徐冉,刘黎平.2024. 高密度雷达网风场反演的优化方法及其应用效果检验[J].暴雨灾害,43(6):713-722. XU Ran, LIU Liping. 2024. The optimization method for wind field retrieval using high-density radar networks and its application effect verification [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):713-722 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-209

高密度雷达网风场反演的优化方法及其应用效果检验

徐冉,刘黎平
(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: 高质量多普勒天气雷达三维风场反演产品是研究和预报中小尺度天气系统不可或缺的资料。现有的天气雷达三维变分风场反演方法(3DVAR)主要基于单部或数部雷达进行小范围风场反演,利用多部雷达资料进行而大范围风场反演计算量大、程序运行速度慢,不利于业务有效开展。利用广东省11部S波段多普勒天气雷达和27部X波段相控阵天气雷达,在3DVAR方法的基础上,结合双雷达风场反演方法提出了一种能够获得高质量大范围风场结果的优化方法(D-3DVAR)。优化过程共分三步:①基于天气系统位置确定风场反演区域从而减少雷达数量;②通过计算雷达网在双雷达风场反演贡献比例减少雷达数量;③在双雷达风场反演过程中每个格点仅选取最优的两个径向速度进行风场反演计算,其余径向速度不参与后续的风场反演,每进行一步优化后进行风场反演的结果记为优化1—3。以2022年5月13日广东沿海地区一次飑线过程为例,应用D-3DVAR方法对雷达网风场进行反演,并对反演结果进行对比检验。结果表明,三步优化的风场反演方法能够得到大湾区大范围的双多普勒雷达风场反演结果,在2 km高度能够较好覆盖大湾区陆地区域,在4 km高度能够覆盖海岸线内大部分区域。相较优化1,优化2和优化3的风场反演程序运行速度提高了3倍,优化3与优化1的风场反演结果基本特征一致,风速误差基本小于1.7 $m \cdot s^{-1}$,风向误差基本小于10°;但优化3的风场反演结果更能突出中小尺度天气系统风场强上升气流和垂直涡旋特征。

关键词: 风场反演;相控阵天气雷达;多普勒天气雷达;效果检验;三维变分
中图法分类号: P412.25　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-209

The optimization method for wind field retrieval using high-density radar networks and its application effect verification

XU Ran, LIU Liping

(*State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081)

Abstract: High-quality three-dimensional wind field retrieval products from Doppler weather radars are essential data for studying and forecasting mesoscale weather systems. The existing 3D variational wind field retrieval method (3DVAR) mainly uses data from single or multiple radars to conduct the wind field retrieval of small regions. However, for wind field retrieval of large regions using multiple radars, challenges exist, such as high computational requirements and slow processing speeds, which obstruct operational applications. In this study, an an improved method (D-3DVAR) that can obtain high-quality large-scale wind field results is proposed by combining the dual-radar wind field retrieval method, based on the 3DVAR method, using 11 S-band Doppler weather radars and 27 X-band phased array weather radars in Guangdong Province. The optimization process consists of three steps. First, determine the wind field retrieval area based on the location of the weather system to reduce the number of radars; Second, reduce the number of radars by calculating the contribution ratio of the radar network in the dual-radar wind field retrieval; Third, during the dual-radar wind field retrieval process, only select the optimal two radial velocities for each grid point to conduct the wind field retrieval, while the remaining radial velocities do not participate in subsequent wind field retrieval. The results of wind field retrieval after each optimization step are recorded as Majorization 1-3. Taking a squall line process along the coastal area of Guangdong Province on 13 May 2022, as an example, wind field retrieval was performed on the radar network using

收稿日期: 2023-09-28;**定稿日期:**2024-02-28
资助项目: 国家自然科学基金项目(U2142210)
第一作者: 徐冉,主要从事雷达气象学研究。E-mail: 770354917@qq.com
通信作者: 刘黎平,主要从事雷达气象学研究。E-mail: liulp@cma.gov.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

D-3DVAR, and the retrieval results were compared and verified. The results show that the three-step optimized wind field retrieval method can obtain dual-Doppler radar wind field retrieval results for a large area of the Greater Bay Area, which can better cover the land area of the Greater Bay Area at an altitude of 2 km and most areas within the coastline at an altitude of 4 km. Compared to Majorization 1, the wind field retrieval program execution speed of Majorization 2 and 3 is increased by 3 times. The basic characteristics of Majorization 3 and Majorization 1 are consistent, with wind speed errors less than 1.7 $m \cdot s^{-1}$ and wind direction errors within 10°. However, the wind field retrieval result of Majorization 3 can better highlight the characteristics of strong updraft and vertical vortex in the wind field of mesoscale weather systems.
Key words: wind field retrieval; X-band phased array radar; Doppler radar; performance evaluation; three-dimensional variation

引 言

多普勒天气雷达反演风场是开展暴雨、台风、龙卷风等灾害性天气预报及机理研究的重要基础。目前,多普勒天气雷达反演风场主要基于单部或数部雷达进行小范围反演得到(刘黎平等,2003),而大范围利用相控阵雷达反演风场的应用还较少。

单部雷达风场反演常常利用一些假设条件,如假设风场水平均匀或呈线性变化、风场分布不随时间变化等,然后通过空间几何关系和约束方程来拟合出水平或三维风场,如陶祖钰(1992)提出的VAP (Velocity-Azimuth Process)方法、郎需兴等(2001)提出的VVP (Volume Velocity Processing)方法、邱崇践(1996)等提出的简单伴随函数法等。但实际大气风场复杂多变,很难满足单雷达风场反演的上述假定条件,尤其是在对流风暴中,气流速度随空间和时间都有显著变化,仅用一部雷达测得的速度资料实际上不可能勾画出风场的空间分布,而利用相隔不远的两部或三部雷达同时测定散射体相对于雷达的径向速度分量,则可计算出散射体的运动速度,从而就能够比较全面地了解空间中的三维风场(张培昌,2000)。

双多普勒雷达测定风场相比三部多普勒雷达方法,也能够获得关于风场的足够有用资料,同时降低了对于计算机数据贮存能力和计算能力的要求,为此国内外科研人员开展了一系列双雷达三维风场反演研究。刘黎平等(2003)提出在进行双雷达风场反演过程中,两部雷达径向速度的夹角在40°~140°范围内时,反演径向速度的标准差误差不超过雷达探测径向速度的标准差的2倍。周海光等(2003)用MUSCAT (Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique)技术对梅雨锋雨带上的一个中β系统进行了双、三多普勒雷达三维风场对比分析,表明中低层辐合线是此次暴雨系统的一个重要特征。王艳春(2016)利用六部S波段多普勒天气雷达构成三个双多普勒雷达系统,在三维变分反演方法的基础上,对三种不同类型的天气过程进行分析,验证了使用双雷达资料进行三维风场反演方法的可靠性,但是由于使用的双多普勒雷达距离较远,且低层盲区较大,能够进行双雷达风场反演的区域较小。

