

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.001

星载对地观测偏振传感器及其大气遥感应用

李正强¹, 谢一淞^{1*}, 洪津², 王中挺³, 王舒鹏⁴, 孙晓兵², 乔延利², 顾行发¹

(¹ 中国科学院空天信息研究院国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

² 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;

³ 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

⁴ 国家气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 偏振反映电磁波的方向特性, 是除强度之外电磁波的另一维度的信息。在电磁波与大气颗粒物的相互作用中, 偏振由于其对颗粒物物理特征的高敏感性, 可以有效提高卫星遥感探测的丰度和精度, 改善对大气中特性复杂的气溶胶和云等成分的探测能力。首次综合介绍了我国研制的4种类型星载对地观测偏振传感器, 包括多角度偏振相机、推扫式偏振成像仪、摆扫式偏振仪、多通道偏振辐射计, 并分析了代表性的国产偏振传感器的指标参数, 总结了各类载荷的探测能力。在此基础上, 介绍了星载偏振传感器的主要定标方法, 包括发射前实验室定标、星上定标和在轨定标。偏振载荷具有增加卫星观测维度和精度、对大气颗粒物粒径和形状特征敏感、改善弱信号探测等方面的综合优势, 能够获取全球范围内高精度的大气气溶胶和云参数。星载对地观测偏振传感器具有广阔的大气遥感应用空间和潜力, 可在细颗粒物PM_{2.5}卫星遥感、关键气候因子观测及评估、极端环境事件监测、气溶胶生态效应评估、对地观测高精度大气校正等多个领域发挥作用。

关键词: 偏振; 卫星传感器; 大气遥感; 气溶胶和云; 定标

中图分类号: O436; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0002-016

Polarimetric Satellite Sensors for Earth Observation and Applications in Atmospheric Remote Sensing

LI Zhengqiang¹, XIE Yisong^{1*}, HONG Jin², WANG Zhongting³, WANG Shupeng⁴,
SUN Xiaobing², QIAO Yanli², GU Xingfa¹

(¹ State Environment Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

³ Satellite Environment Center, Ministry of Ecology and Environmental, Beijing 100094, China;

⁴ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

基金项目: Supported by National Key R&D Program of China (国家重点研发计划, 2016YFE0201400), Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院科研装备研制项目, YZ201664), Science and Technology Service Network Initiative Project of Chinese Academy of Sciences (中国科学院科技服务网络计划区域重点项目, KFJ-STS-QYZD-022)

作者简介: 李正强 (1977 -), 男, 河南洛阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气遥感方面的研究。

E-mail: lizq@radi.ac.cn

收稿日期: 2018-11-23; **修改日期:** 2018-11-29

* **通信联系人. E-mail:** xieys@radi.ac.cn

Abstract: Polarization that reflects the directional characteristics of electromagnetic wave, provides unique information of electromagnetic wave other than intensity. In the interactions between electromagnetic wave and atmospheric particles, polarimetry is able to effectively improve the abundance and accuracy of satellite remote sensing observation, thanks to its high sensitivities to the physical properties of particles. And polarization can significantly enhance the detection capability of the complicated atmospheric components, such as cloud and aerosol. For the first time, four types of polarimetric satellite sensor were introduced for earth observation, including directional polarimetric camera, push-broom polarimetric imager, whisk-broom polarimetric imager and multi-channel polarimetric radiometer. The related and representative Chinese polarimetric sensors are listed, with their characteristic parameters introduced and detection abilities analyzed. Then, typical calibration methods of polarimetric satellite sensors are introduced, including pre-launch laboratory calibration, onboard calibration and in-orbit calibration. Given the advantages of extra observing dimension and accuracy, high sensitivity to particulate size and shape, and enhancement on retrieving weak atmospheric signal, polarimetric satellite sensors have the abilities to obtain comprehensive and accurate aerosol and cloud parameters over the earth. These spaceborne polarimetric sensors have broad application opportunities and enormous potentials in the fields of atmospheric remote sensing, including monitoring atmospheric fine particulate matters PM_{2.5}, observation and retrieval of essential climate variables, monitoring and assessment of extreme environmental events, evaluation of aerosol ecological effects and high-precision atmospheric correction for earth observation.

Key words: polarization; satellite sensor; atmospheric remote sensing; aerosol and cloud; calibration

1 引 言

气溶胶和云是地球 - 大气系统的重要组成部分, 在大气环境、气候变化、能量交换、物质输送、植物迁徙等方面有显著的影响^[1-2]。由于来源和种类繁多, 形成和变化机理复杂, 大气气溶胶和云具有复杂的光学和物理特性, 使其成为气候变化评估中辐射效应不确定性最大的因素^[3-5]。传统的卫星光学遥感一般通过可见光 - 短波红外范围的气溶胶敏感波段来探测全球或区域尺度气溶胶和云的特性, 例如搭载在美国 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)^[6]。但由于观测维度和数据信息有限, 往往仅能获得光学总量 (例如气溶胶光学厚度), 对于气溶胶和云的物理特征 (例如形状、粒径等) 则难以有效反演。多角度成像光谱辐射计 (Multi-angle imaging spectroradiometer, MISR) 在多光谱的基础上, 增加了多角度观测, 可以估算气溶胶类型的部分参数^[7]。与强度观测相比, 偏振观测反映了太阳辐射在气溶胶和云的散射吸收作用下的方向特性, 偏振对气溶胶和云粒子的形状、大小等更深层次的物理特征有更好的敏感性^[8]。目前, 偏振与多光谱、多角度观测相耦合, 已经成为云和气溶胶卫星遥感探测技术发展的重要趋势之一。

国际上星载对地观测偏振传感器的代表是 1996~2013 年的偏振多角度传感器 (Polarization and directionality of earth's reflectance, POLDER) 系列。1996 年和 2002 年明确提出气溶胶探测目标的传感器 POLDER-1 和 POLDER-2 分别搭载于先进地球观测系列卫星 (Advanced earth observing satellite, ADEOS) 中的 ADEOS-1、ADEOS-2 发射升空, 但由于卫星升空后太阳能电池板失效等故障, 均未获得较长期的数据。2004 年, 搭载了 POLDER-3 传感器的“太阳伞”卫星 (Polarization and anisotropy of reflectances for atmospheric science coupled with observations from a lidar, PARASOL) 成功发射^[9], 并在轨稳定运行了超过 9 年, 于 2013 年 10 月结束其探测任务。POLDER 传感器从偏振维度获取气溶胶和云的散射辐射信号, 为通过卫星遥感获得更多的气溶胶参数提供了基础。除了偏振能力, 多角度探测也是 POLDER 区别于

