

钟敏,车钦,张蒙蒙,等,2020.华中区域极端降水天气形势及物理量异常度特征[J].气象,46(4):503-516. Zhong M, Che Q, Zhang M M, et al, 2020. Characteristics of extreme precipitation weather situation and physical quantity anomaly in central China[J]. Meteor Mon, 46(4):503-516(in Chinese).

华中区域极端降水天气形势及物理量异常度特征^{*}

钟 敏 车 钦 张蒙蒙 董良鹏 张萍萍 陈 璇

武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 选取 1960—2012 年间共 139 例极端降水个例, 对其降水特征、天气形势及物理量异常度进行了分类对比研究。结果发现: 华中区域极端降水主要发生在四种不同的天气形势下, 即纬向型、经向型、台风西风带冷槽结合型和短波槽前低涡暖切型, 其个例占比分别为 42.4%, 30.2%, 17.3%, 10.1%; 台风西风带冷槽结合型在暴雨站数、极端降水站数、极端降水量平均值均居四类最大, 纬向型和经向型次之, 短波槽前低涡暖切型最小; 低层水汽辐合、中低层上升速度、低层风场辐合及气旋性涡度, 高层风场辐散和大气可降水量的异常比例超过 50%, 是极端降水物理量异常的共性特征。个性特征为: 纬向型 500 hPa 比湿异常比例较高, 经向型中低层暖平流异常比例较高, 台风西风带冷槽结合型 500 hPa 正涡度平流和中低层比湿异常比例较高, 短波槽前低涡暖切型与其他类异常量更集中于边界层且大气可降水量异常比例低。此外, 极端降水预报除了要关注物理量异常程度, 降水的持续时间也是重要因素之一。

关键词: 极端降水, 天气形势, 异常度

中图分类号: P456, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.005

Characteristics of Extreme Precipitation Weather Situation and Physical Quantity Anomaly in Central China

ZHONG Min CHE Qin ZHANG Mengmeng DONG Liangpeng ZHANG Pingping CHEN Xuan

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: This paper selects 139 extreme precipitation cases from 1960 to 2012 to study the characteristics of precipitation, weather situation and physical quantity anomaly. The findings indicate that, the extreme precipitation in central China mainly occurs in four different weather situations, namely, the zonal type, the meridional type, the typhoon and cold trough combined type and the short wave trough with warm shear type. The proportions of cases are 42.4%, 30.2%, 17.3% and 10.1%, respectively. The typhoon and cold trough combined type stands on the top in the four types of heavy rain stations, extreme precipitation stations and the extreme rainfall, followed by the zonal type and the meridional type, while the short wave trough with warm shear type is the lowest. The anomaly ratios of low-level water vapor convergence, mid-low-level rising velocity, low-level wind convergence and cyclonic vorticity, high-level wind divergence and atmospheric precipitable water exceeding 50% are the common features of extreme precipitation anomalies. The individual characteristics are that the anomaly ratio of 500 hPa specific humidity in the zonal type is higher, the anomaly ratio of warm advection in the meridional type is higher, the anomaly ratio of 500 hPa positive vorticity advection and specific humidity in the typhoon and cold trough combined type is higher. Moreover, in the short wave trough with warm shear type, the abnormal physical quantity

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306011)和湖北省气象局科技基金重点项目(2018Z02)共同资助

2018 年 12 月 16 日收稿; 2019 年 12 月 28 日收修定稿

第一作者: 钟敏, 主要从事暴雨及强对流天气预报. Email: zhongmin296@163.com

is more concentrated in the boundary layer, and the abnormal proportion of atmospheric precipitable water is low. In addition, besides paying attention to the degree of abnormal physical quantities, the duration of precipitation is also one of the important factors in extreme precipitation prediction.

Key words: extreme precipitation, weather situation, anomaly

引 言

全球变暖已经是既定的事实,在此背景下极端降水事件的频繁发生受到广泛关注。王苗等(2012)指出对于极端降水事件,国内外学者展开了一系列研究,主要包括极端降水表征值的确定、极端降水分布和演变趋势、极端降水成因分析及模式预报和评估等方面。翟盘茂等(2016)从气候角度总结了江淮流域持续性极端降水机理及预报方法研究进展。

2012年北京“7·21”极端暴雨事件发生后,诸多专家学者从天气预报的角度进行分析和研究。谌芸等(2012)指出这次特大暴雨是由暖区降水和锋面降水组成,它发生在高层辐散、中低层低涡切变和地面辐合线等高低空系统耦合的背景下。孙军等(2012)在分析这次极端降水成因后特别指出天气形势识别是预报极端强降水的首要一步,此外特征物理量的异常诊断可以对降水过程的异常性给出很好的指示作用。俞小鼎(2012)指出这次过程由一个与河套低涡相联系的高降水效率的 MCS 东移并在太行山附近停滞所导致,同时位于南海的台风远距离影响也起到关键作用。廖晓农等(2013)分析指出这次过程中异常强烈的水汽通量辐合是产生长时间强降水的重要原因。杜钧等(2014)利用集合异常预报法对本次过程成功进行了预报,为预报员进行极端天气预报提供了很好的思路和方法。近年来又相继发生了“7·20”华北特大暴雨和“5·7”广州局地特大暴雨极端事件。符娇兰等(2017)、赵思雄等(2018)、栗晗等(2018)对“7·20”华北特大暴雨做了成因及极端性分析,研究指出高空西来槽停滞加深(并切断)与低层江淮暖性倒槽叠加导致黄淮气旋加强,西南和东南低空急流的异常发展、异常强的垂直速度、水汽异常充沛、地形增幅是此次极端降水的重要原因。雷蕾等(2017)指出强降水与低涡发展的正反馈过程是此次特大暴雨得以长时间维持的重要机制之一,这一过程形成的持续性潜热释放也是对流

层中上层低涡系统热力结构发生改变的重要原因。陈涛等(2017)、王毅等(2018)分别从对流尺度集合预报和全球尺度集合预报两个角度探讨了这次过程的可预报性及不确定性。徐珺等(2018)、田付友等(2018)、伍志方等(2018)、傅佩玲等(2018)分别从中尺度云团触发和维持机制、可预报性及微物理特征等方面对“5·7”广州局地特大暴雨进行了分析。此外杜小玲等(2016)分析指出水汽输送和水汽辐合异常偏强以及降水持续时间长是 2014 年 7 月 13—17 日贵阳极端强降水发生的重要原因。曾勇和杨莲梅(2018)分析 2016 年 7 月 31 日至 8 月 1 日新疆西部极端特大暴雨成因,指出水汽充沛、中低层暖平流、风切变和迎风坡地形增幅是关键因素。

针对暴雨天气形势分型,许多专家学者进行了相关研究,陶诗言等(1980)将中国大暴雨的形势分为三类,即稳定的经向型、稳定的纬向型和过渡型,其中经向型和纬向型是特大暴雨或持续性暴雨的两种主要流型。孙建华等(2005)把华北夏季特大暴雨过程的天气形势分为 5 种类型,分别为台风与低槽(低涡)远距离相互作用型、低涡(登陆台风)与西风槽相互作用型、登陆台风北上受高压阻挡停滞型、低涡暴雨型和暖切变暴雨型。冯志刚等(2013)对 1961—2009 年淮河流域 26 个集中强降水大气环流形势进行分型,归纳出梅雨型、江淮气旋型、江淮切变线型、深槽型和台风北上型。刘国忠等(2013)对 2000—2009 年 5—8 月广西持续性暴雨天气系统进行分型,即高空槽配合切变线或锋面型、副热带高压(以下简称副高)边缘配合深槽型、台风减弱低压型、中低空切变配合型。朱佳蓉和漆梁波(2013)对上海 2001—2012 年 133 个暴雨天气个例进行分类,即静止锋、副高边缘强对流、台风本体或外围螺旋雨带、台风倒槽、暖式切变线、低槽冷锋和江淮气旋,共 7 类。张一平等(2014)将淮河上游短时强降水的天气形势分为副高边缘型、低槽型和台风倒槽型。侯淑梅等(2014)将山东省极端强降水天气形势分为高空槽类、副高外围类、切变线类、气旋类、热带气旋类。

