

惠州前汛期暖区暴雨环流分型及其环境参量统计分析

付智龙¹ 姜帅^{2,3} 李国平⁴ 陈芳丽² 黄楚贤^{2,3} 骆蓉¹ 张秋明¹ 梁惠龙¹

1 惠州市惠阳区气象局, 广东 惠州 516211

2 惠州市气象局, 广东 惠州 516001

3 惠州市突发事件预警信息发布中心, 广东 惠州 516001

4 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225

提 要: 本文利用自动站雨量资料、ERA5 再分析数据对 2003–2022 年 4–6 月惠州前汛期暖区暴雨个例进行挑选和环流分型, 对比分析了不同类型暖区暴雨发生时的平均环流场和环境场特征。得到以下主要结果: 2003–2022 年间惠州前汛期共发生 48 次暖区暴雨, 可以分为切变型(第一类)、短波槽+低空急流型(第二类)和副高外围+低空急流入口型(第三类)。进一步对比各类暖区暴雨的平均环流场发现, 500h Pa 上除第二类暴雨受到短波槽影响外, 其余两类暴雨惠州地区都处于西风气流、副高外围西南气流的控制之下; 在低层第二、三类暴雨惠州附近都出现了双低空急流(西南低空急流和边界层低空急流), 而第一类暴雨只在 925 hPa 珠江口以南出现了边界层低空急流。最后的环境场特征分析表明, ERA5 再分析资料计算的环境参量具有一定的可信度和适用性, 第二、三类暴雨整体上水汽和能量条件要优于第一类暴雨, 但对于动力条件而言, 第一类暴雨的垂直风切变则要明显高于第二、三类暴雨, 同时第一类暴雨的静力不稳定性也要高于前两类暴雨。

关键词: 暖区暴雨, 环流型, 环境参量, 双低空急流

1 引言

惠州地处粤港澳大湾区东部, 属于热带和亚热带季风气候, 拥有山河湖海等多种地形、地貌, 同时位于华南沿海受到南海海洋气流和北方冷空气的影响, 其北部龙门是广东三大暴雨中心之一, 经常受到暴雨灾害的侵扰, 对该地区造成巨大的经济损失和人员伤亡。针对惠州暴雨的研究, 陈芳丽等(2014a)对惠州前汛期暴雨个例进行统计, 揭示了惠州各地前汛期雨量和暴雨日数的变化; 同时也有学者(陈芳丽和张子凡, 2008; 陈芳丽等, 2014b; 邓芸, 1998)通过对发生在惠州的暴雨个例进行环流场和物理量场分析, 试图通过暴雨个例来揭示惠州暴雨的影响系统及机理。

惠州地处华南沿海, 每年发生的暴雨中有相当一部分是暖区暴雨。早在上世纪八十年代, 黄士松(1986)就提出了暖区暴雨的概念: 一是指产生于地面锋线南侧暖区的暴雨; 二是指没有锋面存在、华南未受冷空气或变性冷高脊控制时产生的暴雨。暖区暴雨由于其复杂性、极端性、突发性(何立富等, 2016; 林晓霞等, 2017; 曾智琳等, 2018; 徐珺等, 2018)等, 加之经常发生在珠三角经济发达、人口密集地区, 因此暖区暴雨备受我国气象科研工作者关注。对于暖区暴雨许多学者(汪玲瑶等, 2018; 田莹等, 2022; 陈翔翔等, 2012)首先从暴雨的基础统计工作着手, 筛选统计出各自研究区域内的暖区暴雨个例并按天气学特征或客观方法进行相应的分类, 如刘瑞鑫等(2019, 2021)等在对华南暖区暴雨进行筛选和客观分类的

第一作者: 付智龙, 男, 广东人, 硕士, 天气动力学研究方向。E-mail: sgfzl96@163.com

国家自然科学基金(42175002, 42075013)和广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2021M23、

GRMC2022M29、GRMC2024Q27) 共同资助

基础上,继续深入研究不同类型暖区暴雨的环流特征和环境特征,总结出各类暖区暴雨环流场和环境场的主要特征和差异。在对暖区暴雨进一步的发生、发展机制上,目前暖区暴雨的触发也存在着许多种成因,有重力波触发(徐焱等,2013)、地形强迫抬升辐合(Tu et al, 2014)、海陆风局地环流(叶朗明等,2019; Chen et al, 2016; 付智龙等,2022)、低空急流(Du and Chen, 2018; Zhang and Meng, 2019)等。徐焱等(2013)认为在锋区的对流活动激发低层重力波后,重力波沿稳定层向暖区传播,触发暖区不稳定能量的释放,导致暖区暴雨发生; Du and Chen(2019)认为双低空急流造成的低层辐合和中层辐散共同为沿海对流启动产生了强烈的中尺度抬升,触发了沿海暖区暴雨的发生。关于暖区暴雨的可预报性上,由于数值模式对于暖区暴雨的能力较弱,导致在暖区暴雨中经常出现预报失误(覃武等,2020),因此暖区暴雨一直都是短期预报的难点、痛点,因此有学者就针对暖区暴雨数值预报检验和可预报性进行分析。陈黛雅等(2023)就探究了一次弱天气尺度强迫发生下暖区暴雨的模式预报不确定性,初步证明 CNOP-P-RP 方案在模式不确定性方面的可行性,为华南暖区暴雨预报的改进提供一定参考。

由于目前专门针对惠州前汛期暖区暴雨的统计分析研究并不多,而对于惠州暖区暴雨环境参量统计的相关研究就更少。因此本文挑选出 2003-2022 年 4-6 月发生在惠州的暖区暴雨个例,利用客观聚类方法对惠州暖区暴雨进行环流分型,总结出各型暖区暴雨发生的环流场特点,最后再对比分析各型暖区暴雨发生时的环境场特征,提取一些有预报参考价值的环境参数阈值,希望通过本文的研究可以为惠州前汛期暖区暴雨的预报业务工作提供一些参考。

2 资料选取与研究方法

2.1 选取资料

本文选取资料有:(1) 2003-2022 年 4-6 月惠州国家站和区域站共 123 个站点日降雨、小时降雨资料。(2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代全球再分析资料(ERA5),时间分辨率为 1 小时,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直方向共 37 层,要素包括高空风场、位势高度场、温度场等。

2.2 暖区暴雨个例挑选标准

参考黄士松(1986)和刘瑞鑫等(2021)对暖区暴雨的定义,同时结合惠州暴雨的特点、雨量站数量和分布,提出惠州暖区暴雨的挑选标准:降雨过程中代表站点(过程累计雨量最大的站点)北部无锋面或距离锋面 200 km 以上,同时过程累计降雨量超过 50 mm 且暴雨站点数(国家站和区域站)超过降雨站点数的 20%,降雨过程起止时间则根据代表站点出现降雨和降雨停止的时间确定。由于假相当位温密集区对锋区具有很好的指示作用(万轶婧等,2020; 刘泳涛等,2022),因此本文利用假相当位温密集区来确定锋区,同时考虑到地形对地面假相当位温的影响,本文结合假相当位温垂直剖面以及地面的假相当位温进行筛选,通过代表站点的经向剖面和北风的范围来确定锋区与代表站点的距离,以此挑选出暖区暴雨个例。

