

GAO Hongyu, ZHANG Donghe, ZHANG Yabin, TIAN Yaoyu, LI Ke. Case of the Ionospheric Irregularities in China Low Latitude during the Geomagnetic Storm on 13–14 July 2013 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(3): 618–627. CSTR:32142.14.cjss.2025–0128. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0128

2013 年 7 月 13–14 日磁暴期间中国低纬 电离层不均匀体的时空演化*

高鸿宇¹ 张东和¹ 张雅彬²
田耀宇² 李 科¹

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

摘 要 研究了 2013 年 7 月 13–14 日一次中等强度磁暴期间在中国低纬地区发生的电离层不均匀体事件。通常情况下, 在北半球夏季, 东亚扇区低纬电离层不均匀体不易产生, 但是此次磁暴期间观测到显著的不均匀结构现象。利用中国地壳运动观测网 (CMONOC) 和香港卫星定位参考台站网 (SatRef) 地基 GNSS 数据、深圳站 (22.59°N, 113.97°E) 闪烁接收机 S_4 数据、海南富克站 (19.4°N, 109.0°E) 测高仪数据以及地磁观测数据等, 分析了中国低纬度地区的电离层不均匀体的时空演化过程, 并基于磁暴期间的空间环境参量对此次电离层不均匀体的激发机制进行分析。结果表明, 磁暴期间出现的东向电场增强是促进此次电离层不均匀体发展的主要原因。同时, 电离层不均匀体出现前测高仪观测到的卫星描述表明, 大尺度波状结构可能作为种子作用, 为不均匀结构的产生创造了条件。此外, 对比了 S_4 指数、ROTI、失锁这几种参量在此次事件中的响应, 发现其在时间分布上大体一致, 与电离层不均匀体的发生时间一致, 但是在不均匀结构出现前约 1 h 出现的 L2 载波相位失锁应与本次事件无关。

关键词 电离层不均匀体, 电离层闪烁, 磁暴, 总电子含量 (TEC), 频高图

中图分类号 P352

Case of the Ionospheric Irregularities in China Low Latitude during the Geomagnetic Storm on 13–14 July 2013

GAO Hongyu¹ ZHANG Donghe¹ ZHANG Yabin²
TIAN Yaoyu² LI Ke¹

1(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

2(National Key Laboratory Foundation of Electromagnetic Wave Propagation,
China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

* 电波环境特性及模化技术国家重点实验室基金项目 (6142403240301), 国家自然科学基金项目 (42474206) 和子午工程项目共同资助

2025-07-26 收到原稿, 2025-08-25 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/>)

Abstract This study investigates the effects of a moderate geomagnetic storm during 13–14 July 2013 on the development of ionospheric irregularities in the low latitude region of China. Although in the East Asian sector, ionospheric irregularities are relatively uncommon in July, unseasonal irregularities are observed during this geomagnetic storm. Ground-based GNSS data from Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and Hong Kong Satellite positioning Reference stations (SatRef), S_4 index data from the Ionospheric Scintillation Monitor (ISM) at Shenzhen (22.59°N, 113.97°E) station, ionosonde data from Fuke (19.4°N, 109.0°E) station, and geomagnetic data are used to show the evolution of the ionospheric irregularities in the low latitude region of China during the geomagnetic storm. Geomagnetic and solar activity parameters are used to analyze the generation mechanisms of the irregularities. It is shown that the eastward electric field enhanced by the geomagnetic storm is the major factor contributing to the generation of the irregularities. Satellite traces in the ionograms before the onset of the irregularities indicate that large-scale wave structures acting as seed perturbations may also contribute to this event. Furthermore, it is found that the temporal distribution of S_4 index and ROTI are generally similar (enhanced during 15:00–18:00 UT) and coincide with the time range of the irregularities, but the distribution of L2 loss of lock is slightly different (occurring around 14:00 UT, about one hour earlier). These loss of lock occurrences are unrelated to this event.

Key words Ionospheric irregularities, Ionospheric scintillation, Geomagnetic storm, Total electron content, Ionogram

0 引言

电离层不均匀体是指在电离层中存在的电子密度不均匀结构, 其会导致穿过其中的无线电波发生振幅、相位等参量的随机快速起伏, 产生电离层闪烁现象, 从而降低信号的信噪比甚至导致信号中断, 严重影响星地通信和导航定位的可靠性, 是电离层物理和空间天气的主要研究内容。

研究表明, 低纬电离层不均匀体的发生率存在显著的经度、季节和地方时差异。不均匀结构在东亚扇区主要发生在春秋两分季, 在 9—10 月和 3—4 月达到发生率极大值; 在美洲扇区主要集中于 8 月到次年 5 月, 在 12 月达到发生率极大值^[1-3]。这种经度和季节差异与电离层漂移速度的日落反转前增强 (Pre-Reversal Enhancement, PRE) 电场的形成与强度变化密切相关。在日落后时段, 赤道附近的东向电场会增强, 促进等离子体向上漂移, 进而增加 Rayleigh-Taylor (R-T) 不稳定性的增长率, 促进电离层不均匀体的产生和发展^[4,5]。在晨昏线日落侧与磁场方向平行时, 增长率达到最大, 有利于 R-T 不稳定性的增长, 地球背景磁场位型的经度差异导致不均匀结构发生率的上述经度和季节差异^[6,7]。此外, 在地方时分布上, 低纬电离层不均匀体主要发生在日落后, 这同样与

PRE 电场和日落后 F 区下部电子密度梯度的增大有关。文献 [8] 利用全球测高仪数据对全球中低纬区域电离层 f_0F_2 进行了重构, 并分析了重构误差, 发现中纬区域重构误差低于低纬区域, 说明低纬电离层比中纬控制因素更复杂; 白天重构误差低于夜间, 且误差在日落后 (17:00 LT 之后) 明显增加, 与不均匀结构主要发生在日落后的地方时分布特点可以对应。

