

# 一次华南飑线的观测分析和数值模拟研究\*

邹宛彤<sup>1,2</sup>, 李江南<sup>1,3</sup>, 潘心顺<sup>1,4</sup>, 曹正<sup>2</sup>

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 中国民用航空中南地区空中交通管理局, 广东 广州 510403
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
4. 广东省佛山市南海区气象局, 广东 佛山 528200

**摘要:** 利用多种气象观测资料和高分辨率的数值模拟结果, 对2020年5月11日华南地区一次飑线的初生、增强、成熟和衰亡等4个阶段的对流组织特征和模态的演变及机理进行了分析。结果表明: 该飑线发生于高空急流入口右侧的高空辐散区, 伴随着南支槽的加深东移, 低层暖湿平流以及地面的中尺度辐合线为其提供了有利的水汽、热力和抬升触发条件。初始阶段, 飑线呈断线型发展, 在较大的环境热力条件下具有中到强的对流有效位能和最大的对流抑制。成熟期形成拖尾层状云型飑线, 低层风切变和冷池强度逐渐达到平衡状态。在衰亡阶段, 飑线的组织模态发生转变, 其中环境热力条件是后向新生型对流单体发生的主要原因, 且低层不同的水汽和风切变条件也对模态的变异存在一定作用。在华南地区, 以断线型模态生成拖尾层状云型模态的飑线所需的对流有效位能更高, 且飑线的维持也需要更强的热力条件。对流有效位能、对流抑制能量、粗理查森数、风暴相对螺旋度等在对流单体形成的种类和组织模态方面均有一定的指示意义。

**关键词:** 华南飑线; 数值模拟; 组织模态; 后向新生型

**中图分类号:** P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)01-0024-10

## Observation and numerical simulation of a squall line over South China

ZOU Wantong<sup>1,2</sup>, LI Jiangnan<sup>1,3</sup>, PAN Xinshun<sup>1,4</sup>, CAO Zheng<sup>2</sup>

1. School of Atmospheric Sciences / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. CAAC Central South Air Traffic Control Meteorological Center, Guangzhou 510403, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
4. Nanhai Meteorological Bureau of Foshan, Foshan 528200, China

**Abstract:** Based on meteorological observation data and high-resolution numerical simulation results, the evolution and mechanism of convective organization and modes in a squall line over South China on May 11, 2020, were analyzed in four stages: nascent stage, enhanced stage, mature stage, and decay stage. The results show that the squall line occurred in the strong divergence zone of the upper jet stream. With the deepening and eastward moving of the south branch of the trough, the warm and wet advection in the low layer and mesoscale convergence line on the ground provided favorable conditions of water vapor, heat, and uplift triggering. In the nascent stage, the squall developed in a manner of Broken Lines with medium to strong convective available potential energy and maximum convective inhibi-

\* 收稿日期: 2022-01-06 录用日期: 2022-03-10 网络首发日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602701); 国家自然科学基金(42075064)

作者简介: 邹宛彤(1991年生),女;研究方向: 中尺度气象学; E-mail: zouwt6@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 李江南(1968年生),男;研究方向: 中尺度气象学; E-mail: essljin@mail.sysu.edu.cn

tion, in the environment of the maximum thermal condition. In the mature stage, a trailing stratiform squall was formed, and the low-level wind shear and cold pool intensity gradually reached a balanced state. During the decay stage, the phase mode of the squall line changed, mainly affected by the thermal condition caused Back Building mode convective cells, and also by different water vapor and wind shear conditions in the lower layer. In South China, it requires high convective effective potential energy to generate a squall line of stratiform cloud mode with trailing tail strong thermal conditions to maintain the squall line. The convective available potential energy, convective inhibition, Bulk Richardson number, and storm-relative helicity can indicate the type and structure mode of convective monomer formation.

**Key words:** South China squall line; numerical simulation; organizational mode; Back-Building mode

飚线是指呈线状、带状或准线状排列的中尺度对流复合系统(MCSs),其过境时通常伴随雷暴大风、短时强降水、冰雹或龙卷等强对流天气(Newton, 1950)。早期的飚线系统研究可追溯到20世纪中叶,受制于观测资料、计算机及数值模式的发展水平,主要集中在利用观测资料对飚线系统的天气尺度或中尺度的分析。根据动力机制不同,飚线可分为中纬度引导层型和热带传播型两类,其主要的区别在于热带传播型不具有引导层,并且需要分对流区和层状云区(Moncrieff & Miller, 1976; Moncrieff, 1978; Houze, 1977; Ogura & Liou, 1980)。20世纪80年代以后,随着雷达和卫星等遥感资料的增多、常规观测资料不断加密,飚线的结构特征、演变方式、飚中系统有了更深入、全面的认识(Johnson & Hamilton, 1988)。Bluestein & Jain(1985)总结了飚线形成分为断线型、后部新生型、碎块型和嵌入层状云型4类,不同类型发生在不同的粗理查森数和不同强度垂直风切变的环境下。Rasmussen & Rutledge(1993)指出雷达回波结构的演变分为初生、增强、成熟和消散4个阶段,而各个阶段的演变与运动学结构的变化密切相关。随着计算机能力的提高和数值模式的快速发展,飚线发生发展的动热力机制也有了明显的进展。Rotunno et al.(1988)提出飚线发展传播的“RKW理论”,认为近地面冷池和低层环境垂直风切变相互作用是飚线发展维持最为重要的热动力机制,并不断得到发展和完善(Weisman, 1992, 1993)。随着物理机制和结构演变的研究不断加深,对两个领域的研究均有明显进展。Parker & Johnson(2000)将飚线演变过程分为了拖尾层云型、前部层云型和平行层云型3类。

我国早期对飚线的研究主要采用了统计分析

方法。比如,丁一汇等(1992)通过对18条飚线的统计分析,将我国飚线发展的天气形势分为槽后型、槽前型、高后型和台风倒槽或东风波型4种。随着研究的不断深入,后期对我国不同地区的飚线进行了更细致的特征统计研究,如Meng et al.(2013)对我国东部飚线进行了统计分析,将我国飚线主要消散的方式分为了反向断线型、收缩型及反向碎块型,填补了飚线演变过程消亡阶段的演变方式分类研究的空白。方翀等(2017)对2012—2015年华南20次典型飚线的统计研究发现,华南地区西风带飚线出现在春季和初夏,并指出雷暴高压的持续加强、扩大及相应冷池的扩大导致西风带飚线的不断加强发展。在中尺度结构特征和形态学特征方面,国内也有大量研究成果。如陈涛等(2013)通过对华北飚线个例的研究,发现冷池边界扩展速度与低层风垂直切变大致相当。李娜等(2013)研究分析华东地区的一次后向新生型飚线个例,发现对流线上的后向新生是动力和热力过程共同作用的结果。张哲等(2018)通过对辽东湾的一次飚线个例的多尺度研究,发现一条飚线在不同区域的组织形态发展演变受局地环境条件的影响。李文娟等(2021)在江南-华南一次强飚线研究中,发现飚线后部暖区的加强持续表现为飚线弓状形态的形成并维持。随着高分辨率数值模式的发展,关于飚线对流模态方面的研究主要集中在成熟阶段的模态分析或成熟阶段的模态变异(康兆平等, 2017; 孙虎林等, 2011),但利用高分辨率数值模式结果对华南地区的飚线过程中各个阶段的模态分析及衰亡阶段的模态转变研究还较少,并将中尺度动热力机制的发展和各阶段模态结合的全面分析更少。

