

# 哈尔滨机场中等强度降水案例分析 及短时临近预报探究

卢晓昱<sup>1</sup> 李新华<sup>2</sup> 钟化然<sup>3</sup>

(1 民航东北空管局黑龙江分局, 哈尔滨 150040; 2 黑龙江省气象服务中心, 哈尔滨 150030;  
3 黑龙江省绥化市安达市气象局, 安达市 151400)

**摘要:** 基于常规探测资料、风廓线雷达资料、自动观测系统数据、人工观测数据, 对2021年4月12日及30日短时中雪及短时中雨天气的天气形势、形成机理及短时临近预报方法进行了分析研究, 旨在探究风廓线雷达等值线图的预报价值。结果表明: 风廓线雷达各类产品可至少提前30 min识别系统移动及降水强度变化趋势; 垂直风 $v$ 与折射率结构 $C_n^2$ 常数可分别用来预报降水和降雪的持续时间。近地面 $v$ 的范围为 $5.3 \sim 6.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $C_n^2$ 范围为 $-123 \sim -103 \text{ dB}$ ,  $C_n^2$ 范围为 $-118 \sim -111 \text{ dB}$ 时, 可分别作为中雨及中雪天气的短临预报参考指标。

**关键词:** 中等强度降水, 风廓线雷达, 降水短时临近预报, 等值线图

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.01.009

## Case Analysis of Moderate Intensity Precipitation and Research on Nowcasting at Harbin Airport

Lu Xiaoyu<sup>1</sup>, Li Xinhua<sup>2</sup>, Zhong Huaran<sup>3</sup>

(1 Heilongjiang Branch of Civil Aviation Northeast Air Traffic Management Bureau, Harbin 150040  
2 Meteorological Service Center of Heilongjiang province, Harbin, 150030  
3 Heilongjiang Province Meteorological Bureau in Anda City, Anda 151400)

**Abstract:** Based on conventional detection data, wind profiler radar data, automatic observation system data and manual observation data, the synoptic situation, formation mechanism and nowcasting for moderate snow and rain on April 12 and 30 in 2021 are analyzed to explore the forecast value of the wind profiler radar contour map. The results show that the products of the wind profiler radar can identify the system movement and the change trend of precipitation intensity at least 30 minutes in advance; the vertical velocity  $v$  and the refractive index structure  $C_n^2$  constant can be used to predict the duration of rainfall and snowfall respectively. When the near-ground  $v$  range is  $5.3$  to  $6.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $C_n^2$  range is  $-123$  to  $-103 \text{ dB}$  or  $C_n^2$  range is  $-118$  to  $-111 \text{ dB}$ , it can be used as a reference index for nowcasting of moderate rain and snow respectively.

**Keywords:** moderate rainfall, wind profiler radar, precipitation nowcasting, contour diagram

### 0 引言

为了在突发复杂天气为航空用户的流量部署和制定应急预案争取时间, 短时临近预报准确度的提高成为亟待解决的实际问题。风廓线雷达提供的实时垂直气流分布廓线, 其随时间的演变展示了灾害性天气即将形成的信息, 在航空气象保障的短时临近预报方面具有十分重要的价值。风廓线雷达具有精度高和时空分辨率高、连续性和实时性好的特点, 是天气预报和气象保障的重要手段, 有助于改善中尺度数值天气预报的准确率<sup>[1-2]</sup>。国内外基于风廓线雷达开展了大量

研究, VHF和UHF波段的风廓线雷达对降水信息较敏感<sup>[3-4]</sup>, 可用于对降水天气的监测。邹德龙等<sup>[5]</sup>探讨了最大探测高度与水汽及云滴尺度和浓度的关系; 陈楠等<sup>[6]</sup>对南京地区春季一次降水过程不同阶段风廓线雷达的变化特征进行分析并探讨了垂直风、速度谱宽与降水强度之间的关系; 张楠等<sup>[7]</sup>利用风场随高度变化特性分析了一次中尺度对流过程的逆温结构; 官晓东等<sup>[8]</sup>分析了暖式切变和冷式切变降水的风场垂直结构特征。

目前多数研究仅基于产品图分析实况, 缺乏对降水起止时间、降水强度方面预报价值的研究。而等值线图可以直观地反映要素场的分布和变化趋势, 弥补目前研究的不足。因此本文基于风廓线雷达对两次中

收稿日期: 2021年5月10日; 修回日期: 2021年10月20日  
第一作者: 卢晓昱(1992—), Email: 2234596170@qq.com

等强度降水天气过程进行分析,旨在通过分析不同产品参数的表现特征,探究等值线图对降水强度和起止时间的预报价值。

## 1 资料和方法

哈尔滨机场风廓线雷达于2019年7月投入使用。本文使用资料包括2021年4月12日、30日风廓线雷达探测资料,人工观测数据以及NCEP形势场数据。风廓线雷达时空探测资料包括水平风、垂直风 $v$ 和折射率结构常数 $C_n^2$ 等(下同),利用Fortran软件提取 $v$ 及 $C_n^2$ 数据,绘制等值线图。利用美国NCEP的全球中期预报分析产品(FNL)提供的形势及物理量场数据,空间分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ,时间间隔为6 h。应用反距离加权插值法获取哈尔滨机场气象要素。

