

海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究

王家成^{1,2,3} 乔延利^{1,2} 杨世植^{1,2} 赵强^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心, 安徽 合肥 230031
²中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
³阜阳师范学院物理与电子科学学院, 安徽 阜阳 236041

摘要 气溶胶光学模型参数在气溶胶遥感和气候强迫研究中都具有重要的作用。通过对全球近 90 个气溶胶自动观测网(AERONET)的海洋站点数据进行筛选、分类和分析,发现了气溶胶模型的中值半径及其标准偏差间的负相关性,并给出了经验关系。利用该关系对现行中分辨率成像光谱仪(MODIS)海洋气溶胶模型进行了评估,并指出了该模型存在的不足。

关键词 大气光学;气溶胶模型;气溶胶自动观测网(AERONET);海洋;中分辨率成像光谱仪(MODIS)

中图分类号 X831 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1101005

Study on the Relation of Ocean Atmospheric Aerosol Optical Model Parameters

Wang Jiacheng^{1,2,3} Qiao Yanli^{1,2} Yang Shizhi^{1,2} Zhao Qiang^{1,2}

¹Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization Techniques, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

³College of Physics and Electronic Information, Fuyang Teachers College, Fuyang, Anhui 236041, China

Abstract Aerosol optical model parameters are important for aerosol remote sensing and climate forcing study. The negative correlation between the standard deviation and number median radius has been established based on the ocean Aerosol Robotic Network (AERONET) data worldwide empirical relation is proposed. Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) ocean aerosol models are assessed by using this relation, and some shortcomings have been discussed.

Key words atmospheric optics; aerosol model; Aerosol Robotic Network (AERONET); ocean; moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS)

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 010.1100

1 引 言

气溶胶模型参数在卫星遥感大气气溶胶光学性质中起着重要的作用。卫星遥感气溶胶的算法通常根据下垫面的不同分为陆地算法和海洋算法。在海洋算法中,对于绝大多数海域(近海二类水域除外),

由于下垫面较为均匀,海面的菲涅耳反射和海浪泡沫的白帽反射都有较为成熟的理论计算,同时水体的离水辐射在可见和近红外波段对卫星观测的影响较小,所以影响海洋气溶胶反演精度的主要因素是气溶胶模型^[1]。因此,研究海洋气溶胶模型参数的相

收稿日期: 2011-03-08; **收到修改稿日期:** 2011-04-20

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950800)和国家自然科学基金(41005016)资助课题。

作者简介: 王家成(1968—),男,博士研究生,主要从事光学遥感信息处理与应用等方面的研究。

E-mail: shanqiangw@yahoo.com.cn

导师简介: 乔延利(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事遥感辐射定标基础、遥感传感器辐射校正、目标及背景波谱特征、偏振遥感成像探测机理和技术以及光学遥感信息表征技术等方面的研究。E-mail: yljiao@aiofm.ac.cn

关性,进而细化海洋气溶胶模型、提高海洋气溶胶反演精度是一项十分有意义的工作。同时气溶胶还是气候研究中最活跃、最不确定的因素之一,合理地确定气溶胶模型参数对气候的研究也具有重要的意义。

常用的气溶胶模型有小粒子模型和大粒子模型。对海洋气溶胶模型而言,小粒子模型的主要成分是水溶性粒子,大粒子模型的主要成分是海盐粒子和沙尘。实际应用中,常把气溶胶粒子谱分布看成是几个模态的叠加,而每种模态的分布用对数正态函数来表示。相应地,气溶胶模型参数有三个,即折射指数,中值半径及其标准偏差。早期的气溶胶模型参数主要是根据采样测量和实验室分析得到的,但正如 Tanré 等^[2]指出的,这种测量不能很好地反映整层大气柱内气溶胶的光学性质,为了获取更合理的气溶胶模型参数,需要对气溶胶的尺度分布和散射相函数等进行长时间的测量。气溶胶自动观测网(AERONET)从 1993 年起就开始了这方面的测量,现在已积累了丰富的数据,这些数据可以用于评估和改进气溶胶模型^[3,4]。选取了全球近 90 个海洋 AERONET 站点,共获取了 110,000 多个原始数据,通过对这些原始数据的筛选、分类和分析,发现了气溶胶模型中中值半径和标准偏差间的负相关性,并利用该关系对现行 MODIS 海洋气溶胶模型进行了评估。

