0254-6124/2014/34(3)-296–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Hu Xiaoyan, Zhang Donghe, Hao Yongqiang, Xiao Zuo. Application of atmospheric disturbances monitor on lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(3): 296-303, doi:10.11728/cjss2014.03.296

大气波动监测仪在岩石圈–大气层–电离层研究中的应用*

胡晓彦　张东和　郝永强　肖　佐

(北京大学地球与空间科学学院　北京 100871)

摘　要　针对北京大学空间物理与应用技术研究所研制的两台大气波动监测仪近三年的观测数据, 对这一时段内所观测到的重力波和次声波周期尺度扰动的形态特征、谱结构特征及其在时间分布上的统计特征进行了分析. 给出了几例雷暴、地震等事件中观测到的大气扰动, 并揭示了这些事件期间观测到的与地面大气扰动周期尺度相类似的电离层扰动. 结果表明, 北京大学研制的大气波动监测仪可有效记录到地面的微弱大气扰动, 观测数据可用于进行岩石圈–大气层–电离层之间的耦合研究.

关键词　大气波动检测仪, 重力波, 次声波, 岩石圈–大气层–电离层耦合

中图分类号　P 352

Application of Atmospheric Disturbances Monitor on Lithosphere-atmosphere-ionosphere Coupling

HU Xiaoyan　ZHANG Donghe　HAO Yongqiang　XIAO Zuo

(*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract　Gravity waves and infrasonic waves play important roles in the coupling of lithosphere, atmosphere and ionosphere. This paper analyzes the observational data of Atmospheric Disturbances Monitors, which are developed by Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University. The morphological features and spectral structures of the observed gravity waves and infrasonic waves are presented, then their temporal distribution characteristics are summarized. We also have done some case studies about thunderstorms and earthquakes. The disturbances of atmosphere recorded by Atmospheric Disturbances Monitor and the similar observations of ionospheric disturbances during these events are presented. These results reveal that Atmospheric Disturbances Monitor could record the week disturbance of the surface atmosphere, proving which a useful tool for study of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling.

Key words　Atmospheric disturbances monitor, Infrasonic waves, Gravity waves, Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling

---

* 国家自然科学基金项目 (41174134, 41274156) 和国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB811405) 共同资助

2013-05-13 收到原稿, 2013-12-25 收到修定稿

E-mail: zhangdh@pku.edu.cn

0 引言

岩石圈–大气层–电离层之间的耦合是中高层大气与电离层研究的一个热点问题. 观测表明, 大气中存在多种不同周期尺度的波动, 例如次声波、重力波、行星波、潮汐波等, 其周期范围可从几秒到几十天不等. 研究发现, 这些大气波动中, 低周期部分的次声波及重力波经常与发生在地面附近的一些自然事件有关, 包括台风、雷暴、海啸、地震、火山喷发等 [1]. 这些波传播到电离层高度, 可以引起电离层电子密度产生类似周期的扰动.

剧烈的天气活动是大气扰动的主要来源之一, 例如飓风及雷暴等都能够产生次声波和重力波, 这些波在大气层底部产生并向上传播, 进而对电离层产生影响. 长期以来, 关于剧烈天气现象对大气层和电离层的影响研究不断深入. 例如 Blanc[1] 对高层大气次声波的来源进行了分析, 认为天气活动是其最主要的来源之一. 在强对流天气期间, 电离层高度上可观测到周期 1∼5 min 的次声波, 持续数小时 [2−3]. Xiao 等 [4−5] 研究了台风激发声重力波进而影响电离层的全过程. 此外, 地震等自然现象也能够激发大气低频扰动, Hao 等 [6−7] 对 2005 年印尼地震以及 2011 年日本大地震后电离层高频多普勒数据中观测到的次声波扰动进行了分析, 证实地震与电离层高频多普勒扰动之间具有因果关系.

在已有研究中, 通常主要是利用雷达及高频多普勒探测仪等探测手段对电离层扰动进行观测, 进而推断大气中相应周期尺度扰动的存在. Sindelarova 等 [8] 关于电离层高度上气象学起源的次声波研究以及相关学者关于地震后电离层效应的研究采用的均为高频多普勒探测仪的数据.

事实上, 除利用雷达方式探测电离层高度上的扰动外, 借助地面观测设备直接对低层大气波动进行观测无疑对揭示岩石圈–大气层–电离层之间的耦合过程具有重要意义.

