

遭文章编号: 1672-8785(2019)01-0001-06

多角度偏振探测技术

殷德奎

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 介绍了偏振遥感技术的用途以及国内外发展情况。详细论述了国内第一台空间多角度偏振探测仪器——天官二号多角度偏振探测仪的技术方案、偏振定标试验、航空飞行试验和在轨飞行试验, 并给出了评价结论。

关键词: 大气探测; 多角度观测; 偏振探测

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.001

Multi-Angle Polarization Detection Technology

YIN De-kui

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The purpose of multi-angle polarization detection technology and its developing status at home and abroad are presented. The technical scheme, polarization calibration test, air flight test and in-orbit flight test of the TG-2 multi-angle polarization imager, the first space multi-angle polarization detection instrument of our country, are described in detail. The evaluation conclusion is given.

Key words: atmospheric detection; multi-angle observation; polarization detection

0 偏振探测技术的用途

作为光的固有属性之一, 偏振是指光波振动方向相对于传播方向的不对称性。地球表面上以及大气中的任何目标物在与光相互作用的过程中, 由于目标物的表面状态、内部结构和观测角度不同, 都会产生由其自身性质决定的特征偏振, 即光的偏振状态变化包含了这些作用对象的物理状态信息。图 1 所示为普通图像与偏振图像的对比情况。

国外长期研究结果表明, 光的偏振对大气

粒子特性具有独特的敏感性。偏振遥感技术可以解决传统光学遥感所无法解决的大气粒子精细结构探测问题。通过采用卫星偏振遥感手段, 可以获得卷云和水云的光学厚度、粒径大小、水平结构和云的类别, 气溶胶光学厚度、气溶胶指数、有效半径和折射指数, 晴空大气水汽柱含量等参数, 从而满足数值天气预报、气候监测和空气质量监测等需求。

西方多个国家已经开展了红外偏振成像的军事应用研究。结果表明, 偏振成像由于可获

收稿日期: 2018-12-13

作者简介: 殷德奎(1964-), 男, 安徽人, 博士, 研究员, 长期从事红外技术研究, 涉及红外辐射特性研究、红外图像处理、红外系统研制等, 负责研制的风云三号 B 星红外分光计、C 星红外分光计和天官二号多角度偏振探测仪成功实现在轨稳定运行和业务应用, 先后获得多项科技成果奖励。

E-mail: yin@mail.sitp.ac.cn

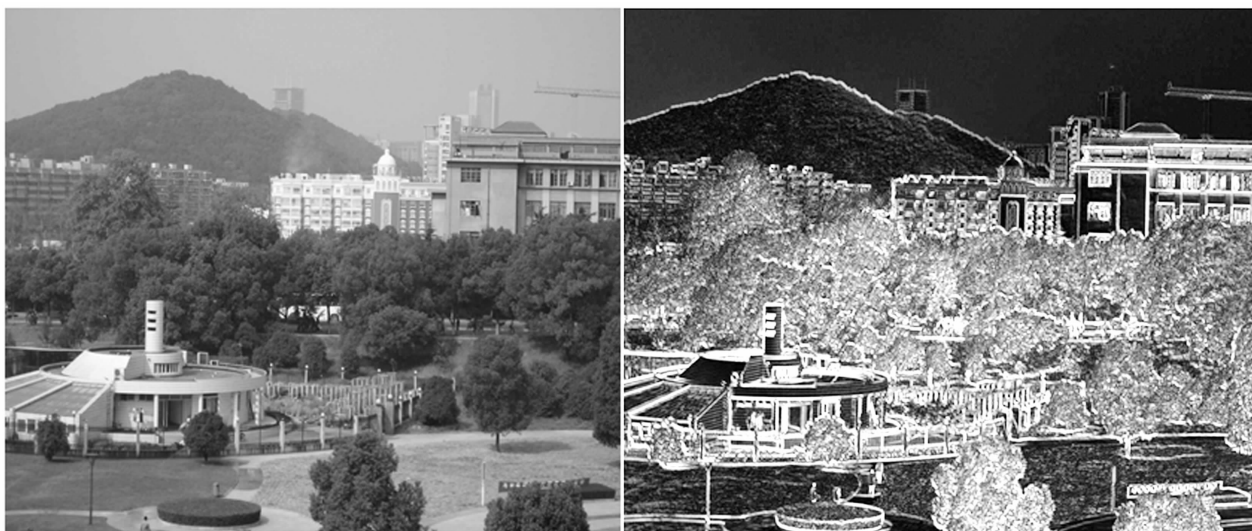


图 1 普通图像(左)与偏振图像(右)

