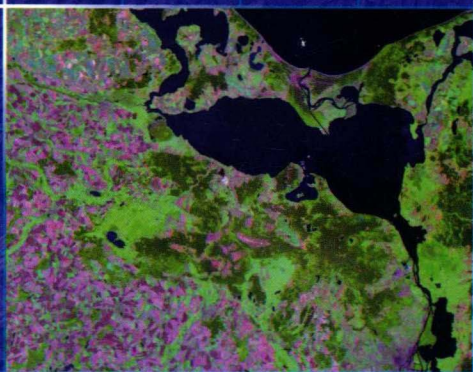


遥感与数值模拟技术 及其应用

高 炜 高志强 等 著



科学出版社

遥感与数值模拟技术 及其应用

高 炜 高志强 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于遥感和模式技术,从遥感技术原理探讨到遥感参数反演,到区域气候模式、陆面模式及生态模式的引进、测试以及生态过程模式和光能利用率模式的设计与测试等多方面展开了研究。内容包括:基于遥感反演机理的 ETM/TM 和 MODIS 数据地表参量反演,GeoRS 程序包的设计和测试,遥感地表覆盖信息的提取及城市扩展的 CLUS 模拟,光能利用率模式 GEOLUE 的设计验证及应用,基于 CEVSA 生态模式的中国碳循环的模拟研究,基于 Holdridge 生命地带分类模型中国 100 年气候和地表覆盖变化研究,区域气候模式 CWRP 的中国本地化测试及相关应用研究等。

本书可为我国地球科学研究领域的量化数值模拟研究提供方法参考,为定量遥感和数值模拟及耦合的方法实现提供技术指导和策略;可供从事遥感应用、数值模拟、地理研究、环境保护等领域的科研人员及高等院校相关专业师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

遥感与数值模拟技术及其应用/高伟等著. —北京:科学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-03-046154-4

I. ①遥… II. ①高… III. ①航天遥感-数值模拟-研究 IV. ①TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 256668 号

责任编辑:彭胜潮 景艳霞 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:北京图阅盛世

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

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:360 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

遥感技术已经进入一个多层、立体、多角度、全方位和全天候对地观测的新时代,生态和气候模式模拟方法正成为极具发展前景的重要研究方向和不可替代的研究手段,对地球表层大气、水文及生态过程的时空变化及其相互作用进行科学模拟,使地球科学的研究达到了一个新的高度。

遥感应用同模式耦合也取得了快速发展,遥感宏观、快捷,与模式时空模拟的连续性结合,为地球科学的时空过程研究提供了强有力的平台。遥感数据产品的网上发布及免费使用,极大地促进了遥感和模式耦合技术的发展。遥感参数已在大气模式、陆面模式及生态过程模式中得到了广泛使用。土地覆盖、反射率、反照率、叶面积指数、土壤水分、光合有效辐射、气溶胶、大气透过率等参数已是模式模拟研究的关键参数,并被广泛应用在数值模拟研究中。模式同遥感的耦合已成为地球科学过程研究的大趋势,并被地球科学家认同。

该书作者长期从事大气(紫外线)辐射理论及观测与影响、定量遥感、区域气候与生态过程模拟、生态环境监测评估等方面的研究,主要致力于区域气候模式、陆面过程模式、生态模式及作物模式的耦合系统开发研究。在定量遥感和模式模拟耦合研究领域,在遥感和野外观测基础上,对植被指数、地表温度、土地净生产力、地表能量、地表蒸散发等参数的定量反演技术进行了实用化研究,并同地理信息系统技术结合,实现了遥感和模式模拟技术的多源耦合。结合遥感和模式技术,利用光能效率原理,成功地进行了区域植被净生产力的模拟研究。

该书是作者及项目组近年来研究工作的总结,包括多源数据的遥感反演及土地覆盖信息提取和响应研究,区域气候模式的引进和本地化测试应用,CLUS模式、Holdridge模型、CEVSA模式、GLOPEM模式的应用及光能利用率模式GEOLUE的设计验证等多方面研究成果。该书的研究成果将对地球科学的量化模拟研究提供技术借鉴,对遥感和模式的耦合研究提供技术帮助和方法指导。

童庆禧

2015年7月27日

前 言

自 20 世纪 60 年代起,人类开始有能力获取空间对地观测遥感数据,特别是 80 年代以来,美国、日本和欧洲空间局相继提出了对地观测系统计划,将人类对地表信息的获取推进到了一个崭新阶段。在遥感技术的支持下,全球变化研究,尤其是陆地表层空间特征和地表演化现代过程等研究,得到了完整的时空序列科学数据,从而进入到了参数化、定量化研究阶段。随着计算机技术、遥感技术和模式模拟技术的发展,地表过程研究的效率和质量得到了大幅提升。现在不仅可以对地表过程进行大面积、多尺度的地表过程综合研究,还可以进一步进行地表过程的性质、结构、空间分布、时间演化乃至未来预测的模拟研究。例如,模拟地表过程的能量通量、物质通量的变化及其运移过程。通过结合通量定位观测技术,可为提高地球科学研究水平带来前所未有的契机。

