

惠柳笛,刘凡胜,莫少壮,等.桂西北杉木人工林的生物量积累及生产力变化[J].亚热带农业研究,2021,17(2):78-83.

HUI Liudi, LIU Fansheng, MO Shaozhuang, et al. Biomass accumulation and productivity changes of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Northwest Guangxi[J]. Subtropical Agriculture Research, 2021, 17(2): 78-83.

# 桂西北杉木人工林的生物量积累及生产力变化

惠柳笛<sup>1</sup>, 刘凡胜<sup>2</sup>, 莫少壮<sup>2</sup>, 南雅薇<sup>1</sup>, 何 斌<sup>1</sup>, 张日施<sup>1</sup>

(1. 广西大学林学院, 广西南宁 530004; 2. 广西南丹县山口林场, 广西南丹 547200)

**摘要:** [目的]探究桂西北杉木人工林生长过程中生物量和生产力的积累过程及其变化规律,为该地区杉木人工林经营管理提供依据。[方法]以广西南丹县杉木人工林为研究对象,采用样地调查与生物量实测方法,研究了不同林龄(5、10、15、20年生)杉木人工林的生物量、年净生产力及其分配特征。[结果]不同林龄乔木层生物量在 19.13~152.14 t·hm<sup>-2</sup>之间,随林龄增加而增大。各林龄乔木层生物量的增长量表现为:10~15年生(51.81 t·hm<sup>-2</sup>)>5~10年生(42.47 t·hm<sup>-2</sup>)>15~20年生(38.73 t·hm<sup>-2</sup>)。随着林龄的增加,杉木人工林生物量中干材所占比例逐渐增大,而树叶和树枝所占比例逐渐减小。5、10、15、20年生杉木人工林林下植被生物量分别为 1.93、1.12、1.38、2.01 t·hm<sup>-2</sup>,其中灌木层依次占 29.02%、44.64%、47.10%和 40.30%,草本层依次占 70.98%、55.36%、52.90%和 59.70%;凋落物层生物量依次为 1.30、2.04、4.03、6.15 t·hm<sup>-2</sup>,随林龄增加而显著增大。杉木人工林乔木层年均净生产力依次为 3.83、6.16、7.56、7.61 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,其中干材组成比例(37.43%~66.24%)随林龄增加而增大,树叶和树枝组成比例(5.12%~16.49%和 9.20%~21.20%)则呈现相反的变化趋势。[结论]杉木人工林乔木层生物量随林龄增加而逐渐积累,其中干材所占比例随林龄增加而增大,树叶、树枝和干皮生物量所占比例随林龄增加而下降,树根生物量所占比例波动较小。桂西北杉木人工林具有较高的生物生产力水平,其不同林龄年均净生产力高于国内多数区域杉木人工林。

**关键词:** 杉木人工林; 林龄; 生物量; 生产力; 桂西北

**中图分类号:** S718.55+6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-0925(2021)02-0078-06

**DOI:** 10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2021.02.002

## Biomass accumulation and productivity changes of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Northwest Guangxi

HUI Liudi<sup>1</sup>, LIU Fansheng<sup>2</sup>, MO Shaozhuang<sup>2</sup>, NAN Yawei<sup>1</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, ZHANG Rishi<sup>1</sup>

(1. Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Shankou Forest Farm of Nandan County, Nandan, Guangxi 547200, China)

**Abstract:** [Purpose] In order to study the accumulation process and its variation of biomass and productivity during the growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation, and to provide a scientific basis for the management of *C. lanceolata* plantations. [Method] The biomass, productivity and distribution characteristics of *C. lanceolata* plantations (5, 10, 15 and 20 years old) in Shankou Forest Farm of Nandan County was studied through sample plot investigation and biomass measurement. [Result] The biomass of the tree layer increased with the increasing stand age, ranging between 19.13 and 152.14 t·hm<sup>-2</sup>. The biomass increments were 51.81, 42.47 and 38.73 t·hm<sup>-2</sup> for stand ages of 10-15, 5-10 and 15-20, respectively. With the increase of stand age, the proportions of biomass allocated to stem gradually increased, while those allocated to leaves and branches decreased. The biomass of undergrowth

