

贵州卫星气象

遥感技术研究及应用

刘丽 谷晓平 主编



气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

贵州卫星气象遥感技术 研究及应用

刘丽 谷晓平 主编
陈娟 刘清 副主编



 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本书汇集了贵州气象部门卫星遥感的研究、开发和利用成果,内容包括贵州卫星气象遥感技术及应用进展、卫星气象遥感技术在气象领域的研究与应用、生态环境遥感监测研究与应用、灾害遥感监测研究与应用等,涵盖卫星遥感反演大气水汽及云液态水、地表反射率产品的应用、植被生长状况和作物长势遥感监测、陆地温度和城市热岛反演、水体及积雪遥感监测应用与服务以及干旱、暴雨、林火、大雾等灾害的遥感监测等方面的技术方法和开发应用。

本书可为气象、农业、林业、水文、水利、生态环境建设与保护、城市规划和管理等行业及部门开展卫星遥感科研和应用服务提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

贵州卫星气象遥感技术研究及应用 / 刘丽, 谷晓平

主编. — 北京: 气象出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5029-6831-1

I. ①贵… II. ①刘… ②谷… III. ①卫星遥感-遥感技术-应用-生态环境-气象观测-贵州 IV. ①P41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 206896 号

Guizhou Weixing Qixiang Yaogan Jishu Yanjiu Ji Yingyong

贵州卫星气象遥感技术研究及应用

刘丽 谷晓平 主编

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 隋珂珂

终 审: 吴晓鹏

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京建宏印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 10.5

字 数: 270 千字

版 次: 2018 年 9 月第 1 版

印 次: 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

编写委员会

主 编 刘 丽 谷晓平
副主编 陈 娟 刘 清
编写人员 刘 丽 谷晓平 陈 娟 刘 清
徐丹丹 康为民 廖 瑶 孟维亮
高 鹏

2024年12月

2024年12月

前 言

卫星气象遥感是 20 世纪 60 年代发展起来的大气科学的新兴学科分支,经过最近几十年的发展,通过同时提供重要的大气和地表物理参数,逐渐向陆面遥感领域拓展,为当前全球高度关注的气候、环境和生态监测研究提供了重要技术手段和基础研究数据。遥感产品已广泛应用于天气预报、气候预测、灾害监测、环境监测、军事活动气象保障、航天发射保障等重要领域,在台风、暴雨、大雾、沙尘暴、森林草原火灾等监测预警中发挥着重要作用。贵州是一个岩溶地貌发育强烈,丘陵起伏、槽谷纵横,地形特别复杂的省份。特殊的地理位置、复杂的大气环流过程和下垫面条件,形成了丰富多样、呈立体分布的气候类型,也造成了生态环境的多样性、脆弱性和各种自然灾害的频繁发生,因此,提高局地中小尺度天气系统和喀斯特山区地表参数的遥感反演精度,开展生态环境、自然灾害的遥感动态监测有着迫切需求。

2001 年以来,在中国气象局业务发展、贵州省科技厅、贵州省优秀科技教育人才省长专项资金和贵州省气象局相关项目的支持下,我们在陆面温度、大气水汽、云和降水、地一气系统辐射收支遥感反演等方面进行了深入的研究,同时加强卫星气象遥感技术向环境领域拓展,开展贵州生态环境的反演研究和动态监测,建成了卫星遥感监测陆面温度、大气水汽、云和降水、植被生长状况、作物长势、干旱、洪涝、森林火灾、城市热岛等业务体系,形成了具有西南山地环境特色的卫星气象遥感应用体系。

本书是作者在多年的研究和业务工作基础上总结提炼撰写而成。其研究成果突出了西南喀斯特山区气象和生态环境遥感信息解译的特点,在遥感与地理信息系统、气象观测、数值模拟等多种技术融合,反演大气可降水量和高原山地城市的热环境,卫星红外云图资料在中尺度模式 MM5 的变分同化,利用多源、多时相卫星反演地表生态参数和水稻产量估算方面具有一定的创新性。项目的实施与应用促进了贵州喀斯特地区的生态环境保护与可持续发展,提升了抵御和防范生态退化与自然灾害的能力,有利于推动建成环境优美和可持续发展的生态文明社会。项目成果得到了社会各界的肯定。

本书由贵州省山地环境气候研究所组织编著完成。在编著过程中,得到了贵州省气候中心、贵州省减灾中心、贵州省气象服务中心、贵州省人工影响天气办公室、贵州省气象台、黔东南州农委以及黔南州、黔西南州、六盘水市、安顺市、铜仁市、黔东南州、贵阳市、遵义市、威宁县、平塘县等气象局的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢!

