

1971–2020 年辽宁龙卷的气候特征及环境条件分析

袁潮^{1,2}, 杨文艳^{1,2}, 李得勤¹, 杨磊³, 王式功⁴

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166;
2. 辽宁省盘锦市气象局, 辽宁 盘锦 124010;
3. 辽宁省气象灾害监测预警中心, 辽宁 沈阳 110166;
4. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要: 为了解辽宁龙卷气候特征, 基于《中国气象灾害大典》、《中国气象灾害年鉴》和其他相关资料, 根据“改进藤田分级”龙卷级别分类标准, 对 1971–2020 年辽宁龙卷进行强度分类和时空分布特征统计, 并对比中国辽宁与美国龙卷高发区环境背景差异, 分析辽宁龙卷典型的环流形势、物理量特征。得到以下主要结论: 1971–2020 年辽宁地区共记录到 97 个龙卷日发生龙卷 105 次, 年均 2.1 次, 年平均龙卷生成密度为 1.4×10^{-5} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$, 约为美国的 1/10。EF2 或以上强龙卷共记录到 17 次, 年均出现 0.3 次。95% 的龙卷出现在 5–9 月, 67% 出现在 14–19 时。EF2 级以上强龙卷主要分布在辽宁中部以西地区, 东南沿海地区多为弱龙卷, 辽宁西北部龙卷季明显早于东南部。对流有效位能和中低层风切变随季节呈反相位变化, 两者的合适配置是龙卷等强对流天气产生的前提条件。低层风暴相对螺旋度偏小是中国辽宁较美国龙卷高发区龙卷密度明显偏小的主要原因。辽宁 87% 的龙卷与冷涡相关, 分为低层锋生主导的冷涡底部短波槽和冷涡前部型 (65%)、中高干冷空气流主导的冷涡后部型 (12%) 以及强热力不稳定条件下中尺度近风暴环境主导的冷涡主体型 (6%)。辽宁龙卷高发区环境条件具有以下特征: 中层影响系统为冷涡, 地面对应锋面气旋。龙卷常出现于低层风暴相对螺旋度中心偏西北象限, 对流有效位能梯度大值区内, 对应地面冷锋和干线的东侧, 温度脊顶部。

关键词: 龙卷; 时空分布; 环境条件; 冷涡; 风暴相对螺旋度

中图分类号: P445, P463 文献标识码: A DOI:

Climatology and Environmental Features of Tornadoes in Liaoning Province during 1971–2020

YUAN Chao^{1,2}, YANG Wenyan², LI Deqin¹, YANG Lei³, WANG Shigong⁴

1. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China;
2. Panjin Meteorological Bureau, Liaoning Province, Panjin 124010, China;
3. Liaoning Meteorological Disaster Warning Center, Shenyang 110166, China;
4. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A climatology is developed for tornadoes in Liaoning province during 1971–2020. The tornado reports are from the "Chinese Meteorological Disaster Dictionary", "Chinese

收稿日期: 2022-xx-xx; 定稿日期:

1

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1507301); 环渤海科技协同创新项目 (QYXM202101); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J059、2022J003); 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2020-026); 东北冷涡研究重点开放实验室开放基金 (2022SYIAEKFS05)

第一作者: 袁潮, 主要从事短期天气预报研究. Email: yuanchao_mare@163.com

通讯作者: 王式功, 主要从事天气分析与预报方法和技术研究. Email: wangsg@cuit.edu.cn

Meteorological Disaster Yearbook" and other related data. The climatology includes interannual variability, annual and diurnal cycles, intensities according to the "Enhanced Fujita Scale", geographic distribution, and environmental conditions derived from reanalysis data. Major findings are as follows. Over the 50 years, there were 105 tornadoes recorded (including 17 tornadoes above EF2) on 97 tornadic days with 2.1 tornadoes per year and 0.14 tornadoes per year per 10000 km², about 1/10 of those in the United States. The tornadoes occurred mostly (95%) from May through September and 67% of tornado genesis was between 14:00 BT and 19:00 BT. Significant tornadoes mainly occurred in the central and west Liaoning, and more of the tornadoes in the southeastern coastal areas were weak. The tornadic season in the northwest of Liaoning is significantly earlier than the southeast. CAPE and mid-level wind shear changed in opposite phase with the season, which makes the appropriate configuration of the two be prerequisites. The lower low-level storm relative helicity is the main reason for the apparently lower tornado density in Liaoning than in the United States. About 87% of tornadoes were related to the cold vortex, which can be mainly divided into the short wave trough category at the cold vortex bottom and the cold vortex front category dominated by low-level frontogenesis (65%), the mid-level dry cold air forcing category dominated by mid-to-high level dry cold air flow(12%), and the cold vortex central area category dominated by meso-scale near-storm environment under severe thermal instability (6%). The characteristic field of typical tornadoes in Liaoning shows that: the comprehensive configurations of cold vortex at middle-level; high wind speed core and relative storm helicity at low-level; CAPE gradient large value area; cold front, warm temperature ridge, and dry line at surface are important indications for tornado-prone areas in Liaoning. The environmental conditions in the high-incidence area of Liaoning tornadoes have the following characteristics: the mid-level system is cold vortex, the ground corresponds to frontal cyclones, tornadoes often appear in the northwest quadrant of the center of SRH, and in the large value area of CAPE gradient, corresponding to the east side of cold front and the dry line at surface, and the top of the temperature ridge.

Keywords: tornado; spatial-temporal characteristics; environmental conditions; cold vortex; storm relative helicity

引言

龙卷是在不稳定大气层结条件下由于强烈的对流运动而产生的强烈涡旋,通常伴随着高速旋转的漏斗状云柱,是猛烈的对流天气现象之一,迄今为止记录到的最强龙卷的地面极大阵风风速介于 $125\sim 140\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Davies-Jones et al, 2001; 郑永光和俞小鼎, 2020)。由于龙卷的空间尺度小,几乎难以经过地面气象观测站,即便是恰巧经过观测站,观测仪器也会被摧毁而无法得到气象观测数据,因此通过灾情来判断龙卷强度就显得尤为重要(张雪芬等, 2013)。为了界定龙卷强度, Fujita (1971) 基于龙卷路径上地面建筑物、树木、汽车等造成的损害程度和风速的对应关系,将龙卷分为从 F0 到 F5 级共 6 个等级,即“藤田分级”(Fujita Scale)。之后为更准确地反映龙卷风破坏力与风速之间的关系,美国国家气象局对“藤田分级”风速的上下限进行了调整,采用美国常见的 28 种标志物受损情况确定龙卷强度等级,称为 EF 级(Enhanced Fujita Scale)(Wind Science and Engineering Center, 2004),同样是从 EF0 到 EF5 级。近年来,我国也逐渐建立起龙卷灾害调查体系,2019 年制定了中国《龙卷强度等级》标准(中国气象局, 2019),其共分为四级,一级对应 EF0 级,二级对应 EF1 级,三级对应 EF2、EF3 级,四级对应 EF4、EF5 级。

就全球而言,美国是发生龙卷频率最高的国家,每年有 1000 多个龙卷生成(王东海等, 2018)。Brooks et al (2003) 研究发现,龙卷与地形及海陆分布存在一定联系,在大地形以东,并且南面临海的区域是龙卷的多发区,Markowski and Richardson (2010) 同样指出墨西哥湾暖湿气流北上与来自落基山东侧的下山暖气流在美国大平原地区交汇,为龙卷的发生提供了不稳定层结条件。高低空急流耦合及地面高温高湿区是龙卷的易发区(Rasmussen et al, 2000),并且龙卷风暴通常是在干线、暖锋以及干线与暖锋形成的锢囚锋三种天气尺度边界线上发展起来的(Hamill et al, 2005; Lee et al, 2006)。对于龙卷天气的环境参数研究,Johns et al (1990) 统计发现,在美国 CAPE 和垂直风切变与龙卷的产生关系最为密切,之后 Brooks et al (2003) 根据探空数据和再分析资料指出,CAPE、低层垂直风切变、抬升凝结高度、中层垂直温度递减率等环境参数是龙卷发生与否的重要影响因子,并且在进一步的研究中发现,将这些参数进行组合,能较好的应用于龙卷落区的潜势预报(Craven and Brooks, 2004)。

