

GAO Jie, WANG Hui, ZHANG Kedeng, ZHENG Zhichao, HE Yangfan, SUN Luyuan, ZHONG Yunfang. Longitudinal Difference of Equatorial Thermospheric Zonal Wind's Reversal Time and Speed (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(2): 255–263. DOI:10.11728/cjss2022.02.210329039

赤道地区热层纬向风反转时间和风速 的经度分布差异*

高 洁 王 慧 张科灯 郑志超
何杨帆 孙璐媛 仲云芳

(武汉大学电子信息学院空间物理系 武汉 430072)

摘 要 使用 CHAMP 卫星观测资料和 TIEGCM 模拟数据,研究了太阳活动低年春秋分季节赤道地区热层纬向风的反转时间和风速在经度分布上的差异,重点分析了离子拖曳力在不同地磁场构型下对纬向风速地理经度分布的影响。研究发现,纬向风一般在清晨时段由东向转为西向,下午时段由西向转为东向,但反转时间存在明显的经度差异,最大经度差异可达 1.8 h,这主要是由于低层大气非迁移潮汐波的影响。非迁移潮汐波使下午时段的风场反转时间提前约 2 h,更符合卫星观测结果;但其对清晨时段风场反转时间的影响不明显,从而使模拟结果与观测结果有较大差异。纬向风的经度四波结构主要来源于低层大气潮汐,但离子拖曳力对不同地磁场构型下的纬向风四波结构有一定的影响。分析发现,除低层大气非迁移潮汐波的作用外,离子拖曳力对纬向风四波结构的贡献约为 25%,白天时段的贡献高于夜晚时段,在理想偶极子磁场时的贡献高于真实地磁场。

关键词 纬向风经度差异,离子拖曳力,CHAMP 卫星,TIEGCM

中图分类号 P352

Longitudinal Difference of Equatorial Thermospheric Zonal Wind's Reversal Time and Speed

GAO Jie WANG Hui ZHANG Kedeng ZHENG Zhichao
HE Yangfan SUN Luyuan ZHONG Yunfang

(Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract Based on the Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) satellite observations and Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model (TIEGCM) simulations, the longitudinal variation of the reversal local time of the equatorial thermospheric zonal wind and its speed at equinoxes during solar minimum period are investigated. It is found that the zonal wind generally

* 国家自然科学基金项目(41974182)和中央高校基本科研业务费专项资金(2042021kf0208)共同资助

2021-03-29 收到原稿,2022-01-04 收到修定稿

E-mail: 057gj@whu.edu.cn. 通信作者 王慧, E-mail: h.wang@whu.edu.cn

turns from eastward to the westward in the morning and from westward to the eastward in the afternoon. However, there are obvious longitudinal differences in the reversal time, with the maximum longitudinal difference of 1.8 h. This is mainly due to the upward-propagating non-migrating tide in the lower atmosphere. The tide can advance the reversal time about 2 h in the afternoon, which is more consistent with the observation. However, it has no obvious effect on the reversal time in the morning, which makes the simulation result different from the observation. The longitudinal wave-4 structure of the zonal wind mainly comes from the non-migrating tide, but the ion drag contributes to the wave-4 structure of the zonal wind. The quantitative analysis shows that the contribution of ion drag to the wave-4 structure is about 25%. The ion drag effect is larger in the daytime than the nighttime, and larger in the frame of the idea dipole field than the real IGRF field.

Key words Longitudinal difference of zonal wind, Ion drag, CHAMP, TIEGCM

0 引言

在电离层-热层耦合系统中,热层风扮演了重要角色。在地磁倾角和地磁偏角不为零的区域,热层风能够驱动等离子体沿磁力线运动,使电离层抬升或下降。热层中性成分与离子碰撞会影响电离层-热层系统的动量和能量传输过程,进而影响电离层电子密度和热层风场的分布^[1,2]。因此,研究热层中性风,不仅有助于更好地了解电离层-热层耦合机理,而且可为航天器的安全运行提供有效支持。

近几十年来,有关纬向风与地方时依赖性的研究不断深入^[3-7]。Hedin等^[3]利用HWM87(Horizontal Wind Model)模型,发现赤道地区纬向风具有明显的日变化特征,午后至清晨纬向风为东向,其他时段为西向。在04:00 LT左右,纬向风从东向转为西向;在14:00 LT左右,从西向转为东向^[4,5]。Liu等^[6]利用CHAMP(Challenging Minisatellite Payload)卫星2002—2004年的纬向风数据,研究了赤道地区热层纬向风的太阳活动、地磁活动和季节依赖关系。研究结果表明,在春秋分季节,随着太阳活动增强,地磁平静期的东向风峰值逐渐增加,峰值出现时间从18:00 MLT推迟到20:00 MLT,但西向风的峰值逐渐减弱。太阳活动水平对西向风转为东向风的时间无明显影响,基本上维持在12:00—13:00 MLT之间,但对东向风转为西向风的地方时影响较大。在太阳活动低年,东向风转为西向风发生在01:00 MLT;在太阳活动高年,则延迟到04:00—05:00 MLT。地磁活动对赤道地区纬向风的影响不显著。赤道地区的纬向风,特别是在太阳活动高年,其幅度和地方时分布

