

卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度的 气溶胶模型影响

伽丽丽¹, 马 奕^{1,2}, 陈兴峰¹, 李 莉¹, 李正强^{1*}, 张 洋^{1,2}

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 卫星偏振测量是气溶胶遥感的一种重要手段。气溶胶模型的准确性是影响卫星遥感气溶胶参数精度的关键因素之一。在卫星反演气溶胶算法中,若忽略气溶胶粗模态贡献(星载偏振传感器气溶胶反演的一种常用假设)或选错气溶胶类型,均会带来反演结果的误差。基于六种典型的气溶胶类型(沙尘型、生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型、污染海洋型和重污染型)模型,模拟研究了气溶胶模态和类型选择对卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度(AOD)的影响。利用矢量的辐射传输模式,模拟分析了六种气溶胶类型在 865 nm 波长的大气偏振反射分布函数(BPDF);发现大气 BPDF 与气溶胶粒子尺度密切相关,粗模态对大气 BPDF 的贡献远小于细模态;粗、细模态同时存在时,大气 BPDF 反而小于仅细模态时的 BPDF。在此基础上,分析了“忽略粗模态贡献”和“选择错误气溶胶类型”两种情况下 AOD 的反演误差,得到如下结论:(1)忽略气溶胶粗模态贡献,会导致反演的细模态气溶胶光学厚度(AOD_r)偏小。六种典型气溶胶类型模型情况下,AOD_r 反演结果可偏低 12.3%~35.7%,其中沙尘型气溶胶时 AOD_r 反演误差最大,污染大陆型气溶胶时 AOD_r 反演误差最小。(2)若气溶胶类型选择错误,反演的 AOD 可能偏大或偏小,取决于与气溶胶类型对应的大气 BPDF 的差别。测试的六种气溶胶类型中,沙尘型与重污染型的大气 BPDF 差别最大,二者互换(即“选择错误”)时,AOD 反演误差最大,分别可达 220.3%或-60.6%;乡村背景型与污染大陆型的大气 BPDF 差别最小,两者互换时,AOD 反演误差最小,分别为 7.1%和-3.0%。研究结果对于发展新一代星载偏振传感器及其气溶胶反演算法研究具有参考价值。

关键词: 气溶胶模型;气溶胶光学厚度;偏振遥感;反演误差
中图分类号: P422.3 **文献标识码:** A

Aerosol model assumption: The retrievals of aerosol optical depth from satellite near-infrared polarimetric measurements

QIE Li-Li¹, MA Yan^{1,2}, CHEN Xing-Feng¹, LI Li¹, LI Zheng-Qiang^{1*}, ZHANG Yang^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Satellite polarimetric observation is an important approach for remote sensing of atmospheric aerosols. The validity and adaptability of aerosol type model is one of key factors affecting polarimetric remote sensing of aerosol properties. For an aerosol retrieval algorithm, either neglecting coarse mode aerosols (one of common assumption of aerosol retrieval from satellite polarimetric sensors) or employing incorrect aerosol types can bring errors to the retrieval results. In this paper, the influence of aerosol modes and choice of aerosol types (six typical types: desert dust, biomass burning, background/rural, polluted continental, polluted marine, and dirty pollution) on the retrieval of aerosol optical

收稿日期: 2015-08-19, 修回日期: 2016-06-22

Received date: 2015-08-19, revised date: 2016-06-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA12A104-3); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100202); 国家自然科学基金项目(41222007); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-18)

Foundation items: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (2012AA12A104-3); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05100202); National Natural Science Foundation of China (41222007); Chinese Academy of Sciences Key Deployment Project (KZZD-EW-TZ-18)

作者简介(Biography): 伽丽丽(1987-), 女, 河南许昌人, 博士, 主要研究领域为气溶胶偏振遥感。E-mail: qiell@radi.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: lizq@radi.ac.cn

depth (AOD) were investigated based on near-infrared polarized satellite channel at 865 nm. Based on the vector radiative transfer simulation results, the atmospheric bidirectional polarized reflection distribution functions (BPDF) of the above six aerosol types at 865 nm were analyzed. The results demonstrate that atmospheric BPDF depends greatly on aerosol particle's size, while influence of coarse mode on atmospheric BPDF is much smaller than that of fine mode. Compared with the atmospheric BPDF associated with only one fine mode, the BPDF associated with both fine and coarse modes shows smaller BPDF. With these simulation results, AOD retrieval errors were analyzed under two circumstances, neglecting coarse mode aerosols and employing an incorrect aerosol type. The results show that: (1) Neglecting coarse mode can lead to underestimation of the retrieved fine mode AOD (AOD_f). The AOD_f errors are in the range of -12.3% to -35.7% for different aerosol types. The maximum AOD_f error associates with desert dust aerosol type while the minimum with polluted continental type. (2) The use of an incorrect aerosol type can bring large AOD retrieval error, which depends on bias of atmospheric BPDF related to the incorrect aerosol type. Among all six aerosol types, the maximum BPDF difference occurs between desert dust and dirty pollution aerosol types, which yields the maximum AOD retrieval errors of -60.6% and 220.3%, given mischoosing one versus another. The minimum AOD retrieval errors can be -3.0% and 7.1% occurring between background/rural and polluted continental types, which have the smallest BPDF difference. The results of this study can help to develop the next generation spaceborne polarimetric sensors and corresponding aerosol retrieval algorithms.

