

SU Ye, LI Jingyuan, LÜ Jianyong, WANG Ming, WEI Guanchun, SUN Meng, XIONG Shiping, LI Zheng. Modeling Study on the Response of the Thermospheric Vertical Winds to Geomagnetic Storm at Middle Latitudes (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(2): 246–254. DOI:10.11728/cjss2022.02.210303023

中纬度地磁暴期间热层垂直风 响应机制的模拟*

苏 烨 李婧媛 吕建永 王 明
魏官纯 孙 梦 熊世平 李 正

(南京信息工程大学大气物理学院空间天气研究所 南京 210044)

摘 要 基于 TIMEGCM 模型,研究了 2005 年 9 月 10 日中纬度地磁暴期间热层 (100~650 km) 水平风场变化对垂直风的影响。通过连续性方程诊断分析了暴时引起垂直风场变化的机制,结果表明:250 km 以上的垂直风场取决于水平风场的变化,而 250 km 以下的垂直风场由较高高度的垂直风拉动;在地磁暴初相开始时,经向风场相比纬向风场对暴时 250 km 以上的垂直风场影响更为显著,随着地磁扰动增强,纬向风场对垂直风场变化的贡献更大;温度场对地磁暴的响应遵循同样规律,扰动开始时,温度沿经线传播更快,经向风变化更大,扰动增强后,温度沿纬线传播更快,纬向风变化更大。

关键词 地磁暴, TIMEGCM 模式, 垂直风, 水平风

中图分类号 P352

Modeling Study on the Response of the Thermospheric Vertical Winds to Geomagnetic Storm at Middle Latitudes

SU Ye LI Jingyuan LÜ Jianyong WANG Ming WEI Guanchun
SUN Meng XIONG Shiping LI Zheng

(Institute of Space Weather, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of
Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract Based on the simulation data of TIMEGCM, the influence of horizontal wind variations on middle-latitude vertical wind changes during the geomagnetic storms (100~650 km) on 10 September 2005 is studied. The model simulations were diagnostically analyzed, which is to investigate the causes of

* 国家自然科学基金项目 (42030203, 42004132, 42074183), 基础性科研院所稳定支持项目 (A131901W14) 和南京信息工程大学人才启动经费项目 (2020r052) 共同资助

2021-03-02 收到原稿, 2021-05-28 收到修定稿

通信作者 E-mail: 李婧媛, jingyuanli@nuist.edu.cn; 吕建永, jyly@nuist.edu.cn

storm-time vertical wind changes. The results show that the vertical wind variations above 250 km depend on the changes of horizontal wind, and the vertical wind changes below 250 km are driven by the vertical wind at high altitudes. In the early initial phase of geomagnetic storms, the meridional winds have more significant influence on the vertical winds over 250 km than the zonal winds. As the storm evolves, the zonal winds contributed more to the changes of vertical wind. The responses of temperature variations to the geomagnetic storms are similar with horizontal wind changes. At the beginning of the initial phase, the temperature propagates faster along the longitude, and the meridional wind changes faster. As the storm evolves, the temperature propagates faster along the latitude, and the zonal wind changes faster.

Key words Geomagnetic storm, TIMEGCM model, Vertical wind, Horizontal wind

0 引言

热层大气位于中间层与逸散层之间,是中高层大气的重要组成部分,热层大气风场受地磁活动影响很大。相对于水平风而言,热层垂直风很小,测量的难度也导致相关观测结果非常缺乏^[1]。但是对地磁暴期间垂直风场的研究从未停止,关于水平风场与垂直风场之间联系的理论研究可以追溯到20世纪70年代,Dickinson等^[2]认为连续性方程中的垂直速度可分为由压力面总质量散度决定的垂直速度和等压面抬升引起的垂直速度。Rishbeth等^[3]将总的垂直风速也分为两部分:表示在高度上平衡水平辐合或辐散的散度速度;表示热层收缩或膨胀时等压面上升或下降的气压速度。Burnside等^[4]建立了关于垂直风场与水平风场散度相关方程。由于高层大气探测手段缺乏,对于垂直风场与水平风场之间联系的研究仅停留在理论阶段。

随着天基和地基探测的发展,关于地磁暴期间热层垂直风场变化的分析也随之增多,其中地基探测数据多使用法布里-珀罗探测器(FPIs)研究热层的垂直风场。Hernandez^[5]指出在准稳态或随时间变化的情况下,强烈的局部加热和地磁扰动造成的热层风场加速可产生接近 $100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的垂直风速。Spencer等^[6]使用WATS(Wind and Temperature Spectrometer)观测数据得到,在有地磁扰动的情况下,极光卵附近300 km以上的热层区域能够观测到的最大垂直风速约 $100\sim 200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Harding等^[7]分析了北美热层-电离层观测网(NATION)5年(2011—2016年)的数据,表明在地磁暴期间中纬度地区能观测到风速较大的热层垂直风变化,并且这种垂直风的变化会持续存

在。Hu等^[8]分析了从北极黄河站全天FPIs观测中获取的热层垂直风数据,得到高热层与低热层的垂直风平均速度分别为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且存在日变化和与地磁活动水平相关的变化。以上研究均证明在地磁暴期间,由地磁扰动引起的热层垂直风场变化非常剧烈,但是造成磁暴期间垂直风场变化的物理机制尚不明了。

