

# 利用 MODIS 图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性

麻金继<sup>1,2,3</sup> 乔延利<sup>2,3</sup> 杨世植<sup>2,3</sup> 崔执凤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000  
<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室, 安徽 合肥 230031  
<sup>3</sup>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

**摘要** 针对中国近海海域的水体大多是混浊水体和其上空有较多吸收性气溶胶的情况, 提出了适合反演该区域上空气溶胶光学特性的新算法。该算法利用多个查找表和基于经验得到下垫面为等效干净水体的晴空图像, 采用插值方法实现了对中国近海海域上空气溶胶光学特性的反演。经过在东山岛地区同地面同步观测多次实验对比, 结果发现该算法可行且具有较高的精度; 并以渤海湾地区为例, 进行了初步的反演应用研究。该算法不仅能为我国海洋和风云系列卫星资料的大气校正研究提供相关的技术基础, 还可以直接利用刚发射的 FY-3 卫星上的 CMODIS 数据来反演近海海域的气溶胶光学特性。

**关键词** 大气光学; MODIS 图像; 气溶胶; 反演; 混浊水体; 近海

**中图分类号** O10.1290 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2039

## Using MODIS Image to Retrieve Aerosol Optical Characteristic Over Coast of China

Ma Jinji<sup>1,2,3</sup> Qiao Yanli<sup>2,3</sup> Yang Shizhi<sup>2,3</sup> Cui Zhifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China  
<sup>2</sup>Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Large area of turbid water body and aerosol with high absorption are the main characters of the offshore coast of our country. A new algorithm is developed to retrieve aerosol optical characteristic over coast waters. Based on several look up tables (LUT) and MODIS image of the clear water with ground surface in the clear sky, the model I uses the interpolation method to retrieve the aerosol optical characteristic over the turbid waters. Preliminary validation results comparing with AERONET data in Dongshan island show that the algorithm has good accuracy and promising potential. By using the algorithm, the preliminary retrieval of aerosols are carried out for MODIS data of ocean surface in Bohai bay area. The new algorithms would be useful in studying the atmospheric correction models of HY and FY satellites. And it can directly use CMODIS data of FY-3 to retrieve accurately aerosol optical characteristic and water color of coast zone.

**Key words** atmospheric optics; MODIS image; aerosol; retrieval; turbid waters; coastal

## 1 引言

气溶胶是悬浮在空气中的微小的固体或液体颗

粒构成的多分散系, 是大气最主要的不确定性的成份之一<sup>[1]</sup>; 此外它还是卫星遥感影像大气校正的重

**收稿日期**: 2008-08-20; **收到修改稿日期**: 2009-01-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(40701132), 安徽省自然科学基金(070412042)和安徽师范大学博士启动基金资助课题。

**作者简介**: 麻金继(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事定量化遥感图像信息提取等方面的研究。

要参数之一<sup>[2]</sup>,因而气溶胶是全球大气科学家研究的热点问题<sup>[3]</sup>,同时也出现了许多探测气溶胶特性的方法和仪器<sup>[4~8]</sup>。气溶胶粒子类型还是大气污染状况的标尺之一<sup>[9]</sup>,而且近海海域是大气污染物从源地向大洋和全球迁移扩散的过渡带,因而研究近海海域气溶胶特性是十分必要的。近年来随着卫星技术的迅猛发展,在下垫面有暗目标的区域,利用遥感技术探测气溶胶的特性已经业务化,而且有较高的精度和很好的效果<sup>[10]</sup>;而在下垫面为高亮度的区域,利用卫星图像反演气溶胶的特性已取得一些进展,但还存在许多问题,如高亮度的区域下列面的反射率无法用公式计算,其上空的云像元的识别和提取有困难,区域内的气溶胶模式表述比较困难等。因而利用卫星数据遥感近海海域上空的气溶胶特性一直是国际上研究的难点与热点<sup>[11,12]</sup>。目前国内学者对此进行广泛的研究,提出了许多的方法,如邻近像元法、迭代法和暗目标法<sup>[12~14]</sup>。这些方法对下垫面是一类水,大气气溶胶为弱吸收性或无吸收性的区域较适合;但由于中国近海海域下垫面大多为高亮区域,且有些地气区的气溶胶还是强吸收性型的,显然这些方法是不适合中国近海海域的<sup>[15~17]</sup>。