取额外的偏振信息而对目标识别具有明显的应用价值；它能够增强图像对比度和区分目标特征，并具有较强的背景抑制作用，为及时发现敌方目标提供了一种有效手段。

辐射探测仪器通常不会考虑观测对象的偏振状态变化以及仪器自身的偏振效应。而这些因素都会导致仪器测量值受到观测对象偏振状态的影响，进而降低辐射探测精度。偏振探测仪器所获得的目标偏振辐射特性，可以应用于其它遥感仪器的辐射测量模型的建立和偏振效应的订正，从而消除这一测量误差，由此进一步提高仪器的探测精度，最终体现出了不同观测仪器的协同应用。

1 国内外大气偏振遥感发展情况

在卫星大气探测方面，国外开展了长期的卫星偏振仪器研制和应用工作。

法国空间研究中心(CNES)研制的偏振探测仪 POLDER 通过探测太阳辐射经地球与大气反射的偏振效应，得到云、气溶胶、地表和海洋的性质数据，从而帮助人们探讨地球大气及陆地和海洋生物圈的相互影响。该仪器工作在可见光-近红外波段，先后于 1996 年 8 月 17 日、2002 年 12 月 14 日和 2004 年 12 月 18 日升空，并获得了丰富的探测资料和应用数据。

目前欧洲已在研制下一代多角度、多谱段

偏振探测仪器 3MI。该仪器用于数值天气预报、气溶胶特性监测、大气化学与空气质量监测等方面，计划装载在 2020 年~2040 年欧洲第二代业务气象卫星 MetOP-SG 上。3MI 在 POLDER 的基础上，增加了短波红外偏振通道，能够获取极为丰富的云、气溶胶和地表探测资料。

美国从 20 世纪 70 年代开始持续研究了多种偏振遥感仪器，其中地球观测扫描偏振计 EOSP 可以测量云的特性、气溶胶大小与光学厚度，探索地表特性与植物及土壤性质的关系，以及对地球观测仪器的海洋与陆地测量数据进行大气订正。气溶胶偏振仪 APS 于 2011 年升空，主要用于测量气溶胶浓度、粒子尺寸、化学成分、形状和云参数，重点研究气溶胶对气候、地球辐射收支以及云的影响。

中国科学院上海技术物理研究所从 20 世纪 90 年代以来先后承担了多个偏振技术型号和预先研究项目，涉及从可见光直至长波红外的光谱波段。主要承担的型号研制项目包括神舟三号飞船卷云探测仪和天宫二号多角度偏振探测仪。其中，卷云探测仪用于获取卷云、水汽、光学厚度等资料，具有 $0.936\ \mu\text{m}$ 全偏振探测功能。它于 2002 年 3 月 25 日升空，是国内第一台具有偏振探测功能的空间遥感仪器。

多角度偏振探测仪用于获取卷云、云顶高度、云相态、云粒子尺寸、气溶胶特性和水汽柱含量等资料。它于 2016 年 9 月 15 日升空, 是国内第一台空间多角度偏振探测仪器。

与此同时, 国内其他研究机构也开展了偏振技术研究。比如, 2016 年 12 月发射的碳卫星和 2018 年 5 月发射的高分五号卫星分别搭载了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的偏振遥感仪器。

2 多角度偏振探测技术

多角度偏振探测仪装载在天宫二号空间实验室上, 可以获取关于云、气溶胶和水汽参数等的应用产品, 填补了空间多角度偏振探测技术的空白。该仪器从 2005 年开始方案论证。此项目由中国科学院上海技术物理研究所与应用研究单位共同提出。

多角度偏振探测仪(见图 2)采用“广角光学系统+偏振检测滤光轮+面阵探测器”方案, 每个偏振探测通道进行 3 次偏振检测, 获取描述偏振光的物理量。该仪器的主要组成部分包括广角光学镜头、电机驱动的偏振检测滤光轮、面阵探测器及其驱动电路、时序采集电路、电机驱动控制电路、温度控制电路、接口电路和机械结构件等。

