

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2021.04.001

# 基于卫星多角度观测的气溶胶遥感反演算法研究进展

吴孔逸<sup>1</sup>, 侯伟真<sup>2\*</sup>, 史正<sup>2</sup>, 许华<sup>2</sup>, 温亚南<sup>2</sup>

(1 自然资源部信息中心, 北京 100812;

2 中国科学院空天信息创新研究院, 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 对国际上双角度、多角度及偏振卫星气溶胶遥感反演算法的最新研究进展进行了综述。双角度遥感作为多角度遥感的一种典型情况, 算法的核心思想同样适用于两个传感器在几乎同时对同一地区进行观测的情况。以双角度观测的沿轨扫描辐射计 (ATSR) 系列传感器为例, 总结了 ADV (ATSR dual view)、SU (Swansea University) 和 ORAC (Oxford-RAL aerosol and cloud) 最优估计等典型的气溶胶反演算法原理及最新研究进展。在此基础上, 以当前国际上采用多角度观测的星载和机载传感器为例, 介绍并总结了星载多角度标量反演算法、星载和机载多角度偏振反演方法的最新研究进展。通过系统发掘双角度和多角度传感器在气溶胶卫星及机载遥感研究中的优势和潜力, 为我国多角度及偏振遥感反演算法的设计和发展提供了有效参考和关键支撑。

**关键词:** 气溶胶遥感; 双角度; 多角度; 偏振; 反演算法

中图分类号: P412

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2021)04-283-016

## Research Progress of Aerosol Remote Sensing Retrieval Algorithm Based on Satellite Multi-Angle Observation

WU Kongyi<sup>1</sup>, HOU Weizhen<sup>2\*</sup>, SHI Zheng<sup>2</sup>, XU Hua<sup>2</sup>, WEN Yanan<sup>2</sup>

(1 Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China;

2 State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The latest research progress of international dual-angle, multi-angle and polarization aerosol satellite remote sensing inversion algorithms are reviewed. As a special case of multi-angle remote sensing, the core idea of inversion algorithm for dual-angle aerosol remote sensing can also be applicable to the situation where two sensors are observing the same area almost simultaneously. Taking the dual-angle observation along-track scanning radiometer (ATSR) series sensor as an example, the algorithm principles and latest research progress of the typical

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金项目, 41871269, 41671364)

**作者简介:** 吴孔逸 (1980 - ), 河南商城人, 高级工程师, 主要从事空间大数据处理与应用机制研究。 **E-mail:** kywu@infomail.mnr.gov.cn

**收稿日期:** 2020-11-03; **修改日期:** 2021-01-22

**\*通信作者.** E-mail: houwz@radi.ac.cn

aerosol inversions, including ATSR dual view (ADV), Swansea University (SU) and Oxford-RAL aerosol and cloud (ORAC) optimal estimation inversion algorithms, are summarized systematically. On this basis, taking the current international spaceborne and airborne sensors with multi-angle observations as examples, the latest research progress of spaceborne multi-angle scalar inversion algorithms and spaceborne and airborne multi-angle polarization inversion methods are further summarized and discussed, respectively. By this means, the application advantages and potential of satellite and airborne multi-angle (including dual-angle) sensors in aerosol remote sensing research are explored and demonstrated, which provides an effective reference and key support for the design and development of multi-angle and polarization remote sensing inversion algorithms in China.

**Key words:** aerosol remote sensing; dual-angle; multi-angle; polarization; inversion algorithms

## 0 引言

气溶胶是大气中重要的组成部分,对全球辐射平衡、气候变化和人类健康等起着直接或间接的作用<sup>[1-6]</sup>。气溶胶光学厚度 (Aerosol optical depth, AOD) 是描述气溶胶光学特性的重要参数,也是地基和卫星遥感需要反演的首要光学参数。地基观测可以获得某一位置高时间分辨率的气溶胶特性,却无法对较大的范围进行监测<sup>[7,8]</sup>。相比于地基观测,星载监测气溶胶具有范围广、成本低、不受地理条件约束等特点<sup>[9,10]</sup>。针对气溶胶卫星遥感反演,由于要用少量观测来估计复杂的地气系统,本质上属于一个“病态” (Ill-posed) 反演问题<sup>[11]</sup>,而对应地表反射率的准确估计和地气解耦是其中的关键<sup>[12]</sup>。

搭载在美国 EOS (Earth observation system) 系列卫星上的中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 是国际上具有代表性的单角度多光谱传感器,其气溶胶反演方法主要包括基于地表反射率波段传递的暗目标 (Dark target, DT) 算法<sup>[13-15]</sup>和基于全球地表反射率库的深蓝 (Deep blue, DB) 算法<sup>[16,17]</sup>。搭载在风云三号 (FY-3) 卫星上的中分辨率光谱成像仪 (Medium-resolution spectral imager, MERSI), 是我国发展的与 MODIS 类似的传感器; 杨磊库等<sup>[18]</sup>通过借鉴 MODIS 的 DT 算法思想,针对升级版的 MERSI-II 传感器,进一步构建了全球适用的陆地气溶胶反演算法。

随着新型传感器的不断发展,卫星遥感对地观测模式也从最初比较典型的单角度观测,发展到现在流行的双角度和多角度观测。对于城市、沙漠等亮地表情况,气溶胶的标量贡献相对于地表反射贡献一般要小很多,属于弱信息,如果缺少地表先验知识很难进行有效的地气解耦。由于大气和地表对大气层顶卫星观测贡献的比率随不同观测角度而有所不同,多角度气溶胶遥感针对这一特性将二者进行分离<sup>[19-21]</sup>。此外,最新发展的偏振探测模式通过与多光谱和多角度的观测方式相结合,使得对气溶胶的观测信息得以丰富,可以获取更多气溶胶微物理和光学参数信息<sup>[22-24]</sup>,有助于气溶胶特性的提取,为大气气溶胶定量遥感反演提供了新的途径。

双角度是多角度遥感的一种特殊情况,欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 研制的沿轨迹扫描辐射计 (Along-track scanning radiometer, ATSR) 系列传感器是经典的双角度观测传感器,对应的 ATSR 气溶胶反演方法是国际上双角度遥感气溶胶中最具代表性的经典方法<sup>[25-28]</sup>,其核心思想也同样适用于两个传感器在几乎同时对同一地区进行观测的情况<sup>[29,30]</sup>。AASTR (Advanced along-track scanning radiometer) 的后续传感器 (Sea and land surface temperature radiometer, SLST, 也称 SLSTR) 已和 OLCI (Ocean and land color instrument) 一同搭载在 Sentinel-3 卫星上,可为 OLCI 传感器的多光谱观测数据进行同步大气校正。

目前,我国也在发展自己的星载大气同步校正仪,如搭载在高分多模卫星上的 SMAC (Synchronization monitoring atmospheric corrector) 和环境减灾二号 A/B 卫星上的 PSAC (Polarized scanning atmospheric corrector) 等<sup>[31-34]</sup>,通过多光谱和偏振观测模式相结合来同步探测和反演关键大气参数,为搭载在同一卫星平台上的主载荷传感器提供大气同步校正,以提升卫星遥感图像大气校正的质量。ATSR 系列传感器双角度观测的通道设计及其双角度气溶胶遥感的反演方法,可为我国星载大气同步校正仪的研制和应用提供很好的借鉴。本文将针对国际上双角度、多角度及偏振卫星遥感反演算法的最新研究进展进行总结和综述,并为我国新发展的多角度观测卫星系列载荷气溶胶反演算法的研究提供有力的支撑。

