

近海污染大气气溶胶光学性质反演研究

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阜阳师范学院物理系,安徽 阜阳 236041

摘要 提出了基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据反演近海污染大气气溶胶光学性质的算法。根据近海污染大气气溶胶的成分特征构建了新的气溶胶模式;同时避免了MODIS反演算法中计算大气顶光谱反射率理论的缺陷;利用近红外光谱数据降低了近岸二类水体离水辐射的影响,并通过光谱匹配技术实现了近海污染大气气溶胶光学性质的反演。利用气溶胶自动观测网(AERONET)的近海站点数据对算法进行了验证。结果表明,超过2/3的反演结果落在误差范围内,反演结果达到了大洋的反演精度。

关键词 大气光学;中分辨率成像光谱仪(MODIS);近海污染大气;气溶胶光学厚度

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.060101

Retrieval of Polluted Aerosol Optical Properties over Coastal Water

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 University, Fuyang, Anhui 236041, China

Abstract An algorithm for retrieving polluted coastal aerosol optical properties based on moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) data is proposed. New aerosol modes are created based on the characteristics of coastal aerosols; the limitation of computing apparent reflectance in MODIS algorithm is removed; and by selecting infrared spectroscopy bands, water leaving radiance from case II water is reduced. Aerosol robotic network (AERONET) sites data are used to test the proposed algorithm, and the results show that more than two-thirds retrievals lie within the expected error bars. The retrieval meets the requirements of the ocean retrieval accuracy.

Key words atmospheric optics; moderate resolution imaging spectrometer; polluted coastal atmosphere; aerosol optical depth

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 010.1100

1 引言

近年来全球气候灾害的增加使得对气候的研究成为热点,在对气候的研究中,气溶胶是最不确定、最活跃的因素之一,因为它具有较大的时空变化性和较短的生命周期,因此需要对其进行全球的实时观测,而这只有通过卫星遥感的方法才能实现^[1]。地球上60%左右的人口居住在沿海,工业区更是集中在海岸带,工业生产和日常生活的排放气体污染了近海的大气,改变了近海气溶胶的成分,因此对近海污染大气气溶胶的研究具有复杂性。同时,对近海污染大气气溶胶的研究有助于认识其对气候的影响,有助于掌握近海海域生

收稿日期: 2011-04-13; **收到修改稿日期**: 2011-04-18; **网络出版日期**: 2011-05-25

基金项目: 国家973计划(2010CB950803)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

产力,有助于了解气溶胶对沿海居民健康的影响^[2],因此对近海污染气溶胶的研究更有其重要性。

目前对海洋气溶胶卫星遥感观测较为成功的例子是中分辨率成像光谱仪(MODIS),对其产品的一些评估研究表明,反演的气溶胶光学厚度大约有 2/3 落在误差范围内^[3]。但 MODIS 现行算法对近海气溶胶的反演存在着困难:1)MODIS 算法采用的气溶胶模式中没有包含造成污染的煤烟成分。由全球气溶胶数据集(GADS)可知^[4],近海污染气溶胶除含有水溶性粒子和海盐粒子外,还含有吸收性较强的煤烟粒子。2) MODIS 算法利用 Wang 等^[5,6]的理论来计算大气顶的表现反射率,该理论不适用于吸收性气溶胶,而煤烟粒子具有较强的吸收性。3)算法中有一个重要假设,即离水辐射在用于反演的 6 个波段内(553,646,855,1243,1632 和 2119 nm 波段)均为零,这一假设对近岸二类水体在可见光波段不成立^[7],因此 MODIS 在进行反演前首先要进行二类水检测^[8],若为二类水则不进行反演。据此,本文采用煤烟粒子、水溶性粒子和海盐粒子 3 种成分构建气溶胶模式;避开 Wang 等的理论,直接计算 3 种成分的大气顶表现反射率构成查找表;利用近红外波段减小近海二类水体离水辐射对反演的影响(因为近海二类水体的离水辐射在近红外波段可以忽略),最后通过对测量的气溶胶光谱反射率进行光谱匹配,实现近海污染大气气溶胶光学性质的反演。

