0254-6124/2026/46(2)-0281-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XIA Xinmiao, JIANG Guoying, NEL Amoré Elsje, ZHU Yajun, XU Jiyao, YUAN Wei. Response of Thermospheric Winds at Mid-latitudes in the Northern and Southern Hemispheres to the Geomagnetic Storm on 18 March 2018 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 281–289. CSTR:32142.14.cjss.2025–0039. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0039

南北半球中纬度地区热层风场对 2018 年 3 月 18 日磁暴的响应特征*

夏新淼 [1,2] 姜国英 [1,3,4] NEL Amoré Elsje [5]
朱亚军 [1,3,4] 徐寄遥 [1] 袁 韦 [1,4]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

3(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

4(海南空间天气国家野外科学观测研究站 儋州 571734)

5(South African National Space Agency Hermanus 7200)

摘 要 基于兴隆 (XLON, 40.2°N, 117.6°E; 磁纬 35°N) 和南非 Sutherland 天文台 (SAAO, 32.2°S, 20.48°E; 磁纬 40.7°S) 的地基 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 观测数据, 结合热层–电离层–电动力学环流模型 (TIEGCM), 系统分析了 2018 年 3 月 18－19 日磁暴事件期间南北半球中纬度地区热层风场的响应特征. 研究发现, 南半球热层风场对磁暴的响应较北半球更为显著. 在 SAAO 台站观测到显著的赤道向和西向风增强现象, 其中经向风最大速度达 128.4 $m\cdot s^{-1}$ (赤道向), 纬向风最大速度达 –165.6 $m\cdot s^{-1}$ (西向). 与 TIEGCM 模拟结果的对比分析表明, 模型能够较好地再现观测数据的扰动趋势, 特别是在 SAAO 经向风和 XLON 纬向风的变化特征方面. 然而模型在风速定量预测方面仍存在一定偏差, 对 SAAO 东向纬向风存在低估现象, 而对 XLON 赤道向经向风则呈现高估趋势.

关键词 热层风场, 地磁暴, 南北半球, 中纬度, Fabry-Perot 干涉仪, TIEGCM 模型

中图分类号 P351

Response of Thermospheric Winds at Mid-latitudes in the Northern and Southern Hemispheres to the Geomagnetic Storm on 18 March 2018

XIA Xinmiao[1,2] JIANG Guoying[1,3,4] NEL Amoré Elsje[5]
ZHU Yajun[1,3,4] XU Jiyao[1] YUAN Wei[1,4]

* 国家重点研发计划项目 (2023YFB3905100), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目 (YSBR-018), 国家自然科学基金项目 (42174212), 中国子午工程和国家重点实验室专项基金项目共同资助

2025-03-14 收到原稿, 2025-05-22 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

1(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

3(*School of Astronomy and Space Science*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

4(*Hainan National Field Science Observation and Research Observatory for Space Weather*, *Danzhou* 571734)

5(*South African National Space Agency*, *Hermanus* 7200)

Abstract The responses of thermospheric winds at middle latitudes to the moderate geomagnetic storm of 18—19 March 2018, are examined using two ground-based Fabry-Perot Interferometer (FPI) observations from the Xinglong (XLON, 40.2°N, 117.6°E; magnetic latitude 35°N) and the Sutherland Astronomical Observatory (SAAO, 32.2°S, 20.48°E; magnetic latitude 40.7°S), combined with simulations from the Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model (TIEGCM). The storm reached a maximum *Kp* index of 6, classifying it as a moderate storm. Ground-based FPI measurements provided high-resolution wind data at both stations, capturing the temporal evolution of zonal (east-west) and meridional (north-south) wind components. Meanwhile, the TIEGCM simulations offered a theoretical framework to interpret the observed disturbances and assess the model's capability in reproducing storm-induced thermospheric dynamics. The results reveal that the response of thermospheric winds to the geomagnetic storm is more pronounced in the southern hemisphere than that in the northern hemisphere. Significant enhancements in equatorward and westward winds are observed at the SAAO station, with maximum meridional wind speeds reaching 128.4 $m\cdot s^{-1}$ (equatorward) and maximum zonal wind speeds reaching –165.6 $m\cdot s^{-1}$ (westward). Comparative analysis with TIEGCM simulations indicates that the model can reasonably reproduce the disturbance trends in observations, particularly in the variations of meridional winds at SAAO and zonal winds at XLON. The model successfully captured the transition from quiet-time wind patterns to storm-driven disturbances, including the shift toward westward and equatorward. However, certain quantitative discrepancies remain in the model's predictions: the model underestimates the eastward zonal winds at SAAO and overestimates the equatorward meridional winds at XLON. Future studies could consider using multiple ground-based stations and a variety of observations, such as temperature, density, chemical composition for the study. Furthermore, investigating the role of seasonal and local time effects in modulating hemispheric asymmetries could provide deeper insights into thermospheric storm responses. Overall, this study contributes to a better understanding of the storm impacts on thermospheric winds and hemispheric differences, as well as their potential physical causes.

