0254-6124/2021/41(2)-261–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Ge, WANG Ningbo, LI Zishen, ZHOU Kai, LIU Ang. Impact of geomagnetic storms on ionosphere variability and precise point positioning application in high latitudes of the northern hemisphere (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(2): 261-272. DOI:10.11728/cjss2021.02.261

地磁暴期间北半球高纬度地区电离层变化特征及对精密定位的影响*

王 格[1,2] 王宁波[1] 李子申[1] 周 凯[1] 刘 昂[1,3]

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 基于加拿大地区高纬度电离层观测网的电离层闪烁观测数据, 分析了 2018 年 8 月 26 日地磁暴事件引发的北半球高纬度地区电离层总电子含量 (TEC) 异常变化、TEC 变化率指数 (ROTI) 及电离层相位闪烁的变化特征. 结果表明: 加拿大地区最大异常值约 6 TECU, 磁暴引发全球电离层 TEC 异常峰值高达 20 TECU; 加拿大地区电离层相位闪烁发生率最大增至 12.6%, 而磁静日期间约为 1%; 强电离层闪烁期间, 电离层相位闪烁指数与 ROTI 之间具有较强的一致性. 对 GPS 双频精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 结果进行分析发现: 无闪烁期间定位误差随测站纬度的增高呈现出增大趋势, 但均方根误差小于 0.4 m; 闪烁发生期间各测站的定位误差均显著增大, 水平和垂直方向定位误差分别增至约 0.9 m 及 1.7 m.

关键词 电离层闪烁, 电离层 TEC 异常, TEC 变化率指数, 精密单点定位

中图分类号 P 352

Impact of Geomagnetic Storms on Ionosphere Variability and Precise Point Positioning Application in High Latitudes of the Northern Hemisphere

WANG Ge[1,2] WANG Ningbo[1] LI Zishen[1] ZHOU Kai[1] LIU Ang[1,3]

1(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

2(*National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710600)

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

Abstract Based on the ionospheric scintillation data of the Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN), the variation characteristics of ionospheric Total Electric Content (TEC), phase

* 国家自然科学基金项目 (42074043, 41704038) 和国家重点研究发展计划项目 (2017YFGH002206, 2016YFB905) 共同资助
2019-12-04 收到原稿, 2020-08-25 收到修定稿

E-mail: wangge@ntsc.ac.cn

scintillation and Rate of TEC Index (ROTI) were analyzed during the 26 August 2018 geomagnetic storm period. Results show that the TEC anomalies reach 20 TECU on global scale and 6 TECU over Canadian regions, respectively. The occurrence of phase scintillations is about 12.6% during the selected stormy day, which is only around 1% during geomagnetic quiet period. The occurrence of ROTI exhibits high correlation with that of phase scintillations during stormy geomagnetic conditions. The impact of ionospheric scintillations on positioning performance was analyzed by means of GPS Precise Point Positioning (PPP). It is proved that the 3D positioning root mean square errors are within 0.4 m for all test stations during the quiet geomagnetic condition. When it comes to the high geomagnetic condition, the magnitude of positioning errors significantly increase, which reaches 0.9 and 1.7 m in horizontal and vertical directions, respectively.

Key words Ionospheric scintillation, Total electron content anomaly, Rate of TEC index, Precise Point Positioning (PPP)

0 引言

从太阳表面喷发的等离子体通过行星际空间传播到地球磁层顶, 其辐射的巨大能量与地球磁场相互作用引起地磁暴 [1]. 受地磁暴的影响, 穿过电离层的无线电信号振幅、相位等发生短周期不规则变化的现象称为电离层闪烁 [2,3]. 电离层闪烁包括幅度 (振幅) 闪烁和相位闪烁两种, 已有研究表明幅度闪烁主要集中在地磁赤道 ±20° 范围内的低纬区域, 而相位闪烁多发生在高纬度地区 [4,5]. 电离层闪烁效应也可能会造成通信系统、卫星导航系统、地空目标监测系统信号中断, 严重影响各类无线电系统的应用效能与可靠性 [6−8].

电离层电子总含量 (TEC) 是表征电离层形态特征的重要参数 [9,10]. 随着无线电卫星信标技术发展与广泛应用, 特别是全球导航卫星系统所具有的多星座、全球覆盖、高时空分辨率和高测量精度等优势, 使其成为全球电离层 TEC 不规则结构、电离层闪烁探测的有效手段 [3,10,11]. Pi 等 [12] 提出利用 GPS 双频相位观测数据计算电离层 TEC 变化率指数 (ROTI), 并将其用于表征电离层闪烁程度以及电离层不规则结构变化研究. Deng 等 [13] 发现中国地区 70% 电离层 TEC 暴扰动与地磁活动有关. 针对 2015 年 3 月 18 日地磁活动, Sun 等 [14] 综合利用电离层测高仪的观测数据、北斗地球同步轨道 (GEO) 卫星 TEC 以及 GPS 电离层闪烁指数, 分析了中国中低纬地区电离层变化活动, 结果显示夜间负相暴抑制了低纬夜间电离层闪烁的发生. 在北京附近地区, 99% 以上的磁暴活动会伴随 TEC 扰动 [15]. 磁暴活动在闪烁少发月 (2001 年 11 月) 触发闪烁的发生, 在闪烁频发月 (2001 年 9 月) 则抑制闪烁的发生 [16].

针对高纬地区, Yin 等 [3] 利用南极 SouthPole 站和 McMurdo 站 GPS 闪烁监测仪数据研究发现: 2011 年 9 月 24−25 日磁暴使得相位闪烁活动及强度均显著增强, 与 ROTI 的变化非常相似; ROTI 数值高时并非代表强闪烁出现, 不能将 ROTI 作为唯一判断电离层闪烁强弱的标准. Krankowski 等 [17] 研究发现, 2001 年 3 月磁暴期间南半球不同测站 TEC 增大了 10∼30 TECU. Prikryl 等 [18] 利用全球分布的 GPS 电离层闪烁监测设备以及高频 GPS (1 Hz) 接收机观测数据, 发现磁暴事件对南北半球的影响呈现出不对称性. Smadi 等 [19] 分析发现, 磁暴期间相位闪烁强度可增大 8.3 倍, TEC 异常时间持续约 30 h.

本文针对 2018 年 8 月 26 日地磁暴事件, 利用加拿大高纬度电离层监测网 (Canadian High Arctic Ionospheric Network, CHAIN) 的电离层闪烁观测数据以及国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Services, IGS) 提供的全球电离层格网数据, 对地磁暴期间北半球高纬度地区的电离层响应及其对 GNSS 精密定位的影响进行详细分析和讨论.

1 数据与方法

基于卫星导航的电离层监测参数主要包括电离层 TEC、电离层闪烁与扰动指数. 这里以 CHAIN

观测网中接收机输出的 GPS L1 波段电离层闪烁指数及双频 GPS 观测数据为基础, 对磁暴期间北半球高纬度地区的电离层闪烁、扰动特征及对导航定位的影响开展分析. 此外, 电离层 TEC 采用 IGS 提供的最终 GIM 数据, 数据的空间经纬度分辨率为 5° × 2.5°, 时间分辨率为 15 min. 通过对 GIM 数据在空间域进行线性内插, 获取加拿大地区上空磁暴期及磁暴前 27 d 的 TEC 时间序列, 并以此作为滑动四分位距法 TEC 时间序列异常探测数据源. CHAIN 观测网包含了 25 个高频 GPS 电离层闪烁接收机和 6 个数字电离层探测仪 [20]. 考虑不同类型接收机电离层闪烁指数处理方法之间的差异, 本文选取 CHAIN 观测网中 11 个装有 Septentrio PolaRxS 电离层闪烁接收机的测站, 利用这些测站的观测数据对磁暴期高纬度地区电离层响应进行分析. 11 个测站位于西经 84°−116° 和北纬 53°−73° 范围内, 具体分布如图 1 所示.

