

FORECAST 模型的原理、方法和应用

接程月¹, 辛贊红¹, 信晓颖¹, 江洪^{1,2}, 魏晓华³

(1. 浙江林学院 国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 3. 不列颠哥伦比亚大学 地球与环境科学系, 不列颠哥伦比亚 基隆那 V1V1V7)

摘要: 数学模型是一个重要的工具, 可以很好地帮助科学家和政府决策人员进行规划和预测。最近几十年来, 数学模型、经验模型和基于过程的计算机模型的大量涌现, 为现代生态学的发展做出了巨大的贡献。其中森林生态系统过程模型就是一类非常重要的林业模型。FORECAST 模型, 是一个基于森林生态系统过程的林分水平模型。它可以模拟多种管理策略对森林的影响, 而且能够预测森林生态系统结构和功能的未来发展趋势, 帮助我们制定合适的管理策略, 为森林生态系统的优化管理服务。主要从 FORECAST 模型的发展概况、原理、方法和实际应用, 并针对目前该模型的优势和局限性进行了简介。图 2 表 1 参 14

关键字: 森林生态学; FORECAST 模型; 森林生态系统; 森林管理; 趋势预测

中图分类号: S711; Q957.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)06-0909-07

Principle, method and application of FORECAST model

JIE Cheng-yue¹, XIN Zan-hong¹, XIN Xiao-ying¹, JIANG Hong^{1,2}, WEI Xiao-hua³

(1. International Ecological Research Center, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Earth System Scientific Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3. Department of Earth and Environmental Sciences, University of British Columbia (Okanagan), Kelowna V1V 1V7, British Columbia, Canada)

Abstract: Mathematical model is an important tool to help scientists and good government policy makers with planning and forecasting. In recent decades, large number of mathematical models, experience models and models based on the process have emerged, and made tremendous contributions to the development of modern ecology. Model of forest ecosystem processes is a very important forestry model. FORECAST is a model based on the process of forest ecosystems stand level. It can simulate a variety of effects that management strategies impose on forests, predict the development trend of the structure and function of the forest ecosystem and help us formulate appropriate management strategies for forest ecosystems optimizing management services. This article makes a simple introduction to the development of FORECAST model, principles, methods and practical applications, and its strengths and limitations. [Ch, 2 fig. 1 tab. 14 ref.]

Key words: forest ecology; FORECAST model; forest ecosystem; forest management; trend predict

模型是人们对真实世界的抽象或简化, 是人们认识和研究自然现象不可缺少的工具^[1-4]。目前, 在林业和森林生态学的研究中, 由于规划和预测的需要, 人们建立了大量的数学和计算机模型^[5]。如对于森林动态进行模拟的林窗模型家族, 对于植被动态进行模拟的 DGVM(dynamics global vegetation model)模型框架, 基于过程的生物地球化学循环模型 DBSM(dynamics biogeochemical simulation model)

收稿日期: 2008-10-15; 修回日期: 2009-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40671132); 科技部国际合作项目(200831810); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2005CB422207, 2005CB422208); 科技部数据共享平台建设项目(2006DKA32300-08)

作者简介: 接程月, 从事森林生态模型等研究。E-mail: iamjcy@126.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士生导师, 从事生态系统生态学、环境遥感、生态模型与模拟等研究。E-mail: hongjiang.china@gmail.com

体系；还有一些综合的模型，集成了多种模拟功能，可以在优化管理的模式下，综合模拟生态系统结构与功能的变化，其中森林生态系统模型就是其中的一类^[6-7]。FORECAST全称Forestry and Environmental Change Assessment，是一个基于森林生态系统林分水平的模型。该模型是在系统研究了森林生物产量与林分结构、演替阶段、营养运输途径以及各种经营管理措施之间的相互规律后，基于森林经营的生态学原理基础上开发的。FORECAST模型的主要价值在于对预测未来生态系统的发展趋势和对转换不同的森林管理策略可能造成的结果进行排序。限于各方面的条件，我们不能精确地预测森林生态系统在一种特定的管理措施下，于100 a后将是什么样子，但是如果我们的模型相当准确，那么我们就能够找出各种需要的可选方案和预测未来森林的生长和主要分布区的变化。这种模型的另外一个价值在于可以启发我们探索真实世界的复杂性，辨别资料和信息的欠缺，指导我们以后的研究、数据监测与存储，以及优化管理的计划。然而，应用者应该注意到如下的问题：模型也可能提供偏见，模型也很难预测未来干扰造成的危险和我们需要的对生态系统价值非常精确的推论结果^[3,6,8]。

