

风云卫星数据应用以及在云物理中的研究综述

汤 堰, 李晓婧, 杨曹赞

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618300)

摘要: 风云四号卫星作为中国新一代地球同步轨道气象卫星,自 2016 年发射以来,在气象观测和预报、自然灾害监测以及气候变化研究等方面发挥了重要作用。为探究风云四号卫星数据在未来航空气象以及探讨研究云滴尺度廓线上的重要性,综述了风云气象卫星数据在气象监测的运用。同时也结合了云物理的相关研究,为未来卫星数据反演云滴尺度廓线提供新的思路,通过深入分析卫星数据与云物理参数之间的关系,卫星数据的广泛运用以及云微物理的研究提供全面的理论基础和实践指导。同时,也为未来的气象卫星应用和云物理研究提供了新的视角和方法

关键词: 风云四号数据; 数据运用; 云物理; 云滴尺度廓线

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)16-0079-05

气象卫星数据应用研究在国际学术界一直是热点领域,多年来积累了大量成果。全球主要国家和地区,如美国、欧洲、日本以及中国,都在这一领域进行了深入的探索与实践。例如,美国的地球静止环境业务卫星(geostationary operational environmental satellite, GOES)和欧洲气象卫星 METEOSAT,在云特性分析、大气成分监测及气候变化研究等方面贡献突出。这些研究利用卫星的多波段观测数据,通过精细的算法处理,获得了关于云物理特性、大气成分和气象灾害的重要信息。

1 国内外关于气象卫星数据应用研究

近年来,随着遥感技术的发展和数据处理能力的提高,气象卫星数据的应用已从传统的气象监测逐渐扩展至气候变化评估、环境监测和灾害预警等多个领域。在这些研究中,重点不仅放在了数据的获取和处理上,更加注重了对数据的深层次分析和综合应用。风云四号卫星作为新一代的地球同步轨道气象卫星,共有 14 通道,是风云二号通道的近三倍,在风云二号观测云、水汽、植被、地表的基础上,还具备捕捉气溶胶、雪的能力,并且能清晰区分云的不同相态和高、中层水气。相比于风云二号单一可见光通道的限制,风云四号首次制作出彩色卫星云图,最快 1 min 生成一次区域观测图像。干涉式大气垂直探测仪是国际上第一台在静止轨道上

以红外高光谱干涉分光方式探测大气垂直结构的精密遥感仪器,在静止轨道上从二维观测进入三维综合观测。闪电成像仪为亚太地区首次研制发射的同类载荷,相关测试数据印证了其可对中国及周边区域闪电进行探测,进而实现强对流天气的监测和跟踪,提供闪电灾害预警。此外,空间环境监测仪器具备监测太阳活动和空间环境的探测通道数量、探测精度显著提高。FY-4B 卫星静止轨道辐射成像仪增加水汽探测通道,并对部分通道光谱进行调整,提高了精细化观测水平;对静止轨道干涉式红外探测仪设计方案进行了优化,空间分辨率进一步提升,能提供更加精确的高光谱大气辐射和温湿度廓线等产品;新增快速成像仪,具备区域范围内最高 250 m 空间分辨率快速成像能力,对台风、暴雨和中尺度灾害性天气的监测更加连续、灵活、精细。特别是在对云滴尺度廓线的反演研究中,风云四号卫星提供的高分辨率和多波段数据,极大地提高了云物理特性分析的准确性和效率。

中国在风云卫星系列的研发与应用方面也取得了显著成就。风云四号卫星作为新一代的地球同步轨道气象卫星,其搭载的静止轨道辐射成像仪、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪器,在气象预报、气候监测和环境评估等方面显示卓越的应用潜力。

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(24CAFUC03033);中国民用航空局安全能力建设项目(14002600100020J009)

作者简介: 汤堰(1998—),女,重庆人,硕士研究生,研究方向为交通运输;通信作者李晓婧(1982—),女,四川乐山人,副教授,硕士研究生导师,研究方向为航空气象;杨曹赞(1999—),男,浙江湖州人,硕士研究生,研究方向为大气科学(人工智能预测天气和气候)。

