

# 佛山强降水与微压计滑动离散功率谱前置信号关联分析

张晶晶 李兆明 黄先香

(广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

**摘要:** 通过对佛山微压计站收集的气压数据进行滑动离散功率谱处理, 以3 h作为窗口, 每分钟进行一次功率谱分析, 分解出2~90 min信号, 对后续强降水过程进行关联分析, 得到如下结论: 微压计滑动离散功率谱前置信号出现在强降水发生前大概1 h左右的时间, 并且伴随降水增强; 风场和气压场信号对强降水没有提前预警信号出现, 只在降水过程中可能出现响应; 重力波信号提前量在不同强降水过程中不尽相同, 在研究时段内, 对70%以上的降水过程有0.5 h的信号超前预警, 50%的强降水能在发生1 h之前获取重力波信号; 微压计滑动离散功率谱前置信号可以作为短时强对流的预警信号之一, 后续可以考虑把信号系统化, 或加入到气象模型中。

**关键词:** 滑动离散功率谱, 微压计, 强降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.015

## The Analysis Between Foshan Heavy Precipitation and Pre-Signal of Sliding Discrete Power Spectrum on Micromanometer

Zhang Jingjing, Li Zhaoming, Huang Xianxiang

(Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

**Abstract:** Using the sliding discrete power spectrum processing of the atmospheric pressure data collected by Foshan micro pressure meter station, taking 3 hours as the window, we decomposed the 2-90 min signal. The correlation analysis was carried out for the follow-up heavy rainfall process. The results show that the micro barometer sliding discrete power spectrum pre signal occurred about 1 hour before the occurrence of heavy rainfall, and was accompanied by the rainfall enhancement. The signals of wind and pressure field had no early warning signal for heavy rainfall, but only had possible response when the precipitation was in progress. For more than 70% of heavy precipitation processes, the signals can be forewarned for 0.5 h, and 50% can be ahead of 1 h. The front signal of micro barometer sliding discrete power spectrum can be used as one of the early warning signals of short-term severe convection In the future, and the signal would be systematized or added to the meteorological models.

**Keywords:** dynamic spectrum analysis, micro piezometer, heavy precipitation

### 0 引言

大气重力波与强对流天气关系密切, 并受到气象工作者的重视与关注。重力波不仅仅是天气过程的产物, 天气尺度过程中产生的重力波可以激发中尺度强对流过程<sup>[1-4]</sup>。Hung<sup>[5-6]</sup>发现美国中部陆龙卷在接地前1~2 h有周期为10~20 min的电离层重力波激发。Koch<sup>[7]</sup>指出高空急流区下方切变不稳定气层产生的重力波对强对流的激发有影响, 同时急流中的垂直切变也是重力波的能量源。Curry等<sup>[8]</sup>在英国伦敦使用3个连网的微压计进行大气重力波观测, 发现在雷暴过程

中有重力波产生, 并观测到大气重力波在超过数百千米的远距离中传播。由此可见, 大气重力波对龙卷及强对流天气的预报预警能起到重要作用。

由于一般天气情况下, 大气重力波的振幅都在0.1 hPa以下, 而强对流过程只在对流发展到极盛时才产生常规气压仪器可测出的压力波动。因次, 对重力波的研究受到传感仪器灵敏度的限制。一直以来, 由于缺乏重力波数据, 重力波与强对流天气关系的相关研究较少且不够深入。

20世纪90年代, 李启泰等<sup>[9-10]</sup>使用高灵敏度的电容式微压波传感器, 将3个探头布置成三角形阵列, 根据同一波阵面到达各阵点(探头)的时间差及各阵点参数计算出重力波的来向及水平波速、波长并计算

收稿日期: 2020年7月31日; 修回日期: 2020年10月14日  
第一作者: 张晶晶(1990—), Email: 786104448@qq.com

出了重力波的振幅和周期，独创了重力波观测系统，应用于冰雹过程的预警中，并取得很好效果。赵彩等<sup>[11]</sup>利用重力波观测资料统计分析了贵州大气重力波的季节特征，发现其具有明显的季节性，且对冷空气活动和雷暴活动有很强的联系。覃卫坚等<sup>[12]</sup>研究了冰雹发生前后的重力波活动特征。

