

滨海沙地木麻黄人工林细根生物量及其动态研究*

叶功富^{1, 3} 张立华^{2**} 侯杰² 卢昌义³ 吴柳清⁴ 李秀明⁴

(¹福建省林业科学研究院 福州 350012; ²福建农林大学林学院 福州 350002)

(³厦门大学海洋与环境学院 福建厦门 361005; ⁴福建省惠安赤湖林场 福建惠安 362100)

摘要 2005年1月到11月对福建省惠安县赤湖林场不同林龄木麻黄人工林细根的生物量及其动态特征进行了研究。结果表明, 24 a生木麻黄林细根生物量分别占其地下部分生物量和林分总生物量的53.1%和3.8%;活细根的生物量随林龄的增大而逐渐增加, 至30 a林龄时达到最大值 12.373 t hm^{-2} , 而后逐渐下降, 死细根的生物量则呈现一直增大的趋势, 木麻黄人工林细根的生物量与林分地上部分的生长具有显著的相关关系; 细根生物量具有明显的季节动态, 各林龄无论活细根还是死细根都表现为双峰型, 3 a生和18 a生的活细根出现在1月和7月, 而12 a生出现在3月和7月, 对于死细根, 12 a生和18 a生的两个峰值出现在3月和7月, 5 a生则出现在7月和11月。各林龄木麻黄防护林活、死细根密度垂直分布呈单峰型, 最大值出现在表层的0~10 cm土层中, 后随土层厚度增加逐渐减少, 其中5 a林龄细根生物量随土层深度增加而减少表现最为明显。在0~10 cm土层中的活、死细根生物量分别占全部活细根生物量的51.9%和死细根生物量的53.3%, 活细根生物量的84.6%和死细根生物量的82.8%分布在0~30 cm的土层中。以后随着林龄的增加, 表层土壤中细根生物量的比重降低而深层的比重增加。图3表2参31

关键词 木麻黄; 细根; 生物量; 动态

CLC S718.45

Fine Root Biomass and Dynamics of *Casuarina equisetifolia* Plantations on Coastal Sandy Soil*

YE Gongfu^{1, 3}, ZHANG Lihua^{2**}, HOU Jie², LU Changyi³, WU Liuqing⁴ & LI Xiuming⁴

(¹Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China)

(²Forestry College, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(³College of Oceanography and Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

(⁴Chifu Forestry Farm of Huian County, Huian 362100, Fujian, China)

Abstract Fine root biomass and its dynamic characteristics of different aged *Casuarina equisetifolia* plantations on coastal sandy soil were studied in the Chifu Forestry Farm of Huian County, Fujian. The results showed that the fine roots of 24-year-old plantation accounted for 53.1% of the total underground biomass and 3.8% of the total amount of plantation, respectively; the standing crop of living fine roots increased as the forest aging until its maximum reached 12.373 t hm^{-2} at 30-year-old, then decreased gradually, while the biomass of dead fine roots increased all along as the forest aging. The fine roots biomass had remarkable correlation with the growth of the above-ground. The fine roots biomass was found with remarkable seasonal dynamics that the standing crop of living and dead fine roots of different aged plantations both were shown with double peaks, while the maximum occurred in different seasons for different aged plantations. The maximum of living fine roots of 5- and 18-year-old plantations occurred separately in January and July, while those of 12-year in March and July. As to the dead fine roots, those of 12- and 18-year occurred in March and July, and 5-year in July and November. The vertical distribution of living and dead fine roots at soil depth was shown with single peak for *C. equisetifolia* plantations, being concentrated at 0~10 cm, and then decreased with depth gradually. This trend was obvious for 5-year-old plantation. The biomasses of living and dead fine roots at 0~10 cm accounted for 51.9% and 53.3% of the totals, respectively. The 84.6% of living and 82.8% of dead fine roots concentrated at the depth of 0~30 cm. The proportion of fine roots decreased in top soil and increased in deep soil along with aging of the forest. Fig 3, Tab 2, Ref 31

