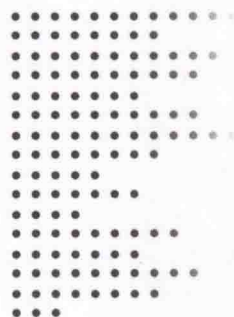
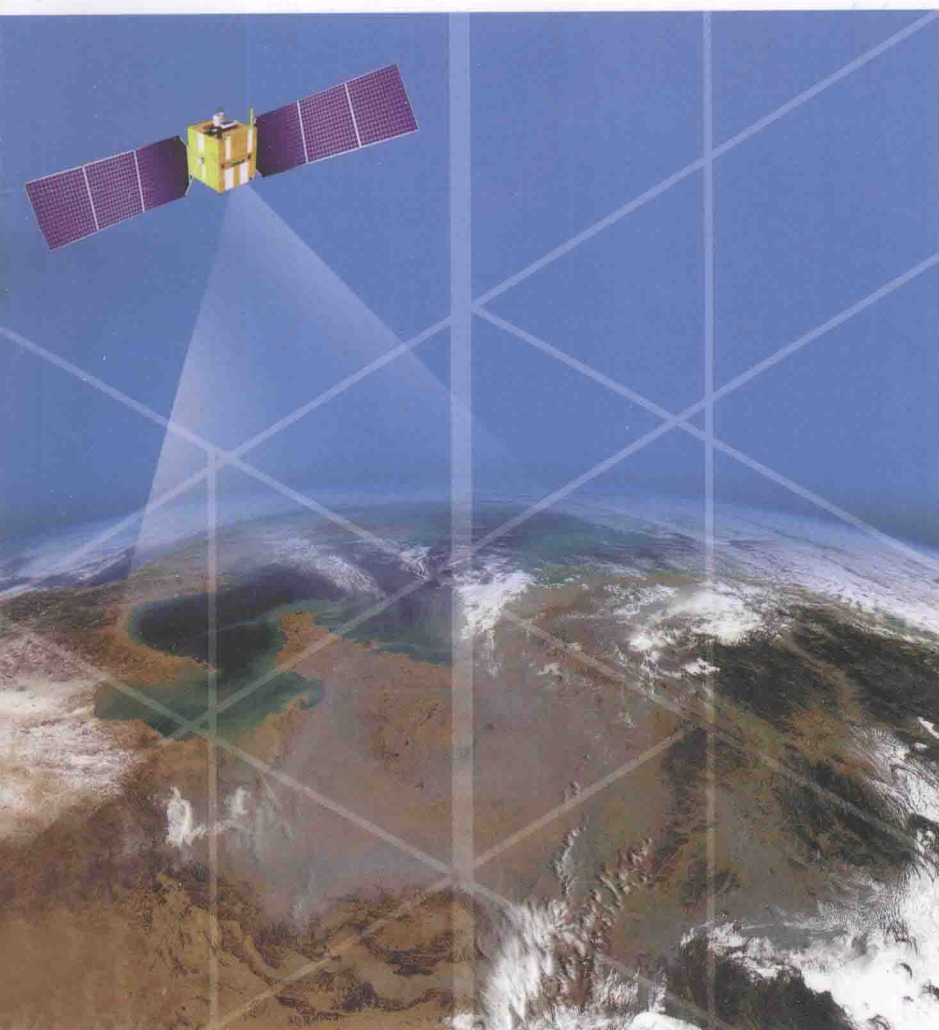




地球信息科学基础丛书

大气遥感定量反演 算法与系统

◎ 陶金花 李小英 王子峰 李莘莘 等 编著



科学出版社

地球信息科学基础丛书

大气遥感定量反演算法与系统

陶金花 李小英 王子峰 李莘莘 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是多源卫星遥感大气污染综合监测技术研究和监测系统研发的技术总结。全书共8章,围绕大气遥感定量反演系统建设过程中所需要的卫星有效载荷、遥感反演算法、软件开发技术和系统设计框架等内容进行介绍。首先系统地描述当前国际上用于大气遥感监测的主要卫星数据源,详细阐述大气水汽、云、雾、温湿廓线、气溶胶、霾、颗粒物、沙尘、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 CH_4 及 CO_2 等大气参数的反演原理与方法;并简要介绍大气遥感反演系统建设所需要的各种软件设计与开发技术;详细介绍大气遥感定量反演系统的设计方案;最后展示大气遥感定量反演系统在我国各地区的应用成果。

本书可供从事大气遥感方法研究、系统建设的科研人员与高等院校相关专业的研究生参考使用;同时,可供从事大气遥感监测业务工作的专业技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

大气遥感定量反演算法与系统/陶金花等编著. —北京:科学出版社, 2014. 10

(地球信息科学基础丛书)

ISBN 978-7-03-042129-6

I. ①大… II. ①陶… III. ①大气遥感 IV. ①P407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 232455 号

责任编辑:彭胜潮 苗李莉 朱海燕 / 责任校对:胡小洁

责任印制:赵德静 / 封面设计:陈 敬

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

*

2014年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:303 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

(按姓氏汉语拼音排序)

