

深圳机场一次水龙卷过程的预报技术研讨

冯锡斌^{*#}, 钟晓涛

中国民用航空深圳空中交通管理站, 广东 深圳

收稿日期: 2025年2月6日; 录用日期: 2025年3月12日; 发布日期: 2025年3月20日

摘要

本文针对预报漏报的深圳机场2024年8月12日早间周边海域水龙卷过程, 从雷达特征及触发条件开展分析发现, 该水龙卷水平尺度较小, 为百米级别, 强度偏弱, 需综合使用相控阵雷达对特定的钩状回波进行识别。此外, 水龙卷由于垂直发展高度及云底高度较低, 在雷达规划时需考虑土建海拔高度, 并合理使用不同仰角扫描产品, 避免龙卷特征出现在雷达高度以下。本次过程由弱暖区西南气流增长提供动力抬升, 配合强烈能量释放形成强对流, 同时叠加超过28 m/s的强低层风切变和底层涡旋触发出水龙卷。在短期预报中, 低层垂直风切变、相对螺旋度等指标较难指示出水龙卷发生的可能性, 但在临近预报中可重点关注上游风廓线雷达, 可提供近1小时提前量, 有利于及早开展短临预警。

关键词

水龙卷, 水平尺度, 低空垂直风切变, 相控阵雷达, 风廓线雷达

Discussion on the Forecasting Techniques for a Water Tornado Process in Shenzhen Airport

Xibin Feng^{*#}, Xiaotao Zhong

Shenzhen Air Traffic Management Station of Civil Aviation of China, Shenzhen Guangdong

Received: Feb. 6th, 2025; accepted: Mar. 12th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

Abstract

In this paper, for the water tornado process in the surrounding waters of Shenzhen Airport in the

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 冯锡斌, 钟晓涛. 深圳机场一次水龙卷过程的预报技术研讨[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 378-385.

DOI: 10.12677/ojns.2025.132039

morning of August 12, 2024, which was not reported in the operational forecast, the radar characteristics and trigger conditions were detailed analyzed. It was found that the horizontal scale of the water tornado was small with the level of 100 meters, and the intensity was weak, so the special characteristic of hook echo in tornado should be recognized by the phased array radar. In addition, due to the low vertical development height and cloud base height of water tornado, it is necessary to consider the altitude for the radar design, and reasonably use different elevation scanning products to avoid the occurrence of tornado features below the radar altitude. This process is triggered by the growth of southwesterly in the weakly warm region, combined with the strong energy release to form strong convection. At the same time, the low-level vertical wind shear exceeding 28 m/s and the bottom vortex trigger the water tornado. In short-term forecasting, low-level vertical wind shear, relative helicity and other indicators are difficult to indicate the possibility of a water tornado, but in the near-term forecasting, we can focus on the upstream wind profile radar, which can provide nearly an hour in advance, and carry out the imminent early warning in time.

Keywords

Water Tornado, Horizontal Scale, Low-Level Vertical Wind Shear, Phased Array Radar, Wind Profiler Radar

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

龙卷这类灾害性天气通常具有极强风速、极低气压、突发性强等特点, 能给广大群众带来巨大的生命财产损失[1]。倘若龙卷事件出现在机场区域, 将给露天作业的地勤人员带来生命危险, 对停车场飞机以及机场各类高精度设施设备带来毁灭性破坏, 从而导致机场正常运行遭受严重影响。

因此, 进一步对我国龙卷风结构进行有效探测并开展短临预警, 以及通过环境场分析开展潜释短期预报具有较大意义[2]。本文基于深圳机场在 2024 年 8 月 12 日遭遇到的一次水龙卷过程, 从业务预报的角度开展复盘讨论, 并针对龙卷预报技术提出一些启示。

2. 研究资料

本文采用的广东省雷达拼图、香港地区探空图由深圳市气象局提供; 相控阵雷达图、垂直风廓线图、广东省地面自动站由广东省气象局提供; 民航中南气象中心提供 EC 数值模式产品; 民航深圳空管站提供民航机场天气报告(METAR 和 SPECI)。