Keywords *Casuarina equisetifolia*; fine root; biomass; dynamics

CLC S718.45

收稿日期: 2006-07-14 接受日期: 2006-11-15

*国家“十五”科技攻关项目 (No. 2004BA516A15-13) 和国家林业局南方山地用材林培育重点实验室资助项目 Supported by the National “10th Five-Year Plan” Project of China and the Southern Mountain Timber Forest Cultivation Laboratory of Ministry of Forestry of China

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zlh800522@163.com)

细根 (Fine root) 是森林生态系统生物量和养分库中重要的动态组成部分, 在森林生态系统能量流动和物质循环中起着关键性的作用^[1]。许多林分年净初级生产力的 50% 以上均用于细根的生产 and 维持^[2], 全球平均约为 33%^[3]; 通过细根周转对土壤 C 和养分的输入可能等于甚至超过地上部分枯落物的归还量^[4]。研究表明, 对于森林生态系统, 如果忽略根 (尤其是细根) 的作用, 有机质及养分归还将被低估 20% ~ 80%^[5]。因此, 细根既是森林净初级生产力重要的“汇”^[6], 又是土壤 C 和养分主要的“源”^[7], 是研究森林生态系统能量流动和物质循环的关键环节。国外对树木细根生长、周转和分解及其对土壤养分树木营养和生态系统碳平衡的影响研究日益受到研究人员的重视, 取得了丰硕的研究成果, 国内也开展了相应的研究^[8-15], 但关于木麻黄防护林细根生物量及其分布却未见报道。本文旨在通过研究东南沿海防护林的当家树种——木麻黄的细根生物量随林龄的变化动态、各林龄细根生物量的季节动态及其垂直分布等, 从

细根生物量及其分布的角度揭示木麻黄耐旱、耐瘠薄及抗盐碱的机制, 为沿海防护林的经营管理提供依据。

1 试验地概况

实验地设在福建省沿海中部惠安县崇武赤湖国有防护林场, 位于 (E) 118°55', (N) 23°45'。属南亚热带海洋性季风气候, 年平均气温 19.8℃, 绝对最高气温 37℃, 绝对最低气温 2.2℃, 全年无霜期 320 d, 年均降水 1 029 mm, 年均蒸发 2 000 mm, 蒸发量大于降雨量, 全年干湿季节明显, 夏季 (7~9 月) 多台风和暴雨天, 秋冬东北风强盛, 8 级以上的大风天达 105 d, 年平均风速 7.0 m s⁻¹, 最大风速 32.6 m s⁻¹, 干湿季明显, 干旱的频率高。试验样地设置在 5、12、18、24、30、42 a 生木麻黄人工纯林内, 株行距 2.0 m × 2.0 m, 样地面积为 20 m × 20 m, 木麻黄初始密度 2 500 株 / hm², 林下灌木、草本稀少。目前各林龄木麻黄林分主要特征见表 1。

表 1 不同林龄木麻黄人工林的主要特征

Table 1 Major characteristics of *C. equisetifolia* plantations at different ages

林龄 Forest age (t/a)	5	12	18	24	30	42
密度 Density (n/plant hm ⁻²)	2350	1725	1648	1497	1157	985
胸径 Diameter at breast height (d/cm)	5.28	9.93	13.78	18.57	20.37	23.18
树高 Forest height (h/m)	8.12	11.75	13.97	16.89	17.75	19.32

2 研究方法

2005 年从 1 月到 11 月生长季内, 隔月月初在 5 a 生、12 a 生、18 a 生样地内随机选择 20 个样点, 每样点用内径为 80 mm、长度 70 cm 的土钻钻取土芯, 使土芯保存完整, 带回实验室, 或者当场按每 10 cm 一个层次分割土芯, 共分为 7 层, 分别在土壤套筛上过筛, 捡出根系, 用清水冲洗干净, 分出乔木根和林下植被根, 并根据外形、颜色、弹性及根皮与中柱分离的难易程度来区分活死根。2005 年 11 月在 24 a 生、30 a 生和 42 a 生林地内按上述方法取样。根系风干后称取鲜重, 然后在 80℃ 下烘干至恒重, 计算干重率, 按以下公式计算细根生物量: 细根现存量 (t hm⁻²) = 平均每根土芯根系干重 (g) × (t 10⁻⁶ g) / [× (8 cm / 2)² × (hm² 10⁻⁶ cm²)]