范 萌 李莘莘 李小英 陶明辉
陶金花 王子峰 张 莹 邹铭敏

序

2013年1月,我国中东部地区经历了连续多次的大气重污染过程,其重污染过程涉及范围之广、污染程度之重、持续时间之长、社会反响之大都是空前的,对城市环境空气质量、大气能见度和公众健康等造成巨大影响。我国目前面临的大气污染问题,是发达国家近百年来经历的大气污染问题的集中体现,其规模和复杂程度未有先例。

党的十八大报告明确提出了到2020年在资源节约型、环境友好型社会建设方面取得重大进展,主要污染物排放总量显著减少,人居环境明显改善,实现全面建成小康社会的宏伟目标。国务院于2013年9月颁布了《大气污染防治行动计划》规定,到2017年重点区域环境空气质量有所改善,并对京津冀、长三角、珠三角等主要区域规定了具体细颗粒物的下降指标。然而,我国不但缺少支撑环境空气质量持续改善的综合技术方法和健全完善的科学管理技术体系,甚至存在着大气污染程度、污染范围和分布状况等家底不清的问题。由于全国地域广阔,环境监测站点数量严重不足,而且主要集中在大城市,因此急需利用卫星遥感技术开展大范围、连续、高效和动态环境空气监测,弥补地面监测站点在空间尺度的不足,为相关部门提供全国范围、空间连续分布的大气污染信息,提升监测能力。

在科学技术部和中国科学院的支持下,我们研究团队先后承担了863计划中资源与环境领域重大项目“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”第三课题“多源卫星遥感大气污染综合监测技术(2006AA06A303)”,以及中国科学院2007年“北京地区大气环境监测行动计划”、2008年“北京及周边地区奥运大气环境监测和预警联合行动计划”等知识创新工程项目。这些有关环境空气质量的卫星遥感监测技术课题,紧密围绕我国环境空气监测与管理工作的迫切需求,开展了多源卫星遥感大气污染综合监测技术研究,以及环境空气质量卫星遥感技术工程化及其应用研究,系统攻克了环境空气质量多源卫星遥感综合监测关键技术,全面创新了环境空气质量反演方法、应用模式、平台系统与业务应用,开拓建立了国家环境空气卫星遥感监测工程化技术体系,有效支撑了我国大气污染防治与环境空气保护等重点工作,最终促成了我国环境空气监测跨入卫星应用时代。

该书是我们研究团队有关多源卫星遥感大气污染综合监测技术研究和监测系统研发的技术总结,是在我的倡导下主要由团队的青年科技工作者陶金花、李小英、王子峰、李莘莘、张莹、陶明辉、邹铭敏和范萌八位博士共同完成。希望该书的出版能为对环境空气质量遥感监测感兴趣的科研院所的研究人员、大专院校的师生,以及从事大气环境的监测人员提供参考。

陈良富

2014年8月

前 言

大气环境直接影响着人类的身体健康,近些年,我国的大气环境质量已经引起广泛的关注,公众、研究人员以及政府部门等都从不同的角度和深度关注着大气环境的质量问题。传统的地基站点式监测方法在大气环境质量监测工作上发挥了重大作用,但由于站点数量有限,导致其监测结果在区域尺度上一直存在不足。卫星遥感观测具有区域连续覆盖优势,能有效地弥补现有地基监测手段在区域尺度上的不足,已成为大气环境质量监测的必要手段。作者所在团队在近十几年中一直从事大气遥感相关理论、技术方法及行业应用等领域的研究,积累了丰富的经验。近些年,通过承担和参与多个有关大气环境卫星遥感监测方面的国家级科研项目以及软件系统的建设工作,我们发现越来越多的科研和业务监测机构迫切需要掌握大气环境参数的区域分布。由于大气遥感监测的门槛较高,能掌握相关理论与技术的人员相对较少,致使大气环境遥感业务在各机构发展缓慢。在这种情况下,一套具备大气环境参数卫星遥感监测能力,且简单易学、操作方便的卫星数据反演系统尤为必要。将大气遥感理论应用到具体的业务监测中需要多个学科的交叉与融合。除大气遥感原理外,还需要掌握大气环境遥感监测在不同应用领域的业务需求,以及应对这些需求的系统设计与软件技术。本书针对上述几个方面,对大气遥感反演系统建设所需的数据源、反演算法、软件技术、系统设计等进行阐述,最后介绍该系统在我国各地的应用示范情况。

全书共分8章。第1章简要介绍大气遥感反演算法研究和系统建设的现状,以及大气遥感应用的现状与前景。第2章系统介绍目前国内外在大气遥感领域主流的卫星传感器。第3~5章从卫星遥感反演原理和方法方面介绍多种大气参数的反演过程;其中,第3章介绍水汽、云、雾及温湿廓线等大气参数的遥感反演方法;第4章介绍气溶胶、霾、颗粒物及沙尘等环境影响因子的反演方法;第5章介绍 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 及 CH_4 等痕量气体的反演方法。第6章从海量遥感数据管理、高性能计算、遥感图像处理、地理信息数据处理以及软件开发语言等方面介绍大气遥感反演系统建设所需要的各种软件技术以及具体的使用方法。第7章从软件工程的角度,介绍大气遥感反演系统的需求分析结果与详细设计方案,主要包括产品体系、软件体系结构、数据处理流程、功能结构以及数据库等方面。第8章介绍大气遥感反演系统在我国不同地区的应用案例。

