

武夷山不同海拔黄山松根系生物量季节变化特征*

杨福春^{1,2,3} 郭炳桥^{1,2,3} 孙俊^{1,2,3} 范瑞瑞^{1,2,3} 孙蒙柯^{1,2,3} 陈晓萍^{1,2,3} 郭英荣⁴
袁荣斌⁴ 程林⁴ 钟全林^{1,2,3} 程栋梁^{1,2,3**}

¹福建师范大学地理科学学院 福州 350007

²福建省植物生理生态重点实验室 福州 350007

³湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福州 350007

⁴江西武夷山国家级自然保护区管理局 上饶 334500

摘要 为揭示植物对环境的适应机制,以江西武夷山国家自然保护区的黄山松为研究对象,探讨该地5个海拔梯度(1 200、1 400、1 600、1 800、2 000 m)的黄山松根系生物量(根的直径 $d \leq 5$ mm)的季节变化特征。结果显示:江西武夷山黄山松细根($d \leq 2$ mm)年度内的平均生物量为 158.76 g/m^2 ,中根($2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$)年度内的平均生物量为 4.68 g/m^2 。海拔对黄山松细根、中根的生物量均有显著的影响。季节对黄山松细根生物量无显著影响,但对中根生物量具有显著影响,即在同一海拔中根生物量具有显著的季节差异,冬季中根生物量显著高于其他季节($P < 0.05$)。上述表明细根与中根生物量不同的季节变化规律体现了不同类型根系在不同生长季具有不同的生长策略,而海拔间的变化则体现不同类型根系在不同生境下的环境适应,结果可为保障我国黄山松林业可持续发展提供理论依据。(图3 表2 参31)

关键词 黄山松; 根系; 生物量; 海拔梯度; 季节变化

CLC S718.5

Seasonal variation in the root biomass of *Pinus hwangshanensis* along an altitudinal gradient in Wuyi Mountain*

YANG Fuchun^{1,2,3}, GUO Bingqiao^{1,2,3}, SUN Jun^{1,2,3}, FAN Ruirui^{1,2,3}, SUN Mengke^{1,2,3}, CHEN Xiaoping^{1,2,3}, GUO Yingrong⁴, YUAN Rongbin⁴, CHENG Lin⁴, ZHONG Quanlin^{1,2,3} & CHENG Dongliang^{1,2,3**}

¹Geography Institute of Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

²Key Laboratory of Plant Physiology and Ecology of Fujian Province, Fuzhou 350007, China

³State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

⁴District Management Bureau of Jiangxi Wuyishan National Nature Reserve, Shangrao 334500, China

Abstract Understanding the seasonal variation in root biomass (root diameter less than or equal to 5 mm) of *Pinus hwangshanensis* would provide a theoretical basis for the sustainable development of *P. hwangshanensis* forestry in China. In the natural habitat of *P. hwangshanensis*, five investigation sites along an elevational gradient from 1 000 m to 2 000 masl (meters above sea level) were established at 200 m intervals. The root biomass of *P. hwangshanensis*, along with the diameter at breast height (DBH) and plant height (H), were measured seasonally at each elevational site. We found that the average annual biomass of small roots ($d \leq 2$ mm) and medium roots ($2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$) was 158.76 g/m^2 and 4.68 g/m^2 respectively. The fine-root biomass and medium-root biomass of *P. hwangshanensis* changed significantly along the elevational gradient. The fine-root biomass of *P. hwangshanensis* did not change from season to season. At each site, however, the medium-root biomass varied significantly across seasons, with higher biomass observed in winter than in all other seasons ($P < 0.05$). In summary, the fine-root biomass and medium-root biomass of *P. hwangshanensis* varied significantly along the elevational gradient; the biomass of fine and medium roots showed divergent seasonal variations, suggesting that different seasonal growth mechanisms occurred between the two root types.

