

# 遗传改良林分生长和收获预估模型的研究进展

孙晓梅<sup>1</sup>, 张守攻<sup>1</sup>, 李凤日<sup>2</sup>, 谭希文<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 东北林业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
3. 国营清源满族自治县大孤家林场, 辽宁 清源 113305)

摘要: 随着越来越多的遗传改良材料大规模地应用于工业用材林建设, 构建能够反映改良材料本身遗传增益的生长和收获预估模型成为近年来生长模型研究的一个热点问题。本文综述了生长和收获模型的定义、分类及发展趋势, 总结了 20 多年来国内外针对不同遗传改良材料建立生长和收获模型的研究现状, 提出了遗传改良林分生长模型的研究展望。

关键词: 遗传改良林分; 生长和收获模型; 树高生长曲线

中图分类号: S711 文献标识码: A

自 20 世纪中叶数量遗传学诞生以来, 林业上一直采用数量遗传学的理论进行遗传改良材料(种源、家系、杂种组合及无性系)的早期选择及未来世代遗传增益的预测。早期选择的理论基础是假设幼年时的增益与成熟(轮伐期)时的增益存在紧密的相关关系, 但也有研究认为对于某些性状这种早晚相关关系并不总是成立的<sup>[1]</sup>, 而且早期选择的年龄一般不足半个轮伐期<sup>[2]</sup>, 也为遗传增益的预测带来一定的风险。如何利用遗传改良材料幼年的生长表现来精确预测未来林分的生长增益已成为林学家们研究的焦点。20 世纪 80 年代之后, 一些学者从生物数学的角度借助建立遗传改良材料生长模型和林分模拟系统来预估不同改良林分的生长过程, 并依此预测改良林分的遗传增益<sup>[3-13]</sup>。建立遗传改良林分生长和收获模型不仅是指导工业用材林科学经营的重要基础工作, 而且为传统的选择和遗传增益的预测提供了另一有效途径, 对于缩短林木育种周期、提高遗传改良的效率和效益具有十分重要的意义。

## 1 林分生长和收获模型研究概述

世界林联从 20 世纪 70 年代开始召开以森林生长和收获模型为主题的国际会议, 标志着森林生长和收获模型已成为国际认可的一个独立研究方向<sup>[14]</sup>。Bruce 在林分生长模型和模拟国际会议上把林分生长模型定义为用来描述林分测树因子、林分状态和立地条件等变量与林分现实生长率之间关系的一个或一组数学方程。在此之前, Avery 等<sup>[15]</sup>定义的林分生长和收获预估模型, 指根据不同立地条件、不同发育阶段的林分现状, 经一定数学方法处理后, 间接预测林分生长、枯损等方面的图、表、公式和计算机程序等。林分生长量是林分在一定期间的变化量, 收获量是林分在一定期间内生长量的累计。人工林林分生长量在很大程度上取决于

收稿日期: 2003-07-28

基金项目: 国家“十五”攻关子专题“落叶松优良品种选育及培育技术”(2002BA515B0401)的部分内容

作者简介: 孙晓梅(1968—), 女, 山东省胶州人, 助理研究员。

以下4个因子<sup>[16]</sup>: (1) 林分年龄; (2) 林地生产潜力(立地条件); (3) 对林地生产潜力的充分利用程度(林分密度); (4) 培育措施(整地、施肥、抚育、间伐等的控制)。Munro<sup>[17]</sup>认为,生长和收获模型不仅能够预估未来林分的生长和收获量,同时还能评价各项经营措施(如间伐、施肥等)的效果。

Davis<sup>[18]</sup>以建模后模拟时的输入变量作为分类原则,将生长和收获模型分为以下3类:

(1) 全林分模型: 以林分总体特征指标为基础,将林分生长量作为林分特征因子,是年龄( $A$ )、立地( $SI$ )、密度( $D$ )及经营措施等的函数。全林分模型研究的最多、应用最广。

