

华西雨屏区香樟人工林土壤表层 细根生物量和碳储量*

魏 鹏¹ 李贤伟^{1,2,*} 范 川¹ 张腾飞¹ 刘运科¹ 苏 宇¹ 杨正菊¹

(¹四川农业大学林学院, 四川雅安 625014; ²长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川雅安 625014)

摘 要 2010年11月—2011年12月,研究了华西雨屏区31年生香樟人工林土壤表层(0~30 cm)细根生物量及碳储量.结果表明:香樟人工林土壤0~30 cm层细根总生物量(活根+死根)和碳储量的平均值分别为1592.29 kg·hm⁻²和660.68 kg C·hm⁻²,其中活细根贡献率分别为91.1%和91.8%.随着土壤深度的增加,香樟1~5级活细根和死细根的生物量及碳储量均显著减少;随着根序等级的升高,香樟活细根生物量及碳储量显著增加.香樟细根总生物量及碳储量均在秋季最高、冬季最低,死细根生物量及碳储量为冬季最高、夏季最低;1级根和2级根生物量及碳储量均在夏季最高、冬季最低,而3~5级根则为秋季最高、冬季最低.土壤养分和水分的空间异质性是导致细根生物量和碳储量变化的主要原因.

关键词 香樟人工林 细根生物量 碳储量 根序 季节动态

文章编号 1001-9332(2013)10-2755-08 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Fine root biomass and carbon storage in surface soil of *Cinnamomum camphora* plantation in Rainy Area of West China. WEI Peng¹, LI Xian-wei^{1,2}, FAN Chuan¹, ZHANG Teng-fei¹, LIU Yun-ke¹, SU Yu¹, YANG Zheng-ju¹ (¹College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China; ²Sichuan Province Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Upper Reaches of Yangtze River, Ya'an 625014, Sichuan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(10): 2755–2762.

Abstract: Fine root in forest ecosystems plays an important role in global C cycle. In this study, a measurement was made on the fine root biomass and carbon storage in the surface soil (0–30 cm) of a 31 year-old *Cinnamomum camphora* plantation in the Rainy Area of West China in November, 2010–December, 2011. The total biomass and carbon storage of the fine roots (living and dead) in the surface soil were 1592.29 kg·hm⁻² and 660.68 kg C·hm⁻², in which, living fine roots accounted for 91.1% and 91.8% respectively. The total biomass and carbon storage of the first five order living roots and dead roots decreased significantly with increasing soil depth, and the living root biomass and carbon storage increased significantly with root order. The sum of the biomass and carbon storage of living and dead fine roots was the largest in autumn and the smallest in winter, but the biomass and carbon storage of the dead fine roots were the largest in winter and the smallest in summer. The biomass and carbon storage of the first two order roots were the largest in summer and the smallest in winter, while those of the last three order roots were the largest in autumn and the smallest in winter. The spatial heterogeneity of soil moisture and nutrients was the main factor affecting the fine root biomass and carbon storage.

Key words: *Cinnamomum camphora* plantation; fine root biomass; carbon storage; root order; seasonal dynamics.

*“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、林业公益性行业科研专项(201104109)、四川省科技支撑计划项目(2010NZ0049)、国家级大学生创新性实验项目(101062622)和长江上游林木种质资源与培育技术创新团队项目(00370503)资助.

* * 通讯作者. E-mail: lxw@sicau.edu.cn

2012-12-05 收稿, 2013-07-22 接受.

细根是植物根系的重要组成部分,在森林生态系统能量流动和碳循环中起着关键性的作用^[1]. 尽管细根($D<2\text{ mm}$)生物量仅占林分根系总生物量的3%~30%^[2-3],但由于其周转迅速,超过40%的森林净初级生产力(NPP)用于细根的生长和维持^[4];如果忽略细根的生产、死亡和周转,土壤有机物质和营养元素的周转将被低估20%~80%^[5]. 细根是埋藏于土壤中的多分枝结构单元. 以往的研究常将 $D<2\text{ mm}$ 的根作为一个均质的整体统称为细根,但近期的研究发现,植物根系依据生长发育的顺序以及着生位置的不同来形成根序^[6-7]. 不同根序细根生物量的高低反映了细根的形态构建,对植物光合产物的投入、产出有着深刻影响^[8]. 细根是森林生态系统地下碳循环的重要组成部分,不仅自身固存着大量的碳,还可通过细根周转将固存的碳转移到土壤中. 在森林生态系统中,通过细根周转归还到土壤中的碳和养分的量甚至超过地上凋落物的归还量^[9],而且细根多生长在土壤表层^[10-14],土壤表层细根是土壤碳库的主要来源和媒介^[15]. 但是在一定的时间尺度内,由于植物凋落物的显著影响,土壤表层的碳储量变化比较明显^[16],而土壤深层碳储量的变化十分缓慢. 因此,研究土壤表层细根碳动态在森林生态系统碳循环中的作用具有重要意义.

