



全球变化与地球系统科学系列

Series in Global Change and Earth System Science

# 陆面观测、模拟与数据同化

## LAND SURFACE OBSERVATION, MODELING AND DATA ASSIMILATION

梁顺林 李 新 谢先红 等著

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



全球变化与地球系统科学系列

Series in Global Change and Earth System Sc

GCESS

# 陆面观测、模拟与数据同化

## LAND SURFACE OBSERVATION, MODELING AND DATA ASSIMILATION

梁顺林 李 新 谢先红 等 著

LUMIAN GUANCE MONI YU SHUJU TONGHUA



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书围绕陆面过程的数据同化方法框架,从数据源、模型参数化、同化理论和同化方法的应用四个方面,系统地阐述了水分和能量循环的定量描述手段。第1~3章介绍目前先进的监测手段和可用于数据同化系统中的数据源,包括我国风云卫星和美国 NASA 卫星的系列数据。第4、5章讲述青藏高原陆面过程模拟存在的问题与改进,并论述水文模型参数化和参数估计的新方法。第6~10章介绍数据同化的相关理论和方法,并重点探讨了数据同化系统中模型误差和观测误差的估计方法以及多尺度卡尔曼平滑框架。第11~14章讲述数据同化的应用,综述了颇具影响力的北美陆面数据同化系统,并给出了同化方法应用于土壤湿度、作物模拟和水文模型参数估计等研究领域的实例。

本书面向遥感、大气、水文、生态、环境及全球变化等领域和农业估产方向的研究人员、研究生和高年级本科生。一定的数学基础和建模方面的知识背景将会有助于对本书的理解。

## 图书在版编目(CIP)数据

陆面观测、模拟与数据同化/梁顺林等著. —北京:  
高等教育出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 04 - 037557 - 2

I. ①陆… II. ①梁… III. ①环境地学 - 研究  
IV. ①X14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 118362 号

策划编辑 关焱	责任编辑 关焱	封面设计 张楠	版式设计 王艳红
插图绘制 尹莉	责任校对 胡美萍	责任印制 赵义民	

---

出版发行 高等教育出版社	咨询电话 400 - 810 - 0598
社 址 北京市西城区德外大街4号	网 址 <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码 100120	<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷 北京鑫海金澳胶印有限公司	网上订购 <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16	<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张 21.25	
字 数 500千字	版 次 2013年7月第1版
插 页 12	印 次 2013年7月第1次印刷
购书热线 010 - 58581118	定 价 69.00元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 37557 - 00

审图号 GS(2013)1036号

# 序 言

陆面系统中水分和能量循环过程以及生态系统演化一直是地球科学的重要研究方向。在全球变化和人类活动的双重影响下,陆面系统中水分和能量交换与循环过程的变化将引发一系列的资源与环境问题,其中包括水资源(干旱和洪涝灾害)和生态环境以及农业和粮食安全问题。为了深刻认知这些变化过程的特征、规律和趋势,我们必须加强多学科交叉与合作,包括气候、遥感、水文、生态、农业以及地球系统科学的合作,形成新的理论和方法。

对于认知各种陆面过程,陆面观测和数值模拟是两种相互补充的手段。近半个世纪以来,各种观测手段,尤其是遥感科学技术迅速发展。世界各国相继发射大量对地观测卫星,包括中国近年来发射的风云系列卫星,逐步形成了综合、灵活的遥感技术体系,获取、存储和发布海量的遥感数据和产品也日益成功,为研究全球资源与环境问题提供了强大的技术支撑。同时,近30年来,随着人们逐渐加深对陆面物理过程的认识,在日新月异的计算机科学和数值方法的支持下,各种气候模式、陆面模型、水文和生态模型等也飞速发展。人们已经可以通过各种模型了解地球系统的过去,并对未来的变化做出预测,增强了人类应对各种自然灾害的能力。

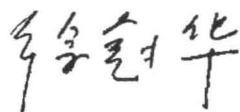
然而,遥感数据的时空连续性仍有许多缺陷,数值模拟也不可避免地存在各种不确定性。我们需要寻求将观测信息和陆面模型进行有机结合的科学途径,因而数据同化领域的研究应运而生。数据同化是一种融合多源观测和动态模拟的科学方法,它结合各种类型的观测和模拟,实现对客观物理过程更完美的描述。经过20多年的发展,它逐渐从大气海洋科学的应用扩展至地球科学的其他分支,包括水文、遥感和生态环境领域,为不同学科之间的交叉和联合提供了非常有效的平台和手段。