Georges[2] 对强对流天气期间雷达和大气微压计这两种不同探测方法探测到的波动特征和相互关系进行了分析. 与雷达及高频多普勒探测仪等通过观测电离层响应来间接反映大气扰动不同, 微气压计可直接探测地表气压扰动. 这种对地面气压扰动的直接观测对研究低频大气扰动在临近空间的传播规律与特性, 分析地震与雷暴等各类事件期间地球空间中的波动, 研究其激发机制和对电离层的作用, 分析岩石圈–大气层–电离层耦合等具有重要作用.

本文详细介绍了北京大学空间物理与应用技术研究所基于微压计原理研制的大气波动监测仪的数据选取和分析方法, 对其部分观测结果进行了分析, 给出特殊事件期间观测到的次声波和重力波周期扰动形态.

1 数据与方法

大气波动监测仪是北京大学空间物理与应用技术研究所研制的用于观测地面低频大气扰动的一种设备, 可探测从周期为几分钟的次声波到周期为几小时的重力波范围内的大气扰动.

仪器硬件部分的核心为高精度微气压计. 该型号微气压计具有稳定性好、灵敏度高的特点. 基于该微压计研制的大气波动监测仪采用 GPS 时间同步单元, 即采用 GPS 接收机的整秒信号来保证各监测点数据的时间同步, 以便获得扰动源等信息, 同步精度可达 100 ns. 微气压计的气压分辨率为 0.001 Pa, 采样频率为 $10\,\mathrm{s}^{-1}$.

本文研究用到的两台大气波动监测仪分别位于北京大学本部电离层观测站 (以下简称 BD, 位于 116.3°E, 40.0°N) 和北京大学昌平校区电离层观测站 (以下简称为 CP, 位于 116.2°E, 40.2°N). 为能够体现部分季节变化特征, 研究主要采用 BD 站 2008 年 9 月 26 日至 2011 年 10 月 8 日三年共计 795 天的数据, 其中, 2010 年 3 月 9 日至 2010 年 10 月 29 日期间无数据. 而 CP 站的监测仪由于投入使用的时间较晚, 只包括了从 2010 年 10 月 5 日至 2011 年 9 月 20 日共计 201 天的数据, 其中, 2010 年 11 月 19 日至 2011 年 3 月 24 日期间无数据.

为了得到某时段内大气扰动的主要周期, 这里使用 Lomb-Scargle 方法 [9−10] 来获取周期谱. 为进一步得到大气扰动随时间变化的周期信息, 研究采用的是连续小波变换 (CWT) 滤波方法. 因为小波变换的时间–频率窗口宽度会随频率不同发生变化, 在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 而在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率, 故能够表述信号的时频局域性质, 反映信号的异

常现象, 适用于分析和处理非平稳信号. 本文选用的是 Morlet 小波.

下面给出几种特殊扰动的观测形态和频谱特征, 并通过简单的统计得到季节变化特征和地方时分布特征等.

2 大气扰动类型观测

2.1 重力波周期尺度扰动观测实例

图 1(a) 给出了 2009 年 8 月 11 日 00:00 LT—08:00 LT 观测到的典型重力波波形, 从图中可以明显看出, 该时段内存在周期为半小时左右的扰动, 振幅约为 3×10^2 Pa. 图 1(b) 给出的是同一时段内的小波功率谱, 图中黑色细包络线显示了小波影响锥, 其外侧为边缘效应较大的区域, 黑色粗实线包围的是置信度在 95% 以上的区域 (其他图相同), 图 1(b) 显示这类周期在半小时左右的扰动几乎在整个时段中都持续存在.

对两站数据的统计发现, 此类重力波周期尺度扰动发生非常频繁. 从地方时分布上看, 此类扰动多发生于夜间, 白天相对较少, 同时白天发生的此类扰动相对于夜间振幅稍大.

2.2 次声波周期尺度扰动观测实例

本文研究中观测到的次声波种类很多, 周期范围在 1~8 min 之内. 例如, 在雷暴等事件中常伴随发生的具有宽谱结构的扰动, 其中就包含有次声波成分. 另外, BD 站在夏季午后常观测到持续周期在 1~2 min 左右的小幅度次声扰动, 而在 CP 站的探测数据中则没有发现这类扰动, 这很可能是由两站所处环境中的背景噪声水平不同导致的.