2020年5月11日午后至夜间,广东发生一次

强飊线天气。该飊线在广东北部生成,随后逐渐东移南压,带来了局地强降水和闪电活动,此次飊线过程对机场运营造成了很大影响,广州白云国际机场约 1 h、深圳宝安国际机场约 2 h 无飞机起降,共有超 30 架次航班备降,严重影响了当日广深两机场的航班正常率。本文利用地面常规观测资料、广东省雷达拼图、广州 S 波段雷达和 FNL 水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的再分析资料分析,分析了此次飊线不同阶段的演变过程,同时利用中尺度 WRF 模式输出的高分辨率时空资料,分析了其不同阶段特征及对流组织过程的变化机制。

## 1 飊线天气过程观测分析

### 1.1 飊线发生发展的背景条件

利用 2020 年 5 月 11 日 14:00(北京时,下同)的 FNL 再分析资料分析飊线发生发展的天气形势。200hPa 副热带西风急流位于  $35^\circ\text{N}$  附近,广东处于其入口右侧的辐散区(图 1a)。500 hPa 副热带高压脊线处于  $20^\circ\text{N}$  附近呈带状控制华南沿海及中南半岛,东亚大槽处于建立和加深阶段,青藏高原南侧的南支槽加深,两广北部槽前西南气流较强,风速达  $12\sim 20\text{ m/s}$ (图 1b)。850 hPa 冷式切变线位

于湖南-贵州中部,广西北部 and 广东西部及珠三角南部处于 850 hPa 的水汽通量辐合的大值区,环境温度普遍均在  $17^\circ\text{C}$  以上,前侧的水汽和不稳定能量都有利于强对流天气发生和发展(图 1c)。此外,地面两广交接处存在明显的地面辐合线,且对流有效位能均大于  $1600\text{ J/kg}$ (图 1d)。对流有效位能表征大气静力不稳定程度,与  $T\text{-log } p$  图的正面积相对应,是被抬升气块的温湿特征和环境大气的温湿分布综合作用的结果(郑永光等, 2017)。此次飊线发生于高空急流入口,伴随南支槽加深,低层暖湿气流以及地面辐合线为其提供有利的水汽、热力和抬升触发条件。

### 1.2 飊线生成至成熟阶段的雷达回波特征

广东省雷达组合反射率较好地反映了飊线发生发展全过程的 4 个阶段, 16:00 广东和广西交接的块状对流逐渐发展并有连接成线的趋势(图 2a),此为飊线初生阶段。18:00 广东河源-清远-肇庆-广西梧州的带状回波逐渐发展且整体向南推进,单体排列相对松散,断线型模态明显,此时飊线处于增强阶段(图 2b)。19:30 广东境内的飊线在广州-佛山处(图 2c),对流单体的结构性相对密实,最大反射率达  $55\text{ dBZ}$ ,但粤东和粤西相对结构较松散,最大反射率也偏弱,此时为飊线成熟阶段。

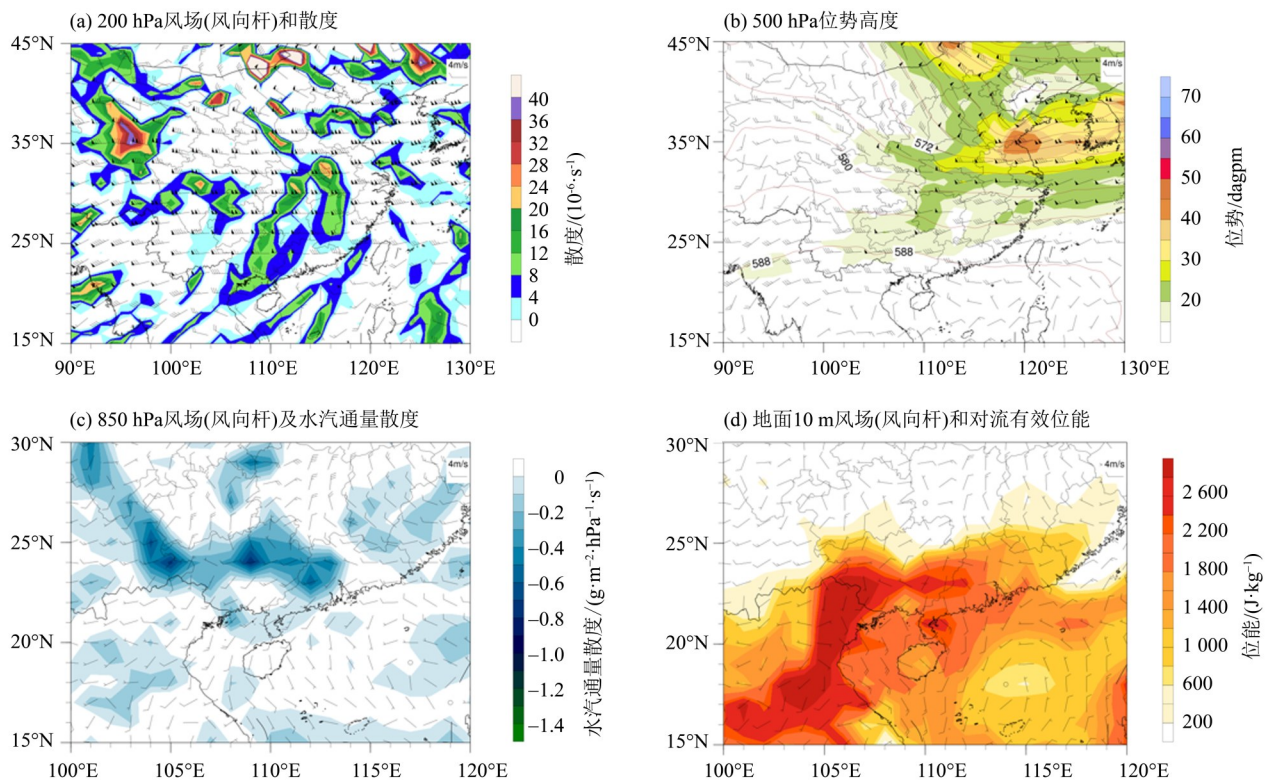


图 1 2020 年 5 月 11 日 14:00 天气形势

Fig. 1 The weather situation at 14:00, May 11, 2020

飊线水平尺度达 500~600 km, 为中- $\alpha$  尺度 MCS。在引导气流的作用下, 飊线向东南方向移动, 强对流云团位于飊线前部, 最大雷达反射率 45 dBZ, 飊线后部是大面积的层状云区等特征均表现为拖尾层状云型飊线。5月11日 20:00 后, 飊线的整体开始逐渐断裂, 全面性衰减, 进入衰亡期。23:00,

