

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200107

## 桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的生物量 积累及生产力变化

张日施<sup>1</sup> 黄振格<sup>1</sup> 何斌<sup>1</sup> 谢敏洋<sup>1</sup> 周刚<sup>1</sup> 韦明宝<sup>2</sup>

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态和保育重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西南丹县山口林场, 广西南丹 547200)

**摘要:**【目的】研究秃杉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, 为秃杉人工林尤其是大径级用材林经营管理提供科学依据。【方法】以广西南丹县秃杉人工林为研究对象, 采用样地调查与生物量实测方法, 研究了不同年龄阶段(9、17、25、37年生)秃杉人工林生物量、生产力及其分配特征。【结果】(1)乔木层生物量随林龄增加而增大, 9、17、25、37年生的秃杉人工林生物量分别为 76.77、157.06、200.82、304.88 t/hm<sup>2</sup>, 其中经济生物量(干材)分别为 35.84、90.10、126.16、212.71 t/hm<sup>2</sup>, 树枝生物量分别为 16.35、28.68、30.60、30.01 t/hm<sup>2</sup>, 树根生物量分别为 11.26、21.22、24.16、39.92 t/hm<sup>2</sup>, 树叶生物量分别为 9.95、10.32、11.72、9.88 t/hm<sup>2</sup>, 干皮生物量分别为 3.38、6.74、8.17、12.36 t/hm<sup>2</sup>。(2)林下植被生物量依次为 1.54、3.38、5.15、5.80 t/hm<sup>2</sup>, 其中灌木层生物量分别占 59.09%、69.53%、73.26%、73.45%, 草本层占 40.91%、30.47%、26.74%、26.55%。凋落物层生物量依次为 2.23、4.73、7.04、10.67 t/hm<sup>2</sup>, 随林龄增加而显著增大。(3)各年龄阶段秃杉人工林乔木层净生产力依次为 8.53、9.24、8.03、8.24 t/(hm<sup>2</sup>·a), 其中干材净生产力组成比例(46.66%~69.78%)随林龄增加而增大, 树叶和树枝的组成比例(3.28%~4.46%和 9.83%~21.34%)则呈现相反的变化趋势。【结论】(1)秃杉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。(2)与杉木和马尾松人工林相比, 秃杉人工林具有速生期长和衰退晚的优点, 生物生产力较高。研究结果为桂西北人工林可持续经营和发展提供了依据。

**关键词:** 秃杉人工林; 年龄阶段; 生物量; 生产力; 桂西北

**中图分类号:** S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)11-0020-08

**引文格式:** 张日施, 黄振格, 何斌, 等. 桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的生物量积累及生产力变化 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(11): 20-27. Zhang Rishi, Huang Zhengge, He Bin, et al. Biomass accumulation and productivity changes of *Taiwania flousiana* plantation at different age stages in northwestern Guangxi, southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(11): 20-27.

### Biomass accumulation and productivity changes of *Taiwania flousiana* plantation at different age stages in northwestern Guangxi, southern China

Zhang Rishi<sup>1</sup> Huang Zhengge<sup>1</sup> He Bin<sup>1</sup> Xie Minyang<sup>1</sup> Zhou Gang<sup>1</sup> Wei Mingbao<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Guangxi University, Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and

Conservation, Nanning 530004, Guangxi, China;

2. Shankou Forest Farm of Nandan County, Nandan 547200, Guangxi, China)

**Abstract:** [Objective] In order to study the accumulation process and its variation of biomass and productivity during the growth of *Taiwania flousiana* plantation, this paper provides a scientific basis for the management of *T. flousiana* plantation, especially the large-diameter timber plantations. [Method] Taking *T. flousiana* plantation in Nandan County, Guangxi of southern China as the research object, the biomass, productivity and distribution characteristics of *T. flousiana* plantation at different age stages (9, 17, 25 and

收稿日期: 2020-04-12 修回日期: 2020-10-29

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB1729008), 国家自然科学基金项目(31560206、31760201)。

第一作者: 张日施。主要研究方向: 人工林培育。Email: 1345072645@qq.com 地址: 530004 广西壮族自治区南宁市大学东路 100 号广西大学林学院。

责任作者: 何斌, 研究员。主要研究方向: 森林培育、森林土壤和森林生态。Email: hebin8812@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

37-year-old) were studied through sample plot investigation and biomass measurement. [Result] (1) The tree layer biomass of 9, 17, 25, and 37-year-old *T. flousiana* plantation was 76.77, 157.06, 200.82 and 304.88 t/ha, respectively, 35.84, 90.10, 126.16 and 212.71 t/ha for the economic biomass (dry wood), 16.35, 28.68, 30.60 and 30.01 t/ha for the branch biomass, 11.26, 21.22, 24.16 and 39.92 t/ha for the root biomass, 9.95, 10.32, 11.72 and 9.88 t/ha for the leaf biomass, 3.38, 6.74, 8.17 and 12.36 t/ha for the dry skin biomass, respectively. (2) The biomass of undergrowth vegetation was 1.54, 3.38, 5.15 and 5.80 t/ha, respectively, of which the shrub layer accounted for 59.09%, 69.53%, 73.26% and 73.45%, the herb layer accounted for 40.91%, 30.47%, 26.74%, 26.55%, respectively. The litter layer biomass was 2.23, 4.73, 7.04 and 10.67 t/ha, respectively, which increased significantly with the increase of stand age. (3) The net productivity of the tree layer of investigated plantations was 8.53, 9.24, 8.03 and 8.24 t/(ha·year), respectively. The proportion of net productivity of dry wood (46.66%–69.78%) increased with the stand age, while the proportion of leaf and branch (3.28%–4.46% and 9.83%–21.34%) showed the opposite trend. [Conclusion] (1) The biomass of tree layer increased with stand age in *T. flousiana* plantation. The proportion of economic biomass (dry wood) increased with the stand age, but it decreased in leaves, branches and bark. The roots showed a small fluctuation with the stand age. (2) Compared with *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations, the *T. flousiana* plantation has the advantages of long fast-growing period and late recession, and high biological productivity. The results provide a basis for the sustainable management and development of plantation forests in northwestern Guangxi of southern China.

