



地球观测与导航技术丛书

# 全球变化遥感产品的 生产与应用

梁顺林 张 杰 陈利军 赵 祥 杨 军 等 著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

# 全球变化遥感产品的生产与应用

梁顺林 张 杰 陈利军 赵 祥 杨 军 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书论述全球陆表、海洋特征参量遥感产品的生成技术与应用方法,综合介绍近年来定量遥感研究的主要动态和最新成果。本书主要包括以下内容:前言中综述全书内容,并介绍各章的内容简介与关联;第 1~19 章阐述关于全球陆表特征参量产品生产与应用,特别是 GLASS 产品的算法和验证结果,以及利用其中产品分析评价植被、海冰和雪盖对气候变化的响应和反馈;第 20~22 章,介绍关于全球地表覆盖精细分类与更新方法;第 23~27 章论述关于风场、海浪和海流等海洋特征参量产品的生成与应用;第 28 章介绍用于特征参量信息获取与处理的平台研发。

本书可以作为地理信息科学相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可以供全球变化遥感产品处理与应用的研究人员参考。每部分内容相对独立,均可单独用于教学或阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

全球变化遥感产品的生产与应用/梁顺林等著. —北京:科学出版社,2017.3  
(地球观测与导航技术丛书)  
ISBN 978-7-03-050807-2

I. ①全… II. ①梁… III. ①遥感技术—应用—全球环境—环境监测  
IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 280466 号

责任编辑:苗李莉 李 静 朱海燕 / 责任校对:何艳萍  
责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
2017 年 3 月第一次印刷 印张:45 3/4 插页:16  
字数:1 080 000  
定价:198.00 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 凯 | 江碧涛 | 景 宁 |
| 景贵飞 | 李 京 | 李 明 | 李传荣 | 李加洪 |
| 李增元 | 李志林 | 梁顺林 | 廖小罕 | 林 琿 |
| 林 鹏 | 刘耀林 | 卢乃锰 | 閻国年 | 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》出版说明

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

在“十一五”期间，以“千人计划”特聘教授梁顺林为首席科学家完成的 863 计划重点项目“全球陆表特征参量产品生成与应用研究”发展了具有鲜明特色的全球陆表特征参量产品的反演算法体系，构建了全球陆表特征参量(GLASS)产品生产平台，生产了全球叶面积指数、地表发射率、地表反照率、下行短波辐射、下行有效光合辐射五种产品。GLASS 产品在 2012 年地球观测组织(GEO)第九次全会上对外发布，这是中国首次生产并向全球用户共享具有中国自主知识产权的全球陆表卫星遥感高级产品，弥补了我国没有自己陆表遥感高级产品品牌的空白，同时也极大地促进了全球地球观测数据共享。基于这些研究成果，他们撰写了中英文专著《全球陆表特征参量 (GLASS) 产品算法、验证与分析》，受到了遥感工作者的好评与欢迎。

“十二五”期间，梁顺林教授主持了 863 计划主题项目“全球生态系统与表面能量平衡特征参量生成与应用”，将第一期 GLASS 产品拓展到 12 种，并联合国家海洋局第一海洋研究所、国家基础地理信息中心和清华大学等科研团队，研制了海面风场、海浪和流场等全球海洋遥感参数产品，发展了土地覆盖精细分类技术，以及一系列遥感数据处理的共性关键技术。研发的产品是对“十一五”863 计划项目的拓展和深化，不仅对原有产品生产的算法进行了更新和优化，而且增加了多种急需的陆表和海洋遥感产品。针对广大遥感科研工作者和研究生的需求，项目组自项目启动起，就决心把项目最新成果介绍给大家。历时三年时间，项目研究人员精心撰写了这本新书。书中介绍了全球变化遥感产品的生产与应用，包括全球陆表特征参量获取与应用技术、地表覆盖精细分类与更新方法，以及海洋特征参量获取与应用技术，并总结了近期研究的最新进展和成果，是一本遥感理论与应用的重要参考书。

希望这本书对广大遥感科研工作者和研究生都有所帮助，并为我国的遥感事业作出新的贡献！

徐冠华

2016 年 11 月

# 前 言

21 世纪以来对地观测遥感已经发生翻天覆地的变化。各种卫星计划和不同类型的传感器层出不穷，以此获取的数据量正在以指数级增长，海量数据的存储与处理能力在迅速提升，遥感信息提取理论与方法在迅速发展，在广度和深度上日益蓬勃发展的遥感应用正在取得巨大的科学和社会经济效益。以此促进了遥感行业的分工日趋明显。许多遥感应用工作者不必过多地关注数据处理和基本信息提取的具体工作，数据提供者正在越来越多地将遥感获取的辐射量转变成表征地球系统物理、化学和生物过程的变量产品，促进数值模型的发展，以进一步监测、加深理解、有效预测和综合评价全球变化。

