

IVAP 法反演组网雷达风场试验与验证

姚晓娟^{1, 2}, 孙鑫¹, 计燕霞¹, 刘林春¹, 孟雪峰¹

1. 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要: 风场观测资料在天气研究和预报中有着举足轻重的作用。基于按方位角均匀假定反演关系进行二维风场反演的积分速度方位处理技术 (IVAP) 具有较好的兼容性并易于实现。本文选取 2020 年 7—8 月的大范围降水过程, 采用 IVAP 法进行组网雷达风场反演, 并以秒探空作为参考对反演风场进行质量评估和分析。结果表明: 反演风场与探空风场之间具有较高的相关性, 随高度升高, 反演风向的质量和稳定性要优于反演风速; 在降水区反演风场的质量最好, 垂直廓线稳定性最好; 晴空区反演风场误差最大, 4 km 以上波动性变大、反演质量显著降低。进一步分析 2019 年 7 月 6 日一次分散性降水过程的雷达反演结果, 发现反演风场能够合理地再现出高层风场的涡旋结构、切变线等动力场特征。本研究表明, 在单雷达风场反演的基础上, 可基于 IVAP 法建立组网雷达风场反演, 该方法在实际业务中有较好的应用前景, 可以更好地为天气预报服务以及风场资料同化提供依据。

关键词: 多普勒雷达, IVAP 方法, 风场反演

Experiments and Verification on Doppler Radar Network Wind Fields Retrieval by the IVAP Method

YAO Xiaojuan^{1,2} SUN Xin¹ JI Yanxia¹ LIU Linchun¹ MENG Xuefeng¹

1. Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Wind observation data is very important in weather research and forecasting. The IVAP technique, which is based on the azimuth uniform assumption retrieval relationship, offers good compatibility and practical simplicity for 2-D wind field retrieval. In his paper, the large-scale precipitation event from July to August 2020 is selected, and its wind fields from the Doppler radar network is retrieved by the IVAP method. At the same time, the quality of the retrieved wind fields is evaluated and analyzed with the seconds-sounding data as a reference. The results indicate that the retrieved wind fields of Doppler radar network have a high correlation with the sounding data, and the quality of wind direction data is better than the wind speed data with altitude rising. The quality of the retrieved winds is better in precipitation areas than in the non-precipitation areas. Moreover, the quality of wind field and the stability of vertical profile are the best in precipitation areas, but the quality of the retrieved winds is the worst in clear sky areas, especially when the altitude is higher than 4 km. The retrieved winds of a scattered precipitation process on 6 July 2019 are further analyzed, which demonstrates that the retrieved wind field can

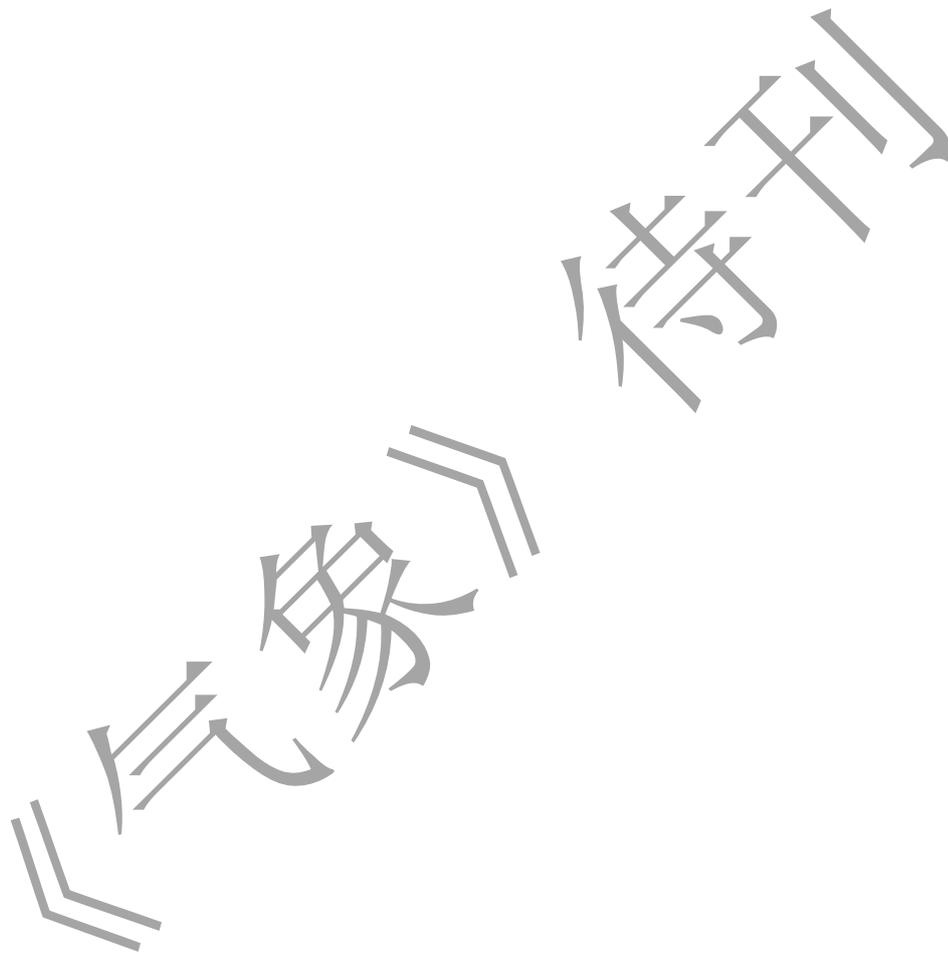
国家自然科学基金项目 (重点项目 42030604)、内蒙古气象局科技创新项目 (nmqxkjc202439)、内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFSH0009) 共同资助

第一作者: 姚晓娟, 主要从事天气雷达资料应用及分析研究, Email: yaoxiaojuan90@163.com

通信作者: 孙鑫, 主要从事数值预报研究, Email: 641680001@qq.com

reasonably reproduce the dynamic field characteristics such as vortex structure and shear line of the upper wind field. This study shows that based on the single Doppler radar wind retrieval, the IVAP method has the ability to retrieve wind fields of Doppler radar network, so the method will have a good application prospect in practical operations, and can provide a better basis for weather forecasting services and wind data assimilation.