对于我国而言,强龙卷主要发生在东部平原、华南、东北等地势平坦的地区(范雯杰和俞小鼎, 2015; 冯佳玮等, 2017; 郑永光, 2020; 郑永光等, 2021),江河湖泊、海陆分布等下垫面差异也对强龙卷生成有一定的促进作用。朱红蕊等(2015)统计黑龙江省近 60a 龙卷事件指出,黑龙江省龙卷主要发生在松嫩平原腹地,绥化及齐齐哈尔地区为主要高发地。王秀明等(2015)选取近年发生在东北地区 13 次龙卷的典型个案,发现绝大多数东北龙卷发生在冷涡背景下,冷涡后部短波槽为直接影响系统,环境条件表现出温度直减率大,高低空垂直风切强而低层相对较干的特点。才奎志等(2022)收集了冷涡背景下辽宁 77 个龙卷个案,并对冷涡背景下龙卷与热带气旋龙卷的热力、动力环境参数进行了对比分析。对于华南地区,台风龙卷主要发生在台风外围云带中,台风前进方向东北侧的强低空急流带来充沛的水汽和强低空垂直风切变,是龙卷生成的有利条件,龙卷风暴多为浅对流风暴或微型超级单体(黄先香等, 2019a; 2019b)。江淮平原地区,冷涡后部龙卷和台风外围龙卷均有出现(姚叶青等, 2012; 郑媛媛等, 2015; 徐芬等, 2021; 慕瑞琪等, 2022),江苏北部为龙卷多发地,龙卷常常出现在梅雨期典型的暴雨天气形势中,对流有效位能通常较东北和华南龙卷更高(曾明剑等, 2016)。

辽宁地处东北平原下游,该地区是我国三大龙卷易发区之一(Yao et al, 2015),其地形及海陆分布与美国大平原地区有着相似之处。辽宁地区几乎每年都会有龙卷生成(白华等, 2023),2019 年 7 月 3 日和 8 月 16 日,龙卷分别穿过开原及营口市,造成重大的财产损失甚至是人员伤亡(袁潮等, 2021, 2022),因此对辽宁地区龙卷进行研究是十分必要的。目前中国的龙卷气候统计主要基于《中国气象灾害大典》及《中国气象灾害年鉴》

(范雯杰和俞小鼎, 2015), 有相当多的龙卷并未被收录, 故本文拟利用多途径收集辽宁龙卷资料, 对辽宁地区龙卷进行相对系统全面的统计, 在此基础上研究本地区龙卷时空分布、环流背景等特征, 并与美国龙卷高发区的气候背景进行对比, 最后总结典型环流背景下辽宁龙卷的概念模型, 以期为辽宁龙卷预报奠定基础。

1 资料来源与方法

1.1 资料来源及选取依据

2000 年以前, 我国尚未建立完整详尽的龙卷事件记录, 为龙卷研究造成一定困难。为尽可能对辽宁龙卷进行详细而全面的统计, 较之前学者的研究扩大了资料搜索范围, 收集龙卷事件的参考资料包括: 《中国气象灾害大典-综合卷》, 统计时段为 1961-2000 年; 《中国气象灾害大典》(辽宁卷), 统计时段为 1951-1983 年; 《中国气象灾害年鉴》(中国气象局, 2005-2019 年) 统计时段为 2004-2019 年; 国家气象观测站人工观测龙卷记录, 统计时段为 1951-2008 年; 县级历史气象灾情资料, 统计时段为 1984-2020 年; 《辽宁省志》(气象志), 统计时段为 1957-2005 年。同时结合各级气象网站、电视、报纸等媒体所公布的龙卷图片和视频等对龙卷个例进行了补充。在上述龙卷数据收集的基础上, 本文采用如下准则来判别记录龙卷个例的真伪:

首先, 所有龙卷事件根据时间及地点查找当日附近地面观测站点记录的雷暴及降水情况(2005 年之后加入雷达反射率因子资料), 用以排除可能的尘卷风等干扰。

之后将龙卷事件设置质量控制等级, 分别为 QC0~QC3 四个等级来代表质量依次递增: QC0 级为经过第一步质控后所有资料来源范围内记录龙卷事件, 共 138 次; QC1 包括灾情记录中有目击者描述漏斗云、“黑龙”、“黑柱子”等形容龙卷的相关内容, 灾情中有明显的狭长的破坏特征, 雷达回波经过灾情记录地点, 在多普勒天气雷达径向速度图上有明显低层中气旋或龙卷涡旋特征(TVS)与之对应, 地面气象观测站点的人工观测记录; QC2 为经过核实过的龙卷漏斗云的照片或视频资料; QC3 为有专门的气象专家经过详细的现场灾调形成报告或公开发表文献, 该部分不再进行重新定级。

为兼顾龙卷事件的真实性和全面性, 选取 QC1 质控等级以上的龙卷事件作为本文研究的对象, 值得指出的是, 该质控等级仍可能包含小部分下击暴流、阵风锋龙卷(gustnado)等非龙卷事件, 但在一定程度上能够较好表征辽宁龙卷的气候分布特征。同时需要说明的是水龙卷未包含在本文统计范围之内, 但不排除水龙卷上岸登陆后造成灾害而被记录。

本文使用的气象数据资料为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5(第五代) $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 全球分析格点资料(下简称 ERA5 资料), 时间分辨率为 1h, 包含了地面及 37 个标准等压层(1000 hPa 至 1 hPa)。

前文提到, 龙卷与地形及海陆分布存在一定联系, 美国中南部平原为强龙卷的高发区, 因此也被称为“龙卷走廊”。该地区存在适合长生命史超级单体风暴生成的环境条件: 高空偏西急流、低层东南侧来自墨西哥湾的暖湿气流、中层西南侧来自新墨西哥州的干暖气流以及西北侧翻山南下的干冷气流交汇造成了强的动力和热力不稳定环境条件(Schultz et al, 2014; 王东海等, 2018)。对比发现, 东北平原地区地形及海陆分布与美国“龙卷走廊”有着相似之处, 比如低层南侧有来自渤海湾的暖湿气流, 西侧存在翻越大兴安岭余脉后下沉的干暖气流, 且该地区地势低洼平坦、江河湖泊水网交织, 在合适的热动力条件下, 大气对流强烈发展利于龙卷产生。为研究中美龙卷环境背景差异, 选取美国国家海洋和大气管理局(NOAA)风暴预测中心(SPC)龙卷数据库(<https://www.spc.noaa.gov/climo/online/sp3>)中所记录的龙卷事件(记录了自 1950 年以来由美国国家气候数据中心和风暴预测中心收集的龙卷事件)。本文选取美国 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的三个龙卷高发代表区域(图 1), 分别为 $36^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 、 $97^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{W}$, 该区域为美国龙卷走廊的代表区域, 亦是强龙卷高发区, 以下简称 UC; $31^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、

86~90 °W, 主要包括美国田纳西州及密西西比洲, 是美国龙卷高致死率的地区(黄大鹏等, 2017), 以下简称 USE; 38~42 °N、75~79 °W, 选取该区域的主要原因是其与辽宁纬度相近, 地形方面西侧为东北-西南走向的阿巴拉契亚山脉, 南侧为切萨皮克湾, 东侧为海洋, 同样与辽宁类似, 以下简称 UE。选取 39~44 °N、119~124 °E 作为中国辽宁龙卷高发代表区(以下简称 LN, 包括辽宁除东部山区外的大部分地区, 也包括内蒙东部的部分地区), 与美国龙卷高发区进行对比, 需要说明的是, 选取比美国略大的区域原因一方面是尽可能包括辽宁龙卷的高发区域, 另一方面由于所选区域内包含一部分海洋, 略微扩大区域也可以使得对比地区的实际面积尽量一致。

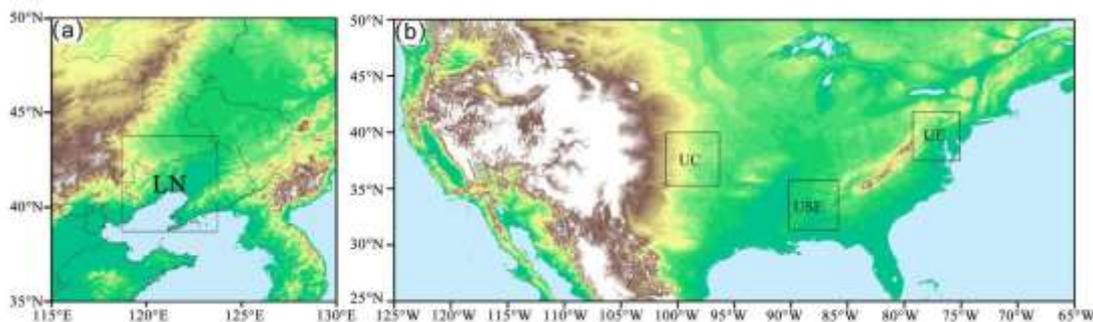


图 1 (a) 中国辽宁龙卷高发代表区域与 (b) 美国龙卷高发代表区域示意图

UC 区: 36~40 °N、97~101 °W; USE 区: 31~35 °N、86~90 °W; UE 区: 38~42 °N、75~79 °W

Fig. 1 Schematic diagram of the representative regions with high incidence of tornadoes in Liaoning Province, China(a) and in the United States (b)

