



地球观测与导航技术丛书

复杂地表定量遥感 模型与反演

李增元 柳钦火 阎广建 王锦地 牛铮 蒋玲梅 陈尔学 等著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

复杂地表定量遥感模型与反演

李增元 柳钦火 阎广建 王锦地 等 著
牛 铮 蒋玲梅 陈尔学

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”为基础,以解决“复杂地表遥感动态信息分析与建模”这个基础性、共性科学问题为目标,首先介绍复杂地表空间异质性的表征方法,阐明复杂地表遥感辐射散射机理及所构建的复杂地表可见光、热红外和微波波段的主被动辐射传输模型系列;其次论述遥感信息空间尺度效应及尺度转换方法、遥感信息动态特征建模与时间尺度扩展方法,为时空连续遥感信息的定量反演奠定了方法论基础;然后介绍森林垂直结构信息遥感定量反演、植被垂直生理生化参数信息遥感提取、土壤-植被水热参数多模式遥感协同反演等研究方向的最新进展。为了满足复杂地表定量遥感科学问题研究对多源多尺度多平台对地观测数据的需求,在典型复杂地表实验区组织开展了星-机-地遥感综合实验。本书最后对综合实验方法和所取得的数据成果进行了总结,并阐述了基于综合实验区数据和以上定量遥感方法论实现区域森林生物量动态信息时空协同建模与分析的模型和方法。

本书可供从事植被结构及理化参数、土壤水热参数、林下地形测绘等定量遥感反演研究领域的科技工作者、高等院校师生和从事相关遥感应用工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地表定量遥感模型与反演/李增元等著. —北京:科学出版社,2019.5
(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-059854-7

I.①复… II.①李… III.①环境遥感—研究 IV.①X87

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第264969号

责任编辑:苗李莉 / 责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东 / 封面设计:图阅社

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年5月第一次印刷 印张:38 3/4 插页:8

字数:900 000

定价:280.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

从书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

序

遥感技术具有宏观动态的优势，是全球资源环境监测不可或缺的重要手段，是全球人类可持续发展研究的重要技术支撑。遥感机理研究主要包括物理属性和几何属性两个方面，遥感物理机理、建模与反演研究是提高全球资源环境遥感监测量化水平的基础，是遥感科学研究前沿之一。2000年以来，国家重点基础研究发展计划（973计划）连续支持了两个项目，形成了以李小文院士为核心的遥感物理定量基础研究团队，在遥感物理建模和地表参数定量反演等方面取得了一系列重要成果，推动了我国遥感物理定量发展，在各个行业中得到了广泛的应用，在国际上也占有一席之地。为进一步满足全球生态系统监测评估，以及森林碳汇估算的需求，中国林业科学研究院资源信息研究所李增元研究员任首席科学家，联合北京师范大学、中国科学院遥感与数字地球研究所、武汉大学、电子科技大学、中国科学院大学和北京大学等单位，于2013年开始承担了973计划新的项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”，围绕复杂地表遥感机理与建模、遥感信息时空尺度效应以及植被三维结构和水热参量的多模式协同反演机制等关键科学问题，团结协作、攻坚克难。

通过5年的努力，项目组精心组织了复杂地表星-机-地遥感综合实验，在非均质混合像元空间异质性表征、山地遥感辐射散射机理和时空尺度扩展等关键科学问题方面取得了显著进展，实现了复杂地表遥感物理信息动态分析与建模理论的突破。可喜的是，项目组凝聚培养了一批优秀的青年学术带头人，在国际一流学术刊物上发表了一系列高水平学术论文，不断提升了我国遥感基础研究的国际学术地位。更加难能可贵的是，项目组特别注重基础研究与实际应用相结合，成果应用于国产卫星全球定量遥感产品生产，为科技部“全球生态环境遥感监测报告”提供了有效支撑；项目成果还直接应用于陆地生态系统碳监测卫星的载荷设计论证，填补了我国植被生物量遥感卫星探测的空白。

该书论述了复杂地表遥感信息动态分析与建模所涉及的前沿科学问题，分析了相关领域的国内外研究现状及发展趋势，全面阐述了项目所取得的最新研究进展和成果，是我国遥感基础研究领域的一本重要著作，可为相关领域科技工作者、高等院校师生和遥感应用相关从业人员提供有益的参考。