低纬电离层不均匀体的产生和演化是一个复杂的过程, 其机制受到多种因素的共同影响。虽然低纬电离层不均匀体的发生率呈现出一定的季节和地方时形态特征, 但在传统上被认为不利于不均匀结构产生的季节也可能出现所谓的反季节性电离层不均匀体事件。反季节事件的成因有多种可能, 例如低层大气活动是一个可能的影响因素, 除此之外, 也有相当一部分的反季节性事件与地磁活动尤其是磁暴密切相关, 地磁活动通过影响电离层中的电场、中性大气风场和电离层状态, 进而改变电离层电子密度的分布和动力学过程。普遍认为, 磁暴期间产生的穿透电场和扰动发电机电场变化是这一类事件的主要驱动力^[9,10]。地磁扰动期间, 特别是在磁暴发生时, 高纬度的对流电场穿透到低纬度区域, 叠加在赤道电场上, 形成穿透电场 (Penetration Electric Field, PEF)。此外, 在磁暴主相阶段, 极区粒子沉降及焦耳加热造成

的大气环流变化也会在低纬地区产生扰动发电机电场 (Disturbance Dynamo Electric Field, DDEF). 这些电场的方向和强度变化, 对低纬电离层中的等离子体动力学过程产生重要影响. 当地磁活动期间在昏侧产生的电场方向与 PRE 电场相同 (即电场为东向) 时, 会增强赤道不均匀结构的产生, 有助于不均匀结构扩散到更高的纬度^[11-14]. 而地磁活动在昏侧产生的电场与 PRE 电场相反 (即电场为西向) 时, 会抑制不均匀结构的形成^[15,16]. 例如, 在东亚扇区的北半球夏季, 虽然 PRE 电场相对较弱, 但磁暴期间的穿透电场可以显著增强, 从而促进不均匀结构的产生和扩散^[17,18].

在已有研究中, 对低纬地区电离层不均匀体或电离层闪烁与地磁活动的关系进行了大量个例或统计分析. 一些研究表明, 部分地磁扰动期间电离层不均匀体受到抑制^[19], 而另一些研究则发现部分地磁扰动会促进电离层不均匀体产生^[11]. 这种差别与磁暴发生的时刻和观测点的地方时有关. 文献 [20] 利用超过 9000 个 GNSS 台站数据对 2000—2018 年的 652 个磁暴事件进行时序叠加分析, 发现发生在地方时后半夜的磁暴倾向于增强低纬地区的闪烁、发生在白天或前半夜的磁暴倾向于抑制低纬地区的闪烁. 这与文献 [9] 用 VHF 卫星得到的结果基本一致. 然而, 也有一些研究结果与现有理论不符. 例如文献 [21] 利用巴西的 4 个 GPS 台站研究了 2009—2018 年 GPS 信号失锁发生率与极光电急流指数 (AE) 和磁暴指数 (Dst) 的关系, 发现失锁发生率与地磁活动有很好的正相关性. 但是由于地磁活动本身就有明显的季节变化, 其统计结果可能受到地磁活动本身季节变化的影响.

由于低纬电离层不均匀体的发生率存在着明显的季节变化, 而磁暴的发生本身也存在着季节变化的特点, 并且两种现象存在着明显的相似性, 这增加了磁暴与电离层不均匀体的关系的复杂性. 由于北半球夏季是中国扇区低纬电离层不均匀体的低发期, 针对该季节小磁暴期间电离层不均匀体的研究, 可以更清晰地明确磁暴与电离层不均匀体的关系, 更好地理解电离层不均匀体的产生和演化规律以及其与地磁活动的关联. 关于北半球夏季磁暴期间东亚扇区的电离层不规则体事件已有许多个例研究. 文献 [22] 研究了 2004 年 7 月 22—28 日连续三次磁暴期间的电离层响应, 在东亚扇区和美洲扇区都观测到了低纬不规则

体, 说明磁暴激发的不规则体可以有很大的经向跨度, 作者认为这样的经向跨度是穿透电场、扰动发电机电场和重力波种子效应共同作用的结果. 文献 [23] 研究了 2022 年 7 月 7 日中等强度磁暴期间东亚扇区日落后的赤道等离子体泡, 并细致分析了其漂移速度的变化. 文献 [24] 研究了 2003 年 7 月 6 日中等强度磁暴期间东亚扇区的中纬不规则体, 认为其来自赤道等离子体泡, 在磁暴期间增强的东向电场作用下抬升, 并扩散到中纬. 与以上研究类似, 本文针对 2013 年 7 月 13—14 日磁暴期间中国低纬地区观测到的电离层不均匀体, 开展电离层不均匀体的时空演化研究, 分析磁暴与电离层不均匀体发生、发展的关系.

1 数据与方法

使用的 GNSS 数据来自包括中国地壳运动观测网 (CMONOC) 227 个台站以及香港卫星定位参考台站网 (SatRef) 12 个台站的测地型 GNSS 接收机, CMONOC 和 SatRef 接收机的采样率分别为 30 s 和 5 s. 由接收机观测数据文件可以计算电离层总电子含量 (TEC), 进而得到描述电离层不均匀体的电离层时间变化率指数 (ROTI), 并得到所在区域的 ROTI 地图. 此外, 使用子午工程深圳站 (22.59°N, 113.97°E) 闪烁接收机观测的 S_4 指数数据. GNSS 台站的位置分布如图 1 所示.

