

文章编号: 2096-1618(2022)01-0072-09

东北地区冷涡背景下飏线的统计特征

李吉^{1,2}, 谌芸^{1,3,4}, 肖天贵¹, 朱克云¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 伊通满族自治县气象局, 吉林 四平 130700; 3. 国家气象中心, 北京 100081; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要:为进一步研究东北地区冷涡背景下飏线的统计特征, 识别出 24 个东北地区冷涡背景下的飏线过程, 并利用动态合成分析等方法, 对飏线过程的时空分布、移动特征、形成和消散方式及其与冷涡的关系进行统计研究。结果表明: (1) 飏线过程南多北少, 与平原-山区交界线的走向一致呈东北-西南向分布。飏线均位于冷涡的南侧, 飏线不同时期差异不大。在冷涡发展增强和成熟阶段形成的飏线较多, 而且在冷涡的减弱消亡阶段也有多条飏线产生。(2) 飏线具有明显的日变化特征, 多在午后至凌晨生成, 上午最少。70.8% 的飏线生命史为 3~5 h。最大雷达回波强度在 50~60 dBZ。(3) 飏线多为从东到东南向直线型移动, 中心平均移动速度为 14.1 m/s。(4) 飏线的形成方式以断续线型(BL)最多, 消散方式以倒虚线型(RBL)最多。

关键词: 大气科学; 中尺度气象学; 东北地区; 冷涡; 飏线

中图分类号: P445

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.01.013

0 引言

冷涡是中、高纬度地区的冷性闭合低压环流, 在夏季最易发生, 冷涡是引发中国东北、华北地区强对流天气的重要影响系统^[1-2]。冷涡是中国北方飏线发生的常见大尺度天气背景之一^[3]。飏线是呈线状排列的中尺度对流系统, 具有发展速度快、强度大、破坏力强^[4]等特点。飏线过境时, 风速剧增, 风向急转, 气温骤降, 气压陡升, 常伴有龙卷、短时强降水、大风、雷暴和冰雹等激烈天气现象^[5]。飏线的中尺度对流特性使得现阶段难以对其做到准确预报, 因此研究东北地区冷涡背景下飏线的特征有重要意义。

在合适的条件下, 冷涡提供的天气背景和物理条件往往有利于飏线的发生^[6-7]。冷涡南部往往是冷暖空气的交汇处, 冷涡西部有不断补充南下的冷空气, 不对称的温压结构促使冷涡中心的垂直轴线呈略前倾, 为飏线形成提供有利的环境场和物理条件^[8], 包括温压场不对称的锋区、弱冷空气入侵、水汽输送与辐合、层结不稳定的加强、垂直风切变等, 飏线发生时天气尺度动能向中尺度系统转换^[7,9-12]。在统计分析方面, 对江淮和华北等地冷涡背景下的飏线过程有一些研究, 在飏线的空间分布、时间变化特征、生命史、移动特征、与冷涡的位置关系和冷涡的发展阶段等方面得到了结论^[13-14]。Bluestein 等^[15]统计了俄克拉荷马州 11

年的飏线特征, 归纳了飏线的 4 种形成方式; Meng 等^[16]统计了 2008-2009 年中国东部的飏线特征, 归纳了飏线的 3 种消散方式; Parker 等^[17]利用雷达资料将飏线的对流组织形式分为 3 类; Jirak 等^[18]将中尺度对流系统的组织形式分为 16 类, 其中 6 类与飏线有关。丁一汇等^[19]将中国飏线发生的天气背景分为槽后型、槽前型、高后型和台风倒槽型。Zheng 等^[20]按发生环境将中国中东部的 47 个对流系统分为干环境和湿环境类型, 指出干环境下的对流系统生命史短, 易发生大风和冰雹, 而湿环境下的对流系统生命史长, 易发生强降雨。常见的飏线触发机制主要有海风锋、阵风锋、冷锋、干线、切变线、辐合线、急流、冷池、雷暴出流边界、地形抬升、热力抬升等^[9,21-22]。Rotunno 等、Weisman 等^[23-25]提出和验证了飏线长时间维持的 RKW 理论, 当低层垂直风切变产生的正涡度与冷池产生的负涡度接近平衡时, 冷池前沿较强的上升气流易形成新对流单体, 进而易形成长生命史的飏线。陈明轩等^[26-27]通过个例模拟和分析表明 RKW 理论可用来解释实际飏线过程的发展维持和传播机制。高分辨率数值模式成功模拟过很多飏线的三维结构和发展^[28-32], 模拟结果表明低层垂直风切变、水汽含量的分布、大的对流有效位能、边界层辐合线、凝结潜热释放、近地面冷池和环境垂直风切变的相互作用、后部入流的加强等因素对飏线的形成和维持有一定影响。

目前对于中国京津冀^[14]等地区冷涡背景下飏线的时空分布、中尺度特征和维持触发机制方面已有一些研究, 但对于东北地区冷涡背景下飏线过程的研究

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41975001); 国家重点研发计划专项资助项目(2017YFC1502501)

较少且均为个例分析。本文将统计分析东北地区冷涡背景下飚线过程的时空分布、移动特征、形成和消散方式及与冷涡的关系等,希望提高东北地区冷涡背景下飚线过程的预报能力。

1 资料与定义

采用2016–2019年4–9月多源资料开展统计分析,主要包括东北地区高空资料;中国气象局东北区域雷达组合反射率拼图资料;欧洲中心逐小时ERA5再分析高空资料,水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,包括各等压面层的位势高度、温度、风等数据。

文中的冷涡包括东北冷涡、蒙古冷涡及华北冷涡,并将500 hPa天气图上 $35^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ 、 $85^\circ\text{E} \sim 145^\circ\text{E}$ 出现闭合等高线,并配合有冷中心或冷槽、持续时间在48 h或以上的低压环流系统定义为冷涡。同时根据500 hPa位势高度场的演变趋势对冷涡不同发展阶段进行划分:发展增强阶段为500 hPa闭合等高线值降低至最低值的过程;成熟阶段为500 hPa闭合等高线值较前后时刻增强或减弱趋势不明显;减弱消亡阶段为闭合等高线值从最低值开始升高^[13,33]。

