

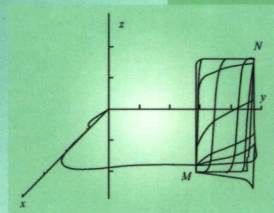
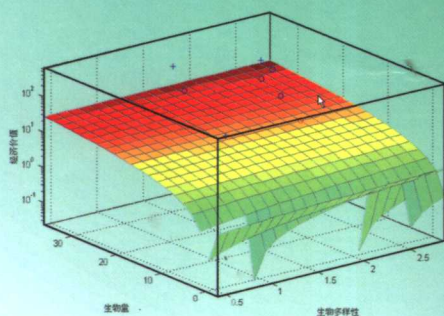
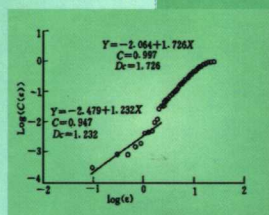
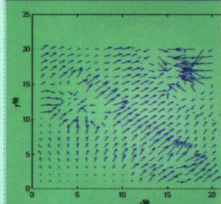


新世纪学术创新团队著作丛书

非线性生态模型

丛书主编 祖元刚

著 者 祖元刚 赵则海
于景华 杨逢建 等



 科学出版社
www.sciencepress.com

 新世纪学术创新团队著作丛书

非线性生态模型

丛书主编 祖元刚

著 者 祖元刚 赵则海

于景华 杨逢建 等

国家自然科学基金项目资助(No.39470129)

国家自然科学基金“八五”重大项目资助(No.39391500)

国家自然科学基金“九五”重大项目资助(No.39893360)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书应用非线性科学的理论和方法,针对生物与环境相互关系中的生态结构、生态功能和生态结构与生态功能相互作用的复杂特征研究中对定量分析的需求,提出了非线性生态模型的概念,构建了非线性生态模型理论体系,总结了非线性生态模型的建模和参数分析的原则、取样技术、计算方法和模拟预测技术,并将这一工具应用于不同层次的生物系统定量化研究中,很好地解释了一些复杂的生态现象,深刻地揭示了其内在的生态机理。全书分为十四章,各章通过实例揭示出植被的生态结构、生态功能以及生态结构和生态功能相互作用特征及生态学机理等内容。

全书内容丰富,结构严谨,语言流畅,具有系统性和科学性。不仅对从事植物学、生态学、保护生物学、生物多样性等研究工作的科研工作者具有重要的参考价值,也是相关专业研究生、本科生以及专科以上的专业技术人员的教学与科研的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性生态模型/祖元刚等著. —北京:科学出版社, 2004
(新世纪学术创新团队著作丛书/祖元刚主编)

ISBN 7-03-014515 1

I. 非… II. 祖 III. 生态系统-非线性-数学模型 IV. Q147

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第119971号

责任编辑:马学海 王日臣 宛楠/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年12月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2004年12月第一次印刷 印张: 47 1/2 插页: 8

印数: 1—1 500 字数: 931 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

The series of monograph produced by group of academic innovation in 21st century

Non-linear Ecological Modelling

Editor-in-chief for the series: Zu Yuan-gang

editors: Zu Yuan-gang, Zhao Ze-hai, Yu Jing-hua, Yang Feng-jian, et al.

Project sponsored

by

National Natural Science Foundation of China (No. 39470129)

The key project of the National Science Foundation of China (No. 39391500)

The key project of the National Science Foundation of China (No. 39893360)

Science Press
Beijing

《新世纪学术创新团队著作丛书》

丛书主编

祖元刚

本书著者名单

祖元刚	赵则海	于景华	杨逢建
张喜军	陈继红	黄 樨	马克明
张文辉	丛沛桐	刘兴华	谷会岩

丛 书 序 言

自从宇宙大爆炸以来，自然天体即在介观的水平上，以夸克等粒子的随机碰撞为基本能量运动形式，由介观向纳观、微观、中观、宏观、宇观方向，以运动的异质性为自然演化的源泉，以无限性的宇量规模演化成太阳系、地球、生命系统，直至形成具有高度发达大脑的人类。