陆地生态系统的能量与物质循环是一个复杂过程,构建模式的目的是描述陆地生态系统物质和能量的变化及迁移等主要生态过程的机理及其与环境的关系,进而预测气候变化和人类活动影响下的陆地生态系统行为。遥感技术被广泛应用于地理学、生态学、水文学、气象气候学等诸多学科领域。由于遥感技术具有多波段、大范围、周期性观测等特点,在这些学科领域中,遥感数据逐步成为最重要的基础数据源之一。通过遥感观测,能有效地解决在常规观测下难以解决的问题,遥感数据已经成为模式模拟研究中不可缺少的数据源。近 20 年来,在遥感、地理信息系统技术和计算机技术等支持下,大气模式、陆面过程模式和生态模式被用于模拟地球表层大气、水文及生态过程的时空变化及其相互作用,实现了地球科学研究从传统的状态描述向过程模拟预测的发展。

我国自 20 世纪 70 年代以来,遥感技术及其应用逐渐成熟。基于覆盖全国的 Landsat 系列和 NOAA/AVHRR 系列多时相数据,通过计算机辅助监督分类,实现了中国土地利用/土地覆盖的动态库,生成了中国资源环境遥感数据库,并提出了变化过程的格局及格局的变化过程理论,标志着中国遥感信息提取及分类技术走向成熟。经过近 20 年的发展,中国定量遥感技术逐渐走向成熟,基于遥感和观测技术,对地表温度、土地净生产力(NPP)、地表能量、作物蒸腾、土壤水分等的定量反演技术逐渐走向实用化。同地理信息系统技术(GIS)、计算机技术相结合,遥感技术为国民经济建设和科学研究提供不可缺少的技术支持,为我国的环境及土地利用/土地覆盖变化研究提供了技术保障,为生态环境、陆面过程和大气数值模拟提供了源源不断的基础数据保障。尽管在陆地生态系统生产力研究中有局部详细样点测量手段,但就目前而言,基于空间平台的遥感技术是唯一经济的、可获得大面积连续观测的途径,其所具有的覆盖广、多波段和高效率等特点,是其他信息源量测方法无法比拟的。遥感数据已经成为当前地球科学研究领域无可替代的重要数据来源。

自 20 世纪 80 年代以来,我国在大气、陆面过程及生态模式的引进、改造和开发方面取得了显著成就。在引进和改造国外先进模式基础上,我国成功开发了自己的大气模式

(AGCM, OGCM, GOAL/LASG)和陆面过程模式(AVM, IAP94, LPM-ZD等);进行了大气、海洋和陆地过程的耦合试验,实现了9层AGCM和简化的简单生物模式(SSiB)的耦合,生成了包括气候子系统及新的辐射方案的海-气-陆耦合系统模式(GOAL/LASG);在生态模式方面,通过引进和合作,我国在生态研究领域已经成功使用了Century、TEM、Biome_BGC、DNDC、DOLY、CEVSA、GLO_PEM、CASA等生态过程和遥感机理模式。同时,针对中国区域特点,对模式进行了参数及内核的修改,并在参考和分析大量模式的特点与机理基础上,设计开发了BEPS_china、TEPC(Terrestrial Ecosystem Production process model in China)等一批更符合我国实际情况的生态过程模式。

本书是作者及项目组近年来依托遥感技术和数值模拟技术,以我国资源与环境领域地表过程机理和人地关系为研究目标,利用遥感和陆地表面时空序列数据,基于定量模型(或模式),分析地表过程的变化机理及响应规律,为国家的环境问题研究及国土资源保护提供理论与方法支持。

本书将努力解决以下地球科学研究中的技术、方法和理论方面的科学问题:

(1) 基于遥感和数值模拟技术,解决地球科学从状态描述到地理过程研究中的关键技术问题。

(2) 以遥感和数值模拟结果为数据基础,力求阐明区域研究中地表物质能量的空间变化过程格局及格局的时空变化过程规律。

(3) 以遥感和数值模拟技术的耦合为切入点,解决地面观测和数值模拟技术为支撑系统的自下而上(bottom-up)的科学数据及其研究途径,与以遥感信息为基础的自上而下(top-down)的科学数据及其研究途径有机结合的关键方法问题等。

本书内容包括:基于遥感反演机理的ETM/TM和MODIS数据地表参量反演及GeoRS程序包的设计与测试;遥感地表覆盖信息的提取及城市扩展的CLUE模拟;光能利用率模式GEOLUE的设计验证及应用;基于CEVSA生态模式的中国碳循环的模拟研究;基于Holdridge生命地带分类模型的中国100年气候和地表覆盖变化研究;区域气候模式CWRF的中国本地化测试及相关应用研究等。

参与本书编写和执笔的有:高炜、高志强、王晋年、张文江、刘朝顺、张杰、刘术艳、陈茂斯、施润和、赵卿、张远等。整个项目的工作及编写由高炜博士组织,高炜博士对书稿进行了最后修正和校对。

本书得到了华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室、华东师范大学环境遥感与数据同化联合实验室和上海市科学技术委员会科研计划项目世博专项“世博后上海空气质量跟踪监测与应用研究”的大力支持,还要特别感谢许世远、周乃晟、俞立中、朱自强、孙真荣、唐玉光、陈振楼、王浩、刘纪远等专家对本书的完成提供的帮助。本书希望为中国地球科学领域的定量化发展及数值模拟研究提供方法参考,为定量遥感和数值模拟及耦合的方法实现提供技术指导和帮助。