收稿日期:2021-04-28

基金项目:广西创新驱动发展专项(桂科 AA17204087-11);国家自然科学基金项目(31760201,31560206)。

第一作者简介:惠柳笛(1996—),女,硕士研究生。研究方向:森林培育。Email: 15797637369@163.com。通信作者何斌(1962—),男,研究员。研究方向:森林培育、森林土壤和森林生态。Email: hebin8812@163.com。

vegetation was 1.93, 1.12, 1.38 and 2.01 t · hm<sup>-2</sup> for 5, 10, 15 and 20 years old plantations, respectively, with the shrub layer accounting for 29.02%, 44.64%, 47.10% and 40.30% of the biomass, and the herb layer accounting for 70.98%, 55.36%, 52.90% and 59.70%, respectively. The biomass of the litter layer reached 1.30, 2.04, 4.03 and 6.15 t · hm<sup>-2</sup>, respectively. The annual net productivity of the tree layer were 3.83, 6.16, 7.56 and 7.61 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup> for the 4 stand ages, respectively. The proportion of net productivity of timber (37.43%–66.24%) increased with stand age, while the proportion for leaf (5.12%–16.49%) and branch (9.20%–21.20%) showed the opposite trend. [ **Conclusion** ] The biomass of the tree layer increased with stand age in *C.lanceolata* plantations. The proportion of the economic biomass (timber) increased with stand age while it decreased in leaf and branch and varied slightly in root and bark. The *C.lanceolata* plantation in Northwest Guangxi had high biological productivity, with net productivity of different ages of stands exceeding those of most *C.lanceolata* plantations in other regions of China.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata* plantation; stand age; biomass; productivity; Northwestern Guangxi

森林生物量和生产力是森林生态系统环境质量的综合体现<sup>[1]</sup>,不仅是评价森林生态系统结构和功能的重要指标,也是估算森林固碳能力的重要参数<sup>[2-3]</sup>。人工林作为森林生态系统的重要组成部分,在增加森林资源、解决木材供需矛盾以及改善生态环境等方面发挥着越来越重要的作用<sup>[4-5]</sup>。杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]是我国南方重要的商品用材林树种之一<sup>[6]</sup>,具有适应性强、生长迅速、木材单产高和材质优良等优点,在我国林业生产和生态建设中发挥着重要作用。桂西北是我国杉木人工林的重要栽培区之一,目前有关杉木人工林生物量和生产力的研究已有较多报道<sup>[7-12]</sup>,但涉及到桂西北地区杉木人工林的研究很少。为此,本研究以地处桂西北的南丹县杉木人工林为研究对象,对不同林龄(5、10、15、20年生)杉木人工林的生物量、生产力及其分配特征进行研究,探索该区域杉木人工林经营过程中生物量积累及生产力的变化规律,以期为合理制定杉木人工林的经营管理计划和栽培措施提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西西北部的南丹县山口林场。南丹县(107°1′~107°55′E,24°42′~25°37′N)地处云贵高原边缘,属中亚热带气候类型,地貌以中低山为主,海拔高度多在500~1000 m之间,具有高原山区的气候特点和变化规律。年均气温16.9℃,年均降水量1498 mm,降雨多集中在4—10月;年均蒸发量1135 mm,年均相对湿度83%<sup>[13]</sup>。试验地海拔750~850 m,土壤母质(母岩)为砂页岩,风化程度较深,平均土层厚度70 cm以上,土壤肥力水平较高,土壤(0~40 cm)容重为0.90~1.02 g · cm<sup>-3</sup>,pH值为4.40~4.62,有机质、全氮含量分别为43.27~51.24、1.90~2.37 g · kg<sup>-1</sup>,土壤水解氮、速效磷、速效钾含量分别为196.4~235.6、1.05~1.24、48.35~64.50 mg · kg<sup>-1</sup>。

各林龄杉木人工林林分经营管理措施相同,造林前均经炼山和清理杂物后挖穴整地,种植穴规格为0.4 m×0.4 m×0.3 m。采用杉木实生苗(融水种源)定植,造林密度为2500株 · hm<sup>-2</sup>(株行距2 m×2 m)。造林后前3年的春季和秋季各进行1次铲草抚育。10年生杉木林于造林后第8年进行间伐,间伐强度(按林分密度计算,下同)约为30%;15年生杉木林分别于造林后第8、13年进行间伐,间伐强度约为30%、20%;20年生杉木林分别于造林后第8、13、18年进行间伐,间伐强度约为30%、20%、20%。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与林分调查 根据南丹县山口林场不同林龄杉木人工林林分分布状况,以5 a为1个林龄阶段,于2019年5月在地理位置毗邻、立地条件相似的地段,分别选取5、10、15、20年生杉木人工林为研究对象。在不同林龄杉木林中分别设置3块样地,样地大小为400 m<sup>2</sup>(20 m×20 m),然后对各样地内的林木进行每木检尺,调查林冠郁闭度、林分密度以及林木胸径、树高、冠幅和枝下高等指标。计算平均胸径和平均树高。杉木单株材积计算公式为: $V=0.65671 \times 10^{-4} \times D^{1.769412} \times H^{1.069769}$ <sup>[14]</sup>,其中D为胸径、H为树高。各林龄杉木人工林样地基本情况见表1。

