

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2015.04.004

# 大气气溶胶航空多角度偏振观测实验及数据分析

黄红莲, 易维宁

(中国科学院安徽光学精密机械研究所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:** 鉴于多角度偏振辐射数据可以有效提升大气气溶胶参数的反演精度, 设计了多角度偏振探测航空实验及数据处理流程。将我国自主研发的多角度偏振成像仪 DPC 搭载在航空平台上, 同时在地面布设太阳辐射计 CE318 观测站点, 设计航线串联地面观测站点, 开展了航空飞行实验。对实验获得的数据进行分析处理, 结果表明, 多角度偏振探测航空实验可获取高精度的偏振、辐射数据; 使用该数据反演大气气溶胶光学厚度, 反演误差小于 3%, 初步验证了多角度偏振成像仪可为大气气溶胶多参数反演提供有效的数据。

**关键词:** 大气气溶胶; 多角度偏振成像仪; 航空实验; 偏振反射率; 光学厚度

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2015)04-0300-08

## Airborne Experiment Demonstration and Data Analysis for Multi-Angle Polarization Detection of Atmospheric Aerosols

HUANG Honglian, YI Weining

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The inversion precision of atmospheric aerosol parameters can be more effectively improved by the combination of multi-angle polarization and radiation data, so the airborne experiment is designed and completed to obtain multi-angle polarization and radiation data. The self-developed multi-angle directional polarized camera (DPC) is equipped on the aircraft, and sun-photometer CE318 is mounted at ground stations, then aviation flight experiment was carried out by designing aircraft's course series ground stations. The data obtained from airborne experiment is analyzed, and the results show that DPC on the aircraft can obtain high precision polarization and radiation data. The atmospheric aerosols optical depth is retrieved using the experiment data, and inversion error is less than 3%, which demonstrates validity of multi-angle polarization and radiation data from airborne experiment.

**Key words:** atmospheric aerosol; multi-angle directional polarized camera; airborne test; polarization reflectance; optical thickness

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2010CB950803) 资助

E-mail: hlhuang@aiofm.ac.cn

# 1 引言

气溶胶是大气的重要组成部分, 广泛存在于对流层中, 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<sup>[1]</sup>。从长远角度看, 是影响气候变迁的主要因素之一; 而对于区域环境大气来说, 自然活动和人为活动与大气气溶胶的状态分布密切相关, 影响局地气候和天气变化<sup>[2]</sup>。目前, 由于生物质燃烧和其它人为活动带来的灰霾天气, 以及西北地区的沙尘天气给人们的健康带来了不利的因素, 人们特别关注中国地区的灰霾气溶胶和沙尘气溶胶<sup>[3-5]</sup>。因此, 开展典型区域的气溶胶多参数综合观测实验, 及时定量掌握大气气溶胶性质及其分布状况, 为研究中国区域大气气溶胶的特性及其变化趋势提供了有效数据。

由于大气气溶胶散射辐射的偏振敏感性, 及其偏振的方向分布特性, 使得近年来发展起来的多角度多光谱偏振遥感技术可以有效应用于大气特性的高精度探测<sup>[6-7]</sup>。安徽光机所自主研发的多角度偏振成像仪 DPC 可以同时获得多个波段、多个角度的偏振和强度信息, 将其搭载在飞机上进行航空飞行试验, 可以为大气气溶胶反演提供多种数据, 以实现气溶胶多参数的同时反演, 并且提高气溶胶反演精度。

考虑到气溶胶具有典型的地理特性, 京津唐地区是中国主要的工业基地、近海、人口稠密、气溶胶类型多样, 故分别于 2011 年 7 月和 2012 年 3 月两次在京津唐地区开展了气溶胶多参数综合观测实验。该实验在将多角度偏振成像仪搭载在飞机上进行航空飞行观测的同时, 地面布置太阳辐射计、粒子计数器等气溶胶地基观测仪器, 以验证航空数据的有效性。

## 2 航空试验

### 2.1 实验区域选择

京津唐开发区位于华北平原东北部, 是全国 17 个重点开发区之一。该地区工业体系门类齐全, 特别是石油、煤化、冶金、海洋化工、机械电子工业非常发达, 加上以煤为主的能源结构, 使得该地区大气污染较严重, 是我国灰霾天气现象严重的四个地区(珠三角、长三角、京津唐、重庆)之一。据 2002 年环境监测数据统计, 该地区是全国二氧化氮污染最严重的区域。该地区是城市化和工业化影响的典型代表, 其近海区域也受到人类活动的显著影响, 选择在该地区进行气溶胶航空观测实验, 可以研究气溶胶的典型地理特性。

