

武汉上空中层和低热层大气潮汐的 流星雷达观测^{*}

熊建刚 万卫星 宁百齐 刘立波

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

武汉流星雷达是2002年元月建成的我国第一部全天空流星雷达,本文对2002年2月19日到7月31日流星雷达观测的潮汐的讨论表明,武汉中层顶以周日潮汐为潮汐运动的主要分量,它的强度远大于半日潮汐,周日潮汐和半日潮汐的波源都在80 km以下.周日潮汐分量在3、4月份最强,并且经向分量略强于纬向分量.两个分量的峰值在约95 km处出现,分别达到44 m/s和60 m/s.半日潮的最大值24 m/s出现在4月初约93 km处.周日潮汐和半日潮汐的振幅和相位随时间呈现出拟周期变化的特征,这可能是潮汐与行星波非线性相互作用的结果.观测结果与GSWM模型的比较表明,GSWM模型在相位随高度变化趋势上与观测结果一致,但模型的周日潮相位比观测约超前1—2 h,半日潮相位约滞后1—4 h.在周日潮汐较强的月份,模型与观测有较大的差异,观测的幅度通常在95 km附近有极大值,而模型并没有极大值.GSWM模型对半日潮的幅度的估计通常过小,观测的半日潮幅度有时甚至超过模型值的一倍以上.

关键词 流星雷达; 潮汐; 中层和低热层大气

1 引言

大气潮汐是周期为太阳日或太阴日的整数分之一的大气波动,由于中层顶附近太阴潮汐较弱,本文只讨论周期为24 h、12 h等的太阳潮汐.潮汐对中间层和低热层大气运动的动力学特性有非常重要的影响^[1],在80 km到100 km的高度范围内潮汐的幅度通常大于行星波和重力波,通过垂直和水平的能量和动量传输、波相互作用和波耗散,这些波动显著地影响大气环流、大气结构及其变化.分布在全球的地面雷达对潮汐的幅度、相位以及潮汐的季节变化作了持续的观测^[2],从UARS卫星上观测潮汐,使人们对一些重要的潮汐模结构有了深入的认识^[3],特别是一系列的国际联合观测,比如DYANA/MLTCS/PSMOS等揭示了潮汐运动的短时变化、季节变化、年变化以及随经纬度和南北半球的变化等^{[4],[5]}.潮汐的理论研究也有很大的进展,Kato^[6]对潮汐的传播波模和消散波模的特性作了研究,潮汐动力学模型与真实风场和温度场的结合,可以相当合理地描述潮汐的季节变化等特性,利用真实的水汽和云层覆盖的分布,人们对于潮汐的非迁移成分也有了较深入的认识^[7].最近Manson等^[8]和Igarashi等^[9]分别对不同地址的潮汐观测结果进行了分析,

^{*} 国家自然科学基金资助项目(40174048, 40134020)

2002-09-17 收到原稿, 2003-04-25 收到修定稿

并将结果与 GSWM 模型进行了比较, 周日潮汐的观测结果与模型符合较好, 而半日潮的观测结果与模型的差别较大. 由于 GSWM 模型^[10]是线性潮汐和行星波模型, 它利用了一些经验模式作为输入量, 比如 MSIS 的温度和 CIRA 的臭氧模型等, 而在有些地区比如纬度为 30°N 的很多地方并没有很多的观测资料, 这些输入模式的误差在这些地区可能较大. 因此对这些地区的潮汐进行观测和分析对于认识全球潮汐运动及构造更为准确的潮汐模型有重要意义.

武汉流星雷达建成于 2002 年元月, 该雷达是最近几年才发展起来的全天空宽波束干涉雷达^[11], 可以利用从流星尾迹反射的 VHF 回波信号的 Doppler 频移确定流星所在位置的大气运动径向速度. 另外, 利用回波信号的衰减时间还可以确定大气的温度^[16], 进而讨论温度的长短周期变化, 如温度潮汐等. 该雷达目前的工作频率是 38.7 MHz, 峰值功率为 7.5 kW, 重复频率为 500 Hz. 本文将利用 2 月 19 日到 7 月 31 日的观测数据讨论潮汐的特性, 并将对每个月潮汐的平均振幅和相位与最新的 GSWM00 模型进行比较.

