1998-2023 年东亚与北美中低纬站点电离层 TEC 对地磁暴响应的统计分析*

徐梓凡[1,2] 万庆涛[1,2] 李婧华[1,2] 范江涛[1,2] 董驰宇[1,2] 马冠一[1,2]

1(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要

本文基于 1998-2023 期间的 563 次地磁暴事件，利用东亚和北美中低纬站点的电离层总电子含量（Total Electron Content, TEC）,以地磁暴主相起始时刻（Main Phase Onset, MPO）的当地时（Local Time, LT）时间为统一基准，提取对应于磁暴时序的 TEC 并计算相对扰动量 ΔTECr，采用时序叠加方法对 MPO 后 0-48 h 内的连续演化特征统计分析。结果表明：（1）晨昏线效应明显，主相阶段（Δt≈0-8 h）日照侧更易出现正相扰动，而在接近/跨越昏线后更易转入或维持负相扰动；当 MPO 位于夜侧时，主相响应整体偏弱，较明显的正相扰动多出现在跨越晨线后的白昼时段。（2）纬度差异主要体现在恢复相（Δt≈8-36 h）负相扰动的持续性，较高纬站点更易形成连续且更强的负相扰动，而较低纬站点的负相扰动更离散、整体更弱。（3）暴时演化的事件间差异显著，并具有季节与昼夜依赖，夜间冬季的季节差异最显著且离散度偏大；昼夜差异在冬、夏两季最明显，冬季夜间以正相扰动占优，夏季夜间以负相扰动占优，而春秋相对较弱。本研究可为后续的地磁暴期间的电离层响应预测提供研究基础。

关键词 地磁暴，电离层扰动，总电子含量，主相起始时刻，时序叠加分析

中图分类号 P352

Responses of Ionospheric TEC to Geomagnetic storms at Mid- and Low-Latitude Stations from 1998 to 2023 in East Asia and North

*国家自然科学基金面上项目（12273062、12473095 和 12273074），中国科学院-日本学术振兴会协议项目（178GJHZ2023180MI）共同资助

最新录用

America

XU Zifan[1,2], WAN Qingtao[1,2], LI Jinghua[1,2], FAN Jiantao[1,2], DONG Chiyu[1,2], MA Guanyi[1,2]

[1] *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract This paper presents a statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC) responses to geomagnetic storms at low- and mid-latitude stations in East Asia and North America based on 563 independent storm events during 1998–2023. Using the local time (LT) corresponding to the main phase onset (MPO) of each storm as a unified reference, the storm-time TEC sequences are extracted and converted into the relative disturbance quantity, ΔTECr. A superposed epoch analysis (SEA) is then performed to investigate the continuous evolution of TEC disturbances within 0–48 h after MPO. Additional comparisons are conducted in terms of day/night conditions, latitude, and season to clarify the local-time dependence and regional characteristics of storm-time ionospheric responses. The results show that: (1) a pronounced terminator effect exists. During the main phase (Δt≈0-8 h), positive disturbances are more likely to occur on the dayside, whereas negative disturbances are more likely to develop or persist after the disturbed ionosphere approaches or crosses dusk. When MPO occurs on the nightside, the main-phase response is generally weaker, and more evident positive disturbances tend to appear after the disturbed ionosphere crosses dawn into the daytime sector. (2) Latitudinal differences are mainly reflected in the persistence of negative disturbances during the recovery phase (Δt≈8-36 h). At relatively higher-latitude stations, negative disturbances tend to be stronger and more continuous, whereas at relatively lower-latitude stations they are more scattered and generally weaker. (3) The storm-time evolution exhibits substantial event-to-event variability, with clear seasonal and day/night dependence. The seasonal contrast is most evident under nighttime winter conditions and is accompanied by relatively large dispersion. In addition, the day/night contrast is strongest in winter and summer: positive disturbances tend to dominate at night in

最新录用

winter, whereas negative disturbances are more likely to dominate at night in summer, while the corresponding contrasts in spring and autumn are comparatively weaker. These results provide statistical constraints for storm-time ionospheric modeling and prediction.

Key words Geomagnetic storm, Ionospheric disturbance, Total electron content (TEC), Main phase onset (MPO), Superposed Epoch Analysis(SEA)

最新录用

0 引言

电离层对地磁暴的响应决定于太阳风—磁层耦合和磁层—电离层—热层耦合的复杂物理过程。地磁暴期间的能量注入会通过焦耳加热和粒子沉降等方式，向下耦合到地球的电离层和中性大气中，磁层发电机、赤道向扰动风、中性成分改变以及电离层发电机都会引发电离层正负相扰动[1-3]。从时间演化上看，典型地磁暴通常可分为初相、主相和恢复相三个阶段。初相阶段虽可能伴随突发压缩或冲击，但整体能量注入有限，其对中低纬电离层的持续影响通常较弱。在主相期间，南向行星际磁场（Interplanetary Magnetic Field, IMF）与地磁场发生磁重联，激发强烈的高纬对流电场，并可产生瞬时穿透电场（Prompt Penetration Electric Field, PPEF），该电场在数分钟尺度内传导至中低纬地区，抬升昼侧 F2 层等离子体，从而引起电子密度与总电子含量（Total Electron Content, TEC）的快速增加，表现为正相扰动[4]；进入恢复相后，随着扰动发电机电场（Disturbance Dynamo Electric Field, DDEF）逐步建立以及热层成分扰动向低纬传播，电子复合过程增强，电离层常表现为持续的负相扰动，这种时序演化反映了主相电场效应与恢复相成分效应在不同时段的相对主导作用[5,6]。为便于在不同背景水平（季节/太阳活动/区域）下进行可比性分析，相关研究也常采用相对变化（如相对 TEC 扰动）来表征扰动幅度[7]。近年来的典型事例亦从个例角度印证了上述过程，例如 2024 年“母亲节超级磁暴”期间，东亚与美洲经度带赤道电离异常（Equatorial Ionization Anomaly, EIA）显著增强，TEC 在主相阶段短时升幅可达 50%-100%，而随后在恢复相普遍转为负相扰动[8-9]。然而，不同地磁暴事件在强度、起始时刻及背景条件上的差异，使得电离层响应具有显著的事件间差异。

已有统计研究表明，地磁暴期间电离层正/负相扰动的幅度与持续时间受纬度、地方时（Local Time, LT）、季节与地磁暴强度等因素共同调制，并在不同经度扇区呈现差异[10-13]。Zhao 基于全球电离层图（Global Ionospheric Map, GIM）的统计结果进一步揭示了扰动 TEC 的整体空间形态及其显著的地方时与经度结构，为跨区域比较提供了统一参照[14]。在区域对比方面，Gao 等利用东亚 4 台测高仪对 1957–2006 年 515 场磁暴逐事件判定扰动极性与持续时间，指出中纬以负暴为主、低纬以正暴为主，且低纬昼侧更易出现正暴而中纬负暴

最新录用

多起始于夜—晨侧[15]。Vijaya Lekshmi 等进一步比较日本低纬与美洲中纬两台站 1985–2005 年 584 场磁暴的扰动分布，发现低纬正暴发生次数显著多于中纬且更偏向晨—午起始，而负暴频次对太阳周期相位更敏感，在极大期更集中[16]。随后研究强调了季节与强度对扰动极性的影响：Matamba 等在非洲南部（1996–2011 年，Dst 指数（Disturbance Storm Time index）≤−50 nT）发现夏季负暴占比更高、冬季正暴更突出，且极强暴几乎仅表现为负暴[17]；de Abreu 等对南美强磁暴逐事件判读则揭示出明显日夜非对称性，即白昼更易出现正相扰动、夜间更易发生负相扰动，并给出不同纬度带正/负相占比的统计特征[18]。