(2) 径阶模型: 模拟各径阶内平均木的模型。径阶模型以林分特征因子及林分结构(直径分布)作为自变量来预估林分的生长动态,模型中包括净生长、进界生长和自然枯损3个模型。

(3) 单木模型: 从林木的竞争机制出发,模拟单木或林分内单株树木生长的模型。单木模型又分为与距离有关的单木模型(DDIM)和与距离无关的单木模型(DIIM)。到目前为止,无论是DDIM还是DIIM尚未找到合理的林木大小因子来反映林木所处的竞争状态。

生长和收获模型正向两个方向发展。一方面,生长和收获模型的研究近年来已从单因子的分类研究进入多因子的统一描述,从而推出了林分整体模型,并通过建立灵活性大的相容性收获模型系统来预估林分的生长和收获量<sup>[19~21]</sup>。这类模型能够满足不同决策层次的用户对模型的需求,把输出信息详尽程度不同的模型联接成结构统一的有机整体,并保证不同模型在生长及收获量预估上数值一致,避免系统内各子模型及不同因子之间由于模型的误差及模型自身的问题出现相互矛盾的结果。在研究方法上,林分生长模型的研究已从传统的回归建模逐渐向包含某些生物生长机理的生物生长模型(生物数学生长模型)方向发展。生物生长模型采用基于生物学假设推导出的理论生长方程作为基础模型,并结合业已公认的生物学规律,根据林木生长的生理生态学知识来构造模型<sup>[23,24]</sup>。这种模型具有较好的可解释性和普遍的适用性,并克服了传统回归法所建立的模型在应用时不能外延的缺点,可以合理地预估未来林分生长和收获量。另外,它不仅可以模拟林分的自然生长过程,还可以反映经营措施对林木生长的影响。

另一方面,由于生理生态学理论的发展、实验测定仪器及分析方法的改进,使得建立可解释生长原因的机理性过程模型成为可能。过程模型是与建立在回归分析基础上的经验模型相对而言的,一般以分子、细胞和器官为模拟单位,可以模拟植株的光合作用、呼吸作用、养分和水分循环等决定植物生长的生理过程,目前应用的过程模型一般以单株木或枝、干等器官为模拟单位。过程模型较之经验模型的可解释性和可移植性增强。由于树木生长机理过程的相互影响,其关系十分复杂,若用简化的数学函数进行拟合会导致估计误差偏高,限制了该类模型的实际应用,因此有学者试图将过程模型与单木模型结合起来,以此预估整个林分的生长变化。

从上述生长模型研究的二个趋势来看,过程模型虽然可以解释生物生长的某些机理,但其模型过于复杂很难在生产中应用。传统林分生长模型或生物生长模型虽说结构相对简单,但很难对森林系统干扰所产生的效果予以解释。解决的办法是:一方面尽量简化过程模型,提高其实用性;另一方面加强生物生长模型与过程模型的联接。目前,过程模型的研究应更侧重于林木的光合作用、呼吸作用、水分循环、养分循环等方面,尤其是光合作用,而树冠作为其光合的场所显得特别重要,也是链接这两类模型的主导因子。因此,在建立生物生长模型中要注意

引入树冠变量。

## 2 遗传改良林分生长模型的研究背景

以往在构建林分生长和收获模型时,多注重林分密度、整地、施肥、抚育间伐等经营措施及立地条件等环境因素对林分生长的影响,而忽视了遗传种植材料本身遗传效应的影响。随着林木遗传育种工作的发展,越来越多的遗传改良材料大规模地应用于生产实践,如果继续沿用原有的基于一般未改良林分建立的生长模型系统来预测改良林分的未来收获量势必造成很大的偏差,带来经营决策上的失误。如何在林分生长模型中体现新的改良材料引起的遗传增益已成为近年来生长模型研究的一个热点。