Keywords *Pinus hwangshanensis*; root system; biomass; elevational gradient; seasonal variation

收稿日期 Received: 2016-12-24 接受日期 Accepted: 2017-03-31

*国家自然科学基金项目(31370589, 31170374)、福建省杰出青年科学基金(2013J06009)和福建省青年拔尖人才支持计划资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31370589, 31170374), the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Fujian Province, China (2013J06009) and the Program for Outstanding Young Scholars of Fujian Province

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: chengdl02@aliyun.com)

根系是植物重要的功能器官,它不但为植物吸收水分和养分、固定地上部分,而且通过呼吸和周转消耗光合产物并向土壤输入有机质。因此,根系在发挥植物功能和陆地生态系统物质循环和能量流动中扮演着重要角色。显然,对根系生态学的研究将有助于我们更深入地认识植物结构与功能之间的关系^[1]。由于细根(直径 $d \leq 2\text{ mm}$)生长和周转迅速,其对森林生态系统的物质循环和能量流动起着十分重要的作用^[2]。研究显示尽管细根占林木根系总生物量的比例不足30%,但由于它具有巨大的吸收表面积,且生理活性强,其年净生产力可占森林总净生产力的30%-84%^[3];而关于林木中根($2\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$)的研究却相对较少^[4-5],中根也是林木根系的重要组成部分之一,对于林木根系如何响应环境变化具有一定的指示作用,尤其是其在土壤改良中对土壤肥力、土壤结构及抗蚀性的生态作用早已引起人们的广泛关注^[6]。因而从细根和中根这两种不同根系的生物量变化来研究环境因子对根系生物量的影响,将对深入了解森林生态系统生产力的分配及其对未来气候变化的响应具有较好的指引意义。

黄山松作为中国特有树种,是我国亚热带东部高海拔山地绿化、造林和生态恢复的重要树种,且在建筑、工业等方面具有特有的经济实用价值。因此,开展黄山松的相关研究对我国的林业调查、生态保护甚至经济发展都具有重大的实际意义。目前,对于黄山松的研究主要集中于黄山松群落物种多样性^[7]、群落与环境关联^[8]、种群数量动态^[9]及种群分布格局等方面^[10-11]。然而这些研究主要是从群落、种群与环境之间关系的大格局研究,而对于不同季节黄山松地下根系生物量随海拔梯度的变化研究还较少见。另一方面,在森林生态系统根系研究中,根数量一般是各单个树木的根系的总和,中根在森林生物量动态中的作用经常被忽视^[12-14]。因此,我们研究江西省武夷山黄山松细根、中根生物量在不同海拔梯度及不同季节下的变化特征,为保障我国黄山松林业可持续发展提供理论依据。

1 研究区域概况

研究区位于江西省东部铅山县武夷山国家级自然保护区($27^{\circ}48'11''\text{N}$ - $28^{\circ}00'35''\text{N}$, $117^{\circ}39'30''\text{E}$ - $117^{\circ}55'47''\text{E}$),海拔在350-2 160.8 m之间。东南与福建武夷山国家级自然保护区相连,共同构成完整的中亚热带中山森林生态系统。武夷山拥有世界同纬度带现存面积最大、保存最完整的中亚热带森林生态系统;地带性森林类型为典型的常绿阔叶林群落,自然

资源丰富。气候属于亚热带季风气候,年均温 $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年度内平均降水量2 583 mm。该区域土壤以山地黄壤为主,植被以亚热带常绿阔叶林为主。土壤具有典型的亚热带中山土壤的特点,可分为山地黄红壤(400-600 m)、山地黄壤(600-1300 m)、暗黄棕壤(1300-1900 m)、山地草甸土(1900 m以上),山体存在明显的垂直变化梯度^[20]。

2 材料与方法

2.1 样地调查

武夷山国家自然保护区内黄山松分布范围为海拔900-2 000 m,根据其实际生长和分布情况,采用典型样地调查法,在海拔1 200 m、1 400 m、1 600 m、1 800 m、2 000 m选择5个典型黄山松样地,在每个样地各设置3个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的黄山松样方,且各样方之间间隔不小于20 m。对各海拔梯度样方内所有胸径(DBH) $\geq 5\text{ cm}$ 的乔木(包括活立木和死立木),逐一鉴别其种类并测定郁闭度、密度、胸径及树高等信息。各海拔黄山松样地郁闭度均大于50%,海拔1 600 m样地黄山松郁闭度最大(90%),海拔1 400 m样地黄山松密度最大($1\,991/\text{hm}^2$),平均胸径为14.25-23.99 cm之间,平均树高为4.76-16.19 m之间(表1),以及各海拔黄山松生境的土壤概况见表1。

