

DOI: 10.20103/j.stxb.202409032109

祝嘉新, 雷梅, 黄智军, 丘清燕, 胡亚林. 不同种类丛枝菌根真菌接种对杉木幼苗氮磷养分吸收和流失的影响. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Zhu J X, Lei M, Huang Z J, Qiu Q Y, Hu Y L. Effects of Different Types of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Nitrogen and Phosphorus Nutrient Uptake and Losses of *Cunninghamia lanceolata* Seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

不同种类丛枝菌根真菌接种对杉木幼苗氮磷养分吸收和流失的影响

祝嘉新¹, 雷梅¹, 黄智军¹, 丘清燕^{2,*}, 胡亚林²

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建农林大学菌草与生态学院, 福州 350002

摘要:丛枝菌根真菌(AMF)有利于促进植物对养分的吸收,但是不同种类 AMF 在促进植物氮(N)、磷(P)养分吸收以及它们的流失方面是否存在明显的差异仍不清楚。因此,本研究以与 AMF 共生的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗为研究对象,通过向其接种不同种类 AMF [摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, Gm)、根内根孢霉(*Glomus intraradices*, Gi)和幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*, Ce)]探究不同种类 AMF 接种及接种后不同时间段对杉木 N、P 吸收与流失的影响。结果发现,AMF 能显著提高杉木幼苗的苗高、根长、干重、根体积、根表面积和根系感染率。摩西球囊霉比其他两种 AMF 更有利于提高杉木幼苗的根长、根表面积和根体积。AMF 接种有助于提高植物对 N、P 的吸收,而且摩西球囊霉对植物 N 吸收的促进作用最强。不同种类 AMF 对杉木 P 吸收的促进作用主要表现在接种的初期,接种根内根孢霉更有利于促进杉木 P 吸收。AMF 接种减少杉木幼苗土壤中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的流失,其中根内根孢霉对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的减少效果最显著。此外,AMF 能有效减少土壤 P 素的流失,与其他 AMF 相比,摩西球囊霉显著降低了接种前期全 P、颗粒态 P、有机 P、可溶性 P 的流失;在接种后期,幼套近明球囊霉显著降低了无机 P 与可溶性 P 的流失。总体而言,在本研究中,摩西球囊霉更有利于促进杉木 N 吸收,而根内根孢霉更有利于促进杉木 P 吸收。不同种类 AMF 接种在减少土壤 N、P 流失方面存在明显的种类与时间差异。

关键词:丛枝菌根真菌;氮磷吸收;氮磷流失;杉木幼苗

Effects of Different Types of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Nitrogen and Phosphorus Nutrient Uptake and Losses of *Cunninghamia lanceolata* Seedlings

ZHU Jiixin¹, LEI Mei¹, HUANG Zhijun¹, QIU Qingyan^{2,*}, HU Yalin²

1 Fujian Agricultural and Forestry University, College of Forestry, Fuzhou 350002, China

2 Fujian Agricultural and Forestry University, College of Mycology and Ecology, Fuzhou 350002, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in enhancing plant nutrient uptake. However, it remains unclear whether there are significant differences among various AMF species in promoting plant nitrogen (N) and phosphorus (P) uptake and reducing nutrient losses. Therefore, this study focused on *Cunninghamia lanceolata* that can form a symbiotic relationship with AMF, a major host plant of AMF. Different AMF species, including *Glomus mosseae* (Gm), *Glomus intraradices* (Gi), and *Claroideoglomus etunicatum* (Ce), were inoculated to investigate their effects on N and P uptake and losses in *Cunninghamia lanceolata* at different time after inoculation. Results showed that AMF significantly increased the height, root length, dry weight, root volume, root surface area, and root volume of the

基金项目:福建省科技厅自然科学基金项目(2023J01433);国家自然科学基金项目(32471829)

收稿日期:2024-09-03; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qingyan_qiu@126.com

Cunninghamia lanceolata seedlings. *Glomus mosseae* was more effective than the other two AMF species in enhancing root length, root surface area, and mycorrhizal colonization rate of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. Inoculation of AMF improved N and P uptake. Specifically, *Glomus mosseae* inoculation could promote plant N uptake most compared with other two AMF inoculation. The promoting effect of different AMF species on plant P uptake mainly occurred at the early stage of AMF inoculation. Moreover, *Glomus intraradices* was more beneficial for P uptake compared with the other two AMF species. AMF inoculation reduced the losses of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in the soil, and this effect was most pronounced in plant inoculated with *Glomus intraradices*. Additionally, AMF effectively decreased P losses from the soil. Compared with other AMF species, *Glomus mosseae* significantly reduced the losses of total P, particulate P, organic P, and soluble P in the early stage after AMF inoculation, while *Claroideoglomus etunicatum* significantly reduced inorganic P and soluble P losses in the later stage of AMF inoculation. Overall, *Glomus mosseae* was more beneficial for enhancing N uptake of *Cunninghamia lanceolata*, whereas *Glomus intraradices* was more effective in promoting P uptake. The effects of AMF inoculation on soil N and P losses depended on both the AMF species and the timing of inoculation.

Key Words: Arbuscular mycorrhizal fungi; nitrogen and phosphorus uptake; nitrogen and phosphorus loss; Chinese fir seedlings

氮(N)和磷(P)作为植物生长必需的养分元素在促进植物生长、提高植物生产力方面发挥着重要的作用。在许多生态系统中,大量的营养物质可能会随水流流失。有研究表明,每年随着水流流失的土壤 N 和 P 量高达 160 kg/hm^2 和 30 kg/hm^2 ^[1]。这些土壤养分的流失不仅会降低植物生产力,还会导致地下水污染和地表水富营养化^[2]。由于土壤 N 的大量流失以及全球 P 储量可能将在未来 50—100 年内耗尽^[3],因而如何提高植物 N、P 吸收,减轻土壤 N、P 损失,对于陆地生态系统的可持续发展和改善人类健康至关重要。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)是一类在自然界中广泛存在的内生真菌,可以与 80% 以上的维管植物形成共生关系^[4]。AMF 侵染植物根系后其发达的根外菌丝可以更深入地钻入到根系无法达到的狭小土壤颗粒缝隙进而促进植物对土壤养分和水分的吸收^[5]。而目前关于 AMF 接种对植物 N、P 养分吸收或者流失的影响主要关注某一种 AMF 对植物的影响^[2],而较少关注不同类型 AMF 接种效果的差异,这就难以明确不同种类的 AMF 在促进植物养分吸收或者减少养分流失方面是否存在明显差异。不同 AMF 其结构特性不同,因此对土壤中的养分和水分的吸收能力也不同,进而对宿主植物的产生不同的促生作用^[6-7]。不仅如此,前人关于接种 AMF 对植物影响的研究主要集中于大田作物中^[8],而对木本植物的相关研究相对较少。因而不同种类的 AMF 在调节木本植物 N、P 吸收以及土壤 N、P 流失等方面是否存在差异仍有待进一步的研究。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)其种植面积达 0.089 亿 hm^2 ,占全国人工乔木林总面积的 20%;蓄积量达 6.25 亿 m^3 ,占比 25%,两项指标均居全国首位(第八次全国森林资源清查)。AMF 能够侵染杉木根系,据统计侵染杉木的 AMF 一共有 4 属 9 种,而摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, Gm)、细凹脆红无梗霉(*Acaulospora laevis*, Ai)和根内根孢霉(*Glomus intraradices*, Gi),这 3 种 AMF 被认为是侵染杉木的优势种^[9]。然而,目前关于哪种 AMF 能更好地提高杉木对 N、P 养分的吸收,减少 N、P 流失仍不清楚^[10-11]。为此研究不同种类 AMF 对杉木 N、P 养分吸收和土壤 N、P 养分流失的影响,对于提高杉木生产力以及杉木管理过程中菌肥的施加具有理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 土壤取样与土样制备

