

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.002

华南前汛期珠江流域两类暖区飑线特征分析

张小雯^{1,2}, 盛杰¹, 滑申冰³, 郑永光¹, 刘鑫华¹, 麦子¹

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 利用 2016—2019 年 4—6 月雷达三维拼图资料, 根据触发条件的差异, 划分华南前汛期暖区飑线为锋面触发暖区发展(I 型暖区飑线)与暖区触发并发展(II 型暖区飑线)两类; 在此基础上针对飑线造成短时强降水和雷暴大风的分布, 对比了飑线发生时的大尺度环境条件和中尺度雷达回波特征。结果表明: I 型暖区飑线大多形成于平原地区, II 型暖区飑线大多生成于山脉迎风坡和海岸线; 两类飑线发生时均伴有明显的短时强降水, 易造成暴雨洪涝; I 型暖区飑线易产生区域性雷暴大风, II 型暖区飑线产生分散性雷暴大风; I 型暖区飑线生命史长, 对流发展更旺盛, 飑线移动速度快; II 型暖区飑线生命史短, 飑线移动速度慢, 回波强度弱于 I 型暖区飑线; 两类飑线都有较好的水汽条件和 0~3 km 低层风垂直切变条件, I 型暖区飑线发生时动力和热力条件更好。

关键词: 珠江流域; 暖区飑线; 华南前汛期; 空间分布; 中尺度特征; 环境参数

中图分类号: P458

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)04-0005-08

Characteristics of two kinds warm-sector squall lines in the Pearl River Basin during the pre-flood season in South China

ZHANG Xiaowen^{1,2}, SHENG Jie¹, HUA Shenbing³, ZHENG Yongguang¹, LIU Xinhua¹, MAI Zi¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. China Meteorological Administration Hydro-meteorology Key Laboratory, Beijing 100081, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Based on the three-dimensional radar mosaic data from April to June in 2016-2019 and the differences in triggering conditions, a classification for warm-sector squall lines with vastly different formation mechanisms during the pre-flood season was proposed. They were divided into two types: squall lines that developed in the warm sector after frontal triggering (Type I warm-sector squall lines), and squall lines that were generated and developed in the warm sector (Type II warm-sector squall lines). On this basis, the distributions of short-term heavy rainfall and thunderstorm winds were compared in terms of large-scale environmental conditions and mesoscale radar echo characteristics during the occurrence of squall lines. The results showed that: Type I warm-sector squall lines were mostly formed in plain areas, while Type II warm-sector squall lines were mostly generated on the windward slopes of mountains and coastlines. Both squall lines were accompanied by obvious short-term heavy precipitation, which was easy to cause rainstorm and flood; Type I warm-sector squall lines were prone to producing regional thunderstorm winds, while Type II warm zone squall lines produce scattered thunderstorm winds. The Type I warm-sector squall lines had longer lifecycle, more vigorous convective development, and a faster moving speed, while the Type II warm-sector squall lines had shorter lifecycle and a slower moving speed with weaker echo intensity. Both types of squall lines had good water vapor conditions and vertical shear conditions of low-level winds at 0-3 km, and the dynamic and thermal conditions are better when Type I warm zone squall lines occurred.

Key words: Pearl River Basin; warm-sector squall lines; pre-flood season in South China; spatial distribution; mesoscale features; environmental parameters

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42175001); 中国气象局水文气象重点开放基金项目(23SWQXZ001); 创新发展专项项目(CXFZ2024J001); 国家重点研发计划项目(2022YFC3004104); 中国气象局重点创新团队项目(CMA2022ZD07, CMA2023QN06)

作者简介: 张小雯(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事强对流天气预报方法研究。E-mail: zhangxw@cma.gov.cn

通信作者: 盛杰(1984—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: shengjie@cma.gov.cn

引用本文: 张小雯, 盛杰, 滑申冰, 等. 华南前汛期珠江流域两类暖区飑线特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 5-12.

ZHANG Xiaowen, SHENG Jie, HUA Shenbing, et al. Characteristics of two kinds warm-sector squall lines in the Pearl River Basin during the Pre-flood season in South China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 5-12.

飊线系统是具有高影响的中尺度对流天气系统,其往往产生大范围流域强降水等极端灾害性天气,导致流域暴雨洪涝灾害,造成巨大的人员伤亡和财产损失^[1-5]。如,2019年4月11日,飊线系统在珠江流域南部产生80.6 mm/h的极端短时强降水,发生流域暴雨洪涝灾害,导致11人死亡。

我国华南前汛期冷暖气流交绥频繁,是珠江流域飊线天气的高发期,极易造成短时强降水、雷暴大风等剧烈天气^[6]。除了跟随锋面触发移动的锋面飊线,暖区飊线也有发生^[7-9]。此类天气同样能够造成强烈的流域灾害,由于锋前暖区天气尺度强迫较弱,数值天气预报模式对该地区暖区飊线的特征和预报也更加困难^[10]。为了更好地做好珠江流域防洪减灾,提升飊线引发流域强降水和极端大风等水文气象要素的预报精度,亟需开展华南前汛期两类暖区飊线的特征分析。