本书是作者团队近年来工作成果的集成,反演算法全部经过作者的验证,软件系统经过多个项目和多个业务部门的实践检验。本书由陶金花和李小英提出和审定编写大纲;第1章由各位作者合力编写,其中,大气遥感反演算法研究进展由陶明辉、邹铭敏以及王子峰共同编写;定量遥感系统平台部分由陶金花和陶明辉整理编写;大气遥感应用的现状与趋势分析由李莘莘、邹铭敏、王子峰以及陶明辉共同编写。第2章由范萌搜集整理及编写。第3章和第4章由陶明辉编写。第5章由王子峰和邹铭敏共同编写,其中,统计回归反演方法和最优估计算法与痕量气体反演部分由邹铭敏编写;基于DOAS算法的 NO_2 反

演和基于 BRD 算法的 SO_2 反演部分由王子峰编写。第 6 章由李莘莘等编写。第 7 章由陶金花编写。第 8 章由范萌等进行统一制图,最后陶金花整理编写。全书由陶金花统稿,李小英在全书编写过程中,对书稿的结构安排、编写方法以及书稿校正上给予指导意见。

本书第 3、4 章的部分图表数据来自 NASA 的技术文档和反演产品。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)熊效振博士在 CO_2 反演算法研究以及反演时先验数据获取中给予很大帮助。夏石明和柴向停为本书第 6 章提供程序源代码。国家卫星气象中心闫欢欢博士、美国内布拉斯卡大学韩冬博士为本书第 5 章部分图表提供了原始数据,并对内容编排等提出了宝贵的建议。美国国家航空航天局戈达德地球科学数据和信息服务中心(NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, NASA GES DISC)提供 AIRS 辐亮度数据。本书部分反演结果的验证采用了中国科学院大气物理研究所王跃思研究员观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据。ATMERS 系统的用户需求主要来源于国家环境保护部卫星环境应用中心和北京市环境保护监测中心。作者在此对上述个人和团体一并表示诚挚的谢意。

本书得到了国家 863 计划“十一五”重大项目“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”中的第三课题“多源卫星遥感大气污染综合检测技术(2006AA06A303)”的资助;得到了中国科学院知识创新工程重要方向项目“北京地区空气质量立体综合观测系统”的资助。

大气遥感反演算法与系统涉及内容广泛,加之作者水平有限,疏漏和不足之处在所难免,希望读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 大气遥感反演算法研究进展	2
1.2 定量遥感系统平台进展	4
1.3 大气遥感应用的现状与趋势分析	9
参考文献	11
第 2 章 大气遥感传感器介绍	15
2.1 MODIS 传感器	15
2.2 OMI 传感器	18
2.3 AIRS 传感器	20
2.4 IASI 传感器	22
2.5 SCIAMACHY 传感器	23
2.6 TANSO 传感器	26
2.7 POLDER 传感器	28
2.8 AVHRR 传感器	30
2.9 CrIS 传感器	31
2.10 HJ-CCD 及 HJ-IRS 传感器	33
2.11 CBERS-CCD 传感器	35
2.12 MERSI 传感器	36
参考文献	38
第 3 章 大气参数遥感反演	41
3.1 大气水汽	41
3.2 大气温湿廓线	45
3.3 云分布	51
3.4 雾分布	55
参考文献	57
第 4 章 气溶胶反演	58
4.1 气溶胶光学厚度	58
4.2 霾	64
4.3 沙尘	67
4.4 近地面颗粒物浓度	68

参考文献	72
第 5 章 大气痕量气体遥感反演	74
5.1 基于 DOAS 算法的 NO_2 反演	74
5.2 基于 BRD 算法的 SO_2 反演	80
5.3 统计回归反演方法	85
5.4 最优估计算法与痕量气体反演	88
参考文献	94
第 6 章 ATMERS 系统的主要实现技术	96
6.1 软件开发语言	96
6.2 海量遥感数据管理	101
6.3 高性能分布式遥感计算	106
6.4 遥感图像处理	108
6.5 地理信息数据处理	111
6.6 其他遥感类库及 GIS 中间件	120
参考文献	130
第 7 章 大气遥感定量反演系统	131
7.1 系统需求分析	131
7.2 系统设计	142
第 8 章 大气遥感定量反演系统应用	156
8.1 珠江三角洲地区气溶胶光学厚度监测	156
8.2 全国范围气溶胶光学厚度监测	160
8.3 奥运期间华北地区近地面颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 监测	166
8.4 华北地区重霾污染过程监测	167
8.5 珠江三角洲地区 SO_2 浓度卫星遥感长时间序列监测	170
8.6 全国范围 NO_2 柱浓度年均值变化监测	172
8.7 全国范围 SO_2 柱浓度年均值变化监测	176
8.8 全国范围 CH_4 柱浓度年均值变化监测	176
8.9 全国范围 CO 柱浓度季均值变化监测	185
8.10 长三角地区颗粒物遥感监测日报	187
8.11 京津冀地区霾遥感监测日报	188
8.12 京津冀地区气溶胶遥感监测简报	188
8.13 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 遥感监测简报	188
参考文献	191
附表	192