要有效的监测重力波，必须要具有超灵敏度的气压监测系统。2016年起，为加强针对龙卷及强对流天气的监测，佛山布设微压计并陆续投入使用，目前已有7台微压计投入使用，利用这些微压计资料，本文分析了重力波与强对流天气的关系。

## 1 资料与方法

利用佛山市布设的微压计单站数据，结合同期气象资料，对佛山2018—2020年强降水过程对应时段的重力波特征进行分析。该微压计分辨率为1 Pa，采样频率为1次/s，数据时间为2018年1月—2020年5月，共29个月。利用连续大气重力波动态普资料，约24480 h（每分钟一次重力波周期—振幅）。将气压数据进行标准化处理，每3 h计算一次平均的周期—振幅谱（采样周期6 s，每分钟进行一次不同波周期（2~90 min）的傅里叶分析，计算出在该时间到达的重力波振幅和周期，每分钟计算一条波周期—振幅谱线，经过连续运算得到大气重力波的动态谱。

通过微压计滑动功率谱对，其中大型的天气过程与具体生成的过程存在异同。通过举例分析下面过程中情况，对强降水与微压计功率谱信号进行关联分析。

## 2 强降水过程与其对应重力波功率谱个例分析

### 2.1 2020年冷空气混合降水过程分析

以2020年2月15日强降水过程为例（图1），此次主要降水过程从2020年2月15日01时（北京时，下同）开始，在次日07时左右结束，全天各时间段都

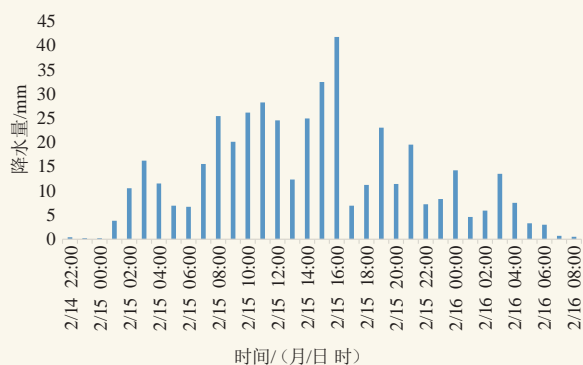


图1 2020年2月15日最大小时累计降水量分布  
Fig. 1 The maximum accumulated precipitation on 29 February 2019

有较大降水量，其中15日15—16时出现时雨量大于30 mm的短时强降水。此次降水过程为锋面降水，其中由于有冷空气补充，降水过程明显，尤其在后续冷空气到达后，降水明显增强。

从最大气压变化（图2）可以看到，气压在降水开始前和降水出现的时维持较为稳定的日周期波动，后续冷空气过境后气压一直上升，没有出现气压在降水前明显的前置信号。最大10 min风速分布（图2）中也可以看出，在降水开始前同样并没有明显的风速上升或者下降，只在2月15日03时出现较弱的风速增幅，风速激增伴随着进一步的降水生成，但风速的变化同样没有提前预警降水的生成。

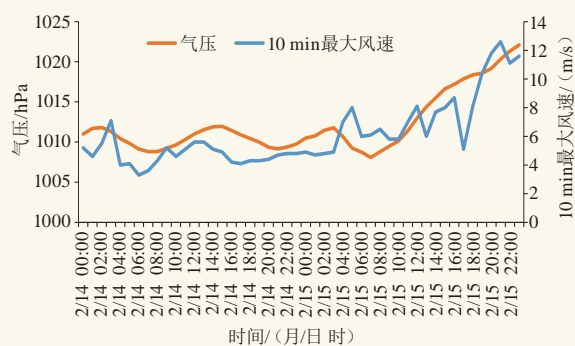


图2 2020年2月14—15日小时最大气压变化情况和最大10 min风速分布

Fig. 2 Variation of hourly maximum pressure and Distribution of maximum 10 minutes wind speed from 14 to 15 February 2020

