

DOI: 10.5846/stxb201809202061

崔莉娜, 郭弘婷, 李维扬, 王金平, 黄章翰, 张金池, 刘光正, 王丽艳, 姜姜. 不同林龄杉木人工林菌根侵染特征的研究. 生态学报, 2019, 39(6):

Cui L N, Guo H T, Li W Y, Wang J P, Huang Z H, Zhang J C, Liu G Z, Wang L Y, Jiang J. Study on the characteristics of mycorrhizal colonization in Chinese fir plantations at different ages. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):

不同林龄杉木人工林菌根侵染特征的研究

崔莉娜¹, 郭弘婷¹, 李维扬¹, 王金平¹, 黄章翰¹, 张金池¹, 刘光正², 王丽艳², 姜姜^{1,*}

¹ 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037

² 江西省林业科学研究院, 南昌 330032

摘要:丛枝菌根真菌是一种通过土壤侵染植物根系, 与寄主植物互利共生的重要有益真菌。探究不同林龄杉木林中菌根侵染状况与土壤养分的变化规律, 有利于深入认识丛枝菌根真菌—杉木相互作用的养分调控因素, 从而为改善杉木人工林土壤肥力、促进杉木林可持续经营提供依据。本研究分别选取 10a、25a、45a 杉木纯林, 分析了不同林分菌根侵染率与孢子密度及部分土壤养分因子(全磷、速效磷、全钾、速效钾)的关系。结果表明:(1)菌根侵染率与孢子密度均呈现出随林龄增大而增大的趋势, pH 随林龄增大而减少的趋势;(2)根际土中磷的含量总体偏低, 而且受到土壤酸化流失和丛枝菌根真菌积累的双重影响呈现出先减少后增加的趋势;(3)虽然有效钾含量随林龄变化趋势不显著, 但丛枝菌根真菌能促进土壤钾的积累。因此, 丛枝菌根真菌能有效调控根际土的养分动力学特征, 减缓土壤酸化造成的养分流失。

关键词:杉木人工林; 丛枝菌根真菌; 菌根侵染率; 孢子密度

Study on the characteristics of mycorrhizal colonization in Chinese fir plantations at different ages

CUI Lina¹, GUO Hongting¹, LI Weiyang¹, WANG Jinping¹, HUANG Zhanghan¹, ZHANG Jinchi¹, LIU Guangzheng², WANG Liyan², JIANG JIANG^{1,*}

¹ Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration in Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

² Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are important beneficial fungi that colonize plant roots through soil and mutually coexist with host plants. Exploring the changes in soil nutrients and mycorrhizal colonization status of Chinese fir forests of different ages could be benefit for in-depth understanding of the interactions between nutrients and mycorrhizal fungi in fir forest, providing suggestions for the improvement of soil fertility and promoting sustainable management of Chinese fir forest. In this study, 10-year-old (10a), 25-year-old (25a), and 45-year-old (45a) pure Chinese fir forests were selected, and the relationships between mycorrhizal colonization rate, spore density and rhizosphere soil nutrients (total phosphorus, available phosphorus, total potassium, and available potassium) were analyzed. The results showed that: (1) Both mycorrhizal colonization rate and spore density increased with forest age, while pH decreased with forest age. (2) The content of phosphorus in the rhizosphere soil is low. With the effects of soil acidification and arbuscular mycorrhizal fungal accumulation, rhizosphere phosphorus exhibited a trend of U shape. (3) Although the content of available potassium did not change with stand age significantly, the arbuscular mycorrhizal fungi promoted the accumulation

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505500, 2017YFC0505502); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A062)

收稿日期:2018-09-20; **修订日期:**2019-02-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecologyjiang@gmail.com

of potassium in the rhizosphere soil. Therefore, arbuscular mycorrhizal fungi can effectively regulate the nutrient dynamics of rhizosphere soil and slow down the nutrient loss caused by soil acidification.

Key Words: Chinese fir plantation; arbuscular mycorrhizal fungi; mycorrhizal colonization rate; spore density

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的一种生长在南方的速生针叶用材树种,因其材质优良、生长周期短、经济效益高等特点,深受青睐^[1]。随着社会经济的发展,对木材的需求量越来越高,但由于对其不合理的经营方式使得杉木林土壤地力衰退、初级生产力下降^[2],影响了生态系统的平衡以及社会经济的发展。为提高杉木低效人工林土壤肥力,改善杉木生长状况,从二十世纪七十年代以来,已有多名专家学者针对提高杉木人工林生产力做出相关研究,主要集中在其生态系统生物量^[2-4]、碳储量^[5-8]、化学计量特征以及杉木的生产力等方面。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是自然界中一种广泛存在的真菌,它可以通过土壤侵染大多数陆生植物根部而形成一种互利共生体^[9],依赖宿主植物提供的能量物质生存,同时,为宿主提供土壤中的营养物质,促进宿主植物的生长,进而改良土壤结构、影响宿主植物的生理生态功能、促进植物养分和水分吸收、影响生态系统结构与功能^[10]。AMF 会影响土壤环境、植物生长,同时,宿主植物和环境因子也会影响 AMF 的繁殖与发育,Allen 等^[11]提出,环境因子对 AMF 分布及侵染的影响要大于寄主植物本身对它的影响,所有的环境因子中,对其影响最大的是土壤因子^[12]。然而,这些研究对于 AMF 与土壤养分之间的关系并不明确,有研究结果显示,AMF 增加了土壤中养分元素含量^[13],另一部分认为 AMF 促进植物吸收养分,从而减少了土壤中养分元素含量^[14-16]。究竟二者之间是如何相互影响的,本研究提出以下假说,由于植物不同生长阶段对养分需求不同、环境状况不同,从而 AMF 与土壤养分含量之间的关系在植被不同生长阶段不同。针对该问题,本文以江西省官山林场 10a、25a、45a 杉木人工林纯林为研究对象,分析不同林龄杉木人工林的菌根侵染率以及根际土壤理化性质的状况,以期揭示不同林龄杉木人工林土壤理化性质特征及其与菌根侵染率、孢子密度之间的关系。

