

中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018)

白兰强, 孟智勇, SUEKI Kenta, 陈桂兴 and 周瑞琳

Citation: 中国科学: 地球科学 **50**, 619 (2020); doi: 10.1360/SSTe-2020-0041

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSTe-2020-0041>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSTe/50/5>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[近50年影响中国热带气旋的气候变化特征](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **41**, 1352 (2011);

[赤道气压振荡与登陆中国热带气旋的关系](#)

Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese) **37**, 1556 (2007);

[LTP_DSEF模型对2018年登陆中国热带气旋强降水预报的应用](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **50**, 609 (2020);

[热带气旋与多尺度气候变异: 2018年西北太平洋台风季概况](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **50**, 581 (2020);

[热带气旋强度变化预报的一种动力-统计预报方法](#)

Chinese Science Bulletin **31**, 1003 (1986);



中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018)

白兰强^{1,2,3}, 孟智勇^{2*}, Kenta SUEKI⁴, 陈桂兴^{1,3}, 周瑞琳²

1. 中山大学大气科学学院, 广州 510275;
2. 北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000;
4. RIKEN Center for Computational Science, Kobe 650-0047, Japan

* 通讯作者, E-mail: zymeng@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-02-25; 收修改稿日期: 2020-03-05; 接受日期: 2020-03-09; 网络版发表日期: 2020-04-03

国家自然科学基金项目(批准号: 41875051、41425018、41775094)、中国博士后科学基金项目(编号: 2019M653146)和日本学术振兴会KA-KENHI基金项目(编号: JP18H01277)资助

摘要 文章调查了2006至2018年中国热带气旋龙卷(简称TC龙卷)的发生情况。在这13年间, 共有64次TC龙卷记录, 平均每年发生约5次。约三分之一的登陆热带气旋至少有一个龙卷生成。这些TC龙卷主要发生在热带气旋临近登陆或登陆后36小时内的午后, 集中于距离热带气旋中心500 km范围内。大多数TC龙卷位于地形相对平坦的沿海地区, 其中江苏和广东是中国TC龙卷发生频次最大的两个省份。此外, 文章还揭示了两个值得注意的特征: (1) 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; (2) 与美国相比, 中国大多数TC龙卷生成于强度相对较弱的热带气旋(如热带低压、热带风暴)。进一步分析表明, 中国的TC龙卷倾向于在具有较大低层风暴相对螺旋度和较大对流有效位能(考虑夹卷效应)的环境中产生。中国2018年的TC龙卷尤其活跃, 共有24次TC龙卷记录, 占总样本数的37.5%。中国现代气象史上的首次龙卷爆发事件发生于台风摩羯(2018)中, 至少有11个龙卷生成。此龙卷爆发事件发生于摩羯与中纬度中层槽的相互作用阶段, 且伴随着较强的中高层干空气侵入过程。

关键词 龙卷, 热带气旋, 气候统计, 中国

1 引言

热带气旋(TC)通常会生成龙卷风(下文简称TC龙卷), 对沿海地区的生命和财产安全构成严重威胁(如Hill等, 1966; Novlan和Gray, 1974; Gentry, 1983; McCaul, 1991; Edwards, 2012)。据统计, 在1948至1986年间登陆美国的TC中, 约59%至少有一个龙卷生成

(McCaul, 1991); 在1961至1982年间登陆日本的TC中约40%至少生成了一个龙卷(Mitsuta, 1983; Suzuki等, 2000)。美国生成龙卷最多的前三个TC甚至分别引发了100多个龙卷(Edwards, 2012)。尽管TC龙卷一般没有中纬度龙卷的强度大(如Novlan和Gray, 1974; McCaul, 1987; Spratt等, 1997), 其造成的死亡人数和财产损失亦可分别占到母体登陆TC对应灾害的10%

中文引用格式: 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 陈桂兴, 周瑞琳. 2020. 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, 50: 619-634, doi: 10.1360/SSTe-2020-0041

英文引用格式: Bai L, Meng Z, Sueki K, Chen G, Zhou R. 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018. Science China Earth Sciences, 63: 37-51, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9391-1>

和0.5%(Novlan和Gray, 1974).

揭示TC龙卷的统计特征有助于进一步研究TC龙卷的生成机制, 从而改善对登陆TC防灾减灾的措施. TC龙卷数据库在美国已建立了几十年, 极大地提高了人们对TC龙卷基本特征和登陆TC环流内龙卷潜在威胁的认识. 根据美国龙卷记录的统计, TC龙卷可在一天中的任何时刻形成, 但在下午中后期发生频次最大(当地时间14~17时)(Schultz和Cecil, 2009). 这种日变化特征表明, 尽管大多数龙卷生成于多云的TC环境中, 但太阳短波辐射加热可能在TC龙卷的生成中仍发挥重要作用(McCaul, 1991). 此外, TC龙卷的这种日变化特征与TC登陆时间没有明显的关系. TC龙卷多发生在白天, 而强TC龙卷则主要发生在夜间(Edwards, 2012).

研究发现, 有利于TC龙卷生成的区域主要位于TC中心的东北象限或TC前进方向的右前象限. 其中, 超过80%的龙卷发生在TC中心的东北象限(Schultz和Cecil, 2009). 由于大多数登陆TC具有向北的移动分量, 大多数TC龙卷也同时位于TC前进方向的右前象限. 超过90%的龙卷发生在相对于TC前进方向340°和120°之间的方位扇区(正东方向为0°, 逆时针增加)(Schultz和Cecil, 2009). 在相对于TC中心的径向方向, 龙卷主要集中在分布在相对于TC中心100~500km处(Edwards, 2012). 约94%的TC龙卷发生在距离海岸线400km的范围内(Schultz和Cecil, 2009). 特别地, 约44%的TC龙卷发生在距海岸线50 km以内.

TC环境中生成的龙卷是所有龙卷的一个重要子集. 美国的龙卷记录中, 约有6%的龙卷源自TC环境中. 据统计, 在1955~2010年间, 美国平均每年有73个TC龙卷生成(Edwards, 2012). 在亚洲, 日本的TC龙卷占其龙卷总数的20%(Niino等, 1997), 年均约5个, 且主要发生在8月底至9月底. 美国每年有约三个登陆TC(包括热带风暴和飓风)(Lyons, 2004), 而每年登陆中国的TC多达8个(基于中国气象局热带气旋资料, 统计包括热带低压; tcdata.typhoon.org.cn; Ying等, 2014). 然而, 中国目前仍缺乏对全国范围内的TC龙卷统计特征分析. 长久以来, 气象部门和公众的关注度主要集中在TC眼壁内或附近的强风、风暴潮和暴洪等威胁. TC环流中的龙卷威胁被大大低估, 部分归因于由缺乏TC龙卷统计分析而导致的认识不足(Yao等, 2019).

虽然中国TC龙卷的相关研究已取得可喜进展, 但

主要侧重在个例及区域气候分析. 根据作者的调研, 中国首个被记录于科学文献中的TC龙卷发生于1923年8月11日. 该龙卷在天津市东北侧的海面生成, 随后移上陆地并造成灾害(Barbour, 1924). 江苏省是中国龙卷(范雯杰和俞小鼎, 2015; Chen等, 2018)和飏线(Meng等, 2013)等强对流灾害天气最频发的省份. 过去42年来, 造成中国伤亡人数最多的龙卷亦发生在江苏省(Meng等, 2018). 统计表明, 江苏省约20%的龙卷过程与TC有关(郑媛媛等, 2015). 在1962~1984年和2005~2014年间, 分别有18和5次TC龙卷记录(沈树勤, 1990; 郑媛媛等, 2015). 毗邻江苏省的上海市, 在1962~1971年间遭遇了至少23个TC龙卷(陈联寿和丁一汇, 1979). 华南沿海地区是中国另一个龙卷高发区(范雯杰和俞小鼎, 2015; Chen等, 2018). 其中, 海南省和珠三角是TC龙卷频发的区域(黄先香等, 2014; 郑媛媛等, 2015; 郑艳等, 2017; Zhao等, 2017; Bai等, 2017).

近年来, 具有社会高影响的TC龙卷越来越多(如2015和2018年), 引起了公众的广泛关注(Bai等, 2017; Zhao等, 2017). 随着TC龙卷在网络上曝光量不断增加, 中国公众和气象工作者对TC龙卷的了解也越来越多. 此外, 值得注意的是, 中国沿海150km内人口密集, 尤其是在龙卷高发的珠三角地区. 因此, TC龙卷可能会对中国沿海的生命财产安全构成巨大威胁.

本文旨在基于最近几十年来最全面的记录, 揭示中国TC龙卷的基本气候特征. 同时, 将对近期研究发现与TC龙卷密切相关的一些环境参数进行诊断分析, 探讨中国TC龙卷与这些环境参数的空间配置关系. 此外, 本文还将对2018年多发的TC龙卷及其生成环境进行分析讨论. 通过揭示全国范围内TC龙卷的基本统计特征, 期望提高对TC环流背景中龙卷潜在威胁的认识.

