



## 基于微压计观测的暴雨过程重力波特征分析

王秀娟 冉令坤 齐彦斌 马淑萍 慕秀香 姜忠宝 毕潇潇

## Analysis of characteristics of gravity waves of heavy rainfall event based on microbarograph observation

Wang Xiu-Juan Ran Ling-Kun Qi Yan-Bin Ma Shu-Ping Mu Xiu-Xiang Jiang Zhong-Bao Bi Xiao-Xiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 234702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210794

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210794>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 基于微压计观测的暴雨过程重力波特征分析\*

王秀娟<sup>1)2)</sup> 冉令坤<sup>3)</sup> 齐彦斌<sup>1)2)†</sup> 马淑萍<sup>3)</sup>  
慕秀香<sup>4)</sup> 姜忠宝<sup>5)</sup> 毕潇潇<sup>4)</sup>

1) (吉林省气象灾害防御技术中心, 长春 130062)

2) (中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室, 长春 130062)

3) (中国科学院大气物理研究所, 中国科学院云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029)

4) (吉林省气象台, 长春 130062)

5) (吉林省气候中心, 长春 130062)

(2021年4月25日收到; 2021年8月24日收到修改稿)

利用高精度微压计数据、卫星、地面观测数据和 GDAS 数据, 对 2020 年 7 月 29 日—30 日东北冷涡暴雨过程重力波特征进行分析, 结果表明: 重力波激发了此次暴雨, 在暴雨发生前 2—4 h, 出现了周期约 128 min 的重力波先兆活动; 在暴雨期间, 重力波周期集中在 120—180 min; 在强对流发展期间出现了周期为 128—256 min 的重力波和 8—64 min 周期更短的重力波. 强对流与重力波相互影响、相互作用. 强对流发展时, 地面出现雷暴高压、冷池、出流边界, 在冷池前方形成气流辐合区; 气流辐合辐散区向前移动, 形成重力波传播, 最终激发暴雨. 重力波先兆活动这一特征对东北冷涡暴雨有一定的指示预警意义.

**关键词:** 重力波, 微压计, 东北冷涡, 暴雨**PACS:** 47.35.Bb, 92.60.Qx, 92.60.Wc**DOI:** 10.7498/aps.70.20210794

## 1 引言

东北冷涡暴雨是我国北方夏季主要的灾害性天气, 往往会造成严重的洪涝灾害, 引发山体滑坡和泥石流等地质灾害. 东北冷涡暴雨发生在条件不稳定的环境下, 配合水汽输送, 受到低空急流的影响, 并伴有明显的中尺度对流系统活动<sup>[1,2]</sup>. 暴雨强对流的因素很多, 重力波是一个重要因素. 重力波发生发展往往与暴雨、强对流等灾害天气密切相关<sup>[3–5]</sup>, 重力波能够触发强对流, 造成短时强降雨<sup>[6]</sup>. 强对流也能够激发多种尺度的重力波<sup>[7]</sup>, 对重力波的传播和发展起到积极的作用<sup>[8]</sup>. 因此, 研究东北

冷涡暴雨过程重力波特征与机理对深入认识二者发生发展机制、东北冷涡暴雨预警有着重要的科学意义.

重力波追赶和碰撞是形成暴雨的重要机制之一<sup>[9]</sup>. 当强对流发展时, 非地转平衡作用会激发重力波; 重力波反过来促进对流组织化发展, 产生暴雨, 并且暴雨区位于中低压和中高压之间, 涡度中心比散度中心落后 $\pi/2$ . 尤其是大振幅(0.5—15 hPa)、长周期(0.5—4.0 h)、中尺度波长(50—500 km)重力波组织带状降水的能力较强<sup>[10–13]</sup>, 易引起大风、冰雹、短时强降雨等强对流活动. 2018年, Liu等<sup>[14]</sup>在一次四川地形暴雨分析中发现, 在10—14 km高度有周期80—100 min、波长40—50 km的重力

\* 国家自然科学基金(批准号: 41775140, 41975182)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFC0200503)和吉林省重点科技研发项目(批准号: 20180201035SF)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiyabin88@qq.com

波, 该波动是引起暴雨的关键尺度重力波. 2020年, Huang等<sup>[15]</sup>在新疆地形暴雨研究中指出, 高、低空存在周期73—200 min、波长50—85 km的重力波, 低层波动与中尺度涡旋共同作用促进对流发展, 导致暴雨.

以往人们常常采用气压仪探测气压波动来观测重力波<sup>[16–18]</sup>. 与常规气压仪相比, 微压计探测精度和采样频率更高, 能够更准确地探测到几分钟至几十分钟更短周期的重力波特征<sup>[19]</sup>. Curry和Murty<sup>[20]</sup>利用微压计数据统计分析雷暴激发的重力波特征, 指出波动平均周期为10 min. Grachev等<sup>[21]</sup>统计分析俄罗斯5年期间20次雷暴激发的重力波特征, 指出雷暴发展移动中存在周期为40—300 min的重力波. Kulichkov等<sup>[22]</sup>分析指出, 在俄罗斯, 夏季冷锋激发的重力波周期约为5—6 min, 波速小于50 m/s. Blanc等<sup>[23]</sup>利用微压计网统计了非洲地区10年强对流过程的重力波特征, 发现强对流激发的重力波平均速度约37 m/s、周期约96 min.

部分雷暴发生前会有重力波提前出现的现象, 称为重力波先兆活动. Uccellini<sup>[10]</sup>研究指出, 重力波先兆活动与强对流的生成发展有密切关系. 1993年, 李启泰等<sup>[24]</sup>利用微压计数据分析降雹天气重力波特征, 发现降雹前数小时间歇出现振幅大于30 Pa的重力波, 其周期范围小于90 min. 2015年, Wu等<sup>[25]</sup>分析发现, 暴雨发生前约2 h有周期120—240 min的重力波存在, 并起到触发暴雨的作用. 2018年, Yang等<sup>[26]</sup>模拟一次新疆地形暴雨, 发现波长20—45 km、周期50—120 min、波速10—25 m/s的重力波提前于暴雨出现, 并促进暴雨发生发展.

受观测技术手段限制, 以往重力波研究主要是利用数值模式或者地面气压观测数据来分析重力波, 关注重力波在一段时间内的平均态特征. 本文利用高精度微压计数据分析东北冷涡暴雨中宽周期范围(几分钟到几小时)重力波频谱随时间演变的动态特征, 研究重力波先兆活动和产生机制, 为此类暴雨预测预警提供科学的依据.

## 2 数据与方法

中国气象局吉林云物理野外科学试验基地位于吉林省白山市靖宇县, 试验区内布设了微压计、云雷达、微波辐射计、微雨雷达、激光雨滴谱、大气电场仪等仪器. 微压计(图1)是用于观测地面低频

大气扰动的一种设备, 可探测周期范围几分钟到几小时的重力波. 微压计从2020年7月1日不间断运行至今, 该仪器由中国科学院大气物理研究所云与强风暴实验室(LACS)自主研发, 采集的气压数据有以下特点: 一是探测精度和灵敏度高, 气压分辨率为0.1 Pa, 采集的信号频率可以达到 $10^{-5}$  Hz, 采样频率高达1 Hz; 二是改良了微压计容易受温度影响这一缺点, 应用恒温技术使得微压计仅对气压变化响应而对温度变化响应较小, 环境的温度误差控制在0.5 °C内; 三是输出的气压数据经过滤波处理, 滤掉了高频噪声. 虽然常规气压仪也能够观测到地面气压, 但是常规气压仪的采样频率通常为1 min/次, 探测精度最高为10 Pa. 而重力波导致的气压波动往往小于100 Pa, 因此, 相比较常规气压仪, 微压计仪器可以更好地满足重力波特征.



图1 微压计  
Fig. 1. Microbarograph.

为分析2020年7月29日—30日东北冷涡暴雨过程重力波频谱特征, 本文利用微压计观测数据, 采用小波分析方法<sup>[27]</sup>计算重力波周期、频率随时间演变的动态特征, 其中, 母波选取Morlet. Morlet小波分析是在傅里叶(Fourier)变换基础上引入窗口函数, 能够反映信号在时域、频域信号的局部特征. 假设有时间序列数据 $X_n$ , 时间步长均为 $\Delta t$ , 小波函数表达式为

$$\phi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (1)$$

式中,  $\eta$ 是无量纲时间参数,  $\omega_0$ 是无量纲频率, 这里取值 $\omega_0 = 6$ .

对离散序列 $X_n$ 进行连续小波变换, 即得到 $X_n$ 和 $\phi_0(\eta)$ 的卷积为

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \varphi^* \left[ \frac{(n' - n)\Delta t}{s} \right], \quad (2)$$

其中  $s$  是小波尺度, \*表示共轭复数, 当小波尺度、时间参数发生变化时, 可以建立一个二维图, 显示不同频率信号的功率谱及其随时间的变化.

