

黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 114–121. [HUANG Xianxiang, YAN Lijun, CAI Kanglong, et al. Analysis of the tornado weather process of No. 1415 kalmaegi typhoon[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 114–121. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.020.]

## 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析<sup>\*</sup>

黄先香<sup>1,2</sup>, 炎利军<sup>1</sup>, 蔡康龙<sup>2</sup>, 麦雪湖<sup>1</sup>, 余乐福<sup>2</sup>

(1. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000; 2. 佛山市龙卷风研究中心, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 2014年9月16日夜, 第15号台风“海鸥”外围螺旋雨带中产生龙卷, 袭击了广东省佛山市三水区白坭镇。通过现场灾情勘察、群众走访、新一代雷达观测等资料的综合分析, 确定这次龙卷强度为EF1级。分析其发生发展的环境背景、雷达回波特征, 并与相似台风路径下无龙卷产生的1409号超强台风“威马逊”环境条件对比, 结果表明: 龙卷发生在登陆台风“海鸥”移动方向的右后侧, 对应上空200 hPa为辐散区, 500 hPa为副热带高压和“海鸥”之间的强东南气流汇合处, 从925 hPa到500 hPa强东南急流轴走向一致、上下叠加在珠江口附近, 地面存在触发对流的东路弱冷空气和中尺度辐合线。环境条件呈弱的条件不稳定, 对流有效位能(CAPE)小、抬升凝结高度(LCL)低、垂直风切变和风暴相对螺旋度(SRH)大; 产生龙卷的对流风暴属于低质心的微型超级单体风暴, 速度图上低层存在强中气旋, 中气旋中心伴有TVS, 中气旋和TVS尺度比较小、垂直伸展高度比较低, 强中气旋、TVS分别早于龙卷14 min、8 min出现。龙卷出现在微型超级单体风暴右后侧钩状回波顶端、TVS附近。分析还表明, 相似台风路径下, 台风“海鸥”(有龙卷出现)和超强台风“威马逊”(无龙卷出现)的环境条件明显差异主要体现在0~1 km的低层垂直风切变和SRH上, 后者的0~1 km垂直风切变和SRH均明显偏小, 不利于微型超级单体风暴的出现。

**关键词:** 台风龙卷; 天气过程; 环境条件; 多普勒天气雷达; 中气旋; “海鸥”台风

**中图分类号:** X43; P458.3; P445.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)04-0114-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.020

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气, 直径一般在几十米到几百米, 强龙卷的地面最大风速可超过140 m/s, 多与雷暴大风、冰雹和短时强降水等强对流相伴<sup>[1-2]</sup>。龙卷因其突发性强、风速大、移动速度快等特点, 往往能在短时间内造成重大的人员伤亡、建筑物倒塌、电力和交通中断等极端气象灾害, 一直以来是气象灾害防御领域关注的重点; 而龙卷又因其空间尺度小、生命史短、发生概率低等特点, 长期以来是气象监测预警和数值模拟的难点, 不少学者对龙卷进行了个例分析<sup>[3-7]</sup>、数值模拟<sup>[8]</sup>、气候统计<sup>[9-11]</sup>和灾害评估<sup>[12-14]</sup>。龙卷的发生主要与两种类型的环流背景有关, 一种是与西风系统相伴随的对流风暴产生的, 另一种是与台风或飓风(以下简称TC)有关。相比较而言, TC龙卷往往持续时间久、路径长、破坏力更大。国内外的研究<sup>[5,15-17]</sup>表明, 距离TC中心180~460 km且位于右前侧的区域是龙卷易发区。Schultz等<sup>[18]</sup>统计

1950–2007年美国TC龙卷表明, 相对于TC运动方向, 90%以上的龙卷发生在方位角340°~120°之间, 距离TC中心200 km以上的外围龙卷具有下午多发的日变化特征, 而距离TC中心200 km之内的内部龙卷多发在TC登陆后12 h内但日变化不明显。McCaul<sup>[19-20]</sup>研究指出1948–1986年约59%的美国登陆TC产生龙卷。李彩玲等<sup>[21]</sup>和黄先香等<sup>[22]</sup>研究佛山TC龙卷产生的环境背景指出, 龙卷产生在TC减弱阶段, 强的低层垂直风切变与龙卷的产生密切相关, 珠江三角洲特殊的喇叭口地形等也起到了一定作用。目前, 对龙卷监测和预警最有效的工具是多普勒天气雷达。美国伊利诺伊州的雷达在1953年发现龙卷的钩状回波特征, Donaldson<sup>[23]</sup>于1970年探测到超级单体风暴中的中气旋, Brown等<sup>[24]</sup>于1978年观测到比中气旋尺度更小的龙卷涡旋特征(TVS), TVS在速度图上表现为像素到像素的强烈速度切变, 直径一般在1~2 km。近年来, 学者们<sup>[25-29]</sup>对龙卷的雷达回波特

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-24 修回日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175043; 41675023); 广东省气象局科技项目(2016B39); 佛山市气象局科技项目(201803)  
第一作者简介: 黄先香(1974-), 女, 广西桂林人, 硕士, 高级工程师, 主要从事强对流天气预警研究。E-mail: fsqxj@163.com