2 数据和方法

本文基于多种数据源, 对发生于2006至2018年间的TC龙卷进行了调查. 数据源主要包括六个方面: 几乎所有与中国龙卷相关的已发表研究论文、由中国气象局编订的《中国气象灾害年鉴》(自2005年由中国气象出版社每年出版一册)、《中国气象灾害大典》(中国气象出版社出版)、由北京大学陈家宜研究团队建立的《中国龙卷数据集》(Chen等, 2018)、气象同行和当地气象部门的信息转达, 以及社交媒体公布的

龙卷相关信息. 有关以上两部书籍的更多详细信息, 请参考Chen等(2018). 考虑到中国早期的气象灾害数据记录不甚完善, 《中国气象灾害年鉴》始于2005年出版, 以及作者对地基多普勒气象雷达数据的可获取性, 本文最终将TC龙卷的研究时段定为2006~2018年, 以保证各年数据样本容量的稳定性. 随着科技发展, 智能手机和数码相机在近十几年得以普及, 全国范围内的公众及网络媒体对龙卷灾害天气事件的关注越来越及时, 越来越多发生于白天的龙卷被拍摄记录并在线分享. 因此, 相比于早些年, 2006~2018年的龙卷数据集是比较稳定和相对完整的, 未被记录的TC龙卷概率相对较小.

本文所用的TC数据来自日本气象厅(JMA; <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>), 包括TC最佳路径和强度信息等数据集. 根据中国《热带气旋等级》国家标准(GB/T 19201-2006), 本文采用的TC强度等级分别为热带低压($10.8\sim 17.1\text{m s}^{-1}$)、热带风暴($17.2\sim 24.4\text{m s}^{-1}$)、强热带风暴($24.5\sim 32.6\text{m s}^{-1}$)、台风($32.7\sim 41.4\text{m s}^{-1}$)、强台风($41.5\sim 50.9\text{m s}^{-1}$)、超强台风($\geq 51.0\text{m s}^{-1}$). 特别地, 若生成龙卷的TC在其整个生命周期内仅达到热带低压强度, 此龙卷仍被视为TC龙卷. 为估计龙卷发生时刻TC中心的位置, 我们采用对TC最佳路径进行线性插值的方法.

对于筛选出的TC龙卷, 我们对其进行了最大程度的数据质量控制. 首先对从不同资料来源中筛选得到的TC龙卷个例进行交叉对比, 再验证各个龙卷是否处于TC环境中. 当龙卷位于其母体TC中心800km范围内时(McCaul, 1991), 将其定义为TC龙卷. 若龙卷发生处距离TC中心超过800km, 但处于TC外围雨带内, 则仍将其视为TC龙卷. 最后, 基于临近的多普勒天气雷达数据, 剔除无对应降水系统的龙卷记录. 此外, 若在雷达 0.5° 和 1.5° 仰角层上均无对应的气旋性旋转特征, 此类龙卷记录亦被剔除. 由于龙卷历史记录中的地点和时间可能存在一定偏差, 本文基于雷达数据对该龙卷记录所给位置的50km(时间1小时)范围内进行龙卷雷达特征的搜索. 在无临近雷达数据可用的情形, 我们只保留来自研究论文、官方报告或有直接影像证据的龙卷记录.

考虑到龙卷涡旋的连续性, 漏斗云在相对较短的时间内多次接触地面的龙卷被视作同一个龙卷记录. 在同一个风暴中, 若一个龙卷在前一个龙卷消亡20分

钟后发生, 则这两个龙卷被记为两次龙卷事件. 对于可在雷达径向速度场中识别到龙卷涡旋特征(Tornado Vortex Signature, 简称TVS)的龙卷个例, 我们以首次在最低层仰角识别到TVS的时刻作为龙卷发生的近似时刻. 考虑到大多数龙卷记录仅对龙卷灾害的部分区域作了定性描述, 仅少数个例具有龙卷全路径的灾害调查记录和龙卷强度客观估计, 本文的TC龙卷统计未包括龙卷的强度信息.

3 中国TC龙卷的统计特征

3.1 2006~2018年TC龙卷的基本特征

在这13年中, 共有64个TC龙卷记录, 年均约5个(图1). 由于夜间能见度有限, 且在海上、野外或人迹罕至的山区缺乏目击者, TC龙卷的数量可能被低估. 值得注意的是, 2018年的台风摩羯(Yagi)和山竹(Mangkhut)分别在华北和华南生成了11个和5个龙卷(图1a). 由于2018年的TC龙卷爆发事件, 使得TC龙卷的年平均数量相较于往年偏多(图1a). 考虑到该龙卷爆发事件属于个别案例, 中国TC龙卷的年发生率未呈现明显的年变化趋势. TC龙卷的生成月份呈单峰分布, 极值月份在8月(约占63%; 图1b), 与西北太平洋TC最频发的月份对应. TC龙卷呈现出明显的日变化特征, 午后的发生频率较高(图1c). 其中, 50%的TC龙卷发生在12:00~18:00之间(本文均采用北京时间).

中国TC龙卷主要分布在热带和中纬度沿海地区, 集中在江苏省和广东省, 其中又以珠三角区域最多(图2). 这两个TC龙卷发生率最高的省份同时也是传统龙卷(即非TC环境下生产的龙卷)最频发的地区(范雯杰和俞小鼎, 2015; Chen等, 2018). TC龙卷主要发生在地形相对平坦的地区, 约95%的TC龙卷发生在距海岸线250km以内. 值得注意的是, 珠三角地区共有16次TC龙卷记录(占总数的25%). 该地区拥有人口密集的大型城市群, 频发的TC及龙卷是当地生命和财产安全的巨大威胁.

中国的TC龙卷主要分布在相对于TC中心的东北象限, 而非相对于TC移动方向的右前象限. 在龙卷发生时刻, 约94%的TC往西北方向行进(图1d). 在地球相对坐标系中, 约72%的龙卷生成于其母体TC的东北象限内(图3a), 方位角中值为 35° (图4a). 在TC相对坐标系, 约41%的龙卷处于TC移动方向的右前象限, 然而

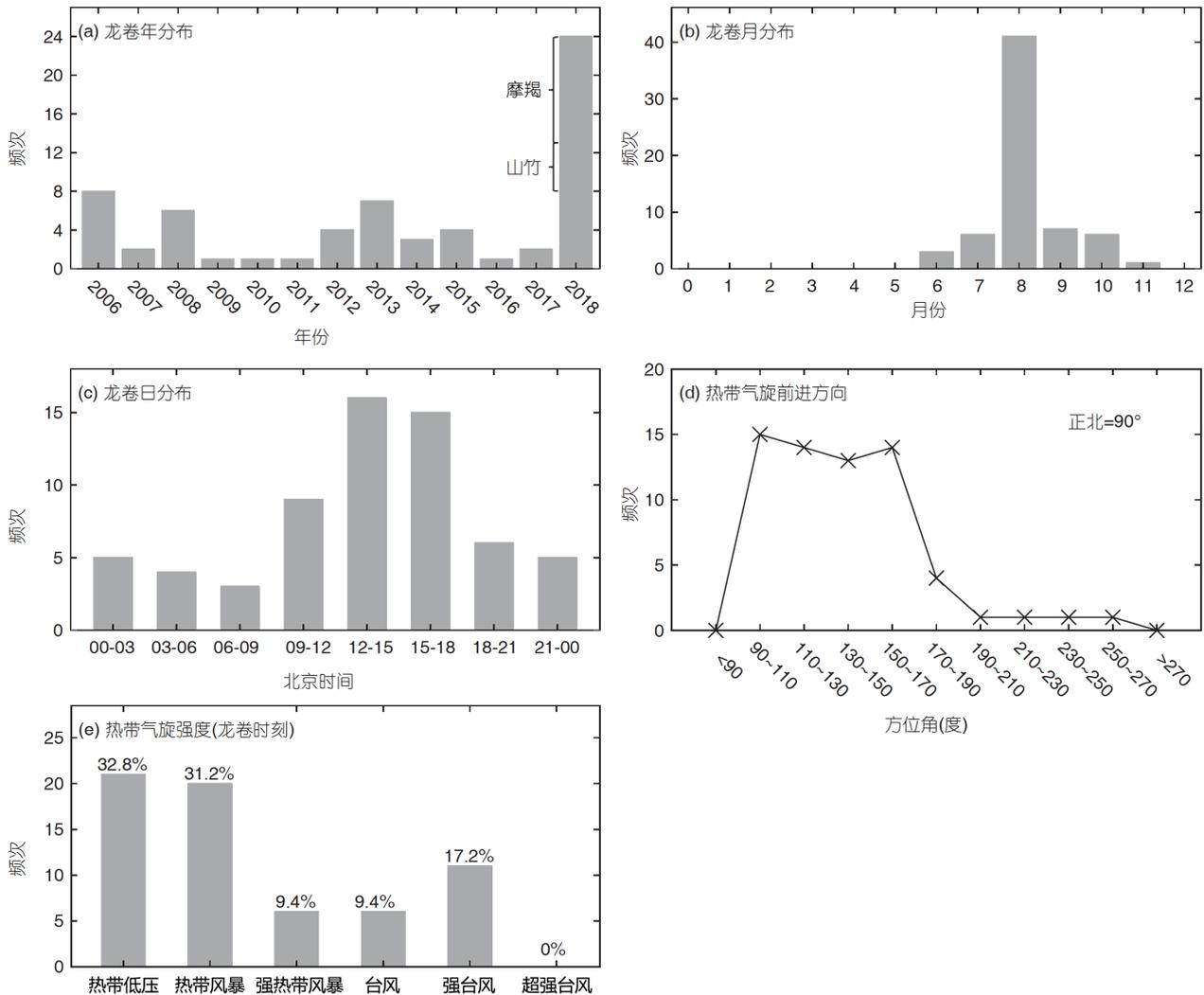


图1 2006~2018年中国TC龙卷的统计结果

分布在右后象限的龙卷达44%(图3b). 其方位角中值约为0°(图4a). 在相对TC中心的径向方向, 龙卷位置主要集中在距离TC中心250~500km处, 中值为361km(图4b).