为了近似连续小波变换, 对于每个尺度  $s$ , (2) 式要计算  $N$  次, 通过卷积定理可知, (2) 式可以用离散傅里叶变换 (DFT) 在傅里叶空间同时进行  $N$  次卷积, 得到

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}_k \hat{\phi}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \Delta t}, \quad (3)$$

其中, 离散序列  $X_n$  的 DFT 为

$$\hat{X}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{-2\pi i k n / N}, \quad (4)$$

式中  $k = 0, \dots, N-1$  是频率序号. 小波尺度  $s$  为

$$s_j = s_0 2^{j \Delta j}, \quad j = 0, 1, \dots, J, \quad (5)$$

$$J = \Delta j^{-1} \log_2(N \Delta t / s_0), \quad (6)$$

其中,  $s_0$  是最小可分辨尺度,  $J$  是最大尺度. 本文中  $\Delta j$  取值  $1/12$ ,  $\Delta t = 1$ ,  $s_0 = 2 \Delta t$ . 由此得到小波功率谱  $|W_n(s)|^2$ . 因为处理的是有限长度的时间序列, 误差出现在小波功率谱的开头和尾端, 这种边缘效应称为影响锥 (COI) [26].

傅里叶变换是一种分析信号的方法, 可以将信号由时域转为频域. 定义  $f(x)$  是在任何有限区间上只存在有限个第一类间断点和有限个极值点, 并且  $f(x)$  在  $(-\infty, +\infty)$  上绝对可积, 则在  $f(x)$  的连续点处

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \right] e^{i\omega x} d\omega,$$

而在间断点处  $f(x) = (f(x+0) + f(x-0))/2$ , 定义

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

为  $f(t)$  的傅里叶变换,  $f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$  称为  $F(\omega)$  的逆傅里叶变换. 为了体现 2020 年 7 月 29 日—30 日东北冷涡暴雨过程关键重力波频段特征, 本文对 48 h (2020 年 7 月 28 日 12:00—30 日 12:00) 微压计气压数据长度进行傅里叶变换, 数据长度为 172800, 选取周期 120—180 min 的重力波进行逆傅里叶变换重构关键尺度重力波信号.

本文采用吉林省 981 个地面加密站数据, 结合 3 路微压计数据分析暴雨过程的重力波特征; 采用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic And Atmospheric Administration) GDAS 同

化数据 (空间分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间分辨率 3 h) 分析天气形势、重力波产生机制; 采用中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) FY-2G 黑体亮温数据 (空间分辨率  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 时间分辨率 1 h) 分析强对流演变过程.

### 3 暴雨过程

2020 年 7 月 29 日 07:00—30 日 5:00 吉林省中部和南部发生暴雨 (图 2), 43 个加密站出现暴雨, 1 个站出现大暴雨. 强降雨带主要分布在吉林省中东部 (四平东部、辽源、吉林) 和吉林省南部 (通化、白山). 其中, 短时强降雨 (小时雨量  $\geq 20$  mm) 主要发生在 7 月 29 日 13:00—21:00、7 月 29 日 21:00—30 日 2:00, 具有雨强大、降雨量不均匀的特点.

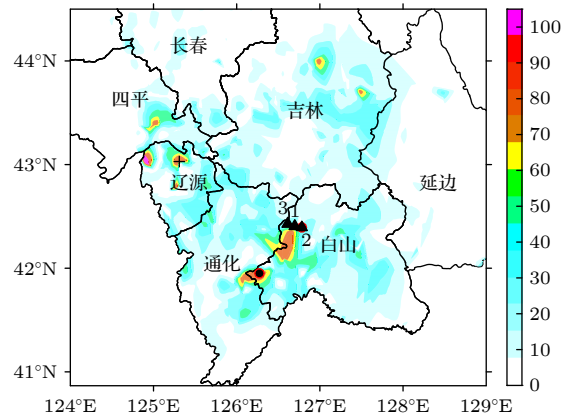


图 2 2020 年 7 月 29 日 7:00—30 日 5:00 吉林省累计降雨量 (填色图, mm)、加密站 E7215 (黑色加号)、E9039 (黑色圆点)、微压计 1, 2, 3 号站 (黑色三角形)

Fig. 2. Accumulated heavy rainfall (shaded, mm) on 7 BJT 29–5 BJT 30 July 2020, the locations of surface automated mesonet station E7215 (black plus), E9039 (black dots) and microbarograph 1, 2, 3 (black triangle).

动力抬升条件方面, 此次暴雨发生时, 高层天气形势 (图 3(a)(b)) 从低纬到高纬呈现了“低-高-低”的 3 带 (西风带、副热带、热带环流系统) 分布特征, 即在热带地区有低值区, 表明有台风活动, 副热带高压位置偏北, 588 脊线北端位于  $40^\circ\text{N}$  附近, 脊线呈东-西状. 吉林省位于东北冷涡前部、副热带高压后部, 高层大气以西南暖湿气流为主 (图 3(a)(b)), 低层 850 hPa 东北冷涡中心位于内蒙中部地区, 低层 850 hPa 吉林省也处于暖湿西南气流中, 另外, 高、低层涡中心位置几乎一致, 表明冷涡系统较为深厚. 同时, 地面有西南风与偏东风辐合区 (图 3(d)), 高低层动力抬升机制明显.

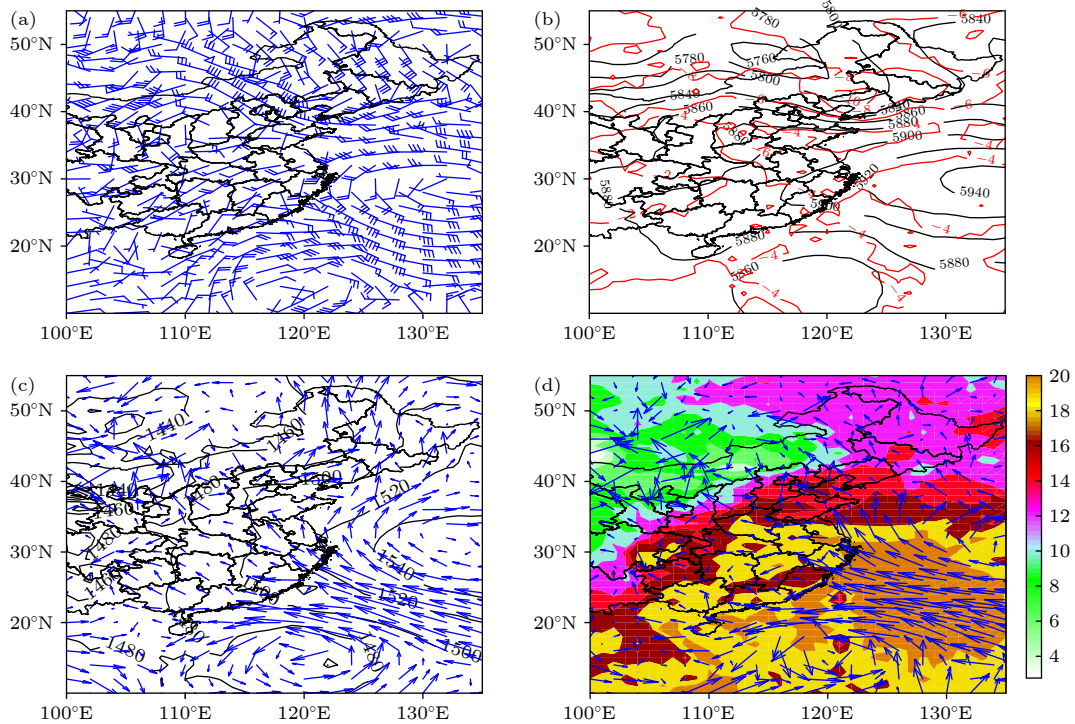


图3 2020年7月29日20:00 (a) 200 hPa 风场(风向杆, m/s); (b) 500 hPa 位势高度场(黑色等值线, gpm)、温度场(红色等值线,  $^{\circ}\text{C}$ ); (c) 850 hPa 位势高度场(黑色等值线, gpm)、风矢; (d) 地面比湿(填色图, g/kg)、风矢  
 Fig. 3. (a) 200 hPa wind field (wind stick, m/s), (b) 500 hPa geopotential height field (black lines, gpm), temperature field (red lines,  $^{\circ}\text{C}$ ), (c) 850 hPa geopotential height field (black lines, gpm), wind vector, (d) surface specific humidity (contour lines, g/kg), wind vector on 20 BJT 29.

热力、水汽条件方面, 在有利的天气形势下, 当东北冷涡系统内的短波槽东移下滑, 东北冷涡携带的干冷空气与副热带高压后部暖湿气流交汇, 这为暴雨提供了有利的热力条件. 同时, 受副热带高压后部与台风外围水汽输送的共同影响, 地面比湿高达 12—14 g/kg(图 3(d)). 因此, 高低层大气动力、热力、水汽条件充分, 当有合适的中尺度触发因子, 就会引发暴雨、雷电等强对流天气.