有明显的季节依赖关系。在春秋分季节,东向风峰值出现在18:00 MLT,而夏季的东向风峰值出现在21:00—03:00 MLT。Liu等^[5]研究发现纬向风的地方时分布存在明显的纬度差异,例如东向风转为西向风的地方时在赤道地区大约为05:00—06:00 MLT,而在 $\pm 30^\circ$ 地磁纬度(MLat, Magnetic latitude)则为02:00 MLT。Miyoshi等^[7]利用Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy模型研究了赤道地区纬向风的日变化特征,研究发现:东向风峰值($220 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)出现在19:00—19:30 LT,之后东向风幅度减弱,直到03:00—03:30 LT出现一个次峰,该次峰与日潮汐和半日潮汐的叠加有关;西向风转为东向风的时间约在14:00—15:00 LT。与400 km高度相比,200 km高度的东向风转为西向风的时间延迟了2 h,约为08:00 LT。Miyoshi等还考察了压强梯度、离子拖曳力和粘滞力在纬向风地方时分布中的重要作用,发现离子拖曳力和粘滞力主要起阻滞作用,其中粘滞力阻力约占离子拖曳的1/4。以往的研究很少关注非迁移潮汐波对纬向风转向时间的调节作用,这是本文的研究重点之一。

除了地方时变化,赤道热层风具有明显的经度分布,例如三波和四波结构^[8-12]。Häusler等^[8]首先对400 km高度纬向风(-10° — 10° MLat)的经度结构进行了统计分析,提出纬向风的地理经度变化并不依赖于太阳活动,而是受地磁活动的影响,特别是在夜间。在春秋分季节,赤道地区纬向风呈现出明显的四波结构。以往的研究认为,该结构可能与受潜热释放激发的向东传播纬向波数为3的非迁移潮汐分量(DE3, eastward propagating diurnal tide with zonal

wavenumber 3)有关。Oberheide 等^[9]对潮汐波在电离层-热层系统中的作用进行了深入研究,发现热层温度场与低层风场的经度结构一致,其驱动因素是由对流层向上直接传播的潮汐波。太阳周期效应在 E 层以上变得更加显著,因此 F 层参数的四波结构将随着太阳活动的减弱而变得更加明显。Häusler 等^[10]利用 2002—2005 年 CHAMP 卫星观测的纬向风数据研究了风场四波结构的年变化和非迁移潮汐波不同分量造成的影响。研究发现,四波结构在全年都存在,只是强度和相位发生了变化,而且最强的四波结构出现在 7—9 月。除 12 月至 2 月外,其他月份均有不同强度的东向相移,且 DE3 的年变化趋势与之一致。另外,由于不同潮汐分量在四波结构中的累积效应不同,四波结构的强度也有明显的地方时差异。Häusler 等^[11]发现,热层中的 DE3 分量随着太阳活动的减弱而增加,这是由于太阳活动最小时潮汐耗散最小。除了热层纬向风,电离层-热层系统的许多其他参数也表现出类似的四波经度结构,例如离子和电子密度^[13,14]、赤道电流^[15-17]、电场^[18]等。Lühr 等^[12]强调离子拖曳在纬向风四波结构中具有重要作用,但没有对其影响程度进行定量分析。已有许多研究利用 TIEGCM(Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model)再现了纬向风的四波结构^[11,19]。本文利用 TIEGCM 定量分析离子拖曳力在不同地磁场构型下对赤道地区纬向风四波结构的影响。

通过分析低层大气向上传播的非迁移潮汐波对纬向风反转时间的影响,可以更好地了解赤道地区纬向风反转时间经度差异的物理原因,从而更好地理解电离层-热层耦合中大气潮汐波的作用。定量分析不同地磁场构型下离子拖曳力对赤道纬向风四波结构的影响,对于阐明四波经度结构的物理激发机理具有重要意义。

1 CHAMP 数据及 TIEGCM 模型

CHAMP 卫星于 2000 年 7 月发射升空,并于 2010 年 9 月停止运行。其轨道倾角为 87.3° ,初始高度为 460 km ^[20],此后轨道高度随时间逐渐下降,其中 2005 年大约在 400 km ,2008 年则大约在 300 km 。因为在中低纬地区,CHAMP 卫星的轨道为南北经向,所以观测横跨轨道的风是东西向的,即相当于纬

向风。利用 CHAMP 卫星上携带的三轴加速度仪测量的数据,可以反演得到热层纬向风(采样精度为 10 s ,误差小于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。CHAMP 在全球范围内的连续观测为深入了解热层纬向风的时空分布提供了数据支持。

本文选取 2001—2008 年间太阳活动指数($F_{10.7}$)小于 100 sfu 的 CHAMP 跨轨道风数据,其平均 $F_{10.7}$ 为 78 sfu ,用于研究太阳活动低年的纬向风。由于春分季节纬向风的结构与秋分季节比较相似^[21,22],这里对春秋分季节的风场合并进行研究。CHAMP 卫星需要 131 天才能覆盖所有地方时,所以在筛选出太阳活动低年数据的基础上,选取以春分(3 月 21 日)和秋分(9 月 21 日)为中心的 131 天的纬向风,用于研究纬向风的地方时和地理经度变化。