2 武汉中层顶附近潮汐的变化特征

在确定流星的位置后, 全天空流星雷达可以得到该流星位置处大气运动的径向速度. 选取时间长度为 2 h、高度宽度为 2 km 的窗口, 假设在各个窗口中风场是均匀的, 那么可以用最小二乘法确定该窗口中的风分量, 即 $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 使下式最小:

$$\sum_i [\mathbf{u} \cdot \mathbf{r}_i - v_{ri}]^2. \quad (1)$$

以上对 i 的求和是对窗口中天顶角小于 70° 范围内的所有流星观测位置进行的, u, v, w 分别是沿纬向、经向和垂直方向的速度分量, $\mathbf{r}_i$ 是窗口中流星的位置, v_{ri} 是沿 $\mathbf{r}_i$ 的径向速度. 由于在 80—100 km 范围内观测的流星数量较多, 下面仅在 80—100 km 高度范围

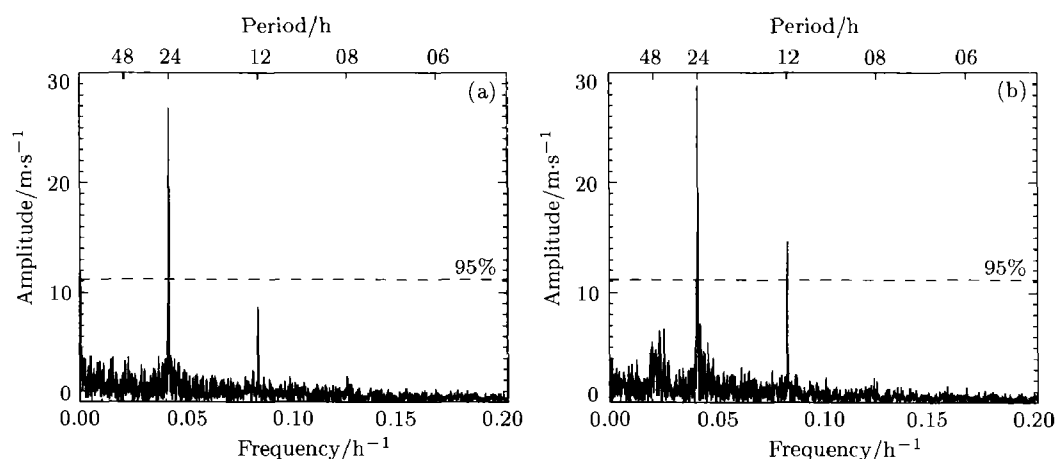


图 1 2002 年 2 月 19 日至 7 月 31 日武汉上空 91 km 水平风的 Lomb 周期图

(a) 纬向风的周期图, (b) 经向风的周期图

Fig.1 The lomb periodogram of horizontal winds over Wuhan at 91 km from Feb. 19 to Jul. 31 2002

(a) Periodiagram of zonal wind, (b) Periodiagram of meridional wind

内讨论大气潮汐的特征. 91 km 处两个水平分量的周期图^[12]见图 1, 最显著的谱分量是周日潮, 其次是半日潮. 因此在每一高度上, 将纬向和经向风的时间序列在 9 天的时间窗内作如下谐波拟合^[13], 可以得到各潮汐分量随时间和高度的分布,

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \sin\left(\frac{2\pi i}{24}t + \phi_i\right). \quad (2)$$

其中, $y(t)$ 是经向风或纬向风, A_1 和 ϕ_1 是周日潮汐振幅和相位, A_2 和 ϕ_2 是半日潮汐振幅和相位. 依照文献中通常的表示方法, 相位用时间表示, 即潮汐在当日第一次达到最大值的时间.