本文将高度分为3个层次,分别是近地面(1500 m以下)、低层(1500~3000 m)以及中层(3000 m以上)。RA代表中雨,-RA代表小雨,-SN代表小雪,SN代表

中雪。软件原始数据以科学计数法表示,本文取原始数据的对数值的产品数据,即 $10\lg C_n^2$ (单位: dB)。

## 2 一次中雪天气案例分析

### 2.1 天气实况及形势

2021年4月12日06:00(UTC,下同)开始哈尔滨机场出现小雨天气,09:00转为小雪,10:00—10:50为中雪,12:20后降雪结束。

如图1所示,06时850 hPa上自黑龙江西部至辽宁西部受切变线控制,哈尔滨位于切变线前,500 hPa始终为宽广的槽区,引导低层槽线由西南向东北偏东方向移动;850 hPa风场与温度场近乎垂直,冷平流强,哈尔滨受 $4^\circ\text{C}$ 线控制。12时850 hPa上哈尔滨已受切变线后西北气流控制,温度显著降低,受 $-4^\circ\text{C}$ 线控制。剧烈降温使得降水相态由液态迅速转变为固态。06时850 hPa上切变线东部有水汽向北输送,为哈尔滨降水提供水汽条件。

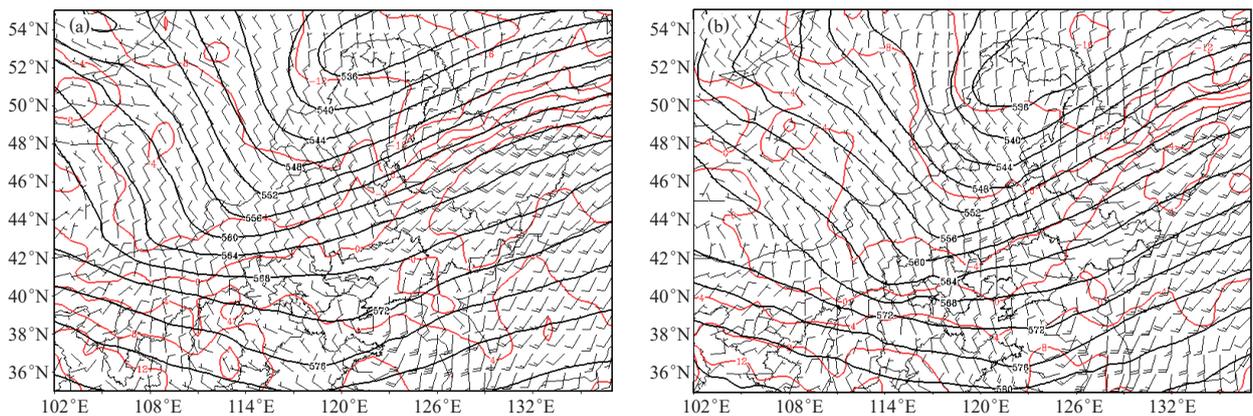


图1 2021年4月12日06(a)、12(b)时(UTC)高空温压场(黑色实线代表500 hPa等高线,红实线代表850 hPa等温线,风向杆代表850 hPa风场)

Fig. 1 The high-altitude temperature and pressure fields at 06 UTC (a) and 12 UTC (b) 12 April 2021 (The black solid line represents the 500 hPa contour, the red solid line represents the 850 hPa isotherm, and the wind direction rod represents the 850hPa wind field)

### 2.2 水汽条件

如图2a所示,09时后850 hPa以下水汽含量显著增加,500 hPa以下高度层相对湿度达到70%~90%,庞博<sup>[9]</sup>相对湿度可以表示大气中水汽饱和情况,相对湿度超70%则可认为大气中水汽饱和度较高,与本文结论一致。如图2b所示,12日06时850 hPa有来自西南方向的水汽通量 $(15\sim 20) \times 10^{10} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,水汽辐合 $(-1\sim -3) \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为中雪天气提供充足的水汽来源。

### 2.3 动力条件

如图3a所示,850 hPa存在 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的垂直上升速度。如图3b所示,06时本场850 hPa处于正涡度

平流大值区,本场涡度小于 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,正涡度平流为 $20 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ 。正涡度平流使本场06时后涡度增加,提供短时强降水的动力条件。哈尔滨水汽及动力条件配合较好,有利于出现中等强度降水。

### 2.4 风廓线雷达的多指标分析

#### 2.4.1 水平风

风廓线雷达的时空剖面图可参照等压面图上的情况进行识别<sup>[10]</sup>,槽线过境时风场变化特征与其一致。如图4所示,从07:00开始,近地面层及中层的风向随高度和时间逆时针旋转,地面风向由西南风转为西北风,表明锋面、切变线的前沿开始影响本场。锋面过境风向变化突然,切变线过境风向变化较为缓和。近