图 2 给出的是一个典型的次声波观测实例, 其周期约在 3~5 min, 同时在波形上具有清晰的类似正弦波的形态特征. 图 2(a) 所示为 2010 年 11 月 5 日 06:00 LT—08:00 LT 期间观测到的波形, 从图 2(a) 可以看出, 在 07:00 LT 前后发生了很明显的短周期扰动, 最大振幅超过了 3×10^2 Pa. 图 2(b) 所示为同

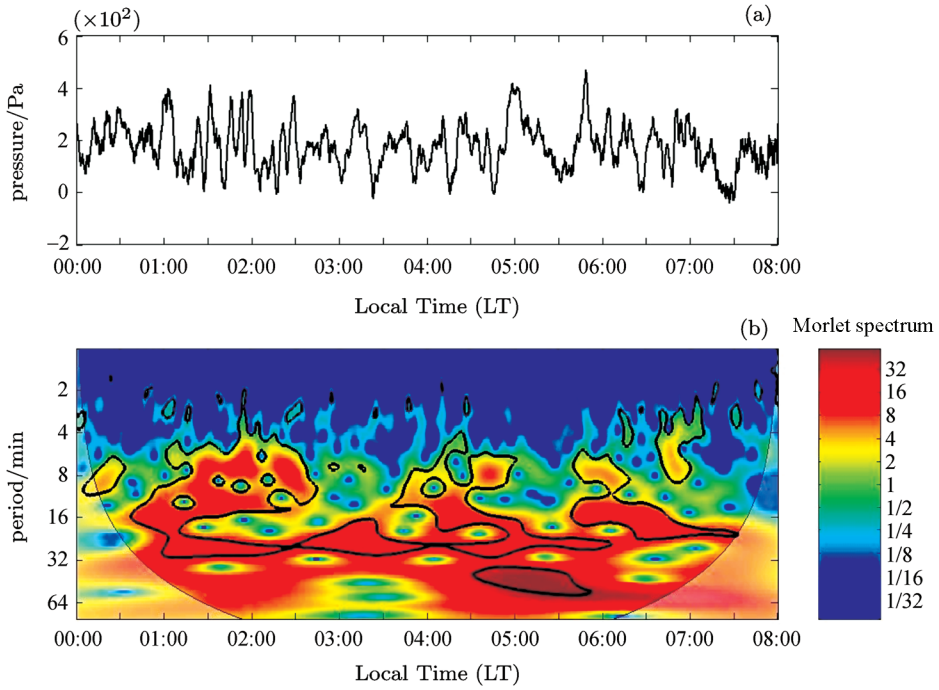


图 1 2009 年 8 月 11 日 BD 台站探测到的重力波波形 (a) 及同一时段小波功率谱 (b). 黑色细包络线显示了小波影响锥, 其外侧为边缘效应较大的区域, 黑色粗实线包围的是置信度在 95% 以上的区域

Fig. 1 Shape of the gravity wave detected at BD station on 11 August 2009 (a) and the wavelet power spectrum for the same interval. The thin black envelope line shows the cone of influence, outside of which edge effects might be large, and the thick black contour designates the 95% confidence level