**Key words:** *Taiwania flousiana* plantation; age stage; biomass; productivity; northwestern Guangxi

森林生物量和生产力作为森林生态系统的重要数量特征<sup>[1]</sup>, 不但是评价森林生态系统结构和功能的重要指标, 是森林生态系统环境质量的综合体现, 同时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>。当前, 我国在人工林经营上受市场经济的影响, 短期轮伐现象严重, 森林培育目标主要以中小径材为主, 经济效益较低, 而培育大径级用材林却具有生长快、产量高、材性好、经济效益显著并有利于维护林地地力等优点。因此, 大力发展大径级用材林, 尤其是珍贵树种大径级用材林已成为我国林业中长期发展的重要目标<sup>[6]</sup>。

秃杉(*Taiwania flousiana*)为杉科(Taxodiaceae)台湾杉属(*Taiwania*)珍稀树种, 具有生长快、病虫害极少, 生物生产力及出材量高和材质好等优点, 而且因其成熟期晚(一般 60 年以上才开花结实), 速生持续时间长, 其人工林培育过程中至今没有出现杉木(*Cunninghamia lanceolata*)大径材因处于成熟或过熟期而容易发生的枯梢及木材心腐现象, 是南方部分中、低山区杉木采伐迹地更新的优良替代树种和退耕还林的重要栽培树种<sup>[7-8]</sup>, 同时也是培育大径级珍贵用材和建设国家木材战略储备林的优良树种<sup>[9]</sup>, 并成为 2010—2020 年广西重点发展的珍贵及乡土树种之一<sup>[8]</sup>。有研究表明, 虽然秃杉生态适应性较强, 但其种源和种子质量、立地条件以及经营管

理措施等都是影响秃杉生长及其生物量和生产力的主要关键因素<sup>[10-13]</sup>。目前, 有关秃杉人工林生物量和生产力的研究已有较多报道<sup>[14-19]</sup>, 但都集中在中、小径材方面, 关于秃杉大径材人工林及其培育过程中生物生产力的相关研究至今未见报道。桂西北是我国杉木人工林的重要产区, 同时也是大面积引种秃杉的重要地区之一。自 20 世纪 70 年代开始引种秃杉以来, 至今共营造秃杉人工林 8 000 hm<sup>2</sup> 多, 成为我国秃杉人工林培育和科学研究的重要基地之一。本研究以广西南丹县秃杉人工林为研究对象, 拟通过对不同年龄阶段(9、17、25、37 年生)秃杉人工林的生物量、生产力及其分配特征的研究, 探索秃杉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, 为合理制定秃杉人工林尤其是大径级珍贵用材林的经营管理计划和栽培措施提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究区位于广西南丹县山口林场(107°31'E, 24°45'N)。南丹县地处广西西北部, 与天峨县、东兰县、环江县和河池市金城江区相邻, 具有高原山区的气候特点和变化规律, 年均温度 16.9 °C, 年降雨量 1 498.2 mm。样地海拔 950 ~ 1 020 m, 土壤类型为砂页岩发育形成的山地黄红壤, 土层深厚(≥ 0 cm), 土壤肥力水平较高, 0 ~ 40 cm 土壤密度为 0.90 ~ 0.97

$\text{g}/\text{cm}^3$ , pH 值为 4.35 ~ 4.60, 有机质和全氮含量分别为 48.67 ~ 56.24、2.25 ~ 2.49  $\text{g}/\text{kg}$ , 水解氮、速效磷和速效钾含量分别为 206.4 ~ 281.2、1.30 ~ 2.21、53.21 ~ 67.30  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

研究林分包括 9、17、25、37 年生共 4 个不同林龄秃杉人工林, 前茬均为杉木人工纯林, 造林密度相同, 均为 2 500 株/ $\text{hm}^2$ , 株行距为 2 m  $\times$  2 m, 造林措施为前茬林分采伐后, 经炼山、挖穴(规格 0.4 m  $\times$  0.4 m  $\times$  0.3 m)整地后, 于第 2 年 3—4 月份用秃杉(贵州雷公山种源)实生苗定植营造。造林后第 1 年秋季和第 2、3 年的春季和秋季分别进行 1 次铲草抚

育, 各林分生长期间均未进行人工施肥<sup>[20]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样地设置与林分生长调查

根据南丹县山口林场不同林龄秃杉人工林林分分布状况, 于 2018 年 3 ~ 4 月在地理位置毗邻、立地条件相似的地段, 分别选取 9、17、25、37 年生秃杉林为研究对象, 在不同林龄的秃杉人工林中分别设置 3 个样地, 样地大小为 600  $\text{m}^2$  (20 m  $\times$  30 m), 调查和测定样地林冠郁闭度、林分密度、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。各年龄阶段秃杉人工林样地概况如表 1 所示。