## 1 ATSR 双角度气溶胶反演

### 1.1 ATSR 系列传感器

迄今为止,搭载 ATSR 系列传感器的卫星已经发射了 5 颗。其中, ATSR-1 搭载在 ERS-1 卫星上,于 1991 年 7 月发射; ATSR-2 搭载在 ERS-2 卫星上,于 1995 年 4 月发射; AATSR 搭载在 ENVISAT (Environment satellite) 卫星上,于 2002 年 3 月发射<sup>[35]</sup>。2012 年 4 月 AATSR 传感器停止工作, AATSR 的后续传感器为搭载在哨兵 3A/3B (Sentinel-3A/3B) 上的 SLSTR, 分别于 2016 年 2 月 16 日和 2019 年 8 月 25 日发射升空。其中, ATSR-1 传感器的波段设计主要用于红外探测获取海面温度,从 ATSR-2 开始设置了可见光和近红外波段的通道。ATSR-2 和 AATSR, 统称 (A)ATSR, 通过采用底向 (0°) 和前向 (55°) 两个角度在短时间联合进行对地观测,进而获取对同一区域两个角度的多光谱观测信息,对应的 7 个波段分别为 0.56、0.66、0.87、1.61、3.70、10.80、12.00  $\mu\text{m}$ , 其中前 4 个波段可用于大气气溶胶的研究<sup>[36]</sup>。

SLSTR 继承了 AATSR 的双角度观测设计,但与 AATSR 不同的是它的双角度分别为底向和后向,并在 AASTR 原有波段的基础上添加了新的波段,与 (A)ATSR 相比, SLSTR 增加了 1.38  $\mu\text{m}$  和 2.25  $\mu\text{m}$  两个红外通道,以及用于火点探测的 3.74  $\mu\text{m}$  和 10.95  $\mu\text{m}$  通道,共 11 个波段,可以更好地用于大气气溶胶的研究<sup>[37]</sup>。SLSTR 底向的扫描幅宽为 1675 km,前向的扫描幅宽为 750 km。搭载在同一卫星平台上的 OLCI 传感器继承了 MERIS (Medium resolution imaging spectrometer) 传感器的设计,并将光谱通道在 0.40~0.90  $\mu\text{m}$  的范围内从 15 个增加到了 21 个,5 个相机呈扇形分布进行穿轨 (Cross-track) 观测,幅宽约为 1269 km<sup>[38,39]</sup>。在可见光和近红外波段, SLSTR 的像元分辨率为 500 m,双角度观测的幅宽覆盖 OLCI,可以对其进行同步大气校正<sup>[35,40]</sup>。

### 1.2 ADV 算法

ATSR-DV (ATSR dual view) 算法简称 ADV 算法,其核心是通过大气层顶观测的表观反射率与由一个辐射传输模型建立的查找表 (Look-up table, LUT) 进行结果对比,从无云的像元中反演得到大气气溶胶的光学特性<sup>[41]</sup>。该算法同时利用双角度和多波段的信息进行气溶胶反演,而不需要事先确定地表反射率的信息。

ADV 气溶胶反演算法基于如下两个假设:

1) 不同类型气溶胶混合体在大气层顶的表观反射率可由其中每种气溶胶的表观反射率加权平均得到<sup>[42]</sup>。

2) 在一定的光学厚度范围内,给定波段  $\lambda$  对应程辐射的表观反射率可近似表示为一个与气溶胶光学厚度  $\tau$  有关的线性形式<sup>[43,44]</sup>,即

$$\rho_a(\lambda) = \rho_0(\lambda) + c(\lambda) \tau(\lambda), \quad (1)$$

式中:  $\rho_a(\lambda)$  为程辐射的表观反射率,  $\rho_0(\lambda)$  为无气溶胶大气  $\tau = 0$  时程辐射的表观反射率,  $c(\lambda)$  为斜率。

对于一个朗伯 (Lambert) 地表, 卫星传感器在大气层顶 (Top of the atmosphere, TOA) 接收到的表观反射率可以表示为

$$\rho_{\text{TOA}}(\lambda) = \rho_a(\lambda) + \frac{\rho_s(\lambda)}{1 - \rho_s(\lambda) S(\lambda)} T(\lambda), \quad (2)$$

式中:  $\rho_{\text{TOA}}(\lambda)$  为表观反射率,  $\rho_a(\lambda)$  为程辐射的反射率,  $\rho_s(\lambda)$  为地表反射率,  $T(\lambda)$  为总透过率 (太阳-地表-卫星),  $S(\lambda)$  为半球反照率。

在双角度反射算法中, 设两个方向的地表反射率之间的关系<sup>[45]</sup>为

$$\rho_{s,f}(\lambda) = k \rho_{s,n}(\lambda), \quad (3)$$

式中:  $\rho_{s,f}(\lambda)$  为前向 (Forward) 的地表反射率;  $k$  为与波段无关的系数, 主要与太阳和卫星的观测角度有关;  $\rho_{s,n}(\lambda)$  为底向 (Nadir) 的地表反射率。

通过结合两个角度的观测信息, 联合式 (2) 和 (3), 并假设  $\rho_s(\lambda) S(\lambda) \ll 1$  可得到

$$\frac{\rho_{\text{TOA},n}(\lambda) - \rho_{a,n}(\lambda)}{T_n(\lambda)} = \frac{\rho_{\text{TOA},f}(\lambda) - \rho_{a,f}(\lambda)}{k T_f(\lambda)}. \quad (4)$$

这样可以将未知的地表反射率  $\rho_s(\lambda)$  消去, 系数  $k$  可由  $1.6 \mu\text{m}$  波段的两个角度的表观反射率来确定 (受大气影响较小)。将式 (1) 带入式 (4) 中, 可推导得到气溶胶光学厚度 (AOD) 的迭代公式为

$$\tau^i(\lambda) = \left[ \frac{\rho'_n(\lambda)}{T_n^{i-1}(\lambda)} - \frac{\rho'_f(\lambda)}{k^i T_f^{i-1}(\lambda)} \right] \left[ \frac{c_n(\lambda)}{T_n^{i-1}(\lambda)} - \frac{c_f(\lambda)}{k^i T_f^{i-1}(\lambda)} \right]^{-1}, \quad (5)$$

式中:  $\rho'_n(\lambda) = \rho_{\text{TOA}}(\lambda) - \rho_a(\lambda)$ , 第  $i$  次迭代的  $k$  值可以表示为

$$k^i = \frac{\rho_{\text{TOA},f}(1.6 \mu\text{m}) - \rho_{a,f}^{i-1}(1.6 \mu\text{m})}{\rho_{\text{TOA},n}(1.6 \mu\text{m}) - \rho_{a,n}^{i-1}(1.6 \mu\text{m})}, \quad (6)$$

