

李峰, 施红蓉. 2014. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 40(8): 992-999.

一次多相态天气过程的风廓线雷达 探测资料特征分析^{* 1}

李 峰¹ 施红蓉²

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

提 要: 利用国产对流层 II 型风廓线雷达资料对 2012 年 3 月 17 日北京地区经历的雾霾雨雪多相态天气过程进行了诊断分析, 结果表明风廓线雷达探测产品能够很好地判别上述天气的发展转变过程, 可以揭示降水过程的细节变化。雾霾维持时, 风廓线雷达一般能够探测到非常弱的水平风和大气垂直运动, 大气折射率参数很小, 而近地面层信噪比则表现出较强的信号, 高度一般在 850 hPa 以下, 其上层大气的信噪比很弱, 表现为晴空状态, 上下对比度非常明显。同时, 风廓线频谱高度图表现为无降水特征。降水发生前, 对流层的信噪比会明显增强, 风廓线雷达垂直波束的径向速度 V_r 首先在中高层出现正值, 反映出下沉运动的不断增强现象, 同时其他两对对称波束 V_r 不再维持对称形态。降水发生时, 5 个波束 V_r 自地面向上均转变为正值, 且最大速度一般位于近地面层, 同时最大 V_r 也不集中在垂直波束, 反映了降雨过程中存在着风的影响。此时, 谱宽一般稳定维持在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当降水发生相态转变时, 谱宽会有明显的减小, 信噪比增强, 频谱图中 V_r 有所减弱, 这种变化通常发生在整个边界层到对流层。降水结束时, 上述现象成相反变化, 谱宽增加, 信噪比减弱, 5 个波束 V_r 呈对称形态。

关键词: 多相态, 风廓线雷达, 特征分析

中图分类号: P425, P415

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.009

Study on Wind Profile Radar Observation Features of a Multi-Phase Weather Process in Beijing

LI Feng¹ SHI Hongrong²

1 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: A multi-phase weather process with fog, haze, rain and snow seen in Beijing on 17 March 2012 is analyzed by using wind profile radar data. The results show that the profiler products are good at diagnosing and distinguishing weather change and evolution, and can reveal the detailed variation of precipitation. The profiler is usually used to detect weak horizontal wind and weak vertical movement of atmosphere in case of fog. Its air refractive index is small while signal noise ratio (SNR) below 850 hPa is strong. Simultaneously, the profiler frequency spectrum shows the features of clear weather. Before it rains, the SNR in troposphere remarkably strengthens, the profiler vertical beam radial velocity (V_r) firstly presents positive values, in the mid- and high-levels, which indicates the air sinking motion is enhanced. At the same time the other two double beams (V_r) are not symmetrical anymore. When it rains, all the five beams (V_r) of profiler turn positive from surface to upper air, and the largest V_r is near surface, not concentrated in the vertical beam. Correspondingly, spectrum width maintains in $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When precipitation phase

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306076)资助

2013 年 2 月 5 日收稿; 2014 年 4 月 15 日收修定稿

第一作者: 李峰, 主要从事灾害性天气机理、探测技术及试验方法研究. Email: liflif04@cma.gov.cn

changes, spectrum width diminishes obviously while SNR strengthens, and the V_r gets weakened. These changes usually occur in the whole boundary layer to troposphere. When rain stops, the above changes show reverse features, including spectrum width increases, SNR weakens, and all the five beams return to symmetrical state.

Key words: multi-phase weather, wind profiling radar, feature analysis

引言

风廓线雷达是利用晴空大气中的湍流活动的后向散射效应探测大气风场的高时空分辨精细化结构的有效工具。自20世纪80年代投入气象探测试验以来,经过不断的技术改进,包括信号处理和数据质量控制的完善(Weber et al, 1992; Barth et al, 1994; 朱斌等, 2003; 董德保等, 2009), 目前已经广泛应用到气象探测业务(何平等, 2006; 李广柱等, 2008; 王敏仲等, 2012)。

