0254-6124/2026/46(5)-0001-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LUO Ji, WEN Bo, WU Kun, LIU Si, XIAO Fuliang, ZHANG Aibin, XU Jiyao, ZHU Yajun. Propagation and Evolution of MSTIDs over the Low-Latitude Region of China during 8 December 2019 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–11. CSTR:32142.14.cjss.2025–0221. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0221

2019 年 12 月 8 日中国低纬区域电离层行扰事件传播演化过程*

罗 吉[1,2] 文 博[1,2] 吴 坤[1,2] 刘 斯[1,2]
肖伏良[1,2] 张爱彬[3,4] 徐寄遥[3,4] 朱亚军[3,4]

1(长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410114)

2(长沙理工大学 近地空间电磁环境监测与建模湖南省普通高校重点实验室 长沙 410114)

3(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 北京 100190)

4(中国科学院大学院 北京 100049)

摘 要 利用子午工程富克台站 (19.5°N, 109.1°E) 气辉成像仪观测数据、数字测高仪探测数据、北海台站 (21.7°N, 109.2°E) GPS(Global Positioning System)-TEC(Total Electron Content) 探测数据及 TIE-GCM(Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model) 模拟数据, 对中国低纬区域 2019 年 12 月 8 日富克台站上空的夜间中尺度电离层行进式扰动 (Medium-scale Travelling Ionospheric Disturbances, MSTIDs) 事件进行了研究. 结果表明, 在夜间中国低纬区域上空观测到典型的北半球 MSTID 结构, 其相平面呈西北–东南分布的明暗相间条带, 向西南方向传播. 在传播过程中, MSTIDs 两条暗条带发生了追赶现象, 后出现在观测视野中的暗条带追赶上了先出现的暗条带. 利用 TIE-GCM 模型模拟了夜间背景风场与电子密度分布, 模拟结果显示, 电离层背景纬向风场梯度差异与低纬区域赤道电离异常区高密度电子密度分布的协同作用是调控此次 MSTIDs 发生追赶过程的主要原因. 本研究为不均匀的中性风场以及电子密度分布对 MSTIDs 传播特征的影响提供了理论依据.

关键词 电离层行进式扰动, 全天空气辉成像仪, 数字测高仪, 电离层中性风场

中图分类号 P352

Propagation and Evolution of MSTIDs over the Low-Latitude Region of China during 8 December 2019

LUO Ji[1,2] WEN Bo[1,2] WU Kun[1,2] LIU Si[1,2] XIAO Fuliang[1,2]
ZHANG Aibin[3,4] XU Jiyao[3,4] ZHU Yajun[3,4]

1(*School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114)

* 湖南省自然科学基金项目 (2026JJ50164), 湖南省教育厅科研资助项目 (25B0196) 和太阳活动与空间天气全国重点实验室专项基金项目共同资助

2025-12-17 收到原稿, 2026-02-02 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/)

2(*Hunan Province Higher Education Key Laboratory of Modeling and Monitoring on the Near - Earth Electromagnetic Environments, Changsha University of Science and Technology, Changsha*, 410114)

3(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract This study investigates a nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance (MSTID) event observed over Fuke Station (19.5°N, 109.1°E) in low-latitude China on 8 December 2019, using airglow imaging and Digisonde observations from the Chinese Meridian Project's Fuke Station, Global Positioning System (GPS) total electron content (TEC) measurements from Beihai Station (21.7°N, 109.2°E), and simulations from the Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model (TIE-GCM). The observations reveal typical northern hemisphere nighttime MSTID structures, characterized by alternating bright and dark bands with northwest–southeast-oriented bands propagating southwestward. During the propagating process, two dark bands exhibited a chasing phenomenon, in which the band that entered the field of view later caught up with the preceding band. The TIE-GCM was used to simulate the nighttime background neutral wind and electron density distribution. The simulation results suggest that the combined effects of spatial variations in the background zonal wind gradient and enhanced electron densities within the low-latitude equatorial ionization anomaly region were primarily responsible for regulating this chasing process. This study provides a theoretical basis for understanding how spatially nonuniform neutral winds and electron density distributions influence MSTID propagation.

Key words Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs), All-sky imager, Digisonde, Ionospheric neutral wind

0 引言

中尺度行进式电离层扰动 (MSTIDs) 是主要发生在中纬度区域的电离层扰动现象, 其产生机制通常与 Perkins 不稳定性有关[1]. MSTIDs 的典型特征包括: 波长范围在数百至数千公里, 传播速度约为每秒数百米[2–4]. 在北半球 (南半球), MSTID 相平面通常呈现西北–东南 (东北–西南) 排列, 并沿西南 (西北) 方向传播[5–8]. 目前, 已有大量研究利用多种观测数据对 MSTIDs 的产生机制和结构特征进行了详细分析和研究[9–13].

近年来, MSTIDs 的演化过程及传播特征成为研究热点, 特别是关于 MSTIDs 之间相互作用的研究. Luo 等[14] 基于中国兴隆台站 (40.4°N, 117.6°E) 的气辉观测数据、法布–珀罗风场探测数据及 Swarm 卫星探测数据, 发现 2016 年 8 月 8 日的 MSTIDs 在背景电离层等离子体和风场调制下发生了大角度旋转和部分消失的现象. 随后, 其又在该台站观测到相互追赶并发生相互作用的 MSTID 结构[15]. 类似地, Yadav 等[16,17] 利用气辉观测数据报道了印度地区 Hanle 台站 (32.7°N, 78.9°E)MSTIDs 的相互作用, Patgiri 等[18] 进一步研究了该台站多个 MSTIDs 之间的相互作用事件, 并指出极化电场在该过程中的关键作用.