为了推动全球变化研究能力的提升，科技部“十二五”863 计划资助，2013 年年底启动了“全球生态系统与表面能量平衡特征参量生成与应用”项目。项目的总体目标是发展全球辐射能量平衡和生态系统特征参量产品的遥感反演算法、地表覆盖信息动态生成与服务技术、全球变化海洋参量遥感数据产品生成技术，生成全球高时空分辨率和高精度的四期表面辐射能量平衡与生态系统特征参量、全球 30m 地表覆盖数据产品精细化处理数据集和全球变化海洋参量遥感数据产品；基于全球辐射能量平衡和生态系统特征参量产品开展同化方法和应用示范研究，基于全球变化海洋参量遥感数据产品开展针对中尺度涡、内波、黑潮、湾流、内潮、强浪，以及初级生产力等时空分布与影响分析的应用示范研究。结合上述研究，研发全球多环境要素遥感的处理、分析、表达、发布的系统平台。

为了实现项目的总体目标，项目分解成四个课题，其相互关系见图 1。第一课题和第二课题分别研究陆表定量产品和定性产品生产，课题间共享基础数据和共性数据预处理技术。第一课题和第三课题的成果形成全球海、陆定量产品集，共享定量产品生产共性技术。第四课题目标则是为其他三个课题提供软件和平台技术支持，

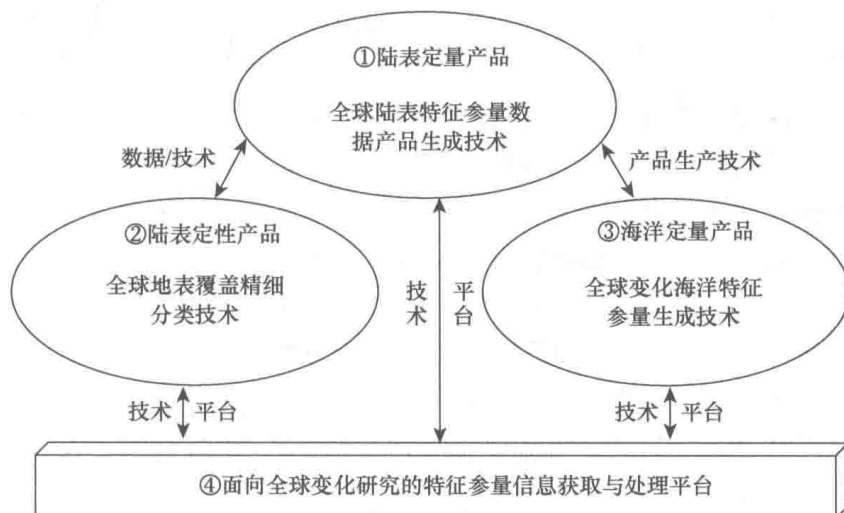


图 1 项目构成及其相互关系

形成覆盖海、陆，包含定量与定性的全球生态系统变化信息获取技术、平台与产品集。下面是四个课题的目标和参加单位的信息。

#### **课题一：全球变化特征参量数据产品生成技术**

课题负责人是北京师范大学梁顺林教授，参加单位包含中国科学院青藏高原研究所、南京大学、中国科学院电子学研究所、桂林理工大学和电子科技大学。

课题的总体目标是针对短波辐射、光合有效辐射（PAR）、反照率、发射率、地表温度、长波净辐射、净辐射（日间）、叶面积指数（LAI）、光合有效辐射吸收比（FAPAR）、植被覆盖度、植被总初级生产力（GPP）和潜热 12 个特征参量，发展适用于全球长时间序列特征参量产品的普适性的算法体系，扩展全球陆表特征参量产品生产系统，实现叶面积指数、发射率、反照率和 FAPAR 4 个产品的全球陆表 33 年（1982~2014 年）最新版本的产品数据，其余特征参量针对四期典型时间（1983 年、1993 年、2003 年、2013 年）进行生产。

#### **课题二：全球地表覆盖精细分类关键技术**

课题负责人是国家基础地理信息中心陈利军高级工程师，参加单位包含北京师范大学、中国科学院地理科学与资源研究所、国信司南（北京）地理信息技术有限公司。

课题的总体目标是研究建立面向全球范围 30m 分辨率地表覆盖信息的更新、精化和动态数据生成工程化作业技术体系，并开展全球典型区域 30m 地表覆盖数据产品更新和精化技术集成应用；研发地表覆盖信息网络化验证和共享服务系统，提高我国在全球生态系统与表面能量遥感监测能力。

