科学通报 2010 年 第 55 卷 第 10 期: 923 ~ 930
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

我国海南上空中高层大气潮汐风场的首次观测分析

姜国英, 徐寄遥, 史建魁, 杨国韬, 王霄, 燕春晓

空间天气学国家重点实验室, 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190
E-mail: gyjiang@spaceweather.ac.cn

2009-08-12 收稿, 2009-09-28 接受
国家自然科学基金(批准号: 40621003, 40804037, 40890165)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806306)和国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 海南富克(19.5°N, 109.1°E)流星雷达是我国低纬地区第一台探测中高层大气风场的雷达. 利用该雷达观测的 2009 年春季近 3 个月的风场数据(2 月 1 日至 4 月 20 日), 第一次给出了我国低纬地区 80~100 km 高度范围内大气周日潮汐、半日潮汐及平均风随时间、高度的变化情况. 分析结果表明: 在春季, 我国低纬上空中层顶区存在非常强烈的大气潮汐波, 并且大气周日潮的幅度明显大于半日潮, 周日潮幅度的最大值(约 100 m/s)出现在经向风场中. 周日潮和半日潮的相位在垂直方向上向下传播. 与大气潮汐波线性理论模式 GSWM02 比较表明, 富克周日潮与模式有较好的一致, 而半日潮汐波与模式有较大的差异.

关键词
流星雷达
中高层大气
潮汐

大气风场的探测和研究是中高层大气动力学研究中重要的组成部分, 探测全球尺度的风场是认知中高层大气结构的最重要的手段之一. 在过去的几十年里, 因中高纬地区地基探测设备的众多及卫星数据方便中高纬风场计算等特点, 其上空中间层-低热层大气风场的实测研究已经取得相对较多的结果[1~10]; 而赤道和低纬地区中高层大气风场研究则比较缺乏. 近些年随着空间科学的发展, 国际上赤道和低纬地区的地基探测设备和相关研究报道也陆续增多[11~15]. 我国海南富克地区(19.5°N, 109.1°E)在 2008 年新建的全天空流星雷达, 其目的就是用于低纬上空中间层-低热层大气风场的探测及研究.

风场中的各类波动(潮汐波、行星波和重力波等)通过自身传播、波包破碎、波-波间或波-流间相互作用等方式, 在大气能量和动量传输中扮演重要角色, 广泛地影响着大气环流形式和大气结构的变化. 其中周期为太阳日整数分之一的大气潮汐波通常是中高层大气中最显著的波动, 大气潮汐波的全球结构、相对较强的振幅及较长的持续时间决定其在中高层大气动力学过程中占据主导地位. 目前, 关于赤道和低纬地区中高层大气潮汐波的研究结论主要有如下几种: (1) 在所有太阳潮汐分量中, 周日潮的幅度最强, 且其经向分量强于纬向分量[14,15]; (2) 潮汐波各分量相位随高度的变化显示其能量是向上传播的, 波源来自低层大气[12~15]; (3) 周日潮汐的幅度有半年、年、准两年等长周期的变化. 研究发现, 周日潮通常在春秋分前后波振幅达到最大值, 周日潮汐振幅的准两年变化可能与赤道上空平流层风场的准两年振荡有关[15,16]; (4) 除了长周期的变化外, 周日潮汐的幅度和相位也有以几天为周期的短期变化[17].

本文采用海南富克流星雷达 2009 年 2 月 1 日~4 月 20 日春分前后近 3 个月的风场数据, 分析研究了低纬地区中高层大气周日潮汐、半日潮汐及平均风随时间、高度的变化情况. 本文的研究目的有两个: (1) 检验富克流星雷达风场探测数据的合理性; (2) 给出富克地区中高层大气潮汐和平均风的观测结果, 丰

英文版见: Jiang G Y, Xu J Y, Shi J K, et al. The first observation of the atmospheric tides in the mesosphere and lower thermosphere over Hainan. Chinese Sci Bull, 2010, 55: 1059—1066, doi: 10.1007/s11434-010-0084-8

富低纬地区中间层-低热层大气风场探测的全球性样本.

1 富克流星雷达及数据分析方法介绍

1.1 富克流星雷达

富克流星雷达是宽波束的全天空加强型流星探测雷达(Enhanced Meteor Detection Radar). 该雷达天线阵包括 1 个发射天线和 5 个接收天线, 每个天线都由两个相互正交的偶极子组成. 流星雷达测风的工作原理: 流星通过大气时被烧蚀产生含有大量自由电子的尾迹, 垂直于尾迹传播的无线电波会产生强的散射回波. 流星尾迹随大气风场一起漂移, 流星雷达可根据其反射回波信号的 Doppler 频移可以确定流星所在位置的大气运动径向速度[18~22]. 利用这个原理可以分析研究中间层-低热层大气风场和温度的相关信息, 例如: 背景风场和温度场、潮汐波、重力波和行星波等[7,8,13~15,17,22,23]. 富克流星雷达相关参数见表 1. 富克流星雷达由澳大利亚大气雷达系统公司(Atmospheric Radar Systems Pty. Ltd)设计制造, 详细的雷达硬件、软件系统设计可以参考文献[21].

