0254-6124/2026/46(5)-0001-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HAN Yunman, YANG Yuyan, ZHAO Xiukuan, LÜ Jianyong, LIU Libo. Observation and Analysis of Ionospheric Perturbations Triggered by the 2025 Mw 7.7 Myanmar Earthquake (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–10. CSTR:32142.14.cjss.2025–0247. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0247

2025 年缅甸 Mw7.7 地震诱发的电离层扰动观测分析*

韩芸蔓[1,2] 杨雨嫣[1,2] 赵秀宽[3,4]
吕建永[1,2] 刘立波[3,4]

1(南京信息工程大学 临近空间环境特性及效应全国重点实验室 南京 210044)

2(南京信息工程大学 空间天气江苏高校重点实验室 南京 210044)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室 北京 100029)

4(中国科学院地质与地球物理研究所 黑龙江漠河地球物理国家野外科学观测研究站 北京 100029)

摘 要 针对 2025 年 3 月 28 日缅甸 Mw 7.7 级走滑型地震激发的同震电离层扰动 (CSID), 探究复杂震源破裂对地震–大气–电离层耦合过程的影响. 基于 IONISE 与 IGS 地基 GNSS 观测网络的高时空分辨率 TEC 数据, 通过滑动平均去趋势与 2～6 min 周期四阶 Butterworth 带通滤波, 有效提取 CSID 信号. 结果表明, 震后 06:36－06:39 UTC 期间, 近场 (<1000 km) 区域清晰出现周期约 5 min 的“N”型扰动, 最大振幅达 0.97 TECU; 扰动在方位上呈现显著东西不对称性, 即东侧 (30°－225°) 振幅远高于西侧. 该特征在多颗不同方位的卫星观测中均存在, 排除了视线方向几何效应或地磁场调制的主导作用. CSID 水平传播速度介于 1.6～3.4 km·s^{-1}, 具有明显方位依赖性, 与地表瑞利波速度范围基本吻合, 表明扰动主要由瑞利波模态激发. 结合该地震初期双向破裂, 随后转为南向超剪切单向破裂的动力学特征, 超剪切破裂理论上可能通过马赫波效应增强特定方向的瑞利波辐射. 本研究结果表明, GNSS TEC 观测能捕捉震源破裂的方向性特征, 为理解瑞利波辐射模式及跨圈层耦合过程提供了有价值的观测线索.

关键词 GNSS TEC, 地震电离层扰动, 岩石圈–大气层–电离层耦合

中图分类号 P352

Observation and Analysis of Ionospheric Perturbations Triggered by the 2025 Mw 7.7 Myanmar Earthquake

HAN Yunman[1,2] YANG Yuyan[1,2] ZHAO Xiukuan[3,4]
LÜ Jianyong[1,2] LIU Libo[3,4]

1(*State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near - space*,

* 国家自然科学基金项目 (42030203) 和江苏省基础研究计划项目 (BK20250747) 共同资助

2025-12-31 收到原稿, 2026-04-16 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

2(*Jiangsu Key Laboratory of Space Weather, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044)

3(*Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

4(*Heilongjiang Mohe National Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract This study investigates Co-Seismic Ionospheric Disturbances (CSID) triggered by the Mw7.7 strike-slip earthquake in Myanmar on 28 March 2025, with a focus on how complex source rupture processes influence the earthquake–atmosphere–ionosphere coupling. High spatiotemporal resolution Total Electron Content (TEC) data from the ground-based GNSS networks IONISE and IGS are employed. CSID signals are effectively extracted through sliding-window detrending and a fourth-order Butterworth band-pass filter with a period band of 2-6 min. Results show that during 06:36–06:39 UTC, a clear N-shaped disturbance with a dominant period of approximately 5 minutes and a peak amplitude of 0.97 TECU emerged in the near-field region (<1000 km from the epicenter). The disturbance exhibits pronounced east-west azimuthal asymmetry, with significantly larger amplitudes in the eastern sector (azimuth 30°-225°) compared to the west. This asymmetry is consistently observed across multiple satellites with diverse viewing geometries—including near-zenith and geostationary satellites—ruling out line-of-sight geometric effects or geomagnetic modulation as primary causes. The horizontal propagation velocity of the CSID ranges from 1.6 to 3.4 km·s^{-1}, showing clear azimuthal dependence and aligning closely with surface Rayleigh wave speeds, indicating that the disturbance is predominantly excited by the Rayleigh wave mode. The observed azimuthal asymmetry may reflect the modulation of Rayleigh wave radiation by the rupture directivity—initial bilateral propagation followed by unidirectional southward supershear rupture. Supershear rupture may theoretically enhance Rayleigh wave radiation in specific directions through Mach wave effects. Our findings suggest that GNSS-derived TEC observations are capable of capturing the directional characteristics of coseismic rupture, providing valuable observational insights into Rayleigh wave radiation patterns and lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling processes.

Key words GNSS TEC, Coseismic Ionospheric Disturbances (CID), Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling

0 引言

地震、爆炸、火山喷发及海啸等突发性强迫过程可激发地表振动, 进而引发出大气波动. 这些波动通过大气介质的周期性压缩与稀疏作用向上传播, 最终扰动电离层[1]. 依据频率差异, 这些大气波动可分为声波与重力波[2,3]. 声波的频率高于声截止频率 (约 3.3 mHz), 以气压梯度为恢复力, 沿垂直方向以当地声速传播; 重力波的频率低于浮力频率 (约 2.9 mHz), 以重力为恢复力, 沿倾斜路径传播, 其相速度远低于声速. 根据能量守恒原理, 两类波动在向上传播过程中振幅持续增长, 以维持恒定的能量通量, 直至因分子黏性与热传导效应而耗散[4].