在这些领域的快速发展过程中,我们迫切需要相关书籍介绍最新的研究状况。梁顺林教授、李新教授和谢先红博士组织了一批学者开展这项工作。该书从遥感观测的数据源、陆面模型、数据同化方法和应用实例四个方面,系统地阐述了这些领域的前沿进展。涉及从陆面同化系统的遥感数据产品,到模型和数据同化中最主要的问题(包括模型参数优化、模型和观测误差的估计等)。书中还给出了数据同化方法在水文和农业等领域的应用和扩展,选题新颖独到,内容精彩纷呈。

该书作者梁顺林教授和李新教授是近年来国内外比较活跃的遥感和水文学专家。梁顺林教授是国家“千人计划”入选者,北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院的首席科学家之一,还兼任美国马里兰大学地理系教授。他在遥感陆表参量反演和四维同化遥感数据产品领域做出了创新性的工作。本人与他相识多年,深感其踏实肯干、治学严谨而又思维活跃的学者风度。李新教授作为国家杰出青年基金获得者,一直参加主持着中国陆面数据同化系统的研发工作。

书中各章的作者都是相关领域在国际上十分活跃的专家,包括美国国家科学院院士

Sorooshian 教授、水文模型 VIC 的开发者梁旭 (Xu Liang) 教授等,从他们的文风中可以领略到醇厚的学术风味。该书凝聚了 20 多位专家的研究成果,是集体智慧的结晶。相信该书对于地球科学的青年学生和研究人员是一部难得的教科书和工具书。该书的出版将促进遥感、水文、气候、生态和农业等学科的交叉与合作,推动地球科学研究的发展。衷心祝愿我国在地球科学领域能涌现一批引领学科前沿的青年科学家,做出自主创新的成果,为气候变化研究做出积极贡献。



2013 年 1 月

# 前 言

观测和模拟是定量描述陆面能量、水分、生态和环境因子循环过程的重要手段。近 30 年来, 由于卫星遥感技术的发展, 不同时空分辨率的海量遥感数据正帮助人们从不同尺度认识陆面过程。而在计算机技术迅速发展的推动之下, 陆面模型的发展也日趋成熟, 各种陆面模型的模拟能力都达到了一定的高度。但是, 单纯地依靠各种观测数据或者陆面模型, 仍然很难有效地认识陆面过程的演变规律。因此, 发展一种能够结合观测和模拟技术的方法尤为重要。数据同化作为一种高级的方法论, 其思想是在数值模型的动力框架内, 融合各种观测数据, 从而改善模型对状态变量的模拟, 实现模型校正或者参数估计, 并进行不确定性分析和数据的延展。相应地, 陆面数据同化的主要目的是利用各种观测和模拟的信息, 尽可能精确地重构或预测陆面过程的状态变量。数据同化在地球科学的研究中扮演着重要角色, 无论是在理论研究还是实际应用方面, 都受到广大学者的关注。

为了帮助地球科学的研究者, 尤其是青年学者更全面地了解陆面过程和数据同化领域最新的研究进展, 我们成功地举办了两届陆面数据同化培训班。第一届培训班于 2007 年 8 月在兰州举行, 国内相关领域的研究人员和学生参加了培训。鉴于第一次培训班受到大家的欢迎, 我们于 2010 年 7 月 13—15 日在北京师范大学举办了“第二届陆面观测、模拟与数据同化培训班”, 邀请了国际上一批非常活跃的科学家主讲 4 个专题, 包括陆面数据同化中的数据、陆面过程模型和分布式水文模型、同化理论与算法以及同化方法在地球科学中的应用。此次培训班吸引了来自十几个国家的 400 多位年轻学者, 可见这一研究领域的影响力和受关注的程度。

基于第二届培训班主讲者的讲稿和另外几位科学家的热情供稿, 我们组织撰写了本书。书中系统地介绍了数据源、模型、同化方法和应用四大部分, 主要集中在: ① 陆面过程的观测和数据源; ② 陆面模型参数化及其不确定性; ③ 陆面数据同化方法; ④ 数据同化方法在气候、水文、生态和农业等方面的应用。

前 3 章主要介绍卫星遥感数据及其获取方法。第 1 章综述了可应用于陆面数据同化系统的多种遥感数据产品, 包括模型驱动数据(如辐射、气温和大气水汽数据)和陆表数据产品(如地表温度、反照率和叶面积指数等)。文中还介绍了模型参数化中需要的土地覆盖遥感数据产品。中国已经成为国际上少数同时拥有业务运行极轨气象卫星和静止气象卫星的国家之一, 因此, 第 2 章重点介绍中国风云三号系列卫星的遥感仪器、地面系统设计和数据服务工作。该系列的前两颗卫星风云三号 A 星(FY-3A)和风云三号 B 星(FY-3B)已分别于 2008 年 5 月和 2010 年 11 月发射并投入使用。鉴于风云三号卫星数据的分辨率较高, 而且国家卫星气象中心提供数据共享服务, 风云三号在国内外的气象、水文和环境领域将发挥更有价值的作用。第 3 章介绍美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)地球观测系统(Earth Observing System, EOS)的陆面数据产品, 并详细介绍了数据搜索和订购方法、数据工具以及数据