1.2 数据及数据分析方法

富克流星雷达可探测的高度范围主要在 70~110 km, 观测到的流星数以 90 km 为中心呈高斯分布. 通常只有利用 80~100 km 之间观测到数量较多的流星才足以计算得到相对连续的风场数据. 本文采用的风场数据高度范围为 80~100 km, 步长为 2 km; 数据长度为 2009 年 2 月 1 日~4 月 20 日, 时间精度为 1 h.

本文采用谐波拟合的方法提取 2009 年春季富克上空中高层大气的背景风场、周日潮和半日潮的信息[24]. 拟合公式如下:

$$y(t)=\bar{y}(t)+\sum_{k=1}^{4}A_k\cos(\frac{2\pi}{T_k}t-\phi_k)+R(t),$$

其中, t 为地方时, $y(t)$为风场数据, $\bar{y}(t)$ 为背景风, A_k 和 ϕ_k 为波动的振幅和相位, T_k 为波动周期(T_1 = 48 h, T_2=24 h, T_3=12 h, T_4=8 h), $R(t)$ 表示残留项. 周期为 24 h 和 12 h 的波动分别对应周日潮和半日潮. 拟合采用 4 d 的滑动窗口, 滑动步长为 1 d. 为保证拟合得到的波参数可信度高, 我们采用如下的规则计算波的振幅和相位: 每个拟合窗口中有效风场数据的比例不少于 3/4, 即所取 4 d 窗口中有效数据的个数≥72(3/4×(4×24))时才做拟合. 另外, 文中用到的潮汐月平均振幅和相位由以 1 个月为窗口的谐波拟合得到.

表 1 富克流星雷达主要参数

参数	参数说明
地理位置	19.5°N, 109.1°E
频率	38.9 MHz
峰值功率	20 kW
脉冲重复频率(PRF)	440 Hz
高度精度	2 km

2 分析结果

图 1 给出 2009 年 2 月 13~18 日、80~100 km 高度范围内富克流星雷达观测的经向小时风场, 图中空白处表示无探测数据. 从图中我们可以直观地看出, 风场中存在幅度很强的周日潮汐信号. 图 1 只给出了几天的风场是为了清晰展示其特点. 其实, 其他时间段的小时风场随时间和高度的分布特征与图 1 给出的时间段类似, 其图不一一画出, 揭示了富克上空中层顶区域大气周日潮幅度在春季很强.

2.1 周日潮、半日潮观测结果

文献[14]和[15]分别利用 Jicamarca (11.95°S, 76.87°W)和 Trivandrum (8.51°N, 771°E)流星雷达观测的风场研究了约 80~100 km 高度范围内周日潮和半日潮的变化. 他们的分析结果同样表明, 低纬地区的中高层大气潮汐波中周日潮占主要地位, 有明显的半年变化(在春秋分前后幅度较大), 且其经向分量振幅大于纬向分量. 现在我们来看富克周日潮汐和半日潮汐的振幅变化情况(图 2). 在 2009 年春分前后, 富克上空周日潮经向分量基本一直保持较强的振幅, 明显比纬向分量强很多, 经向分量最大振幅约为 100 m/s, 纬向分量最大振幅约为 65 m/s. 半日潮的幅度相对于周日潮要弱, 其最大振幅 53 m/s 出现在经向分量中, 半日潮的纬向分量相对于经向分量要弱. 这个结果与文献[14]和[15]的结论基本一致, 只是幅值上富克周日潮汐更强. 其实, 潮汐经典理论已经预示周日潮(1, 1)模最大幅值位于南北纬 20° 附近. 另外, 由图 2 可以看出, 富克周日潮汐经向分量和纬向分量的较强振幅出现的高度比较一致, 大约在 88~100 km 高度范围内.

图 3 给出富克周日潮汐和半日潮汐相位的变化.

