

文章编号: 1001-1498(2009)03-0385-05

不同年龄巨桉人工林枯落物和细根碳储量研究

袁渭阳, 李贤伟*, 张健, 荣丽

(四川农业大学生态林业工程省级重点实验室, 四川 雅安 625014)

摘要:以巨桉工业人工林为对象,采用“空间换时间法”,研究一个轮伐期巨桉林枯落物和细根碳储量,结果表明,1~6年生巨桉林枯落物碳储量为 $0.641 \sim 6.648 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同年龄巨桉林枯落物碳储量1年为 $2.263 \pm 1.022 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,2年为 $3.414 \pm 1.873 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,3年为 $2.270 \pm 1.262 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,4年为 $2.305 \pm 1.664 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,5年为 $3.011 \pm 1.630 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,6年为 $4.139 \pm 2.509 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,6年生巨桉林枯落物碳储量最大。枯落物凋落量在年龄序列中表现为“高-低-高”的趋势;1~6年生巨桉林细根碳储量为 $0.101 \sim 0.637 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同年龄巨桉林细根碳储量1年为 $0.318 \pm 0.109 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,2年为 $0.308 \pm 0.139 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,3年为 $0.255 \pm 0.154 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,4年为 $0.263 \pm 0.076 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,5年为 $0.390 \pm 0.128 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,6年为 $0.438 \pm 0.199 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,6年生巨桉林细根碳储量最大,3、4年生较小,这与细根生物量的年龄变化趋势相一致。

关键词:巨桉;枯落物;细根;碳储量;年龄

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

Preliminary Studies on Carbon Reserves of Litterfall and Fine Root in an Age Series of *Eucalyptus grandis* Plantation

YUAN Wei-yang, LI Xian-wei, ZHANG Jian, RONG Li

(Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract: As the two primary mechanisms existed by which organic matter and nutrients were returned to the soil, litter and fine root had been attracted more attentions over twenty years. Much debate has taken place on whether above- or below-ground primary production contributes more carbon to the soil. But up to now, few studies focused on the soil organic layer carbon variation of *Eucalyptus grandis*, especially in the forestland converted from farmland, which is difficult to meet the needs of plantation management in regeneration of degraded crop ecosystem and the discussion of belowground structure and functional processes in the field of carbon cycle or energy flux. Litterfall and fine root carbon were measured for an age series of *E. grandis* in Danling county of Sichuan Province, using Space-for-Time approach. Litterfall carbon reserves of *E. grandis* ranged from $0.641 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in one-year old forest to $6.648 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in six-year old forest. However, there was a low storage of litter in the mid-age (3 or 4 years) of *E. grandis*. Fine root carbon reserves of *E. grandis* ranged from $0.101 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $0.637 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ approximately with the same trend of the storage of litter, but fine root carbon reserve was consistent with fine root biomass.

Key words: *Eucalyptus grandis*; litterfall; fine root; carbon reserve; age

收稿日期: 2008-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30771717, 30872014)、国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11)、教育部重点学科博士点基金(20050626001)和四川省教育厅重点实验室项目(2006ZD006)共同资助

作者简介: 袁渭阳(1983—),男,陕西渭南人,硕士,主要从事森林可持续经营与碳循环研究。

* 通讯作者: E-mail: lxw@sicau.edu.cn

土壤碳储量的变动是缓慢的,仅在森林枯落物和土壤表层比较明显,尤其是存在干扰时(如去除枯落物、翻耕等),但森林土壤碳库即使是小小的变化,足以引起全球气候实质性的反馈和全球碳收支的剧烈变化,而且,目前很难找到精确的测定方法,尤其是量化森林土壤碳的时间动态^[1]。森林有机质和养分转入土壤的途径主要有两种:第一,枯落物及其分解;第二,细根生物量的周转^[2-3]。因此,对枯落物和细根碳储量的研究,有助于更好地理解森林土壤有机层碳动态和能量转移特征^[3-6]。

桉树(*Eucalyptus* spp.)具有高生产力和很强的碳固定能力。研究表明,桉树人工林是目前世界上单位面积森林生产力最大的森林生态体系^[7]。但是,至今还没有关于一个轮伐期内的桉树工业人工林枯落物和细根碳储量及其年龄效应方面的报道,现有的一些研究都是针对森林达到自然成熟阶段的净生态系统生产力^[6,8],或者针对桉树工业人工林枯落物水文作用、养分分解等方面^[7,9-11]。随着森林经营目标的短周期和集约化,探讨亚热带地区近年来大力发展的巨桉工业人工林生态系统碳平衡规律,可以为我国林业生产实践中最大限度地发挥人工林固碳能力提供理论依据和借鉴。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省丹陵县杨场镇退耕后营造的巨桉(*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden)林区(102°57'~103°04' E, 29°55'~29°59' N),海拔 581 m,该地区

