

文章编号: 1007-4619(2006)05-0756-06

从 ASTER 和 Landsat/TM 卫星数据反演 日本千叶地区地表反射率 和气溶胶光学厚度分布

刘 诚^{1,2}, 阚瑞峰³, Hiroaki KUZE², Mitsuo MINOMURA²

(1. 中国科学技术大学 物理系, 安徽 合肥 230026; 2. 千叶大学环境遥感中心, 日本千叶, 263-8522;

3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在卫星遥感大气研究中,已有的精确反演海洋表面反射率和其上空气溶胶光学厚度分布的算法,由于陆地地表像元反射率的不均匀性,使得这些方法在应用于陆地表面反射率的反演中具有一定的局限性。而利用三步校正法可以去除地表邻近像元的影响,从而消除这种局限性。文中介绍了三步校正的算法,并对日本千叶地区 ASTER 卫星数据进行了大气和地表邻近像元的影响校正,精确地反演了该地区的地表反射率,通过地表反射率和气溶胶光学厚度之间的关系计算得到了气溶胶光学厚度的分布。同时证明了在洁净天反演的地表反射率可以应用于反演同一季节中非洁净天的气溶胶光学厚度分布,这样不但减小了气溶胶模式选择的影响,而且实现了在缺少太阳辐射计数据情况下获得气溶胶光学厚度分布的目的。

关键词: ASTER; Landsat/TM; 大气校正; 地表反射率; 气溶胶光学厚度

中图分类号: P407/X37 **文献标识码:** A

Retrieval of the Surface Reflectivity and the Aerosol Optical Thickness over Chiba Land Area from ASTER and Landsat/TM Imagery

LIU Cheng^{1,2}, KAN Rui-feng³, Hiroaki KUZE², Mitsuo MINOMURA²

(1. The University of Science and Technology of China, Anhui Hefei 230026, China;

2. Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University, Chiba 263-8522, Japan;

3. Key Lab. of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Anhui Hefei 230031, China)

Abstract: In the atmospheric research by satellite remote sensing, due to the inhomogeneous pixels of land surface, there are some limitations of the present algorithms in the reflectivity retrieve of the earth's surface, which are used in deducing the oceanic surface reflectivity and the aerosol optic thickness above it. Now these limitations can be removed by the three-step approach. The algorithm of three-step approach was introduced; the earth's surface reflectivity of Chiba was retrieved after the atmospheric correction and effect removing of the neighboring pixels to the ASTER satellite data. The distribution of the aerosol optic thickness was then retrieved from the earth's surface reflectivity. The earth's surface reflectivity in the fair weather days was applied to retrieve the aerosol optic thickness of the other days in the same season, which not only reduced the effect of the

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家 863 计划资源环境领域“城市大气污染时空分布光学监测技术系统与示范”(编号: 2005AA641010), 中国科学院百人计划项目(编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目(编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目(编号: KJSX0401)。

作者简介: 刘 诚(1981—), 男, 中国科技大学硕士研究生。研究方向为环境光学与光电子技术。E-mail: liucheng@hficas.ac.cn。

choice of aerosol model but also realized the deduction of the aerosol optic thickness distribution without the data from the sun photometer.

Key words: ASTER; Landsat/TM; atmospheric correction; albedo; aerosol optic thickness

1 引言

在使用卫星遥感数据对大气的研究中,若要获得大气气溶胶光学厚度的分布,首先要从卫星数据中反演出精确的地表反射率,虽然目前已经有精确的算法反演海洋表面反射率和其上空的的气溶胶光学厚度分布^[1-3],但由于陆地表面反射率的空间不均一性,在这些方法应用到陆地表面的时候,会有一定的局限性。本文通过采用三步校正法^[4]来去除地表邻近像元的影响,精确地反演出了千叶地区的地表反射率。在三步校正法中,以大气辐射组分为变量,反演地表反射率。因此,这种方法比使用查表反演更加通用。由于地表反射率与大气洁净度无关,而与大气辐射有关^[1-4],因此本文选择同一季节中最洁净天(通过太阳辐射计测得)的卫星数据,通过反演得到的地表反射率来计算这个季节中非洁净天的大气气溶胶光学厚度。