电离层相位闪烁指数 σ_φ 是原始观测消趋势项后 $\varphi_{\rm I}$ 的标准差 [21,22], 其表达式为

$$\sigma_\varphi = -\sqrt{\langle\varphi_{\rm I}^2\rangle - \langle\varphi_{\rm I}\rangle^2}. \tag{1}$$

式中, $\varphi_{\rm I}$ 由原始相位观测数据进行消趋势项处理得到, $\langle\rangle$ 为均值符号, Septentrio PolaRxS 接收机输出相位闪烁指数时间间隔为 1 min.

电离层扰动指数 ROTI 为电离层电子含量 (TEC) 的变化率指数 [12,23], 即电离层扰动指数 ROTI (定义符号 $\phi_{\rm ROTI}$) 可根据原始相位观测值计算得到, 单位为 TECU·min^{-1}, 表达式为

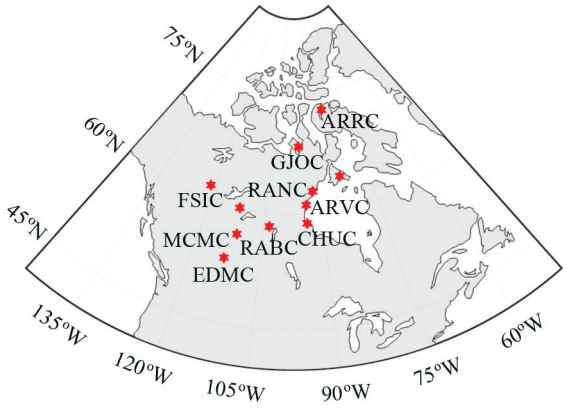


图 1　加拿大地区电离层闪烁监测站地理分布

Fig. 1　Geographic distributions of the selected ionospheric scintillation monitoring sites of the CHAIN

$$\begin{cases} \phi_{\rm ROTI} = \sqrt{\langle\phi_{\rm ROT}^2\rangle - \langle\phi_{\rm ROT}\rangle^2}, \\ \phi_{\rm ROT} = \dfrac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}\big[(L_1^i - L_2^i)_{t+\Delta t} - \\ \qquad (L_1^i - L_2^i)_t\big]/\Delta t. \end{cases} \tag{2}$$

式中: L_1, L_2 分别为频率 f_1, f_2 的相位观测值; i 为卫星编号; t 为历元时刻; Δt 为历元间隔.

滑动四分位距法具有简单快捷并可不断更新基值的优势, 这使之成为电离层 TEC 异常探测较为常用的方法之一. 滑动四分位距法采用滑动的中位数作为基值, 可根据数据背景选取适当长度的滑动窗口不断更新基值, 取 2 倍的滑动均方差作为背景范围. 以分析时刻的 TEC 作为检核值, 前 27 天的 TEC 数据作为背景值. 将背景数据中与检核值在同一时刻的 TEC 组成一个 TEC 序列, 然后对该序列 TEC 按数值大小从小到大进行排序; 将排序后的 TEC 序列分成 4 份, 处于三个分割点上的 TEC 值为该组 TEC 序列的四分位数, 分别为下四分位数 Q_1、中位数 M、上四分位数 Q_2. 四分位距记为 $d_{\rm IQR}$, 其表达式为

$$d_{\rm IQR} = Q_2 - Q_1. \tag{3}$$

根据中值 M 和四分位距 $d_{\rm IQR}$ 确定异常下边界 I_1 和上边界 I_2, 有 [24]

$$\begin{aligned} I_1 &= M - kd_{\rm IQR}, \\ I_2 &= M + kd_{\rm IQR}. \end{aligned} \tag{4}$$

式中, k 为指定系数, 四分位 $d_{\rm IQR}$ 约等于 1.34 倍标准差. 这里取 k 为 1.5 (约等于 2 倍标准差) 作为上下界限 [25].

基于实时动态模式 PPP 测试结果 (RTKLIB v2.4.2), 进一步分析了电离层相位闪烁活动对北半球高纬度地区精密定位精度的影响. PPP 观测模型为双频消电离层 (Ionosphere-free) 组合, 随机模型采用卫星高度角随机定权, 参数估计基于卡尔曼滤波方法. 表 1 列出了 PPP 解算过程中各项误差具体的处理策略.

2　结果与讨论

以电离层电子含量 TEC、电离层扰动指数 ROTI 以及相位闪烁指数作为表征电离层活动的特征参量, 对 2018 年 8 月 26 日强地磁暴期间全球电离层 TEC 活动响应展开研究, 进而分析磁暴期间加

拿大地区电离层相位闪烁与 ROTI 变化, 讨论各测站精密单点定位误差随纬度与地磁活动强度的变化.

2.1 地磁活动概述

2018 年 8 月 20 日, 日面上爆发了一次弱小的日冕物质抛射 CME, 其与冕洞共同作用引发了地球磁场强烈扰动. 该 CME 经过大约 5 d 的传播, 在 8 月 25 日到达地球附近. 8 月 25—28 日期间, 地磁暴水平达到 2018 年的最高值 *.

该次大磁暴过程如图 2 所示, 横轴为 2018 年年积日, 从上到下分别给出了行星际磁场分量 B_z、质子密度、地磁活动指数 Kp, Dst 和太阳活动黑子数. 约在 8 月 25 日 02:30 UTC (图 2 中红色竖线之后), B_z 指数逐渐增大, 表现为 $B_z > 0$, 即行星际磁场 (IMF) 方向向北, 进入地磁活动初相阶段, 质子密度和 Kp 指数均增大. 约在 8 月 25 日 14:30 UTC 进入主相阶段 (图 2 中绿色竖线后), 即 B_z 指数急剧减小, B_z 指数小于 0 后, 即行星际磁场方向转向南向, Dst 指数开始逐步减小, 随后等离子体速度继续增大. 约在 8 月 26 日 06:30 UTC 之后 (图中黄色竖线后), Kp 指数逐渐下降, Dst 指数呈现恢复正常状态, 即进入恢复相阶段.

2.2 磁暴活动对全球及加拿大地区电离层 TEC 的影响

利用全球电离层 TEC 格网数据, 采用滑动四分位距法对 2018 年 8 月 25 日与 26 日 (年积日 DOY 237 与 238 天) 共一天半全球 TEC 序列进行异常探

表 1 GPS 精密单点定位处理策略

Table 1 Strategies for precise single point positioning

序号	选项	处理策略
1	测站坐标	实时估计, 初始坐标由标准单点定位得到
2	定位模型	PPP 卡尔曼滤波
3	电离层改正	双频消电离层组合
4	对流层改正	Saastamoinen 模型 + 实时估计
5	卫星轨道和钟差	SSR 改正信息 + 广播星历
6	接收机钟差	实时估计
7	天线 PCO/PCV	igs14.atx
8	截至高度角	15°
9	模糊度固定	浮点解
10	周跳探测	MW 组合法和无几何相关法