大范围区域组网雷达进行风场反演的研究中,利用S波段和C波段雷达进行组网的研究较多。如Park等(2007)利用韩国8部10 cm波长多普勒雷达和11部5.5 cm波长多普勒雷达组成的雷达网进行三维风场反演,该雷达网在3 km以上覆盖整个南部区域及近海,并对2006年的台风“艾云尼”个例进行分析,与4部UHF风廓线风场测量结果进行比较,雷达网测得的u、v风场标准差分别为3.6 $m \cdot s^{-1}$和4.5 $m \cdot s^{-1}$,验证了雷达网风场反演的能力。Bousquet 等(2014)利用法国的24部雷达(2部X波段雷达)在1 000 km×1 000 km×12 km范围内进行风场反演,并选取了2009年1月的飓风级温带暴风事件克劳斯和2009年10月的典型地形降水事件与法国业务数值天气预报系统分析的模式风场进行比较,验证了新模式风场的时空连续性。

X波段相控阵天气雷达可以弥补常规天气雷达网由于扫描范围、地形阻挡等原因造成的空缺,增强对于低层风场的探测能力,实现大范围低层风场反演,这对于分析龙卷、飑线等中小尺度强对流系统的动力学结构和发生发展机理过程有着非常重要的意义(王艳春等,2014;林小红等,2022;王珏等,2022;姬雪帅,2023)。目前X波段相控阵天气雷达反演风场的可靠性已经过验证,但是研究中投入风场反演的相控阵雷达数量较少,反演区域较小,而对于大范围S波段和X波段雷达共同反演风场效果还没有经过检验。近些年我国多地建成了相控阵天气雷达网,其中广东大湾区布设了30余部相控阵天气雷达,为大范围风场反演创造了条件。本文选择大湾区雷达网覆盖密集区域,利用11部S波段多普勒天气雷达和27部X波段相控阵天气雷达,对雷达数据进行质量控制、退速度模糊处理和插值后,进行三步优化处理,优化的目的是在选定风场反演范围内,利用最少的雷达实现每个点双多普勒雷达风场反演,加快运行速度,实现业务化运行。优化算法分别基于雷达及天气系统位置、双雷达风场反演贡献比例、最优双雷达角度原则进行筛选,每次筛选后使用PyDDA (Python Direct Data Assimilation)软件程序包进行三维风场反演,比较优化过程中三个优化结果风场反演结果,检验优化算法的可靠性

和程序运行效率。同时选择广东地区2022年5月13日一次飑线过程讨论这种新的风场反演方法是否能够提高低层风场反演效果，进一步提高对于引发强对流天气的中小尺度天气系统低层动力学结构的认识。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文在检验优化方法风场反演效果时，使用广东省11部S波段新一代天气雷达数据和高密度分布的27部X波段相控阵天气雷达资料，风场反演选择的水平范围为(112.5°—114.5°E、21.5°—23.5°N)，高度范围为1—8 km的区域，雷达站点位置分布和探测范围如图1所示。S波段多普勒天气雷达仰角有9层，范围为(0.48°—19.51°)，1—6层仰角的最大不模糊速度为27 m·s^{-1}，7—9层仰角的最大不模糊速度为31 m·s^{-1}，最大探测距离为230 km。X波段相控阵天气雷达时间和空间分辨率92 s和30 m，最大不模糊速度为26 m·s^{-1}，最大探测距离为60 km或43 km。

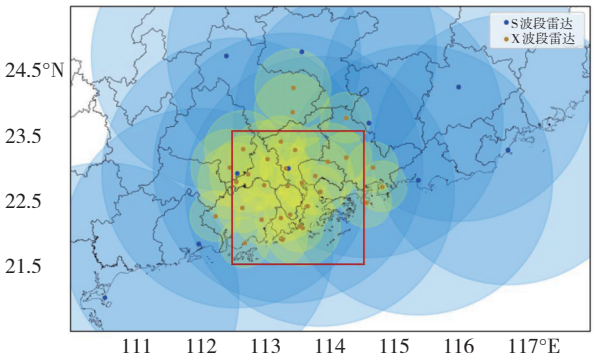


图1 广东S波段新一代多普勒天气雷达及探测范围(蓝色)和X波段相控阵天气雷达及探测范围(黄色)分布图(红框为本文个例进行风场反演的区域，下同)

Fig. 1 Map of S-band radar with detection range (blue) and X-band weather radar with detection range (yellow) in Guangdong (the red box is the area where the wind field retrieval is carried out in this paper)

1.2 研究方法

1.2.1 数据预处理

在进行风场反演前，首先对雷达数据进行质量控制、退速度模糊和插值预处理。在风场反演过程中，粒子下落末速度与回波强度有关，因此，在进行风场反演前需要对X波段相控阵雷达的回波强度进行衰减订正，X波段雷达的衰减误差订正方法为：将雨滴谱计算的X波段相控阵天气雷达水平偏振反射率因子与差分反射率因子的衰减订正系数和水膜衰减的范围作为约束条件，以S波段新一代多普勒天气雷达为参考实时拟合X波段相控阵天气雷达的衰减系数和水膜衰减导致的系统性误差。

多普勒天气雷达观测的径向速度存在速度模糊问题，在风场反演前需要对其进行订正处理。采用的方法是基于区域的退速度模糊算法，在三维空间中查找速度相似的区域，区分速度模糊区与非速度模糊区，再利用动态网络缩减的方法进行退速度模糊处理，从而融合全部区域。具体使用的是Helmus等(2016)开发的Py-ART (The Python ARM Radar Toolkit)软件。

S波段新一代多普勒天气雷达和X波段相控阵天气雷达的时间分辨率分别为6 min和1.5 min，两种雷达数据的时间匹配以S波段新一代多普勒天气雷达为准，X波段相控阵天气雷达选择时间上最接近S波段新一代多普勒天气雷达的数据，时间差在1 min内认为是同一时间的数据，即风场反演结果的时间分辨率为6 min。本文空间上选择了大湾区雷达网覆盖密集的区域，对选定区域内雷达数据进行网格化处理，即对雷达数据在201×201×15的三维格点区域内进行插值，得到水平分辨率为0.01°，垂直分辨率为0.5 km的格点数据，插值方法采用的是基于高斯函数的Barnes插值法(Barnes，1964)。

1.2.2 优化方法

利用多部雷达进行使用3DVAR方法直接进行风场反演，程序数据量大，对计算机内存要求高，并且计算效率低，因此需要对雷达数据进行优化处理，雷达数据进行预处理后，对雷达网进行组网优化，优化过程分三步进行。组网优化的目的在于加快风场反演速度，保证风场反演结果的时效性，进一步实现业务化应用。

