

韩羽庭,陈昭仔,窦利军,等.风廓线雷达在两次冬季多相态降水中的特征对比分析[J].海洋气象学报,2025,45(2):89-98.
HAN Yuting, CHEN Zhaoyu, DOU Lijun, et al. Comparative analysis on characteristics of wind profile radar data in two winter multiphase precipitation processes [J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45 (2): 89-98. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230826001. (in Chinese)

风廓线雷达在两次冬季多相态降水中的特征对比分析

韩羽庭¹,陈昭仔²,窦利军²,张曦¹,何佩仪³,林冰⁴

(1.民航华北空管局大兴空管中心安全业务部,北京 102604;2.民航华北空管局大兴空管中心气象台,北京 102604;3.民航西南空管局气象中心,四川 成都 610202;4.福州市预警信息发布中心,福建 福州 350000)

摘 要 利用欧洲中期天气预报中心 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时 ERA5 资料及北京大兴国际机场 1 号风廓线雷达资料,对比大兴国际机场 2021 年 11 月 6—7 日和 2023 年 2 月 11—12 日两次多相态降水过程,探究风廓线雷达在两次冬季多相态降水中的表现特征。结果表明:(1) 风廓线雷达近地面风场偏东风建立、急流出现及中低空扰动均对冬季降雪临近预报起积极作用,低层冷空气增强对相态转换有一定指示意义,中高层暖湿气流爬升的强弱与降水强度变化有很好的对应关系。(2) 降水强度和降水相态的变化均可在风廓线雷达探测的垂直速度上得到体现。两次过程的降雨时段在 2.5 km 以下有较大的正速度,随着降水相态由雨向雪转变,垂直速度发生锐减。(3) 大气折射率结构常数 (C_n^2) 和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 回波结构特征相似,两者均能反映降水强度变化。两次过程 C_n^2 对数值均在降水前 1 h 开始增大, C_n^2 值越大,降水越剧烈,降水相态转为雨夹雪时, C_n^2 对数值开始逐渐降低,高值区高度开始下降;两次过程 SNR 高值区主要集中在 2.0 km 以下, SNR 结构越紧密、回波强度越大,降水越剧烈。(4) 雷达探测高度受大气高层湿度的直接影响,可为降水强度的判断提供依据。

关键词 北京大兴国际机场;风廓线雷达;相态转换;垂直速度;大气折射率结构常数 (C_n^2);信噪比 (SNR)

中图分类号: P412.25;P458.1+21 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)02-0089-10
DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230826001

Comparative analysis on characteristics of wind profile radar data in two winter multiphase precipitation processes

HAN Yuting¹, CHEN Zhaoyu², DOU Lijun², ZHANG Xi¹, HE Peiyi³, LIN Bing⁴

(1. Safety Business Department of Daxing Air Traffic Control Center, North China Air Traffic Administration, Civil Aviation Administration of China, Beijing 102604, China; 2. Meteorological Observatory of Daxing Air Traffic Control Center, North China Air Traffic Administration, Civil Aviation Administration of China, Beijing 102604, China; 3. Meteorological Center of Southwest Air Traffic Administration, Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610202, China; 4. Fuzhou Early Warning Center, Fuzhou 350000, China)

Abstract Using the ERA5 hourly data ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the data of No.1 wind profile radar at Beijing Daxing International Airport, two multiphase precipitation processes at Daxing Airport from 6 to 7 November 2021 and from 11

收稿日期:2023-08-26;修回日期:2023-12-14

基金项目:2024 年民航安全专业项目第 396 号项目

第一作者:韩羽庭,610902603@qq.com。

to 12 February 2023 are compared, and the characteristics of wind profile radar in the two winter processes are explored. The results are listed below. (1) The establishment of easterly winds near the ground wind field of wind profile radar, the emergence of jet streams and the disturbance in the middle and lower layers all play a positive role in the winter snowfall nowcasting. The enhancement of cold air in the lower layer has certain indicative significance for phase transition, and the strength of warm and humid uplift in the middle and upper layers corresponds well to the change of precipitation intensity. (2) Both precipitation intensity and precipitation phase transition can be reflected in the vertical velocity detected by wind profile radar. There are large positive velocities below 2.5 km during the rainfall period of the two processes, and the vertical velocity decreases sharply with the precipitation phase transition to sleet. (3) The echo structures of the atmospheric refractive index structure constant (C_n^2) and signal-to-noise ratio (SNR) are similar, and both of them can reflect the change of precipitation intensity. The logarithmic values of C_n^2 in both processes begin to increase one hour before the start of precipitation, and the higher the C_n^2 value, the more intense the precipitation; with the phase transition to sleet, the logarithmic values of C_n^2 gradually decline and the height of the high-value area decreases. The area of high SNR in the two processes is mainly concentrated below 2.0 km, and the tighter the SNR structure and the greater the echo intensity, the more intense the precipitation. (4) The radar detection altitude is directly affected by the humidity in the upper atmosphere, which can provide a basis for judging precipitation intensity.

Keywords Beijing Daxing International Airport; wind profile radar; phase transition; vertical velocity; atmospheric refractive index structure constant (C_n^2); signal-to-noise ratio (SNR)

0 引言

风廓线雷达是一种遥感设备,通过向高空发射不同方向的电磁波束,接收并处理这些电磁波束因大气垂直结构不均匀而返回的信息进行高空风场探测。风廓线雷达以多普勒效应为原理,能够探测雷达上空风场及其随时间演变的情况,有很高的时间和空间分辨率,具有连续和实时的特点。其可探测出较密集的廓线资料,测量数据可以几分钟为一个时间间隔输出,空间分辨率以几十米为一个量级。风廓线雷达在现代天气预报工作中被广泛应用,20世纪80年代开始,国内外学者对于风廓线雷达的应用研究主要集中在大气三维风场、边界层高度及湍流运动、降水过程及雨滴谱反演等领域。日本和印度科学家使用低层大气风廓线(lower atmospheric wind profiler, LAWP)雷达进行观测试验,并验证其可靠性和连贯性^[1]。May等^[2]通过风廓线雷达与无线电声波探测系统(radio acoustic sounding system, RASS)连续检测温度和垂直速度,辅助多普勒雷达监测阵风锋,对阵风锋面的温度结构、垂直速度场和运动学特征进行研究。通过对甚高频(very high frequency, VHF)风廓线雷达的功率谱信息观察,Wakasugi等^[3]发现风廓线雷达能够探测降水粒

