

刁秀广,孟宪贵,张立,等.台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):19-28.

DIAO Xiuguang, MENG Xiangui, ZHANG Li, et al. Analysis of microscale vortex signature and early warning capability of tornadoes in the circulations of Typhoon YAGI and RUMBIA[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(3): 19-28. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.003. (in Chinese)

## 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析

刁秀广<sup>1</sup>, 孟宪贵<sup>1</sup>, 张立<sup>2</sup>, 任钟冬<sup>3</sup>, 赵海军<sup>4</sup>

(1. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 2. 东营市气象局, 山东 东营 257091; 3. 滨州市气象局, 山东 滨州 256600; 4. 临沂市气象局, 山东 临沂 276004)

**摘要:** 利用多普勒天气雷达探测资料, 结合常规气象观测资料和天气实况及灾情调查, 对 2018 年 8 月 14 日台风“摩羯”(1814)和 8 月 19 日台风“温比亚”(1818)产生龙卷的环境物理量及龙卷风暴强度结构特征进行了分析, 对诱发龙卷和未诱发龙卷的小尺度气旋性涡旋特征进行了对比。结果表明: 两次台风减弱低压东北象限是龙卷发生的关键区, 低层高湿, 强的低层垂直风切变和大的相对风暴螺旋度是关键物理量; 龙卷出现时都伴有  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的小尺度气旋性涡旋, 且基本出现在 2.0 km 高度以下, 但并不是所有这种低层小尺度气旋性涡旋都能诱发龙卷; 以  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为阈值, 龙卷识别具有较高的命中率, 识别准确率为 31.8%, 空报率为 67.4%, 漏报率为 6.7%; 约 35.7% 的龙卷没有识别时间提前量, 半数龙卷几乎没有预警时间提前量。

**关键词:** 龙卷; 小尺度涡旋; 最大径向速度差; 识别与预警

**中图分类号:** P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0019-10

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.003

### Analysis of microscale vortex signature and early warning capability of tornadoes in the circulations of Typhoon YAGI and RUMBIA

DIAO Xiuguang<sup>1</sup>, MENG Xiangui<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, REN Zhongdong<sup>3</sup>, ZHAO Haijun<sup>4</sup>

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Dongying Meteorological Bureau, Dongying 257091, China; 3. Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 256600, China; 4. Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004, China)

**Abstract** The weakened low of Typhoon YAGI and RUMBIA crossed Shandong Province on 14 and 19 August 2018. The surrounding circulation produced multiple tornadoes and brought about serious economic losses. Based on the data of Doppler weather radar, conventional observations, weather conditions, and disaster investigation, the environmental physical variations and structural characteristics of intensity of tornado storms are analyzed, and the signatures of microscale cyclonic vortices that induced and did not induce tornadoes are compared. The results show that the northeast quadrant of two weakened low-pressure circulations is the key area for the occurrence of tornadoes. The low-level high humidity, strong low-level vertical wind shear, and large storm relative helicity are key physical quantities. Tornadoes are accompanied by microscale cyclonic vortices with  $\Delta V$  larger than  $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , which occur mainly below 2.0 km, but not all such low-level microscale cyclonic vortices can induce tornadoes. With  $\Delta V$  larger than  $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  as the threshold, the hit rate of tornado recognition is high, the

收稿日期: 2019-05-06; 修订日期: 2019-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375120); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20); 山东省气象局科研项目(2016sdqxz01)

作者简介: 刁秀广, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事天气雷达应用研究工作, radardxg@126.com。

accuracy of tornado recognition is 31.8%, the false alarm rate is 67.4%, and the missing alarm rate is 6.7%. About 35.7% of the tornadoes are unable to be identified in advance, and half of the tornadoes have almost no early warning time.

**Key words** tornado; microscale vortex; maximum radial velocity difference; identification and early warning

## 引言

龙卷是一种伴随着猛烈旋转的漏斗状云柱的小尺度涡旋<sup>[1-3]</sup>。根据风力及破坏程度, FUJITA<sup>[2]</sup>将龙卷分为 F0、F1、F2……F5 共六个等级。2006 年初美国国家气象局(National Weather Service)正式对外公布了增强的 F-分级(EF-分级)标准, EF-分级共分为 EF0、EF1、EF2……EF5 六个等级。

超级单体风暴和非超级单体风暴均可产生龙卷。超级单体产生的龙卷通常与中气旋相联系, 在低层较大垂直风切变和抬升凝结高度较低的环境下持续的中气旋很容易诱发龙卷<sup>[4-5]</sup>。非超级单体产生的龙卷通常与浅薄的、尺度较小的低层涡旋气流有关<sup>[6-7]</sup>。由于龙卷尺度小, 突发性强, 在其预警方面最为有效的手段是多普勒天气雷达。为了改进龙卷的预警效果, 美国国家强风暴实验室(National Severe Storms Laboratory, NSSL)开发了基于多普勒天气雷达探测资料的龙卷涡旋探测算法<sup>[8]</sup>, 并在 WSR-88D 雷达业务中进行了应用, 取得了良好效果。

我国气象工作者对龙卷的区域分布、气候特征、产生机制、雷达回波特征等开展了大量研究工作, 取得了丰硕的研究成果。我国龙卷主要分布在江淮地区、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, 具有在某地频发的特征<sup>[9]</sup>。龙卷的形成与低层的强垂直风切变密切相关, 低的抬升凝结高度和地面辐合线的存在利于龙卷的形成<sup>[10-14]</sup>。在多普勒天气雷达产品上, 强龙卷常与中气旋相伴, 低层具有钩状回波结构, 龙卷涡旋特征(TVS)等<sup>[15-18]</sup>。对于台风环流带来的龙卷, 国内也有相应研究<sup>[19-22]</sup>。台风内的龙卷多出现在台风的东北象限或前进方向的右前象限, 强度一般较弱, 多出现在下午, 也多会成群出现<sup>[23]</sup>。郑媛媛等<sup>[24]</sup>对 10 次台风龙卷过程的环境背景和其中 F2~F3 级龙卷过程的回波结构演变特征的分析结果表明, 台风龙卷所处环境基本为弱对流有效位能和风随高度强烈顺转的强低空风的垂直切变环境, 风暴的相对螺旋度很大。黄先香等<sup>[25]</sup>对广东 2 次台风龙卷对比分析发现, 低层辐合、高层辐散及中低空强劲

东南急流在珠江三角洲叠加是其产生的相似环境背景, 两个龙卷母体均为微型超级单体, 都存在强中气旋和龙卷涡旋特征, 中气旋都在中低层形成后, 向更低层发展最终导致龙卷。