处四川盆地西南边缘,属于亚热带气候,最冷月(1月)平均温度为 6.7℃,最热月(7月)平均温为 28.0℃。冬干春旱,夏洪秋雨,阴天偏多,日照偏少。近 7 年平均气温与年均降水量如图 1 所示,年平均相对湿度 82%,土壤为老冲积黄壤,pH 值为 4.3~6.8。2006 年 4 月 23~26 日在四川省丹陵县杨场镇巨桉林区的 6 块巨桉林地内各选 3 个 20 m × 20 m 的样地,调查数据如表 1(本研究的巨桉林皆属实生苗造林)。

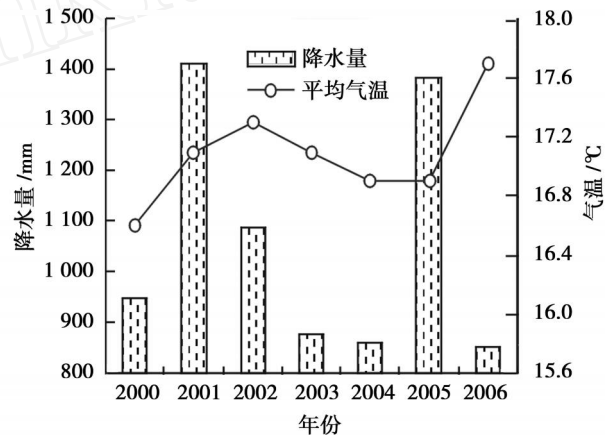


图 1 研究区 2000—2006 年年均降水与气温动态

1.2 研究方法

1.2.1 林地枯落物收集 2006 年 7、10 月和 2007 年 1、4 月,于月初在各年龄(1~6 年)巨桉林下随机选择 3 个面积均为 0.5 m × 0.5 m 的样方,共 18 个样方,收集枯落物(不区分新鲜与腐解部分,统一收集),用托盘天平(感量为 0.2 g)立即称量采集的样品,记录后带回实验室。

表 1 巨桉人工林测树因子及林下植被概况

种植时间	初植密度 / (株 · hm ⁻²)	现存密度 / (株 · hm ⁻²)	胸径 / cm	树高 / m	坡度	坡向	坡位	林下其他植被及其盖度
2005-04	2 000	1 800	4.6	4.0	< 5°	-	-	空心莲子草(25%)、水蓼(5%)、蛇莓(5%)
2004-03	1 667	1 600	8.7	9.2	< 5°	-	-	铁芒萁(10%)、空心莲子草(5%)
2003-03	1 667	1 500	10.5	10.4	14°	E, NE	中坡	铁芒萁(10%)、水蓼(5%)
2002-04	1 667	1 500	14.5	15.7	14°	SE	中坡	铁芒萁(5%)、蛇莓(5%)、水蓼(5%)
2001-03	1 667	1 330	16.2	18.8	26°	SE, E	上坡、中坡	铁芒萁(10%)
2000-03	1 667	1 110	18.8	20.7	28°	W, NW, N	上坡、中坡	铁芒萁(10%)、四川山茶(15%)、空心莲子草(3%)

注: 1. 空心莲子草(*Alectranthera philoxeroides*(Mart.) Griseb.); 水蓼(*Polygonum hydropiper* L.); 蛇莓(*Duchesnea indica*(Andr.) Focke); 铁芒萁(*Dicranopteris linearis*(Burm.) Underw.); 四川山茶(*Camellia szechuanensis* Chi); 2. 括号内数据表示盖度

1.2.2 活细根生物量测定 在每个年龄巨桉林所选的 3 个调查样地中各固定一个样地,在其中选 3~5 株近似平均木,用土钻(内径 6.8 cm)在距树 50 和 100 cm 处,分为 0~15、15~30、30~50 cm 共 3 个层次钻取土芯(采样日期与收集枯落物日期相同,每个年

