

林业信息化系列研究成果之六

人工神经网络在 森林资源动态监 测中的应用

吴达胜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

林业信息化系列研究成果之六

人工神经网络在 森林资源动态监 测中的应用

吴达胜 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以浙江省重点林业县级市（龙泉市）为研究区域，以森林资源蓄积量为主要监测指标，通过整合遥感影像、数字高程模型、森林资源二类调查数据、固定样地调查数据等多源数据，建立了包含土层厚度、A层厚度、海拔、坡度、坡向、地表曲率、太阳辐射指数、地形湿度指数、树龄、郁闭度、归一化植被指数、TM影像中的6个波段（B1、B2、B3、B4、B5、B7）等17个指标在内的自变量因子集。通过多项式拟合，结合经验数据求取各自变量因子的隶属度，按优势树种（分别为杉木、马尾松、硬阔类、黄山松）建立了基于Levenberg-Marquardt优化算法改进的BP神经网络模型。在此基础上，对研究区域各森林资源小班或细班的平均单位蓄积量进行仿真、反演和预测，总体精度均超过90%，高于森林资源二类调查的蓄积量总体抽样精度标准。同时，还利用所建模型，以研究区域2007年度数据为样本数据，估测了平均胸径、平均树高等森林调查因子，总体估测精度也达到90%以上。

本书结合了现代森林资源管理要求和信息技术特点，充分体现了先进技术在传统行业领域应用中所产生的效果，可供森林资源管理工作、信息技术应用人员、信息系统研究与开发人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

人工神经网络在森林资源动态监测中的应用 / 吴达胜著. — 北京：中国水利水电出版社，2014.4
林业信息化系列研究成果
ISBN 978-7-5170-1917-6

I. ①人… II. ①吴… III. ①人工神经网络—应用—森林资源—监测—研究 IV. ①S758.4-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第075584号

书 名	林业信息化系列研究成果之六 人工神经网络在森林资源动态监测中的应用
作 者	吴达胜 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.5印张 178千字
版 次	2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	26.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



序

林业是最古老的行业之一，它伴随着人类社会的发展而诞生。这一古老的行业在面对现代信息技术时亟须做全面而深刻的调整，通过多技术融合，优化或创新林业管理模式，实现森林资源安全、生态环境优良、林业生产力不断提高的目标。

信息技术与林业技术的融合过程就是林业信息化的建设过程。大致可分为基础设施信息化、工艺过程信息化和管理信息化等三方面。基础设施信息化主要包括以局域网和广域网综合为核心的硬件平台建设、以林业基本公共数据库为核心的数据平台建设、以方法和模型为主的公共知识平台、以规范化与标准化为核心的环境平台建设以及在信息等技术支持下的各类生产工具与装备。工艺过程信息化指林业管理、生产和教育、科技各个部门，在经营、生产、科研、教学中的业务过程的信息化，它是以智能化为核心的自动化控制系统的开发。管理信息化指以林业网络化为核心系统建设，以森林资源网络化管理为基础，以电子政务为推动，突破传统管理时间、空间的限制，实现全时空、广信息、多媒体、快速度、零距离和交互虚拟管理，实现林业走向社会，社会参与林业建设的要求。可以说没有林业信息化就没有林业现代化。

我国林业管理信息化建设总体上走过了一条单机单项应用、单机单系统应用、多机单系统应用、多机多系统应用到网络系统应用的道路。但林业受自然、社会和经济的综合作用，数据源、数据类型和格式多样化增加了管理的复杂度，导致不少局部研究整体收效不明，与其他行业相比存在较明显的后滞。

针对我国林业管理信息化建设相对落后的现状，以及林业管理分层、分块的管理特点，2000年以来，我们坚持以系统理论为指导，以森林资源信息

共享联动、管理互动为主线，数据库建设为核心，应用系统建设为目标，以省域林业管理为研究对象，县级林业管理为基点，兼顾地区、省和国家层次管理要求，通过系统建设与应用，初步实现了各级、各部门各尽其责、信息共享联动、管理互动统一、相互协同规则的机制。我们的研究团队也由小变大、由弱变强，现已形成了由方陆明、徐爱俊、吴达胜、唐丽华、楼雄伟等10余位核心成员，40余人组成的林业信息技术研究与应用团队。

在多年的探索中，我们在思想上经历了迷茫、碰撞、统一三个阶段；研究内容上从专题到综合；技术方法上经历了从简单系统建设、复杂系统建设、管理模式探索、管理模式优化到物联网系统建设若干过程。当我们看到自己构建的新模式实现资源的重组时，开发的软件系统完成多部门、多环节信息联动和管理互动时，看到年龄大到50多岁只有小学文化的同志们也能很好地使用系统完成工作时，以及在将系统管理平台放到各县市的行政审批大厅，并延伸到乡镇和企业，听到各级领导、林业管理人员评论系统给他们带来的巨大而潜在效益时，我们深感欣慰。