三步优化方法的总目标是减少数据量并提高结果准确性，三步优化算法如图2所示。第一步选定进行风场反演的天气系统，根据天气系统与雷达网的位置关系，优化加入风场反演过程的雷达组，覆盖水平区域面积比率小于3%的雷达数据不进入风场反演程序。第二步使用双雷达资料进行三维风场反演，这一方法的可靠性已经过验证(王艳春等，2016)，在空间范围内每个格点至少使用两部雷达数据进行双多普勒风场反演，以空间格点为顶点与两部雷达位置点形成的夹角范围在40°~140°区间内的雷达数据认为有效，不在此范围内对应夹角的雷达数据赋值为空。第三步，在第二步的基础上针对不止一对雷达组合满足有效夹角范围的情况，选择夹角最接近90°的两部雷达数据，这样的风场反演结果能够在减少数据量的同时，增加最优雷达权重，优化最终风场反演结果。

算法第一步通过雷达站点分布选择研究区域，并对雷达进行筛选，剔除远离选定区域的雷达。本次研究所使用的S波段新一代多普勒天气雷达网覆盖华南地区，而X波段相控阵天气雷达则主要覆盖大湾区。

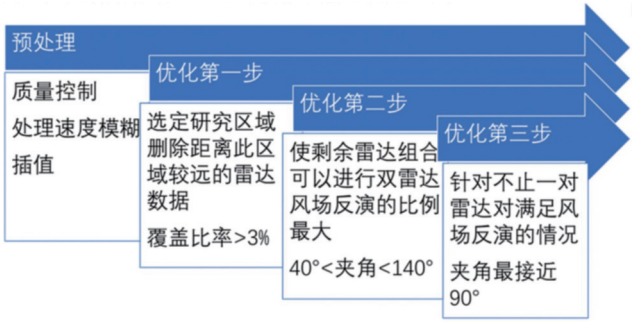


图2 数据三步优化流程图

Fig. 2 Flowchart of the three-step data optimization

因此，选定大湾区范围为(112.5°—114.5°E，21.5°—23.5°N)，覆盖约200 km×200 km的区域，利用多普勒天气雷达三维数字组网及产品预处理系统将处理后的数据在直角坐标系上插值到水平分辨率为0.01°、垂直分辨率为0.5 km的网格中。随后，计算插值后雷达数据的水平区域覆盖比率，并剔除覆盖比率低于3%的雷达，包括5部S波段雷达(Z9751、Z9753、Z9763、Z9754、Z9759)和5部X波段雷达(ZQY01、ZQY02、ZJB04、ZHP02、ZHP04)。优化区域的选择需综合考虑雷达站点的分布以及特定天气系统的位置，以确保筛选结果的针对性和有效性。在实际应用中，针对不同天气系统的位置变化，可以灵活调整筛选策略。利用筛选后的6部S波段雷达和22部X波段雷达进行第一步优化及风场反演的方法，称为优化1 (M1)。

算法第二步优化的核心在于分析插值后雷达数据，评估每部雷达对双多普勒雷达反演区的贡献，进而筛选出15部贡献最大的雷达。首先，对优化插值后的雷达数据赋有效值，若同一空间格点有两部或以上雷达数据，则赋值为有效，形成四维0/1二元数组。随后，在有效值范围内，计算空间格点与任意两部雷达夹角(共种角度组合)，形成双多普勒雷达反演区。根据刘黎平等(2003)的研究，我们设定夹角在40°~140°范围内的两部雷达数据为有效，其余为无效。若格点仅有一部雷达数据，亦视为无效。接着，通过贪婪算法和模拟退火算法选择贡献最大的15部雷达。具体过程为：利用贪婪算法，在雷达网中逐步删除贡献最小的雷达，直至剩余15部，确保覆盖率不低于原覆盖率的80%。随后，采用模拟退火算法进一步优化组合，通过随机调整雷达组合，接受使有效范围增大的新组合，或在一定概率下接受范围减小的新组合，直至获得观测范围最大的最优组合。算法流程如图3所示。通过上述两步筛选，初步确定了参与风场反演的雷达，图中N=28为雷达总数，C_N^2为二次项系数。这种方法称为优化2 (M2)。

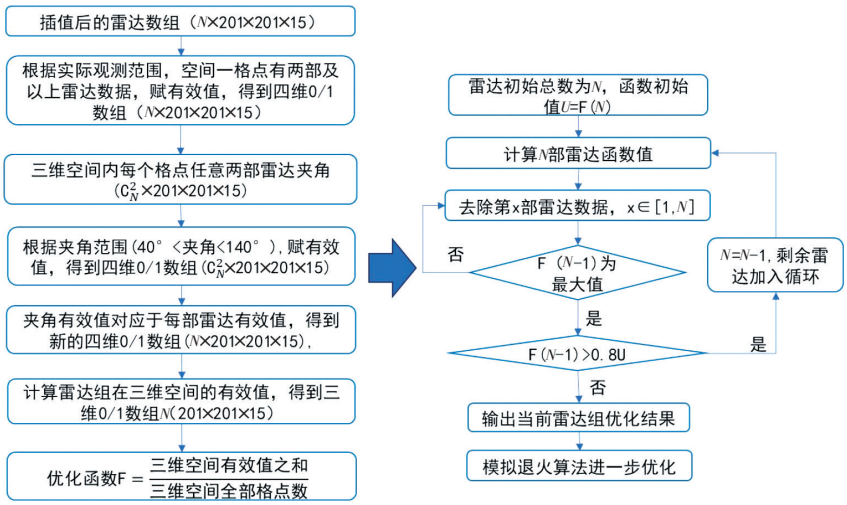


图3 第二步优化算法流程图

Fig. 3 Flowchart of optimization algorithm in the second step

第三步优化的目标是在第二步优化的基础上，不改变参与风场反演的雷达数量，使空间每个格点只有最优的两部雷达径向速度参加风场反演，其他雷达径向速度设置为无效。在第二步风场筛选的基础上，有效值格点至少有一个雷达对，即两部雷达可以进行风场反演，但可能有多于两部雷达的情况，如果多余两部雷达，则比较雷达对夹角，选择夹角最接近90°的两部雷达进行风场反演，其他雷达数据设置为无效。进行第一步、第二步、第三步筛选过程并进行风场反演的方法称为优化3 (M3)。

1.2.3 风场反演方法

本文具体使用的是Potvin等(2012)提出的三维风场反演方法，其具体步骤为

记直角坐标系中的每个点存在三个方向的风分量(u,v,w)，寻找对于目标函数J取极小值的u、v、w。

$$J_{(U,\ V,\ W)}=J_B+J_O+J_M+J_V+J_S \tag{1}$$

公式中其中第一项J_B为背景场的约束，计算方法为

$$J_B=\frac{1}{2}\sum_{i,\,j,\,k}\left[W_{uB}\left(\bar{u}^{xy}-\bar{u}^{B}\right)^2+W_{vB}\left(\bar{V}^{xy}-\bar{V}^{B}\right)^2+W_{wB}\left(\bar{w}^{xy}-\bar{w}^{B}\right)^2\right] \tag{2}$$

$$\bar{u}^{xy}=0.5u_{i,\,j}+0.125\left(u_{i+1,\,j}+u_{i-1,\,j}+u_{i,\,j-1}\right) \tag{3}$$