TIEGCM 是热层与电离层耦合的三维时变物理模型,其主要通过求解中性成分和离子成分的动量、能量和连续性方程,来计算电离层-热层耦合系统的时空变化^[23]。TIEGCM 的水平分辨率为地理纬度(Geographic Latitudes, GLat) 2.5° 和地理经度(Geographic Longitude, GLon) 2.5° 。模型的输入参数分别为:半球能量 18 GW ,跨极盖电势 30 kV 以及 $F_{10.7}$ 指数 78 sfu 。在模型低边界输入 SABER/TIDI(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry/TIMED-Doppler Interferometer)观测的非迁移潮汐波。该模型运行 20 天后达到准稳态,然后利用 24 h 后的输出数据进行理论分析。

在 TIEGCM 模式中,为研究低层大气潮汐波对赤道地区纬向风反转时间的影响,分别采用两种不同的设置:(1)不输入潮汐波,(2)输入非迁移潮汐波。另外,对原始纬向风和关闭离子拖曳力的纬向风作差,分析离子拖曳力对风场的影响。为研究地磁场结构的影响,采用了两种不同的地磁场模型:一种是由 IGRF 定义的真实地磁场,另一种是地磁轴与地理自转轴相重合的偶极子磁场。

2 结果

2.1 转向时间经度差异

在下午到清晨,纬向风是东向风,而在其余当地时间为西向风。由东向转为西向发生在清晨时分,由西向转为东向则发生在下午时段。图 1 给出了赤道

地区纬向风转向时间随经度的分布,黑色曲线表示 CHAMP 卫星的观测结果,蓝色曲线和红色曲线分别表示在 TIEGCM 模拟低边界输入非迁移潮汐波以及不输入任何潮汐波分量的结果。由图 1 可以看出,CHAMP 卫星观测的东向风转为西向风大约发生在 05:00 LT,西向风转为东向风大约发生在 14:00 LT。在清晨和下午,CHAMP 卫星观测到的纬向风转向时间均显示出明显的经度差异,最大差异为 1.8 h。例如:在清晨,−120° GLon 区域纬向风从东向转为西向大约发生在 04:30 LT,但是 130° GLon 区域纬向风从东向转为西向则延迟到了近 06:00 LT;在下午,−30° GLon 区域纬向风由西向转为东向发生在 13:00 LT,而 30° GLon 区域纬向风从东向转为西向则推迟到 14:30 LT。由图 1 中红色曲线可以看出,在模型低边界没有输入大气潮汐波时,纬向风在清晨和下午转向时间的经度差异几乎可以忽略,即早晨纬向风由东向转为西向的时间稳定在 04:00 LT 附近,这比 CHAMP 卫星观测的时间要早 1 h 左右,而下午纬向风由西向转为东向的时间稳定在 16:00 LT 附近,比 CHAMP 卫星观测结果要晚 2 h 左右。

在全球尺度下,低层大气潮汐波影响着热层风场的时空分布^[24]。由图 1 中蓝色曲线可以看出,当 TIEGCM 低边界输入非迁移潮汐波时,清晨和下午

时间段纬向风转向时间的经度差异均表现出了显著的四波结构,纬向风的四个波峰分布在−150°, −60°, 30°和 120° GLon。纬向风在清晨时的四波结构波幅比下午时弱。与 CHAMP 卫星观测值相比,早晨纬向风从东向转为西向的时间较早,但与不输入潮汐波的结果相当;除了某些相位上的差异外,下午纬向风无论在幅度上还是从西向风转为东向风的时间都与 CHAMP 卫星观测值类似,这表明非迁移潮汐波对下午反转时间的提前是有效的,而对清晨反转时间的后移作用则较弱。结果表明,下午时段非迁移潮汐波可以减小模型与观测结果的差异,而上午的影响并不显著。而早晨和下午的纬向风反转时间经度差异,一定程度上是由非迁移潮汐波来调节的。

2.2 纬向风经度分布

热层纬向风的主要驱动力包括压力梯度力、粘滞力、离子拖曳力、科里奥利力^[25]。在这些驱动力当中,离子拖曳力的影响不容忽视,其强弱主要取决于电子密度及其与中性成分的速度差。地磁场构型、日照和高纬极光加热在经度上的差异影响电子密度的分布,也会导致离子拖曳力的经度变化^[7,25,26]。本文在 TIEGCM 中分别开启和关闭中性粒子动量方程中的离子拖曳力,用于研究离子拖曳力对热层纬向风四波结构的影响。