龄林内总共钻取 10~15 个土芯,带回实验室用水浸泡 6 h,漂洗、过 0.3 mm 细筛,根据细根的颜色、弹性、外形、皮层与中柱剥离难易程度挑出活细根(< 2 mm),在 85℃ 下烘干至恒质量(72 h 后),计算生物量,公式为: $B = W \times 100 / [(d/2)^2]$,其中, B 为细根

生物量 ($t \cdot hm^{-2}$); W 为土柱平均根质量 (g); ω 为圆周率; d 为土钻内径 (cm)。

1.2.3 碳储量的测定 枯枝落叶、细根含碳量采用浓 $H_2SO_4-K_2C_2O_7$ 高温外加热氧化— $FeSO_4$ 滴定法。

1.2.4 数据分析 采用 DPS(3.01 版) 软件进行统计分析和差异性检验。

2 结果与分析

2.1 枯落物储量和细根生物量

不同年龄巨桉林枯落物储量和细根生物量分别如表 2、3 所示。枯落物储量并不是随着年龄的增加而增加, 而随着年龄的增大, 枯落物的数量动态表现为“高-低-高”的趋势。在第 3、4 年生的巨桉林中, 枯落物储量均值较低 (表 2)。

0~50 cm 土层中细根 (< 2 mm) 生物量年平均值大小依次为: 6 年生 ($0.9063 t \cdot hm^{-2}$) > 5 年生 ($0.7798 t \cdot hm^{-2}$) > 1 年生 ($0.6277 t \cdot hm^{-2}$) > 2 年生 ($0.6198 t \cdot hm^{-2}$) > 4 年生 ($0.5505 t \cdot hm^{-2}$) > 3 年生 ($0.5377 t \cdot hm^{-2}$) ($P > 0.05$, Duncan 氏检验, 差异不显著, 如表 3 示, 下同), 这种年龄趋势与枯落物储量的趋势相近, 说明枯落物储量可能会影响细根生物量。各年龄林分细根生物量在不同季节的基本趋势是: 秋 > 夏 > 春 > 冬季 ($P < 0.01$), 枯枝

落叶储量显然存在一个累加过程, 这是与活细根生物量的不同之处, 但相对来讲, 2006 年 10 月 (秋季) > 2006 年 7 月 (夏季); 2007 年 4 月 (春季) > 2007 年 1 月 (冬季), 这种趋势与活细根生物量表现相同。4 个季节中, 0~15 cm 土层细根生物量均是 6 年生的巨桉林最大, 与枯落物储量基本上在 6 年生林分中最大的结果是一致的。0~15, 15~30 和 30~50 cm 三层细根生物量 (1~6 年总平均值) 比例为 62.7:28.9:8.4, 主要分布于 0~15 cm 层。

表 2 不同年龄巨桉林不同季节枯落物储量

树龄 / a	不同季节枯落物储量 / ($t \cdot hm^{-2}$)			
	2006 - 07	2006 - 10	2007 - 01	2007 - 04
1	4.452	8.600	9.112	10.680
	2.241	3.346	4.083	6.358
2	6.456	13.400	12.160	12.600
	2.569	4.931	5.551	5.813
3	2.556	7.200	8.560	10.440
	1.343	3.008	3.205	4.187
4	2.436	13.800	11.480	10.507
	0.975	5.221	4.147	4.732
5	9.992	12.200	12.760	15.640
	4.128	6.030	6.874	7.856
6	7.024	11.200	13.240	17.160
	4.714	5.789	6.876	8.107

注: 横线之上为鲜质量, 之下为干质量。

表 3 不同年龄巨桉林细根生物量及垂直分布特征

($t \cdot hm^{-2}$)

