0254-6124/2021/41(6)-887–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

OU Ming, WU Jiayan, CHEN Longjiang, ZHEN Weimin. Global ionospheric TEC and ROTI variations during a moderate geomagnetic storm (in Chinese) *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 887-897. DOI:10.11728/cjss2021.06.887

# 一次中等磁暴期间全球电离层 TEC 及 ROTI 指数变化分析*

欧 明 吴家燕 陈龙江 甄卫民

(中国电波传播研究所 青岛 266107)

**摘 要** 地磁暴发生时, 电离层会有偏离平均水平的强烈扰动. 基于全球电离层 TEC 及其时间变化率 ROTI (Rate of TEC Index) 数据, 对 2014 年 8 月一次中等强度磁暴期间的全球电离层影响进行了分析, 探讨了磁暴所引发电离层暴的可能机制. 研究发现, 本次磁暴伴随有明显的电离层暴效应. 磁暴期间: 南半球电离层以正相暴为主, 北半球电离层暴则整体表现为短暂正相暴后长时间强的负相暴; 电离层在北半球的下降比南半球强, 并且这种下降持续了约一周时间; 低纬区域电离层变化幅度明显小于中纬区域, 高纬区域则主要表现为负暴效应; 赤道北驼峰出现了明显的南移现象, 直至磁赤道两侧双驼峰结构消失. 对磁暴期间三个不同扇区的电离层 ROTI 变化的分析表明: 欧洲–非洲扇区磁暴前有电离层闪烁发生, 磁暴发生后消失, 而东亚–澳大利亚及美洲扇区则无此现象出现. 研究结果表明, 此次磁暴期间的电离层变化存在明显的时间和空间差异.

**关键词** 地磁暴, 电离层, 总电子含量, 总电子含量变化率指数

**中图分类号** P 352

# Global Ionospheric TEC and ROTI Variations during a Moderate Geomagnetic Storm

OU Ming WU Jiayan CHEN Longjiang ZHEN Weimin

(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

**Abstract** The ionosphere will have strong disturbances on geomagnetic storm days. The physical mechanism causing an ionospheric disturbance is very complex, various dynamics and electrodynamics processes in magnetosphere/thermosphere lead to great differences in ionospheric morphology and response in different locations and different time during a geomagnetic storm. Therefore, the geomagnetic storm has always been a hot and difficult issue in ionospheric research. In August 2014, under the influence of a solar flare explosion and two CME events, a strong magnetic storm was triggered on 27 August, accompanied by an ionospheric storm effect. The maximum $Kp$ index reached 4.7, and the lowest $Dst$ index reached $-80$ nT, reaching the level of moderate intensity geomagnetic storm. Based on the data of global ionospheric TEC and Rate of TEC Index (ROTI), the global iono-

* 国家重点研发计划项目 (2018YFF01013703), 装备技术基础预研项目 (315030409) 和中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (A131902W03) 共同资助

2020-08-15 收到原稿, 2021-05-31 收到修定稿

E-mail: ohm1122@163.com

spheric effects at different sectors in August 2014 were analyzed. Possible mechanisms responsible for ionospheric disturbances were also discussed. It is found that the ionosphere in the geomagnetic storm has an obvious ionospheric storm effect. During the magnetic storm, the southern hemisphere was dominated by positive storms while the northern hemisphere was characterized by a positive storm followed by a long duration strong negative storm, and the negative phase storm duration was significantly longer than the positive storm; the amplitude variation at low latitude was smaller than that at mid-latitude and the high latitude mainly performed negative storm effects; the peaks of Equatorial Ionospheric Anomaly (EIA) disappeared after the magnetic storm occurs due to the movement of EIA towards the equator. The analysis of ionospheric irregularities during geomagnetic storms shows that ionospheric scintillation occurs before the magnetic storm at European-African sector and disappears after the geomagnetic storm. The results show that there are obvious temporal and spatial differences in the ionospheric changes during the storm.

**Key words** Geomagnetic storm, Ionosphere, TEC, ROTI

## 0 引言

地磁暴发生时, 电离层会有偏离平均水平的强烈扰动, 即电离层暴. 磁暴及伴随的电离层暴对在轨空间飞行器、全球通信与导航系统以及大型地面输电网等无线电信息系统均有明显的影响, 因此一直受到广泛关注 [1]. 引起电离层扰动的物理机制非常复杂, 再加上磁层/热层中各种动力学和电动力学过程与电离层间复杂的耦合, 导致暴时电离层在不同地点、不同时间条件下的形态及响应存在巨大的差异, 因此电离层暴一直是电离层研究中的一个热点和难点问题 [2]. 随着卫星导航技术在电离层监测方面的应用, 利用 GNSS 等手段对磁暴期间的电离层进行监测分析成为国际上分析磁暴期间电离层响应的主要手段. Lu 等 [1] 利用局域多个 GPS 台网数据, 对强磁暴引发的中低纬电离层暴和行进式电离层扰动 (TID) 的特征进行了分析. Deng 等 [3] 利用 1999−2006 年中国地区六个中低纬 GPS 台站的电离层 TEC 数据, 统计给出了该区域电离层暴扰动的分布特性并对其进行了解释. Azzouzi 等 [4] 利用地基 GNSS 结合垂测及磁力计等数据, 对欧洲–非洲扇区 2013 年 10 月的 4 次电离层暴事件变化特征进行了深入分析. Sun 等 [5] 利用中国区域北斗卫星等多种手段的电离层监测数据, 对 2015 年 3 月第 24 太阳活动周最大的一次磁暴事件引发的中低纬电离层暴和电离层闪烁的有关物理机制进行了探讨. Astafyeva 等 [6] 利用全球地基 GNSS、垂测及 LEO 卫星的顶部 TEC 数据对 2015 年 3 月期间的一次磁暴事件的半球不对称性和不同纬度的响应进行了分析. Nava 等 [7] 综合利用地基 GNSS、磁力计及 LEO 卫星的电离层和磁场等数据对 2015 年 3 月的全球中低纬电离层响应进行分析并讨论了磁层穿透电场及扰动发动机电场. 通过对大量电离层暴事件的统计分析, 对电离层暴的基本形态变化及相应物理机制已有一些基本的认知. 然而大量单个的电离层暴事件表现出来的变化形态与长期的统计规律间通常还存在很大的不同 [2], 这可能与电离层暴某些潜在的物理机制还未被充分认识有关, 所以当前针对个例的磁暴电离层效应研究仍然具有重要意义.

2014 年 8 月期间受太阳耀斑爆发及伴随的两次 CME 事件的影响, 8 月 27 日引发强烈磁暴并伴随有电离层暴效应, $Kp$ 指数极大值达到 4.7, $Dst$ 指数最低达到 −80 nT, 达到中等强度磁暴等级. 本文基于地基 GNSS 观测数据, 结合 GNSS 获取的全球电离层 TEC 和 ROTI 分析结果, 对此次中等强度磁暴事件的电离层响应进行分析, 并对可能引发此次电离层扰动的物理机制进行探讨.