2018 年第 14 号台风“摩羯”在江苏北部及山东造成 12 个龙卷, 尤其是在山东滨州和东营一带集中爆发 7 个龙卷。2018 年第 18 号台风“温比亚”给江苏徐州及山东临沂带来 3 个龙卷。2 次台风减弱低压先后穿过山东, 其外围环流在山东产生多个龙卷, 造成严重经济损失, 实属罕见。文章利用多普勒天气雷达探测资料, 结合环境物理量, 对龙卷产生的关键区和关键环境因子进行了分析, 统计分析了龙卷风暴和非龙卷风暴强度结构及气旋性小尺度涡旋特征并进行了对比, 对台风外围龙卷的识别与可预警性进行了分析, 以期对今后台风减弱低压外围环流中龙卷的预警有借鉴意义。

## 1 实况与环境物理量

### 1.1 龙卷实况

受 2018 年第 14 号台风“摩羯”减弱低压环流影响, 13 日夜间至 14 日下午, 江苏北部邳州市和山东枣庄、潍坊、烟台、滨州、东营、德州等地部分村庄先后出现 12 个龙卷, 造成严重经济损失, 龙卷出现地点见图 1a。江苏邳州(编号 1 和 3)和山东台儿庄龙卷(编号 2 和 3)出现在 13 日夜间, 没有视频资料, 只有新闻报道, 山东其他龙卷有视频资料或经灾情调查证实, 12 个龙卷详细信息见表 1。受 2018 年第 18 号台风“温比亚”减弱低压环流影响, 18 日 18:45 和 19:46 前后江苏徐州市铜山区和丰县先后遭受龙卷袭击, 19 日 19:35 山东临沂市河东区也出现龙卷(图 1b), 3 个龙卷详细信息见表 2。序号是根据龙卷出现时间先后顺序进行的排列, 时间是根据视频时间、实地灾情调查、雷达径向速度上强的小尺度涡旋综合判别得到, 等级是根据视频资料、龙卷破坏程度综合推断得到。

台风环流造成的龙卷均出现在减弱低压中心的东北象限, 距低压中心的距离范围和方位范围基本在 100~360 km 和 35°~75°之间。“温比亚”环流

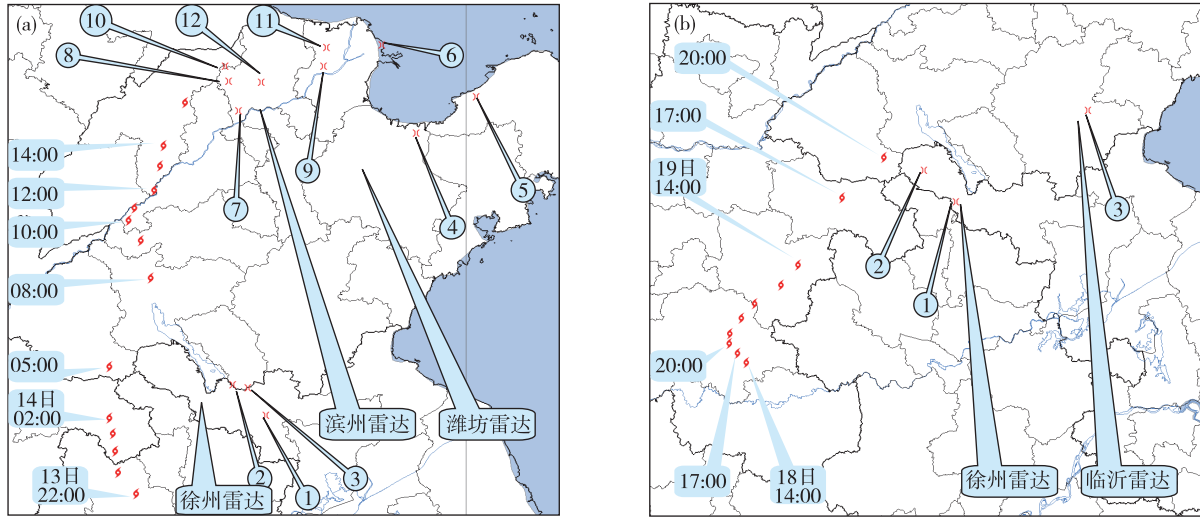


图1 龙卷地点图(a.台风摩羯,b.台风温比亚;♣为台风低压中心位置,×为龙卷位置,外带圆圈数字为龙卷编号,编号顺序见表1和表2)

Fig.1 Location of tornadoes (a. Typhoon YAGI, b. Typhoon RUMBIA; ♣ for location of low pressure center, × for location of tornadoes, circled number for serial number of tornadoes listed in Table 1 and Table 2)

表1 台风“摩羯”(1814)龙卷信息

Table 1 Information of tornadoes from Typhoon YAGI (2018)

| 序号 | 时间        | 地点                | 经纬度                | EF 等级 | 距低压中心方位,距离 | 备注   |
|----|-----------|-------------------|--------------------|-------|------------|------|
| 1  | 13日 22:30 | 邳州市土山镇薛集和刘井村      | 117. 81°E,34. 21°N | 0~1   | 57°,160 km | 新闻报道 |
| 2  | 13日 23:15 | 台儿庄区张山子镇官庄村       | 117. 44°E,34. 52°N | 0~1   | 50°,153 km | 新闻报道 |
| 3  | 14日 00:25 | 邳州市燕子埠镇小吴村        | 117. 62°E,34. 48°N | 0~1   | 60°,155 km | 新闻报道 |
| 3  | 14日 00:30 | 台儿庄区涧头集镇谷庄村       | 117. 60°E,34. 50°N | 0~1   | 60°,155 km | 新闻报道 |
| 4  | 14日 09:45 | 昌邑市柳疃镇辛安庄村、渔尔堡村一带 | 119. 44°E,37. 03°N | 0~1   | 65°,290 km | 视频   |
| 5  | 14日 10:30 | 莱州市朱桥镇大冢坡、寺庄一带    | 120. 12°E,37. 38°N | 0~1   | 68°,365 km | 视频   |
| 6  | 14日 10:40 | 垦利区孤东油田           | 119. 08°E,37. 88°N | 0~1   | 52°,308 km | 视频   |
| 7  | 14日 12:10 | 惠民县姜楼镇            | 117. 50°E,37. 25°N | 1~2   | 40°,125 km | 视频   |
| 8  | 14日 13:10 | 滨州市阳信洋湖镇马士和村      | 117. 40°E,37. 53°N | 0~1   | 35°,114 km | 视频   |
| 9  | 14日 13:20 | 利津县盐窝镇滩东村、台前村、崔西村 | 118. 44°E,37. 68°N | 0~1   | 55°,190 km | 视频   |
| 10 | 14日 13:50 | 庆云县尚堂镇李含贲村        | 117. 36°E,37. 67°N | 0~1   | 32°,99 km  | 灾情调查 |
| 11 | 14日 14:00 | 河口区六合街道南旺村        | 118. 47°E,37. 86°N | 0     | 55°,183 km | 视频   |
| 12 | 14日 14:45 | 惠民县落桑墅镇哨马张村       | 117. 77°E,37. 51°N | 0~1   | 54°,110 km | 视频   |

