

细粒子气溶胶光学厚度和谱分布偏振的反演

蒋哲¹, 陈良富¹, 王中挺²

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

2. 国家环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 细粒子气溶胶物理和光学参数定量卫星遥感反演一直是环境和气候领域研究人员关注的重要课题。气溶胶参数卫星业务遥感产品主要是反演气溶胶光学厚度, 它体现大气中气溶胶总含量的信息, 而获取气溶胶谱分布函数有助于进一步了解气溶胶物理特性, 并提高气溶胶其他参数的遥感探测精度。目前, 陆地气溶胶卫星反演面临两个关键问题: 一是气溶胶模式; 二是地表反射贡献的去除, 偏振遥感在这两方面有其独有的优势。本文以多角度偏振方法, 采用 RT3 辐射传输模型建立矢量查找表, 利用法国 PARASOL 探测器一级数据反演了京津唐地区的细粒子气溶胶光学厚度和谱分布参数, 并使用 AERONET 地基观测数据对反演结果进行验证, 结果表明: 偏振方法能较高精度地实现细粒子气溶胶光学厚度反演, 而谱分布的反演还需进一步改进。

关键词: 遥感; 细粒子气溶胶; 偏振; 谱分布

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00460

1 引言

气溶胶是指悬浮在地球大气中沉降速度小、尺度范围为 $10^{-3} \sim 20 \mu\text{m}$ 大小的液态或固态粒子。气溶胶粒子通过对电磁波的吸收和散射作用, 在紫外、可见光到红外很宽的波段内对辐射传输产生影响。这种辐射效应在气候模拟、大气传输、遥感应用、环境监测等众多领域作用重大。随着近些年对城市大气颗粒物中细粒子部分的研究发现, 细粒子气溶胶体积小、重量轻, 不容易去除, 在大气中停留的时间长, 输送距离远, 成为污染物远距离传输的表征物之一^[1]。

利用卫星数据进行气溶胶特性的反演工作已经开展了 30 多年。卫星反演气溶胶需要解决两个关键问题: 一是气溶胶模式; 二是地表反射贡献的去除。偏振遥感通过测量大气粒子后向散射的偏振特性, 可以得到大气气溶胶的更多信息, 具有对细模态气溶胶敏感、地表偏振反射易分离的特点。多角度偏振所能反映的气溶胶光学性质主要是偏振相函数, 气溶胶偏振相函数对气溶胶性质十分敏感, 多角度偏振信息的利用在一定程度上可以区别

气溶胶的类型^[2]。

谱分布探测(即获取气溶胶谱分布函数)有助于进一步了解气溶胶物理特性, 并提高气溶胶其他参数的遥感探测精度。由于偏振信号对气溶胶复折射指数、谱分布函数等物理性质较为敏感, 利用 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 多角度偏振观测方式, 实现了气溶胶物理性质如复折射指数实部、Angstrom 指数等参数^[3-4]的反演。Deuzé 等用 POLDER-1 偏振辐射资料反演了陆地上空 865nm 波段的气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数^[4]; 日本的 Sano 等用 POLDER-1 偏振辐射资料反演了陆地上空的 550nm 波段的气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数, 并用地基 AERONET 资料对结果进行了验证^[5]。在国内, 韩志刚对 RT3 矢量辐射传输模式作了改进, 并利用 POLDER-1 数据对位于内蒙和外蒙的 2 个草原测点进行了气溶胶反演实验^[6]; Fan 等从 PARASOL (Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Science coupled with Observations from a LI-DAR) 偏振探测数据中反演了东亚地区谱分布^[7]。

本文利用地基观测数据分析了京津唐地区的

收稿日期: 2011-12-31; 修回日期: 2012-07-27.