钱维宏等(2016)将1998年中国东部地区41次区域暴雨异常环流型划分为7类,即华南切变线、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。肖递祥等(2017)对1981—2015年四川盆地23次极端暴雨天气进行分型,主要为东高西低和两高切变两类。张家国等(2018)对2008—2015年5—9月湖北省60例极端降水过程进行分析,归纳出5种主要天气类型,即锋面气旋、西南涡切变、西南涡-东北气旋、暖倒槽和登陆台风。

华中区域包括河南、湖北、湖南三省,南北跨度大,天气系统复杂,极端降水时有发生,而从前文可知,该区域中关于极端降水的系统性分析研究工作却并不多见,为了提高对本区域中极端降水的认识和预报能力,本文选取了1960—2012年间共139例极端降水个例,对其降水特征、天气形势、物理量异常度等进行分类和统计分析,以期为今后华中区域极端降水预报提供有益参考。

1 个例、资料和方法

1.1 个例简介

本文利用1960—2012年5—9月华中区域292个国家站的逐日雨量资料进行排位,当日降水量超过99%阈值时统计为一个异常强降水日,并规定华中区域内 ≥ 3 个站异常时统计为一次极端强降水事件。按照此标准,共有139例极端强降水事件。为了方便预报员确认天气类型,本文统一按照500 hPa天气形势进行分型,并依据陶诗言等(1980)的分型思路结合华中区域极端降水的天气形势特征,共总结出4类天气形势,分别为纬向型、经向型、台风西风带冷槽结合型和短波槽前低涡暖切型,在下文分析中分别用类型一、二、三、四表示。个例类型统计信息如表1所示。

表1 天气类型统计表

Table 1 Statistical table of weather types

天气类型	个例数	占比/%	典型个例/年月日时	极端站数	最大降水量/mm
纬向型	59	42.4	1998072120—2220	8	360
经向型	42	30.2	2000070508—0608	4	492
台风西风带冷槽结合型	24	17.3	1994071120—1220	10	294
短波槽前低涡暖切型	14	10.1	1984053020—3120	5	217

1.2 资料和方法

为了考察极端强降水事件中各物理量的极端性,本文利用NCEP $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析资料计算了位势高度、风、温度、海平面气压、大气可降水量、水汽通量、水汽通量散度、露点、比湿、涡度、散度、垂直速度、假相当位温、K指数、涡度平流、温度平流、比湿平流等物理量,并根据Grumm and Hart(2001)提出的标准化距平法对上述物理量进行异常度分析,具体计算方法如下:

$$N = (X - \mu) / \sigma$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

式中: X 为要素值, μ 为要素平均值, σ 为标准差, n 为样本数。在本文中, μ 取用1980—2009年21 d滑动平均值, σ 为21 d滑动标准差。 N 为某一时刻要素值和历史同期平均值的偏离程度,即异常度,Grumm and Hart(2001)的研究表明,可用 N 值大小判定降水事件的可能严重程度, N 的绝对值越

大,表明要素与历史同期平均值的偏离程度越高。

2 四类天气形势下极端降水特征

表2给出四类天气形势极端降水个例暴雨站数、极端降水站数、极端降水量的统计特征。四类型极端降水在降水特征上有所差别。类型一对应雨带主要在河南中南部、湖北东部及南部及湖南中北部,雨带多呈东北—西南走向,强中心主要位于豫东南、鄂东北、鄂西南和湘西北;暴雨站数、极端降水站数和极端降水量平均值均在四类中为中等。类型二对应雨带主要在河南大部、湖北中东部和湖南中东部,雨带多呈东北—西南或南北向短带状分布,有时也呈西北—东南向带状分布;此类中暴雨站数、极端降水站数和极端降水量平均值与类型一相似,在四类中为中等。类型三对应雨带主要在河南大部、湖北中东部和湖南东部,主要呈东北—西南或南北片状分布,极端降水多位于迎风坡一侧;此类中暴雨站数、极端降水站数、极端降水量平均值均为四类中最大。类型四对应雨带主要在湖南中部和湖北南部,

表 2 四类天气型暴雨站数、极端降水站数、极端降水量统计

统计量	类型一	类型二	类型三	类型四
暴雨站数最大值/站	81	91	87	50
暴雨站数最小值/站	9	13	20	20
暴雨站数平均值/站	38.1	37.6	42.8	32.7
极端站数最大值/站	13	14	12	7
极端站数最小值/站	3	3	3	3
极端站数平均值/站	4.8	4.9	4.9	3.9
极端降水量最大值/mm	382	492	755	282
极端降水量最小值/mm	107	111	152	172
极端降水量平均值/mm	215.6	215.5	259	209.8

雨带多呈东西带状,且多发生在 5—6 月;此类中暴雨站数、极端降水站数、极端降水量平均值均为四类中最小。

3 四类极端降水天气形势特征

对 139 例极端降水的天气形势统计分析发现,四类天气形势有其共性特征,如中低层都有明显的低涡、切变线、低空急流等,高层为辐散场,此外,另一个重要的共同特征是环流形势非常稳定,非常有

利于降水系统长时间维持,形成强的累积雨量。尤其是前三个类型,这从降水特征中极端雨量最大值和平均值的大小可以看出。但各型之间也存在一些差异,主要表现在环流形势和影响系统不同,这些差异也正和雨型分布特征、极端降水落区、量级密切相关,以下将做详细分析。

3.1 纬向型

从该型个例各层平均场(图1)可看出,500 hPa 上,东北冷涡(槽)底后部偏北气流与副高外围偏南

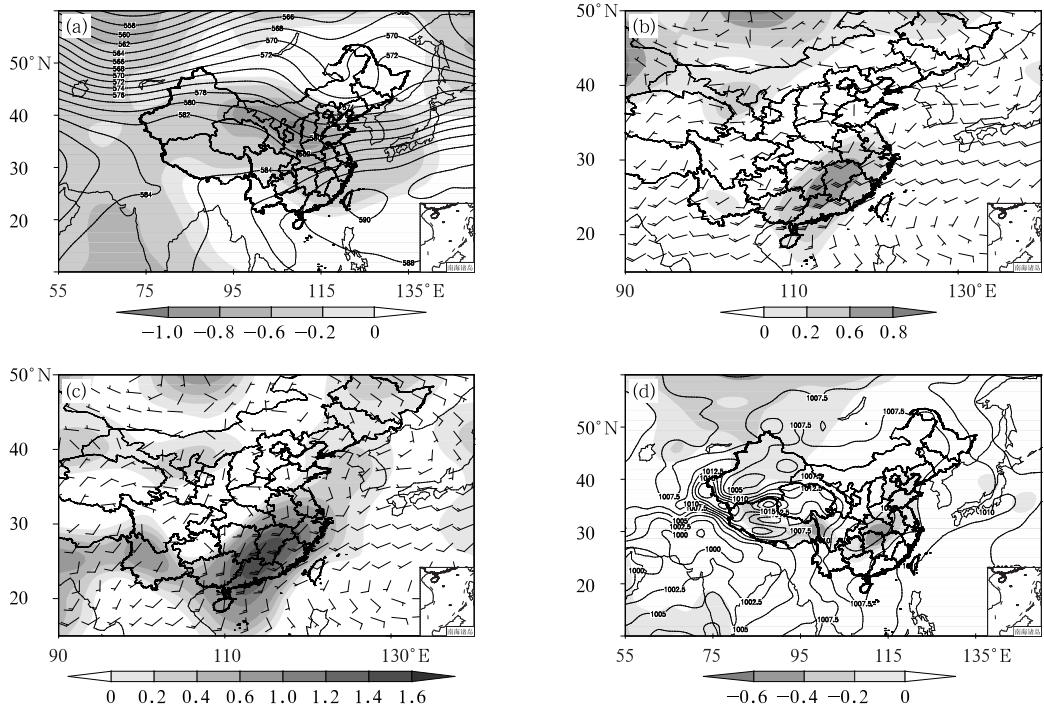


图 1 纬向型各层平均场及标准化距平(阴影)