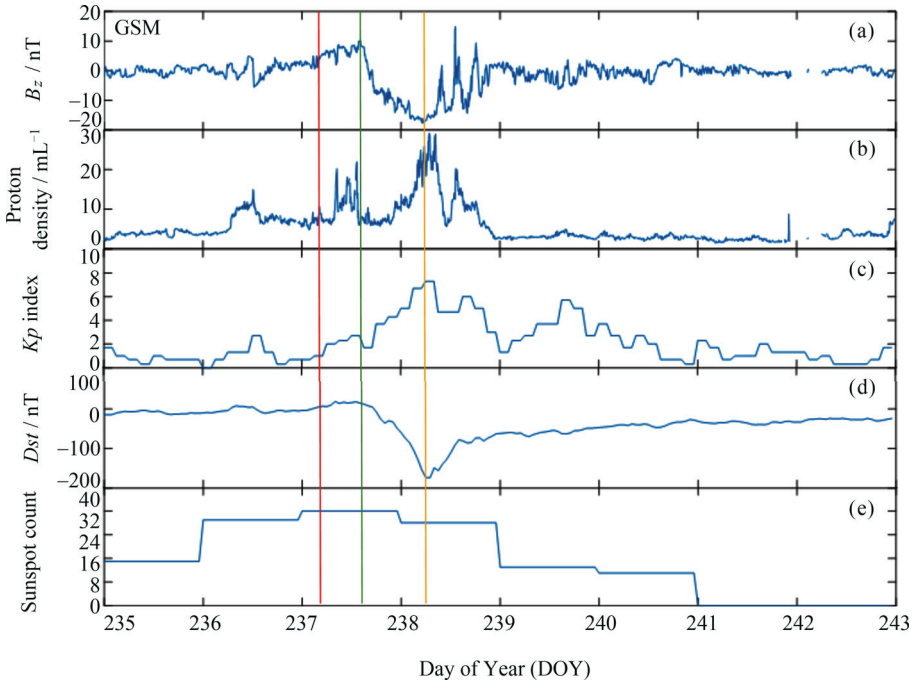


图 2 2018 年 DOY 235—242 天地磁及太阳活动指数变化

Fig. 2 Index of geomagnetic and solar activity from DOY 235 to 242 in 2018

*http://www.sohu.com/a/291217304_610722

测. DOY 237 天 12:00−23:00 UTC 全球电离层 TEC 异常探测结果如图 3 所示, DOY 238 天 00:00 UTC −23:00 UTC 全球电离层 TEC 异常探测结果如图 4 和图 5 所示.

图 3 可以看出: 自 DOY 237 天 19:00 UTC 开始, 南半球中纬度、中高纬度、北半球中纬度均在西经 120° 附近出现电离层 TEC 正异常, 全球范围异常值最大约 5 TECU. 此时, 地磁活动处于主相阶段, Kp 指数约为 4; 随后, 地磁活动不断增强, 电离层 TEC 正异常值逐渐增大, 异常范围也逐渐扩大; 在 22:00 UTC 左右, 南半球电离层 TEC 异常范围比北半球大, 其异常值增至约 15 TECU.

图 4 与图 5 结果显示, 在 8 月 26 日 (DOY 238 天) 00:00 UTC, 120°W 左右的电离层 TEC 异常区间逐渐东移至 150°W 左右, 且 180°E 也开始出现电离层 TEC 异常. 电离层 TEC 异常区域随太阳直射的移动呈自东向西的移动趋势. 这一结论与 Zhao 等 [26] 对磁暴期间其他电离层扰动指数的分析结果一致. 在

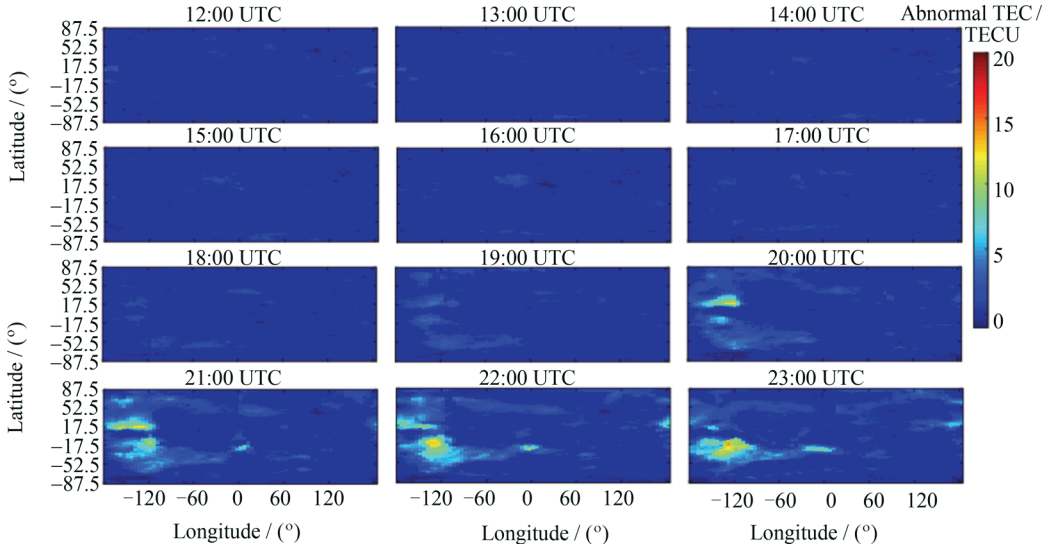


图 3　2018 年 DOY 237 天 12:00 UTC−23:00 UTC 全球电离层 TEC 异常分布

Fig. 3　Abnormal TEC map generated in the geographic latitude and longitude at 12:00 UTC−23:00 UTC on DOY 237

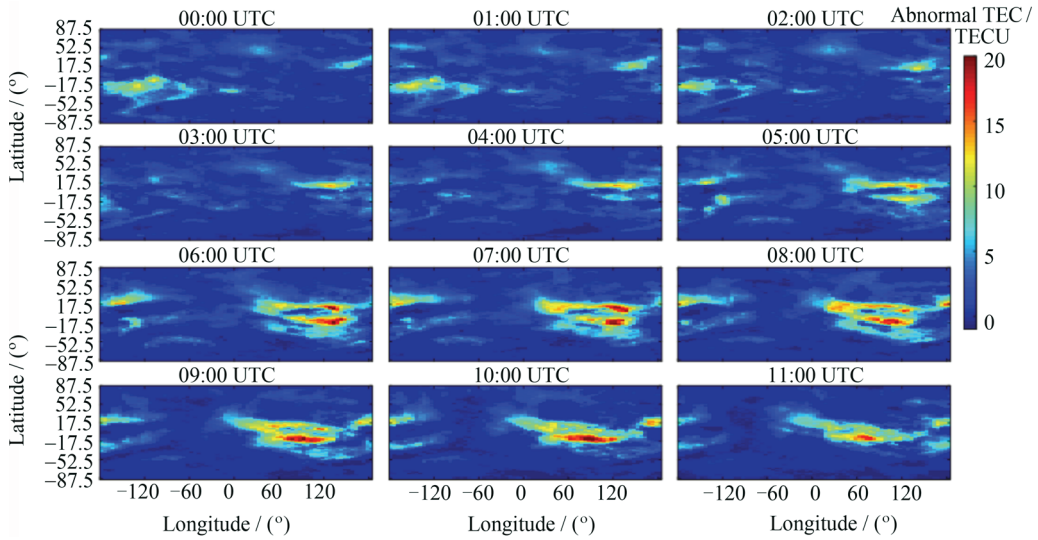


图 4　2018 年 DOY 238 天 00:00 UTC−11:00 UTC 全球电离层 TEC 异常

Fig. 4　Abnormal TEC map generated in the geographic latitude and longitude at 00:00 UTC−11:00 UTC on DOY 238

06:00 UTC—10:00 UTC, 对应本次磁暴激发电离层暴出现较大 TEC 异常时段, 异常值约 20 TECU. 在 06:00 UTC 时, 南北半球 TEC 较大正异常均出现在 120°E、低纬度 15° 左右, 此时地磁活动处于初相最后阶段, Dst 指数达到本次磁暴活动期最小值, Kp 为此次活动最大值. 在 10:00 UTC 时, 电离层 TEC 最大正异常出现在本次磁暴恢复相阶段, 位于 100°E 的赤道附近, 图 2 中 D_z 指数在这一时段发生突变, 这可能是造成这次异常的增大原因. 12:00 UTC 之后, 全球电离层 TEC 正异常集中在北半球, 而 17:00 UTC 之后全球电离层 TEC 异常明显减弱.