Key words: aerosol model, aerosol optical depth, polarimetric remote sensing, retrieval error

PACS: 92.20.Bk

引言

气溶胶受自然和人为因素影响,具有复杂的来源和转化机制,可大致分为乡村型、城市型、海洋型及沙漠型等类型,不同类型的气溶胶具有显著差异的化学成分和物理形态(复折射指数、粒子谱分布、粒子形状等)及相应的光学性质(单次散射反照率(single-scattering albedo, SSA),散射相矩阵等).卫星通过在特定波段被动地接收地-气系统反射的太阳辐射,是目前监测全球范围内气溶胶时空变化的最重要手段^[1].近几十年来,多颗卫星传感器已经为人们提供大量气溶胶监测数据^[2-5].然而,大量研究表明,由于气溶胶物理光学性质的复杂性,对气溶胶模型假设不准确是卫星遥感气溶胶的重要误差源^[6-7].Jethva等^[8]通过改进中分辨率成像光谱辐射仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)算法中印度 Kanpur 地区的气溶胶模型,使之与当地地基观测的气溶胶吸收特性更接近,大大提高了细模态气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)的反演精度.Torres等^[9]利用 A-train 系列卫星中高光谱红外大气探测器(atmospheric infrared sounder, AIRS)的 CO 产品帮助区分紫外吸收性的烟尘和沙尘,提高了臭氧监测仪(ozone monitoring instrument, OMI)卫星的气溶胶探测能力和反演精度.总之,气溶胶模型选择是卫星遥感气溶胶的

关键问题之一.

卫星偏振测量是气溶胶遥感的一种重要手段.国内外开展了大量基于卫星偏振测量遥感气溶胶的研究,其中代表性的偏振传感器如:法国的多角度偏振传感器(polarization and directionality of Earth's reflectances, POLDER)系列^[5]、美国国家航空航天局的气溶胶偏振传感器(aerosol polarimetry sensor, APS)^[10]等.由于偏振辐射对细粒子敏感,对粗粒子敏感性较差.在 Deuzé等^[11]为 POLDER 传感器所建立的陆地上空气溶胶反演算法中,假设了气溶胶粒子尺度谱符合单峰对数正态分布,算法可反演得到 865 nm AOD 和 Ångström 指数.反演结果与地基太阳辐射计测量比较表明,当大气中含有较多的气溶胶粗粒子(如:沙尘)时,算法显著低估了 AOD,而高估了 Ångström 指数^[11].Fan等^[12]对北京地区 POLDER 气溶胶产品的验证也表明,该算法反演结果主要代表细粒子特性,AOD 与全球地基气溶胶观测网(aerosol robotic network, AERONET)站点^[13]测得的气溶胶细模态(半径 $\leq 0.3 \mu\text{m}$)光学厚度一致性良好.为充分利用 POLDER 的多角度、多波长偏振测量信息,克服 Deuzé 算法仅考虑气溶胶单模态的缺点,在 Dubovik等^[14]、Hasekamp等^[15]分别为 POLDER/PARASOL 发展的新一代气溶胶反演算法中,均考虑了气溶胶的双峰谱结构,同时反演气溶胶粗、细模态参数.然而,对于单角度偏振辐射计,如法国

里尔科技大学的 MICROPOL^[16]、中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的偏振大气同步校正仪^[17], 由于对气溶胶模型的识别能力有限, 反演时仍需对气溶胶模型做事先假设, 这可能会带来气溶胶参数的反演误差。

针对卫星近红外偏振通道测量反演 AOD, 以六种典型气溶胶类型模型为例, 通过数值模拟, 研究两种情况下的气溶胶模型假设对 865 nm 波长 AOD 反演的影响, 分别为: (1) 忽略气溶胶粗模态贡献造成细模态光学厚度 (AOD_f) 的反演误差; (2) 气溶胶类型选择错误造成的 AOD 反演误差。研究结果将为卫星偏振反演 AOD 时的模型选择及误差估计提供理论指导。

1 不同气溶胶类型的大气顶偏振反射函数

1.1 典型气溶胶模型

Omar 等^[18] 基于 AERONET 全球多年的观测数据, 利用聚类分析法得到六种典型气溶胶类型模型, 分别为: 沙尘型、生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型、污染海洋型和重污染型。六种类型气溶胶均由粗、细双模态叠加组成, 其详细的粒子谱分布、复折射率等参数见文献^[18] 中表 2。沙尘型气溶胶是以粗模态为主的气溶胶, 主要成分为土壤矿物质; 生物质燃烧型气溶胶主要成分为燃烧产生的烟尘和有机碳, 以细模态为主; 污染大陆型和重污染型气溶胶均受人为污染影响, 以细模态为主, 二者具有相近的粒子谱分布, 而后者吸收性更强; 污染海洋型气溶胶为粗模态的海盐与细模态的燃烧型或工业污染气溶胶混合形成的气溶胶类型。乡村背景型气溶胶通常出现在清洁的大陆或乡村地区, 几乎不受人为污染影响, 特点是 AOD 值较低。本文将基于这六种典型气溶胶模型进行数值模拟研究。

图 1~3 和表 1 列出了上述六种气溶胶模型的重要物理和光学参数。图 1 所示为六种模型的体积谱分布, 呈现显著的双峰结构, 且每种类型粗、细模态的峰值半径及峰值大小不同。图 2 为六种气溶胶模型在 865 nm 波长的偏振相函数 P_{12} 随散射角的变化情况。其中, P_{12} 为散射相矩阵 $P(\theta)$ 的第二个元

