DOI: 10.5846/stxb202203250740

陈蓉,王韦韦,曹丽荣,陈铭,陈光水,姚晓东,王小红.马尾松和杉木人工林细根碳氮磷化学计量特征随土层深度的变化.生态学报,2023,43(9): 3709-3718.

Chen R, Wang W W, Cao L R, Chen M, Chen G S, Yao X D, Wang X H.Variation of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of fine roots in Masson pine and Chinese fir plantations with soil depth. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9):3709-3718.

马尾松和杉木人工林细根碳氮磷化学计量特征随土层 深度的变化

陈 蓉,王韦韦,曹丽荣,陈 铭,陈光水,姚晓东,王小红*

福建师范大学地理科学学院,湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007

摘要:为探究马尾松和杉木人工林细根碳(C)、氮(N)、磷(P)浓度及其化学计量比随土层深度变化的特征,于2011年4月在福 建省三明市金丝湾森林公园陈大林业采育场内测定马尾松和杉木人工林五个土层深度(0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40— 60 cm、60—80 cm)细根的 C、N、P 浓度、比根长(SRL)及其土壤养分浓度,结果表明:林分类型显著影响细根 C 浓度,但对细根 N、P 浓度无显著影响,马尾松人工林细根 C 浓度显著大于杉木人工林。土层深度显著影响马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓 度,对 C 浓度无影响,细根 N、P 浓度随土壤深度的增加呈指数下降。马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓度与土壤全氮(TN)、全 磷(TP)浓度以及 SRL 均呈正相关。拟合直线表明马尾松人工林和杉木人工林细根 N 养分获取能力的不同,马尾松对 N 养分 的获取能力更强,而杉木通过 SRL 获取养分的能力比马尾松更强,可能体现了两种人工林细根 N 获取策略的差异。马尾松和 杉木人工林在不同土层细根 N:P 比值(33.5±2.81、30.18±2.10)均大于 16,表明两者均受 P 限制,但细根 N:P 不受土壤 N:P 和 SRL 的影响。马尾松和杉木人工林细根 N 和 P 浓度受土层深度的影响,与土壤养分和细根形态特征变化有关。 关键词;马尾松;杉木;生态化学计量学;土壤养分;土层深度;比根长

Variation of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of fine roots in Masson pine and Chinese fir plantations with soil depth

CHEN Rong, WANG Weiwei, CAO Lirong, CHEN Ming, CHEN Guangshui, YAO Xiaodong, WANG Xiaohong^{*} Key Laboratory of Ecogeographic Processes in Humid Subtropics, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: In order to examine the characteristics of fine root carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) concentrations and their stoichiometric ratios changing with soil depth in Masson pine (*Pinus massoniana*) and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations, the experiments were conducted in April 2011, in Jinsiwan Forest Park, Sanming City, Fujian Province. The samples of fine roots in five soil depths (0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm) of Masson pine and Chinese fir plantations were collected in the big forestry breeding farm to determine C, N and P concentration as well as specific root length (SRL). Soil nutrient contents were also measured. The results showed that forest type significantly influenced fine root C concentration, but not fine root N and P concentration, and that fine root C concentrations, but not C concentrations, and fine root N and P concentrations decreased exponentially with increasing soil depth in both pinus sylvestris and fir plantations. Fine root N and P

收稿日期:2022-03-25; 采用日期:2022-08-17

基金项目:福建省杰出青年基金项目滚动资助项目(2014J07005)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Wangxh@fjnu.edu.cn

concentrations were positively correlated with soil Total nitrogen (TN) and Total phosphorus (TP) concentrations as well as SRL in both Horsetail Pine and Fir plantations. The fitted straight lines indicated the difference in the fine root N nutrient acquisition capacity between horsetail pine and fir plantations, with horsetail pine having a greater ability to acquire N nutrients and fir having a greater ability to acquire nutrients through SRL than horsetail pine, possibly reflecting the difference in fine root N acquisition strategies between the two plantations. The fine root N : P ratios (33.5±2.81 and 30.18±2.10) of both horsetail pine and fir plantations were greater than 16 in different soil layers, indicating that both were P-limited, but fine root N : P was not influenced by soil N : P and SRL. Fine root N and P concentrations in plantations of horsetail pine and fir were influenced by soil depth and were related to changes in soil nutrients and fine root morphological characteristics.

