

用瞬时扰动法考察龙卷环境系统的模式预报

钱维宏¹ 梁卓轩¹ 罗未萌¹ 杜钧²

(1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2 美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心, College Park 20740, 美国)

摘要: 龙卷作为局地强对流性天气事件的发生与天气和次天气尺度的扰动系统有关。应用“扣除瞬变气候场”的瞬时扰动法对两个全球模式 (ECMWF和GFS) 预报的中国和美国龙卷“扰动系统”进行了考察。回顾了近期研究的2016年6月23日发生在中国东部阜宁的龙卷事件扰动系统和2011年4月27—28日发生在美国南部的多龙卷过程扰动系统。ECMWF对前者的龙卷环境扰动系统能够提前54 h, GFS能够提前18 h预报出低层大气的低压扰动和高层大气的高压扰动以及冷暖扰动气团的变化与对比。ECMWF分别提前3、5、7和9 d对上述美国南部的多龙卷预报出了与观测相吻合的高度扰动和温度扰动, 包括它们的空间结构和随时间的变化。

关键词: 瞬时扰动, 全球模式, 龙卷环境系统

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.004

Examining Performances of Numerical Models in Predicting Tornado Environmental Systems

Qian Weihong¹, Leung Jeremy Cheuk-Hin¹, Luo Weimeng¹, Du Jun²

(1 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 Environmental Modeling Center, NCEP, NOAA, College Park 20740, USA)

Abstract: The tornado formation is largely influenced by the synoptic-scale and sub-synoptic scale anomalous systems. In this paper, the “anomalous weather chart”, which removes the temporal climatology from the conventional weather chart, is applied to analyze the tornado-related anomalous systems and evaluate the global forecasting models’ (ECMWF model and NCEP GFS) performances in predicting such anomalous systems. In this paper, two cases were studied: 1) the recent tornado event occurring in Funing County, China on 23 June 2016 and 2) the strong tornado outbreak in Southern US during 27-28 April 2011. Results showed that both cases are associated with the lower-level anomalous low pressure, upper-level anomalous high pressure systems and the contrast of anomalous warm/cool air masses in the troposphere. The ECMWF model and the NCEP GFS can predict the tornado-related anomalous system for the case 1 in advance of 54 hours and 18 hours, respectively. Furthermore, the ECMWF model is able to predict the spatial structures of strong geopotential height and temperature anomalies, and their evolution for the case 2 in advance of 3, 5, 7, 9 days.

Keywords: temporal climatology, global model, tornado environmental systems

0 引言

龙卷是强对流天气中破坏力最强的一种。美国是龙卷多发国家, 平均每年发生一千多个龙卷, 大多是强度较弱的EF-0级别的龙卷。我国龙卷主要发生在东部平原地区, 尤其以江淮地区为多^[1]。龙卷的尺度小、生命史短, 预报难度极大。目前在美国只能提前15 min做出定时、定点的龙卷预警。美国龙卷的发生多与中尺度对流系统中的超级单体相联系。这些超级单体^[2]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, 路径长达几千米到十几千米, 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^[3]。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强对流天气。天气和次天气尺度系统的形成只可以看作强对流天气发生的必要(环境)条件。

ECMWF和GFS中期数值天气预报模式产品已经在各地气象台得到了广泛的应用。针对发生在中国和美国的龙卷例子, 考察当前这两个全球模式对龙卷天气一次天气尺度系统的预报能力。这两个例子分别发生在美国南部2011年4月27—28日和中国东部2016年6月23日^[4-5]。

收稿日期: 2017年6月20日; 修回日期: 2017年12月4日
第一作者: 钱维宏(1957—), Email: qianwh@pku.edu.cn

1 资料和方法

使用的资料有三套。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(世界时, 下同), 水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的经纬格点, 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时起报的15日预报, 预报时间间隔为6 h。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的预报资料(<http://tigge.ecmwf.int/>)提供的是每天00和12时起报的15日预报, 时间间隔为6 h(00、06、12和18时), 水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬格点, 垂直分8层。ERA Interim的分析场^[6]和两个模式的预报场分别应用于分析对比中。

传统天气图已经使用了一个多世纪。传统天气图上包含了多时空尺度的波动信息。传统的做法是用数学正交分解的原理得到不同的波动分量。由于数学分解函数的不同和选择区域的不同, 分解的波动分量结果也就不同。为了避免传统分解上的不唯一, 把任一大气变量场分解成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^[7]。前者准静态地反映了地球大气中一个固定点上相对太阳辐射年循环和日循环与下垫面辐射达到平衡的状态, 而后者是相对这个平衡态的偏差。后者的偏差场可以绘制成扰动天气图。理论上, 基于扰动场的“扰动天气系统”是产生极端(异常)天气事件的直接原因。所以, 大气变量分解后的扰动场分析是极端天气预报的基础。

根据以上的约定, 任一大气变量场 $F_d(\lambda, \varphi, p, t)$, 如观测时刻 t (每年的第 d 天的第 t 时刻, 每天24 h)的位势高度、温度和风可以分解为瞬变气候场 $\tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p)$ 和瞬时扰动场 $F'_d(\lambda, \varphi, p, t)$ ^[7], 即

$$F_d(\lambda, \varphi, p, t) = \tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p) + F'_d(\lambda, \varphi, p, t), \quad (1)$$