3 结果与分析

3.1 不同林龄木麻黄人工林的细根生物量

由表 2 可见, 木麻黄细根的生物量最高可达 12 371 t hm⁻²。Vogt 等^[16]综述了世界上有关亚热带森林细根报道后指出其生物量介于 1.1 ~ 5.8 t hm⁻² 之间^[17], 本研究的结果远远超出这个范围。与国内同处亚热带的其他森林类型相比, 高于湖南会同的杉木纯林 (0.88 t hm⁻²)、火力楠纯林 (3.035 t hm⁻²)、杉木火力楠混交林 (1.56 t hm⁻²)^[9]、鼎湖山针阔叶混交林^[11]、杉木观光木混交林^[12]、格式栲天然林与人工林^[13]、福建柏和杉木人工林^[14]、与中亚热带武夷山的甜槠林^[10]和南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林^[18]相似。张水松等人^[19]的研究结果表明, 均一性风积沙土上 24 a 生木麻黄林地下部分总生物量和林分总生物量分别为 19.65 t hm⁻² 和 275.85 t hm⁻², 细根生物量 (10.434 t hm⁻²) 分别占它们的 53.1% 和 3.8%。如此大的细根生物量可能与木麻黄所处的环境条件有关, 东南沿海地区生态环境条件恶劣, 木麻黄为了从干旱、贫瘠的风积沙

土中吸收尽可能多的水分和养分, 通过大量细根的生长来增大吸收表面积, 扩大吸收空间, 从而使木麻黄具有耐旱、抗贫瘠、耐盐碱和抗风沙等特性。

表 2 不同林龄木麻黄人工林细根现存量

Table 2 Standing biomass of fine roots of *C. equisetifolia* plantations at different ages (t hm⁻² / %)

林龄 Forest age (t/a)	活细根 Living fine root	死细根 Dead fine root	总量 Total
5	3.772/68.47	1.737/31.53	5.509/100
12	5.651/71.23	2.283/28.77	7.934/100
18	6.693/74.49	2.292/25.51	8.985/100
24	7.486/71.75	2.948/28.25	10.434/100
30	8.450/68.30	3.921/31.70	12.373/100
42	6.873/63.25	3.994/36.75	10.867/100

细根生物量通常随年龄增加而增加, 在一定时期达到最大值, 随后逐渐下降并趋于稳定^[10, 20]。由图 1 可见, 木麻黄细根生物量随林龄变化具有相似的趋势, 其中, 活细根生物量和细根总生物量随林龄增长的变化情况基本相同, 其变化模式为单峰型的曲线, 自幼龄林起, 细根生物量逐渐增加, 至 30 a 林龄时达到最大值, 其后则逐渐降低。而死细根生物量则随着林龄的增加而呈现增加的趋势。由此可见, 细根的生物量与林龄有着密切的关系, 对林龄与不同林龄细根的生物量进行回归分析发现, 它们之间有显著的回归关系 (图 1)。叶功富等人^[21]的研究结果表明, 木麻黄防护林达到过熟阶段的 35 a, 其冠幅、树冠长度及相对冠长均明显下降, 并从林分树高和树冠生长的动态变化、林分的外表特征和林分结构特点, 尤其是林分单位面积蓄积量的变化特征, 推断出木麻黄的防护成熟末期为 31 ~ 35 a^[22], 防护效能降低, 细根生物量与地上部分的变化相一致。这表明, 木麻黄细根生物量下降, 死细根所占比例增加, 削弱了细根吸收水分和养分的功能, 与木麻黄防护林生长衰退、枯损严重、防护功能下降有着密切的关系。

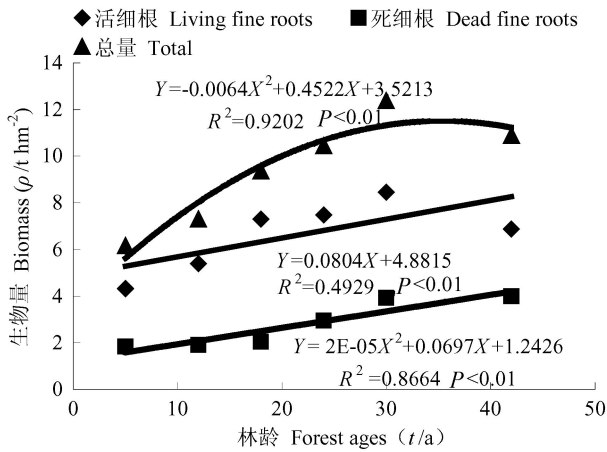


图1 木麻黄人工林细根与林龄之间的相关方程

Fig 1 Correlative equation of fine roots biomass to forest ages of *C. equisetifolia* plantations