高 炜 高志强

2015年7月27日于上海

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 遥感研究概述	2
1.1.1 基于遥感的地表信息提取	2
1.1.2 基于遥感的地表水热通量估算研究	5
1.1.3 地表参数遥感研究进展	12
1.2 生态模式研究	15
1.3 区域气候模式及陆面过程模式研究	19
参考文献	24
第 2 章 基于 TM/ETM+ 的地表温度反演	32
2.1 地表温度反演原理	32
2.1.1 地表温度计算预处理	33
2.1.2 地表温度的计算	35
2.1.3 反演结果	41
2.2 土地利用变化影响分析与讨论	44
2.3 结论	49
参考文献	49
第 3 章 基于 MODIS 数据的地表热量反演	51
3.1 关键参数实现	52
3.2 模式实现方案	57
3.3 模式模拟	61
3.4 模型验证	63
3.5 地表水热通量模拟结果分析	67
3.6 结论	79
参考文献	80
第 4 章 基于 MODIS 数据的区域蒸散反演及早情监测	83
4.1 基于 DEM 改进 SEBAL 模型	84
4.1.1 净辐射通量的计算	84
4.1.2 土壤热通量的计算	87
4.1.3 感热通量的计算	88
4.2 地表蒸散模拟验证与结果分析	94

4.2.1 基于 Lysimeter 实测资料的验证分析·····	95
4.2.2 基于作物系数的验证分析·····	97
4.3 区域地表水热特征的时空格局·····	99
4.3.1 研究区气候特征·····	99
4.3.2 水热特征季相变化的遥感监测·····	100
4.4 区域旱情的遥感监测·····	105
4.4.1 区域缺水指数提取·····	105
4.4.2 区域缺水指数的应用·····	107
4.4.3 区域旱情的遥感动态监测·····	109
4.5 结论·····	112
参考文献·····	112
第5章 LUCC 的提取及 CLUE 模型模拟·····	116
5.1 研究方法·····	117
5.2 地表覆盖信息的提取·····	120
5.3 情景模拟·····	125
5.4 城市扩展下的景观格局特征及 NPP 响应·····	130
5.5 结论·····	132
参考文献·····	133
第6章 GEOLUE 模式设计及应用·····	134
6.1 研究方法·····	135
6.2 模式模拟·····	139
6.3 模式验证·····	139
6.4 结果分析与讨论·····	140
6.5 结论·····	147
参考文献·····	148
第7章 基于 CEVSA 模式的中国生态系统碳循环模拟研究·····	150
7.1 模式机理·····	151
7.2 应用实例及结果分析·····	155
7.3 总结·····	177
参考文献·····	178
第8章 Holdridge 模型及应用研究·····	180
8.1 模型方法·····	181
8.2 应用事例及结果分析·····	182
8.3 总结·····	193
参考文献·····	193
第9章 基于 CWRf 的中国区域气候模拟研究·····	195
9.1 基于 CWRf 模式模拟研究的方法·····	196
9.2 初始条件·····	201

9.3 模拟区域的确定	203
9.4 侧边界条件对 CWRF 模拟中国东部季风区夏季降水的影响	204
9.5 嵌套及水平分辨率对 CWRF 模拟	213
9.6 物理过程对 CWRF 模拟中国东部季风区夏季降水的影响	220
9.7 CWRF 与 RegCM 3 的比较	229
9.8 结论	238
参考文献	239

第 1 章 绪 论

自 20 世纪六七十年代起,人类开始有能力从太空获取对地观测的遥感数据。特别是 80 年代以来,美国、日本和欧洲空间局相继提出了各自的对地观测计划,使人类对赖以生存的地球表层系统的理解推进到一个崭新的阶段。全球变化研究中的陆地表层空间特征研究和地表演化现代过程研究在遥感技术的支持下,获得了时空序列完整的遥感数据,从而进入了参数化、定量化研究阶段。变化监测是遥感数据应用的一个主要方面,遥感数据被广泛地应用于土地利用/土地覆盖的制图与动态变化监测。过去 20 多年来,利用卫星多波段影像数据进行动态信息的提取和监测,成为遥感研究和应用的一个主题(徐冠华、孙枢,1999;陈宜瑜,1999)。

遥感技术集成了空间、电子、光学、计算机通信和地学等学科的最新成就。自 20 世纪 80 年代后期以来,遥感由定性向定量、由静态研究向动态研究方向发展,遥感的实时性和运行性有了显著提高。遥感技术的发展将人类带入一个多层、立体、多角度、全方位和全天候对地观测的新时代。各种高、中、低轨道相结合,大、中、小卫星相协同,高、中、低分辨率相互补的全球对地观测系统,能快速、及时地提供多种空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的海量对地观测数据(刘纪远,1996;李德仁,1999)。

近 30 年来随着计算机技术、遥感技术和模式模拟技术的发展,地表过程研究的效率和质量得到了极大提高。现在不仅可以进行大面积、多尺度的地表过程综合研究,还可以进行大面积、多尺度地表过程性质、结构、空间分布、时间演化及未来预测模拟研究,可以模拟地表过程的能量通量、物质通量的变化及运移过程,结合通量定位观测技术,为地球科学研究水平的提高带来了前所未有的契机(童庆禧、郑立中,2001;秦大河,2002)。

