

新型地基遥感观测技术进展和省级业务化应用思考 ——以上海市气象局为例

彭杰 傅新姝 王晓峰

(上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 以上海市气象局开展新型地基遥感观测建设和应用经验为基础, 一方面简要梳理和总结了主流新型遥感观测的基本情况、国内外应用概况和主要应用技术的发展现状, 另一方面简述了对在省级气象部门如何开展新型地基遥感科学布局的思考与讨论, 旨在为各省气象部门建设发展地基遥感观测体系提供参考。

关键词: 新型地基遥感观测, 应用技术进展, 站网布局

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.00.003

Advances in the Application Technologies of New Ground-Based Remote Sensing and the Consideration for Their Operational Applications at Provincial Meteorological Departments ——Taking Shanghai Meteorological Service as an Example

Peng Jie, Fu Xinshu, Wang Xiaofeng

(Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030)

Abstract: Based on the experiences of the development and application of the new ground-based remote-sensing systems in Shanghai Meteorological Service, we briefly introduce the new ground-based remote-sensing system's basic information, its application around the world as well as the advances of the application technologies. The considerations and discussions on the scientific layout of the new ground-based remote-sensing systems at the provincial level are also given in order to provide the reference for the development of new ground-based remote sensing systems in other provincial meteorological services.

Keywords: new ground-based remote-sensing, advances in application technologies, network layout

0 引言

迄今为止, 气象部门业务化的探测体系对于垂直方向大气热动力状态的观测仍以每天2~4次的无线电探空为主要手段, 尚未实现对温度、湿度等关键气象要素廓线信息的精细化、连续性的观测^[1]。这一方面制约着气象部门对于中小尺度天气过程垂直方向上演化特征与机理的理解和掌握, 另一方面也难以满足分辨率已发展至3 km、甚至1 km的数值天气预报业务模式在发展高分辨率条件下物理过程参数化方案时, 对

于中小尺度天气过程精细化的观测与分析的需求^[2], 因而仍难以实现对天气过程, 特别是对尺度小、演化快的中小尺度短临天气过程精细化监测与预报的有力支撑。

随着遥感技术的不断发展, 各类自动化的垂直探测设备不断涌现, 反演方法和探测精度不断完善和提高^[2], 为实现对关键大气要素廓线实时和连续的业务化观测提供了可能手段。因此, 中国气象局气象探测中心以温、湿、风、水凝物和气溶胶廓线“五条廓线”的观测与应用为核心目标之一, 开展了科技部国家重点研发计划“超大城市垂直综合气象观测技术研究及试验”(下简: 大城市观测试验)专项科学试验工作, 目的在于推动新型廓线遥感观测仪器, 特别是我国自主研发观测仪器的业务化进程。

上海作为首批参与大城市观测试验的省级气象部门之一, 按照试验要求实现了多个站点“五条廓线”

收稿日期: 2021年11月9日; 修回日期: 2022年4月8日

第一作者: 彭杰, Email: pjay163@163.com

通信作者: 傅新姝, Email: fxshu366@163.com

资助信息: 国家重点研发计划(2017YFC1501902, 2017YFC1501701); 国家自然科学基金项目(41905007); 上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1443400); 上海市气象局业务类科研项目(MS202004)

的同址观测综合布局,迄今为止开展了多类新型地基遥感仪器近3年的连续观测,为提高省级气象部门和基层业务人员对新型遥感仪器的观测原理、观测能力、维护保障要点等方面的认识提供了良机。因此,本文拟从上海参与大城市观测试验期间对新型地基遥感观测的认识和应用实践出发,对新型遥感观测技术进展和省级气象部门开展新型遥感观测布局站网建设的思路两方面认识加以梳理总结,希望为各省气象部门进一步发展地基遥感观测体系提供参考。

1 新型地基遥感重点探测仪器简介

近年来,除了地面气象站、S/C波段天气雷达、卫星、探空等常规观测外,全球导航卫星系统气象探测系统(GNSS/MET)、微波辐射计、毫米波云雷达、风廓线雷达、相控阵雷达等新型地基遥感观测技术及其应用获得了越来越多的关注,也发挥着越来越重要的作用。