文中的飚线是指在每6 min一次的雷达拼图上同时满足以下条件:(1)连续或准连续的40 dBZ回波带大于100 km且持续3 h以上;(2)线性或者准线性对流区有一个明显的边界;(3)40 dBZ区域的长宽比在3:1以上;(4)镶嵌有40 dBZ区域的35 dBZ区域是严

格连续的^[13,16]。本文对于飚线发展过程的雷达特征定义如下:形成时间为连续或准连续的长度大于100 km的40 dBZ回波带形成的时候,成熟时间为飚线的最大长度形成时,消散时间为雷达反射率强度减弱小于40 dBZ或回波带长度小于100 km的时候。

东北地区包括黑龙江、吉林和辽宁三省和内蒙古呼伦贝尔、通辽、赤峰、兴安盟和河北承德、秦皇岛构成的区域^[34],飚线主体在该范围内的过程都纳入统计范畴。

2 飚线的时空分布特征

2.1 空间分布

2.1.1 飚线不同发展阶段的地理分布

根据飚线的定义,普查2016–2019年的中国气象局东北地区雷达拼图和欧洲中心ERA5数据绘制的500 hPa高空天气图,在东北地区共识别出冷涡背景下的飚线24条。由飚线不同发展阶段的划分标准及其空间分布(图1)可见:冷涡背景下东北地区飚线过程南多北少,且飚线的形态(40 dBZ回波带)与平原–山区交界线的走向均为东北–西南向。62.5%飚线在内蒙古与东北平原交界处形成。70.8%成熟期飚线,位于东北中部海拔较低的平原地区和辽宁西部,分布相对集中,且飚线长度较长。75%消亡期飚线,分布在辽宁、吉林中部和长白山地区,飚线移动遇山爬坡,动力热力条件变差,逐渐消亡。

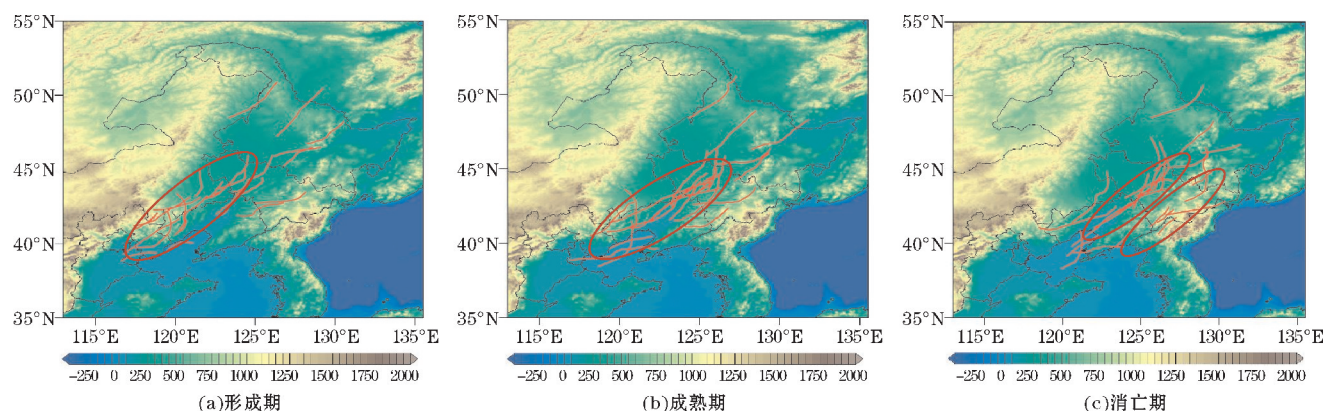


图1 东北地区冷涡背景下飚线在不同发展阶段的地理分布图(阴影填色为地形高度,椭圆区域表示飚线分布密集区域)

2.1.2 飚线与冷涡的关系

为研究东北地区飚线与冷涡的位置关系,采用动态合成的方法^[35–37]将不同时期500 hPa的高度场、温度场的合成和飚线与冷涡中心的相对位置关系绘制在图2中。动态合成分析的公式为

$$\bar{S}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N S_t(x, y)$$

其中: $S_t(x, y)$ 是 t 时刻的高度场和温度场, $t=1; \bar{S}(x, y)$ 为动态合成后的样本平均; (x, y) 为所选区域的坐标,跟随冷涡中心位置变化; N 为样本总数。动态合成以500 hPa高度上冷涡位势高度最低值的位置为合成中心,取正方形区域进行合成。

由图2可见,不同时期的飚线都位于冷涡南部,与杨珊珊等^[13]、段祥海^[14]研究的结论一致。在飚线的

不同时期,相对于冷涡中心位置的分布比较相似,均在相对于冷涡中心以南 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$,东西向 $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的矩形区域内。形成和成熟期的飚线大都在冷涡中心正南下方 $10^{\circ} \times 15^{\circ}$ 的范围内(图中绿方框),西南为两个集中区,东南部相对比较集中。消亡期的飚线更加分散,

主要在冷涡的东西两侧。冷涡南部通常是冷暖空气的交汇处,低层有西南气流输送暖湿空气,高空有冷空气从冷涡西部补充南下,形成上干下湿的层结不稳定条件,可以为飚线形成提供有利的背景环境场^[7,13]。

