

ZHAO Hongyu, ZHOU Shuhua, KUANG Yingcai, WANG Ning. Global Ionospheric Response to the Geomagnetic Storms from March to April 2023 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(5): 1220–1229. CSTR:32142.14.cjss.2024–0198. DOI:10.11728/cjss2025.05.2024–0198

2023 年 3—4 月地磁暴期间全球 电离层响应情况分析

赵洪宇 周淑华 邝英才 王 宁

(山东省青州高新技术研究所 潍坊 262500)

摘 要 利用 IGS 提供的全球电离层数据, 采用滑动四分位距法对 2023 年 3—4 月发生的两次橙色级别地磁暴期间的电离层扰动情况进行分析研究. 结果表明, 日冕物质抛射是引发两次地磁扰动的首要诱因, 当叠加暗条爆发等因素后, 会增强地磁暴发生的强度, 延长地磁扰动时间, 并使引发的电离层 TEC 扰动的发生过程及分布特征具有明显差异. 3 月地磁暴期间的电离层扰动呈现东西向不对称分布, 而 4 月地磁暴期间的电离层扰动全过程表现为由正相扰动向负相扰动的转变. 此外, 东亚—澳洲 (120°E) 一线北半球的电离层 TEC 含量显著高于南半球, 电离层扰动期间的幅度变化在地磁暴恢复阶段最为显著, 呈现出低纬正相扰动而中高纬负相扰动的分布规律.

关键词 地磁暴, 电离层, 总电子含量, 扰动响应

中图分类号 P352

Global Ionospheric Response to the Geomagnetic Storms from March to April 2023

ZHAO Hongyu ZHOU Shuhua KUANG Yingcai WANG Ning

(Qingzhou High-tech Institute of Shandong Province, Weifang 262500)

Abstract By using the global ionospheric data provided by IGS, the sliding quartile range method is employed to study the ionospheric disturbances during the two geomagnetic storms occurred from March to April 2023, striving to provide theoretical basis for the distribution characteristics of ionospheric disturbances caused by geomagnetic storms under strong solar radiation background during the peak year of solar activity. Results show that both geomagnetic storms were caused by the CMEs generated on the surface of the Sun facing towards the Earth, which reached the Earth and triggered an increase in the velocity of the interstellar solar wind. The CMEs carried a southward magnetic field component and high-energy particles, causing magnetic reconnection with the Earth's magnetic field and triggering geomagnetic disturbances. When other factors such as dark stripe bursts are superimposed on the coronal mass ejections, the intensity of geomagnetic storms are enhanced, causing significant differences in the occurrence and distribution characteristics of ionospheric TEC disturbances. The geomagnetic storm that

2024-12-26 收到原稿, 2025-05-13 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

occurred on 23–24 April 2023 was affected by the superposition of dark bars and CMEs, resulting in a stronger intensity and longer duration of the April geomagnetic storm. At the same time, there are significant differences in the occurrence process and distribution characteristics of ionospheric disturbances caused by two geomagnetic storms. The ionospheric disturbances during the March showed an asymmetric distribution in an east-west direction, while the entire process of ionospheric disturbance during the geomagnetic period in April exhibits a transition from positive phase disturbance to negative phase disturbance. Additionally, in the East Asia-Australia (120°E), the ionospheric TEC in the Northern Hemisphere line is significantly higher than that in the Southern Hemisphere. The amplitude changes of ionospheric disturbances are most significant during the recovery phase of geomagnetic storms, showing a distribution pattern of positive disturbances at low latitudes and negative disturbances at middle-high latitudes.

Key words Geomagnetic storm, Ionosphere, TEC, Disturbance response

0 引言

电离层指分布在距地面 60~1000 km 范围内, 因太阳辐射和宇宙高能粒子共同作用, 导致中层大气部分电离而形成的电离区域^[1]. 作为无线电通信的重要媒介, 电离层的形态和结构直接影响短波通信的传输质量. 当太阳耀斑爆发或日冕物质抛射与地球磁场相互作用引发地磁扰动时, 电离层会发生剧烈扰动^[2,3], 即发生电离层暴事件, 进而干扰航空飞行^[4]、短波通信、导航及雷达定位等系统的效能发挥^[5–7].

电离层电子总含量 TEC 是表征电离层形态和结构特征的关键参数^[8]. 研究表明, 电离层对地磁暴的响应与地磁暴强度、地磁暴起始时间、地方时、季节以及地磁经纬度等多种因素紧密相关^[9–11]. Deng 等^[12]发现中国地区约 70% 电离层暴扰动伴随地磁活动. Tang 等^[13]通过分析 2018 年 8 月磁暴期间电离层 TEC 的时空变化特征, 发现地磁暴期间, 亚太地区电离层 TEC 变化及扰动响应存在明显的纬度差异. Wang 等^[14]研究指出, 地磁暴引起的全球电离层异常呈现南北不对称的分布特征. 尽管已有大量研究和个例分析^[15–18]探讨了电离层暴事件对地磁暴的响应, 但多为太阳活动低年、中低等强度地磁暴期间的电离层扰动个例, 期间太阳辐射、高能粒子背景场均相对平静, 因此关于电离层暴的形成机制及其与地磁暴的关联性的认识仍然有限. 研究指出, 太阳紫外线、X 射线与高能粒子的辐射作用是电离层的主要电离源, 其

周期性剧烈变化将直接引发电离层的周期性变化^[19,20]. 当前正处于第 25 太阳活动周的高峰期, 太阳爆发活动剧烈, 各类射线辐射不断增强, 诱发的灾害性空间环境事件频繁. 因此, 通过研究最新的典型地磁暴期间的电离层扰动个例, 对比分析不同太阳活动强度下电离层 TEC 的时空变化特征, 促进对太阳活动高年地磁暴与电离层扰动关联性规律的探索, 加深对电离层扰动机制的理解.

本文通过对比分析两次地磁暴期间行星际环境变化情况, 掌握行星际环境与地磁暴发生发展的相关性, 采用滑动四分位距法探讨地磁暴期间全球电离层 TEC 异常扰动特性, 进一步研究了地磁暴期间东亚–澳洲一线不同纬度带上的电离层扰动变化情况, 分析在进入太阳活动高峰年的强太阳辐射背景下, 地磁暴引发的电离层扰动变化分布特征, 为后续深入研究太阳活动高年期间的电离层扰动预报提供理论支撑.

