

浙北地区多普勒雷达逆风区与风廓线雷达边界层大风提前量研究

郑梅迪¹, 王 冀¹, 涂小萍², 吕艺影³, 肖王星²

¹宁波市气象服务中心, 浙江 宁波

²宁波市气象台, 浙江 宁波

³余姚市气象局, 浙江 余姚

收稿日期: 2024年2月15日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月20日

摘 要

浙江地区汛期雷暴大风天气多发频发, 常导致经济损失和人员伤亡。为提高短临预报水平, 文章利用地面自动气象站、多普勒天气雷达、风廓线雷达资料, 选取2022年浙北地区雷暴大风个例, 探究了雷达逆风区与边界层大风的关系并计算了地面大风的预警提前量。结果表明: 多普勒天气雷达能提前探测到中低空和边界层逆风区的发生发展, 较地面大风出现有平均16.9 min和11.4 min的提前量。通过2020~2022年的典型强对流大风个例分析, 多普勒雷达逆风区-风廓线雷达边界层大风-自动站地面大风三者之间能形成短临预报提前量时间链, 对地面雷暴大风的短临预警有指示意义。此外, 2022年7月12日发生的下击暴流事件中, 多普勒雷达最低仰角探测水平风场变化不明显, 但风廓线雷达探测到高空风速突然增大, 早于地面大风出现时间约33 min, 表明风廓线雷达有利于提高下击暴流的提前预报预警能力。

关键词

逆风区, 边界层大风, 多普勒雷达, 风廓线雷达

Research on the Advance Time between Doppler Radar Adverse-Wind Areas and Wind Profile Radar Boundary Layer Strong Winds in Northern Zhejiang Province

Meidi Zheng¹, Hong Wang¹, Xiaoping Tu², Yiying Lyu³, Wangxing Xiao²

¹Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo Zhejiang

²Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo Zhejiang

³Yuyao Meteorological Bureau, Yuyao Zhejiang

文章引用: 郑梅迪, 王冀, 涂小萍, 吕艺影, 肖王星. 浙北地区多普勒雷达逆风区与风廓线雷达边界层大风提前量研究[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 279-287. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132030

Abstract

Thunderstorms and strong winds are frequent during the flood season in Zhejiang Province, which often leads to economic losses and casualties. In order to improve the level of short-term and imminent forecasting, this article uses the data of automatic weather station, Doppler radar and wind profile radar to select a case of thunderstorm and strong wind in northern Zhejiang in 2022, explore the relationship between radar adverse-wind areas and boundary layer strong winds, and calculate the early warning advance time of ground strong wind. The results show that Doppler weather radar can detect the occurrence and development of adverse-wind areas in the middle and low altitudes and boundary layers in advance, with an average advance of 16.9 minutes and 11.4 minutes compared to the appearance of strong winds on the ground. Through the analysis of typical cases of strong convective winds from 2020 to 2022, it can be concluded that the Doppler radar adverse-wind areas, boundary layer winds detected by wind profile radar, and ground strong winds can form a time chain, which has indicative significance for short-term forecasting of thunderstorm winds on the ground. In addition, during the downburst event that occurred on July 12, 2022, the Doppler radar detected no significant changes in the horizontal wind field at the lowest elevation angle. However, the wind profile radar detected a sudden increase in high-altitude wind speed about 33 minutes earlier than the appearance of strong winds on the ground, indicating that the wind profile radar is beneficial for improving the early warning and forecasting capabilities of downbursts.

Keywords

Adverse-Wind Areas, Boundary Layer Strong Winds, Doppler Radar, Wind Profile Radar

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷暴大风是浙江地区汛期主要的灾害性天气之一，发生时天气剧烈、破坏性强，常导致经济损失和人员伤亡[1]。由于生命史短、空间尺度小、突发性特征显著，雷暴大风的短临预报难度很大。

多普勒天气雷达是探测和预警强对流的主要工具，能够反演中尺度对流系统的精细降水结构和风场特征，在判断其发展趋势以及下击暴流、地面大风等预警工作中发挥着重要作用。近年来，随着多普勒雷达的投入和应用，科研人员发现径向速度场上的逆风区特征与雷雨大风等强对流天气有密切联系[2][3]。李军霞等人[4]分析了山西省强对流天气中的逆风区特征，指出逆风区辐合风场可提前 1~2 小时预警强对流天气。赵海军等人[5]指出，雷达低仰角识别到深厚、持续且强度 ≥ 15 m/s 的逆风区时，风暴明显发展。因此，逆风区可用于预报地面大风的发展。