其他传感器的一个重要因素, 可以使有效观测量提升一个数量级, 等效信噪比显著提高^[10]。欧洲航空航天局正在研发的多角度、多光谱、多偏振成像仪 (Multi-viewing, multi-channel, multi-polarization imaging, 3MI) 预计于 2020 年之后搭载在第二代欧洲气象卫星 (Meteorological operational satellite second generation, MetOp-SG) 上, 开展全球大气气溶胶和云探测^[11]。3MI 是 POLDER-3 的进化版, 观测维度 (多角度、多光谱、偏振) 基本与 POLDER-3 一致, 但探测波段范围扩展至短波红外 2130 nm, 并且空间分辨率更高 (达到 4 km)。除此之外, 日本发射的全球变化碳循环监测卫星 (Global change observation mission-carbon cycle, GCOM-C) 上搭载了第二代全球成像仪 (Second generation global imager, SGLI), 提供 674 nm 和 869 nm 两个波段的偏振观测^[12]。国内星载偏振传感器发展虽然起步较晚但发展迅猛, 云与气溶胶偏振成像仪 (Cloud and aerosol polarimetric imager, CAPI, 2016 年)、多角度成像传感器 (Multi-angle polarization imager, MAI, 2016 年)、多角度偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC, 2018 年) 等偏振传感器相继发射填补了国内在卫星偏振探测方面的空白。另外, 还有多个偏振传感器目前正在通过航空样机开展飞行实验, 例如美国的航空多角度偏振光谱成像仪 (Airborne multiangle spectro polarimetric imager, AirMSPI) 和中国的航空多角度偏振辐射计 (Aviation multi-angular polarimetry radiometer, AMPR)^[13-14]。

本文第 2 部分介绍了目前主流的几种星载对地观测被动偏振传感器类型及代表载荷, 包括多角度偏振相机、推扫式偏振成像仪、摆扫式偏振仪、多通道偏振辐射计。第 3 部分介绍星载偏振传感器的定标方法。第 4 部分简要介绍偏振遥感反演的基本原理和数学表达。第 5 部分介绍偏振遥感探测在细颗粒物 (PM_{2.5}) 遥感估计、关键气候因子观测及评估、定量遥感大气校正, 以及极端环境事件监测和生态效应评估等领域的应用研究。

2 星载对地观测偏振传感器主要类型

2.1 多角度偏振相机

多角度偏振相机采用在沿轨方向多个观测角度下成像的观测模式 (图 1), 一些特定波段提供偏振观测, 兼具多角度加偏振的探测能力。法国 PARASOL 卫星上搭载的 POLDER-3 传感器、我国 2018 年 5 月 9 日发射的高分五号卫星 (GF-5) 上搭载的 DPC 传感器是该类卫星载荷的代表。

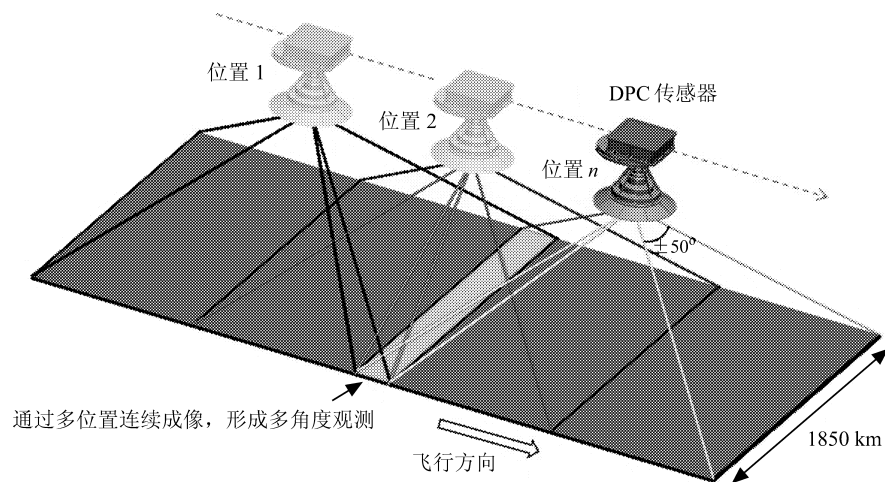


图 1 DPC 传感器多角度观测示意图

Fig.1 Multi-angle observation of DPC sensor onboard GF-5 satellite

DPC 传感器是中国发射的第一个星载多角度偏振对地观测载荷。DPC 用于获得全球覆盖的气溶胶、云、水汽等大气参量和陆地、海洋状况。DPC 主要由 CCD 探测阵列、载有偏振片和光谱滤光片的旋转轮和大视场角的光学系统三部分构成。CCD 传感器沿卫星飞行方向连续拍照成像, 实现多角度观测, 同时通过滤光片及偏振片的转动来获取不同光谱通道上的强度与偏振辐射信号。DPC 可以获得目标最多 12 个观测角度下的强度和偏振辐射信息, 8 个探测通道覆盖可见光至近红外波段, 包括 443, 565, 763, 765, 910 nm 的 5 个非偏振通道以及 490, 670, 865 nm 的 3 个偏振通道(通过 0° 、 60° 、 120° 三个偏振解析角度获得 Stokes 矢量 I 、 Q 、 U)^[15]。其中, 763 nm 和 765 nm 为氧气探测通道, 910 nm 为水汽探测通道, 其他通道进行气溶胶、云、海洋和陆表探测。表 1 给出了 DPC 的主要参数。

表 1 DPC 传感器主要参数

Table 1 Main technical parameters of DPC sensor

传感器指标	参数
幅宽 (km)	1850
瞬时视场角	$\pm 50^\circ$ (沿轨 / 穿轨)
空间分辨率 (km)	3.3(星下点)
像元数	512×512
探测通道 (nm)(P 表示含偏振)	443、490 (P)、565、670 (P)、763、765、865 (P)、910
通道宽度 (nm)	20、20、20、20、10、40、40、20
偏振解析分量	0° 、 60° 、 120°
偏振分量	I 、 Q 、 U
辐射定标误差	$\leq 5\%$
偏振定标误差	≤ 0.02

多角度偏振相机探测大气的主要优势在于可以提供光谱、角度、偏振等多个维度的有效观测, 与传统的多光谱卫星传感器(例如 MODIS)相比, 多角度偏振相机可以获得丰富的气溶胶散射辐射信息, 因此, 可以实现更多参数或更高精度的定量反演。在中国未来即将发射的碳生态监测卫星和大气环境监测卫星上, 均计划搭载此类传感器。

2.2 推扫式偏振成像仪

推扫式偏振成像仪采用沿轨推扫成像的观测模式(图 2), 虽然不具备多角度观测的机制, 但在实现多波长强度观测的基础上可获得同步偏振观测。2016 年 12 月发射的中国碳卫星(TanSat)上搭载的 CAPI 是这类传感器的代表。