表 1 不同年龄阶段秃杉人工林样地概况

Tab. 1 Site conditions of *Taiwania flousiana* plantation at different age stages

林龄/a Stand age/ year	林分密度/ (株· $\text{hm}^{-2}$ ) Stand density/ (plant· $\text{ha}^{-1}$ )	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	坡度 Slope degree/(°)	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	蓄积量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ) Stand volume/ ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	郁闭度 Canopy density	林下植被盖度 Undergrowth coverage degree/%
9	2 100	东北 Northeast (NE)	中 Middle	28	11.86	9.38	120.29	0.87	32.5
17	1 250	东北 NE	中 Middle	31	19.83	16.21	319.23	0.83	45.7
25	850	东北 NE	中 Middle	30	26.31	18.17	404.51	0.72	52.0
37	680	北 North (N)	中 Middle	32	34.76	22.40	662.67	0.65	60.8

### 1.2.2 乔木层生物量测定及其净生产力的估算

在每个年龄阶段样地外选择 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, 地下部分采用“全根挖掘法”将各种根系挖出并测定其鲜质量<sup>[20]</sup>。同时按“混合取样法”采集各器官样品 500 ~ 600 g, 带回实验室后于 80  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干, 测定含水率和干质量, 计算各平均木单株生物量和乔木层生物量<sup>[20]</sup>, 以年平均生物量作为乔木层净生产力的估测指标。

### 1.2.3 林下植被和凋落物层生物量测定

分别在每个样地内按对角线设置 2 m  $\times$  2 m 小样方 3 个, 调查其林下植物种类、个体数、高度和覆盖度等。采用“样方收获法”按灌木层、草本层和凋落物层测定鲜质量, 采集样品测定含水率和干质量, 估算各层次生物量或现存量<sup>[20]</sup>。

### 1.2.4 数据处理

利用 Excel 2013 软件对各年龄阶段秃杉人工林不同结构层次生物量进行统计分析, 并用 SPSS 22.0 软件对不同年龄阶段秃杉人工林各组分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 平均木生物量及其分配

秃杉人工林平均木单株生物量及其各器官(除

树叶外)生物量均随林龄增加而显著增大( $P < 0.05$ ), 其中 9、17、25、37 年生平均木单株生物量分别达到 36.22、125.71、236.39、448.12  $\text{kg}/\text{株}$ (表 2), 表现出该树种在桂西北所具有的速生特性。林木中各器官生物量积累速度以干材最快, 其 37 年生生物量(312.53  $\text{kg}/\text{株}$ )分别是 9、17、25 年生(16.91、72.11、148.49  $\text{kg}/\text{株}$ )的 18.48、4.33、2.10 倍; 积累速度最慢是树叶, 其 37 年生生物量(14.51  $\text{kg}/\text{株}$ )分别是 9、17、25 年生(4.70、8.26、13.80  $\text{kg}/\text{株}$ )的 3.09、1.76、1.05 倍。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, 9、17、25 年生均为干材 > 树枝 > 树根 > 树叶 > 干皮, 37 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, 干材生物量比例随林龄增加而逐步增加, 树叶、树枝和树根生物量组成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。

### 2.2 乔木层生物量及其分配

从表 1 和表 3 可见, 虽然不同年龄阶段秃杉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木生物量相同的变化趋势, 分别为 76.77、157.06、200.82、304.88  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 随林龄增加而增大, 各年龄阶段乔木层生物量间或经济生物量(干材)间的差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。不同年龄阶段乔木层生物量增加值中, 以 25 ~ 37 年生(104.06  $\text{t}/\text{hm}^2$ )最大, 分别为 17 ~ 25 年生(43.76  $\text{t}/\text{hm}^2$ )

表 2 不同年龄阶段秃杉人工林平均木生物量及其分配

kg/株

Tab. 2 Biomass and its distribution of average tree of *T. flousiana* plantation at different age stages

kg/plant

林龄/a Stand age/year	树叶 Leaf	树枝 Branch	干皮 Dry skin	干材 Dry wood	树根 Root	合计 Total
9	4.70 ± 0.37c	7.72 ± 0.47d	1.59 ± 0.13d	16.91 ± 0.87d	5.30 ± 0.32d	36.22 ± 1.70d
17	8.26 ± 0.59b	22.96 ± 0.98c	5.40 ± 0.40c	72.11 ± 3.46c	16.98 ± 0.59c	125.71 ± 4.86c
25	13.80 ± 0.94a	36.04 ± 2.62b	9.62 ± 0.43b	148.49 ± 4.95b	28.45 ± 2.42b	236.39 ± 10.32b
37	14.51 ± 1.13a	44.18 ± 3.54a	18.21 ± 1.65a	312.53 ± 12.93a	58.68 ± 3.43a	448.12 ± 11.29a