另外，风廓线雷达是一种新型高空大气探测系统，主要探测对象是晴空大气，提供测站上空实时 6 min 一次的大气三维风场信息，弥补常规探空资料在时间和空间分辨率上的不足，同时弥补多普勒雷达静锥盲区的固有缺陷。因此，可用于监测预警灾害性强对流天气，风廓线雷达能够探测中低空和边界层的风速突变，对强风暴中的动量下传过程和地面大风的预警有指示作用。

2. 逆风区的定义及强度

根据张沛源和陈荣林[6]提出的逆风区概念, 定义为在低仰角 PPI 多普勒速度图上, 同一方向的速度区中出现另一种方向速度区, 并有明显零速度圆环将两者隔开, 这片被相反方向速度区包围的部分称之为逆风区。赵海军等人[5]指出, 逆风区两侧分别为辐合区和辐散区, 是对流系统低层辐合或辐散风场结构在多普勒雷达速度图上的表现。逆风区正速度最大值和负速度最小值之差定义为逆风区的强度。

本文讨论的逆风区为 0.5° 仰角速度场上出现的逆风区, 且强度 ≥ 10 m/s、径向速度绝对值最大值 ≥ 5 m/s。

3. 资料与方法

本文所用资料包括浙江自动站分钟级观测资料、天气雷达、风廓线雷达数据, 其中浙江省宁波市在余姚、慈溪、象山、奉化等地部署了风廓线雷达。

地面风场数据来自 2022 年汛期(4~9 月)浙江区域自动气象观测站, 时间分辨率 5 min, 平均空间密度约 5 km。挑选出极大风速 8 级(17.2 m/s)及以上个例, 通过形势场分析剔除冷空气大风、台风大风等过程, 将其计为一个强对流大风个例。

采用浙江宁波、杭州、舟山 SA 波段多普勒雷达, 体扫模式为 VCP21, 即 6 min 内完成 9 个仰角的扫描, 分析强对流大风个例中低仰角的逆风区强度和演变特征, 计算其与地面大风出现时间的提前量。

4. 逆风区与边界层大风提前量分析

4.1. 最低仰角逆风区

2022 年浙北地区共筛选出 8 个雷暴大风个例(表 1), 多普勒雷达速度场上均出现了逆风区, 其中个例 3 (7 月 12 日下击暴流个例)最低仰角逆风区强度最小, 仅为 10.5 m/s, 其余 7 个均出现了强度 15 m/s 以上的逆风区, 个例 4 和 6 的逆风区最强, 为 20.5 m/s。

雷达最低仰角的逆风区普遍早于地面大风出现, 平均提前量在 11.4 min。仅有个例 2 的逆风区与地面大风几乎同时出现, 其余 7 个均有 6 min 以上的提前量, 最长的提前量可达 32 min (个例 1), 说明最低仰角的逆风区对地面大风的出现有一定指示意义。

Table 1. Time-advance relationship between the adverse-wind areas on minimum elevation of Doppler radar and the ground strong winds

表 1. 多普勒雷达最低仰角逆风区与地面大风时间提前量关系

	个例日期	雷暴大风出现的区县	最早观测到大风的自动站号	该站极大风 m/s	最早出现地面大风的时间	最低仰角逆风区时间	最低仰角逆风区的提前量/min	最低仰角逆风区强度 m/s	过程极大风速 m/s
1	2022.6.24	海曙	K2117	26.4	14:48	14:16	32	15	26.4
2	2022.6.24	嵊州	K4700	40.1	14:49	14:49	0	15.5	40.1
3	2022.7.12	奉化	K2747	20.4	14:18	14:04	14	10.5	37.9
4	2022.7.17	新昌	K4631	18.6	16:04	15:55	9	20.5	28.4
5	2022.7.26	新昌	K4914	25	15:17	15:06	11	15.5	25
6	2022.7.26	奉化	K2713	19.5	16:30	16:24	6	20.5	20.6
7	2022.8.26	海盐	K5636	18.2	13:08	13:00	8	15.5	18.2
8	2022.8.26	海曙	K2449	19.7	15:23	15:06	11	17.5	22.8

从产生大风的母体风暴类型来看，个例 1 和 2 的地面大风由超级单体引起，个例 3~8 为普通单体或多单体风暴导致。超级单体最低仰角逆风区出现时间的提前量为 16 min，高于普通单体或多单体风暴 9.8 min，强度上差别不大。但是超级单体的最低仰角逆风区时间提前量的离散度很大，而普通单体或多单体风暴的提前量之间更为一致。