根据风廓线雷达的探测原理, 经过信号处理和数据处理过程, 风廓线雷达可以获取除了直观的大气风场产品外, 还有大气垂直方向的运动速度以及信噪比、大气折射率结构常数等。此外, 如天气雷达一样风廓线雷达的一些重要产品, 包括信号强度、信号功率谱密度、谱宽以及各波束的径向速度、多普勒频谱图也越来越受到业务和科研人员的重视。许多研究表明风廓线雷达不仅可以实时监测局地大气风垂直廓线的变化, 结合其他观测资料, 提供精细化的天气系统的变化信息, 而且利用上述参数可以判断晴空和降水, 跟踪天气的转折和发展(Steiner et al, 1994; 翟亮, 2008; 何平等, 2009)。最近, 有些研究还提出利用实时获取的风廓线雷达不同波束的共面多普勒频谱信号, 可以有效地判别晴空、降雨、降雪、大风等天气, 甚至能够细致分析降水发生发展的过程, 具备一定的提前预警能力(Narayana et al, 2007; 杨馨蕊等, 2010; 吴志根等, 2011; 2013; 吴志根, 2012); 而风廓线雷达垂直径向速度对降水的有效应用通过不同个例分析再次得到了证实(王令等, 2014)。

2012年3月17日, 北京经历了一次复杂的天气过程, 先后出现了雾霾、降雨和降雪天气, 全市平均降水量达到12 mm, 部分地区积雪深度达到5~8 cm, 造成了较大的社会影响。本文利用布设在北京延庆地区的对流层Ⅱ型风廓线雷达资料对该次过程进行了细致诊断, 所得结果有助于今后天气监测

及预报业务借鉴。

1 天气实况及影响系统

1.1 天气实况

2012年3月17日, 北京地区经历了复杂多变的天气, 一日之内, 先后出现雾霾、多云、阴天、降雨和降雪等五类天气。早晨至中午, 北京地区一直为雾霾天气笼罩, 能见度一般在1~2 km范围, 地面相对湿度达到90%; 中午雾霾逐渐减弱, 能见度好转, 但空气湿度仍然很大, 维持在85%左右; 傍晚17时左右至18日凌晨, 北京出现了明显的雨、雨夹雪、雪天气。降雨主要集中在17日傍晚到18日前半夜, 夜间随着气温下降, 降雨逐渐转为降雪。此次降水较为明显, 但降水量分布不均, 北京东北部、西北部地区以及城区相对较大。截至18日06时, 北京全市平均降水量有11.1 mm, 城区平均16.4 mm。延庆地区自17日19:05开始出现降雨, 22:51转变成雨夹雪, 18日01:00变为降雪并出现积雪, 02:32降雪停止, 降雨量为4.2 mm, 积雪为1 cm。

1.2 影响系统

3月17日, 亚洲中高纬度地区500 hPa上环流呈两槽一脊型, 东北亚和乌拉尔山地区为两个闭合低涡控制, 两者之间贝加尔湖以西地区为长波脊, 从我国东北到黄河河套、西南地区为梯形的长波槽区, 有利于东北亚地区的冷空气随脊前气流南下。北京地区处于西风槽底部, 为冷暖空气交汇区。从系统的移动变化来看, 在向东南方向移动过程中低层冷空气要比中层快。17日08时, 地面冷空气前锋位于内蒙古中部, 500 hPa高空槽位于河套地区, 850 hPa京津地区处于暖式切变线控制, 京津以北地区处于高压前部的偏东气流, 有利于海上湿空气的回流增湿, 京津以南地区为西南风, 有利于大气增墒。14时, 冷空气从西北、东北两个方向逼近北京, 北京处于锋前, 随着冷锋的逼近, 北京上空边界层进

一步处于增湿增墒过程。20时,地面冷锋掠过北京到河北中南部,而500 hPa高空槽移动到北京至河北上空,850 hPa的冷槽也接近北京,表明北京上空已逐

渐被冷空气控制。18日02时,冷空气团已经完全控制北京上空,08时快速东移到海上(图1b)。

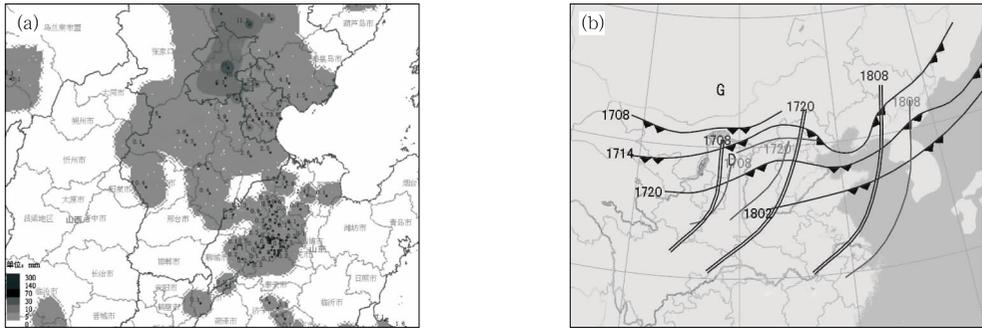


图1 2012年3月17日08时至18日08时北京及周边地区24 h降水量分布(a)和影响北京地区的天气系统演变动态图(b)

