

MULTIFUNCTIONAL FORESTRY

森林经营对多维目标功能的影响评价与模拟研究

何友均 覃 林 李智勇◎著 ■

Impact Assessment of Forest Management Strategies
on Multi-purposes and Its Modeling



科学出版社

S750
H222



郑州大学 *04010845935\$*

Impact Assessment of Forest Management Strategies
on Multi-purposes and Its Modeling

森林经营对多维目标功能的 影响评价与模拟研究

何友均 覃 林 李智勇◎著 ■



科学出版社

北 京

S750
H222

内 容 简 介

本书以天然次生林和人工林为研究对象,分别评价了不同森林经营模式对木材收获、固碳和植物多样性的影响。运用多目标规划方法,综合评价和模拟了天然次生林在粗放经营、目标树经营和无干扰模式下的木材收获、碳储量增量及其净现值。基于矩阵生长模型,模拟了不同采伐方案对红锥纯林、马尾松纯林、红锥+马尾松混交林木材收获、碳储存和植物多样性的影响。提出了东北天然次生林和南亚热带人工林多目标经营策略。

本书可供林业建设、生态保护、环境管理等领域的管理、科研和教学人员阅读,也可相关专业大中专院校学生、技术人员和企业、林农等利益相关者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

森林经营对多维目标功能的影响评价与模拟研究 / 何友均, 覃林, 李智勇著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037119-5

I. 森… II. ①何… ②覃… ③李… III. 森林经营-研究-中国 IV. S75
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 048951 号

责任编辑: 李 敏 张 菊 / 责任校对: 胡小洁

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 4 月第一次印刷 印张: 11 插页: 2

字数: 300 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

新时期的中国林业已进入重要发展机遇期，经济社会可持续发展对林业的多元化需求决定了森林多目标经营的必然性和迫切性。2009年6月举行的首次中央林业工作会议指出，我国林业的地位和作用随着经济社会的发展和人类文明的进步而日益上升和增强。在2009年9月22日举行的联合国气候变化峰会上，胡锦涛主席承诺，争取到2020年，我国森林面积比2005年增加4000万 hm^2 ，森林蓄积量比2005年增加13亿 m^3 。但全国第七次森林资源清查结果显示，我国乔木林每公顷蓄积量仅85.88 m^3 ，只有世界平均水平的78%，平均胸径仅13.3cm，人工乔木林每公顷蓄积量仅49.01 m^3 ，龄组结构不尽合理，中幼龄林比例依然较大。同时，我国还有大面积低质低效的天然次生林。如何发挥森林在木材收获、固碳、生物多样性保护、水源涵养和社会文化服务等方面的多重功能和满足社会经济发展的需求是当前关注的重大问题，它关系到能否实现对国际社会的庄严承诺和实现林业可持续发展的问题。森林经营是解决上述问题的重要途径，加强森林经营是今后很长一段时期内林业发展的主要任务。

为了提高森林生产力和平衡森林的多重功能，我国在森林多目标经营方面开展了许多探索性研究。从1998年开始，黑龙江哈尔滨丹清河实验林场从原来比较粗放的森林经营方式中吸取经验和教训，开展了不同森林经营模式对多目标影响的对比试验。同时，位于亚热带广西凭祥境内的中国林业科学研究院热带林业实验中心从20世纪80年代初开始，针对大面积连片种植单一树种人工纯林导致地力衰退、生产力下降、生物多样性丧失和林产品单一等严重影响林区森林可持续经营的问题，大力开展了以多功能可持续利用为目标的人工林改造实验。但是，这些探索性研究对森林多目标影响的效果如何还没有得到科学、系统的实证研究。因此，为了给森林经营提供科学依据和技术支撑，迫切需要了解不同森林经营模式对木材收获、固碳和植物多样性等多目标的综合影响。

从2010年开始，我们选取哈尔滨丹清河实验林场的天然次生林为研究对象，研究了目标树经营、粗放经营和无干扰对天然次生林木材收获、固碳和植物多样性的影响。同时，以亚热带中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波试验场的人工林为研究对象，评价了针阔混交林、阔阔混交林和针叶纯林近自然改造三种不同森林经营模式对木材收获、固碳和植物多样性的影响。运用多目标规划方法，以50年为经营周期，综合评价和模拟了不同类型天然次生林粗放经营、目标树经营和无干扰模式下的木材收获、碳储量增量及其净现值；基于矩阵生长模型，模拟了不同采伐方案对红锥纯林、马尾松纯林、红锥+马尾松混交林木材收获、碳储存和植物多样性的影响。基于研究结果，提出了东北天然次生林和亚热带人工林多目标经营策略，以期为我国多功能森林经营和多功能林业发展