应用示例。通过了解这些数据产品,读者可以方便地搜索和获取所需要的数据产品。

第4章和第5章分别讲述了陆面模型和水文模型方面的研究进展。第4章介绍干旱区和高海拔地区(主要指青藏高原)陆面过程模拟中存在的问题以及解决方案。文中发展了一个适用于旱区的热力学粗糙度参数化方案,分析了土壤垂向异质性对表层土壤状态变量和地表能量分配的控制作用,并提出了一个土壤蒸发表层阻抗的参数化方案。对观测数据的验证表明,新发展的方案显著提高了模型对土壤含水量的模拟精度。第5章综述了当前水文模型参数化和模型参数估计方法,并重点阐述全局优化算法。具有强物理机制的分布式水文模型成为水文学家一个重要发展方向,而如何降低复杂模型的高维度问题和模型的不确定性,全局优化算法将发挥重要作用,但同时也面临诸多挑战。

数据同化方法是本书的核心内容,包括同化方法的理论发展和实际应用。第6章至第10章围绕数据同化的理论部分展开讨论。第6章从陆面数据同化的定义开始,介绍了数据同化方法的分类,从原理、方法和符号系统为贝叶斯滤波在数据同化中的应用勾勒一个统一的框架,重点给出了非线性系统顺序数据同化的贝叶斯递推滤波形式,然后提供了陆面数据同化的研究实例。文中还指出数据同化方法是实现多尺度信息融合的有效方法论。在数据同化系统中,模型误差和观测误差的估计是一项具有挑战性的工作,它直接影响数据同化的效果。第7章至第9章专门讨论这一问题。第7章以陆面数据同化为背景,论述模型误差和观测误差协方差的估计方法,首先探讨了不恰当的误差给定方式对同化系统的影响,然后重点回顾了自适应滤波策略的研究进展。假想数据同化对照试验表明,自适应滤波方法在陆面模型中可成功应用。第8章讲述了误差方差矩阵的膨胀估计方法。在集合卡尔曼滤波同化方法的框架下,这种膨胀方法可以同时为模型预报误差和观测误差方差矩阵的膨胀系数同时优化。通过简化理想模型的验证表明此方法具有明显的优越性。第9章综述陆面数据同化系统误差估计问题,介绍了误差的来源、误差传播方式,多种误差处理方式,并重点讨论了一种基于进化计算理论的误差处理新方法和相应的耦合遗传算法的数据同化方法。文中还给出了数据同化误差问题研究的前沿方向。鉴于陆面模型的模拟尺度和观测尺度经常不匹配,第10章阐述了一种多尺度卡尔曼平滑框架。这种方法具有两个优点:其一是融合不同空间尺度的观测数据改进陆面模型的模拟;其二是在没有观测数据的时候,可以实现状态变量的尺度转换。该章除了介绍多尺度卡尔曼平滑的理论,还详细地给出了应用实例。

在讲述了数据同化方法理论框架和新的同化算法之后,第11章至第14章展示了同化方法的应用。第11章详细介绍了颇具影响力和代表性的北美陆面数据同化系统。该同化系统最早于1998年由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美国国家航天航空局和多所美国大学共同发起,其目的是为数值天气预报提供更精确的陆面初始条件。该系统经过两个阶段的发展,包含了Noah、Mosaic、SAC-SMA、VIC 4种较为流行的陆面模型,生成了高质量的陆表气象数据和降水数据。结合土壤湿度的模拟,北美陆面数据同化系统为美国综合干旱监测和气候预报提供了重要支撑。第12章针对季节性气候预测中的土壤湿度初始化问题,综述了土壤湿度数据同化的最新研究进展。文中评价了联合应用多源数据刻画模型误差和观测误差的效果,并指出模型误差和观测误差的估算方式在数据同化中的重要性。第13章介绍同化方法在农业方面的应用,论述了可见光/近红外、微波与热红外遥感数据在同化作物模型应用中的潜力,并讨论了遥感与作物模拟模型目前所面临的挑战。第14章介绍了集合卡

尔曼滤波方法在水文模型参数估计方面的应用。文中给出了一种扩展模型状态变量方法用于参数和变量的同步更新,分析了模型参数的初始分布,模型误差和观测误差的给定方式、集合的大小等对同化过程的影响。