限于著者能力和水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2016 年 10 月

目 录

前言	
第 1 章 贵州卫星气象遥感技术及应用进展	(1)
1.1 贵州地理环境及卫星气象遥感特点	(1)
1.2 贵州卫星气象遥感技术发展状况	(3)
第 2 章 卫星气象遥感技术在气象领域的研究与应用	(5)
2.1 大气水汽的遥感反演与应用	(5)
2.1.1 MODIS 二波段比值法反演大气水汽原理	(6)
2.1.2 透射率—大气水汽含量模拟	(7)
2.1.3 二波段比值法在贵州的应用	(12)
2.2 云液态水反演与试验	(18)
2.2.1 MODIS 数据反演云液态水方法	(18)
2.2.2 云液态水反演试验与结果	(20)
2.3 暴雨云卫星数据及同化试验	(23)
2.3.1 暴雨云卫星数据中尺度模式 MM5 同化试验	(24)
2.3.2 TRMM 卫星资料分析贵州夏季暴雨	(47)
2.4 地表反照率产品的应用	(59)
2.4.1 多源卫星地表反照率产品的比较与分析	(59)
2.4.2 地表反照率影响因子	(73)
2.4.3 贵州地表反照率的时空分布	(74)
第 3 章 生态环境遥感监测研究与应用	(77)
3.1 植被生长状况和作物长势遥感监测	(77)
3.1.1 贵州植被的年代际变化和空间分布特征	(77)
3.1.2 基于 MODIS 数据的水稻长势监测与产量估算	(88)
3.1.3 贵州植被生长状况动态监测	(94)
3.2 陆面温度和城市热岛反演	(97)
3.2.1 陆面温度反演方法	(97)
3.2.2 基于 MODIS 数据的热岛效应分析	(100)
3.2.3 基于 ETM+ 影像的土地利用类型与陆面温度的关系研究	(107)
3.3 水体遥感监测应用与服务	(119)
3.3.1 水体遥感监测方法	(119)
3.3.2 贵州主要水域面积动态监测	(121)

3.4	积雪遥感监测应用与服务	(125)
3.4.1	积雪遥感监测方法	(125)
3.4.2	积雪遥感监测应用	(125)
第4章	灾害遥感监测研究与应用	(129)
4.1	土壤湿度与干旱	(129)
4.1.1	土壤湿度和植被干旱反演方法	(129)
4.1.2	植被供水指数干旱监测模型与效果检验	(130)
4.1.3	温度植被干旱指数模型及应用研究	(136)
4.2	林火	(141)
4.2.1	火点判识方法	(141)
4.2.2	火灾遥感监测实例	(142)
4.3	大雾	(146)
4.3.1	雾遥感监测原理与技术方法	(147)
4.3.2	雾遥感监测实例	(148)
参考文献	(152)

第1章 贵州卫星气象遥感技术 及应用进展

遥感技术是从远距离感知目标反射或自身辐射的电磁波、可见光、红外线,对目标进行探测和识别的技术。目前遥感已形成了一个从地面到空中,乃至空间,从信息数据收集、处理到判读分析和应用,对全球进行探测和监测的多层次、多视角、多领域的观测体系,成为获取地球资源与环境信息的重要手段。其中中高分辨率、多通道气象和环境卫星具有探测周期短、覆盖面积大、实时性强等特点,在获取地理资源、气象观测、环境监测、海洋生态、矿产普查、灾害预报等方面得到了广泛的应用。利用气象卫星探测资料研究大气运动和为天气预报服务,也逐渐形成了气象学的一个新分支——卫星气象学。

1.1 贵州地理环境及卫星气象遥感特点

气象卫星观测数据包含高精度的大气温度、湿度、辐射、位势高度、云、水汽、气溶胶、微量气体(臭氧)等垂直分布信息,是天气分析预报和研究气候及气候变化的重要依据。在大尺度天气系统的特征分析、中尺度强对流系统分析、气候变化监测、大气成分监测及其辐射气候效应分析诸多领域发挥着重要作用。在卫星遥感日益成为大尺度天气降水和热带气旋、台风、暴雨等灾害性天气监测必不可少的工具的同时,将遥感信息应用于区域和局地天气系统分析,加强局地中小尺度天气系统的监测能力是现阶段卫星气象学需要拓展的领域之一,也是在贵州这样的低纬多云山区卫星气象遥感技术发展的主要方向和目的之一。除地球大气信息外,地球观测卫星和气象卫星探测信息中还有大量可用于陆地的遥感数据,对生态环境参数进行定量反演,可实现大范围生态环境动态监测,从而使卫星遥感信息在农业生产、自然灾害监测、旅游业、环境保护等方面得以充分应用,服务于地方社会、经济发展。

贵州位于云贵高原东侧、青藏高原东南坡。境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,海拔从西部最高的赫章县韭菜坪 2900.6 m 降低到东部黎平县水口河谷的 147.8 m,平均在 1100 m 左右,境内岩溶地貌发育强烈,丘陵起伏、槽谷纵横,山地和丘陵占全省总面积的 92.8%。贵州属亚热带湿润季风气候,由于特殊的地理环境,影响贵州的天气气候系统多达数十种。如西南季风和东南季风给贵州春夏带来丰沛的降水;副热带高压的位置和强弱影响贵州的冷暖和降水量的多寡;南亚高压和厄尔尼诺—南方涛动(ENSO, El Niño-Southern Oscillation)影响贵州盛夏伏旱或多雨;极地低压和东亚大槽强度和位置决定冬季风的强弱;冬季风常伴随滇黔静止锋,使得贵州的冬季阴雨绵绵,出现持续的凝冻天气过程;西南热低压和促成的小季风使贵州西部和南部春季日照丰富、温暖舒适;西南低涡则是夏半年贵州出现重大降水的一个天气系统过程;而青藏高原大地形、境内山脉也会影响水汽输送、暖湿气团抬升等,造成