#### **课题三：全球变化海洋特征参量遥感数据产品生成技术与应用**

课题负责人是国家海洋局第一海洋研究所张杰研究员，参加单位包含中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、青岛大学和内蒙古师范大学。

课题的总体目标是针对全球变化研究、全球海洋环境监测、海洋防灾减灾和海洋科学研究等需求，基于多源卫星遥感数据，突破海洋特征参量遥感数据产品生成技术，研发具有自主知识产权、具备业务化运行能力的海洋特征参量遥感数据产品制作系统，生成时间序列海洋特征参量遥感数据产品。在此基础上，开展针对中尺度涡、内波、内潮、黑潮、湾流、强浪，以及海洋初级生产力等研究的示范应用，为全球变化研究、海洋环境监测与海洋科学研究等提供遥感技术支撑和信息服务。

#### **课题四：面向全球变化研究的地球信息获取与处理平台**

课题负责人是清华大学杨军副教授。参加单位还包含中国科学院电子学研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、北京国遥新天地信息技术有限公司。

课题的总体目标是研究能够支撑全球多环境要素遥感特征参量信息获取的工程化处理、分析、表达、发布的系统平台，研究并开发实现相应的关键技术。其中要发展两个核心技术是：①实现多源遥感数据定量化分析处理与表达发布的自动化流程；②在全球管理框架下实现 3 维（3D）空间+时间+光谱+物理量纲+任务的协同管理。另外，课题的基础数据集和软件成果能够被项目中其他课题应用，为它们的数据处理、产品生产和发布等提供技术支撑。

经过三年多的努力，项目取得了一系列的创新性成果。本书集成了其中的部分

成果，主要包括以下内容。第一部分（第 1~19 章）是关于全球陆表特征参量产品生产与应用，特别是 GLASS 产品的算法和验证结果，以及利用其中产品分析评价植被、海冰和雪盖对气候变化的响应和反馈；第二部分（第 20~22 章）是关于全球地表覆盖精细分类与更新方法；第三部分（第 23~27 章）是关于风场、海浪和海流等海洋特征参量产品生成与应用。第四部分（第 28 章）是关于用于参数快速提取和发布的特征参量信息获取与处理的平台研发。各章的题目和作者列表如下。

| 序号               | 章名                                 | 作者                                                    |
|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 第一部分 陆表特征参量估算与应用 |                                    |                                                       |
| 第 1 章            | 陆表定量遥感的研究进展                        | 梁顺林, 程洁, 贾坤, 江波, 刘强, 刘素红, 肖志强, 谢先红, 姚云军, 袁文平, 张晓通, 赵祥 |
| 第 2 章            | 地表反照率产品算法                          | 刘强, 瞿瑛, 冯佑斌                                           |
| 第 3 章            | 植被覆盖地表宽波段发射率模拟与反演                  | 程洁, 梁顺林, 张泉                                           |
| 第 4 章            | 地表太阳辐射的估算与验证                       | 张晓通, 梁顺林, 王国鑫                                         |
| 第 5 章            | 晴空长波净辐射估算方法                        | 程洁, 梁顺林, 郭亚敏, 刘昊                                      |
| 第 6 章            | 地表净辐射估算及其时空变化分析                    | 江波, 梁顺林, 贾奥林                                          |
| 第 7 章            | 基于多算法集成的全球地表温度遥感反演                 | 周纪, 梁顺林, 王钰佳, 程洁                                      |
| 第 8 章            | 晴空地表温度日变化模拟通用模型                    | 黄帆, 占文凤, 居为民, 邹照旭, 段四波, 全金玲                           |
| 第 9 章            | 叶面积指数和光合有效辐射吸收比遥感反演                | 肖志强, 石涵予, 梁顺林                                         |
| 第 10 章           | 基于广义回归神经网络算法和 MODIS 数据的全球陆表植被覆盖度估算 | 贾坤, 梁顺林, 刘素红                                          |
| 第 11 章           | 基于多算法集成的全球陆表潜热通量遥感估算               | 姚云军, 梁顺林, 李香兰, 张晓通                                    |
| 第 12 章           | 植被总初级生产力遥感反演方法                     | 袁文平, 李彤, 梁顺林, 周艳莲, 居为民                                |
| 第 13 章           | 植被对气候变化响应的时滞性与全球格局                 | 武东海, 赵祥, 唐荣云, 彭义峰                                     |
| 第 14 章           | 森林生物量估算与应用分析                       | 张玉珍, 梁顺林                                              |
| 第 15 章           | “三北”地区水循环因子变化特征与驱动机制               | 谢先红, 梁顺林, 姚云军, 姚熠                                     |
| 第 16 章           | 水文数据同化方法用于无资料区河流流量预报               | 谢先红, 孟珊珊, 梁顺林                                         |
| 第 17 章           | 基于数据同化方法的地表水热通量估算                  | 徐同仁, 孟杨繁宇, 梁顺林, 毛克彪                                   |
| 第 18 章           | 北极海冰变化的短波辐射效应                      | 曹云锋, 梁顺林, 陈晓娜                                         |
| 第 19 章           | 北半球陆表积雪变化                          | 陈晓娜, 梁顺林, 曹云锋                                         |
| 第二部分 土地覆盖分类      |                                    |                                                       |
| 第 20 章           | 全球典型区地表覆盖精细分类关键技术                  | 匡文慧, 陆灯盛, 杜国明, 张弛, 潘涛, 杨天荣, 刘阁, 刘爱琳, 关志新              |
| 第 21 章           | 基于形状和邻近关系的 GlobeLand30 水体细分        | 陈利军, 李磊, 鲁楠, 陈炜                                       |
| 第 22 章           | 基于 GlobeLand30 的地表覆盖变化检测与自动更新方法    | 陈学泓, 曹鑫, 杨德地, 刘宇, 陈舒立                                 |
| 第三部分 海洋特征参量估算与应用 |                                    |                                                       |
| 第 23 章           | 海面风场产品生成技术与应用                      | 杨俊钢, 闫秋双, 周超杰, 范陈清, 张杰                                |
| 第 24 章           | 海浪产品生成技术与应用                        | 杨俊钢, 韩伟孝, 靳熙芳, 范陈清, 张杰                                |
| 第 25 章           | 海流产品生成技术与应用                        | 杨俊钢, 赵新华, 张杰                                          |
| 第 26 章           | SST 产品生成技术与应用                      | 王进, 包萌, 赵怀松, 孙伟富, 杨俊钢, 张杰                             |
| 第 27 章           | 叶绿素 a 浓度产品生成技术与应用                  | 肖艳芳, 巩加龙, 崔廷伟, 杨俊钢, 张杰                                |
| 第四部分 平台研发        |                                    |                                                       |
| 第 28 章           | 特征参量获取与处理关键技术                      | 杨军, 赵永超, 王杰                                           |

