

# 山西太岳山不同林龄油松林生物量及碳储量研究

宋娅丽, 韩海荣, 康峰峰

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

**摘 要:** 基于山西太岳山油松林 5 种林龄序列(18, 20, 25, 38 和 42 年生)来研究地上和地下各部分生物量和碳储量分配情况。结果表明: 18, 20, 25, 38 和 42 年生油松林地上部分和地下部分不同器官碳素密度波动分别为 0.411 2~0.556 0, 0.424 8~0.532 8 g/g。地上和地下部分总生物量随着林龄的增加逐渐增加, 各器官碳储量与生物量呈显著正相关。不同林龄油松林地上部分碳库分别为 38.18, 42.28, 56.64, 86.36, 95.74 t/hm<sup>2</sup>, 地下部分碳库分别为 8.58, 8.46, 8.92, 19.92, 38.70 t/hm<sup>2</sup>。树干在碳库比例中最大, 其次是根桩、活枝, 最小的是树皮, 分别占油松林总碳储量的 30.90%~54.70%, 11.93%~28.41%, 8.55%~15.77% 和 0.45%~0.88%。油松林地下部分与地上部分碳储量的比值从 18 年生的 0.22 快速降低到 25 年生的 0.16。油松林的固碳潜力随着林龄的增加而逐渐增加, 从 25~42 年生的油松林成熟期是碳积累的重要阶段。

**关键词:** 油松林; 林龄; 碳密度; 生物量; 碳储量

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0029-05

## Study on Biomass and Carbon Storage with Age-Chronosequence in *Pinus tabulaeformis* Forest in Taiyue Mountain of Shanxi Province

SONG Yali, HAN Hairong, KANG Fengfeng

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Above and underground biomass and allocation of carbon storage across an age-sequence of five secondary stands (18, 20, 25, 38 and 42 years old) in *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain of Shanxi were studies. The results showed that C contents in above and belowground components in the 18, 20, 25, 38 and 42 years old *Pinus tabulaeformis* forests were 0.411 2~0.556 0 g/g and 0.424 8~0.532 8 g/g, respectively. Biomass in above and underground increased with age, and C storage in components had positive relationship with biomass. C storage in total aboveground biomass was 38.18 t/hm<sup>2</sup>, 42.28 t/hm<sup>2</sup>, 56.64 t/hm<sup>2</sup>, 86.36 t/hm<sup>2</sup> and 95.74 t/hm<sup>2</sup>, respectively, and it in total belowground biomass was 8.58 t/hm<sup>2</sup>, 8.46 t/hm<sup>2</sup>, 8.92 t/hm<sup>2</sup>, 19.92 t/hm<sup>2</sup> and 38.70 t/hm<sup>2</sup>, respectively. Stem is the most important carbon sink, with the largest carbon storage, followed by root stump, live branches, and the lowest C storage is in the bark, accounting for 30.90%~54.70%, 11.93%~28.41%, 8.55%~15.77% and 0.45%~0.88% of total C storage, respectively. Ratios of aboveground C storage to belowground C storage in five ages stands decreased rapidly from 0.22 in 18 years old stand to 0.16 in 25 years old stand. Capacity of carbon storage potential in *Pinus tabulaeformis* forest increased with age, the large C sequestration potentials were observed in the maturing stands with the ages ranging from 25 years to 42 years

**Keywords:** *Pinus tabulaeformis* forest; age-chronosequence; carbon content; biomass; carbon storage

以大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加和温度升高为主要特征的全球气候变化正在深入地改变着陆地生态系统的结构与功能, 成为各国政府和科学家最为关注的全球性重

大生态与环境科学问题<sup>[1]</sup>。森林生态系统作为陆地生态系统的主体, 储存了陆地生态系统 72%~98% 的有机碳<sup>[2]</sup>, 对短期和长期的碳储量来说均具有巨大的潜

收稿日期: 2014-09-17

修回日期: 2015-03-31

资助项目: 国家林业局 948 项目“基于森林生态系统管理的人工林经营技术引进”(2010-4-15); 国家林业公益性行业科研专项“华北典型林分类型土壤碳储量分布格局及变化规律的研究”(201104008)

第一作者: 宋娅丽(1985—), 女, 山西长治人, 博士研究生, 研究方向为生态系统碳储量研究。E-mail: songyali19851205@sina.com

