

微型无人机在龙卷灾情调查中的应用

蔡康龙^{1,2} 植江玲¹ 李彩玲¹ 黄先香^{1,2} 李兆明¹ 彭斯琪³

(1 广东省佛山市气象局/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 广东省佛山三水区气象局, 三水 528100)

摘要: 微型无人驾驶飞机(简称无人机)是龙卷灾害进行精细调查重要工具之一。无人机航拍可获取灾情的高清图像,为龙卷灾情特征分析提供资料。简要介绍了龙卷灾情调查的常用无人机型号的性能和特点,如不同情形的无人机型号选择和相关备件搭配、无人机起飞条件、作业的天气条件、无人机续航配置,最后结合的灾情调查个例总结出无人机灾情调查航拍方法、灾情指示物识别的四个要点和识别龙卷移动方向和宽度的优势。

关键词: 微型无人机, 航拍, 精细调查, 灾情特征, 应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.010

Application of Miniature Unmanned Aerial Vehicle in Tornado Damage Survey

Cai Kanglong^{1,2}, Zhi Jiangling¹, Li Cailing¹, Huang Xianxiang^{1,2}, Li Zhaoming¹, Peng Siqu³

(1 Foshan Meteorological Service /Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Sanshui Meteorological Service, Foshan 528100)

Abstract: Miniature unmanned aircraft vehicle (UAV) is one of the important tools of tornado damage precise survey. UAV can obtain high-precision image and video to analyze the tornado damage characteristics. This paper introduces features and performance of common UAV that using to tornado damage survey, such as UAV selection and related spare parts in the different situations, weather condition, take-off condition, range configuration. In addition, this paper summaries the damage survey method of UAV, the four main points to identify damage indicators and the advantages of identifying tornado moving direction and width by using damage survey examples.

Keywords: miniature unmanned aerial vehicle, air photographs, precise survey, damage characteristic, application

0 引言

龙卷是大气中最强烈的涡旋现象^[1], 容易导致重大经济损失和人员伤亡。例如, 2015年10月4日广东佛山EF3级造成4人死亡、80人受伤和大量建筑损毁^[2-3], 2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县EF4级龙卷造成98人死亡、800多人受伤和大量建筑损毁^[4-5], 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷^[6]。根据佛山龙卷风研究中心龙卷灾情调查资料, 2016—2019年我国可确认的龙卷有40次, 平均每年有8次龙卷。这些龙卷强度定级

及灾情指示物^[7]的分析主要基于无人机航拍的资料, 无人机成为现场天气调查的最重要的工具之一。

无人机主要包括飞行器、控制台、飞行控制系统、图像传输系统、云台及相机等。无人机具有成本低, 操作简单等特点, 能快速获取高分辨率、高精度、高时效的影像^[7-9], 非常适合用于地震、泥石流、台风、下击暴流和龙卷等自然灾害的灾情评估工作^[10-14]。例如, 2015年使用无人机对“东方之星”客轮翻沉事件进行风灾调查^[14-15]。由于出现龙卷灾情后, 现场往往会被快速清理, 造成树木倒向和风灾造成的碎片等痕迹有可能被破坏而变得不可信, 给龙卷风灾情特征分析增加了难度。因此, 灾情调查人员要及时到达现场, 利用无人机快速航拍原始的灾情, 获取第一手资料进行分析龙卷强度、龙卷灾害带长度和宽度等特征。

本文根据多次灾情调查的实践与探索, 介绍常见的无人机性能、无人机作业因素、无人机在龙卷灾情

收稿日期: 2020年6月3日; 修回日期: 2020年8月21日
第一作者: 蔡康龙(1988—), Email: 35642480@qq.com
资助信息: 灾害天气国家重点实验室开放课题
(2020LASW-A03, 2018LASW-B18); 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项
(2019B020208015); 佛山市气象局科技项目
(201906)

