钱维宏，梁卓轩，金荣花，等，2017. 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[J]. 气象，43(2)：166-180.

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*

钱维宏[1] 梁卓轩[1] 金荣花[2] 符娇兰[2] 吴芳芳[3] 邝珠江[4] 杜 钧[5]

1 北京大学大气海洋科学系，北京 100871
2 国家气象中心，北京 100081
3 盐城市气象台，盐城 224000
4 阜宁县气象局，阜宁 224400
5 美国国家海洋大气局国家环境预报中心，MD 20740

提 要： 2016年6月23日14：00—15：00时，江苏省盐城市阜宁县发生了EF-4级有记录以来的强龙卷风过程，造成了当地30 km长，1.7 km宽的严重气象灾害。受局地环境影响，邻近地区在近50年中发生了大于10人次死亡事件的龙卷风11次，其中6次发生于1979年以后。文章首先是：(1)把6次事件日的再分析变量场分解成瞬时气候和扰动两个部分，发现6次事件都与近地面层出现的负高度扰动轴线和扰动冷暖气团的对峙有关，龙卷发生在暖气团一侧；(2)用模式初始场分解的扰动变量和扰动物理量评估欧美模式对产生阜宁龙卷扰动系统的预报能力。后者的结果也发现，当日14时925 hPa高度扰动槽和850 hPa扰动风辐合线作为环境扰动系统，以及湿涡度扰动和湿散度扰动等环境扰动指标量能够突出地表达有利于龙卷风发生的环境条件。欧洲全球模式能够提前42 h稳定预报出后来扰动槽和环境扰动指标量的位置，美国全球模式也可以提前18 h预报出这样的扰动特征。这些扰动变量和扰动指标量能够快速地帮助预报员判断有可能发生强对流天气的大致时空区域和特征。

关键词： 龙卷风，扰动变量，次天气尺度系统，模式预报能力，评估

中图分类号： P458 **文献标志码：** A **doi：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.004

Application of Anomalous Variables to Severe Convective System Analyses and Model Evaluation: A Case Study on Tornado-Producing Anomalous Systems near Lixia River, Jiangsu Province

QIAN Weihong[1] LEUNG Jeremy Cheuk-Hin[1] JIN Ronghua[2] FU Jiaolan[2]
WU Fangfang[3] KUANG Zhujiang[4] DU Jun[5]

1 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871
2 National Meteorological Centre, Beijing 100081
3 Yancheng Meteorological Office of Jiangsu, Yancheng 224000
4 Funing Meteorological Station of Jiangsu, Funing 224400
5 Environmental Modeling Center/NCEP/NOAA, College Park, MD 20740, USA

Abstract: During 14：00—15：00 Beijing Time (BT) 23 June 2016, an extremely tornado with the EF-4 scale hit the Funing County of Jiangsu Province, causing severe damages. Due to the topographic effect, 11 tornado events were recorded causing more than 10 deaths in nearby region in the past 50 years, and 6

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY20130613)资助
2016年9月30日收稿； 2016年12月21日收修定稿
第一作者：钱维宏，主要从事天气气候研究. Email：qianwh@pku.edu.cn

occurred after 1979. By decomposing model initial variables and model predicted outputs into temporal climatic state and anomaly, this paper first analyzed the 6 tornado events using observation data, finding that these tornadoes were associated with low-level negative anomalous height trough axes and clashes of anomalous cold and warm air masses. Tornadoes always occur in the anomalous warm air mass. In the second half of the paper, the performances of ECMWF model and NCEP GFS on the tornado process on 23 June 2016 were evaluated using anomalous variables and indices. Analysis results at 14:00 BT illustrated that the tornado occurred at the intersection between a 925 hPa height anomaly trough and a maximum axis of moist vorticity anomaly and moist convergence anomaly at 850 hPa, respectively. The low-level moisture convergence and moist vorticity anomalies could well indicate the moisture and unstable condition for tornadogenesis. The ECMWF model well predicted the trough-axis feature for leading 42 h in advance while the NCEP GFS predicted for leading 18 h in advance, respectively. These anomalous variables and indices could help forecasters indicate a potential time-space domain of severe convective systems more quickly.

Key words: tornado, anomaly-based variable, mesoscale system, model prediction, evaluation

引　言

2016 年 6 月 23 日下午 14:30(北京时)左右,阜宁县多个乡镇刮起了狂风,随之龙卷和冰雹来袭,许多房屋倒塌,树木拦腰折断,庄稼大棚被掀,供电、道路等基础设施严重损坏,造成 99 人死亡。这次龙卷风强度确定为 Enhanced Fujita (EF)-4 级,成为有气象记录以来最为严重的龙卷灾害。阜宁县,属江苏省盐城市所辖县之一。地处江淮平原中部,县域介于 33°26′～33°59′N、119°27′～119°58′E,南北长 52.5 km,东西宽 48 km。这次重灾区域位于阜宁县城以南(新沟镇),距离东部黄海大约 60 km,西部洪泽湖大约 100 km。

龙卷是在中涡旋(MV,10 km 左右)系统中产生的(百米)小尺度旋转上升气流形式的猛烈灾害性系统。所以,龙卷的尺度小,生命史短,预报难度极大。在现有技术基础上,不可能提前几个小时做出定时、定点的龙卷预报。我国龙卷主要发生在东部平原地区,尤其以江淮地区为多(范雯杰和俞小鼎,2015)。美国是世界上龙卷风的多发国家,平均每年发生 1000 多个龙卷。大多是强度较弱的 EF-0 级别的龙卷。平均来说,目前在美国只能提前 15 min 做出定时、定点的龙卷预警。所以很多的研究仍然处于寻找有利于龙卷(或中涡旋)发生的天气(次天气)尺度环境或潜势条件的阶段。美国龙卷风的发生多与中尺度对流系统相联系(Knupp et al,2014),如 2011 年 4 月 27 日美国南部的强灾害性多龙卷发生与中尺度对流系统(MCS)、强准线性对流系统(QLCS)和分散的超级单体风暴(WDSS)有关(Simmons and Sutter, 2012)。这些中尺度对流系统有组织地发生在天气尺度或近地面次天气(百千米)尺度的低压系统中。美国龙卷常常是多个同时发生,路径长达几百千米,而发生在中国的龙卷路径相对较短。美国气象学词典描述的龙卷爆发(tornado outbreak)为多个龙卷同时出现在一个天气尺度系统中(Glickman, 2000)。我们可以把这样的天气(次天气)尺度系统称为龙卷和中涡旋发生的环境条件。但是,大气中出现了这样的环境(次天气尺度系统)条件时可能出现的不一定是龙卷,而可能的是下击暴流、冰雹或雷雨大风等其他的强对流性天气。次天气系统的形成可以看作为强对流天气发生的必要条件。

虽然龙卷警报通常限制在 10～20 min 以内,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(Fujita et al,1970; Agee et al,1975; Ferguson et al,1987; Lee et al,2006; Metz and Bosart,2010; Corfidi et al,2010)。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(Thompson and Edwards,2000; Doswell et al,2006; Bunkers et al,2006; Thompson et al,2012; Weisman et al,2013; Brandes et al,1988; Kain et al,2008)。这些研究使用传统天气图和动力-热力学的诊断方法,分析龙卷爆发的例子。Mercer et al(2012)总结出龙卷发生与下列环境条件有关:(1)龙卷西侧的上层槽通过天气尺度过程加

深地面气旋;(2)上层急流与迅速下降的地面气压一起增强气旋位置上的对流层风垂直切变;(3)地面加深的气旋与增加的湿度形成了暖区中的不稳定条件。也正如 Mercer et al(2012)所指出的,这些环境条件研究的结果并没有在当前的预报业务中真正得到应用。原因是,用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。Doswell 和 Schultz (2006)总结了传统的 14 个在强风暴预报中广泛使用的指标量,包括对流有效位能(CAPE)、垂直风切变和风暴螺旋度等。这些指标量多与局地垂直温差或热成风有关,甚至有些指标使用的不是基本变量,计算相当繁琐,也难以用单一指标预测强对流的发生。在预报实践中,Doswell and Schultz (2006)认为更需要寻求快速判断(诊断)强对流可能发生的方法。因此,有明确天气学和动力学意义的简单、快捷和方便的强对流指标量是会受到预报员欢迎的。

鉴于上述传统天气图上直接变量和传统指标量对强风暴诊断和预报的局限,我们把传统天气图上的变量分解成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事件有指示意义 (Qian et al,2016; Jiang et al,2016; Chen et al, 2016)。很多例子说明,对流层上部的正与负的高度扰动中心就是地面极端天气事件的大气扰动信号。龙卷是否也是对流层大气中高度-温度扰动和流场扰动发展到达地面的极端产物呢? 对此,本文就以 1979 年以来发生在苏北地区的 6 次龙卷事件日为例,分别对比总场变量与扰动变量对这种强对流事件发生的指示意义,并用扰动指标量评估欧美模式对 2016 年 6 月 23 日产生阜宁龙卷扰动系统的预报能力。