表2 台风“温比亚”(1818)龙卷信息

Table 2 Information of tornadoes from Typhoon RUMBIA (2018)

| 序号 | 时间        | 地点            | 经纬度                | EF 等级 | 距低压中心方位,距离 | 备注   |
|----|-----------|---------------|--------------------|-------|------------|------|
| 1  | 18日 18:45 | 徐州市铜山区刘集镇张集矿  | 117. 02°E,34. 36°N | 1~2   | 55°,290 km | 视频   |
| 2  | 18日 19:46 | 徐州市丰县凤城街道谢集村  | 116. 65°E,34. 68°N | 1~2   | 46°,286 km | 灾情调查 |
| 3  | 19日 19:36 | 临沂市河东区汤头镇贾官庄村 | 118. 56°E,35. 30°N | 2~3   | 76°,222 km | 灾情调查 |

造成的龙卷个数明显少于“摩羯”环流造成的龙卷个数,但强度强于“摩羯”环流造成的龙卷强度。

### 1.2 环境物理量

根据章丘和徐州探空资料计算的环境参数(表

3),包括K指数,850 hPa与500 hPa温差( $\Delta T$ ),沙氏指数(SI)和抬升指数(LI),0~3 km相对风暴螺旋度(SRH),对流有效位能(CAPE)和对流抑制能量(CIN),抬升凝结高度(LCL),0~6 km和0~2 km

高度垂直风切变 ( $W_{sr}$ ), 925 hPa、850 hPa 和 500 hPa 比湿 ( $q$ )。上标“\*”号的为订正后的 CAPE, 14 日 08 时章丘探空资料订正到 11 时惠民站的 CAPE 值为  $1\ 230\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 18 日 08 时徐州探空资料订正到 17 时徐州站的 CAPE 值为  $1\ 530\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 19 日 08 时徐州探空资料订正到 17 时临沂站的 CAPE 值为  $1\ 180\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。19 日 19:35 临沂河东区龙卷出现在东北象限, 20 时徐州探空站位于台风低压为中心的东南象限区域, SRH 和  $W_{sr}$  较小, 对临沂龙卷指示意义不大。利用临沂多普勒天气雷达风廓线数据计算出的 19:00 前后 0~2 km 和 0~6 km 垂直风切变分别为  $14.1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $12.3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 龙卷发生前低层具有强的垂直风切变。总的看来, 两次台风过

程中龙卷发生地都具有较大的 K 指数 ( $\geq 32\ ^\circ\text{C}$ ), 较低的  $\Delta T$  ( $\leq 23\ ^\circ\text{C}$ ), 较厚的湿层, 较大的 SRH ( $> 270\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ), 较低的 LCL ( $\geq 950\ \text{hPa}$ ), 较强的低层垂直风切变, 0~2 km 高度  $W_{sr} > 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。CAPE 值介于  $1\ 200 \sim 1\ 700\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 台风减弱低压东北象限 CAPE 值并不太高。表 3 中还给出了 2005 年 7 月 30 日安徽灵璧 F3 级龙卷<sup>[10]</sup> 和 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷<sup>[16]</sup> 对应的探空站环境参数, 7 月 30 日用灵璧 11 时温度和露点订正 CAPE, 6 月 23 日用阜宁 13 时温度和露点订正 CAPE。简单对比可知, “摩羯”和“温比亚”环流中诱发龙卷区域的关键环境因子是湿度大湿层厚、强的低层垂直风切变和大的相对风暴螺旋度。

表 3 环境参数

Table 3 Environmental parameter

| 日期       | 时次<br>(站点) | K/ $\Delta T/^\circ\text{C}$ | SI/LL/ $^\circ\text{C}$ | SRH/<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) | LCL/<br>hPa | CAPE/CIN/<br>( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | $W_{sr}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |        | 925/850/500 hPa 比湿/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|----------|------------|------------------------------|-------------------------|--|-------------|--|---|--------|--|
|          |            |                              |                         |  |             |  | 0~2 km                                  | 0~6 km |  |
| 20180813 | 20(徐州)     | 32/20                        | 3.2/-3.4                | 292  | 989         | 1 746/0  | 10.2                                    | 17.4   | 19.1/13.4/6.5  |
| 20180814 | 08(章丘)     | 42/23                        | -2.4/-0.6               | 276  | 970         | 203/76<br>1 230*                                 | 11.9                                    | 20.6   | 19.1/17.3/5.5  |
| 20180818 | 08(徐州)     | 38/21                        | -0.7/-0.6               | 449  | 966         | 260/10<br>1 530*                                 | 11.3                                    | 23.9   | 18.0/16.3/5.5  |
| 20180818 | 20(徐州)     | 38/23                        | -0.5/2.0                | 316  | 950         | 0/0  | 14.2                                    | 9.1    | 14.0/15.3/5.5  |
| 20180819 | 08(徐州)     | 39/22                        | -0.7/-4.2               | 166  | 981         | 1 387/3<br>1 180*                                | 10.6                                    | 16.8   | 18.0/15.3/5.5  |
| 20180819 | 20(徐州)     | 36/20                        | 1.3/-0.8                | 83   | 980         | 262/2  | 5.6                                     | 4.6    | 16.9/15.3/5.9  |
| 20180819 | 20(青岛)     | 36/21                        | 1.6/-2.1                | 272  | 952         | 472/7  | 7.4                                     | 17.4   | 16.9/13.4/4.6  |
| 20050730 | 08(徐州)     | 41/25                        | -2.3/1.7                | 180  | 943         | 0/0<br>1 610*                                    | 4.8                                     | 18.0   | 8.9/14.3/4.6   |
| 20160623 | 08(射阳)     | 19/25                        | 4.8/-1.2                | 74   | 976         | 537/215<br>2 440*                                | 2.7                                     | 16.5   | 16.9/9.0/0.7   |

注: 上标“\*”号数值为订正后的 CAPE 值。

## 2 龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征

利用 ROSE-RPG 系统, 重新回放两次台风过程滨州、潍坊、临沂和徐州多普勒天气雷达基数据资料, 获取反射率因子、平均径向速度、风暴结构参数等产品数据。风暴参数分析风暴演变特征, 包括最大反射率因子 (DBZM)、基于单体的液态含水量 (C-VIL)、风暴顶高度 (TOP) 和强中心高度 (HT)。平均径向速度分析气旋性小尺度涡旋特征, 用方位上相邻距离库间的径向速度差的绝对值最大值 ( $\Delta V$ ) 来表示,  $\Delta V$  越大, 气旋性小尺度涡旋越强。

