

# 坎坷追风路

## ——佛山市龙卷风研究中心李兆明博士谈龙卷灾情调查

■ 侯美亭

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.01.004

**侯美亭:** 请介绍龙卷风等强对流天气灾情调查的目的、国内外现状? 观测平台(如无人机、卫星技术等)的进步如何影响着灾调发展历程?

**李兆明:** 对龙卷风等强对流天气进行及时的灾情调查, 有助于第一时间确定灾害类型和受灾程度。通过现场灾情调查, 获取强对流天气发生的视频、照片资料, 了解目击者对强对流发生时声音、天气现象、时间等的描述, 航拍受灾情况, 科学还原强对流发生的时间、地点、路径以及灾害情况等, 为龙卷风等强对流天气研究提供科学数据资料; 收集龙卷个例, 分析发生龙卷时的不同天气背景及雷达监测特征, 建立科学详实的龙卷个例库; 了解致灾原因, 尤其是造成人员伤亡的情况, 为提升防灾减灾和预报预警能力提供参考依据。



图1 本刊编辑采访李兆明博士(右二)

目前, 美国和欧洲大部分国家已经建立了国家(或区域)龙卷风数据库。美国国家气候数据中心(NCDC)和风暴预测中心(SPC)共同建立了国家级龙卷风数据库风暴事件数据库, 涵盖了美国1950年至今的龙卷风数据。欧洲强风暴实验室(ESSL)于2006年建立了欧洲强天气数据库(ESWD)。中国气象局国家气候中心于2008年开始建立中国龙卷风灾情普查数据库, 截止目前收集整理了1984以来的中国龙卷风灾情。

借助于观测平台, 有助于准确判断龙卷发生时间与影响范围, 尤其是近年来无人机技术的发展, 对灾

### 【编者语】

2019年7月辽宁铁岭市开原遭受龙卷风袭击, 灾后及时的灾情调查对于此次龙卷的定级起到了非常重要的作用。本刊针对我国龙卷灾情调查、灾调对于灾情预警的意义、观测手段的进步等问题采访了佛山市龙卷风研究中心李兆明博士。

害现场的全方位立体观测并进行灾后三维重建, 准确评估受灾情况, 为防灾减灾提供参考依据(链接1)。

**侯美亭:** 请简要介绍佛山龙卷风灾害调查方面的规范、标准的建立和形成过程? 并对调查规范进行简要概述? 另外, 国际上是否也已经建立了有关的灾调规范, 如有的话, 请进行对比。

**李兆明:** 2013年龙卷风研究中心成立后, 主要工作包括: 强对流监测设备的建设; 台风外围龙卷特征研究; 龙卷报料机制及灾情调查规范的制定等。2015年10月4日台风彩虹龙卷袭击佛山, 影响时间32 min、路径长度31.7 km, 23个镇(街)受灾, 造成死亡4人, 受伤95人, 受灾人口超过4.2万, 龙卷中心及局里科研业务人员都参与了此次龙卷的灾情调查, 亲身感受当时受灾情况, 分析不同灾情指示物的受损程度, 从现场目击者、互联网、公安部门等不同渠道搜集灾情信息, 逐步整理灾害调查技术文档, 2017年制定了《佛山市龙卷与雷暴大风灾情调查技术手册(试行)》。近4年龙卷中心参加了国内、省内40多次龙卷风等风灾灾害调查(信息框1), 在实际的龙卷等风灾调查中逐步修订技术手册, 形成比较完备的龙卷灾情调查制度。龙卷灾情调查制度确保第一时间奔赴受灾现场, 尽可能完整地收集龙卷风的灾情信息, 建立完善龙卷风资料库, 主要包括灾调前期无人机等设备的准备与联系受灾当地气象部门, 灾情现场严格按照《佛山市龙卷与雷

