

雷达多观测模式在不同类型天气过程中的适用性评估^{*}

王鹏飞¹ 管理^{2*} 张晶² 陈波¹ 成璐³ 刘子奇⁴ 王坤⁵

1 新疆喀什地区气象台, 喀什 844000

2 上海中心气象台, 上海 200030

3 上海市青浦区气象局, 上海 201700

4 浙江省嘉兴市气象局, 嘉兴 310002

5 江苏省南通市气象局, 南通 226018

提 要: 利用上海青浦、江苏南通和浙江杭州、嘉兴、湖州、宁波共 6 部 S 波段双偏振雷达资料, 通过典型示踪因子主观判别、等高面插值对比和双雷达风场反演比对等几种方式, 评估雷达的 VCP21D、VCP11D、VCP216D 等不同体扫模式在一般降水、强对流和台风等天气中的实际应用效果。结果表明: 降水模式 (VCP21D) 和对流模式 (VCP11D、VCP216D) 均能准确识别零度层亮带特征, VCP21D 相较 VCP216D 识别的融化层高度更稳定, 标准差较小, 与实况更吻合。对流模式 (VCP11D、VCP216D) 相较降水模式 (VCP21D) 能够有效提升垂直方向上的观测精度, 对 Z_{DR} 柱、中气旋等强对流天气关键特征的识别提供了更多有价值的信息; VCP216D 相较 VCP11D 增加的 1.0° 仰角扫描, 能够获取低层阵风锋等中尺度信息的同时, 减少地物回波带来的影响和干扰; 等高面插值对比中, VCP11D、VCP216D 相较 VCP21D, 在 5 km 高度以上的信息获取更为连续; 风场反演算法对比中, 对流模式 (VCP11D、VCP216D) 的双雷达反演结果相较降水模式 (VCP21D), 其数据可用性和反演精度均有较明显提升。

关键词: 体扫模式, 强对流, 台风, 观测模式适用性比较

中图分类号:

文献标志码:

DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2025.080601

Applicability Evaluation of Radar Multi Observation Modes in Different Types of Weather Events

WANG Pengfei¹ GUAN Li^{2*} ZHANG Jing¹ CHEN Bo¹ CHENG Lu³ LIU Ziqi⁴
WANG Kun⁵

1 Kashgar Meteorological Office of Xinjiang, Kashgar 844000

2 Shanghai Center Meteorological Observatory, Shanghai 200030

3 Qingpu District Meteorological Office of Shanghai, Shanghai 201700

4 Jiaxing Meteorological Office of Zhejiang, Jiaxing 310002

5 Nantong Meteorological Office of Jiangsu, Nantong 226018

Abstract: Based on the S-band dual-polarization radar data from Qingpu (Shanghai), Nantong (Jiangsu), Hangzhou, Jiaxing, Huzhou and Ningbo (Zhejiang), the effectiveness evaluation of three

^{*}中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J001); 中国气象局气象能力提升联合研究专项 (23NLTSZ002); 中国气象局青年创新团队 (CMA2023QN06); 上海市自然科学基金 (23ZR1447300); 上海市气象局科技人才类项目 (KJRC202403, KJRC202411) 共同资助。

第一作者: 王鹏飞, 主要从事短临预报预警工作, E-mail: wangpf1208@163.com

通讯作者: 管理, 主要从事双偏振雷达资料处理与应用研究, E-mail: glion2005@163.com

volume coverage patterns (VCP21D, VCP11D and VCP216D) are assessed under general precipitation, severe convective and typhoon conditions. The evaluation is based on three methods: subjective identification of characteristic tracer factors, interpolation of reflectivity factor isosurfaces, and wind field retrieve using dual-radar data. The results indicate that both VCP21D and VCP11D can accurately identify the zero-degree bright band characteristic. VCP21D, compared to VCP11D, shows better stability in recognizing the melting layer height, with a smaller standard deviation and a better match to actual conditions. The convective coverage patterns (VCP11D and VCP216D) significantly enhance vertical observational resolution compared to the precipitation coverage pattern (VCP21D). This improvement is crucial for detecting key severe weather phenomena, such as Z_{DR} columns and mesoscale cyclones. Meanwhile, the additional 1.0° elevation angle in VCP216D volume coverage pattern is particularly effective in capturing mesoscale features such as low-level gust fronts and sea breeze fronts. Also, this additional scan cut eliminates the effect from ground clutter echoes for data quality improvement. The data from VCP11D and VCP216D volume coverage pattern shows great advantages in generating constant altitude plan position indicator (CAPPI), characterize the details special above 5 km altitude, compared to VCP21D volume coverage pattern. in both isosurface interpolation and wind field inversion. In the comparison of wind field retrieve, the availability and accuracy of the retrieved data significantly improved, from the dual-radar Wind field inversion results using convective coverage patterns (VCP11D and VCP216D) compared to precipitation coverage pattern (VCP21D).

Key words: volume coverage pattern (VCP), severe convection, typhoon

引言

强对流天气是预报难度较大的灾害性天气，具有时间短、突发性强、局地性强等特点。台风天气过程是致灾影响范围最大的灾害性天气，具备影响范围大、破坏力强等特征。以局地强对流和台风为代表的灾害性天气，对经济高质量发展和人民生命安全的威胁较大（俞小鼎和郑永光，2020；罗亚丽等，2020；端义宏等，2012；）。如2016年6月1日下击暴流造成“东方之星”号倾覆，442人遇难（郑永光等，2016a）；2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县出现EF4级龙卷，造成99人死亡，800余人受伤（郑永光等，2016b）；2019年辽宁铁岭开原出现EF4级龙卷，造成7人死亡，190余人受伤（郑永光等，2020）；2014年台风“威马逊”造成广东、广西、海南、云南等地1189.9万人受灾，房屋倒塌4.2万间，直接经济损失446.5亿元（杨绚等，2020）。

双偏振天气雷达具备探测距离广、时空分辨率高等特点，在强对流和台风两类天气中的监测和预警发挥着不可替代的作用。借助于天气雷达，强对流和台风的相关机制机理也逐渐被揭示。二十世纪七十年代以来美国建立超级单体概念模型，后侧下沉气流（RFD）和前侧下沉气流（FFD）作为超级单体的两个关键特征，RFD 与龙卷风生成密切相关，FFD 与风暴的旋转特性和直线风有关（Markowski, 2002; Shabbott and Markowski, 2006; Grzych et al, 2007）。国内外学者们基于双偏振参量（差分反射率 Z_{DR} 、差分相移率 K_{DP} 等），开展了一系列风暴结构与微物理特征研究。Hall et al（1984）研究发现对流风暴融化层上存在 Z_{DR} 柱，并揭示了 Z_{DR} 柱可定性表征对流风暴中强烈的上升气流区。Kumjian and Ryzhkov（2008）进一步提炼了超级单体风暴中的 Z_{DR} 弧、 K_{DP} 柱、 Z_{DR} 洞等大风和冰雹的雷达先兆特征。国内，李国翠等（2013）利用天气雷达三维组网数据提炼出 6 个主要识别指标，基于模糊逻辑方法，构建了对流性地面大风的识别方法。植江玲等（2022）基于双偏振雷达对比分析了 2019 年广东两次超级单体导致的下击暴流和龙卷大风，发现中气旋垂直结构和强度的明显差异是造成两种不同类型极端大风的主要成因。黄先香等（2024）依托双偏振雷达和其他多源观测资料，剖析了广东龙卷的时空分布特征以及龙卷对流风暴形态等气候统计特征。徐芬等（2021）、慕瑞琪等（2022）通过对江苏省龙卷过程的天气雷达特征的分析研究，凝练整理了中气旋特征和龙卷涡旋特征在龙卷预警中的业务应用指标。赵坤等（2015）利用东南沿海多个登陆台风的天气雷达资料，采用速度体积分析方法反演登陆台风的边界层风场结构特征，与探空观测的对比检验显示该方法可以准确地反演登陆台风的边界层风场结构。高拴柱（2020）利用多普勒天气雷达资料，对 2018 年台风“温比亚”的强对流螺旋雨带进行了观测特征详细分析，识别出多个超级单体风暴以及低层龙卷涡旋特征。