图 2 是水平风周日潮汐分量的振幅和相位随时间和高度的变化, 潮汐分量随时间几天、十几天的短期变化比较显著. 两个水平分量的振幅在 3 月和 4 月份的振幅较大, 纬向分量 4 月上旬在大约 95 km 处出现约 44 m/s 的最大值; 而经向分量的最大值出现在 3 月上旬, 93 km 处最大值达到 60 m/s, 与该最大值相对应, 在相同时间和相同高度上纬向分量也有一个极大值约 40 m/s. 从 3 月到 4 月上旬, 潮汐振幅呈现逐步增强的趋势, 并且经向分量的幅度超过了纬向分量. 4 月中旬以后, 周日潮汐的幅度逐渐减弱, 经向分量减弱更快. 从图中看, 振幅在变化的过程中出现了几个明显的峰值, 例如经向潮汐振幅在 6 月中旬到 7 月下旬出现 4 个极大值, 呈现周期约为 15 至 18 天的变化. 从武汉中层顶的大气环流来看^[11], 4 月中旬以后, 中层顶附近东风环流发生转向, 出现逐步增强的西风环流, 而西风环流的变化与重力波的活动有关, 因此 4 月下旬以后周日潮汐减弱可能与潮汐分量和重力波与平均风的相互作用有关^[14], 通过相互作用, 潮汐能量向平均风场传递. 武汉中层顶周日潮汐的峰值高于许多其他观测的峰值^{[9],[15]}, 例如, 日本 Yamagawa 1996—1999 年周日潮汐纬向分量振幅平均值在元月份有极大值, 3 月份达到最大值 22 m/s, 经向分量在 3 月初约 86 km 的位置有最大值超过 20 m/s, 均小于武汉的观测值, 并且最大值出现的高度比武汉约低 7 km. 1996—1999 年同在日本的 Wakkanai 观测站上空的周日潮汐与 Yamagawa 也有较大差异, 因此周日潮汐风场随经纬度的变化是比较显著的. 周日潮是水平风场中的主要波动成分, 在不同高度上的相位也呈现有规律的变化, 在不同高度上的相位排列, 特别是从 95 km 到 83 km, 明显显示周日潮汐的等相面是下行的, 即周日潮汐的能量是从下往上传递的. 纬向分量的相位随时间有窄幅波动, 而经向分量的相位在 2 月到 5 月随时间增长并有小幅波动, 到 6 月份以后, 两个分量的相位均有一些不十分规则的变化. 从 95 km 以下纬向分量的相位变化来看, 周日潮汐的垂直波长在几十公里左右, 这与经典潮汐理论的 $S(1,1)$ 模比较符合. 95 km 以上相位随高度变化通常比较缓慢, 从图中看到 99 km 处的相位非常接近 95 km 的相位, 垂直波长较大, 而且潮汐幅度随高度下降, 这是潮汐消散波模的特征. 另外 99 km 高度处, 在有些情况下, 比如 7 月上旬, 相位变化非常不规则, 这与该高度由于周日潮汐分量衰减较快可能引起的估算误差有关, 从图中看到, 在大多数情况下, 特别是在潮汐较强的 3、4 和 5 月份, 95 km 以上的潮汐的等相面也是缓慢下行的. 经向潮汐分量基本也符合上述规律. 这说明在 95 km 或略低的位置以下, 周日潮汐以 $S(1,1)$ 传播模为主, 而在此高度之上, 周日潮汐以消散模为主.

从图 2 周日潮汐的相位随时间的变化来看, 在各个高度上, 相位的变化有一定的波动性, 与 Pancheva 等^[15]的结果类似, 武汉中层顶附近周日潮汐的幅度和相位有从几天到

