

文章编号: 0253-2239(2010)10-2828-09

# 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

李 栋 陈文忠

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100)

**摘要** 利用2006年4月至2007年11月间中国东部海域五个航次的天空辐射计海上观测资料,以 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 和 $\pm 1\text{ h}$ 作为时空匹配窗口,对中分辨率成像光谱仪(MODIS)标准海色产品中的 $869\text{ nm}$ 气溶胶光学厚度数据进行了对比检验。结果显示,在全部匹配数据中,72%非常接近或在NASA公布的期望误差 $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$ 范围以内。MODIS的反演精度具有一定的地域性和季节性差异,东海匹配数据的一致性明显好于黄海,2006年冬季匹配数据的一致性较好,2007年秋季MODIS反演值存在系统性偏高的情况,其主要原因可能与气溶胶模型的不适用有关。通过对全部匹配数据的进一步分析印证了这一点。

**关键词** 海洋光学;遥感;海色影像大气校正;气溶胶光学厚度;中分辨成像光谱仪;天空辐射计

**中图分类号** TP79;P407.4;P41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2828

## Comparison of Remote Sensing Aerosol Optical Depth from MODIS Data with In-Situ Sky Radiometer Observations Over East China Sea

Li Dong Chen Wenzhong

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract** The in-situ data of sky radiometer observed on ship at East China Sea during five cruises from April 2006 to November 2007 are used to validate the corresponding  $869\text{ nm}$  aerosol optical depth data included in MODIS standard ocean color products. The spatial box of  $10\text{ km}\times 10\text{ km}$  and temporal interval of  $\pm 1\text{ h}$  are used as the matching criterion. The results show that, 72% of the match-up data fall close to, or within the expected error range of  $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$ . As there are some differences in the precision of MODIS-derived aerosol optical depth according to regions and seasons, data consistency over the East China Sea is better than the Yellow Sea, while the consistency in the winter of 2006 is better than the fall of 2007. In the fall of 2007, MODIS retrieval values are systematically overestimated. The reason for this phenomenon was analyzed. It seems that twelve pre-calculated aerosol models used by MODIS retrieval algorithms can't match the optical properties of the actual aerosol very well, and further analysis with all of match-up data confirmed the conclusion.

**Key words** oceanic optics; remote sensing; atmospheric correction of ocean color imagery; aerosol optical depth; MODIS; sky radiometer

### 1 引 言

气溶胶的成分构成及其光学性质的不确定性一直以来都是影响我国东部海域海色遥感大气校正以

及气溶胶卫星反演精度的主要因素。中分辨率成像光谱仪(MODIS)作为目前最主要的海洋与大气遥感监测数据源之一,在国内相关领域得到了广泛的

**收稿日期**: 2009-11-18; **收到修改稿日期**: 2010-01-11

**基金项目**: 国家自然科学基金(40875011)资助课题。

**作者简介**: 李 栋(1983—),男,硕士研究生,主要从事海洋光学遥感和气溶胶光学特性等方面的研究。

E-mail: lidong\_ouc@sina.com

**导师简介**: 陈文忠(1965—),男,副教授,主要从事海洋遥感和大气辐射传输等方面的研究。

E-mail: wzchen@ouc.edu.cn

研究与应用<sup>[1,2]</sup>。一方面,MODIS 海色产品在中国东部海域的大气校正效果有待检验;另一方面,卫星遥感气溶胶光学厚度(AOD)在此海域的有效性也亟需验证。由于相应的海上气溶胶现场观测资料较少,这两项工作开展得并不多<sup>[3]</sup>。MODIS 标准海色产品中所包含的气溶胶光学厚度数据是其在大气校正过程中得到的副产品,它既可以作为 MODIS 海色遥感的一种质量控制指标,反映其大气校正水平,又可以作为一种高空间分辨率的气溶胶光学厚度卫星遥感产品,用于海上气溶胶的监测与研究。因此它的有效性检验对于海洋光学遥感大气校正算法的改进以及海上气溶胶卫星反演精度的提高都具有十分重要的意义。本文利用 2006 年 4 月至 2007 年 11 月间中国东部海域五个航次的气溶胶海上观测资料,对 MODIS 标准海色产品中的气溶胶光学厚度数据进行了检验,并对全部 18 个匹配点位作了进一步分析,为今后海色遥感大气校正算法的改进以及更好地利用这种卫星遥感数据提供了依据。

## 2 数据说明

### 2.1 气溶胶光学厚度卫星遥感数据

MODIS 在 0.4~14  $\mu\text{m}$  光谱范围内共设 36 个波段,其中 8~16 波段为海色波段,中心波长分别为 412, 443, 488, 531, 551, 667, 678, 748 和 869 nm。标准海色产品(MOD18, 归一化离水辐亮度产品)是 MODIS 一系列业务化产品中的 level 2(L2)级 LAC