提供科学依据和政策选择。

本研究系林业公益性行业科研专项“多功能林业发展模式与监测评价体系研究”(200904005)和国家自然科学基金项目(31170593)的部分成果。在野外调查、分析测定、数据分析、软件模拟和研究协调过程中,得到了相关单位和人员的大力支持,在此一并致谢。他们分别是中国林业科学研究院林业科技信息研究所陈绍志所长、王登举副所长、白秀萍副研究员、吴水荣副研究员和硕士生张谱、苏立娟;中国林业科学研究院热带林业实验中心蔡道雄主任、贾宏炎副主任、卢立华处长、郭文福副处长、温恒辉场长、明安刚博士和唐继新先生;黑龙江哈尔滨林业局邬可义副局长;黑龙江哈尔滨丹清河实验林场霍彦伟场长、周锦北副场长、吕长军副场长和陈进生副场长等领导和相关技术人员;广西大学硕士生梁星云、邵梅香和谭玲女士;中国科学院沈阳应用生态研究所汪思龙研究员和张伟东博士;辽宁省森林经营研究所杨会侠博士、郑颖、王卫、王品和姚博;中国林业科学研究院资源信息研究所雷相东研究员和博士生戎建涛;中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所丁易副研究员;中国科学院植物研究所王利松博士、陈国科博士和林秦文博士;哈尔滨师范大学王臣教授和史传奇博士。同时,中国林业科学研究院刘世荣副院长、侯元兆研究员和王成研究员,北京林业大学张大红教授和郑小贤教授对本书提出了许多建设性意见和建议,对此深表谢意。

由于时间和著者水平有限,本书还有许多疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

著 者
2013 年 1 月

目 录

第 1 章 森林多目标经营评价与模拟概述	1
1.1 森林多目标经营的内涵	1
1.2 森林多目标经营的目标及度量	1
1.3 森林多目标优化算法	3
1.3.1 多目标优化基本概念	3
1.3.2 多目标优化算法	4
1.3.3 森林多目标经营规划目标函数及其约束条件	7
1.4 森林多目标经营规划与评价研究现状	8
1.4.1 不同算法下的森林多目标经营规划研究	8
1.4.2 森林多目标经营评价与模拟研究现状	9
第 2 章 研究地区概况和研究方法	11
2.1 研究地区概况	11
2.1.1 黑龙江哈尔滨丹清河实验林场	11
2.1.2 中国林业科学研究院热带林业实验中心	12
2.2 研究方法	15
2.2.1 黑龙江哈尔滨丹清河实验林场	15
2.2.2 中国林业科学研究院热带林业实验中心	25
第 3 章 木材收获影响	30
3.1 天然次生林木材收获	30
3.1.1 结果与分析	30
3.1.2 结论与讨论	33
3.2 红锥、马尾松纯林及其混交林木材收获	33
3.2.1 结果与分析	33
3.2.2 结论与讨论	35
第 4 章 植物群落结构与物种多样性影响	36
4.1 天然次生林植物群落结构与物种多样性	36
4.1.1 结果与分析	36
4.1.2 结论与讨论	43
4.2 红锥、马尾松纯林及其混交林群落结构与植物多样性	44
4.2.1 结果与分析	45

4.2.2	结论与讨论	52
4.3	西南桦纯林与西南桦+红锥混交林群落结构与植物多样性	54
4.3.1	结果与分析	54
4.3.2	结论与讨论	59
4.4	针叶纯林近自然改造早期群落结构与植物多样性	60
4.4.1	结果与分析	60
4.4.2	结论与讨论	65
第5章	林分生物量与生产力影响	67
5.1	天然次生林生物量	67
5.1.1	结果与分析	67
5.1.2	结论与讨论	70
5.2	红锥、马尾松纯林及其混交林生物量和生产力分配格局	71
5.2.1	结果与分析	71
5.2.2	结论与讨论	74
5.3	西南桦纯林与西南桦+红锥混交林生物量和生产力分配格局	75
5.3.1	结果与分析	76
5.3.2	结论与讨论	78
第6章	生态系统碳含量与碳储量影响	79
6.1	天然次生林生态系统碳含量与碳储量	79
6.1.1	结果与分析	79
6.1.2	结论与讨论	84
6.2	红锥、马尾松纯林及其混交林生态系统碳含量与碳储量	84
6.2.1	结果与分析	85
6.2.2	结论与讨论	89
6.3	西南桦纯林与西南桦+红锥混交林生态系统碳含量与碳储量	90
6.3.1	结果与分析	91
6.3.2	结论与讨论	94
第7章	土壤理化性状影响	96
7.1	天然次生林土壤理化性状	96
7.1.1	结果与分析	96
7.1.2	结论与讨论	103
7.2	红锥、马尾松纯林及其混交林土壤理化性状	104
7.2.1	结果与分析	105
7.2.2	结论与讨论	109
7.3	西南桦纯林与西南桦+红锥混交林土壤理化性状	110
7.3.1	结果与分析	111