20世纪80年代,Nordius等^[3]首次提出了利用全球定位系统开展大气水汽探测的方法,实现了基于卫星发射信号穿过大气层时所发生的偏折和延迟信息对大气中水汽所导致的湿延迟的估计,从而能够反演出天顶方向大气可降水量(PWV)、信号传播方向上的斜路径水汽含量(SWV)等。以往研究表明,GNSS/MET水汽资料在认识水汽时空变化特征、降水过程预警、改善模式预报质量等方面都有重要的应用价值^[4-13]。

地基微波辐射计通过测量K波段和V波段的大气微波辐射能量,基于统计反演、物理反演等方法,可获得分钟级的大气温度、湿度廓线(地面~10 km)和总体水汽含量、液态水路径,是现阶段获得大气温湿廓线较为成熟的设备。同时因地基微波辐射计具有24 h连续观测、时间分辨率高等优点,是探空的重要补充。研究表明,微波辐射计资料质量与天气条件、工作环境等密切相关^[14-19],且已有多项工作从反演算法、云信息引入、质量控制、后处理等方面开展研究,不断提高微波辐射计资料的质量并扩展其适用范围^[14-15, 20-21]。与此同时,许多针对微波辐射计在高影响天气过程热力结构监测及研究、数值模式预报效果改进等方面的应用研究也有广泛开展^[22-26]。

风廓线雷达通过发射无线电波,接收大气湍流对入射信号的散射回波,可以通过调整电磁波发射方向,通过3个以上不共面的电磁波反演获得三维风场信息,包括获得天顶方向水平风向、风速廓线、垂直风速、大气折射率结构指数等。上海地区风廓线雷达资料的质量评估结果显示,风廓线雷达风速资料与

NCEP资料的平均偏差为 -0.14 m/s,均方根误差为 2.72 m/s,风向偏差为 -4.28° ,有较高的可用性^[27]。风廓线雷达主要应用于天气系统动力学特征监测及预警、降水相态和云微物理结构特征分析、数值模式预报效果改进等方面的研究工作^[28-33]。

毫米波云雷达通过发射波长为 3 mm (94 GHz, W波段)或 8 mm (35 GHz, Ka波段)的脉冲电磁波,接收云滴或冰晶粒子的后向散射回波信号,实时获取云的位置、回波强度、径向速度、速度谱宽等信息。与X波段、S波段等探测电磁波波长更长的雷达相比,毫米波云雷达对云滴、雾滴等小粒子有更强的探测能力,在非降水云及弱降水云探测方面的优势尤其明显。当前毫米波云雷达的应用可以分为包括云底、云顶、融化层高度等的云宏观结构^[34]分析和包括云滴谱分布、水凝物识别、云内液态水含量等的云微观结构分析两个方面^[35-37]。

激光雷达作为雷达技术与激光技术相结合的主动遥感工具,通过激光器发射纳米级波长(532 nm、1064 nm等)的脉冲电磁波,而后采集脉冲电磁波与大气中各类空气分子、气溶胶和云等粒子相互作用后的后向散射信息,基于不同的相互作用机制原理,采用相应算法进行反演以获得大气的相关廓线信息。常见的激光雷达有:基于米散射原理,主要用于云和气溶胶探测的气溶胶激光雷达;基于拉曼转动或拉曼振动非弹性散射原理,主要用于大气温度探测的拉测温激光雷达;基于多普勒频移原理,主要用于风向、风速探测的激光测风雷达;基于空气分析吸收特性差异,主要用于大气气体分子含量测量的差分吸收激光雷达;基于大气分子瑞利光谱多普勒展宽的不同,主要用于进行大气温度测量的高分辨率光谱测温激光雷达等。

2 新型地基遥感观测应用进展简介

2.1 新型地基遥感观测在国内外科学试验中的应用概况

上述几类新型遥感观测被国内外学者广泛应用于各类长期气候观测站、长期观测试验基地和中短期大型科学观测试验项目。在美国,能源部的大气辐射测量计划(ARM)自20世纪90年代初就开始在南部大平原站等多个代表性站点开展以气候变化研究为目标的多种遥感仪器的综合应用;美国国家大气研究中心(NCAR)近期发展了融合多种遥感仪器,以大气边界层和对流层中下部大气垂直信息获取为目标的综合观测平台—低层对流观测系统(LOTOS)。在欧洲,著名的德国林登伯格气候观象台的主要工作之一^[38]就是开展侧重数值预报模式需求和业务化观测潜力评估的