1 研究区概况

研究地点位于江西省中部吉安市永丰县官山林场,地理坐标为 E115°17'—115°56', N26°38'—27°32'。地貌主要是丘陵、山地,气候类型属于中亚热带湿润气候,四季分明,降雨充沛,光照充足,年均气温是 18℃,年均降雨量是 1627.3 mm,无霜期是 279 天。土壤类型丰富,主要含有水稻土、潮土、紫色土、炭质土、红壤、山地黄壤、山地黄棕壤等 7 个土类。红壤是当地典型的土壤类型,面积也是最大。官山林场自然条件优越,适宜松、杉、竹及多种阔叶树生长,是江西省的林业重点产区^[7]。主要种植树种为杉木、湿地松、毛竹、楠木、枫香、红豆杉。选取官山林场下属的三个主要样地地点,大洲山分场(115°29'57"E, 27°14'48"N)、东毛坑分场(E115°33'10", N27°10'43")、遇元分场(E115°34'39", N27°14'13") (图 1)。

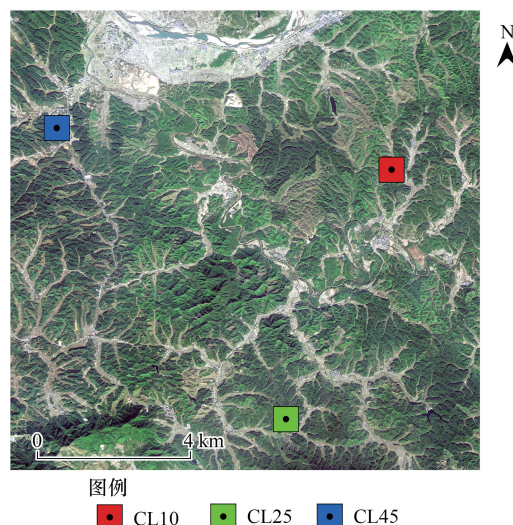


图 1 样点地理分布图 (CL10: 10a 杉木林样地; CL25: 25a 杉木林样地; CL45: 45a 杉木林样地)

Fig.1 The location of sampling plots (CL10: 10a fir plots; CL25: 25a Chinese fir plots; CL45: 45a Chinese fir plots)

2 研究方法

2.1 样品采集

2017 年 12 月前往江西省永丰官山林场进行不同林龄杉木人工林的采样。分别选取 45a(1972 年)、25a(1992 年)、10a(2007 年)三种林龄的人工杉木林样地,样地土壤类型、立地条件一致,杉木种源一致,林分的基本状况见表 1,每个样地设置 3 个 20m×20 m 的样方,在每个样方内随机选择 3 株杉木。在距离杉木主干 30cm 范围内,除掉土壤表面的动植物残体,挖 0—30cm 深的土壤剖面,取主根系附近带有细根的根系,将其放入无菌自封袋中剧烈抖动 1min,使根系与土壤分离,收集到的土壤作为根际土^[17]。采集根系和根际土分别编号装于自封袋中,置于便携式小冰箱内。采集回来的根系,水洗干净后置于盛有 FAA(50mL 冰醋酸,130mL 甲醛,2000mL50%乙醇)固定液的塑料瓶中,24h 后用于菌根形态的观察与侵染率的测定。将土样过 2mm 筛,风干用于部分土壤因子和孢子密度的测定。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

样地 Site	林龄 Age/a	坡向 Aspect	坡位 Slope position	坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation/m	平均株高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	郁闭度 Canopy density
CL10	10	阳	中	32	171.34	12.16	14.06	0.7
CL25	25	阳	中	30	173.30	13.10	17.49	0.8
CL45	45	阳	中	28	163.72	20.50	20.37	0.8

2.2 测定指标及方法

2.2.1 土壤理化性质的测定

土壤的 pH 采用电位法测定;土壤全 K 和速效 K 采用 1 mol/L 乙酸铵浸提—火焰光度法测定;土壤全 P 采用酸溶—钼锑抗比色法测定;土壤速效 P 采用氟化铵-盐酸浸提法测定^[18]。

