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.

佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析

黄先香[1]，炎利军[2]，王硕甫[1,3]，程正泉[3]
(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；
3. 广州中心气象台，广东广州 510080)

摘 要：利用常规气象观测资料和NCEP再分析资料，分析了多年来佛山龙卷风的活动特点及其产生的环流背景和环境条件。结果表明：佛山龙卷风集中出现在4—8月；发生时间主要集中在08：00—14：00；发生地域以南海区最多，其次是三水区；16次龙卷风过程可归纳为4种诱生形势：台风外围型、锋面暖区型、地面辐合线型和热带扰动型。分析还发现：佛山龙卷风发生于偏南暖湿气流中，中低层通常有西南或偏南急流叠加配置，并存在强的垂直风切变和中干冷、下暖湿的强不稳定层结及较低的抬升凝结高度。另外，佛山龙卷风的发生还与地形因素关系密切。

关键词：天气预报；龙卷风；活动特征；环流背景；佛山
中图分类号：P45 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1007－6190.2014.03.004

龙卷风历来是预测科学的难点和“盲区”。与雷雨大风、冰雹、短时强降水等强对流天气相比，华南龙卷风发生的机率较低，但一旦发生经常能在短时间内造成重大的灾害[1－3]。因此，龙卷风的分析和预测研究一直以来备受学者的关注[4－8]。还有一些学者对区域龙卷风的气候特征作了统计分析[9－13]。

广东各地都曾出现过龙卷风，但主要集中在珠江三角洲和南部沿海，而又以佛山最为多发。近10年来平均每2年会有1个龙卷风严重影响佛山[14－15]。最近一次灾害性龙卷风发生于2011年5月7日08：00，造成南海区罗村10人死伤。本研究采用常规气象观测资料和NCEP客观分析资料(分辨率1°×1°)等，重点对多年来佛山龙卷风的活动特点及产生的环流背景等作基础性分析，以期为今后同类灾害天气的分析、监测和风险预警提供参考。

1 佛山龙卷风活动的时空特征

本研究所用案例的判断依据是事后的灾情调查及目击者的叙述，2005年之后部分案例结合了雷达资料的辨别分析。可以确认的佛山龙卷风天气过程有16次(22个)。其中近10年来有12 d出现龙卷风，平均每年发生频率为1.2 d，持续影响时间一般小于10 min，多数为1～3 min。

佛山3—8月均有龙卷风出现；其中，3月1个、4月4个、5月2个、6月5个、7月3个、8月7个(2006年8月4日为5个)，4—8月份龙卷风占区域全年龙卷风总次数的95.5%，可见佛山龙卷风集中出现在春夏之交和盛夏时节。

魏文秀等[10]曾指出，中国龙卷风以午后发生的最多，其中15：00—16：00为发生高峰时段，显示了与太阳辐射影响最大时段的一致性。值得注意的是，佛山龙卷风发生时段主要集中在08：00—14：00，占45.5%；其次是02：00—08：00和14：00—20：00，各占22.7%；20：00到次日02：00占9.1%。佛山龙卷风在午后并非高发阶段，说明动力因素的决定性作用应该更为突出，热力作用其次。

从发生地域看，佛山各区均有龙卷风发生，其中以南海区发生频次最多，有11个；其次是三水区6个；高明区和禅城区各2个；顺德区最少，只有1个。

2 典型龙卷风过程环流背景

分析佛山16次龙卷风天气过程产生的环流背景场，可以概括为台风(泛指热带气旋)外围型、锋面暖区型、地面辐合线型以及热带扰动型等4种类型的诱生形势。本研究重点选取2006年8月4日(台风外围型)、2011年4月17日