研究使用电离层测高仪的频高图及从图中提取的电离层特征参量. 测高仪数据来自子午工程海南富克站 (19.4°N, 109.0°E), 测高仪每 15 min 提供一张频高图, 这些频高图可以得到反映电离层不均匀体产

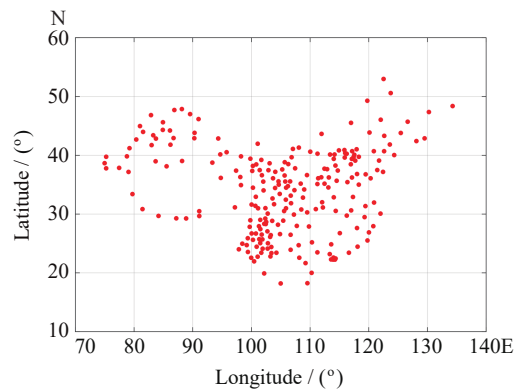


图 1 所使用的 GNSS 台站分布

Fig. 1 Geographic locations of the GNSS stations used

生和发展的特征描述. 此外, 基于这些频高图, 通过 SAO Explorer 软件可以得到电离层 F_2 峰值高度 ($h_m F_2$)、 F_2 临界频率 ($f_o F_2$) 等参数.

赤道电集流 (EEJ) 强度可由两个分别位于磁赤道上和距离磁赤道 $6^\circ \sim 9^\circ$ 的磁强计测得的磁场水平分量的差值得到^[25,26], 该参量可以反映赤道东西向电场的变化信息. 使用中国海南琼州 (QGZ; 19.0°N , 109.8°E ; 9.2°N MLAT, 13.9°N dip lat.) 和越南博寮 (BCL; 9.3°N , 105.7°E ; 0.5°S MLAT, 2.1°S dip lat.) 两个地磁台站的观测数据估算 EEJ.

为反映磁暴期间空间环境的变化信息, 这里还使用了行星际磁场、行星际电场、 K_p 和 SYM- H 指数和 $F_{10.7}$ 指数等空间环境数据.

2 结果与讨论

图 2 给出了 2013 年 7 月 13—15 日深圳站观测的 S_4 指数, 以及香港 HKSC 站 (22.32°N , 114.14°E) 观测数据得到的 ROTI 随世界时的分布, 其中不同颜色的数据点来自不同 GPS 卫星的观测数据. 为了说明这次电离层不均匀体事件可能出现的空间天气效应, 图中还给出香港 HKWS 站 (22.43°N , 114.34°E)

观测数据每分钟内 L2 载波失锁的次数. 对于 S_4 指数、ROTI 和失锁数据, 仰角均限制为 30° 以上. 图 2 还用虚线标出了 S_4 指数和 ROTI 的背景阈值, 即分隔大部分背景数据点与少数增强值的门限, S_4 指数的阈值取为 0.2, ROTI 的阈值取为 $0.5 \text{ TECU} \cdot \text{min}^{-1}$, 高于背景阈值认为有闪烁发生. 可以看出, 7 月 14 日 16:00—19:00 UT (00:00—03:00 LT) 观测到了 ROTI 的显著增强以及较弱的 S_4 指数增强, S_4 指数最大值约为 0.4, ROTI 最大值约为 $1.5 \text{ TECU} \cdot \text{min}^{-1}$. 在 7 月 14 日 14:08—14:13 UT (22:08—22:13 LT) 有失锁事件发生. 作为对比, 7 月 13 日和 15 日没有 ROTI 的增强, 也没有失锁发生; S_4 指数虽然有少数略高于 0.2 的情况, 但与 7 月 14 日的 S_4 指数增强相比明显更弱. 由此可以判断, 7 月 14 日 14:00—19:00 UT 在观测区域确实有不均匀结构事件产生. 由于此次事件不仅为反季节事件 (7 月), 而且发生在一般不容易产生不均匀结构的地方时午夜附近, 很可能与其间发生的磁暴事件有关.

为研究这次事件是否与地磁活动有关, 图 3 给出了 2013 年 7 月 13—15 日的主要空间环境参量. 可以看出, 这段时间内发生了一次磁暴. 行星际磁场 z 分量大约在 7 月 13 日 15:00 UT 开始向南翻转, 同时

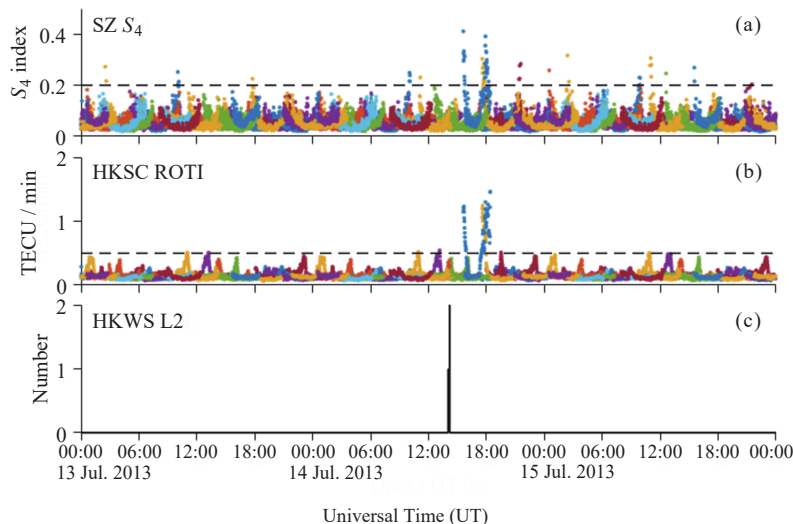


图 2 2013 年 7 月 13—15 日深圳站 S_4 指数、香港 HKSC 站 ROTI、香港 HKWS 站 L2 载波相位每分钟失锁次数分布. 散点图中不同颜色的点代表不同卫星, 黑色虚线表示背景阈值, S_4 的阈值取 0.2, ROTI 的阈值取 $0.5 \text{ TECU} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 2 Variation of S_4 from Shenzhen station, ROTI from HKSC station (Hong Kong), and the number of loss of lock on L2 in every minute from HKWS station (Hong Kong) during 13—15 July 2013.