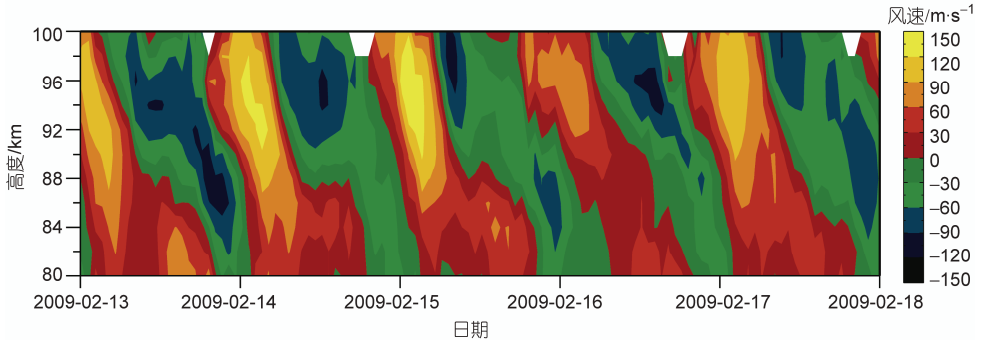

图 1　富克流星雷达观测的经向小时风场

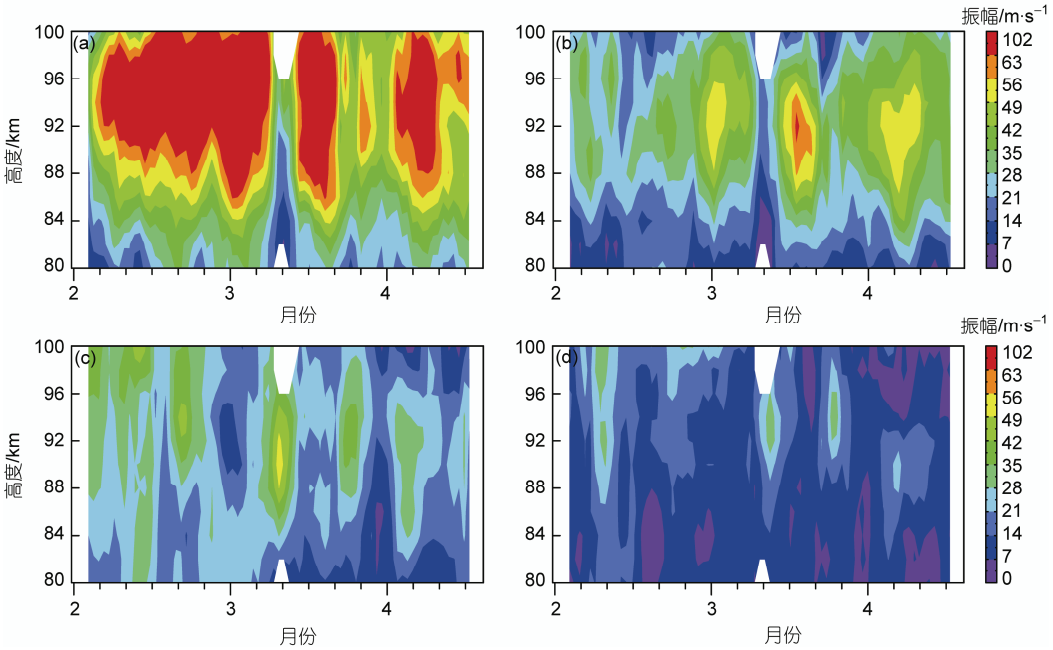

图 2　富克周日潮汐((a), (b))和半日潮汐((c), (d))的振幅

(a), (c) 经向分量; (b), (d) 纬向分量

所选择的 5 个高度上潮汐相位的变化基本可以反映其在 80~100 km 高度范围内的变化情况. 需要指出的是, 本文谐波拟合得到的相位反映波动达到最大幅值的时间. 由图 3 可以得到, 周日潮经向和纬向分量在垂直方向上达到最大幅值的时间先后顺序皆为: $t_{98\ \mathrm{km}}$ 先于 $t_{94\ \mathrm{km}}$ 先于 $t_{90\ \mathrm{km}}$ 先于 $t_{86\ \mathrm{km}}$ 先于 $t_{82\ \mathrm{km}}$, 这里 t 表示周日潮在某高度振幅达到最大值的时间. 据此可判断: 周日潮的相位在垂直方向上自上至下传播. 同样由图 3 可以判断: 半日潮的相位垂直向下传播(更直观的图示见图 6). 比较图 3 所示的周日潮和半日潮相位随高度的变化可以看出, 在垂直高度差 20 km 范围内, 周日潮汐的相位行进近一个周期, 而半日潮相位变化明显小于一个周期. 据此可定性判断两种潮汐波的垂直波长关系: $\lambda_{\text{半日潮}} > \lambda_{\text{周日潮}}$.

基本来看, 富克流星雷达观测的低纬地区中高层大气周日潮、半日潮的振幅及相位变化符合潮汐经典理论[25]和地基与卫星观测的观测结果[12,13~16].