2.2.2 菌根侵染率测定

将 1.0g 新鲜根段从 FAA 固定液中取出,用蒸馏水冲洗 3 次,直到无刺激性气味后放入 10%KOH 溶液中软化透明,利用“Phillips 和 Hayman 染色法”改良法进行染色,染色后,将根样放入乳酸甘油中脱色 12h,随机选取根样放在载玻片上,盖上盖玻片,轻轻敲打。在体式显微镜和光学显微镜下可以清楚地看到菌根的组织结构,包括侵入点、菌丝、丛枝、泡囊等,统计根段样本中被丛枝菌根真菌侵染根段数,按照下面公式计算杉木的菌根侵染率:

$$\text{菌根侵染率} = \text{侵染根段数} / \text{被检根段总数} \times 100\%$$

2.2.3 孢子密度测定

用湿筛倾析法分离植物根际土壤中的 AM 真菌孢子。土样风干后,称取 100g 混合均匀的根际土壤于烧杯中,加入 500mL 水搅拌,静置至少 1h;将孔径为 0.5mm、0.2mm、0.038mm 的土壤标准筛从上到下排列,通过 3 层筛后再加水 500mL 搅拌、静置、过筛,至少重复 3 次。用 60%的蔗糖溶液将各孔筛上的滞留物转移到 100mL 的离心管中,以 3000r/min 的速度离心 3min,将上清液倒入孔隙最小的筛子,再用 100mL 蒸馏水将筛上滞留物转移至 40mL 玻璃瓶中,放入 4℃ 冰箱可保存 30d。

将玻璃瓶震荡均匀,吸取 2—5mL 于滤纸上。在体式显微镜下用解剖针将孢子与有机碎屑分离,将孢子按照形态分开,计孢子数并将其放入离心管中备用,重复 4—5 次。

孢子密度(Spore number, SN):指每克土样中丛枝菌根真菌的孢子个数。

$$SN = \text{某土样中 AMF 所有孢子数} / \text{土壤干质量}$$

2.2.4 数据分析

采用 SPSS25.0 软件对数据(平均值 $\pm$ 标准差)进行统计分析。用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD, $\alpha=0.05$)比较各个变量的差异显著性。利用双尾检验的 Pearson 相关分析法分析各个土壤养分因子与 AM 菌根侵染率、孢子密度之间的关系。

3 结果与分析

3.1 AMF 结构及孢子密度变化情况

所测定的所有样本均含有 AMF 结构,即至少含有丛枝、泡囊、菌丝三者之一(图 2),且三种结构存在概率:菌丝>泡囊>丛枝。观察到杉木 AMF 菌丝具有内生菌丝和外生菌丝两种,观察过程中看到的多数是内生菌丝,外生菌丝出现的概率比较小。内生菌丝居多存在于细胞内或贯穿细胞间,并且大多已经发生变态,成丛状或扭转状结构;泡囊则是多数分布于细胞间隙,呈现规则球形或椭圆形并且有黑色充满内部;丛枝多为不规则四边形或多边形,一般充满细胞,呈现黑色。利用荧光显微镜观察孢子形态,发现孢子多呈现褐色、圆形(图 3)。

分析不同林龄菌根侵染率发现,菌根侵染率随着林龄增加显著增加,10a、25a、45a 杉木菌根侵染率分别为 44.33%、59.33%、76.67%;孢子密度在 48.98—91.91 之间,呈现与菌根侵染率相同变化趋势,且三个林龄间都存在显著差异(图 4)。



图 2 AMF 结构(图中 1:菌丝、2:泡囊、3:丛枝)

Fig.2 AMF structure(in the picture1: hypha, 2: vesicle, 3: arbuscular)

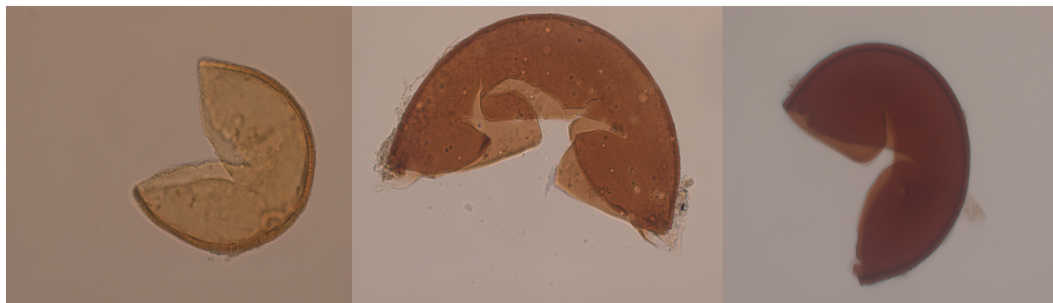


图 3 孢子形态

Fig.3 Spore morphology

3.2 土壤养分变化情况

分析不同林龄根际土壤理化性质(表 1,图 5),结果表明:根际土整体呈现酸性,pH 范围在 3.85—4.67 之间,随着林龄增加,酸性增强,且在不同林龄间存在显著差异。土壤全 P 含量随林龄增加,先减少后增加,25a 杉木显著低于 10a 和 45a;速效 P 变化趋势相同,25a 杉木含量最低,且与 10a 和 45a 都存在显著差异;全 K 与速效 K 含量均随林龄增加而增加,但速效 K 含量在各林龄间差异不明显。将速效 P 与全 P 之比作为磷素活