表 1 不同林龄杉木人工林林分特征

Table 1 Stand characteristics of *C.lanceolata* plantations at different stand ages

林龄 a	林分密度 株·hm <sup>-2</sup>	平均胸径 cm	平均树高 m	蓄积量 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	郁闭度	林下植被覆盖度 %
5	2 250	6.2	4.9	20.42	0.65	40
10	1 480	13.0	10.6	113.66	0.70	35
15	1 200	17.7	14.2	217.54	0.75	32
20	930	22.8	17.1	321.93	0.75	45

1.2.2 林分生物量测定 在每个林龄的样地内选择 3 株平均木并伐倒,采用“Monsic 分层切割法”分别测定地上部分树叶、树枝、干皮和干材鲜质量,采用“全根挖掘法”将地下各种根系挖出并测定其鲜质量。在每个样地内按对角线设置 2 m×2 m 小样方 3 个,采用“样方收获法”按灌木层、草本层和凋落物层测定鲜质量<sup>[13]</sup>。采集 500~600 g 林木各器官和林下植物及凋落物样品于 80 ℃烘箱中烘干,测定含水率和干质量,计算林分各结构层次生物量。采用年平均生物量进行乔木层净生产力的估算。

1.2.3 数据处理 利用 Excel 2013 软件对各林龄杉木人工林不同结构层次生物量进行统计分析,并用 SPSS 22.0 软件对杉木人工林各组生物量以及乔木层各器官净生产力间的差异性进行单因素方差分析(ANOVA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 单株生物量

由表 2 可见,杉木人工林乔木层及其各器官生物量均随林龄增加而显著增大( $P<0.05$ ),其单株生物量依次为 8.50、41.61、94.50、163.61 kg·株<sup>-1</sup>,表现出该树种在桂西北地区所具有的速生特性。不同林龄林木中各器官生物量以干材最大,为 3.18~108.37 kg·株<sup>-1</sup>;其次是树根和树枝,分别为 1.51~22.37、1.39~15.09 kg·株<sup>-1</sup>;最小是干皮和树叶,分别为 0.62~9.39、1.80~8.39 kg·株<sup>-1</sup>。但不同器官生物量由大到小的排列次序因林龄不同而存在一定差异,5 年生为:干材>树叶>树根>树枝>干皮,10 年生为:干材>树根>树枝>树叶>干皮,15 年生为:干材>树根>树枝>树叶>干皮,20 年生为:干材>树根>树枝>干皮>树叶。不同林龄各器官生物量组成分配中,经济生物量即干材比例随林龄增加而逐步增加,树叶、树枝和树根生物量则呈现相反的变化趋势,干皮生物量所占比例则保持相对稳定。

表 2 不同林龄杉木人工林单株生物量及其分配<sup>1)</sup>Table 2 Biomass and its distribution of individual tree in *C.lanceolata* plantations at different stand ages

林龄 a	平均木生物量/(kg·株 <sup>-1</sup> )					
	树叶	树枝	干皮	干材	树根	合计
5	1.80±0.11d	1.39±0.12d	0.62±0.05d	3.18±0.21d	1.51±0.08d	8.50±0.48d
10	5.30±0.35c	6.14±0.50c	3.17±0.15c	20.78±1.31c	6.22±0.16c	41.61±2.20c
15	6.71±0.35b	12.13±0.76b	5.94±0.56b	56.30±1.53b	13.42±0.56b	94.50±3.68b
20	8.39±1.13a	15.09±0.58a	9.39±0.42a	108.37±2.33a	22.37±0.96a	163.61±4.40a

<sup>1)</sup>表中数据为“平均值±标准差”。同列数值后附不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平。