(a)500 hPa 位势高度平均场(等值线,单位:dagpm),(b)850 hPa 风矢量平均场(单位: $m \cdot s^{-1}$)和经向风标准化距平,(c)同图 1b,但为 925 hPa,(d)海平面气压平均场(等值线,单位:hPa)

Fig. 1 The average field and normalized anomaly (shaded area) of each layer in zonal type

(a) 500 hPa geopotential height average field (isoline, unit: dagpm)

(b) 850 hPa wind vector average field (unit: $m \cdot s^{-1}$) and meridional wind normalized anomaly,

(c) same as Fig. 1b, but for 925 hPa, (d) sea level pressure average field (isoline, unit: hPa)

气流形成准东西向气流汇合形势,川东有弱的短波槽活动(平均场上不明显);700 hPa 自河南中部至湖北西部有冷式切变线,切变线南侧有低空急流,最大风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风所覆盖区域为正的标准化距平(图略);850 和 925 hPa 上,川东有低涡发展,自湖北中西部至河南东南部一带有暖式切变线,850 hPa 切变线南侧南风最大风速达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,925 hPa 南风的标准化距平达 1.4,表明与常年同期相比,此类极端降水发生时 700 hPa 以下尤其是边界层附近南风发展旺盛。地面上,川东至湖南北部、湖北、河南一带受低压倒槽控制,河南西北侧多冷空气扩散南下,冷空气入暖倒槽,多形成静止锋,冷暖空气在华中区域强烈交汇,为极端降水提供了有利的大尺度天气背景,梅雨暴雨即属于此型。极端降水落区位于 850 hPa 切变线南侧,西南急流左侧南风风速辐合区中,地面准静止锋北侧。

此类极端降水产生的原因一方面由于副高、东

北冷涡的位置相对稳定,有利于形成系统性雨带,并维持较长时间。冷涡东移受阻,高空引导气流发生改变,从偏北气流转为西西南气流,雨带走向与移动方向近乎一致,利于产生“列车效应”。另一方面,副高外围西南急流很强,暖平流强盛,水汽、热力条件很好,为产生持续强降水提供有利条件。

3.2 经向型

该型个例各层平均场如图 2 所示,此型中 500 hPa 上最大的特点是,在低槽或低涡前有明显的高压坝,或是盛夏期,西太平洋副高北抬,与大陆高压之间形成低压槽或闭合低涡,亦或是低压周围被几个高压包围。以上形势均有利于形成南北向的低压带。高压脊上暖平流明显,使得高压脊增强从而使得其上游的低槽移速缓慢。与之相对应,在中低层(700 hPa 以下)有低涡生成,且低涡东侧最大平均风速达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并且南风的标准化距平最大达

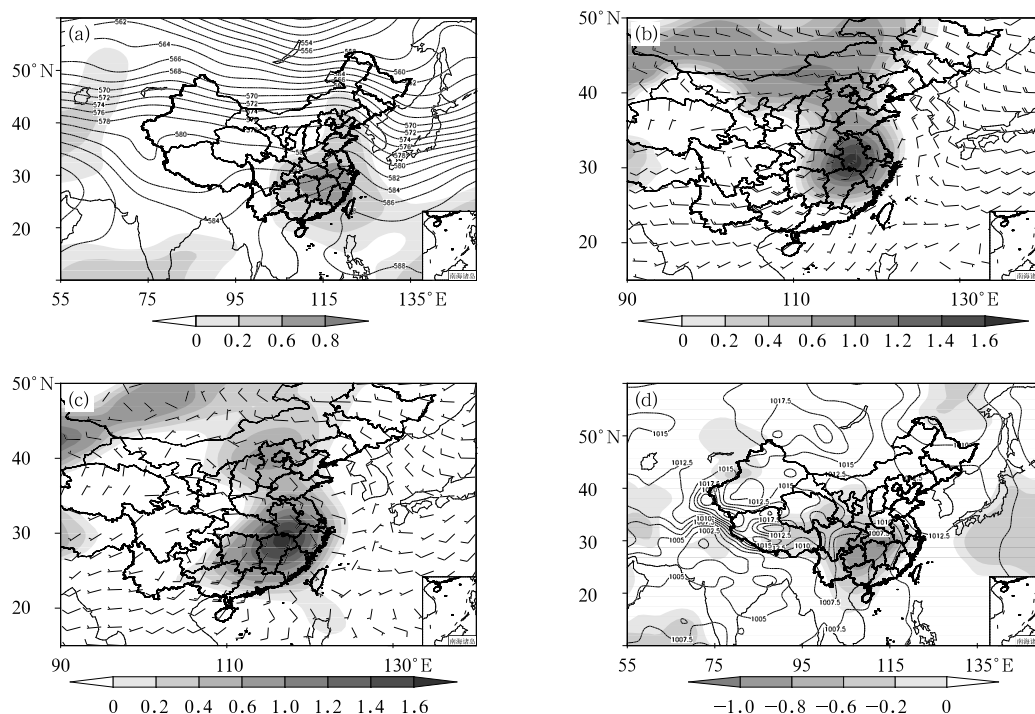


图 2 经向型各层平均场及标准化距平(阴影)

(a) 500 hPa 位势高度平均场(等值线,单位: dagpm),

(b) 700 hPa 风矢量平均场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和经向风标准化距平,

(c) 同图 2b, 但为 850 hPa, (d) 海平面气压平均场(等值线,单位: hPa)

Fig. 2 The average field and normalized anomaly (shaded area) of each layer in meridional type

(a) 500 hPa geopotential height average field (isoline, unit: dagpm),

(b) 700 hPa wind vector average field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and meridional wind normalized anomaly,

(c) same as Fig. 2b, but for 850 hPa, (d) sea level pressure average field (isoline, unit: hPa)

1.6, 这表明与常年同期相比, 此类极端降水发生时 700 hPa 以下南风均明显偏强。此外, 低空偏东急流有时亦较为明显。地面上, 华中区域大部处在低压倒槽中, 而在华北地区有一高压。暴雨区位于低涡东南象限, 高压后部南风急流左侧, 地面倒槽与高压底部结合处。

此类极端降水产生的原因一是槽前高压脊在暖平流作用下增强, 由于槽前高压的阻挡作用或是“两高一低”的稳定形势, 使得低槽移动缓慢, 利于形成较长时间降水。二是由于高低压之间的稳定配置, 中低层气压梯度维持或略有增强, 南风 and 东风风速维持或略增强, 为水汽的输送和不稳定的形成提供了极为有利的条件, 易产生较大强度的雨强。

3.3 台风西风带冷槽结合型

从该型个例各层平均场(图 3)可看出, 500 hPa 上, 台风沿着西北或偏西路径登陆, 并位于西太平洋副高和大陆高压之间, 与此同时中高纬有冷槽(冷涡)东移, 西风带冷槽和台风倒槽结合, 形成“两高两低”的稳定形势。850 和 925 hPa 上, 自北向南伸展的冷舌深入登陆台风环流, 台风低压环流东侧的东

南风 and 东北风均非常强, 最大风速达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两支气流在此处强烈交汇, 辐合抬升作用强。在中低层, 尤其在 925 hPa 上, 风速的标准化距平达 1.8, 较常年同期显著偏强, 为台风系统提供充沛的水汽输送条件, 同时东风气流在西进过程中受地形强迫抬升作用, 在迎风坡更易产生极端降水。地面上, 华中区域受台风低压控制, 地面气压标准化距平达 -1.4, 在台风低压北侧为一冷高压, 冷空气扩散南下进入台风低压倒槽, 为倒槽内产生极端降水提供有利的不稳定和抬升条件。极端降水位于台风倒槽东侧, 低压倒槽与北方冷高压结合处, 并且常位于迎风坡或是喇叭口地形中。

