氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

佛山地区不同类型雷暴过程大气重力波的频谱动态特征研究

王秀娟 雷恒池 姜忠宝 郑首印 齐彦斌

Frequency Spectrum Dynamic Characteristics of Atmospheric Gravity Waves during Various Types of Thunderstorms in Foshan

WANG Xiujuan LEI Hengchi JIANG Zhongbao ZHENG Shouyin QI Yanbin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20047

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

气候变化与建闸影响下小流域入海径流量长周期变化特征:以盐城海岸为例

The Long-Period Variation Characteristics of Water Discharge with Estuarine Sluice and Climate Change in a Small Watershed:A Case Study in Yancheng Coast

气候与环境研究. 2017, 22(6): 671 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15249

放电后电荷重置对雷暴云电荷结构及闪电行为的影响

Effects of Charge Redistribution after Discharges on the Charge Structure of Thunderstorms and Lightning Characteristics

气候与环境研究. 2017, 22(4): 487 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16213

基于PMIP3和CMIP5模拟结果的过去千年特征时段北极涛动的变率特征及成因分析

Characteristics and Cause Analyses of Arctic Oscillation Variability during the Typical Periods in Last Millennium Based on PMIP3 and CMIP5 Simulations

气候与环境研究. 2020, 25(4): 429 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20011

气溶胶对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟

A Numerical Study of Aerosol Effects on Microphysical Process and Electrification in Thunderstorms

气候与环境研究. 2018, 23(6): 758 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18047

湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因

Spatial-Temporal Characteristics and Causes of Summer Heat Waves in Hunan Province

气候与环境研究. 2017, 22(6): 747 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17025

冬季与北大西洋涛动相关波列传播特征及对下游气候的影响

Propagation Characteristics of Rossby Wave Trains Associated with the North Atlantic Oscillation in Winter and Their Impacts on Downstream Climate

气候与环境研究. 2019, 24(3): 289 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.17178

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王秀娟, 雷恒池, 姜忠宝, 等. 2021. 佛山地区不同类型雷暴过程大气重力波的频谱动态特征研究 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 250−262. WANG Xiujuan, LEI Hengchi, JIANG Zhongbao, et al. 2021. Frequency Spectrum Dynamic Characteristics of Atmospheric Gravity Waves during Various Types of Thunderstorms in Foshan [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 250−262. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20047

佛山地区不同类型雷暴过程大气重力波的频谱动态特征研究

王秀娟[1, 2, 3, 4] 雷恒池[1, 2] 姜忠宝[5] 郑首印[1] 齐彦斌[3, 4]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 吉林省气象灾害防御技术中心，长春 130062
4 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
5 吉林省气候中心，长春 130062

摘 要 利用佛山地区 2017 年 1 月至 2019 年 10 月高精度微压计数据，统计分析佛山地区不同类型雷暴天气的大气重力波频谱特征，结果表明：雷暴天气与重力波的生成、发展密切相关，长周期（90～270 min）、短周期（1～90 min）重力波在不同类型雷暴天气有明显的差异。不同类型雷暴期间，都有大振幅（≥110 Pa）、宽周期范围的长周期重力波，但是强雷暴期间长周期重力波的振幅更大、周期范围更宽，中心振幅大于 130 Pa 的重力波发生的比率更高；不同类型雷暴激发的短周期重力波具有共同特征，表现为周期 10～90 min、中心振幅 11～47 Pa，但是大部分强雷暴都会激发 10～90 min 短周期重力波，发生的比率高于弱雷暴，并且强雷暴更易激发更短周期（1～20 min）重力波，更利于振幅较大（≥50 Pa）的短周期重力波发生。近距离雷暴比远距离雷暴对长、短周期重力波有更积极的影响。部分雷暴发生前约 114～168 min，会有长、短周期重力波先兆活动，其中，长周期（90～270 min）重力波平均中心振幅 84～106 Pa、短周期（30～90 min）重力波平均中心振幅 12～43 Pa；相比远距离雷暴，近距离雷暴的重力波先兆活动发生比率更高；雷暴强度对重力波先兆活动也有影响，强雷暴过程振幅更大、短周期（20～30 min）的重力波先兆活动发生率更高。重力波先兆活动这一特征可能对雷暴预警有意义。

关键词 重力波 振幅 微压计 雷暴类型 短周期 长周期

文章编号 1006-9585(2021)03-0250-13 **中图分类号** P446 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20047

Frequency Spectrum Dynamic Characteristics of Atmospheric Gravity Waves during Various Types of Thunderstorms in Foshan

WANG Xiujuan[1, 2, 3, 4], LEI Hengchi[1, 2], JIANG Zhongbao[5], ZHENG Shouyin[1], and QI Yanbin[3, 4]

1 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Jilin Province Technology Center for Meteorological Disaster Prevention*, *Changchun* 130062
4 *Joint Laboratory of Weather Modification of China Meteorological Administration and People's Government of Jilin Province*, *Changchun* 130062

收稿日期 2020-04-16；**网络预出版日期** 2021-01-28

作者简介 王秀娟，女，1985 年出生，博士研究生，主要从事大气重力波研究。E-mail: xiujuan507@126.com

通讯作者 雷恒池，E-mail: leihc@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507900、2016YFC0200503，国家自然科学基金 41530427、41775140

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC1507900 and 2016YFC0200503), National Natural Science Foundation of China (Grants 41530427 and 41775140)

5 *Climate Center of Jilin Province*, *Changchun* 130062

Abstract Taking advantage of the high-precision microbarograph data from Jan 2017 to Oct 2019 in Foshan, a statistical analysis of the frequency spectrum characteristics of the atmospheric gravity waves during various types of thunderstorms in Foshan was presented. Results showed that the thunderstorms were closely related to the occurrence and development of gravity waves. Long-period (90–270 min) and short-period (1–90 min) gravity waves presented different features during various types of thunderstorms. Long-period gravity waves exhibited large amplitudes (≥110 Pa) and wide periodic ranges. Most of strong storms resulted in long-period gravity waves with increased amplitudes and wide period ranges. An increased occurrence rate of long-period gravity waves with center amplitudes greater than 130 Pa was also observed. On the other hand, short-period gravity waves exhibited period ranges of about 10–90 min and center amplitudes of about 11–47 Pa. Strong storms could also spark short-period (10–90 min) gravity waves with a higher occurrence rate than that with weak storms. Furthermore, strong storms were more likely to initiate shorter periods (1–20 min) of gravity waves with larger amplitudes (≥50 Pa) than weak storms. The near-distance storms exerted a more positive impact on the long-period and short-period gravity waves compared with the far-distance storms. Before part of the storms occurred, long-period and short-period gravity waves showed precursor activities with an advancing time of about 114–168 min. Moreover, the center amplitudes of the long-period (90–270 min) and short-period (30–90 min) gravity waves were 84–106 Pa and 12–43 Pa, respectively. The near-distance storms exhibited a higher occurrence rate of the gravity waves' precursor activities than that of the far-distance storms. Strong storms resulted in larger amplitudes of waves and higher occurrence rates of short-period (20–30 min) gravity waves' precursor activities than weak storms. The precursor activity of the gravity waves may be meaningful in severe storm warnings.