利用风云四号卫星数据,杨丽薇等^[1]开展了关于反演地表太阳总辐射和直接辐射的研究,主要集中于开发和验证一种新的算法,以提高地表太阳辐射的估算精度,对于太阳能资源评估和气候模型的改进提供了重要的技术支持。利用风云四号卫星传感器数据,田昊^[2]专注于台风降雨的反演技术及其误差分析,不仅提升了对台风降雨估算的精确性,而且对于灾害预警和气候研究具有显著意义。杨晨阳^[3]利用风云四号卫星数据探讨了在云检测算法的应用及其原型系统的设计,通过创新的数据处理方法,为云覆盖的监测提供了有效的工具,对气候变化研究和天气预报的精度提升有着积极影响。高子恒等^[4]对中国陆地植被的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和净初级生产力(net primary production, NPP)进行了估算,通过精确监测植被状态,为生态监测和农业管理提供了有价值的信息。Yang等^[5]对中国地区的地表太阳辐照度进行了即时预测,不仅展示了风云四号卫星数据在太阳能资源评估中的应用潜力,同时也为能源管理和气候研究提供了重要的数据支持。

卫星气象数据的预测研究已成为气象学和遥感学领域的重要组成部分。学者们利用各种卫星数据,从气候变化分析到极端天气事件预测,展开了广泛而深入的研究。特别是在卫星数据的反演技术方面,开发了多种算法,以提高对大气、云层和降水等气象要素的监测和预测能力。

Bennartz^[6]通过分析卫星数据对全球范围内的海洋边界层云滴数量浓度的卫星进行了评估,为理解海洋边界层云的微物理特性和对气候系统的贡献提供了重要信息,对于全球气候变化研究具有重要价值。周爱明^[7]基于风云四号高光谱红外模拟资料,对大气温湿廓线进行了反演试验研究,对于提高天气预报的准确性和理解大气过程具有显著意义,展现了卫星数据在大气科学研究中的应用潜力。杜明斌等^[8]探讨了干涉式大气垂直探测仪(GNSS)/可降水量(precipitable water vapor, PWV)与风云四号A星全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)水汽廓线的融合应用,通过融合不同数据源,可以有效提高水汽廓线的估算精度,对于改进天气预报和气候研究具有重要意义。蒋耿明和金亚秋^[9]利用风云三号微波温度计(MWTS)和微波湿度计(MWHS)数据反演了全球大气温度和湿度廓线,对于理解全球气候系统

和提高天气预报的准确性提供了重要的数据支持,展示了卫星数据在全球气候监测中的重要作用。

这些研究共同强调了卫星数据在气象和气候研究中的重要性。它们不仅提供了对大气状态更深入的理解,还为天气预报和气候模型的改进提供了关键数据。随着卫星技术的发展和数据处理算法的进步,未来这一领域预计将实现更多突破,为气候科学的发展做出更大贡献。

2 国内外关于云物理特性研究

云物理特性的研究,在国际学术界持续受到广泛关注。全球范围内,众多学者通过不同的方法和技术,对云的微观特性及其在地球气候系统中的作用进行了深入探索。云滴尺度是各类天气和气候模式中描述云微物理特性的基本单位。云滴尺度的变化指示着云卷云舒、暴雨冰雹和台风运动等自然现象,在云物理特性的研究中,云滴尺度廓线反映了云团的垂直发展过程^[10],云滴尺度的精确测定被认为是理解云内部过程的关键。云滴尺度不仅影响云的辐射特性,还与降水过程密切相关。通过卫星遥感技术,能够在在大尺度上连续观测云滴尺度,这对于改进气候模型和提高天气预报的准确性具有重要意义。

美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)等机构的卫星项目,如中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)中分辨率成像光谱仪)和去-气溶胶激光雷达与红外探路者卫星观测(cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation, CALIPSO),为云物理特性的研究提供了宝贵数据。这些数据在全球气候变化、气候模型验证和天气预测等领域发挥了重要作用。国内方面,中国的风云卫星系列,尤其是风云四号卫星,其搭载的先进传感器为云滴尺度廓线的测量提供了高精度的数据。这些研究强调了利用地球同步轨道卫星进行云物理特性观测的重要性,特别是在难以直接观测的地区,如海洋和偏远地区。

对于准确预测天气系统的发展和降水事件,王富和赵宇^[11]提出了一种基于风云四号静止气象卫星数据的云顶高度反演算法,他们对云顶高度的精确估计对于理解云的垂直结构和进行气候模型的验证至关重要,对于天气预报和气候研究领域具有显著的应用价值。周广强等^[12]探讨了云滴谱的不确定性对中尺度降水的影响,揭示了云滴大小分布