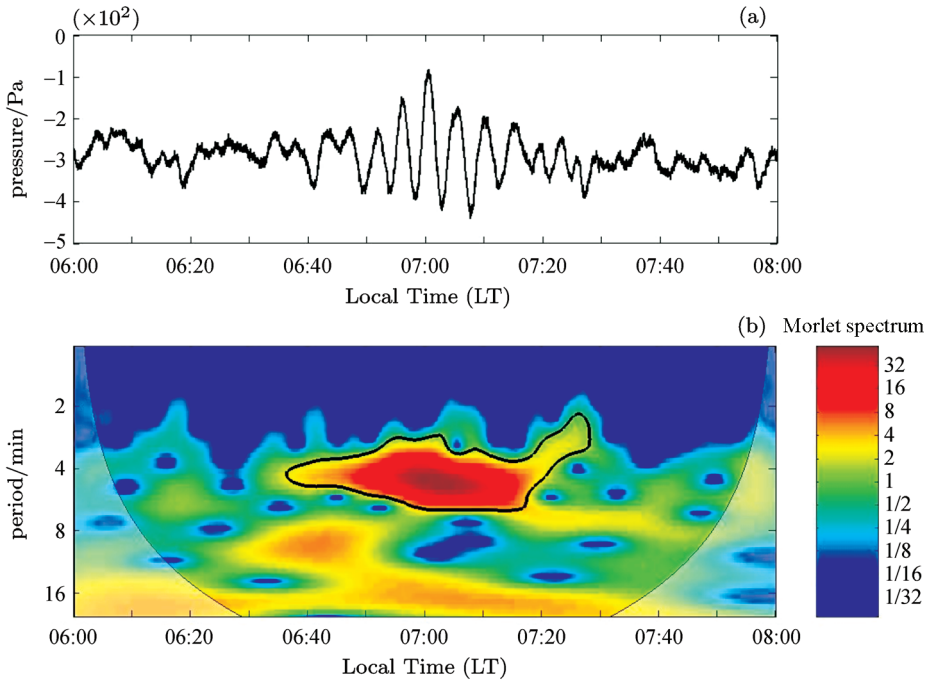


图 2 2010 年 11 月 5 日 BD 台站探测到的次声波波形 (a) 及同一时段的小波功率谱 (b)

Fig. 2 Shape of the infrasound detected at BD station during 06:00 LT—08:00 LT on 5 November 2010 (a) and the wavelet power spectrum for the same time interval (b)

一时段内的小波功率谱, 显示扰动周期约为 4.5 min. 对两站探测结果的统计表明, 在季节分布上, 此类次声波周期尺度扰动在冬季发生次数较多, 而在夏季几乎不发生. 从地方时分布分析, 有将近 90% 的此类扰动发生在夜间, 而只有约 10% 发生在白天. 更具体来分析, 可发现绝大部分此类扰动发生在午夜和日出前后, 这与 Georges[2] 研究提到的发生时段相一致.

2.3 雷暴期间大气扰动观测实例

在雷暴期间的大气波动监测仪观测结果中发现了与雷暴相关的扰动. 以 2009 年 4 月 23 日的雷暴为例, 图 3 给出了该日 19:00 LT—23:00 LT 观测到的扰动波形和小波功率谱. 当天的雷暴在 20:00 LT 以后发生, 如图 3(a) 所示, 在 20:10 LT 开始发生剧烈扰动, 最大扰动幅度超过了 5×10^3 Pa. 在如图 3(b) 所示的同时段小波功率谱中可以看到, 该扰动的周期覆盖了从次声波到重力波的很宽范围, 结构复杂, 且随着雷暴的发展, 频谱结构也在发生变化. 较早出现的是重力波范围的扰动, 随后次声波范围的扰动也开始出现, 在持续一段时间后次声波扰动首先消失, 最后重力波扰动也逐渐消失. 在其他雷暴事件中, 虽然事件间频谱结构差别较大, 但都具有类似的发展过程, 且重力波成分一般要强于次声波成分, 持续时间多为 2 h. 这些结果与 Georges[2] 和 Blanc[1] 的相关结论一致. 值得注意的是, 部分周期的扰动是由剧烈天气活动所激发的, 而另一部分则先于天气活动出现, 很有可能在激发天气活动的机制中起到重要作用 [2].

图 4 给出了 2009 年 6 月 16 日雷暴期间大气波动监测仪观测结果, 从图 4 可以看出与图 3 类似的大气波动现象. 值得注意的是, 这次雷暴天气过程持续时间长, 且覆盖了整个中国华北地区, 为了检验此次天气过程造成的大气扰动是否传播到了电离层高度, 本研究从北京地区两个 GPS 台站的观测数据中提取了电离层总电子含量 (TEC). 图 5 给出了雷暴期间从 GPS 的 12 号星数据得到的垂直 TEC 随时间变化曲线, 从图 5 可以看出, 这期间电离层中也出现了与地面大气扰动周期相近的扰动现象. 有关地面大气扰动与电离层扰动之间关系的研究对分析低层大气与电离层之间的波动耦合过程具有促进作用.