基金项目: 国家科技支撑项目(2008BAC34B04); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(08Y01600KB)。

作者简介: 蒋哲(1985-), 女, 博士, 研究方向为大气遥感。E-mail: jiangzhejx@126.com

气溶胶模式特点,在此基础上,采用 PARASOL 多角度偏振数据使用偏振方法,利用 RT3 辐射传输模型建立矢量查找表^[8],反演了京津唐地区的气溶胶光学厚度与谱分布,并利用北京地区 AERONET (Aerosol Eobotic NETwork)地基观测结果^[8],对反演结果进行了验证与分析。

2 气溶胶模式的分析

AERONET 是一个地基气溶胶检测网,提供全

球的气溶胶光学厚度、谱分布和不同气溶胶中水汽的分布^[9]。AERONET 使用了 Dubovik 和 King^[10]的算法反演气溶胶模式,通过等纬圈观测得到的天空散射数据来进行反演以获得气溶胶物理性质。本文采用北京站的气溶胶复折射指数和谱分布产品进行气溶胶模式分析,分析结果如图 1 和图 2。从图 1 可以看出,复折射指数的实部在 1.4~1.6 之间分布;虚部值大部分分布在 0.00~0.02 之间。从图 2 可看出,细粒子平均半径在 0.04~0.1 μm 之间分布,标准方差大部分在 0.5~0.7 之间。

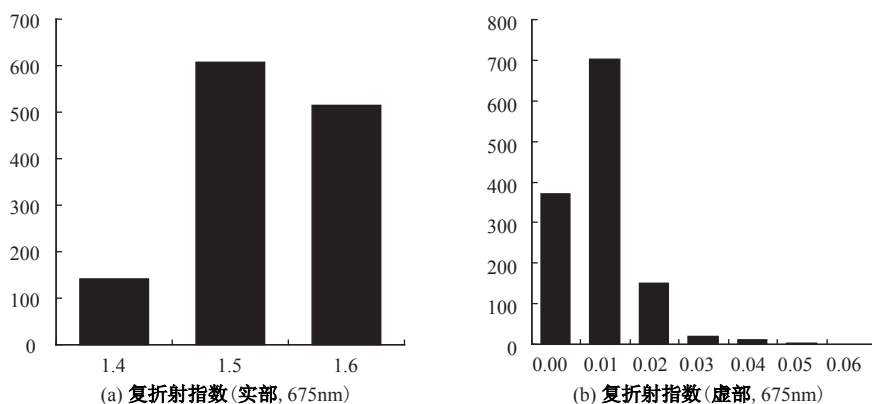


图 1 北京地区气溶胶复折射指数直方图

Fig. 1 Histograms of aerosol refractive index for Beijing

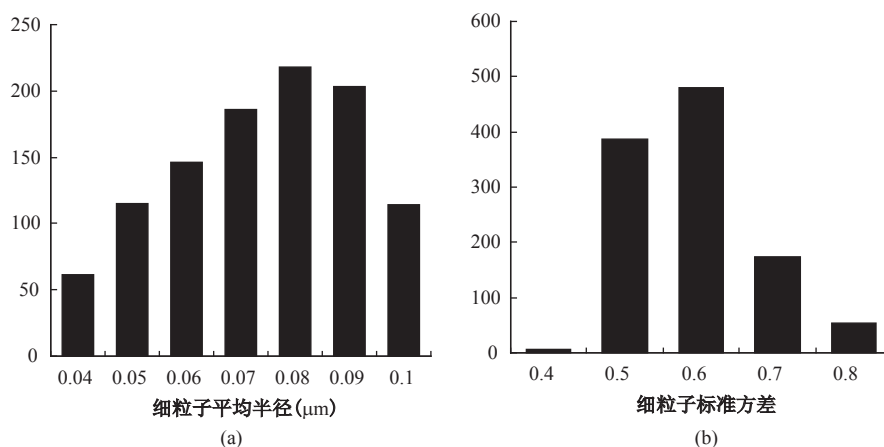


图 2 北京地区气溶胶谱分布函数直方图:(a)为细粒子的平均半径;(b)为细粒子的标准方差

Fig. 2 Histograms of fine mode aerosol size distribution for Beijing

3 气溶胶光学深度与谱分布偏振的反演分析

3.1 反演算法

对于陆地气溶胶,只考虑地表直接散射时,大气层顶偏振辐亮度可以用下式表示:

$$L_{pol} = L_{pol}^{atm} + L_{surf}^{TOA} \quad (1)$$

式中, L_{pol}^{atm} 为考虑多次散射的大气偏振贡献,包括大气气溶胶和大气分子,通过矢量辐射传输计算获得; L_{surf}^{TOA} 为考虑大气影像的地表偏振贡献。

地表的多角度偏振特征采用 Nadal 和 Bréon (1999)的半经验模型描述^[11]:

$$L_{\mu}^{surf}(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \rho[1 - \exp(-\beta \frac{F_p(\alpha)}{\mu_s + \mu_v})] \quad (2)$$

