S1

2014 年 6 月 3 日佛山市龙卷风天气过程分析*

黄先香[1]，植江玲[1]，炎利军[1, 2]

（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）

详细摘要：利用广州多普勒天气雷达、常规气象观测和NCEP再分析等资料，分别从环流背景、物理量特征、多普勒雷达资料和中尺度风场等方面，对2014年6月3日广东佛山的龙卷风天气过程进行了详细分析。结果表明：此次龙卷为超级单体龙卷；500hPa虽为槽后西北气流控制，但中低层辐合切变风场及200hPa高层的辐散“抽吸”作用为此次超级单体龙卷的发生提供了有利的背景条件；中层干冷气流与低层暖湿平流的叠加及低层高湿、增温为超级单体风暴发展提供了对流不稳定条件、水汽和热力不稳定条件，冷空气入侵和近地面边界层中小尺度辐合系统为其提供了触发机制；物理量场中，K指数普遍在40℃以上，SI指数低于2.0℃，SWEAT指数在300以上，TT指数在45以上，清晰地反映了大气的极端不稳定；2500J.kg^{-1}以上的强对流有效位能(CAPE)、较低的抬升凝结高度以及较强的0-1km低层垂直风切变为龙卷产生提供了十分有利的条件；多普勒雷达捕捉到此次龙卷过程中的中气旋特征，其中强度图上可达60dBZ，速度图上在1.5°和0.5°仰角上速度对清晰，符合中等到强中气旋的特征；地面中尺度风场表明，有利的天气形势背景下，地形在近地层辐合线和地面小尺度涡旋的形成中发挥了重要的影响作用。

1 引言

龙卷风是对流云产生的小尺度灾害性天气系统，可在短时间内造成重大灾害[1-3]。因此，龙卷风的分析研究在气象界历来备受关注。郑媛媛等[4]、俞小鼎等[5]研究了典型强龙卷超级单体风暴特征；俞小鼎等[6]总结了国内外龙卷风研究进展；伍志方等[7]归纳统计了中小尺度天气系统的多普勒速度和反射率因子及其导出产品特征，指出了此类中小尺度强对流的分类识别方法；沈树勤[8]、吴海英等[9]和刘式适等[10]从理论模型角度探讨了龙卷风产生的机制和结构，指出绝对不稳定的大气层结和较大的水平涡度是产生龙卷风旋转的条件；魏文秀等[11]、黄先香等[12]分别从气候角度分析了我国龙卷风和佛山龙卷风若干统计特征；黄姚钦等[13]诊断分析了台风外围环流中触发的佛山龙卷风背景场；俞小鼎等[5]诊断分析指出，大的低层垂直风切变、低的抬升凝结高度和地面阵风锋的存在有利于F2级以上强龙卷风的产生。

本研究中，我们利用距离本次强对流风暴最近的广州CINRAD-SA多普勒天气雷达资料、常规气象观测资料和NCEP客观分析资料（分辨率1°×1°）等，对2014年6月3日发生在佛山中部的一次龙卷风天气过程进行较为详细的分析。此次天气过程是受切变线和弱冷空气共同影响，3日13时30分至16时30分，佛山自西北向东南先后受强雷雨云团影响，15时25分在顺德区陈村镇广隆工业区环镇西路和工业大道交界处的钢材厂产生了强烈的龙卷风，重20余顿的厂房房顶和房梁被掀掉。由于30余名工人躲避及时，仅造成1名工人轻微伤。根据房顶倒塌和损坏等灾情调查结果、目击者关于漏斗云的描述，以及临近广州多普勒雷达资料分析，按照Fujita提出的龙卷风分级标准，最后综合判断此次龙卷风的强度为F2级。除了强烈的龙卷风，此次强对流天气过程还产生了短时强降水和大风灾害。在3日14～15时，南海区大沥自动站时雨量为57.1㎜，14时59分佛山一中自动站录得34.5m/s阵风（东南风12级）；15～16时，龙卷风发生的陈村镇自动站时雨量为36.5 ㎜，离龙卷风发生点最近的自动站（顺德陈