式中:  $\rho_{\text{TOA},f}(1.6 \mu\text{m})$  和  $\rho_{\text{TOA},n}(1.6 \mu\text{m})$  分别为卫星遥感前向和底向实际观测的表观反射率值。

利用式 (5) 和 (6), 从  $\tau = 0$  开始进行迭代, 计算得到  $1.6 \mu\text{m}$  波段对应程辐射反射率  $\rho_{a,f}^0$  和  $\rho_{a,n}^0$  的值, 初始的  $k$  可直接由  $\rho_{\text{TOA},f}(1.6 \mu\text{m})$  和  $\rho_{\text{TOA},n}(1.6 \mu\text{m})$  取比值得到, 对应参数的  $T_n^{i-1}$ 、 $T_f^{i-1}$ 、 $c_n$ 、 $c_f$ 、 $\rho'_n$  和  $\rho'_f$  都可以利用查找表或辐射传输模式模拟计算得到, 进而可以迭代得到对应波段的  $\tau$  值。一般情况下, 要使 AOD 达到 1% 的收敛精度, 迭代几次即可满足对应的收敛条件<sup>[46,47]</sup>。

此外,  $k$  比值法为 ADV 迭代法的进一步改进, 由式 (4) 可得到

$$k = \frac{\rho_{\text{TOA},f}(\lambda) - \rho_{a,f}(\lambda) T_n(\lambda)}{\rho_{\text{TOA},n}(\lambda) - \rho_{a,n}(\lambda) T_f(\lambda)}, \quad (7)$$

这样每个波段 ( $0.87 \mu\text{m}$  除外, 植被在该波段有较强的反射特性) 的  $k$  值可以通过模式模拟或直接查表计算得到 (AOD 都归结到同一波段上), 而  $1.6 \mu\text{m}$  对应的初始  $k$  为

$$k = \frac{\rho_{s,f}(\lambda = 1.6 \mu\text{m})}{\rho_{s,n}(\lambda = 1.6 \mu\text{m})}, \quad (8)$$

进而可引入反演所需的代价函数

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \left( \frac{k_l^m - k_l^c}{k_l^m + 0.01} \right)^2}, \quad (9)$$

式中:  $k_l^m$  与  $k_l^c$  分别为第  $l$  通道比值  $k$  的观测值与计算值,  $l$  对应 ATSR 传感器的 3 个波段分别为 0.56、0.66、1.60  $\mu\text{m}$ ; 当  $\varepsilon$  取最小值时 (或取前几个最小值), 对应的 AOD 即为反演得到的 AOD。

ADV 算法, 包括迭代反演方法和  $k$  比值反演方法, 都是基于同一像元地表的两个观测方向地表反射率的比值不变这个基础假设。Flowerdew 和 Haigh<sup>[45]</sup>已验证了这种假设关系是成立的, 比值  $k$  在大部分区域主要与太阳和卫星的观测角度有关, 与观测波段基本无关。其中, 迭代方法只能利用单个波段的观测信息进行迭代反演; 而  $k$  比值反演方法可以结合多个波段的观测信息进行联合反演。

### 1.3 SU 算法

SU-AATSR 算法以斯旺西大学 (Swansea University) 命名, 也是一种针对 (A)ATSR 卫星气溶胶参数反演的常用方法, 它主要是以 North 提出的适用于 (A)ATSR 卫星观测的地表反射率经验模型为基础<sup>[48]</sup>。

Grey 等<sup>[49,50]</sup>基于 (A)ATSR 观测研究了地表二向反射, 给出了与波段和观测几何相关的地表反射率经验模型

$$\rho_{\text{mod}}(\lambda, \Omega) = (1 - D(\lambda))v(\Omega)w(\lambda) + \frac{\gamma w(\lambda)}{1 - g} [D(\lambda) + g(1 - D(\lambda))], \quad (10)$$

式中:  $\Omega$  为观测几何 (ATSR-2 和 AATSR 的垂直和斜向观测);  $D(\lambda)$  为漫射辐照度的分量;  $v(\Omega)$  只与观测几何有关;  $w(\lambda)$  只与波长有关;  $\gamma$  为多次散射系数, 一般取 0.3;  $g$  的表示形式为

$$g = (1 - \gamma)w(\lambda), \quad (11)$$

在反演过程中, 利用模型校正后的地表反射率  $\rho_s$  与模拟得到的  $\rho_{\text{mod}}$  值误差最小, 对应的误差函数可表示为

$$E_{\text{mod}} = \sum_{\Omega=1}^2 \sum_{\lambda=1}^4 [\rho_s(\lambda, \Omega) - \rho_{\text{mod}}(\lambda, \Omega)]^2, \quad (12)$$

这样就可以反演得到 AOD 和对应的气溶胶模型参数。

在 AOD 和大气气溶胶模型反演过程中, 式 (12) 中需要地表反射率  $\rho_s(\lambda, \Omega)$  可通过对表观反射率进行大气校正得到<sup>[51]</sup>, 即

$$\rho_s(\lambda) = \frac{\rho'_{\text{TOA}}(\lambda)}{1 + \rho'_{\text{TOA}}(\lambda)S(\lambda)}, \quad (13)$$

其中

$$\rho'_{\text{TOA}}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{TOA}}(\lambda) - \rho_a(\lambda)}{T(\lambda)}, \quad (14)$$

式中:  $\rho_{\text{TOA}}(\lambda)$ 、 $\rho_a(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$  和  $T(\lambda)$  的定义与式 (2) 中的符号定义一致。

### 1.4 ORAC 算法

ORAC (Oxford-RAL aerosol and cloud) 算法是由牛津大学 (University of Oxford) 和卢瑟福·阿普尔顿实验室 (Rutherford Appleton Laboratory, RAL) 共同开发完成, 并由早期的 ATSR-2 算法改进而来, 可以反演气溶胶光学厚度、粒子有效半径和地表反射率等参数<sup>[52,53]</sup>。该算法首先基于最优估计 (Optimal estimation, OE) 理论建立耦合先验知识约束的价值函数, 然后通过优化迭代方法获得价值函数的最优解, 进而实现气溶胶和地表多参数的联合反演。

最优估计反演一般通过定义一个前向模型  $F$  来描述卫星观测数据对气溶胶和地表的依赖, 其表达式为

$$y = F(x) + \epsilon, \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为对应的观测向量,  $\mathbf{x}$  为包含需要反演参数的状态向量,  $\epsilon$  为误差向量。基于贝叶斯原理和高斯估计,  $\mathbf{y}$  对于  $\mathbf{x}$  的概率分布函数可以表示为

$$-2\ln P(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a), \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{S}_\epsilon$  为测量误差协方差矩阵,  $\mathbf{x}_a$  为对应状态向量的先验参数向量,  $\mathbf{S}_a$  为先验误差协方差矩阵。反演问题就是寻找价值函数式 (16) 的极小值, 即  $\mathbf{x}$  相对于  $\mathbf{y}$  的概率最大化。