2006~2018年间发生的这64个TC龙卷由32个TC生成, 其中30个为登陆TC. 在这13年期间, 共有110个TC登陆中国(包括海南岛和台湾岛)(tcdeta.typhoon.org.cn; Ying等, 2014). 因此, 约27%的登陆TC生成了至少一个龙卷. 值得注意的是, 生成龙卷的TC并不一定会登陆. 例如, 最终登陆越南而未登陆中国的TC, 可能会在海南省生成龙卷.

中国龙卷相对于TC登陆的生成时间与美国的统计特征基本一致(如Novlan和Gray, 1974; Gentry, 1983;

Weiss, 1987; McCaul, 1991). 生成于TC登陆后的龙卷约占67%. 在TC登陆前12小时到登陆后36小时内生成的龙卷占63%(图5a). 在美国, 这一比例约为75%(图5b; McCaul, 1991). 更具体地, 中国大部分TC龙卷发生在TC登陆后12~36小时, 约占龙卷总数的36%. McCaul (1991) 指出, 美国大多数TC龙卷(46%)生成于TC登陆前后12小时内. 中美的这种差异可能部分归因于中美两国海岸线的走向不同. 在美国, 大量TC从墨西哥湾登陆, 其东北象限主要处于陆地上. 而TC在登陆中国东部时, 其东北象限主要处于海上. 由于TC龙卷大多发生在其母体TC的东北象限, 在缺乏观测和目击者的海面上可能存在未被发现的龙卷.

这些TC在生成龙卷时的强度主要是热带低压

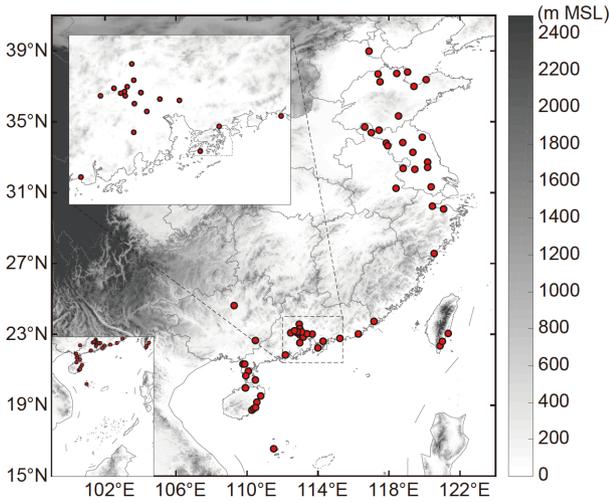


图2 2006~2018年中国TC龙卷(红点)的空间分布
灰度阴影为地形海拔高度(单位: m)

(33%)和热带风暴(31%)(图1e)。例如,生成龙卷最多的台风摩羯(2018),共有8(3)个龙卷是在其处于热带低压(热带风暴)强度时生成。在本文的龙卷记录中,没有发现在超强台风环境下生成的龙卷案例。中国TC龙卷主要发生于TC强度相对较弱的阶段,可能部分归因于中国海岸线的走向。由于TC一般来自中国东部,近岸强TC的东北象限(有利于龙卷生成的区域)主要位于缺乏龙卷观测的海上。TC通常在登陆后迅速减弱,此时在其东北象限陆地上产生的龙卷才开始能够陆续被观测到。

3.2 2018的TC龙卷

2018年的TC龙卷活动显著,占这13年TC龙卷样本总数的37.5%。在这一年中,共有11个TC在中国登陆(包括海南岛和台湾岛),其中7个生成了至少一个龙卷,总计24个TC龙卷记录。这些TC龙卷均已经过作者或当地气象部门的确认(表1)。其中,17个龙卷有直接影像证据(照片或视频)。图6给出了部分龙卷案例的实拍截图,绳状和楔状龙卷皆有被观测到。基于龙卷实拍视频,可观察到由多个尺度相对较小的涡旋合并形成一个更大的楔形龙卷现象(如8月14日的山东东营龙卷)。

迄今为止,中国现代气象史上第一个龙卷爆发事件亦发生在2018年。根据*Glossary of Meteorology*,龙卷爆发事件被定义为:在特定天气尺度系统环境下,发生多次龙卷过程的事件(*American Meteorological Society, 2018*)。具体地,通常将同一天气背景下短时间内至少有十个龙卷发生的事件定义为龙卷爆发事件(*Galway, 1977*)。台风摩羯(2018)在连续20小时内于中国东部生成了至少11个龙卷(如图7a的紫色点)。这些龙卷主要发生在摩羯登陆的第二天而非其登陆当天,这与*McCaul(1991)*的研究结果一致。*McCaul(1991)*指出,尽管在统计上于TC登陆当天生成的龙卷数量最多,但一些TC龙卷爆发事件是发生在TC登陆一到两天之后。由于在夜间或海上缺乏目击者,摩羯(或其他TC)生成的龙卷数量有可能存在低估。

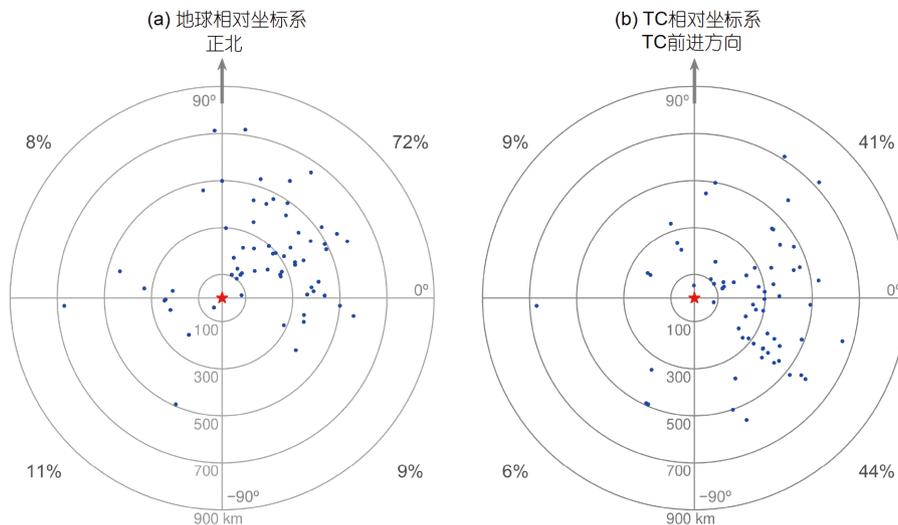


图3 2006~2018年中国TC龙卷(圆点)相对于TC中心(五角星)的空间分布
百分数分别表示各象限的龙卷样本占总样本的比例

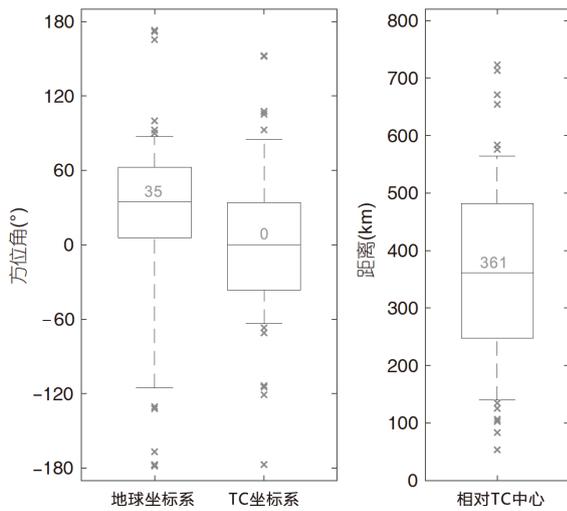


图4 2006~2018年中国TC龙卷的相对于TC中心的方位角(a)和距离(b)

(a)中地球相对坐标系中的正北方向和TC相对坐标系中的TC移动方向均对应为90°(如图3所示)。在盒须图中,上边缘和下边缘分别对应90%和10%,叉号分别对应超过(低于)90%(10%)的值。盒的上下端分别对应75%和25%,中值由盒中横线表示

广东省佛山市是中国龙卷多发的地区之一。佛山市在2018年遭遇了两次TC龙卷过程。第一个龙卷由热带风暴艾云尼(Ewiniar)在6月8日下午生成。另一个龙卷则在9月17日生成于台风山竹(Mangkhut)的东南象限中。值得一提的是,佛山龙卷风研究中心(于2013年成立)在这两次龙卷来临之前均成功发布了龙卷预警。此外,台风山竹于9月17日在毗邻佛山市的肇庆市也生成了一个龙卷。佛山龙卷风研究中心对该龙卷亦成功发布了龙卷预警。

4 中国TC龙卷的关键环境特征

本节将分析有利于TC龙卷生成的关键环境条件,主要关注两个参数: 风暴相对螺旋度(Storm Relative Helicity; 简称SRH)和考虑夹卷效应的对流不稳定能量。近期研究表明,这两个参数对评估TC龙卷潜势有所帮助(Sueki和Niino, 2016)。在分析场/再分析场数据中, TC强度和尺度的偏差越大,由之计算得到的热力学或动力学变量的空间分布不确定性越大。因此,准确表征TC的强度和结构,才能保证本文分析的有效性。Gao等(2018)指出NCEP FNL(National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis)数据对TC强度和暖心结构的表征效果最好,故本文使用了NCEP FNL数据来描述TC和龙卷的环境特征。我们选择距离TC龙卷发生时刻最近的可用数据来描述龙卷的代表性环境。通过计算各案例的环境参数,再按TC中心平移,得到其合成场。需要指出的是,本文对这些环境参数的探讨并非为了找到能直接预测TC龙卷的“灵丹妙药”,而是通过对比TC龙卷与各环境参数的空间分布,揭示在TC环流中有利于龙卷生成的主要环境条件。