7.3.2 结论与讨论	114
7.4 针叶纯林近自然改造早期土壤理化性状	115
7.4.1 结果与分析	116
7.4.2 结论与讨论	120
第8章 森林多目标经营综合影响评价	121
8.1 天然次生林多目标经营综合影响评价	121
8.1.1 结果与分析	121
8.1.2 结论与讨论	125
8.2 红锥、马尾松纯林及其混交林多目标经营综合影响评价	126
8.2.1 结果与分析	127
8.2.2 结论与讨论	129
第9章 森林多目标经营模拟	131
9.1 天然次生林多目标经营模拟	131
9.1.1 结果与分析	132
9.1.2 结论与讨论	136
9.2 人工林多目标经营模拟	137
9.2.1 结果与分析	138
9.2.2 结论与讨论	141
第10章 森林多目标经营策略	143
10.1 东北天然次生林多目标经营策略	143
10.1.1 合理布局功能性天然次生林	143
10.1.2 正常林分目标树经营	144
10.1.3 逆向演替林分多目标经营	145
10.1.4 严重退化次生林挽救性经营	146
10.1.5 开展天然次生林多目标经营长期监测	146
10.2 南亚热带人工林多目标经营策略	146
10.2.1 可持续景观管理	147
10.2.2 适地适树适品种	147
10.2.3 保护造林地周边的天然林和生态敏感区的原有植被	147
10.2.4 发展林下植被	148
10.2.5 林地管理	148
10.2.6 轮伐期调整	149
10.2.7 改造大面积针叶纯林	149
10.2.8 公益林抚育经营	149
10.2.9 加强科学技术支撑	150
参考文献	151

第 1 章 森林多目标经营评价与模拟概述

1.1 森林多目标经营的内涵

长期以来森林经营一直以在一定的社会、经济和环境条件下获得最大收获量的目的产品（主要是木材）为经营目标。然而，目前这个占统治地位的传统森林永续经营观点，从理论到实践均受到了来自森林多功能经营理论的前所未有的挑战。为了平衡森林经营对经济、生态和社会等功能的影响，森林多目标经营成为关注的热点和焦点。

随着生态环境问题的日益突出，森林多目标利用的观念越来越被人们所接受（Baskent, 2005）。森林经营目标不仅包括木材收获，而且还应包括碳储量、物种多样性、氧气释放和游憩娱乐价值等其他经营目标。森林经营者必须同时考虑各种森林利用目标而后形成一个整体解决方案，通常需要建立能够融合多个经营目标的规划模型来解决（Murray and Church, 1995）。森林多目标经营在不破坏森林可持续发展整体性的基础上来实现预定多个目标价值，对于实际森林经营规划具有重要意义。

1.2 森林多目标经营的目标及度量

根据森林生态系统与人类之间的关系，森林生态系统效益可分为三大类：经济效益、生态效益和社会效益。经济效益，即森林生态系统为社会提供直接的物质产品，如木材、薪材以及其他林副产品等；它是人们最早利用森林的目的，也是整个林业生产的主体部分。生态效益，即森林能够涵养水源、防止泥沙冲刷和崩塌、保护和改良土壤、改良空气质量等；同时，森林还具有维护生物多样性、遗传多样性和物种保护等功能。社会效益，首先，森林为人类提供了一个良好的生活环境，具有保健、游憩和美学的功能；其次，森林还可以保护野生动植物及具有科研教育价值。

1) 木材收获目标。木材收获是森林多目标经营的一个重要经营目标，是最先进入社会经济系统中、被人们普遍承认的一种效益，其价值的大小通常以木材价格来体现（Mitchell and Bare, 1981）。木材收获价值量的核算是评定森林生态系统资源的主要组成部分，也是森林生态系统经济效益核算的主要组成部分。木材收获价值量的核算有利于合理地利用、保护和发展森林生态系统，实现森林资源的扩大再生产。遵循森林采伐量不能大于生长量的原则，采用林分净生长量的木材价值来评价木材的经济效益，公式如下：

$$V = GT(P - C)$$

式中, V 为森林生产木材的经济效益值 (元); G 为森林年净生长量 (m^3); T 为出材率 (%); P 为林区木材平均销售价 (元/ m^3); C 为木材平均生产成本费 (元/ m^3)。Baskent (2005) 计算木材的价值表现为单位面积木材经济价值乘以销售的木材量。由于木材生长和收获量的作用取决于树种, 需要不同的木材生长和收获量公式。