FPIs数据和非相干散射雷达(ISR)数据的分析研究印证了垂直风场与水平风场的联系^[9,10]。Biondi^[11]研究表明,观测到的向上和向下垂直运动是对中纬度热层水平风场辐散和辐合的响应。Rees等^[12]发现高度积分(height-integrated)的垂直风速可能超过 $100\sim 150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风的变化与水平风场的高度相关,这种变化是对地磁能量输入的响应,平均垂直风的强度能够达到约 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (或 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)且持续3~6 h,认为这种持续且强烈的垂直风场变化是热层受地磁强烈扰动的表现。Petecherych等^[13]的研究结果表明,在110~125 km高度,焦耳加热直接导致上行风发生,而水平风的散度导致了下行风。Smith等^[14]发现在地磁扰动强且伴随强烈西风时,观测到高达 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的向下气流,而夜间这种垂直气流则以相同速度上行。他们认为造成这种较高热层垂直风场变化的一个主要机制是水平风的散度。由此可以得出,在地磁暴期间,热层中纬度垂直风的变化与水平风密切相关。

近年也有研究利用模型研究磁暴期间垂直风场变化与温度变化的联系,Li等^[15]使用TIMEGCM模型研究了中纬度中间层-低热层(MLT)中性温度对地磁暴的响应。结果表明地磁暴发生后,在中纬度MLT区域的垂直风先发生变化,这种垂直风的变化通过绝

热加热/冷却与垂直热输送过程导致局地暴时温度变化。Li 等^[16]进一步研究发现,中纬度地区来自热层的下行垂直风会造成 MLT 区域的温度增加,这种温度增加在磁暴早期会驱动局地气流向赤道运动,从而造成向南的扰动风场。随着磁暴的发展,MLT 温度升高会在中纬度产生分流,使得扰动风的方向变为向北向上。一直以来,由于探测手段和模型精度的制约,对于磁暴期间垂直风场变化的研究十分缺乏。虽然垂直风在量级上比水平风小得多,但对于热层大气环境(温度及环流等)的影响却是显著的,在垂直方向梯度较小的波动也能引起热层巨大的变化,因此研究磁暴期间垂直风场变化对于理解太阳活动对中层大气影响具有重要意义。

1 数据和方法

1.1 TIMEGCM 模型

研究主要基于 TIMEGCM 模型。TIMEGCM 模型的发展可追溯至 20 世纪 80 年代初,美国国家大气研究中心(NCAR)开始建立 TGCM 模型(Thermospheric General Circulation Models),以研究热层的全球温度、环流和化学成分及其对太阳和极光活动的响应,随后扩展为三维 TIGCM 模型,包含电离层与热层之间电动力学相互作用自洽的 TIEGCM 模型。TIEGCM 模型向下延伸至 30 km 高度,包括中间层和平流层上层,被称为 TIMEGCM,其需要的输入参数包括 57 个主要波长的太阳紫外通量(由 $F_{10.7}$ 通量参数化得到)、极光粒子沉降、高纬度电场以及从 30 km 下边界向上传播的潮汐,TIMEGCM 在了解高层大气的特征方面发挥了重要作用^[17-22]。在本研究中,使用的 TIMEGCM 模型水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (纬度 $\times$ 经度),垂直分辨率为 1/4 个标高。高纬对流电场使用由 3 h 的 Kp 指数驱动的高纬对流电场 Heelis 模型^[23]。

1.2 垂直风诊断

中性大气连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (1)$$

在 Boussinesq 假设条件下可得

$$\frac{\partial v_n}{R \partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \lambda} \frac{\partial u_n}{\partial \varphi} + e^z \frac{\partial}{\partial z} (e^{-z} W) = 0. \quad (2)$$

化简得到

$$\frac{\partial v_n}{R \partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \lambda} \frac{\partial u_n}{\partial \varphi} + \frac{\partial W}{\partial z} = W. \quad (3)$$

其中, u_n 和 v_n 分别为纬向和经向风速, R 为地球半径, λ 为纬度, φ 为经度, z 为高度, W 为垂直风速。 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 等价于 $\frac{1}{R \cos \lambda} \frac{\partial u_n}{\partial \varphi}$, 表示纬向风场沿着模型水平网格的变化; $\frac{\partial v}{\partial y}$ 等价于 $\frac{\partial v_n}{R \partial \lambda}$, 表示经向风场沿模型水平网格的变化; $\frac{\partial W}{\partial z}$ 表示垂直风沿模型高度网格的变化。因此可以得到

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = W. \quad (4)$$

通过式(4)可以看出,垂直风速由高层的垂直风速变化及同层水平风速变化求得。由于 TIMEGCM 模式计算的是压力面间的垂直风速,因此地面加热使得压力面起伏产生的垂直风速不包括在式(4)的计算内。

使用 TIMEGCM 模型进行敏感性实验:一个由地磁平静条件的 2.3 常数 Kp 值(图 1 中黑色横虚线)驱动,另一个由真实的 Kp 值(图 1 中黑色折线)驱动。3 h 指数 Kp 值在 2005 年 9 月 10 日为 2⁺、3⁻、4、3⁺、4、6⁻、5⁺、5。可以看到,在 24 h 的 Kp 值变化中,15~18 h 的 Kp 值最大。

除了 Kp 值条件不同外,这两次实验在 00:00 UT 使用完全相同的初始条件和相同的其他模型驱动参数。因此,两次实验结果之间的差值即为地磁暴对风场的影响。其中,06:00 UT(黑色竖虚线)为 2005 年

