

多源数据融合在台风登陆前后风速的识别应用

方奎明¹, 谈志安^{2*}, 陈莲³, 李渊¹, 陆桥¹

(1. 台州市气象局, 浙江 台州 318000; 2. 台州市路桥区气象局, 浙江 台州 318050; 3. 玉环市气象局, 浙江 台州 317600)

摘要: 基于Pydda反演算法、三次方程内插法及典型相关分析法, 利用多普勒雷达径向速度反演风场、ERA5-Land再分析风场和气象自动站风场进行风场数据融合, 并分析1909号超强台风“利奇马”登陆前后融合风场的特征。试验结果表明: 融合风场结合了各类风场的独特优势, 能够弥补高海拔地区观测资料缺乏的不足; 融合风场既包含低层风场的大风速区特征, 也包含反演风场中超强台风“利奇马”的北倾结构特征。融合风场通过低层风场的传导能够对下一时刻的地面大风区起到一定指示作用, 结合地形可以进一步判断强降水发生的大致范围, 有助于划定风雨灾害影响区域。

关键词: 多源数据; 风场反演; 风场融合; 台风风场; 风速识别

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0099-08

0 引言

台风所引发的灾害链复杂且严重, 包括台风-大风灾害链、台风-风暴潮灾害链、台风-暴雨-滑坡/崩塌/泥石流灾害链等^[1]。以往研究表明, 在一系列灾害中, 风灾最为严重^[2], 因此研究台风登陆前后的地面大风区特点及其发展规律尤为重要。

常见的用于风场研究的数据包括自动站风场数据、多普勒雷达径向风数据、再分析风场数据等^[3-4]。自动站风场数据是地面风场最真实的反映, 时间分辨率较高, 不过其空间分布呈现非均匀性, 高海拔等区域的站点分布相对较少。雷达径向风数据只包含径向风场信息, 很多研究通过雷达径向速度反演技术, 获得雷达探测范围内的三维矢量风场, 这样能够得到时空分辨率较高的风场数据, 并且有利于捕捉一些中小尺度特征, 但是, 反演过程可能会存在一定误差。另外, 由于雷达高度较高且有一定仰角, 因此反演后的风场属于较高层的风场, 与地面风场有一定的量级差异。再分析风场数

据格点分布均匀, 在风场的大尺度特征方面有较好表现, 不过其对各地域的地形特点和中小尺度的特征反映不足。此外, 不同来源的气象观测数据由于观测设备的差异, 往往也存在时空、分辨率不统一的问题。为了更好地研究真实风场的分布特点以及演变规律, 目前大多数做法是在同一时空尺度下利用数据融合技术将不同来源的风场观测数据和模式再分析风场数据进行融合, 以达到多源数据之间优势互补的目的^[5]。

根据气象数据和研究对象的不同, 需要寻找合适的数据融合方法, 一般包括相关性分析法、权重分析法、偏差订正法等^[6-8]。很多研究对风场资料进行了融合分析, 许遐祯等^[9]采用克里金(Kriging)法、克雷斯曼法和时空混合插值法分别对快速散射计(Quick Scaterometer, QuikSCAT)与地面气象测风数据进行融合分析, 由于时空混合插值法考虑了数据空间相关性和数据变化, 因此精度最高, 克雷斯曼法考虑了时间因素, 精度第二, 克里金法仅考虑了空间相关性, 精度最低, 而文中改进的克里金法由

收稿日期: 2024-03-25。

基金项目: 浙江省气象科技计划项目(2021YB32)。

作者简介: 方奎明(1996-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事数值模拟及资料同化相关研究。E-mail: 512381169@qq.com

*通信作者: 谈志安(1986-), 男, 工程师, 本科, 主要从事台风预报服务工作。E-mail: 170177494@qq.com

于增加了时间序列的插值,因此融合结果精度最高。林溢园等^[10]基于变分估计方法,对比了HY-2A/SCAT,METOP-A/ASCAT双星风场数据融合结果和增加Oceansat-2/SCAT的三星风场数据融合结果,结果表明增加数据源,融合结果更有优势。柳婧^[11]运用最优插值法对中国近海的ASCAT散射计轨道风场和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)的ERA-Interim再分析风场进行数据融合,有效提高了风场的精度、分辨率和时空连续性。王子昕等^[5]利用典型关联分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)方法对雷达风场数据、再分析风场数据和自动站风场数据进行融合,由于CCA能够通过最大化两组线性组合后的特征相关性来提取多组典型相关特征,消除了反演风场的量级误差,恢复了强对流中的气旋旋转特征,更有利于捕捉中小尺度系统。

