

武汉上空中间层和低热层大气风场的季节特征研究

朱正平, 蔡俊强*

(中南民族大学 电子信息工程学院, 武汉 430074)

摘要 利用武汉流星雷达(114.4°E, 30.6°N)的96个月观测数据,研究了武汉上空中间层和低热层区域水平背景风场、日潮、半日潮的季节性特征.结果表明:月平均纬向风以至日时存在强烈切变及夏季强东气流为特征.月平均经向风除冬季北向风外,其它季节皆表现为南向风.HWM14模型风中夏季纬向风和经向风明显弱于观测值.对潮汐分析表明,武汉地区潮汐以日潮为主.日潮、半日潮振幅均表现出强烈季节性变化,极大值于近春分和近秋分附近出现.与全球尺度波模式(GSWM)相比,观测结果普遍呈现出较小的日潮幅值和较大的半日潮幅值.这些研究结果表明:模式对北半球月平均风场和日潮汐描述,与实际观测值之间存在明显差异,还需加强对北半球的观测研究,来不断提高和完善目前模式.通过对武汉流星雷达观测数据的深入分析,为理解该地区大气动力学和模式改善提供了重要依据.

关键词 电离层;流星雷达;MLT动力学;平均风;潮汐

中图分类号 P352 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)03-0383-09

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250852

Investigation of seasonal characteristics of wind fields in mesosphere and lower thermosphere over Wuhan

ZHU Zhengping, CAI Junqiang*

(College of Electronics and Information Engineering, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract Using 96 months of observation data from the Wuhan meteor radar (114.4° E, 30.6° N), the seasonal characteristics of the horizontal background wind, diurnal tide, and semidiurnal tide in the middle and lower thermosphere over Wuhan have been studied. The results show strong shear in the monthly average zonal wind, with a prominent easterly flow in summer. The meridional wind is northward in winter and southward in other seasons. The HWM14 model winds are notably weaker than the observed values in summer. Tidal analysis reveals that diurnal tides dominate in Wuhan, with both diurnal and semidiurnal tide amplitudes exhibiting strong seasonal variation, peaking around the equinoxes. Compared to the Global Scale Wave Model (GSWM), the observed diurnal tide amplitude is smaller, while the semidiurnal tide amplitude is larger. These results highlight discrepancies between model simulations and observations, emphasizing the need for improved observations and model refinement. Valuable insights into regional atmospheric dynamics and model enhancement have been provided through an in-depth analysis of Wuhan meteor radar observation data.

Keywords ionosphere; meteor radar; MLT dynamics; mean wind; tide

从上个世纪初开始,雷达技术作为一种有效的地面观测手段,在流星观测领域已有50多年的历史.流星体消融后留下的彗尾中富含自由电子,这些电子能产生垂直于彗尾传播的强反向散射无线

电波,这一特性成为了雷达观测流星的基础^[1].尤其是宽带干涉雷达的出现,使得流星雷达在全天空观测中取得了突破性进展.自20世纪70年代以来,流星雷达不仅被用于天文观测,还实现对中间层和低

收稿日期 2024-11-18 * **通信作者** 蔡俊强,研究方向:电离层探测,E-mail:3014403984@qq.com

作者简介 朱正平(1968-),男,教授,博士,研究方向:电离层无线电传播,无线电探测新观测模式研究,E-mail:zpzh2007@sina.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41474135)

热层(the Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT)区域的大气环流、潮汐、行星波和重力波等现象进行深入研究^[2].这些研究不仅揭示了MLT区域的动力学特征,还为理解大气中的能量平衡及能量转移提供了关键数据和理论支持.尽管如此,现有的大气风场模型如CIRA和HWM14模型^[3]仍然存在一定的局限性,MLT区域也因此日益成为科学研究的焦点.这类研究工作的一个主要限制是地面观测系统网络的不对称性,现有观测数据存在区域性不均衡性.近十几年,大多数MLT区域的观测数据都来自北美和欧洲地区的中高纬度观测站,而其他地区则存在观测不足的情况^[4].特别是非洲和中国地区,平均风和潮汐观测都非常有限,这限制了对全球大气动态的全面理解.在这种背景下,武汉(114.4°E, 30.6°N)流星雷达的风速观测对于了解中国及低纬度向中纬度过渡区域的潮汐变化具有重要意义,并对当前国际社会努力完善MLT区域动力学的全球气候学做出重要贡献.

因此,本文研究了武汉流星雷达观测数据的中间层和低热层区域平均风及日潮、半日潮的季节性特征,并将观测结果与相关模型进行比较分析.通过对武汉流星雷达观测数据的分析,能够填补该地区观测的空白推动全球气候学的进一步完善,为改进现有大气风场模型提供新的数据支持.

1 武汉流星雷达与数据

武汉流星雷达是一种宽带全天雷达,其峰值功率为7.5 kW,占空比为10%,工作频率为38.7 MHz,天线配置与Resolute Bay相同^[5].该雷达是由澳大利亚大气雷达系统公司(ATRAD)制造的商用甚高频系统.雷达系统包含了一个天线阵列、一个发射机、一个接收机和两台用于雷达控制和分析的个人计算机.天线阵列由六副交叉偶极子天线组成,其中一副用于发射,五副用于接收,它们的臂为波长的2或2.5倍^[6].由于天线阵占地面积小,控制系统紧凑,雷达系统移动方便,可以安装在不同的情况下进行日常观测.该雷达还可以用于许多其他工作,其中武汉流星雷达的风场观测对于了解中国和中低纬度过渡地区的潮汐变化异常重要.自建造以来,其记录的日平均流星数约为2500至3000颗,几乎所有流星回波都出现在70~110 km的高度范围内,且峰值出现在91 km附近.回波率存在较大的日

变化,在凌晨时分达到峰值,而傍晚时分则较小.考虑到需要足够的流星回波,本文研究只计算了80~100 km高度区域的风场.

