

中国杉木林现实生产力的分布及模拟*

Distribution and Simulation of Actual Productivity of *Cunninghamia lanceolata* Plantation in China

温远光 元昌安
Wen Yuanguang Yuan Chang'an

(广西农业大学林学院
南宁市邕武路16号 530001)
(Forestry College, Guangxi
Agricultural University, 16 Yongwu
Road, Nanning, Guangxi, 530001)

刘世荣
Liu Shirong

(中国林业科学研究院森林生态环
境研究所 北京万寿山 100091)
(Research Institute of Forest Ecology and
Environment Science, Chinese Academy of
Forestry, Wanshoushan, Beijing, 100091)

蒋海平

Jiang Haiping

(广西资源县林业局 资源县大埠街134号 541400)
(Forestry Bureau of Zi'yuan County, 134 DaBu Street, Zi'yuan County, Guangxi, 541400)

摘要 在对我国杉木林生产力测定资料进行综合分析的基础上,根据生产力与气候变量和生长期之间的相关关系,筛选有代表性的生产力数据和与其相应的气象及生长期资料,构建了中国杉木林生产力气候模型和生长期模型,并模拟出中国杉木林生产力的分布格局。

关键词 杉木 生产力 地理分布 数学模型 中国

Abstract In view of the relationships between productivity and climatic parameters and growth period, the models of *Cunninghamia lanceolata* plantation climatic productivity and growth period within China were developed based on the selected data of plantation net productivity versus the corresponding climatic and growth period variable, by which the distributive pattern of the productivity of Chinese fir plantation in China was successfully simulated.

Key words *Cunninghamia lanceolata*, productivity, geographical variation, mathematical model, China

森林植被的净初级生产力是森林生态系统结构与功能中最重要的特征,也是人类及其它生物赖以生存和发展的生物圈中最重要的功能基础。由于森林生产力的测定费时、费钱、费力,使测定工作受到极大的限制。于是人们便倾向于探索估测任一地区森林物质生产能力的间接方法,并且认为最可行的途径是精心设计模型,模型的参数主要是气候水热条件。目前,迈阿密模型、桑斯威特模型和筑後模型被认为是用气候参数估测全球生产力最成功的模型,并得到了广泛

应用^[1~6]。鉴于上述模型是建立在全球陆地天然植被的巨大范围,将其应用于某一地区,特别是某一具体树种的生产力模拟,难免失之粗略。本文集全国杉木林生产力和物候研究的有关资料,根据年平均温度、降水量、年实际蒸散量及生长期,建立杉木林生产力的预测模型,并进行模拟,旨在为我国杉木用材林基地布局和探讨气候变化对杉木林生产力的影响提供参考依据。

1 数据资料的收集与整理

1.1 生物量和生产力的测算

利用全国10省(区)33个点的杉木生物量测定资
Guangxi Sciences, Vol. 2 No. 2, May 1995

1994-04-05 收稿。

* 国家自然科学基金(3920097)和中国林科院基金资助项目。

料, 经对各地生物量估测方程的统计检验和综合分析, 证明各地方程的估测值间均无显著差异 (江苏、浙江除外), 从而, 建立了全国杉木不同器官的生物量估测方程^[7], 将收集到的大量样地调查资料代入重建的生物量估测方程, 求出各器官的生物量, 然后, 按温远光等提出的杉木林生产力估算方法^[8]计算林分的生物生产力。计算过程在386型微机上一次完成。为排除林分年龄和密度的影响, 按下列式子将生产力修正到年龄为20年, 密度为1800株/hm²下的生产力:

$$NPP_1 = NPP_{\text{实}} \cdot 20 / \text{实际年龄}$$

$$NPP_2 = NPP_1 \cdot 1800 / \text{实际密度}$$

1.2 气象因子的统计

在收集样地资料的同时, 收集其平均气温和降水量等气象数据, 按下式计算年实际蒸散量^[3]:

$$V = \sqrt{\frac{1.05P}{1 + (1.05P/L)^2}}$$

式中: V 为实际蒸散量(mm); L 为年均最大蒸散量(mm); 它与气温 t 之间有下列关系:

$$L = 300 + 25t + 0.05t^2$$

只有当 $p > 0.316L$ 时, 上式才适用, 若 $p/L < 0.316$, 则 $p = V$ 。

1.3 生产力预测模型的构建

根据各地修正年龄和密度下杉木林分的生产力数据及其相当的气候参数, 依最小二乘法原理, 建立生产力与气候变量的数学模型, 借助生产力模型, 将杉木分布区的气候变量图转换为生产力图, 从而揭示杉木林生产力的分布格局。为模拟与气候变量关系选择的建模数据资料见表1。生长期与生产力模型的构建数据同文献 [7]。