本实验为盆栽实验,土壤取自福建农林大学妙峰山亚热带森林 0—20 cm 土层土壤。土样经过自然风干

后过 2 mm 筛,随后按照 3:7 的比例将河沙和土壤混合均匀,混合物放到高压灭菌锅 121℃ 灭菌 2 h,该操作间隔两天再重复一次,所得混合物冷却后备用。本研究采用这种沙土混合物(下文中称“土壤”),可提高土壤的透气性与盆栽幼苗的存活率,方便实验过程中淋溶液和根系的收集。灭菌土壤全氮含量 0.6 g/kg,全碳含量 27.57 g/kg,全磷含量 0.46 g/kg,有效磷含量 18.37 mg/kg,硝态氮含量 43.56 mg/kg,铵态氮含量 12.24 mg/kg,有机氮含量 19.07 mg/kg。

1.1.2 菌种

本研究所用菌种为摩西球囊霉、根内根孢霉和幼套近明球囊霉这 3 类菌种,购于北京农林科学院植物营养与资源研究所。选用高粱作为菌种扩繁时的宿主植物。高温灭菌河沙与沸石(1:1)为扩繁基质。用 10% NaClO 对高粱种子消毒 15 min,再用无菌水冲洗 4—5 次。将高粱种植到扩繁基质中并分别接种上述三种菌种进行为期 90 d 的扩繁。高粱收获时,将高粱地上部分和表层土清除,将侵染的根段、孢子、菌丝作为接种剂。

本实验采用的杉木种子取自于福建农林大学森林与环境研究所。杉木种子用 10% NaClO 对杉木种子消毒 15 min,再用无菌水冲洗 4—5 次,室内育苗。待出苗后,选取 1 株长势相当的幼苗将其移栽到花盆中并接种接种剂(高粱根段、孢子与菌丝的混合物)。整个育苗期间土壤的水分维持在 60% 田间持水量,温度 27℃。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

本实验共设置 4 种处理,分别为不接种 AMF(CK),接种幼套近明球囊霉(幼套)、根内根孢霉(根内)和摩西球囊霉(摩西),每个处理 6 个重复。在整个培养过程中,进行两次破坏性取样[接种菌种后 3 个月(2023 年 6 月)和接种后 7 个月(2023 年 10 月)],盆栽总计 $4 \times 6 \times 2 = 48$ 盆。盆栽实验具体操作步骤如下:每个花盆装入 2 kg 的土壤,将 500 g 菌种放在距离土壤表层 5 cm 深度处,CK 则是加入等量灭菌的高粱根段混合物,用托盘将花盆底部与地面隔离以便防止外界菌根污染和水土淋溶流失。随后在每个花盆中移植 1 株长势相似的杉木幼苗。为满足杉木对养分的需求,在杉木移植后添加复合肥料(过磷酸钙复合生物肥料),复合肥料的添加量为 400 mg 每盆,并将水分含量调节到 60%。

淋溶实验的设计是将花盆放于置物架(长为 95 cm,宽为 22 cm,高为 95 cm)上,并采取点滴输液的方式进行淋溶。淋溶实验开始前先在土壤的表面铺一层无磷滤纸使滴入的液体更均匀地渗入土壤。滴定时将 400 mL 蒸馏水装入吊瓶中,采用点滴输液的方式将其慢慢滴入土壤,并在花盆底部放置收集瓶收集淋溶液。在此过程中,蒸馏水的流速通过输液管上的流量调节器控制,整个淋溶过程持续时间 3 h。

1.2.2 样品采集与测定

植株样品的采集:在每次淋溶实验结束后收集植株,并用游标卡尺记录下植株的苗高。取植株根一部分用流动水冲洗干净,将其剪成 1 cm 保存于 4℃ 的冰箱,用于植株侵染率的测定。将植株洗净放入信封袋中随后放在 105℃ 的烘箱中持续 30 min 的杀青。待杀青结束后,在 75℃ 烘箱中烘干 48 h,用于植株生物量与 C、N、P 含量的测定。

土壤样品的采集:采用抖根法采集根际土,收集的根际土过 2 mm 的筛,随后保存于 -20℃ 的冰箱,用于土壤养分的测定。

1.2.3 测定方法

(1) 植物 C、N 含量的测定采用 C/N 元素分析仪(Elementar vario cube,德国)。植物 P 含量的测定采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 快速消煮法^[12]。菌根的侵染率采用醋酸墨水染色法染色^[13],并用光学显微镜进行观测。根长、根面积与根体积采用 EPSON v29 扫描仪进行扫描测定。

(2) 淋溶液中全 P、可溶性 P、无机 P、全 N:分析方法均按照《水和废水监测方法》的标准,采用过硫酸钾进行消解,分光光度计进行测定;颗粒态 P 的含量为全 P 与可溶性 P 含量的差值,有机 P 为可溶性 P 与无机 P 含量的差值;淋溶液中 DON 为全 N 与无机 N 的差值。淋溶液中无机 N 采用全自动间断化学分析仪

(SmartChem200, AMS, 意大利) 进行分析。

1.2.4 统计分析

利用 SPSS27.0 统计软件的独立样本 T 检验对接种 3 月后和接种 7 月后处理下的测试指标平均值进行统计分析。同一时间不同种类 AMF 接种处理的差异采用单因素邓肯检验来比较显著差异性。采用双因素方差分析检验不同种类 AMF、距接种 AMF 后不同时间以及它们二者的交互作用对植株氮磷的吸收、土壤氮磷流失的影响, 显著性水平 $\alpha=0.05$ 。采用 Origin2021 建库作图。

2 结果分析

2.1 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗菌根侵染率的影响

杉木幼苗根系的侵染率受 AMF 种类、距离 AMF 接种时间长短以及两者交互作用的影响(图 1)。与不接种 AMF 相比, AMF 接种均显著提高了杉木根系的菌根侵染率, 但是不同 AMF 类型对根系侵染率的影响在接种后的不同时间段存在明显差异。具体表现为, 接种 3 个月后, 除摩西球囊霉接种下的根系侵染率显著高于根内根孢霉外, 其他类型 AMF 接种下的侵染率无明显差异。然而在 AMF 接种 7 月后, 接种摩西球囊霉下根系侵染率显著高于幼套近明球囊霉, 其他种类之间的差异不明显。

2.2 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗生长指标的影响

不同种类 AMF 接种对杉木幼苗的苗高与干重无明显影响(图 2), 但是 AMF 的接种显著影响了杉木的根长、根表面积与根体积(图 2), 而且摩西球囊霉对根体积、根表面积、根长的促进作用显著高于另外两种 AMF 处理。

