

## 基于固定样地的林分乔木层年净生产力参数结构化估算

邹奕巧<sup>1,2</sup>, 应宝根<sup>3</sup>, 蔡人岳<sup>1,2</sup>, 陈子剑<sup>1,2</sup>, 姚任图<sup>4,5</sup>, 葛宏立<sup>4,5</sup>

(1. 天台县自然资源和规划局, 浙江 天台 317200; 2. 天台县林业局, 浙江 天台 317200;

3. 浙江省公益林和国有林场管理总站, 浙江 杭州 310020; 4. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300;

5. 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 为更准确估算林分乔木层年净生产力, 解析林分乔木层生产力的构成, 本研究提出了基于固定样地数据的林分乔木层年净生产力参数结构化估算方法。利用天台县 2009–2014, 2014–2016, 2016–2017 年 3 个阶段固定样地数据, 同时考虑森林类别、树种组、龄组等因子, 结构化估算 4 组参数, 第 1 组是保留木生物量年均生长率, 第 2 组是生物量年均保留率, 第 3 组是进界木生物量年均生长率, 第 4 组是单位面积年均进界株数。第 1 组参数结果表明, 各树种组保留木生物量年生长率随着龄组增大而减小; 商品林保留木生物量年均生长率普遍比公益林高。第 2 组参数结果表明, 公益林内所有树种组的生物量年保留率都低于其在商品林内的保留率。第 3 组参数结果表明, 除硬阔 I 类外, 公益林中其他树种进界木生物量年均生长率都高于商品林。第 4 组参数结果表明, 随着龄组的增大, 单位面积进界木株数减少; 任一龄组下, 公益林中的单位面积进界木株数均高于商品林。研究结果表明, 本方法能够解析乔木层生产力的构成情况, 是一种结构化估算方法, 其计算结果与其他相关研究相比更具优点。

**关键词:** 固定样地; 林分年净生产力; 乔木层; 参数; 结构化估算

**中图分类号:** S757      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776(2019)03-0023-09

## Structural Estimation on Annual Net Productivity of Tree Layer by Data from Permanent Sample Plots in Tiantai

ZOU Yi-qiao<sup>1,2</sup>, YING Bao-gen<sup>3</sup>, CAI Ren-yue<sup>1,2</sup>, CHEN Zi-jian<sup>1,2</sup>, YAO Ren-tu<sup>4,5</sup>, GE Hong-li<sup>4,5</sup>

(1. Tiantai Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang, Tiantai 317200, China; 2. Tiantai Forest Bureau of Zhejiang, Tiantai 317200, China;

3. Zhejiang Ecological Forest and State-owned Forest Farm Administration, Hangzhou 310020 China; 4. School of Environment and Resource

Science, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 5. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** Mean annual growth rate of biomass of reserved tree, mean annual retention rate of biomass, mean annual growth rate of ingrowth-tree and mean annual number of ingrowth-tree per unit area was structurally estimated by using the permanent sample plot data during 2009-2014, 2014-2016 and 2016-2017 of Tiantai county, Zhejiang province, with different forest types, tree species groups and age groups. The result showed that mean annual growth rate of biomass of each reserved tree species group decreased with the increase of age group. The average annual growth rate of reserved tree biomass in commercial forest was higher than that in ecological forest. The mean annual retention rate of biomass of all tree species

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 国家科技支撑计划团队任务“低效公益林更新改造和健康维持技术研究与示范”(2012BAD22B0503); “天台县生态公益林效益评价及空间布局与生态需求耦合水平研究”(ZC2017ZFCG-031)

作者简介: 邹奕巧, 工程师, 从事林业技术推广工作; E-mail: 493403212@qq.com。通信作者: 葛宏立, 教授, 博士, 从事森林资源监测研究; E-mail: jhghlhlx@163.com。

groups in ecological forest was lower than that in commercial forest. The mean annual growth rate of ingrowth-tree biomass of tree species in ecological forest was higher than that in commercial forest except hard broad I. With the increase of age group, the number of ingrowth-tree per unit area decreased. Under any age group, the annual number of ingrowth-tree per unit area in ecological forest was higher than that in commercial forest.

**Key words:** permanent sample plot; annual net productivity; arbor layer; parameter; structural estimation

乔木层生产力是森林生产系统的主体<sup>[1]</sup>, 占整个森林生态系统生产力的 80% ~ 90%<sup>[2]</sup>, 也是反映森林生态系统结构和功能特征的基本数据<sup>[3]</sup>。林分年净生产力表示单位面积林分内一年的生物量净生产量, 是量化固碳释氧、积累营养物质等森林生态服务功能的一个基本参数, 计算时要求分林分类型和龄组<sup>[4]</sup>, 它的精确计算是进行生态服务功能精确评估的前提。森林生态服务功能的精确评估将会有效地解决林业建设的动力和机制问题, 并能精准指导森林经营<sup>[5]</sup>, 因此, 林分年净生产力计算方法的研究与生态服务功能紧密结合起来成为新的研究热点。同时, 随着生态文明建设的推进, 要求森林资源监测数据更加精确, 而生产力也是森林资源动态监测的一项重要内容, 所以研究林分乔木层净生产力的精确估算方法具有重要意义。