1 FORECAST模型的发展概况

随着对木材和非木材的需求稳步上升和全世界对可持续理念的追求，提高森林管理策略对森林作用结果的预测的需求比以往任何时期都大。20世纪，蓄积年龄曲线、高度年龄曲线和产量表一直是林业科学家预测未来产量的基础。这个生物产量表方法对涉及到的物种以及关于生长阶段的生物和非生物生长条件的预测是有效的。但是，如果未来管理制度发生变化，人类作用于环境导致环境发生改变（例如气候变化、大气化学成分的变化），或者通过改变土壤肥力而改变了未来的生长条件，那么这种方法的预测可能是不正确的^[9-11]。另外，这些基于生长和产量的经验模型不是被设计用来反映各式各样木材和非木材森林产品价值的未来趋势。而且这些基于生长和产量的经验模型不能提供合适的基础以比较不同森林管理策略对多种资源价值的影响，也不适合多种可持续性的方法在林分水平上的分析。

由于这种传统的预测生长和产量的方法不灵活，最近，研究者把兴趣转向机制模型研究。这些基于过程的模型构成了树木（林分）生长的一系列独立变量和因变量之间实证所得的关系。然而大部分这类模型不是生态系统水平上的模型，而且很少被运用在林业实际生产中。这主要因为我们对关键的生态系统过程和它们的相互关系没有足够的了解，故不能对森林生长作出精确的预测。因此，混合方法对生产力的预测被建立起来，这种方法试图结合上面2种方法的优势，克服它们的薄弱之处。FORECAST模型就是在此需求下产生的，被设计用来评估采伐对长期立地生产力的影响的模型。

FORECAST模型的起源是关注于改变土壤有机物和营养库的层面上，保持树木生长和木材的收获产量。FORECAST模型也检验林分水平上经济和能量收益——消耗比率的社会价值、就业和碳预算（碳固定、存储和释放）。FORECAST模型由加拿大森林生态学家Kimmens在FORCYTE模型的基础上发展而来。FORCYTE模型是以林分群体特征及林地养分循环为基础的森林生态系统管理模型，使用者输入有关的森林生态系统的林分特征、林下植被、苔藓、土壤及林分内养分循环的数据信息，模型可以提交出林分生长、林地养分变化的趋势文件^[12]。用户以此趋势文件为基础，通过施以不同的经营措施进行模拟，得到一个最佳的森林经营方案以供参考。而FORECAST克服了FORCYTE的缺点并发展了其优势。在以后的发展中，FORECAST还将增加水分和气温的模拟，以使模型更加适应长期的气候变化模拟研究。

2 FORECAST模型的原理和运行

2.1 FORECAST模型的原理

FORECAST建立在整个森林生态系统的物质生产和养分循环规律的基础上。一个森林生态系统的生产力大小取决于该系统的叶量和光合效率情况^[10]。对于某一个特定的树种来说，光合效率的高低取决于光照条件和叶片中的氮素含量2个因素。氮素含量的多寡则由系统养分循环（包括植物的吸收、在植物体内的运输和转化、通过凋落物回复到土壤表面以及回复的营养元素的矿化和固定过程）

状况的好坏来决定的。叶片中的氮素含量是一个能反映系统的物质生产、养分循环以及环境的良好的综合性指标^[15]。因此, FORECAST 模型的驱动机制就是叶氮同化率(FNE)。它从输入数据中计算获得。所谓叶氮同化率是指叶片中单位质量的氮素在单位时间内所同化产生的干物质量^[13-14]。这与 Ågren (1983) 的氮生产力的概念很相似(叶氮生产量/叶氮质量), 即:

$$E_{fn} = \frac{P_t}{N_f}。$$

而:

$$P_t = \Delta B_t + E_t + M_t, \quad N_f = B_f \times N_c。$$

其中: P_t (total net primary production) 为单位时间内净初级生产总量; ΔB_t (ΔBiomass) 为单位时间内生物量的增量; E_t (ephemeral litter fall) 为单位时间内的凋落量; M_t (mortality) 为单位时间内的枯损量或自然稀疏量; N_f (foliage nitrogen) 为叶中的氮量; B_f (biomass foliar) 为系统的叶量; N_c (foliage nitrogen concentration) 为叶中的氮的浓度。