2 气溶胶模型

人们提出了多种函数来描述气溶胶模型的粒子尺度分布。研究表明,两个对数正态函数的叠加能够较为恰当地描述对流层气溶胶的尺度分布^[5~8],常用的这类正态分布函数有两种,一种是体积尺度分布,可以表示为

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{V_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_v)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 V_0 表示单位面积大气柱内气溶胶粒子的体积, r_v 是粒子的体积分布中值半径, σ 是体积分布中值半径标准偏差的自然对数。另一种是粒子数尺度分布,可表示为

$$\frac{dN}{d\ln r} = \frac{N_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_n)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中 N_0 表示单位面积大气柱内气溶胶粒子的数目, r_n 是粒子的数分布中值半径, σ 在这两种分布函数中具有相同值。 r_v 和 r_n 之间的关系可表示为

$$r_n = r_v \exp(-3\sigma^2), \quad (3)$$

AERONET 数据中给出的中值半径是体积分布中

值半径,而在一些气溶胶模型中采用粒子数分布中值半径,此时可用(3)式进行转化。

3 AERONET 数据

AERONET 经过近 20 年的发展,在全球已经建立了近 450 个站点,这些站点主要分布在一些典型的区域,如沙漠、草原、城市、乡村和海洋等,所以虽然它们的测量是分散的,但它们的测量能够代表一些典型的气溶胶类型的特征。海洋站点主要分布在海岸、岛屿和搭建在海洋上的观察平台上。主要的仪器是法国 Cimel 公司生产的太阳辐射计,一般包括 440、500、675、870、1020 和 1640 nm 等波段,有的还包括偏振波段,波段的设置随仪器的型号而变。它能够自动对太阳直射光和天空漫射光进行测量,可以由这些测量反演得到整层大气柱内气溶胶的多种性质参数,如小粒子和大粒子的体积分布中值半径和标准偏差、光学厚度、散射系数、消光系数、球形度等。Dubovik 等^[9]对反演的精度进行了分析,指出反演得到的体积分布中值半径和标准偏差几乎在所有的实际情况下都是可靠的。因此可以用 AERONET 数据研究气溶胶模型参数的相关性。但同时他们也指出,折射指数的反演精度较低,因此本研究并未涉及折射指数。

4 数据筛选

采用 AERONET 的 L2.0 级数据,该数据是经过云检测^[10],并具有质量保证的数据。全球近 90 个海洋 AERONET 站点被选择用于本研究,并被分为两类,即非洲和中东的海岸站点(以下简称非洲站点),共 9 个,包括 Sir_Bu_Nuair, Capo_Verde, Abu_Al_Bukhoosh, Santa_Cruz_Tenerife, La_Laguna, Praia, Dakar, Dahkla 和 Izana; 其它海岸和远海站点,共 80 个。这些站点的分布如图 1 所示。所有站点的小粒子气溶胶数据都被用于研究小粒子气溶胶

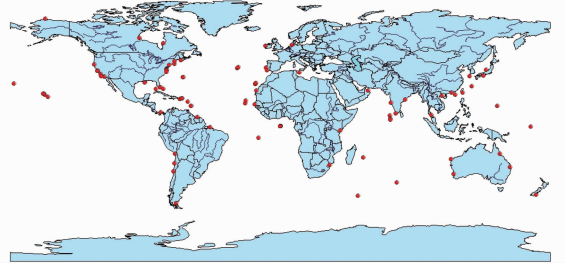


图 1 AERONET 站点分布图

Fig. 1 Locations of the AERONET sites used in this study

模型参数的相关性。非洲近海站点气溶胶的大粒子以沙尘为主,可用于研究沙尘气溶胶模型参数的相关性。其他的海岸站点和远海站点气溶胶的大粒子以海盐粒子为主,可用于研究海盐气溶胶模型参数的相关性。但非洲站点也会受到海盐粒子的影响,其他站点也会受到沙尘的影响,因此需要对 AERONET 站点的大粒子数据进行筛选,筛选按以下两步进行。

首先,根据 Dubovik 等^[9]的建议,所有的反演数据都要满足以下条件:1)太阳天顶角大于 45° ;2)辐射反演误差小于 4% ;3)气溶胶光学厚度 $\tau_a(440) \geq 0.05$ 。经过这样的筛选可以获取更为可靠的数据。