中国科学院院士
中国工程院院士



2018年12月8日

前 言

当前,虽然遥感机理建模与地表参数反演研究已取得一系列重要成果,并开始服务于行业需求,但是,由于对复杂地表的遥感机理不清,对遥感信息的尺度转换机理认识不足,复杂地表植被-土壤参数遥感定量反演精度有待进一步提高,植被理化参数垂直分布需要新的遥感探测方法,复杂地表土壤-植被水热参数精细反演缺乏多波段遥感协同新机制……总之,诸多关联遥感信息定量反演的科学问题严重制约着海量遥感数据的应用成效,定量遥感基础研究正面临新的机遇与挑战。因此,如何利用多源、长时间序列对地观测数据,发展刻画复杂地表动态变化的遥感机理模型,提出改进植被-土壤系统参数估算精度和遥感产品的时空连续性的新思路和新方法,满足多学科对遥感动态信息的需要,推动日益增加的卫星数据的有效应用,是近年全球遥感科学与技术发展关注的重要方向之一。在此背景下,自2013年起中国林业科学研究院联合北京师范大学、中国科学院遥感与数字地球研究所、武汉大学、电子科技大学、中国科学院大学和北京大学等科研院所和高校,开展了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”的研究。

项目组围绕“复杂地表遥感信息动态分析与建模”的国家重大需求和国际科学前沿,突破了非均质混合像元空间异质性表征、山地遥感辐射散射机理和时空尺度扩展等关键科学问题,引领了国际复杂地表定量遥感方向;创造性地提出了复杂地表植被-土壤参数多模式遥感协同反演的新机制,实现了复杂地表遥感动态分析与建模理论的突破。本书以该项目的研究内容为基础,对相关成果进行了较系统的阐述,共设八章,每章的主要内容如下。

绪论:总结了复杂地表定量遥感模型与反演研究的国家重大需求,论述了复杂地表遥感信息动态分析与建模所涉及的科学问题,分析了相关领域的国内外研究现状及发展趋势,阐述了本专著主要研究内容的必要性及其科学价值。

复杂地表遥感辐射散射机理建模:阐述了复杂地表空间异质性的表达方法及全球地表空间异质性的分析结果,介绍了复杂地表的二向反射特性建模、热辐射方向性建模、雷达后向散射建模、激光雷达建模、全波段的遥感联合模拟的最新进展,以及复杂地表遥感机理模型的验证及真实性检验。

遥感信息空间尺度效应及尺度转换:从普适性尺度转换模型的角度阐释了复杂地表空间尺度效应产生的机理,以叶面积指数(LAI)、吸收光合有效辐射比例(FAPAR)和植被覆盖度(FVC)等要素为例,较为系统深入地介绍了遥感参数的空间尺度转换方法。

遥感信息动态特征模型与时间尺度扩展:主要论述遥感信息动态特征提取方法、遥感信息的动态变化模型构建、遥感信息的时间尺度扩展方法和综合多源数据的时空分布参数估计方法。

复杂地表森林垂直结构信息遥感定量提取:阐述了极化SAR(PolSAR)复杂地

形效应和校正方法、干涉 SAR (InSAR) 层析森林垂直结构信息反演模型和方法及多模式遥感协同反演森林垂直结构信息的方法。

植被垂直生理生化参数信息遥感提取理论和方法：阐述了植被生理生化参数垂直异质性特征分布的遥感信息主被动遥感反演的理论和方法，重点论述了基于主动光学遥感的植被叶面积密度、叶绿素等植被结构和生化信息一体化反演的方法、仪器和技术。

土壤-植被水热参数多模式遥感协同反演：论述了热红外与微波辐射协同反演机制、土壤-植被水热参数遥感反演模型和方法、热红外遥感与微波协同反演地表温度、土壤水分和陆表冻融状态监测的方法。

区域森林生物量动态信息多模式遥感协同提取：介绍了复杂地表遥感综合实验、森林生态过程综合模拟方法与时间序列主被动遥感数据的森林地上生物量信息动态分析与建模。

本书由李增元拟定大纲，组织撰写。各章主要执笔人为：第 1 章李增元、田昕、陈尔学等；第 2 章柳钦火、李静、曾也鲁、焦子铨、闻建光、范谓亮、杜永明、曹彪、孙国清、倪文俭、杜阳、黄华国、张阳、肖青和柏军华等；第 3 章阎广建、穆西晗、姜小光、范闻捷、吴骅、张吴明、谢东辉、胡容海、王祎婷、陈一铭和高湛等；第 4 章柏延臣、肖志强、王锦地、屈永华、光洁、宋金玲、周红敏、杜克平等；第 5 章李增元、倪文俭、陈尔学、赵磊和李兰等；第 6 章牛铮、高帅、李世华、孙刚、李旺和寇培颖等；第 7 章蒋玲梅、柴琳娜、张仁华、周纪、刘志刚、邱玉宝、崔慧珍和王健等；第 8 章田昕、李增元、倪文俭和闫敏等。全书由李增元、陈尔学、赵磊等统稿，由李增元审定。