对图 3~5 进行分析可以发现, 磁暴阶段南北半球电离层异常呈现不对称分布, 造成这种现象的原因可能有以下两个. 一是此次地磁活动耦合的区域可能在北半球; 二是 IGS 的 GIM 数据生成时采用的测站在全球的分布存在不均匀特性, 北半球测站明显多于南半球, 这可能导致北半球 GIM 数据精度高于南半球, 因而引起南北半球异常的不对称性.

对 2018 年 8 月 24 日至 29 日 (DOY 236—241 天) 加拿大地区 11 个测站上空电离层 TEC 时间序列进行异常分析, 结果如图 6 所示. 图 6 的横轴为年积日, 纵轴表示不同测站, 由下至上按测站纬度由小到大排列, 不同颜色代表电离层 TEC 异常值大小. 磁暴初相阶段自 237 天 16:00 UTC 开始, 加拿大地区电离层 TEC 表现出正异常, 但异常值总体上小于 2 TECU; 随着时间的推移, 电离层 TEC 正异常逐渐增大, EDMC 测站在 22:00 UTC 出现了 11 个测站中最大的正异常, 其值约为 6 TECU; 随后在 238 天, 加拿大各测站电离层 TEC 异常均不超过 3 TECU. 此次磁暴对研究区 11 个测站电离层 TEC 异常的影响

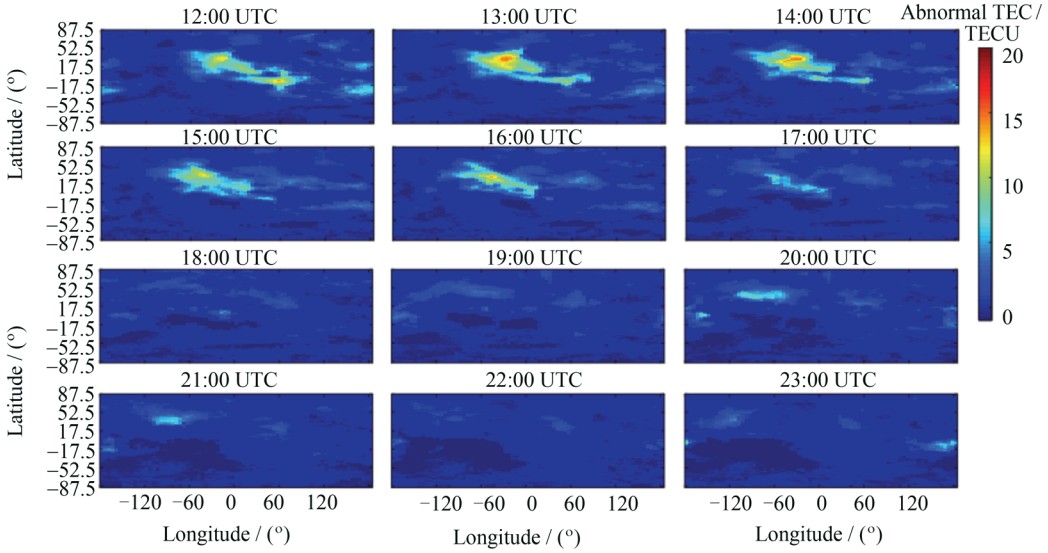


图 5 2018 年 DOY 238 天 12:00 UTC—23:00 UTC 全球电离层 TEC 异常

Fig. 5 Abnormal TEC map generated in the geographic latitude and longitude at 12:00 UTC—23:00 UTC on DOY 238

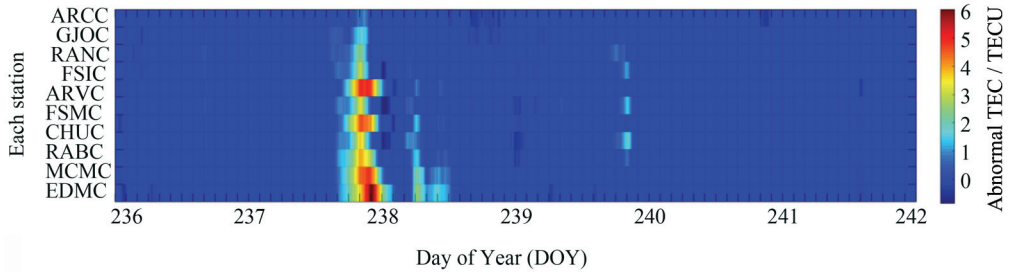


图 6 2018 年 DOY 236—241 天加拿大地区电离层 TEC 异常

Fig. 6 Abnormal TEC map generated in the geographic latitude of each station from DOY 236 to 241 in 2018

随测站纬度的增大呈逐渐减小的趋势, 这可能与不同纬度受磁暴扰动的强度不同有关.

2.3　磁暴期加拿大地区电离层闪烁与扰动变化

地磁活动激发的电离层暴活动除引发电离层 TEC 异常外, 也在全球不同区域抑制或增强电离层闪烁的发生. 以加拿大地区 Septentrio PolaRxS 电离层闪烁接收机实测电离层相位闪烁指数及 GPS 双频数据计算得到的电离层扰动 ROTI 指数为基础, 分析此次地磁暴期间加拿大地区相位闪烁指数与 ROTI 指数的时空变化特征, 并讨论电离层暴对电离层相位闪烁与 ROTI 指数变化的影响.

各测站 2018 年 DOY 236−241 天闪烁发生率通过当天相位闪烁指数大于 0.2 的个数占所有输出个数的百分比确定, 图 7 给出了各测站闪烁发生率统计结果. 地磁活动平静阶段 (DOY 236 天), 电离层相位闪烁发生率不超过 1%, 且发生率随着测站纬度的增大呈现出增加的趋势. 当地磁活动激发电离暴时 (DOY 238 天), 所有测站电离层相位闪烁发生率急剧增大, 其中 MCMC 测站闪烁发生率高达 12.6%, 约是磁静日 12 倍. 这表明地磁活动增强导致北半球高纬度地区电离层相位闪烁发生概率的提高, 与 Cherniak 和 Iurii[27] 的结论一致.