针对中国近海海域的水体大多是混浊水体和其上空有较多吸收性气溶胶的情况,提出了适合反演该区域上空气溶胶光学特性的新算法。该算法利用多个查找表和基于经验得到下垫面为等效干净水体的晴空图像,采用插值方法实现了对中国近海海域上空气溶胶光学特性的反演。利用该算法反演了渤海湾和东山岛地区上空的气溶胶光学厚度,并同利用太阳辐射计地面同步观测的结果进行对比,发现该算法在中国近海海域不仅可行,而且还具有较高的精度;此外由于最近刚发射的 FY-3 卫星上的中国中分辨率光谱仪(CMODIS)的通道与中分辨率光谱仪(MODIS)相近,因而该算法不仅能为 CMODIS 资料的大气校正研究提供相关的技术基础,还可以为直接利用 CMODIS 的数据来反演近海海域的气溶胶光学特性提供参考。

## 2 方 法

对于远海上空气溶胶反演的对策是以查找表(LUT)方法为基础,即根据气溶胶和下垫面的参数先完成辐射传输计算,然后,将观测的光谱辐射值与查找表中事先计算的辐射值对比,直至得到最佳拟合<sup>[9]</sup>。对于近海岸带上空气溶胶反演的对策如果还

是以查找表方法为基础,即根据气溶胶和下垫面参数先完成辐射传输计算,然后将观测的光谱辐射与查找表中事先计算的辐射值对比,直至得到最佳拟合,那么其反演的困难主要有:(1)对于下垫面是混浊水体,没有现成的模型计算其反射率;(2)对于下垫面是混浊水体的卫星图像,其云像元的识别和提取比较困难;(3)近海区域内的气溶胶模式表述比较困难。

在中国近海区域,理论上如果在卫星图像中能把混浊的水体识别出来,并用特定的方法把卫星图像上混浊水体的上空的表现反射率值降低到同等条件下垫面是 I 类水体的表现反射率值;产生的新图像可等同于下垫面是 I 类水体的图像,因而还是可以用查找表的方法来反演近海区域的气溶胶光学特性<sup>[18]</sup>。算法在图像上,首先进行除云和陆海像元分离处理得到无云的海洋像元,然后用下垫面是 I 类水体和表现反射率的经验关系提取出下垫面是混浊的水体的像元,并用经验的方法对这些像元进行降值处理,使它等同于地面是 I 类水体的像元;算法在查找表的计算上,辐射传输计算方法仍然采用的是 Ahmad 的方法<sup>[19]</sup>,气溶胶粒子模式采用的是用双对数正态分布的粒子模式。由于对于同一区域双对数正态分布的粒子模式能更全面的表述气溶胶模式,故本算法中气溶胶模式采用双对数正态分布的粒子模式。根据风速对粒子的影响,在风速低时,采用小粒子多大粒子少的查找表;在风速高时,采用小粒子少而大粒子多的查找表,这样有助于提高算法反演的精度<sup>[20]</sup>。

查找表就是对事先假定的气溶胶粒子和下垫面,在不同几何和光学条件下,用 Ahmad 辐射传输模型计算关于表现反射率的表,用来反演气溶胶特性。对于近海区域气溶胶反演的三个难点,其中两个难点与查找表有关。也就是说,查找表计算的正确与否,对反演的精度有很大的影响。根据近海区域大气气溶胶时空性变化非常快的特点,采用多种粒子来描述气溶胶;根据风速对气溶胶辐射的影响,采用计算三种风速下的气溶胶粒子来避免<sup>[20]</sup>。

