

华南暖区暴雨环境参量的统计分析*

万轶婧¹, 王东海^{1,2,3}, 梁钊明^{3,4}, 曾智琳¹

- (1. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082;
2. 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
4. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用探空数据及地面常规观测资料, 针对 2008~2017 年前汛期 (4~6 月) 发生在华南地区的 54 次典型暖区暴雨过程的不稳定条件、水汽、能量和动力等环境场特征开展统计分析, 并对普通暖区暴雨、特强暖区暴雨的参量条件进行了对比, 基于百分位法提取了用以区分普通、特强暖区暴雨过程的关键阈值。结果表明: 1) 在众多常用的物理参量指标中, 表征水汽条件的 850 hPa 温度露点差、大气可降水量以及表征动力条件的深层垂直风切变对典型华南暖区暴雨事件的发生具有较清晰指示意义。华南暖区暴雨发生前大气可降水量充沛且对流层低层水汽接近饱和, 结合一定的抬升条件, 大气能迅速发生凝结潜热释放, 并在深层垂直风切变的作用下组织化发展, 从而使对流持续形成暴雨。当大气环境满足 850 hPa 的温度露点差 ≤ 2.2 °C、大气可降水量 ≥ 56 mm、深层垂直风切变 ≥ 9 m/s 时, 有利于暖区暴雨的发生。2) 相较于普通暖区暴雨事件, 特强暖区暴雨事件在大气层结上具有更为充沛的对流层低层水汽条件, 当大气环境满足 850 hPa 的温度露点差 ≤ 2.0 °C 时, 特强暖区暴雨发生的概率更高。

关键词: 华南暖区暴雨; 探空资料; 物理参量; 环境条件

中图分类号: P445 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 06-0051-13

Statistical analysis of the environment parameters of warm-sector heavy rainfall in South China

WAN Yijing¹, WANG Donghai^{1,2,3}, LIANG Zhaoming^{3,4}, ZENG Zhilin¹

- (1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
2. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Zhuhai 519082, China;
3. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering(Guangdong,Zhuhai), Zhuhai 519082,China;
4. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The environment features under unstable conditions, water vapor, energy and dynamics

* 收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (41775097, 41861164027); 广东省科技计划项目 (20170244); 广东省科技计划项目 (2017 B020218003); 海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金 (SCSF201801)

作者简介: 万轶婧 (1996 年生), 女; 研究方向: 中小尺度天气; E-mail: wanyj3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王东海 (1965 年生), 男; 研究方向: 中小尺度天气动力学、热带对流系统、数值天气预报、数值模拟和气象资料同化及分析; E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

conditions were studied by using sounding data and conventional observation data for 54 warm-sector heavy rainfall cases in South China from April to June during 2008-2017. The thresholds of key environmental parameters to distinguish the significantly strong warm-sector heavy rainfall cases are extracted with percentile method. The conclusions are shown as follows: (1) The depression of dew point at 850 hPa, the atmospheric precipitation and the deep vertical wind shear can be used to predict the occurrence of warm-sector heavy rainfall in South China. The water vapor in the lower troposphere is nearly saturated with high atmospheric precipitation before the occurrence of warm-sector heavy rainfall. Combined with certain lifting conditions, the latent heat can be released from water vapor condensation in the atmosphere, so that the convection can continue to form rainstorm. The thresholds of physical parameters include depression of dew point ≤ 2.2 °C at 850 hPa, atmospheric precipitation ≥ 56 mm and deep vertical wind shear ≥ 9 m/s. The above conditions are favorable for the generation of warm-sector heavy rainfall. (2) Compared with common warm-sector heavy rainfall, the significantly strong warm-sector heavy rainfall is of more sufficient water vapor in the lower troposphere. Under the condition of depression of dew point ≤ 2.0 °C at 850 hPa, the probability of significantly strong warm-sector heavy rainfall is higher.

Key words: warm-sector heavy rainfall in South China; sounding data; physical parameter; environment conditions

华南位于我国最南端,是我国雨季最长、雨量最丰沛、暴雨最频发的地区之一。每年4~6月为华南地区第一个多雨期,这一时期的降水主要是受西风系统和东亚副热带季风共同影响,并与冷空气的活动有密切联系,这一阶段被称为华南前汛期。与其它类型暴雨相比,华南前汛期的暴雨除了常见的典型锋面降水以外,许多影响严重、范围小的大暴雨和特大暴雨过程,尤其是局地性特大暴雨,大都发生在锋前的暖区里,这类暴雨称为暖区暴雨^[1-2]。根据广东一线预报员的经验,华南暖区暴雨局地性强,预报难度大^[3],截至目前数值模式无论是全球模式还是中尺度模式确定性预报对暖区暴雨的预报能力仍然偏弱,集合预报的不确定性也很明显^[4-6]。因此,加强华南暖区暴雨的研究,提升其预报准确度,具有重要的意义。

华南暖区暴雨,一般是指产生于距离华南地面锋线200~300 km的暖区里的暴雨,或者是发生在西南风和东南风的汇合气流中,甚至是无明显切变的西南气流里的暴雨^[1]。暖区暴雨一般是在高温、高湿和不稳定的情况下产生的,降水强度较大,一般是冷锋暴雨强度的3~5倍;降水范围比锋面暴雨小,且多呈块状,尺度一般为 β 中尺度,只有几十到几百公里^[7]。

前人对华南暖区暴雨形势背景特征进行过统计和提炼总结,何立富等^[2]依据中央气象台预报实践经验,将暖区暴雨分为边界层辐合型、偏南

风风速切变型和强西南急流型3类,大部分暖区暴雨都发生在高空槽前,低层受西南气流影响,对流层上层位于辐散气流区中。苗春生等^[8]采用客观分析方法将华南暖区暴雨主要影响系统分为两类辐合线低值系统:偏南向辐合线和西南向辐合线,两类暴雨均为水汽充沛,条件不稳定能量层深厚,这为凝结潜热释放提供了良好的环境基础,有利于暴雨区形成暖心系统,维持暴雨系统强度与增强系统深度。Du and Chen^[9]研究认为华南沿海暖区暴雨的发生发展与边界层急流、天气尺度急流的相互作用和日变化特征有密切关系。丁治英等^[10]对2005~2008年5、6月华南暖区暴雨统计发现,暖区暴雨多发生于850 hPa低空急流的后部,且均位于南风辐合区中。