的不确定性与降水过程之间的复杂关系,对于改进降水预测模型和理解降水机制具有重要的科学价值,通过这项研究可以更好地理解中尺度天气系统中降水的形成和发展过程。Li 等^[13]通过案例研究,探讨了 FY2C 卫星数据在云分析中的应用对短期降水预报的影响,表明卫星数据在提高短期降水预报精度方面的潜力,对于气象预报和灾害应对具有实际意义。

对于云滴的随机增长,温景嵩^[14]通过分析云滴在不同环境条件下的增长机制,为理解云的形成和发展提供了重要视角,在云物理和大气科学领域具有长远的理论和应用意义,特别是在理解云的动力学和微物理过程方面。Barahona 和 Nenes^[15]集中讨论了大尺度模型中云滴形成的参数化,包括对混合过程的影响,通过将微观过程与大尺度气象模型相结合,增强了对云物理过程模拟的准确性,对气候模型的发展具有重要意义。Nakajima^[16]进行了多通道分析,研究全球尺度上暖云滴大小的特征,利用先进的卫星遥感技术,对全球范围内云滴的大小分布进行了详细的分析,不仅提高了对云微物理特性的全球性认识,而且为气候模型的改进提供了重要的数据支持,为理解云在全球气候系统中的作用提供了重要依据。Gultepe 和 Isaac^[17]结合观测数据和模型分析研究了云滴和气溶胶数量浓度平均值的尺度效应,揭示了微观尺度上的变化如何影响大尺度的气候过程,对于提高天气和气候预测模型的准确性具有重要价值。严采繁和陈万奎^[18]专注于层状云的云滴尺度谱分布及其谱参数的计算,强调了层状云内云滴分布的多样性及其在云物理过程中的作用,特别是对云的光学特性和辐射效应的影响,对于理解层状云的微物理特性和改善云物理模型具有重要意义。

Bennartz^[6]全球海洋边界层云滴数量浓度的卫星进行了评估,通过分析卫星数据,为理解海洋边界层云的特性提供了全球视角,对于气候模型的验证和改进具有重要贡献。这些研究共同展示了云物理特性研究在理解气候系统和改进气候模型方面的重要性,同时也反映了不断进步的遥感技术和模型分析方法在此领域的应用潜力。

Zhang 等^[19]通过大涡模拟的案例研究,探讨了云的水平不均匀性和细雨对遥感云滴有效半径的影响,其研究结果对于理解云内部结构的复杂性和提高云特性遥感技术的准确性具有显著意义。Smith^[20]从被动卫星数据中提取的 4D 云特性,用以

解决飞行中结冰威胁的问题,不仅提升了对云物理特性的理解,还对航空安全具有实际应用价值。

3 国内外关于云滴尺度廓线反演研究进展

关于云滴尺度廓线的反演,利用飞机的直接观测,国内外学者已对云滴尺度廓线有了初步的规律性认知^[21-24]。随高度的增加,云滴尺度逐渐增加并在云顶处达到最大值^[25-26];区域内的污染情况显著影响云滴尺度随高度的增加速率^[27]。云中垂直速度的增大有利于云凝结核的活化,促进凝结增长使云滴尺度增大^[21]。卫星遥感方法具有全球视角,可有效弥补飞机观测的不足。在利用卫星光谱反演云滴尺度的研究中,最具有代表性的是双光谱反演算法^[28]。Twomey 和 Seton^[29]在 1980 年提出用于同步反演云滴尺度和光学厚度,Nakajima 和 King^[30]于 1990 年对这一算法的适用性进行了拓展,并生成了查算表,目前这一算法已广泛用于 MODIS 等国内外星载仪器^[31-34]。Chen 等^[35]利用双光谱查找表计算出云有效半径,利用最大温度梯度法客观识别云团,建立了客观获取垂直温度与云有效半径廓线的新方法。

4 结论

气象卫星数据的应用及其在气象预测中的角色成为研究的核心。近年来,这一领域的研究不仅聚焦于传统的气象监测,还拓展到气候变化评估、环境监测和灾害预警等更广泛的应用。研究者们利用卫星的多波段观测数据,通过精细的算法处理,提取了关于云物理特性、大气成分和气象灾害的关键信息。