在这10多年的探索过程中，得到了诸多领导和专家的关心、支持和帮助。正因有诸多人的付出，才有今天的一点点成绩。北京林业大学关毓秀先生、董乃钧先生、陈谋询先生，原国家林业局资源司司长寇文正先生始终鼓励和关注团队的研究，并在不同阶段给予指导；浙江农林大学校长周国模教授多次亲临团队组指导，甚至帮助解决一些关键问题；浙江省林业厅叶胜荣、吴鸿、蓝晓光、王章明等领导，资源管理处卢苗海处长，政法处吴晓平处长，资源总站丁良冬站长，信息中心叶永钢主任，林业规划设计院刘安兴院长，生态中心李土生主任，杭州市林水局陈勤娟副局长，丽水市林业局和龙泉市林业局多位领导等都在不同阶段指导或参与此项研究；还有浙江省各地、县以及贵州、广西等省区林业部门领导和管理人员也参与此项研究或提供基层需求信息，使我们能够把基层管理上的需求和森林资源自身的发展规律结合起来，切实使研究成果为林业生产经营和管理第一线服务，也使研究不断深入和拓宽，并取得丰硕的成果。在此，对所有关心、支持我们的领导、专家和同志表示衷心感谢！

林业信息化建设是一个只有起点没有终点的过程，是一项复杂的系统工程建设，没有各方通力合作，没有众多学者的共同努力，没有各级管理人员

的积极参与是难有成效的。尽管多年的林业信息化研究与应用存在这样或那样的不足，为了使研究成果能更好地为林业生产经营和管理服务，更好地为培养林业信息化人才服务，也为了能广泛地吸收各方的意见和建议，对其进行提炼和总结，并以森林资源信息管理、林业电子政务、森林防火信息技术、林权信息管理等专题撰书出版奉献给大家。

浙江农林大学林业信息技术研究团队

2014年1月

前 言

森林资源状况及其消长变化动态数据是国家制定经济和社会发展规划、生态安全规划和林业规划计划的重要依据。森林资源信息可通过森林资源监测获取。森林资源监测是指在一定的时间和空间范围内,通过信息采集与处理,对森林资源状态进行系统测定、观察、记载、分析和评价,以揭示区域森林资源动态变化及其机理。目前我国森林资源监测共有四类:国家森林资源连续清查(简称“一类调查”)、森林资源规划设计调查(简称“二类调查”)、森林作业设计调查(简称“三类调查”)及森林资源状况年度核查调查。

5年一次的森林资源一类调查,全国每年有 $1/5$ 的省进行调查,最后全国的数据是通过整合5年中各个省的数据而得到的,当最后的全国范围森林资源调查汇总资料出来时,最先参加森林资源调查省份的数据已经是5年前的数据。二类调查为10年一次,一个单位从调查组织到数据统计完成一般需要两年甚至更久的时间才能完成,且调查数据在调查间隔期内都将使用,这些都导致了森林资源调查数据本身就存在着非时效性。此外,传统森林资源调查成本很高,以浙江省而言,每个县的一次二类调查成本通常都在几百万元以上。森林资源监测无论是从生态角度考虑还是从林产品的利用角度看,传统的监测周期过长已经无法满足实际需求,但要提高其监测时效性又不得不考虑监测成本的问题。

浙江省于1998年提出进行省级森林资源年度监测,从1999年开始进行年度监测的实践和研究。目前,正在将年度监测扩充发展为森林资源动态监测体系。该体系主要针对一类调查,以降低调查样地数量(约为总样地量的 $1/3$)的方式来控制监测成本。针对二类调查的年度监测,目前常用的方式是以生长模型结合突变更新(如采伐、造林、火烧)区域的实地调查进行。动态监测体系的发展在一定程度上解决了传统森林资源监测带来的高成本和低时效问题。但随着科技的进步,森林资源动态监测体系和技术的进一步完善

仍然有很大的提升空间。如在一类调查中,若能充分利用历史数据和信息技术预测样地的调查指标,完全有可能进一步减少抽样调查数量或提高监测精度;在二类调查中,目前常用的生长模型大多都是针对结构简单的人工林的生长提出的,一种模型大多只能应用于同一种树种,且在建立模型前通常要求取地位指数、密度指数等参数,使得这些模型的通用性和实用性大为降低,实际上,许多森林资源尤其是南方的森林资源树种复杂多样,树龄参差不齐,立地条件复杂,许多树种甚至没有现成的模型可用,因此寻求新的模型或方法以适合更加复杂多变的林分的动态监测仍然值得研究。

