

我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用

万蓉

(中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为提高暴雨预报准确度和精细度, 暴雨研究从大尺度背景到中小尺度特征, 从宏观结构到微观变化逐渐深入, 暴雨野外科学试验在原有业务网观测模式上, 逐步纳入不同新型探测系统以获取高时空分辨率、高精度、全方位的探测信息满足科研与业务的需求。综述了地基GNSS大气水汽观测, 地基微波辐射计云水、温度和湿度观测, 风廓线雷达测风, 双偏振雷达云水粒子相态观测, 毫米波雷达云观测获得的非常规探测资料在我国暴雨临近预报、暴雨机理分析、中尺度暴雨数值预报中的应用, 简要回顾近年来这些新型探测遥感技术进展及其对暴雨野外科学试验的作用。思考新型探测资料在质量控制和精度描述规范化、二次产品开发提高业务应用效率、多源资料综合应用和深层次挖掘等方面亟待解决的问题, 并初步探讨新型探测资料在暴雨预报研究应用中的未来发展趋势。

关键词: 暴雨, 地基GNSS, 微波辐射计, 风廓线雷达, 双偏振雷达, 云雷达, 数值预报, 综合观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.003

Research Progress of the Unconventional Observing Technology and the Data Used in the Study of Rainstorm in China

Wan Rong

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

Abstract: To improve the forecast accuracy and precision, the study of Rainstorm Prediction is now from a large scale background to small scale characteristics, from macro structure to micro changes gradually. In order to obtain a higher spatial and temporal resolution, a higher precision, and fuller elements' observation, in recent years more and more new detection systems have been gradually used in the rainstorm field experiments, which mainly depend on the existing conventional observation network. In this review, the progress of the unconventional data is stated, such as the water vapor observing by the ground-based GNSS network, the temperature and humidity observing by the microwave radiometer, wind observing by WPR, the cloud particles by dual polarization radar observations, and the millimeter wave radar observations of clouds, used in rainfall now-casting, rainstorm mechanism analysis, and the mesoscale numerical prediction of heavy rain in China. The related new remote sensing detection technology in recent years and its promotion to the storm field scientific experiments are reviewed. The problems including the quality control and accuracy description standard of the unconventional observation, the products development, the multi-source data integrated application and their thorough study need to be resolved in the near future.

Keywords: heavy rain, ground based GNSS, microwave radiometer, WPR, dual polarization radar, millimeter wave cloud radar, numerical forecast, synthesis observation

1 引言

暴雨是不同尺度天气系统相互作用的结果。不同尺度天气系统的相互作用非常复杂, 大尺度系统对中小尺度系统起着控制作用, 中小尺度系统生成强对

流天气(如暴雨), 对大尺度系统有反馈作用。从另外一个角度看, 暴雨的形成受不同的大气参量的共同影响, 因大气水汽、热力与动力因素的配置不同, 暴雨持续时间、发生地点与强度也各异。为提高暴雨预报水平, 有必要弄清楚三种尺度的相互作用, 弄清暴雨的生成条件和物理过程^[1], 国内外气象科学家近百年也一直努力通过观测与数值模拟, 从宏观到微观不断探求更精细化、更准确的答案。近10年来我国暴雨观测研究不仅仅依赖雷达、卫星、地面与高空等业务观测网, 而且逐步结合地基GNSS(Global Navigation

收稿日期: 2013年9月29日; 修回日期: 2014年1月20日
第一作者: 万蓉(1969—), Email: wanrong1@hotmail.com
资助信息: 国家自然科学基金(41375041); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA120902); 修缮购置专项(2007—2013)

Satellite System)、微波辐射计、风廓线、双偏振雷达、云雷达等新型大气探测设备,即未纳入业务观测的非常规观测,在一次次长江中游、华南、华北等暴雨野外科学综合观测中,获取了高时空分辨率、高精度的云、水汽和风场资料信息,我国学者围绕这些新型探测资料,在反演技术、二次产品开发、数值同化、天气分析等方面做了大量工作,加强了对水汽因子、动力条件与云物理等方面的精细了解。

本文将侧重新型探测资料在我国暴雨研究预报方面的应用,回顾新型探测资料反演开发技术、在暴雨研究与数值模式预报中的应用进展、思考当前暴雨研究资料应用中所亟待解决的问题并探讨未来发展趋势。

2 新型探测资料反演技术与应用

2.1 地基 GNSS 大气水汽观测

大气水汽占大气总体积的4%,对地气系统径向辐射能量平衡、大气的垂直稳定度、云的形成和暴雨的形成及演变有显著影响,通常采用气球探空获取,因布点稀疏、观测时次少,获得的水汽观测资料非常有限。美国GPS(Global Positioning System)、俄罗斯GLONASS,欧盟Galileo和中国北斗等全球导航卫星系统GNSS在进行定位、导航和授时的同时,可从GNSS卫星信号穿过大气层时发生的偏折和延迟中分离出因水汽造成的湿延迟,并反演出分钟级的采样率、全天候、高精度的大气水汽量^[2],以补充常规业务的水汽观测。北京地区GPS/VAPOR水汽观测试验、海峡两岸暴雨观测试验、长江中下游梅雨暴雨观测试验等均把GPS水汽观测作为主要内容。截至2012年底,我国GPS水汽监测网共485个站,主要分布于北京、上海、广东、湖北、河北、安徽、四川、香港、青藏高原等省、市、地区,中国气象局也正规划部署站间距约100km的国家级GPS大气探测网,和站间距约10~40km的降水影响敏感地区中小尺度GPS大气探测网,用于监测不同天气尺度的水汽分布,并计划近两年在10个省份150个台站上搭建国家北斗地基增强系统,湖北省在国内首次建成30站的北斗地基增强示范网,从2013年1月开始大气水汽观测,结合武汉大学研发的精密定位定轨软件PANDA(Position And Navigation Data Analysis),实现了北斗导航系统的高精度数据处理,静态精密单点定位精度达到厘米级,基线相对定位达到毫米级^[3]。地基GNSS大气水汽观测产品天顶大气可降水总量PWV(Precipitation Water Vapor)、信号传播方向上的斜路径大气可降水总量SWV(Slant Water Vapor)和三维层析区域的水汽密度等。

PWV代表测站上空可降水汽总量,国际上GPS

PWV与微波辐射计平均偏差为1.0~1.5mm^[2]。我国针对华北^[4]、华南^[5]、华中^[6]以及中国区域^[7]的大气条件建立了加权平均温度模型,并改进优化静力延迟模型^[8],PWV与探空平均偏差小于4mm,与微波辐射计平均偏差小于2mm,数据采样间隔为秒级,产品输出时间间隔30min,反演的PWV与探空在43km范围内具有可比性^[9]。PWV被用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^[12]。无论是梅雨锋暴雨^[13]、华南暴雨^[14-15],台风降水^[16]、西南涡持续暴雨^[17]和华西秋雨^[18],降水前PWV有陡增急升特征,最大降水强度出现在大气柱水汽含量峰值出现后,与大气水汽有明显联系。局地强降水3与24h变化对未来降水区域和雨量分布有一定的指示意义;PWV在降水过程中不同阶段的趋势变化,反映了500hPa流场,700hPa水汽通量场的变化^[19]。台风降水产生前一般在达到峰值后7~10h开始出现明显的降水^[16](图1)。同化PWV能改善数值模式预报质量。基于MM5或WRF中尺度数值预报模式的PWV同化,能有效调整初始湿度场,明显增强模式初始场描述水汽分布的能力,从而有效地控制模式积分初期对可降水量预报的误差,并对模式6h累积降水量预报有较明显的改善作用^[20-24],使模式对大阈值降水的时段、强度和落区的预报性能均获得全面的提高,此现象在模式积分最初的0~6h表现得更为明显^[25]。在LAPS系统中,同化GPS水汽资料对湿度场产生的调整作用比雷达资料大一个量级,能有效提高下游暴雨量级的TS降水评分^[26]。

SWV表示地基GPS接收机与卫星两点之间信号路径上的积分水汽含量,一定程度地反映测站周边水汽的分布的不均匀性特征。主要采用双差残差转变为单差残差和非差残差技术计算水平延迟梯度,获取斜路径的天顶总延迟和湿延迟,继而采用同PWV相同的算法得到SWV^[27],或基于无电离层影响的GPS非差观测组合直接计算SWV^[28]。国际上与微波辐射计观测比