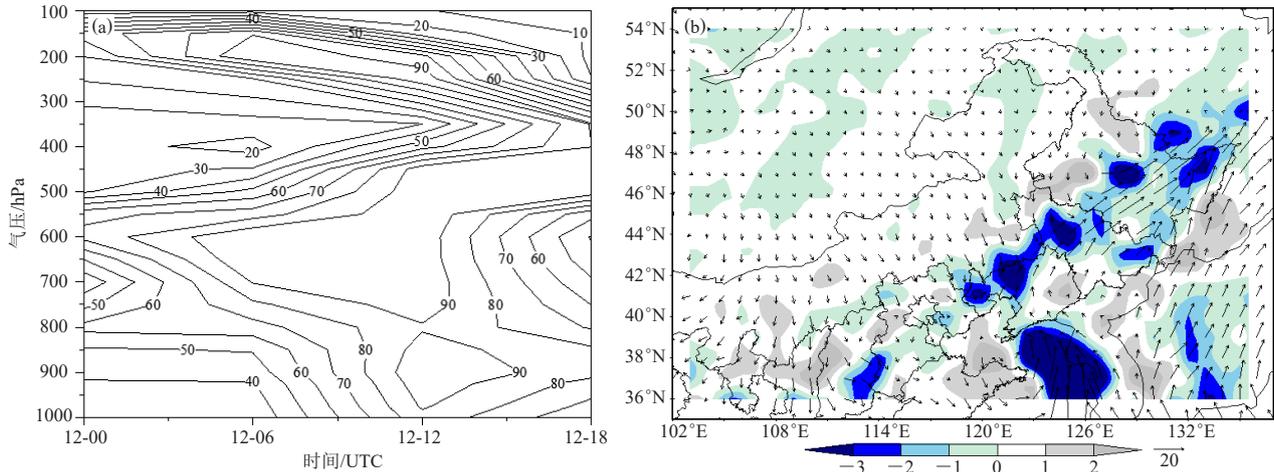


图2 2021年4月12日相对湿度 (单位: %) 时空剖面图 (a)、06时 (UTC) 850 hPa水汽通量散度与水汽通量场 (b)  
 Fig. 2 Temporal and spatial profile of relative humidity (a, unit: %), 850 hPa water vapor flux divergence and water vapor flux field at 0600 UTC (b) 12 April 2021

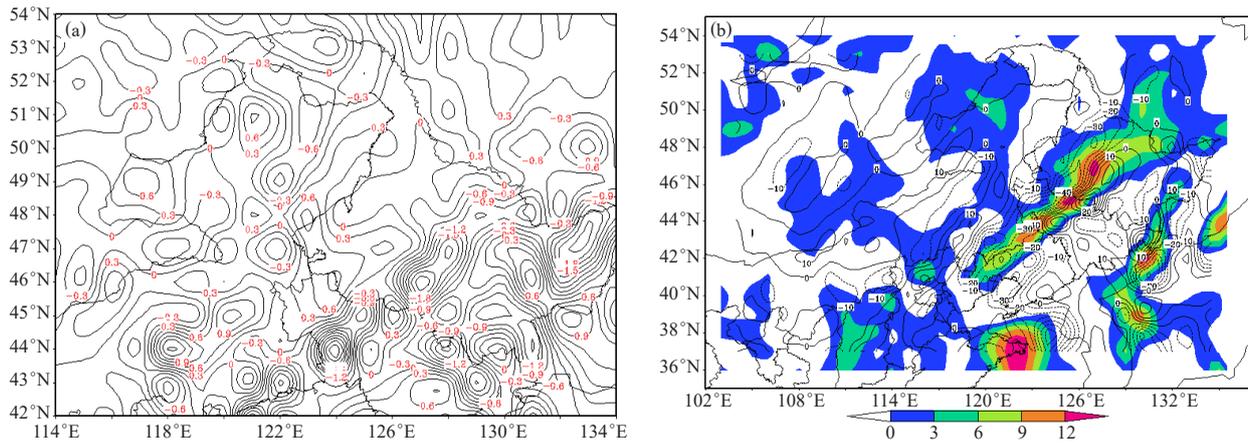


图3 2021年4月12日06时 (UTC) 850 hPa垂直速度场 (a, 单位: Pa/s)、涡度及涡度平流 (b)  
 Fig. 3 Vertical velocity field (a, unit: Pa/s), vorticity and vorticity advection (b) on 850 hPa at 06 UTC 12 April 2021