图1 “海鸥”台风外围龙卷移动路径及受灾现场图

征进行了深入研究。郑媛媛等<sup>[28]</sup>指出,与西风带超级单体龙卷的雷达回波特征相比,TC 龙卷中气旋的尺度更小,垂直伸展高度更低。李兆慧等<sup>[29]</sup>分析 1522 号台风彩虹外围龙卷的环境背景和雷达回波,指出龙卷出现在钩状回波前进方向的右后侧,龙卷涡旋的切变远大于中气旋的切变。

本文利用常规高空地面气象观测资料、广东区域加密自动站资料、广州多普勒雷达产品等对 2014 年 9 月 16 日台风“海鸥”外围的龙卷天气过程进行分析,探讨此次龙卷发生的环境背景、关键物理量参数以及雷达回波特征,以期对广东台风龙卷的监测和预警提供参考。

## 1 龙卷过程及台风“海鸥”活动概况

### 1.1 龙卷过程概况

2014 年 9 月 16 日 23:20(北京时,下同)前后,广东省佛山市三水区白坭镇下灶村附近出现龙卷。据现场受灾群众的描述,龙卷发生时,伴有短时间强烈的大风和巨大的声响,一些物件被卷上空中。经过佛山龙卷风研究中心和佛山市气象台技术人员的实地详细勘察、走访,并结合雷达等多种气象实况资料综合分析研判后,确认是龙卷灾害,受灾现场呈狭长带状分布,龙卷路径长约 2.5 km,宽约 200 m(图 1a)。图 1b 是对现场倒伏物倒伏方向的标示。这次龙卷过程造成部

分厂房、工棚、电线杆、广告牌等设备设施遭到破坏,铁皮被卷到几十米高的铁塔上,直径超过 20 cm 的榕树从下部被强风扭转折断,所幸整个龙卷过程没有造成人员伤亡(图 1)。由于龙卷发生点附近没有气象观测仪器,无法直接判断龙卷强度,国内也没有龙卷灾情的调查标准。为此,我们参照美国于 2007 年施行的“增强的藤田级别”(EF-Scale)龙卷定强标准<sup>[30]</sup>来判断此次龙卷的强度。在 EF-Scale 中,软木树干折断对应的风速为 39.3 ~ 57.2 m/s,其风速期望值为 46.5 m/s,由此推断出此次龙卷灾害强度为 EF1 级,属于弱龙卷。

### 1.2 台风“海鸥”活动概况

2014 年第 15 号台风“海鸥”于 9 月 12 日 14:00 在西北太平洋生成,13 日 05:00 加强为强热带风暴,13 日 17:00 加强为台风,16 日 9:40 在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为 13 级(40 m/s),16 日 12:45 在广东省徐闻市海安镇沿海地区再次登陆,中心附近最大风力维持在 13 级(40 m/s),16 日 23:00 在越南第三次登陆,中心附近最大风力为 12 级(图 2)。佛山市三水区白坭镇龙卷是在 23:20 前后出现的,此时距离台风首次登陆海南文昌已有 13.7 h,“海鸥”强度仍维持台风量级。龙卷发生在台风中心的东北象限,龙卷发生地与台风中心相距约为 609 km。按照历史观测记录,佛山台风外围龙卷距离台风中心在 360 ~ 550 km,此次

609 km 的距离打破了历史极值。这表明, 台风即使三次登陆, 距离佛山超过 600 km, 也不能放松对龙卷监测预警的警惕性。黄先香等<sup>[22]</sup>归纳佛山台风外围龙卷的发生背景时认为, 台风中心位于湛江到广西南部的玉林、贵港或北部湾一带, 强度处于减弱阶段, 但仍维持在热带风暴量级以上, 在有利的大气环流背景和独特的地理环境条件下, 易在台风外围的佛山产生龙卷。此次台风“海鸥”中心位置、强度变化特征以及与佛山的距离方位等都比较符合历史统计阈值, 再次说明这类低概率、高影响的台风外围龙卷事件是遵循一定的统计规律。

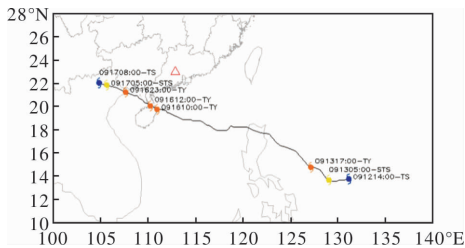


图2 台风“海鸥”路径图(红色三角形为龙卷大致发生地)

## 2 环境背景

### 2.1 天气形势

9月16日20:00, 500 hPa 西太平洋副热带高

压(以下简称副高)主体偏东, 脊线偏北, 位于27°N附近, 588 dagpm 线控制广东东部及其以东地区, 副高西南缘与“海鸥”外围东北侧之间的强劲东南偏南气流在广东中北部一带汇合。925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 东南风速分别为 16 m/s、22 m/s、26 m/s 和 22 m/s, 各层急流轴的位置非常接近, 强劲的东南急流上下叠加在珠江口区域附近(图 3a); 高层 200 hPa 珠江三角洲地区处于高压底部的风场辐散区; 地面东路有弱冷空气南下, 并且广东中部一带有一条辐合线存在(图 3b)。低层辐合、高层辐散以及中低空强劲东南急流在珠江口上下叠加是此次台风龙卷产生的有利大尺度环流背景。

