

文章编号: 0258-7025(2009)02-0312-06

遥感试验数据确定大气气溶胶类型的方法研究

胡方超^{1,2} 王振会^{1,2} 张兵^{3*} 李俊生³

¹ 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044

² 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; ³ 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100190

摘要 以太湖为研究区,通过水面光谱实验采集,地基太阳光度计大气测量,和当天的 MODIS 遥感影像,联合遥感太湖地区的大气光学特性,提出了一种实验确定气溶胶类型的方法。通过与卫星影像准同步的地面光谱和太阳光度计试验,利用辐射传输模式 6S,变化气溶胶类型各组分,建立关于星上辐射的查找表,并利用定义的相对误差参量,在其总误差最小时确定气溶胶类型。将其用于改进后的 Mie 散射程序来计算大气气溶胶粒子群包括偏振散射相函数等的光学特性,并用于太湖地区大气气溶胶光学厚度的反演中,所得结果参考 CE318 实测值,反演精度有了较大的提高。该研究方法与结果可为大气气溶胶光学特性计算,大气辐射传输方程,气溶胶光学厚度反演,卫星数据大气校正等遥感应用提供支持。

关键词 大气光学; 气溶胶类型; 太阳光谱的卫星信号二次模拟; CE318; 中分辨率成像光谱仪; 气溶胶光学厚度
中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0312

Study on Method for Determining Atmospheric Aerosol Type Using Remote Sensing Experimental Data

Hu Fangchao^{1,2} Wang Zhenhui^{1,2} Zhang Bing³ Li Junsheng³

¹ Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

² School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

³ Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The Taihu Lake is selected the study area. By collecting water surface spectral data of analytical spectral devices (ASD) by the ship, atmospheric data of CE318 sunphotometer on the shore, and the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) image data on the same day, the data were used to get optical properties of atmosphere in the study area. A method based on measurements for determining the aerosol type is presented. By using the nearly synchronous measurements of the data from surface spectrum and the sunphotometer with the image, using the radiative transfer model 6S (second simulation of a satellite signal in the solar spectrum), and varying the components of the aerosol type, a look-up table (LUT) is made for the radiance on the satellite. When the total relative error of the defined parameter for relative error gets to the least, the aerosol type is decided. It has been used to get the optical characteristics including polarized phase function of the poly-disperse aerosols by the improved Mie code. The aerosol type is used to retrieve the aerosol optical depth (AOD) in Taihu Lake area, and its retrieval accuracy has been improved a lot compared to the measured value from CE318. The method and results will be provided for the supporting of the remote sensing applications, such as the atmospheric optical properties, the radiative transfer calculation, the retrieval of AOD, and the atmospheric correction.

Key words atmospheric optics; aerosol type; second simulation of a satellite signal in the solar spectrum; CE318; moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS); aerosol optical depth

收稿日期: 2008-08-18; 收到修改稿日期: 2008-10-28

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403705)、中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-YW-14-2)和江苏省高校自然科学基金基础研究项目(08KJB170003)资助课题。

作者简介: 胡方超(1973-),男,博士,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: hufuncho@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: zb@ceode.ac.cn

1 引 言

大气气溶胶作为在全球气候变化^[1]中的一个主要的不确定性因素,通过地基遥感^[2,3]和卫星遥感^[4]已经被广泛地研究。大气气溶胶可对全球气候产生直接和间接的影响。通过云凝结核(Cloud condensation nuclei)和冰核(Ice nuclei)改变云的微物理过程,气溶胶粒子改变云的辐射传输特性^[5]。气溶胶特性包括粒子组成,尺度分布和总量等,其中总量常用气溶胶光学厚度(AOD)来表示。它是遥感气溶胶光学参数中最重要的一个参数,其反演在大气校正^[6]中扮演重要的角色,即大气校正中的基础与本质。在影响气溶胶光学厚度各种因素中,研究表明^[7]气溶胶类型的选择是最大的误差源。故在反

演气溶胶光学厚度前首先要确定与该研究地区实际相符合的气溶胶类型。

内陆水体大大不同于海洋一类水体,从而使得中分辨率成像光谱仪(MODIS)上专门用于水色遥感的大多数通道,处于饱和状态不能用于类似于太湖这样的水体。故这里选来用做气溶胶反演的通道仍是 MODIS1-7 波段。本文选取 2006 年 1 月和 7 月的两次太湖试验作为实例,并按图 1 上所示路线上各采样点采集水面光谱的数据;图上 A₁, A₂, A₃ 分别是北岸的大气测量点, B 点为南岸的大气测量点。

