

2020年中国龙卷过程及灾情特征

蔡康龙^{1, 2} 黄先香^{1, 2} 李彩玲¹ 炎利军¹ 李兆明¹ 顾伯辉³ 何秋蕊¹ 张晶晶¹

(1 佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000; 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3 佛山三水气象局, 三水 528100)

摘要: 2020年我国可确认的龙卷天气过程有13次、共20个龙卷, 发生在5—9月。其中, 强龙卷有8个, 分别是EF2级龙卷7个和EF3级龙卷1个。7月22日安徽宿州EF3级龙卷的路径长达62 km, 是我国近10年来, 使用无人机进行详细灾情调查获得的最长的龙卷路径。EF1级或以上级别龙卷有13个, 略低于2004—2013年全国记录到的14.3个/年, EF2级龙卷数量是2004—2013年的年平均数2.0个的3.5倍。2020年的龙卷过程都是西风带龙卷, 没有台风龙卷记录。2020年现场调查的9个龙卷, 路径的主要下垫面都是开阔平地, 具有明显的树木倒向呈辐合状、破坏范围纵横比大、浅色破坏条迹等地面灾情特征。

关键词: 中国龙卷过程, 灾情调查, 地面灾情特征, 2020年

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.007

龙卷生消快, 影响范围小, 但破坏力极强, 可在短时间内造成重大人员伤亡和财产损失^[1-4]。龙卷大风、下击暴流大风和直线大风是强对流风暴常导致的3类灾害性大风^[5]。龙卷大风破坏带(条迹)一般狭长, 沿破坏带会有明显辐合状树木倒伏; 下击暴流大风造成破坏区域一般比较宽, 树木倒伏则呈明显辐散特征。通常龙卷等灾害性大风空间尺度小, 影响时间短, 很少能直接被气象观测站观测到, 因此开展龙卷等灾害性大风现场灾情调查, 确认风灾类型、龙卷路径、龙卷强度和范围以及龙卷结构等对促进龙卷等强对流天气的研究有重要意义^[6-8]。

目前龙卷定级一般采用国际通用的EF等级来判定龙卷风级别^[9], 2019年8月1日中国气象行业标准《龙卷强度等级》QX/T 478—2019(以下简称行标)开始实施, 本文将结合EF等级和龙卷等级行标两套标准对2020年龙卷过程进行定级分析。

2020年佛山市龙卷风研究中心共参与了国内8次龙卷过程共9个龙卷的灾情调查, 包括6个强龙卷过程(EF3级1次, EF2级5次)、2个中等龙卷过程(EF1级)和1个弱龙卷过程(EF0级)。另外, 根据当地气象部门提供或网络权威发布, 还收集了5次龙卷过程

的10个龙卷活动情况(表1)。

从表1可以看出, 2020年我国能够确认的龙卷天气过程有13次, 确认发生20个龙卷, 其中EF1级或以上级别强度龙卷有13个, 略低于2004—2013年全国记录到的年平均EF1或以上级龙卷数量14.3个^[10]; EF2级龙卷有7个, 是2004—2013年全国记录到的年平均EF2或以上级龙卷数量2.0个^[10]的3.5倍, 分别发生在江苏高邮、江苏太仓、湖北荆门、江苏连云港、江苏盐城、黑龙江绥化和内蒙古包头; EF3级龙卷有1个, 发生在安徽宿州。龙卷发生时间集中在5—8月, 其中7月最多, 有8个龙卷生成, 占总数的42%。出现龙卷的7个省(市)中, 江苏龙卷最多, 有5个; 其次是广东和上海, 均有3个。13次龙卷过程全部发生在西风带系统中, 没有台风龙卷记录。有1人在龙卷天气中遇难、62人受伤。其中, 导致受伤人数较多是“2020.08.09”内蒙古包头龙卷和“2020.07.22”江苏灌南龙卷风, 受伤人数分别为33人和21人。从2016—2020年龙卷等风灾全国分布图(图1)可见, 龙卷主要分布在沿海一带、东北地区、内蒙古等地方, 这与范雯杰^[10]统计的2004—2013年全国龙卷分布比较相符。