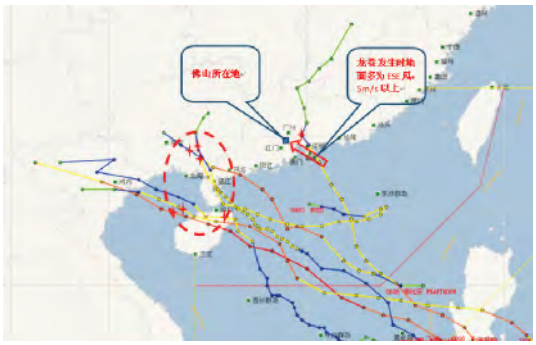
收稿日期：2013－12－12
基金项目：广东省气象局项目《广东省灾害性天气历史个例库查询和检索系统》(201002)和广东省创新台风团队科技项目(201101)共同资助。
作者简介：黄先香(1974年生)，女，高级工程师，硕士，主要从事天气气候预测工作。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(锋面暖区型)、2011 年 5 月 7 日(地面辐合线型) 3 次典型的龙卷风灾害天气过程,探讨其发生的大尺度环流形势特征。

2.1　台风外围型

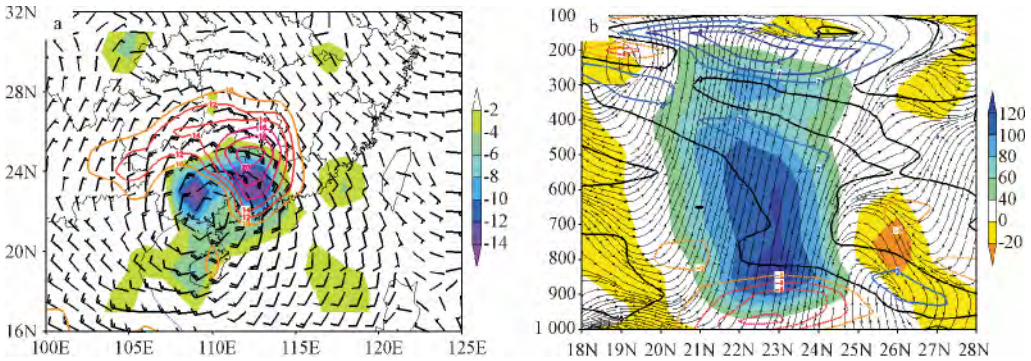
陈联寿等[10]曾指出,龙卷风产生在台风的一定部位,主要位于台风的右前象限,部分出现在右后方。佛山有 7 次龙卷风发生在此类环流背景下。其中有 6 次龙卷风是出现在热带气旋中心的东北侧,龙卷风发生时,热带气旋中心位于湛江到广西南部的玉林、贵港或北部湾一带,强度处于减弱阶段,但仍维持在热带风暴量级以上; 龙卷风发生地与风暴中心相距 360 ~ 550 km。另外还有 1 次龙卷风是出现在热带气旋中心的西南侧,龙卷风发生地与热带风暴中心的相距约 100 km(图 1)。



(星号表示台风在该位置时佛山出现龙卷; 箭头为地面风向)

图 1　引发佛山龙卷风的 7 次台风路径

2006 年 8 月 4 日 08:00,副高处于加强西伸中,脊线偏北(35°N 附近)、主体位置偏东。副高西南侧的东南气流与台风"派比安"外围东南侧的强西南气流在广东中北部辐合,700 hPa 上风速超过 24 m/s 的偏南急流与东南急流汇合于珠三角,850 hPa 上珠三角也存在风速超过 22 m/s 的偏南急流与东南急流的辐合(图略)。925 hPa 上明显的水汽通量辐合中心位于广东的西北部到珠三角一带(图 2a),同时,华南中北部低层(700 ~ 975 hPa)有显著的垂直风切变,风速切变中心高达 20 m/s,清远探空站 0 ~ 6 km 垂直风速切变值达到了 $18.1 \times 10^{-3}\ s^{-1}$。低层明显的水汽辐合、中低层急流的叠加配置和强烈的垂直风速切变有利于强雷暴的发展,为龙卷风的发生发展提供了持续的能量、充足的水汽条件和动力条件。另外,图 2b 揭示了此次龙卷天气的大气垂直结构特征,珠三角低层为强辐合,散度值达到 $-8.0 \times 10^{-5}\ s^{-1}$,低层的强辐合产生强烈的上升运动,强上升运动中心高度接近 400 hPa,高层 200 hPa 为强辐散,散度值达到 $6.0 \times 10^{-5}\ s^{-1}$,高层辐散气流产生"抽吸"作用。低层强辐合、高层强辐散的配置,配合华南上空有利的大气动力和热力不稳定条件,对强对流的发生发展和维持十分有利,为龙卷风群的发生提供了充分条件。