Each color in the scatter plots represents data from one satellite. Black dashed lines indicate the threshold values, taken as 0.2 for S_4 and $0.5 \text{ TECU} \cdot \text{min}^{-1}$ for ROTI

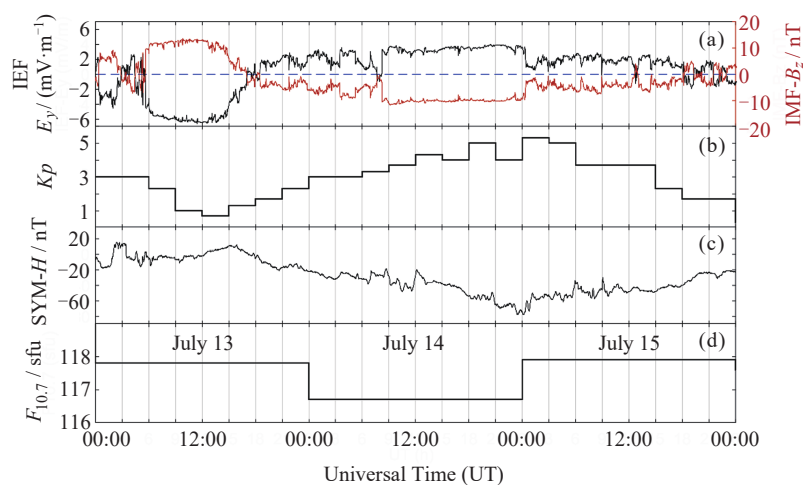


图3 2013年7月13–15日的空间环境参量

Fig. 3 Overview of geomagnetic and solar activity conditions during 13–15 July 2013

SYM- H 指数开始下降,在7月15日00:00 UT附近SYM- H 指数达到极小值 -77 nT, Kp 指数最大达到5,属于中等强度磁暴.在此期间,行星际磁场 z 分量在7月14日09:00 UT达到极小值(约 -11 nT),并在极小值附近维持到7月15日00:00 UT.此后,磁暴进入恢复相,SYM- H 指数上升,行星际磁场 z 分量开始缓慢向北翻转并从7月15日18:00 UT开始在零值附近小幅度波动.为了研究这次磁暴是否有可能通过穿透电场影响低纬度电离层电场,图中也给出了这段时间的行星际电场 y 分量.可以看出,在磁暴期间行星际电场 y 分量存在着比较明显的变化,在7月13日15:00 UT至7月15日18:00 UT保持向东(为正),最大值约为 4 mV·m $^{-1}$,其中在7月14日09:00 UT前扰动很剧烈,7月14日09:00 UT至7月15日00:00 UT较稳定.东向电场最强的时间段与图2中 S_4 指数和ROTI增强的时间段一致,可以作为磁暴引起的东向电场增强对本次不均匀结构事件促进作用的证据.

除了东向电场等影响R-T不稳定性增长率的因素外,种子扰动也是低纬电离层不均匀体产生的必要条件.图4给出了2013年7月14日海南富克站观测的频高图.由图4可知,卫星描述在15:00 UT(约23:00 LT)首次出现在低频端.在15:30 UT,出现了显著的强区域扩展F,持续至18:30 UT(约02:30 LT).扩展F的持续时间与图2中 S_4 和ROTI增强的时间段一致,说明两者为同一事件.频高图中的卫星描述说

明在电离层中可能出现了TID等波状结构^[27],有利于不均匀结构产生.

图5给出了7月14日13:30–19:30 UT由地基GNSS台站观测数据得到的中国扇区ROTI地图,由此可以给出本次事件期间电离层不均匀体的时空演化过程.由图5可见,在14:00–19:00 UT(22:00–03:00 LT),中国扇区低纬度地区出现了电离层不均匀体.在14:00–14:30 UT,可以看到在经度 105°E – 115°E 、纬度约 15°N 处出现了ROTI数值较大的区域.14:30–17:00 UT,这块扰动区域逐渐增强并向北移动,在16:30–17:00 UT,纬度达到约 23°N .17:00–18:00 UT,扰动区域略有向东移动,且范围略有扩大.18:00–19:00 UT,扰动逐渐减弱,在19:00 UT后完全消失.从ROTI地图可以看出,在15:30–18:30 UT,不均匀结构出现在海南上空,与海南测高仪观测到强区域扩展F的时间段一致.除了低纬地区的不均匀结构外,从图5还可以看到,中纬地区(30°N – 40°N)也存在一些ROTI数值较大的区域,其中最明显出现在15:00–15:30 UT(32°N , 112°E)位置附近,这应该是中国中纬度地区夏季夜里经常出现的尺度TID引起的电离层扰动^[28],与低纬度的电离层不均匀体无关.

图6给出了7月14日香港HKSC台站测得的垂直TEC(VTEC),海南富克站测高仪测得的 $h_m F_2$ 和 $f_0 F_2$ (用黑色实线标出),图中的蓝色虚线为VTEC, $h_m F_2$, $f_0 F_2$ 的月中值, VTEC是对所有卫星信标得到