### 2.1 龙卷风暴结构特征

对 13 个龙卷对应的风暴 (简称“龙卷风暴”) 参数进行了统计 (图 2),  $T$  为龙卷首先出现的体扫时间, 龙卷产生前 1 个体扫时间为  $T-1$ , 前 2 个体扫时间为  $T-2$ , 产生后一个体扫时间为  $T+1$ , 产生后 2 个体扫时间为  $T+2$ , 以此类推。8 月 18 日徐州铜山区张集矿龙卷风暴和 14 日临沂河东区贾官庄龙卷风暴由于距离雷达较近, 风暴数据不完整, 未作统计。

由图 2 可以看出, 龙卷产生前 30 min (5 个体扫) DBZM 平均值变化不大, 在 54.5~55.3 dBz 之间, 龙卷出现后 18 min (3 个体扫) 内 DBZM 平均值减小, 在 53.6~54.1 dBz 之间, 龙卷出现后风暴最大

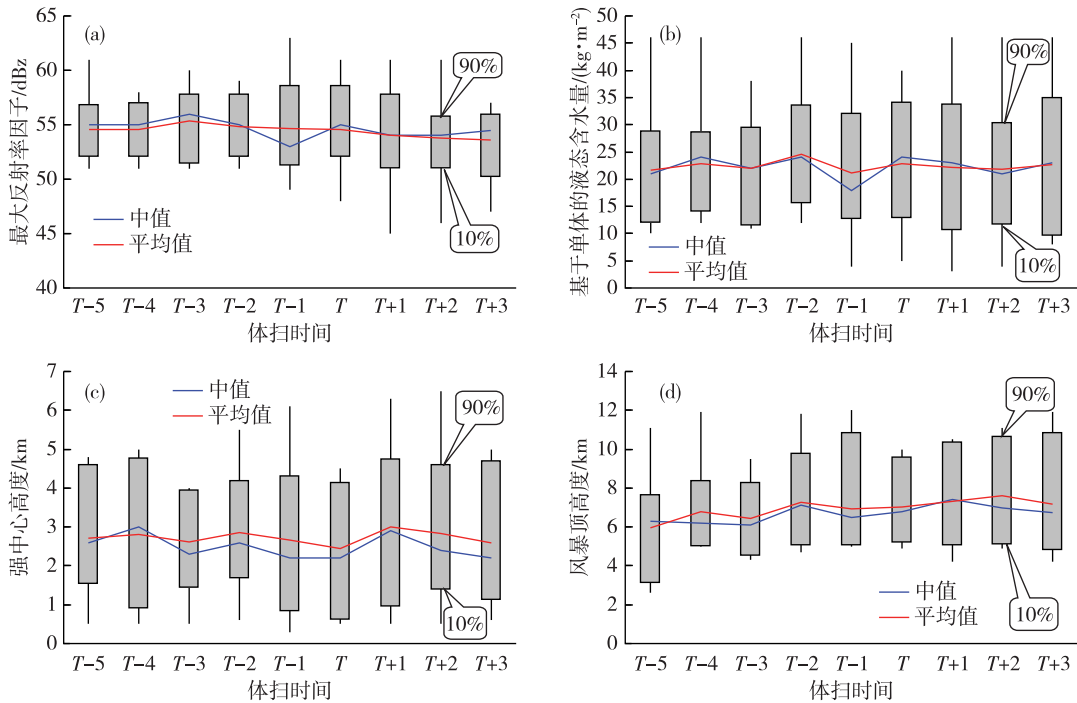


图2 龙卷风暴箱线图(a.最大反射率因子 DBZ,单位:dBz;b.基于单体的液态含水量 C-VIL,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;c.强中心高度 HT,单位:km;d.风暴顶高度 TOP,单位:km;下分位数为10%,上分位数为90%)

Fig.2 Box plot of tornado storms (a. DBZ, units: dBz; b. C-VIL, units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; c. HT, units: km; d. TOP, units: km; the lower quartile is 10%, the upper quartile is 90%)

反射率因子有下降趋势;龙卷产生前30 min内DBZM的最小值为49 dBz,最大值为63 dBz,多数(80%)在51~58 dBz之间。龙卷产生前后C-VIL没有明显变化, $T-5 \sim T-1$ 体扫时间平均值在 $21.1 \sim 24.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , $T+1 \sim T+3$ 体扫时间平均值在 $21.9 \sim 22.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。 $T-2$ 至 $T-1$ 时间DBZM和C-VIL中值都出现明显下降趋势,8个风暴C-VIL出现下降,其中6个下降幅度超过 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,下降幅度最大的达 $13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;5个风暴DBZM出现下降,4个上升,其中3个下降幅度超过2 dBz,下降幅度最大的达5 dBz。HT平均值和中值变化不明显,HT平均值在2.6 km上下,平均值在2.8 km上下,强中心高度较低。TOP平均值和中值呈缓慢上升趋势,风暴顶的高度逐渐升高,说明龙卷前后风暴内部一直维持强的上升气流。

## 2.2 龙卷小尺度涡旋演变特征

### 2.2.1 个例分析

用2个实例分析来说明诱发龙卷的小尺度涡旋在平均径向速度上的表现特征及 $\Delta V$ 计算方法。图3是产生“摩羯”4号龙卷和“温比亚”3号龙卷的风暴低层雷达反射率因子(R19)与平均径向速度(V26)及速度剖面(VCS)。可以看出,14日09:46

体扫(龙卷出现时间)潍坊雷达 $0.5^\circ$ (图3a)和 $1.5^\circ$ (图3c)仰角V26产品上方位相邻距离库之间都存在明显的切变,即小尺度气旋性涡旋(距雷达站距离约62 km), $0.5^\circ$ 仰角最大径向速度为 $19.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应的最小负速度为 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,速度差绝对值为 $24.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $1.5^\circ$ 仰角速度差绝对值为 $20.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $2.4^\circ$ 仰角速度差小于 $10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。此时小尺度气旋性涡旋的 $\Delta V$ 为 $24.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其所在高度是1.1 km;前一体扫和后一体扫 $\Delta V$ 分别是 $12.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $16.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),诱发龙卷的较强的小尺度气旋性涡旋仅在1个体扫内出现;小尺度涡旋中心对应的反射率因子上(图3b,蓝色箭头所示)强度为42 dBz,位于风暴质心的后侧,此时对流单体P0的DBZM、C-VIL、HT和TOP分别是58 dBz、 $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、2.9 km和7.5 km;VCS(图3d)是沿图3a白色虚线所示方向,蓝色箭头与图3a小尺度涡旋中心相对应,低层小尺度气旋性涡旋随高度有明显向北倾斜特征。