新型观测设备的试验及观测方法研究；近期德国气象界融合了德国气象局气候观象台、德国环境局、科隆大学、波恩大学以及多个科研院所开展的各项科学观测试验的数据，形成了以云和降水演化过程为研究目标的多元遥感观测标准大气测量数据集^[39]。欧洲也通过科技合作联盟（COST）和欧洲国家气象网（EUMETNET）合作的形式，构建形成了能够获取对流层中下部温、湿、风、气溶胶、云等信息在内的地基廓线综合观测网。在我国，各类新型遥感观测也被广泛用于“青藏高原气象科学试验”“华南五省暴雨野外试验”“南方暴雨野外科学试验计划”“长江中游梅雨锋暴雨外场试验”以及此次“超大城市垂直综合气象观测技术研究及试验”，获取了大量宝贵的观测数据^[36]。

2.2 新型地基遥感应用技术进展简介

基于上述数据，国内外学者从仪器探测能力评估与拓展、多元观测融合技术、天气过程分析等方面开展了大量研究，推动了新型遥感观测应用技术的进一步发展。

仪器探测能力评估与拓展。探测能力评估方面，以往研究发展了多项评估技术用于进一步提高对新型遥感探测能力的认识：包括利用微波辐射计对GNSS/MET大气可降水量的精度评估^[40]；基于探空资料对风廓线雷达反演风速风向^[27]、微波辐射计反演温湿廓线的精度评估^[41]；利用探空资料结合辐射传输模式开展正演计算得到各波段亮温而后用于评估微波辐射计观测亮温^[42]；利用探空资料估算云顶、云底高度而后评估毫米波云雷达反演云顶、云底高度^[43]；利用地面雨滴谱估算出地表降水回波用于评估毫米波云雷达探测回波强度的精度^[44]等。

探测能力拓展方面：以往研究基于新型地基遥感直接探测的基数据和反演产品的基础上通过新的反演技术开发，开展了对探测数据的深度发掘，主要包括基于毫米波云雷达的融化层识别技术^[45]、过冷水识别技术^[46-47]、液态水含量反演技术^[48]、云中水物质类型判别技术^[49]、云分类技术^[50]、基于GNSS/MET的三维水汽层析技术^[4]、基于全天空仪的云类别人工智能识别技术^[51]等。

多元观测融合技术。由于探测原理的局限性，目前各类主流新型地基遥感观测在使用场景上都存在一定的局限性，而通过多元观测手段的融合应用能够形成优势互补和缺陷弥补。目前发展的多种新型遥感观测融合应用技术主要包括：基于微波辐射计对整层液态水含量的约束，提高毫米波云雷达反演液态水含

量廓线的准确性^[48]；利用毫米波云雷达降水谱优化降水期间风廓线雷达功率谱，通过降水谱和湍流谱的分离，实现降水期间风速和风向更为准确的反演^[33]；结合激光雷达和毫米波云雷达开展过冷水的识别^[46]；利用风廓线雷达研究毫米波云雷达衰减特性^[52]等。中国气象局气象探测中心在开展本次大城市观测试验期间，就梳理整合了目前主流的多类新型地基遥感融合应用技术，建立了包括基数据质控、协同质控、单产品质控、综合质控和融合产品的垂直廓线系统综合质控及产品加工观测系统，在发展多元新型地基遥感观测业务化综合应用体系中迈出了重要一步。

天气过程分析技术。前人也利用各类新型地基遥感开展了短时强降水^[53]、暴雨^[36]、污染^[54]等天气过程分析以及边界层高度反演^[55]、低空急流识别^[56]和边界层湍流特征^[57]分析等方面的研究。