Keywords Gravity wave, Amplitude, Microbarograph, Storm type, Short period, Long period

1 引言

在对流层，大气重力波活动与许多天气过程密切相关，尤其是在一些强对流过程，大气重力波演变特征尤为明显（Einaudi et al., 1987; Koch and Dorian, 1988; 郭欣等, 2013）。重力波能够与云附近的次级环流相结合，释放不稳定能量，造成短时强降水、雷暴的产生（Trexler and Koch, 2000; 龚佃利等, 2019）；强对流也能够激发重力波，对其周期、振幅、波速产生影响（龚佃利等, 2005）。因此，研究雷暴期间重力波的特征对深入了解重力波和强对流二者关系、强对流预警具有重要的意义。

目前，有许多研究通过观测常规地面气压站的气压数据来反映雷暴期间长周期（1 h 至数小时）重力波的平均频谱特征。Uccellini（1975）、Stobie et al.（1983）、Bosart and Sanders（1986）指出强对流过程存在着大振幅 50～250 Pa、长周期 2.5～3.3 h、波长 240～350 km 重力波，该重力波出现在垂直强风切变区域，能够加强先前存在的雷暴，引发大风、冰雹、暴雨等强对流活动。Koch et al.（1988）分析指出长周期 0.9～2.5 h，振幅约 30～50 Pa 重力波会追赶和碰撞进而引发飑线，强雷暴对重力波的反馈也是积极的。Koch and Golus（1988）、Ruppert and Bosart（2014）分析雷暴个例发现，长周期（约 8～33 h）重力波对降水强度和分布有明显的影响。

有学者利用微压计仪器采集高精度、高采样率的气压数据来反映雷暴期间短周期（几分钟至几十分钟）重力波的平均频谱特征（Hauf et al., 1996）。Curry and Murty（1974）利用 3 个微压计统计分析雷暴激发的重力波特征，指出平均周期 10 min 重力波是由雷暴激发的。Balachandran（1980）利用微压计网观测得出强雷暴能够激发的重力波主周期约为 21 min、8 min、5 min。Hauf et al.（1996）采用微压计组网对雷暴激发的中心频率 23 min 和 10 min 的重力波进行了定向。Rees et al.（2000）采用微压计组网数据进行统计分析，观测结果表明边界层内短周期重力波特征为平均周期约 1～20 min，振幅约 1～8 Pa。

有研究指出，雷暴前会有重力波先兆活动，这与强对流的生成、发展有密切关系。Uccellini（1975）分析了一次雷暴过程，指出长周期（约 3 h）重力波是强雷暴的预警因子，并会激发下游的雷暴发展。李启泰等（1993）利用微压计分析了河北灾害性冰雹个例的重力波动态谱特征，指出降雹前数小时即有大振幅（30 Pa）以上、宽周期谱的重力

波间歇出现。巴特尔等（2007）利用微压计数据统计分析内蒙古地区冰雹期间短周期重力波动态谱特征，指出大约 2/5 的降雹天气之前 1～4 h 就有振幅大于 30 Pa 的重力波出现，其周期为 30～70 min。

然而，前人对重力波的观测大多关注的是雷暴个例的长周期（1 h 至数小时）或短周期（几分钟至几十分钟）重力波频谱的平均态特征，采用高精度、长时间的气压数据统计分析雷暴过程长、短周期重力波的动态谱特征还很少。Wang et al.（2020）利用佛山单台微压计数据分析了一次局地暴雨过程长、短周期重力波特征，发现重力波激发了此次暴雨；暴雨前约 4 h，出现了大振幅（80～160 Pa）、长周期（140～270 min）重力波，这对局地暴雨预警有一定的指示意义；强对流对重力波的作用是积极的，出现了大振幅（80～100 Pa）、长周期（210～270 min）重力波，尤其是，激发了更短周期（≤36 min）、振幅约 10 Pa 重力波。基于此个例分析，本文统计分析 2017 年 1 月至 2019 年 10 月佛山地区不同类型雷暴过程的长周期（90～270 min）、短周期（1～90 min）重力波动态频谱特征，重点关注雷暴强弱、雷暴距离微压计远近对重力波的影响，这有利于研究雷暴和重力波二者发生、发展机理及二者相互作用，为强对流预警提供科学依据。

2 数据与方法

微压计是能够观测地面低频大气扰动的一种仪器，可探测周期为几分钟的次声波到周期为几小时的重力波。文中所用的微压计仪器是由中国科学院大气物理研究所云降水与强风暴实验室（LACS）自主研发，安放在广东省佛山市三水区（图 1）。该微压计采集的气压数据具有较高的探测精度和采样频率，气压分辨率为 0.1 Pa，最低频率可以采集到 10^{-5} Hz，采样频率为 1 Hz。利用佛山地区的微压计数据，对重力波动态频谱特征进行分析。佛山自动加密站（206 个）能够每分钟自动采集气压、降雨量、温度、露点数据等气象数据，加密站位置如图 1，利用佛山加密站采集的小时雨量数据、雷达数据对雷暴过程进行分类，数据时间段为 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日。

根据降雨量、雷达回波特征定义雷暴日：佛山市有加密站出现了 24 h 累积降雨量≥5 mm、雷达

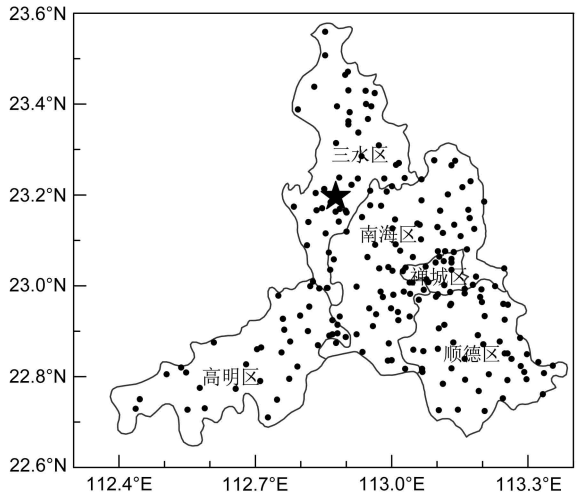

图 1 佛山微压计（五角星）和加密站（黑色圆点）位置

Fig. 1 Locations of the Foshan microbarograph (star) and surface-automated mesonet stations (black dots)

回波特征为有中尺度γ以上对流回波并且其反射率因子≥30 dBZ；雷暴过程定义为在雷暴日有连续降水（小时雨量≥0.2 mm），若此 24 h 内有多次雷暴过程且雷暴中断时间不超过 6 h，则记为一次雷暴过程；若此 24 h 有多次雷暴过程且雷暴中断时间超过 6 h，则记为多次雷暴过程；若雷暴在下一个 24 h 的开始时刻仍持续，则记为上一次雷暴过程。

满足上述一次雷暴过程的条件，4 类雷暴分类标准见表 1。强、弱雷暴分类时，如果 24 h 累积雨量 R_{24}≥100 mm或 1 h 降雨量 R_1≥20 mm 则为强雷暴，反之为弱雷暴。近、远距离雷暴分类时，首先找到最大降雨量对应表中的降雨量分类条件，然后计算满足该降雨量分类条件的N_{30}（距离微压计 30 km 以内满足对应降雨量分类条件的站数）、N_{w30}（距离微压计 30 km 以外满足对应降雨量分类条件的站数），如果N_{30}≥N_{w30}则为近距离雷暴，如果N_{30}<N_{w30}则为远距离雷暴。

表 1 四类雷暴分类标准

Table 1 Classification criteria for four types of thunderstorms

	降雨量分类条件	近距离雷暴	远距离雷暴
强雷暴	R_{24}≥100 mm或R_1≥20 mm	N_{30}≥N_{w30}	N_{30}<N_{w30}
弱雷暴	50 mm≤R_{24}<100 mm	N_{30}≥N_{w30}	N_{30}<N_{w30}
	25 mm≤R_{24}<50 mm	N_{30}≥N_{w30}	N_{30}<N_{w30}
	10 mm≤R_{24}<25mm	N_{30}≥N_{w30}	N_{30}<N_{w30}
	5 mm≤R_{24}<10 mm	N_{30}≥N_{w30}	N_{30}<N_{w30}

注：距离微压计30 km以内共有110个加密站，30 km以外共有96个加密站。

采用快速傅里叶变换（FFT）方法处理每次雷暴过程的微压计数据，将时域气压转为频域，计算得出当前时间波振幅和周期，每秒推进，得出大气重力波振幅随周期、时间的动态谱。然后，统计分析 4 类雷暴过程的大气重力波的频谱特征。