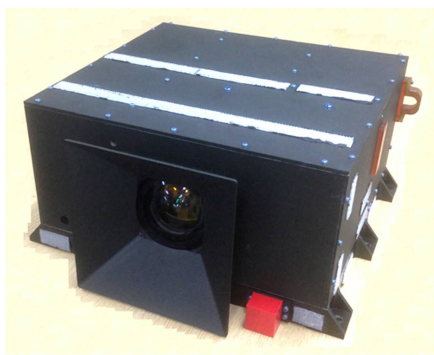


图 2 多角度偏振探测仪

表 1 列出了多角度偏振探测仪的主要技术指标。该仪器的主要创新点包括大视场偏振光学、多光谱与多偏振检测、新型偏振定标等技术。

表 1 多角度偏振探测仪的主要技术指标

参数	描述
光谱范围	550~920 nm, 3 个偏振探测通道
地面像元分辨率	≤ 3 km
幅宽	≥ 770 km
多角度个数	≥ 12
在轨动态 MTF	≥ 0.2
绝对辐射定标精度	优于 7%
偏振探测精度	优于 2%

3 偏振定标试验和航空飞行试验

3.1 偏振定标试验

为了定量描述遥感仪器对入射光的响应测量关系, 仪器产品交付前, 在地面实验室开展了几何定标、辐射定标和偏振定标试验。

关于偏振定标技术的主要创新性研究工作如下: (1) 确立了“通用辐射源+标准偏振器+偏振计量”偏振定标方案, 自主建立了一种输出偏振态稳定可控的标准偏振辐射源。(2) 完成了偏振定标试验, 获得了偏振探测仪器对偏振光的响应方程 $S=MI$ 。结果表明, 测量误差优于 1%。该研究为仪器的在轨应用奠定了基础, 也为后续的定量化工作提供了借鉴。

图 3 所示为多角度偏振探测仪的偏振响应曲线。可以看出, 仪器的偏振响应曲线与理论模型是一致的。

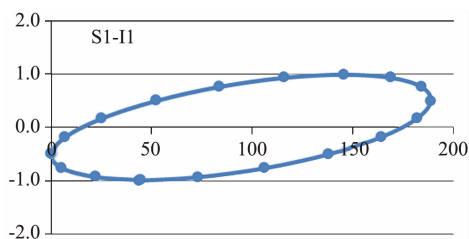


图 3 偏振响应曲线(横坐标为 I , 纵坐标为 S)

2015 年 8 月, 偏振定标试验工作通过了使用单位和应用系统总体单位的专家参加的总结评审。评审意见认为, 定标试验数据完整, 方法合理, 结果可信, 性能符合任务书要求, 可以提供用户使用。目前尚未见到与这一研究成果类似的国内公开报道。

3.2 航空飞行试验

2015 年 10 月中旬至 11 月初, 在山东沿海使用仪器初样产品进行了航空飞行试验(共计飞行 4 架次 17 小时)。如图 4 所示, 观测区域为北海海陆交界区域, 巡航高度为 3600 ~ 3800 m。我们获得了大量有益的大气、地表和海洋观测数据。与此同时, 应用单位组织了地面同步气象观测。

在航空飞行试验中, 仪器捕捉到水云在 140° 散射角附近的环状虹特征, 表明它具有识

别云相态的功能; 捕捉到晴空洋面上的太阳耀斑环状偏振反射特征, 体现了其分离水体菲涅尔反射和漫反射的能力; 展示了海陆目标的多光谱特征。图 5~图 7 分别为陆地辐射图像和陆地偏振图像、云观测图像、洋面太阳耀斑与海岸观测图像。

