

森林生态学

东北林业大学出版社基金资助出版

建模与仿真

葛剑平 编 著



东北林业大学出版社

森林生态学建模与仿真

葛剑平 编著

东北林业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了森林生态学建模与仿真的基本概念、数学理论、量纲分析、模拟程序和语言,以及建模的基本原则和理论,从多个方面对森林生态学模型进行了分类,选择当前较为著名的各类模型进行剖析,评述了各类模型的建模理论、方法、应用范围及存在的问题;对林隙模型进行了改进,并应用于红松林结构和动态过程的模拟;最后综述了现代森林生态学建模研究的概况和发展趋势。

本书可供从事森林生态学、植物生态学和森林经营学的研究人员阅读,亦可作为林业院校相关专业研究生的教材和参考书。

森林生态学建模与仿真

Senlin Shengtaixue Jianmo Yu Fangzhen

葛剑平 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨和兴路26号)

黑龙江省教委印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 11 字数 275 千字

1996年12月第1版 1996年12月第1次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81008-745-2

Q·56 定价: 18.00 元

序

生态学模型是生态学宝塔顶上光彩熠熠的明珠，因为它是根据生态学规律和原理采用数学方程式来表达、阐释或模拟生态系统的格局、结构、过程及其与环境因子相互作用的一个系统。80年代以前的生态学模型尚处于雏形阶段，常常是一个原理性的抽象数学公式或是少量低维度变量的矩阵，它们实质上是一些简单的物理公式。80年代中期之后，多变量、多维度、非线性、偏微分方程、时间序列分析等多种复杂的数学模型被用来计算、模拟和仿真生态系统及其过程，企图阐明和表达更复杂的生命系统与生态机理，尤其是对全球变化的研究更使生态学模型提高到前所未有的水平，其发展速度令人目不暇接。一系列不同空间尺度和动态的生态学模型精彩纷呈、层出不穷，在短短的10年左右就发展和经历了3~4代。目前生态学家所致力于研制的“动态全球植被模型”(DGVM)就是最新一代生态学模型的代表和发展趋势。生态学模型发展和更新的这种高速度是与计算机的计算速度、分析能力、贮存容量和显示能力的迅猛发展相联系的。

在生态学模型日新月异发展的时刻，我很高兴见到葛剑平博士编著的《森林生态学建模与仿真》一书的出版。书中介绍了近20余年来有关森林生态学模型的进展，并做了简明而确切的评述，无疑将对我国森林生态学的发展产生很好的促进作用，尤其是对有意在生态学模型方面发展的研究者将会有很大的参考意义。我在粗读书稿之后已感到受益匪浅，因而十分愿意为这部著作作序，并将它介绍、推荐给我国的生态学家和青年学生。

由于生态学模型仍在不断发展中，目前已发展到与遥感、地

理信息系统和全球定位系统相结合,以及“虚拟现实”的发展阶段。此外,发展有中国特色的生态学模型已迫在眉睫。因此,我期待着在不久的将来还能见到葛剑平博士此书的修订版。

张新时

1996年10月20日于北京

前 言

森林生态系统是地球上结构层次和功能行为最复杂的生态系统，并且气候、环境的变化和人类的经营行为对森林的影响以及森林的反馈效应具有长期性，且可测性、可控性和可预测性相当低。如何构建数学模型来定量描述系统结构以及预测系统过程和功能变化趋势，始终是森林生态研究的热点问题之一。自 60 年代以来，国际上相继开展了一系列重大的研究项目，从宏观和微观等多个时空尺度上对森林生态系统进行了系统研究，在生理、树木构筑型、种群和群落、景观和区域等研究领域获取了大量的生物和生态信息，并且在各自领域建立了一系列模型。但是，这些生态学模型由于在建模时往往偏重于应用物理和化学定律或原则，忽视了应用生物学和生态学原则和规律，因此，此类模型仅限于对生态系统一般性规律的描述，不能从过程和环境响应机理等方面刻画系统的动态。因此相当一部分生态学家对这样的生态学模型的能力持怀疑态度。80 年代以来，森林生态学家开始重视“过程模型”的构建，即在对生态系统内各等级结构和过程研究的基础上，依据系统内各种生态过程的正负反馈关系、系统结构和过程的时空异质性，应用计算机技术和空间信息技术建立“生态学仿真（模拟）模型”，将各时空尺度上的生态过程耦合在一起，以小空间尺度上短期的生态过程推测大尺度上长期的生态现象，这一理论与技术框架已成为现代生态学建模研究的主流。