此次暴雨过程伴有中尺度对流系统活动, 在红外卫星云图(图 4)上, 7月29日11:00吉林省中部(长春、吉林)存在零散云顶亮温高值区, 中心值达到 $-38^{\circ}\text{C}$ — $48^{\circ}\text{C}$ , 代表有对流云团活动. 7月29日14:00对流云团逐渐发展合并, 并向东南方向伸展, 吉林省中北部地区云顶亮温高值中心达到 $-50^{\circ}\text{C}$ — $60^{\circ}\text{C}$ , 伴有强降雨(小时雨量 $\geq 20\text{ mm}$ )产生; 同时白山北部和延边东部有亮温约 $-26^{\circ}\text{C}$ — $30^{\circ}\text{C}$ 的新生对流云团. 7月29日17:00强对流云团主体南移到四平、吉林、辽源、通化北部, 云顶亮温中心值高达 $-50^{\circ}\text{C}$ — $60^{\circ}\text{C}$ 、白山北部强对流云团发展, 亮温增至 $-40^{\circ}\text{C}$ . 7月29日20:00零散的

强对流云团合并形成中尺度对流系统, 亮温高值区位于四平东部、辽源、通化北部, 中心值高达 $-60^{\circ}\text{C}$ , 同时白山和延边仍存在对流云团. 至7月30日2:00(图 4(e), (f)), 中尺度对流系统主体移至白山、延边, 云顶亮温中心值约 $-60^{\circ}\text{C}$ , 进入降水强盛阶段.

在此暴雨过程中, 随着中尺度对流系统的发展变化, 地面气象要素具有明显的波动特征. 如图 5(a)所示, 地面自动站 E7215 降水出现在 29 日 14:00—21:00; 29 日 14:00 开始有小量降水, 气压整体变化呈现下降趋势, 温度达到峰值后迅速减小, 表明天气系统开始影响本站; 29 日 17:00—20:00 短时强降水出现两个峰值, 同时气压整体呈现明显的升高趋势, 气温先减小后增加(气温低至  $21^{\circ}\text{C}$ ). 在降水前后, 气压和温度都表现出脉动特征. 地面自动站 E9039 气压、温度和降水变化具有类似特点. 该站降水时段在 29 日 18:00—30 日 4:00, 在 30 日 1:00—2:00 短时强降水达到峰值, 虽然气压整体趋势是增加的, 但在降水前后仍表现出明显的脉动; 在辐射作用下, 夜间气温整体表现为降温, 但在降

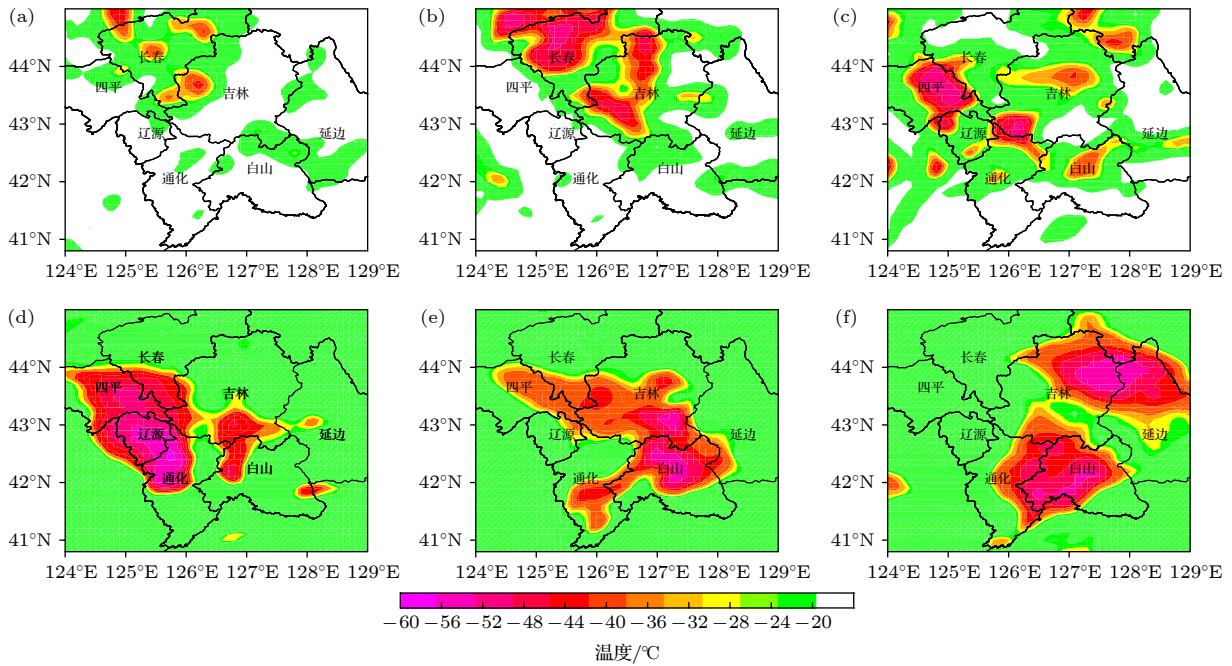


图4 2020年7月 (a) 29日11:00, (b) 29日14:00, (c) 29日17:00, (d) 29日20:00, (e) 29日23:00和(f) 30日2:00 FY-2G卫星云图亮温  
Fig. 4. FY-2G satellite black body temperature on (a) 11 BJT 29, (b) 14 BJT 29, (c) 17 BJT 29, (d) 20 BJT 29, (e) 23 BJT 29, (f) 2 BJT 30 July 2020.

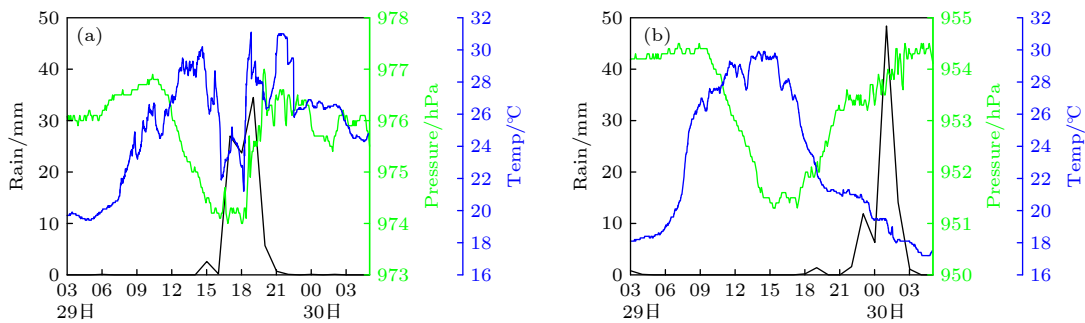


图5 2020年7月29日—30日 (a) E7215站(125.31°E, 43.04°N), (b) E9039站(126.27°E, 41.95°N)1 h累积降雨量(黑色实线, mm)、气压(绿色实线, hPa)、温度(蓝色实线, °C)  
Fig. 5. The 1 h accumulated rainfall (black solid line, mm), pressure (green solid line, hPa), temperature (blue solid line, °C) in (a) E7215 (125.31°E, 43.04°N), (b) E9039 (126.27°E, 41.95°N) on 29–30 July 2020.

水期间存在明显的降温增幅, 加剧气温下降. 综上所述, 在降水过程中地面气压和气温的变化具有两个特点: 第一, 气压和温度的日变化特征显著, 气压在 15:00—18:00 达到最小值, 如果没有降水, 此时气温达到最大值; 如果有降水, 地面降水蒸发冷却作用会引起短时降温; 第二, 在局地降水发生前后, 气压和气温都出现短时脉动, 代表存在某种波动. 本文主要关注这种气压脉动, 因为它对降水有一定的预兆指示意义.

#### 4 重力波特征

下面利用中国科学院大气物理研究所研发的

1, 2, 3号微压计采集的高精度气压数据分析重力波特征. 参考强对流系统自西向东的移动路径, 由于自西向东安装的微压计分别为3号、1号、2号, 以下采用上述顺序进行微压计数据分析.

##### 4.1 重力波时域特征

图6—图8分别是3号、1号、2号微压计采集的原始气压、气压日变化和扰动气压. 在信号处理中, 常用到移动平均滤波进行滤波, 这种方法本质上是一种低通滤波, 假设输入数据为  $x$ , 输出为  $y$ , 窗口宽度为  $N$ , 在新的一次计算中, 将上个窗口队列的首数据去掉, 其余  $N - 1$  个数据依次前移,

并将新的计算数据插入, 作为新队列的尾. 移动平均滤波的计算公式为

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-N+1)}{N} \quad (7)$$

对两日 (48 h) 微压计原始气压数据 (2020 年 7 月 28 日 12:00—30 日 12:00) 进行移动平均滤波, 窗口宽度设为 21600, 可以得到气压的日变化, 原始气压减去气压日变化可以得到扰动气压, 其中, 图 6—图 8 仅显示 29 日 0:00—30 日 6:00 气压原始数据、气压日变化、扰动气压. 可以看出, 平均气压与原始气压的变化趋势基本一致, 29 日 7:00—15:00 气压显著下降并有降水, 29 日 15:00—22:00 气压明显上升, 并且气压波动非常剧烈, 伴随持续性强降水; 29 日 22:00—30 日 5:00, 仍有降雨的发生, 同时气压小幅下降.