2.3 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗碳、氮、磷总量及其化学计量比的影响

不同种类 AMF 接种对植物 C 总量没有显著影响(图 3), 但是 AMF 接种显著提高了杉木的氮吸收量, 且摩西球囊霉接种对杉木氮吸收的促进作用明显强于另外两种 AMF 处理(图 3)。AMF 的接种也提高了接种前期杉木对 P 的吸收量, 而且接种根内根孢霉对植物 P 吸收的促进作用显著强于其他接种处理(图 3)。相对于接种前期而言, 接种后期杉木 C、N 和 P 吸收量均显著提高。

从杉木的碳、氮、磷化学计量比来看, 不同种类 AMF 接种处理、距接种 AMF 后不同时间及二者的交互作用均对碳、氮、磷化学计量比有明显的影响(图 3)。在接种前期, AMF 的接种均显著降低了杉木的 C:N、C:P 以及 N:P(摩西球囊霉处理下的 N:P 除外), 而且根内根孢霉处理下的 C:P、N:P 要明显低于另外两种接种处理。而在接种后期, 根内根孢霉和摩西球囊霉处理下的 C:N 显著低于 CK 处理。相对于接种前期, 在 AMF 接种后期杉木的 C:N、C:P 以及 N:P 均显著降低。

2.4 不同种类 AMF 接种对杉木土壤淋溶液淋溶体积的影响

由图 4 可知, AMF 接种显著降低了接种前期杉木土壤淋溶液的淋溶体积, 其中根内根孢霉和摩西球囊霉处理下的淋溶液的体积显著低于其他处理。

2.5 不同种类 AMF 接种对杉木土壤氮淋溶的影响

由图 5 可知, 虽然 AMF 接种处理对土壤全氮、有机氮淋溶量没有显著影响, 但是 AMF 接种显著降低了铵态氮、硝态氮的淋溶量。其中根内根孢霉与摩西球囊霉处理前期下铵态氮的淋溶量显著低于其他处理, 而且

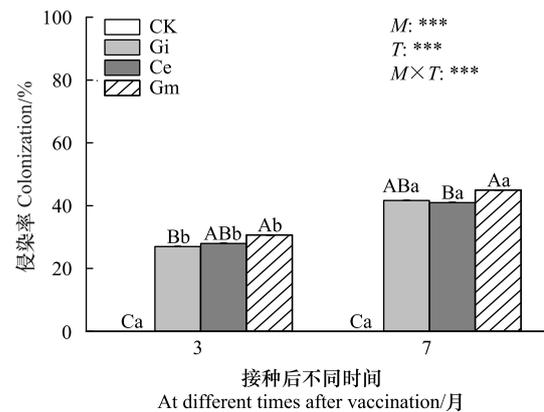


图 1 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗根系侵染率的影响

Fig.1 Effects of different species of AMF inoculation on root colonization rate of Chinese fir seedlings

CK: 空白对照; Gi: 根内根孢霉; Ce: 幼套近明球囊霉; Gm: 摩西球囊霉; 不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性 ($P < 0.05$); 不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性 ($P < 0.05$); M: 丛枝菌根真菌; T: 接种后不同时间; MxT: 表示二者的交互作用; *** 表示不同处理下的侵染率存在极显著的差异 $P < 0.001$

根内根孢霉处理下硝态氮的淋溶量显著低于其他处理。

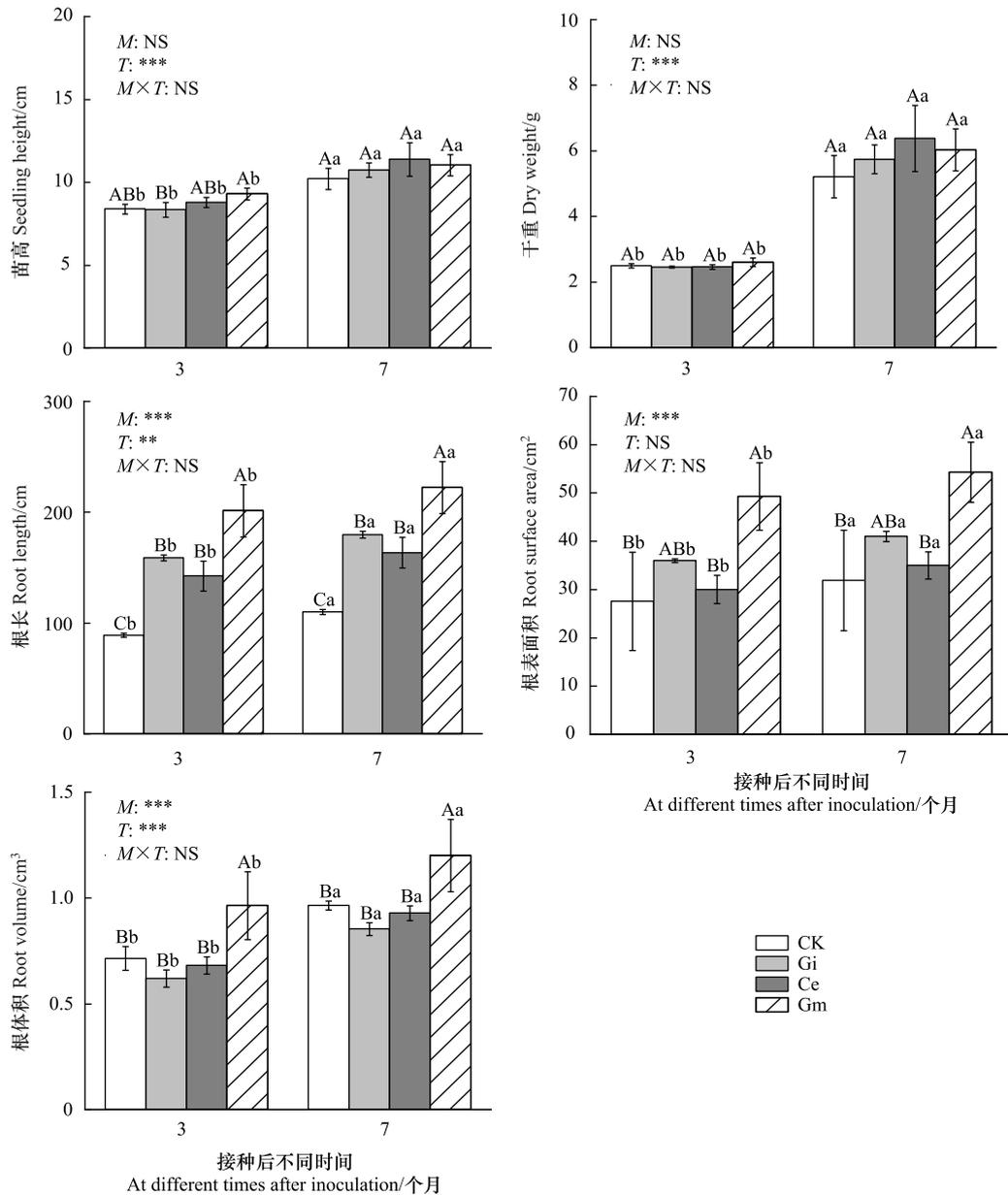


图 2 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗生长指标的影响

Fig.2 Effects of different species of AMF inoculation on the growth indices of Chinese fir seedlings