本书是在国家重点基础研究发展计划 (973 计划) “复杂地表遥感信息动态分析与建模” 项目 (2013CB733400) 资助下完成的。项目开展期间得到了国内相关单位和同行的无私帮助，作者在此表示衷心感谢。由于水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

除书后所附彩图外，读者可扫描封底二维码获取更多彩图资源，供阅读参阅。

作者

2018 年 6 月

目 录

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国家重大需求	2
1.2 主要科学问题	4
1.3 复杂地表遥感信息动态分析与建模研究现状	5
1.4 章节概述	21
参考文献	22
第 2 章 复杂地表遥感辐散射机理建模	33
2.1 复杂地表空间异质性	33
2.2 复杂地表二向反射特性建模	38
2.3 复杂地表热辐射方向性建模	73
2.4 复杂地表后向散射特性建模	88
2.5 复杂地表激光雷达信号建模	97
2.6 全波段遥感联合模拟	105
2.7 复杂地表遥感机理模型验证及复杂地表真实性检验	119
2.8 小结	132
参考文献	133
第 3 章 遥感信息空间尺度效应及尺度转换	141
3.1 尺度效应的定义和表达	141
3.2 复杂地表普适性尺度转换概念模型	143
3.3 复杂地表物理模型参数化及尺度效应	148
3.4 植被结构参数地面间接测量及尺度效应	168
3.5 复杂地表植被结构参数遥感反演尺度转换动态验证	193
3.6 小结	221
参考文献	221
第 4 章 遥感信息动态特征模型与时间尺度扩展	228
4.1 遥感信息动态特征提取方法	228
4.2 遥感信息的时间尺度扩展方法	259
4.3 多源定量遥感产品时空融合	276

4.4 小结	296
参考文献	296
第 5 章 复杂地表森林垂直结构信息遥感定量提取	303
5.1 极化 SAR 复杂地形效应及校正方法	303
5.2 InSAR 层析森林垂直结构信息定量提取模型和方法	323
5.3 多模式遥感协同森林垂直结构信息反演	339
5.4 小结	353
参考文献	353
第 6 章 植被垂直生理生化参数信息遥感提取理论和方法	356
6.1 植被垂直生理生化参数一体化提取理论	356
6.2 植被生理结构参数垂直分布信息提取方法	362
6.3 植被生化组分参数垂直分布信息提取方法	391
6.4 面向植被参数垂直分布探测的多波段激光雷达装置研究	402
6.5 小结	431
参考文献	431
第 7 章 土壤-植被水热参数多模式遥感协同反演	436
7.1 热红外与微波辐射协同反演机制	436
7.2 土壤-植被水热参数遥感反演模型和方法	452
7.3 多模式协同地表土壤-植被水热参数反演模型和方法	489
7.4 小结	511
参考文献	512
第 8 章 区域森林生物量动态信息多模式遥感协同提取	520
8.1 森林生物量动态监测遥感综合实验	520
8.2 森林生态过程综合模拟方法	544
8.3 时间序列主被动遥感数据的森林地上生物量信息动态分析与建模	571
8.4 小结	604
参考文献	605

彩图

第1章 绪 论

陆地表面的复杂多变是遥感信息分析与建模的关注点。“复杂地表”是指地形复杂、地块破碎、类型多样、属性多变的地表。“复杂地表”是中国国土的基本国情，复杂地表遥感辐射传输建模是遥感科学研究的国际前沿，是提高定量遥感产品精度、有效满足遥感应用需求的根本保障；遥感信息动态分析与建模是实现遥感从瞬间观测到获取时空连续信息的前提，是遥感基础研究与应用结合的重要环节，是保护生态环境、履行国际环境公约的战略需求。

复杂地表遥感是当前遥感基础研究的薄弱环节，其建模理论更是遥感科学发展的国际前沿。现有的定量遥感模型多是基于地表均一条件下的遥感辐射传输原理，而对地表混合像元内的相互作用、地形影响、植被三维结构等关键科学问题研究不足。实际上在遥感像元尺度上多数地表并非均质地表，包括复杂山区、地表覆盖等多样性的自然景观，遥感像元一般表现为混合像元。现有的均质地表假设条件下建立的遥感辐射传输模型不能满足非均质地表条件下遥感产品生产的需要，限制了在全球土壤-植被生态参量监测、地表过程及地球系统科学研究中的应用。发展复杂地表像元尺度主被动辐射传输动态建模及反演理论，是遥感科学研究中的前沿方向，可为植被三维结构及动态变化信息探测等遥感新方法、新技术提供模型依据，对于推动定量遥感科学发展具有重要的意义。