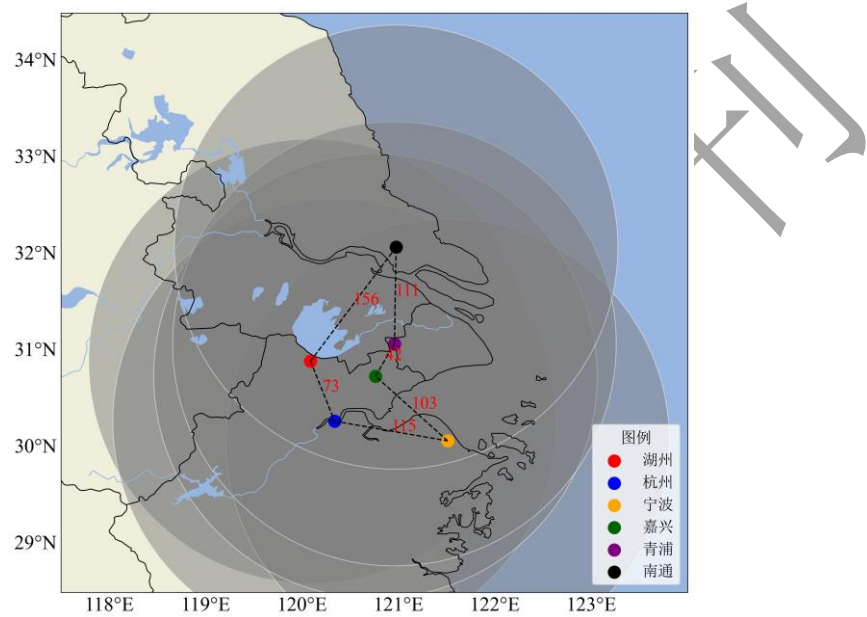
但上述工作均基于雷达的 VCP21 体扫模式开展，强对流天气往往在垂直方向上发展的高度较高，现有的体扫模式对垂直方向上的精细化特征刻画存在不足；对台风个例而言，由于中高层径向风场信息的缺失，限制了台风预报预警能力的提升和台风机制机理的揭示。为了提高天气雷达对灾害性天气尤其是强对流天气的监测能力，国内外学者对天气雷达的体扫模式进行了广泛的研究。美国对于雷达体扫模式的探索开展较早，相关气象从业人员和学者基于 WSR88D 雷达，设计了 VCP11、VCP12、VCP21、VCP121、VCP211、VCP212、VCP221、VCP31 和 VCP32 等多种体扫模式。VCP11、VCP12 等强对流体扫模式较 VCP21 在时空分辨率均有不同程度的提升，同时解决了仰角大于 5° 时 VCP21 或 VCP22 体扫模式数据明显缺失的问题（Brown et al, 2000）。2011 年动态扫描技术 AVSET（Automated Volume Scan Evaluation and Termination）被部署在 WSR88D 雷达上，可在没有降水回波的高仰角扫描中自动终止当前的体积扫描，从而节省时间和资源，提高雷达的响应速度（Cho and Kurdzo, 2019）。2014 年升级为 SAILS（Supplemental Adaptive Intra-Volume Low Level Scan）动态扫描，在低层插入额外的 0.5° 扫描，能够更频繁地进行低层扫描，对监测龙卷等发展快速的天气至关重要（Kingfield and French, 2022）。2016 年在此基础上，又研发了 MRLE（Mid Volume Rescan of Low-Level Elevations）模式，其可在体积扫描的中间部分重新扫描最低的多个仰角（Cho et al, 2022）。国内而言，刘应军等（2006）对比 VCP21 和 VCP11，认为在近距离的强对流天气中使用 VCP11 体扫模式更优。杨金红等（2013）以福州、龙岩雷达为例，设计新的体扫模式 VCP12，通过增加低仰角和负仰角扫描，改善了雷达低层中远距离的探测能力。李柏等（2013）分析了新一代天气雷达对大、中尺度天气系统的监测能力，指出 VCP11 体扫模式比 VCP21 体扫模式更适合对风暴垂直结构进行精细化探测。张晶等（2024）对营口天气雷达 4 种体扫模式进行业务试验，发现强对流探测模式 VCP12D 和 VCP212D 较 VCP11D 增加了低层的垂直分辨率，可以获得距离雷达 100 km 之外更为详细的探测数据，同时缩短了雷达体扫时间，对于发展较快的强对流风暴探测效果更好。

2021 年 4 月，中国气象局遴选了 17 部雷达启动新一代天气雷达模式智能运行试点工作，

在美国 WSR88D 现有模式的基础上，增加了 VCP215D、VCP216D 等体扫模式，并在试运行过程中制定和优化观测模式方案，旨在提升灾害性天气监测预报预警服务能力。截至 2024 年 11 月，全国范围内已有 239 部雷达完成了天气雷达的多模式自适应切换工作。本文基于环上海地区的 S 波段双偏振雷达高时空分辨率观测网，利用 6 部雷达评估多观测模式在一般降水、强对流和台风等不同类型天气过程中的适用性，为天气雷达观测模式选择和优化提供一定参考，从而进一步挖掘新一代天气雷达多观测模式的潜在效益。

1 资料来源及多体扫模式

选用上海市及其周边共 6 部 S 波段双偏振雷达参与天气雷达多模式观测的适用性评估，分别为上海青浦、江苏南通、浙江杭州、湖州、嘉兴和宁波雷达，雷达布局和扫描范围详见图 1。



注：图中数字代表 2 部雷达间的距离（单位：km）

图 1 参与评估的 6 部 S 波段双偏振雷达位置（彩色圆点）与扫描范围（灰色阴影）

Fig.1 Locations (colored dots) and scan coverage (gray shading) of the six S-band dual-polarization radars participating in the evaluation

6 部雷达的相互间距在 42~156 km 之间，非常适合于针对同一个影响系统进行精细化检验评估。6 部雷达中，青浦和南通雷达在降水过程中根据天气形势启动 VCP21D 和 VCP11D 的自适应切换，杭州、嘉兴、湖州和宁波雷达启动 VCP32D 和 VCP216D 的自适应切换。

本文中对比的 3 种模式（VCP21D、VCP11D、VCP216D）扫描方式详见表 1，VCP11D 模式相较 VCP21D 模式在高仰角增加了 5 个仰角的扫描（5.3°、7.5°、8.7°、12.0°和 16.7°）。VCP216D 模式在 VCP11D 模式的基础上，增加了 1.0°仰角的扫描。

表 1 VCP21D、VCP11D、VCP216D 模式扫描方式

Table 1 VCP21D, VCP11D and VCP216D scanning methods

仰角	VCP21D	VCP11D	VCP216D
0.5 °	CS	CS	CS
0.5 °	CD	CD	CD
1.0 °	—	—	CS

1.0 °	—	—	CD
1.5 °	CS	CS	CS
1.5 °	CD	CD	CD
2.4 °	B	B	B
3.4 °	B	B	B
4.3 °	B	B	B
5.3 °	—	B	B
6.0 °	B	B	B
7.5 °	—	CDX	CDX
8.7 °	—	CDX	CDX
10.0 °	CDX	CDX	CDX
12.0 °	—	CDX	CDX
14.0 °	CDX	CDX	CDX
16.7 °	—	CDX	CDX
19.5 °	CDX	CDX	CDX

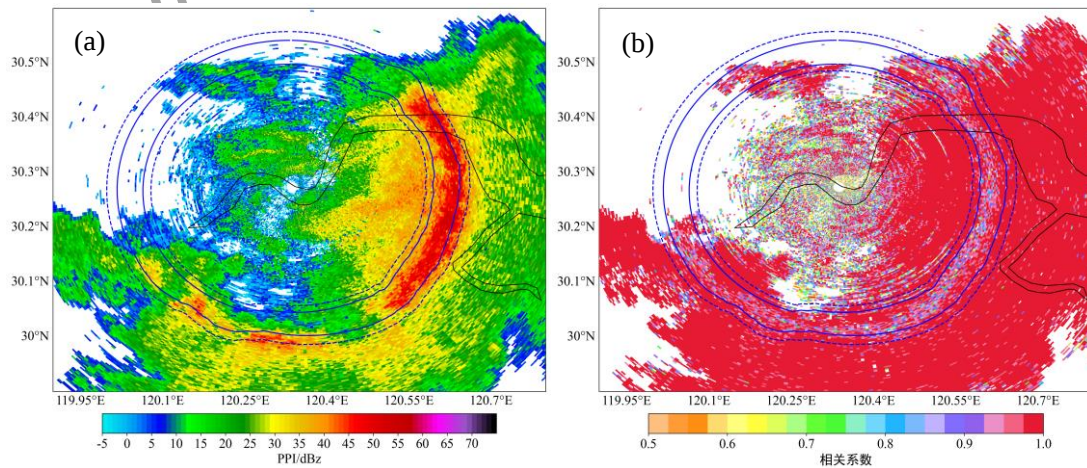
注：“—”表示无数据，CS 和 CD 分别表示连续监测和连续多普勒模式，B 表示交替扫描方式，CDX 表示不考虑距离折叠的连续多普勒方式。

