

武汉上空 (30°N , 114°E) 潮汐及其 相互作用的 MF 雷达观测^{*}

张绍东 易 帆

(武汉大学电子工程系 武汉 430079)

胡 雄

(中国科学院武汉物理与数学研究所)

摘 要

利用武汉 (30°N , 114°E) MF 雷达 2000 年 2 月 11 日至 25 日, 以及 2 月 28 日至 3 月 13 日的观测数据, 研究中层顶 (80—98 km) 区域冬季潮汐振荡及其共振相互作用. 水平风场扰动的动态谱显示出在所有的观测高度上都持续存在很强的 24 h 潮汐波动; 偶尔也会出现较强的 12 h 和弱的 8 h 潮汐振荡, 这说明在中纬地区的冬季, 24 h 潮汐是中层顶区域主要的潮汐成分. 潮汐振幅及其相关动能随时间的变化表明, 在 24 h, 12 h 和 8 h 潮汐之间可能存在强的共振相互作用. 另外, 24 h 潮汐的相位随高度的增加呈现出明显的增加趋势, 表明观测到的 24 h 潮汐是向上传播的. 由相位剖面计算出 24 h 潮汐纬向和经向风场的垂直波长分别为 45 km 和 47 km, 其向下的相位传播速度分别为 1.88 km/h 和 1.97 km/h.

关键词 MF 雷达观测; 潮汐; 相互作用

1 引言

潮汐是中层顶区域典型的大尺度扰动. 潮汐、行星波和背景风场构成了中、高层大气的基本风场, 并且会对中、小尺度重力波的传播产生显著的影响. 在 80—100 km 的高度范围内, 潮汐通常会持续存在并且一般而言扰动振幅比行星波和重力波大. 因此, 潮汐运动会强烈地影响中层顶区域的动力学特性, 这样, 在研究中层顶区域风场结构的过程中, 深入研究潮汐及其变化特性具有重要意义.

不同观测设备 (MF 雷达、VHF 雷达、流星雷达和钠荧光激光雷达) 的大量观测结果都表明^{[1]—[7]}, 12 h 潮汐和 24 h 潮汐是中层顶区域主要的潮汐扰动成分, 并且潮汐谱成分与纬度有明显的相关性. 一般而言, 24 h 潮汐有行进波和消散波两种波模, 行进潮汐波通常显示出向下的相位传播并主要出现在中低纬地区^[5], 而高纬地区的主要潮汐成分则是 12 h 潮汐^{[7]—[9]}. 观测到的潮汐经常显示出时间尺度为数日的变化^{[4],[7],[11]—[13]}. 产生这种变化的机制有多种, 潮汐之间的非线性相互作用是其中一种重要的可能机制. 许多学者的研究结果都证明潮汐之间的共振相互作用在中层顶区域是经常发生的^{[10],[14]}, 双谱分析的结果则进一步证实了这种共振相互作用的存在^{[13],[15],[16]}.

^{*} 国家自然科学基金项目 (40274051, 49990450, 40074040) 共同资助
2003-05-08 收到原稿, 2003-09-08 收到修定稿

因为所采用的技术简单 (SA 技术), 并且与 VHF 雷达和激光雷达系统相比维护费用相对低廉, MF 雷达被广泛应用于测量中层顶区域的中性风场. 武汉 MF 雷达在 2000 年年底建成并开始进行常规观测, 本文的工作便是利用武汉 MF 雷达的观测结果, 研究冬季中层顶区域的潮汐特性.

2 MF 雷达和观测

武汉 MF 雷达于 2000 年年底建成, 并开始用于武汉 (30°N, 114°E) 上空中层顶动力学过程的系统观测研究. 该雷达的工作频率为 2 MHz, 发射部分由 10 个固态发射机和 1 个矩形发射天线组成, 每个发射机的峰值功率为 2.5 kW, 这样雷达系统的总峰值发射功率为 25 kW. 接收天线由 3 个偶极子天线阵组成, 这 3 个天线阵被排列成边长为 185 m 的等边三角形. 雷达波束方向指向正天顶方向, 每 4 分钟发射一次. 风场测量范围为 60—100 km, 高度分辨率为 MF 雷达的典型值, 即 2 km. 本文中采用的观测数据是该雷达系统在 2001 年 2 月 11 日—25 日和 2 月 28 日至 3 月 13 日的观测结果, 中间有两天的数据间断.