### 2.2 环境条件

图 4 给出了 9 月 16 日 20:00 离龙卷发生地最近的清远站及上游的香港站的 T - lnP 图。可以看到, 对流有效位能 CAPE 呈现狭长形, 整个对流层相对湿度都很大, 基本处于或接近饱和状态, 呈现出弱的条件不稳定。表 1 给出了龙卷过程的环境参数。可以看出, 清远和香港的 CAPE 比较小, 在 175 ~ 1 265 J/kg 之间。抬升凝结高度 LCL 很低, 在 500 m 以下; 对流抑制 CIN 很小, 28 ~ 31 J/kg 之间, 由于低层相对湿度和露点都较大, LCL 和自由对流高度都很低, 导致 CIN 很弱, 容易触发深厚湿对流天气。

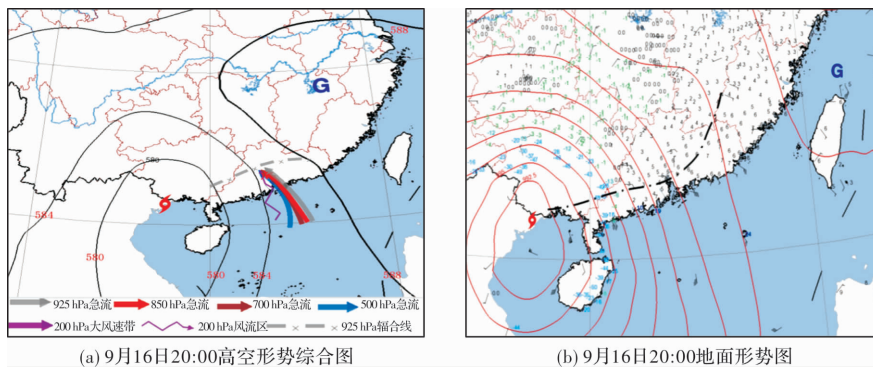


图3 2014年9月16日“海鸥”台风外围龙卷环流形势图

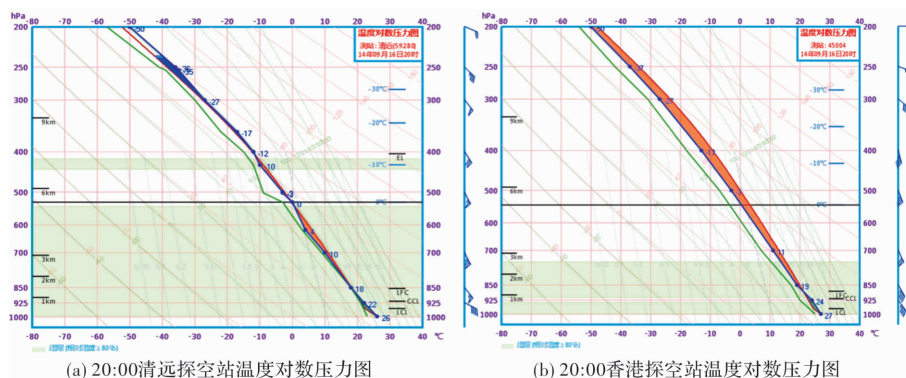


图4 2014年9月16日20:00 温度对数压力图

龙卷等强天气的产生与抬升凝结高度及垂直风切变特别是低层的垂直风切变密切相关。从表 1 还可以看到, 清远、香港站 0~6 km 垂直风矢量差分别为 20.2 m/s、23.0 m/s, 对应的垂直风切变值为  $3.5 \times 10^{-3}/\text{s}$ 、 $3.9 \times 10^{-3}/\text{s}$ , 属于中等到强的 0~6 km 深层垂直风切变; 0~1 km 的垂直风切变分别为  $13.9 \times 10^{-3}/\text{s}$ 、 $14.6 \times 10^{-3}/\text{s}$ , 属于强的低层垂直风切变。Thompson 等<sup>[31]</sup>分析超级单体龙卷对流参数的统计值认为, EF2 级以上龙卷 0~6 km 垂直风切变平均值为  $4 \times 10^{-3}/\text{s}$ , 下限为  $3 \times 10^{-3}/\text{s}$ ; 0~1 km 垂直风切变平均值为  $9.5 \times 10^{-3}/\text{s}$ , 下限为  $5.5 \times 10^{-3}/\text{s}$ ; 还提出, 判断龙卷更为有效的参数是 0~1 km 垂直风切变。由此可见, 0~6 km 深层垂直风切变达到了 Thompson 统计的下限, 0~1 km 垂直风切变远高出 Thompson 统计的平均值, 非常有利于龙卷的产生。

表 1 9 月 16 日 20:00 清远和香港探空站环境参数

环境参数	清远	香港
对流有效位能/(J/kg)	175	1265
对流抑制/(J/kg)	28	31
抬升凝结高度/m	430	250
0~1 km 风矢量差/(m/s)	13.9	14.6
0~6 km 风矢量差/(m/s)	20.2	23.0
0~1 km 风切变/( $10^{-3}/\text{s}$ )	13.9	14.6
0~6 km 风切变/( $10^{-3}/\text{s}$ )	3.5	3.9
风暴相对螺旋度/( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )	227	44