2 方 法

提出利用太阳光度计 CE318^[8]反演得到的 550 nm 气溶胶光学厚度,结合水面光谱分析设备(ASD)光谱仪实测的反射率与 MODIS 影像数据,来确定气溶胶类型的算法。下面就以 2006 年冬夏太湖两次试验为例,通过查找表与最小化技术来实现该算法,以确定太湖地区的冬季和夏季气溶胶类型。

2.1 确定气溶胶类型的算法

2.1.1 MODIS 波段对应的水面反射率

ASD 测得水面反射率包含了天空散射光贡献在内,这里水面反射率指的是传统反射率 ρ_T

$$\rho_T = \frac{E_u}{E_d} = \frac{L_u}{L_d}, \tag{1}$$

式中 L 为辐亮度, E 为辐照度。

测得的水面反射率光谱分辨率为 1 nm, 如图 2 示。



图 1 太湖实验区航行路线以及水面采样点和大气测量点示意图

Fig.1 Sketch map of the shipping line, the water sampling points and the atmospheric measurement stations in Taihu Lake study area

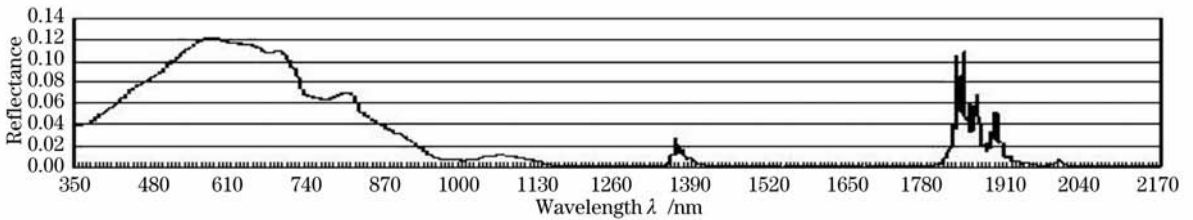


图 2 ASD 测量得到的水面反射率光谱

Fig.2 Water surface spectral reflectance by ASD

MODIS 各个波段的光谱响应函数 $f(\lambda)$, 利用(2)式可得到与 MODIS 各波段对应的水面反射率 ρ_e

$$\rho_e = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_0(\lambda) f(\lambda) \rho_T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_0(\lambda) f(\lambda) d\lambda}, \tag{2}$$

式中 $E_0(\lambda)$ 为大气层外光谱辐照度。

2.1.2 算法描述

算法过程用下面的流程图来表示^[9], 如图 3 所示。

选择 6S 模式, 建立关于变化气溶胶各组分体积百分比的查找表。

查找表以下的算法来计算生成: 以太阳-地表-卫星的观测几何(即太阳天顶角 θ_s , 太阳方位角

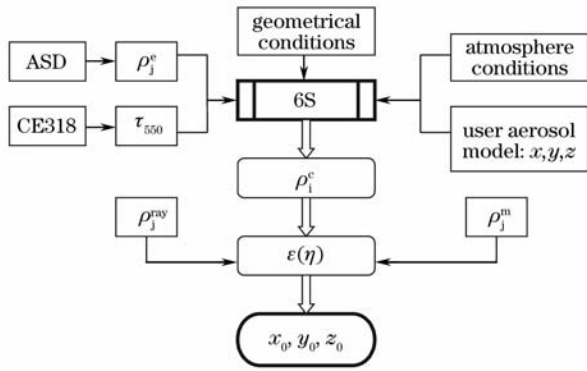


图 3 自定义气溶胶类型的确定流程图

Fig. 3 Flow chart of user-defined aerosol model

ϕ_s , 卫星天顶角 θ_v , 卫星方位角 ϕ_v 地表高度) 和大气条件(选择合适的大气模式,太湖地区一般取中纬度冬季或中纬度夏季大气模式)为基础,利用 ASD 测量得到的水面反射率,和 CE318 反演得到 550 nm 气溶胶光学厚度做输入参数,而选用气溶胶类型为自定义模式,按照一定的策略变化在标准辐射大气模型(SRA)中各种基本气溶胶组分的体积百分比(如表 1 所示),用 6S 模式计算出 MODIS 各个波段上的卫星表观反射率。