目前,在大气及陆地生态系统研究中,模式模拟方法正成为重要的研究方向和极具发展前景、不可替代的研究手段。从国际上看,模式模拟在不同尺度(从样地、区域到全球)的生态系统研究中都得到了广泛应用,并随着实验观测数据和资料的不断积累及对地球系统认识的不断加深,模式研究逐渐趋向实用。在遥感、地理信息系统技术和计算机技术支持下,自 20 世纪 70 年代以来,美国众多大气及生态实验室开发了大量大气模式(如 GCM, RCM, MM5, WRF, RAMS, RegCM 等)、陆面过程模式(如 BATS, LSM, CLM, SSiB, BEST, CAPS, ISBA, BASE, CLASS 等)和生态模式(如 TEM, DOLY, CENTURY, BIOME-BGC, BEPS 等),用来模拟地表大气、水文及生态过程的时间和空间变化及其相互作用,使得地球科学的研究从状态描述到过程模拟预测成为可能。

1.1 遥感研究概述

1.1.1 基于遥感的地表信息提取

自 20 世纪 80 年代后期以来,遥感的发展步伐明显加快,光谱信息的成像化、雷达成像的多极化、地学分析的智能化、环境研究的动态化以及资源研究的定量化等一系列新构思、新理论、新技术和新工艺的发展,使遥感进入了一个更新、更高的发展阶段。遥感正由定性向定量、由静态研究向动态研究方向发展,遥感的实时性和运行性有了显著提高。经过近 30 年的快速发展,我国的遥感技术及应用逐渐成熟,基于覆盖全国的多时相 TM(thematic mapper)和 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)数据,通过计算机辅助及监督分类,实现了中国土地利用/土地覆盖的动态建库,生成了中国资源环境遥感数据库,并提出了变化过程的格局及格局的变化过程理论,标志着中国遥感信息提取及分类技术走向成熟(刘纪远等,2002)。经过近 20 年的发展,中国定量遥感技术也逐渐走向成熟。基于遥感和观测技术,对地表温度、土地净第一性生产力、地表能量、作物蒸腾、土壤水分的定量反演技术逐渐走向实用化。与地理信息系统技术(geographic information system, GIS)、计算机技术相结合,遥感技术已经成为国民经济建设和科学研究中不可缺少的技术支持,为我国环境及土地利用/土地覆盖变化研究提供了技术保障,为生态环境、陆面过程和大气数值模拟提供了数据基础(朴世龙等,2001;陈良富、徐希孺,1999;洪刚等,2001;辛晓洲等,2003;张仁华等,2001)。

为了促进对地球系统的综合观测和研究工作,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 1994 年正式公布了其地球观测系统科学计划(EOS)(<http://eos.nasa.gov>)。该计划的一个主要目的是研究陆地系统在大尺度全球过程中的作用,从而系统地了解地球的功能。由于植被能影响地球系统的能量平衡、气候、水文和生物地球化学循环,是气候和人类影响环境的敏感指示器(周红章等,2000;黄海仁、李培,1999;李晓兵等,2004),因此有必要全面掌握全球植被的类型(包括生理和结构)分布和时空变化。遥感观测技术提供了大尺度、大范围、定量化监测的手段,并可用来调查植被在人类活动和气候变化背景下的各种响应。

地球资源卫星和气象卫星已进行了 30 多年的全球连续观测。自从 Tucker 等进行有关基于遥感的植被指数[一般以 normalized difference vegetation index(NDVI 表达之)]与光合作用相关性的开拓性研究以来,遥感已成为观测土地覆盖、生态系统格局分布和生产力变化的主要手段,并应用于千米级空间分辨率的全球植被分布及其时间变化的研究中。遥感对植被光合有效辐射吸收的测定为估计植被生产力和碳循环变化提供了基础,以遥感数据驱动的植被生产力估计模型得到迅速发展(潘耀忠等,2000;杨立民、朱智良,1999)。

目前,遥感技术在土地利用/覆盖变化(land use-cover change, LUCC)监测方面的应用本质上是利用高精度影像(即约 20 m 至 100 m)去发展各种信息提取技术,并把它们应用到有限的区域上。但当把这些技术和方法应用到较大区域时,会因数据费用昂

贵、分析方法不当以及相关技术不匹配等原因,而面临诸多问题。20世纪80年代后期,随着混合像元分解技术的发展,以NOAA/AVHRR影像为主要代表的低空间分辨率对地观测数据越来越受到人们的关注。最初获得的全球NOAA/AVHRR产品空间分辨率是8 km,后来在国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)及其他计划的推动下,得到了全球各地区空间分辨率约为1 km的影像。ETM+(enhanced thematic mapper plus)、HRG(high resolution geometric imaging instrument)、MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)、MERIS(medium resolution imaging spectrometer)和全球成像仪(global imager, GLI)等新型卫星传感器的开发,以及系统的全球追踪战略为土地覆盖研究开辟了一个新时代。特别是在全球和区域尺度上,美国EOS卫星上的MODIS传感器所获得的数据具有250 m、500 m、1 000 m的空间分辨率以及36个分布在 $0.4\sim 14.4\ \mu\text{m}$ 的光谱波段,并在全球免费接收,已成为全球土地覆盖研究中的重要数据源。随着遥感数据分辨率的提高,遥感数据产品已成为人们研究土地利用和土地覆盖变化的重要数据来源。一般在“省、区、市”以下空间尺度上,选用空间分辨率高于30 m的TM、ETM+、SPOT/HRV,甚至IKONOS、QuickBird等高分辨率遥感资料。而对于国家以上空间尺度,一般选用空间分辨率低于250 m的NOAA/AVHRR或EOS/MODIS等中低分辨率卫星资料(俞宏、石汉青,2002;张霞等,2000;郭晓寅、程国栋,2004)。