2) 碳储量目标。森林中的碳储量是多目标经营的另外一个重要内容。森林生态系统的碳储量包括土壤碳库、植被碳库两部分。土壤碳库主要是指森林土壤中 1m 以上的表层土壤中的有机碳, 森林生态系统中土壤碳库的碳含量是植被碳含量的 2~3 倍 (Huston and Marland, 2003)。目前土壤碳储量估算方法主要有以下 5 种: 土壤类型法、生命带研究法、GIS 估算法、模型估算法和相关关系估计法 (Singh et al., 2011)。森林植被碳储量包括根系碳储量、地上植被部分碳储量及森林凋落物中的碳储量。森林生态系统中地上植被碳储量的估计, 常通过测定森林植被的生物量再乘以生物量中碳元素的含量推算而得。因此, 森林群落的生物量及其组成树种的碳含量这两个因子就成为研究森林生态系统碳储量的关键问题。凋落物及根系所含碳储量一般用网袋法或平衡法先估算出其生物量, 然后再通过碳含量转换系数来估算。但此方法费时费力, 有一定的局限性。常见的较精确测定根系碳储量的方法包括收获法、钻土芯法、内生长土芯法、平衡法、根观测实验室法、土壤碳平衡法、挖土块法和微根区管法等 (Fang et al., 2003)。

在森林生态系统碳释放的计算中, 采伐后的木桩和树根也因为腐蚀作用考虑进去。由于这种分解作用通常与气候、立地条件、树种有很大关系 (Baskent, 2005), 所以假设采伐木桩和树根在经过一段时间的分解后, 存在于其中的碳完全释放到大气中。林产品也在一定时间内储存部分碳。锯材的分解期是 50 年, 坑木的分解期是 40 年, 板材的分解期是 10 年。Masera 和 Garza-Caligaris (2003) 的木材产品碳释放公式即

$$C_{p_{m,t+1}} = C_{p_{m,t}}(1 - a_m)$$

式中, $C_{p_{m,t}}$ 表示木材产品 m 在 t 时的碳储量; a_m 表示木材产品每年的分解率。

3) 生物多样性目标。森林多目标经营研究的另一个主要内容是生物多样性。生物多样性是反映群落结构和功能特征的有效指标, 是生态系统稳定性的度量。因此研究森林群落中的生物多样性对认识森林生态系统的结构、功能和稳定程度有着重要的意义。生物多样性反映了群落自身的结构和演替特征。群落的发展均趋于最大限度地利用环境资源。生物多样性测定主要有三个空间尺度: α 多样性, β 多样性, γ 多样性 (Patil et al., 1982)。 α 多样性的计算度量指标包括 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数 (均匀度指数)、Simpson 指数; β 多样性的计算度量指标包括 Sorensen 指数、Jaccard 指数、Cody 指数; γ 多样性的计算度量指标为物种数。

4) 涵养水源目标。在湿润地区森林常被称为“海绵体”和“绿色水库”, 有着巨大的渗透能力和蓄水力。在降水时, 森林能吸收和渗透降水, 减少了流入大海的无效水, 增加了地表有效水的蓄积, 以供工农业利用和生活利用。因此, 森林涵养水源也是森林多目标经营的一个量化指标。在雨季, 森林吸收、渗透了降水, 减少和滞后了降水进入江河, 削减和滞后了洪峰, 减少了洪水径流; 在枯水期, 森林逐渐放出涵养的水, 增加和滞后了

江河的洪水流量，缓解了旱情。因此，森林生态系统具有涵养水源、调节径流的功能，有着明显的防洪抗旱效能和巨大的经济价值。

5) 土壤固土保肥目标。土壤侵蚀可引起土地资源的损失，如水蚀可导致土壤因石质化、荒漠化而废弃，风蚀可导致土壤因荒漠化而废弃，因此，森林在保护土壤、减少土地资源损失方面有着巨大的经济价值。土壤侵蚀带走了大量表土，而表土中含有大量的营养物质，特别是速效氮、磷、钾和土壤有机质，也随着水流一道损失了，而且土壤侵蚀还带走了下层土壤中部分可溶解物质，从而引起土壤肥力下降，森林则可保护土壤肥力。森林固土的效益值可用河流、水库因泥沙沉积而挖泥的费用进行计量。森林保肥或防止养分流失的效益用弥补养分流失所需要的肥料价格进行计量。

6) 森林游憩目标。森林游憩价值，包括钓鱼、狩猎、划船、野营、野餐、漫步和观景等游憩活动的价值。森林游憩经济价值的核算非常困难，因为森林游憩是一种“公共商品”，它没有市场交换和市场价格，其市场价格资料 and 消费信息很难获得。因此，森林游憩是一种无市场价格的商品。其价值的定量研究很难得到深入、系统的开展。一般可以根据有关资料确定其计算价值 (Johnson, 1977; Keles, 2003)。

7) 野生动植物资源目标。森林野生生物包括森林中的各种野生动植物，如药材、菌类、野菜、鸟类和兽类等。森林野生生物不仅仅是一种物质资源，而且也是一种重要的环境资源，如基因库、生物多样性等。森林野生生物的物质资源效益估计采用市场法，而森林野生生物的环境资源效益估计采用支付意愿法 (指消费者为某种需要而愿意支付货币)。