此外, 风暴相对螺旋度 SRH 是衡量风暴旋转潜能的重要指标, 也是判别超级单体和龙卷形成的重要辅助指标。Davies<sup>[32]</sup>将  $\text{SRH} = 150 \text{ m}^2/\text{s}^2$  界定为有利于产生超级单体风暴的最低值, 而当 SRH 大于  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$  时, 也可作为预报有龙卷、冰雹大风、强降水等天气的参考指标之一。16 日 20:00 离龙卷发生地最近的清远探空站的 SRH 达到  $227 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 有利于超级单体风暴的形成。所以, 环境条件有利于龙卷等强对流天气的产生。

### 2.3 抬升触发条件

在有利的大尺度环流背景下, 龙卷等强对流天气的触发往往与中小尺度天气系统有关。分析 2014 年 9 月 16 日 22:00–23:00 的广东地面自动站风场显示(图 5), 在三水区白坭镇龙卷发生前, 地面已经存在中尺度辐合线和小尺度涡旋。佛山北部主要为东北风, 中部为偏东风, 南部珠江口附近的珠海市、中山市一带为强劲的东南风, 三支气流在佛山汇聚, 形成一条“人字形”的风向风速辐合线; 而且在辐合线南部附近的南海西樵镇开始有小尺度涡旋生成, 之后小尺度涡旋沿着辐合线向西北移动, 靠近三水白坭镇。因此, 从时间对应关系看, 地面辐合线、地面小尺度涡旋的出现超前于龙卷天气, 这表明地面中尺度辐合线、小尺度涡旋是有利于龙卷风暴触发的重要中小尺

度天气系统。

## 3 雷达回波特征

广州多普勒雷达  $0.5^\circ$  仰角反射率因子产品显示, 2014 年 9 月 16 日下午到晚上, 1415 号台风“海鸥”外围不断有螺旋雨带自珠江口西侧的珠海斗门、江门台山新会一带北上影响佛山, 产生三水区白坭龙卷的对流风暴母体是来自第 5 条影响珠江口西侧的台风外围螺旋雨带。16 日 22:30, 产生三水区白坭镇龙卷的对流风暴还在江门市鹤山境内, 最强反射率因子为 58 dBZ, 随后对流风暴向西北方向移动, 强度短暂减弱(53 dBZ), 22:42–22:54 风暴影响佛山南海区九江、西樵镇, 23:00 风暴开始进入三水区白坭镇南部, 强度明显增强, 最强反射率因子达 63 dBZ, 此时该单体风暴已经呈现出低层钩状回波和与暖湿气流相连接的人流缺口回波等特征, 属于微型超级单体风暴(图略)。23:06–23:18, 风暴自南向北影响白坭镇, 钩状回波和人流缺口回波变得更为明显(图 6a1~图 6a3)。图 6b1~图 6b3 是和图 6a1~图 6a3 同时刻的  $0.5^\circ$  仰角平均径向速度对比图。23:06–23:18, 雷达在微型超级单体风暴钩状回波附近持续探测到强中气旋。23:06, 中气旋旋转速度为 24 m/s, 底高约 0.8 km, 最大入流速度和出流速度中心距离约为 2.6 km; 23:12, 中气旋直径缩小至 1.0 km 左右, 并且在中气旋中心首次探测到龙卷涡旋特征(TVS), TVS 切变为 48.0 m/s, 底高约 0.8 km; 23:18, 中气旋出流速度出现速度模糊, 退速度模糊后值为 34 m/s, 中气旋旋转速度为 19 m/s, 达到了中等到强的中气旋标准, 在中气旋中心仍然探测到像素到像素的小尺度强切变(类似于 TVS, 只是没有达到其判别阈值), 切变值为 38 m/s。23:20 前后, 在三水白坭镇下灶村附近出现龙卷, 龙卷出现在微型超级单体风暴右后侧的钩状回波顶端、中气旋中心及类 TVS 附近(图 6)。钩状回波和强中气旋持续了 4 个体扫, TVS 或类 TVS 持续了 2 个体扫, 强中气旋出现 14 min、TVS 出现 8 min 后龙卷出现。23:24 后钩状回波、中气旋及 TVS 消失, 回波强度明显减弱。

为了进一步揭示风暴的结构及其生消过程, 分别沿着图 6a1~图 6a3 中的线段 AB 在反射率因子勾状回波附近、中气旋中心附近做垂直剖面(图 7)。从反射率因子垂直剖面可见, 微型超级单体风暴发展高度不高, 垂直伸展高度基本在 8 km 以下, 50 dBZ 以上回波高度主要在 3 km 以下, 呈现出低质心的特点。从径向速度垂直剖面可以看到, 中气旋伸展厚度 2 km 以下, 平均直径 1.6 km。所以, 台风龙卷母风暴属于低质心微型超级单体, 其中气旋的尺度比较小, 垂直伸展高度比较低。