华西雨屏区地处四川盆地与川西高山/高原的过渡地带. 特殊的地理位置和气候条件使该区有着丰富的植物资源. 香樟(*Cinnamomum camphora*)是该地区珍贵的乡土阔叶树种之一,具有巨大的生态价值和经济价值. 由于香樟人工林地下生态学过程(特别是根系生态学)研究相对滞后,已有对香樟人工林细根的研究多以直径大小来划分等级^[14],忽视了细根分枝特性对根系结构和功能的影响^[17]. 本文以华西雨屏区香樟人工林为对象,研究土壤表层细根生物量和碳储量在1~5级细根中的分配特征、垂直分布和季节变化,旨在为系统地了解香樟人工林地下生态学过程和增强其碳汇能力提供参考依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于“华西雨屏”中心地带的四川省雅安市雨城区老板山实习林场(29°58' N, 102°59' E),海拔620 m. 该地区属于中亚热带湿润气候,年均气温16.2℃,最冷月(1月)平均气温6.1℃;最热月(7月)平均气温25.3℃;年均降水量1732 mm,降水多集中在8月(580 mm以上);12

月和1月降水最少(约20 mm);年均无霜期298 d,年均日照时数1019.9 h,降雪稀少. 该实习林场分布有大面积的31年生香樟人工林,林下伴生有鸢尾(*Iris tectorum maxim*)、接骨草(*Sambucus chinensis*)、土牛膝(*Achyranthes aspera*)及蕨类等植物,土壤为紫色土. 2010年11月—2011年12月试验期间,研究区月平均气温和降水量见图1.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2010年11月,在31年生香樟人工林纯林中设置3块面积为20 m×20 m的样地,调查样地的基本情况,如林分密度、平均胸径、平均树高、枝下高和郁闭度等;同时测定林地土壤的含水量、pH值和土壤养分状况等,结果见表1和表2.

1.2.2 样品采集及处理 2011年1月在每个样地中按照“S”型选择5个采样点,分别在1月、4月、7月和10月,用植物根系取样器(20 cm×20 cm×10 cm)以10 cm土壤分3层取出完整土样,封袋,标记,放入<5℃冷藏箱内保存. 带回实验室后,将土样放在100目(孔径为0.149 mm)土壤套筛上,先用清水浸泡4 h,再用流水清洗,分离土壤和细根,期间尽量避免细根被折断和遗失^[18]. 然后根据细根的颜色、外形、弹性、根皮与中柱分离的难易程度区分活根、死根和草根. 按照 Pregitzer 等^[6]根系序列位置命名方法对活细根分级:位于根轴最远端没有分枝的根称为1级根,1级根着生在2级根上,2级根着生在3级根上,依次分到5级根,着生于高级根上的没有分支的根也算做1级根. 用镊子仔细分离出1~5级根,分别放入已标记的玻璃皿中,死根不分级.

在采集细根的同时,在每个样点上每10 cm深为一层,采集3层土壤,每层取1 kg土壤,装袋,冷藏保存,带回实验室处理分析. 采用烘干法测定土壤

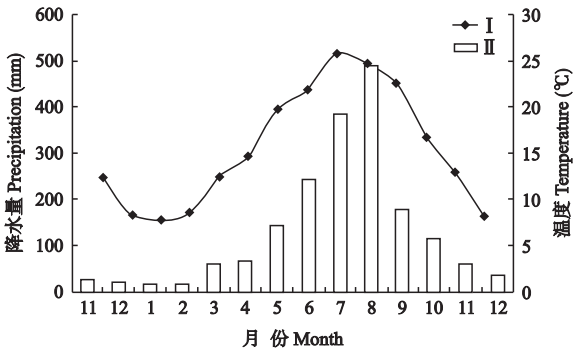


图1 2010年11月—2011年12月研究区的月平均气温(I)和降水量(II)

Fig.1 Monthly mean air temperature (I) and precipitation (II) in study area from Nov. 2010 to Dec. 2011.