图 4 利用线形图更清晰地展示出富克周日潮经向分量和纬向分量幅度随时间的变化情况. 在 2009 年 2 月 1 日至 4 月 20 日期间, 周日潮的经向和纬向分量的振幅都大体存在 3 个峰值. 我们可以看到, 在第一个峰值和第二个峰值之间(即 3 月 10 日前后)短短几天内, 周日潮的振幅有很大起伏. 同时, 周日潮的相位也有相对明显的波动. 周日潮的短期变化引

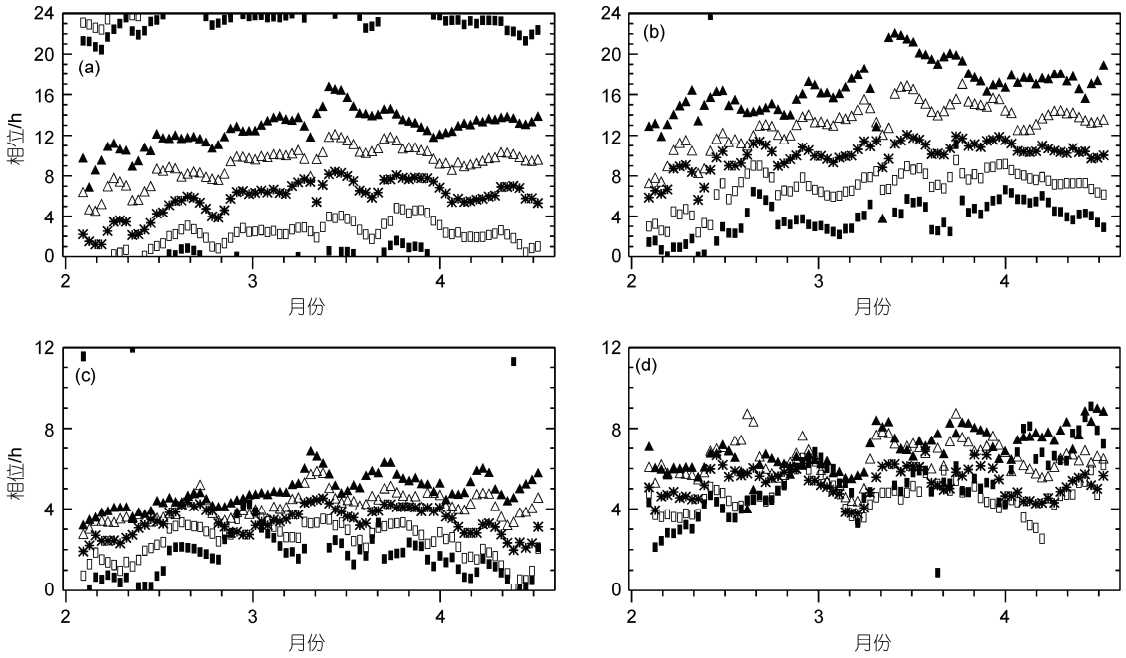

图 3 富克周日潮汐((a), (b))和半日潮汐((c), (d))的相位

(a), (c) 经向分量; (b), (d), 纬向分量. 实心三角, 82 km; 空心三角, 86 km; 星号, 90 km; 空心直棒, 94 km; 实心直棒, 98 km

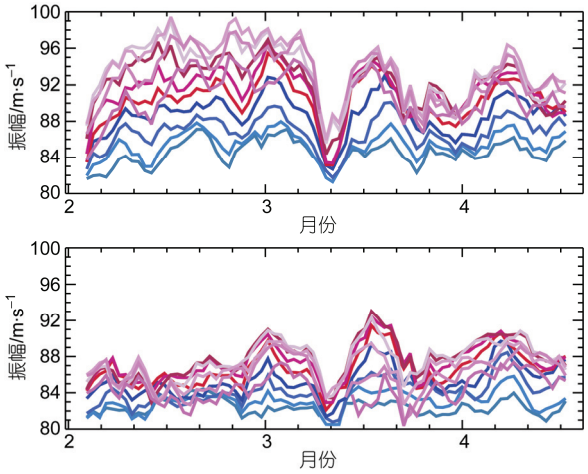

图 4 富克周日潮汐经向分量((a))和纬向分量((b))幅度随时间的变化

红色系列线条, 90~100 km; 蓝色系列线条, 80~88 km

起了很多学者的研究兴趣, 但目前, 导致这种短期变化原因还没有定论, 仍值得被关注. 限于篇幅, 本文暂不展开讨论富克周日潮短期变化的机制.

2.2 周日潮、半日潮观测结果与 GSWM02 模式的比较

GSWM (Global Scale Wave Model) 是 Hagan 等人[26]建立的模拟 0~125 km 地球大气大尺度太阳潮汐和行星波的数值模式. 在众多可模拟潮汐的模式中, GSWM 模式算是最优秀的一个, 因此影响力也最大. 学者们经常将大气潮汐的实测结果与 GSWM 模式做比较, 为 GSWM 模式的改进提供参考意见. 本文也将富克流星雷达观测的中高层大气潮汐与 GSWM02 模式的模拟结果进行了比较. 因 GSWM02 模式计算尺度的限制, 采用模式输出的与富克经纬度相近的 (18°N, 110°E) 点上的模拟结果, 高度范围约取为 78~103 km.