这里, λ 、 φ 和 p 是大气变量所在点的位置(经度、纬度和气压层次), 下标 d (1~365 d)是资料所在日相对每年1月1日的第 d 日。

固定点上的瞬时气候是存在的, 但要准确得到它是困难的。用这个点上几百年的逐时观测资料做瞬时平均(相互抵消掉多变的扰动)是估算瞬时气候的一种方法。由于受到观测资料长度的限制, 研究中的气候场可由30年(1981—2010年)的再分析资料估算得到

$$\tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p) = \sum_{t=1981}^{2010} F_d(\lambda, \varphi, p, t) / 30. \quad (2)$$

这里假定, 在这30年中第 d 日的同一时刻, 正的和负的瞬时扰动相互抵消了, 得到的是准平衡的瞬变气候态。由式(2)定义的气候是逐小时和逐日变化的, 它是用历史资料计算(估算)出的, 不需要预报。这一分解方法已经在我国的区域暴雨和极端温度事件分析中得到了应用^[8-10]。所以, 在本文后面的分析中所提到的“扰动系统”都是指扣除瞬变气候后的扰动天气图上的剩余“天气系统”。

2 中国东部龙卷扰动环境场的实况和模式预报

2.1 实况

数值预报模式产品的天气图表达仍然是常规天气预报的基本方法。在以往的暴雨、热浪和低温事件分析中, 能够看到地面极端天气事件发生地的上空存在着天气或次天气尺度的扰动系统。为此, 用欧洲再分析资料中的基本变量考察当时龙卷发生地对对流层大气中是否也存在一个异常的天气或次天气尺度的扰动系统。

考察龙卷发生地(33.5°N , 120°E)23日的上空大气温度场和高度场上发生了什么变化。常规天气图上难以指示龙卷可能发生的信息, 这是因为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, 即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1是用总场减去了瞬变气候后的扰动变量。00时(图1a)龙卷发生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。06时(图1b), 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)与近地面层上温度扰动的冷暖气团对比零线对应, 龙卷发生在扰动暖气团的一侧。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12时(图1c), 来自北方中层的低压扰动到达阜宁县。与北京2012年7月21日局地暴雨类似的扰动环流形势^[11]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得出^[12]。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。

图2是2016年6月18日00时至25日18时, 经过阜宁龙卷发生地上空每6 h间隔的高度扰动和温度扰动随时间的变化, 表现出了明显的扰动结构。20—23日的4天中出现了3次次天气尺度的高度扰动, 先是在对流

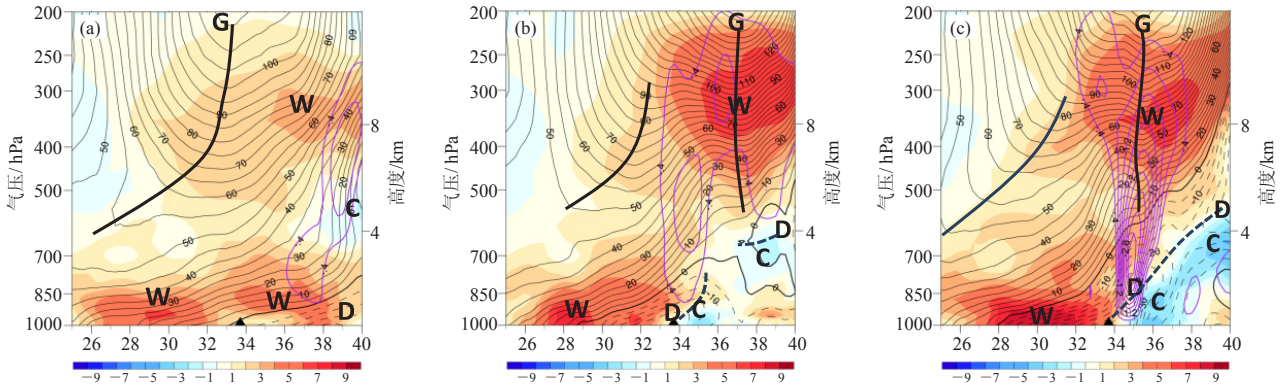


图1 基于再分析 (ERA Interim) 资料沿119.5°E做出的剖面 (a为00时, b为06时, c为12时) (等值线为扰动天气图上的高度扰动, 单位: gpm; 阴影为温度扰动, 单位: °C; 紫色实线为上升速度, 单位: Pa·s⁻¹; G和D为高度中心; W和C为暖冷中心; 粗实线为正高度扰动轴, 粗虚线为负高度扰动轴; ▲处为龙卷发生地)^[4]

Fig. 1 Vertical-latitude cross sections of height anomalies (solid and dashed lines, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: °C) along 119.5°E at 00 UTC (a), 06 UTC (b), and 12 UTC (c) 23 June 2016 (Heavy solid and dashed lines are axes of positive and negative height anomalies while the purple lines indicate the ascending velocity, unit: Pa·s⁻¹. Letters H/L are high/low centers of height and W/C are warm/cold centers of temperature anomalies, respectively. Symbol ▲ indicates the location of tornado. The data used are from the ERA Interim)