1 数据来源与研究方法

分析磁暴期间日地空间环境变化使用的行星际磁场 B_z 分量、太阳风速度 v_{sm} 、地磁 Dst 指数、10.7 cm 射电流量 $F_{10.7}$ 数据来自美国航空航天局戈达德航天中心^{*}. 地磁 Kp 指数数据来自日本京都地磁数据中心^{**}. 以上两类数据时间分辨率均为 1 h. 电离层 TEC 数据来自国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 提供的电离层数据^{***}, 时间分辨

* <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

** <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

*** <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>

率为 15 min, 经纬度分辨率为 $5^\circ \times 2.5^\circ$.

滑动四分位距法是用于识别数据中异常值的一种统计方法. 因其对异常值具有鲁棒性, 极端值不会对四分位产生影响, 在异常数据识别与提取方面得到了广泛应用^[21,22]. 因此, 滑动四分位距法是当前判定电离层扰动偏离程度较为常用的方法^[23-25]. 这里挑选两次地磁暴发生前未出现电离层扰动或地磁扰动的 16 天 TEC 值作为背景数据, 将同一时刻的 TEC 值从小到大进行排序, 将该 TEC 序列进行四等分, 处于三个分割点上的 TEC 值为该组序列的上四分位数 δ_{Q1} 、中位数 δ_{Q2} 和下四分位数 δ_{Q3} . 四分位距为 δ_{IQR} , 这里 $\delta_{IQR} = \delta_{Q3} - \delta_{Q1}$, 本文采用 $\delta_{Q2} \pm 1.5\delta_{IQR}$ 作为 TEC 异常的判定界限. 若研究时刻的 TEC 值高于上界值 $\delta_{Q2} + 1.5\delta_{IQR}$, 则认为电离层发生了正相扰动; 若研究时刻的 TEC 值低于下界值 $\delta_{Q2} - 1.5\delta_{IQR}$, 则认为电离层发生了负相扰动.

2 地磁暴期间的结果分析

2.1 行星际环境

2023 年 3 月 23—24 日发生了进入第 25 太阳活动周以来首个橙色级别地磁暴事件. 此次地磁暴事件是因 3 月 20 日爆发的一个强烈的日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections, CME) 到达地球引发地磁扰动导致的. 一个月后, 位于日面中心附近的太阳活动区 AR3283 爆发了持续近 1 h 的 M1.7 级耀斑, 并伴有暗条爆发, 引发全晕日冕物质抛射, 导致 4 月 23—24 日再次发生了橙色级别地磁暴事件.

为对比分析以上两次地磁暴期间日地空间行星际环境的变化情况, 分别绘制了 3 月 20—27 日 (见图 1) 和 4 月 21—27 日 (见图 2) 地磁暴期间太阳风南向磁场分量 B_z 、太阳风速度 v_{sm} 、太阳 10.7 cm 射电流量 $F_{10.7}$ 以及地磁 Dst 和 Kp 指数的变化情况.

