

中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述

郑永光

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 虽然中国龙卷发生概率极低, 但近几年的多个强龙卷事件引起了极大的社会关注。总结了我国龙卷气候分布特征、环流背景和环境条件研究进展, 包括总体气候分布和热带气旋(TC)龙卷气候分布特征以及梅雨期、冷涡和TC龙卷的环境条件特征等。中国龙卷除了东部和部分中部平坦地区是多发区外, 也需要关注河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生; 此外, 青藏高原也有弱龙卷发生; 平均每年约发生5次TC龙卷。中国记录到最强的龙卷强度为EF4级, 1951—2020年共记录到7次。中国发生较多龙卷的天气环流背景是梅雨、冷涡和TC。梅雨背景下的强龙卷通常具备了中气旋龙卷所有有利条件, 冷涡背景下强龙卷较不利的环境条件是较差的低层湿度条件, 而TC龙卷的环境条件之一是对流有效位能值较低(约200~1000 J/kg)。下一步, 建立一个可靠的我国龙卷个例数据库非常必要, 我国中气旋龙卷和非中气旋龙卷的环境条件和机理研究都还需要进一步深入完善。

关键词: 龙卷, 气候, 天气环流背景, 环境条件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.012

Review of Climatology and Favorable Environmental Conditions of Tornado in China

Zheng Yongguang

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Although the occurrence probability of tornadoes in China is extremely low, several intense tornado events have received a great deal of attention in recent years. This paper summarizes the research progress on the climatological distribution characteristics, circulation backgrounds and environmental conditions of tornadoes in China, including the overall climatology and the climatology of tropical cyclone (TC) tornadoes, as well as the environmental conditions of tornadoes occurring inside the Meiyu systems, cold vortex and TC. In addition to the central plain areas in the eastern part and central part of China which frequently experience tornadoes, attention should also be paid to the northern Hebei and southeastern Inner Mongolia border areas with Liaoning. In addition, weak tornadoes also occur in the Qinghai Tibet Plateau. TC tornadoes occur about 5 times per year on average. The most intense tornadoes recorded in China reached EF4, with 7 tornadoes recorded from 1951 to 2020. The synoptic background for more tornadoes in China is Meiyu, cold vortex and TC. Strong tornadoes under the background of Meiyu usually have all the favorable conditions of mesocyclone tornadoes. The low-level humidity of tonado environment under the cold vortex is low, while the convective available potential energy of TC tornado is weaker (200–1000 J / kg). It is necessary to establish a reliable database of tornado cases in China, and the environmental conditions and mechanisms of mesocyclonic and non-mesocyclonic tornado still need to be further studied.

Keywords: tornado, climatology, synoptic background, environmental condition

0 引言

龙卷发生概率极低, 但是地球大气中最为剧烈和最具有破坏性的天气现象, 其预报预警依然存在极大的困难。全球每年仅约2000个龙卷发生。美国是龙卷

发生频率最高的国家, 每年可超过1200个。中国龙卷每年的发生次数仅约美国的十分之一^[1], 显著低于美国, 但近年来, 2015年10月4日台风彩虹外围佛山EF3级龙卷、2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷和2019年7月3日辽宁开原EF4级龙卷都造成了严重的人员伤亡和巨大经济损失, 引起了极大关注。

龙卷通常分为两类: 一类为中气旋龙卷(也称为超级单体龙卷), 另一类非中气旋龙卷(也称为非超级单体龙卷)^[2-3]。但对美国龙卷的统计发现, 仅约有25%的中气旋能够产生龙卷^[2]。非中气旋龙卷通常比

收稿日期: 2020年8月31日, 修回日期: 2020年11月9日

作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507504和2017YFC1502003); 国家自然科学基金面上项目(41375051); 中国工程科技中长期发展战略研究领域战略研究项目(2019-ZCQ-06)

中气旋中龙卷弱,也可分为两类^[4-5]:一类非中气旋龙卷出现在飏线或者弓形回波前部的 γ 中尺度涡旋(又称中涡旋)内;另一类非中气旋通常出现在地面辐合切变线上,由瞬变涡旋被对流中的强上升气流垂直拉伸加强形成^[4]。已经得到广泛认可,EF2级及以上强度中气旋龙卷除了要求有利于超级单体风暴的环境条件,也就是一定的对流有效位能(CAPE)和强的0~6 km垂直风切变外,还包括低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变^[4,5,6]。

最近,俞小鼎等^[5]回顾了中国包括了龙卷的强对流天气研究和业务进展,但有关龙卷的研究综述篇幅有限。因此,非常有必要进一步回顾和总结中国龙卷的研究成果。由于篇幅所限,本文仅总结中国龙卷气候特征和环境条件研究成果;由于中气旋龙卷强度通常较强,且多普勒天气雷达观测特征较为明显^[4,5,7],研究较多,因此,本文环境条件研究成果总结只针对中气旋龙卷。