ORAC 反演算法利用列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM) 数值优化方法对价值函数进行极小化处理, 即为一个优化迭代的过程。若  $\mathbf{y}$  是  $m$  维的,  $\mathbf{x}$  是  $n$  维的, 则  $\mathbf{x}$  的迭代表达式为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \left( \mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}_k^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K}_k + \gamma \mathbf{D} \right)^{-1} \left[ \mathbf{K}_k^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})) - \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) \right], \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为雅可比 (Jacobian) 矩阵, 下标  $k$  为当前迭代的次数,  $\gamma$  为可变参数,  $\mathbf{D}$  为一个  $n \times n$  的对角尺度矩阵。  $\mathbf{K}$  为一个  $m \times n$  的矩阵, 其中的元素形式为

$$k_{i,j} = \frac{\partial f_i(\mathbf{x})}{\partial x_j}. \quad (18)$$

$\gamma$  是关系到 LM 算法效率和鲁棒性的一个关键参数, 在迭代过程中, ORAC 采用因子 10 来增大或减小  $\gamma$  的大小。矩阵  $\mathbf{D}$  是用来保证状态参数在相同的量级范围内, 以保证数值计算的稳定性。

在 LM 优化算法中, 当  $\mathbf{x}$  满足一个收敛标准或当迭代次数已超出一个设置的最大值时 (即迭代不收敛), 迭代过程停止。与传统反演方法相比, 最优估计方法具有两个明显的优势: 一是将先验知识和观测信息一起包含在反演过程中, 将反演问题转换为一个最优化问题, 利用尽可能多的信息来约束反演; 二是将前向模型和参数的多源误差一起纳入到反演过程中, 通过为反演误差提供约束和对误差传递的严格控制, 在算法上保证了反演的精度。

## 2 多角度气溶胶反演

### 2.1 星载多角度标量反演算法

MISR 传感器的全称为多角度成像光谱仪 (Multiangle imaging spectroradiometer), 与 MODIS 传感器一同搭载在 Terra 卫星上, 于 1999 年 12 月升空。MISR 是可提供多角度、连续、高空间分辨率的传感器, 其主要功能是全球多角度地形地物数据的获取。MISR 采用  $0^\circ$ 、 $\pm 26.1^\circ$ 、 $\pm 45.6^\circ$ 、 $\pm 60.0^\circ$  和  $\pm 70.5^\circ$  (符号“ $\pm$ ”表示前向和后向) 共 9 个不同的角度进行对地观测, 每个角度都设有 4 个通道 (446.4、557.5、671.7、866.4 nm), 共 36 个通道, 可获得 275、550、1100 m 空间分辨率的观测<sup>[19]</sup>。

MISR 气溶胶反演算法采用的气溶胶模型由一系列不同的气溶胶组成, 每一种气溶胶混合物最多可以包括 3 种不同的气溶胶组分, 粒子谱分布采用对数谱分布。MISR 多角度气溶胶反演算法假定地球表面每个  $17.6 \text{ km} \times 17.6 \text{ km}$  的区域内大气气溶胶在水平方向上成分均一, 并包含 256 个  $1.1 \text{ km} \times 1.1 \text{ km}$  的子区域。将一个像元表观辐亮度可以表示为程辐射和地表贡献两部分, 选取区域中所有样本的最小值作为偏移等效反射率, 然后定义散射矩阵 (协方差矩阵), 将协方差矩阵分解成特征值和特征向量的形式, 进而利用经验正交函数分解 (Empirical orthogonal function, EOF) 方法实现地气的分离<sup>[54-57]</sup>。

对于 EOF 方法, 假设一个像元的观测辐亮度信息  $L_{x,y,\lambda}$ <sup>[58]</sup> 可以表示为

$$L_{x,y,\lambda}(\theta_0, \theta_v, \varphi) = L_{\lambda}^{\text{atm}}(\theta_0, \theta_v, \varphi) + L_{x,y,\lambda}^{\text{surf}}(\theta_0, \theta_v, \varphi), \quad (19)$$

式中:  $L_{\lambda}^{\text{atm}}$  和  $L_{x,y,\lambda}^{\text{surf}}$  分别表示程辐射和地表贡献部分, 下标  $x$  和  $y$  表示像元的位置;  $\lambda$  表示采用的波段;  $\theta_0$ 、 $\theta_v$  和  $\varphi$  分别为对应的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。选取  $17.6 \text{ km} \times 17.6 \text{ km}$  的区域内所有有效像元的最小值作为偏移等效反射率  $L_{\text{bias},\lambda}$ , 定义协方差矩阵

$$\begin{aligned} C_{\lambda}(i, j) &= \sum_{x,y} [L_{x,y,\lambda}(i) - L_{\text{bias},\lambda}(i)] [L_{x,y,\lambda}(j) - L_{\text{bias},\lambda}(j)] \\ &= \sum_{x,y} [L_{x,y,\lambda}^{\text{surf}}(i) - L_{\text{bias},\lambda}^{\text{surf}}(i)] [L_{x,y,\lambda}^{\text{surf}}(j) - L_{\text{bias},\lambda}^{\text{surf}}(j)], \end{aligned} \quad (20)$$

式中  $i$  和  $j$  表示 MISR 卫星传感器 9 个不同的观测角度的编号。通过 EOF 处理, 协方差矩阵  $C_{\lambda}$  可表示为特征值和特征向量组合的形式, 则地表贡献部分可以表示为

$$L_{x,y,\lambda}^{\text{surf}}(i) = L_{\text{bias},\lambda}^{\text{surf}}(i) + \sum_n A_{x,y,\lambda}^n f_{n,\lambda}(i), \quad (21)$$

式中  $A_{x,y,\lambda}$  为对应的系数。对应地,

$$L_{x,y,\lambda}(i) = L_{\lambda}^{\text{atm}}(i) + L_{\text{bias},\lambda}^{\text{surf}}(i) + \sum_n A_{x,y,\lambda}^n f_{n,\lambda}(i). \quad (22)$$

因此, 在  $17.6 \text{ km} \times 17.6 \text{ km}$  的区域范围的等效辐亮度可以表示为

$$\langle L_{\lambda}(i) \rangle_{x,y} = L_{\lambda}^{\text{atm}}(i) + L_{\text{bias},\lambda}^{\text{surf}}(i) + \sum_n \langle A_{\lambda}^n \rangle_{x,y} f_{n,\lambda}(i) = L_{\lambda}^{\text{atm}}(i) + \sum_n B_{\lambda}^n f_{n,\lambda}(i), \quad (23)$$

其中的系数

$$B_{\lambda}^n = \sum_n [\langle L_{\lambda}(i) \rangle_{x,y} - L_{\lambda}^{\text{atm}}(i)] f_{n,\lambda}(i). \quad (24)$$

在此基础上, 通过对设定的代价函数取极小, 即可实现气溶胶参数的反演。

在卫星星下点的观测角度上, 由于亮地表等原因, 陆地上空的轻度雾霾很难被探测到, 然而 MISR 通过多角度观测可以有效探测轻度灰霾<sup>[20]</sup>。这是因为大气程辐射的光程距离越大, 灰霾对程辐射的影响就越大, 观测结果也就越明显。在 ATSR 的气溶胶参数反演工作中, 可考虑借用 MISR 所采用的混合气溶胶模型, 但是由于角度太少, 只有两个特征值, 经验正交函数方法不适用。同样, MISR 由于缺少  $1.6 \mu\text{m}$  的波段设置, 也不利用 ADV 方法进行气溶胶参数的反演。