60 天左右的周期分量, 这说明周日潮汐有复杂的短期和长期变化, 这些变化与波动之间的非线性相互作用有关, 本文暂不讨论潮汐的这些变化过程。

由于纬向风的半日潮分量比较弱, 图 2 中该分量的置信度低于 95%, 下面仅讨论经向

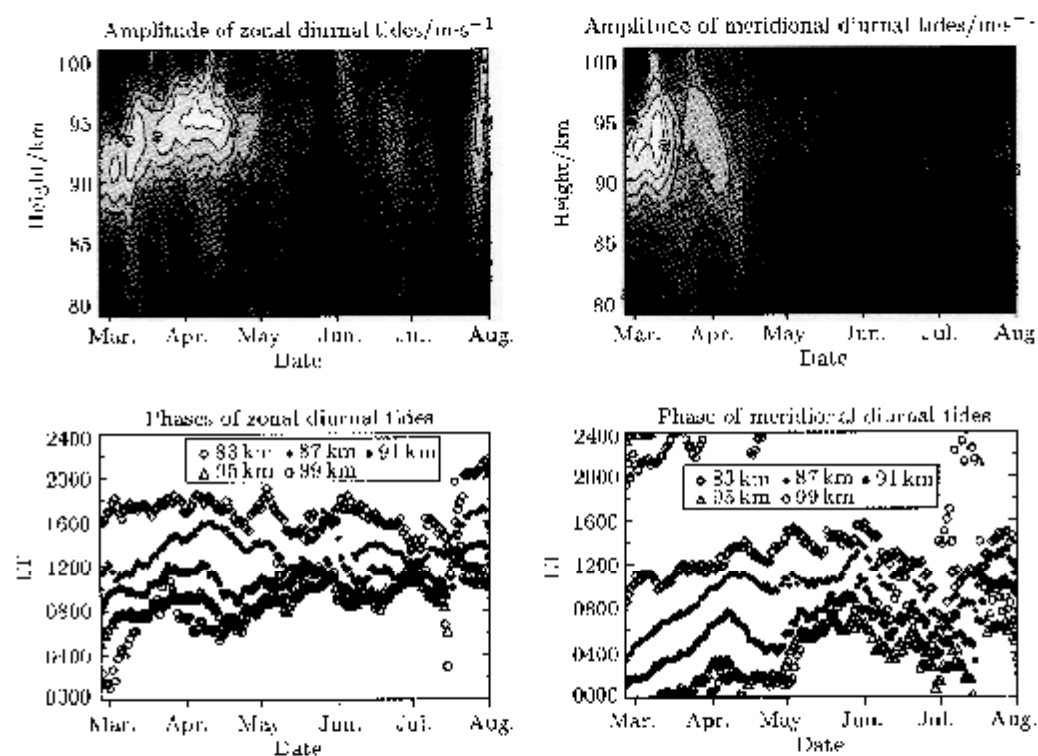


图 2 周日潮汐的振幅和相位

Fig.2 The amplitudes and phases of diurnal tides

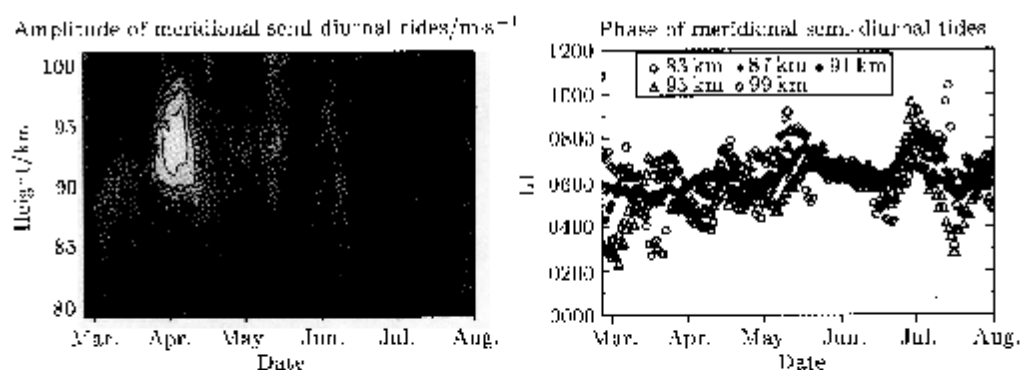


图 3 经向风半日潮汐的振幅和相位

Fig.3 The amplitudes and phases of meridional semi-diurnal tides

风的半日潮分量. 图 3 是水平风半日潮汐经向分量的振幅和相位随时间和高度的变化, 它的幅度最大值约为 24 m/s , 远远弱于周日潮, 而且半日潮的出现不是非常稳定. 半日潮的变化非常复杂, 与平均风场的变化不相关, 从经向半日潮的幅度来看, 随时间明显有 20 天左右的周期变化, 纬向分量的相位变化比较杂乱, 表明半日潮的短期变化比较显著. 另外, 不同高度经向分量的相位差别不大, 说明半日潮的垂直波长较大. 半日潮的这些变化可能与局地激发的非迁移潮汐有关^[9], 在图中能够显著区分不同高度相位大小的时间段, 比如 5 月上旬到 5 月中旬, 明显看到 83 km 处潮汐分量达到最大值的时间晚于 91 km , 而 91 km 处潮汐达到最大值的时间晚于 95 km , 这说明半日潮的相位在这些时段也是向下传播的, 即半日潮能量向上传播. 在其他时间段, 半日潮汐的传播方向显得有些不规则, 可能与一些局地激发源 (包括非线性相互作用) 有关.

3 观测结果与 GSWM00 模型的比较

由于潮汐是大气系统中最重要波动之一, 构造实用的潮汐模型是研究中高层大气的一个重要目的, 在人们构造的潮汐模型中, GSWM 模型是应用比较广泛的一个模型, 由于使用了大气参量的观测模式, GSWM 模型经常用来与各地和卫星观测资料进行比较, 并且不断得到完善. 为了比较流星雷达风场与 GSWM 模型的结果, 类似于文献 [11], 先对每个月构造特征观测序列, 即将当月每一天相同时间的流星观测径向速度看做该月特征日该时间的观测量, 于是得到一个时间长度为 24 h 的特征观测序列. 对这个特征日的序列使用 (1) 式求出纬向速度和经向速度, 并用 (2) 式求出该月的平均潮汐风. 周日潮和半日潮振幅和相位的月均值高度剖面见图 4 和图 5. 图中 GSWM 的数据是 GSWM00 的最新结果.