在实际的林分中, 由于林冠下部的叶片受到上部叶片的遮蔽作用, 所以其光合有效效率会有所下降。因此, 在具体应用时就需要对其进行修正。我们通过将林冠层模拟成“不透光层”来表示上层叶片对下层叶片的遮蔽作用。修正后的叶氮同化率我们称之为遮阴纠正叶氮同化率(shade-corrected foliage nitrogen efficiency, 简称 E_{scfn})。即:

$$E_{scfn} = \frac{P_t}{N_{scf}}。$$

而:

$$N_{scf} = \sum_{i=1}^n (N_{fi} \times C_i)。$$

其中: N_{fi} 为在林冠部第 i 个 25 cm 高度叶层的叶氮量, C_i (即 $PLSC_i$) 为在林冠部第 i 个 25 cm 高度叶层的叶氮量处的光合作用光饱和曲线值; n 为表示林冠层以 25 cm 为一层, 共划分出的总层数。模型的原理见图 1。

2.2 FORECAST 模型的结构

FORECAST 模型运用的是将生物产量表方法和过程模拟方法相结合的混合模拟方法。图 1 描述的是 FORECAST 模型模拟的主要部分和转变过程, 其驱动函数是植物的叶氮效率, 具体的输入数据将在下一部分详细介绍。

其基本的经验数据包括林木生长数据(TREEDATA), 林下植被数据(PLANTDATA), 地被物数据(BRYODATA)和土壤数据(SOILDATA)被输入到程序中“设置”子程序的林木生长模块(TREEGROW), 林下植被生长模块(PLNTGROW), 地被物生长模块(BRYOGROW)和土壤模块(SOILS)中, 程序利用这些信息得到一系列模拟规则和数值, 其各自输出 2 种类型的文件, 一种是生长变化趋势文件(TREERND, PLANTRND, BYROTRND 和 SOILRND), 模型规则和等级评估的特性包含在 TRND 输出文件中, 这些趋势文件同时又作为 FORECAST 继续运行的输入文件。第 2 种是检测性的图形文件(TREEPLOT, PLANTPLOT, BRYOPLOT 和 SOILPLOT), 用户可以从这些输出文件中评价设置程序的应用, 检查输入数据的质量, 了解被持续运用在生态系统模拟程序输入中的数据的特性。其中土壤数据(SOILDATA)设置也生产一个初始状态(INITSTATE)文件, 存放在 ECOSTATE 中作为待模拟生态系统的初始状态, 用来连接生态系统的专门运行, 对有机物和养分含量的初始值进行描述, 为以后的运行打开一个开端^[12](图 2)。

从模型的“setup”(设置)模块产生的输入文件与描述生态系统状态和经营措施的数据文件一起被输入到“ECOSYSTEM”(生态系统模拟)文件中进行生态系统模拟。此模拟在“ECODATA”(生态系统数据)文件的控制下运行。这个文件在其他的模型中类似于“调度程序”(或者是日程安排程序)文件; 它定义初始地点的性质, 植物群落的物种组成以及运行条件; 它描述对生态系统施加影响的运行的各种管理选项和持续时间。其中模拟产生的 ENDSTATE 文件用来定义该系统的最终状态, 可以转入