子信号。Rogers等^[4]通过风廓线雷达接收返回信号的多普勒谱估算降水时雨滴大小的分布,并与飞机探测数据进行对比验证。水平风廓线和垂直风廓线等是风廓线雷达提供的基本气象资料,除此之外还可应用雷达数据分析出切变线、大气重力波动和大气稳定度等信息,通过不同的探测原理估算水平散度和变形量、获取湍流信息和湍流结构常数。因此,风廓线雷达除提供详细的风场及其随时间演变的资料外,还能够提供常规探测手段难以获取的其他可以用于气象研究和天气预报的有用信息。

近年来已有诸多关于冬季降水天气的研究成果^[5-9],降水时间、降水相态以及量级的预报是公认的难点。特别是对于民航运输系统,预报的准确性直接影响航班准点率与飞行安全,成功的预报关系着安全运行应急和决策工作的开展。国内学者对风廓线雷达在冬季降水天气中的表现特征研究相对较少^[10-11]。施红蓉等^[10]认为降雨到降雪相态变化的持续时间能够通过风廓线雷达的强度和速度产品进行监测,通过垂直径向速度、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)的表现可有效区分降水相态。李峰等^[11]利用风廓线雷达探测产品对雾霾、降雨、降雪等天气过程的变化细节进行诊断和判别。大兴机场作为新开航不久的机场,应用机场风廓线雷达诊断

冬季降水天气的研究还不成熟,因此,文中选取2021年11月6—7日和2023年2月11—12日两次多相态降水过程,利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐小时 ERA5 资料及机场1号风廓线雷达资料,探究风廓线雷达在两次冬季多相态降水中的表现特征。着重对降水过程中风廓线雷达水平风场、垂直速度及其他相关产品特征进行诊断分析,以提高冬季降水天气中风廓线雷达的使用效率,为此类天气临近预报预警提供参考,提升预报准确率。

1 风廓线雷达介绍

文中使用北京大兴国际机场1号风廓线雷达。该雷达为CFL-06型对流层风廓线雷达,采用全相参脉冲多普勒体制,具有高时空分辨率,可连续提供0.1~6.0 km或更高高度范围内的大气水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数(C_n^2)等气象要素随高度的分布情况,提供探测地域的大气折射率结构波动和湍流起伏等难以获取的气象信息。空间分辨率最小可达60 m,时间分辨率不大于6 min,工作频率为

1 270 MHz~1 375 MHz。风速测量范围为0~60 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,分辨率为0.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,误差不大于1.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;风向测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,分辨率为 0.5° ,误差不大于 10° 。

2 实况概述

2021年11月6—7日大兴机场降水过程(以下简称“个例1”),先后出现了雨、雨夹雪、雪天气(图1a,降水量数据为自动观测系统融雪后数据,因此雪停后至07:00前,仍有降水量增加)。6日01:38—04:40(世界时,下同)、06:19—12:16相态为雨,12:17—13:26转为雨夹雪,6日13:27—7日05:14转为雪。这次降水过程持续时间约为27 h,前期降雨时间较长,雨雪相态转换过程中出现了冰粒(6日11:27—12:16),后期以小雪为主,短时伴有中雪(7日00:18—02:38),过程累计降水量达5.4 mm,积雪深度达3 cm。

2023年2月11—12日大兴机场降水过程(图1b,以下简称“个例2”),11日22:12—12日00:59相态为雨,12日01:00—09:27为雨夹雪,其中02:24—02:56短时相态为雪,整个过程持续时间约为11.5 h,过程累计降水量达2.7 mm,积雪深度为0 cm。

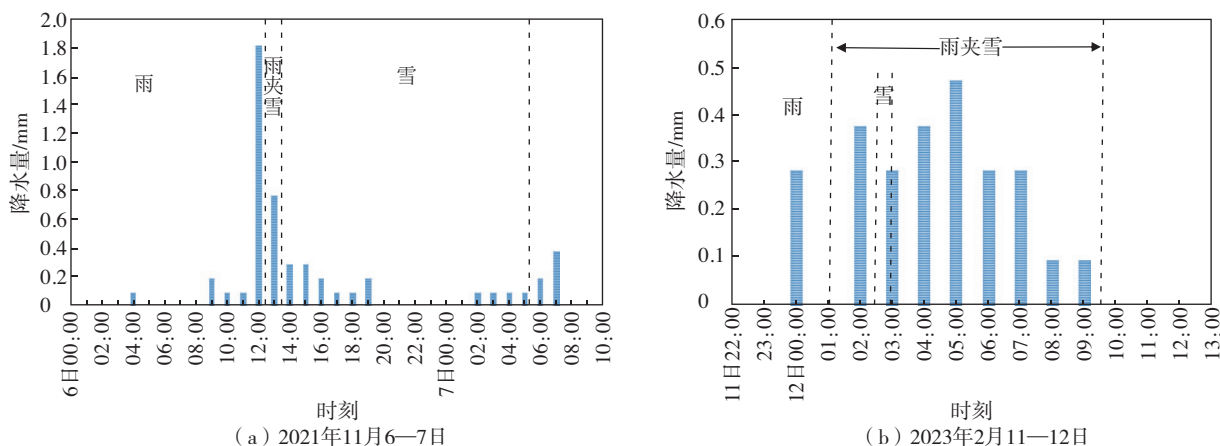


图1 两次降水过程逐时降水量及降水相态转变

Fig.1 Hourly precipitation and precipitation phase transition in the two precipitation processes