3.2 细根生物量的季节动态

如图2所示, 3个林龄中活细根的生物量具有明显的季节动态, 且具有相似的变化趋势, 其变化都呈双峰型, 分别在1月和7月, 最低值都出现在9月. 对于5 a林龄和18 a林龄来说, 1月份出现一个峰值, 随后下降, 到5月份出现一个低峰, 然后上升, 7月出现另一个峰值后又下降, 至9月达到另一个低峰, 后又出现上升趋势. 12 a林龄与上述稍有区别的是第一个低峰出现在3月份. 6次调查结果表明(图2), 3个林龄死细根生物量与活细根生物量一样具有两个峰值, 但波动幅度较小, 其中, 12 a林龄和18 a林龄两个峰值分别出现在3月和7月, 最低值出现在9月, 而5 a林龄7月和11月较大, 1月最小. 这与湖南会同、鼎湖山等地的研究结果有类似之处, 但不尽相同, 湖南会同杉木火力楠纯林的2个高峰都分别在6月和12月, 最低值也出现在9月, 而死细根7月最大, 8月出现最低值^[9]; 鼎湖山季风常绿阔叶林和针阔叶混交林活细根7月最大, 12月最低, 而死细根4月或7月最大, 12月最小^[11].

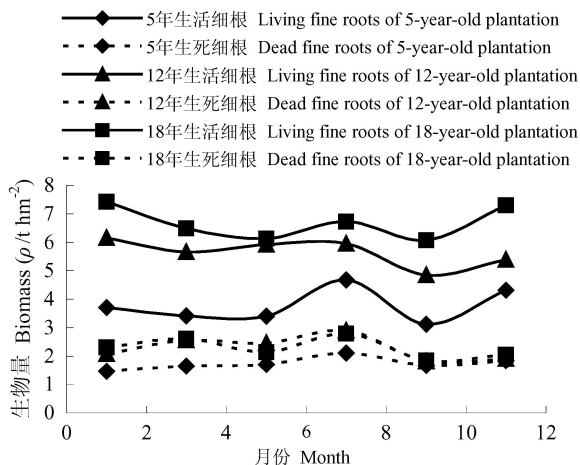


图2 不同林龄木麻黄人工林细根生物量季节动态

Fig 2 Seasonal change in fine roots of *C. equisetifolia* plantations at different ages

细根生物量或细根量具有明显的季节节律^[23], 一年中常出现1或2个高峰, 或变化不明显; 峰值出现时间在春季展叶期前后、晚夏或秋季, 但受树种特性及外界环境条件(如降水

量、土温、养分有效性等)的综合影响, 细根生物量动态会有一定程度的波动^[8, 11]. 本研究细根生物量峰值出现在地上部分开始生长之前的1月份和地上部分达到一个生长高峰之后的7月份, 这与地上部分快速生长时其地下部分根系生长特别慢的研究结果相一致^[24, 25]. 早春气温回升, 降水量增多, 但土温的回升滞后于气温, 灌木和草本植物及木麻黄地上部分的生长同细根争夺养分, 使细根的死亡速度大于生长速度, 而土壤含水量的升高也促进了前期死细根的分解. 至5月份土壤条件适于细根的生长, 细根生物量开始增加, 到7月达到一个峰值. 杨玉盛等^[11]研究认为, 炎夏降雨量小时, 土壤常因强度蒸发及林木蒸腾作用而使土壤含水量下降, 从而导致林木活细根生物量下降. 本研究与其研究结果不同, 这可能与研究地自然条件及树种特性的不同等有关, 由于木麻黄长期适应于滨海干旱的沙地环境, 适度的干旱有利于其细根的生长, 含水量太大反而抑制其生物量的增加, 另一方面, 干旱也加速了细根的死亡. 9月份木麻黄地上部分达到另一个生长盛期^[26], 导致地下细根生物量出现第二个低峰. 此后, 气温开始下降, 灌草及木麻黄地上部分生长减慢或停止, 使细根的生物量进入第二个增长期, 直至翌年1月.