其次,对于非洲站点的数据,要求满足 $\tau_a(440) \geq 0.35$ 。根据 Tanré 等^[11]的研究结果,对于受沙漠影响的非洲海岸站点,当 670 nm 波段的光学厚度大于 0.31 时,表明气溶胶中沙尘粒子已经占主导,本研究将约束条件提高到 $\tau_a(440) \geq 0.35$,可以大大减小海盐的影响。而对其他站点的数据,则要求满足球形度(sphericity,反映了粒子接近球形的状况,是

AERONET 反演产品中的一个基本参数)大于 80% 。沙尘具有很大的不规则性,其球形度较小,而海盐粒子由于其具有吸水性而表现出较高的球形度,因此增加这一约束条件,就可以减小尘粒的影响。图 2(a)和(b)分别显示了非洲站点和其他站点大粒子气溶胶的中值半径(r_n)及其标准偏差(σ)的相关性。由图可见,两者具有相似的形状,即在末端都分为两支。对非洲站点而言,左边一支是主要的,代表沙尘。对其它站点而言,右边的一支是主要的,代表海盐粒子。图 2(a)和(c)分别显示了非洲站点的气溶胶大粒子数据在约束前后的分布情况,由图可见,海盐粒子(右边的一支)已经被很好地去除了,剩下的主要为沙尘粒子;图 2(b)和(d)分别显示了其他站点的气溶胶大粒子数据在约束前后的分布情况,由图可见,沙尘粒子(左边的一支)已经被很好地去除了,剩下的主要为海盐粒子。经过这样的筛选,得到了 33,142 个小粒子气溶胶数据,29,156 个海盐粒子气溶胶数据和 2,411 个尘粒气溶胶数据。这些数据来自全球的近海和远海站点,具有着广泛的代表性。

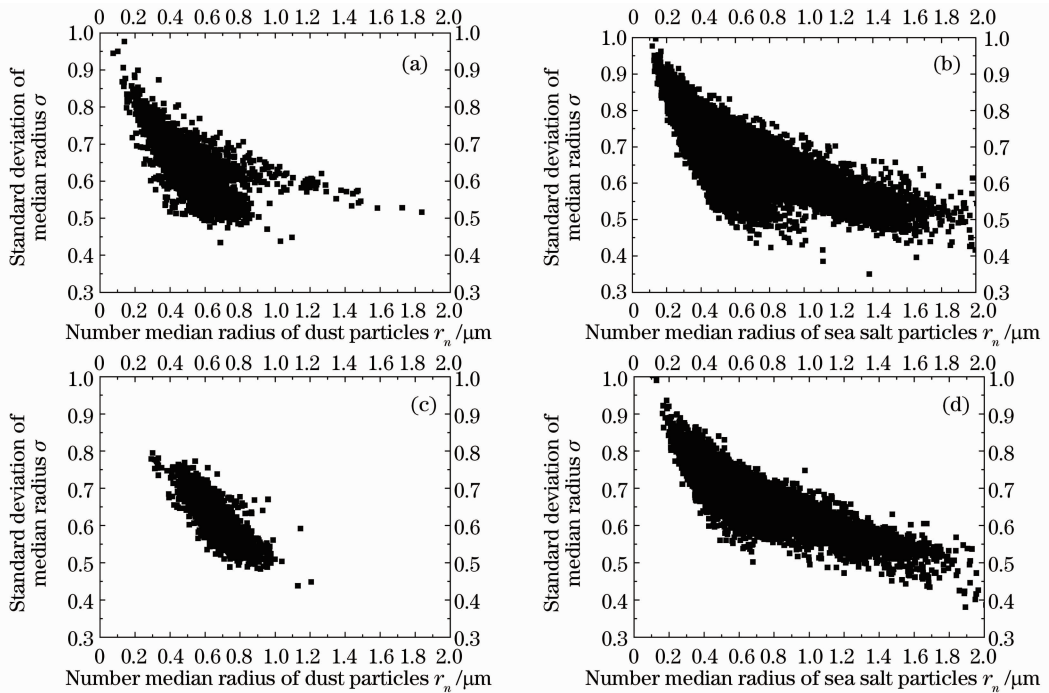


图 2 筛选前后的数据对比。(a)筛选前的沙尘数据;(b)筛选前的海盐粒子数据;(c)筛选后的沙尘数据;(d)筛选后的海盐粒子数据

Fig. 2 Comparison of raw data and screened data. (a) Raw data of dust-like aerosols; (b) raw data of sea salt aerosols; (c) screened data of dust-like aerosols; (d) screened data of sea salt aerosols