遗传增益的定量化研究与预测越来越受到重视。生长和收获模型与林分模拟为传统的优良材料(基因型、家系和群体)选择和遗传增益的预测提供了另一种有效途径。通过建立不同遗传材料的生长模型,根据各遗传材料的早期生长差异预测轮伐期时的选择增益,采用这种方法进行不同遗传材料的选优比传统的数量遗传学方法更简便,更准确。20世纪80年代以来,学者们开始致力于针对遗传改良林分的生长和收获模型的研究,建立了反映不同改良材料生长过程各类生长和收获模型<sup>[6-13,25-31]</sup>。

## 3 遗传改良林分生长模型的研究方法

目前,构建遗传改良材料(种源、家系、无性系等)的生长模型最通常的方法是利用已建立的种源试验林、家系子代测定林或无性系测定林的长期观测数据,研究不同遗传材料的生长过程及遗传变异,提出遗传因子与生长性状的相关关系,借助各种理论生长方程来拟合不同的林分生长过程,并以此建立能够反映遗传效应的生长和收获模型。

### 3.1 试验数据来源

生长和收获模型的模拟和适应性检验要求有长期的、连续观测的固定样地(或标准地)数据,数据间协方差结构的大量重复观测数据是获得可靠模型推理的关键。作为林木育种的基础工作,20世纪60和70年代开始大规模地开展遗传测定工作,建立了大量的种源、家系和无性系试验林,部分试验林已达或接近轮伐期,从中选出了一批生长快、材性优和抗逆性强的优良种源、家系和无性系<sup>[32-35]</sup>。这些以从大量的育种备选材料中选择优良遗传材料为目的建立的育种试验林的小区株数一般为4~16株。由于林木生长的长周期性,以及人工林培育明显滞后于育种工作,现实中缺乏以反映遗传改良林分轮伐期生长规律信息为目的建立的改良林分标准地,而且即使有这类标准地,当标准地达主伐年龄时,一部分选出的优良种植材料可能已被进一步选育的更优良的材料所替代,失去了研究价值。因此,在没有改良林分长期观测标准地的情况下,一般以子代测定林资料代替标准地数据进行改良林分的生长和遗传增益预测。Talbert<sup>[5]</sup>对该种做法提出异议,认为根据这么有限的林木株数组成的群体的表现来推断整个林分水平的生长表现,必然存在一定的局限性。Susan<sup>[36]</sup>对利用子代测定林观测数据建模的做法也提出质疑,认为子代测定林无法完全代表实际改良林分的现实增益。一方面,是因为子代测定林小区株数太少,不足以反映林木间的竞争对树木生长和大小显著影响;另一方面,因为子代测定林与改良林分存在很大的不同,典型的子代测定林包含了生长快、慢不同的基因,而改良林分则全部由优良子代组成。因此,要想真实地反映和准确地评估现实改良林分的遗传增益,必须建立改良和未改良林分对

比样地,利用标准地连续观测的数据进行分析和模拟。由于林木的育种周期较长,良种的应用大大地滞后于良种选育过程,这样的试验只见于少数针叶树的报道<sup>[37-39]</sup>。

### 3.2 理论生长方程的选择

在选择数学模型时,一般选数学上能够正确描述树木生长过程,并具有生物学含义的生长方程作为基础模型。用于构建林分生长和收获模型的理论生长方程主要有 Logistic 模型、单分子式 (Mitscherlich 式)、Gompertz 方程、Schumacher 方程、Richards 方程和 Korf 方程等。描述改良林分生长关系应用最为广泛的是 Richards 方程和 Schumacher 方程。

Richards 理论生长方程是由 Richards<sup>[40]</sup> 基于 Von Bertalanffy 生长方程扩展而来的,是根据合成代谢速率与生物体的表面积成正比、分解代谢与有机物的质量成比例的假设导出的方程。Schumacher 方程是 Schumacher 基于同龄纯林树木的生长百分比与年龄呈负相关的假设原理而推导出的一个较为简明的树木生长方程,一般采用其对数线性回归形式来描述树木生长的各种关系。

