

蒋超,陈传雷,张凯,等,2024. 辽宁地区飊线特征和形成条件[J]. 气象,50(7):791-803. Jiang C, Chen C L, Zhang K, et al, 2024. Squall line characteristics and formation conditions in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 50(7):791-803(in Chinese).

辽宁地区飊线特征和形成条件*

蒋 超¹ 陈传雷¹ 张 凯² 班伟龙³ 杨 磊¹ 曹世腾¹ 陈 宇¹

1 辽宁省气象灾害监测预警中心,沈阳 110166

2 辽宁省气象服务中心,沈阳 110166

3 沈阳市气象局,沈阳 110180

提 要:应用 2015—2020 年 5—9 月辽宁地区的雷达组合反射率拼图产品,在制定飊线识别标准的基础上,识别出 36 次飊线过程,在总结飊线时空分布等特征的基础上,得到了不同组织特征下的辽宁飊线环境特征条件。结果表明,辽宁西北部及赤峰市区至敖汉旗一带是影响辽宁地区飊线形成频率最大的区域,其次为渤海西部到渤海海峡海面,形成频率最小的区域为河北东部的唐山、秦皇岛沿山一线。绝大多数的飊线过程出现在 6—8 月,5 月出现的最少。飊线主要形成于 12—21 时,而 14—17 时为出现飊线的集中时段。飊线的长度介于 114~273 km,最大反射率为 65 dBz,平均生命史为 3.2 h,平均移动速度为 $59.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。辽宁地区的飊线过程 33.3%为断线型,19.4%为后部生成型,36.1%为碎块型,11.1%为层云嵌入型。主要组织形式是层状云尾随型(TS)、平行层状云型(PS)及层状云超前型(LS),LS 出现次数较少。55.6%的飊线以反转断线形式消散,8.3%的以收缩线型消散,36.1%的以颠倒破碎面型形式消散。辽宁地区飊线形成环流形势中冷涡前部型最常见,其次为低槽前部型;比较特有的飊线形成环流形势为冷涡后部型,占比为 16.7%。每个环流型的对流有效位能和下沉对流有效位能都呈“双 1000”的特征,不同的环流型在水汽、层结不稳定、垂直风切变等物理量的特征都各有不同。

关键词: 飊线,统计分析,形成条件

中图分类号: P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.033002

Squall Line Characteristics and Formation Conditions in Liaoning Province

JIANG Chao¹ CHEN Chuanlei¹ ZHANG Kai² BAN Weilong³

YANG Lei¹ CAO Shiteng¹ CHEN Yu¹

1 Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Center, Shenyang 110166

2 Liaoning Meteorological Service Center, Shenyang 110166

3 Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110180

Abstract: According to the squall line recognition standards, 36 squall line processes are identified based on the radar composite reflectivity mosaic product in Liaoning Province from May to September 2015—2020. The spatio-temporal distribution of squall line characteristics and several different formation environment characteristics are summarized. The results show that the areas with the maximum frequency of squall line formation in Liaoning Province are from northwestern Liaoning and Chifeng City to Aohan Banner, followed by the west of Bohai Sea to the sea surface of Bohai Strait. The areas with the lowest frequency of squall line formation are the mountain line of Tangshan and Qinhuangdao in the east of Hebei Province. The vast majorities of squall line processes occur in June to August, while the least squall line processes

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-026)、辽宁省气象局年度科研项目(202202、202301)共同资助

2023 年 6 月 20 日收稿; 2024 年 1 月 28 日收修定稿

第一作者:蒋超,主要从事短时天气预报预警研究. E-mail:522698531@qq.com

通讯作者:张凯,主要从事中短期天气预报研究. E-mail:13700009300@139.com

occur in May. Squall lines are mainly formed from 12:00 BT to 21:00 BT, in which the period from 14:00 BT to 17:00 BT is the concentration period of squall lines. The coverage of squall line varies from 114 km to 273 km, with maximum reflectivity 65 dBz, average life cycle 3.2 hours and the average moving speed $59.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). 33.3% of squall line processes in Liaoning Province are of the fault line type, 19.4% are of the rear extension type, 36.1% are of the fragment type, and 11.1% are the stratiform cloud embedding type. The main organizational form is stratiform cloud trailing type (TS), while the parallel stratiform cloud type (PS) and stratiform cloud leading type (LS) occur less. 55.6% of squall lines dissipate in the form of reverse broken lines, 8.3% dissipate in the form of contraction lines, and 36.1% dissipate in the form of reverse fault zone. In terms of the circulation situation of squall line formation in Liaoning, the cold vortex front type is the most common, followed by the low trough front type. The special circulation situation of squall line formation in Liaoning is the cold vortex rear type, accounting for 16.7%. The convective available potential energy and the sink convective available potential energy of each circulation pattern show the characteristics of “double 1000”. Different circulation patterns have different characteristics in water vapor supply, stratification instability, vertical wind shear and other physical quantities.

Key words: squall line, statistical analysis, formation condition

引 言

飊线是线状或准线状的中尺度对流系统(MCS),它可以造成强降雨、灾害性大风、冰雹,有时候还会形成龙卷。一条飊线的定义为“一连串活跃的雷暴,或连续或断开,由于雷暴的存在造成区域性的连续降水(Glickman, 2000)”。通常在雷达上飊线位于一条对流雨带的前缘,长度大约几百千米,宽大约几十千米,后面跟随有一大片的层状云降水。在对流区域接近地面常常有一个明显的冷池,且冷池的前缘有阵风锋(丁一汇等, 1982; 俞小鼎等, 2006)。强烈的上升气流出现在冷池的前面而对流区域有下沉气流,在层状云区域则是中等强度的上升和下沉气流(孙继松等, 2014)。当阵风锋过境时,地面气压、气温和风等出现异常变化,这个区域易于出现灾害性天气(漆梁波和陈永林, 2004; 俞小鼎等, 2006; 农孟松等, 2014)。强的地面大风部分与在阵风锋前部的低气压和风暴冷池所在地的高压之间的强地面气压梯度相关(陈涛等, 2013; 盛杰等, 2019)。飊线常常生成于中等到强的不稳定和低空垂直风切变的环境中(郑媛媛等, 2014; 张建军等, 2016; 王丹妮等, 2020; 雷蕾等, 2021)。飊线强度能否维持取决于冷池斜压形成的水平涡度和垂直风切变反向旋转造成的水平涡度(Rotunno et al, 1988; 刘莲等,

2015; 孙晓蕾等, 2020)。在不同的环境条件下,飊线常常显示不同的特点(Meng and Zhang, 2012)。目前对 MCS 的预报,尤其是飊线预报仍然非常困难,原因在于其为发展迅速、移动快和强烈的灾害性天气。若是对飊线的时空分布、形态和组织环境有较好的理解,则可以对预报员的短时效预报做出有效的帮助。