国内对暖区飊线的研究以典型个例分析为主。暖区飊线易发生在强热力不稳定环境中^[11];发生时地面无明显冷空气影响,地面倒槽、850 hPa 风速切变或者暖式切变是暖区飊线动力抬升的关键因子,变压风产生的地面风场扰动是对流触发机制^[12];山区地形和海陆边界也是暖区 MCS 过程的触发和发展的重要因素^[13]。吴乃庚等^[14]对比了2013—2017年华南地区暖区暴雨和飊线的差异,指出了地形触发和整层暖湿对暖区暴雨的重要性,而飊线的低层辐合和抬升相对于暖区暴雨更为强烈。暖区飊线与锋面飊线相比,层云区较小,无线尾涡旋^[15]。这些研究成果从个例角度加深了对暖区飊线的认识,但是针对珠江流域暖区飊线的发生频率、时空分布、环境背景和雷达特征等问题的系统性研究很少,因此有必要加强其分类统计研究,提升珠江流域暖区飊线的监测预警能力。

从飊线形成发展条件看,暖区飊线可分为两类:①锋面触发后远离锋面进入暖区并剧烈发展;②触发到形成发展一直处于暖区中。本文综合利用多源数据,特别是三维雷达组网观测资料,对华南前汛期珠江流域两类暖区飊线特征进行较为深入的研究,旨在阐明两类暖区飊线的时空分布和环境条件差异,以期进一步加深对暖区飊线的认识,提升此类天气造成的暴雨洪涝和极端大风天气的预报预警能力。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

根据珠江流域在华南前汛期飊线形成和发展的影响范围,将研究区域定义为18°N~27°N、105°E~118°E,包括广东、广西、海南及其周边的福建、江西、贵州三省的中南部地区,以下简称为华南地区。飊线普查时段为2016—2019年4—6月,所用时间为北京时间,具体数据见表1。

表 1 研究数据
Table 1 Study data

数据名称	数据说明	数据用途
SWAN 三维雷达拼图	空间分辨率为0.01°,时间分辨率为6 min,高度为21层	识别和追踪飊线,计算飊线相关雷达特征(回波顶高、质心高度等)
雷达单站基数据	35部天气雷达基数据,时间分辨率为6 min	飊线雷达回波形态和速度场特征(中气旋、弓形回波等)
强对流天气实况	逐小时观测的短时强降水(降水强度≥20 mm/h)、雷暴大风(风速≥17 m/s)、逐3 h观测的冰雹	飊线造成的强对流天气分布特征
ERA-5 再分析数据	空间分辨率为5 km,时间分辨率为1 h	飊线形成前的大尺度环境场特征
地面加密自动站观测	逐小时地面加密的自动站观测	飊线形成前后地面要素的分析诊断

1.2 暖区飊线定义和分类

对于飊线的定义国内外专家存在一定的差异,本文选择俞小鼎等^[16]对飊线的定义,即连续或准连续的能够带来区域性雷暴大风的线状对流风暴。利用飊线形成时(或者相邻近时刻)的ERA-5高空资料和地面加密自动站的气象要素确定地面锋面的位置,利用Meng等^[17]统计中国中东部飊线的标准统计暖区飊线从形成(第一次满足飊线标准)到消亡(最后一次满足飊线标准)阶段的雷达特征和灾害性天气分布。

本文采用刘瑞鑫等^[18]定义的暖区暴雨标准,将暖区飊线定义为:①飊线形成时无明显冷空气影响,飊线附近无明显地面锋面出现或距地面锋面大于200 km;②对流层低层(925 hPa)处于无明显切变的偏南风气流中。从暖区飊线的定义可知,飊线形成时处于暖区中有两种可能情况:①对流触发时存在锋面或切变线,在暖区发展成飊线,形成飊线时与锋面距离大于200 km;②对流从触发到飊线一直处于暖区中。图1(审图号:GS京(2022)0372号。下同)分别为锋面触发暖区发展的暖区飊线(I型暖区飊线)和暖区触发并发展的暖

区飢线(Ⅱ型暖区飢线)两类暖区飢线的典型个例。图 1(a)对流在广西北部的锋面处生成,向东南方向快速移动时在广东中北部的暖区中形成飢线。图 1(b)对流在广东东部沿海地区触发,向东北移动发展为飢线,此过程飢线处于 925 hPa 偏南气流中,始终远离位于 25°N 以北的江西至广西北部一带的地面锋面。