针对 MODIS 光谱通道计算卫星观测的辐射生成查找表,用于反演每一种模式气溶胶的参数。对每一种模式考虑几个光学厚度下的气溶胶含量值,由  $0.55 \mu\text{m}$  波长的光学厚度描述。对每一种气溶胶模式,用 Ahmad 辐射传输模型分别计算 6 个气溶胶光学厚度( $\tau_a = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ ), 16 个观察天顶角( $\theta_v = 1.5^\circ \sim 88.5^\circ$ , 间隔  $6^\circ$ ), 16 个相对

方位角( $\phi_s=0\sim 180^\circ$ , 间隔  $12^\circ$ )和 9 个太阳天顶角( $\theta=1.5^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 60^\circ, 66^\circ$  和  $72^\circ$ )在 MODIS 前 7 个波段下的表观反射率的值,其它值则在它们之间进行线性内插。分别计算了两种大气模式(中纬度夏、冬季大气模式)和不同风速下(2, 6 和 10 m/s),MODIS 前 7 个波段上的两套查找表。

利用该模型反演我国近海区域的气溶胶光学特性的步骤如下:

1) 基于反演地区的长期地面观测的结果,提出气溶胶粒子的模式,使得用这些气溶胶粒子按双模谱不同比例混合后的气溶胶模式基本能描述该地区出现的气溶胶模式的类型;(所采用的气溶胶粒子模式如文献[20]所述。)

2) 用 Ahamd 的辐射传输模型计算假设的所有

粒子模式,在不同的几何和光学条件下的辐射亮度,生成多维参量的用于 MODIS 图像反演的查找表;(因本文采用两个大气模式和两套粒子模式,故反演中用了两套,四个查找表如文献[20]所述。)

3) 对 MODIS 图像进行处理,得到无云的、下垫面是 I 类水体的等效的 MODIS 前 7 个通道的新图像;

4) 基于无云的、下垫面是 I 类水体的 MODIS 图像,在不同风速和时间条件下,选择不同的查找表为基础,用最小二乘法使得卫星观测的光谱值与查找表中事先计算的辐射值得到最佳符合。输出此时的气溶胶光学特性和粒子的物理特性。