在美国,飊线常常造成严重的灾害性天气,而且详细记录了分布情况。飊线在中国也常常造成灾害性天气,比如 2009 年 6 月在河南出现的一条飊线,形成了 $29.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,并造成了 27 人死亡,近年来中国雷暴大风及飊线大风极端性愈发明显,2019—2022 年中国中东部发生多次极端对流大风天气,2022 年辽宁沈阳甚至出现超过 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极端对流大风。前人对东北地区强对流大风和龙卷做了大量研究(杨珊珊等, 2016; 杨磊和郑永光, 2023; 袁潮等, 2021; 2022; 2023; 白华等, 2023),然而对辽宁地区的飊线气候统计特征,及其与中国东部其他地区的异同点等研究较少。辽宁省位于中国东北地区的南部,南邻渤海及黄海,东西为山地和丘陵,中部为辽河平原,常受不同性质系统影响,气象灾害发生频繁。近几年辽宁地区受飊线过程影响次数较多,带来的短时大风、短时强降水和冰雹对人民群众的生命财产危害极大。

针对选取的 2015—2020 年 5—9 月影响辽宁地

区的飊线过程,对飊线形成、消亡的时空分布特征、飊线的几种不同结构特征、形成飊线环境特征条件等进行分析,可以对预报员的短时效预报做出有效的帮助。及时、准确、有效的气象灾害预警信息,对于各级政府及部门组织防灾减灾,从而最大程度减轻灾害损失及人员伤亡具有十分重要的意义。

1 资料和方法

1.1 基于雷达数据的飊线识别

本文采取人工识别方法,制定辽宁地区的飊线识别标准,选取一段连续或准连续的 40 dBz 以上的回波带,长度至少 100 km,持续时间超过 1 h,选取辽宁及其周边地区 10 部雷达(沈阳、大连、丹东、营口、朝阳、赤峰、通辽、秦皇岛、烟台、白山)的组合反射率拼图产品(本研究采取人工识别飊线的方式,严格把关识别标准,对于有地物杂波或反射率异常的个例全部进行了剔除;2018 年后引入雷达拼图质量控制算法,以减少人工识别飊线的难度)。如此定义

并识别出 2015—2020 年 5—9 月共 36 次飊线过程,并总结了飊线的形成时间、消散时间、持续时间、最大长度、走向、移动速度、强度、形成方式和组织形式等。

目前对飊线有多种定义,选取适合辽宁地区的飊线识别标准是本研究的关键问题。Meng and Zhang(2012)使用的标准类似于 Parker and Johnson(2000)标准:(1)一段连续或准连续的 40 dBz 以上的回波带长度至少 100 km,持续时间超过 3 h;(2) 40 dBz 的区域有线状或准线状形态,而且有明显的前缘。

由于辽宁地区纬度较高,能量和水汽条件相较于长江中下游及华南地区差(樊李苗和俞小鼎,2013;崔胜权等,2015),故导致辽宁地区飊线维持时间很少能达到上述标准。结合辽宁实际情况将持续时间超过 3 h 适当缩短到超过 1 h(俞小鼎等,2020)。同时本标准要求大于 40 dBz 的雷达回波更为连续,这个附加的要求使得样本的识别更加客观且聚焦于强飊线上。如此定义飊线过程的雷达特征如表 1 所示。

表 1 飊线的雷达特征定义

Table 1 Definition of radar characteristics of squall line

雷达特征	具体解释
形成时间	第一次满足飊线标准时
消散时间	飊线形成后连续 1 h 满足标准后最后一次满足标准的时间
持续时间	飊线标准持续满足的时间
最大长度	连续 40 dBz 反射率带长轴最大长度
走向	飊线持续期间连接 40 dBz 回波带的两个顶端的主导方向
移动速度	对飊线前缘的等时线中点进行连接,其长度除以飊线生命史
强度	飊线持续期间,最大的组合反射率值
形成方式	用于表示飊线形成过程的主要模式,包括断线型、后侧形成型、断区域型和层云嵌入型
组织形式	层状云和对流降水的排列,包括层状云超前型、层状云尾随型和并行层状云型

1.2 触发飊线过程的环境特征条件

从探空和环流场两方面入手,总结归类辽宁地区触发飊线过程的环境特征条件。其中探空选择 ERA5 高时空分辨率再分析资料进行处理分析(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 1 h)。一方面,分析距离飊线最近的探空站对流有效位能(CAPE)、下沉对流有效位能(DCAPE)、850 hPa 与 500 hPa 温差($\Delta T_{850-500}$)、大气整层可降水量(PW)、0~3 km 和 0~6 km 垂直风切变等物理量;

另一方面,分析使用高空观测实况,分析触发飊线过程各类天气特征,如低槽前部、冷涡前部、冷涡后部和其他(副热带高压外围、切变扰动)等。

2 辽宁地区飊线时空分布特征

基于雷达回波飊线标准,从 2015—2020 年 5—9 月的资料中共识别出 36 次满足定义的飊线过程,按照 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的空间分辨率将辽宁分为 24 个区域,统计出在各区域形成飊线的次数(图 1)。辽宁西北部

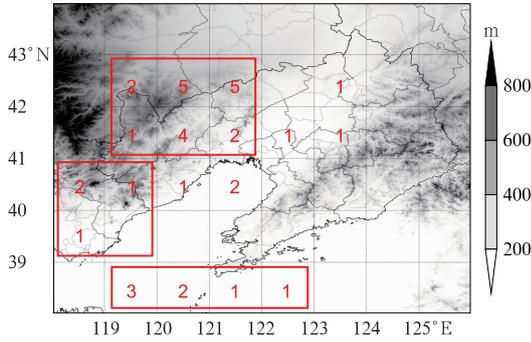


图 1 辽宁及周边地区地形高度(阴影)、
 飊线生成的频次(数字)分布

Fig. 1 Terrain height (shaded) and frequency
 distribution of squall line (number) in
 Liaoning and neighbouring regions

及赤峰市区至敖汉旗一带是辽宁地区的飊线形成频率最大的区域,其次为渤海西部到渤海海峡海面,频率最小的区域为河北东部唐山、秦皇岛的沿山一线。

根据飊线中心点移动的轨迹绘制飊线路径图(图 2),从图中可以看出飊线的路径分为偏北路径

(40°N 以北形成,移动方向由北向南)和偏南路径(40°N 以南形成,移动方向由南向北)。一个明显的特征是绝大多数飊线形成于山脉与平原的交界处,且下山飊线大多数很快趋于消亡;但有一部分下山飊线在高组织化程度的情况下冲入辽河平原后,往往可以维持较长的时间,并保持较快的移动速度。另外,生成在渤海西部到渤海海峡海面的飊线可以维持较长的时间,这种现象与下垫面的摩擦和水汽条件关联明显。从飊线移动方向可以看出,渤海西部到渤海海峡海面形成的飊线多向东北方向移动,由渤海移动至黄海北部,最远可移动至东港进入陆地;河北东部唐山、秦皇岛沿山一线形成的飊线向东南方向移动,从河北东部进入渤海湾;受到地形及不同环流形势下的引导气流影响,辽宁西北部及赤峰市区至敖汉旗一线形成的飊线走向比较复杂,可以分为三类:第一类直接向东南方向移动进入渤海湾;第二类向东南方向移动至辽东半岛的长白山余脉西侧,在山前趋于消亡;第三类向偏东方向移动,沿辽河平原向东北方向移动,与第二类类似,移动至长白