(Local Area Coverage)产品,空间分辨率为 1 km,以 HDF-EOS 格式发布。每个数据文件存储 5 min 的卫星扫描观测数据,共 203 条扫描带。每条扫描带的地面覆盖范围为 2330 km(垂直于轨道方向) $\times$  10 km(沿轨道方向)。标准产品中所包含的数据集有:6 个波段的归一化离水辐亮度,叶绿素 a 浓度,869 nm 气溶胶光学厚度等。其中 869 nm 气溶胶光学厚度数据集,其反演过程同时也是 MODIS 海色遥感大气校正过程,采用 Gordon 等<sup>[4,5]</sup>的多次散射算法以及 Siegel 等<sup>[6]</sup>的近红外波段离水辐射校正算法。

多次散射算法是在第一代水色传感器 CZCS 的单次散射近似算法<sup>[7]</sup>基础上发展的,考虑了大气程辐射中气溶胶多次散射以及大气分子与气溶胶散射之间相互作用的影响。它的核心思想是通过定义大气校正因子  $\epsilon$  来判断气溶胶模型,根据选定模型的消光特性计算气溶胶在大气程辐射中的贡献。

MODIS 海色遥感标准大气校正算法中预设了 12 种海上气溶胶模型<sup>[8]</sup>,如表 1 所示。它们由三种粒子成分组合而成,每种粒子成分代表一种特定的尺度谱(对数正态分布)和复折射率,根据混合后的尺度分布和复折射率,事先计算不同湿度条件下每个模型在 MODIS 9 个海色波段上的辐射消光特性,包括单次散射反照率  $\omega$ ,消光系数  $\beta$ ,体散射相函数  $P_a$  以及气溶胶单次散射量  $\rho_{as}$  与多次散射量  $\rho_m + \rho_{ms}$  之间的关系式  $K$  等参量,并存储到相应的查找表中。

表 1 多次散射算法中预设的 12 种气溶胶模型

Table 1 Aerosol models in the multiple-scattering retrieval algorithm

Index	Aerosol model	Components proportion					
		Tropospheric model			Oceanic model		
		Water soluble particle	Dust-like particle	Sea salt-based particle	Water soluble particle	Dust-like particle	Sea salt-based particle
		70%	30%	0	0	0	100%
1	Oceanic, RH:99%		0			100	
2	Maritime, RH:50%		99			1%	
3	Maritime, RH:70%		99%			1%	
4	Maritime, RH:90%		99%			1%	
5	Maritime, RH:99%		99%			1%	
6	Coastal, RH:50%		99.5%			0.5%	
7	Coastal, RH:70%		99.5%			0.5%	
8	Coastal, RH:90%		99.5%			0.5%	
9	Coastal, RH:99%		99.5%			0.5%	
10	Tropospheric, RH:50%		100%			0	
11	Tropospheric, RH:90%		100%			0	
12	Tropospheric, RH:99%		100%			0	

假设近红外波段(NIR, 748 nm 和 869 nm 波段)离水反射率  $\rho_{w[NIR]}$  为 0,那么在去除白帽和太阳耀斑的情况下,传感器接收到的大气层顶处的反射率  $\rho_t$  等于大气程辐射的反射率  $\rho_{path}$ ,即

$$\rho_{t[NIR]} = \rho_{path[NIR]} = \rho_r[NIR] + \rho_a[NIR] + \rho_{ra[NIR]}, \quad (1)$$

式中  $\rho_r$  为大气分子瑞利散射的反射率,可以根据海表面气压和风速等辅助数据精确计算<sup>[9]</sup>,这样就得到了近红外波段气溶胶多次散射以及大气分子与气溶胶散射相互作用的反射率  $\rho_{a(748)} + \rho_{ra(748)}$  和  $\rho_{a(869)} + \rho_{ra(869)}$ 。通过查找每个气溶胶模型中的  $K^{[i]}[\lambda, \rho_{as}(\lambda)]$ ,计算出相应的  $\rho_{as(748)}^{[i]}$  和  $\rho_{as(869)}^{[i]}$ :

$$\rho_{as[NIR]}^{[i]} = \frac{\rho_{a[NIR]} + \rho_{ra[NIR]}}{K^{[i]}[\lambda_{NIR}, \rho_{as[NIR]}]}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad (2)$$

设大气校正因子  $\epsilon$  的初值  $\epsilon_{ret(748, 869)}$  为

$$\epsilon_{ret(748, 869)} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \epsilon_{ret(748, 869)}^{[i]} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{\rho_{as(748)}^{[i]}}{\rho_{as(869)}^{[i]}}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad (3)$$

而每个气溶胶模型的  $\epsilon$  理论值  $\epsilon_{mod(748, 869)}$  为

$$\epsilon_{mod(748, 869)}^{[i]} = \frac{\omega_{(748)}^{[i]} p_a^{[i]}(\theta_v, \phi_v; \theta_0, \phi_0; 748) \beta_e^{[i]}(748)}{\omega_{(869)}^{[i]} p_a^{[i]}(\theta_v, \phi_v; \theta_0, \phi_0; 869) \beta_e^{[i]}(869)}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad (4)$$

$$p_a^{[i]}(\theta_v, \phi_v; \theta_0, \phi_0; \lambda) = P_a^{[i]}(\Theta_-, \lambda) + [r(\theta_v) + r(\theta_0)] P_a^{[i]}(\Theta_+, \lambda), \quad (5)$$

$$\cos \Theta_{\pm} = \pm \cos \theta_0 \cos \theta_v - \sin \theta_0 \sin \theta_v \cos(\phi_v - \phi_0), \quad (6)$$