2018 年 8 月 24 至 26 日 (DOY 236−238 天), 研究区域内 9 个测站观测到的电离层相位闪烁与扰动随 UTC 变化如图 8 所示. 图 8(a) 为测站观测到的所有卫星相位闪烁指数的变化, 从上至下测站纬度逐渐增大; 图 8(b) 为测站观测到的所有卫星 ROTI 指数的变化, 不同颜色线条表示不同 GPS 卫星的观测结果. 由图 8 可以看出, 8 月 24 日 (DOY 236 天) 地

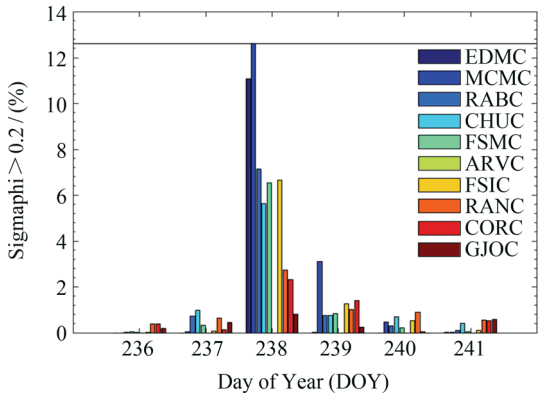


图 7　2018 年 DOY 236−241 天所有测站闪烁发生率

Fig. 7　Occurrence of phase scintillation from DOY 236 to 241 in 2018

磁相关指数显示该天的地磁活动比较平静, 而强电离层相位闪烁和扰动在不同站点的出现时间有所不同. 以 FSIC 测站为例: 在 236 天 06:00 UTC−15:00 UTC (22:00 MLT−07:00 MLT) 时出现较弱电离层相位闪烁和电离层扰动, 扰动强度先强后弱, 并有三个峰值; 在 237 天 04:00 UTC−14:00 UTC, 并未出现电离层相位闪烁, 但该时段电离层 ROTI 存在微弱的异常; 在 237 天夜间 20:00 UTC 电离层 ROTI 开始出现异常, 21:00 UTC 开始出现电离层相位闪烁, 且闪烁强度与范围不断扩大. 对比图 6 中各测站电离层 TEC 时间序列异常时间可以发现, 高纬度地区各测站电离层相位闪烁、ROTI 指数对磁暴事件的响应与 TEC 序列异常无明显关系.

在磁暴期间, 各测站电离层扰动 ROTI 指数均出现了不同时间长度的异常, 其峰值可以达到 2.0 TECU·min^{-1}. 磁暴对研究区域各测站的影响程度不同, EDMC 测站至 FSIC 测站, 电离层相位闪烁发生的时间更集中, 且闪烁强度与扰动强度 (ROTI 指数值) 均较大; 在更高纬度的测站上, 闪烁发生率降低, 但电离层相位闪烁与扰动持续时间较长, 闪烁强度与扰动强度均略低一点.

此外, 从图 8(b) 各测站对应的 ROTI 变化可以看出, ROTI 指数变化与各测站所在纬度相关. 即使在地磁平静阶段, 随着纬度的增大, ROTI 指数浮动值区间在不断变大, 其中纬度较大的 RANC, CORC 和 GJOC 测站表现更为明显.

为深入分析磁暴阶段电离层相位闪烁与扰动发生的时空变化特征, 将所有测站在 DOY 236−238 天发生的电离层相位闪烁与扰动时间进行统计汇总列于表 2. 由表 2 可以看到: 在 237 天日间时段, 出现相位闪烁的测站只有 RANC 测站和 GJOC 测站, 但在大约 00:00 UTC−12:00 UTC, RABC 测站及更高纬度测站的 ROTI 增大, 即出现电离层扰动现象; 对比图 2 给出的地磁活动指数变化, 这一时段内 B_z 指数略微增大且 Kp 指数也不断增大, 这表明地磁活动初现; 随后, 在地磁活动主相中后期及恢复相初期, 所有测站均出现电离层相位闪烁和 ROTI 指数增大的现象, 且随着测站纬度的增大, 电离层闪烁与扰动开始的时间逐渐提前; 238 天在纬度最高的 GJOC 测站上甚至出现所有卫星信号中断现象, 中断时间大约 2.5 h. 整体而言, 观测到电离层发生相位闪烁时, ROTI 均出现异常, 但在未发生闪烁的时段内, 电离

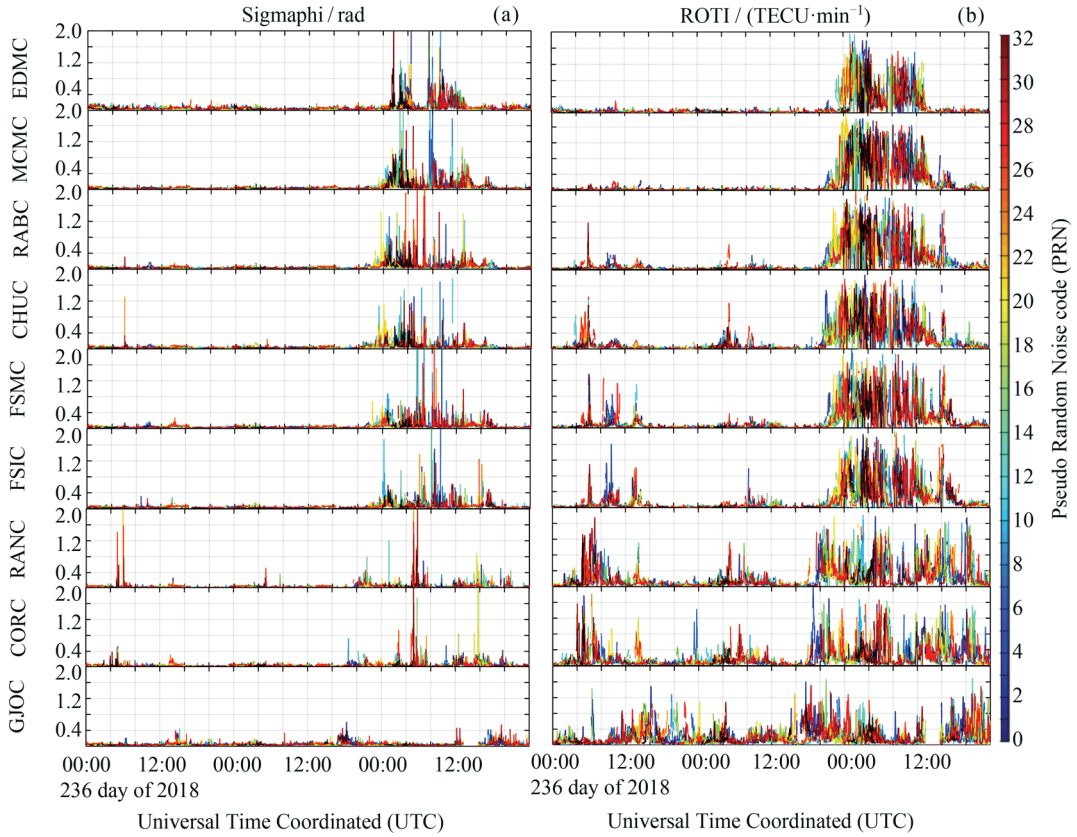


图 8 研究区域内 9 个测站 DOY 236—238 天每颗卫星相位闪烁指数、ROTI 指数变化序列

Fig. 8 Sequence of various ionospheric index (Sigmaphi and ROTI) changes from DOY 236 to 238

表 2 9 个测站相位闪烁与扰动发生时间 (UTC)

Table 2 Phase scintillation and disturbance occurrence time (UTC)