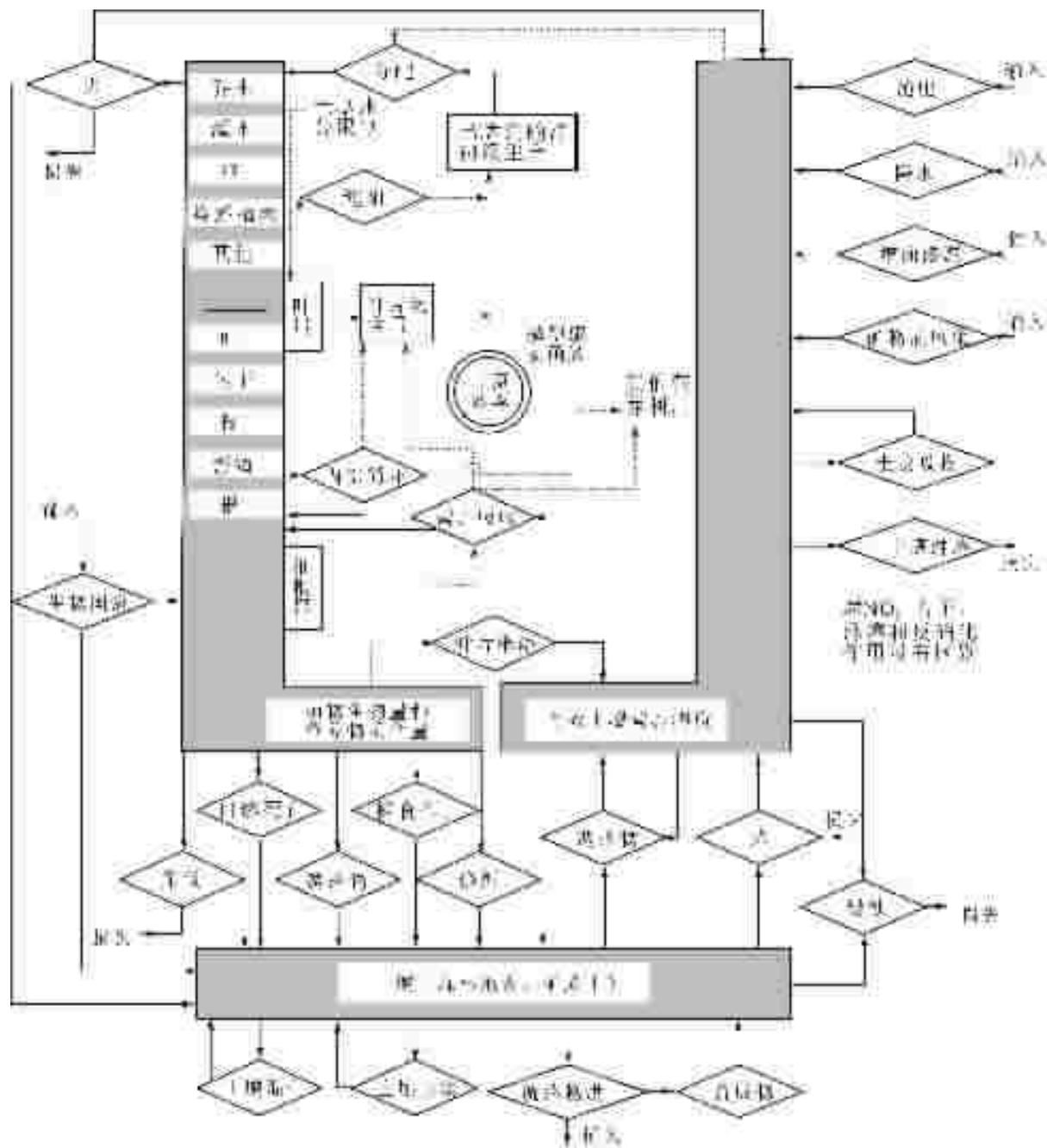


图1 FORECAST模型模拟的主要部分和转变过程的一幅流程图^[12]

Figure 1 A schematic of the major ecosystem compartments and transfer pathways represented in FOCECAST

ECOSTATE文件中作为下一次运行时系统的初始状态。最终的输出文件有2种：图形文件和表格文件(图2)。输出的文件被反馈给“NAVIGATOR”浏览器输出操作程序以供检查以及打印由生态系统模型运行出的结果。整个的模型用户之间的相互作用通过“FORECAST NAVIGATOR”软件进行操控，此软件可以方便地进入，进行数据编辑和程序运行，并设定产生和分析输出的图表^[12]。

2.3 FORECAST模型的数据结构

模型要求的输入数据是：树木高度，林分密度，树干径级频数，林木各器官生物积累(包括有效材积、树皮、树叶和根的生物量)，不同立地条件下林木的最大密度，阴生叶和阳生叶光合强度随光照强度的变化，各器官的养分含量，大气养分输入，树干截流，凋落物的降解速率等其他的林分和土壤特性^[12]。