地震发生时, 地表或海底的瞬时垂直位移可直接激发大气扰动, 并进一步耦合至电离层, 产生所谓的同震电离层扰动 (CSID)[5,6]. 此类扰动通常在地震发生后约 8～9 min 被观测到[2]. 此外, 沿地表以约 3 km·s^{-1} 速度传播的瑞利面波亦可激发声波, 同样在激发后 8～9 min 内上传至电离层[7,8]. CSID 的水平传播速度取决于其激发机制: 若由地震冲击直接激发, 其速度通常为 0.6～1.0 km·s^{-1}[9,10]; 若由瑞利波耦合激发, 则其水平速度与地表瑞利波速度一致[11,12].

对同震大气与电离层扰动的首次系统观测, 源于 1964 年 3 月 28 日美国阿拉斯加大地震 (Mw9.2). 据 1965 年 Davies 与 Baker[13] 的报告, 位于科罗拉多州博尔德的多普勒探测站于震后约 15 min 首次记录到

电离层扰动, 该信号被归因于震中区域激发的长周期导波型声重力波在电离层中的表现. Leonard 与 Barnes[14] 也在美国本土及夏威夷的多个电离层测高仪台站观测到此次地震引发的 CSID. 此后, CSID 主要通过多普勒探测器实现常规监测[15,16], 也有通过电离层测高仪记录的事件[17,18].

全球导航卫星系统 (GNSS) 的发展以及密集地面接收机观测网的部署, 为电离层扰动研究提供了连续、高时空分辨率的观测手段. 基于 GNSS 反演的电离层总电子含量 (TEC) 数据, 因其优异的观测性能, 已被广泛应用于地震电离层扰动事件的分析[19–22]. 1995 年, Calais 与 Minster[23] 首次利用 GPS TEC 数据, 在 1994 年加州 Mw6.7 北岭地震后成功识别出 CSID 信号. 现有研究表明, 震级大于 Mw6.8 的地震极有可能在电离层中产生可检测的扰动[24].

2025 年 3 月 28 日, 缅甸曼德勒附近发生 Mw7.7 级强震[25]. 据美国地质调查局 (USGS) 报告[26], 主震发生于 06:20:52 UTC, 震中位于 22.001°N, 95.925°E, 震源深度约为 10 km. 随后在 06:32:04 UTC 发生一次 Mw6.7 级余震. 根据 Xu 等[25] 的破裂反演结果, 本次缅甸地震破裂过程呈现显著方向性特征, 破裂起始于实皆断层南段 (约 10 km 深度), 初始 25 s 内呈南北双向扩展 (北向约 3.2 km·s^{-1}, 南向约 3.7 km·s^{-1}); 随后转为以平均 4.3 km·s^{-1} 速度向南超剪切单向传播, 累计破裂长度达 269 km; 后期速度降至 2.0 km·s^{-1}. 该破裂过程产生总长约 (465±25) km 的地表破裂带, 为至 2025 年底全球最长的大陆走滑型地表破裂事件. 本研究基于 GNSS TEC 观测数据, 系统分析此次缅甸地震激发的 CSID 特征, 旨在识别大气波动模态并厘清其与地震波的物理关联, 进而深化对地震–大气–电离层耦合机制的理解. 鉴于不同地震事件在震级、深度、构造背景及破裂动力学等方面均存在显著差异, 针对同震电离层响应的个例研究, 对揭示固体地球与高层大气之间的跨圈层耦合过程具有重要科学意义.

1 数据与方法

研究采用的地基 GNSS TEC 观测数据源自东亚 /东南亚电离层不规则体与闪烁观测网 (IONISE)[27] 及国际 GNSS 服务 (IGS)[28], 接收机地理分布如图 1 所示. 红色圆点表示震中位置, 棕色方块表示 GNSS 地基接收机位置, 粉色星星表示 GNSS 卫星的位置, 蓝色虚线表示距离震中分别为 10°, 20°, 30°, 40°的位置处. 基于 30 s 时间分辨率的双频 GNSS 观测数据, 首先通过双频差分法分别计算伪距与载波相位 TEC; 随后, 结合周跳检测与修复算法, 利用相位 TEC 对伪距 TEC 进行平滑, 生成高精度的斜向 TEC(STEC) 弧段[29,30]. 依据电离层薄层模型, 将电离层穿刺点 (IPP) 高度设为 400 km, 将各观测弧段的 STEC 投影至对应的 IPP 位置. 为抑制多路径效应等观测误差, 数据处理中设定卫星截止仰角为 30°.

本次地震发生于日间时段, STEC 背景值较高且变化显著. 为有效提取地震激发的扰动信号, 首先采用滑动平均法拟合 STEC 时间序列的背景趋势. 研究同时采用地球静止轨道 (GEO) 与非 GEO 卫星的观测数据. 由于非 GEO 卫星相对于地面接收机的 IPP 移动速度约为 0.6 km·s^{-1}[5], 其运动将在 TEC 扰动信号中引入低频趋势成分. 因此, 去趋势处理不仅可剥离背景电离层变化, 还有助于消除由卫星运动引

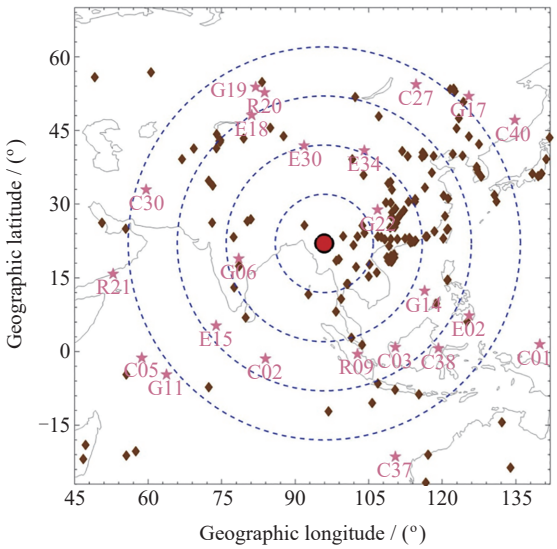


图 1 2025 年 3 月 28 日缅甸地震震中和所用 GNSS 地基接收机的地理位置以及地震前后接收机上空 GNSS 卫星地面投影位置

Fig. 1 Geographic distribution of the epicenter of the 28 March 2025 Myanmar earthquake, ground-based GNSS receivers used in this study, and the ground-projected positions of GNSS satellites above the receiver network before and after the earthquake