3.3 细根垂直分布特点

由图3可见, 各林龄木麻黄防护林活、死细根密度垂直分布呈单峰型, 最大值出现在表层的0~10 cm土层中, 后随土层厚度增加逐渐减少, 其中5 a林龄细根生物量随土层深度增加而减少表现最为明显. 由图3可见, 5 a林龄活细根生物量在0~10 cm土层中最大, 其占全部活细根生物量的51.9%, 死细根生物量甚至占全部死细根生物量的53.3%、活细根生物量的84.6%和死细根生物量的82.8%分布在0~30 cm的土层中. 以后随着林龄的增加, 表层土壤中细根生物量的比重降低而深层的比重增加. 由此可知, 在木麻黄防护林造林初期, 细根迅速向四周扩展, 占领土壤的表层空间, 随着林龄增加, 表层细根密度增大, 细根开始向深层延伸.

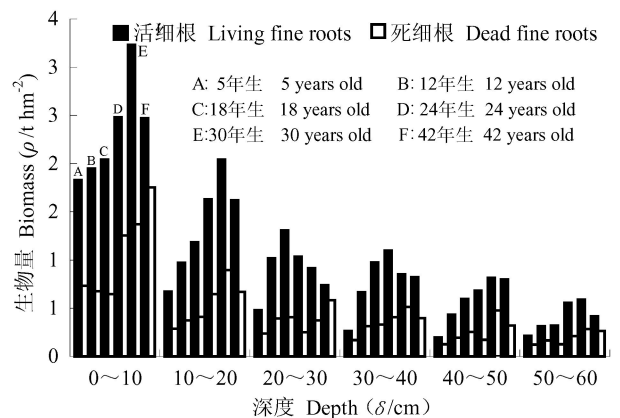


图3 不同林龄木麻黄人工林细根垂直分布

Fig 3 Vertical distribution of fine roots of *C. equisetifolia* in plantations at different ages

大多数研究者报道, 细根生物量随土壤深度增加而明显下降^[27], 本研究的结论与此相一致. 树木根系的垂直分布与树种、年龄、土壤水分、养分和物理性质(通气、机械阻力等)、地下水水位等有关. 土壤温度从地表向下迅速下降也是细根集中于表层的重要原因^[7, 28]. 有研究表明, 对同一树种年龄较大的林

分,细根趋向于表层^[29],主要与幼龄或早期演替阶段腐殖层薄、土壤贫瘠,随着林分的发展,大量凋落物在表层积累有关。本研究与此结论不同,可能是由于木麻黄防护林在整个演替过程中土壤始终比较贫瘠,而营造幼林时,表层土壤中混入了灌草及更新前林木的枯枝落叶,使表层养分相对比较丰富,利于细根在表层的生长。在贫瘠土壤上生长的林分,表层表现出细根集结的特征^[30, 31],这是因为枯枝落叶层被淋溶、分解而使表层土壤具有较高的养分浓度。滨海沙地持水能力差,越趋近于表层,土壤含水量越低,干旱胁迫使细根向深层发展,深层细根比例增加^[31]。

4 讨论

沿海地区恶劣的生态环境条件使得只有木麻黄、相思、湿地松等少数树种生长较好,尤其是木麻黄,具有耐旱、抗贫瘠、耐盐碱和抗风沙等生物学特性。而这必定与地下部分根系尤其是细根的吸收特性有关,因为细根对水分和养分的吸收状况直接影响了地上部分的生长情况。实验结果与我们预想的相吻合,木麻黄细根的生物量最高可达 12.371 t hm^{-2} (30 a生),甚至与南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林^[18]相差不多;细根生物量分别占地下部分生物量和林分总生物量的 53.1%和 3.8%;活细根的生物量随林龄的增大而逐渐增加,至 30 a林龄时达到最大,而后逐渐下降,死细根的生物量则呈现一直增大的趋势,木麻黄人工林细根的生物量与林分地上部分的生长具有显著的相关关系;细根生物量具有明显的季节动态,各林龄无论活细根还是死细根都表现为双峰型,不过不同林龄的木麻黄林分细根生物量峰值出现的季节不同,这是由于受不同季节环境条件,如降水量、土温及养分有效性等的综合影响所致。