气溶胶自动观测网(AERONET)经过近 20 年的发展已经建立了很多的站点,积累了丰富的数据。AERONET 使用的仪器主要是法国 Cimel 公司生产的太阳辐射计,它能够自动对太阳直射光和天空漫射光进行测量。利用 Dubovik 等^[9]的算法,可以由这些测量结果反演得到整层大气柱内气溶胶的多种性质参数,由于是地基测量,地表的影响较小,反演得到的气溶胶参数更为准确^[10],可以作为标准数据用于验证其他气溶胶遥感的精度。AERONET 站点 Hong_Kong_Hok_Tsui 和 MVCO 均位于近海,且分别代表了气溶胶含量高、低不同的两种分布,为检验算法的有效性,将本算法用于这些区域,并用这些站点的数据对反演结果进行验证,结果表明,超过 2/3 的反演结果落在误差范围内,反演结果达到了大洋的反演精度。

2 近海污染大气气溶胶光学性质反演算法

对于大气窗区通道,在忽略气体吸收的情况下,卫星传感器测得的表现反射率值 ρ_t 可分解为

$$\rho_t = \rho_p + T\rho_g + t\rho_w + t\rho_w, \quad (1)$$

式中 T 为大气直射透过率, t 为大气漫射透过率; ρ_p 为大气分子和气溶胶粒子的路径散射,可由瑞利散射和米氏散射理论计算; ρ_g 为太阳直射经过海面镜面反射后直接被传感器所接收到的反射,可由菲涅耳反射理论计算; ρ_w 为离水辐射的贡献,在所选择的波段中,离水辐射的影响很小,可以忽略; ρ_{wc} 为海浪白帽的反射,可由 Koepke 等^[11]的理论计算。

算法采用查找表法,其基本思路是:1)设定合理的气溶胶模式;2)根据气溶胶模式计算大气顶表现反射率构成查找表;3)根据查找表计算观测几何条件下大气顶的表现反射率;4)利用循环迭代寻找最佳解,要求最佳解对应的光谱反射率能够与传感器的观测结果实现最佳光谱匹配。

2.1 近海污染大气气溶胶模式的构建

海洋气溶胶模式的构建有两种典型的方法。一种以 MODIS 为代表,将气溶胶模式分为 4 个小粒子模式和 5 个大粒子模式,模式较为简单。反演前先针对两类模式计算查找表,反演时再利用 Wang 等的理论由查找表中大、小模式的表现反射率合成大气顶的表现反射率,但该理论仅在单次散射下近似成立,且不能用于吸收性较强的气溶胶^[5],而近海污染气溶胶的主要成分煤烟粒子就具有较强的吸收性。另一种以海洋水色传感器(SeaWiFS)为代表,在不同的湿度下,将大、小两种粒子按一定的比例组合构成气溶胶模式^[12,13]。本研究采用后者的理论方法来构建近海污染大气气溶胶模式,即在不同湿度下,将水溶性粒子、海盐粒子和煤烟粒子按不同的比例组合构建气溶胶模式,利用辐射传输方程直接计算这种多成分气溶胶模式的表现反射率构成查找表,这样就避开了 Wang 等的理论在合成大气顶光谱反射率时的缺陷。

在气溶胶模式的构建中需要确定相对湿度和各成分数密度的百分比。近海污染大气气溶胶包括水溶性粒子、海盐粒子和煤烟粒子 3 种主要成分。除煤烟粒子外,其他两种成分的性质受相对湿度的影响较大,主要表现在:1)粒子尺度随相对湿度的增加而增大,且相对湿度较大时,其变化对粒子尺度的影响更加明显;2)粒子的折射指数随相对湿度的变化而变化,随着相对湿度的增加,实部趋向于水的实部,虚部则逐渐减小。因此在构建气溶胶模式时应该考虑相对湿度的影响。图 1 给出了海盐粒子、水溶性粒子和煤烟粒子的数密