1.3 森林多目标优化算法

1.3.1 多目标优化基本概念

多目标优化的定义是找到一组决策变量的向量，这组决策变量满足约束而且最优化一组以目标函数为元素的函数向量。这些函数形成了函数之间通常相互冲突的性能标准的一种数学描述。因此，“优化”是指找到一组解使得所有目标函数的值对于设计者来说是可以接受的。对于多目标优化问题 (multi-objective optimization problems, MOP)，各个子目标之间是矛盾的，一个子目标的改善通常会引起另一个或者另几个子目标的性能降低，只能在诸多子目标之间进行调节和折中处理，使各个子目标都尽可能地达到最优，这一个折中解的集合，称为 Pareto 最优解集。

多目标优化问题数学形式表达如下：

$$\begin{aligned} \min y &= f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \\ n &= 1, 2, \dots, N \\ \text{s. t. } g_i(x) &\leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) &= 0, j = 1, 2, \dots, k \\ x &= [x_1, x_2, \dots, x_d] \end{aligned}$$

$$x_{d-\min} \leq x_d \leq x_{d-\max} \quad d = 1, 2, \dots, D$$

式中, x 为 D 维决策变量; y 为目标向量; N 为优化目标总数; $g_i(x)$ 为第 i 个不等式约束; $h_j(x)$ 为第 j 个等式约束; $f_i(n)$ 为第 n 个目标函数。

1.3.2 多目标优化算法

多目标优化问题不存在唯一的全局最优解, 过多的非劣解是无法直接应用的, 所以在求解时就是要寻找一个最终解。求得最终解主要有三类方法: 生成法, 即先求出大量的非劣解, 构成非劣解的一个子集, 然后按照决策者的意图找出最终解; 交互法, 不先求出很多非劣解, 而是通过分析者与决策者的对话方式逐步求出最终解; 事先要求决策者提供目标之间的相对重要程度, 算法以此为根据, 将多目标问题转换为单目标问题进行求解。这些方法都是通过算法来实现的, 很多专家学者采用不同算法解决多目标优化问题。在林业上, 应用广泛的算法主要有: 多目标进化算法、人工神经网络、混沌优化算法、蒙特卡洛整数规划法、模拟退火算法、遗传算法和禁忌搜索算法等 (肖晓伟等, 2011)。

1) 多目标进化算法 (multi-objectives evolutionary algorithm, MOEA), 这是一类模拟生物进化机制而形成的全局性概率优化搜索方法, 20 世纪 90 年代中期开始迅速发展, 其发展可以分为两个阶段。第一阶段主要有两种方法, 即不基于 Pareto 优化的方法和基于 Pareto 优化的方法; 第二阶段就是在此基础上提出了外部集这个概念, 外部集存放的是当前代的所有非支配个体, 从而使解集保持较好的分布度。

多目标进化算法的基本原理描述如下: 多目标进化算法从一组随机生成的种群出发, 对种群执行选择、交叉和变异等进化操作, 经过多代进化, 种群中个体的适应度不断提高, 从而逐步逼近多目标优化问题的 Pareto 最优解集。与单目标进化算法不同, 多目标进化算法具有特殊的适应度评价机制。为了充分发挥进化算法的群体搜索优势, 大多数多目标进化算法均采用基于 Pareto 排序的适应度评价方法。在实际应用中, 为使算法更好地收敛到多目标优化问题的 Pareto 最优解, 现有的多目标进化算法通常还采用了精英策略、小生境和设置外部集等关键技术 (许婧祺, 2009)。

2) 人工神经网络 (artificial neural networks, ANN)。这是一种应用类似于大脑神经突触连接的结构进行信息处理的数学模型。在工程与学术界也常直接简称为神经网络或类神经网络。神经网络是一种运算模型, 由大量的节点和之间的相互连接构成。每个节点代表一种特定的输出函数, 称为激励函数。每两个节点间的连接都代表一个对于通过该连接信号的加权值, 称之为权重, 这相当于人工神经网络的记忆。网络的输出则依网络的连接方式、权重值和激励函数的不同而不同。而网络自身通常都是对自然界某种算法或者函数的逼近, 也可能是对一种逻辑策略的表达。

它的构筑理念是受到生物 (人或其他动物) 神经网络功能的运作启发而产生的。人工神经网络通常是通过一个基于数学统计学类型的学习方法而得以优化, 所以人工神经网络也是数学统计学方法的一种实际应用。通过统计学的标准数学方法, 我们能够得到大量的

可以用函数来表达的局部结构空间,另外在人工智能学的人工感知领域,我们通过数学统计学的应用可以来做人工感知方面的决定问题。也就是说通过统计学的方法,人工神经网络能够类似人一样具有简单的决定能力和简单的判断能力,这种方法比起正式的逻辑学推理演算更具有优势。