Zhang 等<sup>[59]</sup>将 EOF 方法推广到了具有多角度探测能力的法国“太阳伞” (Polarization and anisotropy of reflectances for atmospheric science coupled with observations from a lidar, PARASOL) 卫星 POLDER (Polarization and directionality of the earth's reflectances) 传感器观测数据的反演处理上, 实现了 POLDER 多角度地表反射贡献的估算。同时结合 6SV 辐射传输模式建立气溶胶反演查找表, 最终实现了多光谱和多角度约束条件的 AOD 的反演。此外, 与从传感器设置方面设计多角度气溶胶反演算法的思路有所不同, 还有一些基于卫星单角度观测合成多角度观测的气溶胶反演算法方面的研究, 如 Lyapustin 等<sup>[60-62]</sup>所发展的 MAIAC (Multiangle implementation of atmospheric correction) 算法和相关评估应用<sup>[63,64]</sup>以及 Xue 等<sup>[65]</sup>所提出的 SRAP (Synergetic retrieval of aerosol properties) 算法。

## 2.2 星载和机载多角度偏振反演算法

法国的 POLDER 系列传感器可以获取多光谱、多角度的辐射 (标量) 和偏振观测信息, 在提高大气参数反演精度方面取得了较好效果。一般情况下, 卫星在大气层顶观测的偏振信息主要来自大气, 地表的偏

振反射贡献相比大气程辐射的偏振贡献要小很多<sup>[66,67]</sup>;通过对地表偏振反射及瑞利 (Rayleigh) 散射偏振贡献部分的进一步订正, 可实现对陆地上空气溶胶参数的反演<sup>[68-75]</sup>。其中, Dubovik 等所发展的 GRASP (Generalized retrieval of aerosol and surface properties) 方法是国际上广泛认可的、同最具代表的最优化反演模型和算法<sup>[11,76-80]</sup>。在多角度偏振卫星遥感反演过程中, 代价函数一般采用多角度偏振表观反射率的模拟值与真实观测值的残差取极小的形式, 由于残差在多角度观测时的累积效应导致最优模型选取出现较大偏差, 会进一步影响气溶胶的反演精度。Zhang 等<sup>[72]</sup>提出了一种基于残差分类排序 (Grouped residual error sorting, GRES) 的细颗粒物反演新策略, 通过对模拟残差、光学厚度分类排序和查找, 有效减少了各类误差的多角度累计效应, 实现最接近真实大气细颗粒物模型和参数的优选。Fan 等<sup>[81]</sup>基于多角度偏振观测和神经网络模型对海洋上空的气溶胶参数进行了反演处理和结果验证, 阐明了神经网络可用于海洋上空气溶胶的业务化反演。

继法国 POLDER 系列传感器之后, 我国高分五号 (GF-5) 卫星搭载的大气气溶胶多角度偏振探测仪 (Directional polarimetric camera, DPC) 已成为全球气候变化、污染传输和气溶胶特性研究领域重要的数据来源<sup>[82-85]</sup>。Li 等<sup>[86]</sup>针对 DPC 提出了一套基于最优化的反演理论框架, 综合利用 DPC 多角度的强度和偏振观测测量进行气溶胶和地表多个参数的联合反演, 并利用 UNL-VRM (Unified linearized vector radiative transfer model) 系统地进行了信息量分析方面的研究<sup>[87,88]</sup>。这里, 最优化反演建模所采用的代价函数<sup>[86]</sup>为

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\gamma_1[\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] + \frac{1}{2}\gamma_2(\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a), \quad (25)$$

对应的梯度向量为

$$\nabla_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = -\gamma_1 \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] + \gamma_2 \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a), \quad (26)$$

式中:  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  表示对应观测部分和先验部分的系数, 用来进一步调整两部分对代价函数的贡献比率, 其他的参数定义与式 (17) 一致。要进行多参数联合反演, 等价于如下形式的最优化问题<sup>[89]</sup>

$$\min J(\mathbf{x}), \quad \text{s.t. } \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}, \quad (27)$$

式中:  $\mathbf{l}$  和  $\mathbf{u}$  为对应的边界约束条件, 需要由先验知识来确定, 并采用含有约束的拟牛顿算法 L-BFGS-B 进行优化模型的迭代求解<sup>[90]</sup>。

为了减少每个波段需要反演的地表核函数的系数, 对核驱动的地表双向反射分布函数 (Bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 形式进行改进和简化<sup>[91]</sup>, 即

$$r_\lambda(\mu_0, \mu_v, \phi) = k(\lambda) \left[ 1 + k_1 f_{\text{geom}}(\mu_0, \mu_v, \phi) + k_2 f_{\text{vol}}(\mu_0, \mu_v, \phi) \right], \quad (28)$$

式中:  $f_{\text{geom}}$  和  $f_{\text{vol}}$  为与观测几何有关几何光学和体积表面散射的核函数, 系数  $k(\lambda)$  与波长有关, 而  $k_1$  和  $k_2$  与波长无关, 这样针对 DPC 传感器 443、490、565、670、865 nm 的 5 个波段的观测就需要反演 7 个 BRDF 核参数, 需要反演的 BRDF 参数数量可大大减少。针对地表偏振反射贡献的描述, 引入单参数的地表偏振双向反射分布函数 (Bidirectional polarized reflectance distribution function, BPDF) 模型<sup>[92]</sup>。因此, 包含反演参数的状态向量可以表示为

$$\mathbf{x} = \left[ V_0^f, V_0^c, f(\lambda_1), \dots, f(\lambda_5), k_1, k_2, C \right]^T, \quad (29)$$



其中  $V_0^f$  和  $V_0^c$  分别表示细模态和粗模态的体积柱浓度, 具体包括 2 个气溶胶参数、7 个 BRDF 参数和 1 个 BPDF 参数。在确定选用的气溶胶模型及反演得到  $V_0^f$  和  $V_0^c$  的基础上, 可进一步得到光谱的 AOD 和 FMF (Fine-mode fraction)<sup>[93]</sup>, 即

$$\tau_a(\lambda) = \tau_a^f(\lambda) + \tau_a^c(\lambda) = \frac{3V_0^f}{4r_{\text{eff}}^f} Q_{\text{ext}}^f(\lambda) + \frac{3V_0^c}{4r_{\text{eff}}^c} Q_{\text{ext}}^c(\lambda), \quad (30)$$

$$\text{FMF}(\lambda) = \frac{\tau_a^f(\lambda)}{\tau_a(\lambda)}, \quad (31)$$

式中:  $\tau_a(\lambda)$  表示可进一步反演得到的 AOD,  $Q_{\text{ext}}$  为对应的消光效率因子, 可由 UNL-VRM 模式所包含的 Mie 散射模块计算得到。

