

地表辐射收支 遥感方法与技术

REMOTE SENSING OF LAND SURFACE
RADIATION BUDGET

辛晓洲 张海龙 余珊珊 李 丽 柳钦火 等 著



科学出版社

地表辐射收支遥感方法与技术

Remote Sensing of Land Surface Radiation Budget

辛晓洲 张海龙 余珊珊 李 丽 柳钦火 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在遥感定量估算地表入射和出射长短波辐射最新研究成果的基础上,全面、系统地介绍地表辐射收支遥感估算的基本理论方法和技术,是对目前地球辐射收支卫星观测理论方法和全球产品的系统概括和总结。本书首先概述地表辐射收支的基本概念和遥感反演现状;然后分章节介绍大气辐射传输的基本理论和几种常用的大气辐射传输模型、地表入射长短波辐射的遥感估算方法,以及全球辐射遥感产品和全球地面观测网络;最后介绍地表出射(反射)长短波辐射的遥感反演方法和不确定性。

本书可作为高等院校遥感和地理信息系统专业本科生、研究生的教材用书,也可作为从事遥感科学和技术研究的科学工作者、遥感项目的计划和管理工作者,以及遥感应用部门和从事环境监测及气候变化等工作人员的工具参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地表辐射收支遥感方法与技术/辛晓洲等著. —北京:科学出版社, 2019.1
ISBN 978-7-03-059555-3

I. ①地… II. ①辛… III. ①地表-表面辐射-遥感数据-研究
IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261723 号

责任编辑:王 运 白 丹/责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张:12 1/4 插页:8

字数:300 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

太阳辐射几乎是地球表面唯一的能量来源,地表辐射收支包括透过大气到达地表的太阳辐射、地表反射的太阳辐射、大气下行长波辐射和地表发射与反射的长波辐射 4 个分量,而地表净辐射能量再分配又包括显热通量(地-气间的热量交换)、潜热通量(蒸发、蒸腾等相变消耗的能量)、地表热通量(地表与地下的热量交换),以及植被系统储存和生长消耗能量等过程。地表辐射收支是地表能量平衡的基础,是地-气交换、水循环和碳循环的驱动力。能量平衡在地球系统中起着重要的驱动和主导作用,与水循环和生物化学循环紧密联系、互相影响,也是影响气候变化和地-气相互作用的关键过程,对自然生态和人类生产生活都有举足轻重的影响。

辐射收支与能量平衡是地球系统科学的重要组成部分,是联系地球系统地圈-生物圈-大气圈的纽带,与全球变化紧密相关。越来越多的证据表明,我们的地球系统,特别是气候系统,正在发生着巨大的变化,最显著的特征是全球变暖。全球变化研究的一系列热点问题,如“全球变暖间断”、“沙漠增温放大”和“北极增温放大”等,都是由能量的收支不平衡和再分配造成的。研究全球地表辐射收支过程及其时空分布特征,对于理解地-气相互作用过程、区分自然演化与人类活动对能量平衡过程的影响及反馈机制具有重要的意义。

地表辐射收支对人类活动造成的变化非常敏感,如工业化过程造成大气温室气体和气溶胶增加,从而改变到达地表的太阳辐射和大气顶出射的长波辐射;人类活动,如城镇化、森林破坏、填海造地等改变地表覆盖类型和状况,从而彻底改变地表反照率、地表发射率和地表温度等辐射收支关键参量,这种全球或区域的能量不平衡造成气候系统变暖或变冷,并通过云、降水、蒸发等过程予以反馈。为了研究地球表面这些复杂而深刻的变化,需要全球尺度的模型模拟与卫星观测相结合,回答“地球表面辐射收支与能量平衡系统如何变化”“成因是什么”“未来变化趋势是怎样的”等问题。

利用卫星遥感开展地表辐射收支的高精度系统观测,对地球系统科学和全球变化研究具有重大的科学意义。当前,基于卫星遥感数据制作生产的辐射驱动数据还存在较大的不确定性(如时空分辨率较低、精度低、时空不连续等),无法满足地球系统模拟的需求,制约着地球科学的发展。另外,随着探测手段的不断完善和人类认知能力的不断提高,空间科学领域的探测与研究在向更深、更广、更精细化的方向不断拓展。在不远的将来,有望看到专业的、高精度的卫星观测系统将地表能量平衡的研究带入新的时代。

为了更好地推动地表辐射收支和能量平衡遥感的研究和应用,我们重点总结国家高技术研究发展计划(863 计划)重大项目课题“多尺度遥感数据按需快速处理与定量遥感产品生成关键技术”(2012AA12A304)、重点项目课题“全球陆表特征参量的遥感提取方法研究”(2009AA122102)和中国科学院重点部署项目“混合像元能量平衡遥感模型及参数化方法研究”(KZZD-EW-TZ-18),以及多个国家自然科学基金项目(41371360、