我国的植物生态学建模研究发展较为迅速。1980 年由著名生态学家张新时院士主持，在新疆八一农学院创办了国内第一个数学生态专业，1989 年在中国科学院建立了“植被数量开放实验

室”，目前该实验室已在生态信息系统、草原生态和全球环境变化等领域取得了一系列建模研究成果，成为国内植被建模研究的中心。张新时先生还于1988年提出了“信息生态学”的概念、理论和技术体系，完善和发展了植被数量生态学的理论。

但是长期以来，我国在森林生态学建模研究领域发展较为缓慢，只是在一些科研院校开展了一些零散的研究工作，尚未形成规模和体系。近年来，在国家科委和国家基金委的课题资助下，此领域的研究也逐渐得到重视，1993年在东北林业大学成立了“生态建模与仿真实验室”。本书是国家自然科学基金项目“天然阔叶红松林林隙结构动态及生态机理的研究”中的建模理论和技术研究部分，该书综述了森林生态学建模理论发展状况、建模方法和存在的问题，并对当前三种不同类型的林隙模型进行了分析和修改，在红松林调查和实验数据的基础上，应用林隙模型定量分析和预测了红松林结构、动态和自我维持过程。其中，郭海燕同志撰写了1~5章和其它章节的部分内容，并绘制了书中所有的图表。

本书得到了东北林业大学出版社的大力支持，东北林业大学生态学科李景文教授、周晓峰教授、祝宁教授、王义弘教授、赵惠勋教授和王凤友教授在本书成稿过程中也给予了热心的指导，另外，美国生态学家 H. H. Shugart 教授和邵国凡博士、R. L. Luxmoore 博士、S. W. Running 教授、E. Rastetter 博士、R. T. Bussing 博士以及瑞典生态学家 I. C. Prentice 教授和 R. Leemans 博士，提供了许多有关研究文献和模型程序。在此，一并表示衷心感谢。

著 者

1996年12月20日

目 录

1 数学模型的基本概念与类型	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.1.1 模型变量与过程	(1)
1.1.2 数学仿真(模拟)	(2)
1.1.3 系统及系统分析	(3)
1.2 数学模型的类型	(5)
1.3 模型建立的方法与步骤	(7)
1.3.1 建模方法	(7)
1.3.2 建模步骤	(8)
2 生态学建模的基本理论与原则	(11)
2.1 生态学建模的物理学理论与原则	(11)
2.1.1 热力学基本概念和定理	(12)
2.1.2 以热力学理论为基础的生态系统原理	(13)
2.1.3 生态系统与环境	(17)
2.1.4 生态系统的稳定和演替	(19)
2.1.5 以物理学理论为基础的建模方法	(20)
2.2 以生态学原理为基础的建模方法	(21)
3 生态学建模的数学理论	(23)
3.1 地统计学的基本理论和方法	(23)
3.1.1 半方差及半方差图的结构分析	(24)
3.1.2 半方差图拟合模型	(27)
3.1.3 空间局部内插法	(29)
3.1.4 空间局部内插法的类型	(30)
3.1.5 地统计分析软件系统	(31)