度比分别为 1%，80%和 19%，在 550 nm 波段，气溶胶光学厚度为 0.4，太阳天顶角为 36°，观测天顶角为 54°，相对方位角为 156°，风速为 6 m/s 时相对湿度对表观反射率的影响。这种影响在红外波段表现更为明显。通过对大量模拟计算的分析，并参考 SeaWiFS 的气溶胶模式构建理论^[12,13]，选择 30%，50%，70%，75%，80%，85%，90%和 95%等 8 种相对湿度(RH)构建气溶胶模式是合理的。

由全球气溶胶数据集可知，近海污染大气气溶胶中海盐粒子含量的变化范围大致为 0~1%，且其含量的少量改变都会导致表观反射率较明显的变化；水溶性粒子的变化范围大致为 40%~100%；煤烟粒子的变化范围大致为 0~60%^[4,12,13]。综合考虑这些因素后，对每一个相对湿度按各种粒子数密度的不同组合构建了 18 种气溶胶模式，如表 1 所示。这 18 种气溶胶模式涵盖了近海污染大气气溶胶各种成分的变化区间。

表 1 各种气溶胶模式中 3 种成分数密度的百分比

Table 1 Ratios of the number density of three components of each aerosol mode

Fraction of sea salt particles /%	Fraction of water soluble particles /%	Fraction of soot particle /%
1.0	40.0	59.0
	60.0	39.0
0.5	99.0	0.0
	40.0	59.5
0.2	60.0	39.5
	99.5	0.0
0.1	40.0	59.8
	60.0	39.8
0.05	99.8	0.0
	40.0	59.9
0	60.0	39.9
	99.9	0.0
	40.0	59.95
	60.0	39.95
	99.95	0.0
	40.0	60.0
	60.0	40.0
	100.0	0.0

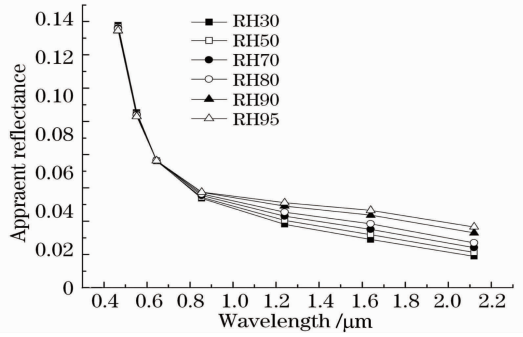


图 1 不同湿度表观反射率随波长的变化关系

Fig. 1 Examples of simulated apparent reflectances as a function of wavelength for 6 relative humidities