调查方法和灾情指示物识别要点。

1 灾情调查对无人机性能的需求

进行龙卷灾情调查常见的无人机型号有大疆御mini、御2、精灵4、悟2（性能参数如表1所示），这几款无人机都可以满足灾情调查基本的航拍需求，但在不同的龙卷灾情调查需求选择合适的无人机型号可提高作业效率。从到达受灾区域时间快慢的角度考

虑，若受灾区是在省外，调查组优先搭乘民航客机，此时应该携带轻巧的御系列无人机。与悟2无人机对比，御系列无人机更轻，电池体积和容量更小，单电池的持续时间更长，在不要求更高清的图像质量情况，航拍灾情航拍效率更高；若受灾区在省内，优先选择自驾汽车，则选择悟2提高航拍图像的质量。

考虑无人机返航时间、无机电池折旧等损耗

表1 常见大疆系列无人机型号和性能参数
Table 1 Types and performance parameters of the common DJI UAVs

型号	轴距/mm	起飞重量/g	照片最大分辨率	录像最大分辨率	抗风能力	飞行时间/min	单块电池重/g
御mini	213	249	4000×2250	2720×1530	4级风	30（单块）	100
御2	354	905	5472×3684	3840×2160	5级风	31（单块）	297
精灵4 RTK	350	1391	5472×3078	4096×2160	5级风	30（单块）	468
悟2	605	4250	6016×3200	6016×3200	5级风	23（双块）	515

时间，表1中各款无人机航拍作业时间约为飞行时间的0.6倍，所以表1的无人机实际作业时间都小于20 min。无人机灾情调查内容主要包括寻找大致灾情以确定龙卷的走向、航拍灾情的视频和航拍灾情指标物的特征（以照片为主）。2019年9月17日广东省佛山三水区发生龙卷，持续时间约23 min，移动路径长度达18 km^[16]。该龙卷灾情调查资料统计可知，单无人机单日最长的航拍视频时间约为92 min，其视频大小约29 GB。若此次作业由御2无人机执行，航拍灾情的视频要消耗6块电池的电量，寻找大致灾情和航拍灾情指标物这两部分作业消耗电池数量需根据实际情况而定，一般需准备4块电池。如果龙卷灾情范围，可以使用多无人机作业和车载充电器补充电池电量。

此外，还要准备足够的电池给遥控器的外接显示屏（包括手机，平板和专业显示屏）使用，御系列和精灵系列无人机的遥控器外接显示屏一般是手机，而悟2则使用平板或者高亮屏，使用充电宝给手机和平板的补充电量，高亮屏则准备2~3块配套的电池。在配备10次飞行的电池的无人机情况下，精灵和悟2无人机（一次起飞消耗两块电池）的装备箱比较笨重，其中悟2装备（包括放置无人机箱和装着20块电池的防静电箱）重量约25 kg，在乘坐民航时较为麻烦，但是航拍视频和相片质量高。而由于御mini和御2都是折叠式无人机，重量轻体积小，方便携带，但御mini无人机抗风能力较差，录像分辨率最低，灾情航拍效率较低；而御2不存在这样的问题。综合分析：乘坐公共交通工具到灾区可以优先选择御2无人机，全程自驾到灾区则推荐使用精灵和悟2无人机。

2 无人机作业的影响因素

无人机能否顺利航拍的龙卷灾情，取决以下方面

的因素。

2.1 起飞准备

无人机作业前要了解灾区的空域属性，应向相关部门了解限制区域的划设情况^[17]。无人机在非禁飞区域（除飞行禁区、限制区和危险区外）作业情况下，必须先进行实名登记和获取飞行执照才能作业，作业的过程要符合安全飞行的相关规定，如飞行高度要保持在120 m以下等规定。若在禁飞限制区域必须到灾区的行政归属地的公安机关或者民航局等机关申请。