3 环流背景

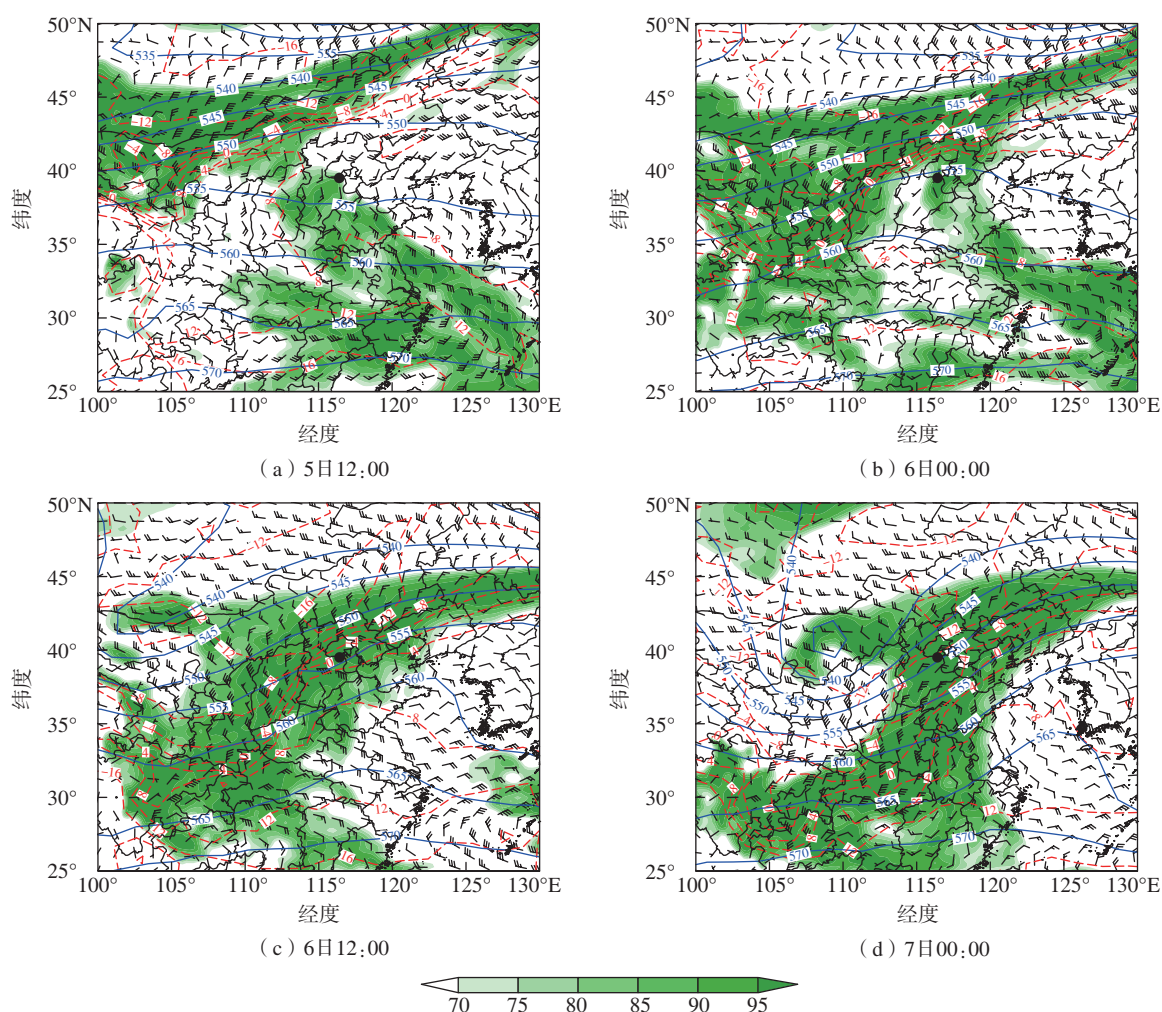
图2为2021年11月6—7日降水过程环流形势场。西北中蒙边境处的冷空气在高空槽的引导下南压,缓慢向华北平原移动,700 hPa冷空气主体位于河套以西,受到华北以东高压环流阻挡,环流后部西南暖湿气流与冷空气在内蒙古和河北交界处形成

对峙。850 hPa槽线处温度梯度明显,槽后有强烈的冷平流降温,东北风风速达16 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,冷空气较700 hPa更早到达华北平原,形成明显的冷垫;水汽从东海经安徽沿太行山脉输送至河北西南侧,后随着冷暖空气的逐渐加强,6日00:00后,河北西南侧有低涡出现,形成大范围的辐合区。6日12:00,大兴机场附近存在明显的偏东风急流,风速为12~

$18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。此时 850 hPa 温度已降至 0°C 以下,偏东风急流与南下的冷空气在机场附近形成强烈抬升,本场短时出现了中雪量级。1 000 hPa 在本场以南区域存在弱辐合,从 5 日傍晚开始有持续的东南风水汽输送(图略),6 日再配合有前期东移入海的冷空气回流,把东海的水汽源源不断的输送到

华北地区,为此次降水过程提供了充沛的水汽。

整层来看,850 hPa 及以下东北风为降雪提供了冷垫,燕山、太行山脉的阻挡有利于低层冷垫进一步增强,500 hPa 和 700 hPa 的西南暖湿气流在冷垫上爬升,是华北地区典型的冷垫背景下的回流降雪天气。



蓝色等值线—500 hPa位势高度,单位为dagpm;红色等值线—850 hPa温度,单位为 $^\circ\text{C}$;风矢—850 hPa风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;色阶—700 hPa相对湿度,单位为%;黑色圆点—大兴机场地理位置。

图2 2021年11月5—7日高低空环流形势场

Fig.2 Synoptic situations in the upper and lower layers from 5 to 7 November 2021