表 1 样地基本概况
Table 1 General status of sampling plots

样地 Plot	林龄 Stand age (a)	密度 Density (trees · hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	枝下高 HUB (m)	郁闭度 Canopy density	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect
1	31	745	20.8	14.0	8.6	0.8	16	西北
2	31	730	21.0	14.2	9.0	0.7	18	西北
3	31	721	21.3	14.5	8.8	0.7	16	西北

表 2 样地土壤的基本理化性质
Table 2 Basic soil characteristics of sampling plots (mean±SD)

样地 Plot	土 层 Soil depth (cm)	含水量 Water content (%)	pH	全碳 Total C (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	水解性氮 Hydrolytic N (mg · kg ⁻¹)
1	0 ~ 10	39.87	4.51	10.16±0.89	1.07±0.12	200.58±23.69
	10 ~ 20	38.14	4.58	7.97±0.73	0.78±0.08	170.48±16.69
	20 ~ 30	36.41	4.65	6.68±0.78	0.67±0.09	152.38±13.69
2	0 ~ 10	40.12	4.45	10.25±0.99	1.18±0.21	199.86±26.63
	10 ~ 20	37.25	4.49	8.03±0.81	0.80±0.11	168.25±20.16
	20 ~ 30	36.18	4.53	6.17±0.68	0.69±0.08	151.67±17.58
3	0 ~ 10	39.73	4.57	9.99±0.94	1.10±0.18	205.37±30.24
	10 ~ 20	38.04	4.62	8.12±1.05	0.77±0.12	178.49±23.96
	20 ~ 30	36.05	4.67	6.52±0.93	0.71±0.15	157.49±26.47

含水量,碱解-扩散法测定水解性氮,凯氏定氮法测定全氮,钼锑抗比色法测定有效磷,原子吸收法测定速效钾等含量。

1.2.3 细根生物量及碳储量的测定 将处理后的细根样品于 65 ℃烘箱烘干 48 h 至恒量,用电子天平称量(精确到 0.0001 g),计算其生物量.然后将细根粉碎,过孔径为 2 mm 筛,用重铬酸钾外加热氧化法测定细根的碳含量^[16].4 次重复,取平均值.根据下式计算细根的生物量(B , kg · hm⁻²)及碳储量(C , kg C · hm⁻²):

$$B=m \times 10^5 / d^2$$

$$C=BW_c \times 10^{-3}$$

式中: d 为土柱边长 (cm); m 为土柱内细根烘干质量 (g); W_c 为细根的碳含量 (g · kg⁻¹).

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理及作图,采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析.采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同土层、不同根序细根生物量和碳储量及其季节变化的差异,采用 Pearson 相关系数评价其相关关系,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 香樟人工林土壤表层细根生物量及其垂直分布

由表 3 可以看出,在 0 ~ 30 cm 土层,香樟人工

林细根总生物量平均为 1592.29 kg · hm⁻²,其中,活细根和死细根生物量分别为 1449.79 和 142.50 kg · hm⁻²,占细根总生物量的 91.1% 和 9.0%,两者之间差异显著.在香樟活细根中,随着根序等级的升高,1 ~ 5 级根的生物量显著增加,且 5 级根生物量是 1 级根的 12.24 倍.1 ~ 5 级根生物量对活细根总生物量的贡献率分别为 3.2%、8.9%、16.9%、31.1% 和 39.9%,表明不同等级细根生物量对活细根总生物量的贡献主要集中在高级根,低级根的贡献率较小.

香樟人工林细根总生物量具有明显的垂直分布特点(图 2),随土壤深度增加,活细根和死细根生物量均显著下降.其中,0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层活细根生物量分别占整个土层活细根总生物量的 58.7%、33.9% 和 7.4%;而死细根生物量分别占整个土层死细根总生物量的 55.6%、32.3% 和 12.1%.且 92.2% 的细根生物量(活根+死根)集中在 0 ~ 20 cm 土层.

不同土层中 1 ~ 5 级根生物量均随根序升高而增加,随土层深度增加而显著减少(图 2).1 ~ 5 级根生物量在 0 ~ 10 cm 土层中分别占各自总生物量的 69.3%、67.0%、60.4%、57.5% 和 55.4%,在 10 ~ 20 cm 土层中分别占 24.1%、27.4%、31.8%、34.2% 和 36.5%,在 20 ~ 30 cm 土层中分别占 6.6%、5.6%、7.8%、8.3% 和 8.1%.

表 3 0~30 cm 土层香樟的细根生物量
Table 3 Fine root biomass of *Cinnamomum camphora* at 0–30 cm depth (kg · hm⁻², n=15)

项目 Item	1 级根 1-order root	2 级根 2-order root	3 级根 3-order root	4 级根 4-order root	5 级根 5-order root	活细根 Live fine root	死细根 Dead fine root	总生物量 Total biomass
平均值 Mean	47.20e	128.94d	244.64c	451.30b	577.71a	1449.79	142.50	1592.29
标准偏差 SD	0.80	2.43	5.54	9.96	21.62	31.83	7.82	47.63

同行不同小写字母表示显著差异 ($P<0.05$) Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level.