3　不同类型雷暴过程大气重力波的频谱特征

为了详细揭示不同类型雷暴过程的重力波（周期范围为几分钟至几小时）频谱特征，根据周期将重力波分为两类：周期范围 90～270 min 为长周期重力波，1～90 min 为短周期重力波。2017 年 1 月至 2019 年 10 月佛山地区共发生雷暴 351 场，其中，近距离强雷暴、近距离弱雷暴、远距离强雷暴、远距离弱雷暴的次数分别为 104、57、123、67 场。以下定义 4 类雷暴过程的长/短周期重力波活动发生的比率为长/短周期重力波活动发生的次数与相应的雷暴次数的比率，定义重力波先兆活动发生的比率为重力波先兆活动发生次数与相应的雷暴次数的比率。

3.1　四类雷暴过程大气重力波实例分析

3.1.1　近距离强雷暴实例分析

2018 年 9 月 7 日 18:00（北京时间，下同）至 8 日 00:00，受强对流（图略，回波强度可达 50 dBZ）影响，佛山市出现了大暴雨，满足R_1≥20 mm 共 45 个站、R_{24}≥100 mm 共 1 个站，N_{30}≥N_{w30}，符合近距离强雷暴的分类标准。微压计采集的气压数据见图 2a，采用快速傅里叶变换方法计算微压计数据，得到长、短周期重力波的动态谱（图 2b 和 2c）。为了进一步分析重力波与强对流的关系，以降雨开始时间为界，将重力波演变划分为两个阶段讨论：

强降雨前期（9 月 7 日 12:00 至 18:00）：无强回波（图略），但有重力波先兆活动，7 日 15:00 出现了中心振幅 80～140 Pa、长周期（150～270 min）重力波和中心振幅 10～46 Pa、短周期（32～90 min）重力波，此波动比强降雨的出现早了约 3 h。

强降雨期间（7 日 18:00 至 8 日 00:00）：有强回波（图略），长周期重力波中心振幅分别增大为 80～180 Pa，周期范围增宽为 120～270 min；同时，强对流激发了周期 14～90 min 的重力波，尤其是更短周期 14～48 min、中心振幅 10～30 Pa 的重力波。这说明，强对流会增大长周期重力波的振幅、增宽波的周期范围、激发短周期重力波的生成。

3.1.2　近距离弱雷暴实例分析

2019 年 3 月 31 日 13:00 至 4 月 1 日 00:00，受强对流影响（图略，回波强度可达 50 dBZ），佛山地区出现了小到中雨，满足 10 mm≤R_{24}<25 mm 共 17 个站，N_{30}≥N_{w30}，符合近距离弱雷暴的分类标准。

由长、短周期重力波动态谱（图 3b 和 3c）可知，降雨前期（3 月 31 日 02:30 至 13:00）无强回波（图略），但有重力波先兆活动，即 31 日 08:30 有中心振幅 70 Pa 的长周期重力波，振幅约 10～26 Pa 的短周期（36～90 min）重力波，重力波先兆活动比降雨的发生早了约 4.5 h。

降雨期间（3 月 31 日 13:00 至 4 月 1 日 00:00）：有强对流（图略），长周期重力波的中心振幅增大至 80～140 Pa，其周期范围为 150～270 min，同时激发了更短周期（20～90 min）、中心振幅 10～50 Pa 重力波。

3.1.3　远距离强雷暴实例分析

2019 年 2 月 18 日 01:00 至 21:00，受飑线影响（图略，回波强度可达 50 dBZ），佛山市出现了短时强降雨，满足 R_1≥20 mm 共 19 个站，N_{30}<N_{w30}，符合远距离强雷暴分类标准。

由重力波长、短周期重力波动态谱（图 4b 和 4c）可知，强降雨发生前期（17 日 20:00 至 18 日 01:00），无强回波（图略），但有重力波先兆活动，即 17 日 22:30 有中心振幅 70 Pa 长周期重力波，振幅约 10～20 Pa 的短周期（60～90 min）重力波，重力波先兆活动比强降雨的发生早了约 2.5 h。

强降雨期间（18 日 01:00 至 21:00）：强对流发展时（图略），长周期重力波中心振幅增大至 80～210 Pa、周期范围约 120～270 min，同时激发了短周期（20～90 min）、中心振幅 10～52 Pa 重力波。

3.1.4　远距离弱雷暴实例分析

2018 年 3 月 15 日 08:00 至 18:00，受强对流（图略，回波强度可达 45 dBZ）影响，佛山市出现了大雨，满足 25 mm≤R_{24}<50 mm 共 1 个站，N_{30}<N_{w30}，符合远距离弱雷暴的分类标准。

由长、短周期重力波动态谱（图 5b 和 5c）可知，降雨发生前期（3 月 14 日 20:00 至 15 日 08:00），无强回波，但有重力波先兆活动出现，15 日 04:00

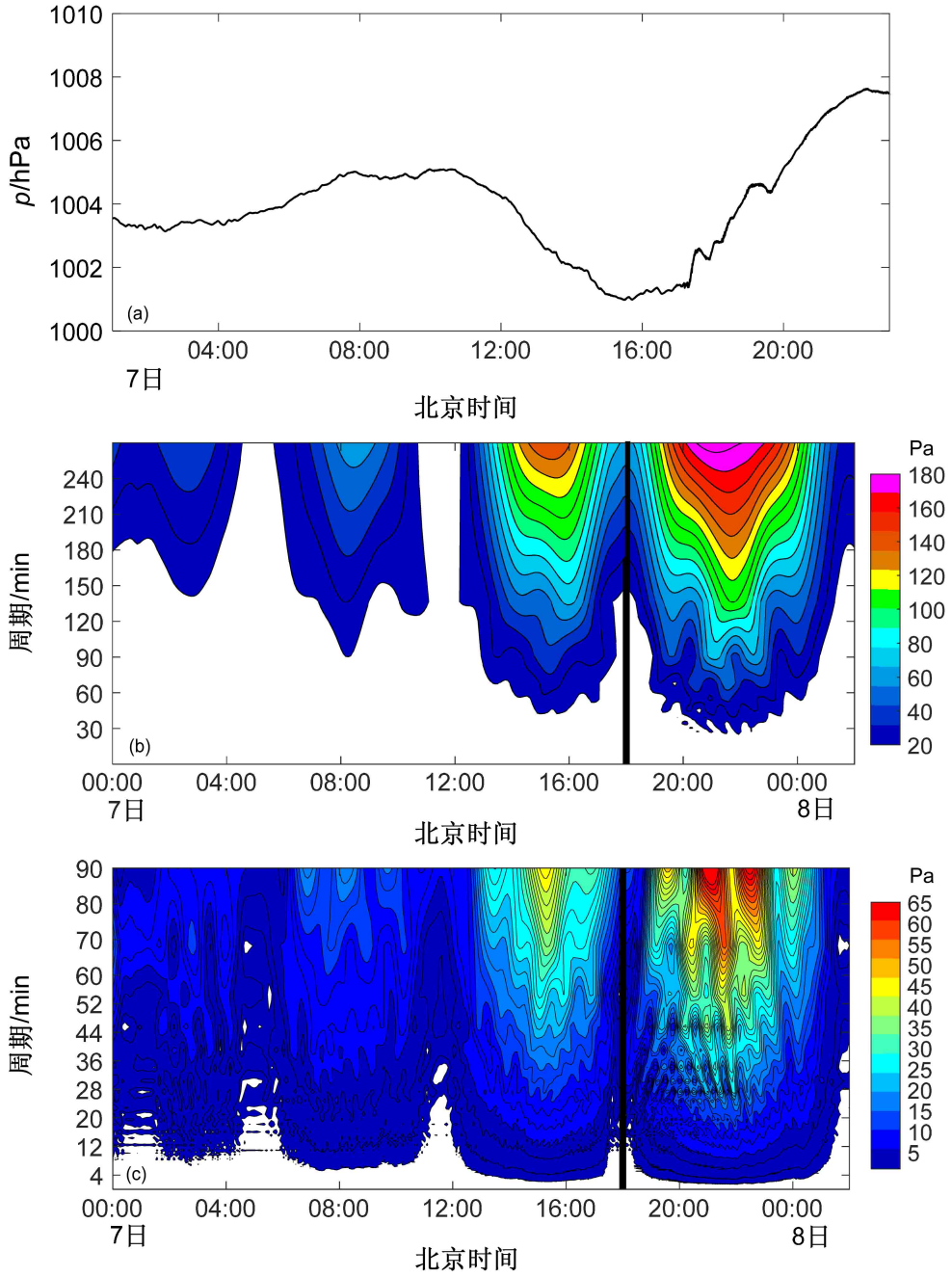

图 2 近距离强雷暴实例：2018 年 9 月 7～8 日（a）微压计气压时间序列、（b）长周期重力波动态谱和（c）短周期大气重力波动态谱（图 2b 和图 2c 中色标代表重力波振幅，黑色实线表示降雨开始时间）

