

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

# 中国东部 7 类暴雨异常环流型<sup>\* 1</sup>

钱维宏<sup>1</sup> 蒋宁<sup>1</sup> 杜钧<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

<sup>2</sup> 美国国家海洋大气局国家环境预报中心, MD 20740

**提 要:** 近年来的研究发现, 瞬变扰动天气图上的扰动场天气系统对区域暴雨的落区指示能力强于传统天气图上的总场天气系统。为供预报员在业务预报中参考, 本文划分 1998 年发生在中国东部地区的 41 日次区域暴雨为 7 类扰动场天气系统。与区域暴雨相联系的 7 类异常环流型分别是: 华南切变线、华南涡旋、华南倒槽、长江切变线与槽、沿江涡旋、华北涡旋和东北涡旋。无论是在对流层的垂直剖面上, 还是在 850 hPa 水平分布上, 扰动天气图上位势高度低值和风扰动辐合处并配合大的水汽扰动对应区域暴雨, 而传统天气图上的低值系统和高水汽区与暴雨之间存在位置上的偏移。由此建议, 用实况大气变量和中期数值模式产品绘制扰动天气图有助于预报员确定区域暴雨落区。

**关键词:** 区域暴雨, 传统天气图, 扰动天气图, 异常环流型

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.003

## Seven Anomalous Synoptic Patterns of Regional Heavy Rain in Eastern China

QIAN Weihong<sup>1</sup> JIANG Ning<sup>1</sup> DU Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871

<sup>2</sup> Environmental Modeling Center/NCEP/NOAA, College Park, MD 20740, USA

**Abstract:** The advantages of the anomalous synoptic systems over the traditional total ones in locating regional heavy rain (RHR) have been revealed by recent work of the anomaly-based synoptic chart. Forty-one daily heavy rain cases in eastern China from 1998 are grouped into seven patterns based on the anomalous synoptic systems. The seven patterns of anomalous synoptic systems associated with regional heavy rain include the shear in South China, vortex in South China, reversed trough in South China, shear and trough along the Yangtze River, vortex along the Yangtze River, vortex in North China and vortex in Northeast China. The RHR can be well located by the negative regions of anomalous geopotential height, wind anomalous convergence combined with high moisture anomaly, which is evident from both the vertical cross-sections and the 850 hPa horizontal distributions. This overcomes the shortage of traditional synoptic chart in which total field systems and high moisture regions do not collocate with heavy rain areas. It is recommended that anomaly-based synoptic chart should be applied in the practice of short-term and medium-range forecasts by using the products of the current state-of-the-art operational numerical weather models.

**Key words:** regional heavy rain, traditional synoptic chart, anomaly-based synoptic chart, anomalous synoptic patterns

\* 国家自然科学基金项目(41375703)和公益性行业(气象)科研专项(201306032)共同资助  
2015 年 5 月 25 日收稿; 2015 年 12 月 2 日收修定稿  
第一作者: 钱维宏, 主要从事天气气候方面的研究. Email: qianwh@pku.edu.cn

## 引 言

区域暴雨在我国东部一年四季都可能发生。统计发现,1960—2010 年中国发生了 3640 个大于相邻两个站的区域暴雨,年平均为 71 个暴雨事件,而大于相邻 10 站的区域暴雨有 1659 个事件,平均每年 32 个暴雨事件(Shan et al, 2015)。对日(24 h)大于相邻 10 站降水达到暴雨(50 mm)的事件既考虑了时间持续性(duration),又考虑了范围(coverage)和降水强度(intensity)等衡量暴雨的三个指标。这样的区域日强降水正是各级政府和公众关注的极端天气事件。如何提前准确地预报出区域暴雨的落区更是我国预报员十分关注的问题。早期区域暴雨预报的主要工具是常规天气图。预报员根据几个小时前的环流型,如低压、气旋、切变线、倒槽、锋区等就可以推断未来几小时到 24 h 内可能发生的区域暴雨。但常常暴雨的落区在切变线的右侧和低空急流的左侧(朱乾根, 1975; 黄土松, 1981)。现代数值天气预报模式可以直接预报未来短期,甚至中期内可能发生的暴雨。但是,即使最好的欧洲中心的中期天气预报模式对我国暴雨的落区也存在偏差(Qian et al, 2013)。

区域暴雨属于极端事件或异常事件,预报异常事件寻找异常大气信号是一种具有前景的做法(杜钧等, 2014)。近年来,北京大学与美国 NOAA 合作共同研究了大气瞬变扰动变量和各种动力学参数在区域暴雨落区中的应用,取得了预期的效果(钱维宏等, 2012; 钱维宏等, 2013a; 钱维宏, 2013; Qian et al, 2013; Shan et al, 2015; Qian et al, 2015a; 2016)。本文用发生在 1998 年的中国 41 日次区域暴雨事件通过环流分型和比较,阐述扰动天气图上的环流系统对区域暴雨落区的指示意义,供预报员在业务预报中参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了三种来源的资料。其一是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料(<http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/index>),包括温度、位势高度、风和比湿等大气变量,空间分辨

率  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ , 时间分辨率 6 h(Dee et al, 2011)。其二是中国大陆 754 站 24 h 降水量资料。它在中国东部站点分布比较均匀,两站之间的距离在 66~163 km。其三是 Chen 等(2010)利用 Kriging 方法内插出的中国大陆 0.5 经纬度格点上的日降水量资料。两套降水资料用于分析区域暴雨与大气环流系统之间的关系。

### 1.2 方法

根据近期研究,任一大气变量场都可以分解成为瞬时的气候分量场和相对气候的扰动场两个部分(Qian et al, 2014b)。前者为准静态地反映了太阳辐射与下垫面辐射达到平衡的状态,而后者是相对这个瞬时平衡态的偏差。理论上,基于扰动场的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气候场  $\tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p)$  和扰动场  $F'_d(\lambda, \varphi, p, t)$ (钱维宏, 2012b; 2012c; Qian et al, 2014b),即

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

式中,  $\lambda, \varphi$  和  $p$  是大气变量所在点的位置(经度、纬度和气压层次),下标  $d(1 \sim 365 \text{ d})$  是资料所在日相对每年 1 月 1 日的第  $d$  日。

气候场由 30 年(1981—2010)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时气候态。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(钱维宏等, 2013a; 2013b; 江漫等, 2014; Qian et al, 2014a; Qian et al, 2016)。

理论上应该存在一个年循环的 8760 个时刻( $365 \text{ d} \times 24 \text{ h}$ )的瞬时气候变化场。如果有过去百年逐小时覆盖全球每千米的多层次和多变量观测资料,就可以很好地估算出这个理想的瞬变气候场。但是,实际的情况不尽人意。目前多家气象中心的