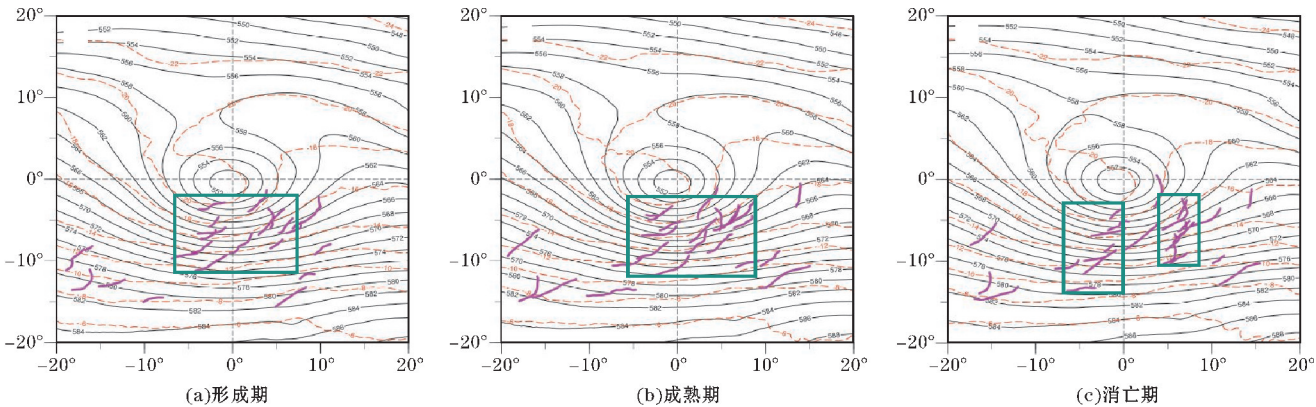


图2 飚线在不同时期与冷涡中心的相对位置关系

图2中的坐标原点为冷涡合成中心,横纵坐标为相对冷涡中心的经纬度,黑色等值线表示500 hPa高度场动态合成,红色断点等值线表示500 hPa温度场动态合成,紫色线条表示飚线相对于冷涡中心的位置,方框表示飚线分布密集区域。

按照冷涡不同发展阶段的定义^[13,33]将冷涡分为发展增强、成熟和减弱消亡阶段,统计分析发现:在冷涡发展增强和成熟阶段形成的飚线较多,各有9条;在冷涡减弱消亡阶段也有6条飚线生成,在日常的预报中要特别加以重视。这与前人在其他地区的研究结论^[13-14]相似,在冷涡的发展增强和成熟阶段,高空冷空气更为强盛,配合低层的暖湿空气和适当的触发机制更易产生飚线等中尺度对流系统。在冷涡减弱阶段,当冷涡外围冷空气南侵且低层有暖湿区配合,地面辐合线触发初始对流,垂直风切变将初始对流进行组织化,也有产生飚线的可能^[14]。

2.2 时间变化特征

2.2.1 年变化和月变化

东北地区冷涡背景下产生的24条飚线中2017年最多有9条(图3中的橙色),2018年最少只有4条(图3中的绿色),其他年份的飚线数量在5~6条。

飚线多发生在9月、7月和6月,其中9月最多(11条,约45.8%),7月次之(4条,约16.7%),6月3条(约12.5%)。与前人^[13-14]对其他地区冷涡背景下飚线发生频次最多为7月的统计结果有所不同,且9月11条飚线在各年发生频次比较均匀,也没有明显的年变化。图4将7月和9月的飚线所在位置和飚线所

在时刻的500 hPa动态合成形势场进行对比发现,9月最北的飚线位置在黑龙江省中部,而7月最北的飚线位置在黑龙江省南部,9月的飚线比7月的飚线出现在更北,且9月飚线的整体位置距离500 hPa动态合成的高度场中心更近。9月的高度场中心较7月偏南 4° 偏东 2° ,9月的高度场中心5500 gpm比7月的高度场中心5640 gpm更强,9月的高度场等值线分布更密集、位势梯度更大,且9月冷涡对应冷中心的强度为 -22°C 强于7月冷中心的强度 -12°C ,这种环流形势的明显差异可能是导致9月东北地区冷涡背景下的飚线偏多的原因之一,其他原因有待进一步深入分析。

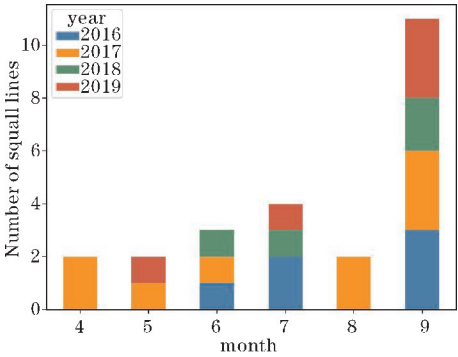
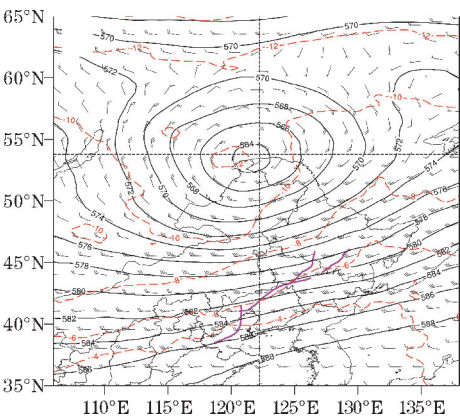


图3 飚线的年际变化和月变化特征

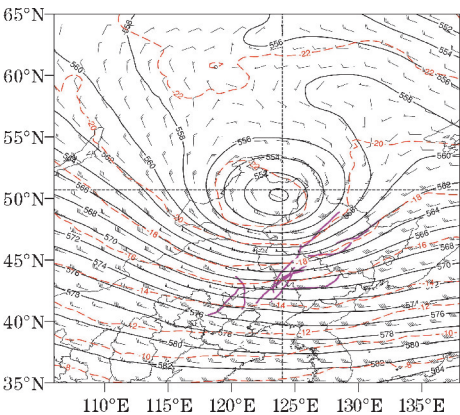
2.2.2 日变化

由东北地区冷涡背景下不同时期飚线的逐小时日变化特征(图5)可见:该地区冷涡背景下的飚线具有明显的日变化特征,多于午后至凌晨发生,上午最少。主要在13-19时(14条,约58.3%)形成,19时最多;在15-21时(15条,约62.5%)成熟,20时最多;在16-24时(16条,约66.7%)消亡,22时最多。与前人对其他