Key Words: Masson pine; Chinese fir; ecological stoichiometry; soil nutrients; soil depth; specific root length

植物生态化学计量学主要研究植物器官元素浓度的计量特征,以及它们与环境因子、生态系统功能之间 的关系^[1]。细根是植物重要的地下器官,具有吸收、运输水分和养分的功能,在养分循环中发挥重要作用,是 土壤碳汇的关键组成部分^[2-3]。细根由不同形态和功能的多分支结构组成,一般定义为直径 <2 mm^[4]。细 根作为生态系统中最活跃、最敏感的部分,其生长和周转与生态系统养分循环密切相关^[5],在调节森林生态 系统的生物地球化学循环中起着重要作用^[6]。细根碳(C)、氮(N)、磷(P)浓度特征及其化学计量比一定程 度能反应植物生理状况。如细根的 C 浓度与建筑成本有关^[7],细根 N 浓度与植物的代谢活性、呼吸作用和根 系寿命有关^[8]。C:N 比值可以作为细根寿命的指标^[9],即细根 C:N 比值越高,细根寿命越长,细根周转率越 低。N:P 则反应植物对 N、P 养分相对受限情况^[10]。因此研究森林生态系统细根 C、N、P 浓度特征及其化学 计量比,对于深入认识林木对养分资源的分配与利用策略至关重要。

研究细根 C、N、P 化学计量学特征在不同土层深度的分布特征,对于了解林木细根在不同土层深度养分 获取策略具有重要的理论意义,同时对于判断林木养分受限情况、指导森林生态系统养分管理也具有重要的 现实意义。前人研究发现土层深度对细根 C、N、P 计量学特征有显著的影响。如 Naoki 等研究发现,枹栎 (*Quercus serrata*)和具柄冬青(*llex pedunculosa*)细根 N 浓度在 0—10 cm 土层显著高于 40—50 cm 土层深 度^[11]。Terzaghi 等人对伦巴第阿尔卑斯山西北部森林的山毛榉(*Fagus engleriana*)细根化学计量特征研究发 现,细根 N 浓度随土层深度增加而减少,C 浓度随土层深度没有发生显著变化,C:N 随土层深度增加而增 加^[12]。植物细根化学计量特征随土层深度变化模式受土壤养分影响。已有研究表明,细根养分与土壤养分 存在显著正相关,如陈晓萍等研究发现黄山松(*Pinus taiwanensis*)细根 P 浓度随土壤 TP 浓度增加而显著增 加^[13]。另外,细根形态变化对细根养分也存在显著影响,如细根直径越小,比根长(specific root length, SRL) 越大,根养分获取能力越强^[14—15],导致细根 N、P 养分越高^[14]。土壤养分在土壤剖面分布存在异质性^[16],导 致细根化学计量学特征在土壤剖面发生变化^[17]。同时细根形态对土层深度变化也存在显著响应,如张良德、 梁胜发等研究发现随土层深度的增加 SRL 呈逐渐减小趋势^[18—19]。这些均能导致细根养分浓度及化学计量 特征随土层深度发生变化。然而,目前有关细根化学计量学特征研究大部分集中在土壤表层(0—50 mm),对 于更深土层深度细根化学计量特征研究尚且不足。因而,开展不同土层深度土壤养分、细根形态对细根 C、N、 P 化学计量特征影响的研究,对了解植物在土壤剖面上养分获取与资源利用具有重要意义。

马尾松(Pinus massoniana)和杉木(Cunninghamia lanceolata)是我国南方主要的两种人工林树种,具有生长快、用途广等优点,同时在保护生态环境和维持生态系统平衡方面发挥着巨大作用。马尾松为深根系物种, 杉木为浅根系物种^[20],与杉木相比,马尾松生长通常需要更高的光照和积温^[21],光能利用效率较低^[22],对异 质养分环境反应更加敏感,养分吸收效率更高^[23]。植物的生理特征与养分吸收、利用密切相关,开展不同土 层深度杉木和马尾松细根化学计量学对比研究,对于深入认识深根系、浅根系物种细根在不同土壤深度上养 分获取能力的至关重要。近年来关于杉木人工林不同土层深度细根养分计量学已有一些研究,但研究的土壤 深度小于 30 cm。如陈安娜等研究发现土壤表层(0—30 cm)杉木细根 P 浓度及 N:P 与土壤全 P 浓度、N:P 均存在显著相关性^[24];李爱琴等对杉木成熟林研究发现,在不同土层深度(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm),随土层深度增加,细根 C:N 和 C:P 比呈递增变化趋势,细根 N:P 比呈先减少后增加的变化趋势^[25]。但目前马尾松人工林细根化学计量学随土层变化的研究仍然缺乏。因此本文以我国主要的马尾松和杉木两种人工林为研究对象,试图回答:(1)土层深度是否对杉木人工林和马尾松人工林细根 C、N、P 浓度及其化学计量特征有显著影响?(2)细根 N、P 浓度及 N:P 随土层的变化是否与土壤全 N、全 P 养分浓度和细根 SRL 的变化有关?旨在揭示马尾松和杉木人工林细根 C、N、P 浓度及其化学计量比随土层深度变化的规律,以期为马尾松和杉木人工林经营管理及可持续利用提供一定的理论参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