除扰动类型的分布差异外，另一类研究更关注在统一参考历元下对扰动出现时刻、时延与持续时间进行定量分析，以刻画暴时 TEC 的典型演化。Şentürk 基于 GIM 对 126 场磁暴以最小 Dst 对齐叠加，给出不同纬度带垂直 TEC（Vertical TEC, VTEC）平均响应幅度的统计约束：低纬更倾向于增强，而中高纬更常持平或下降[19]。在北美扇区，Thomas 等基于全球定位系统（Global Positioning System, GPS）观测反演的 TEC 的叠加统计进一步给出较清晰的“正—负相”演化时间窗口，即日侧早期（约 0–6 h）以正相为主，随后负相在更晚时段逐渐占优并维持下降[20]。在全球尺度上，Liu 等基于美国喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）提供的 GIM 统计了负相扰动由高纬向低纬扩展的时延特征，指出该时延在不同季节、磁地方时与扰动强度条件下呈现系统差异[21]。需要指出的是，由于事件筛选与统计方法存在差别，不同研究间结论出现差异亦在所难免，这也反映了电离层对地磁暴响应的复杂性与多变性。因此，电离层对地磁暴响应特征与机制仍是需要关注的重要研究课题。

本文基于 1998-2023 年间的 563 次地磁暴事件，对东亚和北美中低纬的站点电离层 TEC 的响应特征进行统计分析。研究采用以主相起始时刻（Main Phase Onset, MPO）为参考历元的时序叠加分析（Superposed Epoch Analysis, SEA）方法：首先将各个台站的相对扰动（ΔTECr）在 MPO 处统一对齐，进而按 MPO 发生的 LT 和季节进行分组叠加。在此基础上，定量比较了主相与恢复相期间电离层正、负相扰动的出现时间、持续时间及幅度特征。本文研究内容与结构安排如下：第 1 节介绍数据与方法，包括地磁暴样本筛选与 MPO 确定、TEC 数据来源、背景 TEC 与 ΔTECr 计算，以及按 MPO 的世界时（Universal

最新录用

Time, UT）和季节的分组与 LT 换算。第 2 节给出结果，分别展示电离层扰动与地磁暴起始时刻的地方时、纬度和季节依赖性的结果。第 3 节结合前人工作讨论地方时、纬度与季节差异的统计特征并给出机制解释。第 4 节总结主要结果。

1 数据与方法

1.1 地磁暴数据筛选与 TEC 数据预处理

本研究地磁暴事件来自 Raptis 等发布的 Zenodo 数据库[22]。该数据集基于全球平均环电流（SuperMAG ring current, SMR）对磁暴事件识别：当 SMR ≤ −50 nT 判定为地磁暴，并以 SMR 转负后的持续下降确定 MPO[3,23]。本文选取 1998–2023 年事件，并为避免相邻事件干扰，若某次恢复相结束与下一次 MPO 相连，则视为连续事件，仅保留首个事件。最终获得 563 次独立地磁暴事件。

TEC 数据来自国际 GNSS 服务（International GNSS Service, IGS）发布的最终全球电离层图（final GIM），其在 5°×2.5°（经度×纬度）网格上提供 VTEC，时间分辨率为 2 h；IGS combined GIM（如 IGSG）由多个电离层关联分析中心（Ionosphere Associate Analysis Centers, IAAC）的 GIM 产品综合生成[24]。为与本文 1 h 的相对时间索引一致，采用线性插值将 2 h VTEC 插值至 1 h。需要说明的是，插值仅用于时间对齐；同时 GIM 受时间分辨率与建模假设的影响[25,26]。因此，本文关注 MPO 后 0-48 h 的统计演化特征，避免对 1-2 h 内的变化作过度解读。

本文选取的网格点分别为中国区域四个 IGS 站附近：CHAN、BJFS、JFNG 和 HKSL；美洲区域 2 个 IGS 站附近：WES2 和 CRO1。为描述方便，下文均用 IGS 站点的名称代表相应的网格点。为便于晨昏判别，本文将 06-17 LT 定义为白天、18-05 LT 定义为晚上。具体各站的经纬度以及 LT 的换算如表 1 所示。

表 1 东亚和北美所选测站的经纬度与 LT 的换算

Table 1 Geographic coordinates of the selected stations in East Asia and North America and the LT conversion.

台站名称	地理纬度 (°N)	地理经度(°E)	地磁纬度 (°N)	LT 的换算
CHAN	45.0	125.0	36.0	LT=UT+8
BJFS	40.0	115.0	30.7	LT=UT+8

最新录用

JFNG	30.0	115.0	20.7	LT=UT+8
HKSL	22.5	115.0	13.2	LT=UT+8
WES2	42.5	-70.0	51.8	LT=UT-5
CRO1	17.5	-65.0	26.8	LT=UT-4

1.2 背景 TEC 与 ΔTECr 的定义

我们筛选后的 1998-2023 年间的 563 次地磁暴事件。对于每一次事件，选取 MPO 前 5 天作为背景参考期。针对分析时间窗的任意时刻，取前 5 天同一 LT 对应的 TEC 数据的中位数，构建该时刻的背景 TEC 得到 TEC_{ref} 。该方法不仅能在短时间尺度（数天）内有效体现太阳活动和季节变化的背景特征，还能通过中位数统计降低单日异常值对背景估计的干扰。

为了以 MPO 为基准开展叠加分析，定义相对时间 Δt ，其中 $\Delta t = 0$ 表示 MPO 时刻，$\Delta t < 0$ 为 MPO 之前，$\Delta t > 0$ 为 MPO 之后。设 $TEC(t)$ 为时刻 t 的观测 TEC 值，定义相对扰动量 ΔTEC_r 为：

$$\Delta TEC_r(t) = \frac{TEC(t) - TEC_{ref}(t)}{TEC_{ref}(t)} \tag{1}$$

本文后续统计主要采用 ΔTECr 作为电离层扰动强度指标。

1.3 统计分析与事件分组

首先，对同一分组 g（如按 MPO 的 LT 整点、或按白天/夜间与季节组合分组）内所有地磁暴事件的 $\Delta TEC_r(\Delta t)$ 在每个相对时刻 Δt 取中位数，得到该组的叠加结果：

$$\widehat{\Delta TEC_r}(\Delta t, g) = \text{median}\left\{\Delta TEC_r^{(i)}(\Delta t, g)\right\}_{i=1}^{N_g}, \quad \Delta t = -24, \ldots, 48 \tag{2}$$

最新录用

其中 Δt 为相对 MPO 的小时索引，g 为分组编号，N_g 为第 g 组的事件个数，$\Delta TEC_r^{(i)}$ 表示该组内第 i 次地磁暴在相对时刻 Δt 的扰动值。下文出现的 ΔTEC_r 若未加“～”符号，均指该组的所有地磁暴事件 TEC 响应的中位数。

为定量表征同一分组在各相对时刻的事件间差异，进一步计算跨事件的标准差（σ）：

$$\sigma_r(\Delta t,g)=\sqrt{\frac{1}{N_g}\sum_{i=1}^{N_g}\left(\Delta TEC_r^{(i)}(\Delta t,g)-\widetilde{\Delta TEC_r}(\Delta t,g)\right)^2}, \tag{3}$$