### 2.2 航线设计

通过对京津唐地区进行实地考察, 发现该地区的市区、工业区、郊区和海边等不同地点可能代表不同的气溶胶模型, 设计了能覆盖多种气溶胶模型的航空飞行试验航线, 使航空观测区域包括城市市区、重工业区(天津钢铁集团有限公司厂区)、村庄、农田、港口(天津港)、近海等不同环境。地面沿航线布设有太阳辐射计 CE318 观测站点, 对大气进行地基同步观测, 以获得飞行时刻的气溶胶光学厚度和 Ångström 指数等光学参数, 用于航空实验结果的分析、验证。

第一次航空飞行试验分别于 2011 年 7 月 9 日、7 月 23 日、7 月 24 日进行了三个架次的飞行试验, 航高为 3600~3900 m。航空试验的航线串联了地面试验站点: 天津机场-天钢-塘沽-程家园-曹妃甸-京唐港-七场-天津机场, 飞行试验航线图如图 1 所示, 图中旗帜表示地面站点, 连接旗帜的实线为飞行航线。第二次航空飞行试验分别于 2012 年 3 月 21 日、3 月 26 日、3 月 27 日进行了三个架次的飞行试验, 航高为 2700~3600 m。其中 3 月 21 日和 3 月 27 日, 天气状况良好, 晴朗无云; 3 月 26 日有薄雾。航空试验的航线串联了地面试验站点: 天津机场-天钢-塘沽-汉沽(盘旋)-七场(盘旋)-曹妃甸-塘沽-天钢-天津机场, 飞行试验航线图如图 2 所示。



图 1 第一次航空飞行试验航线图

Fig.1 Aircraft's course of the first airborne test

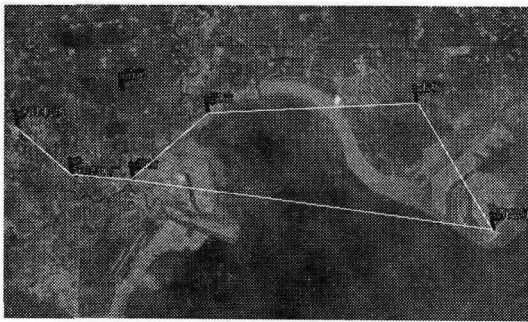


图 2 第二次航空飞行试验航线图

Fig.2 Aircraft's course of the second airborne test

### 2.3 航空实验装置

航空测量平台主要包括多角度偏振成像仪 DPC 和相应的辅助设备。辅助设备有飞行稳定平台和定位定姿 POS 系统。多角度偏振成像仪和 POS 一同安装在稳定平台上。稳定平台和 POS 共同作用,保证了探测设备姿态稳定,并实时获取姿态角度与定位坐标,用于后续处理。

多角度偏振成像仪主要由 CCD 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,具体的技术参数如表 1 所示。表中用 P 标记的是偏振探测波段;每个偏振波段有 3 个通道,即  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  三个偏振方向,而每个非偏波段仅有 1 个通道,剩余 1 个通道用于探测器暗电流的监测。该仪器的最大视场角为  $\pm 60^\circ$ ,能够获得多个观测角度、多个波段的偏振辐射信息,其波段设置定位于监测气溶胶、云和海洋。

表 1 多角度偏振成像仪主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of directional polarimetric camera (DPC)

名称	指标
中心波长 (nm)	490-P, 670-P, 865-P, 550, 780, 810
带宽 / 分辨率	20~100 nm
总视场	沿轨扫描最大角度范围: $-60^\circ \sim +60^\circ$
空间分辨率	3.4 m 相对于 3000 m 高度
像元数	1024×1024
像元大小	12 $\mu\text{m}$ ×12 $\mu\text{m}$
量化精度	12 bits
6 功耗	60 W
体积 / 质量	294 mm×242 mm×256 mm
偏振定标	定标精度 5%