Key words Thermospheric winds, Geomagnetic storm, Northern and southern hemispheres, Mid-latitudes, Fabry-Perot Interferometer, TIEGCM model

0 引言

热层风是高层大气的重要参数, 其行为受到多种作用力的相互影响, 包括压力梯度、科里奥利力、黏滞力和离子曳力等, 这些因素共同决定了热层风的模式[1–4]. 在地磁扰动时期, 与焦耳加热相关的离子阻力和压力梯度增强导致的大规模风扰动会从高纬度向中低纬度传播[5–9]. 通过地基法布里–珀罗干涉仪 (FPI) 观测数据, 对地磁暴期间的全球风环流进行了大量研究[10–23], 描述了不同地磁活动水平下热层风的形态.

近年来, 多项研究利用地基数据对南北半球热层风场的差异进行了深入探讨, 但基本都是利用单个地基台站或者台站网的观测数据, 而结合南北半球地基观测数据的研究较少. Yatagai 等[24] 利用日本和澳大利亚的全天空气辉成像仪数据, 首次研究了亚洲–大洋洲地区约 250 km 高度的热层夜间风的水平结构气候学, 提出北半球热层风具有明显的季节变化, 南半

球的风向变化不如北半球明显. 非洲地区作为南半球中纬度的重要区域, 近年来逐渐成为热层风场研究的焦点之一. 南非 Sutherland 站 (32.2°S, 20.48°E; 地磁纬度 40.7°S) 是南半球中纬度地区的重要观测站点. Ojo 等[25] 利用该站的 FPI 观测数据, 首次对 2018 年 2 月至 2019 年 1 月期间的夜间热层风场进行详细的气候学研究, 南非地区的热层风场表现出显著的季节变化. 这些研究为理解非洲地区热层风场的独特行为提供了重要依据, 但是由于观测数据的时空覆盖范围有限, 非洲地区热层风场的系统性研究仍需进一步深入, 尤其是磁暴时期南北半球中纬度地区热层风场扰动的系统性对比研究仍然不足.

XLON FPI 站 (40.2°N, 117.6°E, 磁纬 35°N) 由中国子午工程于 2010 年建成[26], SAAO FPI 站 (32.2°S, 20.48°E, 磁纬 40.7°S) 是波士顿大学观测网的一部分, 于 2018 年建成[25]. 这两个台站为研究南北半球中纬度地区地磁暴期间热层风扰动提供了风场测量数据. 这里选择位于南北半球的两个 FPI 地基观测站, 通过对比分析, 探讨热层风场在磁暴事件中的响应特征及其差异.

1 观测仪器与 TIEGCM 模型

1.1 FPI 观测站

表 1 给出了 XLON FPI 和 SAAO FPI 两个台站的地理位置. 其中中国子午工程的 XLON FPI 自 2010 年 4 月起开始运行[26]. XLON FPI 配备 3 个滤波通道, 用于测量不同高度的夜间气辉辐射, 分别为 OH 892.0 nm (约 87 km), OI 557.7 nm (约 97 km) 和 OI 630.0 nm (约 250 km). 在每个测量周期内, 系统对天顶、北、南、东、西 5 个方向进行采样, 其仰角为 45°. OH 892.0 nm 积分时间为 3 min, 风场误差为 6 m·s^{-1}; OI 557.7 nm 积分时间为 3 min, 风场误差为 1 m·s^{-1}; OI 630.0 nm 积分时间为 5 min, 风场误差为 2～6 m·s^{-1}, 经向和纬向风的时间分辨率约为 1 h[27]. XLON FPI 工作原理以及风场数据处理方法的介绍, 参见文献 [26,28–31]. 这里分析 2018 年 3 月 18 日采集的 XLON FPI 红线 (OI 630.0 nm) 风场数据.

表 1 XLON 和 SAAO 台站位置

Table 1 Locations of XLON and SAAO stations

Station	Longitude/(°)	Latitude/(°)
XLON	117.6 E	40.2 N
SAAO	20.48 E	32.2 S

波士顿大学观测网的 SAAO FPI 站于 2018 年建成[25]. FPI 测量的是 630.0 nm 波长处的红线发射, 该发射是通过 O_2^+ 的解离重组产生的[32]. 夜间红线辐射一般出现在大约 250 km 的高度, 通过以高光谱分辨率测量这种辐射的多普勒频移, 可利用 FPI 估算视线中性风速, 其核心光学组件包括 15 mm 空气间隙的标准具 (反射率 77%)、630.0 nm 窄带滤光片 (1 nm 带宽) 和制冷 CCD 探测器 (–60℃ 工作温度), 配合稳频 HeNe 激光进行实时校准, SAAO FPI 先观测天顶方向, 分别观测 4 个基点方向 (北、东、南、西), 仰角为 45°, 典型的观测周期为 27 min[25]. Fisher 等[33] 详细介绍了 FPI 仪器的设计和数据处理. 本文主要分析 2018 年 3 月 18－19 日采集的 SAAO FPI 红线风场数据.