然而，人类直观认知自然界的视野仅限于宏观水平，对于从介观到宇观无限性宇量规模的认知也只能借助于各类观测工具由局部、定性、可数计量开始逐渐加深对自然界复杂性的认知，其间经历了数万年的发展历程，因而也推动着科学技术由定性研究到定量研究向智能研究，由单一学科到学科交叉向学科融合的方向发展，也规范着科学研究的行为由个体化向群体化方向发展。进入 20 世纪 90 年代，人类开始迅捷共享全球科技资源，科学研究的群体化整合进一步增强了科学家在整体观上全面认知自然界本质的凝聚力，因而酝酿着人类在 21 世纪通过学术团队创新来实现对自然界整体本质认知的重大突破。

我于 1972 年开始接触生命科学研究，1978 年开始从事生命科学研究，在大约 30 年的学术生涯中，逐渐认识到单一学科和个体化研究的局限性，为此，从 1990 年开始，下决心以重点实验室的形式组建学术团队，发挥集体智慧的优势，试图将宏观研究与微观研究结合起来，全面揭示生命系统与环境系统相互作用的内在机理。经过十几年的努力，积累了一些原始创新性的研究成果，现以《新世纪学术创新团队著作丛书》陆续出版，以利于自由探索式学术交流和集成发展。

祖元刚

2004 年 1 月于哈尔滨

前 言

现代生态学在经历了定性描述和定位观测研究历程后, 精确化定量研究应运而生。生命系统与环境系统之间通过相互作用而产生的生态运动是最复杂、最精细的物质运动形式之一, 因而存在定量关系, 其运动特征的本质是非线性的, 但以往多用两个量之间存在正比关系和遵从叠加原理为本质特征的线性数学, 采用简单的比例关系和时空中的平滑运动进行定量研究工具, 由于忽略了二次以上的因素, 因而不能精确刻画大量的复杂生态现象。

我于 1981 年开始, 针对生命系统与环境系统相互关系中的生态结构、生态功能和生态结构与功能相互作用的复杂特征研究中对精确化定量工具的需求, 以高于一次方的多项式函数关系和整体不简单等于局部之和为本质特征的非线性科学为定量研究工具, 通过精确刻画生命系统与环境系统之间相互作用的规则运动向不规则运动的转化和跃变, 特别是参量极微小的变动即可引起运动形式的定性改变和对简单关系的实质性偏离来研究复杂生态现象中的非线性生态机理, 逐渐形成了非线性生态模型的理论体系和方法体系。

1981 年, 在硕士生导师、著名生态学家祝廷成教授的指导下, 笔者应用李雅普诺夫 (Lyapunov) 的稳定性分析理论, 建立了羊草 (*Leymus chinensis*) 种群能量流动的系统分析模型, 并对该系统的状态进行了稳定性分析, 得出了羊草种群能量流动的过程存在负反馈稳定性机制的结论。同时, 还应用非线性回归的理论和方法, 分析了各种环境条件对羊草种群光合作用、呼吸作用和蒸腾作用的影响。

1985 年, 在博士生导师、著名生态学家周以良教授的指导下, 笔者应用普里高津 (I. Prigogine) 的耗散结构理论, 建立了羊草群落能量流动的扩展二分子模型, 具体分析了羊草群落能流运行过程中能量吸收、能量固定、能量积累和能量损耗之间的相互关系及其产生极限环的条件, 揭示了其周期性的能流运行规律。同时, 还开展了植物群落演替过程中的耗散结构特征分析、植物生态场分析、东北羊草草原“三化”过程的综合速率模型研究、东北羊草草原土壤微生物能流的稳定性分析以及环境条件影响土壤微生物呼吸速率的趋势面分析研究。

1989 年, 我与董世林教授合作指导的硕士研究生刘兴华同志参加了我主持的生态位研究工作, 应用生态位理论开展了羊草草原主要植物种群生态位的初步研究; 1990 年, 我的硕士研究生陈继红同志应用逻辑斯谛分析和多元回归方法开展了松嫩草原主要植物群落地上部生物量增长规律的研究; 1991 年, 我与周以良教授合作指导的博士研究生张喜军同志参加了我主持的国家自然科学基金课