*基金项目：广东省创新台风团队科技项目（201101）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

村新圩民警中队站）15时27分录得19.3m/s阵风（偏西风8级），2分钟平均风力为10.2m/s（偏西风5级）。本文将分别针对此次强对流过程的天气背景和产生条件、龙卷风发生时的多普勒天气雷达回波特征、地面的辐合特征等作详细分析。

2 环流背景特征

6月3日08时，500hPa上，亚洲中高纬度维持两槽一脊形势。高压脊位于河套附近，冷涡中心位于华北及渤海湾附近，脊前的西北气流不断分裂小槽东移下滑，槽底到达25°N附近，引导冷空气南下；受中纬度西风槽东移南压影响，副高持续南落，588线位于南海北部海面，广东省受槽后西北风场影响；700hPa上，有小槽东移影响广东中北部一带；850hPa上，切变线南压到南岭北侧，广东上空为强盛西南风场影响，强盛西南气流为强对流的发生提供了充足的水汽和不稳定能量；同时，广东中北部一带存在西北风与西南风的辐合线；925hPa上，在广东中北部一带也有切变线存在；地面上有弱的冷空气渗透到粤北，3日白天弱冷空气继续南压影响佛山，广东中部一带有辐合线存在。而且700hPa到925hPa的切变线与地面中尺度辐合线的位置非常接近，中低层的具备很好的辐合抬升条件。另外，200hPa上，南亚高压位于中南半岛北部，广东位于其中心东北偏东方，珠三角及以西为东北偏北风场，粤东为西北风场，广东省上空气流呈逐渐散开状，为明显的正散度区；高层的辐散“抽吸”作用有利于底层的上升运动发展。这种天气形势的配置，非常有利于佛山市出现强对流天气。

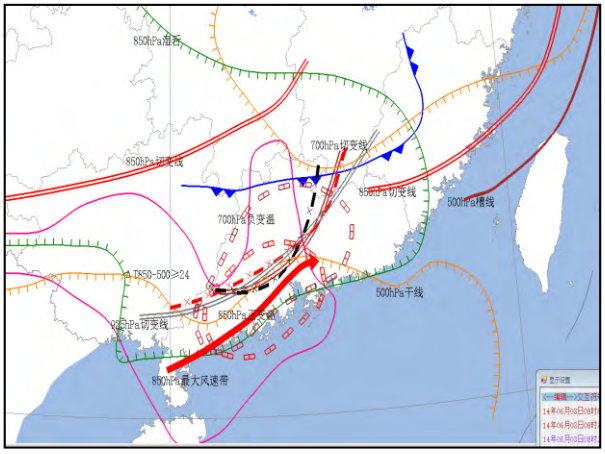

图 1　2014 年 6 月 3 日 08 时各层天气形势配置示意图

图 1 综合了高、中、低各层的主要特征。即 850hPa 存在大范围湿区，珠三角一带为正变温区；700hPa 广东中部一带为负变温区，且珠三角一带中层比较干。中层干冷气流与低层暖湿平流的叠加使位势不稳定明显增大，珠三角及以西地区温度直减率大，$\Delta T_{850-500} \geq 24$℃，为对流不稳定区。另外，地面上珠三角地区暖低压槽区，温度 T≥25℃，露点温度 Td≥23℃，且存在风向的辐合，锋面位于广东北部一带。这种地面高温高湿、风向辐合的环境条件，以及干湿边界和冷锋都是强对流发生的有利抬升触发条件。

