



基于GNSS的2023年8月德州平原县5.5级地震异常环境响应分析

王旭科, 陈良周, 姚伟

Analysis of anomalous environmental responses to the 5.5 earthquake in Pingyuan County, Dezhou in August 2023 based on GNSS

WANG Xuke, CHEN Liangzhou, and YAO Wei

引用本文:

王旭科, 陈良周, 姚伟. 基于GNSS的2023年8月德州平原县5.5级地震异常环境响应分析[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(2): 76–81. DOI: [10.12265/j.gnss.2023219](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023219)

WANG Xuke, CHEN Liangzhou, YAO Wei. Analysis of anomalous environmental responses to the 5.5 earthquake in Pingyuan County, Dezhou in August 2023 based on GNSS[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(2): 76–81. DOI: [10.12265/j.gnss.2023219](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023219)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于小波变换的地震前后GNSS ZTD异常变化分析](#)

Abnormal change of GNSS ZTD before and after earthquake based on wavelet transform
全球定位系统. 2019, 44(3): 62–68

[利用GNSS掩星数据分析ENSO期间](#)

Analysis of Atmospheric Pressure Changes During ENSO Using GNSS Occultation Data
全球定位系统. 2018, 43(5): 58–60

[基于GNSS观测的地下核试验电离层扰动研究](#)

GNSS Observation Based Study of Ionospheric Disturbance Induced by Underground Nuclear Explosion
全球定位系统. 2017, 42(4): 32–37

[小区域GNSS高程异常拟合方法研究](#)

Research on the county area scale fitting methods for GNSS height anomaly
全球定位系统. 2020, 45(5): 34–39

[基于GPS时间序列分析的地震前后噪声特性差异性研究](#)

Research on the difference of noise characteristics before and after earthquake based on GPS time series analysis
全球定位系统. 2021, 46(2): 56–61, 92

[Locata定位系统的时间同步机制](#)

Time Synchronization Mechanism for Locata Positioning System
全球定位系统. 2018, 43(2): 54–59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2023219

基于 GNSS 的 2023 年 8 月德州平原县 5.5 级地震 异常环境响应分析

王旭科^{1,2}, 陈良周³, 姚伟⁴

(1. 兰州资源环境职业技术大学测绘与地理信息学院, 兰州 730021; 2. 兰州资源环境职业技术大学黄河流域生态环境产教融合研究院, 兰州 730021; 3. 浙江省测绘科学技术研究院, 杭州 311122; 4. 龙口市住房和城乡建设管理局, 山东 烟台 265701)

摘要: 为了探测 2023 年 8 月 6 日山东德州平原县 5.5 级地震引起的异常环境响应, 本文基于震中东北方向约 26 km 的 GNSS 观测数据, 提出滑动时变频率方法并引入四分位距 (interquartile range, IQR) 法对地震引发的异常环境响应进行分析. 结果显示, 地震发生后 N 和 E 方向坐标速度时间序列在 9~10 s 处出现显著异常, 垂向在 16 s 时出现轻微异常. 滑动时变频率方法能够在速度时间序列异常跳变发生前 5~10 s 探测到明显变化, 显示了更高的灵敏度. 研究还发现, 在地震发生前一天, 电离层在震中上空出现了异常扰动, 异常值达到 4 TECU. 研究表明: GNSS 技术能有效探测地震过程中的异常环境响应, 为地震监测与预警提供了新的视角和工具.

