DOI: 10.20103/j.stxb.202311112446

郑敬曦,张棋渲,龙福强,王思远,王秀伟,孙涛.中国 16 个地点天然次生林细根产量分布格局.生态学报,2024,44(16):7313-7321. Zheng J X, Zhang Q X, Long F Q, Wang S Y, Wang X W, Sun T.Distribution pattern of fine root production from natural secondary forests in 16 sites of China.Acta Ecologica Sinica,2024,44(16):7313-7321.

中国 16 个地点天然次生林细根产量分布格局

郑敬曦1,张棋渲1,龙福强2,王思远2,王秀伟1,*,孙 涛2

1 东北林业大学林学院,哈尔滨 150040

2 中国科学院森林生态与管理重点实验室,中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳 110016

摘要:细根产量(FRP)是森林生态系统地下产量的最大组分,对森林生态系统的碳和养分的分配和循环起着重要作用。细根根 序对于 FRP 有较大的影响。目前较少通过根序分级法、以我国 16 个地点的天然次生林为整体的大尺度 FRP 研究。采用根序 分级法对我国 16 个地点的天然次生林进行为期 1 年的、群落水平的大尺度 FRP 实验研究,来探索我国 16 个地点的天然次生林 FRP 分布格局。结果表明,FRP 分布格局总体上由北向南逐渐增加,吸收根(AFR)产量、运输根(TFR)产量以及 FRP 均为海南 尖峰岭最高,分别为(115.42±17.87)g/m²、(298.6±76.82)g/m²和(414.01±84.05)g/m²,大兴安岭呼中区最低,分别为(11.25± 1.28)g/m²、(12.44±0.97)g/m²和(23.7±1.21)g/m²。山西太岳山、安徽鹞落坪和湖南会同显著低于邻近纬度地区(P<0.05), FRP 分别为(50.89±5.58)g/m²、(58.85±17.24)g/m²和(67.26±15.31)g/m²。年均温(MAT)和年均降水量(MAP)与 AFR 产量、TFR 产量和 FRP 显著页相关,纬度与 AFR 产量、TFR 产量和 FRP 显著负相关。 关键词:细根;产量;内生长袋法;根序分级法;分布格局

Distribution pattern of fine root production from natural secondary forests in 16 sites of China

ZHENG Jingxi¹, ZHANG Qixuan¹, LONG Fuqiang², WANG Siyuan², WANG Xiuwei^{1, *}, SUN Tao²

1 School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The root system is an important organ of the tree and plays two main roles, one of which is to support the tree, which is mainly performed by the coarse roots, and the other is to absorb water and nutrients, which is mainly performed by the fine roots. Fine roots are not only responsible for water and nutrient uptake, but also contribute significantly to carbon sequestration and net primary productivity (NPP) in forest ecosystems. Fine roots are an important component of the root system, an important soil resource in terrestrial ecosystems, and a mediator of soil geochemical cycling, and are the most active component of the root system. Fine root production (FRP) is the largest component of below-ground production and plays a critical role in the allocation and cycling of carbon and nutrients in forest ecosystems. Root order has a large effect on the FRP. At present, there is fewer large-scale research on FRP based on the method of segment order-based classification with the natural secondary forests of 16 sites in China as a whole. In this study, we conducted a 1-year experimental study of fine root production at the stand level in natural secondary forests at 16 sites in China using the segment order-based classification method to explore the distribution patterns of fine root production in natural secondary forests at 16 sites in

收稿日期:2023-11-11; 网络出版日期:2024-06-18

基金项目:国家自然科学基金(32022054,32192432);中国科学院国际伙伴计划项目(151221KYSB20210005)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wxgreat@nefu.edu.cn#限于数据的可获取性,本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

China. The results showed that the distribution pattern of fine root production increased gradually from north to south. Absorptive fine root (AFR) production, transport fine root (TFR) production and FRP were the highest in Jianfengling, Hainan, with $(115.42\pm17.87) \text{ g/m}^2$, $(298.6\pm76.82) \text{ g/m}^2$ and $(414.01\pm84.05) \text{ g/m}^2$, respectively, and the lowest in Huzhong District, Daxing'anling, with $(11.25\pm1.28) \text{ g/m}^2$, $(12.44\pm0.97) \text{ g/m}^2$ and $(23.7\pm1.21) \text{ g/m}^2$, respectively. Taiyue Mountain, Shanxi, Yao Luoping, Anhui, and Huitong, Hunan were significantly lower than those in neighboring latitudes (*P*<0.05). FRP was $(50.89\pm5.58) \text{ g/m}^2$, $(58.85\pm17.24) \text{ g/m}^2$ and $(67.26\pm15.31) \text{ g/m}^2$, respectively. Mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP) were significantly and positively correlated with AFR production, TFR production and FRP, while latitude was significantly and negatively correlated with AFR production, TFR production and FRP, while latitude was significantly and negatively correlated with AFR production, TFR production and FRP, the global forest ecosystems are huge and diverse, accounting for a large proportion of the global forest ecosystems and playing a very important role in carbon and nutrient cycling at the global scale, whereas global databases seldom cite data from China's forest ecosystems. Therefore, it is of great importance to carry out a study on fine root production on a large scale based on the segment order-based classification method in natural secondary forests at 16 sites in China.

