

doi: 10.3788/gzxb20144301.0101003

利用 MODIS 数据同时反演中国近海海域气溶胶 光学厚度和 Junge 谱指数

边健^{1,2,3}, 曹亚楠^{1,2}, 徐梦春^{1,2}, 徐青山¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 合肥学院 数学与物理系, 合肥 230601)

摘 要: 基于中分辨率成像光谱辐射仪第 15 和 16 两个近红外通道的反射率数据和空间几何角度参量, 利用 Junge 谱近似实际大气气溶胶模型, 采用一种物理迭代法, 同时反演了中国近海海洋上空气溶胶光学厚度和 Junge 谱指数, 并对反演方法进行了验证. 结果表明: 在所研究的海域上空, 大部分气溶胶的光学厚度处于 0.02~0.17 间, Junge 谱指数的范围集中在 2.8~3.8 间, 且都有从海岸到远海递减的趋势, 得到了合理的气溶胶 Junge 谱指数与气溶胶光学厚度的空间分布. 将反演结果与中分辨率成像光谱辐射仪产品和气溶胶观测网数据作对比, 发现反演结果更加逼近气溶胶观测网数据的观测值, 具有更高的反演准确度, 在该区域具有较好的适用性, 以及一定的可行性与可靠性.

关键词: 卫星遥感; 气溶胶; 反演; 光学厚度; Junge 谱; 中分辨率成像光谱辐射仪; 气溶胶观测网

中图分类号: P402

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)01-0101003-8

Simultaneous Determination of Aerosol Optical Thickness and Exponent of Junge Power Law over East China Sea Based on MODIS Data

BIAN Jian^{1,2,3}, CAO Ya-nan^{1,2}, XU Meng-chun^{1,2}, XU Qing-shan¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Department of Mathematics and Physics, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the reflectance data of the fifteenth and sixteenth channels in near-infrared bands and spatial geometrical angles of the moderate resolution imaging spectro-radiometer, a physical iterative algorithm was proposed, using the Junge power-law size distribution to approximate the actual atmospheric aerosol model. The algorithm was used for simultaneous determination of the aerosol optical thickness and the exponent of the Jung power law. The results show that the aerosol optical thickness over most of the studied ocean is in the range of 0.02~0.17, the exponent of the Jung power law is in the range of 2.8~3.8, and both the aerosol optical thickness and exponent of the Jung power law have the trend of descending from coast to open sea. Therefore, the reasonable spatial distributions of the exponent of the Junge power law and aerosol optical thickness were obtained. Comparing the retrieval results with the moderate resolution imaging spectro-radiometer product and aerosol robotic network measurements, the retrieval algorithm whose results are more approach aerosol robotic network data than moderate resolution imaging spectro-radiometer product, is more accurate than moderate resolution imaging spectro-radiometer algorithm. Therefore, the retrieval method which is applied for the studied region is feasible and reliable.

Key words: Satellite remote sensing; Aerosol; Retrieval; Optical thickness; Junge power law; MODIS; AEosd RObotic NETwork(AERONET)

OCIS Codes: 010.1110; 280.4991; 290.1310

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40775028)和装备预研基金(No. 020811ZK09)资助

第一作者: 边健(1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为气溶胶光学特性以及卫星遥感. Email: bianjian0926@163.com

导师(通讯作者): 徐青山(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正. Email: qshxu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2013-04-27; 录用日期: 2013-08-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来随着对气溶胶特性的深入研究,利用卫星遥感气溶胶也得到了不断的发展,包括多光谱、多角度、偏振、成像扫描等功能的各种传感器对遥感气溶胶光学特性提供了更加全面的信息,先后出现了多种卫星遥感气溶胶的方法^[1-6]. Long 等^[1]利用先进甚高分辨率辐射仪(Advanced Very-High Resolution Radiometer, AVHRR)数据的单通道算法描述了全球海洋上的平流层和对流层气溶胶光学厚度的分布情况. Higurashi 等^[2]利用 AVHRR 资料采用双通道反演方法反演了全球的气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数. Mishchenko 等^[3]利用偏振特性和阳光反射强度研究了海洋上卫星遥感气溶胶特性. 自 2000 年 8 月 Terra 卫星正常运行开始,利用中分辨率成像光谱辐射仪(Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS)遥感数据反演海洋或大陆上空气的溶胶光学厚度成为这一领域最重要的方法^[7]. NASA 每天提供全球绝大多数地区 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的 MODIS 气溶胶光学厚度的反演结果,其气溶胶产品已经广泛应用于大气污染、环境监测等领域. Tanre 等^[8]利用 MODIS 资料多通道反射率法计算了海洋上气溶胶的特性. Levy^[9]等通过与气溶胶(AEROSOL ROBOTIC NETWORK, AERONET)观测网的部分观测结果进行比较,得到 MODIS 第 2 代算法反演结果与地面观测结果的统计关系及相关系数. Li 等^[10]利用中国地区太阳光度计观测网(Chinese Sun Hazemeter Network, CSHNET)站点的数据评估了 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性. 何涛等^[11]提出一种反演气溶胶光学厚度的改进方法,并用 MODIS 观测数据反演得到的结果与 AERONET 数据进行比对. 从上面研究结果看出,不同情况下 MODIS 气溶胶产品与地面观测结果的一致性存在差异,原因在于地表的复杂性以及 MODIS 产品反演算法中气溶胶模型的设置. Qingshan Xu 等^[12]提出一种同时反演海洋上空气溶胶光学厚度与 Junge 谱指数的物理迭代法,数值模拟显示:如果实际大气为 Junge 谱分布则反演的谱指数与气溶胶光学厚度的相对误差都在 5% 以内,如果实际大气不是 Junge 谱分布,则反演的气溶胶光学厚度相对误差在 10% 以内.