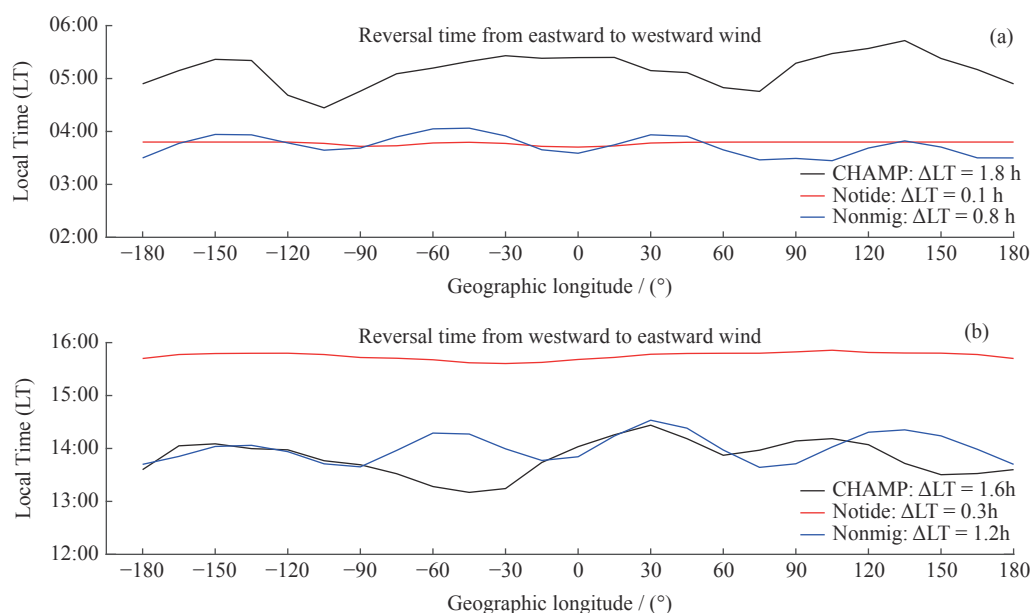


图 1 赤道地区纬向风反转时间的经度分布。 ΔLT 为反转时间在不同经度的最大差异

Fig. 1 Longitudinal variation of the reversal time of the equatorial zonal wind. ΔLT is the maximum differences in the reversal time in different longitude

在 IGRF 地磁场中, 利用 TIEGCM 模拟的赤道区域纬向风随地理经度与地方时的分布如图 2 所示。为了更好展示风场的经度差异, 这里去除了每个地方时扇区的经度平均值。图 2(a) 为原始纬向风的经度分布。从图 2(a) 可以看出, 在不同的地方时, 纬向风都具有四波结构, 且随着地方时的变化其相位也发生了变化。四波结构的相位在 24 h 范围内向东偏移 90° , 与 Häusler 等^[10] 的结果一致。Lühr 等^[16] 研究发现, 24 h 范围内非迁移潮汐 DE3 向东传播 90° 。因此, DE3 波是引起纬向风四波结构的主要原因。另外, 四波的强度在 24 h 内也有明显的变化, 例如在 -75° GLon, 04:00 LT 时纬向风变化达到 $13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 14:00 LT 时风速变化下降到了 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 19:00 LT 时又再次增加到了 $19.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该现象可能是由于不同潮汐分量对四波结构的累积效应造成的^[10]。例如: DE2 会引起三波结构; 三波和四波叠加时, 会导致不同当地时间纬向风幅度的变化。

图 2(b) 为离子拖曳力引起的纬向风经度分布。可以看出, 纬向风在 24 h 内依然存在四波结构。但是, 与原始纬向风的经度分布相比, 其四波结构变得更复杂, 强度也明显减弱, 如图中白色数字所标识, 离子拖曳力引起的纬向风变化值约为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为原始纬向风(约 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的 $3/10$ 。通过对比图 2(a) 与 (b) 四波结构的相位分布, 以白天 06:00 LT 为例, 原始纬向风的四波峰值分布在 -180° , -90° , 0° 和 90° GLon, 与离子拖曳力引起的四波峰值所在经度相同。以夜晚 21:00 LT 为例, 原始纬向风四波结构的波峰分布在 -135° , -45° , 45° 和 135° GLon, 与离子拖曳力引起的波峰所在经度相同。因此, 不论是白天还是夜晚, 离

子拖曳力引起的纬向风四波结构与原始纬向风相位基本相同, 离子拖曳越强, 纬向风幅度越大, 四波结构越明显。这说明离子拖曳力有利于赤道地区风场的四波结构形成。

3 讨论

在赤道地区, 沿磁赤道而非地理赤道方向形成了极强的风急流^[5,27,28], 这表明了地磁场对热层大气的控制作用。赤道喷泉效应使赤道地区的等离子体上升到较高的高度, 并进一步扩散到较高的纬度, 从而在磁赤道两侧形成两个驼峰, 即赤道电离异常(Equatorial Ionization Anomaly, EIA)。EIA 区域的两个电子密度驼峰阻隔了中性风的流动, 从而挤压中性风在赤道地区形成一股风急流。因此, 离子拖曳力是风场从沿地理赤道分布向沿地磁赤道分布的主要原因。在 TIEGCM 热层风计算模块中将离子拖曳力关闭后, EIA 对中性风的阻滞作用消失, 赤道地区原风急流也随之消失, 赤道地区纬向风的四波结构幅度也随之减弱。因此, 离子拖曳力对赤道地区纬向风的四波结构具有明显的促进作用。