Key Words: fine root; production; ingrowth core; segment order-based classification; distribution pattern

细根产量(Fine root production, FRP)是指细根一年的总生长量,而在实践中难以得到细根寿命的确切数 值^[1],因此细根净产量取现有活细根存量在一定时间间隔内的年增加值之和^[2]。FRP 是地下产量的最大组 成部分^[3-4],占森林生态系统净初级生产力(NPP)的 3%—84%^[5-6],细根生产消耗的碳(C)占森林生态系统 NPP 的 10%—60%^[7]。因此,研究细根的生产能够更好地认识细根在陆地生态系统响应全球气候变化中发 挥的重要作用^[2]。

直径分级法(Diameter-based classification)和根序分级法(Segment order-based classification)是定义细根的两种方法^[8-9],在传统上通常把细根定义为直径<2mm的根系^[7,10-12]。然而,很多研究已证实,仅根据直径来定义细根容易导致许多潜在偏差^[9],不同物种间的细根直径存在明显差异^[13-15]。细根根序作为影响细根生产的、内在生理特性,在细根生产中具有较大的作用^[2]。McCormack等^[11]指出,根序分级法可以跨越物种和地点在大尺度上来比较细根的性状,更好地估计细根的产量。根序分级法将从根尖(1级根)开始的前5级根定义为细根^[11,16],在根序分级法的基础上,1—3级根聚类为吸收根(Absorptive fine root,AFR),4—5级根聚类为运输根(Transport fine root,TFR)^[11,16-20]。吸收根是植物资源吸收的主要器官,其寿命较短但周转速度较快;而运输根则负责资源的运输和储存,其寿命较长但周转速度较慢^[16]。如果简单的定义细根为直径<2mm的根,则将高估细根生产对全球年陆地生态系统 NPP 的贡献^[11,21]。因此,根据根序分级法进行 FRP 研究对于精准估计地下 NPP 是十分必要的。

我国地域辽阔,然而细根生产与周转的研究主要集中在以温带大陆性气候区为主的北方地区,同时热带和亚热带地区也有所涉及^[2]。在中国,森林面积为2.083亿hm²,由于气候的多样性,中国从南方到北方有多种森林类型,包括热带森林、温带森林和北方森林^[22],基本涵盖了所有森林类型,能够较好满足本实验进行大尺度的细根产量布局研究。因为时、空间的限制,以往的研究多以Meta分析为主,鲜少有以我国多个地点、通过实验的方法进行的研究^[6,22-23]。由于按根序进行分级的研究的复杂性以及大尺度范围研究的工作量繁杂,我国在大尺度上天然次生林 FRP 分布格局仍需进一步研究。

本研究以中国 16 个地点天然次生林作为研究对象,采用内生长袋法(内径为 5cm)和根序分级法,旨在通 过大量劳动密集型实验揭示我国天然次生林 FRP 分布格局,并探讨调控我国天然次生林 FRP 分布格局的主 要影响因素。为我国碳中和事业地下部分碳中和提供数据的基础支持及参考,对于正确认识细根在生物地球 化学循环中起到的作用以及对生态系统环境变化的响应提供依据和参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点共计16个,具体内容见表1。