CAPI 是日本温室气体观测卫星(Greenhouse gases observation satellite, GOSAT)上搭载的云与气溶胶探测仪 CAI 的“偏振版本”。CAPI 具有 5 个探测波段, 覆盖可见光到短波红外波段范围(380, 670, 870, 1375, 1640 nm), 其中, 670 nm 和 1640 nm 为偏振通道。CAPI 传感器通过 2 组光学镜头对可见和近红外波段分别进行观测, 并通过分量通道组合实现偏振测量(3 个偏振角度分别为 0° 、 60° 、 120°)。CAPI 各通道中, 1375 nm 为卷云探测通道, 其他通道用于获取气溶胶和云相关参数, 其设置的 2 个偏振通道可以改进气溶胶反演精度, 提高云识别的准确度, 用以校正 CO_2 反演中的气溶胶效应和云的影响^[16]。CAPI 的视场角为穿轨方向 $\pm 16^\circ$, 幅宽 400 km, 探测像元为 1600 个(可见-近红外通道)和 800 个(短波红外通道), 有效空间分辨率为 1 km。表 2 显示了 CAPI 传感器的主要参数^[16-17]。

表 2 CAPI 传感器主要参数

Table 2 Main technical parameters of CAPI sensor

传感器指标	参数
幅宽 (km)	400
探测通道 (nm)(P 表示含偏振)	380、670 (P)、870、1375、1640 (P)
通道信噪比	260、160、400、180、110
通道像元数	1600、1600、1600、800、800
偏振解析分量	0°、60°、120°

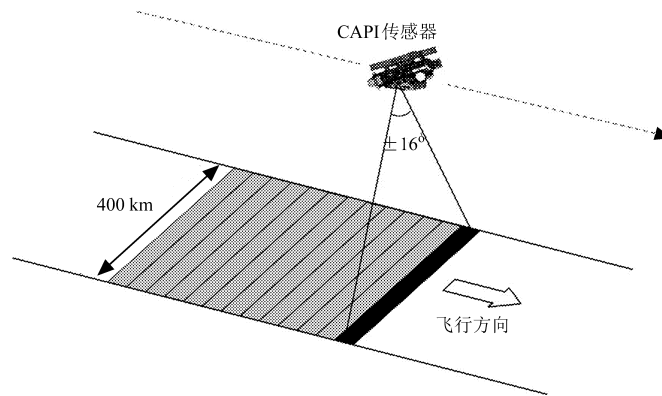


图 2 CAPI 传感器推扫式观测示意图

Fig.2 Push-broom observation of CAPI sensor onboard TanSat

2.3 摆扫式偏振仪

摆扫式偏振仪采用穿轨方向摆扫成像的观测模式(图 3)。与 DPC 等传感器的偏振片起偏机制不同,摆扫式偏振仪采用的是 Wollaston 棱镜起偏。其原理是: Wollaston 棱镜由两块直角方解石棱镜胶合而成,其光轴互相垂直,又都平行于各自的表面。由于不同线偏振光在方解石中传播速度的差异(即折射率不同),在胶合平面发生不同的折射而实现偏振分量的分离,形成按一定角度分开、光矢量互相垂直的线偏振光并出射。摆扫式偏振仪的代表性传感器包括美国原本预计于 2011 年发射的 GLORY 卫星(整流罩打开故障发射失败)上搭载的气溶胶偏振探测仪(Aerosol polarimetry sensor, APS),以及我国即将发射的环境 2 号卫星和大气环境监测卫星上搭载的大气颗粒物观测扫描偏振仪(Particulate observing scanning polarimeter, POSP)。

POSP 传感器是一台多光谱分孔径分振幅型耦合偏振探测的卫星载荷,用于探测气溶胶颗粒物、云的分布和特性。POSP 光学探测系统通过 3 组望远系统,测量目标的 4 个偏振解析方向(0°、45°、90°、135°),其中 2 组测量可见-近红外范围的 6 个通道(380, 410, 443, 490, 670, 865 nm),另 1 组测量短波红外范围的 3 个通道(1380, 1610, 2250 nm),实现可见光至短波红外范围 9 个通道的光谱偏振测量。POSP 的对地观测扫描视场为 $\pm 32.5^\circ$,穿轨扫描幅宽 820 km 情况下空间分辨率约为 6.4 km。POSP 的主要参数指标如表 3 所示。

摆扫式偏振仪的探测优势主要在于采用空间、时间、光谱上同步的测量模式,以此避免时序观测模式造成的不一致性,避免“假偏振”的现象。这种同步测量模式下所有通道观测的系统性误差是一致的,并

且偏振观测精度较高 (误差小于 0.005), 这主要是受益于其内置的多个星上定标装置, 持续维护其在轨的高精度辐射和偏振定标^[18]。

表 3 POSP 传感器主要参数

Table 3 Main technical parameters of POSP sensor

传感器指标	参数
幅宽 (km)	820
瞬时视场角	$\pm 32.5^\circ$
空间分辨率 (km)	6.4(星下点)
探测通道 (nm)(P 表示含偏振)	380 (P)、410 (P)、443 (P)、490 (P)、670 (P)、865 (P)、1380 (P)、1610 (P)、2250 (P)
偏振解析分量	0° 、 45° 、 90° 、 135°
偏振分量	I 、 Q 、 U
辐射定标误差	$\leq 5\%$
偏振定标误差	≤ 0.005

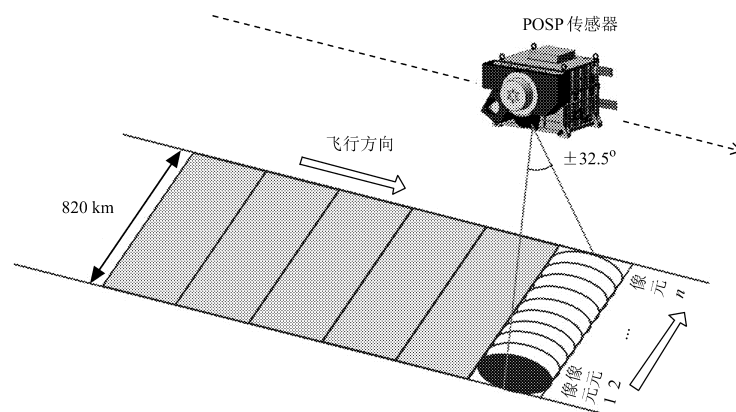


图 3 POSP 传感器摆扫式观测示意图

Fig.3 Whisk-broom observation of POSP sensor

2.4 多通道偏振辐射计

多通道偏振辐射计采用多光谱分孔径的强度 / 偏振辐射同步观测模式。该类传感器较多用于需要小型、轻便偏振载荷的场合, 通常设计为多通道、单角度、非成像式探测, 代表性传感器是我国即将发射的高分多模卫星上搭载的同步探测大气校正仪 (Synchronization monitoring atmospheric corrector, SMAC)。