1 气候特征

1.1 总体气候特征

包澄澜等^[7]给出了1962年和1963年上海的7次龙卷记录;徐良炎^[8]展示了1987年我国的龙卷灾害情况;魏文秀和赵亚民^[9]综合给出了中国1980—1993年灾害性龙卷风的部分记录分布,指出有2个龙卷风多发带,一是自长江三角洲经苏北平原至黄淮海平原,另一个是在广东和广西,呈东西走向。这些分析虽然具有一定的学术价值,但受资料限制,工作还比较初步。

Yao等^[10]、范雯杰等^[1]和Chen等^[11]分别给出了非常详细的中国龙卷气候分布。王东海等^[12]则利用已有文献结果对比分析了中国与欧美龙卷气候统计特征。Yao等^[12]使用中国气象观测站的天气现象观测资料给出了1960—2009年中国龙卷气候分布,但该研究不能给出龙卷强度信息。范雯杰等^[1]则使用了《中国气象灾害大典》《中国气象灾害年鉴》、气候影响评价、台站地面气象观测月报表、地方志、媒体和互联网等信息,给出了1961—2013年中国龙卷及其强度气候分布。Chen等^[13]给出了1948—2012年中国龙卷气候分布,使用的资料与范雯杰等^[1]所用资料基本一致,但还包括了现场调查和中国部分核电厂周边的龙卷调查结果资料。这些研究给出了基本一致的中国龙卷地理分布、月变化和日变化特征。范雯杰等^[1]和Chen等^[13]都大致估计中国每年发生约100个龙卷。中国龙卷大多发生在4—9月;具有明显的日变化特征,大多发生在15—19时(北京时,下同),少量发生在午夜后。中国龙卷主要发生在东部和部分中部平坦地区,包括

江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区,其中江苏和珠三角尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区,但强龙卷基本发生在中国中东部^[1,13]。

姚叶青等^[12]利用1960—2009年气象观测资料,发现安徽省128次龙卷多发于4—9月平原丘陵地带的江淮东部,山区极少。范雯杰等^[1]的分析结果表明:1)1961—2010年共记录到165次强龙卷,含EF2级145次、EF3级16次、EF4级4次,年均3.3次;2)2004—2013年共记录到143次EF1或以上级龙卷,其中EF1级121次、EF2级19次、EF3级3次,年均EF1或以上级龙卷14.3次。Chen等^[13]给出的1948—2012年中国F0、F1、F2和不小于F3强度的龙卷数目分别为4676、2467、555和42,但他们没有对不小于F3强度的龙卷进行区分。

黄先香等^[13]给出2018年中国可确认的龙卷天气过程有10次、共产生22个龙卷;其中,EF1级或以上强度的龙卷有19个,EF1级或以上强度龙卷数量明显多于2004—2013年的龙卷记录年平均值^[1];台风相关的龙卷天气过程是2018年龙卷事件的主要特征,台风龙卷有16个,占到总数的73%。而2019年,综合佛山市龙卷风研究中心的统计结果和相关新闻报道,中国可确认的龙卷仅10个,其中,EF4级龙卷1个,EF3级龙卷1个和EF2级龙卷2个。

但需要指出的是,从图1可以看到,河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生;比如,据新闻报道,2017年8月11日16时许,内蒙古赤峰市克什克腾旗和翁牛特旗遭受龙卷袭击,造成5人死亡,50余人受伤,该龙卷至少达EF3级;2019年6月17日,河北张家口尚义县发生龙卷。图1a和1c还显示,中国西部也有一定数量的龙卷发生;但Chen等^[13]指出这些龙卷的强度都很弱。比如,据新闻报道,2010年9月1日,青海湖一天内两次发生龙吸水(水龙卷)现象。不过,图1b显示2004—2013年中国西部也有两个达到EF1级的龙卷发生。

到目前为止,中国未记录到EF5级龙卷。结合范雯杰等^[1]的统计结果和近几年的龙卷发生情况,1951—2020年共记录到EF4级龙卷7次(见表1)。此外,1977年4月16日湖北安陆等地EF3级龙卷造成118人死亡,1978年4月14日陕西省乾县EF3级龙卷造成84人死亡。