飊线以反向碎块型衰亡减弱为 3 段 MCS(图 2d)。东段位于粤东, 整体衰亡; 中段位于珠江口附近, 其对流单体传播方式转为后部新生型, 具有弓状回波结构; 西段位于粤西, MCS 与层状云的位置近乎平行, 其组织模态与东段特征一致, 均变异为平行层状云型。

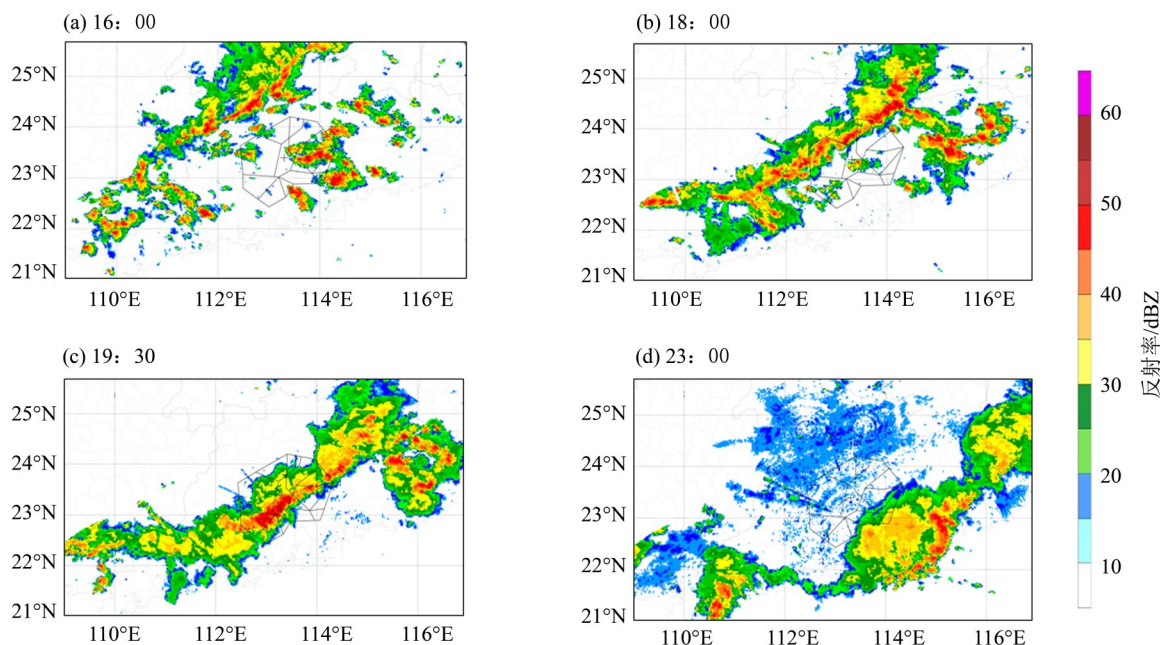


图 2 2020 年 5 月 11 日广东省天气雷达组合反射率拼图

Fig. 2 The composite reflectivity map of weather radar in Guangdong Province on May 11, 2020

## 2 模拟试验设计与结果检验

模拟试验利用 WRF 模式 4.1.2 版本, Lambert 地图投影, 并使用三重双向嵌套网格区域, 分辨率分别为 12、4 和 1.33 km(图 3)。3 个模拟区域均采用 WSM6 云微物理参数化方案、YSU 行星边界层方案及 RRTM 长波和 Dudhia 短波辐射参数化

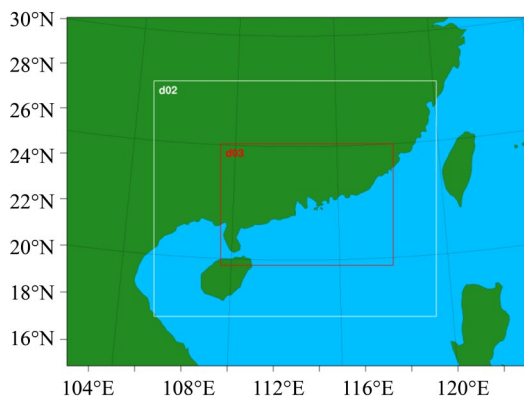


图 3 WRF 模式模拟范围

Fig. 3 Simulation range of WRF model

方案。在模拟区域 d01 和 d02 中, 采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案, 而区域 d03 不采用积云对流参数化方案。初始场资料选用 NCEP 的 6 h 一次、 $1^\circ \times 1^\circ$  分辨率的再分析资料。其中, d01 模拟时间从 2020 年 5 月 11 日 08:00~12 日 08:00, d02 和 d03 模拟时间均从 2020 年 5 月 11 日 14:00~12 日 00:00。

为了更全面展现飊线模拟的时空结果, 本文利用分辨率为 4 km 的数值模拟结果进行数值模拟结果与实况的对比检验。数值模拟结果中的雷达组合反射率是基于雨、雪和霰的混合比例等效雷达反射率因子, 其演变基本重现了此次飊线各阶段的特征, 模拟结果与实况相似(图 4)。初生时(16:00), 辐合线前侧的分散对流的触发特征和纬向尺度均与实况相似(图 4a)。增强阶段(18:00), 两广中部的飊线形态均有较好地重现(图 4b)。成熟阶段(20:00)珠三角北部区域结构密实, 最大雷达反射率为 55 dBZ, 与实况的峰值一致。最强的区域也处于 23°N 附近, 与实际情况符合。同时, 粤东和粤西的对流单体也能与实况相对应, 总体