Key words: Doppler radar, IVAP method, wind retrieval



引言

三维风场信息反映了天气演变的内在动力过程,是了解各种天气现象的重要依据(王改利和刘黎平, 2005)。目前获取三维风场的方法主要有:(1)无线电探空仪测风,但每日观测 2 次,且探空站间距一般在 100 km 以上,远不能满足天气预报的需求。(2)风廓线雷达测风,可提供高时空分辨率和探测精度的水平和垂直风,但其测得数据只能代表单点的垂直廓线。(3)通过再分析资料获取风场信息,但同时其包含有数值模式、同化方案和观测系统变更等引入的误差,不能准确描述大气真实状态(陈君芝等, 2023)。多普勒雷达可以提供高时空分辨率的风场和降水粒子分布信息,在强对流天气的监测、分析、预报中具有非常广泛的应用(黄先香等, 2021; 王秀明等, 2023),但由于其只能探测到径向速度,并不能直接探测大气的三维运动,因此对雷达风场反演的研究具有非常实际的应用价值。

单多普勒雷达风场反演多依赖于一些假定条件,已取得了一定的成果。Lhermitte(1961)在水平风场为线性分布的假定条件下,提出由径向风反演平均风场的速度方位显示(VAD)技术,后经 Browning and Wexler(1968)进一步完善,提高了反演精度的可靠性,目前是美国 WSR-88D 及中国 CINRAD-98D 系统中的一种主要产品算法。Waldteufel and Corbin(1979)在局地均匀风的假定条件下,提出速度体积处理(VVP)技术,后经 Koscielny et al(1982)改进,反演出满足精度要求的风场信息。陶祖钰(1992)在相邻方位角内风场均匀的假定条件下,提出速度方位处理(VAP)技术,利用低仰角 PPI 资料直接反演风场。VAD 技术只能得到平均风场信息,对局部扰动不敏感,且很多情况该算法的假定条件是不能满足的。VVP 技术对局部扰动及 VAP 技术对方位角的变化均很敏感,需对资料进行平滑处理。

借鉴 VAD 法,采用径向速度在一个区间内的积分信息,提高反演风场的平滑性,同时借鉴 VAP 法采用一个较小区间,提高反演风场的分辨率,梁旭东和王斌(2007)提出按方位角均匀假定反演关系的积分 VAP 技术(IVAP),其具有滤波性能,不需对原始资料进行人为的平滑预处理,可得到满足特定平滑性和分辨率要求的风场(Liang, 2007; Liang and Wang, 2009; 罗义等, 2021; Luo et al, 2021)。梅珏等(2007)采用 IVAP 法反演“0185”特大暴雨过程风场,与地面、风廓线仪观测风比较均具有较高准确性。王欣颖等(2009)改进了 IVAP 技术,假定局地风速均匀、风向随方位角线性变化,提高了反演能力。Liang(2010)将 IVAP 法应用于自然坐标系,反演出涡旋风场。

相比于单多普勒雷达风场反演,多部多普勒雷达联合探测可得到更高精度的风场信息,很多学者开展了相关研究,包括双多普勒雷达风场反演(周海光和张沛源, 2000, 2002; 王俊等, 2011; 周海光和王玉彬, 2002; 刘黎平等, 2003, 2004; 庄薇等, 2006)、三部或以上多普勒雷达风场反演(韩颂雨等, 2017)、多基地多普勒雷达风场反演(田静和张庆阳, 2001; 刘黎平等, 2005)。近年来基于变分技术的风场反演也很多,如三维变分同化法(王艳春等, 2014, 2016)、四维变分同化法(牟容等, 2007; 陈明轩等, 2011, 2012; 刘婷婷

等, 2014)、两步变分法(杨毅等, 2008; 张勇等, 2011)。但是, 双雷达风场反演要求两部雷达相距 60~80 km 为宜, 多部雷达联合反演需使用同一时刻同一空间点的数据, 反演区域较小, 而业务雷达布网位置很难满足多雷达反演的要求, 基于变分技术的风场反演需进行多次循环、迭代, 计算量较大, 较难满足大范围风场反演的实时运行。

通过风场反演得到全国雷达网有效探测范围内的二维风场, 提高雷达径向风的应用能力, 一直是业务和科研工作中亟需解决的问题。综上, 使用 IVAP 法反演风场计算量小, 能够实现较高的空间分辨率, 可以快速提供给预报员直观使用, 具有较高的业务应用前景。因此本文采用 IVAP 法反演组网雷达风场, 获得垂直高度 15 层、垂直分辨率 0.5 km、时间分辨率 6 min、空间分辨率 5 km 的全国雷达覆盖范围内的二维风场, 并对反演风场进行质量评估, 针对 2019 年 7 月 6 日一次降水过程分析 IVAP 法反演风场的效果, 以便在实际业务中更好的应用该产品, 为雷达径向风反演用于天气预报服务提供参考。

1 方法和数据

1.1 方法

根据多普勒雷达探测原理, 当雷达扫描仰角 α 小于 20° , 不考虑垂直速度时, 某一扫描半径上方位角 θ 处的径向风 V_θ , 可以表示为该点水平风 u_θ 和 v_θ 的函数:

$$V_\theta = -u_\theta \cos \theta \cos \alpha - v_\theta \sin \theta \cos \alpha \quad (1)$$

依据 IVAP 方法原理, 假定在方位角 $[\theta_1, \theta_2]$ 范围内风场是均匀的, 即 u_θ 和 v_θ 是 $[\theta_1, \theta_2]$ 区间内的平均风 \bar{u} 和 \bar{v} , 则可推导出局地的平均反演风场公式:

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{-\int_{\theta_1}^{\theta_2} V_\theta \cos \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} V_\theta \sin \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\cos \alpha \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos^2 \theta d\theta - \left(\int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta \right)^2 \right]} \\ \bar{v} = \frac{-\int_{\theta_1}^{\theta_2} V_\theta \sin \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos^2 \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} V_\theta \cos \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\cos \alpha \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos^2 \theta d\theta - \left(\int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta \right)^2 \right]} \end{cases} \quad (2)$$

IVAP 法组网雷达风场反演的步骤为: (1) 读取雷达基数据; (2) 去杂波、去地物回波及退速度模糊处理; (3) 将雷达坐标(定义 $\theta=0$ 为正北)转为数学坐标(定义 $\theta=0$ 为正东, 逆时针旋转), 把极坐标形式的雷达数据转为球坐标形式存储; (4) 将雷达径向速度资料网格化为水平分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (约 5 km)、垂直分辨率为 0.5 km、共 15 层的格点径向速度; (5) 利用 IVAP 法采用分析单元为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 对格点径向速度资料进行风场反演。其中, 对于多部雷达共同覆盖区, 即一个网格上有多个雷达观测数据时取平均值。为了保证反演风场的准确性, 当分析单元内径向速度的数据格点数低于总格点数的 60% 时, 不进行 IVAP 反演计算。

1.2 数据

选取 2020 年 7—8 月有大范围降水的全国雷达基数据, 经质量控制后采用 IVAP 法得到时间分辨率 6 min、空间分辨率 5 km、垂直分辨率 0.5 km 的组网雷达反演风场, 垂直方向为 0.5~7.5 km 共 15 层。以秒探空为参考, 根据平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、

平均误差 (Mean Error, ME)、平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 及皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient, r) 等参数对风场反演效果进行质量评估。

探空气球规定的升空速度为 400 m min^{-1} , 放球时间为 07:15 (北京时, 下同) 及 19:15。由于升空过程中存在水平漂移及降水等影响, 实际上升速度约为 380 m min^{-1} , 同时会飘离到气球释放地点十几公里外 (裴丽丝和邱崇践, 2013)。雷达一个体扫为 6 min, 即某一时间的雷达数据, 实际上是 6 min 内从低仰角到高仰角扫描获得数据。例如, 07:30 雷达数据, 在雷达完成体扫的 6 min 时间里, 探空气球所在高度约为 3.42~5.7 km。为了使雷达和探空在数据获取时间上达到较高的匹配度, 将垂直高度层分为低层 (0.5~2.5 km)、中层 (3.0~5.0 km)、高层 (5.5~7.5 km), 每个高度段上所取雷达数据时间如表 1 所示。为了使雷达和探空在数据获取空间上达到较高的匹配度, 首先选出与 15 个高度层相差 2 m 内的秒探空数据, 再利用双线性插值法将组网雷达反演风场的格点资料插值到秒探空风场上。

表 1 不同高度上对应选择的雷达基数据时间

Table 1 The selected radar base data time at different altitudes

垂直分层	高度	雷达基数据时间
低层	0.5~2.5 km	07:20—07:25, 19:20—19:25
中层	3.0~5.0 km	07:26—07:31, 19:26—19:31
高层	5.5~7.5 km	07:32—17:37, 19:32—19:37

2 统计分析

2.1 组网雷达反演风场与探空对比

分析 2020 年 7—8 月所有样本反演风场与探空风场偏差的散点图 (图略) 发现, 风向/风速偏差的绝对值分别集中在 30° 及 7.5 m s^{-1} 以内, 当反演风速 $<2.5 \text{ m s}^{-1}$ 及 $>32.5 \text{ m s}^{-1}$ 时, 存在风向/风速偏差较大的情况, 可信度较低, 因此在做误差分析时首先对资料进行初步质量控制, 去掉反演风速 $<2.5 \text{ m s}^{-1}$ 及 $>32.5 \text{ m s}^{-1}$ 的样本, 构成统计分析的检验样本。图 1 为经初步质量控制后所有检验样本反演风向/风速与探空风向/风速的散点分布, 数据集中在 45° 对角线上, 反演风向/风速和探空风向/风速的皮尔逊相关系数分别为 0.78、0.72。风向散点图 (图 1a) 显示, 探空及反演风在 $200\sim270^\circ$ 之间散点聚集度较高, 说明样本中西南偏西风占比较大。风速散点图 (图 1b) 显示, 数据偏向于 y 轴, 拟合线斜率为 1.057, 说明存在反演风速小于实际探空风速的情况。

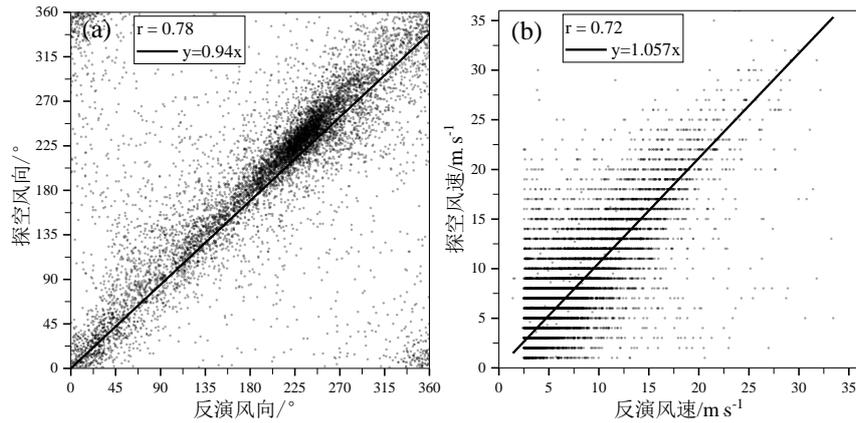


图1 经质量控制后的2020年7—8月全国大范围降水样本的反演风场与探空风场相关性分析

(a) 风向、(b) 风速 (黑色直线为拟合线)

Fig.1 Correlation between the retrieved wind field and the sounding wind field from the quality-controlled nationwide precipitation samples from July to August of 2020 (black line: the fitted line)