1.2 热带气旋(TC)龙卷气候特征

沈树勤^[14]分析了1962—1984年在江苏境内产生的11个TC外围雨带上龙卷过程,发现TC龙卷大致为两

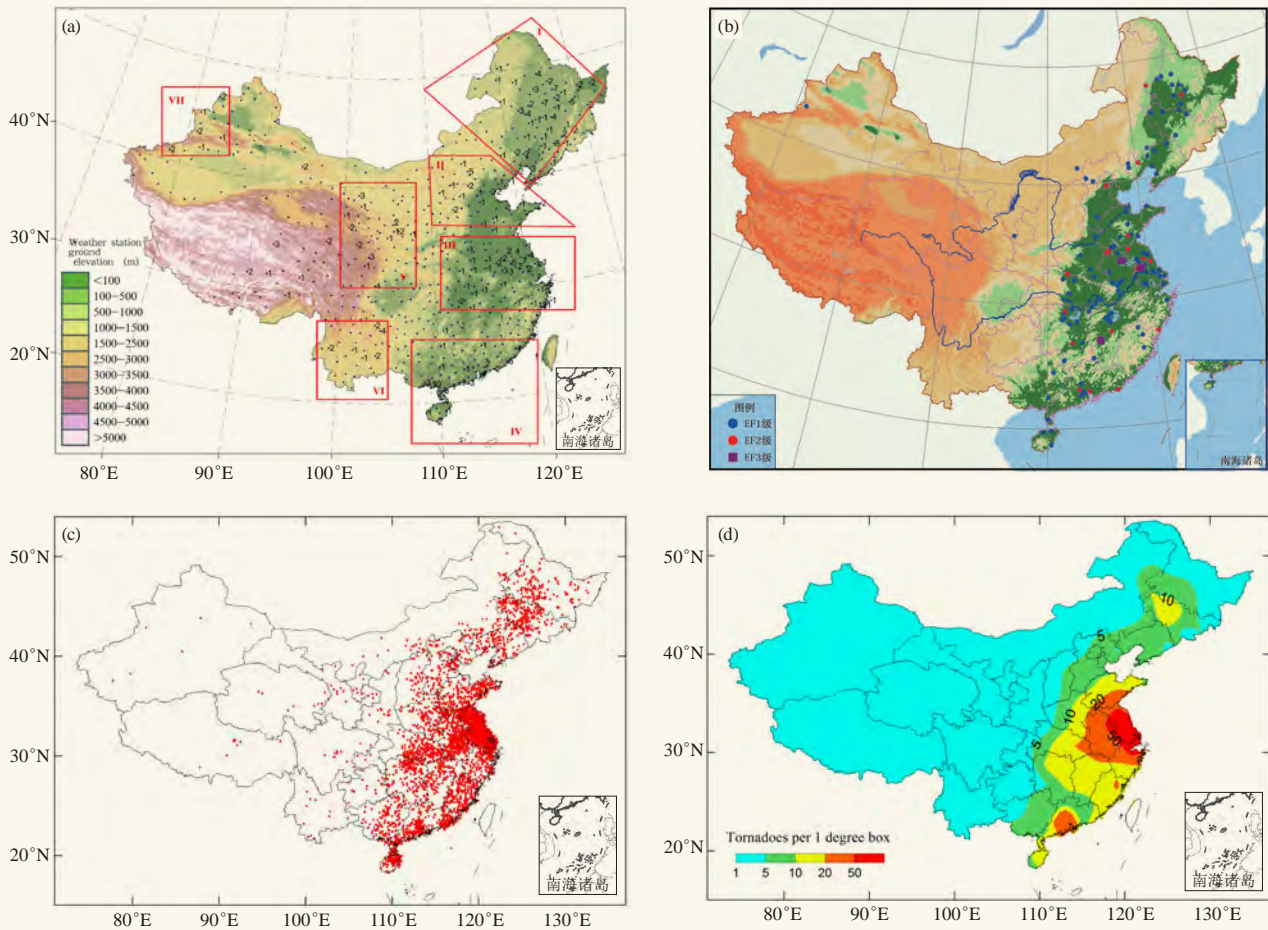


图1 中国龙卷气候分布 (未统计台湾地区)

(a) 1960—2009年国家基本气象站 (黑点) 观测的龙卷发生次数 (黑色数字) (彩色填充为地形)^[12]; (b) 2004—2013年143次EF1级以上龙卷分布图 (彩色填充为地形)^[1]; (c) 1948—2012年中国龙卷发生地点分布 (红点)^[13]; (d) 1948—2012年中国1° × 1° 网格的龙卷发生数目分布^[13]

Fig. 1 Climatological distribution of tornado in China (excluding Taiwan)

(a) Tornado occurrences (black numbers) observed at the national principal observation stations (dark blue dots) during the period of 1960—2009 (Color shaded: topography)^[12]; (b) 143 tornadoes with intensities of no less than EF1 during the period of (Color shaded: topography)^[1]; (c) Distribution of tornado occurrence (red dots) during the period of 1948—2012^[13]; (d) Frequency numbers in 1° (longitude) × 1° (latitude) grids, inverse-square-distance interpolated results during the period of 1948—2012^[13]