从图 4 周日潮两个水平分量随月份的变化来看, 2 月到 7 月纬向分量的振幅与模型符合得比较好, 经向分量与模型的差异比较明显, 特别是 2 月和 3 月份经向分量明显大于模型的结果, 从 $90\text{--}95 \text{ km}$ 处出现的最大值比模型高出近一倍, 在其他月份最大值比较接近, 而 2、3 月份是周日潮经向分量较强的月份 (见图 2). 观测结果与模型最大的不同是, 观测结果通常在 $90\text{--}95 \text{ km}$ 之间出现振幅最大值, GSWM 模型的振幅在 $80\text{--}100 \text{ km}$ 范围内是随高度增加的, 在 $90\text{--}95 \text{ km}$ 之间没有最大值, 在最大值以下, 观测结果和模型在 4 月份、6 月份和 7 月份相当吻合, 但 GSWM 模型在 95 km 以上通常没有衰减. 另外, GSWM 模型的幅度随月份变化不显著, 4 月份和 5 月份的幅度值略大, 而观测的幅度随月份的变化要明显一些. 2 月份和 3 月份经向潮汐分量强于纬向潮汐分量, 4 月份纬向分量比经向分量强, 其他月份两个分量相差不大. 从模型与观测结果的相位来看, 两者随高度的变化趋势是一致的, 这说明周日潮汐的能量基本上是上行的, 周日潮汐的源在中层顶以下. 模型的相位值与观测的相位值比较接近, 模型值比观测值约超前 $1\text{--}2 \text{ h}$. 从图中相位随高度的变化来看, 周日潮汐分量的垂直波长通常在几十公里的量级, 与模型比较符合, 但在较高的高度上, 周日潮汐的相位变化较小, 垂直波长较大, 显示出消散波模的特征.