3. 龙卷事件过程回顾

2024 年 8 月 12 日凌晨 05 时 23 分起, 深圳机场出现了持续 3 小时 12 分钟的中到强雷雨天气, 过程降水量 71.8 mm, 并在 06 时 29 分至 06 时 35 分之间, 于机场西侧海域距离机场跑道 5 公里处, 出现了接地水龙卷, 如图 1 所示。该水龙卷自西南向东北方向移动, 但在靠近机场过程中, 强度逐步减弱并消散, 未造成人员伤亡和机场设施破坏。

本次水龙卷过程为深圳机场建设开航 30 年以来的首次记载, 并通过机场天气报告的形式(龙卷代码: FC)参与到世界民航气象情报交换, 同时也是自珠海机场 2014 年 8 月 5 日记载水龙卷后, 时隔 10 年再一次在中国区域中的机场范围内记录到龙卷影响事件。

此外, 由于水龙卷过程多发于海上, 因此不同于陆龙卷能开展事后评估, 确定龙卷等级, 本次水龙卷过程无法确定 EF 强度。同时水龙卷灾害性破坏主要在沿海地区, 非人口密集地带, 因此市民群众及业务科研等对此类型龙卷记载和业务研究较少, 可参考性较弱。但由于深圳机场正处于海岸线区域, 水龙卷对机场的设施设备破坏仍不可忽视。



Figure 1. The photo of water tornado taken in Shenzhen Airport at 06:29
图 1. 06 时 29 分深圳机场实拍水龙卷

回顾前一日短期潜势预报, 气象产品未提及发生龙卷风的可能性。在短临预警中, 重点关注列车效应下的雷雨天气保障, 对龙卷风的发生和靠近未发布预警提醒, 属于极端天气现象的漏报事件, 反映出业务值班人员未能有效利用各种方式对龙卷风特征进行识别。

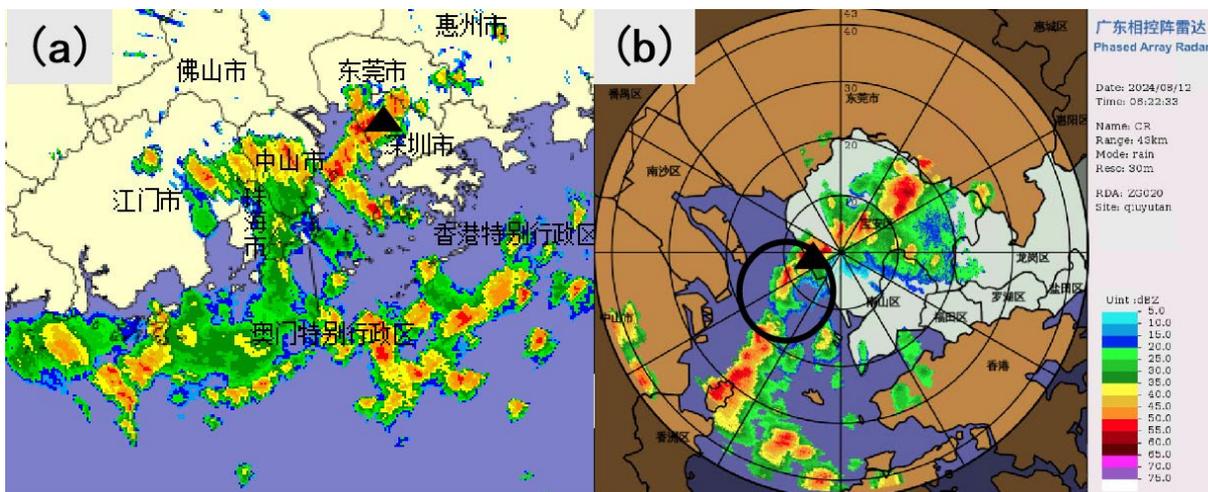
4. 短临雷达特征

4.1. 雷达反射率

从龙卷影响时段的雷达反射率来看, 如图 2(a)的广东省雷达拼图中, 深圳机场受东北西南向的窄带状雷达回波覆盖, 为侧向排列的多单体风暴。回波中心强度可达 55 dbz, 但受限于雷达拼图分辨率超过 1 公里, 未能找到龙卷雷达回波特征。在深圳市求雨坛 S 波段多普勒雷达中心西南侧 15 公里处有疑似钩状回波, 但由于空间分辨率为 250 米, 仍无法有效判别。

