

基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证

黄红莲^{1,2} 易维宁¹ 乔延利¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)
(² 中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230022)

摘要 采用基于逐次散射法的矢量辐射传输模型, 通过求解矢量辐射传输方程, 分析了影响海面上空气溶胶光学参数反演的主要因素。根据海洋大气气溶胶模型, 通过构建多参数的反射率和偏振反射率查找表, 给出了用于海上气溶胶光学参数反演的查找表迭代查找法。利用自主研制的多角度航空偏振相机在渤海湾上空航拍的偏振辐射数据, 反演获得了该海域 550 nm 波段的气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数, 其均值分别为 0.441 和 1.15。通过与布置在京津塘周边的多个地基 CE318 太阳辐射计同步观测数据进行的对比校验发现, 两者间具有很好的 consistency, 说明反演方法针对海天背景的实际问题的考虑和处理过程切实可行。

关键词 大气光学; 气溶胶光学厚度; 多角度偏振相机; 偏振反射率; Ångström 指数

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0601004

Validation of Retrieving Aerosol Optical Parameters over the Sea Using Airborne Directional Polarized Camera

Huang Honglian^{1,2} Yi Weining¹ Qiao Yanli¹

(¹ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
(² School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract The main factors which affect the retrieving of aerosol parameters over the sea surface are analyzed by solving the vector radiative transfer equation according to the models based on the method of successive orders of scattering. An algorithm for the estimating of aerosol optical properties over the sea surface is provided and realized according to the look-up table of reflectance and polarized reflectance estimated from the sea surface aerosol model. By using the data of polarized radiance from the self-developed airborne multi-angle directional polarized camera (DPC) flying over the Bohai Bay, the aerosol optical thickness and Ångström exponent are retrieved, and the results show that the average values of optical thickness and Ångström exponent over the area are respectively 0.441 and 1.15. For the validation of the algorithm as well as the processing of data, the values are compared with those retrieved simultaneously from ground based sun-photometer (CE318) mounted at several different places. Results show that they are in agreement, which demonstrates the feasibility of the algorithm for the practical issue of the background of sea and sky.

Key words atmospheric optics; aerosol optical thickness; directional polarized camera; polarization reflectance; Ångström exponent

OCIS codes 010.0280; 010.1110; 010.1290; 010.5620

1 引言

气溶胶是大气的重要组成部分, 它不但通过自

身散射和吸收太阳辐射直接影响大气辐射平衡, 而且与云相互作用后可对气候产生间接影响。研究表

收稿日期: 2014-01-10; **收到修改稿日期**: 2014-03-03

基金项目: 国家 973 项目(2010CB950803)

作者简介: 黄红莲(1980—), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事定量遥感应用方面的研究。

E-mail: hlhuang@aiofm.ac.cn

导师简介: 乔延利(1958—), 男, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感辐射定标、大气校正等方面的研究。

E-mail: ylqiao@aiofm.ac.cn

明,由大气气溶胶的影响所产生的辐射强迫与人类活动生成的温室气体所产生的辐射强迫相当,因此人们更加关注气溶胶光学特性的研究及其在全球范围内的变化情况^[1-3]。众所周知,地基探测方法不能实现上述目标,特别是在无法设置站点广阔的海域,这促使人们着力于发展大气气溶胶的卫星遥感技术^[4]。国际上,利用卫星遥感数据反演气溶胶光学特性的研究始于20世纪70年代中期,目前已形成相对丰富的研究体系,发展出一系列反演方法,包括单通道法、多角度多通道遥感法、暗像元法、结构函数法、直方图匹配法以及偏振遥感法等^[5-8]。而无论运用哪种方法都必须面临两个关键问题:一是如何去除地表反射的贡献,二是如何确定气溶胶的模式。对于前者,利用大气后向散射的偏振参量对大气气溶胶粒子的敏感性,采用偏振遥感技术将十分有利于分离来自地表的偏振反射,便于气溶胶光学特性的提取;对于后者,需要进行仿真分析和实验验证。