多源数据融合可解决森林资源不同信息的互补性与协同性的问题,神经网络则具有容错能力强、可靠性高、对试验数据没有特殊要求的优点,擅长解决非线性拟合和预测问题,两者结合为实现低成本、高时效地预测森林资源蓄积量、胸径、树高或疏密度等指标提供了可能性。

蓄积量是森林资源监测最重要且最为大众所熟知的指标之一,考虑到研究的针对性,本书将其作为研究对象,整合遥感影像数据、数字高程模型数据、森林资源二类调查数据及固定样地调查数据等多源数据,建立能综合反映影响森林资源消长且能较低成本获取的自变量因子集,这些因子可涵盖地形、地貌、气候气象、土壤、林分结构特征及光谱特征等多个方面。通过多项式拟合结合经验数据求取各自变量因子的隶属度,并建立基于神经网络的模型,然后对森林资源蓄积量进行仿真和预测,预测精度期望能达到森林资源二类调查的蓄积量总体抽样精度标准(即85%)以上,以期对生产实践能起到重要的参考和指导作用。

全书共8章。第1章介绍研究背景、森林资源动态监测的国内外研究进展情况、研究目的与内容等;第2章介绍BP神经网络模型理论,并重点介绍了基于Levenberg-Marquardt算法改进的BP神经网络模型;第3章介绍了研究区概况及研究基础,包括了监测指标及影响其变化的自变量因子集、研究所用到的数据等;第4章为数据预处理,包括DEM、遥感数据的预处理,自变量因子数据的提取、监测指标数据的提取、自变量因子数据整合及各自变量因子隶属度的求解;第5章重点介绍如何建立基于Levenberg-Marquardt算法改进的BP神经网络的森林资源蓄积量预测模型,并以2007年研究区小班为评价单元分训练样本和测试样本对森林资源蓄积量进行仿真测试;第6章为森林资源蓄积量反演和预测,描述了如何利用第5章所建立模型反演2004年森林资源蓄积量及预测2007年森林资源蓄积量;第7章为胸径、树高等调查因子的估测,用于进一步验证模型的通用性;第8章则对全文研究结果作了总结

与讨论，并对今后可能的研究方向与内容提出了一定的看法。

该书是在浙江省重大科技专项（2011C12047）、浙江省自然科学基金（Y5110145）、浙江农林大学科研发展基金预研项目（2008FK60）等的资助下完成的，倾注了众多专家、学者和浙江农林大学林业信息研究团队全体同仁的心血。特别感谢王珂教授的悉心指导！感谢方陆明教授在研究思路、试验设计和野外考察等方面提供的指导！感谢徐爱俊、楼雄伟等老师提供的森林资源二类调查数据！感谢陈健、王彬老师提供的 DEM 数据及在数据预处理方面的指导！感谢胡海根、曾松伟老师在神经网络模型方面的指导！在森林资源二类调查数据中，还得到了龙泉市林业局的大力协助，在此表示衷心的感谢！感谢浙江大学农业遥感与信息技术研究所的黄敬峰、吴嘉平、史舟、许红卫、邓劲松等老师在科研上对我的关心和支持！感谢王小明、傅剑晶、韩凝、干牧野、雒瑞森等博士在课题研究过程中提供的诸多帮助及建议！

因时间和水平等诸多原因，书中错误在所难免，恳请广大读者批评指正！

著者

2014 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 研究目的与内容	12
1.4 研究技术路线	13
第 2 章 BP 神经网络模型	15
2.1 人工神经网络理论	15
2.2 人工神经网络结构	15
2.3 神经网络的学习方式	16
2.4 BP 神经网络	17
2.5 改进的 BP 神经网络	19
2.6 本章小结	24
第 3 章 研究区概况及研究基础	26
3.1 研究区概况	26
3.2 监测指标与自变量因子	28
3.3 研究区数据	33
3.4 本章小结	35
第 4 章 数据预处理	37
4.1 DEM 数据预处理	37
4.2 遥感数据预处理	38
4.3 自变量因子数据提取	42
4.4 监测指标数据提取	50
4.5 自变量因子数据整合	50
4.6 自变量因子隶属度求解过程与结果——以杉木为优势树种的小班	50
4.7 自变量因子隶属度求解结果——以马尾松为优势树种的小班	58