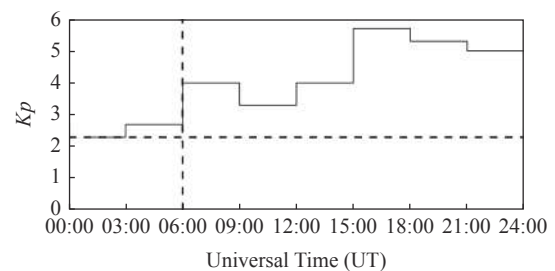


图 1 2005 年 9 月 10 日全天的 Kp 值(黑色折线为 Kp 值,黑色横虚线表示 $Kp=2.3$,黑色竖虚线表示磁暴扰动开始的时间)

Fig. 1 Kp value of the whole day on 10 September 2005 (The black polyline is the Kp value, the black horizontal dashed line represents $Kp=2.3$, and the black vertical dashed line is the time of the start of the magnetic storm)

9月10日地磁暴扰动的开始时间^[24]。

2 结果与分析

以下涉及的风场及温度数据均采用磁暴值减去平静值的方法处理, 确保是地磁暴期间由于地磁扰动影响所引起的变化。

2.1 水平风场沿水平网格的变化与垂直风场在高度上的对比

图2显示 TIMEGCM 模拟了中纬度(30°N–50°N 纬度平均)地磁暴期间, 4个时间点(06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT)的热层(100~650 km 高度)水平风场沿经度和压力面网格的变化(图2 a~d)和垂直风场(图2 e~h)。可以看出, 06:00 UT 的风场整体速度较小, 即由磁场扰动引起的风速变化较小, 且水平风场与垂直风场的变化基本均为负值, 此时主要是较高高度(约250 km 以上)的垂直风拉动较低高度(约250 km 以下)的垂直风且保持向下传播; 而到了10:00 UT, 磁场扰动增大, 风场的整体扰动速度随之增大, 出现了向上的垂直风, 但是扰动的垂直风场始终保持其连续性; 到了14:00 UT 和18:00 UT, 磁场扰动剧烈, 风场速度变化激增, 但依然是较高高度拉动较低高度。并且在这4个图中, 250 km 高度以上的水平风场散度与垂直风场始终保持基本一致。

图3显示 TIMEGCM 模拟了中纬度(30°N–50°N)地磁暴期间, 4个时间点(06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT)的热层(100~650 km)水平风场沿纬度和压力面网格的变化(图3 a~d)和垂直风场(图3 e~h)在107.5°W。可以看出, 在4个时间段内, 250 km 高度以上水平风场的散度与垂直风场始终保持基本一致。

图4显示 TIMEGCM 模拟了中纬度(30°N–50°N)地磁暴期间, 4个时间点(06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT)的热层(100~650 km 高度)水平风场在92.5°E 沿纬度和压力面网格的变化(图4 a~d)和垂直风场(图4 e~h)。可以看出, 在4个时间段内, 250 km 高度以上水平风场的散度与垂直风场始终保持基本一致。由图3和图4可得, 固定经度下的纬度变化并不影响本节的结论。

结果表明, 在250 km 高度以上, 水平风场的散度与垂直风场基本相同, 即可以使用水平风场散度在地磁暴期间的变化解释垂直风场变化。在250 km 高度以下, 可以看到垂直风场的扰动变化都是由于较高高度扰动垂直风场拉动的, 低高度垂直风场的扰动变化量级远小于高高度, 因此100~650 km 高度的扰动垂直风场具有很好的连续性。由此可以进一步研究是经向还是纬向风场在地磁暴期间的变化导致了垂直风场的产生。

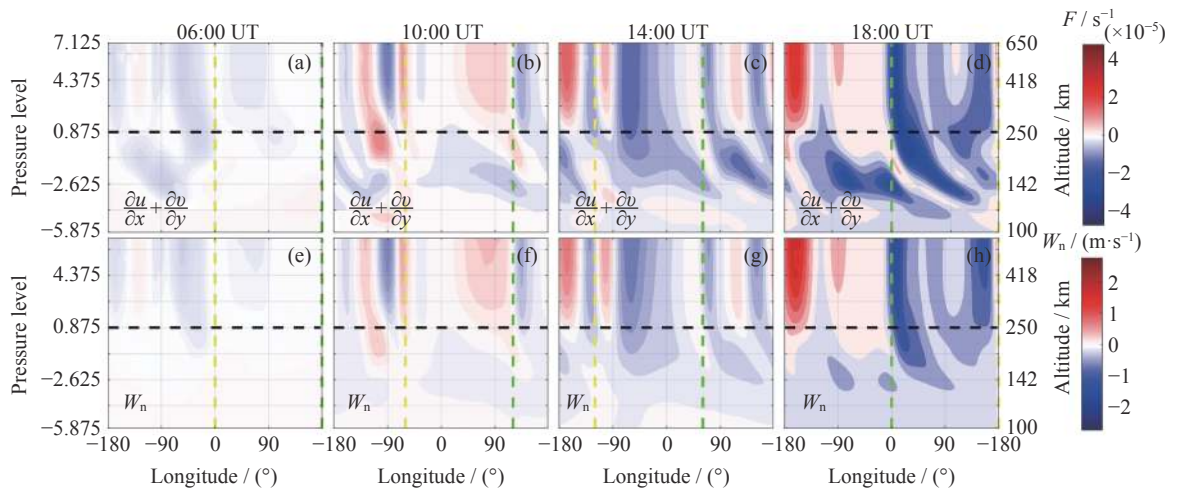


图2 中纬度地磁暴期间热层水平风场沿纬度压力面网格的变化(F)与垂直风场(向上为正, 向下为负; 黑色虚线表示250 km 高度, 黄色和绿色虚线分别代表06:00 UT 和18:00 UT 时刻)

