



# 基于遥感和地面监测的森林 经理数据集成技术研究

纪平 谢阳生 肖云丹 等著



中国林业出版社

林业(Ⅱ)自然保护分册

第11卷 第1期 2011年1月 中国林业出版社

中国林业出版社

100007 北京 木桶胡同15号

# 基于遥感和地面监测的 森林经理数据集成技术研究

纪平 谢阳生 肖云丹 等著

中国林业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

基于遥感和地面监测的森林经理数据集成技术研究/纪平等著. —北京:  
中国林业出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5038-8972-1

I. ①基… II. ①纪… III. ①遥感地面调查—应用—森林经理—数据  
处理—研究 IV. ①S757-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 078670 号

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同7号)

网址 <http://lycb.forestry.gov.cn>

E-mail forestbook@163.com 电话 010-83143544

发行 中国林业出版社

印刷 北京中科印刷有限公司

版次 2017年3月第1版

印次 2017年3月第1次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 11.5

字数 256千字

印数 1~1000册

定价 45.00元

# 序

应对全球环境变化是当代科学研究的重要任务，提高森林生态系统的服务能力是应对气候变化带来的环境问题的主要途径，开展现代多功能森林经理是提高森林生态系统服务能力的一种重要手段。本项目是中国林业科学研究院资源信息研究所与斯洛伐克国家森林中心林业研究所合作，利用双边优势开展的多层次森林经理数据集成方法和技术的创新性合作研究，设计多功能森林经营技术体系，以加速实现提高森林质量、生产力和环境服务能力的现代森林经营目标，促进多功能森林经理的技术发展，为实现我国林业又好又快发展做出贡献。

森林经理学有森林经营管理，或森林资源经营管理等含义，它是对森林资源进行区划、调查、生长收获、效益评价、结构调整、决策和信息管理等一系列工作的总称。世界各国森林经理的具体内容不完全相同，但主体内容是相同的。在我国，森林经理的主要内容包括对森林进行的区划、调查、评价、编制经营计划、森林的经营决策和森林资源信息管理等。森林经理的目标是实现森林可持续经营。森林多功能经营是在气候变化背景下中国、斯洛伐克和世界上许多国家研究的重要方向。斯洛伐克拥有高质量的森林资源，中国有丰富的森林类型，双方有在多目标森林经营技术方面的共同兴趣，通过两国科研合作，双方分工共同开展合作研究，相互交流和共享研究进展和成果，并互派专家赴对方研究团队学习交流，有益于双方林业的发展。

在我国，构建基于遥感监测和地面监测技术的森林经营动态综合监测体系是我国林业技术体系中的亟待发展的领域，对于获取森林结构识别与量化方法、森林资源精准监测等新技术方面有促进作用。本书以现代森林多功能经营的应用需求为导向，开展多层次的森林经理数据集成方法的研究创新，促进以木材生产为主的传统森林经营管理向现代多功能森林经营管理的转变，为传统林业向现代林业发展提供支撑。

本书是中国林业科学研究院资源信息研究所多年研究成果的汇总，希望本书的出版对对我国森林经营工作能更好地应对全球气候变化等环境问题的挑战有所助益。

中国科学院院士



2017年1月

# 前 言

本书是科学技术部国家国际科技合作专项项目《基于遥感和地面监测的森林经理数据集成技术》(项目编号:2014DFG32140)的主要研究成果。

三年来,在十多名中国林业科学研究院科技人员和数名斯洛伐克国家森林中心专家的团结协作、联合攻关下,圆满完成了项目的研究任务,取得了如下的研究成果:①完成实验区森林调查和数据采集加工,建立了实验示范区的遥感和地面监测多层次森林经理数据库。②基于数据集成与数据融合技术,完成多层次森林经理数据集成系统的研制。③基于多层次森林经理数据库,完成多功能森林经营模式研究。④基于多层次森林经理数据库,研究森林植被对经营处理技术因素和气候变化环境因素的响应指标和测量方法,量化多功能森林经营模式的设计和 implementation 技术,提出经营单位级别的多功能森林经营技术体系,提出示范林区的多功能森林经营的优化方案。

经过几年的探索,结合我们的工作总结,在同行专家的指导和启发下,我们共同撰写了本书,旨在通过对关键知识、关键技术、关键技巧等问题的归纳和总结,为读者提供参考或指导。本书是全体项目研究人员集体辛勤劳动的结晶。在研究过程中,数据库技术与应用和森林经理二个学科的科研人员团结协作、密切配合,形成了良好的工作氛围,取得了可喜的研究成果。编写人员是:第1章:1.1 武红敢 1.2 刘宪钊、谢阳生、陆元昌 1.3 纪平 1.4 纪平;第2章:刘宪钊、陆元昌;第3章:3.1 纪平、谢阳生 3.2 侯瑞霞 3.3 张乃静 3.4 肖云丹、张雄清;第4章:纪平;第5章:谢阳生、陆元昌、纪平。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,诚请读者批评指正,我们将表示衷心的感谢,并在今后的编写中改正。