关键词: 全球导航卫星系统 (GNSS); 滑动时变频率; 地震异常; 四分位距 (IQR) 法

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2024)02-0076-06

0 引言

地震作为一种突发性、具有破坏力的自然灾害, 其预警与监测一直是地球科学研究的重点和难点^[1-2]. 传统的地震监测技术, 如地震波分析、地质调查等, 虽然在地震研究领域发挥了重要作用^[3], 但在预警方面存在一定局限性. 近年来, GNSS 技术在地震监测领域展现出了独特的优势^[4-6], 特别是在捕捉地震前的异常环境变化方面^[7]. 这项技术通过监测大气、电离层和地表的细微变化, 为地震预测提供了新的思路和方法. 当今地震研究领域, GNSS 的应用已经成为一项关键技术^[8-10]. 张一彬等^[11]研究 2019 年 5 月 26 日秘鲁北部 Mw8.0 地震发现, 震前 3 天内出现了电离层赤道异常消失、电子含量显著减少 (高达 10 TECU) 以及特定时段内沿纬度分布的双峰曲线特征消失和震中附近低谷现象. 翟笃林等^[12]基于 2008 至 2019 年中国区域 7 个 MS \geq 6.0 地震的地基 GPS 电离层电子总含量 (total electronic content, TEC) 观测数据分析, 研究发现地震前 2~6 天电离层 TEC 出现

负异常扰动, 震时及震后 2~7 天内出现正异常扰动, 异常扰动与震中距离和震级相关. GNSS 技术不仅用于监测地震引起的电离层扰动, 还能检测到海啸引起的电离层变化^[13-14], 其高采样率观测提供了高频速度信息^[15]. 文献^[16]也综合考察了太阳活动、对流层效应以及地震和海啸活动对电离层的综合影响. 然而, 如何从大量的 GNSS 观测数据中准确提取地震信号, 以及如何利用这些数据进行有效的地震分析和预警, 仍然是一个极具挑战性的问题^[4,17].

本文以 2023 年德州平原县地震为背景, 提出滑动时变频率方法对三维坐标速度时间序列进行分析, 引入四分位距 (interquartile range, IQR) 法对三维坐标速度时间序列和震中上空电子含量时间序列进行分析, 旨在深入探讨基于 GNSS 观测站数据探测地震引起的异常环境响应.

1 数据和方法

1.1 研究区域和数据

2023 年 8 月 6 日 2 时 33 分 59 秒, 在山东省德

收稿日期: 2023-12-01

资助项目: 中共甘肃省委组织部省级重点人才项目 (2023RCXM35); 甘肃省高校教师创新基金项目 (2023B-296); 甘肃省职业教育教学改革研究项目 (2023gszyjy-013); 全国煤炭行业职业教育研究课题 (ZMZC2022018); 兰州资源环境职业技术大学校级科研项目 (X2022C-03)

通信作者: 王旭科 E-mail: wxkgeo@lzre.edu.cn

州市平原县 (37.16°N, 116.34°E) 发生 5.5 级地震, 震源深度 10 km, 多地震感明显。

GNSS 观测站为架设在混凝土房顶的临时 GNSS 观测站, 完整记录了地震期间的数据, 数据采样率为 1 s, 截止高度角为 10°。如图 1 所示, GNSS 观测站的位置为 37.26°N、116.61°E, 在震中的东北方向, 距震中的地面距离约 25.6 km, 距离震源约为 28 km。

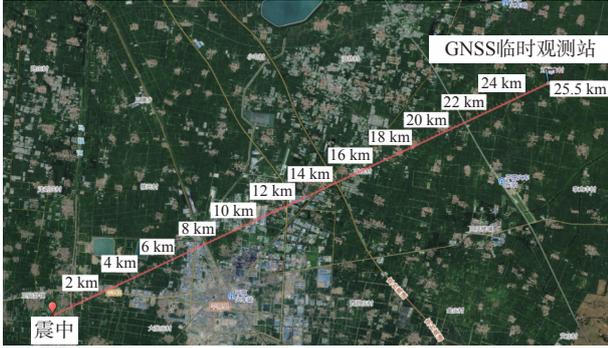


图 1 震中及临时 GNSS 观测站位置

电离层数据来自欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 提供的全球电离层格网 (global ionospheric map, GIM) 资料 (数据网址: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub>), 其中包含格网点上的 TEC。数据时段为 2023 年 7 月 6 日至 2023 年 8 月 13 日。GIM 数据的时间分辨率为 2 h, 空间分辨率为 5°×2.5°。