年一遇, 发生在TC的迅速减弱阶段和台风运动方向的右前象限。郑媛媛等^[15]分析了10次TC龙卷过程, 同样发现大多数出现在台风前进方向的东北侧。基于Chen等^[13]所用龙卷资料、其他相关论文和日本气象厅最佳台风路径资料等, 白兰强等^[16]全面调查了2006—2018年中国TC龙卷的发生情况 (图2), 共获得64次TC龙卷记录, 平均每年发生约5次; 中国2018年的TC龙卷尤其活跃^[15, 18], 共有24次TC龙卷记录, 占总样本数的37.5%。但尚没有研究给出TC龙卷强度的气候分布特征。

中国最近明确记录到的TC龙卷爆发事件发生于2018年登陆台风摩羯中, 至少有11个龙卷生成^[15, 18-17]; 而

2006年8月4日10:50—15:28, 位于登陆台风派比安外围的佛山市南海与三水区约30~40 km的范围内发生了5个龙卷^[18]。

约1/3的中国登陆TC至少有一个龙卷生成^[18], 而美国约59%登陆TC^[19]和日本约40%登陆TC至少生成一个龙卷^[20]。TC龙卷主要发生于距离TC中心500 km范围内, 江苏和广东是中国TC龙卷发生频次最多的两个省份; 中国的TC龙卷主要生成于TC中心的东北象限, 而非TC移动方向的右前象限; 中国大多数TC龙卷生成于强度相对较弱的TC (如热带低压、热带风暴)^[18], 这可能是由于TC登陆后通常强度迅速减弱^[21]的缘故。

表1 中国EF4级龙卷的灾情统计特征（根据范雯杰等^[1]整理和补充）
Table 1 Table of disaster situations of the EF4 tornadoes in China

发生地点 (县区级)	发生日期	级别	人员伤亡		房屋受损/间		典型灾害现象
			亡	伤	倒塌	损坏	
上海浦东	1956年9月24日	EF4	68	842	倒损近千		一座重10 t, 有5人作业的储油罐被卷起腾空约15 m, 抛至120 m远; 一座钢筋混凝土结构房屋被掀倒; 一座四层结构牢固的教学楼被削去半栋。
河北霸州	1969年8月29日	EF4	98	763	1400	—	倒塌房屋中有1106间全部夷平, 屋顶被卷跑; 1人接近窗口时被刮出窗外10 m。该龙卷其后入天津境内, 摧毁一座学校大礼堂, 摧毁6个工厂。
江苏常州	1979年7月21日	EF4	2	231	倒损2914		将一家三间楼房齐地端起, 腾空数丈, 螺旋飞舞, 突然下坠, 迸裂破碎, 楼址夷为平地, 家具什物刮至200 m以外。
湖南湘阴	1983年4月27日	EF4	伤亡83		倒损2.4万		将围径3.15 m的百年古樟树拔起, 使地物呈毁灭性破坏, 数目竹枝呈麻花状旋扭; 一人被卷起30 m, 2名学生被卷出300 m摔死; 一座古塔被卷去8层, 重200 kg麻石像纸片一样缓缓坠落; 高压电杆被卷离原地6 m; 《中国气象报》将其列为20世纪全球10大风灾之一。
黑龙江海伦	1987年7月31日	EF4	12	185	—	—	当天黑龙江全省共有14个县、市受到飏线和龙卷袭击, 其中, 齐齐哈尔北部出现6条龙卷, 海伦先后遭4股强龙卷袭击。海伦某村房屋全部倒塌; 一台3.5 t重的脱谷机被风卷起落到1 km外, 摔碎。
江苏阜宁	2016年6月23日	EF4	98	846	倒损房屋1347户 3200间		多座水泥砖砌和混凝土预制楼板结构二层房屋顶层完全被毁、大量房屋被夷平、完全倒塌的水塔、抛出400~500 m左右1~2 t的空集装箱和汽车、部分树木树叶被剥光和被剥皮
辽宁开原	2019年7月3日	EF4	7	190多	4300户多损坏		钢混框架结构二层房屋全毁, 钢架结构厂房全毁、墙皮剥落、民房掀顶、墙塌、树木枝叶卷光, 民房房顶整体掀飞、墙塌、半米粗砖砌门柱全塌