2.2 天气条件

龙卷灾调中无人机作业常考虑的天气条件有大风环境和雨天情况。

2.2.1 大风环境情况下

有部分龙卷发生在临近海边的地方，无人机在这种地方作业，容易遇到大风情况。除了御mini无人机外，表1中的其他型号无人机可抵抗5级风力（约10 m/s）。在大于5级风力环境中，无人机将无法稳定飞行，甚至会出现无人机被大风吹走的问题。当无人机提示大风警告，操作者应该及时降低飞行高度并尽快返航。

2.2.2 有明显降雨情况下

灾情刚刚发生后，天气条件尚不稳定，无人机在航拍过程看容易遇到雨水，不但会影响航拍视频的质量，而且会对无人机造成一定程度的损坏，遇到此情况应该及时返航。表1中的无人机均属于消费级别的无人机，不具备防水的能力。大疆经纬200系列有液体防护3级的功能，可以在小雨情况下飞行，但下雨影响航拍视频的质量。

2.2.3 有雷电及浓雾情况下

无人机在航拍过程中出现雷电及浓雾情况下，都

应该立即返航，保证安全作业。

3 航拍方法

根据气象资料和网络拍摄视频对灾情进行提前判断，如受灾区域内的气象自动观测站气压出现短暂的下降，瞬时风速短暂增大和天气雷达资料径向速度图上低层出现中等到强的中气旋和类龙卷风涡旋特征^[18]，结合网络拍摄视频或者图片有明确漏斗状云，可以初步判断是龙卷灾情。下面主要结合2019年4月13日广东省徐闻县龙卷（以下简称徐闻个例）的灾情分析给出龙卷灾情航拍的具体步骤，能有效说明灾情航拍的相关工作开展情况。



图1 徐闻个例无人机航拍路线图

Fig. 1 UAV aerial route map in Xuwen County

步骤1：应该根据相关媒体报道或者相关部门的资料找出至少一个明显受灾点的地理位置作为第一个起飞点。在徐闻个例中，和安镇政府（图1中的起飞点1）是灾情严重的地方之一，考虑到人口密集的地方灾情清理会比较快，第一个航拍点选择点1，并在手机导航上记录点1以及每次无人机起飞点的位置。

步骤2：无人机一般以50 m高度以上和云台俯角 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 航拍搜索点1的东、南、西、北四个方向500 m以内（图1中点1绿色箭头所代表的飞行方向）的信息，若实际灾情范围较大，可调整无人机飞行高度和搜索距离以提高搜索的范围，根据四个方向的灾

情特征找出灾情明显的点作为下一个航拍起飞点，简称“十字搜索法”。遇到灾情范围较大的情况，悟系列的无人机可以使用广角镜头，同时给电池进行充电。低空航拍（一般30 m高度以下的航拍）第一个起飞点到第二个起飞点之间的灾情。考虑到无人机在低空飞行时，较高的建筑遮挡和地磁场的变换会影响无人机与遥控器之间的图像信号传输，无人机航拍起飞点之间的距离保持在400~500 m可以保证其信号的正常传输，如图1中的2、3和4点主要是鱼塘和海湾，无人机可适当增加低空飞行距离以提高灾情调查的效率。

在徐闻个例中，按照高空搜索步骤操作后，在无人机向东飞行超过120 m、向南和向西飞行超过100 m后找不到明显灾情，而向北飞行接近500 m时，灾情比较连续，左侧的灾情比右侧的明显，故选择点1以北400 m左右处选址灾情明显并且方便无人机起飞降落操作的点2作为下一个起飞点，点2的灾情主要是树木倒伏和折断（图略）。

低空航拍点1和点2之间灾情，记录各个灾情指示物，并初步分析树木倒伏方向及房屋的受损情况，结合灾情的整体情况对龙卷的移动路径进行判断。图2a（位于图1中的A点）中根据的黄槿树（硬木）倾倒方向、房屋顶过半瓦片吹落方向和电线杆折断的倒向整体偏向东南，判断龙卷在此位置的走向大致是东南方。图2b树木倒伏是点1和安镇镇政府的灾情，该位置的树木整体倒向是东南方，可初步判断点1位置的龙卷移动方向是东南方。由于龙卷移动方向在短距离内比较一致，由此可初步判断点2处的龙卷以东南方向移动到点1处，下一步航拍操作点1向东南和点2向西北搜索。