地区的研究结果^[13-14]对比,飏线成熟和消亡最多的时刻相近,但形成最多的时刻稍晚。这可能是因为东北地区纬度较高,太阳辐射强度弱于前人研究的地区,需要相对更长的时间在白天积累地表热量和能量,因此飏线形成的时间整体较晚。还可能与冷涡在东北地区的发展阶段特征、东北平原地区较多地形触发条件偏少或者飏线与冷涡的相互作用有关,还需后续做进一步的分析。



(a)7月



(b)9月

图4 7月和9月的飏线所在位置和500 hPa 动态合成形势场 (黑色等值线表示500 hPa 高度场动态合成,红色断点等值线表示500 hPa 温度场动态合成,紫色线条表示飏线在成熟期的地理位置)

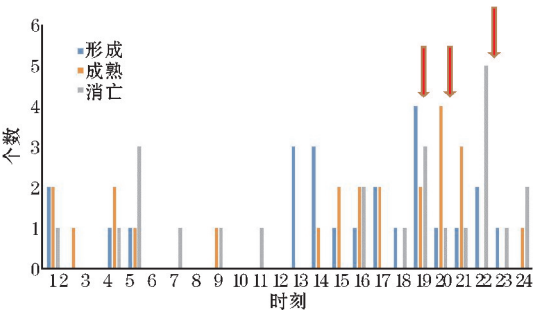


图5 东北地区冷涡背景下不同时期飏线的逐小时变化特征 (箭头表示飏线形成、成熟和消亡最多的时刻)

2.2.3 生命史和最大强度

统计分析发现该地区冷涡背景下的飏线的生命史

为3~8 h,大都为3~5 h(17条,70.8%),与 Meng 等^[16]中国东部飏线有64.8%的生命史在3~5 h结论相似。最大强度在50~60 dBZ,只有4条飏线的最大强度为60 dBZ,与前人对其他地区的统计结果^[13,16]大多数飏线的最大强度在60 dBZ左右相比略偏弱。飏线的生命史与最大强度没有必然联系,生命史更长的飏线对应的最大强度没有更强。

在飏线生命史相对较短(3~5 h)的17条飏线中发生在冷涡发展增强和成熟阶段的各有6条;发生在冷涡减弱消亡阶段的有5条(占29%),略多于全部样本中冷涡减弱消亡阶段发生的飏线比例(25%)。飏线的生命史大于7 h的3条飏线发生在冷涡发展增强(8 h)、成熟(7 h)和消亡阶段(8 h)的各1条。飏线生命史为3~5 h的17条飏线成熟时间多在14~24时(北京时间),仅有2条在2时和4时成熟;飏线的生命史大于7 h的3条飏线中2条的成熟时间在4~6时(北京时间),另外1条在19时成熟。可以发现,生命史较长的飏线成熟时间相对较晚,可能是由于生命史更长的飏线需要更长的时间进行热量积累。

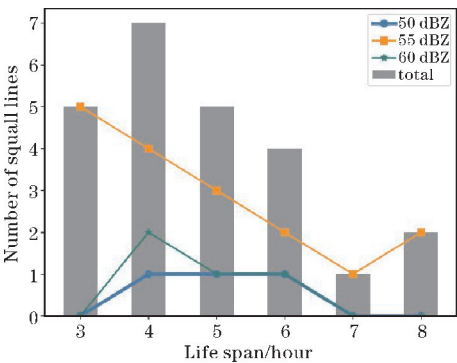


图6 飏线的生命史及强度特征

3 飏线的移动特征

依据飏线不同时期的定义,将飏线形成、成熟、消亡时刻飏线中心位置点绘在图中并连接,就得到了图7(a)的飏线移动路径。大部分飏线的移动方向接近于直线,形成、成熟、消亡时期的移动方向一致,只有小部分飏线在不同时期有不同的移动路径。统计分析发现(图7b):大部分飏线的移动方向在东到东南之间,东南东方向移动的飏线最多(8条,占1/3左右),其次是向东和东南移动的各10条,各占1/5左右。由飏线中心的移动速度(表1)可见:在6~25 m/s,平均移动速度为14.1 m/s。飏线中心移动速度在6~15 m/s的飏线最多,共有16条,占总样本的2/3。

飏线中心移动速度在6~15 m/s的16条飏线中,

发生在冷涡维持阶段的飊线略多有 6 条,在冷涡发展增强和减弱消亡阶段各 5 条。飊线中心的移动速度较快在 21 ~ 25 m/s 的 3 条飊线有 2 条发生在冷涡维持阶段,1 条发生在减弱阶段。冷涡不同发展阶段下生成飊线的中心移动速度有所差异:冷涡发展增强和成熟