该类极端降水产生的原因一是 500 hPa 上“两低两高”的配置是一种极为稳定的大气场形势, 为产生持续性降水提供了有利的环流背景。二是登陆台风东侧与副高之间形成的东南风急流从海上携带暖湿气流北上, 提供了极强和稳定的水汽输送, 另一支偏东路水汽输送通道在低层也较为清晰。三是此型极端降水多发生在迎风坡或受地形辐合作用, 地形的增幅作用进一步增加了极端降水的可能。

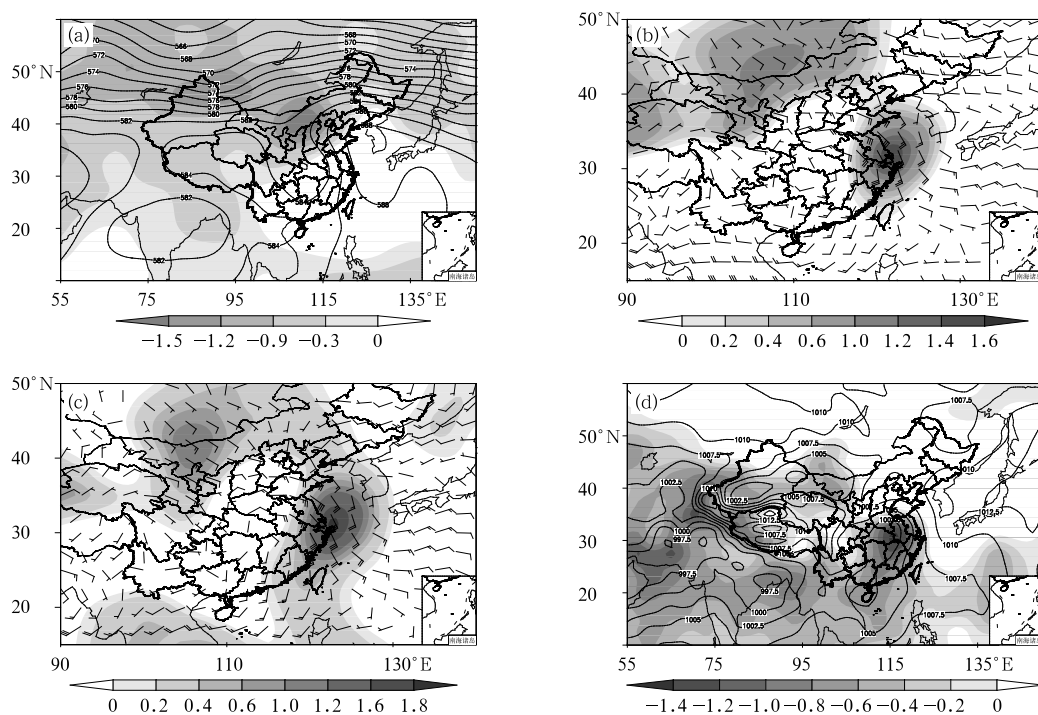


图 3 同图 1, 但为台风西风带冷槽结合型

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the typhoon and cold trough combined type

3.4 短波槽前低涡暖切型

从该类极端降水个例各层平均场(图4)可看出,500 hPa上,川东一带有短波槽东移,槽前有暖舌相配合,西太平洋副热带高压脊线偏南。700 hPa上,川东有低涡发展,低涡东侧西南风与偏东风之间形成一条准东西向的切变线。与700 hPa类似,850、925 hPa上也为一条准东西向暖式切变线,其南侧的偏南风达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,北侧的偏东气流可达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中,南风风速较常年同期显著偏强,925 hPa 南风标准化距平最大达1.6。地面上,川东至贵州一带有暖低压,倒槽向东伸展至湖南北部至湖北东部,华北地区为一冷高压,冷高压底部不断有冷空气扩散南下,入暖倒槽,形成静止锋。极端降水位于850 hPa切变线南侧,低空急流北侧风速辐合区中,地面静止锋北侧。

该类极端降水产生的原因一方面是发生在低涡暖式切变线附近,其雨带多为准东西向或东东北—西西南向,雨带与500 hPa西西南风引导气流较一致,易产生“列车效应”。二是低空西南急流与偏东急流之间形成较强而持续的辐合带,东风急流同时也起到对南风急流的阻挡作用,锋生作用加强并稳

定维持。三是此类极端降水主要发生在5—6月,大气积累的不稳定能量强,对流旺盛,雨强大。

4 四类极端降水物理量异常度特征

4.1 四类极端降水物理量异常度对比分析

对139例极端降水个例中极端降水站点所对应的物理量异常度(N)进行分析,按 $|N| \geq 2$ 的标准统计(其中垂直速度、中低层散度、中低层水汽通量散度等物理量取 $N \leq -2$,其他物理量取 $N \geq 2$),得出在总个例及四类型天气个例中各物理量达到异常标准的比例,如表3所示,可以看到物理量异常比例超过50%的一共有11个,其中925 hPa水汽通量散度在总个例中的异常比例是最高的,达74.1%;850~500 hPa垂直速度异常比例次之,超过或接近70%;925 hPa散度、850和925 hPa涡度、850 hPa水汽通量散度异常比例高于60%;大气可降水量及200 hPa散度异常比例接近60%。这说明大多数极端强降水与其低层水汽辐合、中低层垂直速度、低层风场辐合及气旋性涡度,高层风场辐散和大气可降水量的异常密切相关,是极端降水物理量异常度的

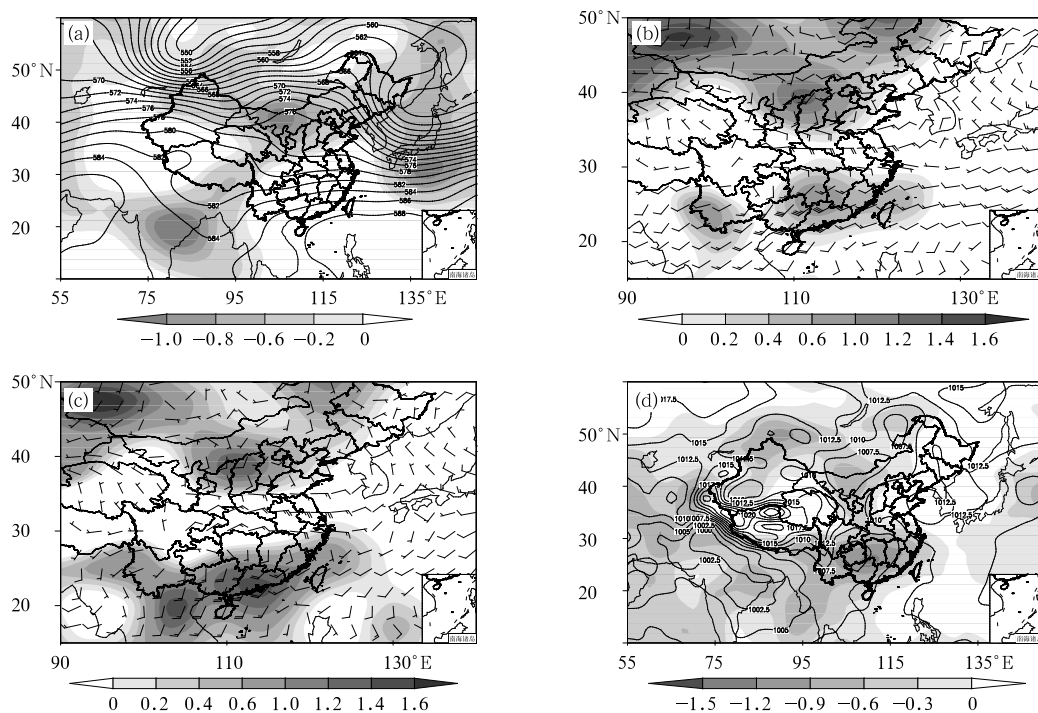


图4 同图1,但为短波槽前低涡暖切型

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for short wave trough with warm shear type