步骤3：下一个航拍起飞点优先按照步骤2进行航拍和分析，若航拍过程中灾情依然比较连续（图1的点2、点3、点4、点5、点6、点7相邻两点之间），则只使用步骤2；若在航拍时出现较大间隔（100 m以上，要结合实际地面情况而定，如大面积的鱼塘，灾情就显现不连续，此时可以增大判断间隔）的灾情不连续的情况（图1的点4和点7），使用步骤1的“十字搜索法”，按照图1的点4和点7的绿色箭头的四个方向搜索航拍，当出现灾情破坏等级变小，受灾指示物从少到无，可以初步判断龙卷灾情的起点和终点，但也存在因为龙卷跳跃或者再次升起^[19]而造成灾情不连续的情况。在龙卷移动轨迹跟点2到点3白色虚线轨迹出现较大偏差时，根据航拍的灾情分布调整无人机航拍路线，保持无人机航拍到有效的灾情。



图2 徐闻个例中灾情指示物
(a) 图1中位置A的灾情图; (b) 和安镇镇政府的灾情图
Fig. 2 Damage indicator in Xuwen County

(a) The damage in location A of Fig. 1; (b) the damage in He'an Town Government

步骤4: 由于无人机不具有夜视功能, 晚上对无人机的电池和遥控器充电, 并将无人机全部航拍资料与气象观测资料进行初步分析, 若在龙卷移动轨迹附近的雷达资料有中气旋和龙卷风涡旋特征等有可能出现龙卷的特征, 仍有必要到出现龙卷特征对应位置走访和使用无人机搜索。

步骤5: 根据无人机的飞行记录上的经纬度信息和航拍视频资料, 将灾情指示物的位置及其他信息录入地理信息系统或者卫星地图, 制作龙卷灾情范围图, 统计出此次龙卷灾情的特征。

4 灾情指示物识别的分析方法

4.1 着重观察同类型地物颜色的连续性

无人机在高度50 m以上重点观察颜色跟周边颜色不一致的区域, 如图3a是2019年8月16日辽宁省营口市龙卷(简称营口个例)灾情图, 龙卷吹掉楼盘顶的防水层材料和部分铁皮(图3a红框位置), 导致此区域的楼盘颜色与其他区域的不同, 遇到此情况, 应该低空航拍楼顶、搜索楼盘的每层玻璃窗是否完好、墙上是否有抛射物和墙上瓷砖是否有脱落。图3b是2019年8月29日海南省屯昌县龙卷(简称屯昌个例)灾情

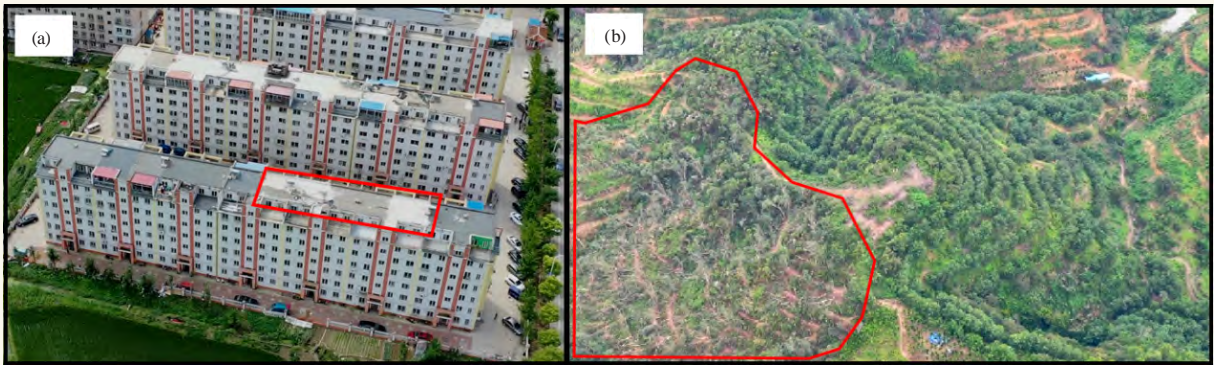


图3 2019年8月16日营口个例(a)和2019年8月29日屯昌个例(b)的灾情图
Fig. 3 Damages of Yingkou on 16 August 2019 (a) and Tunchang on 29 August 2019 (b)