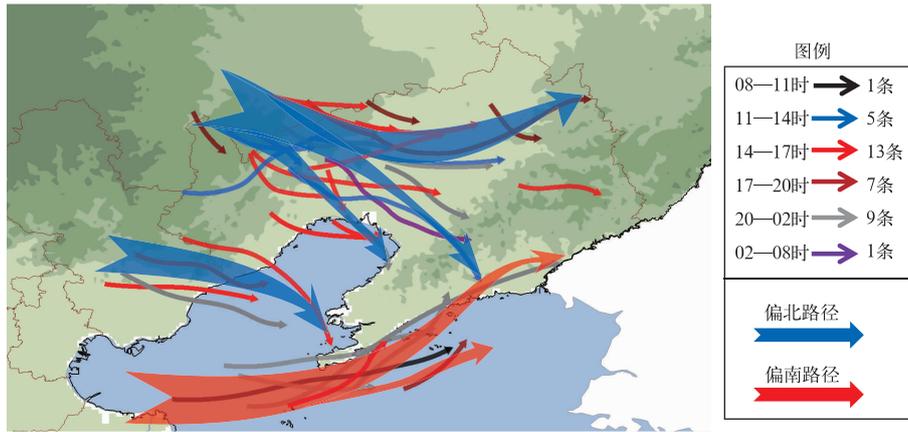


图 2 2015—2020 年影响辽宁地区飊线路径

Fig. 2 Route map of squall lines having affected Liaoning from 2015 to 2020

山余脉西侧,在山前趋于消亡。

从飊线月分布特征可以看出(图 3),绝大多数的飊线过程出现在 6—8 月,占总数的 75%,且以 6 月和 8 月居多,均为 10 次,5 月出现的最少(3 次)。根据杨珊珊等(2016)的研究,夏季西太平洋副热带高压的两次季节性北跳,季风不断带来暖湿气流,水汽充足,在冷涡背景下易产生不稳定层结,容易形成飊线。Meng et al(2013)的研究也表明中国东部 74%的飊线出现在夏季,本文统计结果与其相近。

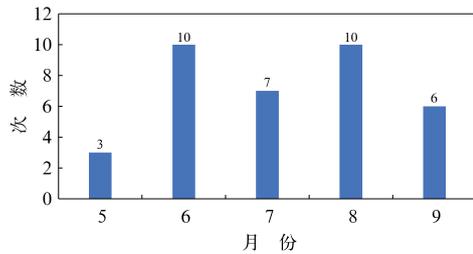


图 3 2015—2020 年辽宁地区飊线出现次数的月变化

Fig. 3 Monthly variation of squall line
 occurrence times in Liaoning from 2015 to 2020

从飚线日变化来看(图4),形成飚线(大于40 dBz)的回波大部分出现在11—18时(北京时,下同),其中12—15时为相对高频时间段。飚线主要形成于12—21时,14—17时为出现飚线的集中时段,总共出现14次飚线过程。这主要是午后太阳辐射导致地表快速升温、配合冷槽或冷涡等天气系统以及大气的条件不稳定层结,有利于对流系统旺盛发展,Meng et al(2013)、杨珊珊等(2016)的研究也表明午后到傍晚最容易形成飚线。绝大部分飚线在23时前消亡,仅有较少飚线可以延续到午夜甚至凌晨(7次),最晚消散的时间为05—06时。

飚线的雷达特征(图5)为:最大长度介于114~273 km,平均187 km;平均最大反射率为65 dBz,其中38.9%介于50~55 dBz;生命史介于1.5~9.0 h,平均3.2 h;移动速度多集中在40~60 km·h⁻¹,平均移动速度59.4 km·h⁻¹(16.5 m·s⁻¹),最大移动速度95 km·h⁻¹(26.4 m·s⁻¹)。

3 辽宁地区飚线的结构特征

3.1 辽宁地区飚线形成结构特征

根据Bluestein and Jain(1985)的研究分析,飚线的形成方式可以分为断线型(BL)、后部生成型(BB)、碎块型(BA)和层云嵌入型(EA)。结果表明辽宁地区飚线可能从初始回波经历不同的方式形成(表2,图6b):12次(33.3%)飚线为断线型,7次

(19.4%)为后部生成型,13次(36.1%)为碎块型,4次(11.1%)为层云嵌入型。其中断线型、后部生成型与Meng and Zhang(2012)的结论较为一致。

由不同飚线形成方式月分布可以看出(表2),层云嵌入型的飚线主要形成于8—9月,且出现频率较低,这与Meng et al(2013)的结论有所不同:可能与辽宁处于中高纬地区,能量和湿度条件相对长江中下游以南地区有明显差异有关;8—9月辽宁在副热带高压并未明显南退,同时冷空气活动增多的情况下,有利于飚线以这种形成方式出现。断线型主要形成于6月及9月,且基本都出现在冷涡前部和低槽前部的环流形势下,这主要与东北冷涡的活跃及冷锋过境等相关。后部生成型与碎块型主要出现在6—8月,这与辽宁地区的能量与湿度条件相关。

辽宁地区飚线过程大都伴随雷暴大风天气,部分伴有冰雹天气,雷暴大风最大风速可达到39.1 m·s⁻¹。辽宁地区飚线过程有移动迅速、飚线形态走向与移动路径近乎垂直等特点,导致强反射率不能长时间影响同一地点,出现短时强降水的次数较少。图7a~7d为2019年6月29日一次断线型飚线过程,红框内是从断线到形成飚线的过程。图7e~7h为2021年5月28日一次碎块型飚线过程,红框内是从碎块到形成飚线的过程,这次过程造成沈阳地区大范围雷暴大风天气,最大风速达到24.4 m·s⁻¹。图7i~7l为2019年6月2日一次后部生成型飚线过程,红框内是两个单体风暴向后扩建形成飚

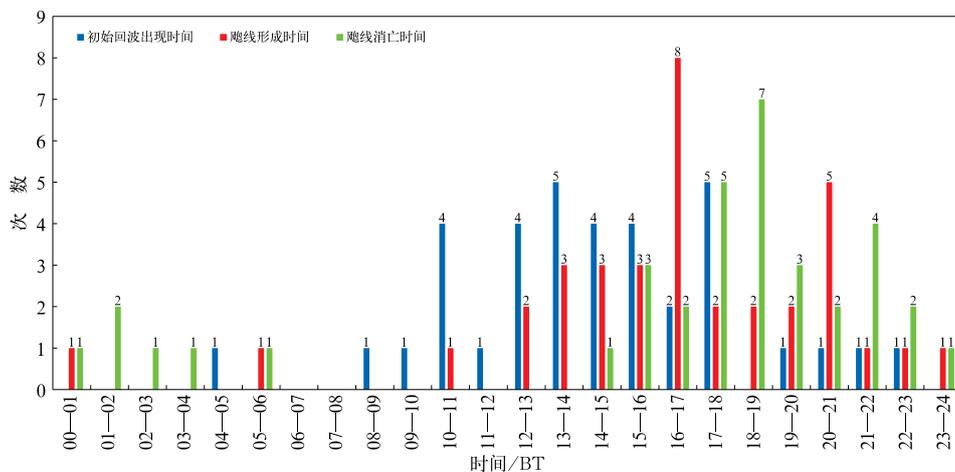


图4 2015—2020年辽宁地区初始回波出现、飚线形成及消亡时间的日变化

Fig. 4 Daily variations of initial echo appearance, formation and dissipation of squall line in Liaoning from 2015 to 2020