1 资 料

分解分析的方法已经在本刊有了介绍(钱维宏和于甜甜,2013;钱维宏等,2016;2013)。本文使用了多套资料。其一是美国国家环境预报中心(NCEP)提供的美国国家气象局全球预报系统(GFS)分析资料及预报资料(http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php? branch=GFS)。GFS 分析场的时间间隔是 6 h,时间点在 00、06、12 和 18 时(UTC),水平空间分辨率为 0.25°×0.25°经纬格点,垂直分 26 层(http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php? branch=GFS)。GFS 预报场提供从每天 00、06、12 和 18 时(UTC)起报的 15 日预报,预报时间间隔为 6 h。其二是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的预报资料(http://tigge.ecmwf.int/)。ECMWF 提供的是每天 00 和 12 时(UTC)起报的 15 日预报,时间间隔为 6 h(00、06、12 和 18 UTC),水平空间分辨率为 0.25°×0.25°经纬格点,垂直分 8 层。ERA Interim 的分析场 (Dee et al, 2011)和欧美模式的预报场分别应用于分析对比中。其三是盐城气象台的雷达观测回波图像和中国气象局 MICAPS 3.2 绘制的地面风。其四是 NOAA 提供的 CMORPH(CPC Morphing Technique)卫星综合降水数据(Joyce et al,2004)。CMORPH 资料结合了低轨卫星和微波观测估算的地面降水,空间分辨率是 0.25°×0.25°经纬格点,时间间隔为 3 h。

2 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷过程

综合分析表明,2016 年 6 月 23 日(6·23)阜宁龙卷与次天气尺度系统的形成及其强度变化有直接关系。这次龙卷最强和灾害最为严重的时刻是在 14:30 前后。图 1 给出了盐城雷达在 6 月 23 日 14:30(图 1a)和 14:37(图 1b)两个时刻的回波。在盐城正北的 70～80 km 处,那里雷达指示的是晴空区。盐城雷达站西北方向的 100 km 以外是强降水回波,而在 100 km 以内的回波形成了一个直径达到 60 km 的扰动系统。钩状回波很好地表达了龙卷位置。两个时刻仅仅相差 7 min,雷达指示的降水回波区和钩状回波都是向东移动的。根据回波强度,扰动系统发展到最深的时刻是 14:37(图 1c),40～50 dBz 回波的顶部高度达 8～9 km,底距地面不到 1 km。

根据雷达回波深度,图 2a 给出了这个扰动系统随时间变化的估计:13:57 时扰动系统的深度达到 5000 m(底高在 1000 m),位于淮安附近。14:02—14:08 时扰动系统整体抬升,底高上升到离地面 3400 m,位置在淮安以东。14:19 时扰动系统增厚,底高下降到离地面800 m。14:20漏斗状涡旋接触

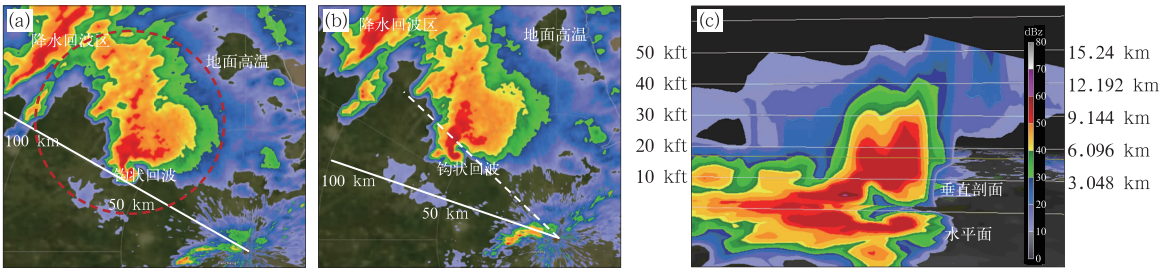


图 1　盐城雷达在(a)14:30 和(b)14:37 的 0.5°仰角回波，以及(c)14:37 沿(b)中粗白虚线的回波垂直与水平强度(阴影，10 dBz 间隔)剖面(图 a 中红色虚线圆指示扰动系统的大致范围)

Fig. 1　Reflectivity factor of radar echo in Yancheng (0.5° elevation angle) at (a) 14:30 BT and (b) 14:37 BT and (c) horizontal and vertical section (shading, 10 dBz interval) of radar reflectivity along the white dashed line in Fig. 1b (The red dashed circle in Fig. 1a denotes the anomalous system)

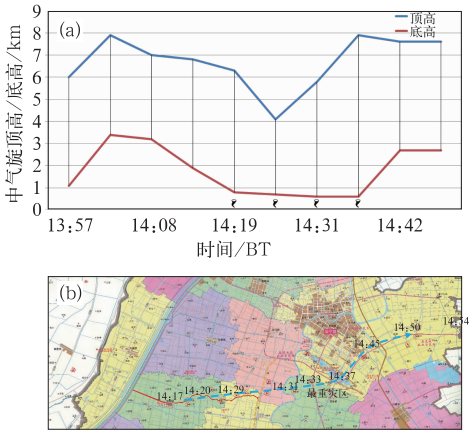


图 2　(a)扰动系统厚度(强回波顶高与底高)相对地面随时间变化的估计和(b)龙卷移动路径(红箭头和蓝点线)以及对应的时间点

Fig. 2　(a) Thicknesses (heights of top and bottom) of the anomalous system in its lifetime, and (b) the tornado track (red arrow and blue dashed line) and the corresponding time

地面，形成接地龙卷。它首先在孔荡东舍下伸到地面并且造成了灾害(图 2b)。14:19—14:36 扰动系统的底部到地面的垂直距离一直稳定小于 1000 m，最低时为 600 m(图 2a)。14:36 扰动系统最深时的垂直厚度达到 7000 多米。由此可见，14:19—14:40 时的 21 min 是这次灾害最严重的时段，危害时段出现在 14:00—15:00 时的一个小时内。由于它的移动性，龙卷在一个地点上的危害时间大致在 1 min 左右。

图 2b 中，龙卷从 14:20—14:37 时沿潮沟河(红实线)直线东移，到达金沙湖后转向东北沿 329 省道移动(蓝点线)。龙卷路径在阜宁县内的长度达 30 余千米，属于国内龙卷中相对长的路径。这种随时间变化的扰动系统特征可以通过图 3 中的地面风场得到解释。23 日 12 时，沿京杭运河的微山湖(沛县)、骆马湖和洪泽湖南端三地各有一个地面风的辐合中心(图略)。13 时(图 3a)，地面图上有三条风向辐合线。北边一条从徐州向东北到台儿庄以北，其上有两个辐合中心。中间一条从泗县向东到淮安，其上有三个辐合中心，最东边一个辐合中心位于淮安附近。东部沿海有一条东南—西北走向，从东台向西北经过建湖到灌南的辐合线，其上没有辐合中心。前两条辐合线之间存在反气旋环流中心。14 时(图 3b)，地面风的三条辐合线都整体向东南方向移动了。13 时位于淮安的辐合中心在 14 时东移到了阜宁县境内的最西端。15 时(图略)，地面风的三条辐合线继续整体向东南方向移动，最东段的辐合中心从阜宁县的西端东移到了阜宁县城东南侧附近。在中间辐合线的北侧，形成了沿废黄河故道的反气旋环流。最东段的辐合中心从 14:00—15:00 时的一个小时东移并经过了阜宁县，与龙卷和形成灾害的时段完全一致。16 时，北边的辐合线呈东北—西南走向，从连云港至宿州。中间的辐合线从洪泽湖向东到建湖和射阳的南部，最东段的辐合中心已经东移到达海边。从图 2b 龙卷路径和图 3 中的辐合中心移动看出，龙卷路径是与中间辐合线上的辐合中心东移密切相关的。

17 时开始，与龙卷对应的中间辐合线消失，北边的辐合线南移到废黄河故道一线，经过泗阳和灌

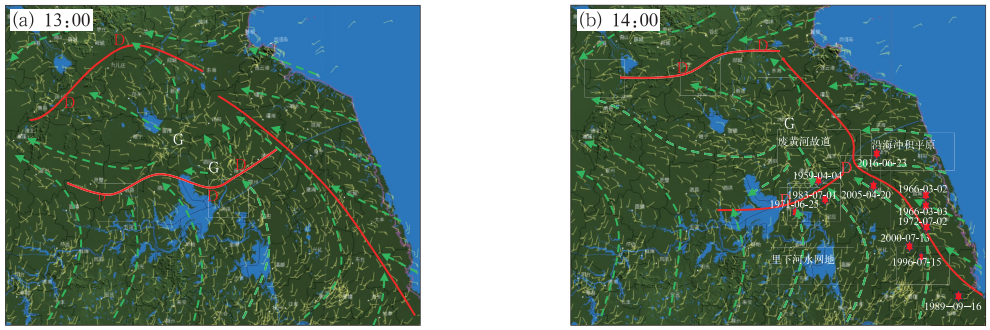


图 3 2016 年 6 月 23 日(a)13 时和(b)14 时地面自动气象站风场
(绿箭头虚线为流线,红实线为辐合线,D 和 G 分别为气旋中心和反气旋中心;
图 3b 中的日期标注了近 50 年中主要的 11 次龙卷事件(☆))

Fig. 3 Wind field observed by surface automatic weather stations at (a) 13:00 BT and (b) 14:00 BT 23 June 2016
(Green dashed arrows denote streamlines and red solid lines denote convergence line; D and G indicate the cyclonic and anticyclonic centers; in Fig. 3b, the dates and symbol ☆ denote the 11 tornado events that occurred in the past 50 years)