值得注意的是, 上述研究均聚焦于中纬度区域. 已有大量研究表明, MSTIDs 同样可以传播至低纬地区或在低纬区域产生[19–22]. 近年来, 低纬地区也观测到少量 MSTIDs 相互作用现象. 例如, Otsuka 等[23] 通过气辉观测发现 MSTIDs 与等离子体泡相互作用导致等离子体泡消失. 在中国低纬地区, Wu 等[24] 利用气辉观测数据不仅观测到 MSTIDs 与赤道等离子体泡 (EPBs) 的相互作用, 并首次发现低纬地区相向运动并发生相互作用的 MSTID 事件. 尽管 MSTIDs 主要发生在中纬度区域, 但近年来在低纬地区观测到 MSTIDs 的频率明显增加. 然而, 目前关于低纬 MSTIDs 的产生机制仍不明确, 尤其是其特殊的传播

演化过程及物理机制亟待深入研究.

利用中国子午工程海南富克台站 (19.5°N, 109.1°E) 全天空气辉成像仪、数字测高仪等观测数据对 2019 年 12 月 8 日中国上空夜间 MSTID 事件进行详细研究, 分析了事件中 MSTIDs 的特征结构及暗条带追赶过程, 并探讨其演化过程中的物理机制.

1　主要数据

使用的主要数据包括全天空气辉成像仪观测数据、电离层数字测高仪探测数据、GPS(Global Positioning System)-TEC(Total Electron Content) 数据及 TIE-GCM(Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model) 模拟数据. 全天空气辉成像仪及数字测高仪均是子午工程海南富克台站 (19.5°N, 109.1°E) 的地基观测仪器. 全天空气辉成像仪主要由 180°的鱼眼镜头、CCD 探测元件和滤波轮组成. 关于该全天空气辉成像仪的详细信息在已有的一些研究中有非常详细的介绍[24–28]. 这里使用的气辉图片均已根据 Garcia 等[29] 提及的气辉观测图片处理方法进行处理, 并已将观测图片投影到 250 km 高度 1600 km × 1600 km 的地理空间坐标范围内. 在获取背景图像的过程中, 使用 1 h 的滑动平均获取背景图像, 然后再用相应图片减去背景图像获得明显的 MSTID 结构. 此外, 在计算 MSTIDs 的速度时, 主要采用以下方法: 在每幅气辉图像中识别 MSTID 暗条带的相平面位置 (通常取其后沿线), 并通过追踪条带相平面在不同时刻的位置变化计算不同条带的传播速度.

GPS-TEC 数据来自于广西北海台站 (21.7°N, 109.2°E)GPS 地面接收机, 数据选取了仰角 20°以上的观测数据, 轨道穿刺点高度为 400 km, 使用到的 TEC 为垂直 TEC(VTEC). 数字测高仪每 15 min 获取一次电离层频高图, 该数字测高仪的信息在之前的文章中已有详细介绍[30–33].

电离层背景风场和电子密度数据来源于 TIE-GCM 3.0 电离层热层模型的模拟, 该模型能够较好地模拟电离层各参量, 已被广泛用于电离层的相关研究[34]. 模型主要由美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发, 相关详细信息可从官方网站获取*.

2　结果与分析

2.1　气辉观测结果

图 1 给出了来自富克观测站 2019 年 12 月 8 日 03:08－05:35 LT 时段内气辉观测系列结果 (03:00 LT 之前的图片被云污染, 不可用). 03:00 LT 之后, 典型的 MSTID 结构出现在气辉观测视野中, 这些结构相平面沿西北–东南分布, 向西南方向传播, 呈现出典型的北半球 MSTID 结构特征. 这里主要关注 MSTID 结构的暗条带部分, 并根据这些暗条带进入气辉观测视野的先后顺序分别标注为 1, 2, 3.

03:08 LT 暗条带 1 进入观测视野. 03:32 LT 暗条带 2 进入视野. 在 03:32－03:57 LT 时段内, 暗条带 1 的传播速度约为 63.5 $m{\cdot}s^{-1}$, 暗条带 2 的传播速度约为 119.6 $m{\cdot}s^{-1}$. 在此过程中, 两个条带之间的距离逐渐减小. 04:03 LT 暗条带 3 进入观测视野, 暗条带 1 和 2 继续向西南方向传播. 在 04:09 LT 之后, 暗条带 1 的传播速度减小, 约为 59.8 $m{\cdot}s^{-1}$. 而在 04:09－04:34 LT 时段, 暗条带 2 和 3 仍保持西南向传播, 速度分别约为 95.7 $m{\cdot}s^{-1}$ 和 181.7 $m{\cdot}s^{-1}$. 在大约 04:21 LT 附近, 两条带之间的距离继续减小, 暗条带 2 追赶上了暗条带 1, 并且暗条带 2 的西南向部分结构几乎与暗条带 1 的结构融合在一起, 这也表示在该 MSTID 事件的传播过程中, 后面的 MSTID 结构追赶上了前面的 MSTID 结构. 此外, 在 04:21 LT 后, 条带 1 的北向结构逐渐消散. 此后, 三个条带继续向西南向传播, 自 04:40 LT 起, 暗条带 1 从观测视野中消散, 暗条带 2 于 04:40－05:17 LT 期间逐渐消散, 暗条带 3 自 05:35 LT 后逐渐消散.

2.2　GPS-TEC 与气辉同时观测结果

图 2 为 GPS-TEC 与气辉成像仪同时观测结果, 图 2(a) 为 GPS 轨道与气辉观测图片的叠加图, 图中实线是 GPS 该时间段经过该区域的轨迹. 研究选取 PRN G02(红色标注)、G05(绿色)、G17(蓝色) 及 G19(品红色)4 个轨道, 轨道上面三角形是对应该气辉图片时刻 PRN 的位置. 图 2(b) 为对应图 2(a) 在 2019 年 12 月 8 日 03:15－05:15 LT 各轨道检测的 VTEC 随时间的变化曲线. 对于轨道 G02, G17 及