4.1 动力环境特征: 风暴相对螺旋度

在低层垂直风切变较大的环境中, TC龙卷发生的概率往往较大(Novlan和Gray, 1974; McCaul, 1991)。前人研究指出, TC龙卷的发生位置通常处于SRH的大值区域(如McCaul, 1991; Sueki和Niino, 2016)。SRH是一个用于描述右移超级单体的气旋性上升运动旋转强度潜势的物理量。它可通过将风暴相对的顺气流方向的

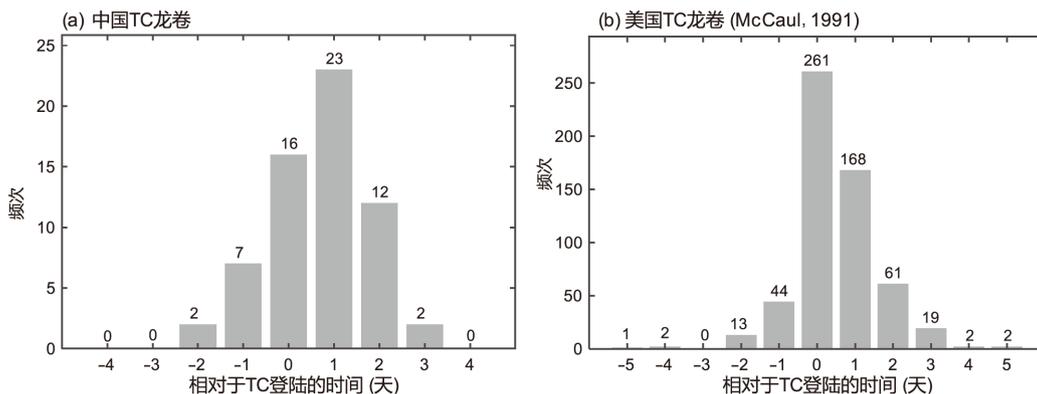


图5 2006~2018年中国TC龙卷(a)与1948~1986年美国TC龙卷(b)相对于TC登陆的时间分布

改自McCaul (1991)的图15。其中,第0天表示龙卷在TC登陆前后12小时内生成;第1天表示龙卷在TC登陆后12~36小时内产生;以此类推

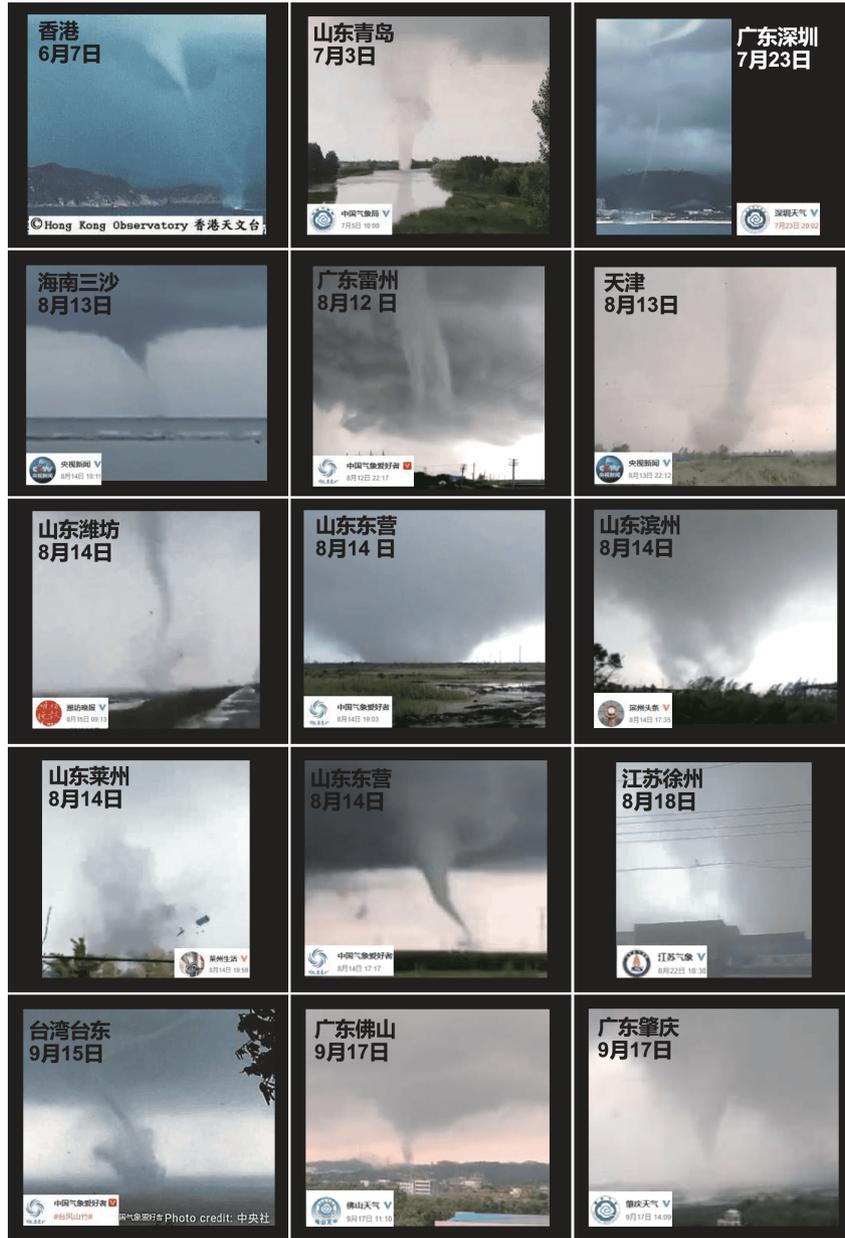


图 6 2018年的部分TC龙卷影像截图

信息来源于新浪微博(<https://weibo.com>), 具体出处分别在对应截图中标出

涡度从地面积分到给定高度来计算(Davies-Jones, 1984):

$$SRH = \int_0^H (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} \right) dz, \quad (1)$$

其中 H 为给定高度, \mathbf{V}_h 为水平风速, \mathbf{C} 为风暴移动速度, \mathbf{k} 为垂直方向的单位矢量. 地面以上0到1km的SRH

(0~1km SRH)通常是评估龙卷性超级单体发生潜势的良好参数(Rasmussen, 2003; Thompson等, 2003, 2007). 基于日本23年的TC龙卷数据集, Sueki和Niino (2016)发现0~3km SRH与TC龙卷有较好的对应关系. 本文将使用0~1和0~3km SRH对中国的TC龙卷生成运动环境进行诊断.

中国TC龙卷的发生位置集中在0~1和0~3km SRH

表 1 发生于2018年的中国热带气旋龙卷^{a)}

序号	热带气旋	强度	龙卷日期	龙卷发生地
1	艾云尼	热带风暴	6月7日	香港
2	艾云尼	热带风暴	6月8日	广东佛山
3	Nameless*	热带低压	7月23日	广东深圳
4	贝碧嘉	热带风暴	8月12日	广东雷州
5	贝碧嘉	热带风暴	8月13日	海南三沙
6	摩羯	热带风暴	8月13日	天津
7	摩羯	热带风暴	8月13日	江苏徐州
8	摩羯	热带风暴	8月13日	安徽宿州
9	摩羯	热带低压	8月13日	山东枣庄
10	摩羯	热带低压	8月14日	江苏仪征
11	摩羯	热带低压	8月14日	山东潍坊
12	摩羯	热带低压	8月14日	山东东营
13	摩羯	热带低压	8月14日	山东莱州
14	摩羯	热带低压	8月14日	山东滨州
15	摩羯	热带低压	8月14日	山东东营
16	摩羯	热带低压	8月14日	山东德州
17	温比亚	热带低压	8月18日	江苏徐州
18	温比亚	热带低压	8月18日	江苏徐州
19	温比亚	热带低压	8月19日	山东临沂
20	山竹	强台风	9月15日	台湾台东
21	山竹	强台风	9月15日	台湾台东
22	山竹	强台风	9月16日	台湾台东
23	山竹	热带风暴	9月17日	广东佛山
24	山竹	热带风暴	9月17日	广东肇庆

a)* Nameless表示该热带气旋由于从未达到热带风暴的强度, 故无命名

的大值区内(图8). 其中, 0~1km SRH与TC龙卷位置的匹配比0~3km SRH略好. 与Sueki和Niino (2016)的研究结果一致, SRH的大值区出现在相对TC中心的东北象限, 主要位于距TC中心约600km的范围内. 在龙卷发生时刻附近, 龙卷生成位置的0~1km SRH数值主要处于75~177m²s⁻²区间, 中值为103m²s⁻²(图9a), 约为美国TC龙卷生成环境中SRH的一半(Edwards等, 2012). 个别TC龙卷的0~1km SRH超过了350m²s⁻². 以往的研究表明, 较大的低层SRH有利于产生大量的旋转性上升气流, 这有利于超级单体和龙卷的生成和发展(Rasmussen, 2003; Thompson等, 2012; Knupp等, 2014). 以上统计结果表明: 从动力环境条件来看, 在相对TC中心的东北象限约600km范围内, 发生龙卷过

程的风险较高.