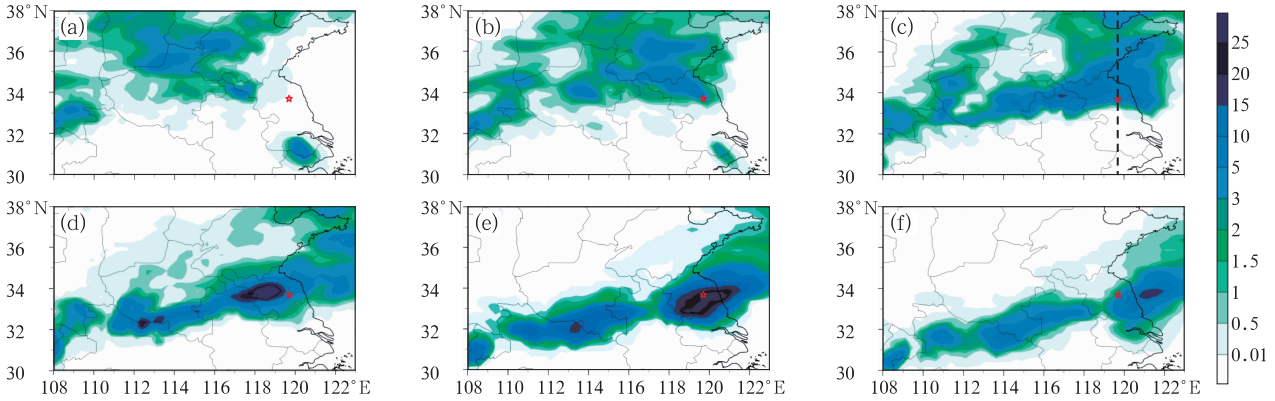


图 4 2016 年 6 月 23 日(a) 08:00 时,(b) 11:00 时,(c) 14:00 时(龙卷发生时),(d) 17:00 时,(e) 20:00 时(最强暴雨发生时),(f) 23:00 时各小时内降水(阴影,mm·h^{-1})
(符号☆的位置为阜宁龙卷发生地,虚线沿 119.5°E)

Fig. 4 Hourly precipitation (shading, mm·h^{-1}) at (a) 08:00 BT, (b) 11:00 BT, (c) 14:00 BT (tornado occurred), (d) 17:00 BT, (e) 20:00 BT (heaviest rainfall), and (f) 23:00 BT 23 June 2016
(Symbol "☆" denotes Funing, where tornado occurred while the dashed line is along 119.5°E)

南。后者 18 时南移到泗洪、淮安、涟水、滨海一线,19 时继续南移到洪泽、楚州和阜宁一线,20 时南移到宝应、建湖和射阳。

图 4 是 2016 年 6 月 23 日龙卷发生前后各小时内的降水。08 时(图 4a),阜宁没有降水。降水主要发生在黄河中下游地区。苏北的西北部,徐州有了降水。此外,江南有降水。11 时(图 4b),苏南的降水减弱,北方的大范围降水区东移。阜宁位于降水的东南边缘。14 时(图 4c),苏北北部,包括阜宁、射阳都在雨区中,雨区也扩展到了东部海上。17 时(图 4d),也就是龙卷发生后的 2 h,一个强降水中心出现在了阜宁的西北方向上。20 时(图 4e),20 mm·h^{-1}的降水中心到达阜宁。23 时(图 4f),大的降水中心减弱入海。显然,这条大降水带落后于龙卷 5~6 h 由西北向东南移动,并于晚上影响到了阜宁。龙卷和后来的暴雨是先后到达的两个不同辐合带上的产物。

图 3b 中的地面风大致可以分为两支相对稳定的气流和一支相对不稳定的气流。南边一支气流是来自里下河水网地区的稳定偏南风。东边一支是来自

沿海冲积平原的稳定东南风。不稳定的气流和环流系统主要活动在废黄河故道地区。图 3b 中还标注了近 50 年中主要的 11 次龙卷事件。其中,沿苏北灌溉总渠有 4 次龙卷事件,沿沿海古范公堤有 7 次龙卷事件,说明强龙卷的发生与地面特征(里下河水网—沿海冲积平原—废黄河故道)有着内在的联系。11 次龙卷事件中,死亡最少 13 人的是 2005 年 4 月 20 日 16 时多的建湖龙卷,死亡次多 87 人的是 1966 年 3 月 2 日午夜盐城—大丰—射阳龙卷。2016 年 6 月 23 日的午后龙卷死亡人数超过了历史。我们需要进一步关注的是 2016 年 6 月 23 日龙卷与上部对流层大气变量分布形势以及可能的早期信号。

3　垂直剖面上的传统与扰动天气分析

天气图分析和数值预报模式产品分析仍然是常规天气预报的方法。从图 1 至图 3 可以清楚地看出,龙卷的出现和移动与近地面辐合系统有密切的联系。为此,我们用欧洲再分析资料中的基本变量考察当时对流层大气中是否也像其他的地面极端天气事件那样,也存在一个天气或次天气尺度的扰动系统。

我们首先沿 120°E(图 4c 中虚线)做南北垂直剖面,描述龙卷发生日天气图上的特征。关注龙卷发生地(33.5°N、120°E),23 日的早、中、晚上空大气温度场和高度场上发生了什么变化? 图 5a～5c 3 幅是目前气象台使用的常规天气图。中午的阜宁以南地区低层大气增暖并伴随湿度增加(图略)。阜宁龙卷发生地位于南高—北低的水平温度梯度上,但这样的温度梯度和平直的高度分布难以指示龙卷可能发生的信息。龙卷属于极端异常的扰动事件。常规天气图中除了有扰动信息外,还存在着基数较大的气候信息。这样,总场变量中的异常信息难以用一般的绘图方法表达出来。为了突显出异常信息,图 5g～5i 3 幅给出的是用总场减去了瞬时气候(图 5d～5f)后的扰动变量。水平温度梯度也存在于气候场中。08 时(图 5g),龙卷地以南出现了低层高温异常,整个对流层大气出现了正的高度异常。其中,正高度异常中心就在龙卷发生地上空的对流层上部。14 时(图 5h),龙卷地上空出现了上升气流,800 hPa 以下的负高度扰动轴线(虚线)与近地面层上冷暖气团对比的零线对应,龙卷发生在扰动暖气团一侧。这个与龙卷对应的地面低压扰动水平尺度达到 600 km,属于次天气尺度扰动系统。到晚上(图 5i),来自北方中层的低压扰动到达阜宁县,这个低压扰动就是图 3 中北边的辐合线。与北京 2012 年 7 月 21 日局地暴雨类似的扰动环流形势(Jiang et al, 2016)一致,暴雨发生在低层大气低压扰动和冷暖气团对比的边界线上。扰动天气图上的温度扰动与高度扰动满足静力平衡关系,即这样的温度扰动可以用静力平衡方程由高度扰动计算出(钱维宏等, 2015)。所以,低层增暖与高层高压发展有直接的联系。扰动天气图(图 5g～5i)中出现的次天气尺度扰动结构及其演变在传统天气图中 (图 5a～5c) 都存在,只是没有扰动天气图描述的清楚。扰动天气图上的这些扰动结构可以从强度和位置上直观地表达地面上极端天气事件可能发生的信号。

为了说明这种扰动分析对寻找龙卷事件信号的有效性,我们也绘制了图 3b 中 1979 年以来的其他 5 次龙卷日连续 3 个时次的当地高度扰动和温度扰动垂直分布。选择图 3b 中的 6 个事件日,是考虑到死亡人数大于 10 和有较好的 1979 年以来的欧洲再分析资料(ERA Interim)。图 6a～6c 是 2005 年 4 月 20 日早、中、晚三个时刻的高度扰动和温度扰动垂直剖面。这是 2005 年 4 月 20 日 16 时后发生在建湖县上冈、冈西、庆丰 3 镇 11 个村的龙卷事件,凤凰视频专门对这次龙卷拍摄了“龙在盐城”的纪录片。类似图 5g～5i,图 6a～6c 给出了 2005 年 4 月 20 日的三个时次高度扰动和温度扰动。晚上(图 6c)负高度扰动轴线(粗虚线)和冷暖气团对比是最明显的,龙卷发生在扰动暖气团一侧。从中午(图 6b)至晚上(图 6c)上升运动演变看,龙卷发生的 16 时后是有上升速度中心经过的。类似的,2000 年 7 月 13 日 15 时的龙卷(图 6d～6f)、1996 年 7 月 15 日(图 6g～6i)、1989 年 9 月 16 日(图 6j～6l)和 1983 年 7 月 1 日(图 6m～6o)的龙卷也都发生在负高度扰动轴线和冷暖气团对比最明显的时刻和在扰动暖气团的一侧。几个扰动变量的关系说明,龙卷大多数发生在地面低压扰动暖气团的上升气流中。图 5 和图 6 中的高度扰动和温度扰动能够快速地帮助预报员判断什么时间和地点可能最有利于强对流发生的扰动系统。