素^[19]。

P_{12} 对气溶胶粒子大小很敏感, 在大部分散射角范围内, 粒子尺度越大, P_{12} 绝对值越小。沙尘型和污染海洋型气溶胶 P_{12} 绝对值仅为另四种气溶胶的约 1/2 到 1/3。在卫星可观测到的侧向和后向散射角度 (散射角 80° - 180°), P_{12} 绝对值随散射角增大而减小。图 3 以沙尘型气溶胶为例, 展示了气溶胶粗、细模态的偏振相函数。由图可知, 粗、细模态的 P_{12} 显著不同, 粗模态 P_{12} 绝对值很小, 几乎接近 0, 而细模态 P_{12} 绝对值很大; 在绝大部分散射角范围内, 粗、细模态 P_{12} 符号相反, 二者叠加的 P_{12} 与细模态 P_{12} 符号一致, 但绝对值较细模态 P_{12} 小。表 1 列出了六种气溶胶模型在 865 nm 波长的细粒子比 (fine mode fraction, 简记为 FMF) 和 SSA 值。其中 FMF 定义为细模态光学厚度与总光学厚度的比值, 即细模态消光在总消光中所占的权重。沙尘型气溶胶 FMF 最小, 为 0.25, 污染大陆型气溶胶 FMF 最大, 为 0.71。SSA 表示气溶胶的散射光学厚度在总光学厚度中的比重, 描述气溶胶的吸收特性。沙尘型气溶胶 SSA 为 0.91, 散射性最强; 重污染型气溶胶 SSA 仅为 0.65, 吸收性最强。

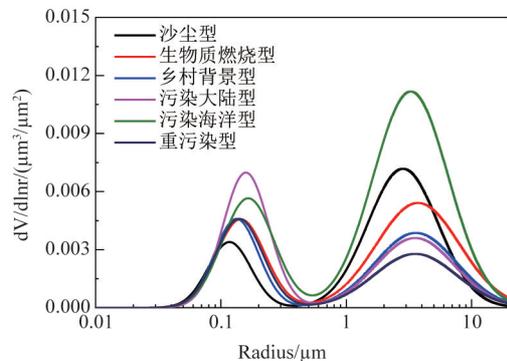


图 1 六种典型气溶胶模型的体积谱分布

Fig. 1 Size distribution of the six aerosol models

1.2 典型气溶胶类型大气顶偏振反射函数特征

卫星偏振传感器在大气顶测得地-气组合系统的矢量反射辐射, 可由斯托克斯参量的前三项 $[I, Q, U]$ 来描述^[20], 其中 I 为总辐亮度, Q 和 U 一起表示线偏振辐射的强度和方向。在遥感反演中, 通常将

表 1 六种典型气溶胶模型在 865 nm 的细粒子比和单次散射反照率

Table 1 Fine mode fraction and single-scattering albedo of the six aerosol models at 865 nm

	气溶胶模型					
	沙尘型	生物质燃烧型	乡村背景型	污染大陆型	污染海洋型	重污染型
FMF(865 nm)	0.253 69	0.628 78	0.559 05	0.711 38	0.420 85	0.684 74
SSA(865 nm)	0.914 56	0.756 3	0.846 72	0.902 23	0.911 1	0.651 46

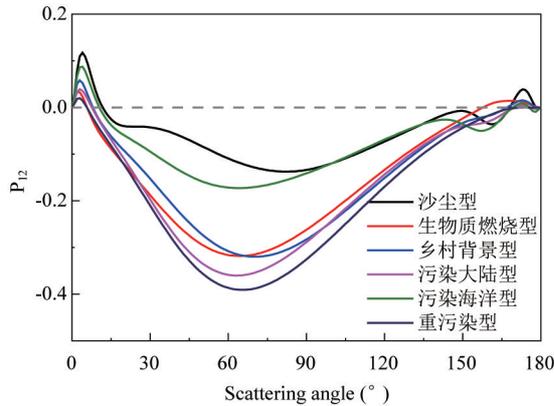


图2 六种典型气溶胶模型在 865 nm 波长的散射偏振相函数 P_{12}

Fig. 2 Scattering polarized phase function P_{12} of the six aerosol models at 865 nm

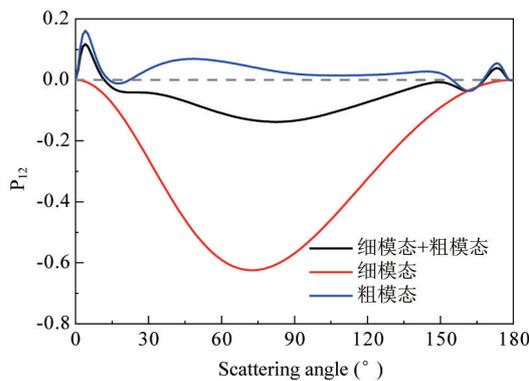


图3 气溶胶粗、细模态在 865 nm 波长的偏振相函数. 从沙尘型气溶胶为例

Fig. 3 Polarized phase function both for the fine and coarse mono-modal models at 865 nm model

辐亮度转换为仅依赖地-气状况及太阳-观测几何的无量纲量——双向反射率,其随观测几何的分布也称为双向反射分布函数.地-气系统标量和偏振反射函数(bidirectional polarized reflection distribution function, BPDF)下式算得

$$R_p(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) = \frac{\pi \sqrt{Q(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)^2 + U(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)^2}}{E_0 \mu_0}, \quad (1)$$

式中, E_0 为太阳光谱辐照度, μ_0, ϕ_0 和 μ, ϕ 分别为太阳、观测天顶角余弦和方位角.

为使问题简化,本文简单假设地表反射率和偏振反射率均为 0,即不考虑地表反射的贡献.通过模拟无云晴空大气(含大气分子和气溶胶)的 BPDF,研究气溶胶模型对大气 BPDF、进而对 AOD 反演的

影响.所有计算以波长 865 nm 为例(该波长为 POLDER^[5]、APS^[10]等卫星偏振传感器的偏振探测通道之一).设大气层为标准大气,分子散射由瑞利散射公式计算.设气溶胶粒子为匀质球形,用米散射理论计算每种气溶胶模型及其粗、细单模态的光学参数,包括:SSA、散射相矩阵、消光系数等.利用矢量的辐射传输模式 RT3^[21],计算每种气溶胶模型对应的大气 BPDF.其中,太阳天顶角设为固定值 45°,观测天顶角范围为 0°~60°,相对方位角范围为 0°~360°,对应的散射角变化范围为 75°~180°.