然而, 从图 2(b)空间分辨率仅 30 米的求雨坛 X 波段相控阵雷达可确认, 该回波属于典型的龙卷钩状回波, 同时钩状回波处于有界弱回波区的右侧。从相控阵雷达上看, 该水龙卷位于雷达西南向 11~14 公里处, 距深圳机场仅 5 公里, 钩内回波反射率强度不足 35 dbz, 反映出该水龙卷相对于陆龙卷[3], 水平尺度偏小, 为百米级别, 强度偏弱, 且非超级单体风暴形成, 因此较难利用多普勒天气雷达识别, 同时基于多普勒雷达的深圳市临近预报决策支持平台也无中气旋告警。

对于业务值班员, 今后需多收集国内外龙卷案例, 加强相控阵雷达使用培训。在业务短临系统建设中, 还需升级天气雷达资料来源, 即以相控阵雷达为基础, 同时引入 AI 图像识别等新技术, 从雷达回波特征的角度升级龙卷风的识别算法。



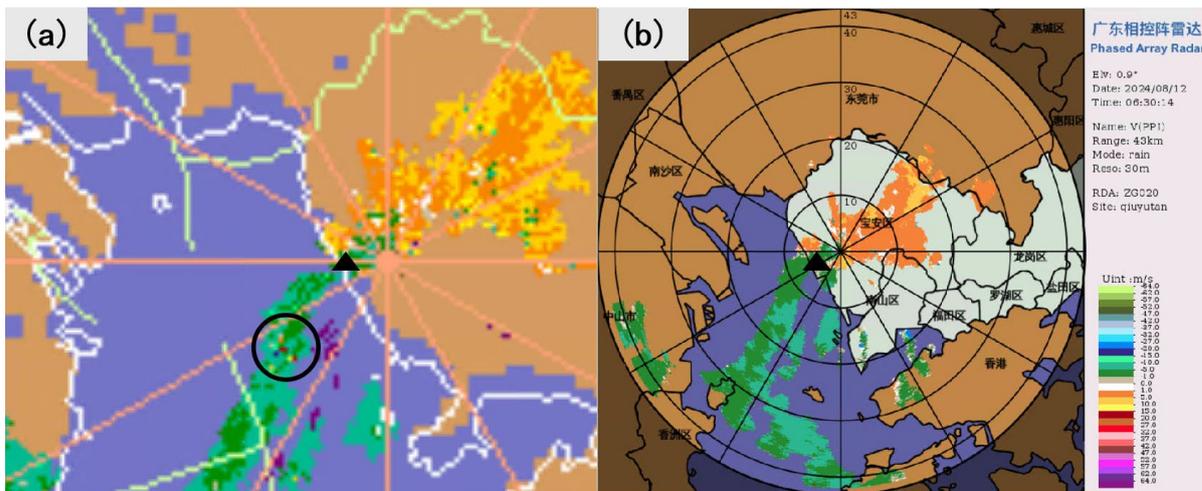
注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0568 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. (a) Guangdong radar puzzle at 06:30; (b) Shenzhen Qiuyutan X-band phased array radar at 06:23; the black triangle is the location of Shenzhen airport, and the black circle is the tornado hook echo feature

图 2. (a) 06 时 30 分广东省雷达拼图; (b) 6 时 23 分深圳求雨坛 X 波段相控阵雷达; 黑色三角为深圳机场位置, 黑色圆圈为龙卷钩状回波特征