再分析资料被认为是对过去几十年历史观测的代表。原始器测数据和同化方法的引入能够反映不同再分析资料的质量。自从同化模式引入了 1979 年以来的卫星观测后,再分析资料的质量有了大的提高。目前研究和业务上使用比较多的是美国的两套三维同化方法的  $2.5^\circ$  经纬格点的再分析资料,以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的  $0.75^\circ$  经纬格点和日本气象厅的  $1.25^\circ$  经纬格点的四维同化再分析资料。不同的同化方法产生的初始场对中期数值天气预报结果会产生不同的影响。欧洲中心的中期预报对我国的环流形势预报可以达到 6.7 d,而美国的只有 3 d(Qian et al, 2013)。欧洲模式对 2012 年 Sandy 飓风在美国东北部登陆点的预报也能提前 7 d,而美国模式只提前了 3 d(Bassill, 2014)。直接观测资料覆盖范围有限。美国当日分析资料成为当前很多区域模式的初始场,但其历史资料长度只有十多年。综合考虑到卫星观测资料和四维同化方法的使用以及我国预报员对 ECMWF 中期模式预报产品的日常业务使用,本文选择用欧洲过去 30 年(1981—2010 年)的每日四时次再分析资料,由式(2)计算得到瞬变气候场。根据上述对瞬变气候的定义,用 ECMWF 再分析资料分解的扰动系统对我国区域暴雨落区的指示能力优于用 NCEP 再分析资料的结果(钱维宏等, 2012; 钱维宏, 2013; 钱维宏等, 2013a)。

利用传统的常规天气图,预报员对未来 24 h 内区域暴雨的预报是以环流型为背景场的。中国东部区域暴雨的一种环流型是切变线,此外还有南方气旋和北方气旋等。1998 年我国长江流域发生了历

史性的暴雨洪涝灾害。根据产生暴雨水汽所在的主要高度 850 hPa,钱维宏(2013)已经绘制了 1980—2011 年中国东部日区域暴雨在传统天气图上的环流与扰动天气图上的环流形势对比。在此,以 1998 年的 41 日次区域暴雨为对象,归并它们为 7 种环流型作合成分析。依据 850 hPa 上的扰动环流系统,归并暴雨环流型的标准和步骤是:把日区域暴雨按华南、长江、华北和东北四个地理区域划分;在华南区域把扰动切变线的暴雨合成为一类,倒槽和涡旋暴雨合成为另外的两类;在长江流域把扰动涡旋和扰动切变线与扰动槽线的暴雨合并为两类;在华北和东北地区把扰动涡旋型暴雨进行合并。这样,合成的暴雨是单个暴雨累加的平均,所以合成的降水中心值小于单个暴雨中心值。同样,各个大气变量的合成场也弱于单个例子的变量场。

## 2 区域暴雨环流型

### 2.1 华南切变线类暴雨

1998 年 1—8 月期间,华南有 4 次类似的切变线环流系统下的区域性暴雨。4 次区域暴雨的日期在表 1 中,分别出现在 6 月 9、14、21 日和 7 月 29 日。对 1998 年发生在我国东部的区域性暴雨分析发现,世界时 0000 时作为中间时间点的高空扰动环流系统与地面前 12 h 和后 12 h 的累积 24 h 区域暴雨有较好的位置对应关系(Qian et al, 2015a)。因此,用上述 4 个世界时 0000 时的大气四变量合成分析研究与 24 h 区域暴雨落区的对应关系。

表 1 1998 年 41 个区域暴雨日对应的天气系统

Table 1 Synoptic systems of 41 regional heavy rain days in 1998

天气系统	暴雨出现日期	日数/d
华南切变线	6 月 9 日, 14 日, 21 日, 7 月 29 日	4
华南涡旋	1 月 14 日, 3 月 9 日, 5 月 14 日, 7 月 24 日	4
华南倒槽	2 月 16 日, 17 日, 3 月 8 日, 5 月 22 日, 6 月 24 日	5
长江切变线和槽	5 月 2 日, 6 月 13 日, 19 日, 23 日, 25 日, 26 日, 7 月 3 日, 22 日, 8 月 27 日	9
沿江涡旋	4 月 11 日, 5 月 23 日, 6 月 12 日, 30 日, 7 月 23 日, 30 日	6
华北涡旋	7 月 1 日, 2 日, 8 月 4 日, 7 日, 15 日, 22 日	6
东北涡	7 月 6 日, 7 日, 8 日, 13 日, 14 日, 15 日, 8 月 5 日	7

图 1a 给出的是上述 4 日总高度和气候高度以及总温度和气候温度沿  $116.25^\circ\text{E}$  世界时 0000 时的合成垂直剖面分布。由于总高度与气候高度和总温

度与气候温度的基础数值都较大,它们的垂直分布曲线画在一起,看不出明显的差异。能够看出它们之间的差异并且做出对暴雨落区的指示性判断,那

是预报员的经验。这种经验需要经过长期的预报实践与总结。但这种经验往往只可意会,难以言传。与此不同,我们把它们的差值绘制在图 1b 中,称为扰动天气图,则地面暴雨带就出现在从对流层上部延伸下来的高度扰动轴线的地方,也在低层大气温度扰动对比最清楚的地方。总风的垂直分布在地面暴雨带的两侧风速是不等的,如图 1c 中暴雨带的南

侧西南风大于北侧的东北风。但在图 1d 中暴雨带两侧的扰动西南风和扰动东北风势力相当,方向相反,能够更好地解释和指示地面暴雨的落区。相对湿度垂直剖面分布上,气候比湿在华南低层分布范围很广,但合成的总湿度与气候之间有一个集中的差(图 1e)。这个高湿度差就在暴雨带的上空,最大值大致在 700 hPa 处(图 1f)。