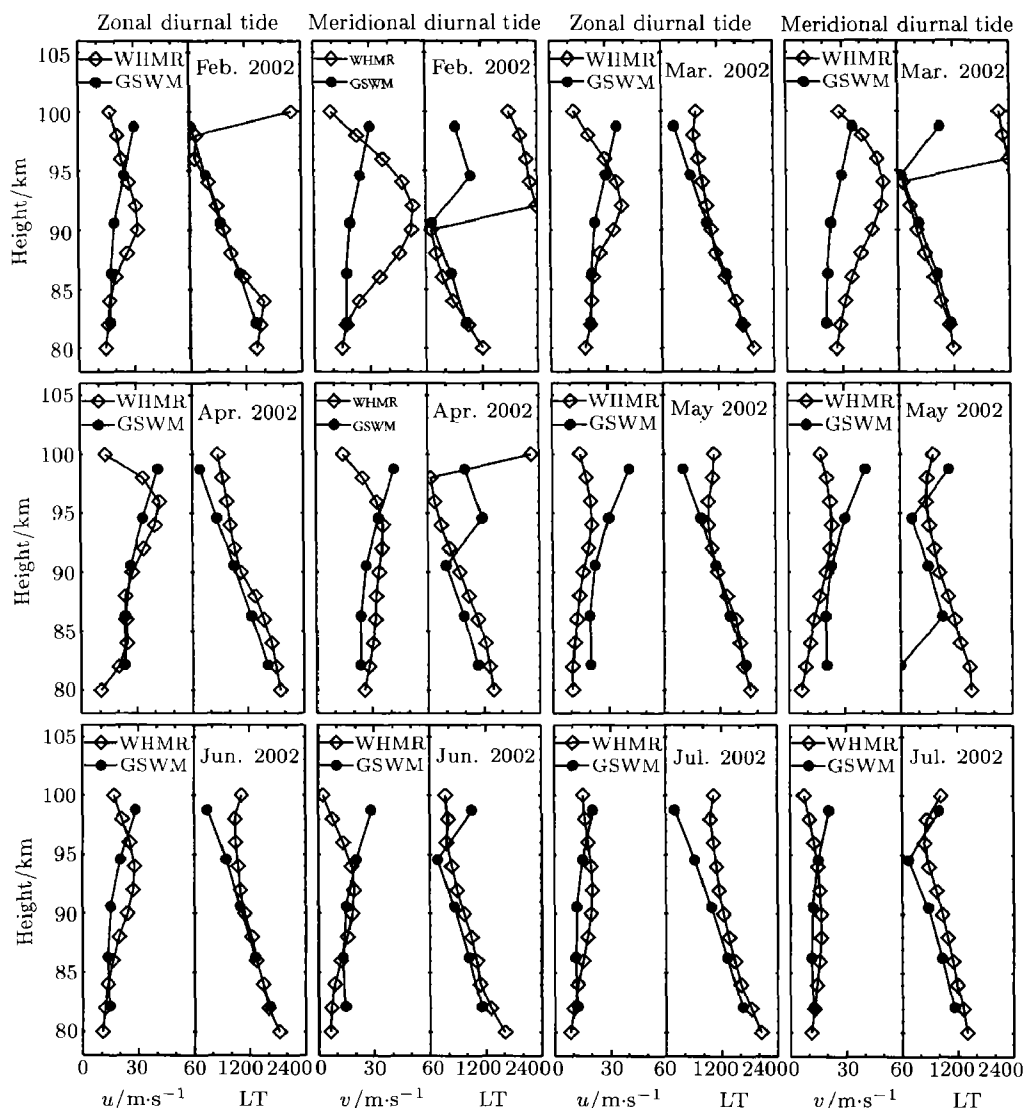


图4 周日潮汐的月平均振幅和相位随高度变化的剖面

图中 u, v 分别表示经向和纬向周日潮汐分量的幅度

Fig.4 Height profiles of the monthly mean amplitudes and phases of diurnal tides.

u, v are amplitudes of zonal and meridional diurnal tides

上节的分析就表明, 半日潮是比周日潮小很多的大尺度波动, 图5的结果支持这个结论. 观测和 GSWM 模型的半日潮振幅值一般不超过 25 m/s, 经向分量的振幅比模型大. 而 2、3、4 月的纬向半日潮分量的观测值与模型比较接近, 5、6、7 月纬向分量的振幅明显超过模型. 经向分量在 90—95 km 范围内有最大值, 而 GSWM 模型在此范围没有最大值. 从半日潮相位随高度的变化来看, 半日潮的垂直波长比较大, 观测和模型两方面都可以说明这一点, 大多数情况下模型的两个分量和观测的经向分量的相位随高度增加而减小, 这说明半日潮是能量上行的波动, 它的源在中层顶以下. 但在 6 月份, 模型的两个

分量的相位都随高度增加, 观测相位也是如此, 从 2、4、7 月份经向分量的相位来看, 在 95 km 以上相位随高度出现减小的趋势. 半日潮的这些特征反映出半日潮与平均流和其他扰动可能存在相互作用, 影响了它的稳定传播. 观测的相位一般比模型的相位超前 1—4 h.

