

多角度气溶胶遥感研究进展

王磊^①, 张鹏^②, 孙凌^②, 张文建^③

(^① 中国气象科学研究院, 北京 100081; ^② 国家卫星气象中心, 北京 100081; ^③ 世界气象组织, 日内瓦 1211)

摘要: 相对于传统的暗目标法, 多角度遥感反演气溶胶光学特性, 能够利用卫星信号中包含的角度信息, 更好地分离地表和大气的贡献, 并且适用于一些高亮地表, 为气溶胶反演提供了新的途径。本文围绕 AATSR、MISR 等多角度传感器, 介绍了它们的设计特色和相关的多角度气溶胶反演算法, 综合阐述了多角度气溶胶遥感方面的研究进展。

关键词: 多角度; 气溶胶; 反演; AATSR; MISR

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.022

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)119-0110-06

Recent Researches on Aerosol Opacity Retrieval from Multi-angle Satellite Radiometers

WANG Lei^①, ZHANG Peng^②, SUN Ling^②, ZHANG Wen-jian^③

(^① Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

^② National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081; ^③ World Meteorological Organization, Geneva 1211)

Abstract: Several new methods for aerosol opacity retrieval using multi-angles satellite instruments, compared to the traditional single view method, can preferably differentiate the contribution of the surface and atmosphere, and also applicable to bright and desert surface. The design features of the multiple angle sensors loaded on Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR), Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), and the retrieval algorithms are presented in this article. The recent developments in aerosol remote sensing using multiple angles are also elaborated.

Key words: multi-angle; atmospheric aerosol; retrieval algorithm; AATSR; MISR

1 引言

气溶胶粒子是指悬浮在大气中的直径为 $10^{-3} \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 的固体或液体粒子, 它主要来源于土壤、海洋、生物圈、火山喷发以及人类活动。

大气气溶胶粒子(雾、霾、沙尘等)直接妨碍视线, 影响交通运输与出行; 在一定大小范围内作为可吸入颗粒物被人体吸入后, 会引发多种呼吸道疾病, 同时它也是城市主要的大气污染物; 它作为云雨的凝结核, 是大气中云和降水的先决条件。因此, 大气

气溶胶正受到包括气象、化学、物理、环境科学等各学科越来越多的关注。

大气气溶胶的辐射强迫历来被认作气候系统中最主要的不确定性因素之一, 它直接和间接地影响辐射平衡, 从而对气候变化产生影响, 而大气气溶胶的不确定性也为遥感影像的大气纠正带来困难。IPCC 第 4 次工作报告指出^[28]: 人类活动导致大气中气溶胶增多, 引起气候变冷, 总的直接辐射强迫影响为 -0.5 W/m^2 ($-0.9 \text{ W/m}^2 \sim -0.1 \text{ W/m}^2$), 气溶胶引起的通过改变云反照率的间接气候效应为 -0.7 W/m^2

收稿日期: 2011-01-16 修订日期: 2011-05-26

基金项目: 973 项目课题“中国和全球重点区域气溶胶的宏观尺度研究(2010CB950802); 科技部科技支撑项目“新一代风云卫星沙尘暴遥感监测方法及其业务系统集成技术研究”(500444001001)。

作者简介: 王磊(1982~)男, 安徽芜湖人, 硕士在读, 主要研究方向为多角度气溶胶参数反演。

E-mail: aqxx_tutu@163.com

— 110 —

($-1.8\text{W/m}^2 \sim -0.3\text{W/m}^2$), 气溶胶研究已经成为当今国际学术界的研究热点之一。

目前,用于探测气溶胶光学特性的手段主要包括:地基遥感和卫星遥感。

地基遥感多采用多波段光度计观测气溶胶光学特性,该方法虽然能够得到较为及时可靠的气溶胶时空变化数据,但是覆盖范围小,不利于研究气溶胶的大尺度特征,通常用于卫星反演结果的验证。而利用卫星遥感资料反演大气气溶胶能够提供广阔背景的气溶胶分布信息,包括一些人烟稀少和偏远的地区,从而实现全球气溶胶监测。