(a 图阴影区为水汽通量负散度中心,单位: $10^{-7}\ g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$,垂直风切变单位: $m \cdot s^{-1}$;
b 图阴影区为垂直运动中心,单位: $10^{-2}\ Pa \cdot s^{-1}$,等值线虚、实线分别对应负、正散度区,单位: $10^{-5}\ s^{-1}$)

图 2　2006 年 8 月 4 日 08:00 850 hPa 水平风场、925 hPa 水汽通量负散度及低层垂直风切变(700 ~ 975 hPa)(a)和沿 113°E 经向环流和散度剖面图(b)

2.2　锋面暖区型

佛山有 5 次龙卷风发生在此类环流背景下。2002 年 4 月 5 日的三水区龙卷; 2006 年 6 月 4 日的顺德区龙卷; 2007 年 6 月 9 日的南海区龙卷; 2011 年 4 月 17 日的南海区龙卷; 2012 年 4 月 18 日的三水区龙卷。集中在 4—6 月。

2011 年 4 月 17 日 08:00,强对流天气发生的区域位于 200 hPa 高空急流轴南侧,500 hPa 槽前、850 hPa 切变线和地面冷锋前部暖区内。地面冷锋位于广东中北部; 850 hPa 为西南暖湿气流,广东上空有暖脊、暖湿舌存在; 500 hPa 华南处于槽前平直西风急流控制、广东上空极干、

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粤中北部温度露点差大于 40 ℃;700 hPa 有强降温区(24 h 负变温)位于广东中北部;$\Delta t_{850-500}$ 梯度很大,也是位于广西 - 广东中北部(图 3a)。表明,中层干冷空气叠加在低层暖湿气流之上,层结非常不稳定。另外,从清远探空站的 $t-\ln p$ 图(图 3b)可见,700 hPa 以下暖湿,700 hPa 以上非常干,整个层结呈现出上干下湿状态,十分不稳定;400 hPa 较强西北气流与地面较弱的偏南气流之间形成较强的垂直风切变,清远探空站 0 ~6 km 垂直风速切变值高达 $21.0\times10^{-3}s^{-1}$,中低空强烈的垂直风切变为强对流的发生发展和维持提供了有利的动力不稳定条件。

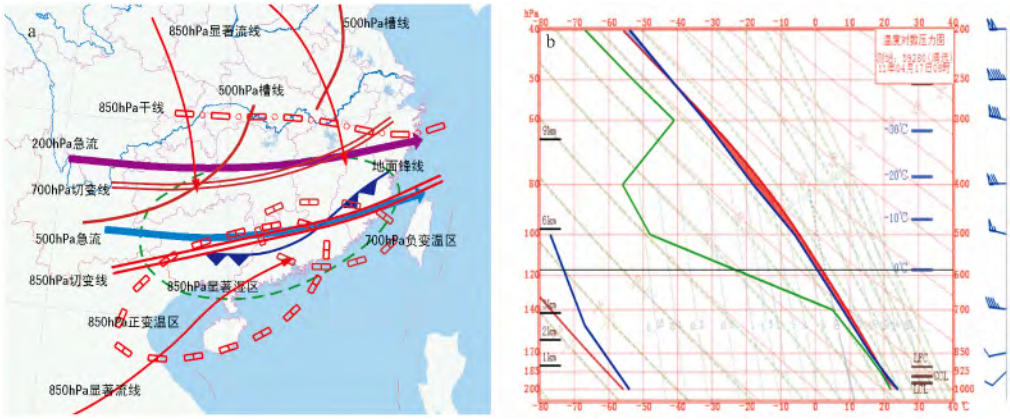


图 3 2011 年 4 月 17 日 08:00 环流配置示意图(a)和广东清远站探空图(b)