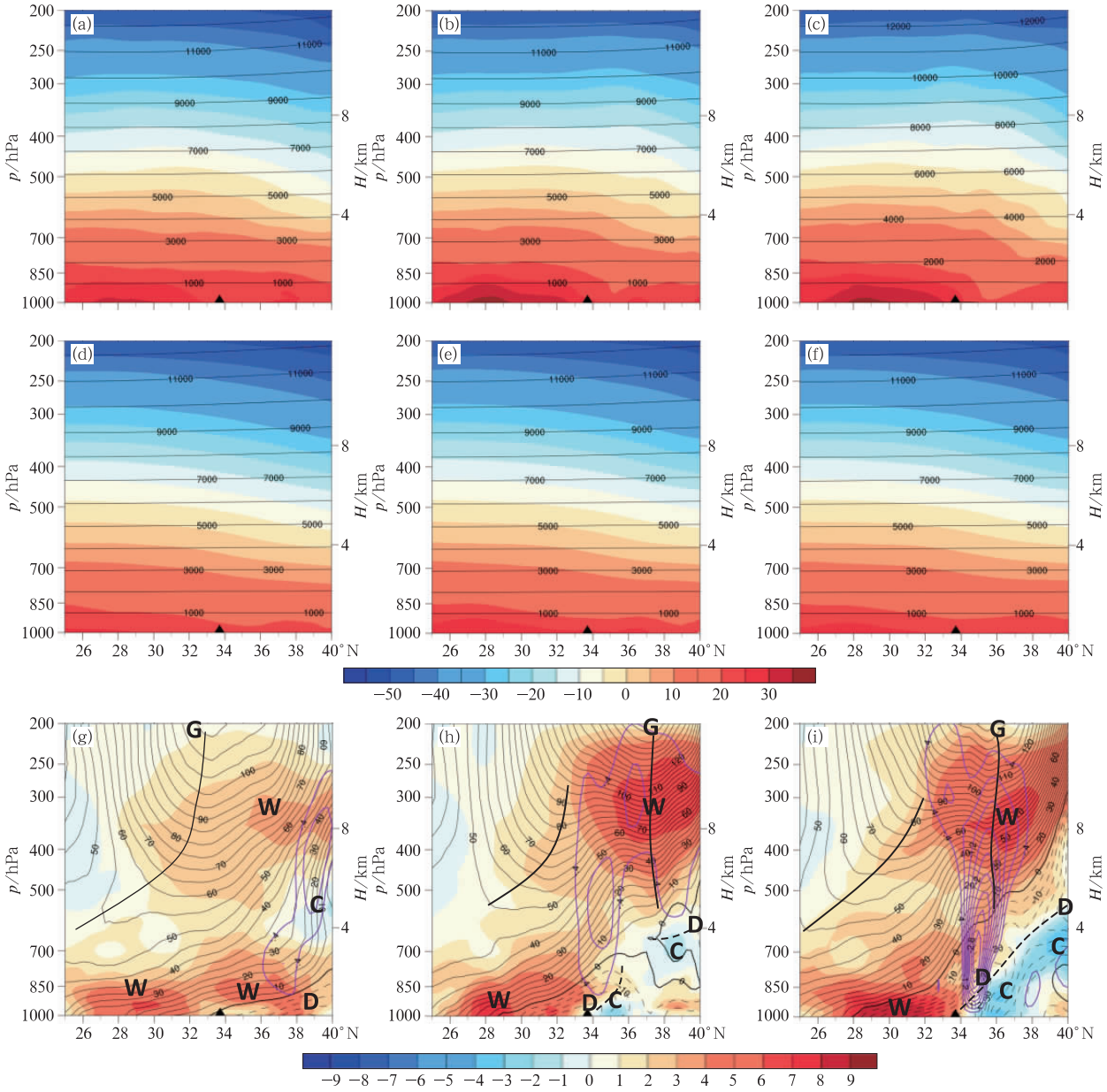


图 5 基于再分析(ERA Interim)资料沿 119.5°E(图 4c 虚线)做出的剖面

(a,d,g)08:00 时,(b,e,h)14:00 时,(c,f,i)20:00 时:(a,b,c)常规天气图上的总高度(实线,1000 gpm 间隔)和总温度(阴影,5℃间隔);(d,e,f)气候高度(实线,1000 gpm 间隔)和气候温度(阴影,5℃间隔);(g,h,i)扰动天气图上的高度扰动(实线,10 gpm 间隔)和温度扰动(阴影,1℃间隔)

(紫实线为上升速度,0.5 Pa·s^{-1}间隔;G 和 D 为高度中心,W 和 C 为暖冷中心;粗实线为正高度扰动轴,粗虚线为负高度扰动轴;符号▲处为龙卷发生地)

Fig. 5 Vertical-latitude cross sections of total height (black solid line, 1000 gpm interval) and total temperature (shading, 5℃ interval) along 119.5°E at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, and (c) 20:00 BT 23 June 2016; (d,e,f) same as Figs. 5a,5b,5c, but for climatic height (solid and dashed lines, 1000 gpm interval) and climatic temperature (shading, 5℃ interval); (g,h,i) same as Figs. 5a,5b,5c, but for height anomalies (solid and dashed lines, 10 gpm interval) and temperature anomalies (shading, 1℃ interval)

(In Figs. 5g,5h,5i, heavy solid and dashed lines are axes of positive and negative height anomalies while the purple lines indicate the ascending velocity (0.5 Pa·s^{-1}); letters G/D and W/C are centers of height and temperature anomalies, respectively; symbol ▲ indicates the location of tornado; the data used are from the ERA Interim)

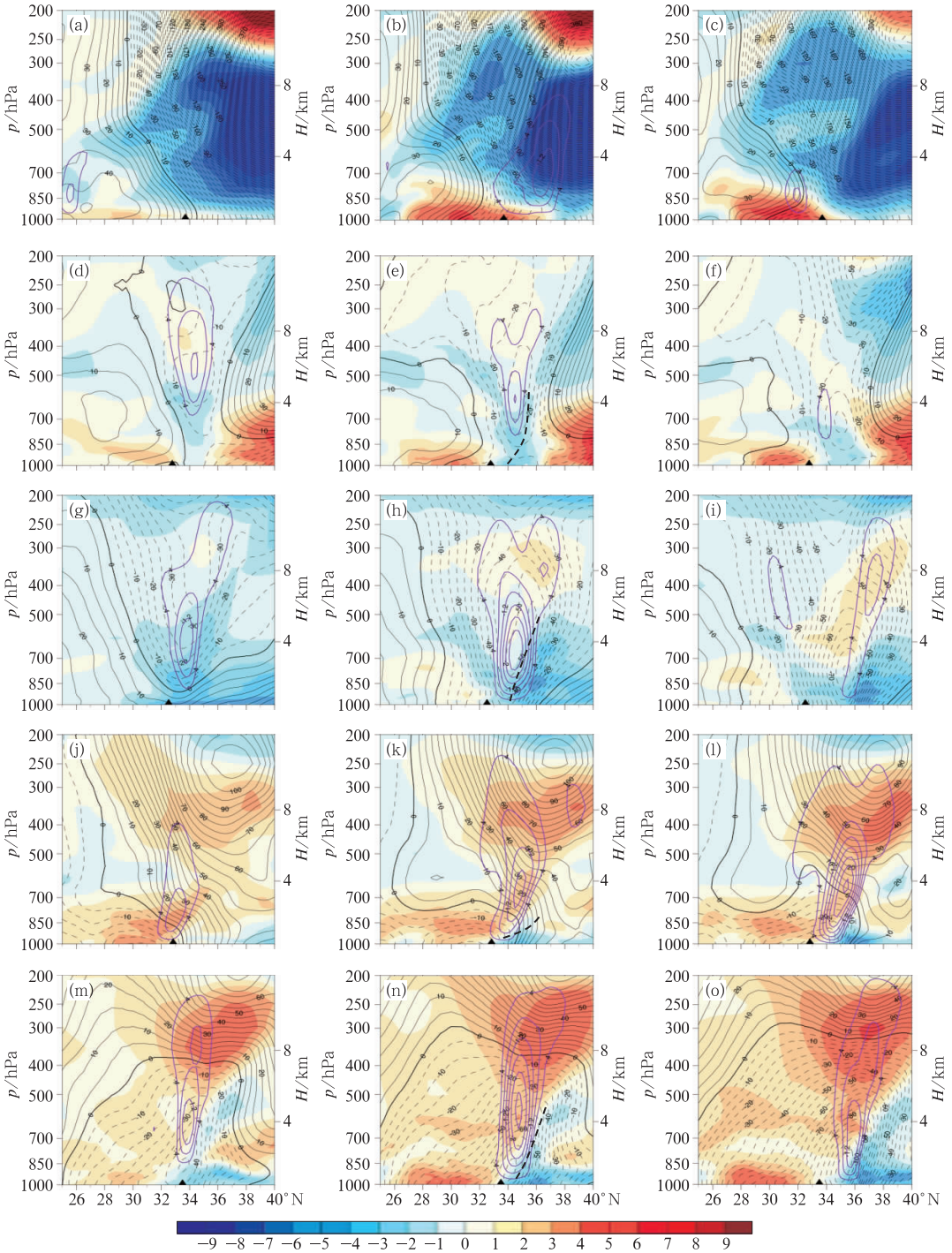


图 6　同图 5,但为 2005 年 4 月 20 日(a)08:00 时,(b) 14:00 时,(c) 20:00 时;2000 年 7 月 13 日(d) 08:00 时,(e) 14:00 时,(f) 20:00 时;1996 年 7 月 14 日(g) 20:00 时,(h)15 日 02:00 时,(i)08:00 时;1989 年 9 月 16 日(j) 08:00 时,(k) 14:00 时,(l) 20:00 时,和 1983 年 7 月 1 日(m) 08:00 时,(n) 14:00 时,(o) 20:00 时