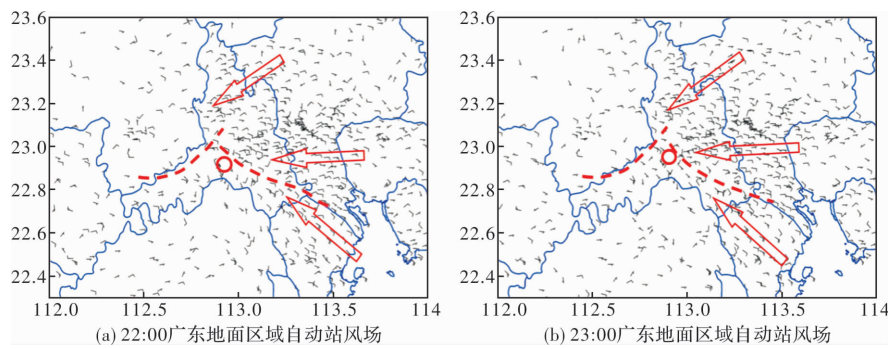


图5 2014年9月16日“海鸥”台风外围龙卷发生前广东地面区域自动站风场分布

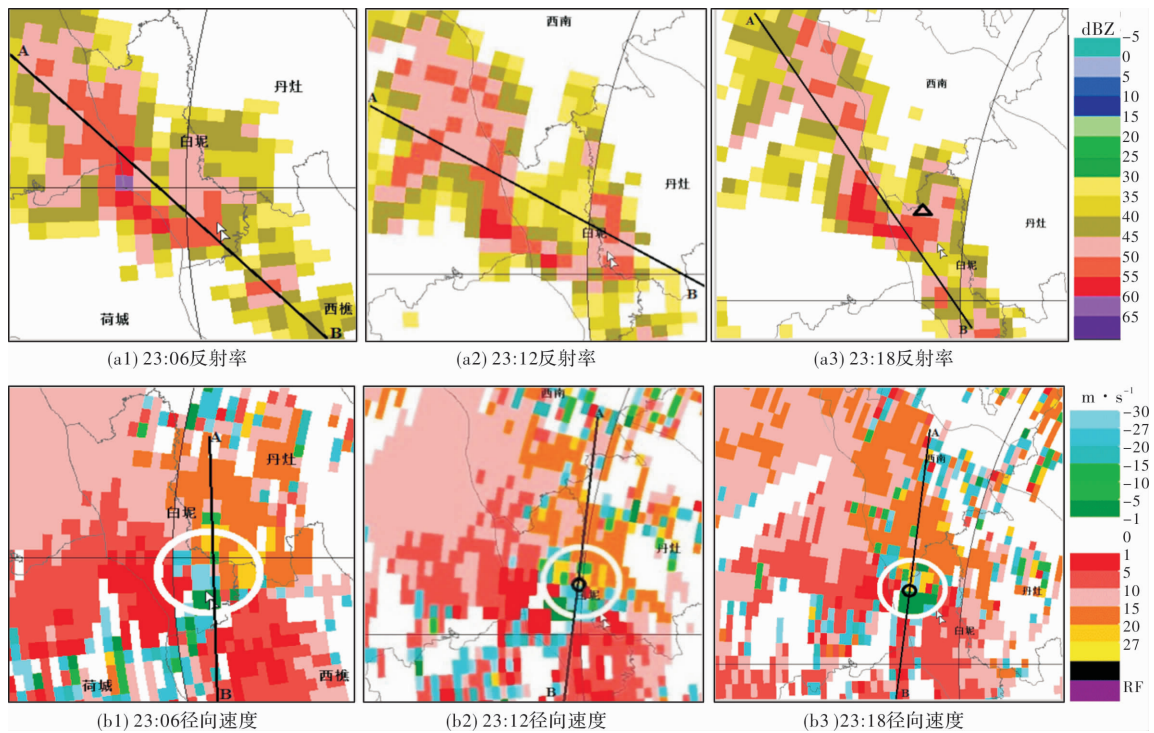


图6 2014年9月16日23:06-23:18广州雷达0.5°仰角雷达回波特征  
(黑色三角形为龙卷大致发生地,白色圆圈为中气旋,黑色圆圈为TVS或类TVS)

#### 4 相似路径台风有/无龙卷环境条件分析

查找历史相似路径台风,发现近年来与1415号“海鸥”路径最为相似的个例有1409号“威马逊”(图8)。1409号台风“威马逊”于2014年7月12日14:00在西北太平洋洋面上生成;7月18日15:30前后,在海南省文昌市翁田镇沿海首次登陆,登陆时中心附近最大风力有17级(60 m/s,超强台风);19:30前后,在广东省徐闻县龙塘镇沿海再次登陆(超强台风);之后“威马逊”穿过雷州半岛后,进入北部湾,并于19日7:10前后在广西防城港市光坡镇沿海第三次登陆,登陆时中心附近最大风力仍有15级(48 m/s)。

“海鸥”与“威马逊”都是2014年的台风,两者

路径非常相似,特别是后期的路径,基本上达到了高度重合的状态(图8蓝色虚线框),两个TC在中国大陆首次登陆的地点完全相同(都在海南省文昌市翁田镇沿海登陆),二次登陆的地点也非常接近(都在徐闻县南部沿海);强度上看,“威马逊”比“海鸥”强很多,“威马逊”是超强台风(17级),“海鸥”是台风(13级);登陆后的位置和移动路径来看,“威马逊”位置更偏北。

根据对历史上的佛山台风外围龙卷统计,“威马逊”这种台风路径及其登陆后所处的位置等条件似乎更有利于其外围雨带在佛山产生龙卷,但实况“威马逊”过程佛山并没有龙卷出现。其中的原因应该是多方面的,值得深入探究。下面主要从环境条件方面进行分析。表2给出了当TC中心位于最有利于佛山出现龙卷的位置(广东湛江到广西东南部或北部湾一带<sup>[22]</sup>)时,距离佛山最近的清远