3 观测结果

大气中的波动使中层大气风场经常处于被扰动的状态, 伴随着这些波动的传播和耗散过程, 动量和能量从一个层区被传输到另一个层区. 为了揭示中层顶大气的波动特性, 我们利用武汉 MF 雷达的观测结果计算了水平风场的动态谱, 计算方法如下.

首先, 对每一个高度上的观测数据, 取 48 h 滑动窗, 每个滑动窗之间的时间间隔为 1 h; 然后对每个滑动窗, 假定风场 (原始数据) 是不同扰动谱成分的线性叠加, 即

$$u(t) = \sum_{i=0}^l u_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}t + \varphi_i\right). \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 为原始观测数据; 下标 i 表示不同的谱成分; u_i 和 φ_i 分别表示第 i 个谱成分的振幅和相位; $T_i = T_0 + i\Delta t$ 为第 i 个谱成分的周期, Δt 为 MF 雷达观测的时间间隔; T_0 和 T_l 为谱成分的截止周期, 分别选为 4 h 和 24 h. 采用最小二乘法对原始观测数据按 (1) 式进行谐波拟合, 我们便可以得到每个谱成分的振幅和相位随时间的变化. 需要说明的是, 由于采用了滑动窗, 会导致最初 24 h 和最后 24 h 的数据缺失拟合结果, 但是这对本文的研究结果没有根本影响. 最后的拟合结果显示, 武汉上空风场扰动的主要成分是周期分别为 24 h, 12 h 和 8 h 的潮汐.

图 1 给出了 24 h (实线), 12 h (点线) 和 8 h (虚线) 3 个潮汐分量的振幅在 80—98 km 的高度范围内随时间的变化. 由图 1 可见, 几乎整个观测时间内都可以观测到强的 24 h 潮汐振荡, 振幅一般都大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于纬向风场, 最大的 24 h 潮汐扰动振幅为 $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在第 46 天的 0700 LT, 出现高度为 94 km; 而对于经向风场, 24 h 潮汐的最大扰动振幅为 $47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在第 46 天的 1700 LT, 出现高度为 88 km. 表明在冬季, 24 h 潮汐是武汉上空中层顶区域主要的潮汐扰动成分, 这与其他中纬的观测结果是一致的 [3], 但与高纬

的观测结果不同^{[5]-[7]}. 进一步的观察发现, 对于纬向风场, 由于大气密度随高度的增加而减小, 在 80—94 km 的高度范围内, 24 h 潮汐的振幅随高度的增加而增加, 但在 94 km 以上的高度上, 振幅却呈现出明显的下降趋势. 从经向风场中也能观测到类似的结果, 在 90 km 高度以下, 24 h 潮汐振幅随高度增加而增加, 而在 90 km 以上, 振幅却随高度的增加而单调下降. 这一现象可能是由于波-波相互作用而导致波能量在不同谱成分之间的交换造成的. 除了 24 h 潮汐外, 从图 1 中还可以看到较强的 12 h 潮汐, 其振幅通常约为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 偶尔也会超过 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 并且随高度的增加而单调增加. 相对而言, 8 h 潮汐则弱得多, 其振幅一般都小于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