当前, 区域性的生产力估算方法大致分为两类。一类是基于遥感技术和数学模型, 结合一定量的地面样地, 对生产力进行估算<sup>[6-9]</sup>。这种方法的优点是效率较高、时效性较强, 可以在大区域上进行, 缺点是精度较低, 且较难求出计算森林生态服务功能所需的既要分树种组和龄组, 又要精确的林分年净生产力大小。另一类是基于地面调查数据的方法, 这类方法的优点是精度高, 缺点是成本较高。但目前国内外最精确的森林资源数据还是基于地面调查获取的, 例如我国的森林资源连续清查体系就是通过复查地面固定样地来获取最权威的森林资源数据, 其系统性和权威性使得此方法在区域森林生产力估算研究中最具代表性<sup>[10-12]</sup>。由于林分年净生产力的计算要求高精度、分树种组、分龄组, 所以研究基于地面调查数据的林分净生产力计算方法依然具有重要意义。近年来有学者利用样地数据对森林净生产力进行了计算, 如李福强等利用吉林市森林资源档案的蓄积量和吉林省主要树种生长率、消耗率表, 分树种组、龄组, 计算了林分年净生产力<sup>[13]</sup>, 但其生物量转化系数采用常数, 未考虑枯死木、采伐木在 1 年内生长一段时间产生的未测生长量, 估算结果有一定的误差; Zhou 等通过样地数据建立了落叶松 *Larix gmelinii* 林蓄积量—生物量和生物量—生产力的相互关系, 来估算区域性落叶松林的年净生产力<sup>[14]</sup>; 张茂震等基于某时刻蓄积的测定, 将蓄积转化为生物量, 考虑了 2 次调查期间的未测生长量, 并在复位样木基础上用复利公式计算了实际生长率进行未测生长量的计算, 最后利用前后期单位面积生物量差减法, 分树种组计算了生产力<sup>[15]</sup>。为了计算生长量或预测林分生长, 常需进行林分生长率的计算, 我国林业上采用普雷斯勒生长率公式计算各因子的生长率<sup>[1]</sup>, 也有学者针对林分生长率估算进行了深入研究, 以林分平均胸径为自变量建立了生长率混合模型, 既能总体上模拟间隔期内区域林分生长, 又能较准确反映不同林分特征的小班生长特点, 反映不同林分个体间生长率的差异<sup>[16]</sup>。但这些估算方法大都从样地的统计数据出发, 都不是结构化估算, 不能解析生产力的构成, 而且容易忽略采伐木和枯损木产生的未测生产力。

为更精确估算林分年净生产力, 直观了解乔木层生产力的构成情况, 本研究对林分乔木层年净生产力的构成进行解析, 包括 3 部分, 保留木的生产力、进界木的生产力和采伐木、枯死木的未测生产力。因此, 提出结构化估算方法, 首要研究对象是用于计算乔木层年净生产力的基本参数, 包括 4 组参数, 保留木生物量年均生长率; 生物量的年均保留率; 进界木生物量的年均生长率; 单位面积年均进界株数。利用天台县 3 个阶段的固定样地数据, 将样木数据分为公益林和商品林 2 个森林类别, 松类、杉类、硬阔 I 类、硬阔 II 类、软阔类 5 个树种组, 幼、中、近、成、过 5 个龄组, 同时考虑森林类别、树种组、龄组 3 个或 2 个因子, 计算以上 4 组参数。本研究旨在为县域林分年净生产力估算提供一种结构化计算方法, 为天台县林分乔木层净生产力精确计算提供基本参数。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

天台县位于浙江省东中部, 东连宁海、三门两县, 西接磐安县, 南邻仙居县与临海市, 北界新昌县。28°57′

~ 29°20'N, 120°41'~ 121°15'E, 森林覆盖率 69.63%。属中亚热带季风气候区, 四季分明, 降水丰沛, 年均气温 17.0℃, 其中最高平均气温 28.3℃ (7 月), 最低平均气温 5.4℃ (1 月), 年均无霜期 243 d, 年均降水量 1 411.7 mm, 四周山体环绕, 中间低平, 因而小区域气候特征显著, 带有一定的盆地气候特征<sup>[17]</sup>。天台县乔木林总面积 84 219 hm<sup>2</sup>, 其中公益林面积 53 187 hm<sup>2</sup>, 商品林面积 31 032 hm<sup>2</sup>。公益林主要林种为防护林, 商品林主要林种为用材林。

1.2 数据来源

基础数据来自对天台县 2009–2014 年, 2014–2016 年, 2016–2017 年 3 个阶段的固定样地复位调查数据。样地为正方形样地, 边长 28.28 m, 面积 800 m<sup>2</sup>, 样地调查严格遵循国家森林资源连续清查技术规定, 对样地内胸径≥5.0 cm 的树种进行每木检尺。本研究针对乔木林分的乔木层, 所以利用的只是其中复位的乔木林固定样地。2009–2014 年的数据来自浙江省森林资源连续清查, 天台县共 60 个样地, 其中符合本次计算要求的为 30 个。2016 年天台县进行森林资源二类调查, 布设了 269 个控制样地, 其中包括全部省级样地, 符合本次计算要求样地数为 32 个。2016–2017 年的数据由本项目组调查, 复查了 78 个样地, 符合计算要求的 63 个。具体样地数据和样木数据见表 1。

表 1 研究数据  
Table 1 basic data

		2009–2014 年			2014–2016 年			2016–2017 年		
		公益林	商品林	合计	公益林	商品林	合计	公益林	商品林	合计
样地数/个		18	12	30	19	13	32	48	15	63
样木数 (按检尺类 型)/株	保留木	1 232	615	1 847	1 849	998	2 847	5 414	1 259	6 673
	进界木	711	397	1 108	358	193	551	166	86	252
	采伐枯死木	–	–	–	97	17	114	358	60	418
样木数 (按树种组) /株	松类	562	459	1 021	608	495	1 103	1 766	548	2 314
	杉类	290	134	424	352	148	500	621	156	777
	硬阔 I 类	651	113	764	792	176	968	1 934	228	2 162
	硬阔 II 类	256	181	437	326	243	569	1 052	300	1 352
软阔类		184	125	309	226	146	372	565	173	738