### 信息框1: 2019年我国龙卷事件发生情况

2019年我国可确认的龙卷天气过程有8次、共9个龙卷, 龙卷数量较2004—2013年的年平均统计结果是属于偏少年景, 龙卷发生时间集中在4—8月, 其中8月最多。2个为台风龙卷, 其他为西风带龙卷, 台风龙卷个数比常年偏少, 可能与2019年是厄尔尼诺年, 生成和登陆我国的台风个数比常年偏少相关。

暴大风灾情调查技术手册（试行）》全面收集龙卷灾情信息，灾调完成后对此次过程的分析。

**侯美亭：**请以2019年开原龙卷风灾调为例，以示意图的形式给出龙卷风灾害调查的完整过程。

**李兆明：**2019年7月3日辽宁铁岭市开原遭受龙卷风袭击，造成7人死亡，190人受伤。7月4日到6日，佛山市龙卷风研究中心随同国家气象中心、辽宁省气象局、铁岭市气象局、开原市气象局等联合开展龙卷

灾害调查，通过无人机航拍、现场勘查取证、影像资料收集、现场走访等方式，结合多种气象数据综合分析研判，此次龙卷始发于金沟子镇金英村北约1 km处，在瓜台子村南约1.8 km处消散，全程直线距离约14 km，大部分路径明显破坏宽度约200~400 m，严重破坏宽度约50~100 m，最大破坏强度达EF4级、行标四级，属于超强龙卷。此次龙卷风灾害调查的完整过程如图2所示。



图2 龙卷灾害调查流程图

**侯美亭：**请对灾调指示物进行介绍，如何选取和判定灾调指示物，灾调指示物对于龙卷风定级具有什么意义？龙卷风路径及外围的气象变量具有怎样的特征？龙卷风灾害发生区域有无气象数据（比如来自自动站的数据）对于灾调具有怎样的意义？

**李兆明：**灾情指示物是指对评估龙卷等造成破坏程度有指示作用的物体。20世纪70—80年代Fujita根据龙卷路径上建筑物的受损程度及其与风速的对应关系将龙卷分为6个等级，从F0级到F5级，即“藤田级别”（F-Scale），此后藤田级别法得到广泛的应用。2007年美国气象局对藤田级别进行了调整，新增了28种灾情指示物，如不同结构、不同建材、不同高度的建筑物，电线架，塔架，硬木，软木等，形成国际惯用的龙卷强度等级（EF-Scale）。2019年8月份中国气象行业标准《龙卷强度等级》开始实施，将龙卷强度分为4个等级，选取的灾情指示物主要为建筑物类、构筑物类与树木类等。

**侯美亭：**高质量的灾调面临什么样的科学问题？或者说，完成一次高质量的灾调需要做好哪些准备，需要对哪些方面进行详细调查？另外，我们了解到，

无人机可能是目前重要的灾调装备之一，而无人机的续航能力可能是无人机正常工作的主要限制因子，对于这个问题，请问有无好的解决方法？

**李兆明：**灾情调查为科学评估受灾情况、检验预报预警服务效益以及服务防灾减灾等方面提供依据。灾情调查评估内容（信息框2）应当包括气象灾害情况及其强度、出现灾害的原因（包括对气候条件的科学估计）、预报服务的有效性和存在的问题以及灾后恢复生产的气象建议等。完成灾情调查需要了解天气形势，雷达监测实况，根据雷达上强回波或中气旋位置大概确定龙卷可能发生的时间路径等，在灾调现场尽可能采访更多目击者获取视频照片资料，详细记录灾调路径上的灾情指示物确定每阶段的强度等级影响范围等，利用无人机进行全方位的航拍是记录受灾情况最主要的方式，无人机电池是无人机正常工作的关键部件，有时候会对航拍起到至关重要的作用，2016年6月23日江苏盐城龙卷时，由于我们携带足够的无人机电池，完成了从起点到终点的全程航拍，为调查组提供第一手的航拍资料，也为科学评估此次龙卷灾害提供依据。