(a) wind direction, (b) wind speed

反演风场与探空风场的风向/风速偏差的概率分布均呈正态分布(图略), 偏差的期望值分别在0及略小于0处, 总体来说, 反演风向没有明显偏向性、反演风速略小于探空风速。所有检验样本中风向偏差绝对值在 50 、 15 、 5 °之内的样本占比分别为 86.3% 、 54.5% 、 23.1% , 风向偏差的MAE、RMSE均值分别为 24.7 °、 38.93 °。风速偏差绝对值在 5 、 3 、 1 m s^{-1} 之内的样本占比分别为 84.9% 、 67.3% 、 29.6% , 风速偏差的MAE、ME、RMSE均值分别为 2.82 m s^{-1} 、 -1.16 m s^{-1} 、 3.87 m s^{-1} , 有 40% 的反演风速比实际风速小 $0\sim 3$ m s^{-1} 。整体而言, 雷达反演风场具有较稳定的反演能力, 但反演风向和风速均有小概率的偏差较大的情况。

2.2 不同高度上组网雷达反演风场与探空风廓线的相关性研究

受雷达探测能力及降水分布的影响, 雷达对风场的获取能力随高度降低, 反演风场样本数随高度递减, 对于较低层次, 受测站高度及地形影响, 雷达对风场的获取能力也有所限制, 在最低两层(0.5 、 1.0 km)上样本数相对较少, $1.5\sim 3.5$ km上样本数最多。图2为反演与探空风场(实线)及内蒙古睿图数值预报系统(RMAPS-NM, 空间分辨率 5 km)背景场与探空风场(点线)之间的风向/风速的各参数垂直廓线。考虑到在实际探空中, 较低层次的风速通常较小, 当高度达到 500 hPa时, 风速可达 15 m s^{-1} , 此时MAE不能反映实际变量之间的偏差程度, 故在分析风速时, 引入MRE参数。

整体上反演风向的垂直廓线比反演风速的波动更小。 0.5 km上, 由于地势影响, 反演误差相对较大。随高度增加, 尤其在高层主要为系统性风, 风向较一致, 反演风向的MAE、RMSE轻微增大再减小, r 持续减小, 但仍在 0.73 以上; 反演风速的RMSE缓慢增大, 这与风速本身不断变大有关, MRE减小、 r 增大, 反演风速质量变好。反演风向及睿图模式背景场风向的MAE、RMSE、 r 均值分别为 24.7 °、 38.93 °、 0.78 及 29.7 °、 46.76 °、 0.74 , 整体上前者质量明显优于后者, 5.5 km以下反演风向的MAE、RMSE远小于睿图模式背景

场， r 则远大于后者（图 2a），随高度增加模式背景场的各参数逐渐接近反演风向的，即在高层睿图模式背景场效果变好，接近于反演风向。反演风速及睿图模式背景场风速的 MAE、MRE、RMSE、 r 均值分别为 2.82 m s^{-1} 、 0.43 、 3.87 m s^{-1} 、 0.72 及 2.22 m s^{-1} 、 0.4 、 3.08 m s^{-1} 、 0.79 ，整体上后者质量略优于前者， 5.0 km 以下反演风速的 MRE 小于或接近模式背景场，即中低层反演风速与睿图模式背景场风速较为接近。

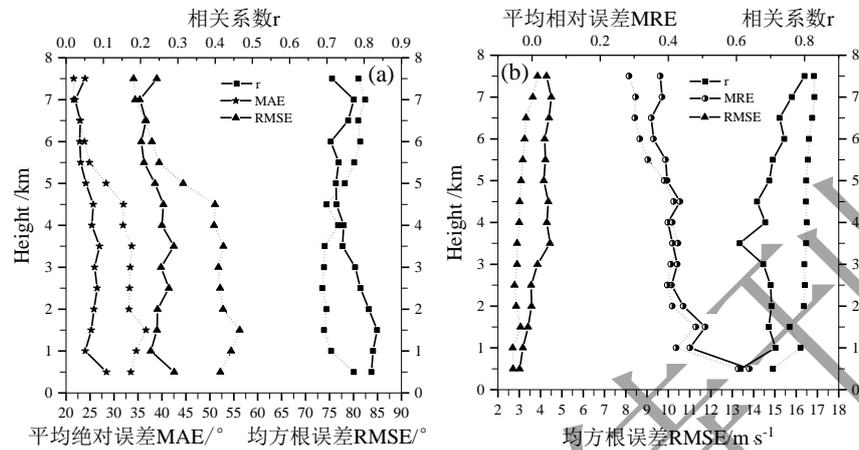


图 2 反演风场（实线）及睿图模式背景场（虚线）的相关系数（ r ）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、平均相对误差（MRE）垂直廓线

(a) 风向、(b) 风速（：反演风场，：睿图模式背景场）

Fig.2 Vertical profiles of the r , MAE, RMSE and MRE for the retrieved wind field (solid line) and the background wind field of RMAPS-NM model (dashed line)

(a) wind direction, (b) wind speed

图 4. 降水、晴空及所有样本反演风场的相关系数（ r ）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、平均相对误差（MRE）垂直廓线

(a) 风向、(b) 风速

Fig.4 Vertical profiles of the r , MAE, RMSE and MRE for the radar-retrieved wind fields in precipitation, clear-sky and all samples

(a) wind direction, (b) wind speed

对比分析图 5 降水区的反演风场（实线）及睿图模式背景场（点线）各参数垂直廓线可以看到，在降水区反演风向\风速效果均比睿图模式背景场好，前者的 MAE、RMSE、MRE 均小于后者， r 大于后者。在 3.5 km 以下反演风速和睿图模式背景场风速效果接近，但随着高度升高，反演风速效果明显优于睿图模式背景场（图 5b）。