对于微压计 3 号站, 如图 6(b) 所示, 29 日 1:00 气压扰动开始增强, 振幅从 -5 Pa 增大到 -30 Pa,

此后气压扰动振幅减小, 29 日 8:00 气压扰动再度增大至 20 Pa, 11:00 该站出现降水, 可以看到气压扰动的增强先于降水出现, 表明这种重力波对降水来说具有明显的先兆活动特征. 另外, 对比图 4(a) 可以看出, 此时降水是由孤立的对流系统造成的, 因此气压扰动振幅不是很强. 随着对流系统的合并增强, 13:00 出现第二次降水峰值, 气压扰动振幅在 12:00 增强为 23 Pa 左右, 在 13:00—22:00 气压波动很剧烈, 扰动振幅进一步增强到 40—60 Pa, 22:00 出现了降水第三次峰值, 特别地, 在 17:00—19:00 降水非常弱, 但是, 气压扰动显示出对未来强降水的先兆信号; 30 日 03:00 降水结束, 气压扰动趋于减弱. 因此气压扰动对第二次、第三次峰值降水来说依然保持一定的提前量.

1 号微压计和 2 号微压计观测的扰动气压具有类似的特点. 1 号微压计记录的气压扰动对峰值降水依然保持一定的提前量. 例如, 对于 1 号微压

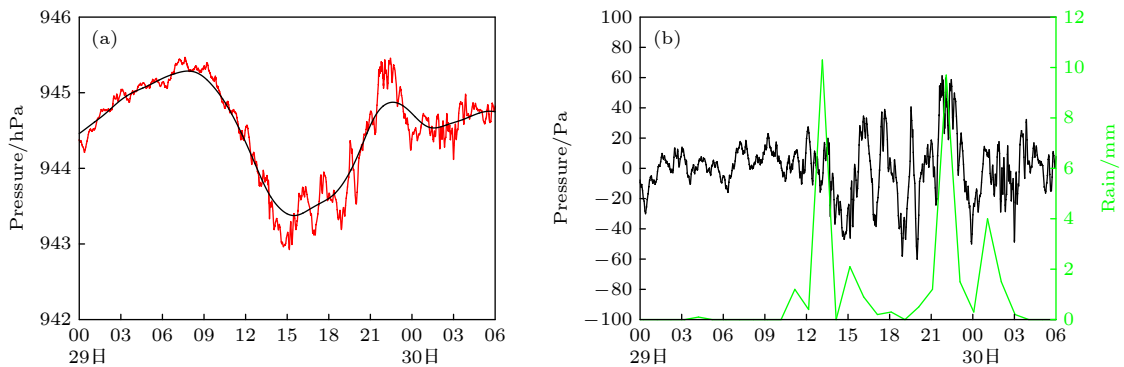


图 6 微压计 3 号站 (126.61°E, 42.43°N) (a) 原始气压 (红色实线, hPa)、气压日变化 (黑色实线, hPa); (b) 扰动气压 (黑色实线, Pa)、小时雨量 (绿色实线, mm)

Fig. 6. Microbarograph 3 (126.61°E, 42.43°N): (a) Original pressure (red line, hPa), pressure daily variation (black line, hPa); (b) pressure disturbance (black line, Pa), hourly rain (green line, mm).

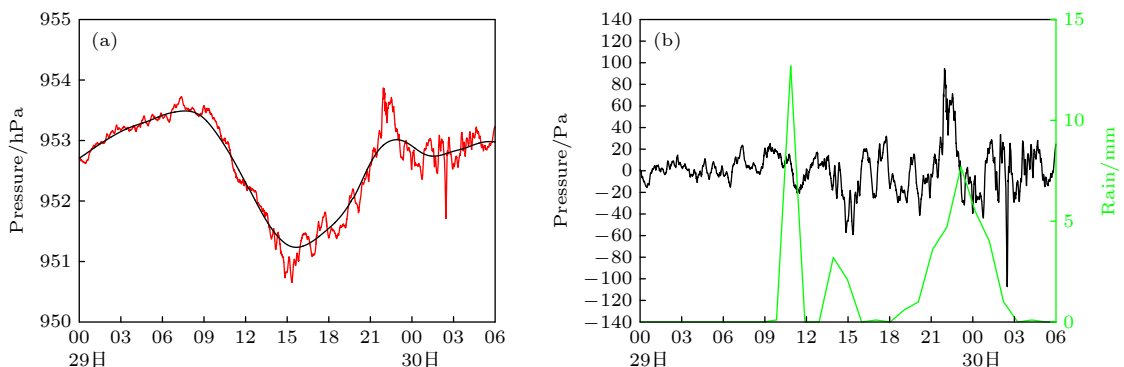


图 7 微压计 1 号站 (126.70°E, 42.41°N) (a) 原始气压 (红色实线, hPa)、气压日变化 (黑色实线, hPa); (b) 扰动气压 (黑色实线, Pa)、小时雨量 (绿色实线, mm)

Fig. 7. Microbarograph 1 (126.70°E, 42.41°N): (a) Original pressure (red line, hPa), pressure daily variation (black line, hPa); (b) pressure disturbance (black line, Pa), hourly rain (green line, mm).

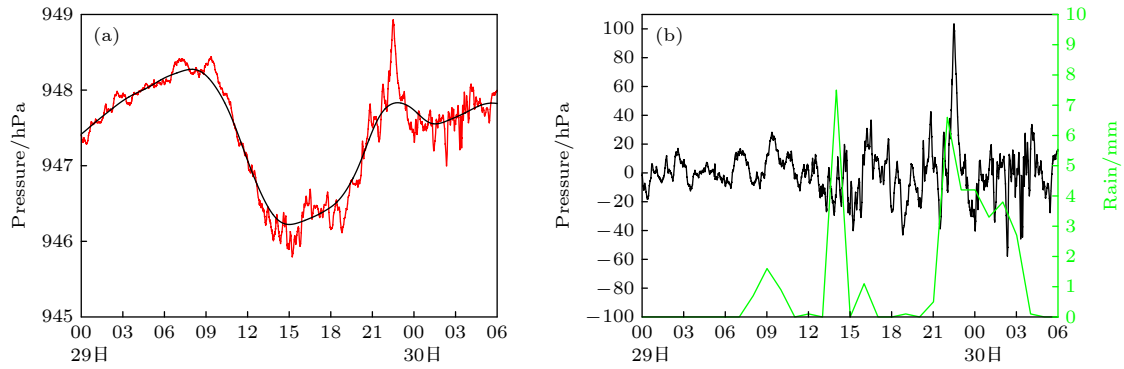


图 8 微压计 2 号站 (126.8°E, 42.4°N) (a) 原始气压 (红色实线, hPa)、气压日变化 (黑色实线, hPa); (b) 扰动气压 (黑色实线, Pa)、小时雨量 (绿色实线, mm)

Fig. 8. Microbarograph 2 (126.8°E, 42.4°N): (a) Original pressure data (red line, hPa), pressure daily variation (black line, hPa); (b) pressure disturbance (black line, Pa), hourly rain (green line, mm).

计 (图 7(b)), 29 日 11:00 降水达到第一次峰值, 但是气压扰动从 29 日 7:00 就开始增强, 振幅从 5 Pa 增长到 20 Pa. 14:00 出现第二次降水峰值, 气压扰动振幅在 11:00—13:00 保持在 20 Pa 左右, 在 13:00—15:00 进一步增强到 -50 Pa. 第三次降水开始于 18:00, 气压扰动从 16:00 开始进一步增强, 在 23:00 振幅增大达到 103 Pa, 此后第三次降水达到峰值. 对于 2 号微压计 (图 8(b)), 降雨量峰值出现在 29 日 14:00, 22:00 (图 8(b)), 同时气压扰动也达到极值, 分别为 -40 Pa 和 102 Pa; 需要强调的是, 在强降水发生前已经出现明显的气压扰动, 例如, 19:00 时的 -40 Pa 的气压扰动先于 21:00 降水的出现, 表明对于强降水, 重力波具有先兆活动特征.

从降雨量主要时段来看, 3 号微压计、1 号微压计、2 号微压计主要时段分别为 29 日 11:00—30 日 3:00、29 日 11:00—30 日 3:00、29 日 14:00—30 日 4:00. 同时, 3 路微压计出现重力波先兆信号的时间分别为 29 日 8:00、29 日 7:00、29 日 10:00, 这也体现了强对流系统自西向东移动的特征.

上述分析表明, 强降水伴随着明显的重力波气压扰动, 该扰动的周期约为几十分钟至几小时, 并且先于降水的出现, 具有明显先兆活动特征, 对降水预报有一定的先兆指示意义.

## 4.2 重力波动态频谱特征

为了分析重力波频率的时间变化特征, 采用小波分析方法对微压计采集的气压扰动进行小波变换. 小波分析方法不仅能够显示信号的时域、频域特性, 也能够反映信号的多尺度特征和局部特征.

图 9 为 3, 1, 2 号微压计气压扰动功率谱的时间变化.