此外，为获得便于不同站点/季节/昼夜条件对比的总体离散程度，我们对 Δt=0-48 h 内的 $\sigma(\Delta t,g)$ 取平均，得到：

$$\sigma(g)=\frac{1}{N_t}\sum_{\Delta t=0}^{48}\sigma_r(\Delta t,g) \tag{4}$$

其中 N_t 为 48。该 $\sigma(g)$ 用于表示不同站点/季节/昼夜组合在 0-48 h 内的事件间离散程度。

本次研究对地磁暴事件期间电离层 TEC 的响应两种分组方式：（1）按 MPO 的 UT 时分组：以 MPO 的整点 UT 将事件划分为 24 组（UT=0,1,…,23），用于研究 LT 对响应的影响；（2）定义四季：春（2-4 月）、夏（5-7 月）、秋（8-10 月）、冬（11-1 月），用于比较不同季节的地磁暴对 TEC 的影响。为便于分季节量化分析，表 2 给出了各季节主相与恢复相的平均时长；据此，本文统一采用主相 Δt≈0-8 h，恢复相 Δt≈8-36 h 的统计窗口。

表 2 所选地磁暴各季节主相和恢复相平均时长

Table 2 Average main phase and recovery phase durations of the selected geomagnetic storms by season

季节	主相平均时长 (h)	恢复相平均时长 (h)
春季	7.87	29.02

最新录用

夏季	7.59	26.40
秋季	8.39	27.66
冬季	8.17	26.46

图 1 展示了 563 次地磁暴事件或其 MPO 在年、UT 时段以及每个季节的 UT 时段上的分布统计。图 1(a) 表明地磁暴在太阳活动极大期（如 2000 和 2013 年）发生频次增加；由图 1(b) 可见，13 UT 事件数最少（12 个），其余时段的分布则较为均匀；图 1(c-f) 分别给出按春、夏、秋、冬进一步拆分后各季的 UT 小时分布，后续季节变化研究主要基于昼/夜分组。

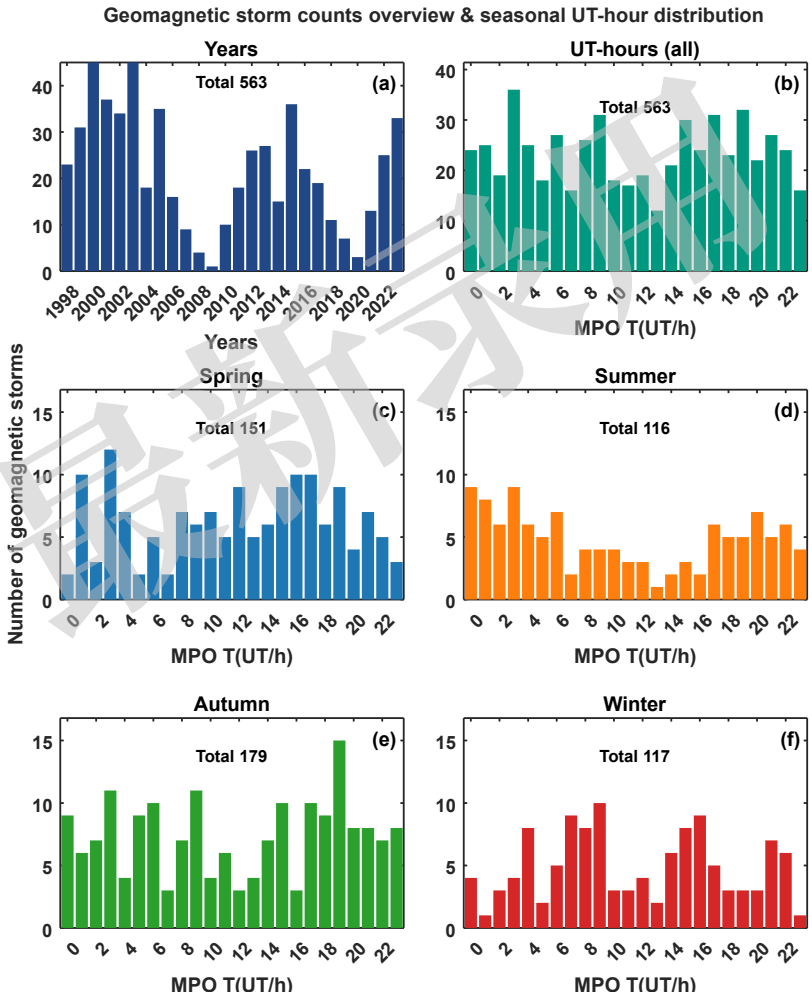


图 1 1998-2023 年地磁暴事件的分布统计，包括 (a) 每年事件总数，(b) 每个 UT 的事件次数，以及 (c)、(d)、(e)、(f) 分别给出春、夏、秋、冬各季的 UT 小时事件数

Fig. 1. Distribution of geomagnetic storm events during 1998-2023, showing (a) annual totals, (b) counts by Universal Time (UT) hour, and (c)-(f) the UT histograms for spring, summer, autumn, and winter, respectively

2 结果

2.1 北美两站的电离层扰动的统计结果

1998-2023 年 563 次地磁暴期间，北美两站 WES2 与 CRO1 的 ΔTECr 中位数分布如图 2 所示。为了考察地方时依赖性，图 2 按 MPO 对应的地方时整点 T=0-23 LT 分组，给出 ΔTECr 在 LT-Δt 两个维度上的统计结果。

图 2(a) 显示，中纬 WES2 站当 MPO-LT 位于白天（Dawn-Dusk 之间，约 06-17 LT）时，Δt≈0-8 内 ΔTECr 主要为集中分布在白昼侧的正相扰动。随后随 Δt 推进并跨越 Dusk 后，ΔTECr 在 Δt≈8-36 h 内以负相扰动为主，且负相在 LT-Δt 平面上的覆盖范围更大。相对地，当 MPO-LT 位于夜间（Dusk-Dawn 之间，约 18-05 LT）时，Δt≈0-8 内扰动总体较弱；较清晰的正相扰动主要出现在跨越 Dawn 之后的白昼时段，随后在再次接近 Dusk 后更易转入负相扰动。

图 2(b) CRO1 站在 MPO-LT 位于白天（约 06-17 LT）时，Δt≈0-8 h 内同样表现为显著正相扰动，且部分正相可延续至 Δt≈8-20 h。与 WES2 相比，CRO1 的负相扰动区域在 LT-Δt 平面上分布更离散。当 MPO-LT 位于夜间（约 18-05 LT）时，Δt≈0-8 h 内扰动不突出，随后的正相扰动仍主要集中在跨越晨线后的白昼时段；进入恢复相，负相扰动多出现在后续更靠近夜间的 Δt 区间。

上述结果表明，两站均显示 ΔTECr 对 MPO-LT 具有明显依赖性：正相扰动主要对应白天（Dawn-Dusk）时段；同时，WES2 在 Δt≈8-36 h 更易形成连续的负相扰动区，而 CRO1 的负相扰动分布相对更离散。