大气层结的对流不稳定、中低层的辐合切变风场及高层的辐散为此次龙卷的产生提供了有利的天气背景条件。

3 强对流潜势分析

龙卷等强对流天气的产生，不仅需要大的垂直不稳定、水汽条件及抬升触发机制条件，还需要较大的对流有效位能和垂直风切变。有研究[5]表明，有利于F2级以上的生成的两个有利的条件分别是低的抬升凝结高度和较大的低层（0-1km）垂直风切变。对此次过程的强对流潜势特征分析如下：

3.1 对流有效位能（CAPE）

分析华南地区CAPE值变化发现，强对流发生的前一天晚上（2日20时），广东及周边省市的CAPE值比2日08时明显增加，增幅最大为河源站，由2日08时的759.5 J.kg^{-1}增大到2534.1 J.kg^{-1}；清远站从2日08时的1455 J.kg^{-1}增大到2795.1 J.kg^{-1}；另外，阳江、梧州的CAPE值分别增大到2870.7 J.kg^{-1}、2876.9 J.kg^{-1}；临近佛山的清远站K指数高达42℃，沙氏指数为-2.41℃，表明大气具有强烈的对流不稳定。3日早晨，由于有强雷暴在清远地区生成发展，

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

3 日08 时，清远站的CAPE值降为402.6J.kg^{-1}，但K指数仍高达43℃，沙氏指数增强到-4.1℃；14时经过订正后的清远站CAPE值为2815.0J.kg^{-1}，修正的K指数为46.8℃。仍然呈现出强烈的对流不稳定。

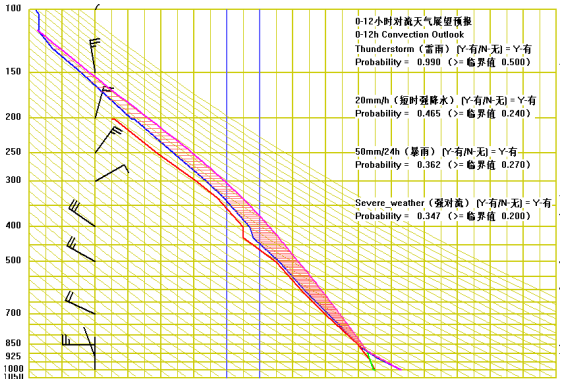

图 2　2014 年 6 月 3 日 14 时订正后清远站 T-LnP

3.2　物理量指数诊断

图3给出6月3日08时K指数和SI指数的分布。K指数是垂直递减率、850hPa水汽和700hPa湿度的和，体现了700湿度的贡献。广东中北部及上游的广西西北部K指数较大，普遍在40℃以上。预计未来随着暖湿区的东移，K指数的大值区将随之东移使广东上空大气的稳定度减小。SI指数则普遍＜-2.0℃，特别是临近佛山的清远站，SI＜-4.1℃，表明大气极不稳定。

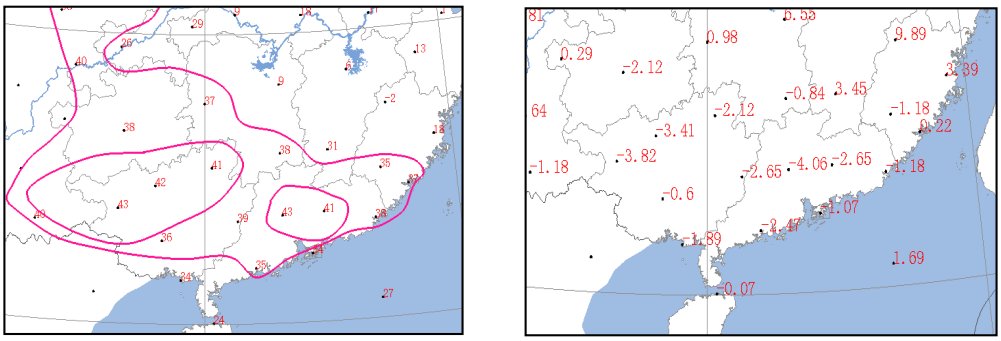

图 3　2014 年 6 月 3 日 08 时 K 指数和 SI 指数分布

图4a给出6月3日08时SWEAT指数的分布。从图可以看出，华南及西南地区的SWEAT指数达200以上，表明这些地区低层湿度条件好，气层不稳定度大，特别是在珠三角地区SWEAT指数高达300以上，有产生强雷暴的可能。