2.3 K-means 聚类分析

为了统计不同环流形势下暖区暴雨的主要环流特征和环境场条件,本文采用客观分类方法 K-means 聚类分析,同时考虑到 850 hPa 西南低空急流对暖区暴雨中起着很重要的作用,因此选用暖区暴雨个例降雨最强时刻 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场进行 K-means 聚类。K-means 聚类分析的基本原理利用空间聚类手段,将研究对象的空间距离指标按照相似性原

则归类到若干个子集中,使得相同子集中各元素间差别最小,而不同子集中各元素差别最大(李玉梅等,2016),K-means 聚类分析常被用于冷空气路径、台风路径、环流分型、粒子轨迹分类等研究中(黄瑶等,2021;周颖等,2020;Nakamura et al,2009;王芳等,2009)。K-means 聚类分析的效果评估即最优分类数则是通过相同子集内误方差平方和拐点法来确定的,误方差平方和与分类数折线的拐点就是最优分类数,本文依次计算了分类数 2-10 的误方差平方和,发现拐点所在的分类数为 3 即最优分类数为 3。

因此,本文将挑选出的暖区暴雨个例划分为以下三种环流型:

(1)切变型:暴雨发生时 500 hPa 副热带地区为较平直的西风气流,850 hPa 上惠州北侧有切变线存在,惠州处于切变线南侧的偏南暖湿气流当中。

(2)短波槽+低空急流型:暴雨发生时 500 hPa 华南受到南支槽分裂的短波槽影响,850 hPa 上则处于低空急流内部,大风速核的入口区内。

(3)副高外围+低空急流入口型:暴雨发生时 500 hPa 华南处于副高外围气流控制,850 hPa 上惠州位于低空急流的入口区内。

3 前汛期暖区暴雨总体特征与环流分型结果

按照 2.2 节中的标准共挑选出 48 个惠州暖区暴雨个例,年平均发生暖区暴雨次数为 2.4 次,其中 2005 年出现次数最多(6 次),2004、2009、2018 年则没有发生暖区暴雨。从图 1 暖区暴雨发生的频率来看,发生频率在 0.5 以上的站点主要分布在莲花山余脉-大亚湾沿海一带和罗浮山南侧,其中惠阳观测站(59298)频率最高,发生总频次超过 33 次。

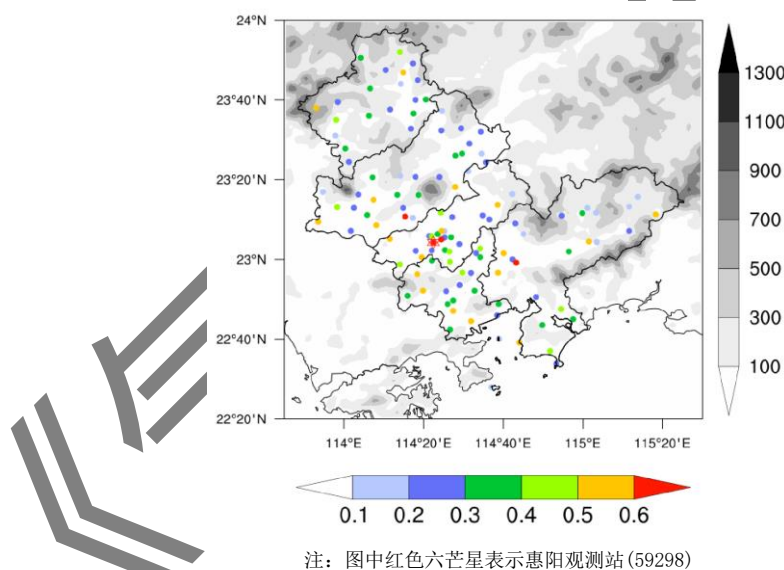


图 1 2003-2022 年惠州前汛期各站点暖区暴雨发生频率及地形(填色,单位:m)

Fig.1 The frequency of warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022 and topography(shadings, unit: m)

K-means 环流分型结果显示,惠州暖区暴雨的主要环流型为短波槽+低空急流型(第二类)和副高外围+低空急流入口型(第三类),分别出现 27 次和 14 次,共占暖区暴雨总数的 85%;而切变型(第一类)出现次数较少,仅占 15%。为了方便后续的研究,突出每类环流型的主要特征,本文从三类环流型中选取每一类降雨量最大的 4 个个例作为每类的代表,将每类代表个例的环流场、雨量分布进行合成分析。图 2 为三种环流型暴雨的过程平均雨量分布,对比三类暴雨的雨量,第一类暴雨的站点平均雨量最少,仅为 65 mm;第二类暴雨的站点平均雨量最大,为 119 mm,且该类暴雨存在两个强降雨带,分别位于大亚湾、惠东沿海和

北部龙门、博罗山区；第三类暴雨站点平均雨量为 84 mm，强降雨带主要位于南部沿海。

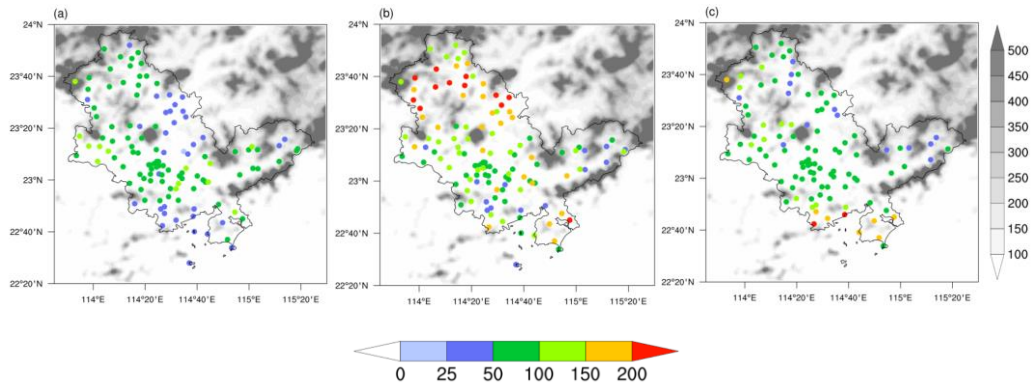


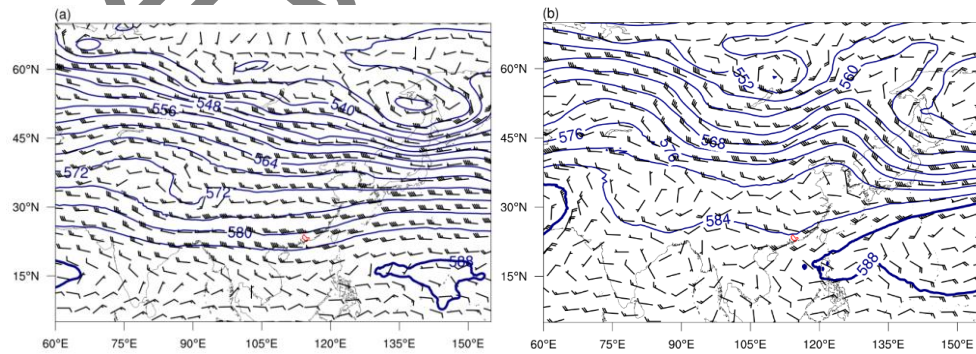
图 2 2003-2022 年惠州前汛期 (a) 第一类、(b) 第二类、(c) 第三类暴雨过程平均降雨量 (单位: mm) 及地形 (填色, 单位: m) 分布