遥感只能获取瞬间观测数据，不能直接提供时间连续的信息产品。遥感信息动态分析方法可以为获取地表连续时空分布信息提供理论基础。基于多年积累的时间序列遥感观测和数据产品，分析遥感信息的动态特征，发展描述陆表相关参量动态变化的时空过程模型，就有能力将各种时空尺度零散分布的观测数据融合到一起，实现多源观测数据的协同反演，有望为遥感数据的应用带来革命性的变化。如果充分集成现有成熟的过程模型作为先验知识来支持遥感信息动态分析，生成高精度时空连续的遥感产品，将有力地促进遥感技术的广泛应用。

为此，在“十二五”国家重点基础研究发展计划（973计划）支持下，“复杂地表遥感信息动态分析与建模”项目（2013CB733400）面向对地观测技术快速发展、急需提高遥感信息动态分析与建模能力的战略需求，围绕复杂地表植被-土壤遥感信息由多期静态观测到时空连续扩展，构建复杂地表的遥感辐射传输模型系列，多尺度长时间序列遥感信息时空尺度转换与动态分析模型系列，发展关键地表参数的多模式遥感协同反演理论，形成森林植被垂直结构、生理生化参量三维信息与土壤水热参数的多维度遥感信息动态分析与建模的新方法体系，提高植被-土壤参数反演精度和信息提取效率，降低遥感监测评估成本，促进定量遥感科学与对地观测技术发展，提升我国生态环境遥感动态监测与预警能力。

1.1 国家重大需求

(1) 遥感基础理论研究是推动我国成为卫星遥感应用世界强国的必要内容,是实现国家中长期规划目标的重要保障。

目前,我国已形成气象、海洋、资源、环境与减灾、测绘五大民用卫星系列,已开展的国家对地观测系统重大科技专项,到2020年,将投资近500亿元,发射多颗不同载荷的卫星,加之一些行业部门的规划(如原国土资源部的陆海卫星),预计“十二五”和“十三五”期间将要发射的民用卫星不少于30颗,携带的载荷近百种,将是国际上最大的对地观测技术与应用的投资国,成为卫星大国已成必然。据估计,全球卫星数据的有效应用比例为10%~20%。面对我国如此众多地来源于不同传感器、不同时空分辨率的数据,以及土地、农林、环境、灾害、城镇等种类繁多的应用,如何充分利用这些数据,从中挖掘出有用的信息,已成为迫切需要解决的重要问题。遥感基础理论研究将为从遥感数据到信息的转换提供方法,从而有效推动卫星遥感应用的发展,促进各行业遥感业务运行体系的建设,使我国从遥感应用大国走向世界强国。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》相关主题明确提出发展地球综合观测技术,要“开发生态和环境监测与预警技术,大幅度提高改善环境质量的科技支撑能力”,要“重点研究开发大尺度环境变化准确监测技术”“重点开发区域环境质量监测预警技术”。因此,发展生态环境遥感监测技术,从地面到天空地一体化监测,从局地到大尺度监测,从定点到空间连续监测,从依赖特定卫星重复周期到时间连续监测是国家的重大需求。