本文将重点聚焦台风登陆前后风场的分布特征及演变规律,因此采用能更好捕捉中小尺度系统的CCA方法并融合多普勒雷达径向速度反演风场、ERA5-Land再分析风场和气象自动站风场,得到台风登陆前后更加精细化的风场结构,并从中提炼有价值的风场演变规律,为有效防范风灾的发生发展提供一定参考。

1 资料来源和方法介绍

1.1 资料来源

本研究使用的数据资料包括温州多普勒雷达径向速度数据、ERA5-Land再分析数据、台州和温州的自动站数据。温州多普勒天气雷达采用VCP21模式观测,空间分辨率为 $0.25\text{ km} \times 0.25\text{ km}$,体扫间隔为 6 min ,使用时选取最接近整点时刻的数据。ERA5-Land再分析数据时间分辨率为逐小时,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。自动站数据选取逐小时的整点数据。地图采用天地图数据。

1.2 方法介绍

将雷达径向速度反演成矢量风场,需要同时保证与自动站风场数据、再分析风场数据时空分辨率一致。本文研究思路如下:

①确定研究的台风个例和研究时段,选取时段

内整点或接近整点时刻的雷达径向风数据、自动站风场数据和再分析地面风场数据。

②利用Pydda反演技术将雷达径向速度反演成三维矢量风场,反演后的精度可自行设置,本研究中设置水平分辨率为 $0.016^\circ \times 0.02^\circ$ 。

③利用三次方程插值方法将自动站风场和再分析风场插值为与雷达反演风场具有相同空间和分辨率的格点风场。

④利用典型关联分析的技术,将格点化插值后的反演风场和再分析资料风场(作为一组多变量)与自动站风场进行数据融合。

下面对Pydda反演技术、三次方程插值方法以及典型关联分析融合的方法进行简要介绍。

1.2.1 反演方法

由于雷达径向速度只有径向信息,因此传统的反演方法通常会给出较多假定,如局地均匀风假定等,然后在强约束条件下对从地面—大气顶部的质量连续性方程进行积分来获取三维风场的信息。另一种反演方法是基于三维变分技术(Three-Dimensional Variational Data Assimilation, 3DVar)框架,其算法思路是通过最小化雷达观测、运动方程、垂直风观测剖面和高分辨率天气预报模式相关的代价函数总和来确定三维风场。算法公式如下:

$$J(V) = C_0 J_0 + C_{\text{mass}} J_{\text{mass}} + C_v J_v + C_r J_r + C_s J_s + C_{\text{model}} J_{\text{model}} + C_{\text{point}} J_{\text{point}} \quad (1)$$

式中: $J(V)$ 为总代价函数; J_0 为雷达观测项; J_{mass} 为质量连续项; J_v 为垂直涡度项; J_r 为探空观测项; J_s 为平滑项; J_{model} 为模式预报项; J_{point} 为站点观测项; C_n 为每个约束项的权重系数。不过早期的3DVar方法只能反演几部特定雷达的径向速度,适用度不高。本研究采用Pydda反演算法^[12],其原理也是基于3DVar框架,但是全套代码通过Python编写,可以添加来自任意数量的雷达观测以及天气预报模式的数据。反演之后可以得到三维的矢量风场,由于本文研究的是地面风场,因此选定最接近地面,即反演后最底层的风场作为研究对象。

1.2.2 插值方法

本文采用三次方程内插的方法将自动站风场和再分析风场进行插值。其思路是用 $\varphi(t)$ 的极小点逼近寻求函数 $f(t)$ 的极小点。多项式为:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2)$$

式中: a_0, a_1, a_2, a_3 是待定的4个系数。该方法具有较高的收敛性和稳定性,且插值函数具有较好的光滑度。

1.2.3 融合方法

本文采用CCA方法进行风场数据融合,该方法可以用来分析两组多变量之间的相关性^[13-14]。设有两组变量:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in R^{N \times p} \quad (3)$$

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_N] \in R^{N \times q} \quad (4)$$

式中: N 为样本数; p 和 q 分别为样本的维数。CCA方法可以使两组变量线性组合之间的相关系数 ρ 最大化。具体做法是将格点化后的雷达底层反演风场和ERA5-Land再分析风场作为一组多变量,气象

自动站风场作为另外一组变量,通过CCA方法求得两组变量线性组合的相关系数最大时的特征系数,最后用反演风场乘以特征系数加上再分析风场乘以特征系数,达到3种风场数据融合的目的。