Fig. 2 Variation of horizontal wind along the grid of longitude (F) and vertical wind in the thermosphere during mid-latitude geomagnetic storms (Up is positive, down is negative; the black dotted line indicates 250 km height, and the yellow and green dashed lines indicate 06:00 UT and 18:00 UT respectively)

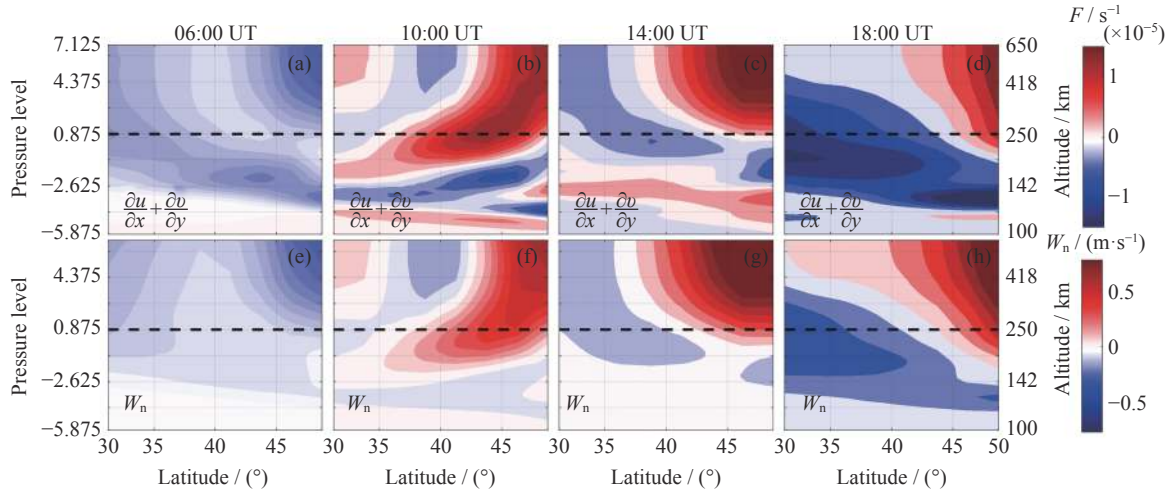


图3 中纬度地磁暴期间热层水平风场沿纬度压力面网格的变化 (F) 与垂直风场 (向上为正, 向下为负; 黑色虚线为 250 km)

Fig. 3 Variation of horizontal wind along the grid of longitude (F) and vertical wind in the thermosphere during mid-latitude geomagnetic storms (up is positive, down is negative, and the black dotted line is marked as 250 km)

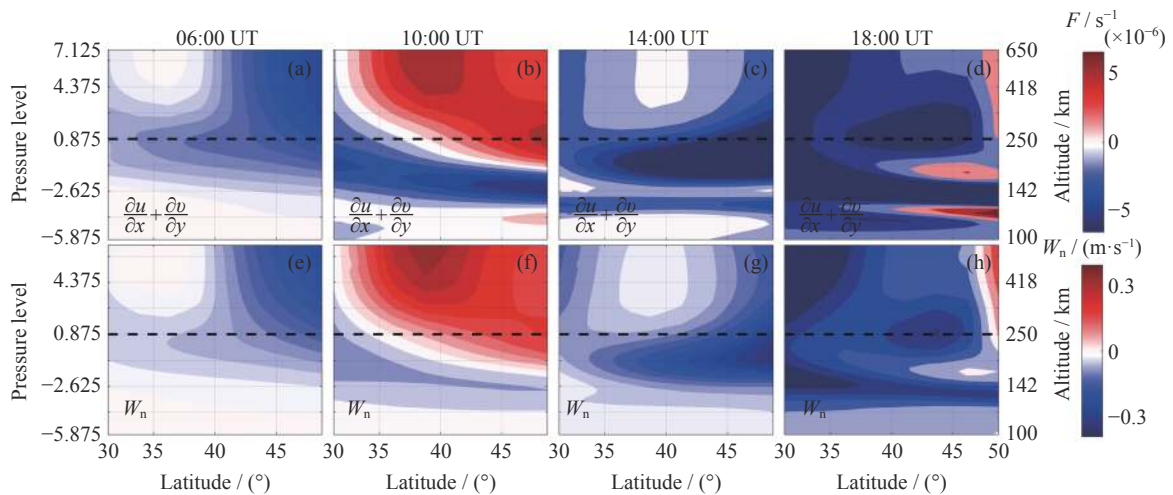


图4 中纬度地磁暴期间热层水平风场沿纬度压力面网格的变化 (F) 与垂直风场 (向上为正, 向下为负; 黑色虚线为 250 km 高度)

Fig. 4 Variation of horizontal wind and vertical wind along the grid of longitude (F) in the thermosphere during mid-latitude geomagnetic storms (Up is positive, down is negative, and the black dotted line is marked as 250 km height)

2.2 经向与纬向风场对水平风场变化的影响

将水平风场拆分成纬向风场与经向风场, 将三个风场在固定时间点及统一坐标轴的情况下进行比较, 通过数据对比可以得到两个风场对水平风场变化的贡献, 进一步理解影响垂直风场变化的物理机制。

图5显示 TIMEGCM 模拟了中纬度 (30°N–50°N) 地磁暴期间 (高度平均约 250 km 以上) 热层纬向风场散度 (图5 a~d)、经向风场散度 (图5 e~h)