式中 $\bar{v}^{xy}$ 和 $\bar{w}^{xy}$ 的定义同 $\bar{u}^{xy}$ 。背景场使用的是 u^B, v^B, w^B 全部为0的初始风场。

公式中第二项 J_o 为观测项，计算方法为

$$J_o=\sum_{i,\,j,\,k}W_{o1}\left(v_{r1}^{\mathrm{obs}}-v_{r1}\right)^2+\sum_{i,\,j,\,k}W_{o2}\left(v_{r2}^{\mathrm{obs}}-v_{r2}\right)^2 \tag{4}$$

其中 v_{r1}^{obs} 和 v_{r2}^{obs} 分别代表的是第一部雷达和第二部雷达，其中 v_r 计算方法为

$$v_r=x\times u+y\times v+z\times\left(w-\left|w_t\right|\right) \tag{5}$$

其中 x、y、z 为直角坐标系中每个点距离雷达站点的水平距离和垂直距离，降水粒子下落末速度 w_t 的估算，固态降水采用Shapiro等(1995)的经验公式

$$w_t=3.088\times Z^{0.0957}\times\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{0.4} \tag{6}$$

液态降水采用Joss等(1970)的经验公式

$$w_t=2.6\times Z^{0.107}\times\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{0.4} \tag{7}$$

其中对于 $\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{0.4}$ 采用 Foote 等(1969)订正粒子下落末速度随高度的变化。其中 ρ_0 为地面标准空气密度为：$\rho_0=1.2\ \mathrm{kg\times m^{-3}}$，而 $\rho=\rho_0\times e^{-z/H}$，其中 z 为高度，H 为大气尺度高度。

式(1)中第三项 J_M 为质量连续项，计算方法为

$$J_M=\sum_{i,\,j,\,k}W_M\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{w}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2 \tag{8}$$

式(1)中第四项 J_V 为涡度项，计算方法为

$$J_v=\sum_{i,j,k}W_v\left[\frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial y}+\omega\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+w\frac{\partial w}{\partial z}\right] \tag{9}$$

其中 $\omega=\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\partial u}{\partial x}$

式(1)中其中第五项 J_S 为光滑线性约束项，计算方法为

$$J_S=\frac{1}{2}\sum_{i,j,k}\left[W_{pD}(dD)^2+W_{pv}(d\zeta)^2+W_{pw}(d^2\nabla^2 w)^2\right] \tag{10}$$

$$D=\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right),\quad \zeta=\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{11}$$

其它权重系数本文参考 Qiu 等(2006)的取值，即 $W_{uB}=W_{vB}=W_{wB}=0$，$W_{o1}=W_{o2}=0.1$，$W_M=1500$，$W_v=1.0\times 105$，$W_{pD}=10.0$，$W_{pv}=4.0$，$W_{pw}=1.0$。

1.2.4 检验方法

鉴于M1采用的雷达数量最多，其在选定区域的风场反演结果与使用全部雷达的结果相近，且所应用的三维变分风场反演方法已经过邱崇践等(1996)、Sun等(2008)以及王艳春等(2016)的验证，其可靠性得以确保。因此，本文选定M1的三维风场反演结果作为基准真值，用于检验M2与M3的风场反演性能。此外，本文还将对三步优化方法的运行时间以及反演风场结构之间的差异进行深入的定性和定量分析，以期全面评估各模式的优劣。

首先定性分析优化方法反演出来的三维风场结构，再定量分析三步优化方法的计算机程序运行时间的变化以及风速和风向差异。风向用角度来表示，把圆周的角度范围定义为−180°—180°，北风为0°，东风为90°，南风为180°(即−180°)，西风为−90°。在水平风场的不同高度上计算水平风速和水平风向的绝对误差AE (A_{E})、均方根误差RMSE (R_{MSE})和相关系数COR (C_{OR})，以优化2为例，算法如下

$$A_{\mathrm{E}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|M_{\mathrm{M2}}(i)-M_{\mathrm{M1}}(i)\right| \tag{12}$$

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}\left[M_{\mathrm{M2}}(i)-M_{\mathrm{M1}}(i)\right]^2} \tag{13}$$

$$C_{\mathrm{OR}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[M_{\mathrm{M2}}(i)-\overline{M_{\mathrm{M2}}}\right]\left[M_{\mathrm{M1}}(i)-\overline{M_{\mathrm{M1}}}\right]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n}\left[M_{\mathrm{M2}}(i)-\overline{M_{\mathrm{M2}}}\right]^2}\sqrt{\sum_{i=0}^{n}\left[M_{\mathrm{M1}}(i)-\overline{M_{\mathrm{M1}}}\right]^2}} \tag{14}$$

2 3DVAR方法在广东飑线天气中的应用效果分析

检验优化算法风场反演效果使用的个例是2022年5月13日9—10时(世界时，下同)的一次飑线事件，风场反演结果的时间分辨率为6 min。M1使用了6部S波段新一代多普勒天气雷达和22部X波段相控阵天气雷达，M2使用了6部S波段新一代多普勒天气雷达和9部X波段相控阵天气雷达，M3使用的雷达与M2相同，但对插值后的格点进行了处理，每个格点有两部雷达径向速度数据，本文以优化1风场反演结果为真值进行对比分析。图4展示了该个例9时30分的反

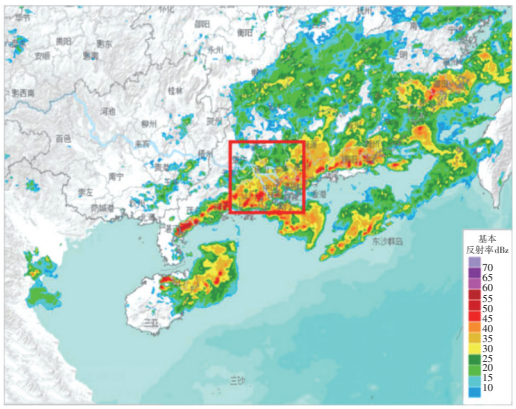


图4　2022年5月13日09:30分飑线个例华南雷达反射率拼图

Fig. 4 South China Radar reflectivity factor mosaic of a squall line case at 09:30 UTC on 13 May 2022