表 1 SRA 气溶胶类型中的四种基本组分

Table 1 The 4 basic components of 2 aerosol models in the SRA

Aerosol type	Continental	Urban
Dust-like	0.70	0.17
Water-soluble	0.29	0.61
Oceanic	0	0
Soot	0.01	0.22

表 2 水面光谱测量点、时间及与太阳卫星之间的观测几何关系

Table 2 The positions and time of points on water surface spectral reflectance and the sun-surface-satellite geometrics

Points	Longitude	Latitude	Time	θ_s	ϕ_s	θ_v	ϕ_v
26P	31.28	120.03	10:30	55.05	164.3	41.4	-77.92
48P	30.99	120.23	11:12	54.71	164.56	42.8	-77.13
30P	31.24	120.33	10:05	28.55	109.60	56.1	94.85
47P	31.03	120.25	10:50	20.46	124.37	13.07	-79.50

表 3 4 个水面测量点的等效后的七个波段的反射率 ρ_j^c

Table 3 The equivalent reflectance on the 4 water surface points in the 7 bands

Points	MODIS 1	MODIS 2	MODIS 3	MODIS 4	MODIS 5	MODIS 6	MODIS 7
26	0.1144	0.0437	0.0792	0.1159	0.0020	0.0008	0.0013
48	0.1064	0.0487	0.0724	0.1112	0.0053	0.0029	0.0027
30	0.0500	0.0083	0.0438	0.0782	0.0008	0.0007	0.0012
47	0.0728	0.0111	0.0647	0.1016	0.0012	0.0009	0.0013

4) 四个水面光谱测量点对应于 MODIS 各波段的, Rayleigh 散射贡献项 ρ_j^{Ray} 可利用表 2 中所示的相同观测几何关系,在 6S 模式中设置无气溶胶方式计算得到。

5) τ_{550} 代入 6S 模式计算的气溶胶于 550 nm 处

为了确定气溶胶的类型,参考相关文献^[10],定义了新的一个量 η ,来表示气溶胶光学厚度的拟合相对误差 ϵ

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \eta^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\rho_j^c - \rho_j^m}{\rho_j^c - \rho_j^{ray} - \rho_j^e + 0.01} \right)^2}, \quad (3)$$

式中 ρ_j^c 为计算的 MODIS 第 j 波段的反射率, ρ_j^m 为 MODIS 影像上表现反射率, ρ_j^{ray} 为 Rayleigh 散射贡献的反射率, ρ_j^e 是水面等效后的反射率。式中 0.01 是为了防止在清洁水体更长的波段时除以 0 出错而设置的^[11]。

2.2 处理流程

1) 研究点的选取

在满足卫星过境的时间内天空晴朗少云的条件下,综合时间和空间这两方面的因素选取了下面四个点,如图 1 所示。

冬季 1 月 9 日 26, 48 点和夏季 7 月 30 日 30 点, 7 月 31 日 47 点。

注: 1 月 9 日卫星过境时间(北京) 11:10, 7 月 30 日过境时间是 10:10, 7 月 31 日的过境时间为 10:50

2) 四个水面光谱测量点的位置与时间以及与太阳和卫星的观测几何关系,如表 2 所示。

3) 四个光谱测量点所测光谱经波段等效后的对应于 MODIS 7 个波段的水面反射率如表 3 所示。

4) 四个水面光谱测量点对应于 MODIS 影像上的表现反射率 ρ_j^m , 如表 4 所示。

的 光 学 厚 度。

太阳光度计反演气溶胶光学厚度的验证,同时还使用了从 NASA AERONET 网站上下载的气溶胶 2.0 版本的气溶胶光学厚度产品,将 Angstrom 产品与我们实验时反演的气溶胶产品相比较^[9]。

表 4 MODIS 遥感影像上对应 4 个点的表观反射率

Table 4 Apparent reflectance on the 4 points in the 7 bands on the MODIS image

Points	MODIS 1	MODIS 2	MODIS 3	MODIS 4	MODIS 5	MODIS 6	MODIS 7
26	0.09675	0.05389	0.11820	0.10642	0.01489	0.01373	0.00762
48	0.08916	0.05430	0.10981	0.10051	0.02218	0.00823	0.00736
30	0.09743	0.11763	0.17465	0.14405	0.11044	0.07768	0.03628
47	0.19033	0.14653	0.19383	0.21567	0.13659	0.13369	0.10854