计算最低仰角的逆风区强度与过程地面极大风速大小之间的相关性，发现两者之间相关系数为 -0.506，即不存在相关性。说明预警地面风速大小不能简单根据逆风区的强弱，还需要综合考虑高悬回波强度导致的下沉拖曳、中层卷入与环境潜势、环境风速与强对流单体出流速度之间的叠加效应等方面。

4.2. 中层逆风区

在上述 8 个个例中，中层逆风区(2.4~6.0°仰角)的平均强度为 22.9 m/s (表 2)，强于最低仰角逆风区的平均强度(16.3 m/s)。中层逆风区较地面大风出现时间平均提前量为 16.9 min，大多早于最低仰角逆风区出现时间。

Table 2. Time-advance relationship between the adverse-wind areas on middle-level elevation of Doppler radar and the ground strong winds

表 2. 多普勒雷达中层逆风区与地面大风时间提前量关系

	个例时间	雷暴大风出现的区县	最早出现地面大风的时间	影响系统	中层逆风区出现时间	2.4~4.3°仰角逆风区最强强度 m/s	中层逆风区提前量/min
1	2022.6.24	海曙	14:48	超级单体	14:29	26.5	19
2	2022.6.24	嵊州	14:49	超级单体	无	无	0
3	2022.7.12	奉化	14:18	脉冲风暴	13:42	20	36
4	2022.7.17	新昌	16:04	多单体风暴	15:49	25	15
5	2022.7.26	新昌	15:17	普通单体	14:56	26.5	21
6	2022.7.26	奉化	16:30	普通单体	16:17	20	13
7	2022.8.26	海盐	13:08	普通单体	13:00	26.5	8
8	2022.8.26	海曙	15:23	多单体风暴	15:12	15.5	23
平均						22.9	16.9

举例来说，中层逆风区出现时间提前量最多的为个例 3，达 36 min，而其最低仰角逆风区的提前量为 14 min。从整体逆风区发展过程来看(图 1)，13:42，3.4~6.0°仰角上观察到有逆风区的加强，强度为 15.5 m/s，高度为 4.1~5.5 km，意味着此时对流单体在中层发展。14:04，6.0°仰角逆风区强度增强到 20.5 m/s 并有气旋式辐合，符合中层径向辐合特征，是低层出现下击暴流的前兆信号，此时 0.5°仰角出现逆风区，表明单体的进一步发展。在 14:18 地面最早出现 8 级大风 4 min 以后，4.3°仰角逆风区范围减小、强度减弱。由于产生下击暴流的单体尺度小，自上而下发展，明显的逆风辐合区出现在 3.4°仰角上(高度约 2.5 km)，而发展初期近地面风速小、杂波多，0.5°仰角上逆风区不明显，强度仅为 10.5 m/s。综合分析，下击暴流类大风需关注速度场中层逆风区的相对强度变化，对地面大风出现的时间和强度有一定指示意义。

唯一例外的是个例 1 的超级单体风暴，逆风区自下而上发展。2022 年 6 月 24 日 14:16，首先在最低仰角上出现逆风区，强度为 15 m/s，中层逆风区均在 14:29 出现，其中 4.0°仰角上的逆风区强度达到最强(26.5 m/s)，高度约为 3 km。说明该个例单体的辐合发展先从边界层开始，逐步在中层形成旋转性

的中气旋。

综合低层和高层逆风区的形成可以看出,在强对流大风个例中,逆风区有垂直延展性,大部分个例逆风区自上而下发展,在中层逆风区对地面大风指示提前量更大。部分个例首先在高仰角出现辐散型逆风区,而后在中低仰角出现辐合型逆风区,说明高空的辐散抽吸有利于低层的辐合加强。脉冲风暴的个例从中层首先出现辐合型逆风区,有利于下击暴流的形成。