灾情调查要注重方法, 才能保证灾情调查在更短时间收集到更多有效的灾情信息。首先, 收集新闻媒体或者互联网等信息尽量确定灾害发生时间、地点和灾情; 然后, 利用地面自动站观测风场和雷达观测径向风场进一步综合判断明确风灾的可能强度、影响区域和可能成因, 并结合灾害情况综合确定现场调查的大致区域和调查路线; 再有, 对受灾现场进行无人机航拍、走访、勘查取证、影像资料收集; 最后, 结

收稿日期: 2020年12月3日; 修回日期: 2020年12月18日
第一作者: 蔡康龙(1988—), Email:35642480@qq.com
通信作者: 黄先香, Email:fsqxj@163.com
资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-A03); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18); 佛山市气象局科技项目(201906)

表1 2020年中国龙卷活动情况及灾情

编号	时间	发生地点	强度等级	环流型	信息来源	伤亡情况
1	20200505 11: 00	福建三明	不详	切变线	官方报道	无
2	20200518 14: 06—14: 07	广东江门台山	EF0 (行标一级)	高空槽	现场调查	无
3	20200531 18: 59—19: 01	广东佛山高明	EF1 (行标二级)	高空槽	现场调查	无
4	20200601 10: 50—10: 56	广东江门开平	EF1 (行标二级)	高空槽	现场调查	无
5	20200612 13: 49—14: 00	江苏高邮	EF2 (行标三级)	低涡切变	现场调查	4人受伤
6	20200624 13: 48—14: 22	内蒙古锡林浩特	不详	冷涡	官方报道	/
7	20200627 19: 00前后	湖北荆门	EF2 (行标三级)	低涡切变	现场调查	无
8	20200706 09: 10前后	江苏昆山	EF0 (行标一级)	高空槽、切变线	气象部门	/
	20200706 09: 45—10: 00	江苏太仓	EF2 (行标三级)	高空槽、切变线	气象部门	无
	20200706 10: 30前后	上海崇明港沿镇	EF1 (行标二级)			
	20200706 10: 40前后	上海崇明陈家镇	EF1 (行标二级)	高空槽、切变线	气象部门	1人伤
	20200706 10: 45前后	上海崇明向化镇	EF0 (行标一级)			
20200722 17: 50—18: 59	安徽宿州	EF3 (行标三级)	低涡切变	现场调查	1人死亡	
20200722 21: 48前后	江苏宿迁沭阳镇	EF1 (行标二级)		气象部门	/	
20200722 22: 00前后	江苏连云港灌南镇	EF2 (行标二级)	高空冷涡和地面气旋	现场调查	/	
9	20200722 22: 40前后	江苏盐城响水镇	EF2 (行标二级)		气象部门	21人伤
10	20200809 11: 47—12: 09	黑龙江绥化	EF2 (行标三级)	高空槽和切变线	现场调查	无
11	20200809 15: 33—15: 43	内蒙古包头	EF2 (行标三级)	高空槽	现场调查	33人伤
12	20200814 16: 00前后	黑龙江密山	不详	冷涡	官方报道	2人伤
13	20200925 16: 00前后	香港赤鱗角机场	不详	短波槽	气象部门	无



图1 2016—2020年中国风灾分布

合多种气象数据，经多方会商综合确认的龙卷及其灾害等级。由于气象探测技术手段和能力所限，本文主要对2020年佛山市龙卷风研究中心参与灾情调查的9个龙卷过程进行分析，灾情资料主要是通过与当地气象部门共同开展的龙卷现场灾情调查，再结合气象监测资料等，经多方会商综合确认龙卷路径及其灾害等级，但由于龙卷尺度小、生消快等特点，灾调和分析过程中难免存在个别个例强度定级等还需商榷。