2 ASTER, Landsat/TM 和太阳辐射计数据

Landsat/TM 是美国在 1985 发射并使用至今的多光谱传感器,其参数见表 1。ASTER 是搭载在美国于 1999 年 12 月发射的 Terra 资源环境监测卫星上的多光谱传感器。它们具有高空间分辨力,光谱范围宽等特点,其中 ASTER 可见光波通道高空间分辨力可达 15m,见表 2。本文选取以日本千叶大

表 1 Landsat/TM 光谱通道特性参数

Table 1 Landsat/TM spectrum specification

波段编号	波长范围/ μm	光谱响应	分辨率/m
1	0.45—0.52	蓝-绿	30
2	0.52—0.60	绿	30
3	0.63—0.69	红	30
4	0.76—0.90	近红外	30
5	1.55—1.75	中红外	30
6	10.40—12.50	热红外	120
7	2.08—2.35	中红外	30

表 2 ASTER 光谱波段参数

Table 2 ASTER spectrum specifications

分系统	波段序号	光谱分辨率/ μm	空间分辨率/m
VNIR	1	0.52—0.60	15
	2	0.63—0.69	
	3	0.76—0.86	
SWIR	4	1.600—1.700	30
	5	2.145—2.185	
	6	2.185—2.225	
	7	2.235—2.285	
	8	2.295—2.365	
	9	2.360—2.430	
TIR	10	8.125—8.475	90
	11	8.475—8.825	
	12	8.925—9.275	
	13	10.25—10.95	
	14	10.95—11.65	

学(东京东南 30km, 35.62°N, 140.12°E)为中心包含东京湾在内的千叶地区的 ASTER 和 Landsat/TM 可见光通道卫星数据,来反演其地表反射率和大气气溶胶光学厚度分布,在第一步反演地表反射率中采用的气溶胶光学厚度由位于千叶大学的太阳辐射计测得。

3 三步校正法算法

在三步校正法中,第一步除去了大气路径辐射成分,第二,三步除去了地表邻近像元的影响,所以三步分离法可以应用于地表反射率不均一的陆地卫星图像反演。在气溶胶光学厚度分布的反演中,证明了当气溶胶光学厚度很小的时候,不同的气溶胶模式对大气校正的影响也很小。

3.1 大气顶辐射组分的分离

在给定的大气和地表条件下,由卫星传感器接收到的大气顶辐射由 4 部分组成,如图 1 所示。其中, L_{gd} 是地表直接反射, L_{gi} 是地表间接反射, L_0 是大气路径辐射, L_{pm} 是由于多重散射产生的路径辐射。其中 L_{gi} 和 L_{pm} 随地表邻近像元反射率的改变而变化。这 4 部分与地表反射率之间的关系如图 2 所示,大气路径辐射 L_0 不随地表反射率变化,而其他组分均与地表反射率变化成正比,其中地表直接反

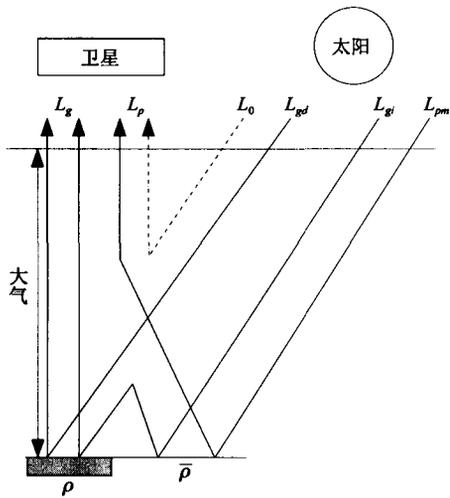


图 1 大气顶辐射的 4 个组成部分

Fig.1 Schematic illustration of the four radiance components

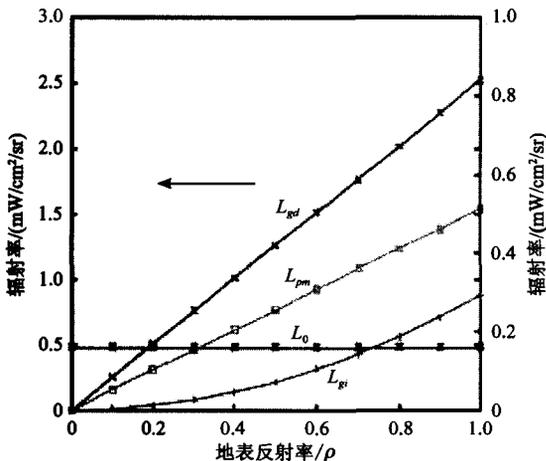


图 2 气溶胶光学厚度为 0.198 时,大气顶辐射,四个组成部分随地表反射率变化图(L_{gd} 的纵坐标在左边,其他三个组分的纵坐标在右边)