## 1 数据来源

太阳风和磁场数据下载自美国 NASA 下设的戈达德空间飞行中心的 OMNI 数据中心 *, 具体数据类

*https://omniweb.gsfc.nasa.gov

型包括: 太阳风速度 $v_{\rm sw}$、动压 Pressure、行星际磁场分量 $B_z$、地磁 $AE$, $AU$ 和 $AL$ 指数, 其时间分辨率均为 1 min. Sym-$H$ 数据来自世界数据中心 WDC2, Sym-$H$ 时间分辨率同样为 1 min, 可看作高时间分辨率的 $Dst$ 指数.

为分析电离层暴的全球变化形态, 选择采用欧洲定轨中心 (CODE) 提供的全球电离层图 (Global Ionospheric Maps, GIM) 数据进行磁暴效应分析. 基于 CODE 提供的 GIM 数据, 可以计算全球及三个不同扇区的 TEC 相对磁静日的变化 Δ TEC 和全球电子含量 GEC 及区域电子含量 REC. 为更细致分析位于不同纬度和经度扇区的台站测量的电离层变化, 选择 IGS 下设的 CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) 数据中心的 24 个低纬 GNSS 台站的 RINEX 观测数据用于低纬区域磁暴电离层响应分析, 台站的具体分布如图 1 所示.

## 2　磁暴期间电离层变化特征分析

### 2.1　磁暴期间太阳及行星际空间地磁环境

2014 年 8 月的太阳 R12 指数月平均值为 106.9, 太阳 $F_{10.7}$ 辐射通量月平均值为 151.7 sfu, 整体属于太阳活动较活跃期. 图 2 给出了 8 月 25−31 日太阳风、行星际环境参数和地磁场的变化, 从顶部至底部按顺序分别为太阳风速度、太阳风动压、行星际磁场 (IMF) 的 $B_z$ 分量、$AE$ 指数及 Sym-$H$ 等各种地磁活动指数. 8 月 25−26 日, 太阳风活动及地磁环境处于平静状态, IMF $B_z$ 分量基本处于北向, 太阳风速度较低, 基本保持在 300 km·s$^{-1}$, 动压处于 3 nPa 以下, $AE$ 指数在 100 nT 内变化; 27 日开始发生磁暴, 从 Sym-$H$ 可以看出, 此次磁暴主相处在 27 日 04:00−20:00 UT, 伴随着太阳风动压的快速增加, IMF $B_z$ 分量处于稳定的南向翻转状态, $AE$ 超过了 1000 nT, 表明有强烈的能量注入到电离层中, $AU$ 和 $AL$ 指数出现明显的差异, 最大差值超过 1100 nT, 但此时太阳风速并未有明显增加, 29 日太阳风速才逐步上升到 400 km·s$^{-1}$; 27 日 20:00 UT 以后, 磁暴进入恢复相阶段, IMF $B_z$ 分量 8 月 28 日前后恢复为北向, 随着太阳风动压的又一次快速增强, $B_z$ 分量随后再次出现南向翻转, 此后数天内 $B_z$ 分量及 $AE$ 指数出现持续的快速震荡, 这种状态一直持续到 31 日, 期间行星际磁场 $B_z$ 分量出现了长时间的振荡, 太阳风速度开始逐渐加快, 这为太阳风能量能够持续注入到极区创造了良好的外部条件. 从 Sym-$H$ 来看, 此次磁暴未有明显的磁暴急始现象发生.

### 2.2　磁暴期间电离层 TEC 变化分析

GIM 数据是研究全球磁暴期间电离层响应最重要的数据来源之一 [2,7]. 通常可以通过电离层 $N_{\rm m}F_2$ 或 TEC 来判断电离层暴的暴相为正还是负. 对此次磁暴事件, 首先利用 CODE 发布的 GIM 数据分析全球电离层变化.

为对此次磁暴事件电离层 TEC 变化情况进行一个整体的了解, 首先利用 GIM 数据计算区域电子含量 REC (Regional Electron Content) [7] 和全球电子含量 GEC (Global Electron Content) 指数 [8]. GEC/REC 不关注电离层的局部变特征, 适合用于表征全球或区域电离层 TEC 的整体变化幅度, GEC/REC 值越大, 则表明对应区域的电离层 TEC 较大, 反之则表示该区域的 TEC 越小. 这里用 $P$ 表示 GEC/REC, 计算方法如下:

$$P=\sum_{i,j}N_{{\rm v}i,j}S_{i,j}=\sum_{i,j}N_{{\rm v}i,j}R_{\rm e}^2\Delta\varphi\big[\sin\theta_j-\sin(\theta_j+\Delta\theta)\big]. \tag{1}$$

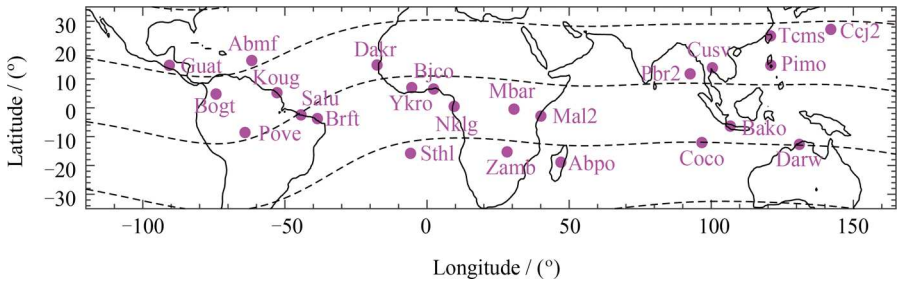


图 1　低纬 GNSS 台站地理位置分布

Fig. 1　Distribution of geographic locations of low latitude GNSS stations

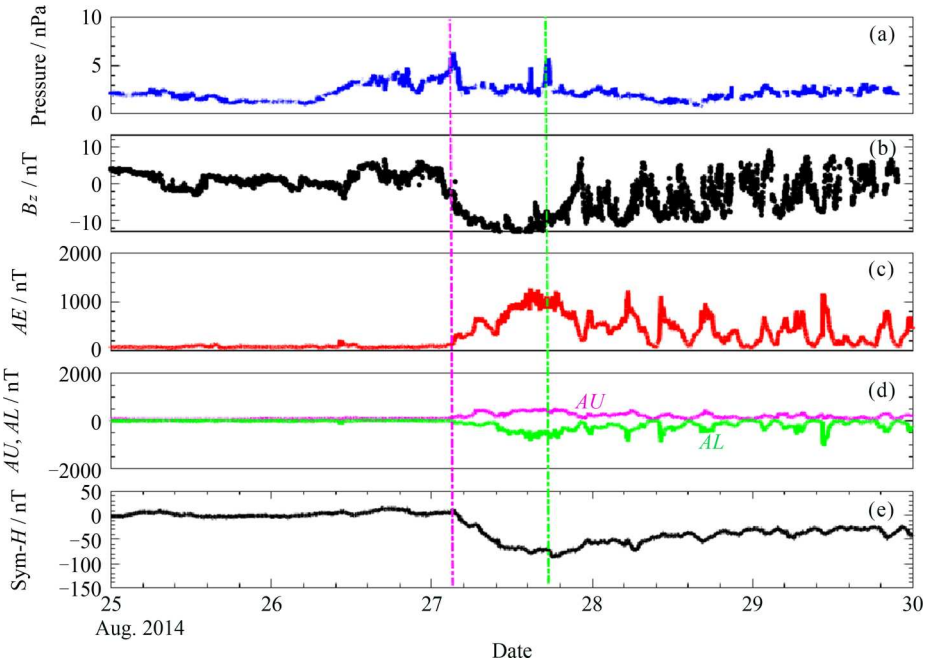


图 2 2014 年 8 月 25—30 日期间太阳风、行星际和地磁参量 (粉色虚线表示磁暴发生的起始时刻, 绿色虚线表示磁暴恢复相起始时刻)