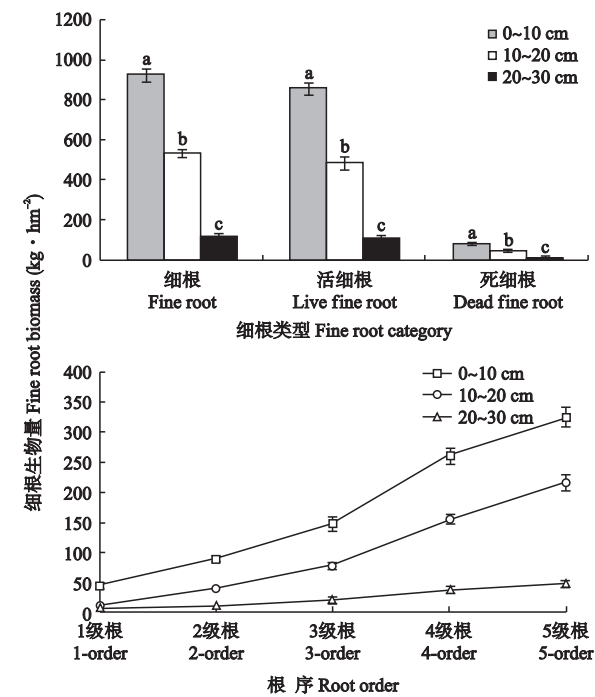


图 2 香樟人工林细根生物量的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of fine root biomass of *Cinnamomum camphora* plantation (mean±SD, n=15).
不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 香樟人工林土壤表层细根生物量的季节变化

由图 3 可以看出,试验期间,香樟人工林土壤表层细根总生物量有明显的季节变化,为 1279.75 ~ 1797.62 kg · hm⁻². 其中,活细根和死细根生物量的变化范围分别为 1105.75 ~ 1647.62 kg · hm⁻²、104.56 ~ 174.37 kg · hm⁻². 活细根生物量和细根总生物量的季节变化规律相同,均在秋季最高,冬季最低. 死细根生物量的季节变化差异不显著,最高值出现在冬季,最低值出现在夏季.

香樟不同根序细根生物量的季节变化均表现为单峰型曲线. 不同季节中各级根生物量的变化有所差异. 1 级根和 2 级根均在夏季最高,冬季最低;3 ~ 5 级根生物量均在秋季最高,冬季最低. 方差分析显示,1 ~ 3 级根生物量的季节间差异不显著,4 级根和 5 级根的季节间差异显著.

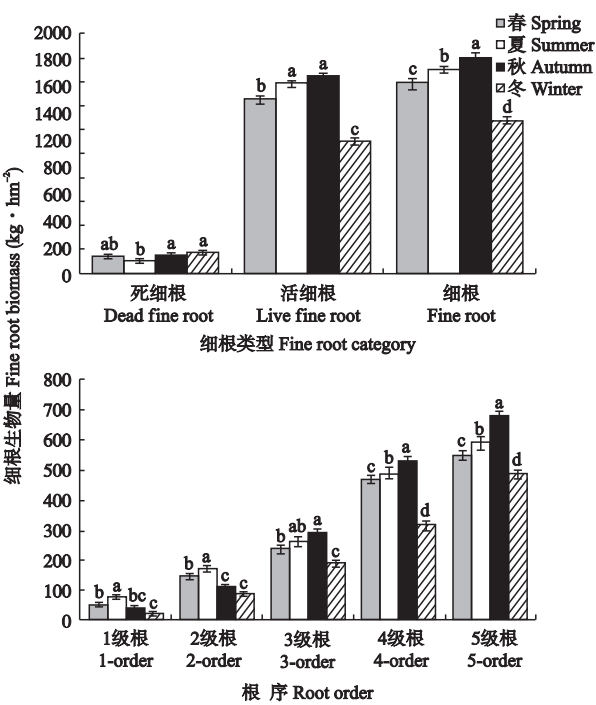


图 3 香樟人工林土壤表层细根生物量的季节变化
Fig.3 Seasonal variation of fine root biomass in surface soil within *Cinnamomum camphora* plantation (mean±SD, n=15).