在利用上述模型拟合不同遗传材料的生长过程时,一般认为 Richards 方程具有广泛的适用性、合理的解析性和良好的预测性,比 Schumacher 对数线性方程更能反映出不同材料间生长过程的细微变化,拟合效果更好些<sup>[25,26]</sup>。

### 3.3 建模方法(模型参数估计和统计假设检验)

要想全面地研究遗传改良林分中各测树因子间的相互关系及遗传因素对林木生长的影响,必须预先做好设计,建立广泛意义的各类试验林。基于遗传测定目的试验林数据不能完全满足对各种关系进行假设检验的需要,很难单纯地根据这些有限的试验数据来推断整个轮伐期内改良林分的生长和收获量。现有的关于改良林分生长和收获模型的研究大多是利用现有的种源试验林、子代测定林或无性系试验林数据调整或验证主要影响因子之间的关系,再结合已建立的一般林分的生长模型系统来实现改良林分的生长预测以解决林分生长模拟过程中数据不足的问题<sup>[6-9]</sup>。

**3.3.1 全林分模型** 定量化遗传改良材料对林分测树因子相关关系影响的相似性或差异程度是了解改良林分生长动态过程、建立改良林分生长和收获模型的基础。林分生长的动态关系包括:(1)优势高曲线动态变化过程(树高-年龄关系或立地指数曲线);(2)林分断面积动态变化关系;(3)直径分布范围内径阶与平均高的关系(树高-直径生长关系);(4)林分密度动态变化关系(自然稀疏模型)。Buford 等<sup>[9,41]</sup> 通过比较火炬松改良林分与未改良林分树高-年龄关系、树高-直径关系、树干削度等关系,认为遗传因素导致林分生长最根本的变化是对树高-年龄关系(立地指数曲线)的影响,对遗传改良林分进行生长预测时最首要的问题是确定树高-年龄关系;Knowe 等<sup>[25]</sup> 通过比较改良林分树高和蓄积的增益更进一步说明了树高-年龄曲线是建立遗传改良林分生长模型的基础。因此,在相关文献中研究最多的是遗传因素对树高-年龄曲线的影响,然后通过种源效应或家系效应调整一般林分生长和收获模型系统中的立地指数模型,达到预测改良林分的生长和收获量的目的<sup>[9,10-12]</sup>。

树高-年龄生长模型的参数主要受环境和遗传因素的影响,应用模型预测新的遗传材料时需要模型参数进行重新估计,确定哪些参数对遗传材料的变化反应灵敏,哪些参数不受遗传因素的影响。Buford 等<sup>[25]</sup> 提出了在研究遗传因素对树高-年龄关系的影响时,需要考虑的 3 个方面:1) 相同立地条件不同种源(或家系)的树高-年龄曲线的形状是否一致;2) 如果相同立地

条件不同种源(或家系)的树高-年龄曲线的形状相同,种源(或家系)是否对曲线的渐近参数产生影响;3)如果相同立地条件不同种源(或家系)的树高-年龄曲线的形状不同,种源(或家系)是否对渐近参数产生显著影响,即采用再参数化的方法,进行多形性、渐近值等模型参数遗传效应影响的显著性检验。最后,在分析生长模型各参数与遗传因素关系的基础上,采用再参数化的方法将种源或家系等遗传效应因子引入方程,构建可变参数的立地指数曲线。

由于林木生长过程及环境的复杂性,使得参数估计成为建立生长模型的首要问题。近年来,提出了许多统计学方法来处理模型的参数估计问题<sup>[14]</sup>。Burford等<sup>[9,25,42]</sup>利用哑变量的方法将遗传效应引入树高-年龄生长方程,形成扩展模型,然后计算并比较该扩展模型和没有遗传效应的基础模型的残差平方和及自由度,以检验遗传因素对树高-年龄曲线参数是否存在显著性影响。李希菲等<sup>[43,44]</sup>应用线性统计推断理论检验了杉木不同种源对立地指数曲线的影响。Tang等<sup>[31]</sup>首次利用线性混合效应模型估计和检验了杉木种源生长和收获模型的参数。