其反演流程如图 1 所示。

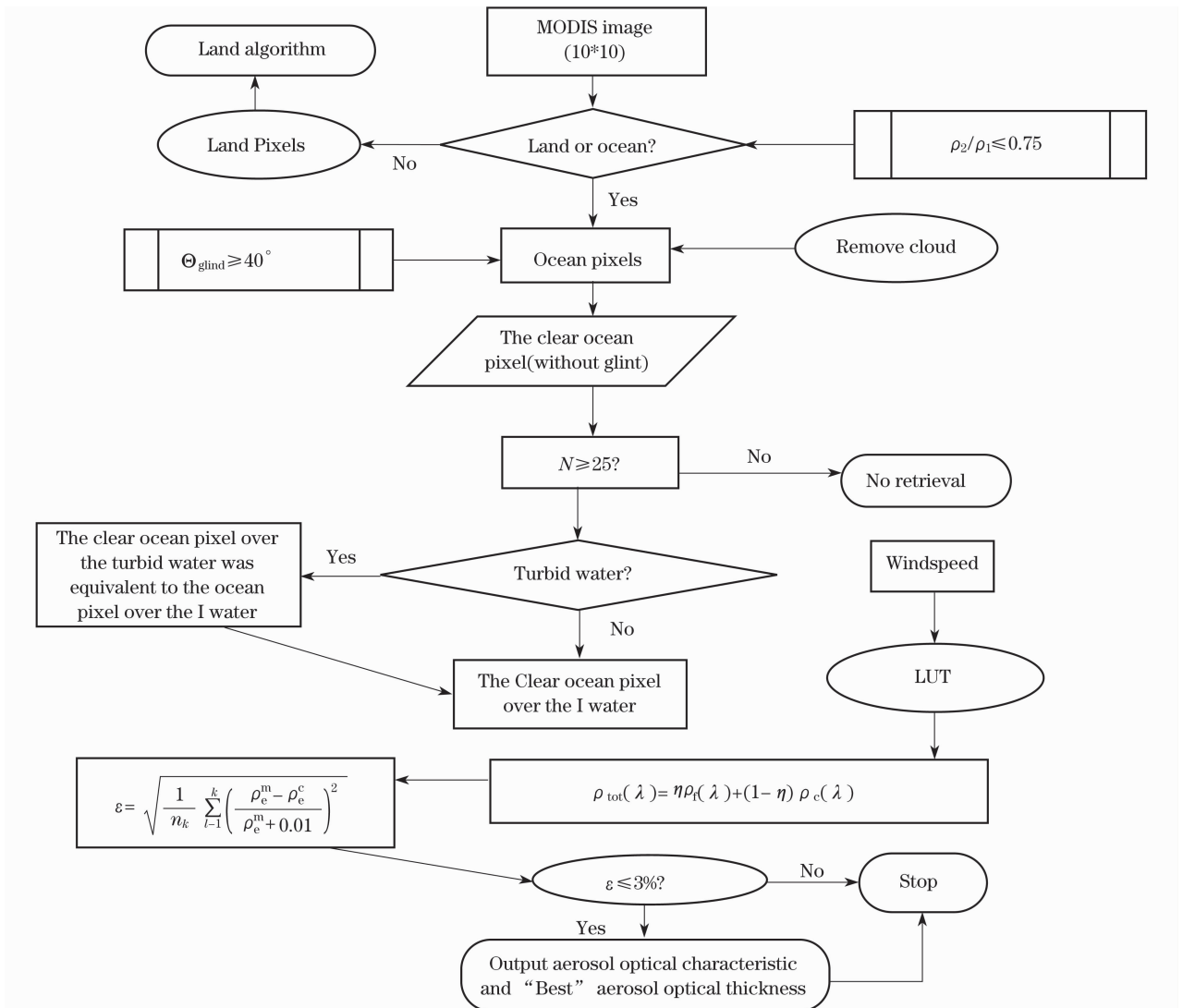


图 1 反演气溶胶光学特性流程图

Fig. 1 Flow chart for retrieval aerosol optical characteristic

### 3 个例分析验证

利用 MODIS 图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性 2006 年 12 月份在福建省厦门市东山岛附近做了地面验证实验, 根据实验的结果我们对该算法进行了分析。首先选取了相对晴朗的五天, 对这五天该地区 MODIS 图像按上面的要求先进行切割选取要研究的区域, 然后按第二部分介绍的反演步骤进行反演计算, 其反演结果如表 1 和表 2 所示。两个表中的  $\tau^m$  (550 nm) 表示的是用太阳辐射计 CIE317 地基测量<sup>[21]</sup>得到的卫星过顶前后 30 min 内的气溶胶光学厚度的平均值, 其它参数(其中  $r_{\text{eff}}$  为气溶胶粒子的有效半径、 $g$  为各相异性因子、 $\eta$  为反演气溶胶粒子大小模式的比值)均是用该算法反演得到的<sup>[20]</sup>。其中表 1 表示的是用该算法反演该区域得到气溶胶光学参数的最佳值; 表 2 表示的是用该算法反演该区域得到气溶胶光学参数的平均值。

从表 1 中, 可以得到空基反演的最佳气溶胶光

表 2 基于该算法的气溶胶光学特性反演的平均结果

Table 2 Aerosol parameters from "average" aerosol based on for the algorithm

Parameter Date	$\tau^m$ (550 nm)	$\tau^r$ (550 nm)	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	$g$	$\eta$	$\epsilon_{\text{min}}/\%$
2006. 12. 17	0.28	0.31±0.06	0.28±0.08	0.71±0.06	0.51±0.08	9.0
2006. 12. 18	0.31	0.30±0.07	0.27±0.04	0.70±0.04	0.87±0.11	11.0
2006. 12. 19	0.29	0.25±0.06	0.24±0.11	0.72±0.03	0.41±0.10	14.5
2006. 12. 23	0.32	0.29±0.07	0.35±0.10	0.73±0.05	0.15±0.09	9.7
2006. 12. 24	0.40	0.41±0.08	0.32±0.14	0.72±0.02	0.23±0.05	18.7