试验地位于三明市陈大林业采育场金丝湾森林公园(26°19′N,117°36′E)内,区内以低山丘陵为主,平均海拔 300 m,平均坡度 25—35°;属中亚热带季风气候,年均气温 19.1℃,年均降水量 1749 mm,年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%,降水主要集中于 3—8月。土壤以花岗岩发育的红壤为主,多呈酸性,土壤厚度超过 1 m。

杉木人工林和马尾松人工林均位于同一小流域,均为1976年次生常绿阔叶林皆伐后,营造人工纯林形成。马尾松和杉木详细概况参见表1。

Table 1 Basic characteristics of the test site and physical and chemical properties of surface soil $(0-20 \text{ cm})$								
项日 I	林分类型 The stand type							
项目 liems -	马尾松人工林 Masson pine plantation	杉木人工林 Fir plantation						
林龄 Stand age/a	36	36						
平均树高 Average tree height/m	18.3	18.2						
平均胸径 Average chest diameter/cm	18.3	15.6						
林分密度 Stand density/(株/hm ²)	1500	2858						
pH	4.75	4.41						
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.33	1.41						
全碳 Total carbon/(g/kg)	21.01	23.89						
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.6	0.8						
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.52	0.35						

表1 试验地的基本特征和表层土壤(0—20 cm)理化性质

1.2 研究方法

中亚热带森林细根生物量一般在春季(3—5月)达到一个峰值^[21],故选择 2011 年在4月进行细根取样。 在马尾松和杉木人工林分中各设置3块20m×20m样地,用内径4.05cm的土钻在每个标准地内按"S"形随 机钻取10个土芯,深度为80 cm。按0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm和60—80 cm土层分割土 芯,把每个土层样品分别装入标记好的塑料袋中,带回实验室,于4℃冰箱内冷藏。

1.2.1 细根形态及化学组分测定

在实验室内,从不同土层深度的土芯中挑出细根样品,并根据根系颜色、外形、弹性、根皮与中柱分离的难易程度分出各目标树种的活细根。马尾松细根表皮多呈黄棕色,侧根较少;杉木幼根多呈乳白色,老根呈棕褐色,有红褐色斑点。并将<2 mm 的活根直径按 0—1mm 和 1—2mm 进行分级,并将分级后的细根进行扫描,记录细根直径、长度、表面积等形态特征,随后将扫描过的细根于 65℃下烘干至恒重,将杀青烘干的根用球磨仪进行研磨。最后称取 10 mg 磨碎根样用元素分析仪(vario EL III Element Analyzer,德国)测定根 C、N 浓度;称取 60 mg 磨碎根样用 HClO₄、H₂SO₄消煮脱硅定容到 100 mL,静置 24 h,取上清液,用连续流动分析仪(Skalar San++,Skalar,荷兰)测定细根 P 浓度。本研究中仅分析目标树种的根。

1.2.2 土壤环境因子测定

不同土层深度的土芯挑出细根后,随后剩下的土壤过2mm筛,将部分过2mm筛的土进行自然风干,用于测定土壤pH,剩余风干土过100目筛,用于测定土壤全碳、全氮和全磷。用C、N元素分析仪(Elementar Vario EL III, Elementar,德国)测定土壤全碳、全氮浓度。土壤全磷采用KCL 浸提,M3 浸提,HClO₄H₂SO₄消煮后用连续流动分析仪(skalar san++,Skalar)测定。

1.2.3 数据处理与分析

所有统计分析均由 SPSS 24.0 软件进行。细根 C、N、P、C:N、C:P 和 N:P 指标取对数后,采用混合线性模型将样地作为随机效应,林分、径级作为固定效应,土层深度作为协变量,分析马尾松和杉木人工林细根 C、N、P 浓度及其化学计量比的差异。采用混合线性模型分析细根 N、P、N:P 与土壤养分浓度和 SRL 的关系,其中样地作为随机效应,林分、径级为固定效应,土壤养分浓度指标或 SRL 作为协变量。并结合相关分析探究细根 N、P 浓度,N:P 与土壤养分浓度、细根 SRL 的关系。