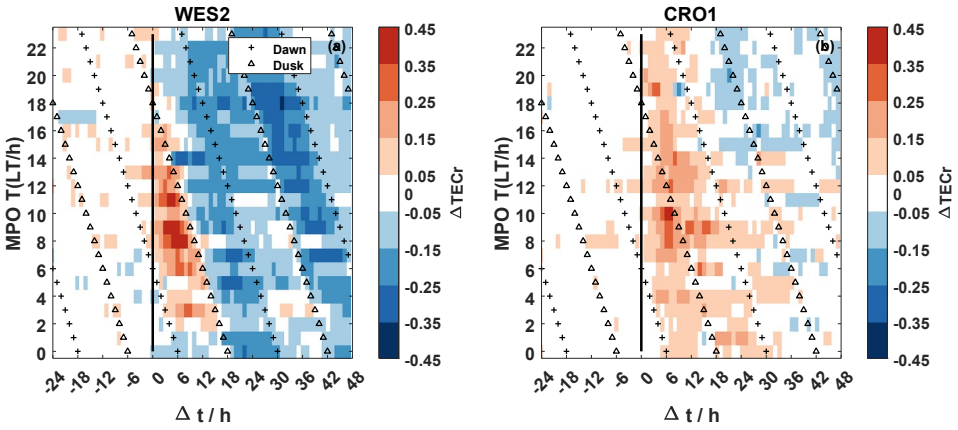


图 2 北美两个站 ΔTECr 中值分布。横轴表示相对 MPO 的小时数（Δt），Δt=0 为地磁暴主相起点；Δt<0 为主相开始前小时数，Δt>0 为主相开始后的小时数；纵轴表示地磁暴的 MPO 对应的 LT 整点（T）；图像中的格点 ΔTECr(Δt,T)代表主相为 T 时的地磁暴引起的电离层在主相开始后的 Δt 时的相对扰动，红色表示正相扰动、蓝色表示负相扰动、白色表示无明显扰动（|ΔTECr|<5%）；图中 '+'和'△' 分别表示大致的日出（06 LT）和日落（17 LT）时刻，粗黑竖线为 Δt=0。

Fig. 2 Median ΔTECr at the two North American stations. The x-axis shows the time relative to the storm main phase onset (MPO), Δt (hours), where Δt=0 denotes MPO, Δt<0 denotes hours before MPO, and Δt>0 denotes hours after MPO. The y-axis shows the local-time hour of MPO, T (LT = 0-23). Each pixel represents the median ΔTECr(Δt,T) over all storms whose MPO occurs at the same T. Red/blue indicates positive/negative perturbations and white indicates near-zero perturbations(|ΔTECr|<5%).

2.2 东亚四站电离层扰动的统计结果

东亚四站 CHAN、BJFS、JFNG 与 HKSL 的 ΔTECr 中位数分布如图 3 所示。图 3 的坐标、分组与标注方式与图 2 一致，均按 MPO 对应的地方时整点 T=0-23 LT 展示。

图 3(a) CHAN 站当 MPO-LT 位于白天（约 06-17 LT）时，Δt≈0-8 h 内以正相为主；进入 Δt≈8-36 h 后，正相扰动减弱，并在跨越昏线后更常出现负相扰动。当 MPO-LT 位于夜间（约 18-05 LT）时，Δt≈0-8 h 内扰动较弱，较清晰的正相扰动主要出现在跨越晨线后的白昼时段，随后向夜间推进时负相扰动更常见。

图 3(b) BJFS 站的 ΔTECr 演化特征与 CHAN 站总体一致。白天 MPO 时 Δt≈0-8 h 的正相扰动更集中；在 Δt≈8-36 h 内，跨越 Dusk 后的负相扰动更为明显。夜间 MPO 时，正相扰动同样主要出现在跨越晨线后的白昼时段，之后更易出现负相扰动。

图 3(c) JFNG 在 Δt≈0-8 h 内较多 MPO-LT 条件下可见正相扰动；进入 Δt≈8-36 h 后，负相扰动亦有出现，但其在 LT-Δt 平面上分布更离散。总体上，

最新录用

较显著的正相扰动仍主要对应 Dawn-Dusk 的白昼时段。

图 3(d) HKSL 在白天 MPO 时，Δt≈0-8 h 内以正相扰动为主；在 Δt≈8-36 h 内，跨越昏线后在部分 MPO-LT 条件下可见较集中的负相扰动区域。夜间 MPO 时，正相扰动主要出现在跨越晨线后的白昼时段，随后在再度向夜间推进时出现负相扰动更常见。

从图 3 的四个子图中可以看出，东亚四站均体现出明显的地方时依赖：正相扰动主要与白昼对应，而跨越昏线后更易出现负相扰动。不同站点在负相出现的 LT 位置与覆盖范围上存在差异，说明同一经度扇区内 ΔTECr 响应具有纬度依赖性。日侧主相正相更突出、夜间后午夜—晨侧更易出现负相/扰动转换”的总体规律。

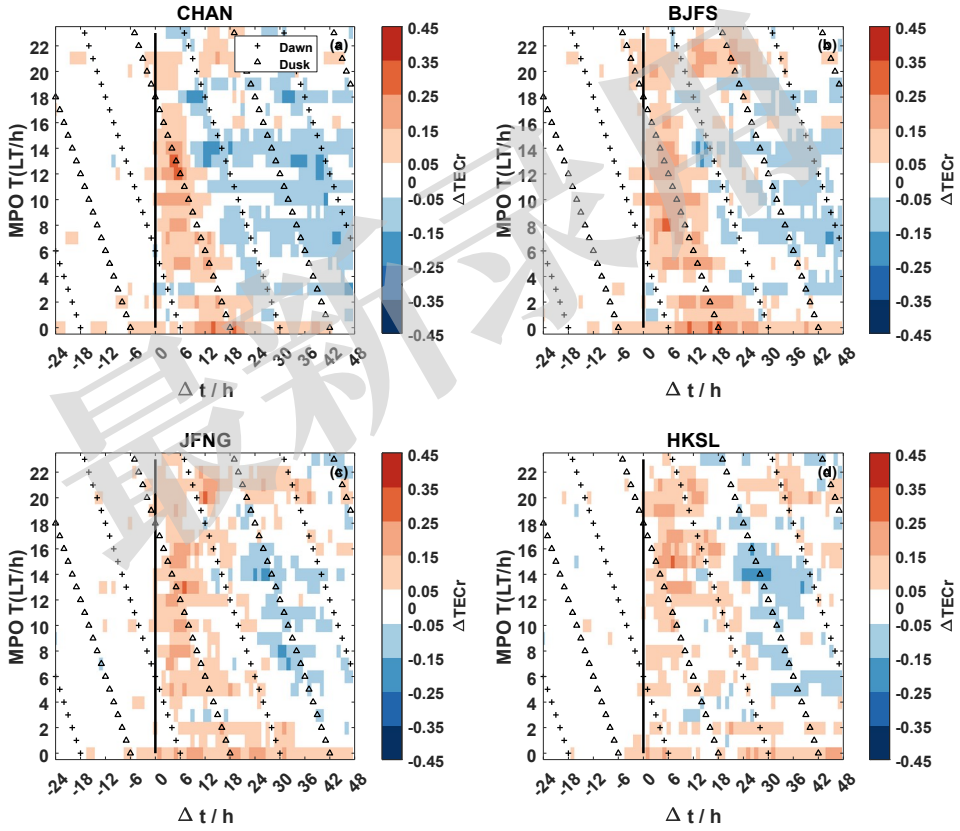


图 3 东亚四站（CHAN、BJFS、JFNG、HKSL）ΔTECr 中位数分布。坐标定义与颜色标注同图 2。

Fig. 3 Median ΔTECr at the four East Asian stations (CHAN, BJFS, JFNG, and HKSL). The axis definitions and color scheme are the same as in Fig. 2.