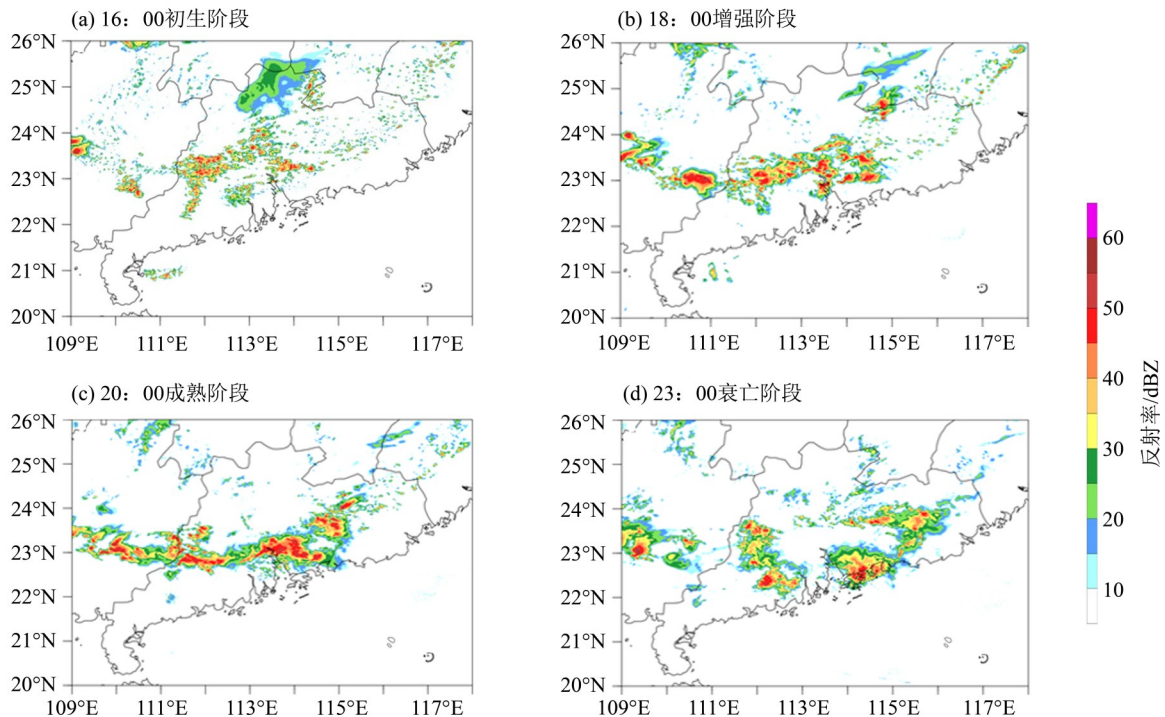


图4 2020年5月11日分辨率为4 km的WRF数值模拟的雷达组合反射率

Fig. 4 Radar composite reflectivity of the WRF numerical simulation with a resolution of 4 km on May 11, 2020

上模拟的结果再现了飊线的宽度、飊线移动方向的后侧宽广的层状云以及对流单体紧密的组织形态(图4c)。23:00飊线进入衰亡期(图4d),整条飊线断裂分成3个中- $\beta$ 尺度的MCS,分别位于粤东、珠江口、粤西阳江地区。东段和中段的MCS位置和变化趋势均与实况一致,近飊线西段MCS模拟的位置比实况略偏东。总体上,5月11日飊线各个阶段的数值模拟结果与实况相似。

### 3 飊线不同阶段的热动力环境场

利用WRF数值模拟结果对飊线的初生、增强、成熟和衰亡共4个阶段进行全面分析。为了全面展现飊线组织整体的形态,对飊线对流组织形态和动力条件的分析选取分辨率为4 km的WRF数值模拟结果进行资料分析。而热力条件更依赖局地的层结条件,因此选取分辨率为1.33 km的WRF数值模拟结果构建由实况站点及其同一经纬度的格点及其周边最近的8个点的物理量构成的9点平均场,以获得更精细的探空来分析层结条件。

#### 3.1 初生和增强阶段

2020年5月11日16:00,飊线在广东中北部地区清远-广州-肇庆-广西梧州等地(23°~24°N, 110°~115°E)的地面辐合线上发生发展。飊线的范围区域基本由分散的块状对流组成,随着时间推

移,块状对流逐渐发展,结构逐渐紧密,最终形成了飊线(图5a)。广东中部冷池逐渐发展,在飊线前侧的惠州和飊线范围内的肇庆处形成了最强的冷池。但冷池扰动位温最大值约为-3 K,而飊线前侧的扰动位温增加,约为7.5 K,冷池效应相对于环境场偏弱(图5b)。图5c是图5a的黑实线所做的垂直剖面图,此时对流单体中的上升气流呈倾斜形态,45 dBZ雷达反射率回波上升的垂直高度达到了3~6 km。图5d是图5b黑圆点位置的模拟探空,对流有效位能达3 523 J/kg,抬升凝结高度为897 hPa,该数值明显高于东部以断线型生成的飊线统计结果。0~6 km垂直风切变分别为16 m/s,速度矢端图中风矢量方向旋转角度均大于90°,风切变属于中到强等级,有利于形成有组织的对流风暴(陈明轩和王迎春,2012)。

5月11日18:00,增强阶段时飊线的整体形态已基本确定(图6a),长度为500~600 km,宽度为20~40 km的中- $\alpha$ 尺度飊线锥形已经形成。在飊线中发展较强MCS后侧的冷池明显加强,扰动位温达-6 K(图6b)。从雷达垂直剖面分布可发现,在增强阶段,单体垂直气流以垂直上升气流为主(图6c箭头所示)。在对流单体中,整体以上升气流为主,对流单体发展到10 km以上呈直立状态。图6b黑点所构成的模拟探空显示,其单点的0~6 km垂