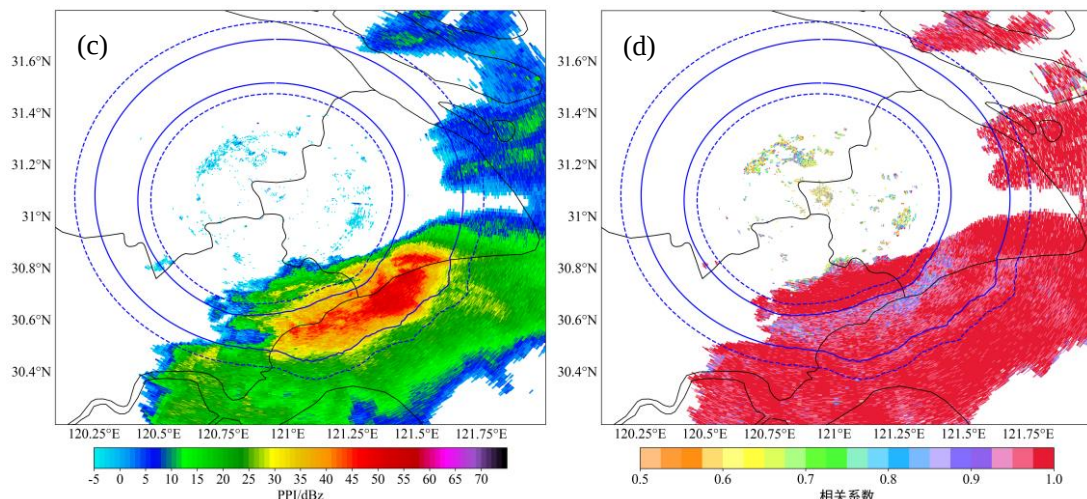
2 应用评估

2.1 精细化特征识别

2.1.1 积层混合型降水过程应用评估

相较于强对流天气过程，积层混合型降水过程中的融化层的垂直结构相对稳定，其识别主要依赖于相关系数 (ρ_{hv})、 Z_{DR} 等双偏振参量 (Giangrande et al, 2008)。尽管 VCP21D 体扫模式较 VCP11D 和 VCP216D 体扫模式缺少 5 个高仰角的扫描，但在 2024 年 6 月 12 日受切变线影响，出现的一次积层混合型降水过程中，青浦雷达 (VCP21D) 和杭州雷达 (VCP216D) 均成功捕捉到零度层亮带特征。如图 2a 所示，08:28 杭州雷达 8.7° 仰角上 (VCP21D 缺少的高仰角) 观测的回波最强，达 59 dBz，且呈圆弧形。然而对应的小时降水量普遍低于 1 mm，结合融化层中冰水混合相态、形状不规则导致的 ρ_{hv} 明显下降 (图 2b)，强回波对应区域 ρ_{hv} 为 0.70~0.95，可以准确判定这是由融化层引起的回波强度异常升高现象——零度层亮带。而 08:26 青浦雷达在 4.3° 仰角仍正确识别出零度层亮带特征 (图 2c、2d)，零度层亮带的正确识别有利于减少强降水的误判 (黄钰等, 2013)。





注：蓝色实线、虚线表示由融化层检测算法计算的融化层上、下边界。

图2 2024年6月12日(a, b) 08:28 杭州雷达(VCP216D) 8.7°仰角和(c, d) 08:26 青浦雷达(VCP211D) 4.3°仰角的(a, c) 反射率因子叠加融化层产品及(b, d) 对应的相关系数

Fig.2 (a, c) Reflectivity factor overlaid with melting layer product from (a, b) Hangzhou radar (VCP216D) 8.7° at 08:28 and (c, d) Qingpu radar (VCP211D) 4.3° at 08:26 BT 12 June 2024, and (b, d) their corresponding correlation coefficients

为进一步对比 VCP211D 和 VCP216D 体扫模式对于融化层识别的能力, 选取 07:30—08:30 (便于与实况探空进行比对) 杭州雷达强回波区域内(方位角 30°~150°) 的平均融化层底部和顶部高度, 青浦雷达强回波区域内(方位角 120°~240°) 的平均融化层底部和顶部高度进行分析。由图 3 可见, 本次过程融化层实际高度在 4.7~5.0 km, VCP216D 体扫模式识别的平均融化层底部高度和顶部高度呈现明显的震荡, 底部、顶部高度的标准差分别为 674 m、751 m, 数据波动幅度过大。而 VCP211D 体扫模式识别的平均融化层底部高度和顶部高度相对平稳, 底部、顶部高度的标准差分别为 68 m、266 m, 且平均融化层顶部高度与实况较为吻合。可见, VCP211D 体扫模式对于融化层识别的能力要强于 VCP216D 体扫模式, 更加稳定。另外, VCP211D 体扫模式对雷达的硬件要求更低, 针对积层混合降水, VCP211D 体扫模式已经能够满足探测性能的要求。

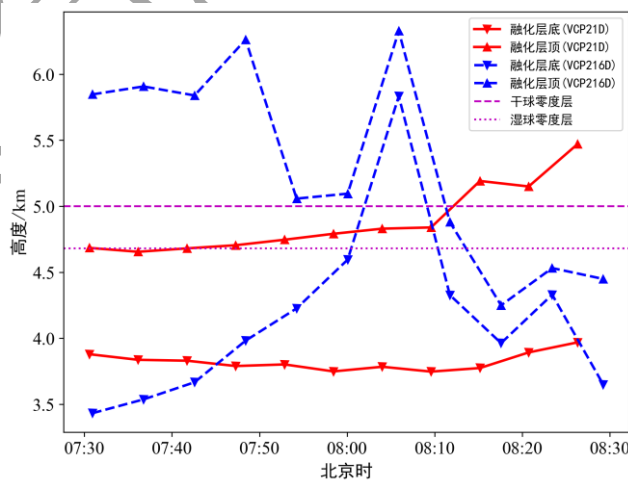


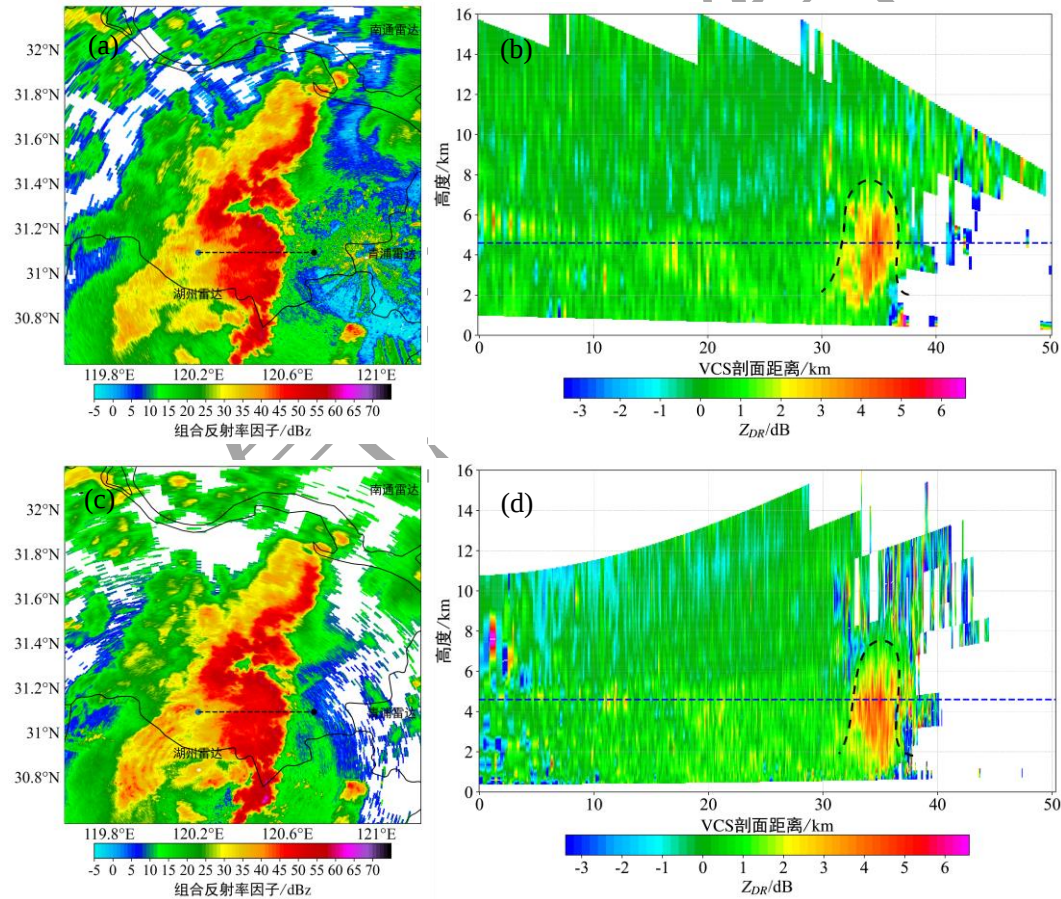
图3 2024年6月12日 07:30—08:30 杭州雷达(VCP216D) 和青浦雷达(VCP211D) 识别融化层高度的时间序列图