**信息框2: 龙卷现场灾情调查的内容及难点**

龙卷现场灾情调查是确定龙卷强度等级的主要手段, 灾情调查中一般分为两组: (1) 航拍组, 主要通过无人机对受灾区域进行全方位航拍, 在此基础上确定龙卷路径长度、不同等级破坏范围, 细致调查不同灾害指示物受损情况, 确定路径上每个阶段的最强破坏指示物特征、位置、影响范围等; (2) 现场走访组, 主要向民众了解龙卷经过当地的时间、描述当时情景, 了解致灾原因, 预报预警信息获取情况, 防灾减灾情况等。获取龙卷相关的视频资料存在难度, 视频资料是证明龙卷发生的最确切的资料, 由于龙卷突发性强, 可能伴随着强烈的天气过程, 当地居民很难拍摄到龙卷视频; 龙卷发生的具体时间不清晰, 少数龙卷发生在凌晨, 很难获得龙卷发生时的确定信息。

**侯美亭:** 湍流遇到热和水汽的夹击可引发极端天气, 例如龙卷风。现在对极端天气(例如极端温度、极端降水事件)的预测有了很大进步, 但是龙卷风的预测难度相比更大, 因此也产生了更具灾难性的影响。请问, 相比极端温度和降水, 龙卷风预测的难度主要体现在哪些方面?

**李兆明:** 美国龙卷风出现频率高、危害大, 在龙卷风研究领域也起步较早, 其已开展了一系列大型外场观测试验, 深入研究龙卷风的机理问题, 在龙卷风理论研究、实验室模拟以及数值模式开发方面有不少进展, 其龙卷风观测设备也不断发展和改进。然而, 龙卷风在美国也难以预测, 龙卷预警空报率和漏报率仍较高。在中国, 龙卷预测更难, 体现在: 1) 中国龙卷发生次数不到美国十分之一, 属于小尺度天气系统或者小概率事件, 时间、空间随机性较强, 我国对龙卷的研究还处于起步阶段, 对其形成机理研究还不深入, 目前, 我国还未开展龙卷预报预警业务, 仅处于试验阶段(信息框3)。2) 龙卷风尺度小、发展迅速, 且经常伴随暴雨、冰雹、雷暴等灾害性天气发生, 常规观测设备难以对龙卷生消进行观测。3) 预报员对龙卷等小概率发生的灾害性天气认识不足。4) 国内龙卷观测的志愿者、追风者等参与度低。

**侯美亭:** 地形被认为是龙卷产生的重要影响因素之一。在美国中西部, 位于落基山脉和阿巴拉契亚山脉之间的平坦而广阔的区域是著名的“龙卷风走廊”。在我国, 龙卷高发的区域是否也存在类似的地形特征, 或者说, 我国龙卷高发的区域存在哪些相似或者各自独有的特征? 对于不同区域的龙卷灾害调查, 是否在调查内容、数据收集上存在一些不同?

**李兆明:** 许多研究表明龙卷发生与地形有密切关系, 通过我们对广东省各市的龙卷历史个例调查分析, 除了地形平坦外, 江河湖泊、沿海等地区对强龙卷生成也有一定的促进作用, 特别是喇叭口地形容易生成强对流天气, 也能促发龙卷的生成。江淮流域、华南、东北和华北地区东南部等地形平坦地区为EF2级以上强龙卷高发区。通过对广东省各市的龙卷历史个例调查分析也验证了上述观点。

不同区域的龙卷灾情调查, 常见的灾情指示物及破坏特征有差异, 比如北方龙卷灾害多以房屋受损、树木折断等为主, 南方多以铁皮厂房被掀翻、铁皮被撕碎等为主, 另外引发龙卷发生的天气系统也不同。

**信息框3: 佛山龙卷风的“一张图”意识**

为了进一步强化佛山预警发布系统支撑, 提升佛山龙卷等致灾性雷暴大风的监测能力, 预警发布能力、预警传播能力, 使佛山龙卷等致灾性雷暴大风的预警信息发布更加精准、更快速, 进一步提升防灾减灾水平, 根据2017年初中国气象局减灾司批复同意广东佛山开展龙卷等致灾性雷暴大风的群策群防预警服务和联防机制试点建设实施方案的要求, 从2017年开始, 佛山市气象局持续开发并升级佛山市龙卷风及雷雨大风等灾害预警信息靶向发布系统(以下简称靶向发布系统)建设和全市铁皮屋和工棚等易受风灾影响建筑物普查工作。