梁顺林等在第 1 章评述了定量遥感反演中机器学习方法和克服病态反演的正则化方法的最新进展。评述的机器学习方法包含人工神经网络、支持向量回归和多元自适应回归样条函数等。评述的 7 种正则化方法包含多源数据、先验知识、最优化反演的求解约束、时空约束、多反演算法集成、数据同化和尺度转换。同时，概要地介绍了北京师范大学研发的全球陆表特征参数 (GLASS) 产品发展情况和全球气候数据集 (CDR) 研发的必要性。

刘强等在第 2 章描述了 GLASS 地表反照率产品的算法、验证、分析和应用。GLASS 反照率产品是基于两个反照率算法的集成，也是目前国际上时间序列最长的全球陆表反照率产品。利用地面观测数据的验证和与 MODIS 反照率产品交叉对比表明，GLASS 反照率产品质量更好、精度更高。

程洁等在第 3 章介绍了 GLASS 宽波段发射率产品中植被覆盖发射率的反演新算法。它以 GLASS 非植被覆盖地表发射率、叶片发射率和 GLASS LAI 作为输入，通过查表得到植被覆盖地表宽波段发射率。新算法能够很好地刻画植被丰度的季节变化，显著地改进了前一版本的 GLASS 发射率产品。

张晓通等在第 4 章全面介绍了 GLASS 地表下行短波辐射和光合有效辐射的算法和精度验证。GLASS 辐射产品的空间分辨率是 5km，相比较目前国际上现有辐射产品 100 多千米的空间分辨率，它们更加适用于各种陆面模式和其他应用，其验证精度也高于国际上同类产品。

程洁等在第 5 章介绍了 GLASS 晴空条件下长波净辐射的估算方法。在简要概括了通常的下行长波辐射和上行长波辐射的估算方法之外，还介绍了他们自己发展的一个新的基于遥感数据的估算全球长波上行辐射的混合算法，该算法具有较高的验证精度，并优于文献中区域尺度上同类算法的精度。

江波等在第 6 章介绍了 GLASS 净辐射产品的算法和验证结果，同时描述了利用 CERES 产品进行的全球地表净辐射时空分析。净辐射遥感产品可以根据下行短波辐射、反照率和长波净辐射几个遥感产品计算而得，但是我们通常只有晴天长波净辐射遥感产品。GLASS 全天候净辐射产品是根据短波净辐射和其他气候信息计算得到的，是世界上空间分辨率最高的全球净辐射遥感产品，精度上也高于世界上同类产品。

