

Xiao Saiguan, Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study on the detectability of Typhoon-generated acoustic-gravity waves. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, 27(1): 35~40

台风激发的声重力波的可探测性研究^{*}

肖赛冠^{1,2} 张东和¹ 肖佐^{1,2}

¹(北京大学地球物理系 北京 100871)

²(中国科学院空间天气学国家重点实验室)

摘要 通过对北京大学高频多普勒台站(39.4°N, 116.2°E)多年的观测资料及相关台风资料的统计分析,着重研究了高频多普勒探测手段对由台风引起的扰动电离层响应的可探测性问题。通过对台风登陆前后的高频多普勒观测记录的细致分析及与宁静条件下记录的对比研究,表明高频多普勒观测手段可以很好地探测由台风激发的声重力波,尤其是对台风登陆前后所激发的扰动具有较高的可探测性。在所分析的24次台风事件中有明显扰动记录的高达22次(22/24)。结合观测事实与Huang等的统计结果(2/12)进行了比较,并进行了可能的原因分析。通过数值模拟的方法对观测到的主要扰动的非线性传播过程进行了模拟再现,结果基本上与观测结果及线性传播理论一致。确认了一般情况下高可探测性这一事实,但同时也表明可探测性和台风激发源与探测位置及中尺度TIDs在电离层中的传播模式有密切关系。

关键词 高频多普勒探测; 低层大气与高层大气耦合; 电离层扰动; 声重力波

中图分类号 P 353

Study on the Detectability of Typhoon-Generated Acoustic-Gravity Waves

XIAO Saiguan^{1,2} ZHANG Donghe¹ XIAO Zuo^{1,2}

¹(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

²(State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences)

Abstract In this paper, the detectability of the ionospheric response to the typhoon-generated acoustic-gravity waves was studied through the statistical analysis of the HF Doppler shift records which come from the corresponding observation station at Peking University (39.4°N, 116.2°E) and a comparison with corresponding typhoon data. It is shown that the HF Doppler frequency sounding can be an effective tool for detecting the acoustic-gravity waves excited by typhoon, and the detectability is as high as up to 22 out of 24 for the present study. The detailed analysis of the HF Doppler records at different stages of the typhoon influenced period was made under the quiet conditions. Then, a comparison was made with the results of Huang (2 out of 12) and the possible causes of the differences between these two studies were analyzed. The non-linear propagation process of the main disturbances is reappeared by the method of numerical simulation, and the simulation results are in good agreement with observation results and the linear theory of acoustic-gravity waves propagated in the atmosphere. This confirmed that the detectability should be high in general. Also it is

* 中国科学院空间天气学国家重点实验室资助项目
2006-03-09 收到原稿, 2006-08-25 收到修定稿

shown that the differences of detectability may be due to the fact that the detectability keeps a close correlation with the difference of relative locations of the source of typhoon and Doppler observation sites, and the propagation pattern of the medium-scale TIDs in the ionosphere.

Key words HF Doppler shift sounding, Coupling between lower and upper atmosphere, Ionospheric disturbances, Acoustic-gravity waves

1 引言

电离层、热层与中、低层大气的耦合主要通过三个渠道,即静电和光化学过程、电磁学过程和动力学过程。声重力波是动力学过程的重要现象之一,也是能量运输的载体,在中、低层大气与高层大气的耦合中起着十分重要的作用。关于声重力波,自1960年 Hines^[1]首先提出声重力波对研究高层大气的重要意义以来,人们通过理论、观测实验、数值模拟等手段对其进行了广泛研究。在实际大气中,声重力波表现出了更多的非线性特性,因而,各种观测手段和计算手段的综合应用是研究声重力波传播特性的有力工具。Davies等^[2]早已指出高频多普勒技术可以很好地用于识别一些地球物理和太阳活动等因素引起的电离层效应。早期的大量研究表明,通过声重力波,各种低层大气气象活动中的一些剧烈天气现象,例如飓风、龙卷风、雷暴等都会对电离层产生影响^{[3]~[6]}。