编者

2017年1月

# 目 录

第1章 国内外研究现状	(1)
1.1 森林资源多尺度监测研究综述	(1)
1.1.1 相关国家的多尺度调查体系	(1)
1.1.2 监测和调查数据的采集技术	(3)
1.1.3 多尺度遥感监测技术	(3)
1.2 森林多功能经营研究综述	(8)
1.2.1 多功能森林经营理论的历史总结	(8)
1.2.2 多功能经营技术的基本要求	(9)
1.2.3 森林多功能经营理论评价	(11)
1.2.4 中国开展多功能森林经营的对策	(11)
1.2.5 斯洛伐克林业及多功能森林经营状况	(12)
1.3 林业数据集成技术研究综述	(14)
1.3.1 概述	(14)
1.3.2 模式集成方法	(15)
1.3.3 数据复制方法	(17)
1.3.4 综合型集成方法	(17)
1.3.5 林业数据集成应用	(18)
1.4 斯洛伐克森林生物动力学模拟器系统(SIBYLA)简介	(20)
1.4.1 SIBYLA 系统	(20)
1.4.2 SIBYLA 的数据	(21)
1.4.3 SIBYLA 的数据库结构	(24)
1.4.4 SIBYLA 的主要功能	(25)
1.4.5 SIBYLA 的用途	(26)
第2章 经营单位级别的多功能森林经营	(27)
2.1 经营单位级多功能森林经营方针和目标	(27)
2.1.1 森林经营方针	(27)
2.1.2 多功能森林经营原则	(27)
2.1.3 森林经营目标	(28)
2.2 经营单位级森林多功能区划	(29)
2.2.1 森林功能区划原则	(29)
2.2.2 森林功能描述与划分	(29)
2.2.3 多功能森林经营区划	(31)
2.2.4 森林多功能经营区划制图	(34)

2.3	森林经营类型组织和林分作业模式设计	(36)
2.3.1	多功能森林经营类型规划设计原则	(36)
2.3.2	森林经营体系设计	(37)
2.3.3	目标森林发展类型设计	(38)
2.3.4	特殊树种的经营使用建议	(44)
2.3.5	林分作业法设计	(45)
2.3.6	小班经营模式设计	(49)
2.3.7	森林发展类型按小班分配结果	(53)
2.4	经营单位级森林多功能经营规划	(54)
2.4.1	更新造林规划	(54)
2.4.2	森林采伐规划	(57)
2.4.3	科学试验示范林规划	(57)
2.4.4	科技创新规划	(58)
2.4.5	科普教育规划	(60)
2.4.6	产业规划	(61)
<b>第3章</b>	<b>数据融合技术方法</b>	<b>(62)</b>
3.1	综述	(62)
3.2	空间数据融合分析	(64)
3.2.1	森林资源空间数据特征及差异性分析	(64)
3.2.2	森林资源空间数据集成技术	(66)
3.2.3	森林资源空间数据集成实现	(70)
3.3	空间与地面调查数据的融合	(75)
3.3.1	概述	(75)
3.3.2	研究数据	(76)
3.3.3	研究方法	(77)
3.3.4	研究结果	(82)
3.3.5	小结	(85)
3.4	地面数据融合	(85)
3.4.1	概述	(85)
3.4.2	研究数据	(87)
3.4.3	研究方法	(88)
3.4.4	研究结果	(91)
3.4.5	小结	(117)
<b>第4章</b>	<b>数据集成系统构建</b>	<b>(119)</b>
4.1	总体设计	(119)
4.1.1	系统需求	(119)
4.1.2	系统设计原则	(121)
4.1.3	系统功能设计	(122)
4.1.4	系统总体架构设计	(122)

4.1.5	系统环境设计	(125)
4.1.6	系统平台设计	(125)
4.2	接口设计	(125)
4.3	运行设计	(126)
4.4	数据库总体设计	(126)
4.4.1	数据库总体设计	(126)
4.4.2	数据存储方式	(127)
4.4.3	元数据库设计	(127)
4.4.4	地理空间数据库设计	(128)
4.4.5	属性数据库设计	(142)
4.4.6	数据库优化设计	(148)
4.5	系统出错处理设计	(148)
4.5.1	出错信息	(148)
4.5.2	补救措施	(149)
<b>第5章</b>	<b>多功能森林经营示范</b>	<b>(150)</b>
5.1	森林经理元数据管理和应用	(150)
5.1.1	森林经理科学数据分类	(150)
5.1.2	元数据设计	(150)
5.1.3	元数据管理应用	(151)
5.2	多层次数据的管理和可视化	(152)
5.3	多功能森林经营模式设计优化	(156)
5.3.1	适地适树	(156)
5.3.2	森林发展类型设计	(157)
5.3.3	林分作业法设计	(161)
5.3.4	多功能森林经营模式命名	(162)
	参考文献	(164)



# 第1章 国内外研究现状

## 1.1 森林资源多尺度监测研究综述

森林是地球上的重要自然资源，与人类生存、经济发展和社会进步休戚相关。众所周知，森林资源作为陆地生态系统的主体，是自然功能最完善、最强大的资源库、基因库和蓄水库，具有调节气候、涵养水源、保持水土、防风固沙、改良土壤、减少污染、美化环境、保持生物多样性等多种功能，对改善生态环境、维护生态平衡，起着决定性的作用。作为陆地生态系统中最大的碳库，森林在降低大气中二氧化碳的浓度、减缓全球气候变暖中具有十分重要的独特作用。因此，森林资源的监测调查及其技术体系研究一直备受各国管理者和研究者关注，且永远会是热点问题之一。