图 5 给出周日潮月平均振幅和相位随高度变化的比较结果. 我们可以看到, 在周日潮相位随高度变化的趋势上, 富克的观测结果与 GSWM02 模式符合得很好, 尤其是周日潮纬向分量的相位几乎与模式完全符合, 经向分量的相位比模式结果约晚 2 h, 但两条相位线的斜率基本一致. 周日潮相位随高度的变化预示着其垂直方向上的相位是向下传播的, 由此可判断其能量向上传播, 即 80~100 km 高度上的周日潮来自低层大气. 这个分析结果与其他研究是一致的[12,14,15,23]. 再看周日潮振幅随高度的变化, 除模式和观测的振幅数值有一定差以外, 两者给出的振幅随高度的变化趋势区别更大. GSWM02 模式结果显示经向分量的振幅在 80~100 km 范围内随高度而增加, 而

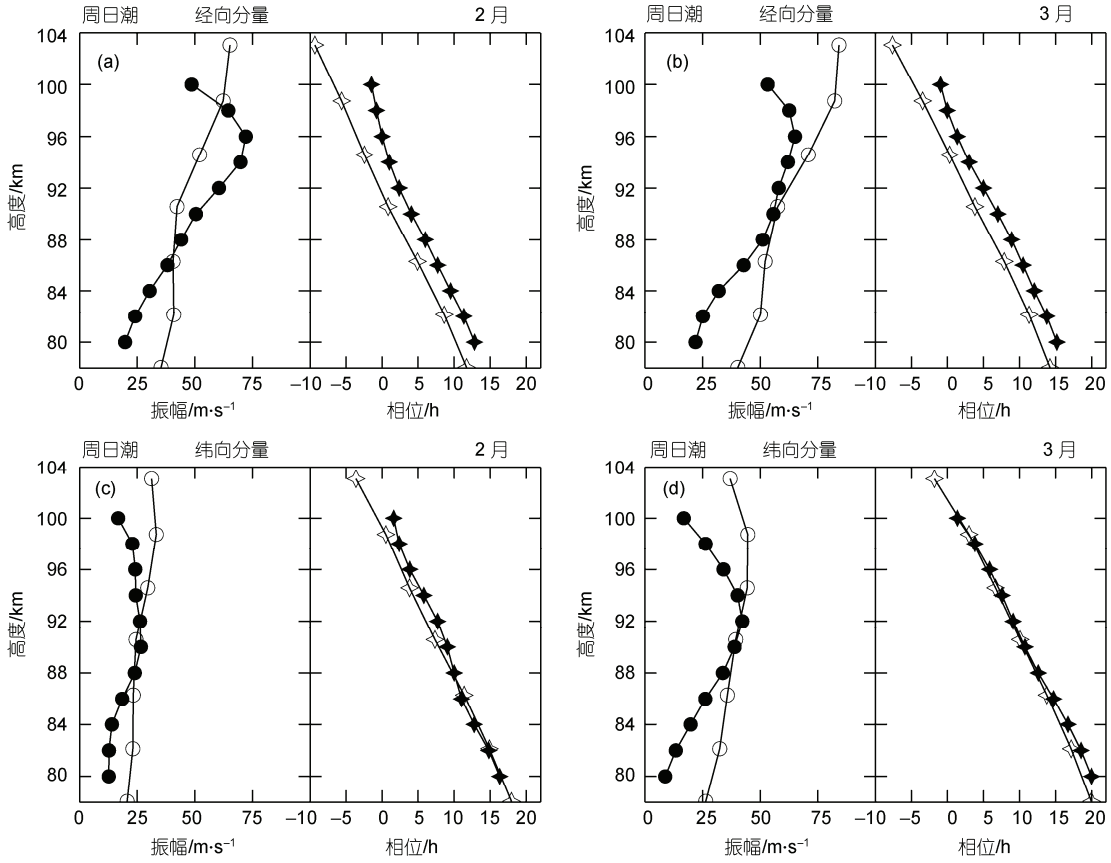

图 5 周日潮汐月平均振幅和相位随高度变化剖面图

实心圆和实心星, 富克流星雷达风场分析结果; 空心圆和空心星, GSWM02 模式输出结果

观测显示其振幅在 96 km 高度上达到最大值. 熊建刚等人[23]利用武汉(30.6°N, 114.5°E)流星雷达观测的周日潮与 GSWM00 做比较, 也得出结论: 观测结果和模式最大的不同是观测结果最大值通常出现在 90~95 km 之间, 而模式在 80~100 km 范围内随高度增加而增加, 无最大值. GSWM02 模式给出的与富克流星雷达观测的周日潮纬向分量振幅的最大值虽然都在 100 km 以下, 但两者出现的高度不一样, 相差约 6 km.

图 6 给出半日潮月平均振幅和相位随高度变化的比较结果. 比较相位来看, GSWM02 模式结果和观测在随高度变化的趋势上基本一致, 都反映了半日潮相位垂直向下传播, 但两者数值上的差相比周日潮大一些. 再关注半日潮振幅的情况, GSWM02 模式结果与观测结果相比, 在数值上明显小很多.