测站 ID	236 天 (发生时刻)		237 天 (发生时刻)		238 天 (发生时刻)	
	闪烁异常	ROTI 增大	闪烁异常	ROTI 增大	闪烁异常	ROTI 增大
EDMC	–	–	–	22:00—24:00	01:00—14:00	00:00—13:00
MCMC	–	–	–	21:00—24:00	00:00—18:00	00:00—18:00
RABC	约 06:00	06:00—14:00	22:00—24:00	约 05:00 21:00—24:00	00:00—18:00	00:00—18:00
CHUC	约 06:00	04:00—08:00	20:00—24:00	04:00—09:00 20:00—24:00	00:00—17:00	00:00—20:00
FSMC	–	06:00—14:00	22:00—24:00	20:00—24:00	00:00—18:00	00:00—18:00
FSIC	06:00—15:00	06:00—15:00	21:00—24:00	04:00—14:00 20:00—24:00	00:00—20:00	00:00—24:00
RANC	05:00—07:00	02:00—16:00	04:00—08:00 20:00—24:00	04:00—12:00 19:00—24:00	00:00—21:00	00:00—24:00
CORC	04:00—06:00 14:00—15:00	04:00—16:00	18:00—24:00	00:00—12:00 18:00—24:00	00:00—21:00	00:00—24:00
GJOC	约 06:00	00:00—24:00	17:00—22:00	00:00—24:00	12:00—22:00	00:00—24:00

层也可能出现扰动现象; 在高纬度地区出现大的电离层相位闪烁前, 会先出现电离层扰动现象, 如表 2 中 237 夜间及 238 天, ROTI 增大时段比闪烁异常时段开始早且结束晚.

2.4　磁暴期电离层闪烁对定位的影响

利用 236 天和 238 天加拿大地区 9 个测站的原始观测数据, 基于 GPS 实时动态精密单点定位方法, 分析电离层相位闪烁对北半球高纬度地区定位精度的影响. 以各测站地磁平静期静态 PPP 解算结果均值作为测站坐标真值, 利用动态 PPP 解算的坐标估值和真值之间的差异在 E (东西), N (南北) 和 U (天顶或垂直) 三个方向的时间序列如图 9 和 10 所示.

由图 9 可以看出: EDMC, MCMC, RABC, CHUC, FSMC 和 FSIC 测站收敛后在 E, N, U 三个方向的定位精度绝大多数优于 0.3 m; RANC 测站和 CORC 测站在 04:00 UTC−10:00 UTC 定位解算出现较大偏差; GJOC 测站在 13:00 UTC−17:00 UTC 定位解算也出现较大偏差. 结合图 8 中 236 天 RANC 测站、CORC 测站、GJOC 测站闪烁发生率比其他测站大以及三测站闪烁发生的时间, 基本可以确定这三个测站的定位结果误差较大是由电离层闪烁引起的.

由图 10 可以看出, 238 天各测站定位结果存在较大误差. EDMC 至 FSIC 测站受地磁活动的影响, 动态定位结果始终无法收敛, 且 U 方向最大误差达 8 m 左右; 而更高纬度的三个测站 (RANC, CORC 和 GJOC 测站), 随着纬度的增大, 收敛所需时间逐渐减小, E, N, U 三个方向的定位精度也比其他测站略高一些. 对比图 8 中闪烁发生的时间, 可以发现定位结果出现较大误差的时刻与闪烁发生的时间基本保持一致.

图 11 给出了研究区内 9 个测站 236 天 (闪烁较少) 和 238 天 (闪烁较多) 定位误差的均方差 (RMS). 由图 11 可以看出: 测站在 236 天 E, N, U 三个方向的定位误差 RMS 均在 0.4 m 以内, U 方向 RMS 略大于 E, N 方向; 纬度较高的三个测站在 E, N, U 三个方向的 RMS 明显大于纬度较低的测站. 对比 236 与 238 天定位误差, 所有测站 238 天 E, N, U 三个方

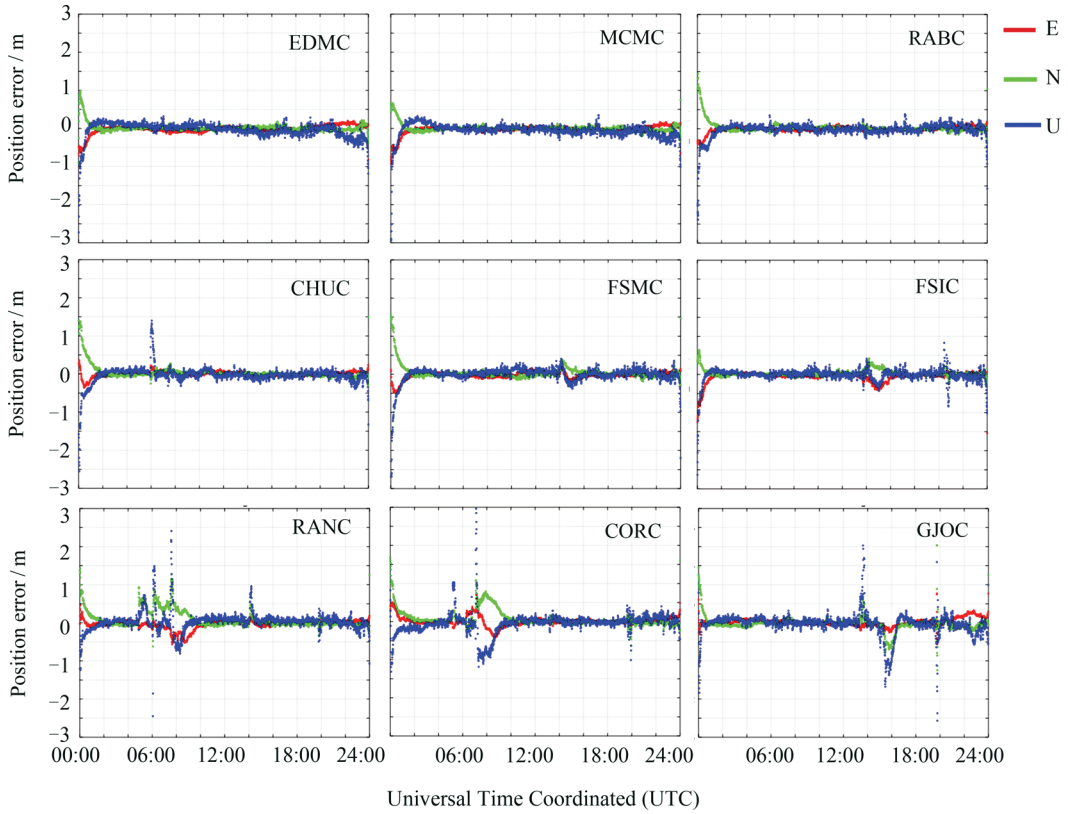


图 9　236 天各测站 E, N, U 三个方向误差时间序列

Fig. 9　Time series of the differences between PPP-estimated and released coordinates in E, N, U directions at each station on DOY 236