为排除太阳活动对电离层的异常扰动, 本文对中科院空间中心提供的 2023 年 7 月 6 日至 2023 年 8 月 13 日的太阳射电通量 $F_{10.7}$ 、太阳黑子数 (sunspot number, SSN) 及地磁指数 A_p (数据网址: <http://www.sepc.ac.cn>) 进行分析。

1.2 研究方法

1) IQR 法

当使用 IQR 法^[18]来处理数据时, 首先需要计算数据集的上下四分之一位数 (Q_1 和 Q_3)。这两个值可以帮助我们了解数据的分布情况, 特别是在处理异常值和离群点时非常有效。

以下是计算 IQR 法的具体步骤:

步骤 1: 将数据集按照从小到大的顺序排列。

步骤 2: 计算第一四分位数 (Q_1)。 Q_1 是中位数与最小值之间的中位数, 表示了前 25% 的数据的位置。如果数据集的大小为奇数, Q_1 即为中位数左侧一半数据的中位数; 如果数据集的大小为偶数, Q_1 即为中位数左侧一半数据的中位数。

步骤 3: 计算第三四分位数 (Q_3)。 Q_3 是中位数与最大值之间的中位数, 表示了前 75% 的数据的位置。同样, 如果数据集的大小为奇数, Q_3 即为中位数右侧

一半数据的中位数; 如果数据集的大小为偶数, Q_3 即为中位数右侧一半数据的中位数。

步骤 4: 计算 IQR。 IQR 是 Q_3 与 Q_1 的差值, 它表示了数据集的中间 50% 范围内的变异程度。数学公式为

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

步骤 5: 检测异常值。在 IQR 法中, 通常将小于 $Q_1 - 1.5 * IQR$ 或大于 $Q_3 + 1.5 * IQR$ 的数据点视为异常值或离群点。

2) 频谱分析方法

本文使用的频谱分析方法为快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), FFT 能高效地将时域中的信号转换为频域, 揭示其构成频率的复合结构, 在信号处理、图像处理、通信等领域中有广泛的应用。以下是 FFT 的具体步骤和公式描述。

步骤 1: 获取离散信号。FFT 适用于离散信号, 因此首先需要获得一个离散的时域信号, 表示为 $x[n]$, 其中 n 表示离散时间点。

步骤 2: 计算复数指数项。FFT 利用复数的旋转特性, 计算复数指数项 W_N^{kn} , 其中 N 表示信号长度, k 表示频率索引, n 表示时间索引。复数指数项的数学表达式为

$$W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2)$$

步骤 3: 执行蝶形运算。FFT 算法通过蝶形运算将时域信号分解为不同频率分量。蝶形运算是一种迭代计算, 它将信号分为两部分, 然后进行乘法和加法运算。这个步骤的关键是利用了复数指数项的周期性和对称性。

步骤 4: 重排结果。在进行蝶形运算后, 需要将计算得到的频域分量按照频率顺序重新排列, 以获得正确的频谱表示。

步骤 5: 重复步骤 3~4。FFT 算法会递归地执行蝶形运算和频谱重排, 直到得到所有频率分量的幅度和相位信息。

步骤 6: 计算频谱。最终, 通过 FFT 算法得到的频率分量的幅度和相位信息构成了信号的频谱表示。频率分量的幅度表示了不同频率在信号中的强度, 而相位表示了信号在不同频率上的相对偏移。

FFT 的离散形式可以用以下公式表示, 其中 $X[k]$ 表示频域信号在频率索引 k 处的分量值

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{kn} \quad (3)$$

2 结果与分析

为了使用 GNSS 技术探测 2023 年德州平原县 5.5 级地震导致的异常, 我们参考震中与 GNSS 观测站的距离, 截取了地震发生时前 20 s 和后 80 s 的时间序列速度数据, 使用 IQR 法和滑动时变频率方法进行分析, 探测地震发生前后的异常环境响应。