表 1 16 个采样点的基本信息

Table 1 Basic information on the 16 sampling sites in China									
编号 Number	地区 Site	年均温 MAT/(℃)	年降水 MAP/mm	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	温度带 Temperate zone	优势树种 Dominant species	土壤类型 Soil type	
1	呼中	-4.3	497.7	51°63′	122°83′	寒温带	落叶松(Larix gmelinii)、樟子松(Pinus sylvestris)、白桦(Betula platyphylla)等	棕色针叶林土	
2	帽儿山	2.1	726	45°24′	127°40′	温带	白桦、水曲柳 (Fraxinus mandshurica) 、 春榆 (Ulmus davidiana) 等	暗棕色森林土	
3	老秃顶	6.3	1060	41°11′	124°41′	温带	紫椴(Tilia amurensis)、水曲柳等	棕壤、暗棕壤	
4	东灵山	4	650	39°58′	115°26′	暖温带	山杨(Populus davidiana) ,胡桃楸 (Juglans mandshurica)等	褐土、棕壤	
5	昆嵛山	11.9	984.4	37°11′	121°41′	暖温带	赤松(Pinus densiflora)、日本落叶松 (Larix kaempferi)等	森林棕壤	
6	太岳山	11	600	36°40′	112°04′	暖温带	油松(Pinus tabuliformis)等	褐土、棕壤	
7	三门峡	13.9	603.4	34°26′	110°09′	暖温带	山杨、油松、侧柏(Platycladus orientalis)等	褐土、棕壤	
8	火地塘	12	1023	33°18′	109°20′	亚热带	红桦(Betula albosinensis)、华山松 (Pinus armandi)、油松等	山地棕壤	
9	鹞落坪	15	1400	30°40′	116°03′	亚热带	茅栗(Castanea seguinii)、鹅耳枥 (Carpinus turczaninovii)等	山地黄棕壤	
10	后河	13.1	1460	30°02′	110°29′	亚热带	水丝梨(Sycopsis sinensis)等	山地黄棕壤	
11	会同	16.5	1400	26°48′	109°30′	亚热带	白栎(Quercus fabri)等	山地黄壤	
12	麻江	13.9	1190	26°26′	107°18'	亚热带	马尾松(Pinus massoniana)等	黄壤	
13	普定	15.2	1342	26°22'	105°45′	亚热带	安顺润楠(Machilus cavaleriei)、滇鼠刺 (Itea yunnanensis)等	棕色石灰土	
14	九连山	16.8	1927.7	24°31′	114°26′	亚热带	木荷(Schima superba)、润楠(Machilus nanmu)、甜槠(Castanopsis eyrei)等	山地红壤	
15	鼎湖山	20.9	1900	23°09′	112°30′	亚热带	马尾松、木荷等	赤红壤	
16	尖峰岭	24.7	2449	18°36′	108°48′	热带	厚皮树(Lannea coromandelica)等	褐色砖红壤	

编号为地点编号;MAT: 年均温 Mean annual temperature; MAP: 年降水 Mean annual precipitation

1.2 研究方法

本实验采用内生长袋法(Ingrowth core method)以及根序分级法(Segment order-based classification)研究 16 个地点的 FRP^[2,8]。实验地点从北至南共计 16 个地点(表 1),对群落水平的 FRP 展开研究。选择我国 16 个 地点天然次生林,每个地点设置随机排列的 4 个重复样方,每个样方之间至少相隔 3m,样方大小均为 4m× 4m。Schenk 等^[24]对生根深度进行的全球分析表明,研究 0—20cm 土层细根动态等参数基本能够满足一般研 究的需要,He 等^[25]研究认为 76%—95%的 FRP 出现在顶部 20cm 层,一些研究也得出了类似的观点^[26-30]。 因此,于 2021 年 10 月使用土钻在每块样方内随机钻取 5 个 20cm 左右深度的土柱,制造无根土柱,将无根土 柱与 15cm 高、内径为 5cm、根袋网孔为 2—3mm、尼龙网材质的根袋一并放入原处土坑中,以无根土填满,等 待细根 1 年的生长之后,在林木生长季结束(10 月,以北方森林为参照)之后取样^[2]。全部样品装入封口袋当 天运回实验室,放入-20℃冰箱中进行冷冻保存。在实验室中,将去除草本根系的根系样品用去离子水浸泡、 解冻、仔细清洗之后,放在直径为15cm 装有1℃去离子水的培养皿中,按照 Pregitzer 等^[31]和王向荣等^[32]介绍的方法进行根系分级。最前端具有根尖的根定义为1级根,多个1级根共同着生的根定义为2级根,以此类推,一直区分到5级细根。然后小心用镊子取下每一个根段,放入不同的信封中进行分级保存。之后将样品置于65℃烘箱内烘干至恒重(24h),测定生物量干重(精确至0.01g)。之后按照下式对每一级细根进行 FRP的估算:

细根产量
$$(g/m^2)$$
=平均土柱细根干重 $(g)/(3.14 \times 0.025^2)(m^2)$ (1)

1.3 数据处理

在取样的 16 个地点中,采用生物量干重来表征细根产量,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)以及 Duncan 法事后多重比较分析 16 个地点 FRP 差异。所有数据统计与分析过程均使用 SPSS 25.0 软件完成,采 用 Pearson 法对细根产量和环境因子进行相关性分析。使用 OriginPro 2024 软件作图。图表中数据为平均值 ±标准差。

2 结果与分析

2.1 AFR 产量分布格局

本研究在去除地表枯枝落叶的基础上根系研究结果集中在 0—15cm 的土层上。细根产量在 16 个采样点中, AFR 产量分布由北向南总体呈上升趋势(图 1), AFR 产量与 MAT 和 MAP 显著正相关, 与纬度显著负相关 (P<0.05)(表 2)。辽宁老秃顶、山东昆嵛山以及河南三门峡与邻近纬度地区差异显著(P<0.05)(图 1)。由 单因素方差分析得出, 16 个采样点中, 1、2、3 级根以及 AFR(1—3 级根总和)的产量之间存在差异。其中, 在 1 级根、2 级根和 AFR 产量中,海南尖峰岭最多, 分别为(25.48±1.67)g/m²、(27.01±4.82)g/m²以及(115.42± 17.87)g/m², 显著(P<0.05)大于其余采样点(表 3, 表 4)。在 16 个采样点中, 1、2、3 级根产量变化趋势基本一致(图 1)。