共性特征。从分天气类型的异常比例统计结果(表 3)看,四类天气型略有差别。类型一中,物理量异常比例超过 50%的有 14 个,主要为 850~500 hPa 垂直上升速度、925~700 hPa 水汽辐合,925~700 hPa 风场辐合,200 hPa 风场辐散,925~700 hPa 正涡度,大气可降水量和 500 hPa 比湿。类型二中物理量异常比例超过 50%的也有 14 个,大部分物理量与类型一相同,不同点主要是 925~850 hPa 暖平流在此型中异常比例较高,达到 57.1%和 52.4%。类

型三中物理量异常比例超过 50%的数量最多,达 18 个,主要差别体现在较其他类型 925~500 hPa 各层比湿以及 500 hPa 正涡度平流异常度明显偏高。类型四中物理量异常比例超过 50%的数量最少,为 11 个,和其他类型的主要差别在于大气降水量的异常比例很低(仅 21.4%),且其水汽辐合和风场辐合以及正涡度相比其他各类而言,要明显集中于低层到边界层。

表 3 四类天气型物理量异常度统计(单位:%)

Table 3 Statistical characteristics of abnormal degree of four weather types physical quantities (unit: %)

物理量	总个例异常比例	异常比例			
		类型一	类型二	类型三	类型四
925 hPa 水汽通量散度	74.1	74.6	66.7	87.5	71.4
500 hPa 垂直速度	73.4	79.7	66.7	66.7	78.6
700 hPa 垂直速度	73.4	76.3	69.0	70.8	71.4
925 hPa 散度	69.8	59.3	66.7	95.8	71.4
850 hPa 垂直速度	69.1	66.1	66.7	79.2	71.4
925 hPa 涡度	66.9	66.1	64.3	83.3	50.0
850 hPa 涡度	64.7	67.8	57.1	79.2	50.0
850 hPa 散度	62.6	67.8	59.5	66.7	50.0
850 hPa 水汽通量散度	62.6	66.1	59.5	66.7	50.0
大气可降水量	56.8	66.1	57.1	62.5	21.4
200 hPa 散度	56.8	66.1	52.4	50.0	50.0
700 hPa 水汽通量散度	49.6	59.3	52.3	33.3	28.6
700 hPa 涡度	48.2	50.8	47.6	62.5	21.4
500 hPa 比湿	48.2	54.2	40.4	66.7	21.4
925 hPa 垂直速度	47.5	40.7	47.6	62.5	50.0
850 hPa 比湿	46.0	45.8	42.9	66.7	21.4
700 hPa 比湿	43.9	49.1	40.5	54.2	21.4
700 hPa 温度平流	39.6	49.1	31.0	45.8	28.6
850 hPa 温度平流	38.8	33.9	57.1	29.2	21.4
925 hPa 比湿	33.1	25.4	33.3	54.2	21.4
925 hPa 温度平流	32.3	33.9	52.4	8.3	7.1
500 hPa 涡度平流	18.0	13.6	2.4	54.2	21.4

4.2 四类极端降水典型个例

下面结合各型典型个例,简要说明物理量异常度与极端降水间的配置关系。类型一中典型个例为 1998 年 7 月 21 日 20 时至 22 日 20 时(北京时,下同),极端降水站数为 8 个站,极端降水量最大达 360 mm。其物理量异常特征如图 5 所示,可以看出,该个例中极端降水主要集中在鄂东南,与 500 hPa 以下垂直速度异常有很好的对应关系,其中在 500 hPa 异常度最强, N 达 -2.3 。850 hPa 以下水汽通量散度也呈现出明显的异常,其中在 850 hPa 上,水汽通量散度的异常度 N 达 -3.46 。

散度场也有着明显的异常,850 hPa 散度异常度 N 为 -2.42 。大气降水量的异常度达 1.99,接近 2。

类型二中的典型个例是 2000 年 7 月 5 日 08 时至 6 日 08 时,极端降水站数为 4 个站,极端降水量最大为 492.2 mm。其物理量异常特征如图 6 所示,可以看出,该个例中极端降水主要集中在豫北,与 850 hPa 以下散度异常有很好的对应关系,其中 925 hPa 异常度最强, N 达 -2.4 。700 hPa 以下温度平流也呈现出明显的异常,其中在 700 hPa 温度平流的异常度 N 达 2.1。500 hPa 以下垂直速度也有着明显的异常,其中 850 hPa 垂直速度异常度 N 为 -2.92 。大气降水量的异常度达 1.96,接近 2。

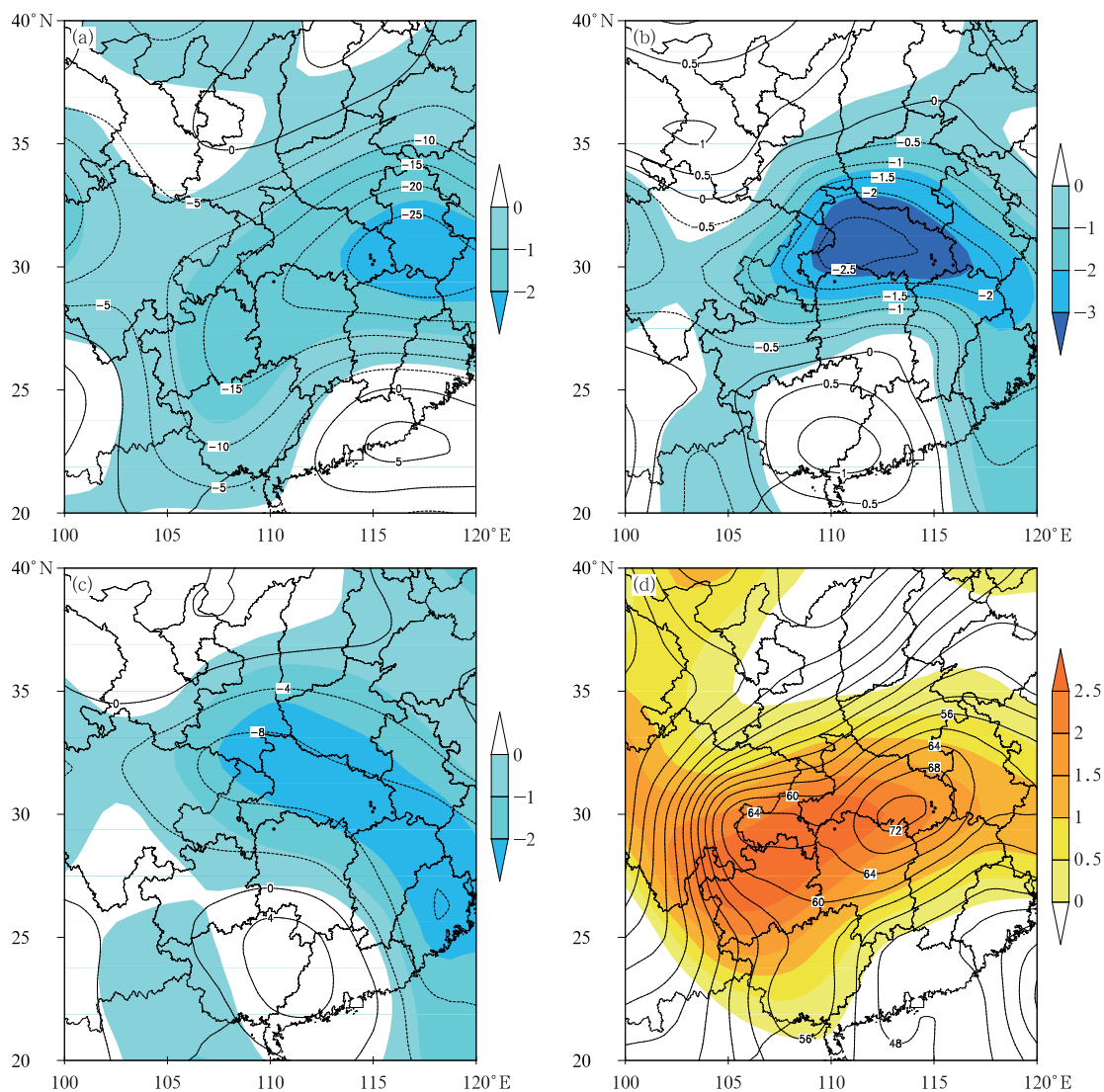


图5 1998年7月22日08时物理量(等值线)及异常度(阴影)