式中  $\omega^{[i]}, \beta_e^{[i]}$  和  $P_a^{[i]}$  为第  $i$  个气溶胶模型查找表中预设的参量,  $\Theta$  为散射角,  $\theta_0$  和  $\phi_0$  分别为太阳天顶角和方位角,  $\theta_v$  和  $\phi_v$  分别为观测天顶角和方位角,  $r$  为海气界面的菲涅耳反射率。

通过  $\epsilon_{ret(748, 869)}$  (最终由 4 个气溶胶模型确定)与每个模型的  $\epsilon_{mod(748, 869)}$  相比较,确定与之最为接近的两个预设模型:上边界模型和下边界模型。根据两模型的  $\epsilon_{(\lambda, 869)}$ ,外推其他波段的  $\rho_{as}(\lambda)$ ,再由  $K$  关系式得到  $\rho_{a(\lambda)} + \rho_{ra(\lambda)}$ ,在两模型间插值,最终求得大气程辐射  $\rho_{path(\lambda)}$  和离水反射率  $\rho_{w(\lambda)}$ 。

把这个大气校正算法扩展一下,就可以反演出各波段的气溶胶光学厚度  $\tau_a$

$$\tau_{a(869)} = \frac{4\rho_{as(869)} \cos \theta_v \cos \theta_0}{\omega_{(869)} p_a(\theta_v, \phi_v; \theta_0, \phi_0; 869)}, \quad (7)$$

$$\tau_{a(\lambda)} = \frac{\tau_{a(869)} \beta_e(\lambda)}{\beta_e(869)}. \quad (8)$$

由此可以看出,MODIS 海色遥感中气溶胶光学

厚度的反演与归一化离水辐亮度的反演其实是一个问题的两个方面,都是以大气校正算法为基础进行的。

### 2.2 气溶胶光学厚度现场测量数据

气溶胶海上观测设备为日本 PREDE 公司生产的 POM01MKII 型船载天空辐射计,它通过测量太阳直接辐射和漫射辐射(天空辐射)来反演气溶胶光学特性,共设 7 个波段,中心波长分别为 315, 400, 500, 675, 870, 940 和 1020 nm,半波宽度 10 nm,主传感器为硅光二极管,视场角约  $1^\circ \sim 1.5^\circ$ ,观测立体角一般在  $0.2 \sim 0.3$  mrad,可反演 5 个波长的气溶胶光学厚度(315 nm 和 940 nm 波段分别用于反演臭氧和水汽的光学厚度),反演软件为东京大学 Nakajima 辐射研究小组开发的 Skyrad (Ver 4.2)<sup>[10]</sup>。

气溶胶现场数据的海上观测位置如图 1 所示,是随中国海洋大学东方红 2 号科考船在 06 年 4 月的黄海(圆形符号),07 年 1 月的北黄海(方形符号),07 年 2 月的东海(下三角符号),07 年 10 月的北黄海(上三角符号)和 07 年 11 月的东中国海(菱形符号)五个航次期间使用 POM01MK II 天空辐射计的观测数据反演得到的。海上实际观测日共计 50 天,获得有效观测记录 460 条。图中十字加号表示现场测量与卫星遥感数据匹配成功的点位。

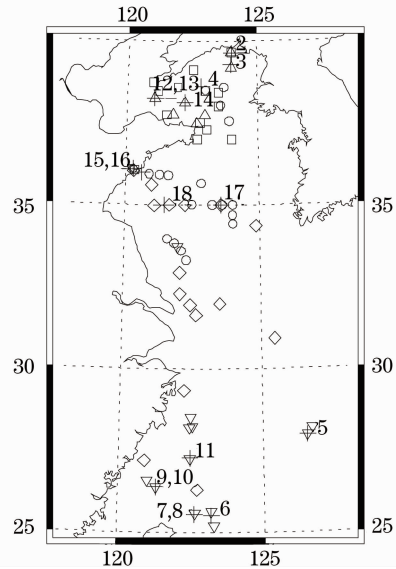


图 1 中国东部海域海上观测位置示意图

Fig. 1 Geographical Positions of the in-situ observation sites over East China Sea

### 3 数据匹配

根据每条现场观测记录的日期与地理位置信息选择当日过境当地的 MODIS 数据,若卫星过境时

间与现场观测时间间隔在 1 h 以内,则在卫星数据中选择以此现场数据的观测位置为中心  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  空间范围内的有效像元值,计算其平均值作为 869 nm 气溶胶光学厚度卫星反演值与实测数据进行对比。根据气溶胶光学厚度随波长的变化规律,考虑到天空辐射计和卫星传感器的带宽及光谱响应函数等因素,869 nm 和 870 nm 波长的光学厚度之间的差异可以忽略不计,故这里直接将二者进行对比。