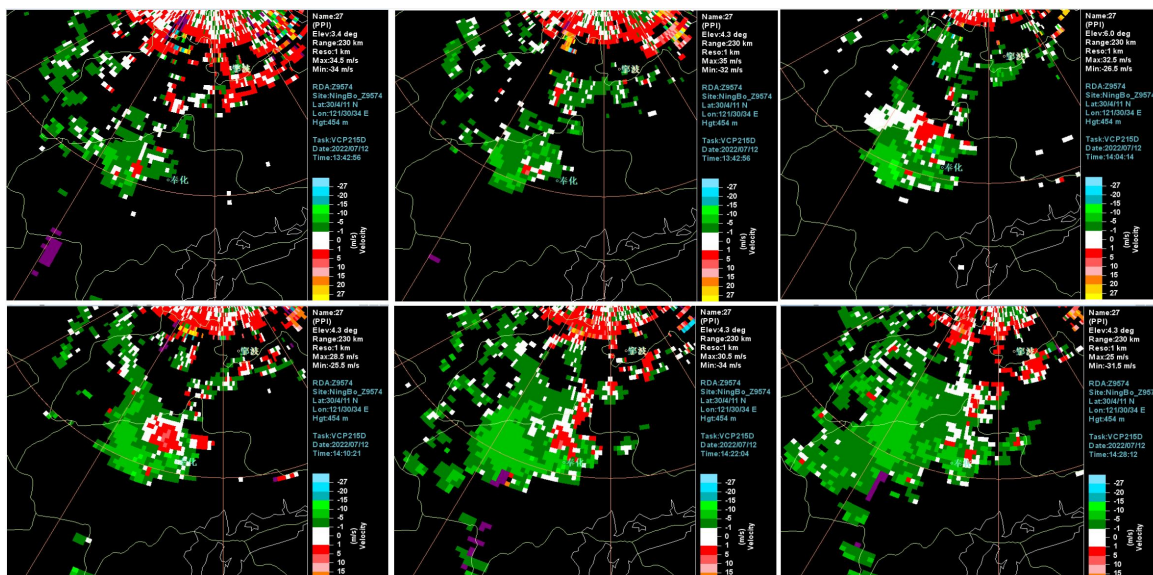


Figure 1. Doppler radar velocity map on July 12, 2022

图 1. 2022 年 7 月 12 日多普勒雷达速度图

5. 风廓线雷达的动量下传的个例分析

风廓线雷达能够探测距地 0~6 km 高度上水平风向和风速的变化,具有较高的时空分辨率,可作为多普勒雷达在高空风场探测不足的补充,提前发现高空风场的变化及动量下传过程。

挑选 2020~2022 年中 4 个典型的个例过程。其中,3 个个例同时满足国家站出现地面大风、风廓线雷达边界层出现动量下传,以及多普勒雷达最低仰角出现逆风区等条件;另一个是下击暴流个例,国家站出现地面大风、风廓线雷达高空出现水平风速增大以及多普勒雷达最低仰角出现了逆风区。

5.1. 边界层或低空出现动量下传的个例

2020 年 3 月 21 日,浙北地区处于南支槽前的西南气流中。傍晚前后,700 hPa 有冷式切变线东移南压,同时 850 hPa 有西南涡发展东移和低涡南部的低空急流发展,急流中心最大风速达 18 m/s,大气整层为下暖湿、上冷干的不稳定层结,切变线和急流脉动共同作用是触发强对流的主要动力机制。浙北处于低涡前部暖区、低空急流的左前侧,午后地面最高气温达 28℃ 上下,能量条件极好。850 hPa 上比湿达 12 g/kg,水汽条件较好。

午后浙北地区有对流单体自西向东移动发展,傍晚宁波余姚受超级单体影响,出现雷暴大风、冰雹等强对流天气。17:06 前后 0.5° 仰角出现逆风区(图 2),强度达 26.5 m/s,显示有中气旋的发展。17:18 最低仰角上出现速度模糊,与此同时,在余姚风廓线雷达上探测到边界层(0~1 km)内水平风速快速增大(图 3(a)),出现 40 m/s 西南大风,有高空动量下传。17:44 余姚国家站(58468)探测到 19.7 m/s 地面大风。该个例中雷达逆风区较地面大风的预警提前量为 38 min,边界层风速突然增大,较地面大风的预警提前量为 26 min。