就某一探测手段对某种扰动的探测性来说,不但要有对重要扰动事件的观测分析,更需要对长期的大量的连续的观测进行统计分析工作。在以往的相关研究中,对个例事件的研究比较多,而大量长期的统计分析工作并不多。Hung等^[6]对数次龙卷风的影响进行了统计分析;沈长寿^{[7],[8]}在统计分析的基础上,研究了台风、寒潮对电离层 f_0F_2 的影响;Huang等^[9]从统计分析的角度研究了台风激发的声重力波以及高频多普勒探测系统对台风激发的声重力波的探测性。作为首次对声重力波探测性的研究,Huang等对1982和1983年的所有台风影响期间的电离层高频多普勒记录进行了统计分析,结果表明两年中共有15次台风爆发,12次有记录,在有记录的12次中仅有2次台风影响期间高频多普勒探测记录到了明显的波状扰动现象。因而,Huang等指出高频多普勒探测系统有时能够用来探测台风激发的声重力波,但其可探测性不高。

针对台风这种激烈的气象活动,已有的研究表明,其在低层大气中激起的扰动是可以向上传播并万方数据

影响电离层的,这种影响可以通过高频多普勒探测手段进行探测研究。那么,高频多普勒探测手段对台风激发的扰动的可探测性到底如何,可能与那些因素有关,相应的观测结果能否通过数值模拟来再现,等等,要解决这些问题,需要对更多更长时间的相关观测资料进行大量的统计分析工作。

本文在北京大学高频多普勒台站多年观测的基础上,对1987—1992年的观测资料及相应时段的台风资料,进行了细致地比较分析,着重研究了高频多普勒探测手段对台风这种激烈的气象活动引起的电离层响应的可探测性问题;介绍了用于分析研究的资料来源;介绍了高频多普勒探测仪对台风激发的声重力波的探测性的统计分析结果及与Huang等的结果的比较分析;对观测结果中出现的主要扰动的传播特性进行了数值模拟研究;给出了统计和模拟的结论与探讨以及影响可探测性的可能因素。

2 资料来源

我们所采用的台风资料取自气象出版社出版的台风年鉴(1987—1988)和热带气旋年鉴(1989—1992)。不同年鉴记载中所采用的台风划分标准略有不同,但1987和1988年定义的强台风和1989至1992年定义的台风,其界定标准均为热带气旋中心附近地面最大风速大于32.6 m/s,相当于风速12级,因此,为简单起见,以下统称为台风。所选取的事例资料是1987—1992年资料记载中曾经登陆我国大陆的所有台风。在这6年中,登陆我国大陆的台风共计36次。

统计分析中所采用的电离层扰动资料来源于北京大学高频多普勒台站纪录。北京大学电离层高频多普勒观测仪是由北京大学自行研制的,该系统接收国家授时中心发射的工作频率为10 MHz的电磁波标准频率。连续记录电离层对该标准频率造成的多普勒频移。发射点(35.0°N, 109.5°E)与北京大学高频多普勒台站接收点(39.4°N, 116.2°E)间直线距

离约 700 km. 选取了 1987—1992 共 6 年间, 我国有相关资料记载的登陆台风影响期间的高频多普勒观测资料进行分析研究.

3 分析结果

1987—1992 年, 影响我国的登陆台风共 36 次, 北京大学高频多普勒观测中记录到了 32 次, 其他 4 次由于电源中断等原因没有记录. 在记录到的 32 次台风影响事件中, 只有 2 次没有明显的扰动记录, 有 30 次都观测到了明显的中尺度电离层扰动. 当然, 这个结果不是单纯的台风影响, 有 8 次记录中强地磁活动产生的高频扰动及太阳耀斑引起回波突然正偏移与台风产生的中尺度扰动混合在一起. 为

了突出台风的影响, 略去了这 8 次台风的影响. 余下的 24 次基本上不受其他因素的影响.