对于 3 号微压计, 由图 9(a) 可见, 重力波信号主要出现在两个时段: 7 月 28 日 21:00—29 日 8:00, 7 月 29 日 8:00—30 日 6:00. 主要特征如下. 1) 7 月 28 日 21:00 出现了较强的气压扰动功率谱, 高功率谱的波动周期约为 128—230 min, 29 日 2:00 开始波动能量开始减弱. 29 日 6:00—8:00 出现 128 min 的高能重力波, 而本站降水从 29 日 10:00 才开始, 可见, 重力波先兆信号的出现比降雨开始提前了约 4 h. 2) 29 日 8:00 开始, 256 min 重力波能量开始增长, 高能重力波向低频发展, 29 日 10:00 本站开始了持续性降雨, 在 13:00—20:00 出现了周期 96—128 min 高功率谱重力波, 与 13:00 第一个降水峰值相对应; 20:00 以后高能重力波的周期以 128—256 min 为主, 一直持续到 30 日 3:00, 同时激发了更短周期 (约 32—64 min) 的重力波, 第二次降水峰值出现在 29 日 22:00. 可见在降水发生前重力波的能量有增强过程, 同时波动周期也是变化的, 代表存在多种频率重力波的混合波动, 在不同阶段, 起主要作用的波动的频率是不同的.

对于 1 号微压计 (图 9(c)), 较强的重力波功率谱出现在 29 日 6:00, 在 10:00—15:00 降水期间, 高功率谱的波动周期为 128—256 min, 在 15:00—18:00 弱降水期间高功率谱的波动周期为 256 min, 同时功率谱开始增强, 在 29 日 21:00—30 日 0:00 强降水阶段, 高功率谱重力波的周期为 128—256 min, 同时激发了更短周期 (32—64 min) 的重力波. 可见, 在降水发生前 3 h, 重力波周期以 128 min 为主.

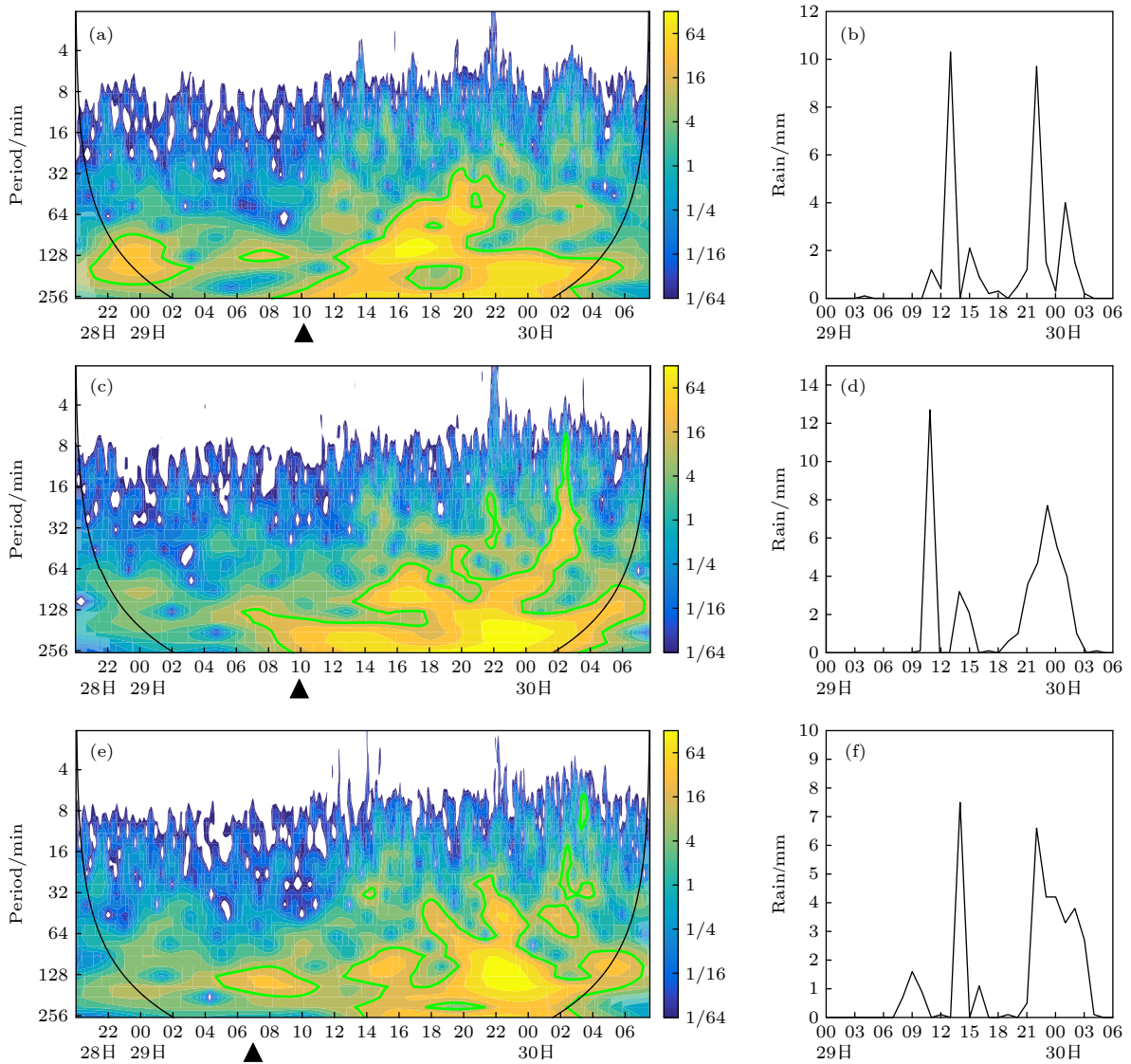


图 9 2020 年 7 月 28 日 20:00—30 日 7:00 重力波动态谱 ((a), (c), (e)) (填色图: 功率谱; 纵坐标: 周期; 横坐标: 时间; 黑色包络线显示了小波影响锥, 其外侧为边缘效应较大的区域, 绿色实线包围的是置信度在 95% 以上的区域; ▲ 表示降雨开始时间) 与降雨量图 ((b), (d), (f)) (a), (b) 微压计 3 号站; (c), (d) 微压计 1 号站; (e), (f) 微压计 2 号站

Fig. 9. Gravity waves dynamic frequency spectra ((a), (c), (e)) (shaded: amplitudes; Y-axis: periods; X-axis: time; The black envelope line shows the cone of influence, outside of which edge effects might be large, and green solid lines designates the 95% confidence level, ▲ denotes the start time of rainfall) and precipitation figure ((b), (d), (f)): (a), (b) Microbarograph 3; (c), (d) microbarograph 1; (e), (f) microbarograph 2 on 20 BJT 28–07 BJT 30 July 2020.

对于 2 号微压计站 (图 9(e)), 弱降水发生在 29 日 7:00—11:00, 但在 7 月 29 日 5:00—7:00 一直有周期约 128 min 的重力波先兆信号, 该波动比降雨开始提前约 2 h 出现. 在 29 日 13:00—15:00 和 29 日 21:00—30 日 4:00 的强降水阶段分别出现了降雨峰值, 其中, 在第一个降雨峰值期间, 重力波能量不断增强, 高能重力波周期为 64—128 min, 并且有更短周期 32 min 重力波产生, 随着对流的发展, 很快 256 min 的重力波也开始出现. 在第二个降雨峰值期间, 高能量重力波从 20:00 开始周期

扩展至 96—192 min 重力波的能量增长, 30 日 2:00 开始衰减, 此时段也激发了更短周期 (8—32 min) 的重力波. 可见, 在降水期间都伴有不同频率的重力波, 并且降雨前 2 h 就已经有重力波信号增强.

从上述分析可看出, 在暴雨发生前 2—4 h 出现周期约 128 min 的重力波先兆活动. 暴雨期间, 高能重力波的周期主要为 128—256 min, 并且随着强对流的发展演变, 高能重力波频谱也相应地调整, 强对流会激发更短周期 (8—64 min) 重力波. 2020 年, Wang 等<sup>[28]</sup> 利用佛山微压计数据分析了

佛山地区一次局地暴雨过程重力波动态谱特征,暴雨前约 4 h, 出现了长周期 (140—270 min) 重力波, 局地暴雨同时激发了更短周期 ( $\leq 36$  min) 重力波. 本次东北暴雨过程也体现了重力波这一特征.

由图 9 可看出, 周期 120—180 min 的重力波能量最强, 提取此频段重力波, 利用逆傅里叶变换进行重力波重构, 对于重构的微压计 3 号重力波 (图 10(a)), 在降雨时段 29 日 10:00—30 日 3:00, 重力波呈现周期性扰动, 并且振幅迅猛增大, 可达约 60 Pa, 并且在 29 日 13:00 和 22:00 峰值降水前都有明显的重力波, 例如 12:00 出现的振幅约为

20 Pa 重力波早于 13:00 的峰值降雨, 20:00 出现的振幅约 65 Pa 的重力波早于 22:00 的峰值降雨. 重构的微压计 1 和微压计 2 重力波信号也呈现相同的特征 (图 10(b) 和图 10(c)). 例如, 对于微压计 2 号重力波重构信号 (图 10(c)), 降雨时段 29 日 7:00—30 日 3:00, 12:00 之前, 重力波振幅较小, 约小于 20 Pa, 29 日 12:00—15:00 振幅增大, 约为 30 Pa, 这早于 14:00 的降水峰值, 随后波动出现周期性扰动, 20:00 开始波动振幅迅速增长, 约为 40 Pa, 这也早于 22:00 的降水峰值. 这表明周期为 120—180 min 的重力波对强降水的发生、发展有着积极的作用.