## 3 数据处理与结果分析

航空实验数据处理首先通过平台姿态数据匹

配、图像像元配准、偏振辐射数据定量化处理实现多角度偏振成像仪的数据预处理,获得定量化的各种偏振辐射参量以及对应的经纬度、太阳几

何条件、观测几何条件等辅助信息。然后, 使用多角度、多波段的偏振辐射数据进行大气气溶胶光学特性反演, 并与地基的测量结果作对比分析, 检验航空观测实验数据的有效性。具体处理流程如图 3 所示。

### 3.1 图像数据配准

对多角度偏振成像仪 DPC 在京津唐地区开展的航空偏振成像试验数据, 进行航拍数据处理, 以解析获得定量化偏振辐射数据。由于多角度偏振成像仪 DPC 采用的是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图像不匹配的问题, 影响偏振解析精度, 所以首先需要对航拍图像进行配准。使用基于傅立叶变化的相位相关配准方法, 以偏振方向为  $0^\circ$  的图像为参考图像, 偏振方向为  $60^\circ$ 、 $120^\circ$  的图像为待配准图像, 将同一波段、三个偏振方向的图像进行配准。图像配准过程中, 偏振方向为  $120^\circ$  的图像需要水平右移 2 个像素, 垂直上移 14 个像素, 旋转角度为  $0$ ; 偏振方向为  $60^\circ$  的图像需要水平左移 1 个像素, 垂直下移 9 个像素, 旋转角度为  $0$ 。

为显示图像配准的效果, 将配准前后三个偏

振方向上的图像进行了图像合成比较, 图 4 为 865 nm 波段三个偏振方向配准前后的合成图。从图 4 中可以看出, 配准前, 三个偏振方向的合成图有明显的像素错位现象, 而配准后, 三个偏振方向的合成图像素基本可以匹配到一致, 说明了基于傅立叶变化的相位相关配准方法对 DPC 航拍图像进行配准的有效性。

### 3.2 图像数据定量化

从偏振探测器的三个偏振方向上的图像得到偏振度、反射率、偏振反射率等有物理意义的偏振辐射参量的过程, 即为定量化的过程。定量化的实现需要偏振探测器的辐射、偏振定标参数。偏振成像探测器的定标可以通过实验室定标和在轨定标两种方式获得定标参数。

对多角度偏振成像仪 DPC 而言, 由于其视场特别大 ( $-60^\circ \sim +60^\circ$ ), 还需要多角度定标。根据 DPC 的辐射、偏振和多角度定标结果, 可以通过公式 (1), 实现数据的定量化, 将偏振波段测量的三个偏振方向的图像转化为有物理意义的偏振辐射图像<sup>[8-9]</sup>。

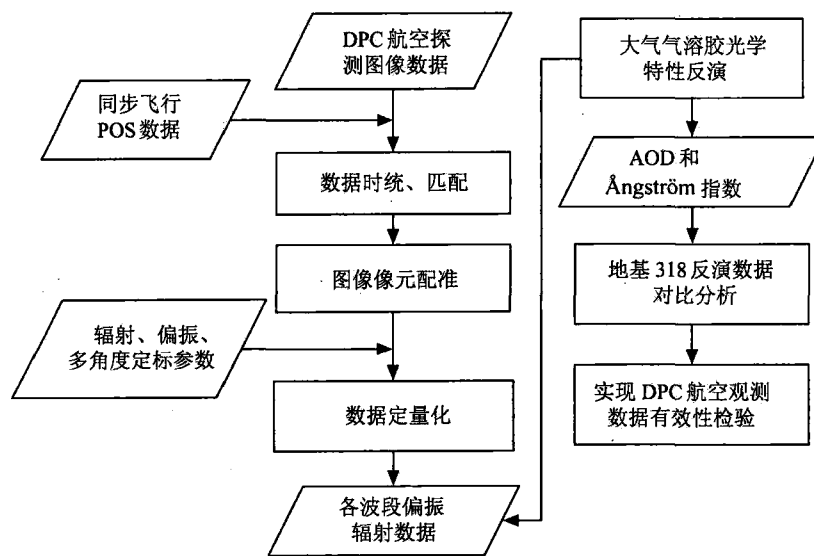


图 3 DPC 航空观测数据处理流程

Fig.3 Processing flow of data obtained from DPC on the aircraft in airborne experiment