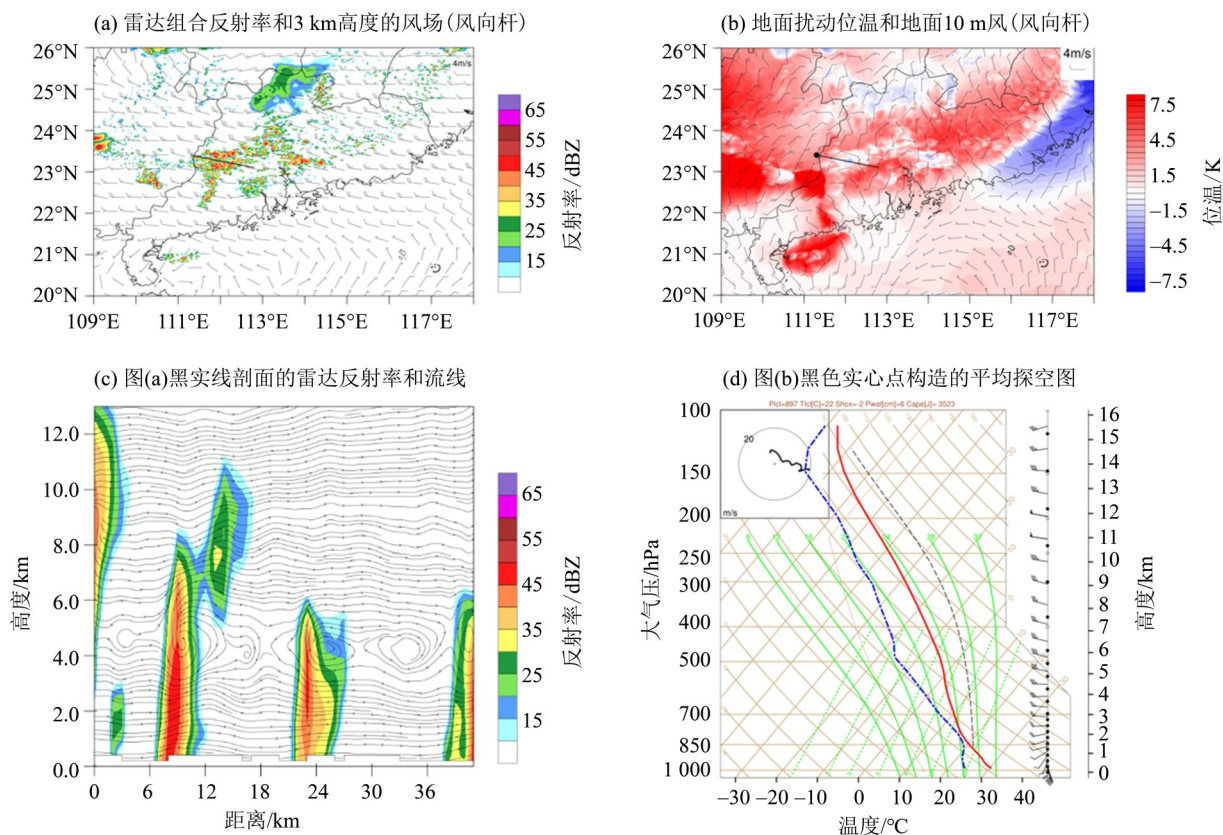


图 5 2020年5月11日16:00初始阶段数值模拟结果

Fig. 5 WRF numerical simulation results of nascent stage at 16:00, May 11, 2020

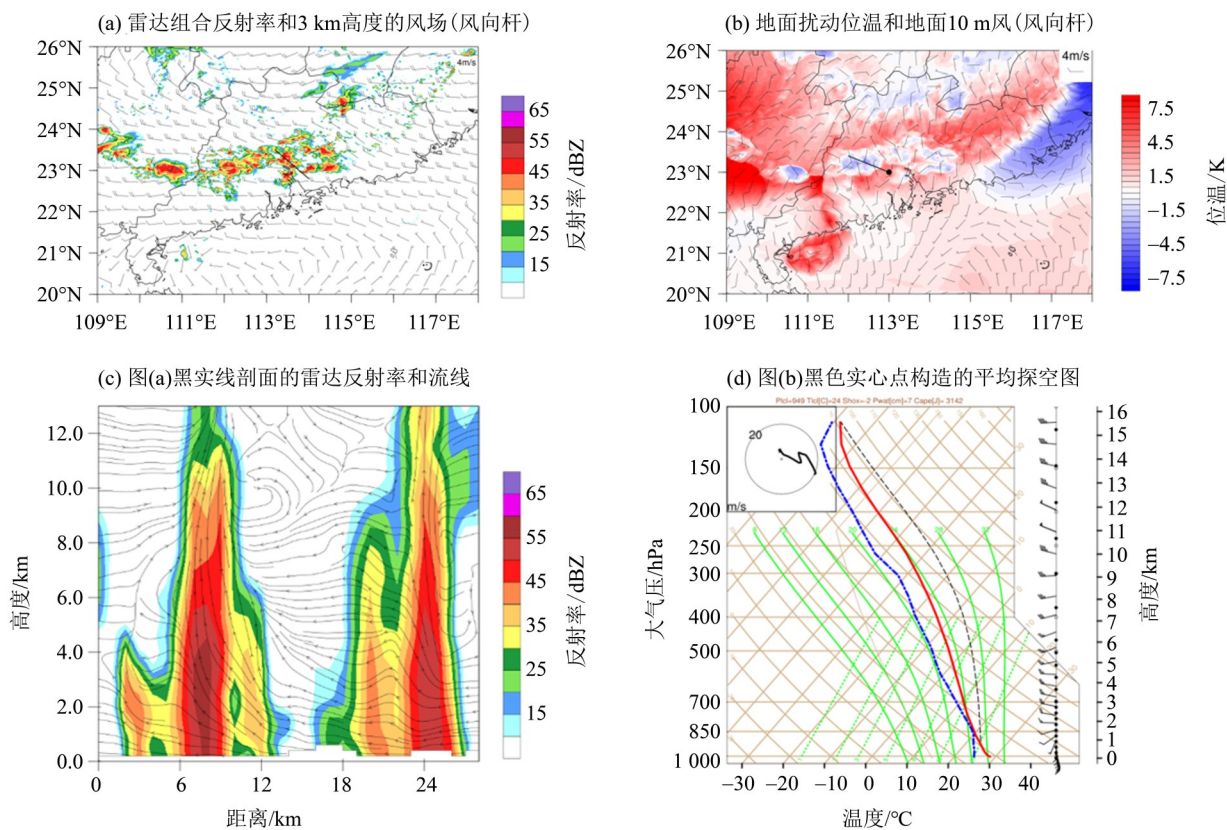


图 6 2020年5月11日18:00增强阶段数值模拟结果

Fig. 6 WRF numerical simulation results of enhanced stage at 18:00, May 11, 2020

直风切变(图 6d)约为 12 m/s, 速度矢端切变角度超过 120°, 中等强度的垂直风切变对飊线发展和维持具有正面的作用(陈明轩和王迎春, 2012)。

### 3.2 成熟和衰亡阶段

20:00, 飊线发展加强进入成熟阶段, 其水平尺度已经达到 500~600 km(图 7a), 冷池的范围和强度又明显增大(图 7b), 从雷达反射率垂直剖面图(图 7c)可以看到, 飊线前沿为强烈的对流区, 雷达反射率梯度较大, 而后侧是宽广的大范围层状云区域, 风暴顶高度已经发展到了 12 km 以上, 且飊线单体的水平尺度明显增大。在飊线成熟阶段, 单体内有两支有组织的气流: 一支为飊线前侧指向飊线后侧上升气流, 主要处于 3 km 以上; 另一支则从单体后侧开始, 近 3 km 高度以下, 略有下降(图 7c 流线)。而在飊线前侧(图 7a 黑点区域)的平均探空图中(图 7d), 0~6 km 垂直风切变为 8 m/s, 风切变略有减弱, 但 0~2 km 垂直风切变也为 8 m/s, 速度矢端切变角度超过 90°, 低层垂直风切变加强是成熟的强对流天气维持的有利条件(陈明轩和王迎春, 2012)。

