

文章编号:1001-1498(2004)04-0413-07

应用于森林资源连续清查的生长模型系统

葛宏立¹, 孟宪宇¹, 唐小明²

(1. 北京林业大学森林资源与环境学院,北京 100083; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091)

摘要:该模型系统根据森林生长发展的内在规律设计,并用现代回归统计方法估计参数,由年龄隐含的单木生长模型、与直径相关的保留率模型(即采伐枯损模型)、以样地平均年龄及样地数为自变量的进界模型和面积模型组成。它适用于一个较大区域(如一个省)的森林资源更新和预测。它用复测的固定样地数据和复测的样木数据建模。文章给出了用江西省的连续清查数据进行建模和预测的误差分析结果。

关键词:森林资源连续清查;年龄隐含的单木生长模型;保留率模型;采伐枯损模型;进界模型

中图分类号:S757.2⁺2 **文献标识码:**A

1975年,我国建立了森林资源连续清查体系(CFI),以省为总体布设固定样地,定期进行复查。对于非复查年份的省份,往往也需要有一套关于森林资源现状的估计值;由于各省的复查年份各不相同,当国家要给出全国的某年的森林资源现状的统计值时,必须对该年为非复查年份的省份的森林资源现状数据作出估计。所以,建立连清数据的更新预测模型是十分必要的。为此我国有关学者曾根据系统动力学原理构造了森林资源状态转移仿真模型系统(简称SD模型)^[1,2]。而本文介绍的生长模型系统与SD模型相比,有二条本质的区别:一是生长模型系统是根据森林生长发展的内部规律设计构造的,二是它应用现代的回归统计方法估计参数。

1 建模背景与模型系统概述

生长模型种类繁多。近年来,强调模型的相容性与一致性,提出了应用计量经济学理论建立的方程组模型^[3]和从传统模型出发的全林整体模型^[4]。但往往越复杂的模型,其对建模数据的要求越高,而应用范围则越窄。有的模型只适用于某一类型的林分,有的甚至受经营措施和经营目标的限制。许多模型的建模数据往往需要通过典型抽样获得。而我国CFI系统的现实情况有许多方面不能满足许多模型的建模要求和应用要求,例如,样地是随机布设的,林相变化复杂且破碎,经营措施和经营目标千差万别等。如果要分森林类型和经营措施等建立模型,则要建一大群模型,无论对建模还是应用来说,都是不适宜的。所以我们只能根据我国CFI的特点建立模型。CFI数据有如下特点:(1)布设固定样地,具有复测样地和复测样木;(2)定期复查,所以需要预测的年限一般不长(一般不超过一个复查间隔期);(3)数据量大,这是任何其它研究项目都无法相比的;(4)无法提供样木(甚至样地)的精确年龄;(5)林相复杂破碎。

收稿日期:2003-07-11

基金项目:联合国UNDP项目“建立国家森林资源监测体系”(CPR/91/151)的部分内容

作者简介:葛宏立(1960—),男,浙江诸暨人,博士生,高级工程师。

前三点是有利的,后两点是不利的。而对所要建模型的要求为:(1)模型应适用于所有森林类型、所有树种、立木类型等;(2)模型的精度只须考虑总体数据的精度,而不必拘泥于样地或样木的精度。

根据我国 CFI 数据的特点和对模型的要求,本系统提出和应用了材积和直径的年龄隐含的单木模型。它不用年龄,所以避免了上述 CFI 特点的第 4 点;它是单木模型,所以基本上不受林相和立木类型(立木类型指的是林木、散生木或四旁树等)的限制,所以它又避免了第 5 点又满足对模型要求的第 1 点;它用复位样木建模,利用了 CFI 特点的第 1 和第 3 点。

对于采伐枯损的作用,提出了年保留率模型,它的含义是,一棵树经过 1 a 的生长后,还能保留多少棵(通常为一小于 1 的小数),它是直径的函数,即直径不同被采伐或枯死的可能性不一样。年保留率模型分 6 个类型估计参数:四旁树、散生木、防护林(含特用林)、松类、杉类、阔叶树类。

