

# 三峡库区马尾松细根生产和周转及其影响因子

王娜<sup>1</sup> 沈雅飞<sup>1</sup> 程瑞梅<sup>1,2\*</sup> 肖文发<sup>1,2</sup> 杨邵<sup>1</sup> 郭燕<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; <sup>2</sup>南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

**摘要** 采用连续根钻法、分解袋法、分室通量模型法计算三峡库区马尾松细根的年生产量和周转率, 分析细根生产量和周转率与各影响因子的关系。结果表明: 马尾松<0.5、0.5~1和1~2 mm细根年均生物量分别为0.29、0.59、0.76 t·hm<sup>-2</sup>, 细根年生产量分别为0.13、0.49、0.37 t·hm<sup>-2</sup>, 细根年周转率分别为1.49、1.01、0.40 a<sup>-1</sup>。各影响因子对不同径级细根生产与周转的影响不同。土壤温度、土壤钙含量显著影响<0.5 mm细根生产量与细根周转, 且土壤温度解释生产量和周转率32.8%和25.0%的变异, 土壤钙含量解释65.6%和73.1%的变异; 细根生物量与细根生产量呈显著正相关, 细根生物量分别解释<0.5、0.5~1和1~2 mm细根生产量41.0%、41.1%和54.5%的变异; 细根P、K含量与<0.5 mm细根生产量具有显著相关性, 分别解释<0.5 mm细根生产量32.2%、39.2%的变异。<0.5 mm细根与各影响因子的关系最为密切, 土壤温度、土壤钙含量是细根生物量的主要影响因子。

**关键词** 马尾松; 细根; 生产; 周转

**Fine root production and turnover of *Pinus massoniana* and their influencing factors in the Three Gorges Reservoir Area, China.** WANG Na<sup>1</sup>, SHEN Ya-fei<sup>1</sup>, CHENG Rui-mei<sup>1,2\*</sup>, XIAO Wen-fa<sup>1,2</sup>, YANG Shao<sup>1</sup>, GUO Yan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; <sup>2</sup>Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China).

**Abstract:** In this study, the annual production and turnover rate of fine root of *Pinus massoniana* in Three Gorges Reservoir Area were calculated using sequential soil core, litterbag and compartment flux model methods, and the relationship between fine root production, turnover rate and factors was analyzed. The results showed that the annual mean biomass of <0.5, 0.5–1 and 1–2 mm fine root was 0.29, 0.59 and 0.76 t·hm<sup>-2</sup>, annual production was 0.13, 0.49, 0.37 t·hm<sup>-2</sup>, and annual turnover rate was 1.49, 1.01, 0.40 a<sup>-1</sup>, respectively. The effects of factors on production and turnover of fine roots with different diameters were different. Soil temperature and soil Ca content had significant effects on production and turnover of <0.5 mm fine roots, and soil temperature explained the variation of production and turnover by 32.8% and 25.0%, and soil Ca content explained by 65.6% and 73.1%, respectively. There was a positive relationship between fine root biomass and fine root production, and the biomass of fine root explained 41.0%, 41.1% and 54.5% of variation in fine root production for <0.5, 0.5–1 and 1–2 mm fine roots, respectively. P and K contents of fine roots correlated significantly with <0.5 mm fine root production, and explained 32.2% and 39.2% of the variation of <0.5 mm fine root production, respectively. The fine root with diameter <0.5 mm was most closely associated with soil factors, and soil temperature and soil Ca content were the main factors affecting fine root biomass.

**Key words:** *Pinus massoniana*; fine root; production; turnover.

本文由“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600204)和科技部科技基础性工作专项(2014FY120700)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2016YFD0600204) and Basic Science and Technology Foundation of the Ministry of Science and Technology, China (2014FY120700).