为获得武汉2011-2018年盛行风和潮汐参数的月平均值和季节平均值,首先将每个月或每个季节的数据合并为一个等效日,并累积到2小时×3千米的时间-高度窗口中.其次通过应用最小二乘拟合算法^[5]来推断每个窗口内的纬向风和经向风,即东-西向风和南-北向风.窗口以1小时和2千米的步长推进,从而在每个高度窗口上获得较为精准的24小时逐时平均风速序列.最后进行谐波分析,以获取平均风、日潮和半日潮分量的振幅和相位.相较于LIU等^[7]的数据分析方法,本文研究累积了更多的日潮汐数据,因此即使在傍晚时分,每个窗口内也有足够多的流星数据.为了更详细地研究日潮和半日潮的季节性特征,本文还计算了90 km高度的潮汐参数,采用了8年的时间数据,时间间隔为30天.

2 平均风的季节性特征

平均风场与大气动力学之间存在密切联系,风场分布和变化直接影响大气的稳定性、运动模式等.通过观测风场特征,可以为大气模型的改进提供重要依据.具体而言,准确的风场观测有助于优化大气模型、改进风场的季节性参数、修正模型与观测之间的差异,并增强对大气边界层与高层大气之间的研究,提升大气模型对天气与气候变化的模拟精度和预测能力.为详细分析武汉上空平均风场在春夏秋冬四季的变化规律,选取武汉流星雷达2011-2018年1月至12月的风场观测数据进行研究.图1给出了武汉上空和HWM14模型月平均纬向风和经向风随高度和时间变化,并将3-5月定义为春季,6-8月定义为夏季,9-11月定义为秋季,12-2月定义为冬季(后同).

由图1(a)可见,月平均纬向风主要受东向气流主导,在80~90 km高度范围的两至日(即夏至和冬至)期间存在强烈的垂直切变(风速或风向在垂直方向上随高度发生剧烈变化的现象).在夏季,每年的向东气流风速从80 km处的10 m/s左右上升到90 km处超过30 m/s,在2011-2012、2015、2017-2018年达到了40 m/s.相比之下,冬季纬向风在最低高度处达到风速最大值,并表现为负垂直梯度.在85 km以下,冬季东向风速可达20~30 m/s.在90 km以上,冬季纬

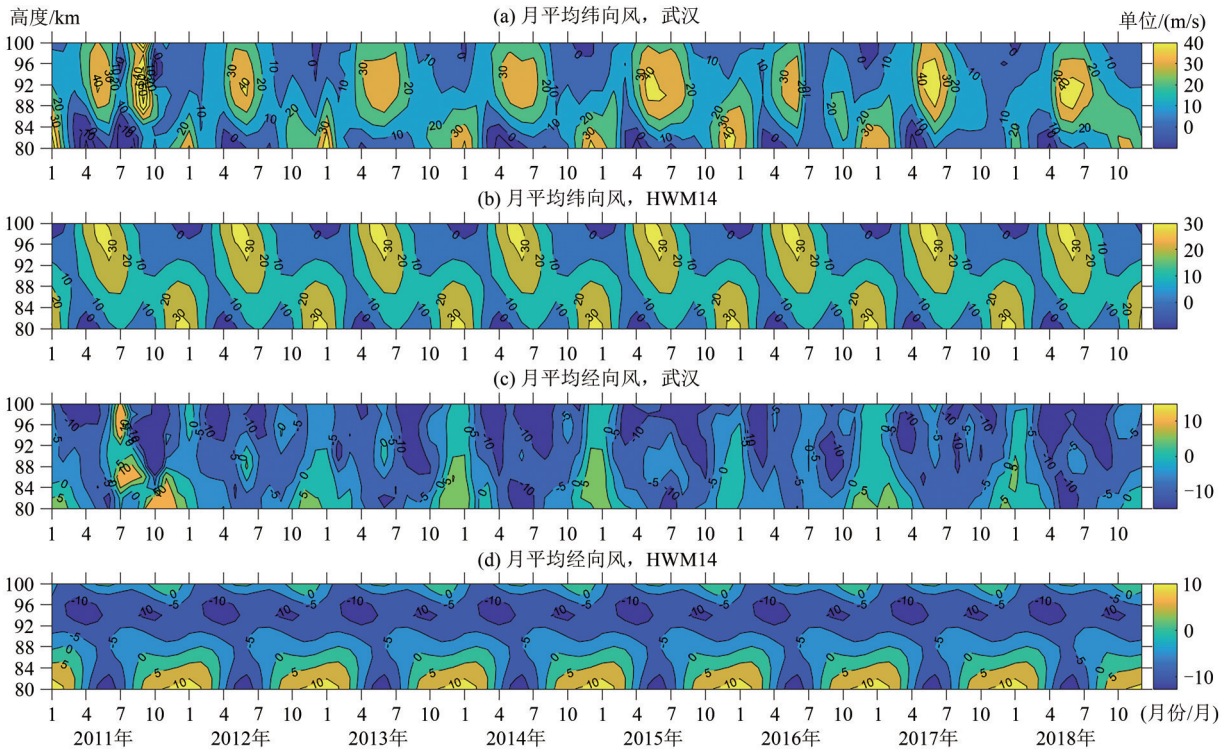


图1 2011年1月至2018年12月期间,武汉流星雷达测量的月平均纬向风(a)和月平均经向风(c);(b),(d)分别来自HWM14的30°N(北纬30度)的月平均纬向风与月平均经向风,其中向东和向北的气流为正