(b: 箭头线为地面冷锋, 双实线为500 hPa槽线, 单实线为850 hPa槽线)

Fig. 1 24 h rainfall distribution in Beijing for 08:00 BT 17 to 08:00 BT

18 March 2012 (a) and related synoptic chart (b)

(b: line with arrowhead denotes surface cold front, dual-solid line is for trough at 500 hPa, single line for trough at 850 hPa)

2 风廓线雷达探测特征

2.1 延庆风廓线雷达介绍

延庆位于北京西北部,延庆风廓线雷达为对流层Ⅱ型风廓线雷达,于2007年建成并投入运行,布设于农田开阔区,地面海拔高度488 m,雷达采用445 MHz为工作频率,以偏东、南、西、北各 14° 及垂直方向共5个波束观测,最大探测高度一般可达8 km,对不同的高度层分别采用高、低两种探测模式,低模式采用 $0.8 \mu\text{s}$ 脉冲宽度,高模式采用 $4.0 \mu\text{s}$ 宽脉冲的探测方式,每6 min可获得一条廓线数据,本文给出的探测数据是高、低模式探测的综合,2000 m以下垂直分辨率为120 m,2000 m以上分辨率为240 m,探测高度达到8000 m。

2.2 影响系统及大气结构变化的监测特征

延庆风廓线雷达以实时运行的方式6 min提供一条风垂直廓线数据。图2给出了延庆风廓线雷达探测的小时风演变。从图中看到,3月17日08—12时北京延庆地区上空500 m以下为东南风控制,风速很小,一般不足 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500~2000 m逐渐转为西南风,风向随高度顺转,风速随高度也逐渐增大到

$12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2000 m以上为西风。从温度平流来看,该时段3000 m以下一般为暖平流控制,在1600和3000 m高度暖平流较明显。13时开始,500 m以下偏东风有所加强,并且转变成冷平流,结合天气图可以看出:这是由于此时冷空从东北方向进入北京地区,东风性质已经由暖湿气流转变成冷空气前锋。18时,3000 m(约700 hPa)以下的近地面层均转变为冷平流控制,1000~2500 m风向逐渐

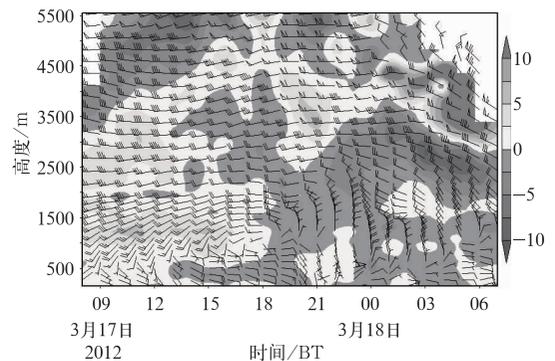


图2 2012年3月17—18日延庆上空风场廓线及温度平流演变

(阴影区为温度平流,单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 Wind profile field and temperature advection over Yanqing Station from 17 to 18 March 2012

(Shaded area is for temperature advection, unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

变为西北向,表明此时冷空气已经完全浸入北京地区。19—24 时,对流层中层风速明显加大,表明冷空气整体过境,大风速向下传递,低层完全转变为北风,这种形势一直持续到 18 日 06 时。从上述分析看,相较于常规资料(图 1),雷达风廓线资料能够更加准确有效地对天气系统及气团性质变化实现实时连续监测。

图 3 给出了延庆风廓线雷达探测的空气垂直速度和大气折射结构常数(C_n2)参数演变。从图上看,3 月 17 日 08—10 时与风场的情况匹配,在延庆上空整层大气垂直速度几乎为零, C_n2 也非常小,表明大气湍流活动非常弱,上下空气交换也很弱,此时水平风也非常小,动力条件有利于雾的形成和维持。10 时以后,1000~2000 m 高度 C_n2 和 w 逐渐增大,表明湍流活动开始活跃,空气也出现弱的垂直运动。直到 18 时前后,可以看到空气垂直速度突然增大,在 2000 m 高度以上出现明显的向下运动,而近地面层垂直运动尚不明显,表明此时在 2000 m 高度