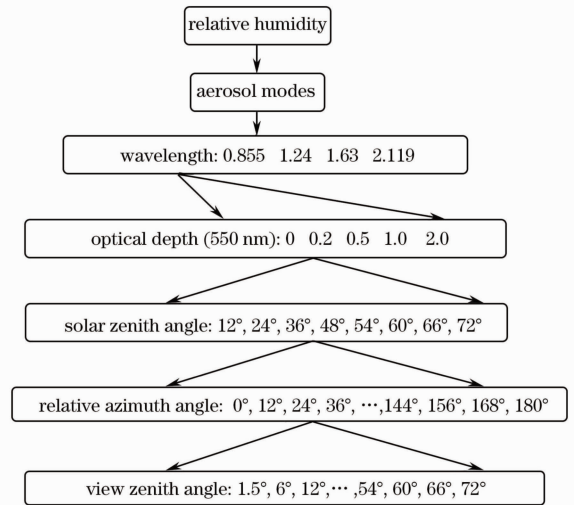


图 2 查找表的结构示意图

Fig. 2 Structure of the look-up table

2.2 查找表的计算

6s (second simulation of a satellite signal in the solar spectrum) 矢量辐射传输代码是目前公开的较为准确的辐射传输代码。由该代码计算的大气顶表观反射率包括了大气分子和气溶胶的路径散射、水面的菲涅耳反射和白帽反射以及水体内部的离水辐射^[14]，同时该代码充分考虑了偏振的影响，Svetlana 等^[15]对它的评估研究表明，其总体误差不超过 0.8%。计算时需要输入一些参数，主要有：1) 大气参数，选择无吸收大气，在反演时对卫星观测进行吸收气体校正；2) 气溶胶模式参数，包括模式中各成分的尺度分布参数、体积比等；3) 550 nm 波段的气溶胶光学厚度；4) MODIS 波段编号，6s 提供了 MODIS 前 7 个波段的响应函数，因此只需要提供波段编号即可；5) 下垫面类型等^[15]。

查找表的计算就是对每一个相对湿度，计算大气顶的表观反射率 $\rho_i(r_w, r_s, \lambda, \tau_a^{550}, \theta_0, \Delta\Phi, \theta)$ ，其中 r_w, r_s

分别代表水溶性粒子和海盐粒子的数密度百分比(查找表的计算是以3种成分数密度百分比为变量的,这3个变量满足一个约束条件,即三者之和等于1,因此三维可以降低为二维),它们的不同组合构成了不同的气溶胶模式,取值见表1。 λ 为用于反演波段的中心波长,共4个; τ_a^{550} 为550 nm波段的气溶胶光学厚度,共5个; θ_0 为太阳天顶角,共8个; $\Delta\Phi$ 为太阳和卫星间的相对方位角,共16个; θ 为观测天顶角,共13个。它们的取值如表2所示,查找表的结构示意图和实际查找表的示例分别如图2和图3所示。

表2 查找表中各参数的取值

Table 2 Values of parameters used in the look-up table

λ /nm	855, 1243, 1632, 2119
τ_a^{550}	0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0
θ_0 /($^\circ$)	12, 24, 36, 48, 54, 60, 66, 72
θ /($^\circ$)	1.5, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72
$\Delta\Phi$ /($^\circ$)	0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180

```

RH= 50
RATIO sea salt 0.0100 WS 0.4000 soot 0.5900
wavelength 0.855
Aerosols
rg sea salt 0.3360 sigma sea salt 2.0300
rg ws 0.0262 sigma ws 2.2400
rg soot 0.0118 sigma soot 2.0000
ssa 0.9919 asym 0.7715
sca 0.0272 ext 0.0274
aot 0.1935
SZA 12.0 24.0 36.0 48.0 54.0 60.0 66.0 72.0
SZA= 12.0
phi vz 1.5 6.0 12.0 18.0 24.0 30.0
36.0 42.0 48.0 54.0 60.0 66.0
0.0 0.1065E+00 0.8336E-01 0.6213E-01 0.4007E-01 0.3273E-01 0.2874E-01
0.2658E-01 0.2588E-01 0.2545E-01 0.2592E-01 0.2759E-01 0.3140E-01
.....

```

图3 实际查找表的示例,除大气顶表现反射率外,还包括大气和气溶胶的信息

Fig. 3 Example of the real look-up table, in addition to apparent reflectance of top of the atmosphere, including information of atmosphere and aerosol

图4给出了一个模拟计算的实例,即相对湿度为50%,550 nm波段,气溶胶光学厚度为0.4,太阳天顶角为36°,观测天顶角为54°,相对方位角为156°,风速为6 m/s时,6种气溶胶模式对应的大气顶表现反射率与波长之间的关系。当大粒子含量较多时,如第一种气溶胶模式,反射率的光谱变化较为平缓,随着大粒子含量的减少,反射率光谱的变化明显加快。同时注意到,在近红外波段光谱反射率仍有明显的波长依赖性,这说明在近红外波段仍然包含有相当多的气溶胶信息。加之二类水体在近红外波段的离水辐射一般可视为零,因此可以选择近红外波段反演近海污染大气气溶胶光学厚度。