图, 龙卷吹倒大量树木后, 由于树木枯萎使树叶颜色变暗, 与周边健康的树木颜色不一致。

4.2 高低空、多视角航拍

图4是对无人高空航拍和低空航拍图像进行对比, 图4a是50 m高度的航拍, 图像可快速找到受灾地点和了解整体灾情, 但受灾细节比较模糊。低空航拍能了解灾情的细节, 但是比较耗时。低空航拍图4a的物体a、b和c, 可以清晰看到条状物体a是水泥电线

杆, 折断倒伏在地面上(图4b); 物体b(图4c)是瓦片房, 从地面的瓦片颜色可判断是最近吹掉的; 从图4d可判断物体c是哪个品种的树及其倒伏的原因(虫病或风灾等)。

4.3 结合百度全景图像和网络视频

图5a是营口个例的营大路附近的灾情图, 由于灾情出现在营大路两侧, 灾情组到现场前倒伏树木已经被清理干净, 导致无人机航拍难于发现此类情况的



图4 徐闻个案调查中无人机高低空航拍效果对比图

(a) 50 m高空航拍图；(b)、(c)、(d) 分别对应于图a红框位置物体a、b和c的低空航拍图

Fig. 4 Comparison of aerial photography effect of UAV at high and low altitude in Xuwen County

(a) Aerial photograph at 50 m; (b), (c) and (d) correspond to the low altitude aerial photos of objects a, b and c in the red box of Figure a, respectively

灾情，需要结合百度全景图像和网络视频协助航拍。从网络视频（图5c和5d）观察到龙卷风（图5c和5d中的黄色实心箭头）大致移动方向（图5a中的黄色空心箭头），龙卷移动过程中部分树木被吹走（图5d中的蓝色虚线方框），故该位置要补充低空航拍或者走访。在百度地图上查看该位置最新的全景信息（2018年2月），能清晰看到主行道路两侧的树数量（图5b

是图5a的红框对应位置的截图，两图的树木位置相对应），而航拍时发现图5a中红圈位置泥土是新的，和周边颜色不一致，可初步了解到龙卷在此位置影响范围及移动方向，提高航拍的效率。