Fig. 2 Solar wind, interplanetary and geomagnetic parameters during 25—30 August 2014 (Pink dotted line indicates the starting time of magnetic storm, green dotted line indicates the starting time of recovery phase)

其中, $N_v$ 为电离层垂直 TEC, $S$ 为网格面积, $i$ 和 $j$ 是 GIM 垂直 TEC 网格点位置索引, $\varphi$ 和 $\theta$ 分别表示经度和纬度, $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 分别表示网格点经度和纬度间隔, $R_e$ 为地球半径. 当 $i$, $j$ 对应的网格覆盖全球所有网格时, $P$ 值即为 GEC; 当 $i$, $j$ 对应的网格只覆盖部分区域时, 计算得到的 $P$ 即为 REC.

对全球、不同纬度区域以及不同半球的 GEC/REC 进行对比分析, 计算结果如图 3 所示. 图 3(a) 给出了全球 GEC 及各纬度区域 REC 的变化情况, 为分析方便起见, 设南北纬度小于 25° 为低纬, 25°—60° 为中纬, 60° 以上为高纬. 从图 2(a) 中可以看出: 磁暴发生后, 8 月 27 日 GEC 有一个明显的突然增加过程, 10:00 UT 前后达到最高 1.37 GECU (1 GECU=$10^{32}$ 个电子), 这表明磁暴期间随着太阳风、行星际能量的注入, 电离层整体的离化水平有所增加 [8], 电离层 TEC 变大, 从而导致 GEC 的增加, 此时电离层表现为正暴特征; 此后开始逐渐下降, 8 月 29 日 02:00 UT 左右达到最低约 1 GECU, 下降幅度达到 30% 左右; 此后数天内, 日最高 GEC 均未能达到磁暴前 8 月 25 日和 26 日的水平, 表现为较长时间的负暴变化. 从各纬度的变化来看, 中纬区域正负双相暴特征明显, 其峰值变化与全球 GEC 的峰值变化基本同步; 低纬电离层变化相对平稳, 磁暴发生后, REC 有小幅增加的趋势, 但其峰值变化与 GEC 变化有相对滞后的现象, 大约在 8 月 28 日 06:00 UT 前后达到最大, 此后低纬 REC 变化平稳并迅速恢复到磁暴前的水平; 高纬区域变化趋势与中纬区域基本相同, 但其负暴相效应更为明显, REC 下降超过 50%, 且持续时间更长, 9 月 3 日 REC 仍没有恢复到暴前状态.

为消除磁赤道不对称性影响, 这里只计算了南北半球纬度高于 18° 以上 (直至 ±87.5°) 的结果, 图 3(b) 给出了南北半球 REC 的比较结果. 从图 3(b) 可以看出, 全球电离层 TEC 呈现明显的南北半球 (夏季和冬季半球) 不对称性, 其中北半球 REC 明显高于南半球. 在对磁暴事件的响应程度上看, 半球不对称性也同样十分明显, 北半球 8 月 27 日正暴效应特征十分明显, 此后更表现长时间的负暴效应; 而对于南半球而言, 其正负暴效应的幅度均明显弱于北半球, 且其负暴相效应持续时间也明显短于北半球.

为更详细分析 TEC 的时空变化特征, 基于 CODE GIM 数据计算了 2014 年 8 月 26—28 日全球尺度电离层垂直 TEC 与磁静日 TEC 均值的差值 $\Delta T$

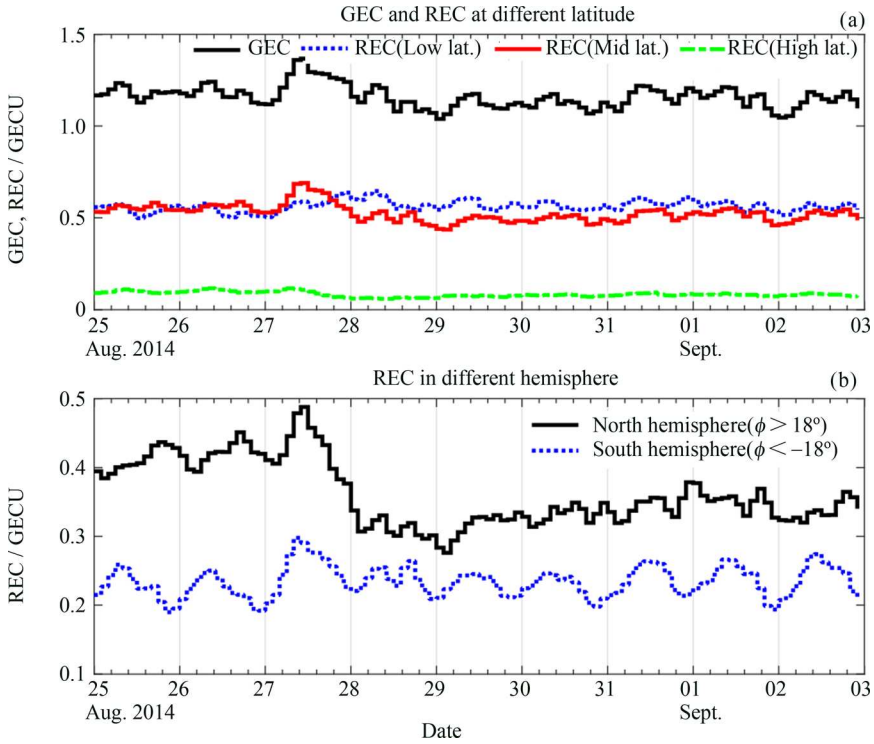


图 3　磁暴期间全球总电子含量 GEC 和区域总电子含量 REC 的变化

Fig. 3　Changes of Global total Electron Content (GEC) and Reginal total Electron Content (REC) during geomagnetic storms

(见图 4), $\Delta T$ 表达式为

$$\Delta T = T_{\mathrm{GIM}} - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_{\mathrm{quiet}}. \tag{2}$$

其中: $T_{\mathrm{GIM}}$ 表示 8 月 26−28 日全球垂直 TEC, $T_{\mathrm{quiet}}$ 表示 8 月 23−26 日磁平静日期间同一世界时垂直 TEC 的均值, $i$ 表示对应的日期, $N$ 为磁静日的总天数. GIM 数据的纬度、经度和时间分辨率为 2.5°×5°×2h, 图中黑色虚线为地磁纬度. 从图 4 可以看出, 在 8 月 26 日磁平静时期, 除局部区域外, 全球电离层绝大部分区域的 TEC 的变化非常平稳, $\Delta T$ 的日变化基本小于 5 TECU.