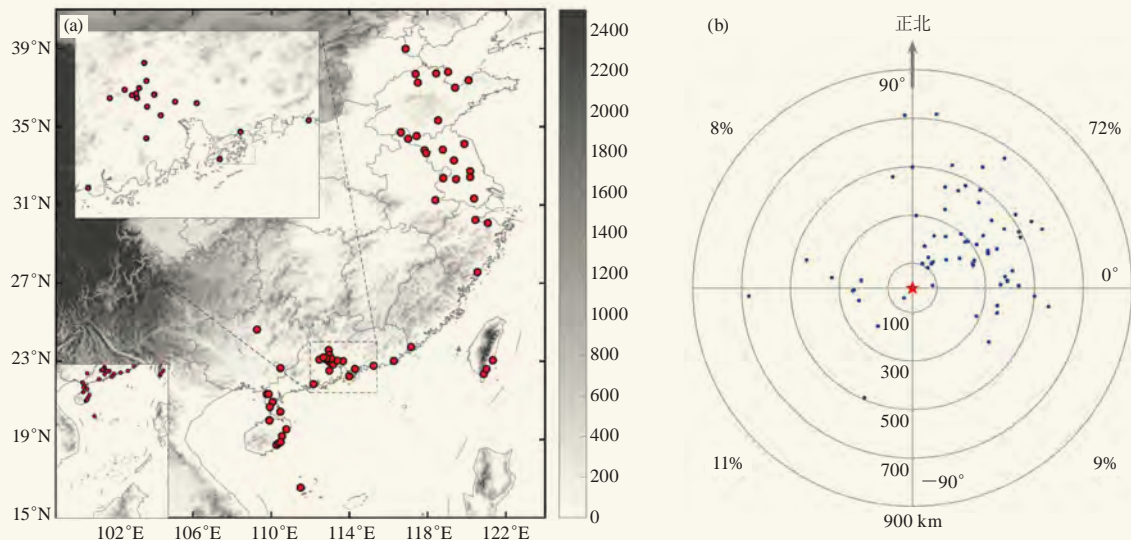


图2 2006—2018年中国TC龙卷分布^[18]

(a) TC龙卷（红点）的地理分布，灰度阴影为地形海拔高度（单位：m）；(b) TC龙卷（圆点）相对于TC中心（五角星）的空间分布，百分数分别表示各象限的龙卷样本占总样本的比例

Fig. 2 TC tornadoes in China during 2006—2018^[18]

(a) Locations of TC tornadoes (red dots). The region around the Pearl River Delta is enlarged in the upper-left corner. Terrain heights (shaded) are also shown for reference; (b) Locations of TC tornadoes (dots) relative to the eye of their parent TC (star) at the time of each tornado shown on Earth-related coordinates

2 环流背景和环境条件

如引言中所述, 非中气旋龙卷大多与飏线或者地面辐合切变线有关, 所以这类非中气旋龙卷的天气背景和环境条件就是有利于出现这些对流风暴的背景和条件。有利于超级单体风暴的环境条件是一定的CAPE和强的0~6 km垂直风切变^[4-5, 7-8, 22]。有利于F2/EF2级及以上中气旋龙卷的环境条件不仅需要有利于超级单体风暴的环境条件, 还需要较高的0~1 km

相对湿度^[23]、较低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变^[4-5, 7-8, 24]。

中国龙卷虽然可发生在多种有利的天气尺度背景下^[11, 14], 但发生较多龙卷的天气背景是梅雨^[25-26]、冷涡^[27]和TC^[17-18, 30], 这是因为在这样的天气形势经常存在低空急流(即低空垂直风切变较大)和较低的抬升凝结高度的缘故^[4], 不过, 冷涡背景下的抬升凝结高度偏高^[32-28]。

早在1964年,包澄澜等^[9]根据稠密测站网的资料分析了1962和1963年上海3次龙卷过程,发现龙卷发生在高空槽和地面冷锋前方的对流性不稳定的气团之中,其上游方向存在着一条明显的低空急流。但他们没有给出深层垂直风切变的情况。

梅雨期的强龙卷通常具备了有利于超级单体龙卷的所有有利条件。不过,不同个例CAPE数值存在差异。2003年7月8日23时20分发生在安徽无为的一次EF3级龙卷CAPE达2800 J/kg^[27],2016年江苏阜宁EF4级龙卷的CAPE达2705 J/kg^[29];不过,2005年7月30日11时30分安徽灵璧发生的一次由强降水超级单体导致的EF3级龙卷^[28,30]和2007年7月3日下午发生在安徽天长到江苏高邮的一次EF3级龙卷^[29,35]也都发生在梅雨期暴雨背景下,具有类似2003年7月8日安徽无为龙卷的环境条件,然而其CAPE值显著偏小,仅达1000多J/kg,为中等强度,但与美国龙卷的CAPE中值大致相当^[26,31]。姚叶青等^[30]分析了1960—2009年安徽省128次龙卷环流背景,发现龙卷与冰雹、雷雨大风在4个方面存在明显差异:中低层比湿、中低层垂直风切变、风暴相对螺旋度和0℃层以下的对流有效位能与整层对流有效位能比值,前3个量均是龙卷最大,龙卷是冰雹和雷雨大风的2~3倍,对流有效位能主要集中在0℃层以下,而冰雹和雷雨大风主要集中在0℃层以上。