2.3 香樟人工林土壤表层细根的碳储量

香樟人工林土壤表层细根总碳储量的平均值为 660.68 kg C · hm⁻² (表 4), 其中活细根和死细根碳储量分别占细根总碳储量的 91.8% 和 8.2%. 不同根序细根碳储量存在差异. 随着根序升高,1 ~ 5 级根碳储量显著增加,对活细根总碳储量的贡献率分别为 2.6%、7.4%、15.5%、31.3% 和 43.2%. 这与生物量在 1 ~ 5 级根中的分配趋势一致 (表 3, 表 4). 死细根及细根总碳储量的垂直分布规律明显 (表 4), 随土壤深度增加,碳储量显著减少. 且 0 ~ 20 cm 土层中的细根总碳储量占 0 ~ 30 cm 土层的 93.1%.

2.4 香樟人工林土壤表层细根碳储量的季节变化

由表 5 可以看出,香樟人工林土壤表层细根总碳储量存在明显的季节变化. 活细根碳储量和细根总碳储量的季节变化规律相同,均在秋季最高、冬季最低,季节间差异显著;死细根碳储量在秋季、冬季较高,夏季最低,但季节间差异不显著.

表 4 香樟人工林土壤表层细根碳储量的垂直分布
Table 4 Vertical distribution of fine root carbon storage in surface soil within *Cinnamomum camphora* plantation (kg C · hm⁻², n=15)

土壤深度 Soil depth (cm)	1 级根 1-order root	2 级根 2-order root	3 级根 3-order root	4 级根 4-order root	5 级根 5-order root	死细根 Dead fine root	活细根 Live fine root	细 根 Fine root
0 ~ 10	10.95a (0.39)	30.61a (1.33)	58.03a (2.15)	112.94a (2.01)	151.64a (3.08)	32.74a (0.91)	364.17a (5.26)	396.61a (4.59)
10 ~ 20	3.72b (0.14)	12.37b (0.62)	29.58b (1.41)	63.06b (1.26)	92.04b (2.42)	17.57b (0.44)	200.78b (2.31)	218.35b (3.14)
20 ~ 30	0.95c (0.06)	2.34c (0.08)	6.41c (0.32)	13.80c (0.42)	18.18c (0.39)	3.73c (0.08)	41.69c (1.57)	45.42c (0.90)
合计 Total	15.63E (0.35)	45.33D (0.86)	94.03C (1.49)	189.80B (2.52)	261.86A (3.19)	54.04 (0.78)	606.64 (9.61)	660.68 (9.49)

括号内为标准偏差 Values in parentheses were standard deviation. 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters within the same column meant significant difference at 0.05 level. 同行不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different capital letters within the same row meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 5 香樟人工林细根碳储量的季节变化
Table 5 Seasonal variation of carbon storage in fine root of *Cinnamomum camphora* plantation (kg C · hm⁻², n=15)

季节 Season	1 级根 1-order root	2 级根 2-order root	3 级根 3-order root	4 级根 4-order root	5 级根 5-order root	死细根 Dead fine root	活细根 Live fine root	细根 Fine root
春 Spring	15.80b (0.44)	46.50b (0.77)	82.15c (1.56)	175.19c (2.42)	222.58c (3.13)	51.83b (0.59)c	542.22c (9.51)	594.05c (4.52)
夏 Summer	28.97a (0.32)	68.19a (1.26)	104.17b (2.08)	213.85b (1.94)	273.22b (3.01)	39.10 (0.84)	688.41b (5.19)	727.51b (9.39)
秋 Autumn	13.51bc (0.25)	41.60b (1.38)	134.51a (2.20)	255.81a (1.41)	350.78a (3.09)	58.80ab (0.96)	796.21a (5.31)	855.01a (4.64)
冬 Winter	6.18c (0.29)	27.52c (0.76)	62.41d (1.39)	114.88d (2.06)	188.75d (2.57)	66.29a (0.68)	399.74d (4.46)	466.03d (6.29)

在活细根中,不同根序细根碳储量均表现为单峰型曲线.1~5 级根碳储量在不同季节间的变化有所差异.1 级根和 2 级根的碳储量从春季到夏季呈增加趋势,在夏季达到峰值,然后一直呈减少趋势,在冬季出现最低值;3~5 级根的碳储量从春季到秋季缓慢增加,在秋季达到峰值,之后快速减少,在冬季出现最低值.方差分析结果显示,1 级根和 2 级根碳储量的季节间差异不显著,而 3~5 级根碳储量的季节间差异显著.