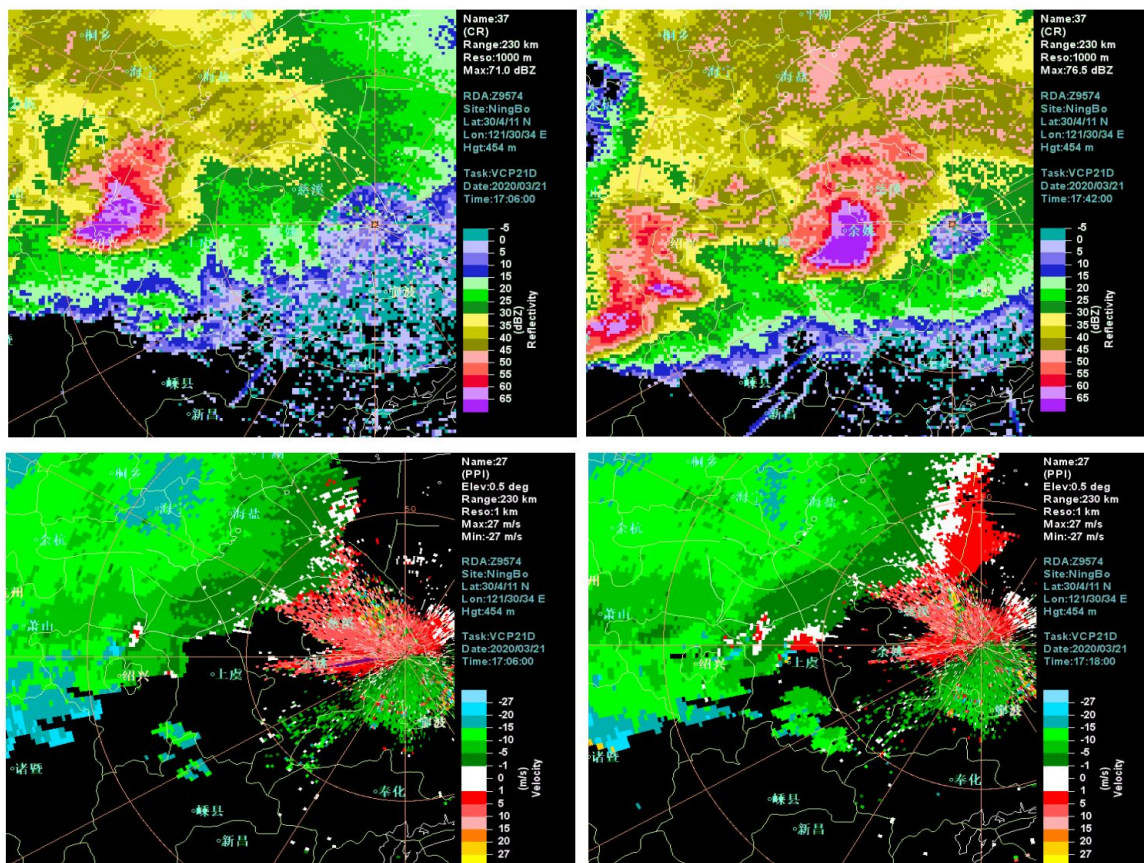


Figure 2. Doppler radar combination reflectance factor and velocity maps on March 21, 2020
图 2. 2020 年 3 月 21 日多普勒雷达组合反射率因子图和速度图

2021 年 5 月 14 日夜，受副热带高压边缘、低空急流和地面辐合线共同影响，浙北地区出现雷暴大风、短时强降水等强对流天气。21:06，宁波雷达 0.5°仰角出现逆风区，高度为 3.5 km，强度达 33.5 m/s，且出现速度模糊，朝向雷达速度达-30.5 m/s。22:24 起，余姚站风廓线雷达上探测到边界层(0~1 km)内水平风速快速增大，出现 36 m/s 的偏西大风，有高空动量下传的过程，且该风速增大过程持续 12 分钟(图 3(b))。23:08，余姚国家站(58468)探测到 23.9 m/s 地面大风。该个例显示，雷达逆风区较地面大风的预警提前量为 86 min，边界层风速突然增大较地面大风的预警提前量为 44 min。

2022 年 7 月 26 日，浙北地区位于副热带高压边缘，北部有高空短波槽东移，冷空气渗透，低层有西南-东北向的暖舌，构成下暖上冷的不稳定层结结构。午后到傍晚，浙北发生大范围强对流天气，15:53 前后，奉化西部山区出现初始对流单体，东移过程中迅速发展成雷暴群。

16:24 在 0.5°仰角的径向速度上出现小范围逆风区，呈顺时针旋转，预示有下沉气流。从奉化风廓线雷达反演的风场变化上来看(图 3(c))，16:30 明显探到中层风速的增大，其中 2~7 km 高度上均有 17 m/s 以上大风，探测到的最大风速 31.3 m/s 出现在 7230 m，此时大风尚未接地。16:36 时湍流过强导致风廓线雷达数据缺损。16:41，奉化国家一般站观测到 8 级(19.5 m/s)大风。该个例显示，雷达低仰角逆风区较地面大风的预警提前量为 17 min，中低层风速突然增大，较地面大风的预警提前量为 11 min。