第 1 章 概 述

地质史、气候变迁史和人类进化史表明,人与大气环境既相互依存、渗透和转化,又相互冲突(唐孝炎,1990;王明星,1999)。今天,大气环境的恶化已成为不争的事实,它集中地表现为气候变暖与极端天气的频发,对人类的生存与发展造成巨大威胁。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的第五次报告进一步确认了全球气候变暖的事实。报告指出,在过去的 130 年全球升温 0.85°C ,且人类活动极有可能是 20 世纪中期以来全球气候变暖的主要原因(Stocker et al., 2013)。人类活动对大气造成的另一个突出的负面影响就是空气污染。目前,全球范围内都出现了不同程度的空气污染问题,这不仅会进一步影响气候变化,还会给人类健康造成危害。世界卫生组织于 2014 年最新发布的一份报告显示,全球每年大约有 700 万人死于空气污染,空气污染已成为全球最大的单一环境健康风险(World Health Organization, 2014)。因此,人类与大气环境的冲突,即人类活动所导致的大气污染、全球气候变暖和极端天气频发等,已令各国政府及全球民众深感忧虑,并引起了高度的重视。

随着大气环境受到越来越高的重视,大气探测技术也得到了十分快速的发展。自 20 世纪 60 年代以来,由于大气科学本身发展的迫切需要,也随着当代卫星、计算机等新技术的推动,大气遥感已成为发展最为迅速的大气科学的新兴学科分支之一,也是大气科学发展的关键技术支柱之一(吕达仁等, 2003; 邱金桓等, 2005; 邱金桓等, 2008)。大气遥感以探测大气参数和过程为目标,主要研究内容包括遥感原理、探测技术、反演原理与方法、遥感实验与应用 4 个方面。目前,大气遥感已经在气象要素、云、气溶胶和大气微量气体成分探测等方面取得了很好的成就。大气遥感资料不仅可以用于天气分析与预报、大气污染和气候变化的研究,还可以改善数值模式的强迫场与相关物理参数,为评估或提高气候模式、空气质量监测与预报模式模拟的准确性提供了强有力的数据支持。然而,未来大气遥感研究任重道远,还面临不少难题和挑战。

大气遥感反演的大规模数据处理过程中,涉及传感器多、数据量和计算量大、区域复杂、数据庞杂质量不一、应用需求非常大且反演模型复杂多样等问题,建立一套全自动的大气遥感数据处理系统,从初级卫星数据中快速提取出用于大气科学研究的参量信息就变得十分复杂。目前,国际应用较为广泛的大气遥感数据处理系统有 IMAPP 和 CSPP 等软件包,但国内在这方面的发展仍非常欠缺。本书的主要内容涵盖大气遥感反演系统建设所需要的遥感反演算法、软件技术、系统设计与开发方面。

1.1 大气遥感反演算法研究进展

1.1.1 温湿廓线、水汽和云

大气对流层内温度和水汽的垂直变化、云的时空分布等参数的遥感观测是区域及全球尺度天气和气候研究的基本手段。早在第一颗人造卫星发射之前, King 在 1956 年就提出了利用卫星观测大气热红外发射的信息来获取大气温度垂直廓线的概念(King, 1956)。Wark 则在 1961 年提出了利用卫星探测大气温度廓线的计划(Wark, 1961)。第一个大气探测仪 SIRS-A 搭载在 1969 年的美国雨云 3 号(NIMBUS-3)实验卫星上发射升空。近三十年来,随着红外高光谱传感器技术和遥感反演方法的进步,卫星遥感探测对流层内温度在适当条件下可优于每千米 1K 的精度(Aumann et al., 2003)。目前,应用最广泛的温湿廓线观测传感器为美国 NASA Terra 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)和 2002 年发射的 Aqua 卫星上搭载的大气红外探测仪(atmospheric infrared sounder, AIRS)。

现有的大气温湿廓线卫星遥感反演算法主要有统计回归和物理反演两种方法(Seemann et al., 2003)。统计回归方法计算简单,依赖于卫星观测与地基已有观测样本的回归关系,是现有卫星遥感监测业务运行的主流算法。物理反演方法精度稍高,常采用统计方法的计算结果作为初始值,但计算量大,不适于业务化应用。

最初,卫星遥感基于 11~13 μm 波段采用分裂窗方法反演海洋和植被上空的大气水汽柱浓度(Chesters et al., 1983),但是常因地面温度和边界层温度相近而对底层水汽不敏感。后来,利用 0.94 μm 处的近红外波段对水汽的吸收敏感性来探测水汽(Vane et al., 1993),并且发展了近红外水汽反演方法(Gao and Kaufman, 2003)。目前,常用的水汽红外观测数据主要来自 AIRS 传感器,精度在 20% 左右(Hagan et al., 2004),MODIS 同时提供红外和近红外的水汽反演,并且近红外水汽反演精度在洁净大气条件下可达 5%~10%。

