

川西亚高山冷杉和白桦细根生物量与碳储量特征*

胡建利 杨万勤** 张健 邓仁菊

(四川农业大学林学院园艺学院 雅安 625014)

摘要 为了解川西亚高山地下生态过程和细根在森林碳(C)库中的作用,采用钻取土芯法,研究了川西亚高山岷江冷杉(*Abies faxoniana*)和白桦(*Betula platyphylla*) 2006年一个生长季节内的细根生物量动态及其C储量特征。冷杉细根现存量显著大于白桦,二者分别为 (6.579 ± 0.220) t hm^{-2} 和 (3.334 ± 0.182) t hm^{-2} 。细根生物量具有明显的月变化规律,以10月最高,6月最低。同时,每次细根大量发生后,都随之产生大量细根死亡。细根生物量和C储量均随着土壤深度的增加而减少。冷杉83.24%的细根分布于土壤表层0~10 cm范围内,11~20 cm为16.76%;而白桦50.26%的细根分布在土壤表层0~10 cm的范围内,0~20 cm层为80.39%。活细根在各层中占总细根量的73%以上。冷杉和白桦细根C含量分别为 $47.21\%\pm2.56\%$ 和 $42.71\%\pm0.89\%$,对应的细根C储量分别为 (3.106 ± 0.104) t hm^{-2} 和 (1.377 ± 0.078) t hm^{-2} 。图1 表3 参37

关键词 亚高山; 细根; 生物量; 碳储量; 冷杉; 白桦; 川西

CLC S718.55 (271)

Characteristics of Biomass and Carbon Stock of Fir and Birch Fine Roots in Subalpine Forest of Western Sichuan, China*

HU Jianli, YANG Wanqin**, ZHANG Jian & DENG Renju

(Faculty of Forestry & Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract Monthly dynamics of biomass and carbon stock of *Abies faxoniana* and *Betula platyphylla* Sukaczew fine roots in the forests in western Sichuan were studied in order to understand the belowground process of subalpine forest ecosystem and the role of fine roots in forest carbon pool, employing the method of sampling soil core in a growth period of 2006. The fine root biomass of *A. faxoniana* [(6.579 ± 0.220) t hm^{-2}] was significantly higher than that of *B. platyphylla* [(3.334 ± 0.182) t hm^{-2}]. The highest and lowest values of fine root biomass were observed in October and June, respectively. Additionally, higher biomass of dead fine roots was observed after higher biomass of living fine roots was found. Both biomass and carbon stock of fine roots decreased with increasing of soil depth. 83.24% and 16.76% of *A. faxoniana* fine roots distributed in 0~10 cm and 11~20 cm soil layers, respectively. Similarly, 50.26% and 80.39% of *B. platyphylla* fine roots occurred in 0~10 cm and 0~20 cm soil layers, respectively. Living fine roots accounted for 73% of the total fine roots in different soil layers. $47.21\%\pm2.56\%$ and $42.71\%\pm0.89\%$ carbon contents, and (3.106 ± 0.104) t hm^{-2} and (1.377 ± 0.078) t hm^{-2} carbon were measured, in *A. faxoniana* and *B. platyphylla* fine roots, respectively. Fig 1, Tab 3, Ref 37

Keyword subalpine; fine root; biomass; carbon stock; *Aies faxoniana*; *Betula platyphylla*; western Sichuan

CLC S718.55 (271)

细根(Fine root)是森林土壤生态系统的重要组成部分,在森林生态系统物质循环与能量流动中具有十分重要的作用^[1]。虽然细根仅占森林生物量的5%左右^[2],但其生长量可占森林初级生产力的50%~75%^[3,4]。了解细根生物量动态是认识森林生态系统的碳(C)平衡与养分循环的基础^[5],如果忽略细根生产、死亡和分解,土壤有机物和营养元素周转将被低