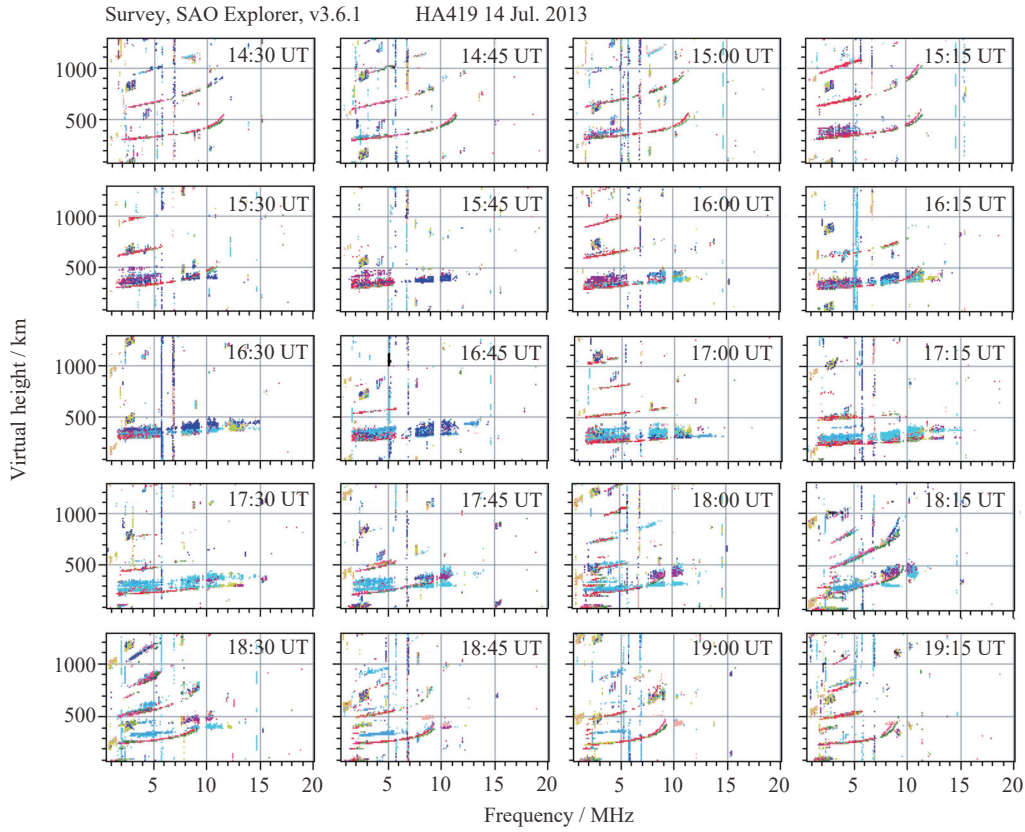


图 4 2013 年 7 月 14 日 14:30—19:15 UT 海南富克站频高图时间序列

Fig. 4 Time sequence of ionograms during 14:30–19:15 UT on 14 July 2013 at Fuke station

的平均值. 测高仪观测到强区域扩展 F 的时间段起止用红色虚线标出. 可以看到发生扩展 F 前后, VTEC, f_0F_2 和 h_mF_2 相对月中值都有明显增加, 说明 F 层发生了抬升, 而且峰值密度增加. 根据 R-T 不稳定性的增长率公式^[4] 为

$$\gamma = \frac{\Sigma_p^F}{\Sigma_p^E + \Sigma_p^F} \left(\frac{\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}}{B^2} - \mathbf{u} - \frac{g}{\nu_m} \right) \cdot \frac{\nabla n_0}{n_0} - \beta. \quad (1)$$

式中, Σ_p^E 和 Σ_p^F 分别为 E 区和 F 区 Pedersen 电导率沿磁通量管的积分, $\mathbf{E}_0$ 和 $\mathbf{B}$ 为背景电场和磁场, $\mathbf{u}$ 为中性风速度, g 为重力加速度, ν_m 为离子与中性成分碰撞频率, n_0 为背景电子密度 (由于重力加速度与电子密度梯度反向, $-\frac{g}{\nu_m} \cdot \frac{\nabla n_0}{n_0} > 0$), β 为复合率. F 区抬升意味着碰撞频率降低, 由增长率公式可知, 有利于 R-T 不稳定性增长率增加. 磁暴期间的穿透电场可显著抬升 F 区高度, 由图 3 可知, 行星际电场在 7 月 14 日 09:00 UT 至 7 月 15 日 00:00 UT 保持向东且强度稳定, 而由图 6 可知, 在此期间, 7 月 14 日 10:00–18:00 UT 海南站发生了 f_0F_2 和 h_mF_2 的增加,

且 f_0F_2 和 h_mF_2 开始增强的时间与图 3 东向电场 E_y 开始时间基本一致. 同时, 在扩展 F 发生的时间段内即 15:30–18:30 UT, 香港站 VTEC 也显著增大. 以上现象说明, 磁暴可能产生了东向穿透电场, 促进了此次事件的发生. 此外, 除了通过 F 区抬升而增加 R-T 不稳定性增长率, 东向电场还可以直接通过增大 $\frac{\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}}{B^2}$ 项促进增长率 γ 增加.

低纬电离层不均匀体的产生和发展很大程度上受电离层中的东西向电场强度的控制^[29], 东向电场导致 R-T 不稳定性增长率公式中的垂直漂移速度增加, 导致增长率增加. 本文事件观测到的不均匀结构出现在午夜附近 (22:00–02:00 LT), 并非更常见的日落后不规则体. 由于缺乏午夜附近电离层电场的观测, 这里用 EEJ 表征低纬地区的电场. 图 7 显示了 2013 年 7 月全月 EEJ 的月中值 (黑线) 和 7 月 14 日的 EEJ (红线). 可以看出, 7 月 14 日 EEJ 在 03:00–09:00 UT 扰动较为剧烈, 在 03:00 UT, 05:00 UT 和 07:00 UT 出现增强, 在 03:00 UT 和 06:00 UT 附近出现减弱.