Fig. 2 (a) Microbarograph pressure time series, dynamic frequency spectra of (b) long-period gravity waves and (c) short-period atmospheric gravity waves (in Fig. 2b and Fig. 2c, shadings denote the amplitudes of the gravity waves and solid black line denotes the onset time of the heavy rainfall) of the near-strong storm case during 7–8 Sep 2018

有长周期重力波中心振幅约 70 Pa，振幅约 10～28 Pa 的短周期（44～90 min）重力波，先兆活动比降雨的发生早了约 4 h。

降雨期间（15 日 08:00 至 18:00），长周期重力波的中心振幅增大为 80～110 Pa、周期范围约 180～270 min，同时激发了短周期（28～90 min）、中心振幅 10～36 Pa 重力波。

3.2 四类雷暴期间大气重力波特征统计分析

为了分析不同雷暴强度、雷暴距离远近对重力波的影响，以下统计分析 2017 年 1 月至 2019 年 10 月佛山地区不同类型雷暴过程长、短周期重力波特征。

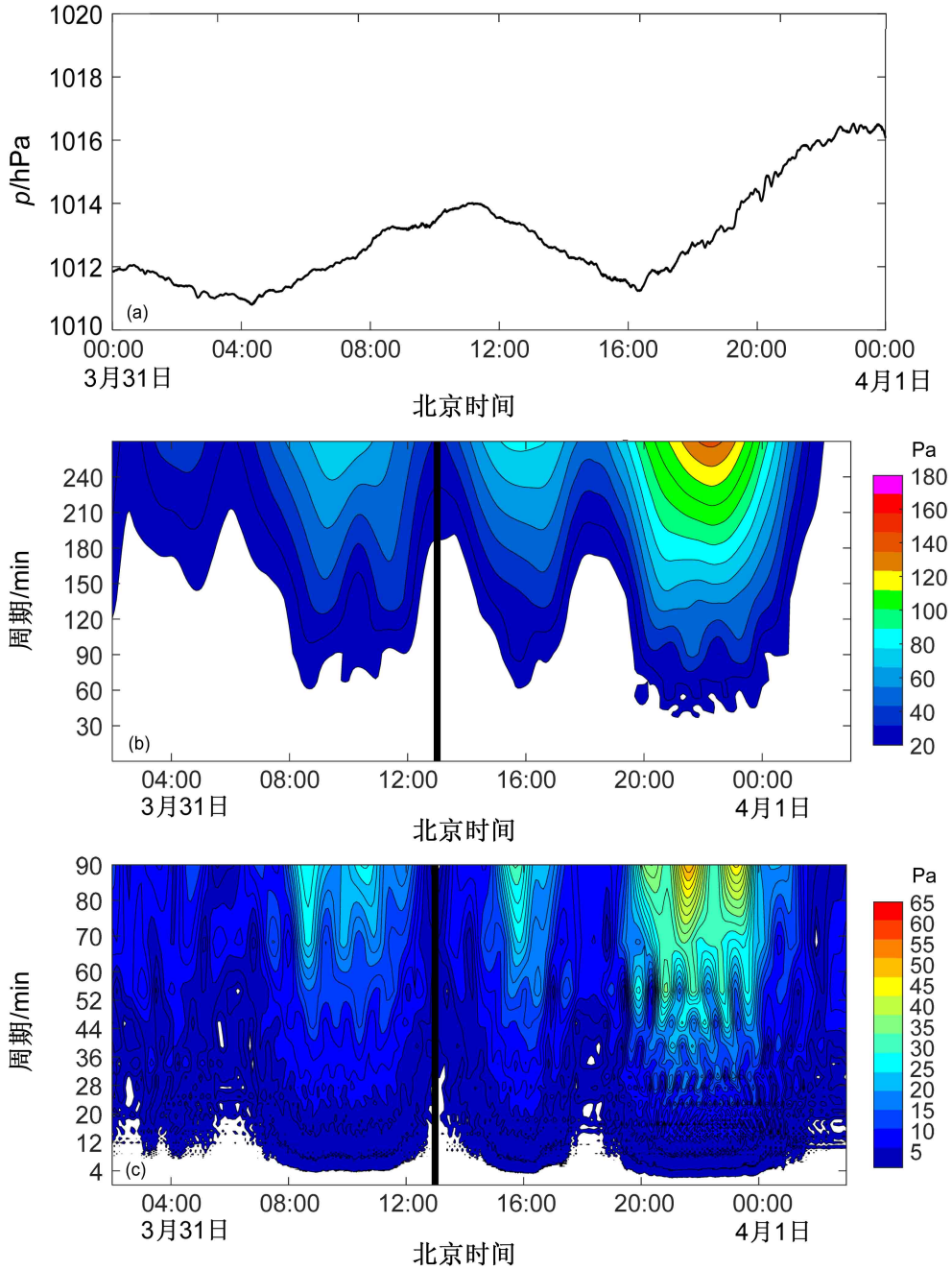

图 3　近距离弱雷暴实例：2019 年 3 月 31 日至 4 月 1 日（a）微压计气压时间序列、（b）长周期重力波动态谱和（c）短周期重力波动态谱（图例说明与图 2 一致）

Fig. 3　(a) Microbarograph pressure time series, the dynamic frequency spectra of (b) long-period gravity waves and (c) short-period atmospheric gravity waves (the illustrations are the same as Fig. 2) of the near-weak storm case during 31 Mar–1 Apr 2019

3.2.1　长周期重力波的频谱特征

长周期（90～270 min）重力波的平均中心振幅值在近距离强、弱雷暴期间分别为 124 Pa、122 Pa，在远距离强、弱雷暴期间分别为 121 Pa、105 Pa。由此可见，长周期重力波的平均中心振幅在前三类雷暴的平均中心振幅差异较小，但其值在近距离强雷暴期间比远距离弱雷暴期间明显偏大，说明近距离或者强雷暴对长周期重力波的振幅有积极的影响。

为了比较数据离散情况，计算了长周期重力波中心振幅在 4 类雷暴的方差，方差在近距离强、弱雷暴分别为 1238、1079，方差在远距离强、弱雷暴分别为 1760、977，说明数据偏差度均较小。为了揭示不同类型雷暴的长周期重力波振幅特征，统