图 5 给出了 2014 年 8 月 27 日全球电离层垂直 TEC 与磁静日偏差 $\Delta T$ 变化. 由图 5 可以看出, 从 27 日开始, 磁暴初相阶段的 00:00−02:00 UT 期间, 磁低纬区域的电离层 TEC 开始有了较为明显的变化, 其中磁赤道南美区域附近的 $\Delta T$ 开始出现一定程度的增加, 而 180°−90°W 经度区域南北驼峰区的 Δ TEC 开始降低, 这应该是 IMF 南向翻转时, 白天的东向穿透电场引起的赤道喷泉所致. 从 04:00 UT 开始, 北半球中高纬地区的正暴效应开始发展起来, 南半球 06:00 UT 开始发展起来. 08:00−16:00 UT 正暴效应持续增强, 并且随着地球的自转从亚澳扇区移动到欧非扇区及美洲扇区. 与此同时, 北半球高纬负相暴从 12:00 UT 开始向低纬扩展; 对于高纬区而言, 南北半球电离层对磁暴的响应差别明显, 北半球高纬区域 10:00−22:00 UT 电离层 TEC 相比磁静日要偏低, 且偏低的区域呈现向赤道侧发展的趋势, 而南半球则表现为比磁静日 TEC 偏高的变化特征.

图 6 给出了 2014 年 8 月 28 日的电离层变化. 从图 6 可以看出, 磁暴恢复相期间, 南北半球不同纬度区域的电离层变化差距更加明显, 磁赤道区电离层 TEC 比磁静日高, 磁赤道北向电离层 TEC 出现明显下降, 北半球中纬和高纬区域 TEC 下降幅度尤为明显, 最大 TEC 下降超过 20 TECU; 磁赤道南向电离层 TEC 比磁静日有所增加, 尤其是南半球磁纬 30° 附近的 TEC 增加幅度非常明显, 02:00−10:00 UT 南半球高纬区域 TEC 偏低且偏低的区域呈现增加的趋势, 12:00 UT 以后, TEC 开始逐步达到磁静日的水平并有局部增强的现象; 南半球局部也有负暴效应, 但主要限制在了极区和高纬地区.

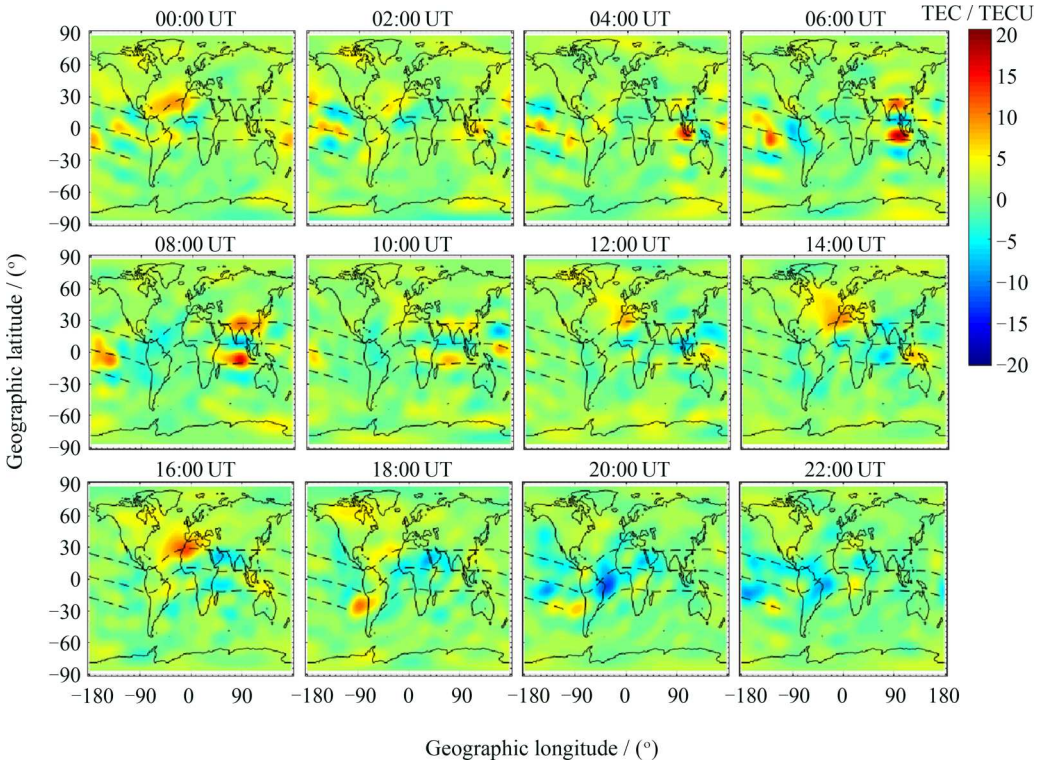


图 4 2014 年 8 月 26 日全球电离层垂直 TEC 与磁静日偏差 $\Delta T$ 变化

Fig. 4 Changes of global ionospheric vertical TEC and TEC deviation $\Delta T$ on 26 August 2014