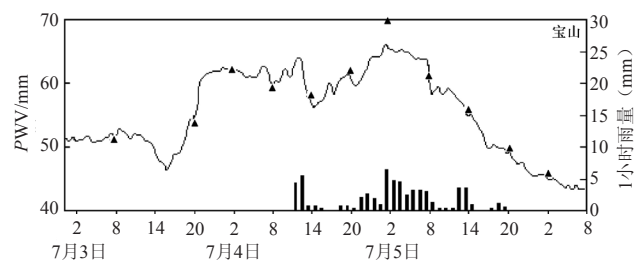


图1 台风Ramasun影响期间上海宝山站的PWV和雨量随时间的变化(单位: mm)^[16]
(曲线为GPS探测的PWV值,▲为宝山探空计算的PWV值,黑直方为1h雨量)

较，GPS得到的SWV误差可以达到毫米量级。国内与微波辐射计对比误差小于4mm，相对于PWV而言，SWV能更好地描述测站周边不同空间方位上水汽的变化，在暴雨系统发生发展移动过程中，测站不同方位上的水汽相对SWV变化量可达20%^[29]。

层析区域的三维水汽密度分布依赖于毫米级精度SWV观测，将GPS加密区域内所有接收站点与不同卫星方向的多个SWV观测值离散化到区域网格中，构建以网格内水汽为未知量的SWV的方程组，求解方程组而获取区域三维网格中的大气水汽量值。为了层析方程组精确求解，层析技术中采用高斯加权函数进行水平约束，利用数值预报结果做先验值，边界条件采用了方差分量估计进行验后定权；针对水汽密度随高度减小的特点，垂直方向上采用随高度变化的非等权约束方法，或引入卡尔曼滤波技术^[31]，或以多年探空观测作为垂直观测约束，将地面观测作为低层边界值^[32]，改善区域三维水汽的整体反演精度。国内宋淑丽等^[30]首次利用上海市区5个GPS站组成的中尺度网反演出60km×60km×10km区域，分辨率为15km×15km×500m大气水汽的三维水汽密度，与数值预报相比1~7km的水汽层析结果更接近无线电探空观测^[30]。若加入地面观测约束后对2km以下水汽密度的精度有明显提高，2km以下水汽密度与探空的相关性提高了4.3%，标准偏差减小2%^[32]。不同垂直分辨率下层析结果均方根误差在0.5g/m³左右^[33]。相对于水汽总量而言，直接采用GPS层析技术得出的水汽密度廓线对模式预报进行订正，比湿廓线水汽变化趋势更接近实况，由此订正出来的CAPE值量值也更为接近^[34]。

2.2 地基微波辐射计云水、温度和湿度观测

云水、温度和湿度的变化对于暴雨天气分析和业务预报都有重要的指示意义，微波辐射计是同时探测温度、湿度和云中液态水的较为理想的设备。1989年我国地基2通道微波辐射计可测对流层水汽与液态水，近年来美国的12通道、35通道地基微波辐射计用于我国气象科学试验，遥感大气温度、湿度、水汽、液态水等的垂直廓线，大气水汽、液态水总量等大气参量。35通道地基微波辐射计加入了测雨波段，具备在降水情况下的有效观测能力，在2008—2013年“长江中游梅雨期暴雨外场试验观测”中获取梅雨期对流层、边界层及地面层的温度、湿度等观测数据，为梅雨锋暴雨的机理研究和强降水预报预测提供了支撑。

地基微波辐射计由多通道获取大气微波辐射能量形成辐射电压，并利用液氮标定、理论标定、传输模式等方法标定亮温；根据辐射传输方程中亮温与

大气中的温度、湿度和云水结构相关关系，反演大气温度、湿度、水汽、液态水等的垂直廓线分布以及大气水汽、液态水总量。可使用的反演技术包括牛顿迭代反演法、线性统计法、贝叶斯最大概率法、蒙特卡罗法以及神经网络法等。目前地基12通道、35通道微波辐射计采用的神经网络反演算法，将亮温数据和地面气象参数作为输入层节点，由历史探空资料训练得到神经网络输入层和隐含层各个节点的权重系数，通过反演模块得到从地面到10km不同高度的大气温度、湿度、水汽和液态水的数据。地基12通道微波辐射计与探空比较：温度偏差1.2~4.5K^[35]、水汽总量平均偏差0.281cm^[36]、湿度均方根误差在33%^[37]；35通道微波辐射计与GPS无线电探空比较：可降水量平均偏差-3.8~15.2mm，均方差1.7~10.4mm；温度平均偏差-2.6~3.5℃，均方差0.6~2.0℃；水汽密度平均偏差-0.7~2.0g/m³，均方差在0.7~1.6g/m³；相对湿度大于GPS无线电探空结果，平均偏差在-4.8%~7.5%^[38]。由于降水易使设备天线罩上覆盖液态水膜或水滴，影响亮温观测和反演结果，降水天气对于微波辐射计反演精度的影响一直备受关注。定量分析显示微波辐射计反演的温度、水汽密度、相对湿度和可降水量与GPS无线电探空结果之间的系统偏差小于4mm，偏差在无降水时较小，而在有降水时较大^[39]。

在数据质量控制方面，可利用辐射传输方程和独立来源的大气层结进行各通道亮温仿真计算、用亮温计算值来检验观测值的数据^[40]。为获取高精度的液态水和可降水量，可基于本地观测改进Liljegren等^[41]的反演算法参数，得到适合本区域的液态云水路径和可降水量反演，改进的算法与神经网络算法比较，相关系数为0.99，平均相对误差为3.58%，反演结果略偏小于神经网络方法，但趋势一致，比神经网络方法对云更为敏感^[42]。

精细化的微波辐射计资料较详细地描述对流区的大气物理特征。在层状云中嵌入的对流区中有丰富的垂直积分过冷水含量，量级可达10³g/m²^[43]；积层混合云降水过程中，空中液态水分布，特别是丰富的低层液态水，与地面降水的产生有直接的关系^[44]（图2和3）。受不同云系影响时，云液水含量的变化与云量的增减有关，大气水汽、云液水和地面降水存在一定的定量关系，云中液态水仅占气态水的8.7%左右，落回地面的降水占空中水汽量的18%左右^[45]。微波辐射计资料不仅显示云中充沛的相对湿度和液态水含量条件，也显示出非常利于冰雹粒子群快速累积增长的交替的干、湿分层生长环境^[46]。

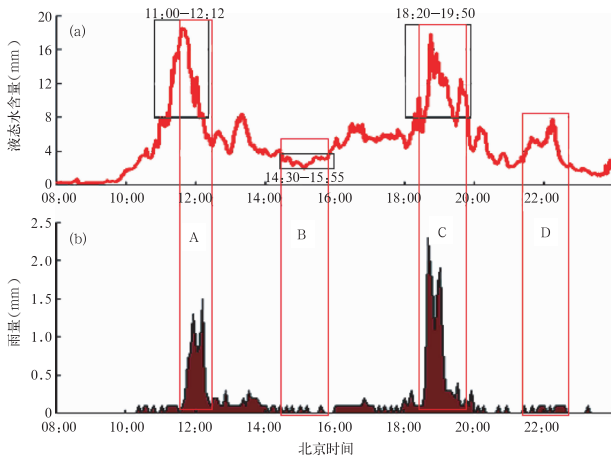


图2 一次积层混合云降水空中液态水与地面降雨的比较^[44]
(a) 微波辐射计所测云液态水含量随时间的变化；(b) 地面雨量随时间的变化

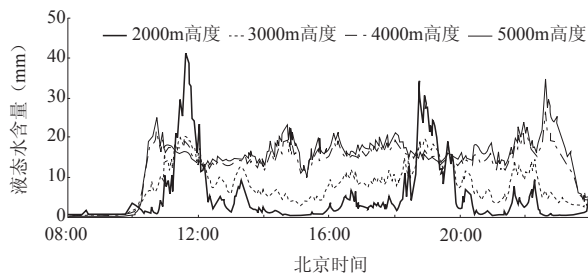


图3 2000、3000、4000和5000m高度层辐射计液态水含量随时间的变化^[44]

因地面降水的产生滞后于空中水汽、液态水含量变化，可基于微波辐射计资料寻找强天气预警指标。依据降水前1h大气水汽含量、云液态水含量的分布和演变与降水的关系，通过对大气水汽含量与液态水含量的FFT变换选取第一个转折点的不同特征作为判断降水的临近指标^[47]，或利用微波辐射计获取的不同高度的温度、露点温度和平均相对湿度等资料计算MKI, KI, TT, HI等不稳定指数，对强对流天气有很好的预警指示作用^[46]。