2.1 IQR 法探测速度时间序列异常值

对原始坐标时间序列进行一阶导数求解, 得到测站 3 个方向的运动速度, 采用 IQR 法对速度进行分析, 探测异常跳变。结果图 2~4 所示。

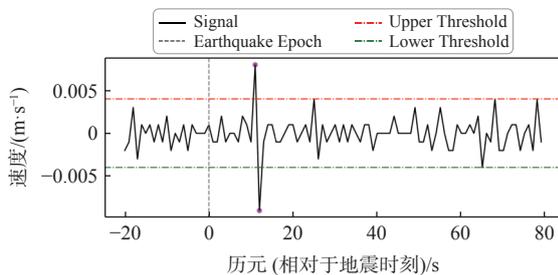


图 2 N 方向速度时间序列异常探测

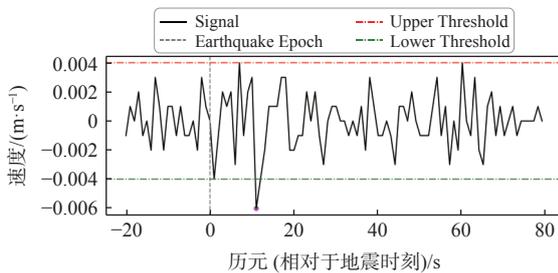
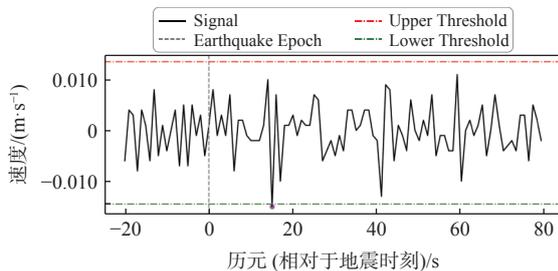


图 3 E 方向速度时间序列异常探测



注: 图中红点为异常跳变值。

图 4 U 方向速度时间序列异常探测

从图 2 的数据分析来看, 在地震发生后的第 9 s 和第 10 s, 观察到了 N 方向速度时间序列的显著异常。这一时段内的速度超过了 5.6 mm/s 的阈值, 约为正常速度的两倍。与此同时, 震后速度时间序列的振动频率也出现了显著变化。在地震发生后的第 10 s 之后, 速度时间序列逐渐回归到了稳定状态。

根据图 3 的结果, E 方向的速度时间序列在地震后

的第 10 s 显示出了显著的异常。异常值超出了 2.2 mm/s 的阈值下限。同时, 震后速度时间序列的震动频率经历了显著的变化。

由图 4 可知, U 方向速度时间序列在震后 16 s 时探测到异常, 但异常值较小。在地震发生后, U 方向速度时间序列可以观察到明显的震动频率变化。

2.2 速度时间序列频率变化研究

在第 2.1 节中发现震后的速度时间序列变化频率出现了明显的变化, 因此, 本文提出滑动时变频率方法对三个方向的速度时间序列进行分析, 每 10 个历元为 1 组, 每 1 个历元为步长向后滑动, 分析速度时间序列的频率随时间的变化, 结果如图 5~7 所示。

由图 5 可得, 从频率变化角度分析, N 方向速度时间序列从第 5~6 s 开始出现明显变化, 较速度时间序列的异常跳变提前 5 s 左右被探测到。到第 14~15 s 左右逐渐恢复正常。上述现象与图 2 中的结果基本吻合。

由图 6 可得, 在地震发生时, E 方向速度时间序列便可观察到明显的频率变化, 比速度时间序列的异常跳变值提前出现 10 s 左右。在第 18 s 左右逐渐恢复正常。在第 68 s 左右又出现短暂的频率异常现象。上述现象与图 3 中的结果基本吻合。