在此最优化反演框架的基础上, Zheng 等<sup>[94]</sup>利用 POLDER 多角度偏振观测数据反演了细、粗模态气溶胶体积柱浓度和光谱的气溶胶光学厚度, 反演结果与 POLDER 官方产品具有较好的一致性。Ge 等<sup>[95]</sup>利用地表偏振反射率基本不随波长变化特性, 发展了一种新的细模态气溶胶光学厚度反演算法, 有效地避免使用 BPDF 模型带来的估算误差, 实现了气溶胶参数和地表偏振反射率的同时反演。此外, 基于 SONET (Sun-sky radiometer observation network) 16 个站点 7 年连续的地基观测<sup>[8]</sup>, Li 等<sup>[96]</sup>建立了 10 种“基因”模态气溶胶模型, 通过组合后可表述中国区域 94% 以上的气溶胶特征, 显著优于国外模型, 为反演中所需的普适气溶胶模型提供了关键参考。针对机载偏振传感器的观测, 基于传统的查找表方法, Waquet 等<sup>[97,98]</sup>开展了针对 MicroPOL (Micro polarimeter) 气溶胶反演研究, Wang 等<sup>[99,100]</sup>和 Qie 等<sup>[101]</sup>分别开展了针对我国 AMPR (Advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer) 传感器观测的气溶胶光学厚度反演研究。基于最优估计方法, Waquet 等<sup>[102]</sup>和 Wu 等<sup>[103]</sup>分别对 RSP (Research scanning polarimeter) 进行了气溶胶多参数的反演, Xu 等<sup>[104–106]</sup>对 AirMSPI (Airborne multi-angle spectropolarimetric imager) 进行了反演, 并分别利用地基观测数据对气溶胶反演参数进行了精度验证。之后, Puthukkudy 等<sup>[107]</sup>对 AirHARP (Airborne hyper angular rainbow polarimeter) 进行了气溶胶多参数的反演, Fu 等<sup>[108]</sup>对 SPEX (Spectropolarimeter for planetary exploration) 机载观测进行反演, 进一步阐述了多角度偏振观测在气溶胶多参数遥感反演上的独特优势。另外, 针对美国 TMEPO (Tropospheric emissions: monitoring of pollution) 静止卫星计划的 GEO-TASO (Geostationary trace gas and aerosol sensor optimization) 机载高光谱传感器, Hou 等<sup>[109–111]</sup>基于主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 进行光谱重建的方法, 综合利用尽可能多的高光谱观测信息, 建立了面向静止高光谱卫星遥感的气溶胶和地表多参数最优化反演理论框架和反演算法, 并利用地面实测数据对光谱的 AOD 和细粒子 AOD 反演结果进行了验证。

### 3 结 论

针对国际上多角度 (含双角度) 及偏振卫星遥感反演算法的最新研究进展进行总结和综述, 可为我国多角度及偏振遥感反演算法的设计和发展提供有效的参考和关键的支撑。ATSR 系列传感器采用的 ADV 算法利用两个观测角度地表反射率的比值关系进行地气解耦合, 避免了对先验地表反射率库的依赖, 实现了植被等暗地表条件下的气溶胶参数反演。SU 算法是一种基于地表经验模型的方法, 通过引入双角度观测条件下地表反射率模型的先验约束, 进而实现气溶胶参数的反演。ORAC 算法将先验知识和观测信息一起包含在反演过程中, 将反演问题转换为一个最优化问题, 利用优化方法进行迭代求解, 保证了反演的精度。这三

种典型的双角度气溶胶反演算法的不同在于气溶胶模型的选取和地气解耦合方法上的处理,从而为双角度气溶胶遥感反演提供了不同的解决方案。**MISR** 多角度气溶胶反演算法结合 9 个角度的观测信息,通过设定不同的混合气溶胶模型,利用经验正交函数的方法实现地气的分离,进而反演得到 **AOD** 等气溶胶参数。偏振遥感通过与多光谱和多角度的观测方式相结合,使得对气溶胶的观测信息更加丰富,更有助于气溶胶光学和微物理参数的提取。基于国际上新发展的最优估计反演框架,多角度偏振反演算法可充分利用多光谱、多角度、标量和偏振的观测信息来约束反演,实现气溶胶和地表关键参数的联合反演,为大气气溶胶定量遥感反演提供了新的途径。

## 参考文献:

- [1] Shindell D, Faluvegi G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(4): 294-300.
- [2] Hasekamp O P, Gryspeerdt E, Quaas J. Analysis of polarimetric satellite measurements suggests stronger cooling due to aerosol-cloud interactions [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5405.
- [3] Bellouin N, Boucher O, Haywood J, et al. Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements [J]. *Nature*, 2005, 438(7071): 1138-1141.
- [4] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(4): 221-227.
- [5] Shindell D, Faluvegi G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(4): 294-300.
- [6] Stephens G L, Li J, Wild M, et al. An update on earth's energy balance in light of the latest global observations [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(10): 691-696.
- [7] 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 Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [8] Li Z Q, Xu H, Li K T, et al. Comprehensive study of optical, physical, chemical and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of sun-sky radiometer observation network (SONET) measurements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(4): 739-755.
- [9] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 215-223.
- [10] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 474-511.
- [11] Dubovik O, Herman M, Holdak A, et al. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(5): 975-1018.
- [12] Sayer A M, Govaerts Y, Kolmonen P, et al. A review and framework for the evaluation of pixel-level uncertainty estimates in satellite aerosol remote sensing [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(2): 373-404.
- [13] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [14] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D13): D13211.
- [15] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2013, 6(11): 2989-3034.

- [16] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol properties over bright-reflecting source regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [17] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [18] Yang Leiku, Hu Xiuqing, Wang Han, *et al.* Preliminary test of quantitative capability in aerosol retrieval over land from MERSI-II onboard Fengyun-3D [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021. DOI: 10.11834/jrs.20200286.  
杨磊库, 胡秀清, 王涵, 等. 风云三号 D 星 MERSI-II 陆地气溶胶反演定量能力初探 [J]. 遥感学报, 2021. DOI: 10.11834/jrs.20200286.
- [19] Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, *et al.* Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) instrument description and experiment overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1072-1087.
- [20] Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, *et al.* Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(2): 155-171.
- [21] Wang Lei, Zhang Peng, Sun Ling, *et al.* Recent researches on aerosol opacity retrieval from multi-angle satellite radiometers [J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(1): 110-115.  
王磊, 张鹏, 孙凌, 等. 多角度气溶胶遥感研究进展 [J]. 遥感信息, 2012, 27(1): 110-115.
- [22] Fougnie B, Marbach T, Lacan A, *et al.* The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager-Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 219: 23-32.
- [23] Fougnie B, Chimot J, Vázquez-Navarro M, *et al.* Aerosol retrieval from space—how does geometry of acquisition impact our ability to characterize aerosol properties [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 256: 107304.
- [24] Waquet F, Léon J-F, Cairns B, *et al.* Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1228-1236.
- [25] Thomas G E, Carboni E, Sayer A M, *et al.* Oxford-RAL Aerosol and Cloud (ORAC): Aerosol Retrievals From Satellite Radiometers [M]. Kokhanovsky A.A., de Leeuw G. *Satellite Aerosol Remote Sensing over Land*. Berlin: Springer, 2009, 193-225.
- [26] Veefkind J P, De Leeuw G, Durkee P A. Retrieval of aerosol optical depth over land using two-angle view satellite radiometry during TARFOX [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(16): 3135-3138.
- [27] North P R J. Estimation of aerosol opacity and land surface bidirectional reflectance from ATSR-2 dual-angle imagery: Operational method and validation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D12): 4149.
- [28] Sogacheva L, Kolmonen P, Virtanen T H, *et al.* Determination of land surface reflectance using the AATSR dual-view capability [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(2): 891-906.
- [29] Tang J K, Xue Y, Yu T, *et al.* Aerosol optical thickness determination by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 327-334.
- [30] Mei L L, Xue Y, de Leeuw G, *et al.* Aerosol optical depth retrieval in the Arctic region using MODIS data over snow [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 234-245.
- [31] Zheng F X, Hou W Z, Sun X B, *et al.* Optimal estimation retrieval of aerosol fine-mode fraction from ground-based sky light measurements [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(4): 196.
- [32] Hou W Z, Li Z Q, Wang J, *et al.* Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: Information content analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 2215-2243.
- [33] Hou W Z, Li Z Q, Song C Y, *et al.* Study on errors propagation in synchronous atmospheric correction for HJ-2 satellites [C]. *Applied Optics and Photonics China (AOPC2019)*, 2019, 1133: 113380V.