3 讨 论

3.1 不同根序细根生物量

细根是植物吸收养分和水分的主要器官,其现存量与立地条件、气候、土壤类型、群落结构、树种、树龄等因素有关^[11,14].全世界亚热带森林细根($D < 2$ mm)生物量介于 1100~5800 kg · hm^{-2[5]};李树战等^[14]研究表明,在同纬度的长沙市,香樟人工林细根($D < 2$ mm)生物量平均值为 1958 kg · hm⁻²,与本研究的 1592.29 kg · hm⁻²相近.根系是一个具有高

度异质性的分枝体系,其分枝特点对细根的结构和功能都有影响^[17].不同根序细根生物量的高低正是细根形态构建的反映^[8].本研究中,随着根序等级的升高,香樟人工林 1~5 级根生物量显著增加.这与熊德成等^[19]对浙江桂(*Cinnamomum chekiangense*)天然林不同根序细根生物量的分配规律的研究结果相同.而刘金梁等^[8]研究发现,水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)人工林 1~4 级根生物量随着根序等级升高逐渐下降,5 级根生物量明显高于前 4 级根.其原因可能与研究方法的不同有关.本研究与熊德成等^[19]均采用土柱法,而刘金梁等^[8]采用内生长法.除此之外,树种的差异也是造成不同根序细根生物量差异的原因.

3.2 细根生物量的垂直分布

土壤资源有效性在垂直分布上表现出的差异,会使不同季节,甚至同一季节各个层次细根的结构和功能发生转变^[20];而转变的基本反应是调整生物量,这也是根系适应空间环境的策略^[21].香樟人工林细根主要分布在 0~20 cm 土层,随土壤深度增

加,细根生物量明显下降^[14,22]. 对于直径较细的根系,其生物量的垂直分布除与细根本身的生理特性有关外,还与土壤资源垂直分布的异质性有关^[23]. 由表 6 可以看出,土壤含水量、土壤全氮和水解性氮与香樟细根生物量呈正相关,且在 0~20 cm 土层达到显著水平. 细根集中分布在土壤表层,主要原因是土壤表面积累的枯落物每年通过淋失(溶)、分解等过程向土壤提供大量有机碳和养分,导致表层土壤的有效养分增加^[24],植物细根尽可能多的投入碳水化合物构建根系,从而吸收更多的水分和养分. 同时,土壤表层温度适宜,水分条件较好,土壤容重小,细根更易获得氧气,有利于细根生长和吸收养分^[13,25],因而细根在表层积聚,生物量较高. 随着土层深度增加,土壤养分资源相对匮乏,质地较差,温度较低,不利于细根生长. 根据“投入”与“产出效益”理论^[8],植物细根会减少碳水化合物的投入,细根生物量减少. 因此,土壤空间异质性导致根系分布空间异质性.

3.3 细根生物量的季节变化

细根生物量在 1 年中常出现 1 个或 2 个峰值,且大多出现在春季展叶期前后、晚夏或秋季等^[10,26]. 本研究中香樟细根生物量的季节变化表现为单峰型,峰值出现在秋季,是亚热带和温带地区森林植被细根生物量的高峰期之一,活细根对细根总生物量的贡献率为 91.1%,说明活细根的季节变化主导了细根总生物量的季节变化. 香樟活细根生物量和细根总生物量均在秋季最高,冬季最低. 细根生物量的季节动态是植物对土壤资源有效性季节变化的反映及地上光合产物在地下分配的最终体现^[6,25,27].

根系为了适应环境形成复杂的分枝结构,导致不同根序的细根具有不同的生理生态功能^[28]. 低级根的形态、结构决定其主要任务是吸收植物所需的水分和养分;高级根的形态、结构决定其主要功能是运输低级根吸收的养分和水分^[29]. 因此,不同根序

的细根生物量季节动态也存在差异. 夏季,树木地上部分生长旺盛,光合产物更多的用于树木地上部分的生长和养分、水分吸收,只有少部分分配到地下根系用于细根构建. 与高级根相比,低级根能有效地吸收土壤内养分和水分,而在形成和维持生理功能方面投入较少的 C^[30]. 在地下根系 C 分配有限时,根据植物“投入”与“产出效益”理论^[8],植物会分配更多的 C 用于构建低级根,以满足地上部分的养分和水分需求,促进 1、2 级根大量生长,其生物量在夏季达到最高. 进入秋季,树木生长减缓,对养分和水分的需求减小,植物体通过自身调节,使得 1、2 级根的发生发育受限,导致 1、2 级根的数量减少;另一方面,由于低级根的寿命较短^[31],一般在几十天到数百天,而且春季生长的细根的寿命比夏季、秋季短^[32],香樟春季发育的大量 1、2 级根到秋季已衰老死亡,也会减少 1、2 级根数量. 而 3~5 级细根是来年 1、2 级细根生长发育的保证,需要在秋季贮存大量的营养物质^[23],因此,3~5 级根生物量增加并在秋季达到最大. 同时,3~5 级根生物量对活细根总生物量贡献率达到 87.9%,导致活细根总生物量在秋季达到最大值. 进入冬季,环境因子不利于根系活动,导致冬季细根死亡量增加^[27],活细根总生物量最低. 而且随着冬季温度的下降,死细根分解速率减慢,造成死细根积累^[33],死细根总生物量达到最大值. 待到来年春季,适宜的温度和水分条件加速了死细根的分解速率,死细根量逐渐减少,在夏季达到最低.