暖区暴雨的发生发展机制复杂,暴雨中的对流系统难以捕捉,是造成暖区暴雨预报能力差的主要原因。大量的研究^[11-14]揭示了暖区暴雨的触发与多种因素相关,包括诸如非均匀下垫面强迫、大气内部多类不稳定热动力、边界层浅薄冷空气活动、海陆分布和地形等,在这些因素相互作用下,暖区暴雨的触发机制更加复杂。此外,许多研究^[15-17]也表明有组织发展的各类中尺度对流系统(MCS)是造成暖区暴雨的直接或主要原因,连续发展的MCS、形成“列车效应”的线状对流系统等有组织的中小尺度对流系统可直接造成暖区暴雨。

虽然上面研究从统计角度已很好总结出有利

于暖区暴雨发生的典型环流背景, 触发机制多样化。然而, 暖区暴雨局地性特征明显, 具体触发地点仍需要考量环境参量因素。此外, 研究表明当大尺度的影响系统难以识别时, “流型识别法”常常失效, 基于雷暴构成要素的“配料法”是暴雨潜势预报的重要思路^[18]。鉴于此, 许多个例研究对暖区暴雨发生前的环境物理参量进行了统计分析^[19-21]。这些研究表明, 大部分暖区暴雨CAPE在1 000 J/kg以上, K指数在32℃以上, 相对湿度达到90%以上, 对流层中低层假相当位温值在335 K以上, 但也有个例对应的物理参量远低于上述水平。而且已有的大部分研究偏重关注CAPE、K指数、假相当位温、相对湿度等少数几个物理参量, 对暖区暴雨的层结状态特征的认识还不够全面, 难以挖掘具有预报指示意义的有效信息。

以上对暖区暴雨的环境参量研究主要基于多个暖区暴雨个例的统计分析研究, 但大多数研究只针对一个个例进行总结, 而且大多选取再分析资料, 不足以准确把握暴雨发生时的真实环境特征, 对于暖区暴雨预报的指示意义有限。同时, 在多源中尺度观测资料逐渐丰富的前提下, 仍缺乏对暖区暴雨发生前的环境场特征定量化统计研究。目前华南暖区暴雨这种灾害性强、影响系统多的天气仍然是预报技术的难点, 了解其真实的温湿层结及环境参量有利于加深对暖区暴雨发展的物理机制的理解, 提高暖区暴雨的潜势预

报水平。本文旨在利用探空资料, 对2008~2017年4~6月的华南暖区暴雨个例进行研究, 从环境条件及层结特征的角度出发, 通过统计多达8种物理参量, 研究暖区暴雨垂直大气的静力不稳定、水汽、能量和动力条件, 以期挖掘有参考价值的预报特征, 并提取有指示意义的华南暖区暴雨关键环境参数, 为预报提供一定的借鉴与参考。

1 数据与研究方法

1.1 数据

选取资料主要包括2008~2017年4~6月华南地区12个L波段探空站观测资料、国家级地面气象站基本气象要素日值数据集以及国家级地面气象站逐小时降水数据集。L波段高空气象探测系统是由我国自行研发的高空气象探测系统, 由GFE(L)1型二次测风雷达和GTS1型数字探空仪共同组成, 采用二次测风雷达测距体制, 能够连续自动测定高空气温、湿度、气压、风向和风速等气象要素, 其采样最大时间分辨率为1.2 s的秒级, 比传统探空数据精度更高、定位更准确, 可为暖区暴雨发生提供密度更高的观测信息^[22]。L波段探空资料常规观测时间为每天08时和20时(北京时间, 下同), 部分时段根据重大天气过程或科学试验需要进行02时和14时加密观测。图1给出了探空站点分布及周围地形示意图。

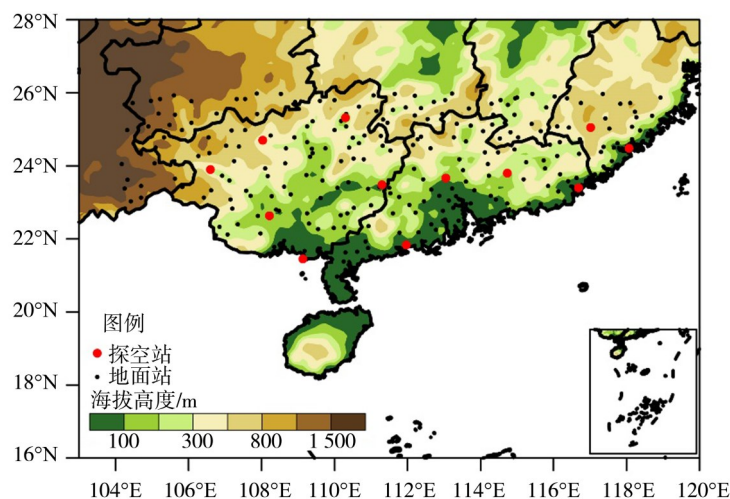


图1 华南地区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of South China area

中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集包括降水量、气温、相对湿度以及地面风向风速等观测要素, 观测时间分辨率为24 h, 华南地

区有264个站点。考虑暖区暴雨具有持续时间短、降水强度大等特点, 国家级地面气象站逐小时资料用于暖区暴雨个例的挑选。

1.2 暖区暴雨个例的挑选

基于前人^[23-24]对华南强降水及暖区暴雨的研究方法首先挑选出华南地区强降水个例,若华南地区264个国家级观测站中出现相邻3站或3站以上(站点之间的距离不超过100 km)日降水量(20时~次日20时)大于或等于50 mm时,即定义为一个华南强降水个例。

基于上述强降水个例,进一步挑选暖区暴雨个例。参考黄土松^[1]和刘瑞鑫等^[24]对暖区暴雨个例的定义,在满足暴雨个例的定义前提下,挑选暖区暴雨个例:①由于假相当位温 θ_{se} 具良好热力学意义,对锋区有非常清晰指示意义^[25],为此以地面 θ_{se} 的密集带确定为锋区位置,发生在其前侧(南侧)200 km或以上的强降水确定为暖区暴雨;②地面不存在明显的锋面系统,华南地区降水区域对应低空为一致偏南风控制时发生的强降水,亦确定为暖区暴雨。根据挑选暖区暴雨个例的暴雨落区,判断暴雨落区内是否有探空站,如有探空站在暴雨落区内,则将该探空站的暖区暴雨发生前最临近一次资料加入暖区暴雨个例样本中,如没有探空站在暴雨落区内,则去掉此个例。

按照上述定义标准,结合逐小时降水的观测资料,从2008~2017年4~6月共挑选出华南典型暖区暴雨过程54例。为了突出暖区暴雨个例的大气层结特征,本文将2008~2017年4~6月12个探空站的所有观测作为气候态,以期通过对比分析,揭示华南暖区暴雨的环境场条件的关键特征。