2.2 根系采样调查方法

本文中我们主要研究的根系生物量是指直径小于等于5 mm的根生物量。关于根的种类划分相当繁多,如王庆成将根直径 $d \leq 2\text{ mm}$ 的归为细根, $2\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 的根归为中根, $d > 5\text{ mm}$ 的根定为粗根^[5],也有研究将直径 $d \leq 2\text{ mm}$ 的归为细根^[12, 14-15, 17], $d > 2\text{ mm}$ 的归为粗根^[12, 16],更有研究直接将 $d \leq 5\text{ mm}$ 的都归为细根^[13];但也有研究像郝艳茹和彭少麟按根直径大小将根细分为细根、小根、中根和粗根4部分^[18]。本文结合王庆成^[5]、马玉珠^[12]以及郝艳茹和彭少麟^[18]的方法,依据直径将根分为细根和中根两部分,其中 $d \leq 2\text{ mm}$ 的根归为细根, $d > 2\text{ mm}$ 的根归为中根。依据根的直径将根分为细根和中根两部分,其中直径 $d \leq 2\text{ mm}$ 的归为细根, $2\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 的根归为中根。本研究对不同海拔、不同季节的细根与中根分别进行了研究。于2014年12月和2015年3月、6月、9月对每个样地内的黄山松,采用挖掘法按3个方位(西南、东北、东南)随机选取3株平均木,在距树干0.5-1 m左右(树冠内),用铲子清理掉表面的凋落物,挖取 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的

表1 不同海拔梯度黄山松样地基本概况

Table 1 The basic characteristics of *Pinus hwangshanensis* sites along elevation gradient

海拔梯度 Elevation gradient (h/m)	黄山松林分特征 Stand characteristics of <i>Pinus hwangshanensis</i>				土壤概况 Basic characteristics of soil			
	郁闭度 Forest canopy closure (r/%)	密度 Density (n/hm ²)	平均胸径 Average DBH (D/cm)	平均树高 Average height (H/m)	pH	全碳 Total C (w/mg g ⁻¹)	全氮 Total N (w/mg g ⁻¹)	全磷 Total P (w/mg g ⁻¹)
1200	86.67 ± 3.33a	717.25 ± 65.08c	23.99 ± 0.79a	16.19 ± 0.46a	3.90 ± 0.09b	98.75 ± 1.60a	5.84 ± 0.07a	0.19 ± 0.01c
1400	86.33 ± 3.18a	1991.12 ± 256.7a	14.25 ± 0.36b	13.29 ± 0.21b	3.94 ± 0.04b	77.02 ± 5.27b	4.20 ± 0.19c	0.15 ± 0.01c
1600	90.33 ± 0.33a	1533.36 ± 370.9b	14.53 ± 0.40b	10.49 ± 0.16c	4.13 ± 0.09ab	97.42 ± 6.78a	5.74 ± 0.38a	0.27 ± 0.03b
1800	60.00 ± 5.77b	417.29 ± 130.98c	14.84 ± 0.69b	6.22 ± 0.20d	4.20 ± 0.06a	66.66 ± 1.22b	5.03 ± 0.09b	0.27 ± 0.01b
2000	49.67 ± 0.33c	525.00 ± 160.73c	13.17 ± 0.66b	4.76 ± 0.14d	4.36 ± 0.02a	76.76 ± 2.96b	5.76 ± 0.17a	0.43 ± 0.02a

同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

土块. 将土块装入孔径0.15 mm的网袋中在流水下反复冲洗, 然后根据根系的外形、颜色、根皮活性、韧性、气味等分拣出目标树根和其他植物根系. 然后将挑出的根依据直径分类中根和细根, 在65 °C烘箱放置72 h后测定其干重(精确到0.01 g), 用干重除以所取土块的表面积得到对应的根生物量. 这种方法简单易行、直观性强、应用广泛, 有利于在山区开展野外工作, 便捷获取所需根系.