4.4 针对疑似对象，分析并走访排查

图6a是徐闻个案灾情调查中发现香蕉树成片倒伏，而旁边的桉树没有倒伏和树枝折断的情况发生，

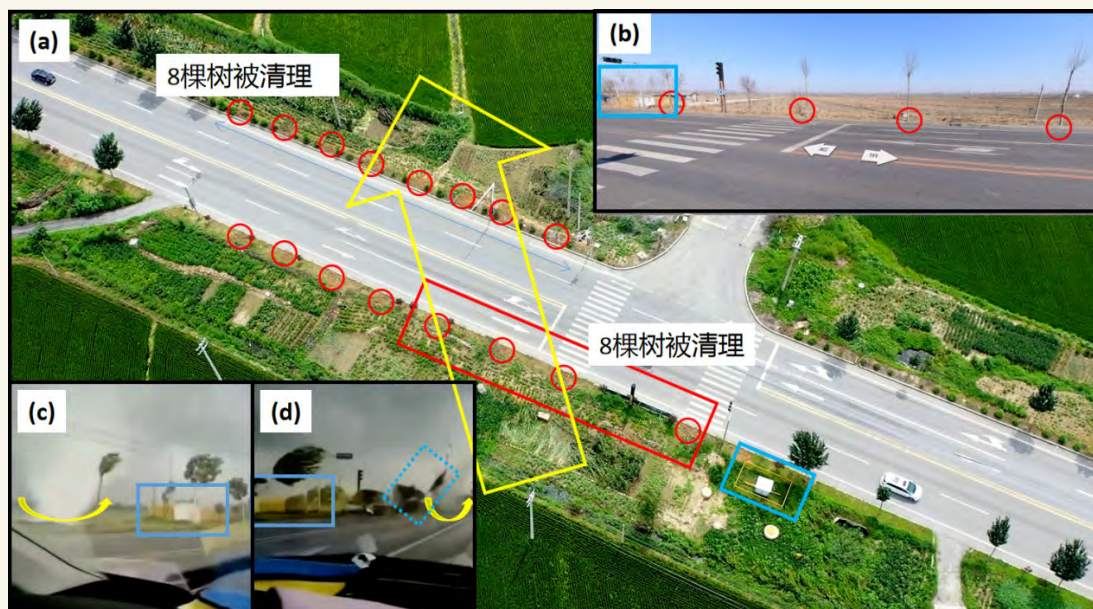


图5 2019年8月16日营口个案中营大路的灾情图（蓝框位置的电箱是位置参照物）

(a) 无人机航拍图，黄色空心箭头表示从红圈表示被清理树木的位置；(b) 图a红框位置的2018年2月的百度全景图；(c) 和 (d) 是网络视频图

Fig. 5 Damage of Zhongying Road in Yingkou on 16 August 2019 (The electric box in the blue frame is the position reference)

(a) aerial photos of UAV, the yellow white arrow indicates the direction of tornado movement; (b) the panorama of Baidu in February 2018 corresponding to the red box position in Fig. a; (c) and (d) are screenshots of online video



图6 徐闻个例的灾情图：(a) 发生在图1点7附近位置；(b) 发生在和安镇镇政府
Fig. 6 Damage in Xuwen County: (a) near point 7 in Fig. 1; (b) in the He'an Town Government

考虑到香蕉树的抗风能力比桉树要差，而且香蕉倒向不是明显辐合的，故把香蕉树倒伏作为疑似对象，经过走访村民是龙卷发生前一天大风吹倒的。图6b是电线杆折断，但是周边的树木只有树枝折断，铁皮棚比较完好，故将此电线杆作为疑似对象，经走访和安镇镇政府人员，是附近树木压断的，树木已被清理。

5 无人机在灾情调查中的优势

5.1 快速识别龙卷破坏带

破坏带是龙卷特有的灾情特征，结合雷达资料、

现场树木倒向和走访信息可以判断龙卷移动的方向。部分龙卷破坏带识别可以直接从航拍资料直接识别浅色的路径，其他的则通过全面分析航拍资料绘制灾情图来分析判别。无人机能忽略大部分地形的障碍并快速寻找到龙卷的破坏带（图7），单靠在走访判断龙卷移动方向是不可能短时间完成的，而使用无人机航拍可大大提高灾情调查的效率。但并不是全部龙卷都会留下明显的破坏带，这与龙卷经过的下垫面相关。图7是近四年使用无人机航拍龙卷灾情时发现的