4.8	自变量因子隶属度求解结果——以硬阔类为优势树种的小班	62
4.9	自变量因子隶属度求解结果——以黄山松为优势树种的小班	65
4.10	本章小结	68
第5章	基于改进BP神经网络的森林资源蓄积量预测模型的建立	70
5.1	确定训练及仿真样本集	70
5.2	设置模型参数	70
5.3	建立网络	71
5.4	训练网络	71
5.5	网络仿真	71
5.6	森林资源蓄积量仿真结果及分析	71
5.7	本章小结	77
第6章	森林资源蓄积量反演和预测	79
6.1	2004年度森林资源蓄积量反演	79
6.2	2010年度森林资源蓄积量预测	82
6.3	本章小结	86
第7章	胸径、树高等调查因子的估测	87
7.1	平均胸径的估测	87
7.2	平均树高的估测	92
7.3	本章小结	98
第8章	总结与展望	99
8.1	主要研究成果与结论	99
8.2	创新点	100
8.3	展望	101
参考文献		102

第 1 章 概 论

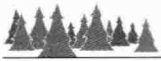
1.1 研 究 背 景

森林是人类生存发展的摇篮(雍文涛, 1992)。人类诞生于森林, 人类的发展受益于森林, 人类的未来离不开森林。森林在陆地生态系统中居于主体地位, 是自然界中物质最繁多、多样性最丰富多彩、层次结构最复杂、生产力最宏大的陆地生态系统。森林资源是生态建设的物质基础, 是生态安全的前提保障, 是生态文明建设的重要载体(方陆明, 2003)。

我国根据《中华人民共和国森林法实施条例》规定:“森林资源, 包括森林、林木、林地以及依托森林、林木、林地生存的野生动物、植物和微生物。森林, 包括乔木和竹林。林木包括树木和竹子。林地, 包括郁闭度 0.2 以上的乔木林地以及竹林地、疏林地、采伐迹地、未成林造林地、苗圃地和县级以上人民政府规定的宜林地。”从国有林区实际出发, 广义的森林资源是指林区范围内林木和林地以及其他植物、野生动物和微生物的总称。狭义的森林资源仅指以林木、林地为主的森林植物(吴宪忠和李志海, 2005)。

森林资源状况及其消长变化动态数据是国家制定经济和社会发展规划、生态安全规划和林业规划计划的重要依据。森林资源信息可通过森林资源监测获取。森林资源监测是指在一定的时间和空间范围内, 通过信息采集与处理, 对森林资源状态进行系统测定、观察、记载、分析和评价, 以揭示区域森林资源动态变化及其机理。目前我国森林资源监测共有四类: 国家森林资源连续清查(简称“一类调查”), 森林资源规划设计调查(简称“二类调查”)、森林作业设计调查(简称“三类调查”)及森林资源状况年度核查调查。我国的一类调查始于 20 世纪 70 年代末, 以省为总体(少数省多于一个总体), 受技术、交通、经费、经营粗放等因素影响, 传统的森林资源调查间隔周期较长, 每 5 年一次; 二类调查则按省进行, 以林业局或林场为总体, 在遥感图像划分小班的基础上结合抽样技术进行蓄积量调查, 每 10 年一次, 用于森林资源经营规划设计; 三类调查用于林业工程设计(刘安兴, 2006; 唐守正, 2011)。

5 年一次的森林资源一类调查, 全国每年有 1/5 的省进行调查, 最后全国的数据是通过整合 5 年中各个省的数据而得到的, 当最后的全国范围森林资源调查汇总资料出来时, 最先参加森林资源调查省份的数据已经是 5 年前的数据。二类调查为 10 年一次, 一个单位从调查组织到数据统计完成一般需要两年甚至更久的时间才能完成, 且调查数据在调查间隔期内都将使用, 这些都导致了森林资源调查数据本身就存在着非时效性(邓成, 2012)。此外, 传统森林资源调查成本很高, 以浙江省而言, 每个县的一次二类调查成本通常都在几百万元以上。森林资源监测无论是从生态角度考虑还是从林产品的利用角度看, 传统的监测周期过长已经无法满足实际需求, 但要提高其监测时效性又不得不考虑监测成本的问题。



浙江省于1998年提出进行省级森林资源年度监测,从1999年开始进行年度监测的实践和研究。目前,正在将年度监测扩充发展为森林资源动态监测体系。该体系主要针对一类调查,以降低调查样地数量(约为总样地量的 $1/3$)的方式来控制监测成本。针对二类调查的年度监测,目前常用的方式是以生长模型结合突变更新(如采伐、造林、火烧)区域的实地调查进行。动态监测体系的发展在一定程度上解决了传统森林资源监测带来的高成本和低时效问题。但随着科技的进步,森林资源动态监测体系和技术进一步完善仍然有很大的提升空间。如在一类调查中,若能充分利用历史数据和信息技术预测样地的调查指标,完全有可能进一步减少抽样调查数量或提高监测精度;在二类调查中,目前常用的生长模型大多都是针对结构简单的人工林的生长提出的,一种模型大多只能应用于同一种树种,且在建立模型前通常要求取地位指数、密度指数等参数,使得这些模型的通用性和实用性大为降低,实际上,许多森林资源尤其是南方的森林资源树种复杂多样,树龄参差不齐,立地条件复杂,许多树种甚至没有现成的模型可用,因此寻求新的模型或方法以适合更加复杂多变的林分的动态监测仍然值得研究。