短时强降水和暴雨分析方面：GNSS/MET能够反演高精度的整层大气可降水量，因此被用于对于地区大气水汽总量日变化研究^[10]、入梅诊断与预测^[11]、以及局地降水前大气水汽的变化，PWV的陡增急升现象对降水具有较好的指示意义^[58]。微波辐射计反演的低层液态水含量对地面降水具有良好的指示作用^[59]；利用微波辐射计观测温度、露点温度、相对湿度等资料计算的各类不稳定指数对于强对流天气有很好的预警指示作用^[60]，同化至中尺度模式后，对于降水强度的预报也有较为明显的改进^[26]；风廓线雷达探测信息能够较好的揭示暴雨发生发展过程中高低空急流的强度、垂直风切变等天气学分析特征^[36]，同时也能够结合微波辐射计资料，通过不同高度涡度、散度、对流有效位能、动力参数构建出对强降水发生的预警指标。毫米波云雷达对融化层的自动识别技术^[45]也能够为降水发展的微物理过程以及雷达观测的降水类型识别和降水定量估计提供重要的参考，同时也是云中水物质分类，粒子等效半径和（液态或冰态）水含量反演算法的基础；利用微波辐射计反演温湿廓线和风廓线雷达反演水平风廓线构造的新型探空对于强天气发生的判别具有良好的短临预报意义^[61]。

污染天气过程分析方面：激光雷达/激光云高仪观测的大气后向散射系数可以用来反映气溶胶浓度的垂直分布，因此多用于大气边界层高度的反演分析^[55]，而近地层的后向散射系数也可用于反演近地层的PM_{2.5}浓度^[62]。风廓线雷达探测的大气折射率结构指数Cn²因能反映出大气湍流的强弱，也被用于研究大气边界层的湍流结构特征^[57]和对流边界层高度的判别^[63]。

3 省级业务化应用站网布局建设思路

结合上海自身发展需求的调研表明,高影响天气预报预警能力提升、区域高分辨率数值天气预报模式发展、气象服务能力提升以及卫星遥感观测能力提升等方面,都对新型遥感观测所能提供的高时空分辨率大气要素廓线信息提出了需求。主要有以下几方面:第一,对城市背景的危害性天气预测技术重点依赖于对城市及周边地区能量、物质交换过程与异常机理、大气物理化学过程及相互作用等方面的认识。因此,发展地基遥感观测能力,对地气能量和物质交换过程、大气边界层垂直混合过程、云雨物理过程、对流层—平流层相互作用等多种过程开展精细化监测,重点解决关键观测要素不全、大气垂直结构观测不足、时效性不够的问题,满足对高影响天气机理的研究需求。第二,区域天气预报业务模式正处于向3 km乃至1 km高分辨率发展的关键阶段,需要综合地基遥感观测技术和其他各类气象观测手段开展针对性科学观测试验,建立高影响天气过程的综合观测数据集,为发展适用高分辨率条件下次网格物理过程的参数化方案提供约束和参考。第三,针对专属经济区、灾害频发区、关键区等特定地区,特定时段(如重大活动期间)开展精细化立体监测,实时获取边界层结构、对流强度、云三维结构、污染物浓度等大气特征参数的精细化监测结果,提供给城市运行、重大活动服务等城市管理部门、航空、新能源开发利用等行业用户和公众,提升气象保障能力。第四,根据各省份自身下垫面环境、气候背景、天气条件等方面的特征,发展建立针对性、系统性、长期性的地基遥感观测系统用于星地校验,在提高气象卫星观测准确性的同时,强化气象卫星产品在省级气象部门的应用和支撑能力。

基于上述需求,上海目前初步建立了以宝山国家基本气象站为中心,以世博气象站、松江国家气象站、崇明东滩站为辅的地基遥感布网格局(图1)。布设的各类设备包括地基微波辐射计、毫米波云雷达、风廓线雷达、GNSS/MET、激光测风雷达、全天空云量仪、微型与雷达、雨滴谱仪、太阳光度计、气溶胶激光雷达、激光云高仪等,并于2019—2021年布设了5部X波段相控阵雷达,实现了对多站点大气温、湿、风、气溶胶廓线和区域云雨三维结构的遥感观测。