2 反演及插值结果

进行个例分析前,首先分析反演及插值的效果。图1a展示的是台风登陆后某个时刻的雷达径向速度,仰角为 1.5° ,从图中可以看出低层—高层的风向均呈气旋式分布,台风中心附近也是风速大值区。图1b为利用雷达径向速度反演后同一时刻的三维矢量风场,且展示的是最底层风场分布,从图

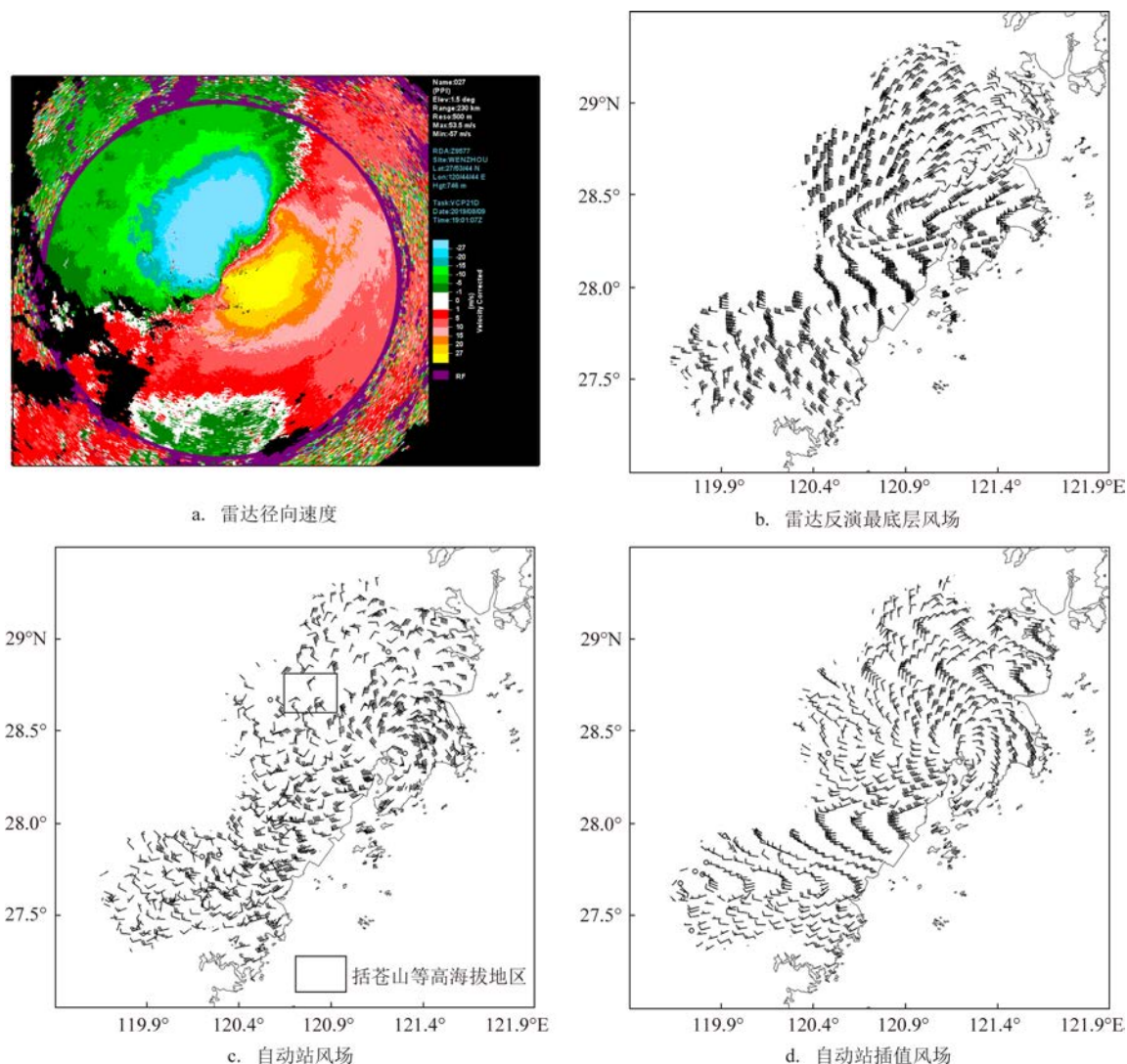


图1 雷达径向速度和不同资料的风场

Fig.1 Radar radial velocity and wind fields from different data sources

中可以看出风向也呈气旋式特征,台风西北以及东南侧径向速度大值区与反演风速大值区对应,且温州南部径向速度为正表明风向为远离雷达方向,这一点也在温州南部反演风场为西北风中得到体现。综合来说Pydda反演方法能够反演出与径向速度特征相匹配的三维风场,反演效果较好。