靶向发布系统的开发依托了研究型业务建设, 在广东省重点科技项目《广东龙卷风识别与预警关键技术研究》支持下, 融合了天气实况监测、龙卷风风险识别、公众实时报料等研判辅助数据, 方便龙卷风及雷雨大风的快速判断, 融入了民政、三防、公安、国土、环保、电力、交通、海事等多个部门的设施信息, 方便应急物资和救援力量的快速指挥调度, 融入了铁皮屋和工棚、电力设施、学校、地质灾害点、危化品企业等易受气象灾害影响主体的责任人信息, 方便预警信息的快速靶向精准发布。系统还建立了龙卷风个例库。

靶向发布系统的建设大大增强了佛山市气象局的强对流天气预警发布能力, 在2018年两次龙卷过程中发挥了重要作用, 其中在2018年6月8日台风“艾云妮”影响期间, 首次利用系统成功发布了龙卷警报, 在2018年9月17日, 台风“山竹”影响期间, 再次利用系统精准靶向发布。

**侯美亭:** 请对佛山龙卷风研究中心建立的龙卷风档案卷宗情况及建档意义进行介绍?

**李兆明:** 佛山市气象局2016—2019年共参加了40

次龙卷等致灾雷暴大风的灾情调查工作，每次灾调按照灾调准备、现场灾调以及灾调分析三个步骤进行，最后确定风灾类型和强度，形成年度灾情调查档案，对于龙卷风的个例，录入龙卷风个例库，为龙卷等强对流的研究累积个例数据。

**侯美亭：**每年春夏，美国沿着“龙卷风走廊”追风的志愿者人数众多，请简要介绍一下美国的追风志愿者的形成过程及对龙卷风预警具有怎样的帮助。相比美国，我国的追风志愿者队伍尚不成熟，那么美国的追风志愿者对于我国构建类似的队伍具有哪些启示？

**李兆明：**美国国家气象局在20世纪70年代开展志愿者项目——SKYWARN计划，到目前为止约有35万~40万名训练有素的强对流天气观察员参与其中，主要职责是识别和描述局地的强风暴，并向当地气象局、应急管理者和新闻媒体提供及时准确的强对流天气报告，为气象部门及时准确地发布龙卷风预警、强雷暴预警和山洪预警提供了很大帮助。美国国家气象局为志愿者提供以下培训：雷暴发展的基础；风暴结构的基本原理；识别潜在的恶劣天气特征；报告哪些信息；如何报告信息以及恶劣天气安全基本常识等。龙卷的突发性和尺度小，常规气象观测仪器难以捕捉，追风志愿者为龙卷的发生、发展提供了可靠实用的观测实况，为龙卷的预报预警和防灾减灾提供依据，是我国发展的趋势。

**侯美亭：**天气预报能力的进步与观测技术的变革紧密相关（链接1），我们得知，佛山市龙卷风研究中心采用阵列天气雷达，用7部相控阵天气雷达（信息框4）来探测龙卷风。请介绍一下相控阵阵列天气雷达的布设时间、选址依据等。

**李兆明：**在省气象局、市委市政府的大力支持下，佛山市相控阵天气雷达网项目从2019年年初开始筹建工作，经过规划、选址、招投标、项目施工等工作，2019年9月开始在三水区安装第一台相控阵天气雷达，11月初陆续在顺德区和三水区安装3部，11月中旬完成4部相控阵阵列天气雷达布设，预计2020年上半年将完成3部相控阵天气雷达的布设。根据佛山地区的地形地貌特征和当地的城镇建设规划，严格按照《局地天气雷达选址规范》的要求，重点考虑历年佛山市区发生过龙卷风的区域，综合考虑雷达性能，确保在三维覆盖区能达到最佳探测效果和三维覆盖范围最大化；充分考虑雷达站点供电、道路、用水、避雷、抗震等所需的建设成本投入和后期维护简便化。综合考虑各个站点的电磁环境测试和遮挡情况以及站点租赁等方面因素，从三十多个预选站点位置中择优