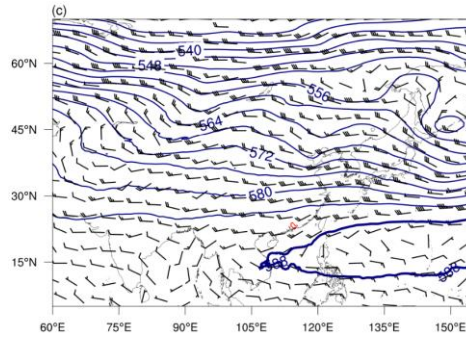
Fig.2 The distribution of averaged rainfall(unit: mm) and topography(unit: m) in (a) the first type, (b) the second type and (c) the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

4 不同类型暖区暴雨的平均环流场

为了对比惠州前汛期各类暖区暴雨的环流形势和影响系统,选取了暴雨发生时刻的平均环流场进行分析。第一类暴雨发生时,500 hPa 环流场上(图 3a),中高纬度鄂霍茨克海附近有低涡维持,青藏高原北部短波系统活跃;副热带地区整个华南受偏西风气流控制,副高强度偏弱位置偏东,西脊点位于菲律宾以东洋面。在 850 hPa 上(注:红色实线表示惠州,图 a、b 中棕色实线表示切变线

图 4a),华南地区上空并没有明显的天气尺度低空急流,但西南风还是为华南地区带来充沛的水汽,因此在华南沿海存在一西南-东北走向的大气整层可降水量大值区;而在长江下游地区存在反气旋环流中心,其西侧偏北风与华南地区的西南风在南岭北侧形成切变线,惠州位于切变线南侧。925 hPa(图 5a),惠州仍处于切变线南侧的西南气流当中,但此时切变线已南压至南岭,同时在珠江口南侧和北部湾存在两个中尺度边界层低空急流,其中珠江口南侧的边界层低空急流造成了广东沿海的若干个水汽辐合中心。





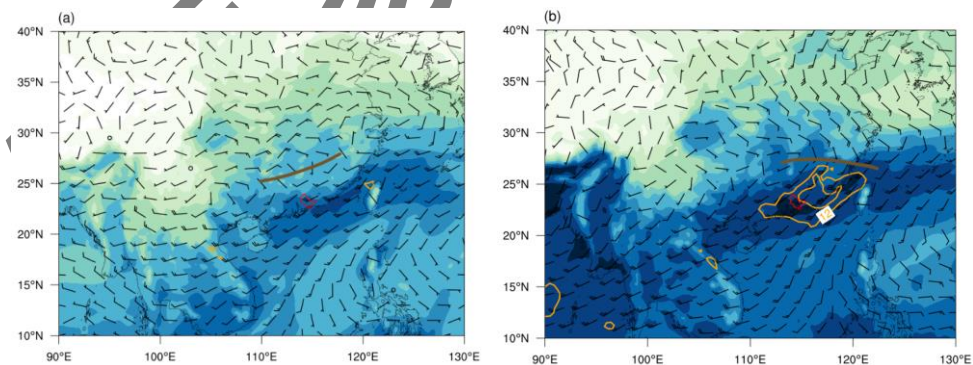
注：红色实线表示惠州，蓝色粗实线表示 588dagpm 等值线

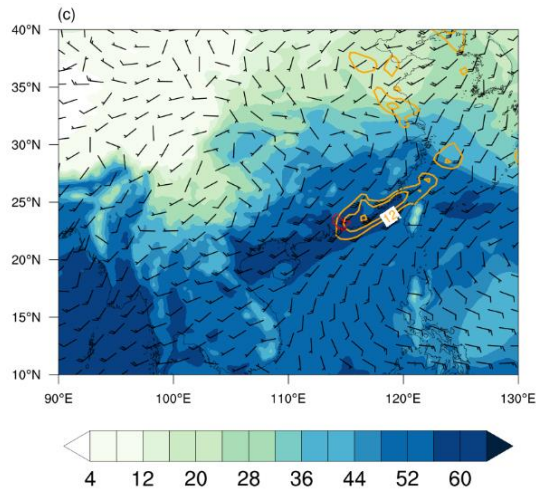
图 3 2003-2022 年惠州前汛期 (a) 第一类、(b) 第二类、(c) 第三类暴雨 500hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 和风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.3 Geopotential height (contours, unit: dagpm) and wind (barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 500 hPa in (a) the first type, (b) the second type and (c) the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

第二类暴雨发生时, 500 hPa (图 3b) 亚洲中高纬度上呈现“两槽两脊”的形势, 长波槽分别位于贝加尔湖和日本, 长波脊则位于巴尔喀什湖和我国东北; 副热带地区南支槽稳定维持在孟加拉湾北部, 不断分裂短波槽影响华南地区, 副高位置则比切变型暴雨要偏西, 受副高阻挡, 短波槽移动缓慢。在 850 hPa 上 (注: 红色实线表示惠州, 图 a、b 中棕色实线表示切变线

图 4b), 在江南地区有一暖式切变线, 切变线南侧盛行西南急流, 西南急流的范围几乎覆盖整个广东沿海, 同时该类暴雨西南急流的水汽输送效果也要比第一类暴雨明显, 因此该类暴雨广东沿海的大气整层可降水量明显高于切变型, 在珠三角还有一大气整层可降水量的大值区; 惠州则位于西南低空急流内、急流核的入口区。925 hPa (图 5b), 在惠州的上风方有一边界层低空急流, 惠州位于边界层低空急流的出口区内, 出口区内的风速辐合造成了在惠州的水汽辐合。在该类暴雨中, 西南急流为惠州输送大量水汽, 配合着 500 hPa 短波槽前的正涡度与 925 hPa 边界层低空急流出口区的风速辐合, 最终导致暖区暴雨的发生。