4.2 热力环境特征: 对流不稳定能量

诸多研究表明, 对流有效位能(Convective Available Potential Energy; 简称CAPE)的大值区与TC龙卷的发生位置并无较好的配置关系(如McCaul, 1991). 前人的研究工作指出, 对流层中层的干空气夹卷效应对TC龙卷爆发有重要作用(如Hill等, 1966; Novlan和Gray, 1974; McCaul, 1987; Curtis, 2004; Eastin和Link, 2009). Sueki和Niino (2016)发现考虑夹卷效应的CAPE (Entrainment CAPE; 简称E-CAPE)可能是评估TC环境中龙卷潜势的一个有效热力学参数之一.

在气块理论中, CAPE表示单位质量湿空气块可通

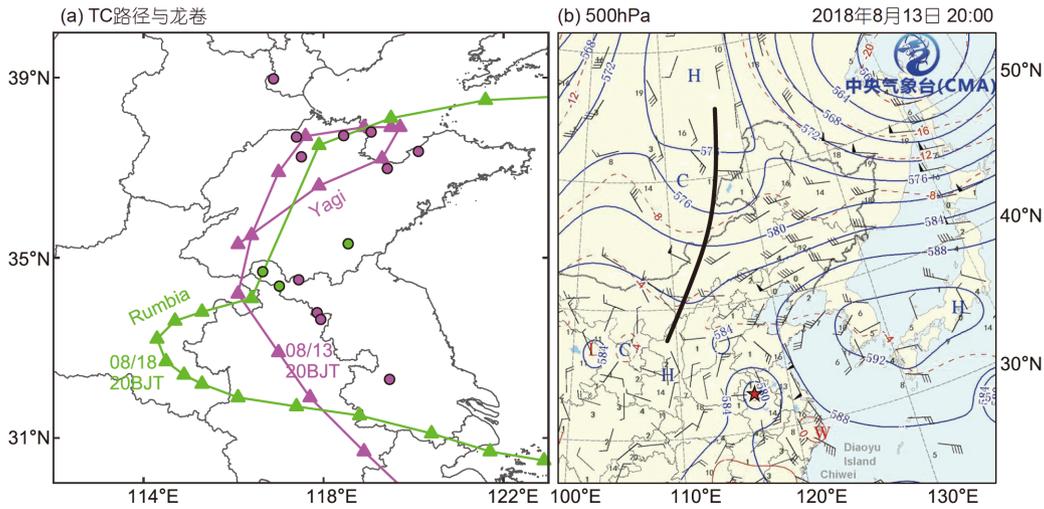


图7 2018年台风摩羯和温比亚的移动路径(a)和2018年8月13日20:00时刻的500hPa天气图(b)

(a)中台风摩羯(Yagi, 紫色)和温比亚(Rumbia, 绿色)各自生成的龙卷位置以相应颜色的圆点表示. TC中心(三角形)的时间间隔为6小时. (b)是由中国气象局提供的天气图, 包括位势高度(蓝色等值线; 单位: dagpm)、水平风速和温度(红色等值线; 单位: °C). 风杆中的半杆、全杆和旗帜分别代表速度为2、4和20m s⁻¹. 红色五角星表示台风摩羯的位置

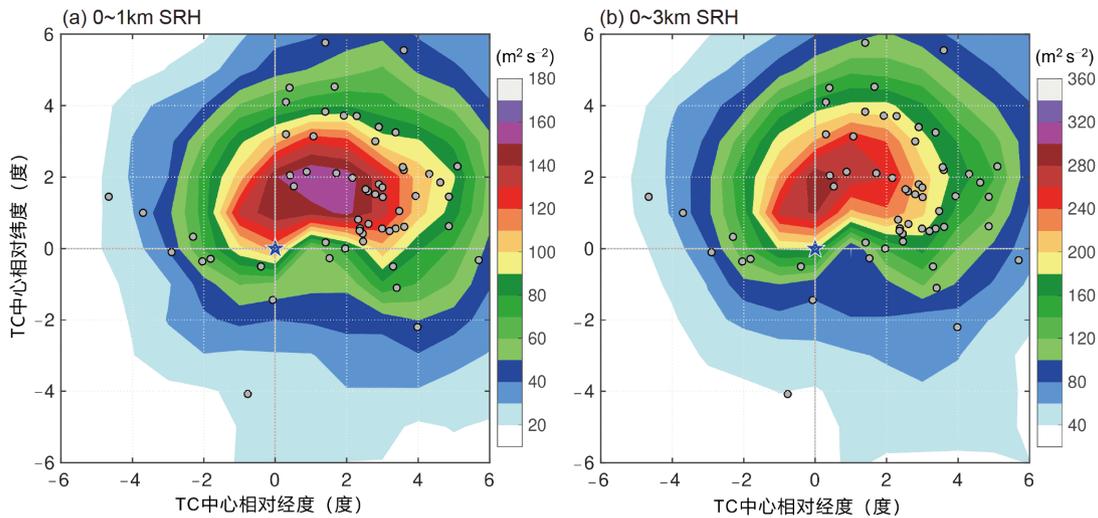


图8 中国2006~2018年TC龙卷个例的环境场合成: 0~1(a)和0~3km(b)的风暴相对螺旋度(SRH)

五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置

过浮力做功转化为垂直运动动能的湿静力能量. 其可通过对该气块自由对流高度(Level of Free Convection, 简称LFC)和平衡高度(Equilibrium Level, 简称EL)之间的浮力进行积分计算得到

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} \frac{T_v - T_v}{T_v} g dz, \quad (2)$$

式中, T_v 为上升气块的虚温, T_v 为环境虚温, g 为重力

加速度. 本文使用Sueki和Niino(2016)基于拉格朗日气块模型(Romps和Kuang, 2010)的算法, 在考虑夹卷效应的情形下通过更新 T_v 来计算E-CAPE. 其中, 假定被抬升气块以恒定的夹卷率(λ)与环境空气发生交换. 在本文中, 所有CAPE、E-CAPE和对流抑制能量(CIN)均基于混合层(地面至1km高度)初始气块计算得到. 初始气块的各相关变量为混合层平均值. 本文亦对基于地

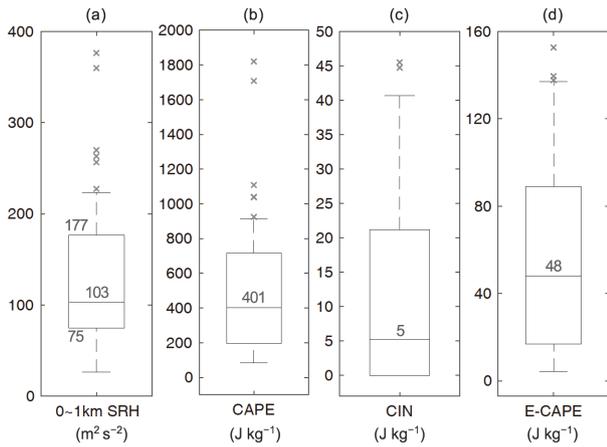


图9 2006~2018年中国TC龙卷发生位置的0~1km SRH (a)、CAPE(b)、CIN(c)和E-CAPE(d)

在盒须图中, 上边缘和下边缘分别对应90%和10%, 蓝色叉号分别对应超过90%的值. 盒的上下端分别对应75%和25%, 中值由盒中横线表示

面和最不稳定层(最低300hPa)的初始抬升气块进行了计算, 其合成E-CAPE的大值区未与TC龙卷高发区很好地对应.

图10显示了龙卷生成时刻在TC中心附近的CAPE和CIN水平分布合成场. 绝大多数龙卷发生在中等大小CAPE区域, 而CAPE的大值区位于TC中心东南侧(图10a). 这种空间分布特征与Sueki和Niino(2016)的结果相似. 龙卷发生位置的CAPE中值为401J kg⁻¹(图9b), 与美国TC龙卷环境的CAPE均值(253J kg⁻¹)相当

(McCaul, 1991). 在CIN的合成场中, 龙卷主要位于其小值区域(图10b), CIN的中值为5J kg⁻¹(图9c). 可见与其他象限相比, 东北象限的低层气块更容易克服对流抑制. 因此, CIN在评估TC龙卷潜势方面的效果似乎比CAPE好.

虽然TC东北象限的CAPE值并不大, 但这并不意味着该象限的气块对流不稳定能量就比其他象限小(如东南象限). 图11显示了不同夹卷率下计算出的E-CAPE水平分布的合成场. 总体来看, TC龙卷主要集中在E-CAPE的大值区域. 相比于CAPE, E-CAPE值约小一个数量级. 这是由于上升的气块在对流层中高层夹卷了非饱和空气, 气块中的单位质量的气团释放的潜热减少. 在Sueki和Niino(2016)的研究工作中, 夹卷率λ=20% km⁻¹时, 日本TC龙卷的总体位置与E-CAPE大值区最吻合. 在本文中, 夹卷率λ>20% km⁻¹的E-CAPE大值区域, 特别是在λ=40% km⁻¹和λ=50% km⁻¹时(图11c, 11d), 与TC龙卷的总体分布具有更好的空间配置关系. 下文将基于λ=40% km⁻¹的E-CAPE进行分析. 其中, 中国TC龙卷生成环境的E-CAPE中值为48J kg⁻¹(图9d).