1.3 数据预处理

本研究参数计算的基础是单木生物量, 因此, 以各期样木胸径为基础, 利用浙江省胸径-树高曲线模型、冠长模型<sup>[18]</sup>和浙江省重点公益林生物量模型, 分松、杉、硬阔 I、硬阔 II、软阔树种组<sup>[19]</sup>, 计算各期样木的单株生物量, 生物量模型和树种组划分见表 2; 样木的年龄采用其所处样地的平均年龄, 根据树种不同将样木划分为幼、中、近、成、过 5 个龄组, 龄组划分参考国家森林资源连续清查技术标准, 见表 3; 同时, 根据样木所处样地的森林类别, 将样木分为公益林和商品林 2 个森林类别。这样, 每株样木都有固定的森林类别、树种组和龄组。

表 2 浙江省重点公益林一般乔木林单株生物量模型  
Table 2 Biomass model for individual arbor in key ecological forest in Zhejiang

分量	松类	杉类	硬阔 I 类	硬阔 II 类	软阔类
总量	$W1= W2+W3+W4$	$W1= W2+W3+W4$	$W1= W2+W3+W4$	$W1= W2+W3+W4$	$W1= W2+W3+W4$
树干	$W2=0.060\ 0H^{0.793\ 4}D^{1.800\ 5}$	$W2=0.064\ 71H^{0.8959}D^{1.488\ 0}$	$W2=0.056\ 0H^{0.809\ 9}D^{1.814\ 0}$	$W2=0.080\ 3H^{0.781\ 5}D^{1.805\ 6}$	$W2=0.044\ 4H^{0.719\ 7}D^{1.709\ 5}$
树冠	$W3=0.137\ 7D^{1.487\ 266}L^{0.405\ 2}$	$W3=0.097\ 1D^{1.781\ 4}L^{0.034\ 6}$	$W3=0.098\ 0D^{1.648\ 1}L^{0.461\ 0}$	$W3=0.286\ 0D^{1.096\ 8}L^{0.945\ 0}$	$W3=0.085\ 6D^{1.226\ 6}L^{0.397\ 0}$
树根	$W4=0.041\ 7H^{0.078\ 0}D^{2.2618}$	$W4=0.061\ 7H^{0.103\ 7}D^{2.115\ 3}$	$W4=0.054\ 9H^{0.106\ 8}D^{2.095\ 3}$	$W4=0.247\ 0H^{0.174\ 5}D^{1.795\ 4}$	$W4=0.045\ 9H^{0.106\ 7}D^{2.024\ 7}$
适用树种	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 湿地松 <i>P. elliotti</i> 火炬松 <i>P. taeda</i> 黑松 <i>P. thunbergii</i> 黄山松 <i>P. taiwanensis</i> 等	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> 水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> 池杉 <i>Taxodium ascendens</i> 落羽杉 <i>T. distichum</i> 等	木荷 <i>Schima superba</i> 栲 <i>Castanopsis fargesii</i> 红楠 <i>Machilus thunbergii</i> 薄叶润楠 <i>Machilus leptophylla</i> 樟 <i>Cinnamomum camphora</i> 等树 种, 其树干木材密度一般小于 0.7 g cm <sup>-3</sup>	青冈 <i>Quercus glauca</i> , 苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i> 甜槠 <i>C. eyrei</i> 冬青 <i>Ilex chinensis</i> 栎属 <i>Quercus</i> 树种等, 其树干 木材密度一般大于 0.7 g cm <sup>-3</sup>	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i> 垂柳 <i>Salix babylonica</i> 枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> 槭属 <i>Acer</i> 树种 枫香树 <i>Liquidambar formosana</i> 檫木 <i>Sassafras tzumu</i> 等软阔叶类 树种

注: 式中, W 为生物量, H 为树高, D 为胸径, L 为冠长。

表 3 南方优势树种(组)龄组划分标准  
Table 3 Classification criteria of age group of dominant tree species in South China

树种	起源	幼龄林/a	中龄林/a	近熟林/a	成熟林/a	过熟林/a
落叶松, 冷杉 <i>Abies fabri</i> , 黑松	天然	≤40	41~60	61~80	81~120	≥121
	人工	≤20	21~30	31~40	41~60	≥61
马尾松, 湿地松, 黄山松, 云南松 <i>Pinus yunnanensis</i> , 华山松 <i>P. armandii</i>	天然	≤20	21~30	31~40	41~60	≥61
	人工	≤10	11~20	21~30	31~50	≥51
杨属 <i>Populus</i> 树种, 柳属 <i>Salix</i> 树种, 桉 <i>Eucalyptus robusta</i> , 椴木, 白花泡桐 <i>Paulownia fortunei</i> , 木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i> , 楝 <i>Melia azedarach</i> , 枫杨等软阔类树种	人工	≤5	6~10	11~15	16~25	≥26
桦木属 <i>Betula</i> 树种, 榆属 <i>Ulmus</i> 树种, 木荷, 枫香树, 珙桐 <i>Davidia involucrata</i>	天然	≤20	21~40	41~50	51~70	≥71
	人工	≤10	11~20	21~30	31~50	≥51
栎属树种, 栗属 <i>Castanea</i> 树种, 锥属 <i>Castanopsis</i> 树种, 樟属 <i>Cinnamomum</i> 树种, 楠属 <i>Phoebe</i> 树种, 椴树属 <i>Tilia</i> 树种, 其他硬阔类	天然	≤40	41~60	61~80	61~80	≥121
	人工	≤20	21~40	41~50	51~70	≥71
杉木, 柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i> , 水杉	人工	≤10	11~20	21~25	26~35	≥36