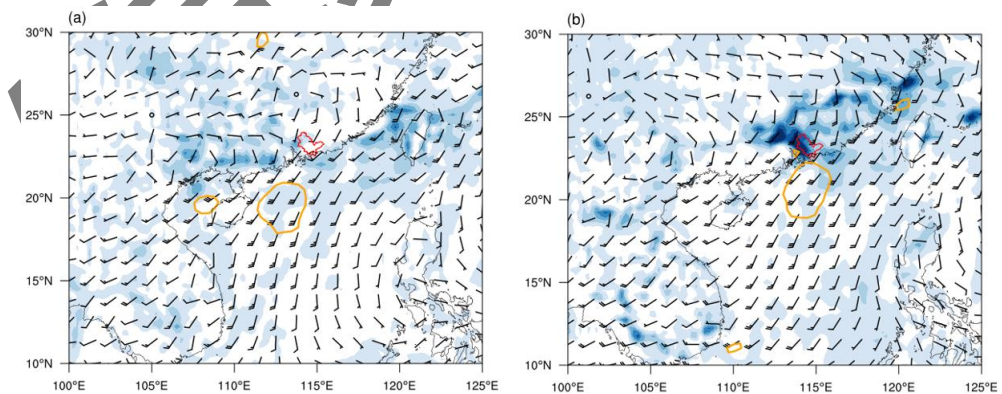
注：红色实线表示惠州，图 a、b 中棕色实线表示切变线

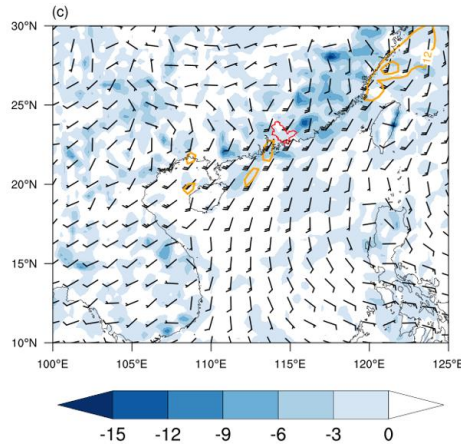
图 4 2003-2022 年惠州前汛期 (a) 第一类、(b) 第二类、(c) 第三类暴雨大气可降水量 (填色, 单位: mm)、850hPa 风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 和急流 (橙色等值线, $\geq 12m \cdot s^{-1}$)

Fig.4 Vertical integrated precipitable water vapor (shadings, unit: mm), wind (barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$) and jet stream (orange contours, $\geq 12m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa in (a) the first type, (b) the second type and (c) the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

第三类暴雨发生时, 500 hPa (图 3c) 亚洲中高纬仍为“两槽两脊”的形势, 但其环流经向度较第二类暴雨要小; 副热带地区副高西脊点位于中南半岛, 该类暴雨中副高的位置是三类暴雨中最为偏西的, 整个华南受副高外围西南气流控制。在 850 hPa 上 (注: 红色实线表示惠州, 图 a、b 中棕色实线表示切变线

图 4c), 华南同样受到西南低空急流的影响, 但该类暴雨中的西南低空急流较第二类暴雨的位置要更偏东北, 惠州则位于低空急流的入口区内。925 hPa (图 5c), 在珠江口上风方向有两个中尺度的边界层低空急流, 惠州位于边界层低空急流的出口区附近。在该类暴雨中, 惠州位于低空急流的入口区内和边界层低空急流出口区附近, 分别在 850 hPa 和 925 hPa 上造成风速辐散、辐合, 共同触发暖区暴雨的发生, 这种双低空急流的相互作用与 Du and Chen (2019) 提出的双低空急流耦合模型相似。





注：红色实线表示惠州

图 5 2003–2022 年惠州前汛期 (a) 第一类、(b) 第二类、(c) 第三类暴雨整层积分水汽通量散度 (填色, 单位: $10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、925hPa 风场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和急流 (橙色等值线, $\geq 12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.5 Vertial integrated water vapor fluxes divergence (shadings, unit: $10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), wind(barbs, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and jet stream (orange contours, $\geq 12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa in (a) the first type, (b) the second type and (c) the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

5 不同类型暖区暴雨的环境场特征

为了对比各类暖区暴雨发生时的环境场特征, 本文挑选了地面露点温度、850 hPa 温度露点差、大气可降水量等 8 个业务预报常用的环境参量 (万轶婧等, 2020) 开展统计分析, 其中 850 hPa 温度露点差代表低层大气饱和程度, 大气可降水量代表暴雨的水汽条件, 对流有效位能、K 指数、850 hPa 和 500 hPa 温度差代表暴雨的能量条件, 垂直风切变、850 hPa 及以下最大偏南风速代表暴雨的动力条件。由于本节所用环境参量均通过 ERA5 再分析数据获得, 因此对基于 ERA5 再分析数据的环境参量进行适用性评估。选用 2021 年 5–6 月 08 和 20 时汕头探空数据 (共 122 个样本) 对本文通过格点资料计算出的环境参量进行系统性对比, 通过定量计算对比各参数的相关系数 R、均方根误差 RMSE 和平均相对误差 RE (施丽娟等, 2022) 来评估 ERA5 环境参量与真实探空环境参量之间偏差。R 可以反映 ERA5 参量与探空参量之间的线性相关程度, RMSE 反映 ERA5 参量的整体误差水平, RE 反映 ERA5 参量相对探空参量的偏离程度, 即相对于真实值的高低估程度 (黄晓龙等, 2023), 结果如表 1 所示。从表中来看各环境参量的相关系数均在 0.7 以上, 且均通过 99% 水平的显著性检验, 说明 ERA5 环境参量与真实值之间具有显著的线性相关性, 特别是大气可降水量、地面 2m 露点温度、垂直风切变的相关系数达到了 0.9, 表现出高度线性相关。结合 RMSE 和 RE 的误差分析, 对流有效位能的相对误差最大, 达到 22.66% 且为负误差, 说明 ERA5 再分析资料对对流有效位能存在低估的现象; 对流有效位能的 RMSE 也是各参数中最大的, 不过这与其自身量级有一定关系。其余各环境参数的相对误差均在 10% 以内, 表现出较低的相对误差。warm-sector heavy rainfall in Huizhou during the first rainy season

表 1 2003–2022 年惠州前汛期暖区暴雨各环境参量评价指数

Table 1 Evaluation index of environmental parameters of warm-sector heavy rainfall in Huizhou during the first rainy season from 2003 to 2022

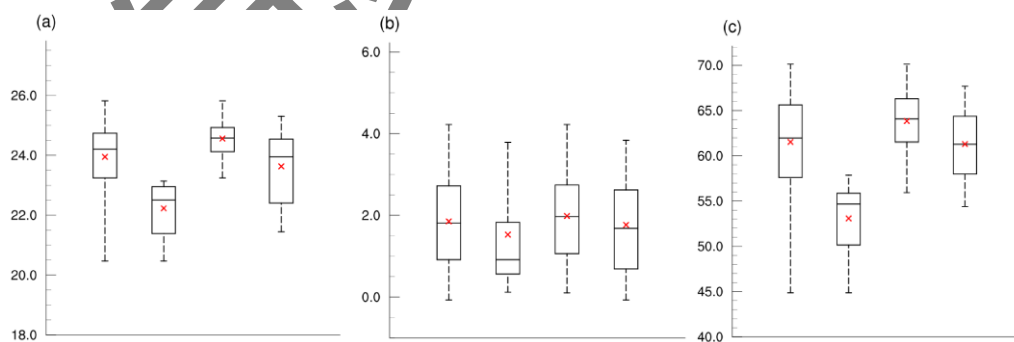
环境参量/(单位)	R	RMSE	RE
对流有效位能/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.70*	625.96	-22.66%
K 指数/($^{\circ}\text{C}$)	0.86*	4.74	4.14%
大气可降水量/(mm)	0.97*	3.49	5.25%