(a)500 hPa 垂直速度(单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)850 hPa 水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c)850 hPa 散度(单位: 10^{-5} s^{-1}), (d)大气可降水量(单位:mm)

(黑点为极端降水站点,下同)

Fig. 5 Physical quantity (isoline) and anomaly (shaded area) at 08:00 BT 22 July 1998

(a) 500 hPa vertical velocity (unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),

(b) 850 hPa water vapor flux divergence (unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) 850 hPa divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}), (d) atmospheric precipitable water (unit: mm)

(Black spot is the extreme rainstorm station, the same below)

类型三中的典型个例是1994年7月11日20时至12日20时,极端降水站数为10个,极端降水量最大达293.5 mm。其物理量异常特征如图7所示,可以看出,该个例中极端降水主要集中在豫北,虽处在500 hPa以下水汽通量散度异常中心偏北处,但其异常度非常强,925 hPa水汽通量散度异常度最强, N 达-2.7。200 hPa散度异常度大值中心

与极端降水对应非常好, N 达2.5。500 hPa以下涡度平流也有着明显的异常,其中500 hPa涡度平流异常度 N 为2.8。大气可降水量的异常度达1.5。在本个例中,结合200 hPa散度异常和500 hPa正涡度平流异常能很好地做出极端降水落区,是预报中值得关注的。

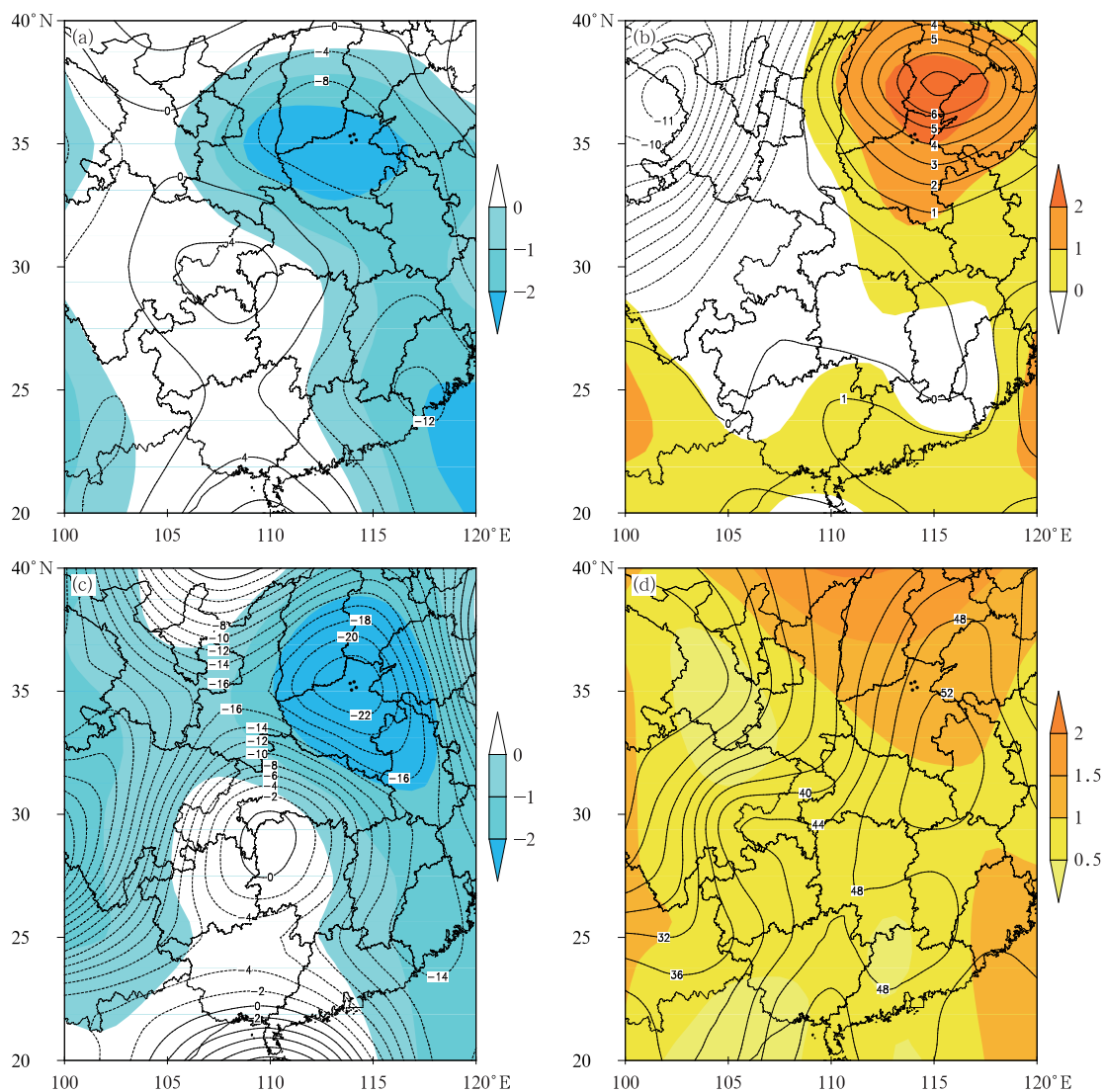


图 6 2000 年 7 月 5 日 14 时物理量(等值线)及异常度(阴影)

(a) 925 hPa 散度(单位: 10^{-5} s^{-1}), (b) 700 hPa 温度平流(单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) 850 hPa 垂直速度(单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 大气可降水量(单位: mm)

Fig. 6 Physical quantity (isoline) and anomaly (shaded area) at 14:00 BT 5 July 2000

(a) 925 hPa divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}), (b) 700 hPa temperature advection (unit: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) 850 hPa vertical velocity (unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) atmospheric precipitable water (unit: mm)

类型四中的典型个例是 1984 年 5 月 30 日 20 时至 31 日 20 时, 极端降水站数为 5 个, 极端降水量最大达 217.4 mm。其物理量异常特征如图 8 所示, 可以看出, 该个例中极端降水主要集中在湘中南, 与位于 500 hPa 以下垂直速度异常中心附近, 其中 700 hPa 异常度最强, N 达 -2.8。850 hPa 以下水汽通量散度也呈现出明显的异常, 其中 925 hPa 水汽通量散度的异常度 N 达 -2.9。850 hPa 以下涡度异常中心与本次过程中极端降水落区对应得非

常好, 925 hPa 涡度异常值 N 为 2.7。中低层和高层散度均表现异常特征, 其中 200 hPa 散度异常度达 2.6。

5 结论与讨论

本文通过 1960—2012 年间共 139 例极端降水个例, 对其降水特征、天气形势、物理量异常度等方面进行了统计分析及分类对比研究, 主要结论如下:

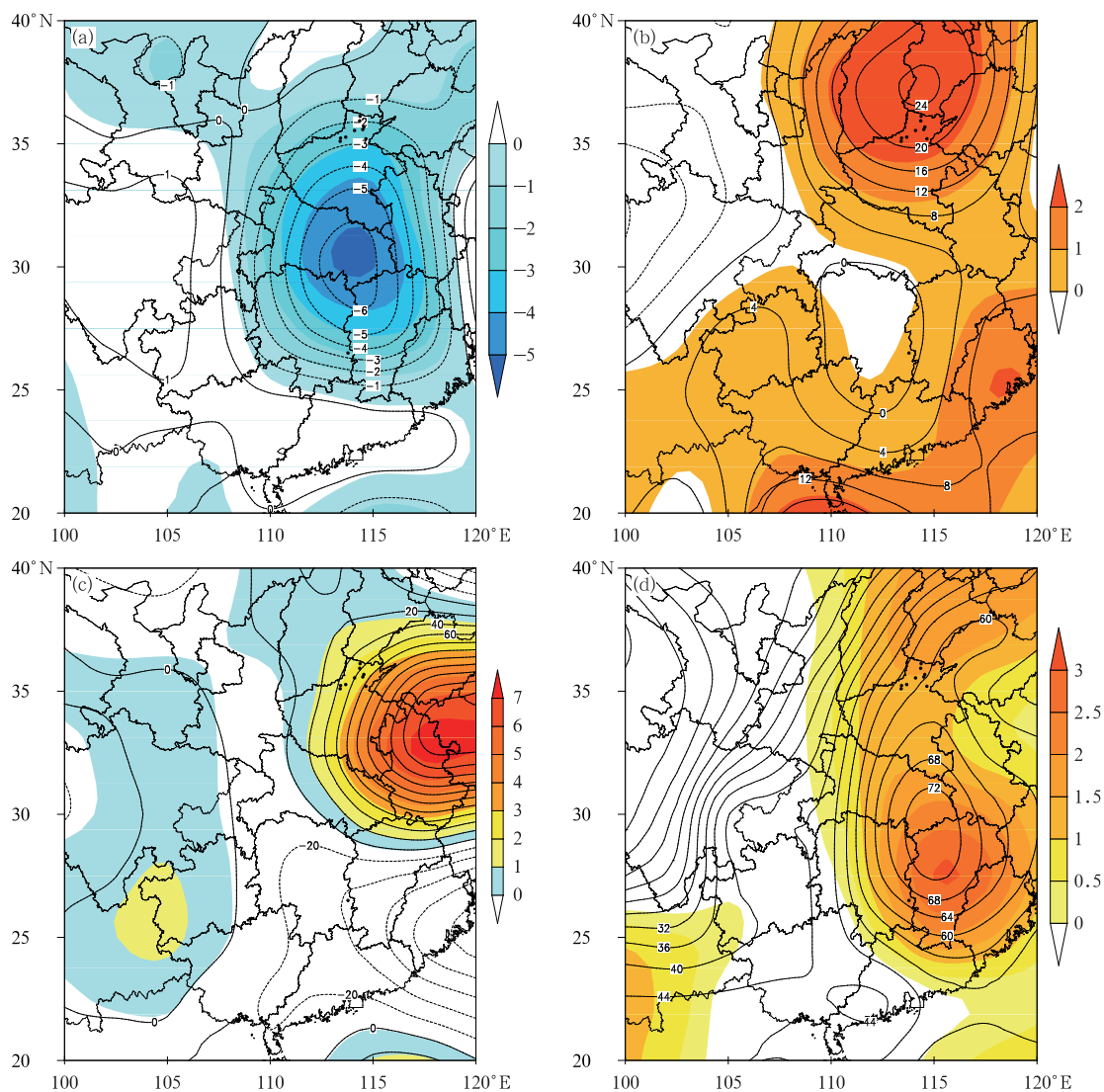


图7 1994年7月12日08时物理量(等值线)及异常度(阴影)

(a) 925 hPa 水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 200 hPa 散度
(单位: 10^{-5} s^{-1}), (c) 500 hPa 涡度平流(单位: 10^{-9} s^{-2}), (d) 大气可降水量(单位: mm)

Fig. 7 Physical quantity (isoline) and anomaly (shaded area) at 08:00 BT 12 July 1994

(a) 925 hPa water vapor flux divergence (unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),
(b) 200 hPa divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}), (c) 500 hPa vorticity advection (unit: 10^{-9} s^{-2}),
(d) atmospheric precipitable water (unit: mm)

(1) 华中区域极端降水主要发生在四种不同的天气形势下, 即纬向型、经向型、台风西风带冷槽结合型和短波槽前低涡暖切型, 其个例占比分别为 42.4%, 30.2%, 17.3%, 10.1%。

(2) 对四类降水特征分析表明, 台风西风带冷槽结合型在暴雨站数、极端降水站数、极端降水量平均值均居四类最大, 纬向型和经向型次之, 短波槽前低涡暖切型最小。台风西风带冷槽结合型、经向型中极端最大降水量明显高于其他两类, 分别达到 755 和

492 mm。

(3) 中低层低涡、切变线、低空急流、高空辐散及稳定的环流形势是四类极端降水天气形势共同特征。但在 500 hPa 上具有不同的环流特征: 纬向型以准东西向的南北气流汇合形势为特征; 经向型以槽前高压坝或“两高”阻挡形势下南北向低压带稳定维持为特征; 台风西风带冷槽结合型为稳定的“两高两低”环流形势; 短波槽前低涡暖切型以中低层暖式切变线辐合为特征。

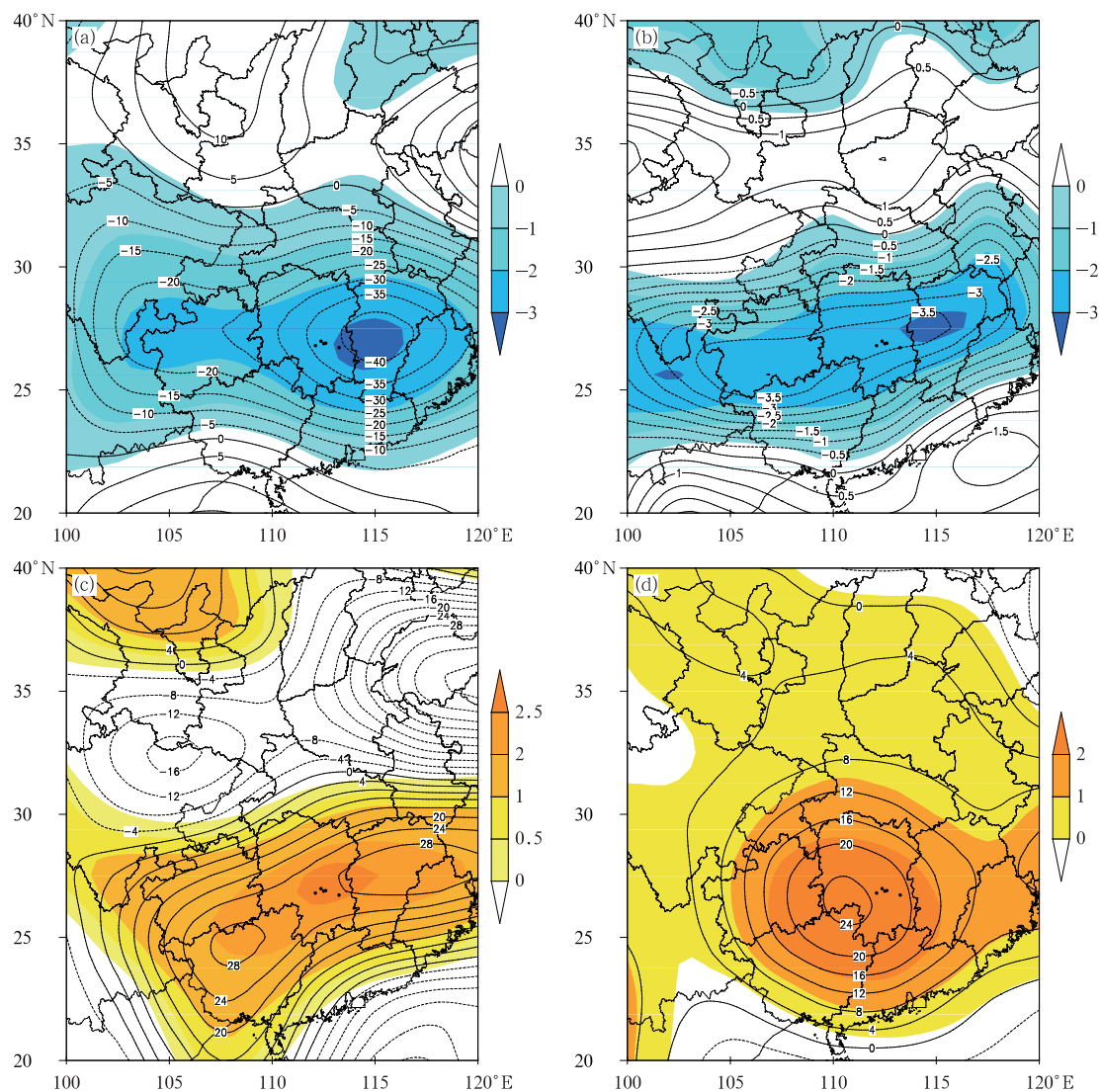


图 8 1984 年 5 月 31 日 08 时物理量(等值线)及异常度(阴影)