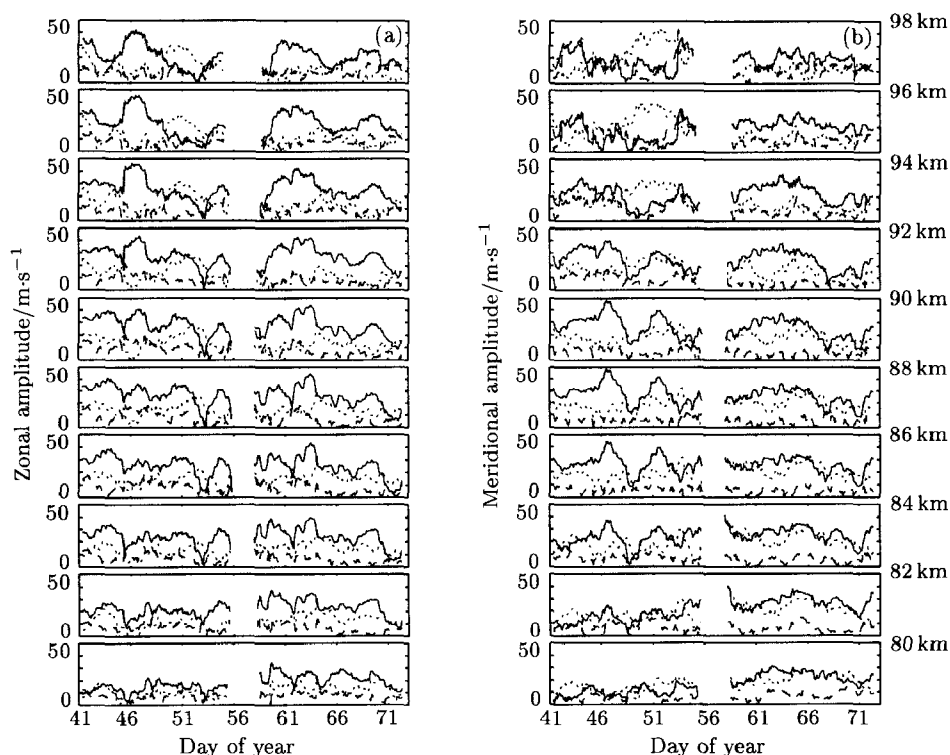


图 1 大气潮汐纬向 (a) 和经向 (b) 风速振幅随时间的变化

Fig.1 Zonal (a) and meridional (b) amplitudes of atmospheric tides. The solid, dotted and dashed lines denote the amplitude of diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides, respectively

图 2 给出了 24 h, 12 h 和 8 h 潮汐纬向风速振幅在 96 km 和 98 km 两个高度上随时间的变化. 如图 2 所示, 在第 49 天前, 24 h 潮汐的振幅随时间有小的起伏, 此后便从 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 单调减小至 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 伴随 24 h 潮汐振幅的下降, 12 h 潮汐的振幅从第 49 天时的 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 单调增加至 49 天 1700 LT 时的 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大约在 49 天 0700 LT 的时候, 12 h 潮汐的振幅达到 24 h 潮汐振幅的水平, 此后便超过了 24 h 潮汐的振幅. 相对而言, 8 h 潮汐的振幅较小, 小于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并且随时间呈现出明显的起伏, 第 49 天后, 伴随 24 h 潮汐的振幅随时间下降, 8 h 潮汐振幅随时间增加, 当 12 h 潮汐的振幅超过 24 h 潮汐时, 又开始下降. 对应的潮汐动能在图 3 中给出. 从图 3 可以看到, 虽然 24 h, 12 h 和 8 h 潮汐

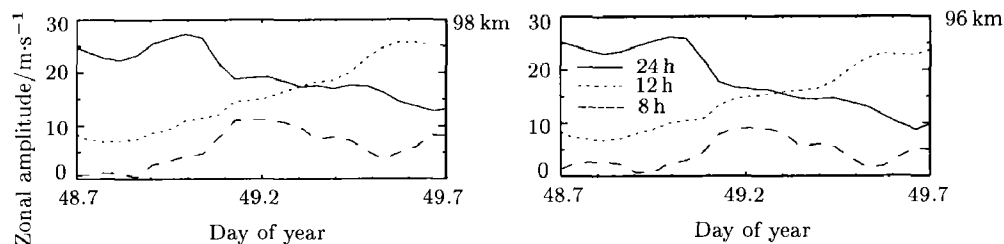


图 2 纬向风场振幅随时间的变化

Fig.2 Temporal variations of zonal amplitudes at selected heights. The solid, dotted and dashed lines denote the zonal amplitude of diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides, respectively