及水平风场的散度 (图5 i~l) 沿经纬度网格在 4 个时间点 (06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT) 上的变化。地磁暴扰动开始时 (06:00 UT), 向东变化的纬向风与向南变化的经向风叠加合成后产生了向下的垂直风, 这时明显可以看出经向风的变化起到主导作用; 10:00 UT 时, 垂直风主要集中在夜侧 (06:00 UT 以西 18:00 UT 以东的区域), 变化更大的纬向风与经向风叠加合成后, 垂直风的变化主要由纬向风的

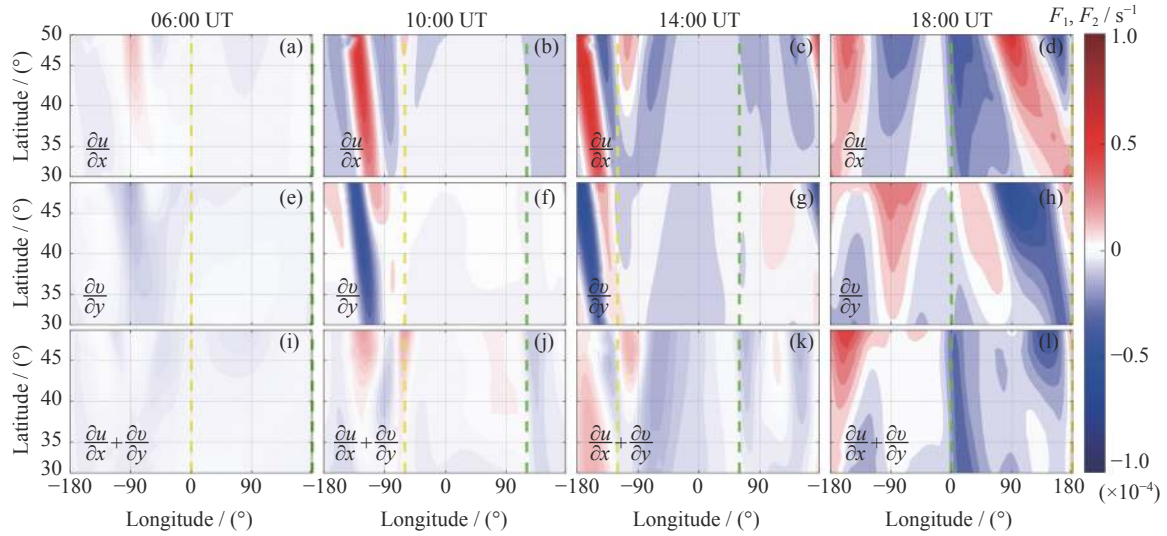


图 5 中纬度地磁暴期间高热层纬向风场、经向风场与水平风场的散度暴时变化 (向东和向北为正, 向西和向南为负; 黄色虚线和绿色虚线分别注明了 06:00 UT 和 18:00 UT)

Fig. 5 Divergence velocity changes of the zonal wind, meridional wind and horizontal wind during geomagnetic storm in the middle latitude (the east is positive and the west is negative; the yellow dotted line and the green dotted lines indicate 06:00 UT and 18:00 UT respectively)

散度造成;到了 14:00 UT, 其与 10:00 UT 的叠加合成效应相同, 可以看出纬向风的变化对垂直风产生了更大贡献;在 18:00 UT, 通过分析夜侧风场, 可以看出纬向风变化对垂直风场变化的影响与经向风相差不大, 但在日侧 (06:00 UT 以东 18:00 UT 以西的区域), 主要是纬向风变化影响了垂直风。

因此, 扰动开始时, 经向风变化比纬向风场更大一些, 即对于水平风场散度的影响也更大。随着地磁暴的发展, 在 10:00 UT 和 14:00 UT, 纬向风变化相对于经向风场更大一些, 同理可得, 在这个时间对于水平风场散度影响更大的是纬向风场。到了 18:00 UT, 地磁扰动更为剧烈, 纬向风场与经向风场的变化也随之加剧。随着两个风场进一步的叠加和合成作用, 水平风场的变化也同样变得更为剧烈, 但依旧是纬向风变化相对较大, 此时其对水平风场散度变化的作用也更大。因此可以得到如下结论: 在地磁暴扰动开始阶段 (06:00—08:00 UT), 在 250 km 高度以上, 相比纬向风场, 热层经向风场的变化是产生垂直风的更大动力源, 而当地磁暴扰动发展起来后, 纬向风场的变化相对更大, 在垂直风的变化趋势上起到更大推动作用。

2.3 水平风场与温度传播的联系

为了将经向风和纬向风沿水平方向的变化与其风场本身及温度的变化联系起来, 将经向风、纬向风

及温度沿经纬线的变化与风场自身数据在固定时间点及统一坐标轴的情况下进行比较, 由此得到地磁暴期间温度传播与水平风场变化的内在联系。

图 6 显示 TIMEGCM 模拟了中纬度 (30°N—50°N) 地磁暴期间 (高度平均 250 km 以上) 热层温度场 (图 6 a~d) 和纬向风场 (图 6 e~h) 沿纬线的差值以及纬向风场 (图 6 i~l) 在 4 个时间点 (06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT) 上的变化。在 06:00 UT, 温度梯度 (东边格点温度减去西边相邻格点温度) 值极小, 且主要出现在夜侧; 10:00 UT 夜侧的温度梯度正值变化区域比负值的大一些, 日侧也出现了温度梯度负值区域; 在 14:00 UT 温度梯度值比之前增大一些, 并且在日侧主要为正值区域, 在夜侧主要为负值区域; 在 18:00 UT, 相比之前的 3 个时间点, 温度梯度值最大, 延续了 14:00 UT 的正负值区域的分布特点。图 6 中 ∂u 的变化与图 5 中 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 的变化基本一致。纬向风场在 06:00 UT 主要为夜侧的西向风, 但在其东侧也有一个较小的东向风; 10:00 UT 夜侧西向风增大, 东侧的东向风也随之增大, 并且在日侧也出现了明显的西向风, 但量级比夜侧的风场小得多; 到了 14:00 UT, 100°W 东侧 (日侧) 和西侧 (夜侧) 均存在一个较小的东向风, 其余区域均为风速较大的西向