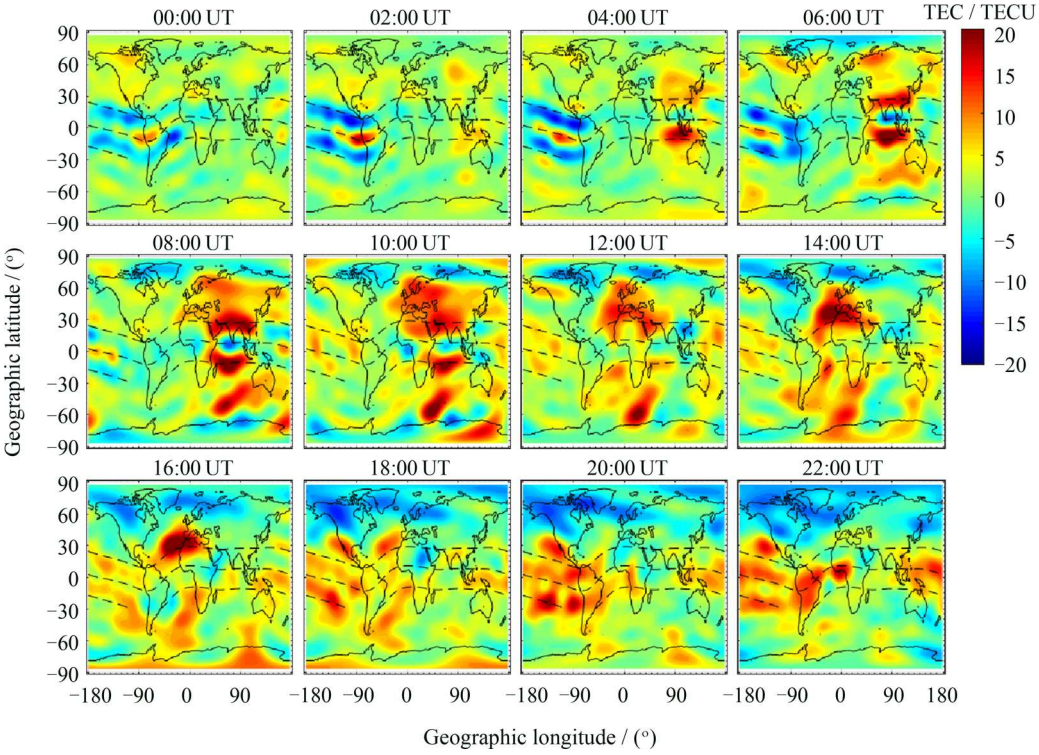


图 5 2014 年 8 月 27 日全球电离层垂直 TEC 与磁静日偏差 $\Delta T$ 变化

Fig. 5 Changes of global ionospheric vertical TEC and TEC deviation $\Delta T$ on 27 August 2014

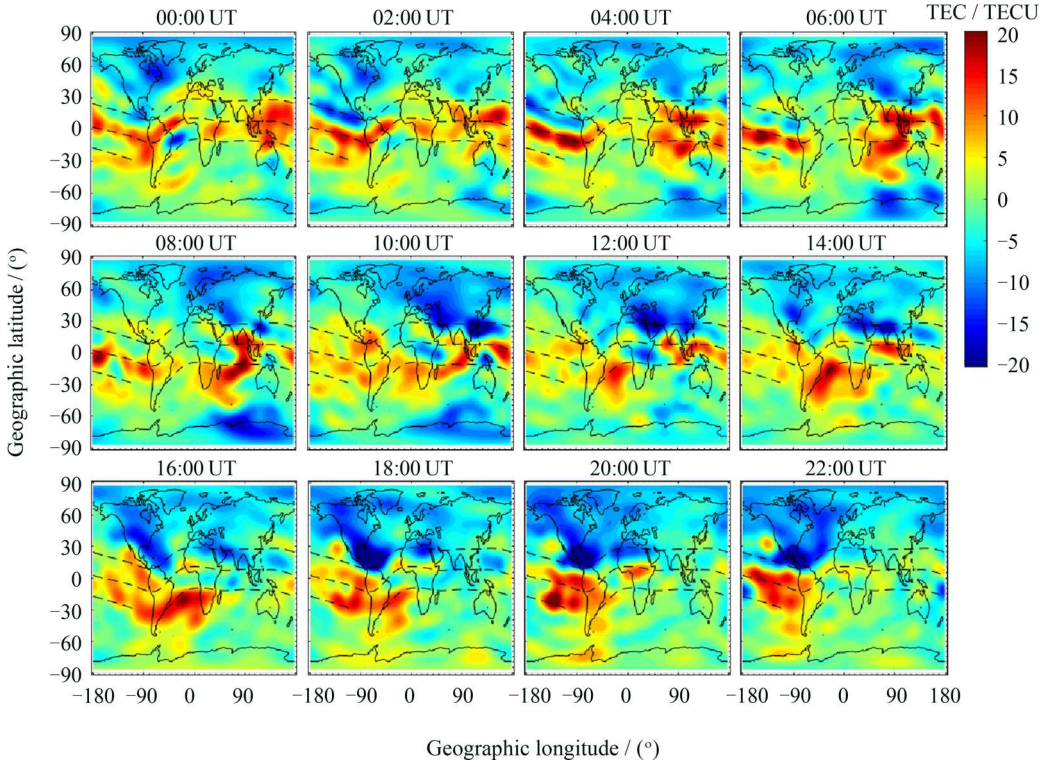


图 6　2014 年 8 月 28 日全球电离层垂直 TEC 与磁静日偏差 $\Delta T$ 变化

Fig. 6　Changes of global ionospheric vertical TEC and TEC deviation $\Delta T$ on 28 August 2014

### 2.3　磁暴期间电离层 ROTI 变化

大量研究表明, ROTI 与电离层的扰动特性存在很强的相关性, 可用于表征电离层不规则结构的存在和电离层闪烁的强弱 [9−12]. 利用 GNSS 的倾斜 TEC 数据计算电离层 ROTI 指数 $R_{\rm roti}$, 用于分析磁暴期间的电离层不均匀体变化特性. 首先计算 TEC 相对变化, 有

$$R_{\rm rot}=\frac{T(t+\Delta t)-T(t)}{\Delta t}, \tag{3}$$

式中, $T$ 表示 GNSS 接收机电离层倾斜 TEC 测量值, $t$ 为时刻, $\Delta t$ 为时间间隔. 然后计算 $R_{\rm roti}$, 有

$$R_{\rm roti}=\sqrt{\langle R_{\rm rot}^2\rangle-\langle R_{\rm rot}\rangle^2}. \tag{4}$$

式中, $\langle\cdot\rangle$ 表示对其中的数值取均值. 为消除多径效应和信号遮挡的影响, ROT 一般取仰角高于 20° 传播路径上 30 s 间隔的 VTEC 随时间的变化率. 然后按 5 min 间隔 ROT 的标准差计算得到 ROTI 指数, $R_{\rm roti}$ 单位为 TECU·min$^{-1}$.

分别选取了东亚–澳大利亚、欧洲–非洲、美洲扇区共 24 个台站的 GNSS ROTI 数据, 用于对此次磁暴期间的电离层变化特征进行计算分析.

图 7 给出了亚洲–澳大利亚扇区磁低纬区域 8 个 GNSS 台站的 ROTI 指数随电离层穿刺点的分布, 选择这些台站主要是为满足该扇区磁纬区域的覆盖性要求. 图 7 中按照绿色和红色两种颜色区分 ROTI 的等级, 其中绿色点表示 ROTI $<1.5$ TECU·min$^{-1}$, 红色点表示 ROTI $\geqslant 1.5$ TECU·min$^{-1}$ (出现不规则体), 图中黑色虚线代表不同的磁纬. 从图 7(a) 可以看出, 磁暴前后, 2014 年 8 月 25 日磁低纬电离层不规则体发生频率较低; 从图 7(b) 中可以看出, 8 月 26 日不规则体发生区域有所升高, 但红色点主要集中在 Pimo 站 (磁纬 7.17°) 和 Darw 站 (磁纬 22.16°) 附近, 与这两个台站约处于同磁纬的 Cusv 站和 Coco 站则基本没有 ROTI $\geqslant 1.5$ TECU·min$^{-1}$ 的情况发生, 表明电离层闪烁的发生有明显的经度依赖, 这与 Santos 等 [13] 在南美区域的研究结果是一致的; 在 8 月 27 日磁暴期间, 该区域的不规则体发生频率有明显的降低, 表明磁暴对该区域的不规则体发生具有一定的抑制作用, 这种情况在 8 月 28 日依然存在, 即该抑制作用能够持续一定的时间.