估20%~80%^[6]。因此,研究细根生物量及C储量是了解森林生态系统结构和功能的基础。

川西亚高山森林是我国的第二大林区(西南林区)的主体^[7],在我国国民经济建设、生物多样性保育和水源涵养等方面具有举足轻重的作用。自20世纪50年代以来,国内外学者对该区森林生态系统的结构、功能、群落更新以及土壤生态过程等进行了广泛的研究^[8~11],但有关川西亚高山森林细根生物量及C储量的研究尚未见报道。因此,研究川西亚高山地区分布范围最广和面积最大的冷杉(*Abies faxoniana*)和白桦(*Betula platyphylla*)的细根生物量动态及细根C储量特征对于揭示细根在森林C储量中的作用以及深入了解亚高山森林生态系统的结构和功能具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

研究样地位于四川绵阳市平武县境内的王朗国家自然保护区($103^{\circ}55'\sim104^{\circ}10'E$, $32^{\circ}49'\sim33^{\circ}02'N$)。依据植被类型差异,

收稿日期: 2008-03-27 接受日期: 2008-05-05

*国家自然科学基金项目(Nos. 30771702, 30471378),教育部新世纪优秀人才支持计划项目(No. NCET-07-0592),国家“十一五”重大科技支撑计划课题(No. 2006BAC01A11)和四川省杰出青年学科带头人培养基金项目(No. 07JQ0081)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 30771702, 30471378), the Key Sci-tech Supporting Project of the 11th 5-year-plan of China (No. 2006BACD01A11), the Program for New Century Excellent Talents in Universities of China (No. NCET-07-0592), and the Science and Technology Foundation for the Excellent Youth of Sichuan, China (No. 07ZQ026-022)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com)

分别选取了保护区内的以冷杉(*A. faxoniana*)为优势树种和白桦(*B. platyphylla*)为优势树种的两种森林群落, 分别位于小牧羊场和七坪沟, 样地面积为20 m×30 m。

① 冷杉林: 海拔2 600 m, 年降水量801 mm, 年均温度2.9 ℃, 坡度4°, 坡向NS170°; 重要树种为岷江冷杉(*A. faxoniana* Rehder), 林份密度1 049 株/hm², 林龄约200 a, 叶面积指数(LAI) 1.9; 林下植物主要是忍冬(*Lonicera* spp.)、茶藨子(*Ribes* spp.)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)、凤仙花(*Impatiens nolitangere*)、苔藓(*Hycomium splendens*)和赤茎藓(*Pleurozium schreberi*); 土壤类型为棕壤。

② 白桦林: 海拔2 540 m, 年降水量825 mm, 年平均温度3.2 ℃, 样地坡度40°, 坡向NS120°; 优势树种为白桦(*B. platyphylla*); 林份密度615株/hm², 林龄40 a, 叶面积指数(LAI) 1.1; 林下植被主要有虎榛子(*Ostryopsis daviana*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)和白苞蒿(*Artemisia lactiflora*); 土壤类型

细根C储量($\rho/t\text{ hm}^{-2}$)=细根生物量×C% (2)

1.4 数据处理与分析

利用SPSS10.0 Duncan多重比较来判断不同月份和两个树种之间细根生物量和生物C的差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 冷杉和白桦细根生物量在土壤剖面上的分布特征

由表1可见, 冷杉细根主要分布在0~10 cm土层, 其生物量占细根总生物量的比例高达83.24%。白桦细根主要分布在0~20 cm土层, 0~10 cm、11~20 cm、21~30 cm以及0~20 cm土层的细根生物量分别占细根总生物量54.26%、26.13%、19.61%和80.39%。尽管两种树木的0~10cm土层的细根生物量都显著($P<0.05$)高于10 cm以下的土层, 但冷杉细根主要分布在0~10 cm土层, 而白桦细根主要分布在0~20 cm土层。

表1 冷杉和白桦细根生物量在土壤剖面上的垂直分布($\bar{x}\pm s$, $N=7$)

Table 1 Vertical distribution of fine root biomass in soil profiles of *A. faxoniana* and *B. platyphylla* forests ($\bar{x}\pm s$, $N=7$)