Fig. 6　Same as Fig. 5, but at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT and (c) 20:00 BT 20 April 2005, (d) 08:00 BT, (e) 14:00 BT and (f) 20:00 BT 13 July 2000; (g) 20:00 BT 14 July, (h) 02:00 BT and (i) 08:00 BT 15 July 1996; (j) 08:00 BT, (k) 14:00 BT and (l) 20:00 BT 16 September 1989; (m) 08:00 BT, (n) 14:00 BT and (o) 20:00 BT 1 July 1983

预报员除了可以简单和快速地画出扰动变量的空间-垂直剖面图外，还可以方便地画出扰动变量的时间-垂直剖面图。图 7 是 2016 年 6 月 18 日 08 时至 26 日 00 时，经过阜宁龙卷发生地上空每 6 h 间隔的总高度和总温度，以及高度扰动和温度扰动随时间的变化。总高度剖面上没有明显的特征可指示龙卷可能发生的信息，总温度上存在明显的增暖（图 7a）。气候高度和气候温度随时间的变化类似图 7a，只是比较平滑。高度扰动和温度扰动的演变图上表现出明显的扰动结构（图 7b）。从 20—23 日的四天中出现了 3 次次天气尺度的高度扰动，先是在对流层中上部出现正高度扰动轴线，然后在近地面层出现负高度扰动中心。对流层上部出现的三个正高度扰动中心，与对流层中、下部的三个暖中心和地面上的三个扰动低压是完全对应的。特别是在 23 日，正高度扰动中心（G3）、暖温度扰动中心（W3）和地面低压扰动（D3）都是最强的。这些扰动特征是在传统天气图（图 7a）上看不到的。为什么前 3 日中的 2 次低压扰动没有发生龙卷呢？细致考察图 7b 中的第三次扰动中近地面还有两个中心，一个是在中午，强的是在晚上，与图 3 中的先龙卷后暴雨的辐合中心有关。

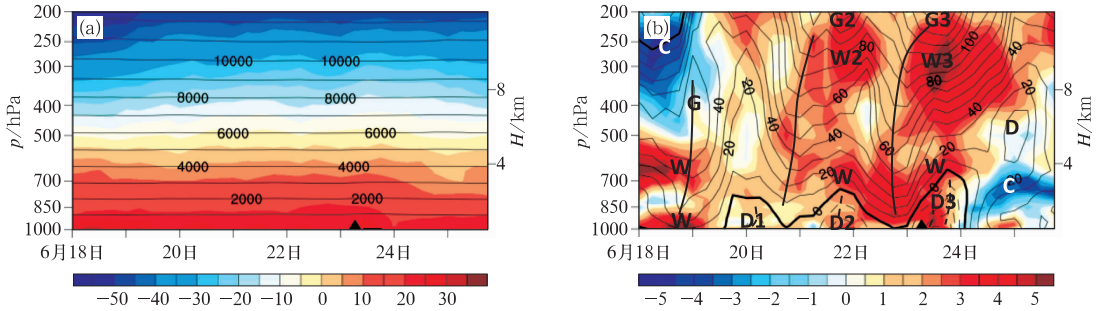


图 7 基于再分析资料（ERA Interim）的剖面：2016 年 6 月 18 日 08:00 时至 26 日 00:00 时，经过龙卷发生地（阜宁）上空每 6 h 间隔的（a）总高度（等值线，1000 gpm 间隔）和总温度（阴影，5℃间隔），（b）高度扰动（等值线，10 gpm 间隔）和温度扰动（阴影，0.5℃间隔）随时间的变化（其他符号同图 5 h）

Fig. 7 Vertical-time sections of (a) total height (contour, 1000 gpm interval) and total temperature (shading, 5℃ interval) as well as (b) height anomalies (contour, 10 gpm interval) and temperature anomalies (shading, 0.5℃ interval) averaged over 33.5°N and 119.5°E (where the tornado occurred) (Symbol ▲ indicates the occurring time of tornado; the data are derived from the ERA Interim)

4 水平面上的传统与扰动天气分析

水平天气图是在日常应用中最广的。图 8 中第 1 行是 2016 年 6 月 23 日早、中、晚三个时刻的 850 hPa 总高度和总温度，也就是常规天气图。这天有一个低压中心由西向东移动，当夜出海。龙卷发生时（图 8b），温度锋区（温度大的水平梯度带）和一条槽线位于阜宁 100 km 以北。总高度和总温度场中包含了气候高度和气候温度以及高度扰动和温度扰动。气候高度有日循环变化，一条气候高度槽正好经过了阜宁上空（图 8d～8f）。高度扰动场上的低值中心总是位于总场低压中心的偏东位置，龙卷发生时的扰动槽线就在阜宁附近的偏北一侧（图 8h）。在 925 hPa 上，扰动槽线就在阜宁上空（图 8k）。垂直方向上，扰动槽线是由下而上向北倾斜的。龙卷确实发生在扰动暖气团的一侧。

在 22 时的 850 hPa 总风场上，有两股西南低空急流分别指向安徽最北部的低压处和龙卷发生地。前者的风速大于后者（图略）。我们关注 925 hPa 层的全风和扰动风与扰动涡度（图 9）。925 hPa 的全风上（图 9a～9c），一个辐合中心快速沿 34.5°N 东移，并没有经过龙卷发生地。龙卷发生地上空，早上到中午为逐渐增强的偏南风，晚上为较强的西南风。

在 925 hPa 扰动风场上(图 9d～9f)，扰动辐合中心的位置比全风场辐合中心的位置偏东 1～2 个经度，东侧有两条切变线随扰动辐合中心东移。早上，两条负的扰动气流辐合带(阴影)是与两条扰动切变线对应的，阜宁上空并没有出现扰动切变线和负的扰动散度。中午的情况大不一样了，扰动切变线和一个扰动辐合中心就在阜宁。随着扰动低压的东移，晚上的扰动切变线和扰动辐合中心东移入海。850 hPa 层上的扰动中心比 925 hPa 上的偏西。在 850 hPa 扰动中心的东侧也有两条扰动切变线与扰动涡度对应。这样的扰动切变线和扰动涡度(阴影)在阜宁上空(图 9h)有利于近地面辐合中心加强的。850 hPa 上，由于西南风气候气流的叠加，原始天气图上的西南低空急流，在扰动图上就不存在了。扰动散度和扰动涡度与扰动风场的配合绘制，对极端天气的判断效果会优于原始风场的配置。此外，图 3b 中