在真实的 IGRF 地磁场中, 由于地理轴与地磁轴存在偏角, 地理坐标和地磁坐标并不重合。等离子体的运动主要受控于地磁场, 适合在地磁坐标系中研究。而中性成分主要受流体力学控制, 更适合在地理坐标系中研究。由于低层大气非迁移潮汐波 DE3 的作用, E 层风发电电场受到调制, 沿着磁力线投影到 F 层, 驱动 EIA 电子密度产生 DE3 的变化, 从而导致赤道风急流也出现类似的经度方向上的四波结

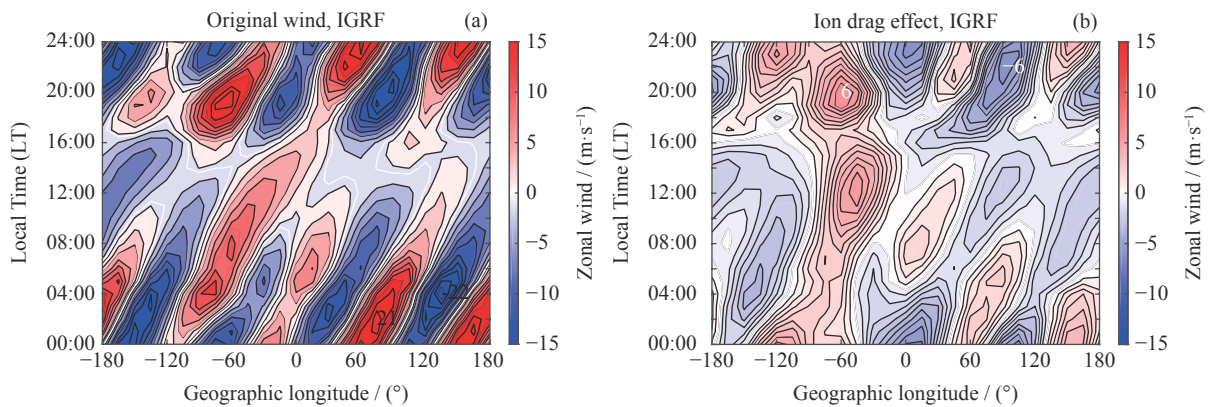


图 2 在 IGRF 地磁场下利用 TIEGCM 模拟赤道地区纬向风的经度分布

Fig. 2 Longitudinal variations of equatorial zonal winds simulated by TIEGCM under IGRF configuration

构。另外,低层大气非迁移潮汐波 DE3 分量的直接上传也能导致赤道风急流出现经度方向上的四波结构。

为了研究地磁场构型对纬向风经度差异的影响,本文在 TIEGCM 中除了引入 IGRF 的实际地磁场构型外,还引入了地磁轴和地理自转轴重合的偶极子场。图 3 给出了在偶极子场中,利用 TIEGCM 模拟的赤道区域纬向风经度分布。图 3(a)为偶极子场中原始纬向风经度分布,(b)为离子拖曳力引起的纬向风经度分布。在偶极子场中,纬向风在赤道地区的四波结构仍然存在,幅度和相位与图 2 IGRF 结果基本一致。然而,离子拖曳力引起的四波结构在偶极子场中分布更加明显,这与偶极子场中地理坐标和地磁坐标重合有关,此时低层大气非迁移潮汐波与离子拖曳力影响的方向相同,可以直接线性叠加,因此导致风场的结构较为简单,四波结构更明显。而在 IGRF 地磁场中,由于地磁与地理坐标系的不重合,离子拖曳力沿着地磁经度分布,大气潮汐波的影响沿着地理经度分布,两个物理过程影响的方向并不一致,因此造成最后风场的结构比较复杂。

Miyoshi 等^[7]对赤道地区纬向风四波结构的物理驱动机制进行了定性研究,结果表明,压强梯度力和离子拖曳力均具有四波结构,而 DE3 潮汐波是压强梯度力的主要来源,其强度大于离子拖曳力。但其并未对离子拖曳力做定量研究。为定量研究离子拖曳力对赤道地区纬向风四波结构的影响,本文分别选取白天和夜间两个时段,计算赤道地区的平均风速,并利用拟合函数求得纬向风四波结构的振幅。通过将

离子拖曳力引起的纬向风四波结构的振幅与原始纬向风四波结构的振幅做比值,可定量得到离子拖曳力的影响。

提取图 2 中白天时段(10:00—12:00 LT)和夜晚时段(20:00—22:00 LT)的风场数据,其平均值随地理经度的分布如图 4 所示(黑色曲线)。红色曲线为四波拟合的结果。由图 4 可以看出,原始纬向风的拟合波幅度在白天时段为 $5.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夜晚为 $9.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夜晚的幅度强于白天。离子拖曳力引起的纬向风拟合波幅度在白天和夜晚分别为 $1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,离子拖曳力在夜晚时段的影响也强于白天,这与夜晚 EIA 的结构比白天更明显有关。Liu 等^[29]研究了 CHAMP 卫星观测的 400 km 高度赤道地区电子密度的分布,发现夜晚 21:00 LT 电子密度的四波结构比白天 12:00 LT 更为显著。离子拖曳力由两个因素决定,一个是中性成分和电子的相对速度,一个是电子密度。由于 EIA 电子密度决定着离子拖曳力,因此夜间的四波结构比白天更强。

