

瞬时扰动法在佛山一次台风龙卷的环境背景分析和模式预报中的应用

顾伯辉^{1,3} 黄先香^{2,3} 张少婷² 植江玲^{2,3}

(1 广东省佛山市三水区气象局, 佛山 528144; 2 广东省佛山市气象局, 佛山 528315;

3 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528315)

摘要: 结合欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5再分析数据与S2D模式输出产品, 利用瞬时扰动法先提取了2018年9月17日台风“山竹”在佛山地区诱发的台前龙卷前期“扰动天气系统”, 接着评估了业务模式对此过程前期扰动天气系统的预报能力。结果表明: 龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线的重合之处; 龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的, 此时近地面有扰动冷气团开始发展; 佛山在龙卷发生前1 h转受近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合影响, 而中高层大气受冷平流扰动影响, 大气层结变得不稳定; 负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展, 但会抑制下沉气流扰动的出现, 而正湿散度扰动增大引起的下沉气流扰动增强; 业务模式起报时间为最新时次的预报结果对全部扰动场的综合预报能力是最好的, 预报提前量有12 h。

关键词: 瞬时扰动, 业务模式, 台风龙卷, 环境背景

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.009

The Applying of Temporal Climatology Method in the Analysis of both Environmental Background and Model Forecasting for a Typhonic Tornado in Foshan

Gu Bohui^{1,3}, Huang Xianxiang^{2,3}, Zhang Shaoting², Zhi Jiangling^{2,3}

(1 Sanshui Meteorological Service, Foshan 528144 2 Foshan Meteorological Service, Foshan 528315 3 Foshan Tornado Research Center, 528315)

Abstract: Basing on the ERA5 reanalysis data and S2D model output of European Centre for Medium-Range Weather (ECMWF), this paper extracts the tornado-related anomalous systems, occurring in Foshan in September 17, 2018 induced by the typhoon ‘mangkhut’, by using temporal climatology method and evaluates the operational forecasting model. The conclusions are listed below. Firstly, this tornado was more likely located at the overlap between axis of negative anomalous height and zero line of anomalous temperature. Secondly, this tornado occurred during the decay stage of both the positive anomalous temperature in the higher and negative anomalous height in the lower, accompanying with a development of negative anomalous temperature. Thirdly, The influence of prevailing wind in Foshan, before this tornado arised, shifted to the convergence between the anomalous southeaster and southerly wind near the ground and the mid-level atmosphere above was affected by negative anomalous advection, resulting in a unstable atmospheric stratification. Fourthly, negative anomalous height and positive anomalous moist vorticity were in favor of strengthening of tornadic parent storm and suppressing the downdraft, while positive anomalous moist divergence can enhance the downdraft. Lastly, the capacity of forecast of operational forecasting model, for all fields generally, is the best when the initial forecast time is latest, which can predict this tornado in advance of 12 hours.

Keywords: temporal climatology, operational forecasting model, typhonic tornado, environmental background

收稿日期: 2020年10月9日; 修回日期: 2020年10月28日
第一作者: 顾伯辉 (1990—), Email: 317510533@qq.com
资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项 (2019B020208015); 灾害天气国家重点实验室开放课题 (2018LASW-B18); 佛山市气象局科学技术研究项目 (201913)

0 引言

龙卷是最猛烈的大气对流现象。佛山市地处亚热带的平原地带, 是龙卷多发的区域。由于龙卷具有尺度小、生命史短等特点, 预报难度极大。短临监测预警是目前减少龙卷造成人员伤亡和财产损失的最有效手段, 多普勒雷达通过探测中气旋和龙卷涡旋特征

(TVS)来对龙卷发生进行提示。然而,90%以上的中气旋伴随有强雹(直径 $>2\text{ cm}$)、强风及龙卷等灾害性天气,但仅有20%~25%左右的中气旋发展成龙卷。此外,当雷达探测到TVS时,通常已出现或即将出现龙卷,这给提高龙卷预警发布的提前量和准确性造成了很大困难^[1]。因此,如何提高龙卷的预报预警提前量对防灾减灾十分重要。

数值模式已经成为了世界各气象部门的主要预测工具,尤其是强对流天气的短临监测预警。虽然龙卷警报通常限制在10~20 min,长期大量的研究仍然在寻找有利于龙卷可能发生的天气(次天气)尺度早期信号^[2-4]。这样的天气(次天气)尺度环境条件受到研究和预报人员的广泛关注^[5-8]。这些研究使用传统天气图和动力-热动力学的诊断方法,来分析龙卷爆发的例子。然而,由于传统天气图和直接观测变量揭示的天气尺度系统也难以精确地确定龙卷的爆发,这些环境条件研究的结果在预报业务中还没有得到真正的应用^[9]。综上,如何在数值模式里面提取有效的信息对龙卷发展的扰动系统进行预报是关键的科学问题。

寻找有明确天气学和动力意义的简单、快捷和方便的强对流指标量,对科研成果应用到强对流预警业务有实质性的帮助。近年来有研究将传统天气图上的变量分解为瞬时气候和扰动后发现,扰动分量及其指标量对多种地面发生的极端天气时间有指示意义^[10-12]。钱维宏等^[13-14]利用该方法进一步分析和评估业务模式对两个江淮龙卷个例发生前的扰动系统,结果表明欧洲中心数值(EC)模式可以提前54 h预报出龙卷扰动系统,美国全球预报模式(GFS)则可以提前18 h。类似地,钱维宏将该方法也应用到暴雨环境背景扰动系统的预报中,取得了良好的预报效果。因此,应用瞬时扰动法提高强对流预报显示出良好的应用前景。然而,西风带龙卷与台风龙卷之间存在诸多区别,例如台风龙卷一般由微超级单体产生,具有更高的风暴相对螺旋度以及低空垂直切变,但对流有效位能明显偏小等。此外,由于影响江淮地区与珠三角地区的下垫面以及天气尺度系统也并不完全相同,常用的业务数值模式对佛山地区产生台风龙卷的扰动天气系统的预报能力如何还不清楚。因此,本文基于瞬时扰动法分析佛山台风龙卷环境背景的扰动指标量以及评估业务模式对龙卷发生前的扰动系统的预报能力。

1 资料和方法

本研究使用到的模式数据为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的预报资料,从每天00时(北京时间,下同)和12时起报的2018年9月17日预报,时间

间隔为6 h,水平空间分辨率是 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬格点,垂直分17层。再分析数据使用ECMWF的ERA5数据集,时间间隔为1 h,水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬格点,垂直分37层。

分析的个例时间为2018年9月17日09:37—10:00,在登陆台风“山竹”外围螺旋雨带中,具体位置在广东省佛山市三水区到肇庆市四会区发生的EF2级强龙卷。龙卷路径长度18 km,持续时间23 min,平均时速47 km/h,导致不少建筑物损毁。本次过程佛山市进行了龙卷预警试验,提前37 min发布了龙卷预警,龙卷没有造成人员伤亡^[7]。