CK:空白对照;Gi:根内根孢霉;Ce:幼套近明球囊霉;Gm:摩西球囊霉;不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性($P < 0.05$);不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性($P < 0.05$);M:丛枝菌根真菌;T:接种后不同时间;M×T:表示二者的交互作用;***、**分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 上差异显著,NS:表示不显著

2.6 不同种类 AMF 接种对杉木土壤磷淋溶的影响

由图 6 可知,AMF 接种显著降低了土壤全磷、无机磷和可溶性磷的淋溶量。在接种前期,摩西球囊霉处理下的全磷、可溶性磷、有机磷以及颗粒态磷的淋溶量显著低于其他两种 AMF 处理。在接种后期,幼套近明球囊霉处理下的无机磷、可溶性磷以及有机磷的淋溶量显著低于其他处理。

2.7 杉木氮磷吸收量与土壤氮磷淋溶量之间的相关关系

由表 1 可知,植株 N、P 吸收与淋溶液中全 P、无机 P、有机 P、可溶性 P 以及全 N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DON

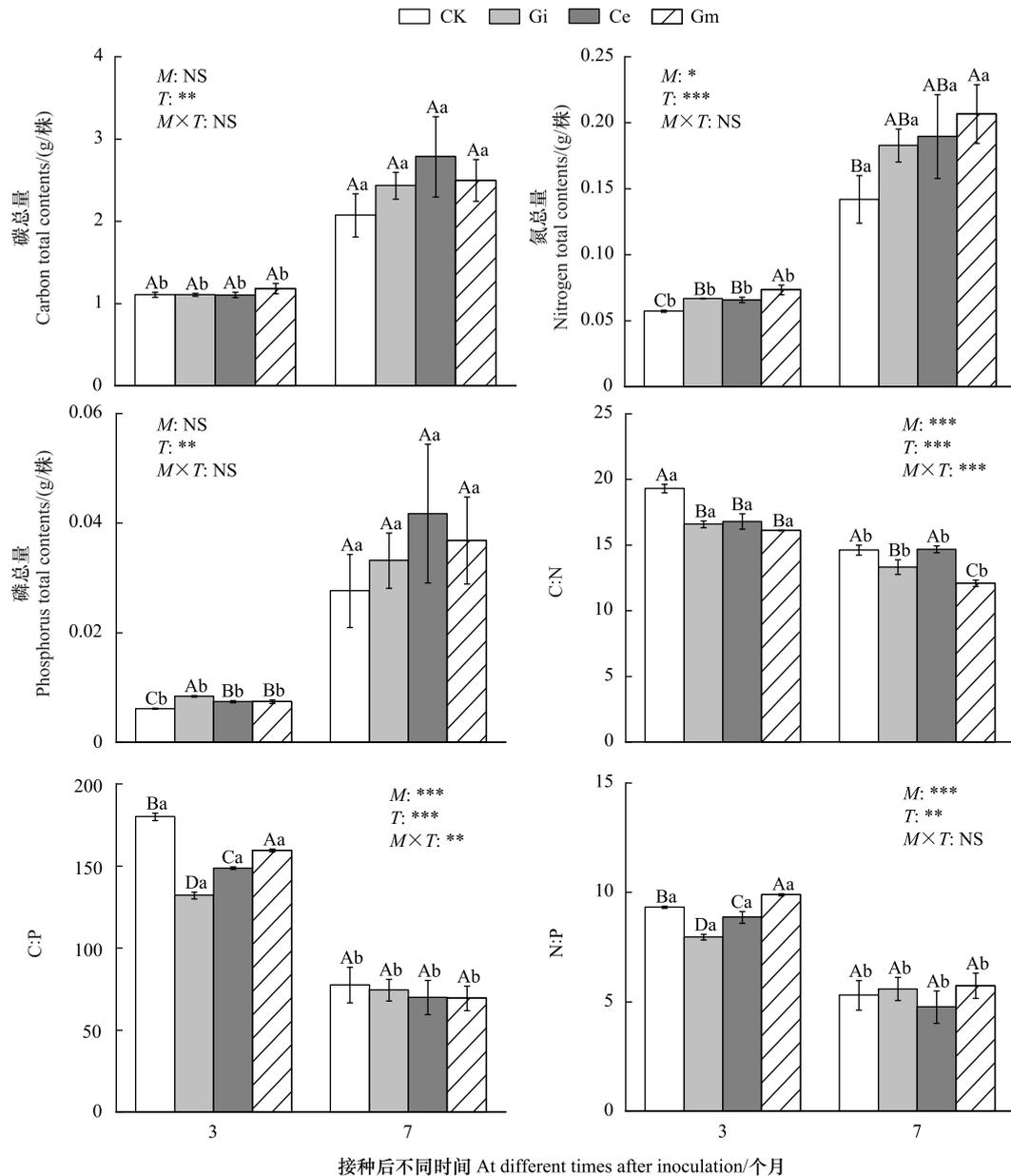


图3 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗碳、氮、磷总量以及碳、氮、磷化学计量比的影响

Fig.3 Effects of different species of AMF inoculation on total C, N and P contents and their stoichiometric ratios of Chinese fir seedlings CK:空白对照;Gi:根内根孢霉;Ce:幼套近明球囊霉;Gm:摩西球囊霉;不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性($P < 0.05$);不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性($P < 0.05$);*M*:丛枝菌根真菌;*T*:接种后不同时间;*M*×*T*:表示二者的交互作用;***、**和*分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 上差异显著,NS:表示不显著

的淋溶量呈显著负相关,与根系性状中苗高、干重、根长、根表面积、根体积以及侵染率呈显著正相关。

3 讨论

3.1 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗生长的影响

菌根侵染率是衡量菌根真菌与宿主植物是否建立共生关系的重要指标。较高的侵染率反映了植物对菌根的依赖性更强,从而提高了养分获取效率^[14]。本研究中,不同种类 AMF 接种提高了杉木根系的菌根侵染率,表明 AMF 对杉木的根系有较强的依赖性。其中摩西球囊霉处理下的侵染率高于根内根孢霉和幼套近明

球囊霉处理,表明在相同的土壤条件下,摩西球囊霉菌与杉木幼苗建立共生关系更加容易,菌根化程度更高。此外,不同 AMF 接种对植物根系的侵染率存在差异,这可能是因为不同 AMF 自身的结构特性差异以及 AMF 对共生植物的选择性差异造成的^[15]。

虽然 3 种 AMF 的接种并未提高杉木幼苗的苗高和干重,但它们的接种显著提高了杉木幼苗的根长、根体积、根表面积,这证实了接种 AMF 对植物根系生长有促进作用^[16]。而且在这 3 种 AMF 中,摩西球囊霉处理下的杉木根长、根表面积和根体积都显著高于其他处理,这是因为同一宿主植株对不同种类 AMF 的亲合力存在差异^[17],且植物对不同 AMF 的选择性决定了其菌根的生长及其功能的发挥程度^[18]。另外,相比于接种的前期,杉木接种后期各个处理下的根系侵染率、苗高、根长、干重、根体积、根表面积均显著提高,这与 AMF 介导的养分吸收和生长响应随植物发育阶段变化的证据一致^[19]。