(2) 复杂地表是我国国土的基本国情,复杂地表的遥感基础研究是提高定量遥感产品精度、有效满足我国遥感应用需求的根本保障。

定量遥感建模的基础是辐射传输理论。截至目前,世界各国遥感辐射传输建模多针对单一地表,而对像元由多种地表类型混合组成,且地形非平坦的,复杂地表鲜有研究。

我国地形复杂,山区占全国总面积的2/3,地表覆盖类型多样,地块破碎,以简单地表为条件的遥感模型,用于复杂地表参数反演必然产生较大误差。例如,复杂地形可引起遥感观测地表反射率误差达到10%~15%(Wen et al., 2009),地表的短波辐射计算误差达到 $900\text{W}/\text{m}^2$ (Hansen et al., 2002);森林生态系统碳密度最高值是最低值的4~5倍,以简单地表为假设的生物量测量足以导致对陆地植被碳储量难以接受的估算误差;常规的合成孔径雷达(SAR)强度辐射定标算法假设地形是平坦的椭球面,并没有考虑具体地形变化的影响,对于平坦地形区相对定标精度可达 $\pm 1\text{dB}$ (Srivastava et al., 1999),但在地形复杂的山区,由局地成像几何的变化引起的后向散射变化可达 $\pm 5\text{dB}$ (Beaudoin et al., 1995),使得山区SAR后向散射系数与森林生物量的相关性很低,严重阻碍了SAR在山区的应用。简单地表的假设极大地降低了陆地遥感的反演精度,造成对植被、土壤等陆表生态环境参量及其动态变化特征的掌握极不精确,使农业、林业、水文、气象、测绘、减灾、环境、国土和全球变化等部门的遥感监测、评估、预警和预报等应用工作面临难以接受的误差,极大地阻碍了各行业的遥感应用。因此,加强复杂

地表遥感基础研究，是提高定量遥感产品精度、满足行业需求的关键所在。

(3) 遥感信息动态分析与建模是实现遥感的瞬间观测到时空连续的前提，是我国保护生态环境、履行国际环境公约的战略需求。

遥感信息动态分析与建模可以实现遥感的瞬间观测到时空连续。长期以来，从遥感观测中定量提取地表信息，主要基于描述遥感成像瞬间获取的电磁波信号与地表参量关系的遥感物理模型，缺乏描述遥感信息动态特征的模型，使得当前可供使用的遥感数据产品，在时空连续性上不能满足应用的需求。以影响植被生态系统的地表温度为例，时时刻刻都在变化，如果用遥感瞬间测量的温度代替全天的平均温度，在7月中纬度农田区可相差5℃。而由于云雨、卫星轨道和幅宽等因素，中分辨率卫星数据获取的间隔时间可能长达10~30天，处于生长期的生物量、叶面积指数、地表水分等植被生态系统要素的遥感反演结果也很难具有代表性。

缺乏遥感信息动态分析与建模手段而造成的地表信息反演误差，将导致遥感难以为地球系统科学的各种模型提供高精度的时空多变参数信息。21世纪以来，我国经济社会高速发展与生态环境保护、应对全球变化的矛盾越来越突出。在经济全球化背景下，中央明确提出坚持科学发展观、建设和谐社会的总体目标，在继续保持快速发展的同时，加强生态环境保护、保障重要战略资源需求、提高应对全球变化的能力是我们面临的迫切任务。

习近平主席于2015年11月30日，在巴黎出席气候变化巴黎大会开幕式，并在发表题为《携手构建合作共赢、公平合理的气候变化治理机制》的重要讲话强调，巴黎大会要加强《联合国气候变化框架公约》的实施，协议应该有利于实现公约目标，有效控制大气温室气体浓度上升，引领绿色发展；应该有利于凝聚全球力量，鼓励广泛参与，提高公众意识。中国一直是全球应对气候变化事业的积极参与者，中国是世界节能和利用新能源、可再生能源第一大国。中国将落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，形成人和自然和谐发展现代化建设新格局。因此，充分利用日益增长的多种遥感观测数据，分析其动态变化特征及影响因素，构建遥感信息的动态变化模型，进而推动遥感基础研究提出新理论、发展新方法，支持生成时空连续的遥感数据产品，已成为满足国家决策和行业应用对时空连续动态信息需求的重要科学问题。该成果可进一步推动全球森林碳汇变化的连续动态监测和分析预警，将为我国制定应对气候变化中长期战略、参与气候变化政府间谈判提供决策支撑信息，是加强生态环境保护、履行国际环境公约和参与全球气候谈判的必然要求。

(4) 陆表生态参量时空协同建模与分析是推进我国生态文明建设、林业行业发展的保障，以我国为主带动“一带一路”生态环境监测与建设的重大需求。

中国共产党第十八次全国代表大会把生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局，中国共产党第十八次中央委员会第三次、第四次、第五次全体会议（简称十八届三中、四中、五中全会）和《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》（2015年4月25日）就生态文明制度体系、法律制度和战略布局做出了重大部署。意见中明确要求，利用卫星遥感等技术手段，对自然资源和生态环境保护状况开展全天候监测，健全覆盖所有资源环境要素的监测网络体系。2016年11月24日国务院印发了《“十三五”生态环境保护规划》，进一步明确，建立天地一体化的生态遥感监测系

统, 实现环境卫星组网运行; 建立全国自然保护区“天地一体化”动态监测体系, 利用遥感等手段开展监测, 国家级自然保护区每年监测两次, 省级自然保护区每年监测一次。