随着遥感技术的发展和数据处理能力的提高,气象卫星数据的综合应用和深层次分析变得日益重要。例如,通过风云卫星系列的高分辨率成像仪和大气探测仪,能够精确监测大气温湿廓线、地表太阳辐射以及反演带得到云滴尺度廓线等,在提高天气预报准确性、理解大气过程和改进气候模型方面发挥了重要作用。

在全球海洋边界层云滴数量浓度的评估、大气温湿廓线的反演试验研究以及不同数据源融合应用等方面,卫星气象数据的应用显示了其在全球气候监测和理解气候系统中的重要性。同时,这些研究也突显了卫星数据在提升对气象和气候系统复杂性理解的潜力。

气象卫星数据界的应用在国际学术呈现多元化和深入化的趋势。随着技术的进步和全球气候变化的挑战,这一领域的研究预计将继续扩展其边

界,提供更多的洞见和解决方案,对气候科学和气象服务产生深远的影响。

风云四号卫星作为一种先进的地球同步轨道气象卫星,其提供的数据对于理解和预测气象现象具有至关重要的作用。特别是在云滴尺度廓线的反演方面,这种卫星技术证明了其在提高预测准确性和理解云物理过程方面的巨大潜力。第一代国产静止卫星风云二号缺乏近红外通道,难以准确反演云滴尺度。云滴尺度廓线反演技术虽已初步运用于低轨卫星(如MODIS),但这一技术并未广泛推广至静止卫星。

云滴尺度廓线可有效表征云微物理特征,使用风云四号卫星数据在反演云滴尺度廓线方面的应用展示了遥感技术在气象学研究中的重要作用。利用静止卫星的研究多是从云图出发以获得云团的移动和生消,对云滴尺度这类反演量的运用目前尚有不足。若能将反演出来的云滴尺度廓线与所研究地区的飞机积冰报告相结合,便能有效预警飞机积冰状况,将飞机积冰预警场由二维平面拓展至三维空间,进一步为飞行安全提供保障。将学科前沿技术(云滴尺度廓线)应用于飞机积冰预警因子的构建,将能定量得到积冰层的具体高度范围,有效节约空域资源,为航路管制提供有效依据。未来,随着技术的不断进步,可以期待在该领域获得更多的创新和突破。

参考文献

- [1] 杨丽薇,高晓清,蒋俊霞. 基于风云4号卫星反演地表太阳总辐射和直接辐射的方法: CN202110006592.8[P]. 2021-07-27.
- [2] 田昊. 基于风云四号传感器的台风降雨反演技术及误差分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2021.
- [3] 杨晨阳. 基于风云四号卫星数据云检测算法研究与原型系统设计[D]. 南京:南京信息工程大学,2024.
- [4] 高子恒,柳艺博,丁炜. 基于风云四号遥感数据的NDVI估算中国陆地地区植被NPP[J]. 江苏海洋大学学报:自然科学版,2020,29(1):11-15.
- [5] YANG J, GAO S, LI M J, et al. Nowcasting of surface solar irradiance using fengyun-4 satellite observations over China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 1984-2003.
- [6] BENNARTZ R. Global assessment of marine boundary layer cloud droplet number concentration from satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007(14): 21-33.
- [7] 周爱明. 基于风云四号高光谱红外模拟资料反演大气温湿廓线试验研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.
- [8] 杜明斌,梁宏,吴春强,等. GNSS/PWV与风云四号A星GIIRS水汽廓线融合应用研究[J]. 气象学报,2022(6):13-18.
- [9] 蒋耿明,金亚秋. 风云三号MWTS和MWS数据反演全球大气温度和湿度廓线[C]//全国电波传播学术讨论会. 北京:中国电子学会,2013:1-7.
- [10] ROSENFELD D. Chapter 6-cloud-aerosol-precipitation interactions based of satellite retrieved vertical profiles of cloud microstructure[J]. Elsevier Inc, 2018, 17: 129-152.
- [11] 王富,赵宇. 风云四号静止气象卫星的云顶高度反演算法[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2021,44(3):714.
- [12] 周广强,赵春生,秦瑜. 云滴谱的不确定性对中尺度降水的影响[J]. 热带气象学报,2005,21(6):10-20.
- [13] LI R X, CHEN H B, CAI D H, et al. A case study of impact of FY2C satellite data in cloud analysis to improve short-range precipitation forecast[J]. *大气和海洋科学快报(英文版)*, 2014, 7(6): 527-533.
- [14] 温景嵩. 大尺度起伏条件下云滴的随机增长[J]. 气象学报,1966(2):134-136.
- [15] BARAHONA D, NENES A. Parameterization of cloud droplet formation in large scale models: including effects of entrainment[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(16): 1-14.
- [16] NAKAJIMA T Y. Multichannel analyses of warm cloud droplet size for global scale[C]//AMS 11th Conference on cloud Physics. Utah, USA: AMS, 2002: 72-91.
- [17] GULTEPE I, ISAAC G. Scale effects on averaging of cloud droplet and aerosol number concentrations: observations and models[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(5): 68-79.
- [18] 严采繁,陈万奎. 层状云云滴尺度谱分布及其谱参数计算[J]. 应用气象学报,1990(4):8-20.
- [19] ZHANG Z, ACKERMAN A S, FEINGOLD G, et al. Effects of cloud horizontal inhomogeneity and drizzle on remote sensing of cloud droplet effective radius: case studies based on large eddy simulations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(19): 208-226.
- [20] SMITH W L. 4D cloud properties from passive satellite data and applications to resolve the flight icing threat to aircraft[D]. Madison: The University of Wisconsin Madison, 2014.
- [21] 朱磊,陆春松,高思楠,等. 海洋层积云中的云滴谱宽度及其影响因子. 大气科学,2020,44(3):575-590.
- [22] 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学,2019,43(6):1191-1203.
- [23] ROSENFELD D, WOODLEY W L, KRAUSST W, et al. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorm feeder clouds in Argentina [J]. *Appl Meteorol Clim*, 2006, 45(9): 1261-1281.
- [24] ANDREAE M O, ROSENFELD D, ARTAXO P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. *Science*, 2004, 303: 1337-1342.