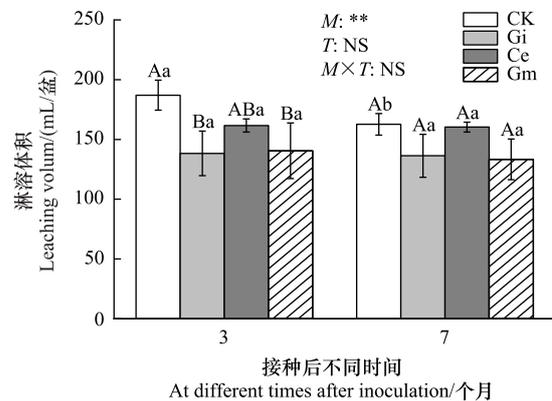


图 4 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗土壤淋溶体积的影响
Fig.4 Effects of different species of AMF inoculation on leaching volume of Chinese fir soil

CK:空白对照;Gi:根内根孢霉;Ce:幼套近明球囊霉;Gm:摩西球囊霉;不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性($P < 0.05$);不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性($P < 0.05$);M:丛枝菌根真菌;T:接种后不同时间;M x T:表示二者的交互作用;**表示 $P < 0.01$ 上差异显著,NS:表示不显著

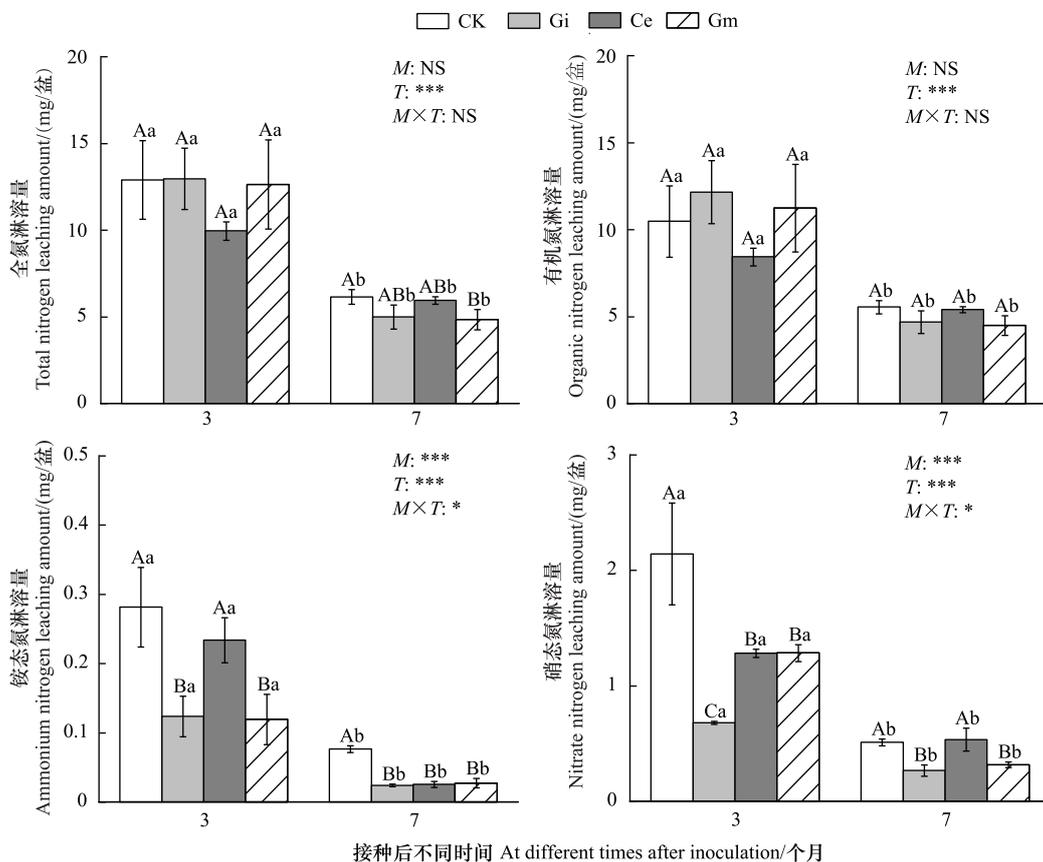


图 5 不同种类 AMF 接种对杉木土壤不同形态氮淋溶量的影响

Fig.5 Effects of different species of AMF inoculation on soil nitrogen leaching of Chinese fir seedlings

CK:空白对照;Gi:根内根孢霉;Ce:幼套近明球囊霉;Gm:摩西球囊霉;不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性($P < 0.05$);不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性($P < 0.05$);M:丛枝菌根真菌;T:接种后不同时间;M x T:表示二者的交互作用;***和*分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.05$ 上差异显著,NS:表示不显著