林龄 / a	土层深度 / cm	2006 - 07		2006 - 10	
		分层	各层总和	分层	各层总和
1	0~15	0.537 7 ±0.104 9		0.581 2 ±0.039 7	
	15~30	0.209 6 ±0.035 0	0.805 5 ±0.151 0b	0.222 5 ±0.053 1	0.853 4 ±0.098 7bc
	30~50	0.058 2 ±0.011 1		0.049 7 ±0.025 2	
2	0~15	0.553 0 ±0.109 1		0.614 8 ±0.032 2	
	15~30	0.270 3 ±0.005 7	0.823 3 ±0.014 8b	0.277 0 ±0.019 8	0.891 8 ±0.042 0bc
	30~50	—*		—*	
3	0~15	0.410 1 ±0.105 4		0.472 3 ±0.012 6	
	15~30	0.267 3 ±0.074 3	0.780 5 ±0.198 4b	0.251 5 ±0.031 0	0.817 5 ±0.0510 0bc
	30~50	0.103 1 ±0.018 7		0.093 7 ±0.017 4	
4	0~15	0.461 1 ±0.079 3		0.401 0 ±0.004 1	
	15~30	0.114 7 ±0.107 0	0.642 6 ±0.194 8b	0.200 5 ±0.011 5	0.677 0 ±0.022 2c
	30~50	0.066 8 ±0.008 5		0.075 5 ±0.016 6	
5	0~15	0.617 5 ±0.034 9	0.912 9 ±0.081 3b	0.633 1 ±0.125 7	1.036 4 ±0.182 4ab
	15~30	0.295 4 ±0.046 4		0.249 4 ±0.038 4	
	30~50	—*		0.153 9 ±0.018 3	
6	0~15	0.742 7 ±0.011 4		0.837 5 ±0.094 7	
	15~30	0.317 6 ±0.079 5	1.233 3 ±0.145 3a	0.301 8 ±0.020 6	1.273 3 ±0.119 8a
	30~50	0.173 0 ±0.054 4		0.134 0 ±0.004 5	
林龄 / a	土层深度 / cm	2007 - 01		2007 - 04	
		分层	各层总和	分层	各层总和
1	0~15	0.276 1 ±0.072 9		0.300 5 ±0.058 6	
	15~30	0.107 6 ±0.065 6	0.434 4 ±0.170 3bc	0.116 8 ±0.048 7	0.417 3 ±0.107 3bc
	30~50	0.050 7 ±0.031 8		—*	

续表 3

林龄 /a	土层深度 /cm	2007 - 01		2007 - 04	
		分层	各层总和	分层	各层总和
2	0~15	0.213 8 ±0.038 5		0.247 7 ±0.060 4	
	15~30	0.165 4 ±0.016 5	0.425 4 ±0.097 3c	0.060 7 ±0.032 5	0.338 7 ±0.095 3bc
	30~50	0.046 2 ±0.042 3		0.030 3 ±0.012 4	
3	0~15	0.108 8 ±0.049 1		0.155 9 ±0.068 5	
	15~30	0.092 7 ±0.018 0	0.201 5 ±0.057 1d	0.126 8 ±0.033 9	0.351 2 ±0.113 0c
	30~50	—*		0.068 5 ±0.010 6	
4	0~15	0.230 9 ±0.020 1		0.285 9 ±0.017 9	
	15~30	0.131 7 ±0.056 8	0.374 8 ±0.078 6c	0.170 5 ±0.018 7	0.507 7 ±0.033 1b
	30~50	0.012 2 ±0.001 7		0.051 3 ±0.006 5	
5	0~15	0.316 7 ±0.032 8		0.414 5 ±0.018 8	
	15~30	0.207 5 ±0.037 7	0.524 2 ±0.040 5a	0.165 7 ±0.015 1	0.645 6 ±0.043 9a
	30~50	—*		0.065 4 ±0.010 0	
6	0~15	0.300 1 ±0.010 6		0.422 8 ±0.013 4	
	15~30	0.130 5 ±0.015 9	0.477 6 ±0.065 5ab	0.121 9 ±0.039 7	0.640 9 ±0.082 8a
	30~50	0.047 0 ±0.049 0		0.096 2 ±0.039 7	

*在 3 次重复挖出的土柱中没有找到活细根。表中的细根生物量为均值 ±标准误。各层总和栏中的相同小写字母表示差异性不显著 ($P < 0.05$)

2.2 枯落物和细根碳储量

单位面积巨桉林枯落物碳储量 (表 4) 和细根碳储量 (表 5) 结果表明, 巨桉林枯落物碳储量在 $0.641 \sim 6.648 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内变化, 6 年生巨桉林枯落物碳储量最大, 其它各年龄林分变化较大, 但差异不显著, 巨桉林细根碳储量在 $0.101 \sim 0.637 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内变化, 6 年生巨桉林细根碳储量最大, 3、4 年生较小。不同季节测定值的统计结果表明, 巨桉林细根碳储量较大值出现在夏、秋季 ($P < 0.05$); 枯落物碳储量较小值出现在夏季 ($P < 0.05$)。

表 4 不同年龄巨桉林不同季节枯落物碳储量

林龄 /a	不同季节枯落物碳储量 / ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	2006 - 07	2006 - 10	2007 - 01	2007 - 04
1	1.241 a	2.656 b	2.314 b	3.285 c
2	1.541 a	2.298 b	4.219 a	5.286 b
3	1.008 a	2.497 b	2.082 b	3.532 c
4	0.641 a	3.105 b	3.847 ab	3.968 c
5	1.381 a	2.698 b	1.983 b	4.640 bc
6	1.629 a	4.878 a	4.755 a	6.648 a