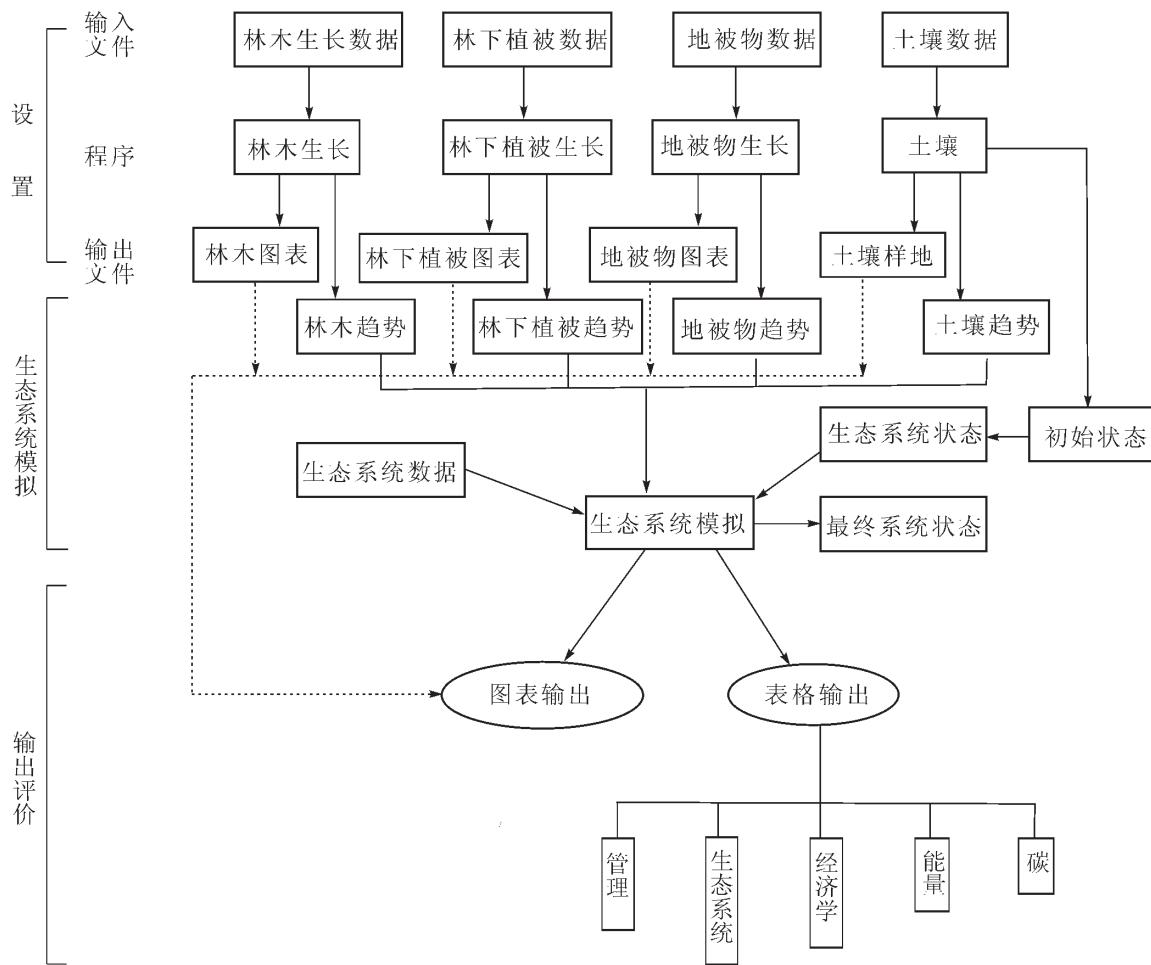


图 2 FORECAST 模型结构中设置程序、数据文件和管理文件的一幅流程图^[12]

Figure 2 A flowchart of the setup programs,data files, and management files that are contained within the forecast modeling structure

这些和确定的其他主要的可选数据被用在一个设置程序中，以建立林冠功能，资源配置，营养吸收、需求和内部循环，与遮光相关的树木和枝的死亡以及树木大小频数的各种指标。它们也提供了一系列模拟规则，指导树木生长和各种生态过程怎样随着土壤营养利用率的变化而变化。这些设置程序的输出建立了生态系统模拟和管理或者自然干扰计划模拟程序的模拟规则。

在数据设置方面，FORECAST 模型要比林窗模型的要求高，因为林窗模型的数据设置的预备工作是在模型的外部被完成的，而且一般的用户不会结合实际的数据校准模型。但是，FORECAST 模型则要求对数据进行校准，并结合数据校准模型。校准中要求的细节取决于用户的模拟目标、被模拟的生态系统类型和物种类型以及校准数据的有效性。