射率雷达拼图，此时的风场反演结果标记为个例05130930，图中红色框定区域为三次实验中进行风场反演的具体区域。

2.1 优化算法风场反演范围分析

在对比风场反演结果之前，首先对比了使用优化1—3时理论风场的反演范围。仍以2022年5月13日9时30分的飑线为例，由于M3与M2的理论风场反演范围相同，因此图5展示了M1和M2的理论风场反演范围。图5a、b、c、d展示了M1优化后的理论风场反演范围，而图5e、f、g、h则呈现了M2的风场反演范围。对比M1和M2理论风场覆盖范围，M1在1 km高度的覆盖范围略大于M2，但两种优化结果范围均较小且区域不连续。在2 km高度，大湾区陆地的大部分区域能够被较好地覆盖；在3 km高度，几乎全部陆地区域都能被覆盖；在4 km高度，海岸线内的大部分区域也能被覆盖。总体来说，在4 km以下区域，两种优化结果覆盖范围的主要差异在1 km高度，M1覆盖范围大于M2，但两种优化结果范围均不满足大范围风场反演的条件，而在2 km以上区域理论上均可进行大范围风场反演。相较于M1，M2全部采用了双雷达或多雷达风场反演方法，并且减少了雷达数量。然而，特别是在低层，M2能够进行风场反演的范围变化并不大，这进一步证明了第二步优化方法在空间上的合理性。

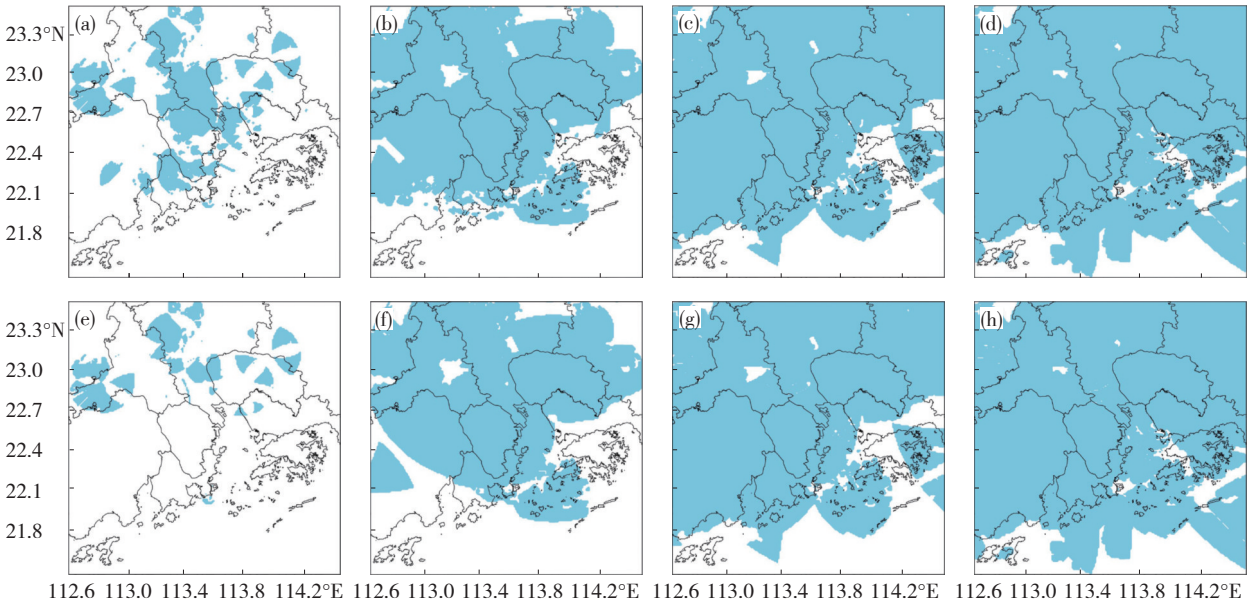


图5 M1 (a—d)和M2 (e—h)分别在1 km (a，e)、2 km (b，f)、3 km(c，g)和4 km (d，h)高度上的水平风场理论覆盖范围

Fig. 5 The theoretical coverage of the horizontal wind field of the two steps (a–d) M1 and (e–h) M2 at an altitude of (a, e) 1 km, (b,f) 2 km,(c, g) 3 km, (d, h) 4 km

风场程序运算过程中，雷达数量越多，数据量越大，运算负荷呈指数倍增长。风场程序运行实验使用的计算机配置为i7-9700f全核默频4.0 GHz，运行内存40 G。M1使用28部雷达数据反演风场，用时约9 min，M2对雷达数量进行优化，用时约7.5 min，M3在M2的基础上再对格点数据量进行优化，用时约3 min，大大提高了风场反演的效率，有利于进一步实现高密度雷达组网大范围风场反演的业务应用。

2.2 水平风场一致性与差异性分析

由于风暴在不同时刻的整体涡旋结构较为相似，故以其中一个时次的反演结果为例进行分析。图6为05130930个例三种雷达组合风场反演结果2 km高度水平风场对比图，图6a—c分别为M1、M2、M3的风场反演结果。对比图5与图6，可见理论风场反演范围与实际风场反演范围具有一致性，在实际风场反演过程中，连续方程的影响会使风场反演范围进行一定程度外推，所以风场反演结果范围会比理论范围略大。

飑线自西北向东南方向移动，根据风场反演结果，整体来看，M1在飑线移动方向前侧自西向东主要呈现出入流的西南风和西风，后侧层状云区域为西风或西北风，在飑线前侧强回波区域形成辐合带。局部来看，在113.3°E、113.7°E和114.3°E强回波中心的东北侧均呈现出气旋性流场结构，在(113.5°E，21.7°N)区域附近出现反气旋特征；M2和M3的风场反演结果与优化1相似，但M2在飑线西侧的西风强度稍弱。局部来看，在M1中，飑线西南方向的回波强度极大值区域，风向呈现出明显的气旋特征。特别是在(113.7°E，22.7°N)区域附近，风向为西北风，并带有气旋性特征，这与飑线的移动方向相一致。此外，本次飑线个例中多处出现的“局地气旋性切变”，在M2和M3中均有体现。由此可见，优化方法三个结果在风场反演上呈现出了一致性特征，均能有效捕捉飑线的风场结构和移

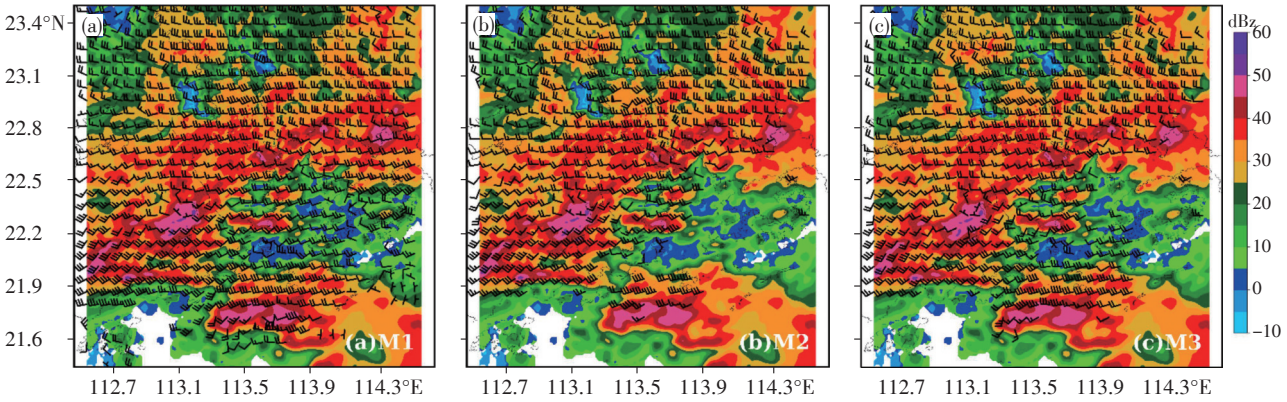


图6　05130930个例中M1 (a) 、M2 (b) 以及M3 (c)对2 km高度水平风场(箭矢)和雷达反射率(填色)反演结果对比图

Fig. 6 The (a–c) comparison diagram of horizontal wind field (barb) at 2 km height of wind field and radar reflectivity factor (shaded) retrieval results of (a) M1, (b) M2, and (3) M3