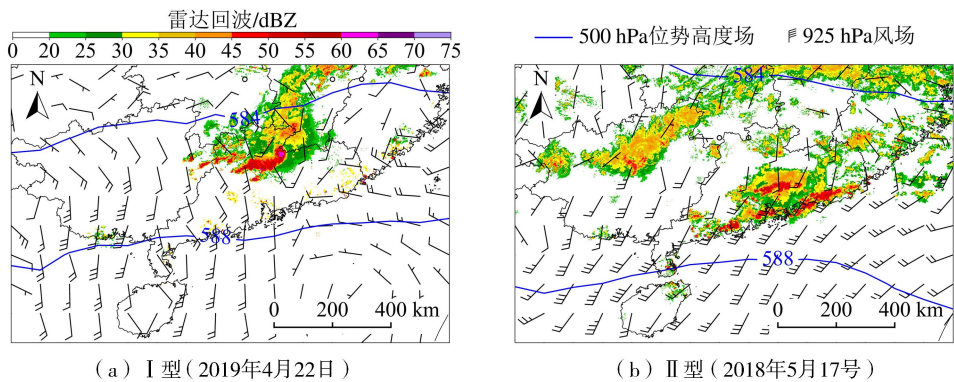


图 1 华南前汛期两类暖区飢线

Fig. 1 Two kinds of warm-sector squall lines during the pre-flood season of South China

按照飢线的定义和分类标准,普查了 2016—2019 年 4—6 月华南前汛期 40 dBZ 的连续或准连续区域且长度大于 100 km 的线状对流并对识别结果进行人工检验,共得到华南前汛期暖区飢线 16 条,其中Ⅰ型暖区飢线 8 条,Ⅱ型暖区飢线 8 条。

2 暖区飢线的空间分布

2.1 空间分布情况

图 2 为 2016—2019 年华南前汛期两类暖区飢线的整体分布,红色阴影代表飢线生命史期间雷达回波大于或等于 40 dBZ 的总次数。由图 2 可知,地形和海陆分布等下垫面差异对暖区飢线分布具有显著影响。Ⅰ型暖区飢线多发生在平原地区,有两个呈现准东西向分布的高发区:一个是广东东南部的喇叭口地区(清远至广州),该地区是华南水系最多的区域;另一个是粤西南的沿海地区(阳江、茂名一带)及其近海海域。Ⅱ型暖区飢线多发生于山脉迎风坡的丘陵地区和东部沿海,与地形走向基本一致。广东西部和北部山区和东北部沿海、海南五指山北麓是飢线发生次数较多的区域。

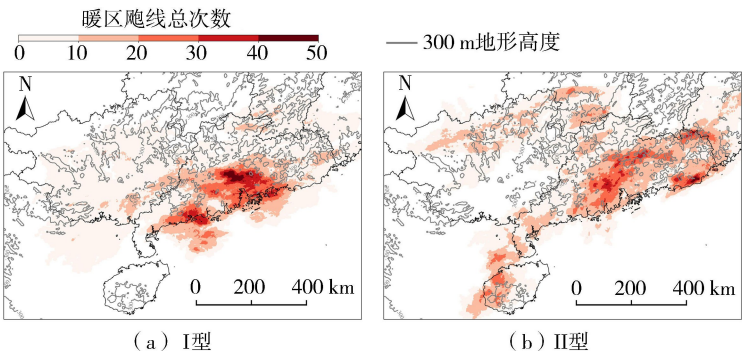


图 2 暖区飢线总次数

Fig. 2 Number of occurrences of warm zone squall lines

图 3 为两类飢线雷达回波首次达到飢线标准时(≥ 40 dBZ)发生次数的空间分布,也就是飢线形成时的位置。Ⅰ型暖区飢线大多形成于山脉南侧的平原地区,大值区在广西南部、广东西南部和中部等地势平坦的地区。Ⅱ型暖区飢线与地形关系密切,大多生成于山脉迎风坡和海岸线附近,大值区在广东东北部沿海和广西的北部湾东部。

从两类飢线的生命史可以看出(图 4(a)),Ⅰ型暖区飢线的持续时间更长,在 6~18 h 之间,平均值为 11.4 h;Ⅱ型暖区飢线持续时间在 4~9 h,平均值仅为 4.9 h。从飢线逐 6 min 移动方向(图 4(b))和移动速度(图 4(c))统计来看,Ⅰ型暖区飢线大多向东偏南方向移动,Ⅰ型暖区飢线移动速度平均值为 11.2 m/s,与华北地区强雷暴大风型飢线移动速度(17 m/s)较为接近^[19];Ⅱ型暖区飢线大多向东偏北方向移动,移动速度平均值为 5.8 m/s,慢于Ⅰ型暖区飢线,非常接近于华北强降水型飢线的移动速度(平均值为 6.6 m/s)。

2.2 飢线短时强降水与雷暴大风的空间分布

由图 5 可知,Ⅰ型暖区飢线造成的短时强降水高发区位于广东珠三角和广西中部和东部的平原地区,最多发生于广东佛冈,超过 50 mm/h 的短时强降水多位于广东沿海和珠三角地区。Ⅱ型暖区飢线造成的短时