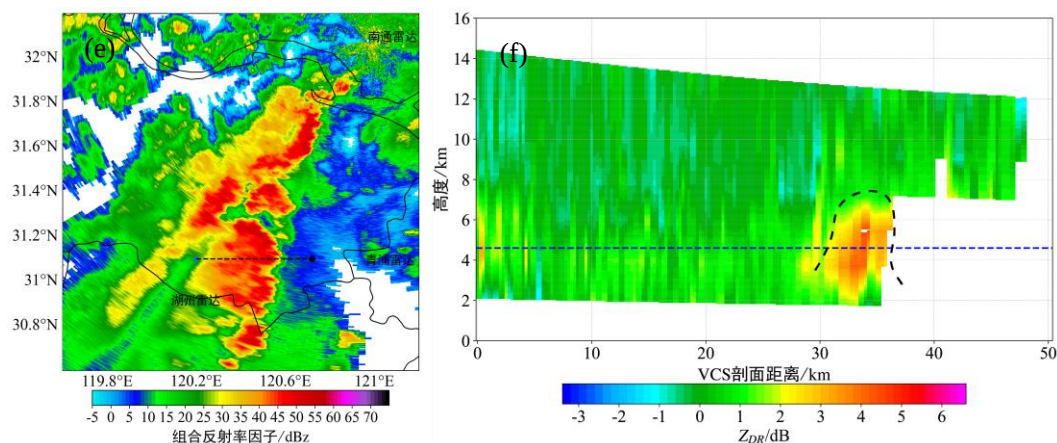
Fig.3 Time series of melting layer height identified by Hangzhou radar (VCP216D) and Qingpu radar (VCP211D)

2.1.2 强天气尺度强迫过程应用评估

2024年7月10日, 苏南至浙北沿线一带出现飊线天气过程, 并依次影响湖州、苏州、嘉兴、南通和上海等地。此次飊线过程时段内青浦雷达启动了VCP11D体扫模式, 南通雷达启动了VCP21D体扫模式, 湖州雷达启动了VCP216D体扫模式。Weisman et al (1988) 和 Rotunno et al (1988) 通过数值模拟揭示了飊线发展维持的机理并提出了解释飊线发展传播的“RKW”理论, 即较强的垂直上升运动是飊线维持和发展的必要条件之一。同时, Z_{DR} 柱已被证实可定性表征上升运动的强弱 (Kumjian and Ryzhkov, 2008), 故借助青浦、南通和湖州雷达在此次飊线过程中的 Z_{DR} 柱典型特征说明多观测模式的差异。

飊线自西向东移动过程中, 湖州雷达在 19:04 首次观测到正 Z_{DR} 区域突破零度层高度, 形成 Z_{DR} 柱 (于 19:33 发展至最旺盛阶段)。19:33 单雷达组合反射率因子 (图 4a、4c 和 4e) 显示 3 部雷达对飊线主体形态的刻画较为一致, 强回波区域对应的组合反射率因子数值也较为接近, 表明 3 部雷达在探测性能上差异不大, 具有可比性。对 3 部雷达在相同位置沿飊线移动方向进行 Z_{DR} 剖面分析, 青浦雷达 (VCP11D) 和湖州雷达 (VCP216D) 对 Z_{DR} 柱的垂直细微结构刻画更加精细化, 其形态与经典 Z_{DR} 柱概念模型更加吻合, 南通雷达 (VCP21D) 显示的 Z_{DR} 柱分辨率较低, 相对模糊 (图 4b、4d 和 4f)。说明 VCP11D 和 VCP216D 体扫模式对于此类强天气尺度强迫过程的典型特征捕捉优势明显。





注：组合反射率因子图中虚线为剖面位置；剖面图中蓝色虚线为湿球零度层，黑色虚线为 Z_{DR} 柱位置。

图4 2024年7月10日(a,b) 19:33青浦雷达(VCP11D)、(c,d) 19:33湖州雷达(VCP216D)、(e,f) 19:34南通雷达(VCP21D) (a,c,e) 组合反射率因子及(b,d,f) 对应差分反射率剖面

Fig.4 (a, c, e) Composite reflectivity factor and (b, d, f) differential reflectivity profiles from (a, b) Qingpu radar (VCP11D) at 19:33; (c, d) Huzhou radar (VCP216D) at 19:33; (e, f) Nantong radar (VCP21D) at 19:34 BT 10 July 2024

对比3种体扫模式(VCP216D、VCP11D和VCP21D)在典型位置(图4的 Z_{DR} 剖面35 km处)的垂直探测能力,发现VCP216D和VCP11D体扫模式在中层和高层的 Z_{DR} 值和反射率因子都有明显的波动,能够较好地捕捉到爬线过程中不同高度上的降水粒子变化和对流活动的不均匀性,对垂直结构的精细刻画能力较强,而VCP21D模式下的垂直结构较为粗糙(图5)。VCP216D、VCP11D模式在3~6 km高度处分别探测出较强的反射率因子(60.5 dBz和56 dBz)及 Z_{DR} 值(5.5 dB和5.3 dB),表明垂直上升运动强烈,该层有扁椭球状的大粒子,存在混合相态降水的可能。而VCP21D模式在3~6 km探测的最大反射率因子为41 dBz,最大 Z_{DR} 值为3.1 dB,对冰雹刻画不明显。

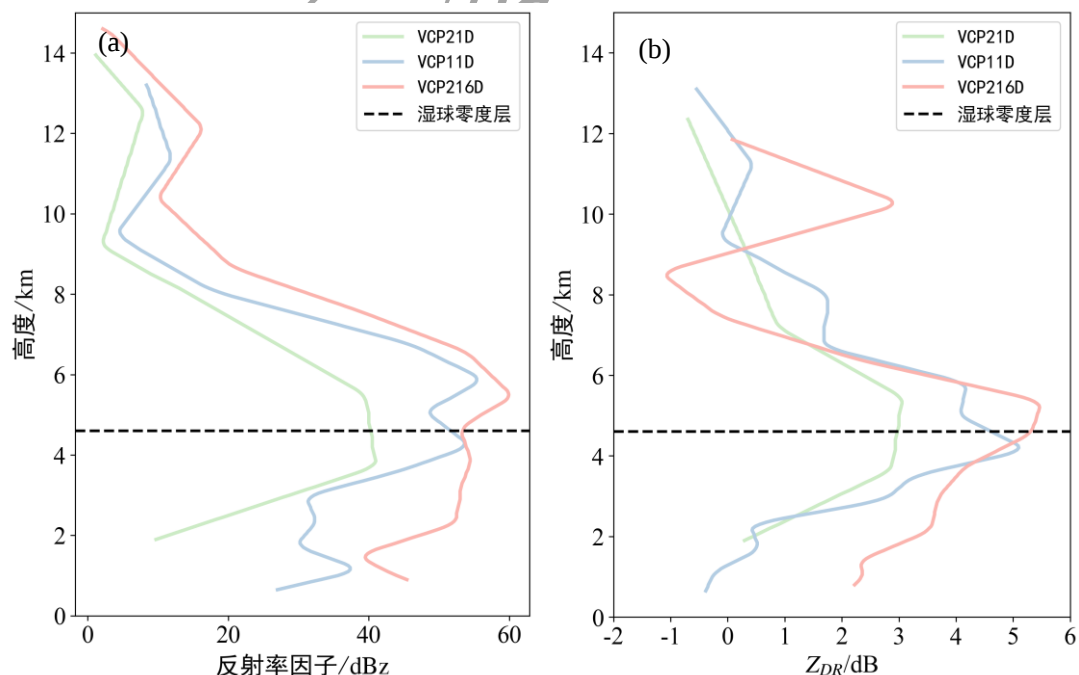


图5 2024年7月10日19:33青浦雷达(VCP11D)、湖州雷达(VCP216D)和19:34南通雷达(VCP21D)在典型位置的(a)反射率因子和(b)差分反射率垂直廓线图

Fig.5 (a) Vertical profiles of reflectivity factor and (b) differential reflectivity at typical locations from Qingpu radar (VCP11D) at 19:33, Huzhou radar (VCP216D) at 19:33, Nantong radar (VCP21D) at 19:34 BT 10 July 2024