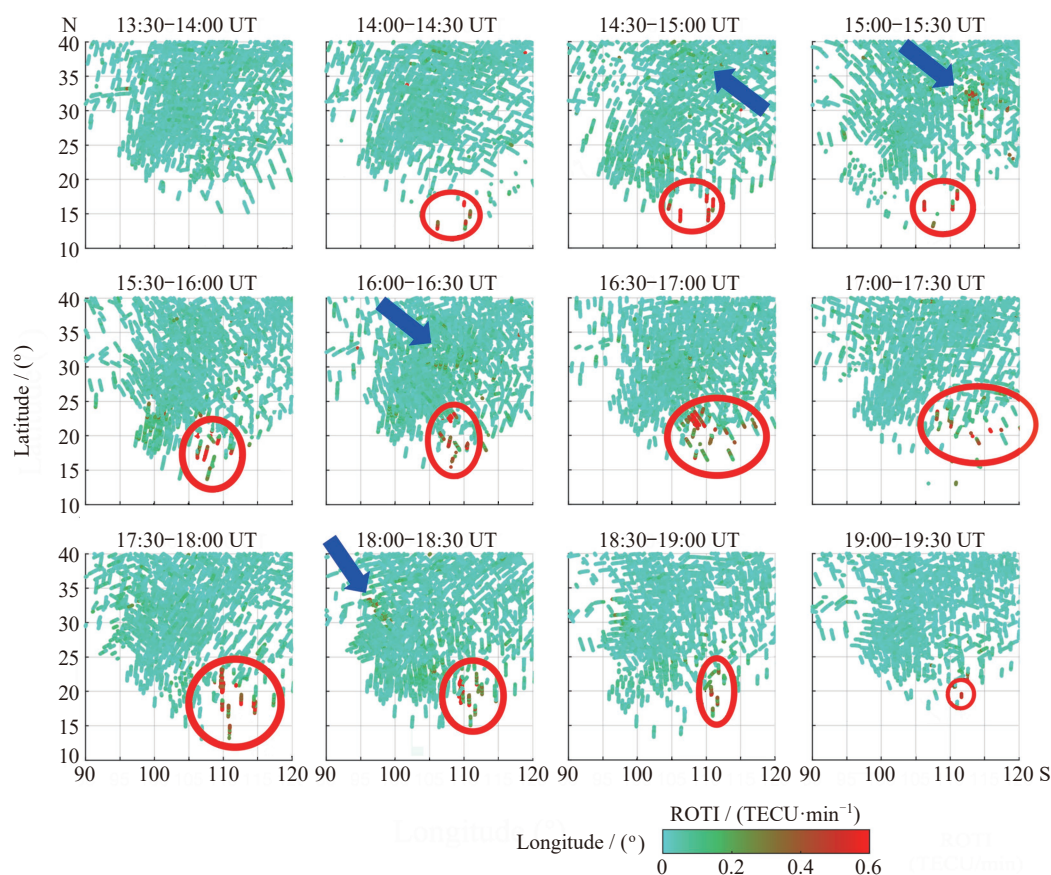


图 5 2013 年 7 月 14 日 13:30–19:30 UT 的 ROTI 地图. 间隔为 30 min. 红圈表示低纬不均匀体, 蓝色箭头表示中纬不均匀体

Fig. 5 Time sequence of ROTI maps during 13:30–19:30 UT on 14 July 2013, in 30 min interval. Red circles represent low-latitude irregularities, and blue arrows represent mid-latitude irregularities

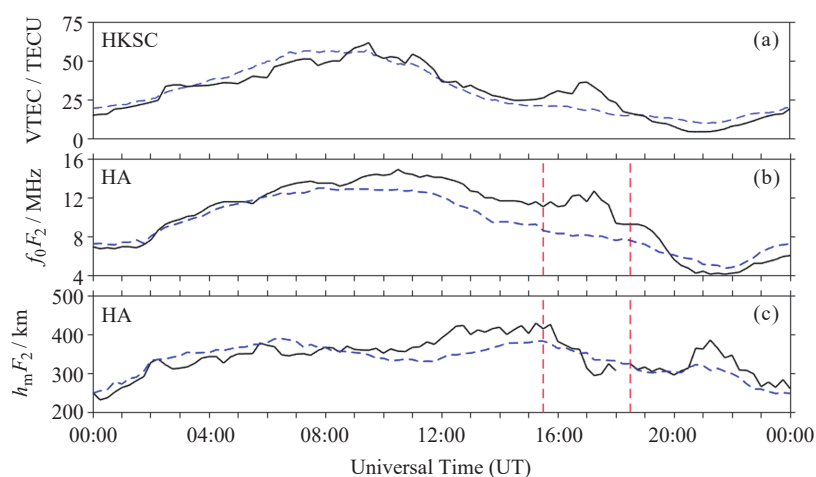


图 6 2013 年 7 月 14 日 HKSC 站垂直 TEC 数据以及海南富克测高仪测得的 f_0F_2 和 h_mF_2 (黑色实线). 蓝色虚线表示 2013 年 7 月的月中值, 红色虚线之间的部分表示有扩展 F 发生的时间段

Fig. 6 Vertical TEC obtained from the HKSC station, and f_0F_2 , h_mF_2 from the Fuke ionosonde on 14 July 2013, shown in black solid lines. Blue dashed lines indicate monthly median data of July 2013, and the start and end of spread-F are marked with red dashed lines

需要注意的是, EEJ 主要反映的是白天的电场尤其是日落前的 PRE^[29-31], 在夜间很弱, 但从图 7 可以看出, 从 09:00 UT (约 17:00 LT) 至 12:00 UT (约 20:00 LT, 此时 EEJ 已几乎趋于零) EEJ 相对于月中值有持续增强, 同时由图 3 可知, 7 月 14 日的行星际电场始终保持东向, 而且也是在 09:00 UT 之前扰动剧烈, 09:00 UT 以后稳定保持东向 (直至 7 月 15 日 00:00 UT), 这在时间上与地面地磁台站观测的 EEJ 变化趋势是一致的, 可以支持磁暴造成的东向穿

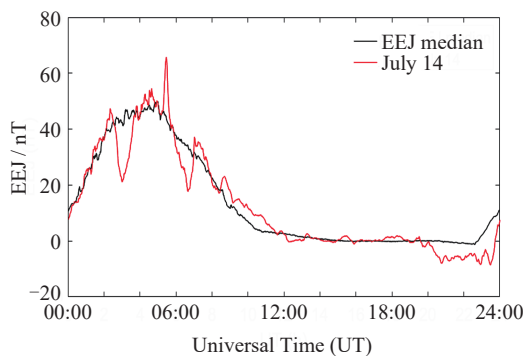


图 7 2013 年 7 月 14 日的 EEJ (红线) 与 2013 年 7 月 EEJ 的月中值 (黑线) 随世界时的分布, EEJ 的值以 17:00 UT 处为零点

Fig. 7 Calculated EEJ on 14 July 2013 (red line) and the monthly median EEJ of July 2013 (black line).

EEJ intensity is set to zero at 17:00 UT

透电场对本次不均匀结构事件的促进作用.