3 讨 论

从图 4 看出,从 11 点开始的半小时内,太湖南北大气测量点的 B 和 A₁ 点的 τ_{550} 已经开始接近相等了。它们的值刚好与 AERONET (Aerosol Robotic Network, NASA) 的产品得到的 τ_{550} 接近相等^[9]。这也说明当天的气溶胶 11 点前有明显的不同,这种差异是由于测量地点的差异引起的。但从 11 点以后三个不同地点的光度计得到的 τ_{550} 接近相等,11 点后太湖区域的气溶胶分布很均匀。在此期间 TERRA 星过境时 τ_{550} 是稳定少变的。此时光度计得的 τ_{550} 可认为就是实际的真实值。当 TERRA 星过境时,由光度计测量得到的 τ_{550} 值 0.397,0.314 和 0.696 就分别代表了 1 月 9 日,7 月 30 日,31 日时真实值。相似地,表 3 中各个点的水面等效反射率被当作为 6S 模式中的 ρ_0 项被用于生成查找表 (LUT)。

以 26 点对应 MODIS 第 1 波段为例,从表 3、表 4 分别提取水面反射率 $\rho_0 = \rho_1^i = 0.1144$,表观反射率 $\rho_j^m = 0.096$,用于反演气溶胶光学厚度;对大陆型气溶胶 ρ_1^i, ρ_j^m 不能用来反演气溶胶,而且若用此时测量的 τ_{550} 对 ρ_j^m 来做大气校正的话,则会对订正后的值得到负值反射率。对城市型气溶胶, ρ_1^i, ρ_j^m 反演的 AOD 误差会很大。类似对其它通道试验,可判断出:不论是大陆型还是城市型气溶胶类型都不适用于太湖地区。

在所有的假定之中,如均匀,朗伯体,大气模式等,气溶胶模型可能是最大的误差因素^[9]。因此我

们应用基于查找表和最小化的技术[即(3)式中 ϵ 为最小值时]得到了太湖地区自定义的气溶胶类型如表 5 示。它们是介于大陆型和城市型之中的气溶胶类型。

表 5 太湖地区冬季和夏季的气溶胶类型

Table 5 Components of aerosol model for Taihu in winter and summer

Taihu	Winter	Summer
Dust-like	0.50	0.48
Water-soluble	0.29	0.50
Oceanic	0	0
Soot	0.21	0.02

比较表 5 中冬季和夏季太湖地区气溶胶类型,其中的三种基本气溶胶粒子,这两种类型主要的不同体现在水溶性粒子(water-soluble)和煤烟粒子(soot)上,对沙尘性粒子(dust-like)变化很少,几乎相同。这从太湖的地理环境来看也是容易理解的:由于太湖周边没有大的沙尘粒子源,被周边发达的工业城市所围绕。在夏季由于平均气温比冬季要高得多,从而使水汽更易于蒸发,而在冬季气温较低,再加上由于人类活动如烟煤燃烧,采暖等的加剧,烟尘性粒子更易于积聚。虽然中国东部以人类活动产生的气溶胶为主,但在春季、秋季、冬季受到来自北方沙尘的影响显著。人口密集城市地区气溶胶指数低于夏季和周边地区,显示城市地区由于人类活动产生的扬尘、煤烟等大粒子占有相当比例。还可以从表 5 中冬季、夏季气溶胶类型的各个组分得到解释:因为这三类组分中 dust 粒子平均半径最大,其