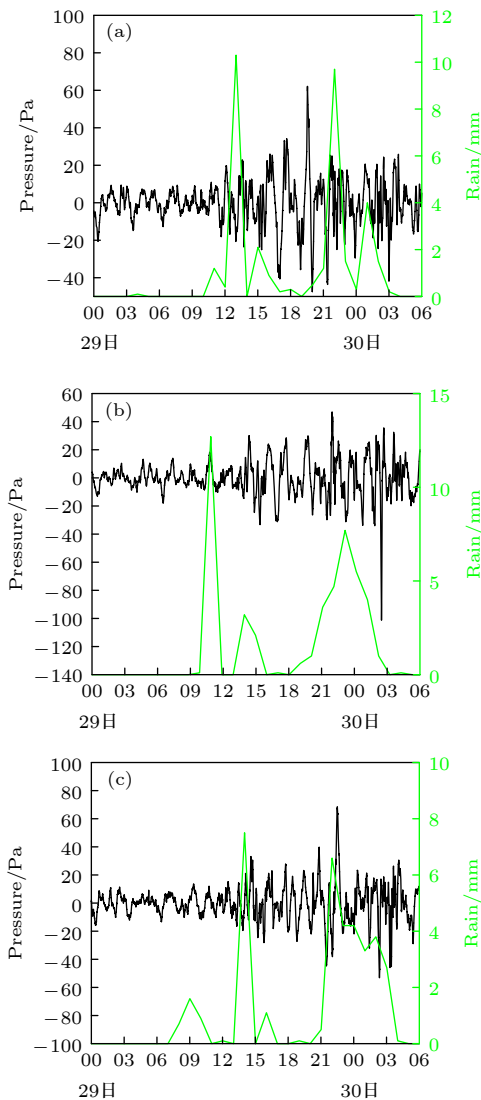


图 10 重力波重构 (黑色实线, Pa) 和小时雨量 (绿色实线, mm) (a) 微压计 3 号站; (b) 微压计 1 号站; (c) 微压计 2 号站

Fig. 10. Gravity waves reconstruction (black line, Pa) and hourly precipitation (green line, mm): (a) Microbarograph 3; (b) microbarograph 1; (c) microbarograph 2.

### 4.3 重力波产生机制

重力波是指在层结稳定大气内部的不连续面上 (如速度不连续的切变线, 密度不连续的锋面), 空气微团受到扰动后偏离平衡位置, 在重力和浮力共同作用下产生的波动. 重力波方程组<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} - f v' &= -\frac{\partial p'}{\partial x}, & \frac{\partial v'}{\partial t} + f u' &= -\frac{\partial p'}{\partial y}, \\ \frac{\partial w'}{\partial t} - g \theta' &= -\frac{\partial p'}{\partial z}, & \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  分别代表风速在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的扰动,  $f$  为 Coriolis 参数,  $\theta'$  为位温扰动. 由于  $w' = W_0 \sin(K_z z) \sin(\omega t - K_x x - K_y y)$ ,  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  分别为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上的波数, 频率为

$$\omega^2 = \frac{K_z^2 f^2 + (K_x^2 + K_y^2) N^2}{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2}. \quad (9)$$

得到散度、涡度、扰动气压方程为

$$\begin{aligned} D &= -K_z W_0 \cos(K_z z) \sin(\omega t - K_x x - K_y y), \\ \zeta &= -\frac{W_0 f K_z}{\omega} \cos(K_z z) \cos(\omega t - K_x x - K_y y), \\ p' &= -\omega \left(1 - \frac{f^2}{\omega^2}\right) (K_x^2 + K_y^2)^{-1} K_z W_0 \cos(K_z z) \\ &\quad \times \cos(\omega t - K_x x - K_y y). \end{aligned} \quad (10)$$

由 (8) 式和 (10) 式可见, 气压扰动能够体现重力波特征, 水平辐合辐散、涡度也与重力波产生密切相关. 水平辐合辐散引起上升下沉运动, 在重力作用下形成重力波. 下面从地面气压扰动、地面风场、散度扰动和气温扰动综合分析重力波产生机制.

7 月 29 日 14:00 强回波主体位于吉林省中部地区 (图 4(b)), 由图 11 可见, 29 日 14:00 在降水粒子下沉运动作用下, 出现了雷暴高压 G1, 引起

气流辐散. 在 G1 前方, 有西北风与西南风的辐合, 周边有辐散. 可以看出, 在散度场上, 存在明显的辐散辐合异常值区, 呈现带状, 向东南方向传播, 这是重力波的明显特征.

29 日 17:00, 强对流主体向东南方向移动到四平、辽源、吉林、通化北部、白山北部 (图 4(c)), 由图 12 可见, 29 日 17:00 相应区域出现中高压 G2, 辐散出流在西南方向辐合. 辐合辐散交替出现, 波动特征明显. 需要注意的是, 在 D2 区域同时有西北风、西南风、偏南风的辐合, 可能是传播的重力波在局地条件下增强的结果.

7 月 29 日 20:00, 强对流降水区位于辽源、吉林南部、通化北部、白山北部 (图 4(d)), 由图 13 可知, 强降水区出现雷暴高压 G3, G4, G5 (图 13(c)), 由于降水蒸发冷却作用造成负气温扰动中心 ( $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 形成地面冷池, 冷池对强对流系统的维持有着重要的作用 [29,30], 同时 G3 和 G4 区域辐散出流强劲. 辐合辐散带状分布, 呈现东西向分布的特征,

代表重力波东西向传播. 这种辐合辐散主要是由对流的下沉气流造成的地面高压和降水蒸发引起的冷池, 造成的出流引起在下游辐合, 根据质量连续性原理, 进而导致其下游出现辐散, 因此这种带状的辐散辐合向外传播, 会形成重力波, 由于中尺度是质量场向风场适应, 因此这种风场的波动也会引起气压场的波动.

29 日 23:00 地面气温扰动为  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (图略), 冷池强度变弱, 辐合辐散强度也明显减小, 表明强对流已发展到成熟阶段并开始减弱, 但辐合辐散依然保持带状, 呈现波动特征.

由以上分析可知, 在对流降水发展过程中, 降水粒子下落和雨水蒸发冷却在近地面产生冷高压, 形成向外辐散的出流, 加强与下游气流的辐合, 根据质量连续性原理, 在辐合区产生上升运动, 在辐散区形成下沉运动, 这种辐合辐散促进了重力波的生成以及强对流向下游的发展. 由于重力波形成在对流的下游, 因此先于对流的传播, 对强对流有一定的先兆指示作用.

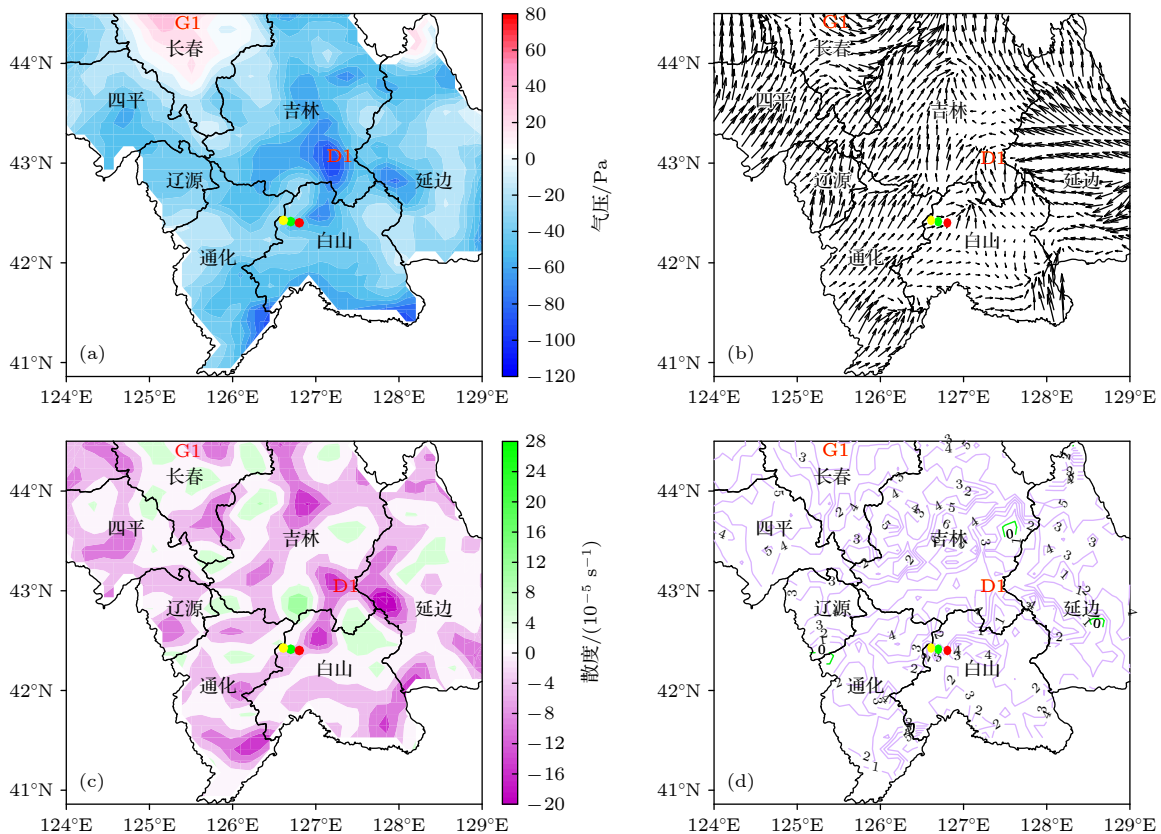


图 11 2020 年 7 月 29 日 14:00 (a) 地面气压扰动, (b) 风场, (c) 散度扰动, (d) 温度扰动 (绿色等值线为正值, 红色虚线为负值,  $^{\circ}\text{C}$ ). 绿色、红色、黄色圆点分别代表微压计 1, 2, 3 号站位置