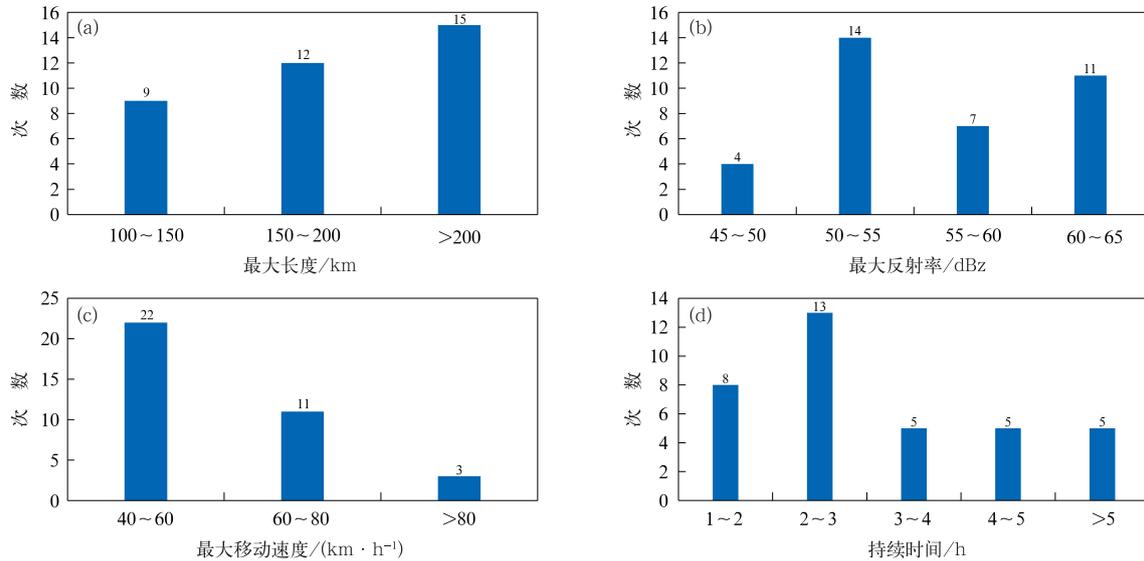


图 5 2015—2020 年辽宁地区飊线特征:(a)最大长度,(b)最大反射率,(c)最大移动速度,(d)持续时间

Fig. 5 Squall line characteristics in Liaoning from 2015 to 2020

(a) maximum length, (b) maximum reflectivity intensity,

(c) maximum moving speed, (d) duration

表 2 2015—2020 年辽宁地区不同飊线形成方式月分布(单位:次)

Table 2 Monthly distribution of different formation modes of squall line (unit: numbers) in Liaoning from 2015 to 2020

形成方式	5月	6月	7月	8月	9月
断线型(BL)	1	4	1	2	4
后部生成型(BB)		3	2	2	
碎块型(BA)	1	3	4	5	
层云嵌入型(EA)	1			1	2

线的过程。图 7m~7p 显示的是 2020 年 5 月 16—17 日一次层云嵌入型飊线过程,红框内显示的是在层状云中的弱多单体风暴逐渐形成飊线的过程。

3.2 辽宁地区飊线组织、消亡特征分析

Parker and Johnson(2000)研究指出飊线的组织形式可分为三种:层状云超前型(LS)、层状云尾

随型(TS)、平行层状云型(PS)。从辽宁地区飊线的研究结果来看(图 6a),主要的组织方式是 TS (75%),共出现 27 个层状云尾随型飊线;而 PS 及 LS 分别出现了 7 次和 2 次。不同组织形式的飊线的占比结果与 Meng et al(2013)中国东部的飊线结论基本一致。

根据 Bluestein and Jain(1985)、Meng et al(2013)的研究结果将 2015—2020 年辽宁地区飊线的消亡方式分成了三种类型(图 8):第一种为反转断线型(RBL),辽宁地区共出现 20 次(55.6%),图 9g~9i 为 2020 年 5 月 16—17 日以 RBL 消亡的一次飊线过程。第二种为收缩线型(SL),仅有 3 次(8.3%),图 9d~9f 为 2019 年 6 月 3 日以 SL 消亡的一次飊线过程。第三种为颠倒破碎面型(RBA),有 13 次(36.1%),图 9a~9c 为 2021 年 5 月 28 日以 RBA 消亡的一次飊线过程。

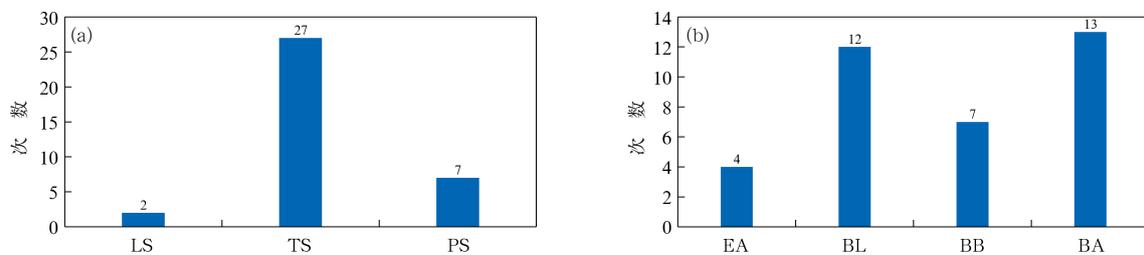
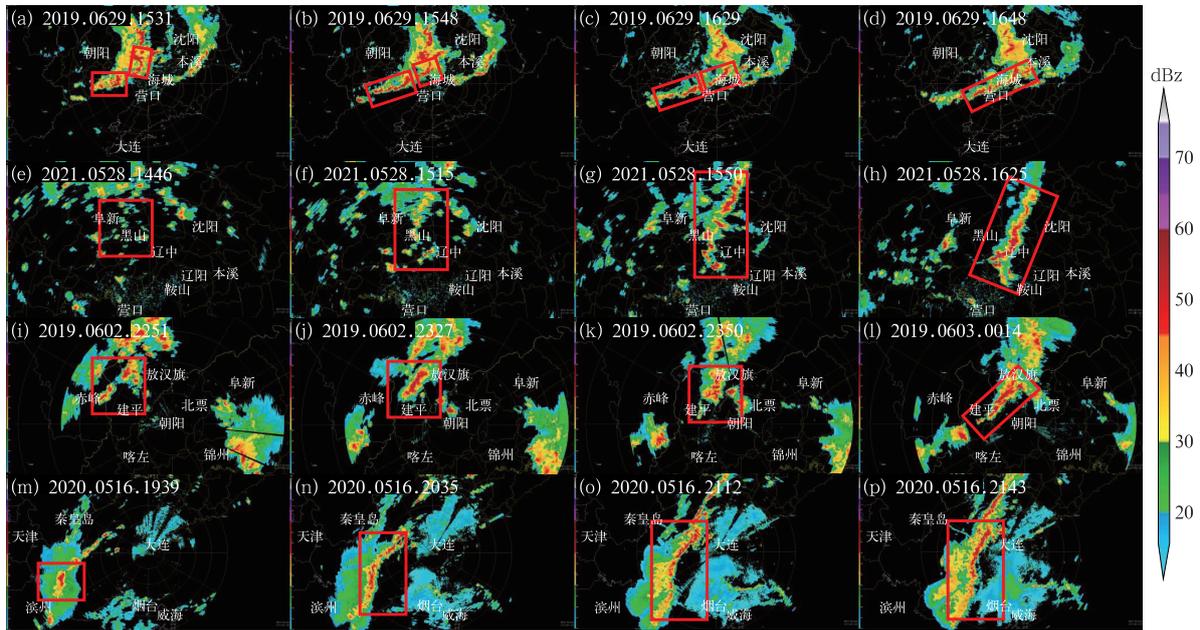