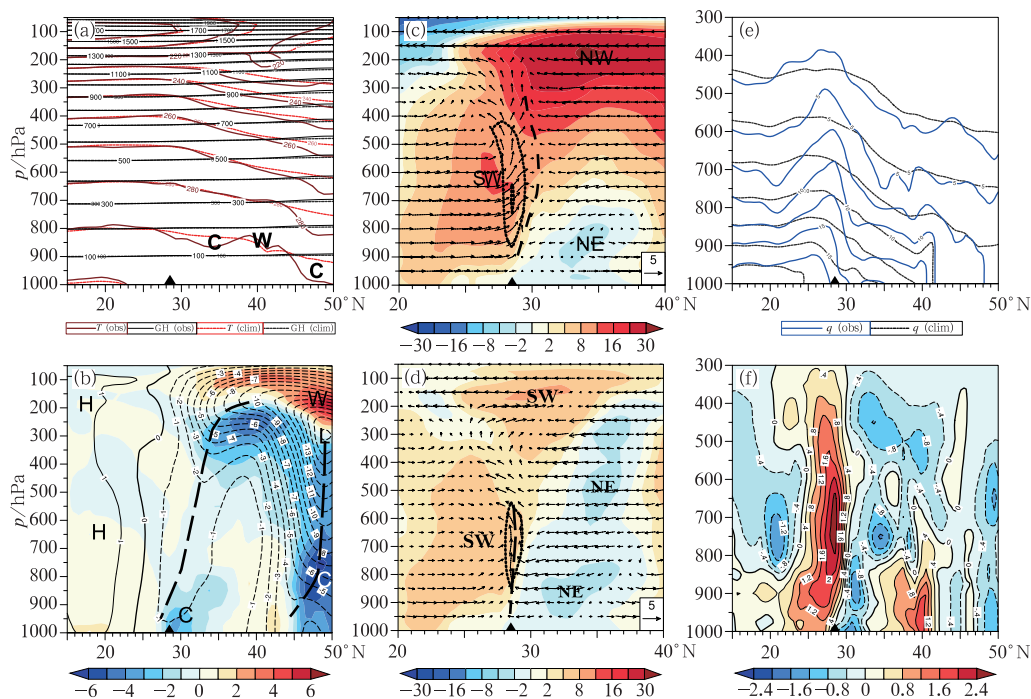


图 1 华南切变线类暴雨四变量沿 116.25°E 世界时 0000 时的垂直剖面合成分析

(a) 总高度(黑实线)和气候高度(黑虚线)(单位: dagpm)以及总温度(红实线)和气候温度(红虚线)(单位: K),  
 (b) 高度异常(实线和虚线,单位: dagpm)和温度扰动(阴影,单位: K), (c) 总风和(d)风扰动(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
 (e) 总比湿(蓝线)和气候比湿(黑线)(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (f) 比湿扰动(阴影,单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
 [符号▲位置指示暴雨带,(c)和(d)中,细点线为上升速度( $0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 间隔,放大了 10 倍),(b)中粗虚线为高度扰动低值轴线,而在(c)和(d)中,细点线为上升速度( $0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 间隔,放大了 10 倍),(b)中粗虚线为高度扰动低值轴线,而在(c)和(d)中,细点线为上升速度( $0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 间隔,放大了 10 倍),“C/W”和“L/H”分别为温度冷/暖中心和高度低/高中心,“SW”,“NW”和“NE”分别为西南风、西北风和东北风]

Fig. 1 Vertical-latitude cross sections of four basic variables for the composite of shear in South China in 1998 along 116.25°E at 0000 UTC

(a) total height (solid-black line) and climatic height (dashed black line)(unit: dagpm) as well as total temperature (solid red line) and climatic temperature (dashed red line)(unit: K),  
 (b) height anomalies (solid and dashed lines, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K),  
 (c) total winds and (d) wind anomalies (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (e) total specific humidity (blue line) as well as its climatic component (black line)(unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
 (f) specific humidity anomalies (shading, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

[The heavy rain area is indicated by the symbol ▲; In (c) and (d) the thin dotted line denotes the ascending velocity ( $0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  interval, enlarged 10 times). The heavy dashed line is the axis of height anomaly trough in (b) and wind convergence line in (c) and (d). Letters “C/W” and “L/H” indicate temperature colder/warmer centers and height lower/higher centers related to the climatology respectively. Letters “SW”, “NW” and “NE” indicate the southwesterly, northwesterly and northeasterly winds, respectively]



综合高度扰动、温度扰动、风扰动和水汽扰动所在的高度,选择在 850 hPa 绘制高度、温度、风和比湿总场与扰动场的水平对比,让预报员认识传统天气图与扰动天气图上系统对区域暴雨的指示能力(钱维宏,2011;2012a)。图 2a 为华南切变线暴雨对应的 850 hPa 合成风场。区域暴雨的北侧有一切变线,暴雨的南侧存在西南低空急流。与此不同,图 2b 中区域暴雨就出现在扰动切变线上。扰动切变线南侧的西南气流和北侧的东北气流强度相当,

方向相反。在 850 hPa 总高度场上,我国西南有一低涡,区域暴雨位于高度槽的南侧,温度场对暴雨落区没有指示意义(图 2c)。与此不同,850 hPa 高度扰动场上区域暴雨位于东部海上向西延伸的低值槽上,也位于北冷南暖的温度扰动对比零线附近(图 2d)。在 850 hPa 总比湿场上(图 2e),中国上空有三条大的湿度带,区域暴雨只与其中一条有联系。在比湿扰动场上(图 2f),区域暴雨就出现在最大的一条湿度扰动轴线上。

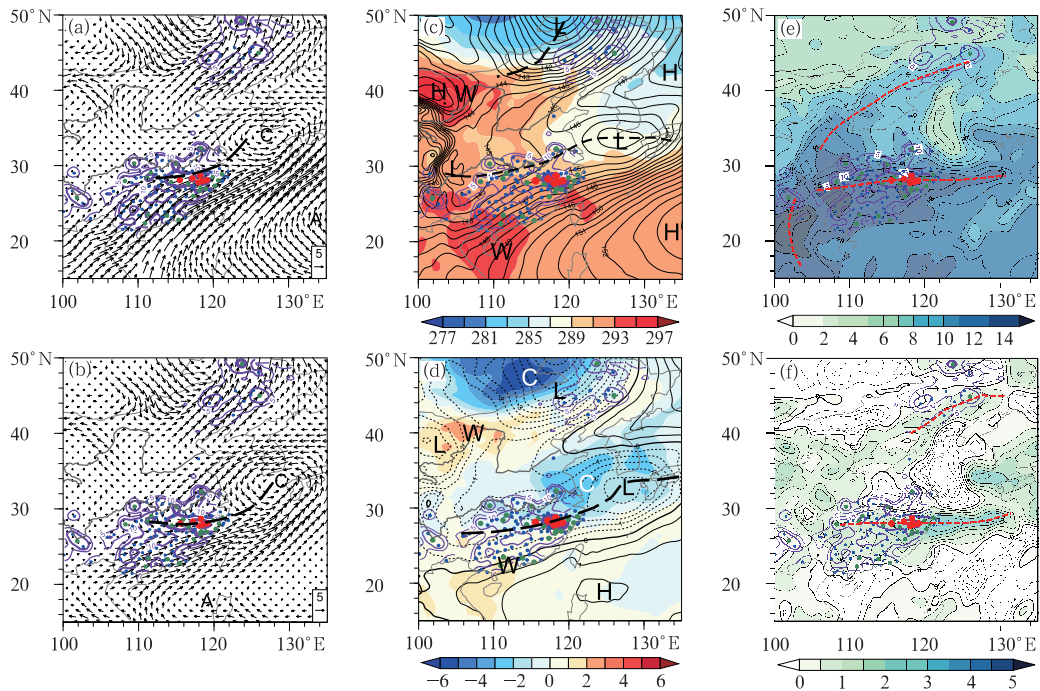


图 2 华南切变线类暴雨四变量在 850 hPa 世界时 0000 时的合成分布

(a)总风(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和(b)风异常(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (c)总高度(细实线, 单位: dagpm)和总温度(彩色阴影, 单位: K), (d)高度扰动(实线和虚线, 单位: dagpm)和温度扰动(彩色阴影, 单位: K), (e)总比湿和(f)比湿扰动(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  间隔), 蓝色实线为日平均降水量等值线, [蓝、绿和红色点分别表示日平均降水量为 10~25、25~50 mm 和超过 50 mm 的站点, (e)和(f)中红虚线为高比湿轴]

Fig. 2 Composites of four basic variables averaged for the group of four shear case heavy rains in South China at 850 hPa at 0000 UTC

(a) total winds (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (b) wind anomalies (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (c) total height thin solid line, unit: dagpm) and total temperature (color shading, unit: K), (d) height anomalies (solid and dashed lines, unit: dagpm) and temperature anomalies (color shading, unit: K), (e) total specific humidity (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and (f) anomalies (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

[Blue solid lines are the daily mean precipitation contours, blue, green and red dots are the daily mean precipitation amounts of 10–25 mm, 25–50 mm and exceeding 50 mm, respectively.