3.2	概率统计模拟理论	(32)
3.2.1	产生均匀分布随机数的数学方法	(33)
3.2.2	均匀随机数的检验	(36)
3.2.3	产生其它分布随机数的数学方法	(39)
4	量纲分析	(43)
4.1	量和单位	(43)
4.2	量纲分析	(45)
4.3	Buckingham π 定理	(47)
4.4	量纲分析在生态学研究中的应用	(48)
4.4.1	确定模型参数的量纲	(49)
4.4.2	应用量纲分析建立面向过程的林分生长模型	(49)
5	模拟程序与语言	(54)
5.1	模拟程序和语言的类型	(54)
5.2	面向数学方程和结构图的程序与语言	(56)
5.3	面向对象的程序设计	(59)
5.4	数学模拟与“5 S”技术	(61)
6	森林生态学模型分类	(63)
6.1	以数学理论为基础的模型分类	(63)
6.1.1	动态模型	(63)
6.1.2	矩阵模型	(64)
6.1.3	随机模型	(64)
6.1.4	多变量模型	(64)
6.1.5	最优化及其它模型	(64)
6.2	以生物组织等级为基础的模型分类	(65)
6.2.1	全球尺度模型	(65)
6.2.2	景观和区域模型	(66)
6.2.3	群落尺度模型	(67)
6.2.4	植物生理生态模型	(69)
6.3	以系统特性为基础的模型分类	(70)

6.4	以干扰理论为基础的生态学模型类型	(71)
6.5	全球变化与陆地生态系统中的模型类型	(73)
6.5.1	全球变化条件下的生态系统生理综合模型	(74)
6.5.2	生态系统动力学斑块模型	(74)
6.5.3	斑块尺度至区域尺度的模型	(74)
6.5.4	元素循环及气候反馈的区域— 全球尺度植被动态模型	(75)
6.6	气候模拟及模型类型	(75)
6.6.1	气候模拟概念及模型类型	(75)
6.6.2	GCM 模型类型	(76)
6.6.3	GCM 模型对全球气候变化的预测	(78)
7	林隙动态理论及模型	(83)
7.1	基本概念	(83)
7.1.1	林隙	(83)
7.1.2	斑块	(84)
7.1.3	斑块镶嵌体	(85)
7.1.4	林隙的时空尺度	(86)
7.1.5	以林隙为基础的森林动态理论	(87)
7.2	林隙模型 (Gap Model)	(88)
7.2.1	基本原理	(88)
7.2.2	模型的结构	(90)
7.3	林隙模型的发展趋势	(93)
8	林隙动态模型——JABOWA 与 FORET 模型	(94)
8.1	JABOWA 模型结构和公式	(94)
8.1.1	树木生长方程	(94)
8.1.2	叶面积的计算	(95)
8.1.3	树高与直径之间的定量关系	(96)
8.1.4	树木径生长方程	(97)
8.2	环境因子与树木生长	(101)
8.2.1	环境的生态作用	(101)

8.2.2	光强分布与光强响应函数	(103)
8.2.3	积温与树木生长	(106)
8.2.4	土壤湿度与树木生长	(107)
8.2.5	土壤水分饱和与树木生长	(109)
8.2.6	土壤养分与树木生长	(110)
8.2.7	树木之间的竞争	(110)
8.3	树木死亡过程	(111)
8.4	树木更新过程	(113)
8.4.1	阳性树种的更新过程	(113)
8.4.2	中性树种的更新过程	(113)
8.4.3	耐荫性树种的更新过程	(114)
8.5	FORET 模型程序分析	(115)
8.5.1	主程序	(115)
8.5.2	树种参数输入子程序 INPT	(118)
8.5.3	样地初始化子程序 PLOTIN	(119)
8.5.4	产生均匀随机数子程序 RANDOM	(119)
8.5.5	产生正态随机数子程序 GGNORD	(120)
8.5.6	树木死亡过程子程序 KILL	(120)
8.5.7	更新过程子程序 BIRTH	(120)
8.5.8	萌生过程子程序 SPROUT	(120)
8.5.9	树木生长过程子程序 GROW	(124)
8.5.10	结果输出子程序 OUTPT	(126)
8.6	红松林结构和动态的 FORET 模拟结果	(126)
8.6.1	参数估计	(127)
8.6.2	模型运行和结果分析	(130)
9	林隙动态模型——FORSKA 模型	(138)
9.1	模型中的生态过程与计算公式	(138)
9.1.1	树木生长过程	(138)
9.1.2	树木生长与环境	(141)
9.1.3	胸径生长过程	(142)