4.2. 雷达径向速度

龙卷通常在雷达径向速度图具有显著的中气旋特征，如图 3(a) 的 S 波段多普勒雷达所示，在钩状回波钩内，存在一组正负速度对。其中，0630PKT 最强时刻的正负速度均为 18 m/s，即旋转速度为 18 m/s，随后逐渐减弱消失。此外，正负速度均仅存在 1~2 像素，同样也反映出本次水龙卷具有尺度小，强度弱的特征。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0568 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure3. (a) The radial velocity in S-band Doppler radar, the black circle is the position of meso-cyclone feature in water tornado, (b) The radial velocity in X-band phased array radar; the black triangle is the location of Shenzhen airport

图 3. (a) S 波段多普勒雷达径向速度图, 黑色圈为水龙卷对应中气旋位置; (b) X 波段相控阵雷达径向速度图; 黑色三角为深圳机场位置

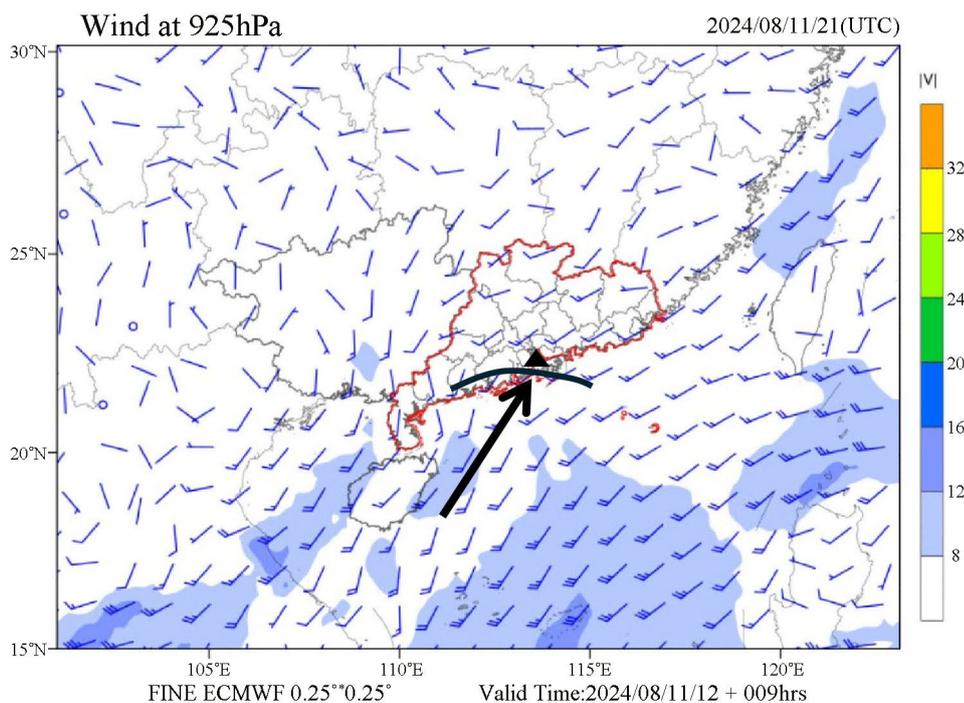
然而，对于空间分辨率更精细的相控阵雷达，其径向速度图却未能显示中气旋结构。在图 3(b)中，

径向速度图表现为大范围的同向运动, 原因在于该雷达相对于多普勒雷达, 三维各方向上波束宽度均偏窄, 因此在天气雷达较高建设海拔的背景下, 常规的 0.9° 仰角无法对云底高度偏低的水龙卷结构进行扫描。当前, 该相控阵雷达布设在海拔 318 米的求雨坛探测基地, 配合 20 米钢结构基础, 若使用常规的 0.9° 仰角, 在水龙卷距离雷达中心 11~14 公里处, 其探测高度为 510 米, 远高于机场实况报文中的 210 米云底高度。

因此, 在天气雷达建设中, 需同步考虑土建海拔高度; 在开展径向速度分析时, 应选用不同仰角扫描产品, 避免龙卷特征出现在雷达高度以下的情况。同时, 这也侧面反映出, 水龙卷区别于陆龙卷, 其螺旋结构主要位于云底及以下, 垂直发展高度偏低。