1 龙卷过程概况

1.1 5月龙卷

5月有3次龙卷过程，1次发生在福建，2次发生在

广东。

5月5日上午，受切变线影响，福建省三明市出现短时强降水、大风等强对流天气，其中11: 00前后沙溪河上出现龙卷风，有市民拍摄到龙卷视频，没有灾情，无法对此龙卷的强度进行定级。

5月18日14: 06—14: 07，受高空槽影响，广东省江门市台山市赤溪镇冲金村委会附近出现龙卷，有市民手机拍到了龙卷视频。龙卷在冲金村村委会约50 m外水稻田附近触地，移动方向大致是自西向东，造成水稻和蔬菜棚架倒伏，并在下垫面留下较明显的轨迹，龙卷路径长约35 m，宽约11 m，无人员伤亡，龙卷破坏程度相当于EF0级，对应我国行业标准一级，属于弱龙卷（图2）。

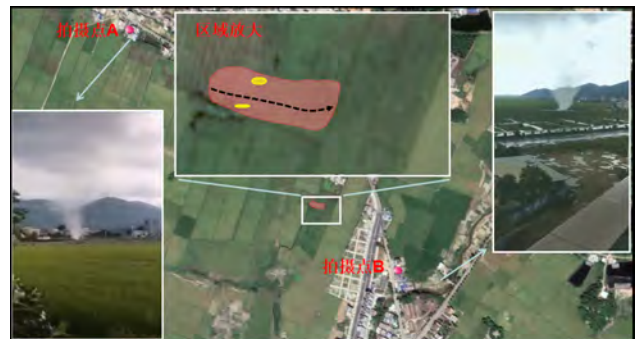


图2 5月18日江门台山龙卷路径及受灾范围 (红色阴影区域为大风影响范围;黄色阴影区域是EF0范围;黑色带箭头虚线表示龙卷移动路径及方向)

5月31日18: 59—19: 01，受高空槽影响，广东佛山市高明区更合镇出现龙卷，造成停步工业区附近

的铁皮厂房受损、树木倒伏和折断，超过80%钢槽结构的铁皮房顶被掀，两棵直径约10 cm的芒果树被拦腰截断，没有人员伤亡。这次过程没有拍到直观的龙卷漏斗视频，但停步工业区的监控视频拍到被卷起的厂房铁皮及其他碎片呈逆时针方向旋转，旋转时间超过1 min（图3）。龙卷造成的破坏区域狭长^[11]（图4），移动方向大致是西北向东南，影响路径长度约670 m，最大破坏直径约80 m，龙卷破坏程度相当于EF1级，对应我国行业标准二级，属于弱龙卷。



图3 5月31日佛山市高明区更合镇龙卷监控视频截

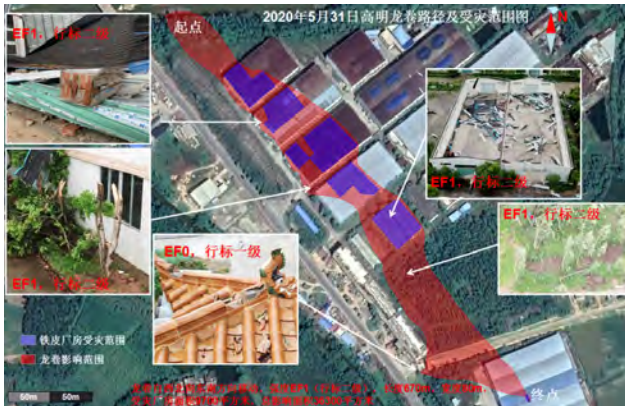


图4 5月31日佛山市高明区更合镇龙卷路径及受灾范围（红色阴影为破坏范围，蓝色阴影表示厂房受损区域）

1.2 6月龙卷

6月有4个龙卷过程，分别发生在广东江门、江苏高邮、湖北荆门和内蒙古锡林浩特。

6月1日10:50—10:56，受高空槽影响，广东江门开平市大沙镇大沙河水库附近出现龙卷，附近的居民拍摄到5 min的龙卷视频。龙卷在大沙镇沃江村北侧生成，向东北方向移动，跨过大沙河水库经Y756乡道上岸后在乡道北侧约230 m草地处消散，造成沃江村树木倒伏、树枝折断，砖瓦房屋顶瓦片零散吹落，Y756乡道北侧花木场树木折断、铁门吹走等灾害，龙卷路径长度约1200 m，最宽位置约100 m（图5），破