* https://ncar.ucar.edu/

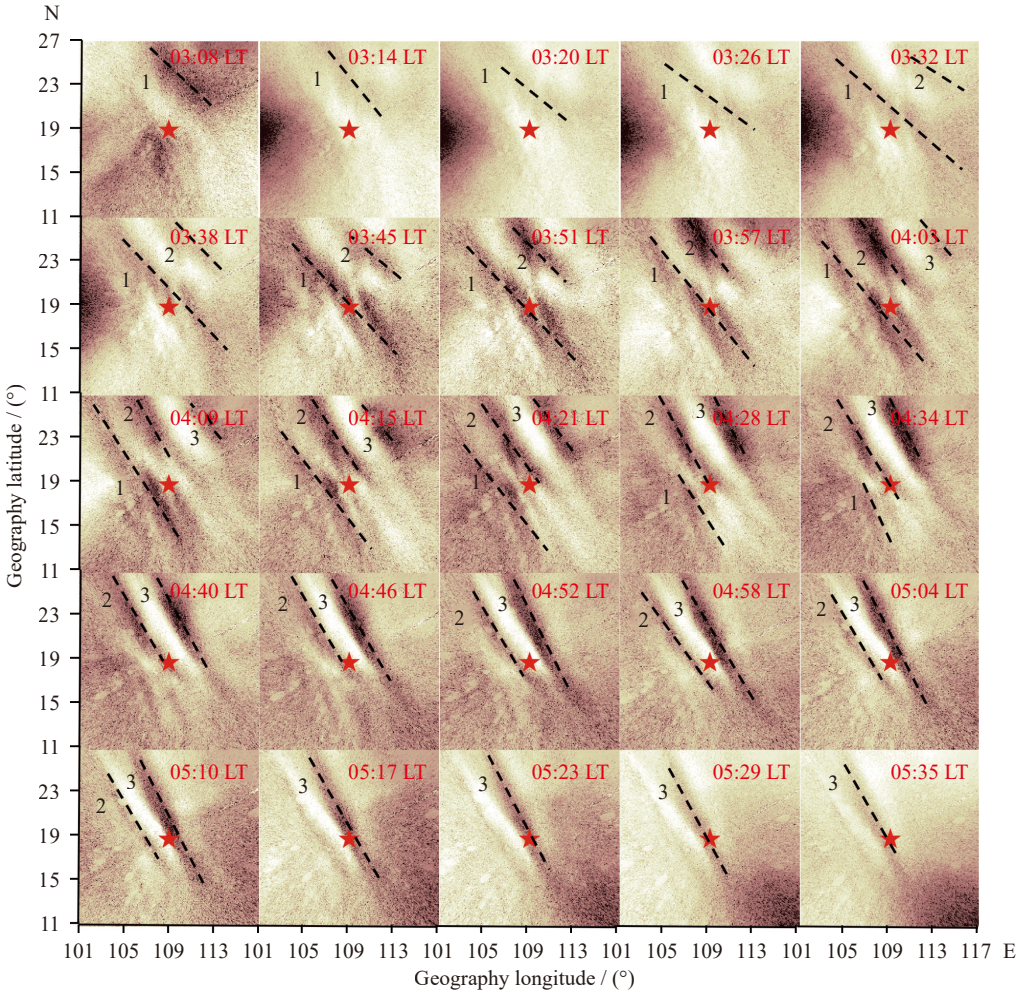


图 1 2019 年 12 月 8 日富克台站气辉观测结果 (数字 1, 2, 3 是根据暗条带进入气辉观测视野的先后顺序, 五角星代表富克观测站地理位置)

Fig. 1 Airglow observations at Fuke station on 8 December 2019 (Number1,2,and 3 are assigned according to the sequence where the dark bands enter the airglow field of view, and the red pentagram represents the geographic location of the Fuke Station)

G19, 在该时间段内这 3 个轨道均经过了气辉观测到的 MSTIDs 区域. 从图 2(b) 中能够明显看出, 这些轨道观测到的 VTEC 呈现出典型的 MSTID 波动结构, 并且根据相应时刻对应关系, 在图 2(b) 中标注出这些波谷对应气辉观测中的暗条带 1, 2, 3, 这些 TEC 的观测结果证实了该事件中气辉观测到的 MSTID 结构. 值得注意的是, G05 轨道虽然未直接经过气辉观测的 MSTIDs, 但是在该时间段 G05 轨道横跨了气辉观测视野的西南方区域, 并且从图 2 可以看出, 在该区域越往南, VTEC 值越高, 也就是说该事件发生的时间段虽然在午夜后, 但是赤道电离异常区 (EIA) 高电子密度峰值仍未完全消散.

2.3 数字测高仪观测结果

图 3 是来自富克台站 2019 年 12 月 8 日 01:00 LT—06:30 LT 数字测高仪的观测频高结果. 从图 3 可以看出, 当晚存在明显的扩展 F 结构. 大约在 02:00 LT 之前, 电离图中无扩展 F; 在 02:00 LT 之后, 电离图呈现出显著的扩展 F 结构, 并且随着时间的推移, 扩展 F 逐渐增强; 大约在 05:00 LT 后, 扩展 F 结构逐渐消失, 这与气辉观测结果一致. 气辉观测数据显示, 在 03:00 LT 之后, 在观测视野中出现 MSTID 结构, 而在 05:00 LT 后, MSTID 结构逐渐消失. 由于气辉观测数据在 03:00 LT 之前受到云的污染不可用, 而数字测高仪显示在 02:00 LT 附近已经