注: 表中数据为平均值 ± 标准差。同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Notes: data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column mean significant differences ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 3 不同年龄阶段秃杉人工林乔木层生物量及其分配

t/hm<sup>2</sup>Tab. 3 Biomass and its distribution of tree layer of *T. flousiana* plantation at different age stages

t/ha

林龄/a Stand age/year	树叶 Leaf	树枝 Branch	干皮 Dry skin	干材 Dry wood	树根 Root	合计 Total
9	9.95 ± 0.68a	16.35 ± 1.04b	3.38 ± 0.36d	35.84 ± 2.07d	11.26 ± 1.17d	76.77 ± 4.60d
17	10.32 ± 0.66a	28.68 ± 0.49a	6.74 ± 0.43c	90.10 ± 3.45c	21.22 ± 0.77c	157.06 ± 3.78c
25	11.72 ± 0.58a	30.60 ± 1.80a	8.17 ± 0.40b	126.16 ± 3.32b	24.16 ± 1.82b	200.82 ± 6.52b
37	9.88 ± 1.12a	30.01 ± 2.28a	12.36 ± 0.12a	212.71 ± 18.15a	39.92 ± 3.52a	304.88 ± 21.94a

和 9~17 年生 (80.29 t/hm<sup>2</sup>) 的 2.38 倍和 1.30 倍, 其中干材的增加值为 86.55 t/hm<sup>2</sup>, 分别为 17~25 年生 (36.06 t/hm<sup>2</sup>) 和 9~17 年生 (54.26 t/hm<sup>2</sup>) 的 2.40 倍和 1.60 倍, 其增加倍数均高于相应的乔木层生物量, 说明秃杉人工林的生长更有利于其经济生物量的生物积累。

从乔木层各器官生物量分配看, 树叶和树枝生物量均随林龄增加呈现先增大后减小的变化, 其中 17、25、37 年生与 9 年生前树枝生物量的差异显著 ( $P < 0.05$ ); 干皮、干材和树根生物量均随林龄增加而增大, 且各林龄间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。如果把

乔木层分为树冠(树叶 + 树枝)、树干(干材 + 干皮)和树根 3 个部分, 则均以树干生物量及其所占比例最高(图 1), 并随林龄增加而增大, 由 9 年生的 51.09% 增加到 37 年生的 73.82%, 表明树干生物量增长速度要高于乔木层生物量的增长速度。树冠生物量呈现随林龄增加先增大(9~25 年生)后减小(25~37 年生)的变化趋势, 其所占比例则随林龄增加而下降, 由 9 年生的 34.26% 下降到 37 年生的 13.08%; 树根生物量呈现随林龄增加而增大的趋势, 但其所占乔木层的比例比较稳定, 为 12.03%~14.67%。

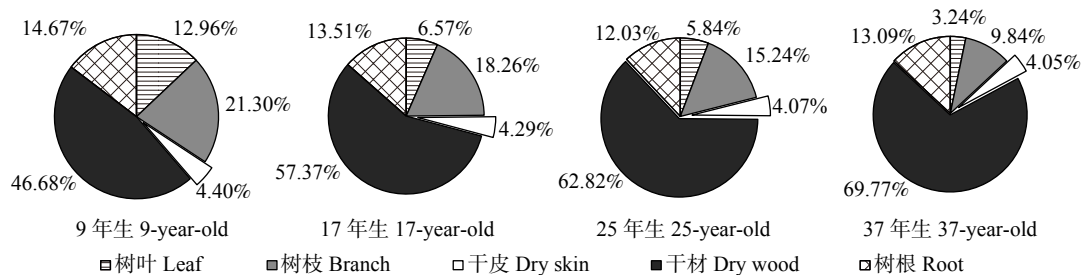


图 1 不同年龄阶段秃杉人工林乔木层生物量分配规律

Fig. 1 Distribution law of tree layer biomass of *T. flousiana* plantation at different age stages

### 2.3 林下植被和凋落物层生物量

林下植被包括灌木层和草本层植物, 是秃杉人工林生态系统的重要组成部分。本文研究表明(表 4), 9、17、25、37 年生秃杉人工林林下植被生物量分别为 1.54、3.38、5.16、5.80 t/hm<sup>2</sup>, 随林龄增大而增加, 表现出与林分郁闭度(表 1)相反的变化趋势; 其中灌木层依次占 59.09%、69.53%、73.26% 和 73.45%,

草本层依次占 40.91%、30.47%、26.74%、26.55%。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、提高土壤肥力的重要基础。不同年龄阶段秃杉人工林凋落物现存量在 2.23~10.67 t/hm<sup>2</sup> 之间, 随林龄增加而显著增大 ( $P < 0.05$ ), 反映出秃杉人工林的生长过程有利于林下植被的生长和凋落物的生物积累。



表 4 不同年龄阶段秃杉人工林林下植被和凋落物层生物量  
Tab. 4 Biomass of undergrowth vegetation and litter layer of *T. flousiana* plantation at different age stages

林龄/a Stand age/year	林下植被生物量 Biomass of underground vegetation			凋落物层生物量 Biomass of litter layer	合计 Total
	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	小计 Sum		
9	0.91 ± 0.23c	0.63 ± 0.16c	1.54 ± 0.19c	2.23 ± 0.17d	3.38 ± 0.34d
17	2.35 ± 0.29b	1.03 ± 0.12b	3.38 ± 0.39b	4.73 ± 0.24c	8.86 ± 0.60c
25	3.78 ± 0.35a	1.38 ± 0.28a	5.16 ± 0.64a	7.04 ± 0.30b	12.20 ± 0.92b
37	4.26 ± 0.37a	1.54 ± 0.22a	5.80 ± 0.17a	10.67 ± 0.56a	16.47 ± 0.41a