1.2 TIEGCM 模型

TIEGCM 是美国国家大气研究中心高空观测站 (NCAR/HAO) 开发的电离层–热层耦合系统三维时变模型[34]. TIEGCM 纳入了由 Heelis 或 Weimer 模型[35,36] 导出的高纬度电场、由 $F_{10.7}$ 指数参数化的太阳极紫外线和紫外线通量[37], 以及由全球尺度波模型 (GSWM)[38,39] 生成的迁移和非迁移昼夜潮汐和半昼夜潮汐. 此外, 该模型还可以纳入利用宽带发射辐射测量法探测大气层 (SABER) 和 TIDI 等仪器观测到的潮汐[40,41]. 该模型地理纬度和地理经度的水平分辨率为 2.5°× 2.5°, 包括 57 个垂直气压层, 高度约 97～700 km (取决于太阳活动)[34,42]. TIEGCM 每小时输出一次, 形成用于建模和分析的综合数据库. 在本文中, 选取 TIEGCM 2.5 版本模拟了 2018 年 3 月的热层风场数据, 并根据地基台站的经纬度在模型中选取离台站最近的点, 其中平静期选取 2018 年 3 月 13 日 10:00 UT 至 14 日 10:00 UT 的数据, 磁暴期选取 2018 年 3 月 18 日 10:00 UT 至 19 日 10:00 UT 的数据.

2 磁暴数据分析

2.1 2018 年 3 月 18 日磁暴事件

2018 年 3 月 18 日发生了一起磁暴事件. 图 1(a) 所示以 GSM 坐标表示 IMF B_y 和 B_z 分量, 可以看

出 IMF B_y 大部分为负值, 在 3 月 18 日 18:00 UT 至 3 月 19 日 02:00 UT, 其主要在–4.9～2.9 nT 内振荡. IMF B_z 在 3 月 18 日 16:00 UT 左右开始南向. 图 1 还给出了 Kp, Dst 和极光带电集流 AE 地磁指数的变化情况, 表征了由此产生的地磁暴. 在 3 月 18 日 18:00－23:00 UT 同步期间, Kp 指数最大达到 6, 按 NOAA 对于磁暴的等级划分*, 此次磁暴事件为 G2 级 (中等) 磁暴事件. Dst 指数表示环电流粒子的总能量, $|Dst|_{\max}$ 在 50～100 nT 的地磁暴被归类为中等地磁暴; $|Dst|_{\max}$ 在 100～200 nT 的地磁暴被归类为强地磁暴[43–45]. 在此次磁暴事件中, $|Dst|_{\max}$ 约为 50 nT, 按 Dst 指数划分, 2018 年 3 月 18 日磁暴事件为中等磁暴事件. 基于 AE 在 400～500 nT 为弱地磁活动和 AE 在 1000 nT 为强地磁活动的定义, 2018 年 3 月 18 日 18:00 UT 时发生了中等地磁活动, $AE > 800$ nT. 地磁指数的变化可能是受冕洞高速流的影响. 当能量沉积到地球空间系统时, 其影响预计从高纬度向低纬度传播, 从而改变地球的热层–电离层系统. 以下利用 XLON 和 SAAO 观测站获得的测量数据研究南北半球中纬度的相关变化.

2.2 观测值与模型结果比较

2.2.1 XLON 台站

图 2 给出了热层风在 XLON 台站观测值以及 TIEGCM 模型结果平静期内每小时的平均变化和 3 月 18－19 日的日变化情况. 其中暴时为 18 日 18:00 UT 至 19 日 02:00 UT, 纬向风在平静期夜间主要为东向风, 最大风速在 00:00 LT 达到 89 m·s^{-1}, 如图 2(a) 所示, 模型结果在东向低估了 FPI 观测数据, 在西向高估了 FPI 观测数据, 并且由东向风转为西向风的时间模型比地基观测数据早 1 h, 暴时 FPI 观测到的纬向风变化不明显. 在 2018 年 3 月 18 日 00:00 LT 纬向风速为 23 m·s^{-1}, 如图 2(c) 所示, 模型结果具有明显的向西扰动现象, 最大风速在 06:00 LT 左右达到–118.6 m·s^{-1}. 如图 2(b) 所示, 经向风在平静期夜间主要为赤道向风, 最大风速在 01:00 LT 达到–47.3 m·s^{-1}, 模型高估了 FPI 的经向风观测数据, 最大风速达到–86.1 m·s^{-1}. 图 2(d) 表明, 在磁暴开始前, 地基观测数据和模型数据均显示了经向风有向赤道方向的增强现象, 地基观测数据显示在 02:00 LT 左右最大风速达到–110 m·s^{-1}, 然而进入磁暴期后, 地基观测数据大幅减小, 模型高估了观测数据.