林分类型 Forest type	土层(δ/cm) Soil layer	活细根 Living fine root		死细根 Dead fine root		总生物量 Total biomass	
		$\rho/t\text{ hm}^{-2}$	$P/\%$	$\rho/t\text{ hm}^{-2}$	$P/\%$	$\rho/t\text{ hm}^{-2}$	$P/\%$
<i>B. platyphylla</i> forest	0~10	1.390±0.158	79.49	0.359±0.051	20.51	1.749±0.168	54.26
	11~20	0.617±0.064	73.22	0.226±0.040	26.78	0.842±0.079	26.13
	21~30	0.494±0.068	78.18	0.138±0.028	21.82	0.632±0.075	19.61
<i>A. faxoniana</i> forest	0~10	4.074±0.308	74.39	1.403±0.084	25.61	5.476±0.273	83.24
	11~20	0.817±0.123	74.04	0.286±0.142	25.96	1.103±0.142	16.76

为棕壤, 有关土壤理化性质的详细特征见文献[1, 12]。

1.2 细根生物量测定

2006年4~10月, 于每月下旬用内径为10 cm的土钻在所选样地内选择3棵平均木, 在每棵平均木下随机打取3个土钻, 每个土钻按10 cm分层取样, 冷杉取深20 cm, 白桦取深30 cm。将每棵平均木的3个土钻分别按照同一土层进行混合, 然后装入保鲜袋内, 同时做好标记带回实验室。将取回的根系样品浸泡1 h后, 用筛孔为0.25 mm的筛子反复淘洗。用游标卡尺仔细测量, 检出细根(直径≤2 mm), 同时根据根的外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度等区分活根与死根, 剔除草根与其他树种的根。对细根种类的区分是一项十分非常繁杂的工作, 必须提前挖取冷杉和白桦的细根样品对其进行反复观察和辨认。将细根区分后, 装入纸袋标记。于105 ℃杀青、85 ℃烘箱中烘干至恒重后称重, 计算生物量^[13]。

生物量($\rho/t\text{ hm}^{-2}$)=平均每根土芯细根重(g)×100/[$\pi(10/2)^2$](cm²) (1)

1.3 细根碳含量及碳储量测定

将前面测重的细根样品混合均匀, 用微型植物粉碎机粉碎, 用K₂Cr₂O₇外加热法测定根系有机C含量。计算细根C储量:

表2 冷杉和白桦细根现存生物量

Table 2 Standing crop of fine root biomass in *A. faxoniana* and *B. platyphylla* forests

林分类型 Forest type	细根现存量 Fine root biomass ($\rho/t\text{ hm}^{-2}$)							$\bar{x}\pm s$
	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	
<i>A. faxoniana</i> forest	6.400	6.832	6.245	6.539	6.577	6.601	6.862	6.579±0.220
<i>B. platyphylla</i> forest	3.075	3.436	2.97	3.122	3.234	3.275	3.454	3.224±0.182