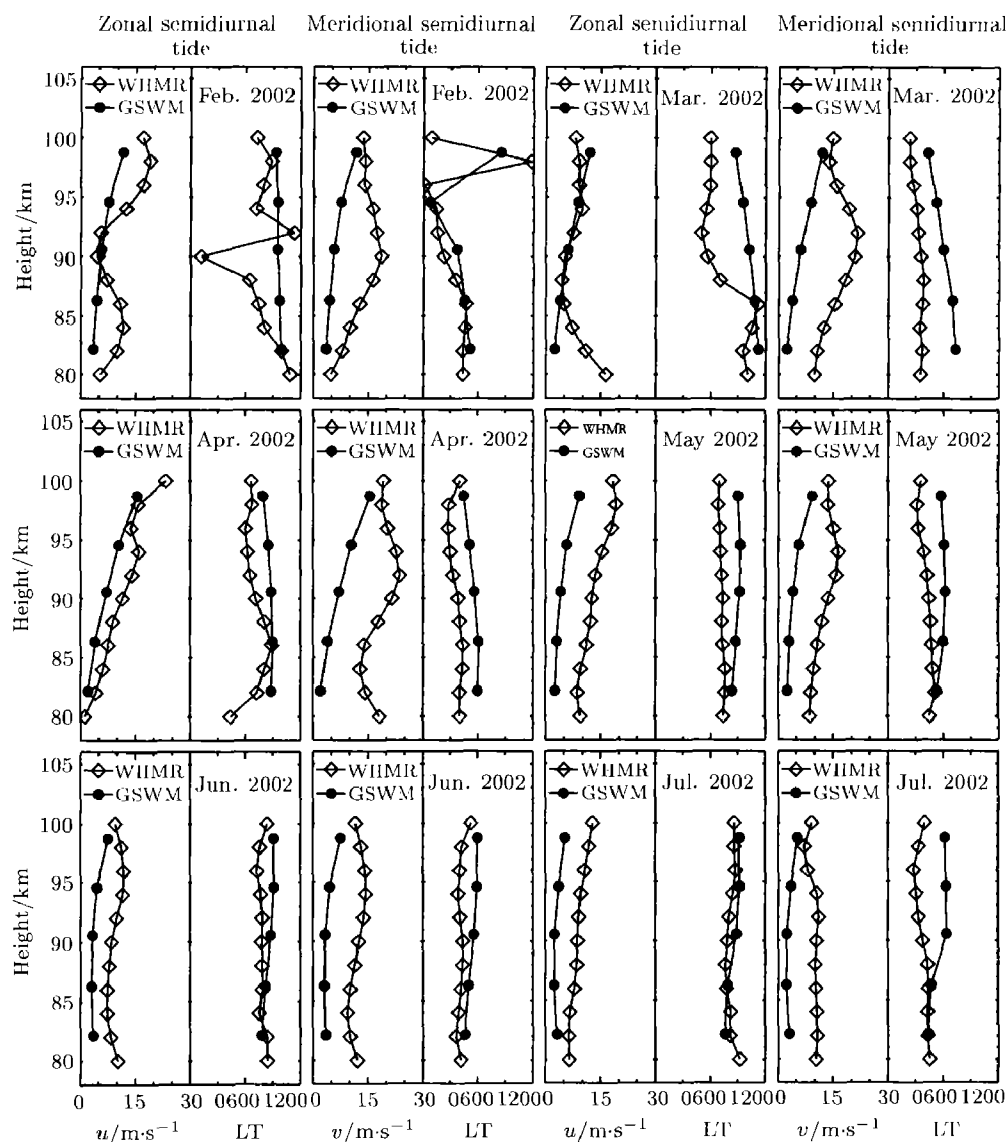


图 5 半日潮汐的月平均振幅和相位随高度变化的剖面

图中 u, v 分别表示经向和纬向半日潮汐分量的幅度

Fig.5 Height profiles of the monthly mean amplitudes and phases of semidiurnal tides u, v are amplitudes of zonal and meridional semidiurnal tides

Manson 等^[8] 和 Igarashi 等^[9] 发现, 在不同地区的潮汐观测结果中, 周日潮分量与 GSWM 模型符合较好, 而半日潮与模型的差别较大. 武汉中层顶观测表明在周日潮汐较强的 2、3 月份, 周日潮与模型仍有很大差异, 而且模型没有反映潮汐幅度在 95 km 以上

的衰减现象,观测的半日潮分量通常比模型要大,甚至超出一倍以上. GSWM 模型与实际观测的差异表明, GSWM 还需要考虑更真实的因素,比如更合理的重力波耗散模型,并且需要更多的低层大气的热量观测等作为输入参数,才能得到更合理的潮汐模型.

4 结论

武汉流星雷达是国内第一部全天空观测的流星雷达,主要用于计算大气运动和温度. 本文对 2002 年 2 月 19 日到 7 月 31 日的潮汐进行了讨论,并将结果与大气潮汐模型 GSWM 的最新结果进行了比较,主要结果如下.

(1) 武汉中层顶以周日潮汐为潮汐运动的主要分量,它的强度远大于半日潮汐,武汉位于中纬度向低纬度地区过渡的位置,潮汐分量的这个特征在许多中纬度地区不具有的.

(2) 周日潮汐分量在 3 至 4 月份最强,并且经向分量略强于纬向分量. 两个分量的峰值在约 95 km 处出现,分别达到 44 m/s 和 60 m/s. 4 月下旬后周日潮汐逐渐减弱,这与 4 月下旬后大气西风环流逐渐增强有关,可能是潮汐、重力波和大气环流相互作用的结果.

(3) 从相位的日变化和月均值来看,周日潮汐和半日潮汐基本上都是能量上行的,说明波源在 80 km 以下.

(4) GSWM 模型与观测结果的差异主要表现在三个方面,观测结果在 95 km 以下通常有最大值,而模型没有;模型的月变化特征与观测的特征不一样,模型中周日潮在 5 月份最强,而观测的周日潮在 2 至 4 月份最强;虽然模型和观测的相位随高度的变化趋势类似,模型的周日潮相位比观测超前 1—2 h,半日潮相位约滞后 1—4 h. 这些差异与模型输入的参数,特别是中低纬地区相对较少的观测数据,以及模型中还不够完善的耗散模式都有很大关系,因此建立更加合适的模型还需要更多的观测积累和合理的大气重力波参数化模式.