2.3 数据处理方法

用SPSS19.0统计软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析法分析不同海拔黄山松细根、中根生物量的差异, 并用最小显著差数法(LSD)进行多重检验; 显著性水平设定为 $P = 0.05$, 之后再用Origin 8.0绘图, 图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准误.

3 结果与分析

3.1 黄山松细根、中根生物量季节变化特征

武夷山各海拔梯度内黄山松细根生物量显著高于中根生物量($P < 0.05$), 且在不同季节, 细根、中根生物量变化各不相同(表2). 细根生物量的变异系数最大为7.70%(夏季), 最小为6.04%(冬季), 季节间变化不大; 而中根的变异系数最大达到了51.80%(夏季), 最小为5.04%(秋季), 季节间变化较大(表2). 这表明细根生物量季节变化差异较小, 而中根生物量季节变化明显, 说明细根在夏秋季节处于快速的生长、衰老和死亡的周转过程中, 且中根生物量非生长季生长速率快于生长季, 因而夏季变异系数较大.

3.2 黄山松细根、中根生物量海拔变化特征

黄山松细根生物量存在显著的海拔梯度变化, 其年度内平均生物量从大到下海拔依次为1 800 m、1 200 m、1 400 m、1 600 m、2 000 m, 表现为随海拔梯度呈现出先降后增再降的变化特征, 且各季节变化一致(图1), 即海拔1 200 m与1 800 m处细根生物量差异不显著, 但均显著高于其余3个海拔(图1). 同一海拔细根生物量的季节变化基本一致, 不存在季节差异(图1).

黄山松中根生物量也存在显著的海拔梯度变化, 但各季节表现不同(图2). 在生长旺盛期(夏季与秋季), 1 800 m海拔处黄山松中根生物量最高; 冬季为1 600 m海拔处的黄山松中根生物量显著高于其余各海拔; 春季则为海拔1 400 m处的黄山松中根生物量显著高于其余各海拔($P < 0.05$). 就同一海拔而言, 海拔1 200 m与2 000 m处的黄山松中根生物量无显著季节差异($P > 0.05$). 而在中高海拔则有显著的季节差异($P < 0.05$), 尤其以1 600 m和1 800 m处的中根生物量季

节变化最为明显. 具体表现为1 600 m处冬、春季节中根生物量显著高于夏、秋季节($P < 0.05$); 1 800 m处秋、冬季中根生物量显著高于春、夏季节($P < 0.05$)(图2).

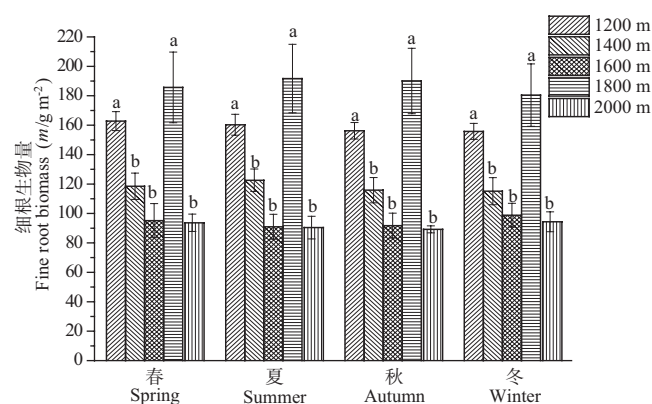


图1 细根生物量在不同季节下随海拔梯度的变化.

Fig.1 Changes of fine root biomass in different seasons along the elevation gradient.