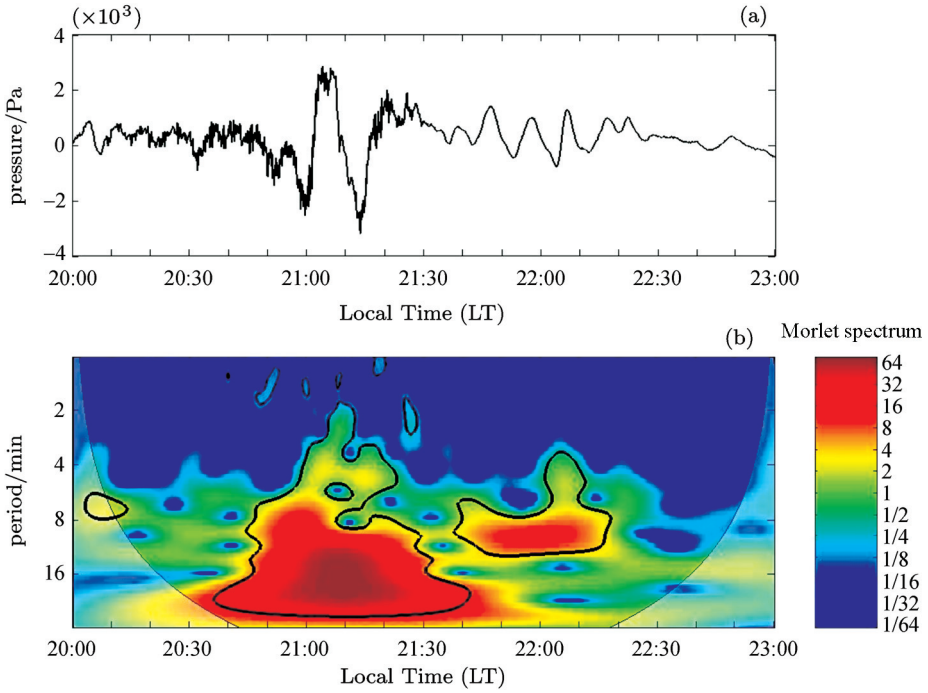


图 3 2009 年 4 月 23 日 BD 台站探测到的雷暴期间波形 (a) 及同一时段的小波功率谱 (b)

Fig. 3 Shape of the disturbance detected at BD station during the thunderstorm on 23 April 2009 (a) and the wavelet power spectrum for the same time interval (b)

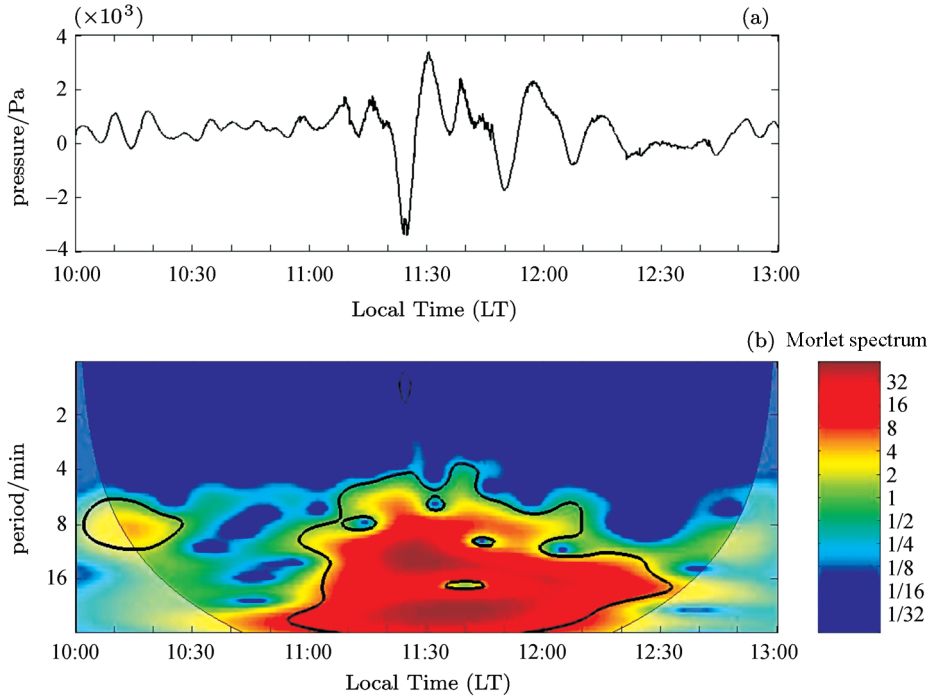


图 4 2009 年 6 月 16 日 BD 台站探测到的雷暴期间波形 (a) 及同一时段的小波功率谱 (b)

Fig. 4 Shape of the disturbance detected at BD station during the thunderstorm on 16 June 2009 (a) and the wavelet power spectrum for the same time interval (b)