我们还发现潮汐振幅和相位随时间有不同周期的长期和短期变化,比如 10 多天到 20 天左右的变化,系统的分析将另文给出.

致谢 感谢 Hagan 教授提供了 GSWM00 的最新计算结果.

参 考 文 献

- [1] Teitelbaum H, Vial F. On tidal variability induced by nonlinear interaction with planetary waves. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:14 159—14 178
- [2] Manson A H *et al.* Climatology of semi-diurnal and diurnal tides in the middle atmosphere (70—110 km) at middle latitudes (40—55°). *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**:579—593
- [3] Hayes P B, Wu D L. Observations of the diurnal tide from space. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**:3 077—3 093
- [4] Portnyagin Y I *et al.* The wind regime of the mesosphere during the DYANA campaign II. *Semidiurnal Tide. J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**:1 731—1 752
- [5] Pancheva D *et al.* Global-scale tidal structure in the mesosphere and lower thermosphere during the PSMOS campaign of June—August 1999 and comparisons with the global-scale wave model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**:1 011—1 035
- [6] Kato S. Dynamics of the upper atmosphere. Beijing: Science Press, 1980. in Chinese (高层大气动力学. 1980, 北京: 科学出版社, 1989)
- [7] Lieberman R S, Leovy C B. A numerical model of nonmigrating diurnal tides between the surface and 65 km. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**:389—409
- [8] Manson A H *et al.* Seasonal variations of the semidiurnal and diurnal tides in the MLT: Multi-year MF radar observations from 2—70°N, and the GSWM tidal model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**:809—828
- [9] Igarashi K, Namboothiri S P, Kishore P. Tidal structure and variability in the mesosphere and lower thermosphere over Yamagawa and Wakkanai. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**: 1 037—1 053
- [10] Hagan M E, Forbes J M, Vial F. On modelling migrating solar tides. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:893—896
- [11] Xiong J G, Wan W X, Ning B Q, Liu L B. Meteor radar observation of circulation near mesopause over Wuhan. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**(10):1 102—1 106. in Chinese (熊建刚, 万卫星, 宁百齐, 刘立波. 武汉上空中层和低热层环流的流星雷达观测. 科学通报, 2003, **48**(10):1 102—1 106)
- [12] Scagle J D. Studies in astronomical time series analysis. *Ap. J.*, 1982, **263**:835—852
- [13] Forbes J M. MST radar detection of middle atmosphere tides. *Radio Sci.*, 1985, **20**:1 435—1 440
- [14] Miyahara S, Forbes J M. Interactions between gravity waves and the diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1991, **69**:523—531
- [15] Pancheva D, Mukhtarov P. Wavelet analysis on transient behavior of tidal amplitude fluctuations observed by meteor radar in the lower thermosphere above Bulgaria. *Ann. Geophys.*, 2001, **18**: 316—331
- [16] Hockin W K. Temperatures using radar-meteor decay times. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**:3 297—3 300

TIDES IN THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE OVER WUHAN REVEALED BY A METEOR RADAR

XIONG Jiangang WAN Weixin NING Baiqi LIU Libo

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

Abstract

An all-sky meteor radar was set up in January 2002 in Wuhan and it is the first meteor radar in China. The characteristics of diurnal and semidiurnal tides over Wuhan from February 19 to July 31 are discussed in this paper. The main tidal component is diurnal tide which is much greater than the semidiurnal tide, and the sources of both tide components are below 80 km. The diurnal tidal components reach their maximum in February and March, and the meridional components are stronger than the zonal components. Zonal and meridional diurnal tides reach their maximum of 44 m/s and 60 m/s at about 95 km, respectively. The semidiurnal tide reaches its maximum amplitude 24 m/s at about 93 km at the beginning of April. The amplitudes and phases of diurnal and semidiurnal tides show some quasi-periodic characteristics which may be resulted from nonlinear interaction between tides and planetary waves. The comparison of the observed tide and GSWM values shows that the variation of both diurnal and semidiurnal tidal phase with height is agreement. But the diurnal tidal phases of the GSWM are 1—2 hours ahead of the observed phases and the semidiurnal tidal phases of the GSWM are 1—4 hours lag of the observed phases. There are significant difference between GSWM tidal amplitudes and the observed amplitudes while the tides are strong. And the observed tidal amplitudes have maximum values at about 95 km, but GSWM values have not maximum from 80 to 100 km. The observed amplitudes of semidiurnal tide are generally greater than the GSWM amplitudes, as much as twice greater in some months.

Key words Meteor radar, Tide, Middle atmosphere