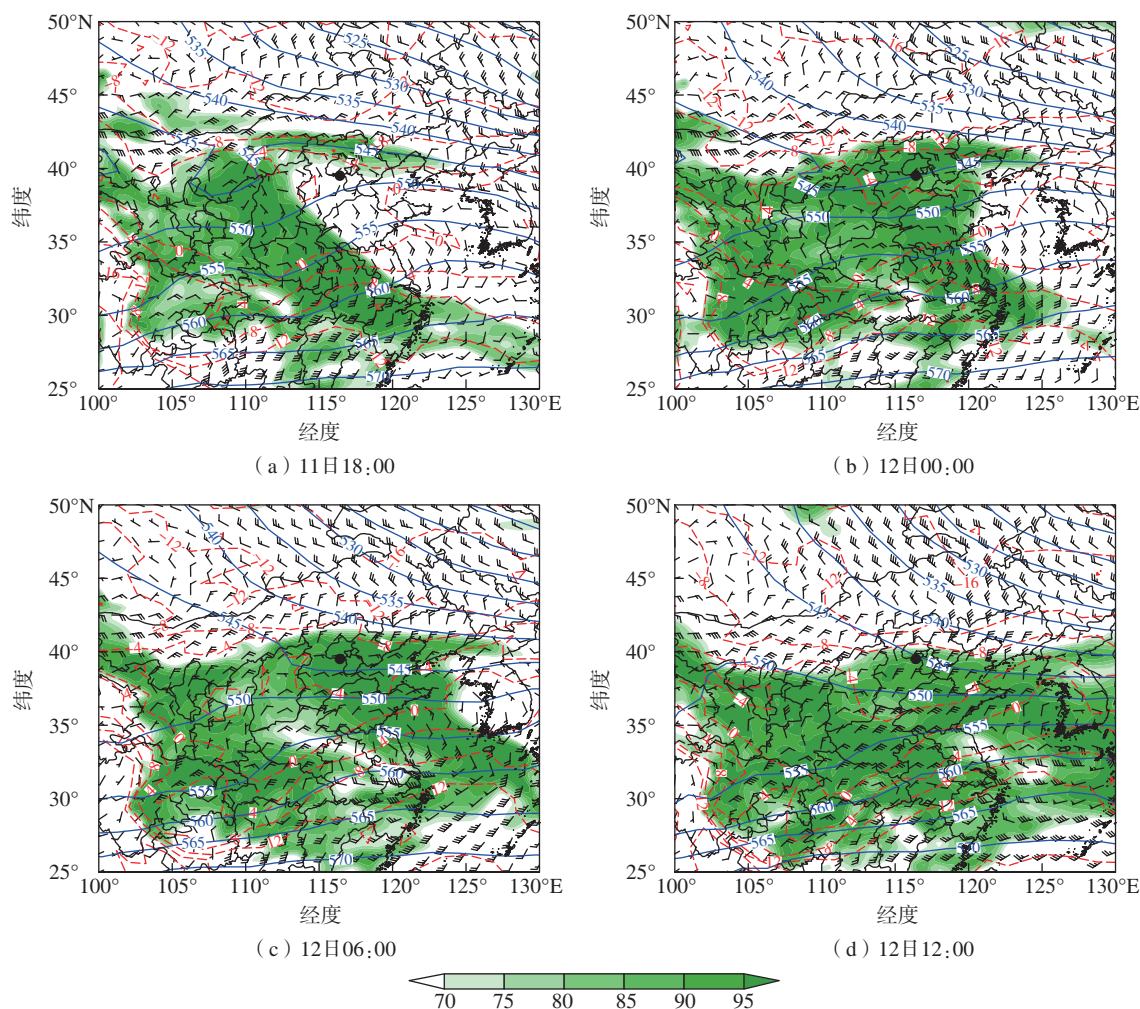
图3为2023年2月11—12日降水过程环流形势场。12日00:00,700 hPa华北平原受低涡控制,为大范围的辐合区。低涡将冷空气分为两支,一支经内蒙古中部、北部、东北地区东移入海,一支经内蒙古西部南下。槽线受低涡的阻挡,南压缓慢。700 hPa低涡在500 hPa上表现为河套地区的弱切变线,可见低涡系统并不深厚,中高层西南

暖湿爬升相对较弱。850 hPa前期有较明显的偏南暖湿输送,与冷空气在华北中部辐合(图略),但随着系统东移南压,冷空气经渤海倒灌,华北低层转为偏东气流影响,辐合条件转弱。由于海上摩擦作用小,1 000 hPa偏东风有明显的加速,风速达 $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,形成低空急流,北京、河北受偏东风冷垫控制。可见,个例2与个例1形势背景相似,

低层均有冷垫存在,西南暖湿气流在冷垫上爬升从而造成回流降雪。

两次过程相比,个例1低层有明显的南北风风向、风速的辐合,冷垫的强度大、厚度高、维持时间长,配合中高层西南暖湿急流,暖湿气流强烈地向上

爬升。而个例2低层受偏东风控制,没有明显的辐合,冷垫条件一般,加上中高层西南暖湿爬升相对较弱,因此造成实际两过程一强一弱的明显差异。后续此文将利用风廓线雷达进一步探究两次过程的表现特征及规律。



蓝色等值线—500 hPa位势高度,单位为dagpm;红色等值线—850 hPa温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$;风矢—850 hPa风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;色阶—700 hPa相对湿度,单位为%;黑色圆点—大兴机场地理位置。

图3 2023年2月11—12日高低空环流形势场

Fig.3 Synoptic situations in the upper and lower layers from 11 to 12 February 2023

4 风廓线雷达特征

4.1 水平风场

个例1降水分为两阶段,第一阶段降水开始前,风廓线雷达水平风场上已经可以看出明显征兆。整层受偏南风控制,11月5日23:00开始(图4a),与地面倒槽东移相配合,近地面层有弱东南风回流出现。在降水开始(01:38)前半小时,近地面层风速

开始加大至 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6日04:00后,风速减小为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,约半小时后雨停。由此可见,第一阶段降水由系统前近地面层东南风扰动和风速的短时加强引起。由于近地面层偏东风是北京降雪的重要特征之一^[12-14],因此风廓线雷达上偏东风、东南风的出现以及风速的变化对降水预报有积极作用。

随着第二阶段主体降水的来临,低层逐渐转为偏北风,暖湿气流沿着冷垫向上爬升。风廓线雷达

上锋面清晰可见,6日05:30开始出现垂直风切变,并且随着时间的推移垂直风切变快速增强,切变位置由低向高变化。06:19降水开始,前期为弱降水,暖湿气流在爬升的过程中不断增强,降雨由弱转强。随着低层偏北风加大,冷垫厚度不断增厚,降水相态逐渐由雨向雪转变。11:20之后,降水相态由中雨