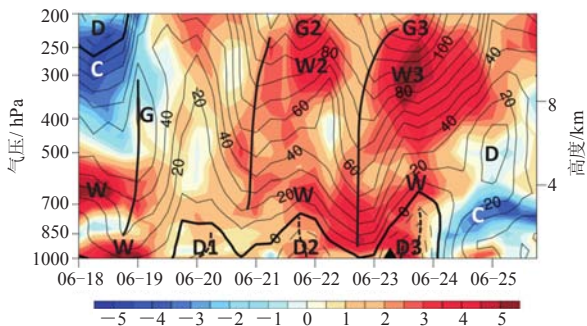


图2 基于再分析资料 (ERA Interim) 的2016年6月18日00时—25日18时龙卷发生地 (阜宁) 上空6 h间隔的高度扰动 (等值线, 单位: gpm) 和温度扰动 (阴影, 单位: °C) 随时间的变化^[4]

Fig. 2 Vertical-time sections of height anomalies (solid and dashed lines, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: 0.5°C) 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)

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2中的第3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, 分别反映的是先龙卷后暴雨的辐合中心。

在中国东部地区的区域暴雨分析中, Qian等^[10]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

$$D'Q' = \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) q', \quad (3)$$

$$V'Q' = \left(\frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \right) q'. \quad (4)$$

比较23日三个时次的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3b)。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3e)。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并与地面上的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。

2.2 模式预报

首先考察ECMWF对阜宁垂直-时间剖面图中高度扰动和温度扰动 (图2) 的预报。图4中清楚地显示出, 欧洲模式提前54 h (图4a) 和提前30 h (图4b) 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。提前90和102 h, 预报出了高度扰动和温度扰动, 但其扰动强度要弱一些。

分析中, 图3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

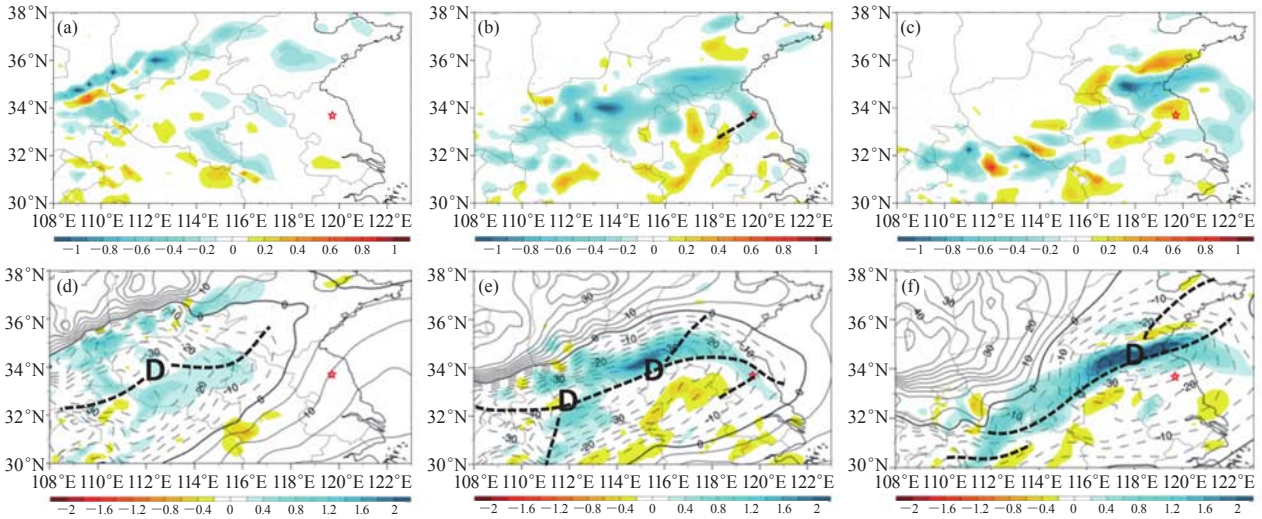


图3 基于模式初始场的850 hPa湿散度扰动 (单位: $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 在2016年6月23日00时 (a), 06时 (b) 和 12时 (c) 的分布, 以及对应三个时刻的925 hPa高度扰动 (实线和虚线, 单位: gpm) 和850 hPa的湿涡度扰动 (阴影单位: $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) (d~f, 粗黑虚线为高度扰动槽线, 黑虚线为地面风辐合线, ☆为阜宁龙卷发生地)^[4]

Fig. 3 Moist divergence anomaly (shading, unit: $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 00 UTC (a), 06 UTC (b), and 12 UTC (c) on 23 June, 2016; (d—f) As same as in (a—c) but for moist vorticity anomaly (unit: $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa and height anomaly (solid and dashed lines, unit: gpm) (The black dashed line is the convergence line of the surface wind. The data is derived from the GFS)