2.3 电离层响应的季节变化特征

为评估季节对地磁暴期间电离层 TEC 响应的影响，图 4 将地磁暴主相起始时刻按本地时划分为白天（06-17 LT）与夜晚（18-05 LT），在两个子图中分别统计 CHAN、HKSL、WES2、CRO1 在春、夏、秋、冬的事件个数。

从图 4 可以看出，各站点在昼夜两个时段均呈现出明显的季节性差异，其中秋季在多数站点和时段中对应的事件数量相对较多，而冬季事件数整体偏少。需要指出的是，不同站点在白天时段的季节分布仍存在一定差异，例如在 CHAN 站，春季白天事件数略高于秋季，而在 WES2 和 CRO1 站，秋季事件数在昼夜两个时段均表现出更为明显的优势。

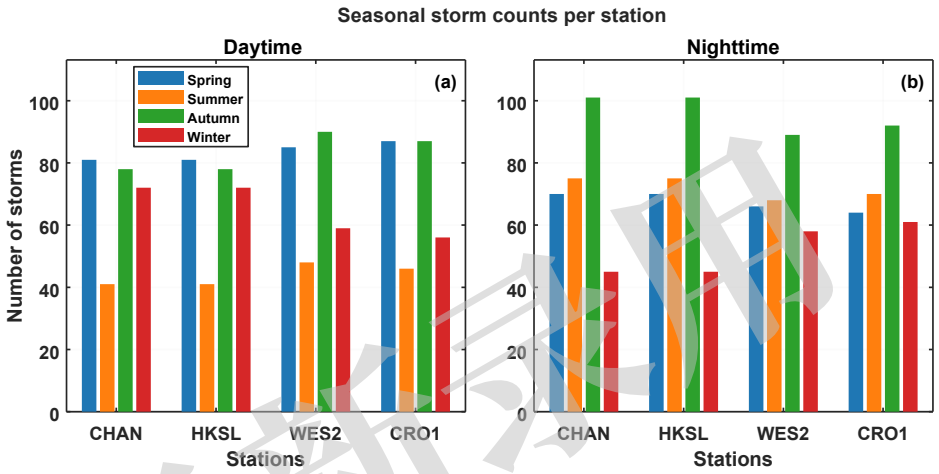


图 4 白天和黑夜 CHAN、HKSL、WES2、CRO1 四个站四季地磁暴事件数分布

Fig. 4 Seasonal distribution of geomagnetic storm event counts at four stations (CHAN, HKSL, WES2, CRO1) during daytime and nighttime.

图 5 展示白天 CHAN、HKSL、WES2、CRO1 四个台站在春、夏、秋、冬四季中的 ΔTECr 变化情况，并在图例中给出了各季节分组事件的平均标准差。图 5(a) 显示，在 CHAN 站，各季节 ΔTECr 在暴前 （Δt<0） 均接近 0。主相阶段（Δt≈0-8 h）均出现正相扰动，其中春季峰值最高，可达 0.22，秋季峰值最低，为 0.12。进入恢复相（Δt≈8-36 h）后，夏、秋两季转入并维持负相扰动，其中夏季负相扰动幅度最大可达 0.15；春季 ΔTECr 在 0 附近浮动，并在 30 h 之后出现较弱的负相扰动。冬季在 Δt≈12-28 h 出现一段正相扰动抬升，峰值可达 0.1，随后回落并出现负相扰动。从图例中可以看出 σ 值在 0.17-0.19，说明四季事件都具有较大且一致的离散度。图 5(b) 为 HKSL 站白天 ΔTECr 的季节变化。在 Δt≈0-8 h 四季均为较弱的正相扰动，春夏秋的正相峰值约为 0.12，且

出现在较早的 Δt 区间，而冬季峰值最大为 0.17，出现在更靠后的 Δt 区间。在 Δt≈8-36 h，夏季更早转入负相扰动并维持较长时间，谷值可至 -0.12；春、秋两季多围绕零附近小幅波动。冬季在由正转负的过程中可出现一定幅度的负相扰动，但整体幅度与持续时长弱于夏季。从图例中 σ 值在 0.20–0.21，四季离散度接近，表明事件间波动幅度整体较稳定。

图 5(c) 显示，WES2 站在 Δt≈0-8 h 主相阶段四季均出现正相扰动，其中冬季峰值最高，可达 0.28，春秋约为 0.20，夏季最低为 0.11。随后在 Δt≈8-20 h 内各季节普遍转为负相扰动，夏季负相扰动幅度最大，可达 0.28，春秋为 0.22，冬季仅有 0.10。冬季 ΔTECr 在 Δt≈20-30 h 出现明显回升并接近零附近，但在 Δt≈32-40 h 又再次表现为较明显的负相扰动，幅度可达 0.23。σ 分布在 0.20–0.25，整体离散度偏大且范围更宽，表示不同事件响应差异更为显著。图 5(d) 表明，CRO1 站白天在主相阶段（Δt≈0-8 h）四季均出现正相扰动，其中春季正相扰动最大约为 0.25，秋季约为 0.22，冬季约为 0.18，夏季约为 0.16。恢复阶段季节差异明显，夏季在 Δt≈8-36 h 内转入并维持强负相扰动，负相扰动最大约为 0.21；春、秋两季由正相扰动逐步衰减至零附近，后段表现为弱负相扰动，负相扰动最大约为 0.05。冬季在 Δt≈0-48 h 整体维持在零以上，恢复相阶段以弱正相扰动为主，正相扰动最大约为 0.11。图例中 σ 为 0.21–0.26，离散度相对其他站更大，说明白天条件下季节间波动强度较大。

由图 5 可知，白天事件中四站在主相阶段（Δt≈0-8 h）普遍呈正相扰动，而恢复相（Δt≈8-36 h）季节差异更显著：夏季更易出现持续负相扰动，冬季更偏弱负相或接近零（CRO1 尤为明显），春秋整体介于两者之间。图例给出的 σ 约为 0.17–0.26，其中 WES2 春季（0.25）与 CRO1 夏季（0.26）较大，提示对应条件下事件间差异更强；而 CHAN/HKSL 白天各季差异较小（约 0.17–0.21），统计曲线相对稳定。