虽然失锁与 S_4 指数及 ROTI 等数据都可以在一定程度上反映电离层不均匀体的特征, 但是不同类型的数据所反映的物理内容不尽相同, 因而在时空分布上可能存在差异. 文献 [32] 利用 Swarm 卫星搭载的 Langmuir 探针和 GPS 接收机数据, 研究了 GPS 失锁期间, 卫星原位测量的电子密度时间序列的谱指数特征, 发现低纬地区的失锁事件可以分为两类, 其中只有一类与强烈的电子密度扰动有关. 在本次事件中, 也可以看到失锁数据的时间分布与其他数据不同, 大部分数据 (S_4 、ROTI、测高仪、电场) 所显示的最强烈扰动均发生在 15:00—18:00 UT, 只有失锁主要发生在 14:00 UT 附近. 为了探究此现象的原因, 图 8 给出了 7 月 14 日 13:00—18:00 UT 的失锁发生次数, 分别按不同台站和不同卫星显示. 可以看出, 所有台站最强的失锁都发生在 14:00 UT 附近, 而在 15:00—18:00 UT 有一些较弱的失锁. 从卫星 PRN 分布图可以看出, 14:00 UT 附近的失锁全部来自 PRN26 这一颗卫星. 此时该卫星仰角约 32° , 方位角约 177° , 即位于南偏东方向. 由于载波信号失锁后不能获得 ROTI 数据, 无法直接判断这些失锁与电离层不均匀体的关系, 但是从深圳站的 S_4 指数来看, 这期间并没有出现电离层闪烁, 所以大致可以推测, 这些异常的失锁与电离层不均匀体无关, 初步猜测这些失锁事件可能是由 PRN26 这一颗卫星本身的原因造成

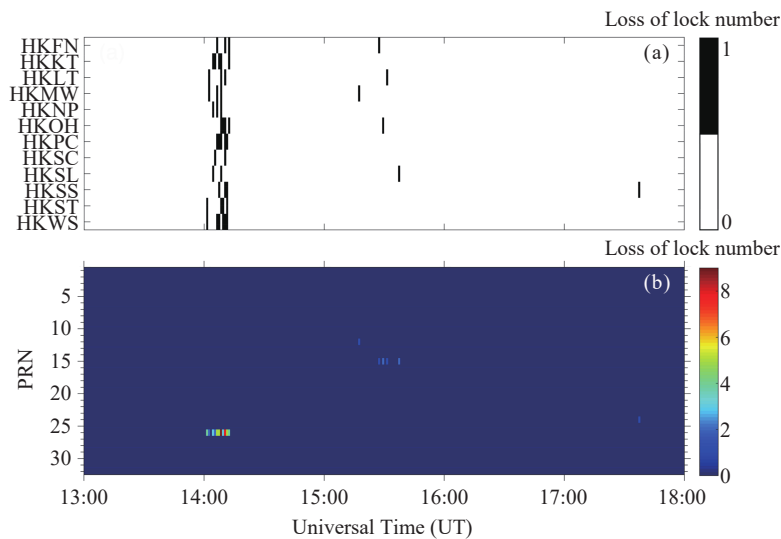


图 8 2013 年 7 月 14 日各台站 (a) 和各卫星 (b) 每分钟内 L2 载波相位失锁发生次数随世界时的分布

Fig. 8 Universal time dependence of L2 loss of lock occurrence number in every minute of 14 July 2013, shown by different stations (a) and different satellite PRNs (b)

的,但后期还需要进行进一步的确认.此外,这一失锁异常提示,在利用 GNSS 数据研究电离层不均匀体时需要进行必要的数据质量检验.

3 结论

利用地基 GNSS、测高仪和地磁观测数据,研究了 2013 年 7 月 13—14 日一次中等强度磁暴期间的中国低纬电离层不均匀体事件,主要结论如下.

(1) 在磁暴发生期间的 2013 年 7 月 14 日午夜附近 (15:00—19:00 UT), ROTI 图、海南富克测高仪频高图、深圳电离层闪烁接收机均观测到与电离层不均匀体有关的特征.从 ROTI 图中可以看出,该不均匀体出现于更低纬度地区,随着时间逐渐向较高纬度漂移,东西向漂移不明显,在 19:00 UT 之后,不均匀体消失,在 15:15 UT 附近,海南富克测高仪观测到了卫星描述现象,半小时后观测到了明显的区域扩展 F 现象,并一直持续到 18:00 UT.

(2) 此次电离层不均匀体出现之前的电离层峰值密度和峰值高度的增加都有利于不均匀结构的发展.此外,本次事件期间观测到了行星际东向电场的增强和较弱的 EEJ 增强,且时间上与地基 GNSS 和测高仪观测的不均匀结构一致,可以表明是磁暴造成的东向穿透电场进一步促进了不均匀结构的发展.

(3) 深圳站 S_4 指数和香港站 ROTI 出现增强的时间集中在 15:00—18:00 UT,但在 14:00 UT 附近,香港地区所有 GNSS 台站接收机出现了短时的 L2 载波失锁现象.这些异常的失锁均来自 PRN26 卫星,由于出现失锁时不能得到 ROTI 数据,因此不好判断这一失锁现象是否由电离层不均匀体引起.但是从深圳站的 S_4 指数来看,在这期间似乎没有电离层闪烁发生,关于这一失锁是由电离层不均匀体还是卫星工作状态引起的,有必要做进一步的分析.但这至少说明,利用 GNSS 数据研究电离层不均匀体时有必要进行数据质量检验.