题——连续时间马尔可夫方法在草原生态学中的应用,完成了松嫩平原人口、资源与环境协调发展的连续时间马尔可夫模型(CTM)的建模、参数分析和模拟预测研究;同年,我的硕士研究生马克明同志应用分形理论开展了羊草群落分布格局的分形研究,之后又作为我的博士研究生和研究骨干参加了我主持的国家自然科学基金课题——兴安落叶松林空间结构分形研究,并完成了他的博士学位论文;此外,张喜军同志也参加了羊草草原植被分形格局特征的研究。1993年,我组建的东北林业大学森林植物生态学国家教委开放研究实验室正式将非线性生态模型作为该实验室的研究方向之一;同年,我在与黄樛同志的学术讨论中发现他在生物生长规律的动力学分析研究方面与我已着手研究的生命能量系统混沌行为的学术思路颇为接近,随即邀请黄樛同志作为客座研究人员来我的实验室与我合作开展混沌理论在生命能量系统中的应用研究,后来,黄樛同志考取了我的博士研究生,系统地开展了生命能量系统混沌生态模型的研究。1994年,我与周以良教授合作指导的博士研究生张文辉同志参加了我主持的国家自然科学基金“八五”重大课题第一子课题——中国主要濒危植物的种群特征及生态模型,完成了裂叶沙参种群分形模型和时间序列模型的研究。1995年和1996年,我作为执行主席,与冯长根教授和李后强教授合作,分别两次以非线性科学为主题,主持了中国科学技术协会“青年科学家论坛”,并在论坛上作了题为“非线性生态模型的理论与方法”、“非线性生态模型的现状与发展”主题报告。1997年,我的硕士研究生赵则海同志开展了东灵山辽东栎林分形及小波分析的理论及应用研究并完成了他的硕士学位论文。1998年,丛沛桐同志来我室开展博士后研究工作,我是他的合作指导教师之一,他参加了我主持的国家自然科学基金“九五”重大课题——中国关键地区生物多样性保育的研究和国家“九五”重点科技攻关课题——三江平原低山丘陵区林农复合系统综合发展技术模式研究,分别开展了暖温带落叶阔叶林和温带针阔叶混交林区群落演替的生态场特征研究和人工神经网络特征研究。

2001年,我的博士研究生赵则海同志、杨逢建同志、于景华同志开始协助我整理我们在非线性生态模型方面的研究成果,在此基础上形成了包括以生态结构为研究对象的分形生态模型(fractal ecological model)、小波生态模型(wavelet ecological model);以生态功能为研究对象的逻辑斯谛模型(logistic model)、非线性回归模型(non-linear regression)、混沌生态模型(chaos ecological model)、稳定性分析生态模型(stability analysis ecological model)和以生态结构与功能相互作用为研究对象的生态场理论(ecological field theory)、生态位(niche model)、综合速率生态模型(integrated rate methodology, IRM)、人工神经网络模型(artificial neural network, ANN)以及连续时间马尔可夫模型(continuous time Markov approach, CTM)为主要内容的非线性生态模型理论体系以及应用非线性生态模型的理论体系来研究生物器官、个体、种群、群落和生态系统不同层次

的非线性生态学特征而提出的模拟样带取样法、模拟冠幅分析法、网格覆盖树枝分析法、定株跟踪取样法、林窗样带取样法、土壤因子序列采样法,改进了半方差和双对数半方差图、小波方差分析和小波变换分析方法、植物生态势的计算公式,还编制出生态等势线和等势面绘制软件,因而形成了非线性生态模型的方法体系。

经过 20 多年的不懈努力,我们在非线性生态模型的研究方面,揭示了植被以同质基质为基本单元,通过自相似的逐级自组织而形成植被分形体的植被格局分形机制和植物分形生长机理,发现了植被多重分维特征和维数决定植物空间占据地位的原理,阐明了小波低频和高频信号在刻划样本空间分布复杂性细节的不同功能及生态学机理,提出了生命能量系统模型的建模理论、产生混沌的特征条件、处理复杂生态学事件的普适性,指出了该模型与洛特卡-沃特拉(Lotka-Volterra)模型的异同及优点,揭示了生物种群能流平衡态的负反馈稳定性机制,阐明了构成植物生态场的分量学说,推导了新的植物生态场计算公式,揭示了汇点变化规律;还成功地将自然控制因素和人为控制因素作用于植物资源的消长过程,实现了 IRM 的状态跃迁。上述研究结果,是我们在中国发展非线性生态模型这一新兴研究领域方面所做出的初步尝试。

使我感到欣慰的是,我在非线性生态模型方面浓厚的研究兴趣和强烈的好奇心,由与我志同道合的我的学生们共同组成的学术团队在体验深入草原和森林的艰辛观测中,在抽象思维和继承综合的煎熬中得以潜心探索和集成综合,这无疑是一次成功的学术合作。本专著总结了我和我的合作者在非线性生态模型方面的研究成果,其中绝大部分内容已经公开发表并予以引证,仅张喜军、陈继红两位同志的学位论文内容尚未公开发表。本书收入由我主编的《新世纪学术创新团队著作丛书》中,即此,谨向我的合作者和所有为本专著的出版作出努力的同仁们表示诚挚的谢意!