最新录用

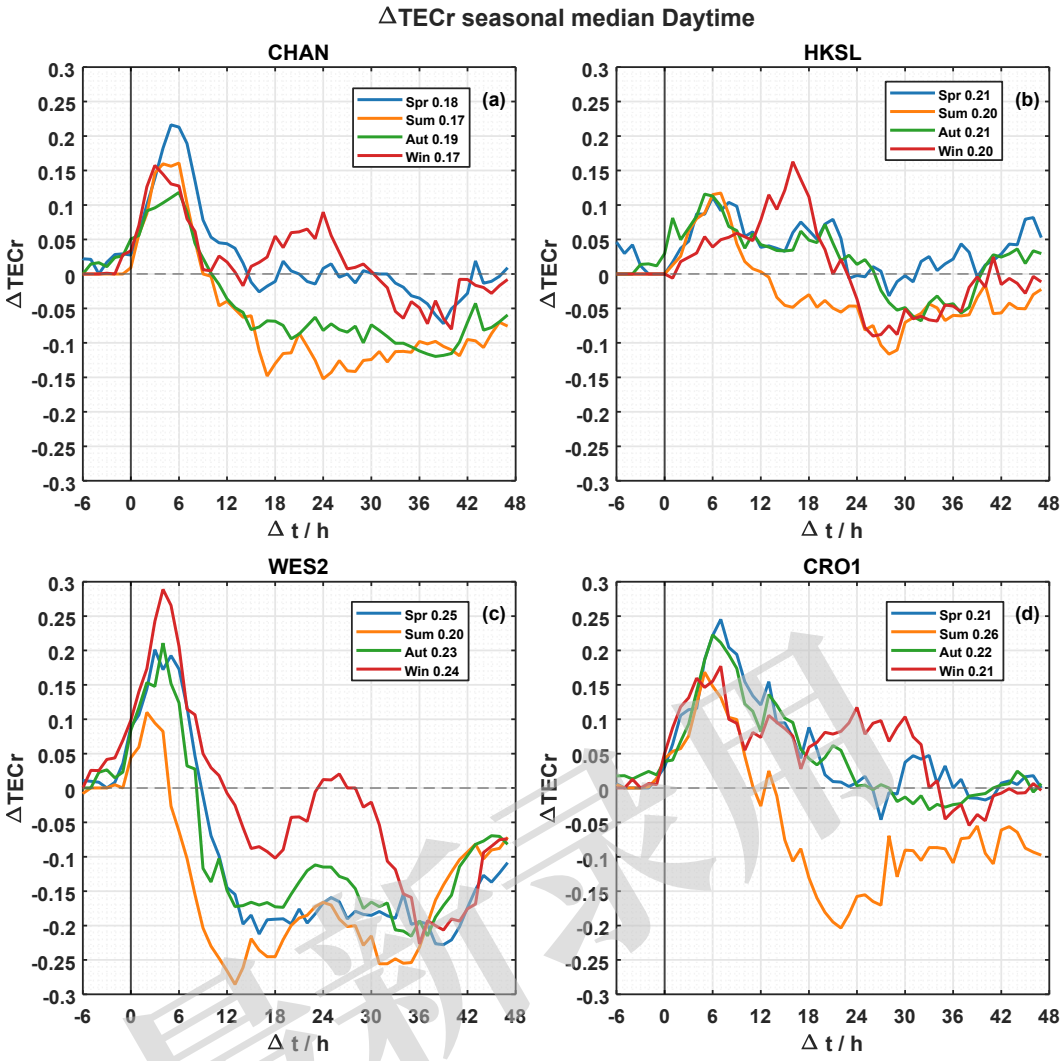


图 5 CHAN、HKSL、WES2、CRO1 四个站在春、夏、秋、冬不同季节的白天的 ΔTECr 变化。横轴表示相对 MPO 的小时数（Δt），Δt=0 为地磁暴主相起点；Δt<0 为主相开始前小时数，Δt>0 为主相开始后的小时数；纵轴表示 ΔTECr 变化量；图例中季节名后的数值表示该站该季节在 Δt=0-48 h 内逐时 1 σ 的平均值，σ 值越大，代表不同地磁暴事件扰动的差异越大。

Fig. 5. Daytime ΔTECr variations at CHAN, HKSL, WES2, and CRO1 in different seasons (spring, summer, autumn, and winter). The x-axis denotes the time offset (Δt, in hours) relative to the main phase onset (MPO), where Δt = 0 marks the storm main-phase onset; Δt < 0 indicates hours before the MPO, and Δt > 0 indicates hours after the MPO. The y-axis denotes the relative TEC disturbance, ΔTECr. Numbers appended to season labels denote the mean hourly 1 σ over Δt=0-48 h, a larger σ means bigger differences between geomagnetic storm events.

图 6(a) 为 CHAN 站夜间四个季节的 ΔTECr 变化情况。在 Δt≈0-8 h 内整体扰动幅度较小。冬季在 Δt≈8-20 h 出现显著正相扰动并持续时间最长，正相扰动最大约为 0.28；春、秋正相扰动最大分别约为 0.10 与 0.07。相比之下，夏季在 Δt≈0-36 h 以负相扰动为主，恢复相阶段负相扰动最大约为 0.17。σ 值在 0.17–0.23 之间，离散度整体较大但季节间仍保持同一水平。图 6(b) 显示，HKSL 站总体扰动幅度较小，主相阶段（Δt≈0-8 h）四季均为弱正相扰动。夏季在 Δt≈8-30 h 内以负相扰动为主，恢复相阶段负相扰动最大约为 0.12；春秋两季整体在零附近波动并在部分时段表现为弱正相扰动，恢复相阶段扰动最大约为 0.04（春季以弱负相为主）与 0.08（秋季以弱正相为主）。冬季在 Δt≈10-30 h 可见一定程度正相扰动，恢复相阶段正相扰动最大约为 0.12，但整体幅度低于 CHAN 与 CRO1。四季 σ 基本集中在 0.20–0.24，事件间离散度相对均匀，说明夜间响应差异较一致。

图 6(c) 表明，WES2 站在主相阶段（Δt≈0-8 h）整体正相扰动较弱。在 Δt≈8-36 h 内春、秋、夏总体以负相扰动为主，恢复相阶段负相扰动最大分别约为 0.22、0.27 与 0.26（夏季最强）。冬季在 Δt≈8-16 h 出现短时正相扰动，恢复相阶段正相扰动最大约为 0.13，但随后同样转入负相扰动，负相扰动最大约为 0.13，并在恢复阶段维持较长时间。图例给出 σ 在 0.17–0.25 之间，离散度跨度较明显，反映夜间不同事件的离散度差异更大。图 6(d) 显示，CRO1 站夜间在冬、春、秋在 Δt≈0-8 h 内均表现为弱正相扰动。随后进入恢复相阶段，冬季正相扰动最大约为 0.17，春季约为 0.13，秋季约为 0.11，并逐步衰减并接近零附近。夏季在较早的 Δt 区间转入负相扰动，并在 Δt≈8-36 h 内维持更显著的负相扰动，负相扰动最大约为 0.15。σ 仅为 0.20–0.22 且波动最小，说明夜间四季离散度接近、一致性更强。

由图 6 可知，夜间事件中季节差异更清晰：夏季在多站更易维持负相扰动，而冬季在 CHAN 与 CRO1 更易出现较明显正相增强，春秋整体介于两者之间。同时，夜间 σ 范围为 0.17–0.25，但季节差异更明显：CHAN 冬季（0.23）与 WES2 冬季（0.26）偏大，表明夜间样本在冬季的事件间差异更强；相对地，HKSL 夜间各季较为接近（0.20–0.24），离散度变化较弱。

最新录用

综合图 5 与图 6 可见，四站 ΔTECr 均呈现一致的季节依赖：夏季更易形成持续的负相扰动，而冬季更倾向于弱负相或出现正相扰动（夜间的 CHAN 与 CRO1 更为突出），春秋整体介于两者之间。昼夜分组不改变“夏负冬正”的总体趋势，但改变其在 Δt 轴上的表现位置：白天样本的季节差异主要集中在恢复相阶段（Δt≈8-36 h）的转负时间与持续时间，而夜间样本中冬季正相扰动与夏季负相扰动的对比更清晰。同时，四站四季昼夜的 σ 值范围为 0.17-0.26，白天样本中 σ 的季节差异较弱，CHAN/HKSL 多数为 0.17–0.21；而 WES2 春季与 CRO1 夏季可达 0.25/0.26。夜间样本的季节差异更清晰，冬季 σ 往往偏大（如 CHAN≈0.23、WES2≈0.26），说明夜间冬季的不同地磁暴事件的差异明显。

