进苗木生长,使植株变得高大以利于获得更多的光照^[28],即菌根苗在养分竞争和光竞争方面都比非菌根苗有优势。

植物体内 N 和 P 在吸收利用上相互依赖^[29-32]。本研究容器苗 P 吸收量 P6 和 P7 水平时接种显著高于不接菌,说明磷添加量较高时,接种菌根菌能显著增加马尾松容器苗 P 吸收量;同时, P 吸收量的增加也促进了容器苗 N 吸收量的增加,其表现是 N 吸收量在磷添加量 P7 水平时接种显著高于不接种。接种菌根菌和添加 P 对马尾松容器苗生长和养分性状无显著的互作效应,可能是因为 P 添加量分次喷施,单次喷施的 P 含量并不高,一定程度上减少了菌根×磷添加互作效应的发生。相关性分析表明,接种菌根菌后马尾松容器苗对 N 含量的变化更敏感,对 P 含量的变化反而变得不敏感,这与苗木的生长主要受 N 含量影响有关。同时,接种后苗高、地径和单株总生物量与 N、P 吸收量及利用指数的相关性进一步提高,说明外生菌根菌与植物之间建立了较好的协同共生关系。

参考文献(reference):

- [1] WANG C Y, XIAO H G, LIU J, et al. Insights into the effects of simulated nitrogen deposition on leaf functional traits of *Rhus typhina* [J]. *Pol J Environ Stud*, 2016, 25(3): 1279-1284. DOI: 10.15244/pjoes/61788.
- [2] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325-339. LIU X J, MA K P. Plant functional traits: concepts, applications and future directions [J]. *Sci Sin Vitae*, 2015, 45(4): 325-339. DOI: 10.1360/N052014-00244.
- [3] 王先之, 蒋海亮, 许可旺, 等. 磷添加对紫花苜蓿幼苗地上部及根系生长模式的影响 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(1): 87-91, 99. WANG X Z, JIANG H L, XU K W, et al. Influence of phosphorus addition on shoot and root growth patterns of *Medicago sativa* L. [J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 2013, 49(1): 87-91, 99. DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2013.01.006.
- [4] 郑亚萍, 王春晓, 郑祖林, 等. 磷对花生根系形态特征的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(4): 622-628. ZHENG Y P, WANG C X, ZHENG Z L, et al. Effect of phosphorus (P) on root morphology characteristics of peanut [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41(4): 622-628. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2019.04.017.
- [5] KIRKBY C A, SMYTHE L J, COX J W, et al. Phosphorus movement down a toposequence from a landscape with texture contrast soils [J]. *Soil Res*, 1997, 35(2): 399. DOI: 10.1071/s96045.
- [6] 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. XUE X P, YANG Y, HUANG J G. Advancement on the research of improvement of plant's phosphorus nutrition by ectomycorrhizal [J]. *Edible Fungi China*, 2006, 25(6): 3-4. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8310.2006.06.001.
- [7] 杨青, 张一, 周志春, 等. 异质低磷胁迫下马尾松家系根构型和磷效率的遗传变异 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1226-1235. YANG Q, ZHANG Y, ZHOU Z C, et al. Genetic variation in root architecture and phosphorus efficiency in response to heterogeneous phosphorus deficiency in *Pinus massoniana* families [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35(12): 1226-1235. DOI: 10.3724/SP. J.1258.2011.01226.
- [8] 杨青, 张一, 周志春, 等. 低磷胁迫下不同种源马尾松的根构型与磷效率 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2339-2345. YANG Q, ZHANG Y, ZHOU Z C, et al. Root architecture and phosphorus efficiency of different provenance *Pinus massoniana* under low phosphorous stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23(9): 2339-2345. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2012.0324.
- [9] 宋平, 张一, 张蕊, 等. 低磷胁迫下马尾松无性系磷效率性状对氮沉降的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 502-511. SONG P, ZHANG Y, ZHANG R, et al. Responses of phosphorus efficiency to simulated nitrogen deposition under phosphorus deficiency in *Pinus massoniana* clones [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2017, 23(2): 502-511. DOI: 10.11674/zwy.16112.
- [10] 王艺, 丁贵杰. 水分胁迫下外生菌根对马尾松幼苗养分吸收的影响 [J]. *林业科学研究*, 2013, 26(2): 227-233. WANG Y, DING G J. Influence of ectomycorrhiza on nutrient absorption of *Pinus massoniana* seedlings under water stress [J]. *For Res*, 2013, 26(2): 227-233. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2013.02.017.
- [11] ELBERSE I A M, VAN DAMME J M M, VAN TIENDEREN P H. Plasticity of growth characteristics in wild barley (*Hordeum spontaneum*) in response to nutrient limitation [J]. *J Ecol*, 2003, 91(3): 371-382. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2003.00776.x.
- [12] 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. ZHANG D B, WANG X H, ZHOU S C, et al. Response of masson pine container seedlings from different families to substrate proportion and control released fertilizer [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2019, 36(5): 1044-1050. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2019.05.026.
- [13] 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. YAN X F, WANG Q. Effects of co-inoculation with two ectomycorrhizal fungi on *Quercus liaotungensis* seedlings [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, 28(1): 17-23.
- [14] 王艺, 王秀花, 吴小林, 等. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响 [J]. *林业科学*, 2013, 49(12): 57-