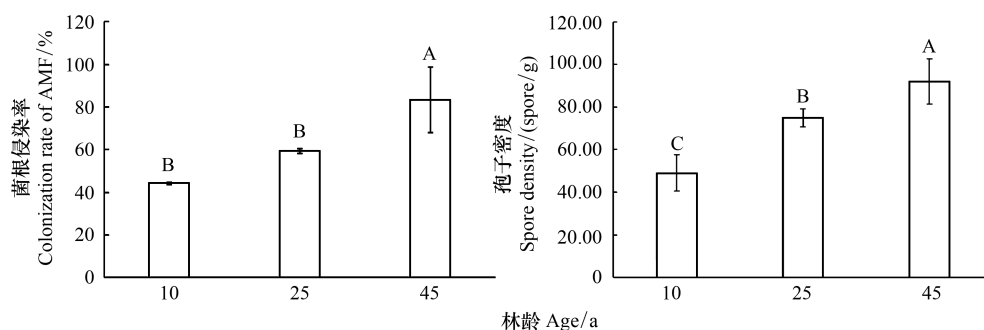


图4 10a,25a,45a 菌根侵染率与孢子密度 (不同字母表示显著差异)

Fig.4 Colonization rate of AMF and spore density in the Chinese fir forest of 10a, 25a and 45a (different letters above bars indicate significant difference)

化系数 (Phosphorus activation coefficient, 简称 PAC), 用来表示土壤中磷素的有效性, 当 $PAC < 2.0\%$, 则说明磷素的利用率较低^[19-21], 该实验测得 PAC 在 10a, 25a, 45a 依次为 0.29%、0.49%、0.21% 之间, 磷素利用率最高的 25a 杉木林, 其 PAC 远低于 2.0%。

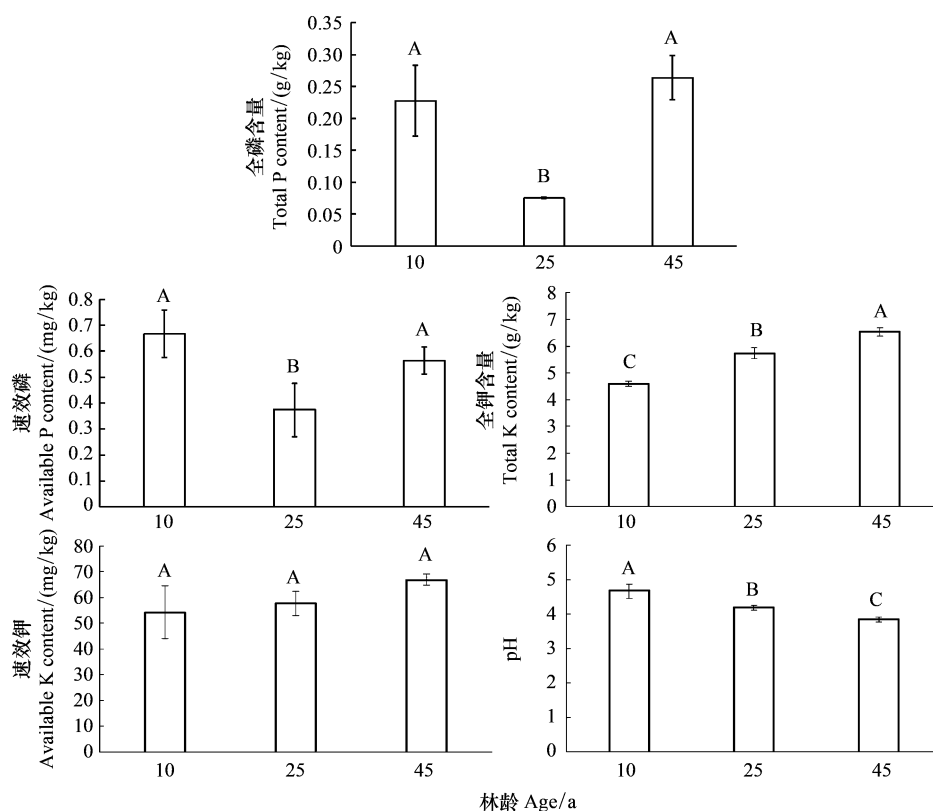


图5 不同林龄土壤养分含量(不同字母表示显著差异)

Fig.5 Soil nutrient contents of 10a, 25a and 45a (different letters above bars indicate significant difference)

3.3 AMF 和孢子密度与土壤因子的相关性分析

相关性分析结果显示(表2):除了全 P 和速效 P, 其他土壤因子及菌根侵染特征均与林龄显著相关, 与前面结果一致。土壤养分与菌根侵染率及孢子密度之间的关系中, 全 K 比速效 K 关系更显著, 而 P 的线性关系不显著, 表明存在其它复杂的关系对根际土中 P 含量产生影响。