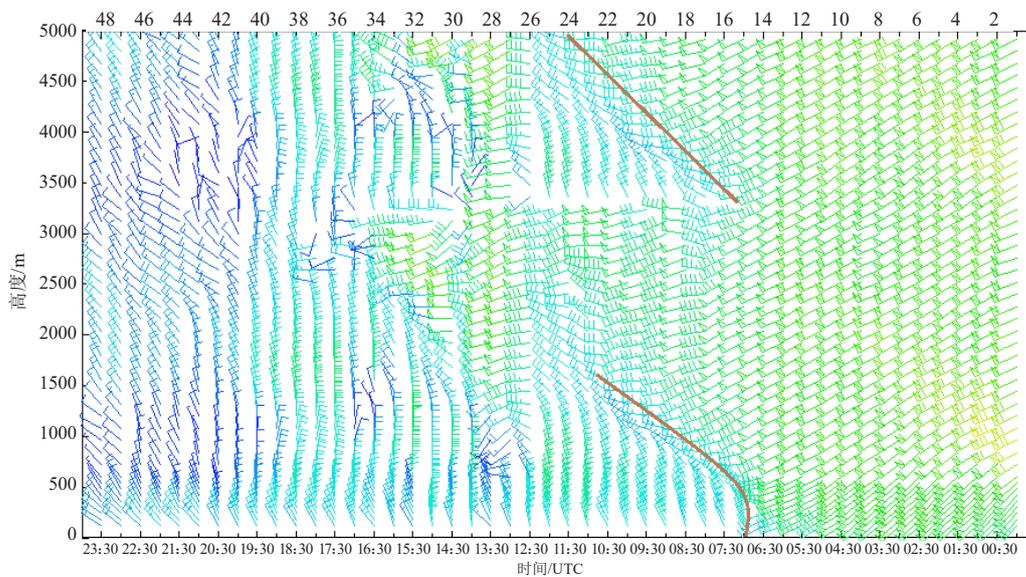


图4 2021年4月12日水平风时间—高度图  
 Fig. 4 Time-altitude diagram of horizontal wind on 12 April 2021

地面风向随高度逆时针旋转,表明有冷平流入侵,有利于降水相态的转变。

### 2.4.2 $v$ 与 $C_n^2$

王令等<sup>[11]</sup>指出,晴空状态时 $v$ 反应的是大气的垂直运动速度;测站上空有降水时,风廓线雷达反应降水粒子和大气垂直运动速度之和。王敏仲<sup>[12]</sup>指出降雨(雪)时,垂直风代表雨(雪)粒子下落速度和大气垂直速度的合成量。王文波等<sup>[13]</sup>指出降水发生时风廓线雷达探测的垂直风主要是降水粒子下落速度。 $C_n^2$ 是大气折射指数湍流结构常数,是表征大气折射率强弱起

伏常用的指标,在中性层结并保持干燥的大气中, $C_n^2$ 将达到最小值。

等值线可以直观地反映要素场的分布、变化分布和变化趋势。由图5可得,在中层、低层及近地面, -RA的 $v$ 分别为 $1.4\sim 3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.4\sim 2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.1\sim 3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,均显著高于降雪;SN的各层 $C_n^2$ 分别为 $-117\sim -111\text{ dB}$ 、 $-118\sim -115\text{ dB}$ ,显著高于-RA和-SN。09:30时 $C_n^2$ 在低层以上出现大值中心,实况10:00时本场转为中雪天气,表明低层 $C_n^2$ 可提前30 min监测到降雪强度变化趋势。10:30时出现 $C_n^2$ 的