Fig. 1 Monthly mean zonal winds (a) and meridional winds (c) measured by Wuhan meteor radar from January 2011 to december 2018; (b) and (d) show the monthly mean zonal winds and meridional winds respectively at 30°N (North Latitude) from HWM14. eastward and northward flows are positive

向气流变得较为微弱.夏季和冬季中间层顶附近的纬向风切变被认为是由重力波的动量沉积引起的^[8].春秋分风表现为夏季和冬季风间的过渡阶段,其中3-4月的东风随高度下降逐渐降低,在86 km以上有微弱的东风(<10 m/s),而在85 km以下存在一个更强的西向“舌状”气流(>10 m/s),这似乎是春夏季节内,位于中下层大气中的一条向西移动增强的急流上部边界.在武汉,夏季中间层西向急流的反转高度在80 km以下.

连续几年观测到夏季东风强度相似,这表明夏季的年际变化不太明显.但冬季纬向风的年际变化性较大,这是由于平流层行星波活动造成的^[9-10].仔细研究纬向风,分析得出2013年、2015-2018年的春季过渡较为突然,秋季过渡则较为平缓.相比之下,2011-2012年、2014年的春季过渡较为平缓,秋季过渡则较为突然.

图1(b)展示了HWM14模型的月平均纬向风,将观测风与模型风比较,可以发现它们风型相似,但存在一些显著差异.在夏季,模型东风相比于观测风较弱,模型东风最大值略高于30 m/s,而观测风达到40~50 m/s.模型夏冬季纬向风的转换高度(即由东风向西风转换)较低于流星雷达观测.此

外,2011年春夏季在85 km以下观测到的强烈西向气流在模型结果显示中似乎要弱得多.

图1(c)显示为武汉流星雷达测得的平均经向风.数据显示冬季经向风是向北极地流动,而其他季节是向赤道流动,且经向风通常小于15 m/s.每年最强的向赤流动(略大于10 m/s)出现在2-5月、7-10月.2011年2月,这些向赤气流峰值首次于94~100 km处出现,并随着时间向下移动,最终在10月降至高度85 km附近.2012年,向赤气流随时间向下移动趋势并不明显,而到了2013年,最强向赤气流迅速随时间向下移动,出现在84~100 km区域内,2014年更是于3-8月涵盖整个中间层与低热层.随后三年向赤气流随时间向下移动有所放缓,2015年最大向赤气流于3月在95 km出现并在6-10月间移动至84 km以下及88~100 km.2016-2017年,最大向赤气流只在85 km以上出现.2018年向赤气流分布规律与2014年相似,3月95 km处首次出现最大向赤气流,5月最大向赤气流覆盖整个MLT层,直到7-8月才有所减弱,88 km以下向赤气流逐渐减少.相比之下,冬季向北极地气流表现出明显的负高度梯度,从80 km附近向北极方向5 m/s到100 km附近向赤道方向的微弱变化.2012年、2018年冬季,较低高

度的向北极气流较其他几年减弱.

图 1(d)展示了HWM14模型预测的北纬 30 度月平均经向风.观测数据与HWM14模型的风向总体模式相似,但也存在部分差异.首先,该模型冬季向北极气流表现强烈,风速大于 10 m/s,是观测值的 1.5 至 2 倍.此外,观测经向风流动并未呈现出模型中所显示的显著特征,在某些年份,这种流动可能并不那么明显.

3 日潮、半日潮的季节性分析与讨论

3.1 日潮

大气潮汐是大气动力学中重要的周期性现象,其对大气波动、天气系统、气候模式等具有显著影响.提取并研究潮汐特征不仅能更好地理解大气中各类波动的传递机制,还能通过特征差异优化模型的预测精度,推动大气动力学的发展^[11].图 2 提供了 2011-2018 年武汉 MLT 层日潮经纬向分量的幅值和相位时间-高度图.

从图 2(a)和(b)中可以看出,日潮振幅表现出强烈的季节性变化.纬向分量的振幅峰值(超过 35 m/s)出现在 3-4 月,经向分量的振幅峰值(超过 40 m/s)出现在 2-3 月.通过分析日潮结构,可以发现

日潮振幅的峰值高度在春季通常是高于秋季的.这表明春季日潮可以在中间大气层中破裂(即振幅达到极值并开始衰减)之前进一步传播到更高的中层大气中.在文献[12]也观测到了日潮振幅的春分点最大值,他们将这春分点最大值归因于平均纬向环流引起的重力波吸收和过滤,也就是春分时耗散的减少导致了这些最大值.综上所述,日潮振幅在春分前后达到极大值,在秋分前后达到次大值,而在至日(夏至和冬至)月份通常较弱.

日潮相位如图 2(c)和(d)所示.这些相位值对应武汉上空 MLT 层东向风和北向风峰值出现的 LT 值(LT=UT+8,LT=0 表示基准参考点,相位负数表示相位值提前于基准参考点,其中 LT 是本地时间 Local Time,UT 是世界时 Universal Time).由图可知,日潮相位的经纬向分量皆表现出向下相位传播,相位梯度呈现出 30~50 km 的垂直波长,表明其主要为日潮 S(1,1)模式.且在两个分量中,尤其是经向日潮中,出现明显的相位年变化,春分和秋分前相位变化十分迅速.在各高度上,日潮纬向相位 9-1 月比 3-7 月提前了 3~8 小时,而在经向分量则滞后了 8~15 小时.