祖元刚

2004 年 3 月 28 日于哈尔滨

目 录

前言

第 1 章 非线性生态模型概论	1
1.1 非线性科学的概念	1
1.1.1 线性与非线性的基本概念和区别	1
1.1.2 非线性科学的基本内容	1
1.1.3 非线性科学的意义	3
1.2 非线性生态学的概念	3
1.3 非线性生态模型的基本内容	4
1.3.1 非线性生态模型的理论体系	4
1.3.2 以生态结构为研究对象的非线性生态模型	5
1.3.3 以生态功能为研究对象的生态模型	6
1.3.4 以生态结构与功能相互作用为研究对象的生态模型	7
第 2 章 逻辑斯蒂生态模型	9
2.1 逻辑斯蒂生态模型基础	9
2.2 逻辑斯蒂生态模型应用实例	11
2.2.1 引言	11
2.2.2 研究地点概况	14
2.2.3 研究方法	15
2.2.4 羊草群落(保护区)生物量季节动态分析	17
2.2.5 羊草群落(放牧场)生物量季节动态分析	22
2.2.6 小獐茅群落生物量季节动态分析	27
2.2.7 马莲群落生物量季节动态分析	30
2.2.8 虎尾草群落生物量季节动态分析	35
2.2.9 碱蓬群落生物量季节动态分析	39
2.2.10 百里香群落生物量季节动态分析	42
2.2.11 针蔺群落生物量季节动态分析	45
2.2.12 野古草群落生物量季节动态分析	49
第 3 章 时间序列分析生态模型	54
3.1 时间序列分析生态模型基础	54
3.2 时间序列分析生态模型应用实例	55
3.2.1 引言	55

3.2.2	裂叶沙参种群的地理分布及自然环境条件	56
3.2.3	研究方法	65
3.2.4	裂叶沙参种群(总和)动态时间序列预测	65
3.2.5	不同海拔间裂叶沙参种群生态学时间序列预测	66
3.2.6	泡沙参种群(总和)动态时间序列预测及裂叶沙参种群(总和) 对照分析	69
第4章	非线性回归生态模型	72
4.1	非线性回归模型概述	72
4.2	植物生物量与环境因子相关性研究	72
4.2.1	环境因子变化规律与生物量变化的关系	72
4.2.2	环境因子与植物群落地上生物量的相关回归方程	85
4.3	植物能量代谢的非线性回归分析	91
4.3.1	羊草群落能量吸收速率的动态变化	91
4.3.2	羊草群落能量固定速率的动态变化	93
4.3.3	羊草群落能量积累速率的动态变化	94
4.4	羊草草原土壤微生物的分布及其与土壤因子之间关系分析	97
4.4.1	样地生境	97
4.4.2	研究方法	97
4.4.3	土壤微生物的分布及其与土壤因子之间关系的非线性回归模型	97
4.5	东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究	102
4.5.1	研究地点	103
4.5.2	研究方法	103
4.5.3	土壤微生物呼吸速率的变化与环境因子之间的关系分析	103
第5章	生态位模型	107
5.1	概述	107
5.2	研究地点及自然条件	108
5.3	研究方法	110
5.3.1	主要生物及环境因子测定方法	110
5.3.2	生态位宽度及生态位重叠计测方法	110
5.4	生态位模型应用实例	117
5.4.1	一维环境因子梯度上生态位宽度的变化分析	117
5.4.2	二维环境因子梯度上生态位宽度的变化分析	145
5.4.3	三维环境因子梯度上生态位宽度的变化分析	158
5.4.4	羊草草原主要植物间生态位重叠关系的变化分析	163
5.4.5	几种生态位计测公式的讨论	172
5.4.6	结论与讨论	177