选取7个站点位置。

#### 信息框4: 相控阵天气雷达

目前佛山部署的X波段相控阵雷达时间分辨率达到24 s、空间分辨率为30 m。相控阵天气雷达的快速、精细扫描可以捕捉迅速发展变化的强对流天气（如中气旋、龙卷），对于监测生命周期非常短的龙卷风等具有更大的时空优势，能够得到更加细微的时空结构特征。

波长较短的无线电波在传播过程中会被大气中的水汽所吸收，并且波长越短这一影响越大，无线电波的传播距离就因此受到了影响，限制了使用这一频段的雷达的探测距离。故与S波段雷达相比，X波段雷达衰减更快，因此需要多部组网观测。

相控阵天气雷达以及在此基础上的阵列天气雷达技术，以其协同、全空域、超高分辨率的监测为准确预警提供主要的观测支撑。

**侯美亭：**能否详细谈一下佛山的7部相控阵阵列天气雷达在探测龙卷风上有什么样的技术优势（尤其是相比其他多普勒雷达）、其功能如何发挥？对龙卷的早期预警能力带来哪些方面的提升？

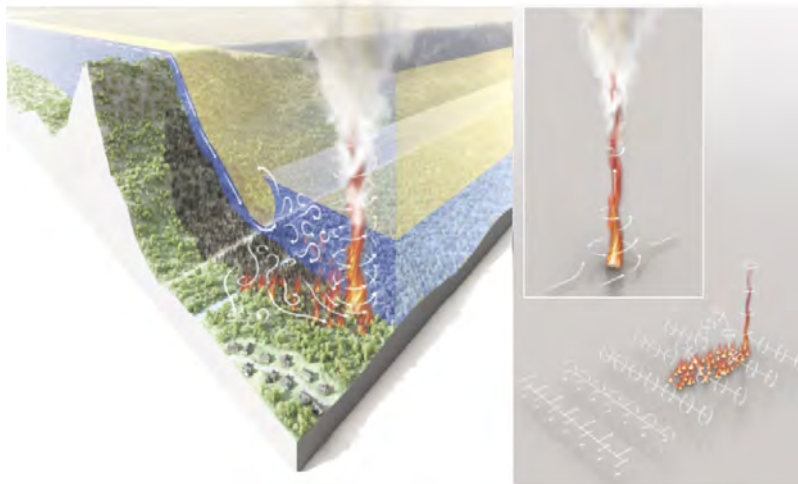
**李兆明：**随着相控阵技术的日趋成熟，采用相控阵技术的天气雷达可以更好地探测和跟踪快速变化的中小尺度天气系统，提高对灾害性天气的预警能力，服务于气象防灾减灾。

佛山采用的是天气阵列雷达，是一种新型分布式相控阵天气雷达。该阵列雷达采用7个相控阵收发子阵进行严格协同扫描，将雷达的体扫时间由目前的6 min提高到24 s，更重要的是通过高度协同可以获得龙卷风的精细风场，这是一个从传统的以强度监测为主到流场结合强度的一个根本性转变，将推动龙卷风预报预警方法和思路的变革。将阵列雷达和传统雷达有效结合，发挥各自的优点，形成互补，是最大发挥雷达系统探测效益、提高龙卷监测和预警的有效方法。

龙卷的预警时效一直很难提高。目前，国际上对于龙卷平均预警时效约15 min，通过缩短雷达的体扫时间，可以提高龙卷预警时效，比如将雷达体扫时间由目前的5~6 min提高到1 min甚至更短，有可能再提高龙卷预警时效0~5 min。能否进一步提高呢？从龙卷母体风暴到龙卷发生，流场的演变能更早的预示龙卷的出现。所以获得龙卷发生前后对流风暴精细流场是提高龙卷预警的有效途径，因此，阵列天气雷达提出的流场结合强度场的龙卷监测预警思路，有望从根本上改善当前的观测环境和观测数据质量。