2 结果与分析

2.1 中国杉木林现实生产力的地理分布

根据对中国杉木林净初级生产力数据的统计分析, 概括出中国杉木林生物生产力的地理分布格局 (如表2所示)。从表2可以看出, 不同地带杉木林的生物生产力存在显著差异, 且具有十分明显的地理分布规律。即从北亚热带至北热带, 生产力呈近似的正态分布。杉木林生产力的最大值不是出现在水热资源最丰富的热带地区, 而是杉木中心分布区的中亚热带, 尤以中亚热带南部亚地带的最高, 其生产力平均达 13.50 t/(hm²·a); 中亚热带北部亚地带平均为 11.95 t/(hm²·a); 南亚热带和北亚热带分别是 8.83 t/(hm²·a) 和 5.54 t/(hm²·a); 北热带地区杉木林的生物生产力最低, 平均为 5.02 t/(hm²·a)。显然, 这种生产力的分布格局主要是受杉木自身的生态遗传性和南部地区高温与季节性干旱及北部地区低温少雨的环境特点共同作用的结果。

2.2 净初级生产力的相关模型

2.2.1 气候变量对净初级生产力的相关模型

利用表1中所筛选的不同区域杉木林净初级生产力数据和气候变量进行单因素和多因素回归分析, 并根据散点分布, 采取分段拟合和整体拟合, 其回归模型列入表3。从模型的相关系数看, 无论是整体拟合, 还是分段拟合, 杉木林生产力与气候变量的相关极紧密, 其中, 年均温与生产力的相关性最好, 其次是年实际蒸散量, 而降水量与生产力的相关性较差。另外, 方程的显著性 (F 值) 和剩余标准差 (s) 也反映了此种特征。分段拟合具有较高的相关系数和较小的剩余标准差, 但降水量的右段拟合不紧密, 表明在低雨量时, 生产力随降水量的增加而增加, 当年雨量超过 1600 mm 时, 生产力不再随雨量的增加而增加。

表1 为模拟与气候变量关系选择的杉木林净初级生产力数据资料^[7,9-16]

Table 1 Correlative data between net primary productivity of Chinese fir plantation and climatic factors and growth period

地点 Location	测定生产力 Actual productivity (t/hm ² ·a)	修正生产力 Amendable productivity (t/hm ² ·a)	年均气温 Mean annual temperature (°C)	年降水量 Precipitation (mm)	年蒸散量 Evapotranspiration (mm)
河南南湾 Nanwan of Henan	6.55	6.20	13.0	1032	546.9
河南方集 Fangji of Henan	4.68	5.40	13.0	1032	546.9
浙江湖州 Huzhou of Zhejiang	5.63	4.92	13.5	1235	578.7
四川梁平 Liangping of Sichuan	10.26	7.14	14.0	1350	598.2