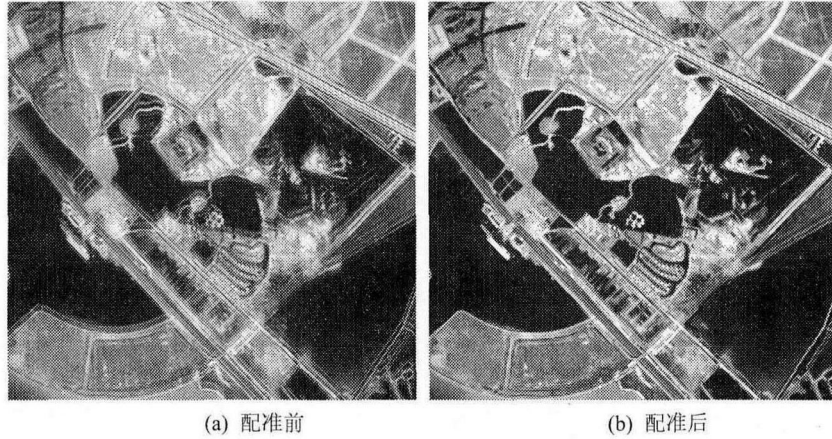


图 4 865 nm 波段三个偏振方向配准前后的合成图, (a) 配准前, (b) 配准后

Fig.4 Synthetic image of three polarization direction in 865 nm wave band, (a) before and (b) after image registration

$$X_{l,p}^{k,a} = A^k T^{k,a} P^k(\theta) [P_1^{k,a}(\theta, \varphi) I^k + P_2^{k,a}(\theta, \varphi) Q^k + P_3^{k,a}(\theta, \varphi) U^k] + C_{l,p}, \quad (1)$$

式中:  $k$  代表不同波段,  $a$  代表不同偏振方向;  $A^k$  为绝对辐射定标系数,  $T^{k,a}$  为偏振片和滤光片的相对透过率;  $P^k(\theta)$  为低频部分的相对透过率拟合系数,  $P_1^{k,a}(\theta, \varphi)$ 、 $P_2^{k,a}(\theta, \varphi)$  和  $P_3^{k,a}(\theta, \varphi)$  为光学系统偏振参数;  $C_{l,p}$  为暗电流校正系数;  $I^k$ 、 $Q^k$ 、 $U^k$  为要解析得到的 Stokes 矢量的前三个参数。

基于 DPC 的定标公式 (1), 由偏振波段测量的三个偏振方向 ( $a=1$ 、 $2$  和  $3$ ) 图像和本底图像可以建立线性方程组 (如公式 (2) 所示), 解析得到四个 Stokes 参数的前三个参数  $I^k$ 、 $Q^k$ 、 $U^k$ 。

$$\begin{bmatrix} I^k \\ Q^k \\ U^k \end{bmatrix} = \frac{1}{A^k} (G^{-1}) \begin{bmatrix} X_{l,p}^{k,1} - C_{l,p} \\ X_{l,p}^{k,2} - C_{l,p} \\ X_{l,p}^{k,3} - C_{l,p} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,

$$G = \begin{bmatrix} T^{k,1} P^{k,1}(\theta) Z^{k,1}(l) P_1^{k,1}(\theta, \varphi) & T^{k,1} P^{k,1}(\theta) Z^{k,1}(l) P_2^{k,1}(\theta, \varphi) & T^{k,1} P^{k,1}(\theta) Z^{k,1}(l) P_3^{k,1}(\theta, \varphi) \\ T^{k,2} P^{k,2}(\theta) Z^{k,2}(l) P_1^{k,2}(\theta, \varphi) & T^{k,2} P^{k,2}(\theta) Z^{k,2}(l) P_2^{k,2}(\theta, \varphi) & T^{k,2} P^{k,2}(\theta) Z^{k,2}(l) P_3^{k,2}(\theta, \varphi) \\ T^{k,3} P^{k,3}(\theta) Z^{k,3}(l) P_1^{k,3}(\theta, \varphi) & T^{k,3} P^{k,3}(\theta) Z^{k,3}(l) P_2^{k,3}(\theta, \varphi) & T^{k,3} P^{k,3}(\theta) Z^{k,3}(l) P_3^{k,3}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