遥感技术在土地利用和土地覆盖研究中的应用主要围绕类型识别和变化监测两方面展开。如何提高遥感分类方法的精度一直是遥感技术方法研究的重要问题。早期的分类研究一般只采用单时相或多时相遥感影像,而目前常采用多时相遥感数据和辅助数据相结合的方法进行遥感影像分类。常用的辅助数据包括热量指标、水热指数、高程、坡度、坡向、最大可蒸散量、湿润度、植被指数等。此外,对传统的土地利用和土地覆盖分类系统的改进也是LUCC研究的一个重要进展。传统利用遥感数据进行的土地分类往往是针对某种特定应用的需要而预先制定好分类系统,因此很难对其进行转换以适应不同应用目的的需求。针对这一局限性,Loveland等(1991)提出了“灵活的土地覆盖数据库”的概念,并将这一新的土地覆盖分类策略在美国及全球1 km土地覆盖数据库的研制中进行了成功应用。遥感动态监测是利用遥感的多传感器和多时相特点,通过对同一地区不同时相遥感数据的分析,进行变化信息提取。土地利用和土地覆盖变化监测主要旨在回答“是否发生变化”以及“变化是从哪种类型到哪种类型”这两个问题。监测方法可分为不同时相单独比较分析法和多时相数据同时分析法两大类。具体方法有:单变量图像差值法、图像回归法、图像比值法、植被指数法、主成分分析法、分类后比较法、变化向量分析法、背景提取法、RGB假彩色合成法等。上述方法中的不同时相单独比较分析法又可分为多时相反射光谱比较监测法和监督分类监测法。前者包括差值法、比值法、植被指数法、主成分分析法、变化向量法等。其中,除了变化向量法以外,都以获得变化的数量和地点为监测目标,并不获得变化的类型,因此多用于单一类型变化的监测,如森林砍伐、林火、洪水监测等。后者如分类后比较法,既能获得变化的数量和地点,又能获得每一个像元的土地利用转变类型。但是,该方法受到分类误差的影响,可能夸大了变化的程度。直接多时相分类法属于多时相数据同时分析法,也可以获得变化类型信

息,但在实际应用时难以在处理过程中确定训练区。在监测土地覆盖变化时,常采用“先分类、后比较”和“先比较、后分类”两种方法。

土地利用和土地覆盖变化机制的研究,对于解释土地利用和土地覆盖的时空变化,并建立其预测模型起到关键作用,是 LUCC 研究的焦点。另一方面,LUCC 与人类驱动力之间的关系,需要在人类驱动力—土地利用和土地覆盖—全球变化—环境反馈的系统动力学框架下开展全球变化中土地利用和土地覆盖变化机制的研究,进而预测土地利用和土地覆盖变化,并对生态环境变化进行评估。

随着计算机技术的发展,新的分类方法将逐步运用到大面积的土地覆盖和土地利用研究中,“3S”等技术的进步必然带来土地覆盖分类精度的进一步提高。特别是随着定量遥感研究的发展,土地利用和土地覆盖分类将逐步由定性向定量过渡。当前,遥感技术正在向“多尺度、多频率、全天候、高精度、高效快速”的方向发展。可以预言,全球和区域土地覆盖与土地利用的遥感应应用研究将更加科学化、客观化、定量化、实用化,尤其是定量遥感成为当前遥感科学发展的主流方向,并成为未来全球变化研究的一个重要基石。随着全球卫星覆盖数据有效性的增强、混淆地区的有效辅助数据质量的提高,以及从多源数据中提取信息技术的改进,必然可以更好地解决全球范围内土地覆盖分类及精度等问题。

遥感观测技术提供了在大尺度覆盖范围进行定量化监测的机会和手段,可调查植被在人类活动和气候变化下的响应。最近 20 多年来,从遥感数据中提取陆地表面生物物理信息,开展模型构建方面的研究获得了很大进展。在陆地生态系统的遥感测量方法及遥感数据驱动的生态系统模型中,LAI(leaf area index)、FPAR(fraction of photosynthetically active radiation)、NPP(net primary production)等被广泛采用。在区域和全球尺度的碳通量模型中,从遥感数据得到的这些参量经常被用来初始化、驱动或验证这些模型。LAI 对陆地生态系统与大气层之间的能量、水汽和 CO_2 的交换过程具有重要影响;NPP 是生态系统新陈代谢过程的关键指示变量,同时也是净生态系统交换量和净生产量的重要组成部分。在遥感技术应用中,植被指数被许多科学家、政府机构、教学和研究部门以及私人公司有效地用于土地覆盖分类制图、变化监测以及提取植被的生物物理性质参量(如植被覆盖度、生物量、LAI、FPAR 和生物气候特征),以及计算净生产量。此外,该植被指数还与植被的生物地球化学循环过程以及 CO_2 源与汇的研究具有密切关系。卫星遥感系统,如 NOAA/AVHRR、SPOT 4/VEGETATION、EOS MODIS 以及 GLI 等可以获取全球尺度不同太阳高度角下地球表面的双向辐射数据,经过大气辐射纠正和辐射定标到地表反射率等处理过程,获得了具有明显地表方向反射差异性的遥感观测数据。这种方向性随土地覆盖类型、像元内部的植被特征、土壤背景的组成以及太阳-地球-传感器的空间几何关系等因素的不同而有所变化,因此对双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)的了解是充分利用角度反射信息和植被指数提取不同土地覆盖状态下生物物理参量的前提。