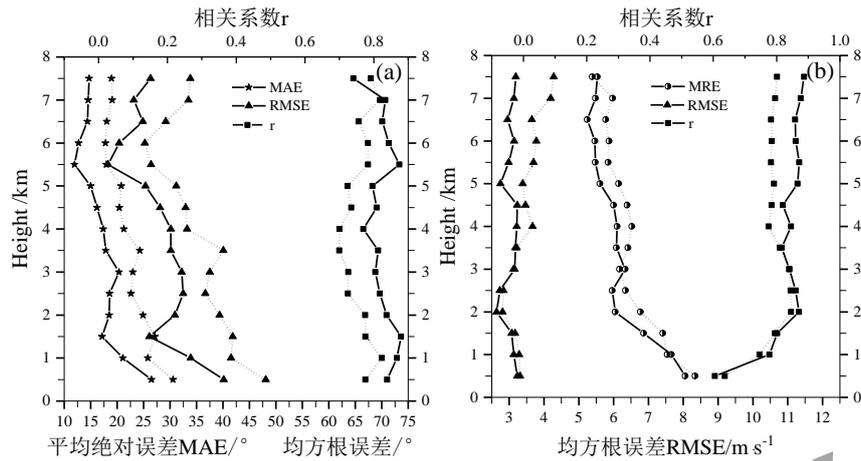


图5 降水区的反演风场及睿图模式背景场的对比分析 (a) 风向、(b) 风速

(实线: 反演风场, 虚线: 睿图模式背景场)

Fig.5 Comparative analysis of the radar-retrieved wind field (solid line) and the background wind field of

RMAPS-NM model (dashed line) in rainfall areas

(a) wind direction, (b) wind speed

3 个例分析

2019年7月6日08时我国存在分散性降水(图略), 华北地区东南部、东北地区以及南部地区降水明显, 雷达反射率达50 dBz以上。利用经质量控制后的雷达基数据采用IVAP法得到不同高度上的组网雷达反演风场如图6所示(仅显示了分散性降水区域内的垂直高度为0.5、1.5、3.0、5.5 km上的反演风场, 棕色、紫色、绿色风向杆及曲线分别为反演、秒探空、睿图模式背景场风场及辐合线), 从不同高度层上可以明显看到反演与秒探空风场的风向和风速基本一致, 说明IVAP法反演风场是合理可靠的。

0.5 km上, 反演风场(图6a1)显示位于黑龙江省西部的降水回波处存在偏东和偏南风的暖式切变(蓝色点线), 睿图模式背景场(图6b1)也存在暖式切变, 但位置略偏东, 秒探空风场显示从华北至华中地区存在偏北和偏西南风的辐合线, 反演风场相同位置处同样有偏北和偏西南风的辐合线, 而在睿图模式背景场上辐合线分为两段, 北段较秒探空风场辐合线位置偏东、南段偏西。1.5 km上, 反演风场(图6a2)和秒探空风场的切变线位置相同, 睿图模式背景场(图6b2)切变线仍分为两段, 北段较秒探空切变线位置偏西, 且在秒探空及反演风场上西南至华东地区基本为西南气流控制, 而睿图模式背景场显示为平直的偏西气流。3.0 km上, 在河北省南部的强降水回波处, 反演风场(图6a3)存在低涡, 位于河北省南部至安徽省北部切变线较秒探空切变线位置略偏西, 安徽省南部至湖南省东北部切变线位置与秒探空一致, 睿图模式背景场(图6b3)低涡位置偏东北方向, 北段切变线较秒探空切变线位置偏北偏西, 南段略偏东。5.5 km上, 反演风场(图6a4)切变线也分为两段, 北段较秒探空切变线位置略偏西、南段略偏东, 睿图模式背景场(图6b4)切变线整体较秒探空切变线位置偏北。