2017-05-25 Received, 2017-09-30 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengrm@caf.ac.cn

森林是世界上重要的碳(C)库,并存储着大量的碳于土壤中.据估计,森林碳含量分别占陆地地上和地下碳含量的 80%和 40%<sup>[1]</sup>.目前,对森林地下 C 动态仍缺乏系统研究.细根通常是指直径<2 mm 的根,具有无木质部、直径小、寿命短、周期快的特点,是森林生态系统地下 C 库的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>.森林地下细根生物量虽然只占大多数陆地生态系统地下总生物量的 3%~30%,但在维持自身功能过程中最高能消耗净初级生产力 75%<sup>[4]</sup>.因此,了解细根动态过程对于理解细根在整个森林生态系统 C 分配和养分循环过程中的作用非常重要.然而,由于研究方法不够完善、取样困难、影响细根生产和周转的内外因素不确定等问题,对于细根对土壤 C 库贡献的了解进程至今仍然缓慢.

细根生产和周转是由根系自身和外界因子共同调控的.在群落水平上,细根生产和周转与海拔、温度、降水、土壤养分等环境因子相关<sup>[3]</sup>.但这些相关性同样依赖于影响因子和种群的共同作用.细根生产量与细根生物量存在显著正相关关系.这种相关性已运用在 C 预算模型中<sup>[5]</sup>.关于影响因子如何影响细根动态的机制还不清楚,存在很多的不确定性.细根生产和周转对环境因子(如土壤温度、土壤湿度、土壤养分)、根组织养分浓度、树种、林龄、生物多样性等因子的反应方向的不确定性,已在很多研究中得到证实<sup>[1,6-7]</sup>.

三峡库区是长江中下游的生态屏障,属于长江流域的生态敏感区.马尾松(*Pinus massoniana*)是三峡库区森林的主要树种之一,在三峡库区分布面积最大<sup>[8]</sup>,在森林资源和生态系统功能中占有重要地位.因此,了解和量化马尾松细根动态,对准确预测马尾松林对三峡库区地下碳储量的贡献和三峡库区生态系统碳循环及碳汇具有重要意义.本文以三峡库区 30 年生马尾松林为研究对象,计算各径级马尾松细根生产量和周转率,分析各径级细根生产量和细根周转率与影响因子的关系,旨在揭示三峡库区森林生态系统地下碳循环机制.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于湖北省秭归县九岭头林场(30°59' N, 110°47' E),海拔 1225 m.该区域属于亚热带季风气候,四季分明,年均温 16.9 °C,年均降水量为 1000~1250 mm,降雨多集中在 4—9 月.区域地带性土壤类型为黄壤或黄棕壤<sup>[9]</sup>.调查样地内马尾

松林为 20 世纪 70 年代飞播造林,样地内林木分布均匀,平均林分密度为 1688 株·hm<sup>-2</sup>,平均胸径 11.1 cm,树高 8.3 m.其中,马尾松为优势种,盖度为 80.0%.林下灌木主要有:胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、木姜子(*Litsea pungens*)等,草本主要有:狗脊(*Woodwardia japonica*)、苔草(*Carex tristachya*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、中日金星蕨(*Parathelypteris nipponica*)等.

1.2 研究方法

1.2.1 细根生物量调查 按坡位从上到下设置 3 块 20 m×20 m 标准样地.2014 年 5 月—2015 年 3 月,采用内径 10 cm、长 18 cm 的根钻进行野外细根生物量调查.其中,由于九岭头林场海拔较高,冬季(1—2 月)气温较低,土壤冻结,无法进行土壤细根取样.采用对角线取样方法,在每个样方内沿着坡向在对角线上设定 8 个固定取样点,分布均匀,且取样范围在据固定取样点 1 m 之内.每隔 2 个月用根钻在 3 个固定样地内钻取 24 个土芯.每点按 0~10、10~20、20~30 cm 分为 3 个垂直层次,将现场采集到的土壤样品拣出石砾,带回实验室进行样品的处理与分析.