地面 2m 露点温度/(° C)	0.93*	1.07	3.14%
垂直风切变/(m·s ⁻¹)	0.93*	1.74	-2.07%
850hPa 和 500hPa 温度差/(° C)	0.76*	1.40	-0.25%
850hPa 温度露点差/(° C)	0.86*	2.57	4.22%

注：*表示通过 99%水平的显著性检验

总的来看，ERA5 再分析资料虽然与真实值存在一定程度的偏差，但是其与真实值保持有明显的相关性和一致性，ERA5 再分析资料计算出的环境参量具有一定的可信度和适用性。因此选取暴雨发生时前一时刻代表站点附近 0.5° × 0.5° 网格内环境参量的平均值作为站点的代表值，通过箱线图给出各类暴雨环境参量的分布，对比分析各类暴雨环境参量的异同来加深对暴雨发生时环境参量阈值的认识。

850 hPa 温度露点差在业务预报中常用来表示低层大气水汽的饱和程度。图 6 给出了惠州暖区暴雨和各型暖区暴雨地面 2 m 露点温度、850 hPa 温度露点差、大气可降水量的箱型图，从图 6b 可以看到，惠州暖区暴雨 850 hPa 温度露点差介于 0~4.2° C 之间，25%~75% 的范围为 0.91~2.72° C，中位值和平均值分别为 1.81° C、1.85° C，表明暖区暴雨发生时低层大气接近饱和的状态。对比各类暖区暴雨，从平均值和中位数来看第二、三类暖区暴雨要明显高于第一类暖区暴雨，同时这两类暴雨的箱体位置（25%~75%）也要明显高于第一类暴雨，说明这两类暴雨在低层水汽饱和程度不高的情况下，可能有比第一类更加好的动力条件触发暖区暴雨。另外，从三类暖区暴雨地面 2 m 露点温度的箱型图（图 6a）也可以看出，第二、三类暖区暴雨的平均值和中位数明显高于第一类暖区暴雨，这表明第二类暴雨地面大气比第一、三类暴雨都要容易达到饱和状态，特别是第二类暖区暴雨，其最小值要比第一类暖区暴雨的最大值还要大。大气可降水量可以表征整层大气柱中的水汽含量，图 6c 显示惠州暖区暴雨大气可降水量介于 44~70 mm 之间，25%~75% 的范围为 57~65 mm，中位值和平均值均为 61 mm，说明 75% 的惠州暖区暴雨发生时大气可降水量在 57 mm 以上。对比各类暖区暴雨，第二、三类暴雨大气可降水量的平均值和箱体位置均高于第一类暴雨，其中这两类暴雨的平均值比第一类暴雨的最大值还要高，表明第一类暴雨的整层水汽条件较差，基本位于惠州暖区暴雨大气可降水量 25%分位值以下，因此其过程平均降雨量也明显低于其它两类暴雨。由此可见，不管是低层还是整层的大气水汽条件，第二类暴雨都要好于第一、三类暴雨。

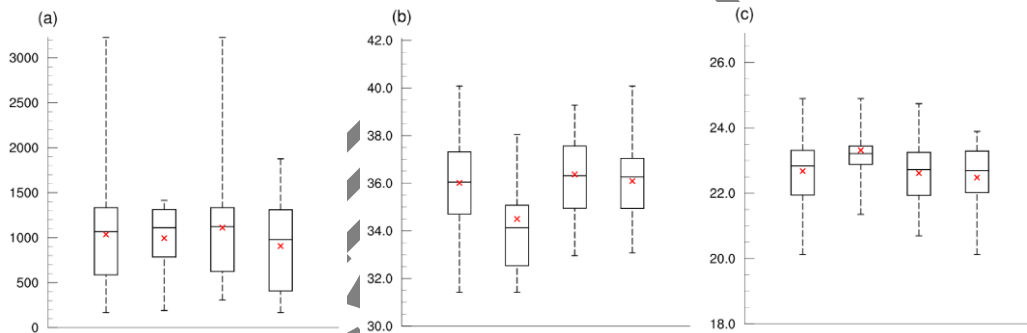


注：线段最高点表示统计最大值，最低点表示统计最小值，箱形上框线表示 75%四分位值，下框线表示 25%四分位值，箱内线表示中位数值，红叉表示平均值

图 6 2003-2022 年惠州前汛期暖区暴雨和第一类、第二类、第三类暖区暴雨的 (a) 地面 2m 露点温度 (单位: ° C)、(b) 850hPa 温度露点差 (单位: ° C)、(c) 大气可降水量 (单位: mm) 箱线图

Fig.6 Box and whisker plot of (a) surface 2m dew point temperature (unit: ° C), (b) the depression of dew point at 850 hPa (unit: ° C) and (c) vertical integrated precipitable water vapor (unit: mm) in the Huizhou warm-sector heavy rainfall, the first type, the second type and the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy

对流有效位能可以定量反映大气中是否发生深厚对流, 表征大气对流的不稳定能量 (金妍和李国平, 2021)。从图 7a 可以看到, 惠州暖区暴雨对流有效位能介于 $167\sim 3227 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 25%~75% 的范围为 $587\sim 1333 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位值和平均值分别为 $1066 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1034 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 属于中等强度的对流有效位能 (万轶婧等, 2020), 说明惠州 75% 暖区暴雨的发生并不依赖很强的对流有效位能。从各类暴雨对流有效位能的箱型图来看, 第一类暴雨的箱体上端非常接近其最大值, 而第二类暴雨对流有效位能分布更为离散, 由于第二类暴雨占总暴雨两个例数最多, 因此惠州暖区暴雨对流有效位能的分布与第二类暴雨更为相似。K 指数可以反映大气的层结稳定性, 指示对流性天气的发生, K 指数越大, 大气层结越不稳定, 对流发生的可能性越大 (林晓霞等, 2017)。统计发现 (图 7b), 惠州暖区暴雨发生时的 K 指数介于 $31.4\sim 40.0^\circ\text{C}$, 25%~75% 的范围为 $34.7\sim 37.2^\circ\text{C}$, 中位值和平均值均为 36.0°C , 而第一类暴雨 25%~75% 的范围仅为 $32.5\sim 35^\circ\text{C}$, 75% 的第一类暴雨发生时 K 指数要比惠州暖区暴雨 K 指数平均值要低, 由于 K 指数是由中低层的湿热力项构成, 因此这也说明第一类暴雨发生时中低层的温湿条件较差。日常业务中常用 850 hPa 与 500 hPa 温差来表征温度随高度垂直递减特征, 反映环境大气的静力稳定度, 850 hPa 与 500 hPa 温差越大环境大气温度垂直递减越剧烈, 静力不稳定越明显 (王迪等, 2020; 黄艳等, 2018)。图 7c 显示, 75% 的惠州暖区暴雨发生时 850 hPa 与 500 hPa 温差介于 $20.1\sim 23.3^\circ\text{C}$ 之间, 中位值和平均值都在 22.5°C 左右, 850 hPa 与 500 hPa 温差较小表现出弱静力不稳定层结, 说明大多数惠州暖区暴雨的触发并不需要很强的静力不稳定, 而是通过低层的南风急流源源输送不稳定能量, 这与陈元昭等 (2016) 得出的结论类似。