图 4 所示为六种典型气溶胶模型的大气 BPDF 分布(AOD=0.5).为分析气溶胶粗、细模态分别对大气顶 BPDF 的贡献,对应每种模型,还模拟了仅气溶胶细模态(图 4(a1)~(f1))或粗模态(图 4(a2)~(f2))单模态存在时的大气 BPDF,其中细模态、粗模态光学厚度分别为: $AOD_f = FMF \cdot AOD$, $AOD_c = (1-FMF) \cdot AOD$.由图可知,图中所示的观测几何范围内, R_p 值在 0~0.1 之间. R_p 值与散射角具有很好的相关性,散射角越大, R_p 值越小,这与偏振相函数 P_{12} 在该散射角范围的变化趋势一致.大气 BPDF 依赖具体的气溶胶模型,相比之下,粗模态主导的沙尘型气溶胶(图 4(a))和海洋型气溶胶(图 4(e))大气 BPDF 值较小,而另四种以细模态为主的气溶胶类型大气 BPDF 值较大.在仅考虑气溶胶细模态贡献时(即假设粗模态不存在),尽管细模态气溶胶光学厚度 AOD_f 小于 AOD,但整体上每种模型的细模态 R_p 值均比粗、细模态都存在时值偏大;而在仅考虑气溶胶粗模态贡献时, R_p 值很小,在 0~0.01 之间,且在散射角 160°附近,除重污染型气溶胶(图 4(f2))外,其它模型的大气 BPDF 均有一明显峰值,这与粗模态气溶胶 P_{12} 在该角度的局域峰值(偏振虹现象)对应.仅细模态气溶胶的大气 R_p 值平均约为粗、细模态均存在时的 1.1 倍(AOD=0.5).因此,气溶胶粗、细模态分别对大气 BPDF 的贡献有相消的效果,粗模态的存在使大气偏振反射率值变小,这与图 3 所示的气溶胶粗、细模态的 P_{12} 通常有相反的符号一致.

2 模型选择与 AOD 反演误差

2.1 误差评价方法

在基于查找表的卫星偏振反演 AOD 算法中,通常事先假设气溶胶的模型参数(如谱分布、复折射指数、粒子形状等),利用辐射传输模式计算不同大气条件及太阳-观测几何的大气顶偏振反射率查找