41301392、41201352、41501366)等的研究成果,汇集成本书。

本书由辛晓洲提出撰写大纲,并完成全书的修改定稿,各章主要编写人员如下:前言,辛晓洲;第1章,辛晓洲、张海龙、柳钦火;第2章,仲波、辛晓洲、张海龙、龚围;第3章,张海龙、辛晓洲、李丽;第4章,余珊珊,辛晓洲;第5章,杜永明、刘强、窦宝成、吴骅、历华、李福根。

本书从立项到完成经历了数年,这期间国内外相关研究发展迅速,尤其是国内项目投入的加大和重视程度的提高,涌现了一批具有影响力的成果和团队,大力推进了领域的进展。本书是作者所在研究团队集体完成的成果总结和提炼,在此对参加研究的所有科研人员的辛勤劳动表示深深的谢意。

本书内容涉及一些前沿问题,正在探索中,反映了我们最近的研究进展和想法。由于水平有限,不足和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2018年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 地表辐射收支遥感基本概念	2
1.3 地表辐射收支遥感反演研究现状	3
1.4 小结	5
参考文献	6
第 2 章 大气辐射传输过程与模拟	10
2.1 大气辐射传输方程	10
2.2 大气组成及其光学特征	12
2.2.1 大气组成及其时空分布	12
2.2.2 大气对电磁波的吸收	14
2.2.3 大气对电磁波的散射	15
2.3 大气气溶胶遥感	19
2.3.1 多角度方法	19
2.3.2 基于多波段的方法	20
2.3.3 多极化的方法	20
2.3.4 近紫外方法	20
2.4 大气辐射传输方程求解	22
2.4.1 6S 辐射传输模型	23
2.4.2 MODTRAN 辐射传输模型	26
2.4.3 SBDART 辐射传输模型	31
2.4.4 SBDART 与 MODTRAN 模型对比	33
参考文献	43
第 3 章 地表入射短波辐射	46
3.1 晴空地表入射短波辐射反演方法	46
3.1.1 经验统计方法	46
3.1.2 辐射传输方法	47
3.1.3 参数化方法	49
3.1.4 查找表方法	50
3.2 云天地表入射短波辐射反演方法	51
3.2.1 经验统计模型	51
3.2.2 辐射传输方法	52

3.2.3	参数化方法	53
3.2.4	Monte Carlo 方法	56
3.2.5	查找表方法	57
3.3	太阳辐射地形订正方法	58
3.3.1	直接辐射	58
3.3.2	散射辐射	58
3.3.3	附加辐射	61
3.4	全球下行短波辐射卫星产品	62
3.4.1	ISCCP	63
3.4.2	GEWEX	66
3.4.3	NCEP/NCAR	69
3.4.4	云和地球能量平衡系统	71
3.4.5	EUMETSAT 辐射产品	80
3.5	光合有效辐射产品	90
3.5.1	ISCCP	90
3.5.2	TOMS-PAR	91
3.5.3	MODIS PAR	92
3.5.4	SeaWIFS PAR	94
3.6	地面辐射观测网络	96
3.6.1	GEBA	97
3.6.2	BSRN	97
3.6.3	SURFRAD	97
3.6.4	FLUXNET	98
3.6.5	CAVE	99
3.6.6	ARM	99
3.6.7	其他洲际观测网络	100
3.7	小结	100
	参考文献	101
第4章	地表入射长波辐射	105
4.1	晴天下行长波辐射反演算法	105
4.1.1	参数化方法	105
4.1.2	辐射传输方法	107
4.1.3	传感器算法	108
4.2	云天下行长波辐射反演算法	110
4.2.1	云量校正方法	110
4.2.2	参数化方法	111
4.2.3	辐射传输方法	113
4.3	全球下行长波辐射产品及验证	114

4.3.1	ISCCP-FD 产品	115
4.3.2	GEWEX-SRB 产品	116
4.3.3	CERES 辐射通量产品	117
4.3.4	欧洲卫星中心辐射产品	123
4.3.5	GSIP 产品	127
4.3.6	MusyQ 产品	127
4.3.7	产品质量评价	131
4.4	小结	133
	参考文献	133
第 5 章	地表出射辐射	139
5.1	地表反照率反演	139
5.1.1	窄波段反照率反演	139
5.1.2	宽波段反照率反演	147
5.2	地表出射长波辐射	152
5.2.1	窄波段发射率	153
5.2.2	宽波段比辐射率反演算法	163
5.2.3	地表温度反演	169
5.2.4	地表上行长波辐射	175
5.2.5	地表长波辐射估算的不确定分析	180
	参考文献	182