动特征。

优化方法三个结果的差异性在于，对比图6b与图6a，M2与M1相比风场结构基本相似，但M2的覆盖范围略小，尤其在飑线西南方向的强回波区域，M2展现出的风场气旋性切变特征更明显。M3 (图6c)具有更明显的气旋性切变特征，同时相较M2空间连续性更好，风场结构更为平滑。但M2 (图6b)在西南方向的风场有缺失，结合图5b和图5f来看，这与风场理论覆盖范围一致，由此推断缺失原因是雷达数量减少并删除了空间格点中只有一个雷达数据的情况。

图7为三个优化结果u、v散点密度图。图7a和图7b分别对比了M1与M2在水平方向和垂直方向的风向分量u、v，图7c和图7d则分别对比了M1和M3的u、v分量。观察散点分布，对于参数u，当M1中的值偏小

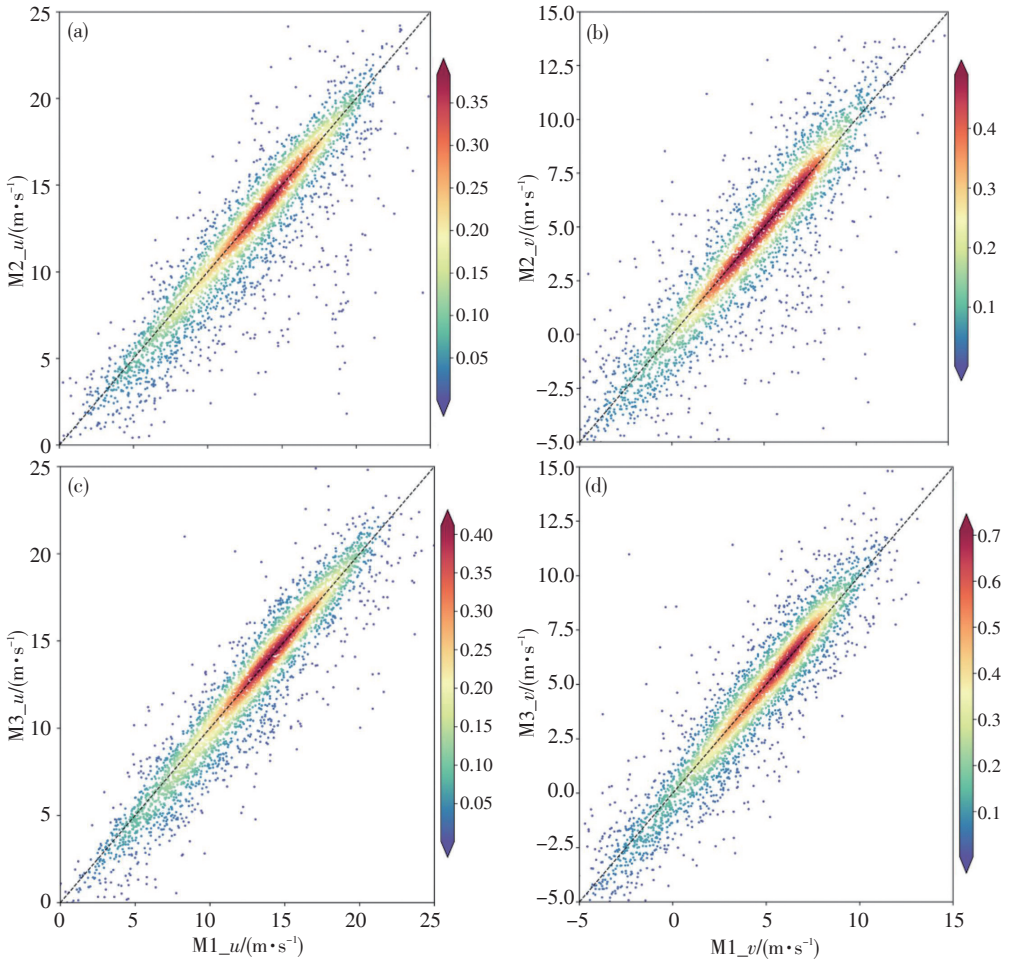


图7　M2与M1、M3与M1针对参数u (a, c)、v (b, d)的散点密度图

Fig. 7 Scatter Density Plots of (a, c) u and (b, d) v for M2 vs M1 and M3 vs M1

时，M2和M3中的值也偏小；同理，当M1中的值偏大时，M2和M3中的值也偏大。而对于参数v，M2和M3的偏差则表现得更为随机。

2.3 垂直风场差异分析

为深入探讨三个优化结果在垂直风场结构上的细微差异，本文针对飑线个例选取22.3°N方向进行垂直剖面分析，图8中风场为u、w速度合成，飑线自西北向东南方向移动，其东西方向的移动速度约为8 m·s^{-1}，为便于分析飑线的垂直结构特征，图中所示风场已减去飑线的移动速度。M1的垂直风场结果显示，在1—3 km高度有入流东风，飑线的两个强回波区在3—8 km高度存在明显上升气流，两个强回波区之间存在下沉气流。M2的垂直风场结果与M1的风场反演结果风向趋势基本相似，不同之处在于M2中两个强回波柱之间的下沉气流更强，113.1°E强回波区有明显上升气流转为下沉气流，并在2 km的低层区域也有明显的下沉气流，而M1的低层气流更为平缓，同时相比M1，在4 km高度，113.4°E处有更明显的气流辐合特征，在右侧强回柱后侧更明显的垂直涡旋特征。M3的垂直风场结果与M1和M2的趋势也基本相似，不同之处在于，在113.1°E和113.4°E出现两次明显的上升气流和下沉气流交替，并在113.5°E区域后侧转为上升气流，113.1°E区域内，下沉气流占主导，113.4°E区域内，下沉气流在3 km以上区域较为明显，上升气流和下沉气流交替，向西的上升气流和向东的上升气流在此形成辐合，气流呈现波动，在113.5°E以东区域上升气流占主导，并且在113.8°E区域，1 km高度也有明显上升气流，并形成垂直涡旋。然而，M3的风场反演结果相比M2在连续性方面稍显不足，这与雷达数据量减少有关。