局地降水过程。复杂的大气环流过程和下垫面条件,使得在贵州发展卫星气象遥感技术,加强中小尺度天气系统监测和向生态环境遥感领域的拓展提出了严峻挑战。

近年来国内外遥感卫星技术蓬勃发展,新型载荷的优化设计和卫星总体设计的提高,使得无论是传感器的空间分辨率、光谱分辨率,还是数据质量都得到了很大提高,使得区域或局地的气象要素和生态环境参数精细化反演成为可能,然而将其应用到气候复杂的贵州喀斯特多云山区,还是非常具有挑战性的工作,对此问题的不断思考和探索,逐渐形成了以下具有西南山地环境特色的卫星气象遥感应应用领域:

(1) 大气水汽和云液态水反演

贵州处于青藏高原南侧水汽辐合输送带中,特殊的地理位置和地形条件为形成亚热带湿润季风气候的水汽输送创造了有利条件,是贵州气候多阴雨、少日照的根本原因,与空中水资源丰富相反,受副热带高压、南亚高压和 ENSO 循环强弱等影响,春夏常出现干旱少雨。在大气水汽和云液态水定量遥感方面,我们发展了大气可降水量反演模型,首次提出利用中分辨率成像光谱仪(MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectrum radiometer)近红外水汽吸收波段表观反射率的比值反演大气水汽的方法,反演结果精度优于地球观测卫星(EOS, Earth Observation System)同类产品;基于云光学性质与云液态水含量的物理关系,推导出利用云光学厚度和云有效粒子半径反演云中液态水含量的函数关系式,并成功生成云液态水含量反演产品。

(2) 中尺度对流云系反演

受青藏高原的热力和动力影响,贵州多强对流天气。除少量过境的西南涡东移南下影响外,本地生成的中尺度对流系统是该区域及下游强对流天气的主要影响系统。利用红外卫星云图对每个云团的生消和移动进行实时监测,发展了风云 2 号卫星红外云图资料在中尺度模式 MM5(Mesoscale Model 5)的变分同化技术和方案并应用于暴雨预报,为卫星反演资料在暴雨预报中的应用探索新的途径。同时利用 TRMM 卫星观测资料对发生在贵州西部夏季的暴雨天气过程进行分析,分析不同暴雨过程降水云团的水平特征、演变特征以及反演出的反射率特征。

(3) 地表气象参数反演

发展了适合复杂下垫面的基于多源、多时相卫星数据的陆面温度反演技术,通过遥感技术与气象观测、数值模拟等技术融合,在陆面温度反演基础上,探索出一套高原山地城市热岛效应及评估林带对减缓热岛效应的方法;利用多源、多角度遥感卫星传感器的地表反照率,研究各产品地表反照率之间存在的系统性差异,以及差异的大小,评估其地表反照率的反演算法。

(4) 生态环境参数遥感反演及动态监测

研制出适于多云山区生态环境动态监测的遥感信息解译和合成技术,提取典型下垫面如森林、草地、作物地、石漠化区等长时间序列遥感信息,运用小波分析方法获得植被指数值的周期变化,形成指标图集。基于多时相的 MODIS 数据,采用遥感和地理信息系统技术,发展数字高程模型辅助下的水稻种植信息自动提取流程,建立复杂地形条件下水稻长势监测与产量估算的遥感方法,运用建立的水稻指数曲线和单产模型监测水稻长势和估算产量。

(5) 自然灾害遥感动态监测

贵州自然灾害频繁,每年因生态退化(水土流失、石漠化)、干旱、低温冷害、洪涝、森林火灾、病虫害等自然灾害造成巨大的损失,还有无法估计的生命损失和对环境与社会的间接影

响。卫星遥感作为一种全新的探测手段,具有宏观性、客观性和实时性强的特点,可对灾害进行灾前跟踪、预警,灾期动态监测和灾后损失评估、恢复监测等。在这方面,我们利用植被供水指数、温度植被干旱指数等干旱遥感监测模型,开展了干旱遥感监测研究和业务,揭示贵州复杂山区独特的归一化植被指数—地表温度(NDVI-Ts)空间的弓形结构特征,表明干旱监测指标模型与观测的土壤湿度和地面干旱指数的显著相关性;通过对极轨气象卫星多波段遥感图像的雾和林火辐射特性分析研究,以及地面观测数据验证,研发雾与林火的遥感监测技术,建立了贵州遥感反演雾和林火的识别指标和判别阈值。