阶段的平均移动速度较快为 14 ~ 15 m/s,减弱消亡阶段的平均移动速度较慢为 12.8 m/s。

图 7(a)中三角表示飊线形成位置,圆圈表示飊线成熟位置,十字表示飊线消散位置,阴影表示地形高度,箭头表示飊线的主要移动方向。

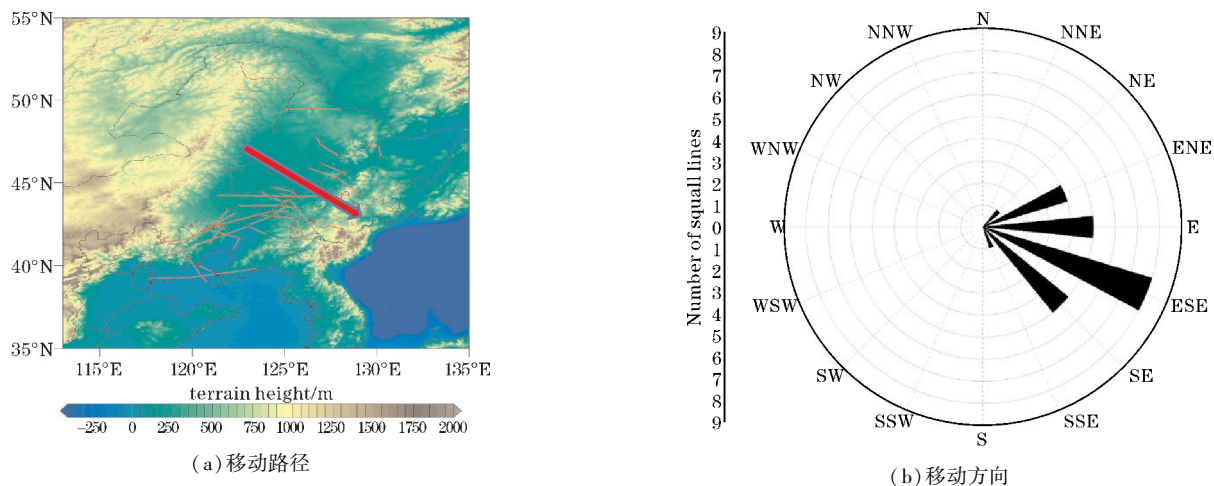


图 7 飊线的移动路径和移动方向

表 1 飊线中心的移动速度							单位: m/s
移动速度	6 ~ 9	9 ~ 12	12 ~ 15	15 ~ 18	18 ~ 21	21 ~ 24	24 ~ 25
飊线数量	4	6	6	1	4	2	1

4 飊线的形成和消散方式

Bluestein 等^[15]将飊线的形成方式分为 4 种:断续线型(broken line, BL)、后续线型(back building, BB)、离散区线型(broken areal, BA)、嵌套区线型(embedded areal, EA),4 种方式的理想化示意图如图 8(a)所示。孟智勇等^[16]将飊线的消散方式分为 3 种:倒虚线型(reversed broken line, RBL)、收缩线型(shrinking line, SL)、颠倒破碎面型(reversed broken areal, RBA),3 种方式的理想化示意图如图 8(b)所示。据此标准,对东北地区冷涡背景下的 24 条飊线进行划分,结果如图 9 所示:形成方式最多为 BL 型(11 条),其次为 BA 型(6 条),还有 5 条 BB 型和 2 条 EA 型。飊线的消散方式最多为 RBL 型(10 条),其次为 SL 型(9 条),还有 5 条 RBA 型。在形成方式最多的 BL 型飊线中以 RBL 型消散的最多,占到一半以上(54.5%);BA 型形成方式的飊线中以 RBL 型消散的最多,占到一半;BB 型的飊线中以 RBA 型消散的最多占 60%。消散方式中的 RBL 型和 RBA 型是形成方式中的 BL 型和 BA 型的近似相反形式,而在形成方式为 BA 型的飊线中并不是 RBA 型的消散方式占比最多,所以飊线的消散方式并不一定是形成方式的相反方式,这与孟智勇等^[16]的研