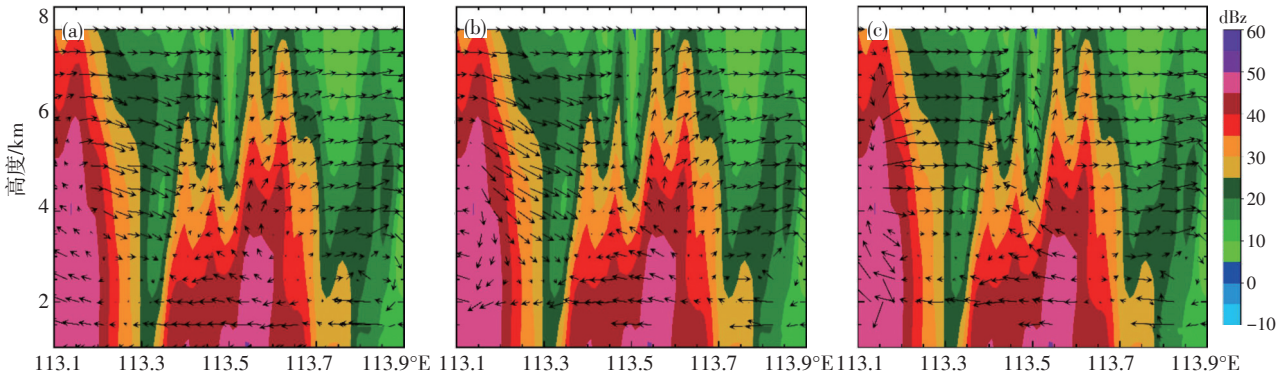


图8 M1(a)、M2(b)、M3(c)反演的05130930个例的垂直风场(箭矢)分布和雷达回波(填色)

Fig. 8 Vertical wind wind field (bard) and radar reflectivity factor (shaded) factor distribution of the case 05130930 derived from (a) M1, (b) M2, and (c) M3

3 基于优化方法的反演结果的可靠性分析

以M1的风场反演结果作为基准，本文选取了5月13日9时—10时共10个时次的广东省11部S波段新一代天气雷达27部X波段相控阵天气雷达资料，对M2和M3的风场反演结果进行了误差检验，在空间格点中，重点分析三个优化结果风场反演结果的数据。图9展示了M2和M3在水平风速和水平风向上的误差廓线。计算了10个时次的绝对误差(AE)、均方根误差(RMSE)和相关系数(COR)在不同高度的均值。从图9a可见，M2在2 km以上的高度与M1相比，水平风向误差较小，均小于10°，且各层的相关系数均很高。而M3在3 km以上的高度与M1相比，风向误差也小于10°，且同样表现出高相关系数。从图9b可见，M2相

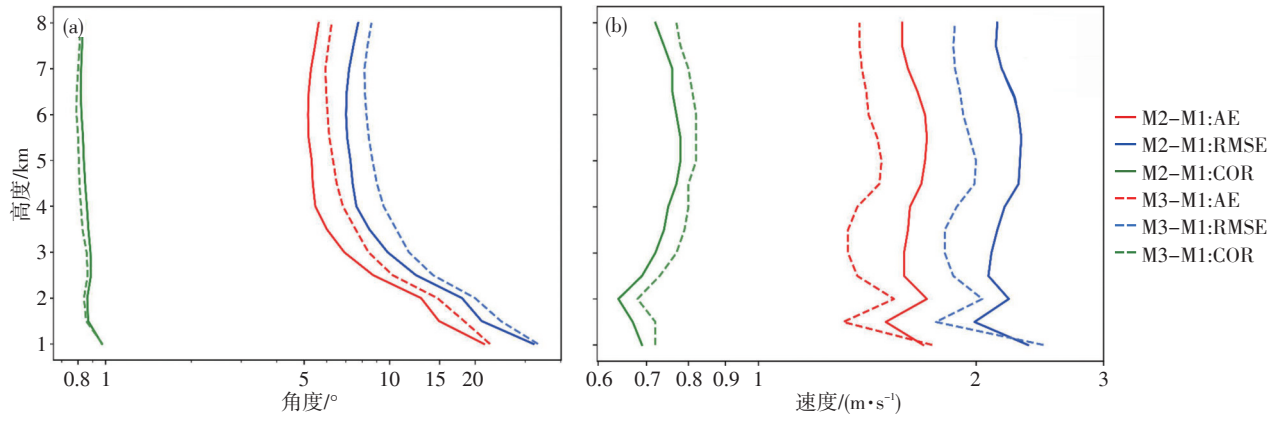


图9 M2和M3水平风速(a)和水平风向(b)的误差廓线图

Fig. 9 Error profiles of (a) horizontal wind speed and (b) horizontal wind direction of M2 and M3

较于M1,风速误差整体低于1.7 m·s^{-1}。在1 km高度,M2的风场误差小于M1,而误差最小值出现在1.5 km高度,风速的相关系数在5 km高度表现最佳。从图9c可见,M3与M1相比,风速误差基本小于1.5 m·s^{-1}。其中1 km高度误差最大,而3~3.5 km高度误差最小。从相关系数来看,风速的相关系数基本保持在0.7以上,尤其在4~7 km高度,相关系数达到或超过0.8。综上所述,M2和M3在不同高度和时次下均表现出较好的风场反演性能,但各有其误差特点和优势高度。

4 结论与讨论

为研究广东S波段和X波段高密度雷达组网大范围探测风场的能力,探讨其发展趋势、在不同天气系统中的适用性以及在实际业务工作中的应用潜力,利用大湾区的11部S波段新一代多普勒天气雷达和27部X波段相控阵天气雷达优化三维变分风场反演的方法,在插值网格内全部进行双雷达风场反演,优化过程分三步进行,每进行一步优化得到一种风场反演结果,对三个优化结果进行对比分析。以2022年5月13日广东沿海地区一次飑线过程为例,应用D-3DVAR方法对雷达网风场进行反演,并对反演结果进行对比检验。结果表明以第一步优化过程使用全部28部雷达数据反演的风场结果为真值,得到以下主要结论:

(1) 三步优化的风场反演方法相较于优化前的三维变分风场反演方法,计算风场反演的速度提高了三倍,相较于传统的双雷达风场反演方法,用到了更多的雷达,提高了双雷达反演区域的范围,得到了大湾区区域内大范围风场反演结果。在2 km高度能够较好覆盖大湾区陆地区域,在4 km高度能够覆盖海岸线内大部分区域。

(2) 三步优化的风场反演方法与初步优化的风场反演结果基本特征一致,即在水平风场和垂直风场上均能反映出飑线个例气旋性切变。通过误差分析,在两公里以上高度误差较小,风速误差基本小于1.7 m·s^{-1},风向误差基本小于10°。