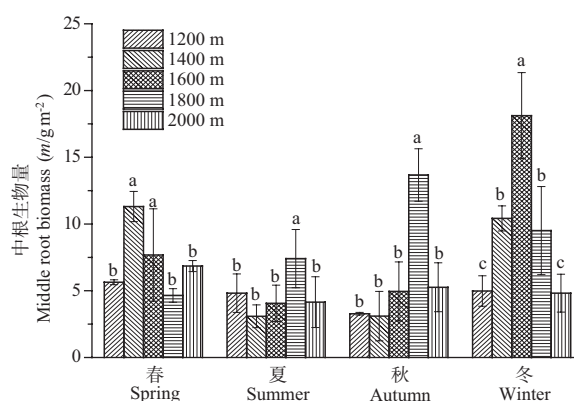


图2 中根生物量在不同季节下随海拔梯度的变化.

Fig. 2 Changes of middle root biomass in different seasons along the elevation gradient.

3.3 细根中根比的季节变化特征

黄山松细根与中根比呈现显著的季节差异, 其中秋季1 400 m处最大比值达到了73.5, 而冬季1 600 m处最小比值只有6.02(图3). 在冬季和春季, 1 200 m、1 800 m处细根与中根比最高, 且均显著高于1 400 m海拔处细根与中根比($P < 0.05$); 而在生长旺盛期, 夏季细根中根比值较为稳定, 且各海拔间无显著差异($P > 0.05$); 秋季中低海拔地区(海拔 $\leq 1 600$ m)黄山松细根与中根比无显著差异, 但均显著高于高海拔地区(海拔 $\geq 1 800$ m)($P < 0.05$). 这表明在不同海拔梯

表2 0-10 cm土层中不同季节细根、中根生物量状况

Table 2 Fine or middle root biomass in different season at 0-10 cm depth

季节 Season	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	细根生物量 Fine root biomass	中根生物量 Middle root biomass	细根生物量 Fine root biomass	中根生物量 Middle root biomass	细根生物量 Fine root biomass	中根生物量 Middle root biomass	细根生物量 Fine root biomass	中根生物量 Middle root biomass
平均值 Mean value (mg m ⁻²)	162.79	5.64	160.29	4.82	156.21	3.28	155.78	4.98
标准误 Standard error	6.42	0.18	7.12	1.44	5.61	0.10	5.44	1.14
变异系数 Coefficient of variation (CV/%)	6.83	5.43	7.70	51.80	6.22	5.04	6.04	39.53
百分比 Percentage (P/%)	97.00	3.00	97.00	3.00	98.00	2.00	97.00	3.00

度, 黄山松细根与中根的比值存在一定差异。

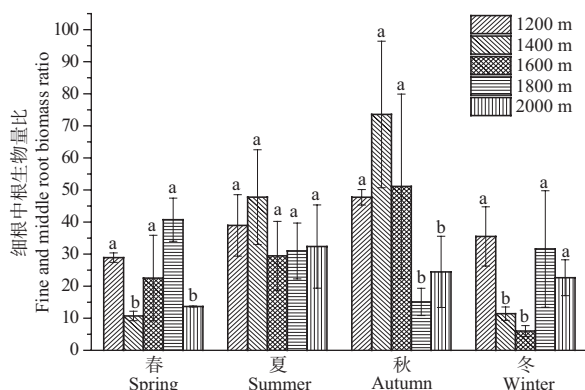


图3 不同季节细根与中根比随海拔梯度的变化。

Fig. 3 Changes of fine and middle root biomass ratio in different seasons along the elevation gradient.

4 讨论

有关报道表明, 林木细根生物量与其所处的气候带、土壤条件、立地条件、降水量、养分利用效率、树龄、林分密度及干扰程度等有关^[19-20]。在本研究中, 各季节黄山松细根生物量的海拔变化规律一致, 均表现为海拔1 800 m处黄山松细根生物量最高, 而海拔2 000 m处细根生物量最低(图1)。而各季节中根生物量的海拔变化却不尽相同, 如夏季与秋季, 1 800 m海拔处黄山松中根生物量显著高于其余各海拔, 而冬季则为1 600 m海拔处黄山松中根生物量显著高于其余各海拔(图2)。这可能与黄山松的根生长特性有关, 在不同的海拔梯度黄山松所处的立地条件、郁闭度、密度、温度等均不相同且存在差异, 进而影响不同海拔梯度土壤养分的差异(表1), 而导致黄山松根系生物量的变化。陈存根等通过对秦岭地区的红桦林、华山松林、锐齿栎林生物量的研究, 发现不同森林类型在其分布的海拔范围内, 其地上、地下部分生物量比值随海拔升高而减小, 这也表明了不同海拔气候对林木生物量的影响^[21]。Persson等认为同一物种在林木个体之间, 以及不同物种间的竞争和不同植物种群之间的种间竞争都会影响根系的生长过程^[22]。