云识别既是气候研究中云量统计的基础,也是陆地、大气和海洋参数遥感探测的前提。基本上所有传感器都涉及云像元的识别过程。AVHRR(advanced very high resolution radiometer)采用 5 个可见光和红外的波段阈值来去除云的影响(Kriebel and Saunders, 1988)。在静止气象卫星上采用 0.6 μm 和 11 μm 的波段来识别云(Rossow and Garder, 1993)。现有的各种传感器都有对应的云掩码算法,MODIS 传感器空间分辨率可达 250~1000m,利用可见光、近红外、红外的 20 个波段来探测云分布和光学特性,是目前比较有代表性的云遥感识别算法。

1.1.2 气溶胶、霾和颗粒物

MODIS 为目前反演颗粒物(particulate matter, PM)的常用传感器之一,该传感器同时搭载在上午过境的 Terra 卫星和下午过境的 Aqua 卫星上,幅宽为 2330km,空间分辨

率为 250~1000m,可利用 0.4~14.4 μm 范围的 36 个波段对全球每天的大气气溶胶和云特性进行观测。MODIS 气溶胶反演主要使用 0.44 μm 、0.66 μm 、2.12 μm 处的三个波段。由于较高的时间和空间分辨率以及反演精度,现有的近地面颗粒物反演主要基于 MODIS 气溶胶光学厚度进行。

最早用于气溶胶光学厚度反演的卫星传感器是 AVHRR,自 1981 年以来,用于业务反演表面均一、反射率较低的海洋上空气溶胶光学厚度。陆地上空由于地表反射率较高,最初的气溶胶光学厚度反演根据可见光反射率较低的浓密植被地区在红蓝波段与短波红外波段的线性关系,称为暗像元算法(Levy et al., 2007)。其他学者后续发展了可利用偏振信息(Tanré et al., 2011)的偏振算法以及地表时相信息的深蓝算法(Hsu et al., 2006)等方法。目前应用最为广泛的是基于 MODIS 传感器的暗像元算法,精度可达 $\pm(0.05+15\%)$ 之内。此外,基于 MODIS 的深蓝算法已经扩展到所有晴空非冰雪覆盖陆地区域,精度也提高到 $0.05+20\%$ 以内(Hsu et al., 2013)。

近地面颗粒物是空气质量评价的主要依据之一。Engel-Cox 等(2004)利用卫星气溶胶光学厚度与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性估算了整个美国地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布。卫星观测的气溶胶光学厚度为整层的大气粒子消光特性,与近地面颗粒物的质量浓度的关系受气溶胶的垂直分布、化学组分、吸湿特性等多种因素的影响。后续研究通过考虑气象参数、气溶胶的垂直分布和湿度等条件对两者的关系进行了改进(Gupta and Christopher, 2009; Wang et al., 2010)。 $\text{PM}_{2.5}$ 的卫星反演方法受反演区域的空间尺度、气溶胶理化特性影响较大,目前常用的主要有多元回归统计方法和基于物理机理的垂直与湿度订正的反演算法。

MODIS 传感器还可用于中国东部区域性霾的识别与定量监测。中国东部常见的区域性霾污染在 MODIS 气溶胶标准产品中经常出现数据缺失情况。Li 等(2013)根据霾与云在可见光、近红外波段以及红外波段的辐射特性的差异,发展了霾层的识别方法,并基于已有的地面反射率数据反演霾层的光学厚度。

1.1.3 痕量气体

自 1982 年 Nimbus-7 卫星上 TOMS 传感器首次观测到 El Chichon 火山爆发产生的 SO_2 云之后(Krueger, 1983),卫星探测开始用于定量化评估大气中主要污染气体的含量,经过 30 余年的发展,相关卫星数据源与反演方法日趋成熟。目前,常用于 NO_2 、 SO_2 等污染气体反演的卫星载荷包括 GOME 及其后续的 GOME-2、大气吸收扫描成像光谱仪(scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography, SCIAMACHY)、臭氧探测仪(ozone monitoring instrument, OMI),以及最新发射升空的 OMPS(ozone mapping and profiler suite)。这些载荷具备在紫外-可见光谱段的连续观测能力,光谱分辨率高达 0.3~1nm,除获取气体整层的含量外,部分载荷还能够反演气体的垂直廓线。

痕量气体反演方法大致可分为统计回归方法和物理反演方法。统计回归方法是一种线性回归模型。Smith 等(1976)将统计回归方法引入到大气参数垂直廓线的遥感反演中,发展了基于经验正交函数(主成分分析)的统计回归方法,该算法被用于反演大气温湿廓线、臭氧廓线和甲烷廓线(Qu et al., 2001; Goldberg et al., 2003; 张莹等, 2012)等参数。