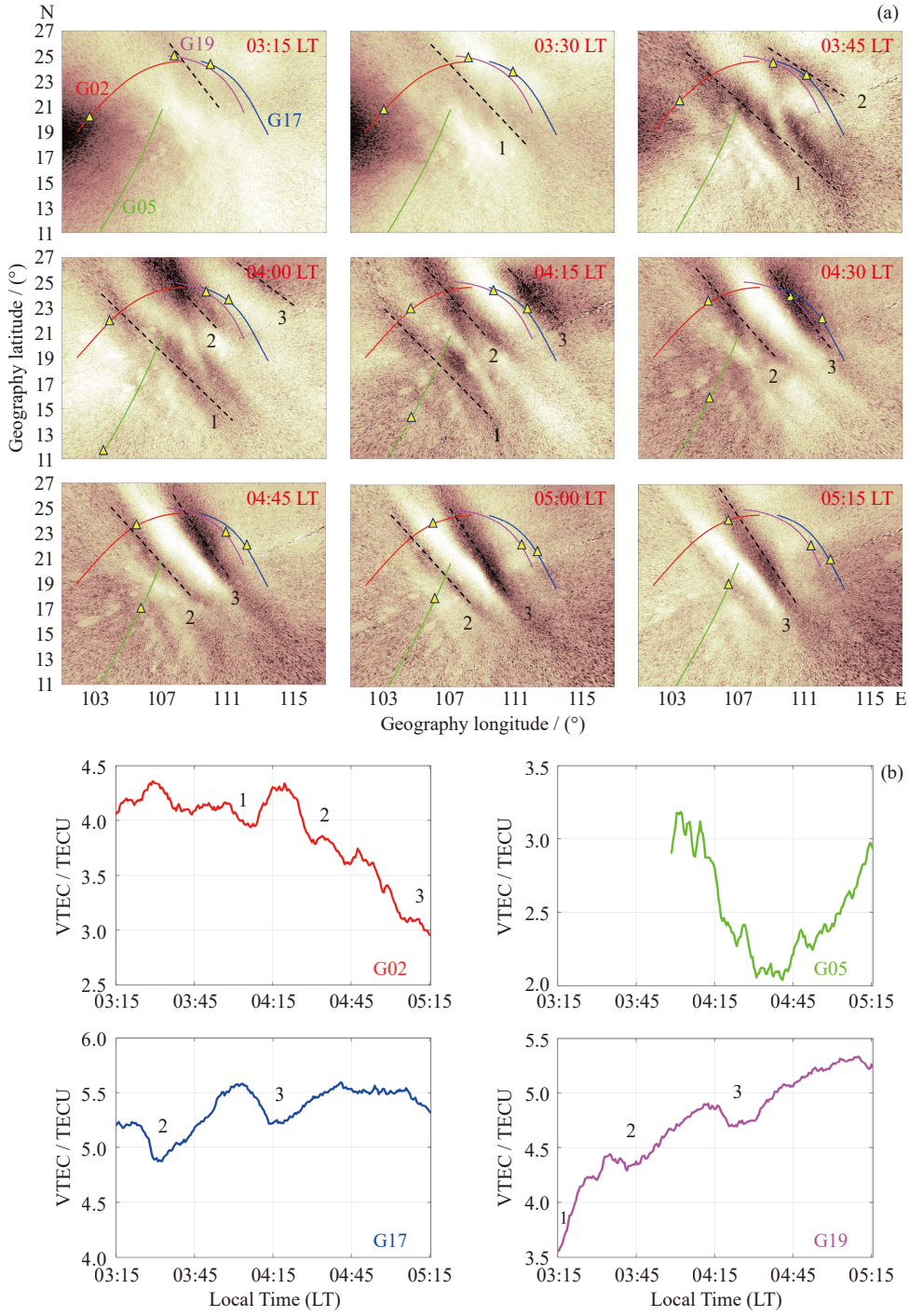


图 2　2019 年 12 月 8 日 GPS-TEC 与气辉同时观测结果. (b) 中曲线对应 (a) 中相同颜色的轨道轨迹

Fig. 2　Simultaneous observation results of GPS-TEC and airglow on 8 December 2019. Colored curves in chart (b) match the same -colored obital trajectories in chart (a)

出现扩展 F, 说明在当日夜间台站上空出现的 MSTIDs 最早应该在 02:00 LT 附近, 而气辉观测只是呈现了 03:00 LT 之后的观测结果. 总的来说, 数字测高仪及全天空气辉成像仪均同时观测到了当晚台站上空的 MSTID 结构.