1.2.2 细根分解试验 2014 年 3 月,在研究区域林分内随机收集表层土中(马尾松细根多集中在 0~30 cm 土层)的活根,按直径分为<0.5、0.5~1 和 1~2 mm 3 个等级.自然状态下风干,称取各径级干样 1 g,装入大小为 10 cm×10 cm、孔径为 0.1 mm 的尼龙网袋内.在每个样方内由上到下设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,于当月将网袋埋入各小样方 10 cm 土层处,表层覆盖凋落物.除 2015 年 1—2 月外,2014 年 5 月—2015 年 3 月,每隔 2 个月取样一次,每次随机抽取各径级样品 9 袋,除去附着的土壤、杂物和新长入的细根后,迅速用清水漂洗,在 80 °C 下烘干至恒量后称量.用非线性指数方程进行回归分析,求得分解系数.

$$X_t/X_0 = e^{-kt} \tag{1}$$

$$D_r = 1 - e^{-k't} \tag{2}$$

式中:  $X_0$ 、 $X_t$  分别为细根初始干质量(g)和分解时间  $t$  时的残留干质量(g),求得细根在  $t$  时间内的分解系数  $k$ ;  $D_r$  为细根年分解率;  $k'$  为细根年分解速率.

1.2.3 环境因子测定 土壤温湿度采用土壤温湿度测定仪器(Watchdog 2000 series weather station)连续监测 0~30 cm 土层土壤温度和湿度,监测频率为每小时 1 次.

在细根生物量调查的同时进行土壤性质的测定,土壤取样点的分布基本采用“S”形.每个样地随

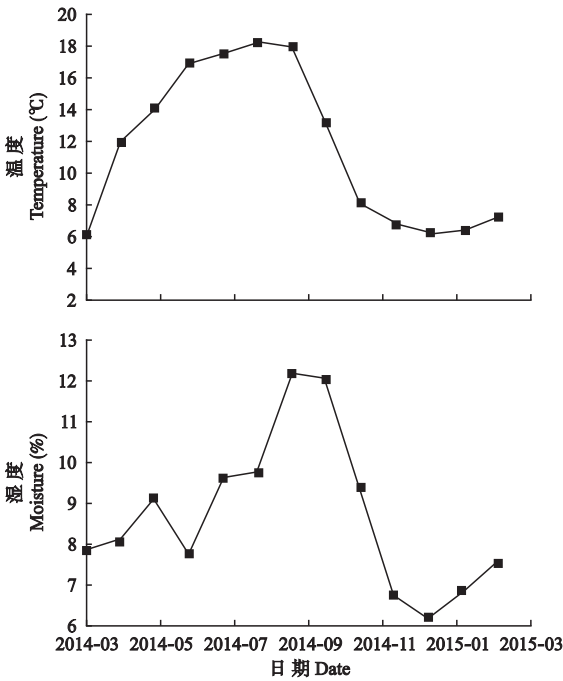


图 1 2014 年 3 月—2015 年 3 月 0~30 cm 土层土壤月均温度和湿度

Fig.1 Monthly mean temperature and moisture at 0-30 cm soil layer from March 2014 to March 2015.

机选取 3 个点取样,每个点重复 3 次,相同土层的土壤组成一个混合土样.取样点去除地表的凋落物层,用土钻按 0~10、10~20、20~30 cm 3 个层次进行采样.充分混匀去掉土壤中可见植物根系和残体后,称取 20 g 鲜土装入自封袋中,放入冰箱中冷冻保存,用于测定土壤硝态氮和铵态氮含量.将野外采集的新鲜土壤均匀平铺于干净而且透气的纸上,放在室内阴凉通风处自行干燥.风干后去除杂物,倒入研钵中研细,过 0.149 mm 筛,装袋测定土壤钙含量.

**1.2.4 根系样品分析** 在实验室内把土样用水泡软后,倒入筛孔 2 mm 的筛网,用水冲洗,将洗净后的根系放入盛有清水的塑料盆中,用镊子将其他植物的根剔除,拣出马尾松的根.根据细根的颜色、外形、弹性、根皮与中柱分离的难易程度,同时结合漂浮法区分活根和死根.将拣出的根,放在干净的滤纸上自然风干.最后,利用游标卡尺将根系按直径分为 <0.5、0.5~1、1~2 mm 3 个径级,分别装入标签的信封袋中,于 80 ℃ 下烘干至恒量,用电子天平称质量(精确度到 0.001).按以下公式计算细根生物量:

$$FRB = G \times 100 / [\pi (\Phi / 2)^2]$$

(3)

式中:FRB 为细根生物量( $t \cdot hm^{-2}$ );G 为平均每个土芯根干质量(g); $\Phi$  为根钻的直径(cm),大小为 10 cm.