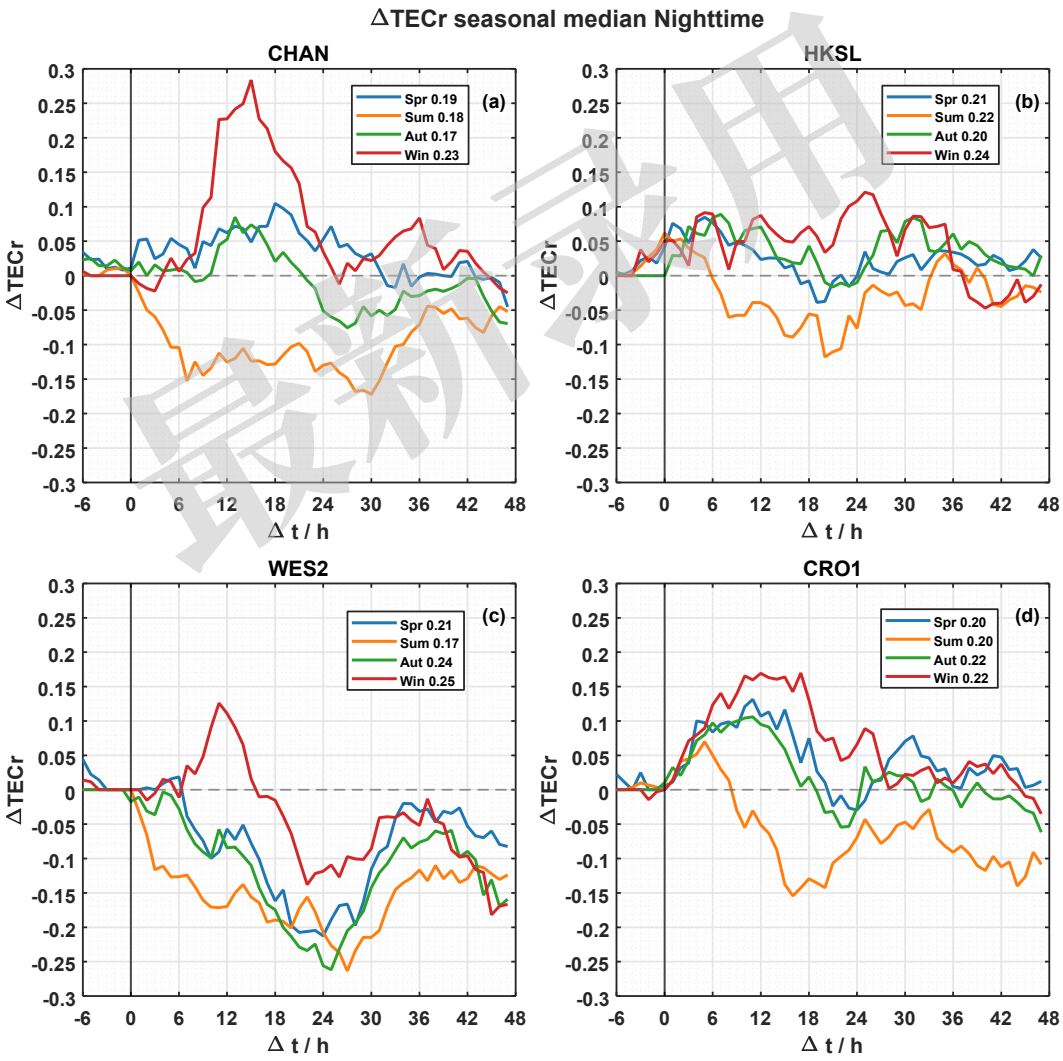


图 6 CHAN、HKSL、WES2、CRO1 四个站在春、夏、秋、冬不同季节的夜间的 ΔTECr 变化。图例说明与图 5 一致。

Fig. 6 Seasonal nighttime median ΔTECr at CHAN, HKSL, WES2, and CRO1 (spring, summer, autumn, winter). The legend format is the same as in Fig. 5.

3 讨论与结论

本研究基于 1998-2023 年 563 次地磁暴事件，采用以主相起始时刻（MPO）为统一参考历元的时序叠加方法，统计刻画了中低纬典型站点 ΔTECr 在 MPO 后 0-48 h 内的演化，并比较其地方时、纬度与季节差异（图 2-图 6）。

首先，图 2-图 3 表明，暴时 ΔTECr 的极性转换与晨昏线跨越呈现一致的对应关系：在主相阶段（Δt≈0-8 h），多数站点更易出现正相扰动，且正相扰动主要集中于日侧；随着 Δt 推进并接近/跨越昏线（Dusk），扰动更倾向于转入或维持负相扰动，并在恢复阶段（Δt≈8-36 h）形成更广泛的负相分布。相对地，当 MPO 位于夜侧时，主相阶段整体响应偏弱，而较清晰的正相扰动多出现在跨越晨线（Dawn）后的白昼时段，随后在再次接近昏线时更易发生由正转负或负相维持的演化。从机制上看，主相附近可能出现 PPEF：若日侧以东向扰动电场为主，可增强向上 E×B 漂移并加强喷泉效应，从而更易形成正相响应；而夜侧光化学补给不足且扰动电场可能减弱或极性改变，使得响应更易被抑制或转向负相演化[3,27-28]。这一日侧主相正相更突出、夜间响应偏弱且跨晨昏线后易发生极性切换的总体形态，与既有全球统计结论在趋势上保持一致[14-16]，并为后续区分主相期间电场效应与恢复相期间成分效应的主导时段提供了更明确的经验依据。

其次，纬度差异主要集中体现在恢复阶段负相扰动的持续性与连续性上。统计结果显示，较高纬站点在恢复相更容易形成连续且更显著的负相扰动区，而较低纬站点的抑制往往更离散、整体更弱。这一纬向差异提示低纬响应更易受到电场驱动的垂直漂移与喷泉效应调制，而中纬在暴时更易受到热层风场与成分变化（如$[O/N_2]$下降导致复合增强）的影响[6,27-28]。已有热层—电离层耦合研究指出，极区焦耳加热可驱动风场与成分扰动向中低纬传播，$[O/N_2]$降低会增强电子损失，从而有利于负相扰动的形成与维持[6,27-28]。因此，中纬站点往往表现为正相持续较短而负相更易占主导；低纬站点则可能在一定时间内由电场过程主导而维持更长的正相或呈现更离散的负相结构[6,27-28]。Zhao 等在 MLT-

最新录用

MLAT 分布中指出负相在后午夜—晨侧更强，且随纬度升高抑制幅度与覆盖范围增大[14]；本文在中低纬站点尺度上进一步给出了恢复相持续性差异的直接对比证据。

最后，图 5–图 6 表明季节依赖在昼夜分组后仍保持一致，但其显著的差异往往出现在恢复相阶段，并且不同事件之间存在较强的差异。总体上，夏季更易维持负相扰动，而冬季更倾向于弱抑制甚至出现正相扰动；昼夜分组后并不改变这一总体趋势，但会改变季节差异在 Δt 轴上的位置：白天样本中季节差异更多体现为恢复相的转负时间与持续性差别；夜间样本中冬季正相扰动与夏季负相扰动的对比更清晰。与此同时，逐时 σ 的统计结果表明暴时响应具有不可忽略的事件间差异，这种差异不仅体现在季节之间，也体现在昼夜之间：夜间冬季的离散度更突出，而昼夜差异在冬季与夏季条件下更为明显。上述结果与多区域统计研究对“夏季负相扰动偏强、冬季正相扰动更常见”的认识一致[15-18]。从可能机制看，季节背景环流与暴时成分扰动的叠加是导致这一结果的原因[20]。夏季半球背景环流更易与暴时赤道向扰动风同向，使极区低[O/N_2]更易向中低纬扩展并维持，从而在恢复相阶段更易出现持续负相扰动。冬季半球背景环流偏极向，可能削弱低[O/N_2]的向赤道传播，使成分效应减弱而 DDEF 等过程相对更突出，因此更倾向于弱抑制甚至短时正相。值得注意的是，HKSL 站在冬季白天的恢复相仍可出现明显的负相扰动，这表明在部分事件中主相后逐步建立的扰动发电机过程可能增强了等离子体的向下漂移，从而加速了电子密度耗空[20]。