以上各项领域的研究与监测服务已纳入正规的业务,形成贵州大气和生态环境遥感监测业务框架和体系,开展贵州生态环境的日/旬/月动态监测并对外发布生态环境监测公报。对气象和生态环境灾害实现逐日全天候监测,在发生时段发布不定期的自然灾害监测公报,特别对林火制定了1小时内汇报的制度,在防火季节每天发布林火监测信息。通过将卫星气象遥感技术与业务相结合,提升了卫星数据和服务产品的利用价值,使卫星遥感信息在天气气候预测、农业生产、灾害监测、旅游业、环境保护等方面得以充分应用。

1.2 贵州卫星气象遥感技术发展状况

2003年,贵州省气象局建成了“HY-6A EOS/MODIS 卫星资料接收处理系统”和极轨气象卫星接收处理系统,接收美国 TERRA、AQUA 两颗地球观测卫星资料和 NOAA、中国风云 1(FY-1)系列气象卫星资料。2004年又建成了“DVB-S 卫星遥感系统”,接收来自 TERRA、AQUA、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18 以及 FY-1D 6 颗卫星的遥感资料。2010年建成了“FY-3 卫星数据接收处理系统”,接收 NOAA 系列、EOS/MODIS 系列以及 FY-3A/3B 系列卫星数据。根据中国气象局的要求,2012年5月将“DVB-S 卫星遥感系统”升级为“CMACast 系统”,保障了卫星资料接收的稳定性、时效性和精确性。2013年09月23日,FY-3C 卫星发射成功,作为我国新一代极轨气象卫星风云三号首颗业务星,FY-3C 卫星搭载了可见光红外扫描辐射计(VIRR)、红外分光计(IRAS)、微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)、中分辨率光谱成像仪(MERSI)、微波成像仪(MWRI)、紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)、紫外臭氧总量探测仪(TOU)、地球辐射探测仪(ERM)、太阳辐射监测仪(SIM)、空间环境监测仪(SEM)、掩星探测仪(GNOS)共 12 台遥感探测仪器。为了进一步扩充原有 FY-3 数据接收处理系统的业务能力,贵州省气象局于 2014 年 6 月将“FY-3 卫星数据接收处理系统”进行升级,在此系统中增添对 FY-3C 卫星数据的接收、处理及应用的功能。2016 年 4 月,贵州省气象局在清镇建立了风云三号气象卫星省级接收站,接收 NOAA 系列、EOS/MODIS 系列、FY-3 系列以及 NPP 卫星数据,实现了多源卫星资料的实时接收。

从 2004 年起,贵州省气象局开展生态环境和自然灾害遥感监测业务,后续的研究不断投入到遥感监测业务中,形成长期稳定的业务体系,提供的实时业务产品涵盖了天气气候预测、生态环境监测和自然灾害监测预警等多个领域。以“3S”技术为主体,建立了专题遥感监测、预警的方法和模型,在陆面温度、大气水汽、云和降水、地—气系统辐射收支遥感反演等方面进行了深入的研究,同时加强卫星遥感技术向环境领域拓展,开展贵州生态环境的反演研究和动态监测,建成了卫星遥感监测陆面温度、大气水汽、云和降水、植被生长状况、作物长势、干旱、洪涝、森林火灾、城市热岛等业务体系。制作发布干旱、林火、积雪等多专题的遥感分析产品,

能使遥感资料与地面点精确配准,快速查找火灾点等地面信息,并且用地面资料对遥感信息进行验证与校准,针对各地不同的地理特点,开展植被生长状况、自然灾害等专业性的定量遥感监测、评价、服务工作。加强遥感地面调查订正工作,修订生态环境监测各项指标,加强与各气象台站、各生态监测点的联系,做好遥感信息反馈工作,同时加强与林业、农业、环保等部门的合作,努力提高遥感产品的准确率和实用性。

（以下内容为模糊文字，无法准确识别，推测为正文的后续部分）

第 2 章 卫星气象遥感技术在气象领域的 研究与应用

2.1 大气水汽的遥感反演与应用

水汽是水分和热量传递的基质,在大气能量传输和天气系统演变中起着非常重要的作用。水汽是一个多变参数,它的相位变化与降雨直接相关,大气中的水汽含量是预报中尺度或局地尺度的降雨强度的一个必要参数。目前有多种探测大气水汽的手段,其中较常使用的有微波水汽辐射计(WVR, Water Vapor Radiometer)、无线电探空仪(Radiosonde)和激光雷达。但是这些水汽探测手段存在很多限制,如费用昂贵、时间空间分辨率低、不能全天候观测等。

卫星技术的发展为探测大气水汽提供了新的手段。目前大气水汽遥感反演主要有三种方法:近红外、热红外和微波方法,其中近红外方法应用最为广泛。在近红外方法中又根据计算水汽的透射率计算采用通道的不同分为二通道比值法(一个吸收通道与一个窗区通道的比值)和三通道比值法(一个吸收通道与两个窗区通道的比值)。目前,国内外更多的研究多是针对 AVHRR 或 ATSR 数据进行的。