如前所述,本书大部分章节是基于“第二届陆面观测、模拟与数据同化培训班”主讲学者的讲稿。此次培训班的主办单位包括北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院、联合国教科文组织北京办事处、季风亚洲区域集成研究科学计划、亚太地区全球变化研究网络组织、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、联合国教科文组织-国际水文计划-干旱区水与发展信息全球网络、中国科学院青藏高原研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、遥感科学国家重点实验室。前6个单位是本次培训班的资助单位,另外,科技部“国家高技术研究发展计划”863重点项目“全球陆表特征参量产品生成与应用”(项目号:2009AA122100)也提供了资助。

此次培训班的成功举办得益于众多学者的出色演讲和培训班组织者的有序运作。中国科学院遥感与数字地球研究所的施建成博士、季风亚洲区域集成研究科学计划的艾丽坤博士是培训班其中两位发起人,他们对培训班的组织和策划付出了大量时间和精力。北京师范大学的江波博士作为培训班的主要负责秘书,高效地安排了培训班的各项事务。在这里对他们的付出谨表谢意!

在培训班结束之后,我们立即组织了本书的撰写。本书的成稿离不开国内外20多位学者近三年的努力。他们负责的各章节内容都经过多次反复修改,意图全面地论述陆面数据同化各方向的研究进展。对他们的努力和热情,在此我们表示诚挚谢意!本书的出版得到了高等教育出版社的帮助。特别是关焱编辑在本书框架安排、文字的校对、图表的审核等方面花费了大量心血,提出的大量修改意见明显地提高了本书的出版质量。我们三位笔者深表谢意!马莉娅负责了本书部分文稿的版式安排和联系相关作者。在此一并衷心感谢她认真、仔细的工作!

本书部分国外学者提供的章节由英文翻译而来,翻译过程得到了北京师范大学多位研究生的帮助,包括王芳、蔡文文、冯丽超、蔡明勇、刘耀开等。孟珊珊协助处理了相关图片。本书的完成历时近三年时间,我们三位笔者得到了所在团队的帮助。另外,我们始终得到家人的理解、鼓励和帮助。没有他们无私的关爱,我们很难完成本书的组织和撰写。在此对学生、同事和家人道一声谢谢!

本书封面图片由中国气象局国家卫星气象中心的张鹏博士提供,特此致谢!

梁顺林 李 新 谢先红

2013年3月



## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

<b>第 1 章 陆面数据同化系统中的遥感数据产品</b>	
…… 姚云军 梁顺林 徐同仁 1	
1.1 引言	1
1.2 大气驱动数据	2
1.2.1 辐射数据	2
1.2.2 空气温度	4
1.2.3 水汽	5
1.2.4 降水	6
1.3 陆表遥感数据产品	8
1.3.1 地表温度	8
1.3.2 地表反照率	9
1.3.3 叶面积指数	11
1.3.4 FPAR	13
1.3.5 植被指数	15
1.3.6 土壤湿度	16
1.4 模型参数化的土地覆盖数据	17
1.5 小结	18
参考文献	19
<b>第 2 章 中国第二代极轨气象卫星——风云三号及其在全球监测中的应用</b>	张 鹏 27
2.1 中国气象卫星历史回顾	27
2.2 风云三号系列卫星的任务	28
2.3 FY-3A 和 FY-3B 星上遥感仪器	28
2.4 FY-3A 和 FY-3B 地面应用系统设计	32
2.5 风云三号 1 级和 2 级产品	34
2.6 数据存档和服务	35
2.7 风云三号资料在多领域的应用示例	37
2.7.1 全球天气监测	37
2.7.2 台风监测	37
2.7.3 卫星资料同化和数值天气 预报	38
2.7.4 全球臭氧监测	41
2.7.5 空气质量监测	41
2.8 讨论和总结	43
参考文献	44
<b>第 3 章 NASA 卫星与模型的陆面数据服务——数据获取指南</b>	Suhung Shen Gregory Leptoukh Hongliang Fang 45
3.1 NASA 陆面产品介绍	45
3.1.1 NASA 卫星陆面观测	45
3.1.2 NASA 卫星陆面产品、数据加工级别、数据分辨率及数据格式	46
3.1.3 NASA 陆面数据同化模型产品	47
3.2 搜索和订购 NASA 地球科学数据产品	48
3.2.1 NASA 地球科学数据与信息服务中心	48
3.2.2 从集中式系统查找和获取数据	48
3.2.3 从数据归档中心查找陆面数据	49
3.2.4 获取 Landsat 数据	50
3.2.5 从 GES DISC 获取数据	51