卫星遥感气溶胶研究始于上个世纪70年代中期,首先用于对海洋上空的气溶胶光学厚度反演;我国对气溶胶遥感的研究始于20世纪80年代。卫星遥感反演气溶胶光学厚度的主要方法包括:基于暗目标的单通道和多通道遥感、基于对比度差异的空间结构法、多角度遥感和偏振遥感4大类。

气溶胶反演起初是在暗背景下采用单通道进行的,随着新传感器的不断涌现,如:MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,中分辨率成像光谱仪)、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer,中等分辨率成像光谱仪)、AATSR(Advanced Along-Track Scanning Radiometer,改进的沿轨迹扫描辐射计)、POLDER(POLarization Directionality of Earth Reflectances)、MISR(Multi-angle Imaging SpectroRadiometer,多视角成像分光辐射度计),以及反演技术的不断改进和发展,多通道、多角度和偏振的算法逐步应用于实践中。

利用卫星进行气溶胶反演是一项复杂的工作,这需要将卫星信号中地表和大气的贡献分离出来,再从大气的信号中提取出气溶胶信息。而气溶胶的贡献相对于地表散射是相当微弱的,尤其在沙漠和雪被等亮地表背景下。

传统的暗目标法,只适用于水体和较低反射率的浓密植被等,对于反射率较高、暗像元较少的地表并不适用。多角度气溶胶遥感针对大气和地表对大气层顶卫星信号贡献的比率随不同观测角度而不同这一特性,将两者分离出来,而此方法同样适用于沙漠等亮地表,为气溶胶遥感提供了新的思路。

其中,基于AATSR和MISR的气溶胶反演方法是近年来多角度遥感气溶胶中最具代表性的两种方法,本文将着重围绕这两种传感器阐述多角度气溶胶遥感的特色和最新的研究进展。

2 多角度传感器

2.1 AATSR

AATSR是欧洲空间局(ESA)ENVISAT卫星上携带的传感器之一,于2002年3月发射升空,它是继ATSR-1(ERS-1,1991年7月发射)、ATSR-2(ERS-2,1995年4月发射)之后,该系列的第3个传感器。ATSR系列传感器虽然逐代改进,但是整体设计和工作原理是类似的,该系列传感器提高长达近20年的数据集,除了主要用于海表面温度监测外,在气候研究方面也有诸多应用。AATSR包括底向(0°)和前向(55°)两个观测角度,可以在3分钟内完成对同一地区两个角度的观测;它拥有7个波段,分别为 $0.55\mu\text{m}$, $0.66\mu\text{m}$, $0.87\mu\text{m}$, $1.6\mu\text{m}$, $3.7\mu\text{m}$, $11\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$ 。(图1为AATSR的观测示意图,来源ESA网站)

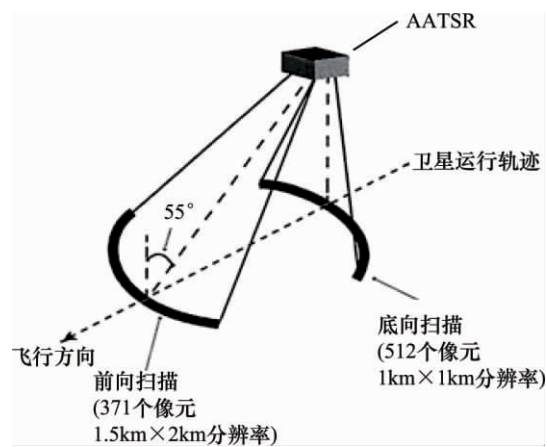


图1 AATSR观测示意图

2.2 MISR

MISR搭载在EOS的TERRA卫星上,于1999年底发射升空,主要设计特色是将9台CCD(Charge Coupled Device,电荷耦合元件)相机沿卫星飞行方向按照一定的角度排列,同时进行观测。其设计目的是通过多角度观测来获取更多的地球生态、环境和气候信息(Diner等,1998),这种设计是当时其他星载气溶胶遥感设备所没有的。MISR包括9个观测角度($0^\circ, \pm 26.1^\circ, \pm 45.6^\circ, \pm 60.0^\circ, \pm 70.5^\circ$),4个波段($0.446\mu\text{m}, 0.558\mu\text{m}, 0.672\mu\text{m}, 0.866\mu\text{m}$),可以在7分钟内完成对同一地点的9个角度观测。(AATSR与MISR的相关参数见表1)