转为雨雪混合状态。11:27冰粒出现时,1.5 km (850 hPa) 以下平均风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4b)。因此,降水相态的转变与冷空气密切相关,风廓线雷达上低层冷空气增强对相态转换有一定的指示意义,中高层暖湿气流爬升的强弱与降水强度变化也有很好的对应关系。

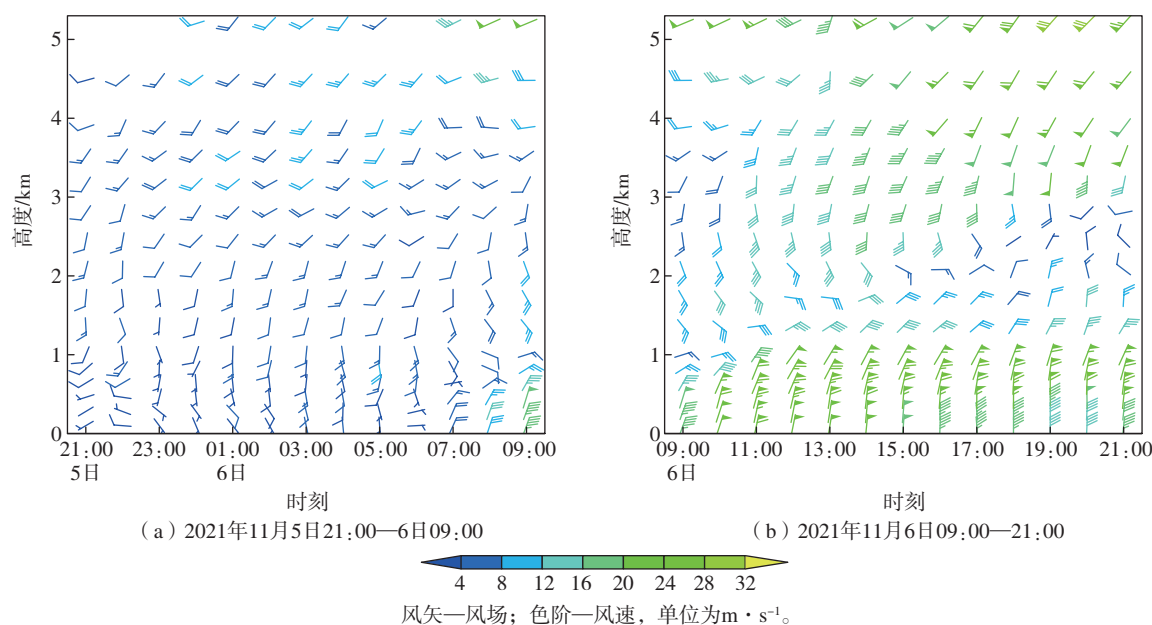


图4 风廓线雷达水平风时间-高度剖面图

Fig.4 Time-height profile of horizontal wind of wind profile radar

个例2 风廓线水平风场与个例1有相似的表现(图5)。过程开始前及过程中1.5 km (850 hPa) 以下均有稳定的偏东风回流建立,平均风速达 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,形成冷垫;中高层2.5 km (近700 hPa) 及以上西南暖湿气流沿冷垫向上爬升。2月12日01:00后,低层偏东风增大至 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着东风势力加强,冷垫厚度逐渐增厚,降水相态转为雨夹雪。02:30后,1.0~1.5 km 之间有偏东风急流建立,短时转为小雪。

研究^[15-19]表明,风廓线雷达对低空急流的探测有很好的表现,因此在北京冬季降雪的临近预报中,要着重关注风廓线雷达上近地面风场的变化,偏东风的建立、急流的出现及中低空的扰动均对临近预报起着积极作用。此外,风廓线雷达水平风场对低层冷垫的形成、中高层暖湿爬升等具有直观表现。伴随着低层冷空气的增强,冷垫不断增厚,中高层暖湿空气爬升到高层降温,降水的下落距离和时间增长,亦使得

温度下降,因此水平风场上低层冷空气的增强对雨雪相态转换有一定的指示意义,中高层暖湿气流爬升的强弱与降水强度变化有很好的对应关系。

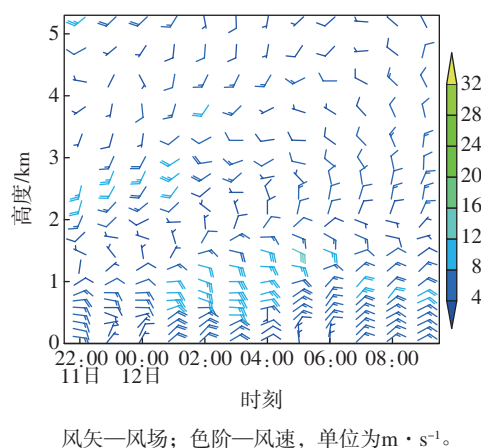


图5 2023年2月11日22:00—12日09:00风廓线雷达水平风时间-高度剖面图

Fig.5 Time-height profile of horizontal wind of wind profile radar from 22:00 UTC 11 to 09:00 UTC 12 February 2023

4.2 垂直速度

风廓线雷达探测的垂直速度为相对于雷达垂直方向波束的多普勒径向速度,运动方向朝向雷达为正径向速度,运动方向远离雷达为负径向速度。降水条件下,风廓线雷达探测的垂直速度表示降水粒子下沉运动和大气垂直运动的总和^[20-23],并未经过落速修订。由于中纬度天气尺度垂直运动的特征尺度与降水粒子下沉运动尺度量级相差甚大,因此可将风廓线雷达探测的垂直速度近似作为降水粒子的下落速度参照分析。

图6为两次过程风廓线雷达垂直速度时间-高度剖面图。图6a显示出个例1的垂直速度变化,11月6日01:00,第一阶段弱降水开始之前,垂直速度约为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。01:30后,垂直速度增大至 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,参照实况资料发现,01:38开始出现小毛毛雨,雨强微弱,由此可见风廓线雷达对于降水粒子下落速度的探