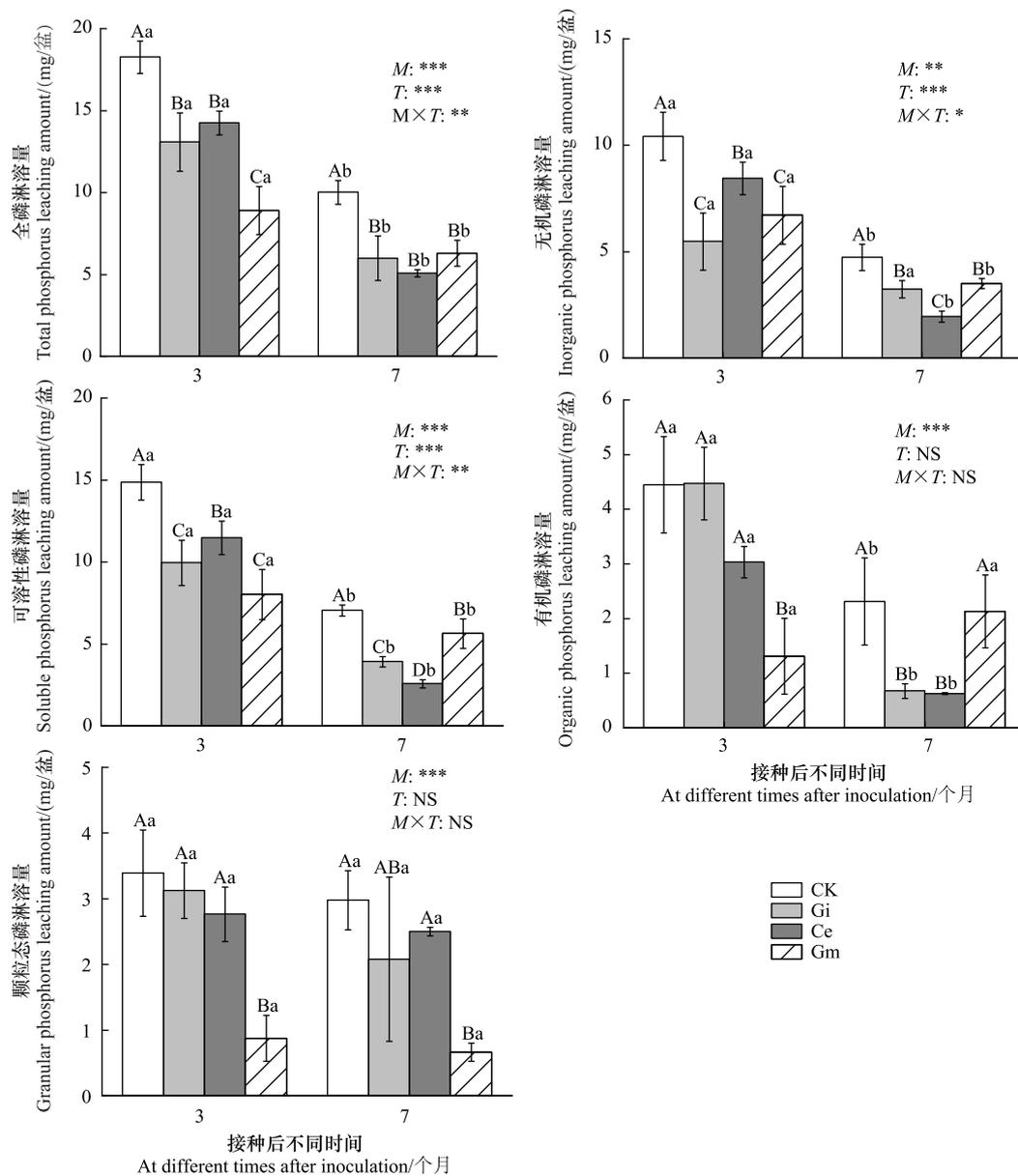


图6 不同种类 AMF 接种对杉木土壤不同形态磷淋溶的影响

Fig.6 Effects of different species of AMF inoculation on soil phosphorus leaching of Chinese fir seedlings

CK:空白对照;Gi:根内根孢霉;Ce:幼套近明球囊霉;Gm:摩西球囊霉;不同的大写字母代表相同时间下不同接种处理间的显著差异性($P < 0.05$);不同的小写字母代表相同接种处理下不同时间的显著差异性($P < 0.05$);M:丛枝菌根真菌;T:接种后不同时间;M×T:表示二者的交互作用;***、**和*分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 上差异显著,NS:表示不显著

3.2 不同种类 AMF 接种对杉木幼苗氮、磷吸收的影响

本研究发现,AMF 接种显著提高了杉木幼苗的氮吸收量(图3),且摩西球囊霉处理下杉木氮含量最高。这可能是因为摩西球囊霉接种处理下的杉木具有较高的菌根感染率(图1)以及根长、根表面积和根体积(图2),而且这些指标均与杉木氮吸收量成正相关关系(表1)。菌根感染率的提升意味着更发达的根外菌丝网络,可通过直接吸收铵态氮并转化为氨基酸,或通过改变根系分泌物组成激活根际固氮微生物活性,从而强化氮素获取能力^[20]。王斌等^[21]对沙冬青接种不同 AMF 的研究中发现,摩西球囊霉相比于其他 AMF 显著提高宿主氮含量,与本研究中摩西球囊霉处理下氮吸收量在接种后期的持续增长(图3)相呼应。此外,AMF 可能通过菌丝分泌物促进特定微生物群落生长,进而增强有机质分解,从而间接调控菌丝对氮的吸收^[22-24]。

本研究发现,杉木接种 AMF 有利高其对 P 的吸收(图 3)。何斐等^[25]对刺槐接种 AMF 后发现,菌根的形成提高了宿主植物对磷的吸收;且 Wahid 等^[26]对绿豆接种 AMF 后也发现其显著提高宿主磷含量。本研究与此结果相似,对于磷素吸收,AMF 接种在初期显著提高了杉木的磷含量(图 3),其中根内根孢霉的促进作用尤为突出。这可能与根内根孢霉处理下根际磷酸酶活性增强有关—AMF 菌丝通过酸化作用溶解金属-植酸盐复合体,促进有机磷向无机磷转化^[27]。然而,接种后期磷吸收增幅减弱(图 3),表明 AMF 对磷的促吸收作用具有阶段性。这一现象可能与根外菌丝功能随环境条件变化的动态响应相关:初期菌丝快速扩展提升磷捕获效率,而后期土壤有效磷库的耗竭或菌丝周转速率变化可能削弱其作用^[28]。值得注意的是,植株磷吸收与土壤各形态磷淋溶量的显著负相关(表 1),进一步证实 AMF 通过增强磷素固定和转运能力减少其流失^[29-30],而根内根孢霉在接种初期对无机磷淋溶的抑制(图 6)也佐证了其对于磷循环的高效调控。

表 1 杉木氮磷吸收与土壤氮磷淋溶以及根系性状之间的相关性分析

Table 1 Correlation Analysis of Nitrogen and Phosphorus Uptake in *Cunninghamia lanceolata* with Soil Nitrogen and Phosphorus Leaching and Root Traits

	氮吸收量 N uptake/(g/株)	磷吸收量 P uptake/(g/株)
全氮淋溶量 TP leaching/(mg/pot)	-0.823 **	-0.763 **
可溶性磷淋溶量 DTP leaching/(mg/pot)	-0.804 **	-0.771 **
无机磷淋溶量 DIP leaching/(mg/pot)	-0.794 **	-0.769 **
颗粒态磷淋溶量 PP leaching/(mg/pot)	-0.359 **	-0.237 **
有机磷淋溶量 DOP leaching/(mg/pot)	-0.589 **	-0.550 **
全氮淋溶量 TN leaching/(mg/pot)	-0.842 **	-0.796 **
铵态氮淋溶量 NH ₄ ⁺ -N leaching/(mg/pot)	-0.795 **	-0.742 **
硝态氮淋溶量 NO ₃ ⁻ -N leaching/(mg/pot)	-0.748 **	-0.703 **
有机氮淋溶量 DON leaching/(mg/pot)	-0.800 **	-0.757 **
苗高 Seedling height/(cm)	0.711 **	0.937 **
干重 Dry weight/(g)	0.704 **	0.985 **
根长 Root length/(cm)	0.789 **	0.361 *
根表面积 Root surface area/(cm ²)	0.646 **	0.232 *
根体积 Root volume/(cm ³)	0.631 **	0.552 **
侵染率 Colonization/(%)	0.806 **	0.465 *

**、* 表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 上差异显著

AMF 接种显著改变了杉木的 C、N、P 化学计量比。杉木接种 AMF 的前期,其 C:N、C:P、N:P 显著下降(摩西球囊霉处理下的 N:P 除外),其中根内根孢霉处理下的 C:P、N:P 下降最为明显。这主要是因为虽然 AMF 接种均能促进杉木对 N、P 的吸收,但是相对于杉木对 N 的吸收而言,根内根孢霉更有利于促进杉木对 P 的吸收。这与前人的研究结果相似,例如 Zhao 等^[31]对玉米接种根内根孢霉后显著降低其 N:P。李月灵^[32]等对七子花接种 AMF 后发现降低其 C:N、N:P、C:P。在接种前期,与未接种 AMF 处理相比,杉木接种摩西球囊霉后的 N:P 显著提高,这与高志强^[33]等的研究结果相似,这可能是因为摩西球囊霉相比于 P 素更利于促进 N 素的吸收。在接种后期,摩西球囊霉、根内根孢霉处理下杉木的 C:N 显著降低,但其 N:P 和 C:P 与未接种 AMF 相比无明显差异,这说明 AMF 对杉木 C:P 和 N:P 的影响可能表现在接种前期。