森林资源的监测调查通常在不同尺度下开展，从单木、样地、小班、林班、区域(县、省)到整个国家乃至大洲和全球。这些不同层次的监测调查要求和目标各异，所采用的技术和方法也各不相同。

### 1.1.1 相关国家的多尺度调查体系

1923年瑞典就开始了全国森林资源调查(NFI)，其目标是掌握森林资源状况(例如生长和采伐)，并跟踪这些变化。主要采用对调查地带进行系统抽样的方法，包括设立永久样地和临时样地，实现每年的全覆盖调查。其中调查森林地带由圆形样地组成，分别对树木及灌木层、立地条件、位置、土壤等因子进行测量，并估计所有树木的总蓄积、植被总面积等参数；由于瑞典的私有林比重较高，其为木材生产相关的森林经营规划调查，多采用目测法并以样地数据进行校准的方法进行。

德国为了掌握全国的森林面积和蓄积生长情况、森林破坏状况、土壤条件评价等管理目标，分别设计了国家林业调查、国家森林破坏调查、国家土壤状况调查等任务，以制定科学的林业政策，确保森林的各种生态和社会经济功能。其中全国森林调查时采用方格系统布局的方形群团样地，每个样地需要采集多达150个左右的变量；由林业主管部门实施的地区性调查主要完成森林规划框架、森林功能图、森林群落生境图等的编制，为森林政策制定和经营管理提供科学依据；林班水平的调查主要是服务于土地所有者的经营规划，产出反映森林真实分布的林班(或小班)图，它是定位、森林勘查、运输、采伐、木材加工和森林保护等的主要支撑手段和辅助工具。

印度每两年开展一次森林覆盖制图工作，主要是摸清茂密森林、疏林、红树林、低矮丛林地、无林地等分布情况，成图比例尺是1:25万或1:5万；全国森林调查自2001年后，对野外样地调查的内容进行了扩充，以便能在国家水平上对林地内外的森林资源做出全面

评估,也可掌握更新、生物多样性、土壤碳的情况;林外树木和庭院树木的调查采用按街区、直线和散状分层办法,各层间样地大小可能会不同,主要是估计立木蓄积、树种分类、直径等级等经营参数。

美国森林以天然林为主,人工林主要分布于东部和南部,其全国的森林普查(森林调查与分析)始于1930年,旨在获取森林面积状况及其发展趋势、森林分布、类型、健康状况、死亡率、砍伐、产品利用率、土地所有权、植被多样性、林中残余物等信息,由三阶段方案构成,每五年完成一次数据更新;林分水平的调查主要是用来绘制森林分布图,服务于工业用材林的经营规划;勘测、测量和蓄积估计调查的目的是为评估和销售木材,准确掌握木材或产品的潜在市场价值。

加拿大管理着世界上10%的森林,北半球30%的森林,其林地以公有为主。起初加国的全国森林调查主要是完成全国数据的汇总(各省森林类型制图结果),自上世纪90年代中期,启用新的设计方案,所有潜在样本都标注在全国网络中,以便于开展变化监测的管理需要;省级森林经营调查通常10~15年间循环一次,调查方法也不时更新。这些调查是在经营单元水平上为周期性规划而设计,成图比例尺约为1:20000,成果是森林类型(或林分)地图;工业林的经营调查主要通过经营管理调查和作业调查两种方式来实现,前者的目的是获得大面积森林的统计信息,以便制定经营规划和确定准许采伐的范围。后者的任务是提供小面积森林统计信息,以便制定采伐计划。

中国为了及时掌握森林资源的数量、质量和生长、消亡的动态规律及其与自然环境和经济、经营等条件之间的关系,为制订和调整林业政策,编制林业计划和鉴定森林经营效果服务,以保证森林资源在国民经济建设中得到充分利用,并不断提高其潜在生产力。按调查的地域范围和目的,森林资源调查分为:以全国(或大区域)为对象的森林资源调查,简称一类调查;为编制规划设计而进行的调查,简称二类调查;为作业设计而进行的调查,简称三类调查。这三类调查上下贯穿、相互补充,形成森林调查体系,是合理组织森林经营,实现森林多功能永续利用、建立和健全各级森林资源管理与森林采伐计划的基本技术手段。

全国森林资源连续清查是要从宏观上掌握森林资源的现状和变化。在一般情况下,不要求落实到山头地块,也不进行森林区划。当前大都采用以固定样地为基础连续抽样方法。其中固定样地不仅可以直接提供有关林分及单株树木生长和消亡方面的信息,而且由于它本身是一种由多次测定的样本单元,因此可以根据两期以至多期的抽样调查结果,对森林资源的现状,尤其是对森林资源的变化作出更为有效的抽样估计。2005年起,我国森林资源一类调查增加了遥感卫星判读的工作,即增加了数以百万计的遥感样地,主要是辅助固定样地调查,提高一类调查的数据精度;省级组织的二类调查主要是森林经营单位或县级行政单位对辖区范围内所有的森林、林木和林地的调查。包括区划、调查、资源统计分析3大工作步骤。除要进行或调整(复查)经营区划外,应调查各类林地的面积、林木蓄积、自然地理环境和生态环境因素、森林经营条件、前期主要经营措施与经营成效等基本内容,还需依据森林资源特点、经营目标和调查目的以及以往资源调查成果的可利用程度,定期(五年或不定期)开展森林生长量和消耗量、森林土壤、森林更新、森林病虫害、森林火灾、野生动植物资源、生物量、湿地资源、荒漠化土地资源、森林景观资源、森林生态因子、森林多种效益计量与评价、林业经济与森林经营情况、森林经营、保护和利用