通信作者: 韩海荣(1963—), 男, 青海西宁人, 教授, 主要从事森林生态学研究。E-mail: hanhr@bjfu.edu.cn

力<sup>[3]</sup>。作为全球气候系统的重要组成部分,森林生态系统的碳储量是研究森林生态系统与大气间碳交换的基本参数<sup>[4]</sup>,也是估算森林生态系统向大气吸收和排放含 C 气体的关键因子。接近 80% 的陆地地上部分碳储量和 40% 的地下部分碳储量储存在森林中,森林碳储量动态变化的研究进展对于生态系统碳库管理及减缓全球气候变化具有十分重要的意义<sup>[5]</sup>。

森林生物量各组分碳储量缺一不可,各部分碳储量数据对于理解大气中 CO<sub>2</sub> 水平迅速增加和森林生态系统中碳的积累是最有意义的。在特定森林中的碳固存受当地森林种类、样地情况、气候、林龄、植被密度和土壤属性等的相互影响<sup>[6]</sup>。暖温带中次生油松林(*Pinus tabulaeformis*),可以生长在干旱的壤砂土中,有较高产量,并能较好地适应当地环境。基于生态系统各组分对碳储量进行估算,有助于更准确地了解该地区油松林固碳潜力。本文基于山西太岳山油松林 5 种林龄序列(18, 20, 25, 38 和 42 年生)来研究油松林地上和地下部分生物量和碳储量随着林龄的增加所产生的分配情况。本研究的结果将会增加该地区相关森林生物量和碳储量的估算数据,用“伐倒法”来估算生物量和碳储量使研究结果更为精确。

## 1 研究区概况

试验地建立在中国山西省太岳山森林生态系统定位研究站(112°01'—112°15'E, 36°31'—36°43'N),属暖温带半干旱大陆性季风气候,夏季湿润多雨,冬季寒冷多雪。年均温和年降雨量(1979—2010 年)分别是 8.6℃ 和 650 mm。最热月平均气温 21.5℃,最冷月平均气温 -5℃,均温 ≥ 10℃,年积温 2 700℃,年日照 2 600 h,无霜期 125 d 左右,平均生长季为 240 d。地势西高东低,平均海拔 1 500 m,山地基岩以花岗岩和石灰岩为主。地带性土壤为黑垆土,山地森林由褐土和棕色森林土发育,厚度约为 60—110 cm,质地变化从细小砂土到细小壤土。该地区是山西保护最好的森林之一,乔木层优势种有油松(*Pinus tabulaeformis*)和辽东栎(*Quercus wutaishanica*);灌木有绒毛绣线菊(*Spiraea velutina*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、榛子(*Corylus heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等;草本有披针苔草(*Carex lanceolata*)、宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、山蓼(*Oxyria digyna*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

通过实地踏查,2010 年 7 月在研究区选择 5 组林龄分别为 18, 20, 25, 38 和 42 年生的油松林。每个

林龄油松林中设置 3 个重复的永久性样地,面积为 20 m×30 m,共 15 个样地。样地基本特征如表 1 所示。每个重复样地之间在 20 km 的范围内,以确保样地之间有着相近的气候、土壤等环境条件。

表 1 样地基本特征

林龄/ a	海拔/ m	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 DBH/cm	树高/ m	郁闭 度/%
18	1233	4869	9.31	6.11	65
20	1180	4504	10.03	6.53	69
25	1210	2683	11.36	6.93	72
38	1258	1561	14.78	8.67	75
42	1238	1406	16.76	9.12	85

### 2.2 样品的采集

在 2011 年 8 月,记录样地中油松的胸径(DBH,树高 1.3 m 处的直径)、树高、地理坐标、冠幅、枝下高。各林龄油松胸径用胸径尺测定,38 和 42 年生油松林的树高用布鲁莱斯测高器来测定,18, 20 和 25 年生油松林用测树杆来测定。采用“伐倒法”伐倒 15 株胸径为 6.1~20.7 cm(样地内油松林的最小与最大胸径值)的乔木,用于估算样木每个部分的生物量和碳储量。每个林龄的 3 株乔木基于胸径范围和树高优势进行随机选择。伐倒后,记录冠层长、宽,并剥下叶子、枝、果实,其中死枝、活枝分别剥下,记录各部分鲜重。样木的所有枝叶剥去后,将树干分为 10 个高度相似的部分,记录鲜重。从树干上移走树皮来测定树皮鲜重。同时,小心仔细挖掘整个地下部分根系,分为根桩、粗根(直径为 2~5 cm 和直径 > 5 cm)、中根(直径为 0.5~2 cm)和细根(直径 < 0.2 cm 和直径为 0.2~0.5 cm),分别称鲜重。各部分取样品带回实验室测定干重和碳含量。