多源数据融合可解决森林资源不同信息的互补性与协同性的问题,神经网络则具有容错能力强、可靠性高、对试验数据没有特殊要求的优点,擅长解决非线性拟合和预测问题,两者结合为实现低成本、高时效地预测森林资源蓄积量、胸径、树高或疏密度等指标提供了可能性。

蓄积量是森林资源监测最重要且最为大众所熟知的指标之一,考虑到研究的针对性,本书将其作为研究对象,整合遥感影像数据、数字高程模型数据、森林资源二类调查数据及固定样地调查数据等多源数据,建立能综合反映影响森林资源消长且能较低成本获取的自变量因子集,这些因子可涵盖地形、地貌、气候气象、土壤、林分结构特征及光谱特征等多个方面。通过多项式拟合结合经验数据求取各自变量因子的隶属度,并建立基于神经网络的模型,然后对森林资源蓄积量进行仿真和预测,预测精度期望能达到森林资源二类调查的蓄积量总体抽样精度标准(即85%)以上,以期对生产实践能起到重要的参考和指导作用。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 森林资源监测

我国的森林资源连续清查始于20世纪70年代末,以省为总体(少数省多于一个总体),每年调查 $1/5$ 的省份,5年一个轮回。二类调查一般每10年进行一次(刘安兴,2006)。通常认为,森林资源的主要因子如蓄积、面积等,在一定时间内是比较稳定的,不会有大的变动,因此5年一次的调查已能满足要求。但实际情况并不总是这样。就浙江省而言,从1979年开始到2004年进行了6次5年一次的一类调查,结果表明第6次的蓄积量变化几乎相当于前5次蓄积量变化之和(浙江省林业厅,2005)。

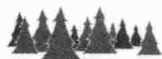
森林资源监测无论是从生态角度考虑还是从林产品的利用角度看,传统的监测周期过长已经无法满足实际需求。为此,许多国家如美国、奥地利、芬兰、法国、瑞典等从20世纪90年代开始实施森林资源年度监测(annual forest inventory)项目(Socott, C. T. et



al., 1999)。尤其在美国, 正从一个地区性的、周期性的老监测体系向全国性的年度监测新体系转变。2005年6月, 随着《强化森林资源调查与分析项目——全国抽样设计及估计方法》(The Enhanced Forest Inventory and Analysis Program—National Sampling Design and Estimation Procedures) (Bechtold, W. A. et al. (eds.), 2005) 的正式公布, 表明美国的新监测体系已基本成型。

浙江省从20世纪90年代后期开始研究年度监测问题(浙江省森林资源监测中心, 2000; 张国江等, 2002)。2000年由浙江省森林资源监测中心组织进行实践研究, 系统抽取1/3国家连续清查固定样地进行外业调查并进行成果分析, 2001—2003年以浙江省丽水市森林资源为对象, 连续3年进行年度监测(刘安兴, 2006)。刘安兴在总结多年来浙江省森林资源监测经验的基础上提出了3种省级监测样地抽取方案及相应估计方法, 即随机方案、系统方案和块状方案。同时, 提出了一套省级年度监测生长量和消耗量的估计方法, 给出了面积、蓄积方差估计的精确表达式, 在蓄积和生长消耗二相回归估计中, 提出了一些多元回归方程(刘安兴, 2006)。