冷涡背景下不利龙卷的环境条件是低层湿度较差。王秀明等^[32]分析了2002—2013年东北13个龙卷个例的环境特征,发现:1)龙卷多发生在东北冷涡背景下,直接影响系统为冷涡南侧次天气尺度短波槽,且常出现在槽区或前倾槽后;2)东北龙卷环境温度直减率较大,850~500 hPa温差达30~33℃;3)低层水汽含量及湿层厚度较之江淮及华南龙卷显著偏低,地面露点温度可低至13℃,850 hPa露点多在8℃以下;4)龙卷环境中常出现强低空急流和对流层中层急流,且对流层中层急流通常与干下沉气流相伴;5)东北地区龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发。郑永光等^[33]分析发现,2019年7月3日辽宁开原EF4级龙卷发生在前倾槽系统中,地面西南暖湿气流风速大,地面露点达19℃左右;地面露点显著高于王秀明等^[32]统计的多数东北龙卷相应数值;该次龙卷满足了有利于超级单体龙卷的大CAPE值(达3450 J/kg)、强0~6 km垂直风切变条件、较小对流抑制能量(CIN)和较强0~1 km垂直风切变条件;但0~1 km垂直风切变的增强具有中尺度特征;本次龙卷发生的不利环境条件与王秀明等^[32]的相应统计结果

较为一致,即开原附近区域对流层中低层存在干层,相对湿度低,抬升凝结高度较高;但分析发现,龙卷产生前,对流风暴的前部先在开原及周边地区产生了降水迅速改善了湿度条件。

TC龙卷的环境条件一个重要的特征是CAPE较低。郑媛媛等^[17]发现TC龙卷的环境条件(图3)为弱CAPE(200~1000 J/kg)和风随高度强烈顺转的强低空风的垂直切变环境,0~1 km风的垂直切变超过10 m/s,风暴的相对螺旋度很大,粗理查孙数很小。白兰强等^[18]发现中国的TC龙卷倾向于在具有较大低层风暴相对螺旋度、较小的CIN和较大的考虑夹卷效应的对流有效位能的环境中产生(图4)。但需要指出的是,较大的考虑夹卷效应的CAPE实际上是考虑环

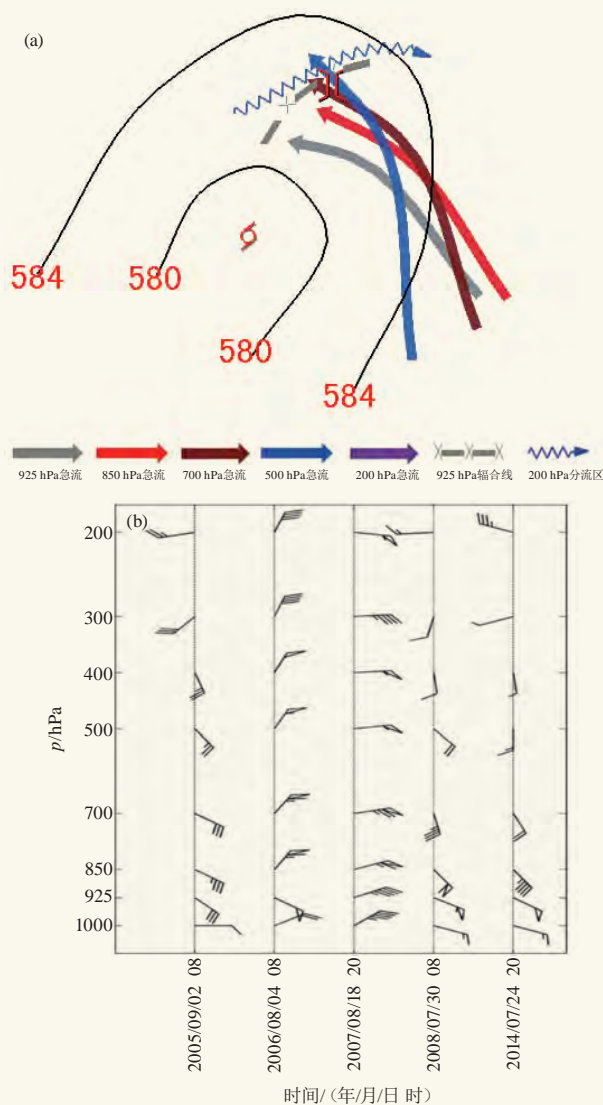


图3 TC外围龙卷高空形势综合图(a)和5次TC龙卷过程探空风垂直廓线(b)^[17]