1.4 林分乔木层年净生产力的构成分析

1 年内的净生产力由 3 部分构成, 保留木生产力, 采伐木、枯损木产生的未测生产力, 进界木的生产力。保留木的年生产力是指年初生长到年末依然存在的活立木产生的生物量生长量; 采伐木、枯死木产生的未测生产力是指年初为活立木, 年末为采伐木或枯死木, 但在年初到采伐枯死前, 依旧生长一段时间, 由此产生的生物量生长量为未测生产力, 因采伐、枯死的时间难以确定, 和进界木进界当年的情况一样, 因此假定采伐木、枯损木在采伐、枯损当年生长了半年; 进界木生产力是指年初在起测胸径(5 cm)以下生长到年末起测胸径以上的林木产生的生物量生长量, 同样因为进界木生长到恰好 5 cm 的时间难以确定, 因此假设所有进界木均在年中进界, 进界后当年生长半年。

1 年内林分净生产力的构成如图 1 所示。

从图 1 可看出, 要准确计算出林分年净生产力, 需计算出以上 3 部分的生产力:

(1) 保留木产生的净生产力  $W_{\text{年(保)}}$ , 其计算公式为:

$$W_{\text{年(保)}} = q_{\text{(年)}} B_{\text{年初(活)}} p_{\text{(年)}} \tag{1}$$

式中,  $q_{\text{(年)}}$  表示生物量年保留率,  $B_{\text{年初(活)}}$  为年初活立木的总生物量(下同),  $p_{\text{(年)}}$  为保留木生物量年生长率。

(2) 采伐木、枯损木产生的净生产力  $W_{\text{年(采枯)}}$

假定采伐木、枯损木生长了半年, 设半年生长率为  $P_{\text{(半年)}}$ , 则:

$$W_{\text{年(采枯)}} = (1 - q_{\text{(年)}}) B_{\text{年初(活)}} p_{\text{(半年)}} \tag{2}$$

式中,  $1 - q_{\text{(年)}}$  为年采伐、枯损率,  $q_{\text{(年)}}$  可由  $P_{\text{(年)}}$  推算出。

(3) 进界木产生的净生产力  $W_{\text{年(进)}}$

假定进界木在进界后生长半年, 则进界木的生产力包括了进界时的总量(胸径为 5 cm 时的生物量)及其在进界后的半年的生长量。因此, 有:

$$W_{\text{年(进)}} = AN_{\text{进(年)}} b_0 + AN_{\text{进(年)}} b_0 p_{\text{进(半年)}} \tag{3}$$

式中,  $A$  为林分面积,  $N_{\text{进(年)}}$  为单位面积年进界株数,  $b_0$  为刚进界时( $D = 5\text{ cm}$ )单木的生物量,  $P_{\text{进(半年)}}$  为进界木生物量半年生长率, 可由  $P_{\text{进(年)}}$  以式(11)推算出。

由以上 3 式可以看出, 要计算林分乔木层年净生产力, 需先对保留木生物量年生长率、生物量年保留率、进界木生物量年生长率和单位面积年进界株数 4 组参数进行计算。以下提出参数的结构化估算方法。

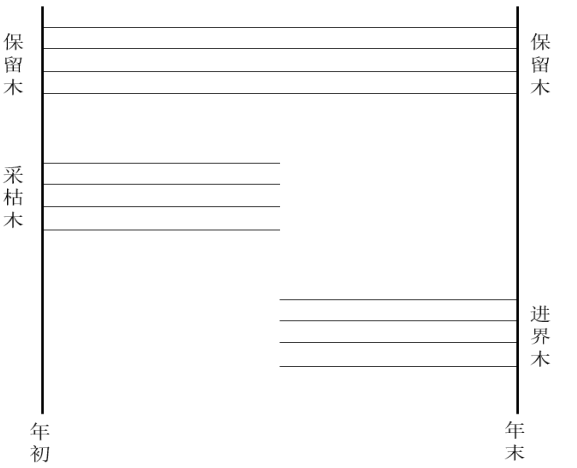


图 1 1 年内林分净生产力的构成示意图  
Figure 1 Composition of net productivity of stand within one year

### 1.5 参数的结构化估算方法

本研究根据 3 个阶段复位样地数据, 计算 4 组基本参数: 保留木生物量年均生长率; 生物量年均保留率; 进界木生物量年均生长率; 单位面积年均进界株数。

各阶段分不同森林类别、不同树种组、不同龄组, 计算 3 因子联立下的保留木生物量年生长率; 由于进界木生长大多是幼树, 是从起测胸径以下生长到起测胸径以上, 从理论上讲, 进界木的生长率与样木所处林分的龄组无太大直接联系, 因此, 本研究计算森林类别、树种组 2 因子联立下的进界木生物量年生长率; 由现实数据分析, 林木采伐、枯死在不同龄组间的不确定性大, 规律性不强, 因此本研究只计算森林类别、树种组 2 因子联立下的生物量年保留率; 同时, 统计和计算各阶段森林类别、龄组 2 因子联立下的年进界株数。根据各阶段的值, 计算出一个加权平均值, 最终形成 4 组参数, 运用到林分水平的计算中, 即保留木年生物量平均生长率 (50 个)、生物量年平均保留率 (10 个)、进界木年生物量平均生长率 (10 个) 和单位面积年平均进界株数 (10 个)。