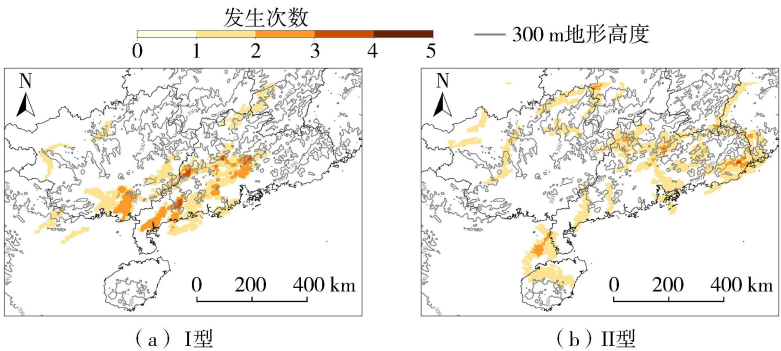


图 3 暖区飑线初次形成发生次数

Fig.3 Number of occurrences of the initial formation location of warm-sector squall lines

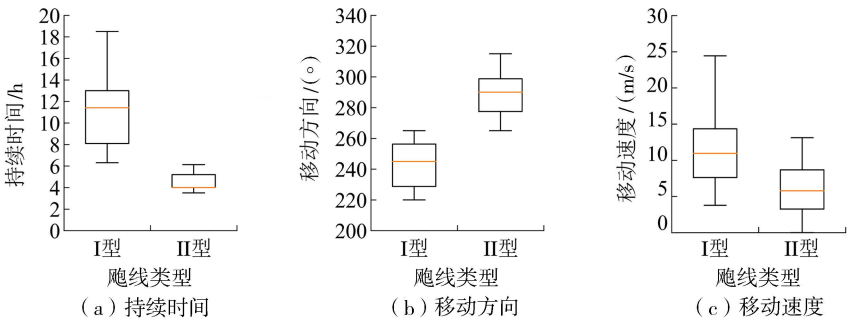


图 4 两类暖区飑线的特征分析

Fig.4 Characteristics analysis of two kinds of warm-sector squall lines

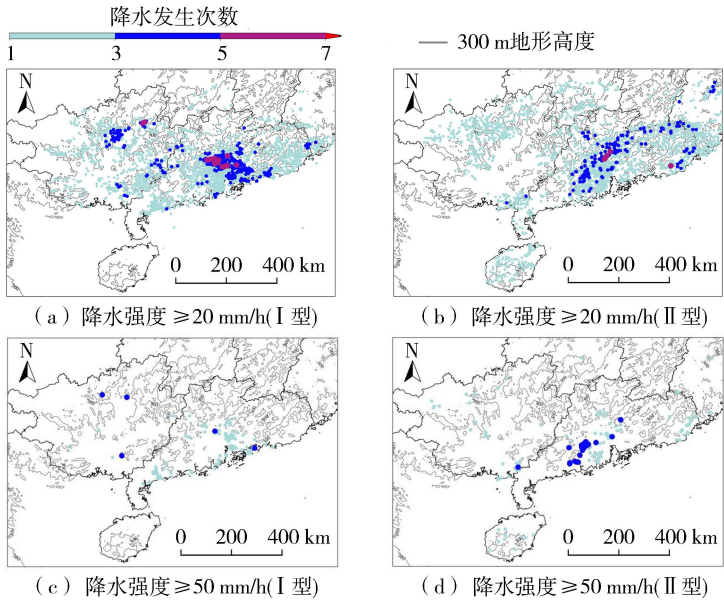


图 5 两类暖区飑线造成的不同量级短时强降水空间分布

Fig.5 Spatial distribution of short-term heavy rainfall with various intensities caused by two kinds of warm-sector squall lines

强降水主要位于广东西部和北部山脉迎风坡,与山脉走向大致相同,相比 I 型暖区飑线,II 型暖区飑线出现 50 mm/h 的短时强降水频次更多,是 I 型的 1.3 倍。

两类飑线造成的雷暴大风分布差异较大(图 6)。从 8 级(风速 $\geq 17.2\text{ m/s}$)以上雷暴大风分布看,I 型暖区飑线雷暴大风多发生在广东东南部和广西中部的平原地区,高发区域较强降水位置偏东;II 型暖区飑线产生的雷暴大风较为分散,与地形相关性较强,广东峡谷地区和沿海地区发生次数最多。从 10 级以上(风速 $\geq 24.5\text{ m/s}$)雷暴大风分布来看,I 型暖区飑线主要发生在广东东南部的平原地区,II 型暖区飑线主要发

生在广东山脉的迎风坡,且发生次数明显小于 I 型暖区飑线,仅为 I 型次数的 45%。

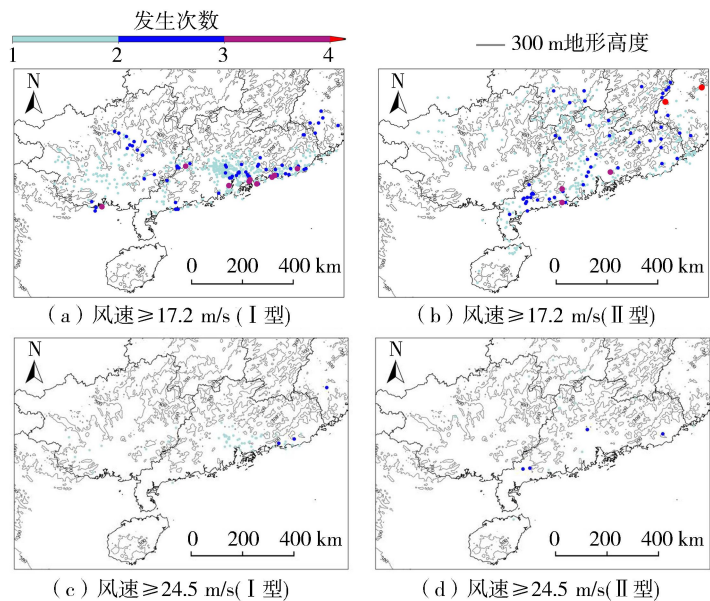


图 6 两类暖区飑线造成的雷暴大风空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of high wind caused by two kinds of warm-sector squall lines