将 3 个样方内同一径级的活细根整合在一起,利用液氮进行粉碎处理,过 100 目孔径筛,用来测定细根全氮、全磷、全钾、全钙含量.

**1.2.5 细根生产量和周转率计算** 采用分室通量法计算生产量和周转<sup>[8]</sup>:

$$P = B_{t2-t1} + M_{t2-t1} + D$$

(4)

$$D = M \times D_r$$

(5)

$$T = P / B$$

(6)

式中: P 为细根年生产量( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );B 为活细根生物量年平均值( $t \cdot hm^{-2}$ ), $B_{t2-t1}$  为各取样间隔内活细根生物量的变化; $M_{t2-t1}$  为各取样间隔内死细根生物量的增加值;D 为细根年分解量( $t \cdot hm^{-2}$ );M 为死细根生物量年平均值( $t \cdot hm^{-2}$ ); $D_r$  为细根年分解率;T 为细根周转速率( $a^{-1}$ ).

1.3 数据处理

通过球形检验(Mauchly's test of sphericity)的结果判断重复测量数据之间是否存在相关性.采用 SPSS 19.0 软件中 Repeated Measures ANOVA 过程进行不同取样期间细根生物量的方差分析,用 Multivariate 过程进行组间的两两比较.采用 one-way ANOVA 和 LSD 多重比较结果来评价同一取样时间不同径级细根生物量的差异显著性( $\alpha = 0.05$ ).

采用 Canoco for Windows 4.5 软件中主成分分析(PCA)的结果来判断环境因子(土壤温度、土壤湿度、土壤硝态氮、铵态氮和土壤钙含量)、细根生物量和细根各养分之间的相关关系.采用 SPSS 19.0 软件中的 Pearson 相关分析和线性回归分析来分析和判断不同径级细根生产量和周转率与各因子的关系.数据的前期处理、作图分别在 Excel 2010 和 SigmaPlot 11.0 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 三峡库区马尾松不同径级细根生物量及细根分解速率

由表 1 和表 2 可以看出,马尾松细根(<2 mm)总年均生物量(活细根和死细根)为  $1.64 t \cdot hm^{-2}$ ,其中活细根总年均生物量为  $1.19 t \cdot hm^{-2}$ ,占总细根生物量的 72.6%,是死细根生物量的 2 倍多.<1 mm 细根生物量为  $0.88 t \cdot hm^{-2}$ ,所占比例为 54.3%.<0.5 mm 细根分解速率远大于 0.5~1、1~2 mm 细根分解速率,0.5~1 和 1~2 mm 细根分解速率相同,为  $0.31 a^{-1}$ .方差分析结果表明,不同取样时间的马尾松活、死根生物量差异显著,不同直径的细根生物量均存在组间差异.

表 1 马尾松细根生物量和分解速率  
Table 1 Fine root biomass and decomposition rate of *Pinus massoniana*

项目 Item		直径 Diameter (mm)		
		<0.5	0.5~1	1~2
年平均细根生物量	活细根 Living root	0.19±0.01	0.42±0.01	0.58±0.02
Annual mean fine root biomass (t·hm <sup>-2</sup> )	死细根 Dead root	0.10±0.01	0.17±0.01	0.18±0.01
年分解率		0.52±0.02	0.31±0.01	0.31±0.01
Annual decomposition rate (a <sup>-1</sup> )				

2.2 三峡库区马尾松不同径级细根年生产量与年周转率

由表 3 可以得出,马尾松 3 个径级细根年生产量大小顺序为 0.5~1 mm>1~2 mm>0.5 mm,分别为 0.49、0.37 和 0.13 t·hm<sup>-2</sup>;周转率大小顺序为 <0.5 mm>0.5~1 mm>1~2 mm,分别为 1.49、1.01 和 0.40 a<sup>-1</sup>.不同径级细根之间年生产量均达到显著差异水平,1~2 mm 细根周转率与其他 2 个径级细根之间差异显著.