4.3 龙卷多发与非多发的TC环境对比

为探究以上环境参数(如SRH和E-CAPE)对龙卷爆发事件的发生是否具有指示意义, 本文对龙卷多发和非多发的TC环境进行了对比分析. 其中, 龙卷多发

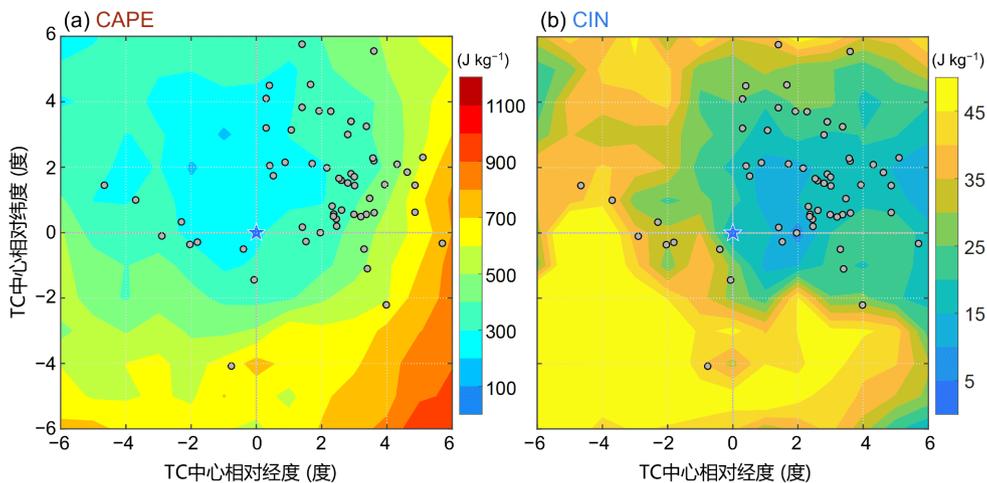


图10 中国2006~2018年TC龙卷个例的环境场合成: CAPE(a)和CIN(b)
蓝色五角星表示TC中心, 灰色圆点为相对TC中心的龙卷位置

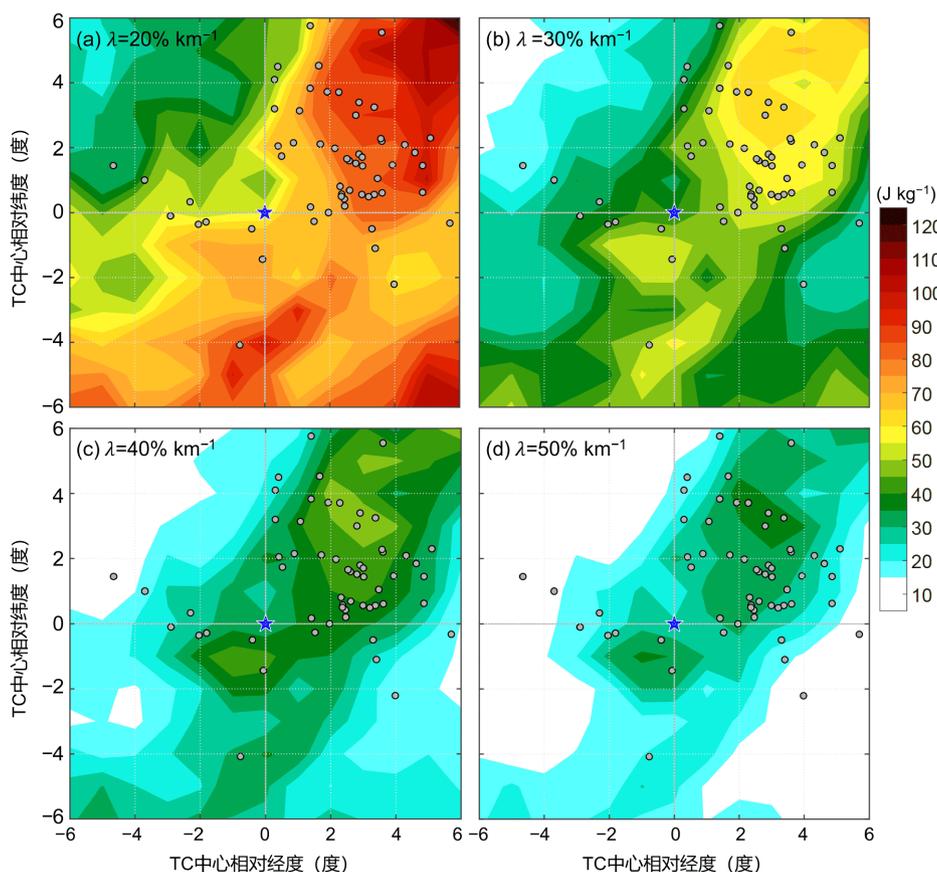


图 11 中国2006~2018年TC龙卷个例的环境场合成: 夹卷率 λ 20% km^{-1} (a)、30% km^{-1} (b)、40% km^{-1} (c)和50% km^{-1} (d)的E-CAPE

五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置

的TC案例选择的是发生于2018年的台风摩羯(Yagi)。摩羯于8月12日晚登陆中国东部, 在其环流背景下于13~14日共生成11个龙卷(表1)。作为对照组, 本文选择与摩羯移动路径相近的台风温比亚(Rumbia)为非龙卷多发的TC(图7)。温比亚于2018年8月16日晚登陆, 其在18日晚于江苏省徐州市生成2个龙卷, 随后在19日晚于山东省临沂市生成1个龙卷(表1)。

对台风摩羯和温比亚环境特征的比较发现, 在龙卷多发的摩羯环境中, 绝大多数龙卷都位于更加有利的热力条件区域(图12)。具体来说, 摩羯东北象限的E-CAPE大值区范围比温比亚更大; 其龙卷所处位置的CAPE(CIN)比温比亚更大(小)。虽然温比亚东北象限的热力条件总体没有摩羯有利, 但其0~1km SRH大值区范围比摩羯更大。这表明温比亚具有的动力条件环境更有利于龙卷生成。

虽然以上对比结果表明, 龙卷多发的台风摩羯环境具有比非龙卷多发的温比亚环境更大的E-CAPE值, 但本文同时也发现E-CAPE可能不足以判断一个龙卷多发环境。通过对仅有一个龙卷记录的TC环境场进行分析(共21个TC样本), 我们发现在TC的东北象限中也具有较大SRH与E-CAPE值, 中等大小的CAPE和相对较小的CIN(图13)。这种动力与热力环境特征与发生龙卷爆发事件的台风摩羯(2018)环境特征类似。与摩羯相比, 这些仅生成一个龙卷的TC环境甚至具有数值和范围均更大的E-CAPE。此外, 在无龙卷生成的TC环境中, 尽管在统计上SRH和E-CAPE总体偏小, 但其大值区亦处于TC的东北象限内(Sueki和Niino, 2016)。近期研究表明, 结合了E-CAPE的一些复合指数, 如夹卷能量螺旋度指数等, 对于评估温带气旋暖区中的龙卷爆发潜势具有较好的效果(Tochimoto等, 2019)。运用这

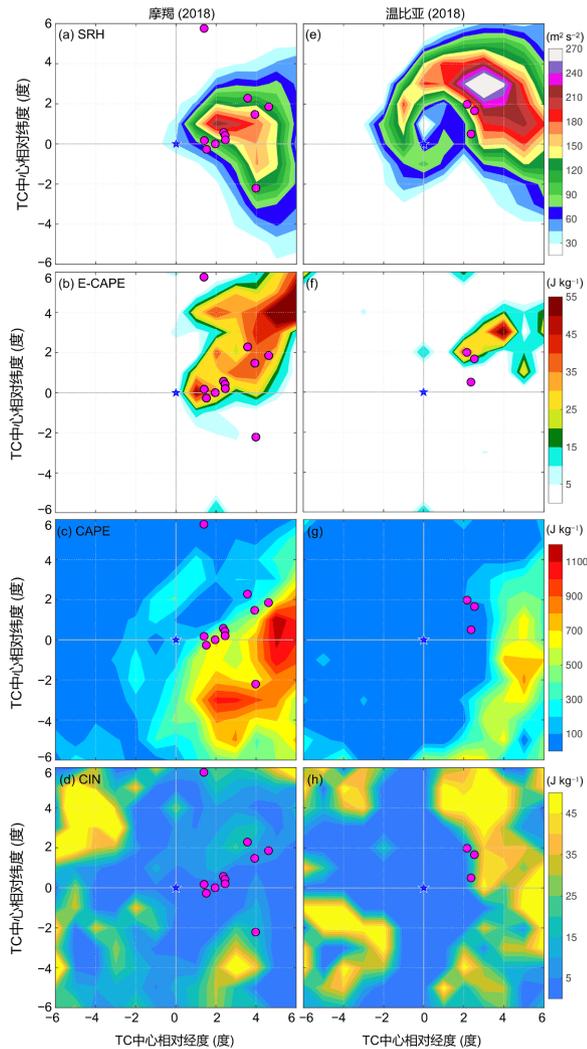


图 12 2018年台风摩羯和温比亚在龙卷时刻的环境场合成: 0~1km SRH(a)、E-CAPE(b)、CAPE(c)和CIN(d)
五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置

类考虑夹卷效应的复合指数来区分龙卷多发的TC环境, 值得进一步研究。

诸多研究表明, 对流层中层的干空气侵入(下文简称干侵入)过程可能是造成龙卷爆发的关键环境特征。其通过不断地增加大气的的不稳定度, 从而有助于加强深对流以及龙卷活动(Hill等, 1966; McCaul, 1987; Vescio等, 1996; Curtis, 2004; Schultz和Cecil, 2009)。例如, 受干侵入的影响, 云量的减少使得地表将接收更多的太阳短波辐射; 同时, 由于中层的蒸发冷却作用加强使得垂直减温率增大, 最终导致大气层结的对流不稳定性增加。基于Himawari-8静止轨道卫星的水