彩图

第1章 绪 论

1.1 引 言

地表辐射收支过程与能量循环是地表过程的重要组成部分，是地球系统演化发展的重要驱动力之一，也是影响气候变化和地-气相互作用的关键过程。能量平衡在地球系统中起着重要的驱动和主导作用，与水循环和生物化学循环紧密联系、互相影响，也是影响气候变化和地气相互作用的关键过程，对自然生态和人类生产生活都有举足轻重的影响，同时受人类活动的影响也非常敏感，如工业化污染造成大气气溶胶增加，减少太阳辐射到达地表的能量；人类活动(如城镇化、森林破坏、填海造地等)改变地表覆盖类型和状况，从而彻底改变地表反照率、地表发射率和地表温度等能量平衡关键参量。

“全球变暗”(global dimming)和“全球变亮”(global brightening)是地球系统辐射收支研究的一个热点，引起全球变暗的主要因素是云量变化、火山爆发导致的平流层气溶胶增加，以及城市规模和工业发展导致的人工气溶胶的变化，而云和气溶胶对太阳辐射的吸收和散射并不相同，对气候变化的响应机制也存在较大差异。能量平衡作为驱动数据，也存在严重的不确定性，制约着地球科学的发展，如 IPCC 第四次报告中指出，地表年平均吸收的太阳辐射值大概为 168 W/m^2 ，而根据大气环流模式的模拟结果，年平均值从 148 W/m^2 到 180 W/m^2 ，变化量高达 30 W/m^2 。目前的地表辐射收支产品精度低、时空不连续，无法满足地球系统模拟的需求。某些关键参数还无法获取或精确计算，严重影响地表能量平衡计算精度，如云的特性(包括云量、云的类型、光学厚度、云温度、几何形态、三维结构、粒子分布和云水相态等)、气溶胶特性(包括光学厚度、类型、源、细粒子比、区分气溶胶和薄云等)，以及云覆盖下的地表参数(如地表温度、地表发射率等)。

遥感数据本质上就是传感器接收到的辐射信号，因此，用遥感数据反演地表辐射和能量平衡参数就是最为自然的一个过程，尤其是在可见光、近红外、中红外和热红外波段，集中了地气系统辐射能量的绝大部分，从而也是研究地表辐射和能量平衡的主要数据来源，各类极轨卫星和静止卫星的波段设置都以此为主要考虑因素之一，已有和现有的大多数卫星数据都可以用于地表辐射和能量平衡参数的反演。使用比较广泛的数据有 NOAA/AVHRR、MODIS、TM/ETM、ASTER、AATSR 等。针对这些数据的地表辐射和能量平衡参数的算法，或者产品在同行中有比较大的影响，如 MODIS 的反照率、温度产品，以及 TM 的温度产品和 ASTER 的温度、发射率产品等。在国产的资源、环境、气象等卫星数据方面，近年相关的研究也有很多，并逐步成为可以代替传统遥感数据的选择，如 HJ-1、FY-3 卫星的相关产品的研发正在如火如荼地开展，不久的将来将进入业务系统，为相关行业的应用服务。

辐射传输模型包括大气辐射传输模型、地表二向反射模型、地表热红外辐射模型、冠层反射率模型、冠层热辐射方向性模型等机理模型，是地表辐射收支遥感研究的主要

手段,也是遥感科学基础研究的重要方向之一。这些模型描述了短波与长波辐射在介质中的传播过程,包括散射、透射、发射等物理机理。地表反照率、地表温度、大气下行辐射等参数的反演研究已经获得了很好的进展,能够初步为人类提供全球辐射平衡的一些基本规律,如大气和海洋向极地输送能量的规律。海洋以热通量的形式向极地方向输送能量已经被空间观测证实,其量级和大气的输送通量相当,但其最大值相对处于低纬度地区,大约 20° ,而大气通量在 50° 左右达到顶峰(Vonder Haar and Oort, 1973; Trenberth et al., 2001)。随着区域或全球地表辐射收支遥感研究的不断进步,新的传感器和观测手段的发展,传统遥感手段无法获取的诸多参数,可以通过激光雷达、垂直分层观测等新的手段获取云的三维结构、粒子分布等参数,从而提高云内辐射传输过程的模拟和反演精度;为了反演温室气体这样的痕量气体,发展了热红外高光谱传感器及其反演算法。