### 信息框5: 火龙卷概念模型

火龙卷是一种旋转的火柱和烟柱，其风速可比拟真正的龙卷风，但其十分罕见极具破坏性。火龙卷可以从地面吸收如燃烧的原木之类的碎片并将其卷到很远的地方，从而不可预测地引发新的火灾。在空中旋转的火龙卷可以产生自不同的来源，比如沿地面的风，其产生的漩涡是水平的，但野火产生的热空气，由于有浮力，向上流动。火焰中燃烧的气体使空气升温，从而加速向上运动，使火焰旋转成细长的管状。当漩涡变薄时，它就会旋转起来，直到一个高大的、紧紧旋转的火柱形成。



火龙卷形成机理图（引自Scientific American）

**侯美亭:** 请结合佛山2019年12月出现的林火谈一下佛山出现火龙卷的可能性，以及气象雷达是否具备对林火、乃至火龙卷的监测能力？

**李兆明:** 火龙卷是由灰烬与火焰组成的，通常是旋风与不断增加热量的火焰形成龙卷风形状的涡旋（信息框5）。由于在火场中心释放出大量上升的热空气，低气压使得外面的冷空气从各个方向迅速地向火场中心涌入，这就形成了飓风般的火风暴。虽然火龙卷的物理特性目前已经被很好地理解，预测其何时何地出现仍然是一个挑战。

2019年12月佛山森林火灾发生后，我们进行了一些灾情调查。通过这次火灾，我们也进行了分析，发现龙卷风监测预警体系的雷达产品在火灾发生初期确实能提供火灾预警信息，尤其是X波段双偏振雷达的偏振参量为识别火灾提供有益参考，我们正在做进一步的研究。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

### 链接1: 专家点评



广东省气象台首席预报员伍志方

近年来，龙卷、下击暴流、强雷暴大风等激烈的强对流天气对人民生命财产造成的严重威胁越来越受到广泛关注，如2015年6月1日强飑线引发的强雷暴大风使“东方之星”轮船在长江中游湖北监利水域倾覆造成442人遇难，2016年6月23日江苏阜宁强龙卷造成99人逝去、大量房屋夷为平地。随着手机、互联网等技术和公众防灾意识的提高，越来越多的龙卷、冰雹等强对流天气实况被拍摄并上网，气象部门获得的信息来源明显增多，但龙卷、下击暴流等致灾性大风的强度、致灾路径等仅仅依靠公众拍摄的视频、照片无法获取，而现场灾害调查则可以区分龙卷、下击暴流等致灾性大风的种类，明确其强度、路径、影响范围、时间等，结合雷达、自动站等监测资料，为

龙卷、下击暴流等强烈的强对流天气发生发展机制的科学研究和预警预报技术研发奠定基础。

多普勒天气雷达是对龙卷、下击暴流等强对流天气最有效的监测手段之一，但龙卷（或微下击暴流）具有尺度很小、移速很快、对流时间很短的特点，以目前业务上使用的多普勒天气雷达完成一次体扫需4~6 min，难以及时捕捉到其精细的演变过程；而随着雷达技术的发展，相控阵天气雷达被引入气象探测领域。相控阵天气雷达具有快速且精确转换波束指向的能力，能够在1~2 min内完成全空域的扫描，同时获取大量气象信息。快速更新体扫数据（1~2 min间隔），可探测分析出龙卷超级单体中，中气旋的加强和下降、整层旋转结构等发展和演变的细微特征。快速更新的相控阵天气雷达数据使预报员能够快速跟踪、判识超级单体内中气旋和入流的增强以及龙卷涡流的移动等，有助于预报员更早发布龙卷警报。X波段相控阵雷达有其固有缺陷—即衰减和监测范围相对较小，因此建立相控阵雷达网可弥补单部雷达因强降雨水衰减造成的无法探测区域，同时扩大监测范围。