通过对 24 次台风影响期间的高频多普勒记录和相关的台风资料进行对比分析, 发现共有 22 次台风影响期间, 几乎每次在观测点都能够观测到中尺度声重力波, 这是电离层对台风响应的最主要方式, 伴随着这些声重力波的出现, 这些扰动还有一些其他共同的特性, 即行进电离层扰动的出现、高频先到低频后到、夜间扩展 F 的发生、中尺度 S 型扰动的出现以及类似日出效应现象的出现等, 如图 1 所示. 统计分析结果表明, 高频多普勒探测仪对台风引起的声重力波的可探测性达到了 22/24 (91.67%), 比 Huang 等的统计结果 2/12 (16.67%) 高得多. 这种显著的差异需要给出一种合理的解释, 为此进行了更为详细的分析.

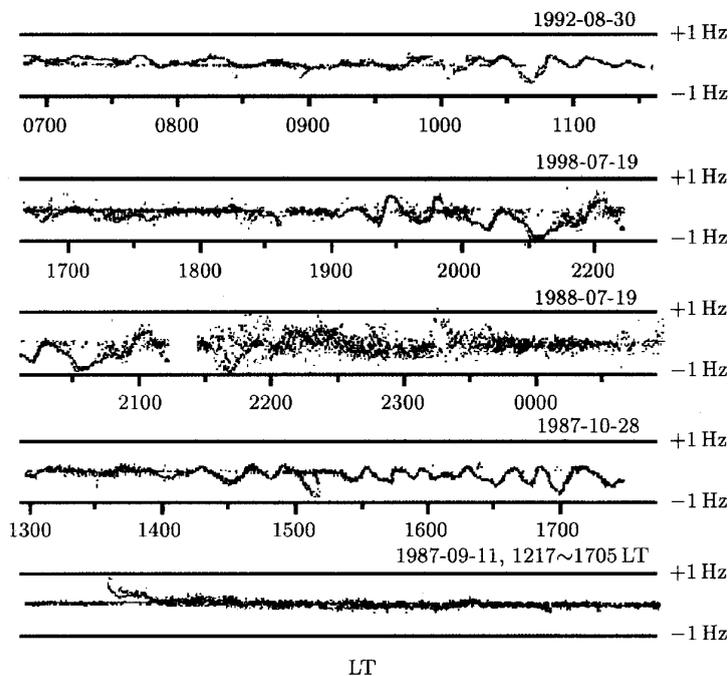


图 1 台风影响期间出现频次较高的电离层形态特征 (自上而下分别是行进电离层扰动、波动主频率随时间的演化、Spread-F 现象、中尺度 S 型扰动、类似日出效应现象)

Fig.1 Frequent ionospheric features during the typhoon influenced period (from top to bottom: ionospheric traveling disturbances-TIDs, the temporal evolution of the wave main frequency, Spread-F, the S-shaped medium scale disturbances, sunrise-like phenomena, respectively)

由于每次台风的发生点、发展路径、中心强度变化、从形成到消失的影响时间等都是各不相同的, 因而, 每个台风对电离层的影响也是各异的. 为了

突出登陆台风的主要影响, 选取在台风登陆前两天内及登陆后直到消失这段时间内的高频多普勒观测记录进行分析, 其他时段的影响暂不考虑. 可以把

台风的影响分为远海(台风登陆前的 24~48 h)、近海(台风登陆前 24 h 内)、登陆(台风登陆时段)和登陆后(台风登陆后 24 h 内) 4 个时间段进行统计, 结果如图 2 所示。