Fig. 11. (a) Surface pressure disturbances, (b) surface wind filed, (c) divergence disturbances fields, (d) temperature disturbances (green solid lines denotes positive values, red dotted lines denotes negative values, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) on 14 BJT 29 July 2020. Green, red and yellow dot respectively denotes the locations of microbarograph 1, 2, 3.

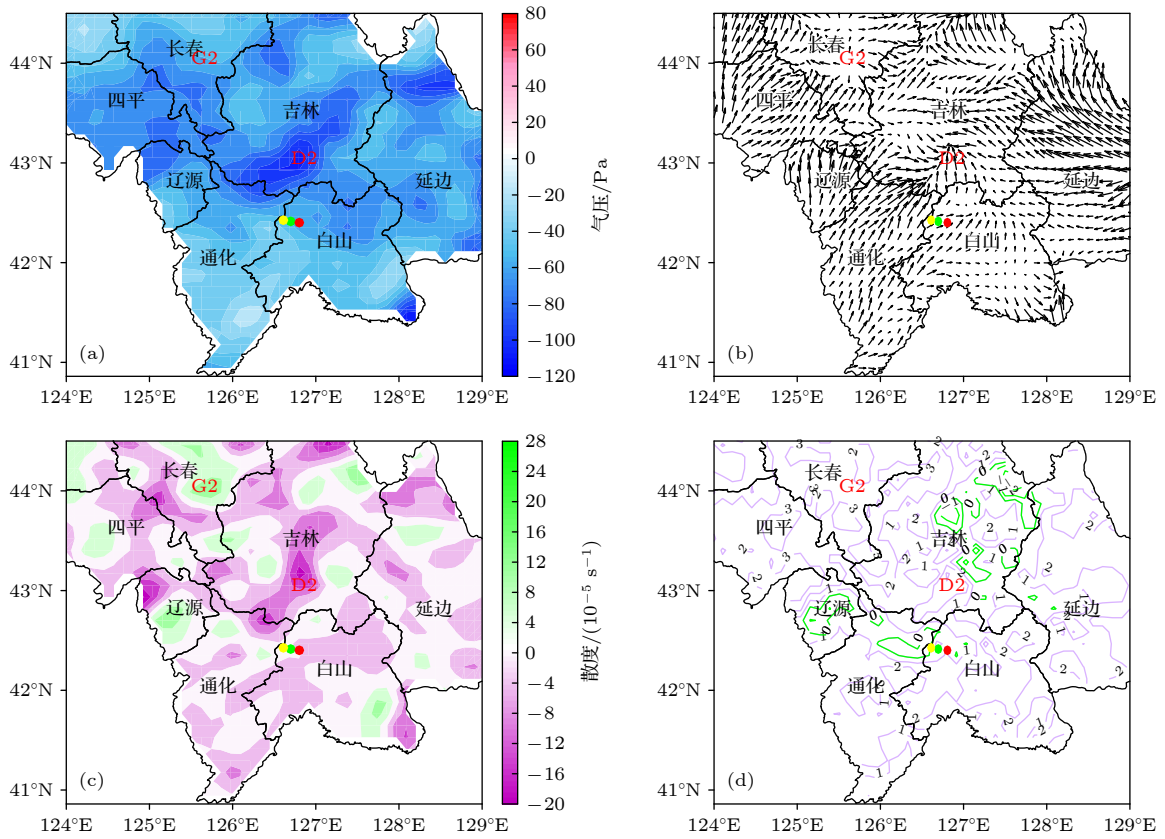


图 12 2020 年 7 月 29 日 17:00 (a) 地面气压扰动, (b) 风场, (c) 散度扰动, (d) 温度扰动 (绿色等值线为正值, 红色虚线为负值,  $^{\circ}\text{C}$ ). 绿色、红色、黄色圆点分别代表微压计 1, 2, 3 号站位置

Fig. 12. (a) Surface pressure disturbances, (b) surface wind filed, (c) divergence disturbances fields, (d) temperature disturbances (green solid lines denotes positive values, red dotted lines denotes negative values, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) on 17 BJT 29 July 2020. Green, red and yellow dot respectively denotes the locations of microbarograph 1, 2, 3.

## 5 结 论

利用中国科学院大气物理研究所自主研制的微压计探测数据, 结合地面自动站观测、GDAS 数据, 分析了 2020 年 7 月 29 日—30 日吉林省暴雨过程的重力波特征, 得出以下结论.

1) 暴雨与重力波密切相关, 降雨量峰值与气压扰动有明显的对应关系, 并且周期为几分钟至几小时的重力波早于降雨数小时出现.

2) 扰动气压的小波分析表明, 在暴雨发生前 2—4 h, 就有周期约 128 min 的重力波先兆活动 (图 14 重力波 A), 暴雨 (图 14 左侧对流云) 发生后又加强了重力波的发展, 促进了 96—256 min 重力波产生 (图 14 重力波 B), 并激发了更短周期 (8—64 min) 的重力波. 重构重力波信号表明, 此次暴雨过程重力波的主要周期为 120—180 min. 相比于对流降水, 重力波信号提前 2—4 h 出现, 表明重力波对强对流降水有一定的预兆

指示意义.

3) 在对流降水云发展过程中, 降水粒子下落和雨水蒸发冷却在近地面产生冷高压, 形成向外辐散的出流 (图 14 辐散区), 加强与下游气流的辐合 (图 14 辐合区), 根据质量连续性原理, 在辐合区产生上升运动, 在辐散区形成了较强的下沉运动, 这种辐合辐散促进了重力波的生成以及强对流向下游对流云 (图 14 右侧对流云) 的发展. 这是重力波形成的主要机制, 重力波的产生促进了下游对流的发展和移动.

本文利用高精度微压计探测数据, 分析了暴雨过程重力波特征和产生机制, 但是有一些问题仍待深入研究, 比如重力波先兆活动的产生机制是什么, 重力波是如何激发暴雨的, 重力波其他的频谱特征, 比如波长、波速是多少, 重力波的传播和发展是如何完成的, 这些问题需要利用数值模式进行更深入的研究.