偶极子地磁场中,白天(10:00—12:00 LT)和夜晚(20:00—22:00 LT)时段赤道地区纬向风的变化值随地理经度的分布如图 5 所示。原始纬向风的四波振幅在白天为 $4.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夜晚为 $10.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。离子拖曳引起的纬向风四波波幅分别为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与 IGRF 中的结果相似,夜晚纬向风的四波振幅强于白天。

在不同地磁场构型条件下,白天和夜晚时段离子拖曳效应与原始风场四波振幅的百分比列于表 1。在 IGRF 地磁场中,离子拖曳在白天时段和夜晚时段

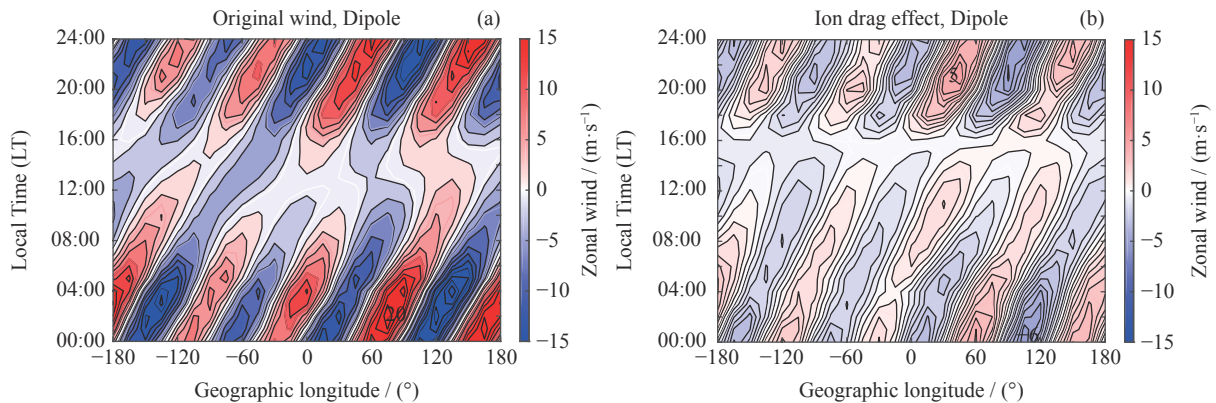


图 3 在偶极子磁场中利用 TIEGCM 模拟的赤道地区纬向风经度分布

Fig. 3 Longitudinal variations of equatorial zonal winds simulated by TIEGCM in the dipole field

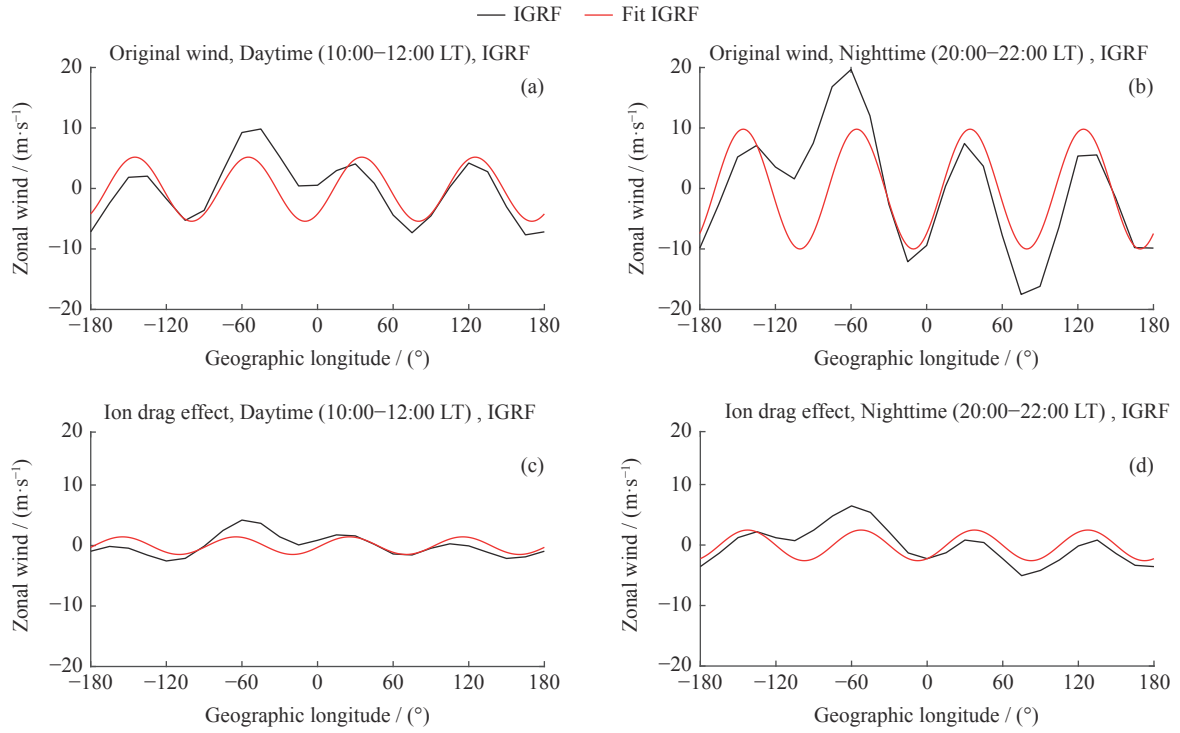


图 4 在 IGRF 地磁场中白天和夜晚两个时段赤道地区纬向风的经度平均分布

Fig. 4 Longitudinal variations of zonal winds during the daytime and nighttime under IGRF configuration