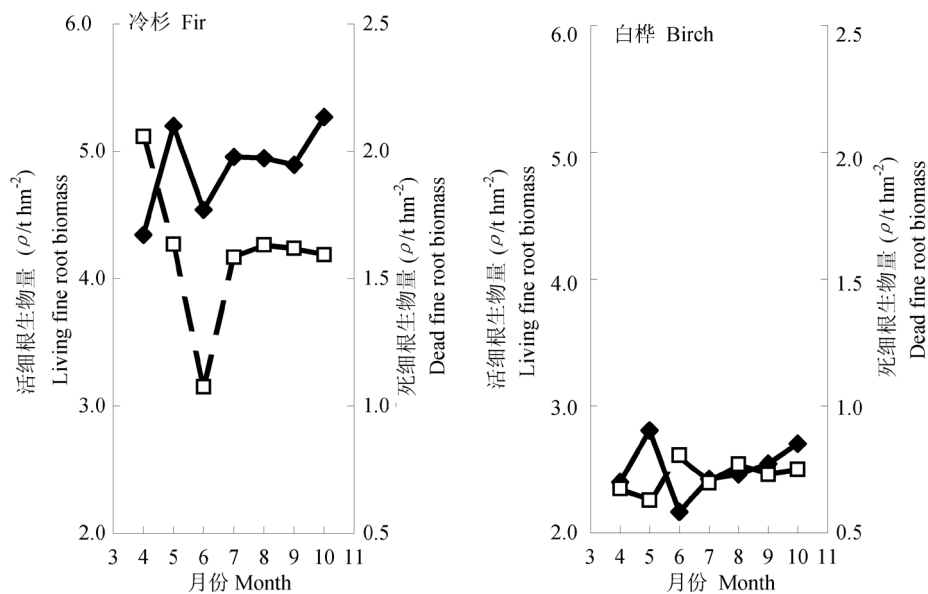


图1 2006年4~10月冷杉林和白桦林活细根(◆)与死细根(□)生物量月动态

Fig. 1 Monthly dynamics of biomass of living (◆) and dead fine (□) roots in *A. faxoniana* and *B. platyphylla* forests from April to October, 2006

图1显示, 冷杉活细根生物量与细根现存生物量的月变化趋势基本相同, 总的看来, 在整个生长季节内有不断增长的趋势, 在5月和10月出现两个高峰值, 表明有大量的细根发生, 而4月较低. 冷杉死细根生物量从4月到6月呈递减趋势, 6月达到最低值, 7~10月变化幅度不大. 白桦活细根生物量在整个生长季节内也有不断增长的趋势(除6月最低外), 在5月有大量细根生长, 是细根生长的高峰期, 白桦细根死亡高峰期比生长滞后30d, 6月出现大量细根死亡, 6月以后趋于平稳, 其总趋势和细根生长趋势基本相同, 但在细根生长最快的5月, 具有最低的死亡量. 冷杉与白桦活细根生物量总的变化趋势其本相同, 而死亡动态不同, 冷杉死细根生物量变化幅度较大, 最大死细根生物量是最小死细根生物量的1倍左右, 白桦则相对平缓; 冷杉死细根生物量最低的月份则是白桦死细根生物量最高的月份.

送的C是3.106 t hm⁻², 白桦细根每年向林地输送的C为1.377 t hm⁻².

3 讨论

林木细根生物量在土壤剖面上的垂直分布特征与树种、树龄、土壤水分、养分、物理性质(通气、机械阻力等)^[12, 14]以及群落优势树种细根发生过程中的生物学、生态学密切相关^[5, 15]. 本文研究表明, 川西亚高山冷杉83.24%的细根分布于0~10 cm土层, 白桦50.26%的细根分布在0~10 cm土层, 80.39%的细根分布在0~20 cm土层. 大多数研究者报道森林细根随着土壤深度的增加而明显下降^[5, 12, 16]. 本研究的结论与此相一致. 冷杉和白桦细根分布差异除了与白桦和冷杉本身的生物学特性有关外, 还可能与其不同的土壤物理结构有关. 冷杉林下的土壤为发育于河流冲积物上的棕色冲积土^[1], 没有明

表3 冷杉和白桦细根碳含量与碳储量

Table 3 Fine root carbon content and carbon stock in soil profiles of *A. faxoniana* and *B. platyphylla* forests

林分类型 Forest type	土层 Soil layer (δ/cm)	C含量 Carbon content (P/%)	生物量C储量 Biomass carbon (ρ/t hm ⁻²)	总计 Total (ρ/t hm ⁻²)
<i>A. faxoniana</i> forest	0~10	47.21±2.56	2.585	3.106±0.104
	10~20		0.521	
	20~30		—	
<i>B. platyphylla</i> forest	0~10	42.71±0.89	0.747	1.377±0.070
	10~20		0.360	
	20~30		0.270	