9.1.4	树冠大小的变化过程	(142)
9.1.5	树高方程	(143)
9.1.6	更新过程	(143)
9.1.7	树木死亡过程	(145)
9.1.8	萌生过程	(148)
9.2	模型变量、参数和参数估计	(148)
9.2.1	模型变量和参数	(148)
9.2.2	参数估计	(148)
9.2.3	灵敏性分析	(154)
9.3	模型程序结构分析	(156)
9.3.1	主程序 MAIN	(156)
9.3.2	数据块子程序 SYSVAR	(157)
9.3.3	立地和运行参数读取子程序 GETMOD	(158)
9.3.4	树种参数子程序 GETSPE	(158)
9.3.5	控制参数读取子程序 GETOUT	(158)
9.3.6	产生均匀随机数子程序 GETRAN	(159)
9.3.7	程序初始化子程序 INITIA	(159)
9.3.8	树木变量读取子程序 IN	(160)
9.3.9	树木更新子程序 ETBL	(161)
9.3.10	树木生长子程序 TVXT	(162)
9.3.11	树木死亡子程序 SKOT	(165)
9.3.12	林分特征输出子程序 STAND	(165)
9.3.13	结果输出子程序 OUT	(166)
9.3.14	产生泊松分布随机数子程序 PRAND	(166)
9.4	红松林结构和动态的 FORSKA 模拟结果	(166)
9.4.1	参数估计	(166)
9.4.2	模拟结果分析	(168)
9.5	FORSKA 模型的发展	(170)
10	SPACE 森林动态的空间模型	(172)
10.1	模型结构	(172)

10.1.1	确定树木分布位置的网格结构	(172)
10.1.2	重复样地边界法	(173)
10.1.3	确定树木邻体的计算方法	(174)
10.2	模型程序分析	(178)
10.2.1	更新过程	(178)
10.2.2	树木生长过程	(183)
10.3	红松林动态的 SPACE 模拟结果与分析	(188)
10.3.1	参数估计	(188)
10.3.2	模拟结果与分析	(190)
11	森林生态系统流模型	(193)
11.1	以微分方程组为基础的流模型	(193)
11.1.1	模型结构	(194)
11.1.2	生理生态过程之间以及与环境之间的联接	(195)
11.1.3	模型的应用范围	(195)
11.2	生物地球化学循环模型 (FOREST-BGC)	(196)
11.2.1	模型结构	(196)
11.2.2	气象驱动变量	(198)
11.2.3	生态过程日变化亚模型	(198)
11.2.4	生态过程年变化亚模型	(199)
11.2.5	模型应用	(199)
12	森林生态学模型研究概况及趋势	(203)
12.1	以等级理论为基础的生态学模型研究	(203)
12.2	以空间为基础的森林生态学模型研究	(207)
12.2.1	以林隙动态模型预测气候变化下的森林演替	(207)
12.2.2	以 GIS 为基础的空间模型的研究	(212)
12.3	以植物生理过程为基础模型研究	(214)
12.3.1	大气 CO ₂ 浓度变化与森林生长	(214)
12.3.2	降水变化与森林生长	(217)
12.3.3	植物生长胁迫模型	(218)
12.4	森林生态系统流模型研究概况	(219)

12.4.1	生态系统流模型与生理模型的结合	(219)
12.4.2	生态系统流模型与地理信息系统的结合	(222)
12.4.3	生态系统流模型与一般环流模型的结合	(223)
12.5	预测全球植被变化模型的研究	(224)
12.6	森林生态学模型的发展趋势	(226)
12.6.1	异质性与时空尺度	(226)
12.6.2	社会经济模型与生态模型的联接	(233)
12.6.3	生态学模型的可视化	(237)
12.6.4	模型检验和验证	(238)
12.6.5	新理论的应用前景	(240)
参考文献		(241)
附录 1 FORET 模型源程序清单		(262)
附录 2 FORSKA 模型源程序清单		(279)
附录 3 SPACE 模型源程序清单		(319)