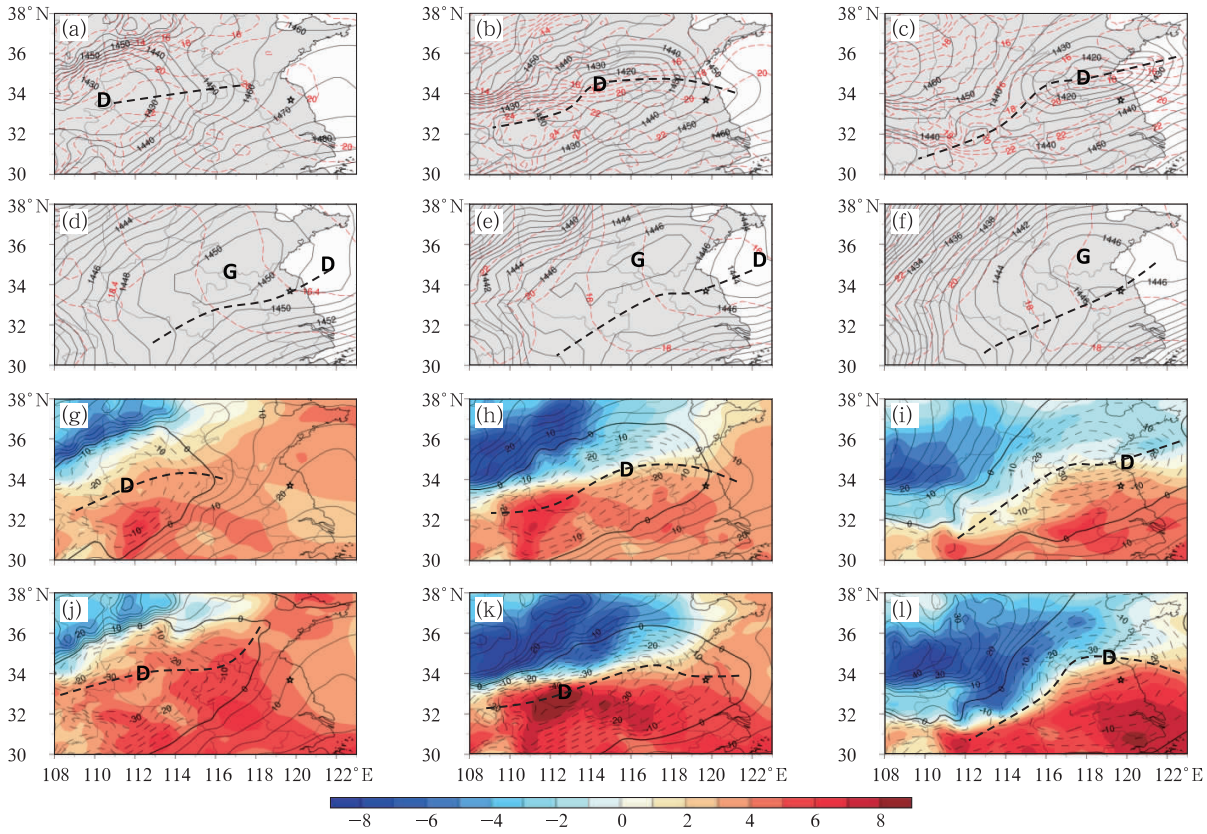


图 8　2016 年 6 月 23 日 (a) 08:00 BT，(b) 14:00 BT 和(c) 20:00 BT 时刻 850 hPa 高度(黑实线，5 gpm 间隔)和温度(红虚线，1℃间隔)；(d,e,f)对应三个时刻 850 hPa 气候高度(黑实线，1 gpm 间隔)和气候温度(红虚线，1℃间隔)；(g,h,i)对应三个时刻 850 hPa 高度扰动(实线和虚线，5 gpm 间隔)和温度扰动(阴影，1℃间隔)；(j,k,l)同 Figs. 8g,8h,8i，但为 925 hPa 的高度扰动和温度扰动(符号☆的位置为阜宁龙卷发生地)

Fig. 8　Total height (black-solid line, 5 gpm interval) and total temperature (red dashed line, 1℃) at 850 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT and (c) 20:00 BT 23 June 2016; (d,e,f) same as Figs. 8a,8b,8c, but for climatic height (black solid line, 1gpm interval) and climatic temperature (shading, 1℃) at 850 hPa; (g,h,i) same as Figs. 8a,8b,8c, but for height anomaly (solid and dashed lines, 5 gpm interval) and temperature anomaly (shading, 1℃) at 850 hPa; (j,k,l) same as Figs. 8g,8h,8i, but for height anomaly (solid and dashed lines, 5 gpm interval) and temperature anomaly (shading, 1℃) at 925 hPa (Symbol ☆ represents the spot where the Funing tornado occurred, the data are derived from the GFS)

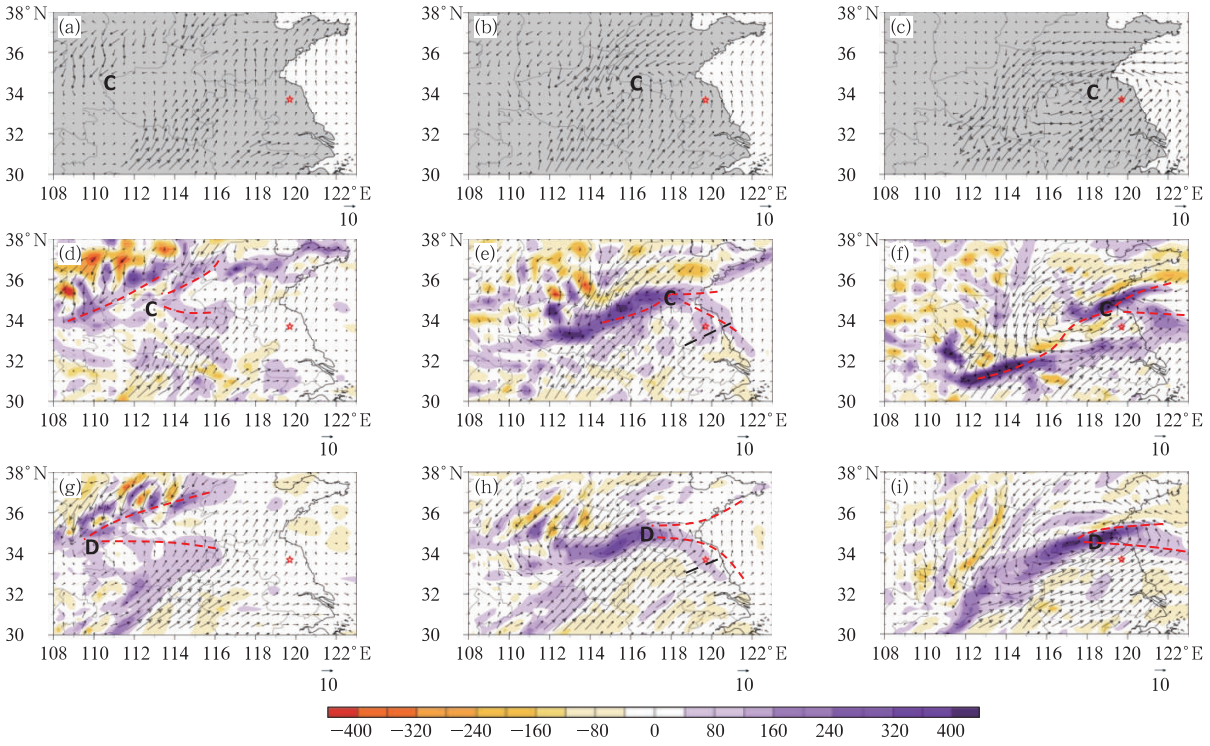


图 9 基于模式初始场的分析:2016 年 6 月 23 日 (a) 08:00 BT,(b)14:00 BT 和 (c)20:00 BT 925 hPa 全风(m·s^{-1});
(d,e,f)对应时次的 925 hPa 的扰动风(单位:m·s^{-1})和扰动散度(阴影,单位:10^{-6} s^{-1});
(g,h,i)对应时次的 850 hPa 的扰动风(单位:m·s^{-1})和扰动涡度(阴影,10^{-6} s^{-1})
(符号☆的位置为阜宁龙卷发生地,红虚线为扰动气流的辐合线或切变线;
图 9e 和 9h 中,黑虚线为图 3b 中地面风辐合线)

Fig. 9 Total wind (unit: m·s^{-1}) at 925 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, and (c) 20:00 BT 23 June 2016; (d,e,f) same as Figs. 9a,9b,9c, but for wind anomalies (unit: m·s^{-1}) and divergence anomalies (shading, unit: 10^{-6} s^{-1}); (g,h,i) same as Figs. 9a,9b,9c, but for wind anomalies (unit:m·s^{-1}) and vorticity anomalies (shading, unit: 10^{-6} s^{-1}) at 850 hPa
(Symbol ☆ represents the site where the Funing tornado occurred; the red dashed line indicates the shear line of wind anomalies and the black dashed line in Fig. 3b is the convergence line of the surface wind; the data are derived from the GFS)

影响阜宁县的地面风辐合线是西南至东北向的,而图 9e 和 9h 中的扰动辐合线是西北—东南向的(与沿海内陆地面风辐合线一致),它们正好相交于阜宁县(图 9e 和 9h 中的黑虚线和红虚线)。

在中国东部地区的区域暴雨分析中,Qian et al (2016)提出了扰动散度与扰动比湿乘积的扰动指标量(湿散度扰动)和扰动涡度与扰动比湿乘积的扰动指标量(湿涡度扰动)。它们的表达式分别为

$$D'Q' = \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y}\right)q' \qquad (1)$$

$$V'Q' = \left(\frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y}\right)q' \qquad (2)$$

比较 23 日早、中、晚三个时次的 850 hPa 湿散度扰动分布看出,中午时刻有一个湿散度扰动中心在阜宁上空(图 10b)。同样,850 hPa 湿涡度扰动也是在中午时刻有一个大值带经过阜宁的上空(图 10e)。这些扰动指标量的分布基本上是沿沿海—内陆地面风辐合线走向的(图 3b)并与地面上的中间辐合线相交于阜宁上空。这里用扰动天气分析的方法得到了近地面扰动系统可能发展的环境和潜势条件。

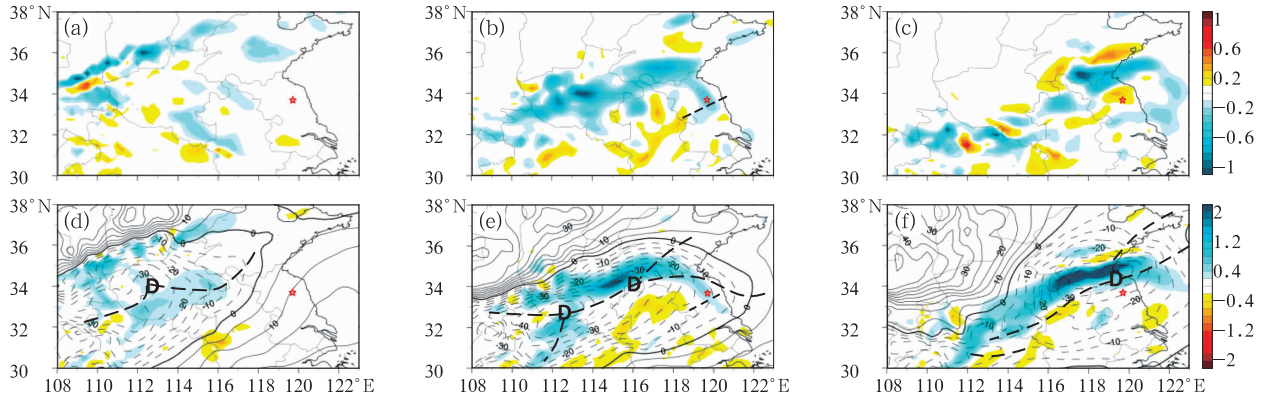


图 10　基于模式初始场的 850 hPa 湿散度扰动(单位：10^{-6} kg·kg^{-1}·s^{-1})
在 2016 年 6 月 23 日(a) 08:00 BT，(b) 14:00 BT，(c) 20:00 BT 的分布；
(d,e,f)对应三个时刻的 925 hPa 高度扰动(实线和虚线，5 gpm 间隔)和 850 hPa
的湿涡度扰动(阴影，单位：10^{-6} kg·kg^{-1}·s^{-1}间隔)
(粗黑虚线为高度扰动槽线，黑虚线为图 3b 中地面风辐合线；符号☆的位置为阜宁龙卷发生地)