2.4 FORECAST 模型的模拟和运行过程

FORECAST 模型模拟草、灌木和乔木之间对于光照、营养和水分之间的竞争，它还可以表现苔藓类植物在营养循环中的所扮演的角色。它可以模拟从生态系统中由地球化学循环造成的营养输入和损失；可以模拟生态系统中通过凋落物、树干截流、再生产、草食动物取食、树木死亡、森林管理活动（例如林木自疏和树木修剪）以及有机物分解的营养流通；可以模拟通过植物内部循环的营养保留。所有的基于林分水平上的主要的森林管理实践都可以被模拟：整地（通过火烧或者是机械方法），林木更新（通过植树、天然下种或者植被的再生产）、控制作物树木和非作物树木之间的竞争（除草），林木密度的控制（间距布置、未长成商品材前疏伐和间伐），修剪整枝，施肥，商业材疏伐，最终收获（通过皆伐、渐伐或者通过有选择地采伐管理不同年龄的树木），轮作，利用，未处理木质碎屑（CWD），枯立木和风倒木的保留。自然干扰（例如风、火和昆虫等的破坏）都可以在模型中被呈现。其主要部分如

图1所示。

3 FORECAST 模型的应用

目前, FORECAST 模型在全球的森林系统中, 已经在加拿大、英国、挪威和中国等国家中运用(表1)。以加拿大不列颠哥伦比亚省的黑松 *Pinus thunbergii* 林为例, 介绍 FORECAST 模型的模拟结果。Wei 等^[4](2000)曾运用 FORECAST 模型作为一个工具模拟不同的管理策略对不列颠哥伦比亚省中部黑松林长期立地生产力的影响。结果显示对保持黑松林的长期立地生产力的可持续管理策略应该是 80~120 a 的轮伐长度, 不管是茎干采伐策略还是全树采伐策略均应如此。然而, 更多营养保留的茎干采伐策略可以比全树采伐策略获得更高的生产力(3.5%~8.5%)。在240 a 的模拟中, 疏伐策略(从 4 000~1 000 株·hm⁻²)没有提高总生产力。但是疏伐可以增加驯鹿 *Rangifer tarandus* 的栖息地价值。最好的疏伐策略需要在更广阔的环境背景下对驯鹿的各种放养水平对森林的影响进行进一步的模拟。模拟同时显示, 有机物和地下木质残骸对能否保持黑松林长期立地生产力在研究范围内是有争议的, 而且有机物和地下木质残骸的重要搬迁可以引起产量的下降。另外, Bi 等^[13]还利用 FORECAST 模型模拟了中国人工杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林产量的下降和土壤退化。在中国, 杉木是最重要的用材树种之一, 占东南部总的用材林种群的 60%~80%, 它占中国经济木材产量的 20%~25%。所以杉木种群产量的下降和土壤的损耗已经引起了广泛的关注。FORECAST 模型模拟表明, 在 3 个连续的轮伐期之后茎干的生物量出现连续的下降。它预测了杉木林长期的发展趋势, 模拟的结果对整合一系列的预测研究数据和确定今后的研究项目和方向有重要的启发作用。虽然在预测的过程中 FORECAST 对胸径的预测值还有一些偏差, 但是, 它在模拟上的灵活性和适应性仍然值得应用, 并在应用中不断被校准和完善^[13]。

表 1 目前 FORECAST 模型应用的实例^[14]

Table 1 Current applications of the FORECAST model

地点	项目	应用	
加 拿 大	Arrow TSA	Arrow IFPA	混合林分中生长和产量的动态; 长期立地生产力; 非木材价值的指示器; 碳平衡。
	Canfor TFL 48	SFM 计划	混合林分中生长和产量的动态; 长期立地生产力变化; 非木材价值的指示器; 碳平衡。
	阿尔伯塔省	油砂开垦	生态系统恢复; 长期立地生产力变化。
	萨斯喀彻温省	北方混交林管理	白杨和云杉混合林分中生长和产量的动态; 经济分析; 决策支持工具。
英国	植树造林		收获对锡特卡云杉林的影响; 长期立地生产力变化。
挪威	植树造林		收获对挪威云杉林的影响; 长期立地生产力变化
中国	植树造林		收获对中国杉木的影响; 长期立地生产力变化。