高分多模卫星主要用于获取高空间分辨率地物目标的信息, 因此更容易受到大气成分的散射 / 吸收影响, 导致定性 / 定量遥感探测出现偏差, 需要进行高精度大气校正。与以往基于大气模型的校正方法不同, SMAC 利用同步测量的大气气溶胶、云、水汽等参数, 实现遥感影像的实时大气校正, 具有更好的校正效果^[19]。SMAC 的主要参数如表 4 所示, 其探测通道覆盖从可见光到短波红外的波段范围, 包括 550, 910, 1380 nm 的 3 个非偏振通道和 490, 670, 870, 1610, 2250 nm 的 5 个偏振通道, 其中, 除 2250 nm 通道偏振解析角度为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 外, 其他通道的偏振角度均为 0° 、 60° 、 120° ^[20]。偏振辐射计相比于面阵型成像系统, 消除了多路信息分时获取带来的观测误差; 更容易实现在轨高信噪比偏振探测;

采用单元探测器使得波段设置范围更宽,能够进一步提高大气特性参数的反演精度^[21-22]。

表 4 SMAC 传感器主要参数

Table 4 Main technical parameters of SMAC sensor

通道 (nm)	通道宽度 (nm)	是否偏振	偏振解析分量
490	20	偏振	0°、60°、120°
550	20	/	/
670	20	偏振	0°、60°、120°
870	40	偏振	0°、60°、120°
910	20	/	/
1380	40	/	/
1610	60	偏振	0°、60°、120°
2250	80	偏振	0°、45°、90°、135°

3 星载偏振传感器定标和真实性检验

大气成分(气溶胶、云等)参数的定量遥感是星载偏振传感器的关键应用目标。高精度的偏振探测是其中的关键。一般认为当目标偏振度为 0.2 时,偏振测量精度优于 0.005 的偏振数据,可以有效提高气溶胶反演精度^[23]。因此,发展高精度偏振定标技术,是大气参量准确反演和定量化遥感应用的重要基础^[24]。偏振定标建立了偏振传感器输出与已知入射光之间的定量关系,据此可以确定偏振传感器对矢量辐射传输物理参数的影响^[21]。根据第 2 节的介绍,星载偏振传感器在观测机制、载荷配置等方面有所差异,其需要的偏振定标方法也各有不同。

3.1 实验室定标

在星载偏振传感器发射之前,开展实验室辐射定标以确定传感器相关性能参数,评估其测量不确定度。通过详细完备的实验室定标,以保证偏振传感器的测量精度和可靠性。辐射定标包括绝对辐射定标和相对辐射定标。绝对辐射定标是将星载传感器测量的信号值(DN)转换为物理参量数值(表观辐射亮度等),定标内容包括检测传感器的光学响应动态范围、响应线性度和稳定性、带内/带外响应度、偏振敏感性、杂散光等参数,并评估其测量不确定度^[20]。相对辐射定标则是指在相同的入射条件下(相同入射波长、辐射亮度和偏振状态),检测传感器各像元响应之间的数值关系。

DPC 传感器的特点是高稳定性仪器和发射前高精度定标,星上没有定标系统,采用的实验室偏振定标系统能提供一定偏振度变化范围的出射光。实验室定标系统主要由两部分构成:积分球提供稳定的朗伯体光源,偏振度调节器改变出射光的偏振度。系统中偏振度输出值与调节器内部的玻璃平板折射率、倾斜角度等有关。在实验室定标系统中,可采用大动态范围可调偏振度光源^[25],通过积分球输出近似自然光,利用高精度起偏玻片堆实现偏振度精密调节,偏振定标误差可达到小于 0.02。

3.2 星上定标

通常在卫星发射过程及在轨运行期间,由于空间环境变化,星载传感器性能随着光学元件和电子器件可能出现衰变,发射前的实验室定标并不能解决传感器在轨运行时的定标^[26],需要利用卫星上搭载的星上定标器进行偏振定标,以保证传感器在轨运行的数据精度。POSP 传感器携带有星上定标器,包括线偏振定标器、非偏振定标器、太阳漫射板、太阳漫射板稳定性监测仪与暗陷阱等定标设备。其中,线偏振定标

器可提供标准偏振态的线偏振光, 作为星上偏振定标的偏振源; 非偏振定标器通过退偏器提供偏振定标的非偏振源; 偏振特性 (米勒矩阵和偏振双向反射分布函数) 已知的太阳漫射板, 用于绝对辐射定标, 获取定标系数^[18]。

我国即将发射的大气环境监测卫星上同时搭载了 DPC 和 POSP 两种类型的偏振仪, 组成“偏振交叉 (Polarization cross-fire, PCF)”探测模块, 可以实现星上偏振交叉定标, 即将带有星上定标器的 POSP 的高精度定标传递到 DPC 上, 提高 DPC 多角度偏振观测的定标精度。

3.3 在轨定标

DPC 等多角度偏振相机由于不具有星上定标装置, 需要采用观测具有特定且辐射和偏振特性目标的方法进行在轨定标, 传感器在轨运行期间定期对仪器的数据进行量化校准, 并及时修正传感器参数的衰变^[27]。在强度辐射定标方面, 一般采用太阳作为稳定的辐射光源, 利用洁净海水或耀斑具有的良好辐射特征来实现定标。在偏振定标方面, 需要已知偏振特性的地物或目标作为偏振源^[28]。一种是海洋耀斑定标, 其基本原理是当太阳光以布儒斯特角入射至平静海洋表面 (即发生镜面反射, 传感器观测到太阳耀斑) 时, 反射光线是完全线偏振光 (即偏振度为 1), 因此海面太阳耀斑可以作为有效偏振源实现偏振定标^[29]。另一种是深对流云场景定标, 利用水云在特定波段和散射角处出现零偏振的现象^[30], 通过传感器在特定角度下观测深对流云获得的数据, 计算出传感器的相关定标参数。

3.4 真实性检验

星载偏振传感器所获取的偏振观测量及大气参量产品, 其准确性需要精度更高的地基偏振观测数据和产品进行验证。法国 CIMEL 公司生产的地基太阳 - 天空辐射计 (扩展多波段偏振测量) 与星载传感器采用相同的遥感原理, 利用可见光 - 近红外通道探测整层大气的气溶胶特征, 气溶胶光学厚度探测和反演精度比卫星观测高约 1 个数量级, 广泛用于大气卫星产品的真实性检验。