Nowotny等认为土壤pH值在很大程度上决定了土壤中许多元素的形态和溶解性, 进而影响植物的营养关系, 并且当pH值降低到4.2以下时, 便会危害到树木的根系生长^[23]。我们的研究表明武夷山在1 200 m、1 400 m和1 600 m海拔处的土壤pH值均在4.2以下(表1), 且1 600 m处细根生物量最少, 表明该处的土壤pH值对其根系生长产生了抑制。土壤溶液浓度和矿质营养元素种类不同对根系的水分、养分吸收都会产生影响, 王政权等的沙培试验结果表明, 土壤养分和水分的空间异质性对水曲柳幼苗根系生长和分布有明显影响^[24]。研究表明土壤的空间异质性是导致根系分布空间异质性的主要原因, 根系在土壤中的空间结构和分布决定了植物获取土壤资源的多寡以及植物个体间或种群间对土壤资源的竞争能力, 从而影响到根系生物量的变化^[25-27]。我们的研究表明黄山松在1 200 m处的C、N含量最高, 而P含量却很低; 2 000 m处的黄山松N、P含量较高, 但C含量却很低(表1)。不同海拔间土

壤养分的差异很可能是造成1 800 m产生较大差异的原因, 我们分析各海拔的土壤养分发现1 800 m处土壤的全碳、全氮和全磷养分虽不是最高, 但均分配适中, 且与其他海拔间存在差异(表1)。罗伟祥等的研究也表明, 尽管林分的生物量在一定的密度范围内随密度的增加而增加, 但当林分密度增大到一定值时, 由于单位面积林木过多, 其营养面积减小, 因而根系生长发育受到限制, 使得其生长缓慢、衰弱而不利于物质积累^[28]。这可能是1 800 m处黄山松样地的郁闭度、密度适中(表1), 且土壤养分与其他海拔间的差异影响了该处黄山松的生长, 使其生物量高于其他海拔。林木过密会损害林木根系的发育, 在过密林分中林木不但个体小, 全林的总根生物量也很少^[27-28]。

也有研究表明由于亚热带地区森林系统所处的独特的气候环境, 亚热带森林的细根生物量并不存在显著的季节性变化^[29-30], 我们的研究结果也与之相符。但黄山松中根生物量在中高海拔上却存在明显的季节变化(图2), 其中在1 600 m、1 800 m样地上的黄山松中根生物量非生长季显著高于生长季。即中高海拔处的黄山松中根生物量在生长季与非生长季之间存在显著的季节差异, 这是由于生长季细根快速生长而延缓了中根的生长, 而非生长季细根生长延缓中根相对生长, 即中根生物量非生长季生长速率快于生长季, 因而生长季细根中根比值较大而非生长季其比值较小。总之, 森林群落内的不同植物为了最大限度地降低对土壤养分和水分的竞争, 可能通过调整细根分布、形态及构型来适应植物间的竞争, 导致不同林分的细根、中根生物量空间分布的差异^[31]。在不同海拔梯度, 植物对于所处的不同的环境条件依据自身作出相应的调整, 使得不同海拔梯度的细根、中根生物量具有显著差异, 这表明了不同类型根系在不同生长环境下生长策略的不同。

参考文献 [References]