3.3.2 单木模型 全林分模型中利用子代测定林等遗传材料的数据拟合立地指数模型来表示遗传改良林分的生长增益<sup>[9-12,25-26]</sup>。由于这类育种试验林的小区株数有限,多为单行或单株小区,与传统建立生长模型的试验数据相比,这类试验没有培育目标,缺乏立地和培育措施的代表性,林分组成的异质性导致林木间竞争的不一致,因此采用这种方法建立的立地指数曲线模型,很难具有代表性。Rehfeldt等<sup>[7,8]</sup>提出用与立地指数无关的单木生长的累积来模拟改良林分生长的方法,首先利用北美乔松(*Pinus strobus* L.)全同胞家系的遗传变异估计单木改良的遗传增益,然后根据已建立的一般单木模型预测改良林分的遗传增益。借助已建立的一般单木生长模型预测改良林分收获量的具体步骤为<sup>[7]</sup>:1)利用试验林观测数据,验证已有模型对未改良林分和改良林分生长过程的拟合效果;2)提出如何根据树木早期生长速率预测未来林分生长的遗传增益的假设;3)开展一定期间(轮伐期)内遗传增益是否存在的假设检验;4)对建立的生长模型进行遗传增益和改良林分生长过程假设反应的灵敏性评价。

Susan等<sup>[36]</sup>把遗传改良效应作为时间轴的收缩因子,提出用遗传增益乘数的概念来表示改良林分水平生长速率的变化,而不是固定单木生长的变化率。假设改良林分树高(断面积、蓄积)生长速率为一般生长模型计算速率的 $m$ 倍:当 $m=1$ 时,模型为已建立的一般模型形式;当 $m>1$ 时,模型表示为树高增长型;当 $m<1$ 时,为树高生长减缓型。根据广泛的未改良林分来反映遗传改良改变遗传增益预测的生长速率对生长模型的修正,不仅考虑了树木大小,而且考虑了影响树木大小的重要因子。该方法充分利用已建立的一般林分的生长模型系统,根据不同遗传材料的可比生长速率(或遗传增益乘数)对模型预测值进行修正,无需采用有限的遗传测定林数据重新拟合各模型参数,从而能够利用现有的生长模型预测生态区、立地质量及培育措施对林分生长的影响。

### 3.4 遗传改良林分生长和收获模型的研究结果

由于采用的遗传材料、选择的理论生长模型及研究方法的不同导致最终得出的结论也不相同。大多数研究表明不同遗传材料的树高-年龄曲线不同,树木的优势高生长是综合环境差异和遗传变异的树木表现型反映,树高的生长潜力(立地指数)随着遗传改良材料的应用而增大<sup>[9,12,13,25,29,30]</sup>。Nance等<sup>[9,29]</sup>通过比较火炬松(*Pinus taeda* L.)种源和家系的树高和年龄曲线,认为不同遗传材料的曲线形状(斜率)不变,但其水平值(截距)发生改变,即基本生长模式一致;李希菲等<sup>[43]</sup>通过对杉木不同种源的立地指数曲线研究也认为各种源的立地指数不同,但

立地指数曲线的斜率相同; Golden 等<sup>[45]</sup>的研究表明不同种源的生长模式存在差异,但这种差异并不重要;也有研究认为不同遗传材料的水平值(渐近线)也不发生改变<sup>[26]</sup>。

Rehfeldt 等<sup>[6-8]</sup>通过研究发现由遗传改良引起的生长速率的提高随时间而降低,尤其在林分达到郁闭时,林木间开始竞争,至轮伐期时可能会消失。Susan 等<sup>[36]</sup>认为断面积生长率(遗传增益乘数)即使是在纸浆材培育林中也不会出现随时间的差异。