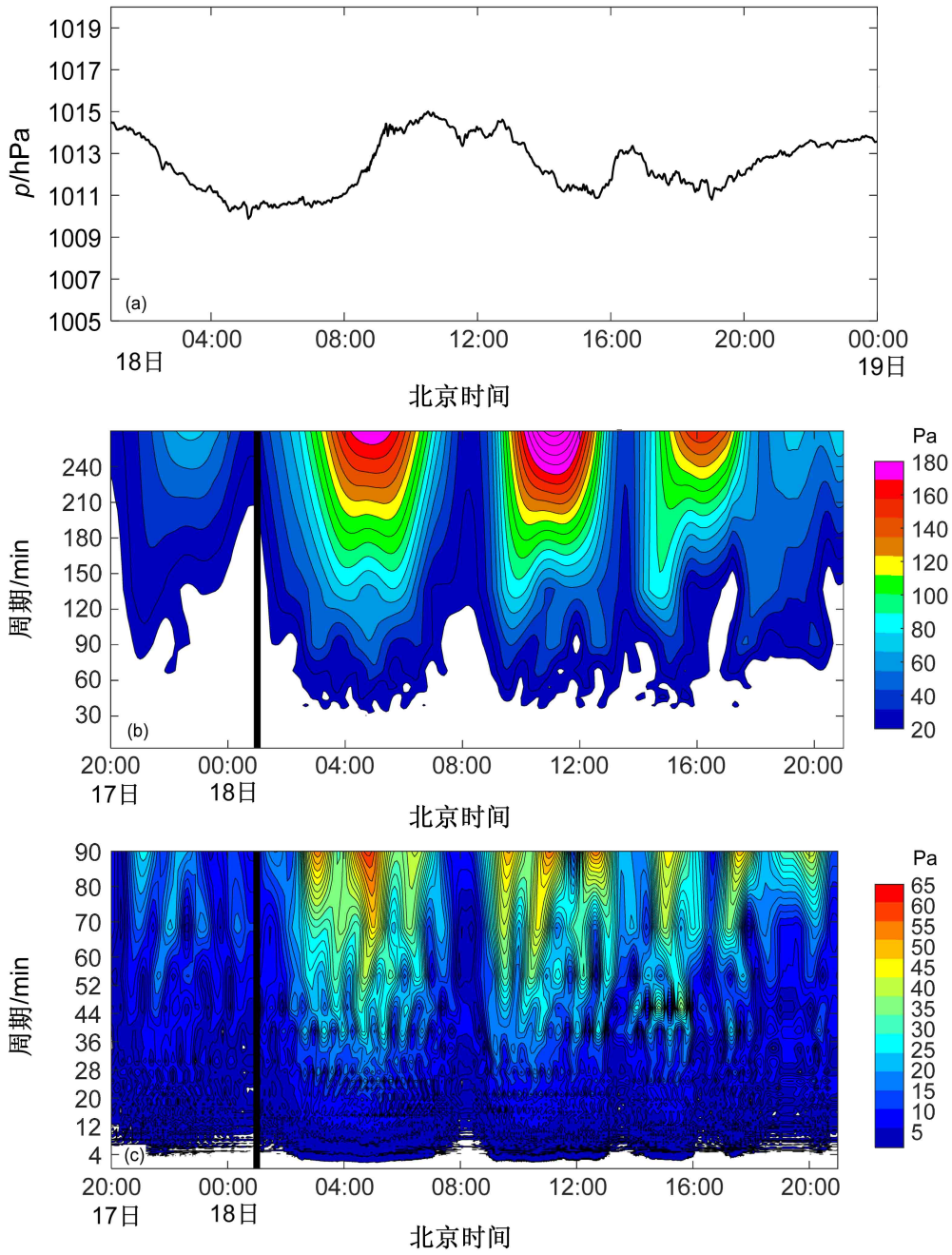

图 4 远距离强雷暴实例：2019 年 2 月（a）18 日微压计气压时间序列、（b）17~18 日长周期重力波动态谱和（c）短周期重力波动态谱（图例说明与图 2 一致）

Fig. 4 (a) Microbarograph pressure time series, the dynamic frequency spectra of (b) long-period atmospheric gravity waves and (c) short-period gravity waves (the illustrations are the same as Fig. 2) of the far-strong storm case on 18 Feb 2019

计 4 类雷暴过程长周期重力波中心振幅箱线图（图 6a）以及大振幅（≥130 Pa、≥180 Pa）重力波活动发生的比率（图 6b）。图 6a 显示，近距离强、弱雷暴过程，50%～75% 重力波中心振幅分别约 120～146 Pa、119～133 Pa，而远距离强、弱雷暴过程，50%～75% 重力波中心振幅分别约 113～134 Pa、112～128 Pa。可见，近距离或强雷暴更利于增大长周期重力波的振幅。

近距离强、弱雷暴过程，中心振幅≥130 Pa 的长周期重力波分别占 39%、28%（图 6b），其中，中心振幅≥180 Pa 的波分别占 6%、7%；远距离强、弱雷暴过程，中心振幅≥130 Pa 的长周期重力波分别占 29%、22%、中心振幅≥180 Pa 的波约占 6%、0。可见，近距离或者强雷暴过程更有利于产生大

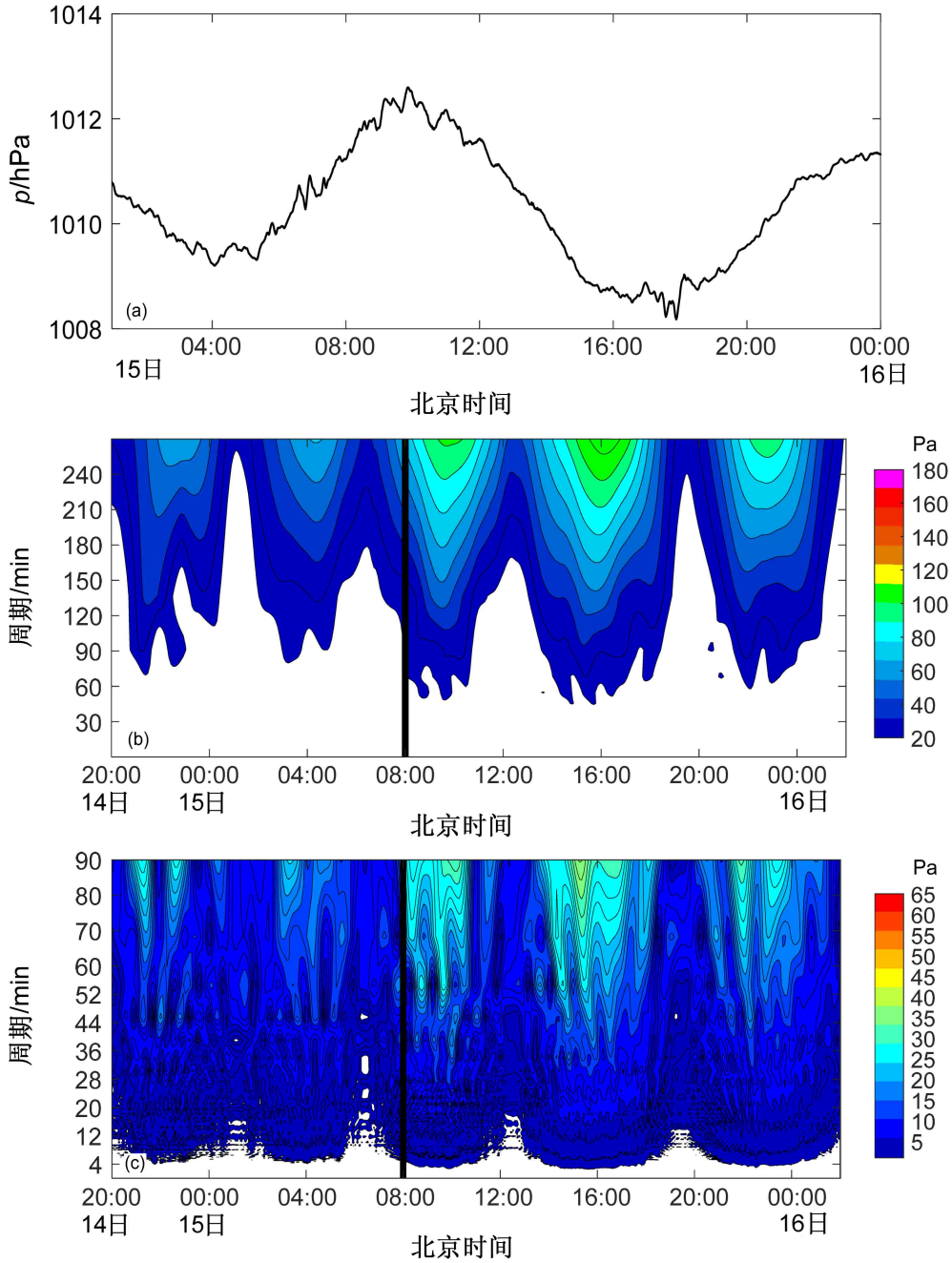

图 5　远距离弱雷暴实例：2018 年 3 月（a）15 日微压计气压时间序列、（b）14~15 日长周期大气重力波动态谱和（c）短周期大气重力波动态谱（图例说明与图 2 一致）