起的缓慢时变偏差. 将原始 STEC 序列减去拟合的背景趋势, 获得 TEC 扰动的时间序列; 随后采用四阶 Butterworth 带通滤波器提取周期为 2～6 min 的扰动成分, 如图 2 所示. 图 2(a) 中蓝点表示接收机 GXNN 与卫星 R21 之间的原始 STEC 观测值, 黑色实线为其滑动平均拟合的背景趋势. 可以看到, 原始序列中的同震 TEC 扰动特征难以辨识. 经过去趋势处理及带通滤波后, 图 2(b) 在 06:36 UTC 附近清晰呈现一个显著的扰动信号, 周期约为 5 min, 峰值幅值达 0.77 TECU, 竖直的红色虚线标记了地震的发生时间. 基于上述处理流程, 利用 2～6 min 周期带通滤波后的 TEC 扰动数据, 对同震电离层扰动 (CSID) 的时空特征进行系统分析.

2 结果与讨论

理论研究表明, 声波型 CSID 通常表现为 N 型波形: 初始为一个具有快速上升沿和缓慢衰减的超压半周期, 随后接续一个稀疏半周期[1,31]. 图 2(b) 给出了广西南宁站 (GXNN) 跟踪 GLONASS 卫星 R21 所观测的 STEC 扰动序列, 经 2～6 min 周期的四阶 Butterworth 带通滤波后呈现出清晰的 N 型特征, 主周期约为 5 min, 峰值幅值达 0.77 TECU. 需要说明的是, 实际观测中的 CSID 波形常因破裂过程、瑞利面波及传播路径等因素呈现复合特征, 而偏离理想模型[32].

在成功提取显著的 CSID 信号后, 对震后 1 h 内所有可用 TEC 弧段均实施相同的去趋势与 2～6 min 周期带通滤波处理. 结果表明, 绝大多数扰动集中出现在 06:30－06:40 UTC 时段, 其中 06:36－06:39 UTC 期间扰动幅值最为突出. 图 3 展示了该时段内 4 个时刻 (06:36 UTC, 06:37 UTC, 06:38 UTC, 06:39 UTC) 的 TEC 扰动沿方位角与震中距离的分布. 图中原点代表震中, 同心圆分别表示 1000, 2000, 3000 km 距离. 从图中可以看出, 扰动信号明显集中于震中东侧/东南侧, 对应方位角约 30° ～210°, 体现出东西向振幅的显著不对称性. 此外, 高振幅扰动主要局限于距震中 1000 km 以内的近场区域. 本事件中最强扰动出现在东侧方向, 幅值达 0.97 TECU; 相比之下, 西侧扰动普遍微弱, 幅值多为 0.02～0.05 TECU. 尽管 GNSS 台站整体分布存在东西差异, 但由于多系统卫星数量较多, 西侧仍获得了大量的有效穿刺点观测, 足以分辨该区域的扰动特征. 这些穿刺点普遍记录到 N 形扰动信号, 但是振幅较东侧显著偏低. 若方位不对称性主要由台站稀疏导

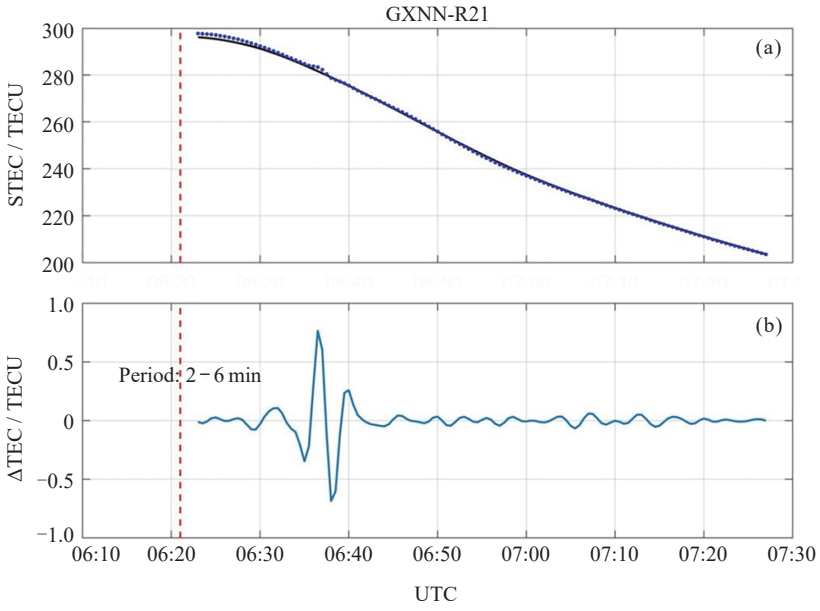


图 2 接收机 GXNN 与 R21 卫星之间的 STEC 扰动提取. (a) STEC 原始观测值与滑动平均背景趋势, (b) 2～6 min 带通滤波后的 TEC 扰动

Fig. 2 Extraction of STEC perturbations between receiver GXNN and satellite R21. (a) Original STEC observations and fitted background trend, (b) TEC perturbations after applying a 2-6 min band-pass filter