19日19:35体扫(龙卷出现时间)临沂雷达V26产品上方位相邻距离库之间有明显的切变(距雷达站距离约14 km), $1.5^\circ$ 仰角(图3g)速度差绝对值为 $32.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $3.4^\circ$ 仰角(图3e)速度差绝对

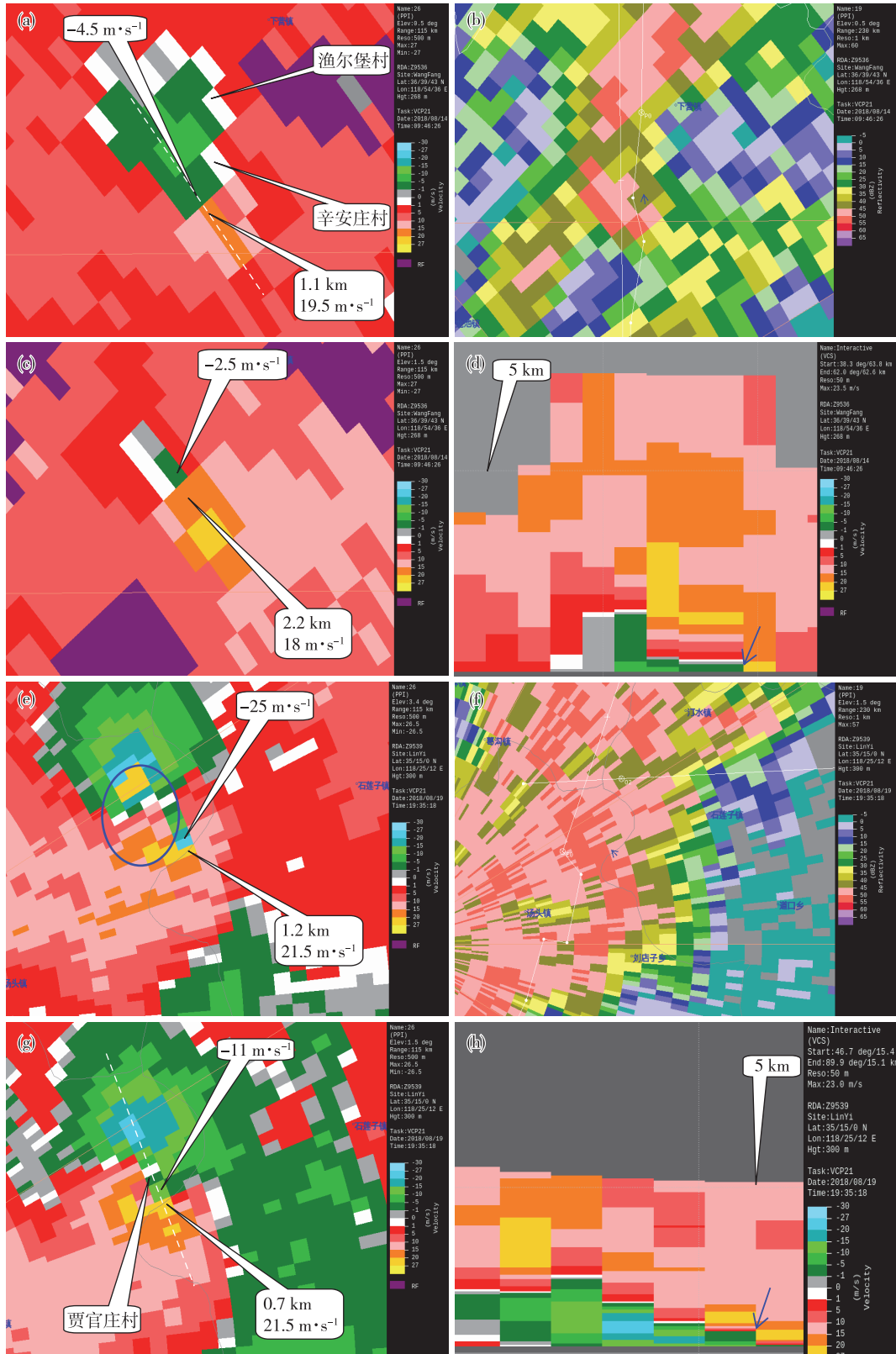


图3 2018年8月14日09:46潍坊雷达(a.0°仰角V26,b.0°仰角R19,c.1.5°仰角V26,d.VCS)和2018年8月19日19:35临沂雷达(e.3.4°仰角V26,f.1.5°仰角R19,g.1.5°仰角V26,h.VCS)产品

Fig.3 Product of Weifang radar at 09:46 on 14 (a. 0.5° elevation, V26; b. 0.5° elevation, R19; c. 1.5° elevation, V26; d. VCS) and Linyi radar at 19:35 on 19 (e. 3.4° elevation, V26; f. 1.5° elevation, R19; g. 1.5° elevation, V26; h. VCS) August 2018

值为  $46.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $0.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$  和  $6^\circ$  仰角速度差绝对值分别为  $19.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $19.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (图略), 此时小尺度气旋性涡旋的  $\Delta V$  为  $46.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其所在高度是  $1.2 \text{ km}$ ; 前一体扫和后一体扫  $\Delta V$  分别是  $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $26.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (图略), 诱发龙卷的较强的小尺度气旋性涡旋持续时间相对较长; 19:35 小尺度涡旋中心低层对应的反射率因子上 (图 3f 蓝色箭头所示) 强度为  $49 \text{ dBz}$ , 位于风暴质心的右侧; VCS (图 3h) 是沿图 3g 白色虚线所示方向, 蓝色箭头与图 3g 小尺度涡旋中心相对应, 低层小尺度气旋性涡旋随高度有明显向北倾斜特征。

“摩羯”4号龙卷出现在对流单体质心的后侧, “温比亚”3号龙卷出现在对流单体质心的右侧, 同时伴有较强的直径约  $2.5 \text{ km}$  的气旋性涡旋 (图 3e 蓝色圆圈所示), 由于其高度较低 (约  $2.0 \text{ km}$ ), 中气旋算法并没有识别出中气旋。诱发龙卷的小尺度气旋性涡旋强度差别较为明显, 两者差值达  $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 导致“温比亚”3号龙卷的强度也强于“摩羯”4号龙卷强度。

### 2.2.2 龙卷小尺度涡旋演变特征

对 14 个龙卷产生前 2 个体扫和出现后 1 个体扫的低层  $\Delta V$  及所在高度 ( $H$ ) 进行了统计 (图 4)。图 4 下分位数均为 10%, 上分位数均为 90%。8 月