图 3 给出了 90 km 高度处的日潮参数,共采用 96 个月时间数据,时间步长为 1 月.如图进一步证明日

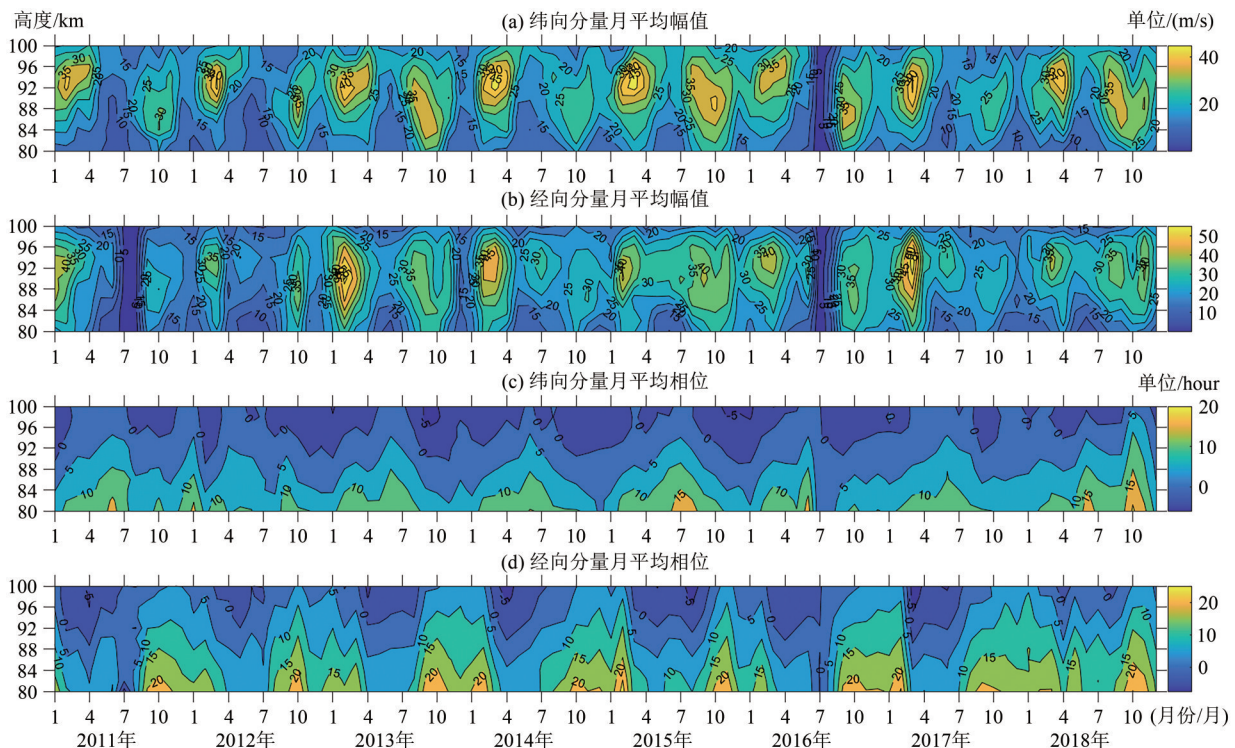


图 2 2011-2018 年武汉,日潮纬向分量的月平均振幅(a)与月平均相位(c),日潮经向分量的月平均振幅(b)与月平均相位(d)

Fig. 2 Monthly average amplitude (a) and monthly average phase (c) of the zonal component of the diurnal tide, as well as monthly average amplitude (b) and monthly average phase (d) of the meridional component of the diurnal tide in Wuhan from 2011 to 2018