目前,MISR多角度反演气溶胶光学厚度(AOD)产品和MODIS的AOD产品一样被公认为最为准确的。MISR与MODIS同时搭载在TERRA卫星上,前者为多角度传感器,后者是多光谱传

感器,两者拥有独立的反演方法和算法。Abdou^[5]等(2005)利用 MISR、MODIS 以及 AERONET^[11](Aerosol Robotic Network, 气溶胶自动观测网)的 AOD 结果进行了比较,表明在陆地上, MISR 的误差要小于 MODIS;在海洋上,情况则刚好相反,其中部分原因是辐射定标造成的, Abdou 在文中提到 MISR 在红光和近红外波段分别偏亮 3%和 1%,在经过通道间辐射定标校准后,部分减少了两者的偏差,通过气溶胶模型的修订可以进一步减小两者的偏差,而在高亮地表下, MODIS 的反演结果误差较大。

表 1 AATSR 与 MISR 相关参数

	AATSR	MISR
通道数(μm)	0.55, 0.66, 0.87, 1.6, 3.7, 11, 12	0.446, 0.558, 0.672, 0.866
观测角度	$0^\circ, 55^\circ$	$0^\circ, \pm 26.1^\circ, \pm 45.6^\circ, \pm 60.0^\circ, \pm 70.5^\circ$
扫描带宽	500km	360km
分辨率	1km \times 1km(底向) 1.5km \times 2km(前向)	0.275km \times 0.275km 1.1km \times 1.1km

3 多角度反演算法

3.1 基于 AATSR 的双角度算法 (ATSR-DV 算法)

双角度算法最初是在处理 ATSR-2 数据时由 TNO(Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 荷兰应用科学研究组织)开发出来的,后来通过算法升级,也可以用于处理 AATSR 数据。

在 ATSR-DV 算法中,假设地表反射率在前向和底向的比值 k 是一个与波长 λ 无关的量:

$$k = \frac{\rho_{sfc,f}(\lambda)}{\rho_{sfc,n}(\lambda)} \quad (1)$$

(1) 式中, $\rho_{sfc,f}$, $\rho_{sfc,n}$ 分别表示前向和底向的地表反射率。

这是一个合理的假设,因为地表反射率随角度的变化主要取决于地表覆盖的宏观结构,而非波长,其不同波长的二向反射函数在形状上差不多是一致的(Flowerdew and Haigh^[9,22],1995)。

对于朗伯体的表面,卫星接收到的来自大气层顶(TOA)的表观反射率可表示为:

$$\rho(\lambda) = \rho_{atm}(\lambda) + \frac{\rho_{sfc}(\lambda)}{1 - \rho_{sfc}(\lambda) \cdot s(\lambda)} T(\lambda) \quad (2)$$

(2) 式中 $\rho_{atm}(\lambda)$ 表示大气本身的反射率, $s(\lambda)$ 表示球面反照率, $T(\lambda)$ 表示大气透过率。

基于以上假设,结合卫星两个角度在大气层顶的反射率表达式并进行公式的比较变换,得到如下表达式:

$$\frac{\rho_n(\lambda) - \rho_{atm,n}(\lambda)}{T_n(\lambda)} = \frac{\rho_f(\lambda) - \rho_{atm,f}(\lambda)}{k \cdot T_f(\lambda)} \quad (3)$$

公式(3)中,下标 n 和 f 分别表示卫星前向和底向两个观测角度, $\rho_n(\lambda)$ 和 $\rho_f(\lambda)$ 为卫星测量值, k 为公式(1)的比值,均为已知量, $\rho_{atm,n}(\lambda)$, $\rho_{atm,f}(\lambda)$, $T_n(\lambda)$, $T_f(\lambda)$ 都是 AOD 的函数,通过引入气溶胶模型,利用辐射传输模型建立查找表(LUT),可以进行 AOD 的反演计算。