5 模型参数的相关性

图 3 给出了海洋小粒子气溶胶和大粒子气溶胶(包括海盐粒子和沙尘)中值半径和标准偏差的相关

性。图中的曲线为两者的拟合线,对小粒子而言,该关系呈现出衰减的指数形式,故采用指数形式来拟合,而对海盐粒子和沙尘粒子,该关系呈现出明显的

线性关系,故采用线性拟合。由图 3 可见,不论是小粒子气溶胶还是大粒子气溶胶,其中值半径和标准偏差都呈现出明显的负相关,对小粒子,相关系数达到 0.69,而海盐粒子和尘粒相关性更高,相关系数分别达到 0.87 和 0.81。

该相关性表明,不论是大气子气溶胶还是小粒

子气溶胶,其标准偏差都随着中值半径的增加而减小。图 3 中还给出了它们之间的经验关系。这一相关性对气溶胶建模具有一定的指导意义。作为这一相关性实际应用的例子,下面将利用该相关性简要评估一下现行 MODIS(中分辨率成像光谱仪)海洋气溶胶模型。

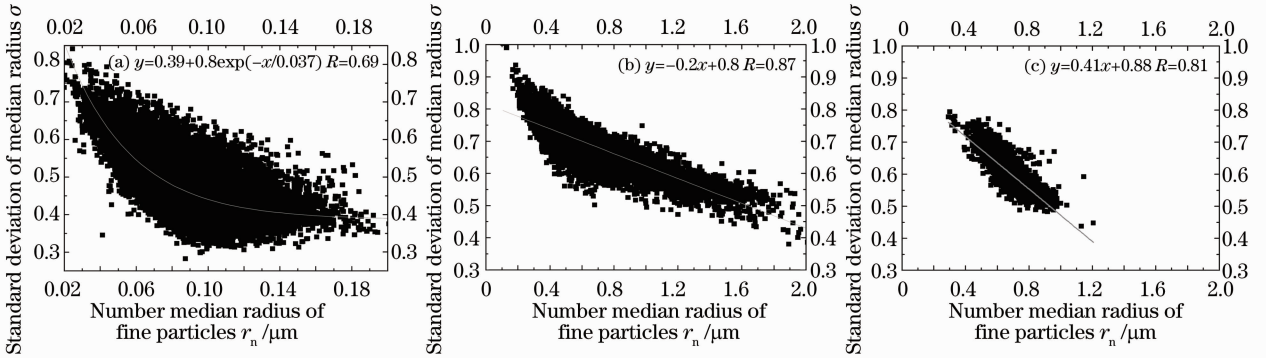


图 3 气溶胶数模型半径及其标准偏差的相关性。(a)小粒子气溶胶参数的相关性;(b)海盐粒子气溶胶参数的相关性;(c)沙尘气溶胶参数的相关性

Fig. 3 Correlation between number median radius and standard deviation. (a) Fine aerosols; (b) sea salt aerosols; (c) dust-like aerosols

6 利用相关性评估 MODIS 海洋气溶胶模型

最早的 MODIS 海洋气溶胶模型由 Kaufman 等^[12]提出(表 1),主要是经过地面采样测量获得,Tanré 和 Kaufman 等^[9~13]指出了这一方法的缺陷,同时也指出,气溶胶模型可以用 AERONET 站点数据进行验证和细化。现行的气溶胶模型则是根据早期的 AERONET 数据在 Kaufman 等^[14]的气溶胶

模型的基础上发展而来的(表 2)。通过比较可以发现二者的主要差别在于,现行的气溶胶模型去除了早期模型中的 F1 和 C6,并将原模型中 C4 的 r_n 修改为 0.6,而对标准偏差则未作修改。现在 AERONET 已经积累了丰富的数据,可以用于对现行的气溶胶模型进行验证。