UC area : 36~40 °N, 97~101 °W; USE area: 31~35 °N, 86~90 °W; UE area : 38~42 °N, 75~79 °W

1.2 龙卷定级方法

由于我国的《龙卷强度等级》给出的灾害指示物较少, 灾害特征描述较为模糊, 本文仍采用美国的龙卷强度分级方法。用以确定龙卷 EF 等级的 28 种指示物很多具有美国特点, 本文采用范雯杰和俞小鼎(2015)提出的定强方法, 保留原有确定 F 等级的一些判据, 与新的 28 种标志物判据适当结合, 形成辽宁地区关于龙卷强度 EF 级别的判据; 为尽量减小个人主观判断的误差, 采取多位气象学者进行独立判别, 差异个例进行二次判别。考虑到早期东北农村木质电杆与美国金属电杆抗风能力相差较大, 电线杆倒伏、折断定为 EF1 级(高压电杆除外), 此外, 对灾情描述不详、无有效灾情指示物的个例, 其强度按照较低级别判定。通常将 EF0 和 EF1 级龙卷称为弱龙卷, 将 EF2 级或以上级龙卷称为强龙卷(significant tornadoes)。

2 辽宁龙卷时空分布特征

2.1 龙卷等级特征

根据 QC1 质控等级, 1971-2020 年辽宁地区共记录到龙卷 105 次, EF2 或以上级强龙卷 17 次(包含 EF4 级 1 次、EF3 级 2 次), Brooks et al (2003) 研究指出, 龙卷强度分布存在一定的规律性, $F(n+1)$ 与 $F(n)$ 强度的比值一般在 0.1~0.36, 且超级单体龙卷越多, 其比值越高(非超级单体产生龙卷通常较弱), 该特征可用来检验龙卷记录资料的可靠性。以 EF3 级与 EF2 级之比为例, 1961-2010 年全国范围内比值为 0.11(范雯杰和俞小鼎, 2015),

本文统计的辽宁地区比值为 0.14，可能与我国华南地区多台风龙卷，强度通常较弱有关。辽宁与 UE 区的龙卷强度分布特征较为相似（图 2），UC 区呈现出线性分布，而 USE 区 EF2 以上级别龙卷比例最高。除 UC 区以外，其他地区 EF1 级与 EF0 级龙卷数量大致相等，这可能是由于 EF0 级弱龙卷更难被监测和记录下来。

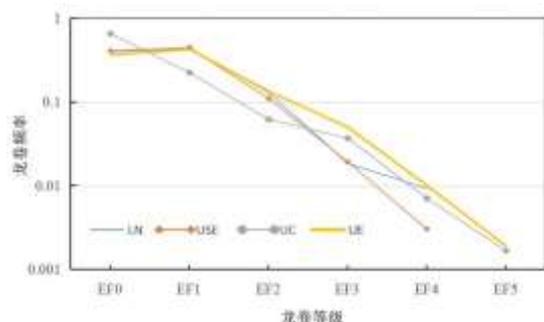


图 2 1979-2020 年辽宁与美国代表区域龙卷强度分布

龙卷强度按照 EF 等级划

Fig. 2 Probability distribution of tornado intensity in the representative regions of Liaoning and the United States from 1979 to 2020

the tornado intensity is divided according to the EF scale

2.2 龙卷空间分布

辽宁龙卷整体上分布于低海拔地区，主要包括辽宁东、西部沿海及辽河平原地区，EF2 及以上级别强龙卷主要分布在辽宁中部以西地区，辽宁东南沿海地区也是龙卷多发地，但整体强度偏弱（图 3）。龙卷分布呈现出明显季节变化特征（图 4），辽宁汛期之前（5-6 月）龙卷主要发生在西部地区，高发区位于辽西走廊至西北部的阜新地区，呈东北—西南带状，同时值得指出的是，辽宁西部山区汛前也偶有龙卷发生，而在汛期及汛期之后鲜有发生，这一气候特点可作为业务上对该地区龙卷预报的重要参考；7-8 月随着副热带夏季风的北推，辽宁进入主汛期，龙卷数量增多，分散地分布于低海拔地区，以辽西走廊及辽河平原中下游地区为主；9-10 月龙卷数量明显减少，主要分布于辽宁东部沿海地区。

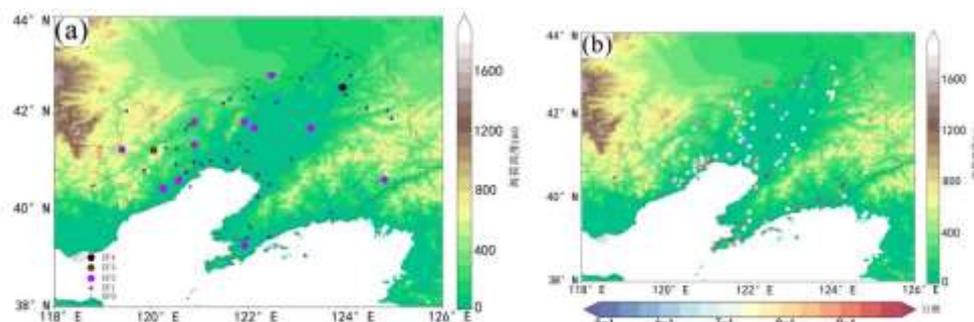


图 3 1979-2020 年辽宁龙卷空间分布（填色：海拔高度）

(a) 龙卷强度 (EF0-EF4), (b) 龙卷发生时间

Fig. 3 The spatial distribution of Tornadoes in Liaoning Province from 1979 to 2020 (shaded: altitude)

(a) tornado intensity (EF0-EF4), (b) tornado time

2.3 龙卷时间分布

统计得到 1971-2020 年 97 个龙卷日共发生 105 次龙卷事件 (图 4), 其中 90 个龙卷日记录到一次龙卷, 最多一日记录到三个龙卷。年均龙卷数量为 2.1 个, 年平均龙卷生成密度为 1.4×10^{-5} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$ 。美国每年有多于 1000 个龙卷生成, 同时, 相比中国辽宁地区 (最多单日记录到 3 个龙卷), 美国龙卷日的龙卷发生频次也明显偏高, 例如 2008 年 5 月 23 日 UC 区记录到当日发生 70 次龙卷事件。美国全境年均龙卷密度为 1.33×10^{-4} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$, UC 区年均龙卷密度为 3.7×10^{-4} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$, USE 区年均龙卷密度为 3.2×10^{-4} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$, UE 区年均龙卷密度为 1.5×10^{-4} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$, 与美国全境及 UE 区相比, 辽宁龙卷密度约为其 1/10。

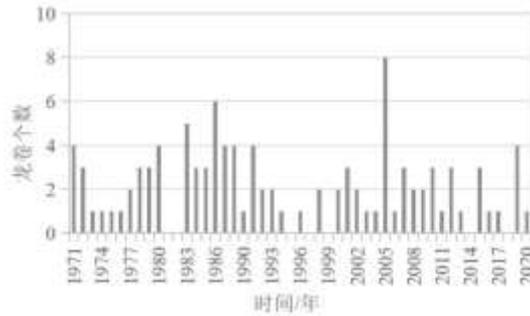


图 4 1971-2020 年辽宁龙卷个数年变化

Fig. 4 Annual variation of tornadoes in Liaoning from 1971 to 2020

辽宁龙卷存在明显的季节变化 (图 5), 多发于每年的 5-9 月, 占全年总数的 95%, 高发时段相对集中, 1-3 月及 11-12 月无龙卷记录, 这与美国龙卷的季节分布特征差别很大。美国龙卷整体上多发于晚春时节 (4-6 月), 并在全年均有出现。值得指出的是, 美国东部与我国东北处于同纬度的地区 (以图 5 中 UE 区为例), 但其一年中几乎每个月都会有龙卷发生。