对于欧洲–非洲扇区的磁低纬区域而言, ROTI

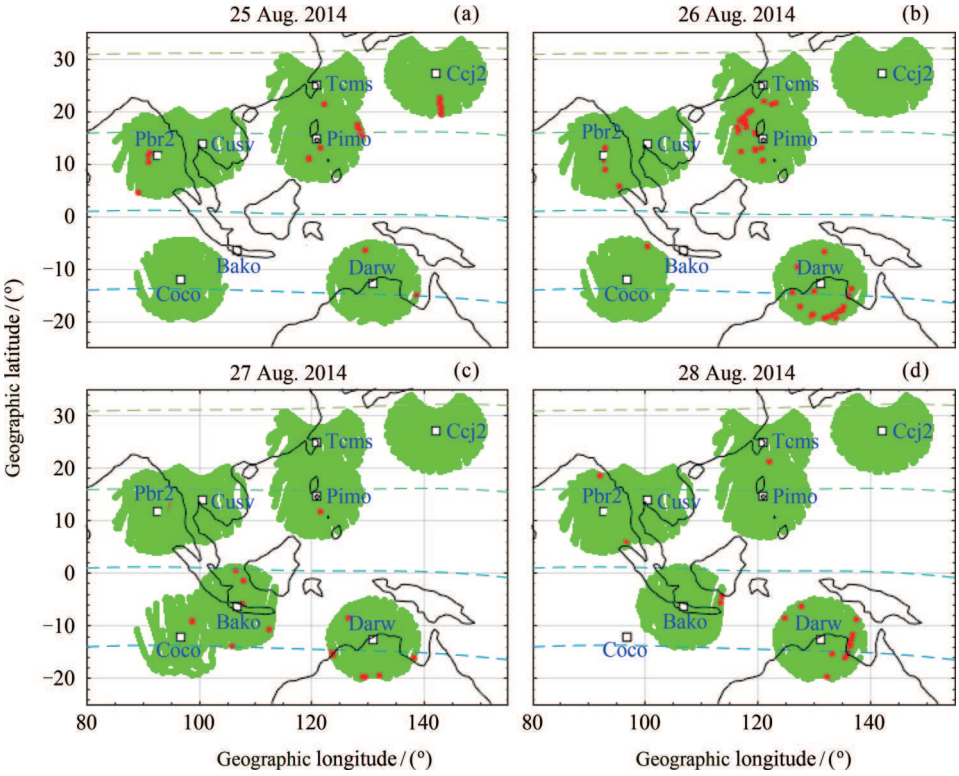


图 7 亚洲–澳大利亚扇区磁低纬区域电离层 ROTI 变化

Fig. 7 Changes of ionospheric ROTI index in the lower latitude region of the Asia-Australia sector

的变化与亚洲–澳大利亚扇区类似. 从图 8(a) (b) 可以明显看出, 2014 年 8 月 25 日和 26 日有明显的不规则体产生, 尤其以东非 Mbar 和西非 Nklg 两个台站最为明显. 从图 8(c) 可以看出, 除极小部分区域外, 绝大部分台站基本观测不到不规则体的出现. 从图 8(d) 可以看出, 到了 28 日, 不规则体又开始在西非几个台站出现, 但分布范围比 25 和 26 日有明显的缩小. 欧洲–非洲扇区的分析结果再次证实了本次磁暴对磁低纬区域不规则体的强烈抑制作用.

美洲扇区的 ROTI 如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 美洲扇区磁暴前后的 8 月 25−28 日均未能观测到明显的不规则体现象发生, 这表明不规则体的产生和发展具有强烈的局地性和经度差异.

## 3 讨论

利用多观测手段获取的电离层特征参量, 对 2014 年 8 月磁暴事件的电离层响应特征进行了分析. 此次磁暴事件总体来说属于缓始型中等磁暴, 从分析结果来看, 此次磁暴期间电离层变化有以下几点特征.

2014 年 8 月 25 −26 日, 太阳、行星际及地磁环境属于整体平静的阶段, 电离层以正常的日变化和纬度变化为主, 并未发生明显的正暴和负暴现象. 8 月 27 日开始, 随着磁暴事件的发展, 磁赤道南北驼峰区电子浓度开始增强, 从两极向赤道的风在南北驼峰区抬升电离层, 引起电子密度增加; 同时, 在磁偏角很小的条件下, 从两极向赤道的风在磁赤道及附近区域不能抬升电离层, 而赤道喷泉效应增强导致的电子密度耗空是磁赤道附近出现负暴的可能原因.

磁暴发生后的 8 月 28−30 日, 赤道北驼峰出现了明显的南移现象, 磁赤道两侧双驼峰结构完全消失, 变成单峰结构. 基于 CODE 全球 TEC 地图数据, 图 10 给出了亚洲–澳大利亚 (经度 120°E)、欧洲–非洲 (经度 10°E) 和美洲 (经度 70°W) 三个不同扇区低纬区域的 TEC 随时间–纬度的轮廓. 推测出现这一现象与扰动发动机电场 (Disturbance Dynamo Electric Field, DDEF) 有直接关联, 扰动发电机电场与宁静日电场作用相反, 其抑制了喷泉效应和减弱赤道异常峰的形成 [14−17], 但更为准确的证据则依赖于直接的电场观测数据.