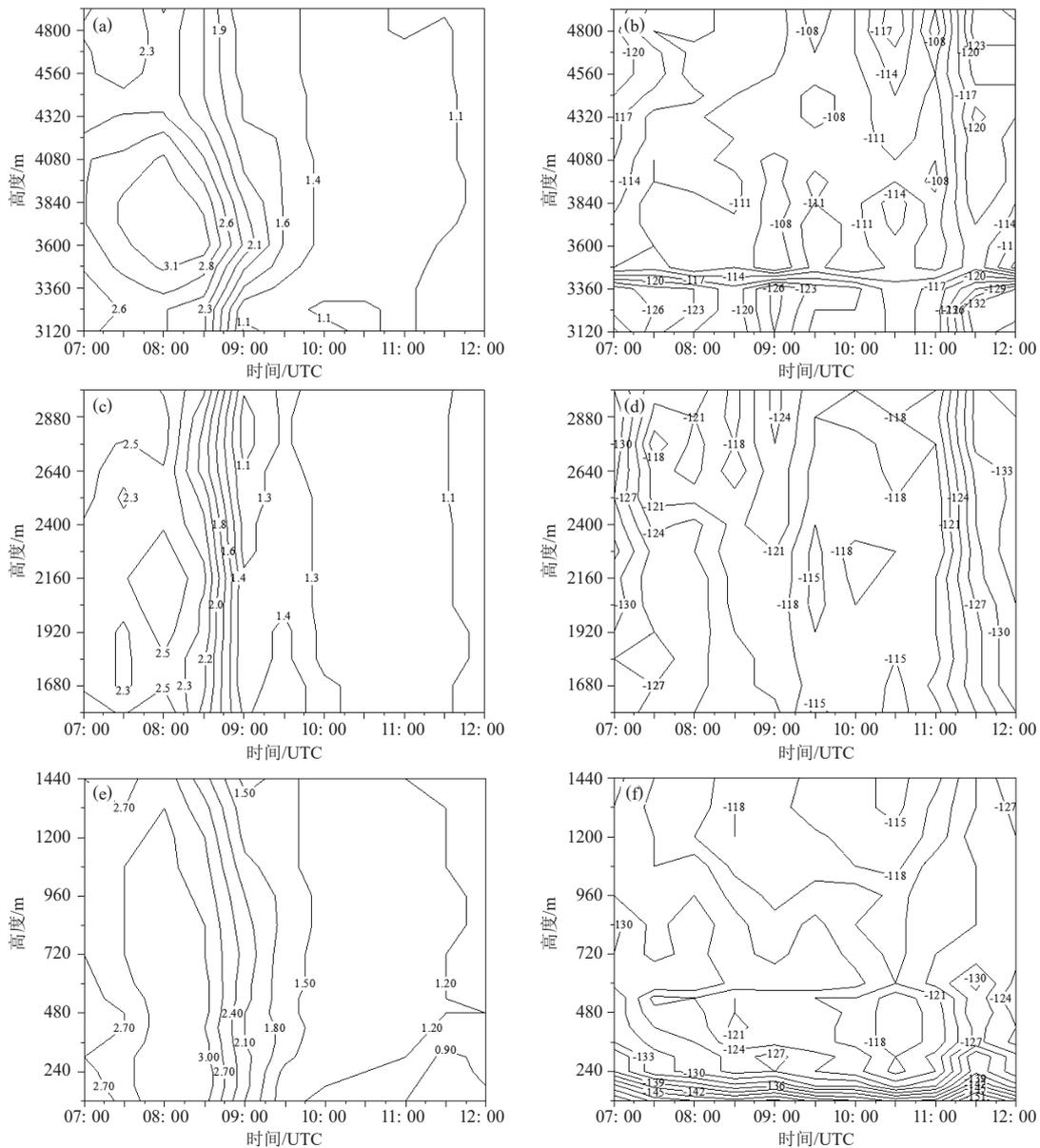


图5 垂直风及 $C_n^2$ 时间-高度等值线图

(a) 中层 $v$ , (b) 中层 $C_n^2$ , (c) 低层 $v$ , (d) 低层 $C_n^2$ , (e) 近地面层 $v$ , (f) 近地面层 $C_n^2$

Fig. 5 Time-altitude contour diagram of  $v$  and  $C_n^2$

(a) middle level vertical wind, (b) middle level  $C_n^2$ , (c) low level vertical wind, (d) low level  $C_n^2$ , (e) vertical wind near the ground level, (f)  $C_n^2$  near the ground level

中心, 低层以上时空分布呈对称结构,  $C_n^2$ 等值线图对中等强度降雪持续时间的短临预报有一定的指导意义。

整层 $\nu$ 、 $C_n^2$ 均无显著差异,  $-RA$ 的 $\nu$ 显著高于 $-SN$ 和 $SN$ ,  $-SN$ 与 $SN$ 的 $\nu$ 无显著差别,  $\nu$ 可较好区分降水相态, 但对降雪强度变化表现欠佳。由小雪到中雪 $C_n^2$ 的阈值下限显著增加,  $C_n^2$ 可较好地用于对降雪强度变化的预报, 中雪 $C_n^2$ 的阈值范围为 $-118 \sim -111$  dB。

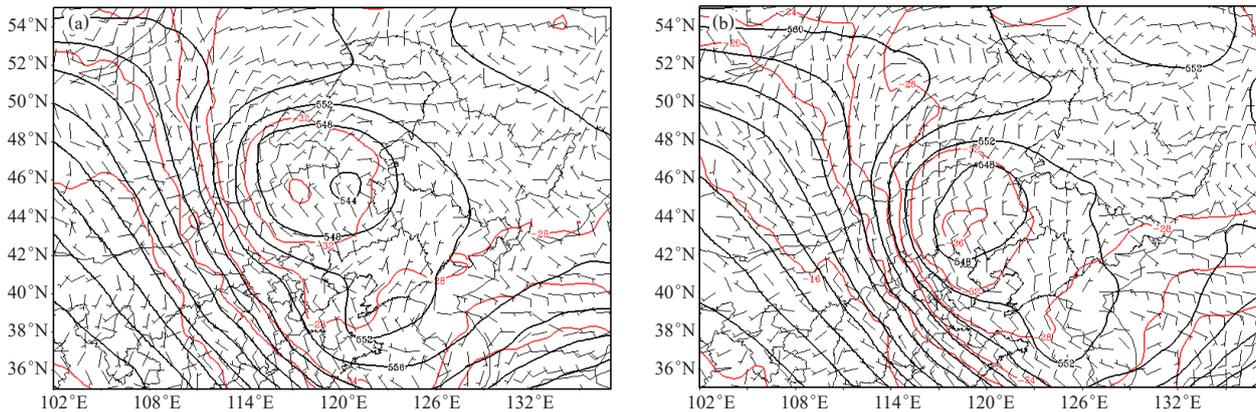


图6 2021年4月30日18时(a)、5月1日00时(b) (UTC) 高空温压场(黑色实线代表500 hPa等高线, 红实线代表850 hPa等温线, 风向杆代表850 hPa风场)

Fig. 6 The high-altitude temperature and pressure field at 18 UTC 30 April (a) and 00 UTC 1 May 2021 (b) (The black solid line represents the 500 hPa contour, the red solid line represents the 850 hPa isotherm, and the wind direction rod represents the 850 hPa wind field)