由于传统天气分解一般使用正交分解方法,但不同区域和分解函数的不同,分解的波动量也不同。为了避免这种不唯一,Qian等^[15]把任一大气变量场分解为瞬变气候分量场和相对瞬变气候的瞬时扰动场两部分,后者可以反映扰动天气系统。理论上,基于扰动场的“扰动天气系统”是产生极端天气事件的直接原因,所以通过分解得到的扰动天气场可以作为龙卷发生发展的环境背景预报基础。

本文拟通过瞬时扰动方法(有关原理参见文献[13-15])分解台风发生当日和逐时的水平和垂直方向上的高度、温度、风速风向、湿涡度和湿散度的扰动场,以期分析热动力扰动条件对台风龙卷形成的指示作用以及数值模式对这些扰动天气系统的预报能力。

2 佛山台风龙卷扰动环境场分析

2.1 台风“山竹”概况

1822号台风“山竹”最早于9月7日10时在西太平洋生成,16日17时以强台风级在广东台山海宴镇登陆,登陆时中心附近最大风力14级(45 m/s),登陆后维持西北偏西方向移动,强度不断减弱,17日14时减弱为热带低压。佛山市三水区白坭镇龙卷发生在17日09:37前后、距离台风登陆已有16.5 h,此时台风中心位于广西南宁市境内,强度为热带风暴级。龙卷产生于距台风“山竹”中心东北象限约490 km处螺旋雨带中的一个微型超级单体^[7]。

2.2 实况

台风外围螺旋雨带的龙卷一般出现在台风的东北侧象限^[16-17]。2018年9月17日,台风“山竹”西侧外围螺旋雨带触发的龙卷位于(23°N , 112.75°E)附近,雷达回波显示强对流雨带呈南北带状分布^[7]。因此,沿着 112.75°E ,剖面分析了17日08—10时温度扰动、高度扰动和垂直速度的垂直分布随时间的变化(图1)。在08时(图1a)在龙卷发生地南北两侧的低层大气上均有

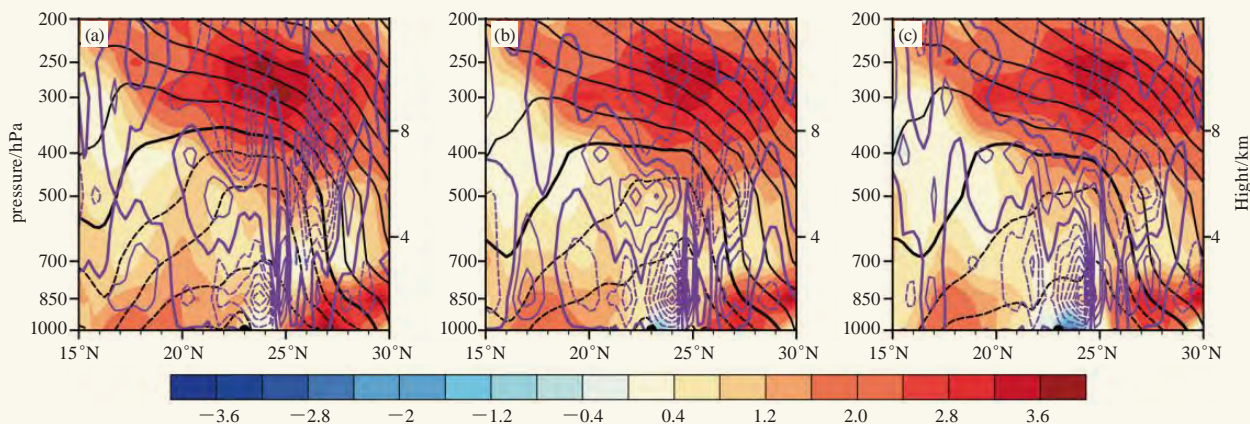


图1 基于ERA5资料沿着112.75°E做出的剖面图，分别是2018年9月17日08时(a)、09时(b)、10时(c) (北京时)的温度扰动场(阴影填色，单位： $^{\circ}\text{C}$)、高度扰动场(黑色等值线，单位： gpm)和垂直速度扰动场(紫色等值线，单位： $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)。实线为正值，虚线为负值，黑色实心半圆为龙卷发生纬度

Fig. 1 Vertical-latitude cross sections of temperature anomalies (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$), height anomalies (black contour, unit: gpm) and vertical velocity anomalies (purple contour, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) along 112.75°E at (a) 08:00 BT, (b) 09:00 BT, and (c) 10:00 BT 17 September 2018 based on ERA5 reanalysis. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. The black solid semi-circle indicates the location of tornado

明显扰动暖气团，在上空也有显著的扰动暖气团。高空扰动暖气团对应中低层有明显的负高度扰动，近地面的负高度扰动中心内有弱的下沉扰动气流出现，北侧低空有明显的上升扰动气流，对应近地面有弱的扰动冷气团出现。09时(图1b)高空暖气团略有减弱北移，对应的中低层负高度扰动也有所减弱。然而，负高度扰动中心内下沉扰动气流、北侧上升扰动气流和扰动冷气团都继续增强，扰动冷暖气团南侧交汇处基本与负高度扰动轴线(虚线)重合。10时(图1c)高空暖气团继续减弱北移，中低层负高度扰动也减弱，但上升气流和扰动冷气团进一步增强，减弱了南侧的下沉气流。综上所述，高空扰动暖气团随时间减弱北移，引起中低空负高度扰动的减弱，但负高度扰动轴线处伴随的上升气流，不仅引起低空近地面扰动冷气团的发展，还使得南侧近地面出现下沉气流，反映了台风内微超级单体的发展过程，下沉气流北侧即为龙卷发生地。因此，台风高空扰动暖气团以及中低空对应的负高度扰动是诱发龙卷的重要原因，龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线重合之处。

图2给出了龙卷发生地上空的温度扰动和高度扰动的垂直分布在2018年9月15—19日随时间的变化，发现在15日08时—16日08时850 hPa以下存在明显的扰动暖气团，但16日08时低层扰动暖气团消失，500 hPa以上开始出现扰动暖气团并逐渐增强，在16日下午达到最强，此后不断减弱。对应地，负高度扰动从15日08时不断发展增强，并在16日下午达到最强，此后不断减弱，17日午后基本消失。实际上，温度扰动与高

度扰动随时间的变化过程是与台风移动密切相关的，反映的是台风来临前的外围环流温压场扰动形势。15日08时—16日08时，受台风“山竹”外围下沉气流影响，佛山地区晴天为主，低层扰动暖气团和正高度