	产量 Production/(g/m ²)							
相关因子	1级根	2级根	3级根	4级根	5级根	吸收根	运输根	台县
Correlation factor	First-order	Second-	Third-order	Fourth-order	Fifth-order	Absorptive	Transport	心里 All roota
	root	order root	root	root	root	fine root	fine root	All loots
年均温 MAT/(℃)	0.389	0.543 *	0.582 *	0.688 **	0.648 **	0.578 *	0.678 **	0.685 **
年降水 MAP/mm	0.433	0.499 *	0.607 *	0.619 *	0.645 **	0.591 *	0.652 **	0.669 **
纬度 Latitude	-0.343	-0.510 *	-0.608 *	-0.745 **	-0.661 **	-0.577 *	-0.706 **	-0.705 **

表 2 环境因子与细根产量的相关系数 Table 2 Correlation coefficients between environmental factors and fine root production

* P<0.05; * * P<0.01

2.2 TFR 产量分布格局

我国天然次生林 TFR 产量分布格局由北向南总体逐渐增加(图 2),4 级根中产量最多的是贵州麻江县,为(93.25±18.61)g/m²,5 级根中产量最多的是海南尖峰岭,为(213.5±75.24)g/m²(表 3)。在 TFR(4—5 级根 总和)产量中,海南尖峰岭最多,为(298.6±76.82)g/m²(表 4),山东昆嵛山、贵州麻江县、海南尖峰岭的 TFR 产量显著多于邻近纬度地区,山西太岳山、安徽鹞落坪、湖南会同的 TFR 产量显著低于邻近地区(P<0.05)(图 2)。4、5 级根与运输根变化趋势基本一致(图 2),4 级根在 P<0.05 水平上与 MAP 显著正相关,在 P<0.01水平上与 MAT 显著正相关、与纬度显著负相关。5 级根、TFR 产量与 MAT、MAP 显著正相关,与纬度显著负相关(P<0.01)(表 2)。

2.3 FRP 分布格局

在 16 个地点中, FRP 分布由北向南总体呈上升趋势, 与纬度呈显著负相关, 同时, 与 MAT 和 MAP 显著正相关(P<0.01)(表 2), FRP 最高的是海南尖峰岭, 显著高于其他地区(P<0.05)(图 2), 为(414.01±84.05)g/m²



Fig.1 Differences in production of First-order root, Second-order root, Third-order root and AFR at different sites 不同小写字母表示差异显著(P<0.05)下同

(表4)。热带森林 FRP 显著高于亚热带森林、温带森林以及寒温带森林(图2)。山西太岳山、安徽鹞落坪、湖南会同 FRP 显著低于邻近纬度地区(P<0.05),分别为(50.89±5.58)g/m²、(58.85±17.24)g/m²和(67.26±15.31)g/m²(表4)。

3 讨论

对中国 16个地点天然次生林 FRP 分布格局的调查表明,AFR 产量、TFR 产量与 FRP 分布格局一致,整体呈由北向南增加的趋势,其中海南尖峰岭的 FRP 最高,为(414.01±84.05)g/m²,大兴安岭呼中的细根产量最低,为(23.7±1.21)g/m²。Finér 等^[23]对全球尺度上的 FRP 进行的 Meta 分析也得出同样的趋势,北方森林到热带森林 FRP 呈上升趋势,这个结果也支持了以往的研究^[33-34]。

纬度是影响 FRP 分布格局的重要因子^[23]。本研究发现,纬度与 AFR 产量、TFR 产量、FRP 都显著负相 关。许多研究表明,FRP 随着纬度的增加而逐渐降低^[25,28,30,34–35]。原因可能是低纬度地区气候比高纬度地 区更为温暖湿润,生长季长,导致南北方不同森林生态系统在细根生产上的碳投入不同,热带和亚热带地区水 热丰富,投入较多的碳用于细根生产,有利于养分和水分的吸收,而温带和寒温带地区生长季短,水热不足,投 入较少的碳用于细根生产^[15]。邓强等^[36]也得出纬度与 FRP 呈线性负相关的结论,认为在温暖气候条件下细 根生产力较强。此外,本研究还发现 FRP 分布格局受气候因子中 MAT 和 MAP 的影响。有研究得出北美东 部的香脂冷杉(*Abies balsamea*)林细根产量随 MAT 增加而增加^[37],Yuan 等^[6]通过 Meta 分析也发现,在北方 森林中,FRP 随着 MAT 的增加而增加,这在一定程度上是温度的升高土壤矿化增加的结果,提高了氮的有效 性,土壤资源有效性的增加刺激了细根的生产。



