

## Aeolus 卫星测风激光雷达观测印证、气溶胶长程输运研究以及未来中国 CO<sub>2</sub> 星载激光雷达任务的前期预备

Oliver Reitebuch<sup>1</sup>, 吴松华<sup>2,3</sup>, 陈卫标<sup>4</sup>, Christian Lemmerz<sup>1</sup>, Oliver Lux<sup>1</sup>, Fabian Weiler<sup>1</sup>, Benjamin Witschas<sup>1</sup>, 戴光耀<sup>2</sup>, 宋小全<sup>2,3</sup>, 刘秉义<sup>2,3</sup>, 翟晓春<sup>2,5</sup>, 刘继桥<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 德国宇航中心, 大气物理研究所, 韦斯灵, 德国

<sup>2</sup> 中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 青岛 266100, 中国

<sup>3</sup> 青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 青岛 266237, 中国.

<sup>4</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800, 中国

<sup>5</sup> 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081, 中国

全球大气风场深切影响着大气环流、大气碳循环、海洋-大气环流以及气溶胶活动; 气溶胶通过直接、半直接及间接辐射调制气候变化和空气质量; 作为重要的人为温室气体, 二氧化碳含量与气候研究和环境监测息息相关。欧洲空间局实施了大气动力学 Aeolus 任务, 可提供全球范围内的风场、云和气溶胶特性的垂直廓线分布。Aeolus 搭载了全球首颗星载测风激光雷达 (ALADIN), 于 2018 年 8 月成功发射。中国研发的星载激光雷达 ACDL (气溶胶和二氧化碳探测激光雷达) 目前计划于 2021 年发射, 开展全球范围内的二氧化碳和气溶胶测量。本课题的主要项目包括对 Aeolus 卫星的印证、气溶胶长程输运的研究, 以及中国 CO<sub>2</sub> 星载激光雷达任务的前期预备。第一个项目由德国宇航中心 (DLR) 与中国海洋大学 (OUC) 基于地基与机载激光雷达的观测, 对 Aeolus 的风场数据进行印证; 第二个项目由德国宇航中心 (DLR) 与中国科学院上海光学精密机械研究所 (CAS-SIOM) 负责, 通过地基与机载激光雷达的观测, 在 Aeolus 卫星印证的经验基础上开展 ACDL 的前期预备; 第三个项目由中国海洋大学 (OUC) 负责, 主要基于地基与星载激光雷达的观测, 研究沙尘的长程输运。

欧洲空间局的地球探索者任务 Aeolus 卫星于 2018 年 8 月 22 日发射后的前几周内, 就已经分别于 2018 年 9 月 5 日和 12 日获取了首批大气后向散射测量数据和风廓线数据。ALADIN 在发射后能够迅速就位并提供观测数据, 是欧洲空间局、航天工业以及算法和数据处理程序开发团队在卫星发射前超过十五年合作的巨大成功。自 2019 年 1 月开始, 在新的探索活动框架下, Aeolus 准备发射阶段的合作进一步扩展数据创新与科学组 (Data Innovation and Science Cluster, DISC)。Aeolus 数据创新与科学组使用欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的数

值天气预报（numerical weather prediction, NWP）模型评估了 Aeolus 设备在风产品随机误差和系统误差方面的性能。此外，数据创新与科学组还开展了一些机载验证和地面验证活动，通过同步观测来评估风和气溶胶产品的质量。自 Aeolus 发射以来，德国宇航中心使用的 Aeolus 机载校飞样机（airborne demonstrator of Aeolus, A2D）和 2 $\mu$ m 多普勒激光雷达的德国宇航中心 Falcon 20 飞机开展了 3 次机载验证活动。前两次验证活动在欧洲中部开展，第三次验证活动在冰岛和格陵兰岛周围的北大西洋地区开展，三次验证活动提供了一个全面的数据集，能够用于 Aeolus 风数据产品质量的验证。Aeolus 任务的目的是实现对水平风矢量其中一个分量的垂直廓线的全球观测，并使得观测数据具有足够的准确性和精确性，以证明其能够对 NWP 的分析和预测产生积极影响。使用 ECMWF 模型进行的影响实验表明，Aeolus 对分析和天气预报产生了不可忽视的积极影响。目前，多个 NWP 中心已开始使用 Aeolus 的观测数据，包括 ECMWF、德国气象局（DWD）、法国气象局和英国气象局。

为验证 Aeolus 的数据产品并论证 ACDL 的测量原理，中方开展了相应的大气观测活动。其中，中国海洋大学研发了地基的水汽云和气溶胶激光雷达 WACAL，并部署于多次外场实验，其中包括 2014 年在海拔 4500 米以上的青藏高原那曲那区（31.5°N, 92.05°E）开展的第三次青藏高原大气科考实验。为了验证 Aeolus 探测的径向风速数据产品的精确度，中国海洋大学在中国境内的 17 个观测站点部署了多部相干多普勒风激光雷达 CDL 并进行与 Aeolus 的长期联合观测。上述定标验证实验的开展有助于利用 Aeolus 观测资料进行大气动力学研究。作为科学应用，利用星载激光雷达 ALADIN 和 CALIOP 观测数据以及 ECMWF 和 HYSPLIT 模式分析数据，对 2020 年 6 月 14 日至 27 日发生在撒哈拉沙漠及大西洋海域的大尺度沙尘输运案例进行了跟踪。2019 年 3 月 9 日至 19 日，机载 IPDA CO<sub>2</sub> 激光雷达缩比样机进行了高密度的试飞活动，同时部署地基激光雷达、傅里叶变换红外光谱仪 FTS 和太阳光度计对该缩比样机的观测性能进行了比对验证。在此基础上，提出了利用太阳光度计和相干测风激光雷达的联合观测进行气溶胶光学特性的定标反演方法。