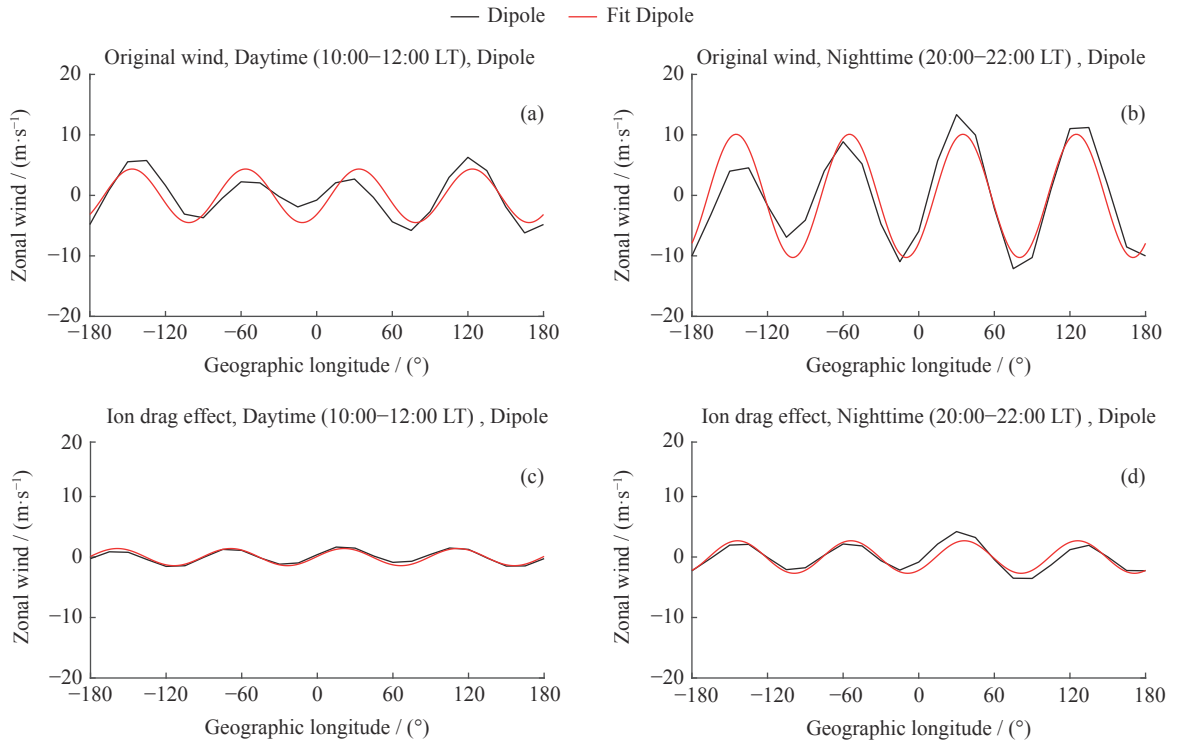


图 5 在 Dipole 地磁场中白天和夜晚两个时段赤道地区纬向风的经度平均分布

Fig. 5 Longitudinal variations of zonal winds during the daytime and nighttime in the Dipole field

表 1 离子拖曳力对纬向风四波经度分布影响的定量分析结果

Table 1 Quantitative analysis of the influence of ion drag on the longitudinal variation of the zonal wind

	10:00—12:00 LT	20:00—22:00 LT
IGRF	26.4%	25.3%
Dipole	31.1%	26.7%

的影响分别为 26.4% 和 25.3%;而在偶极子场中,影响分别为 31.1% 和 26.7%。在赤道地区纬向风的四波结构中,白天时段离子拖曳效应的贡献略高于夜晚,在偶极子场中高于在 IGRF 地磁场中。

4 结论

利用 CHAMP 卫星观测和 TIEGCM 模拟,研究了太阳活动低年春秋分季节赤道地区纬向风的空间分布,重点分析了纬向风反转时间和风速的地理经度分布差异,讨论了非迁移潮汐波和离子拖曳力在不同地磁场构型下的相对影响。主要结论如下。

(1) 纬向风的反转时间存在明显的经度差异,其经度差异最大可达 1.8 h。在早晨和下午,纬向风转向时间的经度差异一定程度上是由非迁移潮汐波引起的。下午时段的非迁移潮汐波可以减小模型与观测结果的差异,而在清晨的影响并不显著。

(2) 在 IGRF 地磁场和偶极子磁场中,白天和夜晚时段的离子拖曳力对风场的四波结构均有促进作用。这主要是因为离子拖曳力有利于在磁赤道地区形成风急流,从而增强了风场四波结构的幅度。