- [25] PAINEMAL D, ZUIDEMA P. Assessment of MODIS cloud effective radius and optical thickness retrievals over the Southeast Pacific with VOCALS-REx in situ measurements[J]. *Geophys Res-Atmos*, 2011, 116(24).
- [26] PAWLOWSKA H, BRENGUIER J L, BURNEt F. Microphysical properties of stratocumulus clouds[J]. *Atmos Res*, 2000, 55(1): 15-33.
- [27] WENDISCH M, PÖSCHL U, ANDREAE M O, et al. Microphysical properties of stratocumulus clouds[J]. *Tellus Series Bochemical & Physical Meteorology*, 2000, 55(1): 15-33.
- [28] 傅云飞. 利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用. *气象学报*, 2014, 72(5): 1039-1053.
- [29] TWOMEY S, SETON K J. Inferences of gross microphysical properties of clouds from spectral reflectance measurements[J]. *Atmos Sci*, 1980, 37(5): 65-69.
- [30] NAKAJIMA T, KING M D. Determination of the optical-thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar-radiation measurements[J]. *Atmos Sci*, 1990, 47(15): 1878-1893.
- [31] LETU H, NAGAO T M, NAKAJIMAT Y, et al. Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: capability of the AHI to monitor the dc cloud generation process[J]. *IEEE T Geosci Remote*, 2019, 57(6): 3229-3239.
- [32] 刘健. 风云二号卫星的冰云光学厚度反演偏差分析[J]. *气象学报*, 2015, 73(6): 1121-1130.
- [33] KAWAMOTO K, NAKAJIMA T, NAKAJIMA T Y. A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing[J]. *Climate*, 2001, 14(9): 2054-2068.
- [34] 张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(4): 6-11.
- [35] CHEN Y, CHEN G, CUI C, et al. Retrieval of the vertical evolution of the cloud effective radius from the Chinese FY-4 (Feng Yun 4) next-generation geostationary satellites[J]. *Atmos. Chem. Phys*, 2020, 20: 1131-114.

Application of Fengyun Satellite Data and Its Research Review in Cloud Physics

TANG Yan, LI Xiaojing, YANG Caozan

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, Sichuan, China)

Abstract: To explore the importance of Fengyun-4 satellite data in future aviation meteorology and to discuss the significance of studying cloud droplet size profiles, a comprehensive review was conducted on the application of Fengyun meteorological satellite data in meteorological monitoring. Additionally, this review integrates relevant cloud physics research to provide new perspectives and approaches for future satellite data inversion of cloud droplet size profiles.

Keywords: Fengyun-4 satellite data; data application; cloud physics; cloud droplet size profile