3　讨论

本次事件展现了 MSTID 事件中特有的暗条带的

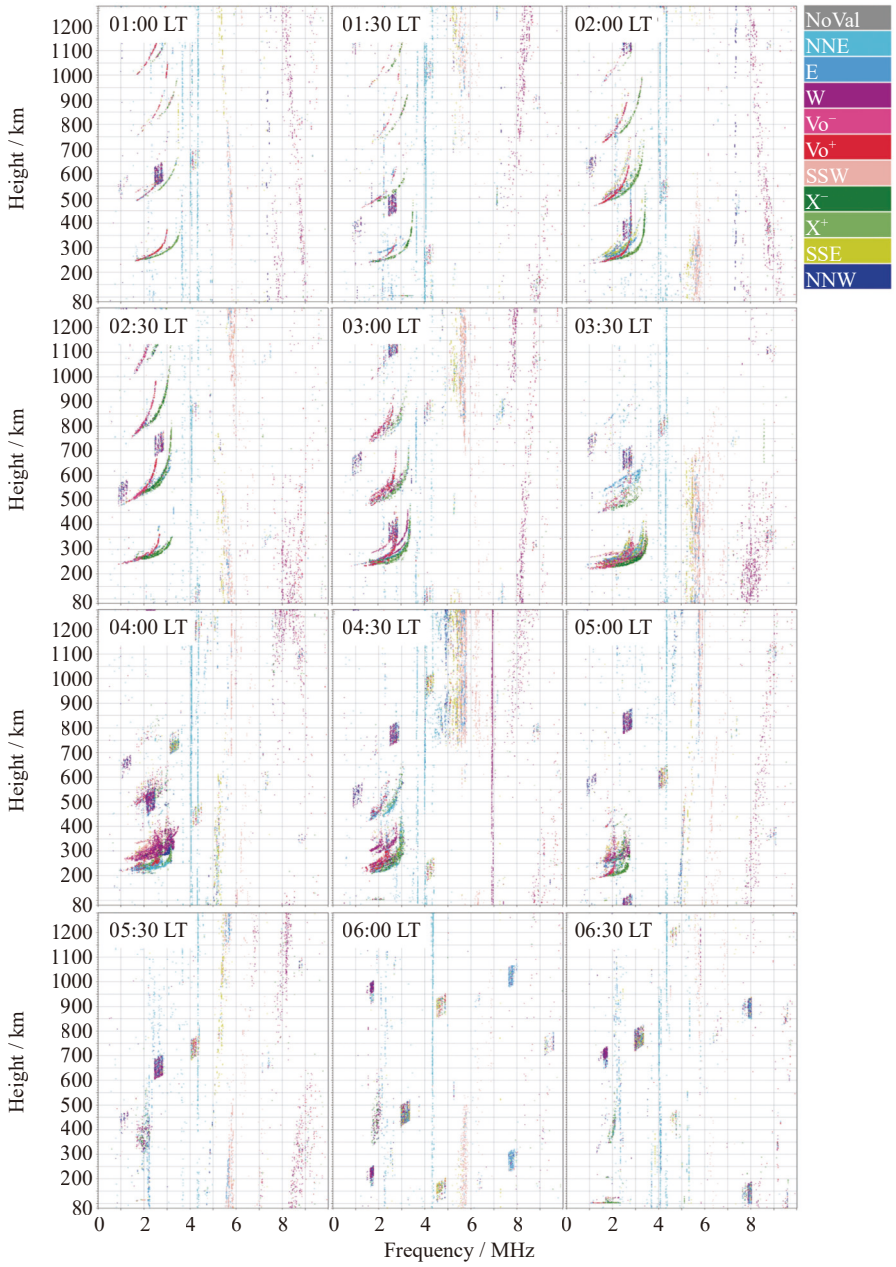


图 3 2019 年 12 月 8 日富克台站数字测高仪观测结果

Fig. 3 Digisonde observations at Fuke Station on 8 December 2019

追赶过程, 即随着时间的推移, 后出现的暗条带结构追赶上先出现的暗条带. 类似的传播过程已在 Luo 等[15] 近期的研究中首次报道, 不过其报道的 MSTID 事件发生于中国兴隆台站中纬地区. 在他们的研究中, MSTIDs 后出现的条带能够追赶上先出现的条带, 主要源于电离层背景风场及等离子体密度变化, 造成前后条带传播速度存在显著差异. 而该事件发生于中国海南富克台站所在的低纬区域, 其背后的物理机制是否与中纬区域 MSTID 追赶事件一致, 值得深入探讨.

为评估地磁环境对此次 MSTIDs 的传播演化过程的影响, 查阅了 OMNI 网站*提供的事件当日地磁环境数据. 数据显示, 在 2019 年 12 月 8 日的事件观测时段内, 并未出现显著磁暴扰动, *Dst* 指数绝对值始终小于 10 nT, *Kp* 指数均未超过 3. 同时, 太阳风

* https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/

速度维持在 350−375 km·s^{-1} 的低值范围, 太阳风动压低于 1.5 nPa 且保持稳定. 以上观测数据表明, 该事件发生于太阳风能量输入较为微弱的地磁平静期, 不存在由磁暴引起的显著扰动电场及风场作用. 因此, 本次低纬 MSTID 事件的观测特征及其演化过程与地磁暴及强太阳风输入无直接关系. 此外, 由于富克台站附近缺少该事件对应的风场观测数据, 为更好地探讨电离层背景参量变化对该事件传播演化过程的影响, 本研究借助 TIE-GCM 模型获取该区域当日夜间的风场与等离子体密度变化.

图 4 和图 5 分别给出了 TIE-GCM 模拟的该区域当日夜间 250 km 高度处 02:00−05:40 LT(模拟结果对应的时间已经根据世界时 UT 与当地时间 LT 关系转换为北京时间) 纬向风场 (图 4) 和经向风场 (图 5) 模拟结果, 东向及北向为正. 模拟结果表明, 该事件中 MSTIDs 的追赶与当日夜间电离层背景中性风的变化相关. 根据气辉的观测结果, 自暗条带 2 进入气辉观测视野后, 在大约 03:30 LT 后, 暗条带 1 及暗条带 2 之间的距离逐渐缩小, 大约在 04:21 LT 附近, 暗条带 2 几乎追上了暗条带 1. 从图 4 可以看出, 在传播过程中暗条带 1 主要位于纬向风接近 0 的零风场区域附近, 而暗条带 2 主要位于 19°N 以北的区域, 其大部分结构均处于东向风区域. 已有早期研究表明, 电离层行扰的传播会受到风场与电场的作用[1,14,35–37]. Waldock 和 Jones[38] 利用中性风场模型指出, 当波的传播方向与背景风场一致时, 波会受到阻碍; 反之则被加速. 暗条带 1 位于纬向风为零的区域, 因此纬向风对其传播速度的影响并不大. 然而, 暗条带 2 位于东向风区域, 在东向风的作用下使条带 2 传播速度增加, 为其能够追赶上条带 1 提供了可能. 除了纬向风的作用外, 经向风是否对追赶过程有贡献也是需要考虑的. 结合图 1 气辉观测结果和图 5 的经向风模拟结果, 研究发现, 在追赶过程中, 暗条带 1 与暗条带 2 主要位于经向风接近于 0 的区域. 该区域经向风大约在 05:00 LT 后才发生明显的变化, 因此, 在该 MSTID 事件的追赶过程中, 经向风的贡献非常小,