3.3	NASA 在线可视化服务 .....	53	5.1	概述 .....	88
3.4	支持的研究项目与数据和服务 使用示例 .....	54	5.2	水文模型综述 .....	89
3.4.1	NASA 数据支持的研究项目—— NEESPI 和 MAIRS .....	54	5.2.1	水文模型基本概念 .....	89
3.4.2	利用 Giovanni 绘制示例地图 .....	55	5.2.2	现代水文建模的发展方向 .....	90
3.5	总结 .....	59	5.3	参数估计方法综述 .....	92
	参考文献 .....	60	5.3.1	自动校正的条件 .....	92
<b>第 4 章</b>	<b>旱区及高海拔地区陆面过程 分析与模拟</b> ..... 陈莹莹 阳 坤	62	5.3.2	目标函数的选择 .....	93
4.1	陆面过程模型简介 .....	62	5.3.3	流行的水文模型优化算法 .....	93
4.2	旱区和高海拔地区陆面过程 模拟中存在的问题 .....	63	5.4	结论 .....	95
4.2.1	旱区陆地和大气之间的 热耦合 .....	64		参考文献 .....	95
4.2.2	高寒草地的土壤分层现象 .....	67	<b>第 6 章</b>	<b>遥感数据和陆面模型的 同化——理论与方法</b> ..... 李 新 摆玉龙	97
4.2.3	土壤蒸发表层阻抗 .....	68	6.1	数据同化理论 .....	97
4.3	旱区和高海拔地区陆面参数化 的发展 .....	68	6.1.1	模型的不确定性 .....	98
4.3.1	热力学粗糙度参数化方案及其 验证 .....	69	6.1.2	观测的不确定性 .....	99
4.3.2	土壤垂向异质性的逆向分析 .....	74	6.1.3	陆面数据同化概述 .....	100
4.3.3	土壤蒸发表层阻抗参数化 方案 .....	75	6.2	数据同化方法 .....	100
4.4	地表过程模拟的改进 .....	76	6.2.1	数据同化方法分类 .....	101
4.4.1	新热力学粗糙度参数化方案对 旱区模拟的改进 .....	76	6.2.2	数据同化的贝叶斯理论 基础 .....	101
4.4.2	考虑高寒草地土壤垂向异质性 对模拟的改进 .....	80	6.2.3	集合卡尔曼滤波 .....	105
4.4.3	新土壤蒸发表层阻抗对模拟的 改进 .....	81	6.3	陆面数据同化研究实例 .....	109
4.5	总结和建议 .....	82	6.3.1	同化 MODIS 地表温度以提高 土壤温度廓线估计精度 .....	109
	参考文献 .....	83	6.3.2	同化被动微波遥感观测提高 冻土活动层土壤温度估计精度 .....	111
<b>第 5 章</b>	<b>水文模型参数化和参数估计方法 综述</b> ... Soroosh Sorooshian Wei Chu	88	6.4	总结与展望 .....	113
				参考文献 .....	114
			<b>第 7 章</b>	<b>陆面数据同化系统模型误差和 观测误差的协方差估计</b> ..... Wade T. Crow	117
			7.1	引言 .....	117
			7.2	研究背景 .....	118
			7.3	现代陆面模型中的应用 .....	122
			7.4	存在的挑战 .....	127
			7.4.1	观测误差自相关 .....	127

7.4.2	模型误差来源和结构的不确定性	129	结果	155	
7.4.3	自适应滤波的收敛速度	132	8.5.1	观测算子的切线性程度的敏感性分析	155
7.5	可能的解决方法	133	8.5.2	观测算子为切线性时几种膨胀调整方法的比较	156
7.5.1	三重组合方法估计 $R$	133	8.6	讨论与主要结论	157
7.5.2	稳健的滤波策略	135	参考文献	158	
7.6	结论	136	附录 8. A	159	
参考文献		136	附录 8. B	行列式 $\det(H_t \lambda_t P_t^f H_t^T + R_t)$ 的一个计算方法	160
附录 7. A	最优卡尔曼滤波中新息的特点	138	第 9 章	陆面数据同化系统误差估计问题综述	
第 8 章	集合卡尔曼滤波同化中误差方差矩阵的膨胀调整			… 摆玉龙 李新 柴乾隆	161
	… 郑小谷 吴国灿 梁晓 张树鹏	141	9.1	引言	161
8.1	简介	141	9.2	现代数据同化方法的误差问题	162
8.2	集合卡尔曼滤波中误差方差矩阵的调整方法	143	9.2.1	误差定义及来源	162
8.2.1	集合卡尔曼滤波	143	9.2.2	顺序数据同化方法中的误差定义	164
8.2.2	观测算子为线性时误差方差矩阵的膨胀调整	144	9.2.3	变分数据同化方法中的误差定义	166
8.2.3	观测算子为非线性时误差方差矩阵的膨胀调整	145	9.3	误差估计综述	167
8.2.4	验证同化方法的统计量	147	9.3.1	模型误差	167
8.3	用于验证的简化理想模型简介	147	9.3.2	观测误差	168
8.3.1	Lorenz-96 模式	147	9.3.3	集合同化中的算法误差	169
8.3.2	二维浅水方程模型	148	9.4	集合数据同化中的误差处理方法	169
8.4	线性观测条件下的验证结果	149	9.4.1	乘数放大法	170
8.4.1	膨胀系数依赖于时间的情形	149	9.4.2	附加放大法	170
8.4.2	膨胀系数不依赖于时间的情形	151	9.4.3	松弛 - 先验法	170
8.4.3	观测误差方差矩阵不正确的情形	152	9.4.4	基于进化计算的误差参数化方法	171
8.4.4	观测误差方差矩阵的膨胀系数依赖于时间的情形	153	9.5	杂交误差处理试验设计	172
8.5	非线性观测条件下的验证		9.5.1	耦合遗传算法的误差因子寻优方法	172
			9.5.2	实验模型	173
			9.5.3	性能评价及适应度函数	174
			9.5.4	数值试验	174