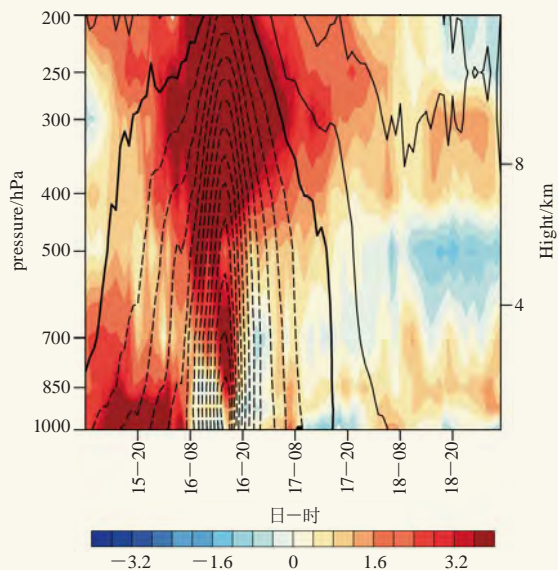


图2 基于ERA5资料的2018年9月15日08时—19日07时龙卷发生地上空1 h间隔的高度扰动(等值线，单位： gpm)和温度扰动(阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$)随时间的变化。黑色实心半圆是龙卷发生时间

Fig. 2 Vertical-time distribution of height anomalies (black contour, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$) over the location of tornado from 8:00 15th to 7:00 19th September 2018 with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Black solid semi-circle indicates the arising time of tornado

扰动发展，16日08—17时台风不断移近，受外围螺旋雨带影响佛山上空云量增多，低空扰动暖气团减弱，中高空扰动暖气团和正高度扰动迅速发展。16日17时台风登陆广东台山，此后向西北向移动，强度逐渐减弱，温度扰动和高度扰动也相应减弱。值得注意的是，龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的，在正温度扰动和正高度扰动的发展以及最强盛阶段并没有发生，而且龙卷发生时对应近地面有扰动冷气团开始发展。这里存在着台风大尺度的温压场扰动结构和有利于龙卷发生的中小尺度温压场扰动。

台风龙卷的生成，不仅与中气旋发展增强有关

系，也与地面辐合或者气旋性涡旋有关系^[18]。高空槽引导的冷空气可以加强登陆后的台风强度，因此也更容易激发出龙卷^[16, 19]。进一步分析了17日02—10时台风“山竹”登陆之后1000 hPa水平风扰动和250 hPa温度平流扰动的逐时变化（图3）。结果表明，1000 hPa风气旋式切变最大的区域基本维持在22°—23°N、110°—114°E，随着台风往西北向移动并逐渐远离佛山，17日08—10时佛山地区也逐渐转成受较强的东南风和偏南风扰动辐合控制，23°N附近的气旋式切变已经明显减弱。龙卷发生地佛山三水白坭金竹村上空持续有冷平流扰动，有利于该处持续有深对流发生。通过分析龙卷发生地上空的温度平流扰动垂直分布随时

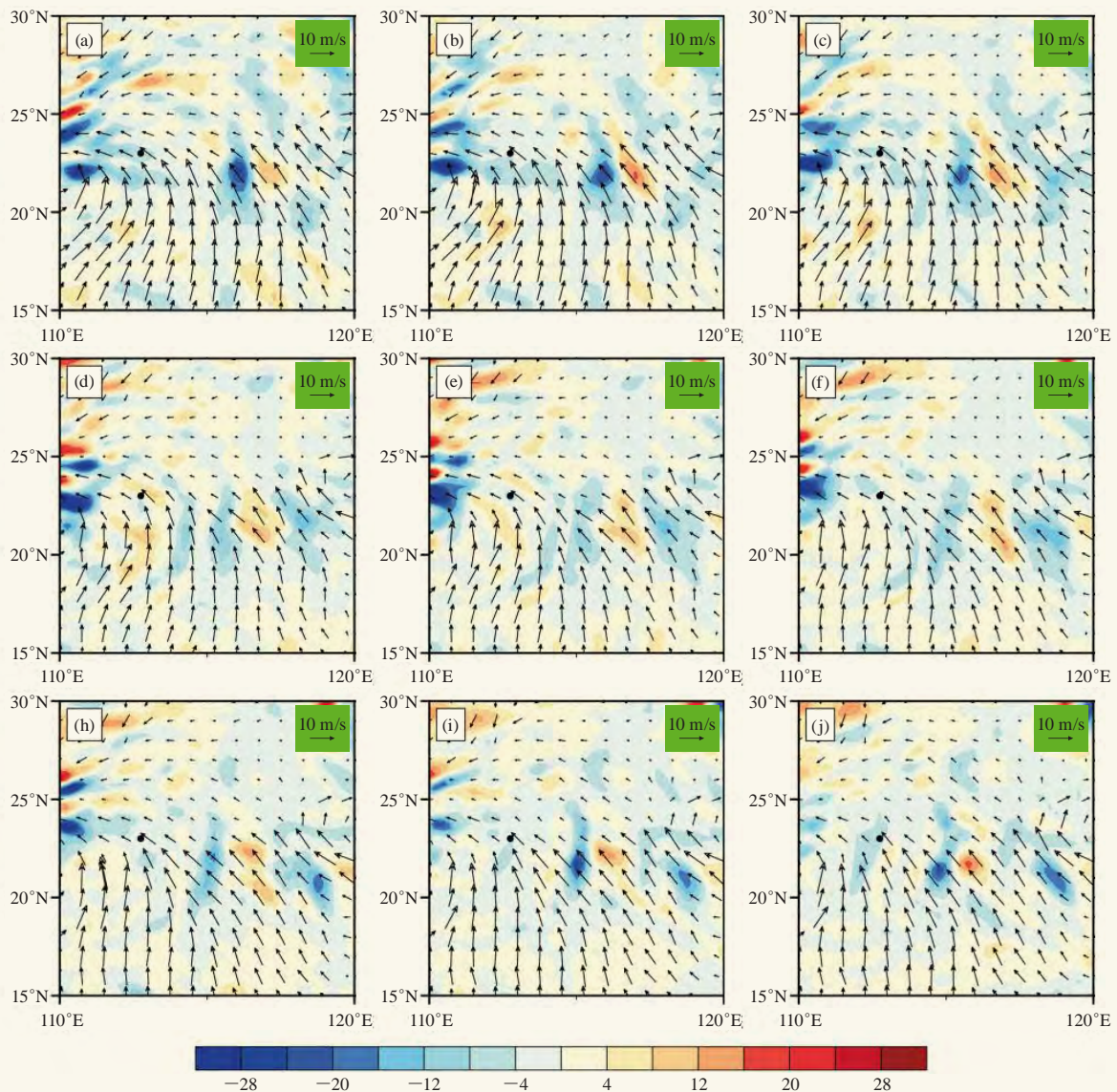


图3 基于ERA5资料在17日02—10时（a—j）的1000 hPa水平风扰动（单位：m/s）和250 hPa温度平流扰动的逐时变化（阴影，单位： $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。黑色点为龙卷发生地（23°N，112.75°E）