3) 混沌优化算法 (chaos optimization, CO)。早在 19 世纪末,法国数学家 Poincaré 就曾预言过混沌的一些行为,但是,直到 1963 年 Lorenz 研究了大气流动中的混沌之后,混沌的研究才有了巨大的发展。近年来,随着混沌理论与应用研究的飞速发展,混沌学正以前所未有的深度和广度渗透和影响现代科学的许多学科领域。混沌现象是无固定周期的循环行为,即非周期的具有渐进的自相似有序性的现象。混沌现象具有其独特性质:随机性,即混沌现象具有类似随机变量的杂乱表现;遍历性,即混沌现象能够不重复地历经一定状态空间中的所有状态;规律性,即混沌现象是有确定性的迭代方程产生的。混沌现象介于确定性和随机之间,具有丰富的时空状态,系统动态的演变可导致吸引子的转移。混沌用于优化设计的根本点在于混沌的一个轨道可以在其吸引子中稠密,根据混沌吸引子的这种特性,当时间足够长,这根轨道就能以任意精度逼近吸引子中的任意点,在优化设计领域中也利用混沌现象的遍历性特点作为搜索过程中避免陷入局部极小的一种优化机制,该优化机制与模拟退火算法的概率性劣向转移优化机制和禁忌搜索算法的禁忌表检验优化机制存在明显的不同。

在这类算法中,首先使求解优化问题的连续动力系统(神经网络等)和离散动力系统(梯度法、DFP 法等)暂时处于混沌状态,通过混沌的遍历性搜索能访问各种各样的解,非平衡态的混沌搜索最优解陷入局部极小。与随机优化方法在整个解空间中搜索不同的是,混沌动态搜索被限制在相对低维的分形空间中进行。随着控制参数的调整,混沌状态逐渐消失,恢复到原先的动力系统,最后获得一个平衡状态,得到全局最优解。

4) 蒙特卡洛整数规划法 (Monte Carlo integer programming, MCIP)。该算法的概念是,当系统中各个单元的可靠性特征量已知,但系统的可靠性过于复杂,难以建立可靠性预计的精确数学模型或模型太复杂而不便应用,则可用随机模拟法近似计算出系统可靠性的预计值 (Borges and Hoganson, 2002)。随着模拟次数的增多,其预计精度也逐渐增高。由于需要大量反复的计算,一般均用计算机来完成。

应用此方法求解工程技术问题可以分为两类:确定性问题和随机性问题。解题步骤如下:根据提出的问题构造一个简单、适用的概率模型或随机模型,使问题的解对应于该模型中随机变量的某些特征(如概率、均值和方差等),所构造的模型在主要特征参量方面要与实际问题或系统相一致;根据模型中各个随机变量的分布,在计算机上产生随机数,实现一次模拟过程所需的足够数量的随机数,通常先产生均匀分布的随机数,然后生成服从某一分布的随机数,方可进行随机模拟试验;根据概率模型的特点和随机变量的分布特性,设计和选取合适的抽样方法,并对每个随机变量进行抽样(包括直接抽样、分层抽样、相关抽样和重要抽样等),按照所建立的模型进行仿真试验、计算,求出问题的随机解;统计分析模拟试验结果,给出问题的概率解以及解的精度估计。在可靠性分析和设计中,用蒙特卡洛整数

规划法可以确定复杂随机变量的概率分布和数字特征，可以通过随机模拟估算系统和零件的可靠度，也可以模拟随机过程、寻求系统最优参数等。20 世纪 90 年代末，国外在森林管理问题上频繁使用精确算法和启发式算法，使用精确算法如整数规划和动态规划能够得到最优解，但是缺点是问题的规模很大程度上限制了算法在合理时间内的求解。实验证明，整数规划和动态规划都只适用于较小或是中等规模的问题中，在具有相邻空间约束条件的采伐规划问题上，已经开始使用启发式优化算法。首先使用的是基于随机搜索技术的方法。

5) 模拟退火算法 (simulated annealing, SA)。这是一种基于 Monte Carlo 迭代求解策略的启发式随机搜索算法，最早是由 Metropolis 等在 1953 年提出的，Kirk 和 Patrick 将退火思想引入组合优化领域，提出了一种解决大规模组合优化问题，特别是 NP 完全组合优化问题的有效近似算法——SA，它源于对固体退火过程的模拟，采用 Metropolis 接受准则，用一组称为冷却进度表的参数控制算法进程，使算法在多项式时间内给出一个近似最优解。

基本思想是从一个给定解开始，从邻域中随机产生另一个解，根据目标函数值有选择地接受或是拒绝新解，通常接受目标函数值改进的解，而使目标函数值变坏的解根据接受准则有选择地接受。Metropolis 准则允许目标函数在有限范围内变坏，由控制参数 T 决定，其作用相当于物理过程的温度 T ，开始 T 值较大，可能接受比较差的恶化解，随着 T 值的减小，只能接受较好的恶化解，当 T 趋于 0 时，就不再接受任何恶化解了。模拟退火算法的基本原理是有选择地接受较差的排列，防止目标函数“贪婪地”收敛到局部最小。模拟退火是最常见的空间森林规划问题求解应用的元启发式技术之一。