3.3 不同种类 AMF 接种对杉木土壤氮、磷流失的影响

本研究结果发现,杉木在接种 3 种 AMF 后均显著降低了硝态氮与铵态氮的淋溶。这可能归因于 AMF 通过诱导根系性状变化以及球囊霉素相关土壤团聚体改善土壤结构进而显著提高了杉木对 N 的吸收(从表 1 可知,杉木 N 吸收量与土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 DON 的淋溶量之间存在显著的负相关关系;与植物根系性状存在显著的正相关关系)^[34]。此外,目前关于 AMF 接种减少土壤 N 素流失还可能是因为土壤颗粒与 AMF 分泌的球囊霉素黏结以及 AMF 菌丝将土壤颗粒的缠绕包裹加强形成土壤水稳性大团聚体,进而可以改善土壤的

结构和保水率,从而使得 AMF 可以通过控制减少淋溶液的体积来实现降低 N 素淋溶损失^[11]。不同 AMF 对杉木土壤 N 素的调节作用在各个阶段存在差异^[35]。接种前期 AMF 降低了淋溶液 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N(幼套近明球囊霉除外)的淋溶量,但其对土壤淋溶液中 DON 和全 N 的淋溶量无显著差异性。虽然摩西球囊霉对植物 N 吸收的促进作用最强,但根内根孢霉相对于其他 AMF 处理显著降低了 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的淋溶,这可能是由于不同 AMF 在影响土壤 N 素淋溶方面的作用存在差异^[36]。杉木对 N 的吸收进而减少土壤中 N 的流失是其原因之一,AMF 还可能通过调节土壤团聚体,促进的土壤聚合,调节土壤的通气状况,进而影响土壤 N 素的淋溶^[37]。接种后期 AMF 降低了土壤中 NH_4^+ -N、全 N 和 NO_3^- -N 淋溶量,其中摩西球囊霉显著降低了全 N 淋溶量;摩西球囊霉和根内根孢霉更显著降低 NH_4^+ -N 淋溶量。这表明 AMF 对降低杉木土壤全 N 淋溶流失的影响主要发生在其接种后期。AMF 真菌对菌根反应性植物为主的植物群落的养分保留作用更大,因为这些植物随时间生长得更大,吸收的养分更多,从而减少了土壤中淋失损失的养分量^[2]。本研究中,土壤中 NO_3^- -N 的淋溶量大于 NH_4^+ -N 的淋溶量。这可能是因为 AMF 根外菌丝吸收同化 NH_4^+ 的成本要低于 NO_3^- 或是因为 AMF 缺乏将 NO_3^- -N 转移到植物的能力^[38-39]。还有可能是因为根外菌丝对 NH_4^+ -N 的吸收能力高于 NO_3^- -N,这是因为 NO_3^- -N 的移动性较强,容易发生转化,而 NH_4^+ -N 的移动性较弱容易固定吸收^[40-41]。

同样,本研究中 AMF 减少土壤 P 流失可能是由 AMF 接种促进植物对 P 的吸收引起的。从表 1 可知,杉木 P 吸收量与土壤全 P、无机 P、有机 P、可溶性 P 的淋溶量之间存在显著的负相关关系。表明 AMF 通过促进植物根系高亲和力磷转运基因的高效表达,增强了植物对 P 的吸收能力,并能够将其有效转移到植物的各个部位^[28],这也可能是植物磷增加的原因。通过获取磷,AMF 可以防止这种营养物质的流失。张丽等^[30]研究发现,经过 AMF 处理后的植株土壤径流中的总 P、可溶性 P 以及颗粒态 P 含量很明显低于对照。本研究结果与之相似,AMF 处理下的杉木土壤淋溶液中的全 P、有机 P、可溶性 P、无机 P 和颗粒态 P 的淋溶量要低于未接种 AMF 处理。另外 Martínez-García 等^[42]研究发现,P 的损失随着菌根定殖的增加而减少。这表明 AMF 在减少土壤 P 流失方面有一定的作用。本研究还发现,AMF 对土壤中 P 素流失的降低作用具有时间上的差异性。在接种前期,摩西球囊霉对全 P、有机 P、可溶性 P 和颗粒态 P 淋溶量的降低作用更为明显,而根内根孢霉对无机 P 淋溶量的降低作用更明显。接种后期幼套近明球囊霉对可溶性 P、无机 P 淋溶量的降低更显著,摩西球囊霉对颗粒态 P 淋溶量的降低更显著。这表明 AMF 对土壤淋溶液中 P 素的影响可能因 P 素形态和 AMF 的种类不同而有所差异^[43]。

4 结论

不同种类 AMF 接种显著提高了杉木幼苗的根系侵染率、根长、根表面积与根体积,而且摩西球囊霉对根系侵染率、根体积、根表面积、根长的促进作用显著高于另外两种 AMF 处理。AMF 接种显著促进了杉木对 N、P 的吸收,其中摩西球囊霉对 N 吸收的促进作用最强,而根内根孢霉在接种初期更有利于促进杉木对 P 的吸收。且 AMF 接种促进杉木 N、P 吸收与其接种提高杉木幼苗根系侵染率、根长、根表面积与根体积有关。此外,AMF 接种显著降低了 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的淋溶损失,其中根内根孢霉对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的淋溶降低效果最为显著。同时,接种 3 种不同的 AMF 后,杉木显著减少了土壤 P 素的流失,摩西球囊霉在接种前期显著降低了全 P、颗粒态 P、有机 P 和可溶性 P 的流失,而幼套近明球囊霉在接种后期显著降低了无机 P 与可溶性 P 的流失。总体而言,AMF 接种通过增加根系的侵染率、根长、根表面积以及根体积等多种机制进而促进杉木对 N、P 的吸收,从而有效减少了土壤 N、P 的流失。

参考文献(References):

- [1] Smith S E, Smith F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62: 227-250.
- [2] Van Der Heijden M G A. Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems. *Ecology*, 2010, 91(4): 1163-1171.
- [3] Cordell D, Drangert J O, White S. The Story of Phosphorus: Global Food security and food for thought. *Global Environ Change*, 2009, 19(2):