坏程度相当于EF1级，对应我国行业标准二级，属于弱龙卷。



图5 6月1日江门开平龙卷路径及受灾范围（红色区域表示龙卷影响范围）

6月12日13:49—14:00，受低涡切变影响，江苏省扬州市高邮勤王村和管伙村发生龙卷，导致水泥围墙倒塌、房顶及玻璃受损，成片树木折断、电线杆折断，简易养殖厂房倒塌。如图6所示，龙卷是从西向东移动，影响路径约3.5 km，最大宽度约320 m，龙卷破坏程度相当于EF2级，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。

6月24日13:48—14:22，受冷涡系统影响，内蒙古自治区锡林郭勒盟东南方的阿利嘎哇乌拉山峰附近出现龙卷，有较多目击者拍摄到龙卷视频，龙卷出现在开阔的草原上，没有灾情，无法对此龙卷的强度进行定级。

6月27日19:00前后，受低涡切变影响，湖北省荆门市发生龙卷，龙卷经过上湾村、泉洼村、李宁物流园、荆门检验检测产业园、安能物流、阳光大道，柳家沟，污泥资源开发中心（图7）。从西南向东北移动，影响路径约19 km，最大宽度约160 m，破坏程度相当于EF2级，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子围墙倒塌等。龙卷漏斗云触地在开阔田地上，在上湾村到李宁物流园之间留下明显的浅色条迹，在尾段经过山丘地形（图7中的白色方框）后就开始消散。