(3) 经过了三步优化的风场反演方法相较于两步优化风场反演后的方法,更能突出风场局部特征,尤其在垂直风场上,在飑线强回波中心前有更明显的上升气流与下沉气流交替特征和涡旋特征。

尽管本文已从多个方面对广东高密度雷达组反演三维风场的能力进行了分析,但由于观测资料和分析方法的限制,仍存在一些不足:(1)优化的风场反演方法只对双雷达夹角进行了限制,对于雷达距离未有限定,后续可进行更精细化的风场反演研究;(2)目前风场反演的区域只针对X波段相控阵天气雷达网密集区域,对于边缘区域风场数据的利用还不够充分;(3)将多普勒雷达径向速度从球坐标系插值到直角坐标系中,会对风场结果造成一定的误差。后续工作将会对以上问题进行一些补充。

参考文献(References):

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 Meteorologica Sinica,69(1):64-78 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2011.006

郎需兴,魏鸣,葛文忠,等.2001.一种新的单多普勒雷达风场反演方法[J].气象科学,21(4):417-424. Lang X X, Wei M, Ge W Z, et al. 2001. A new method of retrieving windfield using single doppler radar [J]. Chinese Journal of Meteorological Sciences,21(4):417-424 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2001.04.005

林小红,范能柱,蔡义勇,等.2022. “利奇马”(2019)台前飑线过程演变和异常特征分析[J].暴雨灾害,41(2):192-203. Lin X L, Fan N Z, Cai Y Y, et al. 2022. Analysis of evolution and abnormal characteristics on the pre-TC squall line of typhoon Lekima (2019) [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):192-203 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.010

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]. Journal of Applied Meteorology,14(1):17-29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.01.003

潘佳文,蒋璐璐,魏鸣等.2020.一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J].气象学报,78(1):86-100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al. 2020. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):86-100 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.003

邱崇践.1996.由单Doppler雷达资料反演水平风场的简单共轭函数方法的改进方案[J].应用气象学报,(4):421-430. Qiu C J. 1996. An improvement on the simple coniugate method forretrieving the wind fields fromsingle-doppler data [J]. Journal of Applied Meteorology,7(4):421-430 (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 Meteorologica Sinica,50(1):81-90 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1992.009

王珏,肖艳姣,冷亮,等.2022. 2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析[J].暴雨灾害,41(2):119-129. Wang J, Xiao Y J, Leng L, et al. 2022. Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):119-129 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.002

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 insouthern China [J]. Torrential Rain and Disasters,33(4):305-312 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.001

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 Meteorology,35(4):1097-1101 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00022

张培昌.2000.雷达气象学[M].气象出版社. Zhang P C. 2000. Radar Meteorology [M]. China Meteorological Press (in Chinese)

赵娟,王斌,刘娟娟.2012.预分析初始扰动样本对降维投影四维变分同化性能的影响[J].气象学报,70(3):549-561. Zhao J, Wang B, Liu J J. 2012. Influence of pre-analyzing the initial perturbation sample on DRP-4DVar assimilation performance [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(3):549-561 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.045

周海光,王玉彬.2003.一次梅雨锋降水系统三维风场双、三雷达对比研究[J].气象,29(5):13-17. Zhou H G, Wang Y B. 2003. Contrastive study on three-dimensional wind field of Mei-yu precipitation using dual- and triple-Doppler radar [J]. Meteorology,29(5):13-17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2003.05.003

姬雪帅,杜晖,张曦丹,等.2023.基于 VDRAS 资料探究河北中南部一次弓状强飑线的演变和机理[J].沙漠与绿洲气象,17(3):44-51. Ji X S, Du H, Zhang X D, et al. 2023. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring in the center-south part of Hebei Province based on VDRAS data [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):44-51 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.006

Barnes S L.1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis [J]. Journal of Applied Meteorology,3(4):396-409. doi:10.1175/1520-0450(1964)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2

Bluestein H B, French M M, Popstefanija I, et al. 2010. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,91(5):579-600. doi:10.1175/2009BAMS2914.1

Bousquet O, Tabary P. 2014. Development of a nationwide real-time 3-D wind and reflectivity radar composite in France [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,140(679):611-624. doi:10.1002/qj.2163

Doviak R J, Lei L, Zhang G, et al. 2011. Comparing theory and measurements of cross-polar fields of a phased-array weather radar [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters,8(5):1002-1006. doi:10.1109/LGRS.2011.2146753

Foote G B, Toit P S D. 1969. Terminal velocity of raindrops aloft [J]. Journal of Applied Meteorology,8(2):249-253. doi:10.1175/1520-0450(1969)008<0249:TVORA>2.0.CO;2

Heinselman P L, Torres, Sebastian M. 2011. High-temporal resolution capabilities of the national weather radar testbed phased-array radar [J]. Journal appl meteor climatol,50(3):579-593. doi:10.1175/2010JAMC2588.1

Helmus J J, Collis S M. 2016. The python ARM radar toolkit (Py-ART), a library for working with weather radar data in the python programming language [J]. Journal of Open Research Software,4(1):119. doi:10.5334/jors.119

Ison R L, Collins K B, Wallis P J. 2015. Institution alising social learning: Towards systemic and adaptive governance [J]. Environmental Science & Policy,2015:105-117. doi:10.1016/j.envsci.2014.11.002

Knorr J B. 2007. Weather radar equation correction for frequency agile and phased array radars [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,43(3):1220-1227. doi:10.1109/TAES.2007.4383614

Ladue D S, Heinselman P L, Newman J F. 2010. Strengths and limitations of current radar systems for two stakeholder groups in the southern plains [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,91(7):899-910. doi:10.1175/2009BAMS2830.1

Park S G, Lee D K. 2007. Retrieval of high-resolution wind fields over the southern korean peninsula using the Doppler weather radar network [J]. Weather & Forecasting,24(1):87-103. doi:10.1175/ 2008WAF2007084.1

Potvin C K, Shapiro A, Xue M. 2011. Impact of a vertical vorticity constraint in variational Dual-Doppler wind analysis: Tests with real and simulated supercell data [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,29(29):32-49. doi:10.1175/JTECH-D-11-00019.1

Qiu C J, Shao A M, Liu S, et al. 2006. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar [J]. Meteorology & Atmospheric Physics,91:1-8. doi:10.1007/s00703-004-0093-8

Shapiro A, Ellis S, Shaw J. 1995. Single-Doppler velocity retrievals with phoenix II data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,52(9):1265-1287. doi:10.1175/1520-0469(1995)0522.0.CO;2

Shapiro A, Potvin C K, Gao J. 2009. Use of a vertical vorticity equation in variational Dual-Doppler wind analysis [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,26(10):2089-2106. doi:10.1175/2009JTECHA1256.1.

Sun J, Zhang Y. 2008. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations [J]. Monthly Weather Review,136(7). doi:10.1175/2007MWR2205.1

Zrnić D S. 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value [J]. Radio Science,22(1):76-86. doi:10.1029/RS022i001p00076

(责任编辑 闵爱荣)