在数值预报方面，地基微波辐射计反演的相对湿度廓线资料在暴雨中尺度数值预报模式同化后，对降水落区预报改进不明显，但对降水强度预报改进明显，24h降水最大增幅为45mm，同化的站点信息越多，站点与降水中心越近，降水模拟效果越好^[48]。

2.3 风廓线雷达的测风观测

风廓线雷达发射无线电波，并接收因大气湍流影响和散射作用返回的波信号，由回波信号处理和分析得到湍流强度、风向和风速随高度的分布即风廓线。暴雨研究上使用的对流层风廓线雷达有效探测高度从近地面到16km的范围、垂直分辨率120~480m，时间

分辨率6~10min。与其他测风设备如L波段或GPS探空、多普勒雷达、测风经纬仪、测风塔等相比，风廓线雷达以其分钟级的采样率和米级垂直分辨率较好地满足中小尺度暴雨分析与预报的需求。该资料在1998年华南暴雨试验、2001—2002年长江流域梅雨锋强暴雨外场试验、2006年华南五省两特区暴雨野外观测试验、2007—2013年长江中游梅雨期暴雨外场试验中利用风廓线雷达获取了暴雨过程中大气湍流与各高度层风的变化信息，这些信息无论在暴雨落区、强度和持续时间的数值预报上，还是在暴雨的发生发展过程中高低空急流的强度、深度配置、冷暖平流分布、垂直风切变等天气分析中，都起着重要作用。我国风廓线雷达已进入业务布网阶段，截至2012年底，已建成49部边界层风廓线雷达和9部对流层风廓线雷达。

与常规高空探空系统对比，风廓线资料的探测精度以北京南郊CFL-16型风廓线雷达为例，水平风 u 、 v 分量的标准偏差在2.3m/s左右^[49]；北京延庆CFL-08风廓线雷达风速误差不大于1.5m/s、风向误差不大于 10° ^[50]；上海组网边界层风廓线雷达盛夏时段各层风速的平均标准差分别是3.34~4.03m/s，初冬时段则为3.22~4.12m/s^[51]；湖北咸宁风廓线雷达在1km以上风向偏差小于等于 20° 、风速偏差小于等于3m/s^[52]。

为提高测风精度，可通过极大似然法对回波谱的谱矩进行有效估计，显著改善低层取样体积谱矩估计，而有效抑制和去除了杂波干扰^[53]；可依据噪声频域统计特性计算风廓线雷达功率谱噪声功率^[54]；利用雨滴下降的平均多普勒速度^[55]，或利用降水期间谱功率双峰测出垂直气流速度及下降粒子速度^[56]，对风廓线垂直观测资料进行修正，减少降水对测风精度的影响。经对风廓线雷达多种探测模式探测数据的估算分析发现，雷达参数的确切选用、信噪比、测量方法的合理性以及信号累积得益的认定对大气折射率结构常数的准确估算有较大的影响，为此提出适合风廓线雷达多种探测模式对返回信号信噪比的正确估测和规范化处理方法，正确估算大气折射率结构常数 C_n^2 ^[57]。

风廓线雷达产品被广泛用于暴雨形成机理研究中。在地形与北京城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨过程中，低空风的垂直切变是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件。一旦迎风坡出现强降水、将形成吹向迎风坡的风速与降水强度之间的正反馈现象；地形坡度越大的地方，产生的上升运动越强^[58]；北京局地暴雨相联系的对流层偏东风浅薄与深厚不同结构，结合温、湿结构，散度场、涡度场配置分析认为：对流层低层的偏东风对北京的局地暴雨的发生有

重要作用，特别是浅薄偏东风能够在局地形成较强的辐合、暖湿空气局地集中和形成热力不稳定，加之系统的生命期短，发生发展迅速，容易造成突发性的局地暴雨，而且非常容易产生漏报；而深厚偏东风在提供强对流发生所需的对流层垂直切变方面有重要作用，同时，其产生的辐合层次较厚，水汽输送能力较强，同样有利于较强降水的发生，然而持续的偏东风并不是对流风暴的直接触发机制，因此非常容易造成对局地暴雨的空报^[59]（图4）。此外，地面偏东气流中的切变线以及西部山脉作用时的气流在山前汇聚从而强迫抬升，产生地面中尺度系统；城市热力加强中尺度辐合，容易形成北京城市降水^[60-61]；在北京夏季暴雨过程中，风廓线显示双层低空急流影响降水，切变线低涡是主要中尺度系统，强降水前地面风场辐合，临近降水辐合层向上发展^[62]。强对流过程发生前，风廓线雷达资料中均出现明显的风向的垂直切变。风向随高度顺转，有暖平流，为强上升运动提供了有利条件，可产生、维持强对流^[63]。基于风廓线观测订正的亮带识别算法识别延庆地区亮带厚度为

1000~1500m，上下边界速度差值主要为4~5m/s^[64]。风廓线雷达与无线电声探测系统的温度廓线综合探测，能高时空分辨率地展示晴空热对流的演变过程和热对流对上层空气的加热效应，有利于加深热对流泡和边界层热对流运动的认识^[65]。北京地区风廓线仪布网数值研究表明，天气系统对大气风场的垂直结构特征较为敏感，大气风场随高度的垂直分布和变化对天气过程有明显的的作用，在较短时期就可对大气的空间特征形成深厚的影响。其可在短期天气过程中影响天气系统的温度场结构及相关降水过程，且在以上影响随着预报时效的增加而增强的同时，影响范围也随预报时效的增加而扩大^[66]。

在暴雨临近期风廓线雷达资料有特征性变化，观测发现：在暴雨发生前的1~2h，水平风向、风速的方差增长迅速^[50]，低空急流指数反映脉动向地面扩展的程度与中小尺度降水的密切关系，比雨强增大提前2~4h，增大程度与雨强成正比^[67-69]，高低空急流及其向下的脉动指数与降水强度的增强有密切关系，低空急流向脉动的影响强于高空急流^[70]。我国学者利用风

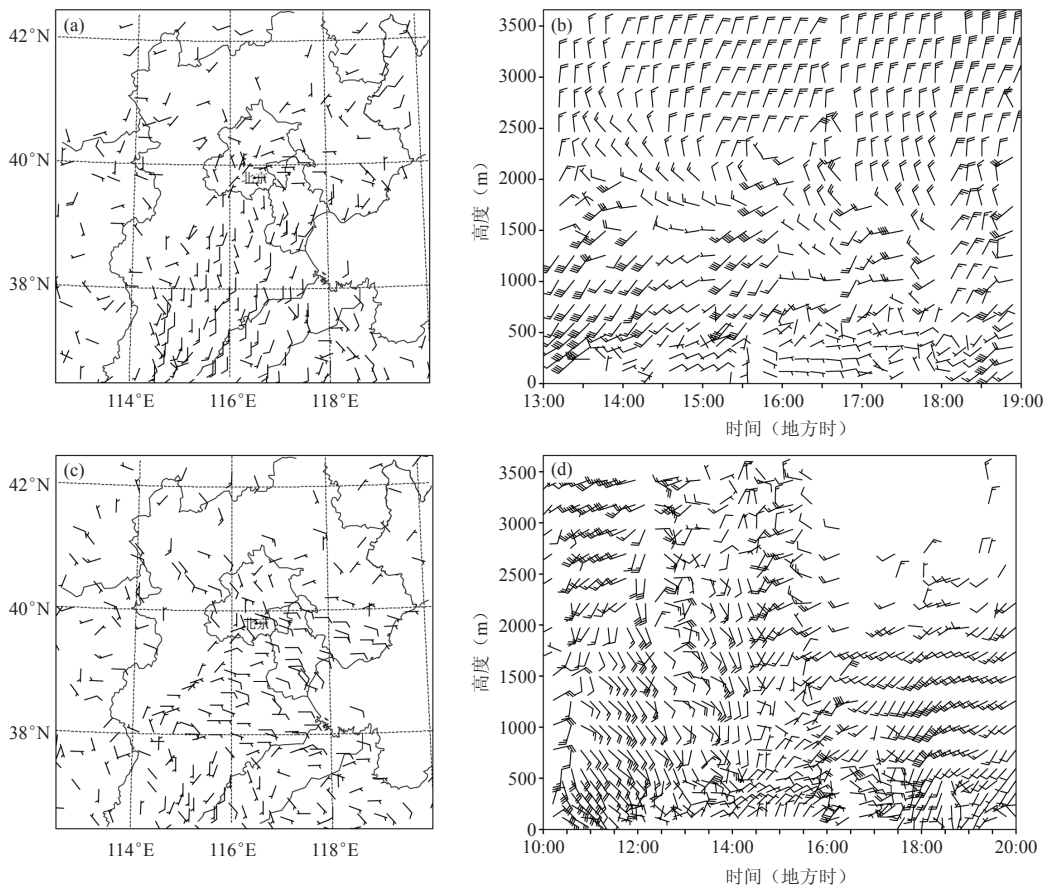


图4 与北京局地暴雨相联系的对流层低层偏东风不同结构^[59]
 (a、c为08时地面风观测；b、d为海淀站风廓线时间演变，单位：m/s)
 (a) 浅薄偏东风个例；(b) 偏东风浅薄结构；(c) 深厚偏东风个例；(d) 偏东风深厚结构