在偏振传感器的研制方面,美国国家航空航天局的地球观测扫描偏振计(EOSP)和法国空间研究中心的地球反射偏振测量仪(PoLDER)最具代表性。EOSP有12个探测通道,全部具有偏振分析功能;而PoLDER仅有3个偏振探测通道,其最大视场角沿轨±43°,垂轨±51°,可以在13个观测方向收集地气体系反射的强度和偏振信息。在偏振遥感信息的反演计算方面^[9-13],Goloub等^[9]利用PoLDER数据,通过建立查找表的方法,获得了海洋上空的气溶胶光学厚度、Ångström指数和折射率等参量;Herman等^[10]则将气溶胶分为粗细两种模式,使用PoLDER两个近红外通道的数据反演了海上气溶胶光学厚度,其结论认为海洋上空大多数是非球型的气溶胶粒子;Deuzé等^[11]利用PoLDER数据给出了气溶胶光学厚度在全球的分布;顾行发等^[13]使用PARASOL数据,开展了偏振信息对气溶胶特性反演的敏感性分析;段民征等^[14]则利用多角度PoLDER的标量辐射和偏振信息实现了陆地上空气溶胶光学厚度和地面反射率的同步反演。

本文针对我国自行研制的多角度航空偏振相机(DPC)在大气气溶胶探测方面的潜在应用,给出了基于偏振遥感信息的气溶胶参数反演方法,利用6SV矢量辐射传输模型计算分析了海天环境背景对反演结果的影响,通过航空飞行实验对反演方法和结果进行了实验验证。使用的DPC是即将搭载在高分5号卫星上的多角度偏振成像仪的预研

版^[14-15],它主要由CCD(1024×1024)矩阵探测器、滤光片/偏振片组合转轮和宽视场光学系统三部分组成,共有6个光谱波段和13个探测通道,采用多波段多通道分时方式采集数据;其光谱波段分别为490 nm-P、670 nm-P、865 nm-P、550 nm、780 nm、810 nm,其中用P标记的是偏振探测波段;每个偏振波段有3个通道,即0°、60°和120°三个偏振方向,而非偏波段仅有1个通道,剩余1个通道用于探测器暗电流的监测;该相机的波段设置定位于监测气溶胶、云和海洋,其最大视场角为±60°。利用DPC多角度偏振辐射数据,开展海洋上空气溶胶光学参数的反演方法研究,可为航天偏振相机卫星数据的应用做好技术储备。

2 反演方法与数值分析

在海洋下垫面条件下,航空传感器对地观测时接收到的辐亮度 $L_r^i(\lambda)$ 和偏振辐亮度 $L_r^p(\lambda)$ 可表示为

$$L_r^i(\lambda) = L_r^i(\lambda) + L_a^i(\lambda) + L_{ra}^i(\lambda) + L_g^i(\lambda) + t(\lambda)[L_w^i(\lambda) + L_f^i(\lambda)], \quad (1)$$

$$L_r^p(\lambda) = L_r^p(\lambda) + L_a^p(\lambda) + L_{ra}^p(\lambda) + L_g^p(\lambda) + t(\lambda)[L_w^p(\lambda) + L_f^p(\lambda)], \quad (2)$$

式中 L_r 为大气分子散射辐亮度, L_a 为大气气溶胶散射辐亮度, L_{ra} 为大气分子和气溶胶复合散射辐亮度, L_g 为太阳直射光在水面的镜面反射(太阳耀光)辐亮度, L_w 为离水辐亮度, L_f 为水面白沫反射辐亮度, t 为洋面到传感器的大气透射率。其中 L_r 、 L_a 和 L_{ra} 均来源于大气,合称为大气程辐射; L_g 、 L_w 和 L_f 三项则反映了海面的反射特性。

相对于辐亮度和偏振辐亮度来说,反射率和偏振反射率没有量纲,使用起来更加方便,所以通常使用传感器入瞳处的反射率 ρ^i 和偏振反射率 ρ^p 来反演气溶胶光学参数,它们之间的关系是

$$\rho^i = \frac{\pi L^i}{\mu_0 F_0}, \quad (3)$$

$$\rho^p = \frac{\pi L^p}{\mu_0 F_0}, \quad (4)$$

式中 μ_0 为太阳天顶角的余弦, F_0 为大气层外的太阳辐照度。

对于气溶胶光学特性的反演来说,需要消除下垫面的影响,使得传感器接收的信号全部来自大气的散射辐射。为研究海洋下垫面对传感器入瞳处反射率和偏振反射率的影响,使用矢量辐射传输模型6SV^[16]计算了大气反射率、大气偏振反射率和入瞳处反射率、入瞳处偏振反射率随观测天顶角和观测方位