河南南林 Nanlin of Henan	6.22	5.57	14.5	1050	574.7
河南黄柏 Huangbai of Henan	6.88	5.64	14.8	1197	598.7
河南董河 Donghe of Henan	5.71	4.55	15.0	1028	579.1
河南新县 Xinxian of Henan	5.96	6.90	15.1	1274	612.5
河南白云寺 Baiyunshi of Henan	5.07	6.21	15.1	1274	612.5
江苏江宁 Jiangning of Jiangsu	6.96	4.49	15.5	1006	583.2
四川兴文 Xingwen of Sichuan	9.66	6.53	15.6	1324	626.8
江西万载 Wanzai of Jiangxi	9.92	8.93	15.6	1919	663.1
浙江宁海 Ninghai of Zhejiang	7.89	11.07	16.0	1646	658.9
安徽歙县 Yixian of Anhui	12.88	12.88	16.0	1800	666.9
浙江宁波 Ningbo of Zhejiang	10.45	8.47	16.1	1350	638.7
安徽休宁 Xiuning of Anhui	7.32	8.11	16.2	1067	660.8
湖南桃源 Taoyuan of Hunan	11.53	14.41	16.5	1443	654.3
湖南会同 Huitong of Hunan	16.82	14.56	16.8	1300	646.5
江西奉新 Fengxin of Jiangxi	19.41	15.22	17.4	1613	685.9
广西龙胜 Longsheng of Guangxi	10.08	14.34	17.6	1550	685.3
福建邵武 Shaowu of Fujian	14.16	16.66	17.7	1770	702.0
湖南江华 Tanghua of Hunan	21.25	15.88	17.8	1520	686.8
江西大岗山 Dagangshan of Jiangxi	12.25	15.22	17.9	1593	694.6
浙江文成 Wencheng of Zhejiang	8.28	13.25	18.1	1806	712.5
广西凤山 Fengshan of Guangxi	14.73	14.90	18.1	1640	702.1
广西田林 Tianlin of Guangxi	13.56	10.53	18.2	1452	688.4
福建建阳 Jianyang of Fujian	18.02	14.89	18.3	1777	715.1
贵州三都 Sandu of Guizhou	15.01	14.06	18.7	1348	686.5
江西安远 Anyuang of Jiangxi	9.85	13.66	18.7	1650	715.0
广西柳江 Liujiang of Guangxi	10.48	8.81	18.8	1757	711.1
福建尤溪 Youxi of Fujian	13.90	11.80	18.9	1602	715.3
广西岑溪 Chenxi of Guangxi	7.66	8.36	19.1	1750	730.2
广西贵港 Guigang of Guangxi	9.51	10.38	19.2	1578	719.3
广西富川 Fuchuan of Guangxi	10.06	13.49	19.4	1712	733.8
福建南平 Nanping of Fujian	13.77	11.29	19.4	1814	740.6
广西武宣 Wuxuan of Guangxi	9.87	7.11	19.7	1314	669.3
广西桂平 Guiping of Guangxi	5.53	5.35	19.8	1684	739.9
广西灵山 Lingshan of Guangxi	4.60	4.33	20.1	1736	749.9
广西陆川 Luchuan of Guangxi	7.48	6.73	20.1	1940	762.8
广西玉林 Yulin of Guangxi	7.46	6.16	20.2	1740	752.2
广西田阳 Tianyang of Guangxi	6.13	4.49	20.5	1226	699.7
广西南宁 Nanning of Guangxi	3.60	5.88	20.6	1401	727.0
广东西江 Xijiang of Guangdong	11.39	9.80	20.8	1650	757.0
广东怀集 Huaiji of Guangdong	5.43	9.55	20.8	1754	765.5
广西浦北 Pubei of Guangxi	4.15	3.45	20.9	1803	771.3
广东英德 Yingde of Guangdong	8.89	7.02	20.9	1900	777.6
广西百色 Baise of Guangxi	7.47	6.41	21.0	1189	700.9
广东云浮 Yunfu of Guangdong	4.59	5.51	21.5	1595	765.5
广东兰溪 Lanxi of Guangdong	7.77	5.28	21.8	1856	793.5
广西钦州 Qinzhou of Guangxi	4.58	5.37	22.0	2103	812.8

表2 中国杉木林净初级生产力的地理分布

Table 2 Geographic distribution of net primary productivity of Chinese fir plantation in China

植被带 Vegetation belt	测定生产力 Actual productivity (t/hm ² ·a)		修正生产力 Amendable productivity (t/hm ² ·a)	
	范围 Range	平均 Average	范围 Range	平均 Average
北亚热带 Northern subtropic	4.68~6.96	5.96	4.49~6.90	5.54
中亚热带北部亚地带 North of mid-subtropical	7.32~19.41	12.06	6.53~16.66	11.95
中亚热带南部亚地带 South of mid-subtropical	9.85~21.25	13.42	11.29~15.88	13.50
南亚热带 Southern subtropic	5.43~14.73	9.53	5.28~14.90	8.83
北热带 Northern tropic	3.60~6.13	4.73	3.45~5.88	5.02

表3 杉木林净初级生产力与气候变量和生长期的相关模型

Table 3 Correlation models between net primary productivity of Chinese fir plantation and climatic variables and growth period