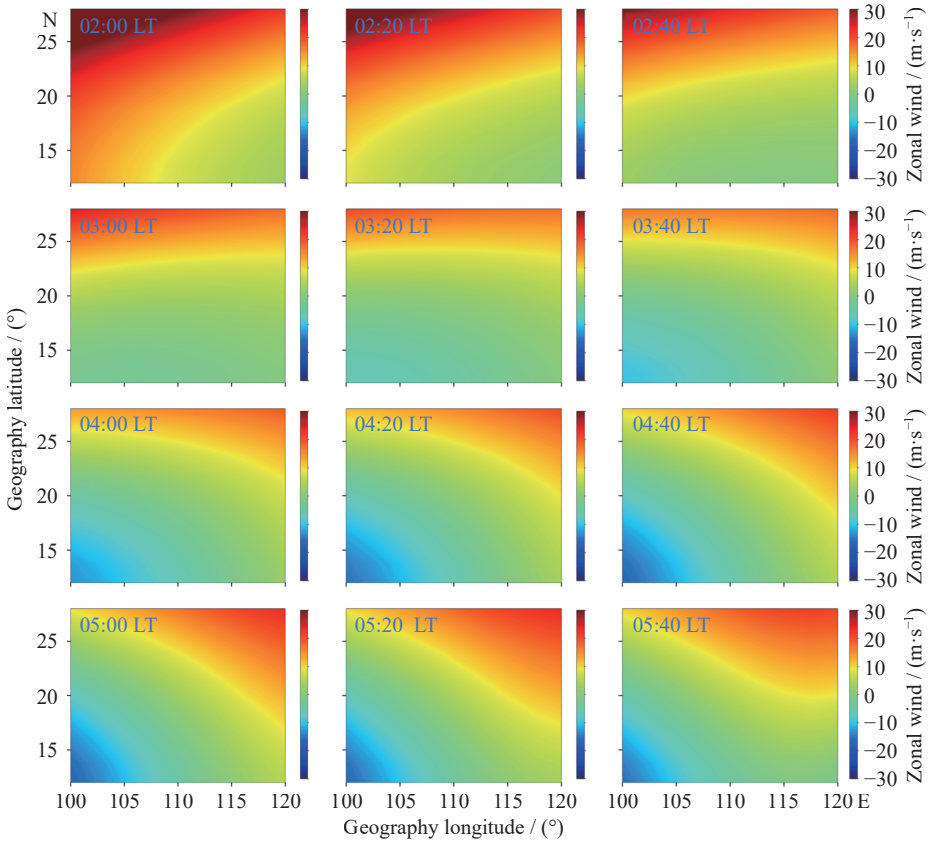


图 4　TIE-GCM 模拟的 2019 年 12 月 8 日 02:00−05:40 LT 100°E−120°E, 11.5°N−27.5°N 区域 250 km 高度纬向风

Fig. 4　Zonal wind at 250 km altitude from TIE-GCM simulation for the region by 100°E−120°E and 11.5°N−27.5°N at 02:00−05:40 LT on 8 December 2019

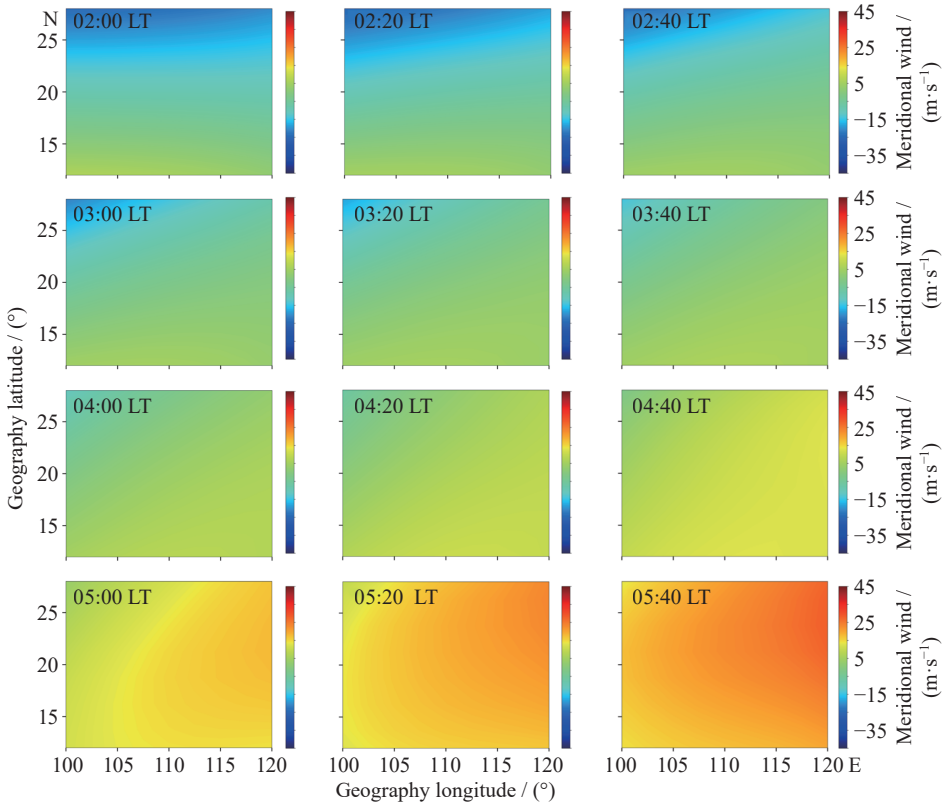


图 5 TIE-GCM 模拟的 2019 年 12 月 8 日 02:00−05:40 LT 100°E−120°E, 11.5°N−27.5°N 区域 250 km 高度经向风

Fig. 5 Meridional wind at 250 km altitude from TIE-GCM simulation for the region by 100°E−120°E and 11.5°N−27.5°N at 02:00−05:40 LT on 8 December 2019

几乎未起到作用.

该事件发生在低纬区域, 需要考虑赤道区域等离子体密度高的区域 (EIA) 是否对该 MSTID 事件的追赶现象存在影响. 已有大量研究表明, 大部分 MSTID 结构难以传播至低纬区域, 主要因为低纬区域存在 EIA 的驼峰结构 (赤道电离异常高电子密度峰值区域), 导致 MSTIDs 无法越过该区域[22,39,40]. 该 MSTID 事件的追赶过程主要发生在午夜之后, 此时赤道电离异常区的电子密度可能因夜间电离层等离子体复合作用而衰减. 尽管如此, 其对该事件的影响机制仍需进一步研究.