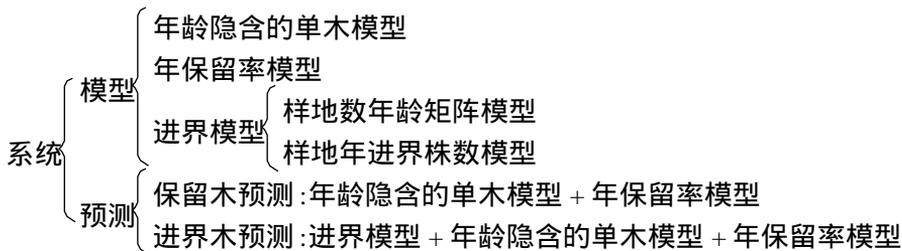
进界模型只建一个,不考虑林相、起源、林种等。进界模型包括样地年进界株数模型和样地数按年龄的转移矩阵模型,前者以样地平均年龄为自变量,估计出年龄为 A 的单个样地的年进界株数,后者估计出样地数按年龄的分布情况。样地年进界株数模型以样地平均年龄为自变量,这是基于对于单个样地来说其年龄精度可能不高,但当样地数多时,进界株数与年龄之间还能具有一个令人满意的规律这么一个事实。进界模型还考虑了采伐枯损问题,即考虑了这样一部分进界木,它们在前期复查后进界,但未到后期复查就被采伐或枯死了,在预测时,同样考虑了这个问题。所以进界模型可以估计出那些野外调查观测不到的进界木。

建立该模型系统需要有两期复查数据。

2 模型系统介绍

2.1 模型系统的框架结构

框架结构如下:



预测部分的模型组成表示预测时需要用到的模型。

2.2 模型的建立

2.2.1 年龄隐含的单木模型^[5] 该模型的形式为:

$$\hat{y}_k = y(y_0, k) = a \cdot \exp \left[\frac{-b}{k - \frac{b}{\ln(y_0) - \ln(a)}} \right] \quad (1)$$

y 可为单木直径 D 或单木材积 v , y_0 是作为预测起始点的实测值, \hat{y}_k 为 y_0 经过 k 年生长后的估计值; k 为预测年限,是自变量,根据需要输入; a 、 b 为参数。

(1) 式是从下式以年龄为自变量的模型推导而来的:

$$y + \epsilon = a \cdot \exp(-b/A) \tag{2}$$

为随机误差, A 为年龄, 其它同上。设 ϵ_0 为用模型估计 y_0 时的误差, y_k 为经过 k 年生长后的实测值, ϵ_k 为用模型估计 y_k 时的误差, 取两点 (A_0, y_0, ϵ_0) 和 $(A_k = A_0 + K, y_k, \epsilon_k)$ 代入 (2) 式有:

$$\begin{aligned} y_0 + \epsilon_0 &= a \cdot \exp(-b/A_0) \\ y_k + \epsilon_k &= a \cdot \exp(-b/(A_0 + k)) \end{aligned}$$

从此两式消去 A_0 得:

$$y_k + \epsilon_k = a \cdot \exp\left(k \cdot \frac{-b}{\ln(y_0) - \ln(a)}\right) \tag{3}$$

写成估计时的形式就是(1)式。

(3) 式是一个自变量也含误差的非线性模型, 这种模型的参数估计需用专门的方法^[6,7], 参数估计必须有成对的复测样木资料。我们分树种组估计参数, 拟合时 k 取复查间隔期 A 。

模型(1)以观测值作为自变量, 而观测值在一定程度上反映了林相、立地、立木所处的竞争状态等因子的作用, 所以用观测值作为自变量在一定程度上淡化了林相、立地、竞争等因子的影响。数据试验的结果也证实了这一点。基于这个情况, 建模型时没有区分起源、异龄林和同龄林、纯林和混交林, 林木和散生木等, 当然, 如有必要, 分别估计参数也是可以的。另外, 从模型(1)可看出, 模型的预测误差只在预测年限 k 之内产生, 当 k 为零时, 预测误差为零, 随着 k 的增大, 预测误差随之增大。当 k 为零时, 预测误差为零这一点, 以年龄为自变量的模型是做不到的。只要 k 不是太大, (1) 式对单木的直径和材积的预测精度是比较高的。

2.2.2 年保留率模型 年保留率模型为:

$$\hat{p}^{(1)} = p(D, 1) = a \cdot \exp(-b \cdot \ln(D)) \tag{4}$$

式中 $\hat{p}^{(1)}$ 为年保留率的估计值, D 为直径, a 、 b 为参数。若一棵直径为 D 的样木, 其年保留率为 0.95, 则一年以后这棵树被认为只剩下 0.95 棵。据(4)式, k 年保留率模型为:

$$\hat{p}^{(k)} = p(D_0, k) = a^k \cdot \exp(-b \cdot \ln(D_0 D_1 \dots D_{k-1})) \tag{5}$$