角的变化关系。计算中选择下垫面为粗糙海表双向反射模型,其四个参数海面风速、海水盐度、风向方位角、色素质量浓度均参考沿海-大洋典型值,分别设置为 5 m/s,3.430%,100.00°和 0.01 mg/m³,大气模型为中纬度冬季,气溶胶类型为海洋型,能见度为 10 km,太阳天顶角为 54.356°、太阳方位角为 120.43°,波段范围为 647~693 nm。其结果分别见图 1 和图 2,其中图 1 显示的大气反射率、大气偏振反射率是只考虑大气程辐射的计算结果,图 2 显示的人瞳处反射率、人瞳处偏振反射率是考虑了海表模型和大气耦合后的计算结果。通过比较可以看出,大气反射率、大气偏振反射率和人瞳处反射率、人瞳处偏振反射率都随观测方向变化明显。在镜面

反射方向附近,相对大气反射率和大气偏振反射率,考虑海表模型和大气耦合的人瞳处反射率、人瞳处偏振反射率增大明显,人瞳处偏振反射率的最大增幅接近 10 倍,此时大气偏振反射率和人瞳处偏振反射率分别为 0.035、0.348。而在非镜面反射方向,大气反射率、大气偏振反射率和人瞳处反射率、人瞳处偏振反射率差别不大,如大气反射率和人瞳处反射率分别为 0.0798、0.0891,大气偏振反射率和人瞳处偏振反射率分别为 0.0123、0.0124。这说明对海洋下垫面,近红外波段的离水辐射和海水白沫反射很小,可以忽略不计,但是在镜面反射方向和临近镜面反射方向,太阳耀光不可忽视,在进行气溶胶反演时需要剔除这些方向。

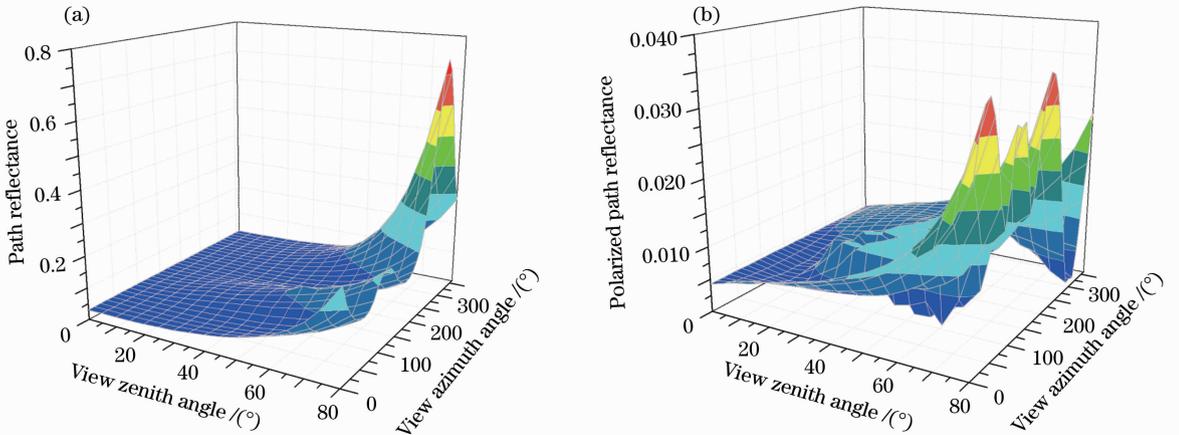


图 1 (a)大气反射率、(b)大气偏振反射率随观测天顶角和观测方位角的变化关系

Fig. 1 Distributions of (a) path reflectance and (b) polarized path reflectance changing with view zenith angle and view azimuth angle