周纪等在第 7 章描述了 GLASS 陆表温度产品的算法和验证结果。基于大规模辐射传输模拟，他们对目前世界上常用的十余种分裂窗算法进行了重新拟合和测试。在此基础上，确定了精度较高、参数敏感性较低、实用性较强的 9 种分裂窗算法，通过贝叶斯加权平均模型 (BMA) 构建了集成算法，其估算的温度产品精度好于单一算法。

黄帆等在第 8 章描述了他们基于地表能量平衡方程和一维热传导方程构建的晴空地表温度日变化的通用框架模型 (GEM)。地表温度日变化的重建对卫星热红外观测的时间序列拓展、地表热属性 (如热惯量) 反演与热通量 (如土壤热通量) 估计等，均具有非常重要的作用。相比于多数地表温度日变化模型，GEM 为不同实际需求提供了更多选择。

肖志强等在第 9 章描述了 GLASS 叶面积指数 (LAI) 和光合有效辐射吸收比 (FAPAR) 产品的反演算法, 并且详细地比较了它们与世界上几种主要产品的时空一致性和验证精度, 证明了 GLASS 产品的优越性。比较于其他产品, GLASS LAI/FAPAR 产品的时间跨度也最长。另外一个独有的特征是, GLASS FAPAR 是从 GLASS LAI 和其他信息计算得到, 以确保两个产品的一致性。

贾坤等在第 10 章介绍了基于 MODIS 数据的 GLASS 植被覆盖度产品算法和结果。在全球陆地生态区划和土地覆盖数据的支持下生产高空间分辨率样本数据集, 进而研究基于广义回归神经网络算法和 MODIS 数据的全球陆表长时间序列、高时间分辨率的植被覆盖度反演方法和产品生产。GLASS 植被覆盖度产品经直接验证和与现有产品对比表明, 本算法的精度较好、产品质量高, 并在空间分辨率、时空连续性和完整性方面具有较大优势。

姚云军等在第 11 章介绍了针对全球高时空分辨率陆表潜热产品生产中采用的多算法集合方法。利用 AVHRR、MODIS 数据和全球超过 300 个通量观测站数据, 验证了每个算法的模拟精度, 并综合评价了各种算法针对不同植被类型的模拟差异; 将贝叶斯模型平均方法应用到五种潜热通量算法集成中, 降低了单一算法的不确定性, 针对不同的植被类型, 提高了陆表潜热通量模拟的精度, 得到了多算法集成的全球陆表潜热通量遥感产品。

袁文平等在第 12 章系统介绍 GLASS 植被生产力算法, 并介绍产品的全球验证情况。GLASS 植被生产力算法结合了国际上主流的八种方法, 并比较了三种集合预估方法, 利用全球 155 个涡度相关通量站点的观测资料开展模型参数拟合和验证, 确定了最优的算法组合和集合预估方法, 生产了全球植被生产力产品, 为开展全体碳循环研究提供了数据支持。

武东海等在第 13 章基于遥感和气候数据, 分析了全球植被对于不同气候因子响应的空间差异与时间滞后。在介绍植被气候动态变化及交互效应研究背景的基础上, 描述了植被对气候因子滞后响应的空间格局, 以及气候因子对植被生长贡献率的分布格局, 并且归因分析了 1982~2008 年全球植被显著性变化。

张玉珍和梁顺林在第 14 章系统阐述森林生物量的遥感估算方法, 介绍现有的区域和全球森林生物量数据集, 并举例示范如何应用森林生物量数据解决气候变化和生态环境领域的一些热点问题。特别是利用 GLASS 反照率产品评价森林扰动导致的辐射强迫效应。

谢先红等在第 15 章利用多种遥感数据产品和水文模型探索了中国“三北”地区在 1980~2009 年的水文循环变化情况, 以及气候变化和土地覆盖变化的相对影响。结果显示在整个地区, 水文循环的变化主要是源于降水量的变化, 尤其是在最近的 20 年, 年蒸散发量下降了 27.5mm, 年产流量下降了 16.8mm。相比于气候变化, 土地覆盖变化所带来的影响微不足道。

谢先红等在第 16 章发展了一种基于集合卡尔曼滤波改进后的方法, 实时更新分布式水文模型的状态变量和参数, 用于无资料区河流流量预报, 以减少预报中的不确定性。尽管该同化方案的目的是提高嵌套流域的径流预报精度, 但是它也具有同

化多源观测数据（地面观测和遥感数据产品）、提高独立流域水文预报精度的潜力。

徐同仁等在第 17 章描述了基于数据同化方法的地表水热通量估算方法。本章回顾了地表水热通量的获取方法，并详细介绍了利用变分数据同化技术，通过同化遥感地表温度产品来求解地表能量平衡方程，以获取时间连续地表水热通量的估算新方法。