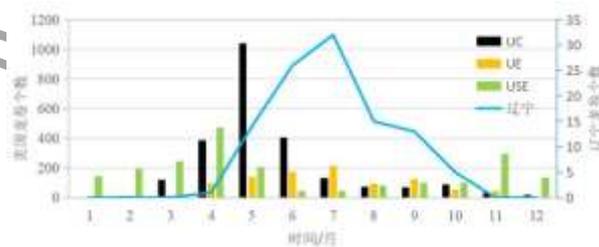


图 5 1971-2020 年中国辽宁 (折线) 与美国代表区域 (柱状) 龙卷月变化

Fig. 5 Monthly changes of tornadoes in Liaoning(line) and the representative regions of United States(histrogram) from 1971 to 2020

辽宁龙卷有明确开始时间的记录共 70 次，大多出现在午后到傍晚（图 6），14-19 时出现的龙卷个数占总个数的 67%，17-18 时是多发时段。美国龙卷主要出现在下午和晚上，约一半以上龙卷出现在 15-20 时（当地时），其最高发时段同样也出现在 17-18 时（王东海等，2018）。龙卷的这种日变化特征一方面是由于太阳辐射，午后近地面层温度的升高，易形成强烈的不稳定层结，大量不稳定能量的积累和释放为龙卷等强对流天气产生提供有利的环境条件，另一方面 00-05 时无龙卷记录也与夜间观测缺失有关。

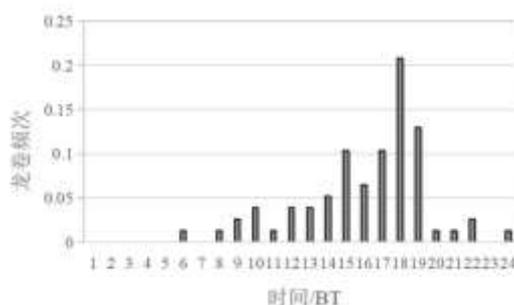


图 6 1971-2020 年辽宁龙卷逐小时变化

时间代表记录到龙卷的开始时间，对应数字代表龙卷发生在当前时间到前 1h 时段内

Fig. 6 Hourly changes of tornadoes in Liaoning from 1971 to 2020

The time represents the start time of the tornado recorded, and the corresponding number represents that the tornado occurred from the current time to the previous 1h period

3 中国辽宁与美国龙卷高发区环境特征对比

3.1 龙卷高发季关键参数对比分析

前文提到，辽宁龙卷密度不及美国的 1/10，诚然由于在地形、海洋尺度方面，我国东北地区相比美国都较小，可能导致不同性质气流的强度相对较弱，气团属性差异不显著，表现为单次对流事件的环境参数值较美国明显偏小，但基于大尺度环境背景分析辽宁龙卷仍具有重要意义。

龙卷生成有利环境条件包括强垂直风切变、充足的水汽条件以及足够的能量条件。强龙卷参数（STP）（公式 1.1）是最能表征龙卷潜能的环境参数，该参数被美国业务上用于预报龙卷发生的可能性（Grams et al, 2012），当 STP 大于 1 时，易发生 EF2 以上级别强龙卷。

$$STP = \left(\frac{MLCAPE}{1000}\right) \times \left(\frac{2000 - MLLCL}{1500}\right) \times \left(\frac{SRH1}{100}\right) \times \left(\frac{SHR6}{20}\right) \quad 1.1$$

式中：MLCAPE 代表近地面 150 hPa 混合后对流有效位能，MLLCL 代表混合后的抬升凝结高度，SRH1 代表 0~1 km 风暴相对螺旋度，SHR6 为 0~6 km 垂直风切变。

统计 1979-2018 年美国三个代表地区（UC、USE、UE）的龙卷事件，UC 区发生龙卷 2381 次，主要集中于 4-6 月（1834 次，77%）；USE 区发生龙卷 2072 次，主要集中于 3-5

月（922次，44%）；UE区发生龙卷978次，主要集中于5-7月（528次，54%），LN区主要集中于6-8月（72次，71%）。为探求中美龙卷环境背景差异，选取上述地区龙卷高发季节环境参数均值进行对比分析（图7），可见四个区域龙卷环境背景具有较大差异性，UC区龙卷发生次数最多，环境背景条件表现为强热力及动力不稳定（高SHR6、高SRH1、高CAPE）；USE区表现为高SHR6、中等SRH1、低CAPE，低CAPE与该地区龙卷季更早有关；UE区表现为中等SHR6、较低SRH1、低CAPE；LN区表现为低SHR6、低SRH1、高CAPE，分析LN区明显偏少的原因，可能是因为辽宁主汛期处于副热带高压外围维持高温高湿环境中，CAPE平均值偏高，表现为低动力不稳定、高热力不稳定的环境背景，但多数情况下缺少对流触发机制。东北地区典型龙卷个例（王秀明等，2015；袁潮等，2021；蔡康龙等，2021）发生的环境背景表现为中等到强的CAPE和强中、低层风垂直切变，也有少数出现于弱风垂直切变环境下（王秀明等，2015；王婷婷等，2017；袁潮等，2022）。而相比之下，美国相当一部分龙卷产生于强风垂直切变和相对较低的CAPE的环境条件下（Sherburn and Parker, 2014），同样多见于我国台风外围龙卷（黄先香等，2019a；李彩玲等，2019；Bai et al, 2020；郑永光，2020；郑永光等，2021）。

整体来看，美国三个区域复合参数STP与龙卷数体现出很高的一致性，而中国LN区因为高CAPE、低SRH1，呈现出STP指数略高于UE区，但是龙卷发生概率低。分析STP差异不明显而LN区概率偏低的原因，可能与STP阈值设定有关，该阈值是Grams et al (2012)基于美国龙卷发生各环境参数均值所设定，与中国辽宁龙卷的环境参数存在差异（王秀明等，2015；才奎志等，2022）。本文统计2018年夏季（6-8月）辽宁锦州站（54337）探空，对比ERA5再分析资料发现，ERA5资料925 hPa风速偏小约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；环境温度垂直递减率较实况探空低 1.5°C ，另外中层干层亦不如观测探空显著，表明ERA5资料显著低估了龙卷发生的概率，其或许是基于ERA5的复合参数STP与龙卷数并未体现出很高的一致性的原因之一。此外有研究（郑永光等，2021；袁潮等，2021）指出，2019年开原EF4级龙卷，再分析资料表征中等到弱低层风垂直切变，而风廓线雷达在临近时刻显示出强的 $0\sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变。综上，虽然再分析资料显示，辽宁在气候态上表现为相对小的SRH1，大量个例研究表明（王秀明等，2015；袁潮等，2021；蔡康龙等，2021；徐玥等，2022），925 hPa的超低空急流是东北龙卷的环流特征之一。此外，Roebber (2009)研究美国STP中单独各项对于龙卷预报的评分时指出， $0\sim 500 \text{ m}$ 的SRH评分最高，MLCAPE评分最低。同样对于LN区而言，70%龙卷发生于夏季（6-8月），高温高湿的环境背景使得以CAPE为代表的热力条件不是制约龙卷生成的主要因子。

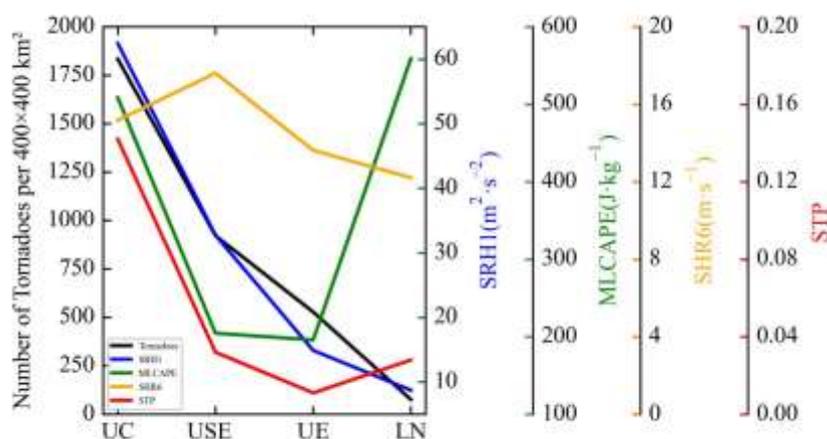


图7 1979-2018年各区域龙卷高发季环境参数对比

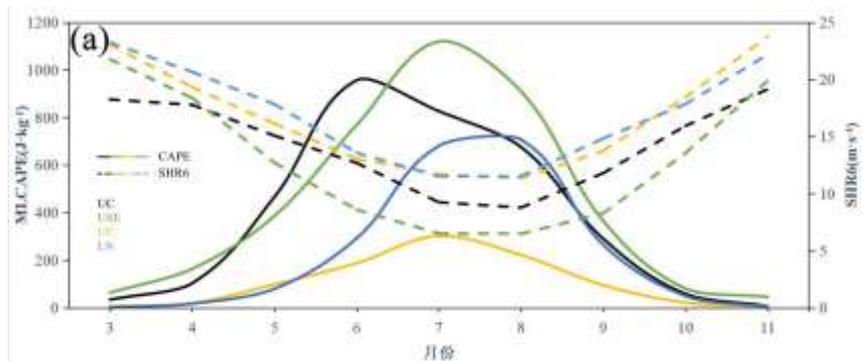
Fig. 7 Comparison of environmental parameters in the high-incidence season of tornadoes in various regions from