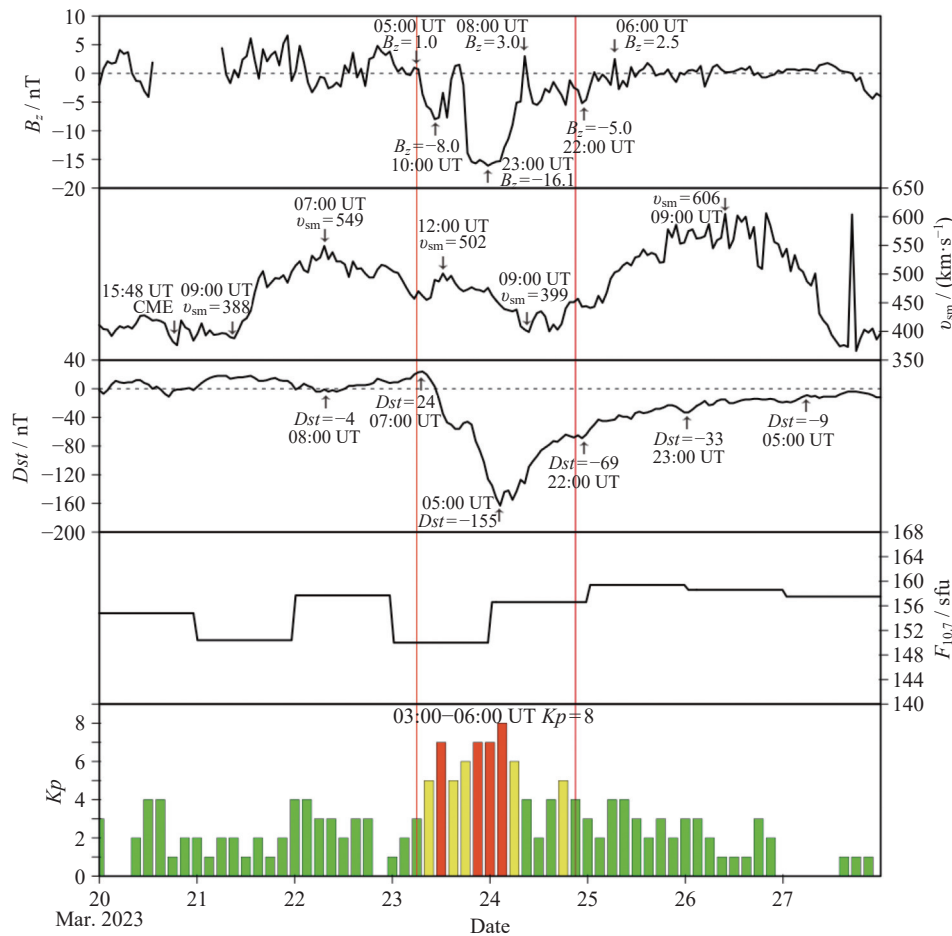


图 1 2023 年 3 月 20—27 日行星际空间环境

Fig. 1 Interstellar space environment from 20 to 27 March 2023

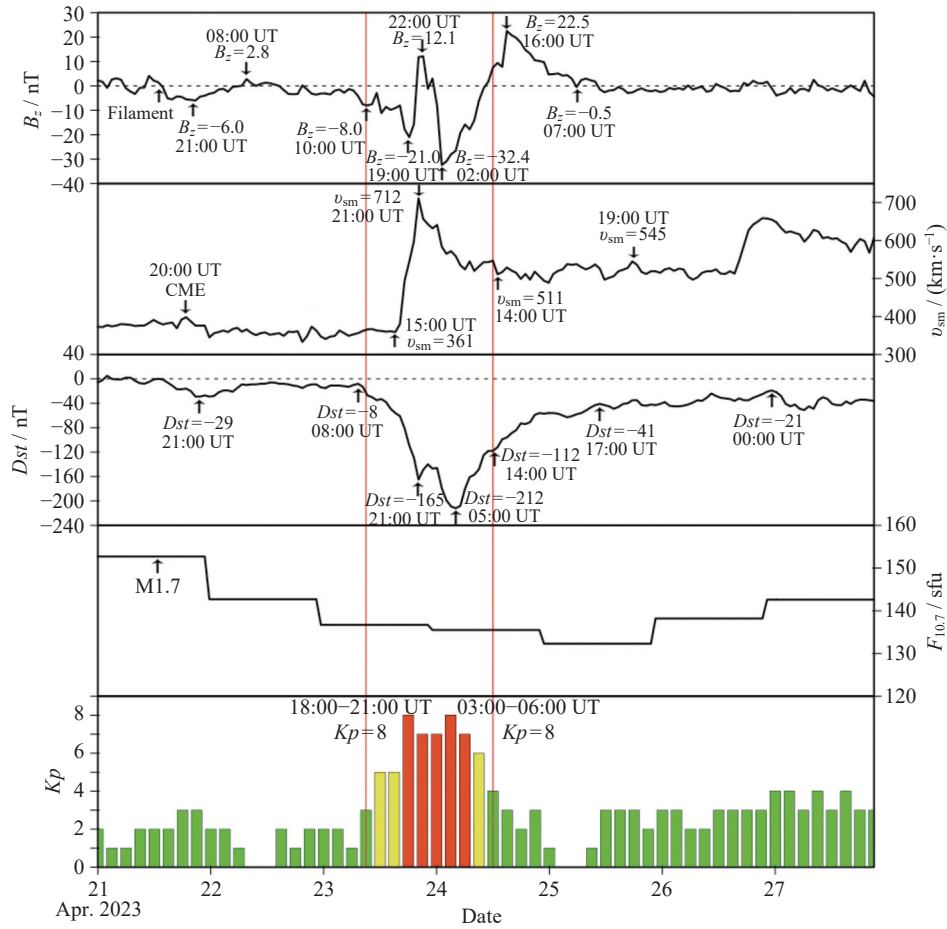


图 2 2023 年 4 月 21—27 日行星际空间环境

Fig. 2 Interstellar space environment from 21 to 27 April 2023

由图 1 可以看出, 3 月 20—27 日期间, $F_{10.7}$ 整体保持在 150~160 sfu 之间波动, 太阳辐射水平相对较高, 但变化幅度较小. 受 3 月 20 日爆发的 CME 的影响, 太阳风速度 v_{sm} 快速上升, 从 $388 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (3 月 21 日 09:00 UT) 攀升至 $549 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (3 月 22 日 07:00 UT). 但该时段内行星际磁场 B_z 分量在 0 nT 上下波动, 太阳风未携带南向磁场分量, 故对地球磁场影响较小. 随后太阳风速度 v_{sm} 呈波动下降趋势, 但仍保持在相对较高水平 ($500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上). 与此同时, 行星际磁场 B_z 分量开始波动下降, 地磁暴进入主相阶段, 至 3 月 23 日 10:00 UT, 行星际磁场 B_z 分量降至第一个低值 -8.0 nT , 太阳风速度 v_{sm} 在 12:00 UT 再次出现小高峰 $502 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 高速的太阳风携带较强的行星际磁场 B_z 分量和高能粒子进入地球磁层, 与地球磁场发生磁重联, 并与地球热层发生耦合作用, 使地磁环电流增强, Dst 指数开始迅速降低. 3 月 23 日

23:00 UT 左右, B_z 最强达到 -16.1 nT , 在此期间 Dst 指数持续快速下降, 至 3 月 24 日 05:00 UT 降至最低 -155 nT , Kp 指数已连续 12 h 达到橙色级别地磁暴水平, 最高值达 8. 随后, 地磁暴进入恢复相阶段, Dst 指数开始回升, 行星际磁场 B_z 分量开始减弱, 至 3 月 25 日 00:00 UT, 地磁已基本恢复平静. 即使太阳风速度 v_{sm} 仍有增强的趋势, 但因其未携带南向磁场分量, 未对地磁场造成影响, 此次地磁扰动过程基本结束.

与 3 月 23—24 日的地磁暴相同, 4 月 23—24 日的地磁暴同样是受 CME 影响导致的. 由图 2 可知, 4 月 21—27 日期间, $F_{10.7}$ 保持在 130~150 sfu 之间, 表明 4 月 21 日爆发的 M1.7 级耀斑未对地球辐射环境造成显著影响. 但与耀斑几乎同时出现的暗条引起了地磁场短时扰动, 行星际磁场 B_z 分量和 Dst 指数在 4 月 21 日 21:00 UT 左右均出现了一个短暂的低

谷 (最低值分别为 $B_{z,\min} = -6.0$ nT 和 $Dst_{\min} = -29$ nT), 随后地磁逐渐恢复平静. 值得注意的是, 4月21日 20:00 UT 左右发生了一个全晕 CME, 伴随着暗条爆发和 CME 所携带的磁能和高能粒子到达地球, 与地球磁场发生磁重联, 行星际磁场开始出现 B_z 分量 (-8.0 nT), 太阳风速度 v_{sm} 从 4月23日 15:00 UT 前维持的 $360 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的状态跃升到 $712 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 并裹挟着南向磁场分量撞击地球磁场, 地磁暴进入主相阶段, Dst 指数开始下降, Kp 开始达到黄色级别地磁暴水平, 随后 B_z 分量持续增强, 24日 02:00 UT 时 B_z 达到最低值 -32.4 nT, 24日 05:00 UT 时 Dst 达到最低值 -212 nT. 而后, 太阳风速度 v_{sm} 开始波动下降, 行星际磁场 B_z 分量持续上升, 此次 CME 和暗条爆发对地磁场的影响逐渐减弱, 地磁暴进入恢复相阶段, Dst 指数开始回升, 至 4月25日 00:00 UT, 地磁已基本恢复平静, 此次地磁扰动过程基本结束. 此次地磁暴过程, Kp 指数有连续 15 h 达到橙色级别地磁暴水平.