Fig. 5　(a) Microbarograph pressure time series, the dynamic frequency spectra of (b) long-period atmospheric gravity waves and (c) short-period atmospheric gravity waves (the illustrations are the same as Fig. 2) of the far-weak storm case on 15 Mar 2019

振幅（≥130 Pa）的重力波。

为了显示不同类型雷暴过程长周期重力波动态谱特征，选取 4 类雷暴过程长周期重力波的中心振幅所在的波列，该波列的中心振幅大于相应雷暴期间的波平均中心振幅值（124 Pa、122 Pa、121 Pa、105 Pa），求其平均动态谱分布（图 7）。可知，4 类雷暴期间都有大振幅、宽周期范围的长周期重力波，重力波周期越长，振幅越大；中心振幅所在的波列平均持续时间约 300 min；波列期间，重力波振幅先增大后减小。4 类雷暴过程长周期重力波的不同特征为：近距离强、弱雷暴过程，大振幅（≥110 Pa）重力波周期范围分别为 205～270 min、215～270 min；远距离强、弱雷暴过程，大振幅（≥110 Pa）重力波周期范围为 200～270 min、240～

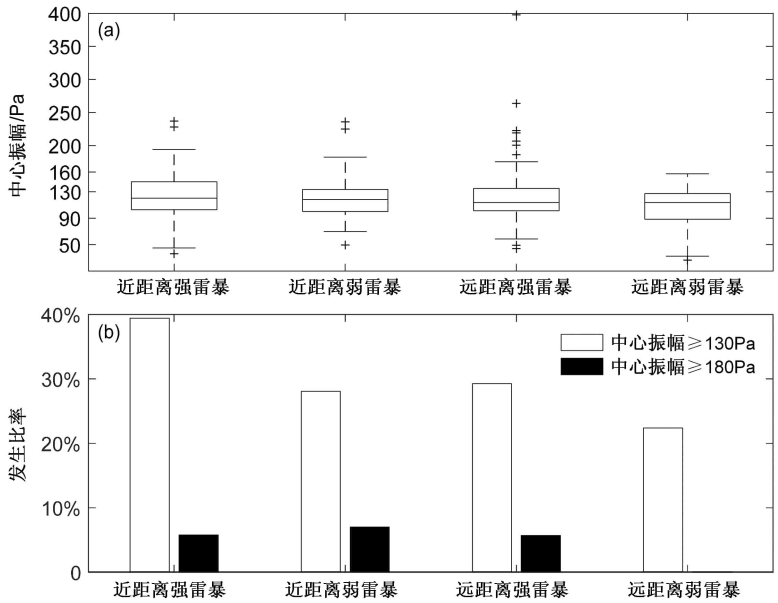

图 6 四类雷暴过程（a）长周期大气重力波中心振幅箱线图和（b）大振幅（≥130 Pa、≥180 Pa）长周期大气重力波活动发生的比率

Fig. 6 (a) Boxplot of the center amplitudes in the long-period atmospheric gravity waves and (b) the occurrence rate of large amplitudes (≥130 Pa and ≥180 Pa) in the long-period atmospheric gravity waves during the four types of thunderstorms

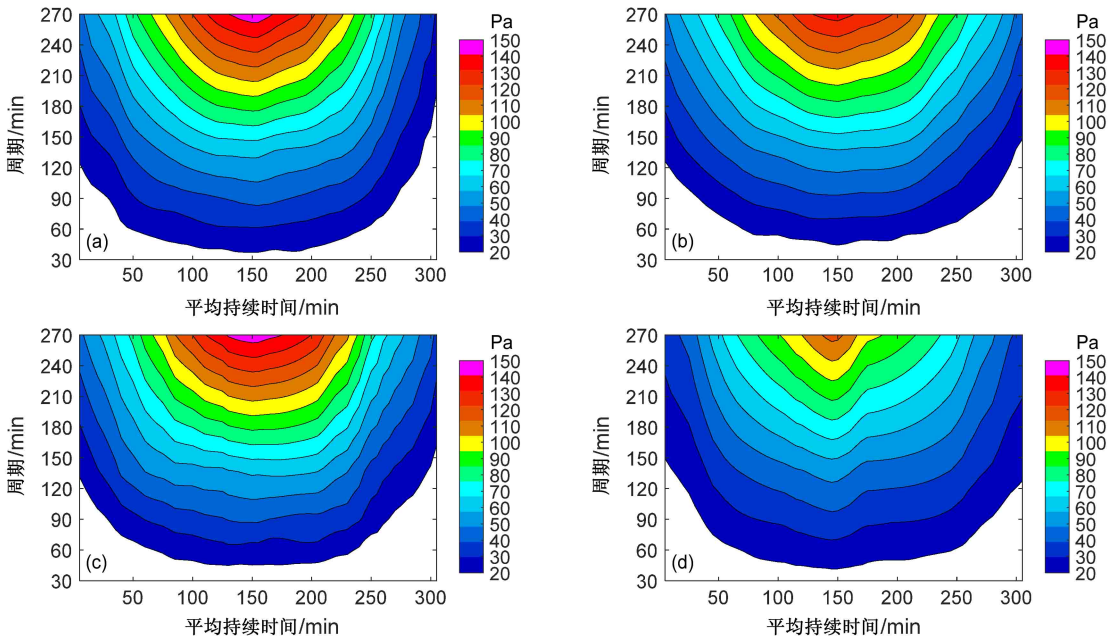

图 7 （a）近距离强雷暴、（b）近距离弱雷暴、（c）远距离强雷暴、（d）远距离弱雷暴过程长周期大气重力波中心振幅所在波列的平均动态谱分布

Fig. 7 Average dynamic frequency spectra of the center amplitudes of the wave train in the long-period atmospheric gravity waves during the (a) near-strong storms, (b) near-weak storms, (c) far-strong storms, and (d) far-weak storms

270 min。这说明，在强雷暴过程，振幅大于 110 Pa 的重力波周期范围比在弱雷暴过程更宽；对于弱雷暴过程，重力波在近距离雷暴比在远距离雷暴的周期范围更宽、振幅更大（图 7b 和 7d）。前人研究表明，强对流过程会有大振幅、长周期重力波（Uccellini, 1975; Stobie et al., 1983; Bosart and Sanders, 1986），这与前人研究结果一致。

3.2.2 短周期重力波的频谱特征

雷暴期间除了有长周期重力波活动还会有短周期 1～90 min 重力波活动，短周期重力波特征识别

依据 Wang et al.（2020），即其频谱特征与长周期重力波明显不同，主要表现为会有多个中心振幅周期性出现、中心振幅所在的周期范围较窄。为了比较数据离散情况，计算 4 类雷暴过程短周期重力波最大的中心振幅的方差，方差在近距离强、弱雷暴分别为 113、131，方差在远距离强、弱雷暴分别为 239、123，说明数据偏差度均较小。图 8a 统计了 4 类雷暴过程短周期重力波最大的中心振幅箱线图，可见，近距离强、弱雷暴过程，50%～75% 短周期重力波最大的中心振幅分别为 40～48 Pa、39～46 Pa，而远距离强、弱雷暴过程，50%～75% 短周期重力波最大的中心振幅分别为 38～48 Pa、35～41 Pa。

图 8b 是 4 类雷暴过程短周期重力波活动发生的比率，近距离强、弱雷暴一般都会有短周期重力波活动，比率分别为 84%、70%，其中，中心振幅≥50 Pa 短周期重力波发生的比率分别为 17%、14%；远距离强、弱雷暴短周期重力波发生的比率分别为 71%、43%，其中，中心振幅≥50 Pa 短周期重力波发生的比率分别为 16%、3%。可见，近距离或强雷暴更利于激发短周期重力波，并且更易于振幅较大（≥50 Pa）的短周期重力波产生。