3.2 龙卷关键参数变化趋势分析

强对流天气发生需要良好的热力和动力条件配合 (Brooks et al, 2003), 但在气候态上以 CAPE 为代表的热力不稳定和以 SHR6 为代表的动力不稳定却呈现反位相的变化趋势(图 8a), 两者的配置是强对流天气的产生的关键。美国各代表区龙卷季均早于 LN 区 (即便是同纬度地区, 图 5), 这与其热力和动力条件能够更早达到合适的配置有关。图 8b 可见, 美国春季 CAPE 增长迅速, 且 SHR6 仍维持相对较高数值, 因而很好对应美国龙卷的高发季 (图 5), 而中国 LN 区 5 月之前 CAPE 明显偏低, 表明热力条件差, 即使 SHR6 与美国地区相差不大 (甚至更高), 能量条件制约强对流天气的发生。暖季 (6-8 月) 受副热带夏季风的影响, 辽宁地区 CAPE 较前期迅速增大 (图 8a), LN 区比同纬度 UE 区的 CAPE 明显偏高, 但龙卷个数却明显偏少 (图 5), 同样表征 CAPE 为代表的热力条件对龙卷的指示意义相对较差 (Roebber, 2009)。综上所述, CAPE 与 SHR6 的气候态表征强风暴 (通常以超级单体风暴为代表) 发生的可能性 (Brooks et al, 2003), 但龙卷并不仅产生于超级单体风暴之中, 故 CAPE 和 SHR6 仅能部分地解释不同地区龙卷季节差异性特征。

美国龙卷最高发的“龙卷走廊” (以 UC 区为代表) SRH1 较其他三个地区明显偏高, 这与低层风速的大小和风向随高度变化有关 (图 8b), 各地区在其他环境参量无明显差异的情况下, SRH1 对于龙卷生成的至关重要 (Lu et al, 2015; Tippett et al, 2016; Coffey et al, 2019)。此外, 同纬度的 LN 区与 UE 区相比, 暖季 LN 区 CAPE 比 UE 区更高, 低层风速及 SRH1 明显偏低, 对应的龙卷密度也偏低 (图 5), 在一定程度上表征动力条件是中国 LN 区较美国龙卷高发区龙卷明显偏少的重要因素。同时需要指出的是, USE 区在暖季 (6-8 月) 相较其他月份 SRH1 同样偏低, 龙卷发生次数比 LN 区更多 (图 5, USE 区年均 4.3 次)。这与上述分析并不矛盾, 首先 6-8 月确实是 USE 区龙卷最少的时段 (图 5, 仅占年总数 8%), 同时, 6-8 月 USE 区的 CAPE 较其他地区显著偏大 (图 8a), 对比 USE 区与 LN 区, 推测在低 SRH1 条件下, 显著偏大的 CAPE 对龙卷产生有一定贡献 (这其中可能有相当一部分是非中气旋龙卷), 但影响相对较小。综上分析, 在满足强风暴的发生的环境背景下, SRH1 是 LN 区龙卷生成的主要制约条件。

低层水汽含量对东北龙卷发生极为重要 (王秀明等, 2015)。对比不同区域的低层湿度 (图 8c), 925 hPa 比湿 (q_{925}) 均存在明显的季节变化趋势, 而其中 LN 区季节变化最为明显, 龙卷高发季 (6-8 月) 对应低层湿度最大季节, 平均值为 $11.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。美国三个代表区同样在 6-8 月低层湿度达到最大, 除 6-8 月之外, 三个代表区的低层湿度较 LN 区明显更大。但与 LN 区不同的是, 各代表区龙卷高发季与低层湿度最大季节并不重合。UC、USE、UE 的龙卷高发季 925 hPa 比湿的平均值分别为 8.6 、 7.1 、 $8.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显小于 LN 区龙卷高发季的低层湿度。结合上述分析, 表明从气候背景的角度分析, 夏季中国 LN 区与美国龙卷高发区龙卷数量明显差异可能由动力不稳定条件主导, 而春季低层湿度过小是 LN 区龙卷数量偏少的原因之一。



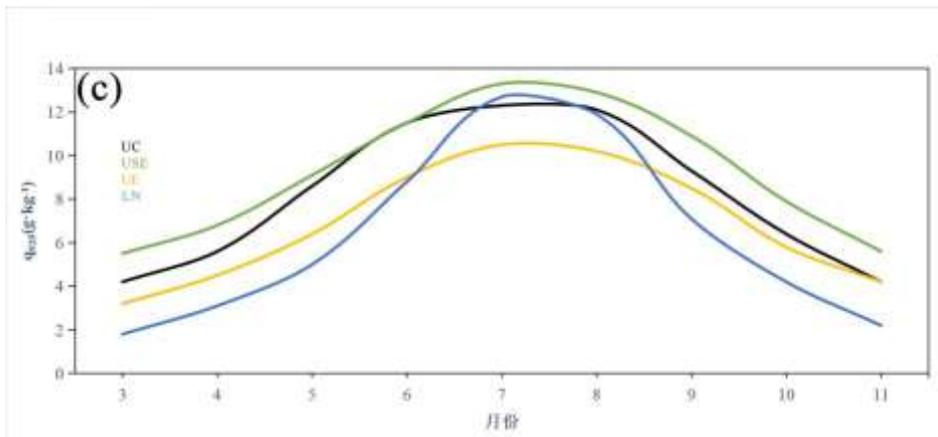
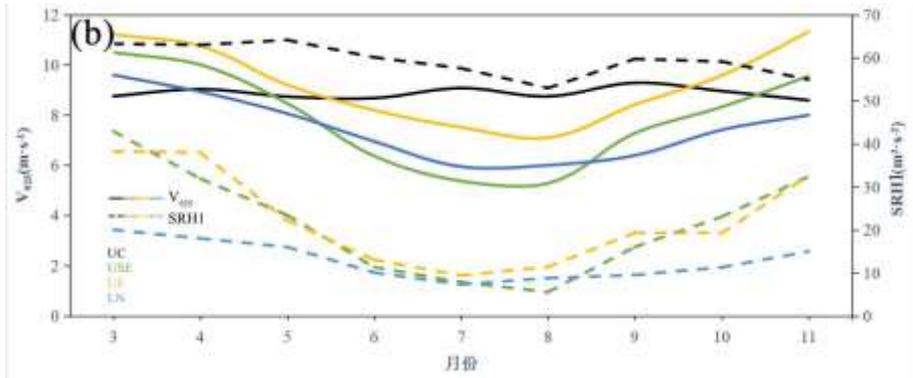


图 8 各区域龙卷高发季环境参数对比

(a) CAPE 和 0~6 km 垂直风切变, (b)925 hPa 风速和 0~1 km 风暴相对螺旋度, (c)925 hPa 比湿

Fig. 8 Comparison of environmental parameters in the high-incidence season of tornadoes in various regions