63. WANG Y, WANG X H, WU X L, et al. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings [J]. *Sci Silvae Sin*, 2013, 49 (12): 57–63. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20131209.
- [15] HAWKINS B J. Family variation in nutritional and growth traits in Douglas-fir seedlings [J]. *Tree Physiol*, 2007, 27 (6): 911–919. DOI: 10.1093/treephys/27.6.911.
- [16] 王亚军, 唐明, 郭渊, 等. 外生菌根真菌对杉木的接种效应 [J]. *西北植物学报*, 2006, 26 (9): 1900–1904. WANG Y J, TANG M, GUO Y, et al. Inoculation effect of ectomycorrhizal fungi on *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Bot Boreali Occidentalia Sin*, 2006, 26 (9): 1900–1904. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.09.026.
- [17] 何跃军, 钟章成, 刘济明. 接种外生菌根真菌对柏木幼苗生长的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2008, 36 (1): 67–69. HE Y J, ZHONG Z C, LIU J M. Effects of ectomycorrhiza fungi on seedling growth of *Cupressus funebris* [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2008, 36 (1): 67–69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2008.01.021.
- [18] 姜磊, 李焕勇, 张芹, 等. AM 真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长与生理代谢的影响 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44 (6): 152–160. JIANG L, LI H Y, ZHANG Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi on the growth and physiological metabolism of *Pyrus betulaefolia* Bunge seedlings under saline-alkaline stress [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 44 (6): 152–160. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.202001045.
- [19] 贾艳艳, 顾大路, 杨文飞, 等. 丛枝菌根真菌对还田麦秆分解及玉米生物量的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2019, 35 (3): 612–617. JIA Y Y, GU D L, YANG W F, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi colonization on wheat-straw decomposition and maize biomass [J]. *Jiangsu J Agr Sci*, 2019, 35 (3): 612–617. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.03.015.
- [20] 鲍志来. 外生菌根菌接种对白皮松生长的影响 [J]. *上海农业科技*, 2017 (4): 99, 107. BAO Z L. Effects of ectomycorrhizal fungi inoculation on the growth of *Pinus bungeana* [J]. *Shanghai Agric Sci Technol*, 2017 (4): 99, 107. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0106.2017.04.054.
- [21] 宝秋利, 乔宇, 闫伟, 等. 两株乳牛肝菌属外生菌根真菌对沙地云杉幼苗生长的影响 [J]. *北方园艺*, 2020 (4): 87–92. BAO Q L, QIAO Y, YAN W, et al. Effect of two *Suillus* ectomycorrhizal fungus on seedling growth of *Picea mongolica* [J]. *North Hortic*, 2020 (4): 87–92. DOI: 10.11937/bfy.20192033.
- [22] 马琼, 黄建国, 蒋剑波. 接种外生菌根真菌对马尾松幼苗生长的影响 [J]. *福建林业科技*, 2005, 32 (2): 85–88. MA Q, HUANG J G, JIANG J B. Effect of inoculating with the ectotrophic mycorrhizal epiphyte on the *Pinus massoniana* seedling growth [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2005, 32 (2): 85–88. DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2005.02.021.