2.3 反演

尽管MODIS仪器用于气溶胶反演的通道信噪比较高,但仍不能满足逐像元反演的要求,将10 km×10 km内的像元进行平滑处理后其信噪比将大幅提高,因此一般以10 km×10 km的粗格点为单位进行反演。反演步骤如下:

1)读取MODIS云检测通道数据,并进行云检测,对有云像元做云标记^[16]。

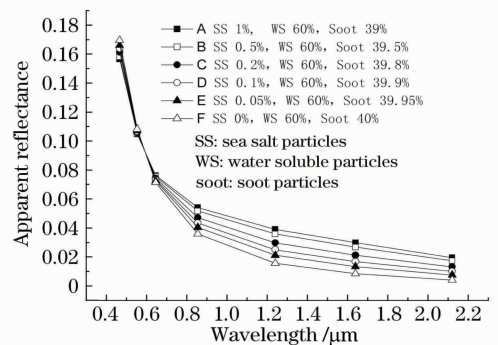


图4 相对湿度为50%时几种气溶胶模式的表现反射率随波长的变化关系。计算对应的太阳天顶角为36°,观测天顶角为54°,相对方位角为156°,0.55 μm波段气溶胶光学厚度为0.4,风速为6 m/s

Fig. 4 Examples of simulated apparent reflectances as a function of wavelength for four types of aerosol model at the same relative humidity of 50%. The simulations are made for a solar zenith angle of 36°, a view zenith angle of 54°, a relative azimuth angle of 156°, an aerosol optical depth of 0.4 at 0.55 μm, and a surface wind speed of 6 m/s

2) 读取反演通道的反射率数据, 并进行吸收气体校正和平滑降噪处理。大气中的吸收气体主要为臭氧、二氧化碳和水汽, 考虑到这些吸收气体的含量和分布的时空变化性, 在计算查找表时没有考虑这些吸收气体的影响, 而是在反演阶段对遥感观测结果进行吸收气体校正, 即去除吸收气体的影响。方法是: 由其他遥感资料获取各种吸收气体的含量和分布数据; 由这些数据计算出各种吸收气体的透过率; 再计算各种气体透过率的乘积得总透过率; 用观测到的表观反射率除以总透过率得校正后的表观反射率。这样做能够实时地考虑各种吸收气体的时空变化, 实现灵活、准确地反演。最后将格点内的所有校正后的无云像元的反射率求平均用于后续步骤的反演。

3) 利用查找表计算观测几何条件下, 每一个相对湿度, 18 种气溶胶模式, 4 波段, 5 个 τ_a^{550} 对应的大气顶表观反射率值。即在图 2 中由下往上依次对观测天顶角、相对方位角和太阳天顶角进行多维线性插值。这样就可以得到在观测几何条件下, 每个模式在各个波段对应于查找表中 5 个光学厚度的表观反射率值, 即 $\rho_t(r_w, r_s, \lambda, \tau_a^{550}, \theta'_0, \Delta\Phi', \theta')$, 其中 $\theta'_0, \Delta\Phi', \theta'$ 分别表示实际的太阳天顶角, 相对方位角和观测天顶角。