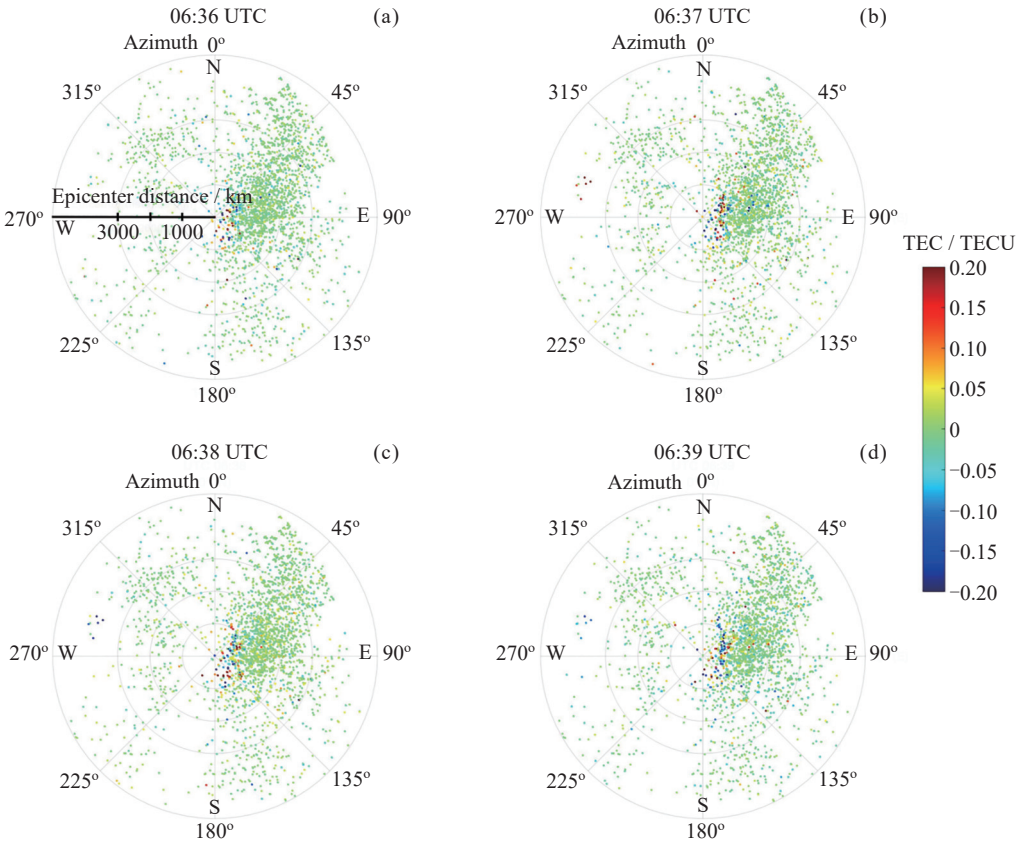


图 3　经 2～6 min 带通滤波得到的 TEC 扰动相对于地震震中的方位–距离分布.

Fig. 3　Azimuth-distance distribution of TEC perturbations after 2–6 minute period band-pass filtering relative to the earthquake epicenter

致, 则西侧应表现为信号缺失或噪声主导, 而非系统性低振幅扰动. 因此, 观测到的方位不对称性并非主要源于台站的空间分布不均.

已有研究表明, CSID 的振幅分布受多种因素综合影响, 包括震源参数 (如震级、破裂方向性) 以及非震源因素 (地磁场构型、观测视线方向 (LOS)、背景电离层状态等)[33,34]. 本研究观测到的 CSID 东西向振幅不对称性, 可能与 Xu 等[25] 报道的南向超剪切破裂方向性特征相关. 参考 Bagiya 等[35] 对 2023 年土耳其超剪切地震的分析, 超剪切破裂可激发马赫波, 在特定方向增强瑞利波辐射强度, 这为解释本事件东向–东南向扰动振幅增强提供了可能的物理解释. 受限于区域地壳 S 波速度结构数据的可获取性, 本研究未对马赫角进行定量计算, 采用典型地壳 S 波速度估算得到的马赫波前辐射方向为东南–西南方位, 与本研究观测到的 CSID 振幅分布特征具有部分一致性. 由于 GNSS TEC 为沿卫星–接收机路径的积分量, 其扰动振幅对方位角高度敏感. 当扰动波矢与 LOS 方向垂直时, 积分路径上相位变化累积最大, 扰动振幅达峰值; 当波矢与 LOS 平行时, 路径上波前相位相互抵消, 导致振幅降至最低, 从而产生方位依赖性[36,37]. 为检验观测到的东西不对称性是否源于真实的辐射不对称性, 而非 LOS 几何效应, 这里选取分布于震中不同方位的 G06, G19, R09 和 G22 四颗卫星观测数据. 无论卫星方位如何, CSID 信号在东侧或东南侧均表现出更大振幅, 如图 4 所示, 图 4 中粉色五角星表示卫星的位置. 图 4(a)～(c) 中, 最大扰动集中于方位角 45°～180°区间, 图 4(a) 中, G06 卫星观测到的正负半相分布呈现明显的东南向传播特征. 图 4(d) 中, G22 卫星虽然位于多数接收机近天顶位置 (LOS 几何导致的东西不对称效应较小), 但是其东侧扰动幅值仍略高于西侧. 因此, 观测到的强烈东西不对称性无法仅由 LOS-波矢几何关系解释, 而更可能源于震源辐射本身的方位非对称性.