1.3 7月龙卷

7月有2次龙卷过程共出现9个龙卷，分别发生在江苏昆山、江苏太仓、上海崇明（3个）、安徽宿州、江苏宿迁、江苏连云港和江苏盐城。

7月6日上午，受高空槽和切变线影响，09:10前后江苏省昆山市出现龙卷，灾情较轻，强度为EF0级09:45—10:00太仓市出现龙卷，造成房屋外墙

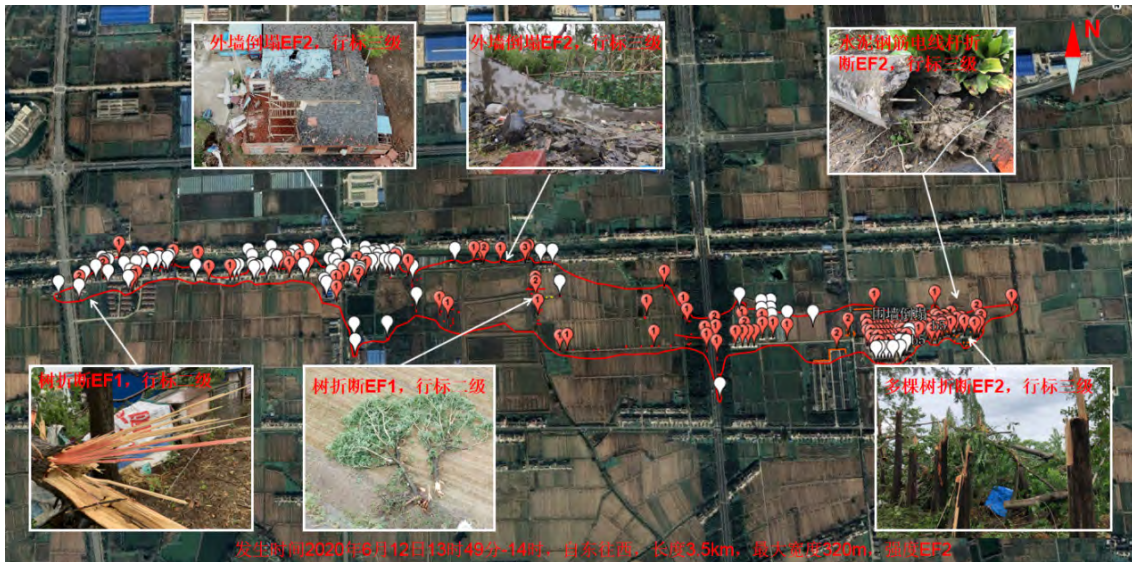


图6 6月12日江苏省扬州市高邮破坏范围（红色区域表示龙卷影响范围）

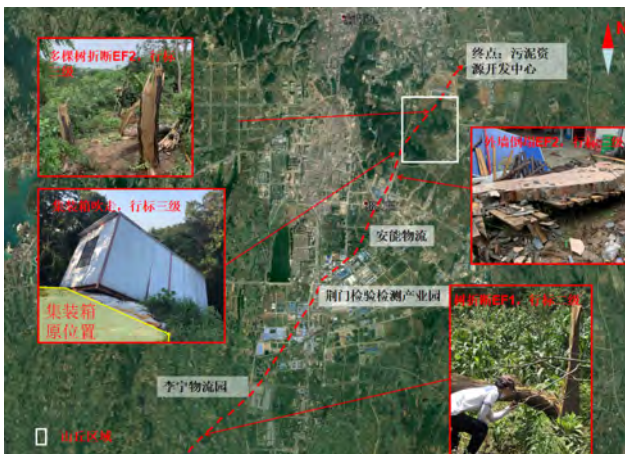


图7 6月27日湖北省荆门市龙卷路径（红色带箭头虚线）

倒塌，成片树木折断，强度达到EF2，属于强龙卷；10:30、10:40、10:45上海市崇明区港沿镇、陈家镇和向化镇先后出现EF0~EF1级弱龙卷，造成房屋受损、树木和田间作物倒伏，陈家镇裕西村住户辅房外墙坍塌，有1人受伤。

7月22日17:50—18:59，受低涡切变影响，安徽省宿州市发生龙卷，龙卷从南向东北移动，经过埇桥区蕲县镇、芦岭镇、姜庄镇和灵璧县，影响路径约62 km，最大宽度约800 m（图8）。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子围墙倒塌等，破坏等级为EF3，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。初步统计，房屋倒塌损坏670余间，受灾人口8720余人，死亡1人。这是我国近年进行详细灾情调查的破坏路径长度最长的一个龙卷。

7月22日22:00前后，受高空冷涡和地面气旋影响，江苏连云港灌南镇发生龙卷，龙卷从西南向东北



图8 7月22日安徽省宿州市发生龙卷路径（黑色带箭头虚线）

移动，经过条房村，影响路径约3.1 km，最大宽度约300 m（图9）。主要灾情指示铁路路灯杆和成片硬木折断、桥梁围栏倒塌等，破坏等级为EF2，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。



图9 7月22日江苏连云港灌南镇发生龙卷影响范围（红色区域）

7月22日21:48前后、22:40前后,受高空冷涡和地面气旋影响,江苏省宿迁市沭阳镇、盐城市响水镇先后出现龙卷,根据当地气象部门的灾情调查资料,两次龙卷天气造成村民房屋不同程度受损,部分地区电力等基础设施受损,部分树木折断,响水镇龙卷强度达到EF2,属于强龙卷,而沭阳镇龙卷强度达到EF1。

1.4 8月龙卷

8月出现3个龙卷,分别发生在黑龙江省绥化市、内蒙古区包头市和黑龙江密山市。

8月9日11:47—12:09,受高空槽和切变线影响,黑龙江绥化市绥胜满族镇发生龙卷,龙卷从西南向东北移动,经过四排村、刘家屯、郭家村和三发村,影响路径约13.5 km,最大宽度约300 m(图10)。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子水泥围墙倒塌和电线杆折断等,破坏等级为EF2,对应我国行业标准三级,属于强龙卷。