汽通道图像(通道9; 约400hPa高度; Ma等, 2017), 台风摩羯(2018)的东南象限具有显著的中高层干空气特征(图14a)。在中层西南风的影响下, 中高层干空气将被平流进台风雨带区域(图14a, 14b)。事实上, 通过对2015年7月以后(Himawari-8数据在此时之后可用)的所有TC龙卷案例进行检查, 台风摩羯的中高层干侵入特征最为显著。与摩羯相比, 温比亚的龙卷生成环境总体偏湿(图14c, 14d)。除了中高层干侵入过程, 前人的研究表明, 当TC与逐渐接近的中层低压槽相互作用时, 也可能在短时间内生成多个龙卷(如Novlan和Gray, 1974; Verbout等, 2007; Schultz和Cecil, 2009)。Verbout等(2007)的研究指出, 美国的TC龙卷爆发与中纬度中层低压槽的靠近密切相关。TC与逐渐接近的中纬度中层低压槽相互作用, 往往会导致TC迅速向东北转向。在这种天气背景下, 高空急流具有更大的向赤道分量, 从而有助于增加深层垂直风切变, 进一步有利于中气旋和龙卷的生成(Verbout等, 2007)。在本文TC龙卷研究中, 龙卷爆发事件亦发生于摩羯与中纬度中层低压槽相互作用的过程中, 并伴随摩羯朝东北转向(图7b)。

5 总结与讨论

本文对2006~2018年间在中国发生的热带气旋龙卷(简称TC龙卷)进行了调查分析, 总结出中国TC龙卷的基本统计特征, 揭示了中国登陆TC环流中的龙卷潜在威胁。

统计结果表明, 中国约27%的登陆TC至少有一个龙卷生成。在这13年间, 共有64次TC龙卷记录, 平均每年约5个。TC龙卷主要发生在午后, 且在8月最频发。中国有两个TC龙卷高发区, 分别是江苏省和广东省。同时, 这两个省份也是非TC龙卷的高发区(范雯杰和俞小鼎, 2015)。与美国相比, 中国TC龙卷的生成位置集中在离海岸线更近的相对平坦区域, 约95%的龙卷发生在距海岸线250km内。龙卷的生成位置和其母体TC中心的距离主要处于250~500km。中国TC龙卷主要发生在TC中心的东北象限, 而非TC移动方向的右前象限。相比之下, 美国TC中心的东北象限和右前象限均为有利于龙卷生成的区域。这种差异可能是由于中美两国海岸线与TC移动方向的夹角不同造成。不过, 这一假设需要做进一步的研究来证实。本文还发现, 中国

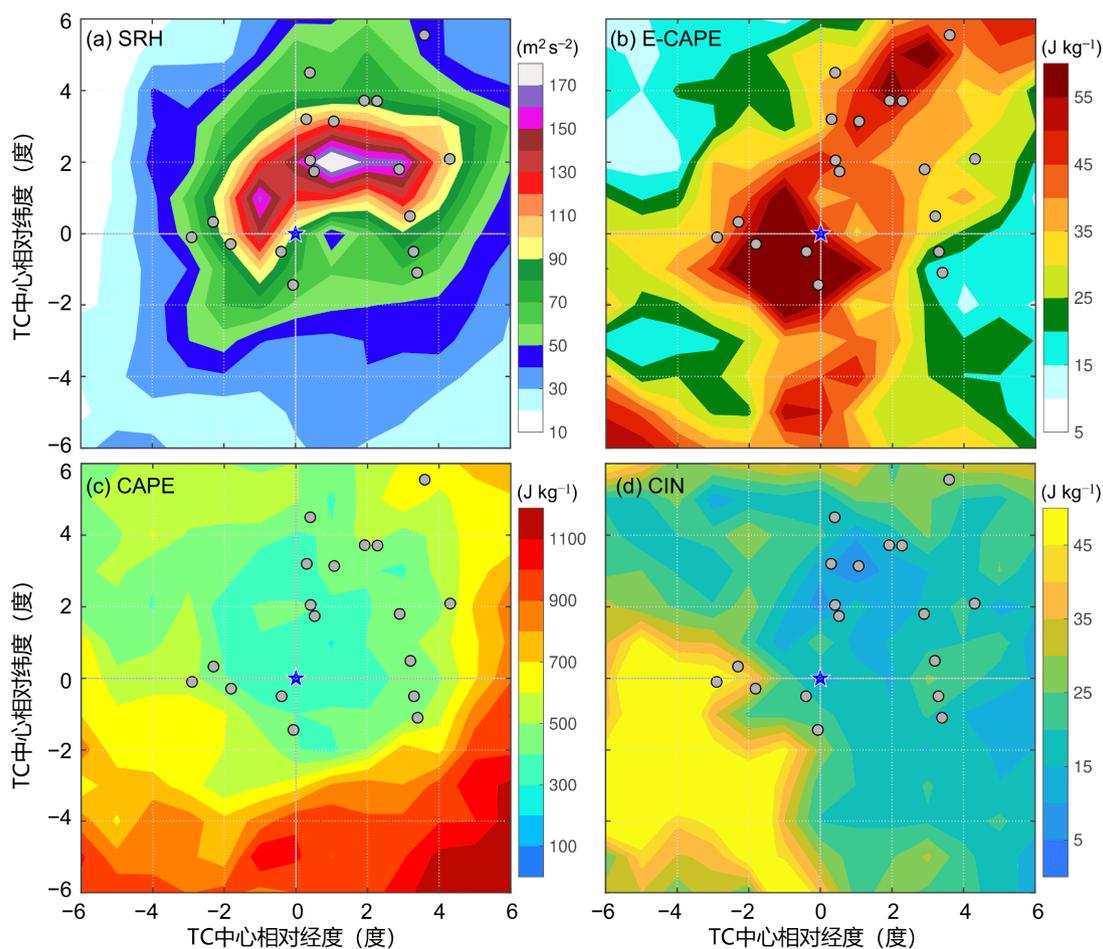


图 13 中国2006~2018年间仅有一个龙卷记录的TC环境场合成: 0~1km SRH(a)、E-CAPE(b)、CAPE(c)和CIN(d)
五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置

大多数TC龙卷生成于其母体TC强度较弱的阶段。例如, 约33%(31%)的龙卷在热带低压(热带风暴)环境中生成。因此, 在对登陆TC防灾减灾的过程中, 即使TC显著减弱也不能掉以轻心。

针对一些有助于评估TC龙卷潜势的关键环境参数, 本文探讨了中国TC龙卷生成的环境特征。结果表明, 中国TC龙卷的生成位置主要集中在SRH和E-CAPE的大值区域。这与日本的TC龙卷环境分析结果一致(Sueki和Niino, 2016)。不过, 中国TC龙卷所处环境的0~1km SRH的统计值总体低于美国。

在最近13年中, 2018年是中国TC龙卷活动最活跃的一年, 共有24个TC龙卷生成。同时, 中国现代气象史上第一次龙卷爆发事件亦发生在2018年。此次龙卷爆发事件发生于台风摩羯(2018)登陆中国东部的第二天。

在龙卷爆发时段, 摩羯与中纬度中层低压槽相互作用, 并伴随显著的中高层干空气侵入。通过将龙卷多发和非龙卷多发的TC环境进行比较, 本文发现SRH或E-CAPE的数值大小和空间覆盖区域无法用以区分一个龙卷性TC是否具有龙卷多发的潜势。

此外, 尽管本文的研究结果显示TC龙卷与SRH和E-CAPE的大值区存在较好的空间配置关系, 但却不能简单地使用SRH和E-CAPE来预测TC龙卷。这是由于在SRH和E-CAPE数值都较大的TC环境中, 大多数情况下并无龙卷生成。当一个TC环境在东北象限具有较大的SRH、E-CAPE和CAPE, 以及较小的CIN时, 或许只能说明在此环境下发生龙卷的概率较高。除有利的环境条件外, TC龙卷的生成可能最终取决于风暴尺度的动力和热力过程。

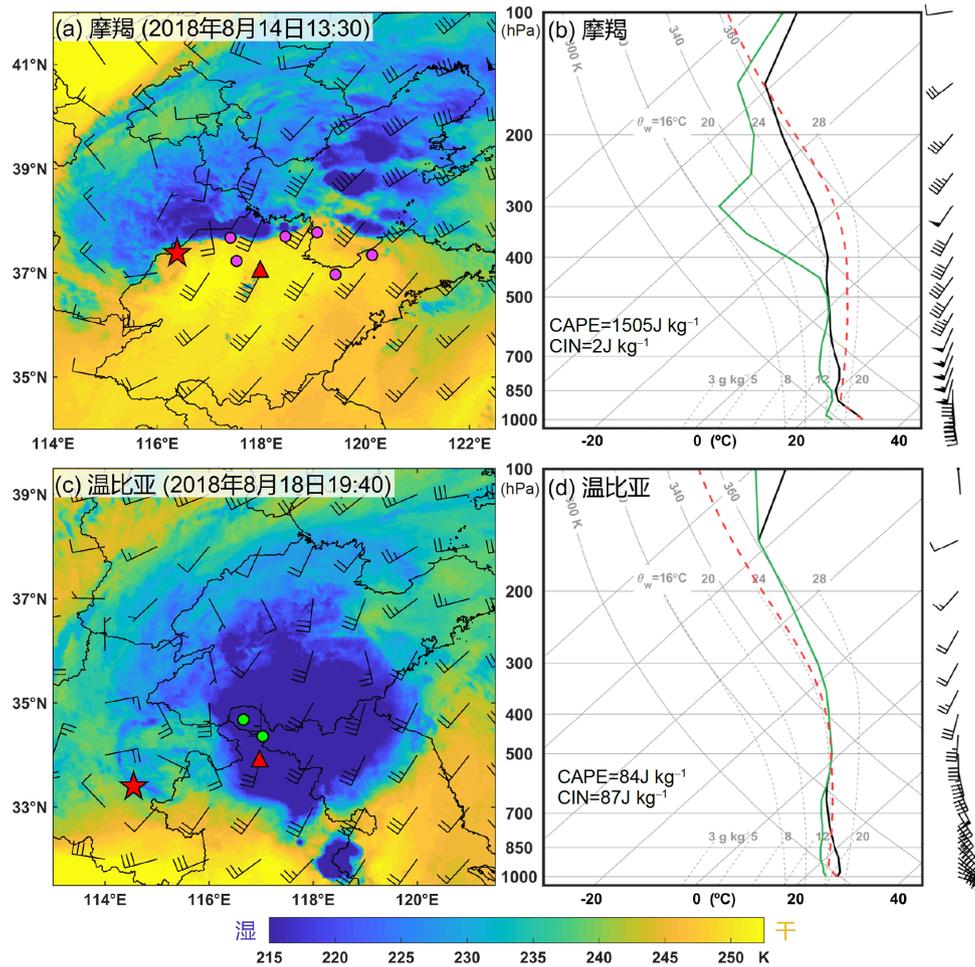


图 14 Himawari-8卫星通道9(约400hPa高度)的亮温((a)(c))及其三角形位置处的斜温图((b)(d))