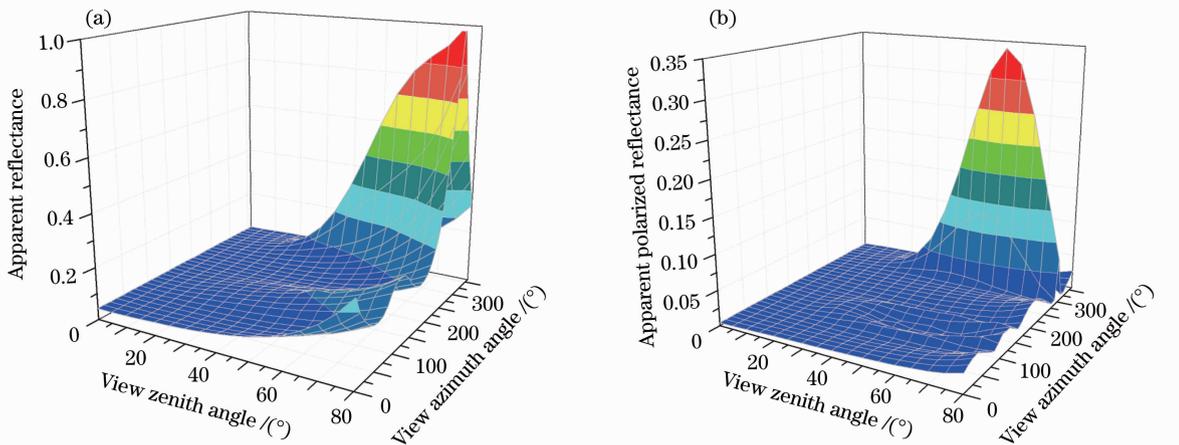


图 2 (a)人瞳处反射率、(b)偏振反射率随观测天顶角和观测方位角的变化关系

Fig. 2 Distributions of (a) apparent reflectance and (b) apparent polarized reflectance changing with view zenith angle and view azimuth angle

充分了解下垫面海洋的影响后,即可使用矢量辐射传输模型 6SV 来构建气溶胶光学特性反演查找表,具体参数设置为:选择下垫面为粗糙海表双向

反射模型,其四个参数海面风速、海水盐度、风向方位角、色素质量浓度分别为 5 m/s, 3.430%, 100.00°和 0.01 mg/m³,均参考沿海-大洋典型值;

大气模型为中纬度冬季,气溶胶类型选择为海洋型气溶胶;对航空飞行,观测高度为 3.6 km;观测几何条件(太阳天顶角变化范围 $0^\circ \sim 70^\circ$ 、间隔 5° ,太阳方位角变化范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、间隔 10° ,观测天顶角变化范围 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、间隔 5° ,观测方位角变化范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、间隔 10°);气溶胶光学厚度 $0 \sim 1.0$,间隔 0.1 。由此分别构建出 670 nm、865 nm 两个近红外波段的传感器入瞳处反射率和偏振反射率的查找表。

构建完查找表后,根据航空偏振相机观测数据的几何条件,通过多次线性内插到仪器所有观测天顶角和方位角上,利用(5)式,查找对应观测几何条件下与观测数据相差最小的理论值对应的气溶胶光学厚度。

$$\eta = \frac{1}{2} (|\rho_{ob}^I - \rho_t^I| / |\rho_{ob}^I + \rho_t^I| + |\rho_{ob}^P - \rho_t^P| / |\rho_{ob}^P|), \quad (5)$$

式中 η 为相关误差, ρ_{ob}^I 、 ρ_t^I 分别为观测反射率和理论计算反射率, ρ_{ob}^P 、 ρ_t^P 分别为观测偏振反射率和理论计算偏振反射率。

由(5)式,利用已建立的 670 nm、865 nm 两个近红外波段的查找表,可分别得到 670 nm、865 nm 处气溶胶光学厚度 τ ,然后根据(6)式获得气溶胶 Ångström 指数 α 。 α 与气溶胶粒子的平均半径有关,范围一般为 $0 < \alpha < 2$;较小的 α 代表较大粒径的气溶胶粒子为主控粒子,相反,较大的 α 代表较小粒径的气溶胶粒子为主控粒子^[17]。

$$\alpha = -\ln\left(\frac{\tau_{670}}{\tau_{865}}\right) \ln\left(\frac{670}{865}\right). \quad (6)$$

3 数据描述和处理

2012 年 3 月份,在京津塘地区开展了天地一体化气溶胶综合观测实验,实验中在七场、塘沽、天津钢场、清河、曹妃甸等地安放了太阳辐射计 CE318 对大气进行同步观测,以获得飞行时刻的气溶胶光学厚度和 Ångström 指数。飞机的飞行航线根据地面站点设置,并将 DPC(具体的配置如表 1 所示)安装在飞机上面,使其与定位定姿系统(POS)连接,这样不仅可以准确控制航拍重叠度,还能实时获得每幅图像的相机姿态和位置信息。