### 2.2 乔木层生物量及其分配

从表 3 可见,受经营过程中间伐和自然稀疏(林分抚育措施)的影响,杉木人工林林分密度随林龄增加而显著下降,但其乔木层生物量仍然表现出与平均单株生物量相同的变化趋势,即随林龄增加而显著增大,5、10、15 和 20 年生生物量分别为 19.13、61.60、113.41、152.14 t·hm<sup>-2</sup>,各林龄杉木林乔木层生物量或经济生物量(干材)间的差异显著( $P<0.05$ )。而在不同林龄生物量增长量中,以 10~15 年生(51.81 t·hm<sup>-2</sup>)最大,分别为 5~10 年生(42.47 t·hm<sup>-2</sup>)和 15~20 年生(38.73 t·hm<sup>-2</sup>)的 1.22 倍和 1.34 倍,其

中干材的增加量为  $36.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,也高于 5~10 年生的  $23.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 15~20 年生的  $33.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表3 不同林龄杉木人工林的乔木层生物量及其分配<sup>1)</sup>

Table 3 Biomass and its distribution of tree layer of *C.lanceolata* plantations at different stand ages

林龄 a	乔木层生物量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )					
	树叶	树枝	干皮	干材	树根	合计
5	4.05±0.25c	3.13±0.26c	1.39±0.10d	7.16±0.46d	3.40±0.18d	19.13±1.09d
10	7.84±0.52b	9.09±0.74b	4.69±0.22c	30.75±1.94c	9.21±0.23c	61.60±3.25c
15	8.05±0.42a	14.56±0.92a	7.13±0.67b	67.56±1.83b	16.10±0.67b	113.41±4.42b
20	7.80±0.43a	14.03±0.54a	8.73±0.39a	100.78±2.17a	20.80±0.89a	152.14±4.09a

<sup>1)</sup>表中数据为“平均值±标准差”。同列数值后附不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平。

在乔木层各器官生物量分配中,干材、干皮和树根生物量均随林龄增加而显著增大( $P<0.05$ ),树叶和树枝则呈现先显著增大(5~15 年生)后缓慢下降(15~20 年生)的变化趋势。如果把乔木层分为树冠(树叶+树枝)、树干(干材+干皮)和树根三部分,则均以树干生物量及其所占比例最高,并随林龄增加而增大,由 5 年生的 44.69% 增加到 20 年生的 71.98%;树冠生物量所占比例随林龄增加而下降,由 5 年生的 37.53% 下降到 20 年生的 14.35%;树根生物量所占比例则比较稳定,为 13.67%~17.78%。

### 2.3 林下植被和凋落物层生物量

林下植被和凋落物层都是杉木人工林生态系统的重要组成部分,对林地土壤肥力的恢复、维持和提高起着重要作用。从表 4 可见,5、10、15、20 年生杉木人工林林下植被生物量分别为 1.93、1.12、1.38、2.01  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其中灌木层依次占 29.02%、44.64%、47.10%、40.30%,草本层依次占 70.98%、55.36%、52.90%和 59.70%。森林凋落物是植物—土壤养分循环的联结库,是林地有机质的主要物质库和恢复、维持及提高土壤肥力的重要基础。不同林龄杉木人工林凋落物现存量在 1.30~6.15  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,随林龄增加而显著增大( $P<0.05$ ),表明杉木人工林的生长过程有利于其凋落物的积累。

表4 不同林龄杉木人工林的林下植被和凋落物层生物量<sup>1)</sup>

Table 4 Biomass of undergrowth vegetation and litter layer in *C.lanceolata* plantations at different stand ages

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$

林龄 a	林下植被生物量			凋落物层生物量	合计
	灌木层	草本层	小计		
5	0.56±0.03c	1.37±0.10c	1.93±0.20c	1.30±0.07d	3.23±0.22d
10	0.50±0.02b	0.62±0.04b	1.12±0.08b	2.04±0.14c	3.16±0.13c
15	0.65±0.05a	0.73±0.05a	1.38±0.15a	4.03±0.23b	5.41±0.30b
20	0.81±0.37a	1.20±0.22a	2.01±0.18a	6.15±0.30a	8.16±0.45a

<sup>1)</sup>表中数据为“平均值±标准差”。同列数值后附不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平。