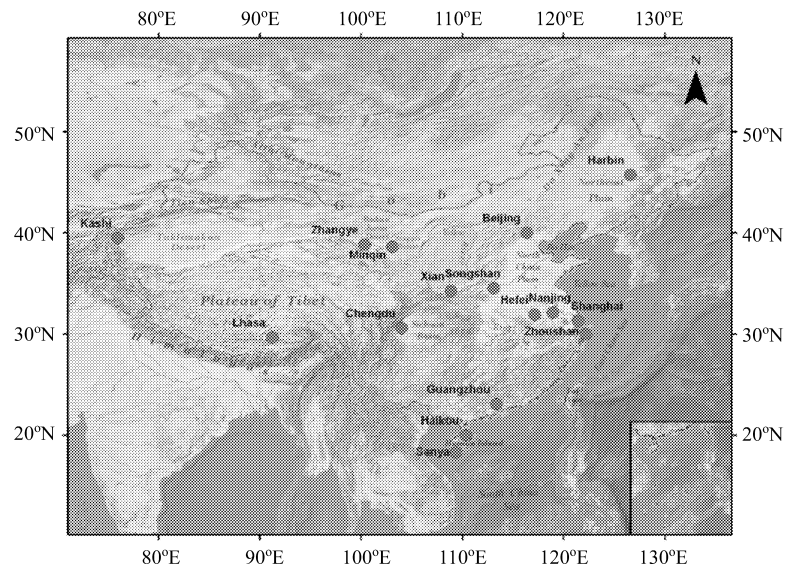


图 4 SONENT 观测网长期观测站点分布 (<http://www.sonet.ac.cn>)

Fig.4 Map of main long-term SONENT sites (<http://www.sonet.ac.cn>)

美国宇航局 NASA 建立的全球气溶胶自动观测网络 (Aerosol robotic network, AERONET)^[31] 在全球分布 500 多个站点, 均采用太阳 - 天空辐射计作为标准观测仪器, 是国际上开展气溶胶气候和环境效应研究、相关卫星产品验证的主要观测网络。然而, AERONET 在中国地区站点较少且主要集中在北京周

边, 而在中国中部、西南、西北等区域则少有分布。中国科学院建立的太阳 - 天空辐射计观测网 (Sun-sky radiometer observation network, SONET)^[32] 在中国多种典型区域 (重点城市群、乡村、沙漠、海洋、山地、高原等) 布设有 16 个长期观测站点, 如图 4 所示, 开展长期连续观测, 系统获取中国大气整层气溶胶的光学、物理、化学、辐射的时空分布特征^[33], 并应用于星载传感器的大气观测定标与真实性检验。与 AERONET 相比, SONET 观测网的特点在于其太阳 - 天空辐射计均为偏振型, 可以实现多波段偏振散射直接测量, 利用气溶胶的偏振敏感性获得偏振相函数、线偏振度等参数。对于大气观测类传感器, 太阳 - 天空辐射计的高精度大气产品可以作为验证基准; 对于地表探测类传感器, 太阳 - 天空辐射计可以提供关键辐射数据, 用于将大气层顶观测信号转化为地表反射率等关键参数。Ma 等利用 SONET 山区站点超过 1 年的观测验证了 MODIS 的气溶胶光学厚度产品, 发现不同算法 (暗目标法和深蓝算法)、不同空间分辨率 (3 km、10 km) 产品中, 暗目标法的 10 km 产品与地基观测对应程度最好^[34]。Breon 等利用地基观测数据验证了 POLDER 反演的全球陆地细粒子气溶胶光学厚度, 相关系数可达 0.84^[35]。

4 大气偏振遥感反演

4.1 遥感反演的数学模型

大气气溶胶组成和特征复杂, 用于描述其全面特性的参数包括光学厚度 (AOD, 总量)、细粒子比 (FMF, 粒子大小)、单次散射反照率 (SSA, 粒子散射特性)、复折射指数 (RI, 实部为气溶胶光学折射率, 虚部表示粒子光学吸收性)、体积谱分布 (VPSD, 粒径尺寸)、非球形比例 (SPH, 粒子形状) 等。其中 AOD、FMF、SSA 等光学参数还涉及到波段变化, 待反演参数的个数 (数量) 较多, 仅有光谱维度探测能力的传感器难以有效约束这些参数的同时反演。气溶胶参数卫星遥感的数学反演模型^[36] 为

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T, \quad (3)$$

式中 \mathbf{x} 为状态矢量 (待反演量), 可包括光学厚度、谱分布参数、复折射指数等气溶胶参数; \mathbf{y} 为观测矢量, 包括多光谱、多角度、强度和偏振观测; \mathbf{F} 为前向模型 (物理 / 数学模型), 将待反演参数和观测量联系起来; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为误差项, 包括观测误差和模型不确定性等。此外, 反演模型中还包括地表信息 (例如地表反射率和偏振反射率等参数)^[37]。如果待反演量 (状态矢量 \mathbf{x} 的元素个数 n) 高于观测量 (观测矢量 \mathbf{y} 的元素个数 m), 则可能导致病态反演问题。而增加偏振、多角度等维度的观测能力后, 有效观测量有成倍的增长, 使得反演状态矢量成为可能^[38-39]。例如, DPC 传感器对于同一个像元, 一般可以获得 9 个角度、3 个偏振波段、5 个非偏振波段的观测信息, 共计 126 个有效观测值 (如图 5 所示), 可满足气溶胶和云多参数同时反演的需求^[15]。

4.2 偏振遥感反演优势

偏振对气溶胶卫星遥感反演的贡献不仅在于扩充了观测量, 更重要的是偏振信息对气溶胶的粒径和形状等特征的探测具有独特的敏感性, 能够解决利用强度探测反演气溶胶信息的一些瓶颈问题。偏振探测的特点在于:

1) 偏振对大气散射信号较敏感, 而对地表变化相对不敏感, 因此偏振探测信号中大气部分的贡献较大^[40], 克服了强度辐射观测中大气信号远弱于地表信号从而难以提取 (特别是亮地表情况下) 的问题。

2) 作为独立于强度 (I) 的观测分量, 偏振可有效增加观测维度, 提高卫星观测丰度, 使观测信息倍增 (偏振分量 Q 、 U)。同时, 新增偏振观测可以对反演迭代过程提供更好的约束, 有效提高反演效率和参数反演精度。Dubovik 等利用 POLDER 传感器的偏振和强度观测, 同时反演了气溶胶光学厚度及单次散射反照率等参数^[41], 并通过地基遥感观测验证了反演的可靠性。

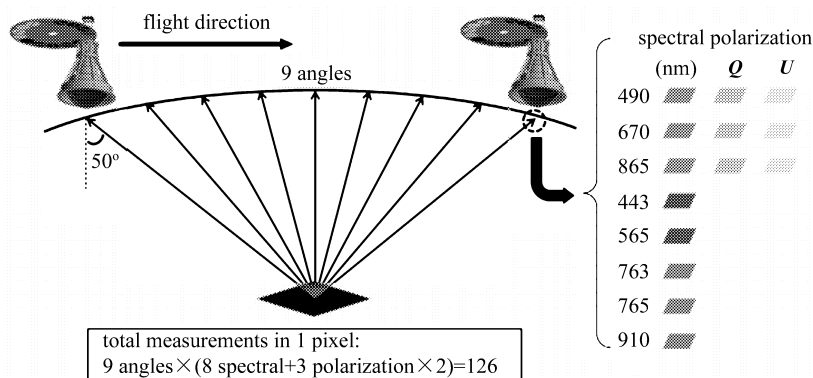


图 5 高分五号卫星 DPC 传感器多角度偏振观测信息含量示意图^[15]