其中, F_p 为地物的菲涅尔反射系数, ρ 和 β 是随着地表覆盖类型(森林、灌木、低植被、沙漠和水体等 5 类)调整的系数。

地表的偏振光传输到大气层顶还受到了大气的影

$$L_{surf}^{TOA} = L_{pol}^{surf}(\theta_v, \theta_s, \varphi) \cdot \exp(-M\tau_m - Mc\tau_a) \quad (3)$$

式中, M 为大气质量数, τ_m 为大气分子光学厚度, τ_a 为气溶胶光学厚度, c 为与气溶胶强前向散射有关的系数, 一般设置为 0.5。

本文使用 RT3 进行矢量辐射传输计算形成查找表, 在具体建立查找表时, 要设定不同卫星观测几何参数, 不同的大气气溶胶参数, 考虑观测数据所在的波段。其中, 观测几何参数包括: 9 个太阳天顶角在 $0 \sim 66^\circ$ 之间变化; 16 个观测天顶角 ($4 \sim 87^\circ$); 16 个相对方位角取值从 $0 \sim 180^\circ$, 每个方位角相隔 12° ; 大气气溶胶模式只考虑细粒子, 复折射指数实部为 1.4、1.5、1.6, 虚部为 0、0.01、0.02, 标准方差为 0.5—0.7 共 6 组, 平均半径 $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间, 共 6 组, 这样共有 324 组气溶胶模式; 气溶胶光学厚度统一转换为 670nm 处的光学厚度, 共设立 6 组值: 即 0、100、200、400、600 和 800nm; 波段的中心波长取 670nm 和 860nm; 大气分子光学厚度设为海拔 50m 处的值; 暂不考虑地表贡献, 地表设为黑体。这样就组成了 $9 \times 16 \times 16 \times 324 \times 6 \times 2 = 8\,957\,952$ 组大气层顶偏振辐亮度的查找表。

在完成查找表构建后, 按照下面步骤进行反演。首先, 对 PARASOL 一级数据进行预处理, PARASOL 一级产品已经对原始数据进行了定标、辐射校正、几何校正。PARASOL 一级产品是以二进制的方式存储的。每个点作为一个单元进行存储, 包括非方向参数和方向参数。非方向参数包括像元点在 PARASOL 参考网格中的行列数、海拔、水陆标识、云标识等, 方向参数包括, 各方向的太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、不同通道的归一化辐亮度, 以及偏振波段 Stokes 分量的 Q、U 值。对此, 首先提取出晴朗的陆地像元, 并将偏振数据从 Stokes 参量转换为偏振辐亮度; 然后, 根据观测几何对查找表进行插值, 得到不同气溶胶模式和光学厚度下的大气贡献, 并计算出地表偏振贡献, 进而计算出大气层顶偏振辐亮度; 最后, 进行气溶胶

最优模式选择, 获得最优的气溶胶模式, 对不同角度的气溶胶光学厚度进行平均, 获得反演的气溶胶光学厚度与谱分布函数。

3.2 反演结果与验证

本文利用上述方法采用 PARASOL 一级数据反演了京津唐地区 2009 年的细粒子气溶胶光学厚度和谱分布(图 3), 同时用北京地区 AERONET 地基观测产品, 对反演结果进行了验证。

Fan 等(2008)研究表明, 中国地区细粒子的截断半径为 $0.3 \mu\text{m}$ ^[12]。本研究以 $0.3 \mu\text{m}$ 为分界点区分粗细粒子, 只比较细粒子。从图 4 和表 1 可以看出, 利用偏振方法较高精度地实现了细粒子气溶胶光学厚度的反演。图 5 为数谱验证数据平均的对比图, 可以看出, 与地面细粒子谱分布监测结果相同, 本算法得出的气溶胶数谱分布为典型的对数正态分布, 细粒子的平均半径与地面监测结果较一致。

从图 4—图 6 可以看出, 细粒子光学厚度反演结果与地面观测结果具有较高的相关性, 但谱分布反演精度还需进一步的提高。由于多角度偏振对粗粒子不敏感, 而陆地气溶胶则是典型的双峰型谱分布^[13], 即粗细粒子混合的气溶胶, 因此利用多角度偏振反演陆地气溶胶时就不得不考虑粗粒子在总体陆地气溶胶中的比重。而引入更多先验条件以提高粒子谱反演精度, 如结合标量信号^[14]获取气溶胶光学厚度成为一种选择。