图10 8月9日黑龙江绥化市龙卷影响范围(红色区域)

8月9日15:33—15:43,受高空槽影响,内蒙古包头市武川县发生龙卷,15:38前后龙卷经过包头市希拉穆仁镇天鹅湖牧区(图11),市民录下了多段龙卷视频。根据目击者描述,龙卷影响时,伴有1.5 cm大小冰雹,石头、杂物等满天飞,天昏地暗,房屋门窗、大小轿车、屋顶瓦片、彩钢结构蒙古包等遭到严重破坏,部分墙体吹倒,院内烧烤炉、儿童车、娱乐卡车等吹起抛过房屋飞出数米。龙卷从西南向东北移动,影响路径约10 km,最大宽度约450 m。造成天鹅湖景区接待点33人不同程度受伤,其中游客24人、旅游点务工人员9人,188顶蒙古包受损或倾倒,员工生活区、砖混结构蒙古包钢制回廊等多处设施被毁,附近5户牧民房屋及车辆受损。此次龙卷破坏等级为EF2(图11),对应我国行业标准三级,属于强龙卷。



图11 8月9日内蒙古包头龙卷移动路径(红色带箭头虚线)

8月14日16:00前后,受冷涡影响,黑龙江省密山市富源乡珠山村富国组遭受龙卷风袭击,造成铁皮房盖被掀翻、电线杆和路灯被刮倒、成片树木折断,有68户民宅受损,2人受伤,由于没有收集到更全面灾情资料,龙卷强度待定。

1.5 9月龙卷

9月25日16:00前后,受短波槽影响,香港赤鱗角机场出现龙卷,有目击者拍摄到相关的视频,但缺少相关灾情资料,龙卷破坏等级无法确定。

2 龙卷破坏特征

龙卷地面灾情特征通常表现为树木倒向呈辐合状、破坏范围纵横比大,地面浅色破坏条迹。

2.1 纵横比

表2给出了9个龙卷的灾调信息。可以看出,龙卷的EF等级强度与长度、最大宽度和纵横比(长度与最大宽度之比)成正相关,强龙卷的纵横比大于10,特别是安徽宿州EF3龙卷的纵横比高达77.5,纵横比大也是龙卷区别于下击暴流的一个重要地面灾情特征。但是范雯杰^[10]在分析1961—2010年33次强龙卷的路径信息时,龙卷风路径宽度与其强度的暂时不存在明确的对应关系,有可能是因为1961—2010年期间的灾调手段较落后及对最大宽度的定义存在偏差而造成的。

2.2 辐合倒向

龙卷经过树林时,龙卷等级强度越强,地面的辐合倒向(尺度是龙卷的宽度)特征越明显。在地面灾情未处理的情况下,此辐合倒向特征很容易识别到,这也是及时开展灾情调查的原因之一。图12a是江苏省高邮市龙卷个例中,G233国道西辐合倒向的树木,图12b是安徽省宿州龙卷个例中,刘村西吴成片呈辐合状折断的杨树。若龙卷比较弱,强度达不到令树木

表2 现场灾调龙卷信息表

编号	时间	龙卷发生地点	强度等级	长度/m	最大宽度/m	纵横比
1	20200518 14: 06—14: 07	广东江门台山	EF0 (行标一级)	35	11	3.2
2	20200531 18: 59—19: 01	广东佛山高明	EF1 (行标二级)	670	80	8.4
3	20200601 10: 50—10: 56	广东江门开平	EF1 (行标二级)	1200	100	12
4	20200612 13: 49—14: 00	江苏高邮	EF2 (行标三级)	3500	320	11
5	20200627 19: 00前后	湖北荆门	EF2 (行标三级)	19000	160	11
6	20200722 17: 50—18: 59	安徽宿州	EF3 (行标三级)	62000	800	77.5
7	20200722 22: 00前后	江苏连云港灌南镇	EF2 (行标三级)	3100	300	10.3
8	20200809 11: 47—12: 09	黑龙江绥化	EF2 (行标三级)	13500	300	45
9	20200809 15: 33—15: 43	内蒙古包头	EF2 (行标三级)	10000	450	22.2