Fig. 3 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000 hPa and temperature advection anomalies (shading, unit: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at 250 hPa from 2:00 to 10:00 17 September 2018 (a-j) with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Black dot indicates the location of tornado

间的变化(图4),发现低层大气在台风登陆前主要以暖平流扰动为主,中层以冷平流扰动为主,但由于台风外围的下沉气流影响以及相对湿度持续偏低,始终无法产生对流。在台风登陆之后到16日上半夜,低层大气开始转受冷平流扰动,中高层大气转受暖平流扰动,大气层结趋于稳定。17日开始,低层大气又转受暖平流扰动,这种暖平流扰动主要是由东南风和偏南风扰动带来的,中层大气受弱冷平流扰动影响,层结处于不稳定状态。因此,台风登陆之后,近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合有利于龙卷触底,中高层大气受冷平流扰动和低层大气受暖平流扰动影响的大气不稳定层结配置有利于深对流的发展,这些热力扰动结构都非常有利于台风龙卷的出现。

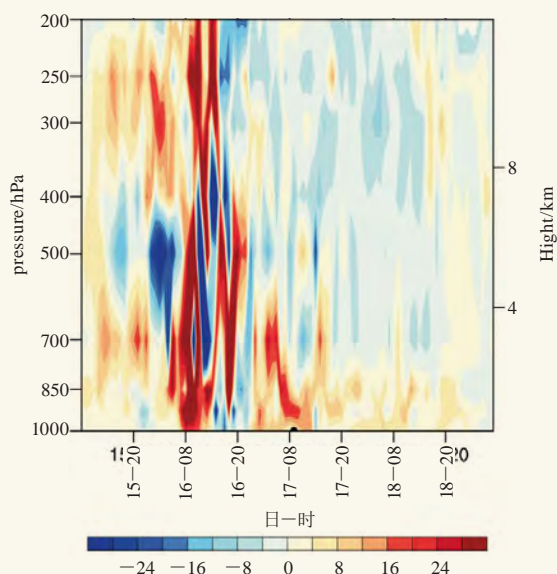


图4 基于ERA5资料的2018年9月15日08时—19日07时龙卷发生地上空1 h间隔的温度平流扰动(阴影,单位: $10^{-5} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) 随时间的变化。黑色实心半圆是龙卷发生时间
Fig. 4 Vertical-time distribution of temperature advection anomalies (shading, unit: $10^{-5} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) from 8:00 15th to 10:00 17th September 2018 with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Black solid semi-circle indicates the location of tornado

湿涡度和湿散度是反映强对流发生背景的热动力结构的两个综合指标, Qian等^[10, 14]应用这两个指标对中国东部地区的区域暴雨和2015年阜宁龙卷进行环境背景分析,效果良好。造成台风龙卷的微超级单体,水平尺度和伸展高度都很低^[20],因此对“扰动天气系统”的低空要素场进行分析。图3的研究结论表明,在17日08—10时佛山地区已经由受气旋性弯曲扰动气流转为受较强的东南风和偏南风扰动气流影响。由于地面辐合配合中气旋下降是龙卷触底的关键过程,而下沉气流又是中气旋下降的重要原因^[18]。根据图1的

分布,引起龙卷生成的下沉气流出现在近地面,因此先分析了17日08—10时1000 hPa垂直速度和925 hPa的湿散度(图5a—5c),结果发现,在08时的龙卷发生地上空,虽然有较强的扰动气流辐合,但正湿散度扰动较弱,对应的下沉气流也较弱。09时,正湿散度扰动增强,对应的下沉气流也有所增强,龙卷发生地位于正、负湿散度扰动交界处。10时,龙卷所在地附近的湿散度扰动变为负值,对应的下沉气流消失,变为上升气流。

接着分析3个时次对应的925 hPa湿涡度扰动和925 hPa高度扰动(图5d—5e),发现龙卷发生地上空在3个时次都处于负高度扰动轴线中,对应有正湿涡度扰动,但负高度扰动随时间减弱西退,正湿涡度在09时比08时要强,10时有所减弱。虽然负高度扰动和正湿涡度扰动有利于微超级单体的发生发展,但对下沉气流起抑制作用。从图5a—5c可知,并不是所有正湿散度都对应下沉气流扰动,说明下沉气流的出现是各种力的综合结果。综上所述,负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展,但会抑制下沉气流扰动的出现,而正湿散度扰动增大引起的下沉气流扰动增强。

2.3 模式预报

发生在台风外围螺旋雨带上的龙卷致灾往往具有叠加效应。虽然目前业内广泛认可的临近预报时段是0~6 h,实际上大多数情况下对雷暴和强对流能够真正做到定点、定时和定性的有效预报时效大多数情况下不超过1 h,而对龙卷的提前预警时间平均只有10~20 min,这给防灾减灾工作的开展制造了很大困难^[21]。毫无疑问,数值模式是增加对流预报预警提前量最具有潜力的工具,但模式对“扰动天气系统”的预测能力如何仍不清楚。数值天气预报模式对台风龙卷环境背景的“扰动天气系统”的预测能力,决定了台风龙卷的潜势预报技巧。为了考察常用业务数值模式(EC S2D)对龙卷发生前的“扰动天气系统”预测能力,对温度扰动、高度扰动和垂直速度扰动沿着龙卷发生经度进行垂直剖面,从起报时间为11日08时—16日20时,预报时次为17日08时的12个预报结果中,选取与图1a垂直结构特征相近的4个预报结果(图6),分别是11日08时、15日08时、16日08时和16日20时,对应的预报时长为144 h、48 h、24 h和12 h。它们都具有龙卷发生地的偏北高空有扰动暖气团,且处于负高度扰动中心和扰动冷暖气团对比零线之中等特征。其他时次无法预报出17日08日基本特征的主要原因是预报的扰动暖气团位置偏南,近地面负