本文利用 TERRA/MODIS 卫星的一级数据资料和相应的辅助数据,采用文献[12]的反演方法得到 1 km 分辨率的气溶胶光学厚度和 Junge 谱指数结果,并与 AERONET 站点探测得到的气溶胶光学厚度资料 and 同期 MODIS 产品进行对比验证,以研究气溶胶光学厚度和谱指数的反演准确度,探讨适合中国近海区域气溶胶光学厚度和谱指数的反演方法.

1 反演算法

卫星反演大气参数的最佳方案是忽略下垫面贡献,卫星接收的信号全部来自于大气的散射辐射. 在广阔的大洋上空卫星近红外波段接收的信息满足这个要求,而像宽视场水色扫描仪(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor, SeaWiFS)、MODIS 等卫星传感器在近红外波段都具有两个用于海洋水色遥感的通道.

忽略海面耀斑与海水泡沫的影响,在单次散射假定下,大洋上空卫星近红外通道接收的表现反射率可以表示为^[13-14]

$$\rho_p(\theta_0, \phi_0, \theta, \phi) = \rho_m(\theta_0, \phi_0, \theta, \phi) + \omega_a \tau_a P_a(\theta_0, \phi_0, \theta, \phi) / 4 \cos \theta_0 \cos \theta \quad (1)$$

式中 $\rho_m(\theta_0, \phi_0, \theta, \phi)$ 是大气分子表现反射, ω_a 、 τ_a 、 $P_a(\theta_0, \phi_0, \theta, \phi)$ 分别是气溶胶单次散射反照率、光学厚度与相函数, θ_0 、 ϕ_0 与 θ 、 ϕ 分别是太阳与观测的天顶角和方位角.

反演过程中假设大气气溶胶为 Junge 谱分布,气溶胶光学厚度与波长之间的关系可用 Angstrom 公式表示为^[15]

$$\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

式中 α 是 Angstrom 波长指数, β 是浑浊度系数. Angstrom 波长指数(α)是一种表征气溶胶粒子相对大小的参量, α 越大,粒子尺度越小,反之亦然^[16]. Junge 谱指数 ν 与 Angstrom 波长指数的关系为 $\nu = \alpha + 2$. 具体算法:分别用卫星两个近红外通道接收的数据按照式(1)建立两个方程,经过变换处理后,两个方程相比,再结合式(2)可得

$$\frac{[\rho_{p_1}(\theta_0, \theta, \phi) - \rho_{m_1}(\theta_0, \theta, \phi)] [\rho_{p_2}^c(\theta_0, \theta, \phi) - \rho_{m_2}(\theta_0, \theta, \phi)]}{[\rho_{p_2}(\theta_0, \theta, \phi) - \rho_{m_2}(\theta_0, \theta, \phi)] [\rho_{p_1}^c(\theta_0, \theta, \phi) - \rho_{m_1}(\theta_0, \theta, \phi)]} = \frac{\omega_{a_1} \tau_{a_1} P_{a_1}(\theta_0, \theta, \phi) \omega_{a_2}^c \tau_{a_2}^c P_{a_2}^c(\theta_0, \theta, \phi)}{\omega_{a_2} \tau_{a_2} P_{a_2}(\theta_0, \theta, \phi) \omega_{a_1}^c \tau_{a_1}^c P_{a_1}^c(\theta_0, \theta, \phi)} \quad (3)$$

式中上标 c 表示利用辐射传输程序计算的两个近红外通道的计算值,式(3)左边用 Y 表示,可得

$$\alpha = \ln Y / (\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1) + \alpha^c \quad (4)$$

α^c 表示辐射传输计算时输入的值. 利用求得的 α , 550 nm 气溶胶光学厚度可用一近红外通道由式(5)迭代计算^[17]

$$\tau_a(550) = \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p^c - \rho_m} \tau_a^n(550) \quad (5)$$

式中 $\tau_a^n(550)$ 是辐射传输计算输入的 550 nm 光学厚度. 再将 $\tau_a(550)$ 代替 $\tau_a^n(550)$ 进行辐射传输计算,重复式(5),直到

$$|(\rho_p - \rho_p^c) / \rho_p| < \epsilon \quad (6)$$

成立,此时 $\tau_a(550)$ 即认为是要求的值(ϵ 是预先给定小值),将求得的 $\tau_a(550)$ 和 α 重新进行式(5)和式(6)直到

$$\sum_i^2 |(\rho_{pi} - \rho_{pi}^s) / \rho_{pi}| < \delta \quad (7)$$

成立(δ 是预先给定的小值),则此时 Junge 谱指数与 550 nm 气溶胶光学厚度即可作为要求的值。

2 算法应用于 MODIS 数据

利用 2008 年 7 月 3 日的 MODIS 卫星一级数据资料和相应的辅助数据,按照上述迭代算法,大气模式用中纬度夏季,气溶胶折射指数取 1.45-i0.003 5,辐射传输计算用 6S 模式^[18]。反演得到台湾周边海域分

辨率为 1 km 的 550 nm 气溶胶光学厚度与 Junge 谱指数如图 1 和图 2,图中黑色区域为陆地或云。图 1 为气溶胶光学厚度反演值,具有从近岸海域到外海数值大小递减的趋势,除了海岸带出现少量高值区外,大部分海域上空的气溶胶光学厚度为 0.02~0.17,统计数值也显示气溶胶光学厚度小于 0.05 的像元占大多数,说明该海域大气十分清洁。图 2 为 Junge 谱指数的反演值;统计结果显示数值范围集中在 2.8~3.8 之间;谱指数为 2.7~3.0 的像元最多。