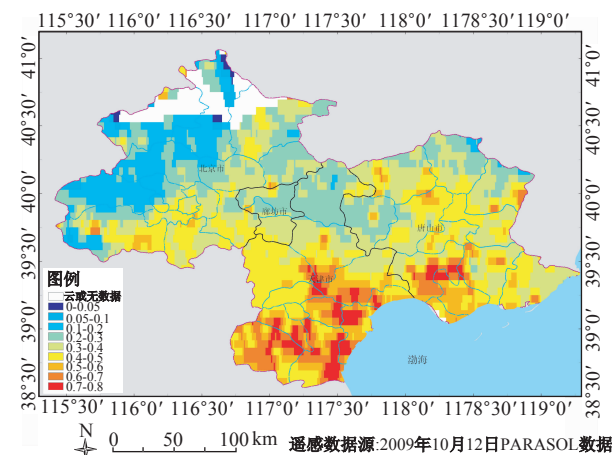


图3 京津唐地区 2009 年 10 月 12 日细粒子气溶胶光学厚度反演结果

Fig. 3 The retrieved fine mode AODs at 0.67 micron on October 12th, 2009

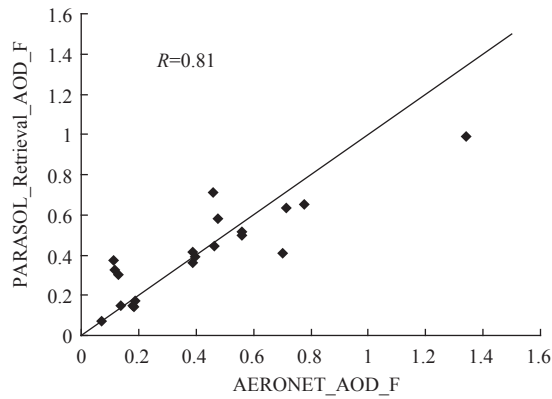


图 4 北京地区细粒子气溶胶光学厚度反演结果与地面观测数据验证图

Fig. 4 The validation results between the retrieved fine mode AODs and AERONET for Beijing

表 1 北京地区细粒子气溶胶光学厚度验证表

Tab. 1 The validation results of fine mode AODs for BEIJING

	验证数	相关系数	绝对误差	相对误差	标准差
细粒子光学厚度	20	0.81	0.11	25.5%	0.15

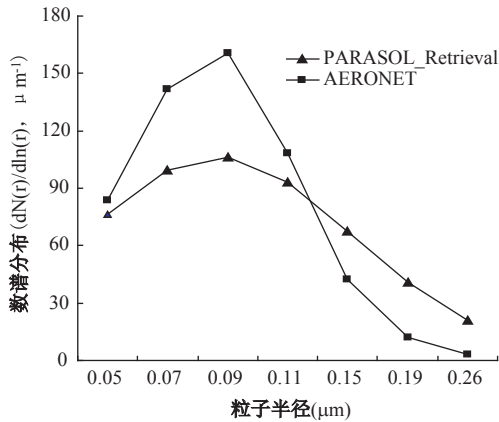


图 5 北京地区 2009 年细粒子气溶胶谱分布反演结果与验证平均图

Fig. 5 The averaged retrieved and validation results of aerosol size distribution in 2009 for Beijing

4 讨论与分析

本文利用多角度偏振数据,实现了气溶胶光学厚度与谱分布的同时反演,根据反演结果,我们发现偏振方法受地表类型和季节影响很小,但由于多角度偏振方法对气溶胶细粒子很敏感,对粗粒子在大部分角度不敏感,而陆地气溶胶是典型的双峰分布,即粗细粒子混合的类型,采用多角度偏振方法

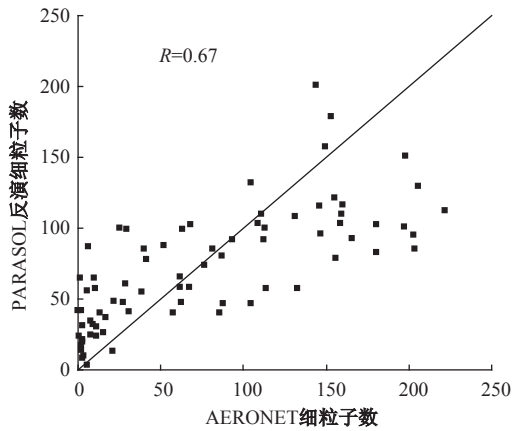


图 6 北京地区细粒子气溶胶数谱分布验证图

Fig. 6 The validation results of fine mode aerosol size distribution in 2009 for Beijing