D_0 为预测起始点的实测值, D_1, \dots, D_{k-1} 为用年龄隐含的单本模型估计的各年的直径值。

参数 a 、 b 是根据(5)式估计的, 估计时 k 取复查间隔期 A 。先要有 $p^{(A)}$ 和 $\ln(D_0 D_1 \dots D_{A-1})$ 。 $p^{(A)}$ 这样计算: 将前期所有活立木和后期除进界木以外的活立木提取出来, 分别从小到大排序。将前期样木按一定规则划分径界(本文后面的数据实例为径阶距不小于 1 cm, 径阶内株数不少于 500), 然后用单本模型将径阶上下限值更新到后期, 统计后期与前期相对应的径阶内的株数。设某径阶前期株数为 N_1 , 后期株数为 N_2 , 则该径阶的 $p^{(A)} = N_2/N_1$ 。

2.2.3 进界模型

(1) 样地数年龄矩阵模型 该模型用以估计各年度样地数(仅包括林分、疏林地和未成林造林地)按样地平均年龄的分布状况, 该模型为一个概率转移矩阵模型。

(2) 样地年进界株数模型 模型为:

$$N_{yr} = N(A) = \frac{A^2}{C_0 A^3 + C_1 A^2 + C_2 A + C_3} \tag{6}$$

其中 N_{yr} 为样地年进界株数的估计值, A 为样地平均年龄, $C_0 \sim C_3$ 为参数。

将二次复查间隔期 A 年内的各个样地的进界株数 N 统计出来, 按下式估计参数:

$$N = N(A - A) \bar{P}^{A-0.5} + N(A - (A - 1)) \bar{P}^{A-1-0.5} + \dots + N(A - 1) \bar{P}^{1-0.5} + \tag{7}$$

这里 A 为后期样地平均年龄, \bar{P} 为估计误差, 当 $A = A - j < 0 (j = A, \dots, 1)$ 时, 令 $N(A) = 0$ 。
 \bar{P} 为总体平均年保留率, 是个常数, $\bar{P}^A =$ 后期除进界木以外的总活立木株数/前期总活立木株数, 减去 0.5 表示进界木是在一个生长期的中期进界的, 在进界第 1 年平均生长半年。

2.3 预测

2.3.1 保留木预测 保留木的单株材积用下式预测:

$$v_k = v(v_0, k) \cdot \bar{P}^{(k)} = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{k - \ln(v_0/a)}\right) \cdot a^k \cdot \exp(-\ln(D_0 D_1 \dots D_{k-1})) \tag{8}$$

(8) 式是(1)式和(5)式的乘积。直径用下式预测:

$$D_k = D(D_0, k) = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{k - \ln(D_0/a)}\right) \tag{9}$$

以上两式中的 v_0 和 D_0 为预测开始时的实测值。两式中的参数 a, b 是不同的。

2.3.2 进界木预测

(1) 进界木株数预测 今后第 $j (j = 1, 2, \dots, k, \text{下同})$ 年年龄为 A 的进界株数 N_{jA} 为:

$$N_{jA} = N(A) N_{plotjA} = \frac{A^2 N_{plotjA}}{C_0 A^3 + C_1 A^2 + C_2 A + C_3} \tag{10}$$

N_{plotjA} 为今后第 j 年年龄为 A 的样地数的估计值, 由样地数年龄矩阵模型估计而得。今后第 j 年进界的样地进界木总株数 N_j 为:

$$N_j = \sum_A N(A) N_{plotjA} \tag{11}$$

第 j 年进界的各类型的株数 $N_{j \text{类型}}$: 将 N_j 按比例分配到根据立木类型、树种、地类、权属、林种、起源等 6 个因子组合划分的类型中去。比例数据根据用于建模的复查年份的进界木株数统计。

k 年间保留的样地进界木总株数 N :

$$N = N_1 \bar{P}^{k-0.5} + N_2 \bar{P}^{k-1-0.5} + \dots + N_k \bar{P}^{1-0.5} \tag{12}$$

N 为林分、疏林地、未成林造林地样地的进界木总株数, 还需按根据复查年份统计的比例数将 N 换算到所有地类。

(2) 进界木材积和直径预测 k 年间保留的某类型的进界木材积 $V_{\text{类型}}$:

$$V_{\text{类型}} = v(\bar{v}_0, k - 0.5) N_{1 \text{类型}} \bar{P}^{k-0.5} + v(\bar{v}_0, k - 1 - 0.5) N_{2 \text{类型}} \bar{P}^{k-1-0.5} + \dots + v(\bar{v}_0, 1 - 0.5) N_{k \text{类型}} \bar{P}^{1-0.5} \tag{13}$$