表 5 不同年龄巨桉林不同季节细根碳储量

林龄 /a	不同季节细根碳储量 / ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	2006 - 07	2006 - 10	2007 - 01	2007 - 04
1	0.403 b	0.427 bc	0.217 a	0.209 b
2	0.412 b	0.446 bc	0.213 a	0.169 b
3	0.390 b	0.409 bc	0.101 b	0.176 b
4	0.321 b	0.339 c	0.187 ab	0.254 ab
5	0.456 b	0.518 b	0.262 a	0.323 a
6	0.617 a	0.637 a	0.239 a	0.320 a

注: 同一列的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

3 结论与讨论

(1) 1~6 年生巨桉林枯落物碳储量为 $0.641 \sim 6.648 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 6 年生巨桉林枯落物碳储量最大。

但枯落物凋落量在年龄序列中表现为“高 - 低 - 高”的趋势。在第 3、4 年生的巨桉林中, 枯落物储量均值达到较低, 4 年生巨桉林枯落物储量与欧阳育林等^[9]研究的广东雷州 4 年生柠檬桉 (*E. citriodora* Hook f) 和雷林 1 号桉 (*E. leizhouensis* Na 1) 林分枯落物量相近, 6 年生巨桉林枯落物储量比薛立等^[10]研究的华南地区的 8 年生尾叶桉 (*E. urophylla* S. T. Blake) 枯落物储量大 (但含水率与他们的研究结果相近), 与刘洋等^[11]在四川洪雅研究的 7 年生巨桉林分的结果一致, 其枯落物的储量极值出现的季节与刘洋的研究结果相同。但是, 总体来讲, 枯落物储量的年龄趋势几乎不具有什么规律性, 这可能是因为: 1) 巨桉在四川分布的景观斑块特征是小面积镶嵌于不同生态系统中, 不同于我国沿海地区 (如广东) 的大面积连片种植情况, 这种特征造成林缘距离林子中心较近, 或者, 边长/面积的值较大, 为人为干扰或风干扰创造了有利条件; 2) 研究地属于退耕还林地, 且并非富裕地带, 区内部分农户不定期在退耕地的林内割草、收集落叶, 这也是许多退耕还林地的一个显著特点。但是, 干扰下也许还存在一定的规律, 这也是近年来森林干扰生态学研究的主要内容^[12], 不能轻易地忽视干扰, 而纯粹地去探讨自然生态系统, 人工林的一个显著特点就是受干扰胁迫或促进, 在研究人工林生态系统的时候, 必然会面临干扰影响。

(2) 1~6 年生巨桉林细根碳储量为 $0.101 \sim 0.637 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 6 年生巨桉林细根碳储量最大, 3、4 年生较小, 这与细根生物量的年龄变化趋势相一致。随着年龄的增长, 活细根生物量基本上表现为先降低后升高的趋势 ($P < 0.05$, Duncan 氏检验), 这可能是由于, 在巨桉生长期, 地上部分和地下部分竞争碳

源^[13]以及土壤有效养分平衡至根际圈的滞后性^[14]导致了地下活细根生物量减少,而地上部分却迅速生长,地上部分生长到一定阶段后,由于活细根生物量减少而不能持续稳健地为植物地上部分的生长供给养分,如果没有其它外源肥力的施入(本试验地内未进行施肥),植物将增加新的生产量向细根进行分配,以使地下部分的资源与地上部分达到平衡(或者,使地下部分的资源限制最小化)^[15]。可见,在 3、4 年生时,巨桉林地可能会出现营养亏缺,这就迫使巨桉去平衡这种营养失调,如 Yu 等^[16]对 1~7 年生一个年龄序列的桉树人工林地上生物多样性的研究表明到第 3、4 年时,林地地上生物多样性达到较低,与本研究对地下细根生物量和细根碳储量在此年龄阶段出现较低的结论相吻合,说明地上部分与地下部分的生物地化循环是紧密的联系着的。因此,对短轮伐期的桉树在 3、4 年左右追肥,将会达到良好的营林效果,这在有些研究和实践中已经有所体现^[19, 17]。