3.4 细根碳储量的变化

细根不仅贮存着大量的 C,而且能将 C 直接转移到土壤中并存储相当长的时间^[16]. 因此其对土壤有机碳库有着重要意义. 因为在温带森林,因细根周转进入土壤的有机 C 占总输入量的 14.0%~86.8%^[2]. 细根 ($D < 2 \sim 5$ mm) 生物量为 460~28050 kg·hm⁻²,若采用细根平均生物量法估算细根碳储量,碳储量可达 230~14025 kgC·hm⁻². 本

表 6 香樟人工林细根生物量与碳储量和土壤养分的相关系数
Table 6 Correlation coefficient between soil nutrition, carbon storage and fine root biomass of *Cinnamomum camphora* plantation

	土壤深度 Soil depth (cm)	含水量 Water content	速效钾 Available K	有效磷 Available P	全氮 Total N	水解性氮 Hydrolyzable N	碳储量 Carbon storage
总生物量	0~10	0.615 *	0.432	0.328	0.688 *	0.796 *	0.981 **
Total	10~20	0.644 *	0.567	0.212	0.659 *	0.613 *	0.991 **
biomass	20~30	0.211	0.373	0.284	0.534	0.436	0.962 **

* $P < 0.05$; * * $P < 0.01$.

研究结果显示, 香樟人工林细根碳储量平均值为 $660.68 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$. 因为本研究仅针对土壤表层且细根直径均 $< 2 \text{ mm}$, 同时, 人工林不可避免地受到人为干扰胁迫, 林内生物多样性减小, 导致细根碳储量偏小^[34]. 随着土层深度增加, 细根碳储量减少^[35], 并表现出与生物量一致的季节变化规律, 表明细根生物量是导致碳储量变化的主要因素之一. 细根分枝序列(即根序)是林木根系重要的结构特征. 本研究中, 随着根序的升高, 各根序细根碳储量显著增加. 这与刘运科等^[18]对川西亚高山粗枝云杉人工林不同根序细根生物量和碳储量的研究结果相同. 高级根构建投入的 C 较多, 细根碳储量大; 低级根构建投入的 C 较少, 细根碳储量小, 但低级根寿命短, 周转迅速^[31]. 由此可见, 细根碳储量在生态系统碳循环中的重要性不容忽视.

致谢 感谢周义贵、王谢、凌银花、苗宇、张军、潘业田、刘浩、贾晨、杨旭、王之南等同学在样品采集及室内分析测定中给予帮助.