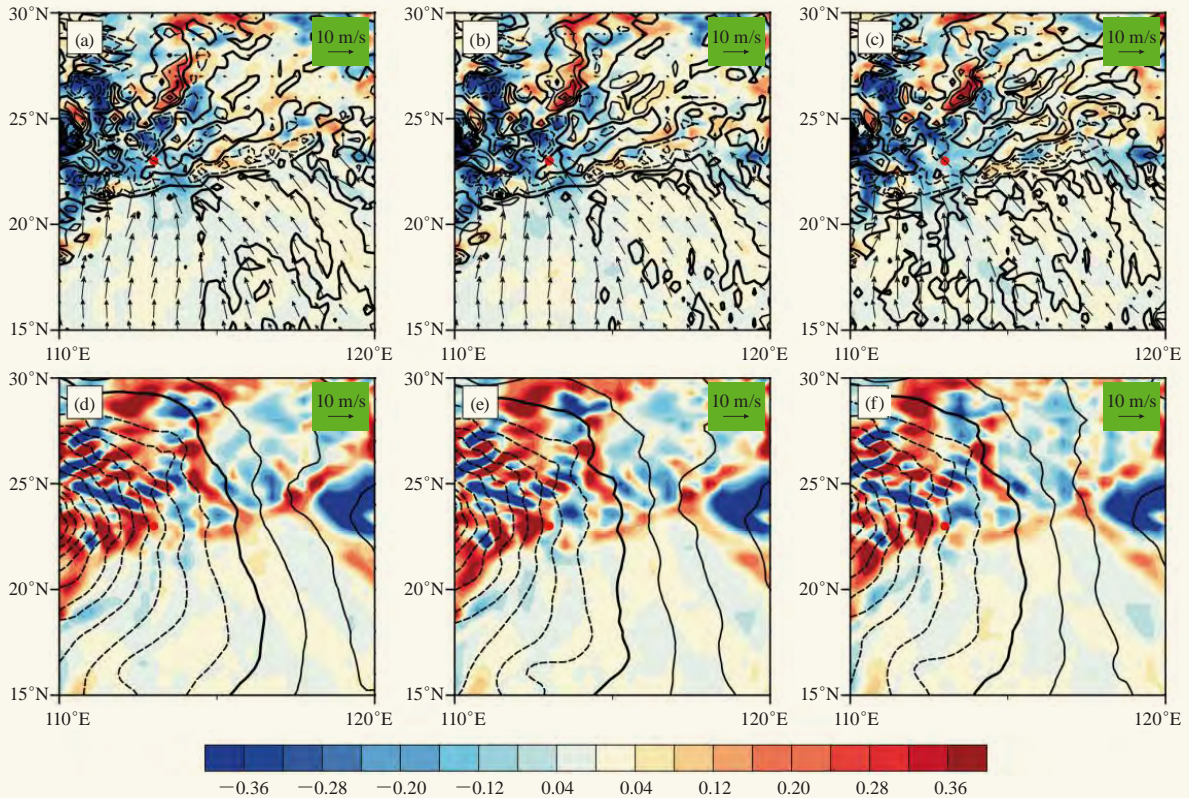


图5 基于ERA5数据的1000 hPa风场扰动 (单位: m/s)、1000 hPa垂直速度扰动 (等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和925 hPa湿散度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 在17日08时 (a)、09时 (b) 和10时 (c) 的分布, 以及对应三个时刻 (d—f) 925 hPa高度扰动 (等值线, 单位: gpm) 和925 hPa湿涡度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。d—f 中, 实线为正值, 虚线为负值。红色圆点是龙卷发生地

Fig. 5 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000hPa, vertical velocity anomalies (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa and moist divergence anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925hPa at (a) 08:00 BT, (b) 09:00 BT, and (c)10:00 BT 17 September 2018 based on ERA5 reanalysis. (d-f) are height anomalies (contour, unit: gpm) at 925 hPa and moist vorticity (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa corresponding to (a-c). Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Red dot indicates the location of tornado

高度扰动也对应偏南。这4个预报结果, 虽然可以基本把径向的垂直热动力结构特征预报出来, 但负高度扰动仅存在于850 hPa以下, 明显比实况偏弱, 使得龙卷南侧下沉气流扰动也明显偏强。此外, 由于高空正温度扰动的强度以及位置与实况基本吻合, 因此与图1a最接近的是图6a的预报结果。以上分析说明, 虽然业务数值模式对这次台风龙卷的温度扰动和高度扰动最早可以提前144 h进行预报, 但高层大气温度梯度刻画能力仍然有待改进。

类似地, 选取了模式预测的1000 hPa风场扰动、1000 hPa垂直速度扰动和925 hPa湿散度扰动分布与图5a相近的4个预报结果, 起报时间分别是11日08时、11日20时、15日08时和16日20时 (图7)。4个预报结果都符合23°N附近有最大风切, 龙卷发生地附近有较强的偏南风 and 东南风扰动辐合且东侧有弱湿散度平流的基本特征。最接近图5a的预报结果图7b, 起报时间

是11日20时, 预报提前量为132 h, 另外3个是144 h、48 h和12 h。其他预报结果一部分没有预报出龙卷发生地东侧正湿散度, 一部分没有预报出较强的东南风和偏南风扰动辐合, 可能与台风运动路径和东南风预报偏差较大有关 (图略)。接着选取了模式预测的925 hPa高度扰动和925 hPa湿涡度扰动分布与图5d相近的4个预报结果 (图8), 这些结果基本符合龙卷发生地上空存在负高度扰动轴线以及正湿涡度的特征。图8a—8c的高度扰动的强度明显弱于实况, 对应的正湿涡度扰动也偏弱。图8d是最接近图5d的预报结果, 起报时间是16日20时, 预报提前量是12 h, 另外3个分别为72 h、60 h和36 h。

无论是热动力扰动的纬向垂直分布 (图6), 还是低空风场扰动、湿散度、湿涡度以及高度扰动 (图7和图8), 都是只有4个预报结果符合对应实况的基本特征, 而且这4个预报结果的起报时间并不连续,