图 2 4 级根、5 级根、运输根以及细根的不同地点的产量差异

Fig.2 Differences in production of Fourth-order root, Fifth-order root, transport root and fine root at different sites

1	able 5	FKI III TO natural secondary forests in Clinia (Segment order-based classification) (Mean±3D)
		产量 Production/(g/m ²)

此上的日)									
地点编写 Site number	根序 Root order									
Site number	1	2	3	4	5					
1	1.53±0.34h	2.00 ± 0.4 g	$7.73 \pm 1.13 f$	$5.31 \pm 0.42e$	7.13±0.97i					
2	$1.53 \pm 0.59 h$	2.55 ± 1.02 g	$8.92 \pm 1.28 f$	$9.43 \pm 2.68 de$	11.47±1.53i					
3	$16.05 \pm 4.66 \mathrm{b}$	$21.15 \pm 6.36 ab$	$26.24{\pm}7.08{\rm de}$	$17.58{\pm}4.02{\rm de}$	31.34±4.51fghi					
4	$13.76 \pm 3.77 \mathrm{bc}$	$11.98{\pm}3.16{\rm cde}$	$32.36{\pm}10.44\mathrm{de}$	$25.73{\pm}7.03{\rm cd}$	64.71±17.46defg					
5	12.74 ± 2.43 bed	$18.15{\pm}1.43{\rm bc}$	$61.15 \pm 13.65 \mathrm{ab}$	$56.94{\pm}16.48\mathrm{b}$	$104.21{\pm}21.07\mathrm{cd}$					
6	$1.04 \pm 0.21 h$	$1.44 \pm 0.57 g$	$7.47 \pm 1.08 f$	$15.54{\pm}4.19{\rm de}$	25.39±6.23ghi					
7	$11.47{\pm}2.81{\rm cde}$	24.71±7.41ab	$36.69{\pm}7.9{\rm d}$	$39.49 \pm 7.27 \mathrm{c}$	46.88±9.04efghi					
8	$11.72 \pm 3.17 \mathrm{cd}$	$20.13{\pm}6.62{\rm b}$	$26.75{\pm}8.7\mathrm{de}$	36.95 ± 11.6 c	$77.45{\pm}17.51\mathrm{de}$					
9	$4.08{\pm}1.44{\rm gh}$	$5.86{\pm}1.74{\rm efg}$	$9.68 \pm 2.94 f$	$11.97{\pm}4.43{\rm de}$	27.26±8.13fghi					
10	$3.94{\pm}0.94{ m gh}$	$10.19 \pm 2.2 def$	$31.59 \pm 9 \mathrm{de}$	$35.16 \pm 8.26c$	$67.52{\pm}16.14\mathrm{def}$					
11	$1.91 \pm 0.87 \mathrm{h}$	$4.21 \pm 1.67 { m fg}$	$18.09{\pm}5.09{\rm ef}$	23.44 ± 7.3 cd	19.62±6.14hi					
12	$6.88{\pm}1.74{\rm fg}$	$13.00{\pm}2.81{\rm cd}$	$40.51{\pm}7.18{\rm cd}$	93.25±18.61a	$144.97 \pm 27.96 \mathrm{b}$					
13	$9.17{\pm}3.63{\rm def}$	$19.87{\pm}3.86{\rm b}$	$53.00{\pm}5.46{\rm bc}$	$65.48{\pm}13.93\mathrm{b}$	75.42 ± 22.53 de					
14	$9.43 \pm 2.26 def$	$24.97{\pm}6.37{\rm ab}$	71.34±19.46a	$55.8{\pm}10.73{\rm b}$	54.78±10.13efgł					
15	$7.9 \pm 1.74 \mathrm{ef}$	$18.35{\pm}6.34{\rm bc}$	$40.51{\pm}10.07{\rm cd}$	$65.99{\pm}19.2{\rm b}$	$119.49{\pm}43.79{\rm bc}$					
16	25.48±1.67a	27.01±4.82a	62.93±14.33ab	85.10±10.83a	213.50±75.24a					

同列不同字母表示差异显著(P<0.05)

本研究中 FRP 与 MAT 呈显著正相关的结果与此相一致。姜红英等^[38]研究认为,大气温度是影响细根生产最重要的环境因子,而 Wang 等^[22]研究认为中国森林 FRP 与 MAT 无关,原因可能是在生长季节南北方温