主要步骤与方法如下:

#### (1) 各阶段保留木生物量年生长率的计算

设保留木生物量年生长率为  $P_{\text{年}}$ ,  $B_{1(\text{保})}$ ,  $B_{2(\text{保})}$  分别为全部复位样地上的全部保留木的前期、后期生物量之和, 则:

$$B_{2(\text{保})} = B_{1(\text{保})} (1 + P_{\text{年}})^{\Delta} \quad (4)$$

式中,  $\Delta$  为复查间隔期。根据 (4) 式有:

$$P_{\text{年}} = \left( \frac{B_{2(\text{保})}}{B_{1(\text{保})}} \right)^{(1/\Delta)} - 1 \quad (5)$$

#### (2) 各阶段生物量年保留率 $q_{\text{年}}$ 的计算

林分生物量年保留率用以反映采伐、枯损的影响。设  $B_{0(\text{活})}$  为年初样地上所有活立木的总生物量, 经过一年的生长后, 其中部分林木枯损或被采伐, 在  $B_{0(\text{活})}$  中减去这部分枯损采伐木的年初生物量后的总生物量记为  $B_{1(\text{活})}$ ,  $B_{1(\text{活})} \leq B_{0(\text{活})}$ 。则林分生物量年保留率  $q_{\text{年}}$  满足

$$B_{1(\text{活})} = q_{\text{年}} B_{0(\text{活})} \quad (6)$$

$q_{\text{年}}$  反映的是林木株数变化引起的生物量的变化。这里不考虑自然生长, 自然生长已经在保留木生长部分考虑, 这里的保留率只根据前期数据计算。没有直接用株数变化来反映这种变化是考虑到林木大小不等。设  $B_{2(\text{活})}$  为在  $B_{0(\text{活})}$  中减去经过 2 a 生长后减少的那部分林木的期初生物量, 则

$$B_{2(\text{活})} = q_{\text{年}}^2 B_{0(\text{活})} \quad (7)$$

以此类推, 设调查间隔期为  $\Delta$ , 有:

$$B_{\Delta(\text{活})} = q_{\text{年}}^{\Delta} B_{0(\text{活})} \quad (8)$$

由式 (8), 有生物量年保留率:

$$q_{\text{年}} = \left( \frac{B_{\Delta(\text{活})}}{B_{0(\text{活})}} \right)^{(1/\Delta)} \quad (9)$$

式中,  $B_{\Delta(\text{活})}$  为后期样地上的全部复位样木 (保留木) 的前期生物量之和, 与式 (4) 中的  $B_{1(\text{保})}$  相同。

#### (3) 各阶段进界木生物量年生长率 $p_{\text{进}}$ 的计算。

根据后期样木数据统计进界木株数。进界木是在后期调查时确定的, 可以肯定它们在前后两次调查之间进界, 但无法确定具体在哪年进界, 所以本文假定每年的进界株数相同, 设进界木总株数为  $N_{\text{进}}$ , 则每年的平均进界株数  $N_{\text{进(年)}}$  为

$$N_{\text{进(年)}} = N_{\text{进}} / \Delta \quad (10)$$

根据后期样木数据统计进界木生物量, 记为  $B_{\text{进}}$ 。刚进界时单木的生物量根据 5 cm 胸径的林木计算, 记为  $b_0$ 。设进界木生物量的年生长率  $p_{\text{进}}$  为常数。进界木在生长期的什么时候进界无法确定, 如果进界当年的生长不计, 则系统低估, 如果进界当年按整年计, 则系统高估, 为了避免系统偏差, 本文假定进界木在一年的生长期

的中间进界,所以进界当年按生长半年计算。则进界木生物量半年的生长率  $p_{\text{进(半年)}}$  为

$$p_{\text{进(半年)}} = \sqrt{1 + p_{\text{进}}} - 1 \quad (11)$$

于是,进界生物量总量构成如下图所示:

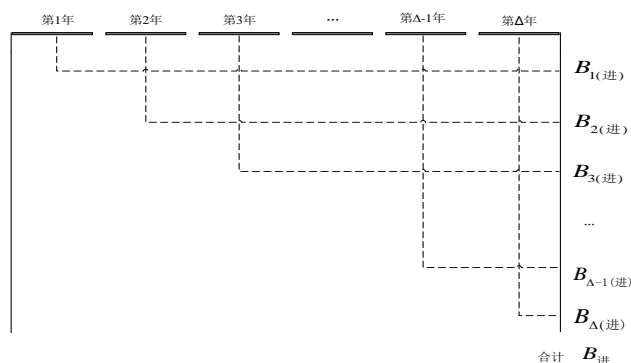


图 2 进界木的进界生物量估算示意图

Figure 2 Estimation of the biomass of ingrowth tree

即,调查间隔期第 1 年进界的林木到调查期末的进界生物量  $B_{1(进)}$  为:

$$B_{1(进)} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\Delta-1} \sqrt{1 + p_{\text{进}}} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\frac{\Delta-1}{2}} \quad (12)$$

调查间隔期内第 2 年进界的林木长到调查期末的进界生物量  $B_{2(进)}$  为:

$$B_{2(进)} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\Delta-2} \sqrt{1 + p_{\text{进}}} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\frac{\Delta-3}{2}} \quad (13)$$