2.2.2 SAAO 台站

与图 2 类似, 图 3 给出了 SAAO 台站以及 TIEGCM 模型热层风的平静期月平均变化和日变化. 图 3(a) 表明, 在平静期, 纬向风主要为东向风, 最大风速在 23:00 LT 左右达到 82.6 m·s^{-1}, 在 02:00 LT

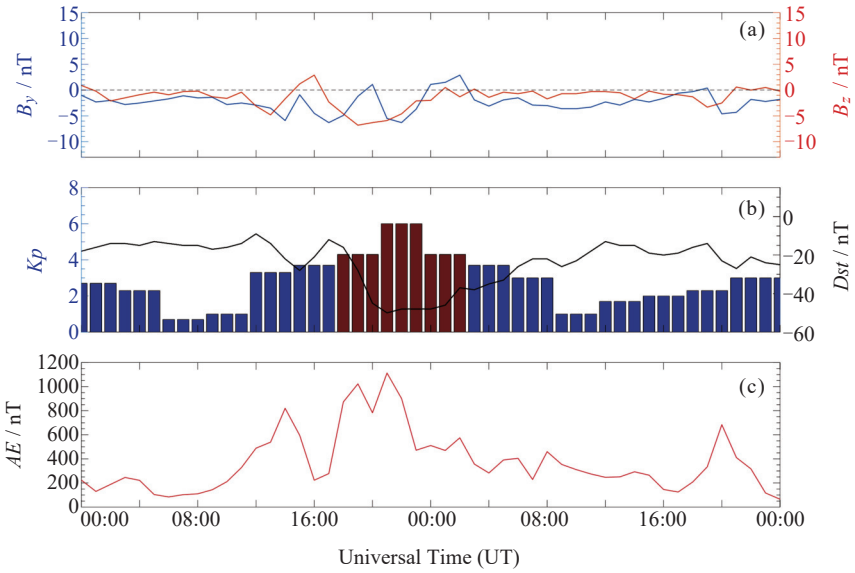

图 1 2018 年 3 月 18－19 日行星际磁场 B_y, B_z 分量及地磁指数 Kp, Dst, AE 随时间的变化

Fig. 1 Time variations of IMF B_y, B_z and geomagnetic indices Kp, Dst, AE during 18－19 March 2018

* https://www.swpc.noaa.gv/noaa-scales-explanation

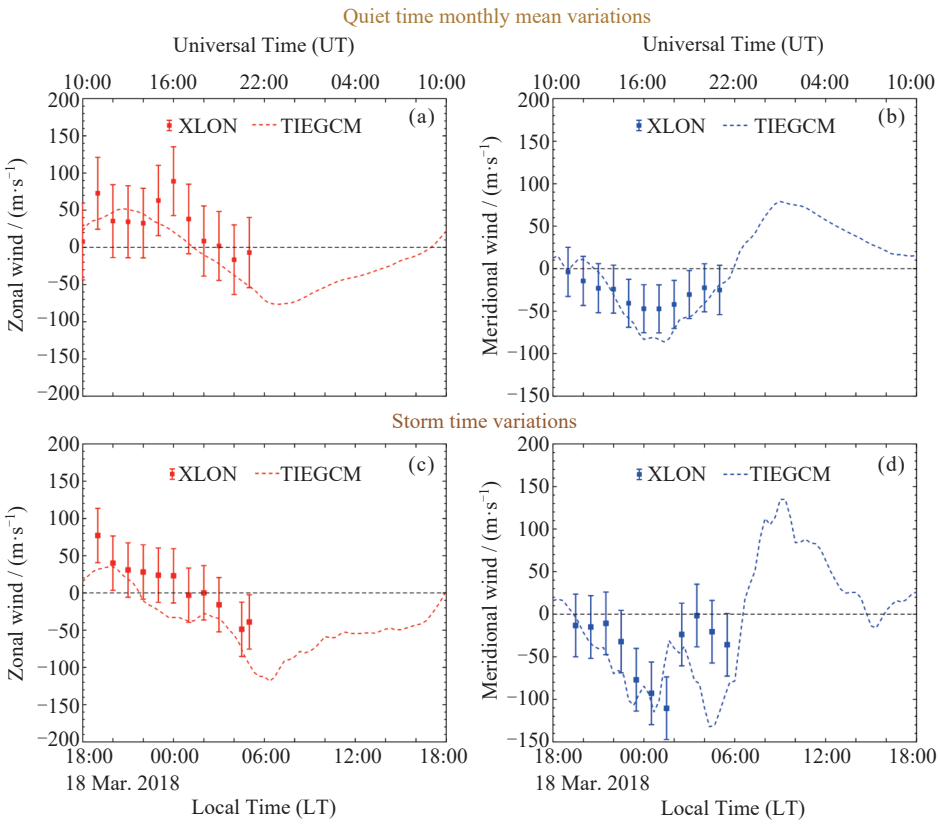

图 2 XLON 台站观测数据与 TIEGCM 模型数据在热层风场纬向风和经向风随世界时和地方时的变化

Fig. 2 Thermospheric zonal and meridional winds from XLON observation and TIEGCM simulation as functions of UT and LT