图 6 2015—2020 年辽宁地区飊线(a)组织形式及(b)形成方式

Fig. 6 (a) Formation and (b) organization modes of squall line in Liaoning from 2015 to 2020



注:红框表示飊线形成的过程;填色为雷达组合反射率;2019.0629.1531表示2019年6月29日15:31,余同。

图 7 辽宁地区飊线形成方式示意图

(a~d)2019年6月29日断线型,(e~h)2021年5月28日碎块型,

(i~l)2019年6月2日后部生成型,(m~p)2020年5月16—17日层云嵌入型

Fig. 7 Composite radar reflectivity (colored) of four squall lines with different formation modes in Liaoning

(a~d) BL on 29 June 2019, (e~h) BA on 28 May 2021,

(i~l) BB on 2 June 2019, (m~p) EA on 16-17 May 2020

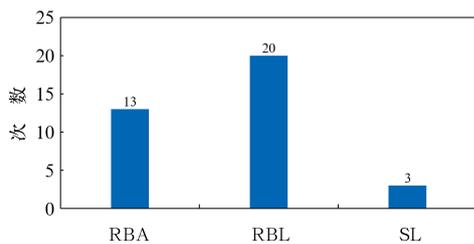


图 8 2015—2020年辽宁地区飊线消亡方式

Fig. 8 Dissipation mode of squall line

in Liaoning from 2015 to 2020

4 触发飊线过程的环境特征条件

4.1 环流形势分析

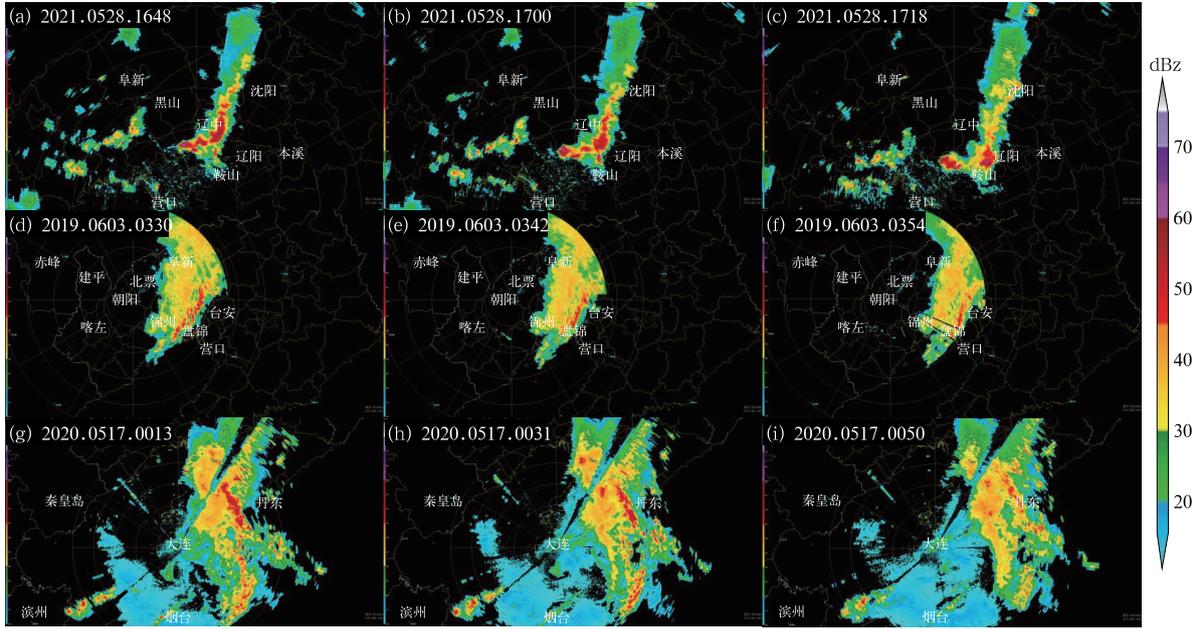
为了探讨辽宁地区飊线形成的环境有利条件,选取 1 h 时间分辨率、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空间分辨率的 ERA5 分析场对 36 次飊线的天气特征进行了分析。总结出 4 种环流形势(图 10),包括冷涡前部型、低槽前部型、冷涡后部型和其他型(副热带高压、台

风)。

冷涡前部型最多,共 19 次,特点是在东北地区中北部存在冷涡,辽宁地区位于冷涡东南象限,低空配合切变和南到西南急流影响该地区,冷涡前部充沛的水汽、动力抬升为飊线的形成提供有利条件。

其次为低槽前部型,共 9 次。特点为河北东部或内蒙古东部南部纬向气流中的一个低压槽,辽宁地区位于其前部,低压槽带来的中层冷空气侵入促使层结不稳定性增强,同时锋面抬升作用提供抬升触发条件,使辽宁地区存在飊线形成的有利条件。如果在其东南部有副热带高压,副热带高压西北部边缘的南到西南气流提供的充足水汽的情况下,飊线的强度及持续时间往往会得到增强。

辽宁地区特有的飊线形成的环流形势为冷涡后部型,共 6 次。特点为在东北地区中东部存在冷涡,辽宁地区位于冷涡西南象限,高空为西北气流,有较强的冷平流,低空配合暖脊和南或西南急流。在此形势下,辽宁地区由于出现了更加明显的上干下暖湿的不稳定大气层结结构,为飊线的形成提供了有利条件,但因为缺少抬升触发条件,大部分情况下



注:2021.0528.1648 表示 2021 年 5 月 28 日 16:48,余同。

图 9 辽宁地区飚线消亡方式示意图

(a~c)2021 年 5 月 28 日颠倒破碎面型,(d~f)2019 年 6 月 3 日收缩线型,
(g~i)2020 年 5 月 16—17 日反转断线型

Fig. 9 Composite radar reflectivity of three squall lines with different dissipation modes in Liaoning
(a—c) RBA on 28 May 2021, (d—f) SL on 3 June 2019, (g—i) RBL in 16—17 May 2020

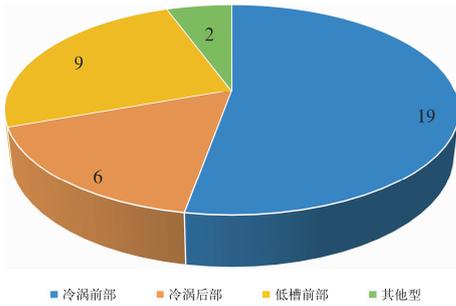


图 10 2015—2020 年辽宁地区发生各环流形势下出现飚线过程次数

Fig. 10 Number of squall line process under different atmospheric circulation situations in Liaoning from 2015 to 2020