1.3 分析方法

为探明暖区暴雨发生前的环境场条件和特征,参照基于构成要素的预报方法(配料法)的主要思路^[26-27]来选取关键环境参数。强对流主要发生在条件不稳定、一定的水汽条件和适当的垂直风切变的环境下。因此,基于静力不稳定、水汽、能量与动力条件,选取了8种业务预报常用的物理参数开展统计分析^[28-33]。涉及静力不稳定,使用850 hPa与500 hPa温差(ΔT_{85})来表示。水汽条件采用850 hPa温度露点差 $[(T-T_d)_{850}]$ 、500 hPa温度露点差 $[(T-T_d)_{500}]$ 和大气可降水量(PWAT)来代表。表示能量条件的参数选取对流有效位能(CAPE)和K指数,使用深层垂直风切变($SHRL_{0-6km}$)和850 hPa以下最大偏南风速(U)代表动力条件。

通过箱线图给出各种关键参数的分布,并与气候态特征进行对比,提取暖区暴雨发生的各种关键参数的阈值,以期构建对暖区暴雨预报有更

清晰指示意义的预报参数模型。参考高晓梅等^[28]对鲁中地区强对流天气环境参量特征的分析方法,如果采用箱线图中某参数的最低值或最高值作为阈值,则可能出现大量的虚警,因此决定采用某关键参数的25百分位或75百分位作为影响华南暖区暴雨的参数阈值,在虚警率和漏报率之间确定一个折中,25百分位和75百分位的选择总体上看还是相当合理的。

将小时雨量不低于50 mm的暖区暴雨个例称为特强暖区暴雨,将小时雨量低于50 mm的个例称为普通暖区暴雨,筛选出特强暖区暴雨8例,普通暖区暴雨46例,以期通过对比分析,深入分析暖区暴雨的环境特征。

2 华南暖区暴雨的环境参量分析

2.1 静力不稳定

大气静力稳定度在很大程度上决定着降水的性质,静力不稳定大气层结对深厚湿对流的触发和发展起重要作用,甚至决定这对流发展强弱以及持续时间长短。在预报实践中,对流层中低层的温度直减率通常用850和500 hPa之间的温差(ΔT_{85})来表示,通过大气垂直温度结构特征反映大气静力稳定度。图2显示了暖区暴雨个例的 ΔT_{85} 和气候态无明显差异,两者中位数分别为22.9℃和22.5℃,均值仅有0.1℃差异,暖区暴雨个例和气候态的 ΔT_{85} 最小值到最大值范围分布分别为9~26℃和8~35℃,但两者的箱体位置及高度处在接近相同的水平,呈现为弱的条件不稳定层结。因此就 ΔT_{85} 分布而言,暖区暴雨的发生不需要很强的静力不稳定条件,且暖区暴雨个例的 ΔT_{85} 分布特征与气候态类似,利用 ΔT_{85} 无法判断是否发生暖区暴雨。

2.2 水汽条件

大气水汽的含量以及饱和程度和垂直分布是影响降水效率和强度的重要因素。图3a和b分别为暖区暴雨的850 hPa和500 hPa温度露点差箱线图,分析发现,暖区暴雨个例的850 hPa温度露点差介于0.4~8.5℃之间,箱体结构窄小,其均值仅为2.0℃,表明低层大气接近饱和状态,显著低于其气候态均值(17.9℃)。通过箱体结构及分布对比发现,低层(850 hPa)大气饱和程度对暖区暴雨具有一定的指示性,说明暖区暴雨对低层饱和程度的依赖是比较明显的,这很大程度上可与气候态区分开。然而,从500 hPa温度露点差来看,

由于暖区暴雨最值离散度很大造成均值偏离箱体, 均值代表性较差, 故从箱体位置 (25~75 百分位) 与气候态对比, 可见暖区暴雨在 500 hPa (对流层中层) 亦比气候态更湿, 但整体差异程度略低于低层。总体而言, 华南暖区暴雨事件具有“低层高湿”的层结特征, 850 hPa 温度露点差是暖区暴雨发生的关键指标之一。

从表征气柱绝对水汽含量的大气可降水量

(PWAT) (图 3c) 来看, 暖区暴雨两个例的 PWAT 介于 44~73 mm, 25%~75% 的范围为 56~64 mm, 其均值为 60 mm。气候态的 PWAT 在 5~83 mm 之间, 25%~75% 的范围为 41~60 mm, 均值为 50 mm。暖区暴雨的 PWAT 最小值远大于气候态的 PWAT 最小值, 暖区暴雨 PWAT 箱体的上下端须更为接近, 离散度较气候态也明显要小得多。一些强降水个例分析表明, 大气可降水量达到 60 mm 左右或者以上

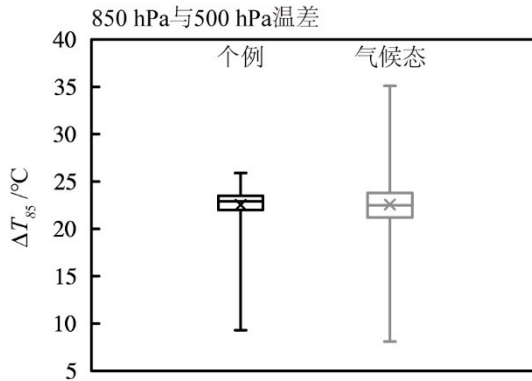


图 2 华南暖区暴雨个例和气候态的静力不稳定环境参量箱线图

线段最高点为统计最大值, 最低点为统计最小值;

箱形上框线为 75% 四分位值, 下框线为 25% 四分位值, 箱内线为中位数值

Fig. 2 Box and whisker plot of environmental parameter of static instability for warm-sector heavy rainfall and climatology (the highest point of the line is the statistical maximum, the lowest point is the statistical minimum, the box upper frame line is the upper quartile, the lower frame line is the lower quartile, line inside the box indicates the median, × is the average)