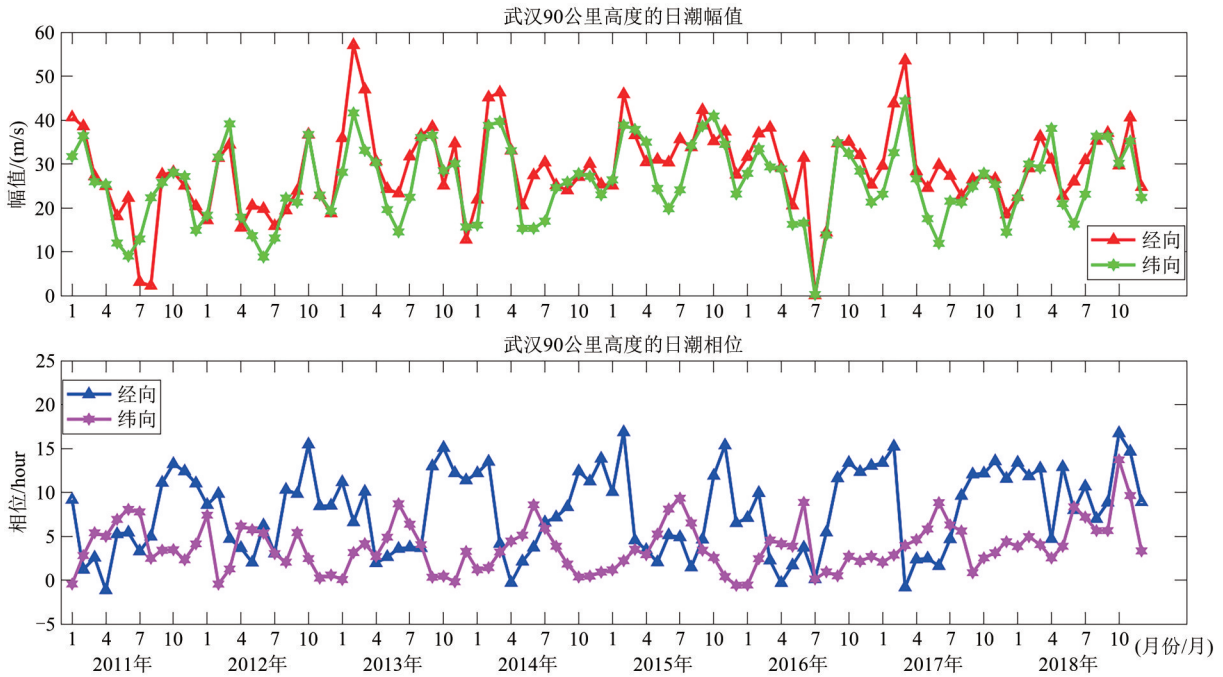


图3 2011-2018年武汉上空90公里高度的日潮幅值和相位

Fig. 3 Diurnal amplitude and phase at an altitude of 90 km above Wuhan from 2011 to 2018

潮振幅在两分点处极大,在两至点处极小.在90 km高度上,经向分量与纬向分量振幅高度重合,同时也观察到较为明显的相位双峰结构.在夏季,日潮经向相位比纬向相位提前0~6小时,相比之下在冬季却滞后了8~12小时.与此同时,日潮相位在前七年中,4月至次年4月存在强烈的准周期变化,而在2018年秋冬季发生较大异常,表明此时多个波之间存在相互干扰.

3.2 半日潮

如图4(a)和(b)分别给出半日潮纬经向分量的月平均振幅.在武汉,半日潮明显弱于日潮,这与日潮在低纬度地区较强,而半日潮在纬度约40度以上向极地方向占主导地位的发现相一致^[13].半日潮纬向振幅(0~25 m/s)通常小于经向振幅(5~35 m/s),且二者振幅在春分(3-5月)和秋分(8-9月)前后皆达到峰值.在秋冬交际时刻,振幅逐渐衰减,纬向分量降至10 m/s左右,经向分量降至15 m/s左右.值得注意的是,2018年5月观测到的经向最大振幅(88 km以上达到30~40 m/s),较前几年观测值的1.5倍左右,同一时期纬向分量的2倍多.

半日潮纬经向分量相位如图4(c)、(d)所示,从图中可以看出半日潮相位分布以向下传播为主.纬向分量的垂直波长通常较长(大于150 km).对于经向分量,冬季垂直波长较小(约为60 km),而其他季节则超过了150 km.根据经典潮汐理论^[14-15],这表明

冬季存在高阶模态(S(2,4)或S(2,5)),而其他季节为基本模态.半日潮经向平均相位比纬向相位提前约2小时.并且经向分量中发现明显的相位年变化,冬季相位比其他季节相位滞后3~6小时.从图中进一步可观察到这种相位年变化与垂直波长(或者说是潮汐模态的转变)的转变高度吻合.而对于半日潮纬向相位来看,年变化普遍较弱.

图5显示了90 km高度处半日潮振幅和相位变化.由图可知,纬向振幅通常小于经向分量.二者皆在5月和9月处达到极大值,在7月降至极小值.此外进一步分析可知,10月振幅下降与经向相位的快速推进时期相吻合,这表明在此期间基本模态和高阶模态之间存在干扰.半日潮经向分量中存在明显的相位双峰结构,相位在10月初和2月中旬出现相位突变,且春夏季提前于秋冬季.相比之下,对于半日潮纬向相位而言,相位变化不明显,始终保持较稳定状态.

3.3 观测结果与GSWM模式的比较

在本节中,将武汉流星雷达观测到的季节性平均潮汐参数与全球尺度波浪模式(GSWM, Global-scale Wave Model)^[16]的预测进行了比较.

图6展示了武汉2011-2018年与GSWM在日潮经纬向分量上的季节平均振幅和相位比较.由图可知,武汉观测值通常小于GSWM振幅(冬季除外).观测值与GSWM之间的最大振幅差出现在秋季90 km