总的来说, GSWM02 模式给出的周日潮结果与观测基本符合, 而在半日潮的分析上, 模式与观测相差较多. Guo 等人[14]利用 Jicamarca (11.95°S, 76.87°W) 流星雷达观测的潮汐与 GSWM02 模式进行了比较, 也得出了相似的结论.

2.3 平均风场观测结果

富克上空 80~100 km 高度范围内 2009 年春季的平均风情况如图 7 所示. 纬向平均风: 东向风盛行于 2 月份的较低高度和 3, 4 月份的较高高度上, 2 月初 80 km 处的峰值(约 30 m/s)形态预示着更强的东向风出现在低于 80 km 的高度上; 西向风盛行于 2 月份的较高高度和 3, 4 月份的较低高度上, 在 2 月中旬的 92~100 km 高度上和 4 月中旬 80~84 km 高度上有两个峰值, 其中, 4 月中旬 80 km 处的峰值(约 –48 m/s)的形态预示着更强的西向风出现在低于 80 km 的高度上. 经向平均风: 除 2 月 10~15 日期间整个分析高度上出现的北向风外, 基本上整个 2~4 月份的较低高度处盛行北向风, 在较高高度处盛行南向风; 北向风最大值(约 18 m/s)出现在 2 月 20 日的 80 km 处, 南

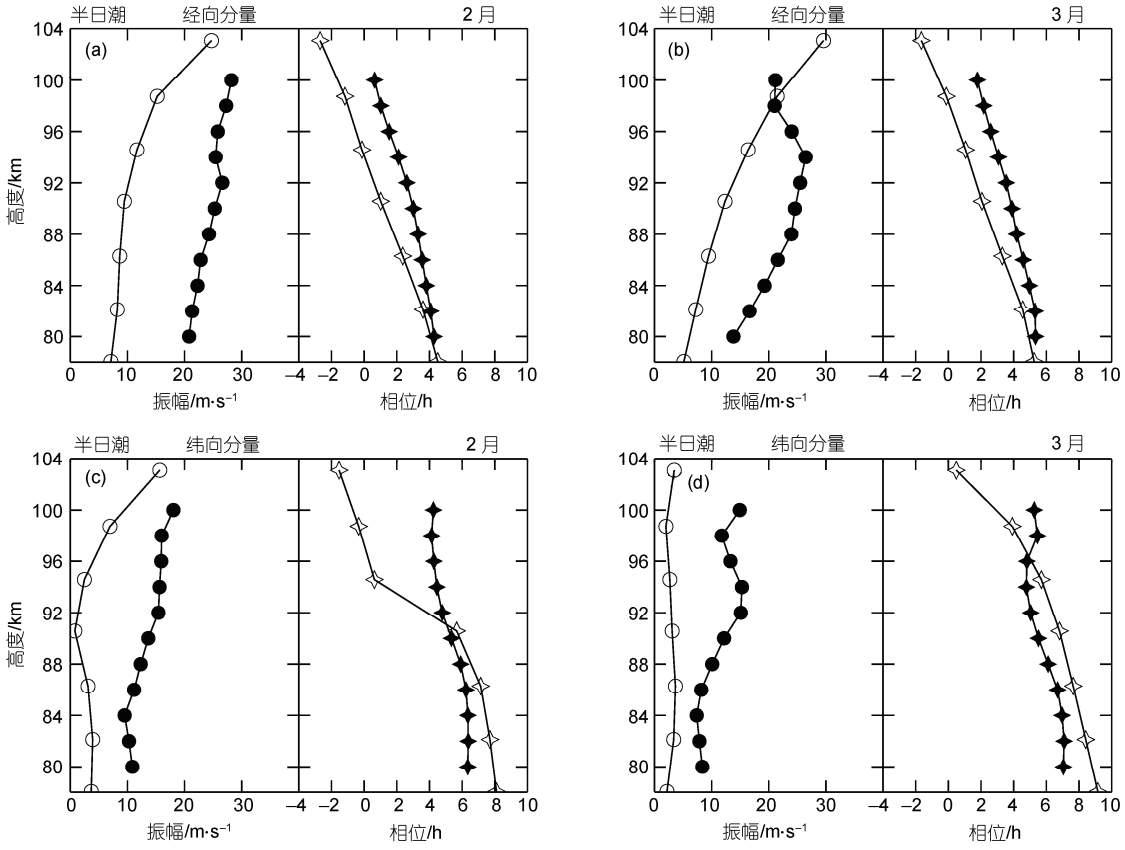

图 6 半日潮汐月平均振幅和相位随高度变化剖面图

实心圆和实心星, 富克流星雷达风场分析结果; 空心圆和空心星, GSWM02 模式输出结果

向风最大值(约 −33 m/s)出现在 4 月 4 日的 100 km 处.