廓线资料提取诸多的暴雨预警指标,如不同高度散度和涡度,结合微波辐射计数据,计算对流有效位能、K指数等动力、热力参数和风暴相对螺旋度等^[71-72]。

风廓线雷达资料也支持数值预报和定量降水估算。中尺度模式数值试验表明:同化2分钟一次的风廓线雷达资料对降水的模拟有较明显的改善;风廓线雷达资料在进入模式之后,随模式的积分可以把其影响从低层带至高层,并扩展到较大的范围。同化风廓线雷达资料对风场、高度场和湿度场均有明显的改变,对温度场的影响较小^[73]。降水的雨滴谱对于提高雷达定量测量降水的精度、研究降水机制和云结构很重要,可利用五波束风廓线雷达,通过连续方程求得各层垂直空气运动速度,根据垂直指向波束测出的功率谱导出雨滴谱;或假定雨滴谱为 Γ 分布,根据垂直指向的多普勒雷达测得的回波强度、径向速度、多普勒谱宽求得雨滴谱参数^[74],来支持定量降水估算。

2.4 双偏振雷达云水粒子相态观测

双偏振雷达通过发射、接收水平和垂直偏振波,获得降水目标的水平偏振反射率和垂直偏振反射率之差,即差分反射率,其反映降水粒子在水平和垂直方向尺度大小的差异,可用于降水粒子形状、相态、雨滴和冰雹特征的识别。双偏振雷达的降水粒子相态以及粒子谱特征信息有效用于降水的定量测量订正,联合使用反射率因子和差分反射率反演降水强度,能进一步改善定量测量降水精度。美国已在十多部NEXRAD上进行了双线偏振技术升级改造,在2008—2009年我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX),2007—2013年长江中游梅雨锋暴雨外场试验观测和2013年“973”华南暴雨外场观测中,双偏振雷达探测的加入,加强了暴雨发生发展过程中云中粒子相态识别能力,并提高降水定量测量精度,进一步提高暴雨机理研究和预报与预警能力。

为提高双线偏振探测数据观测质量,国内针对反射率、差分反射率、传播相位、差分相位和相关系数等参数的精确观测,采用自测试校验关键技术确保双偏振通道的一致性^[75],通过标定消除系统误差,减小差分反射率因子测量误差^[76],建立差分相位质量控制算法,有效识别和消除差分相位数据中的地物杂波,退掉折叠的相位并滤除正常的随机差分相位波动^[77];为提高偏振天气雷达对降水观测和水成物识别能力,提高探测质量,如利用模糊逻辑来处理订正偏振参数^[78]、采用移相器技术调节垂直通道与水平通道的相位差,合成所需要的任意偏振波(如倾斜45°线偏振、圆、椭圆偏振波)改进双偏振同时发射方式^[79]等。

为提高双偏振雷达降水的估测精度,可在差分传播相移滤波中引入卡尔曼滤波,假设近地面降水粒子的主轴是水平取向,对稳定层状云降水进行衰减订正法^[80];或通过设置KDP的阈值,综合利用单位差分传播相移KDP订正法、ZH订正法^[81]订正方法和固定系数对不同的降雨类型进行衰减订正^[82];或采用改进自适应约束算法^[83-84]对双线偏振雷达进行反射率衰减进行有效订正,特别是当存在较大范围、含对流型降雨时,该订正方法可以明显提高降水的估测精度^[85]。

双偏振雷达观测为降水系统的微物理结构研究提供了依据。双偏振雷达通过发射水平和垂直方向的电磁波以及采用不同的信号处理方式得到多种测量参数用于观测降水粒子的大小、形状、相态和空间上的翻滚,展现暴雨过程中水凝物转换的云微物理过程和变化特征。国内通过不同的雷达双偏振观测变量对不同降水粒子的敏感程度不同,使用不同的权重建立逻辑判断,不断改进模糊逻辑用于识别水凝物粒子类型,反演结果能较好地反映层状云降水的相态结构,验证了顾震潮^[86]提出的层状云降水的三层模型,并联合双偏振雷达参数与地面温度反演温度廓线,区分雨滴和融化层之上的雨、冰混合物;大多数层状云表现为在均匀的层状云中有高低起伏的柱状回波镶嵌在其中,而其水凝物粒子的组成结构从上到下为冰晶(霰、干霰、湿霰、雪、过冷水等)、雨区等(图5)。最为显著的特征是霰的范围最大,雨水主要存在于云体的暖区,霰的融化和凝结碰并过程对雨水的形成起到了重要作用。分析认为对于层状冷云降水,冰相粒子的转化主导了整个降水过程,转化效率的高低决定了地面降水的大小^[87]。通常建立的云粒子相态反演的模糊逻辑算法中的Beta型成员函数,包括:水平反射率因子、线性退偏比、差分反射率及温度0℃、-40℃对应高度等成员变量,反演出的相态有毛毛雨、雨、低密度干冰晶、高密度干冰晶、湿冰晶、干霰、湿霰、小冰雹、大冰雹、雨夹雪和液态水滴等11种,在降水不同阶段,水凝物粒子的演变不同:初始阶段层状云相态呈现分层结构,从上至下依次为高密度干冰晶、湿冰晶和液态水滴;初始阶段云体中的回波大值区核心区域为大的冰相粒子,其余部分为液态粒子;在初始到成熟的阶段演变中,回波大值区上部液态粒子逐步向冰相转化;消散阶段云中零度层亮带逐步消失,温度零度层以上云粒子结构呈现高密度干冰晶包裹湿冰晶的情况^[88]。双偏振雷达测量参量的变化特征进一步证实了在暴雨形成过程中,由于在零度层以下冰相粒子融化成大雨滴然后再裂碎为小雨滴,形成零度层亮带的现象^[89]。

2.5 毫米波双偏振雷达云观测

云的发生、发展的研究是提高灾害性天气预警预报能力的重要手段。毫米波测云雷达有较宽的多普勒带宽，多普勒效应明显，具有较好的多普勒分辨力，测速精度较高，受地面杂波影响较小，低空性能好，从几微米的云粒子到弱降水回波粒子都能够探测到，并且能够非常精细地探测云体的物理结构，是探测云发生发展及其演变的有效工具^[90]。在观测非降水及弱降水云时，毫米波测云雷达的探测能力远高于天气雷达，尤其表现在远距离的弱回波探测；而对于较强的降水天气，毫米波测云雷达受衰减影响很大，需要考虑衰减订正。通过毫米波测云雷达观测得到的不同类型云的回波强度个例图分析得到：毫米波测云雷达具有较高的时空分辨率，能够穿透云粒子获得清晰的云水平和垂直结构，探测云的内部特征；能够观测到碎积云、淡积云、浓积云、层积云、雨层云等多类云以及这些云之间的相互演变过程。发展毫米波测云雷达能获取云量、云类等云参数，这些基本参数的获得将有助于研究云内液态水含量、云粒子的谱分布等征，特别是云中液态水含量的三维分布的定量测量，在云—辐射相互作用、暴雨形成研究等方面有重要意义^[91]。

目前国内外云雷达的频段主要选择在35或94GHz，其对应的波长分别为约8或3mm，其中8mm波长云雷达适合观测非降水云、毛毛雨以及弱降水云系；3mm波长云雷达适合观测卷云。