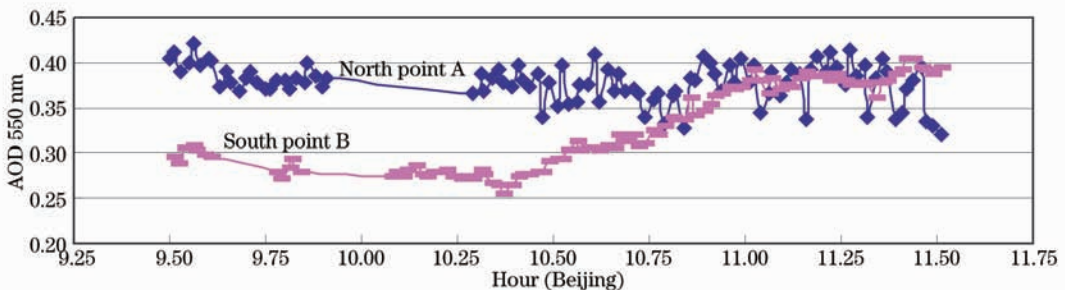


图 4 2006 年 1 月 9 日太湖南北岸两台光度计得到 550 nm 处 AOD 随时间的变化

Fig. 4 AODs at 550 nm variations by the BeiJing time on Jan, 9th on north A₁ Point and south bank B point

次是 soot 粒子,最小的是 wate-soluable 粒子^[12]。

3.1 太湖上空气溶胶光学厚度的反演

确定了太湖地区的气溶胶类型后,进行气溶胶光学厚度的反演。这里也是基于查找表的方法。即气溶胶类型现作为已知输入量,而光学厚度做为可变量,查找后得到就是输出的气溶胶光学厚度。对于水面单点测量值的气溶胶光学厚度反演也是对所得太湖地区自定义气溶胶类型的验证。现以 2006 年

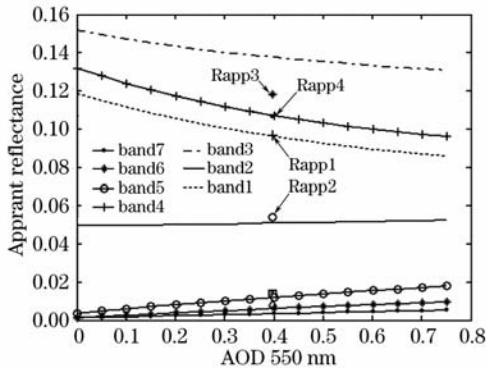


图 5 MODIS 的不同波段对应的天上表现观反射率随光学厚度的变化

Fig. 5 Apparent reflectance variation by the AODs in MODIS different bands

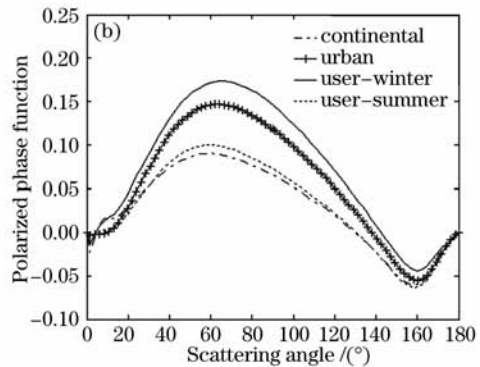
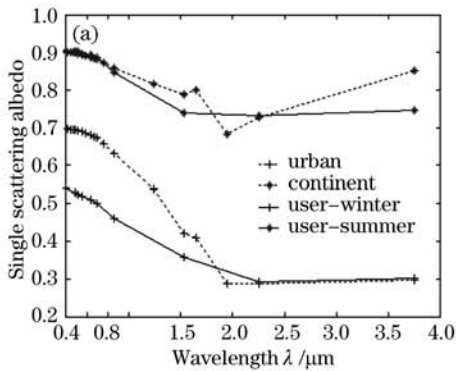


图 6 (a)四种气溶胶类型的单次散射反照率;(b)四种气溶胶类型的偏振相函数

Fig. 6 (a) Single scattering albedo of four models; (b) polarized phase function of four models at 550 nm

4 结 论

一般的使用大陆型和城市型的气溶胶,已不能满足更精确的气溶胶反演和大气校正的需要。本文应用从水面光谱到岸上大气测量,从地基到星基的遥感数据相结合,基于自定义气溶胶类型的查找表和总相对偏差最小化的技术确定了在太湖地区冬季和夏季的气溶胶类型(表 5)。通过所确定的自定义气溶胶类型更能接近于研究区的实际,与常用的大