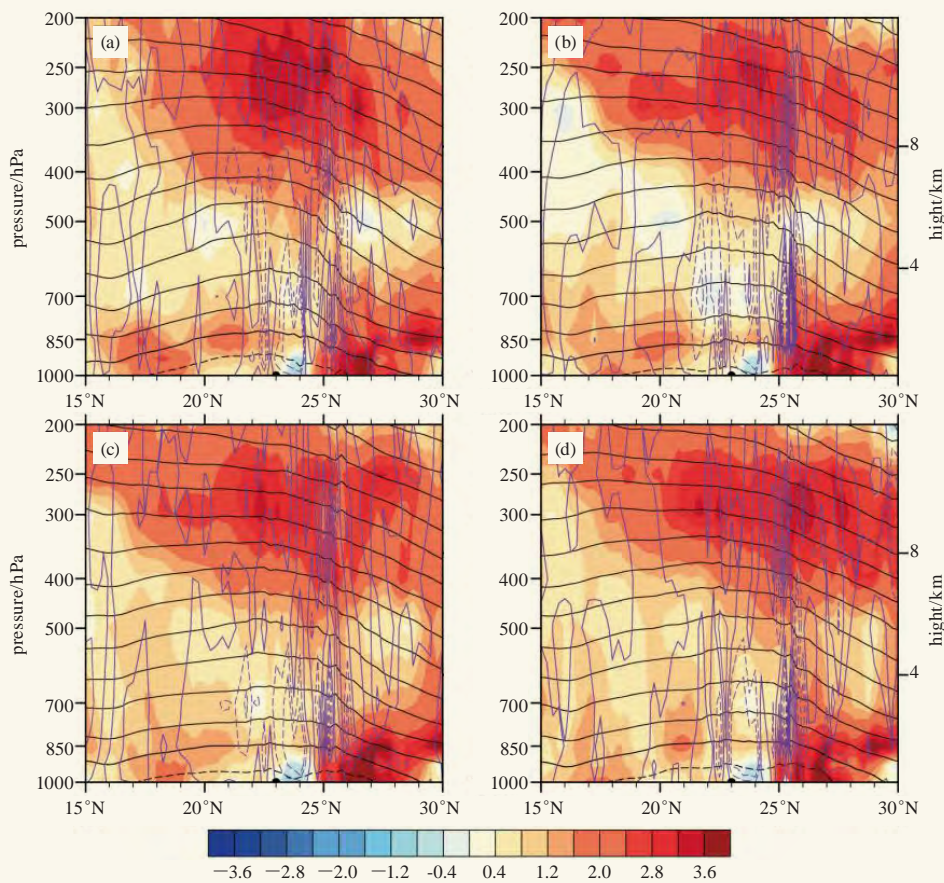


图6 同图1，但数据为EC S2D模式输出结果，时间分别是11日08时 (a)、15日08时 (b)、16日08时 (c) 和16日20时 (d)。为了突出下沉气流，a—c中，等值线只显示正值。d—f中，虚线为负值，实线为正值。红色圆点是龙卷发生地
Fig. 6 Same as Fig.1, but the data used is basing on the output of EC S2D operational model and times are (a) 08:00 11th, (b) 08:00 15th, (c) 08:00 16th and (d) 20:00 16th, respectively. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Black solid semi-circle indicates the location of tornado

与实况最接近的并不一定是最临近的预报结果。需要指出的是，虽然这次龙卷是在台风登陆之后生成的，但温度扰动和高度扰动的纬向垂直分布以及近地面风场扰动和湿散度扰动，与实况最接近的预报结果对应的起报时间，都是在台风登陆之前，说明模式对台风龙卷的预报性能不够稳定，这在一定程度上影响了台风龙卷的潜势预报能力。究其原因，可能是因为业务数值模式目前对高层温度扰动、低层的高度扰动和风场扰动等物理过程刻画能力仍然不足，同时对台风登陆后的路径和强度的预测有偏差。综合来看，起报时间为16日20时的预报结果预测龙卷发生前的“扰动天气系统”基本特征都与实况接近（图6—图8），可以有12 h的预报提前量，比分析实况数据得到“扰动天气系统”的提前量要大大增加。因此，预报的时候我们不仅要重点关注最新时次的预报结果，基于瞬时扰动法分解出影响台风龙卷发生发展的“扰动天气系统”，同时也要配合实况资料去订正预报结果。通过

确定“扰动天气系统”的发生发展时间和落区，可以在一定程度上提高台风龙卷的潜势预报技巧和预警准确率。

3 结论

传统的大气变量场分解，一般是基于正交分解或者滤波等数学方法进行，以此得到不同时空尺度的波动信息。然而，这些分解或者滤波一般都是针对某些区域进行的，分解函数的选取不同，分解结果也并不唯一性，这是纯数学分解伴随的问题。因此，本研究采用Qian等^[15]提出的分解方法，把任一大气变量场分解为瞬变气候分量场和相对瞬变气候的瞬时扰动场两个部分，利用瞬时扰动部分对2018年9月17日台风“山竹”在佛山市触发的EF2级强龙卷的环境背景进行分析，研究扰动天气系统热动力结构特征。该方法具有明显的物理意义，能够更好的解释扰动天气系统对龙卷生成的影响。本文先基于ERA5再分析数据，分析了实况中“扰动天气系统”的热动力垂直结构特