Sontag(1992)提出了基于神经网络的统计方法,使用多层感知器网络反演痕量气体浓度。物理反演方法是建立在求解辐射传输方程基础上的。物理反演是一个典型的非适定问题(周秀骥等,1982;Thompson et al.,1986),理论上可以统一到最优化理论框架之下。Chahine(1970)提出了大气辐射传输方程的一种迭代解法,迭代方式为沿某一固定方向的寻优策略,这是较早期的一种求解方法。Rodgers(1976)提出了另一种方法,该方法利用前向模型计算辐射值和卫星实测值的差,与先验廓线和反演廓线值之间的差值一起定义代价函数,基于先验条件和牛顿迭代方式逐步逼近真解的最大似然估计。Lorenz(1986,1988)从 Bayesian 理论出发,经过一些假设得到了和 Rodgers 一样的迭代公式。

差分吸收光谱技术(differential optical absorption spectroscopy,DOAS)是目前应用较为广泛的反演算法,该算法从 20 世纪 70 年代发展至今,能较好地提取痕量气体的弱信息,适用于大多数污染气体的反演。另外,国际上针对 SO_2 等污染气体还发展了 BRD (band residue difference)和 LF(linear fit)等专门的反演算法,也都具有一定的适用性。国内在痕量气体的探测方面起步较晚,目前搭载在风云 3 号(FY-3)卫星上的臭氧总量探测仪(total ozone unit,TOU)和紫外臭氧垂直探测仪(solar backscatter ultraviolet sounder,SBUS)可以探测 O_3 的柱总量和垂直廓线。

1.2 定量遥感系统平台进展

美国在 1969 年发射的 Nimbus-3 卫星上搭载了红外分光计传感器,基于多波段红外探测大气廓线的理论模型实现了垂直温度的卫星定量反演。基于遥感反演模型,利用卫星观测到的光谱信息定量获取地球物理参数已经成为现有卫星遥感的主流技术,这一技术的广泛应用需要软硬件平台的共同支持。尤其是随着全球变化研究的快速发展,迫切需要区域尺度大气、陆地和海洋参数的快速定量获取。目前国际上遥感参数的获取针对不同的传感器和参数由不同的团队负责,主要提供专业参数的反演结果。不同来源的卫星数据和各种应用之间缺乏方便的连接,全面综合的定量遥感平台较少。本节概要介绍几个比较有代表性的遥感反演平台。

1.2.1 MODIS/AIRS 处理软件 IMAPP

CIMSS(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)是由美国威斯康星大学麦迪逊分校、NOAA 和 NASA 在 1980 年组建的一个联合研究中心,研究卫星遥感技术以及遥感在天气预测、云和辐射、全球水循环、环境和气候变化中的应用等一系列相关领域。除了环境模式与数据同化、卫星气象研究与应用以及卫星传感器技术等几个方面外,CIMSS 在极轨和静止气象卫星数据获取和处理软件开发方面具有丰富经验,开发了一系列应用系统,包括 CSPP(community satellite processing package)、IAPP(international ATOVS processing package)、IMAPP(international MODIS/AIRS processing package)、McIDAS(man computer interactive data access system)以及 Polar Remote Sensing Software 等软件系统。其中,用于参数定量反演遥感系统的主要有 CSPP、IAPP 和 IMAPP。

IMAPP 是 CIMSS 在美国 NASA 戈达德航天中心和喷气动力实验室的地球观测系统基础上发展起来的,可提供从接收 Terra 和 Aqua 卫星直接广播数据,到反演 MODIS、AIRS、AMSU,以及 AMSR-E 传感器对应参数的完整处理功能。IMAPP 主要运行在 Linux 系统平台上,也可以通过虚拟操作系统用于 Windows 和 Mac OS X 等系统上,并且免费发放。该软件的 Windows 版本 WIMAPP 由俄罗斯 ScanEx 公司提供。IMAPP 支持的针对不同传感器的反演参数见表 1.1。

表 1.1 IMAPP 产品列表

产品类别		产品
MODIS 产品 (Terra 和 Aqua)	大气和极地冰雪产品	云掩码、云顶压强和温度、云的光学厚度和有效半径、温湿廓线、大气可降水量柱浓度、稳定性指数、气溶胶光学厚度、冰面温度、雪掩码、冰覆盖和冰浓度、反演强度和反演深度
	陆地产品	地表反射率、校正到天底的 BRDF 反射率
	图像产品	MODIS L1B 真彩图、假彩图
AIRS 和 AMSU 产品(Aqua)	传感器产品	校准和定位辐射与反射率(AIRS)、校准与定位天线温度(AMSU)
	大气产品	JPL 温湿廓线(3×3 AIRS FOV)、UW 温湿廓线、AIRS/MODIS 合成温湿廓线
	应用程序	AIRS HDF 到 BUFR 的格式转换
AMSR-E 产品 (Aqua)	传感器产品	校准与定位天线温度(AMSU)
	大气产品	雨强
	地表产品	土壤湿度、雪水当量
NWP 产品	DBCAS 系统是一个区域数字化天气预报模型,可同化 MODIS 产品并提供 16km 和 48km 分辨率的 72 小时预报	—
航空/灾害性天气预报产品	IMAPP 上冲云顶软件包识别 MODIS 数据中由于强烈上升气,已经突破对流层顶部进入平流层底部的对流云顶的区域,过冲云顶的对流风暴可能产生地面灾害性天气(大雨、破坏性大风、冰雹和龙卷风)和类似雷电和湍流的航空危害	—
空气质量预报产品	IDEA-I 软件利用 MODIS 气溶胶产品(MOD04)识别重污染区域,然后运行轨迹模型预测未来 48 小时气溶胶的垂直和水平运动	—