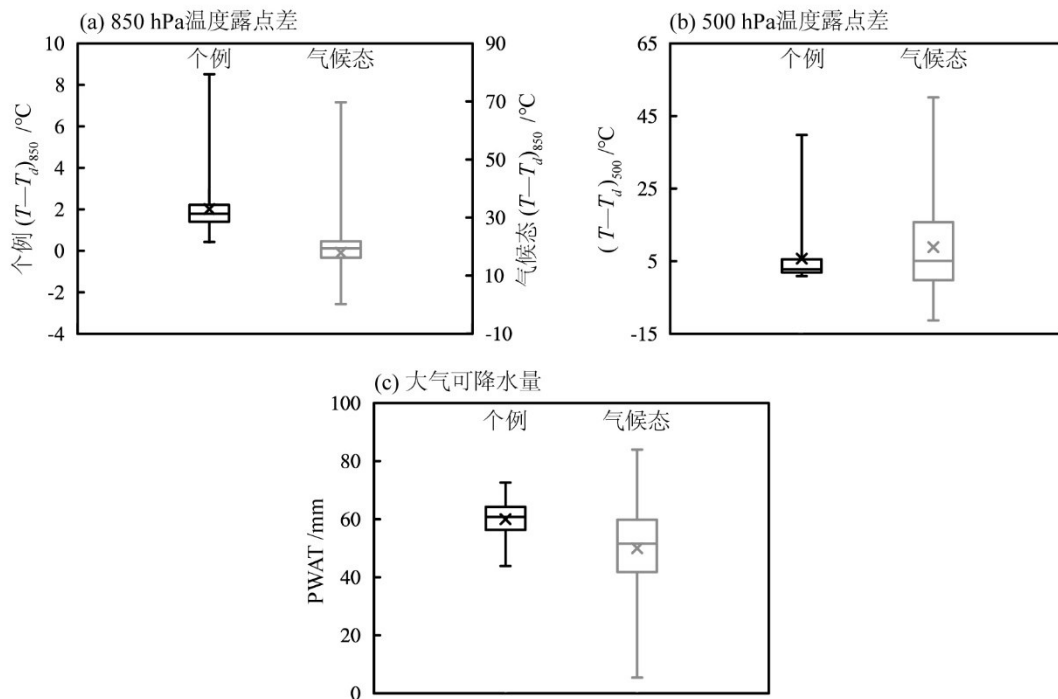


图 3 华南暖区暴雨个例和气候态的水汽条件环境参数箱线图

Fig. 3 Box and whisker plot of environmental parameters of water vapor condition for warm-sector heavy rainfall and climatology

时,表明大气非常暖湿^[34]。华南前汛期PWAT气候态均值为50 mm,该值本身是较高的,这与华南纬度较低,环境水汽本身较充沛有关。而75%的暖区暴雨个例在PWAT大于56 mm的条件下发生,说明暖区暴雨更倾向在较气候态更高的PWAT条件下发生,这是暖区暴雨产生的关键指标之一。因此,临近预报判别暖区暴雨不但需要关注低层的水汽,也要重视大气整层可降水量,足够大的大气整层的水汽含量对是否发生暖区暴雨有一定的指示性。

2.3 能量条件

对流有效位能(CAPE)是反映大气潜在不稳定能量的关键参数,也是强天气业务预报中判断

深厚湿对流潜势的常用重要指标。图4a为华南暖区暴雨个例和气候态的CAPE箱线图,从图4a可知,暖区暴雨发生前的CAPE值离散度较大,其75%、25%四分位值分别为2127 J/kg和965 J/kg,中位数(1410 J/kg)、均值(1491 J/kg)都属于中等强度的CAPE(1000~2000 J/kg),可见相较于那些风雹为主的强对流天气^[35-36],大部分暖区暴雨并不需要很强的CAPE。从气候态来看,CAPE介于0~7460 J/kg,箱体较暖区暴雨个例的更宽,对流有效位能分布更为离散,其中位数(631 J/kg)及均值(1232 J/kg)虽低于暖区暴雨个例,但二者重叠区间范围仍然明显,因此很难单从CAPE具体数值判别是否发生暖区暴雨。

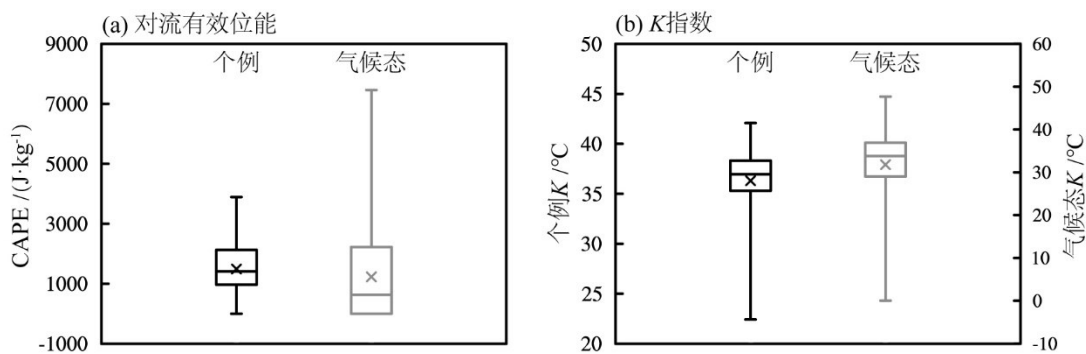


图4 华南暖区暴雨个例和气候态的能量条件环境参数箱线图

Fig. 4 Box and whisker plot of environmental parameters of energy condition for warm-sector heavy rainfall and climatology

K 指数是判断大气稳定度的一个综合性指标,当垂直温度递减率越大,累积不稳定能量越多,且低空水汽接近饱和时,层结不稳定越明显, K 指数越大。统计发现(图4b),暖区暴雨个例的 K 指数介于22~42 °C,均值为36.3 °C,中位数为37.0 °C,气候态 K 指数介于0~47 °C,均值为31.8 °C,中位数为33.8 °C。暖区暴雨个例的 K 指数明显比气候态高,考虑到 K 指数是由中低层热力差异项(ΔT_{85})、低层湿度项(T_{d850})以及低层饱和程度项($T_{700}-T_{d700}$)构成三项,而前述分析发现暖区暴雨个例的 ΔT_{85} 与气候态差异很小,表明低层湿度及饱和程度项是造成暖区暴雨 K 指数较高的关键,这与前述分析得到的暖区暴雨对低层大气饱和程度依赖较高的讨论结果一致。可见,判断暖区暴雨的潜势时应该对低层高湿的水汽条件予以更多关注。

2.4 动力条件

风暴的强弱与环境水平风场的垂直切变大小密切相关,在给定的湿度、不稳定性及抬升触发

的深厚对流中,垂直风切变对对流风暴组织和特征的影响最大^[37]。强冰雹、F2级以上龙卷和区域性的雷暴大风天气通常出现在明显的垂直风切变环境下,而对流性暴雨(短时强降水)的产生并不需要强的垂直风切变作为前提条件^[38-39]。Davis^[40]研究发现,降水效率与环境条件密切相关,对流层整层相对湿度越大,垂直风切变越小,导致雨滴越不容易蒸发,降水效率越高。根据前人研究发现,华南暖区暴雨一般发生在较强的深层垂直风切变下^[41-42]。参考樊李苗等^[29]对中国短时强对流天气的风切变的分类,将深层(0~6 km)垂直风切变 $SHRL_{0-6km}$ 分为弱(<12 m/s)、中(12~20 m/s)和强(≥ 20 m/s)三档。统计54例典型华南暖区暴雨个例的深层垂直风切变(图5a),分析发现暖区暴雨个例和气候态的深层垂直风切变均值分别为13.2和2.1 m/s,中位数分别为12.5和2.0 m/s,25百分位值到75百分位值分别为9.0~16.1和1.2~2.9 m/s,暖区暴雨事件的箱体更宽,深层垂直风切变分布较气候态更分散,且箱体位