调查间隔期内第  $\Delta-1$  年进界的林木长到调查期末的进界生物量  $B_{\Delta-1(进)}$  为:

$$B_{\Delta-1(进)} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}}) \sqrt{1 + p_{\text{进}}} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

调查间隔期内第  $\Delta$  年进界的林木长到调查期末的进界生物量  $B_{\Delta(进)}$  为:

$$B_{\Delta(进)} = N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

根据式 (12) 至式 (15), 可以得到调查期内进界木产生的总生物量  $B_{\text{进}}$  为:

$$B_{1(进)} + B_{2(进)} + \cdots + B_{\Delta-1(进)} + B_{\Delta(进)} = B_{\text{进}} \quad (16)$$

把式 (12) - 式 (15) 代入式 (16) 有:

$$N_{\text{进(年)}} b_0 (1 + p_{\text{进}})^{1/2} [(1 + p_{\text{进}})^{\Delta-1} + (1 + p_{\text{进}})^{\Delta-2} + \cdots + (1 + p_{\text{进}}) + 1] = B_{\text{进}} \quad (17)$$

整理得:

$$N_{\text{进(年)}} b_0 \sqrt{1 + p_{\text{进}}} \frac{(1 + p_{\text{进}})^{\Delta} - 1}{p_{\text{进}}} = B_{\text{进}} \quad (18)$$

根据式 (18) 可以计算出  $p_{\text{进}}$ 。为了用迭代的方法估计  $p_{\text{进}}$ , 将式 (18) 改写为:

$$p_{\text{进}} = \left[ 1 + \frac{p_{\text{进}} B_{\text{进}}}{N_{\text{进(年)}} b_0 \sqrt{1 + p_{\text{进}}}} \right]^{(1/\Delta)} - 1 \quad (19)$$

式 (19) 是一个关于  $p_{\text{进}}$  的非线性方程, 且无法得到它的显式解, 只能通过迭代算法得到近似解。下面讨论一种迭代解法, 即将式 (19) 改写成迭代形式:

$$p_{\text{进}}^{(1)} = \left[ 1 + \frac{p_{\text{进}}^{(0)} B_{\text{进}}}{N_{\text{进(年)}} b_0 \sqrt{1 + p_{\text{进}}^{(0)}}} \right]^{(1/\Delta)} - 1 \quad (20)$$

先估计一个初值  $p_{\text{进}}^{(0)}$ , 代入式 (20) 计算出修正值  $p_{\text{进}}^{(1)}$ , 然后将  $p_{\text{进}}^{(1)}$  作为新的初值  $p_{\text{进}}^{(0)}$  代入式 (20), 直到计算收敛, 即  $p_{\text{进}}^{(0)}$ ,  $p_{\text{进}}^{(0)}$  与  $p_{\text{进}}^{(1)}$  差值小到符合要求。

(4) 保留木年均生长率、年均保留率和进界木年均生长率的计算

若有多期复查数据, 则可以计算多个生长率、保留率等数据, 于是可以根据多个阶段数据计算一个年均生长率、年均保留率等参数。本研究中, 有 2009–2014 年、2014–2016 年、2016–2017 年三个阶段的样地复查数据, 于是可以计算出各阶段保留木生长率  $p_{0914}$ ,  $p_{1416}$ ,  $p_{1617}$ 。根据各阶段生长率, 可以计算保留木年均生长率  $p$ :

$$p = \frac{5N_{0914}P_{0914} + 2N_{1416}P_{1416} + N_{1617}P_{1617}}{5N_{0914} + 2N_{1416} + N_{1617}}$$

(21)

$N$  为用于计算生长率的样木数。同理, 生物量年均保留率、进界木生物量年均生长率的计算方法同式 (21)。

(5) 单位面积年均进界株数的计算

本研究中样地 (800 m<sup>2</sup>) 年均进界株数  $\bar{N}_{\text{进(年)}}$  计算方法如下:

$$\bar{N}_{\text{进(年)}} = \frac{N_{\text{进(0914)}} + N_{\text{进(1416)}} + N_{\text{进(1617)}}}{5n_{(0914)} + 2n_{(1416)} + n_{(1617)}}$$

(22)

式中,  $\bar{N}_{\text{进(年)}}$  是单位面积 (800 m<sup>2</sup>) 年进界木株数, 与式 (10) 的  $N_{\text{进(年)}}$  不同, 这里的  $\bar{N}_{\text{进(年)}}$  是利用 3 阶段数据计算出来的平均值, 在森林类别、龄组 2 因子联立下统计和计算。 $N_{\text{进}}$ ,  $n$  分别为各阶段进界总株数、样地数。

2 结果与分析

2.1 保留木生物量年均生长率

保留木生物量年均生长率计算结果如表 4。由表可知, 5 个树种组的保留木生物量年均生长率几乎都随着龄组变大而降低。小龄组林分中的生长率分布范围广, 随着龄组的变大, 生长率分布范围减小, 如在幼龄林中, 生长率分布从 8.61% ~ 19.86%, 在过熟林中的分布从 3.44% ~ 7.83%。从横向来看, 在公益林中同一龄组下, 软阔类和杉类树种的生长率相对高于其他树种, 硬阔Ⅱ类树种组的生长率在 5 大树种组中较低; 在商品林中同一龄组下, 硬阔Ⅰ类、杉类和软阔类 3 个树种组的生长率处于较高的水平, 硬阔Ⅱ类生长率相对较低, 这与树木自身生长特性有着直接联系, 硬阔Ⅱ类多为中生或慢生树种, 符合实际。在同一龄组、同一树种下, 对比不同森林类别, 可以看出商品林的保留木的生长率普遍高于公益林, 这也与森林分类经营的目标相一致。