2.1.3 弱天气尺度强迫过程应用评估

2024年7月18日,上海处于副热带高压控制下,山东半岛至江苏北部有切变存在,低层700 hPa和850 hPa在浙江北部到上海一带可见明显的风速辐合和弱的暖平流环境。受其影响,午后嘉兴北部和上海西部地区出现分散性阵雨或雷雨,并伴有9~10级雷雨大风。本次过程中,对流单体在嘉兴境内触发生成,在嘉兴与上海毗邻区域发展为超级单体风暴。其路径位于青浦雷达和嘉兴雷达之间,非常适合比较VCP216D和VCP11D在对流发展过程中的效能。

阵风锋作为雷暴大风的直接前兆,其形成与发展标志着雷暴系统内部动力过程的强烈活动,其位置和移动速度可以作为雷暴系统移动路径的重要参考。如图6所示,14:09青浦雷达(VCP11D)的0.5°仰角受到地面杂波的影响,导致雷达回波图上阵风锋的识别受阻。相对而言,14:06嘉兴雷达(VCP216D)1.0°仰角的反射率因子图上,可以观测到对流单体移动路径右侧存在明显的西南—东北方向的弧状细长狭窄回波带,这一特征为阵风锋的识别提供了有力依据,从而为预报员的快速决策提供支撑。

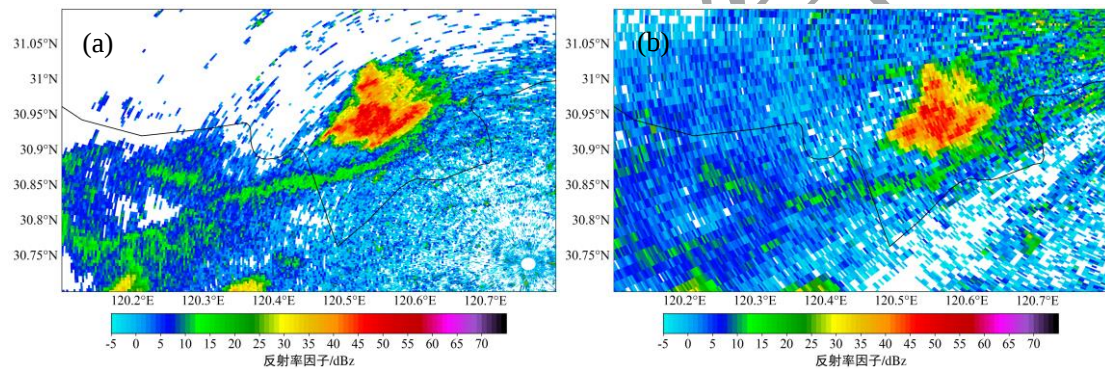


图6 2024年7月18日(a)14:06嘉兴雷达(VCP216D)1.0°、(b)14:09青浦雷达(VCP11D)0.5°反射率因子

Fig.6 Reflectivity factor from (a) Jiexing radar (VCP216D) 1.0° at 14:06, and (b) Qingpu radar (VCP11D) 0.5° at 14:09 BT 18 July 2024

同时,相比较传统的VCP21D模式而言,VCP216D和VCP11D模式增加了5.3°、7.5°、8.7°、12°和16.7°等高仰角的探测。从中国气象局天气雷达业务软件(ROSE)识别结果来看,本次个例中,14:36—14:42,嘉兴雷达(VCP216D)7.5°、8.7°和12°仰角的径向速度上均可见较明显的中气旋(图7),该特征有助于对右侧单体超级单体性质的诊断和分析。且中气旋出现的初始仰角为7.5°;由于中气旋算法需要连续3层均符合中气旋判据才能生成中气旋产品(Stumpf et al, 1998),故针对本例,传统的VCP21D的体扫模式难以契合上述判据。

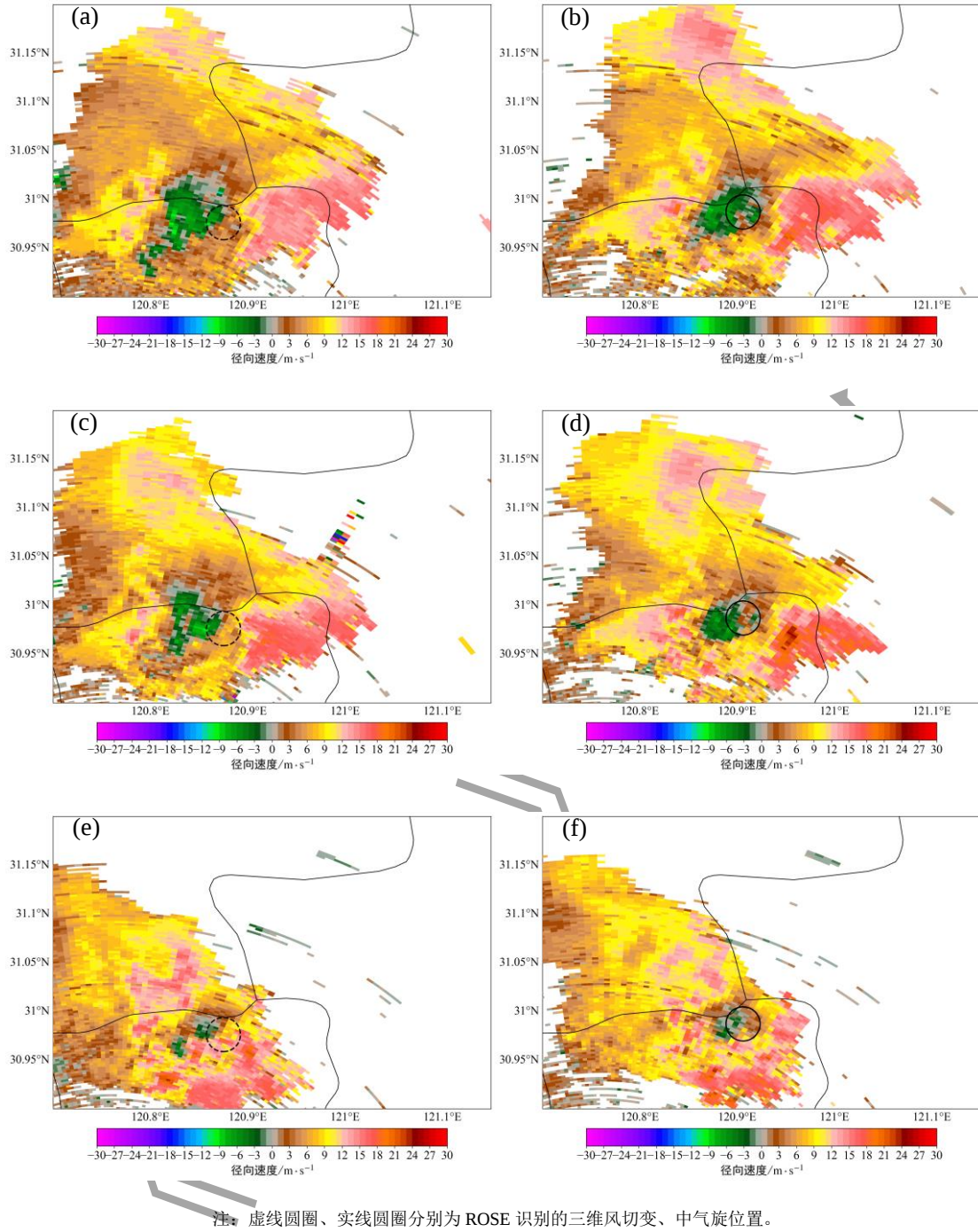


图 7 2024 年 7 月 18 日 (a, c, e) 14:36 和 (b, d, f) 14:42 嘉兴雷达 (VCP216D) (a, b) 7.5°、(c, d) 8.7°和 (e, f) 12°径向速度

Fig.7 Radial velocity at (a, b) 7.5°, (c, d) 8.7°, and (e, f) 12° from Jiading radar (VCP216D) at (a, c, e) 14:36 BT and (b, d, f) 14:42 BT 18 July 2024

嘉兴雷达 (VCP216D) 和青浦雷达 (VCP11D) 在 14:36—14:48 期间对该天气系统进行观测，嘉兴雷达成功识别出了中气旋特征，而青浦雷达未观测到有效信号（表 2）。其原因主要是风暴单体与青浦雷达的水平距离较近，雷达波束无法满足中气旋算法要求，同时青浦雷达附近有较明显的地物遮挡，亦影响了青浦雷达对中气旋的识别能力。嘉兴雷达在 14:36 监测到三维风切变，该切变底高 4.3 km，顶高 7.4 km，切变值 $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，表明在中高层存