等众多专项调查；作业设计调查是林业基层单位为满足伐区设计、抚育采伐设计等需要而进行的调查。对林木的蓄积量和材种出材量要做出准确的测定和计算。在调查过程中，对采伐木要编号。根据调查对象面积的大小和林分的同质程度，可采用全林实测或标准地调查方法，调查结果要给出物质—货币估算表。

总之，世界上许多发达国家都采取三个层次（国家、区域、小班）左右的林业调查体系，由于各类调查的对象范围和目的不同，所采用的方法、技术方案和所提供成果的详细程度与精度也各不相同。

## 1.1.2 监测和调查数据的采集技术

森林的数量和属性特征是林业行业科学决策的基础信息，获取这些信息的渠道就是开展监测和调查，由于林地面积巨大，采取对每株树木进行测量的统计调查方法极不现实且无必要，故调查区域和目的不同，数据采集的技术和方法也有所差异，需要强调的是很多技术和方法是相辅相成、相互补充与依存的关系，难以相互替代。

### 1.1.2.1 现地采集技术

依据调查人员的经验和专业知识或借助地面测量设备（或工具）等手段，通过人工在现场勘察、测量来采集待测木（或样地、林分）的定量和定性信息。如 GNSS 设备可以采集林木位置数据，测高仪可以获取树高信息，使用胸径尺可以量测胸径，地面传感网可以实时获取林间气象、土壤、树木生长等数据。这种现场采集技术可以获得精确的基础数据，但也与调查员的技术水平、责任能力、设备性能等条件极其相关，虽然具有一定的主观性，但仍然是样本调查、区域调查、每木调查等作业的重要手段，也是不可取代的工作过程。

### 1.1.2.2 抽样与统计分析技术

通过抽样的方法来获取相关信息。即对总体的一部分（样本）进行调查，然后以这些样本为基础对总体进行统计推理，各国现行的国家级森林资源调查多采用这种方式。目前主要有基于设计和基于模型的两大学派。在基于设计的推理中，抽样的随机性仅仅归结于抽样单元的随机选择。这种推理的依据是所以样本之间存在着差异，而这些样本又能够按照某种给定的抽样设计而抽取，所得置信区间可在重复抽样的假设下得以解释；而基于模型的推理却不是这样，其随机性仅取决于描述总体所使用的模型。在这种情况下抽样方法并不一定要随机，但必须考虑样本之间的相关性。

### 1.1.2.3 航空和航天遥感技术

虽然针对自然界中的每棵树都进行现场准确测量可以获得全面、详尽的第一手资料，但森林的广泛分布必然导致这仅可是幻想而已。因此到了 20 世纪 30~50 年代，在森林调查中就引进了抽样调查及航空摄影测量技术，调查效率大为提高。中国于上世纪五十年代开始使用航空相片进行小班区划、林木高度等因子的提取，随着遥感技术的不断发展，卫星遥感数据也逐步成为森林资源调查的重要数据源和辅助资料与手段。近几十年来 GIS 和 GNSS 的飞速发展，已使调查数据处理和图面材料的编制趋于标准化、自动化，极大地提高了工作效率和数据更新周期。

## 1.1.3 多尺度遥感监测技术

遥感即遥远感知，指在高空和外层空间的各种平台上，不直接接触目标或自然现象，

对其远距离探测和感知的一种技术。主要是运用各种传感器获取反映地表特征的各种数据,通过传输、变换和处理,提取有用信息,分析地物空间形状、位置、性质、变化及其与环境相互关系的一门现代应用技术科学,已经历了几百年的历史和发展阶段。即无记录的地面遥感阶段(1608~1838年)、有记录的地面遥感阶段(1839~1857年)、空中摄影遥感阶段(1858~1956年)和航天遥感阶段(1957至今)。

20世纪60年代为对地观测试验阶段,进行了机载飞行试验,发射了气象试验卫星、地球资源探测试验卫星。20世纪70年代开始发展实用气象、资源卫星,发射了NOAA系列气象卫星、LandSat系列陆地卫星,海洋卫星开始起步。20世纪80、90年代,海—陆—气对地观测体系建立,如行星地球计划。进入21世纪,对地观测产业迅猛发展,十多年间全球发射了数百颗对地观测卫星。表1-1就可充分展示空间分辨率的飞速发展进程。

表 1-1 陆地资源多光谱卫星发展历史简表

时 间	国 别	平台或传感器	空间分辨率
20世纪60年代	美国	TIROS、ATS、ESSA等气象卫星和载人宇宙飞船	
1972年	美国	地球资源技术卫星 ERTS-1(后改名为 Landsat-1), MSS 传感器	79m
1982年	美国	Landsat-4, TM 传感器	30m
1986年	法国	SPOT-1, PAN 和 XS 遥感器	10m
1999年	美国	IKONOS	1m
2014年	美国	WorldView-3	0.3m