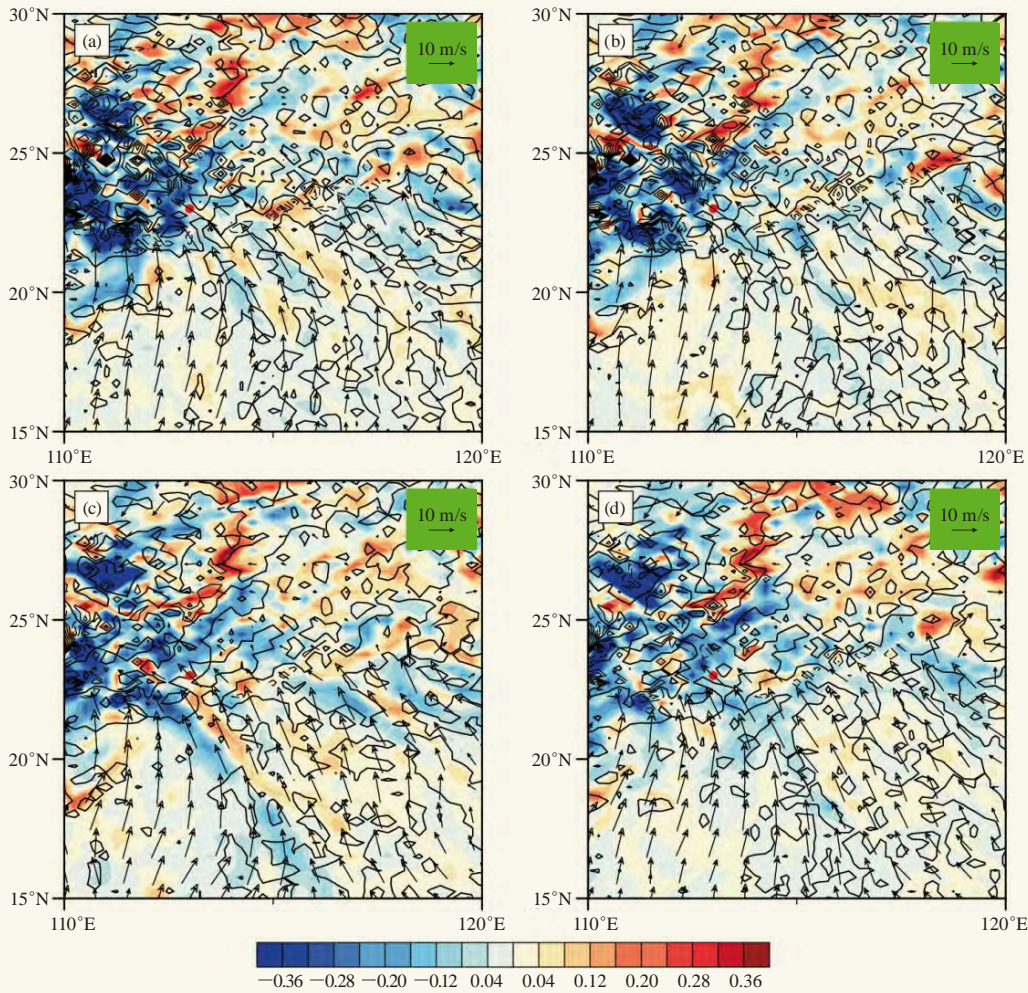


图7 基于EC S2D模式输出结果的1000 hPa风场扰动 (单位: m/s)、1000 hPa垂直速度扰动 (等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和925 hPa湿散度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 在11日08时 (a)、11日20时 (b)、15日08时 (c) 和16日20时 (d) 的分布。实线为正值, 虚线为负值。红色圆点是龙卷发生地

Fig.7 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000 hPa, vertical velocity anomalies (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa and moist divergence anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) based on the output of EC S2D operational model at (a) 08:00 11th, (b)20:00 11th, (c) 08:00 15th and (d) 20:00 16th September 2018. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Red dot indicates the location of tornado

征, 后面基于EC S2D模式输出结果评估了常用业务模式对“扰动天气系统”预报能力, 寻找预报误差的可能来源。

高空正温度扰动和低空的负高度扰动, 是“扰动天气系统”的主要热动力结构。高空扰动暖气团随时间减弱北移, 会引起中低空对应的负高度扰动减弱。负高度扰动轴线处伴随的上升气流, 不仅引起了低空近地面扰动冷气团的发展, 还使得南侧近地面出现下沉气流, 下沉气流北侧即为龙卷发生地。龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线重合之处。

温度扰动与高度扰动随时间的变化过程与台风移动密切相关。龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的, 此时近地

面有扰动冷气团开始发展, 而在正温度扰动和正高度扰动的发展以及最强盛阶段并没有发生。

台风龙卷的生成与触底, 与高层冷空气和近地面辐合或涡旋关系密切。佛山在龙卷发生前1 h转受近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合影响, 中高层大气受冷平流扰动和低层大气受暖平流扰动影响, 大气层结不稳定, 高中低空的热动力配置都非常有利于台风龙卷的出现。

湿涡度和湿散度是两个反映“扰动天气系统”较好的综合指标。负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展, 但会抑制下沉气流的出现, 而正湿散度扰动的增大会引起下沉气流扰动增强。

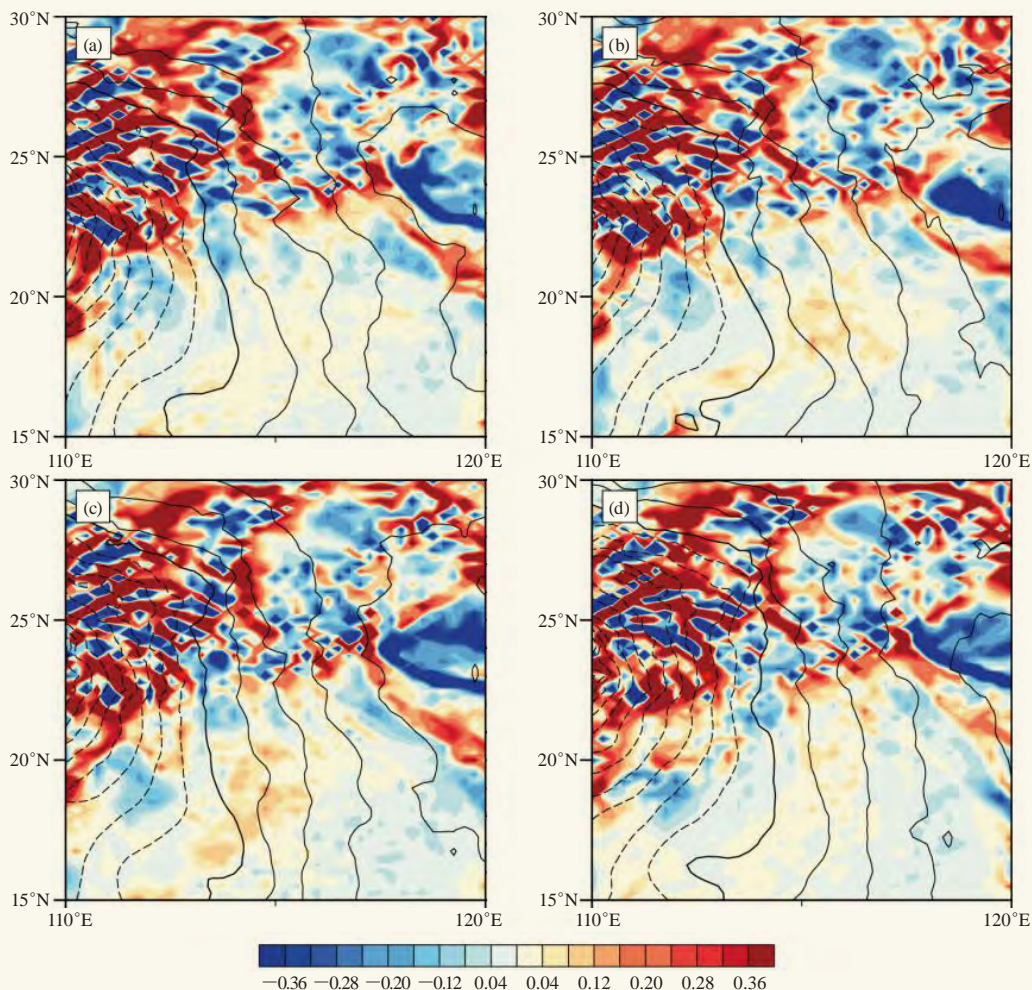


图8 同图7, 但为925 hPa高度扰动 (等值线, 单位: gpm) 和925 hPa湿涡度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 8 Same as Fig.7, but for height anomalies (contour, unit:gpm) and moist vorticity anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa

模式对台风龙卷的预报能力并不是稳定。业务模式对17日08时的温度、高度、风场、湿散度和湿涡度等扰动场与实况最接近的预报结果, 起报时间并不一定是最新时次, 有可能是台风登陆之前。综合来看, 起报时间为最新时次的预报结果对全部扰动场的预报能力是最好的, 预报提前量有12 h, 比分析实况数据得到“扰动天气系统”的提前量要大大增加。