遥感的本质是反演,遥感反演对于定量遥感应应用具有重要意义。遥感反演理论的研究也引起了很多科学家的兴趣,在遥感实验设计和遥感数据的定量化分析方面提出了新颖独特的方法。李小文等(1999)提出的核驱动模型成功应用于 MODIS 的反照率和

BRDF 产品。最近他们又改进了模型中的核,用新的 Li-Transit 核取代 Li-SparseR 和 Li-Dense 核,认为新的核更能反映出反照率随太阳天顶角变化的趋势,而且反演结果表明新核更为稳定。热红外波段的“劈窗技术”是利用光谱维信息的有效方法,F. Becker 和 Li Zhaoliang 把劈窗技术从海面温度(sea surface temperature, SST)遥感引入到陆面温度(land surface temperature, LST)遥感。Wan Zhengming 和 Li Zhaoliang 还提出了一个针对 MODIS 数据提取陆面温度的新算法,被称为具有物理基础的算法,可以得到陆面温度和比辐射率(李小文等, 2001; Li et al., 1999)。

近年来,人工神经网络是计算机人工智能领域的热点,并广泛应用到各学科和领域,其中包括遥感反演。如 Louis E. Keiner 和 Xiao-Hai Yan 用人工神经网络从 TM 数据估算海洋表面的叶绿素和沉积物,取得了均方根误差小于 10%的结果,而原先的回归分析法得到的结果误差大于 25%。金亚秋和宫鹏等使用人工神经网络反演植被生物量和冠层发射率,反演结果和实测数据具有良好的一致性。庄家礼、徐希孺、陈良富使用人工神经网络从多波段、多角度辐射温度中提取组分温度,反演的组分温度均方根误差小于 1 K,引入遗传算法来优化神经网络的权重配置后,提取的组分温度均方根误差可以小于 0.5 K。

遥感应应用同模式耦合也取得了大量成果。遥感的宏观、快捷特性同模式的时空模拟连续性相结合,为地球科学的时空过程研究提供了强有力的平台。MODIS 数据产品的网上发布及免费使用,极大地促进了遥感和模式耦合技术的发展。大气模式、陆面模式及生态过程模式正在努力尝试融入遥感参数,土地覆盖、反射率、反照率、叶面积指数、土壤水分、光合有效辐射、气溶胶、大气透过率等参数已经成为模式模拟研究的常用参数,被广泛应用在数值模拟研究中。模式同遥感的耦合已成为地球科学过程研究的大势所趋,并被广大地学科研工作者所认同。

1.1.2 基于遥感的地表水热通量估算研究

1. 研究进展

从物理学和气象学角度,植被-土壤的水热通量研究最早起源于蒸散计算的漫长历史。早在 1802 年 Dalton 就把蒸发量与水汽压差和风速等联系起来。著名的 Penman 蒸发公式则在 1948 年就已正式发表,到目前已建立了一系列基于植物生理学、微气象学的土壤-植被-大气传输模型(SVAT)。蒸散计算的气象学方法有很多种,包括波文比-能量平衡法、空气动力学方法、Penman-Monteith 公式、布德科法等,这些方法各有优劣和适用条件。20 多年来,在野外实验和植物微气象学研究基础上,逐渐发展了一些陆面过程模型,计算地表的辐射通量、动量通量、水汽通量和显热通量等。这类模型综合考虑了土壤-植被-大气系统的相互作用,具有明确的物理基础(郭晓寅, 2005)。但是,复杂自然过程模拟的机理完整性与求解简洁性和可行性通常是矛盾的,上述基于机理的水热模型考虑的过程复杂、要求参数多,实际运行存在很大困难。

上述蒸散发估算方法大多基于单个站点资料,在点上有很高的精度。但由于下垫面几何结构及生物物理性质的空间差异性,点上的水热计算很难外推到面。目前而言,遥

感观测是唯一有可能提供区域水热通量估算的手段。多时相、多光谱及多角度的遥感资料能比较综合地反映出下垫面的几何结构和湿热状况,特别是表面热红外温度与其他资料结合起来,能够较客观地反映出近地层湍流热通量大小和下垫面干湿差异,使得遥感方法在区域蒸散计算方面具有明显的优越性(郭晓寅,2005)。因此,运用遥感数据推算区域地表通量的方法受到广泛重视。不少研究者对地表温度更为关注,这是因为地表辐射温度蕴涵了地表(界面)热量平衡、水分平衡的综合信息(张仁华等,2004)。与地表辐射温度相关联的对地遥感信号也包含了地表水热平衡与过程的信息,这是遥感间接观测地表通量的重要理论依据之一。