2007年我国第一部用于天气研究的测云雷达系统诞生，该系统具有多普勒和极化功能，采用全相干体制、8mm波长、单发双收的极化体制，实现定向扫描；探测距离为30km，距离分辨率高达30m，雷达基数据中包括的参量分别为水平反射率因子、多普勒速度、速度谱宽、退极化因子等。中国气象科学研究所率先利用毫米波测云雷达对不同季节云型的观测，获

取了我国第一手关于层云、淡积云、层积云、台风外围云系、降水云、降雪云等不同云的高空间分辨率宏观结构特征信息^[92]（图6）。在南方暴雨野外科学试验（SCHeREX计划，2008—2009年），长江中游梅雨锋暴雨外场试验（2007—2013年），青藏高原东部及下游关键区大气观测科学试验（2010年），以及“973”华南暴雨外场观测（2013年）中，我国研制的多部测云雷达相继参与观测试验并获取宝贵的信息。

我国毫米波测云雷达资料应用研究主要集中在雷达探测能力评测与宏观特征的反演，如云顶、云底高度的确定，融化层边界的识别等，微观特征的反演如云内云、冰含量的计算，云滴谱分布以及云层湍流结构变化，冰云、水云识别以及云内液态水含量和有效粒子半径大小等在进一步研究中。为提高毫米波多普勒雷达的观测质量，国内采用零速度带和高仰角观测特征相结合的方法对RHI进行退速度模糊^[93]，利用改进的小粒子示踪法和云雷达反演的垂直速度，订正反演精度受湍流影响的问题^[94]。融化层边界的识别可以为降水发展的微物理过程提供信息，对雷达观测的降水类型（雪或雨）识别以及降水定量估计非常重要，同样也是雷达水凝体分类、粒子等效半径反演、液水（冰水）含量反演算法的基础，是数值天气预报模式的数据同化、预报结果验证的观测依据之一。毫米波双偏振测云雷达融化层自动识别技术主要依赖于极化参量，包括差分反射率、正交相关系数、差分传播相移和线性退极化比等参量，因为这些参量在层云和对流云中都具有明显的融化层特征。此外，在反射率中没有亮带的情况下，极化参量对融化的水凝体也非常敏感，极化参量对融化层的敏感程度大于反射率因子^[95]，结合云雷达垂直探测到的雷达反射率因子和极化参量（线性退极化比）的垂直廓线数据，并根据参量在融化层附近显著变化特性，可识别融化层高度和

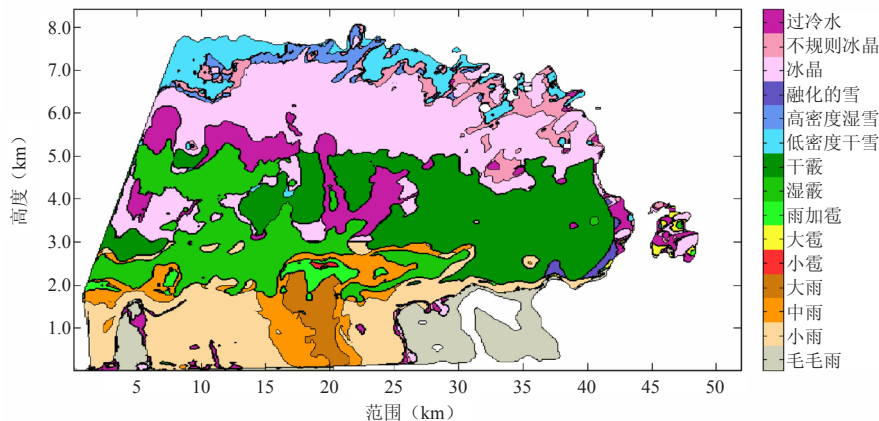


图5 2006年5月8日位于吉林伊通X波段多普勒双线极化雷达探测的云中水凝物粒子分布^[87]

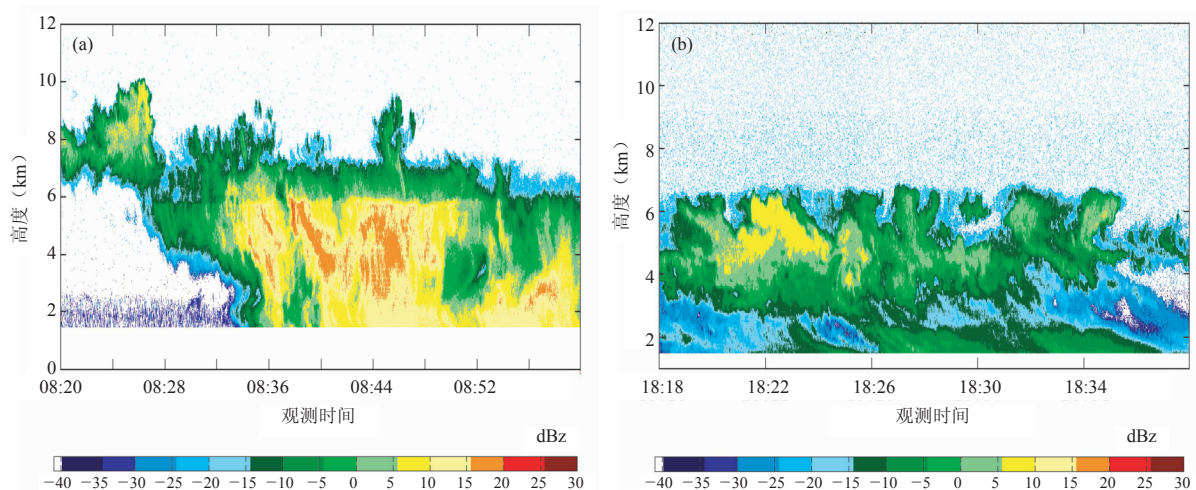


图6 毫米波测云雷达观测得到的不同云类型的回波强度^[92]

- (a) 台风外围积雨云结构 (雷达位于台风中心左前沿, 内部嵌有正在发展的深对流系统, 5.9km高度存在零层亮带);
 (b) 层积云 (降水前0.5h观测) 结构 (云顶云底较不均匀, 水平方向连成一片, 云厚达4km)

厚度, 自动识别的融化层上边界平均高度与探空实测偏差小于 100m ^[96]。

2.6 暴雨综合观测与多源资料应用

暴雨野外科学观测试验是探索研究和解决暴雨预报诸多关键科学问题的基础支撑, 早期的试验完全基于气象业务观测系统^[97], 随着暴雨研究的需求的提高和暴雨新型探测技术的更新进步, 近年越来越多的非业务观测现代气象科技新型的设备融入到暴雨的联合观测中, 并逐渐显现出其重要作用。

2001—2002年, 在我国10多家气象科研院所和日本气象专家联合开展的“长江流域梅雨锋强暴雨外场试验”中, 华中、华东区域14个高空加密观测站和100多个地面加密观测站的业务观测网, 以及“风云一号”和“风云二号”卫星、2架无人驾驶遥测飞机、3个闪电记录仪、6部数字化天气雷达、8部多普勒雷达和8个GPS站等首次构成了地、空和天基立体综合观测系统, 长江中下游双多普勒雷达或三多普勒雷达观测系统获取了中尺度暴雨系统的三维立体结构; 立体综合观测形成中尺度暴雨三维结构气象信息的气象数据库, 并由此研制和发展了具有中国特色和拥有自主知识产权的最新的四维同化理论, 以及处理多种气象资料的数值预报模式。

2006年, 广东、广西、福建、湖南、江西五省(自治区)气象局以及香港、澳门两个特别行政区气象台联手开展“华南五省暴雨野外试验”, 首次对华南地区的中尺度灾害天气进行了车载多普勒雷达跟踪观测、车载风廓线仪与车载探空仪跟踪观测、机载下投式探空和机载毫米雷达观测。试验在上述观测区内

实施地面和探空站的时间加密观测, 包括: 9部多普勒雷达、10个业务探空站、169个地面站、600个自动气象站、FY-2C静止气象卫星以及若干个GPS水汽观测站组成的强大的中尺度观测网。此次试验建设了一个中尺度灾害天气三维跟踪观测基地, 实现了监测与预测在同一平台上互动与综合应用, 是我国在中尺度暴雨观测上的突破性尝试, 提升了对暴雨中尺度灾害天气监测、预测与预警的综合能力。