左右转向为西向风, 最大风速在 06:00 LT 达到 –47.18 m·s^{-1}; 从图 3(b) 可以看出, 经向风主要为赤道向风, 最大风速在 00:00 LT 达到 71.7 m·s^{-1}, 模型扰动趋势与观测数据均基本一致. 图 3(c) 所示的磁暴期显示, 纬向风先向东增强, 最大风速在 22:00 LT 左右达到 107.4 m·s^{-1}, 2 h 后在 00:00 LT 左右反转向西, 并发生了明显的风速增强现象, 最大风速在 04:00 LT 达到–165 m·s^{-1}, 模型得到的纬向风由东向风转为西向风的反转时间约提前 2 h, 并且明显低估了东向的观测数据; 图 3(d) 表明, 经向风在磁暴刚发生时先向极区方向有小幅增强, 2 h 后反转向赤道方向, 并且风速明显向赤道方向增强, 最大风速在 22:00 LT 达到 128 m·s^{-1}, 模型结果与经向风观测数据的扰动趋势基本一致.

3 分析与讨论

研究使用两个地基 FPI 观测数据与 TIEGCM 模型数据分析了 2018 年 3 月 18 日磁暴事件南北半球中纬度地区热层风场的响应特征. 磁暴发生时, XLON FPI 处于观测后半段即 02:00 LT, SAAO FPI 刚开始观测即夜间 20:00 LT, SAAO FPI 能更好地捕捉磁暴在整个过程中热层风场的变化. 结果表明, 南半球的热层风变化比北半球更明显, 模型与观测数据在平静期的符合程度较高; 在磁暴期, 虽然热层风的模型与观测数据变化趋势基本一致, 但是在风速上存在较大差别, 尤其是 SAAO 台站的纬向风和 XLON 台站的经向风, SAAO 台站纬向风向东的最大风速为 107 m·s^{-1}, 而模型为 32 m·s^{-1}; XLON 台站经向风向赤道方向最大为 –35 m·s^{-1}, 而模型为 –132 m·s^{-1}, 模型低估了 SAAO 台站的纬向风, 却高估了 XLON 台站的经向风.

在南非地区, 由于台站数量限制, 针对南非中纬度地区热层风场对磁暴响应特征的研究还不完全, Yatagai 等[24] 利用日本和澳大利亚的全天空气辉成像仪数据, 首次展示了亚洲–大洋洲地区约 250 km 高

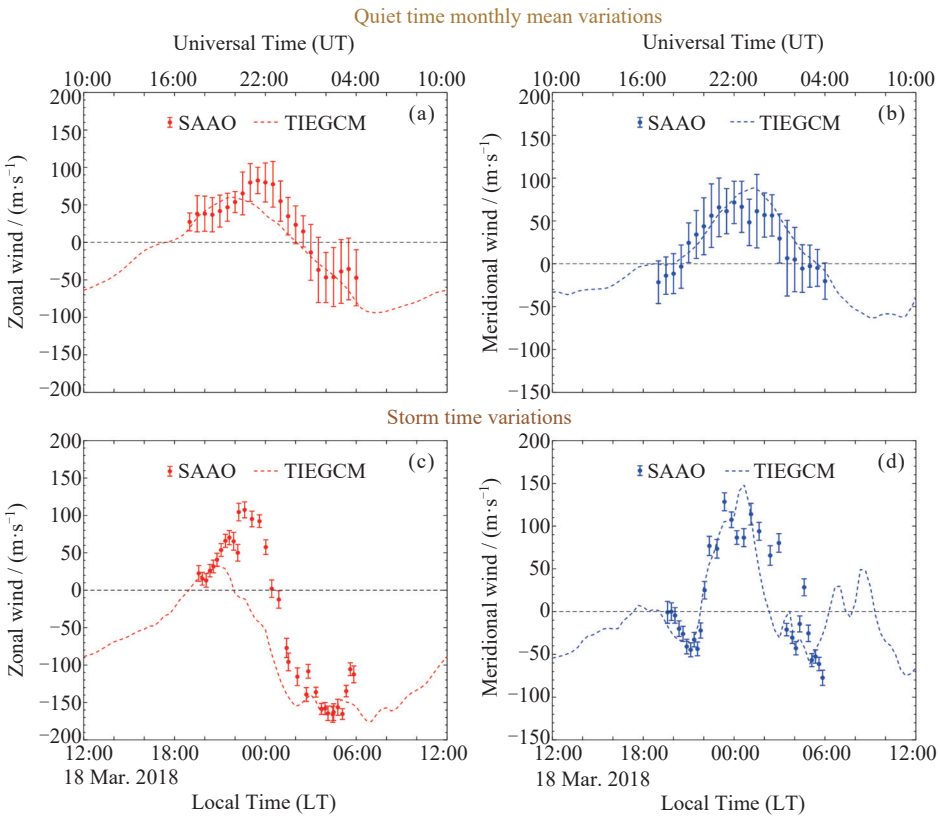

图 3 SAAO 台站观测数据与 TIEGCM 模型数据在热层风场纬向风和经向风随世界时和地方时的变化

Fig. 3 Thermospheric zonal and meridional winds from SAAO observation and TIEGCM simulation as functions of UT and LT