9.6 总结与讨论 .....	179	第 12 章 土壤湿度数据同化——用于季节性 气候预报中的状态初始化 ..... Wenge Ni-Meister	263
参考文献 .....	181	12.1 引言 .....	263
<b>第 10 章 多尺度卡尔曼平滑框架及其在 数据同化中的应用</b> ..... Daniel E. Salas Xu Liang	186	12.2 土壤湿度数据同化发展 简介 .....	264
10.1 引言 .....	186	12.3 土壤湿度数据同化基本 概念 .....	266
10.2 传统卡尔曼滤波 .....	187	12.4 土壤湿度同化——研究 实例 .....	267
10.3 多尺度卡尔曼平滑(MKS)框架 及其扩展 .....	188	12.4.1 数据同化算法的发展 ...	267
10.3.1 向上扫描 .....	192	12.4.2 同化 SMMR 数据到 CLSM 模型中 .....	268
10.3.2 向下扫描 .....	202	12.5 结论与讨论 .....	275
10.4 EM 算法参数化 .....	205	参考文献 .....	276
10.4.1 E 步骤 .....	206	<b>第 13 章 同化遥感数据与作物模拟模型 的农业应用研究——最新进展 与发展方向</b> ..... 方红亮 梁顺林 Gerrit Hoogenboom	280
10.4.2 M 步骤 .....	206	13.1 引言 .....	280
10.5 多尺度卡尔曼滤波(MKS-EM) 框架的应用 .....	207	13.2 作物生长模型 .....	281
10.5.1 算法的复杂度 .....	207	13.3 数据同化方法 .....	282
10.6 算例 .....	208	13.3.1 直接输入法 .....	283
10.7 符号说明 .....	230	13.3.2 序贯同化方法 .....	284
参考文献 .....	231	13.3.3 变分同化方法 .....	284
<b>第 11 章 北美陆面数据同化系统概述</b> ... Youlong Xia Brian A. Cosgrove Michael B. Ek Justin Sheffield Lifeng Luo Eric F. Wood Kingtse Mo NLDAS team	235	13.4 遥感数据及其预处理 .....	285
11.1 引言 .....	236	13.4.1 可见光与近红外信息 ...	286
11.1.1 陆面数据同化系统的背景 .....	236	13.4.2 微波信息 .....	288
11.1.2 NOAA - NASA - 大学合作与 NLDAS 的发展 .....	237	13.4.3 热红外信息 .....	289
11.1.3 世界范围内其他陆面数据 同化系统 .....	238	13.5 在区域范围进行玉米产量 估算 .....	289
11.2 NLDAS 发展历史 .....	238	13.5.1 敏感度分析 .....	290
11.2.1 NLDAS-1 .....	238	13.5.2 构建代价函数 .....	291
11.2.2 NLDAS-2 .....	243	13.5.3 估算玉米产量 .....	292
11.3 总结 .....	255	13.5.4 水分平衡研究 .....	294
参考文献 .....	256	13.6 挑战与发展方向 .....	296

13.7 小结 .....	297	实例 .....	306
参考文献 .....	297	14.4 数据同化在分布式水文模型 中的应用 .....	308
<b>第 14 章 水文模型参数和变量同步估计的 数据同化方法——集合卡尔曼 滤波的扩展与应用</b> ..... 谢先红	303	14.4.1 SWAT 模型 .....	308
14.1 引言 .....	303	14.4.2 数据同化环境设定 .....	309
14.2 集合卡尔曼滤波与状态向量 扩展方法 .....	304	14.4.3 数据同化结果 .....	310
14.3 简单降水 - 径流模型的应用		14.5 讨论 .....	315
		14.6 结论 .....	317
		参考文献 .....	318
		<b>索引</b> .....	320