(3)在巨桉工业人工林的一个轮伐期内,枯落物储量和碳含量的年龄效应与细根略有不同,但两者并不能进行对比,因为前者相对于树木生长是静态的、死亡的,而后者是活细根生物量,很显然,前者会影响后者,这正是森林自我培肥过程的体现,也是本研究的结果“活细根主要分布于 0~15 cm 层”的一个有力的解释。虽然细根生物量和碳储量比枯落物小,但其对土壤碳的贡献却很大,Rasse 等^[18]综述 1974—2004 年间相关的研究成果后指出,根系(尤其是细根)对土壤碳的平均贡献是对应的地上凋落物的 1.8 倍;来自植物根系的碳在根土界面层的平均残留时间是来自凋落物的碳的 2.4 倍。而且,细根对大多数陆地生态系统物质和能量流动起着至关重要的作用^[19],由于其周转较快,对根土界面层的碳循环贡献大,而受许多研究者关注^[19-22]。

树木年龄对净生态系统生产力的影响占 92%^[6],因此,对不同年龄速生丰产林碳储量和动态进行研究意义重大。而且,将来的研究应该从其采伐后的萌生林或次生林继续开始探讨,以深入森林经营管理,尤其是采伐干扰对巨桉工业人工林有机层土壤碳储量的影响。

参考文献:

- [1] Kbpatek J M. Litterfall and fine root biomass contribution to nutrient dynamics in second-and old-growth Douglas-fir ecosystems [J]. *Plant Soil*, 2007, 294: 157 - 167
- [2] Agren G I, Bosatta E. Theoretical Ecosystem Ecology: Understanding Nutrient Cycles [M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996: 234
- [3] Guo L B, Halliday M J, Siakimotu S J M, et al. Fine root production and litter input: Its effects on soil carbon [J]. *Plant Soil*, 2005, 272: 1 - 10
- [4] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Ecology—managing soil carbon [J]. *Science*, 2004, 304(5669): 393
- [5] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest Ecology Management*, 2005, 220: 242 - 258
- [6] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, et al. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests [J]. *Nature*, 2007, 447: 848 - 850
- [7] 林 旭, 吴志华. 桉树水分胁迫研究进展 [J]. *桉树科技*, 2006, 23(2): 46 - 52
- [8] 陈 滨. 江西大岗山杉木人工林生态系统土壤呼吸与碳平衡研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007: 7 - 11
- [9] 曾天勋, 刘有美, 傅冠旭. 雷州短轮伐期桉树生态系统研究 [M]. 北京:中国林业出版社, 1995: 1 - 241
- [10] 薛 立, 何跃君, 屈 明, 等. 华南典型人工林凋落物的持水特性 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 415 - 421
- [11] 刘 洋, 张 健, 冯茂松. 巨桉人工林凋落物数量、养分归还量及分解动态 [J]. *林业科学*, 2006, 42(7): 1 - 10
- [12] 朱教君, 刘世荣. 森林干扰生态研究 [M]. 北京:中国林业出版社, 2007
- [13] 程云环, 韩有志, 王庆成, 等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 403 - 410
- [14] Box J E, Hammond L C. Rhizosphere Dynamics [M]. Westview Press Inc, 1990: 15 - 74
- [15] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology [M]. 李 博, 赵 斌, 彭容豪, 等译. Springer-Verlag New York, Inc 2002
- [16] Yu X B, Yang Z H, Yang X B. A comparative study on understorey vegetation diversity of *Eucalyptus* plantation in Hainan Island [M] // 莫晓勇. 桉树人工林培育的理论与方法. 北京:中国林业出版社, 2005: 189 - 208
- [17] 蔡惜芳, 姚 昭, 莫锦钊, 等. 桉树近熟林施肥效果初探 [J]. *桉树科技*, 2006, 23(2): 26 - 29
- [18] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation [J]. *Plant Soil*, 2005, 269: 341 - 356
- [19] Valverde-Barrantes Q J, Raich J W, Russell A E. Fine-root mass, growth and nitrogen content for six tropical tree species [J]. *Plant Soil*, 2007, 290: 357 - 370
- [20] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots [J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(3): 311 - 328
- [21] Lenka B, Nilsson I, Kleja S B, et al. Decomposition and substrate quality of leaf litters and fine roots from three exotic plantations and a native forest in Southwestern highlands of Ethiopia [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 2317 - 2328
- [22] Palacio S, Montserrat-Martí G. Above and belowground phenology of four mediterranean sub-shrubs, preliminary results on root-shoot competition [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68: 522 - 533