置明显偏高, 可见暖区暴雨深层垂直风切变明显大于气候态, 大部分属于弱到中等强度的深层垂直风切变。一定强度的深层垂直风切变对暴雨的组织化和强度非常关键, 是暖区暴雨发生的关键指标之一。

许多研究都表明暴雨与低空急流的关系密切。为研究暖区暴雨与低空急流 ($U \geq 12$ m/s) 的关系, 统计了 850 hPa 及以下层最大偏南风速。从图 5b 可见, 暖区暴雨个例和气候态的 850 hPa 以下最大偏

南风速 25 百分位到 75 百分位的范围分别为 7~14 和 7~12 m/s, 中位数分别为 11 和 9 m/s。暖区暴雨个例对应的箱体更宽, 气候态对应的箱体更窄, 但两者的重叠区间很大。因此就 850 hPa 以下最大偏南风速而言, 约有一半的暖区暴雨个例发生前伴随低空急流, 低空急流为暴雨发生提供充足的热量和水汽, 同时也输送了大量的不稳定能量, 但很难单凭 850 hPa 以下最大偏南风速来判断是否发生暖区暴雨, 需要结合其它参数共同判断。

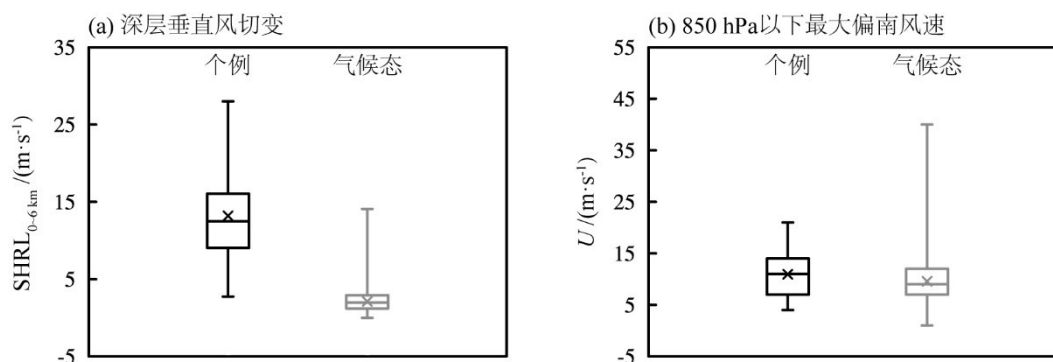


图5 华南暖区暴雨个例和气候态的动力条件环境参量箱线图

Fig. 5 Box and whisker plot of environmental parameters of dynamics condition for warm-sector heavy rainfall and climatology

3 华南暖区暴雨关键参量的提取和阈值定义

3.1 特强暖区暴雨关键参量

考虑到暖区暴雨短历时性降水强度大的特点, 那些产生极端短时强降水 (≥ 50 mm/h) [43-44] 的暖区暴雨造成的局地洪涝风险更高, 为此对“特强暖区暴雨”、“普通暖区暴雨”的关键物理参数进行参数横向对比分析。

850 hPa 和 500 hPa 温差 (ΔT_{85}) 箱线图 (图 6a) 显示特强暖区暴雨对应的 ΔT_{85} 中位数值为 23.3 °C, 和普通暖区暴雨对应的 ΔT_{85} 中位数值 (22.9 °C) 相差不大, 且二者箱体范围高度重合, 且前文分析得出 ΔT_{85} 对暖区暴雨的发生的指示性不强, 暖区暴雨发生前存在较弱的条件不稳定, 因此还需结合其他参数共同判断是否发生特强暖区暴雨。

由 850 hPa 温度露点差分布箱线图 (图 6b) 可见, 特强暖区暴雨和普通暖区暴雨对应的 850 hPa 温度露点差中位数值分别为 1.8 和 1.7 °C, 相差不大。特强暖区暴雨和普通暖区暴雨 850 hPa 温度露点差分布 25 百分位到 75 百分位数值的范围分别为

1.5~2.0 和 1.4~2.2 °C, 两者存在部分重合区间, 但特强暖区暴雨离散度小, 普通暖区暴雨离散度很大, 说明特强暖区暴雨的发生对对流层低层水汽条件要求更高, 水汽接近饱和, 850 hPa 温度露点差对特强暖区暴雨的发生有一定的指示意义。

图 6c 给出了 500 hPa 温度露点差分布的箱线图, 特强暖区暴雨的 500 hPa 温度露点差中位数值 (3.5 °C) 箱线图略高于普通暖区暴雨对应的 500 hPa 温度露点差中位数值 (2.7 °C), 特强暖区暴雨和普通暖区暴雨的 500 hPa 温度露点差分布 25% 到 75% 范围分别为 2.1~7.0 和 1.9~5.0 °C, 而且特强暖区暴雨与普通暖区暴雨的 500 hPa 温度露点差离散度相当, 都比较大。分析大气可降水量的箱线图发现 (图 6d), 特强暖区暴雨的大气可降水量与普通暖区暴雨差异不大, 只是箱体更窄, 说明在整层水汽含量足够大的情况下更有利于特强暖区暴雨发生。总体来看, 特强暖区暴雨的发生对对流层中层的水汽条件要求并不高, 对低层的水汽要求更高。

图 6e 为华南特强暖区暴雨 CAPE 箱线图。由图 6e 可以看出, 特强暖区暴雨的 CAPE 分布的中位数值为 1 768 J/kg, 而普通暖区暴雨的 CAPE 中位数值