第 6 章 分形生态模型	181
6.1 概述	181
6.2 分形理论	182
6.2.1 欧氏几何维数	182
6.2.2 非欧几何的维数	183
6.2.3 分形理论的萌芽	184
6.2.4 分形体的概念	188
6.2.5 分形维数的定义	190
6.2.6 测量分形维数的实验方法	193
6.3 植被格局中的分形特点	194
6.3.1 植被格局具有分形特征	194
6.3.2 植被格局分形特征的应用	195
6.4 植被个体格局的分形模型	198
6.4.1 研究概况	198
6.4.2 研究方法	200
6.4.3 羊草地上部分生物量与株高的分形关系及生长方式研究	202
6.4.4 兴安落叶松树冠格局的分形特征	205
6.5 植物种群格局的分形模型	218
6.5.1 研究概况	218
6.5.2 研究方法	220
6.5.3 种群格局分形维数的含义	222
6.5.4 东北羊草草原植物种群格局的分形分析	226
6.5.5 小兴安岭红景天群落植物种群格局的分形特征	238
6.5.6 大兴安岭兴安落叶松种群格局的分形特征	240
6.5.7 裂叶沙参种群分布格局分形分析	262
6.6 植物群落格局的分形模型	270
6.6.1 研究概况	270
6.6.2 研究方法	272
6.6.3 羊草草原群落格局的分形特征及与环境因子的关系	277
6.6.4 兴安落叶松林群落格局的分形特征及与环境因子的相关关系	296
6.6.5 东灵山辽东栎林群落分形分析	304
6.6.6 喜树种群空间结构的分形分析	326
6.7 景观格局的分形模型	329
6.7.1 研究概况	329
6.7.2 研究方法	331
6.7.3 羊草草原景观格局的分形特征	331

6.7.4	兴安落叶松林景观格局的分形特征	333
第7章	小波生态模型	341
7.1	概述	341
7.2	小波理论	341
7.2.1	小波及小波变换	342
7.2.2	小波函数的选取	343
7.2.3	最佳小波分析尺度的选择	344
7.3	辽东栎群落主要种群的小波分析	345
7.3.1	研究概况	345
7.3.2	自然环境概况	345
7.3.3	研究方法	348
7.3.4	辽东栎群落主要乔木种群小波分析	348
7.3.5	辽东栎群落主要灌木种群小波分析	356
7.3.6	乔木种群分形分析结果的小波处理	366
7.3.7	样带内土壤因子变化趋势小波分析	372
7.4	兴安落叶松林窗分布规律的小波分析研究	378
7.4.1	引言	378
7.4.2	研究地区自然概况	379
7.4.3	调查方法	379
7.4.4	兴安落叶松林窗小波分布的分析	379
第8章	混沌生态模型	383
8.1	概述	383
8.2	混沌生态模型基础	388
8.2.1	混沌的概念	388
8.2.2	混沌对生命科学的影响	391
8.2.3	一维能量模型的复杂行为	393
8.2.4	二维能量模型的复杂行为	395
8.2.5	三维能量模型的混沌现象	399
8.3	研究方法	399
8.3.1	能量混沌模型的符号动力系统	400
8.3.2	能量系统的 Melnikov 方法	403
8.3.3	Liapunov 指数	406
8.4	生命能量系统与混沌生态学分析	410
8.4.1	研究概况	410
8.4.2	基本方法的建立及其生物的含义	416
8.4.3	生命能量的系统结构分析	421

8.4.4	能量系统的稳定性及功能性反应	432
8.4.5	生命能量系统的涨落响应机制	440
8.4.6	从植物生理生态数据分析看能量模型特征参数的测定	447
8.4.7	生命能量系统模型在种群生态学中的应用	457
8.4.8	生命能量系统生态模型在生态系统工程中的应用	466
第9章	耗散结构生态模型	474
9.1	概述	474
9.2	耗散结构理论	475
9.3	植物群落耗散结构的形成过程分析	476
9.3.1	植物繁殖体定居前的热力学平衡态	476
9.3.2	植物繁殖体定居时的远离平衡态	477
9.3.3	植物群落耗散结构的形成	478
9.4	能量系统的耗散生态模型	478
9.4.1	能量系统的熵变	478
9.4.2	能量系统的扩展二分子模型	481
9.4.3	能量系统的时间有序耗散结构	484
第10章	生态场模型	486
10.1	概述	486
10.2	生态场模型简述	487
10.3	辽东栎群落生态场分析	490
10.3.1	研究概况	490
10.3.2	自然概况与植被特征	491
10.3.3	研究方法	498
10.3.4	辽东栎群落主要种群生态场特征	498
第11章	综合速率生态模型	501
11.1	前言	501
11.1.1	IRM模型的提出和含义	501
11.1.2	IRM模型的理论基础	501
11.1.3	IRM模型的基本假设	501
11.1.4	IRM模型的应用	502
11.1.5	IRM模型框架	502
11.2	IRM模型基本理论	502
11.2.1	一种生态因子的情况	502
11.2.2	两种生态因子的情况	503
11.2.3	因子权重的确定	503
11.2.4	修改子	504