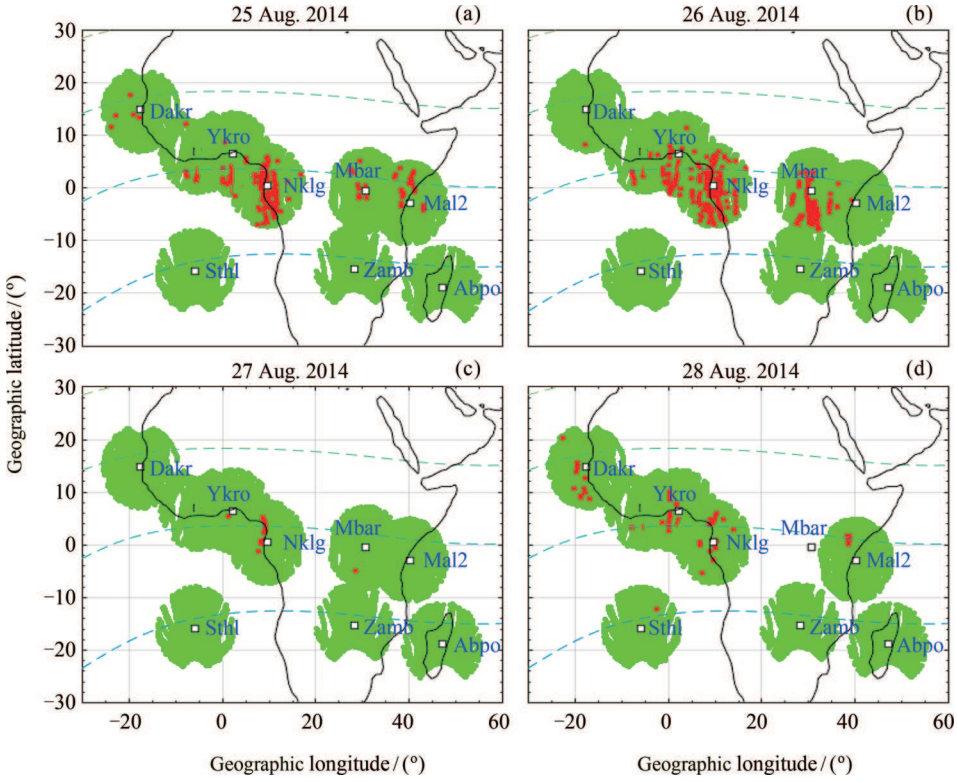


图 8　欧洲–非洲扇区磁低纬区域电离层 ROTI 变化

Fig. 8　Changes of ionospheric ROTI in the lower latitude region of the European-African sector

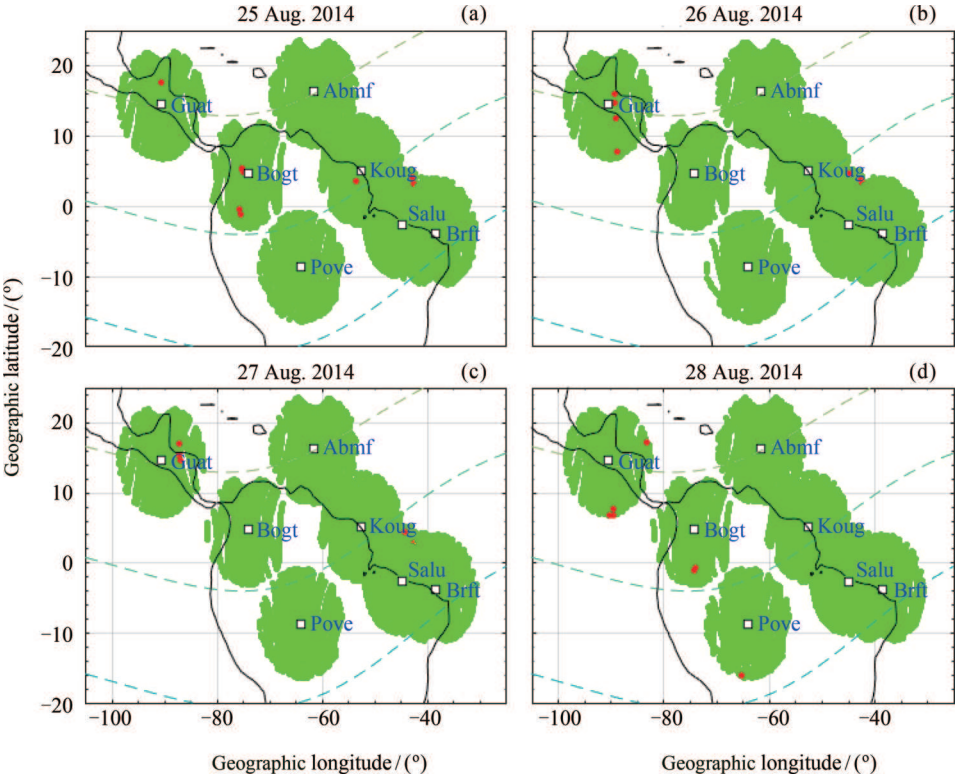


图 9　美洲扇区磁低纬区域电离层 ROTI 变化

Fig. 9　Changes of ionospheric ROTI in the lower latitude region of the American sector

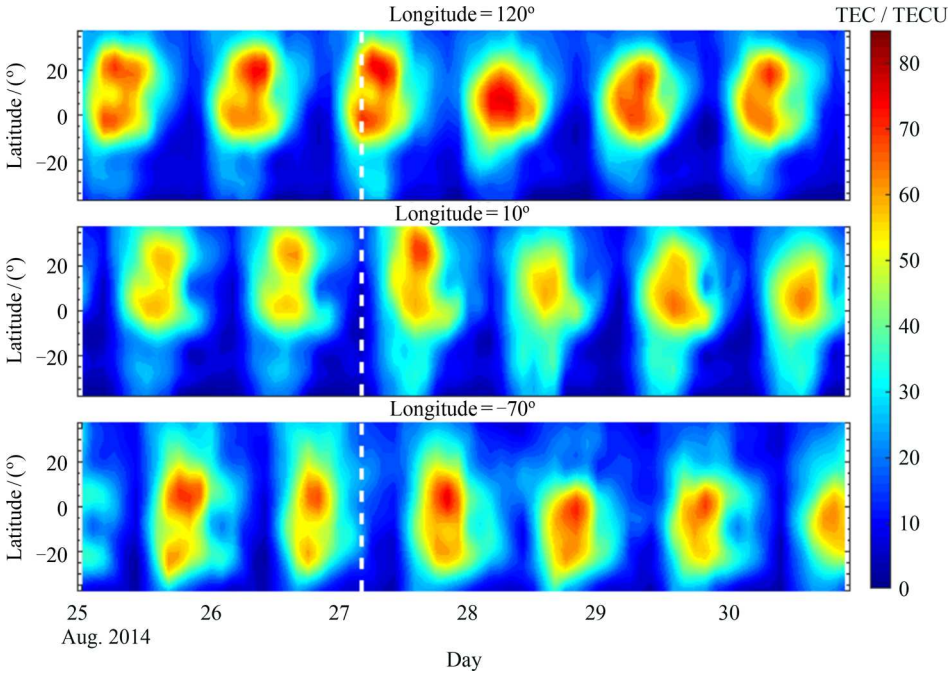


图 10 3 个不同经度扇区电离层 TEC 变化

Fig. 10 Ionospheric TEC variations in three sectors with different longitudes

磁暴期间基于 GNSS ROTI 的分析表明: 8 月 27 日, 欧洲–非洲低磁纬区域电离层不规则体的生成受到了很强的抑制作用. 大量研究表明, 在日落前后电场翻转前出现增强使赤道 F 层被抬升到足够高的高度, 这有利于瑞利–泰勒不稳定性的发展和低纬赤道 F 层不均匀体的产生. 但是暴时增强的西向扰动发电机电场驱动的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移抑制 F 层抬升, 不利于瑞利–泰勒不稳定性的发展, 从而抑制了低纬赤道日落后 F 层不均匀体和电离层闪烁的发生 [4]. 由于欧洲–非洲扇区低磁纬缺乏 $h_{\mathrm{m}}F_2$ 的直接探测数据, 无法通过分析 $h_{\mathrm{m}}F_2$ 的变化对此进行深入验证.