### 2.4 净生产力

森林生产力直接反映森林的生产能力。本研究以林木年平均生物量作为乔木层净生产力的指标,由于未把凋落物生物量、根系损失量、林下植物以及动物啃食量等计算在内,其净生产力估算结果比实际低。从表 1 和表 3 计算出 5、10、15、20 年生杉木人工林年平均蓄积生产量分别为 4.08、11.37、14.50、16.10  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其年均净生产力分别为 3.83、6.16、7.56、7.61  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,随林龄增加呈现先显著增加(5~15 年生)后基本稳定(15~20 年生)的变化趋势。从表 5 可见,不同器官净生产力积累速率最快的是干材,为 1.43~5.04  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占乔木层年均净生产力的 37.43%~66.24%,其净生产力及所占林分净生产力比例均随林龄增加而增大;其次是树枝、树根、树叶,分别为 0.63~0.97、0.68~1.07、0.39~0.81  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,积累速率最慢的是干皮,为 0.28~0.48  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仅占 5.78%~7.33%,呈现随林龄增加而下降的趋势。

表 5 不同林龄杉木人工林年均净生产力<sup>1)</sup>Table 5 Annual net productivity of *C. lanceolata* plantations at different stand ages

林龄 a	净生产力/(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )					
	树叶	树枝	干皮	干材	树根	合计
5	0.81±0.05a	0.63±0.05b	0.28±0.02b	1.43±0.09c	0.68±0.04c	3.83±0.22c
10	0.78±0.05b	0.91±0.07a	0.47±0.02a	3.08±0.19b	0.92±0.02b	6.16±0.32b
15	0.53±0.03b	0.97±0.06a	0.48±0.04a	4.50±0.12a	1.07±0.04a	7.56±0.29a
20	0.39±0.02c	0.70±0.03b	0.44±0.02a	5.04±0.11a	1.04±0.04ab	7.61±0.20a

<sup>1)</sup>表中数据为“平均值±标准差”。同列数值后附不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平。

### 3 讨论与结论

据报道,我国贵州省中部 11、19 和 30 年生杉木人工林乔木层生物量分别为 54.72、102.82、115.26 t · hm<sup>-2</sup>[15];河南省信阳市豫南 5、10、15、20 和 25 年生杉木人工林乔木层生物量分别为 20.92、50.01、73.95、109.71 和 126.51 t · hm<sup>-2</sup>[16];江西省分宜县相近密度(1 667 株 · hm<sup>-2</sup>) 12 年生杉木林生物量为 57.42 t · hm<sup>-2</sup>[17]。本研究中,5、10、15、20 年生杉木人工林乔木层生物量分别为 19.13、61.60、113.41、152.14 t · hm<sup>-2</sup>。可见,与我国其他杉木栽培区域相比,桂西北杉木林具有较高的生物量积累能力。而在杉木林生物量积累动态中,随着林分的生长与发育,林木的自然整枝能力不断增强,林木生长逐渐进入或处于干材阶段,干材生物量及其所占比例逐渐增大,其增长速度均高于乔木层生物量增长速度,树叶和树枝生物量所占比例则逐渐减少,表明杉木林的生长过程对于以培育干材为目标的用材林经营十分有利。不同林龄间乔木层生物量增长量中,10~15 年生分别为 5~10 和 15~20 年生的 1.22、1.34 倍,其中干材增长量分别比 5~10 和 15~20 年生增加 56.04%和 10.81%,说明该生长阶段乔木层生物量积累速率最快,同时也更有利于其经济生物量的生物积累。

受树种生物学特性和抚育间伐等人干扰的影响,不同林龄杉木林林下植被发育均较差,其生物量均小于 2.02 t · hm<sup>-2</sup>,凋落物层生物量也明显低于相同区域、相近林龄的光皮桦人工林[18],不利于林地植物多样性的恢复和营养元素的生物循环[19]。但由于杉木林凋落物现存量呈现随林龄增加而增大的变化趋势,说明杉木林的生长过程在一定程度上也促进了凋落物的生物积累和养分归还。因此,在杉木林经营过程中,通过调控林分密度来促进林下植被的生长发育和增加林下植物物种多样性,从而加快凋落物层分解和腐殖化过程,将有利于提高林分的自肥能力,维持林地的持久生产力。