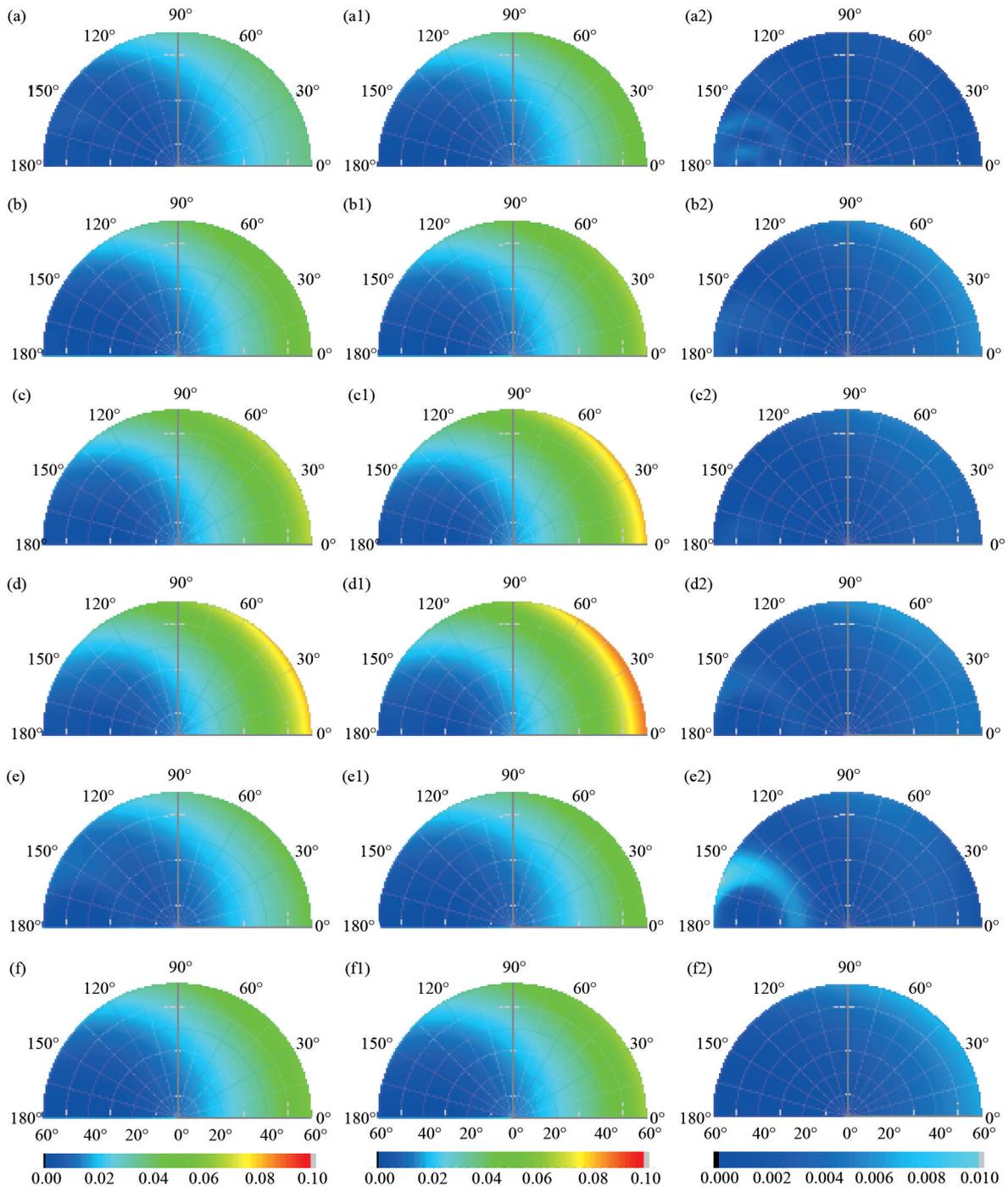


图 4 六种气溶胶模型的双向偏振分布函数(波长 865 nm, AOD = 0.5). (a) ~ (f) 依次为:沙尘型、生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型、污染海洋型和重污染型. (a1) ~ (f1) 仅气溶胶细模态; (a2) ~ (f2) 仅气溶胶粗模态
 Fig.4 Atmospheric bidirectional polarized reflection distribution functions for the six aerosol models (The wavelength is 865 nm, and AOD is 0.5). (a) ~ (f) denote desert dust, biomass burning, background/rural, polluted continental, polluted marine, and dirty pollution aerosol, respectively, while (a1) ~ (f1) and (a2) ~ (f2) represent that for the fine or coarse monomodal models, respectively

表,反演时查找与卫星观测的偏振反射率吻合时对应的 AOD 值作为反演结果. 由第 1.2 节的分析可知,若算法所选的气溶胶模型与实际大气不符,为使查找表中计算的偏振反射率与测量值相等,将导致

AOD 的反演误差.

如图 5 所示,为通过数值实验模拟 AOD 的卫星偏振反演过程,估算由反演时气溶胶模型假设带来的 AOD 反演误差,在此,预先设定某个大气气溶

胶模型(即“预定义的气溶胶模型(pre-defined aerosol model)”,标记为“MODEL^{pd}”)和 AOD(即“预定义的 AOD(pre-defined AOD)”,标记为“AOD^{pd}”),利用辐射传输模式正向模拟卫星观测到的大气顶偏振反射率,这些“模拟的观测量”(标记为“R_p^{meas}”)即成为本文数值实验的输入观测数据;反演时,则假设其它不同的气溶胶模型(即“反演中使用的气溶胶模型(inversion-employed aerosol model)”,标记为“MODEL^{ie}”),同样利用辐射传输模式计算不同 AOD 时的偏振反射率查找表,查找表中的偏振反射率计算值(标记为“R_p^{cal}”)与模拟的观测值 R_p^{meas}相等时,对应的 AOD 值即为反演结果。

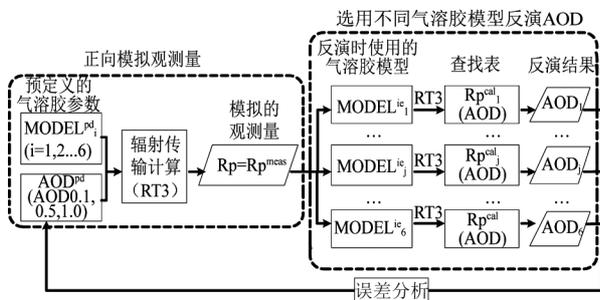


图5 卫星偏振反演 AOD 的气溶胶模型影响模拟流程图
Fig.5 Flowchart for simulating the influence of the aerosol model assumption on the retrievals of AOD from satellite polarimetric measurements

如图6所示,在某一特定观测角度, R_p 为 AOD 的函数,通常随 AOD 单调递增(散射角小于 150°时), R_p(AOD) 函数曲线依赖具体的气溶胶模型.正向模拟时预定义的气溶胶模型 MODEL^{pd} 和反演时使用的气溶胶模型 MODEL^{ie} 对应的 R_p(AOD) 曲线分别如图所示,利用卫星测量的单波长(865 nm)、单角度的偏振反射率反演 AOD,则 AOD 的反演误差

$$\delta\tau = \tau' - \tau \quad (2)$$

式中, τ 为正向模拟时预定义的 AOD, τ' 为反演的 AOD.

若 MODEL^{ie} 对应的 R_p 较 MODEL^{pd} 对应的 R_p 偏大,则反演的 AOD 偏小, $\delta\tau$ 为负值;反之, AOD 偏大, $\delta\tau$ 为正值.

表1 忽略粗模态贡献反演的 AOD_i 平均相对误差(865 nm)

Table 1 The average relative errors of AOD_i caused by ignoring aerosol coarse mode contribution during retrieval

$\overline{\delta\tau_i/\tau_i}(\%)$	气溶胶模型					
	沙尘型	生物质燃烧型	乡村背景型	污染大陆型	污染海洋型	重污染型
AOD = 0.1	-27.29	-15.18	-14.23	-8.34	-9.05	-14.13
AOD = 0.5	-35.70	-22.33	-21.53	-12.29	-19.97	-17.46
AOD = 1.0	-45.63	-36.87	-34.76	-23.61	-31.29	-33.60

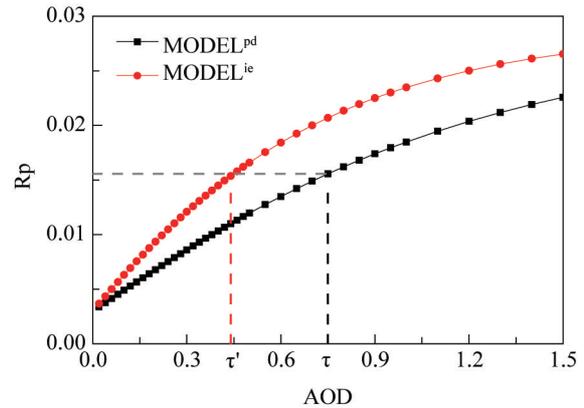


图6 气溶胶模型选择与 AOD 反演误差
Fig.6 Schematic of the relationship between aerosol model assumption and AOD retrieval error