11.2.5	实际生长的转化	504
11.3	综合生态因子下辽东栎生长的 IRM 模型	505
11.3.1	IRM 模型建模程序	505
11.3.2	辽东栎生长预测模型分析	505
11.4	濒危植物——裂叶沙参生长的 IRM 模型	510
11.4.1	研究概况	510
11.4.2	裂叶沙参生长的 IRM 模型分析	511
11.4.3	裂叶沙参 IRM 模型的 r_n 值分析	514
11.5	东北草原“三化”过程的 IRM 模型	515
11.5.1	研究概况	515
11.5.2	东北草原“三化”过程 IRM 模型	516
11.6	东北羊草草原综合生态因子对微生物生长的 IRM 模型	523
11.6.1	研究概况	523
11.6.2	羊草草原土壤微生物生长的 IRM 模型分析	523
11.6.3	微生物生长的建模分析	525
11.6.4	微生物生长的 IRM 模型参数化过程	526
11.6.5	计算机模拟及分析	527
第 12 章	人工神经网络模型	530
12.1	概述	530
12.2	神经网络理论	530
12.3	根据植物地上茎叶图像仿真地下根系图像	537
12.4	应用神经网络技术预测树种的萌生枝产生规律	542
12.4.1	应用径向基函数计算萌芽更新动态的精确度分析	543
12.4.2	神经网络模型预测程序	543
12.4.3	预测精确性检验	546
12.5	生物多样性指数的神经网络预测	548
12.6	生态系统的自组织分类的神经网络模型分布	554
12.6.1	自组织神经树模型建立	555
12.6.2	辽东栎林自组织分类研究实例	556
12.7	森林生态系统演替的神经网络自组织特征	560
12.8	甘草经济蕴藏量的 BP 神经网络分析	560
12.8.1	研究概况	560
12.8.2	研究方法	562
12.8.3	神经网络模型的构建	565
12.8.4	神经网络模型的训练	568
12.8.5	甘草经济蕴藏量的 BP 神经网络预测	570

第 13 章 能量流动稳定性生态模型	573
13.1 概述	573
13.2 能量流动生态模型	573
13.3 羊草种群的能量流动及其稳定性分析	574
13.3.1 自然概况	574
13.3.2 研究方法	574
13.3.3 羊草种群的能量流动过程	575
13.3.4 羊草种群的能量流动稳定性分析	577
13.4 东北羊草草原微生物在能流中的作用	582
13.4.1 研究方法	582
13.4.2 东北羊草草原土壤微生物的能量流动过程	582
13.4.3 土壤微生物能量流动的稳定性分析	583
第 14 章 连续时间马尔可夫模型	587
14.1 概述	587
14.2 CTM 模型的数学基础	588
14.2.1 CTM 模型概述	588
14.2.2 CTM 建模方法	589
14.2.3 模型假设	591
14.2.4 模型的构建与求解	592
14.3 松嫩平原人口、资源与环境协调发展的 CTM 模型	592
14.3.1 研究概况	592
14.3.2 研究地点概况	602
14.3.3 研究方法	607
14.3.4 腰井子村人口、资源与环境系统分析	609
14.3.5 人口、资源与环境系统的 CTM 模型	646
14.3.6 人口、资源与环境的系统决策	666
14.3.7 人口、资源与环境协调发展决策	687
14.3.8 结论与建议	695
14.4 裂叶沙参种群濒危过程及保护的 CTM 模型	696
14.4.1 研究概况	696
14.4.2 控制因子分析	697
14.4.3 裂叶沙参种群 CTM 模型的建模	697
14.4.4 裂叶沙参种群密度模拟预测	703
14.4.5 裂叶沙参种群的濒危趋势的 CTM 模型	708
14.5 CTM 模型对穿龙薯蓣种群濒危因素综合分析及预测	709
14.5.1 引言	709

14.5.2	薯蓣种群濒危过程及保护的 CTM 模型	710
14.5.3	薯蓣种群密度模拟预测	714
14.5.4	综合分析	718
14.6	群落演替 CTM 模型	718
14.6.1	CTM 生态模型概述	718
14.6.2	辽东栎群落演替的 CTM 模型	719
14.6.3	群落演替的模拟	721
参考文献		724
图版		