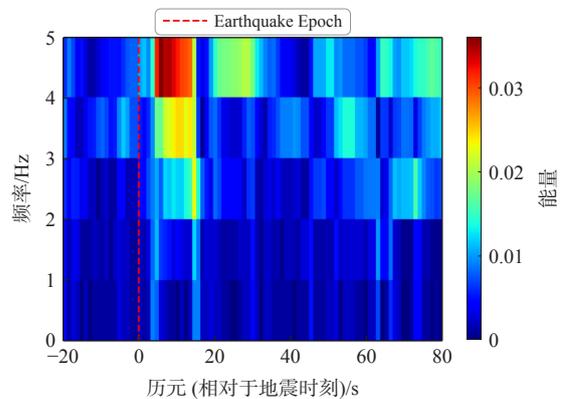


图 5 N 方向速度时间序列频率变化

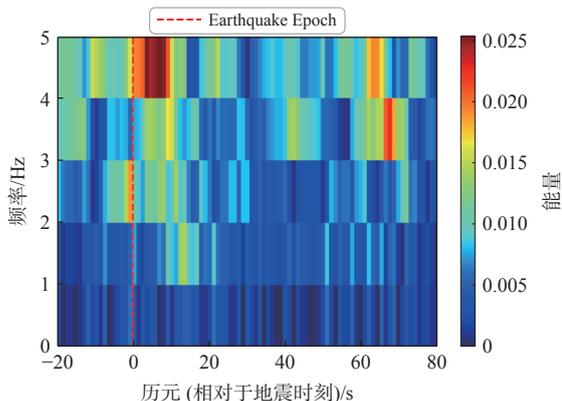


图 6 E 方向速度时间序列频率变化

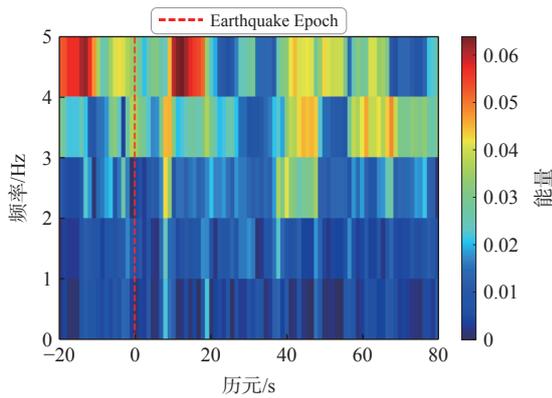


图 7 U 方向速度时间序列频率变化

由图 7 可知,在地震发生后第 6 s 左右,U 方向速度时间序列的变化频率出现明显变化,比速度时间序列的跳变值提前出现 10 s 左右.而速度时间序列的异常跳变并不明显.

综上所述,从速度时间序列的变化频率上可以更加提前地观察地震引起的速度异常变化,且异常现象非常明显.

2.3 电离层异常探测

从 CODE 提供的 GIM 资料中提取出距离震中最近的 GNSS TEC 值,利用双线性内插得到震中处的 TEC 值.利用滑动四分位距法,以 30 天同一时刻的观测值为背景值,1.5 倍 IQR 为限差,对汤加火山爆发中心位置前 30 天的电离层异常进行探测.探测结果如图 8 所示.

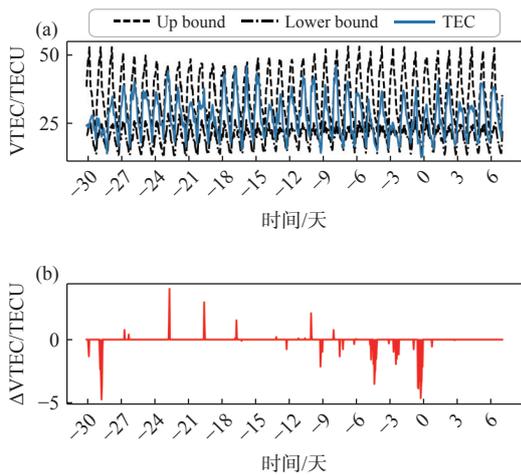


图 8 TEC 异常探测结果

由图 8(a)可知,在地震前的第 26 天左右、第 16 天左右以及第 11 天左右出现 TEC 的高峰值,在

地震前第 28 天左右、第 9 天左右以及第 1 天左右出现了 TEC 低谷值.