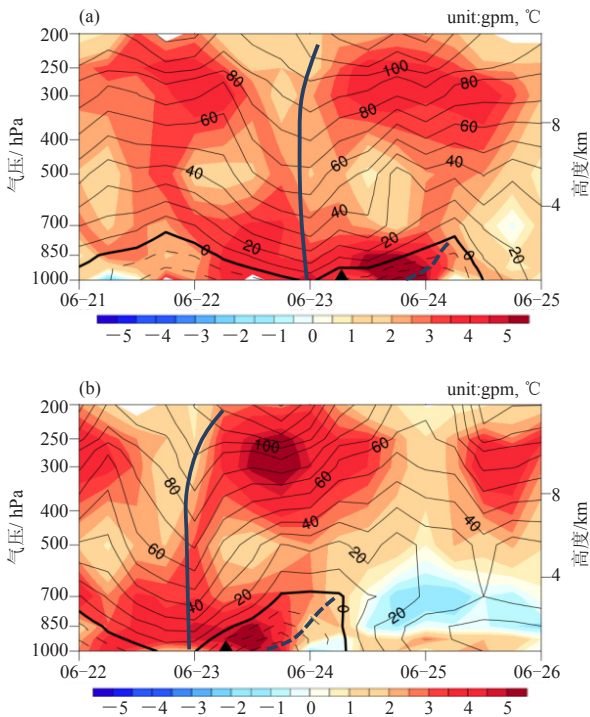


图4 同图2, 但为ECMWF提前54 h (a) 和30 h (b) 预报的高度扰动和温度扰动^[4]

Fig. 4 As same as in Fig. 2 but for height-temperature anomalies of the ECMWF prediction in advance of 54 h (a) and 30 h (b)

可能出现的强对流天气发生位置是有帮助的。集中分析和评估两个模式对925 hPa高度扰动和850 hPa湿

度扰动 (图3e) 的预报。图5是对ECMWF预报提前102 h到提前6 h预报产品的分析^[4]。虽然提前102和90 h预报中在925 hPa出现了负的高度扰动, 但850 hPa的湿涡度扰动都在阜宁以北地区 (图5a和5b)。从提前78 h开始 (图5c) 到提前54 h (图5e), 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5f) 到提前6 h (图5i) 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3e基本一致。可见, ECMWF至少提前42 h预报出了阜宁低层大气中强烈的高度扰动和湿涡度扰动信息。

同样地, 钱维宏等^[4]也分析了GFS预报提前102 h到提前6 h预报的扰动量 (图6)。可以看出, 美国模式提前102 h到30 h的7个时刻, 925 hPa的高度扰动中心位置是不稳定的, 阜宁也没有出现850 hPa的湿涡度扰动。在提前42 h (图6f) 和提前30 h (图6g), 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 (图6h和6i) 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3e一致了。说明, GFS提前18 h预报出了阜宁低层大气中强烈的高度扰动和湿涡度扰动信息。