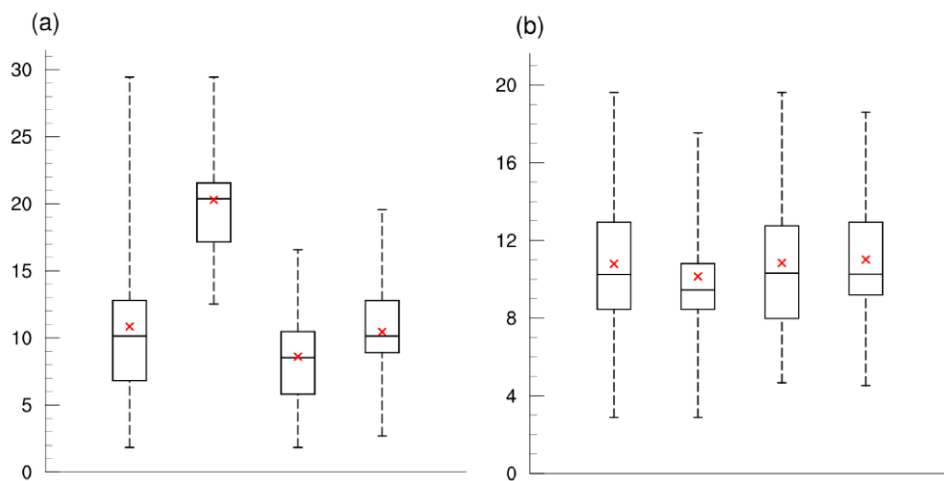
注: 线段最高点表示统计最大值, 最低点表示统计最小值, 箱形上框线表示 75% 四分位值, 下框线表示 25% 四分位值, 箱内线表示中位数值, 红叉表示平均值

图 7 2003—2022 年惠州前汛期暖区暴雨和第一类、第二类、第三类暖区暴雨的 (a) 对流有效位能 (单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)、(b) K 指数 (单位: $^\circ\text{C}$)、(c) 850hPa 与 500hPa 温度差 (单位: $^\circ\text{C}$) 箱线图

Fig.7 Box and whisker plot of (a)CAPE(unit: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$), (b)K index(unit: $^\circ\text{C}$) and (c)temperature difference between 850hPa and 500hPa in the Huizhou warm-sector heavy rainfall, the first type, the second type and the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

一定强度的垂直风切变有利于对流风暴的组织和维持 (尉英华等, 2023), 本文参考刘珍圆等 (2019) 对垂直风切变的计算方法, 计算出 500 hPa~地面的垂直风切变如图 8a 所示, 惠州暖区暴雨垂直风切变 25 百分位值到 75 百分位值为 $6.81\sim 12.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 中位值和平均值分别为 10.1 和 $10.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。值得注意的是, 在三类暴雨中第一类暴雨箱体和中位值明显高于其它两类暴雨, 其最小值基本与惠州暖区暴雨垂直风切变 75 百分位值持平, 此类暴雨在发生时伴随较高的垂直风切变, 这可能是第一类暴雨站点平均雨量小于其它两类暴雨的原因, 过高的垂直风切变导致雨滴蒸发, 降水效率变低。相关研究表明, 华南 64% 的暖区暴雨伴随低空急流出现 (Zhang and Meng, 2019), 因此本文统计了惠州暖区暴雨发生时 850

hPa 及以下最大偏南风速。如图 8b 所示，惠州暖区暴雨 850 hPa 及以下最大偏南风速 25 百分位值到 75 百分位值为 $8.44\sim 12.93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中位数和平均值分别为 10.24 和 $10.79\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；从各类暴雨来看，第一类暴雨的箱体窄于第二、三类暴雨，但就均值而言第三类暴雨最大，其次为第二类，最后是第一类。



注：线段最高点表示统计最大值，最低点表示统计最小值，箱形上框线表示 75% 四分位值，下框线表示 25% 四分位值，箱内线表示中位数值，红叉表示平均值

图 8 2003-2022 年惠州前汛期暖区暴雨和第一类、第二类、第三类暖区暴雨的 (a) 垂直风切变 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、(b) 850hPa 及以下最大偏南风速 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 箱线图

Fig.8 Box and whisker plot of (a) vertical wind shear (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and (b) maximum south wind at 850hPa and below (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the Huizhou warm-sector heavy rainfall, the first type, the second type and the third type warm-sector heavy rainfall during the first rainy season of Huizhou from 2003 to 2022

基于各类暖区暴雨环境参量的对比分析可以发现，由于西南风急流在水汽输送、不稳定能量积累上的作用十分明显，因此就水汽（低层、整层）和能量条件而言第二、三类暴雨要优于第一类暴雨；虽然第一类暴雨的水汽和能量条件不如第二、三类暴雨，但对于动力条件而言，第一类暴雨的垂直风切变则要明显高于第二、三类暴雨，同时第一类暴雨的静力不稳定度也要高于前两类暴雨，故在水汽和能量条件不佳的情况下，一定强度的垂直风切变对暖区暴雨的组织化和触发还是非常关键的。

6 结论与讨论

本文利用自动站雨量资料、ERA5 再分析数据对 2003-2022 年 4-6 月惠州前汛期暖区暴雨个例进行挑选和环流分型，同时还对比分析了惠州前汛期不同类型暖区暴雨发生时的平均环流场和环境场特征，得出以下主要结论：

(1) 2003-2022 年前汛期惠州共发生 48 次暖区暴雨事件，平均每年发生 2 次，其中莲花山余脉-大亚湾沿海一带和罗浮山南侧发生暖区暴雨频率最高；从环流分型结果来看，分为切变型（第一类）、短波槽+低空急流型（第二类）和副高外围+低空急流入口型（第三类），其中第二、三类共占暖区暴雨总数的 85%。

(2) 在平均环流场上，500 hPa 除第二类暴雨受到短波槽影响外，其余两类暴雨惠州地区都处于西风气流、副高外围西南气流的控制之下；低层第二、三类暴雨惠州附近都出现了西南低空急流和边界层低空急流，而第一类暴雨只在 925 hPa 珠江口以南出现了边界层低空急流。

(3) 环境场特征分析表明，ERA5 再分析资料计算的环境参量具有一定的可信度和适用

性。惠州前汛期暖区暴雨常用环境参量 25 百分位值分别为：地面 2 m 露点温度 23.24°C 、850 hPa 温度露点差 0.91°C 、大气可降水量 57 mm、对流有效位能 $587\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、K 指数 34.7°C 、850 hPa 与 500 hPa 温度差 21.93°C 、垂直风切变 $6.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、850 hPa 及以下最大偏南风速 $8.44\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。第二、三类暴雨整体上水汽（低层、整层）和能量条件要优于第一类暴雨，但对于动力条件而言，第一类暴雨的垂直风切变则要明显高于第二、三类暴雨，同时第一类暴雨的静力不稳定性也要高于前两类暴雨。