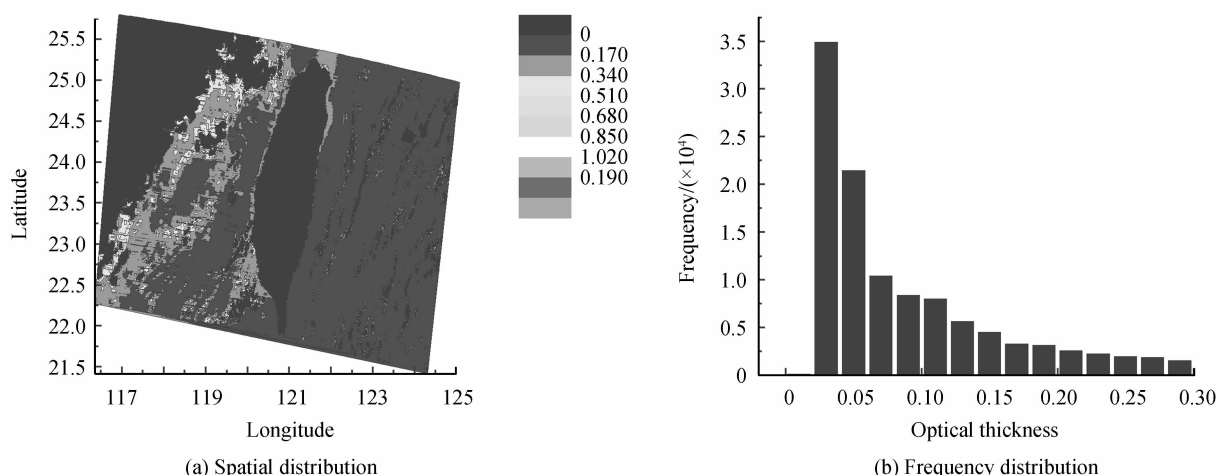


图 1 MODIS 数据反演的 2008 年 7 月 3 日台湾周边海域气溶胶光学厚度分布
Fig. 1 Distribution of AOT from MODIS data on 3 July 2008 near Taiwan

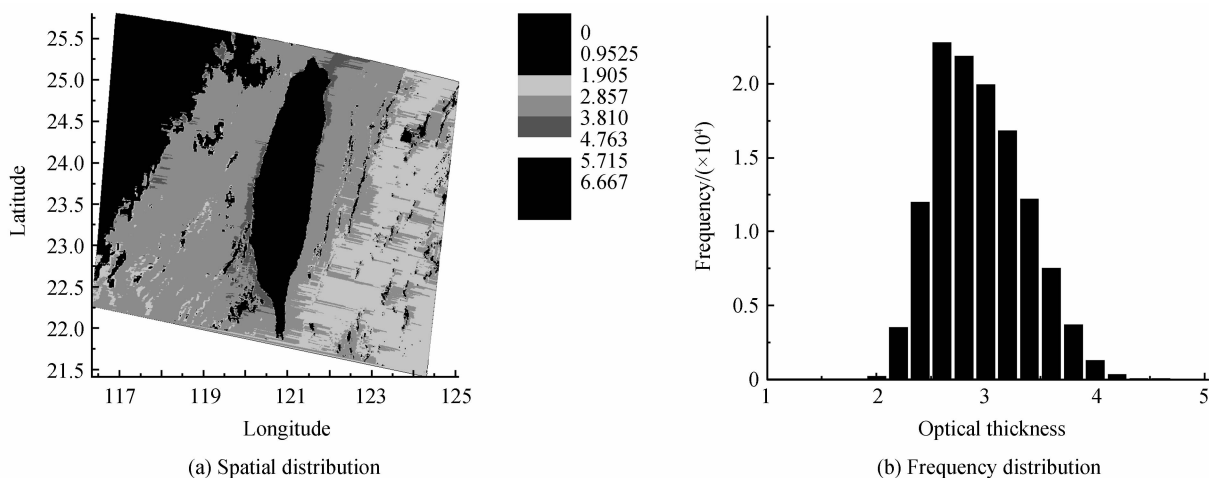


图 2 MODIS 数据反演的 2008 年 7 月 3 日台湾周边海域 Junge 谱指数分布
Fig. 2 Distribution of Junge index from MODIS data on 3 July, 2008 near Taiwan

3 MODIS 产品数据和分析

MODIS 的反演算法中,根据粒子尺度把大气气溶胶分为三类,可以以对数正态谱分布描述为:1)直径小于 0.04 μm ,由气态物质自发核化生成的核(nuclei)模式粒子;2)直径在 0.04~0.5 μm 之间,由凝聚和云中过程形成的累积(accumulation)模式粒子;3)直径大于 1.0 μm ,产生于地球表面的粗(coarse)模式粒子。正演过程所用气溶胶模型采用双模式对数正

态分布来描述经过平流层气溶胶订正后的对流层气溶胶模式,即累积模式和粗模式的相加。累积模式也被称为小模式(Si),描述气态核化过程和云中凝结过程形成的粒子;粗模式也被称为大模式(Lj),描述海洋性气溶胶粒子和沙尘粒子。

MODIS 气溶胶产品是 NASA 业务化处理的二级产品,其中包括了海洋气溶胶遥感资料。海洋气溶胶遥感资料是利用 MODIS L1B 数据,通过严格滤云、陆地和浑浊水体以及耀斑像元剔除等处理,并且以

10×10 km²为参量输入窗口,应用 MODIS 海洋气溶胶反演算法获得的,其空间分辨率为 10 km. 海洋气溶胶反演算法的基本思路是根据各种假设的气溶胶和地表参量进行辐射传输计算建立辐射传输查找表(LUT),并且以查找表为基础,将观测的大气顶辐射与查找表中事先获得的辐射值进行比较,直至得到最佳拟合参量 ϵ (如式(8))为止. MODIS 气溶胶光学厚度有最优和平均两种解决方案. 最优解是取 ϵ 最小的值作为反演值,而平均解则是取 ϵ 小于 3% 的所有值的平均值作为反演值,若 ϵ 大于 3%,则取 ϵ 最小 3 个值的平均值作为反演值.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{L_{mj}(u_s, u_v, \phi_v) - L_{cj}(u_s, u_v, \phi_v)}{L_{mj}(u_s, u_v, \phi_v) + 0.01} \right]^2} \quad (8)$$

式中, $L_{mj}(u_s, u_v, \phi_v)$ 和 $L_{cj}(u_s, u_v, \phi_v)$ 是第 j 通道的观测和计算辐射值,下标 m 和 c 表示观测和计算, u_s 和 u_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角, ϕ_v 为观测方位角. 算法的详细描述见文献[8,19].