### 2.3 样品的测定与计算

样木各部分样品在野外称鲜重后,收集部分样品带回实验室分析。将样品放置在 65℃ 烘箱烘干后,测定样品干重,计算鲜重/干重比,推算各部分干重生物量。测定干重后的各部分样品使用碳氮分析仪来测定碳含量。

植被各部分碳储量由以下公式来计算:

$$D_c = B \cdot R_c \quad (1)$$

式中: $D_c$ ——植被中各部分的碳储量(t/hm<sup>2</sup>); $B$ ——各部分的生物量(t/hm<sup>2</sup>); $R_c$ ——各部分的碳含量(%)。

### 2.4 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 统计分析软件进行图表处理和数据处理分析,用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验油松林林龄与各部分碳储量的差异性,并用最小显著差异法(LSD)进行差异显著性分析。

3 结果与分析

3.1 不同林龄油松林各器官碳素密度

如表 2—3 所示,18,20,25,38 和 42 年生油松林地上部分和地下部分不同器官碳素密度波动分别为 0.411 2~0.556 0,0.424 8~0.532 8 g/g。植物各器官碳素密度变化范围与其他地区不同树种碳素密度变化基本一致,如川西苦竹和桦木碳素密度波动范围为 0.348 5~0.518 6,0.451 9~0.513 7 g/g<sup>[7]</sup>、湖南会同杉木林为 0.455 8~0.500 3 g/g<sup>[8]</sup>。不同植物

器官的碳素密度不同,各林龄平均碳素密度高低排列依次为:活枝>死枝>树干>根桩>活树皮>死树皮>细根>中根>粗根>叶>果。这与其他树种的碳素密度分布略有不同,如川西桦木不同器官的碳素密度高低顺序为:枝>干>叶>粗根>中根>细根<sup>[7]</sup>,湖南会同杉木各器官排列顺序为:叶>根>枝>干<sup>[8]</sup>。不同林龄油松林各器官碳素密度变化不大,除了活枝明显较高之外,其他各部位没有明显差异。总的来看,油松林与其他林木碳素密度各器官变化规律基本一致。

表 2 不同林龄油松林地上部分碳素密度 g/g

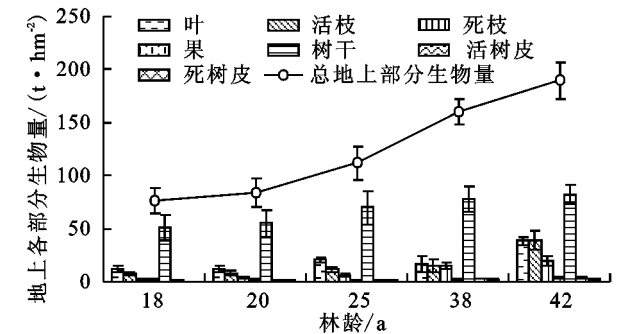
林龄/a	叶	活枝	死枝	果	树干	活树皮	死树皮
18	0.4598	0.5466	0.5369	0.4112	0.4931	0.4941	0.4829
20	0.4602	0.5560	0.5461	0.4154	0.4940	0.4975	0.4863
25	0.4746	0.5322	0.5228	0.4254	0.5123	0.4921	0.4809
38	0.4963	0.5528	0.5429	0.4386	0.5087	0.4741	0.4625
42	0.4917	0.5520	0.5030	0.4425	0.5097	0.4847	0.4733

表 3 不同林龄油松林地下部分碳素密度 g/g

林龄/a	根桩	>5 cm 根	2~5 cm 根	0.5~2 cm 根	0.2~0.5 cm 根	<0.2 cm 根
18	0.4538	0.4248	0.4851	0.4625	0.5021	0.4789
20	0.4994	0.4941	0.5148	0.4828	0.4944	0.4670
25	0.4932	0.4591	0.4919	0.5084	0.5094	0.4798
38	0.5105	0.5102	0.4479	0.4565	0.5128	0.4899
42	0.5328	0.4664	0.4905	0.4780	0.4968	0.4832