度变化较小。同时,也可能是因为 Wang 等^[22]进行研究的文献采用了不同的研究方法,如根钻法、内生长袋 法等方法,以及对于细根采用了不同的定义标准导致的。本研究结果表明 MAP 与 AFR 产量、TFR 产量、FRP 都显著正相关。Zhang 等^[39]通过 Meta 分析研究发现,在全球尺度上降水量的增加显著提高了细根产量。 Yuan 等^[6]通过分析也发现,FRP 随着 MAP 的增加而增加。降水是森林生态系统的主要水分来源,低降水通 常会导致土壤水分的亏缺,减少土壤养分通过土壤表面向根系的集流和扩散,导致根表面养分有效性降低,细 胞分裂和扩张减少,致使 FRP 下降^[40]。Wang 等^[22]也分析得出中国森林 FRP 随 MAP 的增加而增加,在群落 水平上与 MAP 显著正相关,可能是在生长季节南北方降水量差异较大导致的。同时,Wang 等^[22]研究得出中 国的干旱水平高于全球的平均干旱水平,这可能使中国森林对于 MAP 变化更为敏感。

Table 4 FRP in 16 natural secondary forests in China(functional classification)(Mean±SD)									
地点编号 - Site number	产量	書 Production/(g/m ²	2)	地点编号 Site number	产量 Production/(g/m ²)				
	吸收根	运输根	总量		吸收根	运输根	总量		
	Absorptive roots	Transport roots	All roots		Absorptive roots	Transport roots	All roots		
1	11.25 ± 1.28 g	$12.44 \pm 0.97 h$	23.70±1.21h	9	19.62 ± 5.54 g	39.24 ± 12.13 gh	$58.85{\pm}17.24\mathrm{h}$		
2	13.00 ± 2.26 g	$20.89 \pm 2.12 h$	$33.89 \pm 1.53 h$	10	$45.73 \pm 11.42 f$	$102.67{\pm}15.8{\rm de}$	$148.40{\pm}20.88{\rm ef}$		
3	$63.44{\pm}17.58\mathrm{def}$	$48.92{\pm}5.71\mathrm{fgh}$	$112.36 \pm 21.94 \mathrm{fg}$	11	24.21 ± 7.46 g	$43.06{\pm}8.7{\rm gh}$	$67.26{\pm}15.31{\rm gh}$		
4	$58.09{\pm}15.88{\rm ef}$	$90.45{\pm}23.99\mathrm{ef}$	$148.54 \pm 38.97 \mathrm{ef}$	12	$60.38 \pm 11.36 \text{ef}$	$238.22{\pm}33.87\mathrm{b}$	$298.60{\pm}34.5\mathrm{b}$		
5	$92.04{\pm}14.43{\rm bc}$	$161.15 \pm 37.07 c$	$253.19{\pm}48.35\mathrm{bc}$	13	$82.04{\pm}8.42\mathrm{cd}$	$140.89{\pm}17\mathrm{cd}$	$222.93{\pm}16.17\mathrm{cd}$		
6	$9.95 \pm 1.42 g$	$40.94{\pm}6.82{\rm gh}$	$50.89 \pm 5.58 \mathrm{h}$	14	$105.73{\pm}25.52{\rm ab}$	$110.58{\pm}10.83{\rm de}$	$216.31{\pm}33.07\mathrm{cd}$		
7	$72.87{\pm}17.46{\rm cde}$	$86.37{\pm}10.24\mathrm{efg}$	$159.24 \pm 23.15 \mathrm{ef}$	15	$66.75 \pm 12.85 def$	$185.48{\pm}61.96\mathrm{c}$	$252.23{\pm}59.6{\rm bc}$		
8	$58.6{\pm}17.56{\rm ef}$	$114.39{\pm}26.21\mathrm{de}$	$172.99{\pm}36.4{\rm de}$	16	115.42±17.87a	$298.60 \pm 76.82a$	414.01±84.05a		

表 4 我国 16 个天然次生林细根产量(功能模块化分类)(平均值±标准偏差)

本研究结果显示,1级根与纬度、MAT 和 MAP 不存在相关性(P>0.05),这可能是因为1级细根具有寿命 短,周转快^[14],对土壤环境变化最为敏感^[41]的特点,更易受到局部条件的影响。山东昆嵛山 FRP 显著高于邻 近纬度地区,原因可能是昆嵛山靠近海洋,在纬度较高的情况下有着高于邻近纬度地区的 MAT、MAP,使得 FRP 高于邻近纬度地区。而山西太岳山、安徽鹞落坪和湖南会同显著低于邻近纬度地区一方面是在大尺度 上受到 MAT 和 MAP 的影响,在局部区域也会受到如地形、土壤性质、林分结构等因素的影响^[42],且低级根对 于温度和土壤养分的响应更为敏感^[43]。本研究得出 16 个地点的天然次生林 FRP 为 164.6g/m²,低于 Wang 等^[22]对于中国森林 FRP 的估计值 366.8g/m²,这可能是因为本研究采用根序分级法定义细根,而 Wang 等^[22] 进行 Meta 分析采用的文献使用直径分级法定义,且 1—5mm 的情况均有存在,多项研究指出通过直径分级法 来定义细根是存在问题的^[9,11,44],McCormack 等^[11]研究发现,基于根序分级法进行估算细根周转消耗陆地生 态系统 NPP 明显低于直径分级法,这支持了本研究的结果。