值得注意的是, 这两次的地磁暴不同点在于, 3月发生的地磁暴单纯受 CME 影响, 而 4月发生的地磁暴受 CME 和日面中心位置的暗条爆发共同作用, 二者叠加导致这次爆发的地磁暴相比 3月的地磁暴太阳风速度 v_{sm} 攀升更为迅速, 地磁场扰动更为强烈, 维持在橙色级别水平的时间也更长.

2.2 全球电离层响应情况

为分析以上两次地磁暴期间电离层的响应情况, 本文选取地磁暴发生前未出现电离层扰动或地磁扰动的 16 天的 TEC 值作为背景数据, 所选取的背景数

据具体时间范围为 3月6—22日 (其中 3月15日出现了地磁扰动, 故剔除); 4月3—4日、4月7—9日、4月11—17日、4月19—22日 (4月5日、6日、10日有电离层扰动, 4月18日出现地磁扰动, 故剔除). 采用滑动四分位距法分别计算以上所选两段时间范围内 TEC 的上界和下界值, 将地磁暴期间的 TEC 与该上界和下界作对比, 当 TEC 超出上界时认为电离层存在正相扰动, TEC 低于下界时认为电离层存在负相扰动, 从而得到地磁暴前后全球电离层 TEC 的扰动情况.

图3和图4分别为 3月23日和 24日的电离层 TEC 扰动情况. 由图3可以看出, 3月23日 12:00 UT 前, 全球电离层 TEC 基本处于平静状态. 至 12:00 UT 地磁暴处于主相阶段 (见图1), 受地磁扰动影响, 北半球极地、赤道附近以及非洲南部的高纬地区出现电离层正相扰动, 扰动强中心 (中心强度约为 38 TECU) 主要集中在非洲南部. 随后扰动西移增强, 至 14:00 UT 正相扰动的范围和强度均达最强 51 TECU. 此后, 随着昏线临近, 太阳辐射减弱, 电离层正相扰动西移减弱, 北半球开始出现微弱的负相扰动, 至 22:00 UT, 南美洲南部 (处于日半球) 出现较大范围的正相扰动 (中心强度在 30 TECU 左右), 并在其东南边缘叠加小范围的负相扰动.

对比图1和图4可以看出, 电离层扰动与地磁暴过程具有较强的相关性. 3月24日随着地磁扰动达到橙色级别地磁暴水平, 电离层扰动相应地也更为强烈 (见图4). 24日 00:00 UT, 全球出现两个电离层正相扰动中心, 一个正相扰动中心位于太平洋东南部区

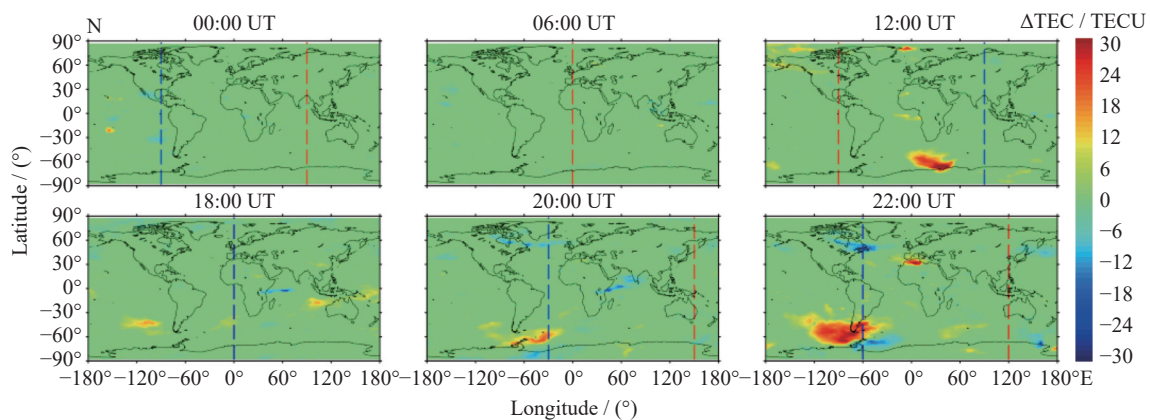


图3 2023年3月23日电离层 TEC 扰动情况 (红色和蓝色虚线表示大致晨昏线, 红虚线以东为日半球)

Fig. 3 Disturbance of ionospheric TEC on 23 March 2023 (The red and blue dashed lines represent the dawn dusk line, and to the east of the red dashed line is the solar hemisphere)