以上可能已经出现降水粒子或者下沉气流,但此时并没有向下到达地面形成降雨(地面未观测到降水)。延庆地面站 19:05 开始观测到有地面降雨,与此对应,风廓线雷达探测到 19—20 时,4000~2500 m 高度层下沉运动 w 开始向下传递,强度也明显增强,超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并且到达地面。23 时,垂直速度达到最大超过 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且最大值位于近地面层,反映了降雨的特征,此时地面观测雨强达到最大,小时雨量超过 1 mm。18 日 02:30 以后,风廓线雷达测量到的大气垂直运动结构发生明显改变,对流层中下层 w 突然变小,1500 m 以下甚至转为负值,对应为弱的上升运动,其上为不足 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉活动,对应地面观测此时降水基本结束。结合图 3b 来看,在对流层中低层平均 C_n2 与垂直速度变化基本一致,表明在整个边界层到对流层中低层大气湍流的活动和空气的上下运动有较好的对应关系,能够很好地揭示降雨发生前后大气内部活动和动力条件变化。

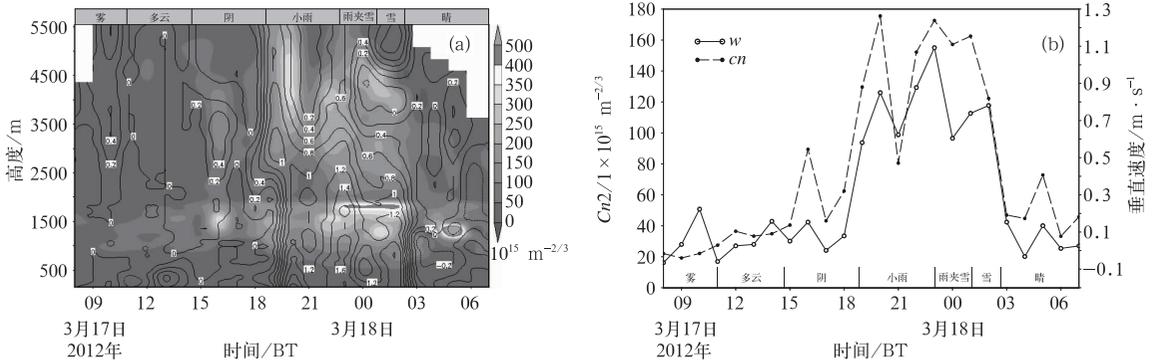


图 3 (a)延庆风廓线雷达探测到的垂直速度和大气 C_n2 演变(阴影区为 C_n2 ,单位: $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2/3}$),
(b)风廓线雷达探测的延庆上空地面到 500 hPa 高度平均垂直速度(实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
和 C_n2 (虚线,单位: $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2/3}$)演变

Fig. 3 (a) Air vertical velocity and C_n2 variation detected by wind profiler radar at Yanqing (Shaded area is for C_n2 , unit: $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2/3}$), (b) mean vertical velocity (solid line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and mean C_n2 (dashed line, unit: $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2/3}$) variation of surface to 500 hPa detected by Yanqing wind profiler radar

2.3 信噪比与谱宽特征分析

风廓线雷达除了可以直接给出站点上空的风场信息外,根据其探测原理,还可以给出信噪比、谱宽和功率谱密度等信息。许多研究表明(杨馨蕊等 2010;吴志根等,2011),在不同的天气条件下,风廓线雷达探测的信噪比、谱宽和频谱都表现为明显的变化和差异。

信噪比是雷达接收到经目标散射后的信号与噪声的比值,风廓线雷达在对弱信号探测时进行了时域相干累计处理来提高信噪比(何平,2006)。吴蕾(2011)研究指出,当大气中存在冰晶、云滴、雨滴和雾滴时,雷达信噪比将比晴空湍流增强许多,以此可以判断大气的状态和天气状况。图 4a 给出了 3 月 17 日延庆风廓线雷达探测到的信噪比变化。从图上看,早晨阶段,延庆上空约 1000 m 以下信噪比较