(a) 700 hPa 垂直速度(单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 925 hPa 水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c) 925 hPa 涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}), (d) 200 hPa 散度(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 8 Physical quantity (isoline) and anomaly (shaded area) at 08:00 BT 31 May 1984

(a) 700 hPa vertical velocity (unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),

(b) 925 hPa water vapor flux divergence (unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) 925 hPa vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}), (d) 200 hPa divergence (unit: 10^{-5} s^{-1})

(4) 四类极端降水的物理量异常度特征分析表明, 大多数极端强降水与其低层水汽辐合、中低层上升速度、低层风场辐合及气旋性涡度, 高层风场辐散和大气可降水量的异常密切相关, 上述物理量异常比例超过 50%, 这是极端降水的共性特征。此外, 各类型亦有差别, 纬向型 500 hPa 比湿异常比例较高, 经向型中低层暖平流异常比例较高, 台风西风带冷槽结合型在 500 hPa 正涡度平流和中低层比湿上异常比例较高, 短波槽前低涡暖切型异常物理量更集

中于边界层, 且此类中大气可降水量异常比例不高。

由于在本文分析中所用到的气候平均场为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率资料, 而极端强降水往往是发生在有利的大尺度天气背景之下, 多尺度天气系统综合作用的结果, 其落区具有局地性特征, 因此, 本文的研究仅仅只能对极端降水发生的背景及大致落区提供一定参考, 更为精细的结果有待于今后对上述各类天气形势下的中小尺度系统发生发展进行更为深入的分析 and 总结。

参考文献

- 陈涛,林建,张芳华,等,2017.“16·7”华北极端强降水过程对流尺度集合模拟试验不确定性分析[J].气象,43(5):513-527. Chen T, Lin J, Zhang F H, et al, 2017. Uncertainty analysis on the July 2016 extreme precipitation event in North China using convection allowing ensemble simulation[J]. Meteor Mon, 43(5): 513-527(in Chinese).
- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266(in Chinese).
- 杜钧,Grumm R H,邓国,2014.预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”:以北京2012年7月21日特大暴雨为例[J].大气科学,38(4):685-699. Du J, Grumm R H, Deng G, 2014. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 38(4): 685-699(in Chinese).
- 杜小玲,吴磊,杨秀庄,等,2016.梅雨锋西段持续性暴雨的环境场特征及贵阳极端降水成因[J].暴雨灾害,35(5):415-426. Du X L, Wu L, Yang X Z, et al, 2016. Analysis of environment conditions of a sustained heavy rain event occurred in western Meiyu front and cause of extreme precipitation in Guiyang[J]. Torr Rain Dis, 35(5): 415-426(in Chinese).
- 冯志刚,程兴无,陈星,等,2013.淮河流域暴雨强降水的环流分型和气候特征[J].热带气象学报,29(5):824-832. Feng Z G, Cheng X W, Chen X, et al, 2013. The classification of the circulations and the climatic characteristics of rainstorms in Huaihe River Basin[J]. J Trop Meteor, 29(5): 824-832(in Chinese).
- 符娇兰,马学款,陈涛,等,2017.“16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J].气象,43(5):528-539. Fu J L, Ma X K, Chen T, et al, 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon, 43(5): 528-539(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018.2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J].气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).
- 侯淑梅,盛春岩,王文龙,等,2014.山东省极端强降水天气概念模型研究[J].大气科学学报,37(2):163-174. Hou S M, Sheng C Y, Wan W L, et al, 2014. The conceptual models of extreme precipitation weather in Shandong Province[J]. Trans Atmos Sci, 37(2): 163-174(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,何娜,等,2017.“7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 685-699(in Chinese).
- 栗哈,王新敏,张霞,等,2018.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the north of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1136-1147(in Chinese).
- 廖晓农,倪允琪,何娜,等,2013.导致“7·21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,71(6):997-1011. Liao X N, Ni Y Q, He N, et al, 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the “7·21” heavy rain case[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 997-1011(in Chinese).
- 刘国忠,黄开刚,罗建英,等,2013.基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究[J].气象,39(1):20-27. Liu G Z, Huang K G, Luo J Y, et al, 2013. Research on the short-term forecasting technique of persistent rainstorm with conceptual model and ingredients-based method[J]. Meteor Mon, 39(1): 20-27(in Chinese).
- 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. Qian W H, Jiang N, Du J, 2016. Seven anomalous synoptic patterns of regional heavy rain in eastern China[J]. Meteor Mon, 42(6): 674-685(in Chinese).
- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005.20世纪90年代华北暴雨过程特征的分析研究[J].气候与环境研究,10(3):492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic Environ Res, 10(3): 492-506(in Chinese).
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1267-1277(in Chinese).
- 陶诗言,等,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:35-46. Tao S Y, et al, 1980. Torrential Rain in China[M]. Beijing: Science Press: 35-46(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018.2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484(in Chinese).
- 王苗,郭品文,郭驹,等,2012.我国极端降水事件研究进展[J].气象科技,40(1):79-86. Wang M, Guo P W, Wu Y, et al, 2012. Progresses in researches on extreme precipitation over China[J]. Meteor Sci Technol, 40(1): 79-86(in Chinese).
- 王毅,马杰,代刊,2018.“7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析[J].气象,44(1):53-64. Wang Y, Ma J, Dai K, 2018. Ensemble-based analysis of medium-range forecast change and uncertainty for the 20 July 2016 severe heavy rainfall over North China[J]. Meteor Mon, 44(1): 53-64(in Chinese).

- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 肖递祥,杨康权,俞小鼎,等,2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象,43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 徐珺,毕宝贵,湛芸,等,2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报,76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):511-524(in Chinese).
- 俞小鼎,2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象,38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 曾勇,杨莲梅,2018. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J]. 高原气象,37(5):1220-1232. Zeng Y, Yang L M, 2018. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 37(5):1220-1232(in Chinese).
- 张家国,王珏,吴涛,等,2018. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. 暴雨灾害,37(1):14-23. Zhang J G, Wang J, Wu T, et al, 2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Torr Rain Dis, 37(1):14-23(in Chinese).
- 张一平,乔春贵,梁俊平,2014. 淮河上游短时强降水天气学分型与物理诊断量阈值初探[J]. 暴雨灾害,33(2):129-138. Zhang Y P, Qiao C G, Liang J P, 2014. Tentative discussion on synoptic type and physical diagnostic threshold of short-time strong precipitation in upper reaches of the Huaihe River[J]. Torr Rain Dis, 33(2):129-138(in Chinese).
- 翟盘茂,李蕾,周佰铨,等,2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报,27(5):631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. J Appl Meteor, 27(5):631-640(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,鲁蓉,等,2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象,44(3):351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3):351-360(in Chinese).
- 朱佳蓉,漆梁波,2013. 上海地区近12年暴雨个例分型及预报要点[J]. 大气科学研究与应用, (1):13-24. Zhu J R, Qi L B, 2013. The classification and forecast key points of heavy rainfall over the past 12 years in Shanghai[J]. Atmos Sci Res Appl, (1):13-24(in Chinese).
- Grumm R H, Hart R, 2001. Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: preliminary findings[J]. Wea Forecasting, 16(6):736-754.