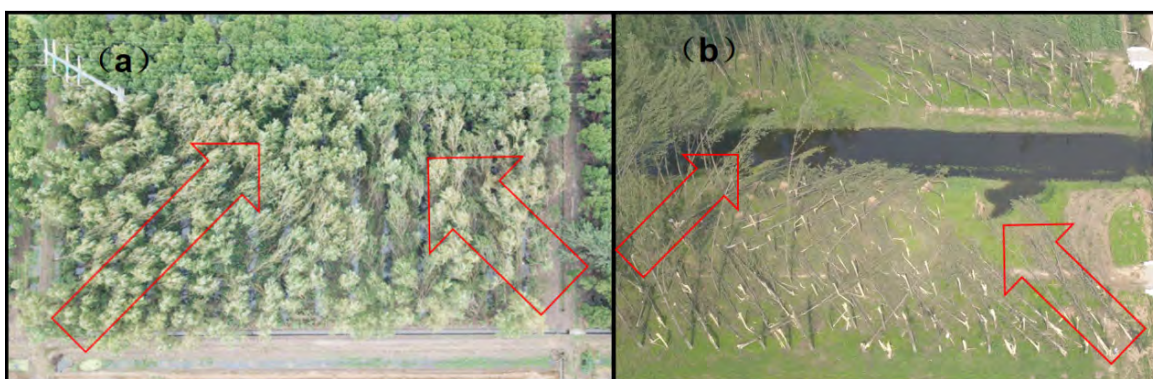


图12 江苏省高邮市龙卷 (a) 和安徽省宿州龙卷 (b) 个例中辐合倒向的树木

倒伏，或者龙卷强度较强，但没有经过树林，此辐合倒向特征则难以识别。

2.3 浅色条迹

强龙卷容易在开阔的植被（草地、水稻田、玉米地）留下浅色的条迹，植被在龙卷极高风速的冲击作用下，叶子及枝干容易被吹走，龙卷等级强度更高时，如2019年7月3日辽宁省开原市龙卷在榆树堡村的草地留下一条清晰的白色条迹。图13a 安徽省宿州龙卷在沈寨村附件留下的浅色条迹，图13b是黑龙江绥化

化龙卷在郭家村留下的浅色条迹，这个特征都是龙卷特有，在灾情调查时，可以根据此特征判断龙卷的特征方向。

3 总结与讨论

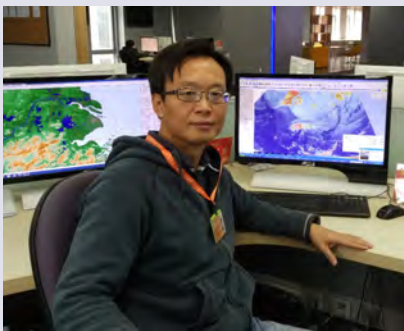
2020年我国可确认的龙卷天气过程有13次、共20个龙卷，龙卷数量较2004—2013年的年平均统计结果是属于偏多年景，EF2级强度龙卷数量是2004—2013年的年平均数的3.5倍^[11]。2020年龙卷全部是西风带龙卷，没有台风龙卷记录。台风龙卷比常年偏少，可能



图13 安徽省宿州龙卷 (a) 和黑龙江绥化 (b) 个例中浅色条迹

(下转53页)