致谢 GNSS 观测数据从中国大陆构造环境监测网络 (CMONOC)、香港卫星定位参考台站网 (SatRef) 和国际 GNSS 服务中心 (IGS) 获取,深圳站闪烁数据和海南海口测高仪数据从子午工程数据中心获取.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] BASU S, GROVES K M, BASU S, *et al.* Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(16): 1745-1754
- [2] KINTNER P M, LEDVINA B M, DE PAULA E R. GPS and ionospheric scintillations[J]. *Space Weather*, 2007, **5**(9): S09003.
- [3] GAO H Y, ZHANG D H, ZHANG Y B, *et al.* Case studies of the unseasonal ionospheric irregularities in China's low latitude on July 5 and July 17, 2013. *Science China: Technological Sciences*, 2025, **68**(11): 2120601. DOI: [10.1007/s11431-025-3046-x](https://doi.org/10.1007/s11431-025-3046-x)
- [4] SULTAN P J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A12): 26875-26891
- [5] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics[M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2009: 142-152
- [6] TSUNODA R T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1985, **90**(A1): 447-456
- [7] KIL H, PAXTON L J, OH S J. Global bubble distribution seen from ROCSAT-1 and its association with the evening prereversal enhancement[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A6): A06307
- [8] CHEN Longjiang, ZHEN Weimin, OU Ming, *et al.* A method of ionospheric f_0F_2 reconstruction in low and middle latitudes of the world based on stepwise linear optimal estimation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, **36**(1): 36-42 (陈龙江, 甄卫民, 欧明, 等. 一种基于分步线性最优估计的全球中低纬区域电离层 f_0F_2 重构方法 [J]. *电波科学学报*, 2021, **36**(1): 36-42)
- [9] AARONS J. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storms[J]. *Radio Science*, 1991, **26**(4): 1131-1149
- [10] CHERNIAK I, ZAKHARENKOVA I, SOKOLOVSKY S. Multi-instrumental observation of storm-induced ionospheric plasma bubbles at equatorial and middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 1491-1508
- [11] MA G Y, MARUYAMA T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(21): L21103
- [12] CHERNIAK I, ZAKHARENKOVA I. First observations of super plasma bubbles in Europe[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(21): 11137-11145

- [13] AA E, HUANG W G, LIU S Q, *et al.* Midlatitude plasma bubbles over China and adjacent areas during a magnetic storm on 8 September 2017[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(3): 321-331
- [14] TIAN Y Y, ZHANG D H, WANG J Y, *et al.* Comparative analysis of VHF radar Doppler velocity and neutral wind velocity from meteor radar[J]. *Sci Sin Tech*, 2026: 56 (in Chinese) (田耀宇, 张东和, 王鉴远, 等. 甚高频雷达多普勒速度与流星雷达中性风速的对比分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2026: 56)
- [15] KIKUCHI T, HASHIMOTO K K, NOZAKI K. Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A6): A06214
- [16] ABDU M A. Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **75**: 44-56. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.04.024
- [17] LIU K K, LI G Z, NING B Q, *et al.* Statistical characteristics of low-latitude ionospheric scintillation over China[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **55**(5): 1356-1365
- [18] KUMAR S, CHEN W, LIU Z Z, *et al.* Effects of solar and geomagnetic activity on the occurrence of equatorial plasma bubbles over Hong Kong[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 9164-9178
- [19] RAMA RAO P V S, JAYACHANDRAN P T, SRI RAM P, *et al.* Characteristics of VHF radiowave scintillations over a solar cycle (1983-1993) at a low-latitude station: Waltair (17.7°N, 83.3°E)[J]. *Annales Geophysicae*, 1997, **15**(6): 729-733
- [20] SORI T, SHINBORI A, OTSUKA Y, *et al.* The occurrence feature of plasma bubbles in the equatorial to midlatitude ionosphere during geomagnetic storms using long-term GNSS-TEC data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(5): e2020JA029010
- [21] DAMACENO J G, BOLMGREN K, BRUNO J, *et al.* GPS loss of lock statistics over Brazil during the 24th solar cycle[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(2): 219-225
- [22] LI G Z, NING B Q, HU L H, *et al.* Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A4): A04304
- [23] HAN C Y, LI G Z, SUN W J, *et al.* Generation and evolution of post-sunset equatorial plasma bubbles in East and Southeast Asia during the July 2022 geomagnetic storm[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(3): 1843-1853
- [24] YE H L, YI W, ZHOU B Z, *et al.* Multi-instrumental observations of midlatitude plasma irregularities over Eastern Asia during a moderate magnetic storm on 16 July 2003[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(4): 1160
- [25] RASTOGI R G, KLOBUCHAR J A. Ionospheric electron content within the equatorial F₂ layer anomaly belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1990, **95**(A11): 19045-19052
- [26] ANDERSON D, ANGHEL A, YUMOTO K, *et al.* Estimating daytime vertical $E \times B$ drift velocities in the equatorial F-region using ground-based magnetometer observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(12): 1596
- [27] TSUNODA R T. On seeding equatorial spread F: circular gravity waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(10): L10104
- [28] LI K, ZHANG D H, ZENG Y, *et al.* Revisiting the ionospheric disturbances over low latitude region of China during super typhoon Hato[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(5): e2023SW003694
- [29] FEJER B G, SCHERLIESS L, DE PAULA E R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A9): 19859-19869
- [30] HAERENDEL G, ECCLES J V. The role of the equatorial electrojet in the evening ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, **97**(A2): 1181-1192
- [31] ECCLES J V, ST. MAURICE J P, SCHUNK R W. Mechanisms underlying the prereversal enhancement of the vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(6): 4950-4970
- [32] DE MICHELIS P, CONSOLINI G, PIGNALBERI A, *et al.* Ionospheric turbulence: a challenge for GPS loss of lock understanding[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(7): e2022SW-003129

作者简介



高鸿宇 男, 1997 年 1 月出生于湖北省, 北京大学地球与空间科学学院博士研究生, 研究方向为电离层物理。
E-mail: gaohongyu@pku.edu.cn



张东和(通信作者) 男, 北京大学地球与空间科学学院教授, 从事空间物理、空间天气、电离层物理的教学与科研工作, 承担国家重大科研基础工程项目(子午工程)、国家基金委、国家高技术研究发展计划、国家重点基础研究发展计划等科研项目。
E-mail: zhangdh@pku.edu.cn