此外, 地磁场对 CSID 在 F 区电离层的传播也具有显著的调制作用. Rolland 等[33] 的模拟结果表明,

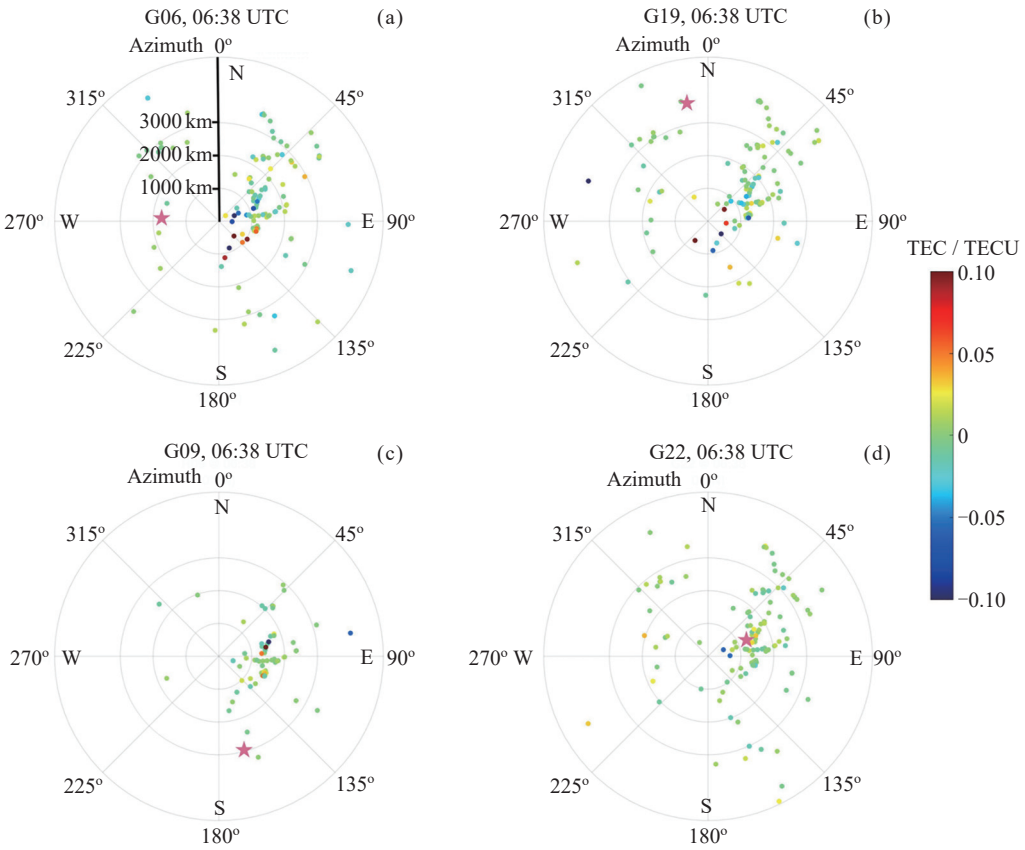


图 4 在 06:38 UTC 时刻 4 颗卫星观测的经 2～6 min 带通滤波的 TEC 扰动相对于地震震中的方位–距离分布. (a) G06, (b) G19, (c) R09, (d) G22

Fig. 4 Azimuth-distance distribution of 2-6 minute band-pass-filtered TEC perturbations observed by four satellites at 06:38 UTC. (a) G06, (b) G19, (c) R09, (d) G22

地磁场对 CSID 正、负半相的影响存在差异. 当扰动传播方向与磁力线夹角超过±10°时, 正半相开始衰减; 夹角大于±30°时, 衰减尤为显著. 在北半球震中以北区域 (极地方向), 通常仅能观测到被强烈削弱的负半相, 且扰动难以远传; 而在向赤道方向, 地磁场则对扰动传播起到引导或增强作用, 可使其传播更远并维持较大振幅. 本次缅甸地震震中位于北半球低纬度 (地理纬度 22°N), 接近磁赤道, 南北不对称性被抑制. 从图 3 与图 4 中可以观察到, 南侧扰动略强于北侧, 但是地磁场效应主要表现为南北调制, 无法解释东西向的不对称性. 因此, 本事件中观测到的强烈东西向振幅差异, 应主要归因于震源辐射模式的真实不对称性.

为进一步分析本次 CSID 的传播特性, 本研究基于 CSID 到达时间与震中距离, 估算了其在不同方位上的水平传播速度. 图 5 给出了 30°～60°, 60°～90°, 90°～120°, 120°～150°, 150°～180°和 180°～210° 6 个方位区间内的 CSID 走时图. 其余方位未检测到两个以上幅值超过 0.1 TECU 的显著扰动. 图 5 中红色竖直虚线表示地震发生时刻; 绿色参考线表示扰动传播速度, 其中绿色虚线自发震时刻起算, 绿色实线相对于其存在时间延迟; 蓝色短棒代表 0.5 TECU 的扰动幅值. 需要指出的是, 受限于 GNSS 台站分布, 无法获得跟踪同一卫星的连续观测. 因此, 本研究在各方位区间内汇集多条卫星链路得到的 CSID 信号, 推断传播速度. 图 5(a) 给出了在 30°～60°方位区间内识别出的 12 个显著 CSID 信号 (06:15－07:00 UTC), 最近的扰动距震中约 255 km(YNKM-C05), 最远的扰动距震中约 1205 km(GDGZ-C36). 据此估算, 水平传播速度为 3.4 km·s^{-1}, 由绿色实线标示; 该线相对于自发震时刻起算的绿色虚线存在约 12 min 的时间延迟. 类似地, 其余方位区间的速度与延迟分别为: 2.8 km·s^{-1}, 12 min (60°～90°); 2.1 km·s^{-1}, 12 min(90°～120°); 2.9 km·s^{-1}, 11 min(120°～150°);