14 日莱州朱桥镇龙卷距离潍坊雷达和烟台雷达较远, 最低仰角探测高度超过  $2.2 \text{ km}$ , 探测不到底层径向速度特征, 未作统计。

可以看出, 龙卷首次出现的体扫时间都出现较大的  $\Delta V$  (图 4a), 平均值是  $31.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 中值是  $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 两者基本相当; 最小值是  $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为 8 月 14 日东营市垦利孤东油田龙卷, 最大值是  $46.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为 8 月 19 日临沂河东区贾官庄龙卷;  $T+1$  时间, 中值为  $32.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与  $T$  时间相比略有增大, 平均值是  $30.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与  $T$  时间相比略有减小, 这种状况利于部分龙卷的维持或增强; 最小值为  $15.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 明显小于  $T$  时间的最小值, 说明个别小尺度气旋性涡旋强度迅速减小, 龙卷维持时间较短。与  $T$  时间相比,  $T-2$ 、 $T-1$  时间平均值与中值均明显下降, 最小值仅有  $11.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右, 说明有些龙卷的  $\Delta V$  在龙卷产生前并不大,  $\Delta V$  可在短时间内迅速增大, 从而诱发龙卷。径向速度差的绝对值最大值  $\Delta V$  所在高度  $H$  多数在  $2.0 \text{ km}$  高度以下 (图 4b), 中值为  $1.0 \text{ km}$ , 平均值为  $1.2 \text{ km}$  左右, 说明诱发龙卷的小尺度涡旋主要位于风暴低层, 环境场上  $0 \sim 2 \text{ km}$  高度具有强垂直风切变, 利于在低层产生容易诱发龙卷的气旋性小尺度涡旋。 $T$  时间最大高度  $3.7 \text{ km}$ , 为“摩羯”11号龙卷, 其他龙卷最大  $\Delta V$  所在高度均在  $2.2 \text{ km}$  以下。

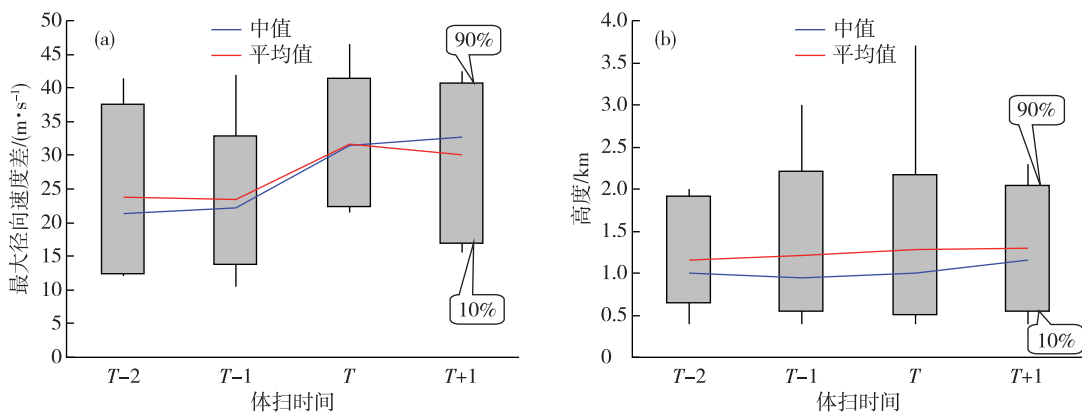


图4 龙卷风暴底层最大径向速度差  $\Delta V$  (a; 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和所在高度  $H$  (b; 单位:  $\text{km}$ ) 箱线图

Fig.4 Box plot of maximum radial velocity difference  $\Delta V$  (a; units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and its height  $H$  (b; units:  $\text{km}$ ) from the bottom of tornado storms

## 3 龙卷的可预警性分析

### 3.1 未诱发龙卷的气旋性小尺度涡旋特征

由以上分析可知, 14 个龙卷发生时气旋性小尺度涡旋  $\Delta V$  的最小值为  $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 也就是说, 龙卷都具有  $\Delta V \geq 21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气旋性小尺度涡旋,

但是不是所有  $\Delta V \geq 21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气旋性小尺度涡旋都会伴有龙卷呢?

为了方便, 以  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为阈值, 重新普查济南、滨州、潍坊、临沂和徐州雷达  $100 \text{ km}$  之内陆地区域的径向速度, 发现有 29 个  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气旋性小尺度涡旋未出现龙卷, 对应的风暴简称

为非龙卷风暴,“摩羯”环流中有19个,“温比亚”环流中有10个,其特征见图5, $T$ 为首次出现 $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 体扫时间,前1个体扫为 $T-1$ ,后一个体扫为 $T+1$ ,下分位数均为10%,上分位数均为90%。

可以看出, $T$ 时间 $\Delta V$ 最大 $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,多数(80%)集中在 $21.0 \sim 27.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,平均值是 $23.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中值是 $23.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5a)。 $T-1$ 时间多数集中在 $10.0 \sim 18.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,平均值和中值都是 $14.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $T+1$ 时间多数集中在 $17.0 \sim 29.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,平均值和中值均为 $22.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

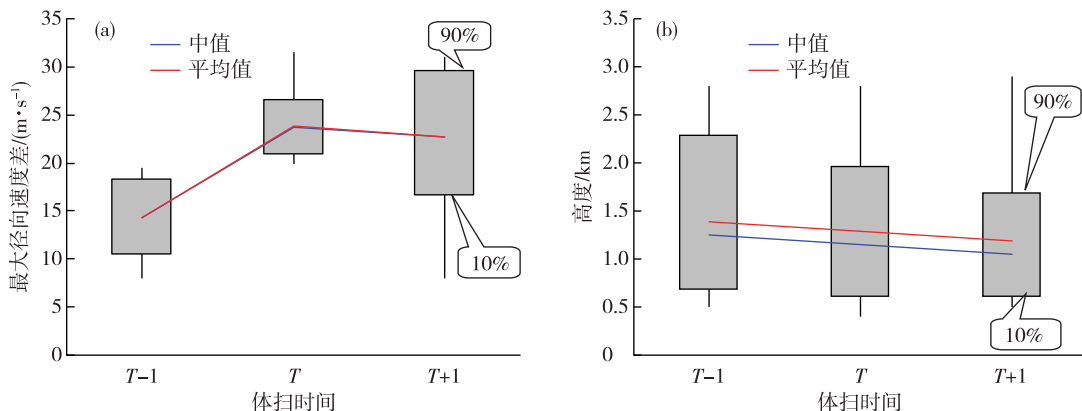


图5 未诱发龙卷的小尺度环流最大径向速度差 $\Delta V$ (a;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和所在高度 $H$ (b;单位:km)箱线图(下分位数为10%,上分位数为90%)。