Angstrom 波长指数计算需要两个中心波长至少

相距 20 nm 波段的气溶胶光学厚度测值. 在海洋区域,利用 MODIS 气溶胶光学厚度产品中 0.55 μm 和 0.865 μm 波长气溶胶光学厚度反演值,可获取相对可靠的 Angstrom 波长指数. Angstrom 波长指数定义为

$$\alpha = -\frac{\ln \tau_1 - \ln \tau_2}{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2} \quad (9)$$

图 3~图 5 中,黑色为陆地,云或二类水体. 图 3(a)和(b)为 MODIS 产品有效光学厚度最优解空间分布图和频率统计图,是用正态分布的 5 种细粒子模式和 6 种粗粒子模式最优化组合近似实际大气气溶胶模式,反演得到的气溶胶光学厚度,除了海岸带出现少量高值区外,其它海域的气溶胶光学厚度基本趋于正常,为 0.01~0.3. 图 3(c)和(d)为 MODIS 产品有效光学厚度平均解空间分布图和频率统计图,大气气溶胶模式和数值范围如图 3. 比较图 3(a)、(b)和(c)、(d)可得,MODIS 产品有效光学厚度最优解分布图和频率统计图与平均解无明显差别.

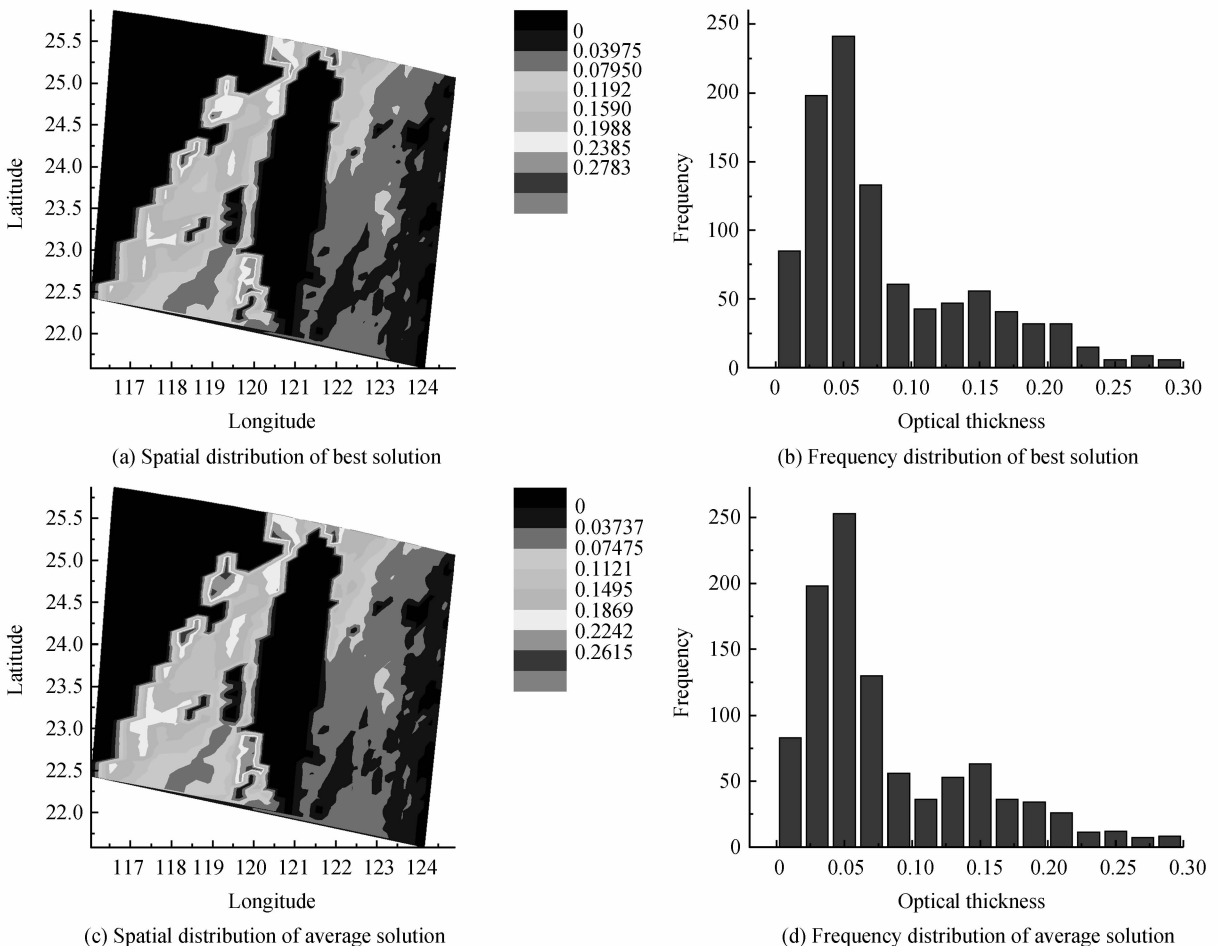


图 3 2008 年 7 月 3 日 MODIS 产品有效光学厚度最优解和平均解分布

Fig. 3 Distribution for effective AOT of best solution and average solution from the MODIS on 3 July, 2008

图 4(a)和(b)为 MODIS 产品细粒子模式光学厚度最优解空间分布图和频率统计图,是用正态分布的 5 种细粒子模式近似实际大气气溶胶模式,反演得到的气溶胶光学厚度,海岸带以外数值范围为 0.01~0.3.图 4(c)和(d)为 MODIS 产品细粒子模式光学厚

度平均解空间分布图和频率统计图,大气气溶胶模式和气溶胶光学厚度数值范围同图 4(a)和(b).比较图 4(a)、(b)和(c)、(d)可得,MODIS 产品细粒子模式光学厚度最优解分布图和频率统计图与平均解无明显差别.