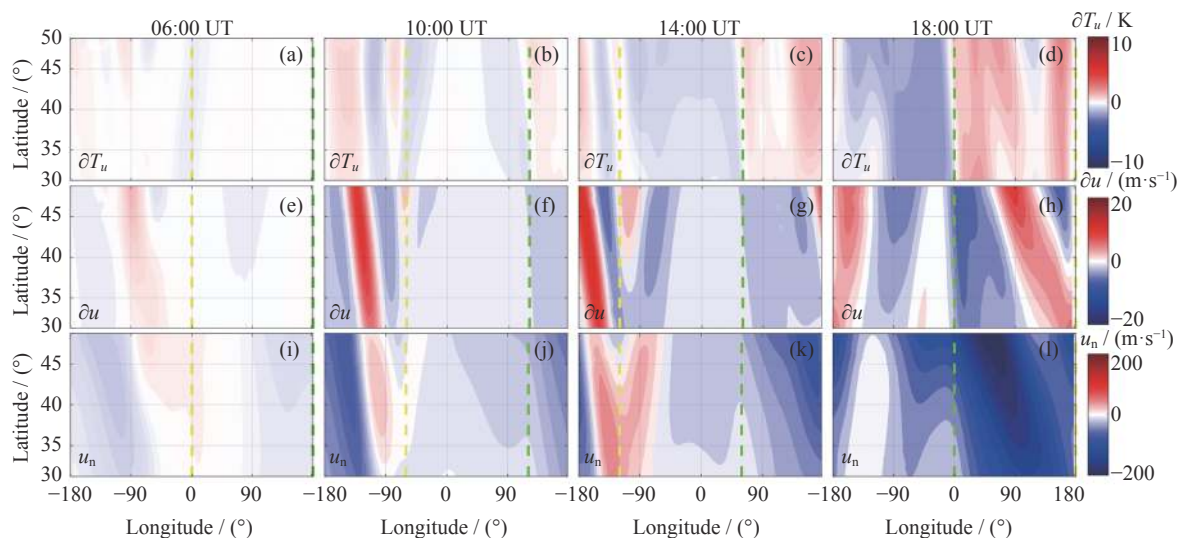


图6 中纬度地磁暴期间热层纬向风场和温度场沿纬线的差值与纬向风场（向东为正，向西为负；黄色和绿色虚线分别表示 06:00 UT 和 18:00 UT 时刻）

Fig. 6 Difference between the zonal wind and temperature along the latitude line and the zonal wind during geomagnetic storm in the middle latitude (The east is positive, the west is negative, and the yellow and the green dotted lines indicate 06:00 UT and 18:00 UT respectively)

风,且西向风的风速大值区域主要存在于夜侧;18:00 UT 整个中纬度全是风速极大的西向风,但夜侧的西向风风速大于日侧。

地磁扰动开始(06:00 UT)后,温度梯度值在中纬度夜侧比日侧大得多,沿东向纬线升高的温度(图 6 a~d)产生了西向的纬向风(图 6 i~l),反之沿东向纬线降低的温度产生东向的纬向风。到了 10:00 UT,温度沿东向纬线在夜侧的变化比日侧大得多,仍然是向东增加的温度梯度形成西向风,向西增加的温度梯度形成东向风。随着扰动增强,到了 14:00 UT,日侧温度梯度也随之增强,但依然是夜侧温度梯度更大,纬向风场仍遵循与温度梯度的关系。进入 18:00 UT,日侧和夜侧的纬向风场整体速度都很大,但随着扰动进一步增强,温度梯度与纬向风场依旧呈现出很好的对应性,温度梯度在日侧呈现出沿东向纬线升高的趋势,在夜侧呈现出沿东向纬线降低的趋势,而纬向风场无论在日侧还是夜侧都是西向风。可以看出,温度梯度和纬向风场均随地磁暴扰动的增强而增大。并且在地磁暴扰动期间,温度梯度与纬向风的变化趋势基本一致,可以看出沿纬线分布的纬向风基本由沿纬线分布的温度梯度决定。

图 7 显示 TIMEGCM 模拟了中纬度(30°N—50°N)地磁暴期间(高度平均 250 km 以上)热层温度

场(图 7 a~d)和经向风场(图 7 e~h)沿经线的差值以及经向风场(图 7 i~l)在 4 个时间点(06:00 UT、10:00 UT、14:00 UT、18:00 UT)上的变化。温度梯度(北南)在 06:00 UT 的值极小,且主要是沿北向经线增大的温度梯度(正)出现在夜侧;10:00 UT 夜侧的温度梯度正值区域扩大,在日侧出现一个较小的沿北向经线减小的温度梯度(负)区域;14:00 UT 的温度梯度正值区域急剧增大并扩展到整个北半球,但夜侧的温度梯度量级更大;18:00 UT 的温度梯度正值在整个中纬度的量级急剧增大,此时日侧和夜侧的量级相差不大。图 7 中 ∂v 的变化与图 5 中 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 的变化基本一致。经向风场在 06:00 UT 仅在夜侧产生一个较小的南向风;10:00 UT 的夜侧南向风风速有所增大;14:00 UT 的经向风场延续了上一个时间点的夜侧南向风,同时在日侧也出现一个风速较小的南向风;南向风在 18:00 UT 扩展至整个北半球,并且风速急剧增大,形成一个超大型的南向风。