曹云锋等在第 18 章主要介绍近年来北极地区海冰覆盖的变化对地气系统短波辐射收支所产生的影响。北极地区的近地表气温正在以全球平均两倍以上速度急剧升高，导致北极夏秋季的海冰覆盖正在加速融化，大量对太阳短波辐射具有高反射能力的海冰被强吸收的海水所取代，会使得吸收的短波辐射能量增加，从而对北极地区的升温过程形成正向的辐射反馈作用，加速北极地区升温的步伐。本章利用遥感海冰反照率产品和模型精确地估算北极海冰融化所产生的短波辐射效应。

陈晓娜等在第 19 章着重介绍了在气候变化背景下北半球积雪面积和积雪物候的时空变化及其产生的气候效应。本章首先介绍了北半球积雪的基本特征及其对气候变化的响应、现阶段常用的遥感积雪数据集，然后描述了利用多种数据源确定的北半球积雪面积及积雪物候的变化特征，同时用了 GLASS 反照率产品和模型确定积雪变化对地球-大气系统辐射收支的影响。

匡文慧等在第 20 章介绍了国内外 5 个典型区中，基于全球 30m 分辨率的地表覆盖数据产品（GlobeLand30）一级类产品和亚类分类体系，采用基于决策树、分层分类、多源信息融合与分辨率尺度转换等技术，开展 2000 年、2010 年、2013 年基准年地表覆盖二级类信息提取关键技术集成应用，最终形成耕地、林地、草地、人造地表、裸地等二级分类技术体系。

陈利军等在第 21 章讨论了如何利用形状和邻近关系开展基于 GlobeLand30 水体图层的河流和湖泊自动细化分类。由于水体数据形态万千，大小不一，不可能通过单一规则或阈值区分河流和湖泊，本章采用基于形状和邻近关系的水体二级类分层分类策略和层层筛选的思路，由先到后依次采用基于先验知识的分层分类、基于邻近关系的分层分类和基于水体形状的分层分类等方法，充分利用了水体图斑的形状特点和空间关系，逐层分类，最终得到河流和湖泊的分类数据，为全球及区域尺度上的水体空间格局解读和动态变化分析提供翔实的基础资料。

陈学泓等在第 22 章介绍了基于 GlobeLand30 的地表覆盖变化检测与自动更新方法。GlobeLand30 只包括 2000 年与 2010 年两个基准年的地表覆盖数据，不足以全面表达地表覆盖的动态过程。针对 30m 分辨率影像中变化检测与更新所面临的难点问题，在遥感影像云检测、考虑物候信息的变化检测、图像分割尺度选择，以及面向对象更新等方面研发了相应算法，为 GlobeLand30 的更新提供了可行的技术方案。

杨俊钢等在第 23 章介绍了基于多源卫星遥感数据的全球海洋海面风场遥感数据产品生成技术与产品精度检验。本章回顾了海面风场卫星遥感观测和国内外相关产品的现状，基于多源卫星散射计和辐射计海面风场遥感数据，利用最优插值方法生成了 2000~2015 年全球海洋时间分辨率为 6 小时、空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  的海面

风场遥感数据产品。基于浮标实测数据的精度检验结果表明,海面风场产品风速均方根误差为  $1.21\text{m/s}$ ,风向均方根误差为  $19.26^\circ$ 。同时利用生成的 2014 年海面风场遥感数据产品,分析了西北太平洋海域海面风场的时空分布和变化特征。

杨俊钢等在第 24 章介绍了基于多源卫星遥感数据的全球海浪遥感数据产品生产技术与产品精度检验。本章回顾了海浪卫星遥感观测和国内外相关产品的现状,基于多源卫星高度计数据和 ENVISAT ASAR 海浪谱数据,利用反距离加权法生成了 2000~2015 年的全球海洋时间分辨率为 1 天,空间分辨率为  $0.25^\circ\times 0.25^\circ$  的海浪遥感数据产品。基于浮标实测数据的精度检验结果显示海浪数据产品 RMSE 小于  $0.40\text{m}$ 。同时利用生成的全球海浪遥感数据产品开展了全球海洋海浪时空分布特征分析等示范应用研究。

杨俊钢等在第 25 章介绍了基于多源卫星高度计数据的全球海洋流场遥感数据产品生成技术与产品精度检验。本章回顾了海洋流场遥感观测和国内外相关产品的现状,基于多源卫星高度计数据,通过多源卫星高度计数据统一、海面高度异常网格化和地转流计算等,生成了 2000~2015 年全球海洋时间分辨率为 7 天、空间分辨率为  $0.25^\circ\times 0.25^\circ$  的海洋流场遥感数据产品,与国外同类 AVISO 产品比较验证了数据的精度。同时利用生成的全球海洋流场遥感数据产品,采用改进的特征线法,开展了黑潮特征提取及变化特征分析等示范应用。