2 结果与分析

2.1 马尾松和杉木人工林细根 C、N、P 化学计量学特征随土层深度的变化规律

由表 2 可知, 马尾松和杉木人工林细根 C 浓度在林分、细根径级之间的差异极显著(P<0.01)。马尾松人 工林细根 C 浓度((416.91±3.43)mg/g)显著高于杉木人工林((401.55±5.98)mg/g)。两种人工林 1—2 mm 细根 C 浓度((425.51±2.90)mg/g)显著高于 0—1 mm 细根((392.96±4.18)mg/g)。细根 N 浓度不受林分类型 的影响, 马尾松和杉木人工林细根 N 浓度相近(平均 N 浓度分别为(8.50±0.65)mg/g、(7.92±0.51)mg/g); 但径级 之间细根 N 浓度差异显著(P<0.05), 0—1 mm 细根 N 浓度((8.79±0.33)mg/g)显著高于 1—2 mm 细根 N 浓度 ((7.01±0.31)mg/g)。细根 P 浓度不受林分类型和径级的影响, 马尾松和杉木人工林细根 P 浓度相近(平均 P 浓 度分别为(0.26±0.03)mg/g、(0.25±0.02)mg/g)。细根 C 浓度不随土壤深度变化而变化(P=0.063), 而细根 N、P 浓度均受土壤深度的极显著影响(P<0.01), 均随土层深度的增加而呈现指数下降趋势(图 1)。

马尾松和杉木人工林细根 C:N、C:P 在径级之间的差异显著,0—1 mm 细根 C:N、C:P 显著低于 1— 2 mm细根。细根 C:P 随土层深度的增加而呈指数上升趋势(图 2)。马尾松和杉木人工林细根 C:N、N:P 受 林分和土层深度交互作用的影响(P<0.05),杉木人工林细根 C:N 随土层深度增加而增加的幅度大于马尾松 人工林(图 2),而两种人工林细根 N:P 随土层的变化规律则不明显。

表 2 林分、径级、土层深度对细根 C、N、P 浓度以及 C:N、C:P、N:P 影响的混合线性模型分析

Table 2Mixed linear model analysis of the effects of forest stand, diameter class, and soil depth on the concentration of carbon, nitrogen andphosphorus in fine roots, as well as the ratio of carbon to nitrogen, carbon to phosphorus, and nitrogen to phosphorus

变异来源 Variance of source	lgC	lgN	LgP	lg(C:N)	Lg(C:P)	lg(N:P)
林分类型(F) Forest type	< 0.01	0.622	0.368	0.784	0.677	0.554
细根径级(D) Fine root diameter grade	< 0.01	< 0.05	0.104	< 0.01	< 0.05	0.970
土层深度(S) Soil depth	0.063	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.535
F×D	0.428	0.388	0.631	0.516	0.784	0.876
F×S	0.090	0.074	0.489	< 0.05	0.737	< 0.05
D×S	0.654	0.263	0.874	0.231	0.744	0.414
F×D×S	0.529	0.917	0.872	0.959	0.894	0.876

2.2 马尾松和杉木人工林细根氮、磷浓度及氮磷比与土壤理化性质的关系

由表3可知,林分和土壤TN的交互作用显著影响细根N浓度(P<0.05),马尾松和杉木人工林细根N浓度与土壤TN浓度均呈正相关,但杉木人工林拟合直线斜率显著高于马尾松人工林(图3a)。土壤TP浓度显著影响细根P浓度(P<0.01),细根P浓度随土壤全磷浓度的升高而升高(图3b),而细根N:P与土壤TN:TP关系不显著(图3c)。





Fig.1 The concentration of fine root C, N, and P in Pinus massoniana and Chinese fir plantations at different soil depths F:林分类型 Forest type;D:细根径级 Fine root diameter grade; S: 土层深度 Soil depth; * 表示显著(P<0.05)

表 3 细根 N、P 浓度及 N:P 与土壤养分的关系

Table 3 The relationship between the concentration of nitrogen and phosphorus in fine roots and the ratio of nitrogen to phosphorus and the physical and chemical properties of soil

N			Р			N : P		
变异来源 Variance of source	F	Р	变异来源 Variance of source	F	Р	变异来源 Variance of source	F	Р
F	29.678	< 0.01 *	F	2.301	0.294	F	3.289	0.109
D	9.607	< 0.01 *	D	0.651	0.646	D	0.249	0.228
TN	26.307	< 0.01 *	ТР	3.470	< 0.01 *	NP	0.062	0.733
F×D	1.867	0.120	F×D	0.121	0.427	F×D	0.005	0.892
F×TN	8.247	< 0.05 *	F×TP	2.023	0.306	F×NP	0.948	0.377
D×TN	1.792	0.646	D×TP	1.062	0.783	D×NP	0.846	0.435
F×D×TN	1.215	0.930	F×D×TP	0.123	0.466	F×D×NP	0.008	0.839