度的热层夜间风的水平结构气候学, 北半球热层风具有明显的季节变化, 南半球的风向变化不如北半球明显. Rukundo[46] 使用 HWM-14 模式报道了在南半球, 由于半球间的季节不对称性, 平静期傍晚和早晨的风向分别为赤道向和极区向, 磁暴期间, 向赤道方向的扰动比平静期间的风更快地增强了由极区向到赤道向的逆转; 在平静期, 纬向风在北半球午夜后转为西向风, 南半球则相反, 并且暴时纬向风在两个半球的反转时间会提前, 反转的幅度会增强, 上述模拟的风场结果与之前在非洲地区的 FPI 测量结果一致[25,33]. 本研究使用 TIEGCM 模型数据也观测到部分上述现象, 在平静期, 南半球经向风傍晚为赤道向, 早晨为极区向, 但是在进入磁暴期之前, 经向风有向极区方向的小幅加速, 2 h 后反转向赤道方向显著增强, SAAO 地基观测数据也观测到上述现象; 为此, 研究了模型模拟的风场随时间变化的全球分布 (见图 4～6), 发现磁暴初期南半球经向风向极区方向增强和北半球经向风向赤道方向减小可能与暴前的波动结构有关. 模型得到的纬向风由东向风转为西向风的反转时间约提前 2 h, 并且明显低估了向东方向的观测数据.

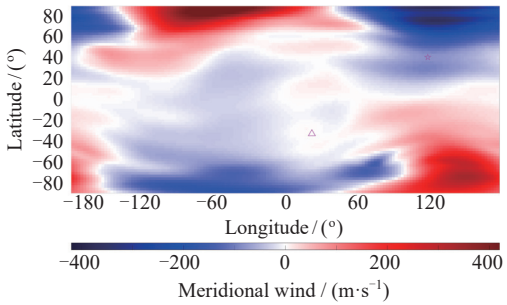

图 4 TIEGCM 模拟的 2018 年 3 月 18 日 16:00 UT 经向风全球分布

Fig. 4 Global distribution of meridional wind at 16:00 UT on 18 March 2018 simulated by TIEGCM

Huang 等[16] 利用 XLON 观测数据和 HWM07 模式研究了热层风场对 2015 年 3 月 17—19 日磁暴事件的响应特征, 报道了在磁暴期间纬向风明显向西, 经向风在磁暴初期只有向极区方向, 随着能量的持续

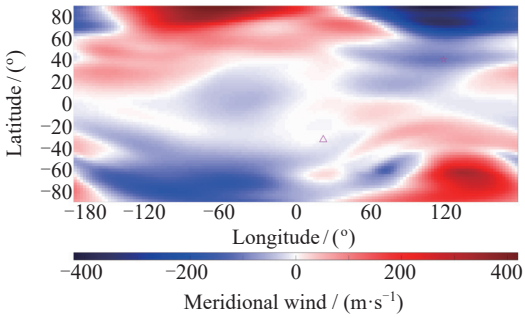

图 5 TIEGCM 模拟的 2018 年 3 月 18 日 17:00 UT 经向风全球分布

Fig. 5 Global distribution of meridional wind at 17:00 UT on 18 March 2018 simulated by TIEGCM

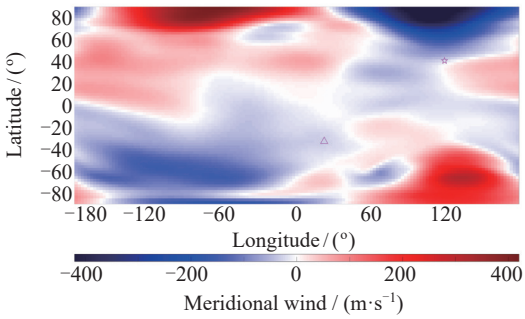

图 6 TIEGCM 模拟的 2018 年 3 月 18 日 18:00 UT 经向风全球分布

Fig. 6 Global distribution of meridional wind at 18:00 UT on 18 March 2018 simulated by TIEGCM

注入, 有向南方向的激增, 并且 HWM07 模式结果在磁暴初期高估了观测数据, 在磁暴中后期低估了观测数据. 在本文研究中, 纬向风在暴时并未发现明显的向西扰动, 并且在磁暴开始前的 4 h 经向风有向赤道方向的加速, TIEGCM 模型也有上述现象, 对比地磁指数的变化特征发现, AE 指数在此段时间增强, Dst 指数减小, 并且 B_z 为南向. 进入磁暴期, TIEGCM 模型数据显示有明显的向赤道方向增强, 但是观测数据与模型结果之间相差较大, 模型高估了观测数据.

4 结论

研究使用 XLON 台站 (40.2°N, 117.6°E; 磁纬 35°N) 和 SAAO 台站 (32.2°S, 20.48°E; 磁纬 40.7°S) 观测数据以及 TIEGCM 模型数据, 分析了 2018 年 3 月 18 日磁暴事件期间南北半球中纬度地区热层风场的响应特征.