2.3 地面辐合线型

佛山有 2 次龙卷风发生在此类环流背景下。2007 年 3 月 25 日三水区龙卷;2011 年 5 月 7 日南海区龙卷。出现在 3—5 月。

2011 年 5 月 7 日,500 hPa 高原东侧分裂短波西风槽东移,佛山处于槽前西南气流中,且风速加大到 20 m/s;7 日 08:00—20:00,从 925—700 hPa 风场顺转近 80°,有暖平流;850 hPa(700 hPa)西南低空急流强度达 14 m/s(18 m/s);清远探空站 0 ~6 km 垂直风速切变值高达 $16.0\times10^{-3}s^{-1}$,为强对流的发生发展提供了充足的暖湿空气条件和动力条件(图略);地面为东高西低的形势,东部有弱冷空气扩散,西部西南低槽强烈发展,导致华南等压线密集(5°E 5 hPa),这样佛山东北侧有一干冷气流入侵,而西南部为暖湿气流,佛山处于地面辐合线附近及干冷暖湿气流交汇处(图 4a),形势极不稳定;另外,从 7 日 20:00 的温度露点差剖面图上,可见低层和中高层均为明显湿层,中低层(700 hPa 附近)有一干舌自东向西伸进佛山南海区(113°E)上空(图 4b),垂直方向表现为“湿 - 干 - 湿”的结构。地面辐合线和干冷空气的入侵为强对流的发生提供了触发条件,强对流从东向西推进,龙卷风出现在辐合线上的强对流单体中。

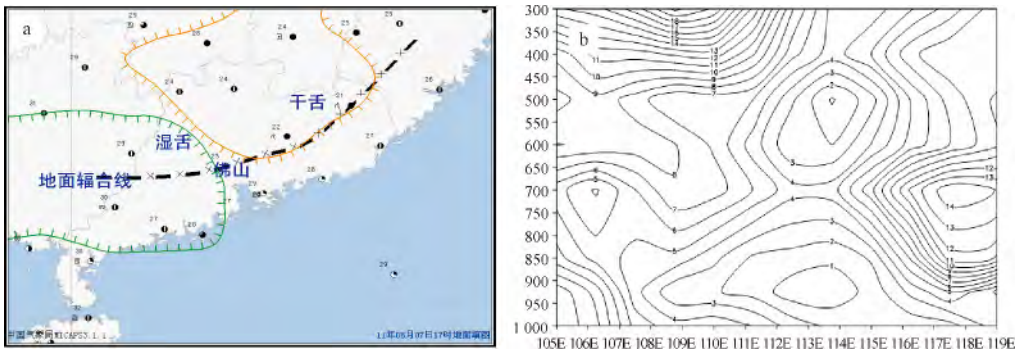


图 4 2011 年 5 月 7 日环流配置示意图

(a:17:00 地面形势;b:20:00 温度露点差沿 23°N 的剖面图)

2.4 热带扰动型

热带扰动型与台风外围型均属于东风带系统影响下的环流背景。近些年有 2 次记录,分别是 2009 年 5 月 26 日的高明区龙卷风和 2010 年 8 月

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 日的南海区龙卷风。与前 3 类相比,此类背景场下生成的龙卷风均没有产生大的气象灾害。