强,达到 -30 dB以上,表明此时该层大气中有较强的反射信号。结合上述大气垂直速度和天气实况分析可知这种现象不是降水,也不是强湍流造成的,而是空气中雾霾粒子散射结果。1000 m以上信号迅速减弱,2000 m以上信噪比下降到 -45 dB以下,大气表现为晴空状态。从时间演变来看,09—12时,信噪比强信号层的高度逐渐抬升,对应实况观测,该时段地面雾霾浓度逐渐好转,但垂直方向能见度仍较差,这可能是由于太阳辐射增强,近地面湍流活动随之增强,近地面层的雾霾层相应抬升,其上下界面也随之升高造成的。12时以后,北京地面的能见度继续好转,垂直方向上能见度变化不大,该时段在1000~1500 m高度仍观测有较明显的霾层或薄云存在。从17时开始,天气变得阴沉,图4可以看到此时1500 m以上一直到对流层信噪比明显的增加,表明此高度不再是晴空状态,但该时段增强信号还没有形成时间连续性,同时大气的垂直运动还不明显,仅仅在对流层中低层出现了不足 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的下沉运动,此时地面也没有形成降雨。随着冷空气进一步侵入,可以看到延庆上空的信噪比逐渐增大,19时前后强信号上下层一致,且向下延伸至地面,到了18日01时左右,信噪比自上而下再次增强,02:30以后,2500 m以上,信噪比明显变小,2000 m以下仍然维持较明显信号,此时对应地面降水结束。

研究表明风廓线雷达多普勒速度谱宽信号在不同的天气条件下会有明显的变化,尤其是降水发生时谱宽较宽,而降雪时则谱宽会变窄。图4b给出了3月17—18日的延庆风廓线雷达探测到的多普勒频谱谱宽变化,由图可知,与信噪比一致,从早晨到下午17时,延庆上空1500 m以下谱宽较窄,而其上尤其2500 m以上谱宽值较大,反映了上下大气状态差异。17—18时,信噪比增强的同时,1000~3500 m高度,谱宽逐渐变窄,但结构松散不连续,至19时前后,可看到谱宽自上到下较之前变化明显,数值变小且结构紧密,尤其在21时后,3000~2000 m高度层谱宽窄小密实,一般不足 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,凌晨以后,逐渐变得松散,一直持续到18日02:30左右谱宽再次增大。从谱宽的变化看同样也存在对流层中层超前边界层的现象,这可为短临预报预警提供有利依据,提前时效一般可达5~10 min。

2.4 多普勒频谱的精细特征

延庆风廓线雷达采用5个波束定向探测,扫描顺序按中—北—东—南—西进行,6 min循环一次。每个周期5个波束能够获得各高度共面上的径向速度 V_r 和多普勒频谱信号。根据吴志根等(2011)的研究,分析5个波束不同高度共面频谱信号特征可以判别天气类型和大气状态。

图5a~5d给出了2012年3月17日08:07、15:07、18:48和19:06左右延庆风廓线雷达探测到的多普勒频谱高度图,每张图自左向右分别为垂直、偏南、偏北、偏东和偏西5个波速的测值。从图5a上看,17日08时左右垂直波束测得的径向速度在边界层内均接近 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明大气稳定,空气的上下运动非常微弱,而两组对称波束(偏南/偏北,偏东/偏西)相对于 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度轴基本成对称分布,5个波束频谱表现为无降水的频谱特征。同时,两组对称波束在600 m以下的近地面层径向速度接近为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,反映此时水平风也非常弱,近地面层近乎静风状态。下午15时左右,从频谱图上看(图略),此时仍然为无降水特征,垂直波束径向速度在2000 m以下约为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,3000~5000 m为弱的正速度,但不足 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两组对称波束的频谱径向速度相对0速度轴仍成对称结构。此时,近地面层信噪比信号明显减弱,850 hPa以上信噪比明显增强,表明对流层大气中水汽或湍流开始增强。

图5b可看出,18时左右,1000 m以下频谱无明显变化,垂直波束 V_r 仍为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明此时仍没有发生降水,但在1500 m以上,垂直波束 V_r 出现了 $1\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的正速度,表明该时刻该高度上已经出现了较明显的下沉活动,南北东西波束 V_r 也不再成对称分布,偏北和偏西的正速度更明显一些,反映了此高度上出现西北风,而下沉活动削弱了偏南和偏东波束 V_r 的向上分量。结合信噪比变化,可看出此时800 hPa高度以上强度明显增强,表明大气的反射信号在发生变化,这种变化来源于大气中湍流活动及其夹杂的反射粒子的变化,而这些变化又是由于空气的温度和湿度变化造成。结合其下沉活动,可以判断此时在对流层中低层已经开始出现降水粒子,但该降水粒子并没有降落到地面形成降雨。