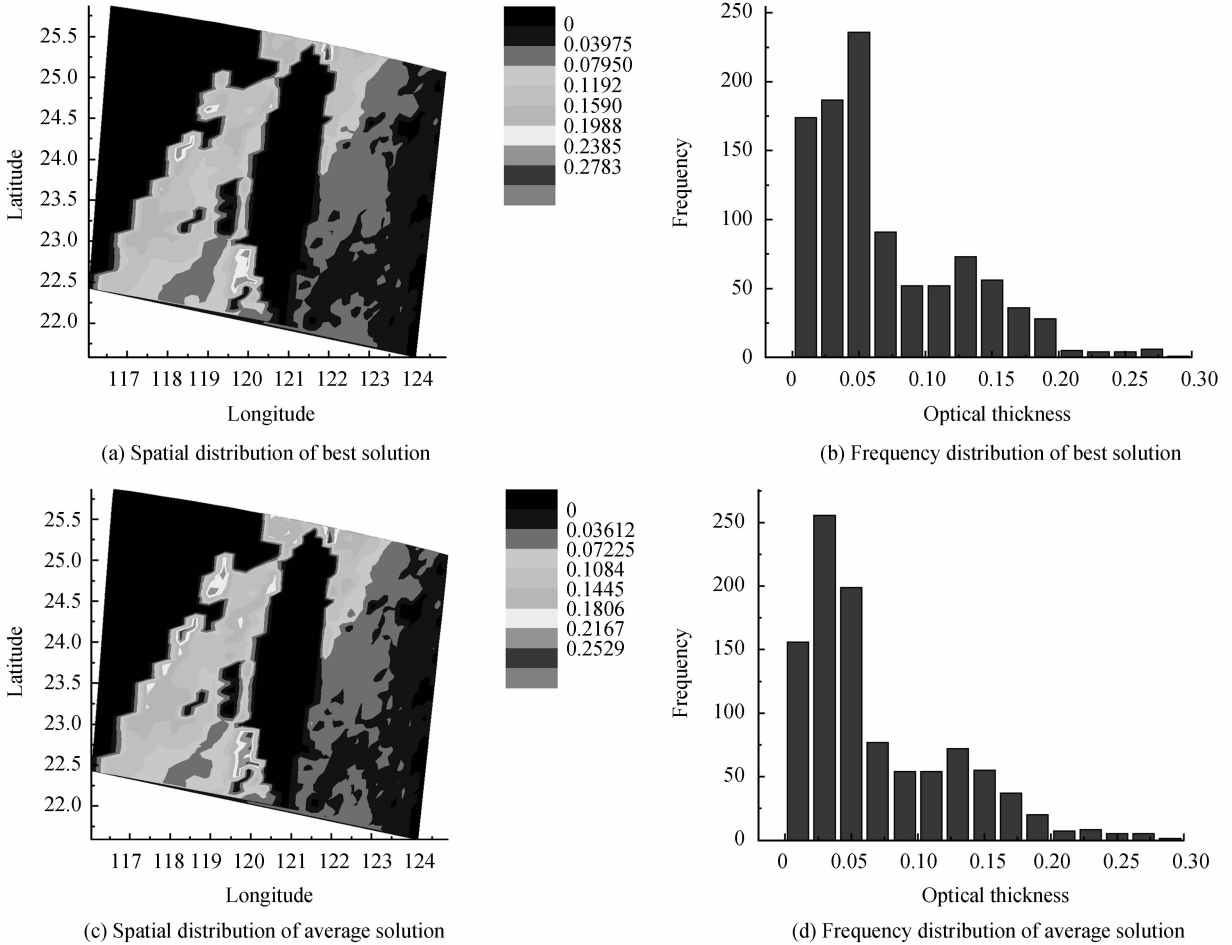
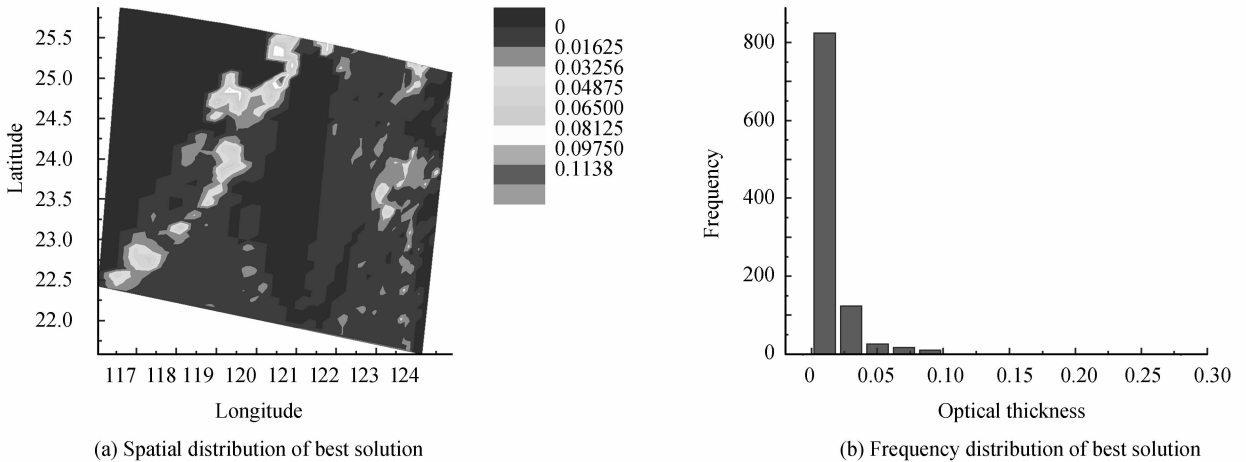