2008—2009年5—7月, 我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX计划)在华南、华中、江淮和长三角四个观测区内投入48个业务雷达、63个探空观测站、近60个GPS水汽观测站、2000个地面观测站和无人自动观测站以及5部车载雷达, 开展 β 中尺度暴雨系统观测试验。首次启用车载双偏振多普勒雷达与云雷达等先进装备。这次试验将建立具有适应性功能的中尺度观测网, 获取具有 β 中尺度分辨能力的观测资料; 我国首次探索在中尺度暴雨与台风观测中实施飞机下投式探空观测, 以及在局部区域内组织双多普勒雷达的同步观测, 全面提升对 β 中尺度强对流系统的观测能力; 建立观测系统与预报系统的互动, 使野外试验资料能实时进入预报系统, 提高中尺度暴雨的预报水平^[98]。

从2007年开始, 中国气象局武汉暴雨研究所每年汛期抓住有利时机, 组织实施空、地基立体式“长江中游梅雨锋暴雨外场试验”观测, 地基GPS网用于获取暴雨过程大气水汽变化; 微波辐射计获取暴雨过程中大气温度、湿度、水汽密度和液态水含量等随高度变化与分布特征; 移动探空和风廓线雷达追踪获取暴雨系统温度、压强、湿度和风的廓线资料; 移动双

偏振雷达获取暴雨对流云团内部的粒子相态变化特征，云雷达用于分析暴雨前云的结构变化，云间相互影响对暴雨形成的作用等。这些梅雨期对流层、边界层及地面层的立体观测数据，为进一步弄清梅雨期暴雨的形成机理和提高强降水的预报预测提供了良好的数据支撑。

2007和2010年中国气象局武汉暴雨研究所和成都高原气象研究所联合开展“青藏高原东部及下游关键区大气边界层科学试验前期预研究”。青藏高原的动力和热力作用对下游天气有着重要影响，高原低值系统的东移往往造成长江流域出现暴雨洪涝等灾害天气。基于长江中游暴雨外场试验基地新型探测系统，针对青藏高原对下游天气气候影响，完成了青藏高原对下游暴雨的作用的野外观测试验。并开展青藏高原东部及下游关键区大气边界层的观测分析等研究工作，分析了青藏高原及长江中游不同地形、不同季节大气边界层高度及其变化规律，评估主要边界层参数化方案对青藏高原及长江中游边界层高度的刻画能力和对预报降水的影响，建立边界层高度的修正模型，研究边界层物理过程对降水的影响机理。未来几年，将继续开展长江流域大气水汽和云的宏、微观结构的地基、飞机联合观测、利用同化技术等进一步研究高原及周边地区水汽输送对长江流域降水预报的影响，深入开展水汽与云的宏微观发生发展机制以及云参数化订正等研究。

上述各个时期的大型综合观测所积累的观测数据集是一个蕴藏丰富的宝库，值得广泛研究和深入挖掘。我国学者在如何综合使用多源观测数据上取得一定的进展。

利用微波辐射计探测的温湿度数据和风廓线仪探测的水平风数据构造特种探空资料。构造场要素与常规探空具有较一致的变化趋势，定性分析使用时可有效弥补常规探空时间分辨率低的不足，构造探空的温度和经向风、纬向风具有较好的定量使用价值，与温度廓线、低空风廓线相关的参量，如垂直温度梯度、0和-20℃层低空垂直风切变等参量的绝对误差很小，也具有很好的定量使用价值。与湿度相关的参量，如对流有效位能，假相当位温K数，湿度垂直梯度和温度露点差等参量存在不同程度的误差，是由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大需要订正^[99]。对于冰雹、雷暴大风和短时暴雨等三种不同强天气，构造探空与常规探空的热动力物理参量在中的表现基本一致。与常规探空相比，特种探空数据的时间分辨率高，各物理参量的变化特征表现更明显，能更详细地

描述强天气发生前后大气状态的变化。由特种探空计算的多种物理参量在不同强天气的酝酿、发展过程中差别明显，在强天气发生前36h的变化趋势尤其明显，对于上述三类强天气的判别具有明确的短时临近预报意义^[100]。

多源资料综合应用于局地暴雨形成机理分析。长江中游暴雨外场试验基地的风廓线雷达、地基微波辐射计和常规观测分析显示，引发武汉“2011.6.9”局地短时强降水过程的是一个尾随层云类中尺度对流系统：降水开始前从风廓线上可见地面气压迅速降低，地面风速迅速增大，云底高度波动降低对流层中低层有显著倾斜上升气流，并在其前后形成两个小尺度涡旋，与冷池和风切变抗衡下新单体的生成模型相吻合^[101]；基于北京市业务观测网以及风廓线网、微波辐射计、GPS水汽分布观测网等新型探测资料，我国学者精细分析了“2006.7.9”夜间香山局地大暴雨中的地形辐合回波带影响系统和风向切变、抬升、 γ 中尺度气旋性3种辐合对 γ 中尺度强降雨落区构成的动力影响机理、大暴雨落区形成的主要动力源和水汽输送能量来源^[102]；认识了“2012.7.21”北京地区特大暴雨的中尺度对流条件主要包括非常充沛的水汽，一定的对流不稳定性，对流系统持续的“列车效应”，以及低质心、高效率的降雨对流系统；从风廓线产品与分钟雨量看出锋前暖区降雨的对流系统特征^[103]；对比分析了北京“2008.8.14”和“2009.7.13”两次突发性强对流局地暴雨形成差异（图7）：从水平风垂直廓线可以看出这两次降水过程的动力机制有很大不同，“2009.7.13”开始时是深厚的暖湿气流、冷空气高空侵入和结束时整层冷空气下沉的前倾槽结构；“2008.8.14”是东风被近地面的东北风强迫抬升。“2009.7.13”的冷空气从高空入侵，降温从高空开始，造成上层干冷，下层暖湿的层结，使得对流发展；“2008.8.14”冷空气从近地面楔入暖空气（东南风）之下，造成暖湿空气被抬升，使对流发展。在预报中要关注水平风的垂直廓线，当低空急流加强，或有扰动生成，高空有波动等都预示着天气的转变^[104]；比较分析北京“2006.6.27”两个局地暴雨，结果显示微波辐射计液态水含量的集聚增减过程，预示着降水的即将出现和消亡；风廓线雷达揭示了影响系统的风场细节特征，中低层的风切变以及降水前低层的暖平流和小尺度低涡环流，这种系统结构和配置对降水的形成和维持有重要作用^[105]。

3 存在的问题

尽管上述非常规探测资料在反演技术、暴雨形成

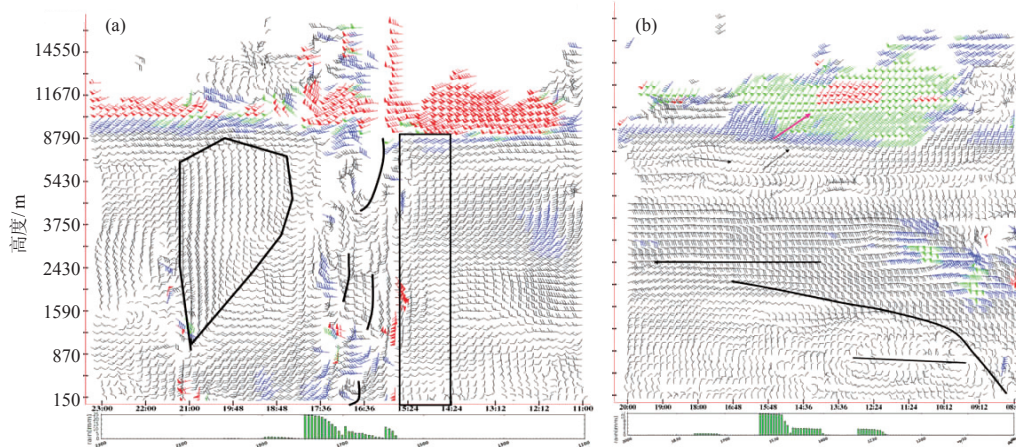


图7 北京南郊观象台水平风垂直分布廓线图^[104]

(a) 2009年7月13日11—23时, 间隔12min; (b) 2008年8月14日08—20时, 间隔12min

(图中横坐标下的绿色柱状线为南郊观象台自动站每小时5min降水量累加值, a中黑色方框区域显示的是高低空偏南风打通的时段, 黑色多边形区域则显示干冷空气入侵的时间段, 短粗黑实线为切变线; b中黑色粗实线为切变线, 黑色或红色箭头示意风向)