测较敏感。04:00左右,垂直速度短时增大,04:30后,垂直速度从 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,第一阶段降水结束。06:00后,垂直速度开始增加,此时主体降水来临,06:00—08:30为主体降水前期,仍为毛毛雨,垂直速度维持在 $0.5\sim 1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。08:30,开始转为小雨,4.5 km以下垂直速度显著增大,2.5 km以下垂直速度为 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,因此垂直速度可以较好地表现出雨强的变化。11:00—12:00,2.0 km以下出现强下沉运动,垂直速度最大超过 $6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与实况冰粒发生时间相对应。12:00以后,相态转为雨夹雪,垂直速度下降至 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。13:30,转雪后垂直速度继续降至 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,这是由于降雪粒子的下落末速度小于降雨粒子的下落末速度,垂直速度随着相态的变化发生了锐减,因此降水相态转换情况可在垂直速度图上清晰表现。17:30后,垂直速度稳定减小至 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明降雪天气趋于稳定。

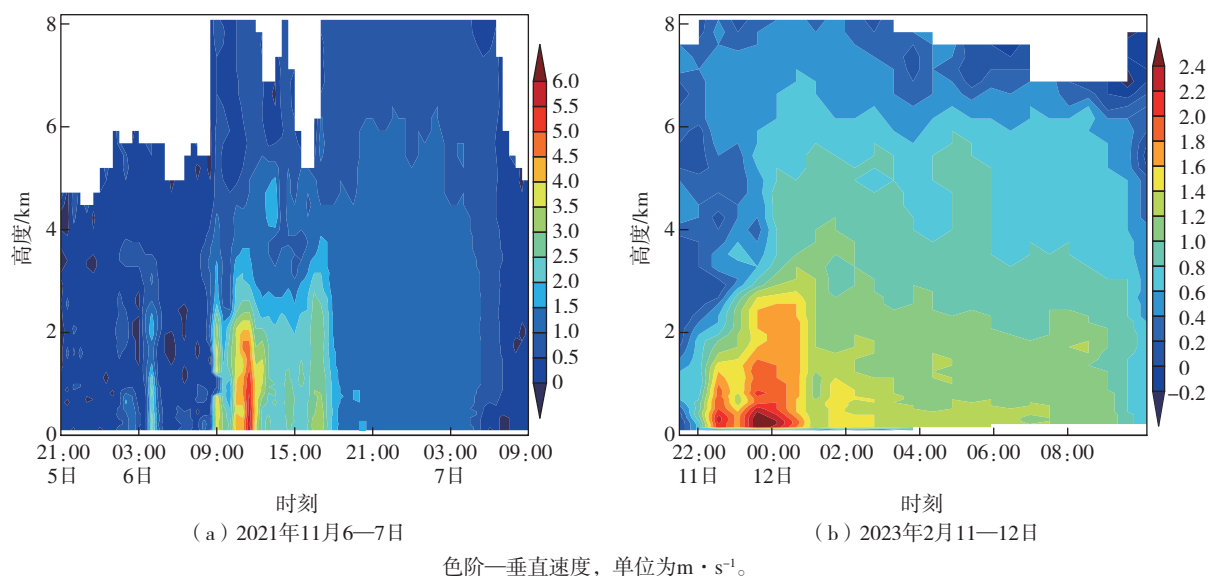


图6 两次降水过程风廓线雷达垂直速度时间-高度剖面

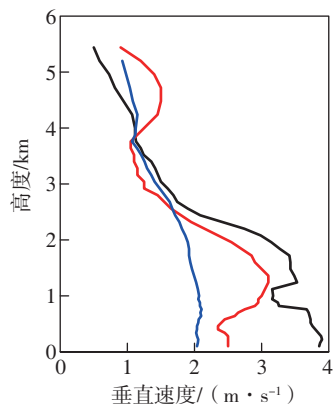
Fig.6 Time-height profile of vertical velocity of wind profile radar in the two precipitation processes

个例2前期降雨时垂直速度最强为 $2.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(图6b),01:00转雨夹雪时垂直速度明显衰减至约 $1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,02:30—03:00短时降雪时段垂直速度进一步减小。两次过程的降雨时段在2.5 km以下有较大的正速度,较个例1相比,个例2垂直速度数值明显偏小,但两次过程实况雨强却存在相近值,这是由于个例2系统前期明显的偏南暖湿输送,使得个例2的水汽好于个例1。因此垂直速度虽可以

表现雨强变化,但与雨强没有固定线性关系。

图7为个例1降雨时段(09:00—12:00)、雨夹雪时段(12:30—13:00)、降雪时段(13:30—21:00)垂直速度随高度变化,更为直观地表明风廓线雷达探测的垂直速度受降水相态变化出现锐减现象。垂直方向上,2.5 km以上各相态垂直速度均小于 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;值得关注的是,在1.5~2.5 km之间降雨时段和雨夹雪时段的垂直速度明显增大,这是由于

降水粒子从冻结层降至融化层的过程中由固态变为液态,下落速度增大导致。近地面平均垂直速度随着相态的转变逐渐变小,降雨时段平均垂直速度约为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,雨夹雪时段平均垂直速度在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,而降雪时段平均垂直速度则降至 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综上,降水强度和降水相态的变化均可在风廓线雷达探测的垂直速度上得到体现。



黑色线—雨; 红色线—雨夹雪; 蓝色线—雪。

图7 2021年11月6—7日降水过程不同相态时段垂直速度随高度变化

Fig.7 Variation of vertical velocity with height during different phase states of the precipitation process from 6 to 7 November 2021