图4b给出6月3日08时抬升指数（LI）的分布。抬升指数是从地面开始抬升的气块到达500时，环境温度与此高度上气块的温度差，如果环境温度低于气块温度，气块将继续上升。从图可以看出，华南地区的抬升指数都为负值，表面气块温度高于环境温度，气块将继续上升，使大气层结变得越来越不稳定。

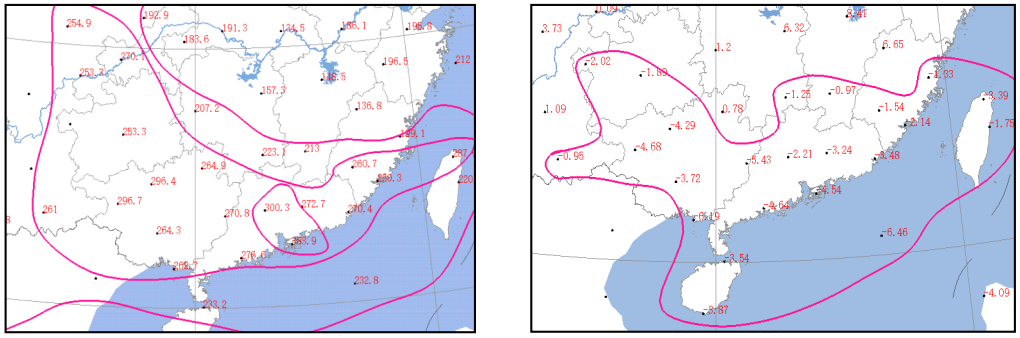

图 4　2014 年 6 月 3 日 08 时 SWEAT 指数和 LI 指数分布

另外，6 月　　3 日 08 时 850hPa 和 500hPa 的垂直温度递减的情况表明（图略），在广西大部及广东的中西部地区，$\Delta T_{850-500} \geq 24$℃，为对流不稳定区，与强对流天气落区一致。Total Totals 指数的分布可见（图略），

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

广东大部 Total Totals 指数≥45，大气已具有较大的潜在不稳定度。考虑到上游还有垂直温度递减率较大的不稳定区将叠加上来，层结不稳定度将加剧。

3.3 垂直风切变和抬升凝结高度

分析距离佛山市较近的清远探空站，2日20时、3日08时的垂直风变化可知：从低层925hPa到高层200hPa，风随高度顺转，有暖平流；0-6km的风矢量差为14.0m/s，垂直风切变较大；但是，0-1km的风矢量差为6.0m/s，低空的垂直风切变小。3日08时，从低层到高层的风随高度逆转，有冷平流，地面有冷空气的入侵；0-6km的风矢量差为12.0m/s,垂直风切变较大；0-1km的风矢量差为10.0m/s，低空的垂直风切变较强。另外，从临近佛山的广州多普勒天气雷达VAD风廓线产品可以看出，3日14时42分，0.3-1.2km的风矢量差为10.0m/s，对应的垂直风切变值为1.1×$10^{-2}s^{-1}$，属于较强的低层垂直风切变。环境条件有利于强对流的生成和发展。2日20时和3日08时，清远站的抬升凝结高度为951hPa和981hPa，均相对较低。由此可见，此次龙卷是发生在较大的低层垂直风切变和较低的抬升凝结高度下。需要指出的是,广州雷达站和清远探空站距离佛山分别是30km和80km,虽不能完全代表佛山实际情况,但具有较好的参考价值。

