第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

大气中层顶区域波相互作用的一个观测个例*

熊建刚
(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)
易 帆
(武汉大学无线电科学技术系)

摘 要

利用 SOUSY VHF 雷达的观测数据分析了极区中层顶 83.4—91.2 km 范围内大气风场波动的非线性相互作用. 大气风场的谱在不同高度上均有明显的潮汐分量峰值, 纬向风分量中 35 h 波、半日潮和 8.9 h 惯性重力波构成共振相互作用对, 经向风分量中 33 h 波、半日潮和 19 h 惯性重力波构成共振相互作用对. 双谱分析表明, 这些共振对在许多高度上都发生耦合. 35 h 或 33 h 波振幅的极小值与半日潮的极大值出现的高度几乎相同, 呈现出明显的非线性相互作用特征. 说明波的非线性相互作用在空间上不是局域的, 而是存在于中层顶区域的几乎所有高度上, 这种相互作用不仅导致半日潮振幅随时间的变化, 也使半日潮的振幅随空间变化. 35 h 和 33 h 波动可能是在其他时段或其他位置通过行星波与周日潮相互作用产生的, 然后传播到观测点并与半日潮发生相互作用.

关键词 中层顶—非线性相互作用—半日潮

1 引言

自 Manson[1] 用 MF 雷达观测到半日潮与两天波耦合产生 9.7 h 和 16 h 的惯性重力波, Rüster[2,8] 用双谱分析方法检验这种相互作用以来, 人们使用各种探测手段研究了中高层大气波动的非线性相互作用及其对大气的影响. Beard 等 [4] 利用流星雷达数据的几个观测结果分析了 90 km 附近由波非线性相互作用导致的潮汐振幅周期变化, Teitelbaum 等 [3] 用数值方法模拟了行星波与潮汐的相互作用. COSPAR C2(中层大气和电离层) 组 1998/1999 年度总结报告指出, 欧洲、日本和加拿大等国科学家对中高纬区域大气的联合观测证明, 行星波和潮汐之间以及行星波之间的耦合都是非常重要的过程.

一般认为, 行星波和重力波是导致潮汐振幅发生长期和短期变化的重要原因. 然而目前几乎所有的观测分析都只讨论了某几个高度上波的非线性相互作用, 而且是否有其他波动导致潮汐发生变化也不得而知 [10]. 究其原因, 一方面是这种相互作用只在一定条件下才能发生, 另一方面在许多高度上雷达回波较弱, 有时无法得到连续的观测数据. 人们无法判断波相互作用发生的区域, 也难以辨明波的耦合是全局还是局域发生的. 本文将讨论

* 国家自然科学基金 (49674240,49990450) 共同资助
2000-08-05 收到原稿, 2001-08-15 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

极区中层顶区域夏季风场中波的非线性相互作用，由于存在强的极区夏季回波 (PMSE)，观测数据的连续性相对较好.

2　Lomb-Scargle 谱及其检验

由于观测数据中有间断点，使用通常的方法计算谱时需先进行插值，有可能会对结果造成一些影响. 下面我们将使用 Lomb-Scargle 方法 [5,6] 估计时间序列的谱，该方法是估计不均匀或间断序列谱的有效方法，使用该方法不仅不需要对缺损数据作插值，而且可以得到分辨率较高的谱. 从而可以较准确地确定谱峰的位置. Hocke 等 [7] 用该方法对一组人工数据的检验表明，用 Lomb-Scargle 方法确定谱峰的位置相当准确. 从文献上，没有见到对有较多间断的数据序列的 LS 谱的检验，为此用

$$x_j = 20\cos\frac{2\pi}{T_1}t_j + 25\cos\frac{2\pi}{T_2}t_j + 15\cos\frac{2\pi}{T_3}t_j + S_j$$

产生一个检验序列，该序列的长度 $N = 364$, 采样周期为 30 min, 3 个谱成份的周期分别为 35 h 、 12 h 和 8.9 h, 这些参数与下面要讨论的观测数据的参数是一样的， S_j 是均值为 0, 方差为 5 的随机噪声. 图 1 是该序列的 LS 谱. 图中实线为完整数据的振幅，虚线为随机去掉 40% 数据后得到序列的振幅，点划线为去掉几段长度和为总长 20% 的连续数据和 20% 随机数据后得到序列的振幅. 图中水平点线从下往上分别是 50% 、 90% 和 99% 的置信水平. 为了便于比较，我们已将归一化谱转换为归一化振幅 [4,5], 某一频率处的归一化振幅即为该频率波分量的振幅. 当数据没有间断时， 3 个峰值的位置和大小与理论值完全一致，用两种方法去掉 40% 的数据，所得序列的 LS 归一化振幅的 3 个谱峰的位置仍十分准确，但峰值有所减小. 从图 1 可以看到，去掉一些数据后，会产生一些虚峰，但这些虚峰的振幅均未达到 50% 的置信水平. 由于 LS 谱的计算采用了数据拟合的方法 [6], 只要没有大的间断，从一个均匀采样序列中去掉 40% 的数据后，用 LS 方法计算尺度远大于采样周期的谱成份应该是比较准确的.