究结果结论一致。

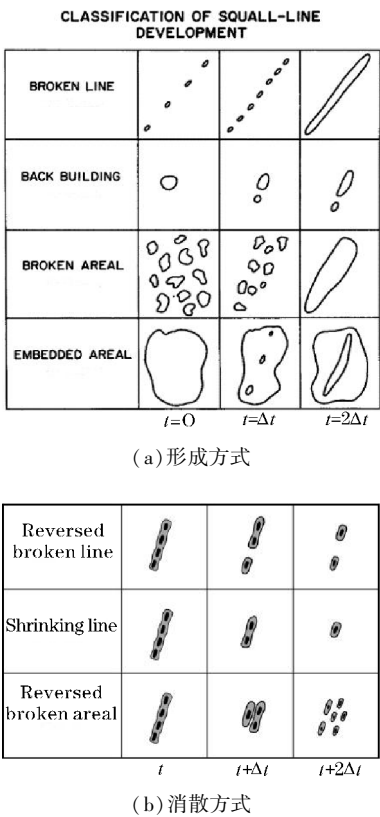


图 8 飊线形成方式和消散方式理想化示意图

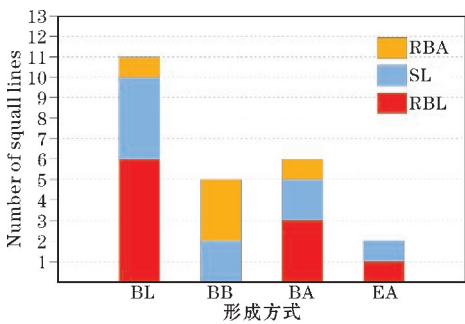


图9 飚线形成方式(BL, BB, BA, EA)和消散方式(RBA, SL, RBL)的统计

图 10 按照飚线的形成方式分类统计了 24 条飚线

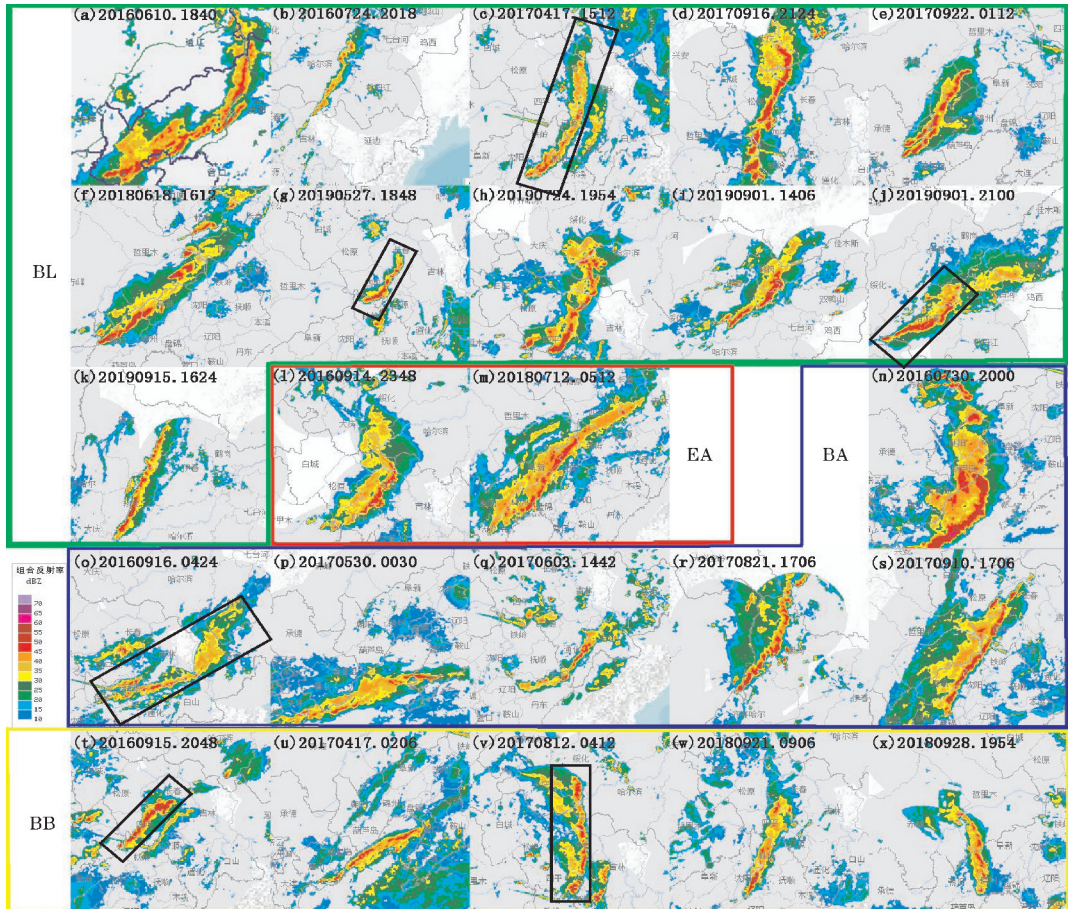


图 10 24 条飚线成熟时刻雷达回波图(彩色方框表示飚线的不同形成方式,黑色方框表示飚线所在位置)

图 11 为东北地区冷涡背景下飚线形成方式示意图。其中图 11(a) ~ (c) 是 2017 年 4 月 17 日一次在辽宁沈阳、铁岭和吉林四平生成的断续线型(BL)飚线过程,图 11(a)沿辐合带有接近直线排列的小的对流单体生成,单体强度在 35 dBZ 左右,图 11(b)中这些单体增强、面积扩大且部分连在一起,且有少数新单体沿对流带生成,图 11(c)中每个单体继续发展增强,连成一条飚线。图 11(d) ~ (f) 为 2017 年 4 月 17 日在河北秦皇岛和辽宁葫芦岛沿海形成的一次后续线型(BB)飚线过程,图 11(d)中秦皇岛沿海有线性的对流单体和一个小的块状对流单体,图 11(e)中性对流

成熟时刻的雷达回波图,发现以 BL 型形成的飚线最大长度差异较大,以 BB 型形成的飚线普遍比较窄,以 BA 型形成的飚线有宽有窄,以 EA 型形成的飚线普遍比较宽。BL 型形成的飚线中,成熟于吉林和黑龙江的较多,各 4 条,另外 3 条成熟于辽宁及辽宁与内蒙古边界。BB 型形成的飚线中,成熟于辽宁及辽宁与内蒙古边界的飚线较多有 4 条,另外 2 条成熟于吉林。BA 型形成的飚线中,成熟于辽宁的最多有 3 条,有 2 条主体成熟于吉林,有 1 条主体成熟于黑龙江。EA 型形成的飚线中,成熟于辽宁和吉林的飚线各 1 条。

单体向东发展增强,图 11(f)中线状对流继续向东沿海发展增强与块状对流单体连在一起形成飚线。飚线在形成过程中一直沿着海岸线发展,海陆风辐合提供的水汽和动力条件可能是该飚线形成的有利条件。图 11(g) ~ (i) 是 2017 年 6 月 3 日在辽宁东部和吉林南部形成的一次离散区线型(BA)飚线,图 11(g)中有大片零星的对流单体,图 11(h)中在中尺度系统的组织下,对流单体有呈东北-西南向线状排列的趋势,在图 11(i)中带状对流区域外的单体减弱消散,带状对流区域内的单体继续加强连在一起形成飚线。图 11(j) ~ (l) 为 2016 年 9 月 14 日在吉林省西部生成的一次嵌套区

线型(EA)飊线过程,图11(j)中有大片30~40 dBZ的降水回波,图11(k)降水回波内部强度较大的对流开始组织化形成间断的线状,图11(l)中降水回波前侧形成强度45~50 dBZ的连续线状对流,飊线形成。

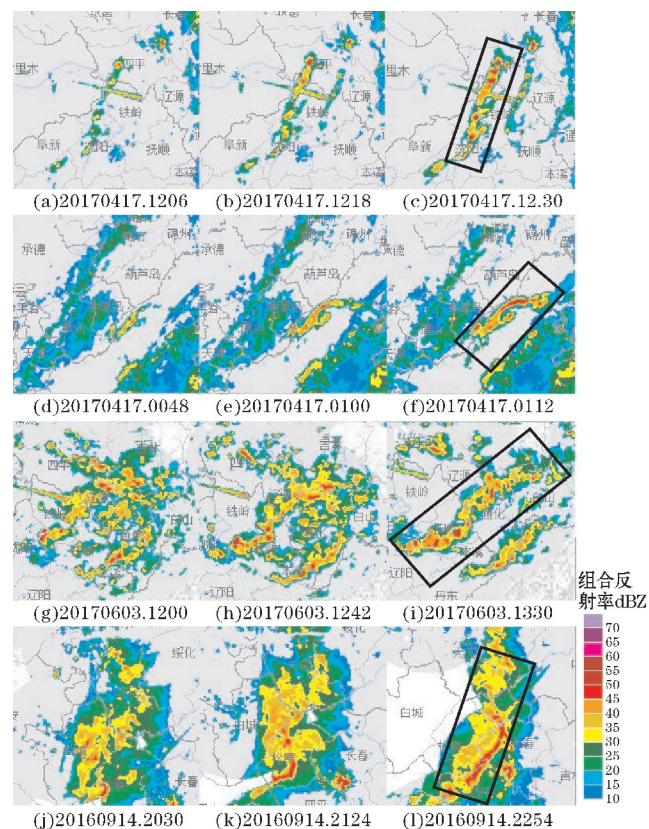


图11 东北地区冷涡背景下飊线的形成方式示意图

分析发现 BL 型和 BA 型的形成方式有将对流单体组织化连成飊线的过程,东北地区冷涡背景下以 BL 型和 BA 型方式形成的飊线共有 17 条,占飊线样本的 71%。孟智勇等^[16]对 2008–2009 年中国东部的 96 条飊线统计表明 BL 型和 BA 型方式形成的飊线共有 55 条,占飊线样本的 57%。冷涡背景下以 BL 型和 BA 型方式形成的飊线比例更高,可能是由于冷涡可以对飊线的组织化过程起到一定作用,更有利于飊线以 BL 型和 BA 型的方式形成。