对微压计单站取得的气压数据进行标准化处理，使用功率谱为3 h滑动平均。图3为摘选15~30 min周期的滑动功率谱分析，窗口为3 h。从图中可以看出，25~30 min周期波动对本次过程有较好的提前相应作用：从2月15日22—23时开始，25~30 min周期的振幅明显加强，对强降水过程有约2~3 h的提前预警可能性。在后续强烈降水出现前，波动持续保持在较高的

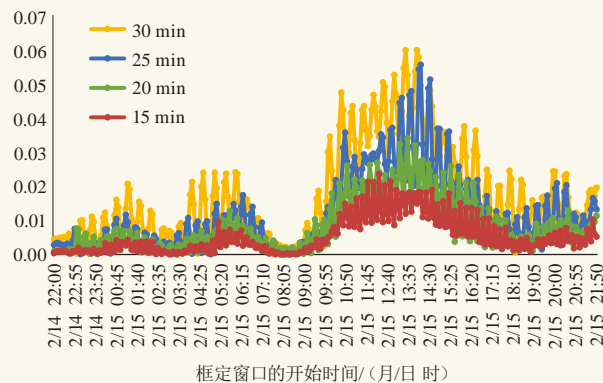


图3 2020年2月14—15日滑动功率谱振幅分布  
Fig. 3 Amplitude distribution of sliding power spectrum from 14 to 15 February 2020

振幅,对15日15—16时,出现超过30 mm/h的短时强降雨,也有明显的信号提前量且振幅波动尤为剧烈。由于冷空气比降水先到达站点,对于这次冷锋过程,25~30 min的微压计气压频率波动出现了2~3 h提前相应。重力波在天气系统到来前先出现,故可以通过捕捉异常波动,对后续天气过程进行预估,而原来的气压和风速原始数据较难发现此类天气过程的提前响应。

## 2.2 2019年夏季短时强降雨过程分析

以2019年7月29日凌晨开始的短时强降雨为例(图4),降水开始时间为29日03时,降水时间主要集中在03—20时,时雨量存在两次波峰,即有两次短时强降雨过程,峰值达到45 mm/h以上。同样,在图5中可以看到:气压和风速不存在明显的前置信号,且风速在时雨量第2个峰值处才出现强度响应。

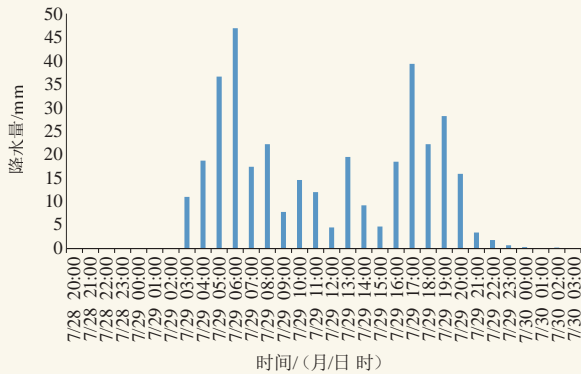


图4 2019年7月29日最大小时累计降水量分布

Fig.4 The maximum accumulated precipitation on 29 July 2019

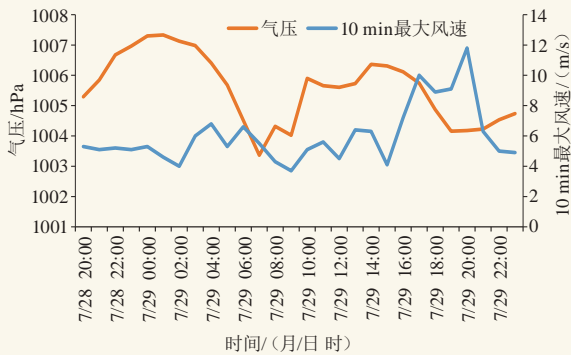


图5 2019年7月28—29日小时最大气压变化情况与最大10 min风速分布

Fig. 5 Variation of hourly maximum pressure and distribution of maximum 10 minutes wind speed from 28 to 29 July 2020

而从图6可以看到:在29日00时窗口的时间中,气压开始出现较强的25~30 min周期波动,对本次降水过程有2~3 h左右的提前效应,而在后续波动最强出现在04时左右,一小时后降水出现时雨量大于30