Veefkind 等^[12](1998)最先发表了运用双角度算法反演 AOD 的结果,在 TARFOX(Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment, 对流层气溶胶辐射强迫观测实验)的实验中,他利用 ATSR-2 资料对美国中部大西洋沿岸的 AOD 进行反演,获得了与地基观测相似的结果; North 等^[21](1999)利用 ATSR-2 的双角度信息发展了一种同时反演气溶胶光学厚度和地表二向反射率的方法,通过建立简单的地表二向反射率物理模型^[20,26],在没有地表覆盖先验知识的基础上,利用双角度的信息,将地表二向反射率与大气气溶胶的贡献区分开来。ATSR-DV 算法已经在北美(Veefkind 等, 1998,1999),欧洲(Robles-Gonzalez 等, 2000; Veefkind 等^[25], 2000),印度及印度洋(Robles-Gonzalez 等^[24], 2006),中非和南非(Robles-Gonzalez 和 de Leeuw, 2007)以及高亮的沙漠表面(de Leeuw 等, 2005)等多个地区进行试验,并在与地基结果的印证中得到较为满意的结果^[10,23],同时在与 MODIS、MISR、MERIS 反演结果进行相互对比中表现出比较好的一致性(KOKHANOVSKY 等^[2], 2009)。

此外, Grey 等^[8](2006)同样利用 AATSR 的双角度特性开发了 AARDVARC 算法,与 ATSR-DV 算法不同的是,它引入了地表反射率模型,同时进行气溶胶光学特性和地表反射率的反演,但是它们的气溶胶反演结果却表现出良好的一致性(KOKHANOVSKY 等^[1], 2008)。

3.2 基于 AATSR 的最优估计算法(ORAC 算法)

由牛津大学和 RAL 实验室共同开发的 ORAC 算法(Thomas 等, 2006),是由早期的关于 ATSR-2 算法(Marsh 等, 2004)改进而来的,可以反演 AOD,

气溶胶粒子有效半径和地表反射率。该算法基于最优估计^[27] (Optimal Estimation, OE) 技术来最小化代价函数, 采用 Levenberg-Marquardt 方法将模拟值与观测值进行拟合。起初该算法只采用 AATSR 的底向观测角度的数据, 而作为该算法延伸的双角度算法, 则在前者的基础上, 引入了 AATSR 前向观测数据, 其数据处理过程和前者相似, 并在算法中引入了地表二向反射率的前向模型, 同时利用两个角度的数据进行反演计算。将前者的利用单个角度 4 个观测值反演 3 个参数, 变为利用 8 个观测值反演 4 个参数, 期望通过增加初始的输入值数量, 提高反演结果的精度。

3.3 基于 MISR 的多角度算法

MISR 在其公开的气溶胶反演产品中, 采用一套预先设计好的能代表全球各种类型的气溶胶模型, 算法通过一系列严格的设定, 以决定在何种光学厚度下采用何种模型。MISR 拥有 9 个近似同步的观测角度, 涵盖了一个大的散射角, 在中纬度这个角度大概在 $60^\circ \sim 160^\circ$, 结合多光谱信息, 可以对气溶胶的形状和尺度分布做出限定。

对于深海区, MISR 采用的标准气溶胶反演算法类似传统的暗目标法, 对于气溶胶光学厚度大的区域, 算法会加入 446nm 和 558nm 通道的光谱信息以去除任何不确定的来自海洋表面短波反射辐射的影响。在这里, 多角度观测的一个应用是当一些角度的像元受到太阳耀斑区影响的时候, 仍然可以利用其他角度的像元信息进行反演计算。

在进行陆地气溶胶反演计算时, 不同于前面所说的双角度算法, 而是通过构造一系列与观测角度相关的经验正交函数 (EOF) 来模拟地表的反射率随观测角度的变化, 利用空间对比和观测信号中的角度变化信息来区分地表和大气的贡献, 最后通过最小化方差的方法来估算出 AOD^[29]:

$$x_N^2(\tau) = \frac{1}{N_{band} N_{cam}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{band}} \sum_{j=1}^{N_{cam}} \frac{[\langle \rho_{MISR}(l, j) \rangle - \rho^b(l, j) + \sum_{n=1}^N A_n f_{j,n}(l)]^2}{\sigma_{abs}^2(l, j)} \quad (4)$$