Fig.2 The radiance components calculated versus the surface reflectivity with the aerosol optical thickness of 0.198. (The left ordinate is for L_{gd} , and the right ordinate is for the other components)

射, L_{gd} 随地表反射率增加最大。因为 MODTRAN4.0 假定地表反射率均一,与本文研究的日本千叶地区的实际情况不符合,所以首先对 MODTAN4.0 代码做了修改,以适合地表反射率非均一的情况,然后计算得到大气顶辐射 L_{total} :

$$L_{total} = L_{gd} + L_{gi} + L_{ps} + L_{pm} \quad (1)$$

3.2 大气与地表邻近像元影响的校正

首先对卫星数据做大气辐射校正,在假定地表

为均一的朗伯体条件下,地表反射率 $\rho(\lambda)$ 的反演的最终方程如式(2)(详细推导见文献[1],本文只给出最后结果):

$$\rho^{(1)} = \rho_{MOD} \frac{L_{pix} - L_0}{L_{total} - L_0} \quad (2)$$

这里的 ρ_{MOD} 是作为 MODTRAN 计算输入参数的假设地面反射率,其值与反演得到的地表真实反射率无关^[1], L_{total} 和 L_0 是 MODTRAN 计算出的大气总辐射和路径辐射, L_{pix} 是数据中的每个像元的辐射。

通过(3)与(4)式除去地表邻近像元的影响:

$$\rho^{(2)} = \rho^{(1)} + \frac{L_p - L_0}{L_g} (\rho^{(1)} - \bar{\rho}^{(1)}) \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}^{(1)} = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^{N^2} \rho_j^{(1)} \quad (4)$$

式中, L_g 是地面直接和间接反射之和, L_p 是总的路径辐射之和,即 $L_0 + L_{pm}$ 。 N 根据不同地表实际情况,取值有所不同,这里 N 取 15。由于 $\bar{\rho}^{(1)}$ 是 $\rho^{(1)}$ 的平均值,而 $\rho^{(1)}$ 是没有经过地表邻近像元影响校正的地表反射率,因此 $\rho^{(2)}$ 仍然受到邻边像元的影响,通过(5)式进一步去除这种影响:

$$\rho^{(k)} = \rho^{(k-1)} + \frac{L_p - L_0}{L_g} (\bar{\rho}^{(k-2)} - \bar{\rho}^{(k-1)}), \quad k = 3, 4, \dots \quad (5)$$

图 3 是从 ASTER 数据反演得到的只经过大气

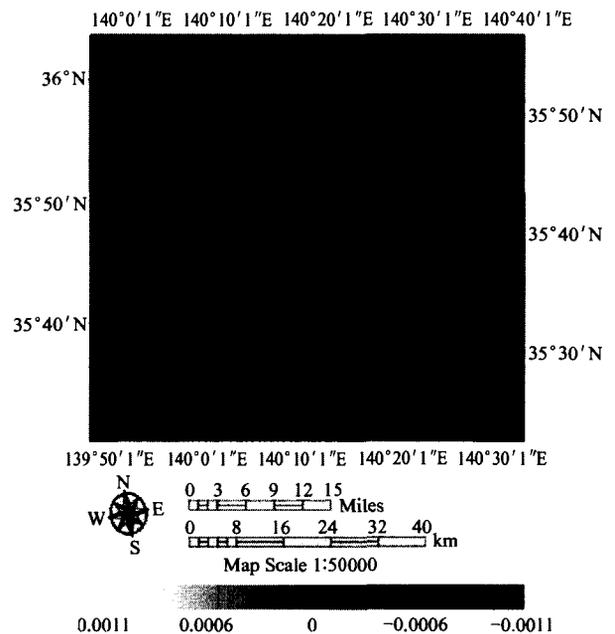


图 3 对 ASTERband1 进行邻边校正后的结果($\rho^{(1)} - \rho^{(3)}$)

Fig.3 Results of the adjacency-effect correction for ASTER band1 ($\rho^{(1)} - \rho^{(3)}$)