序号 No.	模型 Models	r	s	F
1	$NPP = -38.8022 + 5.431623 \times 10^{-4} \times t + 0.4805925 \times t^2 - 1.799769 \times 10^{-2} \times t^3$	0.7062	2.7991	23.3823
2	$NPP = -10.94547 + 6.330491 \times 10^{-6} \times r + 2.511025 \times 10^{-5} \times r^2 - 1.035755 \times 10^{-8} \times r^3$	0.5390	3.3300	9.6246
3	$NPP = -68.32421 + 2.363534 \times 10^{-5} \times v + 5.084496 \times 10^{-4} \times v^2 - 4.946451 \times 10^{-7} \times v^3$	0.6254	3.0849	15.0974
4	$NPP = -45.81444 - 3.429806 \times 10^{-2} \times t - 1.693861 \times 10^{-2} \times t^2 + 7.633101 \times 10^{-2} \times p - 2.305222 \times 10^{-5} \times p^2$	0.6160	3.1143	14.3718
5	$NPP = -56.15717 + 9.447695 \times 10^{-4} \times t + 0.3706572 \times t^2 - 1.424675 \times 10^{-2} \times t^3 + 4.303039 \times 10^{-2} \times p - 1.883747 \times 10^{-5} \times p^2 + 2.602469 \times 10^{-9} \times p^3$	0.7480	2.623	829.8551
6	$NPP = 0.1466749e^{0.2596535t} (13.0 \leq t \leq 17.9)$ $NPP = 0.02614463e^{113.4807/t} (17.7 \leq t \leq 22.0)$	0.8870	2.0359	77.5082
7	$NPP = 53.78063e^{-2403.042/p} (NPP_{p2} \text{ 相关不紧密})$	0.7267	3.0293	23.4949
8	$NPP = 0.04011e^{0.008519571v} (547 \leq v \leq 695)$ $NPP = 32.98845 - 4.394751 \times 10^{-5} \times v^2 (702 \leq v \leq 813)$	0.9033	1.8918	93.0913
9	$NPP = -38.10602 + 1.718979 \times 10^{-4} \times l + 3.037951 \times 10^{-3} \times l^2 - 9.082774 \times 10^{-6} \times l^3$	0.7381	2.9294	23.3343
10	$NPP = 0.3312538e^{0.0164658l} (150 \leq l \leq 230)$ $NPP = 24096.82e^{-0.03187971l} (230 \leq l \leq 290)$	0.8235	2.4725	42.1399
		0.8199	2.4487	36.9173

以年平均温度与杉木林净初级生产力为例,其模型的分段和整体拟合曲线如图1所示。图1的方程曲线基本上反映了杉木林净初级生产力与温度的数量关系,即在杉木的全分布区内,生产力与年均温呈三次曲线关系(整体拟合),按分段拟合,当温度 $\leq 18^\circ\text{C}$ 时,随着温度的增加表现为 $b > 0$ 的指数函数关系;而当温度 $\geq 18^\circ\text{C}$ 时,随着温度的增加则表现为 $b < 0$ 的指数函数关系。

2.2.2 生长期长度对净初级生产力的相关模型

广西科学 1995年5月 第2卷第2期

林木主梢生长期的长短,直接影响到光合物质的生产、消耗和积累,因而左右着林木的生物生产力。利用全国各地杉木生长期数据与生产力进行回归分析,结果生产力与生长期长度的关系也表现为与气候相类似的曲线关系,其模型见表3。模型的拟合曲线如图2所示。

2.3 净初级生产力的模拟

2.3.1 模型的适合性检验

模型的适合性检验用以检验理论值与实际值是

否吻合。按下式求算 χ^2 值,查 χ^2 表,在信度 $\alpha_{0.05}$ 的水平上检验理论值与实际值有无显著差异^[19]。

$$\chi^2 = \sum \frac{(W_i - W_j)^2}{W_j}$$

式中: W_i 为实际值; W_j 为理论值。计算结果列入表 4。

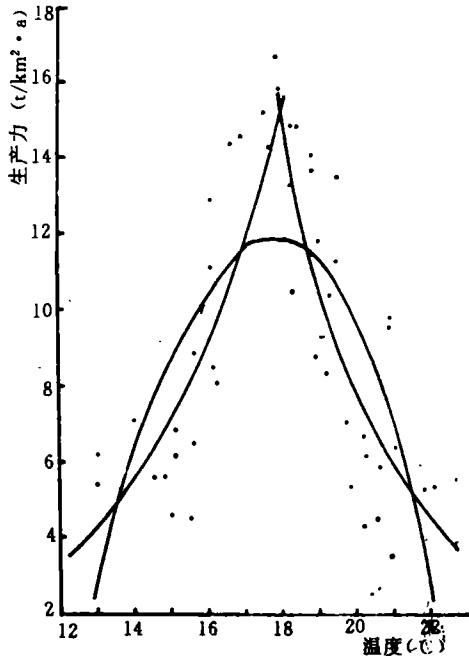


图 1 净初级生产力与年平均温度的关系

Fig. 1 The relationship between net primary productivity and annual mean temperature