3 美国南部龙卷扰动环境场的实况和模式预报

3.1 实况

2011年4月27—28日美国南部多龙卷发生后, 美

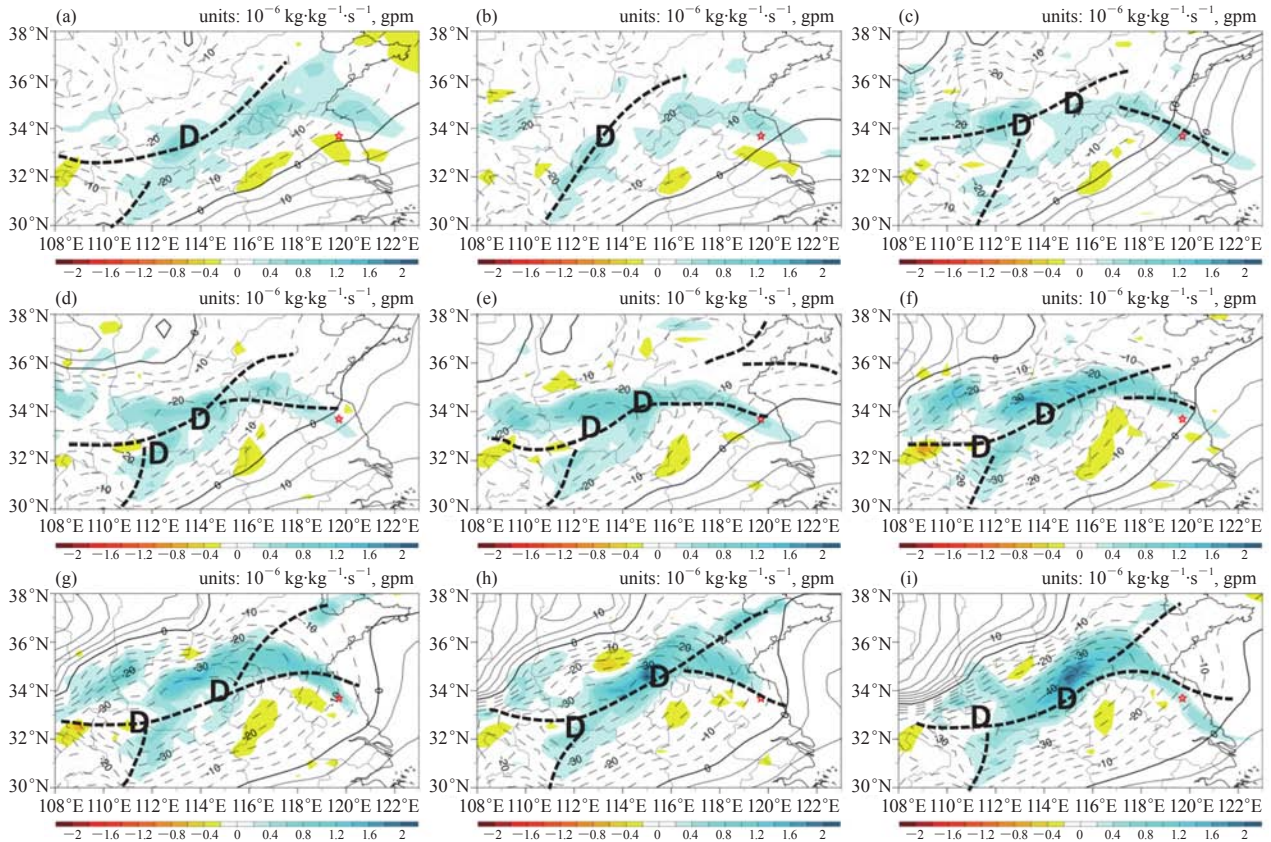


图5 同图3e, 但为ECMWF预报: 提前102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h) 和6 h (i) 的扰动量分析^[4]

Fig. 5 As same as in Fig. 3e, but for the ECMWF prediction in advance of 102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h), and 6 h (i)

国研究人员^[2]也用传统的天气图做了环境场的分析。传统天气图上,总高度的时间变化没有清楚的波动,只有总温度垂直剖面上能够看到一些波动,但这些波动难以指示27日夜间的龙卷。与传统天气图的表达不同,图7a和7b分别是沿88°W和84°W位置上高度异常和温度异常随时间的变化。龙卷发生在地面附近低压扰动出现的时候,也对应高层大气正的高度扰动和低层大气正温度扰动转为负温度扰动的时候。

图8是2011年4月27—28日美国南部多龙卷发生期间4个时间点上的925 hPa (图8a~8d)和垂直剖面(图8e~8h)上的高度扰动和温度扰动分布。龙卷和降水位置位于925 hPa低压扰动附近靠近暖气团的一侧。由于降水的原因,925 hPa的暖气团中龙卷发生地范围内温度扰动为负值(图8a和8b)。日常业务中,预报员很少画高度和温度的垂直剖面图。关注图8e~8h的高度扰动和温度扰动的垂直剖面分布。在龙卷和暴雨发生位置的上空对流层—平流层大气中,存在4个(两对)温度扰动气团并与一对高低压扰动

中心对应。在正(负)的高度扰动中心的下方是正(负)的温度扰动,而在其上(下)方是负(正)的温度扰动。垂直方向上分布的一对高度扰动与两对温度扰动是满足静力平衡关系的,即用高度扰动场可以根据静力平衡关系计算出温度扰动的分布。在一个有限的范围内,高度扰动与温度扰动的强度和对比越强烈,则暖(冷)气团靠近低压一侧的上升(下沉)速度会越大。这是扰动大气中有效位能释放并转变成动能的结果。于是,在暖气团的一侧会出现龙卷和暴雨,而在冷气团的一侧会出现下击暴流。图8c和图8g是2011年4月27—28日期间龙卷最多和最强的时刻,扰动气团之间的温度对比也是最强的。

3.2 模式预报

关注ECMWF对图7a和7b的预报。图9是ECMWF起报时间为2011年4月25日00时(a),23日00时(b),21日00时(c)和19日00时(d)分别提前3、5、7和9 d预报的扰动场。发生龙卷和暴雨的扰动形势是低层大气出现负的高度扰动,高层大气出现正的高