表 2 现行的 MODIS 海洋气溶胶模型

Table 2 Current aerosol models for MODIS ocean aerosol retrieval

Aerosol Mode	$r_n/\mu\text{m}$	σ	Comments
F1	0.07	0.4	Water soluble
F2	0.06	0.6	Water soluble
F3	0.08	0.6	Water soluble with humidity
F4	0.10	0.6	Water soluble with humidity
C1	0.4	0.6	Wet sea salt type
C2	0.6	0.6	Wet sea salt type
C3	0.8	0.6	Wet sea salt type
C4	0.60	0.6	Dust-like type
C5	0.50	0.8	Dust-like type

现行气溶胶模型中 F1-F4 代表水溶性气溶胶,除了 F1 的标准偏差为 0.4 以外,其他三个模型的标准偏差均为 0.6,尽管它们的中值半径不同。根据小粒子气溶胶模型参数 r_n 和 σ 的相关性,F2-F3 的标准偏差应分别为:0.55,0.48 和 0.44,显然原模

表 1 早期的 MODIS 海洋气溶胶模型

Table 1 Previous aerosol models for MODIS ocean aerosol retrieval

Aerosol mode	$r_n/\mu\text{m}$	σ	Comments
F1	0.035	0.4	Water soluble
F2	0.07	0.4	Water soluble
F3	0.06	0.6	Water soluble
F4	0.08	0.6	Water soluble with humidity
F5	0.10	0.6	Water soluble with humidity
C1	0.4	0.6	Wet sea salt type
C2	0.6	0.6	Wet sea salt type
C3	0.8	0.6	Wet sea salt type
C4	0.4	0.6	Dust-like type
C5	0.5	0.8	Dust-like type
C6	1.0	0.8	Dust-like type

型中的标准偏差过大。另外,从图 3(a)可以发现,模型 F1 对应于点(0.07,0.4),其代表性很低,作为气溶胶模型是不合理的。

现行气溶胶模型中 C1-C3 代表海盐气溶胶,其中值半径分别为 0.4,0.6 和 0.8 μm ,相应的标准偏差均为 0.6。根据海盐粒子气溶胶模型参数 r_n 和 σ 的相关性,C1-C3 的标准偏差应分别为:0.725,0.685和 0.645,显然原模型中的标准偏差偏小。

现行气溶胶模型中 C4-C5 代表沙尘气溶胶,其中值半径分别为 0.6 μm 和 0.5 μm ,相应的标准偏差分别为 0.6 和 0.8。根据尘粒气溶胶模型参数 r_n 和 σ 的相关性,C4-C5 的标准偏差应分别为:0.63 和 0.55,而原模型 C5 的标准偏差设置为 0.8,显然过大,从图 3(c)也可以看出,标准偏差为 0.8 的情况

在沙尘气溶胶中几乎不可能出现,因此应予以修正。

气溶胶模型参数会明显地影响大气辐射传输的计算,从而影响查找表的可靠性,最终影响气溶胶的反演精度。利用该相关性对气溶胶模型进行修正,将有利于气溶胶反演精度的提高^[15~18]。为了说明这种影响,计算了标准偏差修正前后气溶胶模型 F3 和 C3 在光学厚度为 $\tau_{550}=0.2$ 时的大气顶表观反射率随波长的变化情况,结果如图 4 所示。由图可见,修正前后的差异主要表现在近红外波段,以 0.855 μm 波段为例(该波段对大小粒子都比较敏感),对 F3、C3,该差值分别为 0.002721 和 0.003331,如果以修正后的气溶胶模型的计算结果作为标准来计算相对差异,则这种相对差异分别为 11.6% 和 16.2%。显然,这样的差异会影响到反演的结果。