由图 8(b)可知,在地震前的第 23 天、第 19 天、第 16 天、第 10 天均出现明显的 TEC 正异常,异常值最高达 4 TECU.地震前的第 28 天、第 9 天、第 4 天及第 1 天,出现了明显的负 TEC 异常,异常最大可达 5 TECU.地震发生后,基本没有 TEC 异常现象出现.

然后,利用 IQR 法分析了地震前 30 天的太阳射电通量 $F_{10.7}$ 、地磁 A_p 指数和太阳黑子数 SSN 的异常信息,以排除太阳活动和地磁活动引起的 TEC 异常.分析结果如图 9 所示.

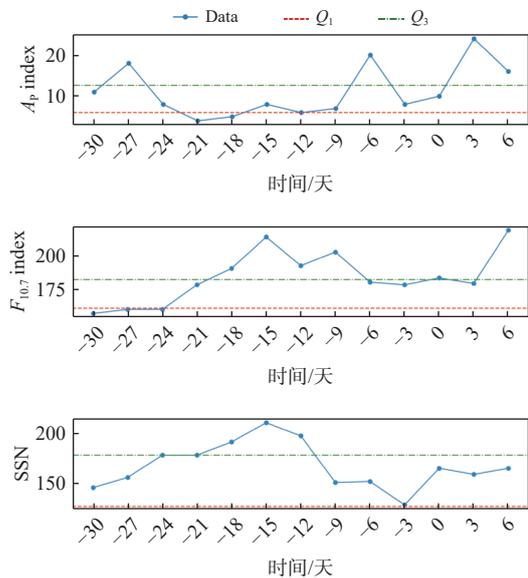
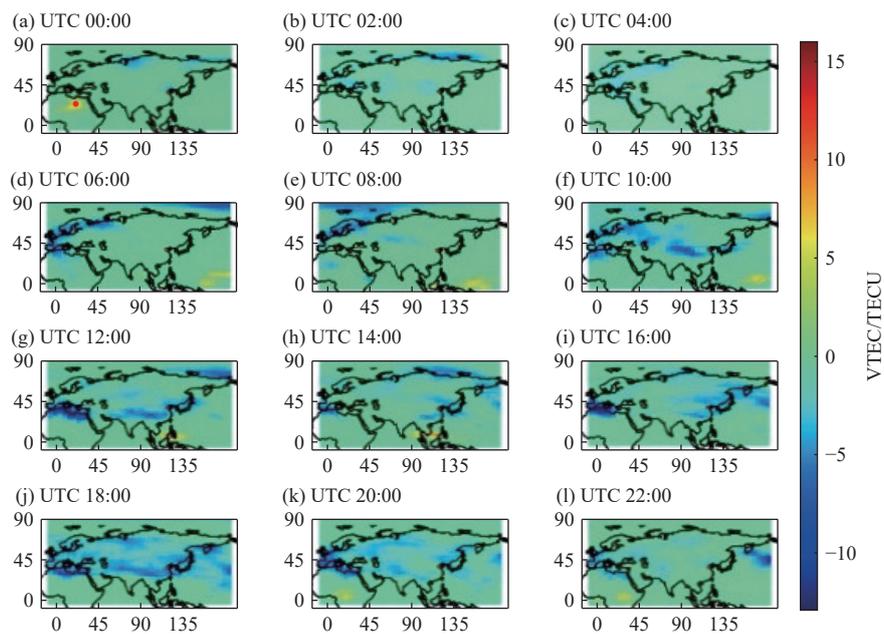


图 9 太阳活动及地磁活动引起的 TEC 异常探测

由图 9 可知, A_p 指数在地震前第 26~28 天和第 4~8 天有明显的正异常,在震前第 18~22 天有明显的负异常; $F_{10.7}$ 在震前第 24~30 天有明显的负异常,在震前第 6~19 天出现明显的正异常; SSN 的变化趋势与 $F_{10.7}$ 的变化趋势相似,在震前第 11~21 天出现明显的正异常现象,通过与 TEC 时间序列进行对比,发现震前 0~4 天太阳活动和地磁活动都未出现明显异常,而 TEC 出现了明显的负异常,因此,我们认为震前 0~4 天的 TEC 异常可能与此次地震有关.