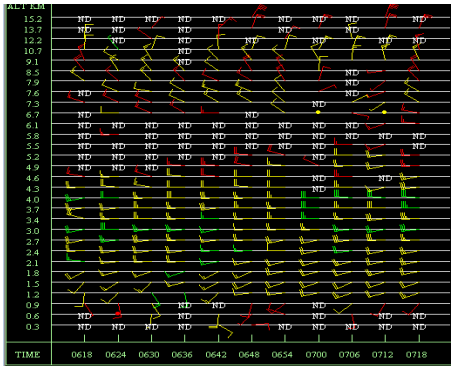

图 5　2014 年 6 月 3 日广州雷达 VAD 产品

4　多普勒天气雷达资料分析

2014 年 6 月 3 日 12 时前后，雷达上肇庆附近有零散对流生成并自西向东移动。13 时 30 分开始移入佛山境内，影响三水区南部和高明北部。13 时 36 至 42 分回波略有减弱，48 分回波开始加强，并且在南海区北部也有回波生成发展。14 时 12 至 18 分，影响高明区北部的回波明显加强，同时南海北部的回波继续加强，范围越来越大。14 时 42 分影响高明的南边回波与影响南海北部的回波加强，连成南北向的带状回波。14 时 48 分带状回波继续加强，最强回波值达到了 55 到 60dBZ，并逐渐演变成弓状回波。与弓状回波顶点处相对应，速度图上开始出现一对正负速度对（气旋性），具体位置在禅城区的张槎附近，该特征在 1.5° 和 0.5° 仰角上均可见到，0.5° 仰角更清楚，其在 0.5° 仰角上表现为纯粹的旋转特征，其旋转速度(正负速度对的绝对值之和的二分之一) 约为 13m/s，为弱中气旋；在 1.5° 仰角上表现为辐合旋转特征（图略）。14 时 54 分，气旋性涡旋特征持续，1.5° 和 0.5° 仰角上均表现为纯粹的旋转特征，并且强度加强，位于左侧的向着雷达的负速度出现了模糊，经过退速度模糊后的负速度最大值为-33 m/s，其旋转速度约为 21 m/s，具体位置在石湾附近（图 6）。其正负速度对之间的距离(即涡旋的尺度) 约为 4km，涡旋的垂直伸展局限于低层大气，约 3km。根据美国天气局的标准[2]，上述小尺度涡旋可以判定为中等到强中气旋。15 时 00 分，气旋性涡旋呈现出辐散旋转的特征，并且位于左侧的向着雷达的负速度中的大风区范围有所增大，导致位于其附近的佛山一中自动站录

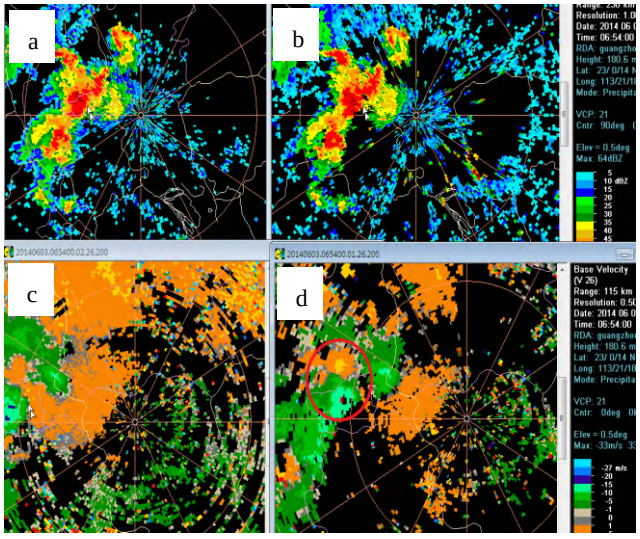

图 6　6 月 3 日 14:54 广州雷达强度（a、b）和速度图(c、d)