Favrichon建立了热带混合品种异龄天然林分的动态生长模型, 并已被证实可用于短期以及中期预测(Favrichon, 1999)。项晓强等提出变时相生长模型技术, 从而解决了误差逐年积累和放大的问题, 提高了小班数据更新的可靠性(项晓强等, 1999)。杜纪山等以吉林省汪清林业局为例, 根据1997年森林经理调查的848块固定样地数据, 与全林整体模型方法相结合, 建立了适合于天然林区林业局(场)无人为干预小班森林资源数据更新的林分级生长模型组, 当小班调查得到各组成树种的平均高、平均直径及小班年龄、每公顷株数、郁闭度、散生木蓄积等因子后, 用天然林分生长模型可实现无人为干预小班数据的全面更新和连续预测(杜纪山等, 2000)。林成来等在研究马尾松人工林相对树高、相对冠幅、冠长率、树冠伸长度、树冠完满度、树冠投影比等6个竞争指数的基础上, 表明相对树高、相对冠幅及冠长率与马尾松直径生长关系密切, 进而建立了它们与马尾松平均胸高断面积生长量之间的回归关系, 以模拟林分生长(林成来等, 2000)。黄宝灵等建立了以种群密度为因变量的单因素回归模型(黄宝灵等, 2000)。黄家荣用模型优选方法构建了单木模型, 该模型主要适用于黔中地区中上等立地条件和正常经营密度的马尾松人工林(黄家荣, 2001)。周国模等研究表明浙江省杉木人工林生长模型、数量成熟龄、经济成熟龄和主伐年龄均与林分的立地条件有关(周国模等, 2001)。吴载璋和吴锡麟等利用福建省杉木产区的材料, 根据相对生长理论, 选用Richards一般化的Bertalanffy模型为福建省杉木人工林生长的基本模型, 并将地位指数和密度指数引入该模型, 形成以地位指数、密度和年龄为自变量的多形生长模型(吴载璋和吴锡麟, 2004)。谢惠琴利用福建省森林资源二类调查杉木纯林样地资料及正交表进行多元线性回归, 建立杉木树高、蓄积量数学模型, 结果表明, 线性回归方程极端显著(谢惠琴, 2004)。林太本等则利用“小班更新法”对县级森林资源进行动态监测, 其基本思想是在已建立的小班数据库基础上, 采用日常记载更新、补充调查更新、建立模型更新对小班数据进行更新, 然后再更新森林现状图和森林资源分布图(林太本等, 2006)。施新程则采用二维Kalman滤波方法, 以浙江省丽水市历年森林资源连续清查数据为基础, 对森林资源蓄积、面积动态变化进行预测, 该方法对于样地较多、面积较大的幼中龄林面积动态预测结果较为可靠, 而对于样地



较少、变异系数较大的成熟林和过熟林面积动态预测结果误差较大(施新程, 2006)。陆玉云和宋永全利用测树因子之间的回归关系, 构建了各生长分量随时间变化的经验回归模型(陆玉云和宋永全, 2010)。魏晓慧等利用 Richards 生长方程构建杉木树高生长模型(魏晓慧等, 2012)。

随着“3S”技术的飞速发展, 其构成了对空间数据实时进行采集、更新、处理、分析及为各种实际应用提供科学决策咨询的强大技术体系。在森林资源监测(刘缤艳等, 2007; 陈芸芝等, 2003; 杨朝俊等, 2006; 余坤勇等, 2007; 郭志华等, 2003; 阮仁宗, 2005; 葛宏立和方陆明, 2007)、土地利用(夏春林等, 2008; 薛阿亮等, 2008; 冯德俊等, 2003; 周斌等, 2001)、农业水利(张秀英等, 2008; 周炼清等, 2005; 杨武年等, 2003; 徐涵秋, 2006; 张华等, 2005; 陆家驹, 2001)、生态监测(张继承等, 2008; 江振蓝, 2008)、城市空间演变(吴柏清等, 2007; 陈龙乾等, 2004)等方面应用甚广。

Li Zengyuan 等在研究多源遥感技术在中国森林资源动态监测中取得了较好的应用性成果, 其研究中所利用的遥感数据包括 TM、MODIS、SAR, 采用光谱角法及最大似然分类法等对多源遥感图像进行分类和信息提取(Zengyuan Li, 2005)。TM 影像是经常使用的多光谱数据, 在 7 个波段中, 主要包括两类: 可见光波段(TM1, TM2, TM3)和红外波段(TM4, TM5, TM7), 波段 6 分辨率较低故不予考虑, 选择可见光波段中较典型的红色波段(TM3), 红外波段中较典型的近红外波段(TM4)和短波红外波段(TM7, 地质学家要求追加的波段)进行组合。SPOT5 全色波段分辨率高, 将 TM 与 SPOT5 进行数据融合, 不仅可最大限度地反映植物、地形、地貌信息, 而且能进一步提高识别精度, 一般采用代数运算的方法, 将多光谱数据与高分辨率全色数据进行逐点相加、相减或相乘等运算, 合成彩色图(王小东, 2005)。Propastin Pavel A. 在印度尼西亚的苏拉威西岛山区的热带雨林中, 采用改进的地理加权回归方法, 基于多光谱遥感数据估算热带雨林的地上部分生物量, 结果表明, 同时考虑水平和垂直两个方面要素的 GAWR(地理位置和海拔加权回归)方法显著提高了传统的 GWR(地理加权回归)和 OLS(普通最小二乘法)方法的仿真预测精度(Propastin Pavel A., 2012)。