菌根侵染率和孢子密度与 pH 呈极显著负相关, 且孢子密度与其相关性更大, 随着菌根侵染率和孢子密

度的增加, pH 值均显著下降(图 6a、b), 说明 AMF 对 pH 变化较为敏感, 且其生长发育更适应偏酸性条件。速效 K 含量随孢子密度的增加而增加, 而随菌根侵染率的增加趋于饱和(图 6c、d)。全 P 及速效 P 与菌根侵染率和孢子密度之间呈现微弱的负相关, 但规律不明显, 说明根际土中 P 含量受 AMF 与其他因子交互作用的影响, 表现出复杂的关系(图 6f、g)。菌根侵染率与孢子密度呈极显著相关关系, 且菌根侵染率随孢子密度的增加呈现加速上升的趋势。当孢子密度较低时, 菌根真菌对寄主根系的侵染比率几乎保持不变, 只有当孢子密度增大到一定量时, 菌根真菌的侵染成功率快速上升(图 6g)。

表 2 AM 真菌侵染率与土壤因子相关性分析

Table 2 Correlation analysis between AM fungal infection rate and soil factors

	林龄 Age	菌根侵染率 Colonization rate of AMF	孢子密度 Spore density	全磷 Total P	速效磷 Available P	全钾 Total K	速效钾 Available K	pH
林龄 Age	1	0.911 **	0.916 **	0.243	-0.233	0.971 **	0.691 *	-0.937 **
菌根侵染率 Colonization rate of AMF		1	0.893 **	0.247	-0.109	0.862 **	0.579	-0.883 **
孢子密度 Spore density			1	0.072	-0.312	0.949 **	0.694 *	-0.972 **
全磷 Total P				1	0.786 *	0.066	0.460	-0.156
速效磷 Available P					1	-0.408	0.203	0.259
全钾 Total K						1	0.647	-0.951 **
速效钾 Available K							1	-0.786 *
pH								1

“* * .”在 0.01 水平(双侧)上极显著相关, “* .”在 0.05 水平(双侧)上显著相关

4 讨论与结论

4.1 杉木人工林土壤养分随林龄变化

我们的研究发现, 土壤 pH 呈酸性, 这与张美庆等^[22]的研究结果相似, 且随林龄增加酸性增强, 分析原因主要是随着林龄增加, 杉木林下凋落物增加, 凋落物分解产生酸性物质, 另一方面, 研究证明, 在缺磷地区, 植物生长过程中会分泌质子和有机酸, 以促进对难溶性 P 的吸收利用^[15, 16, 23], 同时也会造成土壤酸化严重。土壤酸化首先受到影响的是植物根系, 抑制了根系对养分的吸收, 同时造成土壤中养分元素的流失, 这是造成该地区林分地理退化的原因之一^[24]。在过去的研究中, P 含量随林龄变化结果并不一致, 刘振坤等^[13]在黄土高原地区研究刺槐林发现, 随林龄增加, P 含量先增加后降低。而本文先减少后增加的结果与陈安娜等^[25]研究结果一致, 分析原因主要有两个方面: 一方面, 前期受土壤酸化的影响造成土壤磷素流失, 后期由于 AMF 的增加, 促进了根际土中磷素的积累; 另一方面, 前期杉木处于速生阶段, 对养分需求较高, 归还速率低于吸收速率, 进而导致 P 含量降低, 当林分成熟后, 生长速率相对变慢, 枯落物的归还使土壤养分有增加趋势。另外, 也有报道指出由于 AMF 促进植物对 P 的吸收, 会使得土壤中 P 素含量更低^[14, 15, 26]。25a 杉木对 P 的需求量大, AMF 的存在促进了其对 P 的吸收, 而林分成熟后对养分吸收和归还速度相对平衡, AMF 的存在能有效吸收土壤酸化造成养分流失。PAC 随林龄先增加后降低, 且均低于 2.0%, 说明该地区 P 的有效性低, 全 P 难以转化为速效 P, 研究证明速效 P 是反应土壤 P 供应多少的实际指标^[27], 因此, P 一直是该地区限制植物生长的重要因子, 要提高土地生产力, 必须提高磷素活化能力, 研究发现, 适当间伐有利于提高土壤 P 有效性^[28], 同时可以改善林内小气候^[29], 因此, 在 25a 左右适当间伐, 有利于提高土地生产力, 促进植物生长。全 K 与速效 K 含量随林龄增加而增加, 这与张社奇等^[30]在刺槐林中的研究结果相同, 原因可能是随着林龄增加, 植物根系数量以及土壤微生物量增加, 促进了难溶矿物态钾向水溶性、交换态钾转化, AMF 的增加也促进了 K 的积累, 另外, 张远等^[31]在对鹅掌楸的研究中发现, 植物生长幼年期对速效 K 的需求量较大, 这也可能是造成幼龄林中 K 含量较少的原因之一。而尹永强等^[32]人的研究中, 土壤酸化会降低盐基离子的含量, 与本研究结果