飊线成熟之后, 整体进入衰亡阶段, WRF 模式的数值模拟结果表明, 到 23:00, 原本中- $\alpha$  尺

度, 水平尺度长达 500 km 的飊线呈反向碎块型消散(图 8a)。在图 8b 中, 对比 A、B 两个区域可以发现, MCS\_A 南侧为南海北部吹向陆面的南风, 岸上的扰动位温为负, 但海上的扰动位温为正。虽然区域 A 的对流有效位能仅为 473 J/kg(图 8c), 但持续南风带来暖湿气流和维持不稳定条件, 地面增温增湿, 为对流发展提供热力条件。而区域 B 中, 地面扰动位温均为负变温(图 8b), 且 0~2 km 的低层风切变减弱, 并表现为冷平流所体现的逆时针旋转, 地面冷空气入侵, 对流发展条件被破坏, 冷池的强度大于风切变, MCS\_B 快速衰亡。

## 4 飊线各阶段组织模态

### 4.1 初生到成熟的模态稳定期特征

本次飊线的形态最初为断线型并逐渐增强, 发展至成熟时为拖尾型层状云型飊线。根据分辨率 4 km 的模拟结果, 在 5 月 11 日 16:00, 广东省处于高对流有效位能的环境下(图 9a), 飊线前侧及西侧较大的对流有效位能值(1 400~2 600 J/kg), 且具有大于 40 J/kg 的对流抑制(图 9b), 与断线型和拖尾层状云型的模态飊线的条件吻合(Bluestein & Jain, 1985; Parker & Johnson, 2000), 但都高