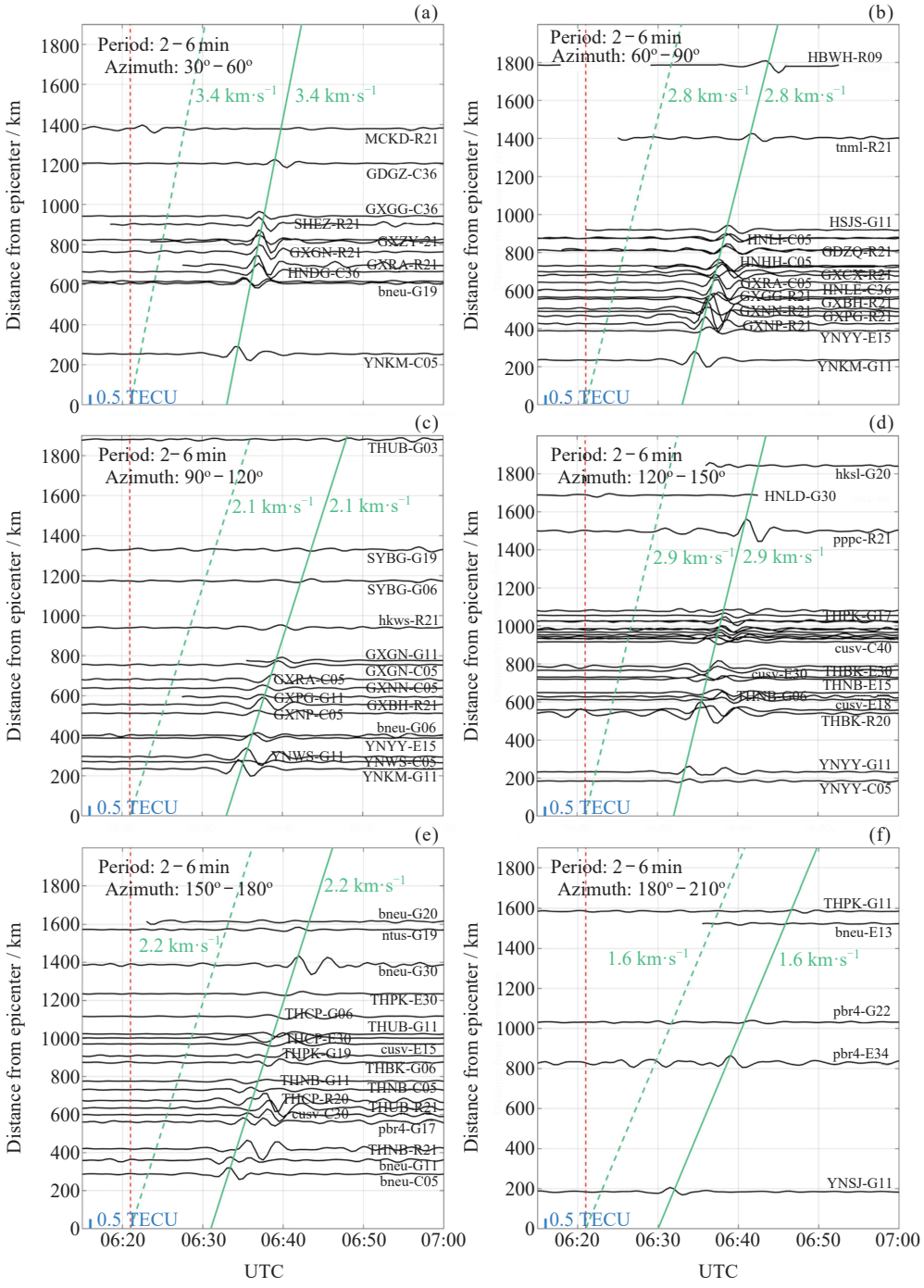


图 5　不同方位角区间下距离地震震中不同距离处的 2～6 min 周期带通滤波 TEC 扰动值

Fig. 5　Band-pass-filtered (2-6 min period) TEC perturbations as a function of distance from the earthquake epicenter, binned by azimuth ranges

2.2 km·s^{-1}, 10 min(150°～180°); 1.6 km·s^{-1}, 9 min (180°～210°). 结果表明, 扰动主要出现在距震中约 1400～1600 km 范围内, 60°～150°方位区间内的扰动幅值显著高于 30°～60°和 150°～210°区间. 综上, 本次事件中 CSID 在振幅与传播速度上均呈现明显的方位不对称性.

已有研究认为, CSID 可由两类机制激发. 一类是声波模态, 震中区域瞬时地壳位移直接激发的声波, 其水平传播速度为 0.6～1.0 km·s^{-1}, 约 8～9 min 到达电离层, 通常在震中附近 (近场区域) 被观测到[2,7,9];

另一类是瑞利波模态, 地表瑞利波传播过程中激发的大气声扰动, 其水平速度与瑞利波一致, 约为 3～4 km·s^{-1}, 扰动同样在 8～9 min 后到达电离层[2,10,11]. CSID 与瑞利波在速度和到达时间上的差异常被用来区分扰动的传播模态[2,6,10]. 在 2011 年日本 M9.0 地震中, 瑞利波模态 CSID 速度范围为 2.2～3.77 km·s^{-1}[8,22]; 2015 年尼泊尔 M7.9 廓尔喀地震相关的瑞利波模态速度为 2.0～2.74 km·s^{-1}[12]. 虽然本事件中的 CSID 显著峰值主要出现在距震中 1000 km 以内的近场区域, 但是观测到的 CSID 传播速度范围为 1.6～3.4 km·s^{-1}, 明显以瑞利波模态为主导. 各方位扰动峰值相对于发震时刻的时间延迟为 9～12 min, 略长于典型的 8～9 min 到达时间, 可能包含地表瑞利波从震源传播至扰动激发点所需的时间. 此外, 本次缅甸地震为走滑型事件, 其垂直地表位移较小, 直达声波本征信号较弱; 同时, 该地震发生大规模超剪切破裂[25], 必然激发强瑞利波. 加之所用 GNSS 站点密度有限, 可能难以有效分辨传播速度更慢、信号更弱的声学模态扰动.

瑞利波传播本身具有方向依赖性, 其速度受破裂几何与介质非均匀性影响. 根据地表地震台站反演, 本次缅甸地震不同方向的瑞利波速度为 2.9～4.2 km·s^{-1}, 最大值出现在南向. 本研究在电离层观测到的 CSID 速度与此基本一致, 存在轻微差异. 类似差异在多次强震中均有报道, 例如 2012 年 M7.8 海达瓜依地震、2018 年与 2020 年两次 M7.9 阿拉斯加地震以及 2020 年 M7.7 牙买加地震中, CSID 与地表瑞利波的速度差介于 0.3～2.0 km·s^{-1}[38–41]. 2023 年土耳其双震事件也呈现出类似特征: Vesnin 等[6] 报道 M7.5 主震的 CSID 速度约为 2.0 km·s^{-1}; Haralambous 等[42] 发现其速度随方位在 2.623～2.878 km·s^{-1} 范围内变化, 而地表瑞利波速度为 2.998 km·s^{-1}; Salikhov 等[43] 则利用多普勒探测在 M7.8 余震中测得 CSID 速度约为 3.7 km·s^{-1}. 此类差异可能源于卫星观测几何构型、瑞利波频散效应及电离层积分路径的综合影响[38]. 值得注意的是, 图 5 中包含多颗 GEO 卫星的观测结果, 其穿刺点静止, 不受非 GEO 卫星 0.6 km·s^{-1} 穿刺点移动所引入的类多普勒效应干扰; 而 GEO 与非 GEO 卫星的 CSID 峰值均落在相近的参考线附近, 表明速度估算未受到显著的系统偏差影响.