18:48, 风廓线雷达 5 个波束的频谱图开始出现明显变化(图 5c), 垂直波束的径向速度 V_r 在 800 m 以下开始出现弱的正速度, 测值不足 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 800~1500 m 为约 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正速度, 而更明显的是在 2400~4000 m 高度层出现了约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正速度, 表明该高度下沉粒子的速度在增加, 并向下拓展延伸。这种下沉运动也造成南北波束和东西波束 V_r 的不对称, 该现象 1000 m 以下表现较弱, 偏南波

束 V_r 为弱正值, 偏北波束 V_r 为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 偏东波束 V_r 为正, 偏西波束 V_r 为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 结合信噪比强度变化可知此时近地面应该出现了微弱的降雨, 而高层降水强度更强一些, 此时为降水的初期阶段。

19:06 频谱图已经表现为明显的降水模式了(图 5d), 5 个波束 V_r 均为正值, 垂直波束 V_r 自地面向上到对流层中层均探测到正速度, 且近地面值最大, 根据文献(吴志根等, 2011)可判断此时设备上空

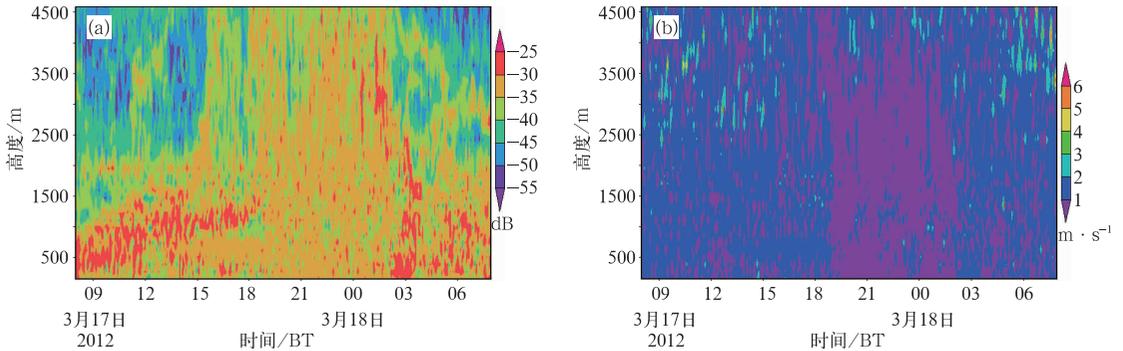


图 4 2012 年 3 月 17 日延庆风廓线探测到的信噪比(a)和多普勒频谱谱宽(b)变化图

Fig. 4 Signal noise ratio (a) and Doppler spectrum width (b) variation over Yanqing Station detected by wind profiler radar