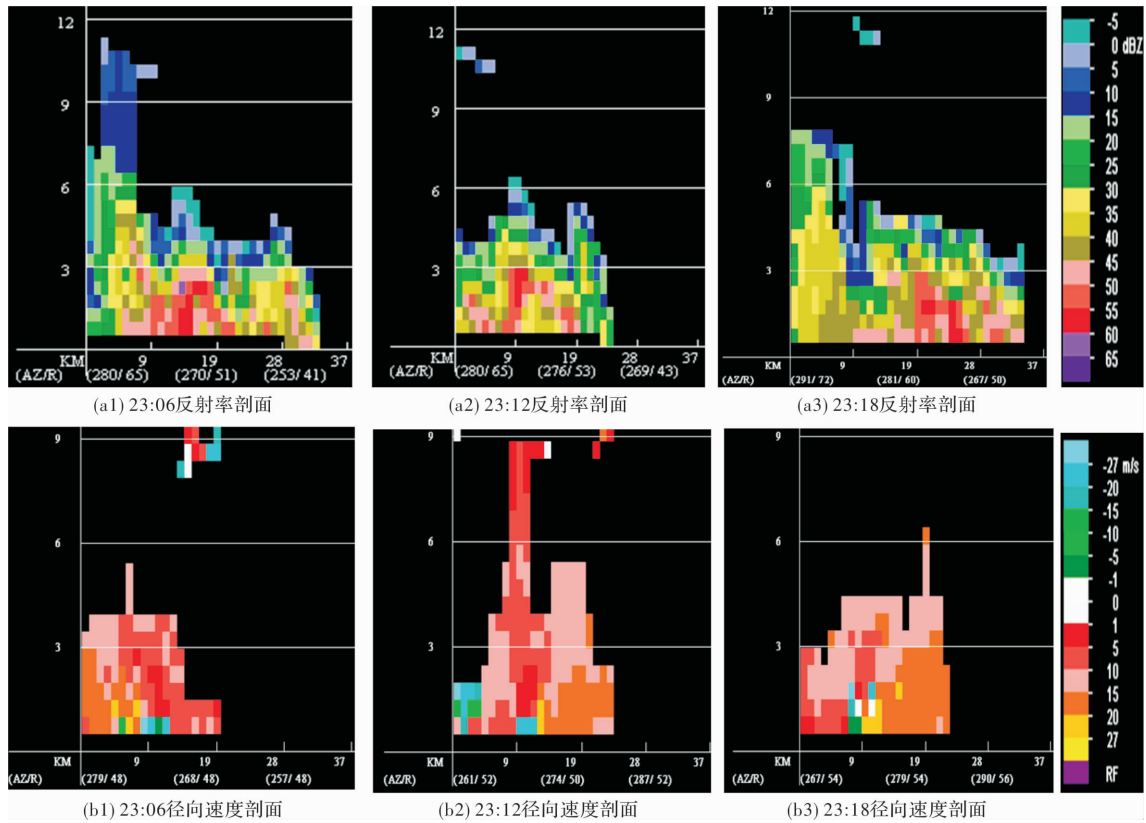


图7 2014年9月16日23:06–23:18广州雷达垂直剖面特征

表2 相似路径台风有/无龙卷发生时的关键环境参数对比

台风编号	时间	有/无龙卷	0~6km	0~1km	SRH/(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
			风切变/(10 <sup>-3</sup> /s)	风切变/(10 <sup>-3</sup> /s)	
1415“海鸥”	2014/9/16/20:00	有	3.5	13.9	227
1409“威马逊”	2014/7/19 08:00	无	3.1	12.4	70

探空站的“海鸥”与“威马逊”过程的关键大气环境参数对比。从表2可以看出,两个过程的0~6 km垂直风切变分别为 $3.5 \times 10^{-3}/s$ 、 $3.1 \times 10^{-3}/s$ ,都达到了Thompson等<sup>[31]</sup>统计的下限,差异并不明显。两个过程的环境参数明显差异体现在0~1 km的低层垂直风切变和风暴相对螺旋度SRH上。从0~1 km低层垂直风切变来看,两次过程虽然都达到了Thompson等的统计平均值,但“威马逊”过程的0~1 km垂直风切变与“海鸥”相比,明显偏小。再从SRH来看,“威马逊”过程的SRH与“海鸥”过程相比也明显偏小,“威马逊”过程的SRH只有 $70 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,远没有达到Davies<sup>[32]</sup>统计得出的有利于超级单体风暴产生的最低阈值 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。所以,“威马逊”过程的环境条件不利于微型超级单体风暴的出现,实际雷达上也没有监测到微型超级单体风暴。在这里需要特别说明一下超强台风“威马逊”过程,虽然“威马逊”是建国以来登陆广东的最强台风,但可以看到其在珠三角地区呈现出的环境条件并不是很有利。这也表明,台风外围龙卷除了与台风移动路径及其登陆后台风中心所处位置等因素有关外,台风登陆后的大气环境条件是