Fig.5 Observing information content of multi-angle and polarimetry measurements of DPC sensor^[15]

3) 偏振观测对气溶胶和云粒子的粒径、形状等物理特征较为敏感, 利用偏振分量反演得到的偏振相矩阵元素能够提供一些独特的气溶胶光学特征。例如, 海盐气溶胶的偏振相矩阵元素随散射角增大具有显著的波段间差异, 与同样以粗模态为主的沙尘气溶胶显示出较明显区别^[42]。Li 等根据信息量分析显示, 利用最优化反演框架, DPC 传感器的观测数据可以反演得到气溶胶粗、细模态的体积谱参数, 同时获得地表双向反射分布模型参数^[15]。

4) 偏振信号主要来源于大气中细模态气溶胶, 对大气细颗粒物的光学特征较敏感, 因此在大气环境和气候变化研究中针对性更强。例如, POLDER 官方算法可获得细粒子气溶胶光学厚度^[43,10]; 一些研究表明直接利用 POLDER 细粒子光学厚度产品分析和评估大气污染情况更有效^[40,44]。

由于偏振遥感探测的这些优势, 星载偏振传感器的大气遥感应用已聚焦于气溶胶细颗粒物 (PM_{2.5}) 探测等研究。一些研究利用 POLDER 的偏振观测反演了细粒子气溶胶光学厚度^[43,10], 并且全球尺度的验证显示与地基同步观测较为一致^[35]。此后, 随着相关研究工作的推广, 一些研究将已有气溶胶模型应用到 POLDER 偏振数据中尝试反演气溶胶总光学厚度, 取得了一定的结果^[45-48]。Dubovik 等利用 POLDER 多波段、多角度的偏振和强度信息, 结合气溶胶参数先验知识进行反演建模, 运用统计最优化的反演方法同时反演了气溶胶的光学厚度、复折射指数、单次散射反照率、粒子谱分布、气溶胶标高以及地表的相关参数^[41], 证明了多角度偏振遥感探测在气溶胶特性综合反演中不可替代的独特优势。

5 偏振大气遥感的应用

依赖于高精度的强度和偏振辐射测量, 以及反演获得的气溶胶、云、水汽等大气成分的关键光学、微物理参数, 偏振大气遥感开辟并改进了多个大气遥感领域的应用。除了在数值天气预报、环境污染预报等方面获得重要应用之外, 由于其高精度和监测多个气溶胶高级参数的能力, 偏振大气遥感在多个领域研究前沿也获得重要应用。

5.1 大气细颗粒物卫星遥感

细颗粒物 PM_{2.5} 是主要大气污染物之一, 特别是在秋冬季节由燃煤排放、秸秆焚烧等造成的大气复

合污染,使得细颗粒物成为中国众多大中城市的首要空气污染物。近 5~10 年来,随着地面环境监测站网的建设,近地面 PM_{2.5} 监测能力有所发展,然而利用卫星遥感监测重点区域甚至全国范围的 PM_{2.5} 技术还有待进一步的提高。在近期提出的近地面 PM_{2.5} 卫星遥感模型 PMRS^[49-50] 中,细粒子比例 FMF 是关键参数之一,需要从卫星传感器探测的气溶胶总光学厚度中分离出细粒子的贡献,从而实现大气细颗粒物浓度的反演。MODIS 传感器虽然已能提供较为准确的总光学厚度,但其获得的 FMF 往往包含大量的无效值^[51],严重影响卫星遥感估算 PM_{2.5} 的精度。

Zhang 等利用 POLDER 传感器同时具有强度和偏振信息的多角度多波段探测能力,发展了基于偏振传感器反演 FMF 的方案^[39],即分别利用强度和偏振辐射观测反演大气气溶胶总光学厚度和细模态光学厚度,并据此获得细粒子比例 FMF。将该算法应用到东亚地区,反演得到了空间连续覆盖的 AOD 和 FMF 结果,并通过地基 AERONET 高精度数据验证了反演的 AOD 和 FMF。验证结果显示,卫星反演与地基观测有较好的一致性,特别是 FMF,在数据有效性和反演精度上均优于 MODIS-C6 版本的 FMF 产品。因此,星载偏振传感器可以为全球 PM_{2.5} 卫星遥感估计和大气环境污染评估等领域的研究提供良好的观测基础。

5.2 关键气候因子观测及评估

气溶胶辐射效应的不确定性是气候变化评估中最大的不确定性来源,特别是一些具有强光学吸收特性的细模态气溶胶颗粒物,例如来源于化石燃料和生物质燃烧排放的黑碳和棕色碳等^[52-53]。作为一次细颗粒物的重要组成成分,这些细模态气溶胶具有显著的辐射强迫作用。最新的 IPCC 报告估计,由化石燃料和生物燃料燃烧排放的黑碳的直接辐射强迫约为 $+0.4 \text{ W/m}^2$,但其不确定性高达 $200\%(+0.8 \text{ W/m}^2)$ ^[3]。由于大气模式涉及到复杂的物理过程和化学反应,同时排放清单的不确定性较大,因此迫切需要同化卫星观测数据和产品来约束和改善其模拟结果。目前,获取准确可靠的气溶胶卫星产品,尤其是描述气溶胶类型/模型的光学和物理参数(例如气溶胶辐射效应估计的关键参数单次散射反照率),已被认为是改进气候变化评估不确定性的关键途径。

Dubovik 等利用 POLDER 传感器的多角度、多波段偏振观测,提出基于多源统计优化的气溶胶多参数反演算法,反演获得了气溶胶光学厚度、单次散射反照率、复折射指数、谱分布等参数,其中 AOD 和 SSA 反演结果通过 AERONET 站点的同步观测进行了验证^[41]。结果显示,当 AOD 较高 (>0.5) 时,SSA 的卫星反演结果与地基观测一致性较好^[54]。基于卫星平台偏振传感器获得可靠的 SSA、AOD 等气候变化关键因子,可为大气气溶胶辐射效应的准确估计提供数据基础,改善全球气候变化评估。

5.3 对地观测大气校正

量化应用是目前卫星遥感发展的主要方向,对于陆表/海表探测载荷,精准的大气校正是实现定量遥感的必要环节,传感器探测的辐射信号需扣除大气程辐射的影响后才能表现地物目标的反射特性。大气校正中真实大气的气溶胶光学厚度、气溶胶类型等可能有复杂的变化,而使用经验性、固化的模型可能无法反映实际大气气溶胶状况,最终影响大气校正效果。