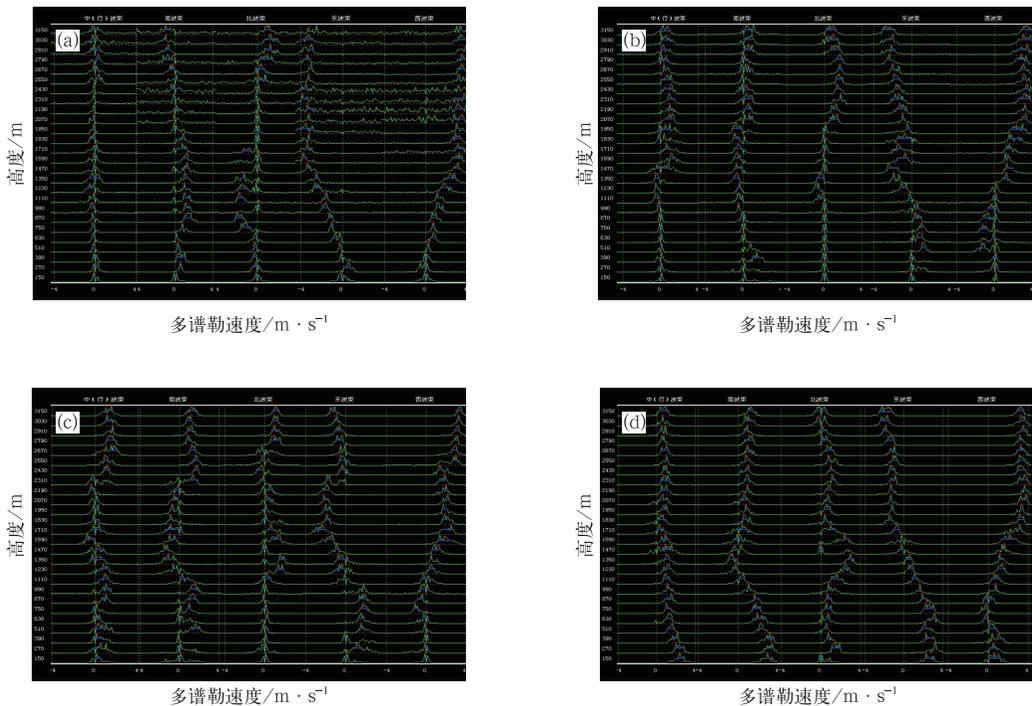


图 5 2012 年 3 月 17 日风廓线 5 个波束多普勒频谱高度图

(a)08:07, (b)15:07, (c)18:48, (d)19:06

Fig. 5 Five Doppler spectrum velocity distribution detected respectively by five beams at 17 March 2012

(a)08:07, (b)15:07, (c)18:48, (d)19:06

一定出现了较明显的降水,此时频谱谱宽一般在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,则降水可能为雨或雨夹雪形式。从图上看,最大径向速度不在垂直波束上而在偏南波束上,表明此时还存在着风的影响,对比两对对称波束 V_r 大小,可判断在 1500 m 以下以东南风为主,向上逐渐转为西南、西北风。这种形态一直持续到 21 时,从地面到对流层中层,各高度层降水谱宽变小,一般不足 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但 V_r 的结构形态基本没变,信噪比的强度有所减弱,表明降水在稳定持续但降水的性质可能有所变化,实况观测此时延庆地区已经转变为降雪。这种形势一直持续到 18 日 02 时左右,频谱图上垂直波束 V_r 逐渐减弱到 $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东西、南北波束也转变为 0 轴对称形态,表明降水逐渐停止。此时,谱宽图上各高度信号谱宽也恢复到 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高层信噪比也随之减弱,低层由于水汽作用仍然维持较强。纵观降水的整个过程,对比延庆站地面实况观测与上述判断基本一致。

根据风廓线频谱高度图分析,可以看出通过 5 个波束探测到的径向速度变化特征能够判断无雨—雨—雪天气的转折,而不同高度的速度变化时差也为降雨发生提供了预兆。图 6 给出了 2012 年 3 月 17 日延庆风廓线雷达 5 个波束从地面到 3000 m 高度平均的径向速度 V_r 时变图,图中 $v_r \setminus v_e \setminus v_s \setminus v_w \setminus v_n$ 线分别表示中—东—南—西—北波束 V_r ,背离雷达方向为负。从图上看,从早晨到 16 时,对流层低层一直吹西北风(西、北波束 V_r 为正,东、南波束 V_r 为

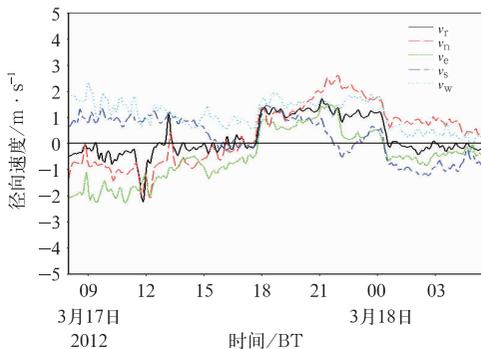


图 6 2012 年 3 月 17 日延庆风廓线 5 波束探测从地面到 3000 m 高度平均径向速度 V_r 时变图(图中 $v_r \setminus v_e \setminus v_s \setminus v_w \setminus v_n$ 分别表示风廓线中—东—南—西—北 5 波束的径向波速)

Fig. 6 Five mean radial velocity from surface to 3000 m variation detected by five wind profiler beams on 17 March 2012 ($v_r \setminus v_e \setminus v_s \setminus v_w \setminus v_n$ lines denote respectively mid-east-south-west-north beam radial velocity)