MODIS 传感器是 EOS 系列卫星中安装在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪,是新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,其中 1~19 和 26 通道为可见光和近红外通道,其余 16 个通道均为热红外通道。目前 EOS 网站发布的 MODIS 大气水汽产品可降水汽(PWV, Precipitable Water Vapor)是使用 Kaufman 等(1992)和 Gao 等(1998)提出的波段比值算法。该算法从 MODIS 传感器的五个水汽反演波段(2, 5, 17, 18, 19)出发,在假设下垫面单一的条件下,使用 DISORT 辐射传输模型,计算生成包括大气水汽含量、水汽透过率、太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角等数据项的查找表。应用中首先根据五个波段的辐射观测值计算出各波段的表观反射率,由水汽吸收波段(17, 18, 19 波段)和大气窗口波段(2, 5 波段)表观反射率的比值求出水汽吸收波段对应的水汽透过率。相对误差在晴空条件下(可见范围 20 km)达到±13%。相对于使用水汽吸收通道与窗口通道比值反演大气水汽的方法,历史上 Fourin 等(1990)曾做过飞行试验,使用两个中心波长为 936 nm 的水汽吸收通道(光谱范围分别为 17 nm 和 45 nm)推算水汽总量,与探空结果比较,发现该试验的结果误差为 15%。黄意玟等(2002)使用 6S 辐射传输模型模拟 940 nm 附近 4 个水汽吸收通道(中心波长分别为 903, 923, 943 和 963 nm)的反射率之比 $\frac{\rho_{943}}{(\rho_{923} + \rho_{943} + \rho_{963})/3}$ 与大气廓线水汽含量的关系,模拟结果的相对误差在 6% 以下。姜立鹏等(2006)、毛克彪等(2004)进行 MODIS 近红外二通道比值法和三通道比值法反演大气水汽的试验与融合,取得了较好的效果。

另外,MODIS 近红外数据有 3 个水汽吸收通道(17,18 和 19),而目前一般仅利用 19 通道反演大气水汽含量,17 和 18 通道很少涉及。

综上所述,我们在前人研究成果的基础上,以贵州为研究区域,探讨基于 MODIS 的近红外二波段表观反射率的比值反演大气水汽的方法,以便于业务运行。

2.1.1 MODIS 二波段比值法反演大气水汽原理

2.1.1.1 大气水汽含量

表示大气水汽状况的物理量通常有两个:一个是对高度积分的水汽含量 IWP(Integrated Water Vapor),即每单位面积上的水汽的质量,其在高度上理解为无限往上的延伸。

另一个物理量是可降水汽 PWV,它相当于同样水汽含量的水柱高,可理解为某一时刻大气中的水汽在达到饱和时凝结成水全部降落后生成的降水量。即

$$PWV = \frac{IWP}{\rho_w} \tag{2.1}$$

式中,ρ_w 是液态水的密度。在遥感反演中,可降水汽定义为:单位面积上,沿卫星天顶角方向从地表到大气层顶的所有水汽,凝结后的水柱高度。即 1cm PWV 对应为 1 g/cm² 的水汽柱。

2.1.1.2 MODIS 水汽反演波段

利用地表或云在 MODIS 近红外通道的测量值可以反演出大气水汽含量 PWV。用于大气水汽反演的五个近红外通道见表 2.1。0.865 μm 和 1.24 μm 是 MODIS 上用于反演植被和云的非水汽吸收通道;0.936 μm、0.940 μm 和 0.905 μm 是三个水汽吸收通道,它们的水汽吸收系数依次降低,0.936 μm 的强水汽吸收通道适用于在干燥环境下进行水汽反演,0.905 μm 的弱水汽吸收通道适用于潮湿的环境或太阳高度角很低的情形。

表 2.1 MODIS 传感器的 5 个近红外水汽反演波段

波段号	光谱范围	中心光谱	地面分辨率
2	841~876 nm	865 nm	250 m
5	1230~1250 m nm	1240 nm	500 m
17	890~920 nm	905 nm	1000 m
18	931~941 nm	936 nm	1000 m
19	915~965 nm	940 nm	1000 m

2.1.1.3 二波段比值法原理

传感器接收的辐射亮度简化表示为:

$$L_{Sensor}(\lambda) = L_{Sun}(\lambda)T(\lambda)\rho(\lambda) + L_{Path}(\lambda) \tag{2.2}$$

式中,λ 为波长;L_{Sensor}(λ)是传感器接收到的辐射亮度;L_{Sun}(λ)是大气顶太阳辐射亮度;T(λ)是大气透过率(从太阳到地面和从地面到传感器两部分透过率的乘积);ρ(λ)为地表(双向)反射率;L_{Path}(λ)为大气程辐射。在晴朗无云、能见度较高(气溶胶含量少)的情况下,程辐射中的多次散射相对于单次散射忽略不计,假设公式右侧第二项正比于第一项,且常数部分计为 K,即

$$L_{Sensor}(\lambda) = L_{Sun}(\lambda)T(\lambda)\rho(\lambda)(1 + 常数) = L_{Sun}(\lambda)T(\lambda)\rho(\lambda)K \tag{2.3}$$