王进等在第 26 章介绍了基于多源卫星遥感数据的全球海洋海面温度遥感数据产品生成技术与产品精度检验。本章回顾了海面温度遥感观测和国内外相关产品的现状,结合微波辐射计全天候观测和红外辐射计高空间分辨率的优点,基于多源卫星红外与微波辐射计海面温度遥感数据,利用最优插值融合算法生成了 2003~2015 年全球海洋时间分辨率为 1 天、空间分辨率为  $0.1^\circ$  的 SST 遥感数据产品;基于浮标实测数据的精度评估结果表明, SST 数据产品 RMS 误差小于  $0.5^\circ\text{C}$ 。同时利用生成的全球海洋 SST 遥感数据产品,分析了西北太平洋海域锋面的时空分布和演变特征。

肖艳芳等在第 27 章介绍了基于多源卫星遥感数据的全球海洋叶绿素 a 浓度遥感产品生成技术与产品精度检验。本章回顾了叶绿素 a 浓度遥感观测和国内外相关产品的现状,基于国内外主流的卫星水色卫星遥感数据,生成了 2000~2015 年全球海洋时间分辨率为 1 天、空间分辨率为  $9\text{km}$  的叶绿素 a 浓度遥感数据产品;与实测数据和国外同类产品比较表明,生成的产品时空分辨率、精度与国外同类产品相当,且空间覆盖率显著占优。基于生成的全球海洋叶绿素 a 浓度遥感数据产品,开展了全球海洋叶绿素 a 浓度时空变化特征分析,以及台风对叶绿素 a 浓度影响的应用研究。

杨军等在第 28 章介绍了用于参数快速提取和发布的特征参量信息获取与处理平台的研发情况。目前这个处理平台是在已有的软件平台(ENVI、GE)上进行集成建设。建设的关键技术包括定制同时能支持 2D 图像处理软件和 3D 地球系统软件的专有图像格式,对多源异构的遥感数据中涉及的不同物理量纲和时间进行管理,改造通用图像处理算法,实现对一些过程的自动化流程,并建设支撑上述功能所需的基本数据库/集。

借此机会，我们衷心感谢国内外许多专家和同行对项目实施提供的指导和帮助，包括徐冠华、李小文、郭华东、周成虎、龚健雅、刘纪远、陈军、王桥、李增元、周国清、唐新明、林明森、侯一筠、宫鹏、施建成、陈仲新等专家，特别是徐冠华院士自始至终地关心项目的进展并给予诸多的指导；感谢科技部国家遥感中心的原主任廖小罕研究员、总工程师李加洪研究员、张松梅处长、张景和彭焕华等主管领导和工作人员对项目给予的指导和帮助；感谢项目办公室人员的辛勤劳动：程晓（主任）、刘素红和赵祥（副主任）、马莉娅（科研秘书）、王宇箏和师敬敏（行政秘书）。特别感谢孔颖在本书出版过程中所付出的大量辛勤劳动。也一并感谢许许多多的专家和同行对我们提供的各种帮助和支持。

本书的出版得到了科技部国家高技术研究发展计划项目（863 计划项目编号：2013AA122800）和国家自然科学基金重点项目（项目编号：41331173）等的资助。

书中除附后彩图外，更多彩图资源见在线服务网址 <http://sciencereading.cn>，供读者参阅。

梁顺林 张 杰 陈利军 赵 祥 杨 军

2016年8月

# 目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

## 第一部分 陆表特征参量估算与应用

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 1 章 陆表定量遥感的研究进展 .....       | 3   |
| 1.1 引言 .....                  | 3   |
| 1.2 反演方法概述 .....              | 4   |
| 1.3 GLASS 产品研发的新进展 .....      | 13  |
| 1.4 气候数据集 .....               | 18  |
| 1.5 结语与展望 .....               | 20  |
| 参考文献 .....                    | 21  |
| 第 2 章 地表反照率产品算法 .....         | 32  |
| 2.1 引言 .....                  | 32  |
| 2.2 算法 .....                  | 33  |
| 2.3 产品特色、质量分析和精度验证 .....      | 62  |
| 2.4 初步分析和应用 .....             | 73  |
| 参考文献 .....                    | 79  |
| 第 3 章 植被覆盖地表宽波段发射率模拟与反演 ..... | 84  |
| 3.1 引言 .....                  | 84  |
| 3.2 数据 .....                  | 86  |
| 3.3 方法 .....                  | 88  |
| 3.4 结果 .....                  | 93  |
| 3.5 讨论 .....                  | 98  |
| 3.6 结论 .....                  | 99  |
| 参考文献 .....                    | 100 |
| 第 4 章 地表太阳辐射的估算与验证 .....      | 104 |
| 4.1 引言 .....                  | 104 |
| 4.2 GLASS 地表太阳辐射估算方法 .....    | 110 |
| 4.3 精度验证与质量评价 .....           | 118 |
| 4.4 总结与展望 .....               | 125 |
| 参考文献 .....                    | 126 |