传统卫星遥感的动态监测方法大体上可分为光谱直接比较法和分类比较法两大类。光谱直接比较法对光谱变化较为敏感, 可避免分类方法过程所导致的误差积累, 但需事先进行严格的辐射标准化, 以排除大气、太阳高度角、土壤湿度、物候等“噪声”对图像光谱的影响。由于目前各种辐射校正方法仍不成熟, 只能通过选择同一传感器、同一季相的数据以尽可能减少“噪声”。对数据预处理的过高要求大大地限制了光谱直接比较法的广泛使用。分类比较法对辐射校正要求相对较低, 适用于不同传感器、不同季相数据的比较。但由于不同时期分类结果误差的累积, 导致了对变化信息的判别精度较低。每一种方法都有其优势和缺陷, 事实上并没有一种方法最优而适用于所有情况, 只能根据不同的研究需要选择不同的动态监测方法。由于树冠阴影、林分结构的异质性以及光谱数据的饱和问题等影响, 单纯依靠遥感光谱信息建立森林资源动态监测模型存在精度不高、适用性不强等不足。纹理是影像的基本特征, 通常也是识别目标的一个关键特征, 与其他影像特征相比, 反映了像元的对比度及其频率变化, 从而反映了影像灰度模式的空间分布情况, 包含影像表面信息及与周边环境的关系。纹理更好地兼顾了宏观结构与微观结构, 可很好地反



映出遥感影像上的地物特征。纹理分析在计算机视觉、模式识别及数字图像处理中可起到重要作用。目前,在遥感中应用纹理信息的研究已经很多,研究结果表明纹理信息同光谱信息一样,能够有效进行地物信息的提取与分析(张锦水等,2007;李明诗等,2006;安斌等,2002;刘新华等,2006)。

多时相遥感影像可通过同一区域不同时期遥感影像的对比提取变化信息。结合小波融合、傅里叶变换、粗集、神经网络、云模型、独立成分分析等方法可对多时相遥感影像进行辐射校正、配准、边缘检测、变化趋势分析。粗集利用一对上、下挖集研究不确定性,是一种根据不完备信息分析决策的方法(Pawlak, 1991)。在地球信息科学中,粗集可用于分析森林资源属性数据库属性表的一致性和属性的可靠性,简化属性依赖和属性表,生成最小决策和分类算法,分辨不精确的空间影像,发现不确定属性的知识,集成多源不确定的属性数据等。但其存在一些弊端与不足:对计算和存储空间的浪费;符号混乱;粗集的等价类和等价关系缺乏数学基础;没有充分考虑空间关系、分布、粒度、测度等特性以及属性数据的不确定性等。利用 GIS 研究地球空间信息世界的理论和方法,数学假设应该承认其不确定性以及信息采集的不完备性。仅仅使用实体的确定性或不确定性的一种来完全取代它的所有不确定性,是不可能全面研究该实体的。为了解决上述瓶颈问题,处理定性概念中广泛存在的随机性和模糊性现象,李德毅得出了包括基本云模型、云发生器、虚拟云、云变换和云可视化等内容在内的云模型。云模型可将模糊性和随机性完全集成在一起,构成定性和定量相互间的映射,提供了一套可解决空间数据挖掘中的空间不确定性问题的新方法和新技术(李德毅等,2006)。根据不同的应用环境,不同时相的遥感影像变化检测方法可归纳为三类(Jensen J R, 1996):①基于简单代数运算的方法,是通过对多时相遥感图像进行代数运算,根据辐射值差异检测出变化的区域,如图像差分、比值和回归分析;②基于图像分类的方法,先对多时相图像进行分类,再根据分类后的类别属性进行变化检测,如分类后比较和多时相图像直接分类方法;③基于多变量分析的数据变换方法,先对多时相图像进行多变量变换以消除图像间的相关性,然后在变换后的图像上进行变化信息提取,如 PCA、MAD 和 Canonical 分析方法。PCA 是基于二阶统计的方法,只有在信号的统计分布符合高斯情况的前提下,才能完全消除信号间的相关信息,而对于非高斯信号则只能去除信号间的二阶相关信息。但在多时相遥感影像中,各种地物的光谱特性并非都能满足高斯分布,因此经过 PCA 变换的各成分图像间仍存在高阶相关信息,从而影响到变化信息的检测。为了提高检测精度,国内各研究学者又先后提出了自适应参数估计法、独立成分分析法、动态贝叶斯网络法对多时相遥感信息动态变化进行检测。自适应参数估计法首先应用分层 Markov 随机模型建立多时相差分图像的统计模型,然后通过非监督的迭代自适应参数估计实现差分图像的分类来检测变化的像元。在每次参数估计过程中,先将上次估计出的参数用于最大后验估计实现差分图像的分类,然后根据分类结果再对参数进行修正,并将修正后的参数用于下一次迭代分类,如此反复循环,从而自适应地完成差分图像的参数估计与分类(钟家强等,2005)。变化检测则通过分析多时相遥感图像间的差异实现地物变化信息的提取,而消除多时相遥感图像中的相关性,是提取变化信息的一种有效途径。独立成分分析(ICA)作为近年出现的盲源分离技术,能够有效地消除多源信号间的二阶和高阶相关,经其变换的各分量之间相互独立,通过分析后的独