公式两边同除以 L_{Sun}(λ)

$$\rho^*(\lambda) = L_{Sensor}(\lambda)/L_{Sun}(\lambda) = T(\lambda)\rho(\lambda)K \tag{2.4}$$

式中,ρ*(λ)为表观反射率,可以由传感器观测得到。

在 940 nm 附近,影响 $T(\lambda)$ 的因素包括分子散射、气溶胶散射和水汽吸收,相对于其他两种因素,分子散射可以忽略不计。假设气溶胶散射和水汽吸收两种过程各自独立,因此

$$T(\lambda) = T_a(\lambda)T_{ww}(\lambda) \quad (2.5)$$

式中, $T_a(\lambda)$ 和 $T_{ww}(\lambda)$ 分别表示气溶胶散射和水汽吸收。 $\rho(\lambda)$ 、 $T_a(\lambda)$ 和 $T_{ww}(\lambda)$ 随波长变化的规律不同, $\rho(\lambda)$ 和 $T_a(\lambda)$ 随波长变化缓慢,而 $T_{ww}(\lambda)$ 具有波长选择性。在 940 nm 附近的水汽吸收带, $T_{ww}(\lambda)$ 变化剧烈, $\rho(\lambda)$ 和 $T_a(\lambda)$ 变化很小。因此,选择 940 nm 附近的光谱通道,通过不同通道的反射率之比消除 $\rho(\lambda)$ 和 $T_a(\lambda)$ 的影响,从而得到反映水汽含量的 $T_{ww}(\lambda)$ 。因此,在 940 nm 附近的波段的表现反射率之比中消除了 $\rho(\lambda)$ 和 $T_a(\lambda)$ 的影响,并且表现反射率之比恰恰等于相应波段的 $T_{ww}(\lambda)$ 之比,该比值与大气水汽含量有关。因此,通过 MODIS 传感器两个波段表现反射率的比值反演 PWV 是可行的。

2.1.1.4 表现反射率的计算

根据朗伯(Lambertian)反射率定义,大气层顶的表现反射率 ρ 等于该表面的辐射出射度 M 和辐照度 E 的比值:

$$\rho = \frac{M}{E} \quad (2.6)$$

假设在大气层顶,有一个朗伯反射面。太阳光以天顶角 θ 入射到该面,则该表面的辐照度为 $E = ESUN \cdot \cos\theta/D^2$, 辐射出射度 $M = \pi L$ (吕斯骅, 1981)。

由此上式可以写成:

$$\rho = \frac{M}{E} = \frac{\pi L D^2}{ESUN \cdot \cos\theta} \quad (2.7)$$

式中, ρ 为大气层顶(TOA)表现反射率(无量纲); π 为常量(球面度 sr); L 为大气层顶进入卫星传感器的光谱辐射亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); D 为日地之间距离(天文单位); $ESUN$ 为大气层顶的平均太阳光谱照度 ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$); θ 为太阳的天顶角。光谱辐射亮度 L 和光谱辐照度 $ESUN$ 与波段有关,不同的波段有其相应的值。由于 L 实际上为来自地物和大气辐射亮度的总和。因此,大气层顶的表现反射率 ρ 也是地面反射率 ρ_G 和大气发射率 ρ_A 的总和。

各个波段的每个像元的辐射亮度 L 值可以根据(2.9)式计算。

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{QCAL_{\max} - QCAL_{\min}} \cdot (QCAL - QCAL_{\min}) + L_{\min} \quad (2.8)$$

式中, $QCAL$ 为某一像元的灰度值 DN ; $QCAL_{\max}$ 为像元可以取的最大灰度值 255; $QCAL_{\min}$ 为像元可以取的最小值(一般取值为 0 或 1)。对于 MODIS ($QCAL_{\min} = 1$) 来说, (2.8) 式可以改写为:

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{254} \cdot (DN - 1) + L_{\min} \quad (2.9)$$

式中, L_{\max} 和 L_{\min} 分别为 $QCAL = 255$ 和 $QCAL = 1$ (或 0) 时的光谱辐射亮度值。

2.1.2 透射率—大气水汽含量模拟

2.1.2.1 大气辐射传输模型

大气辐射传输模型用于模拟大气与地表信息之间耦合作用的结果,其过程可以描述为地表光谱信息与大气耦合以后,在遥感传感器上所获得的信息(程天海等, 2009)。

早期大气传输的计算大多采用查表的方法。如水平观测路径的大气透过率可通过查海平面水平路程上主要吸收气体水蒸气,二氧化碳的光谱透过率表。由于二氧化碳成分变化不大,它的透过率可直接查表。水汽是大气的可变成分,它的吸收与气温、相对湿度有关,即与反映每千米可凝水量的绝对湿度有关。