为使用 DPC 的航拍图像进行气溶胶光学特性的反演,需对航拍偏振图像进行筛选,即选择海洋上空晴朗无云的偏振图像;由于 DPC 采用分时多波段偏振辐射数据的采集方式,导致航拍的同一波段三个偏振方向的图像不匹配,所以还需要根据 POS 数据,对同一偏振波段三个偏振方向的图像进行配准;利用航

空 DPC 的辐射和偏振定标矩阵,将偏振波段的三个偏振方向的图像转化为反射率图像和偏振反射率图像;最后,选择远离镜面反射方向的反射率和偏振反射率测量值,进行大气气溶胶光学特性的反演。

表 1 DPC 波段布置

Table 1 Waveband of DPC

Channel number	Center-wavelength λ / nm	Bandwidth $\Delta\lambda$ / nm	Polarizer orientation
1	490	30	$P, -60^\circ$
2	490	30	$P, 0^\circ$
3	490	30	$P, +60^\circ$
4	670	47	$P, -60^\circ$
5	670	47	$P, 0^\circ$
6	670	47	$P, +60^\circ$
7	865	55	$P, -60^\circ$
8	865	55	$P, 0^\circ$
9	865	55	$P, +60^\circ$
10	background	—	—
11	550	28	unpolarized channel
12	780	29	unpolarized channel
13	810	50	unpolarized channel

4 气溶胶参数反演结果及验证

使用 2012 年 3 月 27 日上午的航空偏振成像数据,根据查找表,由(5)式可分别得到 670 nm 和 865 nm 波段处的气溶胶光学厚度,进而利用(6)式获得气溶胶的 Ångström 指数。渤海湾上空气溶胶 Ångström 指数的概率分布如图 3 所示,其范围覆盖 $0.95 \sim 1.5$,大都集中在 $1.1 \sim 1.2$ 之间,其均值为 1.15。该结果与 6SV 中提供的大陆型气溶胶模型的 Ångström 指数 1.2 特别接近,说明在近京津塘渤海湾上空的气溶胶类型偏向于陆地型。由于在遥

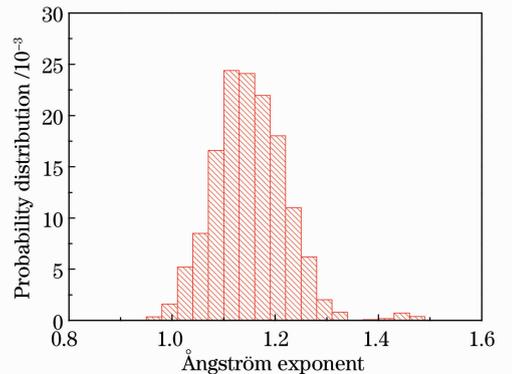


图 3 航空数据反演的渤海湾上空气溶胶 Ångström 指数
Fig. 3 Aerosol Ångström exponent over the BoHai Bay by air board DPC

感中常使用 550 nm 处的气溶胶光学厚度,所以利用 670 nm、865 nm 波段处的气溶胶光学厚度和 Ångström 指数,得出了渤海湾上空 550 nm 处的气溶胶光学厚度,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在近海岸区域气溶胶光学厚度普遍较大,在 0.44~0.53 之间,平均值为 0.441;在离岸较远的海域,气溶胶光学厚度也很大,这说明渤海湾海域大气受周边内陆的影响较为严重。