2.3 三峡库区马尾松不同径级细根生产和周转与影响因子的关系

由图 2 可以看出,土壤温度、湿度、硝态氮,以及 0.5~1 和 1~2 mm 细根生物量与第 1 主成分轴紧密相关,土壤钙含量、铵态氮、细根养分(N、P、K、Ca)和<0.5 mm 细根生物量与第 2 主成分轴紧密相关,表明土壤温度、湿度、硝态氮与 0.5~1、1~2 mm 细根生物量之间显著相关,土壤钙含量、铵态氮、细根各养分元素与<0.5 mm 细根生物量之间显著相关.

表4表明,环境因子和细根质量因子对<0.5 mm

细根生产量与细根周转的影响较 0.5~1 和 1~2 mm 细根大.土壤温度、土壤钙含量显著影响<0.5 mm 细根生产量与细根周转率,呈显著正相关.土壤温度分别解释<0.5 mm 细根生产量和周转率的32.8%和 25.0%,土壤钙含量分别解释 65.6%和73.1%.细根生产量与细根生物量呈显著正相关,并且<0.5 mm 细根生产量与细根 P、K 含量呈显著相关.细根平均生物量分别解释<0.5、0.5~1 和 1~2 mm 细根生产量变异的 41.0%、41.1%和 54.5%,细根 P、K 含量分别解释<0.5 mm 细根生产量变异的 32.2%、39.2%.

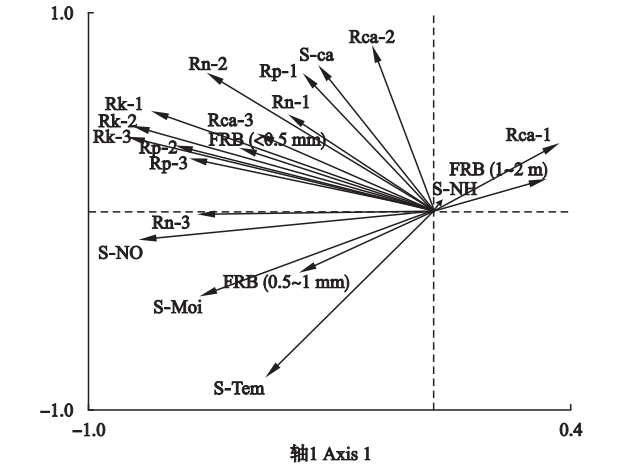


图 2 细根生物量与相关影响因子的 PCA 分析  
Fig.2 Principal component analysis ordination of the relationships between the FRB and fine root biomass factors.

Rca-1: <0.5 mm 细根钙 Ca content of <0.5 mm fine roots; Rca-2: 0.5~1 mm 细根钙 Ca content of 0.5~1 mm fine roots; Rca-3: 1~2 mm 细根钙 Ca content of 1~2 mm fine roots; Rp-1: <0.5 mm 细根磷 P content of <0.5 mm fine roots; Rp-2: 0.5~1 mm 细根磷 P content of 0.5~1 mm fine roots; Rp-3: 1~2 mm 细根磷 P content of 1~2 mm fine roots; Rk-1: <0.5 mm 细根钾 K content of <0.5 mm fine roots; Rk-2: 0.5~1 mm 细根钾 K content of 0.5~1 mm fine roots; Rk-3: 1~2 mm 细根钾 K content of 1~2 mm fine roots; Rn-1: <0.5 mm 细根氮 N content of <0.5 mm fine roots; Rn-2: 0.5~1 mm 细根氮 N content of 0.5~1 mm fine roots; Rn-3: 1~2 mm 细根氮 N content of 1~2 mm fine roots. FRB (<0.5 mm): <0.5 mm 细根生物量<0.5 mm fine root biomass; FRB (0.5~1 mm): 0.5~1 mm 细根生物量 0.5~1 mm fine root biomass; FRB(1~2 mm): 1~2 mm 细根生物量 1~2 mm fine root biomass. S-Tem: 土壤温度 Soil temperature; S-Moi:土壤湿度 Soil moisture; S-NO: 土壤硝态氮 Soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; S-NH: 土壤铵态氮 Soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N.