4) 确定气溶胶光学厚度的最佳解。采用约束条件下 n 维极值的复形调优法循环迭代寻找最佳解。首先对水溶性粒子和海盐粒子的数密度百分比赋初值 r'_w, r'_s , 采用基于 delaunay 三角形的随机点二维插值法由 3) 中的结果计算 $\rho_t(r'_w, r'_s, \lambda, \tau_a^{550}, \theta'_0, \Delta\Phi', \theta')$, 对每一种湿度, 这样的值共有 20(4×5) 个, 对应着查找表中 4 个波段、5 个光学厚度。利用 0.855 μm 波段在 5 个光学厚度下的这些计算值和该波段 MODIS 的实测值即可插值出对应的气溶胶的光学厚度 τ_a^{550} , 之所以选择该波段, 是因为该波段对大、小粒子都比较敏感。再由各波段在 5 个光学厚度下的这些计算值和 τ_a^{550} 即可插值出各波段在光学厚度为 τ_a^{550} 时的光谱反射率, 即 $\rho_t(r'_w, r'_s, \lambda, \tau_a^{550}, \theta'_0, \Delta\Phi', \theta')$, 这样的值有 4 个, 对应着 MODIS 的 4 个红外波段。最后将这些值代入 (2) 式进行光谱拟合, 直至搜索到最佳拟合点, 此时对应的光学厚度 τ_a^{550} 即为该湿度下的反演结果。最后比较每一个湿度的反演结果对应的 ϵ 值, 最小的 ϵ 对应的反演结果即为最终的反演结果,

$$\epsilon = \sqrt{\sum_{\lambda=1}^4 N_{\lambda} \left(\frac{\rho_{\lambda}^m - \rho_t}{\rho_{\lambda}^m - \rho_{\lambda}^{\text{ray}} + 0.01} \right)^2 / \left(\sum_{\lambda=1}^4 N_{\lambda} \right)}, \quad (2)$$

式中 N_{λ} 是 λ 波段能够用于反演的像元数, 因为一些被云污染的像元和耀斑像元等不能用于反演, ρ_{λ}^m 是 MODIS 测得的 λ 波段的反射率, $\rho_{\lambda}^{\text{ray}}$ 是该波段的瑞利反射率, ρ_t 是计算得到的大气顶表观反射率, 0.01 是为了防止在长波段分母可能为 0 而加的常数。

3 算法验证

为检验算法的有效性, 将本算法用于香港的 Hong_Kong_Hok_Isui (Latitude 22.2097°N, Longitude 114.258°E) 和美国东海岸的 MVCO (Latitude: 41.3° North, Longitude: 70.55° West) 两个 AERONET 站点附近的水域, 并用 AERONET 站点的数据对反演的结果进行验证, 因为地基的太阳辐射计测量结果较为准确, 可以作为评估算法的标准^[17]。

对一个 AERONET 站点而言, 它提供的是同一区域、不同时间的气溶胶性质参数, 是一种时间变化的数据, 而由 MODIS 反演得到的则是一定时间不同区域的气溶胶数据, 是一种空间变化的数据。采用 Ichoku 等^[18]提出的理论, 用 AERONET 随时间变化的气溶胶数据对 MODIS 随空间变化的气溶胶数据进行验证。即取 MODIS 过顶前后 30 min 内的 AERONET 数据做时间平均; 取以 AERONET 站点为中心的 50 km×50 km 范围内的 MODIS 气溶胶数据进行空间平均, 然后将这两种平均值作对比。对典型的海洋平均风速而言, 这 50 km×50 km 的区域刚好与太阳辐射计在 1 h 内观测的大气质量相匹配。这样处理后即可用 AERONET 气溶胶数据对 MODIS 气溶胶数据进行科学的验证。

AERONET 提供 3 个等级的气溶胶数据, 即 L1.0, L1.5 和 L2.0, 其中 L1.0 级数据没有经过云检测, L1.5 级数据是经过云检测的数据, L2.0 级数据则是经过云检测并具有质量保证的数据。评估中我们采用 L2.0 级产品。由于 MODIS 是以 10 km×10 km 作为一个反演单元, 因此在 50 km×50 km 范围内应该有 5×5=25 个气溶胶数据, 但是由于云和耀斑等的存在, 气溶胶数据可能会小于 25 个。验证时要求在 50 km×50 km 区域内至少有 5 个气溶胶反演数据。