2.3 飑线雷达回波中尺度特征

由于地面自动站观测的时间和空间分辨率低,不能连续完整地观测到飑线发生时强对流天气的特征和演变,因此通过雷达回波特征进一步分析两类飑线强度的中尺度特征。I 型暖区飑线的回波顶高集中在 3 ~ 15 km,最大反射率因子平均值为 60 dBZ,对流发展更深厚旺盛,表现为温带深厚对流的回波特征,对应解释了 I 型暖区飑线不仅仅伴有短时强降水,同时伴有更加明显的雷暴大风天气。II 型暖区飑线更多地表现为强降水的回波特征,回波顶高度明显低于 I 型,集中在 4 ~ 8 km,平均值不到 5 km,回波强度也弱于 I 型暖区飑线,最大反射率因子平均值为 57 dBZ,这些特征更符合热带低质心回波特征,飑线移动速度较慢,更容易造成短时强降水天气,导致暴雨洪涝天气。例如,2018 年 5 月 7 日就是一次典型的 II 型暖区飑线暴雨洪涝过程,造成广东中部和东部部分地区出现较大范围暴雨、局地大暴雨,并导致河道水位明显上涨,多条河流出现洪水过程,其中广州市新街河支流铜鼓坑等出现 20 年一遇洪水;广东多地出现旱涝急转,正式全面入汛。本次降水过程效率高,持续时间长,累积降水量大,24 h 最大降水量达 168 mm(图 7(a)),6 h 内出现了 98 个降水强度大于 50 mm/h 的观测站(图 7(b)),占总站次的 11%;有 6 个站超过 80 mm/h,最高达 91.4 mm/h。

3 暖区飑线形成的环境条件

通过分析两类飑线发生前 ERA-5 再分析数据的环境参数差异,对比两类飑线所需要的大尺度环境条件。统计飑线生命史期间回波大于 40 dBZ 区域的所有格点平均值,时间为飑线形成前 3 h,平均场为 2016—2019 年 4—6 月华南地区参数的平均值分布。

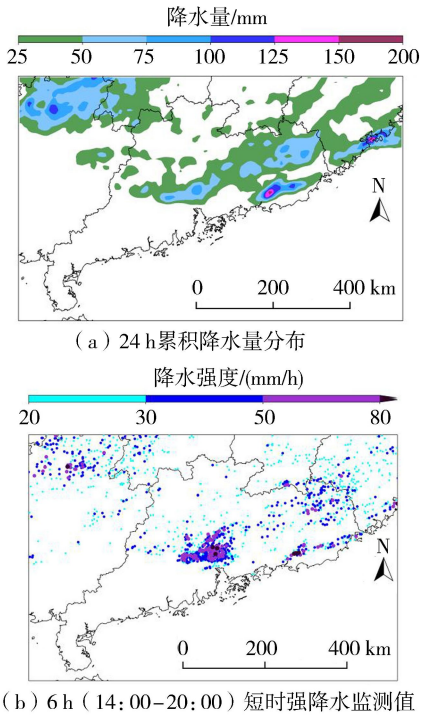


图 7 2018 年 5 月 7 日典型的 II 型暖区飑线暴雨洪涝过程

Fig. 7 A typical rainstorm and flood process caused by Type II warm-sector squall line on May 7th, 2018

3.1 动力条件

由图8可知,I型暖区飢线发生前,华南中南部位于500 hPa 高空槽前正涡度平流区和925 hPa 散度负值的大值区,对流触发后易在此发展加强。在合适的对流条件下,925 hPa 辐合区里易生成分散性对流,在与 I 型暖区飢线合并时,弓形回波加强,飢线强度加强^[20],最大反射率因子的空间分布大值区与 925 hPa 辐合区较为一致也说明了这一点。II型暖区飢线发生在 500 hPa 槽前正涡度平流区,925 hPa 偏南风的风速辐合大值区位置与地形关系密切。对流沿着山脉或者海岸线触发并发展,并在边界层急流的暖平流强迫中加强,后向传播明显。925 hPa 风速辐合大值区与飢线雷达反射率因子强度大值区位置也较为一致,说明低层风和大尺度地形的相互作用是影响此类飢线加强的主要因子之一。值得注意的是,在飢线发展的区域,I型暖区飢线 925 hPa 低层动力辐合作用明显强于II型,受天气尺度扰动的影响更大;II型暖区飢线低层动力辐合作用相对较弱,其触发和发展受到天气尺度扰动和地形或海岸线等多种因素共同影响。