首先,预设大气气溶胶为六类典型气溶胶中的一种,利用 RT3 模拟出不同气溶胶类型条件下、在不同 AOD^{pd}(0.1, 0.5, 1.0) 及观测几何时的大气顶偏振反射率,作为卫星测量值 R_p^{meas}. 然后,

(1) 假设反演 AOD 时仅考虑单一细模态的贡献,忽略粗模态贡献.利用辐射传输模式计算气溶胶细模态在一系列 AOD_i 时的 R_p 查找表,通过查找插值得到 R_p^{cal} 与 R_p^{meas} 相等时对应的 AOD_i 值(τ_f'), 与预定义的 AOD_i^{pd} 值(τ_f = FMF · τ) 比较,求 AOD_i 相对误差(δτ_f/τ_f).

(2) 假设反演 AOD 时选择了 MODEL^{pd} 之外的模型 MODEL^{ie}. 与(1)类似,利用辐射传输模式计算 MODEL^{ie} 在一系列 AOD 时的 R_p 查找表,通过查找插值得到 R_p^{cal} 与 R_p^{meas} 相等时对应的 AOD 值(τ'), 与 AOD^{pd} 值(τ) 比较,求 AOD 相对误差(δτ/τ).

2.2 忽略气溶胶粗模态贡献的影响

在利用偏振反射率反演 AOD 时,通常认为其对大粒子不敏感而忽略粗模态的贡献,假设气溶胶模型为单一的细模态,仅反演细模态的光学厚度 AOD_i. 由 1.2 节的分析可推知,反演时为使细模态对应的偏振反射率计算值与实际气溶胶模型的测量值吻合,必须用更小的 AOD_i 与之匹配,因此,所反演的光学厚度不仅只是细模态光学厚度 AOD_i,而且

所得的 AOD_r 偏小. 图 7 所示为六种典型气溶胶模型因忽略粗模态贡献引起 AOD_r 反演相对误差随观测几何分布情况 ($AOD^{pd} = 0.5$). 为避开粗模态气溶胶在散射角 160° 附近的偏振虹, 这里仅考虑散射角小于 150° 的范围. 表 2 列出了六种模型在 AOD^{pd} 分别为 0.1、0.5 和 1.0 时反演的 AOD_r 相对误差在不同观测几何上的平均值. 由图 7 和表 2 可知, 忽略粗模态贡献会使反演的 AOD_r 结果偏小, 相对误差随 AOD 的增大而增大. 其中沙尘型气溶胶平均误差最大, 污染大陆型气溶胶平均误差最小; $AOD^{pd} = 0.5$ 时, 最大、最小相对误差分别为 -35.7% 和 -12.3%. 相应的这两种气溶胶类型分别有最小和最大的 FMF 值. 容易理解, FMF 值越大, 因忽略气溶胶粗模态贡献引起的 AOD_r 反演误差越小. 但是, 各模型的反演误差排序并不完全与 FMF 值排序一致, 这说明粗模态的影响不仅与其光学厚度比重有关, 同时与粗模态的有效半径大小、吸收特性等因素有关.

2.3 气溶胶模型选择不准确的影响

大气偏振反射辐射对气溶胶参数的敏感性, 决定了反演时气溶胶模型选择不准确会导致更大的 AOD 反演误差. 由 1.2 节分析, 细模态主导的气溶胶模型对应的大气 BPDF 整体上较粗模态主导的气溶胶模型的偏大. 因此, 若实际大气中为粗模态为主的气溶胶, 而反演时假设了细模态为主的气溶胶模型, 则反演的 AOD 应偏小, 反之, AOD 应偏大. 分别预设大气中气溶胶 $MODEL^{pd}$ 为沙尘型和重污染型, 图 8 所示为反演时选用了 $MODEL^{pd}$ 之外的五种气溶胶类型中的一种, 模拟计算得到 $\delta\tau/\tau$ 随观测几何的变化情况. 同样仅考虑散射角小于 150° 的范围. 在六种典型气溶胶模型中, 沙尘型气溶胶粗模态光学厚度比重最大, 偏振相函数绝对值最小, 大气顶偏振反射率值最小. 由图 8(a1) ~ (e1) 可知, 当选用另五种模型反演 AOD 时, 反演误差均为负值, 其中选用污染大陆型时误差最大, 污染海洋型时误差最小. 重污染型是细粒子为主的气溶胶类型, 其 FMF 仅次

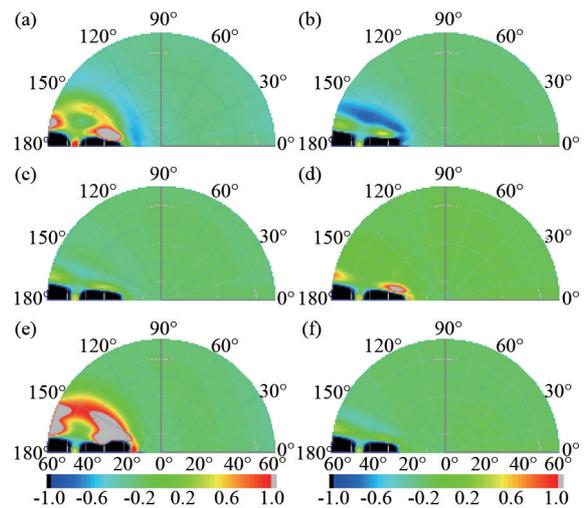


图 7 六种气溶胶模型因忽略气溶胶粗模态贡献反演的 AOD_r 相对误差随观测几何分布 (865 nm , $AOD^{pd} = 0.5$). (a) ~ (f) 依次为: 沙尘型、生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型、污染海洋型和重污染型