林业是生态建设的主体, 履行着建设和保护“三个系统、一个多样性”的重要职能, 即建设和保护森林生态系统、保护和恢复湿地生态系统、改善和治理荒漠生态系统及维护生物多样性。习近平总书记、李克强总理等中央领导同志关于生态文明建设和林业改革发展作出了一系列重要讲话和指示批示, 对林业提出了“稳步扩大森林面积, 提升森林质量, 增强森林生态功能, 为建设美丽中国创造更好的生态条件”的明确要求。特别是习近平总书记在中央财经领导小组第12次会议上关于森林生态安全的重要讲话强调, 森林关系国家生态安全。要着力提高森林质量, 坚持保护优先、自然修复为主, 坚持数量和质量并重、质量优先, 并明确指示要实施森林质量精准提升工程。

为贯彻落实党中央、国务院对林业工作的目标要求和中央领导同志的系列重要批示指示精神, 特别是习近平总书记关于森林生态安全和精准提升森林质量的重要讲话精神, 国家林业局于2016年5月20日印发了《林业发展“十三五”规划》(林业“十三五”规划)(林规发〔2016〕22号)。林业“十三五”规划指出, 要“深化遥感、定位、通信技术全面应用, 构建天空地一体化监测预警评估体系, 实时掌握全国生态资源状况及动态变化”。

2016年10月22日, 国家国防科技工业局、国家发展和改革委员会发布《关于加快推进“一带一路”空间信息走廊建设与应用的指导意见》, 明确“‘一带一路’空间信息走廊以在轨和规划建设中的通信卫星、导航卫星及遥感卫星资源为主, 形成‘感、传、知、用’四位一体的空间信息服务系统, 为‘一带一路’沿线国家及区域提供空间信息服务能力, 实现信息互联互通”。

1.2 主要科学问题

复杂地表遥感信息动态分析与建模所涉及的科学问题主要包括复杂地表空间异质性表征与遥感辐射散射机理、复杂地表遥感信息时空尺度扩展机理和复杂地表植被-土壤参数多模式遥感协同反演机制。

1.2.1 复杂地表空间异质性表征与遥感辐射散射机理

遥感辐射传输模型是高精度遥感信息动态分析与建模的理论基础, 但是, 我国山区占国土面积2/3以上, 地形复杂, 地表类型多样, 景观斑块破碎, 复杂地表是我国国土的基本国情, 现有的遥感辐射传输模型不能满足复杂地表高精度定量遥感监测与动态分析的需求。如何表征复杂地表空间异质性, 刻画遥感混合像元内各组分的属性特征及动态变化规律, 定量描述各组分内和组分间的辐射、散射机理, 建立非均质混合像元主被动遥感辐射传输模型, 已成为提高山区定量遥感精度和遥感数据有效利用率亟需解决的关键科学问题。

1.2.2 复杂地表遥感信息时空尺度扩展机理

由于地形的复杂性、地表类型的多样性和地表属性的多变性, 遥感数据基本上都是

时空多变的混合像元,不同平台、不同传感器的遥感数据往往反演出不同的结果。复杂地表遥感反演参数的尺度转换规律是什么?有没有适合复杂地表的最优遥感反演尺度?如何在遥感反演中表征时空多变参量的动态变化规律,并将多源瞬间遥感观测和时空多变参量的动态变化综合来生成时空连续的遥感数据产品?这些都是迫切需要解决的关键科学问题。

1.2.3 复杂地表植被-土壤参数多模式遥感协同反演机制

复杂地表植被-土壤动态信息遥感反演存在的反演精度低、易出现信号饱和与弱信息现象、模型对复杂地表(地形复杂、植被 3D 空间分布异质性强)适应性差、单一模式传感器难以提供足够信息等问题,如何通过利用激光雷达、SAR 层析、光学立体测量、多角度光学、高光谱、被动微波、热红外等越来越多的遥感资源,揭示多模式遥感的优化组合机理,探索多模式遥感与协同反演机制,是提高反演能力和精度的关键所在。

为了解决这些科学问题,应从如下 4 个方面开展定量遥感科学研究:复杂地表遥感辐射散射机理及动态建模、复杂地表遥感信息时空尺度扩展模型和方法、复杂地表森林三维信息多源遥感协同反演及动态分析、复杂地表土壤-植被水热参数多模式遥感协同反演。通过这些研究,构建复杂地表可见光、红外和微波波段的主被动辐射传输模型系列及多尺度长时间序列遥感信息时空尺度转换与动态分析模型系列,发展关键地表参数的多模式遥感协同反演理论,形成森林植被垂直结构、理化参量三维信息与土壤水热参数的多维度遥感信息动态分析与建模的新方法体系,以提高植被-土壤参数反演精度和信息提取效率,降低遥感监测评估成本,促进定量遥感科学与对地观测技术发展,提升中国生态环境遥感动态监测与预警能力。