图 4 2008 年 7 月 3 日 MODIS 产品细粒子模式光学厚度最优解和平均解分布

Fig. 4 Distribution for small mode AOT of best solution and average solution from the MODIS on 3 July, 2008

图 5(a)和(b)为 MODIS 产品粗粒子模式光学厚度最优解空间分布图和频率统计图,是用正态分布的 6 种粗粒子模式近似实际大气气溶胶模式,反演得到

的气溶胶光学厚度,除了海岸带出现少量高值区外,其它海域的气溶胶光学厚为 0.01~0.1.图 5(c)和(d)为 MODIS 产品粗粒子模式光学厚度平均解空间分布



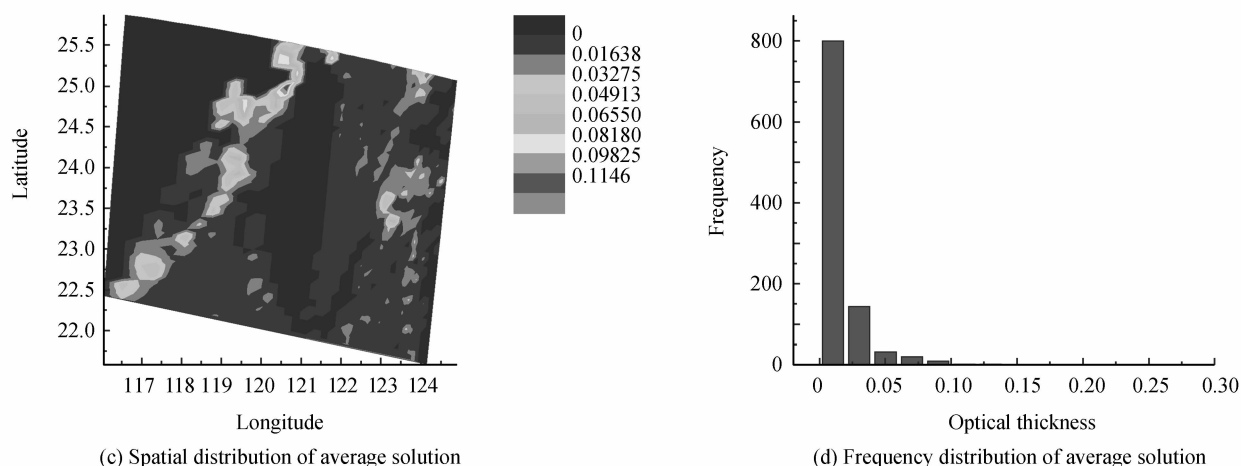


图5 2008年7月3日MODIS产品粗粒子模式光学厚度最佳解和平均解分布图

Fig. 5 Distribution for large mode AOT of best solution and average solution from the MODIS on 3 July, 2008

图和频率统计图,大气气溶胶模式和气溶胶光学厚度范围同图5(a)和(b).比较图5(a)、(b)和(c)、(d)可得,MODIS产品粗粒子模式光学厚度最优解分布图和频率统计图与平均解无明显差别.

从MODIS的光学厚度产品(图3~图5)可以看出,从海岸到远海气溶胶光学厚度呈递减的趋势,MODIS产品中有效光学厚度值最优解(图3(a))和平均解(图3(b))与本算法的反演结果分布趋势上一致,数值范围基本一致.图3(a)、(b)和(c)、(d)的气溶胶光学厚度分布与图4(a)、(b)和(c)、(d)很接近,说明细粒

子对有效光学厚度的贡献远大于粗粒子.图5(a)、(b)和(c)、(d)气溶胶光学厚度分布明显不同于图4(a)、(b)和(c)、(d)(也不同于图3(a)、(b)和(c)、(d)),说明气溶胶模型的假设对光学厚度反演结果的影响很大.

从图6可以看出,Junge谱指数为3.2的像元出现的次数最多,董海鹰等^[20]在MODIS遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析中得到,Angstrom指数具有从近海海域到外海递减的趋势,Angstrom指数为0.7,0.8(Junge谱指数为2.7,2.8)的区域比较多,本算法反演结果(图2)与文献^[20]的结论一致性更好.

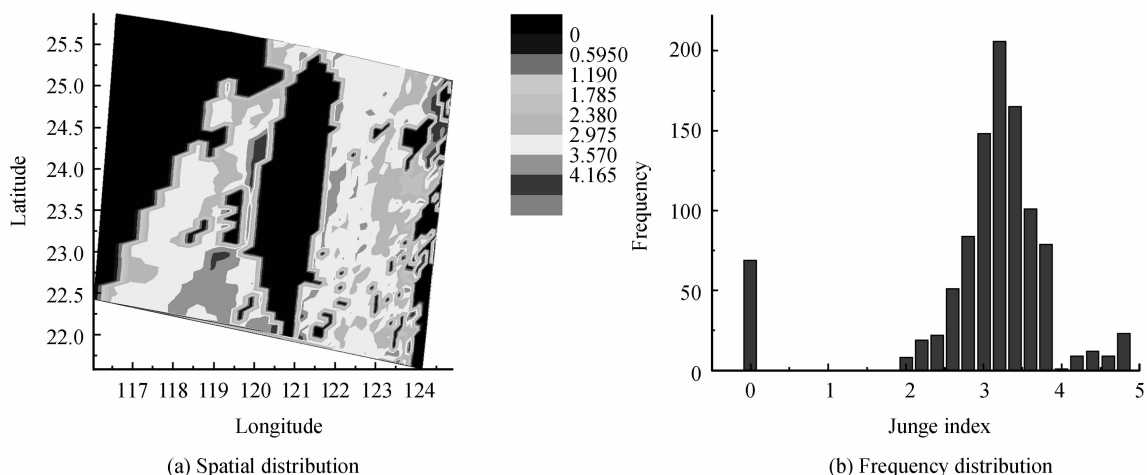


图6 2008年7月3日MODIS产品谱指数分布

Fig. 6 Distribution of Junge index from the MODIS on 3 July, 2008

4 算法结果与卫星产品数据对比分析

对比气溶胶光学厚度反演值(图1)和MODIS产品气溶胶光学厚度(图3~图5)可以看出,反演值与MODIS产品中有效光学厚度(图3)和细粒子模式光学厚度(图4)的数值范围一致,具有从近岸海域到外海递减的趋势,除了海岸带出现少量高值区外,其它海域的气溶胶光学厚度为0.02~0.3.反演值与MODIS