在地球系统的模拟与观测、全球变化研究、气候系统的模拟与分析等方面,地表辐射收支与能量平衡都扮演着最基本的变化过程、输入参数或者状态变量的角色。长期的地球能量平衡监测有助于更好地理解气候系统对厄尔尼诺、火山爆发等自然事件的响应,同时也可以揭示人类引起的全球变暖的开端的各个方面。地球辐射收支的观测用于研究气候反馈机制,以及观测地球反照率和热辐射的年际变化的趋势(Wong et al., 2006)。全球气候变化研究,确定温室气体效应的强度,研究温室气体与气溶胶变化及其对气候变化的影响,为应对全球气候变化,保障农业、生态、环境安全提供科学依据。

1.2 地表辐射收支遥感基本概念

地表辐射收支(earth radiation budget)与能量平衡(land surface radiation balance)是两个相互独立又互相联系的过程。地表辐射收支,或称地表净辐射,是指地球与太空之间的能量交换及其在全球分布的变化,包括透过大气到达地表的太阳辐射、地表反射的太阳辐射、到达地表的大气下行长波辐射(大气温湿度廓线决定),以及地表发射与反射的长波辐射(地表温度和发射率决定)4个分量。地表净辐射驱动着蒸发、光合作用,以及土壤和大气的加热过程(Bisht and Bras, 2010),被用于各种应用中,如气候预测、气候监测及农业气象(Bisht et al., 2005)。许多蒸散发模型都把地表净辐射作为核心输入参数(Monteith, 1965; Priestley and Taylor, 1972; Shuttleworth and Wallace, 1985; Boegh et al., 2002; Su, 2002; Nishida et al., 2003)。

地表能量平衡则是一个消耗能量的过程,即地表获得的净辐射以几种不同的形式被消耗掉,主要有显热通量(地气间的热量交换)、潜热通量(蒸发和蒸腾消耗的能量)、土壤热通量(表层土壤与深层土壤的热量交换),另外,还有地表植被光合作用消耗的能量、冠层植被和空气储存的能量等,在定义上为失去能量为正,获得能量为负。对于陆面过程、水文和生态等过程的模拟和研究,地表的辐射与能量平衡具有重要的科学意义。温室气体对大气的影 响在能量平衡中很重要,其过程主要由水汽、云和二氧化碳驱动,非云气溶胶对气候系统也很重要。地表温度和大气温度也参与能量平衡过程,地球吸收的太阳辐射由地球出射的热能量得到平衡。

整个辐射与能量平衡过程是一个连续的循环过程,是动态变化的过程,但是在分析

的时候必须假设局地能量平衡在每一个时刻都得到满足，只有这样，地表能量平衡方程才能够成立。随着遥感科学与技术的不断发展，上述所有的辐射与能量平衡的分量与相关参数都可以利用遥感数据直接反演或间接估算获得。测量地球的辐射收支是地球轨道卫星最早的科学应用方向之一，卫星遥感提供地表属性空前的时空覆盖，以及大气状态相关的信息数据，为估算区域尺度上，乃至全球尺度上的净辐射提供重要的条件，已成为估算净辐射的一个重要手段。图 1.1 是经过多年观测总结得到的全球地气系统辐射收支和能量分配的比例。

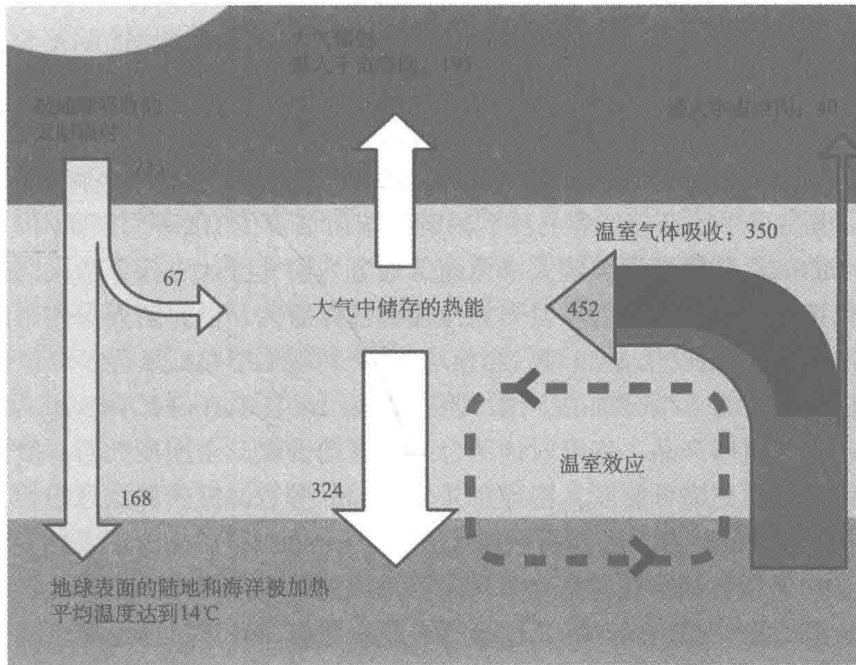


图 1.1 地球辐射收支与能量分配示意图(引自 NASA 报告，图中未标明单位的数字，单位为 W/m^2)
(见彩图)