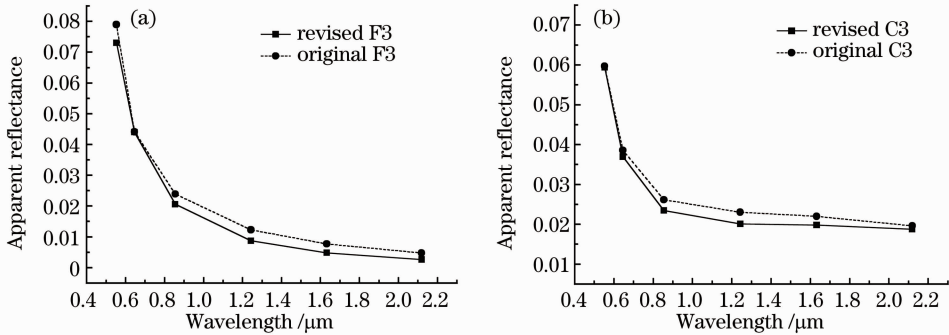


图 4 气溶胶光学厚度为 $\tau_{550}=0.2$,太阳天顶角为 36° ,观测天顶角为 42° ,相对方位角为 60° ,风速为 6 m/s 时,根据修正前后气溶胶模型计算得到的大气顶表观反射率随波长的变化情况,(a)小粒子模型 F3,(b)大粒子模型 C3

Fig. 4 Examples of simulated apparent reflectance of atmosphere as a function of wavelength for revised and original aerosol models. The simulations are made for a solar zenith angle of 36° , a view zenith angle of 42° , a relative azimuth angle of 60° , an aerosol optical depth of 0.2 at 550 nm, and a surface wind speed of 6 m/s, (a) for small-particle model F3, (b) for coarse-particle model C3

7 结 论

通过对全球近 90 个海洋 AERONET 站点气溶胶数据的分析,给出了海洋大气气溶胶光学模型参数 r_n 和 σ 的相关关系,并利用该关系简单评估了 MODIS 海洋大气气溶胶模型,指出了该模型中需要改进之处。该关系对气溶胶建模具有一定的指导意义。

致谢 感谢为 AERONET 站点的维护及数据的收集和而努力工作的团队,是他们的付出使本课题工作能够顺利地展开。

参 考 文 献

1 M. D. King, Y. J. Kaufman, D. Tanré *et al.*. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future

[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, **80**(11): 2230~2259

2 D. Tanré, Y. J. Kaufman, M. Herman *et al.*. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (014): 16971~16988

3 B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker *et al.*. AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *J. Remote Sens. Environ.*, 1998, **66**(1): 1~16

4 O. Dubovik, B. N. Holben, T. Lapyonok *et al.*. Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids [J]. *J. Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(10): 54-1~4

5 E. P. Shettle, R. W. Fenn. Models for the aerosol of the lower atmosphere and the effect of humidity variations on their optical properties[M]. AEGL Tech. Rep., AFGL-TR 790241, Opt. Phys. Div., Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force Base, Mass., 1979. 1~94

6 G. A. D'Almeida. On the variability of desert aerosol radiative characteristics [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **93** (D3): 3017~3026

7 Y. J. Kaufman, A. Gitelson, A. Karnieli *et al.*. Size

- distribution and scattering phase function of aerosol particle retrieved from sky brightness measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D5): 10341~10356
- 8 Y. J. Kaufman, B. N. Holben. Hemispherical backscattering by biomass burning and sulfate particles derived from sky measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D14): 19433~19445
- 9 O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben *et al.*. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D8): 9791~9806
- 10 A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck *et al.*. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base[J]. *Rem. Sens. Env.*, 2000, **73**(3): 337~349
- 11 D. Tanré, Y. J. Kaufman, B. N. Holben *et al.*. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D16): 18205~18218
- 12 Y. J. Kaufman, D. Tanré. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS [R]. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, 1998. 1~85
- 13 Ziauddin Ahmad, Bryan A. Franz, Charles R. McClain *et al.*. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and open oceans[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(29): 5545~5560
- 14 L. A. Remer, Y. J. Kaufman, D. Tanré *et al.*. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**(4): 947~973
- 15 He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan *et al.*. Rough sea-surface model for vector radiative transfer of coupled ocean-atmosphere system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 618~624
何贤强, 潘德炉, 白雁等. 海洋大气耦合矢量辐射传输粗糙海面模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 618~624
- 16 Li Dong, Chen Wenzhong. Comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data with in-situ sky radiometer observations over east china sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2828~2836
李栋, 陈文忠. MODIS 遥感中国东部海域气溶胶光学厚度与现场测量数据的对比分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2828~2836
- 17 Ma Jinji, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2039~2045
麻金继, 乔延利, 杨世植等. 利用 MODIS 图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2039~2045
- 18 Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1772~1777
孙夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1772~1777

栏目编辑: 谢婧