Fig. 10　Moist divergence anomaly (shading, unit: 10^{-6} kg·kg^{-1}·s^{-1})
at 850 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 20:00 BT 23 June 2016;
(d,e,f) same as Figs. 10a,10b,10c, but for moist vorticity anomaly (unit: 10^{-6} kg·kg^{-1}·s^{-1})
at 850 hPa and height anomaly (solid and dashed lines, 5 gpm interval)
(The black dashed line in Fig. 3b is the convergence line of the surface wind, the data are derived from the GFS)

5　模式预报的次天气尺度扰动环境条件

我们首先考察 ECMWF 模式对阜宁垂直-时间剖面图中高度扰动和温度扰动(图 7b)的预报能力。图 11 中清楚地显示出，ECMWF 模式提前 54 h(图 11a)和提前 30 h(图 11b)预报出了可与实况对比的 23 日中午的高度扰动和温度扰动。在提前 90 和 102 h，高度扰动和温度扰动也已经预报出了，但其扰动强度要弱一些。

分析中，图 10 的 850 hPa 湿散度扰动和湿涡度扰动在 23 日中午时刻指示出了有利于强对流天气发生的环境扰动条件。如果模式预报产品中也能够计算得到这些扰动量的位置，这对预报员在考虑局地地面和模式预报的高度-温度扰动环境条件的同时推断未来时刻可能出现的强对流天气发生位置是有帮助的。我们集中分析和评估欧美两个模式对 925 hPa 高度扰动和 850 hPa 湿涡度扰动(图 10e)的预报能力。图 12 是对欧洲 ECMWF 预报提前 102 h 到提前 6 h 预报产品的分析。虽然提前 102 和 90 h 预报中 925 hPa 负的高度扰动出现了，但

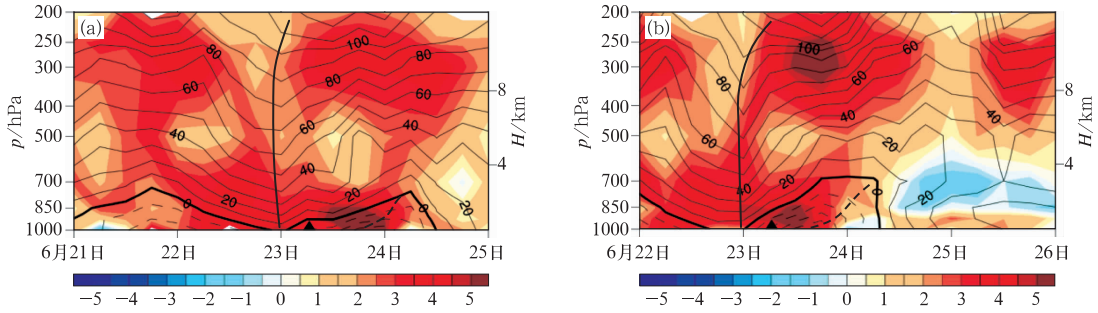


图 11　同图 7b，但为 ECMWF 模式提前(a)54 h 和(b)30 h 预报的高度扰动和温度扰动

Fig. 11　Same as in Fig. 7b, but for the height-temperature anomalies
of the ECMWF model prediction for leading (a) 54 h and (b) 30 h

850 hPa 的湿涡度扰动都在阜宁以北地区(图 12a，12b)。从提前 78 h 开始 (图 12c)到提前 54 h(图 12e)，预报 850 hPa 的湿涡度扰动轴线稳定在阜宁上空。从提前 42 h(图 12f) 到提前 6 h(图 12i)的预报，925 hPa 层的槽线和 850 hPa 层的湿涡度扰动轴线都稳定出现在阜宁上空，与图 10e 基本一致。可见，欧洲中期模式至少提前 42 h 预报出了阜宁低层大气的高度扰动和湿涡度扰动信息。

同样地，我们也分析了美国 GFS 预报提前 102 h到提前6 h预报的扰动量分析(图13)。可以

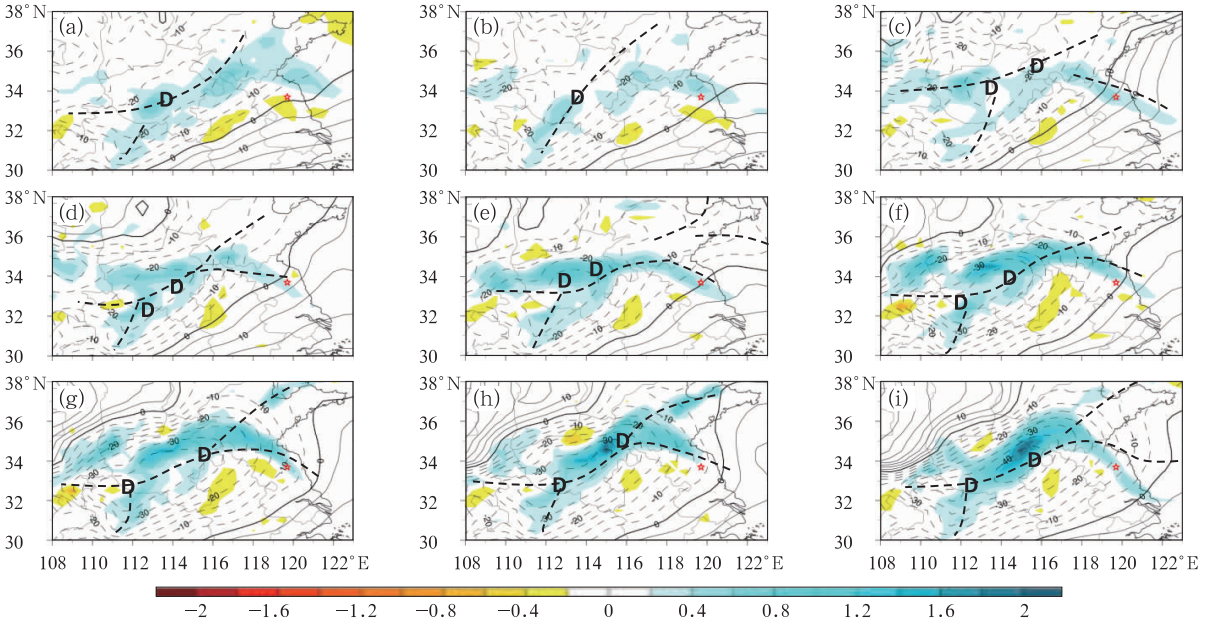


图 12 同图 10e，但为欧洲 ECMWF 预报：提前(a)102 h，(b)90 h，(c)78 h，(d)66 h，(e)54 h，(f)42 h，(g)30 h，(h)18 h，(i)6 h 的扰动量分析

Fig. 12 Same as Fig. 10e, but for the ECMWF prediction for leading (a) 102 h, (b) 90 h, (c) 78 h, (d) 66 h, (e) 54 h, (f) 42 h, (g) 30 h, (h) 18 h, and (i) 6 h in advance