校正和经过大气与地表邻近像元双重校正后的差异图,即 $\rho^{(1)} - \rho^{(3)}$ 。从图中可以发现海洋像元数值变化很小(颜色均一),而陆地像元数值变化较大,这说明海洋表面反射率均一,而陆地各像元反射率相差较大,因此对于反演陆地地表反射率来说,进行地表邻近像元影响的校正是十分必要的。

4 结果与讨论

由于地表反射率与大气洁净度无关,而与季节变化有关^[1-4],从冬季和秋季的地表反射率—像元数二维曲线图(图 4)中可以发现,该地区地表像元反射率值主要分布在两个峰值区域,其中较小的峰为海洋(东京湾)像元,其反射率值主要分布在 0.02—0.03 之间,随季节变化不大;较大的峰为陆地像元(主要为植被地区和城市建筑物等),反射率值主要分布在 0.05—0.18 之间,由于植被像元在 0.52—0.60 μm (ASTER 波段 1)的反射率随季节变化较大,所以图中陆地像元(较大的峰)的反射率值也随季节变化较大,但在同一季节内,却可以假定地表反射率的变化是可以忽略的^[5]。

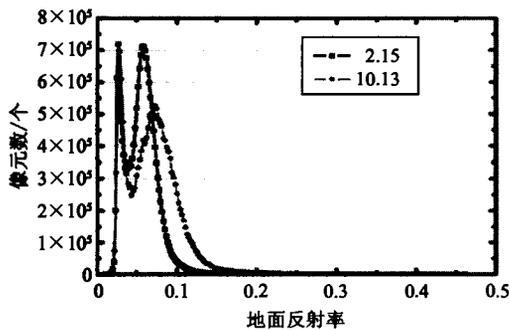


图 4 冬季(2002 年 2 月 15 日)和秋季(2002 年 10 月 13 日)的地表反射率—像元数二维曲线图

Fig. 4 The plot of ρ -pixels versus surface reflectivity, including that of winter (a, 2002. 02. 15) and that of autumn (b, 2002. 10. 13)

如果在 MODTAN 模拟中选择不同的气溶胶模式,那么反演出的地表反射率也会有所不同。经过敏感性分析后发现,当气溶胶光学厚度较大时,选择不同的气溶胶模式,对反演出的地表反射率值有较大影响,如图 5 所示。当气溶胶模式选择乡村和海洋型气溶胶时,反演出的地表像元反射率值相差不大;但当气溶胶模式选择城市型气溶胶时,反演出的地表反射率要远大于气溶胶模式为乡村和海洋型时的结果。

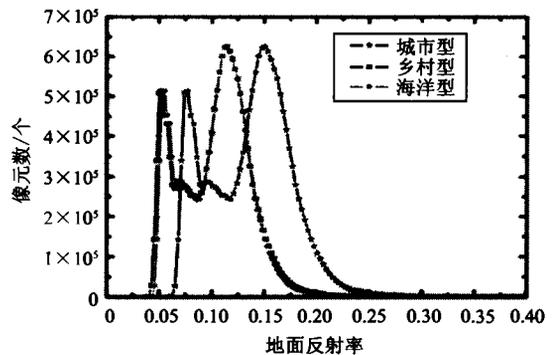


图 5 当气溶胶光学厚度为 0.34 时,在不同的气溶胶模式下,千叶地区春季 ASTER 波段 1 的地表反射率—像元数二维曲线图

Fig. 5 The plot of pixel numbers versus surface reflectivity of ASTER channel 1 in spring (12:22 JST on March 19, 2002 aerosol optical thickness: 0.34.) using different aerosol model in MODTRAN

当气溶胶光学厚度较小时,选择不同的气溶胶模式对反演出的地表反射率值的影响也较小,可以忽略,如图 6 所示。无论气溶胶模式选择乡村、海洋还是城市型,反演出的地表像元反射率值都相差不大。