(4) 式中, N_{band} 代表可用的波段数, N_{cam} 代表各个波段上可用的相机数, $\langle \rho_{MISR}(l, j) \rangle$ 是平均样本 TOA 等效反射率, ρ^b 是暗地表 (零反射率) 路径辐射亮度的 TOA 等效反射率, $\sum_{n=1}^N A_n f_{j,n}(l)$ 表示样本点在每个视角和太阳入射方向上减少的样本等效

反射率, 其中 A_n 是由正交条件决定的。

该方法同样采用了 ATSR-DV 算法中关于由角度变化造成的地表二向反射率的变化与波长无关的假设作为约束条件, 并且在引入多角度数据后, 对 AOD 和地表反射率反演结果有所改进 (Diner 等^[6], 2005)。MISR 的 AOD 产品已经通过了 AERONET^[16,19] 以及其他光度计在多种地表类型下的验证^[14~15], 其中也包括一些暗目标遥感困难的沙漠地区 (Diner^[5], 2005; Martonchik^[18], 2002)。同时, 理论研究表明 (Kalashnikova 等^[17], 2005), 利用 MISR 多个角度遥感数据可用于区分不同沙尘粒子的形状类别, 这也体现出多角度遥感在呈现气溶胶粒子空间结构形状方面的应用潜力^[4]。

针对 AATSR 和 MISR 的多角度气溶胶反演精度, Grey 等^[9] (2006) 在利用 2002 年 7 月~2004 年 3 月来自全球 19 个站点超过 200 幅 AATSR 晴空遥感影像的双角度气溶胶反演结果与 AERONET 观测结果、MISR 和 MODIS 气溶胶 AOD 产品进行的对比验证中发现: AATSR 反演结果与太阳光度计的观测结果在所有站点的相关系数为 0.70, 与 MISR 产品的相关系数达到 0.84, 而与 MODIS 反演结果的对比, 其相关系数较低, 通过将 MODIS 的结果与 AERONET 观测结果比较发现, 在这些站点 MODIS 的 AOD 反演结果估值偏高, 这可能是导致两者偏差较大的一部分原因。

4 结束语

目前, 气溶胶反演所面临的难题, 除了区域气溶胶模型的选择之外, 还有对地表反射率的处理。传统的暗目标法, 常假定地表反射率的光谱形状已知或者不同波长的表面反射率比值恒定, MODIS 等传感器多采用此种方法。

本文以多角度传感器 AATSR 和 MISR 为例, 主要介绍了几种典型的多角度气溶胶反演算法及其应用情况, 展示了多角度传感器在气溶胶遥感研究中的应用潜力, 为气溶胶反演提供了新的途径。

ATSR-DV 算法采用表面方向反射率光谱恒定的假设来取代对光谱不变的限定, 从而避免了对地表反射率的依赖; ORAC 算法仍需要地表二向反射率的信息, 它基于 OE 理论的反演算法, 以及通过将双角度信息融入到先前开发的单一角度算法中, 通过增加更多的初始值作为约束条件, 从数学运算的角度提高反演精度; MISR 的多角度反演算法则利用 9 个观测角度的信号构造一系列经验正交函数来

模拟地表的反射率随观测角度的变化,利用空间对比和角度变化信息来区分地表和大气的贡献。这3种算法的主要不同在于对地表反射率的处理,从而为多角度气溶胶遥感提供了3种不同的方案。

相比于单一角度陆地气溶胶反演,多角度气溶胶遥感一个显著的特色是对于沙漠等高亮地表的适用性,此方法同样适用于其他均一性地表。而对于非均一性地表(如:高低起伏的山地、海岸线附近)该方法的使用仍有局限性,需要进一步改进。