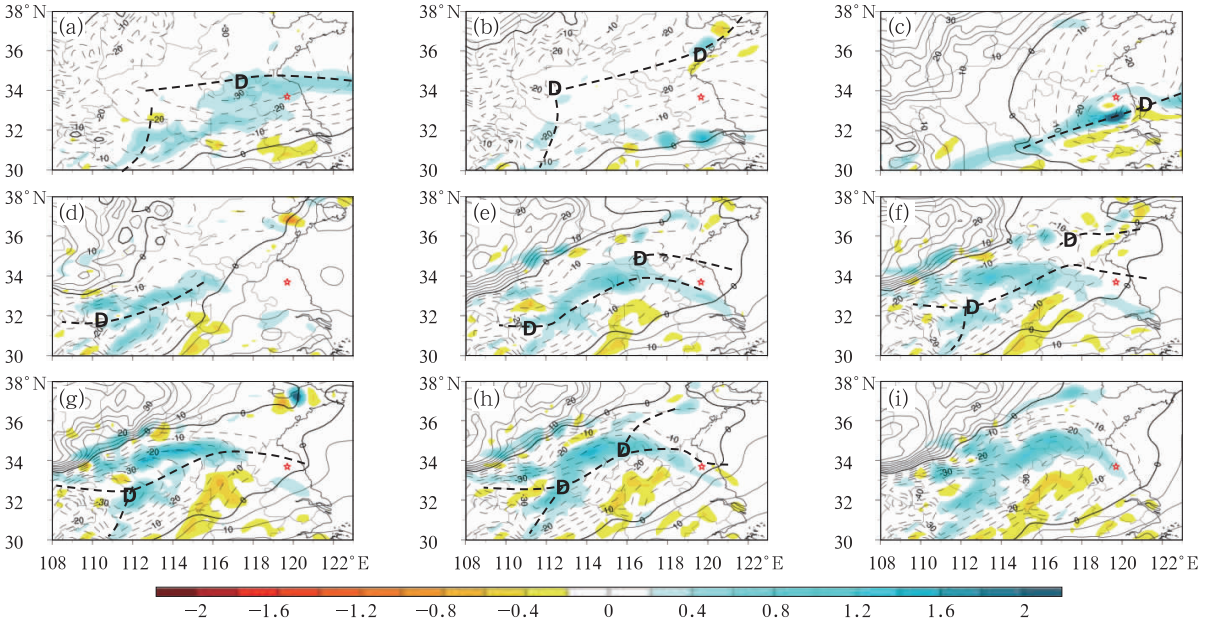


图 13 同图 12 和图 10e，但为美国 GFS 预报的各时次 925 hPa 的高度扰动和 850 hPa 的湿涡度扰动

Fig. 13 Same as Fig. 12 and Fig. 10e, but for the GFS prediction

看出,美国模式提前 102 h 到 30 h 的 7 个时刻,925 hPa的高度扰动中心是不稳定的,阜宁也没有出现 850 hPa 的湿涡度扰动。在提前 42 h(图 13f) 和提前 30 h(图 13g),预报的 925 hPa 高度扰动槽影响到阜宁。在提前 18 h 和提前 6 h 的预报图 13h 和 13i 上,925 hPa 上的高度扰动中心、槽线和 850 hPa 上的湿涡度扰动都与图 10e 一致了。说明,美国模式提前 18 h 预报出了阜宁低层大气中的高度扰动和湿涡度扰动信息。

6　结论与讨论

提前 30 min 做出龙卷发生地的预报是当前世界性的难题。国际上,很多研究仍然在试图尽早地得到龙卷可能发生的大气环境指标条件。在中国,龙卷是不常发生的小尺度极端天气事件。为此,本文先把历史上 6 次发生在苏北里下河地区的龙卷事件日的再分析变量场分解成瞬时气候和扰动两个部分,发现 6 次事件都与近地面层出现的负高度扰动轴和扰动冷暖气团的对峙有关,龙卷发生在暖气团一侧。这给出了一个从基本的大气变量出发简便快速地分析强对流天气可能发生的扰动方法。其次,模式初始场和模式预报场分解成瞬时气候和扰动两个部分后,扰动部分可以评估欧美模式产品中的扰动变量和扰动指标量对最近一次龙卷发生环境条件的预报能力,得到了下列认识。

(1)在扰动天气图上,龙卷事件都与近地面层出现的负高度扰动轴和扰动冷暖气团的对峙有关,龙卷发生在扰动暖气团一侧。这些指示龙卷可能发生的次天气尺度扰动特征较常规天气图更能清晰地显示出来。

(2)对流层低层的散度扰动、涡度扰动、湿散度扰动和湿涡度扰动均表明大气中存在次天气尺度低值系统扰动形成的条件,它们也是龙卷可能发生的环境条件。

(3)利用对流层低层的高度扰动和湿涡度扰动可以表征大气低层扰动信息,并以此检验模式对大气扰动的预报能力。就这次阜宁发生的与龙卷相联系的次天气尺度高度扰动和湿涡度扰动,欧洲 ECMWF 模式可以提前 42 h,美国 GFS 模式也能提前 18 h 预报出阜宁龙卷可能发生时的低层大气扰动信息。

这次阜宁龙卷恰好发生在有模式分析资料的 14 时(北京时)后的半小时。所以,分析出来的湿散度扰动和湿涡度扰动也恰好有一个中心就在龙卷发生地。欧洲模式能在这 42 h 内从不同的初值出发,美国模式也能在 18 h 内从不同的初值出发预报在相同的地方出现这些扰动特征。这些扰动槽和指标量表明,大气中存在有利于龙卷或其他强对流天气发生的低层辐合等环境条件,要预报龙卷等强对流天气是否出现以及其精准落区仍需要在短时临近时效内加强卫星和雷达等实况资料监测分析以及风暴尺度数值模式的应用。本文的分析也表明,当前全球模式对强对流天气事件发生的大尺度环境已有了较好的预报能力。本文用 6 个例子分析了有利于龙卷发生的扰动环境场。本文没有解决在未来的中尺度强对流天气系统发生潜势区内发生的是雷雨、冰雹、大风、下击暴流,还是龙卷。这仅是一个开端性的研究,更多的例子分析是有必要的。

致　谢:感谢国家气象中心宗志平和郑永光,中国气象局公共服务中心唐千红,北京市气象台时少英等给予的资料支持。美国国家强风暴实验室的郜吉东博士对本文做了文字修改。

参考文献

范雯杰,俞小鼎,2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,41(7):739-805.

钱维宏,江漫,单晓龙,2013. 大气变量物理分解原理及其在区域暴雨分析中的应用[J]. 气象,39(5):537-542.

钱维宏,蒋宁,杜钧,2016. 中国东部 7 类暴雨异常环流型[J]. 气象,42(6):674-685.

钱维宏,于甜甜,2013. 大气变量物理分解法在极端温度事件前期信号提取中的应用[J]. 气象,39(6):665-674.

钱维宏,张广文,黄静,2015. 不同资料大气扰动分量对 2010 年台风鲇鱼强度变化的描述[J]. 气象,41(7):806-815.

Agee E,Church C,Morris C, et al,1975. Some synoptic aspects and dynamic features of vortices associated with the tornado outbreak of 3 April 1974[J]. Mon Wea Rev,103(4):318-333.

Brandes E A,Davies-Jones R P,Johnson B C,1988. Streamwise vorticity effects on supercell morphology and persistence[J]. J Atmos Sci,45(6):947-963.

Bunkers M J,Johnson J S,Czepyha L J, et al,2006. An observational examination of long-lived supercells. Part II:Environmental conditions and forecasting[J]. Wea Forecasting,21,689-714,doi:10.1175/WAF952.1.

Chen Y,Hu Q,Yang Y M, et al,2016. Anomaly-based analysis of extreme heat waves in Eastern China during 1981－2013[J]. Int J Climatol,doi:10.1002/joc.4724.

Corfidi S,Weiss S,Kain J, et al,2010. Revisiting the 3－4 April 1974 super outbreak of tornadoes[J]. Wea Forecasting,25(2):465-

510.

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137: 553-597.

Doswell C A, Edwards R, Thompson R L, et al, 2006. A simple and flexible method for ranking severe weather events[J]. Wea Forecasting, 21, 939-951, doi: 10.1175/WAF959.1.

Doswell C A, Schultz D M, 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms[J]. Electronic J Severe Storms Meteor, 1(3): 1-22.

Glickman T, 2000. Glossary of Meteorology[M]. 2nd ed. Amer Meteor Soc, 855 pp.

Ferguson E W, Ostby F, Leftwich P, 1987. The tornado season of 1985[J]. Mon Wea Rev, 115(7): 1437-1445.

Fujita T, Bradbury D L, Van Thullenar C F, 1970. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965[J]. Mon Wea Rev, 98: 29-69.

Jiang N, Qian W H, Du J, et al, 2016. A comprehensive approach from the raw and normalized anomalies to the analysis and prediction of the Beijing extreme rainfall on 21 July 2012[J]. Nat Hazards. Revision submitted.

Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al, 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from Passive and Microwave Infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. J Hydrometeor, 5: 487-503.

Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al, 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP[J]. Wea Forecasting, 23 (5): 931-952.

Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al, 2014. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95, 1041-1062, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00229.1.

Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence[J]. Wea Forecasting, 21: 449-464.

Mercer A E, Shafer C E, Doswell III C A, et al, 2012. Synoptic composites of tornadic and nontornadic outbreaks[J]. Mon Wea Rev, 140: 2590-2608. doi: 10.1175/MWR-D-12-00029.1.

Metz N, Bosart L, 2010. Derecho and MCS development, evolution, and multiscale interactions during 3-5 July 2003[J]. Mon Wea Rev, 138: 3048-3070.

Qian W H, Jiang N, Du J, 2016. Anomaly based weather analysis vs. traditional total-field based weather analysis for depicting regional heavy rain events[J]. Wea Forecasting, 31: 71-93.

Simmons K M, Sutter D, 2012. The 2011 tornadoes and the future of tornado research[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 93, 959-961, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00126.1.

Thompson R L, Edwards R, 2000. An overview of the environmental conditions and forecast implications of the 3 May 1999 tornado outbreak[J]. Wea Forecasting, 15, 682-699, doi: 10.1175/1520-0434(2000)0152.0.CO;2.

Thompson R L, Smith B T, Grams J S, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS tornado environments[J]. Wea Forecasting, 27, 1136-1154, doi: 10.1175/WAF-D-11-00116.1.

Weisman M A, Evans C, Bosart L, 2013. The 8 May 2009 superderecho: Analysis of a real-time explicit forecast[J]. Wea Forecasting, 28, 863-892, doi: 10.1175/WAF-D-12-00023.1.