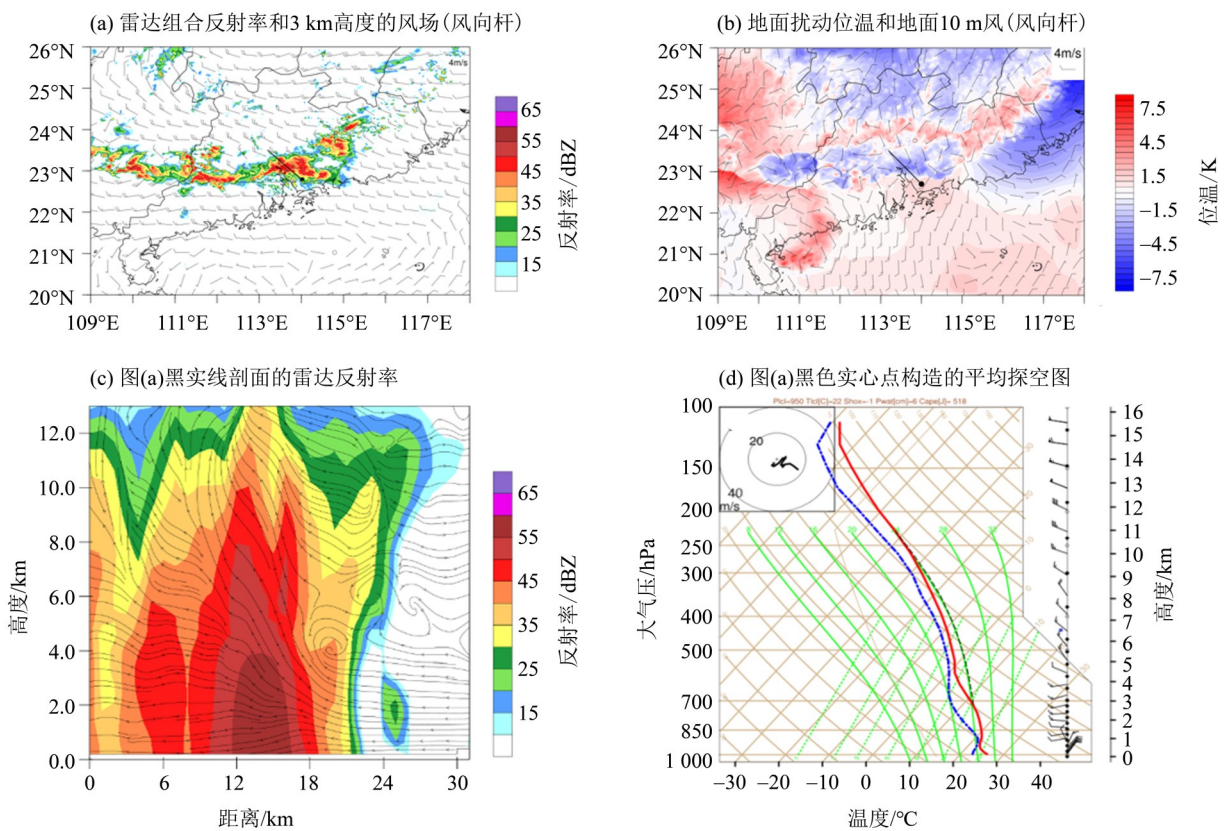


图 7 2020 年 5 月 11 日 20:00 成熟阶段数值模拟结果

Fig.7 WRF numerical simulation results of mature stage at 20:00 on May 11, 2020

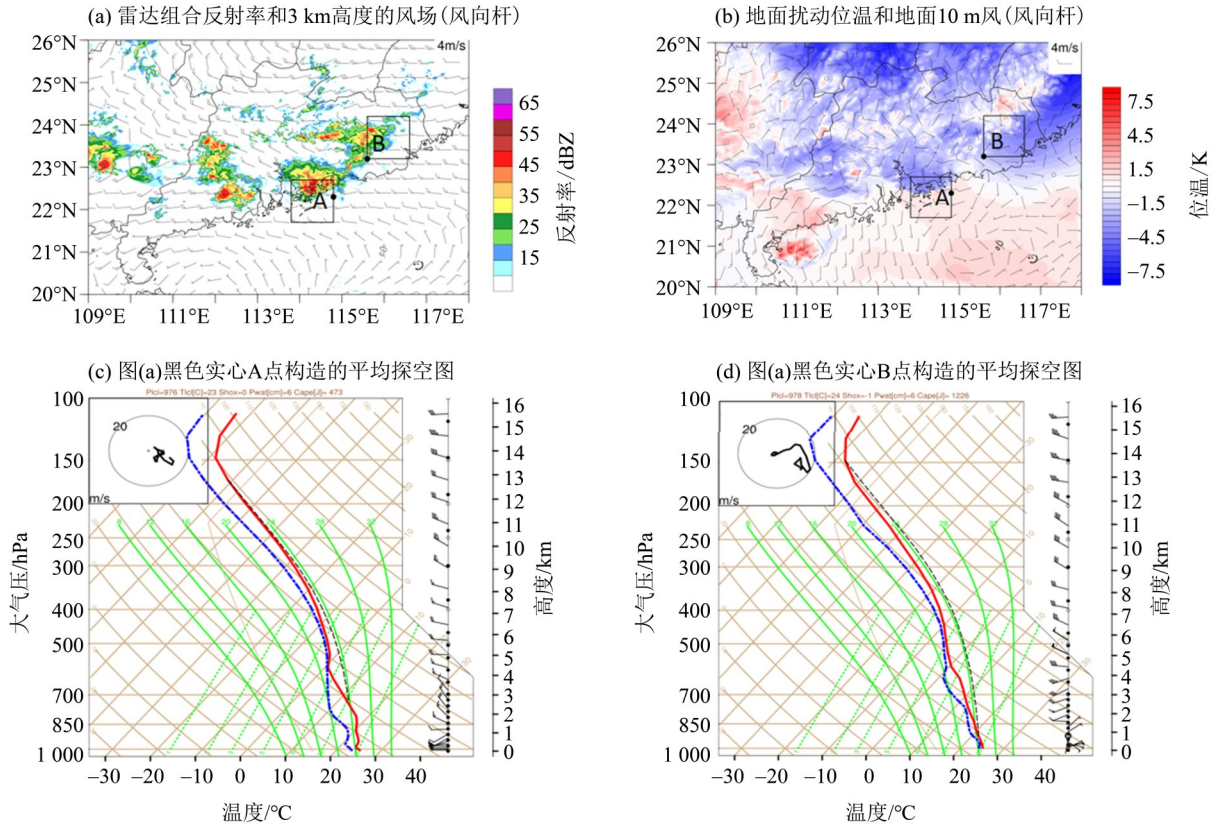


图 8 2020年5月11日23:00 衰亡阶段数值模拟结果

Fig.8 WRF numerical simulation results of mature stage at 20:00 on May 11, 2020

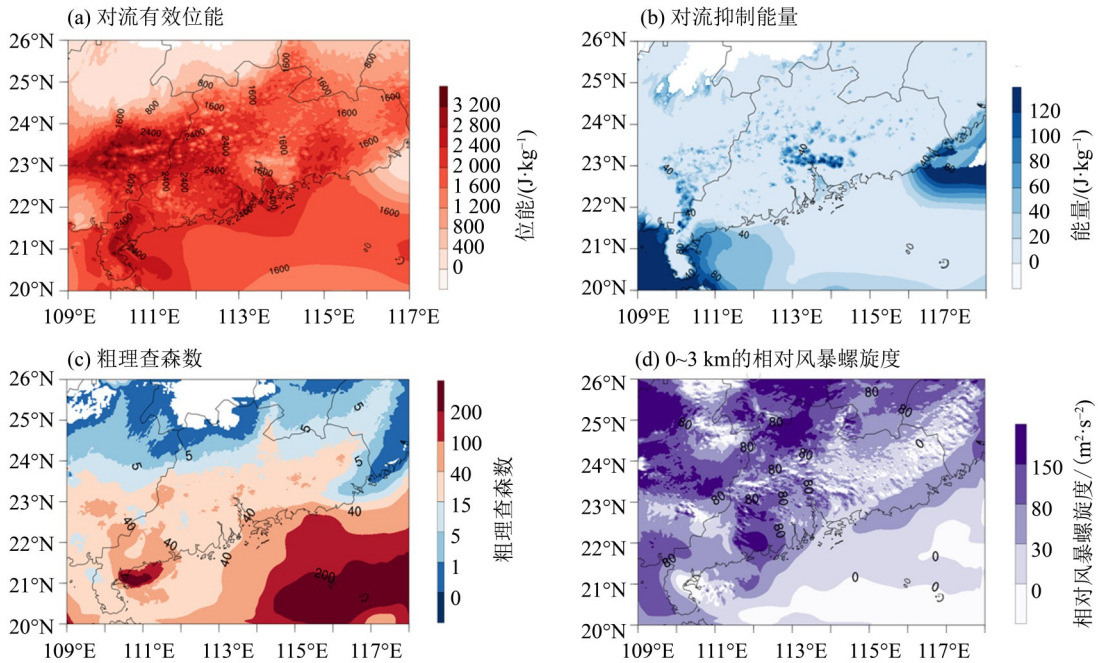


图 9 2020年5月11日16:00 WRF数值模拟物理量结果

Fig. 9 WRF numerical simulation physical quantity results at 16:00 on May 11, 2020

于东部飊线这两种模态的对流有效位能范围 (Meng et al., 2013)。珠江口北部粤西与两广交界处粗理查森数大于40的区域比较分散(图9c), 但整体呈纬向分布且与飊线的纬向分布基本一致,

因此此次飊线中整体以多单体风暴为主。广东中部的0~3 km相对风暴螺旋度为30~80 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>(图9d), 中等强度的风暴相对螺旋度有利于断线型飊线生成模态的形成。而螺旋度高值中心位于飊线移动

方向前方的西南侧及阳江一带, 大于  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

#### 4.2 模态转变期特征

飊线于5月11日20:00进入成熟期, 其组织形态的强度达到极值, 之后进入衰亡期。利用分辨率为4 km的WRF数值模拟结果分析在21:00飊线从成熟进入衰亡期的物理量变化。珠江口沿岸( $113^\circ\sim 116^\circ\text{E}$ )的对流有效位能(图10a)仍较大, 最大具有2400 J/kg以上, 这也有利于飊线南段在衰亡阶段加强, 形成后向新生型MCS的有利条件(李娜等, 2013), 这与Meng et al.(2013)对东部飊线的统计结果相符合。飊线东、西段的对流有效位能为800~1600 J/kg, 整个飊线的前侧对流抑制基本均小于20 J/kg(图10b)。与我国东部地区的飊线(Meng et al., 2013)相比, 华南飊线维持对热力条件要求更高。粗理查森数(图10c)在珠江口为

40~100, 更倾向于多单体风暴; 粤东地区大部分为5~15, 不利于对流单体风暴的发展; 但在粤西地区, 粗理查森数为15~40, 处于有利于对流单体的发展的区域。风暴相对螺旋度(图10d)的结论类似, 珠江口均大于  $30 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 珠江口以东是其分布的大值区, 最高值大于  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ; 粤东也不大, 但并不具备珠江口的大值区, 偏小的风暴相对螺旋度不利于风暴的维持; 粤西阳江地区整体的风暴相对螺旋度大于80, 其大于  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的区域也较珠江口大。较强的低层垂直风切变是粤西MCS没有迅速减弱继续维持发展的重要原因。而中部和西部MCS分别在单体新生的组织模态和对流与层状云结构的组织模态上有变异, 这是其所在环境动力、热力条件共同作用决定的。