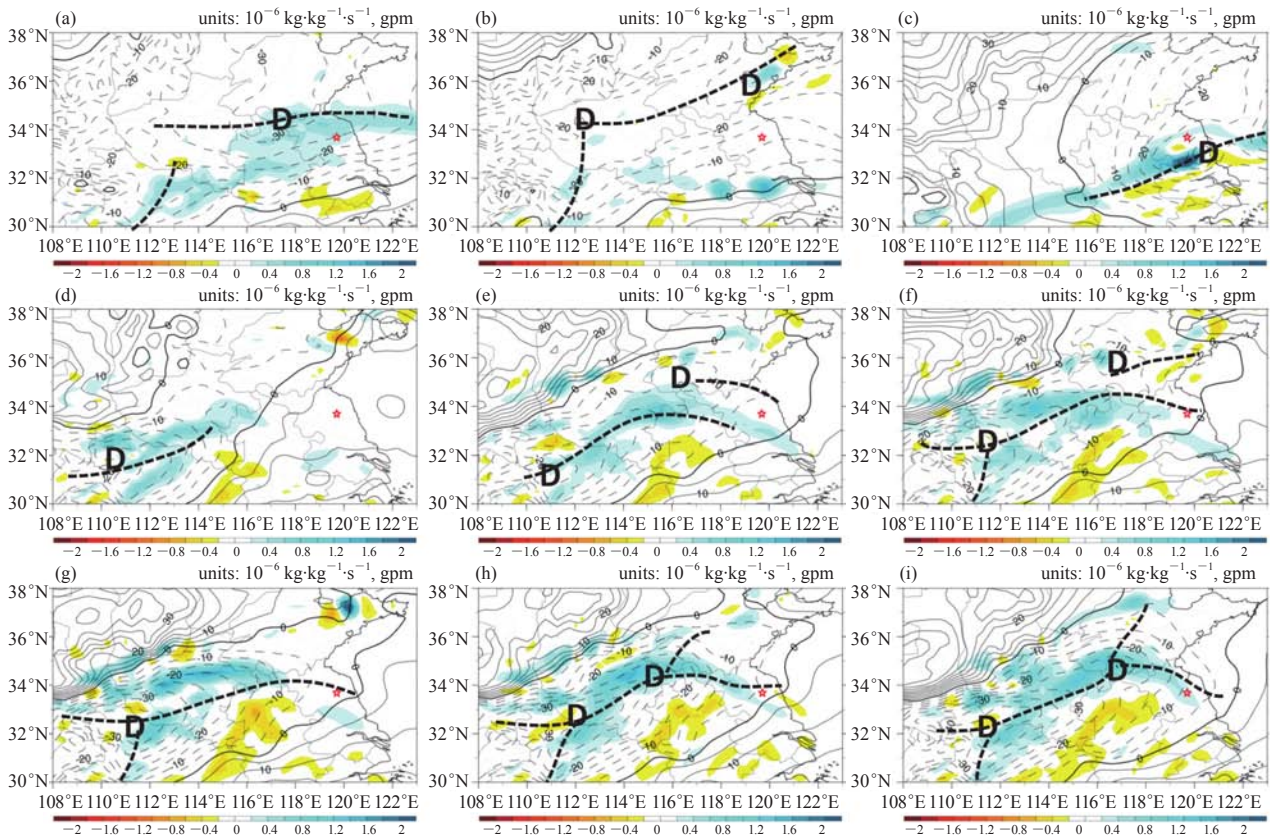


图6 同图5和图3e, 但为GFS预报的各时次925 hPa高度扰动和850 hPa的湿湿度扰动^[4]

Fig. 6 As same as in Fig. 5 and Fig. 3e, but for the GFS prediction in advance of 102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h), and 6 h (i)

度扰动, 温度扰动从正异常转为负异常。提前3、5和9 d的预报都满足上述扰动形势, 只是提前7 d的温度扰动预报没有达到条件。这也说明, 模式也会在一些起报时刻由于初值误差会影响到未来几天的环流形势预报结果。

4 结论

龙卷属于小尺度的强对流性天气事件, 对其发生地点(路径)预报尤为困难。但是这样的小尺度强对流天气是大气热力和动力状态大大偏移了平衡态的结果, 即出现了剧烈的次天气尺度扰动系统。这个平衡态的瞬变气候具有日循环和年循环的变化, 它们是不需要预报的, 只需要认识。这样的瞬变气候是一个随时间变化的参考态。大气瞬时扰动变量及其构成的扰动系统如果接近地面就会产生地面上的极端天气事件。因此, 需要从观测、再分析和模式预报的资料中减去瞬变气候参考态, 得到扰动变量并绘制扰动天气图。后者就可以比较直观地应用于龙卷和暴雨等地面极端天气事件的落区预报了。由扰动基本变量可以构造具有物理含义的指标量, 如扰动湿湿度和扰动湿散

度等^[10]。指标量达到一定的阈值就有可能出现确定的极端天气事件。

龙卷相对其他的极端天气事件, 如暴雨、冰雹和雷暴等, 其强度更强。近期的比较也可以看出^[5], 龙卷发生时和发生前对应的一对(两个相邻)的高度扰动系统和两对(四个相邻)的温度扰动系统也特别强烈。这些天气尺度和次天气尺度的扰动系统说明, 龙卷发生前和发生时是有大气扰动信号的。地面上极端天气事件的发生是前期大气扰动能量不断积累到最后迅速释放的结果。

对2016年6月23日发生在中国东部阜宁的龙卷事件, ECMWF能够提前54 h, GFS能够提前18 h预报出了低层大气的低压扰动和高层大气的高压扰动以及冷暖扰动气团的变化与对比。对2011年4月27—28日发生在美国南部的多龙卷过程, ECMWF分别提前3、5、7和9 d预报出了与观测对应的高度扰动和温度扰动, 包括它们的空间结构随时间的变化。因此, 在全球中期模式预报产品的解释应用中, 强烈建议预报员使用扰动天气图代替传统天气图。