由以上结果可知, 树木自身生长特性、龄组大小和森林经营方式都直接关系到林分中保留木的生长发育, 是影响林分生产力的重要因素。因此, 分树种组、龄组和森林类别进行林分中保留木的生长率计算是必要的。

表 4 三因子联立条件下的保留木生物量年平均生长率  
Table 4 Annual growth percentage of biomass of reserved tree under three-factor simultaneous

龄组	公益林					商品林				
	松类/%	杉类/%	硬阔Ⅰ类/%	硬阔Ⅱ类/%	软阔类/%	松类/%	杉类/%	硬阔Ⅰ类/%	硬阔Ⅱ类/%	软阔类/%
幼龄林	10.21	18.43	11.10	8.61	14.51	14.28	19.86	19.34	9.00	10.46
中龄林	6.24	10.50	8.76	7.22	13.58	10.98	17.25	13.06	8.68	13.57
近熟林	5.43	8.85	7.63	7.12	11.51	8.94	9.33	10.64	8.29	9.35
成熟林	5.77	6.68	5.95	5.36	9.28	6.00	8.33	10.31	7.21	8.32
过熟林	4.58	3.44	4.12	5.35	7.58	4.80	5.09	5.14	5.00	7.83

2.2 生物量年均保留率

林分生物量年保留率间接反映了林分采伐、枯损率, 即保留率越高, 林分中采伐、枯损的量越少。生物量保留率的计算结果如表 5。表 5 显示, 在公益林中, 不同树种生物量年保留率排序为硬阔Ⅰ类 (96.92%) > 杉类 (96.01%) > 软阔类 (95.95%) > 松类 (94.47%) > 硬阔Ⅱ类 (91.73%); 在商品林中, 不同树种生物量年保留率排序为杉类 (98.89%) > 硬阔Ⅱ类 (98.06%) > 松类 (97.54%) > 硬阔Ⅰ类 (97.46%) > 软阔类 (97.36%)。对比不同森林类别, 可以看出, 商品林的生物量年保留率均比公益林的高, 分析原始样木数据发现, 虽然公益林的采伐木数量不如商品林多, 但公益林中各树种的枯立木和枯倒木数量均远大于商品林的数量, 并且商

品林中采伐木数量不大,只占有所有采伐、枯损木的 17.80%,因此出现商品林的生物量年保留率大于公益林的结果。

表 5 两因子联立条件下的生物量年保留率  
Table 5 Annual retention rate of biomass under 2 factor simultaneous

森林类别	松类/%	杉类/%	硬阔Ⅰ类/%	硬阔Ⅱ类/%	软阔类/%
公益林	94.47	96.01	96.92	91.73	95.95
商品林	97.54	98.89	97.46	98.06	97.36

2.3 进界木生物量年均生长率、单位面积年均进界木株数

进界木生长引起的蓄积、株数、生物量等相关生长称为进界生长。进界生长是引起森林资源变化的主要因素之一,是森林动态变化的重要过程<sup>[20]</sup>。因此,在森林资源生长量计算中,进界木生长率、单位面积进界木株数的计算是一项重要的内容。不同林分因子联立条件下的进界木生物量年均生长率和单位面积年均进界株数计算结果如表 6 和表 7。表 6 显示,在公益林中,不同树种的进界木生物量年均生长率为松类(42.41%)>杉类(33.79%)>软阔类(34.18%)>硬阔Ⅰ类(25.11%)>硬阔Ⅱ类(24.92%);在商品林中,进界木生物量年均生长率为松类(35.09%)>硬阔Ⅰ类(30.34%)>杉类(25.20%)>硬阔Ⅱ类(21.59%)>软阔类(19.73%)。从表中还可以看出,除硬阔Ⅰ类外,公益林内其他树种的进界木生物量年均生长率都比商品林中的高。表 7 显示,无论在公益林还是商品林中,随着龄组的增大,单位面积年均进界株数逐级减少,这比较符合理论上的进界状态。从表 7 还可看出,在各龄组下,公益林中的单位面积年均进界株数均大于其在商品林中的株数。

表 6 两因子联立条件下的进界木生物量年平均生长率  
Table 6 Mean annual growth rate of biomass of ingrowth tree under 2 factor simultaneous

森林类别	松类/%	杉类/%	硬阔Ⅰ类/%	硬阔Ⅱ类/%	软阔类/%
公益林	42.41	33.79	25.11	24.92	34.18
商品林	35.09	25.20	30.34	21.59	19.73

表 7 两因子联立条件下单位面积年均进界木株数  
Table 7 Average annual numbers of in-growth tree per unit area under 2 factor simultaneous

森林类别	幼龄林/(株 800 m <sup>2</sup> )	中龄林/(株 800 m <sup>2</sup> )	近熟林/(株 800 m <sup>2</sup> )	成熟林/(株 800 m <sup>2</sup> )	过熟林/(株 800 m <sup>2</sup> )
公益林	3.76	3.11	2.82	1.88	1.37
商品林	2.67	1.81	1.57	1.31	1.10

3 结论与讨论

林分乔木层年净生产力参数的估算方法是一种结构化估算方法,解析了乔木层生产力的构成,能够最大化利用现有数据从复测样地、样木数据出发,对 4 组参数进行全面、合理的计算。计算结果为保留木的生产力、采伐木和枯死木的未测生产力、进界木的生产力的计算提供了基础参数,也能描述一个县域林分中林木资源的发展变化规律,反映不同特征林分的生长特点。