遥感和 GIS 等空间信息技术(特别是热红外遥感)的发展,对区域尺度水热通量的估算研究起了很大的推动作用。地表温度是计算地表水热通量最重要的参数之一。劈窗算法(split window)通过计算大气水汽对地表热辐射的波段差异而实现地表辐射温度的遥感估算,该方法目前仍是反演地表温度最实用的途径(张仁华等,2000)。Bastiaanssen 等利用 Landsat 数据反演埃及西部沙漠地区地表反射率和地表温度,从而计算了该地区地下水损耗量,并且 Bastiaanssen 等还发展了陆面能量平衡法(surface energy balance algorithm for land, SEBAL)计算潜热通量,估算了地中海地区的实际蒸发、蒸发比值和表面层阻抗。这属于一层模型或单源模型,适合于湿润植被覆盖茂密地区,但在半湿润植被不茂密或半干旱植被稀疏地区,则应该将土壤和植被分开考虑(Bastiaanssen et al., 1998a, b)。

Deardorff(1978)、Dickinson(1984)、Shuttleworth(1988)等提出“阻力网”概念,开始考虑将水热通量性质存在很大差异的土壤和植被分开计算。Choudhury 和 Monteith(1988)将之扩展为以系统阻力网为基础的二层模型,但方程的参数和过程还局限在农业气象的田间尺度。Norman 和 Becker(1995)发展了著名的平行二层模型(N95),提出了利用多角度热红外遥感分解混合像元辐射温度的关键步骤,并仍采用 Beer 定律进行净辐射的分解,其实质是对二层模型的“阻力网”概念作了一定简化,但是 N95 模型的重要意义在于将遥感和地面观测结合起来。之后,Kustas 和 Norman(2000)又对平行二层模型运用 Beer 定律进行净辐射分解的不确定性进行了分析,但对多角度遥感分解混合像元辐射温度的方法及其不确定性没有详细论述。二层模型要求分解像元的植被、土壤组分温度,多角度遥感数据是目前的主要途径。但是,上述二层模型所需的多角度遥感数据几乎都是基于大型陆面试验,而没有基于卫星传感器多角度观测的解决方案,这是限制二层模型实用化的一个屏障。

在国内,不少学者在区域尺度的地表水热通量遥感估算以及地面试验和验证方面作了大量工作,并取得了显著成果。张仁华等(2004)曾用早上、中午两个时相的热图像获取热惯量信息来分解混合像元温度,同覆盖率、温度联合求得 T_v 、 T_s 。但他也指出这种方法要求用实验方法确定局地热惯量和风速影响因子的系数,区域可操作性不强。后来,张仁华等提出像元组分排序对比法算法,避开边界层的微气象条件来计算地表通量,但是需要确定四个理想的极端水热组合点,同时需要植被覆盖率同地表温度和反照率的经验关系。基于黑河试验,胡隐樵等(1994)、马耀明等(1999)利用遥感数据对区域尺度干旱区水热通量作了大量的研究和讨论,并对沙漠-绿洲陆面系统的通量特征和相

互作用取得了一些新的认识。对于地表热信息的多波段提取,陈良富等(2000a, b)认为,由于波段信息的相关性大,因而并不乐观,他们比较推崇利用多角度遥感手段来推算地表信息。尽管多角度遥感是提取地表热量信息很有潜力的方向(马耀明等, 2004a),但是遥感角度造成像元几何和有效辐射率差异问题却比较明显(张仁华等, 2004)。1997~2001年在内蒙古锡林郭勒草原进行了“内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)试验”,在中尺度典型草原试验区开展了多点、多要素的综合观测,包括土壤、植被、大气相关要素和发生于地气界面的潜热、感热通量等观测。该试验结合草原的长期监测资料,分析了气候生态长期相互作用,特别是人类活动干预的影响(吕达仁等, 2002)。因此,对于更高精度地表组分热信息的遥感提取方法仍有待进一步研究发展。

2. 地表水热通量的遥感方法

应用遥感的地表水热通量估算方法,其理论基础多是基于地表辐射平衡、地表能量平衡和大气边界层扩散理论。首先,根据地表辐射平衡计算得到地表净辐射能量;其次,根据边界层的扩散理论由空气动力学阻抗求出显热通量,通过土壤温度梯度或经验系数计算土壤热通量;然后,再由地表能量平衡方程求得潜热通量。大多数估算模型的思路基本如此,但不同方案中关键变量的计算方法则差异很大:对地表温度的计算有热惯量法、多角度法、劈窗法等。对空气动力学阻抗的简化和计算也差异很大,如二层模型中对土壤和植被阻抗的耦合方式有并联和串联的不同。下面简要介绍基于空气动力学扩散的水热通量遥感一般步骤。

1) 地表水热通量计算的一般步骤

根据地面能量平衡方程:①利用遥感信息提取净辐射 R_n 信息;②根据土壤热扩散梯度或经验系数获取土壤热流量 G ,一般取经验公式;③结合地表温度、大气边界层扩散条件计算显热通量 H ;④根据地表能量平衡方程计算潜热通量 LE 。