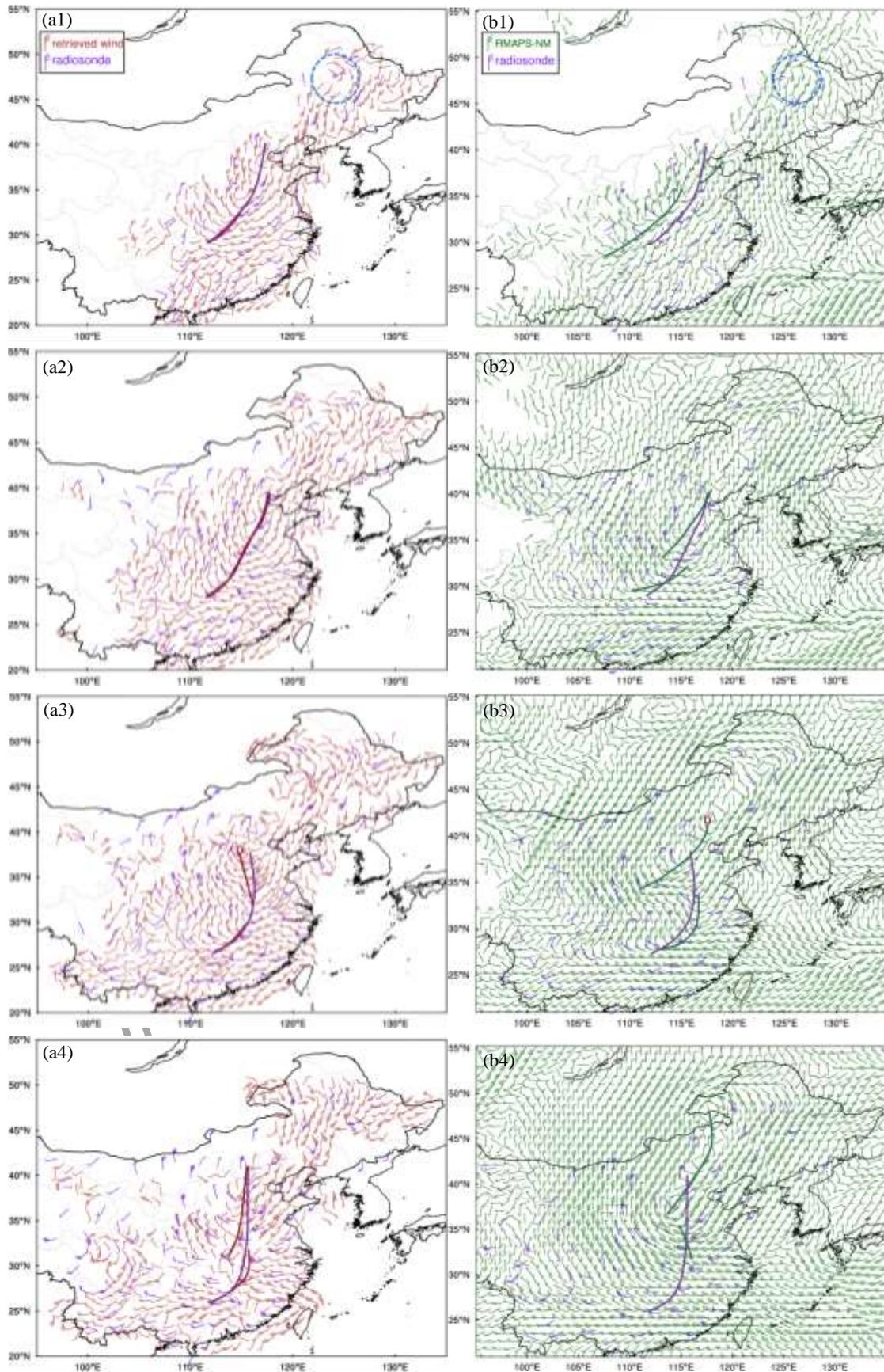


图 6 2019 年 7 月 6 日 08 时分散性降水个例的不同高度秒探空风场 (紫色) 和 (a) 反演风场 (棕色) 和 (b)

睿图模式背景场（绿色）

(a1,b1) 0.5 km、(a2,b2) 1.5 km、(a3,b3) 3.0 km、(a4,b4) 5.5 km

Fig.6 The seconds-sounding wind field (purple) with (a) the retrieved wind field (brown) and (b) the background wind field of RMAPS-NM model (green) at the altitudes of (a1, b1) 0.5 km, (a2, b2) 1.5 km, (a3, b3) 3.0 km and (a4, b4) 5.5 km for the scattered precipitation case at 08:00 BT 6 July 2019

进一步分析位于河北及山东省强对流区域的反演风场（图7）。图中仅显示了强对流区域的垂直高度为1.5、3.0、5.5 km上的反演风场，代表低、中、高层风场结构，其中填色为雷达回波，棕色、紫色风向杆分别为反演及秒探空风场。北京市由低层4~10 m s⁻¹的偏北风转为高层6~8 m s⁻¹的偏南风，河北省东南部低高层为8~12 m s⁻¹的偏南风、西南部为8~12 m s⁻¹的偏北风，山东省西北部的偏南风由低层的4~8 m s⁻¹转为高层14~16 m s⁻¹，反演风场与探空风场的风向风速基本一致，且越往高层两者越接近。在强对流云区域低层为偏北风，随高度逐渐转为强盛的偏南风，中高层发展北上的西南急流（风速达20 m s⁻¹）与低层扩散南下的冷空气相互作用，在急流带上随暖湿气流的输送对流从较高位置发展起来，从而触发了高架雷暴。

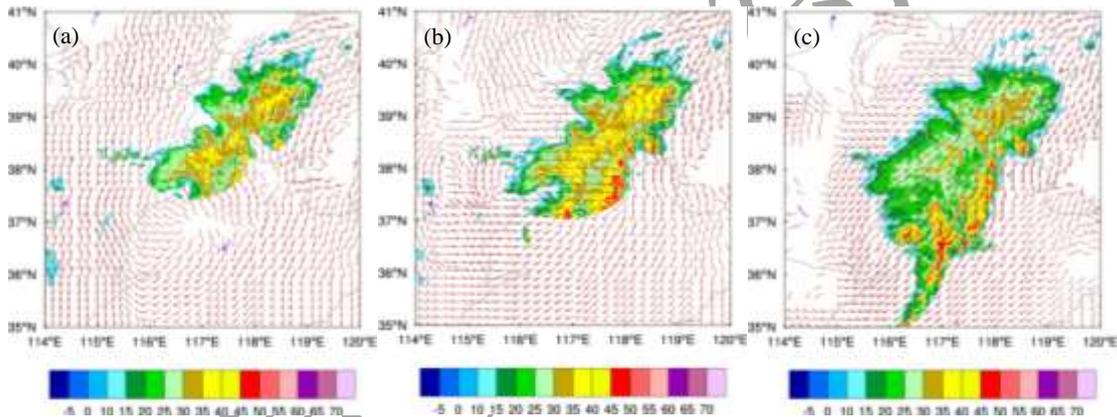


图7 2019年7月6日08时强对流区域的雷达反射率因子（填色）和反演风场（风羽）、探空风场（紫色风羽）

(a) 1.5 km、(b) 3.0 km、(c) 5.5 km、

Fig.7 The radar reflectivity (colored), and retrieved wind field (brown wind barb) and sounding wind field (purple wind barb) at the altitudes of (a) 1.5 km, (b) 3.0 km and (c) 5.5 km in the severe convection zone at 08:00 BT 6 July 2019

从上述反演实例可以看出，由IVAP法得到的组网雷达反演风场和秒探空风场的风向及风速有很好的 consistency，考虑到实际探空记录很稀疏，而雷达反演风场可以很好地弥补探空记录不足造成的对中小尺度系统的分析困难，且相较于睿图模式背景场，反演风场对于系统移速及强弱的表现更优，在实际业务中可以更好地为天气预报服务以及风场资料同化提供依据。

4 结论与讨论

本文利用经过质量控制后的雷达基数据，采用 IVAP 法获得了高时空分辨率的组网雷达反演风场，进一步利用统计学方法对反演风场进行定量的质量评估，并通过 2019 年 7 月 6 日一次降水过程展示了反演风场的合理性及准确性，并得出以下结论：

(1) IVAP 法组网雷达反演风场与探空风场之间具有较高的相关性，从分层检验的结果来看，随高度升高反演风向的质量和稳定性要优于风速。

(2) 进一步将检验样本区分为降水及晴空样本，对风场反演精度进行对比研究，发现在降水区反演风场的质量最好，垂直廓线波动也最小，稳定性最好；晴空区反演风场误差最大，4.0 km 以上波动性变大反演质量显著降低。