本研究计算了 4 组参数。第 1 组计算结果表明,天台县各树种组保留木生物量年生长率几乎随着龄组增大而减小;杉类、硬阔Ⅰ类、软阔类的保留木生物量年均生长率较高,硬阔Ⅱ类最低;商品林中的保留木生物量年均生长率普遍比公益林内的高。第 2 组计算结果表明,天台县公益林中的所有树种的生物量年保留率都低于商品林中的树种,可见公益林内的枯死林木比商品林多。第 3 组计算结果表明,除硬阔Ⅰ类外,公益林中的其他树种的进界木生物量年均生长率均大于商品林。第 4 组计算结果表明,随着龄组的增大,单位面积年均进界株数减少;任一龄组下,公益林中的单位面积年均进界株数均高于商品林。4 组参数的计算结果与其他相关研究对比具有较好的一致性,如本研究用到的生物量模型是关于胸径和树高的二元模型,得出的生物量生长率应和利用二元材积模型算出的蓄积生长率有较好的一致性。与相邻的仙居县主要树种蓄积量生长率<sup>[22]</sup>比较,占林分中主要部分的保留木的生物量年均生长率与对应的蓄积生长率有较好的一致性。

以各小班生物量为年初生物量,利用这一套参数与其结合,可以计算出每个小班的林分乔木层年净生产力,



并对净生产力构成进行解析,能清楚林分中保留木、采伐木、枯损木以及进界木的生产力大小,若有新的复位样地调查数据,可用上述方法进行参数的更新,以进行新的林分年净生产力估算。

对于这 4 组参数的计算,在前后两期固定样地调查数据充足的情况下也可以通过建立相关数学模型进行估算,以预测更长时间范围的生产力。如对年均进界株数的估算,一定时间内其受多种因素影响,幼树数量、林分密度、平均年龄、平均胸径等,规律性不易把握,在固定样地调查数据充足的情况下,可以充分考虑这些因子对进界木株数的影响,进行进界木株数模型研建,以便对林分生产力进行更大时间跨度的计算和预估。

在本研究中对公益林和商品林的生物量估算统一采用了浙江省重点公益林生物量模型,由于模型建模样本均选自浙江省内的公益林中,从浙江省内公益林区和商品林区的林分质量看,公益林平均蓄积量为  $53.79 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ ,商品林为  $52.11 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ ,两者差异不大<sup>[21]</sup>,且建模区域和应用区域一致,因此模型在本研究中具有较好适用性和通用性。

### 参考文献:

- [1] 孟宪宇. 测树学[M]. 中国林业出版社, 2006, 193, 298.
- [2] 徐永兴. 杉木-深山含笑混交林及其纯林乔木层的净生产力研究[J]. 浙江林业科技, 2017, 37 (01): 47-50.
- [3] 项文化, 田大伦, 闫文德. 森林生物量与生产力研究综述[J]. 中南林业调查规划, 2003 (03): 57-60, 64.
- [4] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范: LY/T 1721-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 惠刚盈, 王宏翔. 关于森林生态系统服务功能评价的思考[J]. 温带林业研究, 2018, 1 (03): 5-9.
- [6] HASENAUER H, PETRITSCH R, ZHAO M S, *et al.* Reconciling satellite with ground data to estimate forest productivity at national scales[J]. *For Ecol Manag*, 2012, 276: 198-208.
- [7] MACHWITZ M, GESSNER U, CONRAD C, *et al.* Modelling the Gross Primary Productivity of West Africa with the Regional Biomass Model RBM, using optimized 250m MODIS FPAR and fractional vegetation cover information[J]. *Int J App Earth Observ Geoinform*, 2015, 43: 177-194.
- [8] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007 (03): 413-424.
- [9] 沃笑, 吴良才, 张继平, 等. 基于 CASA 模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (09): 45-50.
- [10] BROWN S L, SCHROEDER P, KERN J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA[J]. *For Ecol Manag*, 1999, 123: 81-90.
- [11] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20 (5): 733-740.
- [12] ZHAO M, ZHOU G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data[J]. *For Ecol Manag*, 2005, 207 (3): 0-313.
- [13] 李福强, 王兴华, 陈士刚, 等. 吉林市森林固碳释氧生态效益评价[J]. 吉林林业科技, 2011, 40 (02): 10-12, 43.
- [14] ZHOU G S, WANG Y H, JIANG Y L, *et al.* Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests[J]. *For Ecol Manag*, 2002, 169 (1): 149-157.
- [15] 张茂震, 王广兴, 刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力[J]. 林业科学, 2009, 45 (09): 13-17.
- [16] 季碧勇, 陶吉兴, 张国江, 等. 林分生长率非线性混合模型的构建[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37 (01): 149-158.
- [17] 管杰然, 伊力塔, 郑超超, 等. 浙江天台公益林生物量及涵养水源效益研究[J]. 福建林业科技, 2016, 43 (04): 27-33.
- [18] 陶吉兴. 浙江森林碳汇功能监测[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 290-292.
- [19] 袁位高, 江波, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2009, 29 (02): 1-5.
- [20] 吴雨峰, 葛宏立, 邹奕巧. 基于抽样固定样地的总体进界木株数模型研建[J]. 林业资源管理, 2015 (01): 38-43.
- [21] 张豪杰, 朱巍巍, 王思娜, 等. 仙居县主要树种蓄积量生长率研究[J]. 现代农业科技, 2018 (15): 165-166, 170.
- [22] 季碧勇, 陶吉兴, 张国江, 等. 高精度保证下的浙江省森林植被生物量评估[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29 (03): 328-334.