对一定海拔高度的水平路程,由于大气压强低,吸收带变窄,同样路程透过率增加,须引入高度修正因子,等效折算到海平面路程。倾斜路程则要将路程等分为若干段,分段折算等效路程,计算各段的透过率,再求整个路程的透过率。查表法对大气传输模型做了大量简化,也未考虑散射,计算繁复,精度较差,已很少使用。美国麻省汉斯康姆空军基地的地球物理管理局发展了一套大气传输软件:LOWTRAN(低频谱分辨率传输)、FASCODE(快速大气信息码)、MODTRAN(中频谱分辨率传输)等。这些大气传输模型都可以达到较高的精度(董言治等,2003)。

MODTRAN 模式是公认的以中等光谱分辨率(2 cm^{-1})计算大气透过率和辐射值的标准模式。与 LOWTRAN 相比,其改进了光谱分辨率,将光谱的半高全宽度(FWHM,full with half maximum)由 LOWTRAN 的 20 cm^{-1} 减少到 2 cm^{-1} 。对于 $0\sim 22000\text{ cm}^{-1}$ 波段数,采用 1 cm^{-1} 间隔进行计算,对于 $22000\sim 50000\text{ cm}^{-1}$ 波段数,采用 5 cm^{-1} 的固定步距。实测资料分析表明(孙毅义等,2004;傅炳珊等,2001):在模拟大气透过率上,LOWTRAN 可以出现 $>7\%$ 的误差,MODTRAN 则 $<3\%$,用模型得到的各种参数在误差允许范围内可以接受。

为此,本节采用 MODTRAN 4.0 进行大气透过率与大气水汽含量的关系模拟。

2.1.2.2 平均透过率的计算

首先假设已经完成了图像的几何纠正,因此,无须考虑卫星天顶角的差异,按照中纬度夏季、中纬度冬季两种大气模式,利用 MODTRAN 模型模拟不同大气水汽含量和不同气溶胶模式下两波段的透过率。由于模拟透过率的分辨率为 1 个波数(cm^{-1}),因此,使用 MODIS 红外波段的任意两个波段的波段响应函数对其进行加权积分,最终得到对应于两个波段的积分透过率,进而求得两波段透过率之比。

波段 ν_1 至 ν_2 的平均透过率计算公式如下:

$$\tau = \frac{\int_{\mu_2}^{\mu_1} \tau(\mu)\phi(\mu)d\mu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\nu)d\nu} \quad (2.10)$$

式中, $\phi(\mu)$ 为波段响应函数; $\tau(\mu)$ 为大气透过率。

2.1.2.3 不同波段比与水汽含量(mm)关系曲线拟合

从表 2.1 中的五个波段中任选 2 个或 3 个波段计算反射率之比,其中一个波段要在 940 nm 附近,共有 6 种组合方案(见表 2.2)。

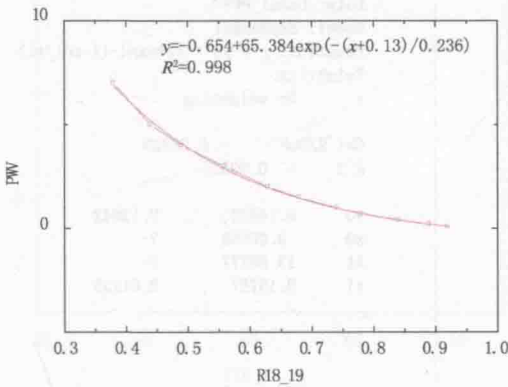
表 2.2 波段组合方案

序号	1	2	3	4	5	6
组合方式	$\frac{\rho_{18}^*}{\rho_{19}^*}$	$\frac{\rho_{18}^*}{\rho_2^*}$	$\frac{\rho_{19}^*}{\rho_2^*}$	$\frac{\rho_{18}^*}{(\rho_2^* + \rho_5^*)/2}$	$\frac{\rho_{19}^*}{(\rho_2^* + \rho_5^*)/2}$	$\frac{\rho_{18}^*}{(\rho_{17}^* + \rho_{19}^*)/2}$

6 种方案的拟合结果见表 2.3 和图 2.1。

表 2.3 六种波段比与水汽含量(mm)关系曲线的拟合结果

陆地大气模式		
	中纬度冬季	中纬度夏季
方案 1	$y=0.654+65.384\exp(-(x+0.130)/0.236)$ $R^2=0.998$	同左
方案 2	$y=0.155+13.852\exp(-(x+0.007)/0.182)$ $R^2=0.993$	同左
方案 3	$y=0.084+51.123\exp(-(x+0.051)/0.195)$ $R^2=0.997$	同左
方案 4	$y=0.148+13.838\exp(-(x+0.007)/0.158)$ $R^2=0.995$	同左
方案 5	$y=0.006+56.223\exp(-(x+0.035)/0.158)$ $R^2=0.996$	同左
方案 6	$y=(3.266E-7)x^{3.998}$ $R^2=0.989$	$y=(3.267E-7)x^{3.998}$ $R^2=0.989$