5. 环境场潜势预报

利用 8 月 11 日 12UTC 起报的 EC 数值预报分析可知, 本次过程 925 hPa 西南急流中心速度为 12 m/s, 处于中等偏弱强度, 但在后半夜至凌晨, 由于惯性震荡出现脉动增长, 急流核与风速出口区均呈现北推趋势。深圳机场处于西南急流出口处, 通过超低空辐合带来垂直上升速度, 从而形成动力抬升机制, 即从动力条件归类为弱暖区强迫的对流触发机制, 即典型的华南暖区对流机制, 如图 4 所示。与此同时, 本次过程的出现时间也与华南暖区对流高发的凌晨至上午时段相对应。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)3124 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. The prediction of the low-level 925 hPa wind field in South China region at 05:00 on August 12 by EC numerical model. The black triangle is the location of Shenzhen airport, and the black arrow and black arc are the low-level wind flow and the position of the wind convergence

图 4. 华南区域 EC 数值模式对 12 日 05 时低空 925 hPa 风场预报, 黑色三角为深圳机场位置, 黑色箭头与黑色弧线为低空气流及对应辐合位置

通过图 5(a)中的 8 月 11 日 20 时香港地区(45004)实况探空资料来看能量条件, 探空图呈现上干下湿层结, 500 hPa 中层干区温度露点差接近 20°C , 低层风随高度有显著顺时针旋转, K 指数 36°C , 地面假

相当位温大于 365 K, 对流有效位能达到 2800 J/kg, 为弱动力强迫背景提供了充沛的能量释放, 最终形成强雷雨及列车效应, 为华南地区夏季常见强对流天气配置[4]。

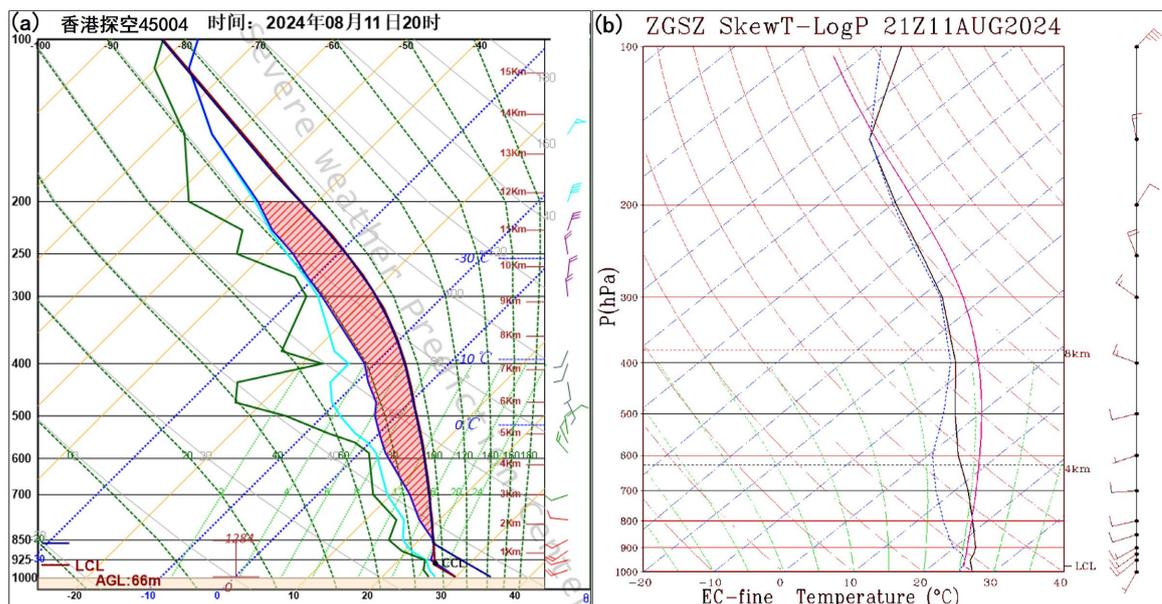


Figure 5. (a) The detected air sounding of Hong Kong Region 45004 Radiosonde station at 20:00 on August 11, (b) The air sounding of Shenzhen airport at 05:00 on August 12 predicted by EC numerical model