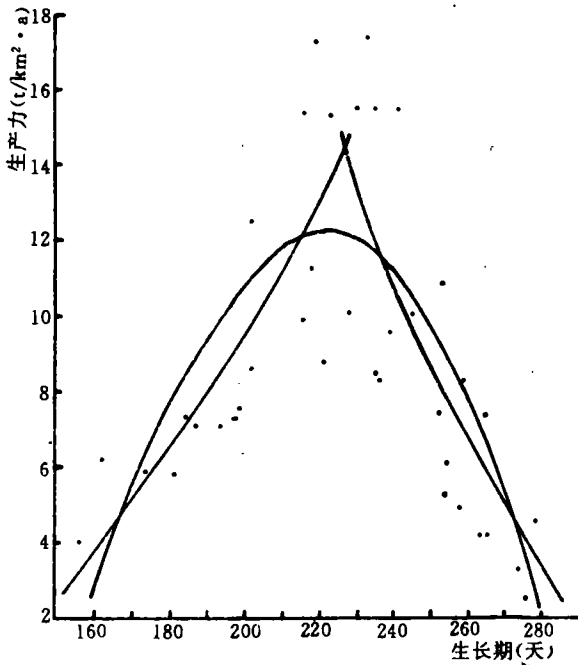


图 2 净初级生产力与生长期长度的关系

Fig. 2 The relationship between net primary productivity and length of the growth period

表 4 各模型的 χ^2 检验

Table 4 The χ^2 test of different models

模型 Model	χ^2 值 χ^2 Value	模型 Model	χ^2 值 χ^2 Value
1	47.22	6	24.73
2	55.15	8	41.53
3	53.99	9	42.48
4	50.01	10	22.82
5	41.52		

* $F = 50 - 2 - 1 = 47$, $\chi_{0.05}^2 = 60.87$.

从表 4 看出,所有模型的 χ^2 值均 $< \chi_{0.05}^2$,表明这些模型的估计值在总体上与实际值无显著差异,与杉木林生产力的变化规律一致。尤其以模型(6)和(10)的拟合程度最佳。

2.3.2 模型的精度检验

模型的精度检验用以检验各模型的可靠程度。按下式计算模型的精度:

$$p = \sum (1 - \frac{W_j - W_i}{W_i}) / n_i$$

计算结果可见,各种模型的精度变化在 64.63% ~ 78.72% 之间,其中模型(6)和(10)的精度较高,达 78% 以上,而单因素整体拟合模型的精度较低,为 64% ~ 66% (表 5)。

表 5 各模型的精度检验

Table 5 The actual precision test of different models

模型 Model	精度 Precision (%)	模型 Model	精度 Precision (%)
1	66.44	6	78.08
2	64.63	8	69.12
3	65.21	9	70.44
4	66.89	10	78.72
5	70.81		

2.3.3 净初级生产力的模拟

相关分析、 χ^2 检验和精度检验结果都证明,模型(5)、(6)、(9)和(10)的相关性、适合性及可靠性较高,可用于模拟杉木林的生产力。

利用全国杉木分布区气候参数值代入生产力模型,实现气候变量图转变为生产力图。根据模型(6)的模拟结果,我国杉木林气候生产力最大值出现在中亚热带区域的桂北、黔东南、湘西、湘南、赣南、粤北和闽北等山区,其生产力可达 12~14 t/(hm²·a) 以上,离开中亚热带,无论北上或南下,杉木生产力

均逐渐下降。北上至陕西汉中、河南信阳及苏南丘陵一线,生产力降至 $4\sim 6\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$;南下到华南沿海地区,进入北热带,杉木生产力也很低,通常在 $4\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 以下。这种气候生产力的分布格局与杉木林现实生产力的分布规律相一致。其它模型的拟合结果也呈类似的规律。

3 讨论与结论

3.1 研究表明,中国杉木林的净初级生产力是沿中心产区(中亚热带)向南、向北两边缘产区(南亚热带和北亚热带)逐步递减,大致上呈正态分布格局。这主要是由于杉木系亚热带树种,其中心分布区在中亚热带,长期的系统演化使之形成了喜温暖湿润,忌高温干旱,怕强风的生态生物学特性。中心产区的气候环境条件最有利于光合物质的生产和积累,因此生产力较高;离开中心产区,向北、向南推移,气温的下降或升高,雨量的过多或过少或季节分配不均,生长期缩短或延长,不利于光合物质的生产和积累,因此生产力较低。这与 Shelford 的耐受定律的原理是相似的。本文所建立的气候生产力模型和生长期模型充分反映了此种客观规律。由于建模的材料取自杉木的全分布区,具有较强的代表性,可在全国杉木栽培区试用。