- 292-305.
- [4] Schüßler A, Schwarzott D, Walker C. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research*, 2001, 105(12): 1413-1421.
- [5] 王紫瑄, 解甜甜, 王雅茹, 杨杰艳, 杨秀清. 丛枝菌根真菌(AMF)对蒙古沙冬青幼苗的促生特性及作用机制. *干旱区研究*, 2023, 40(1): 78-89.
- [6] Horsch C C A, Antunes P M, Fahey C, Grandy A S, Kallenbach C M. Trait-based assembly of arbuscular mycorrhizal fungal communities determines soil carbon formation and retention. *New Phytologist*, 2023, 239(1): 311-324.
- [7] 王浩, 方燕, 刘润进, 陈应龙. 丛枝菌根中养分转运、代谢、利用与调控研究的最新进展. *植物生理学报*, 2018, 54(11): 1645-1658.
- [8] 周游, 杨敏, 郭冬琴, 潘兴娇, 丁博, 张杰, 周浓. 不同丛枝菌根真菌组合接种后对云南重楼根际土壤环境的影响. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(22): 96-109.
- [9] Li L, Zhou G Y, Liu J A, Li H. The resource investigation and community structure characteristics of mycorrhizal fungi associated with chinese fir. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(30): 5719-5724.
- [10] Asghari H R, Cavagnaro T R. Arbuscular mycorrhizas reduce nitrogen loss via leaching. *PLoS ONE*, 2012, 7(1): e29825.
- [11] Bender S F, Van Der Heijden M G A. Mycorrhizal effects on nutrient cycling, nutrient leaching and N₂O production in experimental grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 80: 283-292.
- [12] 张淑民. 植物氮、磷、钾联合测定的快速消煮法. *北京农业大学学报*, 1988, 14(3): 295-300.
- [13] 杨沐, 季生连, 郭寰, 段国珍, 樊光辉, 李建领, 王占林. 枸杞根系中 AMF 染色方法优化及其侵染率与土壤因子的关系. *山东大学学报(理学版)*, 2024, 59(11): 40-50.
- [14] 弓明钦, 王凤珍, 陈羽, 陈应龙. 西南桦对菌根的依赖性及其接种效应研究. *林业科学研究*, 2000, 1: 11-17.
- [15] Liu H, Wu M, Chen J, Gao Y B, Ren A Z. Arbuscular mycorrhizal fungus identity modulates growth effects of endophyte-infected grasses on neighboring plants. *Mycorrhiza*, 2020, 30(5): 663-670.
- [16] 高文童, 张春艳, 董廷发, 胥晓. 丛枝菌根真菌对不同性别组合模式下青杨雌雄植株根系生长的影响. *植物生态学报*, 2019, 43(1): 37-45.
- [17] 李果果, 刘金华, 宋娟, 李铭燕, 李冬萍, 刘升球, 张金莲, 陈廷速. 不同丛枝菌根真菌促进资阳香橙幼苗生长研究. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(6): 1022-1027.
- [18] 王红菊, 王幼珊, 张淑彬, 左强, 张永清, 邹国元. 丛枝菌根真菌在蔬菜基质育苗上的应用研究. *华北农学报*, 2011, 26(2): 152-156.
- [19] Van Der Heijden M G A. Arbuscular mycorrhizal fungi as support systems for seedling establishment in grassland. *Ecology Letters*, 2004, 7(4): 293-303.
- [20] Jach-Smith L C, Jackson R D. N addition undermines N supplied by arbuscular mycorrhizal fungi to native perennial grasses. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116: 148-157.
- [21] 王斌, 任学花, 党兴东, 屠丽芳. 3 种丛枝菌根真菌对沙冬青的接种效应. *甘肃林业科技*, 2022, 47(2): 28-32.
- [22] Hodge A, Fitter A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(31): 13754-13759.
- [23] Tanaka Y, Yano K. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(10): 1247-1254.
- [24] Bago B, Vierheilig H, Piché Y, Azcón-Aguilar C. Nitrate depletion and pH changes induced by the extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* grown in monoxenic culture. *New Phytologist*, 1996, 133(2): 273-280.
- [25] 何斐, 李川, Shah F, 卢谢敏, 王莹, 王梦, 阮佳, 魏梦琳, 马星光, 王卓, 姜浩. 丛枝菌根菌丝桥介导刺槐-魔芋间碳转运和磷吸收. *植物生态学报*, 2023, 47(6): 782-791.
- [26] Wahid F, Muhammad S, Shan F, Muhammad A, Ali K I, Emre A, Amjad A, Tariq S, Mukhtar A, Muhammad S, Hidayat U, Abdul B, Muhammad N, And Khan N A. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth and phosphorus uptake of mung bean plants fertilized with composted rock phosphate fed dung in alkaline soil environment. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(15): 1760-1769.
- [27] George T S, Gregory P J, Hocking P, Richardson A E. Variation in root-associated phosphatase activities in wheat contributes to the utilization of organic P substrates in vitro, but does not explain differences in the P-nutrition of plants when grown in soils. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64(3): 239-249.
- [28] Kuzyakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 83: 184-199.
- [29] 薛英龙, 李春越, 王苻蓉, 王益, 刘津, 常顺, 苗雨, 党廷辉. 丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 10-20.
- [30] 张丽, 杨继宇, 贾广军, 宁东卫, 夏运生, 范世杰, 张乃明, 刘大会. 菌根对滇池流域玉米//大豆间作红壤磷素迁移削减的影响因素研

- 究. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(06): 909-915.
- [31] Zhao R X, Guo W, Bi N, Guo J Y, Wang L X, Zhao J, Zhang J. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Affect the Growth, Nutrient Uptake and Water Status of Maize (*Zea mays* L.) Grown in Two Types of Coal Mine Spoils under Drought Stress. *Applied Soil Ecology*, 2015, 27: 883-895.
- [32] 李月灵, 金则新, 罗光宇, 陈超, 孙中帅, 王晓燕. 干旱胁迫下接种丛枝菌根真菌对七子花非结构性碳水化合物积累及 C、N、P 化学计量特征的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 963-971.
- [33] 高志强, 谢腾龙, 艾俊国, 梅琳琳. 施氮下丛枝菌根真菌对羊草化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(3): 113-118.
- [34] 张丽, 贾广军, 夏运生, 张乃明, 刘大会, 宁东卫, 陈瑞. 菌根和间作对滇池流域红壤磷素迁移的影响. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 760-766.
- [35] 张淑娟. 丛枝菌根—稻田生态系统对氮磷的削减功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [36] Jackson L E, Burger M, Cavagnaro T R. Roots, Nitrogen Transformations, and Ecosystem Services. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59(1): 341-363.
- [37] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 俞慎. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控. *生态学报*, 2016, 36(14): 4233-4243.
- [38] Li J, Zhou L, Chen G, Yao M, Liu Z, Li X, Yang X, Yang Y, Cai D, Tuexum Z, Li B, Nie T, Chen X. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance drought resistance and alter microbial communities in maize rhizosphere soil. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 37: 103947.
- [39] Tanaka Y, Yano K. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(10): 1247-1254.
- [40] Hawkins H J, George E. Reduced ¹⁵N-nitrogen transport through arbuscular mycorrhizal hyphae to *Triticum aestivum* L. supplied with ammonium vs. nitrate nutrition. *Ann Bot*, 2001, 87(3): 303-311.
- [41] Jin H R, Zhang P H, Jiang D H. Study on mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi absorbing and transporting nitrogen from different sources to the host plant with isotopic tracin. *Acta Pedol Sin*, 2011, 48(4): 888-892.
- [42] Martínez-García L B, De Deyn G B, Pugnaire F I, Kothamasi D, Van Der Heijden M G A. Symbiotic soil fungi enhance ecosystem resilience to climate change. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5228-5236.
- [43] Verbruggen E, Kiers E T, Bakelaar P N C, Röling W F M, van der Heijden M G A. Provision of contrasting ecosystem services by soil communities from different agricultural fields. *Plant and Soil*, 2012, 350(1): 43-55.