1.3 地表辐射收支遥感反演研究现状

卫星可获得大面积、连续的观测资料，提供区域尺度上地表能量较详细的空间分布信息，使得卫星遥感成为地表净辐射通量及其分量估算的重要手段。国内外很多学者开展了地表净辐射的卫星遥感估算研究，各种遥感平台，包括地球同步环境卫星 (GOES)、先进甚高分辨率辐射仪 (AVHRR)、陆地卫星 (Landsat) 和中等分辨率航天成像光谱仪 (MODIS) 被用于估算表面辐射平衡 (Gautier et al., 1980; Pinker and Corio, 1984; Gratton et al., 1993; Li and Leighton, 1993; Jacobs et al., 2002; Lee and Ellingson, 2002; Nishida et al., 2003; Bisht et al., 2005; Tang and Li, 2008; Wang and Liang, 2009)。利用遥感方法获取地表净辐射的时间尺度可以分为如下两类。

1) 瞬时净辐射的遥感估算。利用遥感卫星过境时获得的遥感数据，或其经过处理后生成的遥感产品，结合数学方程，估算瞬时净辐射通量。许多研究利用 TM、MODIS 及

AVHRR 等传感器获得的遥感影像数据, 结合地面观测数据或探空数据, 使用地表辐射平衡方程分别计算出各个分项(瞬时向下、向上短波辐射, 以及瞬时向下、向上长波辐射)来估算地表净辐射(Bastiaanssen et al., 1998; Roerink et al., 2000; Jiang and Islam, 2001; Ma et al., 2002; Su, 2002; Nishida et al., 2003; Norman et al., 2003; Ma et al., 2007; Sobrino et al., 2007; Ma et al., 2011)。随着 MODIS 定量遥感产品的发布, 国际上也发展了利用 MODIS 遥感产品估算瞬时净辐射通量的方法(Bisht et al., 2005; Bisht and Bras, 2010; Ryu et al., 2008)。而遥感产品的精度取决于遥感数据、非遥感数据和定量遥感模型(张仁华等, 2010)。

2) 日净辐射的遥感估算。Bisht 等(2005)首次提出仅用遥感数据(Terra-MODIS)估算晴空条件下的净辐射, 包括瞬时净辐射和日平均净辐射的遥感估算。这个方法的优势之一是, 使用一个正弦模型, 直接从卫星过境时估算的瞬时净辐射值提取日平均净辐射, 不要求对日平均净辐射的每一个分项参数化。该算法的思想是从瞬时净辐射通量直接提取日平均值, 但是日平均净辐射容易受到瞬时净辐射估算值的影响。Bisht 和 Bras(2010)首次仅使用 MODIS 数据, 以美国大平原南部地区为研究区, 进行了全天空条件下净辐射的研究, 包括晴空瞬时净辐射和日平均净辐射估算研究, 以及阴天条件下的瞬时净辐射和日平均净辐射估算研究。Hou 等(2014)同样仅利用遥感数据发展了一个估算晴空条件下日平均净辐射及其 4 个分项的方法。该方法使用来自 Terra-MODIS 和 Aqua-MODIS 获得的陆地和大气遥感产品, 克服对地面台站数据的依赖, 企图在大的异质性区域捕捉日平均净辐射通量的空间分布及其格局。其与 Bisht 等(2005)的算法思想相反, 即先对净辐射每个分项求平均值, 后获得日平均值。Hurtado 和 Sobrino(2001)提出一个从 NOAA-AVHRR 遥感数据中获得晴空条件下日净辐射通量的算法。该算法将地表能量平衡时间尺度从瞬时推广到一天 24 h, 结合地表观测数据, 计算日净辐射及其分项。国际上也发展了利用地面观测数据估算地表日净辐射的算法(Dong et al., 1992; Irmak et al., 2003; Kjaersgaard et al., 2007; Samani et al., 2007; Wang and Liang, 2009)。