4 FORECAST 模型的优点和局限性

FORECAST 模型系统的一个突出优点在于它不仅是某一立地条件下某一立地树种的计算机模型, 而且是一个框架模型。它有一个模块化的结构, 能够对不同林分类型进行模拟研究, 如混交林、人工同龄林和混农林业等, 只要适当地利用它的数据文件, 输入有关参数, 便能对所研究的系统做出比较好的预测。

与所有的模型一样, FORECAST 模型在其应用中有一些局限性。例如, 在 FORECAST 模型中, 许多土壤过程的表示相对简单。土壤范围、土壤混合和根分配表示的缺乏限制了 FORECAST 模型解决土壤压实和土壤侵蚀问题的能力。模型的方法对评价单位时间内的凋落量可以导致在模拟开始的几个时间段里对凋落物的过高评价, 这可能造成模拟早期遮光校正叶氮效率有过高的值。但是早期对凋落物速率的过高评价, 只是被应用在一个非常小的生物量中, 因此在轮换长度模拟方面涉及的失误应

该比较小。虽然在 FORECAST 模型中树木林冠作为“不透明层”的设定对模拟个体树木生长、疏伐反应、农林复合、间伐和混合年龄林分管理造成了一些困难，不过迄今为止的这些模拟和经验表明，作为一个林分生态系统管理模拟器，FORECAST 模型在它预定的框架里完成了预测，并实现了大部分设计目标。

参考文献：

- [1] JIANG Hong, PENG Changhui, APPS M J, *et al.* Modeling the net primary productivity dynamics of temperate forest ecosystem with a GAP model [J]. *Ecol Model*, 1999, **122**: 225 – 238.
- [2] PENG Changhui, JIANG Hong, APPS M J, *et al.* Simulating the effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in Central Canada using a process model [J]. *Ecol Model*, 2002, **155**: 177 – 189.
- [3] WEI Xiaohua, KIMMINS J P, ZHOU G. Disturbances and sustainability of long-term site productivity in lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia—an ecosystem modeling approach [J]. *Ecol Model*, 2003, **164**: 239 – 256.
- [4] WEI Xiaohua, LIU W, WATERHOUSE M, ARMLEDER H. Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forests of the central interior of British Columbia [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **133**: 217 – 229.
- [5] JIANH Hong, APPS M J, PENG Changhui, *et al.* Modeling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **169** (1): 65 – 82.
- [6] KIMMINS J P. *Forest Ecology* [M]. 3rd Edition. New York: Person Education, Inc. Prentice Hall, 2004: 635.
- [7] 刘平, 马履一, 段勘. 森林动态计算机模拟模型研究[J]. 世界林业研究, 2007, **20** (3): 45 – 50.
LIU Ping, MA Lüyi, DUAN Jie. Study of forest dynamic computer simulation model [J]. *World For Res*, 2007, **20** (3): 45 – 50.
- [8] SEELY B, WELHAM C, KIMMINS H. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **169**: 123 – 135.
- [9] KIMMINS J P. Community organization: methods of study and prediction of the productivity and yield of forest ecosystems [J]. *Can J Bot*, 1988, **66**: 2654 – 2672.
- [10] KIMMINS J P. *Scientific Foundations for the Simulation of Ecosystem Function and Management in FORCYTE-11* [R]. Vancouver: University of British Columbia. Faculty of Forestry. Department of Forest Sciences, 1993: 3 – 7.
- [11] KORZUKHIN M D, TER-MIKAElian M T, WAGNER R G. Process verse empirical models: which approach for forest ecosystem management? [J] *Can J For Res*, 1996, **26**: 879 – 887.
- [12] KIMMINS J P, DANIEL M, BRAD S. Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST [J]. *Ecol Model*, 1999, **122**: 195 – 224.
- [13] BI J, BLANCO J A, KIMMINS J P, *et al.* Yield decline in Chinese fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity [J]. *Can J For Res*, 2007, **37**: 1615 – 1630.
- [14] WELHAM C, SEELY B, KIMMINS J P. 2001. *Bringing Biology into Growth and Yield: An Overview of the Ecologically Based Forest Growth Model*, FORECAST[EB/OL]. 2008-8-15[2008-09-01]. <http://www.siferp.org/pubs/link/v3iss2/article6.asp>.