3　数据分析与结果

本文的数据来源于德国 SOUSY 雷达 1987 年夏天从 6 月 23 日到 6 月 29 日的观测资料，时间分辨率为 1 min, 高度分辨率为 300 m, 从 6 个方向沿天线的径向速度可以求出 78—94.2 km 高度范围内风场在纬向、经向和垂直方向的 3 个分量. 首先将各高度上纬向风和经向风分量进行 30 min 的算术平均，去掉小尺度起伏，可以得到各高度上分辨率为 30 min 、总长度为 364 的风场时间序列. 从 83.4—91.2 km 范围内各高度上纬向和经向风分量的有效数据均超过总长度的 60%, 而且没有长时间的间断，使用 LS 方法可以比较准确地确定主要波分量的周期和振幅.

在每个高度上，首先去掉风场时间序列的平均值和线性倾向，再求 LS 谱. 图 2 是纬向风序列的 LS 振幅随高度的变化，图中用实线连接起来的峰值处的周期从左到右近似为 35 h 、 12 h 和 8.9 h. 从图中可以看到半日潮、周日潮、 35 h 波和一些惯性重力波成份较

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

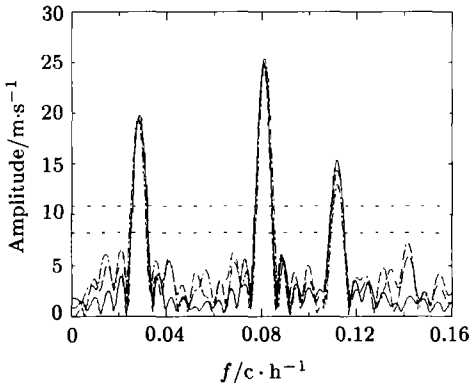


图 1 用一组人工数据检验间断对 LS 归一化振幅的影响

Fig.1 A test of data gaps on Lomb-Scargle spectral estimation with a set of artificial data