变, 00时位于内蒙古的低涡已东移减弱, 与东南边的低涡合并形成一个控制东三省大部的低涡, 本场位于低涡北部倒槽的尾部。500 hPa冷涡及850 hPa倒槽的发展加强为降水提供动力条件, 系统前部的东南气流的水汽输送为降水提供水汽条件。

### 3.2 物理量场分析

此次中雨过程500 hPa以下的相对湿度均达70%

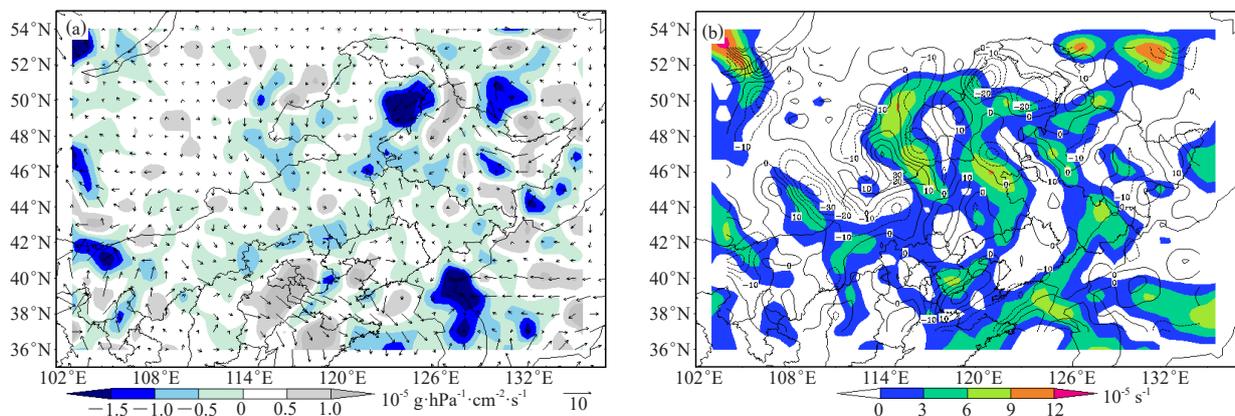


图7 2021年4月30日18时 (UTC) 850 hPa水汽通量及散度(a)、涡度及涡度平流(b)

Fig. 7 Water vapor flux divergence and water vapor flux (a), vorticity and vorticity advection (b) on 850 hPa at 18 UTC 30 April 2021

## 3 一次中雨天气过程分析

### 3.1 天气实况及形势分析

2021年4月30日18:40—22:50哈尔滨机场为降水天气, 其中19:30—20:50本场为中雨天气。

如图6所示, 18时500 hPa上内蒙古中部地区受冷涡系统控制, 哈尔滨位于冷涡前部, 冷中心略落后于低中心, 冷涡将进一步发展; 00时冷中心与低中心重合。18时850 hPa上本场风场存在东北与东南气流的切

(图略)。如图7a所示, 30日18时850 hPa上黑龙江南部有水汽辐合 $(-1 \sim -0.5) \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 配合来自东南方向的水汽通量 $(2 \sim 4) \times 10^{10} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为中雨天气提供水汽来源。850 hPa本场垂直速度值为 $0.3 \sim 0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  (图略), 如图7b所示, 18时本场涡度为 $(3 \sim 6) \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ , 正涡度平流小于 $10 \times 10^{10} \text{ s}^{-2}$ , 正涡度输送使18时后涡度增加, 提供降水的动力条件。

### 3.3 风廓线雷达特征

#### 3.3.1 水平风

如图8所示, 14时开始近地面风场较乱, 表明地面气压场处于调整阶段, 17时当系统逐渐移近本场, 近地面为西南风, 18时左右经过本场, 19:30完全转

为系统后部西北气流。17:30时3500~4000 m高度层风向由偏东风向偏北风偏转, 表明有倒槽移近, 并于19:30过境。整层风场辐合条件从生成到结束的时段为17:00—19:30, 而实况中等强度降水出现在系统过境转为系统后部西北气流之后。