两个表中的气溶胶光学厚度的值均在查找表的范围内, 但其  $\epsilon$  值无论是求最佳值还是平均值时都比 3% 大, 因而在利用该算法反演近海区域的气溶胶光学特性时, 其  $\epsilon$  值应该相应的放大。根据 2006 年 12 月反演得到最佳值时的  $\epsilon$  值, 可以取  $\epsilon$  值为 10%。如果取  $\epsilon$  值为 10%, 那么从表 1 中可以求得用该算法反演的气溶胶光学厚度的最佳值的最大误差是 12 月 17 日, 其绝对误差为 0.04, 折合为相对误差为 14.3% (气溶胶光学厚度的误差一般用绝对误差和期望误差来表示, 而不用相对误差。只有反演值较大时才可用相对误差表示); 最佳值的最小误差是 12 月 23 日, 其绝对误差为 0.04, 折合为相对误差为 12.5%。从表 2 中, 可以看到地基反演的气溶胶光学厚度值在空基反演的气溶胶光学厚度范围内, 其绝对误差的最大值是 12 月 24 日的 0.08, 最小值当然是 0。该算法的反演绝对误差在  $0.2\tau$  之内, 相对误差最大的约为 15%, 而目前国际上对远海上空气溶胶反演误差一般是 0.05, 对较大气溶

胶厚度比地基测量的气溶胶光学厚度均要大, 反演区域内的气溶胶光学厚度的均方差  $\epsilon$  的最小值均大于 3%; 从表 2 中, 可以得到空基反演的平均气溶胶光学厚度比地基测量的气溶胶光学厚度也要大, 但空基反演的平均值范围基本涵盖了地基测量值, 且其均方差  $\epsilon$  的最大值达到 18.7%。

表 1 基于该算法的气溶胶光学特性反演的最佳结果

Table 1 Aerosol parameters from "best" aerosol model based on the algorithm

Parameter Date	$\tau^m$ (550 nm)	$\tau^r$ (550 nm)	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	$g$	$\eta$	$\epsilon_{\text{min}}/\%$
2006. 12. 17	0.28	0.32	0.29	0.75	0.49	3.9
2006. 12. 18	0.31	0.35	0.25	0.73	0.95	4.0
2006. 12. 19	0.29	0.33	0.30	0.74	0.38	4.2
2006. 12. 23	0.32	0.36	0.32	0.76	0.12	3.7
2006. 12. 24	0.40	0.45	0.29	0.74	0.21	4.9

胶厚度, 其相对误差为 5%; 对陆地上空的反演误差一般是 0.15, 对较大气溶胶厚度, 其相对误差为 20%; 对近海区域的报道精度为 25%<sup>[9]</sup>。故该算法用来反演近海区域的气溶胶光学厚度, 其精度是较高的。对于表中其它气溶胶的参数值, 地面没有反演, 但通过分析表 2 的反演结果, 其反演结果是合理的。

表 3 和表 4 分别表示的是用该算法反演得到的 2003 年到 2006 年不同季节东山岛上空的气溶胶光学特性最佳值和平均值。从表 3 和表 4 中, 可以看出其反演的误差和分析表 1 和表 2 得出结论相近。对表 3 中的粒子的有效半径分析可知, 该地区粒子的在冬天和春天有效半径相对较小, 而在秋天和夏天相对较大。其原因主要有: 1) 夏秋天该区域内的风速较大, 故其小粒子的成活的几率较小, 相对大粒子成活的几率较大, 即大小粒子的比例增大, 有效半径相对增大<sup>[22]</sup>; 2) 夏秋季受天气的影响, 在研究图像上可能有小量的薄云没有识别出来, 从而把这些