本研究结果揭示了无论是分析实况数据还是业务模式输出结果, 都可以利用瞬时扰动法寻找到有利于“扰动天气系统”发展的前期信号, 这些是台风龙卷的重要可预报源。然而, 由于“扰动天气系统”受台风移动的影响, 热动力结构变化比较快, 在本研究的实况中预报提前量只有1h。虽然借助业务数值模式, 提前量可增加到12 h, 但由于业务数值模式目前对高层温度扰动、低层的高度扰动和风场扰动等物理过程刻画能力仍然不足, 同时对台风登陆后的路径和强度

的预测有偏差, 使得模式对“扰动天气系统”的预报稳定性较差, 而这些系统的预报预警准确率又依赖于模式。除此之外, 本研究仅用了一个个例进行分析, 研究结果仍需用更多的个例去验证。尽管如此, 通过寻找“扰动天气系统”前期信号来提高台风龙卷的潜势预报, 是一个值得努力的方向。

参考文献

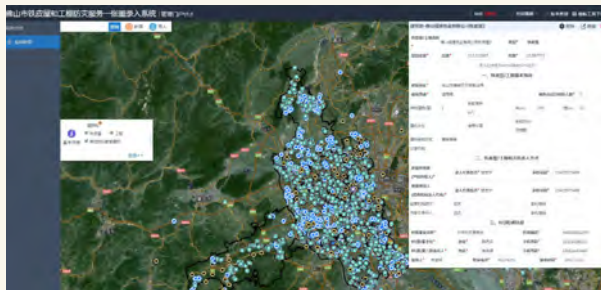
- [1] 周小刚, 王秀明, 俞小鼎, 等. 逾量旋转动能在区分我国龙卷与非龙卷中气旋中的应用. 高原气象, 2012, 31(1): 137-143.
- [2] Fujita T T, Bradbury D L, Thullenar C F V. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965. Monthly Weather Review, 1970, 98(1): 29-69.
- [3] Agee E, Church C, Morris C, et al. Some synoptic aspects and dynamic features of vortices associated with the tornado outbreak of 3 April 1974. Monthly Weather Review, 1975, 103(4): 318-333.
- [4] Metz N D, Bosart L F. Derecho and MCS development, evolution, and multiscale interactions during 3-5 July 2003. Monthly Weather Review, 2010, 138(8): 3048-3070.
- [5] Weisman M L, Evans C, Bosart L. The 8 May 2009 superderecho: Analysis of a real-time explicit convective forecast. Weather & Forecasting, 2013, 28(3): 863-892.
- [6] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷

- 达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [7] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [8] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. 气象学报, 2019, 77(4): 645-661.
- [9] Mercer A E, Shafer C M, Doswell C A, et al. Synoptic composites of tornadic and nontornadic outbreaks. Monthly Weather Review, 2012, 140(8): 2590-2608.
- [10] Qian W, Jiang N, Du J. Anomaly-based weather analysis versus traditional total-field-based weather analysis for depicting regional heavy rain events. Weather and Forecasting, 2016, 31(1): 71-93.
- [11] Jiang N, Qian W, Du J, et al. A comprehensive approach from the raw and normalized anomalies to the analysis and prediction of the Beijing extreme rainfall on July 21, 2012. Natural Hazards, 2016, 84(3): 1551-1567.
- [12] Chen Y, Hu Q, Yang Y, et al. Anomaly based analysis of extreme heat waves in Eastern China during 1981-2013. International Journal of Climatology, 2017, 37(1): 509-523.
- [13] 钱维宏, 梁卓轩, 金荣花, 等. 扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用——以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例. 气象, 2017, 43(2): 40-54.
- [14] 钱维宏, 梁卓轩, 罗未萌, 等. 用瞬扰扰动法考察龙卷环境系统的模式预报. 气象科技进展, 2018, 8(2): 38-45.
- [15] Qian W, Shan X, Liang H, et al. A generalized beta-advection model to improve unusual typhoon track prediction by decomposing total flow into climatic and anomalous flows: GBAM for improving unusual typhoon track. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(3): 1097-1117.
- [16] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [17] Bai L, Meng Z, Sueki K, et al. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018. Science China Earth Sciences, 2020, 63(1): 37-51.
- [18] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. Atmospheric Research, 2014, 158(5): 274-291.
- [19] Tochimoto E, Niino H. Structure and environment of tornado-spawning extratropical cyclones around Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2018, 96(4): 355-380.
- [20] Burgess D W, Lee R R, Parker S S, et al. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars//Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology. Vail CO: Amer Meteor Soc, 1995.
- [21] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.

佛山靶向发布系统应用成效显著

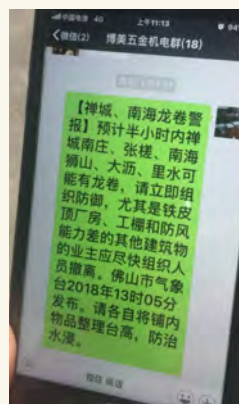
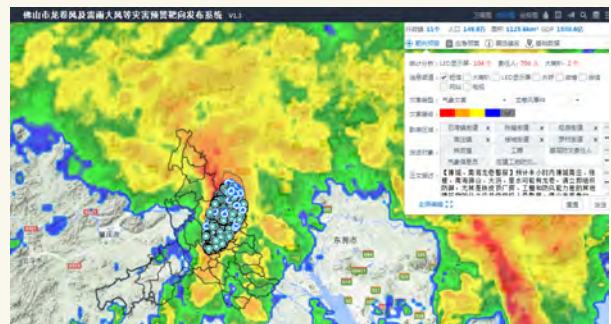
■ 褚红星 麦文强

为了强化佛山预警发布系统支撑,提升佛山龙卷等致灾性雷暴大风监测和预警信息发布能力,2017年,佛山市气象局开展了佛山市龙卷风及雷雨大风等灾害预警信息靶向发布系统(以下简称靶向发布系统)建设和全市铁皮屋和工棚等易受风灾影响建筑物普查及培训工作,截至2020年10月系统共录入铁皮屋数据4.1万条。



靶向发布系统通过融入了实况监测、灾害模型、龙卷风险指标、公众报料信息等辅助研判数据,以及铁皮屋和工棚、电力设施、学校、地质灾害点、危化品企业等易灾主体的责任人信息,实现灾害性天气快速研判和预警信息的精准发布。

靶向发布系统的建设有效提升了佛山市气象局预警信息的精准发布能力,在2018年佛山发生的两



次龙卷过程中发挥了重要作用。2018年6月8日台风“艾云妮”影响期间,首次利用系统成功发布了龙卷警报,共精准发布短信14407人次。2018年9月17日台风“山竹”影响期间,再次利用系统精准靶向发布6800人次,两次过程的预警信息发布速度均高达800条/s,为公众自救互救赢得宝贵时间。

(作者单位:广东省佛山市气象局/佛山市突发预警事件发布中心)