In (e) and (f) red dashed line indicates the axis of high specific humidity]

## 2.2 华南涡旋类暴雨

华南涡旋对应的区域暴雨有 4 日次(表 1), 它

们分别出现在 1 月 14 日、3 月 9 日、5 月 14 日和 7 月 24 日。图 3a 给出了华南涡旋类暴雨沿 116.25°E 的合成总高度和总温度及其气候场的垂直剖面, 它

们也难以直接指示区域暴雨的落区。但暴雨就位于高度扰动低值轴线到达地面的位置上,也位于低层温度扰动的正负对比零线附近(图 3b)。取低层

850 hPa层的总风和风扰动绘制的天气图,区域暴雨位于华南总风涡旋东西两侧切变线的南侧,暴雨区上游有强的西南气流(图4a),但在风扰动场上暴雨

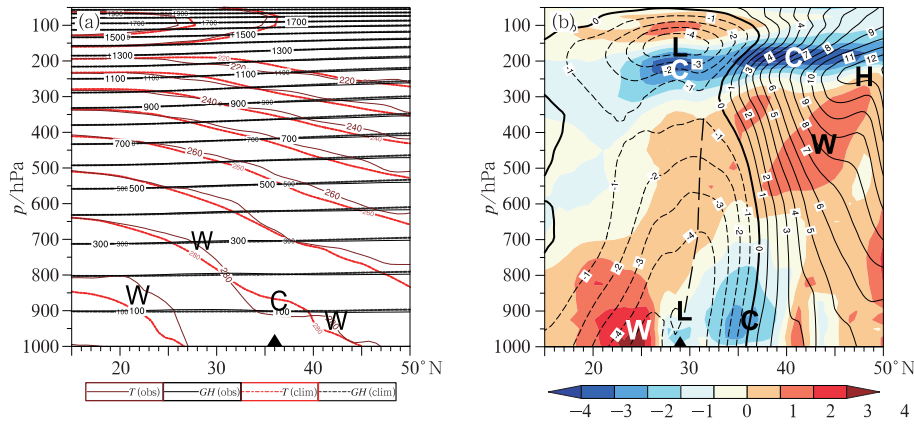


图 3 同图 1a 和 1b,但为华南涡旋类暴雨沿 116.25°E 的垂直剖面合成分析  
Fig. 3 Same as Figs. 1a and 1b, but for the heavy rain of South China vortices along 116.25°E

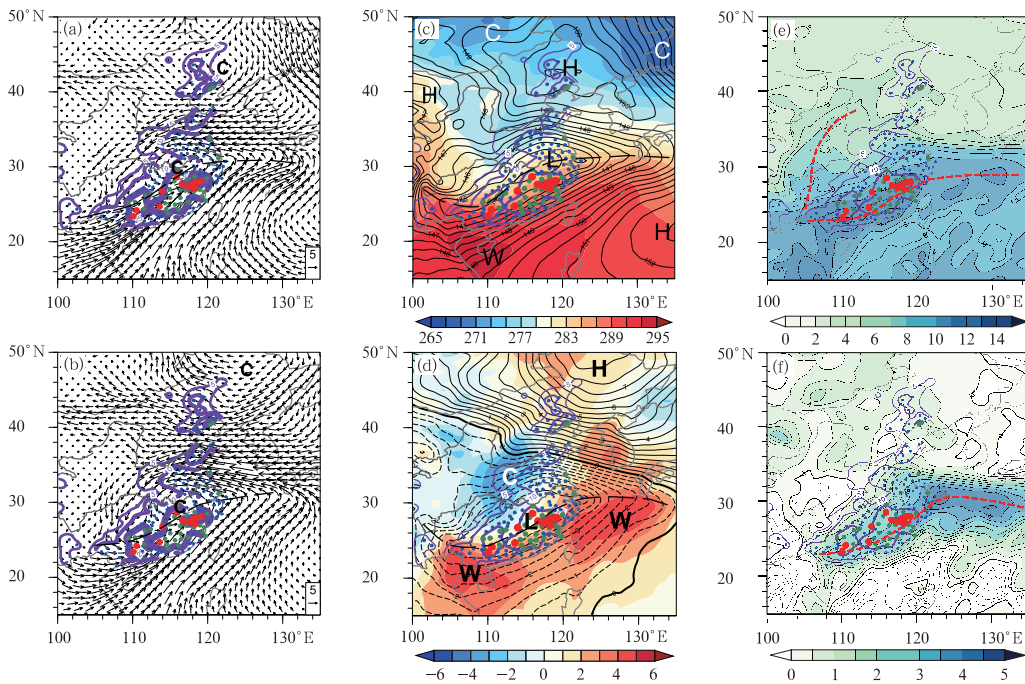


图 4 同图 2,但为华南涡旋类暴雨  
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the heavy rain of South China vortices

位于华南扰动涡旋中心和扰动切变线上(图 4b)。同样,区域暴雨位于 850 hPa 总高度场低涡的南侧,总温度场对暴雨落区也没有指示意义(图 4c)。不同的是,区域暴雨位于 850 hPa 华南扰动涡旋中心和低值带上,也位于温度扰动的冷暖对比零线上(图 4d)。850 hPa 总比湿场上存在两条大值带

(图 4e),只有其中一条对应暴雨。不同的是,比湿扰动场上(图 4f)区域暴雨就位于一条大的湿度扰动区中。

### 2.3 华南倒槽类暴雨

华南倒槽类暴雨的环流形势是由 5 日次区域暴

雨合成的(表 1)。图 5a 和 5b 分别为 850 hPa 层的合成总风环流和风扰动环流。它们之间的差异不大,但总风场上暴雨区西南方的西南气流比扰动场上的西南气流强。扰动环流系统更能反映区域暴雨的范围。这种差异在 850 hPa 的高度和温度对比上更为清楚。图 5c 中区域暴雨出现在西南涡的东北

侧。但在图 5d 中区域暴雨出现在倒槽低压中的高度扰动低值线附近。对倒槽类暴雨,冷空气并没有进入涡旋系统中。在总比湿场上(图 5e),华南和我国西部南北方向上各存在一条大值带。而在比湿扰动场上(图 5f),只有华南的一个湿度扰动区域与区域暴雨落区对应。