(1) 净辐射 R_n 是地表能量的主要来源,目前通过遥感手段计算地表净辐射基本能达到应用的精度要求。净辐射通过式(1.1)计算获得:

$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} = (1 - r_0)\tau K\downarrow + L\downarrow - \epsilon_0\sigma T_s^4 \quad (1.1)$$

式中,下标 s 和 l 分别表示短波辐射($0.3\sim 3\mu\text{m}$)和长波辐射($3\sim 100\mu\text{m}$);符号 $\downarrow$ 、 $\uparrow$ 则分别表示向下和向上的辐射。 τ 为大气透过率; $K\downarrow$ 为下行的短波辐射; $L\downarrow$ 为下行的长波辐射; ϵ_0 为大气的比辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_s 为近地表温度。因此, $R_{s\downarrow}$ 表示来自太阳和大气的下行短波辐射; $R_{s\uparrow}$ 表示地表反射的短波辐射; $R_{l\downarrow}$ 是大气向地表发射的长波辐射; $R_{l\uparrow}$ 表示地表发射到大气的长波辐射,以上单位均是 W/m^2 。 $r_0 = R_{s\uparrow}/R_{s\downarrow}$,即地表反照率(无量纲),因而 $(R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow}) = (1 - r_0)R_{s\downarrow}$,地表反照率 r_0 可由遥感影像反演获得。根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,通过地表温度、地表发射率和大气平均温度、发射率即可计算 $R_{l\downarrow}$ 、 $R_{l\uparrow}$ 。

(2) 土壤热通量是地表同下层土壤之间的热交换,受土壤温度梯度、土壤质地、土

壤湿度等因素影响。其理论定义是:

$$G_0(x, y) = \rho_s C_s [T_{\text{sfc}}(x, y) - T_{\text{soil}}(x, y)] r_{\text{sh}}(x, y) \quad (1.2)$$

式中, ρ_s 、 C_s 、 T_{sfc} 分别是土壤密度、比热、地表温度; T_{soil} 和 r_{sh} 是土壤温度和土壤热输送阻抗。短波和热红外遥感目前不能直接获取这些参数, 穿透性强的微波是可能的解决途径, 常用简化的估计方法: $G = C_g R_n$; G 是土壤热惯量; R_n 是太阳净辐射。 C_g 为土壤热通量系数, 不同的下垫面状况 C_g 的取值不同。马耀明等(2004b)提出用 MSAVI 植被指数来计算区域的土壤热通量系数:

$$G_0(x, y) = [T_{\text{sfc}}(x, y) / r_0(x, y)] * (a * b * r_m + c * r_m^2) * [1 - d * \text{MSAVI}(x, y)] \quad (1.3)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 是经验系数, 马耀明等(2004a)根据野外观测得出了黑河地区经验系数。 r_m 无说明。

(3) 地表显热通量是依据空气动力学扩散理论计算的, 这是地表水热通量计算中最复杂的环节, 不同方法采用不同的具体实现方案。最早 Monteith(1972)通过地气的温度差来表示显热通量:

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_{\text{ah}} \quad (1.4)$$

式中, ρ 为空气密度(单位: kg/m^3); C_p 为空气定压比热[单位: $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]; $T_s - T_a$ 为地表温度与空气温度的差值(单位: K), 这里使用了地表温度代替地表空气动力学温度, 因为后者难以测定; r_{ah} 为空气动力学阻抗(单位: s/m), 其表达式为

$$r_{\text{ah}} = \{ \ln[(Z_h - d) / Z_{0h}] - \Psi_h \} k \mu_* \quad (1.5)$$

式中, Z_h 为测量空气温度和湿度的参考高度(m); d 为地表零平面位移(m); Z_{0h} 为地表热量粗糙高度(m); Ψ_h 则是显热交换稳定度系数(无量纲); k 为卡曼常数(无量纲, 一般取 0.40); μ_* 为摩擦速度(m/s)。风速 μ_z 与摩擦速度 μ_* 的关系式为

$$\mu_z / \mu_* = \{ \ln[(Z_m - d) / Z_{0m}] - \Psi_m \} k \quad (1.6)$$

式中, Z_m 为风速测量高度(m); Z_{0m} 为动量输送的表面粗糙高度(m); μ_z 为 Z_m 高度上所测量的风速(m/s); Ψ_m 为动量输送的稳定系数(无量纲); 将式(1.6)转换为 $1/\mu_*$ 的表达式, 然后代入式(1.5)中得到在非稳定和稳定层结下, 空气动力学阻抗的表达式:

$$r_{\text{ah}} = \{ \ln[(Z_h - d) / Z_{0h}] - \Psi_h \} * \{ \ln[(Z_m - d) / Z_{0m}] - \Psi_m \} / k^2 \mu_z \quad (1.7)$$

在中性层结下 $\Psi_h = \Psi_m = 0$, 空气动力学阻抗的表达式为

$$r_{\text{ah}} = \ln[(Z_h - d) / Z_{0h}] * [(Z_m - d) / Z_{0m}] / k^2 \mu_z \quad (1.8)$$

稳定系数 Ψ_h 和 Ψ_m 的表达式如下。

当 $Z_h/L < 0$ 时

$$\Psi_m = 2 * \ln[(1+x)^2] + \ln[(1+x)^2/2] - 2 * \arctan x + \pi^2 \quad (1.9)$$