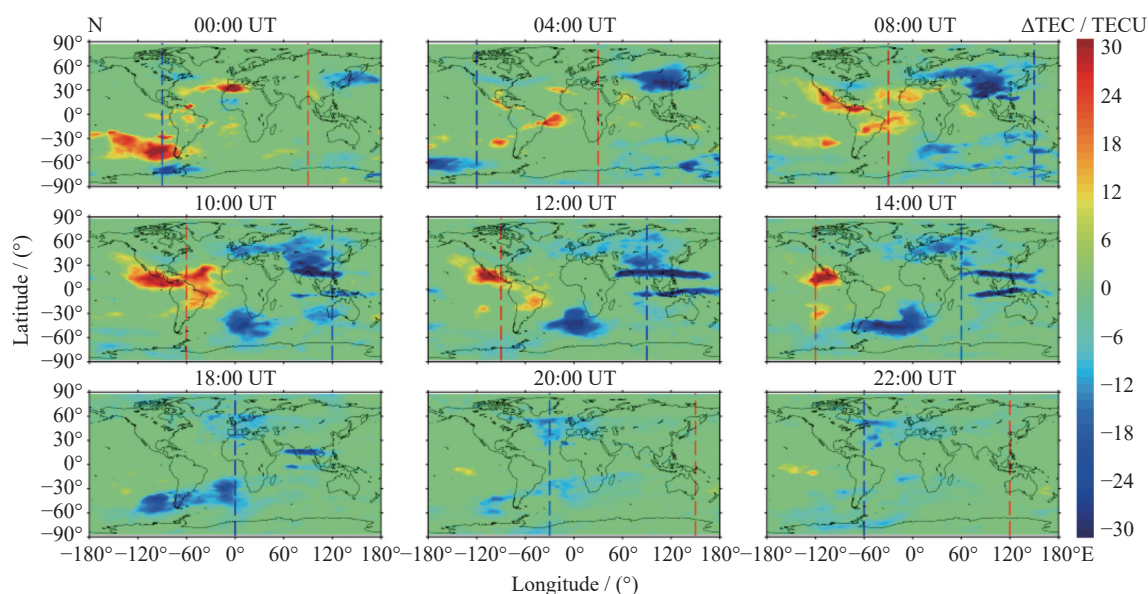


图 4 2023 年 3 月 24 日电离层 TEC 扰动情况 (红色和蓝色虚线表示大致晨昏线, 红虚线以东为日半球)

Fig. 4 Disturbance of ionospheric TEC on 24 March 2023 (The red and blue dashed lines represent the dawn dusk line, and to the east of the red dashed line is the solar hemisphere)

域, 是南半球高纬地区的电离层 TEC 正相扰动中心西移加强形成; 另一个正相扰动中心位于非洲西北部与欧洲西南部交界处, 范围相对较小, 但强度较强, 超过 55 TECU. 此后, 电离层 TEC 正相扰动中心不断向低纬地区汇聚. 与此同时, 出现多个电离层 TEC 负相扰动中心. 其中范围最大的位于日本海至中国东北一带, 处于日半球, 该负相扰动中心范围不断延展, 强度不断增强, 至 08:00 UT 左右, 此负相扰动已基本覆盖亚洲全境, 强度达到橙色级别电离层扰动水平. 至 10:00 UT 左右, 电离层扰动达到最强, 此时西半球以正相扰动中心为主, 东半球以负相扰动为主. 其中范围较大的负相扰动中心依旧位于亚欧大陆上空, 低纬地区扰动强度超过 -60 TECU, 达到红色级别电离层暴水平; 非洲南部和大洋洲西部地区也存在范围相对较小的电离层负相扰动中心, 强度约 -15 TECU.

值得注意的是, 以上电离层 TEC 负相扰动中心均位于日半球, 电离层 TEC 正相扰动中心大部分出现在夜半球, 位于南美洲北部的赤道地区, 呈东西向分布. 当地磁暴过程处于恢复相阶段时, 电离层 TEC 扰动仍在持续. 在 24 日 12:00—14:00 UT, 电离层 TEC 负相扰动范围进一步扩大, 但强度开始减弱; 正向扰动范围开始萎缩. 随着地磁暴过程结束, 电离层逐渐恢复至弱负相扰动状态. 3 月 25 日, 电离层基本恢复平静状态.

图 5 和图 6 分别为 4 月 23 日和 24 日的电离层 TEC 扰动情况. 4 月 23 日 18:00 UT 前, 全球电离层基本处于平静状态. 随着 4 月 21 日 15:00 UT 左右爆发的暗条率先抵达地球引发地球磁场第一次扰动, 23 日 18:00 UT 时 K_p 指数首次达到 8.0, Dst 指数降至 -165 nT. 同时, 日半球南极洲附近的电离层开始出现 8 TECU 左右的正相扰动. 随着地磁扰动不断增强, 太阳风速度 v_{sm} 不断攀升, 暗条和耀斑对地球磁场的影响达到峰值, 行星际磁场 B_z 分量和地磁 Dst 指数相继达到第一个低值期 (见图 2), 电离层扰动也随之加强. 至 20:00 UT, 赤道附近陆续出现多个电离层 TEC 负相扰动中心; 东太平洋南部地区则呈现不断增强的大范围电离层 TEC 正相扰动中心, 至 22:00 UT 时扰动强度已高达 40 TECU. 但随着昏线抵近该区域, 此时太阳辐射减弱, 中层大气电离减少, 加之暗条和耀斑对行星际磁场 B_z 分量和地磁 Dst 指数的影响开始减弱, 至 24 日 00:00 UT 时全球电离层 TEC 正相扰动强度和范围显著缩小 (见图 6).

4 月 21 日爆发的 CME 携带高能粒子和磁能抵达地球引发行星际磁场 B_z 分量急剧下降和地磁 Dst 指数再次降低至第二个低值 (最低值分别为 $B_{z,min} = -32.4$ nT 和 $Dst_{min} = -212$ nT), 地磁扰动再次达到橙色级别地磁暴水平, 进而引发电离层大范围扰动. 在 24 日 04:00 UT 时, 日本海至中国东北一带

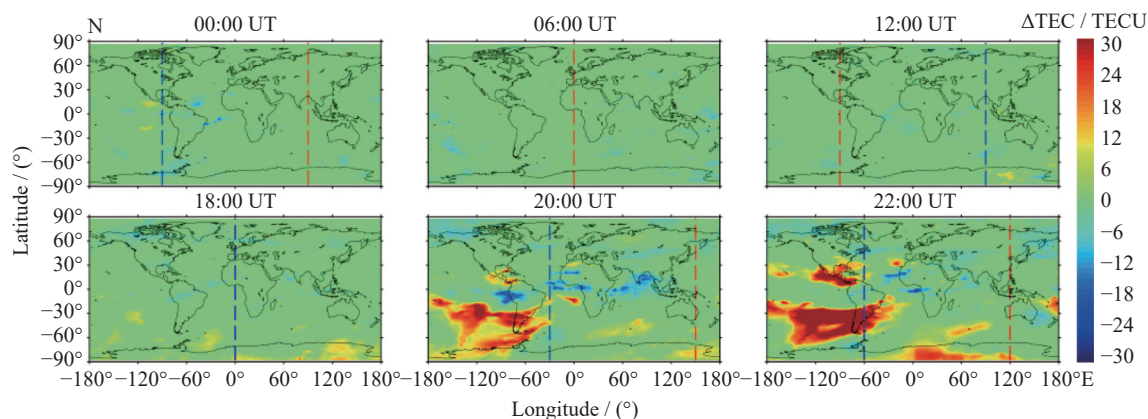


图 5 2023 年 4 月 23 日电离层 TEC 扰动情况 (红色和蓝色虚线表示大致晨昏线, 红虚线以东为日半球)