F、D分别表示林分类型、细根径级,TN、TP、NP分别表示土壤全氮、全磷、氮磷比,P<0.05表示显著,P<0.01极显著

2.3 马尾松和杉木人工林细根氮、磷浓度及氮磷比与细根 SRL 的关系

细根 N、P 浓度及 N:P 比与细根 SRL 混合线性模型分析结果表明,林分和 SRL 交互作用显著影响细根 N 浓度(表 4),马尾松和杉木人工林细根 N 浓度与细根 SRL 均呈正相关,拟合直线显示,马尾松人工林直线斜率显著高于杉木人工林的(图 3 d)。而细根的 P 浓度和细根 N:P、细根 SRL 均无关(表 4;图 3 e,f)。

43 卷



Fig.2 The stoichiometric ratio of fine root C, N, and P in Pinus massoniana and Chinese fir plantations at different soil depths F:林分类型 Forest type;D:细根径级 Fine root diameter grade; S: 土层深度 Soil depth; * 表示显著(P<0.05)

表 4 细根 N、P 浓度及 N:P 与细根 SRL 的关系

Table 4 The relationship between the concentration of nitrogen and phosphorus in fine roots and the ratio of nitrogen to phosphorus and the specific root length of fine roots

变异来源	N			Р	N : P	
Variance of source	F	Р	F	Р	F	Р
F	5.906	< 0.05	1.356	0.267	0.527	0.482
D	1.814	0.203	5.173	< 0.05	2.707	0.126
SRL	0.803	0.388	1.366	0.265	0.678	0.426
F×D	0.858	0.372	2.991	0.109	1.862	0.197
F×SRL	6.578	< 0.05	3.550	0.084	0.007	0.936
D×SRL	0.738	0.407	2.506	0.139	1.875	0.196
F×D×SRL	4.316	0.060	4.075	0.066	0.503	0.492

F、D分别表示林分类型、细根径级,SRL表示细根比根长,P<0.05表示显著,P<0.01极显著

3 讨论

3.1 马尾松和杉木人工林细根 C、N、P 计量学特征

本研究发现,马尾松人工林细根 C 浓度显著高于杉木。马尾松人工林细根 C 浓度均值为(416.91±6.08) mg/g,杉木人工林细根 C 浓度均值为(409.60±7.08) mg/g,略低于孙佳祺等^[28]收集的 68 个乔木树种细根 C

浓度((428.9±7.4)mg/g),但远远高于李爱琴等^[25]研究结果中的安徽省天马自然保护区不同海拔 0—30 cm 土层深度范围内杉木细根 C 浓度(329.7 mg/g),这可能与研究地海拔差异有关。有研究表明细根 C 浓度差异 可能与细根更高的次生代谢物木质素和单宁等浓度有关,次生代谢物的 C 浓度高于纤维素和其他糖类化合 物,因此次级代谢物的增加会导致总 C 浓度的增加^[12]。另外,较高的 C 浓度也可能是由较低的纤维素或非结 构碳水化合物等组分造成的^[12]。马尾松人工林与杉木人工林细根 C 浓度的差异,可能是两种人工林细根次 生代谢物浓度差异的结果。

马尾松和杉木人工林细根 0—80 cm 土层深度 N((8.50±0.65)mg/g、(7.92±0.51)mg/g)、P((0.26±0.03) mg/g、(0.25±0.02)mg/g)平均浓度均低于中国植物细根 N、P 平均浓度(9.16 mg/g 0.954 mg/g),也低于全球 植物细根 N、P 浓度范围(9.9—11.2 mg/g、0.55-0.85 mg/g)^[26],这可能与土壤深度、径级差异有关。马尾松和 杉木人工林在土壤表层(0—20 cm)细根 N 浓度((11.1±0.42)mg/g、(10.0±0.62)mg/g)高于中国乔木细根 N 浓度((7.7±0.5)mg/g)^[28],此结果与 Kerkhoff 等研究^[24]发现大多数亚热带地区植物细根 N 浓度((0.7±0.1)mg/g)^[28],这可能与亚热带地区土壤 P 有效性低有关。马尾松和杉木人工林间细根 N 和 P 浓度均差异不显 著,表明两种人工林细根具有相似的 N 和 P 的利用效率。

马尾松和杉木人工林 0-1 mm 细根 C:N、C:P 浓度显著高于 1-2 mm 细根,细根 C:N、C:P 表征植物对

N、P 养分的利用效率,C:N、C:P 值越大,说明植物对 N、P 养分的利用效率越高^[29]。也研究表明根 C:N 比越低,细根寿命越长、周转越快^[30],我们的研究结果与前人研究结论一致,较细的细根周转较快^[11]。