图1c为某一时刻自动站的风场分布,从图中可以明显看出台风的中心位置,且中心附近风向呈气旋式结构,在括苍山等高海拔地区(方框区域)的站点分布相对稀疏。图1d是利用三次方程内插后格点化的自动站风场分布,可以发现插值后的风场分布更加均匀,更好地反映台风的中心位置,且原本的一些风速大值区的特征也大致得到保留。另外,通过插值可以让原本缺乏风场信息的高海拔山区也有风场数据可以参考。总的来说三次方程内插法在最大限度保留原始风场特征的前提下,可以提供一些额外的风场信息。再分析数据的插值也可得到类似结论,此处不再赘述。

3 个例分析

3.1 台风大风特征介绍

本文选取1909号超强台风“利奇马”作为个例。台风“利奇马”造成温州—台州地区8级以上大风,影响时段为2019年8月8日06时(北京时,下同)—8月11日15时。台风于8月10日01时45分前后登陆台州温岭市城南镇,随着台风的逐渐靠近,大风站数越来越多,台风极大值集中在沿海地区,最大风速61.4 m/s出现在台州温岭市三蒜岛,即台风登陆点附近,出现时间为8月10日02时05分,为台风登陆后的20 min。考虑登陆后地形对台风强度的削弱作用,为了精细分析台风登陆前后的大风特征,选择14级及以上风影响的时段为本文主要分析时段,即2019年8月9日23时—10日03时。