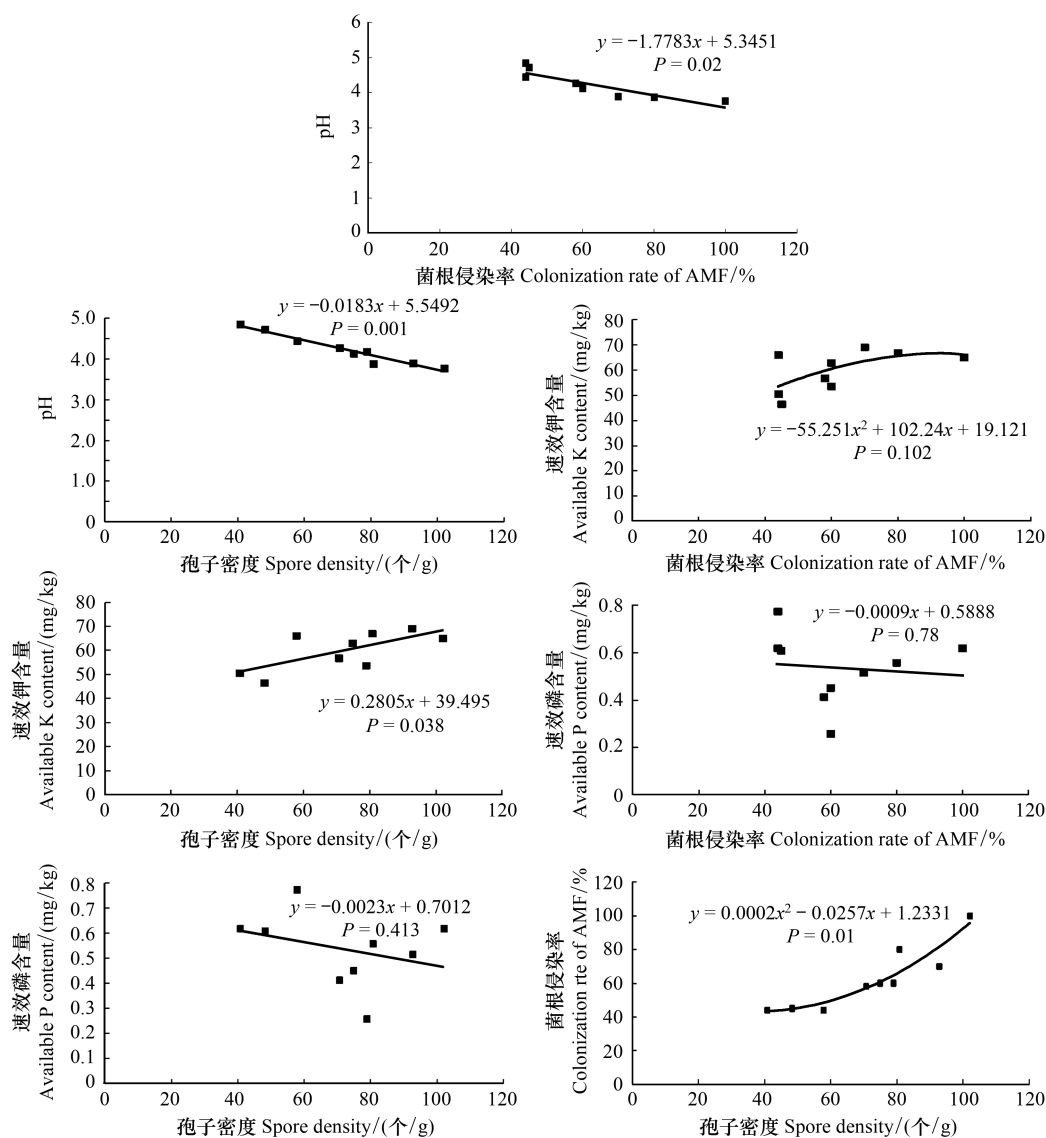


图 6 AMF、孢子密度与土壤因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of AMF, spore density and soil factors

不一致,分析原因可能是 AMF 促进养分积累能力高于土壤酸化对土壤中盐基离子的影响。

4.2 AMF 侵染状况及孢子密度随林龄的变化

国内外已有许多专家学者对林龄与二者的关系进行了研究,如 Cheng 等^[33]研究加拿大魁北克市糖枫 (*Acer saccharum*) 的菌根侵染率与林龄呈负相关,刘振坤等^[13]研究我国黄土高原地区刺槐的菌根侵染率和孢子密度随林龄先增大后减小,但本研究发现 AMF 侵染率和孢子密度与林龄极显著正相关。分析原因,AMF 的生长与结构受到植被类型和 pH 影响^[34],杉木林凋落物分解速率相对较慢^[35],随着林龄增加,其凋落物归还量增大,促进土壤有机质积累,有利于 AMF 的繁殖生长,另一方面,研究证明,pH 通过影响孢子的萌发、芽管菌丝的生长和菌丝对宿主植物根系的侵染等影响 AMF 的产孢量,一般情况下,AMF 更适应酸性条件下产孢,菌根侵染率和孢子密度与 pH 呈负相关^[36-38],这与本研究结果一致,另外该地区是典型的低效林区,需要 AMF 促进植物吸收养分。