表 3 基于该算法的气溶胶光学特性反演的最佳结果

Table 3 Aerosol parameters from “best” aerosol model base on the algorithm

Parameter Date	$\tau^m$ (550 nm)	$\tau^r$ (550 nm)	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	$g$	$\eta$	$\epsilon_{\text{min}}/\%$
2003. 12. 03	0.25	0.28	0.26	0.72	0.55	4.3
2003. 12. 04	0.26	0.29	0.28	0.73	0.42	5.4
2005. 03. 07	0.22	0.25	0.30	0.74	0.45	3.1
2005. 03. 11	0.31	0.31	0.28	0.76	0.72	3.2
2005. 10. 12	0.25	0.27	0.38	0.71	0.28	2.4
2005. 10. 18	0.23	0.26	0.36	0.73	0.76	3.8
2006. 12. 18	0.31	0.35	0.25	0.73	0.95	4.0
2006. 12. 24	0.40	0.45	0.29	0.75	0.21	4.9

表 4 基于该算法的气溶胶光学特性反演的平均结果

Table 4 Aerosol parameters from “average” aerosol model base on the algorithm

Parameter Date	$\tau^m$ (550 nm)	$\tau^r$ (550 nm)	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	$g$	$\eta$	$\epsilon_{\text{min}}/\%$
2003. 12. 03	0.25	0.30±0.05	0.25±0.09	0.69±0.04	0.57±0.11	9.5
2003. 12. 04	0.26	0.30±0.06	0.30±0.06	0.71±0.05	0.32±0.19	10.4
2005. 03. 07	0.22	0.24±0.05	0.32±0.10	0.72±0.06	0.41±0.06	13.4
2005. 03. 11	0.31	0.29±0.07	0.31±0.08	0.70±0.05	0.38±0.19	10.1
2005. 10. 12	0.25	0.28±0.05	0.38±0.14	0.68±0.03	0.29±0.08	12.2
2005. 10. 18	0.23	0.29±0.05	0.34±0.07	0.69±0.04	0.72±0.06	13.0
2006. 12. 18	0.31	0.32±0.07	0.27±0.04	0.70±0.04	0.87±0.11	11.0
2006. 12. 24	0.40	0.41±0.08	0.32±0.14	0.72±0.02	0.23±0.05	18.7

薄云认为是气溶胶粒子。由于受数据源较少的影  
响,对其它光学参数分析受限,如其光学厚度的变化  
趋势就不太明显,似乎没有规律可寻。

## 4 应 用

从卫星图像中,可以发现整个渤海湾地区的海水  
基本都是混浊水体;从现场看,渤海湾地区的海水确  
实是非常混浊的,在黄河的入海口区域,其情况更为  
突出。此外渤海周围有许多的大城市和工厂,人类的  
活动和工厂气体的排放使得渤海地区的气溶胶也比  
较复杂。这样渤海湾地区的水体混浊,气溶胶成份复  
杂,使得用卫星图像反演该地区的气溶胶光学特性异  
常困难;但由于用卫星图像反演气溶胶光学特性和海  
色具有很大的优越性,使得基于卫星图像反演气溶胶  
光学特性和海色方法的研究成为当前的热门。

利用本文算法研究了渤海地区 2002 年的大气气  
溶胶的情况,图 2(a)图是 2002 年 5 月 28 日渤海和长

江入海口地区的 MODIS 第 1,3,4 通道的合成图;  
图 2(b)是利用该算法提取出来的海洋部分的图像;  
图 2(c)是 NASA 利用暗目标方法反演出的图 2(b)上  
空的最佳气溶胶光学厚度图;图 2(d)分别是利用该  
算法反演出的图 2(b)上空的最佳气溶胶光学厚度  
图;图 2(c)和图 2(d)相比较,可以发现 NASA 的方  
法不能反演近海高反射率区域上空的气溶胶光学厚  
度,但在远海区域,二种方法反演的最佳结果非常相  
近。这说明:在近海海域该算法比 NASA 的方法要好  
一些,在远海该算法和 NASA 方法具有相同的效果;  
即该算法可以用来反演我国近海域上空的气溶胶光  
学特性。