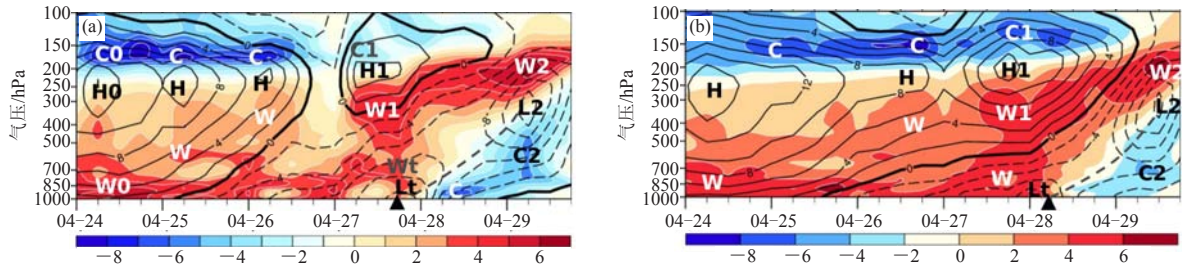


图7 沿32°—38°N平均的垂直—时间剖面图：88°W (a) 和84°W (b) 位置上高度扰动 (等值线, 单位: dagpm) 和温度扰动 (阴影, 单位: K) (▲为龙卷在2011年4月27日18时和 4月28日06时的位置; H/L和W/C为高低压中心和冷暖中心)^[5]
Fig. 7 Vertical pressure–time sections of height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K) averaged over latitudes of 32°–38°N at 88°W(a) and at 84°W(b) (Symbol ▲ indicates the central position of tornadoes at 18 UTC 27 and 06 UTC 28 April 2011. The heavy dashed line links two low centers of L1 and L2. Letters H/L and W/C indicate the centers of height and temperature anomalies, respectively)

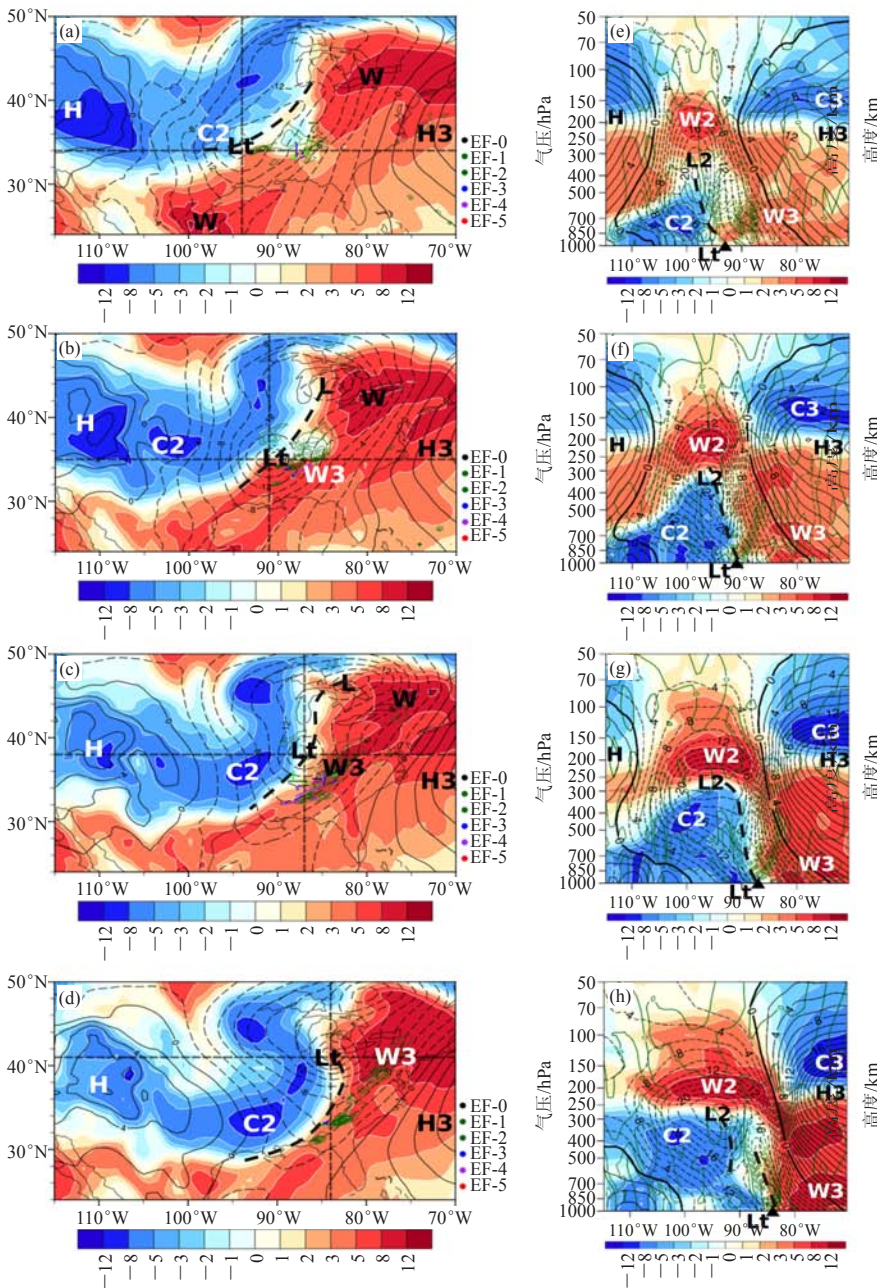


图8 2011年4月27日12时 (a), 18时 (b) 及28日00时 (c) 和06时 (d) 925 hPa上的高度异常 (等值线, 单位: dagpm) 和温度异常 (阴影, 单位: K)^[5], 以及其沿34°N (e), 35°N (f), 38°N (g) 和41°N (h) 的垂直分布 (左侧绿线为降水率 (2.5 mm·h⁻¹), 粗虚线为高度扰动槽, 颜色线段为龙卷路径; ▲为扰动低压的中心位置, 绿线指示垂直速度 (单位: Pa·s⁻¹))