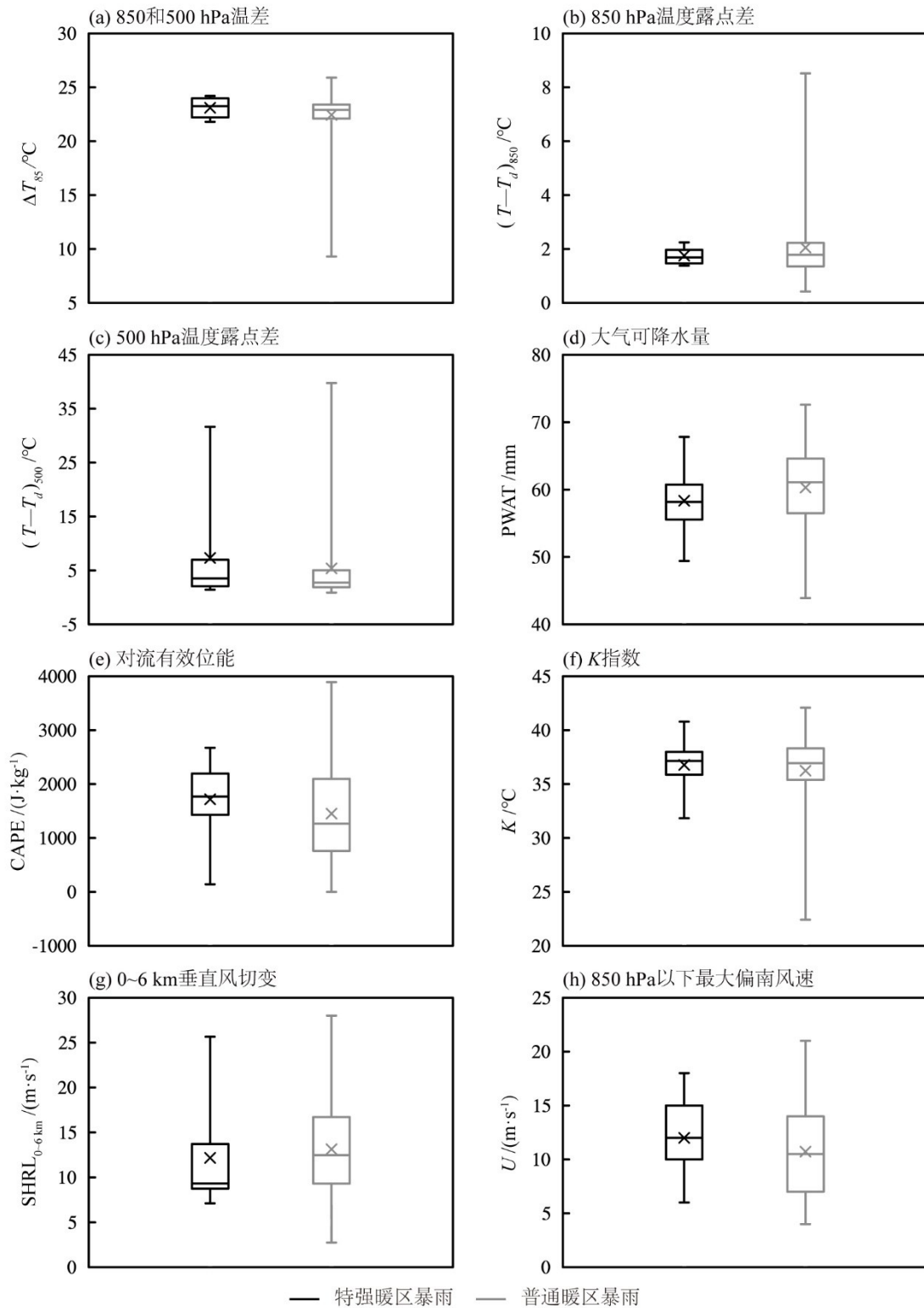


图 6 华南特强暖区暴雨和普通暖区暴雨的环境参量箱线图

Fig. 6 Box and whisker plot of environmental parameters of significantly strong warm-sector rainfall and normal warm-sector heavy rainfall

值为 1451 J/kg ，特强暖区暴雨对应的 CAPE 中位数偏高。特强暖区暴雨和普通暖区暴雨 CAPE 对应的 25 到 75 百分位值分别为 $1428 \sim 2196$ 、 $760 \sim$

2098 J/kg 。由 CAPE 的分布可见，特强暖区暴雨相对于普通暖区暴雨具有一定可区分度，特强暖区暴雨发生前对流有效位能更大，有利于深厚湿对

流的发展。分析K指数箱线图(图6f)发现, 特强暖区暴雨的K指数分布与普通暖区暴雨存在较大的箱体重叠区间, 中位数值都在37℃左右, 差异不大。

图6g显示特强暖区暴雨深层(0~6 km)垂直风切变中位数在9.3 m/s, 而普通暖区暴雨的中位数在12.5 m/s, 特强暖区暴雨和普通暖区暴雨的箱体类似, 说明特强暖区暴雨也倾向于发生在中等至强的强度的深层垂直风切变情况下; 从850 hPa以下最大偏南风速分布的箱线图可以看出(图6h), 特强暖区暴雨的850 hPa以下最大偏南风速与普通暖区暴雨的特征类似, 两者的850 hPa以下最大偏南风速的中位数分别为12和10.5 m/s, 特强暖区暴雨的箱体范围更高, 暴雨伴随低空急流出现的概率更大, 但两者箱体的重叠区间也较大。可以看出, 特强暖区暴雨和普通暖区暴雨的动力条件相似, 很难通过深层垂直风切变和850 hPa以下最大偏南风速将特强暖区暴雨从普通暖区暴雨中凸显出来。

3.2 影响华南暖区暴雨的参数阈值分析

McNulty^[45]指出, 了解大气层结状态特征及环境条件参量计算, 是制作强风暴预报时必须考虑的重要因素, 分析暖区暴雨的层结结构特征并进一步得出影响暖区暴雨的参量阈值, 可为暖区暴雨的潜势预报提供有意义的参考信息。从前文的分析中可知, 华南暖区暴雨的判别很难基于单一的物理量或环境参量来进行, 需要结合多种因素去综合判断分析针对前文所有的物理量或环境参数进行统计。根据高晓梅等^[28]对鲁中地区强对流天气环境参量特征的分析方法, 如果采取箱线图中各个参数的最低值或最高值作为影响暖区暴雨的参数阈值, 很大可能导致很高的虚警率, 因此决定采用某参数的25百分位值和75百分位值作为参数阈值, 这样虽然会有漏报, 但必须在虚警率和漏报率之间确定一个折中, 25百分位和75百分位的选择总体上看还是相对合理的。表1列出了2008~2017年4~6月期间华南54例暖区暴雨个例及8例特强暖区暴雨个例的8种参数的参考阈值。

表1 华南全部暖区暴雨和特强暖区暴雨环境参数预报阈值表(以25或75百分位作为预报阈值)

Table 1 Forecasting thresholds of environmental parameters for all warm-sector heavy rainfall and significantly strong warm-sector rainfall (with 25/75 percent as the forecasting threshold)

阈值类型	类型	全部暖区暴雨	特强暖区暴雨
25百分位阈值	$\Delta T_{85}/^{\circ}\text{C}$	22.0	22.2
	PWAT/mm	56	56
	CAPE/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	965	1428
	K/ $^{\circ}\text{C}$	35.2	35.9
	SHRL _{0-6km} / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	9.0	8.8
	U/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7	10
75百分位阈值	$(T-T_d)_{850}/^{\circ}\text{C}$	2.2	2.0
	$(T-T_d)_{500}/^{\circ}\text{C}$	5.5	7.0