图 2 中横坐标是统计分析所选用的 22 个台风, 纵坐标的 2, 3, 4, 5 分别表示台风影响的 4 个不同时段即远海、近海、登陆和登陆后, 图中圆点表示相应的台风在所对应的那个时段电离层中有明显的波状扰动出现。从图 2 中发现, 有些台风的影响期间(如序号为 1, 11, 15 等所代表的台风), 电离层只在某个时段出现明显的波状扰动, 而有些台风影响期间(如序号为 2, 3, 4 等所代表的台风), 在几个时段电离层都有响应发生。另外, 对于多次台风的影响, 纵坐标 3, 5 对应的时段(近海、登陆后)电离层中出现明显扰动记录的次数分别是 14 和 19, 明显高于 2, 4 所对应的时段(分别出现 7 和 6 次记录)。如果我们把近海、登陆和登陆后三个时段(即 3, 4, 5)的影响结合起来, 考虑台风登陆前后各 24 h 的影响, 那么, 22 次台风在登陆前后, 电离层中都有明显的波状扰动出现。可见, 电离层的响应主要集中在台风登陆前后, 显然通过高频多普勒观测手段在台风登陆前后所记录到的扰动是由这些登陆台风引起的。

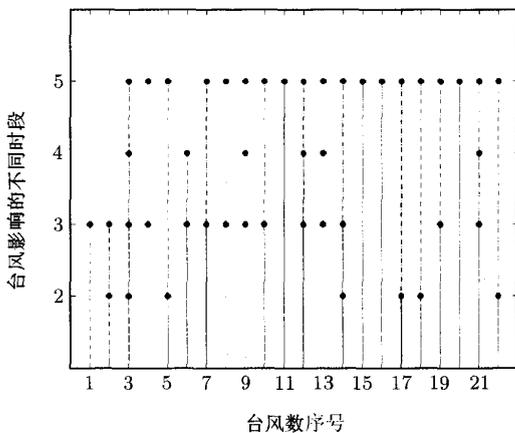


图 2 台风影响的 4 个不同时段电离层中出现扰动的统计结果

Fig.2 Statistical results of the disturbances appeared in the ionosphere during the four various time period of typhoon

通常情况下, 电离层中的中尺度扰动多发生在夏季的晚上和冬季的白天, 不受剧烈的气象活动如

万方数据

台风、龙卷风等的影响, 夏季的白天很少出现中尺度的声重力波。结合我们台站多年来的高频多普勒观测资料, 可以发现, 在宁静情况下(不受台风, 也不受太阳及地磁活动的影响), 尤其是夏季的白天, 电离层中基本上没有明显的中尺度扰动出现。

通过这些比较分析, 基本上可以得出这样的结论, 即使在台风多发的时间, 在不受台风、太阳、地磁活动等因素的影响时, 电离层中是较少出现典型扰动的, 尤其那些源于低层大气的中尺度扰动。而在台风登陆前后, 我们的高频多普勒探测仪记录到了大量的中尺度扰动, 表明这些扰动确实是由台风的近海及登陆引起的。因而, 台风登陆前后在低层大气产生的扰动, 可以影响到电离层高度, 通过高频多普勒探测方法可以对这种影响进行很好的探测。

4 数值模拟结果

以上对大量的观测结果进行了统计分析, 这些观测结果正是声重力波在实际大气中的真实体现。采用数值模拟的手段, 再现了观测结果中主要扰动的非线性传播, 同时也是对观测结果的一个很好验证。

在模拟中, 控制方程、数值格式、网格划分、边界条件及初始扰动形式等均采用了文献 [10] 的方法, 代数方程的数值求解参考了文献 [12] 的逐线法。结合台风影响期间电离层中出现扰动的主频率特点, 对周期为 15 min, 30 min 和 60 min 的小振幅声重力波的非线性传播过程进行了计算。其主要结果如图 3 所示。