Fig. 7 Bidirectional relative errors of the retrievals of AOD_r for the six aerosol models, which are caused by ignoring aerosol coarse mode contribution (The wavelength is 865 nm , and AOD^{pd} is 0.5). (a) ~ (f) denote desert dust, biomass burning, background/rural, polluted continental, polluted marine, and dirty pollution aerosol, respectively

于污染大陆型, 但具有最大的偏振相函数绝对值. 由图 8(a2) ~ (e2) 可知, 当选用沙尘型、污染海洋型、生物质燃烧型气溶胶反演 AOD 时, 相对误差 $\delta\tau/\tau$ 为正值, AOD 结果偏大; 当选用乡村背景型、污染大陆型气溶胶时, 相对误差 $\delta\tau/\tau$ 为负值, AOD 结果偏小. AOD 反演误差 $\delta\tau/\tau$ 随观测几何变化, 与散射角具有一定的相关性. 对六种气溶胶模型按整体的大气 BPDF 从小到大排序, 依次为沙尘型、污染海洋型、生物质燃烧型、重污染型、乡村背景型和污染大陆型. 表 3 按此顺序列出了各种 ($MODEL^{pd}$, $MODEL^{ic}$) 组合时, 反演的 AOD 平均相对误差 $\overline{\delta\tau/\tau}$ ($AOD^{pd} = 0.5$). 由表可知, 以左上至右下对角线为分界, 对角线以上表示反演时选用了比 $MODEL^{pd}$ 对应的大气 BPDF 更大的气溶胶模型, $\overline{\delta\tau/\tau}$ 均为负值, 且距对

表 1 气溶胶模型不准确反演 AOD 的平均相对误差 (865 nm , $AOD^{pd} = 0.5$)

Table 1 The average relative errors of AOD caused by inaccurate aerosol model assumption during retrievals

$\overline{\delta\tau/\tau}(\%)$		反演时使用的的气溶胶模型					
		沙尘型	生物质燃烧型	乡村背景型	污染大陆型	污染海洋型	重污染型
模拟时预定义的 气溶胶模型	沙尘型	-	-13.38	-39.82	-43.33	-55.18	-60.62
	生物质燃烧型	22.21	-	-27.92	-32.47	-47.23	-54.20
	乡村背景型	74.33	44.06	-	-3.04	-27.02	-37.25
	污染大陆型	84.26	50.98	7.10	-	-23.54	-34.44
	污染海洋型	160.90	111.53	48.07	43.22	-	-14.47
	重污染型	220.36	161.19	88.93	83.63	21.22	-

角线越远, $MODEL^{ie}$ 与 $MODEL^{pd}$ 对应的大气 BPDF 相差越大, 反演误差也越大; 反之, $\overline{\delta\tau/\tau}$ 均为正值. 在极端情况下, 即 $MODEL^{pd}$ 为沙尘型, 而选用了污染大陆型反演 AOD, 相对误差均值可达 220.4%; 反之, 误差均值约为 -60.6%.

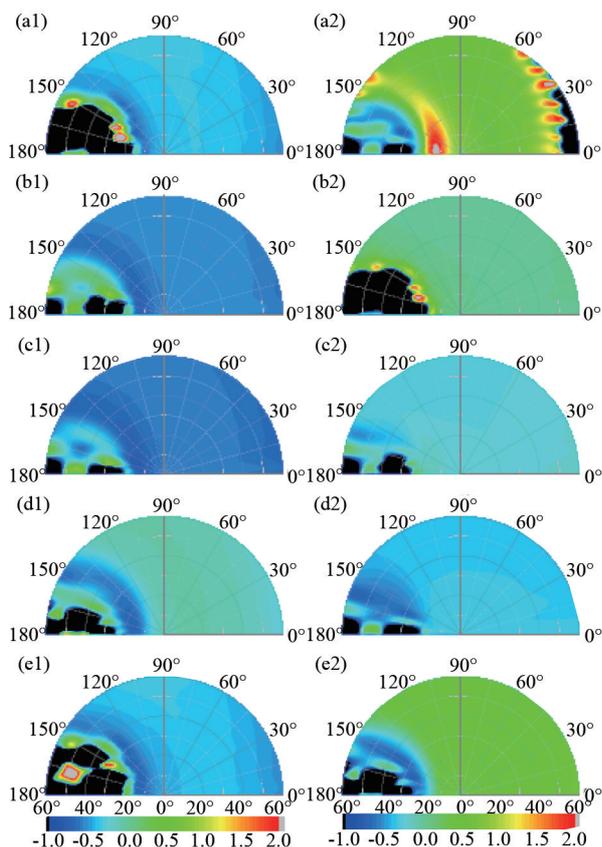


图 8 气溶胶模型不准确反演 AOD 相对误差随观测几何分布 (865 nm, AOD = 0.5). (a1) ~ (e1) 预定义的气溶胶 $MODEL^{pd}$ 为沙尘型, 反演时使用的气溶胶模型 $MODEL^{ie}$ 依次为: 生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型、污染海洋型和重污染型; (a2) ~ (e2) 预定义的气溶胶 $MODEL^{pd}$ 为重污染型, 反演时使用的气溶胶模型 $MODEL^{ie}$ 依次为: 沙尘型、生物质燃烧型、乡村背景型、污染大陆型和污染海洋型