表 2 天空辐射计现场观测气溶胶光学厚度与 MODIS 卫星遥感数据的匹配结果

Table 2 Matching results between AOD retrieved from MODIS and in-situ sky radiometer observations

Index of site	Date	Time (UTC) (in-situ/MODIS)	$\tau_a(870 \text{ nm})$ (in-situ)	$\tau_a(869 \text{ nm})$ (MODIS)	Satellite Platform	$n(\tau_a _{\text{MODIS}})$	$\sigma(\tau_a _{\text{MODIS}})$
#1	2006/04/29	04:19/04:55	0.3038	0.2711	Aqua	2	0.0035
#2	2007/01/08	02:03/01:55	0.0460	0.0640	Terra	34	0.0044
#3	2007/01/08	05:01/05:10	0.0592	0.0677	Aqua	82	0.0061
#4	2007/01/12	02:51/03:10	0.0977	0.0906	Terra	70	0.0044
#5	2007/01/31	02:22/02:05	0.1930	0.2405	Terra	1	0.0000
#6	2007/02/04	04:15/04:50	0.1226	0.1670	Aqua	88	0.0327
#7	2007/02/05	02:34/02:25	0.0652	0.1099	Terra	108	0.0031
#8	2007/02/05	06:03/05:35	0.1157	0.1538	Aqua	58	0.0070
#9	2007/02/06	03:30/03:05	0.1414	0.1091	Terra	58	0.0038
#10	2007/02/06	04:58/04:40	0.1328	0.1193	Aqua	17	0.0018
#11	2007/02/08	02:30/02:55	0.1526	0.1351	Terra	62	0.0188
#12	2007/10/20	03:51/03:05	0.0377	0.1415	Terra	98	0.0095
#13	2007/10/20	03:51/04:40	0.0377	0.1131	Aqua	80	0.0088
#14	2007/10/23	01:10/01:55	0.0449	0.1034	Terra	36	0.0031
#15	2007/11/01	05:10/05:05	0.0861	0.2147	Aqua	84	0.0106
#16	2007/11/02	02:31/02:30	0.0927	0.2308	Terra	44	0.0092
#17	2007/11/23	02:36/02:50	0.0862	0.1245	Terra	88	0.0155
#18	2007/11/24	05:11/05:10	0.1683	0.2248	Aqua	54	0.0110

#### 4 匹配结果的初步分析

对匹配成功的 18 个点位气溶胶光学厚度卫星遥感与现场测量两组数据进行一元线性回归分析,

共得到 18 个点位的匹配数据。全部匹配结果如表 2 所示, $n(\tau_a|_{\text{MODIS}})$ 表示 MODIS 数据中  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  范围内有效像元值的个数, $\sigma(\tau_a|_{\text{MODIS}})$ 为其标准差,它反映了空间窗口内卫星反演光学厚度值的离散程度。从表 2 可以看到,大部分卫星反演数据的标准差较小,这也在一定程度上消除了卫星反演的面观测数据与天空辐射计的点观测数据对比时,由于气溶胶在小尺度空间分布上可能存在的较大差异所带来的影响。

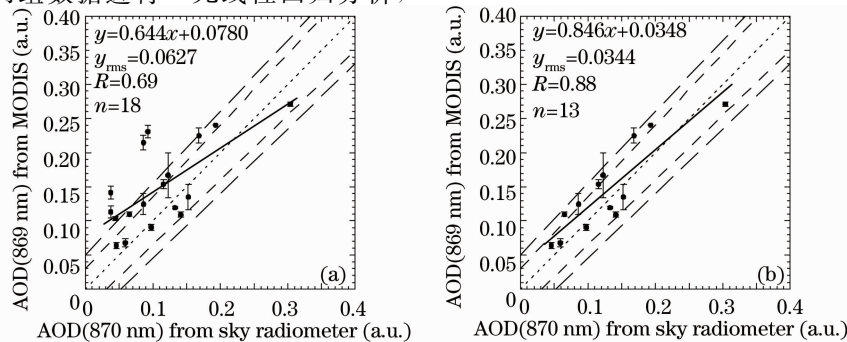


图 2 MODIS 反演气溶胶光学厚度与天空辐射计现场测量数据对比。(a)全部 18 个点位的匹配数据;

(b)去除误差最大的 5 个点位

Fig. 2 Comparison between AOD retrieved from MODIS and in-situ sky radiometer observations. (a) all of matching data; (b) excluding five pairs of data with maximum errors