目前在轨陆地卫星达上百颗,可实现长期稳定的全球监测。陆地卫星系列的空间分辨率、时间分辨率不断提高,且高一中—低搭配,为多尺度森林资源的监测奠定了坚实数据基础。

1983年,世界第一台成像光谱仪 AIS-1 在美国研制成功,并在矿物填图、植被生化特征等研究方面取得了成功,初显了高光谱遥感的魅力。在此后,许多国家先后研制了多种类型的航空成像光谱仪。如美国的 AVIRIS、DAIS,加拿大的 FLI、CASI,德国的 ROSIS,澳大利亚的 HyMap 等。在经过多年的航空试验和成功应用之后,90年代末期终于迎来了航天高光谱遥感的发展。1999年美国地球观测计划(EOS)的 Terra 综合平台上搭载了中分辨率成像光谱仪(MODIS)和号称新千年计划第一星的 EO-1,欧洲环境卫星(ENVISAT)上的 MERIS,以及欧洲 CHRIS 卫星的升空,宣告了航天高光谱时代的来临。我国高光谱仪的发展,经历了从多波段到成像光谱扫描,从光学机械扫描到面阵推扫的发展过程。根据我国海洋环境监测的需求,首先研制发展了以红外和紫外波段以及以中波和长波红外为主体的航空专用扫描仪。80年代中期,面向地质矿产资源勘探,又研制了工作在短波红外光谱区间(2.0~2.5 mm)的6~8波段细分红外光谱扫描仪(FIMS)和工作波段在8~12mm 光谱范围的航空热红外多光谱扫描仪(ATIMS)。在此基础上于80年代后期开发了新型模块化航空成像光谱仪(MAIS),这一成像光谱系统在可见—近红外—短波红外具有64波段,并可与6~8波段的热红外多光谱扫描仪集成使用,从而使其总波段达到70~72个。这一系列高光谱仪器的成功研制,为中国遥感应用提供了新的技术手段。此后,中国又自行研制了更为先进的推帚式成像光谱仪(PHI)和实用型模块化成像光谱仪(OMIS)等,并在国内外得到应用,成为世界航空成像光谱仪大家庭中的一员。PHI 成像光谱仪在可见

到近红外光谱区具有 244 个波段,其光谱分辨率优于 5nm; OMIS 则具有更宽泛的光谱范围,如 OMIS-1 具有 128 波段,其中可见-近红外光谱区(0.46~1.1 $\mu\text{m}$ )32 波段,短波红外区(1.06~1.70 $\mu\text{m}$ 及 2.0~2.5 $\mu\text{m}$ )48 波段,中波红外区(3.0~5.0 $\mu\text{m}$ )8 波段,热红外区(8.0~12.5 $\mu\text{m}$ )6~8 波段。

作为遥感手段发展的激光雷达测量技术可以追溯到上世纪 80 年代中期,当时美国国家航空航天局(NASA)研制了海洋激光雷达系统以及机载地形测量系统等机载设备,并开始了试验研究。经过几十年的快速发展,移动、地基、机载、星载商业传感器如雨后春笋般问世,为不同尺度森林资源的调查提供了丰富数据。

目前激光雷达技术与成像雷达、成像光谱技术被列为对地观测领域三大前沿技术。

### 1.1.3.1 洲际或全球尺度的资源评估

Dong 等(2003)利用 AVHRR 和森林调查蓄积量信息回归了全球生物量,在宏观尺度获得较好结果。Gallaun (2010)基于聚类的升尺度方法,结合 MODIS 数据和森林调查数据对针叶林和阔叶林分别建模估算了欧洲生物量,该方法不受样地数据和遥感数据尺度不一的影响。Chopping(2011)利用几何光学冠层反射率模型,结合 MODIS 红波段双向反射率系数提取了森林地上生物量。Chopping (2008)等人利用多角度成像光谱数据(MISR)估算亚马逊流域生物量,试验表明 MISR 包含了植被垂直尺度信息,可以提供及时、有效、大范围的森林生物量估算数据,极利于准确评估森林火灾导致的气体和颗粒物含量变化,从而获得较准确的生物量损失信息。

ICESat/GLAS 是目前唯一可以进行地上生物量估算的星载激光雷达数据,该数据提供全球范围的激光测距信息,被广泛用于洲际尺度森林冠层高度提取以及森林地上生物量估算。例如 Baccini 等(2008)就利用 GLAS 数据和 MODIS NBAR 数据进行了非洲生物量提取。

我国利用 TM 等中分辨率航天遥感数据,完成了涵盖全球陆域范围和两个基准年(2000 年和 2010 年),包括水体、耕地和林地等十大类地表覆盖信息,提供了全球地表覆盖空间分布与变化的详尽信息,将同类全球数据产品的空间分辨率提高了 10 倍,是全球环境变化研究、可持续发展规划等不可或缺的重要基础资料。

### 1.1.3.2 国家或区域尺度的资源普查

Guo(2008)采用多元线性回归模型,根据 LVIS 数据高度四分位数以及 PALSAR 后向散射系数,获取了美国北方针叶林生物量。Mitchard (2011a)利用 PALSAR 数据将研究区分为 40 个类别,根据 GLAS 冠层高度数据反演每个类别的生物量,从而得到加蓬 Lopé 国家公园生物量,该方法适用于生物量较高的非洲地区,且数据保障性极好。Hyde(2007)比较了 LiDAR、SAR、InSAR 在亚马逊较开阔区域西黄松(ponderosa pine)生物量的提取精度,认为还是 LiDAR 最高。尽管理论上结合 InSAR 数据,可以提高估测精度,但实际效果并不明显。Zhang (2014)联合使用 GLAS 数据与 MODIS 的 NBAR、LAI、森林覆盖率产品以及 MISR 数据,对比发现 MODIS 数据的引入提高了生物量反演精度,而 MISR 数据的加入未能改进反演精度。Duncanson (2010)和 Swatantran(2011)使用包括 LVIS 提取的高度信息以及 AVIRIS 分布信息,成功完成了美国内华达州森林生物量制图。