未形成飚线,如果一些中小尺度抬升触发条件出现(如海风锋、山谷风、地面辐合线等),则可以触发对流,在适合的物理量场条件下,形成飚线。

4.2 物理量参数分析

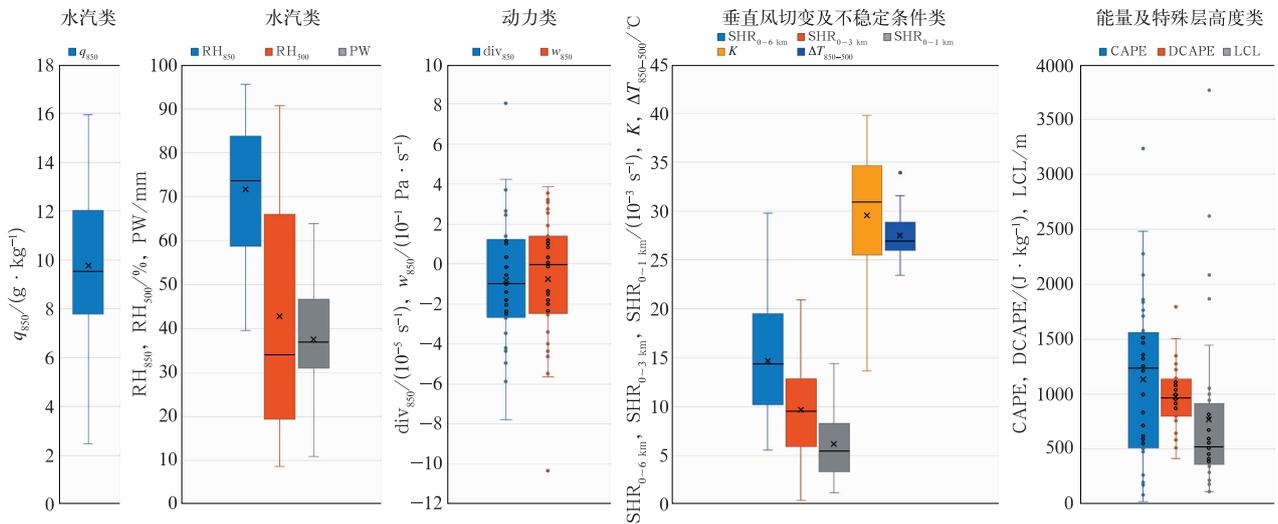
为了探讨辽宁地区发生飚线的有利环境条件,参考前人研究(曲晓波等,2010;刘瑞翔等,2015;公衍铎等,2019),共选取水汽、动力、不稳定条件、垂直

风切变、能量及特殊层高度等 14 个物理量,进一步分析各个飚线过程的物理量特征(图 11)。

4.2.1 辽宁地区飚线过程物理量参数特征

选取飚线出现前距离飚线最强位置处各点的资料,计算出各个过程的多种物理量,具体包括 850 hPa 比湿(q_{850})、850 hPa 相对湿度(RH_{850})、500 hPa 相对湿度(RH_{500})、大气整层可降水量(PW)、850 hPa 垂直速度(w_{850})、850 hPa 散度(div_{850})、K 指数、 $\Delta T_{850-500}$ 、0~6 km 垂直风切变($SHR_{0\sim 6\text{ km}}$)、0~3 km 垂直风切变($SHR_{0\sim 3\text{ km}}$)、0~1 km 垂直风切变($SHR_{0\sim 1\text{ km}}$)、CAPE、DCAPE 及抬升凝结高度(LCL)等 14 个物理量进行分析,结果见图 11。

水汽对飚线组织结构和强度有重要影响(孙建华等,2014),在水汽类各物理量指标中, q_{850} 分布范围主要集中在 $8\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, RH_{850} 在 $60\%\sim 85\%$,PW 在 $30\sim 45\text{ mm}$,以上三个指标体现了飚线过程对中低层水汽含量和低层大气饱和程度的要求; RH_{500} 集中在 $19\%\sim 65\%$,而中位数在 37% 左右。虽然一些过程中可能存在中低层大气饱和程度均较好,但从中位数情况分析,飚线过程对于中层的干侵入也有需求,中层干侵入有利于干空气从风暴



注:箱线图的上端、下端分别表示最大值和最小值,箱体内三条线自下而上分别表示第 25%、50%和 75%分位值。

图 11 2015—2020 年辽宁地区 36 次飊线过程 14 个物理量指标箱线图

Fig. 11 Box plots of 14 physical quantity indicators of 36 squall line processes in Liaoning from 2015 to 2020

后侧卷入对流云体并在云体后侧下沉,并在蒸发冷却等作用下加大气流密度使下沉速度增大形成对流大风天气。

在图 11 的动力类各物理量指标中, w_{850} 在 $-0.22 \sim 0.15 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, div_{850} 分布范围主要集中在 $-2.5 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在飊线过程中,有低层辐合与上升运动的需求,以触发形成飊线系统。

K 指数和 $\Delta T_{850-500}$ 分布范围分别在 $26 \sim 34 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $26 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。辽宁地区飊线过程需要中低层温度垂直递减率接近干绝热直减率,大气层结处于条件不稳定状态,且有辐合上升运动时,可能出现飊线。

0~6、0~3 和 0~1 km 的垂直风切变分布范围分别集中在 $11 \times 10^{-3} \sim 19 \times 10^{-3}$ 、 $6 \times 10^{-3} \sim 13 \times 10^{-3}$ 、 $3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。辽宁地区飊线发生时,从低层到高层的垂直风切变相对较大,由于国内目前对飊线发生时垂直风切变条件的研究较少,没有较好的参考指标,但根据东北冷涡对江淮飊线生成的影响研究(郑媛媛等,2014;于庚康等,2013),0~3 km 垂直风切变超过 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 可能发生飊线过程,辽宁地区的飊线过程 0~3 km 垂直风切变统计结果类似于江淮地区。

CAPE 和 DCAPE 分布范围分别集中在 $500 \sim 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $800 \sim 1150 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,辽宁地区飊线过程 CAPE 与 DCAPE 呈现“双 1000”特征,需要有较大 CAPE 来提供增强上升运动的能量,使对流系统可以充分发展,同时有较大 DCAPE 与之对应,加速

下沉气流向下的运动速度。LCL 分布范围主要集中在 $400 \sim 900 \text{ m}$,云底高度需要维持在一个较适宜的高度:首先,云底不能太高否则对流系统将无法很好地维持深对流结构,从而使对流生命史大大缩短;其次,云底高度如果太低则低层没有一定干层对应,在下沉气流没有蒸发层的支持下,则无法形成较强的下沉气流从而无法增强低层及近地面的风速,导致没有较强的冷池持续存在,根据 RKW 理论只有上升气流两侧水平涡度平衡但没有冷池,无法触发新生对流,飊线结构则无法很好维持(姚建群等,2005;俞小鼎等,2020)。

4.2.2 不同环流形势下飊线过程各物理量参数差异

进一步分析不同环流形势下飊线过程物理量场特征的差异,从表 3 中可以看出:

垂直风切变参数中,冷涡后部型有较强的 0~6 km 垂直风切变,而冷涡前部型和低槽前部型则有较强的 0~3 km 及 0~1 km 垂直风切变。这是由于冷涡后部往往拥有很强的高空西北急流,而冷涡前部和低槽前部则有较强的低空西南急流或者超低空偏南急流,0~3 km 垂直风切变是维系强对流发生、发展的必要条件。Weisman et al(1982)统计指出,强垂直风切变有利于风暴的持续发展,可以增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中下沉气流和低层冷空气外流,同时风随高度顺转有利于强风暴的产生,这些条件有利于飊线形成及维持。