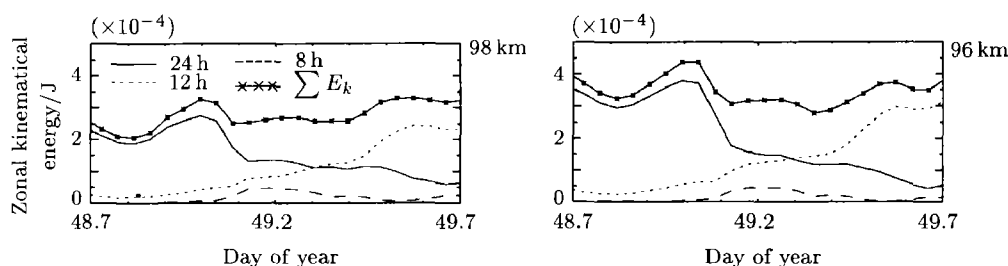


图 3 纬向动能随时间的变化

Fig.3 Temporal variations of zonal kinematical energy at selected heights. The solid, dotted and dashed lines denote the zonal kinematical energy of diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides, respectively; the solid lines with asterisks denote the sum of zonal kinematical energy of diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides

的波动动能随时间有明显的变化, 但它们的动能总和却没有很明显的增加或减少. 经向扰动风场的分析也可以得到类似的结果. 考虑到 8 h 潮汐的频率是 12 h 和 24 h 潮汐频率之和, 这正是共振相互作用的条件, 表明在中层顶区域, 24 h, 12 h 和 8 h 潮汐之间存在显著的共振相互作用, 这种相互作用会导致不同潮汐分量的振幅随时间呈现出明显变化.

研究了潮汐的扰动振幅后, 下面分析 24 h 潮汐的相位变化特征, 即利用 (1) 式拟合得到 φ_i . 图 4 是整个观测期间 24 h 潮汐相位的平均. 图 4 中, 相位的垂直剖面显示出对于纬向和经向风场 24 h 潮汐的相位都随高度增加而增加, 表明观测到的 24 h 潮汐能量是向上传播的. 纬向和经向风场的平均垂直波长分别为 45 km 和 47 km, 对应的向下传播的平均相速度分别为 1.88 km/h 和 1.97 km/h.

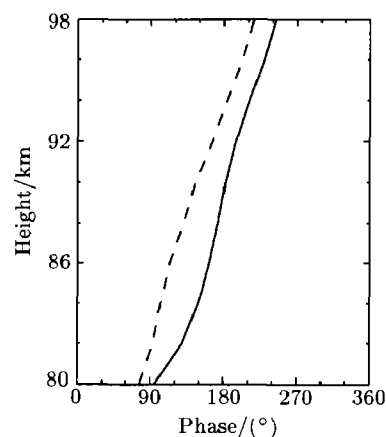


图 4 24 h 潮汐纬向 (实线) 和经向 (虚线) 风场相位的高度剖面

Fig.4 Profiles of phases of zonal (solid lines) and meridional (dashed lines) diurnal tidal wind

4 结 论

利用武汉 (30°N , 114°E) MF 雷达在 2001 年 2 月 11 日至 25 日及 2 月 28 日至 3 月 13 日的观测数据研究了冬季武汉上空中层顶区域潮汐及其相互作用的基本特性。

水平风场扰动振幅的动态谱分析显示出在所有高度上都存在连续的、强的 24 h 潮汐振荡, 同时偶尔也能观测到较强的 12 h 和弱的 8 h 潮汐振荡, 这表明在冬季武汉中层顶区域, 24 h 潮汐是潮汐的主要成分。

对不同潮汐成分振幅和动能时间变化特性的细致分析则表明在 24 h, 12 h 和 8 h 潮汐之间存在显著的共振相互作用, 这种相互作用会导致不同潮汐成分的扰动振幅随时间呈现出明显变化。

对 24 h 潮汐扰动风场的相位计算结果说明观测到的潮汐扰动是向上传播的, 纬向和径向风场的平均垂直波长分别为 45 km 和 47 km, 对应的向下的相位传播速度则分别为 1.88 km/h 和 1.97 km/h。