为理想的 1:1 线, 误差棒表示卫星数据空间窗口内参与平均的有效像元值的标准差。

两组数据的线性拟合方程为  $y = 0.644x + 0.0780$ , 相关系数  $R = 0.69$ , 大于 99% 置信度要求的 0.59, 可以认为两组数据间的线性相关关系特别显著, 均方根偏差  $y_{\text{rms}} = 0.0627$ 。约 39% (7/18) 的对比结果落在 NASA (美国宇航局) 公布的 MODIS 反演 869 nm 海洋上空气溶胶光学厚度期望误差范围  $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$  之内 (两短虚线之间)。如果将误差范围扩大到  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.05\tau$  (长虚线), 则约有 72% (13/18) 的对比结果在此范围内。5 个点位 (分别为 #12, #13, #14, #15, #16) 的数据超出了这个误差范围。图 2(b) 为去掉这 5 个点位的匹配数据后, 卫星反演与现场观测气溶胶光学厚度的散点图。两组数据取得了较好的一致性, 13 个匹配点位均十分接近或落在  $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$  的期望误差范围之内。由此可见, MODIS 海色遥感标准大气校正算法对大气程辐射中气溶胶贡献的估算在中国东部海域很大程度上还是可行的, 其反演的 869 nm 气溶胶光学厚度多数也是有效的。同时也发现, 卫星反演的光学厚度值略大于现场测量值: 18 对匹配数据中有 13 对 (约

占 70%) 在 1:1 线之上, 表明标准算法易于高估近红外波段的大气程辐射, 从而导致离水辐亮度在该区域的低估。

东中国海不同海区的水质成分, 悬浮颗粒物状况各异, 水体光学性质也不尽相同, 将匹配数据按所在海域 (黄海和东海) 进行分类对比, 如图 3 所示。总体来说, 黄海的反演情况不甚理想, 上述 5 个误差最大的点位 (#12~#16) 全部位于黄海海域。从图 1 可以看到, #12~#14 点位靠近渤海湾, 渤海常年水质浑浊, 光学性质复杂多变; #15, #16 点位在胶州湾内, 同样受到下垫面水质状况较差的影响, 反演精度不高, 同时气溶胶易受陆上气溶胶影响而给反演增加了难度。东海的反演情况较为理想, 7 个匹配点位全部在  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.05\tau$  的误差范围之内, 两组数据的均方根偏差仅为 0.0363。一方面, 东海的匹配点位多数距离陆地较远, 海上气溶胶特征较为典型; 另一方面, 表明东海点位下垫面水体的水质情况要优于黄海。

考虑到不同季节气溶胶的组成成分可能存在较大差异, 将匹配数据按季节分类加以分析。图 4(a) 为

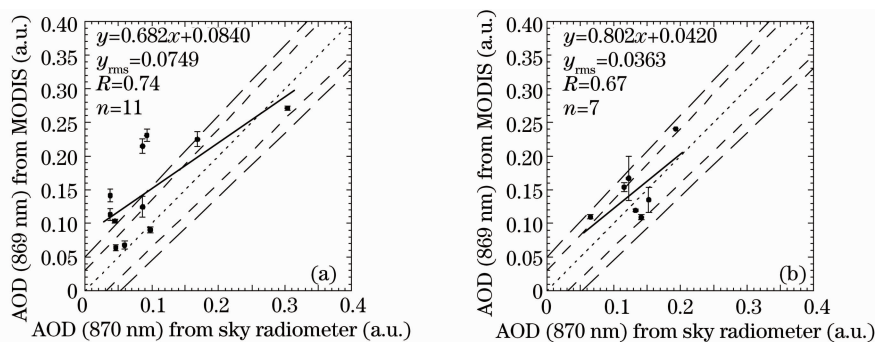


图 3 按海域分类, MODIS 反演气溶胶光学厚度与天空辐射计现场测量数据的对比。(a) 黄海; (b) 东海  
Fig. 3 Comparison between AOD retrieved from MODIS and in-situ sky radiometer observations according to sea areas. (a) the Yellow Sea; (b) the East China Sea

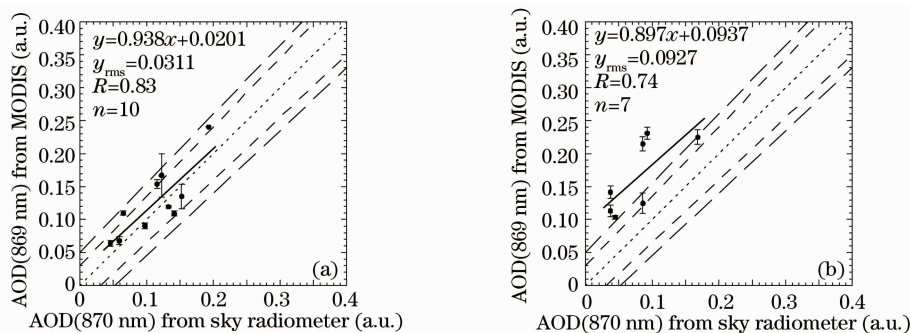


图 4 按季节分类, MODIS 反演气溶胶光学厚度与天空辐射计现场测量数据的对比。(a) 2006 年冬季; (b) 2007 年秋季  
Fig. 4 Comparison between AOD retrieved from MODIS and in-situ sky radiometer observations according to seasons. (a) the winter of 2006; (b) the fall of 2007