不稳定条件参数中,冷涡前部型及冷涡后部型

的 K 指数比低槽前部型大,而冷涡后部型的 $\Delta T_{850-500}$ 则明显高于其他两个环流型,这主要由于东北冷涡的存在使得中层有较强的冷空气侵入,增大了中低层温差,而冷涡后部的强西北气流可以更加明显地增强中低层温差,导致其有更强的大气层结不稳定性。

能量参数中,每个环流型的对流有效位能和下沉对流有效位能都呈“双 1000”的特征,不过冷涡后部型的对流有效位能较大,主要由于中层干冷空气侵入导致大气温度直减率增大,从而增大对流有效位能;冷涡后部型及低槽前部型下沉对流有效位能较比冷涡前部型稍大。

水汽参数中,冷涡前部型 850 hPa 相对湿度大,而冷涡后部型的 500 hPa 大气与其他型相比较相对湿度小;从大气整层可降水量来看,冷涡前部型和低槽前部型的均值较大,而且极大值也比冷涡后部型更大一些。

特殊高度层中冷涡后部型的抬升凝结高度较高,这与冷涡后部型的相对湿度小有关。

4.2.3 不同形成方式下飑线过程各物理量参数差异

从不同形成方式下飑线过程物理量场特征的差异可以看出(表 4):垂直风切变参数中,断线型比其他几个类型有较弱的 0~6 km 及 0~3 km 垂直风切变,由于此类飑线是由少数呈线状排列的松散单

表 3 辽宁地区不同环流形势下飑线过程物理量场特征

Table 3 Characteristics of physical quantity field of squall line process under different atmospheric circulation situations in Liaoning

物理量	冷涡前部型	冷涡后部型	低槽前部型
$SHR_{0\sim 6\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	16.21	20.11	12.42
$SHR_{0\sim 3\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	10.82	9.68	9.19
$SHR_{0\sim 1\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	6.85	5.85	6.45
K/°C	31.89	31.38	29.16
CAPE/(J·kg ⁻¹)	1301.43	1375.37	1283.81
DCAPE/(J·kg ⁻¹)	910.93	1134.67	1083.04
$\Delta T_{850-500}/\text{°C}$	27.95	28.24	27.41
LCL/m	482.38	635.73	489.96
$q_{850}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	10.37	10.01	10.44
RH ₈₅₀ /%	80.49	71.60	75.97
RH ₅₀₀ /%	37.24	17.83	37.78
PW/mm	39.29	36.77	39.15
$\omega_{850}/(\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1})$	-0.11	-0.34	-0.02
$\text{div}_{850}/10^{-4}\text{ s}^{-1}$	-0.21	-4.23	-1.62

表 4 辽宁地区不同形成方式下飑线过程物理量场特征

Table 4 Characteristics of physical quantity field of squall line process under different formation modes in Liaoning

物理量	后部生成型(BB)	碎块型(BA)	断线型(BL)	层云嵌入型(EA)
$SHR_{0\sim 6\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	15.13	17.58	10.57	16.22
$SHR_{0\sim 3\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	10.45	10.49	7.54	11.55
$SHR_{0\sim 1\text{ km}}/10^{-3}\text{ s}^{-1}$	5.65	5.83	5.94	8.71
K/°C	28.86	30.27	29.08	30.38
CAPE/(J·kg ⁻¹)	1220.08	1036.4	1155.93	1251.11
DCAPE/(J·kg ⁻¹)	848.84	989.84	1064.22	890.79
$\Delta T_{850-500}/\text{°C}$	26.89	27.58	27.83	27.39
LCL/m	442.32	678.11	791.44	430.20
$q_{850}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	9.82	9.95	9.50	9.92
RH ₈₅₀ /%	74.81	70.15	71.61	72.08
RH ₅₀₀ /%	55.32	42.08	41.54	26.31
PW/mm	40.43	37.50	36.15	35.93
$\omega_{850}/(\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1})$	0.14	-0.15	-0.09	-0.18
$\text{div}_{850}/10^{-4}\text{ s}^{-1}$	-0.31	-0.781	-1.38	-0.08

体不断发展并更新迭代,最终连接起来形成的,故不需很强的垂直风切变,层云嵌入型的0~1 km垂直风切变较强;不稳定条件参数中,所有类型皆要求有比较大的K指数,同时 $\Delta T_{850-500}$ 都超过 26°C ,差异并不明显;能量参数中,所有类型的对流有效位能和下沉对流有效位能都呈“双1000”的特征,后部生成型和层云嵌入型的对流有效位能较大,断线型的下沉对流有效位能相比其他几种类型偏大;水汽参数中,几种形成方式 RH_{850} 、 q_{850} 无明显差异,而层云嵌入型的500 hPa大气与其他型相比更加干燥,从大气整层可降水量来看,后部生成型的整层可降水量均值较大;特殊高度层中后部生成型和层云嵌入型抬升凝结高度相对较低。这是由于后部生成型和层云嵌入型往往发生在冷涡前部或低槽前部的环流形势里,此类环流形势有较强低空西南急流,由渤海上带来充沛的水汽与能量,可以有效增大对流有效位能,降低抬升凝结高度。

5 结 论

(1)2015—2020年5—9月辽宁地区共出现了36次飊线过程。辽宁西北部及赤峰市区至敖汉旗一带是影响辽宁地区飊线形成频率最大的区域,其次为渤海西部到渤海海峡海面,形成频率最小的区域为河北东部唐山、秦皇岛的沿山一线。飊线的路径中83%为偏北路径,17%为偏南路径。

(2)2015年出现的飊线次数最多,2018年和2020年出现次数较少。绝大多数的飊线过程出现在6—8月,5月出现最少。飊线主要形成于12—21时,而14—17时为出现飊线的集中时段。绝大部分飊线在23时前消亡,仅有较少部分可以延续到午夜甚至凌晨。飊线的长度介于114~273 km,平均最大反射率为65 dBz,平均生命史为3.2 h,平均移动速度为 $59.4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($16.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

(3)辽宁地区33.3%的飊线为断线型,19.4%为后部生成型,36.1%为碎块型,11.1%为层云嵌入型。主要组织形式是层状云尾随型(TS),平行层状云型(PS)及层状云超前型(LS)出现次数较少。55.6%的飊线以反转断线形式消散,8.3%以收缩线型消散,36.1%以颠倒破碎面型形式消散。

(4)辽宁地区飊线的环流形势包括冷涡前部型、

低槽前部型、冷涡后部型及其他型。从各个物理量的参数分析中,冷涡后部型有较强的0~6 km垂直风切变,而冷涡前部型和低槽前部型则有更强的0~3 km及0~1 km垂直风切变,冷涡前部型及冷涡后部型相比低槽前部型有更大的K指数,而冷涡后部型的 $\Delta T_{850-500}$ 则明显高于其他两个环流型,每个环流型的对流有效位能和下沉对流有效位能都呈“双1000”的特征,冷涡后部型的对流有效位能较大,冷涡后部型及低槽前部型下沉对流有效位能较比冷涡前部型稍大,冷涡前部型有较饱和的850 hPa相对湿度,而冷涡后部型的500 hPa大气与其他型相比更加干燥。从大气整层可降水量来看,冷涡前部型和低槽前部型的整层可降水量均值较大,极大值也比冷涡后部型更大一些。特殊高度层中冷涡后部型的抬升凝结高度相对较高。

参考文献

- 白华,袁潮,潘晓,等,2023.辽宁省温带气旋龙卷的环境参数特征[J].应用气象学报,34(1):104-116. Bai H, Yuan C, Pan X, et al, 2023. Environmental characteristics of extratropical cyclone tornadoes in Liaoning[J]. Appl Meteor Sci, 34(1): 104-116(in Chinese).
- 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. Chen T, Dai K, Zhang F H, 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China[J]. Meteor Mon, 39(8): 945-954(in Chinese).
- 崔胜权,梁寒,李爽,2015.辽宁强对流天气物理量阈值探索统计分析[J].气象科技进展,5(5):55-59. Cui S Q, Liang H, Li S, 2015. A statistic analysis of the threshold value of strong convection weather physical quantity in Liaoning[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(5): 55-59(in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982.我国飊线发生条件的研究[J].大气科学,6(1):18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al, 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China[J]. Chin J Atmos Sci, 6(1): 18-27(in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013.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,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019.冷涡底部一次弓状强飊线的演变和机理[J].气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4): 483-495(in Chinese).