3.2 不同林龄油松林各器官生物量

由图 1 可以看出,地上部分总生物量随着林龄的增加逐渐增加,18,20,25,38 和 42 年生油松林地上部分总生物量分别为 75.98,83.63,111.74,160.24,189.40 t/hm<sup>2</sup>,说明从 18~25,25~42 年生油松林生物量分别快速增加。不同林龄油松林树干生物量为 50.85~82.54 t/hm<sup>2</sup>,地上部分总生物量随着林龄的增加而减小,占到 43.61%~66.99%,分别为叶、活枝、死枝、果的 2.13~4.89,2.11~6.82,4.32~24.93,20.33~38.87 倍。说明地上部分生物量更易受到树干的限制,这种限制尤其体现在林龄较小的林木;同时其他各部分生物量同样不能忽略。



注:柱状图中的垂直线表示 SD( $p<0.05$ ),折线图中的垂直线表示在给定温度内的最小显著差异(LSD)( $p<0.05$ ),下图同。

图 1 不同林龄油松林地上部分各器官生物量

从图 2 可以看出,地下部分根系总生物量在 18,20,25 年生油松林差异不显著,但在 38,42 年生油松林显著增加,5 种林龄分别为 36.20,38.92,38.24,74.36,101.48 t/hm<sup>2</sup>。其中根桩生物量最高,其次为粗根、中根、细根。不同林龄油松林根桩占地下部分生物量的比例随着林龄的增加而增加,但粗根、中根、细根生物量占地下部分生物量的比例却相反,随着林龄的增加而减小,分别占到 37.14%~66.01%,10.13%~27.05%,10.72%~18.36%,19.61%~29.23%。

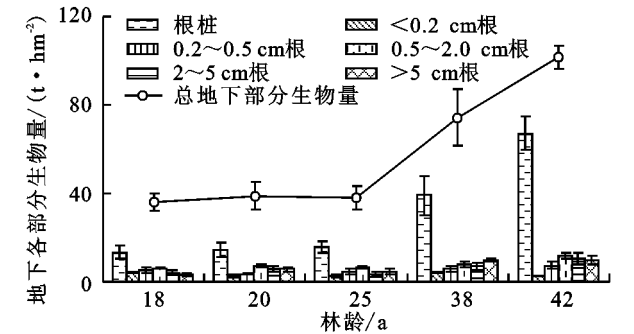


图 2 不同林龄油松林地下部分各器官生物量

3.3 不同林龄油松林各器官碳储量

从表 4 可以看出,各器官碳储量与生物量成正比例关系,与生物量趋势相同,随着林龄的增加而增加,18,20,25,38,42 年生油松林中总碳储量分别为 46.76,50.74,65.46,106.28,134.44 t/hm<sup>2</sup>。地上部分中树干

是重要的碳库,与其他器官相比碳储量最高,不同林龄中碳储量分别为 25.58,27.54,35.22,46.78,41.54 t/hm<sup>2</sup>。然而,树干占乔木地上部分碳储量的比例随着林龄增加而降低,分别占到 67.00%,65.14%,62.29%,54.17%和 43.39%。其次碳储量较高的为叶(各林龄分别占到地上部分总碳储量的 14.51%,14.10%,17.56%,16.79%和 19.32%)和活枝(各林龄分别占到地上部分总碳储量的 10.56%,10.26%,

10.82%,18.25,22.14%)。

地下部分碳储量在 18,20,25 年生油松林中差异性不显著,但在 38,42 年生中显著增加,分别积累了 19.92,38.70 t/hm<sup>2</sup> 的碳。地下部分碳储量随着林龄的增加趋势与生物量相同,根桩占地下部分比例逐渐增加,而粗根、中根、细根逐渐降低,分别占到地下部分碳储量的 77.62%~98.71%,0.46%~4.60%,0.36%~6.29%,0.46%~12.12%。