前人总结的有利于强对流天气的发生的几个条件, 包括静力不稳定、垂直风切变、初始的抬升触发条件和充沛的水汽条件^[46]。统计前文所有环境参量发现, 华南暖区暴雨与气候态在850 hPa温度露点差、大气可降水量、深层垂直风切变差别比较明显, 华南暖区暴雨发生前, 大气可降水量充沛且对流层低层水汽接近饱和, 结合一定的抬升条件, 大气能迅速发生凝结潜热释放加热大气, 且较高的深层垂直风切变有利于对流组织化, 使对流持续发展从而形成暴雨。因此, 上述提及的物理参数可作为判断是否有暖区暴雨的关键环

境参数。基于探空资料统计分析, 如果大气层结状态满足以下条件: 850 hPa的温度露点差 $\leq 2.2^{\circ}\text{C}$ 、大气可降水量 $\geq 56\text{ mm}$ 、深层垂直风切变 $\geq 9\text{ m/s}$ 时, 大气层结是有利于产生暖区暴雨的。

针对特强暖区暴雨和普通暖区暴雨的环境背景参数进行对比, 发现特强暖区暴雨的850 hPa温度露点差有显著差异, 特强暖区暴雨的发生更依赖于对流层低层充沛的水汽条件, 异常丰沛的水汽有利于对流和暴雨的持续发展, 降雨强度增大, 这很可能是特强暖区暴雨比普通暖区暴雨降水强度更大的重要原因。当大气环境满足850 hPa的温

度露点差 ≤ 2.0 °C时,更有利于产生特强暖区暴雨。

4 结论

本文结合了我国探空资料和地面气象站数据,研究了华南地区2008~2017年4~6月发生的54例暖区暴雨个例,通过箱线图的形式,初步得到一系列关键环境参数的分布特征和阈值,再从54个个例中选取特强暖区暴雨个例,即小时雨量超过50 mm的个例,和普通暖区暴雨(小时雨量不大于50 mm)个例的相应关键参数进行对比,总结分析出暖区暴雨个例的环境特征。主要结论有:

1) 在众多常用的物理参量指标中,表征水汽条件的850hPa温度露点差、大气可降水量以及表征动力条件的深层垂直风切变对典型华南暖区暴雨事件的发生具有较清晰指示意义。华南暖区暴雨发生前,大气可降水量充沛且对流层低层水汽接近饱和,结合一定的抬升条件,大气能迅速发生凝结潜热释放加热大气,并在深层垂直风切变的作用下组织化发展,从而使对流持续形成暴雨。基于25和75百分位的判别条件,得出华南暖区暴雨发生的关键物理参数的阈值,当大气环境满足850 hPa的温度露点差 ≤ 2.2 °C、大气可降水量 ≥ 56 mm、深层垂直风切变 ≥ 9 m/s时,有利于产生暖区

暴雨。850 hPa和500 hPa温差、500 hPa温度露点差、对流有效位能、K指数和850 hPa以下最大偏南风速对暖区暴雨的指示意义不大。

2) 从上述54个暖区暴雨个例中选出8例特强暖区暴雨个例与46例普通暖区暴雨个例比较,发现特强暖区暴雨事件发生的环境条件关键点是更充沛的低层水汽条件,对应的关键指标是850hPa温度露点差,异常丰沛的水汽有利于对流和暴雨的持续发展,降雨强度增大,这很可能是特强暖区暴雨比普通暖区暴雨降水强度更大的重要原因。当大气环境满足850 hPa的温度露点差 ≤ 2.0 °C时,特强暖区暴雨发生的概率更大。对比特强暖区暴雨与普通暖区暴雨发现,850 hPa和500 hPa温差、500 hPa温度露点差、大气可降水量、对流有效位能、K指数、深层垂直风切变和850 hPa以下最大偏南风速的分布特征没有显著差异。

本文基于探空资料对华南暖区暴雨的环境场特征进行统计与分析。暖区暴雨时空尺度小,探空资料时空分辨率较粗,因此可能存在误差。下一步工作将对不同天气类型形成的华南暖区暴雨进行遴选归类后加以分析,以期利用探空资料的优势,丰富对华南暖区暴雨环境特征的认识,为华南暖区暴雨预报的改进提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 黄土松. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社, 1986: 94-95.
HUANG S S. The prefrontal season rainstorm in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1986: 94-95.
- [2] 何立富, 陈涛, 孔期. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5):559-569.
HE L F, CHEN T, KONG Q. A review of studies on pre-frontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5):559-569.
- [3] 郭圳勉, 黄先伦, 麦宗天, 等. 阳江市暖区暴雨的天气学分型[J]. 广东气象, 2016, 38(1):13-18.
GUO Z M, HUANG X L, MAI Z T, et al. Classification of synoptic patterns for warm-sector rainstorms in Yangjiang city [J]. Guangdong Meteorology, 2016, 38(1): 13-18.
- [4] 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学, 2017, 41(4):784-796.
WANG J H, YANG Y Y, MIAO C S, et al. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(4):784-796.
- [5] 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 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, 2018, 44(4):485-499.
WU Z F, CAI J J, LIN L X, et al. Analysis of meso-scale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(4):485-499.
- [6] 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉, 等. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J]. 气象学报, 2018, 76(3):323-342.
WU Y L, MENG W G, CHEN D H, et al. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(3):323-342.
- [7] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社, 2006: 143-152.