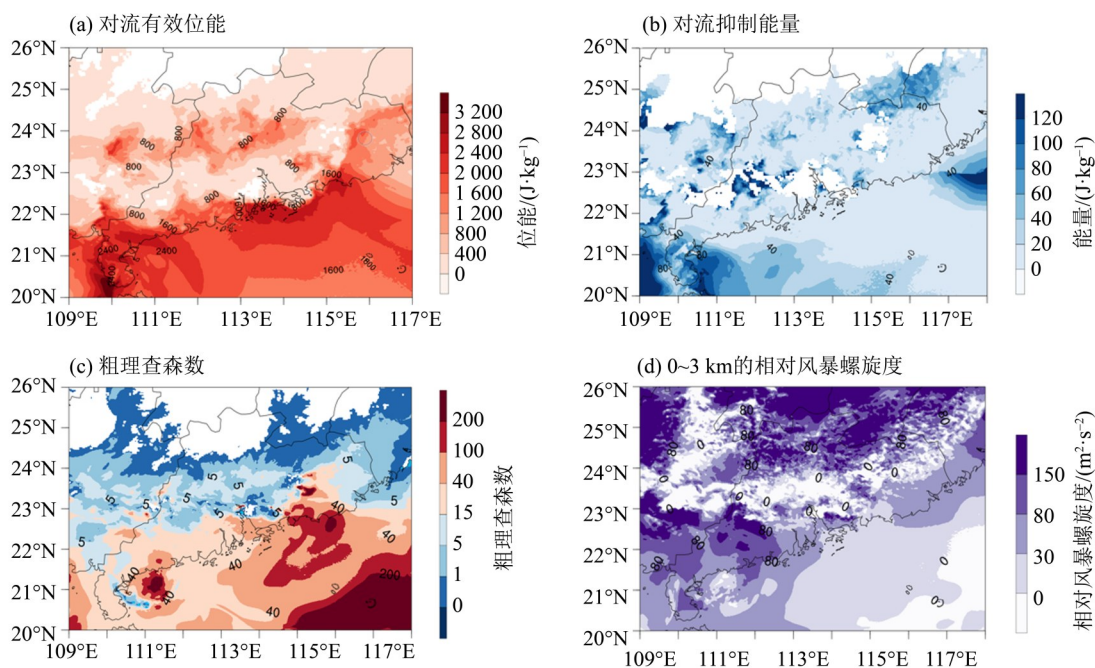


图10 2020年5月11日21:00WRF数值模拟物理量结果

Fig. 10 WRF numerical simulation physical quantity results at 21:00, May 11, 2020

## 5 结论

本文利用常规观测资料、多普勒雷达资料及高分辨率数值模拟结果, 对2020年5月11日的华南一次飊线过程的环境背景场和对流模态特征进行了分析。重点研究了飊线的初生、增强、成熟和衰亡共4个阶段的组织模态和对流组织特征的演变机理, 并得出以下主要结论:

1) 飊线发生在200 hPa急流入口右侧的高层强辐散区、500 hPa南支槽前强西南风区、850 hPa切

变线南侧的低层暖湿平流区中水汽辐合散度最大的区域, 及地面辐合线上发生发展。

2) 在初生过程中, 飊线以断线型方式对流单体逐个发展, 对流单体内主要是上升气流, 且垂直方向风向呈顺时针旋转, 风向切变大, 风速切变中等, 最初冷池强度较弱, 飊线的发展受到环境热力条件的影响。

3) 飊线发展至成熟阶段为拖尾型层状云型飊线, 低层切变和冷池强度逐渐达到平衡状态, 低层大气处于最强的垂直抬升状态, 飊线回波直立。

通过诊断发现,以断线型的飊线形成的拖尾层状云型飊线发生在有中到强的对流有效位能、较大的对流抑制的较好的热力环境条件下。

4) 飊线以反向碎块型衰亡,其对流组织模式也随之进入变异期。飊线衰亡是分为3段,衰亡过程中东西两端的对流组织形态由拖尾层状云型转变为平行层状云型。东段快速减弱,中段减弱过程中受地面辐合线和热力环境共同作用,衰亡速度相对较慢,其对流单体生成发展的形式转变为后向新生型,呈弓状并仍维持拖尾层状云型的组织模式。而西段在减弱过程中,线状组织形式转化为块状组织形式。

#### 参考文献:

- 陈明轩,王迎春,2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飊线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报,70(3):371-386.
- 陈涛,代刊,张芳华,2013. 一次华北飊线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J]. 气象,39(8):945-954.
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1992. 我国飊线发生条件的研究[J]. 大气科学,6(1):18-28.
- 方翀,林隐静,曹艳察,等,2017. 华南地区西风带飊线和台风飊线环境场特征统计对比分析[J]. 热带气象学报,33(6):965-974.
- 康兆萍,林永辉,2017. 华南一次飊线过程线状对流模式变异机理研究[J]. 大气科学学报,40(5):631-640.
- 李娜,冉令坤,高守亭,2013. 华东地区一次飊线过程的数值模拟与诊断分析[J]. 大气科学,37(3):595-608.
- 李文娟,俞小鼎,滕代高,等,2021. 中国江南—华南地区一次强飊线天气过程位涡诊断分析[J]. 气象与环境学报,37(6):1-10.
- 孙虎林,罗亚丽,张人禾,等,2011. 2009年6月3~4日黄淮地区强飊线成熟阶段特征分析[J]. 大气科学,35(1):105-120.
- 张哲,周玉淑,高守亭,2018. 一次辽东湾飊线过程的观测与数值模拟分析[J]. 大气科学,42(5):1157-1174.
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,43(6):641-652.
- BLUESTEIN H B, JAIN M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. J Atmos Sci, 42:1711-1732.
- HOUZE R A Jr, 1977. Structure and dynamics of a tropical squall-line system[J]. Mon Wea Rev, 105:1540-1567.
- JOHNSON R H, HAMILTON P J, 1988. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense mid-latitude squall line[J]. Mon Wea Rev, 116 (7):1444-1473.
- MENG Z Y, YAN D C, ZHANG Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1629-1647.
- MONCRIEFF M W, 1978. The dynamical structure of two-dimensional steady convection in constant vertical shear[J]. Quart J Royal Meteorol Soc, 104(441):543-568.
- MONCRIEFF M W, MILLER M J. 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall-lines[J]. Quart J Royal Meteorol Soc, 102(432):373-397.
- NEWTON C W, 1950. Structure and mechanism of the prefrontal squall line: A case study[J]. J Atmos Sci, 7(3):210-222.
- OGURA Y, LIOU M L, 1980. The structure of a midlatitude squall line: A case study[J]. J Atmos Sci, 37(3):553-567.
- PARKER M D, JOHNSON R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3436.
- RASMUSSEN E N, RUTLEDGE S A, 1993. Evolution of quasi-two-dimensional squall lines. Part I: Kinematic and reflectivity structure [J]. J Atmos Sci, 50(16):2584-2606.
- ROTUNNO R, KLEMP J B, WEISMAN M L, 1988. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. J Atmos Sci, 45(3):463-485.
- WEISMAN M L, 1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. J Atmos Sci, 49(19):1826-1847.
- WEISMAN M L, 1993. The genesis of severe long-lived bow echoes[J]. J Atmos Sci, 50(4):645-670.