3　产生龙卷风的环境条件特征

龙卷风大多是超级单体风暴中的小尺度天气系统。因此,龙卷风的形成要有适宜的环境流场条件; 另外,地理环境因素则会进一步增强大气环境的作用效果。

3.1　不稳定的大气层结条件

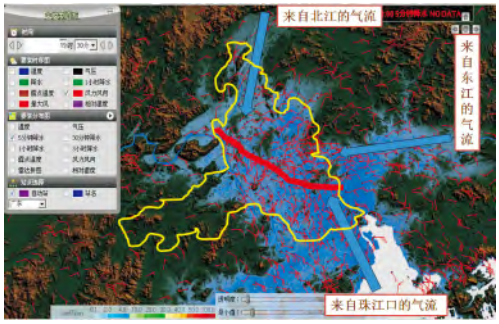
表 1 给出了 21 世纪以来造成人员伤亡的 4 次典型龙卷风过程的一些物理量指数。可以看出: 龙卷发生前,抬升凝结高度 LCL 在 940 ~ 979 m 之间; K 指数多数在 36 ℃或以上; 有一定的 CAPE 值,但并不是很大,最大为 639 J·kg^{-1},最小只有 14 J·kg^{-1}; 总温度较高,在 41 ℃以上; 强对流威胁指数 Sweat 在 240 以上,最大高达 389。高温、高湿的大气不稳定层结,特别有利于强对流的发展。另外,还可以看到,4 次龙卷风过程的中低层 0 ~ 6 km 垂直风切变($SHR_{0-6\ km}$) 很大,其中有 3 次都在 3.5 × 10^{-3} s^{-1}以上。沈树勤[4]给出了风暴研究中概括出的不同类型风暴所具有的切变: 多单体风暴为 1.5 ~ 2.5 × 10^{-3} s^{-1},超级单体风暴为 2.5 ~ 4.5 × 10^{-3} s^{-1}。可见本研究中的 4 个典型龙卷风案例的垂直风切变值多数达到超级单体风暴强度。这种强垂直风切变的存在,可以增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流,再通过强迫抬升使得流入的暖湿气流更强烈上升,不仅有利于潜在不稳定度加大和低空垂直上升运动的发展,还有利于高空垂直涡旋运动的发展,对于龙卷风的形成十分有利。

表 1　21 世纪以来佛山造成严重伤亡的 4 次典型龙卷风过程的相关物理量指数

时间	K 指数/℃	CAPE/(J·kg^{-1})	总温度/℃	Sweat 指数	LCL/m	$SHR_{0-6\ km}$ × 10^{-3}/s^{-1}
2006 - 08 - 04	36	231	41	340	969	4.5
2007 - 06 - 09	36	14	45	321.5	940	1.5
2011 - 04 - 17	34	560	43	240	967	3.5
2011 - 05 - 07	40	639	48	388.9	979	3.5

3.2　独特的地理环境条件

龙卷风的形成除与气象条件密切相关外,地形环境因素也是不可忽视的一个重要影响因子。从佛山地势地理位置看,总体有北高南低、西高东低的特征,西北部多起伏的丘陵和山脉,东南部为珠江三角洲平原; 北有南岭山脉,东南面正对着向南开的“喇叭形”珠江口。而且佛山地处西江、北江和东江三江交汇处,又恰恰处于三角洲上正对东江河谷的位置上,南来的暖湿气流沿着“喇叭状”的珠江口北上后通常与顺着北江和东江河谷渗透到佛山的浅薄冷空气交汇,产生辐合抬升作用,形成地面辐合线,在适当的大气环境条件下容易诱发龙卷风或者促进龙卷风等小尺度涡旋的生成与发展。见图 5。



(红线为辐合区、黄线为佛山边界; 箭头为三股气流来向)

图 5　佛山独特地理环境引发的气流辐合示意图

4　小结

1) 佛山龙卷风活动具有明显的时空统计特征。龙卷风集中出现在春夏之交和盛夏时节的 4—8 月; 时段上主要集中在 08:00—14:00; 以南海区发生频次最多,其次是三水区。近 10 年来平均每年发生频率为 1.2 d; 持续时间多为 1 ~ 3 min。

2) 佛山龙卷风过程可归纳为台风外围型、锋面暖区型、地面辐合线型和热带扰动型等 4 种诱发形势。其中台风外围型龙卷具有较强的规律性,多数出现在热带气旋中心的东北侧。龙卷风发生时,热带气旋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; 龙卷风发生地与热带风暴中心相距 360 ~ 550 km 之间。

3) 选取近年来给佛山造成重大人员伤亡的 3 次典型的龙卷风过程(分别代表台风外围型、锋面暖区型和地面辐合线型) ,探讨其发生的大尺度环流形势。结果表明,龙卷风发生于“偏南暖湿气流中,中低层通常有西南或偏南急流,中低层具有强的垂直风切变,并且具有低层辐合、高层辐散相叠加配置”的大尺度环流背景下。对于锋面暖区型和地面辐合线型龙卷,还具有“中