2012 年,我国开始了全国林地“一张图”的建设工作,其主要内容是利用近期米级高分辨率遥感数据,以及已有的一类、二类调查和其他相关资料,采用地理信息系统构建全国统一的森林资源数据库,提高林地资源监管效率,服务政府科学决策。这次全覆盖的遥

感监测,以县域单位为总体,将林地及其利用状况落实到山头地块,通过逐级汇总形成的“一张图”“一个库”成果,包含林地因子(地类、土地退化类型、林地质量等级)、基础因子(小班、面积、地形、土壤、交通区位等)、管理因子(土地权属、林种、类型、工程类别、公益林事权等级、公益林保护等级等)、林分因子(起源、优势树种、郁闭度、龄组、每公顷蓄积量、平均胸径、每公顷株树、灾害类型、灾害等级、生态功能等级等)、规划因子(林地保护等级、林地功能分区、主体功能区等)等五大方面因子,向精细化监测与管理迈出坚实步伐。

### 1.1.3.3 林班(或小班)尺度的资源详查

Boudreau(2008)探索了使用 GLAS、SRTM 以及基于 Landsat 影像获取的土地利用数据,在加拿大魁北克省提取斑块尺度生物量信息。

高光谱遥感数据的林业应用主要集中在区域森林类型识别和分类、植被化学成分估测和植物生态学评价等方面。由于高光谱遥感能探测到具有细微光谱差异的各种物体,因此,受“异物同谱”和“同物异谱”现象的影响相对较小,能大大地改善森林植被的识别和分类精度。森林树种类型识别的主要目的是提取森林树种的专题信息,为划分森林类型、绘制林相图等提供基础和依据。有学者利用 CASI、HYDICE、Hyperion 等航空、航天高光谱数据或光谱仪实测光谱数据进行森林树种类型的识别研究,还有学者通过波段组合、Logistics 回归、建立光谱信息模型等方法进行森林主要树种类型的识别,均取得了与地面数据相吻合的结果。如宫鹏(2000)等在利用机载 CASI 高光谱数据对美国加州的 6 种树种(糖松、美国西黄松、白冷杉、花旗松、香肖楠、加州黑栎)进行识别研究时,通过利用光谱微分计算成功地识别出这 6 种树种,向人们展示了高光谱数据在进行树种识别方面的强大能力;Zhang J K(2006)等利用小波变换方法处理 HYDICE 高光谱数据,对处理后的结果进行热带森林的树种识别研究,发现小波变换后的高光谱数据能提高热带森林树种的识别精度;陈尔学(2007)等利用 Hyperion 高光谱数据和地面观测数据,比较了几种高光谱统计模式识别方法,结果发现采用二阶统计量方法,同时结合空间上下文信息和光谱信息分类法(ECHO)可以有效地提高森林树种的识别精度;刘秀英(2005)等利用地物光谱仪测量了杉木、雪松、小叶樟树和桂花等 4 个树种的光谱数据,并利用光谱微分、波段选择等技术成功地识别出这几个树种;Tung FUNG(1998)利用野外实测光谱数据对香港 6 种常见的亚热带树种进行识别,精度都在 80% 以上。

在森林树种的生理生化特征识别中,主要涉及叶面积指数、生物量、水分含量、郁闭度、光合有效辐射、叶绿素、各种营养成分(N、P、K 等),以及(半)纤维、木质素、淀粉和蛋白质等。Zaroc-Tejada(2004)等通过不同尺度下冠层光谱模拟,获得了随叶绿素含量变化的一些规律,发现 MCARI/OSAVI 能有效去除土壤背景对植被叶绿素含量估测的影响,对叶绿素(a+b)含量的估测达到了预想的效果。Dalponte(2008)等使用包络线去除的 HYMAP 遥感数据对桉树进行监测发现,利用高光谱数据反演的氮含量估测值与同步实测冠层叶片的氮含量具有一致性。宫鹏(1995)等利用 CASI 高光谱数据对美国俄勒冈州针叶树的 LAI 进行了估测实验,得出 LAI 与归一化植被指数(NDVI)之间的双曲线关系是估计 LAI 最合适的方法。张良培(1997)等利用进行一阶导数运算处理后的高光谱数据对生物量进行估计,其结果很好地反映了地面的实际情况。实际上,通过森林生理生化特性的识别得到不同森林树种间的差异信息,利用这些差异信息进而可以实现树种类型识别,可以

更为有效地提高树种类型识别的精度。如 Martin(1998)结合不同森林树种之间特有的生化特性,将高光谱数据 AVIRIS(航空可见光/红外成像光谱仪)与簇叶化学成分之间建立关系,成功鉴别了10种森林类型(红枫、红栎、阔叶混交林、白松、铁杉、针叶混交林、挪威云杉、红松、云杉沼泽林及落叶阔叶沼泽林)。