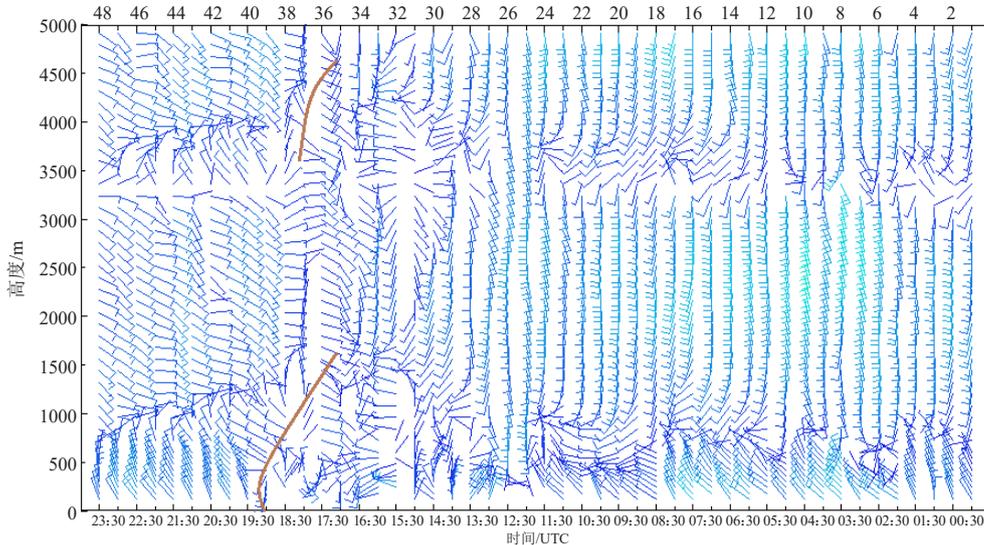


图8 2021年4月30日水平风时间—高度图  
Fig. 8 Time-altitude diagram of horizontal wind on 30 April 2021

各层水平风的垂直结构能及时有效监测到天气系统即将影响本场, 为天气出现时间和强度预报提供思路; 系统过境带来冷空气下冲, 风随高度的变化, 有利于分析冷暖平流, 丰富了降水相态转变的短时临近预报指标, 对航空气象保障具有十分重要的意义。

#### 3.3.2 $v$ 与 $C_n^2$

如图9所示, 在中层RA的 $v$ 与 $C_n^2$ 分别为 $1.9\sim 3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-118\sim -103\text{ dB}$ 。19:00中层的 $v$ 与 $C_n^2$ 均出现增加趋势, 实况19:30开始转为中雨天气, 表明中层 $v$ 与 $C_n^2$ 可提前30 min监测到降水强度变化趋势,  $C_n^2$ 为 $-123\sim -108\text{ dB}$ 。近地面层, RA的 $v$ 与 $C_n^2$ 分别为 $5.3\sim 6.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-122\sim -116\text{ dB}$ 。

整层 $v$ 的时空分布均呈对称结构, 分析近地面层 $v$ 可得, 19:00时 $v$ 开始增加, 20:00出现大值中心, 由对称性可预测21:00左右中雨将结束, 与实况一致。近地面 $v$ 对降水强度预报效果最佳, 阈值范围为 $5.3\sim 6.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整层 $C_n^2$ 无显著差异, 由小雨到中雨 $C_n^2$ 的阈值下限显著增加,  $C_n^2$ 可较好地反映降水强度变化, 中雨 $C_n^2$ 的阈值范围为 $-123\sim -103\text{ dB}$ 。

### 4 结论与讨论

(1) 500 hPa以下相对湿度显著增加至70%是降水强度增强的主要因素。

(2) 两个天气过程均表明 $C_n^2$ 可较好地反映降水(雪)强度的变化;  $v$ 可较好地反映降水相态和强度的变化, 但因数值较小, 对降雪强度变化表现欠佳。发生RA时近地面 $v$ 的范围为 $5.3\sim 6.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $C_n^2$ 范围为 $-123\sim -103\text{ dB}$ , SN的 $C_n^2$ 范围为 $-118\sim -111\text{ dB}$ , 当预计 $C_n^2 > -123\text{ dB}$ 时需关注中等强度降水(雪)的概率。上述结论可作为中雪及中雨短时临近预报的参考指标, 均需在日后的预报业务中进一步验证完善。

(3)  $v$ 与 $C_n^2$ 可至少提前30 min预报强度变化趋势, 或者强度、时间均与实况吻合。降水强度增强出现在系统过境后期或过境后, 分析原因可能为前期有大量水汽累积或动力条件不是造成强降水的主要因素。

(4) 风廓线雷达资料的等值线图呈现时空分布的对称结构可用于降水持续时间的临近预报。基于Python等软件开发具有等值线实时绘制功能的网页或系统, 将在很大程度上丰富短时临近天气预报的手段, 并且不断在业务中验证与完善成为未来亟待研究的课题。

#### 参考文献

- [1] 曹俊武, 胡志群. 多普勒天气雷达与风廓线雷达测风比较. 雷达科学与技术, 2013, 11(6): 605-610.
- [2] 胡明宝, 李妙英. 风廓线雷达的发展与现状. 气象科学, 2010, 30(5): 724-729.