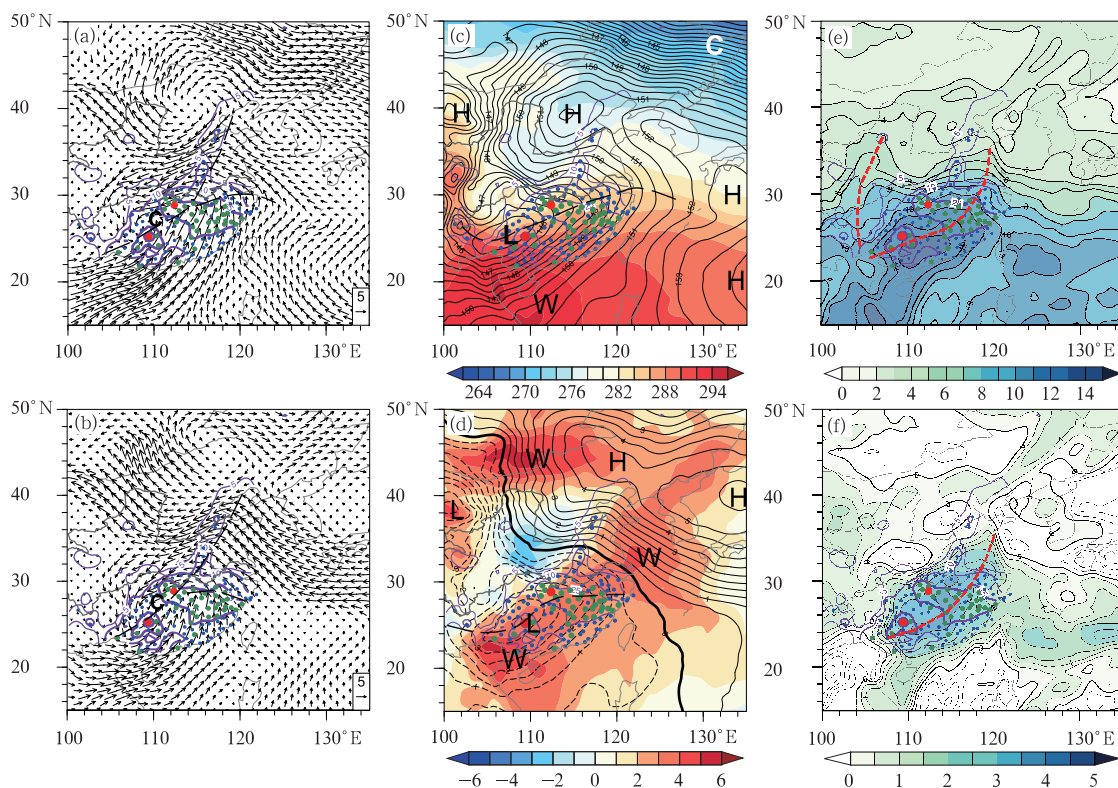


图 5 同图 2, 但为华南倒槽类暴雨

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the heavy rain of reversed trough in South China

#### 2.4 长江切变线和槽线类暴雨

长江切变线和槽线类暴雨的环流形势是由 9 日次区域暴雨合成的, 主要出现在 5—7 月(表 1)。图 6a 中雨区西南方气流较强, 所以切变线和槽线的位置在雨区的偏北部位。图 6b 中雨区南侧的偏南气流和雨区北侧的偏北气流强度相当, 所以扰动辐合线和扰动槽线与雨区对应。850 hPa 总高度场上(图 6c), 西南涡比较清楚, 东部海上有一高度槽。但在高度扰动场上(图 6d), 与区域暴雨对应的扰动低压中心在 30°N 和 110°E 交叉的位置, 比总高度场上的西南涡位置偏东。沿海槽上出现了另外一个扰动低压中心。这样, 两个扰动低压的连线与大降水位置有很好的对应。在温度扰动场上, 冷暖空气对比与雨区的关系更清楚。在总比湿场上(图 6e), 南

方和我国西部各存在一条大值带。但在比湿扰动场上(图 6f), 只有南方的一个湿度扰动区域与区域降水对应。

#### 2.5 沿江涡旋类暴雨

沿江涡旋, 也就是通常的江淮气旋。表 1 中列出了 6 日次区域暴雨。图 7a 和 7b 分别为 850 hPa 层的合成总风环流和风扰动环流。它们之间的差异主要表现在前者雨区西南侧的气流较强, 所以涡旋中心位置相对偏西, 而后的扰动气旋位置偏东, 南北侧的气流方向相反, 势力相当。在总高度场和总温度场上(图 7c), 由于西南涡的始终存在, 最大的低值中心不在江淮流域, 而在西南地区, 总温度分布对区域降水落区也没有指示意义。与此不同, 高度扰动场和温度扰动场上(图 7d), 扰动低压位于江淮



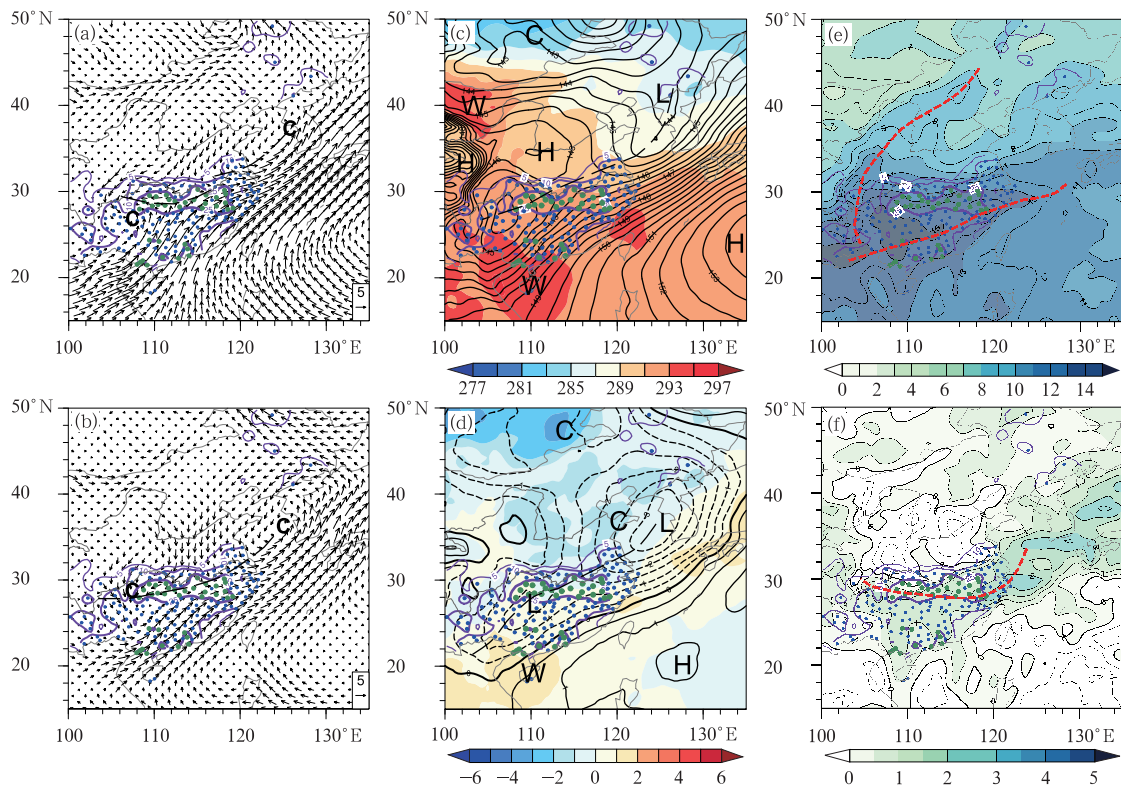


图 6 同图 2, 但为沿长江切变线和槽线类暴雨  
Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the heavy rain of shear and trough along the Yangtze River