图 5. (a) 香港地区 45004 站点于 8 月 11 日 20 时实况探空图; (b) EC 数值模式对深圳机场 12 日 05 时预报探空图

然而, 利用龙卷指标特征开展潜势预报时[5], 无论使用探空实况资料或 EC 探空图预报, 如图 5(a) 和图 5(b)所示, 0~1 公里垂直风切变 3 m/s~5 m/s, 为弱风切变; 风暴相对螺旋度 SRH2-4m/s, 为弱螺旋度; 粗理查森数 88, 远大于 10; 仅 200 m~437 m 较低的 LCL 有利于龙卷的发生。而单独使用 LCL 与 CCL 这类与地面水汽直接相关的高度指标, 在业务预报中, 通常仅对应指示雷暴云具有较低的云底高度, 但无法直接指示龙卷的生成与发展。总的来说, 在本次过程中, 直接利用常见的龙卷指标开展水龙卷短期潜势预报, 难度较大。

6. 临近实况对比订正

对于水龙卷的预警, 关键在于临近预报, 特别是开展实况和数值模式的对比订正。深圳机场出现水龙卷的时间为 06 时 29 分, 但如图 6(a)所示, 上游珠海风廓线雷达自 05 时 30 分起, 0~1 公里垂直风切变逐步增大至 10 m/s; 如图 6(b)所示, 上游中山风廓线雷达自 06 时 12 分起, 0~1 公里垂直风切变更增加至 28 m/s, 属于强烈风切变, 能给下游的龙卷短临预报提供充足的提前量。

这强烈的低空风切变主要归因于 1 公里高度处 18 m/s 的东南风的入侵, 使得底层西南风和东南风形成强烈垂直风切变, 将水平涡管倾斜成垂直涡管, 即雷雨天气下边界层垂直剖面中的小尺度上升与下沉环流扭转成水平环流, 并通过旋转抽吸作用进一步加强垂直抬升运动, 从而形成本次水龙卷天气。然而此类小尺度信号无法通过全球数值模式体现, 如图 5(b)的 EC 全球预报中, 深圳机场低空风场仍为西南风, 因此在基于强对流天气预报的背景下, 结合上游风廓线雷达资料进行对比订正, 是开展龙卷临近预报的关键。

在业务预报, 除了需要例行分析本场风廓线特征, 还需要通过从雷达回波移动方向或引导气流方向, 找到该天气的上游站点, 并进一步分析上游站点的特征, 从而判断天气。在短临业务系统建设中, 不仅

需要对本站的气象要素特征开展预警, 还需对上游及周边站点的气象要素围绕预报指标进行识别判断, 从而提供具有提前量意义的有效预警。

此外, 从图 7 地面风场来看, 珠江口 06 时 15 分已出现气旋性环流, 处于带状列车效应对流区域中。直至 06 时 40 分, 随着西北气流侵入机场内陆, 气旋性环流方才消散, 基本与水龙卷观测出现时间对应, 反映出加强上游地面风场的监视, 对龙卷探测与预报也同样起着重要作用。