机理、改善模式预报等方面有一定的研究进展, 但距离深入研究和投入业务应用仍然还存在一定的差距。主要表现在以下几方面。

(1) 资料的质量控制技术需要在线能力, 对于资料精度的描述缺乏标准性。前面介绍的暴雨新型资料反演技术, 展示了我国学者在提高资料质量方面的努力, 但天气分析和模式运行等业务应用需要在线、优质与稳定的各级资料。此外, 掌握不同资料的精度是气象观测资料应用的必要前提, 但从目前研究成果看, 即使是对于同一资料, 其精度的描述也不尽相同, 有平均偏差、偏差均方差、偏离率等, 缺乏统一标准, 有待根据业务应用需求进行规范。

(2) 非常规观测资料在天气分析的业务预警预报中应用效率不高, 二次产品开发是瓶颈之一。目前新型探测资料二次开发利用, 还处于初步阶段, 远不能满足预报员的实际需求。预报员希望在第一时间直接使用这些高密度精细的新型探测信息, 如果基于非常规观测资料能反演出一些有天气意义的、预报员日常惯用的物理量指标, 并集中于一个平台, 将大大提高资料的业务应用效益。

(3) 基于非常规观测的科学布网研究有待关注与加强。非常规观测研究是业务观测的预研究阶段, 为以后设备纳入业务观测和应用提供科学依据和技术储备, 有待通过中尺度模式的敏感性试验确定预报敏感区域、不同探测区域的布点空间分辨率、设备选型搭配等设计。

(4) 包含非常规观测的多源资料的综合应用和深层次的挖掘不够。目前高时空分辨率、高精度的新

型探测设备如风廓线雷达、GNSS/MET和微波辐射计等主要通过数值模式改善初始场提高模式预报质量, 但对于多源资料的融合和再构造, 有待找到时空上的合理匹配, 不同精度观测的取舍, 以及站点数据网格化等科学的技术方法; 如何利用新型的云观测、水汽观测和风廓线观测开展模式核心技术(如云参数化、边界层参数化)的研究和改进, 需要做深入的挖掘。

4 新型探测资料应用未来发展趋势

从我国常规气象观测如探空、地面自动站、业务雷达等从新建到现代无障碍业务应用的发展历程, 从目前国际发达国家在气象探测资料方面的管理与应用看, 围绕新型探测资料在暴雨预报研究中的应用, 我国在未来10年将开展如下方面的工作。

(1) 新型资料的规范化、系统化管理。从20世纪末至今, 我国利用多种探测设备在华南、华中、华北、江淮以及青藏高原组织开展了气象综合观测科学试验, 并建立了较为详实的数据集。基于建立这些外场观测数据集的经验, 非常规观测的数据管理, 将逐年向数据准确化、归纳合理化、调用方便化发展, 并针对不同的数据发展反演技术, 建立质量控制评估系统, 为资料用户提供高精度的资料和资料的可用性评价。

(2) 应天气分析业务应用需求, 推进新型探测资料的二次产品开发。新型探测资料在出现初期往往多用于天气个例的特征分析, 定性用于中小尺度分析和精细化的强天气预警。新型探测资料的定量使用有待二次产品的开发, 一是依赖于大样本的分析统计, 针对不同类型天气系统提炼的预警指标才能经得住检验, 有较好的实用性。二是将各种探测的温度、湿

度、风、双偏振量等参数转换为垂直温度梯度、低空垂直切变、对流有效位能、500与850hPa的假相当位温差、K指数、湿度梯度和温度露点差等热力、动力稳定度、水汽输送、定量降水测量等参数，便于预报员直接使用。三是将多种观测信息直接集中在一个平台进行实时处理与显示，便于预报前线人员第一时间调用。

(3) 与机理研究和数值模式的需求相衔接，实现目标化观测。不同于常规业务观测，新型探测资料具备对暴雨过程更细致的描述、更精细化的采样等优势。基于常规观测业务体系和精细化的暴雨新型探测系统，已经可以深入开展大背景天气系统下、中小尺度的天气系统的相互影响和暴雨的发生发展机理研究、地形对暴雨的影响研究，可以深入开展云内部水汽、云水和水成物之间的微物理转化研究，加强了暴雨形成机理分析，也为中尺度数值预报的边界层参数化、云参数化等数值方案的改进提供了良好条件。因此，暴雨综合观测科学试验中新型探测资料的获取，越来越与解决暴雨机理研究关键问题，或改进数值模式中重要物理模型等目标紧密衔接，做到目标化观测。

(4) 暴雨新型探测资料的深度应用并开拓新应用领域。主要体现于：全方位、精细地对重要暴雨天气特征和形成机理进行精细化研究分析；基于风廓线、大气水汽、云、温度等观测，在模式云参数化、边界层参数化等核心技术方面有突破；改进多源资料融合技术，加入新的精细化小尺度观测，改善模式预报初始场，提高模式预报能力；进一步从新型探测资料大样本数据集的天气系统分析中，提取临近预报预警指标，为强天气预报预警服务提供新的有效依据。随着新型探测资料的长时间序列的累计，这些高精度、高时空分辨率资料也将会在气候变化、云水资源评估、环境监测与预报等方面发挥各自的作用。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] Duan J, Bevis M, Fang P. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J Appl Meteorol*, 1996, 35: 830-838.
- [3] Shi C, Zhao Q L, Li M, et al. Precise orbit determination of Beidou Satellites with precise positioning. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1079-1086.
- [4] 李国翠, 李国平, 杜成华, 等. 华北地区地基GPS水汽反演中加权平均温度模型研究. *南京气象学院学报*, 2009, 32(1): 80-86.
- [5] 谷晓平, 王长耀, 吴登秀. GPS水汽遥感中的大气加权平均温度的变化特征及局地算法研究. *气象科学*, 2005, 25(1): 79-83.
- [6] 徐桂荣, 陈波, 万蓉, 等. 地基GPS不同水汽反演方法的误差分析. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 346-350.
- [7] 龚绍琦. 中国区域大气加权平均温度的时空变化及模型. *应用气象学报*, 2013, 24(3): 332-341.
- [8] 徐桂荣, 万蓉, 李武阶, 等. 地基GPS反演大气可降水量方法的改进. *暴雨灾害*, 2009, 28(3): 203-209.
- [9] 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.
- [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, 20(3): 346-353.
- [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] 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.
- [13] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002年6月20—24日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. *气象学报*, 2004, 62(4): 423-438.
- [14] 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等. GPS/PWV资料在强对流天气系统中的特征分析. *暴雨灾害*, 2008, 27(2): 141-148.
- [15] 杨红梅, 何平, 徐宝祥. 用GPS资料分析华南暴雨的水汽特征. *气象*, 2002, 28(5): 17-21.
- [16] 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等. 2002年台风Ramasun影响华东沿海期间可降水量的GPS观测和分析. *大气科学*, 2004, 28(4): 613-624.
- [17] 郝丽萍, 邓佳, 李国平, 等. 一次西南涡持续暴雨的GPS大气水汽总量特征. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 230-239.
- [18] 陈娇娜, 李国平, 黄文诗, 等. 华西秋雨天气过程中GPS遥感水汽总量演变特征. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 753-760.
- [19] 姚建群, 丁金才, 王坚捍, 等. 用GPS可降水量资料对一次大一暴雨过程的分析. *气象*, 2005, 31(4): 48-52.
- [20] 袁招洪, 丁金才, 陈永林. 中尺度数值预报模式预报水汽与GPS观测的比较研究. *大气科学*, 2004, 28(3): 433-440.
- [21] 袁招洪. GPS可降水量资料应用于MM5模式的变分同化试验. *气象学报*, 2005, 63(4): 391-404.
- [22] 楚艳丽, 郭英华, 张朝林, 等. 地基GPS水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用. *气象*, 2007, 33(12): 16-22.
- [23] 张朝林, 陈敏. “00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估. *气象学报*, 2005, 63(6): 922-932.
- [24] 丁金才, 袁招洪, 杨引明, 等. GPS/PWV资料三维变分同化改进MM5降水预报连续试验的评估. *气象*, 2007, 33(6): 11-18.
- [25] 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.
- [26] 李红莉, 万蓉, 谢有才. 利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 702-709.
- [27] 曹云昌, 陈永奇, 李炳华, 等. 利用地基GPS测量大气水汽廓线的方法. *气象科技*, 2006, 34(3): 241-245.
- [28] 宋淑丽, 朱文耀, 程宗颐, 等. GPS信号斜路径方向水汽含量的计算方法. *天文学报*, 2004, 45(3): 338-345.
- [29] 毕研盟, 毛节奏, 李成才, 等. 利用GPS的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布. *大气科学*, 2006, 30(6): 1169-1176.
- [30] 宋淑丽, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海GPS层析水汽三维分布改善数值预报湿度场. *科学通报*, 2005, 50(20): 2271-2277.
- [31] 张双成, 叶世榕, 万蓉, 等. 基于Kalman滤波的断层扫描初步层析水汽折射率分布. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(8): 797-799.
- [32] 万蓉, 郑国光, 于胜杰, 等. 基于观测约束的地基GPS三维水汽层析技术研究. *气象学报*, 2013, 71(2): 318-331.
- [33] 毕研盟, 毛节奏, 毛辉. 海南GPS网探测对流层水汽廓线的试验研究. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 412-419.
- [34] 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.
- [35] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. *气象学报*, 2011, 69(4): 719-728.
- [36] 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析. *大气科学*, 2009, 33(2): 388-396.
- [37] 刘建忠, 何晖, 张蕾. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估. *气象科技*, 2012, 40(3): 332-339.
- [38] 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.
- [39] 张文刚, 徐桂荣, 廖可文, 等. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响. *暴雨灾害*, 2013, 32(1): 70-76.
- [40] 潘旭光. 地基微波辐射计资料的质量控制方法及其应用研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [41] 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. *J Geoph Res*, 2001, 106: 14485-14500.
- [42] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区