按照估算地表净辐射及其分项所使用的数据进行分类, 估算方法可分为使用近地面数据和使用大气顶卫星观测数据两种。使用近地面数据: 几个经验参数化方案利用近地面气温、湿度和地表温度来估算净辐射及其分项(向下短波辐射、向下及向上长波辐射)(Zillman, 1972; Brutsaert, 1975; Idso, 1981; Prata, 1996; Dillely and O'Brien, 1998), 以及利用卫星数据发展的针对短波和长波辐射的参数化方案(Ellingson, 1995; Pinker et al., 1995; Niemelä et al., 2001a, 2001b; Diak et al., 2004; 马耀明等, 1997)。使用大气顶卫星观测数据: 利用卫星观测的大气顶辐射通量(长波辐射)或大气顶反射通量(短波辐射)估算地表净辐射及其分项, 该方法通过研究卫星获取的大气顶辐射与地表净辐射, 或者与各辐射分量之间的回归关系, 得到地表净辐射(Li and Leighton, 1993; Pinker and Ewing, 1985; Pinker and Tarpley, 1988; Wang et al., 2005; Tang et al., 2006; Tang and Li, 2008; Wang and Liang, 2009; 王可丽和钟强, 1995; 吴鹏飞等, 2003; 杜建飞等, 2004)。

除了上面地表净辐射通量的卫星遥感估算方法研究以外, 目前已经出现了多种利用卫星资料估算地表辐射收支的全球产品, 并且已经发布, 可供公众免费使用。全球能量与水循环实验——地表能量收支平衡项目(GEWEX-SRB)小组发布了 1983~2007 年的空

间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的全球辐射数据产品, 并提供了 3 h、日均、月均三种时间分辨率供用户选择(Pinker et al., 2003)。国际卫星云气候计划(ISCCP)利用其建立的云气候资料集和辐射传输模式建立了一套与 ISCCP-D 云资料集完全配套的 ISCCP-FD 辐射资料集(1983~2000 年), 时间分辨率为 3 h, 分布在 280 km 的等面积全球格网上(Zhang et al., 2004)。云和地球辐射能量系统(CERES)科学研究小组(Wielicki et al., 1998)提供了瞬时的全球辐射产品(2000~2007 年), 称为 CERES-FSW, 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。这些辐射收支产品已经被广泛应用。

现有的利用卫星资料估算地表净辐射及其各分量的研究依然存在以下几个方面的问题。

1) 过分依赖地面观测数据。目前很多利用遥感数据估算地表净辐射的方法都需要结合地面观测资料, 一些方法通过对地面观测数据进行插值来估算净辐射分量(向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射及向上长波辐射), 或获得向下长波辐射的参数值(如空气温度)(Hurtado and Sobrino, 2001; Ma et al., 2002; Ma et al., 2007), 这些方法对于估算大范围的地表净辐射通量具有很大的局限性: 一方面, 气象站点稀疏的地区会缺少常规的地面观测资料; 另一方面, 地面站点观测数据与遥感数据存在着时空的尺度匹配问题, 若将地面观测值插值到较大的范围, 则得到的值太平滑。一些参数化方案在基于地面观测数据的基础上, 假定某一辐射分量或计算分量中的参数为常量。Jacobs 等(2002)和 Nishida 等(2003)假定陆表反照率和表面发射率是常数, 而 Jiang 和 Islam(2001)假定整个研究范围的向下长波辐射项为常数。

2) 现有低分辨率的全球辐射产品易造成区域尺度上地表净辐射通量图较平滑, 难以刻画地表的空空间异质性。由于地表辐射收支数据会随着空间变化有明显的不同, 地表的空空间异质性和复杂性一直都是地表建模和生物物理变量的卫星遥感研究中最具有挑战性的问题之一(Kustas and Norman, 2000; Ryu et al., 2008), GEWEX-SRB、CERES-FSW 及 ISCCP-FD 地表辐射数据集都利用低分辨率的卫星数据反演获得, 这些产品都侧重于关注从地表到大气顶不同大气廓线的辐射通量, 因此, 地表辐射通量的精度可能达不到实际应用的要求(Liang et al., 2010)。这些全球辐射产品空间分辨率大于 1° , 主要用于大气模拟, 不能解释许多局部特征, 如城市化。

1.4 小 结

地表辐射收支与能量平衡在地球系统的模拟与观测、全球变化研究、气候系统的模拟与分析等方面, 都扮演着最基本的变化过程、输入参数或者状态变量的角色, 是遥感定量反演研究的重要方向。目前在全球辐射与能量平衡遥感中还存在较多的不确定性, 涉及地表、大气及海洋等多个层次, 其中, 以下问题是制约发展的主要屏障。

1) 定量遥感反演精度不够, 包括遥感数据的定标精度和产品的反演精度。以下行短波辐射和长波辐射为例, WMO 和 FAO 规定的可允许误差为 $10 \sim 20 \text{ W/m}^2$, 但目前的产品精度只能达到 $30 \sim 50 \text{ W/m}^2$, 甚至更大。