图 6 是利用 TIE-GCM 模拟的该区域 250 km 高度附近 02:00−05:40 LT 的电子密度变化. 从图 6 可以看出, 在 03:00 LT 之后, 23°N 以南存在明显的高电子密度区域. 该高电子密度区域越往南, 电子浓度相对越高. 该结果也可由被图 2 中的 VTEC 观测结果证实. 图 2 中 PRN-G05 的观测也显示 20°N 以南存在明显的高电子密度区域, 并且越往南, 电子密度峰值越大, 这应该是午夜之后还未消散完的赤道电离异常高电子密度区域. 该事件 MSTIDs 的追赶过程中, 暗条带 1 主要位于 23°N 以南的区域, 而暗条带 2 在 04:15 LT 以前主要位于 23°N 以北区域. 因此, 在两暗条带传播过程中, 条带 1 首先传播至赤道电离异常高电子密度区域, 由于赤道电离异常高电子密度区域阻挡了条带 1 的传播, 使条带 1 的传播速度较慢, 被束缚在台站附近. 而条带 2 由于未进入高密度电子区域, 在东向纬向风的作用下以较快的速度追赶上条带 1. 而此后, 条带 1, 2 和 3 均进入赤道电离异常高电子密度区域, 导致这些条带到达台站附近后传播速度均较慢. 因此, 该事件中的 MSTIDs 追赶过程, 是背景纬向风的纬度梯度差异与赤道电离异常区的高密度电子区域共同作用的结果. 此外, 本研究结果表明, 相较于中纬区域 MSTIDs 的追赶过程, 低纬区域的赤道电离异常高密度区会对先期抵达的 MSTID 结构产生阻碍并使其减速, 进而更利于后面的 MSTID 结构追赶.

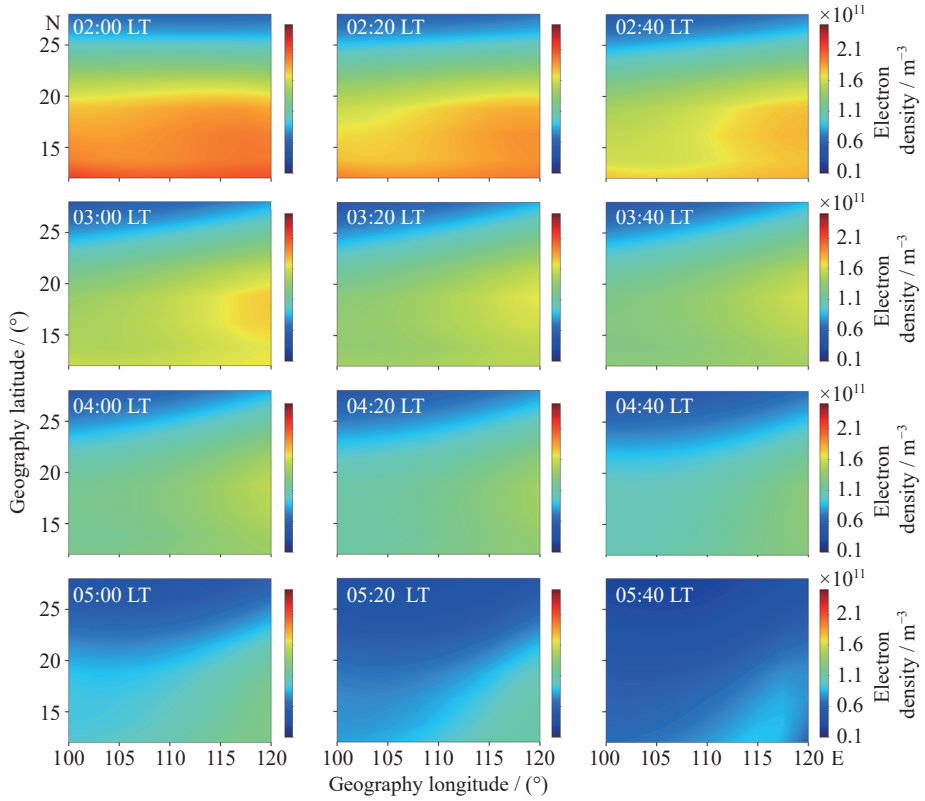


图 6　TIE-GCM 模拟的 2019 年 12 月 8 日 02:00−05:40 LT 100°E−120°E, 11.5°N−27.5°N 区域 250 km 高度电子密度

Fig. 6　Electron density at 250 km altitude in the region by 100°E−120°E and 11.5°N−27.5°N from TIE-GCM simulation at 02:00−05:40 LT on 8 December 2019

4　结论

利用子午工程富克台站的全天空气辉成像仪及数字测高仪观测数据、北海台站 GPS-TEC 观测数据, 结合 TIE-GCM 物理模型模拟数据对 2019 年 12 月 7−8 日磁平静期的低纬 MSTID 传播事件进行了详细分析. 研究结果表明, 当日夜晚在中国低纬区域富克台站上空观测到典型的北半球 MSTID 结构, 其相平面沿着西北–东南向分布, 自东北向西南向传播. 并且在传播过程中, 两暗条带出现了明显的追赶过程, 后进入观测视野的暗条带追赶上先进入观测视野的暗条带. TIE-GCM 模拟结果显示, 此次事件中 MSTID 条带的追赶过程主要由纬向风梯度差异与赤道电离异常区的高密度电子区域共同作用导致. 研究表明, 与中纬区域相比, 低纬区赤道电离异常区的高密度电子区域在低纬区发生的 MSTIDs 追赶过程中起重要作用.

致谢　气辉观测数据与数字测高仪探测数据由中国子午工程提供, TIE-GCM 模式公开代码由美国国家大气研究中心官网 (NCAR) 提供.

医学伦理　研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] PERKINS F. Spread *F* and ionospheric currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(1): 218-226

[2] HUNSUCKER R D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, **20**(2): 293-315

[3] KELLEY M C, MILLER C A. Mid-latitude thermospheric plasma physics and electrodynamics: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, **59**(13): 1643-1654

[4] OGAWA T, NISHITANI N, OTSUKA Y, *et al*. Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido radar, all-sky imager, and GPS network and their relation to concurrent sporadic E irregular-

ities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A3): A03316

[5] SHIOKAWA K, OTSUKA Y, TSUGAWA T, *et al*. Geomagnetic conjugate observation of nighttime medium-scale and large-scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A5): A05303

[6] GARCIA F J, KELLEY M C, MAKELA J J, *et al*. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A8): 18407-18415

[7] SHIOKAWA K, IHARA C, OTSUKA Y, *et al*. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A1): 1052

[8] MILLER C A, SWARTZ W E, KELLEY M C, *et al*. Electrodynamics of midlatitude spread *F*: 1. Observations of unstable, gravity wave-induced ionospheric electric fields at tropical latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A6): 11521-11532