- 王政权, 郭大立. 根系生态学[J]. 植物生态学报, 2008, **32** (6): 1213-1216 [Wang ZQ, Guo DL. Root ecology [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2008, **32** (6): 1213-1216]
- 张小全, 吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000, **20** (5): 875-883 [Zhang XQ, Wu KH, Murach D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (5): 875-883]
- 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[J]. 生态学报, 2003, **23** (9): 1719-1730 [Yang YS, Chen GS, Lin P, Huang RZ, Chen YX, He ZM. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (9): 1719-1730]
- 卢华正, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林不同径级根分解[J]. 云南大学学报自然科学版, 2009, **31** (5): 528-533 [Lu HZ, Sha LQ. Root decomposition in different diameter classes of tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuang-banna [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 2009, **31** (5): 528-533]
- 王庆成. 水曲柳落叶松细根对土壤养分空间异质性的反应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004 [Wang QC. Fine roots responses of *Fraxinus mandshurica* to soil nutrients heterogeneity [D]. Harbin: Northeast

- Forestry University, 2004]
- 6 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. 西北林学院学报, 1998 (3): 74-78 [Liu JJ. A review on root ecology of forest trees [J]. *J NW For Univ*, 1998 (3): 74-78]
 - 7 吴甘霖, 黄敏毅, 段仁燕, 赵凯. 不同强度旅游干扰对黄山松群落物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26 (12): 3924-3930 [Wu GL, Huang MY, Duan RY, Zhao K. Disturbing effects of tourism on species diversity in *Pinus taiwanensis* communities [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26 (12): 3924-3930]
 - 8 Hendricks JJ, Aber JD, Nadelhoffer KJ, Hallett RD. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2000, 3 (1): 57-69
 - 9 Lin C, Yang Y, Guo J, Xie J. Fine root decomposition of evergreen broad leaved and coniferous tree species in mid-subtropical China: dynamics of dry mass, nutrient and organic fractions [J]. *Plant Soil*, 2011, 338 (1-2): 311-327
 - 10 苏松锦, 刘金福, 马瑞丰, 詹银华, 周姗姗, 洪伟. 戴云山黄山松种群的空间分布格局与关联性[J]. 资源科学, 2015, 37 (4): 841-848 [Su SJ, Liu JF, Ma RF, Zan YH, Zhou SS, Hong W. Spatial distribution pattern and correlation of Dai Yunshan pine population of *Pinus hwangshanensis* [J]. *Resour Sci*, 2015, 37 (4): 841-848]
 - 11 郑成洋, 刘增力, 方精云. 福建黄冈山东南坡和西北坡乔木物种多样性及群落特征的垂直变化[J]. 生物多样性, 2004, 12 (1): 63-74 [Zheng CY, Liu ZL, Fang JY. Tree species diversity along altitudinal gradient on southeastern and northwestern slopes of Mt. Huanggang, Wuyi Mountains, Fujian, China [J]. *Biodiv Sci*, 2004, 12 (1): 63-74]
 - 12 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[J]. 植物生态学报, 2015, 39 (2): 159-166 [Ma YZ, Zhong QL, Ji BJ, Lu HD, Guo BQ, Zheng Y, Li M, Cheng DL. Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39 (2): 159-166]
 - 13 李子敬, 陈晓, 舒健骅, 孙红彦, 丛日晨. 树木根系分布与结构研究方法综述[J]. 世界林业研究, 2015, 28 (3): 13-18 [Li ZJ, Chen X, Shu JH, Sun HY, Cong RC. Research methods for tree root system distribution and structure: a review [J]. *World For Res*, 2015, 28 (3): 13-18]
 - 14 杨喜田, 杨小兵, 曾玲玲, 范增伟. 林木根系的生态功能及其影响根系分布的因素[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43 (6): 681-690 [Yang XT, Yang XB, Zeng LL, Fan ZW. Ecological functions of tree root system and influencing factors on its distribution [J]. *J Henan Agric Univ*, 2009, 43 (6): 681-690]
 - 15 Geng Y, Wang L, Jin D, Liu H, He JS. Alpine climate alters the relationships between leaf and root morphological traits but not chemical traits [J]. *Oecologia*, 2014, 175 (2): 445-455