- [34] Hou W, Li Z, Zheng F, *et al.* Retrieval of aerosol microphysical properties based on the optimal estimation method: Information content analysis for satellite polarimetric remote sensing measurements [C]. *Proceedings of the International Archived of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS TC III Mid-term Symposium "Development, Technologies and Applications in Remote Sensing"*, 2018, XLII-3, 533-537.
- [35] Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, *et al.* The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 37-57.
- [36] Llewellyn-Jones D, Remedios J. The advanced along track scanning radiometer (AATSR) and its predecessors ATSR-1 and ATSR-2: An introduction to the special issue [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 116: 1-3.
- [37] Coppo P, Ricciarelli B, Brandani F, *et al.* SLSTR: a high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(18): 1815-1830.
- [38] Shen M, Duan H, Cao Z, *et al.* Sentinel-3 OLCI observations of water clarity in large lakes in Eastern China: Implications for SDG 6.3.2 evaluation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111950.
- [39] Guan Q, Feng L, Hou X J, *et al.* Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246: 111890.
- [40] Bi S, Li Y, Wang Q, *et al.* Inland water atmospheric correction based on turbidity classification using OLCI and SLSTR synergistic observations [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1002.
- [41] Kolmonen P, Sogacheva L, Virtanen T H, *et al.* The ADV/ASV AATSR aerosol retrieval algorithm: Current status and presentation of a full-mission AOD dataset [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(6): 1-17.
- [42] Wang M, Gordon H R. Radiance reflected from the ocean-atmosphere system: Synthesis from individual components of the aerosol size distribution [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(30): 7088-7095.
- [43] Durkee P A, Jensen D R, Hindman E E, *et al.* The relationship between marine aerosol particles and satellite-detected radiance [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1986, 91(D3): 4063-4072.
- [44] Veefkind J P, de Leeuw G. A new algorithm to determine the spectral aerosol optical depth from satellite radiometer measurements [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29(10): 1237-1248.
- [45] 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, 22(13): 1693-1696.
- [46] Veefkind J P, de Leeuw G, Stammes P, *et al.* Regional distribution of aerosol over land, derived from ATSR-2 and GOME [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(3): 377-386.
- [47] Sundström A M, Kolmonen P, Sogacheva L, *et al.* Aerosol retrievals over China with the AATSR dual view algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 116: 189-198.
- [48] North P, Heckel A, Davies W, *et al.* Algorithm theoretical basis document (ATBD) instruments: ATSR-2 and AATSR algorithm: SU-ATSR [OL]. 2017. [https://climate.esa.int/sites/default/files/Aerosol\\_cci2\\_ATBD\\_ATSR\\_SU\\_v4.3.pdf](https://climate.esa.int/sites/default/files/Aerosol_cci2_ATBD_ATSR_SU_v4.3.pdf).
- [49] Grey W M, North P R, Los S O. Computationally efficient method for retrieving aerosol optical depth from ATSR-2 and AATSR data [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(12): 2786-2795.
- [50] Grey W M, North P R, Los S O, *et al.* Aerosol optical depth and land surface reflectance from multiangle AATSR measurements: Global validation and intersensor comparisons [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2184-2197.
- [51] Vermote E F, Tanré D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [52] Thomas G E, Poulsen C A, Curier R L, *et al.* Comparison of AATSR and SEVIRI aerosol retrievals over the northern Adriatic [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(S1): 85-95.
- [53] Thomas G E, Poulsen C A, Povey A C, *et al.* Algorithm theoretical basis document (ATBD) AATSR Oxford-RAL aerosol and cloud (ORAC) [OL]. 2017. [https://climate.esa.int/sites/default/files/Aerosol\\_cci2\\_ATBD\\_ATSR\\_ORAC\\_v3.0.pdf](https://climate.esa.int/sites/default/files/Aerosol_cci2_ATBD_ATSR_ORAC_v3.0.pdf).

- [54] Martonchik J V, Diner D J, Kahn R A, *et al.* Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1212-1227.
- [55] Martonchik J V, Diner D J, Crean K A, *et al.* Regional aerosol retrieval results from MISR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(7): 1520-1531.
- [56] Kahn R A, Gaitley B J, Martonchik J V, *et al.* Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D10): D10S04.
- [57] Liu Y, Sarnat J A, Coull B A, *et al.* Validation of multiangle imaging spectroradiometer (MISR) aerosol optical thickness measurements using Aerosol Robotic Network (AERONET) observations over the contiguous United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D6): D06205.
- [58] Martonchik J V, Kahn R A, Diner D J. *Retrieval of Aerosol Properties Over Land Using MISR Observations* [M]. Kokhanovsky A. A., de Leeuw G. *Satellite Aerosol Remote Sensing Over Land*. Berlin: Springer, 2009: 267-292.
- [59] Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth using the empirical orthogonal functions (EOFs) based on PARASOL multi-angle intensity data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 578.
- [60] Lyapustin A, Martonchik J, Wang Y J, *et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2011, 116(D3): D03210.
- [61] Lyapustin A, Wang Y J, Laszlo I, *et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D3): D03211.
- [62] Lyapustin A, Wang Y J, Laszlo I, *et al.* Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric correction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 385-393.
- [63] Zhang Z Y, Wu W L, Fan M, *et al.* Evaluation of MAIAC aerosol retrievals over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 202: 8-16.
- [64] She L, Zhang H K, Wang W L, *et al.* Evaluation of the multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) aerosol algorithm for Himawari-8 data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2771.
- [65] Xue Y, He X W, Xu H, *et al.* China Collection 2.0: The aerosol optical depth dataset from the synergetic retrieval of aerosol properties algorithm [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95: 45-58.
- [66] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [67] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [68] Herman M, Deuzé J L, Marchand A, *et al.* Aerosol remote sensing from POLDER/ADEOS over the ocean: Improved retrieval using a nonspherical particle model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D10): D10S02.
- [69] Fan X H, Goloub P, Deuzé J L, *et al.* Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 697-707.
- [70] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, *et al.* Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(7): 1383-1395.
- [71] Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, *et al.* Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over East Asia [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 417.
- [72] Zhang Y, Li Z Q, Liu Z H, *et al.* Retrieval of the fine-mode aerosol optical depth over East China using a grouped residual error sorting (GRES) method from multi-angle and polarized satellite data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1838.
- [73] Wang H, Sun X B, Yang L K, *et al.* Aerosol retrieval algorithm based on adaptive land-atmospheric decoupling for polarized remote sensing over land surfaces [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 219: 74-84.