#### 4 遗传改良林分生长模型的研究展望

现有的遗传改良林分生长模型的数据主要来自为遗传测定而建的试验林,普遍存在着小区株数过少,无法真实反映现实林分生长的问题。因此,在建立遗传改良林分生长和收获模型的研究中,没有考虑到边缘效应的影响问题;另外,要想深入、系统地研究改良林分与未改良林分的生长和收获量的差异,准确预测改良林分的遗传增益,有必要建立以反映各种遗传改良林分轮伐期内生长信息为目的改良林分与对照(未改良林分)接近现实林分生长状态的标准地,并依据标准地的长期连年观测资料模拟和评估现实改良林分的遗传增益。

由于缺乏长期定位观测的标准地资料,现有改良林分生长模型的研究多集中于不同遗传材料对树高-年龄关系(立地指数)变化影响的研究,或者是致力于现有一般模型的修正以反映改良林分生长过程,但对遗传材料组成的不同改良林分生长的动态关系缺乏全面了解。今后研究的重点是利用固定标准地资料,验证关于不同改良林分的假设,系统地开展遗传改良林分生长动态规律方面的研究(如改良林分直径和树高的分布规律、林木株数随时间的动态变化规律、林分断面积随时间的动态变化规律、改良林分生长速率随时间的变化规律、优良遗传材料林木干形等级的变化、病虫害等自然灾害对改良林分收获量的影响),探讨构建反映不同遗传改良林分生长过程的生长和收获模型的方法。

由于良种的应用明显地滞后于良种选育过程,目前遗传改良林分的生长和收获模型的研究对象主要以初级种子园生产的良种、种源为主,对家系和无性系等其它遗传育种材料的研究较少,而树种也主要集中于火炬松、辐射松(*P. radiata* D. Don)、北美乔松等针叶树种。随着优良无性系选育、规模无性扩繁及无性系育林技术的完善,无性系正成为世界工业用材林培育的主要发展方向。同一无性系各分株的遗传组成相同,生长、干形、木材材性一致,研究不同无性系间的生长差异,建立针对不同无性系(品系)的生长和收获模型为无性系的集约化经营(如确定合理的造林密度、抚育管理等经营措施)、缩短培育周期提供理论基础。

随着计算机技术、现代数学和生理生态学理论的发展,在生长和收获模型研究方法上更加注重研制可解释性、普适性强的能够反映多变条件下改良林分生长动态的兼容性林分整体模型,在研究建模方法和技术中,重视模型的估计误差,通过不断修正模型使之在模拟林分生长动态过程中保持准确的预估效果,进一步完善模型参数的估计方法(如联立方程组方法、线性或非线性混合模型方法、层次结构模型、线性或非线性度量误差模型等统计方法在建立相容性的生长和收获模型系统中的应用)。

我国开展林木遗传改良方面研究的时间较短,而能够用于提供改良林分生长方面信息的长期观测的样地更少。国内,只有李希菲等<sup>[43,44]</sup>根据杉木种源试验林数据,应用线性统计方法检验了不同种源对立地指数曲线的影响,而对其它树种、其它遗传材料(家系、无性系等)及其它林分动态规律的研究尚未见报道。因此,更需要开展遗传改良林分生长和收获模型方面的系统研究。