从以上个例中可以看出，在强对流过程中，多普勒雷达能够探测到上游逆风区的出现，表示低层空中有辐合辐散场的发展，风廓线雷达则能提前发现站点上空风速的突然增强，且边界层风速快速增大，甚至由于湍流变化导致边界层风速探测缺失。这两者均与下游地面灾害性大风的出现存在时间提前量，

能够形成较完整的短临预报时间链，提高强对流大风的预警水平。

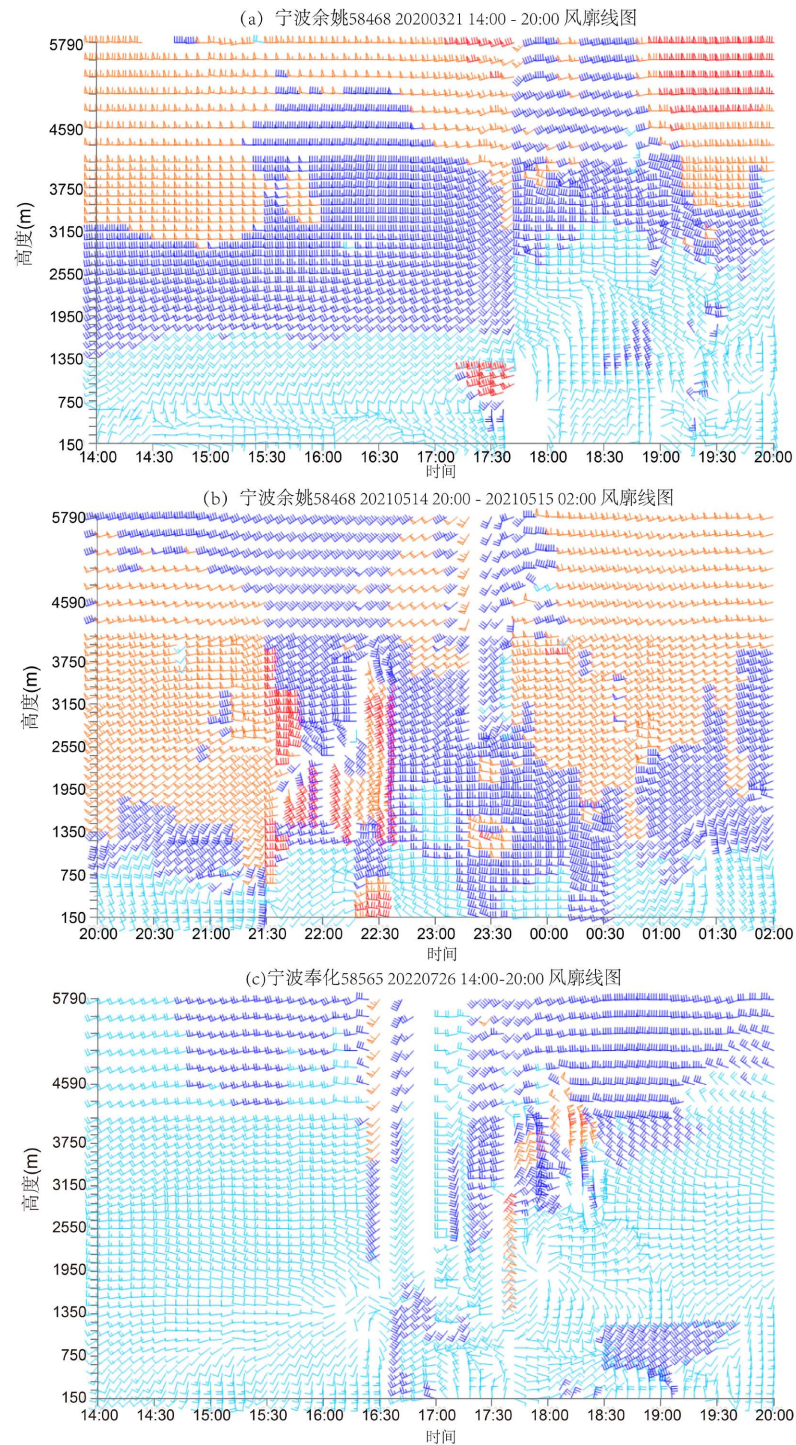


Figure 3. Wind profile radar wind direction and wind speed changes with altitude-time: (a) 58468 Station March 21, 2020 14:00~20:00; (b) 58468 Station May 14, 2021 20:00~May 15, 2021, 02:00; (c) 58565 Station July 26, 2022 14:00~20:00