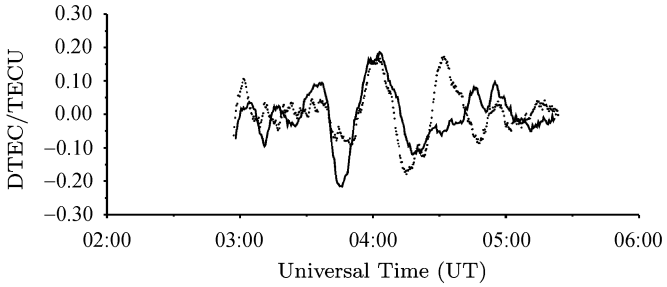


图 5 2009 年 6 月 16 日雷暴期间 BD 观测站和 BJFS 观测站利用 GPS 12 号星数据提取的垂直 TEC 扰动信息

Fig. 5 Disturbances of DTEC obtained from No.12 GPS satellite at BD station and BJFS station during the thunderstorm on 16 June 2009

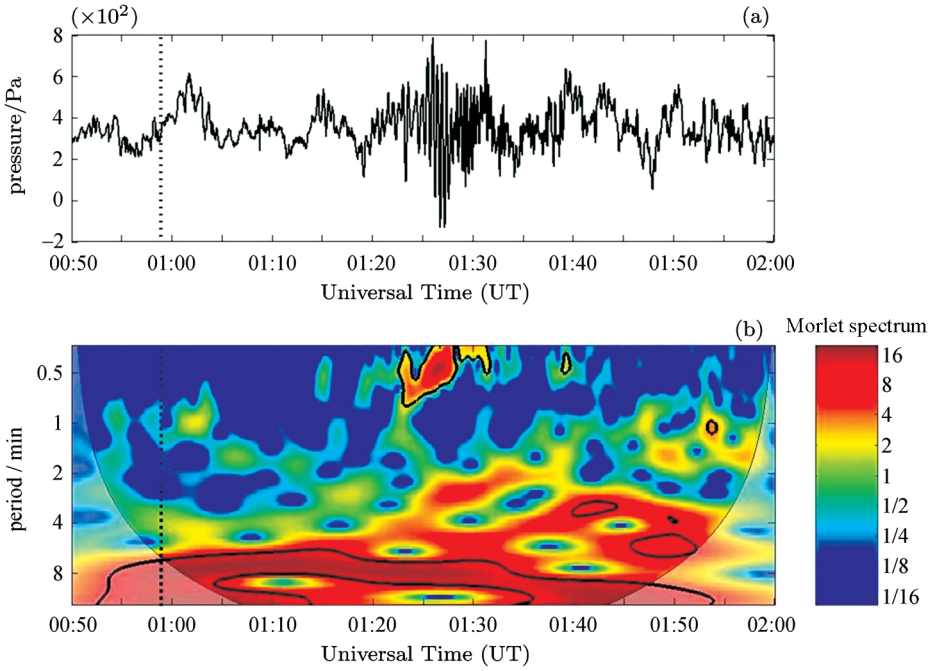


图 6 2004 年 12 月 26 日 00:50 UT—02:00 UT BD 台站探测到的波形 (a) 及同一时段的小波功率谱 (b), 虚线指示地震发生时刻

Fig. 6 Shape of the disturbance detected at BD station during 00:50 UT—02:00 UT on 26 December 2004 (a) and the wavelet power spectrum for the same interval (b). The dash lines indicate the starting time of the earthquake

研究还发现, 有些雷暴事件仅在其中一个站可以探测到大气扰动, 而有些雷暴事件在两个台站的探测数据中均无迹象. 该结果表明, 不是所有雷暴都能激发大气剧烈扰动而被探测到, 而是需要具备一定条件的. 之所以有些雷暴仅在一个站被探测到可能与所激发的扰动在大气中传播时具有一定的方向性有关 [8].

同样, 对与雷暴期间大气扰动具有相似特征的扰动进行简单统计, 发现此类扰动的发生率在夏季达到最大, 而冬季几乎不发生. 这与雷暴这一天气事件的季节分布是一致的.

2.4 大地震期间次声波观测实例

地震和火山喷发等事件也是大气扰动的重要来源. Hao 等 [6] 在北京地区的高频多普勒观测数据中发现, 2004 年 12 月 26 日苏门答腊岛地震发生 25 min 后, 电离层发生突然扰动. 对这个事件进行分析, 为了对比方便, 这里使用世界时来标示事件发展过程.