- 雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021.北京地区一次飑线的组织化过程及热动力结构特征[J].大气科学,45(2):287-299. Lei L, Sun J S, Chen M X, et al, 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):287-299(in Chinese).
- 刘莲,王迎春,陈明轩,2015.京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析[J].气象,41(12):1433-1446. Liu L, Wang Y C, Chen M X, 2015. Spatio-temporal evolution characteristics of a squall line in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon, 41(12):1433-1446(in Chinese).
- 刘瑞翔,丁治英,孙凌光,等,2015.夏季江淮地区中尺度对流系统的统计特征分析[J].暴雨灾害,34(3):215-222. Liu R X, Ding Z Y, Sun L G, et al, 2015. Statistical analysis of mesoscale convective systems over Yangtze-Huaihe Basin in summer[J]. Torr Rain Dis, 34(3):215-222(in Chinese).
- 衣孟松,翟丽萍,屈梅芳,等,2014.广西一次飑线大风天气的成因和预警分析[J].气象,40(12):1491-1499. Nong M S, Zhai L P, Qu M F, et al, 2014. Study on initialization mechanism and alert of gale in squall line storm event[J]. Meteor Mon, 40(12):1491-1499(in Chinese).
- 漆梁波,陈永林,2004.一次长江三角洲飑线的综合分析[J].应用气象学报,15(2):162-173. Qi L B, Chen Y L, 2004. Synthetic analysis of a squall in Yangtze River Delta[J]. Appl Meteor Sci, 15(2):162-173(in Chinese).
- 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等,2010.2009年6月淮河中下游三次飑线过程的对比分析[J].气象,36(7):151-159. Qu X B, Wang J J, Yang X X, et al, 2010. Contrast analysis of three squall lines in middle and lower reaches of the Huaihe River in June 2009[J]. Meteor Mon, 36(7):151-159(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019.2018年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J].气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2):141-154(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:52-58. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Fundamental and Technical Method of Severe Convection Prediction in Middle and East China[M]. Beijing: China Meteorological Press:52-58(in Chinese).
- 孙建华,郑淋淋,赵思雄,2014.水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J].大气科学,38(4):742-755. Sun J H, Zheng L L, Zhao S X, 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments[J]. Chin J Atmos Sci, 38(4):742-755(in Chinese).
- 孙晓蕾,闵锦忠,王仕奇,等,2020.中尺度对流系统的动热力特征及其演变对风垂直切变的响应[J].热带气象学报,36(3):401-415. Sun X L, Min J Z, Wang S Q, et al, 2020. Dynamic and thermodynamic characteristics of mesoscale convective system and the impact of its evolution on vertical wind shear[J]. J Trop Meteor, 36(3):401-415(in Chinese).
- 王丹妮,丁治英,王咏青,等,2020.一次多弓状中尺度雨带的成因机理及其与水平涡度的关系[J].热带气象学报,36(1):131-144. Wang D N, Ding Z Y, Wang Y Q, et al, 2020. The relationship between the formation mechanism of a multi-mesoscale-bow-rainband and horizontal vorticity[J]. J Trop Meteor, 36(1):131-144(in Chinese).
- 杨磊,郑永光,2023.东北地区雷暴大风观测特征及其与东北冷涡的关系研究[J].气象学报,81(3):416-429. Yang L, Zheng Y G, 2023. Observational characteristics of thunderstorm gusts in Northeast China and their association with the Northeast China cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 81(3):416-429(in Chinese).
- 杨珊珊,谌芸,李晟祺,等,2016.冷涡背景下飑线过程统计分析[J].气象,42(9):1079-1089. Yang S S, Chen Y, Li S Q, et al, 2016. Analysis of squall lines under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 42(9):1079-1089(in Chinese).
- 姚建群,戴建华,姚祖庆,2005.一次强飑线的成因及维持和加强机制分析[J].应用气象学报,16(6):746-753. Yao J Q, Dai J H, Yao Z Q, 2005. Case analysis of the formation and evolution of 12 July 2004 severe squall line[J]. J Appl Meteor Sci, 16(6):746-753(in Chinese).
- 于庚康,吴海英,曾明剑,等,2013.江苏地区两次强飑线天气过程的特征分析[J].大气科学学报,36(1):47-59. Yu G K, Wu H Y, Zeng M J, et al, 2013. Characteristic analysis of two severe squall line processes in Jiangsu Area[J]. Trans Atmos Sci, 36(1):47-59(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社:292-293. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection [M]. Beijing: China Meteorological Press:292-293(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:122-123. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press:122-123(in Chinese).
- 袁潮,李得勤,杨磊,等,2022.冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究[J].气象学报,80(6):878-895. Yuan C, Li D Q, Yang L, et al, 2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(6):878-895(in Chinese).
- 袁潮,王式功,马湘宜,等,2021.2019年7月3日开原龙卷形成环境背景及机理探究[J].高原气象,40(2):384-393. Yuan C, Wang S G, Ma X Y, et al, 2021. Environmental background and formative mechanisms of a tornado occurred in Kaiyuan on 3 July 2019[J]. Plateau Meteor, 40(2):384-393(in Chinese).
- 袁潮,杨文艳,李得勤,等,2023.1971—2020年辽宁龙卷的气候特征及环境条件分析[J].气象,49(11):1285-1298. Yuan C, Yang W Y, Li D Q, et al, 2023. Climatology and environmental features of

- tornadoes in Liaoning Province during 1971—2020[J]. *Meteor Mon*, 49(11):1285-1298(in Chinese).
- 张建军,王咏青,钟玮,2016. 飏线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J]. *大气科学*, 40(4):689-702. Zhang J J, Wang Y Q, Zhong W, 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(4):689-702(in Chinese).
- 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等,2014. 东北冷涡对江淮飏线生成的影响研究[J]. *高原气象*, 33(1):261-269. Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al, 2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex[J]. *Plateau Meteor*, 33(1):261-269(in Chinese).
- 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(16):1711-1732.
- Glickman T S, 2000. *Glossary of Meteorology*[M]. 2nd ed. Boston: American Meteorological Society: 855.
- 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.
- Meng Z Y, Zhang Y J, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. *Mon Wea Rev*, 140(2):445-470.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10):3413-3436.
- 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, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy[J]. *Mon Wea Rev*, 110(6):504-520.

(本文责编:俞卫平)