2) 产品的分辨率不够, 包括时间和空间分辨率, 地表反照率产品周期为 $8 \sim 16 \text{ d}$, 无法满足地球系统模拟的高时间分辨率需求, 造成模拟误差。目前的辐射产品空间分辨率

为 $10^2 \sim 10^4$ km, 只能反映全球大尺度的分布和变化, 无法反映局地细节。

3) 某些参数还无法精确获取, 如云底温度、云的几何形态、三维结构、粒子分布和云相态等; 气溶胶特性包括光学厚度、类型、源, 区分气溶胶和云, 区分粗粒子气溶胶和细粒子气溶胶等。

上述问题在一定层面上是互相交叉、互相影响的, 同时会导致以下问题。

1) 有云条件下的下行辐射难以估算, 主要因为云的特征参数产品还比较少, 且精度难以保证。

2) 地表和海洋反射辐射估算不准确, 主要因为卫星观测数据的方向有限, 地表方向性模型不准确, 海洋海浪的变化等。

3) 大气气溶胶和温室气体的遥感手段有限, 产品精度难以保证, 影响下行短波辐射和长波辐射的估算精度。

4) 地-气热量交换模型及其参数化方案存在缺陷, 无法满足复杂地表的显热、潜热和土壤热通量的估算需求。

5) 对极地的辐射与能量平衡过程知之甚少, 主要因为数据较少, 且关注较弱, 对诸如极地反照率和温度, 极地冰水相变的能量存储与释放等重要参数和过程的研究不够。

6) 卫星观测数据的限制及相关研究的薄弱使目前可用的、质量较好的全球辐射与能量平衡数据产品较少。

参 考 文 献

- 杜建飞, 陈渭民, 吴鹏飞, 等. 2004. 由 GMS 资料估算我国东部地区夏季地表净辐射. 南京气象学院学报, 27(5): 674-680.
- 马耀明, 王介民, Menenti M. 1997. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化. 大气科学, 21(6): 743-749.
- 王可丽, 钟强. 1995. 青藏高原地区大气顶净辐射与地表净辐射的关系. 气象学报, 53(1): 101-107.
- 吴鹏飞, 陈渭民, 王建凯, 等. 2003. 用卫星资料探讨有云情况下的地面辐射收支. 南京气象学院学报, 26(5): 613-621.
- 张仁华, 田静, 李召良, 等. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. 中国科学: 地球科学, 40(2): 211-222.
- Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology, 212: 198-212.
- Bisht G, Venturini V, Islam S, et al. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. Remote Sensing of Environment, 97(1): 52-67.
- Bisht G, Bras R L. 2010. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: southern Great Plains case study. Remote Sensing of Environment, 114(7): 1522-1534.
- Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. Remote Sensing of Environment, 79(2): 329-343.
- Brutsaert W. 1975. A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level. Water Resources Research, 11(4): 543-550.
- Diak G R, Mecikalski J R, Anderson M C, et al. 2004. Estimating land surface energy budgets from space—review and current efforts at the University of Wisconsin-Madison and USDA-ARS, Bull. Amer

- Meteorol Soc, 85: 65-78.
- Dilley A C, O'Brien D M. 1998. Estimating downward clear sky long - wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(549): 1391-1401.
- Dong A, Grattan S R, Carroll J J, et al. 1992. Estimation of daytime net radiation over well-watered grass. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(3): 466-479.
- Ellingson R G. 1995. Surface longwave fluxes from satellite observations: a critical review. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 89-97.
- Gautier C, Diak G, Masse S. 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 19(8): 1005-1012.
- Gratton D J, Howarth P J, Marceau D J. 1993. Using Landsat-5 Thematic Mapper and digital elevation data to determine the net radiation field of a mountain glacier. *Remote Sensing of Environment*, 43(3): 315-331.
- Hou J, Jia G, Zhao T, et al. 2014. Satellite-based estimation of daily average net radiation under clear-sky conditions. *Adv Atmos Sci*, 31: 705.
- Hurtado E, Sobrino J A. 2001. Daily net radiation estimated from air temperature and NOAA-AVHRR data: a case study for the Iberian Peninsula. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8): 1521-1533.
- Idso S B. 1981. A set of equations for full spectrum and 8-to 14- μm and 10.5-to 12.5- μm thermal radiation from cloudless skies. *Water Resources Research*, 17(2): 295-304.
- Irmak S, Irmak A, Jones J W, et al. 2003. Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4): 256-269.
- Jacobs J M, Myers D A, Anderson M C, et al. 2002. GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 266(1): 53-65.
- Jiang L, Islam S. 2001. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2): 329-340.
- Kja ersgaard J H, Cuenca R H, Plauborg F L, et al. 2007. Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(3): 417-431.
- Kustas W P, Norman J M. 2000. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surfaces. *Agronomy Journal*, 92(5): 847-854.
- Lee H T, Ellingson R G. 2002. Development of a nonlinear statistical method for estimating the downward longwave radiation at the surface from satellite observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(10): 1500-1515.
- Li Z, Leighton H G. 1993. Global climatologies of solar radiation budgets at the surface and in the atmosphere from 5 years of ERBE data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D3): 4919-4930.
- Liang S, Wang K, Zhang X, et al. 2010. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(3): 225-240.
- Ma Y, Su Z, Li Z, et al. 2002. Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 16(15): 2963-2971.
- Ma Y, Tian H, Ishikawa H, et al. 2007. Determination of regional land surface heat fluxes over a heterogeneous landscape of the Jiddah area of Saudi Arabia by using Landsat - 7 ETM data. *Hydrological Processes*, 21(14): 1892-1900.
- Ma Y, Zhong L, Wang B, et al. 2011. Determination of land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the MODIS and in situ data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(20): 10461-10469.