图 12 为东北地区冷涡背景下飊线消散方式示意图。其中图 12(a)~12(c)是 2016 年 7 月 24 日在黑龙江哈尔滨和牡丹江之间以倒虚线型(RBL)消散的飊线,图 12(a)中飊线为连续的线状对流,图 12(b)中飊线分散成几个强度减弱的对流块,图 12(c)中对流块强度和面积继续减弱且部分消散。图 12(d)~(f)为 2018 年 9 月 28 日在内蒙古通辽市以收缩线型(SL)消散的飊线,图 12(d)中飊线为连续的线状对流,图 12(e)中对流带收缩变窄,图 12(f)中东南侧对流均消散。图 12(g)~(i)是 2017 年 8 月 12 日主体在吉林

省中西部以颠倒破碎面型(RBA)消散的飊线,图 12(g)中飊线南部两侧有分散的对流单体出现,图 12(h)中分散的对流单体数量增加且飊线主体有断裂分散的趋势,在图 12(i)中飊线中部和北部也开始断裂分散,飊线消散。

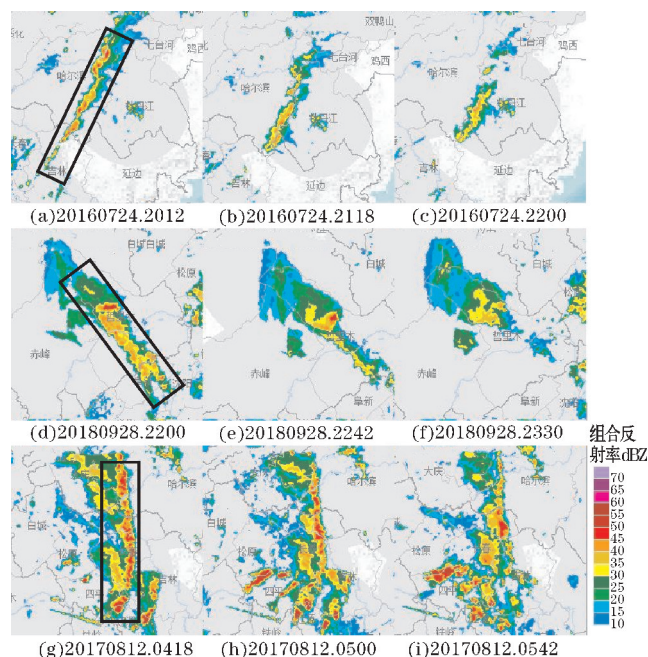


图12 东北地区冷涡背景下飊线的消散方式示意图

5 结论与讨论

利用雷达拼图资料和 500 hPa 高空天气图资料对东北地区冷涡背景下的飊线过程进行统计分析,得出以下主要结论。

(1)冷涡背景下的飊线空间分布南多北少,与平原—山区交界线的走向一致呈东北—西南向分布。多形成在山区和平原的地形过渡地带;成熟在东北平原和辽宁西部,分布相对集中;消亡在东北平原的东部和长白山地区。在飊线的任何时期,都位于冷涡中心的南部;在飊线的不同时期,相对于冷涡中心的位置差异不大,均在相对于冷涡中心以南 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$,东西向 $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的矩形区域内。在冷涡发展增强和成熟阶段形成的飊线较多,而且在冷涡的减弱消亡阶段也有多条飊线产生。

(2)东北地区冷涡背景下的飊线有明显的日变化,多发生于午后至凌晨,上午最少。主要在 13–19 时(14 条,约 58.3%)形成,19 时最多;在 15–21 时(15 条,约 62.5%)成熟,20 时最多;在 16–24 时(16 条,约 66.7%)消亡,22 时最多。飊线的生命史为 3~8 h,大多数飊线生命史长度在 3~5 h,生命史较长的飊线成熟时间相对较晚。飊线的最大强度在 50~60 dBZ,最

大强度为55 dBZ的飚线最多。

(3)大部分飚线的移动方向接近于直线,形成、成熟、消亡时期的移动方向一致,只有小部分飚线在不同时期有不同的移动路径。移动方向多在东到东南之间,其中东南东方向移动的飚线最多,占统计样本的1/3。飚线中心的移动速度在6~25 m/s,平均移动速度为14.1 m/s。移动速度在6~15 m/s的飚线最多,占统计样本的2/3。冷涡发展增强和成熟阶段的飚线平均移动速度较快,冷涡减弱消亡阶段的飚线平均移动速度略慢。

(4)飚线的形成方式BL型最多占45.8%,消散方式RBL型最多占41.7%。在形成方式最多的BL型飚线中以RBL型消散的最多,占到一半以上(54.5%);BA型形成方式的飚线中以RBL型消散的最多,占到一半;BB型的飚线中以RBA型消散的最多占60%。飚线的消散方式并不一定是形成方式的相反方式。冷涡背景下以BL型和BA型方式形成的飚线比例更高,可能与冷涡对飚线的组织化过程有一定关系。以BL型形成的飚线最大长度差异较大,以BB型形成的飚线普遍比较窄,以BA型形成的飚线有宽有窄,以EA型形成的飚线普遍比较宽。