\bar{v}_0 为进界时的平均材积, 是与起测径界相对应的单木材积的平均数。

各年度进界的进界木直径 D_j :

$$D_j = D(D_0, k - j + 1 - 0.5) \quad (14)$$

D_j 为今后第 j 年进界的林木生长至今后第 k 年时的直径估计值。

3 数据实例

3.1 数据来源

数据为江西省的三期 CFI 数据,复查年份为 1988 年,1991 年,1996 年。1988 年和 1991 年的总样地数为 10 455 个,1996 年的总样地数为 2 610 个,约为以前的 1/4,但样地未重新布点,只在原固定样地的基础上按规则选择了 1/4。为与 1996 年的样地数一致,将 1988、1991 年的样地中对应的 2 610 个样地挑选出来作为建模数据。1991 年与 1996 年的数据称为检验数据,其中 1991 年的数据与建模数据的后期数据相同。由于篇幅有限,主要分析活立木总蓄积和总株数的精度问题。

讨论中所谓的实测值实际上是通过抽样而对总体作出的估计值,而预测值实际上是对抽取的样本数据进行预测更新从而对总体数据作出的估计值。

由于有的类型样木数不够多,所以没有分 6 个类型估计保留率模型的参数,而是 6 个类型合在一起建了 1 个模型。

3.2 精度分析

表 1 中的建模精度是从建模数据的前期(1988 年)出发预测至建模数据的后期(1991 年),与后期的实测值比较。预测精度是从建模数据的后期出发预测至 1996 年,与 1996 年的实测值比较。

表 1 江西省 1988—1991 年的建模精度与 1991—1996 年的预测精度

项目	总株数/ $\times 10^5$ 株	总蓄积/ $\times 10^5 \text{ m}^3$	保留木株数/ $\times 10^5$ 株	保留木蓄积/ $\times 10^5 \text{ m}^3$	进界木株数/ $\times 10^5$ 株	进界木蓄积/ $\times 10^5 \text{ m}^3$
建模						
实测值	48 639	2 450	36 178	2 376	12 461	74
预测值	49 066	2 473	36 172	2 393	12 894	80
精度 误差/ %	0.9	0.9	0.0	0.7	3.5	8.2
预测						
实测值	64 158	2 770	37 600	2 574	26 558	196
预测值	58 009	2 564	35 369	2 395	22 640	169
精度 误差/ %	- 9.6	- 7.4	- 5.9	- 7.0	- 14.7	- 13.5

建模精度较高,预测精度看起来不怎么理想,而且系统偏小。由于生长模型系统是用两期复查数据建模,然后从后期数据出发进行预测,所以预测的结果完全取决于两期建模数据的变化趋势。为了对问题有深入的了解,有必要对建模数据的变化趋势和 1991、1996 年两期实测数据的变化趋势及预测值的变化趋势进行分析。

表 2 的实测值变化趋势栏表明,1988 年至 1991 年的森林资源变化趋势与 1991 年至 1996 年的变化趋势大不相同。1988 年至 1991 年蓄积量是负增长,总株数的增长量也远比 1991 年至 1996 年的小,而 1991 年与 1996 年的蓄积与株数都以较快的速度在增长。从预测值变化趋势栏可看出,总蓄积从建模数据的负增长变成了预测值的正增长,株数的增长量也有所提高。这样看来,似乎预测值的变化趋势与建模数据的变化趋势不相符,其实不是,对于趋势,不应只考虑株数或蓄积等单个因子,而应考虑森林结构变化的趋势。建模数据虽其蓄积负增长,但株

数却以较快的速度增长,其后期的单株平均材积明显比前期的小,这说明后期减少了一定数量的大径阶树木,而增加了大量的幼龄树木,因为大径阶树木材积比重大,所以蓄积还是下降了。所以建模数据的变化趋势是:总株数在增加,幼龄林比重在增大,平均单株材积在下降。由于幼龄林具有更大的生长潜力,所以这种趋势预示今后的蓄积增长速度将加快。所以预测值的变化趋势正是体现了建模数据的变化趋势。检验数据的变化趋势除了总蓄积在增大外,与建模数据的变化趋势基本相同,幼龄林的比重还在增加,平均单株材积还在下降。既然如此,为什么 1996 的预测值与 1996 的实测值相比还是系统偏小呢?这是因为,虽然趋势相同,但趋势还是有个强弱问题。这可能有林业政策变化的影响,从表 1 可看出,预测的蓄积误差的绝对量主要来自保留木,这可能就是采伐限额政策所起的作用。建模数据的总体平均年保留率为 0.94,而检验数据为 0.95,这是一个不小的差别。生长模型系统对于政策变化而引起的森林资源的变化不具有预测功能。如此分析,模型系统对 1996 年的预测值能达到这样一个精度,已是一个令人满意的结果。