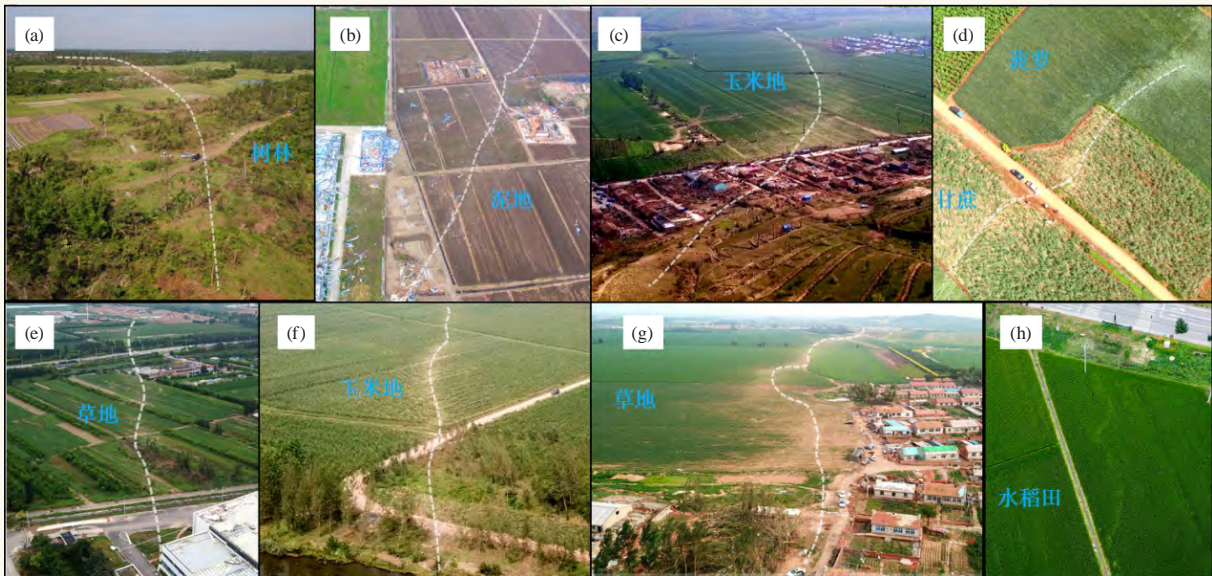


图7 无人机识别出的浅色龙卷破坏带（白色虚线是表示龙卷路径）

(a) 2016年6月5日海南文昌龙卷；(b) 2016年6月23日江苏阜宁龙卷；(c) 2017年8月14日内蒙古赤峰龙卷；(d) 2017年8月16日广东湛江龙卷；(e) 2018年8月13日天津静海龙卷；(f) 2019年8月19日江苏徐州龙卷；(g) 2019年7月3日辽宁开原龙卷；(h) 2019年8月16日辽宁营口龙卷

Fig. 7 Light tornado damage swath identified by UAV (the white dotted line indicates the tornado path)

(a) Wenchang tornado in Hainan Province on 5 June 2016; (b) Funing tornado in Jiangsu Province on 23 June 2016; (c) Chifeng tornado in Inner Mongolia on 14 August 2017; (d) Zhanjiang tornado in Guangdong Province on 16 August 2017; (e) Jinghai tornado in Tianjin on 13 August 2018; (f) Xuzhou tornado in Jiangsu Province on 19 August 2019; (g) Kaiyuan tornado in Liaoning Province on 3 July 2019; (h) Yingkou tornado in Liaoning Province on 16 August 2019

龙卷路径，下垫面有民房、树林、泥地、草地和庄稼，其中玉米田和草地从航拍画面更容易判别。航拍若没发现浅色龙卷破坏带，则可通过全面分析灾情分布特征来判别龙卷的破坏带（如图1中徐闻个例中的红色阴影区域）。

无人机作业要注意以下细节以提高调查的效率。无人机拍摄起飞周边环境的照片和在手机导航软件上收藏此位置，并标记收藏点的时间；当无人机处于灾情正上方时，要拍摄照片，根据照片经纬度信息描绘完整的龙卷破坏带。灾情线路图并与雷达图的中气旋产品路径对比，避免因龙卷跳跃或者升起造成地面灾情不连接的对龙卷路径的判断失误。

5.2 快速了解龙卷灾情宽度

龙卷影响宽度是比较重要的参数，如图8所示，红色箭头根据树木倒向及相关走访信息判断出来的龙卷移动方向，此位置龙卷的影响宽度 a 可通过无人机摄像头视角范围（FOV）、拍摄画幅（ $a:b=16:9$ ）及拍摄高度 h 可计算。图8是无人机在200 m高度航拍，实际宽度 a 约为280m。范雯杰等^[7]指出龙卷宽度与等级强度没有明确的对应关系。