Fig.5 Box plot of maximum radial velocity difference  $\Delta V$  (a; units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and its height  $H$  (b; units: km) for microscale circulation that does not induce tornadoes (the lower quartile is 10%, the upper quartile is 90%)

### 3.2 龙卷风暴与非龙卷风暴特征对比

图6是龙卷风暴和非龙卷风暴参数的对比情况,龙卷风暴参数和 $\Delta V$ 对应龙卷首次出现的体扫时间(图3和图4中的 $T$ 时间),非龙卷风暴 $\Delta V$ 是气旋性小尺度涡旋持续阶段的最大值,及其对应的风暴参数。可以看出,龙卷风暴DBZM、C-VIL、TOP和 $\Delta V$ 的平均值和中值均大于非龙卷风暴,非龙卷风暴HT平均值和中值均大于龙卷风暴,但差别不明显。龙卷风暴DBZM平均值和中值分别是 $54.5 \text{ dBz}$ 和 $55.0 \text{ dBz}$ ,非龙卷风暴DBZM平均值和中值分别是 $53.4 \text{ dBz}$ 和 $54.0 \text{ dBz}$ ;龙卷风暴C-VIL平均值和中值分别是 $22.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $24.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,非龙卷风暴C-VIL平均值和中值分别是 $19.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $19.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;龙卷风暴HT平均值和中值分别是 $2.4 \text{ km}$ 和 $2.2 \text{ km}$ ,非龙卷风暴HT平均值和中值分别是 $2.6 \text{ km}$ 和 $2.5 \text{ km}$ ;龙卷风暴TOP平均值和中值分别是 $7.0 \text{ km}$ 和 $6.8 \text{ km}$ ,非龙卷风暴TOP平均值和中值分别是 $6.45 \text{ km}$ 和 $6.40 \text{ km}$ ;龙卷风暴 $\Delta V$ 平均值和中值分别是 $31.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和

$\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小尺度涡旋有19个,占比为67.8%。 $T-1$ 时间 $\Delta V$ 较小, $T$ 时间 $\Delta V$ 迅速增大, $T+1$ 时间有2/3风暴 $\Delta V$ 仍维持在 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。这种未诱发龙卷的小尺度气旋性涡旋具有迅速发展增强的特征,与诱发龙卷的小尺度涡旋具有相似性。非龙卷风暴 $\Delta V$ 所在高度 $H$ 多数在 $2.0 \text{ km}$ 高度以下,中值为 $1.2 \text{ km}$ ,平均值为 $1.3 \text{ km}$ 左右(图5b),说明未诱发龙卷的小尺度涡旋仍位于风暴低层,与诱发龙卷的小尺度涡旋 $\Delta V$ 所对应高度大致相当。

$31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,非龙卷风暴 $\Delta V$ 平均值和中值分别是 $26.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $25.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,龙卷风暴 $\Delta V$ 平均值和中值与非龙卷风暴 $\Delta V$ 最大值大致相当。

### 3.3 龙卷识别与预警

依据上述分析,识别风暴低层气旋性小尺度涡旋是单偏振多普勒天气雷达识别龙卷的唯一有效途径。将台风减弱低压环流中的气旋性小尺度涡旋的强度分为3个等级,满足 $10.0 < \Delta V \leq 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低层气旋性小尺度涡旋定义为弱气旋性涡旋,满足 $20.0 < \Delta V \leq 32.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低层气旋性小尺度涡旋定义为显著气旋性涡旋,满足 $\Delta V > 32.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低层气旋性小尺度涡旋定义为强气旋性涡旋。

弱气旋性涡旋不会诱发龙卷,在对流风暴中较为常见。强气旋性涡旋都诱发了龙卷,14个龙卷中 $T$ 时间有6个 $\Delta V$ 超过 $32.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,非龙卷风暴中最大 $\Delta V$ 没有超过 $32.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的个例。

显著气旋性涡旋对应的风暴较多,龙卷风暴有8个,非龙卷风暴有29个,龙卷出现的概率仅



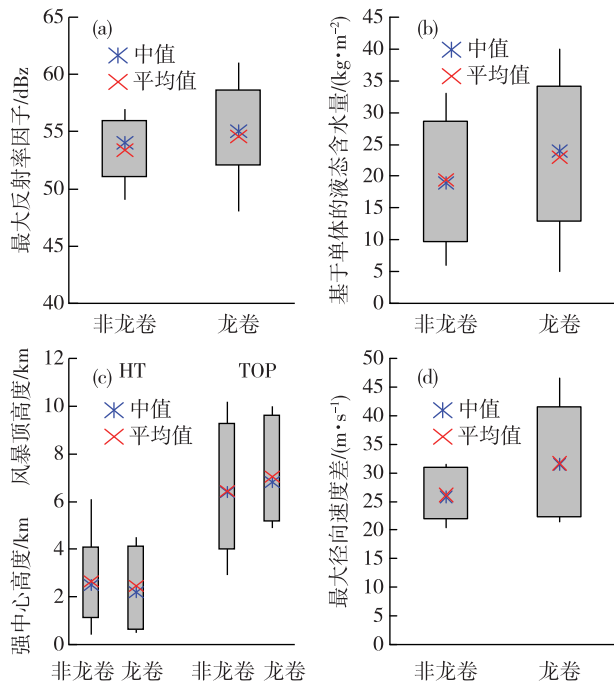


图6 龙卷风暴与非龙卷风暴对比箱线图(a. 最大反射率因子 DBZ, 单位: dBz; b. 基于单体的液态含水量 C-VIL, 单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; c. 强中心高度 HT 和风暴顶高度 TOP, 单位: km; d. 最大径向速度差  $\Delta V$ , 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 下分位数为 10%, 上分位数为 90%)

Fig.6 Box plot of comparison between tornado storms and non-tornado storms (a. DBZM, units: dBz; b. C-VIL, units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; c. HT and TOP, units: km; d.  $\Delta V$ , units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the lower quartile is 10%, the upper quartile is 90%)

有 21.6%。

以显著气旋性涡旋最低值  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为阈值, 44 个风暴中伴有龙卷的为 15 个, 满足阈值的有 14 个, 命中率为 93.3%, 龙卷识别准确率为 31.8%, 空报率 67.4%, 漏报率 6.7%。受雷达架设高度及探测距离因素影响, 远处(基本 100 km 之外)的风暴很难识别出低层小尺度涡旋, 这种情况下就会出现漏报现象。

对于龙卷的预警还有时间提前量问题。降水天气情况下, 雷达常用扫描模式为 VCP21 模式(体扫时间 6 min), 龙卷小尺度涡旋出现在低层, 基本在低层 2 个仰角扫描结束后可进行识别, 大致 2 min 完成最低 2 个仰角扫描, 这样可增加近 4 min 识别时间提前量(相对于体扫结束后再进行识别)。以  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为阈值, 14 个龙卷有 5 个在  $T-1$  时间不满足阈值, 因此, 35.7% 龙卷没有识别时间提前量。在  $T-2$  时间满足阈值的有 7 个, 约 50% 龙卷识别时间提前量在 10 min 左右或以上, 2 个龙卷(约