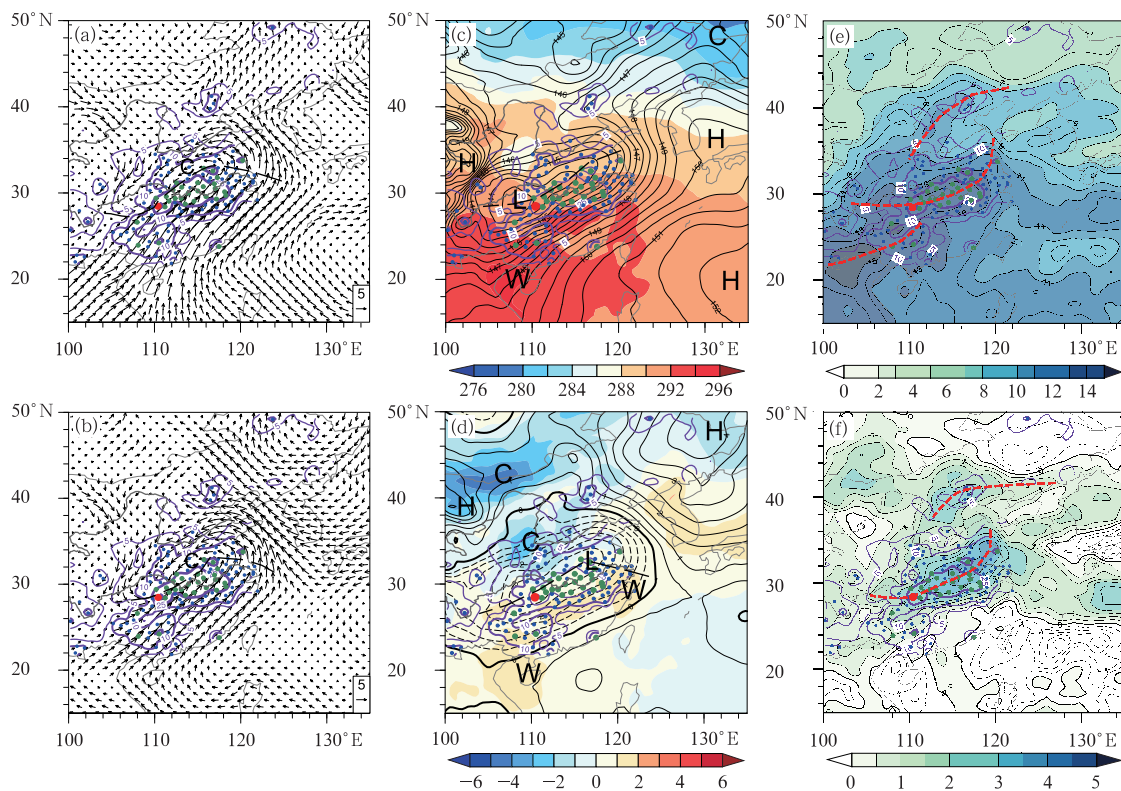


图 7 同图 2, 但为沿江涡旋类暴雨  
Fig. 7 Same as Fig. 2, but for the heavy rain of vortices along the Yangtze River

地区并与雨区对应,冷暖气团分布也对气旋模型对应得很好。850 hPa 总比湿场和湿度扰动场上(图 7e和 7f)都有三条湿度大值带,但前者相对雨区的范围太大,只有后者与降水落区的关系比较紧密。

### 2.6 华北涡旋类暴雨

华北涡旋对应的区域暴雨有 6 日次(表 1)。

图 8a给出了华北涡旋类暴雨沿 116.25°E 的总高度和总温度及其气候场的垂直剖面合成分析。它们也难以直接指示区域暴雨。但暴雨就位于高度扰动低值轴线到达地面的位置上,也位于低层温度扰动的正负对比线上(图 8b)。取低层 850 hPa 层的总风和风扰动绘制的天气图上,涡旋西北侧的总风场上偏北风分量(图9a)弱于风的扰动分量(图9b),涡旋

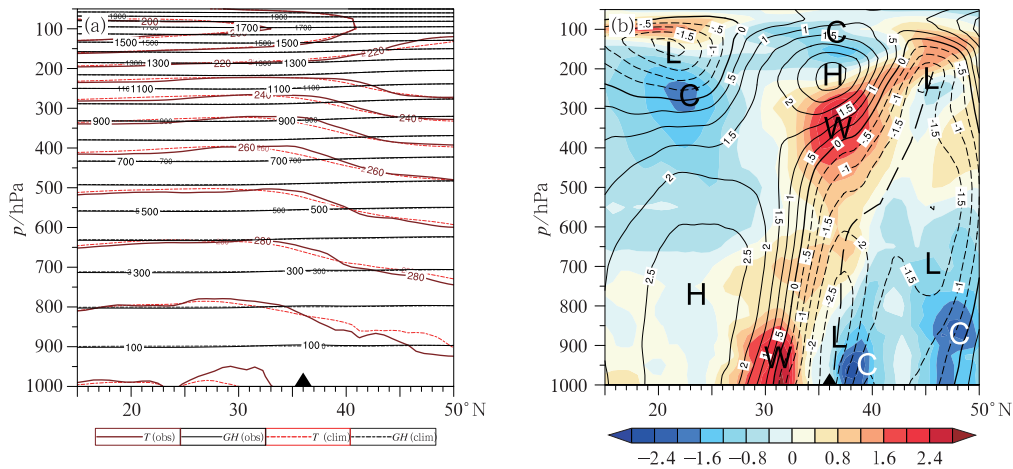


图 8 同图 1a 和 1b, 但为华北涡旋类暴雨

Fig. 8 Same as Figs. 1a and 1b, but for the heavy rain of North China vortices along 116.25°E