2006 年冬季(2007 年 1,2 月)北黄海和东海气溶胶光学厚度的对比结果,显示 MODIS 的反演精度较高,两组数据的相关系数为 0.83,均方根偏差为 0.0311,拟合线斜率接近于 1,表明 MODIS 海色遥感标准大气校正算法的近红外波段暗像元假设以及离水辐射校正在这个特定时空内是有效的。图 4(b)为 2007 年秋季(2007 年 10,11 月)的对比结果。两组数据的均方根偏差达到了 0.0927,卫星反演的光学厚度存在显著性的高估。全部 18 个匹配点位中误差最大的 5 个点位也都出自 2007 年秋季。通过分析这些匹配点位现场观测时的随船气象记录,显示当时均为晴空无云天气,风速不大,海上为 1 级或 2 级海况,相对湿度在 10%~50%之间,排除了天气条件异常对气溶胶反演的影响。这一点从表 2 中这几个点位的卫星反演有效像元数量也可以反映出来。由此推测,2007 年秋季 MODIS 数据的系统性高估既有可能与下垫面海水

光学性质异常有关,也有可能是由气溶胶模型与实际情况的较大差异造成的。

## 5 对匹配数据的进一步分析

为了了解 MODIS 海色遥感大气校正过程中气溶胶模型的使用情况,掌握更多有关气溶胶模型误差影响反演精度的信息,利用 SeaDAS(Ver 5.3.0)软件对全部 18 个匹配点位所对应的原始 MODIS L1A 数据进行重新处理,反演得到了 9 个波段的气溶胶光学厚度  $\tau_a$  和下垫面水体的归一化离水辐亮度  $L_{wn}$ ,反演结果如图 5 所示。表 3 为反演过程中气溶胶模型的选择使用情况,percentage(%)为空间窗口内具有相同气溶胶模型的像元在所有有效像元中所占比例。

表 3 SeaDAS 对全部匹配点位重新反演过程中气溶胶模型使用情况

Table 3 MODIS derived aerosol models by SeaDAS using different retrieval policies

Index of Site	#1		#2				#3		#4			
Retrieval policy	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2		
Upper-bounding model	12	6	2	7	3	6	10	7	2	10	2	7
Lower-bounding model	6	7	2	3	8	7	10	2	3	11	3	2
Percentage /%	100	100	46.6	46.6	5.2	1.6	100	76.9	23.1	100	67.5	28.3
Index of site	#4		#5				#6					
Retrieval policy	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1		
Upper-bounding model	3	12	6	11	7	2	8	6	3	10		
Lower-bounding model	8	6	7	12	2	3	8	4	7	10		
Percentage /%	4.2	100	100	100	86.3	6.5	2.4	2.4	2.4	100		
Index of site	#7				#8				#9		#10	
Retrieval policy	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	
Upper-bounding model	6	12	7	8	10	6	7	10	10	11	10	10
Lower-bounding model	7	6	2	3	10	7	2	10	11	12	10	11
Percentage /%	64.3	26.6	8.4	0.7	100	73.1	26.9	100	70.7	29.3	100	100
Index of site	#10		#11				#12		#13			
Retrieval policy	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1		
Upper-bounding model	10	12	11	6	10	7	6	2	10	6	12	7
Lower-bounding model	10	6	12	7	11	2	7	3	10	7	6	2
Percentage /%	100	68.8	28.6	2.6	100	81.1	13.6	5.3	100	49.2	37.7	13.1
Index of site	#13		#14				#15		#16			
Retrieval policy	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2	SeaDAS1		
Upper-bounding model	10	6	7	10	7	2	6	10	12	6	10	
Lower-bounding model	10	7	2	10	2	3	7	10	6	7	10	
Percentage /%	100	89.6	10.4	100	71.6	27.6	0.8	100	87.5	12.5	100	
Index of site	#17						#18					
Retrieval policy	SeaDAS1						SeaDAS2	SeaDAS1	SeaDAS2			
Upper-bounding model	11	12	7	6	2	3	10	7	6	10		
Lower-bounding model	6	12	2	7	8	3	10	2	7	11		
Percentage /%	44.6	44.6	5.4	3.6	0.9	0.9	100	85.9	14.1	100		