Fig. 5 Disturbance of ionospheric TEC on 23 April 2023 (The red and blue dashed lines represent the dawn dusk line, and to the east of the red dashed line is the solar hemisphere)

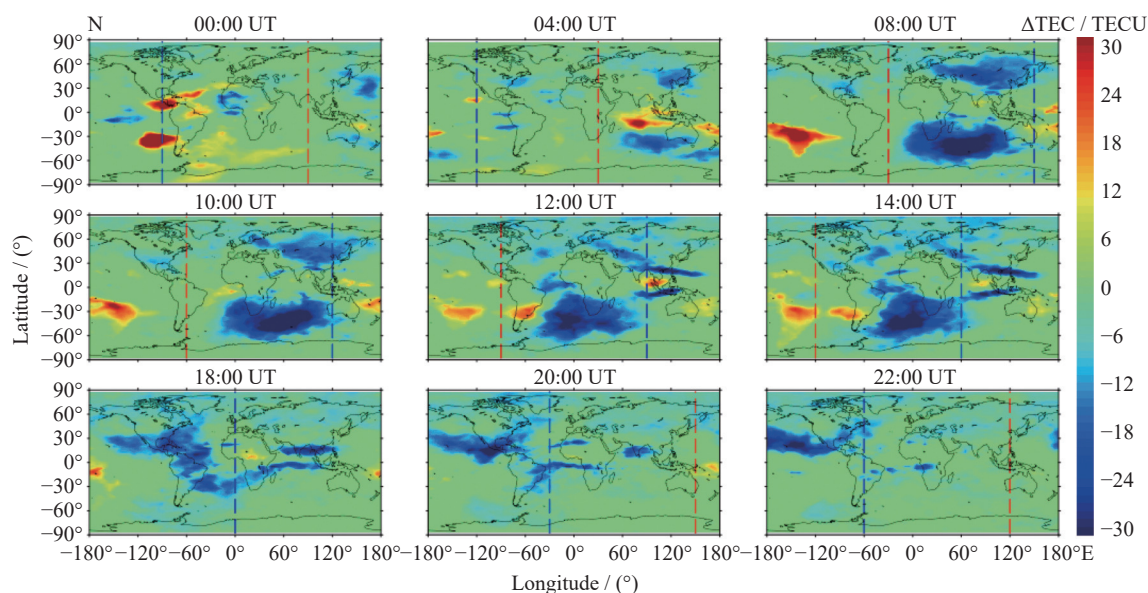


图 6 2023 年 4 月 24 日电离层 TEC 扰动情况 (红色和蓝色虚线表示大致晨昏线, 红虚线以东为日半球)

Fig. 6 Disturbance of ionospheric TEC on 24 April 2023 (The red and blue dashed lines represent the dawn dusk line, and to the east of the red dashed line is the solar hemisphere)

及印度洋东部区域出现强度约为 -5 TECU 的电离层负相扰动区. 随着地磁暴的持续, 两个电离层 TEC 负相扰动区域的范围不断扩大, 强度不断加强, 特别是赤道以南的扰动区域加强尤为明显. 08:00—14:00 UT 期间, 负相扰动影响范围从大西洋东侧横跨至大洋洲西侧, 强度最大达 -40 TECU (见图 6). 之后, 随着地磁暴进入恢复相阶段, 电离层扰动也随之减弱. 至 25 日 00:00 UT, 除太平洋北部还存在强度相对较强的电离层 TEC 负相扰动中心 (最强 -44 TECU) 外, 全球电离层已基本恢复平静状态.

通过以上分析看出, 4 月 23—24 日出现的电离层暴事件与暗条和 CME 先后抵达地球造成地磁场的两次扰动相对应. 暗条和 CME 叠加作用引发的 4 月地磁暴导致的电离层扰动强度明显强于 CME 单一因素引发的 3 月地磁暴所导致的电离层扰动强度, 影响范围也明显扩大. 此外, 4 月 23—24 日期间电离层扰动由正相扰动转为负相扰动, 而 3 月 23—24 日期间的电离层扰动则以负相扰动为主.

为进一步分析地磁暴期间东亚—澳洲一线的电离层 TEC 变化情况, 这里沿 120°E 在南北半球各选取

3 个点位, 分别绘制两次地磁暴期间电离层 TEC 的时间变化曲线 (见图 7 和图 8). 整体来看, 全球电离层 TEC 呈明显不对称分布, 北半球的 TEC 含量显著高于南半球, 而低纬地区尤为明显. 其原因在于, 本文所研究的地磁暴发生于 3—4 月, 太阳直射点从赤道向北回归线方向移动, 北半球所接收的太阳辐射强于南半球, 而低纬地区接收到的太阳辐射强于中高纬度地区, 进而导致北半球低纬度高层大气相比中高纬度地区, 电离程度更强, TEC 含量更高.

从电离层 TEC 扰动幅度来看, 地磁暴期间, 特别是地磁暴恢复相阶段, 电离层扰动在低纬地区为正相扰动且南半球强于北半球, 而中高纬地区为负相扰动.

3 结论

综合利用美国航空航天局提供的行星际磁场数据、日本京都地磁数据中心提供的地磁数据以及 IGS 提供的电离层 TEC 数据, 采用滑动四分位距法对 2023 年 3—4 月连续发生的两次地磁暴事件期间电离层响应情况进行了分析研究, 主要结论如下.