本文基于 ERA5 再分析资料的环境场分析虽然对数据进行了适用性评估，但由于资料自身与真实值存在误差加上其空间分辨率较低，使得分析具有一定的局限性；另外，对于环流场的分析也仅选用了几个具有代表性的个例，并未对所有个例进行归纳总结。因此，下一步工作将对每一类暖区暴雨的个例进行分析，归纳总结出每一类暖区暴雨的特征，同时尝试构建暴雨触发的机理模型。

参考文献：

- 陈黛雅, 沈学顺, 霍振华, 2023. 广州“5.7”暴雨预报的模式不确定性研究[J]. 气象学报, 81(1): 58-78. Chen D Y, Shen X S, Huo Z H, 2023. A research on the model uncertainty in forecast of the 7 May 2017 heavy rainfall in Guangzhou[J]. Acta Meteor Sin, 81(1): 58-78 (in Chinese).
- 陈芳丽, 张子凡, 2008. 惠州地区一次暴雨过程的环流背景和物理量场特征[J]. 广东气象, 30(5): 33-35, 37. Chen F L, Zhang Z F, 2008. Synoptic circulation and physical field characteristics of a heavy rain in Huizhou[J]. Guangdong Meteor, 30(5): 33-35, 37 (in Chinese).
- 陈芳丽, 张子凡, 李明华, 等, 2014a. 惠州市近 40 年前汛期暴雨的气候特征分析[J]. 广东气象, 36(3): 25-29, 36. Chen F L, Zhang Z F, Li M H, et al, 2014a. Analysis on climate characteristics of rainstorms in the annually first rain season of Huizhou in the past 40 years[J]. Guangdong Meteor, 36(3): 25-29, 36 (in Chinese).
- 陈芳丽, 李明华, 杜小松, 等, 2014b. 惠州高潭一次特大致洪暴雨过程分析[J]. 广东气象, 36(2): 24-29. Chen F L, Li M H, Du X S, et al, 2014b. Analysis of an unusually heavy, flood-causing rain at Gaotan, Huizhou[J]. Guangdong Meteor, 36(2): 24-29 (in Chinese).
- 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等, 2012. 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, 28(5): 707-718. Chen X X, Ding Z Y, Liu C H, et al, 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000—2009[J]. J Trop Meteor, 28(5): 707-718 (in Chinese).
- 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 2016. 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, 42(2): 144-155. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L, 2016. Characteristics of short-time severe rainfall events based on weather flow and key environmental parameters in Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 42(2): 144-155 (in Chinese).
- 邓芸, 1998. 1996 年“6.24”惠州暴雨过程分析[J]. 广东气象, (2): 32-33. Deng Y, 1998. An analysis of heavy rain in Huizhou on June 24, 1996[J]. Guangdong Meteor, (2): 32-33 (in Chinese).
- 付智龙, 李国平, 姜凤友, 等, 2022. 四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分析与局地环流数值模拟[J]. 大气科学, 46(6): 1366-1380. Fu Z L, Li G P, Jiang F Y, et al, 2022. Dynamic analysis and local circulation numerical simulation of a warm-sector mountain rainstorm event in the western Sichuan Basin[J]. Chin J Atmos

Sci, 46(6): 1366-1380 (in Chinese).

何立富, 陈涛, 孔期, 2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 559-569.

He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569 (in Chinese).

黄士松, 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社: 94-95. Huang S S, 1986. Heavy Rainfalls in the Pre-Flood Season in South China[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press: 94-95 (in Chinese).

黄晓龙, 吴薇, 许剑辉, 等, 2023. ERA5-Land 降水再分析资料在中国西南地区的适用性评估[J]. 高原气象, 42(6): 1562-1575. Huang X L, Wu W, Xu J H, et al, 2023. The applicability performance of the ERA5-Land precipitation datasets in Southwest China[J]. Plateau Meteor, 42(6): 1562-1575 (in Chinese).

黄艳, 俞小鼎, 陈天宇, 等, 2018. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J]. 气象, 44(8): 1033-1041. Huang Y, Yu X D, Chen T Y, et al, 2018. Analysis of conceptual models and ambient parameter of short-time severe rainfall in South Xinjiang[J]. Meteor Mon, 44(8): 1033-1041 (in Chinese).

黄瑶, 陶丽, 刘新超, 等, 2021. 大渡河上游强降水的环流分型及时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(4): 58-67. Huang Y, Tao L, Liu X C, et al, 2021. Synoptic circulation patterns clustering analysis and space-time distribution characteristics of heavy precipitation in the upper Reaches of the Dadu River[J]. Des Oasis Meteor, 15(4): 58-67 (in Chinese).

金妍, 李国平, 2021. 爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响[J]. 高原气象, 40(2): 314-323. Jin Y, Li G P, 2021. Impact of flow around and flow over in sudden rainstorm on mountains[J]. Plateau Meteor, 40(2): 314-323 (in Chinese).

李玉梅, 李勋, 冯文, 等, 2016. 秋季西沙非台风强降水天气形势分析[J]. 气象, 42(8): 934-943. Li Y M, Li X, Feng W, et al, 2016. Investigation of the synoptic situation associated with autumnal Non-TC heavy precipitation in Xisha[J]. Meteor Mon, 42(8): 934-943 (in Chinese).

林晓霞, 冯业荣, 张诚忠, 等, 2017. 华南一次暴雨过程热力和动力特征的诊断分析[J]. 热带气象学报, 33(6): 975-984. Lin X X, Feng Y R, Zhang C Z, et al, 2017. Diagnostic analysis of thermal and dynamic characteristics of a rainstorm process in Southern China[J]. J Trop Meteor, 33(6): 975-984 (in Chinese).

刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发, 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J]. 大气科学, 43(1): 119-130. Liu R X, Sun J H, Chen B F, 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1): 119-130 (in Chinese).

刘瑞鑫, 孙建华, 傅慎明, 2021. 不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J]. 气候与环境研究, 26(4): 359-373. Liu R X, Sun J H, Fu S M, 2021. Comparison of synoptic circulation characteristics in different types of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Climatic Environ Res, 26(4): 359-373 (in Chinese).

刘泳涛, 万永建, 陈映强, 等, 2022. 潮汕地区暖区暴雨分型及其环流形势特征[J]. 广东气象, 44(4): 1-5. Liu Y T, Wan Y J, Chen Y Q, et al, 2022. Classification of warm-sector hard rain patterns for the Chaozhou-Shantou area and analysis of the characteristics of the associated circulation situations[J]. Guangdong Meteor, 44(4): 1-5 (in Chinese).

刘珍圆, 王咏青, 张秀年, 等, 2019. 台风 Chanchu (0601) 变性过程中的强度变化及环境场分析[J]. 热带气象学报, 35(4): 528-538. Liu Z Y, Wang Y Q, Zhang X N, et al, 2019. Intensity changes and environmental field analysis of extratropical transition for typhoon Chanchu (0601) [J]. J Trop Meteor, 35(4): 528-538 (in Chinese).