负),且呈无雨特征(南北、东西波束 V_r 大小相近,方向相反成对称分布), 16 时以后,西风逐渐减弱,北风仍然维持,但到了 19 时前后, 5 个波束的 V_r 都突然转变为正值,此时对应降水发生,一直到 $02:30$ 左右, 5 个波束的 V_r 又突然减小,西、南转为负值,中波束 V_r 接近于 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表示降水结束。在降水期间, 23 时左右 5 个波束的 V_r 都有所减小,表明此时降水的强度在减弱,结合前述信噪比增强和谱宽变窄的信息可以推断此时可能发生了降雪的改变,而延庆地面站确实观测到 $22:51$ 降雨转变为雨夹雪,由此再次证实了风廓线雷达可以准确地监测判别降水的细致变化。另外,从不同高度的中波束 V_r 的时变来看,在 $4000 \sim 2000 \text{ m}$ 高度 V_r 要超前于低层,存在着预警征兆,这与前面的分析是一致的。

3 结 论

(1) 2012 年 3 月 17 日,北京地区先后经历了雾霾、降雨、降雪天气,利用风廓线雷达探测产品能够很好地诊断和判别天气系统的演变以及上述天气的转变过程。

(2) 雾霾天气时,风廓线雷达一般能够探测到非常弱水平风和垂直运动速度,大气折射率参数也很小,表明大气层结稳定,无明显的空气流动。而近地面层信噪比则表现出较强的信号,高度一般在 850 hPa 以下,其上层大气的信噪比很弱,表现为晴空状态,上下对比度非常明显。同时,风廓线频谱图表现为无降水特征。

(3) 降水发生前,对流层的信噪比会明显增强,风廓线雷达垂直波束的径向速度 V_r 首先在中高层出现正值,反映出下沉运动的不断增强现象,同时其他两对对称波束 V_r 不再呈对称形态。降水发生时, 5 个波束 V_r 自地面向上均转为正值,且最大速度一般在近地面层,同时最大 V_r 不位于垂直波束,反映了降雨过程中存在风的影响。此时,谱宽一般稳定维持在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 当降水发生相态转变时,谱宽会有明显的减小,信噪比增强,频谱图中 V_r 有所减弱,这种变化通常发生在整个边界层到对流层。降水结束时,上述现象呈相反变化,谱宽增加,信噪比减弱,大气折射率参数减小, 5 个波束 V_r 呈对称分布形态。

参考文献

董德保,翁宁泉,肖黎明,等. 2009 . 一种风廓线雷达谱矩估计方法研

- 究. 现代雷达, 31(9):40-43.
- 何平. 2006. 相控阵风廓线雷达. 北京:气象出版社, 200.
- 何平, 朱小燕, 阮征, 等. 2009. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. 应用气象学报, 20(4):465-470.
- 李广柱, 陈少应. 2008. 一种风廓线雷达信号处理新方法. 现代雷达, 30(1):60-63.
- 王令, 王国荣, 古月, 等. 2014. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探. 气象, 40(3):290-296.
- 王敏仲, 魏文寿, 何清, 等. 2012. 风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠晴天边界层的探测分析. 气象, 38(5):577-584.
- 吴蕾. 2011. 风廓线雷达探测性能分析及谱矩参数应用研究. 北京:中国科学院研究生院博士学位论文, 120.
- 吴志根. 2012. 边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究. 气象, 38(6):758-763.
- 吴志根, 丁若洋, 郑杰, 等. 2011. 边界层风廓线仪多普勒频谱高度图综合应用初探. 气象, 37(8):1006-1017.
- 吴志根, 徐同, 丁若洋, 等. 2013. 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, 39(3):370-376.
- 杨馨蕊, 马舒庆, 吴蕾. 2010. UHF 风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价. 大气科学学报, 33(5):576-581.
- 翟亮. 2008. 北京奥运期间一次暴雨过程风廓线资料特征. 气象, 34:26-31.
- 朱斌, 高仲辉. 2003. 风廓线雷达探测系统中的谱数据处理. 现代雷达, 25(11):21-23.
- Barth M F, Chadwick R B, van de Kamp D W. 1994. Data processing algorithms used by NOAA's wind profiler demonstration network. J Geophysicae, 12:518-528.
- Rao N T, Kirankumar N V P, Radhakrishna B, et al. 2007. Classification of tropical precipitation systems using wind profiler spectral moments. Part I: Algorithm description and validation. J Atmos Ocea Tech, 25:884-897.
- Steiner A, Richner H. 1994. Separation of clear air echoes from precipitation echoes in UHF wind profiler measurements. Geophys, 12:497-505.
- Weber B L, Wuertz D B, Welsh D C, et al. 1992. Quality Control for Profiler Measurements of Winds and RASS Temperatures. J Atmos Ocea Tech, 10:452-464.