表 2 马尾松细根生物量的重复测量方差分析  
Table 2 ANOVA of fine root biomass measured repeatedly in *Pinus massoniana* plantation

变异来源 Source of variance	活根 Living root			死根 Dead root		
	df	F	P	df	F	P
T	8	4.51	0.000**	8	2.35	0.020*
D	2	86.88	0.000**	2	20.64	0.000**
T×D	16	1.24	0.242	16	1.46	0.118

\* P<0.05; \*\* P<0.01. T: 取样时间 Sampling time; D: 细根直径 Root diameter.

表 3 马尾松细根年生产量和周转率  
Table 3 Annual production and turnover rate of fine roots of *Pinus massoniana*

项目 Item	直径 Diameter (mm)		
	<0.5	0.5~1	1~2
生产量 Production (t·hm <sup>-2</sup> )	0.13±0.01a	0.49±0.01b	0.37±0.01c
周转率 Turnover rate (a <sup>-1</sup> )	1.49±0.02a	1.01±0.01a	0.40±0.01b

同行不同小写字母表示差异显著 (P<0.05) Different small letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.



表 4 三峡库区马尾松细根生产量和周转与各因子的相关分析  
Table 4 Correlation analysis of fine root production and turnover with factors ( $R^2$ )

环境因子 Environmental factor	直径 Diameter (mm)						细根因子 Fine root trait	直径 Diameter (mm)					
	<0.5		0.5~1		1~2			<0.5		0.5~1		1~2	
	FRP	FRT	FRP	FRT	FRP	FRT		FRP	FRT	FRP	FRT	FRP	FRT
土壤温度 Soil temperature	0.328 *	0.250 *	0.003	0.009	0.035	0.020	FRB	0.410 *		0.411 *		0.545 *	
土壤湿度 Soil moisture	0.028	0.057	0.051	0.057	0.115	0.064	N	0.173	0.087	0.084	0.052	0.174	0.192
铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.005	0.014	0.006	0.009	0.013	0.006	P	0.322 *	0.085	0.219	0.194	0.199	0.212
硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.004	0.043	0.125	0.011	0.067	0.044	K	0.392 *	0.113	0.147	0.096	0.173	0.154
土壤钙含量 Soil Ca content	0.656 * *	0.731 * *	0.143	0.114	0.104	0.118	Ca	0.009	0.002	0.073	0.043	0.038	0.041

\*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ . FRP: 细根生产量 Fine root production; FRT: 细根周转率 Fine root turnover; FRB: 细根生物量 Fine root biomass.

3 讨 论

3.1 马毛松细根生产和周转

本研究中,三峡库区马尾松细根(<2 mm)年生产量为  $1.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,年周转率为  $0.97 \text{ a}^{-1}$ ,与王瑞丽<sup>[10]</sup>对三峡库区马尾松细根(<2 mm)的周转率( $1.05 \text{ a}^{-1}$ )的研究结果相近.细根生产量和年周转率因不同气候和森林类型而异,从北方森林到热带森林,细根生产量和周转率逐渐增加<sup>[2]</sup>.这可能是由于从北方到南方,根系呼吸、养分矿化速率、病原菌和食根动物的增加,导致热带地区细根周转较快<sup>[3]</sup>.2011 年,Finér 等<sup>[1]</sup>在全球尺度上,通过整理 186 个林分类型的数据发现,北方森林、温带森林和热带(包括亚热带地区)森林细根周转率分别为 0.77、1.21 和  $1.44 \text{ a}^{-1}$ .在同一气候区域内,细根生产量和周转率也存在差异.Yang 等<sup>[11]</sup>采用分室模型方法对亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)混交林的研究发现,细根年生产量为  $4.124 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;陈光水等<sup>[12]</sup>采用分室模型方法对亚热带福建柏(*Fokienia hodginsii*)的研究发现,细根年周转率为  $1.48 \text{ a}^{-1}$ ,均高于本研究结果.除了局部气候和选择树种特性的差异之外,地下植被组成、根系取样深度、取样方法、活死根区分方法等都是细根生产量估计及其他研究结果产生差异的原因.