(1) 两次地磁暴均由太阳朝向地球一侧的日表面产生的 CME 到达地球, 引发行星际太阳风速度增强, 裹挟着南向磁场分量和高能粒子与地球磁场发生磁重联, 进而激发地磁扰动引起. 不同点在于, 2023 年 3 月 23—24 日期间发生的地磁暴受 CME 单一因素

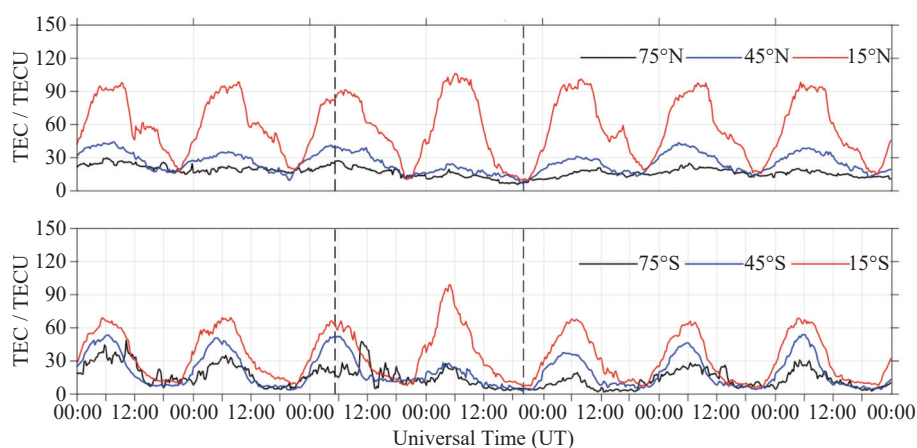


图 7 2023 年 3 月 21—27 日磁暴期间经度 120°E 处的电离层 TEC 变化 (虚线为地磁暴发生时间段)

Fig. 7 Changes of ionospheric TEC at 120°E during the geomagnetic storm from 21 to 27 March 2023
(The dashed line represents the period of geomagnetic storm)

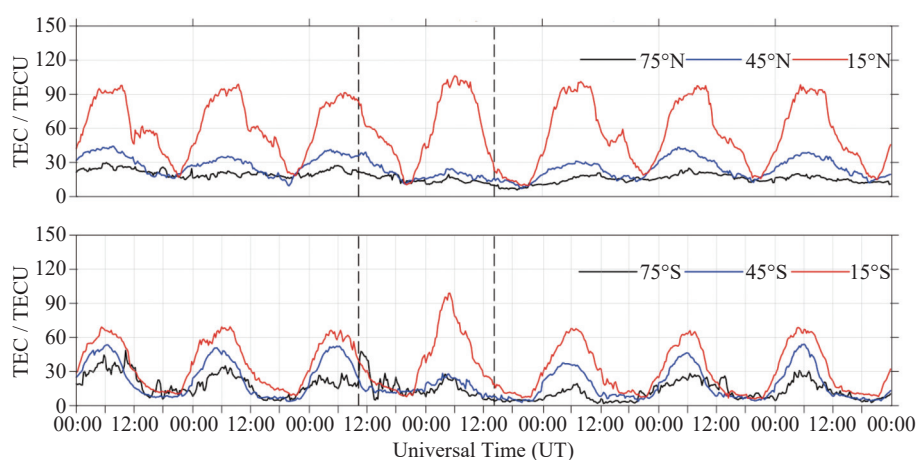


图 8 2023 年 4 月 21—27 日磁暴期间经度 120°E 处的电离层 TEC 变化 (虚线为地磁暴发生时间段)

Fig. 8 Changes of ionospheric TEC at 120°E during the geomagnetic storm from 21 to 27 April 2023
(The dashed line represents the period of geomagnetic storm)

影响,而2023年4月23—24日发生的地磁暴受暗条与CME叠加作用,使得4月这次地磁暴强度更强,持续时间更长。

(2) 两次地磁暴均引发了强烈的电离层TEC扰动,但电离层扰动的发生过程及扰动分布特征具有明显差异。具体而言,3月23—24日地磁暴期间的电离层扰动呈现东西向不对称分布,西半球以正相扰动为主,东半球以负相扰动为主。4月23—24日地磁暴期间的电离层扰动受暗条和CME先后到达地球影响,全过程表现为由正相扰动向负相扰动转化。

(3) 东亚—澳洲一线的电离层TEC表现为北半球显著高于南半球,低纬地区尤为明显。从电离层扰动幅度来看,其在地磁暴恢复相阶段最为明显,表现为低纬地区是正相扰动,中高纬地区则为负相扰动的分布规律。