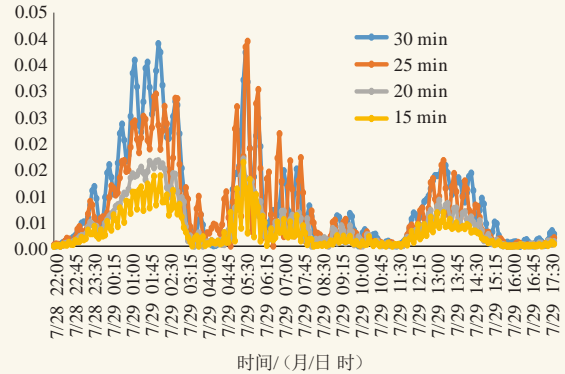


图6 2019年7月28—29日滑动功率谱振幅分布

Fig. 6 Amplitude distribution of sliding power spectrum from 28 to 29 July 2020

mm的降水,存在1 h左右的信号超前。图5未提及重力波信号提前量,图6的重力波信号提前量为3 h左右,凌晨前后功率谱增大,3 h后出现降水。

## 2.3 强降雨与波动前置关系分析

经统计,在无降水时间段,30 min周期的波动振幅主要在0.15强度以下,故选取0.15作为临界,将30 min波动振幅在0.15强度以上的过程定义为较强波动。通过对强降雨最大降水时间点前寻找降水开始时间,同时在强降雨时间点往前推找到微压计中25~30 min周期的较强波动开始出现的时间点,通过两个时间点进行相减得到下列出现强降雨时间点与两者时间差的关系(图7),在不同强降雨过程中,前置时间大多不一样。从图8中可以看到70%以上降水过程能有0.5 h的微压计功率谱信号超前预警,50%过程能在1 h之前出现功率谱信号提前。重力波信号出现的时间早于强降雨天气过程,可以通过对重力波功率谱信号异常波动捕捉,对后续天气过程进行预估。强降雨发生时段和气压下降时段一致,均为04—06时,气压对降水有明显的提前量信号,最大风速则是在降

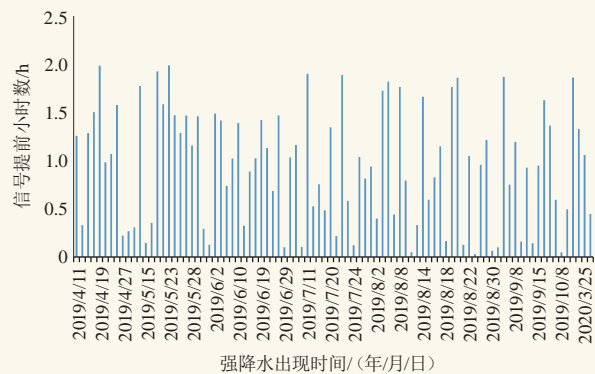


图7 强降雨出现时间与信号提前小时数分布

Fig.7 Distribution of occurrence time of heavy precipitation and signal advance

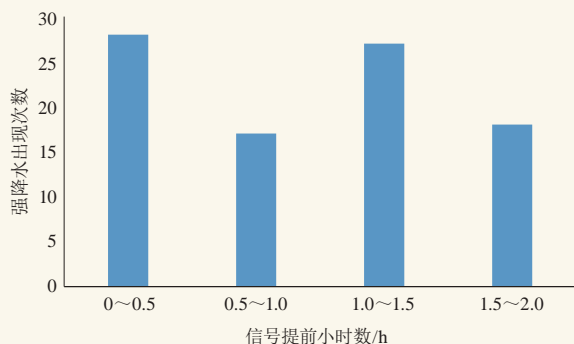


图8 信号提前小时数统计  
Fig. 8 Statistics of signal advance hours

水后出现, 同样对降水没有提前预警信号。

### 3 结论

1) 强降水发生前往往能探测到微压计滑动离散功率谱前置信号, 伴随信号增强雨强也可能随之增大。

2) 风场和气压场信号对强降水没有提前预警信号出现, 只在降水正在进行中出现可能响应。

3) 微压计功率谱的信号提前在不同强降水过程中不尽相同, 70%以上降水过程能有0.5 h的微压计功率谱信号超前预警, 50%过程能在1 h之前出现功率谱

(上接79页)