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

干冷、下暖湿”的强不稳定层结。

4) 佛山龙卷风与强的不稳定层结条件和强的垂直风切变等关系密切。龙卷风发生在高温高湿的不稳定层结环境中: K 指数较大,有一定的 CAPE 值,但并不是很大,总温度较高,强对流威胁指数很大,具有低的对流抬升凝结高度和中低层大的垂直风切变。另外,佛山龙卷风的发生还与地形因素关系密切。

本研究仅是统计了近年来发生在佛山地区的龙卷风的一些活动特征及灾害性龙卷风的环流背景分析,对龙卷风的雷达回波特征等缺乏分析; 所提及的预报预警关注点还有待更多个例进行检验。

参考文献:

[1] 林仲青,李献洲. 9403 号强热带风暴外围龙卷风分析 [J]. 广东气象,1995,17(3):11 - 13.

[2] 林志强. “6.9”南海、清远龙卷风灾情调查 [J]. 广东气象,1995,17(1):36 - 38.

[3] 罗晓玲. 2007 年第 2 季度广东气候综述 [J]. 广东气象,2007,29(3):1 - 2.

[4] 沈树勤. 龙卷形成原因初探 [J]. 南京大学学报: 自然科学版,1996,32(灾害专辑): 235 - 240.

[5] 吴海英,沈树勤,蒋义芳,等. 龙卷诱发原因的实例分析 [J]. 气象科学,2009,29(3):335 - 341.

[6] 刘式适,付遵涛,刘式达,等. 龙卷风的漏斗结构理论 [J]. 地球物理学报,2004,47(6):959 - 963.

[7] 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 - 16.

[8] 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.

[9] 林仲青. 广东省 2—5 月各类强对流天气的时空分布 [J]. 广东气象,1999,21(1):21 - 22.

[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] 梁必骐,易耀辉. 广东局地强风暴的活动特征及其灾害分析 [J]. 广东气象,1994,16(1):11 - 13.

[12] 郑峰,谢海华. 我国近 30 年龙卷风研究进展 [J]. 气象科技,2010,38(3):295 - 299.

[13] 农孟松,董良淼. 广西“94.6”特大洪涝暴雨过程的中尺度分析 [J]. 气象研究与应用,2008,29(s):10 - 13.

[14] 周能,李生艳. 08.6 广西连续暴雨的大尺度环流和物理条件分析 [J]. 气象研究与应用,2011,32(4):23 - 26.

[15] 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.

[16] 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.

Analysis of the Characteristics of Tornados in Foshan City and Their Circulation Background

HUANG Xian-xiang[1], *YAN Li-jun*[2], *WANG Shuo-fu*[1,3], *CHENG Zheng-quan*[3]

(1. Meteorological Bureau of Foshan City, Foshan 528000;
2. Tornadoes Research Center of Foshan, Foshan 528000;
3. Guangzhou Central Meteorological Observatory, Foshan 510080, China)

Abstract: Conventional meteorological observations and NCEP reanalysis data are used to analyze the characteristics of the tornadoes that happened in recent years in Foshan and the associated circulation background and environmental conditions. It is found that in Foshan tornadoes mostly occur in April–August and concentrate from 08:00 to 14:00. The district of Nanhai has the most occurrence, followed by Sanshui. In summery, the 16 tornadoes studied are considered to be triggered by the four following patterns: the periphery of a tropical cyclone, the warm core of a front, convergence lines at the surface and tropical disturbances. It is also noted in our study that the tornadoes are generated within southerly warm and humid airflows and usually superimposed with a southwesterly or southerly jet stream. Besides, the tornadoes are also associated with strong vertical wind shear, intense instable stratification that is dry and cold at the middle level but warm and humid at the lower level, and relatively low altitudes of lifting-caused condensation. Lastly, the tornadoes are also closely linked with the orographic factor.

Key words: weather forecasting; tornadoes; activity characteristics; circulation background; Foshan

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net