图 3 中实线、虚线与点线分别代表的是周期为 15, 30 和 60 min 的声重力波波包中心位置的传播途径。每两个圆圈、星号及三角之间的时间间隔分别为 15, 30 和 60 min。图 3 清楚地说明不同频率的声重力波在一定条件下都可以从较低高度向上传播到电离层高度, 而且他们传播到接近同样高度所需的时间不同, 周期为 60 min 的声重力波传播到电离层高度(如 180 km)所用的时间比周期为 30 min 和 15 min 的声重力波所用时间都长得多; 另外, 不同频率的声重力波波包在传播过程中与垂直方向之间的法向仰角不同, 频率较低的波在向上传播的同时沿水平方向传播的距离较远, 周期为 60 min 的声重力

波传播到大约 180 km 的高度时沿水平方向传播了将近 1100 km, 而周期为 15 min 的声重力波到达差不多相同高度时在水平方向上传播了不到 300 km.

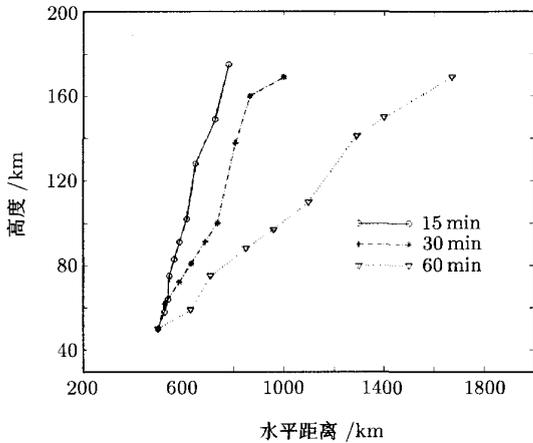


图3 周期分别为 15, 30 和 60 min 的声重力波波包的传播途径

Fig.3 Propagation path of the acoustic-gravity waves packet with the period of 15, 30 and 60 min respectively in an isothermal atmosphere

上述模拟研究表明, 在非线性条件下周期分别为 15 min, 30 min 和 60 min 的声重力波不但可以从低层大气向上传播到电离层高度, 而且色散现象明显, 不同频率的声重力波在传播过程中, 到达电离层同一高度, 所用时间不同, 频率越低所用时间越长, 且在水平方向上传播的距离越大, 这与我们(较容易地观测到了许多频率较低的波状扰动)及 Huang 等(观测到的扰动的频率则较高)的观测事实基本吻合, 同时也与高层大气对脉冲式扰动的响应特性的理论研究是一致的. 当然我们的初步模拟还有相当的局限性, 例如, 初始扰动没有考虑实际台风激发扰动时的大面积的影响, 为简单起见仅以脉冲扰动的形式来说明问题, 也没有考虑非等温大气和中性风的影响, 这些影响有时会导致波的反射或路径改变, 但模拟结果还是能够基本解释所观测到的现象.

5 结论与讨论

通过对发生在 1987—1992 年的数十次台风资料及相关高频多普勒记录的细致统计分析, 发现高

频多普勒探测方法对由台风引起的扰动具有很好的可探测性. 在不受太阳、地磁等因素影响的 24 次台风发生期间的高频多普勒记录, 22 次记录中出现了明显的波状扰动-中尺度声重力波, 可探测性高达 22/24.

通过对台风影响的不同时段的高频多普勒记录分析以及与宁静情况下的高频多普勒记录的比较, 进一步表明台风登陆前后在低层大气产生的扰动可以影响到电离层高度, 我们通过高频多普勒探测方法可以对这种影响进行很好的探测, 且其可探测性相当高.

但是, Huang 等的统计结果表明高频多普勒探测仪有时可以探测到台风激发的扰动, 但可探测性不高, 12 次仅有 2 次记录到明显的波状扰动, 与我们的观测结果 (22/24) 存在明显的不同. 我们认为可能有以下几个方面的原因.