4 大城市观测试验对新型地基遥感系统建设的启示

1) 加强科学规划。大型观测试验投入大,探索与尝试的比重也较大,而省级业务部门在开展观测系统和体系的建设时,更注重仪器的实用性和投入产出

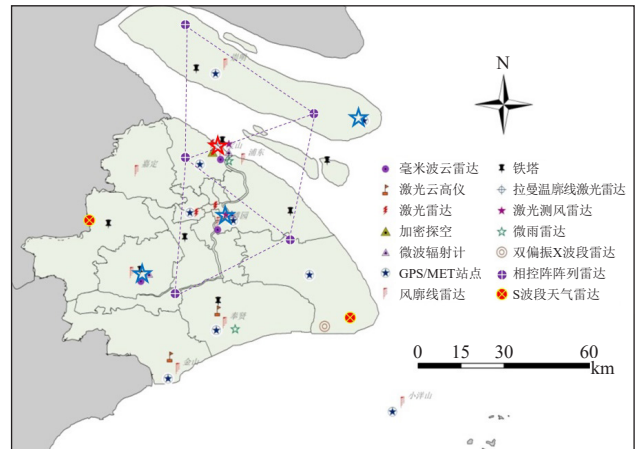


图1 上海地基遥感观测网(图中红色空心五角星标示出宝山气象站位置,蓝色空心五角星标示出世博气象站、松江气象站和崇明东滩气象站位置)

Fig. 1 The layout of ground-based remote sensing network in Shanghai (The red hollow star shows the location of Baoshan Meteorological Station and the blue hollow stars show the locations of World Exposition Meteorological Station, Songjiang Meteorological Station and Chongmingdongtan Meteorological Station)

比。因此,在当前各类新型地基遥感仪器建设费用仍相对较高的前提下,需要深刻吸取过去很多仪器还未发挥作用就退出业务体系的教训,在充分做好前期科学规划、布局论证、模拟试验和建设必要性、布设效果评估研究的基础上开展建设。

2) 建立专人专管模式。鉴于新型地基遥感仪器原理复杂,实际应用工作中研究比重仍较高的现状,应考虑以“专人专管,一台仪器成就一名科学家”的思路,在重点、大型新型地基遥感仪器上配备专人组建团队把握维护管理、数据收集、研究应用的全链路,通过长期培养专家的方式推进新型地基遥感系统的建设。

3) 逐步完善配套保障体系建设。多数新型地基遥感体系尚未进入业务观测体系,因此其元数据采集、管理维护标准、数据和产品的采集与分发等配套保障体系存在不同程度的缺失,需要在观测体系的建设中逐步完善,搭建好新型地基遥感观测仪器从科学试验到准业务化运行再到业务化应用中的关键一环。

5 讨论与展望

综上所述,各类新型地基遥感观测展现出了对天气过程精细化结构特征的探测能力,为提升对天气过程精细化结构特征的认识提供了有力支撑,具有在未来中小尺度预报业务中应用的良好潜力,是大气探测体系未来发展中的重要领域和方向之一。从进一步发展新型遥感观测技术和省级气象部门做好新型遥感观

测科学布局的角度出发,做好以下几方面工作可进一步发挥新型遥感观测对精细化监测、预报和服务的支撑能力。

1) 强化仪器标准化和质量控制技术。与传统的地面和探空观测业务相比,新型地基遥感仪器的观测原理和应用技术都更为复杂,观测数据的标准化和质量控制也更难。即使是已经业务化的风廓线雷达,其观测数据的质量也难以做出直观的判别,而尚未业务化的微波辐射计和毫米波云雷达等仪器更是存在厂家型号众多、定标周期不够明确、同类仪器探测结果差异大等问题。因此,进一步强化仪器的标准化,发展质量控制技术,是开展新型遥感业务化应用的重要前提。