CSID 传播速度的方位不对称性可归因于多种因素, 包括大气背景状态的非均匀性、沿地磁场线的能量传输优势以及瑞利波辐射模式本身的不对称性. 例如, 2012 年印度洋地震与 2023 年土耳其地震均有报道电离层扰动振幅的不对称性源于瑞利波辐射方向性[5,44]. 瑞利波辐射的非对称性通常反映断层破裂过程的复杂性. 在本次缅甸地震中, 破裂初期 (前 25 s) 呈南北双向扩展, 随后转为以超剪切速度向南单向传播[25]. 超剪切破裂理论上可激发马赫波, 在特定方向上显著增强瑞利波振幅, 进而导致电离层扰动呈现方位依赖性[45]. 本文观测到的 CSID 方位不对称性与超剪切破裂引发的瑞利波辐射非对称性预期特征较为一致, 表明地表破裂的方向性特征可能通过瑞利波模态传递至电离层扰动.

3 结论

基于 IONISE 与 IGS 地基 GNSS 观测网络的高时空分辨率 TEC 数据, 系统分析了 2025 年 3 月 28 日缅甸 Mw7.7 走滑型地震所激发的同震电离层扰动 (CSID) 特征. 通过滑动平均去趋势与 2～6 min 周期四阶 Butterworth 带通滤波, 成功提取出清晰的 N 型 CSID 信号, 其主周期约为 5 min, 最大扰动幅值达 0.97 TECU, 集中出现在震后 06:36－06:39 UTC 时段. CSID 分布呈现显著的方位不对称性: 高振幅信号主要集中于震中东侧 (方位角 30°～225°), 且多局限于 1000 km 以内的近场区域. 多颗卫星的观测结果表明, 该东西向振幅不对称性无法由 GNSS 视线方向 (LOS) 几何或地磁场南北调制效应完全解释, 而更可能源于震源辐射的真实非对称性. 不同方位区间的 CSID 水平传播速度范围为 1.6～3.4 km·s^{-1}, 明显以瑞利波模态为主导, 时间延迟 (9～12 min) 与地表瑞利波传播至扰动激发点所需时间一致. 结合该地震破裂过程, 观测到的 CSID 方位不对称性可能反映破裂方向性对瑞利波辐射的调制作用. 超剪切破裂激发的马赫波在特定方向增强瑞利波能量, 为本事件中东–东南方向电离层扰动更为显著这一现象提供了可能的物理解释.

研究揭示了走滑型超剪切地震所激发的 CSID 特征, 证实了电离层扰动能有效记录地表破裂的方向性与动力学特征. 上述结果进一步表明, GNSS

TEC 观测可作为反演瑞利波辐射模式及震源复杂性的有效手段, 为地震–大气–电离层跨圈层耦合研究提供关键观测依据.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] ZEL'DOVICH Y B, RAIZER Y P. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena [M]. Mineola: Dover Publications, 2002

[2] ASTAFYEVA E. Ionospheric detection of natural hazards[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(4): 1265-1288

[3] HUANG C Y, HELMBOLDT J F, PARK J, *et al*. Ionospheric detection of explosive events[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(1): 78-105

[4] HINES C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1960, **38**(11): 1441-1481

[5] RAO H, CHEN C H, MENG G J, *et al*. Relationship between TEC perturbations and Rayleigh waves associated with 2023 Turkey earthquake doublet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033267

[6] VESNIN A, YASYUKEVICH Y, PEREVALOVA N, *et al*. Ionospheric response to the 6 February 2023 Turkey–Syria earthquake[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(9): 2336

[7] INCHIN P A, SNIVELY J B, KANEKO Y, *et al*. Inferring the evolution of a large earthquake from its acoustic impacts on the ionosphere[J]. *AGU Advances*, 2021, **2**(2): e2020AV000260

[8] HAO Y Q, LI Q H, GUO J G, *et al*. Imaging of the large-scale ionospheric disturbances induced by seismic waves using GPS network in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(11): 3925-3932 (郝永强, 李泉翰, 郭建广, 等. 利用中国 GPS 站网对地震波引发的大尺度电离层扰动的观测 [J]. 地球物理学报, 2021, **64**(11): 3925-3932)

[9] LI J D, RUDE C M, PANKRATIUS V. Characterizing the complex two N- wave ionospheric signature of the 2016 Kaikoura earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(12): 10358-10367

[10] ASTAFYEVA E, HEKI K, KIRYUSHKIN V, *et al*. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(A10): A10307

[11] ZHAO B Q, HAO Y Q. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: a revisit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 5758-5777

[12] INCHIN P A, SNIVELY J B, ZETTERGREN M D, *et al*. Modeling of ionospheric responses to atmospheric acoustic and gravity waves driven by the 2015 Nepal M_w 7.8 Gorkha earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2019JA027200

[13] DAVIES K, BAKER D M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, **70**(9): 2251-2253

[14] LEONARD R S, BARNES JR R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, **70**(5): 1250-1253

[15] ARTRU J, FARGES T, LOGNONNÉ P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modelling[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, **158**(3): 1067-1077

[16] CHUM J, LIU J Y, LAŠTOVIČKA J, *et al*. Ionospheric signatures of the April 25, 2015 Nepal earthquake and the relative role of compression and advection for Doppler sounding of infrasound in the ionosphere[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**(1): 24