- LIN L X, FENG Y R, HUANG Z, et al. Technical guidance on weather forecasting in Guangdong province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 143-152.
- [8] 苗春生, 杨艺亚, 王坚红, 等. 两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究[J]. 热带气象学报, 2017, 33(1): 53-63.
- MIAO C S, YANG Y Y, WANG J H, et al. Comparative study of characteristics and thermodynamical development mechanism on two types of warm sector heavy rainfall in south China coast[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(1): 53-63.
- [9] DU Y, CHEN G X. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation[J]. Monthly Weather Review, 2019, 147(2): 543-565.
- [10] 丁治英, 刘彩虹, 沈新勇, 等. 2005-2008年5-6月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(3): 307-316.
- DING Z Y, LIU C H, SHEN X Y, et al. Statistic analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(3): 307-316.
- [11] MENARD R D, FRITSCH J M. A Mesoscale convective complex-generated inertially stable warm core vortex [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(6): 1237-1261.
- [12] 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等. “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, 2018, 76(4): 511-524.
- XU J, BI B G, CHEN Y, et al. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(4): 511-524.
- [13] CHEN X C, ZHANG F Q, ZHAO K. Diurnal variations of the land-sea breeze and its related precipitation over South China[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2016, 73(12): 4793-4815.
- [14] HUANG Y J, LIU Y B, LIU Y W, et al. Mechanisms for a record-breaking rainfall in the coastal metropolitan city of Guangzhou, China: Observation analysis and nested very large eddy simulation with the WRF model [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2019, 124(3): 1370-1391.
- [15] LUO Y L, GONG Y, ZHANG D L. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in east China[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(1): 203-221.
- [16] WANG H, LUO Y L, JOU B J D. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: observational analysis[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(23): 206-232.
- [17] 湛芸, 陈涛, 汪玲瑶, 等. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 483-493.
- CHEN Y, CHEN T, WANG L Y, et al. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 483-493.
- [18] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 2014, 40(4): 389-399.
- WANG X M, YU X D, ZHOU X G. Discussion on basic issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 389-399.
- [19] 赵欢, 张人禾, 温敏. 2013年5月华南强降水与中国南海夏季风爆发[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 442-458.
- ZHAO H, ZHANG R H, WEN M. Severe rainfalls in South China during May 2013 and its relation to the onset of the South China Sea summer monsoon[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(3): 442-458.
- [20] 徐明, 黄治勇, 高琦. 2016年5月20日广东信宜特大暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 32-40.
- XU M, HUANG Z Y, GAO Q. Analysis of mesoscale convective systems characteristics of torrential rain in Xinyi Guangdong province in 20th May 2016[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(1): 32-40.
- [21] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 2017年“5.7”广州特大暴雨的中尺度特征分析与成因初探[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6): 791-805.
- ZENG Z L, CHEN Y, ZHU K Y, et al. Mesoscale characteristic analysis and primary discussion on the formation of the 7 May 2017 torrential rainfall in Guangzhou [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(6): 791-805.
- [22] 李伟, 李峰, 赵志强, 等. L波段气象探测系统建设技术评估报告[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 95.
- LI W, LI F, ZHAO Z Q, et al. L-band meteorological observation system construction technology assessment report [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 95.
- [23] 汪汇洁, 孙建华, 卫捷, 等. 近30年我国南方区域持续性暴雨过程的分类研究[J]. 气候与环境研究,

- 2014, 19(6): 713-725.
- WANG H J, SUN J H, WEI J, et al. Classification of persistent heavy rainfall events over Southern China during recent 30 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(6): 713-725.
- [24] 刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J]. *大气科学*, 2019, 43(1): 122-133.
- LIU R X, SUN J H, CHEN B F. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(1): 119-130.
- [25] 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等. 2000-2009年5-6月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(5): 707-718.
- CHEN X X, DING Z Y, LIU C H, et al. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000-2009[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(5): 707-718.
- [26] DOSWELL C A, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. *Weather Forecasting*, 1996, 11(4): 560-581.
- [27] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. *气象*, 2011, 37(8): 913-918.
- YU X D. Ingredients based forecasting methodology [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(8): 913-918.
- [28] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. *气象学报*, 2018, 76(2): 196-212.
- GAO X M, YU X D, WANG L J, et al. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(2): 196-212.
- [29] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(1): 156-165.
- FAN L M, YU X D. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(1): 156-165.
- [30] 张志富, 希爽. 关于露点温度计算的探讨[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 275-281.
- ZHANG Z F, XI S. Study on calculation of dew-point temperature [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2): 275-281.
- [31] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 1-235.
- LIU J W, GUO H, LI Y D, et al. The basis of the physical quantities calculation for weather analysis [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 1-235.
- [32] 廖晓农. 北京雷暴大风日环境特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(1): 54-62.
- LIAO X N. Analysis on environmental condition for wind gust in Beijing area[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(1): 54-62.
- [33] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. *气象*, 2016, 42(2): 144-155.
- CHEN Y Z, YU X D, CHEN X L. Characteristics of short time severe rainfall events based on weather flow and key environmental parameters in Pearl River Delta [J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(2): 144-155.
- [34] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. *气象*, 2017, 43(6): 641-652.
- ZHENG Y G, TAO Z Y, YU X D. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(6): 641-652.
- [35] 符式红, 王秀明, 俞小鼎. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究[J]. *气象学报*, 2018, 76(5): 742-754.
- FU S H, WANG X M, YU X D. A comparative study on two consecutive severe convective weather events in Hainan under similar background[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(5): 742-754.
- [36] 杨波, 孙继松, 刘鑫华. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. *气象学报*, 2019, 77(3): 427-441.
- YANG B, SUN J S, LIU X H. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, 77(3): 427-441.
- [37] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 314.
- YU X D, YAO X P, XIONG T N, et al. The principle and operational application of doppler radar [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 314.
- [38] 齐琳琳, 刘玉玲, 赵思雄. 一次强雷雨过程中对流参数对潜势预测影响的分析[J]. *大气科学*, 2005, 29(4): 536-548.
- QI L L, LIU Y L, ZHAO S X. The analyses of convective parameters and their potential predictability in a severe thunderstorm rain [J]. *Chinese Journal of Atmo-*

- spheric Sciences, 2005, 29(4): 536-548.
- [39] 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[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- YU X D, ZHOU X G, WANG X M. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 311-377.
- [40] DAVIS R S. Flash flood forecast and detection methods [J]. Meteorological Monographs, 2001, 28(50): 481-526.
- [41] 林确略, 邓雅倩, 陈明璐, 等. 广西一次槽前型暖区飚线的中尺度分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(01): 38-45.
- LIN Q L, DENG Y Q, CHEN M L, et al. A mesoscale analysis on a warm-sector squall line in front of the trough occurred in Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2018, 39(1): 38-45.
- [42] 付炜, 叶成志, 王东海, 等. 一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 511-521.
- FU W, YE C Z, WANG D H, et al. Diagnostic analysis of a severe convective weather event in the Nanling Mountains during the pre-rainy season [J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(6): 511-521.
- [43] 田付友, 郑永光, 张小玲, 等. 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, 2018, 44(4): 469-484.
- TIAN F Y, ZHENG Y G, ZHANG X L, et al. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(4): 469-484.
- [44] 孙明生, 李国旺, 尹青, 等. “7·21”北京特大暴雨成因分析(I): 天气特征、层结与水汽条件[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 210-217.
- SUN M S, LI G W, YIN Q, et al. Analysis on the cause of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 (I): Weather characteristics, stratification and water vapor conditions [J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(3): 210-217.
- [45] MCNULTY R P. Severe and convective weather: A central region forecasting challenge [J]. Weather and Forecasting, 1995, 10(2): 187-202.
- [46] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象, 2012, 38(2): 164-173.
- SUN J S, TAO Z Y. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(2): 164-173.

(责任编辑 秦社彩)