卷是由台风或强台风引发的, 龙卷发生时台风中心距离龙卷发生地约200~400 km; 海南岛南部西行的台风引发的龙卷出现在东部沿海, 中部西行的台风引发的龙卷出现在北部沿海, 东部西北行的台风龙卷出现在北部沿海。

2) 非热带气旋龙卷主要出现在春季, 其中以5月最为多发, 超过90%的非热带气旋龙卷发生在13—17时; 海风锋引发的龙卷落区位于海南岛北部地区, 最强可达EF2级, 边界层中 $\beta$ 尺度海风锋辐合线是这类龙卷发生、发展的关键因素; 干冷空气引发的龙卷落区位于海南岛北部和东部地区, 约23%为EF1级, 其余77%为EF0级, 边界层切变线是这类龙卷发生、发展的关键因素。

另外, 目前海南还没有对水龙卷进行过详细分析, 有待于今后进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 姚叶青, 俞小鼎, 郝莹, 等. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析. 热带气象学报, 2007, 23(5): 483-490.
- [5] 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

信号提前。

4) 微压计滑动离散功率谱前置信号可以作为短时强对流的预警信号之一, 后续可以考虑把信号系统化, 或加入到气象模型中。

#### 参考文献

- [1] Hines C O. Gravity waves in the atmosphere. Nature, 1972, 239: 73-78.
- [2] Nagpal O P. The sources of atmospheric gravity waves. Contemp Phys, 1979, 20(6): 593-609.
- [3] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991.
- [4] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用. 大气科学, 1978, 2(3): 201-209.
- [5] Hung R J. Ray tracing of gravity waves as a possible warning system for tornado storms and hurricane. J Appl Meteor, 1978, 17: 3-11.
- [6] Hung R J. Case studies for gravity wave associated with isolated tornadic storms on 13 January 1976. J Appl Meteor, 1979, 18: 460-466.
- [7] Koch S E. Observed interaction between strong convection and internal gravity waves. Preprints at the 14th Conference on Severe Local Storms, 1985.
- [8] Curry M J, Murty R C. Thunderstorm-generated gravity waves. J Atmos Sci, 1974, 31: 1402-1408.
- [9] 李启泰, 李诗明, 赵彩. 大气重力波布阵探测灾害性冰雹过程的研究. 贵州地质, 2001, 18(2): 73-78.
- [10] 李启泰, 谢金来, 杨训仁. 灾害性冰雹过程的重力波演变特征. 气象学报, 1993, 51(3): 361-367.
- [11] 赵彩, 田英, 周涛. 贵州中部大气重力波活动的天气气候学分析. 高原气象, 1998, 17(4): 420-426.
- [12] 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭, 等. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1039-1049.

研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.

- [6] 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件. 气象, 2013, 39(6): 728-737.
- [7] 王宁, 王婷婷, 张硕, 等. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析. 应用气象学报, 2014, 25(4): 463-469.
- [8] 陶祖钰, 赵翠光, 陈敏. 谈谈统计预报的必要性. 气象科技进展, 2016, 6(1): 6-13.
- [9] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [10] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [11] 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. 气象, 2019, 45(6): 777-790.
- [12] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [13] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [14] 吴俞, 薛湛彬, 郝丽清, 等. 强台风“山神”外围超级单体引发的龙卷分析. 热带气象学报, 2015, 31(2): 213-222.
- [15] 郑艳, 俞小鼎, 任福民, 等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. 气象, 2017, 43(6): 675-685.
- [16] 符式红, 王秀明, 俞小鼎. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究. 气象学报, 2018, 76(5): 742-754.
- [17] 王秀明, 俞小鼎. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究. 气象学报, 2019, 77(3): 387-404.
- [18] 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.
- [19] 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): 8-14.
- [20] 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006-2018). 中国科学: 地球科学, 2020, 50(5): 619-634.
- [21] 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. 应用气象学报, 2016, 27(3): 334-341.
- [22] 杨伟, 方阳, 蒋帅, 等. 2017年8月13日洞庭湖水龙卷特征. 应用气象学报, 2020, 31(3): 328-338.