基于辐射传输模型 6S 对卫星多光谱影像进行大气校正的研究显示,采用同步实测参数建立的气溶胶模型,对地物光谱反射率的恢复效果在各个波段均显著优于使用 6S 的固有模型,说明实测气溶胶参数对高精度大气校正的必要性^[55]。利用星载偏振传感器对多维度气溶胶参数的探测能力,获得近实时的气溶胶模型,或者进一步在对地观测平台上搭载偏振大气同步校正仪^[56],提供实时大气探测参数以实现主载荷的同步大气校正,是卫星遥感定量化探测的发展趋势之一。

5.4 极端环境事件监测

火山喷发、沙尘暴等突发自然环境事件, 可在短时间内将大量气溶胶颗粒物喷射到地球大气的对流层、平流层以及人类居住区域, 造成严重的交通、健康以及环境问题。因此, 从太空监测这些极端环境事件具有重要的意义。例如, 2010 年冰岛 Eyjafjallajökull 火山爆发, 产生的火山灰导致整个欧洲空中航路的瘫痪。欧洲火山灰咨询中心 VAAC 强调了从太空测量气溶胶的空间分布及其含量, 提出获取三级的火山灰浓度分布图, 这非常有助于在这种情况下空中交通管制工作的开展。为了进一步制定飞行计划, 还需要精确预测火山灰分布的演变趋势。这些需求都需要先进的气溶胶遥感技术来提供支持, 不仅需要提高 AOD 获取的精度, 还需要同时获得颗粒物垂直分布高度、颗粒物粒径尺寸等关键参数。星载偏振遥感器已经证明能够从太空获得这些重要的气溶胶高级参数^[41]。

沙尘暴是沙漠、干旱等区域频发的自然环境事件。在沙尘源区, 沙尘暴发生时可造成地表能见度急剧降低, 并伴随多种次生灾害。在大气风场和环流的作用下, 沙尘暴使得大量地表矿物颗粒被抬升至较高的高度, 并传输至几百甚至数千千米外。在沙尘暴传输和评估模型中, 悬浮颗粒物尺寸等参数至关重要, 因此, 偏振遥感对气溶胶粒子大小敏感的特性, 能够为沙尘暴的监测和应对提供关键的卫星观测数据。

5.5 生态效应评估

气溶胶通过影响地球大气中的辐射分布, 对植物光合作用产生影响, 并以此改变整个生态系统的碳收支。总体而言, 气溶胶通过其散射作用, 增强了天空漫射辐射, 促进光合作用, 增加了整个生态系统的碳吸收, 这被称为气溶胶施肥效应。实际上这一过程直接依赖于大气中气溶胶的含量及其特性: 适量气溶胶对直接辐射的削弱比较小, 导致较弱的光合损耗, 而过量气溶胶对直接辐射的削弱很强烈, 会导致较强的光合损耗。初步分析显示, 对于中国区域夏季, 晴空条件下, 气溶胶可导致局地生态系统净初级生产力增加 35%, 变化范围在 20%~60% 之间, 强烈依赖于气溶胶的含量及其特性参数^[57]。为了准确评估这些过程, 需要在生态系统的层面对区域和全球气溶胶多个关键参数进行观测和评估, 多角度偏振星载传感器是目前能够提供这些高精度、丰富观测数据和气溶胶参数产品的首选观测手段。

6 结 论

星载偏振传感器在探测地球系统与电磁波交互作用的辐射强度的同时, 增加了对电磁波方向特性的同时探测, 大幅提高了卫星遥感探测的丰度和精度。根据敏感性测试, 偏振遥感能够有效改进对大气中特性复杂的气溶胶和云等成分的探测能力, 增加可反演参数的种类和精度。基于环境、气象、灾害、生态、对地观测等多个领域的应用需求, 我国已经研发了多角度偏振相机、推扫式偏振成像仪、摆扫式偏振仪、多通道偏振辐射计等星载偏振传感器。针对这些仪器的不同特性, 开展了遥感方法和技术研究, 应用于大气细颗粒物卫星遥感、关键气候因子观测及评估、对地观测大气校正、极端环境事件监测、生态效应评估等领域。未来, 多颗搭载有偏振传感器卫星的陆续发射, 将为我国大气环境监测以及生态文明建设提供重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] Penner J E, Chuang C C, Grant K. Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosols [J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14(12): 839-851.

- [2] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al.* Atmosphere-Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, **294**(5549): 2119-2124.
- [3] Boucher O, Randall D, Artaxo P, *et al.* Clouds and aerosols [R]. in: Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013: 571-657.
- [4] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 826-840(in Chinese).
石广玉, 王 标, 张 华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 826-840.
- [5] Zhang Xiaoye. Aerosol over China and their climate effect [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(1): 12-16(in Chinese).
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(1): 12-16.
- [6] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, **102**(27): 51-67.
- [7] Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, *et al.* Multi-angle imaging spectro radiometer (MISR) instrument description and experiment overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1072-1087.
- [8] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, *et al.* Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(12): 2642-2650.
- [9] Bertrand F, Guillaume B, Bruno L, *et al.* PARASOL in-flight calibration and performance [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5435-5451.
- [10] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, *et al.* Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, **4**(7): 1383-1395.
- [11] Marbach T, Riedi J, Lacan A, *et al.* The 3MI mission: multi-viewing-channel-polarisation imager of the EU-METSAT polar system: second generation (EPS-SG) dedicated to aerosol and cloud monitoring [C]. *Polarization Science and Remote Sensing VII. International Society for Optical and Photonics*, 2015, **9613**: 96310.
- [12] Thanyapraneedkul J, Muramatsu K, Daigo M, *et al.* A vegetation index to estimate terrestrial gross primary production capacity for the global change observation mission-climate (GCOM-C)/second-generation global imager (SGLI) satellite sensor [J]. *Remote Sensing*, 2012, **4**(12): 3689-3720.
- [13] Wang Han, Sun Xiaobing, Sun Bin, *et al.* Evaluation of land surface polarization models based on airborne advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 252-259(in Chinese).
王 涵, 孙晓兵, 孙 斌, 等. 基于航空多角度偏振辐射计遥感数据评估陆地表面偏振反射模型 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(1): 252-259.
- [14] Qie L, Li Z, Sun X, *et al.* Improving remote sensing of aerosol optical depth over land by polarimetric measurements at 1640 nm: Airborne test in North China [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(5): 6240-6256.
- [15] Li Z, Hou W, Hong J, *et al.* Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, **218**(7): 21-37.