表 4 不同林龄油松林各器官碳储量 t/hm<sup>2</sup>

项目	18 年生	20 年生	25 年生	38 年生	42 年生
叶	5.54±2.22	5.96±2.08	9.93±2.30	14.50±3.38	18.50±1.82
活枝	4.03±1.26	4.34±2.26	6.12±2.28	15.76±5.44	21.20±4.48
死枝	1.11±0.24	2.24±1.14	3.51±0.08	6.82±1.86	9.78±2.52
果	1.14±0.46	1.24±0.22	0.86±0.16	1.14±0.38	1.94±0.24
树干	25.58±5.36	27.54±4.66	35.22±14.02	46.78±7.88	41.54±4.08
活树皮	0.54±0.14	0.58±0.18	0.54±0.02	0.68±0.12	1.62±0.28
死树皮	0.24±0.18	0.38±0.12	0.36±0.16	0.48±0.18	1.18±0.12
总地上部分	38.18±5.50	42.28±4.24	56.54±9.23	86.36±13.53	95.74±18.32
根桩	6.66±2.22	7.18±1.14	7.81±2.06	19.36±3.08	38.20±6.12
<0.2 cm 根	0.11±0.03	0.14±0.05	0.17±0.06	0.08±0.02	0.08±0.02
0.2~0.5 cm 根	0.23±0.08	0.21±0.02	0.24±0.03	0.14±0.02	0.10±0.03
0.5~2 cm 根	0.54±0.04	0.42±0.06	0.31±0.04	0.14±0.05	0.14±0.06
2~5 cm 根	0.52±0.18	0.21±0.09	0.20±0.07	0.10±0.02	0.08±0.01
>5 cm 根	0.52±0.12	0.30±0.03	0.19±0.04	0.10±0.03	0.10±0.02
总地下部分	8.58±2.32	8.46±2.15	8.92±2.46	19.92±3.83	38.70±6.99
总碳储量	46.76±9.92	50.74±7.55	65.46±11.54	106.28±16.91	134.44±23.46

3.4 不同林龄油松林各器官碳储量分配特征

从图 3 可以看出,不同林龄油松林中,树干碳储量最大,其次是根桩、活枝,最小的是树皮。树干在 5 个林龄油松林碳储量中占支配地位,占总碳储量的比例随着林龄的增加而降低,分别占到 54.70,54.28,53.80,44.02,30.90%。根桩、活枝占总碳储量的比例随着林龄的增加逐渐增加,分别占到 11.93%~28.41%,8.55%~15.77%。叶占总碳储量的比例在不同林龄中变化不明显。

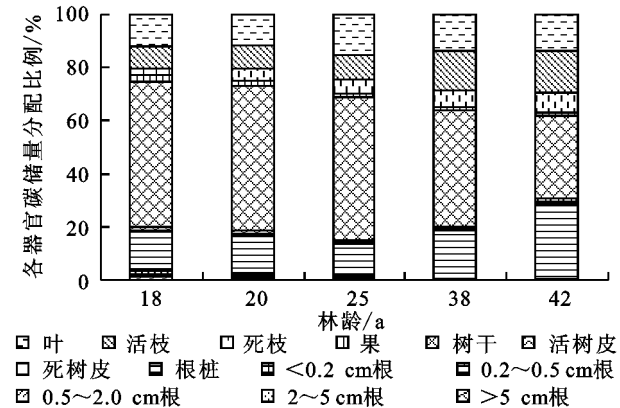


图 3 不同林龄油松林各器官碳储量分配特征

4 讨论与结论

(1) 暖温带常绿针叶林广泛分布于中国北方地区,是较为常见的优势种。本研究中油松林生物量随着时间序列增加而产生较高的标准差,说明在个体林木中的总生物量变化显著。42 年生油松林生物量比 18,20,25 年生油松林分别增加了 159.30%,137.38%,93.95%,说明油松林的固碳潜力随着林龄的增加而逐渐提高。在其他地域也得到相似结论,例如在巴塔哥尼亚地区的假山毛榉南极种(*Nothofagus Antarctic*)中,111~235 年生植被碳积累高于 5~20 年生幼林龄的 6 倍<sup>[9]</sup>;苏格兰油松成熟林比树苗和幼林龄分别增加了 257.90%和 161.27%<sup>[10]</sup>。不同地区林木随着林龄增加而提高的碳储量与当地的土壤水分、温度、营养元素、土壤类型等因素有关。本研究的环境中土壤水分和营养成分等样地条件相似,因此油松林相对生物量分配的不同主要与林龄结构有关。