2.4 细根碳含量及储量

研究结果(表3)表明, 白桦细根含C量(42.71%±0.89%)小于冷杉林(47.21%±2.56%). 冷杉细根C储量[(3.106±0.104) t hm⁻²]显著($P<0.05$)高于白桦细根C储量[(1.377±0.078) t hm⁻²]. 细根的C储量在土壤剖面上的分布特征与细根生物量的分布一致, 即随着土层深度的增加而逐渐减少. 如果假定王朗自然保护区的细根每年周转一次, 那么冷杉细根每年向林地输

显的淀积层, 细根主要分布于凋落物较厚的腐殖质层, 而白桦林下的土壤是发育于坡积物上的黄棕壤^[1], 土壤剖面层次结构完整, 细根主要分布于有机质含量丰富的腐殖质层和淀积层. 但无论如何, 林木细根是水分和养分的吸收器官, 其主要分布在土壤团粒结构较好、通气性良好和养分含量较高的表层土壤, 对于林木的生长发育具有重要的生态学意义.

活细根占细根总量的比例反映了林木的生长状况及土

壤水分和养分状况. 本文研究表明, 冷杉林和白桦林的活细根占细根总量的比例都高于73%, 说明两个林分的林木生长发育良好, 两类土壤的水分、通气性和养分能满足林木生长发育的需求, 因而细根周转快, 同时存在大量的细根发生和死亡.

林木的细根生物量与树种、树龄、气候、土壤类型、群落结构、取样方法、时间和细根分类标准等有关^[17-21]. 全世界100多份森林生态系统细根生物量研究结果^[19]表明, 细根(直径 $\leq 2\sim 5$ mm)生物量的地带性变化表现为: 北方森林细根生物量为 265 g m^{-2} , 寒温带为 633 g m^{-2} , 暖温带为 766 g m^{-2} , 亚热带为 631 g m^{-2} , 热带为 $1\,029\text{ g m}^{-2}$. 本文研究结果亦在这一范围内. 研究表明, 川西亚高山冷杉细根生物量为 6.579 t hm^{-2} , 显著大于白桦(3.224 t hm^{-2}). 这与Steele等(1997)^[21]和Vogt等(1996)^[22]得出的结论相反, 他们的研究表明, 同一气候带不同森林类型比较, 落叶阔叶林细根平均生物量大于常绿针叶林. 本文研究中的冷杉具有较高的林分密度($1\,049\text{ 株/hm}^{-2}$)、郁闭度(1.0)、叶面积指数(1.9)、胸径($51.7\text{ m}^2\text{ hm}^{-2}$)和林龄(200 a), 林木正处于快速生长阶段, 并且森林地表覆有一层较厚的凋落物, 表层土壤的有机质含量高, 土壤有效养分多^[1], 因而具有相对较高的细根生物量. 相反, 尽管白桦林的土层相对较厚, 但由于具有相对较低的树木密度(615 株/hm^{-2})、郁闭度(0.53)、胸径($18.7\text{ m}^2\text{ hm}^{-2}$)、叶面积指数(1.1)和林龄(40 a)^[1], 所以具有较低的细根生物量. 可见, 森林的细根生物量还与森林群落的结构和林木的生长发育状况有关.

细根现存量的月动态反映了林木生长发育的状况、土壤水分和养分变化及细根的周转特征等. 本文研究表明, 白桦林和冷杉的细根现存量均以5月和10月较高, 以6月最低. 这与许多研究报道的细根现存量峰值出现在春季和秋季相一致^[19, 23]. 5月有较高的生物量与植物进入生长期、土温回升、土壤含水量升高以及前一个生长季节所存储的碳水化合物首先供给地下部分等有关^[5]. 此外, 冻融过程破坏了土壤和凋落物中微生物及动植物残体细胞, 生物体在融冻期释放的C和养分提高了土壤养分的有效性^[24-28], 促进了生长季节初期的植物根系生长^[29, 30]. 10月有较高的生物量与细根较低的分解率有关, 在细根储存更多的碳水化合物用于下一年展叶前较长一段时间细根的生长需要^[31]. 本文只报道了生长季节内的细生物量动态, 对季节性冻融期间的细根生物量动态及分解没涉及, 相关的研究成果将后续报道.