参 考 文 献

- [1] Manson A H, Meek C E. Middle atmosphere (60—110 km) tidal oscillations at Saskatoon (52°N , 107°W) during 1983—1984. *Radio Sci.*, 1985, **20**(12):1441—1451
- [2] Avery S K, Vincent R A, Phillips A *et al.* High-latitude tidal behavior in the mesosphere and lower thermosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**(5):595—608
- [3] Isler J R, Fritts D C. Mean winds and tidal and planetary wave motions over Hawaii during airborne lidar and observations of Hawaii airglow ALOHA-93. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **102**(8):4437—4446
- [4] Mitchell N J, William P J S, Jones A G *et al.* Nonlinear planetary/tidal wave interactions in the lower thermosphere observed by meteor radar. *Ann. Geophys.*, 1996, **19**(2):364—366
- [5] States R J, Gardner C S. Thermal structures of the Mesopause region (80—105 km) at 40°N Latitude. Part II: Diurnal variations. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**(1):78—92
- [6] Greet P A, Murphy D J, Vincent R A *et al.* A comparison of optical and radar measurements of mesospheric winds and tides. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(10):2477—2480
- [7] Yi Fan. Short-term variability and temporary structures of tides and mean wind in the polar summer mesosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**(5):749—757
- [8] Ruster R, Czechowsky P, Schmidt G. VHF radar observations of tides at polar latitudes in the summer mesosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1988, **50**(5):1041—1046
- [9] Huuskonen A, Virdi T S, Jones G O L *et al.* Observations of day-to-day variability in the meridional semidiurnal tide at 70°N . *Ann. Geophys.*, 1991, **9**(2):407—415
- [10] Manson A H, Meek C E, Gregory J B *et al.* Fluctuation in tidal (24- and 12-h) characteristics and oscillations (8-h, 5-d) in the mesosphere and lower thermosphere (70—110 km): Saskatoon (52°N , 107°W), 1979—1981. *Planet. Space Sci.*, 1982, **30**(9):1283—1294
- [11] Fritts D C, Vincent R A. Mesospheric momentum flux studies at Adelaide, Australia: Observations and a gravity wave-tidal interaction model. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**(3):605—619
- [12] Hall G E, Namboothiri S P, Manson A H *et al.* Daily tidal, planetary waves, and gravity wave amplitudes over the Canadian prairies. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(6):1553—1567
- [13] Beard A G, Mitchell N J, Williams P J S *et al.* Nonlinear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**(2):363—376
- [14] Manson A H, Meek C E. Long period (~ 8 —20 h) wind oscillations in the upper middle atmosphere at Saskatoon (52°N): Evidence for nonlinear tidal effects. *Planet. Space Sci.*, 1990, **38**(5):1431—1441

- [15] Ruster R. VHF radar observations of nonlinear interactions in the summer polar mesosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**(5):1 289—1 299
- [16] Clark R R, Bergin J S. Bispectral analysis of mesospheric winds. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**(3):629—639

MF RADAR OBSERVATIONS OF TIDES AND THEIR INTERACTIONS OVER WUHAN (30°N, 114°E)

ZHANG Shaodong YI Fan

(Department of Electronic Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

HU Xiong

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

Abstract

Data obtained from the medium-frequency (MF) radar at Wuhan (30°N, 114°E) from 11 to 25 February and from 28 February to 13 March have been used to study the tidal oscillations and their interactions at mesopause (80—98 km) region over Wuhan in winter. A dynamic spectral variation of disturbance amplitude illustrates a prominent peak at a period of 24 hours at all heights and almost uninterrupted, and there are occasionally slightly strong semidiurnal and weak terdiurnal tidal disturbances. These indicate that in the mid-latitude regions, the diurnal tide is the dominant tidal disturbance at mesopause in winter. A detailed analysis of tidal amplitudes and their wave kinematical energies implies that there may be significant resonant interaction among the diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides. The phase profiles of the diurnal tides show obvious increase trend with the increasing heights in both the zonal and meridional directions, which indicate that the observed diurnal tides are propagating upward. The mean vertical wavelengths of the diurnal tides obtained from the zonal and meridional phases are 45 km and 47 km, respectively, and the corresponding downward phase velocities are 1.88 km/h and 1.97 km/h, respectively.

Key words MF radar observation, Tides, Interaction