a、c:1.5° 仰角；b、d:0.5° 仰角；红圈处为中气旋

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

得 34.5m/s（12 级）大风，将数棵直径 20cm 左右的桉树拦腰折断。15 时 06 分气旋性辐散旋转特征持续。15 时 12 分，气旋性辐散旋转涡旋减弱，但负速度中的大风区范围增大、强度增强，达到了 20-27m/s。之后强雷雨带和大风区继续东移南压，于 15 时 30 分前后影响顺德区陈村镇，位于顺德区陈村镇广隆工业区环镇西路和工业大道交界处的钢板厂 15 时 25 分许出现龙卷风，造成 1 名工人受轻微刮伤。根据佛山市自动气象站监测，离该点附近最近的站点（顺德陈村新圩民警中队）15 时 36 分测得 19.3m/s（8 级）大风。

5　地形和地面风场特征

佛山独特的地理环境条件是龙卷风产生的一个重要影响因素。从地理位置看，佛山总体上呈北高南低、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；从 100㎞ 外的更大范围看，北部有南岭山脉、南部为向东南开口的“ 喇叭形 ”珠江口。而且佛山地处西江、北江交汇处，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“ 喇叭形 ”的珠江口北上后通常与顺着北江或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。在适当的大气环流条件下，容易触发龙卷风等小尺度天气系统的发生或发展。此次过程中，地形对地面风场也起到了明显的影响作用。分析强对流天气发生当天的 08、11、14 时地面风场变化可以发现，从河源-广州-佛山-江门一带持续维持长约 300 KM 的中尺度辐合线，而影响佛山的强对流风暴就是由肇庆附近的零散对流单体移入佛山境内，在中尺度辐合线附近进一步发展加强的。结合广东省自动站 12-16 时实时风场资料和雷达资料分析表明，在中午 12 时前后，渗透南下的冷空气前锋的偏北气流沿着北江河谷率先抵达佛山市南海区中北部，东江河谷有一支偏东气流抵达佛山中部，同时南部沿海有偏南气流北上，分别与北部的冷空气前锋和东部的偏东气流形成两条地面辐合线（图 7）。