南半球的热层风变化比北半球更为显著, 并且模型结果与观测数据在平静期的吻合度较高. 然而在磁暴期间, 尽管模型结果与观测数据在风场变化趋势上基本一致, 但是二者在风速上存在显著差异. 特别是在 SAAO 台站的纬向风和 XLON 台站的经向风方面, 模型明显低估了 SAAO 台站东向的纬向风, 却高估了 XLON 台站赤道向的经向风.

此外, 研究还发现, 南半球经向风在磁暴初期表现出向极区方向的增强, 随后在 2 h 后显著转向赤道方向, 这一现象与地基观测数据一致. 纬向风由东向风转为西向风的反转时间在模型中提前了约 2 h, 且模型明显低估了向东方向的观测数据. 这些发现与以往研究结果部分一致, 但也揭示了 TIEGCM 模型在模拟磁暴期间热层风场响应时的局限性. 未来的研究应结合更多台站数据和更精细的模型模拟, 全面揭示热层风场对磁暴的响应特征及其深层物理机制.

致谢 空间环境地基综合监测网 (中国子午工程) 提供了部分数据, SAOO FPI 数据由 SANSA 和 University of Illinois Urbana-Champaign 合作获得, IMF 的 B_z, B_y, Dst, Kp 指数来自 OMNIWeb 数据浏览器 (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html). TIEGCM 模式模拟数据由 NASA-CCMC (https://ccmc.gsfc.nasa.gov) 提供. Michael Kosch 和 Jonathan Makela 提供了测量数据, Zama Katamzi-Joseph 为本文研究提供了帮助.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] HEPPNER J P, MILLER M L. Thermospheric winds at high latitudes from chemical release observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, **87**(A3): 1633-1647

[2] HSU V W, THAYER J P, WANG W B, *et al.* New insights into the complex interplay between drag forces and its thermospheric consequences[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(10): 10417-10430

[3] KILLEEN T L, ROBLE R G. An analysis of the high-latitude thermospheric wind pattern calculated by a thermospheric general circulation model: 1. Momentum forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, **89**(A9): 7509-7522

[4] RISHBETH H, YELLE R V, MENDILLO M. Dynamics of Titan's thermosphere[J]. *Planetary and Space Science*,

2000, **48**(1): 51-58

[5] FORBES J M, ROBLE R G, MARCOS F A. Thermospheric dynamics during the March 22, 1979, magnetic storm: 2. comparisons of model predictions with observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, **92**(A6): 6069-6081

[6] BURNS A G, KILLEEN T L, DENG W, *et al.* Geomagnetic storm effects in the low-to middle-latitude upper thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A8): 14673-14691

[7] FULLER-ROWELL T J, CODRESCU M V, MOFFETT R J, *et al.* Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A3): 3893-3914

[8] BUONSANTO M J. Ionospheric Storms — a review[J]. *Space Science Reviews*, 1999, **88**(3/4): 563-601

[9] FEJER B G, EMMERT J T, SHEPHERD G G, *et al.* Average daytime F region disturbance neutral winds measured by UARS: initial results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(13): 1859-1862

[10] YU T, HUANG C, ZHAO G X, *et al.* A preliminary study of thermosphere and mesosphere wind observed by Fabry-Perot over Kelan, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4981-4997

[11] WU Q, NOTO J, KERR R, *et al.* First Palmer and Millstone Hill midlatitude conjugate observation of thermospheric winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(4): 3016-3028

[12] WEI Y F, GU S Y, LI N, *et al.* Passive optical observation of mesosphere and thermosphere wind over three stations in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(3): e2023JA032214

[13] OYAMA S, VANHAMÄKI H, CAI L, *et al.* Thermospheric wind response to march 2023 storm: largest wind ever observed with a Fabry-Perot Interferometer in Tromsø, Norway since 2009[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(3): e2023SW003728

[14] OKOH D, BOUNHIR A, HABARULEMA J B, *et al.* Thermospheric neutral wind measurements and investigations across the African region—a review[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(6): 863

[15] LOUTFI A, BOUNHIR A, PITOUT F, *et al.* Thermospheric neutral winds above the Oukaimeden Observatory: effects of geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(7): e2019JA027383

[16] HUANG C, XU J Y, ZHANG X X, *et al.* Mid-latitude thermospheric wind changes during the St. Patrick's Day storm of 2015 observed by two Fabry-Perot interferometers in China[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **61**(7): 1873-1879

[17] HERNANDEZ G, ROBLE R G, RIDLEY E C, *et al.* Thermospheric response observed over Fritz Peak, Colorado, during two large geomagnetic storms near Solar Cycle Maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, **87**(A11): 9181-9192

[18] HERNANDEZ G, ROBLE R G. Thermospheric nighttime neutral temperature and winds over Fritz Peak Observatory: observed and calculated solar cycle variation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A8): 14647-14659