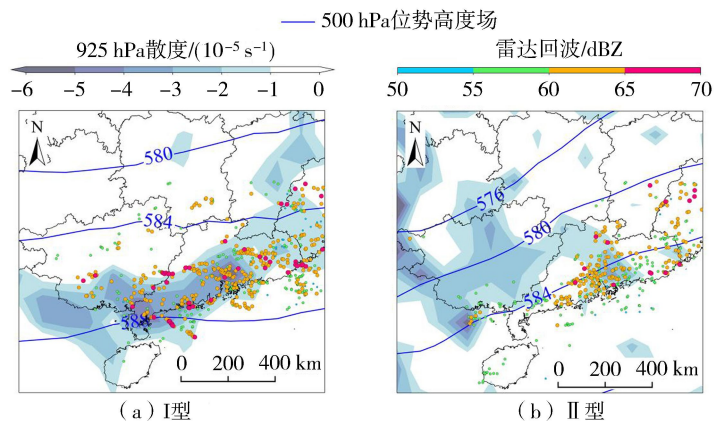


图8 飢线发生前3 h 的环流形势平均场和飢线最大雷达反射率因子分布

Fig.8 Average field of atmospheric circulation at 3 hours before the formation and the maximum radar reflectivity of two squall lines

3.2 水汽和能量条件

从水汽条件看,两类暖区飢线均发生高湿区,绝对水汽条件好(图9)。整层可降水量平均值在 63 mm 以上,远高于华南地区西风带飢线平均值(46 mm)和 Tian 等^[21]统计得到的中国短时强降水发生时整层可降水

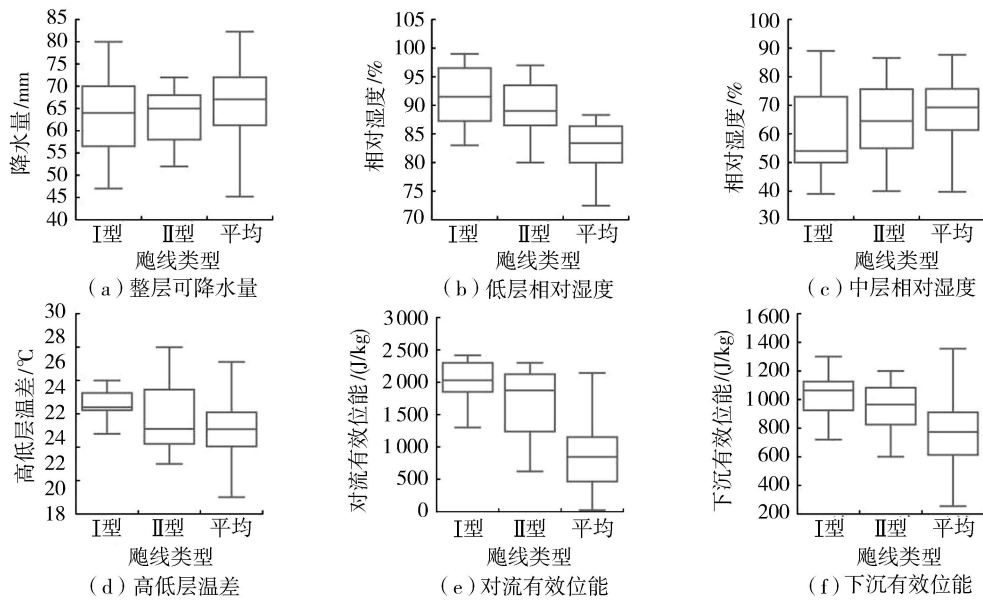


图9 两类暖区飢线水汽条件和不稳定条件与平均场对比

Fig.9 Comparison of water vapor conditions and instability conditions of two types of warm-sector squall lines with average field

量的阈值(56 mm),因此两类飢线发生时都伴有明显的短时强降水。从不同层次的水汽分布来看,Ⅰ型暖区飢线低层相对湿度平均值为 92%,中层为 54%,相对于Ⅱ型暖区飢线,呈现出低层更湿、中层更干的水汽层结。Takemi 等^[22]指出在较湿的环境下,低层更湿的环境所生成的飢线强度更强。

从能量条件来看,两类暖区飢线发生较高的对流有效位能(CAPE)区域,中位数分别为 2 030 J/kg 和 1 875 J/kg,远大于平均态 844 J/kg 和广东出现雷暴大风时^[23]CAPE 中位数 1 433 J/kg。Ⅰ型暖区飢线低层更湿,温度直减率更大,因此具有更强的 CAPE 值,飢线的雷达反射率因子强度大于Ⅱ型暖区飢线。下沉有效位能(DCAPE)代表着对流系统中层大气的干燥程度,气流下沉蒸发过程造成后侧入流急流是形成弓形回波或者飢线的主要原因^[20]。两类暖区飢线均生成于 DCAPE 大于 1 000 J/kg 的区域,其中Ⅰ型暖区飢线中层较干,温度直减率大,因此 DCAPE 更大,相对于Ⅰ型暖区飢线更易形成强雷暴大风,这与前文结论一致。