Fig. 8 Horizontal height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K) at 925 hPa at 12 UTC 27 April (a), 18 UTC 27 April (b), 00 UTC 28 April (c), and 06 UTC 28 April (d) 2011, and vertical distributions along 34°N (e), 35°N (f), 38°N (g), and 41°N (h)^[5] (In Figs. 8a–8d, green line indicates the hourly precipitation rate (unit: mm·h⁻¹) and the thick dashed line denotes the trough of height anomalies along with the front of temperature anomalies. In Figs. 8e–8h, symbol ▲ indicates the central position of low (Lt) in surface anomaly, while think dashed lines indicate the trough axis in height anomalies, the green solid and dashed lines respectively indicate anomalous sinking and rising pressure velocities (unit: Pa·s⁻¹ interval))

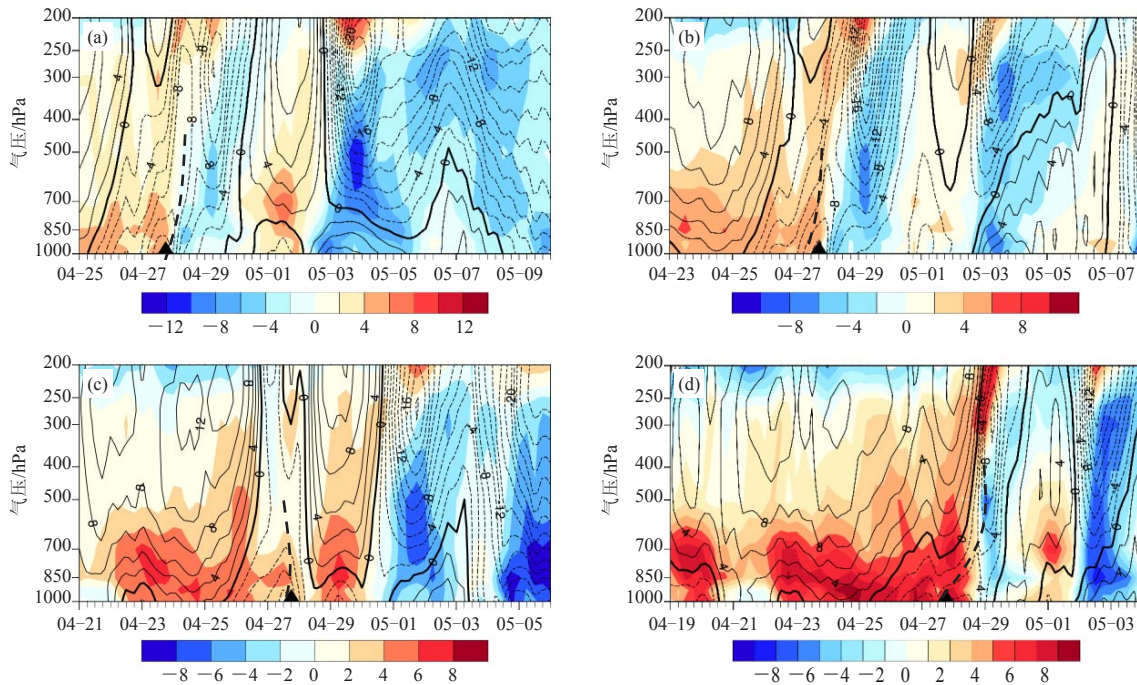


图9 同图7a沿88°W，但为ECMWF预报，起报时间为2011年4月25日00时（a），23日00时（b），21日00时（c）和19日00时（d），分别提前3、5、7和9 d预报的扰动场^[5]

Fig. 9 As same as in Figure 7a along 88°W, but for ECMWF model prediction initiated at 00 UTC 25 April (a) in advance of 3 days, at 00 UTC 23 April (b) in advance of 5 days, at 00 UTC 21 April (c) in advance of 7 days, and at 00 UTC 19 April (d) in advance of 9 days

参考文献

- [1] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 739-805.
- [2] Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95: 1041-1062, doi:10.1175/BAMS-D-11-00229.1.
- [3] Glickman T. Glossary of Meteorology (2nd ed). American Meteorological Society, 2000.
- [4] 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): 129-143.
- [5] Qian W H. Temporal Climatology and Anomalous Weather Analysis. Springer, 2017.
- [6] Dee D P, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [7] 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.
- [8] 钱维宏, 江漫, 单晓龙. 大气变量物理解析原理及其在区域暴雨分析中的应用. 气象, 2013, 39(5): 537-542.
- [9] 钱维宏, 于甜甜. 大气变量物理解析法在极端温度事件前期信号提取中的应用. 气象, 2013, 39(6): 665-674.
- [10] Qian W H, Jiang N, Du J. Anomaly based weather analysis vs. 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] 钱维宏, 张广文, 黄静. 不同资料大气扰动分量对2010年台风鲇鱼强度变化的描述. 气象, 2015, 41(7): 806-815.