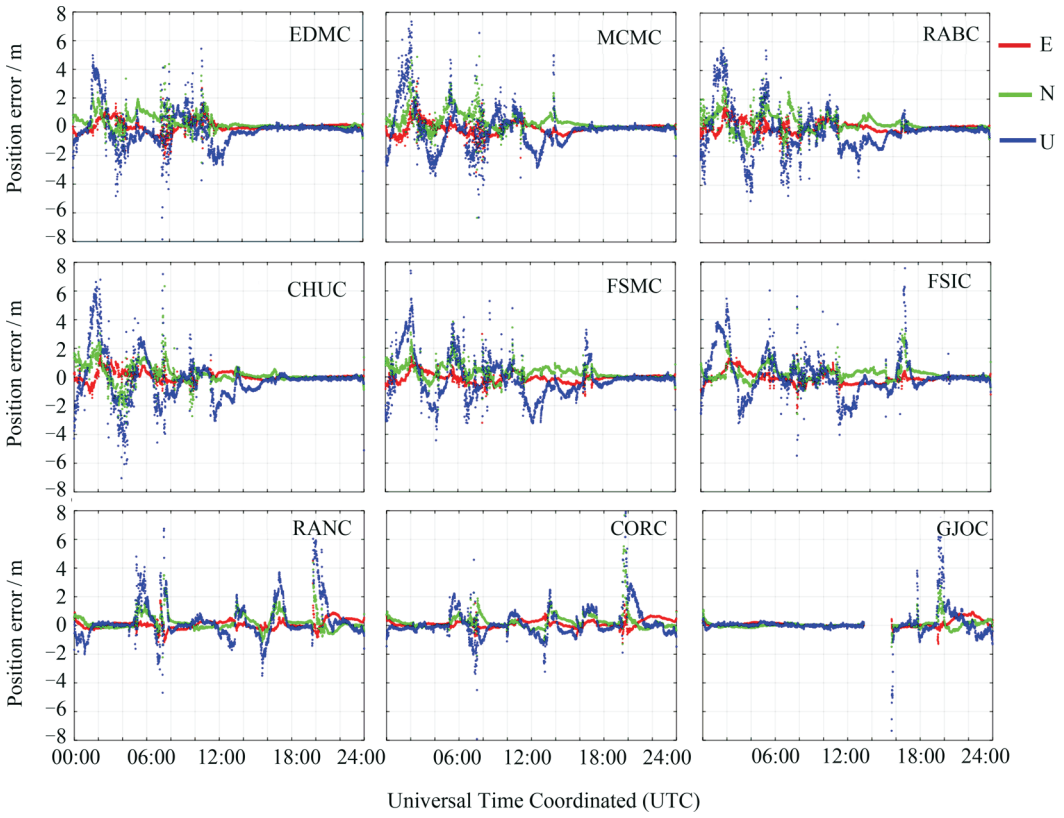


图 10 238 天各测站 E, N, U 三个方向误差时间序列

Fig. 10 Time series of the differences between PPP-estimated and released coordinates in E, N, U directions at each station on DOY 238

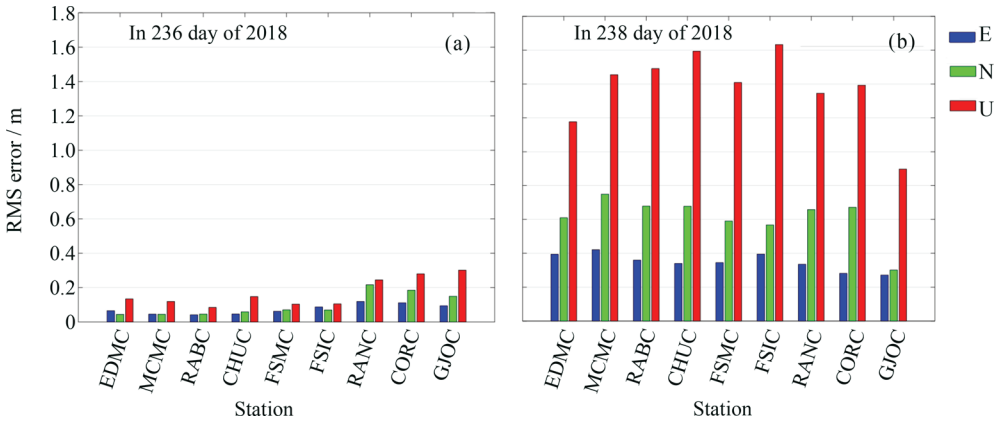


图 11 236 天和 238 天各测站定位结果均方差

Fig. 11 RMS of the PPP-estimated result at 9 stations on DOY 236 and 238

向上 RMS 均大于 236 天对应的 RMS. 闪烁对三个方向上定位误差 RMS 的影响从大到小分别为 U, N, E 方向; 各测站 238 天 E 方向的 RMS 均不超过 0.5 m, N 方向不超过 0.8 m, U 方向最大, 但不超过 1.7 m. 电离层闪烁期间, 各测站定位结果 RMS 在 E 方向增大 2.5~9.3 倍, N 方向增大 2.0~16.7 倍, U 方向增大 2.9~17.6 倍, 在 E, N, U 三个方向上平均增大了 5.54, 9.15, 10.24 倍. 观察 RMS 值大小或 RMS 值扩大的倍数均可发现, 电离层闪烁活动大幅度降低了 GPS 定位精度, 且对 U 方向定位结果影响最

大. 这一结论与 An 等 [28] 分析的磁暴阶段电离层异常对定位结果 U 方向影响较大的结论一致.

3 结论

利用 IGS 提供的全球电离层 TEC 格网数据以及加拿大地区电离层闪烁监测网观测数据, 针对 2018 年 8 月 26 日地磁活动引发的电离层暴事件, 通过电离层 TEC 异常、电离层相位闪烁指数、ROTI 指数分析磁暴期间电离层响应, 以及电离层闪烁对 GNSS 精密定位的影响, 主要结论如下.

(1) 磁暴引起的全球电离层异常呈现出南北半球不对称性, 电离层 TEC 最大异常值约 20 TECU, 出现在赤道及低纬度区域; 异常区域自东向西漂移; 地磁活动恢复相阶段, 北半球中、中高纬地区出现电离层 TEC 异常, 但是南半球不存在.

(2) 北半球高纬度地区电离层 TEC 异常集中在磁暴主相阶段, 最大异常值约为 6 TECU, 且随着纬度的增大, 电离层 TEC 异常逐渐减低, 异常时间也逐渐缩短.

(3) 2018 年 8 月 26 日北半球高纬度地区测站最高相位闪烁发生率约是磁静日的 12 倍; 磁暴主相后期和恢复相初期, 地磁活动强度较大, 这一阶段各高纬度地区测站电离层相位闪烁指数与 ROTI 指数均较大, 分别高达 2.0 rad 和 2.0 TECU·min^{-1}. 此外, 高纬度地区电离层相位闪烁、ROTI 增大与电离层 TEC 异常无显著联系.

(4) 电离层相位闪烁的发生伴随着较大的 ROTI 指数, 地磁活动期间, ROTI 增大出现的时间比电离层相位闪烁出现的时间更早, 且持续时间更长; 高纬度测站 ROTI 值的波动比低纬度测站更大, 其原因仍需进一步研究.

(5) 电离层闪烁活动严重影响了高纬度地区 GPS 在 E, N, U 各方向上的定位精度. 这种定位精度的变化是由闪烁发生时接收机接收到信号幅度和相位的快速变化所引起的, 且对 U 方向定位结果影响最大, 各测站 U 方向定位精度衰减至 0.9~1.7 m.

致谢 高纬度地区电离层闪烁观测数据由加拿大 CHAIN (http://chain.physics.unb.ca/chain/) 提供, 全球 TEC 格网、地磁活动数据由 IGS 和 OMNI 提供.