3.2 细根生产和周转与影响因子的关系

本研究表明,土壤湿度和土壤温度对细根生产量和周转率的影响较小,且只能解释细根生产量和周转率的变异的<20%,而土壤温度对<0.5 mm 细根影响显著,解释<0.5 mm 细根生产量变异的 32.8%和周转率变异的 25.0%.森林生态系统细根生产和周转与温度和降雨量显著相关.这在多数研究中得到证实<sup>[3]</sup>,但温度和湿度对细根生产和周转的变异

贡献大小主要取决于研究对象<sup>[1-3]</sup>.研究尺度的大小可能也影响土壤温湿度与细根生产和周转的相关程度.本研究对象为单一样地上的单一树种,土壤温湿度有效梯度的缺失可能削弱了土壤温湿度与细根生产和周转的相关联系.细根生产量和周转率随温度和湿度的增加而增加,且温度和湿度紧密相关,这与多数研究结果相似<sup>[6,13]</sup>.但细根对温湿度的反应在许多单个研究中并不是连续的,可能与研究对象、研究方法等不同有关,至今很难准确解释产生差异的原因<sup>[3]</sup>.

细根生产和周转与土壤养分相关<sup>[3]</sup>.本研究发现,土壤钙含量对细根生产和周转有显著影响,平均能解释马尾松<0.5 mm 细根生产与周转的变异的 69.0%.细根分解控制着细根周转速率<sup>[14]</sup>.一般认为,细根分解速率越大,周转速率越快. $\text{Ca}^{2+}$ 在细根分解过程中有着特殊的作用.它能为分解过程中微生物正常的新陈代谢提供养分以渡过不利环境,对细根分解起促进作用<sup>[15]</sup>,同时,土壤钙含量与<0.5 mm 细根生物量紧密,这可能解释马尾松<0.5 mm 细根生产和周转与土壤钙含量表现出明显相关性的原因.细根周转与土壤养分相关性方向存在不确定性,可能是正相关、负相关,也可能相关性较弱<sup>[16-20]</sup>.这取决于树种种类、林龄、土壤养分的分布,以及环境因子(如气候、菌根、土壤微生物等)与养分的交互作用等<sup>[21]</sup>.本研究发现,土壤铵态氮和硝态氮与各径级细根生产和周转均表现为弱正相关.然而,土壤养分与各径级马尾松细根生产相关关系的一致性,可能在一定程度上反映出本研究中细根研究单元采用的直径阈值(<0.5、1~1.5 和 1.5~2 mm),能较好地反映出根组分与土壤养分之间的联系.

相比环境因子而言,细根生物量能更大程度地解释细根生产变异,但几乎不能解释细根周转变异.

细根生物量能解释细根生产量变异的 45%, 且细根生产量随细根生物量的增加而增加. 细根生产量与细根生物量的显著正相关关系已在多数研究中得到证实<sup>[1,5,22]</sup>. 如 Li 等<sup>[5]</sup>研究发现, 细根生物量能最大解释细根生产量 50% 的变异; Finér 等<sup>[1]</sup>研究发现, 细根生物量能解释林木细根生产量 53% 的变异. 一般认为, 直径越细的根, N 浓度越高, 非木质化程度越高, 周转越快<sup>[2]</sup>. 细根周转速率与细根 N 浓度呈显著正相关<sup>[1]</sup>. 本研究结果与此结论一致. 然而, 可能由于不同直径细根对细根本身养分的敏感性不同, 导致不同径级细根的生产和周转与本身养分浓度之间的联系存在明显的差异. 本研究发现, 细根养分浓度对 <0.5 mm 细根生产量的影响明显大于对 0.5~1 和 1~2 mm 细根的影响.