参考文献

- [1] LI Zhenghang, HUANG Jinsong. GPS Surveying and Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 4 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2024)
- [2] NITTA N V, MULLIGAN T, KILPUA E K J, *et al.* Correction to: understanding the origins of problem geomagnetic storms associated with “Stealth” coronal mass ejections[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(8): 84
- [3] QIU Na, CHEN Yanhong, WANG Wenbin, *et al.* Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in Mid-latitude regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(7): 2250-2262 (邱娜, 陈艳红, 王文斌, 等. 中低纬地区电离层对 CIR 和 CME 响应的统计分析 [J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(7): 2250-2262)
- [4] XU Xiaoheng. The Effects of Space Weather on Flight Delays and Flight Times[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023 (徐小恒. 空间天气对航班延误和飞行时间的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023)
- [5] MANDEA M, CHAMBODUT A. Geomagnetic field processes and their implications for space weather[J]. *Surveys in Geophysics*, 2020, **41**(6): 1611-1627
- [6] CONTREIRA D B, RODRIGUES F S, MAKITA K, *et al.* An experiment to study solar flare effects on radio-communication signals[J]. *Advances in Space Weather*, 2005, **36**(12): 2455-2459
- [7] DING Zonghua, CHEN Chun. Preliminary analysis of the ionospheric dispersion effect on linear polarization radar signal[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, **26**(1): 30-34 (丁宗华, 陈春. 电离层色散效应对线极化雷达信号的影响分析 [J]. *电波科学学报*, 2011, **26**(1): 30-34)
- [8] NIE Wenfeng, HU Wusheng, PAN Shuguo, *et al.* Extraction of regional ionospheric TEC from GPS dual observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, **39**(9): 1022-1027 (聂文锋, 胡伍生, 潘树国, 等. 利用 GPS 双频数据进行区域电离层 TEC 提取 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, **39**(9): 1022-1027)
- [9] QUAN Lin, XUE Junchen, HU Xiaogong, *et al.* Performance of GPS single frequency standard point positioning in China during the main phase of different classified geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(9): 3030-3047 (全林, 薛军琛, 胡小工, 等. 中国区域 GPS 单频点定位在不同类型磁暴主相期间定位性能分析 [J]. *地球物理学报*, 2021, **64**(9): 3030-3047)
- [10] HUANG Weiquan, WAN Weixing, XUE Bingsen. Analyses of geospace response to the geomagnetic storm in May 2017[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(9): 1051-1063 (黄为权, 万卫星, 薛炳森. 2017 年 5 月磁暴过程及近地空间环境响应分析 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, **49**(9): 1051-1063)
- [11] MANSILLA G A. Behavior of the total electron content over the arctic and antarctic sectors during several intense geomagnetic storms[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2019, **10**(1): 26-36
- [12] DENG Zhongxin, LIU Ruiyuan, ZHEN Weimin, *et al.* Study on the ionospheric TEC storms over China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 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)
- [13] TANG Jun, GAO Xin, LI Yijian, *et al.* Spatial-temporal variations of the ionospheric TEC during the August 2018 geomagnetic storm by Beidou GEO Satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, **51**(3): 317-326 (汤俊, 高鑫, 李垠健, 等. 2018 年 8 月磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层 TEC 时空变化分析 [J]. *测绘学报*, 2022, **51**(3): 317-326)
- [14] WANG Ge, WANG Ningbo, LI Zishen, *et al.* Impact of geomagnetic storms on ionosphere variability and precise point positioning application in high latitudes of the northern hemisphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 261-272 (王格, 王宁波, 李子申, 等. 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 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(2): 261-272)
- [15] YUAN Jiangang, LI Wang, LIU Shengnan. Global ionospheric responses to the strong geomagnetic storm on March 17, 2015[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, **36**(6): 558-564 (袁建刚, 李旺, 刘胜男. 全球电离层对 2015 年 3 月 17 日强地磁暴的响应分析 [J]. *测绘科学技术学报*, 2019, **36**(6): 558-564)
- [16] MING Feixiong, MA Jinshan. Study on ionospheric anomaly during geomagnetic storm by Beidou GEO Satellites[J]. *Geospatial Information*, 2023, **21**(8): 100-103 (明飞雄, 马锦山. 磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层异常研究 [J]. *地理空间信息*, 2023, **21**(8): 100-103)
- [17] LI Weixin, CHEN Yanhong, YUAN Tianjiao. Ionosphere

- responses to geomagnetic storms at middle to low latitude region in different seasons[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 746-759 (李维新, 陈艳红, 袁天娇. 中低纬电离层不同季节地磁暴响应的事例分析 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(5): 746-759)
- [18] OU Ming, WU Jiayan, CHEN Longjiang, *et al.* Global ionospheric TEC and ROTI variations during a moderate geomagnetic storm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(6): 887-897 (欧明, 吴家燕, 陈龙江, 等. 一次中等磁暴期间全球电离层 TEC 及 ROTI 指数变化分析 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(6): 887-897)
- [19] LE Huijun, LIU Libo, CHEN Yiding, *et al.* Anomaly distribution of ionospheric total electron content responses to some solar flares[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2019, **3**(6): 481-488
- [20] LI Yongtao, LI Jianwen, DAI Taogao, *et al.* Influence of solar activity on ionospheric TEC change[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(6): 847-854 (李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析 [J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(6): 847-854)
- [21] ZHAO Yongning, YE Lin, ZHU Qianwen. Characteristics and processing method of abnormal data clusters caused by wind curtailments in wind farms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, **38**(21): 39-46 (赵永宁, 叶林, 朱倩雯. 风电场弃风异常数据簇的特征及处理方法 [J]. *电力系统自动化*, 2014, **38**(21): 39-46)
- [22] ZHU Juntao, ZHAO Miaoxing, GONG Chaofei, *et al.* Ionosphere abnormalities before the 2017 M_s7.0 Jiuzhai Valley earthquake[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2020, **40**(2): 372-378 (朱军桃, 赵苗兴, 龚朝飞, 等. 2017 年九寨沟 M_s7.0 级地震震前电离层异常 [J]. *桂林理工大学学报*, 2020, **40**(2): 372-378)
- [23] YANG Keke, LIU Liyou, CHEN Jun. Abnormality of ionospheric TEC during earthquake based on sliding interquartile rang method[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2019, **39**(2): 427-432 (杨可可, 刘立友, 陈军. 基于滑动四分位距法的地震期间电离层 TEC 异常 [J]. *桂林理工大学学报*, 2019, **39**(2): 427-432)
- [24] SUN Jialong, LONG Bingxin, QIN Siyuan, *et al.* Analysis of abnormal changes of ionospheric TEC during typhoon Megi[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, **34**(3): 936-943 (孙佳龙, 龙冰心, 秦思远, 等. 台风“鲶鱼”期间电离层 TEC 变化异常分析 [J]. *地球物理学进展*, 2019, **34**(3): 936-943)
- [25] ZHU Juntao, LIU Yusheng, LIN Zhiyu, *et al.* Response analysis of global ionospheric TEC to geomagnetic storms from august 25~29, 2018[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, **42**(7): 661-668, 674 (朱军桃, 刘玉升, 林知宇, 等. 2018-08-25~29 期间全球电离层 TEC 对地磁暴的响应分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, **42**(7): 661-668, 674)

作者简介



赵洪宇 女, 1990 年 7 月出生于黑龙江省牡丹江市, 现为山东省青州市高新技术研究所助理工程师. 主要研究方向为电离层扰动过程研究、空间灾害性天气预报等.
E-mail: yrovzl@126.com