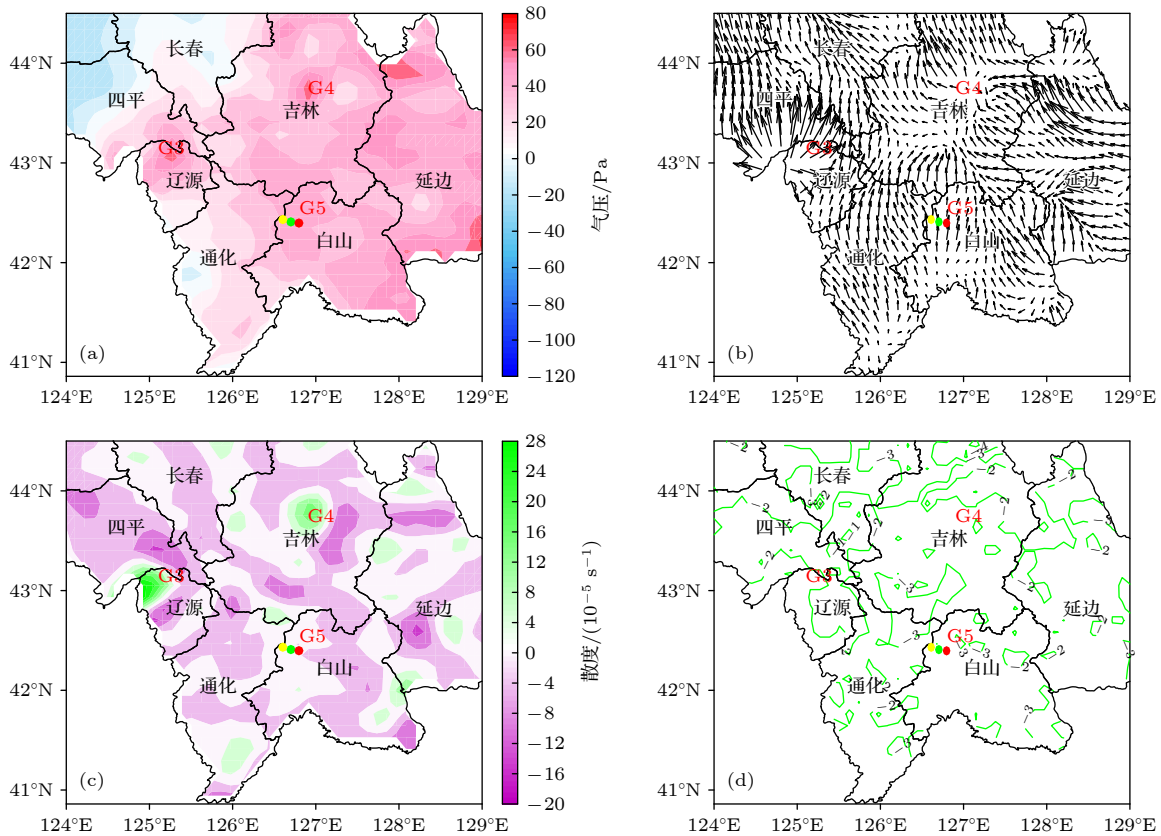


图 13 2020 年 7 月 29 日 20:00 (a) 地面气压扰动, (b) 风场, (c) 散度扰动, (d) 温度扰动 (绿色等值线为正值, 红色虚线为负值,  $^{\circ}\text{C}$ ). 绿色、红色、黄色圆点分别代表微压计 1, 2, 3 号站位置

Fig. 13. (a) Surface pressure disturbances, (b) surface wind filed, (c) divergence disturbances fields, (d) temperature disturbances (green solid lines denotes positive values, red dotted lines denotes negative values, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) on 20 BJT 29 July 2020. Green, red and yellow dot respectively denotes the locations of microbarograph 1, 2, 3.

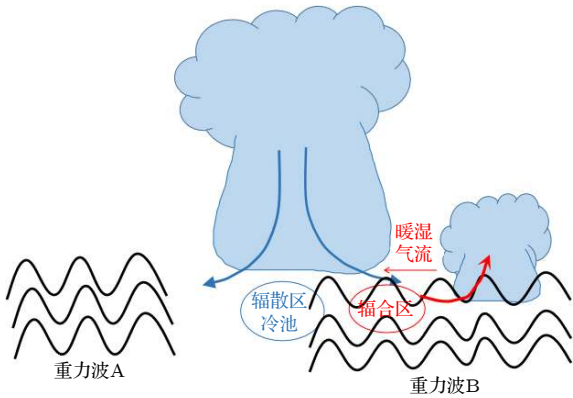


图 14 重力波对暴雨的触发机制概念模型

Fig. 14. Conceptual model of triggering mechanism of gravity waves on rainstorm.

参考文献

[1] Zhang Y, Lei H C, Qian Z C 2008 *Chin. J. Atmos. Sci.* **32** 481 (in Chinese) [张云, 雷恒池, 钱贞成 2008 *大气科学* **32** 481]  
 [2] Zhong S X, Wang D H, Zhang R H, Liu Y 2011 *Plateau Meteorol.* **30** 951 (in Chinese) [钟水新, 王东海, 张人禾, 刘英 2011 *高原气象* **30** 951]  
 [3] Koch S E, Dorian P B 1988 *Mon. Weather Rev.* **116** 2570

[4] Schumacher R S, Johnson R H 2008 *Mon. Weather Rev.* **136** 3964  
 [5] Plougonven R, Zhang F Q 2014 *Rev. Geophys.* **52** 33  
 [6] Trexler C M, Koch S E 2000 *Mon. Weather Rev.* **128** 2423  
 [7] Sato K 1993 *J. Atmos. Sci.* **50** 518  
 [8] Balachandran N K 1980 *Mon. Weather Rev.* **108** 804  
 [9] Li M C 1978 *Chin. J. Atmos. Sci.* **2** 201 (in Chinese) [李麦村 1978 *大气科学* **2** 201]  
 [10] Uccellini L W 1975 *Mon. Weather Rev.* **103** 497  
 [11] Fovell R, Durran D, Holton J R 1992 *J. Atmos. Sci.* **49** 1427  
 [12] Piani C, Durran D, Alexander M J, Holton J R 2000 *J. Atmos. Sci.* **57** 3689  
 [13] Ruppert J H, Bosart L F 2014 *Mon. Weather Rev.* **142** 1403  
 [14] Liu L, Ran L K, Gao S T 2018 *Adv. Atmos. Sci.* **35** 604  
 [15] Huang X, Zhou Y S, Liu L 2020 *Atmosphere.* **11** 752  
 [16] Herron T J, Tolstoy I 1969 *J. Atmos. Sci.* **26** 266  
 [17] Stobie J G, Einaudi F, Uccellini L W 1983 *J. Atmos. Sci.* **40** 2804  
 [18] Rees J M, Denholm-Price J C W, King J C, Anderson P S 2000 *J. Atmos. Sci.* **57** 511  
 [19] Hauf T, Finke U, Neisser J, Bull G, Stangenberg J G 1996 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **13** 1001  
 [20] Curry M J, Murty R C 1974 *J. Atmos. Sci.* **31** 1402  
 [21] Grachev A I, Kulichkov S N, Otezov A I 1997 *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* **33** 583  
 [22] Kulichkov S N, Chunchuzov I P, Popov O E, Perepelkin V G, Gorchakov G I 2019 *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* **55** 167  
 [23] Blanc E, Farges T, Pichon A Le, Heinrich P 2014 *J. Geophys.*

- Res. Atmos.* **119** 6409
- [24] Li Q T, Xie J L, Yang X R 1993 *Acta Meteorol. Sin.* **51** 361 (in Chinese) [李启泰, 谢金来, 杨训仁 1993 气象学报 **51** 361]
- [25] Wu L J, Wen Z P, He H Y 2015 *Atmos. Oceanic Sci. Lett.* **8** 78
- [26] Yang R, Liu Y, Ran L K, Zhang Y L 2018 *Chin. Phys. B* **27** 059201
- [27] Torrence C G, Compo G P 1998 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** 61
- [28] Wang X J, Lei H C, Feng L, Zhu J S, Li Z M, Jiang Z B 2020 *Atmos. Oceanic Sci. Lett.* **13** 163
- [29] Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L 1988 *J. Atmos. Sci.* **45** 463
- [30] Weisman M L, Rotunno R 2004 *J. Atmos. Sci.* **61** 361

## Analysis of characteristics of gravity waves of heavy rainfall event based on microbarograph observation\*

Wang Xiu-Juan<sup>1)2)</sup> Ran Ling-Kun<sup>3)</sup> Qi Yan-Bin<sup>1)2)†</sup> Ma Shu-Ping<sup>3)</sup>

Mu Xiu-Xiang<sup>4)</sup> Jiang Zhong-Bao<sup>5)</sup> Bi Xiao-Xiao<sup>4)</sup>

1) (*Jilin Province Technology Center for Meteorological Disaster Prevention, Changchun 130062, China*)

2) (*Joint Open Laboratory for Weather Modification of Jilin Provincial People's Government, China*

*Meteorological Administration, Changchun 130062, China*)

3) (*Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms of Chinese Academy of Sciences,*

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

4) (*Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062, China*)

5) (*Climate Center of Jilin Province, Jilin Province Meteorological Bureau, Changchun 130062, China*)

( Received 25 April 2021; revised manuscript received 24 August 2021 )

### Abstract

Taking advantage of high-precision microbarograph data, satellite, ground measured data and GDAS data, the characteristics of gravity waves during the cold vortex heavy rainfall in Northeast China on 29–30 July 2020 are analyzed. The results show that the gravity waves initiate this heavy rainfall. In 2–4 h before the heavy rainfall, there appear the precursor activities of gravity waves with a period of about 128 min. During the heavy rainfall, the periods of gravity waves concentrate in a range of 120–180 min. During the development of convective storms, there occur gravity waves with periods in a range of 128–256 min. And severe storms spark the gravity waves with shorter periods (8–64 min). The relationship between rainstorm and gravity wave is interactive. When severe storms develop, there occur thunderstorm high pressure, cold pool and out-flow boundary. In the front of cold pool, there is formed a flow convergence. The convergence and divergence of air flow propagate forward, forming gravity waves and finally triggering the rainstorm. The characteristics of precursor activities of gravity waves may play a positive role in warning heavy rainfall during the cold vortex in Northeast China.

**Keywords:** gravity waves, microbarograph, cold vortex in Northeast China, heavy rainfall

**PACS:** 47.35.Bb, 92.60.Qx, 92.60.Wc

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210794

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41775140, 41975182), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC0200503), and the Key Scientific and Technology Research and Development Program of Jilin Province, China (Grant No. 20180201035SF).

† Corresponding author. E-mail: [qiyabin88@qq.com](mailto:qiyabin88@qq.com)