表 2 江西省 1988、1991、1996 年实测值与预测值的变化趋势分析

项目	年份	实测值变化趋势			年份	预测值变化趋势		
		总株数/ $\times 10^5$ 株	总蓄积/ $\times 10^5 \text{ m}^3$	单株材积/ m^3		总株数/ $\times 10^5$ 株	总蓄积/ $\times 10^5 \text{ m}^3$	单株材积/ m^3
建模 数据	1988	43 720	2 479	0.056 71				
	1991	48 639	2 450	0.050 37				
	(年增长)	1 640	- 10					
检验 数据	1991	48 639	2 450	0.050 37	1991(实)	48 639	2 450	0.050 37
	1996	64 158	2 770	0.043 17	1996	58 009	2 564	0.044 20
	(年增长)	3 104	64		(年增长)	1 874	23	

建模数据和检验数据的实测值都表明幼龄林的比重在不断增加,这说明生长在不断加快。表 3 所示的蓄积预测值及年增长量正说明了这个情况。

表 3 江西省 1991—1996 年蓄积预测值的加速生长情况

年度	1991(实)	1992	1993	1994	1995	1996
预测值/ $\times 10^5 \text{ m}^3$	2 450	2 462	2 480	2 503	2 531	2 564
年增长量/ $\times 10^5 \text{ m}^3$		12	18	23	28	33

4 讨论

本文介绍的应用于森林资源连续清查的生长模型系统能较好地描述一个较大区域(例如一个省)的森林资源的内在的发展变化规律,从而也具有较好的预测功能。年龄隐含的单木模型避免了使用年龄的问题,提高了预测精度,同时基本具有年龄模型的一些性质。进界模型可以估计出那些仅通过野外调查观测不到的进界木。建立模型系统的条件是要有复查的固定样地和复测样木数据,这在我国绝大多数省区已经满足。模型系统充分利用了我国 CFI 的有利条件,尽量避免不利因素。它在我国 CFI 中具有推广条件和推广价值。

模型系统是以两期建模数据的内在结构变化趋势为基础往后进行预测或更新的,当以后林业政策、经营措施等发生重大改变时,这个结构变化趋势将会发生较大改变,对这种改变,模

型不具有预测功能。如果模型系统能增加一个接纳建模数据以外的其它信息的功能,那么系统就会增强对政策、经营措施的变化适应能力。

在模型的细节方面,年保留率模型值得进一步研究。现在的年保留率模型(4)式是随直径 D 的增大而单调下降的(因为一般小于零),这样直径越小,保留率越大。这在有些情况下是不符合实际的。当竞争较激烈时,小直径的林木枯损的可能性更大。所以可以考虑一个更具灵活性的模型,它可以是单调下降的,也可具有一个单峰。在数据条件许可时,也可考虑将保留率模型分为枯损模型和采伐模型。

如果数据条件具备,进界模型也可分人工林、天然林、同龄林、异龄林等因子来建。

参考文献:

- [1] 项小强. 系统逼近理论在SD模型参数调试中的应用[J]. 林业资源管理, 1990(4): 44~47
- [2] 于政中. 数量森林经理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995. 305~349
- [3] Borders B E. Systems of equations in forest stand modelling[J]. For Sci, 1989, 35: 548~556
- [4] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及其应用[J]. 林业科学研究, 1991, 4(增): 8~13
- [5] 葛宏立, 项小强, 何时珍, 等. 年龄隐含的生长模型在森林资源清查中的应用[J]. 林业科学研究, 1997, 10(4): 420~424
- [6] 唐守正. 利用对偶回归和结构关系建立林分优势高和平均高模型[J]. 林业科学研究, 1991, 4(增): 57~62
- [7] 王瑜, 李希菲. 密度-直径关系研究中变量变换形式的选择和变量误差矩阵的估计[J]. 林业科学研究, 1996, 9(6): 568~572

Growth Model System for Continuous Forest Inventory

GE Hong-li¹, MENG Xiaoyu¹, TANG Xiaoming²

(1. College of Forest Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Forest Resource Information Technique, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: The Growth Model System was developed for data updating and forecasting of the National Continuous Forest Inventory. It was designed based on the inherent forest growth laws and its parameters were estimated by the modern regression methods. It was composed of the age-implicit tree model, the diameter related survival rate model, the age and number of plots based ingrowth model, and the area model. It was suitable for forest resources updating and forecasting for a large region, for example, a province. Data of re-measured plots and trees were needed for the system development. A study case of Jiangxi Province with detailed error analyses was given.

Key words: continuous forest inventory; age-implicit tree model; survival rate model; cut and mortality model; ingrowth model