[19] FORBES J M, ZHANG X L, BRUINSMA S. Middle and upper thermosphere density structures due to nonmigrating tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A11): A11306

[20] FEJER B G, EMMERT J T, SIPLER D P. Climatology and storm time dependence of nighttime thermospheric neutral winds over Millstone Hill[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A5): SIA 3-1-SIA 3-9

[21] EMMERT J T, FAIVRE M L, HERNANDEZ G, *et al.* Climatologies of nighttime upper thermospheric winds measured by ground-based Fabry-Perot interferometers during geomagnetically quiet conditions: 1. Local time, latitudinal, seasonal, and solar cycle dependence[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A12): A12303

[22] TAGI T, DYSON P L. The response of the mid-latitude thermospheric wind to magnetic activity[J]. *Planetary and Space Science*, 1985, **33**(4): 461-467

[23] BRUM C G M, TEPLEY C A, FENTZKE J T, *et al.* Long-term changes in the thermospheric neutral winds over Arecibo: climatology based on over three decades of Fabry-Perot observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A2): A00H14

[24] YATAGAI A, OYAMA S I. Thermospheric nocturnal wind Climatology observed by Fabry-Perot interferometers over the Asia-Oceania region[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2016, **94**(6): 525-536

[25] OJO T T, KATAMZI-JOSEPH Z T, CHU K T, *et al.* A climatology of the nighttime thermospheric winds over Sutherland, South Africa[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(1): 209-219

[26] YUAN W, XU J Y, MA R P, *et al.* First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(35): 4046-4051

[27] WU Q, GABLEHOUSE R D, SOLOMON S C, *et al.* A new Fabry-Perot interferometer for upper atmosphere research[C]//*Proceedings Volume 5660, Instruments, Science, and Methods for Geospace and Planetary Remote Sensing*. Honolulu, Hawai'i: SPIE2004: 218-227

[28] YUAN W, LIU X, XU J, *et al.* FPI observations of nighttime mesospheric and thermospheric winds in China and their comparisons with HWM07[J]. *Annales Geophysicae*, 2013, **31**(8): 1365-1378

[29] JIANG G Y, XU J Y, WANG W B, *et al.* A comparison of quiet time thermospheric winds between FPI observations

and model calculations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(9): 7789-7805

[30] JIANG G Y, XU J Y, YUAN W, *et al*. A comparison of mesospheric winds measured by FPI and meteor radar located at 40N[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(5): 1245-1250

[31] LIU X, XU J Y, ZHANG S R, *et al*. Thermospheric planetary wave-type oscillations observed by FPIs over Xinglong and Millstone Hill[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(8): 6891-6901

[32] LINK R, COGGER L L. A reexamination of the O I 6300-Å nightglow[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1988, **93**(A9): 9883-9892

[33] FISHER D J, MAKELA J J, MERIWETHER J W, *et al*. Climatologies of nighttime thermospheric winds and temperatures from Fabry-Perot interferometer measurements: from solar minimum to solar maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(8): 6679-6693

[34] QIAN L Y, BURNS A G, EMERY B A, *et al*. The NCAR TIE-GCM[M]//HUBA J, SCHUNK R, KHAZANOV G. Modeling the Ionosphere–Thermosphere System. San Francisco: American Geophysical Union, 2014: 73-83

[35] HEELIS R A, LOWELL J K, SPIRO R W. A model of the high-latitude ionospheric convection pattern[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, **87**(A8): 6339-6345

[36] WEIMER D R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A5): A05306

[37] RICHARDS P G, FENNELLY J A, TORR D G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A5): 8981-8992

[38] HAGAN M E, FORBES J M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D24): ACL 6-1-ACL 6-15

[39] HAGAN M E, FORBES J M. Migrating and nonmigrating semidiurnal tides in the upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A2): 1062

[40] 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

[41] WU Q, SHENG C, WANG W B, *et al*. The midlatitude thermospheric dynamics from an interhemispheric perspective[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 7971-7983

[42] 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

[43] SINGH A, RATHORE V S, SINGH R P, *et al*. Source identification of moderate (–100 nT<*Dst*<–50 nT) and intense geomagnetic storms (*Dst*<–100 nT) during ascending phase of solar cycle 24[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **59**(5): 1209-1222

[44] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, *et al*. What is a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A4): 5771-5792

[45] Loewe C A, Prölss G W. Classification and mean behavior of magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A7): 14209-14213

[46] RUKUNDO W. The ionospheric dynamics of the African sector responding to a severe geomagnetic storm: the storm of 3–5 November 2021[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(3): e2022SW003219

作者简介

夏新淼 女, 2000 年 12 月出生于四川省泸州市, 现为中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为中高层大气物理方向.

E-mail: xiaxinmiao22@mails.ucas.ac.cn

姜国英（通信作者） 女, 1979 年 4 月出生于河北省邢台市, 现为中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为中高层大气动力学、热层–电离层耦合等.

E-mail: gyjiang@swl.ac.cn