3 结论

富克流星雷达是我国低纬地区新建的 1 台全天空加强型流星探测雷达, 利用该雷达观测的参数可以计算出中高层大气中的风场和温度信息. 本文采用富克流星雷达 2009 年 2 月 1 日~4 月 20 日观测的风场数据, 研究了低纬上空 80~100 km 高度范围内大气周日潮、半日潮和平均风随时间和高度的变化特征, 并与 GSWM02 模式给出的大气潮汐模拟结果进行了对比分析. 本文研究的主要结论如下.

2009 年春季, 富克上空中高层大气周日潮是幅度最强的波动. 周日潮经向分量的振幅明显大于纬向分量, 经向分量最大值约 100 m/s. 周日潮汐的相位在垂直方向上向下传播, 说明其波源位于低层大气. 对比半日潮相位的变化, 我们发现, 周日潮的垂直波长比半日潮短. 半日潮的振幅明显小于周日潮, 其经向分量相对于纬向分量幅度较强. 半日潮的相位在垂直方向上向下传播, 根据其相位随高度变化的特征可推断半日潮拥有较长的波长. 富克流星雷达观测的周日潮、半日潮的变化特征与潮汐经典理论和其他相近纬度的探测结果是一致的.

平均风的分布情况. 纬向平均风: 东向风盛行于 2 月份的较低高度和 3, 4 月份的较高高度上; 西向风盛行于 2 月份的较高高度和 3, 4 月份的较低高度上. 经向平均风: 除 2 月份 10~15 日期间整个分析高度上出现的北向风外, 基本上整个 2~4 月份的较低高度处盛行北向风, 在较高高度处盛行南向风.

将 GSWM02 模式给出的潮汐模拟结果与富克流星雷达的观测做对比分析, 发现该模式对周日潮的模拟比较成功, 尤其是其周日潮纬向分量的相位几乎与实际观测完全一致, 但 GSWM02 模式给出的周日潮的振幅有待于改进. 另外, GSWM02 模式对半日潮的模拟, 无论幅度或相位, 与观测结果相差较多. 在 GSWM02 模式与中纬度的观测潮汐对比分析中, 同样存在类似的结论[23].

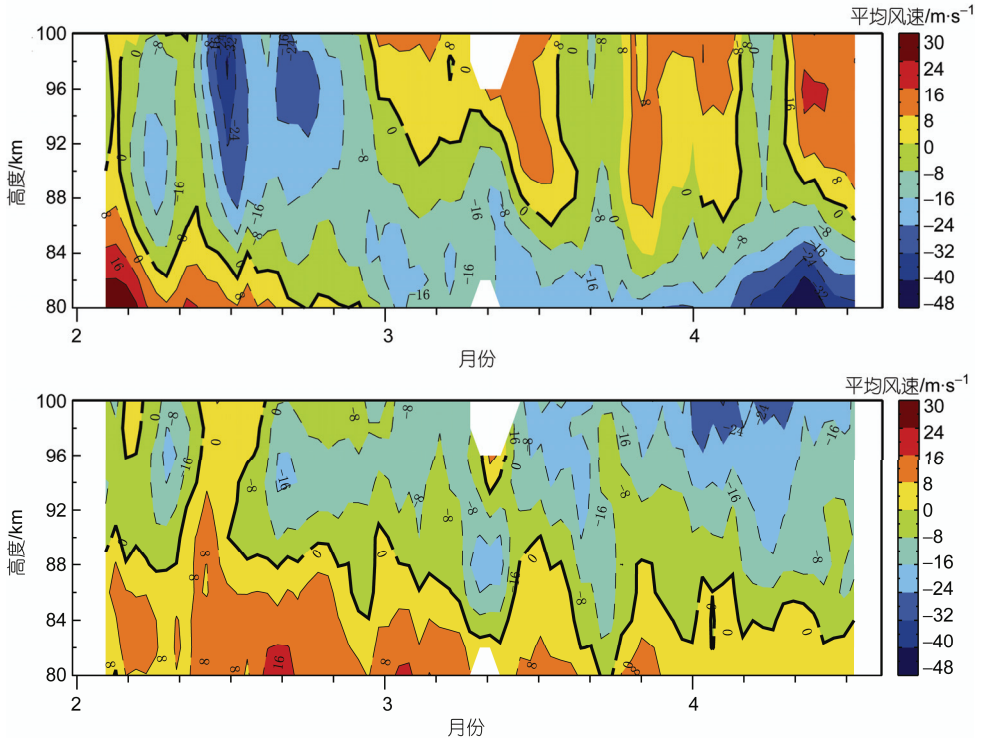

图 7　富克上空纬向平均风(a)和经向平均风(b)随时间和高度的分布

本文研究还发现, 2009 年 3 月 10 日前后几天, 富克上空大气周日潮振幅数值存在很大变化. 目前, 在中高层大气的潮汐研究中, 周日潮的振幅和相位的短期变化这一有趣现象仍值得我们进一步研究.