3.2 融合风场分析

利用CCA方法对分析时段每隔1 h进行风场数据融合试验。下面通过台风登陆前后两个阶段开展融合风场分析。

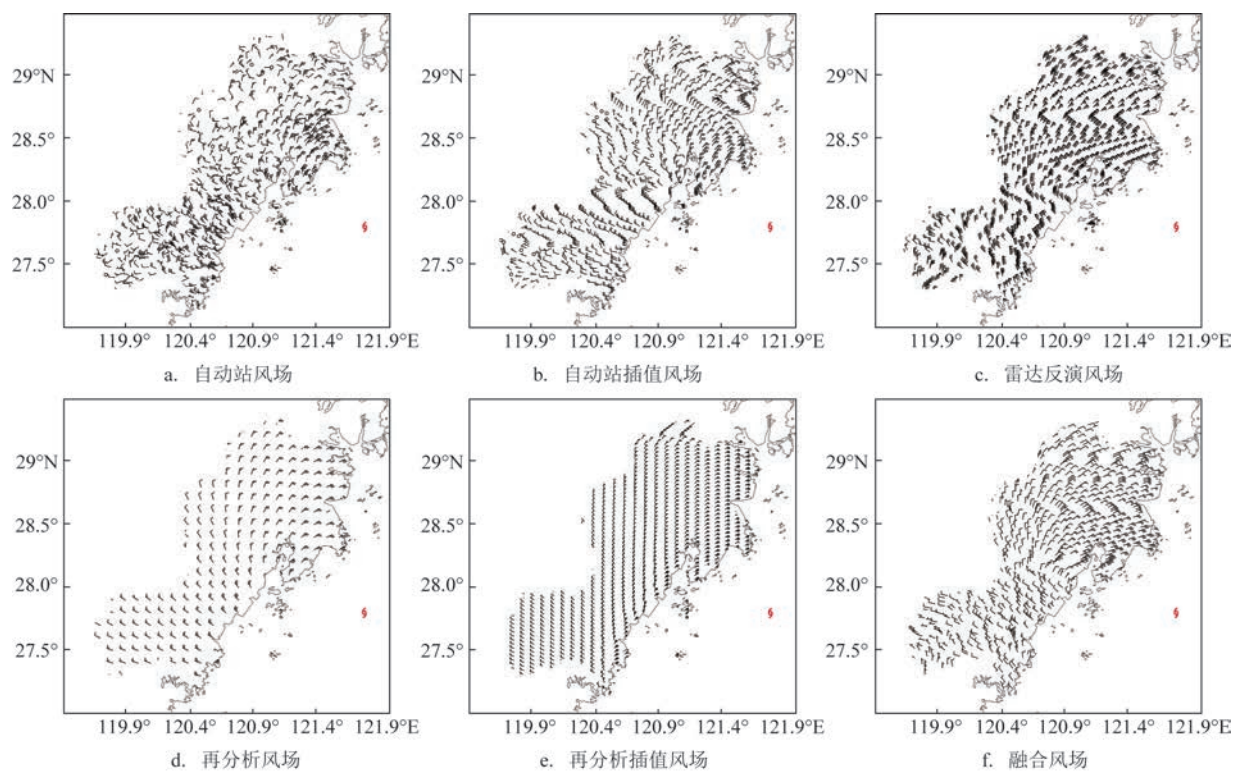
3.2.1 台风登陆前

图2为2019年8月9日23时不同风场分布图,

红色标识代表台风位置,此时台风中心位于海上。从自动站风场分布(见图2a)可以看出,此时沿海一些站点的风速较大,内陆站点风速较小,沿海站点的风向大致呈气旋式分布。从插值之后的自动站风场(见图2a)可以更加明显地看出气旋式的结构,并且仍然是沿海区域风速较大,且内陆一些高海拔山区也有风场信息可以参考。从雷达径向速度反演后三维风场最底层的风场分布可以明显看出(见图2c),相对于自动站风场,反演风场的风速较大,这是由于雷达本身观测高度较高,因此反映的是较高层的风场信息,所以风速比地面风速大;另外还可以看出,反演风向与地面风场也有些差异,如在地面风场中,温岭—玉环附近为东北偏北风,而反演风场中为东北偏东风,造成这一差异的原因可能是由于超强台风“利奇马”具有前倾结构。以往研究发现^[15-17],不同台风受环境及自身影响会呈现南倾或北倾的垂直结构,台风的倾斜结构往往也是暴雨中心出现在台风某一侧的原因。由于雷达观测高度较高,因此反演风场中超强台风“利奇马”中心的位置可能比图中标定的地面台风中心位置更偏西北,从而造成风向反演结果的一定差异。不过本研究认为,台风的前倾结构在台风登陆后能够包含台风风场的演变特征,这一点会在后文进行分析。从再分析资料以及再分析插值之后的风场分布(见图2d)可以看出,反演风向与自动站风场一致,也能反映出气旋式结构,但是风速比较均匀统一,缺少局地性的特征。从融合后的风场分布(见图2f)可以看出,反演风速更加接近自动站风场,但是反演风向却与上述反演风场较为类似,继续保留了台风前倾结构的特征。

3.2.2 台风登陆后

图3为2019年8月10日02时(台风已经登陆)不同资料风场的分布。从自动站风场(见图3a)和自动站插值风场(见图3b)均可以看出风向围绕台风中心呈现明显气旋式分布,且台风附近风速及一些高海拔地区风速较大。从反演风场(见图3c)可以看出反演风速仍然偏大,且反演风向与自动站风场的差异加大,这是由于台风登陆之后受陆地摩擦等因素影响,低层移动更慢,前倾结构更加明显,地面上台风中心位置位于温岭一带,而反演风场中反映的是较高层的信息,此处台风中心位置大概在温