Fig. 3 Composite analysis on the upper-level circulation of TC tornadoes (a), and wind profiles of five TC tornado processes (b)^[17]

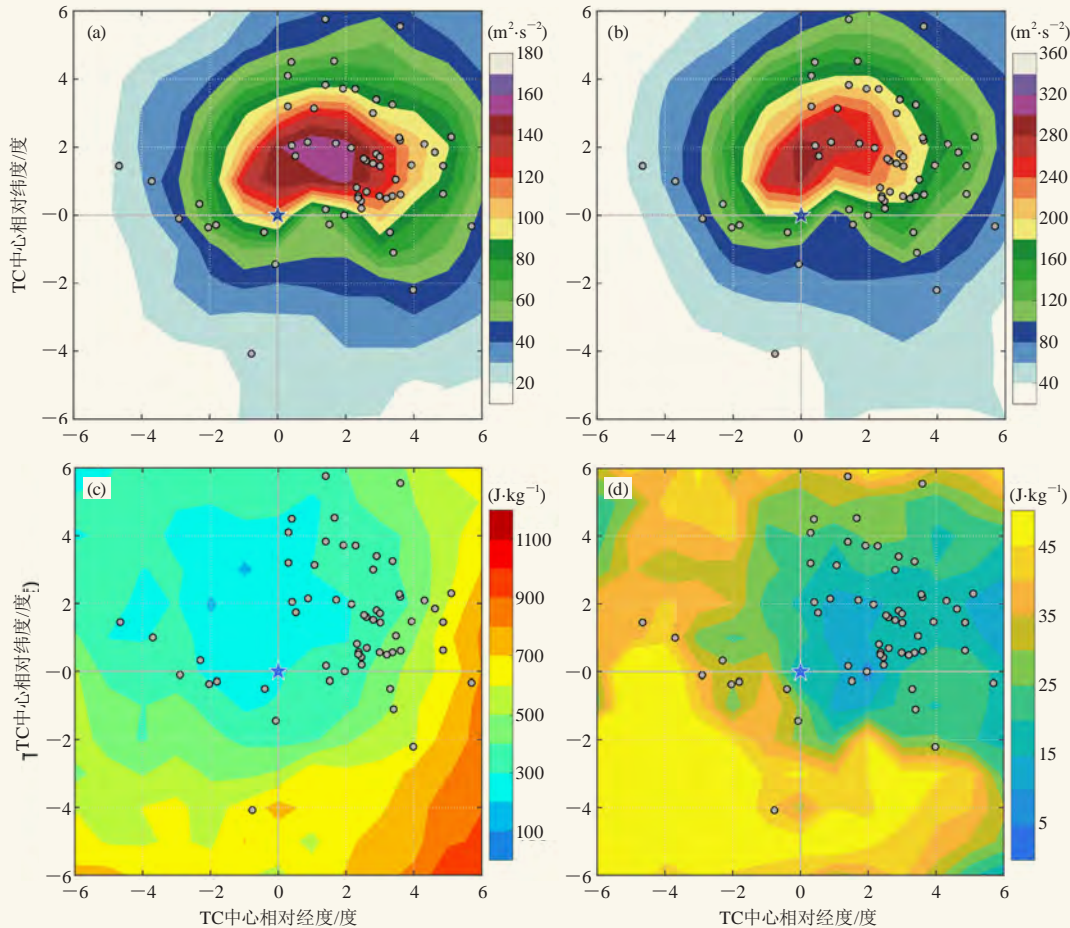


图4 中国2006—2018年TC龙卷个例的环境场合成^[18]: 0~1 km (a)和0~3 km (b)的风暴相对螺旋度、CAPE (c)和CIN (d) (五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置)

Fig. 4 Composite horizontal distributions^[18] of the (a) 0~1 km and (b) 0~3 km SRH, CAPE (c) and CIN (d) around the TC eyes (blue stars). The solid gray circles represent the locations of TC tornadoes during 2006—2018 relative to the eye of their parent TC. The X (Y) axis is arranged in the TC eye relative longitude (latitude) for convenience

境自由大气总体的相对湿度较高对CAPE数值影响的反映。

3 总结和讨论

中国龙卷为发生概率极低的小尺度天气系统, 观测和预报都非常困难。尽管如此, 通过收集文献、现场调查等手段, 中国龙卷的气候特征已经非常清晰, 易于发生龙卷的环流背景和环境条件也已获得。

Yao等^[12]、范雯杰等^[1]和Chen等^[13]分别给出了中国龙卷气候特征。中国龙卷主要发生在东部和部分中部平坦地区, 其中江苏和珠三角尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区。强龙卷基本发生在中国中东部。但河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生, 中国西部青藏高原也有龙卷发生。中国尚未记录到EF5级龙卷; 1951—2020年共记录到EF4级龙卷7次。