(3) 离子拖曳力对赤道地区纬向风四波结构的作用约占总风场的 25%,其中,白天时段离子拖曳效应的贡献略高于夜晚,在偶极子场中高于在 IGRF 地磁场中。

致谢 CHAMP 卫星跨轨道风数据来自于 <http://thermosphere.tudelft.nl/acceldrag/data.php> 网站。TIEGCM 模拟被存档在 NCAR 超级计算机 Cheyenne 中(<https://www2.cisl.ucar.edu/resources/storage-and-file-systems/hpss>)。

参考文献

[1] RISHBETH H. Thermospheric winds and the F-region: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1972, **34**(1): 1-47

[2] BLANC M, RICHMOND A D. The ionospheric disturbance dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space*

Physics, 1980, **85**(A4): 1669-1686

[3] HEDIN A E, SPENCER N W, KILLEEN T L. Empirical global model of upper thermosphere winds based on Atmosphere and Dynamics Explorer satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1988, **93**(A9): 9959-9978

[4] LIEBERMAN R S, AKMAEV R A, FULLER-ROWELL T J, et al. Thermospheric zonal mean winds and tides revealed by CHAMP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(10): 2439-2443

[5] LIU H X, WATANABE S, KONDO T. Fast thermospheric wind jet at the Earth's dip equator[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(8): L08103

[6] LIU H X, LÜHR H, WATANABE S, et al. Zonal winds in the equatorial upper thermosphere: decomposing the solar flux, geomagnetic activity, and seasonal dependencies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A7): A07307

[7] MIYOSHI Y, FUJIWARA H, JIN H, et al. Numerical simulation of the equatorial wind jet in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A3): A03309

[8] HÄUSLER K, LÜHR H, RENTZ S, et al. A statistical analysis of longitudinal dependences of upper thermospheric zonal winds at dip equator latitudes derived from CHAMP[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(12): 1419-1430

[9] OBERHEIDE J, FORBES J M, HÄUSLER K, et al. Tropospheric tides from 80 to 400 km: propagation, interannual variability, and solar cycle effects[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D1): D00I05

[10] HÄUSLER K, LÜHR H. Nonmigrating tidal signals in the upper thermospheric zonal wind at equatorial latitudes as observed by CHAMP[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(7): 2643-2652

[11] HÄUSLER K, LÜHR H, HAGAN M E, et al. Comparison of CHAMP and TIME-GCM nonmigrating tidal signals in the thermospheric zonal wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D1): D00I08

[12] LÜHR H, HÄUSLER K, STOLLE C. Longitudinal variation of F region electron density and thermospheric zonal wind caused by atmospheric tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(16): L16102

[13] LIN C H, WANG W, HAGAN M E, et al. Plausible effect of atmospheric tides on the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC: three-dimensional elec-

- tron density structures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(11): L11112
- [14] WANG H, ZHANG K D. Longitudinal structure in electron density at mid-latitudes: upward-propagating tidal effects[J]. *Earth, Planets and Space*, 2017, **69**(1): 11
- [15] LÜHR H, MAUS S, ROTHER M. Noon-time equatorial electrojet: its spatial features as determined by the CHAMP satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A1): A01306
- [16] LÜHR H, ROTHER M, HÄUSLER K, *et al.* The influence of nonmigrating tides on the longitudinal variation of the equatorial electrojet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A8): A08313
- [17] WANG H, ZHENG Z C, ZHANG K D, *et al.* Influence of nonmigrating tides and geomagnetic field geometry on the diurnal and longitudinal variations of the equatorial electrojet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(6): e2019JA027631
- [18] HARTMAN W A, HEELIS R A. Longitudinal variations in the equatorial vertical drift in the topside ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A3): A03305
- [19] ZHANG K D, WANG W B, WANG H, *et al.* The longitudinal variations of upper thermospheric zonal winds observed by the CHAMP satellite at low and midlatitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(11): 9652-9668
- [20] REIGBER C, LÜHR H, SCHWINTZER P. CHAMP mission status[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **30**(2): 129-134
- [21] DROB D P, EMMERT J T, CROWLEY G, *et al.* An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12304
- [22] EMMERT J T, DROB D P, SHEPHERD G G, *et al.* DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A11): A11319
- [23] RICHMOND A D, RIDLEY E C, ROBLE R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(6): 601-604
- [24] CHANG L C, LIN C H, LIU J Y, *et al.* Seasonal and local time variation of ionospheric migrating tides in 2007-2011 FORMOSAT-3/COSMIC and TIE-GCM total electron content[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(5): 2545-2564
- [25] WANG H, LÜHR H. Longitudinal variation in zonal winds at subauroral regions: possible mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(1): 745-763
- [26] MAUTE A, RICHMOND A D, ROBLE R G. Sources of low-latitude ionospheric $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifts and their variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A6): A06312
- [27] COLEY W R, HEELIS R A, SPENCER N W. Comparison of low-latitude ion and neutral zonal drifts using DE 2 data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A1): 341-348
- [28] KONDO T, RICHMOND A D, LIU H, *et al.* On the formation of a fast thermospheric zonal wind at the magnetic dip equator[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(10): L10101
- [29] LIU H X, WATANABE S. Seasonal variation of the longitudinal structure of the equatorial ionosphere: does it reflect tidal influences from below?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A8): A08315

(责任编辑: 孙伟英)