(a) CAPE and SHR6, (b) wind speed at 925 hPa, (c) specific humidity at 925 hPa

此外, 需要指出的是, 本文还对 LN 区龙卷高发季 (6~8 月) STP 和龙卷个数的时间序列及相关性进行了分析 (图 9), 图 9a 显示的一个显著特征是多龙卷年份 (如 1985 年、1990 年和 2005 年) 均与 STP 大值对应, 但部分 STP 大值年份并未对应多龙卷, 如 1994 年、2017 年, 其是否与龙卷样本的完整度有关还有待进一步研究。同时, 相关分析 (图 9b) 可见两者的相关系数达到 0.63, 且通过 $p < 0.01$ 的显著性检验, 表明两者存在一定的正相关。分析相关性不甚显著的可能原因是龙卷日样本过少, 过多的非龙卷日影响了 STP 季节平均值与龙卷个数之间相关性, 并且相较于整体气候背景的研究, 时间序列相关性可能对个别样本的缺失更为敏感。

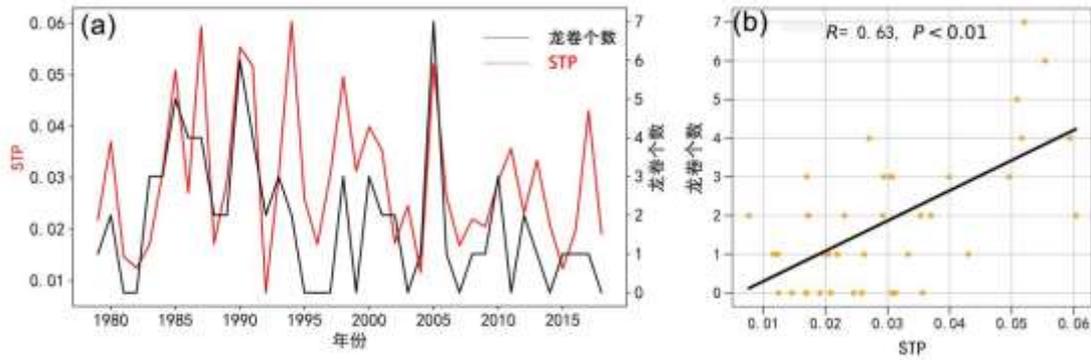


图 9 1979–2018 年辽宁龙卷个数和 STP 的 (a) 年变化及 (b) 相关性

Fig. 9 The conceptual model of tornado under typical synoptic background in Liaoning

4 辽宁龙卷环流背景及物理量场

4.1 辽宁龙卷环流背景特征

基于 500 hPa 高空形势场分析产生龙卷的天气尺度环流特征, 统计发现 87% 的辽宁龙卷个例与冷涡有着直接或间接的关系, 其次为高空槽 (占 8%), 1 次为北上变性台风影响, 其余个例无明显影响系统。基于龙卷发生地相对于冷涡的位置的差异, 主要包括以下几种形势: 冷涡后部型, 冷涡前部型, 冷涡底部短波槽型, 冷涡主体型及其他型 (包含 2 次冷涡东北象限)。其中冷涡后部型占 12%, 冷涡底部短波槽型占 49%, 冷涡前部型占 16%, 冷涡主体型占 6%。

若以对流触发的物理机制作为着眼点, 冷涡后部型主要机制为高空干冷气流强迫, 冷涡后部横槽引导冷空气东移南下, 低层有暖舌或热低压配合, 中高层干冷气流提供了强热力及动力不稳定条件; 冷涡主体型最主要特征为龙卷发生区域强热力不稳定层结, 冷涡处于减弱期, 环境垂直风切变较弱, 前期以晴好天气为主, 午后近地面的辐射加热进一步加强热力不稳定层结, 雷暴出流与各类边界层辐合线 (干线、海风锋等) 相遇时, 容易发展成龙卷风暴。两者共同点表现为: 一是低层的天气尺度强迫较弱, 多为中尺度边界层辐合线触; 二是代表龙卷潜能的大尺度环境参数在上述两种龙卷天气中表现并不好, 这可能是中尺度近风暴环境对两类龙卷影响更大, 并且其中有相当一部分为非超级单体龙卷。上述两种类型占比不大 (共 18%), 且无论是潜势预报或是短临预警在现阶段难度都极大, 故本文只作简要分析, 而重点对余下两类龙卷加以研究。

冷涡底部短波槽及低涡前部型主要机制为低层锋生作用。冷涡前部型及冷涡底部短波槽型为代表的龙卷天气主要发生在高空冷涡东南象限或冷涡底部短波槽前。冷涡前部型环流形势特点表现为 500 hPa 在贝加尔湖东南部有低涡处于强烈发展阶段, 配合高空强冷中心, 环流中心距离辽宁地区大约 8~10 个纬距, 整层系统发展深厚并随高度略向西北倾斜; 冷涡底部短波槽型与低涡前部型相似, 只是通常冷涡强度较后者略弱, 但高空冷涡位于吉林西部到黑龙江中西部一带, 冷涡底部短波槽快速移过辽宁, 有时在短波槽也伴有中 α 尺度低涡, 整层系统近于垂直。两者相同点为地面有锋面气旋发展, 天气尺度锋面对龙卷风暴触发起关键作用, 龙卷多出现在冷锋前侧, 下一小节将对其加以详细分析。

4.2 典型环流背景下辽宁龙卷环境条件分析

依据前文研究结果, 选取龙卷典型天气背景, 即冷涡前部型及冷涡底部短波槽型龙卷个例 (大约占辽宁龙卷总数 65%), 其中有明确记录时间共 45 例。以龙卷发生地为中心, 将龙卷发生前 1 h 的环流背景及物理量参数的空间分布进行合成分析 (图 10)。图 10a 可见,

龙卷高发中心位于 500 hPa 冷涡底部，以偏西气流为主，距冷涡中心约 9 个纬距，处于位势梯度的大值区内，0~6 km 垂直风切变的分布相对较为分散，龙卷中心均值为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

分析 925 hPa 低空形势场（图 10b），龙卷位于低空低涡西南侧，同样处于强位势梯度区内。西南气流风速平均值超过 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，对应 0~1 km 的风暴相对螺旋度大值区。相较于中层垂直风切变，SRH1 分布更为集中，龙卷高发区位于 SRH1 核心的西北象限，平均值约为 $70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，同样为低层大风速核的左侧，分析其可能原因是：急流出口区左侧气旋性辐合，伴随低层抬升运动，有利于对流的触发；同时急流轴左侧具有明显的气旋性切变涡度，这可能会为伴随旋转的强风暴提供一定的初始涡度贡献。

图 10c、10d 可见龙卷高发区位于地面气旋底部偏西约 4~5 个纬距，地面冷锋前侧 1~2.5 个经距，地面温度脊顶部，干线东侧 1~1.5 个经距，地面湿舌附近，露点温度 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。综上，得到辽宁典型环流背景下龙卷概念模型示意图（图 11）。

同时图 10e 可见，冷锋前侧对流有效位能呈现东北—西南的带状分布特征，龙卷高发区并不在 CAPE 最大值附近，而是位于大值中心的左前侧，即 CAPE 梯度的大值区内，平均值约为 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。最后给出综合参数 STP 分布（图 10f），其与 SRH1 分布较为类似，这也在一定程度上反映出 SRH1 对于辽宁龙卷的关键作用。龙卷中心 STP 约为 0.3，其东南侧存在 STP 为 0.7 的相对大值中心，但分布范围较小。若以 STP 来代表适宜龙卷发生的环境背景，其范围过小表征辽宁龙卷生成更为苛刻，这可能是导致辽宁龙卷相较美国明显偏少且龙卷日龙卷频次明显偏低的原因之一。