## 参考文献:

- [1] Lambeth C C, van Buijtenen P, Duke S, et al. Early selection is effective in 20 year old genetic tests of loblolly pine[J]. *Silva Genetica*, 1983, 32(56): 210~ 215
- [2] Falconer D S. *Introduction to Quantitative Genetics*(Ed. 3)[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1989. 438
- [3] Dutrow G F, Row C. Measuring financial gains from genetically superior trees[R]. US For Serv South For Exp Sta Res Pap, 1976. 50~ 132
- [4] Thumes J F. Predicting the effects of intensive cultural practices on optimal management strategies for loblolly pine stands[D]. Unpubl M S Thesis, Virginia Poly Inst & St Univ, Blackburg, 1980. 90
- [5] Talbert C B, Hyink D M. Implications of genetic improvement for the growth and yield of trees and stands[A]. In: Ek AR, Shifley S R, Burk T E. *Forest growth modeling and prediction*[C]. Proc IUFRO Conf, USDA For Serv Gen Tech, 1988. 562~ 571
- [6] Nance W L, Bey C F. Incorporating genetic information in growth and yield models[A]. In: Proc South For. Tree Improvement Conf [C], Starkville, MS. 1979. 140~ 148
- [7] Hamilton D A, Rehfeldt G E. Using individual tree growth projection models to estimate stand level gains attributable to genetically improved stock[J]. *For Ecol Manage*, 1994, 68: 189~ 207
- [8] Rehfeldt G E, Wykoff W R. Genetic gains in growth and simulated yield of *Pinus monticola*[J]. *For Sci*, 1991, 37: 326~ 342
- [9] Buford M, Burkhart H. Genetic improvement effects on growth and yield of loblolly pine plantations[J]. *Forest Science*, 1987, 33(3): 707~ 724
- [10] Buford M A. Height diameter relationships at age 15 in loblolly pine seed sources[J]. *For Sci*, 1986, 32: 812~ 818
- [11] Buford M A. Mean stem size and total volume development of various loblolly pine seed sources planted at one location[J]. *Can J For Res*, 1989, 19: 396~ 400
- [12] Danjon F. Observed selection effects on height growth, diameter and stem form in maritime pine[J]. *Silv Genet*, 1995, 44: 10~ 19
- [13] Schmidling R C, Froelich R C. Thirtyr seven year performance of loblolly pine seed sources in eastern Maryland[J]. *For Sci*, 1993, 39: 708~ 721
- [14] 唐守正, 李勇. *生物数学模型的统计学基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [15] Abvey T E, Burkhart H E. *Forest Measurement* (3rd Edition)[M]. New York: McGraw-Hill Book Company. 1983
- [16] 李凤日. 落叶松人工林林分动态模拟系统的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 1995
- [17] Munro D D. Forest growth models a prognosis[A], In: *Growth models for tree and stand simulation*[C]. Stockholm, Sweden, 1974
- [18] Davis L S, Johnson K N. *Forest Management*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987
- [19] Pienaar L V, Shiver B D. The effect of planting density on dominant height in unthinned slash pine plantations[J]. *For Sci*, 1984, 30: 1059~ 1066
- [20] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体模型及其应用[J]. *林业科学研究*, 1991, 4(增刊): 8~ 13
- [21] 惠刚盈, 盛炜彤, 罗云伍, 等. 杉木人工林收获模型系统的研究[J]. *林业科学研究*, 1994, 7(4): 353~ 357
- [22] Daniels R F. An integrated system of stand models for loblolly pine[D]. Virginia Polytechnic Inst and State Univ, 1981
- [23] Sommers G L, Farrar R M. Biomathematical growth equations for natural longleaf pine stands[J]. *For Sci*, 1991, 37(1): 227~ 244
- [24] 孙晓梅, 李凤日, 牛岫, 等. 长白落叶松人工林生物生长模型的研究[J]. *林业科学研究*, 1998, 11(3): 306~ 312
- [25] Knowe S A, Foster G S. Application of growth models for simulating genetic gain of loblolly pine[J]. *For Sci*, 1989, 35: 211~ 228
- [26] Sprinz P T, Talbert C B, Stub M R. Height age trends from an Arkansas seed source study[J]. *For Sci*, 1989, 35: 677~ 691
- [27] Nance W L. Simulated growth and yield of single family versus multi family loblolly pine plantations[A]. In: Proc 2<sup>nd</sup> Bienn. South Silv Res Conf[C]. Atlanta, GA, 1982. 446~ 453
- [28] Nance W L, Wells O O. Estimating volume potential in genetic tests using growth and yield models[A]. In: Proc 16<sup>th</sup> South For Tree Improv Conf[C]. 1981, Blacksburg, VA. 1981a, 39~ 46
- [29] Nance W L, Wells O O. Site index models for height growth of planted loblolly pine seed sources[A]. In: Proc 16<sup>th</sup> South For Tree Improv Conf[C]. Blacksburg, VA. 1981b, 86~ 96
- [30] Schmidling R C. Racial variation in self thinning trajectories in loblolly pine[R]. USDA For Serv Gen Tech Rep NG 120, 1988, 2: 611~ 618