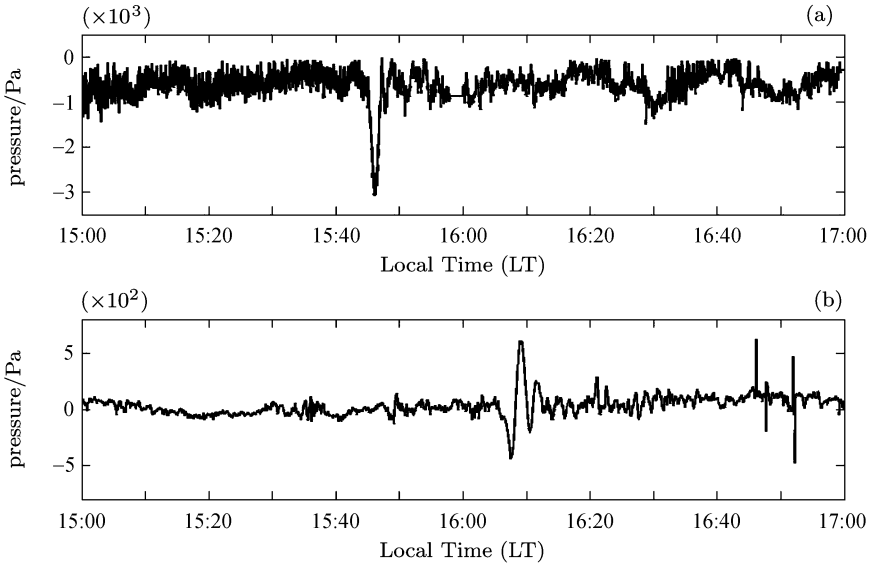


图 7 2011 年 3 月 11 日日本大地震期间 XC 台站 (a) 及 BD 台站 (b) 探测到的波形结果

Fig. 7 The shapes of the disturbances detected at XC station (a) and BD (b) station during the great Japan earthquake on 11 March, 2011

图 6 给出的是 2004 年 12 月 26 日 00:50 UT−02:00 UT BD 台站观测的波形和小波功率谱. 从图 6 可以清楚看到, 在地震发生约 23 min 后出现明显的次声波扰动, 这进一步验证了文献 [6] 所提出的一个岩石圈–大气层–电离层耦合过程的结论, 即此事件中地震波由震中传播到北京, 引起当地地表震荡激发次声波并向上传播到较高高度.

2011 年 3 月 11 日的日本大地震为大气波动检测仪提供了又一次重要的研究事件. 此次地震震级为里氏 9.0 级, 震中位于 142.6°E, 38.1°N, 主震发生时刻为 13:46 BLT(北京时间). Hao 等 [7] 通过此次地震期间的多仪器观测, 对地震引发的次声波进行了分析, 其中用到了大气波动监测仪的观测数据. 图 7 为当日兴城观测站 (120.5°E, 40.4°N, 以下简称 XC 站) 和 BD 站 15:00 BLT−17:00 BLT 的探测波形, 可以看到 XC 站的扰动开始于 15:44 BLT, 而 BD 站距离震中相对较远, 扰动起始时刻要晚, 发生于 16:06 BLT. 利用震中到两站距离和地震发生时刻与扰动起始时刻的时间差进行粗略计算, 可以得到扰动从震中传播到两站的速度均约为 280 $m\cdot s^{-1}$. 这个估算结果与以往一些关于大气扰动传播速度的研究结论相符 [11], 可见这个扰动是在震中上方激发, 并从大气中传播到探测点的.

3 结论

通过对 BD 站近三年和 CP 站近一年大气波动监测仪数据进行的初步分析和统计, 发现了一些典型的扰动类型, 有一部分扰动与雷暴及地震等事件相联系. 其中, 重力波周期尺度的扰动多以振幅较小的背景波形式出现, 主要发生于夜间. 次声波周期尺度的扰动类型比较复杂, 其中, 周期约 3∼5 min 且具有明显类似正弦波形态特征的扰动主要发生在午夜和日出前后, 在季节上则主要分布在冬季. 雷暴时的大气扰动具有复杂的频谱结构, 不同事件之间的频谱差别很大, 但也有一些共同特征, 例如一般来说较早出现的是重力波范围的扰动, 此后更短周期的次声波扰动出现, 扰动谱变宽, 在持续扰动约 2 h 后, 次声波扰动先于重力波扰动消失. 这类扰动主要发生在夏季, 与雷暴的季节分布相一致. 地震这类特殊事件也会激发大气扰动, 同样可以被大气波动监测仪探测到.