3.2 温远光等^[9]对应用迈阿密模型和桑斯威特模型(简称 Lieth 模型)估算杉木林生产力的适合性作了统计检验,指出 Lieth 模型不适于估算中亚热带及其以南地区杉木林的气候生产力。本文的研究结果进一步证明:Lieth 模型在估算我国中亚热带及其以北地区杉木林的气候生产力也是不适合的。与 Lieth 模型比较,在中亚热带及其以北地区,杉木林生产力也是随着温度和降水量的增加而增加,但是,它们的相关拟合曲线形式则显有不同。据分段拟合,本模型的温度拟合范围在 $12\sim 18^\circ\text{C}$ 之间,为正指数上升曲线,而 Lieth 模型在此范围内呈直线上升趋势。在温度为 $12\sim 18^\circ\text{C}$ 范围内, Lieth 模型的预测值为 $15.85\sim 20.87\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,而杉木则变动于 $3\sim 15.77\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,反映出 Lieth 模型对杉木的局限性。其实,这是 Lieth 模型主要考虑模型的全球性和综合性功能,而无法顾及地区性和树种个性特征的必然结果。因此,在应用 Lieth 模型来估算某一地区或某一树种的生产力时,应充分考虑模型的适合性问题。

3.3 由于森林的生产力受到诸多因素的综合影响,杉木林生产力的测定又无统一规范化的方法,以及测

定点难以有完全匹配的气象资料,因此,本模型的精度还不是很高,为 $65\%\sim 79\%$ 。

参考文献

- 1 Lieth H. 生物圈的第一性生产力. 北京: 科学出版社, 1986.
- 2 贺庆棠等. 中国植物的可能生产力——农业和林业的气候产量. 北京林业大学学报, 1986, (2): 84~97.
- 3 高素华等. 海南岛农业气候生产力的估算. 热带气象, 1986, 2 (4): 327~334.
- 4 陈国南. 用迈阿密模型估算我国生物生产力的尝试. 自然资源学报, 1987, 2 (3): 270~279.
- 5 侯光良等. 用筑後模型估算我国的植物气候生产力. 自然资源学报, 1990, 5 (1): 60~65.
- 6 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算和分布. 自然资源, 1993, (1): 15~21.
- 7 温远光, 刘世荣. 杉木物候期地理变化规律及其与生产力关系的研究. 林业科学, 1994, 30 (4): 313~319.
- 8 温远光等. 广西杉木人工林生产力地理分布规律及模型的研究. 山西师大学报(自然科学版), 1993, (2) 增刊: 12~18.
- 9 温远光, 元昌安, 刘世荣. 广西杉木林气候生产力模型及分布的研究. 自然资源, 1994, (6): 63~70.
- 10 冯宗炜等. 不同自然地带杉木林的生物生产力. 植物生态学与地植物学丛刊, 1984, 8 (2): 93~100.
- 11 叶镜中等. 福建省洋口林场杉木林生物量的年变化动态. 南京林产工业学院学报, 1984, (4): 1~9.
- 12 韶关地区杉木速生高产调查组. 杉木调查密度的调查研究. 韶关林业科技资料, 1979, (1): 8~12.
- 13 唐汝明, 卫广扬. 杉木人工林不同间伐强度和不同造林密度材性的研究. 安徽林业科技, 1983, (1): 19~23.
- 14 潘国兴. 杉木人工林林分收获表的编制. 中南林业调查规划, 1992, (2): 45~48.
- 15 古炎坤, 陈北光, 冯耀华. 广东西江地区杉木人工林地上部分生物量和生产力的研究. 华南农业大学学报, 1987, 8 (1): 41~50.
- 16 吴祖映, 王隆护. 杉木造林密度与生物量关系. 浙江林业科技通讯, 1983, (2): 34~43.
- 17 侯远鹏, 许德钰, 李永忠等. 江宁低山丘陵优良立地杉木生长潜力及其生长规律. 江苏: 林业科技, 1985, (3): 29~31.
- 18 河南省农林科学院林科所等. 河南省信阳地区杉木栽培区划及立地类型划分. 信阳: 林业科技, 1980, (1): 1~19.
- 19 北京林学院主编. 数理统计. 北京: 中国林业出版社, 1980, 164~170.

(责任编辑: 蒋汉明、邓大玉)