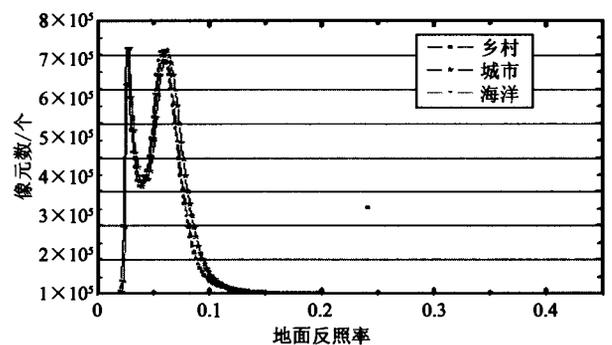


图 6 当气溶胶光学厚度为 0.14 时,在不同的气溶胶模式下,千叶地区冬季 ASTER 波段 1 的地表反射率—像元数二维曲线图

Fig. 6 The plot of pixel numbers versus surface reflectivity of ASTER channel 1 in winter (12:22 JST on February 15, 2002 aerosol optical thickness: 0.14.) using different aerosol model in MODTRAN

由于当气溶胶光学厚度很小时,大部分气溶胶集中在低对流层,尤其是大气边界层处,因此可以认为:当气溶胶光学厚度很小时,各像元处的气溶胶光学厚度值可以近似地等于位于千叶大学的太阳辐射计测得的气溶胶光学厚度值^[5]。

因此,可以把使用同一季节中最洁净天(气溶

胶光学厚度小于 0.15) 的卫星数据和太阳辐射计测得的气溶胶光学厚度值、反演得到的地表反射率作为这个季节该区域的地表反射率, 由此来反演该地区气溶胶光学厚度。图 7 为气溶胶反演的具体流程图。首先对要反演气溶胶光学厚度的卫星数据进行地理和辐射率校正; 然后, 用 MODTRAN 模拟生成气溶胶光学厚度 τ 和地表反射率 ρ 的查找表, 如图 8 所示。从图中可以发现随 DN (即 $L_{total}(DN)$) 不同, ρ 和 τ 的关系曲线也不同; 接着判断卫星观测到的地表像元辐射率 $L_{obs}(DN)$ 与 MODTRAN 模拟的 $L_{total}(DN)$ 是否相等; 如果不相等, 就改变 ρ , 用 MODTRAN 重新计算 $L_{total}(DN)$, 再判断与 $L_{obs}(DN)$ 是否相等; 如果相等, 则根据 ρ 和 τ 的关系曲线, 由反演出的地表反射率 ρ_{map} , 计算得到气溶胶光学厚度分布 τ_{map} 。

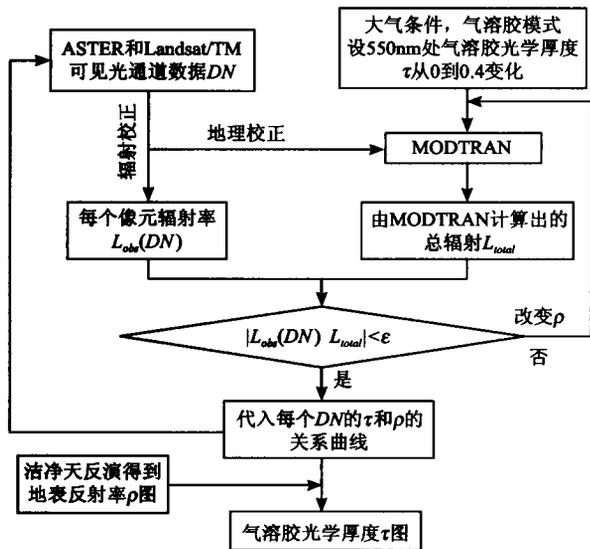


图 7 气溶胶光学厚度反演流程图
Fig. 7 Schematic diagram of AOT retrieval

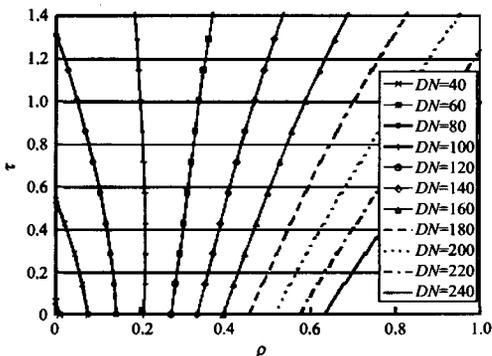
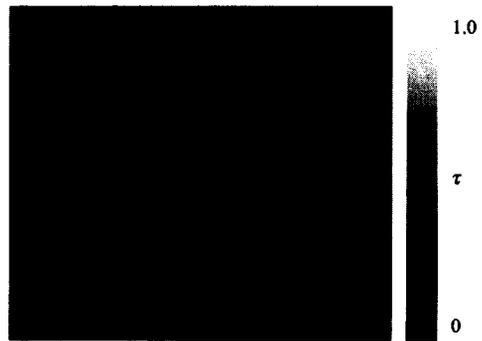