表 2 统计了每次短周期重力波活动的中心振幅值及其相应的周期范围。4 类雷暴期间出现短周期重力波总共活动次数分别为 87、40、87、29 场，比率是指该区间内出现短周期重力波的次数/相应雷暴过程的短周期重力波活动总共次数。由表 2 可知，4 类雷暴期间都会激发周期 10～90 min、中心

表 2　四类雷暴过程短周期大气重力波频谱分布

Table 2　Short-period atmospheric gravity waves' frequency spectra distribution during the four types of thunderstorms

	近距离强雷暴		近距离弱雷暴		远距离强雷暴		远距离弱雷暴	
周期范围	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa
70～90 min	77%	43	57%	47	86%	45	62%	41
50～70 min	18%	26	14%	24	18%	29	14%	31
40～50 min	18%	20	23%	19	18%	19	10%	17
30～40 min	50%	17	43%	16	57%	16	57%	15
20～30 min	57%	13	40%	14	41%	14	31%	12
10～20 min	26%	12	25%	12	24%	13	3%	11
1～10 min	—	—	—	—	3%	11	—	—

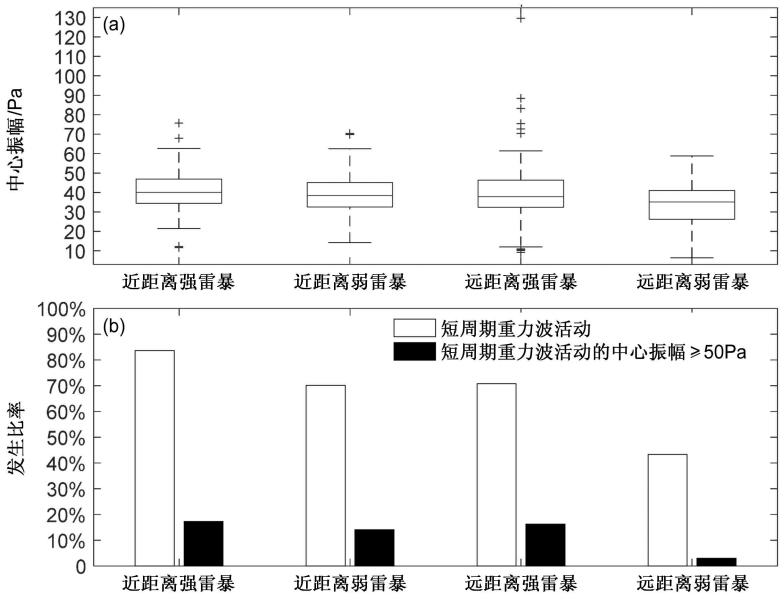

图 8　四类雷暴过程（a）短周期大气重力波最大的中心振幅箱线图、（b）短周期重力波活动的发生比率

Fig. 8　(a) Boxplot of the maximum center amplitudes in the short-period atmospheric gravity waves and (b) occurrence rate of the short-period atmospheric gravity waves during the four types of thunderstorms

振幅 11～47 Pa 重力波。不同类型雷暴对短周期重力波的影响表现为：1）强雷暴激发的各周期区间尤其 1～30 min 周期重力波活动的发生比率明显高于弱雷暴，这表明强雷暴更有利于激发短周期 1～30 min 的重力波。2）强雷暴在近、远距离激发的短周期重力波主周期为 70～90 min、10～40 min，弱雷暴在近距离有主周期 70～90 min、10～50 min 的短周期重力波，而弱雷暴在远距离的短周期重力波主周期为 70～90 min、20～40 min；另外，强雷暴还会出现周期小于 10 min 的重力波，这表明强雷暴更易激发更短周期（1～20 min）的重力波。3）4 类雷暴期间，重力波在各周期区间的平均中心振幅区别不大。前人研究指出，强雷暴会激发短周期 1～20 min 重力波（Curry and Murty, 1974; Balachandran, 1980; Hauf et al., 1996），上述与前人研究结果一致。

3.2.3 重力波先兆活动的频谱特征

统计分析中还发现，部分雷暴前（以降水开始时间为参考）就会有长、短周期重力波活动并且会一直持续直到雷暴期间，称其为重力波先兆活动（李启泰等, 1993; Wang et al., 2020）。

近距离强雷暴、近距离弱雷暴、远距离强雷暴、远距离弱雷暴的重力波先兆活动次数分别为 28、16、30、11 场，图 9 显示了近距离强、弱雷暴出现重力波先兆活动的比率分别为 27%、28%，远距离强、弱雷暴出现重力波先兆活动的比率分别为 24%、16%。这表明，相比远距离雷暴，近距离雷暴出现重力波先兆活动的比率更高。在远距离雷暴期间，强雷暴的重力波先兆活动发生比率更高。

重力波先兆活动提前时间量是指重力波先兆活动早于对流发生的时间量，表 3 统计结果表明 4 类雷暴的重力波先兆活动平均提前时间为 114～168 min。4 类雷暴的长周期重力波平均中心振幅 84～106 Pa（表 4），重力波先兆活动的振幅在近距离强雷暴明显大于在其他 3 类雷暴，说明在强雷暴或近距离雷暴，重力波先兆活动的振幅更大。

表 5 统计了每次重力波先兆活动的短周期重力波频谱分布。4 类雷暴的短周期重力波先兆活动共同特征为都有周期 30～90 min、中心振幅 12～43 Pa 的波。不同类型雷暴的重力波先兆活动不同之处：1）近距离强雷暴的短周期重力波先兆活动主周期为 70～90 min、20～40 min，近、远距离弱雷暴的

表 3 大气重力波先兆活动的提前时间量

Table 3 Advanced time of the atmospheric gravity waves' precursor events

提前时间/min	近距离强雷暴	近距离弱雷暴	远距离强雷暴	远距离弱雷暴
平均提前时间/min	130	151	114	168
最长提前时间/min	434	397	398	439

表 4 重力波先兆活动的长周期大气重力波平均中心振幅

Table 4 Average center amplitudes of the long-period atmospheric gravity waves in the gravity waves' precursors events during the four types of thunderstorms

	近距离强雷暴	近距离弱雷暴	远距离强雷暴	远距离弱雷暴
中心振幅/ Pa	106	91	90	84

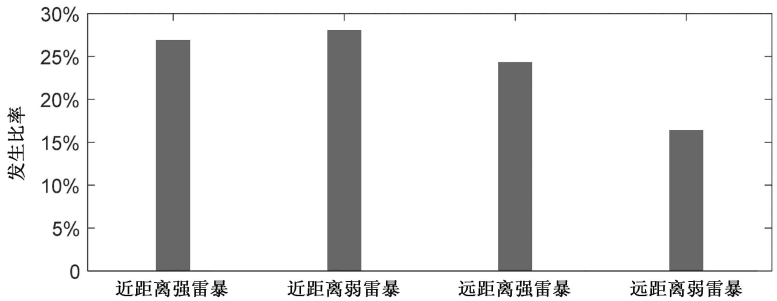

图 9 四类雷暴过程重力波先兆活动发生的比率

Fig. 9 Occurrence rate of the gravity waves' precursor events during the four types of thunderstorms

表 5　重力波先兆活动的短周期大气重力波频谱分布（平均中心振幅）

Table 5　Short-period gravity waves' frequency spectra distribution in the atmospheric gravity waves' precursor events during the four types of thunderstorms

	近距离强雷暴		近距离弱雷暴		远距离强雷暴		远距离弱雷暴	
周期范围	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa	发生比率	中心振幅/Pa
70～90 min	78%	43	80%	30	62%	30	82%	36
50～70 min	16%	28	38%	15	18%	20	50%	17
40～50 min	16%	20	50%	15	11%	12	50%	14
30～40 min	58%	17	50%	12	35%	13	67%	13
20～30 min	21%	17	—	—	—	—	—	—
10～20 min	—	—	—	—	—	—	—	—
1～10 min	—	—	—	—	—	—	—	—