- 液态云水路径和可降水量的初步研究. 大气科学, 2012, 34(3): 548-558.
- [43] 金德镇, 雷恒池, 谷淑芳, 等. 机载微波辐射计测云中液态含水量. 气象学报, 2004, 62(6): 868-874.
- [44] 张志红, 周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析. 气象, 2010, 36(3): 83-89.
- [45] 李铁林, 刘金华, 刘艳华, 等. 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析. 气象, 2007, 33(12): 62-69.
- [46] 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.
- [47] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 地基微波辐射计资料在降水分析中的应用. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 358-365.
- [48] 王叶红, 赖宏伟, 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.
- [49] Wu L, Zhou X H, Wang F R. Primary analysis of the comparison test of wind profilers Made in China. International Conference on Information Science and Technology (ICIST 2011), 2011, Nanjing, China.
- [50] 邓闯, 阮征, 魏鸣, 等. 风廓线雷达测风精度评估. 应用气象学报, 2012, 23(5): 528-533.
- [51] 吴志根, 徐同, 丁若洋, 等. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. 气象, 2013, 39(3): 370-376.
- [52] 万蓉, 周志敏, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 130-136.
- [53] 惠建新, 吴蕾, 高玉春, 等. 基于极大似然算法的风廓线雷达谱矩估计. 气象科技, 2012, 40(1): 9-14.
- [54] 何平, 李柏, 吴蕾, 等. 确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法. 应用气象学报, 2013, 24(3): 297-303.
- [55] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330-338.
- [56] 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用. 气象科技, 2012, 40(1): 74-78.
- [57] 阮征, 何平, 葛润生. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究. 大气科学, 2008, 32(1): 133-140.
- [58] 孙继松, 杨波. 地形与城市环流共同作用下的中尺度暴雨. 大气科学, 2008, 32(6): 1352-1364.
- [59] 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用. 大气科学, 2013, 37(4): 829-840.
- [60] 王丛梅, 吴智杰, 刘瑾, 等. 城市短时强降雨中尺度观测特征分析. 气象科技, 2011, 39(6): 678-684.
- [61] 丁青兰, 王令, 卞素芬. 北京局地降水云中地形和边界层辐合线的作用. 气象科技, 2009, 37(2): 152-155.
- [62] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的作用. 气象科技, 2008, 36(3): 300-304.
- [63] 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 251-256.
- [64] 黄钰, 阮征, 葛润生, 等. 2010年夏季北京零度层亮带特征统计. 气象, 2013, 39(6): 704-709.
- [65] 何平, 马颖, 阮征, 等. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究. 气象学报, 2010, 68(2): 264-269.
- [66] 张朝林, 王迎春. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究. 气象学报, 2002, 60(6): 786-791.
- [67] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流与暴雨的关系. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- [68] 曹春燕, 江崑, 孙向明. 一次大暴雨过程低空急流脉动与强降水关系分析. 气象, 2006, 32(6): 102-106.
- [69] 金巍, 曲岩, 姚秀萍, 等. 一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系. 气象, 2007, 33(12): 31-38.
- [70] 张京英, 漆梁波, 王庆华. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系. 气象, 2005, 31(12): 41-45.
- [71] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探空资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-419.
- [72] 王丽荣, 胡志群, 匡顺四. 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度. 气象, 2006, 32(4): 45-51.
- [73] 古红萍. 风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气中的分析和应用及数值模拟. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.
- [74] 黄伟, 张沛源, 葛润生. 风廓线雷达估测雨滴谱参数. 气象科技, 2002, 30(6): 234-238.
- [75] 吴志根, 杨礼敏, 王勤典, 等. 移动X波段双线偏振多普勒气象雷达及其关键技术分析. 气象, 2010, 36(8): 126-133.
- [76] 魏洪峰, 薛振刚. 双偏振多普勒天气雷达差分反射率因子的测量误差. 气象科技, 2008, 36(2): 223-227.
- [77] 肖艳姣, 王斌, 陈晓辉, 等. 移动X波段双偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制. 高原气象, 2012, 31(1): 223-230.
- [78] 曹俊武, 刘黎平, 陈晓辉, 等. 3836C波段双线偏振多普勒雷达及其在一次降水过程中的应用研究. 应用气象学报, 2006, 17(2): 192-201.
- [79] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法. 大气科学, 2006, 30(4): 635-644.
- [80] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. X波段雷达双线极化雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2009, 33(5): 1027-1037.
- [81] Brangi V N. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2001, 39 (9): 1906-1915.
- [82] 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠, 等. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. 气象学报, 2008, 66(2): 251-261.
- [83] Brangi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [84] Park S G, Brangi V N, Chandrasekar V, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I, Theoretical and empirical basis. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22 (11): 1621-1632.
- [85] 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2012, 36(3): 495-506.
- [86] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980.
- [87] 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布. 大气科学, 2010, 34(1): 23-34.
- [88] 程周杰, 刘宪勋, 朱亚平. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析. 应用气象学报, 2009, 20(5): 594-601.
- [89] 曹俊武, 刘黎平, 陈晓辉, 等. 3836C波段双线偏振多普勒雷达及其在一次降水过程中的应用研究. 应用气象学报, 2006, 17(2): 192-201.
- [90] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. 地球科学进展, 2009, 24(4): 383-391.
- [91] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. 气象学报, 2011, 69(2): 352-362.
- [92] 刘黎平, 仲凌志, 江源, 等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. 气象科技, 2009, 37(5): 567-571.
- [93] 宋立雪, 魏鸣, 宋继堂. 毫米波多普勒雷达RHI退速度模糊研究. 气象科技, 2012, 40(4): 542-547.
- [94] 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 3mm多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究. 大气科学, 2012, 36(1): 1-10.
- [95] 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.
- [96] 孙晓光, 刘宪勋, 贺宏兵, 等. 毫米波测云雷达融化层自动识别技术. 气象, 2011, 37(6): 720-726.
- [97] 陶诗言, 周秀骥, 等. 20世纪中国学术大典——大气科学. 福州: 福建教育出版社, 2002.
- [98] 倪允琪, 张人禾, 刘黎平, 等. 中国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX). 北京: 气象出版社, 2013.
- [99] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 697-706.
- [100] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 2011, 37(4): 412-422.
- [101] 汪小康, 王晓芳, 崔春光, 等. 用新型探测资料分析武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 321-327.
- [102] 郭彪, 段雨, 杨波, 等. 0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.
- [103] 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 2012, 38(10): 1278-1287.
- [104] 王令, 王国荣, 孙秀忠, 等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 2012, 38(3): 281-290.
- [105] 郑祚芳, 刘红燕, 张秀丽. 局地强对流天气分析中非常规探测资料应用. 气象科技, 2009, 37(2): 243-247.