陆型和城市型相比较,可以说在太湖地区的气溶胶类型应属于两者的混合型。

1 月 9 日测量的 26 点为例。反演结果如图 5 所示。图中除了水面反射率 7 个波段所对应的变化线外,还标出了实际气溶胶和表观反射率的位置(τ_{550} , R_{appj}), $j=1, 4$ 波段。从该点作一平行于 AOD550 轴的直线,与同波段的变化线有交点的坐标对应的横坐标即为查找反演出来的气溶胶光学厚度。综合来看图 5 宜于用来反演的两个波段为 Band 1, 和 Band 4, Band 2 用来演的误差较大。

3.2 气溶胶光学参数的计算

气溶胶的光学特性也许是气溶胶的各种物理特性中最特殊也是最重要的物理特性之一^[13~15]。它常用单次散射反照率、散射相函数、不对称因子等光学参量来表示。通过对单个粒子 Mie 散射程序的改造,使之能进行粒子群即多分散体系的计算。这里仅给出偏振散射相函数,单次散射反照率两种参量的计算如图 6 示。

图 6 给出了太湖地区的夏季和冬季与标准城市型,大陆型的气溶胶光学参量——单次散射反照率和偏振相函数的计算比较。可看出与典型气溶胶类型相比,太湖地区自定义夏季和冬季的,有较明显的不同,这也说明了在太湖地区确定气溶胶类型很有其必要性。

陆型和城市型相比较,可以说在太湖地区的气溶胶类型应属于两者的混合型。

本文提供这样一种遥感试验确定气溶胶类型的方法:联合应用 MODIS 和太阳光度计 CE318 数据^[12]结合地面准同步的光谱测量可以确定不同季节当地的气溶胶类型,有助于将来应用在精确的大气校正过程中。

参 考 文 献

- 1 Hansen J. E., Lacis A. . Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, **346**: 713~719
- 2 Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I. *et al.*. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1998, **66**: 1~16
- 3 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 4 Kaufman Y. J., Tanré D., Boucher O. . A satellite view of aerosols in the climate system[J]. *Nature*, 2002, **418**: 215~223
- 5 Peng Nina, Yi Weiming, Ma Jinji *et al.*. Atmospheric correction of QuickBird-2 imagery for turbid water coastal areas using MODIS data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 817~821
彭妮娜, 易维宁, 麻金继 等. 利用 MODIS 数据进行 QuickBird-2 卫星海岸带图像大气校正研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 817~821
- 6 Hegg D. A. . Heterogeneous production of cloud condensation nuclei in the marine atmosphere[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**: 2165~2188
- 7 Hu Fangchao, Zhang Bing, Chen Zhengchao *et al.*. Improved algorithm for the retrieval of aerosol optical depth using the sunphotometer CE318[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(suppl.): 38~43
胡方超, 张 兵, 陈正超 等. 利用太阳光度计 CE318 反演气溶胶光学厚度改进算法的研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(增刊): 38~43
- 8 Li Chengcai, Liu Qihan, Mao Jietai *et al.*. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hong Kong[J]. *Atmospheric Sciences*, 2005, **29**(3): 335~342
李成才, 刘启汉, 毛节泰 等. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度[J]. *大气科学*, 2005, **29**(3): 335~342
- 9 Hu Fangchao. The atmospheric properties over Taihu Lake jointly remote sensed from MODIS and sun photometer data[D]. eijing: Institute of Remote Sensing Applications, CAS, 2007. 91~116
胡方超. 基于 MODIS 与太阳光度计联合遥感太湖地区大气特性[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007. 91~116
- 10 Tanré, D. Kaufman, Y. J. Herman M *et al.*. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiance[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16971~16988
- 11 Remer L A, Tanré D, Kaufman Y J. MODIS ATBD: Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 5. Product ID: MOD04/MYD04-C005, 2006. 3~20
- 12 Liu Yujie, Yang Zhongdong. Principle and Algorithm Process of MODIS Remote Sensing Information[M]. Beijing: Science Press, 2001. 122
刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 122
- 13 Lu Zhengyong . Introduction to Aerosol Science[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000
卢正永. 气溶胶科学引论[M]. 北京: 原子能出版社, 2000
- 14 Fang-chao Hu, Bing Zhang, CXhen Z *et al.*. Investigation of atmospheric aerosol optical properties over Lake Taihu using MODIS and CE318 data[C]. *SPIE*, 2007, **6625**: 66251F
- 15 Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli *et al.*. Analysis of the optical characteristic of littoral aerosol influenced by typhoon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2046~2050
赵 强, 杨世植, 乔延利 等. 台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2046~2050