综上，本文的研究结果在总体形态上与前人的统计结论一致，并在站点尺度上进一步得到三点统计结论：

（1）晨昏线效应明显：主相阶段（Δt≈0-8 h）日照侧更易出现正相扰动，而在接近/跨越昏线后更易转入或维持负相扰动；当 MPO 位于夜侧时，主相响应整体偏弱，较明显的正相扰动多出现在跨越晨线后的白昼时段；

（2）纬度差异主要体现在恢复相负相扰动的持续性：较高纬站点更易形成连续且更强的负相扰动，而较低纬站点的负相扰动更离散、整体更弱；

（3）暴时演化的事件间差异明显，且具有季节与昼夜依赖：夜间冬季的季节差异最显著且离散度偏大；昼夜差异在冬、夏两季最明显，冬季夜间以正相

最新录用

扰动占优，夏季夜间以负相扰动占优，而春秋昼夜差异与离散度变化相对较弱。

上述结果为后续从统计角度区分主相电场过程与恢复相成分过程的相对作用时段，以及开展站点尺度经验建模提供了更清晰的依据。

致谢 本文所用 IGS GIM 数据来自 NASA CDDIS（ftp://cddis.gsfc.nasa.gov）；地磁暴事件数据来自 Raptis 等人整理并公开于 Zenodo 的数据库。对数据提供机构与作者致以诚挚感谢。

最新录用

参考文献

[1] BLANC M, RICHMOND A D. The ionospheric disturbance dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 1980, **85**(A4): 1669-1686

[2] PRÖLSS G W. Ionospheric F-region storms[M]//VOLLAND H. Handbook of Atmospheric Electrodynamics (1995), Vol. 2. Boca Raton: CRC Press, 1995: 195-248

[3] RAPTIS S, MERKIN V, OHTANI S, *et al*. Plasma sheet magnetic flux transport during geomagnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(18): e2024GL110839

[4] FEJER B G. Low latitude storm time ionospheric electrodynamics[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(12/13/14): 1401-1408

[5] DANILOV A D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances[J]. *Advances in Space Research*, 2013, **52**: 343-366

[6] SHINBORI A, OTSUKA Y, SORI T, *et al*. Statistical behavior of large-scale ionospheric disturbances from high latitudes to mid-latitudes during geomagnetic storms using 20-yr GNSS-TEC data: dependence on season and storm intensity[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2022, **127**(1): e2021JA029687

[7] MENDILLO M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content[J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, **44**(4): RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193

[8] AA E, CHEN Y H, LUO B X. Dynamic expansion and merging of the equatorial ionization anomaly during the 10-11 May 2024 super geomagnetic storm[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(22): 4290

[9] GUO X, ZHAO B Q, YU T T, *et al*. East-west difference in the ionospheric response during the recovery phase of May 2024 super geomagnetic storm over the East Asian[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2024, **129**(9): e2024JA033170

[10] IMMEL T J, MANNUCCI A J. Ionospheric redistribution during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2013, **118**(12): 7928-7939

最新录用

[11] HEELIS R A. Longitude and hemispheric dependencies in storm-enhanced density[M]//FULLER-ROWELL T, YIZENGAW E, DOHERTY P H, *et al*. Ionospheric Space Weather: Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing. Washington: American Geophysical Union, 2016: 61-70

[12] BERÉNYI K A, HEILIG B, URBÁŘ J, *et al*. Comprehensive analysis of the ionospheric response to the largest geomagnetic storms from solar cycle 24 over Europe[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1092850

[13] ZHAO B Q, YANG C J, CAI Y H, *et al*. East-west difference in the ionospheric response of the March 1989 great magnetic storm throughout East Asian region[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2019, **124**(11): 9364-9380. DOI: 10.1029/2019JA027108

[14] ZHAO B Q, WAN W X, LIU L B, *et al*. Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, **25**(7): 1555-1568. DOI: 10.5194/angeo-25-1555-2007

[15] GAO Q, LIU L B, ZHAO B Q, *et al*. Statistical study of the storm effects in middle and low latitude ionosphere in the East-Asian sector[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, **51**(3): 626-634 (高琴, 刘立波, 赵必强, 等. 东亚扇区中低纬地区电离层暴的统计分析[J]. 地球物理学报, 2008, **51**(3): 626-634)

[16] VIJAYA LEKSHMI D, BALAN N, TULASI RAM S, *et al*. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2011, **116**(A11): A11328

[17] MATAMBA T M, HABARULEMA J B, MCKINNELL L A. Statistical analysis of the ionospheric response during geomagnetic storm conditions over South Africa using ionosonde and GPS data[J]. *Space Weather*, 2015, **13**(9): 536-547

[18] DE ABREU A J, CORREIA E, DE JESUS R, *et al*. Statistical analysis on the ionospheric response over South American mid- and near high-latitudes during 70 intense geomagnetic storms occurred in the period of two decades[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2023, **245**: 106060

最新录用

[19] ŞENTÜRK E. Statistical analysis of storm-time TEC variation during ascending and descending solar periods of 24th solar cycle[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021, **61**(2): 277-286

[20] THOMAS E G, BAKER J B H, RUOHONIEMI J M, *et al*. The geomagnetic storm time response of GPS total electron content in the North American sector[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2016, **121**(2): 1744-1759. DOI: 10.1002/2015JA022182

[21] LIU J, ZHAO B, LIU L. Time delay and duration of ionospheric total electron content responses to geomagnetic disturbances[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(3): 795-805. DOI: 10.5194/angeo-28-795-2010

[22] RAPTIS S. Geomagnetic Storms - Classified - 1993-2023[EB/OL]. Zenodo, 2024[2025-06-18].https://doi.org/10.5281/zenodo.11407297

[23] NEWELL P T, GJERLOEV J W. SuperMAG-based partial ring current indices[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2012, **117**(A5): A05215. DOI: 10.1029/2012JA017586

[24] JOHNSTON G, RIDDELL A, HAUSLER G. The international GNSS service[M]//TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer, 2017: 967-982. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1_33

[25] MILANOWSKA B, WIELGOSZ P, KRYPIAK-GREGORCZYK A, *et al*. Accuracy of global ionosphere maps in relation to their time interval[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(18): 3552. DOI: 10.3390/rs13183552

[26] CHEN P, LIU H, MA Y C, *et al*. Accuracy and consistency of different global ionospheric maps released by IGS ionosphere associate analysis centers[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(1): 163-174. DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.042

[27] BALAN N, OTSUKA Y, NISHIOKA M, *et al*. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2013, **118**(5): 2660-2669

最新录用

[28] HUANG C M. Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2013, **118**(1): 496-501

作者简介

徐梓凡（199X—），男，江西上饶人，中国科学院国家天文台博士研究生，主要从事电离层 TEC 建模、地磁暴期间电离层 TEC 扰动统计分析等方面的研究 E-mail：xuzf@nao.cas.cn

马冠一（1963—），女，河南人，中国科学院国家天文台研究员，博士生导师，主要从事无线电物理、空间天气及其对卫星导航定位影响等方面的研究。E-mail：guanyima@nao.cas.cn

最新录用