2.4 乔木层净生产力

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,由于没有把凋落物生物量、根系损失量以及动物啃食量等计算在内,其净生产力估算结果比实际偏低。从表 1 可计算出 9、17、25、37 年生秃杉人工林年平均蓄积生产量分别为 13.37、18.78、16.18、17.91 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a),其乔木层净生产力分别为 8.53、9.24、8.03、8.24 t/(hm<sup>2</sup>·a),随林龄增加呈现缓慢的上升(9~17 年生)下降(17~25 年生)再上升(25~37 年生)的变化趋势,除 17 年生净生产力最大且显著高于 25 年生( $P < 0.05$ )外,其他 3 个林龄净生产

力间的差异不显著( $P > 0.05$ )(表 5)。不同器官净生产力积累速度最快的是干材,为 3.98~5.75 t/(hm<sup>2</sup>·a),总体上呈现随林龄增加而增大的趋势,其占乔木层净生产力的 46.66%~69.78%,随林龄增加而升高,其中 37 年生的净生产力(5.75 t/(hm<sup>2</sup>·a))明显高于其他年龄阶段;其次是树枝和树根,分别为 0.81~1.82 t/(hm<sup>2</sup>·a)和 0.97~1.25 t/(hm<sup>2</sup>·a),分别占 9.83%~21.34% 和 12.08%~14.65%,其中树枝所占比例随林龄增加而下降;积累速率最慢的是干皮和树叶,分别为 0.33~0.40 t/(hm<sup>2</sup>·a)和 0.27~1.11 t/(hm<sup>2</sup>·a),分别占 4.00%~4.45% 和 3.28%~4.46%,均随林龄增加而下降。

表 5 不同年龄阶段秃杉人工林乔木层净生产力  
Tab. 5 Net productivity of tree layer of *T. flousiana* plantation at different age stages

林龄/a Stand age/year	树叶 Leaf	树枝 Branch	干皮 Dry skin	干材 Dry wood	树根 Root	合计 Total
9	1.11 ± 0.07a	1.82 ± 0.03a	0.38 ± 0.04ab	3.98 ± 0.23b	1.25 ± 0.04a	8.53 ± 0.51ab
17	0.61 ± 0.04b	1.69 ± 0.03a	0.40 ± 0.03a	5.30 ± 0.20a	1.25 ± 0.04a	9.24 ± 0.22a
25	0.47 ± 0.03c	1.22 ± 0.07b	0.33 ± 0.02b	5.05 ± 0.13a	0.97 ± 0.07b	8.03 ± 0.26b
37	0.27 ± 0.03d	0.81 ± 0.06c	0.33 ± 0.01b	5.75 ± 0.49a	1.08 ± 0.10b	8.24 ± 0.59ab

3 讨 论

据报道,我国福建省连城县 9 年生<sup>[14]</sup>、湖北星斗山 16 年生<sup>[15]</sup>、福建德化县 20 年生<sup>[17]</sup>、湖南省湘西 37 年生<sup>[18]</sup>秃杉人工林乔木层生物量分别为 70.37、75.40、177.75、282.01 t/hm<sup>2</sup>。本研究中,9、17、25、37 年生秃杉人工林乔木层生物量分别达到 76.77、157.06、200.82、304.88 t/hm<sup>2</sup>。由此可见,与我国其他秃杉引种区域相比,桂西北秃杉人工林具有较高的生物量积累水平。不同年龄阶段秃杉人工林各器官生物量及其分配因林龄不同而存在差异,其中经济生物量(干材)及其组成比例均随林龄增加而增大,其增长速度均高于整个乔木层生物量增长速度,至 25 和 37 年时干材比例分别达到 62.89% 和 69.78%,树叶、树枝、干皮和树根等其他器官生物量所占比例随林龄增加而下降。由此可见,秃杉人工林生长过程中

生物量积累及其分配的变化趋势对以培育干材为目标的用材林经营十分有利,同时也表明秃杉是培育大径材的优良树种。而其 25 和 37 年生树冠生物量分别达到 42.32 和 39.89 t/hm<sup>2</sup>,其中树叶生物量分别达到 11.72 和 9.88 t/hm<sup>2</sup>,明显高于相近区域、相同或相近林龄的广西武宣县马尾松(*Pinus massoniana*)人工林(23、38 年生树叶生物量分别为 4.3 和 8.8 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[21]</sup>、广西东部马尾松人工林(23 和 38 年生树叶生物量分别为 3.53 和 3.58 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[22]</sup>以及广西北部杉木人工林(23、32 年生树叶生物量分别为 7.44 和 8.54 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[23]</sup>,这有利于林木光合作用的顺利进行,同时也是其林龄即使达到 37 年仍然维持较高生物量生长水平的重要原因之一。