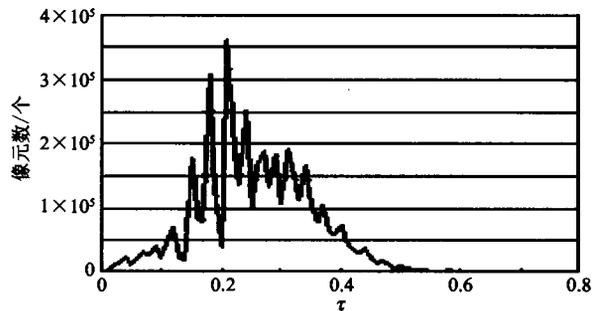
图 8 气溶胶光学厚度和地表反射率关系曲线图
(1999-01-14) Landsat/TM band1, 气溶胶模式乡村型
Fig. 8 Schematic diagram of AOT retrieval

图 9 为用此流程图反演 Landsat/TM 数据得到的气溶胶光学厚度分布图。

从图 9 可以发现, 大部分海洋地区 (东京湾) 上空的气溶胶光学厚度小于 0.3, 其中, 沿岸上空的气溶胶光学厚度稍大于海洋其他部分, 这可能是由于风速原因造成的; 还可以发现, 虽然海洋和陆地的植被区域的地表反射率相差无几, 但图中海洋上空的气溶胶光学厚度大于陆地的植被区域, 这是由于冬季该地区风向主要为西北风 (图中上方为西方, 下方为东方), 而海洋的西北方是繁华的城市地带, 所以这是由于光学厚度大的内陆气溶胶被风带到海洋上空所造成的。



(a)



(b)

图 9 (a) 由 1998 年 12 月 13 日, Landsat/TM band1 数据反演出的气溶胶光学厚度分布图 (气溶胶模式乡村型); (b) 为相应的气溶胶光学厚度 τ 和像元数的直方图

Fig. 9 (a) Aerosol optical-thickness map from the TM band1 image on December 13, 1998

5 结 论

通过三步校正法去除了大气和地表邻边像元的影响, 精确地反演出了日本千叶地区的地表反射率, 说明这种方法可以用于反演空间不均一的陆地表面反射率。同时, 讨论了在 MODTRAN 模拟中选择不同

的气溶胶模式对地表反射率反演的影响,并证明了当气溶胶光学厚度很小时,不同气溶胶模式对地表反射率的影响可以忽略。从而,通过假定由同一季节中最洁净天的卫星数据反演出的地表反射率为这个季节该区域的地表反射率,然后,用 MODTRAN 模拟生成气溶胶光学厚度 τ 和地表反射率 ρ 关系的查找表,反演出了该季节非洁净天的气溶胶光学厚度分布,用此方法获得了气溶胶光学厚度的分布。

参 考 文 献 (References)

- [1] Stowe L, Ignatov A, Shing R. Development, Validation, and Potential Enhancements to the Second-generation Operational Aerosol Product at the National Environmental Satellite, Data and Information Service of the NOAA[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16923—16934.
- [2] Remer L A, Tanre D, Kaufman Y J, *et al.* Validation of MODIS Aerosol Retrieval Over Ocean[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(12): 1618 MOD3 1—4.
- [3] Masuda K Takashima, T Sasaki M. Retrieval of the Optical Thickness and Angstrom Coefficient of the Aerosols Over the Ocean from Polarization Measurements by POLDER on Board ADEOS Satellite. 2 fig.; 23 ref [J]. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan (Japan)*, 1999, **19**(2): 64—70.
- [4] Minomura M, Kuze H, Takeuchi N. Atmospheric Correction of Visible and Near-Infrared Satellite Data Using Radiance Components: An Improved Treatment of Adjacency Effect[J]. *J. Rem. Sen. Soc. Jpn.*, 2001, **21**(3): 260—271.
- [5] Minomura M, Todate Y, Kuze H, *et al.* Proceedings of the CEReS International Symposium on Radiation Budget and Atmospheric Parameters Studied by Satellite and Ground Observation Data[C]. 2005.