2) 研发多仪器融合应用技术。进一步研发多类新型地基遥感的融合应用,提升单个仪器的观测能力是未来大气廓线观测发展的重要趋势之一。近期可期的几方面技术主要有:研发风廓线雷达和激光测风雷达融合技术,利用激光测风雷达改善风廓线雷达低层风精度差的问题,获取更为全面的风廓线观测。研发毫米波云雷达/全天空仪和微波辐射计融合技术,将毫米波云雷达和全天空仪提供的云观测信息纳入微波辐射计的反演过程,提高微波辐射计在云天条件下对温湿廓线的反演精度。研发微波辐射计、激光测温测湿雷达等温湿廓线探测仪器的深度融合技术,在拓宽仪器应用场景的同时提升探测精度。

3) 基于需求和充分谋划的科学布局。我国幅员辽阔,各省份气象部门所关心的重点天气各不相同。因此做好新型遥感观测站网布局工作的前提是开展充分调研,基于历史统计,明确重点天气过程的频发区和预报、预警的核心要素,而后根据新型遥感的实际探测能力,开展多仪器的合理配置部署,最后形成科学的布局设计。

4) 强化人员培训。鉴于新型遥感的复杂性,需要进一步强化对探测和应用人员的培训与指导,提高业务人员对各类新型地基遥感仪器技术特点的理解和认识程度,掌握其在不同天气条件下优势和局限性,才能够真正应用和发挥好新型地基遥感的作用。

参考文献

[1] 王志诚,张雪芬,茆佳佳,等.地基遥感大气温湿风垂直廓线观测方法综述.气象水文海洋仪器,2018,2: 109-116.
[2] 许晓峰.低层垂直大气廓线遥感探测技术进展.气象科技进展,2020,10(2): 2-8.
[3] Askne J, Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwave from surface weather data. Radio Science, 1987, 22: 379-386.
[4] 王皓.地基GPS反演可降水量和三维水汽层析方法研究.合肥:安徽理工大学,2019.
[5] 宋淑丽,朱文耀,廖新浩.地基GPS气象学研究的主要问题及最新

进展.地球科学进展,2004,19(2): 250-259.
[6] 李佳英.利用高分辨率中尺度模式和地基GPS资料构造高时空分辨率的大气湿度廓线.北京:中国气象科学研究院,2006.
[7] 曹玉静,刘晶淼,梁宏,等.基于无线电探空资料反演大气水汽资源的垂直层结特征.自然资源学报,2011,26(9): 1603-1612.
[8] 袁招洪,丁金才,陈敏.GPS观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究.气象学报,2004,62(2): 200-212.
[9] 陈敏,范水勇,仲跻芹.全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验.气象学报,2010,68(4): 450-463.
[10] 柳典,刘晓阳.地基GPS遥感观测北京地区水汽变化特征.应用气象学报,2009,18(6): 791-801.
[11] 曹晓岗,丁金才,叶其欣,等.利用水汽总量资料诊断入梅时间的方法.应用气象学报,2007,18(6): 791-801.
[12] 于晓晶,唐永兰,于志翔,等.基于地基GPS资料的天山山区夏季大气可降水量特征.气象,2019,45(12): 1691-1699.
[13] 刘梅,王磊,陈圣劫,等.江苏梅汛期不同天气背景水汽特征量分析.资源科学,2017,39(11): 2141-2152.
[14] 傅新姝,谈建国.地基微波辐射计探测资料质量控制方法.应用气象学报,2017,28(2): 209-217.
[15] 车云飞,马舒庆,杨玲,等.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响.应用气象学报,2015,26(2): 193-202.
[16] Xu G, Xi B, Zhang W, et al. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 120(19): 10313-10323.
[17] 茆佳佳,张雪芬,王志诚,等.多型号地基微波辐射计亮温准确性比对.应用气象学报,2018,29(6): 724-736.
[18] 王振会,李青,楚艳丽,等.地基微波辐射计工作环境对K波段亮温观测影响.应用气象学报,2014,25(6): 711-721.
[19] 王志诚,张雪芬,茆佳佳,等.不同天气条件下地基微波辐射计探测性能比对.应用气象学报,2018,29(3): 282-295.
[20] 鲍艳松,钱程,闵锦忠,等.利用地基微波辐射计资料反演0-10km大气温湿廓线试验研究.热带气象学报,2016,32(2): 163-171.
[21] 马丽娜.地基微波辐射计数据的质量控制及基于云天样本的参数反演研究.南京:南京信息工程大学,2018.
[22] Ware R, Cimini D, Campos E, et al. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. Atmospheric Research, 2013, 132-133: 278-290.
[23] Gascón E, Sánchez J L, Fernández-González S, et al. Monitoring a convective winter episode of the Iberian Peninsula using a multichannel microwave radiometer. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 120(4): 2014JD022510.
[24] 张秋晨,王俊,李雪.地基微波辐射计资料在对流云降水前的变化特征初探.高原气象,2018,37(6): 1578-1589.
[25] 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等.风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用.高原气象,2015,34(1): 269-278.
[26] 王叶红,赖安伟,赵玉春.地基微波辐射计资料同化对一次特大暴雨过程影响的数值试验研究.暴雨灾害,2010,29(3): 201-207.
[27] 刘梦娟,刘舜.上海组网风廓线雷达数据质量评估.气象,2016,42(8): 962-970.
[28] 王丹,阮征,王改利,等.风廓线雷达资料在GRAPES-Meso模式中的同化应用研究.大气科学,2019,43(3): 634-654.
[29] 张小雯,郑永光,吴蕾,等.风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望.气象科技,2017,45(2): 285-297.
[30] 张旭斌,万齐林,薛纪善,等.风廓线雷达资料质量控制及其同化应用.气象学报,2015,73(1): 159-176.
[31] 马秋杰,李珍妮,宋小全,等.基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究.海洋气象学报,2019,39(4): 61-67.
[32] 林晓萌,尉英华,陈宏,等.降水时风廓线雷达风场反演效果评估.应用气象学报,2020,31(3): 361-372.
[33] 黄书荣,吴蕾,马舒庆,等.结合毫米波雷达提取降水条件下风廓线雷达大气垂直速度的研究.气象学报,2017,75(5): 823-834.
[34] 王喆.基于地基毫米波雷达等多种资料的云高观测对比研究.南京:南京信息工程大学,2018.
[35] 武静雅,刘黎平,郑佳锋.固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析.气象,2016,42(7): 790-798.
[36] 万蓉.我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用.气象科