Fig. 8 Bidirectional relative errors of the retrievals of AOD, which are caused by inaccurate aerosol model assumption during retrieval (The wavelength is 865 nm, and AOD_{pd} is 0.5). (a1) ~ (f1) denote that the pre-defined aerosol model $MODEL^{pd}$ is desert dust, and the inversion-employed models $MODEL^{ie}$ are biomass burning, background/rural, polluted continental, polluted marine, and dirty pollution aerosol, respectively. (a2) ~ (f2) denote that the pre-defined aerosol model $MODEL^{pd}$ is dirty pollution aerosol, and the inversion-employed models $MODEL^{ie}$ are desert dust, biomass burning, background/rural, polluted continental and polluted marine aerosol, respectively

3 结论

大气偏振反射辐射具有对气溶胶粒子特性敏感

的特点. 本文针对卫星偏振反演 AOD 过程, 基于六种典型气溶胶类型模型, 模拟研究了近红外波段 (865 nm) 不同类型气溶胶的大气 BPDF 特征和气溶胶的模式、模型假设对 AOD 反演的影响. 主要结论如下:

(1) 大气 BPDF 与气溶胶粒子尺度密切相关, 气溶胶粗模态对大气 BPDF 的贡献远小于细模态; 粗、细模态同时存在时, 大气 BPDF 反而比仅细模态存在时的 BPDF 偏小约 10%.

(2) 忽略气溶胶粗模态贡献, 会导致反演的 AOD 仅为细模态光学厚度, 且反演结果偏小. 六种模型中, 沙尘型气溶胶 AOD_f 反演误差最大, 污染大陆型误差最小; AOD^{pd} = 0.5 时, AOD_f 平均相对误差的最大、最小值分别为 -35.7% 和 -12.29%; 反演误差随 AOD 的增大而增大.

(3) 若气溶胶模型选择错误, 会导致 AOD 反演结果偏大或偏小. 选用比 $MODEL^{pd}$ 对应的大气 BPDF 更大的模型, 反演的 AOD 偏小; 反之偏大. 六种典型类型气溶胶的大气 BPDF 从小到大排序, 依次为沙尘型、污染海洋型、生物质燃烧型、重污染型、乡村背景型和污染大陆型. 沙尘型和污染大陆型互换 (即“选择错误”) 的极端情况下, AOD 平均相对误差分别可达 220.36% 和 -60.62% (AOD^{pd} = 0.5). 乡村背景型与污染大陆型气溶胶对应的大气 BPDF 最接近, 两者互换时, 反演误差最小, 分别为 7.1% 和 -3.0% (AOD^{pd} = 0.5).

为使问题简化, 仅考虑了无云晴空大气暗地表的情况, 并假设通过卫星单波段、单角度偏振测量反演 AOD, 气溶胶模型参数均由人为假定. 但在实际的卫星气溶胶反演中, 地表反射的贡献是必须考虑的, 气溶胶模型则可通过先验知识或卫星更多维度的观测 (如多波段、多角度及标量辐射) 来约束, 反演误差的估算需结合具体的反演算法综合考虑. 通过研究不同气溶胶模型对大气 BPDF 的影响, 并将其折算为 AOD 的偏差, 更清晰地显示了气溶胶模型这一因素对 AOD 反演的影响.

References

- [1] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, *et al.* Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2007, **106**: 325 - 347.
- [2] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 17051 - 17067.

- [3] 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 Sens. Environ.*, 2005, **94**: 155–171.
- [4] Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, *et al.* Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: an overview [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D24S47.
- [5] 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]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**: 1383–1395.
- [6] MAO Jie-Tai, LIU Li, ZHANG Jun-Hua. GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu lake [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的实验研究. *气象学报*), 2001, **59**(3): 352–359.
- [7] WANG Xiao-Yuan, XIN Jin-Yuan, WANG Li-Li, *et al.* Aerosol optical depth observed by Chinese Sun Hazemeter Network and comparison with MODIS products in three typical cities in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, (王小元, 辛金元, 王莉莉, 等. 中国 3 个典型城市气溶胶光学厚度地基观测及其 MODIS 气溶胶产品精度分析. *气候与环境研究*), 2012, **17**(1): 37–45.
- [8] Jethva H, Satheesh S K, Srinivasan J, *et al.* Improved retrieval of aerosol size-resolved properties from moderate resolution imaging spectroradiometer over India: Role of aerosol model and surface reflectance [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: D18213.
- [9] Torres O, Ahn C, Chen Z. Improvements to the OMI near-UV aerosol algorithm using A-train CALIOP and AIRS observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, **6**: 3257–3270.
- [10] Mishchenko M I, Cairns B, Hansen J E, *et al.* Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total Solar irradiance: Introducing the Glory mission [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2007, **88**: 677–691.
- [11] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *J. Geophys. Res.* 2001, **106**: 4913–4926.
- [12] Fan X, Goloub Ph, Deuzé J L, *et al.* Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia [J], *Remote Sens. Environ.*, 2008, **112**: 697–707.
- [13] Holben N B, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterisation [J]. *Remote Sens. Environ.* 1998, **66**: 1–16.
- [14] 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], *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**: 975–1018.
- [15] Hasekamp O P, Litvinov P, Butz A. Aerosol properties over the ocean from parasol multiangle photopolarimetric measurements [J], *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: D14204.
- [16] Waquet F, Goloub P, Deuzé J L, *et al.* Aerosol retrieval over land using a multiband polarimeter and comparison with path radiance method [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D11214.
- [17] Hu Ya-Dong, Hu Qiao-Yun, Sun Bin, *et al.* Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. *Optics and Precision Engineering*, (胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪. *光学精密工程*), 2015, **23**(3): 652–659.
- [18] Omar A H, Won J G, Winker D M, *et al.* Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) Measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D10S14.
- [19] LIU K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Second edition, California: Academic press, 2002: 193.
- [20] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Sci. Rev.*, 1974, **16**: 527–610.
- [21] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1991, **46**: 413–423.