6) 遗传算法 (genetic algorithm, GA)。这是模拟自然界生物优胜劣汰、适者生存的自然遗传法则进行科学研究的一种手段。在遗传算法中，个体的适应值是判断个体生存能力的唯一标准。通过对群体中的个体进行遗传操作，实现群体内部结构的重组，进而使群体的性能逐渐得到优化，并最终逼近最优解。

遗传算法的基本原理是从一组随机产生的初始解开始搜索，这些初始解被称为群体，其中，每个个体是问题的一个解，为染色体。遗传算法通过染色体交叉、变异和选择不断进化，生成后代染色体，后代染色体的好坏用适应值来衡量，再根据适应值的大小从上一代和后代中选择一定数量的个体，作为下一代群体继续进化，这样经过几代以后，算法收敛于最好的染色体，可能就是问题的最优解或次优解，其中，衡量染色体好坏的适应值由适应值函数确定，适应值函数的定义与具体问题有关。

7) 禁忌搜索算法 (tabu search algorithm, TS)。这是一种全局性邻域搜索算法，模拟人类具有记忆功能的寻优特征。它通过局部邻域搜索机制和相应的禁忌准则来避免迂回搜索，并通过破禁水平来释放一些被禁忌的优良状态，进而保证多样化的有效探索，以最终实现全局优化。

简单禁忌搜索算法的基本思想是：给定一个当前解（初始解）和一种邻域，然后在当前解的邻域中确定若干候选解；若最佳候选解对应的目标值优于“best so far”状态，则忽视其禁忌特性，用其替代当前解和“best so far”状态，并将相应的对象加入禁忌表，

同时修改禁忌表中各对象的任期；若不存在上述候选解，则在候选解中选择非禁忌的最佳状态为新的当前解，而无视它与当前解的优劣，同时将相应的对象加入禁忌表，并修改禁忌表中各对象的任期；如此重复上述迭代搜索过程，直至满足停止准则。与传统的优化算法相比，禁忌搜索算法的主要特点是：在搜索过程中可以接受劣解，因此具有较强的“爬山”能力；新解不是在当前解的邻域中随机产生，而或是优于“best so far”的解，或是非禁忌的最佳解，因此选取优良解的概率远远大于其他解。

1.3.3 森林多目标经营规划目标函数及其约束条件

国内外关于森林多目标经营规划研究的目标函数总结（Baskent, 2005；Keles, 2003；Marland, 2003；戎建涛, 2010）如表 1-1 所示。从表 1-1 可知森林多目标规划目标函数主要包括经济和商品生产、野生动植物生境、生物多样性、娱乐游憩和其他目标五大类别。经济和商品生产主要是以各种收入最大、费用最小和净现值最大为最终经营目标。野生动植物生境以生境面积最大为最终经营目标。生物多样性以物种最多为最终经营目标。娱乐游憩以游憩价值最大为最终经营目标。其他目标以防火、邻域、景观、碳储量最大、更新面积和水源涵养为最终经营目标。

表 1-1 森林多目标规划目标函数分类

主要类别	细分类别
经济和商品生产	净现值最大
	收入最大
	费用最小
野生动植物生境	生境面积最大
生物多样性	物种最多
娱乐游憩	游憩价值最大
其他目标	防火
	邻域
	景观
	碳储量最大
	更新面积
	水源涵养

国内外关于森林多目标经营规划研究的约束条件总结（Hoen and Solberg, 1994；Pukkala et al. , 1995；Yolasigmaz, 2004）如表 1-2 所示。从表 1-2 可知，森林多目标规划目标约束包括经济和商品生产、水流、碳储存、森林结构、野生动植物、最大最小收获年龄和其他约束七类别。

表 1-2 森林多目标规划目标约束分类

主要类别	细分类别
经济和商品生产	净现值约束
	收入约束
	预算约束
	木材产量约束
水流	水系沉淀物约束
	水温度约束
	水流量约束
碳储存	碳储量最大约束
森林结构	
野生动植物	
最大、最小收获年龄	
其他约束	防火约束
	昆虫约束
	生物多样性约束