从垂直分布状况来看,各林龄木麻黄防护林活、死细根密度垂直分布呈单峰型,最大值出现在表层的 0~10 cm土层中,后随土层厚度增加逐渐减少。林龄越小,其表层细根所占比例越大,随着林龄的增加,表层土壤中细根生物量的比重降低而深层的比重增加。滨海沙地持水能力差,越趋近于表层,土壤含水量越低,但从各林龄表层细根生物量占绝对优势来看,木麻黄细根的生长对养分的需求远大于对水分的需求,因为枯枝落叶层被淋溶、分解而使表层土壤具有较高的养分浓度。鉴于养分是木麻黄细根乃至整个林分生长的主要限制因素,因此在防护林的经营管理上,应依据沿海地区的生态条件状况和海岸林生态系统的特点,以实现人工林生态系统可持续经营目标,加强对现有林地的管理,特别是林地凋落物的管理,使其能够回到自然,实现土壤养分良性循环,为防护林生态系统可持续经营提供养分保障,在条件具备的情况下可采用人工施肥等方法补充营养,改善林地土壤肥力,以促进木麻黄防护林的生长。

References

- 1 Usman S, Singh SP, Rawat YS. Fine root decomposition and nitrogen mineralization patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya. *For Ecol & Manag*, 2000, **131**: 191~199
- 2 Fogel R, Hunt G. Fungal and arboreal biomass in a western Oregon douglas-fir ecosystem: distribution patterns and turnover. *Can J For Res*, 1979, **9**: 245~256
- 3 Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents. *Ecology*, 1997, **78**: 7362~7366
- 4 Pregitzer KS, Hendrick RL, Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytol*, 1993, **125**: 575~580
- 5 Vogt KA, Crier CC, Gower ST. Overestimation of net root production: A real or imaginary problem. *Ecology*, 1986, **67**: 577~579
- 6 Hendrick RL, Pregitzer KS. The dynamics of fine root, length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Can J For Res*, 1993, **23**: 2507~2520
- 7 Steele SJ, Gower ST, Vogel JG. Root mass, net primary production and turnover in Aspen, Jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiol*, 1997, **17**: 577~587
- 8 Shan JP (单建平), Tao DL (陶大力), Wang M (王森). Fine root turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 1993, **4** (3): 241~245
- 9 Liao LP (廖利平), Chen CY (陈楚莹), Zhang JW (张家武), Gao H (高洪). Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclareii*. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 1995, **6** (1): 7~10
- 10 Li LH (李凌浩), Lin P (林鹏), Xing XR (邢雪荣). Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 1998, **9** (4): 337~340
- 11 Wen DZ (温达志), Wei P (魏平), Kong GH (孔国辉), Ye WH (叶万辉). Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan. *Acta Phytoecol Sin (植物生态学报)*, 1999, **23** (4): 361~369
- 12 Yang YS (杨玉盛), Chen GS (陈光水), He ZM (何宗明), Chen YX (陈银秀), Huang RZ (黄荣珍). Distribution of fine roots in a mixed *Cunninghamia lanceolata* - *Tsoongiodendron odonm* plantation. *J Trop & Subtrop Bot (热带亚热带植物学报)*, 2002, **10** (2): 111~117
- 13 Yang YS (杨玉盛), Chen GS (陈光水), Lin P (林鹏), Huang RZ (黄荣珍), Chen YX (陈银秀), He ZM (何宗明). Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2003, **23** (9): 1719~1731
- 14 Chen GS (陈光水), He ZM (何宗明), Xie JS (谢锦升), Yang YS (杨玉盛), Jiang ZK (蒋宗培). Comparison on fine root production, distribution and turnover between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Sci Silv Sin (林业科学)*, 2004, **40** (4): 15~21
- 15 Yang YS (杨玉盛), Chen GS (陈光水), Lin RY (林瑞余), Cai LP (蔡丽平), Chen YX (陈银秀). Energy for mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odonm*. *Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报)*, 2001, **7** (6): 536~542
- 16 Vogt KA, Publicover DA, Boomfield J. Belowground responses as indication of environmental change. *Environ Exp Bot*, 1993, **33**: 189~205
- 17 Huang JH (黄建辉), Han XG (韩兴国), Chen LZ (陈灵芝). Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 1999, **19** (2): 270~277
- 18 Liao LY (廖兰玉), Ding MM (丁明懋), Zhang ZP (张祝平). Root biomass and its nitrogen dynamic of some communities in Dinghushan. *Acta Phytoecol et Gelbot Sin (植物生态学与地植物学学报)*, 1993, **17** (1): 56~60