- 技进展, 2014, 4(2): 24-35.
- [37] 杨文霞, 范皓, 杨洋, 等. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析. 气象, 2019, 45(9): 1278-1287.
- [38] 曹晓钟, 李峰, 张明. 德国气象局质量管理体系及林登伯格观象台建设简介. 气象科技合作动态, 2016, 增刊(3): 1-19.
- [39] Andrea L, Akio H, Felix A et al. A standardized atmospheric measurement data archive for distributed cloud and precipitation process-oriented observations in central Europe. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100: 1299-1314.
- [40] Jing P D, Michael B. et al. GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitation water. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(2): 830-838.
- [41] 徐桂荣, 孙振添, 李武阶, 等. 地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 315-321.
- [42] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 微波辐射计亮温观测质量控制研究. 气象科学, 2013, 33(2): 130-137.
- [43] 王喆, 王振会, 曹晓钟, 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析. 气象学报, 2016, 74(5): 815-826.
- [44] 谢蕾, 刘黎平, 姚雯. 毫米波雷达与雨滴谱仪观测弱降水的对比分析. 成都信息工程大学学报, 2014, 29(1): 39-46.
- [45] 王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. 气象, 2012, 38(6): 712-721.
- [46] 吴举秀, 魏鸣, 王以琳. 利用毫米波测云雷达反演层状云中过冷水. 干旱气象, 2015, 33(2): 227-235.
- [47] 黄毅梅, 周毓荃, 杨敏. 利用3 mm云雷达资料分析混合相云垂直结构及过冷水分布. 高原气象, 2017, 36(1): 219-228.
- [48] Frisch A S, Feingold G, Fairall C W et al. On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D18): 23195-23197.
- [49] 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 模糊逻辑法在3 mm云雷达反演云中水凝物粒子相态中的应用. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 655-663.
- [50] 杨晓, 黄兴友, 杨军, 等. 毫米波雷达云回波的自动分类技术研究. 2019, 77(3): 541-551.
- [51] 叶亮. 地基云图像的云状识别技术研究. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [52] 钟正宇, 马舒庆, 杨玲, 等. 结合风廓线雷达的毫米波衰减特性初步研究. 应用气象学报, 2018, 29(4): 496-504.
- [53] 周芯玉, 廖菲, 胡东明. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降雨类暴雨过程低空风场特征的研究. 热带气象学报, 2019, 35(3): 332-342.
- [54] 黄俊, 廖碧婷, 王春林, 等. 新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用. 中国环境科学, 2019, 39(1): 92-105.
- [55] 张镭. 大气边界层高度的地基遥感观测及其在中国的分布和趋势. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [56] 马秋杰, 李珍妮, 宋小全, 等. 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 61-67.
- [57] 张梦佳, 沈学顺, 何平, 等. 基于风廓线仪的华南地区夏季边界层湍流统计特征研究. 热带气象学报, 2018, 34(4): 535-545.
- [58] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54-59.
- [59] Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G et al. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D13): 14485-14500.
- [60] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析. 气象学报, 2012, 70(4): 806-813.
- [61] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-417.
- [62] Sundstrom A M, Nousiainen T, Tuukka Petaja. On the quantitative low-level aerosol measurements using ceilometer-type lidar. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26: 2340-2351.
- [63] 张哲, 师宇, 王咏薇, 等. 基于风廓线雷达的对流边界层高度的确定. 气象科学, 2019, 39(3): 359-367.