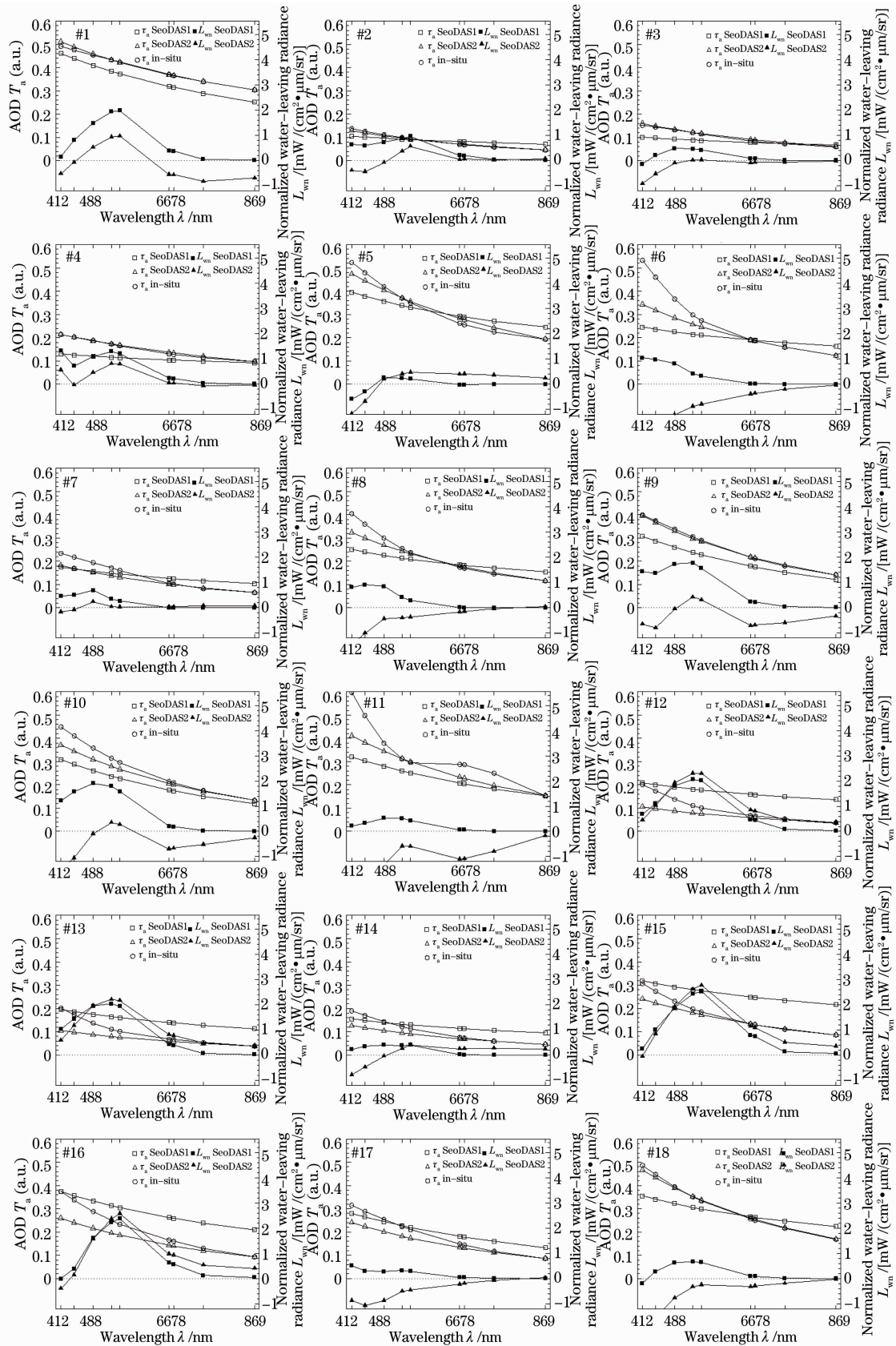


图 5 使用 SeaDAS 对全部匹配点位重新反演得到 9 个波段的气溶胶光学厚度  $\tau_a$  和归一化离水辐亮度  $L_{wn}$   
 Fig. 5 MODIS derived AOD  $\tau_a$  at 9 ocean color bands as well as normalized water-leaving radiance  $L_{wn}$  by SeaDAS using different retrieval policies

SeaDAS 是 NASA 发布的用于 SeaWiFS, MODIS 等海色产品反演的标准软件。在实际操作中使用两种不同的气溶胶模型选择方法, 分别用 SeaDAS1 和 SeaDAS2 表示。SeaDAS1 为 MODIS 海色遥感标准大气校正算法; SeaDAS2 则是通过输入 9 个波段实测气溶胶光学厚度(由天空辐射计测得的 5 波段光学厚度通过三次样条插值获得)来选择气溶胶模型的反演方法; SeaDAS 根据输入的 748 nm 和 869 nm 实测光学厚度来估算这两个波段气溶胶单次散射量  $\rho_{as(748)}$  和  $\rho_{as(869)}$ , 从而得到  $\epsilon_{ret(748, 869)}$ , 据此在预设的 12 个气溶胶模型中判断出适用的模型, 根据选定模型外推其它波段的情况。SeaDAS2 方法并不依赖标准大气校正算法中的暗像元假设, 可以排除下垫面水体在近红外波段光学性质异常所带来的误差, 并提供一个表征气溶胶含量的初值  $\tau_{a(869)}$  以及用于判断气溶胶模型的  $\epsilon_{(748, 869)}$ 。虽然这样使得整个研究区域具有相同的气溶胶模型和光学厚度, 但在 10 km × 10 km 空间范围内还是合理的。