#### 参考文献

- [1] Finér L, Ohashi M, Noguchi K, *et al.* Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management*, 2011, **262**: 2008–2023
- [2] Gill RA, Jackson RB. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, **147**: 13–31
- [3] Yuan Z, Chen H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2010, **29**: 204–221
- [4] Zhang X-Q (张小全), Wu K-H (吴可红). Fine root production and turnover for forest ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37**(3): 126–138 (in Chinese)
- [5] Li Z, Kurz WA, Apps MJ, *et al.* Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: Recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**: 126–136
- [6] Hendricks JJ, Hendrick RL, Wilson CA, *et al.* Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: An empirical test and methodological review. *Journal of Ecology*, 2006, **94**: 40–57
- [7] Liu Z-M (刘泽民). Fine Root Dynamics of *Larix principis-rupprechtii* in Guandi Mountains. Master Thesis. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [8] Wang R-L (王瑞丽), Cheng R-M (程瑞梅), Xiao W-F (肖文发), *et al.* Fine root production and turnover in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(9): 2346–2352 (in Chinese)
- [9] Ge X-G (葛晓改), Xiao W-F (肖文发), Zeng L-X (曾立雄), *et al.* Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 445–451 (in Chinese)
- [10] Wang R-L (王瑞丽). Study of Fine Root Dynamics of *Pinus massoniana* Plantation in Three Gorges Reservoir Area. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012 (in Chinese)
- [11] Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), He Z-M (何宗明), *et al.* Production, distribution and nutrient return of fine roots in a mixed and pure forest in Subtropical China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2002, **8**(3): 223–233 (in Chinese)
- [12] Chen G-S (陈光水), Yang Y-S (杨玉盛), He Z-M (何宗明), *et al.* Comparison on fine root production, distribution and turnover between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(4): 15–21 (in Chinese)
- [13] Jakub O, Marek JK, Michael BL, *et al.* Fine root production varies with climate in balsam fir (*Abies balsamea*). *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, **42**: 364–374
- [14] Li J-M (李吉玫), Zhang Y-T (张毓涛), Han Y-L (韩燕梁), *et al.* Effects of variation of precipitation on the fine root decomposition and related nutrient release in *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2015, **24**(9): 1453–1460 (in Chinese)
- [15] Xu Y-Q (许玉庆), Xiang W-H (项文化), Zeng Y-L (曾叶霖), *et al.* Fine root decomposition pattern of forest ecosystem in China and research progress of controlling factors. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2015, **44**(2): 149–155 (in Chinese)
- [16] Nadelhoffer KJ. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist*, 2000, **147**: 131–139
- [17] Burton AJ, Pregitzer KS, Hendrick RL. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, **125**: 389–399
- [18] Mei L (梅莉), Wang Z-Q (王政权), Zhang X-J (张秀娟), *et al.* Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass production and turnover of *Fraxinus mandshurica* plantation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(10): 1663–1668 (in Chinese)
- [19] Tâmara TS, Izildinha SM, Steel SV. Effects of water and nutrient availability on fine root growth in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil. *New Phytologist*, 2010, **187**: 622–630
- [20] Yuan ZY, Chen HYH. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, **279**: 3796–3802
- [21] Ying H (英慧), Yin Y (殷有), Yu L-Z (于立忠), *et al.* Effects of soil moisture and soil nutrient on the dynamic and turnover of the tree fine roots: A review. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2010, **25**(3): 36–42 (in Chinese)
- [22] Chen WJ, Zhang QF, Cihlar J, *et al.* Estimating fine-root biomass and production of boreal and cool temperate forests using aboveground measurements: A new approach. *Plant and Soil*, 2004, **265**: 31–46

作者简介 王娜, 女, 1990 年生, 硕士研究生. 主要从事森林生态学研究. E-mail: 13121498454 @ 163.com

责任编辑 孙菊