另外,由于大尺度实验的工作量繁多以及本实验研究时间较短,因此并未对 FRP 进行季节性的研究,所 以 FRP 随季节的变化规律还有待今后进一步研究。同时,FRP 分布格局还可能在局部区域受地形、土壤性 质、林分结构、树种组成等因素影响,在之后的研究中应加强相关的研究。

4 结论

本研究通过根序分级法对我国 16 个地点天然次生林的 FRP 进行了群落水平的研究,在1 年的生长中获 得了我国 16 个地点天然次生林 FRP 分布格局。研究发现 FRP、AFR 产量和 TFR 产量总体上均由北向南呈增 加趋势,其中海南尖峰岭最高,大兴安岭呼中区最低,山东昆嵛山和贵州麻江县显著高于邻近纬度地区,山西 太岳山、安徽鹞落坪和湖南会同显著低于邻近纬度地区。FRP 与 MAT、MAP 显著正相关,与纬度显著负相关。 本研究结果通过实验的方法,为地下部分碳储量提供了数据基础支持。为准确预测未来生态系统 C 的分配格局 和正确认识细根在生物地球化学循环中起到的作用以及对生态系统环境变化的响应提供了数据支撑及参考。

7319

参考文献(References):

- [1] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态. 生态学杂志, 1992, 11(4): 46-49.
- [2] 胡琪娟, 王霖娇, 盛茂银. 植物细根生产和周转研究进展. 世界林业研究, 2019, 32(2): 29-34.
- [3] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. Ecology, 1992, 73(4): 1139-1147.
- [4] Addo-Danso S D, Prescott C E, Smith A R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: a review. Forest Ecology and Management, 2016, 359: 332-351.
- [5] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. New Phytologist, 2000, 147(1): 13-31.
- [6] Yuan Z Y, Chen H Y 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(4): 204-221.
- [7] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(12): 2507-2520.
- [8] 陈莉莉, 袁志友, 穆兴民, 焦峰, 邓强. 森林细根生产力研究进展. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 70-75, 80.
- [9] Freschet G T, Pagès L, Iversen C M, Comas L H, Rewald B, Roumet C, Klimešová J, Zadworny M, Poorter H, Postma J A, Adams T S, Bagniewska-Zadworna A, Bengough A G, Blancaflor E B, Brunner I, Cornelissen J H C, Garnier E, Gessler A, Hobbie S E, Meier I C, Mommer L, Picon-Cochard C, Rose L, Ryser P, Scherer-Lorenzen M, Soudzilovskaia N A, Stokes A, Sun T, Valverde-Barrantes O J, Weemstra M, Weigelt A, Wurzburger N, York L M, Batterman S A, Gomes de Moraes M, Janeček Š, Lambers H, Salmon V, Tharayil N, McCormack M L. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. New Phytologist, 2021, 232(3): 973-1122.
- [10] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine roots in a northern hardwood forest. Ecology, 1992, 73(3): 1094-1104.
- [11] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, Fahey T J, Fernandez C W, Guo D L, Helmisaari H S, Hobbie E A, Iversen C M, Jackson R B, Leppälammi-Kujansuu J, Norby R J, Phillips R P, Pregitzer K S, Pritchard S G, Rewald B, Zadworny M. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. New Phytologist, 2015, 207(3): 505-518.
- [12] Pang Y, Tian J, Yang H, Zhang K, Wang D X. Responses of fine roots at different soil depths to different thinning intensities in a secondary forest in the Qinling Mountains, China. Biology, 2022, 11(3): 351.
- [13] 师伟,王政权,刘金梁,谷加存,郭大立.帽儿山天然次生林 20个阔叶树种细根形态.植物生态学报,2008,32(6):1217-1226.
- [14] 王向荣,谷加存,梅莉,韩有志,于水强,史建伟,于立忠.水曲柳和落叶松细根形态及母根与子根比例关系.生态学报,2006,26(6): 1686-1692.
- [15] 常文静, 郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [16] 谷加存, 王东男, 夏秀雪, 王韶仲. 功能划分方法在树木细根生物量研究中的应用: 进展与评述. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1344-1351.
- [17] Guo D L, Xia M X, Wei X, Chang W J, Liu Y, Wang Z Q. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. New Phytologist, 2008, 180(3): 673-683.
- [18] 华绍贵,周靖,杨邵,吴甘霖.大别山五针松半天然林不同根级细根解剖结构特征.安庆师范大学学报:自然科学版,2023,29(1): 92-97.
- [19] Huang L, Zhao R D, Zhao X X, Tian Q X, Yue P Y, Liu F. Effects of stand condition and root density on fine-root dynamics across root functional groups in a subtropical montane forest. Journal of Forestry Research, 2023, 34(3): 665-675.
- [20] 刘源豪,杜旭龙,黄锦学,熊德成. 增温对林木细根寿命影响的研究进展. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1693-1702.
- [21] Wang N, Wang C K, Quan X K. Variations in fine root dynamics and turnover rates in five forest types in northeastern China. Journal of Forestry Research, 2020, 31(3): 871-884.
- [22] Wang S Z, Wang Z Q, Gu J C. Variation patterns of fine root biomass, production and turnover in Chinese forests. Journal of Forestry Research, 2017, 28(6): 1185-1194.
- [23] Finér L, Ohashi M, Noguchi K, Hirano Y. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. Forest Ecology and Management, 2011, 262(11): 2008-2023.
- [24] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots. Ecological Monographs, 2002, 72(3): 311-328.
- [25] He W, Mäkiranta P, Straková P, Ojanen P, Penttilä T, Bhuiyan R, Minkkinen K, Laiho R. Fine-root production in boreal peatland forests: effects of stand and environmental factors. Forest Ecology and Management, 2023, 550; 121503.