短周期重力波先兆活动主周期均为 30～90 min，远距离强雷暴的短周期重力波先兆活动主周期为 70～90 min、30～40 min，这说明在强雷暴过程，更短周期（20～30 min）的重力波先兆活动发生比率更高。2）各周期区间重力波先兆活动的振幅值在强、弱雷暴区别明显，前者大部分都大于后者，这说明在强雷暴过程波的振幅更大。前人结果指出，强对流过程有较大振幅的短周期（≤90 min）重力波先兆活动，上述统计值与前人研究结果一致（李启泰等, 1993; 巴特尔等, 2007; Wang et al., 2020）。

4　结论

利用 34 个月佛山市三水区微压计数据、降水和雷达数据，统计分析了不同类型雷暴过程的重力波频谱特征，结果如下：

（1）不同类型雷暴期间，都有大振幅（≥110 Pa）、宽周期范围的长周期（90～270 min）重力波，波的周期越长，振幅越大。但是，雷暴强弱对长周期重力波有明显的影响，强雷暴期间长周期重力波的振幅更大、周期范围更宽，大振幅（≥130 Pa）重力波发生的比率也更高。相比远距离雷暴，近距离雷暴对长周期重力波的发展有着更积极的影响。

（2）短周期重力波的发生、发展与对流天气密切相关。不同类型雷暴都会激发短周期重力波活动，共同特征为周期 10～90 min、中心振幅约 11～47 Pa。短周期重力波的频谱特征在不同强度的雷暴天气有明显差异，在不同距离的雷暴天气也有一定的差别，其中，大部分强雷暴都会激发短周期（10～90 min）的重力波，发生的比率高于弱雷暴过程，尤其是，强雷暴期间更易于激发周期 1～20 min 的重力波；强雷暴也更容易产生振幅较大（≥50 Pa）的短周期重力波。相比远距离雷暴，近距离雷暴更利于激发短周期重力波的发生。

（3）部分雷暴前会出现重力波先兆活动，平均提前时间量约 114～168 min，波的特征为长周期重力波平均中心振幅 84～106 Pa、短周期 30～90 min 重力波中心振幅 12～43 Pa。重力波先兆活动的特征在不同类型雷暴有区别，重力波先兆活动在近距离雷暴发生更高，在强雷暴过程振幅更大、并且短周期（20～30 min）的重力波先兆活动发生率更高。重力波先兆活动可能对强对流预警有指示意义。

本文统计结果显示重力波的发生发展与不同类型的对流有一定的相关性，文中虽然分析了雷暴发生前的重力波先兆活动特征，但尚不能确定该先兆信号是否为强对流的预警因子，未来拟利用多台微压计数据对重力波先兆信号进行波源定位，由此可以确定重力波先兆信号预警强对流的可行性。

致谢　感谢佛山市气象局李兆明、余乐福为本文提供了佛山市加密站、雷达等气象数据，感谢中国气象数据网提供的雷达等数据。

参考文献（References）

Balachandran N K. 1980. Gravity waves from thunderstorms [J]. Mon. Wea. Rev., 108(6): 804−816. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<0804:GWFT>2.0.CO

巴特尔, 巩迪, 单久涛. 2007. 重力波冰雹预警系统应用研究 [J]. 自然灾害学报, 16(6): 21−24.　Bateer, Gong Di, Shan Jiutao. 2007. Application study on gravity wave-based hail early warning system [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 16(6): 21−24. doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2007.06.004

Bosart L F, Sanders F. 1986. Mesoscale structure in the megalopolitan snowstorm of 11–12 February 1983. Part III: A large-amplitude gravity wave [J]. J. Atmos. Sci., 43(9): 924−939. doi:10.1175/1520-0469(1986)043<0924:MSITMS>2.0.CO;2

Curry M J, Murty R C. 1974. Thunderstorm-generated gravity waves [J]. J. Atmos. Sci., 31(5): 1402−1408. doi:10.1175/1520-0469(1974)031<1402:TGGW>2.0.CO;2

Einaudi F, Clark W L, Green J L, et al. 1987. Gravity waves and convection in Colorado during July 1983 [J]. J. Atmos. Sci., 44(11): 1534−1553. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<1534:GWACIC>2.0.CO;2

龚佃利, 吴增茂, 傅刚. 2005. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析 [J]. 大气科学, 29(3): 453−464. Gong Dianli, Wu Zengmao, Fu Gang. 2005. Analysis of the mesoscale characteristics about a severe thunderstorm in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 453−464. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.13

龚佃利, 庞华基, 王俊, 等. 2019. 2006 年 4 月 28 日山东强飑线过程中尺度结构和动力机制分析 [J]. 海洋气象学报, 39(3): 64−73. Gong Dianli, Pang Huaji, Wang Jun, et al. 2019. Analysis of mesoscale structure and dynamic mechanism for a severe squall line process in Shandong Province on 28 April 2006 [J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 39(3): 64−73. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.008

郭欣, 郭学良, 付丹红, 等. 2013. 钟形地形动力抬升和重力波传播与地形云和降水形成关系研究 [J]. 大气科学, 37(4): 786−800. Guo Xin, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2013. Relationship between bell-shaped terrain dynamic forcing, mountain wave propagation, and orographic clouds and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(4): 786−800. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12114

Hauf T, Finke U, Neisser J, et al. 1996. A ground-based network for atmospheric pressure fluctuations [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 13(5): 1001−1023. doi:10.1175/1520-0426(1996)013<1001:AGBNFA>2.0.CO;2

Koch S E, Dorian P B. 1988. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part III: Wave environment and probable source mechanisms [J]. Mon. Wea. Rev., 116(12): 2570−2592. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2570:AMGWEO>2.0.CO;2

Koch S E, Golus R E. 1988. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part I: Multiscale statistical analysis of wave characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 116(12): 2527−2544. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2527:AMGWEO>2.0.CO;2

Koch S E, Golus R E, Dorian P B. 1988. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part II: Interactions between mesoscale convective systems and the antecedent waves [J]. Mon. Wea. Rev., 116(12): 2545−2569. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2545:AMGWEO>2.0.CO;2

李启泰, 谢金来, 杨训仁. 1993. 灾害性冰雹过程的重力波演变特征 [J]. 气象学报, 51(3): 361−368. Li Qitai, Xie Jinlai, Yang Xunren. 1993. The dynamic characteristics of gravity waves during severe hailstorm process [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 51(3): 361−368. doi:10.11676/qxxb1993.046

Rees J M, Denholm-Price J C W, King J C, et al. 2000. A climatological study of internal gravity waves in the atmospheric boundary layer overlying the brunt ice shelf, Antarctica [J]. J. Atmos. Sci., 57(4): 511−526. doi:10.1175/1520-0469(2000)057<0511:ACSOIG>2.0.CO;2

Ruppert J H Jr, Bosart L F. 2014. A case study of the interaction of a mesoscale gravity wave with a mesoscale convective system [J]. Mon. Wea. Rev., 142(4): 1403−1429. doi:10.1175/MWR-D-13-00274.1

Stobie J G, Einaudi F, Uccellini L W. 1983. A case study of gravity waves-convective storms interaction: 9 May 1979 [J]. J. Atmos. Sci., 40(12): 2804−2830. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<2804:ACSOGW>2.0.CO;2

Trexler C M, Koch S E. 2000. The life cycle of a mesoscale gravity wave as observed by a network of Doppler wind profilers [J]. Mon. Wea. Rev., 128(7): 2423−2446. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<2423:TLCOAM>2.0.CO;2

Uccellini L W. 1975. Case study of apparent gravity wave initiation of severe convective storms [J]. Mon. Wea. Rev., 103(6): 497−513. doi:10.1175/1520-0493(1975)103<0497:acsoag>2.0.co;2

Wang Xiujuan, Lei Hengchi, Feng Liang, et al. 2020. Analysis of the characteristics of gravity waves during a local rainstorm event in Foshan, China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 13(2): 163−170. doi:10.1080/16742834.2020.1719567