---

# 第 1 章

## 陆面数据同化系统中的遥感数据产品

本章介绍目前陆面数据同化系统中主要的遥感数据产品以及它们在数据同化中的应用研究概况。本章第 1.1 节简要介绍数据同化的基本概念以及遥感数据源在数据同化中的必要性;第 1.2 节介绍数据同化系统中的模型驱动数据(如辐射数据、空气温度和水汽等)产品的基本概况;第 1.3 节主要介绍用于数据同化的陆表遥感数据产品及其应用研究进展;第 1.4 节详细介绍模型参数化数据中的土地覆盖遥感产品;最后是本章小结。

### 1.1 引言

在全球变化研究中,遥感数据已经成为重要的数据源。然而利用遥感手段得到的仅仅是地球表层的瞬时信息,很难得到时空连续的地表状态变量,这阻碍了遥感数据在地球科学研究中的应用。数据同化方法可以在陆面过程模型的动力框架内,融合不同来源和不同分辨率的直接与间接观测,将陆面过程模型和各种观测算子集成为不断地依靠观测而自动调整模型轨迹,并且减小误差的预报系统(李新等,2007;Liang and Qin,2008)。因此,利用数据同化方法,将遥感数据与过程模式结合起来,弥补了遥感数据的这一缺陷,为遥感数据在全球变化中的应用开辟了新的道路。

数据同化可定义为将物理过程数值模型拟合结果与观测数据相融合,不断更新系统状态与参数,从而提高物理过程模拟或预报精度的方法。遥感数据包含了地表的空问异质性信息,克服了点观测数据向面数据扩展的局限性,应用遥感数据进行数据同化可以在区域和全球尺度上高效地进行气候、水文以及生态过程等相关环境信息的监测。

从纯算法角度,现有的同化算法可以分为两类:变分同化与顺序同化。变分同化方法以最优控制理论为基础,以分析值与观测值以及背景场之间偏差为目标函数,通过对其最小化寻求整个同化时段的最优解。顺序同化方法则只着眼于求解单个观测时刻的最优分析值,不断地用新的观测更新模型的预报场,从而形成下一时刻模型预报的初始场,并进行新的预报,如此按顺序向前推进。陆面数据同化系统中,遥感数据产品可以分为大气驱动数据(辐射数据、温度、降水和

水汽等)、陆表遥感数据产品(地表温度、地表反照率、叶面积指数和土壤湿度等)以及模型参数化数据(主要是土地覆盖数据和土壤类型数据)。下面将详细介绍这三类数据同化系统中所需要的遥感数据。

## 1.2 大气驱动数据

大气驱动数据在数据同化系统中主要是作为模型输入数据,本节简要介绍能够利用遥感反演和估计得到的一些常见的大气数据,包括辐射、空气温度、水汽和降水等数据。

### 1.2.1 辐射数据

地表辐射包括短波辐射和长波辐射两部分,其中、短波下行辐射( $S_{\downarrow}$ , insolation),通常是指到达地表的总太阳辐射,波谱范围一般定义为  $0.15 \sim 5.00 \mu\text{m}$ ,包括直射太阳辐射、散射太阳辐射和多次散射后到达地表的太阳辐射。地表短波辐射是地表能量收入的重要组成部分,也是地表净辐射的一项重要组成部分,对地表的辐射平衡、地气能量交换具有重要意义。通常辐射数据集可以分为地面辐射观测数据集、GCMs 辐射产品和卫星遥感辐射产品数据集三类。

#### 1. 地面辐射观测数据集和 GCMs 辐射产品

为了测量和获取地表太阳辐射量,在一定的气象或者气候观测站点进行辐射测量是极其必要的。全球具有代表性的地面辐射观测的网络有 GEBA(Global Energy Balance Archive)(Gilgen and Ohmura,1999;Liang,2004)、BSRN(Baseline Surface Radiation network)(Liang,2004;Ohmura et al.,1998)、SURFRAD(Surface Radiation Budget Network)(Augustine et al.,2000;Augustine et al.,2005;Liang,2004)和 FLUXNET(全球通量观测网络)(Baldocchi et al.,2001;Liang,2004)。这些观测网络的测量数据可以用于验证经验模型或者大气辐射传输模型模拟的准确性,从而预测或者验证其他未测量站点的辐射值。