在较强的旋转。14:42—14:48，该系统进一步演变为中气旋，切变值增强至 $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，顶高降低至 5~6.2 km，直径减小至 4.4~5 km，可见该中气旋核心区垂直结构收缩且强度增强，符合超级单体的成熟阶段特征。VCP216D 模式能够观测到风暴回波的结构细节及其顶部高度等特征，实现了中气旋产品的识别，进而帮助预报员快速识别出超级单体。结合超级单体的概念模型和地面自动站实况（RFD 造成的大风），中气旋前侧有出现 FFD 造成的下击暴流大风的可能，助力此次过程高级别大风预警信号的发布。

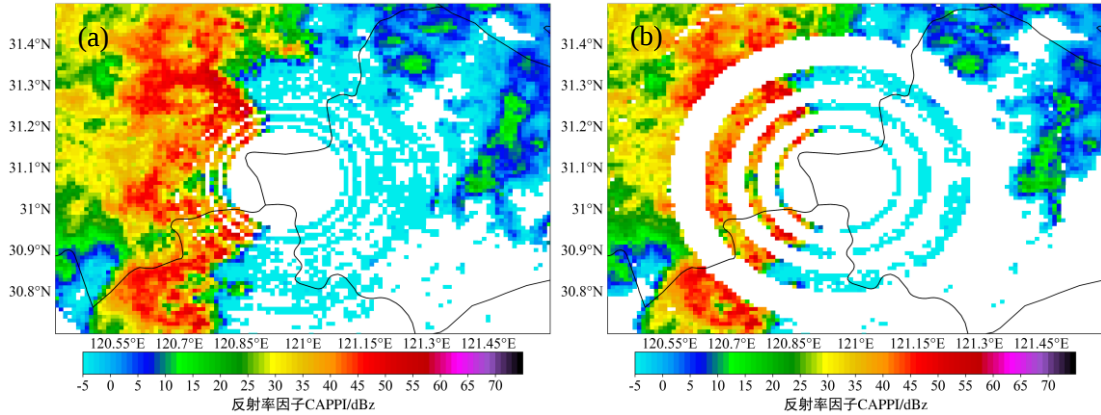
表 2 2024 年 7 月 18 日 14:36—14:48 嘉兴雷达（VCP216D）中气旋产品识别结果

Table 2 Identification results of mesocyclone products from Jiaxing radar (VCP216D) ROSE during 14:36—14:48 BT 18 July 2024

雷达及体扫模式	观测时间	识别结果	中气旋特征					
			底高/km	顶高/km	直径/km	速度对径向	速度对切向	切变值/ 10^{-3} s^{-1}
						距离/km	距离/km	
嘉兴雷达	14:36	三维风切变	4.3	7.4	7.4	0.9	4.1	7
VCP216D	14:42	中气旋	4.3	5	5	2.4	5.1	8
	14:48	中气旋	4.4	6.2	4.4	2.7	4.5	9

2.2 CAPPI 产品

CAPPI（Constant Altitude Plan Position Indicator）可提供对应不同高度的雷达参量，有利于分析不同高度层结的天气系统。作为天气雷达主要衍生产品之一，在天气雷达组网拼图、天气雷达定量降水估测等多个方面起到重要支撑作用。为详细评估 VCP11D 和 VCP21D 两种体扫模式的业务应用效果，利用同一时刻的 VCP21D 和 VCP11D 数据，选用 Barnes 方法构建 CAPPI 产品。Barnes 方法基于统计学原理，通过最小化观测值与分析值之间的误差来对气象数据进行客观分析，能够高效、准确地处理一维与二维场数据 (Pauley and Wu, 1990)，是一种在气象学领域广泛使用的客观分析技术。本文采用该方法进行分辨率为 1 km 的等高平面插值，能够优先保留高分辨率特征，同时不添加额外的填补步骤，以客观反映高分辨率结构的真实性，Barnes 插值的空缺区域代表实际观测的数据盲区。以 2024 年 7 月 10 日的飊线过程为例，当天上海青浦雷达启动了 VCP11D 的观测模式，基于 VCP11D 数据通过数据编码构建 VCP21D 数据，并进行对比分析，结果如图 8 所示。



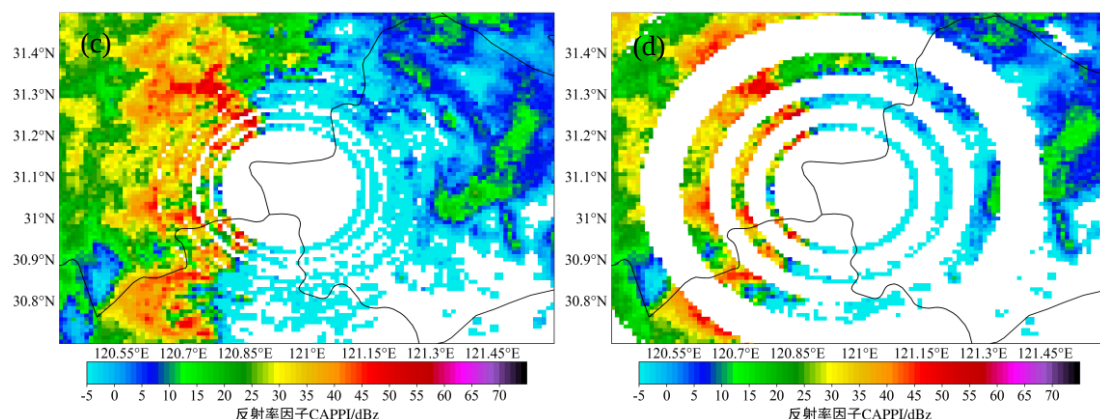


图 8 2024 年 7 月 10 日 20:03 青浦雷达 (a, c) VCP11D 和 (b, d) VCP21D 模式在 (a, b) 5 km 和 (c, d) 6km 高度的 CAPPI 产品

Fig.8 CAPPI products from the Qingpu radar at (a, b) 5 km and (c, d) 6 km altitudes, based on the (a, c) VCP11D and (b, d) VCP21D patterns at 20:03 BT 10 July 2024

在 5 km 高度处，雷达波束覆盖的区域变宽，基于 VCP11D 模式的 CAPPI 在静锥区周围具有较好的连续性，能够有效观测到飢线的中层结构。然而，VCP21D 模式由于高仰角扫描次数有限，导致 CAPPI 在该高度上的数据严重缺失，出现多处观测盲区，这在一定程度上限制了对风暴内部微物理过程的深入解析能力。在 6 km 高度处，VCP11D 模式增加的 5 层仰角扫描仍发挥重要作用，提供了更密集的数据点。相比之下，VCP21D 模式下的 CAPPI 无法提供有效的观测数据，对飢线的垂直结构分析造成显著影响。

2.3 双雷达风场反演

在台风的监测与预警中，双雷达风场反演技术扮演着关键角色。利用双极化雷达技术，能够精确推断出高分辨率的台风水平及垂直风场，细致描绘出台风螺旋雨带的三维风场结构，这对于预测台风的移动路径和强度至关重要。本节以一次台风过程为例，利用基于三维变分技术 (3DVAR) 的双多普勒雷达反演方法反演格点实时风场 (Potvin et al, 2012)，进而评估雷达对流模式 (VCP11D、VCP216D) 和降水模式 (VCP21D) 在此类天气中的应用价值。

2024 年 9 月 16 日台风“贝碧嘉” (强台风级) 于 07:30 在上海浦东临港新城登陆，11:30 进入江苏昆山。受其影响，上海市及苏州、南通等地普降大到暴雨，陆地阵风 8~10 级，沿江沿海阵风 11~13 级。为保障风场反演结果与宝山站 08:00 探空资料实现最佳时空匹配以及该时段探空站周边的风场反演精度，选取上海青浦与浙江宁波雷达进行双雷达风场反演。此次过程中，青浦和宁波雷达分别启用了 VCP11D 和 VCP216D 体扫模式，本节将对应雷达基数据由对流模式 (VCP11D、VCP216D) 转换为降水模式 (VCP21D)，比较对流模式和降水模式在风场反演方面的差异。

通过对流模式和降水模式反演 08:00 台风风场，在 4 km 高度，均能够较为清晰地捕捉台风涡旋结构，可以观测到台风中心位于上海浦东 (图 9a、9b)，为台风定位提供了重要参考依据。随着高度到达 7 km，基于对流模式反演的风场仍有较好的连续性，风场呈现明显的气旋式分布，对流层 4~7 km 垂直风切变较小，台风结构比较对称 (图 9c)。相比之下，基于降水模式反演的 7 km 高度风场无法完整刻画台风结构，数据缺失区域面积较大。同时，在上海地区的风场连续性较差，风力明显减弱 (图 9d)。对流模式在捕捉台风高层结构方面具有更高的适用性。