地磁扰动开始(06:00 UT)后,温度梯度在中纬度夜侧的量级大于日侧,沿北向经线升高的温度(图 7 a~d)产生了南向的经向风(图 7 i~l),即高纬度的温度沿南向的经向风向低纬度扩散,且仅有南向的经向风。在 10:00 UT,温度梯度沿北向经线在夜侧的变化占温度传播的主导地位,依然遵循沿北向经线升高的

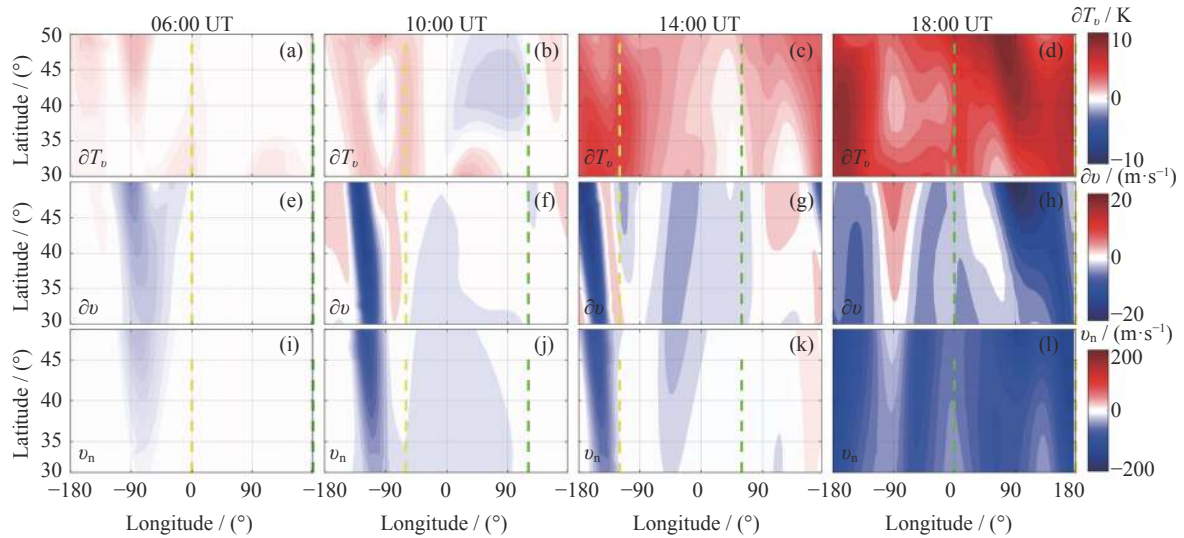


图 7 中纬度地磁暴期间热层温度场和经向风场沿经线的差值与经向风场（向东为正，向西为负，黑色虚线标注的是 250 km，黄色和绿色虚线分别表示 06:00 UT 和 18:00 UT 时刻）

Fig. 7 Difference between the temperature of the hyperthermia and the meridional wind along the meridian during the mid-latitude geomagnetic storm and the meridional wind (North is positive, south is negative, and the yellow and the green dotted lines indicate 06:00 UT and 18:00 UT respectively)

温度产生南向经向风的规律。随着扰动增强,到了 14:00 UT,日侧温度梯度沿北向经线的变化也随之增强,但依然是夜侧的温度梯度更大,经向风场仍遵循与温度梯度的关系,整个中纬度北半球都是南向经向风。而进入 18:00 UT,日侧和夜侧的经向风场整体速度都很大,但随着扰动进一步增强,温度梯度的变化与经向风场对应得更好,温度梯度在整个中纬度北半球呈现出沿北向经线急剧升高的趋势,即越来越多的高纬度温度沿经线向低纬度传播,而经向风场都是南向的经向风。因此可以得出,地磁扰动开始后,温度开始沿着经线扩散,温度与经向风的变化也随扰动增大而增强,沿北向经线升高的温度梯度产生了向南的经向风。因此,温度梯度对于经向风场的影响在扰动增强时更明显。

由图 6 和图 7 可知,前两个小时经向风的变化更明显地导致了垂直风的变化,由磁暴导致的增温从高纬度向低纬度扩散,沿经线的风速变化较大;08:00 UT 之后,温度沿纬线扩散得更快,风速沿纬线变化更大,因此纬向风的变化更明显导致了垂直风的变化。而随着扰动增强,温度不再是影响水平风场的唯一因素,纬向风沿纬线的变化比经向风沿经线的变化更大,纬向风场的变化更明显地导致了垂直风场的变化。

3 结论

利用 TIMEGCM 模型,研究了 2005 年 9 月 10 日中纬度地磁暴期间热层(100~650 km 高度)水平风场变化对垂直风的影响,依据模型中垂直风求解公式,对数据进行了处理与分析,主要得到结果和结论如下。