1.3 复杂地表遥感信息动态分析与建模研究现状

1.3.1 遥感辐射散射机理模型

遥感机理模型是定量提取地表生态系统要素的理论基础。在植被光学遥感中,辐射传输模型的发展经历了对地表描述从理想假设到逐渐逼近真实地表的发展过程。假设地表植被为均匀植被,发展了一系列以均匀地表假设为基础的辐射传输模型(Kuusk, 1995; Huemmrich, 2001; Verhoef et al., 2007)及适合于稀疏林地和离散植被的几何光学模型(Li and Strahler, 1992)。利用计算机强大的计算能力和图形模拟功能,又发展了一系列基于真实场景的计算机模拟模型(Goel et al., 1991; Qin and Gerstl, 2000; Liu et al., 2007; Huang et al., 2013a)。但无论是辐射传输模型还是计算机模拟模型,都不能准确刻画非均质混合像元辐射的动态变化特征。因而,复杂地表条件下遥感像元尺度的辐射传输模型扩展,就成为遥感建模的重要研究方向。

主动微波遥感机理建模也经历了与光学遥感建模相似的发展过程,从连续植被模型(Attema and Ulaby, 1978)到层状模型(Ulaby et al., 1990),再到三维模型(Sun and Ranson, 1995)和真实森林场景模型(Liu et al., 2010)。传统的建立在辐射传输理论基础上的模型主要用于模拟 SAR 后向散射系数,干涉 SAR(InSAR)/极化干涉(PolInSAR)

技术的发展对相干模型的需求日益增强。从辐射传输模型的发展过程看,三维雷达后向散射模型是优选的模型,它既能描述植被在水平方向的不连续性又能描述垂直方向的异质性,同时相对于真实场景模型,所需要的计算量大大减小,目前已经建立了高分辨率的相干雷达后向散射模型(Ni et al., 2014),为了用于模拟复杂地表场景,发展中低分辨率的相干散射模型成为必需。

目前,针对植被的被动微波遥感模型,都把植被层当作连续介质,没有考虑植被在真实场景中的三维空间特征。另外,由于陆表植被结构的复杂多样,针对土壤-植被系统的微波辐射传输模型通常也比较复杂,很难直接应用于反演。基于遥感机理模型,发展精度较高、形式相对简单的参数化模型是一个有效的解决方案。Shi 等针对 AMSER-E 配置发展了裸露地表反射率参数化模型(Shi et al., 2002)和裸露地表微波辐射参数化模型(Shi et al., 2005),Jiang 等(2007)针对积雪覆盖地表发展了微波辐射参数化模型,以及 Chen 等(2010)针对 L 波段发展的地表发射率模型等。这些模型兼具了半经验模型和简化物理模型简洁的方程形式和高效的计算效率,以及物理模型可靠的计算精度,已在各种反演算法中得到了广泛的应用。进一步的发展趋势,则是构建适用于复杂地表的土壤-植被微波辐射参数化模型。

总之,复杂地表空间异质性表征与遥感辐射散射机理动态建模是遥感基础理论研究最前沿的共性科学问题之一,具有学科交叉性强、难度大的特点。美国、加拿大和欧洲等遥感发达国家和地区,一贯重视遥感机理模型研究工作,发展了众多基于单一地表类型假设的辐射散射机理模型。近些年来,以欧美和中国学者为主的科学家们进一步推动了基于三维近真实场景的遥感正向模拟模型的发展,但目前仍然缺乏可描述复杂地表辐射传输机理的动态模型。

1.3.2 空间尺度扩展

尺度(scale)是与空间现象相关的术语,定量遥感建模和遥感关键参数反演都面临尺度问题。不同遥感图像像元对应的地表单元具有从亚米级到数千米不同尺度的空间分辨率,这些不同尺度的像元反映出的同一地表物体的信息量是不同的。