我国不久前刚发射的 FY-3 号卫星上载有  
CMODIS 遥感器,根据 CMODIS 的通道设置与  
MODIS 相同的特色,只要把该算法中查找表根据  
CMODIS 的通道的响应函数进行改变,应该可以直  
接利用 CMODIS 的图像来实现对我国海域上空的气  
溶胶特性进行反演。

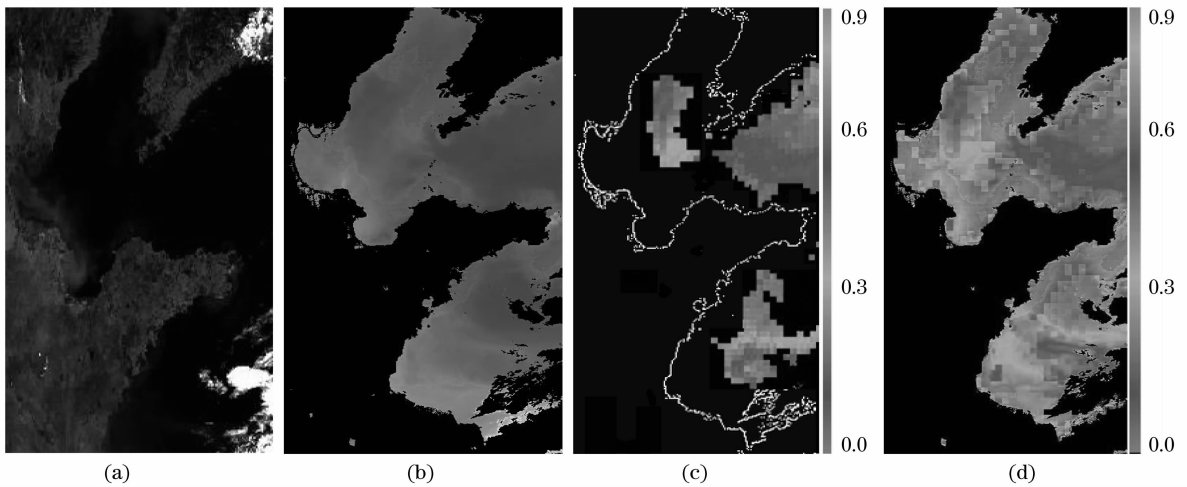


图 2 MODIS 原图和不同方法反演的气溶胶光学厚度图

Fig. 2 MODIS image and Aerosol optical thickness image by different method

## 5 结 论

虽然该算法可以用来反演近海海域上空的气溶胶光学特性,但它还有许多不足的地方,如算法中的气溶胶模式的设置和地面反射率计算公式的改进等。针对该算法中气溶胶模式的设置问题,在后续研究中,可以借助国际 AERONET 太阳辐射计观测网的多年数据反演出的研究区域的所有气溶胶的模式,然后用统计的方法把该区域内所有可能的气溶胶模式进行双模谱的统计分析,得到该区域内长期的气溶胶的双模谱模式的粒子,再把统计得来的粒子分为大粒子和小粒子,认为研究区域内的气溶胶模式是有这些粒子按一定比例混合而成的双模谱而成;针对该算法中混浊水体识别精度问题,考虑用多通道的反射率比值的方法来代替目前的经验判别法;针对浑浊水体上空的云识别的精度问题,考虑用目标函数识别的方法等,该算法的进一步完善的研究工作正在进行中。

## 参 考 文 献

- 1 Twomey, S., *Atmospheric Aerosols* [M]. Elsevier Sci. Publ. Company, 1997
- 2 Kaufman Y. J., Tarré D.. Algorithm for remote sensing of aerosol from MODIS[R]. *MODIS Algorithm Theoretical Basis Document*, 1996
- 3 Ramaswamy V., Boucher O., Haigh J. *et al.*. *Radiative Forcing of Climate Change, in IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis. Contribution of Work Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge University Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 2001,881
- 4 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Changjia *et al.*. Two-wavelengthMie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20** (10): 1412~1417