1.4 森林多目标经营规划与评价研究现状

1.4.1 不同算法下的森林多目标经营规划研究

森林多目标规划问题通常包括建立目标函数、确定约束条件和利用优化算法求解结果三个步骤。Lockwood 和 Moore（1993）第一次使用模拟退火算法来模拟收获调整问题，其中包括斑块大小的限制、相邻延迟和满足收获量指标的最小可用面积等目标。Murray 和 Church（1995）使用模拟退火算法，以解决调整与邻接的限制及道路建设问题。Daust 和 Nelson（1993）在瑞典亚高寒地区采取相邻约束，使用模拟退火算法解决规划上的问题。Tarp 和 Helles（1997）开发了模拟退火邻接模型，其结合一种 IP 结果计算模型来实现对净现值的最大化。Ohman 和 Eriksson（1998）评价了核心区的经营措施并解决了 200 个林分组成的景观的长期规划问题，用模拟退火算法解决了一定量的核心区约束下的景观整体和在 100 年的时间跨度中森林经营的净现值最大化问题。van Deusen（1999）开发了一种在景观上创造理想的配置同时处理收获调整目标的基于 Metropolis 算法，他的方法有可能改善栖息地和联通性，并创造缓冲区。Baskent 和 Jordan（2002）用模拟退火算法开发了一种景观的经营模型，他们用该模型测试了 20 000hm²（987 个林分）森林景观，发现龄阶组成和空间配置目标的最优解，与非空间的最优解相比，可以达到 72%。Eriksson（1998）用三种包括空间决策的方法，在一个长远森林规划问题上应用了稳定产出和蓄积量限制，发现就净现值和景观空间布局而言，同时使用模拟退火和线性规划的这种方法比仅仅使用模拟退火算法更有效。Chen 和 Gadow（2002）发表了一个案例研究，考虑空间布局和木材收获目标同时使用模拟退火模型，其空间调整模型应用于不同年龄、立地指数和密度的 1480 个林分组成

的森林, 结果表明, 调整邻接矩阵可以产生大量形式的空间类型。

Murray 和 Church (1995) 使用禁忌搜索算法, 通过求最优解集解决包括相邻约束的采伐设计及道路规划问题。Laroze 和 Greber (1997) 通过禁忌搜索算法建立了一个优化造材模型, 用于解决不同材料的最优利用问题。Bettinger 等 (1997) 建立了一个禁忌搜索模型, 表达以均衡采伐、相邻约束和空间野生动植物栖息地质量为目标采伐收获问题。Bettinger 等 (1998) 建立了一个在森林经营中满足确保水生动植物栖息地质量和商品生产目标的相容性土地利用模型。模型通过用禁忌搜索算法获得可行的木材采伐和道路系统设计方案。

Mullen 和 Butler (1997) 采用遗传算法开发设计了一个空间约束的收获模型。在时间测试中, 基于遗传算法的模型找到的解决办法, 比蒙特卡洛整数规划为基础的模型平均优出 3.5%。Lu 和 Eriksson (2000) 采用遗传算法, 用不同网格像素来划分采伐单位, 并找到了好的解决办法。Moore 和 Conroy (2000) 在一个固定的规划范围内为造林的空间分布建立了遗传算法来进行搜索, 根据初始生境组合和种群数量分布来最大限度的提高鸟类分幅度。Venema 和 Calamai (2005) 为森林结构优化设计采用了新的基于遗传算法和景观生态学指标的框架, 为多用途景观系统设计了优化过程, 其中包括生物多样性和社会需求目标。

Nelson 和 Brodie (1990) 使用蒙特卡洛整数规划法通过建立多目标模型, 解决了一个规划期为 30 年的森林规划问题, 蒙特卡洛整数规划法随机产生采伐单元模式, 使之符合约束条件以及木材采伐量, 并在相对短的时间内检查比较可供选择的其他解。Daust 和 Nelson (1993) 运用蒙特卡洛整数规划法解决各种空间采伐规划问题, 在一个短期规划水平内应用空间和时间采伐限制及收获量、蓄积量约束开发了一种规划模型。Boston 和 Bettinger (1999) 使用蒙特卡洛整数规划法来解决一个空间采伐规划问题, 目标是在达到平均木材产量的条件下使净现值最大。

1.4.2 森林多目标经营评价与模拟研究现状

近年来, 森林多目标经营评价和模拟预测也成为广大学者关注的重点。Keles (2003) 比较了两种经营规划方案: 多目标森林经营方案 (以木材、碳和氧气为经营目标) 和传统的木材收获经营方案。经营目的是在每个分期均衡采伐量的约束下, 得到木材、碳和氧气净现值的最大化。研究表明: 多目标经营方案中的生态和环境约束极大地降低了木材净现值, 但是增加了氧气、碳的净现值。尽管多目标经营规划可以得到更多的碳、氧气净现值, 但是会相应获得较少木材净现值。因此, 在研究新的经营规划方案时, 考虑所有的可量化的森林价值是非常重要的。Baskent (2005) 规划模型中以碳价值、水源价值和木材价值为经营目标, 通过建立目标模型分析各个目标之间的关系。在经营期内, 目标模型分别以碳价值最大化、水源价值最大化和木材价值最大化为经营目标, 通过约束条件, 建立多个目标模型, 最后分析在每个目标模型的经营下, 木材、碳和水源等目标的变化情况。例如当以木材价值最大化为经营目标, 包含固碳为约束条件时, 固碳越多, 木材价值越小。Nieuwenhuis 和 Tiernan (2005) 通过建立生态因子和社会价值因子的多目标经营模