从总的反演结果来看, SeaDAS1 方法易于高估 869 nm 气溶胶光学厚度  $\tau_{a(869)}$ , 而且其反演的 9 个波段的  $\tau_{a(\lambda)}$  所体现出的 Angstrom 波长指数明显小于海上实测光学厚度的波长指数, 表明 SeaDAS1 方法在气溶胶模型选择上误差较大, 这主要与下垫面海水在近红外波段的离水辐射有关, 特别是在 SeaDAS1 反演  $\tau_{a(869)}$  误差最大的 5 个点位 (#12 ~ #16), 使用 SeaDAS2 方法反演得到的 748 nm 和 869 nm 的  $L_{wn}$  均值分别为 0.4484 mW/(cm<sup>2</sup> · μm · sr) 和 0.3324 mW/(cm<sup>2</sup> · μm · sr)。SeaDAS2 在模型选择上相比 SeaDAS1 有了明显改进, 但模型所表现出的光学厚度随波长的变化规律仍与实测气溶胶有一定的偏差: 该方法反演的  $\tau_{a(\lambda)}$  在红光波段上与实测值取得了较好的一致, 但从绿光到蓝光波段与实测值之间的误差却逐渐增大。这与气溶胶模型中消光系数  $\beta_e$  在蓝绿波段取值偏低有关, 说明实际气溶胶在蓝绿波段可能存在一定的吸收性。

而在 SeaDAS1 反演  $\tau_{a(869)}$  误差较小的点位, 则出现了使用 SeaDAS2 方法反演  $L_{wn}$  在蓝光波段负值较多的情况, 有的点位甚至 9 个波段的  $L_{wn}$  全部为负。这说明在由  $\tau_a$  到  $\rho_{as}$  再到  $\rho_a + \rho_{ra}$  的转换过程中, 气溶胶模型中预设的单次散射量与多次散射量之间的关系式  $K$ , 体散射相函数  $P_a$  以及单次散射反照率  $\omega$  都可能与实际情况存在差异。其中单次散射反照率取值偏高对反演精度的影响更为明显和直接。气溶胶光学厚度由散射光学厚度和吸收光学厚

度构成。蓝光波段  $\tau_{a(\lambda)}$  的显著增大很可能是由吸收主导, 即  $\tau_a$  的增大并不必然导致散射也有相应量的增加, 而使得  $L_{wn}$  出现负值。另外, 气溶胶的吸收性还会导致单次散射和多次散射间误差的增大。中国东部海域上空气溶胶易受陆源气溶胶影响, 细粒子比重偏大且呈现出较强的吸收性。MODIS 标准大气校正算法中 12 个预设模型均为无吸收或弱吸收型, 单次散射反照率多在 0.9 以上, 且随波长变化较小, 这显然与研究海域的气溶胶实际情况不符。

由此可见, 气溶胶模型的误差主要包括两个方面: 1) 尺度分布引起的散射相函数的误差, 2) 由气溶胶的吸收特性带来的单次散射反照率的误差, 而标准大气校正算法中预设的气溶胶模型都不能很好地描述我国东部近海海上气溶胶的光学特性。

## 6 结 论

MODIS 反演气溶胶光学厚度出现误差的原因是复杂的和多方面的, 包括传感器辐射定标的误差, 天气条件尤其是云的干扰, 海面白帽的估算误差等, 但最主要的原因有两个: 1) 下垫面海水固有光学性质的复杂性和不确定性, 特别是在我国东部近海海域, 叶绿素, 悬浮泥沙等水色要素的浓度极不稳定, 导致近红外波段离水辐亮度可能远大于零; 2) 气溶胶类型及其光学特性的复杂性和不确定性。由于中国东部海域气溶胶易受陆源气溶胶的影响, 因此 MODIS 海色遥感标准大气校正算法中由水溶性粒子, 类灰尘粒子和海盐粒子三种组分组成的海上气溶胶模型不能完全满足在此区域气溶胶光学厚度反演的需要。鉴于气溶胶模型在 MODIS 海色遥感大气校正以及气溶胶反演过程中所发挥的关键性作用, 收集积累更多这一海域气溶胶海上观测资料, 掌握其尺度分布, 复折射率, 单次散射反照率等性质的季节性变化规律, 总结提取更为适用的气溶胶模型加入到相关算法中将是下一步的工作方向。

**致谢** 感谢 2006 年, 2007 年 5 个航次全体海上试验人员的辛勤工作, 以及 NASA Goddard Space Flight Center (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) 提供的 MODIS 数据和 SeaDAS 软件。

## 参 考 文 献

- 1 Peng Nina, Yi Weining, 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
- 2 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
- 3 Shen Yanbo, Wang Biao, Shi Guangyu. Aerosol optical depth and dusty weather over eastern china seas in spring of 2006 [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(3): 290~298  
申彦波, 王 标, 石广玉. 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(3): 290~298
- 4 H. R. Gordon, M. Wang. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 443~452
- 5 H. R. Gordon. Atmospheric correction of ocean color imagery in the earth observing system era [J]. *J. Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 17081~17106
- 6 D. A. Siegel, M. Wang, S. Maritorena *et al.*. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3582~3591
- 7 H. R. Gordon. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(10): 1631~1636
- 8 H. R. Gordon, K. J. Voss. MODIS normalized water-leaving radiance algorithm theoretical basis document (Version 5), Technical Report. Under Contract Number NAS5-31363, 2004, 7~53
- 9 He Xianqiang, Pan Delu, Zhu Qiankun *et al.*. Exact rayleigh scattering calculation for chinese ocean color and temperature scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 145~151  
何贤强, 潘德炉, 朱乾坤 等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 145~151
- 10 T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao *et al.*. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2672~2686