否有利也是至关重要的。由此可以得到初步结论,SRH越大,0~1 km低层垂直风切变越强,出现超级单体风暴的可能性越大,龙卷发生的概率也越高。更确定的结论还需要通过更多相似个例作进一步分析验证。

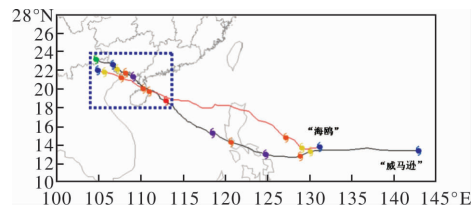


图8 台风1415号“海鸥”和超强台风1409号“威马逊”路径

## 5 结论和讨论

利用常规气象观测、广东区域自动气象站、广州多普勒天气雷达等资料,分析2014年9月16日夜間发生在台风“海鸥”外围的广东省佛山市三水区龙卷的天气背景、物理量参数、自动站特征和雷达回波演变等观测事实,主要结果如下。

(1)此次龙卷是在台风“海鸥”登陆后的外围螺旋雨带中产生的,龙卷出现在台风前进方向的右后侧,强度为EF1级,属于弱龙卷。龙卷发生时,台风中心位于越南广宁省潭河县境内(北部湾西北侧近岸陆地),强度处于减弱阶段,但仍维持在强热带风暴量级,符合历史佛山台风外围龙卷发生的统计特征。

(2)龙卷产生的天气背景和环境条件是有利的。200 hPa的辐散抽吸作用、500 hPa到925 hPa强的东南急流轴走向一致、位置接近且上下叠加在珠江口附近,形成中低空强的垂直风切变,配合地面中尺度辐合线和弱冷空气入侵,使得各层天气形势的综合配置有利于超级单体风暴龙卷的发生。临近的清远探空表现为较小的对流有效位能(175 J/kg),低抬升凝结高度(430 m),较强0~6 km深层风垂直切变( $3.5 \times 10^{-3}/s$ )与强的0~1 km低空风垂直切变( $13.9 \times 10^{-3}/s$ )以及大的风暴相对螺旋度( $227 m^2/s^2$ )。

(3)产生龙卷的对流风暴属于低质心的微型超级单体风暴,速度图上低层有强中气旋存在,中气旋中心伴有TVS,中气旋的尺度比较小、垂直伸展高度比较低,中气旋与TVS分别较龙卷提早约14 min和8 min出现。龙卷出现在微型超级单体风暴右后侧钩状回波顶端、TVS附近。

(4)对比了相似台风路径下1415号台风“海鸥”(有龙卷出现)和1409号超强台风“威马逊”(无龙卷出现)的环境条件。两个过程环境参数明显差异体现在0~1 km的低层垂直风切变和SRH上,后者的0~1 km垂直风切变和SRH均明显偏小,不利于微型超级单体风暴的出现。所以,0~1 km低层垂直风切变和SRH越大,出现超级单体风暴的可能性越大,龙卷发生的概率也越高。更确定的结论还需要通过更多相似个例归纳证实和高分辨率的数值模式深入研究。

## 参考文献:

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:297-305.
- [2] 吴越,沈明刚.龙卷风灾害刍议[J].灾害学,1988,3(2):56-59.
- [3] 李向红,胡静,伍静,等.广西两次系列龙卷过程多尺度对比分析[J].灾害学,2017,32(3):71-79.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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[J].大气科学,2008,32(3):508-522.
- [7] 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.
- [8] Roberts B, Ming Xue, Schenkman A D, et al. The role of surface drag in tornadogenesis within an idealized supercell simulation[J]. J Atmos Sci, 2016, 73: 3371-3375.
- [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] 魏文秀,赵亚民.中国龙卷风的若干特征[J].气象,1995,21(5):36-40.
- [11] 徐良炎.一九八七年我国龙卷风灾害[J].灾害学,1988,3(2):60-62.
- [12] 何如,唐忠莲,苏志,等.广西某核电站周边地区龙卷风调查与评价[J].灾害学,2016,31(1):153-156.
- [13] 相德勤,李瑛.1978年陕西乾县龙卷风纪实[J].灾害学,1986,1(创刊号):67.
- [14] 郑永光,朱文剑,姚鹏,等.风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J].气象,2016,42(11):1289-1303.
- [15] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:464-465.
- [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[J].气象,1990,16(1):11-15.
- [17] Edwards R. Tropical cyclone tornadoes: A review of knowledge in research and prediction[J]. Electronic J. Severe Storms Meteor. 2012, 7(6): 1-33.
- [18] Schultz L A and Cecil D J. Tropical cyclone tornadoes, 1950-2007[J]. Mon Wea Rev. 2009, 137: 3471-3484.
- [19] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1954-1978.
- [20] McCaul E W. Observations of the Hurricane “Danny” tornado outbreak of 16 August 1985[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115: 1206-1223.
- [21] 李彩玲,杨宇声,郑启康,等.一次台风暴雨中的龙卷风天气[J].广东气象,2007,29(3):26-29.
- [22] 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):1-6.
- [23] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a doppler radar[J]. J Appl Meteor, 1970, 9(4): 661-670.
- [24] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, et al. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106(1): 29-38.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 郑峰,钟建锋,张灵杰.超级台风“圣帕”引发温州类龙卷的特征分析[J].高原气象,2012,31(1):231-238.
- [28] 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):942-925.
- [29] 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.
- [30] Texas Tech University. 2006. A recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)[M]. Lubbock: Wind Science and Engineering Center.
- [31] Thompson R L, Edwards R, Hart J A. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings[C]//Preprints 21st Conf On Severe Local Storm. San Antonio: Amer Meteor Soc, 2000b: 595-598.
- [32] Davies J R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms[J]. J Atmos Sci. 1984, 41: 2991-3006.