覃武, 刘国忠, 赖珍权, 等, 2020. 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J]. 气象, 46(8): 1039-1052. Qin W, Liu G Z, Lai Z Q, et al, 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon, 46(8): 1039-1052 (in Chinese).

施丽娟, 冯婉悦, 雷勇, 等, 2022. GPM 日降水产品在中国大陆的准确性评估[J]. 气象, 48(11): 1428-1438. Shi L J, Feng W Y, Lei Y, et al, 2022. Accuracy evaluation of daily GPM precipitation product over mainland China[J]. Meteor Mon, 48(11): 1428-1438 (in Chinese).

田莹, 叶成志, 姚蓉, 2022. 2008—2018 年江南暖区暴雨特征[J]. 大气科学学报, 45(1): 51-64. Tian Y, Ye C Z, Yao R, 2022. Statistical analysis of the characteristics of warm-sector rainstorms in the southern part of the Yangtze River during the period of 2008—2018[J]. Trans Atmos Sci, 45(1): 51-64 (in Chinese).

万轶婧, 王东海, 梁钊明, 等, 2020. 华南暖区暴雨环境参量的统计分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 59(6): 51-63. Wan Y J, Wang D H, Liang Z M, et al, 2020. Statistical analysis of the environment parameters of warm-sector heavy rainfall in South China[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 59(6): 51-63 (in Chinese).

王迪, 牛淑贞, 曾明剑, 等, 2020. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. 气象, 46(5): 618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5): 618-628 (in Chinese).

王芳, 陈东升, 程水源, 等, 2009. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. 环境科学研究, 22(6): 637-642. Wang F, Chen D S, Cheng S Y, et al, 2009. Impacts of air pollutant transport based on air trajectory clustering[J]. Res Environ Sci, 22(6): 637-642 (in Chinese).

汪玲瑶, 谌芸, 肖天贵, 等, 2018. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 44(6): 771-780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Meteor Mon, 44(6): 771-780 (in Chinese).

尉英华, 花家嘉, 王莹, 等, 2023. 近 11 年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析[J]. 气象, 49(2): 213-223. Wei Y H, Hua J J, Wang Y, et al, 2023. Statistical characteristics and convection indicators of hailstorm over Tianjin in recent 11 years[J]. Meteor Mon, 49(2): 213-223 (in Chinese).

徐珺, 毕宝贵, 谌芸, 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).

徐焱, 闫敬华, 王谦谦, 等, 2013. 华南暖区暴雨的一种低层重力波触发机制[J]. 高原气象, 32(4): 1050-1061. Xu Y, Yan J H, Wang Q Q, et al, 2013. A low-level gravity wave triggering mechanism for rainstorm of warm zone in South China[J]. Plateau Meteor, 32(4): 1050-1061 (in Chinese).

叶朗明, 吴乃庚, 张华龙, 等, 2019. 海陆风和地形对一次弱天气背景下暖区特大暴雨的影响分析[J]. 暴雨灾害, 38(6): 597-605. Ye L M, Wu N G, Zhang H L, et al, 2019. Analysis of the influence of sea-land breeze and topography on the extraordinary heavy rain in warm sector under a weak weather background[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 597-605 (in Chinese).

曾智琳, 谌芸, 朱克云, 等, 2018. 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, 34(6): 791-805. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, et al, 2018. Mesoscale characteristic analysis and primary discussion on the formation of the 7 May 2017 torrential rainfall in Guangzhou[J]. J Trop Meteor, 34(6): 791-805 (in Chinese).

周颖, 张贺, 张珂玮, 2020. 基于K-均值聚类方法的大气环流模式 IAP AGCM4.1 对西北太平洋热带气旋的模拟评估[J]. 大气科学, 44(5): 1141-1154. Zhou Y, Zhang H, Zhang K W, 2020. Evaluation of simulated tropical cyclones over the western North Pacific with IAP AGCM4.1 based on K-Means method[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5): 1141-1154 (in Chinese).

Chen X C, Zhang F Q, Zhao K, 2016. Diurnal variations of the land-sea breeze and its related precipitation over South China[J]. J Atmos Sci, 73(12): 4793-4815.

Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis[J]. Mon Wea Rev, 146(11): 3827-3844.

Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 147(2): 543-565.

Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al, 2009. Classifying North Atlantic tropical cyclone tracks by mass moments[J]. J Climate, 22(20): 5481-5494.

Tu C C, Chen Y L, Chen C S, et al, 2014. A comparison of two heavy rainfall events during the terrain-influenced monsoon rainfall experiment (TiMREX) 2008[J]. Mon Wea Rev, 142(7): 2436-2463.

Zhang M R, Meng Z Y, 2019. Warm-sector heavy rainfall in southern China and its WRF simulation evaluation: a low-level-jet perspective[J]. Mon Wea Rev, 147(12): 4461-4480.

Statistical analysis of environmental parameters and classification of synoptic circulation of warm-sector heavy rainfall in Huizhou during the first rainy season

FU Zhilong¹ JIANG Shuai^{2,3} LI Guoping⁴ CHEN Fangli² HUANG Chuxian^{2,3} LUO Rong¹
ZHANG Qiuming¹ LIANG Huilong¹

1 Meteorological Bureau of Huiyang District, Huizhou, Huizhou 516211, China;

2 Meteorological Bureau of Huizhou, Huizhou 516001, China;

3 Huizhou Emergency Warning Information Dissemination Center, Huizhou 516001, China;

4. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

Abstract: Based on the precipitation data from automatic weather stations and ERA5 reanalysis data, case selection and classification of synoptic circulation are carried on for warm-sector heavy rainfall of the first rainy season in Huizhou from April to June 2003 to 2022. And a comparison is used to study the characteristics of mean synoptic circulation and environmental parameters between different types of warm-sector rainfall events. The results showed that there are a total of 48 warm-sector heavy rainfall events in Huizhou during the first rainy season. According to synoptic circulation, the selected warm-sector rainfall events are divided into three types, i.e., shear line (the first type), shortwave trough&low level jet (the second type), and the edge of subtropical high&the entrance of low level jet(the third type). A further comparison of mean synoptic circulation between different types of warm-sector rainfall events show that Huizhou is under the control of the west wind flow and the southwest flow around the subtropical high at 500hPa, except for the second type of heavy rainfall. In low-level, there are double low-level jet(southwest low-level jet and boundary layer low-level jet) near Huizhou both in the second and third type of heavy rainfall, while in the first type of heavy rain, boundary layer low-level jet just occurred in the south of the Pearl River Estuary at 925hPa. Finally, the analysis indicate that there is reliability and applicability of environmental parameters based on ERA5 reanalysis. The second and third type of heavy rainfall is superior to the first types of heavy rainfall in moisture and energy conditions. But in terms of dynamic conditions, the first type of heavy rainfall is superior to other types of heavy rainfall in vertical wind shear, and the static instability of the first type of heavy rainfall is superior to other.

Key words: Warm-sector heavy rainfall; Synoptic circulation pattern; Environmental parameters, Double low-level jet