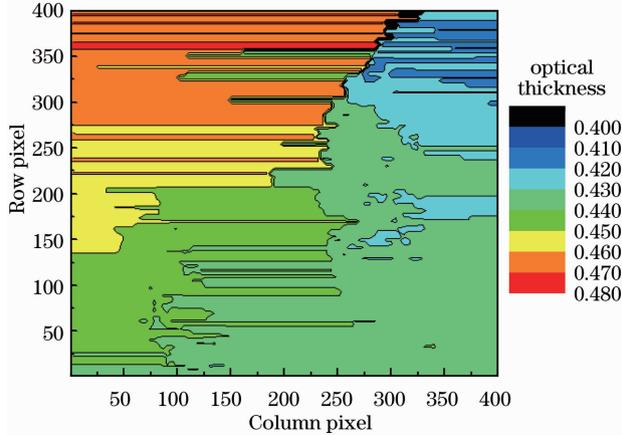


图 4 航空数据反演的渤海湾上空 550 nm 处气溶胶光学厚度

Fig. 4 Aerosol optical thickness over the BoHai Bay at 550 nm by air board DPC

为检验空基反演结果是否正确,将其与地基 CE318 太阳辐射计的观测结果进行了比对。由于空基反演的是从地面到飞行高度的大气柱气溶胶光学厚度,而地基太阳辐射计反演的是整层大气气溶胶光学厚度,故首先需将两者在高度上统一起来。一般认为气溶胶 Ångström 指数不随高度变化,空基反演的结果和地基测量的结果可以直接对比,这里不再赘述。根据气溶胶光学厚度、标高和地面水平能见度的关系^[18-20]:

$$\tau = \int_0^{\infty} \beta_{\text{ext}}(0) \exp(-h/H_a) dh = \beta_{\text{ext}}(0) H_a = 3.912 H_a / V, \quad (7)$$

式中 $\beta_{\text{ext}}(0)$ 为地面的气溶胶消光系数, H_a 为气溶胶标高, V 为水平能见度。根据(7)式,若已知地面水平能见度和气溶胶光学厚度,即可求得气溶胶的标高。根据地基反演的气溶胶光学厚度和塘沽气象局给出的水平能见度,求得近京津塘渤海湾气溶胶标高为 0.821。同理,到达高度为 h 处的气溶胶光学厚度可以表示为

$$\tau_h = \int_0^h \beta_{\text{ext}}(0) \exp(-h/H_a) dh = \beta_{\text{ext}}(0) H_a [1 - \exp(-h/H_a)], \quad (8)$$

进而,由(7)式和(8)式可得从地面到达高度 h 处的气溶胶光学厚度与整层大气气溶胶光学厚度的关系:

$$\tau = \frac{1}{1 - \exp(-h/H_a)} \cdot \tau_h, \quad (9)$$

将气溶胶标高代入(9)式,可得到近京津塘渤海湾整层大气柱气溶胶光学厚度是航空飞行高度为 3.6 km 时大气柱气溶胶光学厚度的 1.013 倍。可见该区域整层大气柱气溶胶光学厚度和航空飞行高度为 3.6 km 时大气柱气溶胶光学厚度基本一致。

表 2 列出了空基反演结果与地基观测结果的对比数据,其中七场和清河站点在农田附近,塘沽、天钢和天津站点在城市中心。就地基观测而言,位于城市市区的气溶胶光学厚度和 Ångström 指数普遍比位于乡村或海边的数值大,这符合城市污染增加气溶胶的一般规律。将航拍所得的大区域气溶胶光学厚度和 Ångström 指数进行统计平均后,其均值则位于城市和乡村两者之间,实验结果符合预期。但也存在一些影响局部反演精度的客观因素,例如理论上利用 DPC 航拍的渤海湾上空气溶胶光学厚

表 2 地基反演结果和空基反演结果的对比

Table 2 Comparison of aerosol optical parameters from air board DPC with ground based sun-photometer (CE318)

Site	Coordinate	Aerosol optical thickness	Ångström exponent	
Dround based CE318	Qichang (39.177N, 118.340E)	0.417	1.19	
	Tangu (39.033N, 117.644E)	0.523	1.14	
	Tiangang (39.043N, 117.494 E)	0.484	1.21	
	Qinghe (39.200N, 117.617E)	0.422	1.14	
	Tianjin (39.074N, 117.197E)	0.574	1.20	
	Bohai seaside (38.917N, 118.517E)	0.412	1.09	
Air board DPC	Bohai Bay	—	0.441	1.15

度和 Ångström 指数应与海边的地基观测结果接近,但实际上,空基反演结果比地基反演观测稍大。这两方面的原因:1)多角度航空偏振相机 DPC 没有进行在轨定标,在将偏振波段测量的三个偏振方向的图像转化为反射率图像和偏振反射率图像时,使用的是实验室定标矩阵;2)在建立查找表时,选用的气溶胶类型为海洋型气溶胶,而渤海湾上空受陆地环境的影响,已不完全是海洋型气溶胶。好在虽然其结果不完全一致,但差别很小,亦能说明本文提出的基于 DPC 的气溶胶光学厚度反演方法是可靠的。