通过航空飞行试验, 获得了仪器的近似速高比对地观测数据, 检验了仪器的工作可靠性与性能(有利于演练数据处理流程), 为正样的在轨飞行测试与应用奠定了技术基础。

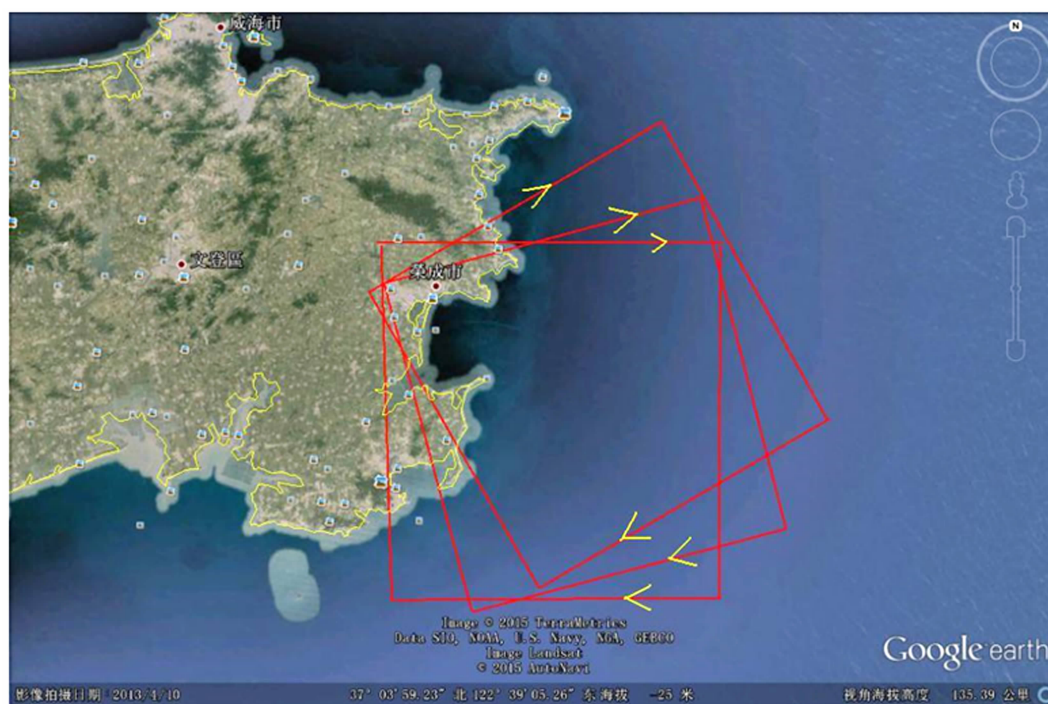


图 4 试验飞行路线的示意图

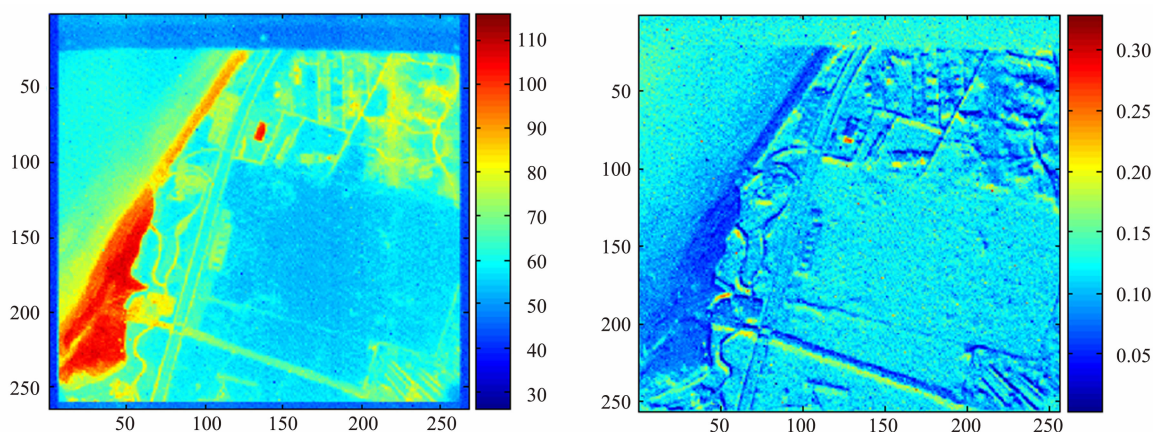


图 5 陆地辐射图像(左)和陆地偏振图像(右)