图 3. 风廓线雷达风向风速随高度 - 时间的变化: (a) 58468 站 2020 年 3 月 21 日 14:00~20:00; (b) 58468 站 2021 年 5 月 14 日 20:00~15 日 02:00; (c) 58565 站 2022 年 7 月 26 日 14:00~20:00

5.2. 风廓线雷达在下击暴流个例中的作用

2022年7月12日下午,受对流单体的下击暴流影响,宁波市奉化区、鄞州区先后出现8~11级雷暴大风过程,其中鄞州区个别风力达13级。最早于14:18奉化K2747自动站出现8级(20.4 m/s)大风,14:27奉化国家一般站出现9级(21.6 m/s),14:51鄞州站观测到13级(37.9 m/s)极大风。

本次过程在雷达上反射率因子图上有较明显的回波悬垂和入流缺口(图4(a)、图4(b)),由于质心的快速下沉、降水粒子的拖曳作用导致的下击暴流,在地面形成顺时针旋转的极大风分布。但雷达最低仰角速度场上很不明显,由于杂波众多,难以从中分辨对流系统的速度场。14:04在奉化站附近出现了微弱的逆风区,在大片离开雷达的速度场中出现了朝向雷达的速度,相对速度差为10.5 m/s。综合来看,下击暴流的极大风方向基本与雷达径向垂直,这可能是速度场上反应不明显的原因之一。尽管出现了不明显的逆风区,其提前量亦有14 min。

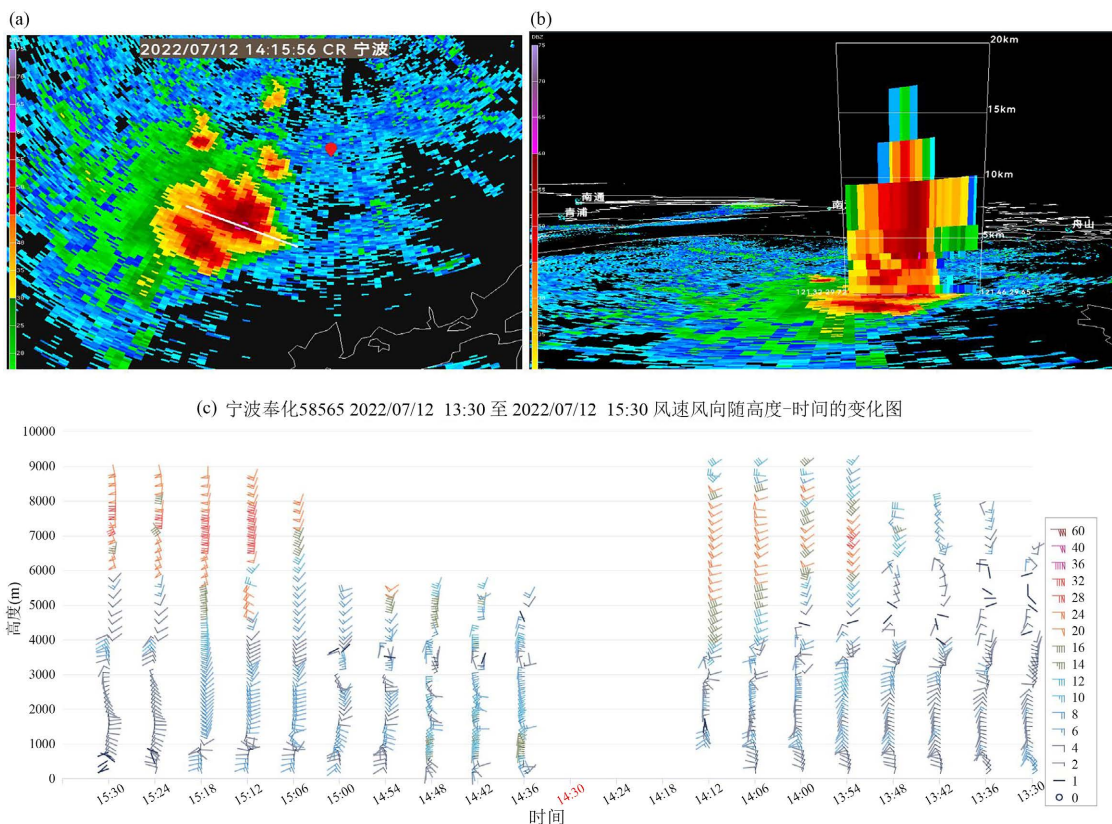


Figure 4. Reflectivity factor map (a) and reflectivity factor profile map (b) of Ningbo radar combination at 14:15 on July 12, 2022, wind profile radar at 58565 Station changes of wind direction and wind speed with altitude-time from 12:00 to 18:00 (c)