- 周 军,岳古明,金传佳等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412~1417
- 5 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 吴永华,胡欢陵,周 军等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. *光学学报*, 2001, **21** (8): 1012~1015
- 6 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,Philip Gpeoloub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
- 7 Li Xuebin, Xu Qingshan, Hu Huanling *et al.*. New method deduce imaginary part of refractive index of aerosol with double scattering-angles L-OPC[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 391~394
- 李学彬,徐青山,胡欢陵等. 双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率的新方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27** (3):391~394
- 8 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (9):1655~1658
- 李学彬,徐青山,魏合理等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1655~1658
- 9 Kaufman Y. J., Fraser R. S., Ferrare R. A.. Satellite measurements of large-scale air pollution: Method [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **95**: 9895~9990
- 10 Tanré D., Y. J. Kaufman, M. Herman. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16971~16987
- 11 Kaufman Y. J., J. M. Haywood, P. V. Hobbs *et al.*. Remote sensing of vertical distributions of smoke aerosol off the coast of africa[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(16):1~4
- 12 K. Stamnes, W. Li, B. Yan *et al.*. Accurate and self-consistent ocean color algorithm: Simultaneous retrieval of aerosol optical properties and chlorophyll concentrations [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**:939~951
- 13 H. Eide, Wei Li, Knut Stamnes *et al.*. Simultaneous retrieval of aerosols and in-water constituents in turbid coastal waters using Multi- and Hyperspectral data[C]. *SPIE*, 2004, **5569**: 44~55
- 14 Frouin R., M. Schwindling, P. Y. Deschamps. Spectral reflectance of sea foam in the visible and near infrared: in situ measurements and remote sensing implications[J]. *J. Geophys.*

- Res. , 1996, **101**: 14361~14371
- 15 Luo Y. F. , Lu D. R. , Zhou X. J. *et al.*. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in the last 30 years[J]. *J. Geophys. Res.* , 2001, **106** (D13): 14501~14513
- 16 Tang J. , Wang X. , Song Q. *et al.*. The statistic inversion algorithms of water constituents for Yellow Sea and East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica* , 2004, **23**: 617~626
- 17 Wang M. , Shi W. . Estimation of ocean contribution at the MODIS nearinfrared wavelengths along the east coast of the U. S. : Two case studies[J]. *J. Geophys. Res. Lett.* , 2005, **32**: L13606
- 18 Rong Li, Y. J. Kaufman, Bocai Gao *et al.*. Remote sensing of Suspended sediments and shallow coastal waters [J]. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* , 2003, **41**(3): 559~566
- 19 Ahmad Z. , R. S. Fraser. An Iterative Radiative Transfer Code For Ocean-Atmosphere Systems[J]. *J. Atmos. Sci.* , 1982, **39**: 656~665
- 20 Ma Jinji. Using the MODIS Image to Retrieval Aerosol Optical Characteristic Over Coast and Turbid Waters[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, PhD dissertation, 2007, 5  
麻金继. 基于 MODIS 图像海岸带气溶胶光学特性反演模型研究 [D]. 合肥: 中科院安徽光学精密机械所, 2007, 5
- 21 Ma Jinji, Yang Shizhi, Zhang Yuping, Measurements and study of aerosol optical characterization over Xiamen sea region[J]. *Chin. J. Quant. Electroni.* , 2005, (3): 473~476  
麻金继, 杨世植, 张玉平. 厦门海域气溶胶光学特性的观测研究 [J]. *量子电子学报*, 2005, (3): 473~476
- 22 Liu Yi, Zhou Mingyu. Temporal and spatial characteristics of aerosols over the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica* , 1999, **21**(1): 32~40  
刘毅, 周明煜. 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征 [J]. *海洋学报*, 1999, **21**(1): 32~40