- [31] Tang S, Meng F R, Bourque C P. Analyzing parameters of growth and yield models for Chinese fir provenances with a linear mixed model approach[J]. *Silvae Genetica*, 2001, 50(3-4): 140~ 145
- [32] Griffin A R, Cotterill P P. Genetic variation in growth of outcrossed, selfed and open pollinated progenies of *Eucalyptus regnans* and some implication for breeding strategy[J]. *Silvae Genetica*, 1988, 37(3-4): 124~ 131
- [33] van Wyk G. Genetic improvement of timber yield and wood quality in *Eucalyptus grandis* Maiden. Part I. Genetic parameters of growth characteristics[J]. *South African Forestry Journal*, 1990, 153: 1~ 11
- [34] Magnussen S, Yeatman C W. Predictions of genetic gain from various selection methods in open pollinated *Pinus banksiana* progeny trials[J]. *Silvae Genetica*, 1990, 39(3-4): 140~ 153
- [35] Svensson J C, McKeand S E, Allan H L, et al. Genetic variation in height and volume of loblolly pine open pollinated families during canopy closure[J]. *Silvae Genetica*, 1999, 48(3-4): 204~ 208
- [36] Susan D C, Oscar G, Judy D H. Realized gain and prediction of yield with genetically improved *Pinus radiata* in New Zealand[J]. *For Sci*, 1999, 45(2): 186~ 200
- [37] Johnson G R, Firth A, Brown P C. Value gains from using genetically improved radiata pine stock[J]. *N Z J For*, 1992, 36: 14~ 18
- [38] Cleland M. Early performance of first generation seed orchard stock at Omataroa Forest[J]. *N Z J For*, 1985, 30: 45~ 53
- [39] Eldridge K G. Genetic improvement from a radiata pine seed orchard[J]. *N Z J For Sci*, 1982, 12: 404~ 411
- [40] Richards F J. A flexible growth function for empirical use[J]. *J Exp Bot*, 1959, 10: 290~ 300
- [41] Tankersley L. Operational plantations of improved slash pine: Age 15 results[R]. In: Proc. 17<sup>th</sup> South For Tree Improve Conf, Athens, GA, 1983, 271~ 280
- [42] Neter J W, Wasserman W. *Applied Linear Statistical Models*[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Richard D. Irwin, Homewood, IL, 1985. 1127
- [43] 李希菲, 王明亮, 黄旺志. 利用线性模型检验杉木不同种源立地指数曲线模型的通用性[J]. *林业科学研究*, 1999, 12(5): 505~ 509
- [44] 李希菲, 王明亮. 杉木种源对立地指数模型的影响[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(6): 641~ 645
- [44] Golden M S. Predicting site index for old field loblolly pine plantations[J]. *South J Appl For*, 1981, 5: 109~ 114

## An Overview on Growth and Yield Projection Models for Genetically Improved Stands

SUN Xiao-mei<sup>1</sup>, ZHANG Shou-gong<sup>1</sup>, LI Feng-ri<sup>2</sup>, Tan Xi-wen<sup>3</sup>

(1 Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China;

2 Faculty of Forest Resources and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

3 Dagujia Forestry Farm, Qingyuan County, Qingyuan 113305, Liaoning, China)

**Abstract:** As a steady increase in the proportion of genetically improved materials planted in industrial timber forest and the resulting stands mature, it became great important to model the development of these stands to reflect the genetic gains of genetic improved material itself so that accurate yield forecasted and sound management decisions could be made, as well as another way for typical selection and genetic gains projection was provided. This study overviewed the definition, classification and trends of growth and yield model of stands, summarized the state-art, data source and methods of growth and yield model for genetically improved stands at home and abroad. An outlook of its development was discussed.

**Key words:** genetically improved stands; growth and yield models; height-age curve