- [26] 蔡银美,张成富,李昕颖,何腾兵,赵庆霞. 凋落物输入对马尾松细根生长及化学计量的影响. 东北林业大学学报, 2022, 50(6): 32-38.
- [27] Han S H, An J Y, Hernandez J O, Yang H M, Kim E S, Noh N J, Seo J M, Park B B. Effects of thinning intensity on litterfall production, soil chemical properties, and fine root distribution in *Pinus koraiensis* plantation in republic of Korea. Plants, 2023, 12(20): 3614.
- [28] 何永涛,石培礼,张宪洲,钟志明,徐玲玲,张东秋.拉萨河谷杨树人工林细根的生产力及其周转.生态学报,2009,29(6):2877-2883.
- [29] 张云宇,孙晓凤,张临峰,李颖池,王传宽,王兴昌.帽儿山温带落叶阔叶林细根生物量、生产力和周转率.应用生态学报,2021,32 (9):3053-3060.
- [30] 周本智, 傅懋毅. 庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究. 江西农业大学学报, 2008, 30(2): 239-245.
- [31] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 293.
- [32] 王向荣,王政权,韩有志,谷加存,郭大立,梅莉.水曲柳和落叶松不同根序之间细根直径的变异研究.植物生态学报,2005,29(6): 5-11.
- [33] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. Plant and Soil, 1995, 187(2): 159-219.
- [34] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. 林业科学, 2001, 37(3): 126-138.
- [35] 杨玉盛,陈光水,林鹏,黄荣珍,陈银秀,何宗明.格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力.生态学报,2003,23(9): 1719-1730.
- [36] 邓强,李婷,袁志友,焦峰.黄土高原4种植被类型的细根生物量和年生产量.应用生态学报,2014,25(11):3091-3098.
- [37] Olesinski J, Krasowski M J, Lavigne M B, Kershaw J A Jr, Bernier P Y. Fine root production varies with climate in balsam fir (*Abies balsamea*). Canadian Journal of Forest Research, 2012, 42(2): 364-374.
- [38] 姜红英,谷加存,邱俊,王政权. 2004—2008年落叶松人工林细根生产和死亡的季节动态. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2465-2471.
- [39] Zhang X, Xing Y J, Yan G Y, Han S J, Wang Q G. Effects of precipitation change on fine root morphology and dynamics at a global scale: a metaanalysis. Canadian Journal of Soil Science, 2019, 99(1): 1-11.
- [40] North G B, Nobel P S. Root-soil contact for the desert succulent Agave deserti in wet and drying soil. The New Phytologist, 1997, 135(1): 21-29.
- [41] 史建伟,秦晴,陈建文. 柠条人工林细根不同分枝根序寿命估计. 生态学报, 2015, 35(12): 4045-4052.
- [42] Súnchez-Silva S, De Jong Bernardus H J, Huerta-Lwanga E, Mendoza-Vega J, Morales-Ruiz D, Aryal Deb R. Fine root biomass stocks but not the production and turnover rates vary with the age of tropical successional forests in Southern *Mexico*. Rhizosphere, 2022, 21: 100474.
- [43] 陈铭,程慧梓,姚晓东,曹丽荣,陈蓉,陈光水,王小红. 增温和氮添加对杉木不同序级细根形态和化学性状的影响. 生态学报, 2023, 43(5):1874-1883.
- [44] Xiong Y M, Liu X, Guan W, Liao B W, Chen Y J, Li M, Zhong C R. Fine root functional group based estimates of fine root production and turnover rate in natural mangrove forests. Plant and Soil, 2017, 413(1): 83-95.