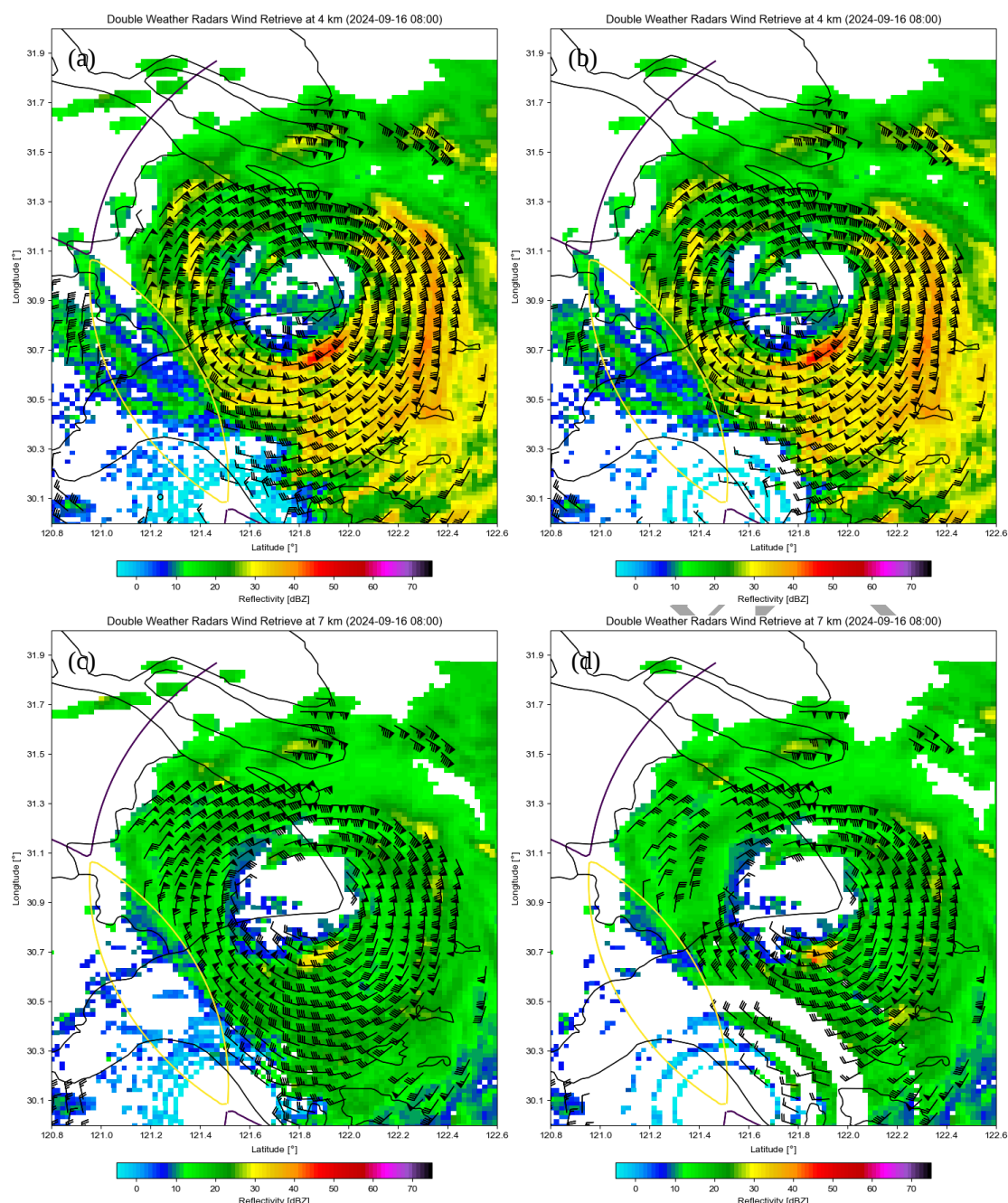


图9 2024 年台风“贝碧嘉”期间 9 月 16 日 08:00 基于青浦和宁波双雷达 (a, c) 对流模式 (VCP216D、VCP11D) 和 (b, d) 降水模式 (VCP21D) 在 (a, b) 4 km 和 (c, d) 7 km 高度的反射率因子 (填色) 和反演风场 (风羽)

Fig.9 Reflectivity (color-shaded) and retrieved wind fields (wind barbs) at (a, b) 4 km and (c, d) 7 km altitudes, based on dual-radar observations from Qingpu and Ningbo using (a, c) convective (VCP216D and VCP11D) and (b, d) precipitation (VCP21D) patterns, at 08:00 BT 16 September 2024

高分辨率探空探测数据凭借其精细的垂直结构信息和严格的质量控制，在数值天气预报、资料同化和大气边界层等研究中具有重要应用价值（龚玺等，2023；周芯玉等，2019）。为对比检验对流模式和降水模式反演的风场强度的准确性，通过将宝山站秒级探空观测数据（实际探测时间 07:29—08:44）与反演的三维风场进行分层时空配对，在 1~10 km 高度范围内逐公里提取时空上最接近的反演风场数据，进行定量分析。受双雷达 3DVAR 风场反

演算法本身限制及静锥区的影响，风场反演存在一定盲区，为保证对比数据的数量及精度，寻找秒级探空数据水平 10 km 范围内的最邻近反演风场数据（若该范围内无有效数据则记为数据缺失），计算偏差（Bias）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。由表 3 可知，基于对流模式和降水模式反演的风速在 1~5 km 高度上差距不明显，对流模式在中低层 1~5 km 高度反演风力较实况偏小 4 m s^{-1} ，降水模式反演的风力偏小 3.55 m s^{-1} ，对流模式反演的风速 MAE 较降水模式减小 0.03 m s^{-1} ，RMSE 较降水模式增大 0.03 m s^{-1} 。在中高层 6~10 km 高度，基于降水模式反演的风场强度出现明显偏差，较实况偏小 9.59 m s^{-1} ，精度明显下降。对流模式的 RMSE 和 MAE 在 6~10 km 高度上分别较降水模式减小 6.41 m s^{-1} 和 6.05 m s^{-1} 。降水模式在高仰角数据不足的情况下，对中高层风场的反演能力受限，风场强度的反演结果明显偏弱，同时误差也相应增大。相较于降水模式，基于对流模式的风场反演结果更接近实况，准确度更高。

表 3 2024 年 9 月 16 日 08:00 基于对流模式（VCP216D、VCP11D）和降水模式（VCP21D）的风场反演数据的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of wind field retrievals based on the convective patterns (VCP216D and VCP11D) and the precipitation pattern (VCP21D) at 08:00 BT 16 September 2024

统计指标	降水模式（VCP21D）		对流模式（VCP216D、VCP11D）	
	1~5 km	6~10 km	1~5 km	6~10 km
偏差/ (m s^{-1})	-3.55	-9.59	-4.00	-3.42
均方根误差/ (m s^{-1})	5.44	10.98	5.47	4.57
平均绝对误差/ (m s^{-1})	4.27	9.59	4.24	3.54

3 结论

本文根据上海及其周边地区 2024 年的典型个例，选取上海青浦、江苏南通、浙江杭州、湖州、嘉兴和宁波 S 波段双偏振雷达，评估 VCP21D、VCP11D 和 VCP216D 体扫模式在一般降水、强对流和台风中的应用效果，得出以下结论：

（1）在积层混合型降水过程中，VCP216D 和 VCP21D 体扫模式虽然均能准确识别零度层亮带特征，但 VCP21D 体扫模式识别的融化层高度更稳定，与实况更为吻合；另外，VCP21D 体扫模式对雷达的硬件要求更低，针对积层混合降水，VCP21D 体扫模式已经能够满足探测性能的要求。

（2）VCP11D 体扫模式相较 VCP21D 模式增加了 5 层仰角的扫描，具有更高的垂直分辨率，对 Z_{DR} 柱的结构刻画更为精细；此外，VCP11D 体扫模式通过加密高仰角采样，能够显著提升超级单体中气旋的识别率。

（3）VCP216D 体扫模式在 VCP11D 体扫模式的基础上，增加了 1.0° 仰角的扫描。根据模拟结果， 0.5° 仰角的中心波束在 25 km 和 50 km 处距地高度分别为 250 m 和 600 m，对应 1.0° 仰角分别为 480 m 和 1 km 左右。结合阵风锋的最大发展高度，VCP216D 体扫模式能够在减少地物回波干扰的同时最大程度保留阵风锋等关键中尺度信息。