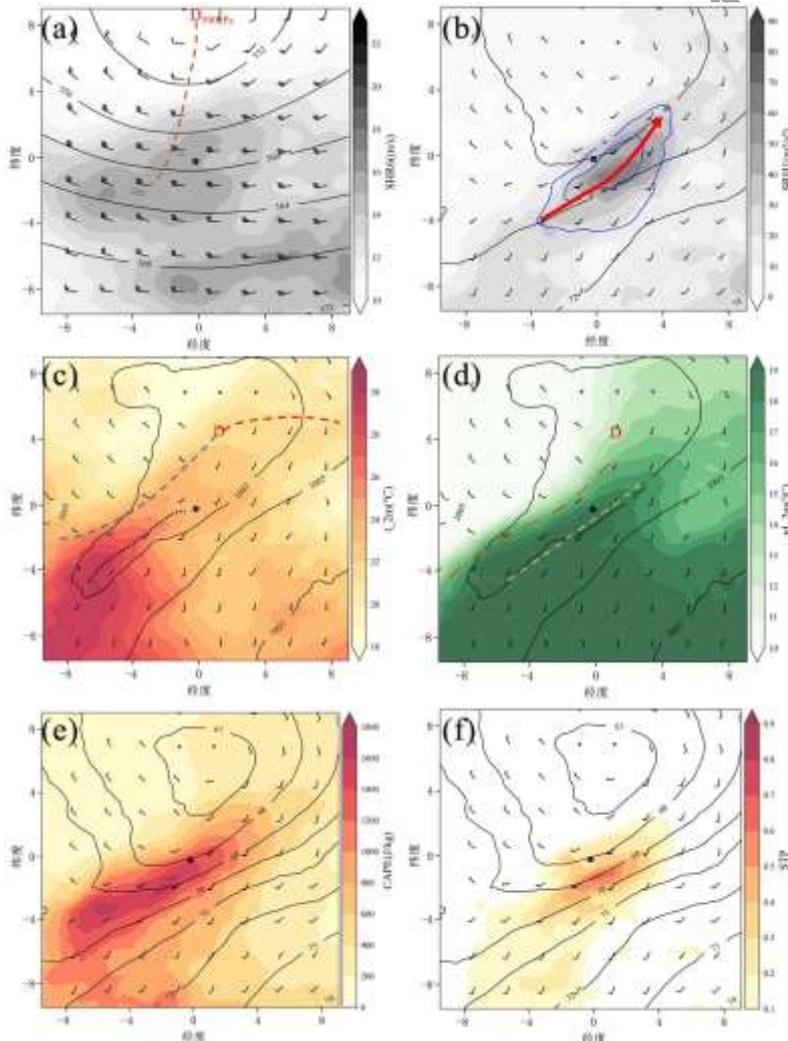


图 10 以龙卷为中心的物理量场分布

- (a) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场及 0~6 km 垂直风切变 (填色) (棕色虚线: 槽线)
- (b) 925 hPa 高度场 (黑色等值线, 单位: dagpm)、风场及 0~1 km 风暴相对螺旋度 (填色) (蓝色等值线: 等风速线, 红色箭头: 显著流线, 图 e f 同)
- (c) 海平面气压场 (等值线, 单位: hPa)、风场及地面 2 m 气温 (填色) (蓝色虚线: 冷锋, 红色虚线: 暖锋, 黑色圆点线: 地面暖温度脊)
- (d) 海平面气压场 (等值线, 单位: hPa)、风场及地面 2 m 露点温度 (填色) (棕色点划线: 干线, 绿色箭头: 湿舌)
- (e) 925 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场及 CAPE (填色)
- (f) 925 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场及 STP (填色)

Fig. 10 The distribution of the environmental parameters centered on the tornado

- (a) 500 hPa height field (isoline , unit: dagpm), wind field, and 0~6 km vertical wind shear (shaded). (brown dashed line : trough line),
- (b) 925 hPa height field (isoline , unit: dagpm) , wind field, and the relative helicity of the 0~1 km storm (shaded) (blue isoline: isowind line, red arrow: significant streamline; the same in the Figs 3e, 3f),
- (c) sea level pressure field (isoline , unit: hPa), wind field and surface temperature at 2 m AGL (shaded) (blue dotted line: cold front, red dotted line : warm front, black dotted line: ground warm temperature ridge),
- (d) sea level pressure field (isoline , unit: hPa), wind field and dew point temperature at 2 m AGL (shaded) (brown dot dashed line : the main line, green arrow:wet tongue),
- (e) 925 hPa height field (isoline , unit: dagpm) , wind field, and the CAPE (shaded),
- (f) 925 hPa height field (isoline , unit: dagpm) , wind field, and the STP (shaded)

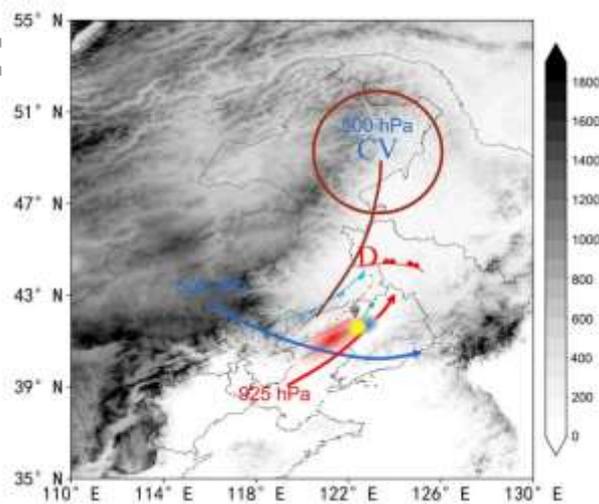


图 11 典型环流背景下辽宁龙卷概念模型

灰色填色：海拔高度，棕色实线：500hPa 槽线，红色箭头：925 hPa 显著流线，蓝（红）色线加三角（半圆）：冷（暖）锋，黑色圆点线：地面暖温度脊，棕色点划线：干线，绿色箭头：湿舌，红色阴影区：CAPE，蓝色阴影区：0~1 km 风暴相对螺旋度，黄色阴影区：STP

Fig. 11 The conceptual model of tornado under typical synoptic background in Liaoning

grey shaded: altitude, brown solid line : trough line at 500hPa, red arrow : significant streamline at 925 hPa, blue (red) line plus triangle (semicircle) : cold (warm) front, black dotted line : warm temperature ridge at surface, brown dotted line : trunk line, green arrow : wet tongue, red shaded area : CAPE, blue shaded area : 0~1 km storm relative helicity, yellow shaded area : STP

5 结论与讨论

本文统计了 1971–2020 年辽宁龙卷强度等级、时空分布特征，分析了辽宁与美国龙卷高发区环境背景差异以及辽宁龙卷的环流型、关键环境参数分布特征，得到以下主要结论。

(1) 1971–2020 年辽宁地区共记录龙卷 105 次（年均 2.1 次），其中 EF2 及以上级别强龙卷 17 次（年均 0.3 次），相邻强度等级龙卷比例基本符合 0.1~0.36 区间，但 EF0 级弱龙卷可能因难以监测而被显著低估。辽宁龙卷年平均龙卷生成密度为 1.4×10^{-5} 个 $\cdot \text{km}^{-2}$ ，95% 龙卷出现在 5–9 月，日变化特征显示 67% 龙卷出现在 14–19 时，17–18 时是辽宁龙卷明显高发时段。空间分布特征表现为辽宁龙卷整体上发生于低海拔地区，EF2 级以上强龙卷主要分布在辽宁中部以西地区，东南沿海地区多为弱龙卷，辽宁西北部龙卷季明显早于辽宁东南部。

(2) 相比于美国龙卷代表区域，中国辽宁环境参数气候态表现为高 CAPE、低 SRH1、低 SHR6，STP 相近时，龙卷概率远低于美国龙卷高发地区。以 CAPE 为代表的热力不稳定和以 SHR6 为代表的动力不稳定随季节呈现反相位的变化趋势，两者的配置对于龙卷等强对流天气发生至关重要。环境参数平均值与辽宁龙卷个数在年际变化的时间序列上存在正相关。年尺度上美国龙卷多发区的能量条件和动力条件能够更早达到合适的配置，中国辽宁地区能量条件增长较晚、春季低层湿度条件差、且 SRH1 最低，是造成辽宁龙卷密度明显偏小的主要原因。

(3) 87% 的龙卷个例与中层冷涡相关，基于龙卷发生地相对于冷涡的位置的差异，统计得到冷涡后部型占 12%，冷涡底部短波槽型占 49%，冷涡前部型占 16%，冷涡主体型占 6%。冷涡后部型龙卷生成机制为中空干冷气流强迫，冷涡底部短波槽及冷涡前部型龙卷生成要机制为低层锋生作用，冷涡主体型龙卷产生于强热力、弱动力大尺度环境条件下，近风暴环境对龙卷生成具有重要作用。

(4) 辽宁龙卷典型环流特征为：500 hPa 高度上龙卷位于冷涡底部，距冷涡中心约 9 个纬度，0~6 km 垂直风切变为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。925 hPa 高度上龙卷位于低涡西南侧， $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速核的左侧，SRH1 核心附近偏西北象限，平均值约为 $70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。龙卷中心位于东北—西南的带状分布的 CAPE 梯度大值区内，平均值约为 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地面上龙卷位于气旋底部偏西大概 4~5 个纬距，地面冷锋前侧 1~2.5 个经距，温度脊顶部，干线东侧 1~1.5 个经距，地面湿舌附近。龙卷位于 STP 核心西北侧，均值约为 0.3。