4.3 大气折射率结构常数

大气折射率结构常数 (C_n^2) 与风廓线雷达参数、温度、相对湿度、空气脉动等因素有关,是描述大气光学湍流强度的重要物理量。图8a为个例1风廓线雷达 C_n^2 自然对数的时间-高度剖面。图中显示,降水临近前1 h,由于大气高层湿度增加, C_n^2 对数值开始增大。第一阶段弱降水时,高度4.5 km以下最大 C_n^2 对数值约为-31左右。雨停后数值下降至-34左右,并在主降水来临前再度增大。6日12:00—13:30雨夹雪时段, C_n^2 对数值升至-30以上,并且高值区厚度较降雨有所增厚。转雪后,在雷达探测高度8.08 km之下均有高 C_n^2 对数值,最大值在-29以上,与其对应实况出现短时中雪。7日05:14降雪结束后, C_n^2 对数值迅速降低。由此可见, C_n^2 值能够反映降水强度及相态变化, C_n^2 值越大,降水强度越大,其高值区的延伸高度随相态的转变而逐渐变高。

值得关注的是,在不同降水时段,风廓线雷达的探测高度也有显著变化。过程开始前及前期弱降水

时段,雷达仅能探测到约5.5 km以下高度的 C_n^2 数据,随着降水强度加大,雷达探测高度达到约8.0 km。这是由于风廓线雷达最大探测高度受大气环境因素(大气折射率、湍流强度、温度、相对湿度等)影响,大气湿度增加,雷达探测高度亦会随之增高。因此,雷达探测高度的变化可直观反映出大气湿度的变化,为降水强度的判断提供进一步依据。

同样的 C_n^2 探测特征在个例2中也清晰呈现(图8b),降水开始前1 h左右, C_n^2 对数值开始显著增大。11日22:00,随着降水的开始, C_n^2 对数值从-35升至-33左右,并且在12日03:00(含)降雪之前,随着大气水汽含量的增加, C_n^2 对数值始终处于高值区,最大值超过-31。03:00之后,降水相态转为雨夹雪, C_n^2 对数值开始逐渐降低,高值区高度开始下降。风廓线雷达的探测高度也随着水汽含量的降低呈下降趋势。

4.4 SNR

SNR是一项反映回波功率的重要指标,其大小为雷达信号强度与噪声强度的比值,SNR越大表示回波功率越强。图9为两次降雪过程风廓线雷达信噪比时间-高度剖面。图中两次过程SNR高值区主要集中在2.0 km以下,SNR值随高度呈减小趋势,整体结构特征与 C_n^2 相似。个例1前期弱降水SNR回波结构表现松散,6日08:00后,随着降水增强,近地面层SNR呈现紧密的高值区,最大在18 dB以上。个例2由于降水强度相对个例1较弱,因此SNR总体回波强度稍弱,结构也相对松散。由此可见,SNR的强度和结构变化对降水强度预报起着积极的参考意义,SNR结构越紧密、回波强度越大,降水越剧烈。

5 结论

北京两次多相态降水均发生在华北地区典型有冷垫存在的回流降雪形势背景下,由于辐合条件及冷垫条件的不同,造成两次过程降水一强一弱的明显差异,但在风廓线雷达上两次过程却有相似的表现,因此,总结风廓线雷达在两次冬季多相态降水中的表现特征如下:

(1) 风廓线雷达近地面风场偏东风的建立、急流的出现及中低空的扰动均对冬季降雪临近预报起着积极作用,低层冷空气的增强对相态转换有一定

指示意义,中高层暖湿气流爬升的强弱与降水强度变化有很好的对应关系。

(2)降水强度和降水相态的变化均可在风廓线

雷达探测的垂直速度上得到体现。两次过程的降雨时段在 2.5 km 以下有较大的正速度,随着降水相态由雨向雪转变,垂直速度发生锐减。

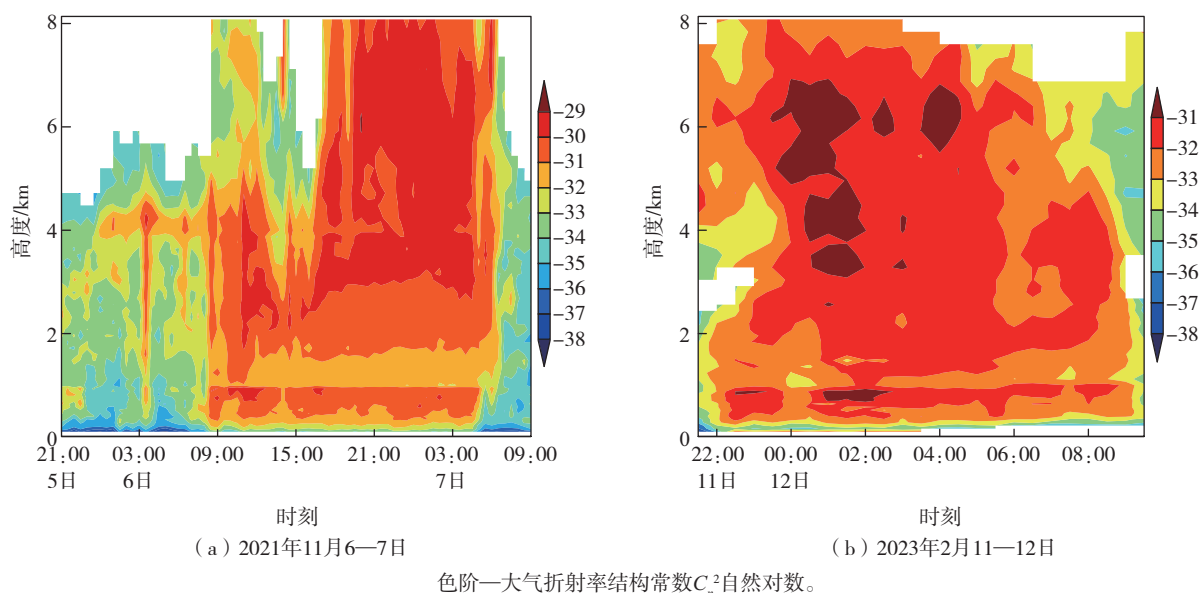


图8 两次降水过程风廓线雷达大气折射率结构常数自然对数时间-高度剖面

Fig.8 Time-height profile of natural logarithm of C_n^2 of wind profile radar in the two precipitation processes