（4）VCP11D 体扫模式相较 VCP21D 体扫模式，在 5 km 高度以上的 CAPPI 反射率因子产品中，生成的 CAPPI 数据更为连续且数据点更为密集，显著减少了 CAPPI 的空缺间隙。而 VCP21D 模式下的 CAPPI 无法提供有效的观测数据，会对强对流过程的结构分析造成一定影响。

（5）对流模式（VCP11D 和 VCP216D）在台风过程的双雷达风场反演中具有明显优势，能够清晰捕捉台风结构，准确判断台风中心位置，且反演风场准确性的高于降水模式（VCP21D），尤其在中高层更为明显。具体表现为在 6~10 km 高度，基于对流模式反演的

风场强度 RMSE 和 MAE 分别较降水模式减小 6.41 m s^{-1} 和 6.05 m s^{-1} ，而降水模式反演风场的强度明显偏低，误差较大，适用性较差。

然而，由于多模式观测业务正式运行时间较短，针对不同类型的多模式天气个例积累较少，未来需要收集周边雷达针对同一过程的不同体扫模式数据，进一步评估雷达多体扫模式在不同类型天气过程中的适用性。

参考文献:

- 端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等, 2012. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. 中国工程科学, 14(9): 4-9. Duan Y H, Chen L S, Xu Y L, et al, 2012. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation, forecasting and warning systems in China[J]. Eng Sci, 14(9): 4-9 (in Chinese).
- 高拴柱, 2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 46(6): 792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6): 792-800 (in Chinese).
- 龚玺, 陈起英, 倪长健, 等, 2023. 基于高垂直分辨率探空数据对五种典型下垫面湍流分布特征分析[J]. 气象, 49(8): 901-914. Gong X, Chen Q Y, Ni C J, et al, 2023. Turbulence distribution characteristics of five typical underlying surfaces based on high vertical resolution radiosonde data[J]. Meteor Mon, 49(8): 901-914 (in Chinese).
- 黄先香, 炎利军, 白兰强, 等, 2024. 广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征[J]. 气象, 50(7): 804-817. Huang X X, Yan L J, Bai L Q, et al, 2024. Spatio-temporal distribution of Guangdong tornadoes and characteristics of radar echoes of parent storms[J]. Meteor Mon, 50(7): 804-817 (in Chinese).
- 黄钰, 阮征, 葛润生, 等, 2013. 2010 年夏季北京零度层亮带特征统计[J]. 气象, 39(6): 704-709. Huang Y, Ruan Z, Ge R S, et al, 2013. Feature statistics on bright band in Beijing in 2010 summer[J]. Meteor Mon, 39(6): 704-709 (in Chinese).
- 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等, 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 39(3): 265-280. Li B, Gu Q T, Li R Y, et al, 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteor Mon, 39(3): 265-280 (in Chinese).
- 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等, 2013. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别[J]. 气象学报, 71(6): 1160-1171. Li G C, Liu L P, Zhang B X, et al, 2013. Automatic identification of ground thunderstorm gale based on the radar mosaic 3D data[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 1160-1171 (in Chinese).
- 刘应军, 顾松山, 周雨华, 等, 2006. 新一代天气雷达体扫模式的比较分析[J]. 气象, 32(1): 44-50. Liu Y J, Gu S S, Zhou Y H, et al, 2006. Comparison of CINRAD/SA volume coverage patterns on algorithms output[J]. Meteor Mon, 32(1): 44-50 (in Chinese).
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 419-450 (in Chinese).
- 慕瑞琪, 徐芬, 孙康远, 等, 2022. 江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析[J]. 气象, 48(2): 190-202. Mu R Q, Xu F, Sun K Y, et al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 48(2): 190-202 (in Chinese).
- 徐芬, 郑媛媛, 孙康远, 2021. 江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J]. 气象, 47(5): 517-528. Xu F, Zheng Y Y, Sun K Y, 2021. Characteristics of Spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 47(5): 517-528 (in Chinese).
- 杨金红, 陈大任, 王曙东, 2013. 改进新一代天气雷达低层探测能力研究[J]. 气象, 39(4): 494-499. Yang J H, Chen D R, Wang S D, 2013. Research on improving CINRAD detection ability in lower layers[J]. Meteor Mon, 39(4): 494-499 (in Chinese).
- 杨绚, 张立生, 杨琨, 等, 2020. 台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用[J]. 气象, 46(3): 429-440. Yang X, Zhang L S, Yang K, et al, 2020. Typhoon vulnerability of typical low-rise buildings and application of intelligent grid forecast[J]. Meteor Mon, 46(3): 429-440 (in Chinese).
- 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 391-418 (in Chinese).
- 张晶, 姚文, 孙召平, 等, 2024. 双偏振天气雷达新体扫模式试验评估分析[J]. 气象, 50(10): 1201-1215. Zhang J, Yao W, Sun Z P, et

- al, 2024. Evaluation and analysis of experimental testing of dual-polarization weather radar's new volume coverage pattern[J]. Meteor Mon, 50(10): 1201-1215 (in Chinese).
- 赵坤, 王明筠, 朱科锋, 等, 2015. 登陆台风边界层风廓线特征的地基雷达观测[J]. 气象学报, 73(5): 837-852. Zhao K, Wang M J, Zhu K F, et al, 2015. An analysis of the CINRAD-98D observations for the landfalling typhoon boundary layer wind profiles and their characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(5): 837-852 (in Chinese).
- 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等, 2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship "Dongfangzhixing"[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13 (in Chinese).
- 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等, 2016b. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象, 42(11): 1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing county, Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 42(11): 1289-1303 (in Chinese).
- 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等, 2020. 2019 年 7 月 3 日辽宁开原 EF4 级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. 气象, 46(5): 589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5): 589-602 (in Chinese).
- 植江玲, 黄先香, 顾伯辉, 等, 2022. 广东两次超级单体导致不同类型强风天气对比分析[J]. 气象, 48(7): 813-825. Zhi J L, Huang X X, Gu B H, et al, 2022. A comparative study on two different types of gale events caused by supercell in Guangdong[J]. Meteor Mon, 48(7): 813-825 (in Chinese).
- 周芯玉, 廖菲, 胡东明, 2019. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J]. 热带气象学报, 35(3): 332-342. Zhou X Y, Liao F, Hu D M, 2019. A study on low-level wind field characteristics of rainstorm containing short-range heavy rainfall during April to June rainy season in Guangdong by wind profiler data[J]. J Trop Meteor, 35(3): 332-342 (in Chinese).
- Brown R A, Janish J M, Wood V T, 2000. Impact of WSR-88D scanning strategies on severe storm algorithms[J]. Wea Forecasting, 15(1): 90-102.
- Cho J Y N, Kurdzo J M, 2019. Weather radar network benefit model for tornadoes[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(5): 971-987.
- Cho J Y N, Kurdzo J M, Bennett B J, et al, 2022. Impact of WSR-88D intra-volume low-level scans on severe weather warning performance[J]. Wea Forecasting, 37(7): 1169-1189.
- Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V, 2008. Automatic designation of the melting layer with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(5): 1354-1364.
- Grzych M L, Lee B D, Finley C A, 2007. Thermodynamic analysis of supercell rear-flank downdrafts from Project ANSWERS[J]. Mon Wea Rev, 135(1): 240-246.
- Hall M P M, Goddard J W F, Cherry S M, 1984. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar[J]. Radio Sci, 19(1): 132-140.
- Kingfield D M, French M M, 2022. The influence of WSR-88D intra-volume scanning strategies on thunderstorm observations and warnings in the dual-polarization radar era: 2011-20[J]. Wea Forecasting, 37(2): 283-301.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7): 1940-1961.
- Markowski P M, 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review[J]. Mon Wea Rev, 130(4): 852-876.
- Pauley P M, Wu X A H, 1990. The theoretical, discrete, and actual response of the Barnes objective analysis scheme for one- and two-dimensional fields[J]. Mon Wea Rev, 118(5): 1145-1164.
- Potvin C K, Shapiro A, Xue M, 2012. Impact of a vertical vorticity constraint in variational dual-Doppler wind analysis: Tests with real and simulated supercell data[J]. J Atmos Ocean Technol, 29(1): 32-49.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. J Atmos Sci, 45(3): 463-485.
- Shabbott C J, Markowski P M, 2006. Surface in situ observations within the outflow of forward-flank downdrafts of supercell thunderstorms[J]. Mon Wea Rev, 134(5): 1422-1441.
- Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D W, et al, 1998. The National Severe Storms Laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 13(2): 304-326.
- Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R, 1988. Structure and evolution of numerically simulated squall lines[J]. J Atmos Sci, 45(14): 1990-2013.