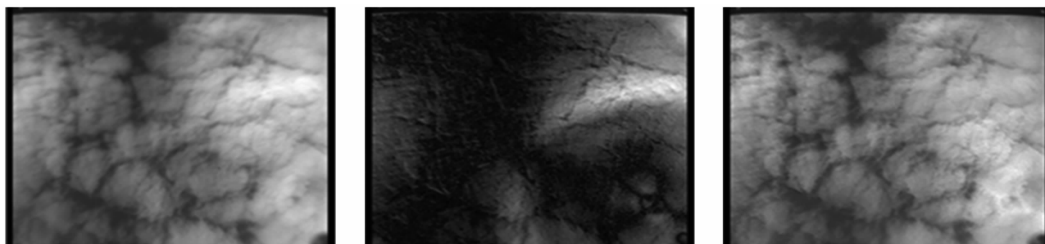


图 6 云观测图像

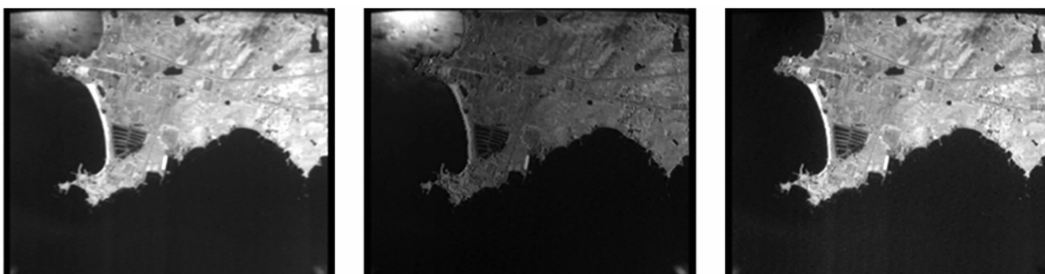


图 7 洋面太阳耀斑与海岸观测图像

4 在轨飞行试验与结论

自 2016 年 9 月 15 日随天宫二号空间实验室发射并在轨运行以来, 多角度偏振探测仪工作正常、性能稳定, 进行了上千次对地成像; 重点对海洋层积云、深远海寡养区、热带深对流云、沙漠、中国及周边区域等全球重点关注区域进行了观测, 并进行了云参数和气溶胶反演试验。图 8~图 13 所示分别为对地观测区域的示意图、多角度观测的偏振图像、云的辐射图像和偏振图像、太阳耀斑观测图像、气溶胶细粒子光学厚度(AOD)的反演结果、云顶高度(气压)分布的反演结果。

用户认为, 天宫二号多角度偏振探测仪获得了大量观测资料, 并成功验证了以下几项主要功能: (1) 观测到丰富的海陆目标反射特征, 验证了仪器的多角度、多光谱偏振检测能力; (2) 捕获到水云偏振光反射所特有的环状虹特征, 表明仪器具有不依赖于温度测量而识别云相态的功能; (3) 捕获到晴空洋面上的太阳耀斑环状偏振反射特征, 体现了多角度偏振测量在分离菲涅尔反射和漫反射贡献上的作用。在轨测试结果表明, 仪器的技术指标符合研制要求。