第 5 章 晴空长波净辐射估算方法 ..... 131

5.1 引言 ..... 131

5.2 下行长波辐射 ..... 133

5.3 长波上行辐射 ..... 145

5.4 长波净辐射 ..... 154

5.5 长波辐射产品 ..... 155

5.6 结语 ..... 156

参考文献 ..... 156

第 6 章 地表净辐射估算及其时空变化分析 ..... 159

6.1 引言 ..... 159

6.2 GLASS 净辐射产品算法 ..... 161

6.3 质量控制与精度验证 ..... 172

6.4 全球净辐射时空分析 ..... 177

6.5 总结 ..... 179

参考文献 ..... 180

第 7 章 基于多算法集成的全球地表温度遥感反演 ..... 184

7.1 引言 ..... 184

7.2 算法构建 ..... 187

7.3 算法参数确定 ..... 211

7.4 算法实现 ..... 217

7.5 算法验证 ..... 224

7.6 总结与展望 ..... 233

参考文献 ..... 234

第 8 章 晴空地表温度日变化模拟通用模型 ..... 237

8.1 引言 ..... 237

8.2 地表温度日变化通用模型 ..... 238

8.3 实验数据 ..... 242

8.4 模型验证 ..... 243

8.5 小结 ..... 250

参考文献 ..... 251

第 9 章 叶面积指数和光合有效辐射吸收比遥感反演 ..... 253

9.1 引言 ..... 253

9.2 GLASS LAI 产品反演算法 ..... 255

9.3 GLASS FAPAR 产品反演算法 ..... 259

9.4 全球 LAI/FAPAR 产品比较分析 ..... 261

9.5 全球 LAI/FAPAR 产品直接验证 ..... 269

9.6 小结 ..... 272

参考文献 ..... 273

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 第 10 章 基于广义回归神经网络算法和 MODIS 数据的全球陆表植被覆盖度估算 ..... | 276 |
| 10.1 引言 .....                                   | 276 |
| 10.2 基于 MODIS 数据的 GLASS 植被覆盖度产品算法 .....         | 281 |
| 10.3 精度验证与质量评价 .....                            | 287 |
| 10.4 总结与展望 .....                                | 292 |
| 参考文献 .....                                      | 293 |
| 第 11 章 基于多算法集成的全球陆表潜热通量遥感估算 .....               | 296 |
| 11.1 引言 .....                                   | 296 |
| 11.2 基于多算法集成的全球陆表蒸散遥感估算算法 .....                 | 300 |
| 11.3 精度验证与制图 .....                              | 307 |
| 11.4 总结与展望 .....                                | 313 |
| 参考文献 .....                                      | 313 |
| 第 12 章 植被总初级生产力遥感反演方法 .....                     | 317 |
| 12.1 研究意义 .....                                 | 317 |
| 12.2 GLASS 植被生产力算法 .....                        | 318 |
| 12.3 全球植被生产力产品 .....                            | 326 |
| 参考文献 .....                                      | 334 |
| 第 13 章 植被对气候变化响应的时滞性与全球格局 .....                 | 338 |
| 13.1 植被气候动态变化及交互效应概述 .....                      | 338 |
| 13.2 研究数据和方法 .....                              | 341 |
| 13.3 植被对气候因子滞后响应的空间格局 .....                     | 345 |
| 13.4 气候因子对植被生长贡献率的分布格局 .....                    | 350 |
| 13.5 1982~2008 年全球植被显著性变化归因探究 .....             | 356 |
| 13.6 小结 .....                                   | 359 |
| 参考文献 .....                                      | 360 |
| 第 14 章 森林生物量估算与应用分析 .....                       | 365 |
| 14.1 简介 .....                                   | 365 |
| 14.2 森林地上生物量估算方法 .....                          | 365 |
| 14.3 区域/全球森林生物量数据集 .....                        | 369 |
| 14.4 森林生物量应用实例 .....                            | 370 |
| 14.5 小结 .....                                   | 378 |
| 参考文献 .....                                      | 379 |
| 第 15 章 “三北”地区水循环因子变化特征与驱动机制 .....               | 383 |
| 15.1 引言 .....                                   | 383 |
| 15.2 研究区域与数据 .....                              | 386 |
| 15.3 模型与评价 .....                                | 388 |
| 15.4 结果分析 .....                                 | 391 |
| 15.5 讨论 .....                                   | 398 |