在森林生态系统的C库调查和估算中, 树木的根系由于土壤的覆盖和在土壤中的分布不均匀性, 使其成为研究的一个难点^[32]. 林木根系是森林地下C循环的重要组成部分, 因为它们不仅贮存着大量的C, 而且可以将C直接转移到土壤中, 这些C也将在土壤中存储相当长的时间^[33]. 森林地下根系生物量大部分累计在粗根(直径 $> 2\text{ mm}$)中, 但是每年用于生长的大部分则被分配到细根中, 细根具有较高的周转率, 是土壤中C的主要来源. 陈光水等(2005)用分室累加法对格氏栲和杉木人工林的地下C分配的研究表明, 地下C分配中约又1/3(33%~36%)将转化为细根C归还量^[34]. 已有的研究表明, 细根对土壤有机C库有着重要的意义, 仅温带森林因细根周转进入土壤的有机C就占总输入量的14.0%~86.8%, 多数为40%^[22].

Niu等对美国中西部农业用地边缘的造林生态系统的固C潜力进行了评估发现, 根系生物量总固C为 $10\sim 12\text{ Mg (C) hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 占总固C潜力的14%^[35]; Laclau对一个20 a生松树林的固C能力评价中发现根系固C为 $12.8\text{ Mg (C) hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ^[36]. 本文研究表明, 冷杉林和白桦林的细根含C量分别为 $47.21\%\pm 2.56\%$ 和 $42.71\%\pm 0.89\%$, 对应的细根生物量C库分别为 $(3.106\pm 0.104)\text{ t hm}^{-2}$ 和 $(1.377\pm 0.078)\text{ t hm}^{-2}$, 对应的土壤有机C库分别为 $(19.74\pm 1.76)\text{ t hm}^{-2}$ 和 $(14.92\pm 1.64)\text{ t hm}^{-2}$ ^[1], 即冷杉林和白桦林的细根生物量C约为土壤有机C库的15.73%和9.37%, 说明细根是森林生态系统地下C库的组成部分之一, 在估算森林生态系统C储量或C循环时, 不应该由于细根测量的困难性而将其忽略, 否则会造成结果上的一定误差, 但细根C如何周转, 如何贡献于整个系统C的循环, 还需要进一步研究.

References

- 1 Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), Hu TX (胡庭兴), Sun H (孙辉). Forest Soil Ecology. Chengdu, China (成都): Sichuan Science and Technology Press, 2006
- 2 Shan JP (单建平), Tao DL (陶大立). Overseas researches on tree fine root. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 1992, **11** (4): 46~49
- 3 Hendrick RL, Pregitzer KS. Spatial variation in root distribution and growth associated with minirhizotrons. *Plant and Soil*, 1992, **143**: 283~288
- 4 Nadelhoffer KJ, Raich JW. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 1992, **73** (4): 1139~1147
- 5 Guo ZL (郭忠玲), Zheng JP (郑金萍), Ma YD (马元丹), Li QG (李庆康), Yu RG (于贵瑞), Han SJ (韩士杰), Fan CN (范春楠), Liu WD (刘万德). A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, **26** (9): 2855~2862
- 6 Vogt KA, Grier CC, Vogt DJ. Production, turnover and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forest. *Adv Ecol Res*, 1986, **15**: 303~337
- 7 Pang XY (庞学勇), Hu H (胡泓), Qiao YK (乔永康), Pang KW (潘开文), Liu SQ (刘世全), Chen QH (陈庆恒), Liu Q (刘庆). Nutrient distribution and cycling of artificial and natural subalpine spruce forest in Western Sichuan. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (1): 1~7
- 8 Yang YP (杨玉坡), LI CB (李承彪), Guan ZT (管天中). Sichuan Forest. Beijing, China (北京): China Forestry Press, 1992
- 9 Yang WQ (杨万勤), Feng RF (冯瑞芳), Zhang J (张健), Wang KY (王开运). Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and mineral soil under three subalpine forests in western China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, **27** (10): 4157~4165
- 10 Deng RJ (邓仁菊), Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), Hu JL (胡建利), Feng RF (冯瑞芳), Jian Y (简毅), Lin J (林静). Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of subalpine forests in western Sichuan. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2007, **13** (4): 492~496
- 11 Feng RF (冯瑞芳), Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), Deng RJ (邓仁