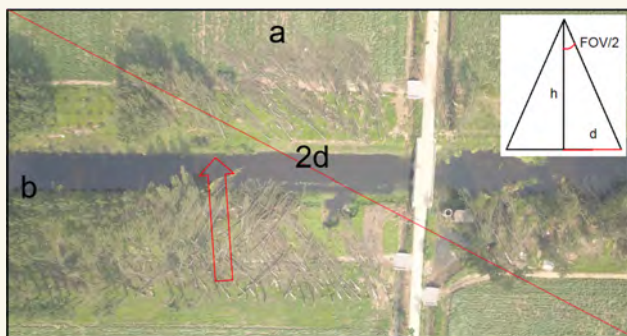


图8 现场测试龙卷影响宽度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of tornado influence width in field test

6 结论

通过多次灾情调查的实践和探索，得到以下认识和结论。

1) 关注无人机的新型号及相关管理规定，考取相关的无人机驾驶证，保证无人机使用符合相关管理规定；

2) 针对不同情况，使用不用型号的无人机，乘坐民航等交通工具可优先选择御2无人机；遇到严重和大范围的灾情时，优先使用搭配广角摄像头的悟2无人机，或者两台以上无人机分段航拍，并考虑现场

及时给电池充电的方法以提高灾情调查效率；

3) 考虑天气条件，5级风以上和下雨天气的情况下无人机不能起飞，保证无人机使用的安全性；

4) 注意航拍方法，以灾情最明显的地方作为第一个航拍点，以400~500 m分段高低空和多角度航拍，期间根据灾情特征不断微调航拍线路，直到航拍完整的龙卷灾害范围；

5) 注重灾情指示物识别的四个要点，同类型地物颜色不连续，则有可能是灾情导致的；同个灾情指示物使用高低空、多视角航拍有助于全面了解其特征；对于疑似对象要及时走访排查，最后结合百度全景图像和网络视频分析龙卷的影响范围和移动方向。

6) 无人机提供高空俯瞰的图像，可以快速识别龙卷的灾情破坏带、判断龙卷移动方向和估算龙卷宽度。

参考文献

- [1] Davies-Jones, R. Trapp R J, Howard B. Tornadoes and tornadic storms. Meteorological Monographs, 2001, 28(50): 167-221.
- [2] 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. 热带气象学报, 2016, 32(3): 416-424.
- [3] 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析. 暴雨灾害, 2016, 35(5): 403-414.
- [4] 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 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.
- [5] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象, 2016, 42(1): 1-13.
- [6] 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.
- [7] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [8] 高姣姣. 高精度无人机遥感地质灾害调查应用研究. 北京交通大学, 2010.
- [9] 陆博迪, 孟迪文, 陆鸣, 等. 无人机在重大自然灾害中的应用与探讨. 灾害学, 2011, 26(4): 122-126.
- [10] 李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究. 灾害学, 2011, 26(1): 138-143.
- [11] 邓飞, 窦爱霞, 吴玮莹, 等. 基于无人机遥感的四川九寨沟地震极灾区灾情快速调查. 灾害学, 2018, 33(3): 210-215.
- [12] 杨小凤, 曹云刚, 冯薪朗, 等. 基于无人机高分影像的七盘沟泥石流风险性评价. 灾害学, 2016, 31(2): 206-212.
- [13] 汤剑雄, 徐礼来, 李彦旻, 等. 基于无人机遥感的台风对城市树木生态系统服务的损失评估. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 153-161.
- [14] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象, 2016, 42(1): 1-13.
- [15] Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, 等. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Science Bulletin, 2016, 61(4): 330-337.
- [16] 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): 50-55.
- [17] 中国民用航空局. 轻小无人机运行规定 (AC-91-FS-2015-31). 北京, 2015.
- [18] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [19] Fujita T T, Smith B E. Aerial survey and photography of tornado and microburst damage. The Tornado: Its Structure, Prediction, and Hazards, Geophys Monogr, No 79. Amer Geophys Union, 1993.