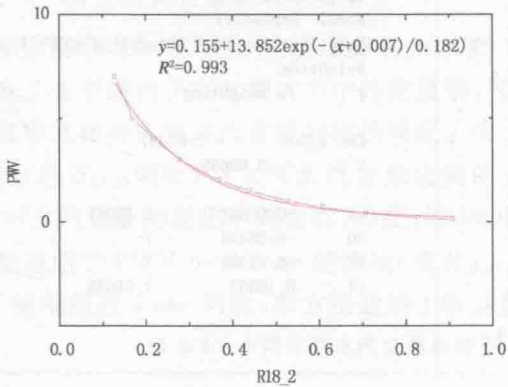


```
Data: Datal_PWV
Model: ExpDecay1
Equation: y = y0 + A1*exp(-(x-x0)/t1)
Weighting:
y      No weighting

Chi^2/DoF   = 0.01144
R^2         = 0.99842

y0      -0.65385      ? 15832
x0      -0.13003      ?-
A1      65.38463      ?-
t1      0.23608       ? 01305
```

(a)

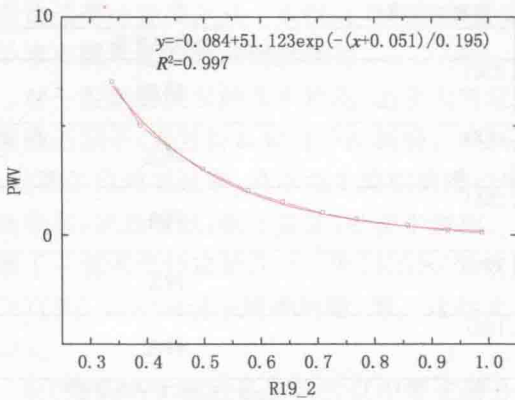


```
Data: Datal_PWV
Model: ExpDecay1
Equation: y = y0 + A1*exp(-(x-x0)/t1)
Weighting:
y      No weighting

Chi^2/DoF   = 0.05148
R^2         = 0.99288

y0      0.15507      ? 15492
x0      -0.00695     ?66431.03633
A1      13.85163     ?0302705.51633
t1      0.18177      ? 01621
```

(b)



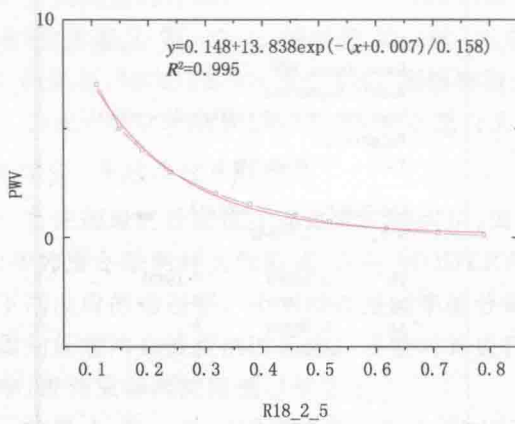
(c)

```

Data: Datal_PWV
Model: ExpDecay1
Equation: y = y0 + A1*exp(-(x-x0)/t1)
Weighting:
y      No weighting

Chi^2/DoF   = 0.01826
R^2         = 0.99747

y0    -0.08361    ? 1.1867
x0    -0.05121    ?52354.43336
A1    51.12311    ?9857343.12775
t1    0.19542     ? 0.11106
    
```



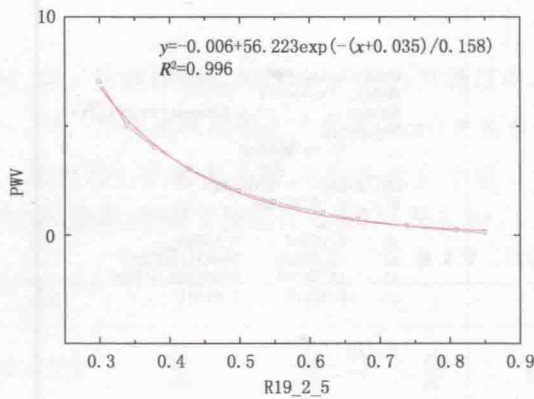
(d)

```

Data: Datal_PWV
Model: ExpDecay1
Equation: y = y0 + A1*exp(-(x-x0)/t1)
Weighting:
y      No weighting

Chi^2/DoF   = 0.03428
R^2         = 0.99526

y0    0.14803    ? 1.2642
x0    -0.00668    ?-
A1    13.83777    ?-
t1    0.15787     ? 0.11135
    
```



(e)

```

Data: Datal_PWV
Model: ExpDecay1
Equation: y = y0 + A1*exp(-(x-x0)/t1)
Weighting:
y      No weighting

Chi^2/DoF   = 0.02497
R^2         = 0.99655

y0    -0.00647    ? 1.2981
x0    -0.03494    ?-
A1    56.22321    ?-
t1    0.15852     ? 0.1038
    
```