多角度算法有别于传统的暗目标法,利用卫星信号中的角度信息能够更好地剔除地表和大气的贡献,同时还可以区分出一些气溶胶粒子的形状。由于多角度算法在一些地区的运用还有局限性,它作为一种新的反演思路,还需要进一步拓展到多种地表覆盖进行实验,并尝试加入更合适的气溶胶类型以提高其全球的适用性,在经过大量的对比验证中不断发现优点和不足,及时改进和完善算法,提高算法精度和效率。

参考文献

- [1] A. A. Kokhanovsky et al. . Aerosol remote sensing over land: A comparison of satellite retrievals using different algorithms and instruments[J]. Atmospheric Research, 2007.
- [2] A. A. Kokhanovsky et al. . The inter-comparison of AATSR dual-view aerosol optical thickness retrievals with results from various algorithms and instruments[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009.
- [3] Abdou, W. A. , Diner, D. J. , Martonchik, J. V. , Bruegge, C. J. , Kahn, R. A. , Gaitley, B. J. , et al. . Comparison of coincident MISR and MODIS aerosol optical depths over land and ocean scenes containing AERONET sites[J]. Journal of Geophysical Research, 2004(110).
- [4] David J. Diner et al. . The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces[J]. Remote Sens, 2005(97): 495-518.
- [5] Diner, D. J. , Abdou, W. A. , Bruegge, C. J. , Conel, J. E. , Crean, K. A. , Gaitley, B. J. , et al. . MISR aerosol optical depth retrievals over southern Africa during the SAFARI-2000 dry season campaign[J]. Geophysical Research Letters, 2001(28): 3127-3130.
- [6] Diner, D. J. , Martonchik, J. , Kahn, R. A. , et al. . Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land [J]. Remote Sens, 2005(94): 155-171.
- [7] FLOWERDEW, R. J. , HAIGH, J. D. . An approximation to improve accuracy in the derivation of surface reflectances from multi-look satellite radiometers[J]. Geophysical Research Letters, 1995(23): 1693-1696.
- [8] GREY, W. M. F. , NORTH, P. R. J. , LOS, S. O. . Computationally efficient method for retrieving aerosol optical depth from ATSR-2 and AATSR data[J]. Applied Optics, 2006(45): 2786-2795.
- [9] GREY, W. M. F. , NORTH, P. R. , LOS, S. O. , MITCHELL, R. M. . Aerosol optical depth and land surface reflectance from multi-angle AATSR measurements: Global validation and intersensor comparisons[J]. IEEE Transactions Geosciences Remote Sensing, 2006(44): 2184-2197.
- [10] GUO Jianping, XUE Yong, et al. . A synergic algorithm for retrieval of aerosol optical depth over land[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009(26): 973-983.
- [11] HOLBEN, et al. . AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterisation[J]. Remote Sensing of the Environment, 1998(66): 1-16.
- [12] J. Pepijn Veeffkind, Gettit de Leeuw, Phillip A. Durkee . Retrieval of aerosol optical depth over land using two-angle view satellite radiometry during TARFOX[J]. Geophysical Research Letters, 1998(25): 3135-3138.
- [13] J. V. Martonchik, D. J. Diner. Retrieval of aerosol optical properties from multiangle satellite imagery[J]. IEEE Transactions Geosciences Remote Sensing, 1992(30): 223-230.
- [14] Kahn, R. , Banerjee, P. , McDonald, D. , Diner. Sensitivity of multiangle imaging to aerosol optical depth, and to pure-particle size distribution and composition over ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1998(103): 32195-32213.
- [15] Kahn, R. , Banerjee, P. , McDonald, D. The sensitivity of multiangle imaging to natural mixtures of aerosols over ocean [J]. Journal of Geophysical Research, 2001(106): 18219-18238.
- [16] Kahn, R. A. , Gaitley, B. J. , Crean, K. A. , Diner, D. J. , Martonchik, J. V. , Holben. MISR global aerosol optical depth validation based on two years of coincident AERONET observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2005(110).
- [17] Kalashnikova, Kahn, et al. . Ability of multiangle remote sensing observations to identify and distinguish mineral dust types: Optical models and retrievals of optically thick plumes[J]. Journal of Geophysical Research, 2005(110).