马尾松和杉木人工林细根 N:P((33.5±2.81)、(30.18±2.10))远远高于中国植物细根 N:P(14.27),且远远大于 16。N:P 反映植物受 N、P 养分的供应与养分受限特征,当植物 N:P>16 时表明植物主要受 P 限制,当 14<N:P<16,植物受 N、P 养分共同限制,植物 N:P<14 时,植物主要受 N 限制^[31],说明马尾松和杉木人工林都受土壤 P 养分的限制,这与黄雍容^[32]、Wardle^[30]等报道亚热带植物生长主要受土壤 P 限制的研究结果一致。且在不同土层范围内,细根 N:P 也远远大于 16,表明中亚热带地区不同土层深度细根均受 P 限制。

3.2 马尾松和杉木人工林细根 C、N、P 计量学特征随土层深度的变化

在 0—80 cm 土层深度,细根 C 浓度不随土层深度的变化而变化,而 N、P 浓度随土层深度的增加,呈指数型下降趋势。两种人工林表层土壤细根 N 浓度比深层土壤高,杉木细根 N 浓度随土层深度的变幅大于马尾松,其中 0—10 cm 土层中马尾松和杉木人工林细 N 浓度分别比 70—80 cm 土层高约 1.2 倍和 1.54 倍。Naoki等人在日本西部山区天然林里对枹栎(*Quercus serrata*)和具柄冬青(*Ilex pedunculosa*)两种树种研究发现,两种树种极细根(0-0.5 mm)N 浓度随土层深度(0—50 mm)的增加而降低,而较粗根(1—2 mm)的 N 浓度均不随深度变化^[11]。Patrick 在季节性干旱植物群落细根生产和周转的研究发现,浅土层土壤中具有较高的细根密度有利于磷的吸收^[34]。廖逸宁对板栗细根化学计量特征的研究也发现深层(20—40 cm)土壤细根 N、P 浓度显著低于浅层(0—20 cm)土壤细根^[34]。

马尾松和杉木人工林细根 C:N、C:P 均随土层深度的增加而呈现指数上升趋势,这主要是由于随土层深度的增加,马尾松和杉木人工林细根 C 浓度无显著差异(P>0.05),而 N、P 浓度呈指数下降趋势,使得细根 C:N、C:P 随土层深度的增加呈增加趋势。与李爱琴等对 0—30 cm 土层深度杉木细根 C:N、C:P 变化趋势 一致^[25]。

3.3 马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓度和 N:P 随土层变化的原因及与土壤养分和 SRL 的关系

细根 N、P 浓度随土层深度的增加,呈指数型下降趋势。验证了在不同土层深度上,土壤 TN、TP 养分、 SRL 是影响细根 N、P 浓度的因素。马尾松和杉木人工林 N、P 浓度随土壤深度的增加呈指数下降,且细根 N、 P 浓度与土壤 TN、TP 浓度呈正相关。一是因为随土层深度的增加,N、P 养分浓度降低^[31],由于土壤养分来 源的差异^[17],导致细根 N、P 浓度随土层深度的增加而降低。二是随土层深度的增加细根形态发生变化^[35], 进而导致细根 N、P 浓度发生变化。马玉珠等^[23]研究表明,随土层深度的增加,较细根数量会减少,较粗根的 数量会增多;与较细根相比,较粗根寿更命长,代谢活性较小,N、P 浓度越低^[36]。王韦韦^[37]等通过对亚热带 树种米槠和杉木研究发现细根直径随土层的增加而增大,SRL 也随土层深度的变化而变化,呈先减少后增加 的趋势。且有研究认为直径较小、SRL 较大的细根周转速率较快,N、P 浓度较高^[37]。也有研究表明,土壤物 理属性也是造成细根 N、P 浓度随土层发生变化的原因之一。随土层深度增加土壤容重增加、土壤空隙度降 低,进一步降低土壤水分浓度和根系渗透^[38],降低根系吸收养分能力,导致细根 N、P 浓度随土层深度的增加 而降低,C:N、C:P 随土层深度增加而增大。

马尾松和杉木人工林细根 N 浓度与土壤 TN 浓度拟合直线表明,杉木人工林拟合直线的斜率显著高于马 尾松人工林,相反截距低于马尾松人工林(图 3 a),这表明马尾松人工林和杉木人工林细根 N 养分获取能力 的不同。马尾松人工林细根受土壤 TN 浓度变化的影响较小,对 N 养分的获取能力更强,其对 N 养分的吸收 能基本满足马尾松对 N 养分的需求;杉木人工林细根 N 浓度对土壤 TN 浓度变化更敏感,对 N 养分的吸收能 力较弱。这可能与树种菌根类型不同有关,马尾松是外生菌根树种,外生菌根树种能通过外延菌丝获取养分, 而杉木是内生菌根树种,菌根为泡囊型^[36],导致杉木根系菌丝比马尾松短很多,对 N 养分的吸收能力相对较 差,更容易受土壤 TN 的影响。范爱莲等研究也表明内生菌根树种对 N 浓度的响应高于外生菌根树种^[39]。