注:红色标识代表台风位置,下同

图2 2019年8月9日23时不同资料风场图

Fig.2 Wind fields at 23:00 on August 9, 2019 from different data sources

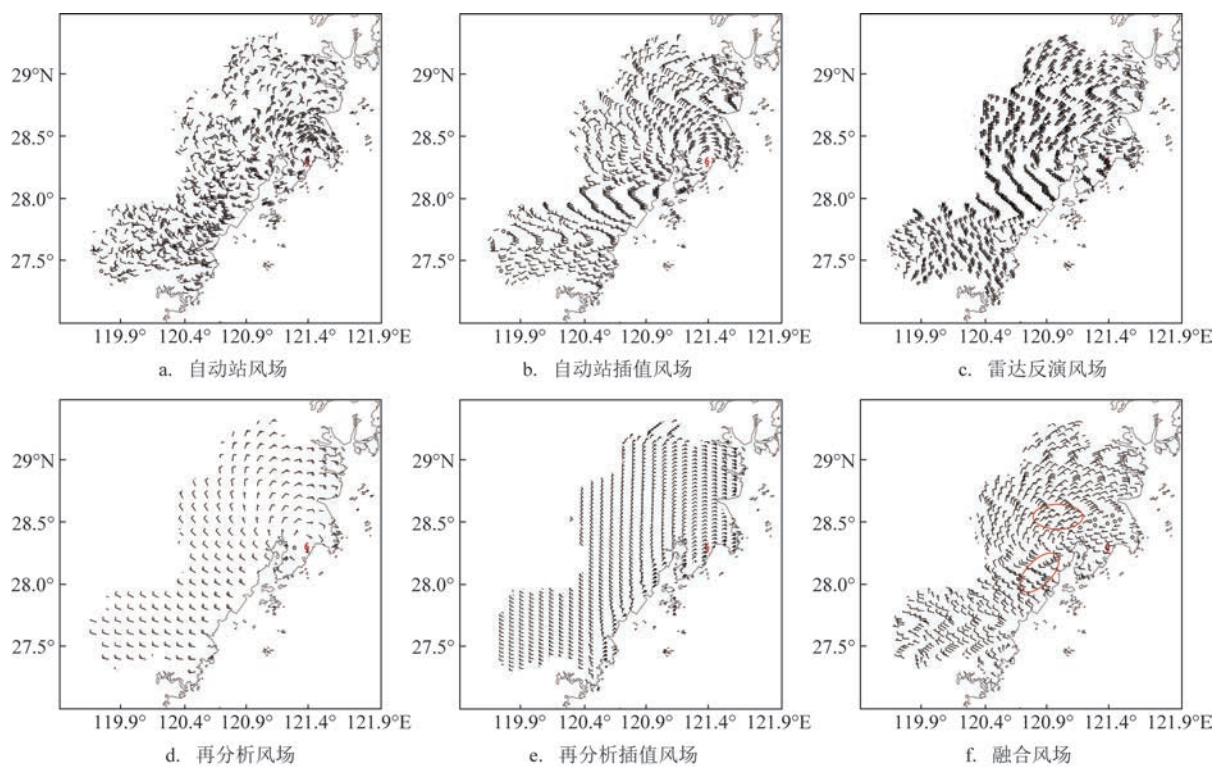


图3 2019年8月10日02时不同资料风场图

Fig.3 Wind fields at 02:00 on August 10, 2019 from different data sources

岭与乐清的交界处,因此造成了较大的风向差异。融合风场(见图3f)的风向仍然与反演风场一致,保留了台风前倾结构的特征;但是风速较自动站结果和反演风场偏小,这是由于反演风场的风速比自动站大,而再分析风场的风速比自动站小,因此使用CCA方法求得的两组特征系数均较小,导致最终的融合风速偏小。融合风场中存在一些风速大值区(见图3f红圈区域),这是因为这些地方的地面风速较大,与反演风场求得的相关特征系数也较大,因此最终融合结果也较大。总的来说,融合风速的大值区既包含了地面风速大值区的特点,也包含了台

风前倾结构的特征,对大风区的未来演变有一定指示作用。

从自动站风场分布可以看出(见图4b),此时台风位置恰好与图3f中的台风位置接近,两者的大风速区也存在一定重合。进一步分析推测这是由于融合风场代表的是较低层的风场信息,相较于地面风场有一定前倾性,并且这些低层风场信息会随着时间的逐渐传导到地面风场中,所以融合风场对下一时刻的地面大风区有一定指示性意义。因此,将图4a中的地面大风区结合地形特征进行分析,可以对图4c中的强降水落区做出大致判断。