立成分实现地物的变化检测(钟家强等, 2006)。利用动态贝叶斯网络(DBNs)在处理不同时相遥感数据时可以一次性输入多个时间段的数据, 同时完成分类和建立输出类别之间的关联, 基于DBNs的变化检测方法是一种新的遥感变化检测的有效方法, 在遥感时序数据动态变化分析的研究方面也展示了巨大的发展潜力(欧阳赞等, 2007)。

雷达遥感数据的高精度为森林资源动态监测注入了新的活力。Falkowski, Michael J. 等选择美国俄勒冈州东北部面积 12100 公顷的研究区域, 结合 K-近邻法和激光雷达数据, 建立了基于树级的森林生长模型(Falkowski, Michael J. et al., 2010)。Solberg Svein 等选取挪威南部以云杉为主的包含 28 个林分的森林作为研究区域, 建立了 192 个圆形样地, 样地面积为 250m^2 , 利用来自 TanDEM-X 的合成孔径雷达干涉测量技术数据监测云杉的蓄积量和生物量(Solberg Svein et al., 2013)。

1.2.2 森林资源多源数据融合

一种数据源通常只能较好地反映森林资源被测对象的某一方面, 如地形图能较好地反映地形和高程变化, 遥感图像则能较好地地区分各种地类和反映不同林种的变化, GPS 能较好地确定某一目标的经、纬度, 实地测量虽能较准确地获得树高、胸径、坡度和坡向等多种因子, 但因地势、成本和效益等因素必须通过其他数据源加以补充。由此可见, 森林资源多源数据提供的信息具有冗余性、互补性和协作性。进行多源数据融合与建模是一项十分有意义的工作, 可以更好地利用不同的数据源, 获取被测目标更准确、更综合、更有效的信息(曲晓慧等, 2003; 石玉梅等, 2003; Hall, d.l, Llinas, J., 1997)。

森林资源多源数据的融合主要表现在: 互补信息和协同信息的融合、多源遥感数据的融合等方面。在数据融合处理中使用的主要方法有: 图像处理、专家系统、多元统计、神经网络等。基于信息的互补性与协同性的融合, 可采用多元统计、神经网络等方法, 对已有多源数据或数据库进行数据特征分析与配准、特征提取与分类, 并通过特征值之间的关系建立信息与知识表达模型(陈怀新等, 2003; 游松等, 2001; 谢平等, 2001; 张兆礼等, 2001; 袁强等, 2000; Sharkey A J C., 1996)。

Shataee Shaban 在德国西南部地区的瓦尔德基希森林, 使用激光雷达及 TM 遥感数据作为数据源对研究区域的森林蓄积量和基底面积进行估算(Shataee Shaban, 2011)。Ying Guo 等基于多种遥感影像数据和支持向量机算法估计森林碳储量, 结果表明 LiDAR 和 SPOTS 结合比单一的数据源具有更好的效果(Ying Guo et al., 2011)。在芬兰, Mäkelä Helena 等利用 Landsat 卫星图像和连续清查样地的森林数据, 采用图像分割划分研究区域林分, 每个林段的林分蓄积量及其他参数产生于样地数据的平均值, 个别样地权重则是通过最近邻(KNN)方法计算得到, 最终估算地方级森林的生产和利用的可能性(Mäkelä Helena et al., 2011)。Han Ning 等以地面调查数据及 Landsat 影像为数据源, 基于地统计学来预估 1986 年到 2008 年间安吉县毛竹林地上部分碳储量(AGC)的时空异质性, 结果表明 AGC 的增加与空间异质性具有中度相关性(Han Ning et al., 2013)。

1.2.3 基于神经网络的森林资源动态监测

1943 年, 生理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 发表文章, 提出了第一个神经元模型(M-P 模型), 他们的努力奠定了网络模型和以后神经网络开发的基础, 开启了人们对人