3.3 垂直风切变

垂直风切变对飢线发展有重要意义,0~6 km 风切变越大风暴的组织性越强甚至强度越强^[24]。由图 10 可知,Ⅰ型暖区飢线 0~6 km 风切变为 21.5 m/s,达到了强垂直风切变等级(≥ 20 m/s),具有雷暴大风型的风切变特征^[25]。Ⅱ型暖区飢线 0~6 km 风切变为 13 m/s,属于弱风切变(<15 m/s),具有短时强降水的风切变特征。在弱的中层风切变条件下,Ⅱ型暖区飢线大多是沿着地形或者中尺度辐合线触发并在偏南急流中后向传播形成线状对流,其飢线尺度远小于在强风切变条件下的Ⅰ型暖区飢线。虽然Ⅱ型暖区飢线的 0~6 km 垂直风切变较弱,但 0~3 km 垂直风切变较强,达到了 15 m/s,与Ⅰ型暖区飢线平均值为 15.5 m/s 大致相当,大于华南地区出现强雷暴大风的风切变平均值 11.6 m/s^[26],因此对于Ⅱ型暖区飢线,0~3 km 风垂直切变可能也是其维持和传播的重要因素。

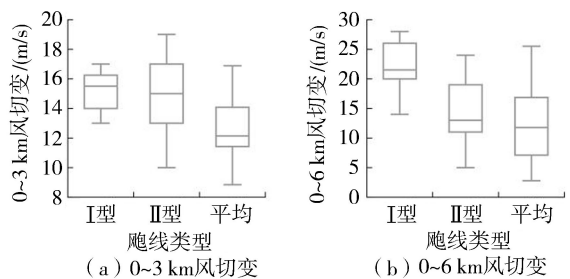


图 10 两类暖区飢线的垂直风切变条件

Fig. 10 Comparison between vertical wind shear conditions of two types of warm-sector squall lines

4 结 论

a. Ⅰ型暖区飢线大多形成于平原地区,Ⅱ型暖区飢线大多生成于山脉迎风坡和海岸线附近。两类暖区飢线发生时均伴有短时强降水,Ⅱ型暖区飢线出现 50 mm/h 的短时强降水次数更多,极易出现暴雨洪涝;Ⅰ型暖区飢线多造成区域性雷暴大风,Ⅱ型多为分散性的雷暴大风,发生次数和强度均小于Ⅰ型暖区飢线。

b. Ⅰ型暖区飢线生命史长,飢线移速快,回波顶高在 3~15 km,对流发展更旺盛,更多表现为温带深厚对流的回波特征;Ⅱ型暖区飢线生命史短,飢线移速慢,回波强度弱于Ⅰ型暖区飢线,回波顶高度大多在 4~8 km,具有低质心对流特征,更多地表现为热带强降水回波特征,导致暴雨洪涝。

c. Ⅰ型暖区飢线发生时 500 hPa 大多位于高空槽底,925 hPa 低层动力辐合作用更强,呈现出下湿上干的水汽层结,高低层温差大、不稳定能量强,中低层均处于强垂直风切变区域,该环境条件有利于对流脱离锋面在其前侧高能高湿强不稳定强风切变环境中发展加强。Ⅱ型低层动力辐合作用相对较弱,暖区飢线大多形成于 500 hPa 槽前的西南气流中,触发与地形关系密切,后向传播明显。对流层中层的干冷环境弱于Ⅰ型暖区飢线,且处于弱的 0~6 km 垂直风切变环境中,飢线的组织性相对较差和尺度较小。

参考文献:

[1] 俞小鼎,郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,2020,78(3):391-418. (YU Xiaoding, ZHENG Yongguang. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020,78(3):391-418. (in Chinese))

[2] 曹勇,包红军,张恒德,等. 基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):303-308. (CAO Yong, BAO Hongjun, ZHANG Hengde, et al. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(4):303-308. (in Chinese))

[3] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):197-203. (BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on