致谢　感谢 Marua Hagan 提供 GSWM02 模式输出的潮汐结果.

参考文献

1　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: 595—608

2　Manson A H, Meek C E, Teitelbaum H, et al. Climatologies 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　Thayaparan T, Hocking W K, MacDougall J. Middle atmospheric winds and tides over London, Canada (43°N, 81°W) during 1992—1993. 1995, 30: 1293—1309

4　Hocke K, Igarashi K. Diurnal and semidiurnal tide in the upper middle atmosphere during the first year of simultaneous MF radar observations in northern and southern Japan (45°N and 31°N). Ann Geophys, 1999, 17: 405—414

5　Yi F. Short-term variability and temporary structures of tides and mean wind in the polar summer mesosphere. J Atmos Solar-Terr Phys, 2001, 63: 749—757

6　Manson A H, Meek C, Hagan M, et al. Seasonal variations of the semi-diurnal and diurnal tides in the MLT: Multi-year MF radar observations from 2°–70°N, modelled tides (GSWM, CMAM). Ann Geophys, 2002, 20: 661—677

7　Pancheva D, Mitchell N J, Hagan M E, 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: 1011—1035

8　Xiong J, Wan W, Ning B, et al. First results of the tidal structure in the MLT revealed by Wuhan Meteor radar (30°40′N, 114°30′E). J Atmos Solar-Terr Phys, 2004, 66: 675—682

9　Zhang S, Yi F, Hu X. MF radar observation of mean wind and tides of winter mesopause (80—98 km) region over Wuhan (30°N, 114°E),

J Atmos Solar-Terr Phys, 2004, 66: 15—25
10 Portnyagin Y I, Solovjova T V, Makarov N A, et al. Monthly mean climatology of the prevailing winds and tides in the Arctic mesosphere/lower thermosphere. Ann Geophys, 2004, 22: 3395—3410
11 Chang J L, Avery S K. Observations of the diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere over Christmas Island. J Geophys Res, 1997, 102: 1895—1907
12 Vincent R A, Kovalam S, Fritts D C, et al. Long term MF radar observations of solar tides in the low-latitude mesosphere: Interannual variability and comparisons with the GSWM. J Geophys Res, 1998, 103: 8667—8683
13 Pancheva D, Mitchell N J, Younger P T. Meteor radar observations of atmospheric waves in the equatorial mesosphere/lower thermosphere over Ascension Island. Ann Geophys, 2004, 22: 387—404
14 Guo L, Lehmacher G. First meteor radar observations of tidal oscillations over Jicamarca (11.95°S, 76.87°W). Ann Geophys, 2009, 27: 2575—2583
15 Deepa V, Ramkumar G, Maria Antonia T. Meteor wind radar observations of tidal amplitudes over a low-latitude station Trivandrum (8.5°N, 77°E): Interannual variability and the effect of background wind on diurnal tidal amplitudes. J Atmos Solar-Terr Phys, 2008, 70: 2005—2013
16 Xu J, Smith A K, Liu H L, et al. Seasonal and quasi-biennial oscillation variations in the migrating diurnal tide observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED). J Geophys Res, 2009, doi:10.1029/2008JD011298/
17 Pancheva D. Quasi-2-day wave and tidal variability observed over Ascension Island during January/February 2003. J Atmos Solar-Terr Phys, 2006, 68: 390—407
18 Robertson D W R, Liddy D T, Elford W G. Measurements of winds in the upper atmosphere by means of drifting meteor trails. J Atmos Terr Phys, 1953, 4: 255—270
19 Hocking W K, Fuller B, Vandepeer B. Real-time determination of meteor related parameters utilizing modern digital technology. J Atmos Solar-Terr Phys, 2001, 63: 155—169
20 Cervera M A, Elford W G, Steel D I. A new method for the measurement of meteor speeds: The pre-t0 phase technique. Radio Sci, 1997, 32: 805—816
21 Holdsworth D A, Reid I M, Cervera M A. Buckland Park all-sky interferometric meteor radar. Radio Sci, 2004, 39, doi:10.1029/2003RS003014
22 熊建刚, 万卫星, 宁百齐, 等. 武汉上空中层顶附近大气环流的流星雷达观测. 科学通报, 2003, 48: 1102—1106
23 熊建刚, 万卫星, 宁百齐, 等. 武汉上空中层和低热层大气潮汐的流星雷达观测. 空间物理学报, 2003, 23: 361—370
24 Jiang G, Xu J Y, Franke S J. The 8-hour tide in the mesosphere and lower thermosphere over Maui (20.75°N, 156.43°W). Ann Geophys, 2009, 27: 1989—1999
25 加藤进, 著. 马淑英, 李钧, 译. 高层大气动力学. 北京: 科学出版社, 1988
26 Hangan M E, Forbes J M, Vial F. On modeling migrating solar tides. Geophys Res Lett, 1995, 22: 893—896