IMAPP 产品可以为政府、科学研究和航空等商业领域提供关于极端天气监测、森林火灾探测、渔业管理、天气预报、航空安全和冰监测等即时信息。例如,美国威斯康星大学的直接广播 IMAPP MODIS 产品用于帮助美国国家气象局(NWS)进行中短期气象预报,通过提供更高分辨率产品或新产品来改进 15 分钟 GOES 数据。MODIS 大气水汽柱

总量(TPW)和 MODIS 云有效辐射率的实时广播产品被同化到 CIMSS 区域同化系统(CRAS)数值天气预报模型中,用于改进模型中水汽和云的预测。高分辨率 MODIS 真彩图像被用于 NOAA 五大湖沿岸监视计划,协助监测五大湖及其周边情况,并被加拿大冰面监测部门用于监测大洋航线的结冰信息。

1.2.2 卫星数据处理软件 CSPP

CSPP(the community satellite processing package)是在美国 NOAA JPSS 的资助下,由 CIMSS 开发的卫星数据处理软件包,在 2012 年首先发布 1.0 版本。通过发布免费开源软件,CSPP 支持极轨卫星和地球同步卫星数据直播用户的数据处理和区域实时应用。该软件支持 Suomi NPP 以下数据与功能。

(1) 可见光红外成像辐射仪 VIIRS、先进微波探测器 ATMS、跨轨迹红外探测器 CrIS(cross-track infrared sounder)数据的定标和地理定位,将原始数据记录(RDRs)转化为科学数据记录(SDRs)。

(2) VIIRS 的环境数据记录,包括陆地、海洋和大气产品,主要包括:VIIRS 云掩码(cloud mask)、VIIRS 火点(active fires)、VIIRS 气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness)、VIIRS 悬浮物(suspended matter)、VIIRS 海面温度(sea surface temperatures)、VIIRS 地表反射率(surface reflectance)、VIIRS 增强植被指数(enhanced vegetation index)、VIIRS 归一化植被指数(normalized difference vegetation index)。

(3) VIIRS 科学数据记录(SDR)的重投影,生成 GeoTIFF 格式或者 AWIPS NetCDF 文件。

(4) CrIS、AIRS、红外大气探测干涉仪(infrared atmospheric sounding interferometer,IASI),利用美国威斯康星大学的双回归方法(晴空和云)反演单个视场内的温度、湿度、地表和云反演等环境参数,主要包括:①101 层的大气温度、湿度、臭氧、相对湿度和露点温度廓线;②地表温度;③传感器波段分辨率的地表反射率(单位:cm⁻¹)(仅晴空);④总可降水量(从 100 hPa 到地面)(单位:cm);⑤可降水量 1(从地面至 900hPa 垂直积分)(单位:cm);⑥可降水量 2(从 700~900hPa 垂直积分)(单位:cm);⑦可降水量 3(从 300~700hPa 垂直积分)(单位:cm);⑧臭氧总量(垂直积分);⑨抬升指数;⑩对流潜能(单位:J/kg);⑪CO₂(单位:ppm^①);⑫云顶气压 1(单位:hPa);⑬云顶温度 1(单位:K);⑭云光学厚度;⑮云掩码(值域:0 晴空;1 云)。

(5) 具备 Suomi-NPP 的 VIIRS、ATMS、CrIS 和 Aqua 与 Terra 卫星 HYDRA2 多波段数据分析工具包,为检验和显示不同传感器观测和波段之间关系提供了快速、灵活的接口,通过对应的位置和时间以光谱线图、截面图、散点图、多波段联合或者色彩增强等方式实现。

(6) NOAA/NESDIS/STAR 的微波集成反演系统(MIRS)支持 Suomi NPP 的 ATMS、NOAA 18 和 19 的 AMSU-A 和 MHS L1B 产品、MetOp-A 和 MetOp-B 的

① 1ppm 指每立方米的大气中含有 CO₂ 的体积数(cm³),即 1ppm=1cm³/m³=10⁻⁶

AMSU-A和MHS L1B产品等数据反演大气廓线和地表参数。主要包括:①开阔大洋水面的温度、湿度廓线,可降水量总量,垂直的非降雨云的液态水总量;②非海岸的陆地区域的可降水量总量和湿度廓线;③陆面温度;④陆面和雪地的地表发射率;⑤地表分类;⑥雪水当量,雪覆盖范围;⑦海冰密度;⑧垂直冰晶水路径(IWP);⑨垂直雨水路径(RWP);⑩开阔海洋水面和非海岸带及雪覆盖的陆地区域的降水速率。