刘延惠等[15]研究表明,贵州省中部 11、19 年生杉木人工林(乔木层,下同)净生产力分别为 4.97、5.41 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>,广西北部部的 16、23 年生杉木人工林净生产力分别为 10.27、5.71 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>[20],广西武宣县 8、14、23 年生马尾松人工林净生产力分别为 4.00、7.71、8.11 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>[21]。本研究中,5、10、15、20 年生杉木人工林净生产力分别为 3.83、6.16、7.56、7.61 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>,其中干材净生产力分别为 1.43、3.08、4.50 和 5.04 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>,均表现出随林龄增加而增大的变化趋势,表明桂西北杉木人工林具有较高的生物生产力水平。由于在不同林龄阶段的发育和生长过程中,杉木林 10~15 年生阶段的乔木层生物量增长量最大,净生产力积累速率也较高,若在该生长阶段根据林木和土壤养分特性进行合理的林地施肥,将对满足林木生长对养分的需求与促进林木生长起到积极的作用。而在杉木林 20 年生后通过间伐进行大径材培育,不但可以继续发挥杉木杆材生长阶段的速生特性,并产生一定量木材(间伐材)而获得经济收益,同时可以降低经营管理强度,大幅度地节省经营成本,提高木材产量和经营效益,而且有利于增加林下植物的多样性,促进其生态系统养分元素生物循环,在一定程度上解决杉木连栽造成的地力衰退和生态功能下降而导致的林分生产力下降问题[22-23],从而实现木材收益和碳吸存收益的经营目标。

## 参考文献

- [1] 石旭霞,侯继华,王冰雪,等.长白山阔叶红松林生态系统生产力与温度的关系[J].北京林业大学学报,2018,40(11):49-57.
- [2] LÜ X T, YIN J X, JEPSEN M R, et al. Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in Southwestern China[J]. Forest Ecology and Management, 2010,260(10):1798-1803.
- [3] ZHAO M M, YANG J L, ZHAO N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013[J]. Forest Ecology and Management, 2019,448:528-534.
- [4] 魏晓华,郑吉,刘国华,等.人工林碳汇潜力新概念及应用[J].生态学报,2015,35(12):3881-3885.
- [5] 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(1):1-14.
- [6] SELVARAJ S, DURAISAMY V, HUANG Z J, et al. Influence of long-term successive rotations and stand age of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties[J]. Geoderma, 2017,306:127-134.
- [7] 王俊鸿,吴鹏飞,周丽丽,等.杉木人工林生物量和生产力研究进展[J].河北北方学院学报(自然科学版),2014,30(3):36-40.
- [8] FAROOQ T H, WU W J, TIGABU M, et al. Growth, biomass production and root development of Chinese fir in relation to initial planting density[J]. Forests, 2019,10(3):236.
- [9] ZHOU L L, SHALOM A D D, WU P F, et al. Biomass production, nutrient cycling and distribution in age-sequence Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in subtropical China[J]. Journal of Forestry Research, 2016,27(2):357-368.
- [10] 谢建文.不同造林密度下杉木人工林的生物量与分配特征[J].亚热带农业研究,2020,16(2):84-88.
- [11] 李玲燕,代林利,刘丽,等.不同密度12年生杉木林地上部分生物量的垂直分布[J].亚热带农业研究,2020,16(4):229-236.
- [12] 卢立华,农友,李华,等.保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):717-724.
- [13] 韦家国,周刚,刘凡胜,等.秃杉林和连栽杉木林生态系统C积累及其分布格局[J].亚热带农业研究,2018,14(1):29-33.
- [14] 陈代喜,陈琴,蒙跃环,等.杉木大径材高效培育技术探讨[J].南方农业学报,2015,46(2):293-298.
- [15] 刘延惠,丁访军,崔迎春,等.黔中地区不同林龄杉木人工林碳贮量及其分配特征[J].水土保持学报,2015,29(4):278-283.
- [16] 邓华平,李树战,何明山,等.豫南不同年龄杉木林生态系统碳贮量及其空间动态特征[J].中南林业科技大学学报,2011,31(8):83-90,95.
- [17] 段爱国,张建国,何彩云,等.杉木人工林生物量变化规律的研究[J].林业科学研究,2005,18(2):125-132.
- [18] 滕秋梅,何斌,徐广平,等.桂西北光皮桦人工林水源涵养功能[J].水土保持学报,2019,33(5):177-184,189.
- [19] 林开敏,洪伟,俞新妥,等.杉木人工林林下植物生物量的动态特征和预测模型[J].林业科学,2001,37(S1):99-105.
- [20] 俞月凤,宋同清,曾馥平,等.杉木人工林生物量及其分配的动态变化[J].生态学杂志,2013,32(7):1660-1666.
- [21] 项文化,田大伦.不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究[J].植物生态学报,2002,26(1):89-95.
- [22] 夏丽丹,于姣姐,邓玲玲,等.杉木人工林地力衰退研究进展[J].世界林业研究,2018,31(2):37-42.
- [23] YANG Z J, CHEN S D, LIU X F, et al. Loss of soil organic carbon following natural forest conversion to Chinese fir plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2019,449:117476.

(责任编辑:陈幼玉)