- [74] Wang H, Yang L K, Zhao M R, *et al.* The normalized difference vegetation index and angular variation of surface spectral polarized reflectance relationships: Improvements on aerosol remote sensing over land [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(6): 982-989.
- [75] Wang H, Zhao M R, Yang L K, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth over North China from polarized satellite observations using Re-derived surface properties [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(12): 2241-2250.
- [76] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, *et al.* GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere [J]. *SPIE Newsroom*, 2014.
- [77] Dubovik O, Holben B N, Kaufman Y J, *et al.* Single-scattering albedo of smoke retrieved from the sky radiance and solar transmittance measured from ground [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D24): 31903-31923.
- [78] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673-20696.
- [79] 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]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [80] Li L, Che H Z, Derimian Y, *et al.* Retrievals of fine mode light-absorbing carbonaceous aerosols from POLDER/PARASOL observations over East and South Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111913.
- [81] Fan C, Fu G L, Noia A D, *et al.* Use of a neural network-based ocean body radiative transfer model for aerosol retrievals from multi-angle polarimetric measurements [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2877.
- [82] Zheng Fengxun, Hou Weizhen, Li Zhengqiang. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: An analysis on multi-angle dependence and a posteriori error [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(4): 040701.  
郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优估计反演: 角度依赖与后验误差分析 [J]. *物理学报*, 2019, 68(4): 040701.
- [83] Li Zhengqiang, Xie Yisong, Hong Jin, *et al.* Polarimetric satellite sensors for earth observation and applications in atmospheric remote sensing [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(1): 2-17.  
李正强, 谢一淞, 洪津, 等. 星载对地观测偏振传感器及其大气遥感应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(1): 2-17.
- [84] Xie Yisong, Li Zhengqiang, Hou Weizhen, *et al.* Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera onboard GF-5 satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36 (Sup 2): 219-226.  
谢一淞, 李正强, 侯伟真, 等. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演 [J]. *上海航天*, 2019, 36 (增刊 2): 219-226.
- [85] Huang Honglian, Ti Rufang, Zhang Dongying, *et al.* Inversion of aerosol optical depth over land from directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 454-461.  
黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 等. 高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度 [J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39 (4): 454-461.
- [86] Li Z Q, Hou WQZ, Hong J, *et al.* Directional polarimetric camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21-37.
- [87] Wang J, Xu X G, Ding S G, *et al.* A numerical testbed for remote sensing of aerosols, and its demonstration for evaluating retrieval synergy from a geostationary satellite constellation of GEO-CAPE and GOES-R [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 146: 510-528.
- [88] Xu X G, Wang J. UNL-VRM, A Testbed for Aerosol Remote Sensing: Model Developments and Applications [M]. Kokhanovsky A. A. Springer Series in Light Scattering. Berlin: Springer, 2019: 1-69.
- [89] Yu J, Li M Q, Wang Y L, *et al.* A decomposition method for large-scale box constrained optimization [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 231: 9-15.

- [90] Byrd R H, Lu P H, Nocedal J, *et al.* A limited memory algorithm for bound constrained optimization [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1995, 16(5): 1190-1208.
- [91] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: Comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781-792.
- [92] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, *et al.* Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [93] Xu X G, Wang J, Henze D K, *et al.* Constraints on aerosol sources using GEOS-Chem adjoint and MODIS radiances, and evaluation with multisensor (OMI, MISR) data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(12): 6396-6413.
- [94] Zheng F X, Li Z Q, Hou W Z, *et al.* Aerosol retrieval study from multiangle polarimetric satellite data based on optimal estimation method [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, 14(01): 014516.
- [95] Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, *et al.* An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: Application and validation for POLDER-3 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111894.
- [96] Li Z Q, Zhang Y, Xu H, *et al.* The fundamental aerosol models over China region: A cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 4924 - 4932.
- [97] Waquet F, Léon J F, Goloub P, *et al.* Maritime and dust aerosol retrieval from polarized and multispectral active and passive sensors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D10): D10S10.
- [98] Waquet F, Goloub P, Deuzé J L, *et al.* Aerosol retrieval over land using a multiband polarimeter and comparison with path radiance method [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11): D11214.
- [99] Wang H, Sun X B, Sun B, *et al.* Retrieval of aerosol optical properties over a vegetation surface using multi-angular, multi-spectral, and polarized data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(4): 879-887.
- [100] Wang H, Yang L K, Deng A J, *et al.* Remote sensing of aerosol optical depth using an airborne polarimeter over North China [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 979.
- [101] Qie L L, Li Z Q, Sun X B, *et al.* Improving remote sensing of aerosol optical depth over land by polarimetric measurements at 1640 nm: Airborne test in North China [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 6240-6256.
- [102] Waquet F, Cairns B, Knobelspiesse K, *et al.* Polarimetric remote sensing of aerosols over land [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D1): D01206.
- [103] Wu L, Hasekamp O, van Diedenhoven B, *et al.* Aerosol retrieval from multiangle, multispectral photopolarimetric measurements: Importance of spectral range and angular resolution [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(6): 2625-2638.
- [104] Xu F, Dubovik O, Zhai P W, *et al.* Joint retrieval of aerosol and water-leaving radiance from multispectral, multiangular and polarimetric measurements over ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(7): 2877-2907.
- [105] Xu F, van Harten G, Diner D J, *et al.* Coupled retrieval of aerosol properties and land surface reflection using the airborne multiangle spectropolarimetric imager [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(13): 7004-7026.
- [106] Xu F, Diner D, Dubovik O, *et al.* A correlated multi-pixel inversion approach for aerosol remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 746.
- [107] Puthukkudy A, Martins J V, Remer L A, *et al.* Retrieval of aerosol properties from airborne hyper-angular rainbow polarimeter (AirHARP) observations during ACEPOL 2017 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(10): 5207-5236.
- [108] Fu G L, Hasekamp O, Rietjens J, *et al.* Aerosol retrievals from different polarimeters during the ACEPOL campaign using a common retrieval algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(2): 553-573.
- [109] Hou W Z, Wang J, Xu X G, *et al.* An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 1. Development of theoretical framework [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 178: 400-415.

- [110] Hou W Z, Wang J, Xu X G, *et al.* An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 2. Information content analysis for aerosol parameters and principal components of surface spectra [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 192: 14-29.
- [111] Hou W Z, Wang J, Xu X G, *et al.* An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 3. Application to the GEO-TASO data in KORUS-AQ field campaign [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 253: 107161.