4.3 不同林龄杉木人工林生长状况的影响因素

本研究发现,林龄是影响杉木人工林生长状况的重要因素,菌根侵染率、孢子密度、pH 与林龄呈极显著相

关,速效 K 含量与林龄显著正相关,杉木不同生长阶段土壤状况不同,分析原因主要是不同生长阶段植物的吸收与归还不同。杉木通过 AMF 促进难溶性元素和水分的吸收利用^[39],帮助自身生长。本研究结果显示,菌根侵染率与速效 P 呈微弱的负相关,与前人的研究结果相似,Tawaray 等^[40]研究证明速效 P 和 AMF 的关系最为密切,李蓉等^[41]人的研究中,杉木根际土中存在一定的溶磷细菌,并且溶磷细菌与 AMF 之间存在协同作用,二者共同促进 P 的吸收和作物生长^[42, 43],另外,由于杉木长期处于缺磷环境中,溶磷菌含量较高,实验证明,溶磷菌会产生致酸物质^[41],降低土壤 pH。也有相关研究表明,光照强度与菌根的形成具有显著的相关性^[44]。还有学者研究表明,日照长短会影响 AMF 孢子的发育^[45],但是在本研究中,三种林分郁闭度相似,因此,光照并不是影响 AMF 的主要因素。具体来说,10a 杉木正处于生长旺盛期,对养分、水分需求量大,此时土壤养分充足,足以通过根系被植物吸收,因此,AMF 作用不明显;25a 杉木人工林干才快速发育,林分密度增加,林内竞争较大,此时的杉木根系向土层深处伸长,汲取更深层的养分,同时给 AMF 提供了更多生长的场所,而随着 AMF 侵染植物根部的比率增大,增强了植物对于土壤中水分与养分的吸收,二者形成互利共生的关系,此时是 AMF 充分发挥作用的阶段;45a 杉木人工林属于成熟林,木材生长相对缓慢,对光照、养分等条件的需求量相对减少,植物根系错综复杂,形成根系网,而此时的菌根也形成菌根网^[46],但是,养分含量并不是该阶段主要的限制因子,植物根系优先吸收,AMF 作用相对降低。

4.4 结论

本研究得出了杉木人工林不同林龄下土壤养分含量、菌根侵染率、孢子密度会发生显著变化,这些都是杉木生长过程中重要的影响因子,随林龄的增加菌根侵染率、孢子密度和速效 K 都呈现增加的趋势;林龄增加,土壤酸性增强,在 pH 和 AMF 交互作用下,土壤中全 P 和速效 P 先减少后增加,这为改良土壤酸碱性、提高土壤地力提供了方向。对于 AMF 不同林龄杉木林的具体影响机理还有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 卢妮妮,张鹏,徐雪蕾,刘晓兰,李振林,王新杰,彭道黎. 杉木林地土壤微生物研究进展. 世界林业研究, 2017,30(5):8-12.
- [2] 赵均嵘. 杉木林生态系统转换对土壤磷形态的影响及其机制[D]. 福建农林大学, 2012.
- [3] 郭琦,王新杰,衣晓丹. 不同林龄杉木纯林下生物量与土壤理化性质的相关性. 东北林业大学学报, 2014(3):85-88.
- [4] 杨超,田大伦,康文星,项文化,闫文德,方晰,梁小翠. 连栽 14 年生杉木林生态系统生物量的结构特征. 中南林业科技大学学报, 2011,31(05):1-6.
- [5] 涂宏涛,万杰,孙玉军,梅光义,刘素真. 不同林龄杉木人工林根生物量及其相容性模型. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015,39(6):81-86.
- [6] 涂宏涛,孙玉军,刘素真,董云飞,方景. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布——以福建将乐县杉木人工林为例. 中南林业科技大学学报, 2015,35(07):94-99.
- [7] 曾伟,江斌,熊彩云,肖复明,张开珍. 江西省不同林龄杉木碳储量分配格局. 中国农学通报, 2015,31(28):1-5.
- [8] 兰斯安,杜虎,曾馥平,宋同清,彭晚霞,韩畅,陈莉,苏樑. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2016,27(4):1125-1134.
- [9] 李秋玲凌婉婷高彦征李福春熊巍. 丛枝菌根对有机污染土壤的修复作用及机理. 应用生态学报, 2006,17(11):2217-2221.
- [10] Augé R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza, 2001,11(1):3-42.
- [11] Allen E B, Allen M F, Helm D J. Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity. Plant & Soil, 1995,170(1):47-62.
- [12] Gong M, Tang M, Zhang Q. Effects of climatic and edaphic factors on arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of Hippophae rhamnoides in the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(2):62-67.
- [13] 刘振坤,田帅,唐明. 不同树龄刺槐林丛枝菌根真菌的空间分布及与根际土壤因子的关系. 林业科学, 2013,49(8):89-95.
- [14] 钟思远,张静,童琳,高一飞,夏艳菊,唐旭利. 亚热带森林优势树种氮、磷可利用性与菌根侵染率的关系. 生态环境学报, 2016,25(12):1929-1936.
- [15] Hoffland E, Boogaard R V D, Nelemans J. Biosynthesis and root exudation of citric and malic acids in phosphate - starved rape plants. New Phytologist, 2010,122(4):675-680.
- [16] Lipton D S, Blanchar R W, Blevins D G. Citrate, Malate, and Succinate Concentration in Exudates from P-Sufficient and P-Stressed Medicago sativa L. Seedlings. Plant Physiology, 1987,85(2):315-317.