- [16] Chen X, Wang J, Liu Y, *et al.* Angular dependence of aerosol information content in CAPI/TanSat observation over land: Effect of polarization and synergy with A-train satellites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **196**: 163-177.
- [17] Yang Bin, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, *et al.* Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(5): 1126-1134(in Chinese).
杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标 [J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(5): 1126-1134.
- [18] Yang Hongchun, Yang Benyong, Song Maoxin, *et al.* Onboard polarimetric calibration method of particulate observing scanning polarimeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(11): 1110002(in Chinese).
杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等. 星载偏振扫描仪的星上偏振定标方法 [J]. *中国激光*, 2018, **45**(11): 1110002.
- [19] Ma Yan, Li Zhengqiang, Li Hao, *et al.* Influence of aerosol model in the atmospheric correction of satellite images—a case study over Tianjin Region [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, **29**(3): 410-418 (in Chinese).
马葵, 李正强, 李浩, 等. 卫星影像大气校正中气溶胶模型的影响分析 — 以天津地区为例 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, **29**(3): 410-418.
- [20] Kang Qing. *Research on system-level radiometric and polarized calibration methods in laboratory of polarization remote sensors* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of University of Science and Technology of China, 2018(in Chinese).
康晴. 偏振传感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2018.
- [21] Fan Huimin, Kang Qing, Qiu Zhenwei, *et al.* Polarization calibration for multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(2): 275-283(in Chinese).
范慧敏, 康晴, 裘桢炜, 等. 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法 [J]. *光学学报*, 2017(2): 275-283.
- [22] Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Sun Bin, *et al.* Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 652-659(in Chinese).
胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(3): 652-659.
- [23] Zhang Junqiang, Xue Chuang, Gao Zhiliang, *et al.* Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future [J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(5): 679-698(in Chinese).
张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势 [J]. *中国光学*, 2015, **8**(5): 679-698.
- [24] Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, *et al.* Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1153-1158(in Chinese).
宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1153-1158.
- [25] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, *et al.* Test and uncertainty analysis of reflectance source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(4): 0412003(in Chinese).
康晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析 [J]. *光学学报*, 2015, **35**(4): 0412003.
- [26] Zheng Xiaobing. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, **32**(5): 36-43(in Chinese).
郑小兵. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(5): 36-43.

- [27] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, *et al.* Results of POLDER in-flight calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1550-1566.
- [28] Wang Yi, Hong Jin, Sun Xiaobing, *et al.* Technique of polarization remote sensing instrument for aerosol measurements and its onboard calibration [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(2): 131-137(in Chinese).
王 羿, 洪 津, 孙晓兵, 等. 用于气溶胶探测的偏振遥感器及其在轨定标技术 [J]. *大气与环境光学学报*, 2014, **9**(2): 131-137.
- [29] Goloub P, Toubbe B, Herman M, *et al.* In-flight polarization calibration of POLDER [C]. *Advanced and Next-Generation Satellites II*, 1997, **2957**: 299-311.
- [30] Goloub P, Deuze J L, Herman M, *et al.* Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(1): 78-88.
- [31] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**(1): 1-16.
- [32] Li Zhengqiang, Li Donghui, Li Kaitao, *et al.* Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, **19**(3): 495-519(in Chinese).
李正强, 李东辉, 李凯涛, 等. 扩展多波长偏振测量的太阳 - 天空辐射计观测网 [J]. *遥感学报*, 2015, **19**(3): 495-519.
- [33] Li Z Q, Xu H, Li K T, *et al.* Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of sun-sky radiometer observation network (SONET) measurements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, **99**(4): 739-755.
- [34] Ma Y, Li Z, Li Z, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over mountains in central China based on a sun-sky radiometer site of SONET [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(2): 1-14.
- [35] Bréon F M, Vermeulen A, Descloitres, J. An evaluation of satellite aerosol products against sunphotometer measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(12): 3102-3111.
- [36] Hou W, Wang J, Xu X, *et al.* An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 2. Information content analysis for aerosol parameters and principal components of surface spectra [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 2017, **192**: 14-29.
- [37] Nadal F, Bréon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1709-1718.
- [38] Waquet F, Le'on J F, Cairns B, *et al.* Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(6): 1228-1236.
- [39] Zhang Y, Li Z, Qie L, *et al.* Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over East Asia [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(5): 1-18.
- [40] Fan X, Goloub P, Deuzé J-L, *et al.* Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 697-707.
- [41] Dubovik O, Herman M, Holdak, A, *et al.* Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, **4**(5): 975-1018.
- [42] Li Li. *Retrieval of Elements of the Scattering Phase Matrix of Aerosol Particles Based on the Multi-Angle Multi-Spectral Stokes Parameter Measurements* [D]. Beijing: Doctorial Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese).

- 李 莉. 基于多角度多光谱 Stokes 参数测量的气溶胶散射相矩阵元素反演研究 [D]. 北京: 中国科学院大学博士论文, 2016.
- [43] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surface from POLDER-ADEOS — 1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, **106**(D5): 4913-4926.
- [44] Chen H, Cheng T, Gu X, *et al.* Evaluation of polarized remote sensing of aerosol optical thickness retrieval over China [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(10): 13711-13728.
- [45] Cheng T H, Gu X F, Xie D H, *et al.* Simultaneous retrieval of aerosol optical properties over the Pearl River Delta, China using multi-angular, multi-spectral, and polarized measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(7): 1643-1652.
- [46] Wang Z, Chen L, Li Q, *et al.* Retrieval of aerosol size distribution from multi-angle polarized measurements assisted by intensity measurements over East China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **124**(124): 679-688.
- [47] Zhang Y, Li Z, Qie L, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth using the empirical orthogonal functions (EOFs) based on PARASOL multi-angle intensity data [J]. *Remote Sensing*, 2017, **2017**(9): 1-12.
- [48] Wang S, Fang L, Zhang X, *et al.* Retrieval of Aerosol Properties for Fine/Coarse Mode Aerosol Mixtures over Beijing from PARASOL Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(7): 9311-9324.
- [49] Zhang Y, Li Z. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentration near the ground from satellite observation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **160**: 252-262.
- [50] Li Z, Zhang Y, Shao J, *et al.* Remote sensing of atmospheric particulate mass of dry PM_{2.5} near the ground: Method validation using ground-based measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 59-68.
- [51] Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, *et al.* Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(21): 10399-10420.
- [52] Xie Y, Li Z, Li L, *et al.* Aerosol optical, microphysical, chemical and radiative properties of high aerosol load cases over the Arctic based on AERONET measurements [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 1-9.
- [53] Schuster G L, Dubovik O, Arola A. Remote sensing of soot carbon-Part 1: Distinguishing different absorbing aerosol species [J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2016, **15**(9): 13607-13656.
- [54] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, **105**(D8): 9791-9806.
- [55] Ma Yan. *Synchronous atmospheric correction of high spatial resolution remote sensing image* [D]. Beijing: Doctorial Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese).
- 马 奕. 高空间分辨率光学遥感卫星同步大气校正研究 [D]. 北京: 中国科学院大学博士论文, 2016.
- [56] Li Zhengqiang, Chen Xingfeng, *et al.* An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellite [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology*, 2018, **10**(1): 6-15(in Chinese).
- 李正强, 陈兴峰, 等. 光学遥感卫星大气校正研究综述 [J]. *南京信息工程大学学报*, 2018, **10**(1): 6-15.
- [57] Yue X, Unger N. Aerosol optical depth thresholds as a tool to assess diffuse radiation fertilization of the land carbon uptake in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 1329-1342.