#### 1.1.3.4 单木(或树丛)尺度的精细化监测(或调查)

机载 Lidar 数据已经成为获取单木参数的良好数据源。Eysn(2015)在阿尔比斯山的异构林分中,首先应用多种方法开展了单木位置的检测,同时借助 Lidar 数据具有获取目标高度的优势,可将树高的信息存储在单木点上,之后利用高度信息在下一个迭代中对非树木点进行剔除,整个流程实现了自动化。并认为基于树冠高度模型(CHM)的可变移动窗口大小的光谱最大值法较为有效,宜于单层针叶林分单木分布的探测,但对于复层林分的单木树冠探测还有很大挑战。

单木树冠形状和大小是森林经理和森林生态等的重要研究内容之一。早期基于航空图像的树冠投影勾绘在林分密度等因子的提取、林木竞争评估中发挥了重要作用。近20年来,基于高空间分辨率航空和航天遥感图像的树冠轮廓与树种类型提取研究层出不穷。PU(2012)等基于 IKONOS 和 WorldView-2 多光谱图像,应用线性判别分析方法,较好地实现了美国佛罗里达州坦帕市棕榈、栎等7种城市绿化树种的识别。Skurikhin(2013)等在西非半干旱区域的布基纳法索稀疏高原上,基于 QuickBird 图像采用面向地理对象的影像分析技术,成功提取了树冠(丛)。Bao(2014)等基于 GeoEye-1 数据,采用自适应互信息和瓦片计算方法,在宁波和北海实验区开展了单木树冠的提取。在 WorldView-2 数据的应用研究中,Ozdemir(2011)等应用灰度共生矩阵提取的纹理信息,预测了以色列干旱区林分的立木数量、断面积、材积、胸高直径标准差等森林结构参数的方法。Latif(2012)等根据近红外通道反映的树冠信息,在马来西亚热带雨林区开展了树种识别研究,认为只要有一定的地面数据支撑,就可以实现原始林区林木数量和树种的遥感监测。Heenkenda 等(2014)采用支持向量机方法,对澳大利亚达尔文市的红树林进行了树种级的识别,认为 WorldView-2 比航空相片有更好的分类准确性。Comes(2014)等在南半球的巴西第3大城市贝洛奥里藏特,针对研究较为薄弱的南半球、热带、城市区域的阔叶树单木树冠提取问题,在分析比较了区域生长、分水岭、模板匹配3种分类结果后认为,区域生长的分类精度最高。Ghosh(2014)等在低洼的印度恒河平原,分析了基于像素和面向对象分类方法用于竹(丛)提取的精度,认为面向对象的支持向量机分类器在热带地区的树种提取上有极大潜力。Karlson(2014)等实现了矮松、圆柏等冠幅(树冠直径)的估测。Chemura(2015)等根据树冠面积与年龄相关的特点,基于分层分类与线性回归技术,很好地估测了13年以下的油椰子树的林龄,表明影像上树冠投影面积的准确提取最为关键。Mutanga(2015)等应用归一化差值植被指数(NDVI)和比值指数(RI)构建了南非草地叶片氮含量随机森林回归模型,并评估了模型的健壮性。

近年来,林业物联网技术飞速发展,可以实时准确获取林间小气候、森林土壤养分情况、树木健康状态等动态信息,使遥感技术服务于更为微观、定量、精准数据的采集。

总而言之,由于区域范围、成果粒度、调查周期等的差异,会使用不同空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率、波谱分辨率的遥感数据,实现不同尺度森林资源的监测与评估,在实际生产中并不是数据越精细越好,比如空间分辨率和时间分辨率就是一对“冤

家”，只要能满足多层次管理需求即可。无论如何，天空地一体化的遥感数据采集技术和分析方法，正在丰富和完善着现代林业资源数据的调查手段，也将会使传统的人工地面调查、抽样和遥感技术更为融合与集成，促进社会管理的信息化、科学化和智能化。

## 1.2 森林多功能经营研究综述

森林具有十分复杂的系统结构，以多种方式和多种机制影响着陆地上的气象、水文、土壤、化学、生物等过程，并由此生成了对人类有益的多种功能，同时具有多种功能，是森林相对于农田、草地等矮小和短生长期植被的最突出特征，是一种自然禀赋，但能否充分发挥却与人类的正确认识和科学利用相关。

森林具有多种功能，《联合国千年生态系统评估报告》将其分为供给、调节、文化和支持等四大类。多功能林业就是在林业的发展规划、恢复和培育、经营和利用等过程中，从局地、区域、国家到全球的角度，在容许依据社会经济和自然条件正确选择的一个或多个主导功能利用并且不危及其他生态系统的条件下，合理保护、不断提升和持续利用客观存在的林木和林地的生态、经济和社会等所有功能，以最大限度地持久满足不断增加的林业多种功能需求，使林业对生态、社会和经济建设发展的整体效益达到持续最优。

多功能林业就是在林业的发展规划、恢复和培育、经营和利用等过程中，从局地、区域、国家到全球的角度，在容许依据社会经济和自然条件正确选择的一个或多个主导功能利用并且不危及其他生态系统的条件下，合理保护、不断提升和持续利用客观存在的林木和林地的生态、经济和社会等所有功能，以最大限度地持久满足不断增加的林业多种功能需求，使林业对社会经济发展的整体效益达到持续最优。多功能林业又称多功能森林，其本质是一样的。森林多功能经营就是合理保护、不断提升和持续利用客观存在的林木和林地的生态、经济和社会等所有功能，以最大限度地持久满足不断增加的林业多种功能需求，使林业对社会经济发展的整体效益达到持续最优。森林多功能价值的发挥需要通过科学合理的经营活动来实现，森林的多功能经营技术及模式的研究，是当前我国林业向多功能可持续森林经营方向发展最需要解决的关键问题(侯元兆, 2010)。