(上接63页)

- 20(5): 832-841.
- [4] Eyer J R, Kelly G A, McNally A P, et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119: 1427-1463.
- [5] 薛纪善. 气象卫星资料同化的科学问题与前景. 气象学报, 2009, 67(6): 903-911.
- [6] 方宗义, 许健民, 赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展. 气象学报, 2004, 62(5): 550-560.
- [7] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用. 气象, 2010, 6(7): 94-100.
- [8] 许健民, 郭强, 陆其峰, 等. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新. 气象学报, 2014, 72(5): 1023-1038.
- [9] 张鹏, 咸迪, 柯玲. 观乎天文以察时变——探秘风云气象卫星. 自然资源科普与文化, 2021, 4: 4-11.
- [10] Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(9): 1027-1045.
- [11] Zhang P, Chen L, Xian D, et al. Recent progress of Fengyun meteorology satellites. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 788-796.
- [12] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS). 气象, 2010, 36(3): 1-8.
- [13] 张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力. 气象科技进展, 2012, 2(4): 6-11.
- [14] 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. 气象科技进展, 2016, 6(1): 72-75.
- [15] Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. Frontiers of Earth Science, 2019, 6: 224.
- [16] Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137: 1298-1311.
- [17] Liao M, Healy S, Zhang P. Processing and quality control with FY-3C/GNOS data used in numerical weather prediction applications. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12: 2679-2692.
- [18] Xian D, Zhang P, Gao L, et al. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(8): 1267-1284.
- [19] 国气象局. 我国气象卫星及其应用发展规划(2011—2020年). 北京: 中国气象局, 2012.
- [20] 谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. FY-3气象卫星降水探测能力分析与展望. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 1-10.
- [21] 张鹏, 杨磊, 谷松岩, 等. 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析. 气象科技进展, 2015, 5(2): 6-12.
- [22] Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, et al. FY-3E: The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(1): 1-8.
- [23] 张文建. 世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读. 气象科技进展, 2016, 6(1): 135-145.
- [24] Zhang P, Lu N, Li C, et al. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA. Remote Sensing, 2020, 12: 2179.
- [25] 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术. 遥感学报, 2020, 24(6): 672-680.
- [26] 施建成, 郭华东, 董晓龙, 等. 中国空间地球科学发展现状及未来策略. 空间科学学报, 2021, 41(1): 95-117.
- [27] 李俊, 张鹏, 陈林, 等. 观测系统模拟和评估: 进展及展望. 气象科技进展, 2021, 11(3): 27-34.
- [28] Zhang P, Yang J, Wang J, et al. Preface to the special issue on Fengyun meteorological satellites: data, application and assessment. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(8): 1265-1266.
- [29] 许健民. 温带气旋和梅雨锋的卫星云图特征. 气象科技进展, 2021, 11(3): 14-26.