大气波动监测仪能够有效探测到地面大气压力的微小低频扰动, 可以作为研究大气扰动及不同圈层耦合关系等问题的重要手段. 将大气波动监测仪与其他观测方法相结合, 对空间物理的一些现象进行多方面和多尺度全面观测, 将会推进岩石圈–大气层–电离层耦合研究的不断深入.

参考文献

[1] Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary [C]. *Ann. Geophys.*, 1985, **3**(6):673-688

[2] Georges T M. Infrasound from convective storms: Examining the evidence [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1973, **11**(3):571-594

[3] Prasad S S, Schneck L J, Davies K. Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, **37**(10):1357-1363

[4] Xiao Saiguan, Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study on the detectability of typhoon-generated acoustic-gravity waves [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(1):35-40. In Chinese (肖赛冠, 张东和, 肖佐. 台风激发的声重力波的可探测性研究 [J]. 空间科学学报, 2006, **27**(1):35-40)

[5] Xiao Saiguan, Hao Yongqiang, Zhang Donghe, *et al.* A case study on whole response processes of the ionosphere to typhoons [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(3):623-628. In Chinese (肖赛冠, 郝永强, 张东和, 等. 电离层对台风响应的全过程的特例研究 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3):623-628)

[6] Hao Yongqiang, Xiao Zuo, Zhang Donghe. Responses of the ionosphere to the great Sumatra earthquake and volcanic eruption of Pinatubo [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(7):1955

[7] Hao Yongqiang, Xiao Zuo, Zhang Donghe. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2012, **117**(A2)

[8] Sindelarova T, Buresova D, Chum J, *et al.* Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights [J]. *Adv. Space Res.*, 2009, **43**(11):1644-1651

[9] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 1976, **39**(2):447-462

[10] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis, II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data [J]. *Astrophs. J.*, 1982, **263**:835-853

[11] Mutschlecner J P, Whitaker R W. Infrasound from earthquakes [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2005, doi:10.1029/2004JD005067

第三届高分辨率对地观测学术年会征文

由高分辨率对地观测系统重大专项管理办公室、中国科学院重大科技任务局、中国航天科技集团公司宇航部、中国航天科工集团公司空间工程部、中国电子科技集团公司科技部联合主办的高分辨率对地观测学术年会 (China High Resolution Earth Observation Conference) 将于 2014 年秋季召开. 本次会议聚焦天基、临近空间、航空全维度立体高分辨率对地观测系统发展, 瞄准数据资源共享与成果推广应用的根本目标, 全方位展示高分辨率对地观测领域取得的研究成果, 为其今后发展提供有益借鉴和参考. 会议分为五个研究领域, 现已全面启动征文.

管理与政策 对地观测领域政策法规、综合管理、国际交流合作、知识产权管理、标准规范.

天基对地观测技术 先进对地观测卫星系统总体, 先进对地观测卫星平台, 天基光学遥感载荷, 天基微波遥感载荷, 星上智能数据处理与传输, 高精度姿态、轨道测量与敏捷控制, 高可靠、长寿命设计与验证.

临近空间对地观测技术 平流层飞艇总体设计与集成测试, 临近空间系统气动计算与试验, 临近空间系统轻质结构与蒙皮材料, 临近空间系统发电/储能/能源管理/推进, 临近空间系统飞行控制与任务管控, 临近空间环境探测与预报, 临近空间系统综合集成与飞行试验, 临近空间系统创新思路与仿真分析.

航空对地观测技术 航空对地观测载荷, 航空对地观测处理及应用, 运动目标航空观测, 航空对地观测天基转化应用.

地面系统与应用技术 对地观测数据接收与处理, 对地观测任务规划, 高精度定标与质量评定, 大数据存储、智能检索技术, 特性分析及检测识别, 测绘、气象水文定量分析, 多源信息融合应用.

年会将评选产生优秀论文和青年创新基金论文. 具体征文要求请登陆网站 www.chreos.org 查询.