## Analysis of the Tornado Weather Process of No. 1415 kalmaegi Typhoon

HUANG Xianxiang<sup>1, 2</sup>, YAN Lijun<sup>1</sup>, CAI Kanglong<sup>2</sup>, MAI Xuehu<sup>1</sup> and YU Lefu<sup>2</sup>

(1. *Foshan Meteorological Service, Foshan 528000, China*; 2. *Foshan tornado Research Center, Foshan 528000, China*)

**Abstract:** On the night of September 16, 2014, a tornado broke out in the spiral rain belt around Typhoon No. 15 kalmaegi and struck Baini Town, Sanshui District, Foshan City, Guangdong Province. The tornado strength was determined to be EF1 level by comprehensive analysis of the disaster investigation, mass visits and new generation radar observations. The environmental background and radar echo characteristics of typhoon occurrence and development are analyzed. The results show that the tornado occurs at the right rear of typhoon kalmaegi moving direction and the upper 200 hPa is the divergence area, and 500 hPa is the subtropical high. The strong southeasterly jet from 925 hPa to 500 hPa moves in the same direction and superimposes on the upper and lower sides near the Pearl River Estuary at the confluence of the strong southeasterly air pressure and the kalmaegi. Weak cold air and the mesoscale convergence line triggering convection exist on the ground. The environment condition is weak and unstable, the convective effective potential energy (CAPE) is small, the elevation condensation height (LCL) is low, the vertical wind shear and the storm relative helicity (SRH) is large; the convective storm which produces tornado belongs to the micro super-cell storm with low center of mass, and there is strong mesocyclone in the lower layer of the velocity chart, and the mesocyclone center is accompanied by TVS. The mesocyclone and TVS have smaller scale and lower vertical extension height, and the strong mesocyclone and TVS appear earlier than tornado 14 min and 8 min respectively. The tornado appears on the right rear side of the miniature supercell storm, near the top of the hook echo and near TVS. The analysis also shows that the environmental conditions of typhoon kalmaegi (with tornadoes) and super typhoon Wilmathon (without tornadoes) are significantly different under similar typhoon paths, which are mainly reflected in the low-level vertical wind shear of 0-1 km and SRH. The latter's 0-1 km vertical wind shear and SRH are obviously smaller than those of the former and aren't conducive to the appearance of mini supercells. The emergence of body storms.

**Key words:** typhoon tornado; weather process; environmental conditions; Doppler weather radar; mesocyclone; kalmaegi typhoon

(上接第 107 页)

## Potential Impacts of Geoengineering on the Spatial and Temporal Pattern of Future Rainfall in China from 2010 to 2099

KONG Feng<sup>1, 2, 3</sup>, SUN Shao<sup>4</sup>, WANG Pin<sup>5</sup> and WANG Yifei<sup>2</sup>

(1. *School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *China Meteorological Administration Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*; 3. *Central Asia Atmospheric Sciences Center, Urumqi 830002, China*; 4. *National Climate Center, Beijing 100081, China*; 5. *Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, College of Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China*)

**Abstract:** The pressure of global emission reduction increases sharply under the temperature control targets of 1.5 C and 2 C set by the Paris Agreement. In view of solar radiation management, which is most discussed in geo-engineering, the spatial-temporal distribution and difference of precipitation in China during 2010-2099 were statistically analyzed based on the BNU-ESM geoengineering (G4 experiment) and non-geoengineering (RCP4.5) scenarios. The results show that: (1) geoengineering is beneficial to the increase of China's total rainfall over time series. The precipitation of China in 2010-2099 and 2020-2069 scenarios showed an increasing trend, and the increasing trend of precipitation in 2010-2099 scenarios under geoengineering scenarios was greater than that under non-geoengineering scenarios. However, there was little difference between the two scenarios in 2020-2069. In 2070-2099, after the implementation of geo-engineering, the precipitation under geo-engineering scenarios increased, but not geo-engineering scenarios decreased. The precipitation variation trend of seven geographic zones was higher than that under non-geo-engineering scenarios. (2) In the spatial pattern, the spatial distribution of precipitation in China was similar in different research periods under the two scenarios, but the area distribution was different. During the implementation of geo-engineering, the precipitation in most areas decreased, and the precipitation in 2070-2099 after the completion of geo-engineering was significant. (3) The area of increasing precipitation under the geoengineering scenario in 2010-2099 was larger than that of non-geoengineering scenario, especially after the implementation of geo-engineering in 2070-2099, the area of increasing precipitation in China increased significantly. The characteristics of rainfall fluctuation in geo-engineering scenarios are smaller than that in non-geo-engineering scenarios, and the annual variation of rainfall in China is relatively stable under geo-engineering scenarios.

**Key words:** geoengineering; RCP4.5; rainfall change; regional difference; climate change