(3) 与睿图模式背景场比较发现，整体上雷达反演风向质量更优，反演风速质量略逊于睿图模式背景场，在中低层反演风速质量两者接近；在降水区反演风向风速均更优，尤其在中高层反演风速明显优于睿图模式背景场。

(4) 个例分析表明，基于 IVAP 法的组网雷达反演风场与秒探空风场有较好的一致性，可以反演出强对流区域的风场精细结构，该反演方法是稳定可信的，在实际业务应用中具有很好的应用前景，且相较于睿图模式背景场，其对于系统移速及强弱的表现更优，利用组网雷达反演风场资料结合雷达资料同化技术将有助于提升模式预报质量。

IVAP 法通过给定分析单元的所有多普勒风的信息提取该分析单元上的平均风，从而自动具有了滤波功能，并且滤波过程和反演过程同时进行。本文在采用 IVAP 法进行组网雷达风场反演时，选择的分析单元为 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 。选择的分析单元越大，得到的风场越平滑，相反，分析单元越小，得到的风场小尺度信息越多，但是受小尺度脉动的影响也越大。此外，对于格点径向速度资料，当一个网格点上有多个雷达观测数据时，本文选择取平均值的处理方法进行风场反演。在今后研究中，可进一步调整分析单元大小，对于同一网格点上有多个观测值时可根据雷达距离、仰角等分别给定不同权重，使得反演风场质量更优。

致谢：感谢中国气象科学研究院梁旭东研究员、尹金方研究员对本文给予了宝贵指导与帮助！

参考文献：

陈君芝, 施晓晖, 温敏, 2023. ERA5 再分析 10m 风速数据在“两洋一海”的适用性分析[J]. 气象, 49(1): 39-51. Chen J Z, Shi X H, Wen M, 2023. Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of “Two Oceans and One Sea”[J]. Meteor Mon, 49(1): 39-51 (in Chinese).

陈明轩, 王迎春, 高峰, 等, 2011. 基于雷达资料 4DVar 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J]. 气象学报, 69(1): 64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 64-78 (in Chinese).

陈明轩, 王迎春, 肖现, 等, 2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析[J]. 大气科学, 36(5): 929-944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5): 929-944 (in Chinese).

韩颂雨, 罗昌荣, 魏鸣, 等, 2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究[J]. 气象学报, 75(5): 757-770.

Han S Y, Luo C R, Wei M, et al, 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual-and triple-Doppler radar retrieval[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(5): 757-770 (in Chinese).

黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等, 2021. 2019年4月13日广东徐闻强龙卷天气分析[J]. *气象*, 47(2): 216-229. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2021. Analysis of the 13 April 2019 strong tornado in Xuwen county, Guangdong province[J]. *Meteor Mon*, 47(2): 216-229 (in Chinese).

梁旭东, 王斌, 2007. 多普勒雷达积分 VAP 反演技术[J]. *气象学报*, 65(2): 261-271. Liang X D, Wang B, 2007. An integrating VAP method for single-Doppler radar wind retrieval[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(2): 261-271 (in Chinese).

刘黎平, 张沛源, 梁海河, 等, 2003. 双多普勒雷达风场反演误差和资料的质量控制[J]. *应用气象学报*, 14(1): 17-29. Liu L P, Zhang P Y, Liang H H, et al, 2003. Error estimation in wind fields derived from dual-Doppler radar and data quality control[J]. *J Appl Meteor Sci*, 14(1): 17-29 (in Chinese).

刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等, 2004. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究[J]. *大气科学*, 28(2): 278-284. Liu L P, Shao A M, Ge R S, et al, 2004. A study of mesoscale wind structures in heavy rainfall system of merging cloud with dual-Doppler radar[J]. *Chin J Atmos Sci*, 28(2): 278-284 (in Chinese).

刘黎平, 莫月琴, 沙雪松, 等, 2005. C 波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维变分风场反演方法研究[J]. *大气科学*, 29(6): 986-996. Liu L P, Mo Y Q, Sha X S, et al, 2005. Radar data processing and a variational algorithm for 3-dimensional wind field retrieval by C band bistatic radar network[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(6): 986-996 (in Chinese).

刘婷婷, 苗春生, 张亚萍, 等, 2014. 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用[J]. *气象*, 40(12): 1530-1538. Liu T T, Miao C S, Zhang Y P, et al, 2014. Application of Doppler radar wind field retrieval technique to southwest vortex rainstorm process[J]. *Meteor Mon*, 40(12): 1530-1538 (in Chinese).

罗义, 梁旭东, 王刚, 等, 2021. 雷达反演的多尺度风场在临近预报中的应用研究[J]. *暴雨灾害*, 40(4): 401-409. Luo Y, Liang X D, Wang G, et al, 2021. A study of the multi-scale winds from radar retrieval for nowcasting[J]. *Torr Rain Dis*, 40(4): 401-409 (in Chinese).

梅珏, 梁旭东, 吕环宇, 2007. 单 Doppler 雷达 IVAP 风场反演试验[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 43(1): 48-54. Mei J, Liang X D, Lü H Y, 2007. Experiments on the IVAP single-Doppler radar wind retrieval method[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 43(1): 48-54 (in Chinese).

牟容, 刘黎平, 许小永, 等, 2007. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. *气象*, 33(1): 11-18. Mou R, Liu L P, Xu X Y, et al, 2007. The capability research on retrieving low-level wind field with 4D-VAR assimilation technique[J]. *Meteor Mon*, 33(1): 11-18 (in Chinese).

裴丽丝, 邱崇践, 2013. 多普勒雷达 VAD 风廓线资料的质量评估[J]. *热带气象学报*, 29(4): 597-606. Pei L S, Qiu C J, 2013. The assessment of velocity azimuth display technique of Doppler weather radar[J]. *J Trop Meteor*, 29(4): 597-606 (in Chinese).