- short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 197-203. (in Chinese))
- [4] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域1981-2020年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [5] 郑金海,鲍仕昱,张蔚,等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 1-6. (ZHENG Jinhai, BAO Shiyu, ZHANG Wei, et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 1-6. (in Chinese))
- [6] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 274-284. (DING Yihui. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(3): 274-284. (in Chinese))
- [7] 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 Xiangxiang, DING Zhiying, LIU Caihong, et al. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000 to 2009[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(5): 707-718. (in Chinese))
- [8] 陈涛,张芳华,于超,等. 2020年6—7月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. 气象, 2020, 46(11): 1415-1426. (CHEN Tao, ZHANG Fanghua, YU Chao, et al. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River basin during June-July 2020[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(11): 1415-1426. (in Chinese))
- [9] 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 Lifu, CHEN Tao, KONG Qi. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 559-569. (in Chinese))
- [10] 郭弘,林永辉,周森,等. 华南暖区暴雨中一次飑线的中尺度分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2): 171-180. (GUO Hong, LIN Yonghui, ZHOU Miao, et al. Mesoscale analysis on a squall line in the warm-sector heavy rainfall over Southern China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2014, 33(2): 171-180. (in Chinese))
- [11] 翟丽萍,农孟松,赖珍权,等. 广西“4·20”暖区飑线的形成及结构[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 568-576. (ZHAI Liping, NONG Mengsong, LAI Zhenquan, et al. Formation and structure of “4·20” warm sector squall line in Guangxi Province[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(2): 568-576. (in Chinese))
- [12] 聂云,周继先,李习瑾,等. 贵州一次暖区飑线过程的环境条件和结构特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(5): 782-793. (NIE Yun, ZHOU Jixian, LI Xijin, et al. Environmental condition and structure feature of a warm-sector squall line process in Guizhou Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(5): 782-793. (in Chinese))
- [13] 汪玲瑶,湛芸,肖天贵,等. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 2018, 44(6): 771-780. (WANG Lingyao, CHEN Yun, XIAO Tianguai, et al. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(6): 771-780. (in Chinese))
- [14] 吴乃庚,温之平,邓文剑,等. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. 气象科学, 2020, 40(5): 605-616. (WU Naigeng, WEN Zhiping, DENG Wenjian, et al. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(5): 605-616. (in Chinese))
- [15] 何齐强,陆汉城,张铭. 江淮地区暖区飑线中尺度观测研究[J]. 气象学报, 1992, 50(3): 290-300. (HE Qiqiang, LU Hancheng, ZHANG Ming. A mesoscale study of squall line in warm sector of Jiang-Huai area[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 50(3): 290-300. (in Chinese))
- [16] 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 Xiaoding, ZHOU Xiaogang, WANG Xiuming. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 311-337. (in Chinese))
- [17] MENG Zhiyong, YAN Dachun, ZHANG Yunji. General features of squall lines in East China[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(5): 1629-1647.
- [18] 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): 119-130. (LIU Ruixin, SUN Jianhua, CHEN Baofa. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 119-130. (in Chinese))
- [19] 盛杰,郑永光,沈新勇,等. 基于骨架的线状对流系统客观量化识别算法研究[J]. 大气科学, 2020, 44(6): 1291-1304. (SHENG Jie, ZHENG Yongguang, SHEN Xinyong, et al. Research on skeleton-based objective quantization and identification algorithm for quasi-linear convective systems[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(6): 1291-1304. (in Chinese))

event extraction and improved MMHC[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(2):152-158. (in Chinese))

[21] POTASH E,STEINSCHNEIDER S. A Bayesian approach to recreational water quality model validation and comparison in the presence of measurement error[J]. Water Resources Research,2022,58(1):e2021WR031115.

[22] ZHOU Z P,YU X H,ZHU Z Y,et al. Development and application of a Bayesian network-based model for systematically reducing safety risks in the commercial air transportation system[J]. Safety Science,2023,157:105942.

[23] LI X G,WANG X F,FANG Y. Cause-chain analysis of coal-mine gas explosion accident based on Bayesian network model[J]. Cluster Computing,2019,22(1):1549-1557.

[24] LI Z,WANG T,GE W,et al. Risk analysis of Earth-Rock dam breach based on dynamic bayesian network[J]. Water,2019,11(11):2305.

[25] 张宇,高鸿磊. 病险水库大坝风险因素综合排序研究[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(6):65-68. (ZHANG Yu,GAO Honglei. Study on comprehensive ranking of dam risk factors of dangerous reservoir[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,2019,47(6):65-68. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 07 - 02 编辑:刘晓艳)

(上接第 12 页)

[20] 孙继松. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J]. 气象,2023,49(1):1-11. (SUN Jisong. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteorological Monthly,2023,49(1):1-11. (in Chinese))

[21] TIAN Fuyou,ZHENG Yongguang,ZHANG Tao,et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China[J]. Journal of Meteorological Research,2015,29(3):370-384.

[22] TAKEMI T. Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions [J]. Atmospheric Research,2006,82(1/2):37-54.

[23] 罗欣,张华龙,陈元昭,等. 广东雷暴大风天气环境参量的特征分析[J]. 广东气象,2023,45(3):13-17. (LUO Xin,ZHANG Hualong,CHEN Yuanzhao,et al. Analysis of the characteristics of environmental parameters with the weather of thunderstorm in Guangdong Province[J]. Guangdong Meteorology,2023,45(3):13-17. (in Chinese))

[24] 陈晓欣,俞小鼎,王秀明. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报,2022,80(1):67-81. (CHEN Xiaoxin,YU Xiaoding,WANG Xiuming. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution,environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems [J]. Acta Meteorologica Sinica,2022,80(1):67-81. (in Chinese))

[25] 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 Limiao,YU Xiaoding. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. Plateau Meteorology,2013,32(1):156-165. (in Chinese))

[26] 费海燕,王秀明,周小刚,等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象,2016,42(12):1513-1521. (FEI Haiyan,WANG Xiuming,ZHOU Xiaogang,et al. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteorological Monthly,2016,42(12):1513-1521. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 11 - 22 编辑:刘晓艳)