在本研究的 4 个不同年龄阶段秃杉人工林生长过程中,从 9 年生到 17 年生,林分密度较高,郁闭度较大,林下植被发育较差,其生物量分别为 1.54 和

3.38 t/hm<sup>2</sup>; 此后至 25 到 37 年生, 林分密度逐渐降低, 郁闭度也随之减小, 林下植被发育良好并趋于稳定, 其生物量分别达到 5.16 和 5.80 t/hm<sup>2</sup>。可见, 秃杉人工林生长过程中林下植被生物量的变化趋势, 在一定程度上反映了林分郁闭度的变化和人工抚育对林下植被生长的影响<sup>[24-25]</sup>。凋落物作为秃杉人工林养分归还的重要途径之一, 是林地有机质的主要物质库, 同时也是恢复、维持和提高土壤肥力的重要基础。9、17、25、37 年生秃杉人工林凋落物现存量分别为 2.23、4.73、7.04 和 10.67 t/hm<sup>2</sup>, 随林龄增加而显著增大, 表现出与相近区域广西南宁市马占相思 (*Acacia mangium*) 人工林相同的变化趋势<sup>[26]</sup>, 说明秃杉人工林林龄越大, 凋落物量及其养分归还量也越多。因此, 在秃杉人工林培育过程中, 通过对林分密度的合理调控, 确保林木足够的营养空间, 不但有利于林木的生长发育, 而且可以促进林下植被的稳定生长, 提高林下植物物种多样性, 加快凋落物层分解和腐殖化过程, 从而提高林分的自肥能力, 恢复、维持和提高林地地力。

有研究表明, 广西武宣县 8、14、23、38 年生马尾松人工林 (乔木层, 下同) 净生产力分别为 4.00、7.71、8.11 和 5.19 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[21]</sup>, 广西北部的 16、23、32 年生的杉木人工林净生产力分别为 10.27、5.71 和 5.80 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[23]</sup>, 我国福建省连城县 9 年生<sup>[14]</sup>、湖北星斗山 16 年生<sup>[15]</sup>、福建德化 20 年生<sup>[17]</sup>、湖南省湘西 37 年生<sup>[18]</sup>秃杉林乔木层净生产力分别为 7.82、4.71、8.89 和 7.62 t/(hm<sup>2</sup>·a)。本研究在采用与上述区域相似的育林措施下, 9、17、25、37 年生秃杉人工林年平均蓄积生产量分别达到 13.37、18.78、16.18 和 17.91 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a), 均明显高于我国林业行业标准《秃杉速丰林》中秃杉最适区的生长指标<sup>[27]</sup>, 其乔木层净生产力分别为 8.53、9.24、8.03 和 8.24 t/(hm<sup>2</sup>·a), 均高于上述相近区域的多数相同或相近林龄的杉木、马尾松人工林, 也高于采用相似育林措施的我国福建、湖北、湖南等引种区秃杉人工林, 其中 25 和 37 年生仅略低于相同区域广西南丹县以培育中、小径材为经营目标, 林分保留密度达到 2 000 株/hm<sup>2</sup> 的 28 年生秃杉人工林 (8.84 t/(hm<sup>2</sup>·a))<sup>[16]</sup>, 表明桂西北秃杉人工林具有较高且持续时间较长的生物生产力水平。不同年龄阶段各器官净生产力均以经济生物量 (干材) 最高, 其中 17~37 年生净生产力均达到 5.00 t/(hm<sup>2</sup>·a) 以上, 其所占乔木层净生产力的比例 (57.36%~69.78%) 随林龄增加而增大, 而且 37 年生净生产力 (5.75 t/(hm<sup>2</sup>·a)) 明显高于其他年龄阶段, 说明该时期处于干材速生期, 其在林木生物生产力中的主导地位随林龄增加愈加明显。秃杉人工林

乔木层净生产力及其分布格局的变化特点, 进一步说明秃杉人工林生长过程有利于干材的生物积累, 即使林龄达到 37 年, 其仍然表现出较高积累速率。因此, 在秃杉人工林培育过程中, 可以通过合理的人工抚育和间伐, 达到减小林木径级变化幅度, 增加大径材比例, 增大林木平均胸径和平均生物量, 从而提高干材产量和经营效益的预期效果。

森林生物量及生产力的大小受多种生物学因素和非生物学因素的影响, 包括森林类型、树种造成、年龄以及区域的水热和土壤条件等影响<sup>[24,28]</sup>。秃杉作为著名的长寿树种, 寿命可达千年以上, 其主干粗壮且通直圆满, 侧枝细而柔软, 其中、下部枝条易向树外伸展或向下倾斜生长, 使树冠表面积得到增加, 从而提高了树木光合作用能力, 而且秃杉为疏散型半深根树种, 根系发达, 不同根系之间连生且其短根常与土壤中的真菌共生形成菌根, 其庞大的根系群体结构和菌根具有较强的吸收营养和水分的能力, 能够从土壤中吸收充足的水分和养分供给满足林木生长需要<sup>[29-30]</sup>, 而且秃杉速生时间可达 50~100 年。因此, 即使秃杉人工林林龄已达到相当于杉木或马尾松人工林过熟期或近过熟期的 37 年生, 仍然保持较高的生物生产力水平。

目前, 我国大面积秃杉人工林经营过程中长期存在种源选择不当、种子品质良莠不齐、立地选择不合理、林分密度过高和经营管理粗放等问题, 而且以培育中、小径材为经营目标, 木材价格低, 经营效益较差, 无法满足市场上对优质大径材的需求, 严重制约了秃杉产业的健康发展<sup>[31]</sup>。与国内一些引种区域相比, 本研究区具有与我国秃杉主要原产地贵州省雷公山和云南西部怒江流域相似的气候特点和变化规律<sup>[13]</sup>, 地貌类型 (中、低山为主) 及土壤类型 (山地黄壤或黄红壤) 基本一致, 而且土层和腐殖质层较深厚, 土壤肥力水平较高, 这也是在采用相似的经营措施下, 采用贵州省雷公山种源营造秃杉人工林具有较高生物生产力的重要原因。而传统的以培育中、小径材为经营目标相比, 进行秃杉大径级用材林的培育, 在引种区具有良好的秃杉适应气候条件的基础上, 应选择水肥条件好、土层深厚、土壤肥力良好的立地, 同时在经营管理上重点做好秃杉人工林不同年龄阶段的林分密度调控, 就可以降低经营管理强度, 大幅度地节省经营成本, 提高其大径材珍贵木材的产量和经营效益。