本文针对东北地区冷涡背景下飚线过程的时空分布、移动特征、形成和消散方式及其与冷涡的关系进行了统计分析,而飚线引发的强对流天气及其分类特征也是值得深入研究的内容,这些问题将在今后进行探讨和解决。

参考文献:

- [1] 傅慎明,孙建华,张敬萍,等.一次引发强降水的东北冷涡的演变机理及能量特征研究[J].气象,2015,41(5):554-565.
- [2] 何晗,湛芸,肖天贵,等.冷涡背景下短时强降水的统计分析[J].气象,2015,41(12):1466-1476.
- [3] 公衍铎,郑永光,罗琪.冷涡底部一次弓状强飚线的演变和机理[J].气象,2019,45(4):483-495.
- [4] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,1981.
- [5] 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003.
- [6] 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等.东北冷涡对江淮飚线生成的影响研究[J].高原气象,2014,33(1):261-269.
- [7] 白人海,谢安.东北冷涡过程中的飚线分析[J].气象,1998,(4):38-41.
- [8] 郭淳薇.飚线的研究进展[J].气象与减灾研究,2013,36(4):1-7.
- [9] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等.我国飚线发生条件的研究[J].大气科学,1982(1):18-27.
- [10] 李姝霞,张宇星,张怡,等.豫东地区一次强飚线天气过程的综合分析[J].暴雨灾害,2011,30(1):57-63.
- [11] 姬鸿丽,常红丽,陈红霞,等.一次飚线天气过程的综合分析[J].气象与环境科学,2009,32(2):41-45.
- [12] 姚叶青,俞小鼎,张义军,等.一次典型飚线过程多普勒天气雷达资料分析[J].高原气象,2008(2):373-381.
- [13] 杨珊珊,湛芸,李晟祺.冷涡背景下飚线过程统计分析[J].气象,2016,42(9):1079-1089.
- [14] 段祥海.冷涡背景下京津冀地区飚线过程分析[D].成都:成都信息工程大学,2019.
- [15] Bluestein H B, Jain M H. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1985, 42(16):1711-1732.
- [16] Meng Z, Yan D, Zhang Y. General features of squall lines in East China[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(5):1629-1647.
- [17] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Monthly weather review, 2000, 128(10):3413-3436.
- [18] Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development[J]. Monthly weather review, 2003, 131(10):2428-2449.
- [19] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等.我国飚线发生条件的研究[J].大气科学,1982(1):18-27.
- [20] Zheng L, Sun J, Zhang X, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. Weather and Forecasting, 2013, 28(5):1081-1098.
- [21] 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.
- [22] 李文娟,郇敏杰,李嘉鹏,等.浙江省春季至夏初飚线分型及对比分析[J].热带气象学报,2019,35(4):480-490.
- [23] Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(3):463-485.

- [24] Weisman M L. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 1992, 49(19): 1826–1847.
- [25] Weisman M L, Rotunno R. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(4): 361–382.
- [26] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. *气象学报*, 2012, 70(3): 371–386.
- [27] 罗琪. 冷涡背景下飑线发展机理个例分析和模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [28] 王林, 沈新勇, 王勇, 等. 华南一次飑线升尺度增长过程的机制分析[J]. *高原气象*, 2021, 40(1): 145–158.
- [29] 杨吉, 郑媛媛, 夏文梅, 等. 东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析[J]. *气象*, 2020, 46(3): 357–366.
- [30] 张乐楠, 丁治英, 王咏青, 等. 一次东北冷涡下槽后强风与飑线后向入流演变及成因分析[J]. *气象科学*, 2019, 39(4): 488–501.
- [31] 罗琪, 郑永光, 陈敏. 2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理[J]. *气象学报*, 2019, 77(3): 371–386.
- [32] 张哲, 周玉淑, 高守亭. 一次辽东湾飑线过程的观测与数值模拟分析[J]. *大气科学*, 2018, 42(5): 1157–1174.
- [33] 张仙. 冷涡背景下京津冀地区连续降水特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [34] 窦慧敏, 丁治英, 郭春燕, 等. 2013—2017年夏季东北冷涡下东北地区 MCS 的统计特征[J]. *气象科学*, 2020, 40(3): 341–353.
- [35] Gray W M. Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis [M]. WMO, 1981.
- [36] 孙力, 王琪, 唐晓玲. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析[J]. *气象*, 1995(3): 7–10.
- [37] 沈新勇, 张弛, 高焕妍, 等. 三类高空冷涡的划分及其动态合成分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(1): 1–9.

Statistical Characteristics of Squall Line Under Cold Vortex Background in Northeast China

Li Ji^{1,2}, CHEN Yun^{1,3,4}, XIAO Tiangu¹, ZHU Keyun¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Yitong Manchu Autonomous County Meteorological Bureau, Siping 130700, China; 3. National Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: In order to further study the statistical characteristics of squall line under the background of cold vortex in Northeast China, 24 squall line processes under the background of cold vortex in Northeast China were identified, and the temporal and spatial distribution, movement characteristics, formation and dissipation modes of squall line processes and their relationship with cold vortex were statistically studied by using dynamic synthesis analysis and other methods. The results show that: (1) Squall lines process is more in the South and less in the north, which is consistent with the trend of the boundary between plain and mountain area, and is distributed in Northeast southwest direction. Squall lines are located in the south of the cold vortex, and there is little difference in different periods of squall lines. There are more squall lines formed during the development and maturity stage of the cold vortex, and some of the squall lines are also generate during the weakening and disappearing stage of the cold vortex. (2) Squall lines have obvious diurnal variation characteristics, most of them are formed from afternoon to early morning, and least in the morning. The life history of 70.8% of squall lines is mainly 3 to 5 hours. The maximum radar echo intensity is in the range of 50–60 dBZ. (3) Squall lines mostly moves linearly from east to southeast, and the average moving speed of the center is 14.1 m/s. (4) Squall lines are formed by Broken line(BL) the most, and the dissipation method is Reversed broken line(RBL).

Keywords: atmospheric science; mesoscale meteorology; northeast China; cold vortex; squall line