(2) 树干在油松林碳储量中起到控制性作用,作为主要碳库,其占总碳储量的比例相对保持稳定(30.90%~54.70%)。树干占林木碳储量比例较高已经广泛

报道,在不同地区森林植被中比例范围在 43.74%~83.33%<sup>[11-12]</sup>。树干生物量的不同由胸径直接作用,因此胸径是生物量的永久指示器,而其他器官如枝、叶实质上会贡献于凋落物和土壤。印度西部地区植被 *S. apetala* 的树干生物量(111.39 t/hm<sup>2</sup>)高于本研究的结果(50.85~82.54 t/hm<sup>2</sup>),原因是该地区周边的河流系统为林木生长提供了较好的水温 and 土壤条件<sup>[13]</sup>。随着林龄的增加,树干占地上部分生物量和乔木总生物量的比例发生较大变化,说明使用敏感的林龄因子来精确地测定油松林碳储量是有必要的。

(3) 地下部分根系碳库是油松林生态系统重要的碳库来源。本研究中,根系占到不同林龄总生物量的比例较大(13.63%~28.79%),是油松林生长中的一个重要部分。42 年生成熟油松林根系生物量高于其他林龄地上部分生物量。本研究中的 18,20,25 年生油松林根系生物量(8.46~8.92 t/hm<sup>2</sup>)与 Peichl<sup>[12]</sup>报道的 15,30 年生美国五针松(5.02,9.23 t/hm<sup>2</sup>)处于同一水平。但 42 年生根系生物量(38.7 t/hm<sup>2</sup>)显著高于 65 年生美国五针松(19.20 t/hm<sup>2</sup>)。数据差异的原因主要是由于根系生物量很难测定,Peichl<sup>[12]</sup>采用“土芯法”估测根系生物量,而本研究采用“伐倒法”,后者更能较为准确地反映不同林龄根系生物量。平均地下部分生物量和碳储量占到油松林总生物量和碳储量的 29.77%,19.24%,说明根系对于估算不同林龄油松林碳储量有着显著贡献。

(4) 5 个林龄序列的碳储量结果表明地上部分与根系碳储量呈很好的正相关关系( $R^2=0.863\ 5$ ),同样的结论也出现在其他研究中<sup>[9-10,14-15]</sup>。地下部分与地上部分碳储量的比值从 18~25 年生快速降低(0.22~0.16),这种快速降低主要是因为油松林碳储量在 25 年生油松林中快速积累,而随后又从 25~42 年生逐渐增加(0.22~0.40)。说明油松林碳积累在 25 年内相对不稳定;在 25 年左右,油松林可能有相对较低的生长率和循环时期,但从 25~42 年生的油松林成熟期是碳积累的重要阶段。20 年前,该地区由于森林砍伐造成了大量的碳储量损失。自 1999 年开始实施“黄河中上游天然林保护工程”以来,农民被禁止砍伐林木用于生活和商业用途,使油松林生态系统碳储量迅速积累。该工程的实施和营林技术的改革与调整,对于随着林龄增加而逐渐增加的油松林碳储存有着非常重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Davis M R, Allen R B, Clinton P W. Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand *Nothofagus* forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3):313-321.
- [2] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 现代生态学的热点问题研究 [M]. 北京:中国科学技术出版社,1996.
- [3] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(6):945-958.
- [4] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144):185-190.
- [5] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, et al. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(3):891-899.
- [6] Bert D, Danjon F. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3):279-295.
- [7] 黄从德,张健,邓玉林,等. 退耕还林地在植被恢复初期碳储量及分配格局研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4):130-133.
- [8] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. *林业科学*, 2002, 38(3):14-19.
- [9] Peri P L, Gargaglione V, Pastur G M, et al. Carbon accumulation along a stand development sequence of *Nothofagus antarctica* forests across a gradient in site quality in Southern Patagonia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(2):229-237.
- [10] Helmisaari H S, Makkonen K, Kellomäki S, et al. Below and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 165(1/3):317-326.
- [11] Martin J L, Grower S T, Plaut J, et al. Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(11):1883-1894.
- [12] Peichl M, Arain M A. Above and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4):51-63.
- [13] Kawadiaz V A, Alifragis D, Tsiontsis A, et al. Litter-fall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 144(1/3):113-127.
- [14] Paz H. Root/Shoot allocation and root architecture in seedlings: Variation among forest sites, microhabitats, and ecological groups [J]. *Biotropica*, 2003, 35(3):318-332.
- [15] Bisbing S M, Alaback P B, DeLuca T H. Carbon storage in old-growth and second growth fire-dependent western larch(*Larix occidentalis* Nutt.) forests of the Inland Northwest, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5):1041-1049.