- 19 Zhang SS (张水松), Ye GF (叶功富), Xu JS (徐俊森), Lin WX (林武星), Huang RQ (黄荣钦), Chen S (陈胜), Pan HZ (潘惠忠), Tan FL (谭芳林). Relationship between site quality conditions and growth of *Casuarina equisetifolia* on the coastal sandy soil. *Prot For Sci & Technol* (防护林科技), 2000, Special issue 1: 1~5, 14
- 20 Chaturvedi OP, Singh JS. Total biomass and biomass production of *Pinus roxburghii* trees growing in all-aged natural forests. *Can J For Res*, 1982, **12**: 632~640
- 21 Ye GF (叶功富), Zhang SS (张水松), Xu YC (徐耀昌), Huang FR (黄芙蓉), Xu JS (徐俊森), Lin WX (林武星), Pan HZ (潘惠忠), Tan FL (谭芳林). The crowned pattern and structural characteristic of *Casuarina equisetifolia*. *Prot For Sci & Technol* (防护林科技), 2000, Special issue 1: 15~18
- 22 Ye GF (叶功富), Zhang SS (张水松), Xu JS (徐俊森), Lin WX (林武星), Yao QD (姚庆端), Huang FR (黄芙蓉), Xu YC (徐耀昌), Tan FL (谭芳林). Protection autumn and renewal period of main typical protection forest of *Casuarina equisetifolia*. *Prot For Sci & Technol* (防护林科技), 2000, Special issue 1: 19~23, 78
- 23 Zhang XQ (张小全), Wu KH (吴可红). Fine root production and turnover for forest ecosystems. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2001, **37** (3): 126~138
- 24 Eissenstat DM, Van Rees KCL. The growth and function of pine roots. *Ecol Bull*, 1994, **43**: 76~91
- 25 Law BE, Ryan MG, Anthoni PM. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. *Global Chang Biol*, 1999, **5**: 169~182
- 26 Ye GF (叶功富), Zhang SS (张水松), Su QX (苏全兴), Xu JS (徐俊森), Wang WH (王维辉), Long XW (隆学武), Lin WX (林武星), Tan FL (谭芳林). Pattern of growth and development of main typical protection forest of *Casuarina equisetifolia*. *Prot For Sci & Technol* (防护林科技), 2000, Special issue 1: 6~14
- 27 Yang YS (杨玉盛), Chen GS (陈光水), He ZM (何宗明), Chen YX (陈银秀), Guo JF (郭剑芬). Production, distribution and nutrient return of fine roots in a mixed and a pure forest in subtropical China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (3): 223~233
- 28 Tryon PR, Chapin FS. Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees. *Can J For Res*, 1983, **13**: 827~833
- 29 Klinge H. Root mass estimation in lowland tropical rainforest of Central Amazonia. Fine root masses of a pale yellow latosol and a giant humta podsol. *Trop Ecol Manag*, 1994, **70**: 11~21
- 30 Huttel C. Root distribution and biomass in three Ivory coast rain forests plots. In: Golley FB, Medins E eds. *Tropical Ecology System, Ecological studies*. New York: Springer-Verlag, 1975. 123~130
- 31 Persson H, Firecks YV, Majdi H. Root distribution in a Norway spruce (*Pinus abies* (L.) Karst) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application. *Plant and Soil*, 1995, **168/169**: 161~165