陶祖钰, 1992. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法[J]. *气象学报*, 50(1): 81-90. Tao Z Y, 1992. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field[J]. *Acta Meteor Sin*, 50(1): 81-90 (in Chinese).

田静, 张庆阳, 2001. 双基地多普勒雷达在云内风场探测中的应用研究[J]. *气象*, 27(12): 13-16. Tian J, Zhang Q Y, 2001. Application of bistatic Doppler weather radar to wind observation in precipitation systems[J]. *Meteor Mon*, 27(12): 13-16 (in Chinese).

王欣颖, 梁旭东, 2009. 基于风向线性变化假定的单 Doppler 雷达风场 IVAP 反演技术[J]. *暴雨灾害*, 28(1): 73-93. Wang X Y, Liang X D, 2009. An Improved IVAP Single-Doppler Radar Wind Retrieval Technique on the Linearly Varying Assumption of Wind Direction[J]. *Torr Rain Dis*, 28(1): 73-93 (in Chinese).

王改利, 刘黎平, 2005. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. *气象*, 31(10): 12-15. Wang G L, Liu L P, 2005. Application of Doppler radar observation to rainfall nowcasting[J]. *Meteor Mon*, 31(10): 12-15 (in Chinese).

王俊, 俞小鼎, 郁庆国, 等, 2011. 一次强烈雹暴的三维结构和形成机制的单、双多普勒雷达分析[J]. *大气科学*, 35(2): 247-258. Wang J, Yu X D, Tai Q G, et al, 2011. Analysis on the three-dimensional structure and formation mechanism of a severe hailstorm with single- and dual-Doppler radar data[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(2): 247-258 (in Chinese).

王秀明, 俞小鼎, 费海燕, 等, 2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. *气象*, 49(2): 129-145. Wang X M, Yu X D, Fei

- H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon, 49(2): 129-145 (in Chinese).
- 王艳春, 王红艳, 刘黎平, 2014. 华南一次强飑线过程的三维变分风场反演效果分析[J]. 暴雨灾害, 33(4): 305-312. Wang Y C, Wang H Y, Liu L P, 2014. Performance evaluation of 3-dimensional variation assimilation retrieval of wind field of a squall line event in southern China[J]. Torr Rain Dis, 33(4): 305-312 (in Chinese).
- 王艳春, 王红艳, 刘黎平, 2016. 三维变分方法反演风场的效果检验[J]. 高原气象, 35(4): 1087-1101. Wang Y C, Wang H Y, Liu L P, 2016. Performance evaluation of three-dimensional variation assimilation retrieval of wind field[J]. Plateau Meteor, 35(4): 1087-1101 (in Chinese).
- 杨毅, 邱崇践, 龚建东, 等, 2008. 利用3维变分方法同化多普勒天气雷达资料的试验研究[J]. 气象科学, 28(2): 124-132. Yang Y, Qiu C J, Gong J D, et al, 2008. Study on Doppler weather radar data assimilation via 3D-Var[J]. Sci Meteor Sin, 28(2): 124-132 (in Chinese).
- 张勇, 刘黎平, 仰美霖, 等, 2011. “天鹅”台风风场结构特征[J]. 气象, 37(6): 659-668. Zhang Y, Liu L P, Yang M L, et al, 2011. Analysis on the structure characteristics of typhoon Goni[J]. Meteor Mon, 37(6): 659-668 (in Chinese).
- 周海光, 张沛源, 2000. 多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验[J]. 气象, 26(5): 13-16. Zhou H G, Zhang P Y, 2000. Contrast experiments on methods for retrieving two-dimensional wind from single-Doppler radar data[J]. Meteor Mon, 26(5): 13-16 (in Chinese).
- 周海光, 张沛源, 2002. 笛卡尔坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术[J]. 气象学报, 60(5): 585-593. Zhou H G, Zhang P Y, 2002. A new technique of recovering three-dimensional wind fields from simulated dual-Doppler radar data in the Cartesian space[J]. Acta Meteor Sin, 60(5): 585-593 (in Chinese).
- 周海光, 王玉彬, 2002. 多部多普勒雷达同步探测三维风场反演系统[J]. 气象, 28(9): 7-11. Zhou H G, Wang Y B, 2002. A retrieving system of three-dimensional wind fields by multiple-Doppler radar[J]. Meteor Mon, 28(9): 7-11 (in Chinese).
- 庄薇, 刘黎平, 王楠, 2006. 新疆地区一次对流性降水的三维中尺度风场研究[J]. 应用气象学报, 17(4): 444-451. Zhuang W, Liu L P, Wang N, 2006. Study on three-dimensional wind fields of mesoscale convective systems in Xinjiang[J]. J Appl Meteor Sci, 17(4): 444-451 (in Chinese).
- Browning K A, Wexler R. 1968. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar[J]. J Appl Meteor, 7(1): 105-113.
- Koscielny A J, Doviak R J, Rabin R, 1982. Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to prestorm boundary-layer observations[J]. J Appl Meteor, 21(2): 197-210.
- Lhermitte R M, Atlas D, Precipitation motion by pulse Doppler[C]. Proc Ninth Weather Radar Conf. Boston: Amer Meteor Soc, 1961: 218-223.
- Liang X D, 2007. An integrating velocity-azimuth process single-Doppler radar wind retrieval method[J]. J Atmos Oceanic Technol, 24(4): 658-665.
- Liang X D, Wang B, 2009. An integrating VAP method for single-Doppler radar wind retrieval[J]. J Meteor Res, 23(2): 166-174.
- Liang X D, 2010. Improvement of the integrating velocity-azimuth process single-Doppler radar wind-retrieval method[J]. J Meteor Res, 24(6): 721-731.
- Luo Y, Liang X D, Wang G, et al, 2021. A study of extrapolation nowcasting based on IVAP-retrieved wind[J]. J Atmos Oceanic Technol, 38(4): 885-895.
- Waldteufel P, Corbin H, 1979. On the analysis of single-Doppler radar data[J]. J Appl Meteor, 18(4): 532-542.