使用航空多角度偏振成像仪配准后的三个偏振方向上的图像, 依据上述定量化方法, 解析得到了航空多角度偏振成像仪 865 nm 波段的 Stokes 矢量的前三个参数  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和偏振度  $P$ , 如图 5 所示。

相对于辐亮度和偏振辐亮度来说, 反射率和偏振反射率是归一化的辐射量, 没有量纲, 使用起来更加方便, 是目前利用航空和卫星遥感数据

反演气溶胶光学特性通常使用的辐射量。由前面解析得到的前三个 Stokes 参数  $I$ 、 $Q$ 、 $U$ , 根据公式 (4) 可以计算得到多角度偏振成像仪入瞳处的表现反射率  $\rho$  和表现偏振反射率  $\rho_P$ 。

$$\begin{cases} \rho = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0} \\ \rho_P = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 F_0} \end{cases}. \quad (4)$$

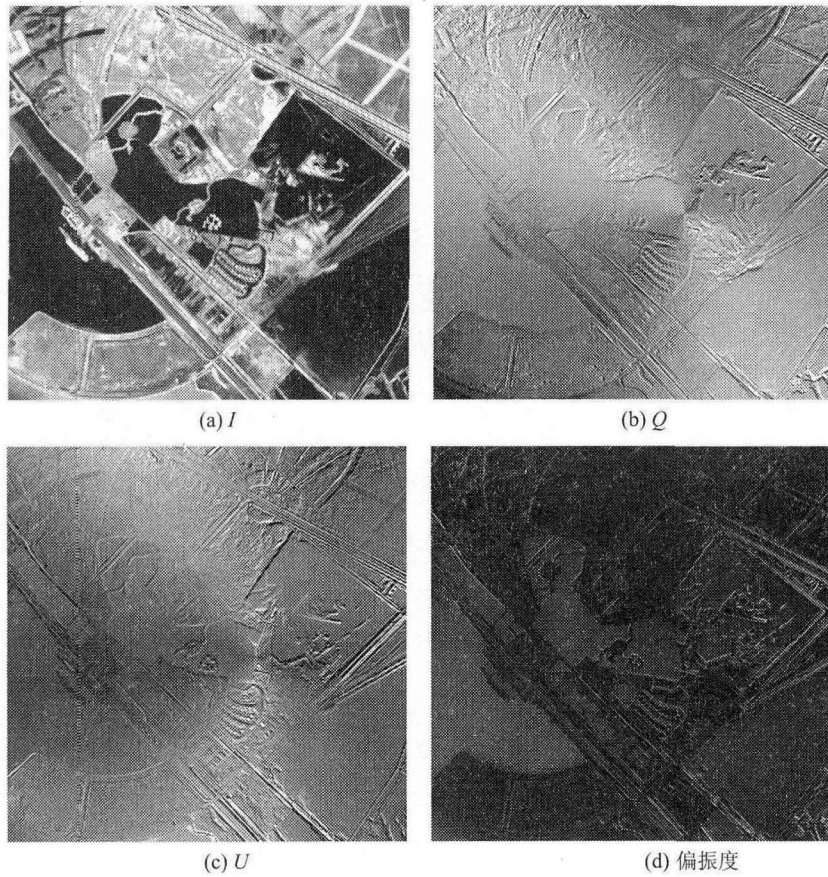


图 5 航空多角度偏振成像仪 865 nm 波段的三个 Stokes 参数  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和偏振度  $P$

Fig.5  $I$ ,  $Q$ ,  $U$  and  $P$  obtained from DPC on the aircraft in 865 nm wave band