(a)和(c)的亮温单位: K. 其中, 风向杆为NCEP FNL分析场的400hPa水平风, 时间分别对应(a)2018年8月14日14:00和(c)8月18日20:00. 红色五角星表示TC中心位置. 在(a)中, 于2018年8月14日10:00~13:30生成的龙卷位置以紫色圆点表示. 在(c)中, 两个绿色圆点分别代表2018年8月18日18:40和19:40发生的龙卷位置. (b)和(d)中环境温度和露点温度分别以黑色和绿色曲线表示. 基于地面初始气块的抬升曲线由红色虚线表示. 风杆中的半杆、全杆和旗帜分别代表速度为2、4和20m s⁻¹

致谢 感谢诸多气象同行、气象爱好者和新闻媒体通过网络或私下分享宝贵的龙卷信息(包括龙卷的实拍照片和视频). 特别感谢北京大学陈家宜教授提供的龙卷数据集(Chen等, 2018), 以及纽约城市大学罗正钊教授给予的宝贵意见. 同时, 感谢佛山龙卷风研究中心的炎利军、李兆明和蔡康龙等提供的部分龙卷信息. 最后, 感谢三位匿名审稿人为本文的改进给予的极大帮助.

参考文献

陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 科学出版社, 北京. 491
范雯杰, 俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 41: 793-805

黄先香, 炎利军, 王硕甫, 程正泉. 2014. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析. 广东气象, 36: 20-24
沈树勤. 1990. 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, 16: 11-16
郑艳, 俞小鼎, 任福民, 蔡亲波. 2017. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. 气象, 43: 675-685
郑媛媛, 张备, 王啸华, 孙康远, 慕瑞琪, 夏文梅. 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 41: 942-952
American Meteorological Society. 2018. Tornado outbreak. Glossary of Meteorology. Available online at http://glossary.ametsoc.org/wiki/Tornado_outbreak
Bai L, Meng Z, Huang L, Yan L, Li Z, Mai X, Huang Y, Yao D, Wang

- X. 2017. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015). *Bull Amer Meteor Soc*, 98: 2619–2640
- Barbour G B. 1924. Waterspout and tornado within a typhoon area. *Mon Weather Rev*, 52: 106–107
- Chen J, Cai X, Wang H, Kang L, Zhang H, Song Y, Zhu H, Zheng W, Li F. 2018. Tornado climatology of China. *Int J Climatol*, 38: 2478–2489
- Curtis L. 2004. Midlevel dry intrusions as a factor in tornado outbreaks associated with landfalling tropical cyclones from the Atlantic and Gulf of Mexico. *Weather Forecast*, 19: 411–427
- Davies-Jones R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J Atmos Sci*, 41: 2991–3006
- Eastin M D, Link M C. 2009. Miniature supercells in an offshore outer rainband of Hurricane Ivan (2004). *Mon Weather Rev*, 137: 2081–2104
- Edwards R. 2012. Tropical cyclone tornadoes: A review of knowledge in research and prediction. *Electronic J Severe Storm Meteorol*, 7: 1–61
- Galway J G. 1977. Some climatological aspects of tornado outbreaks. *Mon Weather Rev*, 105: 477–484
- Gentry R C. 1983. Genesis of tornadoes associated with hurricanes. *Mon Weather Rev*, 111: 1793–1805
- Gao S, Wang D, Hong H, Wu N, Li T. 2018. Evaluation of warm-core structure in reanalysis and satellite data sets using HS3 dropsonde observations: A case study of Hurricane Edouard (2014). *J Geophys Res-Atmos*, 123: 6713–6731
- Hill E L, Malkin W, Schulz Jr. W A. 1966. Tornadoes associated with cyclones of tropical origin-practical features. *J Appl Meteor*, 5: 745–763
- Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, Wade R A, Mullins S A, Schultz C J, Schultz E V, Carey L, Sherrer A, McCaul Eugene W. J, Carcione B, Latimer S, Kula A, Laws K, Marsh P T, Klockow K. 2014. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak. *Bull Amer Meteor Soc*, 95: 1041–1062
- Lyons S W. 2004. U.S. Tropical cyclone landfall variability: 1950–2002. *Weather Forecast*, 19: 473–480
- Ma Z, Maddy E S, Zhang B, Zhu T, Boukabara S A. 2017. Impact assessment of Himawari-8 AHI data assimilation in NCEP GDAS/GFS with GSI. *J Atmos Ocean Technol*, 34: 797–815
- McCaul E W. 1987. Observations of the Hurricane “Danny” tornado outbreak of 16 August 1985. *Mon Weather Rev*, 115: 1206–1223
- McCaul E W. 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon Weather Rev*, 119: 1954–1978
- Meng Z, Bai L, Zhang M, Wu Z, Li Z, Pu M, Zheng Y, Wang X, Yao D, Xue M, Zhao K, Li Z, Peng S, Li L. 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China. *Weather Forecast*, 33: 693–713
- Meng Z, Yan D, Zhang Y. 2013. General features of squall lines in East China. *Mon Weather Rev*, 141: 1629–1647
- Mitsuta Y. 1983. Studies on wind disasters caused by tsumaki (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
- Niino H, Fujitani T, Watanabe N. 1997. A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *J Clim*, 10: 1730–1752
- Novlan D J, Gray W M. 1974. Hurricane-spawned tornadoes. *Mon Weather Rev*, 102: 476–488
- Rasmussen E N. 2003. Refined supercell and tornado forecast parameters. *Weather Forecast*, 18: 530–535
- Romps D M, Kuang Z. 2010. Do undiluted convective plumes exist in the upper tropical troposphere? *J Atmos Sci*, 67: 468–484
- Schultz L A, Cecil D J. 2009. Tropical cyclone tornadoes, 1950–2007. *Mon Weather Rev*, 137: 3471–3484
- Spratt S M, Sharp D W, Welsh P, Sandrik A, Alsheimer F, Paxton C. 1997. A WSR-88D assessment of tropical cyclone outer rainband tornadoes. *Weather Forecast*, 12: 479–501
- Sueki K, Niino H. 2016. Toward better assessment of tornado potential in typhoons: Significance of considering entrainment effects for CAPE. *Geophys Res Lett*, 43: 12597–12604
- Suzuki O, Niino H, Ohno H, Nirasawa H. 2000. Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon Weather Rev*, 128: 1868–1882
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, Elmore K L, Markowski P. 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Weather Forecast*, 18: 1243–1261
- Thompson R L, Mead C M, Edwards R. 2007. Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. *Weather Forecast*, 22: 102–115
- Thompson R L, Smith B T, Grams J S, Dean A R, Broyles C. 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS tornado environments. *Weather Forecast*, 27: 1136–1154
- Tochimoto E, Sueki K, Niino H. 2019. Entraining CAPE for better assessment of tornado outbreak potential in the warm sector of extratropical cyclones. *Mon Weather Rev*, 147: 913–930
- Verbout S M, Schultz D M, Leslie L M, Brooks H E, Karoly D J, Elmore K L. 2007. Tornado outbreaks associated with landfalling hurricanes in the North Atlantic Basin: 1954–2004. *Meteorol Atmos Phys*, 97: 255–271
- Vescio M D, Weiss S J, Ostby F P. 1996. Tornadoes associated with

- Tropical Storm Beryl. Preprints, 21st Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer Meteorol Soc, 469–471
- Weiss S J. 1987. Some climatological aspects of forecasting tornadoes associated with tropical cyclones. Preprints, 17th Conf on Hurricanes and Tropical Meteor. Miami, FL, Amer Meteor Soc. 160–163
- Yao D, Liang X, Meng Q, Li J, Wu C, Xie Z, Chen D, Guo J. 2019. Importance of identifying tropical cyclone tornadoes in typhoon warning and defense systems. *Sci Bull*, 64: 143–145
- Ying M, Zhang W, Yu H, Lu X, Feng J, Fan Y, Zhu Y, Chen D. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J Atmos Ocean Technol*, 31: 287–301
- Zhao K, Wang M, Xue M, Fu P, Yang Z, Chen X, Zhang Y, Lee W C, Zhang F, Lin Q, Li Z. 2017. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of Typhoon Mujigae (2015) in South China. *Bull Amer Meteor Soc*, 98: 1821–1831

(责任编辑: 罗德海)