1 数学模型的基本概念与类型

1.1 基本概念

数学模型是从量的方面认识事物和进行理论思维的工具。在自然科学研究中,一般广义地将运用各种数学分支所提供的概念、方法对真实系统所作的假定和假说进行数量描述和计算的过程称为数学模型。数学模型的应用为科学研究提供了一种简洁精确的形式化语言,并且能够对研究系统的结构、功能和行为进行推理和预测。

1.1.1 模型变量与过程

一个完整的数学模型应包括时间变量、输入和输出变量、内部状态变量。描述和确定任何时刻的系统状态的变量称之为状态变量,如生物量、养分含量等。状态变量必须是独立的,也就是不能把一个状态变量表达为另一些变量的代数函数。输入变量是作用于系统的外部作用力,又称为驱动变量,如环境变量。输出变量是要进行计算和测量的变量。

在数学模型中,系统的过程是依据状态变量的变化速率进行的。每一过程均由一个依赖于状态的速率所决定。Thornley (1976)将植物的过程划分为运输过程和化学转化过程两种基本类型,并将各种过程分为植物体内的、植物体外的和植物与环境之间的过程(见表 1.1)。表中仅列出了部分的系统瞬时性质,这些性质可以用于构建系统模型的状态变量。

1.1.2 数学仿真（模拟）

数学仿真（计算机仿真）就是建立系统的数学模型，并通过计算机在模型上进行实验。对于简单的数学模型可以采用分析的方法得到模型的解析解，这样的数学模型也称为解析模型。但是，对于复杂的数学模型，尤其是由多层亚模型构成的“集成的”数学模型，往往难以得到系统的解析结果，对此，需要采用仿真的方法进行研究，即在计算机上建立计算机仿真模型进行实验，计算机为复杂数学模型的建立和实验提供了一个运行环境，它使抽象的数学模型变成了一个“活的数学模型”。

表 1.1 植物的过程和性质

过 程	性 质
光的吸收、反射、散射、透射	大小、重量、长度、面积
营养吸收	结构、内部结构、外形
水分吸收	几何形状、位置、样式组成、
气体、糖、激素	化学浓度
生长因素、其它养分在植物	温度、压力
体内的运转	
光合作用	电学与光化学性质
呼吸	吸收率、传导率
维持呼吸	
碳同化产物和其它养分利用	反射率、散射率、透射率
代谢的其它方面	力学性质
物质的浪费和丧失	弹性、透性
贮存	
生长	
发育	
发芽	
形态建成	
收获	
收获后过程	

（引自 Thornley, 1976）

数学仿真由系统、数学模型和计算机三个基本要素构成。一个数学仿真的建立包括数学模型、仿真模型和仿真实验三个基本过程（见图 1.1）。

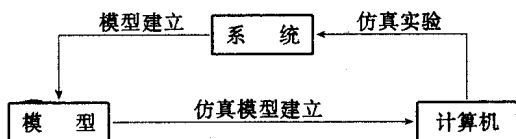


图 1.1 数学仿真三要素及它们之间的关系

模型建立是对系统进行观测和分析，确定模型的结构和参数。仿真模型建立是通过一定的算法和计算机语言将数学模型转化为能在计算机上运行的程序。仿真实验就是模型程序在计算机上的运行过程，并通过改变模型的输入变量和模型参数，对系统的行为进行实验和预测。

1.1.3 系统及系统分析

系统（system）一词最早出现在古希腊语中，syn 具有“共同”和“给以位置”的含义，即指事物中的共性部分和每一事物应占据的位置。系统论创始人贝塔朗非将系统定义为“处在一定相互联系中与环境发生关系的各组成部分的整体。”这一概念强调了两点，第一是系统由相互联系的要素所构成；第二是系统不是孤立存在的，它与环境发生关系。

一个系统不是其组成单元的简单相加，而是通过一定规则组织起来的整体，这种规则和组织形式就是系统的结构。系统的结构是内在的，一般不能够从系统表面看出，它反映了构成系统的组成单元之间的相互关系。结构直接决定了系统的性质，是系统与其组成单元之间的中介，系统对其组成单元的制约是通过结构起作用的，并通过结构将组成单元联接在一起。例如，一个植物群落并非是植物杂乱的堆积，在群落内不同种类的植物之间存在