细根 N 浓度与 SRL 拟合直线显示,马尾松人工林拟合直线斜率大于杉木人工林(图 3 d),表明马尾松细根 N 浓度对 SRL 的变化更敏感,杉木人工林细根 N 浓度受 SRL 的影响较小。且一般线性模型分析表明,杉

木人工林细根 SRL 大于马尾松人工林细根(呈边缘显著水平,*P*=0.055)。SRL 是表征植物获取养分能力的 特征,细根 SRL 越小,养分获取能力越弱^[40]。我们的研究表明杉木通过 SRL 获取养分的能力比马尾松更强。 欧阳等研究发现,中亚热带 AM 树种通常比 ECM 树种具有更高的 SRL^[41],这与本研究结果大概一致。

4 结论

土层深度显著影响马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓度,对 C 浓度无影响,且细根 N、P 浓度随土壤深度 的增加呈指数下降,而 C 浓度在土壤深度之间没有差异。马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓度随土层深度变 化与土壤 TN、TP 浓度、SRL 有关。马尾松为外生菌根树种,其细根对 N 养分获取能力更强,受土壤 TN 变化 的影响较小;而杉木人工林细根对 N 养分的吸收能力较弱,容易受土壤 TN 的影响,但通过 SRL 获取养分的能 力比马尾松强。马尾松和杉木人工林细根在不同的土层空间范围内均受 P 限制,且获取 P 养分的能力差异 不显著。

上述结论丰富了我们对亚热人工林细根 C、N、P 化学计量学特征随土层深度变化的认识,为了解植物在 土层剖面上养分获取与资源利用提供了一定的基础数据,可以为人工林养分管理提供参考。考虑到细根存在 季节变化,取样次数的局限性,结论的普适性还需在未来马尾松和杉木人工林生态系统中开展更多不同季节 的相关研究来加以验证。

参考文献(References):

- [1] Sterner R W, Elser J J, Vitousek P M. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere.
- [2] 何茂松,罗艳,彭庆文,严正兵,杨思琪,李凯辉,韩文轩.新疆45种荒漠植物粗根碳、氮、磷计量特征及其与环境的关系.生态学杂志, 2019, 38(9): 2603-2614.
- [3] Cai H Y, Li F R, Jin G Z. Fine root biomass, production and turnover rates in plantations versus natural forests: effects of stand characteristics and soil properties. Plant and Soil, 2019, 436(1): 463-474.
- [4] Zhang X Y, Wang W. The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. Scientific Reports, 2015, 5: 9940.
- [5] Philpott T J, Barker J S, Prescott C E, Grayston S J. Retention trees slow post-harvest fine-root decomposition in a coastal temperate rainforest. Forest Ecology and Management, 2018, 430: 431-444.
- [6] Cao Y, Li Y N, Zhang G Q, Zhang J, Chen M. Fine root C: N: P stoichiometry and its driving factors across forest ecosystems in northwestern China. Science of the Total Environment, 2020, 737: 140299.
- [7] Guo D L, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. Oecologia, 2004, 140(3): 450-457.
- [8] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, Lessard V C, Zak D R. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth. Tree Physiology, 1998, 18(10): 665-670.
- [9] Withington J M, Reich P B, Oleksyn J, Eissenstat D M. Comparisons of structure and life span in roots and leaves among temperate trees. Ecological Monographs, 2006, 76(3): 381-397.
- [10] Townsend A R, Cleveland C C, Asner G P, Bustamante M M C. Controls over foliar N: P ratios in tropical rain forests. Ecology, 2007, 88(1): 107-118.
- [11] Makita N, Hirano Y, Mizoguchi T, Kominami Y, Dannoura M, Ishii H, Finér L, Kanazawa Y. Very fine roots respond to soil depth: biomass allocation, morphology, and physiology in a broad-leaved temperate forest. Ecological Research, 2011, 26(1): 95-104.
- [12] Terzaghi M, Montagnoli A, Di Iorio A, Scippa G S, Chiatante D. Fine-root carbon and nitrogen concentration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Italy Prealps: possible implications of coppice conversion to high forest. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 192.
- [13] 陈晓萍,郭炳桥,钟全林,王满堂,李曼,杨福春,程栋梁.武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应.生态 学报,2018,38(1):273-281.
- [14] 陈柳娟,钟全林,李宝银,姚湘明,徐朝斌,程栋梁,郑跃芳,余华. 翅荚木人工林不同径阶间细根主要功能性状与根际土壤养分的关系. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3627-3634.
- [15] Yan X L, Jia L M, Dai T F. Fine root morphology and growth in response to nitrogen addition through drip fertigation in a *Populus × euramericana* "Guariento" plantation over multiple years. Annals of Forest Science, 2019, 76(1): 13.
- [16] Yang L, Jia W X, Shi Y, Zhang Z Y, Xiong H, Zhu G F. Spatiotemporal differentiation of soil organic carbon of grassland and its relationship with