- 菊), Jian Y (简毅), Lin J (林静). Effects of simulated atmospheric CO₂ Concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, **27** (10): 4019~4026
- 12 Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健). *Researches on Soil Ecology*. Chengdu, China (成都): Sichuan Science and Technology Press, 2008
- 13 Ye GF (叶功富), Zhang LH (张立华), Hou J (侯杰), Lu CY (卢昌义), Wu LQ (吴柳清), Li XM (李秀明). Fine root Biomass and dynamics of *Casuarina equisetifolia* plantations on coastal sandy soil. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2007, **13** (4): 481~485.
- 14 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
- 15 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
- 16 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
- 17 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 patten and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, **23** (9): 1719~1730
- 18 Zhai MP (翟明普), Jiang SN (蒋三乃), Jia LM (贾黎明). Study on fine root nutrient dynamic in the mixed plantation of poplar and black locust. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2004, **40** (4): 46~51
- 19 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): 126~135
- 20 Burke MK, Raynal DJ. Fine root growth phrenology, production, and turn over in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant & Soil*, 1994, **162**: 135~14
- 21 Steele SJ, Gower ST, Vogel JG, Norman JM. 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
- 22 Vogt KA, Vogt DJ, Palmiotto PA, Boon P, Hara JO', Absbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climate forest type and species. *Plant & Soil*, 1996, **187**: 159~219
- 23 Harris WF, Kinerson RS, Edwards NT. Comparison of below-ground biomass of natural deciduous forest and loblolly pine plantation. *Pedobiologia*, 1977, **17**: 369~381
- 24 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
- 25 DeLuca TH, Keeney DR, McCarty GW. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen. *Biol & Fertil Soils*, 1992, **14**: 116~120
- 26 Groffman PM, Driscoll CT, Fahey TJ, Hardy JP, Fitzhugh, Tierney GL. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, **56**: 191~213
- 27 Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biol & Biochem*, 2002, **34**: 1495~1505
- 28 Lipson DA, Schmidt SK, Monson PK. Links between microbial population dynamics and nitrogen availability in an alpine ecosystem. *Ecology*, 1999, **80**: 1623~1631
- 29 Schimel JP, Clein JS. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biol & Biochem*, 1996, **28**: 1061~1066
- 30 Bardgett RD, Bowman WD, Kaufmann R, Schmidt SK. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Trends Ecol & Evol*, 2005, **20**: 634~641
- 31 Brooks PD, Williams MW, Schmidt SK. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt. *Biogeochemistry*, 1998, **43**: 1~15
- 32 Pregitzer KS. Woody plants, carbon allocation and fine roots. *New Phytol*, 2003, **158**: 421~423
- 33 Santantonio D, Hermann RK, Overton WS. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia*, 1997, **17**: 1~31
- 34 Watson RT, Noble IR, Bolin B. Land Use, Land Use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. 189~217
- 35 Chen GS (陈光水), Yang YS (杨玉盛), Qian W (钱伟), Gao R (高人), Niu ZP (牛志鹏), Han YG (韩永刚), Zhang YL (张有利). Total belowground carbon allocation in *Castanopsis kawakamii* and Chinese fir plantations in subtropical area of China. *Acta Ecol sin* (生态学报), 2005, **25** (11): 2824~2829
- 36 Niu XZ, Duiker SW. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U.S. *For Ecol & Manage*, 2006, **223**: 415~427
- 37 Laclau P. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *For Ecol & Manage*, 2003, **173**: 353~360