专家点评：“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用



上海市中心气象台首席戴建华

相较于机械扫描的常规业务天气雷达，相控阵阵列天气雷达的覆盖仰角广、时空分辨精度高，对尺度小、变化快的近距离对流天气监测优势显著，表现在以下几个方面：1) 高空间分辨率：有助于获取中小尺度对流降水的动力和热力精细结构，为监测和预警冰雹、下击暴流、龙卷等中小尺度灾害性天气提供支撑；2) 高垂直空间覆盖：多波束观测可以增加垂直方向空间探测范围和连续观测，获取垂直方向上对流降水的完整结构，为对流降水发展演变研究奠定基础；3) 高时间分辨率：低于1 min间隔观测，可捕捉中小尺度对流降水发展过程中重要的演变特征；4) 分布式阵列协同观测：进一步提升观测的针对性和一致性，可获取更加精细、全面的热力、动力信息。

因此，相控阵阵列天气雷达的重要价值之一是有助于提高对中小尺度对流天气的科学认识。1) 为探索新的发现提供了手段：对流天气的精细结构，如上升、下沉运动区、

各类中小尺度涡旋甚至龙卷等，一个典型的例子是2020年7月6日上海崇明迷你龙卷，相控阵雷达可以连续(30 s间隔)、精细(30 m距离库)地观测到水平尺度小于250 m、高度低于1.8 km、生命史不到18 min的龙卷涡旋的发展演变，揭示了龙卷涡旋自低层向上发展加强的过程，这些是周边的业务雷达无法识别的。2) 借助双偏振技术，可获取中小尺度对流云中的相态分布及其动态演变，从而提高对云物理过程的科学认识。3) 深入探索：借助阵列雷达的新型观测能力，通过业务观测和科学试验，进一步提高对中小尺度对流天气中动力结构及其演变的认识，探索其形成机制机理。

另外，相控阵阵列天气雷达还可有效推进强对流天气预报预警业务的发展：一方面，通过高时空精细化的观测，提高对中小尺度对流降水的探测能力，对临近预报预警技术的提升起到明显的促进作用；另一方面，其新型观测手段和协同观测方式对传统技术方法将有明显的提升，如协同观测的时空一致性将大大提升多雷达风场反演的精度。

经过2年多的业务观测试验，相控阵阵列雷达已展示其优势，对研究我国特色的中小尺度对流天气提供了有效手段。

(上接45页)

与今年生成和登陆我国的台风个数比常年偏少相关。龙卷发生时间集中在5—9月，其中7月最多，出现在湖北省、江苏省、安徽省和上海市，均为我国龙卷相对高发省(市)。江苏在同一过程出现3个龙卷，当上游出现龙卷，上下游的气象局部门联动可以更好对龙卷进行预警。

相对2018年和2019年的龙卷伤亡信息^[7-8]，2020年的龙卷数量有所增加，但致灾性比2019年低。7月22日安徽宿州EF3级龙卷的路径长达62 km，是我国近10年来利用微型无人机进行详细灾情调查的破坏路径长度最长的一个龙卷。2020年现场调查的9个龙卷中，除6月27日湖北荆门龙卷有部分路径经过山丘地形，其他龙卷风的路径的主要下垫面都是开阔平地，下垫面的粗糙程度与龙卷存在某些联系，还值得做进一步研究。部分强龙卷地面灾情特征具有树木倒向呈辐合状、龙卷破坏范围纵横比大，地面浅色破坏条迹，这些地面灾情特征对灾情调查判断灾情性质和龙卷的移向有重要作用。

致谢

感谢国家气象中心、江门市气象局、台山市气象局、开平气象局、高明区气象局、江苏省气象局、荆门市气象局、

宿州市气象局、盐城市气象局、响水县气象局、包头市气象局、武川市气象局、达茂旗气象局、绥化市气象局等对龙卷灾害调查提供的支持和帮助。

参考文献

- [1] 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. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [2] 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. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [3] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [4] 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. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [5] Fujita T T, Wakimoto R M. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Monthly Weather Review, 1981, 109(7): 1438-1456.
- [6] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [7] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 51-55.
- [8] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [9] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [10] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [11] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 702-724.