- Monteith J L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19(19):205-234.
- Niemelä S, Räisänen P, Savijärvi H. 2001a. Comparison of surface radiative flux parameterizations-Part I: Longwave radiation. *Atmospheric Research*, 58(1): 1-18.
- Niemelä S, Räisänen P, Savijärvi, et al. 2001b. Comparison of surface radiative flux parameterizations-Part II. Shortwave radiation. *Atmospheric Research*, 58(2): 141-154.
- Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9): 4270.
- Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, et al. 2003. Remote sensing of surface energy fluxes at 10^1 -mpixel resolutions. *Water Resources Research*, 39(8): 1221.
- Pinker R T, Corio L A. 1984. Surface radiation budget from satellites. *Monthly Weather Review*, 112(1): 209-215.
- Pinker R T, Ewing J A. 1985. Modelling surface solar radiation: model formulation and validation. *J Climate Appl Meteor*, 24: 389-401.
- Pinker R T, Tarpley J D. 1988. The relationship between the planetary and surface net radiation: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 27(8): 957-964.
- Pinker R T, Frouin R, Li Z. 1995. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 108-124.
- Pinker R T, Tarpley J D, Laszlo I, et al. 2003. Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental - Scale International Project(GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project(GAPP), including the North American Land Data Assimilation System(NLDAS) project. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- Prata A J. 1996. A new long - wave formula for estimating downward clear - sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(533): 1127-1151.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81-92.
- Roerink G J, Su Z, Menenti M. 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2): 147-157.
- Ryu Y, Kang S, Moon S K, et al. 2008. Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10): 1538-1552.
- Samani Z, Bawazir A S, Bleiweiss M, et al. 2007. Estimating daily net radiation over vegetation canopy through remote sensing and climatic data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4): 291-297.
- Shuttleworth W J, Wallace J S. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469): 839-855.
- Sobrinho J A, Gómez M, Jiménez-Muñoz J C, et al. 2007. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote sensing of Environment*, 110(2): 139-148.
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-100.
- Tang B, Li Z L. 2008. Estimation of instantaneous net surface longwave radiation from MODIS cloud-free data. *Remote Sensing of Environment*, 112(9): 3482-3492.

- Tang B, Li Z L, Zhang R. 2006. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 115-126.
- Trenberth K E, Caron J M, Stepaniak D P. 2001. The atmospheric energy budget and implications for surface fluxes and ocean heat transports. *Climate Dynamics*, 17(4): 259-276.
- Vonder Haar T H, Oort A H. 1973. New estimate of annual poleward energy transport by northern hemisphere oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 3(2): 169-172.
- Wang W, Liang S. 2009. Estimation of high-spatial resolution clear-sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 113(4): 745-754.
- Wang K, Zhou X, Liu J, et al. 2005. Estimating surface solar radiation over complex terrain using moderate - resolution satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1): 47-58.
- Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, et al. 1998. Clouds and the Earth's Radiant Energy System(CERES): algorithm overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1127-1141.
- Wong T, Wielicki B A, Lee III R B, et al. 2006. Reexamination of the observed decadal variability of the earth radiation budget using altitude-corrected ERBE/ERBS non scanner WFOV data. *Journal of Climate*, 19(16): 4028-4040.
- Zhang Y, Rossow W B, Lacis A A, et al. 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: refinements of the radiative transfer model and the input data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D19105): 1-27.
- Zillman J W. 1972. Solar radiation and sea - air interaction south of Australia. American Geophysical Union.