自 20 世纪 70 年代中期以来,遥感中的尺度问题开始被人们关注。在利用遥感图像进行土地利用和土地覆盖变化研究时人们发现,不同分辨率及分类处理窗口大小对分类精度有很大影响(Marceau, 1999)。国际上尺度问题已成为遥感研究的热点(Quattrochi and Goodchild, 1997)。国内李小文院士从 1999 年开始系统性地研究普朗克定律、互易原理等基本物理定律在应用到遥感像元尺度时的尺度效应和尺度转换方法(李小文等, 1999),在遥感界引起了同行的高度关注。作为概念性的普适尺度转换模型,基于泰勒级数展开的方法已经提出过(Hu and Islam, 1997; Wu and Li, 2009)。大家对此问题的一个基本的共识是认为尺度效应来自于地表异质性和模型的非线性(Garrigues et al., 2006)。李新(2013)从不确定性的角度考虑地表参数的高度空间异质性,提出应以随机的观点对待复杂的陆地表层系统(如数据同化方法)并发展描述动力学系统统计分布的新一代模型。2007 年开始执行的国家 973 计划“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”中,将尺度效应及转换方法专门作为一个课题,较为系统深入地针对反照率、叶面积指数、地表温度、植被覆盖度等遥感时空多要素进行尺度问题的研究,

并提出了普适性尺度转换概念模型 (Hu and Islam, 1997; Wu and Li, 2009)。李小文和王炜婷 (2013) 提出地理学中研究“尺度综合”的思路, 在解决遥感科学核心问题“尺度效应”方面先搭建一个方法框架。

1. 叶面积指数反演与尺度效应

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 定义为地表单位面积柱体上叶片总面积的一半, 是衡量植被浓密程度和长势的基本参数。作物的叶面积指数是描述植被长势的关键指标。通常可以利用多光谱或高光谱数据反演得到。

LAI 因其重要性和时间变化相对稳定的特性, 经常被用来作为尺度效应研究的示例参数。相关研究利用半变异函数 (Garrigues et al., 2006; Chen et al., 2006)、泰勒级数展开 (Zhu et al., 2010) 和计算几何 (Wu et al., 2009) 等尺度转换模型, 研究不同源 LAI 之间的尺度转换方法; 通过尺度转换规律, 从多尺度遥感图像系列中同时计算出作物播种面积和 LAI (Fan et al., 2010)。

2. FAPAR 反演与尺度效应

吸收光合有效辐射比例 (fraction of absorbed photosynthetically active radiation) 也称为 FAPAR 或 fAPAR, 植被吸收的光合有效辐射 (PAR) 在入射太阳辐射中所占的比例。FAPAR 作为植被的基本生物物理参数, 可用于估计植被的初级生产力和二氧化碳吸收, 是作物生长模型、净初级生产力模型、气候模型、生态模型、水循环模型、碳循环模型等的重要陆地特征参量 (Liu et al., 1997; Liang, 2004; 吴炳方等, 2004)。FAPAR 可与冠层基本参数如 LAI、冠层结构、叶绿素等建立相关关系得到, 也可直接利用太阳光谱区间的遥感测量值直接反演得到, 迄今为止, 已经提出了一系列的算法用于估计该参数, 主要分为经验关系表达和辐射传输模型反演两种。

近年来遥感反演 FAPAR 的尺度效应的研究相对比较少, 对 FAPAR 的尺度转换研究就更加少见。Friedl (1997) 用场景仿真 (scene simulation) (Strahler et al., 1986; Friedl et al., 1995) 生成了几个尺度上的影像, 用公式计算了 NDVI, 并用经验关系式计算了 LAI 和 FAPAR 在几个尺度上的值。结果发现随着尺度的变化, FAPAR 与 NDVI 的关系也发生变化, 表现为散点图的方差变小, 即 NDVI 和 FAPAR 值的振荡变小; NDVI 和 FAPAR 的取值范围也变小, 如当分辨率从 30 m 降到 990 m 时, FAPAR 的取值从区间 (0.05~0.94) 变为 (0.41~0.70)。另外, Friedl 在结论部分进一步声明, 实际影像的尺度效应会比场景仿真的结果更为复杂。

Tian (2002) 在其博士学位论文中提到, 基于辐射传输方程反演的 FAPAR 的尺度效应根源是冠层柱体之间的辐射水平传输。她用公式定量表达了辐射传输方程的尺度依赖性质, 指出媒介中光子水平迁移的平均长度是辐射传输方程尺度依赖的根本原因, 并利用 Green 函数解释了散射中心吸收和反射性质的尺度依赖, 并且提出可以依据土地覆盖类型的比例相应修正单次散射反照率来描述像元异质性。而这些研究都是针对平坦地形进行的, 缺乏针对复杂地表的具有明确物理意义的尺度效应机制分析。

3. FVC 尺度效应

目前国内外遥感反演植被覆盖的方法多为针对平地的模型, 并没有考虑到地形效