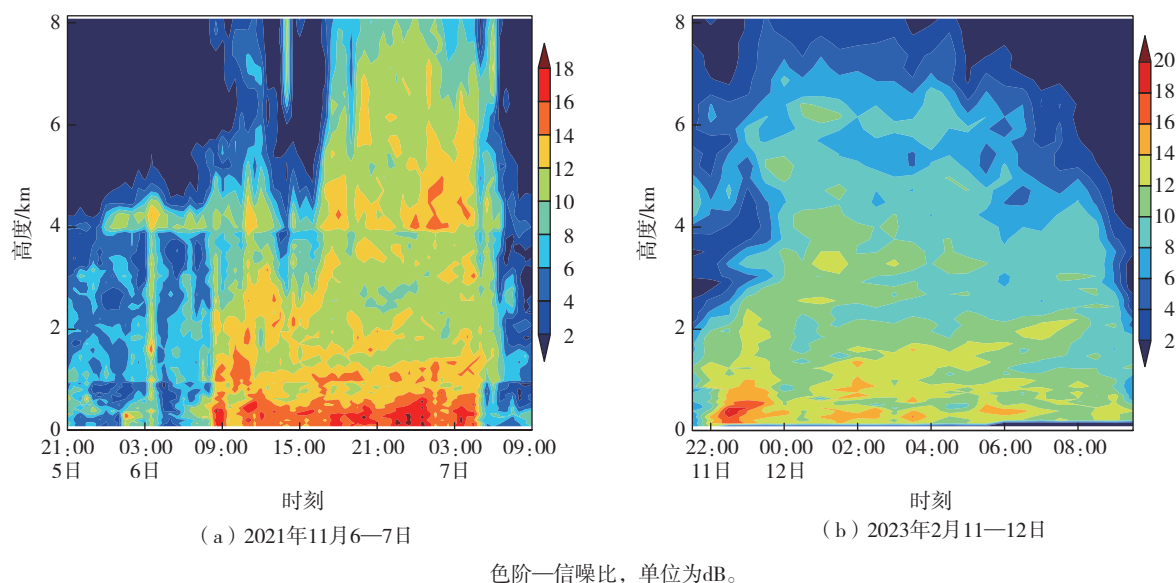


图9 两次降水过程风廓线雷达信噪比时间-高度剖面

Fig.9 Time-height profile of SNR of wind profile radar in the two precipitation processes

(3) 大气折射率结构常数 (C_n^2) 和信噪比 (SNR) 回波结构特征相似,两者均能够反映降水强度相态变化。两次降水过程 C_n^2 对数值均在降水开始前 1 h 开始增大, C_n^2 值越大,降水越剧烈。降水相态转为雨夹雪时, C_n^2 对数值开始逐渐降低,高值

区高度开始下降。两次过程 SNR 高值区主要集中在 2.0 km 以下, SNR 结构越紧密、回波强度越大,降水越剧烈。

(4) 雷达探测高度受大气高层湿度的直接影响,可为降水强度的判断提供依据。

文中所使用雷达探测的垂直速度没有经过下落速度订正,忽略了大气垂直运动,近似作为降水粒子垂直速度进行研究。此外,由于真实降水相态转换的微物理过程极为复杂,以及人工观测存在差异性,地面观测记录的各相态降水时段与风廓线雷达数据特征有微小偏差。文中结论仅通过两次雨雪过程总结得出,在今后的工作研究中仍需进一步分析验证。

参考文献:

- [1] REDDY K K, KOZU T, NAKAMURA K, et al. Lower atmospheric wind profiler at Gadanki, tropical India: initial results[J]. Meteorol Z, 2001, 10(6): 457-468.
- [2] MAY P T, STRAUCH R G, MORAN K P, et al. Temperature sounding by RASS with wind profiler radars: a preliminary study[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28(1): 19-28.
- [3] WAKASUGI K, MIZUTANI A, MATSUO M, et al. A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1986, 3(4): 623-629.
- [4] ROGERS R R, BAUMGARDNER D, ETHIER S A, et al. Comparison of raindrop size distributions measured by radar wind profiler and by airplane[J]. J Appl Meteor Climatol, 1993, 32(4): 694-699.
- [5] 刘畅, 杨成芳, 郑丽娜. 江淮气旋影响下的山东降雪过程相态特征[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 74-83.
- [6] 李燕, 赛瀚, 刘晓初, 等. 辽宁东南部一次强降雪天气的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(3): 84-93.
- [7] 郑丽娜, 李恬, 孙骞, 等. 2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(3): 48-56.
- [8] 高留喜, 杨成芳, 刘畅. 山东一次极端雨雪过程积雪特征分析及模式产品检验[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(4): 58-66.
- [9] 杨璐瑛, 张芹, 郭俊建, 等. 鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 100-107.
- [10] 施红蓉, 李峰, 吴蕾, 等. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析[J]. 气象, 2014, 40(10): 1259-1265.
- [11] 李峰, 施红蓉. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 992-999.
- [12] 仪清菊, 刘延英, 许晨海. 北京1980—1994年降雪的天气气候分析[J]. 应用气象学报, 1999, 10(2): 249-254.
- [13] 赵鲁强, 齐丹, 李军, 等. 2008年12月10日北京初雪天气成因分析[C]//第26届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集. 杭州: 中国气象学会, 2009: 438-447.
- [14] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 北京“12·7”降雪过程的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1): 7-21.
- [15] 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应用[J]. 气象科技, 2008, 36(3): 300-304, 385-386.
- [16] 郭虎, 段丽, 杨波, 等. 0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.
- [17] 顾映欣, 陶祖钰. UHF多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用[J]. 气象, 1991, 17(1): 29-34.
- [18] 王文波, 高晓梅, 李晓利, 等. 一次雨雪天气过程的风廓线雷达特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 109-116.
- [19] 翟亮, 王令, 刘文军. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 783-788.
- [20] 王令, 王国荣, 古月, 等. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探[J]. 气象, 2014, 40(3): 290-296.
- [21] 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[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330-338.
- [22] 何平, 朱小燕, 阮征, 等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 465-470.
- [23] 杨馨蕊, 马舒庆, 吴蕾. UHF风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价[J]. 大气科学学报, 2010, 33(5): 576-581.