[17] MARUYAMA T, SHINAGAWA H. Infrasonic sounds excited by seismic waves of the 2011 Tohoku-oki earthquake as visualized in ionograms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(5): 4094-4108

[18] MARUYAMA T, SHINAGAWA H, YUSUPOV K, *et al*. Sensitivity of ionosonde detection of atmospheric disturbances induced by seismic Rayleigh waves at different latitudes[J]. *Earth, Planets and Space*, 2017, **69**(1): 20

[19] BAGIYA M S, SUNIL P S, SUNIL A S, *et al*. Coseismic contortion and coupled nocturnal ionospheric perturbations during 2016 Kaikoura, M_w 7.8 New Zealand earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(2): 1477-1487

[20] HEKI K, PING J. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **236**(3/4): 845-855

[21] LIU H T, ZHANG K K, IMTIAZ N, *et al*. Relating far-field coseismic ionospheric disturbances to geological structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(7): e2021JA029209

[22] LIU J Y, CHEN C H, LIN C H, *et al*. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 *M*9.0 Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A6): A06319

[23] CALAIS E, MINSTER J B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(9): 1045-1048

[24] PEREVALOVA N P, SANKOV V A, ASTAFYEVA E I, *et al*. Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, **108**: 77-90

[25] XU X W, KANG W J, WANG T, *et al*. The M_w7.7 Myan-

mar earthquake: a continental longest surface-rupturing supershear cascading event[J]. *npj Natural Hazards*, 2025, **2**(1): 73

[26] United State Geological Survey. *M* 7.7 - 2025 Mandalay, Burma (Myanmar) earthquake: finite fault[EB/OL]. (2025-03-28)[2025-12-20]. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000pn9s/finite-fault

[27] SUN W J, WU B Y, WU Z, *et al*. IONISE: an ionospheric observational network for irregularity and scintillation in East and Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA028055

[28] BEUTLER G, ROTHACHER M, SCHAER S, *et al*. The International GPS Service (IGS): an interdisciplinary service in support of Earth sciences[J]. *Advances in Space Research*, 1999, **23**(4): 631-653

[29] YANG Y Y, LIU L B, ZHAO X K, *et al*. Ionospheric nighttime enhancements at low latitudes challenge performance of the global ionospheric maps[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(5): 1088

[30] YANG Y Y, SUN W J, LI W, *et al*. Special ionospheric structure over the Asia-Australia sector during the May 2024 superstorm recovery phase[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2025JA033822

[31] NAUGOLNYKH K, OSTROVSKY L. Nonlinear Wave Processes in Acoustics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998

[32] HEKI K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(14): L14303

[33] ROLLAND L M, VERGNOLLE M, NOCQUET J M, *et al*. Discriminating the tectonic and non-tectonic contributions in the ionospheric signature of the 2011, M_w7.1, dip-slip Van earthquake, Eastern Turkey[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(11): 2518-2522

[34] CAHYADI M N, HEKI K. Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: M_w dependence of the disturbance amplitudes[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, **200**(1): 116-129

[35] BAGIYA M S, HEKI K, GAHALAUT V K. Anisotropy of the near-field coseismic ionospheric perturbation amplitudes reflecting the source process: the 2023 February Turkey earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(14): e2023GL103931

[36] BAGIYA M S, SUNIL A S, SUNIL P S, *et al*. Efficiency of coseismic ionospheric perturbations in identifying crustal deformation pattern: case study based on M_w 7.3 May Nepal 2015 earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(6): 6849-6857

[37] MALETCKII B, ASTAFYEVA E, SANCHEZ S A, *et al*. The 6 February 2023 Türkiye earthquake sequence as detected in the ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(9): e2023JA031663

[38] JIN S G, JIN R, LI D. GPS detection of ionospheric Rayleigh wave and its source following the 2012 Haida Gwaii earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(1): 1360-1372

[39] CHAI Y, JIN S G. Two-azimuth co-seismic ionospheric disturbances following the 2020 Jamaica earthquake from GPS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(9): e2020JA028995

[40] LIU Y H, JIN S G. Ionospheric Rayleigh wave disturbances following the 2018 Alaska earthquake from GPS observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(8): 901

[41] LUO Yiyong, WU Dawei, CHEN Qiang, *et al*. Analysis of coseismic ionospheric disturbance of Alaska *M*7.8 earthquake on July 22, 2020[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, **67**(1): 34-49 (罗亦泳, 吴大卫, 陈强, 等. 2020 年 7 月 22 日阿拉斯加 7.8 级地震同震电离层扰动分析 [J]. 地球物理学报, 2024, **67**(1): 34-49)

[42] HARALAMBOUS H, GUERRA M, CHUM J, *et al*. Multi-instrument observations of various ionospheric disturbances caused by the 6 February 2023 Turkey earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(12): e2023JA031691

[43] SALIKHOV N, SHEPETOV A, PAK G, *et al*. Investigation of the pre- and co-seismic ionospheric effects from the 6 February 2023 *M*7.8 Turkey earthquake by a Doppler ionosonde[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(10): 1483

[44] CATHERINE J K, VIJAYAN M S M, SYEDA RABIYA U B, *et al*. Dichotomy in mode propagation of coseismic ionospheric disturbance: observations from 11 April 2012 Indian ocean earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(5): 3854-3867

[45] BAGIYA M S, PAUL H, RAJEWAR S K, *et al*. Strong Rayleigh wave radiation toward southwest from ionospheric observations of the Elbistan earthquake of the 2023 Kahramanmaras, Türkiye, Doublet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(6): e2024GL112923

作者简介



韩芸蔓 女, 2006 年 7 月出生于江苏省宿迁市, 现为南京信息工程大学大气物理学院 2024 级本科生, 主要研究方向为电离层物理.

E-mail: 3505725130@qq.com



杨雨嫣（通信作者） 女, 1996 年 11 月出生于山东省临沂市, 现为南京信息工程大学讲师, 主要研究方向为电离层与高层大气物理.

E-mail: yangyuyan@nuist.edu.cn