14.3%) 识别时间提前量在 0~10 min 之间。在  $T-3$  时间不满足阈值的有 10 个, 满足阈值的仅有 4 个, 约 28.6% 龙卷识别时间提前量在 16 min 左右或以上, 3 个龙卷(约 21.4%) 识别时间提前量在 10~16 min 之间。如果进行人工识别预警的话, 预警时间提前量会更短, 需要增加相应的识别与预警准备时间和通讯传输到用户的时间, 按 5 min 计算的话, 7 个龙卷(50%) 没有预警时间提前量, 4 个龙卷预警时间提前量  $\geq 11 \text{ min}$ , 3 个龙卷时间提前量在 0~11 min 之间。

#### 4 结论

1) 两次台风减弱低压极易诱发龙卷的关键区是东北象限, 关键物理量是高湿且湿层厚、强的低层垂直风切变和大的相对风暴螺旋度。15 个龙卷均出现在台风减弱低压中心的东北象限, 距低压中心的距离范围和方位范围基本在 100~360 km 和  $35^\circ \sim 75^\circ$  之间。两次台风过程中 K 指数较大, 较低的  $\Delta T$ , 低层比湿大 ( $> 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 而且湿层较厚, 较大的 SRH ( $> 270 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ), 较低的 LCL, 较强的低层垂直风切变 ( $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 中等强度的 CAPE。

2) 14 个龙卷风暴在龙卷风出现的首个体扫时间都具有较大的  $\Delta V$ , 平均值是  $31.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 中值是  $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小  $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大  $46.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $\Delta V$  所在高度多数在 2.0 km 高度以下, 中值为 1.0 km, 平均值为 1.2 km 左右, 诱发龙卷的小尺度气旋性涡旋主要位于风暴低层。

3) 29 个非龙卷风暴在  $\Delta V$  首次达到  $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上时,  $\Delta V$  平均值是  $23.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 中值是  $23.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大  $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $\Delta V$  所在高度多数在 2.0 km 高度以下, 中值为 1.2 km, 平均值为 1.3 km 左右。非龙卷风暴  $\Delta V$  平均值和中值明显小于龙卷风暴的  $\Delta V$  平均值和中值, 但所在高度基本相当。0~2 km 高度具有强垂直风切变, 利于在低层产生气旋性小尺度涡旋。

4) 非龙卷风暴  $\Delta V$  最大值所对应的风暴参数 DBZM、C-VIL、TOP 平均值和中值均小于龙卷首次出现体扫时间所对应的龙卷风暴的 DBZM、C-VIL、TOP 平均值和中值, 而 HT 相反, 但差别都不明显。单纯的从风暴参数上无法区别龙卷风暴和非龙卷风暴。

5) 两次台风减弱低压外围环流中, 弱气旋性涡旋不会诱发龙卷, 强气旋性涡旋都诱发龙卷。显著气旋性涡旋对应的 37 个风暴有 8 个出现龙卷, 诱发

龙卷的概率仅有 21.6%。

6) 以  $\Delta V > 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为阈值, 43 个满足阈值的风暴中龙卷风暴为 14 个, 龙卷命中率为 93.3%, 龙卷识别准确率为 31.8%, 空报率 67.4%, 漏报率 6.7%。14 个龙卷风暴中有 5 个龙卷(约占 35.7%) 没有识别时间提前量, 7 个(50%) 识别时间提前量在 10 min 左右或以上, 4 个(约占 28.6%) 识别时间提前量在 16 min 左右或以上。如果进行预警的话, 时间提前量会更短, 50% 左右龙卷没有预警时间提前量。

### 参考文献:

- [1] BATES F C. A theory and model of the tornado [C]// International Conference on Cloud Physics, August 26-30, 1968, Toronto, Canada. Boston: AMS, 1968: 559-563.
- [2] FUJITA T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity [R]// Satellite and Mesometeorology Research Paper 91. Chicago: University of Chicago, 1971: 42.
- [3] BROWN R A, LEMON L R, BURGESS D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar [J]. Mon Wea Rev, 1978, 106(1): 29-38.
- [4] DOSWELL C A III, BURGESS D W. Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models [M]// CHURCH C, BURGESS D, DOSWELL C, et al. The tornado: Its structure, dynamics, prediction, and hazards, Geophysical Monograph Series Volume 79. Washington, D C: American Geophysical Union, 1993: 161-172.
- [5] CRAVEN J P, BROOKS H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection [J]. Natl Wea Dig, 2004, 28: 13-23.
- [6] WAKIMOTO R M, WILSON J W. Non-supercell tornadoes [J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(6): 1113-1140.
- [7] LEEB D, WILHELMSON R B. The Numerical simulation of non-supercell tornadogenesis part I: Initiation and evolution of pretornadic misocyclone circulations along a dry out flow boundary [J]. J Atmos Sci, 1997, 54(1): 32-60.
- [8] MITCHELL E D, VASILOFF S V, STUMPF G J, et al. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm [J]. Wea Forecasting, 1998, 13(2): 352-366.
- [9] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征 [J]. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [10] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降雨超级单体风暴研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [11] 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.
- [12] 周后福, 刁秀广, 夏文梅, 等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析 [J]. 气象学报, 2014, 72(2): 306-317.
- [13] 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警 [J]. 气象, 2014, 40(6): 668-677.
- [14] 赵海军, 刁秀广, 王庆华, 等. 非超级单体龙卷风暴低层流场特征及模拟分析 [J]. 山东气象, 2016, 36(2): 1-8.
- [15] 林应, 王啸华, 顾沛澍, 等. 2016 年夏季如东一次 EF2 级龙卷多普勒天气雷达特征分析 [J]. 气象科学, 2018, 38(3): 392-398.
- [16] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析 [J]. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [17] 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 [J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [18] 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 [J]. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [19] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析 [J]. 广东气象, 2014, 36(3): 20-24.
- [20] 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等. 2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析 [J]. 气象学报, 2017, 75(2): 288-313.
- [21] 李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等. 1522 号台风彩虹外围佛山强龙卷特征分析 [J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 416-424.
- [22] 李彩玲, 蔡康龙, 黄先香, 等. 1822 号台风外围佛山龙卷特征与预警发布 [J]. 广东气象, 2018, 40(6): 41-44.
- [23] 陈联寿, 孟智勇, 从春华. 台风暴雨落区研究综述 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 1-7.
- [24] 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 [J]. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [25] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比 [J]. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.