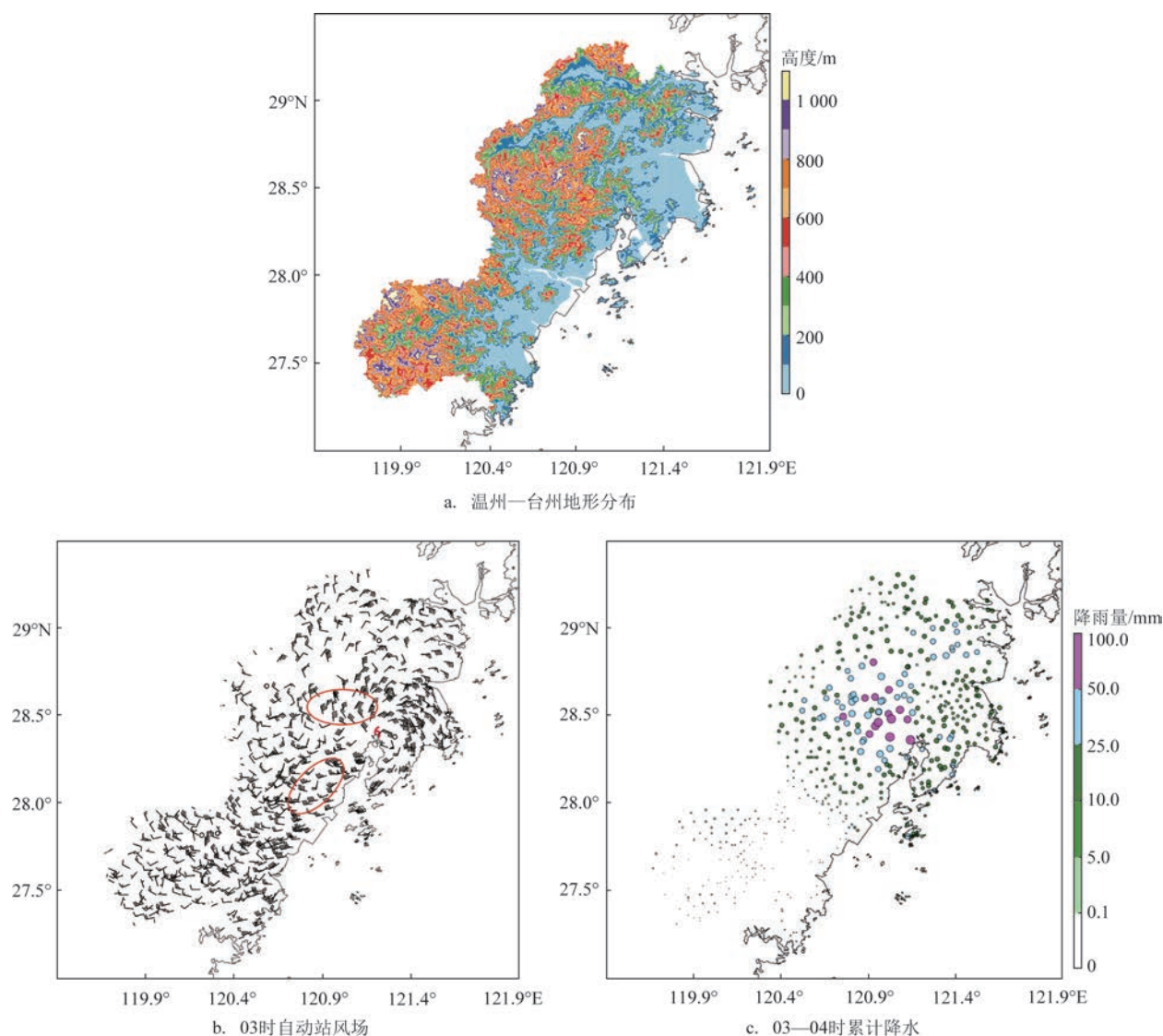


图4 2019年8月10日03时温州—台州地形、风场、雨量图

Fig.4 Topography, Wind Field, and Rainfall around Taizhou and Wenzhou at 03:00 on August 10, 2019

4 结论

本研究主要利用典型关联分析(CCA)方法对多普勒雷达径向速度反演风场、ERA5-Land再分析风场和气象自动站资料风场进行融合,并通过对1909号超强台风“利奇马”个例分析台风登陆前后融合风场对大风区特征和演变规律的反映。主要结论如下:

①Pydda反演算法可以较好地将雷达径向速度反演成三维矢量风场;三次方程内插法可以在尽量保持风场原本信息的前提下将风场插值成均匀格点数据,能够一定程度地弥补高海拔地区观测的缺乏。

②反演风场反映出1909号超强台风“利奇马”的前倾结构,且随着台风登陆,地面摩擦加大,前倾特征更加明显。

③融合风场既保留了低层大风区的特征,也保留了台风前倾结构特征,通过低层风场传导对下一时刻地面大风区的位置有一定指示意义。

④将大风区结合地形进行分析,可大致判断强降水易发区。

本研究个例的融合风场保留了各种数据特有的属性,对下一时刻大风区的指示性作用具有一定的科学性和实用性,为预知预防风雨灾害的发生提供一定帮助,值得深入探讨。下一步会采用不同的数据融合方法和更多台风个例开展研究,以期挖掘出更为普适性的结论。

参考文献:

- [1] 葛昕瑶,高路.不同地形条件下的台风灾害链致灾分析——以“利奇马”台风为例[J].福建师范大学学报(自然科学版),2020,36(5):74-83.
QI X Y, GAO L. Analysis on typhoon disaster chain under different terrain conditions: a case study of typhoon Lekima in 2019[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2020, 36(5): 74-83.
- [2] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979.
CHEN L S, DING Y H. An introduction to typhoons in the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [3] 高雅. HY-2卫星风场资料LAPS系统融合及其应用研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
GAO Y. Data fusion of HY-2 satellite sea surface wind data in LAPS and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.
- [4] 杨璐,陈敏,陈明轩,等.高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J].气象学报,2019,77(2):243-255.
YANG L, CHEN M, CHEN M X, et al. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(2): 243-255.
- [5] 王子昕,王咏青,张静,等.多源数据融合在强对流天气中地面风场的识别应用[J].高原气象,2022,41(3):790-802.
WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG J, et al. Application of multi-source data fusion in surface wind field identification in severe convective weather[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3): 790-802.
- [6] 唐焕丽,姚琴,吕晓莹,等.多源卫星融合的广东海域海面风场特征[J].遥感信息,2020,35(1):117-122.
TANG H L, YAO Q, LYU X Y, et al. Characteristics of sea surface wind field in Guangdong sea area with multi-source satellite fusion[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(1): 117-122.
- [7] 潘畅,谷军霞,徐宾,等.多源降水数据融合研究及应用进展[J].气象科技进展,2018,8(1):143-152.
PAN Y, GU J X, XU B, et al. Advances in multi-source precipitation merging research[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(1): 143-152.
- [8] 徐宾,宇婧婧,张雷,等.全球海表温度融合研究进展[J].气象科技进展,2018,8(1):164-170.
XU B, YU J J, ZHANG L, et al. Research progress of global sea surface temperature fusion[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(1): 164-170.
- [9] 许遐祯,高健,张康宇,等.基于多源数据的中国近海风场融合方法研究[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2016,15(3):325-330.
XU X Z, GAO J, ZHANG K Y, et al. Fusion method of China's offshore wind field based on multi-source data[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2016, 15(3): 325-330.
- [10] 林溢园,邹巨洪,林明森,等.多源星载微波散射计海面风场信息融合研究[J].遥感技术与应用,2017,32(1):126-132.
LIN Y Y, ZOU J H, LIN M S, et al. Study on the ocean surface wind vector fusion based on multi-source spaceborne microwave scatterometer data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 126-132.
- [11] 柳婧.基于最优插值方法的中国近海海面风场资料融合研究[D].北京:国家海洋环境预报中心,2018.
LIU J. Research on data fusion of sea surface wind in China's offshore based on optimal interpolation method[D]. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center, 2018.
- [12] JACKSON R, COLLIS S, LANG T, et al. PyDDA: a pythonic direct data assimilation framework for wind retrievals[J]. Journal of Open Research Software, 2020, 8(3): 20.
- [13] VESTERGAARD J S, NIELSEN A A. Automated invariant

- alignment to improve canonical variates in image fusion of satellite and weather radar data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(3): 701-709.
- [14] 顾高升, 葛洪伟, 周梦璇. 利用特征信息的加权典型相关分析算法[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 30(2): 280-288.
- GU G S, GE H W, ZHOU M X. Weighted canonical correlation analysis with feature information[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2018, 30(2): 280-288.
- [15] 黄元森. 2006年闽北二次台风降水的异同特征分析[C]//2006年度华东区域台风预报服务技术交流会. 上海: 中国气象局, 2006.
- HUANG Y S. Analysis of differences and similarities in the precipitation of two typhoons in Northern Fujian in 2006[C]//East China Regional Typhoon Forecasting Service Technical Exchange Conference. Shanghai: China Meteorological Administration, 2006.
- [16] 林小红, 刘爱鸣, 刘通易, 等. 2013年“苏力”与“潭美”相似路径台风大暴雨落区差异分析[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(4): 517-525.
- LIN X H, LIU A M, LIU T Y, et al. An analysis on different heavy rain areas with two typhoons Trami and Soulik with similar tracks during 2013[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(4): 517-525.
- [17] 黄莉, 黄增俊, 白龙, 等. 台风“海燕”(2013)暴雨非对称结构及中尺度特征分析[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(3): 334-344.
- HUANG L, HUANG Z J, BAI L, et al. The analysis of the asymmetric structure and the mesoscale characteristics of typhoon Haiyan(2013)[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(3): 334-344.

Application of multi-source data fusion in identification of wind speed before and after typhoon landfall

FANG Kuiming¹, TAN Zhian^{2*}, CHEN Lian³, LI Yuan¹, LU Qiao¹

(1. Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 318000, China; 2. Luqiao Meteorological Bureau, Taizhou 318050, China; 3. Yuhuan Meteorological Bureau, Taizhou 317600, China)

Abstract: Based on Pydda inversion algorithm, cubic interpolation method and typical correlation analysis method, the wind field data are fused from Doppler radial velocity inversion wind field, ERA5-Land reanalysis wind field and automatic station wind field, and the characteristics of the fused wind field before and after the landfall of the super Typhoon "Lekima" (1909) are analyzed. The results show that the fused wind field with unique advantage of each wind source overcomes the deficiency of the lack of observational data at high altitudes, which performs well both for the large wind speed areas in the low-level atmosphere and the north-dipping vertical structure of the super Typhoon "Lekima" (1909). The fusion wind field can provide some indications of the windy area on the ground at the next time step through analyzing the low-level wind field at current time step, and further predict approximate extent of heavy precipitation after combining the topography information which can be used to identify the impacting areas of wind and rain disasters.

Key words: multi-source data; wind field inversion; wind field fusion; typhoon wind field; wind speed identification