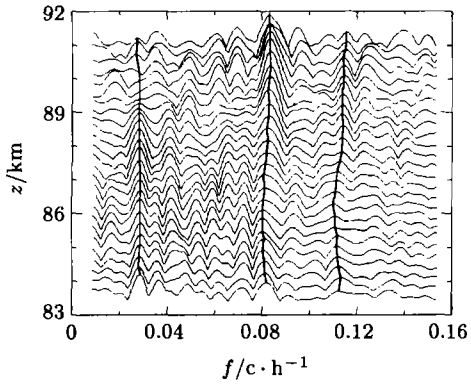


图 2 纬向风分量的 LS 归一化振幅

Fig.2 The normalized LS amplitude of zonal winds

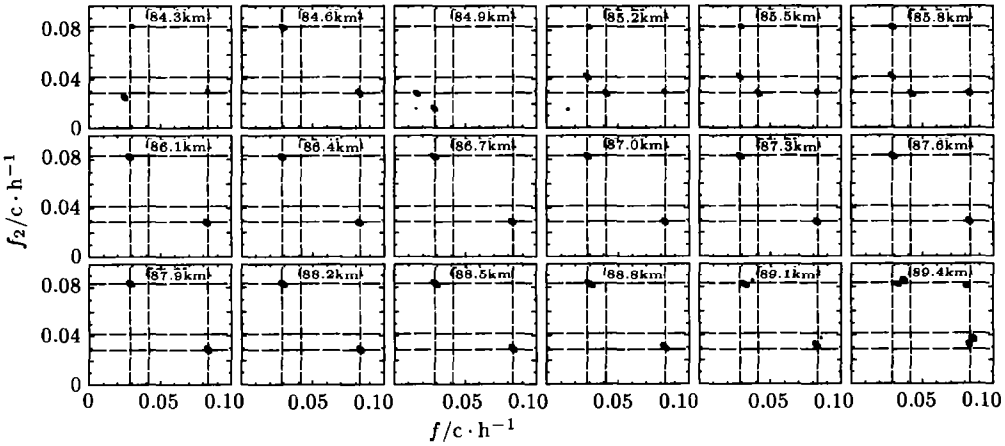


图 3 84.3—89.4 km 高度上纬向风分量的双谱

Fig.3 The bispectra of zonal winds at heights 84.3—89.4 km

为明显. 在文献 [5] 中我们分析了 86.4 km 处 35 h 波、半日潮和 8.9 h 惯性重力波非线性相互作用时振幅随时间的变化, 从中可以看到明显的波能量交换. 从图 2 发现, 几乎所有高度上, 在周期为 35 h 、 12 h 和 8.9 h 附近均有比较明显的峰值, 而周期为这 3 个值的波可以近似构成共振相互作用波组. 为了检验这 3 个波是否发生相互作用, 我们计算了各高度上的双谱 [2], 计算双谱时所用的窗宽为 5 天、滑动步长为 2 h[5], 结果见图 3. 图中从左到右和从下到上的 3 条虚线对应的周期为 35 h 、 24 h 和 12 h, 图中仅标出了双谱归一化系数大于 0.7 的极大值. 在 83.7—89.4 km, 周期为 35 h 和 12 h 处双谱均有极大值, 特别是 86.1—89.1 km, 该处双谱取最大值. 这表明, 35 h 波和半日潮有明显的相位耦合. 与它们构成共振对的惯性重力波的周期为 8.9 h, 虽然它的振幅通常较小, 大多数情况下仍然超过了 50% 置信水平.

因此, 在极区中层顶区域 35 h 波、半日潮和 8.9 h 惯性重力波的共振耦合波组是真

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

实存在的. 图 4 是这 3 个波分量振幅随高度的变化，图中实线为 35 h 波的振幅，虚线为半日潮的振幅，点划线为 8.9 h 惯性重力波的振幅. 从 83.7—86.1 km, 35 h 波和半日潮振幅随高度增长，能量交换并不明显，图 3 也显示该范围内波的耦合并不是最强的. 但从 86.1—89.7 km, 35 h 波振幅的变化方向与半日潮振幅的变化方向正好相反，从图 3 也可以看到在此高度范围内双谱在周期为 35 h 和 12 h 处均取最大值. 而且半日潮振幅的最大值和 35 h 波的最小值几乎出现在同一高度. 因此，半日潮与 35 h 波的耦合使得半日潮振幅明显增长，半日潮振幅增长的能量来自于 35 h 波，即 35 h 波和半日潮之间有能量交换.

经向风分量的 LS 振幅谱，几乎在所有高度上 33 h 波、半日潮和 19 h 处都有明显峰值，这三者同样构成共振相互作用对. 图 5 是这 3 个波振幅随高度的变化，图中实线为 33 h 波的振幅，虚线为半日潮的振幅，点划线为 19 h 惯性重力波的振幅. 33 h 波动和半日潮振幅反方向变化的特征更加明显. 87 km 处 33 h 波振幅达到最大值，而半日潮振幅在 86.7 km 处为最小值，这两个位置十分接近. 从图中看，经向风分量中 33 h 波与半日潮的能量交换也很显著.

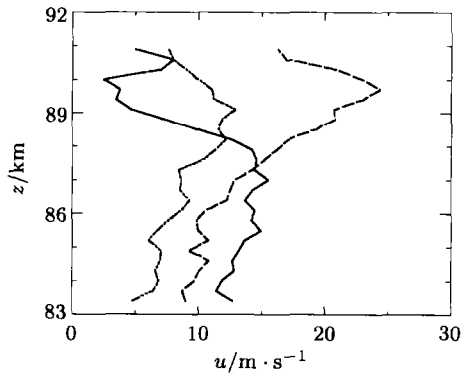


图 4　纬向风中 3 个主要波分量的振幅
Fig.4　The amplitudes of zonal waves of the triads at periods of 35 h, 12 h and 8.9 h

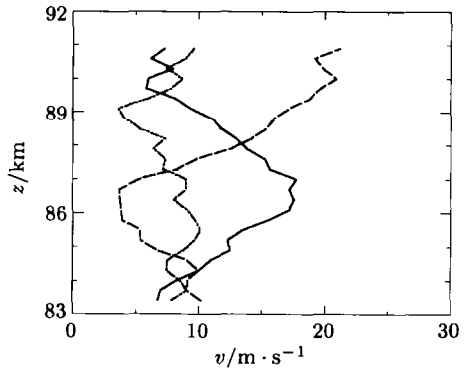


图 5　经向风中 3 个主要波分量的振幅
Fig.5　The amplitudes of meridional waves of the triads at periods of 33 h, 12 h and 19 h

4　讨论

潮汐在中层大气中振幅随时空变化可能是下述几种因素引起的 [8]: (1) 潮汐驱动力的变化; (2) 潮汐在变化的背景风场中传播; (3) 在潮汐频率附近有其他能量的注入; (4) 潮汐间以及潮汐与行星波间的非线性相互作用，其中准 2 天行星波与半日潮的非线性相互作用最为显著. 一般认为，周期为 1.5—2.5 天的大气波动是准 2 天行星波，Pancheva[8] 的计算表明，行星波能量约占大气波动能量的 20%, 准 2 天波在其中的贡献最大. 本文所用的数据中，没有显著的准 2 天波成份. 关于 35 h 的波成份的性质可能是以下两种情况:

(1) 由于背景风场引起的 Doppler 飘移，地面所观测到的频率与波的本征频率并不相等 [9], 本文中 35 h 是最接近准 2 天波的周期，其本征频率可能在准 2 天波的范围内. 但从单站观测数据很难判断它是否满足行星波的绝对涡度守恒等条件.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(2) 在文献 [8] 中， Pancheva 发现在 95 km 附近纬向风场中有显著的 30 h 波成份，而且该波成份与半日潮构成非线性共振相互作用对，但 Pancheva 并没有给出 30 h 波动波源的合理解释. 本文的数据是 MAC-SINE 计划期间 SOUSY 雷达的观测数据， Rüster 在文献 [9] 中也研究了同一计划期间波的非线性相互作用，但该文献中仅讨论了几个高度上沿天线径向方向的风场，而且本文采用的数据时段与该文献中给出的例子的时段都不重合. 文献 [9] 中的几个例子表明， 32—38 h 的波动的产生是 2—3 天波与周日潮的相互作用的结果，但本文使用的数据段中这种相互作用并不显著，因此 35 h 或 33 h 的波动成份可能是在其他时段或其他位置通过行星波与周日潮相互作用而产生的，然后传播到观测地点并与半日潮发生显著的相互作用.

由于无法得到更多数据，验证以上结论 2) 比较困难，但认为 35 h 或 33 h 波动是由行星波与周日潮相互作用产生的可能更合理些. 本文的结果显示，通过共振相互作用产生的 35 h 或 33 h 波动在中层顶区域与半日潮发生了明显的非线性相互作用，而且只有波幅达到一定值时， 35 h 波动与半日潮才会有明显的能量交换，行星波与潮汐的多重耦合过程引起了半日潮振幅的变化.

参 考 文 献

[1] Manson A H *et al.* Fluctuation in the tidal charateristics and oscillations in the mesophere and lower thermosphere (70—110 km). *Planet. Space Sci.*, 1982, **30**(12):1283—1294

[2] Rüster R. VHF radar observations in the summer polar mesosphere indicating nonlinear interaction. *Adv. Space Res.*, 1992, **12**(10):1085—1089

[3] Teitelbaum H, Vial F. On the variability induced by nonlinear interaction with planetary waves. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A8):14 169—14 182

[4] Beard A G, Mitchell N J, Williams P J S. Nonlinear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**(4):363—376

[5] 熊建刚, 易帆, Klostermeyer J, Rüster R. 行星波、潮汐和惯性重力波非线性相互作用的 VHF 雷达观测研究. 电波科学学报, 2000, **15**(1):84—90

[6] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. *Ap. J.*, 1982, **263**(2):835—853

[7] Hocke K, Igarashi K. Variability and anisotropy of mesospheric wind spectra. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(22):2725—2728

[8] Pancheva D. Evidence for nonlinear coupling of planetary waves and tides in the lower thermosphere over Bulgaria, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**(2):115—132

[9] Rüster R. VHF radar observations of nonlinear interactions in the summer polar mesosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**(10):1289—1299

[10] 刘仁强, 易帆. 极区夏季中间层半日潮汐的 VHF 雷达观测. 空间科学学报, 2000, **20**(3):233—241

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

A CASE STUDY OF WAVE INTERACTIONS IN THE MESOPAUSE REGION

XIONG Jiangang

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*, 430071)

YI Fan

(*Department of Radio Sciences and Technology, Wuhan University*)

Abstract

The nonlinear interaction among waves in the polar mesopause region at height from 83.4 km to 90 km has been studied. The 35 h wave, semi-diurnal tides and inertial-gravity waves at period of about 8.9 h existed at almost all heights in the zonal winds and their frequencies satisfied resonance condition. The 33 h wave, semi-diurnal tides and inertial-gravity waves at period of about 19 h in the meridional winds satisfied resonance condition. By using the bispectral analysis, we found that those sets of waves were coupled each other. The maximum amplitude of semi-diurnal tide appeared just at the height where the 35 h or 33 h wave reached its minimum amplitude. The energy exchange between 35 h or 33 h waves and semi-diurnal tide was obvious. That indicates that the nonlinear wave interaction was not local only at lower atmosphere, but also at all heights in the mesopause region. The interaction leads the variation of tide amplitude temporally and spatially. The 35 h and 33 h waves may be generated by nonlinear interaction between diurnal tide and planetary waves at periods of 2—3 days at other sites or other time, and they interacted with semi-diurnal tides when they propagated to the observation site.

Key words Mesopause, Nonlinear interaction, Semi-diurnal tide

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com