 - 16 Ruess RW, Hendrick RL, Burton AJ, Pregitzer KS, Sveinbjornsson B, Allen MF, Maurer GE. Coupling fine root dynamics with ecosystem carbon cycling in black spruce forests of interior Alaska [J]. *Ecol Monogr*, 2003, 73 (4): 643-662
 - 17 Trumbore SE, Gaudinski JB. The secret lives of roots [J]. *Science*, 2003, 302 (5649): 1344-1345
 - 18 郝艳茹, 彭少麟. 南亚热带地带性植被优势树种根系的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31 (2): 25-30 [Hao YR, Peng SL. Roots of different dominant tree species in zonal vegetation in southern subtropical China. *J Beijing For Univ*, 2009, 31 (2): 25-30]
 - 19 李树战, 田大伦, 王光军, 闫文德, 朱凡. 樟树人工林细根生物量的时空动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28 (6): 51-55 [Li SZ, Tian DL, Wang GJ, Yan WD, Zhu F. Time-space dynamics of fine root biomass in *Cinnamomum camphora* plantations of Changsha, Hunan [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2008, 28 (6): 51-55]
 - 20 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 韩士杰, 李庆康, 于贵瑞, 范春楠, 刘万德, 邵殿坤. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态[J]. 生态学报, 2006, 26 (9): 2855-2862 [Guo ZL, Zheng JP, Ma YD, Han SJ, Li QK, Yu GR, Fan CN, Liu WD, Shao DK. A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26 (9): 2855-2862]
 - 21 陈存根, 彭鸿. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量 and 生产力[J]. 西北林学院学报, 1996 (S1): 92-102 [Chen CG, Peng H. Standing crops and productivity of the major forest-types at the Huoditang forest region of the Qinling Mountains [J]. *J NW For Univ*, 1996 (S1): 92-102]
 - 22 Persson HÅ. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests [J]. *Plant Soil*, 1983, 71 (1): 87-101
 - 23 Nowotny I, Dähne J, Klingelhöfer D. Effect of artificial soil acidification and liming on growth and nutrient status of mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) [J]. *Plant Soil*, 1998, 199 (1): 29-40
 - 24 王政权, 张彦东, 王庆成. 水曲柳幼苗根系对土壤养分和水分空间异质性的反应[J]. 植物研究, 1999, 19 (3): 329-334 [Wang ZQ, Zhang YD, Wang QC. Responses of *Fraxinus manchurica* seedling roots to heterogeneous nutrients and water distribution [J]. *Bull Bot Res*, 1999, 19 (3): 329-334]
 - 25 Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108 (3): 389-411
 - 26 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9 (4): 337-340 [Li LH, Lin P, Xing XR. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1998, 9 (4): 337-340]
 - 27 权伟, 余少娜, 王国兵, 阮宏华, 方燕鸿, 汪家社. 武夷山不同海拔植被土壤细根根长季节动态[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, 35 (6): 139-142 [Quan W, Yu SN, Wang GB, Yuan HH, Fang YH, Wang JS. Seasonal variations of fine root special root length along an elevation gradient in the Wuyi Mountains of southeastern China [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2011, 35 (6): 139-142]
 - 28 罗伟祥, 黄增兴. 油松人工林生产结构及其生物量的初步研究[J]. 陕西农业科学, 1981 (6): 20-24 [Luo WX, Huang ZX. A preliminary study on the structure and biomass of *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Shanxi J Agric Sci*, 1981 (6): 20-24]
 - 29 Hendricks JJ, Hendrick RL, Wilson CA, Mitchell RJ, Pecot SD, Guo D. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review [J]. *J Ecol*, 2006, 94 (1): 40-57
 - 30 刘聪, 项文化, 田大伦, 方晰, 彭长辉. 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”[J]. 植物生态学报, 2011, 35 (5): 539-550 [Liu C, Xiang WH, Tian DL, Fang X, Peng CH. Overyielding of fine root biomass as increasing plant species richness in subtropical forests in central southern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35 (5): 539-550]
 - 31 Gill RA, Jackson RB, Norby R, Fitter A, Jackson R. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems [J]. *New Phytol*, 2000, 147 (1): 13-31