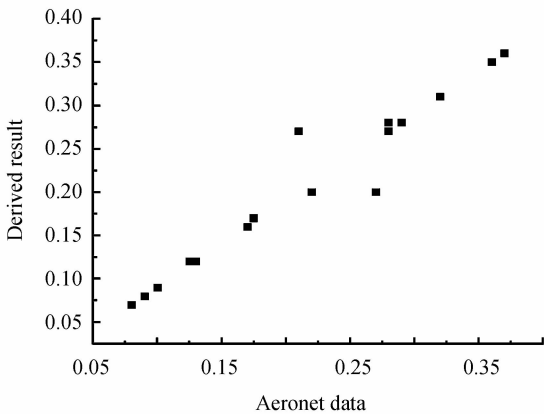
产品中粗粒子模式光学厚度(图5)数值范围差别很大,说明气溶胶模式的假设对光学厚度的反演结果影响很大.

Junge谱指数的反演值(图2)与MODIS产品Junge谱指数(图6)数值范围一致,为2~4.3.反演值具有从近岸海域到外海递减的趋势,谱指数为2.7~3.0的像元最多.这是因为近海岸地区是经济发达、人口较集中的地区,由沿岸地带人为污染产生的小粒子

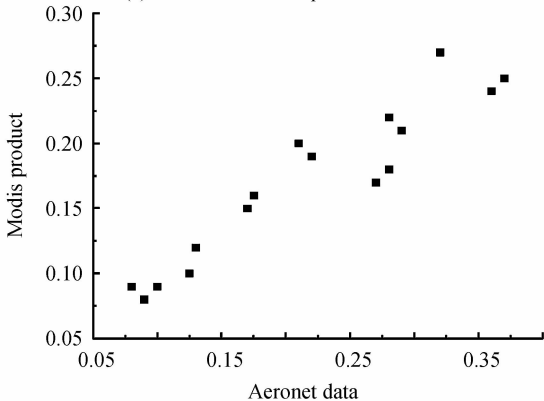
导致的 Angstrom 指数较大, Junge 谱指数也较大;而在远离海岸的广阔海域,大气气溶胶的主要成分是海盐粒子,粒径较大,因此 Angstrom 指数较小, Junge 谱指数也较小. MODIS 产品 Junge 谱指数没有明显的从近岸海域到外海递减的趋势,因此反演值与文献[20]的结论一致性更好,与实际情况更吻合.

5 算法结果与地基观测数据对比检验

AERONET 是以美国宇航局 NASA 为首建立的全球气溶胶光学特性监测网络,目的是利用地基太阳光度计获取全球具有代表性区域的气溶胶光学特性参量的基准资料,用于验证和评估卫星反演的气溶胶光学特性参量的准确度^[21-22]. 夏祥鳌通过对比 AERONET 和 MODIS 陆地上空气溶胶光学厚度资料,发现全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高^[23]. 将 AERONET 观测网台湾中央大学(TaiWan NCU)站点的的数据与文中反演算法结果以及 MODIS 产品作比较分析,验证反演算法的可行性. 由于 AERONET 观测网数据量有限,比对过程中时间匹配不能完全吻合,所以比对过程中可能有偏差. 图 7 为气溶胶光学厚度反演结果和 MODIS 产品分别与



(a) AOD derived compared with aeronet data

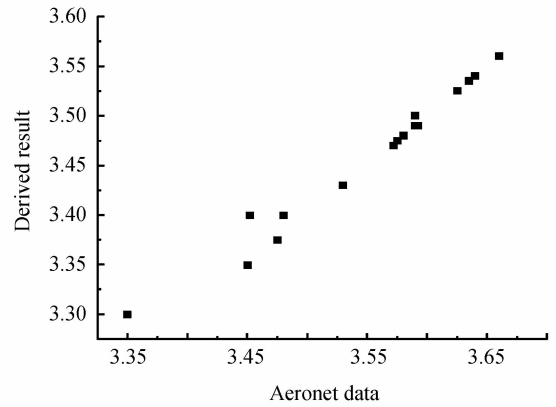


(b) Modis product compared with aeronet data

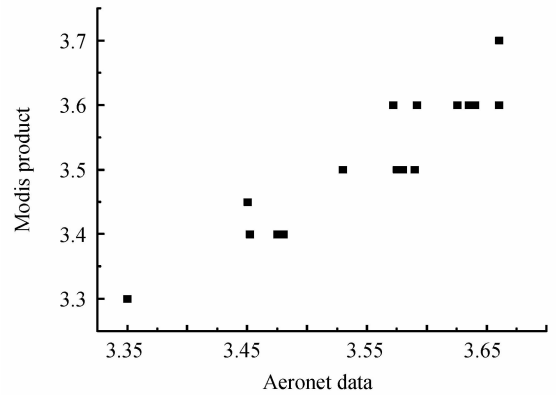
图 7 光学厚度反演结果、MODIS 产品与台湾中央大学站观测值对比

Fig. 7 The comparisons between AOT derived and MODIS products with measurements at TaiWan NCU

AERONET 台湾中央大学站(TaiWan NCU)观测值的对比图,相关系数分别为 0.934 2 和 0.882 3. 图 8 为 Junge 谱指数反演结果和 MODIS 产品分别与 AERONET 台湾中央大学站观测值的对比图,相关系数分别为 0.976 38 和 0.844 01. 通过图 7 和图 8 看出,本算法反演的结果与 AERONET 台湾中央大学站点的太阳光度计观测结果一致性较好,相关系数达到 0.9 以上,与 MODIS 的产品比较,更加逼近 AERONET 的观测值.