## 4 结 论

桂西北 9、17、25、37 年生秃杉人工林乔木层生物量分别为 76.77、157.06、200.82 和 304.88 t/hm<sup>2</sup>, 其

中经济生物量(干材)所占比例(46.68%~69.77%)随林龄增加而增大,树叶、树枝、干皮所占比例(3.24%~12.96%、9.84%~21.30%、4.04%~4.40%)随林龄增加而减小,树根所占比例(12.03%~14.67%)则相对稳定。不同年龄阶段秃杉人工林林下植被生物量依次为1.54、3.38、5.16和5.80 t/hm<sup>2</sup>;凋落物层生物量依次为2.23、4.73、7.04和10.67 t/hm<sup>2</sup>,随林龄增加而显著增大。

桂西北秃杉人工林净乔木层净生产力在8.03~9.24 t/(hm<sup>2</sup>·a)之间,高于相近区域多数相同或相近林龄的杉木和马尾松人工林,也高于相似经营条件下我国福建、湖北和湖南省等一些引种区秃杉人工林。乔木层不同组分净生产力组成比例均以干材净生产力(46.66%~69.78%)最大,且随林龄增加而增大。各年龄阶段乔木层净生产力以9~17年生积累速度(8.53~9.24 t/(hm<sup>2</sup>·a))最快且处于上升阶段,表明9~17年生为秃杉人工林乔木层生物量快速积累期。因此,秃杉在桂西北具有较强的生态适应性,同时也具有较高且持续时间较长的生物生产力水平。在该地区合理发展秃杉人工林,并且在其生物量快速积累的9~17年生阶段,根据林木生长对养分的需求,结合林地土壤养分供给水平,进行合理的林地施肥,对满足林木生长对养分的需求,促进林木生长和提高生物生产力,都会起到积极的作用。而与培育中小径材的秃杉林传统经营模式相比,在秃杉林17年生后继续通过间伐进行大径材培育,不但可以发挥秃杉速生持续期长和生物生产力高的优良特性,显著提高经营效益,而且有利于促进生态系统营养元素生物循环,避免出现杉木林经营过程中的地力衰退和生态功能下降现象<sup>[32-33]</sup>,实现其兼具木材收益和碳吸存收益的可持续经营目标<sup>[20]</sup>。

### 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.  
Shi X X, Hou J H, Wang B X, et al. Relationship between primary productivity and temperature in broadleaved *Pinus koraiensis* mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 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, Yang J, 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.  
Wei X H, Zheng J, Liu G H, et al. The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 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.  
Sheng W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. *Forest Research*, 2018, 31(1): 1-14.
- [6] 郭文福, 蔡道雄. 红椎大径材近自然培育适用性分析[J]. 湖南林业科技, 2015, 42(1): 79-82.  
Guo W F, Cai D X. The applicability analysis on growing for large diameter valuable wood of *Castanopsis hystrix* by close-to-nature forest management[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2015, 42(1): 79-82.
- [7] 何斌, 黄寿先, 招礼军, 等. 秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 151-157.  
He B, Huang S X, Zhao L J, et al. Dynamic characteristics carbon accumulation in *Taiwania flousiana* plantation ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9): 151-157.
- [8] 何斌, 卢万鹏, 唐光卫, 等. 桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 88-92.  
He B, Lu W P, Tang G W, et al. Soil fertility change in *Taiwania flousiana* plantation in northwest Guangxi[J]. *Forest Research*, 2015, 28(1): 88-92.
- [9] 陈强, 苏俊武, 刘云彩, 等. 秃杉大径材培育技术[J]. 林业科技通讯, 2017(2): 15-18.  
Chen Q, Su J W, Liu Y C, et al. Cultivation techniques of *Taiwania flousiana* large-sized timber[J]. *Forest Science and Technology*, 2017(2): 15-18.
- [10] 洪菊生, 潘志刚, 施行博, 等. 秃杉的引种与栽培研究[J]. 林业科技通讯, 1997(1): 7-14.  
Hong J S, Pan Z G, Shi X B, et al. Study on introduction and culture of *Taiwania flousiana*[J]. *Forest Science and Technology*, 1997(1): 7-14.
- [11] 陈慧泉. 云南西部秃杉生长与土壤的关系[J]. 西南林学院学报, 1998, 18(3): 153-158.  
Chen H Q. The relation between the growth of *Taiwania flousiana* Gaussen and soil in western Yunnan[J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 1998, 18(3): 153-158.
- [12] 陈建新, 王明怀, 殷祚云, 等. 广东省秃杉引种栽培效果及栽培区划分研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(4): 399-405.  
Chen J X, Wang M H, Yin Z Y, et al. A study on introduction and culture of *Taiwania flousiana* in Guangdong and its cultural regional assignment[J]. *Forest Research*, 2002, 15(4): 399-405.
- [13] 陈强, 袁明, 刘云彩, 等. 秃杉的物种确立、天然林种群特征、保护、引种和种源选择研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(2): 1-16.  
Chen Q, Yuan M, Liu Y C, et al. Progress on species identification, natural population characteristics, protection, introduction and provenance selection of *Taiwania flousiana*[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2012, 41(2): 1-16.
- [14] 黄钦忠. 不同坡位9年生秃杉人工林生物量分布规律研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2123-2125.  
Huang Q Z. Biomass distribution of nine-years-old *Taiwania flousiana* plantation in different slope[J]. *Journal of Anhui*



- Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 2123–2125.
- [15] 鲁胜平. 星斗山自然保护区秃杉资源及人工林生物量、生长规律研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2002, 20(4): 14–17.
- Lu S P. Research on the *Taiwania flousiana* Gaussen and the biomass and law of growth of planted forest in Xingdoushan Nature Reserve[J]. Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition), 2002, 20(4): 14–17.
- [16] 何斌, 刁海林, 黄恒川, 等. 秃杉人工林生物量与生产力的变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(9): 17–18, 27.
- He B, Diao H L, Huang H C, et al. Change laws of biomass and productivity of *Taiwania flousiana* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(9): 17–18, 27.
- [17] 黄金玲. 闽南山地秃杉人工林的生物量与生产力[J]. 福建林业科技, 2016, 43(3): 161–164.
- Huang J L. The biomass and productivity of *Taiwania flousiana* plantation on South Mountain[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2016, 43(3): 161–164.
- [18] 孙昀. 秃杉人工林生长规律及生产力研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- Sun Y. The study on growth rule and productivity of *Taiwania flousiana*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016.
- [19] Liu K, Wei J G, He B, et al. Biomass productivity of *Taiwania flousiana* plantation and successive rotation plantation of *Cunninghamia lanceolata* in cutover forest land of C. *lanceolata*[J]. Agricultural Biotechnology, 2018, 7(4): 178–180, 186.
- [20] 谢敏洋, 何斌, 戴军, 等. 桂西北秃杉人工林不同年龄阶段的固碳功能[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 106–113.
- Xie M Y, He B, Dai J, et al. Carbon sequestration of different aged stands of *Taiwania flousiana* plantations in Northwestern Guangxi[J]. Forest Research, 2020, 33(5): 106–113.
- [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.
- Xiang W H, Tian D L. Nutrient cycling in *Pinus massoniana* stands of different age classes[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(1): 89–95.
- [22] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 等. 桂东不同林龄马尾松人工林的生物量及其分配特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 394–400.
- Du H, Song T Q, Zeng F P, et al. Biomass and its allocation in *Pinus massoniana* plantation at different stand ages in East Guangxi[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(2): 394–400.
- [23] 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.
- Yu Y F, Song T Q, Zeng F P, et al. Dynamic changes of biomass and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(7): 1660–1666.
- [24] 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(增刊1): 99–105.
- Lin K M, Hong W, Yu X T, et al. The dynamic characteristics and forecasting models of biomass of undergrowth plant in Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(Suppl.1): 99–105.
- [25] 蔡道雄, 卢立华, 贾宏炎, 等. 封山育林对杉木人工林林下植物物种多样性恢复的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(3): 319–327.
- Cai D X, Lu L H, Jia H Y, et al. The influences of closing for afforestation on vegetation diversity restoration under Chinese fir plantation[J]. Forest Research, 2007, 20(3): 319–327.
- [26] 何斌, 贾黎明, 金大刚, 等. 广西南宁马占相思人工林土壤肥力变化的研究[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 10–16.
- He B, Jia L M, Jin D G, et al. Studies on soil fertility change in *Acacia mangium* plantation in Nanning, Guangxi[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 10–16.
- [27] 中华人民共和国林业行业标准. 秃杉丰产林: LY/T 1951—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Forestry Industry Standard of the People's Republic of China. Fast growing and high yield plantation of *Taiwania flousiana*: LY/T 1951—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [28] 尉文, 庞荣荣, 彭潔莹, 等. 太白山锐齿栎林地上生物量分布[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 69–76.
- Wei W, Pang R R, Peng J Y, et al. Above-ground biomass distribution of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Taibai Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 69–76.
- [29] 陶国祥. 秃杉[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001.
- Tao G X. *Taiwania flousiana* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing House, 2001.
- [30] 孙志刚, 陈强, 苏俊武, 等. 秃杉持续生长力的探讨[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(5): 116–119.
- Sun Z G, Chen Q, Su J W, et al. A discussion on continuous growth ability of *Taiwania flousiana*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(5): 116–119.
- [31] 云南省林业科学院. 秃杉大径材培育关键技术开发与应用[J]. 云南科技管理, 2019, 32(6): 85.
- Yunnan Academy of Forestry. Development and application of key technologies for large-sized timber cultivation of *Taiwania flousiana*[J]. Yunnan Science and Technology Management, 2019, 32(6): 85.
- [32] 夏丽丹, 于姣姣, 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.
- Xia L D, Yu J D, Deng L L, et al. Researches on soil decline of Chinese fir plantation[J]. World Forestry Research, 2018, 31(2): 37–42.
- [33] Yang Z, Chen S, Liu X, et al. Loss of soil organic carbon following natural forest conversion to Chinese fir plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 1–8.

(责任编辑 范娟 赵田芸  
责任编辑委 马履一)