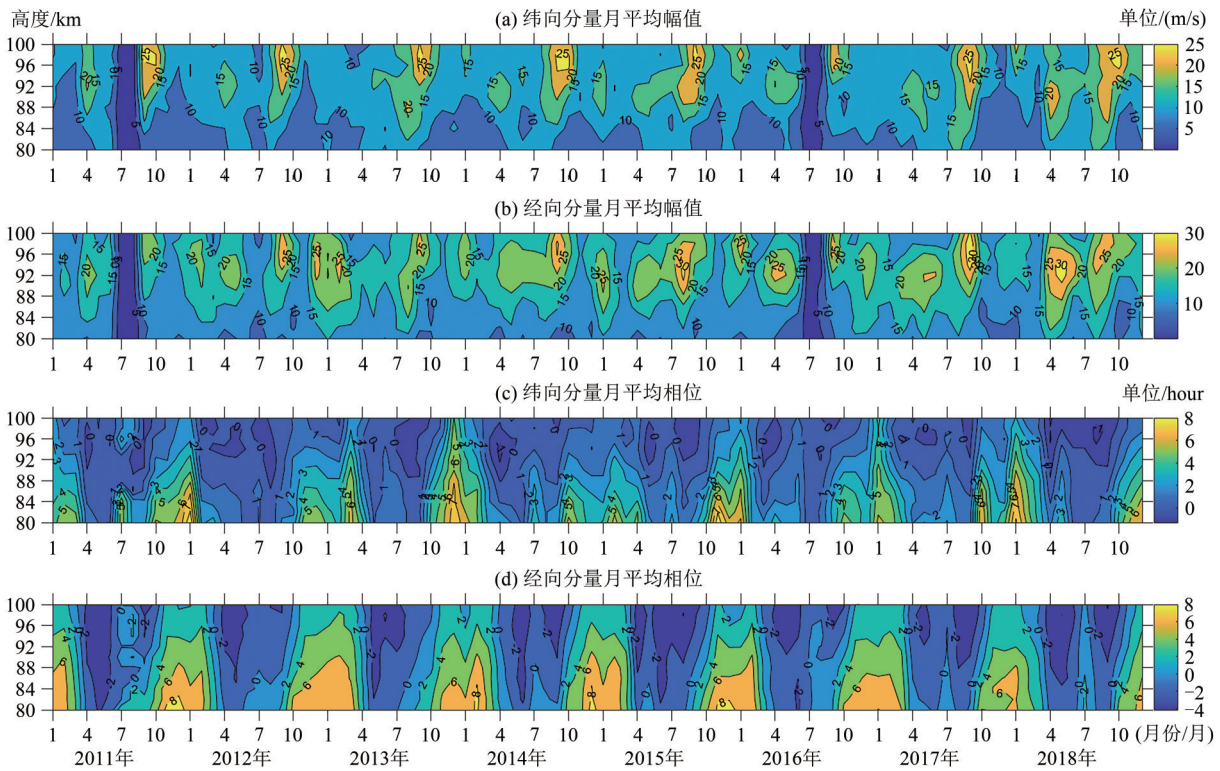


图4 2011-2018年武汉,半日潮纬向分量的月平均振幅(a)与月平均相位(c),半日潮经向分量的月平均振幅(b)与月平均相位(d)

Fig. 4 Monthly average amplitude (a) and monthly average phase (c) of the semidiurnal tide zonal component, as well as monthly average amplitude (b) and monthly average phase (d) of the semidiurnal tide meridional component in Wuhan from 2011 to 2018.

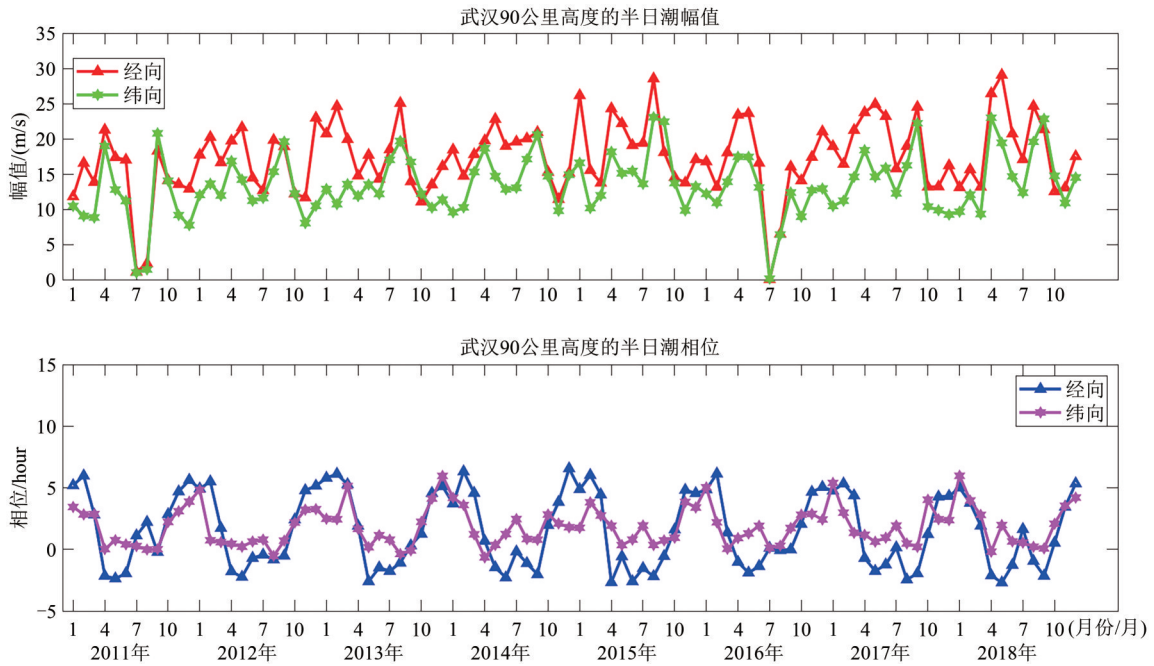


图5 2011-2018年武汉上空90公里高度的半日潮幅值和相位

Fig. 5 Amplitude and phase of the semidiurnal tide at an altitude of 90 km above Wuhan from 2011 to 2018

高度以上.在秋季98 km高度处,2011-2018年纬向观测值约为20 m/s,而GSWM振幅达到了45 m/s;对于经向分量,观测值约为25 m/s,而模式观测值为54 m/s.无论是观测结果还是GSWM都表明日潮振幅峰值均出现在分点前后,但观测值在春分时达到

极大值,而GSWM振幅峰值出现在秋分时.相较于全年峰值时间,从图6数据中也可分析出,春夏季的最大日潮振幅出现在92~98 km高度区间,而秋冬季出现在90 km高度处.GSWM预测结果在高度90 km以下振幅基本不变,在90 km以上振幅呈单调增加.