磁暴事件发生时, 不同扇区不同半球的电离层响应存在明显的不对称性. 不同扇区的差异可能与磁暴期间各经度链区域内的焦耳加热强度、热层环流和重力波传播条件不同有关. 不同半球的不对称性能够用背景风场的差异进行解释 [18−21]: 在冬季半球, 赤道向的中性风比较弱而极向背景风场很强, 使得中低纬区能观测到很强的电离层正暴, 负暴效应也被限制在了极区和高纬地区; 而此时夏季半球极向背景风场 (白天) 主要以赤道向为主, 再加上其强度要明显弱于冬季, 因此北半球更易观测到电离层负暴. 更加准确的解释还需依赖直接观测才能获得.

## 4 结论

利用全球电离层 GNSS 数据对 2014 年 8 月一次中等强度的地磁暴期间全球不同扇区电离层 TEC 和 ROTI 的变化进行分析, 并对此次磁暴所引发电离层暴的可能机制进行了探讨. 分析发现, 本次地磁暴伴随明显的电离层暴, 该电离层暴在电离层特征参量中均有明显的体现. 磁暴期间: 北半球正相暴之后转入长时间的负相暴, 南半球以正相暴为主, 磁低纬和中纬响应均较为明显, 高纬主要以负相暴特征为主; 赤道北驼峰出现了明显的南移现象, 磁赤道两侧双驼峰结构完全消失, 变成单峰结构; 电离层响应存在南北半球不对称性, 不同扇区电离层响应存在一定的时间延迟; 亚洲–澳大利亚扇区和美洲扇区均未有明显闪烁发生, 欧洲–非洲扇区磁暴前有电离层闪烁发生, 磁暴发生后消失, 推测与暴时西向扰动发电机电场的抑制作用有关.

当前, 随着电离层探测手段的不断发展, 磁暴期间电离层响应研究已经逐步从早期的地基单台站单参量的变化分析向天地基、多台站、多手段、多要素的综合分析发展, 这将进一步促进对磁暴期间的电离层变化机理的深入了解.

**致谢** 空间环境数据从美国 NASA 戈达德空间飞行中心 OMNI 数据中心获取, 全球电离层 TEC 地图数据从欧洲定轨中心 CODE 获取, GNSS 数据从国际 GNSS 服务 IGS 获取.

## 参考文献

[1] LU Fang, XU Jisheng, ZOU Yuhua. Analysis of observations of ionospheric storms and tid using a GPS- Array [J]. *J. Wuhan Univ.*: *Nat. Sci. Ed.*, 2004, **50**(3): 365-369 (鲁芳, 徐继生, 邹玉华. 电离层暴和行扰的 GPS 台网观测与分析 [J]. 武汉大学学报: 理学版, 2004, **50**(3): 365-369)

[2] ZHAO Biqiang. Studies on the Annual and Semiannual Anomalies and Storm Characteristics of Mid-and Low Latitudes Ionosphere [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006 (赵必强. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2006)

[3] DENG Zhongxin, LIU Ruiyuan, ZHEN Weimin, *et al.* Study on the ionospheric TEC storms over China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(7): 2177-2184 (邓忠新, 刘瑞源, 甄卫民, 等. 中国地区电离层 TEC 暴扰动研究 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(7): 2177-2184)

[4] AZZOUZI B I, MIGOYA-ORU'E Y, MAZAUDIER C A, *et al.* Signatures of solar event at middle and low latitudes in the Europe-African sector, during geomagnetic storms, October 2013 [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **56**(9): 2040-2055

[5] SUN Wenjie, NING Baiqi, ZHAO Biqiang, *et al.* Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2017, **60**(1): 1-10 (孙文杰, 宁百齐, 赵必强, 等. 2015 年 3 月磁暴期间中国中低纬地区电离层变化分析 [J]. 地球物理学报, 2017, **60**(1): 1-10)

[6] ASTAFYEVA E, ZAKHARENKOVA I, FORSTER M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2015, **120**(10): 9023-9037

[7] NAVA B, RODRÍGUEZ ZULUAGA J, ALAZO CUARTAS K, *et al.* Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2016, **121**(4). DOI: 10.1002/2015JA022299

[8] AFRAIMOVICH E L, ASTAFYEVA E I, OINATS A V, *et al.* Global electron content: a new conception to track solar activity [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**(2): 763-769

[9] PAN Lijing. Studies on Monitoring and Modeling of Polar Ionosphere Scintillation Based on GNSS [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015 (潘丽静. 基于 GNSS 数据的极区电离层闪烁监测及建模研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2015)

[10] PI X, MANUCCI A J, LINDQWISTER U J, *et al.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(18): 2283-2286

[11] CHERNIAK I, KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I. ROTI Maps: a new IGS ionospheric product characterizing the ionospheric irregularities occurrence [J]. *GPS Solut.*, 2018, **22**(3): 69

[12] SIERADZKI R, PAZIEWSKI J. GNSS-based analysis of high latitude ionospheric response on a sequence of geomagnetic storms performed with ROTI and a new relative STEC indicator [J]. *J. Space Weather Space Clim.*, 2019, **9**. DOI: 10.1051/swsc/2019001

[13] SANTOS A M, ABDU M A, SOBRAL J H A, *et al.* Strong longitudinal difference in ionospheric responses over Fortaleza (Brazil) and Jicamarca (Peru) during the January 2005 magnetic storm, dominated by northward IMF [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2012, **117**(A8): 101-110

[14] BLANC M, RICHMOND A D. Ionospheric disturbance dynamo [J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: A4

[15] FULLER-ROWELL T J, CODRESCU M V, RISHBETH H, *et al.* On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1996, **101**(A2): 2343-2354

[16] BALAN N, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al.* A physical mechanism of positive ionospheric storms at low and mid latitudes through observations and modeling [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2010, **115**(A2): A02304

[17] MENGIST C K. Response of ionosphere over Korea and adjacent areas to 17 March 2015 geomagnetic storm [J]. *Adv. Space Res.*, 2019, **64**(1): 183-198

[18] SHIMEIS A, AMORY-MAZAUDIER C, FLEURY R, *et al.* Transient variations of vertical total electron content over some African stations from 2002 to 2012 [J]. *Adv. Space Res.*, 2014, **54**(11): 2159-2171

[19] QIU Na. Statistical Analysis of the Ionosphere Response to the CIR and CME [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 (邱娜. 电离层对 CIR 和 CME 响应的统计分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015)

[20] ZHAO Biqiang, WAN Weixing, LEI Jiuhou, *et al.* Positive ionospheric storm effects at Latin America longitude during the superstorm of 20—22 November 2003: Revisit [J]. *Ann. Geophys.*, 2012, **30**: 831-840

[21] ZHAO Biqiang, YANG Changjun, CAI Yihui, *et al.* East-west difference in the ionospheric response of the March 1989 great magnetic storm throughout East Asian region [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2019, **124**(11): 9364-9380