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] 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)
- [3] Helmisaari HS, Makkonen K, Kellomäki S, *et al.* Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 2002, **165**: 317–326
- [4] Tatenó R, Hishi T, Takeda H. Above- and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2004, **193**: 297–306
- [5] Vogt KA, Vogt DJ, Palmiotto PA, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1995, **187**: 159–219
- [6] Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, *et al.* Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 2002, **72**: 293–309
- [7] Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, **140**: 450–457
- [8] Liu J-L (刘金梁), Mei L (梅 莉), Gu J-C (谷加存), *et al.* Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass and morphology of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*: A study with in-growth core approach. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(1): 1–6 (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] Yang LY, Wu ST, Zhang LB. Fine root biomass dynamics and carbon storage along a successional gradient in Changbai Mountains, China. *Forestry*, 2010, **83**: 379–387
- [11] Canham CA, Froend HR, Stock WD, *et al.* Dynamics of phreatophyte root growth relative to a seasonally fluctuating water table in a Mediterranean-type environment. *Oecologia*, 2012, **170**: 909–916
- [12] Makita N, Ishii H, Kanazawa Y, *et al.* Very fine roots respond to soil depth biomass allocation, morphology, and physiology in a broad-leaved temperate forest. *Ecological Research*, 2011, **26**: 95–104
- [13] Dong H-X (董慧霞), Li X-W (李贤伟), Zhang J (张 健), *et al.* Biomass of fine root and its relationship with water-stable aggregate in compound lands of triploid *Populus tomentosa* on lands converted from agricultural lands. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43**(5): 24–29 (in Chinese)
- [14] Li S-Z (李树战), Tian D-L (田大伦), Wang G-J (王光军), *et al.* Time-space dynamics of fine root biomass in *Cinnamomum camphora* plantations of Changsha, Hunan. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2008, **28**(6): 51–55 (in Chinese)
- [15] Noguchi K, Nagakura J, Sakata T, *et al.* Fine-root dynamics in sugi (*Cryptomeria japonica*) under manipulated soil nitrogen conditions. *Plant and Soil*, 2013, **364**: 159–169
- [16] Yuan W-Y (袁渭阳), Li X-W (李贤伟), Zhang J (张 健), *et al.* Preliminary studies on carbon reserves of litterfall and fine root in an age series of *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Research* (林业科学研究), 2009, **22**(3): 385–389 (in Chinese)
- [17] Cheng W, Fu S, Susfalk RB, *et al.* Measuring tree root respiration using ^{13}C natural abundance: Rooting medium matters. *New Phytologist*, 2005, **167**: 297–307
- [18] Liu Y-K (刘运科), Fan C (范 川), Li X-W (李贤伟), *et al.* Effects of thinning on fine root biomass and

- carbon storage of subalpine *Picea asperata* plantation in Western Sichuan Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2012, **36**(7): 645–654 (in Chinese)
- [19] Xiong D-C (熊德成), Huang J-X (黄锦学), Yang Z-J (杨智杰), *et al.* Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(6): 1888–1897 (in Chinese)
- [20] Pregitzer KS, King JS, Burton AJ, *et al.* Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 2000, **147**: 105–115
- [21] Shi J-W (史建伟), Wang M-B (王孟本), Chen J-W (陈建文), *et al.* The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(3): 726–733 (in Chinese)
- [22] Wang S-T (王树堂), Han S-J (韩士杰), Zhang J-H (张军辉), *et al.* Woody plant fine root biomass and its spatial distribution in top soil of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(3): 583–589 (in Chinese)
- [23] Zhang X-Q (张小全). Fine-root biomass, production and turnover of trees in relations to environmental conditions. *Forest Research* (林业科学研究), 2001, **14**(5): 566–573 (in Chinese)
- [24] Cheng Y-H (程云环), Han Y-Z (韩有志), Wang Q-C (王庆成), *et al.* Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelinii* plantation. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(3): 303–310 (in Chinese)
- [25] Wang Z-H (王祖华), Li R-X (李瑞霞), Hao J-P (郝俊鹏), *et al.* Effects of thinning on fine root morphology in Chinese fir plantations. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2011, **39**(6): 13–15 (in Chinese)
- [26] Du Y-X (杜有新), Pan G-X (潘根兴), Li L-Q (李恋卿), *et al.* Fine root biomass and its nutrient storage in Karst ecosystems under different vegetations in central Guizhou, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(8): 1926–1932 (in Chinese)
- [27] Eissenstat DM, Yanai RD. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 1997, **27**: 1–60
- [28] Pregitzer KS, Kubiske ME, Yu CK, *et al.* Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species. *Oecologia*, 1997, **111**: 302–308
- [29] Guo DL, Mitchell RJ, Withington JM, *et al.* Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: Root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 2008, **96**: 737–745
- [30] Ryan MG, Hubbard RM, Pongracic S, *et al.* Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. *Tree Physiologist*, 1996, **16**: 333–343
- [31] Guo DL, Li H, Mitchell RJ, *et al.* Fine root heterogeneity by branch order: Exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic methods. *New Phytologist*, 2008, **177**: 443–456
- [32] Mei L (梅莉), Wang Z-Q (王政权), Cheng Y-H (程云环), *et al.* A review: Factors influencing fine root longevity in forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(4): 704–710 (in Chinese)
- [33] 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 of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(9): 2346–2352 (in Chinese)
- [34] Yang Z-G (杨芝歌), Zhou B (周彬), Yu X-X (余新晓), *et al.* Biodiversity analysis and carbon storage assessments in Beijing mountainous areas. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2012, **32**(3): 42–46 (in Chinese)
- [35] Li XD, Yi MJ, Son Y, *et al.* Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea. *Plant Biology*, 2011, **54**: 33–42

作者简介 魏鹏,男,1989年生,硕士研究生.主要从事树木生理与生态学研究. E-mail: weipengderensheng@163.com
责任编辑 李凤琴