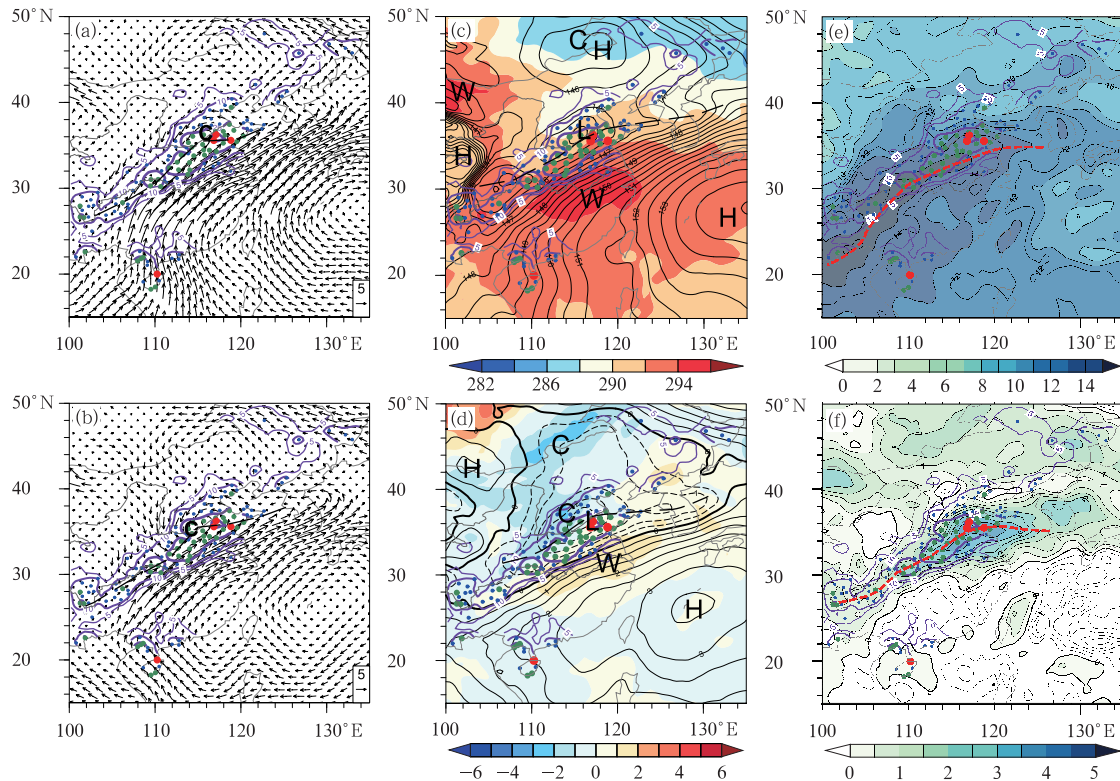


图 9 同图 2, 但为华北涡旋类暴雨

Fig. 9 Same as Fig. 2, but for the heavy rain of North China vortices

周围的扰动气流更对称,扰动气流的辐合对降水落区的解释更清楚。在总高度场和总温度场上(图 9c),由于西南涡的始终存在,西南—东北走向的降水带的北侧有两个低压中心,雨带位于暖区中。在高度扰动和温度扰动场上(图 9d),只有一个扰动低压位于华北,扰动低压槽及其两侧的冷暖对比能够很好地指示降水的位置。从我国西南地区到华北,低层大气表现为大范围的高比湿区(图 9e)。但在湿度扰动场上(图 9f),降水区与湿度扰动区域有很好的对应。

## 2.7 东北涡旋类暴雨

表 1 中列出了东北涡旋类暴雨有 7 日次。

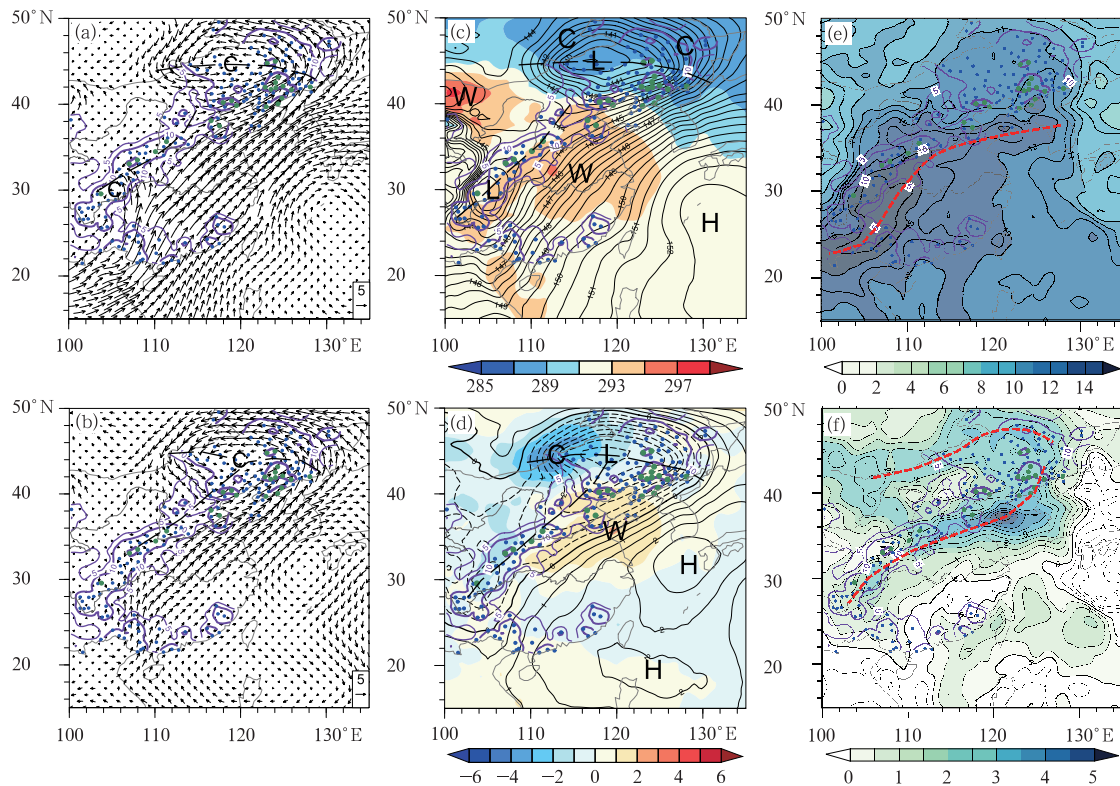


图 10 同图 2, 但为东北涡旋类暴雨

Fig. 10 Same as in Fig. 2, but for the heavy rain of Northeast China vortices

## 3 结论与讨论

近年来的对比分析已经清楚了,扰动天气图上的环流系统对应地面上区域极端天气事件位置比传统天气图上环流系统有更好的指示能力。过去很多对暴雨事件的研究都做单一例子的诊断分析。这

往往带有研究方法不具普遍应用意义。本文用 1998 年发生在中国东部地区的 41 日次区域暴雨,分 7 类环流系统做了与暴雨落区对应关系的传统天气图与扰动天气图上四个基本大气变量的分布特征分析。这种大样本和多变量覆盖中国大范围的区域暴雨环流形势对比分析会增加预报员应用扰动天气图诊断和分析极端天气事件的信心和提高预报高影