- [17] Zhou Z J, Li Z Q, Chen K, Chen Z M, Zeng X Z, Yu H, Guo S, Shangguan Y X, Chen Q R, Fan H Z, Tu S H, He M J, Qin Y S. Changes in soil physicochemical properties and bacterial communities at different soil depths after long-term straw mulching under a no-till system. SOIL, 2021, 7(2): 595-609.
- [18] 张良德,徐学选,胡伟,李星.黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征.林业科学,2011,47(11):31-36.
- [19] 梁胜发, 茹豪, 雍鹏, 武秀娟, 奥小平. 晋西北黄土丘陵区柠条锦鸡儿根系分布特征. 东北林业大学学报, 2016, 44(8): 24-28.
- [20] 张鼎华,林开森,李宝福.杉木、马尾松及其混交林根际土壤磷素特征.应用生态学报, 2011, 22(11): 2815-2821.
- [21] 迟健. 马尾松和杉木生态习性的比较. 湖南林业科技, 1992, 19(2): 31-35.
- [22] 张秀娟, 韩海荣, 王军邦. 亚热带人工针叶林光能利用效率的差异. 东北林业大学学报, 2010, 38(12): 12-14.
- [23] 马雪红,周志春,张一,金国庆.马尾松苗遭遇不同养分斑块的觅养行为和生长响应.林业科学研究,2010,23(5):697-702.
- [24] 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): 4027-4036.
- [25] 李爱琴. 杉木成熟林细根形态与化学计量的海拔梯度变异特征[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- [26] 马玉珠,钟全林,靳冰洁,卢宏典,郭炳桥,郑媛,李曼,程栋梁.中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子.植物生态学报,2015,39(2):159-166.
- [27] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(6): 585-598.
- [28] 孙佳祺,熊维彬,李永奇,蔡天润,余华.中国不同生活型植物细根碳氮磷化学计量特征及其影响因子.防护林科技,2021(4):28-32,38.
- [29] 张勇,刘海英,吕爱华,吴翠蓉,吴家森,傅伟军,王晓晓,蒋仲龙.杨梅根系和土壤微生物量碳、氮、磷生态化学计量随林龄的变化.生态科学,2022,41(1):84-90.
- [30] Wang G L, Fahey T J, Xue S, liu F. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabuliformis*, West China. Oecologia, 2013, 171(2): 583-590.
- [31] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. Science, 2004, 305 (5683): 509-513.
- [32] 黄雍容,高伟,黄石德,林捷,谭芳林,游惠明,杨丽.福建三种常绿阔叶林碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2021,41(5): 1991-2000.
- [33] Ellsworth P Z, Sternberg L S L. Linking soil nutrient availability, fine root production and turnover, and species composition in a seasonally dry plant community. Plant and Soil, 2019, 442(1): 49-63.
- [34] 廖逸宁,郭素娟. 有机-无机肥配施对板栗根际土壤及细根化学计量特征的影响. 东北林业大学学报, 2022, 50(1): 58-63, 71.
- [35] 张雷,项文化,田大伦,赵仲辉,陈瑞.第2代杉木林土壤有机碳、全氮对细根分布及形态特征的影响.中南林业科技大学学报,2009,29 (3):11-15.
- [36] Luke McCormack M, Adams T S, Smithwick E A H, Eissenstat D M. Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees. The New Phytologist, 2012, 195(4): 823-831.
- [37] 王韦韦,熊德成,黄锦学,黄超超,杨智杰,胡双成,林成芳,陈光水.亚热带不同演替树种米槠和马尾松细根性状对比研究.生态学报, 2015, 35(17): 5813-5821.
- [38] Qi K B, Pang X Y, Yang B, Bao W K. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry shifts with tree species in subalpine plantations. PeerJ, 2020, 8: e9702.
- [39] 范爱连,张礼宏,陈廷廷,陈宇辉,姜琦,贾林巧,王雪,陈光水.常绿阔叶林外生、内生菌根树种细根化学计量学性状对N添加的响应. 生态学报,2020,40(14):4966-4974.
- [40] Westoby M, Falster D S, Moles A T, Vesk P A, Wright I J. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 125-159.
- [41] 欧阳园丽,张参参,林小凡,田立新,顾菡娇,陈伏生,卜文圣.中国亚热带不同菌根树种的根叶形态学性状特征与生长差异:以江西新 岗山为例. 生物多样性,2021,29(6):746-758.