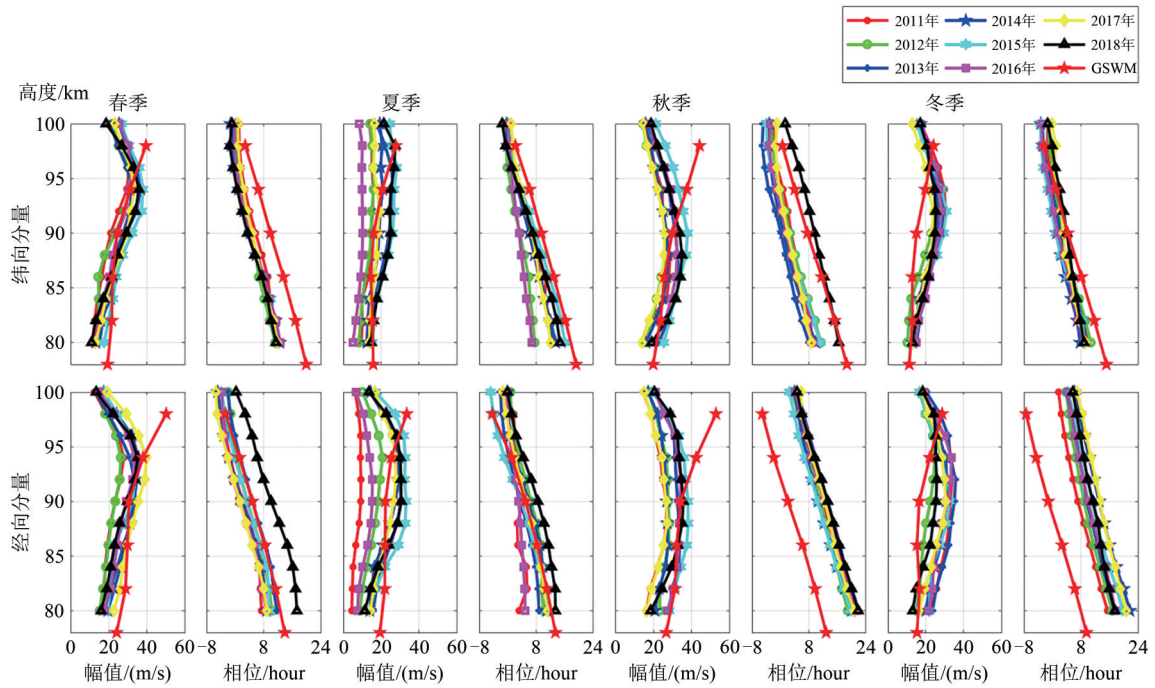


图 6 2011-2018年日潮幅值和相位的季平均值与GSWM模式比较

Fig. 6 Comparison of seasonal averages of daily tide amplitude and phase from 2011 to 2018 with the GSWM model

此外,图6中的相位比较结果显示,除经向分量秋冬季差异显著,其他季节所有高度处几乎保持一致,且观测到的相位逐年保持稳定.以相位一致性最佳的夏季为例,此时纬向相位差为0~4小时,经向相位差仅为0~3小时.最大相位差出现在经向分量的秋冬两季,GSWM相位比观测值提前约5~10小时.并且从图中还可以得出GSWM的相位梯度略低

于观测值,相应的垂直波长为约30 km,短于观测到的30~50 km.并且,观测值在95 km高度以上相位变化极小,表明其具有消逝特性,而GSWM并未预测到这一点^[17].

图7给出了半日潮季平均振幅和相位的类似分析并与GSWM比较.实测半日潮参数与GSWM的对比结果并不令人满意.由图可知,除夏季和冬季纬

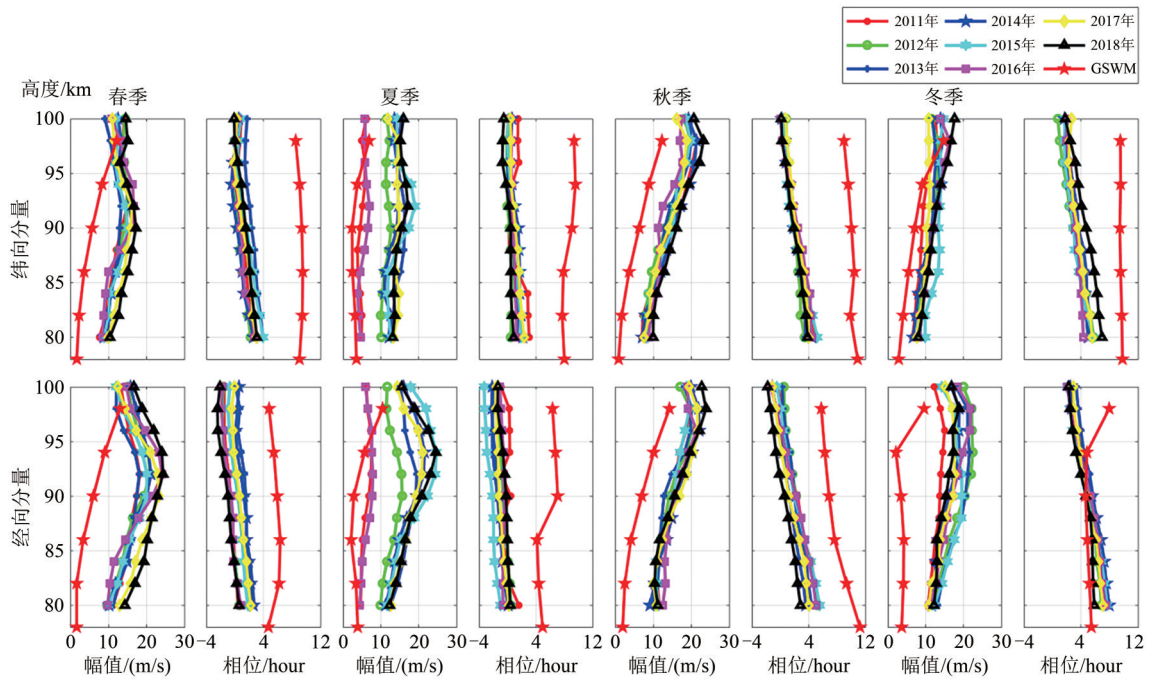


图 7 2011-2018年半日潮幅值和相位的季平均值与GSWM模式比较

Fig. 7 Comparison of seasonal averages of semi-diurnal tide amplitudes and phases from 2011 to 2018 with the GSWM model