较高精度地反演了细粒子气溶胶光学厚度,谱分布的反演精度还需进一步提高。本文在利用 RT3 进行辐射传输计算时,为节约时间,简化查找表,没有考虑地表与大气之间的多次散射,地表与大气之间的多次散射的影响究竟有多大,如何消除这种影响,需要做进一步的研究。

致谢: 本文的 PARASOL 一级数据由法国空间中心提供, AERONET 北京站数据由中国科学院大气物理所的陈洪滨研究员、美国的 Philippe Goloub 提供, 矢量辐射传输计算代码 RT3 由美国科罗拉多大学的 Evans K. F. 教授提供, 在此表示感谢。

参考文献:

[1] 任希岩, 吉东生, 王跃思, 等. 北京大气细粒子及其成分的浓度变化特征[J]. 地球信息科学, 2008, 10(4): 426 - 429.

[2] 王中挺. 陆地气溶胶的多角度偏振遥感研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2008.

[3] Herman M, Deuzé J L, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements[J]. J. Geophys. Res., 1997, 102(D14), 17039 - 17049.

[4] Deuzé J L, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS 1 polarized measurements[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106(D5), 4913 - 4926.

[5] Sano I. Optical thickness and Ångström exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data[J]. Adv. Space Res., 2004, 34, 833 -

- 837.
- [6] 韩志刚. 草原上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感——正问题模式系统和反演初步试验[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 1999.
- [7] Fan X H, Goloub P H, Deuzé J L, *et al.* Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia[J]. *Rem. Sens Env.*, 2008, 112 (3), 697 – 707.
- [8] Evans K F and Stephens G L. A New Polarized Atmospheric Radiative Transfer Model[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1991, 46(5), 413 – 423.
- [9] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 9791 – 9806.
- [10] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of the Environment*, 1998, 66(1): 1 – 16.
- [11] Nadal F and Bréon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER space borne measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37 (3), 1709 – 1718.
- [12] Remer L A, Kaufman Y J, Holben B N, *et al.* Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 31879 – 31891.
- [13] Fan X H, Goloub P H, Deuzé J L, *et al.* Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (3): 697 – 707.
- [14] Mishchenko M I, Travis L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 16989 – 17013.
- [15] Diner D J, Chipman R A, Beaudyr N, *et al.* An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space[C]. *Proc. SPIE*, 2005, 5659: 88 – 96.

Study on the Retrieval of Fine Mode Aerosol Optical Depth and Size Distribution Using Polarized Signal

JIANG Zhe¹, CHEN Liangfu¹ and WANG Zhongting²

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *State Environment Protection Ministry, Environment Satellite Center, Beijing 100029, China*)

Abstract: The remote sensing of microphysical and optical properties of fine mode aerosol has gain most attention in both environmental and climatological fields. Aerosol retrieval over land is confronted with two difficulties: selecting the aerosol type and taking out of the surface contribute. As the polarized light reflected by ground targets is small and stable enough to allow for correction in TOA measurements, polarization remote sensing has unique predominance and potential. Based on the directional polarization method, the fine mode aerosol optical depths and size distributions are retrieved using PARASOL Level 1B data through vector radiative transfer model and semi empirical surface polarized reflectance model. Aerosol model selecting is a key factor in the work of aerosol retrieval, so importing local aerosol model is essential in our work. Compared with the products of the ground-based AERONET, the precision of fine mode aerosol optical depth retrieving is bigger than 81% and size distribution retrieving needs to be improved. The results show that the directional polarization method is more accurate for the retrieval of fine mode aerosol and more stable in different seasons and different types of land surfaces. As aerosols over land are mostly composed of fine modes and coarse modes, we need farther study on the aerosol retrieval, such as importing scalar signal to vector method considering the different instrument characteristics and retrieval strategies of scalar and vector methods.

Key words: remote sensing; fine mode aerosol; polarization; size distribution