此外,支持VIIRS、MODIS、AVHRR(POES and MetOp)的云和陆地参数反演的CLAIR-x软件也将在随后加入CSPP系统。

1.2.3 NWP SAF 的遥感系统

NWP SAF是欧洲气象卫星组织(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)为改进卫星和数值天气预报的接口而建立的,由英国国家气象局负责,合作伙伴有欧洲中期天气预报中心、皇家荷兰气象研究协会和法国气象局。相对于CIMSS具有专门的地球物理参数反演系统来说,该中心更侧重于研究数值天气预报中的卫星数据同化过程。该中心主要提供各种软件和数据报告,但是专门用于遥感参数反演的软件系统很少,而且主要集中在大气方面,比较典型的为一维变分反演软件1D-Var反演包。1D-Var系统在欧洲数值天气预报中应用广泛,为模式提供云、大气温湿廓线等大气状态参数,可根据需要同化到天气变化预测的各个过程中。它包含三个一维变分分析包:Met Office 1D-Var、SSMIS 1D-Var和ECMWF 1D-Var。这些软件使用来自数值天气预报模式的初始值进行物理参数的卫星遥感反演。这三个软件包各有不同的特点,涵盖不同的传感器。各软件包的功能和特点如下。

1. Met Office 1D-Var

Met Office 1D-Var是一个独立的软件系统,通过用户提供的观测和背景误差协方差文件进行一维变分反演。它最初是为了IASI传感器而开发的,可以通过配置来支持ATOVS、AIRS、IASI和SSMIS等传感器,在有合适的辐射传输模型条件下,可以支持任何的天底探测传感器。ECMWF 1D-Var作为优化的一个选项,也可被Met Office 1D-Var调用。最新发布的版本Version 3.5支持RTTOV v11辐射传输模型。它可以针对不同的研究目的进一步开发和移植。主要可输出以下参数:①分析误差协方差矩阵;②最小化logs;③波段选择文件中每个波段的反演亮温;④依据背景廓线层数的温度、湿度、臭氧以及可选择的云液态水。

2. SSMIS 1D-Var

SSMIS 1D-Var代码最初由欧洲中尺度天气预报中心开发,进一步开发来处理SSMIS微波成像仪/测深仪及AMSU数据。它是一个独立软件包,从微波辐射观测中反演温度、水汽、地表风速和云液态水,反演参量可以由用户指定。

3. ECMWF 1D-Var

ECMWF 1D-Var软件是可适用广泛卫星数据反演问题的最简化代码,不针对特定

的传感器。它不提供 1D-Var 反演所需要的所有部件(如正向快速辐射传输模型),而是利用 INRIA(拟牛顿算法)M1QN3 软件和预先设定背景误差协方差矩阵的特征向量实现。用户必须定义控制变量并且接入适当的辐射传输模型。

1.2.4 极轨卫星数据处理系统

极轨卫星数据处理系统是在我国气象部门中使用较广的一套卫星数据处理系统,由商业公司开发,基于城市大气环境质量卫星遥感监测技术,在多源卫星遥感数据的基础上,能够逐日提供区域范围多种空间尺度的空气质量参数的时空分布图,为灰霾等空气污染事件的空间分布及其扩散、传播提供直观的图解。主要功能可以概括为以下几点。

(1) 对 MODIS、NOAA、FY-3、NPP 等卫星影像数据进行自动处理、加工成统一的开放性的存储格式,以备后续的分析和使用。

(2) 基于多源遥感数据城市空气典型指标反演研究,通过遥感数据的处理,多元统计分析,利用实际的气象观测参数、污染物指标监测值以及城市及周边地区的不同比例尺的基础地理空间数据,建立城市气溶胶光学厚度等指标的反演模型。提供逐日提供区域范围多种空间尺度的 AOD(aerosol optical depth)、 NO_2 、 SO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空分布图。

(3) 大气后向轨迹模型。进行灰霾等大气污染浓度分布的成因进行溯源,定量评估周边地区对目标地区污染物输送贡献以及本地排放的贡献。

(4) CALIPSO 气溶胶垂直分布廓线遥感产品反演。

1.2.5 环境卫星空气质量遥感应用系统

环境卫星空气质量遥感应用系统是国家环境保护部为满足我国环境与灾害监测预报小卫星星座的应用需求,在以环境与灾害监测预报小卫星星座为主要数据源的基础上,结合气象卫星、海洋卫星、资源卫星等数据,开展卫星环境监测应用系统建设,形成天地统筹的国家环境监测体系,实现我国环境大范围、全天候、全天时的动态监测。系统在 MODIS、HJ-CCD(charge coupled device)、HJ-HSI、HJ-IRS、CBERS-CCD、OMI、AIRS、AVHRR 等传感器数据的基础上,进行如下大气参数的监测。

1) 颗粒物污染监测

包括对大气水汽、气溶胶粒子谱、气溶胶光学厚度、可吸入颗粒物浓度(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)等参数的监测。

2) 雾霾覆盖及污染监测

实现雾霾污染区的自动识别,在此基础上生产出雾、霾光学厚度,雾、霾能见度,霾天的颗粒物浓度等产品监测。

3) 沙尘遥感监测功能

实现沙尘的空间分布、强度信息提取,生产出沙尘分布及强度等专题产品,并对影响