[9] HUANG F Q, LEI J H, DOU X K, *et al*. Nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from airglow imager and global navigation satellite systems observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(1): 31-38

[10] KIL H, PAXTON L J. Global distribution of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances seen by swarm satellites[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(18): 9176-9182

[11] SUZUKI S, HOSOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Coordinated observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances in 630-nm airglow and HF radar echoes at midlatitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A7): A07312

[12] OTSUKA Y, SHIOKAWA K, OGAWA T, *et al*. Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(15): L15803

[13] MARTINIS C, BAUMGARDNER J, WROTEN J, *et al*. All-sky imaging observations of conjugate medium-scale traveling ionospheric disturbances in the American sector[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A5): A05326

[14] LUO J, XU J Y, WU K, *et al*. The influence of ionospheric neutral wind variations on the morphology and propagation of medium scale traveling ionospheric disturbances on 8th August 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2020JA029037

[15] LUO J, XU J Y, WU K, *et al*. Investigation on chasing and interaction of traveling ionospheric disturbances based on multi-instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(8): e2023JA032283

[16] YADAV V, RATHI R, GAUR G, *et al*. Interaction between nighttime MSTID and mid-latitude field-aligned plasma depletion structure over the transition region of geomagnetic low-mid latitude: first results from Hanle, India[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, **217**: 105589

[17] YADAV V, RATHI R, SARKHEL S, *et al*. A unique case of complex interaction between MSTIDs and mid-latitude field-aligned plasma depletions over geomagnetic low-mid latitude transition region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(1): e2020JA028620

[18] PATGIRI D, RATHI R, YADAV V, *et al*. A case study on multiple self-interactions of MSTID bands: new insights[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(7): 3595-3612

[19] FUKUSHIMA D, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Observation of equatorial nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances in 630-nm airglow images over 7 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A10): A10324

[20] LEE C C, LIOU Y A, OTSUKA Y, *et al*. Nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances detected by network GPS receivers in Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12316

[21] MAKELA J J, MILLER E S, TALAAT E R. Nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances at low geomagnetic latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(24): L24104

[22] SHIOKAWA K, OTSUKA Y, EJIRI M K, *et al*. Imaging observations of the equatorward limit of midlatitude traveling ionospheric disturbances[J]. *Earth, Planets and Space*, 2002, **54**(1): 57-62

[23] OTSUKA Y, SHIOKAWA K, OGAWA T. Disappearance of equatorial plasma bubble after interaction with mid-latitude medium-scale traveling ionospheric disturbance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(14): L14105

[24] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al*. Interaction of oppositely traveling medium-scale traveling ionospheric disturbances observed in low latitudes during geomagnetically quiet nighttime[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): e2020JA028723

[25] WU K, QIAN L Y. Interactions between MSTIDs and ionospheric irregularities in the equatorial region observed on 13-14 May 2013[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(13): 2413

[26] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al*. Morphology and evolution of plasma density enhancement events in the equatorial ionospheric F region on 8 February and 4 November 2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(9): e2022JA030482

[27] WU K, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Ionospheric plasma vertical drift and zonal wind variations cause unusual evolution of EPBs during a geomagnetically quiet night[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): e2021JA029893

[28] WU K, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Occurrence characteristics of branching structures in equatorial plasma bubbles: a statistical study based on all-sky imagers in China[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(5): 407-415

[29] GARCIA F J, TAYLOR M J, KELLEY M C. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(29): 7374-7385

[30] SHI J K, WANG G J, REINISCH B W, *et al*. Relationship between strong range spread *F* and ionospheric scintillations observed in Hainan from 2003 to 2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A8): A08306

[31] WANG G J, SHI J K, REINISCH B W, *et al*. Ionospheric plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments over low-latitude station Hainan[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(3): 2288-2298

[32] WANG Z, ZHAN M Y, GAO P D, *et al*. Automatic detection and classification of spread-F from ionosonde at Hainan with image-based deep learning method[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(11): e2023SW003498

[33] LI G Z, NING B Q, ABDU M A, *et al*. Precursor signatures and evolution of post-sunset equatorial spread-F observed over Sanya[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A8): A08321

[34] WU H N, WANG W B, PHAM K H, *et al*. The NCAR-TIEGCM version 3.0[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(9): e2025JA034219

[35] MARTINIS C, BAUMGARDNER J, WROTEN J, *et al*. Seasonal dependence of MSTIDs obtained from 630.0 nm airglow imaging at Arecibo[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(11): L11103

[36] PAULINO I, MEDEIROS A F, VADAS S L, *et al*. Periodic waves in the lower thermosphere observed by OI630 nm airglow images[J]. *Annales Geophysicae*, 2016, **34**(2): 293-301

[37] KELLEY M C, FUKAO S. Turbulent upwelling of the mid-latitude ionosphere: 2. Theoretical framework[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, **96**(A3): 3747-3753

[38] WALDOCK J A, JONES T B. The effects of neutral winds on the propagation of medium-scale atmospheric gravity waves at mid-latitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1984, **46**(3): 217-231

[39] NARAYANAN V L, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Airglow observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from Yonaguni: statistical characteristics and low-latitude limit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(11): 9268-9282

[40] SIVAKANDAN M, CHAKRABARTY D, RAMKUMAR T K, *et al*. Evidence for deep ingression of the midlatitude MSTID into as low as ~3.5° magnetic latitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(1): 749-764

作者简介



罗　吉　女, 1993 年 8 月出生于湖南省邵阳市, 现为长沙理工大学专任教师, 硕士生导师, 主要研究方向为中电离层不规则体、中高层大气等.
E-mail: llluoji@126.com



吴　坤（通信作者）　男, 1989 年 12 月出生于云南省昆明市, 现为长沙理工大学专任教师, 硕士生导师, 主要研究方向为中低纬电离层等.
E-mail: kunwu1220@163.com



刘　斯（通信作者）　女, 1984 年 3 月出生于湖南省新化县, 现为长沙理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为等离子体物理、空间等离子体波动等.
E-mail: liu.si@hotmail.com