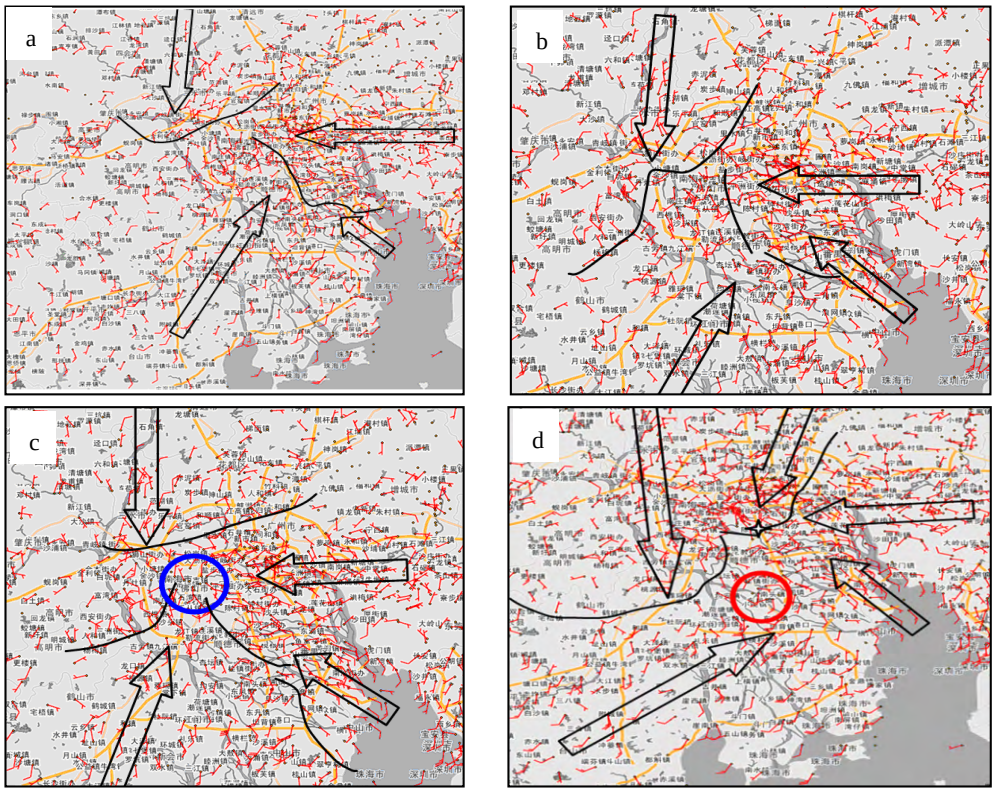

图7　2014年6月03日13-15时地面自动站风场（a：13:00；b：14:15；c：14:30；d：14:59）

由图可见，13-15 时，辐合线两侧的南、北风逐渐加强，辐合增强：14 时 15 分，地面

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

两条辐合线逐渐靠拢，形成“人”字型结构，珠江口内部的西侧东南气流明显增强并向西北推；14 时 30 分，辐合线西段南压较快，在“人”字型的结合部，由冷、暖气流形成了冷性的小尺度涡旋，位于禅城北部的张槎附近，14 时 59 分禅城区的佛山一中自动站录得 34.5m/s 阵风（东南风 12 级）；随后辐合线和小尺度涡旋中心东南压，给沿途的禅城张槎和顺德陈村带来强对流天气。因此，地面中尺度风场监测表明，有利的天气形势背景下，地形在地面辐合线和小尺度涡旋的形成中发挥了重要的影响作用。

6 小结

（1）本次龙卷风天气过程发生在有利的环流背景场中。广东地区虽然 500hPa 处于不利的槽后西北气流控制下，但是中低层辐合切变风场及 200hPa 高层辐散“抽吸”作用为此次超级单体的发生发展提供了有利的天气背景条件；中层干冷气流与低层暖湿平流的叠加及低层高湿、增温为强对流发展提供了对流不稳定条件、水汽和热力不稳定条件；冷空气入侵和近地面边界层中小尺度辐合系统为其提供了触发机制。

（2）此次超级单体龙卷发生时，物理量场上的 K 指数普遍在 40℃以上，SI 指数低于 2.0℃，SWEAT 指数在 300 以上，TT 指数在 45 以上，清晰地反映了大气的极端不稳定；2500J.kg^{-1}以上的强对流有效位能(CAPE)、较低的抬升凝结高度（981hPa）以及较强的 0-1km 低层垂直风切变为龙卷产生提供了十分有利的条件。

（3）多普勒雷达捕捉到此次龙卷过程中的中气旋特征，其中强度图上可达 60dBZ，速度图上在 1.5°和 0.5°仰角上速度对清晰，符合中等到强中气旋的特征。

（4）强对流风暴的发展加强与近地面边界层中小尺度辐合系统的加强有着密切关系。地形在有利的天气形势背景下发挥了重要的影响作用，触发了地面辐合线。

关键词：龙卷，天气过程，物理量，中气旋，佛山。

参考文献

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

2 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（3）：11-13．

3 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．

4 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．

5 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．

6 俞小鼎，姚秀萍，熊延南，等．多普勒天气雷达原理与业务应用[M]．北京：气象出版社，2006：130-145．

7 伍志方，叶爱芬，胡胜，等．中小尺度天气系统的多普勒统计特征[J]．热带气象学报，2004，20（4）：391-400．

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

9 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．

10 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．

11 魏文秀，赵亚民．中国龙卷风的若干特征[J]．气象，1995，21（5）：36-40．

12 黄先香，炎利军，王硕甫，等．[J]．广东气象，1995，21（5）：36-40．

13 黄姚钦，陈小芸．一次龙卷风天气的热力学动力学分析[J]．广东气象，1996，18（2）：17-19．

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