多功能林业的目标是在相同的时间和空间上发挥森林的这些效用，这即意味着放弃通过人为手段和计划大规模控制和干预自然的轮伐期林业经营体系，而转向以生态系统为对象的近自然经营道路。多功能森林经营就是以在林分水平上同时实现森林的供给、调节、文化、支持等四大类功能中的两个或以上功能的森林经营方式。

### 1.2.1 多功能森林经营理论的历史总结

多功能森林经营理念由来已久，根植于19世纪的恒续林思想，发达于20世纪60年代西方社会出现的生态觉醒。联合国在1992年召开的环境发展大会明确提出森林可持续经营的概念和思想，实质上包括了森林多功能经营思想。多功能森林经营是指管理一定面积的森林，使其能够提供野生动物保护、木材及非木材产品生产、休闲、美学、湿地保护、历史或科学价值等功能中的2种或以上(William Hubbard et al., 2006; 李智勇等, 2013)。经过近半个世纪的研究和实践，多功能森林经营已成为世界林业发展的新方向；特别是近三十年以来，成为林业发达国家森林经营的总趋势(Puettmann et al. 2015; Brukas



& Weber, 2009)。目前,德国、澳大利亚等林业发达国家已步入多功能林业时代,欧盟和日本还通过立法促进多功能森林经营;而我国仍处于起步阶段,发展空间很大(李剑泉等, 2011)。

在全球森林经营水平较高的国家和地区,多功能经营的理念已有超过两百年的发展历程。18世纪初,德国、法国、瑞士等国家的林学家提出森林永续收获原则并广泛应用于木材收获和森林经营实践;中期时认识到大面积人工针叶纯林的弊端,提出了著名的“森林多效益永续经营理论”;18世纪末提出恒续林经营思想,为日后近自然经营的理念奠定了基础(Bauhus et al. 2013)。从19世纪后期至20世纪初期,德国、瑞士等国的学者开始倡导在森林经营中维护并顺应林分自身的结构和发育进程(Bauhus et al., 2013)。从20世纪50年代起,人们对森林结构和功能的研究与认识日渐深入,森林的多重功能性被进一步发掘,强调了森林包括非商品性价值在内所有功能和价值(Evans 2006)。20世纪60年代以后,“森林多功能理论”由德国开始推行,并逐渐为美国、瑞典、奥地利、日本等许多经济发达国家接受。1960年,美国颁布了《森林多种利用及永续生产条例》,标志着美国的森林经营思想由生产木材为传统的森林经营走向经济、生态、社会多功能经营的现代林业。1975年,德国公布了《联邦保护和发展森林法》确立了森林多效益永续利用的原则,正式制定了森林经济、生态和社会三大效益一体化的林业发展战略(陆元昌等, 2010)。近年来,在多功能森林经营的框架下(Bauhus et al., 2013),将森林作为一个完整的生态系统来经营的“近自然林业”(Close-to-Nature Forestry)在欧洲中部和南部(如德国、瑞士、斯洛文尼亚、意大利)发展迅速(ProSilva, 2014);在北美和澳大利亚,基于火干扰或其他自然干扰事件后森林的反应发展而来的“新林业”(New Forestry)(Franklin & Forman, 1987),将经营的关注重点放在采伐后所“保留”林分的状态上,也因此以“保留性林业”(Retention Forestry, Lindenmayer et al., 2012)这一更广义的概念在世界范围内得到了认可。

我国多功能森林经营理念有深远的历史渊源,早在先秦时期就认识到森林具有多种功能。清代俞森是比较早地系统论述林业具有多种效益的学者。1947年,郝景盛发表《森林万能论》,标志着中国多功能林业理论正式诞生。20世纪末出现的现代林业理论,在突出强调森林生态效益的同时,要求高效发挥森林的多重功能和价值(宋军卫, 2011)。国家林业局在2008年全国林业厅局长会议上明确提出“把加强森林经营作为现代林业建设的永恒主题”,并启动了森林抚育试点项目。《中国多功能林业发展道路探索》一书进一步肯定了开展多功能森林经营理论与技术研究的必要性和迫切性(中国林业科学研究院“多功能林业”编写组, 2010)。

我国围绕多功能森林经营开展的理论和实践研究,在人工林经营的生态学基础和育林体系方面也有试点突破(盛炜彤, 2014),但是对多功能森林经营的概念、技术和模式等仍处于探索阶段(曾详谓等, 2013)。陆元昌等(2011)在总结德国多功能森林经营在国家、区域和经营单位层面的实践的基础上提出了一种我国多功能森林经营的作业法技术模式(Lu et al., 2013),并结合全国多功能森林经营样板基地的建设应用到森林抚育经营实践中,但森林作业法的机理性研究仍处于空白状态。

### 1.2.2 多功能经营技术的基本要求

森林多功能经营技术就是在功能评价的基础上,结合社会经济水平和社会需求确立主