向外,GSWM 振幅预测结果远小于半日潮振幅观测值.从图中进一步分析可得到 GSWM 在 100 km 高度以上达到振幅极大值,但半日潮振幅极大值通常出现在观测范围以内,即 90~100 km 之间.此外,图 7 中也将半日潮相位的经纬向分量与 GSWM 相位预测值进行比较.在冬季,经向相位位于 95 km 高度以下与 GSWM 预测值梯度变化相吻合,相位观测值具有非常良好的年稳定性.除经向冬季外,半日潮相位观测值普遍提前于 GSWM,且经向相位差要小于纬向相位差.经向相位差约低于 5 小时,而纬向相位差则在 5~10 小时之间,同时二者相位差随高度呈正相关变化.在大多数情况下,观测值和 GSWM 均表现出显著较大的垂直波长.然而,GSWM 在秋季的经向相位中出现了较短的垂直波长,而观测值则在冬季的经向相位中呈现较短的垂直波长.此类差异并未同时出现在它们的对应点中.

4 总结

利用武汉流星雷达(114.4°E, 30.6°N)2011-2018 年的观测数据,研究了武汉上空 MLT 层 80~100 km 区间的水平平均风场和潮汐特征,并与相关模型比较得出如下结论.

(1)平均纬向风以东向为主,在较低 MLT 层高度上,3-4 月偶现西向风.在夏季中间层顶附近有强烈的纬向风切变.平均经向风在冬季向北极方向流动,其他季节向赤道方向流动.

(2)风场观测值与 HWM14 模型相比,风型的相似度较高,但 HWM14 模型中夏季东向风强度明显弱于观测结果,冬季经向风向北极风速强于观测风值.

(3)在两个潮汐分量中,日潮和半日潮都具有春秋分极大值和至日极小值.纬向分量日潮振幅在 2014-2015 年 3-4 月间达到八年极大值,超过 45 m/s,经向分量日潮振幅在 2013、2017 年 2-4 月间达到八年极大值,超过 55 m/s.日潮相位和半日潮经向相位中都发现了明显的双峰结构,且相位分布主要都是以向下传播为主.

(4)将观测到的日潮汐参数与 GSWM 结果进行比较发现,日潮振幅观测值通常小于模型预测值,而半日潮振幅观测值大于模型预测值.GSWM 结果表明,日潮和半日潮振幅模型值与高度呈正相关性,然而振幅观测值通常在较高高度处减小.日潮

相位观测值与 GSWM 相位吻合度较高,半日潮相位观测值在各高度上普遍小于 GSWM 相位值.

这些分析与发现对于武汉地区深入理解大气动力学过程、改进大气模型以及预测大气潮汐等提供重要的参考依据.

参 考 文 献

- [1] LUO J, ZHANG S, ZHOU Q, et al. Diurnal and seasonal variations of sporadic meteors radiant observed by meteor radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, 129(12): e2024JA032889.
- [2] 易稳. 基于流星雷达的中间层—低热层天气与气候现象的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [3] DROB D P, EMMERT J T, MERIWETHER J W, et al. An update to the horizontal wind model (HWM): The quiet time thermosphere[J]. *Earth and Space Science*, 2015, 2(7): 301-319.
- [4] 周宝柱. 基于流星雷达观测全球中间层和低热层大气特征研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [5] HOCKING W K, FULLER B, VANDEPEER B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63(2-3): 155-169.
- [6] MARSH S H, BENNETT R G T, BAGGALEY W J, et al. Measuring meridional mesospheric winds with the AMOR meteor radar[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, 62(13): 1129-1133.
- [7] ZHAO G, LIU L, NING B, et al. The terdiurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere over Wuhan (30°N, 114°E) [J]. *Earth, Planets and Space*, 2005, 57(5): 393-398.
- [8] HOLTON J R. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39(4): 791-799.
- [9] TSUDA T, NAKAMURA T, KATO S. Mean winds observed by the Kyoto meteor radar in 1983-1985 [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1987, 49(5): 461-466.
- [10] 朱正平, 高紫枫, 罗伟华. 中国低纬地区行星波扰动观测及其对 SF 的影响[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(1): 81-88.
- [11] 周旭, 乐新安, 陈桂万. MJO 与中间层-低热层风场潮汐 DE3 季节内变化性的关联[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(12): 4817-4827.
- [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]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D8): 8667-8683.
- [13] BURRAGE M D, HAGAN M E, SKINNER W R, et al. Long-term variability in the solar diurnal tide observed by HRDI and simulated by the GSWM [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(19): 2641-2644.
- [14] KATŌ S. *Dynamics of the upper atmosphere* [M]. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 1980.
- [15] FORBES J M. Atmospheric tide: 2. The solar and lunar semidiurnal components [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, 87(A7): 5241-5252.
- [16] HAGAN M E, BURRAGE M D, FORBES J M, et al. GSWM-98: Results for migrating solar tides [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, 104(A4): 6813-6827.
- [17] MANSON A, 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 to 70°N, and the GSWM tidal model [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61(11): 809-828.

(责编&校对 雷建云)