2006—2018年中国共获得64次TC龙卷记录, 平

均每年约5次; 约1/3的中国登陆TC至少有一个龙卷生成; TC龙卷主要生成于TC中心的东北象限^[18]。

中国发生较多龙卷的天气背景是梅雨、冷涡和TC。梅雨背景下的强龙卷通常具备了中气旋龙卷所有有利条件, 但不同个例的CAPE值差异较大, 一些个例CAPE可达3000 J/kg左右, 而有些个例CAPE达1000多J/kg。冷涡背景下强龙卷的环境条件除了较差的低层湿度条件较不利和较高的抬升凝结高度外, 其他有利中气旋龙卷条件通常都具备。而TC龙卷的环境条件除了较弱的CAPE (200~1000 J/kg) 外, 其他有利条件也都具备。

但需要指出的是, 在进行龙卷气候特征分析时, 由于历史条件、观测数据和文献资料的限制, 历史龙卷的确定存在一定的不可靠性, 因此, 从目前开始, 通过现场调查、新闻报道和互联网图片、视频等手段, 建立一个可靠的中国龙卷个例数据库非常必要。

建立这样的数据库需要全国各气象部门的共同努力。该数据库除了包括龙卷本身的相关信息外,还应包括各种观测数据资料,从而为完善中国龙卷的气候特征、环境条件和机理研究等奠定坚实的基础。

中国龙卷的环境条件研究需要进一步完善深入,比如,冷涡背景下龙卷的大气低层湿度条件通常较差,其在发生龙卷时是否会有改善? TC龙卷的CAPE通常较低,是否其是产生TC龙卷对流风暴的强上升气流的主要原因?考虑夹卷效应的CAPE是否更具有代表性?还是有其他的因素导致了TC龙卷风暴中的强上升气流?此外,针对中国非中气旋龙卷研究还非常欠缺,既包括气候分布特征,也包括环境条件和机理研究等。

参考文献

- [1] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [2] Davies-Jones R, Trapp R J, and Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms, American Meteorological Society, 2001: 167-221.
- [3] Bluestein H B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Springer-Praxis, 2013.
- [4] 郑永光, 田付友, 周康辉, 等. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查. 气象科技进展, 2018, 8(2): 55-61.
- [5] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [6] Wakimoto R M, and Wilson J W. Non-supercell tornadoes. Monthly Weather Review, 1989, 117: 1113-1140.
- [7] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [8] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [9] 包澄澜, 赵刚然. 上海地区龙卷风的初步分析. 南京大学学报(自然科学版), 1964, (01): 168-192.
- [10] 徐良炎. 1988. 一九八七年我国龙卷灾害. 灾害学, 1988, (02): 60-62.
- [11] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [12] Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al. Climate analysis of tornadoes in China. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(3): 359-369.
- [13] Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al. Tornado climatology of China. International Journal of Climatology, 2018, 38: 2478-2489.
- [14] 王东海, 李兆慧, 高枫亭, 等. 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展. 气象科技进展, 2018, 8(2): 8-23.
- [15] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 50-55.
- [16] 沈树勤. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析. 气象, 1990, 16(1): 11-15.
- [17] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [18] 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006-2018). 中国科学: 地球科学, 2020, 50: 619-634.
- [19] Yao D, Liang X D, Meng Q, et al. Importance of identifying tropical cyclone tornadoes in typhoon warning and defense systems. Science Bulletin, 2019, 64: 143-145.
- [20] 李彩玲, 杨宇声, 郑启康, 等. 一次台风暴雨中的龙卷风天气. 广东气象, 2007, 29(3): 26-29.
- [21] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane tornado environments. Monthly Weather Review, 1991, 119: 1954-1978.
- [22] Mitsuta Y. 1983. Studies on wind disasters caused by Tatsumaki (tornadoes and waterspouts) and severe local storms in Japan (in Japanese with English abstract). Final Report of the Special Research Project for Natural Disaster Sponsored by the Ministry of Education. 124.
- [23] Zheng Y G, Chen J, Tao Z Y. Distribution characteristics of the intensity and extreme intensity of tropical cyclones influencing China. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(3): 393-406.
- [24] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Atmospheric Research, 2003, 67: 73-94.
- [25] Doswell III C A, Evans J S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. Atmospheric Research, 2003, 67-68: 117-133.
- [26] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. National Weather Digest, 2004, 28: 13-24.
- [27] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [28] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [29] 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 2009, 35(10): 32-39.
- [30] 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [31] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [32] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [33] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理. 气象, 2020, 46(5): 589-602.
- [34] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [35] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [36] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Weather and Forecasting, 2012, 27: 106-123.