需要说明的是，虽然尽可能地扩大了资料搜集范围，仍有大量的龙卷未被记录，并且因为缺少详实的灾情信息，龙卷强度的估计应该较实际情况偏低。龙卷属于极小概率事件，样

本量过少难免对物理量等统计结果的可信度产生影响,并且给今后进一步分季节、分类型及与非龙卷强对流天气对比等研究工作带来挑战。此外,虽然 STP 在年际变化上与龙卷数量呈现出正相关,但依据现有统计结果或不足开展龙卷年变化的预测,通过建立更加合理完善的龙卷个例库,今后或可能开展龙卷年际或年代际变化的气候研究。

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]. J Appl Meteor Sci, 34(1): 104-116 (in Chinese).
- 蔡康龙,黄先香,戴春容,等,2021.2020年8月9日黑龙江绥化龙卷灾情调查与天气雷达识别[J].热带气象学报,37(5-6):792-800. Cai K L, Huang X X, Dai C R, et al, 2021. Damage survey and weather radar identification of the tornado on August 9, 2020 in Suihua, Heilongjiang province[J]. J Trop Meteor, 37(5-6): 792-800 (in Chinese).
- 才奎志,姚秀萍,孙晓巍,等,2022.冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和环境条件[J].气象学报,80(1):82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun X W, et al, 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 82-92 (in Chinese).
- 范雯杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的时空分布特征[J].气象,41(7):793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7): 793-805 (in Chinese).
- 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然,2017.中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J].热带气象学报,33(4):530-539. Feng J W, Min J Z, Zhuang X R, 2017. The spatial and temporal distribution of Chinese tornados and their characteristics analysis of environmental physical variations[J]. J Trop Meteor, 33(4): 530-539 (in Chinese).
- 黄大鹏,高歌,叶殿秀,等,2017.龙卷风研究进展及预警业务现状[J].科技导报,35(5):45-53. Huang D P, Gao G, Ye D X, et al, 2017. Progress in tornado research and present situation of tornado warning operational system[J]. Sci Technol Rev, 35(5): 45-53 (in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019a.1804号台风“艾云尼”龙卷分析[J].气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019a. An analysis on tornadoes in typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 645-661 (in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019b.珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析[J].气象,45(6):777-790. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019b. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 45(6): 777-790 (in Chinese).
- 李彩玲,吴乃庚,王硕甫,等,2019.台风“艾云尼”(2018)外围两次近距离龙卷的环境条件和雷达特征[J].热带气象学报,35(4):446-457. Li C L, Wu N G, Wang S F, et al, 2019. The environmental conditions and radar characteristics of two tornadoes in the periphery of typhoon Ewiniar in 2018[J]. J Trop Meteor, 35(4): 446-457 (in Chinese).
- 慕瑞琪,徐芬,孙康远,等,2022.江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析[J].气象,48(2):190-202. Mu R Q, Xu F, Sun K Y, et al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 48(2): 190-202 (in Chinese).
- 王东海,李兆慧,高枫亭,等,2018.中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展[J].气象科技进展,8(2):8-23. Wang D H, Li Z H, Gao Z T, et al, 2018. A comparison of statistical characteristics and research progress of tornadoes in China to that in Europe and USA[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2): 8-23 (in Chinese).

- 王婷婷, 王宁, 姚瑶, 等, 2017. 东北冷涡背景下两类龙卷形成机制的对比分析[J]. 气象与环境学报, 33(6): 9-15. Wang T T, Wang N, Yao Y, et al, 2017. Comparison analysis of formation mechanisms of two tornado cases under the background of Northeast Cold Vortex[J]. J Meteor Environ, 33(6): 9-15 (in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China torandoes: The environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 425-441 (in Chinese).
- 徐芬, 郑媛媛, 孙康远, 2021. 江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J]. 气象, 47(5): 517-528. Xu F, Zheng Y Y, Sun K Y, 2021. Characteristics of spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 47(5): 517-528 (in Chinese).
- 徐玥, 邵美荣, 唐凯, 等, 2022. 2021 年黑龙江两次超级单体龙卷过程多尺度特征[J]. 应用气象学报, 33(3): 305-318. Xu Y, Shao M R, Tang K, et al, 2022. Multiscale characteristics of two supercell tornados of Heilongjiang in 2021[J]. J Appl Meteor Sci, 33(3): 305-318 (in Chinese).
- 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等, 2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 31(6): 1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor, 31(6): 1721-1730 (in Chinese).
- 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China. Acta Meteor Sin, 78(3): 391-418 (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, 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).
- 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等, 2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象, 42(3): 280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al, 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. Meteor Mon, 42(3): 280-293 (in Chinese).
- 张雪芬, 杜波, 汤志亚, 等, 2013. 基于观测资料的我国天气现象时空分布分析[J]. 气象, 39(11): 1452-1460. Zhang X F, Du B, Tang Z Y, et al, 2013. Spatio-temporal distribution of weather phenomena in China[J]. Meteor Mon, 39(11): 1452-1460 (in Chinese).
- 郑永光, 2020. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 10(6): 69-75. Zheng Y G, 2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 69-75 (in Chinese).
- 郑永光, 刘非凡, 张恒进, 2021. 中国龙卷研究进展[J]. 气象, 47(11): 1319-1335. Zheng Y G, Liu F F, Zhang H J, 2021. Advances in tornado research in China[J]. Meteor Mon, 47(11): 1319-1335 (in Chinese).
- 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等, 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 41(8): 942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8): 942-952 (in Chinese).
- 中国气象局, 2019. QX/T 478-2019 龙卷强度等级[S]. 北京: 气象出版社: 1-4. China Meteorological Administration, 2019. QX/T 478-2019 Tornado intensity scale[S]. Beijing: China Meteorological Press: 1-4 (in Chinese).

- 朱红蕊, 张洪玲, 孙爽, 等, 2015. 1956-2011 年黑龙江省龙卷风气候特征[J]. 气象与环境学报, 31(3): 98-103. Zhu H R, Zhang H L, Sun S, et al, 2015. Climate characteristics of tornado from 1956 to 2011 in Heilongjiang province[J]. J Meteor Environ, 31(3): 98-103 (in Chinese).
- Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al, 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China Earth Sci, 63(1): 37-51.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res, 67-68: 73-94.
- Coffer B E, Parker M D, Thompson R L, et al, 2019. Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting[J]. Wea Forecasting, 34(5): 1417-1435.
- Craven J P, Brooks H E, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection[J]. Natl Wea Dig, 28: 13-24.
- Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and tornadic storms[M]//Doswell C A III. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society: 167-221.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[R]. Chicago: The University of Chicago.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1): 106-123.
- Hamill T M, Schneider R S, Brooks H E, et al, 2005. The May 2003 extended tornado outbreak[J]. Bull Amer Meteor Soc, 86(4): 531-542.
- Johns R H, Davies J M, Leftwich P W, 1990. An examination of the relationship of 0-2 km AGL "Positive" wind shear to potential buoyant energy in strong and violent tornado situation[C]//16th Conference on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada: American Meteor Society: 593-598.
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence[J]. Wea Forecasting, 21(4): 449-464.
- Lu M Q, Tippett M, Lall U, 2015. Changes in the seasonality of tornado and favorable genesis conditions in the central United States[J]. Geophys Res Lett, 42(0): 4224-4231.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Rasmussen E N, Richardson S, Straka J M, et al, 2000. The association of significant tornadoes with a baroclinic boundary on 2 June 1995[J]. Mon Wea Rev, 128(1): 174-191.
- Roebber P J, 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality[J]. Wea Forecasting, 24(2): 601-608.
- Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al, 2014. Tornadoes in the central United States and the "clash of air masses"[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(11): 1704-1712.
- Sherburn K D, Parker M D, 2014. Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, Low-CAPE environments[J]. Wea Forecasting, 29(4): 854-877.
- Tippett M K, Lepore C, Cohen J E, 2016. More tornadoes in the most extreme U.S. tornado outbreaks[J]. Science, 354(6318): 1419-1423.
- Wind Science and Engineering Center, 2006. A recommendation for an enhance Fujita scale (EF-scale)[EB/OL]. Wind Science and Engineering Center Rep, Texas Tech University, Lubbock, TX. <http://www.depts.ttu.edu/nwi/pubs/fscale/efscale.pdf>.
- Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al, 2015. Climate analysis of tornadoes in China[J]. J Meteor Res, 29(3): 359-369.