几乎所有的大气环流模型(GCMs)都会涉及到达地表的短波太阳辐射,不过目前为止,GCMs模型的空间分辨率相对都都比较低( $>1^\circ$ ),而时间分辨率尚可(6 h)(Liang,2004)。大多数的GCMs模型都会过高估计到达地表的短波辐射(Liang,2004;Wild,2008)。同时,Liang(2004)也比较了不同来源数据获得地表下行短波辐射值,同样存在很大的不确定性。

#### 2. 卫星遥感辐射数据集

基于卫星遥感技术估算到达地表太阳辐射是最实际和最可靠的方法,这是因为遥感观测的全球覆盖特征与地面站点观测相比具有较大优越性(Liang et al.,2010),甚至覆盖整个地球的任何区域。目前,计算到达地表的太阳辐射的算法多种多样,但是全球的地表辐射产品数量屈指可数。这在很大程度上是由目前算法的适用性和局限性造成的。

从20世纪60年代开始,气象卫星已经拓展了我们对地表能量和辐射平衡的认识。有很多典型的测量或者观测地表太阳辐射的辐射仪或者传感器,如搭载在 Nimbus-7 卫星上的 ERB(Earth Radiation Budget)传感器(Jacobowitz and Tighe,1984);搭载在 Terra、Aqua 和 TRMM 卫星上的 CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)传感器(Barkstrom and Smith,1986);搭载在 Meteosat-8 和 Meteosat-9 卫星上的 GERB(Geostationary Earth Radiation Budget)传感器



(Harries et al., 2005)。多波段的传感器也被用来生产地表太阳辐射产品,如搭载在 MSG (METEOSAT Second Generation) 卫星上的 SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) 传感器以及 GOES-R ABI (Laszlo et al., 2008) 和 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器等 (Liang et al., 2006)。通常卫星遥感估算到达地表太阳辐射主要有三种基本方法:一种是通过统计回归;另一种是建立物理模型;第三种是通过精确辐射传输模型模拟太阳辐射与大气和地表之间的相互作用建立查找表来估算地表太阳辐射。目前,主要的卫星辐射产品包括 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) C1 数据 (Pinker and Laszlo, 1992); GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) 地表辐射收支数据,空间分辨率为  $1^\circ$ ; CERES 的辐射收支数据,空间分辨率为 140 km 以及基于查找表的 GLASS (Global LAnd Surface Satellite) 辐射产品 (Liang et al., 2006)。

经过验证比较, ISCCP-BR 和 ISCCP-PL 分别比 TOMAS-PAR 大 12% ~ 16% 和 8% ~ 12%。在低纬度区域的实测无雪站点验证表明,三个数据产品的 RMSE 分别为 28.1%、13.7% 和 7.2%,偏差分别为 +25.9%、+12.0% 和 +2.8% (Dye and Shibasaki, 1995; Schroeder et al., 2009)。Gui 等 (2010b) 给出了三种卫星短波辐射产品与查找表方法反演结果在不同区域验证精度的比较,发现 GWEXE 产品精度比 ISCCP 和 CERES 产品精度要高,其典型的全球辐射产品基本信息如表 1.1 所示。

表 1.1 典型的全球辐射产品基本信息

产品类型	产品名称	时间覆盖范围	空间分辨率	时间分辨率
光合有效辐射	ISCCP-BR	1983—2007	280 km	3 h
	ISCCP-PL	1983—2007	280 km	3 h
	TOMAS-PAR	—	$1^\circ$	每月
	GLASS	2008—2010	5 km	3 h
下行短波辐射	ISCCP-C1	1983—2007	280 km	3 h
	GEWEX	1983—2007	$1^\circ$	3 h
	CERES	2000	140 km	—
	GCMs	—	$>1^\circ$	6 h
	GLASS	2008—2010	5 km	3 h

### (1) ISCCP

国际卫星云气候计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 是世界气候研究计划 (World Climate Research Program, WCRP) 的第一个子计划,始于 1982 年,至今已经 30 多年,目前仍在执行中。它提供了第一手的、系统的、全球时空尺度上的天气云图,通过收集和分析卫星测量辐射率数据,来推算全球的云及云属性,以及云的日变化、季节性变化和年季变化。ISCCP 数据产品中,PAR 和短波下行辐射产品的空间分辨率为 280 km,时间分辨率为 3 h,时间跨度为 1983—2007 年。其中 B3、BT 是单颗卫星最初级的全球可见光 (VIS:  $0.6 \mu\text{m}$ ) 和红外 (IR:  $11 \mu\text{m}$ ) 通道辐射率产品,由随机取 4 ~ 7 km 像素尺度的图像经过归一化定标和降低分辨率