图 5 给出了本算法反演的气溶胶光学厚度与 AERONET 站点数据的对比结果,图中的实线为两者的拟合线,虚线为正负误差限,即 $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$,根据对 MODIS 反演产品的评估研究^[3,19],MODIS 现行算法在大洋海域反演得到的光学厚度有超过 2/3 的点落在该误差限内。本算法有大约 3/4 的点落在了误差限以内,达到了大洋的精度要求。大的光学厚度对应着较强的污染,当光学厚度大于 0.2 时仍然有超过 2/3 的点落在误差限内,这表明该算法对污染大气气溶胶光学性质的反演效果较好。同时反演结果与 AERONET 数据的相关系数也较高(0.929)。

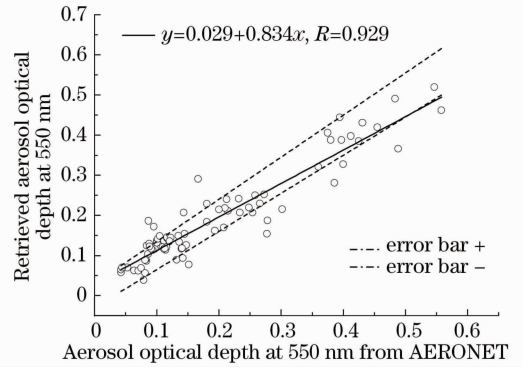


图 5 新算法反演的气溶胶光学厚度与 AERONET 站点数据的对比结果

Fig. 5 Comparison of the results between the proposed algorithm and AERONET

4 结 论

提出了利用中分辨率成像光谱仪近红外波段数据,考虑 3 种气溶胶成分反演近海污染大气气溶胶光学性质的算法,并取得了较好的结果。这表明近红外波段对气溶胶仍然比较敏感,可用于对普通二类水体上空气溶胶光学性质的反演。同时本算法采用的考虑 3 种气溶胶成分构建气溶胶模式的反演算法还可以移植到其他气溶胶成分复杂的区域。

致谢 感谢为接收和提供 MODIS 数据而努力工作的团队,感谢为 AERONET 站点的维护及数据的收集和整理而努力工作的团队,是他们的付出使得我们的工作能够顺利地展开。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Kaufman, D. Tanré, O. Boucher. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 215~223
- 2 D. A. Chu, Y. J. Kaufman, G. Zibordi *et al.*. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D21): ACH4-1
- 3 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
- 4 P. Koepke, M. Hess, I. Schult *et al.*. Global aerosol data set[R]. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie, 1997. 937~939
- 5 M. Wang, H. R. Gordon. Radiance reflected from the ocean-atmosphere system; synthesis from individual components of the aerosols size distribution[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 7088~7095
- 6 Lei Chengxin, Zhang Huafu, Liu Hanfa. Study of extinction characteristics of solar radiation by soot aerosols[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3373~3377
类成新,张化福,刘汉法. 煤烟气溶胶粒子对太阳辐射的消光特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3373~3377
- 7 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
- 8 R. R. Li, Y. J. Kaufman, B.-C. Gao *et al.*. Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**(3): 559~566
- 9 O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben *et al.*. Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieval from AERONET sun and sky radiance measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(8): 9791~9806
- 10 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
- 11 P. Koepke. Effective reflectance of oceanic whitecaps[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(11): 1816~1824
- 12 B. C. Gao, Marcos J. Montes, Ziauddin Ahmad *et al.*. Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(6): 887~896

- 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 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
- 15 Svetlana Y. Kotchenova, Eric F. Vermote. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4455~4464
- 16 Wang Jiacheng, Yang Shizhi, Ma Jinji *et al.*. Automatic cloud detection applied to MODIS image in the southeast of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(3): 270~273
王家成,杨世植,麻金继等. 东南沿海 MODIS 图像自动云检测的实现[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, **31**(3): 270~273
- 17 B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker *et al.*. AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1998, **66**: 1~16
- 18 C. Ichoku, D. A. Chu, S. Mattoo *et al.*. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products[J]. *J. Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(12): MOD1
- 19 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