首先, 在线性条件下声重力波是不可能纯粹沿垂直方向传播的. 在相同条件下, 频率越高, 其传播时的法向仰角越小, 频率越低, 其群速度方向越趋于水平方向. 也就是说, 频率较高的声重力波较容易向上传播, 而频率较低的声重力波则更容易斜传播到较远的地方. 从声重力波传播的色散特性而言, 离源较远的观测站较容易观测到频率较低的声重力波, 而较近的台站较容易观测到较高频率的波动. 从观测结果看 Huang 等观测到的声重力波集中在周期为 11~13 min 的范围内, 我们就数十次台风影响的分析表明, 观测到的声重力波的周期多为 20~30 min, 有些甚至长达 45~60 min, 两者的观测结果分别集中在不同的频率范围, 基本上与声重力波的传播特性相一致.

其次, 认为可能与波源(台风)和响应点(电离层中多普勒频移主要地区)的相对位置有关. 我们的台站与 Huang 等的台站所处的地理位置的不同使我们更容易观测到频率较低的声重力波, 这与我们的观测结果相一致, 同时, 与声重力波非线性传播的数值计算结果基本吻合. 虽然我们的非线性模拟由于诸多原因, 无法完全再现台风所激发的声重力波在真实大气中的传播, 但也基本上对我们的观测结果起到了验证作用. 另外, 实际背景大气的复杂性-大气的温度梯度、中性风的剪切等都会对声重力波的传播路径及方向造成影响, 也将影响到观测记录, 等等. 也许还有其他方面的原因, 还有待于做进一步的分析研究.

致谢 中国国家气象局资料室为本文提供了大量的有关台风的资料——台风年鉴及热带气旋年鉴,文中相关的数值模拟工作得到了中国科学院空间科学与应用研究中心冯学尚研究员及中国科学技术大学胡友秋教授的帮助。

参考文献

- [1] Hines C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, 1960, **38**:1441~1481
- [2] Davies K, Watts J M, Zacharisen D H. A study of F₂ layer effects as observed with a Doppler technique. *J. Geophys. Res.*, 1962, **67**:601~609
- [3] Baker D M, Davies K. F₂-region acoustic waves from severe weather. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1969, **31**:1345~1352
- [4] Davies K, Jones J E. Ionospheric disturbances in the F₂ region associated with severe thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**:254~262
- [5] Prasad S S, Schneck L J, Davies K. Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, **37**:1357~1363
- [6] Hung R J, Phan T. Observation of gravity waves during the extreme tornado outbreak of 3 April 1974. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978, **40**:831~843
- [7] Shen Changshou. The correlations between the typhoon and the f_0F_2 of ionosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 1982, **2**(4):335~340. in Chinese (沈长寿. 台风与电离层 f_0F_2 相关性的探讨. 空间科学学报, 1982, **2**(4):335~340)
- [8] Shen Changshou, Zi Minyun. The crossing of cold front and the night f_0F_2 . *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(3):211~215. in Chinese (沈长寿, 资民筠. 关于寒潮对夜间 f_0F_2 影响的探讨. 空间科学学报, 1986, **6**(3):211~215)
- [9] Huang Y N, Cheng K, Chen S W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system. *Radio Sci.*, 1985, **20**:897~906
- [10] Zhang Shaodong, Yi Fan. The nonlinear propagation of gravity wave packets in compressible atmosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 1998, **18**(1):98~110. in Chinese (张绍东, 易帆. 重力波波包在可压大气中的非线性传播. 空间科学学报, 1998, **18**(1):98~110)
- [11] Wang Yongmei, Xu Jiyao, Wang Yingjian. Nonlinear evolution of a gravity wave propagating from the tropopause. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **44**(2):154~162. in Chinese (王咏梅, 徐奇遥, 王英鉴. 对流层上传重力波的非线性演化. 地球物理学报, 2001, **44**(2):154~162)
- [12] Fu Zhufen, Hu Youqiu. The numerical simulation of space plasma. Hefei: An Hui Science Technology Publishing House, 1995, 128~136. in Chinese (傅竹凤, 胡友秋. 空间等离子体数值模拟. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1995, 28~136)