图 4. 2022 年 7 月 12 日 14:15 宁波雷达组合反射率因子图(a)和反射率因子剖面图(b), 58565 站风廓线雷达 12:00~18:00 风向风速随高度 - 时间的变化(c)

从奉化站风廓线雷达速度随高度 - 时间的变化图上可以看出(图 4(c)), 13:54 起高空(4~6 km)风速明显增大,对下击暴流单体的发生发展有一定的指示意义。14:12 边界层扰动加强,750 米及以下水平风场数据缺测,14:18 风廓线雷达整层水平风场数据缺测,意味着整层水平风力受湍流扰动变得不可信,此时也是奉化站附近开始出现大风的时间。14:27 奉化国家站(58565)出现 21.6 m/s 大风。本个例中,高层风速突然增大,较地面大风的预警提前量为 33 min,而边界层扰动导致的数据缺测较地面大风出现的提前量为 15 min。

在下击暴流个例中, 单体首先在中层开始辐合发展, 边界层的风速小, 多普勒雷达风场表现不明显, 逆风区强度弱。风廓线雷达能够探测到整个对流层晴空条件下风场的变化, 对对流单体发展前期高空风场的变化有良好的探测效果, 能指示地面下击暴流大风。

6. 总结与讨论

文章利用地面自动气象站、多普勒天气雷达、风廓线雷达资料, 分析了 2022 年浙北地区雷暴大风个例中雷达逆风区与边界层大风的的关系, 并计算了预警提前量。得到以下结论:

1) 分析 2022 年浙北地区 8 个强对流大风个例, 发现雷达最低仰角速度场上均出现逆风区, 7/8 的个例逆风区强度在 15 m/s 以上, 其中最强为 20.5 m/s。0.5°仰角上的逆风区较地面大风出现时间具有提前量, 最长可达 32 min, 平均提前量 11.4 min。

2) 多普勒雷达 0.5~3.4°仰角的逆风区均有指示中低空辐合辐散的出现, 对强对流单体快速发展有提示作用。下击暴流的个例中高仰角的逆风区较低仰角的逆风区发展更早, 意味着下击暴流是从中空开始辐合发展, 在短临业务中应多层速度场配合研判, 灵活运用逆风区在地面大风提前量上的指示作用。

3) 选取国家站出现地面大风, 同时风廓线雷达和多普勒雷达探测到逆风区的 3 个个例, 发现逆风区较地面大风的提前量最多, 风廓线雷达探测到中低空风速增长和边界层大风的提前量次之, 两者之间能够配合形成短临预报时间提前链。

4) 7·12 下击暴流个例中, 多普勒雷达最低仰角探测水平风场变化不明显, 但风廓线雷达探测到高空风速突然增大, 早于地面大风出现时间约 33 min, 表明风廓线雷达能够探测到下击暴流单体早期在高空的发展, 有利于提高下击暴流的提前预报预警能力。

目前存在的问题为两种雷达的数据传输均存在一定的滞后性, 因此在业务运用中提前量有所减少。随着多普勒雷达和风廓线雷达的进一步建设布局、升级改造和业务化, 未来可以进一步研究双偏振雷达参量、风廓线雷达风场与近地面大风的的关系, 为雷暴大风的短临预警提供参考。

参考文献

- [1] 涂小萍, 姚日升, 漆梁波, 等. 浙江省北部一次灾害性大风多普勒雷达和边界层特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1687-1696.
- [2] 王丽荣, 胡志群, 汤达章, 等. 多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用[J]. 气象科学, 2007, 27(6): 695-701.
- [3] 陈鲍发, 魏鸣, 柳守煜. 逆风区的回波演变与强对流天气的结构分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 127-134.
- [4] 李军霞, 汤达章, 李培仁, 等. 中小尺度的多普勒径向速度场特征分析[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 557-563.
- [5] 赵海军, 李柏, 潘玲, 等. 暴雨过程中逆风区特征及应用判据研究[J]. 山东气象, 2019, 39(2): 126-133.
- [6] 张沛源, 陈荣林. 多普勒速度图上的暴雨判据研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(3): 373-378.