参考文献

[1] XIA Chunliang, WAN Weixing, YUAN Hong, *et al.* Analysis of the intense magnetic storm of July, 2000 and of October, 2003 using the technique for nowcasting of GPS TEC data [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4): 259-266 (夏淳亮, 万卫星, 袁洪, 等. 2000 年 7 月和 2003 年 10 月大磁暴期间东亚地区中低纬电离层的 GPS TEC 的响应研究 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(4): 259-266)

[2] HUANG Linfeng, DENG Baichang, HUANG Jiang, *et al.* Statistical analysis of geomagnetic disturbances and ionosphere scintillations over Guangzhou region during solar minimum [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1): 25-32 (黄林峰, 邓柏昌, 黄江, 等. 太阳活动低年广州地区地磁扰动与电离层闪烁的统计特征分析 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(1): 25-32)

[3] YIN Ping, WANG Huimei, PAN Lijing, *et al.* Correlation between ionospheric scintillations and GPS TEC spatiotemporal variations at the South Pole and McMurdo stations during a magnetic storm [J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2016, **28**(4): 514-522 (尹萍, 王慧美, 潘丽静, 等. 磁暴期间南极 SouthPole 站和 McMurdo 站电离层闪烁与 GPSTEC 时空变化相关性研究 [J]. 极地研究, 2016, **28**(4): 514-522)

[4] MA Baoke, CHANG Hongfang, SUN Lin, *et al.* Statistical analyses on characteristics of GPS signal scintillation in high latitude ionosphere [J]. *J. Xi'an Univ. Posts Telecommun.*, 2015, **20**(3): 92-96 (马保科, 常红芳, 孙琳, 等. 极区电离层 GPS 信号闪烁特征统计分析 [J]. 西安邮电大学学报, 2015, **20**(3): 92-96)

[5] HUANG Rongze, XU Jie, DENG Kun, *et al.* Statistical analysis of GPS scintillation and TEC depletion in temporal and spatial distributions over South China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(4): 414-423 (黄荣泽, 徐杰, 邓琨, 等. 华南地区电离层闪烁与 TEC 耗空的时间和空间分布统计分析 [J]. 空间科学学报, 2017, **37**(4): 414-423)

[6] JACOBSEN KS, DAHNN M. Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes [J]. *J. Space Weather Space Clim.*, 2014, **4**(4): A27

[7] JACOBSEN K, LINNEA A Y. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway [J]. *J. SPACE WEATHER SPAC.* , 2016, **6**: A9

[8] DASGUPTA A, RAY S, PAUL A, *et al.* Errors in position-fixing by GPS in an environment of strong equatorial scintillations in the Indian zone [J]. *Radio Sci.*, 2016, **39**(1). DOI: 10.1029/2002RS002822

[9] SONG Qian, DING Feng, WAN Weixing, *et al.* Monitoring traveling ionospheric disturbances using the GPS network around China during the geomagnetic storm on 28 May 2011 [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2013, **56**: 718-726 (宋茜, 丁峰, 万卫星, 等. 2011 年 5 月 28 日磁暴期间中国地区

大尺度电离层行进式扰动的 GPS 台网监测 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, (4): 513-522)

[10] FENG Jian, DENG Zhongxin, ZHEN Weimin, *et al.* Study of ionospheric TEC disturbances over China during the intense magnetic storm of November 2004 [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2016, **31**(1): 157-165 (冯健, 邓忠新, 甄卫民, 等. 2004 年 11 月强磁暴期间中国地区电离层 TEC 扰动特性分析 [J]. 电波科学学报, 2016, **31**(1): 157-165)

[11] CHENG Guanghui, XU Jisheng, ZHU Jie, *et al.* Response of low-latitude ionospheric scintillations to major magnetic storms [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2010, **5**: 845-851 (程光晖, 徐继生, 朱劼 , 等. 低纬电离层闪烁对强磁暴的响应 [J]. 电波科学学报, 2010, **5**: 845-851)

[12] PI X, MANNUCCI 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

[13] DENG Zhongxin, ZHEN Weimin, LIU dun, *et al.* Study on the ionospheric TEC storms over China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(7): 2177-2084 (邓忠新, 甄卫民, 刘钝, 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)

[14] 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**(2): 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**(2): 1-10)

[15] LI Yihong, LIU Daizhi, WANG Hongxia, *et al.* Statistical study on correlation between geomagnetic storms and ionospheric total electric content disturbance [J]. *Chin. J. Nonferr. Metal.*, 2013, **9**: 2396-2403 (李义红, 刘代志, 王红霞, 等. 磁暴与电离层总电子含量扰动相关关系的统计研究 [J]. 中国有色金属学报, 2013, **9**: 2396-2403)

[16] YANG Shenggao, FANG Hanxian, LI Gang, *et al.* Impact of geomagnetic storms on L-band ionospheric scintillation over equatorial region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 812-817 (杨升高, 方涵先, 李刚, 等. 磁暴对赤道地区 L 波段电离层闪烁的影响研究 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(6): 812-817)

[17] KRANKOWSKI A, SHAGIMURATOV I, BARAN L, *et al.* Study of TEC fluctuations in Antarctic ionosphere during storm using GPS observationss [J]. *Acta Geophys. Apol.*, 2005, 53(2):205-218

[18] PRIKRYL P, GHODDOUSIFARD R, SPOGLI L, *et al.* GPS phase scintillation at high latitudes during geomagnetic storms of 7—17 March 2012–Part 2: Interhemispheric comparison [J]. *Ann. Geophys.*, 2015, **33**(6): 637-656

[19] MOMANI M A, SMADI T A A, TAWEEL F M A, GHAIDAN K A. GPS Ionospheric total electron content and scintillation measurements during the October 2003 magnetic storm [J]. *Amer. J. Eng. Appl. Sci.*, 2011, **4**(2): 301-306

[20] JAYACHANDRAN P T, LANGLEY R B, MACDOUGALL J W, *et al.* Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**(1): 1-10

[21] YANG Z, LIU Z. Correlation between ROTI and ionospheric scintillation indices using Hong Kong low-latitude GPS data [J]. *GPS Solut.*, 2015, **20**(4): 1-10

[22] LI Penghui, HU Hongqiao, FANG Hanxian, *et al.* Statistical properties of polar ionospheric scintillations at the South Pole and McMurdo stations, Antarctica [J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2016, **28**(1): 19-24 (李鹏辉, 胡红桥, 方涵先, 等. 基于 South Pole 站和 McMurdo 站的极区电离层闪烁统计特性 [J]. 极地研究, 2016, **28**(1): 19-24)

[23] DENG B, HUANG J, KONG D, *et al.* Temporal and spatial distributions of TEC depletions with scintillations and ROTI over south China [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **55**(1): 259-268

[24] AKHOONDZADEH M. Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011 [J]. *Natl. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, **12**(5): 1453-1462

[25] ZOU Bin, CHANG Xiaotao, GUO Jinyun, *et al.* Analysis of TEC anomalies before the 2014 MW 6.5 Ludian earthquake [J]. *Sci. Surv. Mapp.*, 2017, **42**(3): 45-51 (邹斌, 常晓涛, 郭金运, 等. 2014 年鲁甸 6.5 级地震震前 TEC 异常分析 [J]. 测绘科学, 2017, **42**(3): 45-51)

[26] ZHAO Yuxin, MAO Tian, CHEN Zhou, *et al.* Ionospheric weather disturbance indices based on spectral whitening [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(3): 270-276 (赵瑜馨, 毛田, 陈洲, 等. 一种基于白谱法的电离层天气扰动指数 [J]. 空间科学学报, 2017, **37**(3): 270-276)

[27] CHERNIAK I, KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I. Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: methodology and service: methodology and service [J]. *Radio Sci.*, 2015, **49**(8): 653-662

[28] AN Jiachun, WANG Zemin, E Dongchen, *et al.* Ionosphere behavior and its effect on positioning during the solar eclipse of 22 July 2009 [J]. *Chin. J . Geophys.*, 2010, **53**(10): 2291-2299 (安家春, 王泽民, 鄂栋臣, 等. 2009 年 7 月 22 日日全食引起的电离层扰动及其对定位的影响 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(10): 2291-2299)