响天气事件的能力。基于本文的对比分析,可以总结出下列结论和建设性的建议。

在传统天气图上,区域暴雨多位于低空急流的左侧和切变线的右侧,但在扰动天气图上,区域暴雨就位于对流层扰动辐合线上,扰动辐合线两侧的气流强度相当,方向相反。在总的高度场上,我国西南地区气候上存在的西南涡和东南部地区的气候副热带高压环流会大大改变真正与暴雨落区有直接关系的扰动低值系统,而区域暴雨就位于低层大气高度扰动的低值中心和槽线上。总温度场对区域暴雨落区没有指示意义,但温度扰动的冷暖对比零线上往往是区域暴雨的落区。对流层的低层大气中,总比湿范围比暴雨区大很多,在去掉气候湿度后的湿度扰动场上有限的湿度扰动大值带与暴雨落区有密切的联系。

对流层大气中的扰动环流结构和扰动变量的中心值分布是观测大气资料和模式产品中客观存在的。只是原始场中同时包含了气候和扰动,而气候部分大大影响了预报员对极端天气事件对应大气中扰动信号的准确识别。我国东部地区常常出现南方气旋和北方气旋。分解后的扰动南方涡旋位置主要存在于 400 hPa 以下的对流层中(图 3b),其北侧华北地区上空有一个扰动高压垂直伸展到对流层和平流层中。与南方扰动涡旋不同,北方扰动涡旋(图 8b)的深度可以到达对流层上部,而在其南侧的我国南方地区为深厚的扰动高压。无论在哪一种合成暴雨型的变量垂直剖面分布上,或者每个时刻的变量垂直剖面分布上,那些高度扰动和温度扰动都满足静力平衡关系,即用高度扰动的空间分布可以计算出温度扰动的空间分布(Qian et al, 2015b; Qian et al, 2015c)。在高度正(负)扰动的下方对应为高(低)温扰动,而在上方为低(高)温扰动。本文统一分析 850 hPa 层的高度扰动、温度扰动、风扰动和湿度扰动不是一个最佳做法。对区域暴雨落区的诊断,高度扰动和温度扰动在南方沿海地区取 925 hPa 可能更合适,而湿度扰动取 700 hPa 更好。在我国西南和长江上游地区,由于气候上西南涡的存在和高原东坡地形的影响,所取的高度也不能定在 850 hPa 上。不过,我们给相关气象台提供的分解软件可以很容易地让预报员看到扰动系统在不同气压层上的表现。这些需要当地预报员的实践总结与应用。

虽然传统的天气图被现代数值天气预报及其产

品代替了,但用观测资料和数值模式的预报产品绘制扰动天气图会提高预报员判断区域暴雨落区的水平。虽然美国的全球分析 FNL 资料在 6 h 后才能得到,对它的分解绘制的扰动天气图及其连续跟踪也能比较好地判断当前和未来区域暴雨的位置。我国地市级气象台可以实时地获得未来 10 d 内的欧洲中期模式 0.25°和 0.75°经纬格点空间分辨率的预报产品了。2010 年春夏,我国东部地区发生了几十场的区域性暴雨,欧洲模式能够提前 6.7 d 预报出影响这些区域暴雨的扰动环流系统(Qian et al, 2013)。因此,利用欧洲中期模式预报的低层高度扰动量、温度扰动量、风扰动量和湿度扰动量可以建立预报未来区域暴雨的落区指标和环流型。此外,本文所用的 41 日次区域暴雨也同样用在了区域暴雨的动力学诊断分析中(Qian et al, 2015a)。另外设计的湿涡度和湿散度可以结合数值预报产品对暴雨落区做客观的诊断。

## 参考文献

- 杜钧,钱维宏. 2014. 天气预报的三次跃进. 气象科技进展, 4(6):13-26.
- 黄士松. 1981. 暴雨过程中低空急流形成的诊断分析. 大气科学, 5(2):123-135.
- 江漫,于甜甜,钱维宏. 2014. 我国南方冬季低温雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析. 大气科学, 38(4):813-824.
- 钱维宏. 2011. 基于大气变量物理解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 中华人民共和国知识产权局, 专利号: ZL201110061438. 7.
- 钱维宏. 2012a. 瞬变天气扰动图和低频扰动天气图制作方法及其在天气预报中的应用. 中华人民共和国知识产权局, 专利号: ZL201210134358. 4.
- 钱维宏. 2012b. 中期-延长期天气预报原理. 北京:科学出版社, 410.
- 钱维宏. 2012c. 天气尺度瞬变扰动的物理解原理. 地球物理学报, 55(5):1439-1448.
- 钱维宏. 2013. 中国区域暴雨扰动环流图集. 北京:气象出版社, 227.
- 钱维宏,单晓龙,朱亚芬. 2012. 天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力. 地球物理学报, 55(5):1513-1522.
- 钱维宏,江漫,单晓龙. 2013a. 大气变量物理解原理及其在区域暴雨分析中的应用. 气象, 39(5):537-342.
- 钱维宏,于甜甜. 2013b. 大气变量物理解法在极端温度事件前期信号提取中的应用. 气象, 39(6):665-674.
- 朱乾根. 1975. 低空急流与暴雨. 气象科技, (8):12-18.
- Bassill N P. 2014. Accuracy of early GFS and ECMWF Sandy (2012) track forecasts: Evidence for a dependence on cumulus parameterization. Geophys Res Lett, 41:3274-3281.
- Chen D, Ou T H, Gong L, et al. 2010. Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951-2005. Adv Atmos Sci, 27(6):



- 1221-1232.
- Dee D P, and Coauthors. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137:553-597. DOI:10.1002/qj.828.
- Qian, W H, Li J, Shan X L. 2013. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010. *Science China: Earth Sciences*, 56(6):1059-1070.
- Qian W H, Jiang M. 2014a. Early signals of synoptic-scale atmospheric anomalies associated with the summer low temperature events in northeast China. *Meteor Atmos Phys*, 124:33-46.
- Qian W H, Shan X L, Liang H Y, et al. 2014b. A generalized beta advection model to improve unusual typhoon track prediction by decomposing total flow into climatic and anomalous flows. *J Geophys Res Atmos*, 119(3):1097-1117.
- Qian, W H, Du J, Shan X L, et al. 2015a. Incorporating the effects of moisture into a dynamical parameter: moist vorticity and moist divergence. *Wea and Forecasting*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-14-00154.1>.
- Qian, W H, Chen Y, Jiang M, et al. 2015b. An anomaly-based method for identifying signals of spring and autumn low temperature events in the Yangtze River Valley, China. *J App Meteor Clim*. DOI:10.1175/JAMC-D-14-0240.1.
- Qian W H, Yu T T, Du J. 2015c. A unified approach to trace surface heat and cold events by using height anomaly. *Climate Dynamics*. DOI:10.1007/s00382-015-2666-2.
- Qian W H, Jiang N, Du J. 2016. Anomaly based weather analysis vs. traditional total-field based weather analysis. *Wea and Forecasting*, revision submitted.
- Shan, X L, Jiang N, Qian W H. 2015. Regional heavy rain locations associated with anomalous convergence lines in eastern China. *Natural Hazards*. DOI:10.1007/s11069-015-1671-4.