(a) Junge index derived compared with aeronet data



(b) Modis product compared with aeronet data

图 8 谱指数反演结果、MODIS 产品与台湾中央大学站观测值对比

Fig. 8 The comparisons between Jung index derived and MODIS products with measurements at TaiWan NCU

6 结论

本文采用 Junge 谱分布近似实际大气气溶胶模型,根据一种同时反演气溶胶光学厚度与 Junge 指数的物理迭代法,反演了中国近海海域气溶胶光学厚度和谱指数.反演结果与 MODIS 的产品比较,更加逼近 AERONET 的观测值,具有更高的反演准确度,在该区域具有较好的适用性.在迭代算法中使用的气溶胶折射指数是固定的,而实际大气气溶胶折射指数往往并不是确知的,如何在卫星遥感反演过程中同时确定气溶胶折射指数需要进一步的研究.

参考文献

- [1] LONG C S, STOWE L L. Using the NOAA/AVHRR to study stratospheric aerosol optical thickness following the Mt. Pinatubo eruption[J]. *Geophysical Research Letter*, 1994, **21**(20): 2215-2218.
- [2] HIGURASHI A, NAKAJIMA T. Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA/AVHRR[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, **56**(7): 924-941.
- [3] MISHCHENKO M I, TRAVIS L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(14): 16989-17013.
- [4] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne Low-distortion and super-wide-angle aerosol imager [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 15-20.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 15-20.
- [5] ZHANG Xiang, ZHANG Jian-qi, JIN Wei, *et al.* Improved method for retrieving remote sensing reflectance of ground targets from a spectral image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1221-1225.
张翔, 张建奇, 靳薇, 等. 一种改进的光谱图像反演地表目标遥感反射率的方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1221-1225.
- [6] LI Li-gang, LIU Bo, YOU Hong-jian, *et al.* The comprehensive comparison of several algorithms for precision rectification of satellite imagery [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1028-1034.
李立钢, 刘波, 尤红建, 等. 星载遥感影像几何精校正算法比较分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1028-1034.
- [7] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, *et al.* Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(1): 2-27.
- [8] TANRE D, KAUFMAN Y J, HEMAN M, *et al.* Remote sensing of aerosol properties over ocean using the MODIS / EOS spectral radiance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(14): 16971-16988.
- [9] LEVY R C, REMER L A, OLEG D. Global aerosol optical properties and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**, D13210, doi10. 1029/2006JD007815.
- [10] LI Zhang-qing, NIU Feng, KWOHN-HO L, *et al.* Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld sun photometer network in China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**, D22S07, doi: 10. 1029/2007JD008479.
- [11] HE Tao, ZHAO Feng-sheng. An improved retrieval algorithm of aerosol optical depth [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, **22**(6): 663-672.
何涛, 赵凤生. 一种反演气溶胶光学厚度的改进方法[J]. *应用气象学报*, 2011, **22**(6): 663-672.
- [12] XU Qing-shan, WEI He-li, RAO Rui-zhong, *et al.* Simultaneous determination of aerosol optical thickness and exponent of Junge power law from satellite measurements of two near-infrared bands over the ocean [J]. *Optical Express*, 2007, **15**(8): 5227-5236.
- [13] GILL P E, MURRAY W. Quasi-Newton methods for unconstrained optimization [J]. *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*, 1972, **9**: 91-108.
- [14] DAVID A S, WANG Meng-hua, STEPHANE M, *et al.* Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(21): 3582-3591.
- [15] ANGSTROM A. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere [J]. *Tellus*, 1961, **13**: 214-223.
- [16] YANG Hong-long, LI Lei, YANG Su, *et al.* The measurement of aerosol optical properties over Shenzhen [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1427-1434.
杨红龙, 李磊, 杨溯, 等. 深圳城市气溶胶物理光学特性的观测研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1427-1434.
- [17] XU Qing-shan, WEI He-li, ZHAO Feng-sheng. Retrieval of reflectance along coastal zone with SeaWiFS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(6): 352-356.
徐青山, 魏合理, 赵凤生. 利用 SeaWiFS 数据反演海岸地物光谱反射率 [J]. *遥感学报*, 2002, **6**(6): 352-356.
- [18] VERMOTE E, TANRE D, DEUZE J L, *et al.* The second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 675-686.
- [19] LEVY R C, REMER L A, TANRED, *et al.* Evaluation of the MODIS retrieval of dust aerosol over the ocean during PRIDE [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D14): 10. 1029/2002JD002460.
- [20] DONG Hai-ying, LIU Yi, GUAN Zhao-yong. Validation of MODIS aerosol optical depth retrievals over east China sea [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, **30**(3): 328-337.
董海鹰, 刘毅, 管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析 [J]. *南京气象学院学报*, 2007, **30**(3): 328-337.
- [21] REMER L A, TAME D, KAUFMAN Y J, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(12): 1617-1621.
- [22] ZHANG Jun-hua, WANG Mei-hua, MAO Jie-tai. Error analysis and correction for multi-wavelength sun-photometer aerosol remote sensing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2000, **24**(6): 855-859.
张军华, 王美华, 毛节奏. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正 [J]. *大气科学*, 2000, **24**(6): 855-859.
- [23] 夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高 [J]. *科学通报*, 2006, **51**(19): 2297-2303.