5 结 论

根据自主研发的多角度航空偏振相机 DPC 的偏振辐射数据,提出了使用多波段如 670 nm 和 865 nm 两个近红外波段的偏振辐射数据构建反射率和偏振反射率查找表,通过迭代查找进行海上气溶胶光学参数反演的方法,并通过对比观测实际验证了反演算法的可行性。当然,文中给出的反演结果仍然存在一些不确定因素:1)定标矩阵问题,即航空偏振相机的实验室定标与在轨定标矩阵可能有细微差异;2)气溶胶类型问题,在我国近海海域的大气受陆源和海洋双重影响,可能已不是单纯的海洋型气溶胶,如果利用 AERONET 太阳辐射计观测网或业务化大气校正方法精确确定中国近海海域的气溶胶类型,则可有效降低反演结果的不确定性;3)海洋水体问题,中国近海海域的水体大多是混浊水体,较为复杂,更为完善的算法需要构建下垫面为等效干净水体的查找表,这又必将面临一系列复杂的计算和验证。但从对海上气溶胶光学特性的空基反演结果与地基观测结果比较来看,两者之间的差别很小,说明该反演方法对实际问题的考虑具有一定的合理性,其分析处理过程切实可行。文中通过航空飞行实验,对海洋气溶胶光学特性的反演算法进行验证,可为将来高分 5 号卫星在全球范围内开展海上气溶胶光学特性的观测提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101005.
王家成, 乔延利, 杨世植, 等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101005.
- 2 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.

- 3 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 4 Qiu Jinhuan, Wang Pucui, Xia Xiang'ao, *et al.*. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches [J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 841–853.
邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 近年来大气遥感研究进展[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 841–853.
- 5 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Retrieval of polluted aerosol optical properties over coastal water [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 060101.
王家成, 乔延利, 杨世植, 等. 近海污染大气气溶胶光学性质反演研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 060101.
- 6 Y J Kaufman, C Sendra. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. *Int J Remote Sens*, 1988, 9(8): 1357–1381.
- 7 Xue Yong, Yu Tong. Aerosol optical depth determination from along track scanning radiometer (ATSR) data [C]. *New York: Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2003. 793–796.
- 8 I Sano. Optical thickness, Angstrom exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(4): 833–837.
- 9 P Goloub, D Tanre, J L Deuzé, *et al.*. Validation of the first algorithm applied for deriving the aerosol properties over the ocean using the POLDER/ADEOS measurements [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1586–1596.
- 10 M Herman, J L Deuzé, A Marchand, *et al.*. Aerosol remote sensing from POLDER/ADEOS over the ocean: improved retrieval using a nonspherical particle model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D10): D10S02.
- 11 J L Deuzé, F M Breon, C Devaux, *et al.*. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *J Geophysical Research*, 2001, 106 (D5): 4913–4926.
- 12 X Gu, T Cheng, D Xie, *et al.*. Analysis of surface and aerosol polarized reflectance for aerosol retrieval from polarized remote sensing in PRD urban region [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(36): 6607–6612.
- 13 Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Cheng Tianhai, *et al.*. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 070702.
顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 070702.
- 14 Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurement. II: a case study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 27–35.
段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 II. 实例分析[J]. *大气科学*, 2008, 32(1): 27–35.
- 15 Chen Ligang. Study of Laboratory Calibration of the Airborne Polarization CCD Camera with Wide Field of View (Optics) [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2008. 15–26.
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008. 15–26.
- 16 E Vermote, D Tanre, J L Deuze, *et al.*. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector(6SV) [M]. *6S User Guide*, 2006, 3.
- 17 Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. *Atmospheric Aerosols Tutorials* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1995.

- 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- 18 Tao Jinhua, Zhang Meigen, Chen Liangfu, *et al.*. Method to estimate concentration of surface-level particulate matter from satellite-based aerosol optical thickness [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(1): 143–154.
- 陶金花, 张美根, 陈良富, 等. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(1): 143–154.
- 19 Chen Jingjing, Sheng Lifang, Zheng Yuanxin. The correlation analysis of aerosol optical depth, aerosol index and visibility in Qingdao spring 2006 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(1): 10–16.
- 陈静静, 盛立芳, 郑元鑫. 2006 年春季青岛气溶胶光学厚度与气溶胶指数、能见度的关系分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(1): 10–16.
- 20 Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 33–37.
- 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 33–37.

栏目编辑: 王晓球