(1)在地磁暴期间,250 km 以上的垂直风场变化与水平风场的散度相同,因此可以得到水平风场变化引起垂直风场变化的结论,由于 100~650 km 高度的垂直风是连续的,250 km 以下的垂直风场主要由较高高度垂直风拉动。

(2)在地磁暴初期(06:00—08:00 UT),经向风场的变化比纬向风场更大,因此对垂直风场变化做出了更大贡献,而随着扰动的增强,纬向风场变化更大,在 08:00 UT 之后,相比经向风场,纬向风场对垂直风场的变化影响更大。

(3)结合温度沿经纬线的变化分析,在地磁暴初期(06:00—08:00 UT),温度沿经线传播得更快,经向风沿经线的方向变化更大,而在 08:00 UT 之后,温度沿纬线传播得更快,纬向风沿纬线的方向变化更大,与结论 2 有很好的对应。

虽然已通过 TIMEGCM 模型模拟研究了中纬度

地磁暴期间热层垂直风场的变化, 以及其与水平风场之间的内在联系, 并得出了初步结论, 但是对于地磁暴期间影响热层水平风场变化的物理过程尚不了解, 今后将对其进行更深入研究。

致谢 地磁活动指数 K_p 数据来源于 ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/网站。

参考文献

- [1] LIU Libo, WAN Weixing. A brief overview on the issue on space physics and space weather[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3493-3501
- [2] DICKINSON R E, GEISLER J E. Vertical motion field in the middle thermosphere from satellite drag densities[J]. *Monthly Weather Review*, 1968, **96**(9): 606-616
- [3] RISHBETH H, MOFFETT R J, BAILEY G J. Continuity of air motion in the mid-latitude thermosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1969, **31**(8): 1035-1047
- [4] BURNSIDE R G, HERRERO F A, MERIWETHER JR J W, *et al.* Optical observations of thermospheric dynamics at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**(A7): 5532-5540
- [5] HERNANDEZ G. Vertical motions of the neutral thermosphere at midlatitude[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, **9**(5): 555-557
- [6] SPENCER N W, THEIS R F, WHARTON L E, *et al.* Local vertical motions and kinetic temperature from AE-C as evidence for aurora-induced gravity waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 1976, **3**(6): 313-316
- [7] HARDING B J, MAKELA J J, QIN J Q, *et al.* Atmospheric scattering effects on ground-based measurements of thermospheric vertical wind, horizontal wind, and temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, **122**(7): 7654-7669
- [8] HU Guoyuan, AI Yong, ZHANG Yange, *et al.* A method for vertical neutral wind in the thermosphere deduced from all-sky FPI measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3695-3702
- [9] ZHANG S R, ERICKSON P J, FOSTER J C, *et al.* Thermospheric poleward wind surge at midlatitudes during great storm intervals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(13): 5132-5140
- [10] ZHANG R L, LIU L B, LE H J, *et al.* Equatorial ionospheric electrodynamics over Jicamarca during the 6-11 September 2017 space weather event[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, **124**(2): 1292-1306
- [11] BIONDI M A. Measured vertical motion and converging and diverging horizontal flow of the midlatitude thermosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1984, **11**(1): 84-87
- [12] REES D, SMITH R W, CHARLETON P J, *et al.* The generation of vertical thermospheric winds and gravity waves at auroral latitudes—I. Observations of vertical winds[J]. *Planetary and Space Science*, 1984, **32**(6): 667
- [13] PETEHERYCH S, SHEPHERD G G, WALKER J K. Observation of vertical E -region neutral winds in two intense auroral arcs[J]. *Planetary and Space Science*, 1985, **33**(8): 869-873
- [14] SMITH R W, HERNANDEZ G. Vertical winds in the thermosphere within the polar cap[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, **57**(6): 611-620
- [15] LI J Y, WANG W B, LU J Y, *et al.* On the responses of mesosphere and lower thermosphere temperatures to geomagnetic storms at low and middle latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(19): 10128-10137
- [16] LI J Y, WANG W B, LU J Y, *et al.* A modeling study of the responses of mesosphere and lower thermosphere winds to geomagnetic storms at middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, **124**(5): 3666-3680
- [17] 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
- [18] RICHMOND A D. Ionospheric electrodynamics[M]//VOL- LAND H. Handbook of Atmospheric Electrodynamics. Boca Raton: CRC Press, 1995: 249-290
- [19] ROBLE R G, RIDLEY E C. An auroral model for the NCAR thermospheric general circulation model (TGCM)[J]. *Annales Geophysicae Series A-upper Atmosphere and Space Sciences*, 1987, **5**(6): 369-382
- [20] ROBLE R G, RIDLEY E C. A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (time-GCM): equinox solar cycle minimum simulations (30-500 km)[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(6): 417-420
- [21] ROBLE R G. Energetics of the mesosphere and thermosphere[M]//JOHNSON R M, KILLEEN T L. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A review of Experiment and Theory. Washington: American Geophysical Union, 1995: 1-21
- [22] ROBLE R G. The NCAR thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (TIME-GCM)[M]//SCHUNK R W. Solar-Terrestrial Energy Program: Handbook of Ionospheric Models. Logan: Utah State University, 1996: 281-288
- [23] HEELIS R A, LOWELL J K, SPIRO R W. A model of the high-latitude ionospheric convection pattern[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(A8): 6339-6345
- [24] KLIMENKO M V, KLIMENKO V V, RATOVSKY K G, *et al.* Ionospheric effects caused by the series of geomagnetic storms of September 9-14, 2005[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, **51**(3): 364-376

(责任编辑: 宋雅娜)