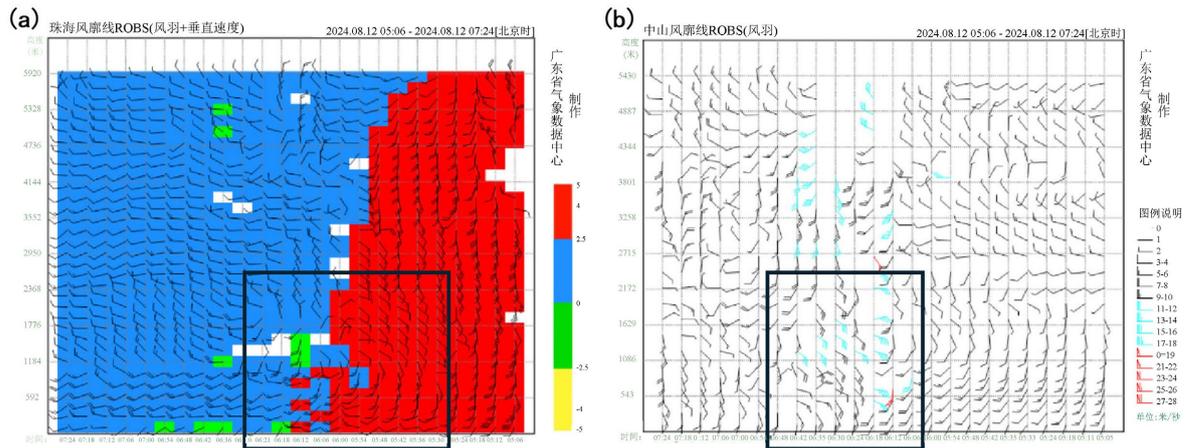
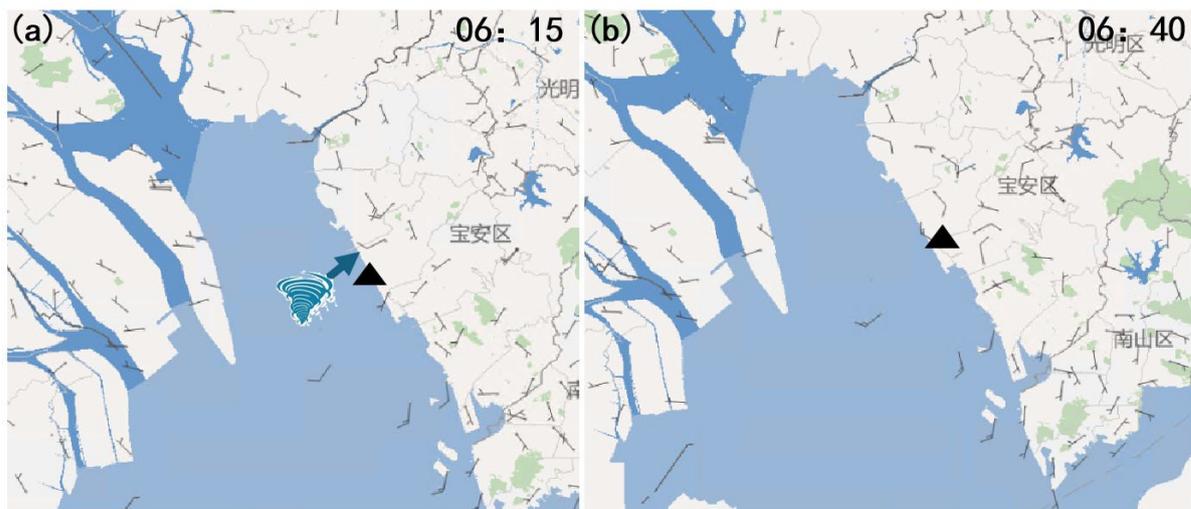


Figure 6. (a) The wind field detected by Zhuhai Wind Profiler Radar, (b) The wind field detected by Zhongshan Wind Profiler Radar; the black box area is the period that 0~1 km low altitude vertical wind shear is greater than 10 m/s

图 6. (a) 珠海风廓线雷达风场; (b) 中山风廓线雷达风场; 黑色框区域为 0~1 公里低空垂直风切变大于 10 m/s 时段



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1719 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 7. The wind field averaged by 1 minute on the ground in Guangdong Province, (a) 06:15, (b) 06:40; the black triangle is the location of Shenzhen airport, and the blue vortex and arrow are the location and moving direction of the water tornado

图 7. 广东省地面 1 分钟平均风场, (a) 06 时 15 分, (b) 06 时 40 分; 黑三角为深圳机场位置, 蓝色漩涡与箭头为水龙卷位置及移动方向

7. 结论与讨论

本文利用天气雷达及环境场资料从水龙卷特征及触发条件对深圳机场 2024 年 8 月 12 日早间周边海域的水龙卷进一步分析, 得出了如下结论:

(1) 深圳机场本次水龙卷处于侧向排列的多单体风暴中, 无超级单体风暴特征, 相对于陆龙卷, 水平尺度偏小, 为百米级别, 强度偏弱, 反射率回波小于 35 dbz, 且龙卷独特的钩状回波特征无法在多普勒雷达上识别, 需综合使用空间分辨率仅 30 米的高分辨率相控阵雷达进行有效探测。

(2) 本次水龙卷在多普勒雷达径向速度图上, 旋转速度达 18 m/s。然而在相控阵雷达中却无中气旋特征, 归因于波束宽度偏窄, 常用扫描仰角过高, 使得雷达扫描高度在龙卷螺旋云体以上。因此在天气雷达建设中, 需考虑土建海拔高度, 并合理使用不同仰角扫描产品, 避免龙卷特征出现在雷达高度以下的情况。

(3) 本次水龙卷过程的触发机制为在弱暖区强迫下, 由风速大小为 12 m/s 的 925 hPa 超低层西南急流的脉动增长提供动力辐合抬升启动机制, 并配合对流有效位能超过 2800 J/kg 不稳定层结下的强烈能量条件释放, 从而形成强对流天气。在强对流背景下, 同时叠加带状列车效应形态下的底层涡旋结构, 即西南风和东南风辐合产生的小尺度辐合旋转, 触发出本次水龙卷过程。

(4) 在通过环境场潜势预报时, 能较好开展强雷雨预报, 但在本次过程中使用龙卷判据, 即 0~1 公里垂直风切变 3 m/s~5 m/s、相对螺旋度 2 m/s~4 m/s、粗理查森数 88 远大于 10 等弱指示意义的龙卷指标, 对本次水龙卷开展短期预报难度较大。但在短临预报中, 在 1 公里高度处 18 m/s 东南风的入侵形成了 28 m/s 的强烈低空风切变, 是本次水龙卷形成的核心关键。因此, 在水龙卷临近预报中, 需重点利用上游风廓线雷达开展对比订正, 如在本次水龙卷过程的短临预报中, 上游珠海站指标可提供近 1 小时提前量, 中山站可提供 17 分钟提前量, 为龙卷预警提供了充足的时间。

(5) 针对水龙卷的形成机制今后将继续收集更多案例, 从雷达特征、环境条件等角度切入, 开展统计研究。同时结合常用陆龙卷指标, 进一步开展对比分析, 从而寻找更接近水龙卷且具有普适性与代表性的指标判据。此外, 围绕水龙卷的形成机制, 今后还需结合数值模拟等方式, 以本次过程为控制组, 通过设计改变下垫面、低空垂直风切变等方案, 对水龙卷的精细结构和演变过程进行更深入的研究。

(6) 在新型设备应用中, 需加大相控阵雷达的组网建设, 及时覆盖高影响地区及生命线工程, 同时尽早将该产品数据推送融入至各类短临预警平台, 并通过大小雷达融合的方式, 结合 AI 图像识别等算法, 进一步开展龙卷雷达特征识别, 从而及时提供有效客观预警。此外, 在风廓线雷达的应用中, 除了关注预报范围内单点风廓线雷达外, 还要对周边地区的风廓线雷达特征进行识别, 特别是天气上游地区, 需重点关注与龙卷形成及加强密切关联的 0~1 公里低空垂直风切变强度。同时, 在业务预警系统中, 也需对周边地区的风廓线雷达特征新增预警告警功能, 从而使在短临预报中, 即使面对如龙卷这类极端危险天气, 也能多争取一点提前量。

参考文献

- [1] 张晶晶, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2023 年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2024, 14(1): 15-24.
- [2] 郑永光. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 2020, 10(6): 69-75.
- [3] 黄先香, 炎利军, 白兰强, 等. 广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征[J]. 气象, 2024, 50(7): 804-817.
- [4] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 等. 2015 年 5 月华南一次龙卷过程观测分析[J]. 应用气象学报, 2016, 27(3): 334-341.
- [5] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析[J]. 气象, 2019, 45(6): 777-790.