- [23] 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. WANG Y, DING G J. Effects of ectomycorrhizal on growth, physiological characteristics and nutrition in *Pinus massoniana* seedlings [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2013, 37 (2): 97–102.
- [24] 郝龙飞, 郝文颖, 刘婷岩, 等. 氮添加及接种处理对 1 年生樟子松苗木根系形态及养分含量的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43 (4): 1–7. HAO L F, HAO W Y, LIU T Y, et al. Responses of root morphology and nutrient content of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings to nitrogen addition and inoculation treatments [J]. *J Beijing For Univ*, 2021, 43 (4): 1–7. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200071.
- [25] 刘婷岩, 郝龙飞, 王续富, 等. 氮沉降及菌根真菌对长白落叶松苗木根系构型及根际酶活性的影响 [J]. *植物研究*, 2021, 41 (1): 145–151. LIU T Y, HAO L F, WANG X F, et al. Effects of nitrogen deposition and ectomycorrhizal fungi on root architecture and rhizosphere soil enzyme activities of *Larix olgensis* seedlings [J]. *Bull Bot Res*, 2021, 41 (1): 145–151. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2021.01.018.
- [26] 张珍明, 张家春, 何云松, 等. 马尾松外生菌根真菌研究进展 [J]. *耕作与栽培*, 2016 (2): 66–68, 72. ZHANG Z M, ZHANG J C, HE Y S, et al. The research progress of ectomycorrhizal fungi in *Pinus massoniana* [J]. *Tillage Cultiv*, 2016 (2): 66–68, 72. DOI: 10.13605/j.cnki.52-1065/s.2016.02.027.
- [27] 李洋, 胥晓雯, 杨凯晴, 等. 一株高效羽毛降解菌的筛选与鉴定 [J]. *生物加工过程*, 2022, 20 (3): 270–276. LI Y, XU X W, YANG K Q, et al. Screening of a highly efficient feather degrading bacterium [J]. *Chin J Bioprocess Eng*, 2022, 20 (3): 270–276. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3678.2022.03.005.
- [28] LAN Z C, BAI Y F. Testing mechanisms of N-enrichment-induced species loss in a semiarid Inner Mongolia grassland: critical thresholds and implications for long-term ecosystem responses [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2012, 367 (1606): 3125–3134. DOI: 10.1098/rstb.2011.0352.
- [29] 毛佳昊, 熊晓辉, 卢一辰. 茉莉酸调控植物应对逆境胁迫作用的研究进展 [J]. *生物加工过程*, 2021, 19 (4): 413–419. MAO J H, XIONG X H, LU Y C. Advances in the regulation of plant stress response by jasmonic acid [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2021, 19 (4): 413–419.
- [30] HE J S, WANG L, FLYNN D F B, et al. Leaf nitrogen: Phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, 155 (2): 301–310. DOI: 10.1007/s00442-007-0912-y.
- [31] MARKLEIN A R, HOULTON B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems [J]. *New Phytol*, 2012, 193 (3): 696–704. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2011.03967.x.
- [32] 原雅楠, 李正才, 王斌, 等. 不同林龄榿树根、枝、叶的 C、N、P 化学计量及内稳性特征 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2021, 45 (6): 135–142. YUAN Y N, LI Z C, WANG B, et al. Ecological stoichiometry in leaves, branches and roots of *Torreya grandis* with different forest ages and its stoichiometric homeostasis [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 45 (6): 135–142. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202003057.

(责任编辑 王国栋)