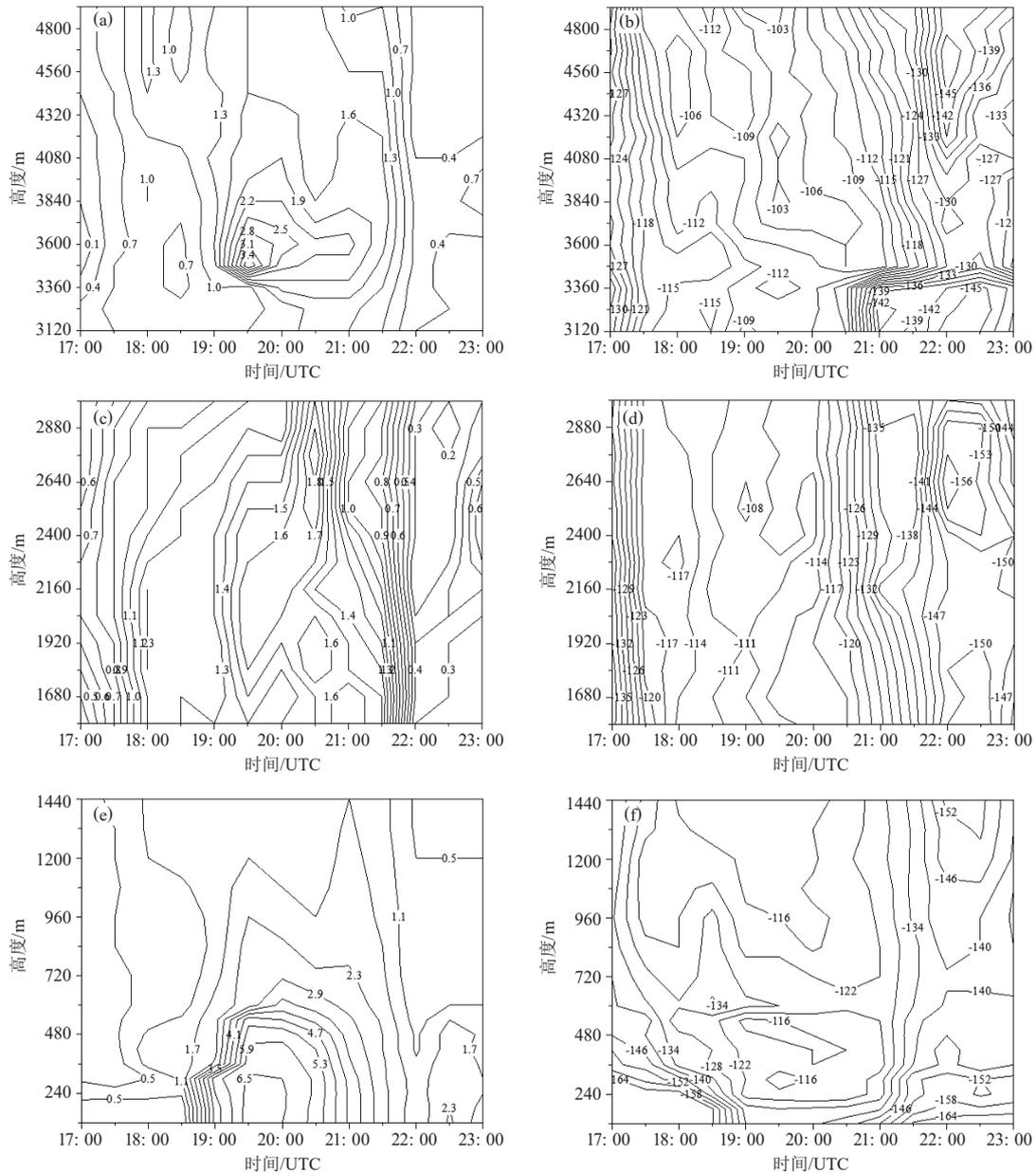


图9  $v$ 及 $C_n^2$ 时间-高度等值线图

(a) 中层 $v$ , (b) 中层 $C_n^2$ , (c) 低层 $v$ , (d) 低层 $C_n^2$ , (e) 近地面层 $v$ , (f) 近地面层 $C_n^2$

Fig. 9 Time-altitude contour diagram of  $v$  and  $C_n^2$

(a) middle level vertical wind, (b) middle level  $C_n^2$ , (c) low level vertical wind, (d) low level  $C_n^2$ , (e) vertical wind near the ground level, (f)  $C_n^2$  near the ground level

[3] Fukao S, Wakasugi K, Sato T, et al. Direct measurement of air and precipitation Particle motion by very high frequency Doppler radar. *Nature*, 1985(316): 712-714.

[4] 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. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1986, 3(4): 623-629.

[5] 邹德龙, 梁晓京, 岑易峰, 等. 基于风廓线雷达资料的一次强降水天气过程分析. *气象研究与应用*, 2019, 40(3): 26-30.

[6] 陈楠, 胡明宝, 徐芬, 等. 一次降雨过程风廓线雷达回波特征. *气象与环境学报*, 2012, 28(5): 19-24.

[7] 张楠, 杨晓君, 何群英, 等. 一次台风残涡引发的天津局地暴雨中尺度对流过程分析. *气象与环境学报*, 2020, 36(4): 1-10.

[8] 官晓东, 刘玉, 卜银军. 基于风廓线雷达对暖式切变和冷式切变大范围强降水的风垂直结构观测与差异分析. *气象科技进展*, 2020, 10(6): 95-100, 105.

[9] 庞博. 黑龙江省雨夹雪转雪天气过程特征分析. 兰州: 兰州大学, 2017: 20-21.

[10] 胡明宝. 气象雷达资料分析与应用. 北京: 气象出版社, 2016: 193-195.

[11] 王令, 王国荣, 古月. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探. *气象*, 2014, 40(3): 290-296.

[12] 王敏仲. 基于风廓线雷达的沙尘暴和降水过程探测分析. 兰州: 兰州大学, 2014: 95-96.

[13] 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. *干旱气象*, 2020, 38(1): 109-116.