- [17] Clegg S, Gobran G R, Guan X. Rhizosphere chemistry in an ammonium sulfate and water manipulated Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] forest.. Canadian Journal of Soil Science, 1997,77(4).
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[Z]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 李卿叁. 杉木林生态系统转换对土壤铝形态的影响及其机制[D]. 福建农林大学, 2011.
- [20] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究. 中国土壤与肥料, 2011(6):76-82.
- [21] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究. 土壤通报, 1994(6):259-260.
- [22] 张美庆, 王幼珊, 张弛, 黄磊. 我国北方 VA 菌根真菌某些属和种的生态分布. 真菌学报, 1994(3):166-172.
- [23] Dinkelaker B, Hehlgler C, Neumann G. Root exudates and mobilization of nutrients. Trees Contributions to Modern Tree Physiology, 1997.
- [24] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants.. Journal of Ecology, 2012,76(4):1250.
- [25] 陈安娜, 王光军, 陈婵, 李淑英, 李维佳. 亚热带不同林龄杉木林叶-根-土氮磷化学计量特征. 生态学报, 2018,38(11).
- [26] Lipton D S, Blanchar R W, Blevins D G. Citrate, Malate, and Succinate Concentration in Exudates from P-Sufficient and P-Stressed *Medicago sativa* L. Seedlings. Plant Physiology, 1987,85(2):315-317.
- [27] 曹娟, 闫文德, 项文化, 湛小勇, 雷丕锋, 向建林. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征. 生态学报, 2014,34(22):6519-6527.
- [28] 叶钰倩, 赵家豪, 刘畅, 关庆伟. 间伐对马尾松人工林根际土壤磷组分的影响. 生态学杂志, 2018,v.37;No.298(05):76-82.
- [29] Chuong DAO Ngoc, 林达, 洪森先, 田野, 方升佐. 间伐对杨树人工林土壤微生物量和氮含量的影响. 森林与环境学报, 2016,36(4):416-422.
- [30] 张社奇, 王国栋, 张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响. 水土保持学报, 2008(05):91-95.
- [31] 张远, 李火根, 蒋祥英, 戴其生, 张焕朝, 宋宏林, 张井义. 土壤因子对杂交鹅掌楸幼林生长的影响. 浙江农林大学学报, 2016,33(1):94-101.
- [32] 尹永强, 何明雄, 邓明军. 土壤酸化对土壤养分及烟叶品质的影响及改良措施. 中国烟草科学, 2008,29(1):51-54.
- [33] Cheng S, Widden P, Messier C. Light and tree size influence belowground development in yellow birch and sugar maple. Plant & Soil, 2005,270(1):321-330.
- [34] 马玉颖, 张焕朝, 项兴佳, 王道中, 郭熙盛, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土丛枝菌根真菌群落的影响. 应用生态学报, 2018,29(10):3398-3406.
- [35] 章志琴. 杉木与阔叶树凋落物分解特征的比较及其混合分解研究[D]. 福建农林大学, 2005.
- [36] 盖京苹, 冯固, 李晓林. 我国北方农田土壤中 AM 真菌的多样性. 生物多样性, 2004,12(4):435-440.
- [37] Bai C, He X, Tang H. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China. Soil Biology & Biochemistry, 2009,41(5):941-947.
- [38] 盖京苹, 刘润进. 土壤因子对野生植物 AM 真菌的影响. 应用生态学报, 2003,14(3):470-472.
- [39] 张倩. 植物相互作用与丛枝菌根真菌[D]. 浙江大学, 2011.
- [40] KeitaroTawaraya, MasanoriSaito, MikioMorioka. Effect of phosphate application to arbuscular mycorrhizal onion on the development and succinate dehydrogenase activity of internal hyphae. Soil Science & Plant Nutrition, 1994,40(4):667-673.
- [41] 李蓉, 周德明, 吴毅, 周国英, 黄鹏飞, 邓小军. 杉木根际溶磷菌筛选及其部分特性的初步研究. 中南林业科技大学学报, 2012,32(4):95-99.
- [42] 王树和, 王晓娟, 王茜, 金樑. 丛枝菌根及其宿主植物对根际微生物作用的响应. 草业学报, 2007,16(3):108-113.
- [43] Vessey J K, Pawlowski K, Bergman B. Root-based N₂-fixing symbioses: Legumes, actinorhizal plants, Parasponia sp. and cycads. Plant & Soil, 2005,266(1-2):205-230.
- [44] Zhu Y G, Smith S E, Barritt A R. Phosphorus (P) efficiencies and mycorrhizal responsiveness of old and modern wheat cultivars. Plant & Soil, 2001,237(2):249-255.
- [45] Vierheilig H, Bago B, Lerat S. Shoot-produced, light-dependent factors are partially involved in the expression of the arbuscular mycorrhizal (AM) status of AM host and non-host plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002,165:21-25.
- [46] 陈雪冬, 唐明, 张新璐, 周远博, 韦素贞, 盛敏. 黄土高原刺槐纯林的土壤-菌根关系及随林龄的变化. 林业科学, 2017,53(12):84-92.