图 6 865 nm 波段反射率图

Fig.6 Reflectance image in 865 nm wave band

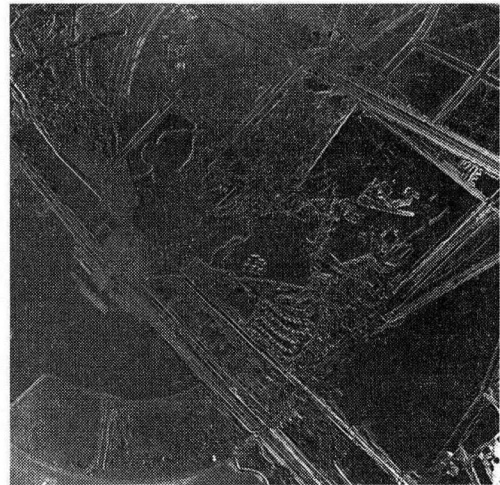


图 7 865 nm 波段偏振反射率图

Fig.7 Polarized reflectance image in 865 nm wave band

表 2 地基反演结果和空基反演结果对比表

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

反演地点		经纬度	气溶胶 光学厚度	Ångström 波长指数
地基反演	七场	(39.177°N, 118.340°E)	0.417	1.19
	塘沽	(39.033°N, 117.644°E)	0.523	1.14
	天钢	(39.043°N, 117.494°E)	0.484	1.21
	清河	(39.200°N, 117.617°E)	0.422	1.14
	天津	(39.074°N, 117.197°E)	0.574	1.20
	渤海海边	(38.917°N, 118.517°E)	0.412	1.09
	空基反演	渤海近海		0.441

使用计算得到的  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  图像可以获得反射率图像和偏振反射率图像。图 6 为航空多角度偏振成像仪 865 nm 波段的反射率图像, 图 7 为航空多角度偏振成像仪 865 nm 波段的偏振反射率图像。反射率和偏振反射率的解析, 为大气气溶胶光学特性的反演打下了基础。

### 3.3 图像数据有效性检验

为验证多角度偏振成像仪航空数据的有效性, 基于查找表法, 使用多角度偏振成像仪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, 并将空基反演结果与地面站点太阳辐射计 CE318 地基反演的结果进行了对比<sup>[10-11]</sup>, 如表 2 所示。表 2 中七场和清河站点在农田附近, 塘沽、天钢和天津站点在市中心, 渤海海边站点就在海边。从表中可以看出, 相对于太阳辐射计 CE318 地基反演的结果, 由 DPC 航空测量的偏振数据反演得到的渤海湾上空的气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数, 比市中心 CE318 地基站点反演的气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数均较小, 比农田附近和海边 CE318 地基站点反演的溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数略大。虽然空基反演结果与海边 CE318 地基站点反演结果不完全

一致, 但相差不大, 小于 0.03, 能说明航空多角度偏振成像仪航拍数据的有效性。

## 4 结束语

本文通过航空版多角度偏振成像仪 DPC 的两次航空飞行实验、数据处理及结果分析, 解析得到了量化的偏振辐射数据 - 反射率图像和偏振反射率图像; 并将基于航空偏振辐射数据反演得到的大气气溶胶光学厚度与地基太阳辐射计反演结果进行了对比, 反演误差小于 0.03。说明由我国自主研发的多角度偏振成像仪 DPC, 可获取高精度的偏振辐射数据, 为大气气溶胶多参数反演提供有效的数据, 为研究局部区域大气气溶胶的特性及其变化趋势服务。

### 参考文献:

- [1] Buseck P R, Pósfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: effects on climate and the environment [J]. *PNAS*, 1999, **96**(7): 3372-3379.
- [2] Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric Aaerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(5): 625-634(in Chinese).



- 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [3] Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513002(in Chinese).
- 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.
- [4] Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, et al. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002(in Chinese).
- 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.
- [5] 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(in Chinese).
- 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.
- [6] Gu X, Cheng T, Xie D, et al. Analysis of surface and aerosol polarized reflectance for aerosol retrieval from polarized remote sensing in PRD urban region [J]. *Atmos. Environ.*, 2011, 45: 6607-6612.
- [7] 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): 27-34(in Chinese).
- 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): 27-34.
- [8] Chen Ligang. Study of Laboratory Calibration of the Airborne Polarization CCD Camera with Wide Field of View (Optics) [D]. Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 15-26(in Chinese).
- 陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光机所博士论文, 2008: 15-26.
- [9] Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Cheng Tianhai, et al. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(7): 070702(in Chinese).
- 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.
- [10] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli. A method for retrieving aerosol optical properties based on sun photometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(3): 175-180(in Chinese).
- 黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于太阳辐射计的气溶胶光学特性反演算法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(3): 175-180.
- [11] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli. Validation of retrieving aerosol optical parameters over the sea using airborne directional polarized camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601004(in Chinese).
- 黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601004.

作者简介: 黄红莲 (1980-), 女, 山东济宁人, 硕士, 副研究员, 主要从事遥感信息处理及应用方面的研究。