2017 年 7 月 3 日, 使用单位在北京组织召

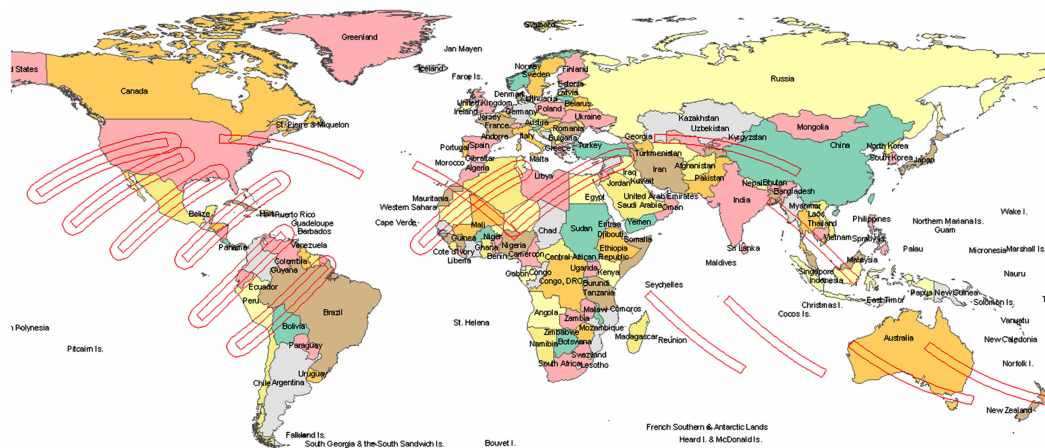


图 8 对地观测区域的示意图

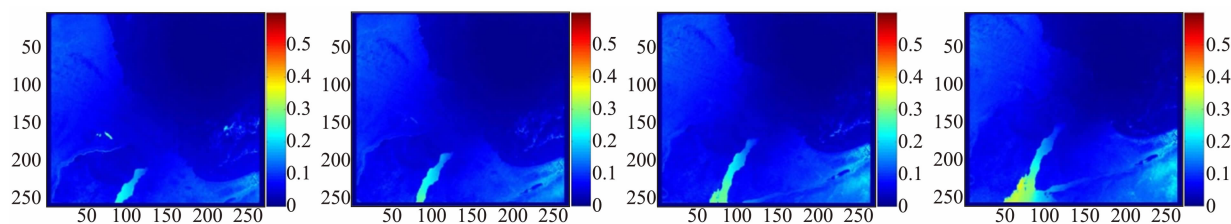


图 9 多角度观测的偏振图像

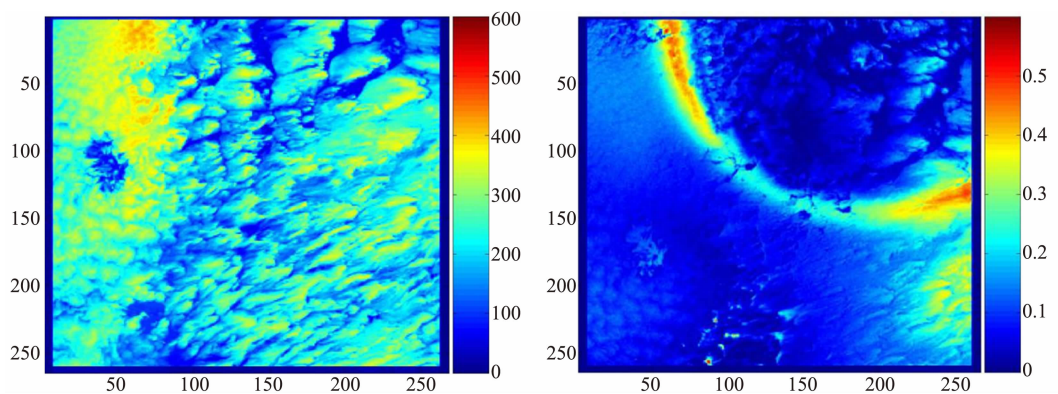


图 10 云的辐射图像(左)和偏振图像(右)

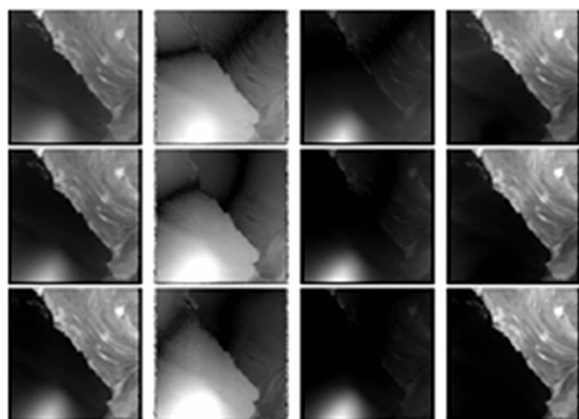


图 11 太阳耀斑观测图像

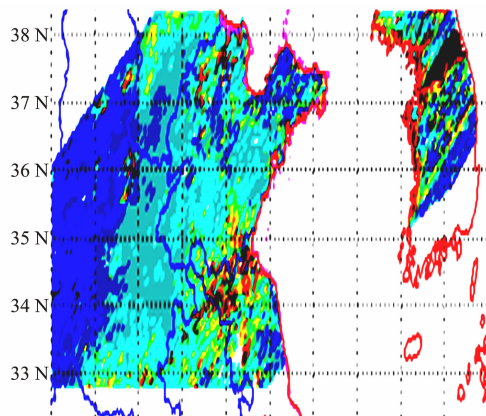


图 12 气溶胶细粒子光学厚度(AOD)的反演结果

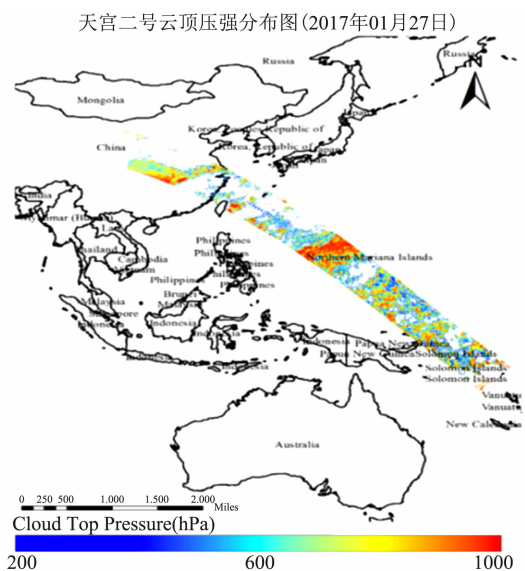


图 13 云顶高度(气压)分布的反演结果

开了多角度偏振探测仪在轨指标评价评审会。参加会议的专家主要来自于国内的应用研究单位。形成的评审意见认为,“多角度偏振探测仪作为国内首个在轨运行的多角度偏振成像仪器,在国内率先实现了多角度光学偏振遥感技术新体制,填补了我国天基多角度光学偏振成像的空白。”

(下转第 23 页)