根据震中处 TEC 异常扰动探测的结果,震前 0~4 天的 TEC 异常扰动尤为明显,因此我们对震前第 1 天的亚洲及周边区域 TEC 异常分布进行研究,结果如图 10 所示.



注: 红点位置为地震中心位置。

图 10 震前 1 天亚洲及周边的 TEC 异常探测结果

由图 10 可得, 震前 1 天的 0~8 h 亚洲及周边区域的电离层没有出现特别明显的电离层异常现象, 从震前 1 天的 10 h 开始, 出现了较为明显的电离层异常现象, 震前 10~16 h, 震中同纬度上出现了明显的电离层负异常现象, 震前 12 h 在 30°N~60°N 出现了大范围的负异常现象, 从震前 12 h 开始, 电离层异常范围逐渐缩小。

3 结束语

本文提出滑动时变频率方法对三维坐标速度时间序列进行分析, 引入 IQR 法对三维坐标时间序列、三维坐标速度时间序列和震中上空电子含量时间序列进行分析, 得出如下结论:

1) 在地震发生后的第 9 s、10 s 左右, N 和 E 方向坐标速度时间序列可见明显异常, 最大异常超过正常值的 50%, U 方向速度时间序列在震后 16 s 时探测到轻微异常。

2) 利用滑动时变频率方法对速度时间序列进行分析, N、E、U 三个方向分别可以提前 5 s、6 s、10 s 左右探测到地震引起的速度时间序列异常。

3) 从时间维度分析, 在地震的前 1 天, 地震引起震中上空的电离层出现明显的异常扰动, 异常值为 4 TECU。从空间维度分析, 从震前 1 天的 10 h 开始, 出现了较为明显的电离层负异常现象, 震前 12 h 电离层负异常的范围达到最大, 从震前 12 h 开始, 电离层异常范围逐渐缩小。

参考文献

- [1] 杨剑, 张宇, 胡良晨, 等. 2017 年九寨沟 M7.0 地震前临震电离层异常研究 [J]. 地震, 2022, 42(4): 100-110.
- [2] 蔡华, 李子申, 王敏, 等. 汶川 Mw7.9 与日本 Mw9.0 地震同震电离层扰动研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2013, 38(6): 716-719, 724.
- [3] 张怀, 聂兆生, 刘刚, 等. 高频 BDS/GPS 融合 PPP 确定 2021 年玛多 M_W7.4 地震三要素 [J]. 地震研究, 2023, 46(2): 216-225.
- [4] BESHAR A, ZARZOURA F. Using artificial neural networks for GNSS observations analysis and displacement prediction of suspension highway bridge[J]. *Innovative infrastructure solutions*, 2021, 6(1): 1-15. DOI: 10.1007/s41062-021-00458-4
- [5] TU R, ZHANG R, ZHANG P, et al. Integration of single-frequency GNSS and strong-motion observations for real-time earthquake monitoring[J]. *Remote sensing*, 2018, 10(6): 886. DOI: 10.3390/rs10060886
- [6] WANG J, JIANG W, LI Z, et al. A new multi-scale sliding window LSTM framework (MSSW-LSTM): a case study for GNSS time-series prediction[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(16): 3328. DOI: 10.3390/rs13163328
- [7] 王玉, 祝芙蓉. 基于 GPS TEC 的尼泊尔 M_W7.8 地震同震电离层扰动研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(9): 957-961, 969.
- [8] GAO Z, LI Y, SHAN X, et al. Earthquake magnitude estimation from high-rate GNSS data: a case study of the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(21): 4478. DOI: 10.3390/rs13214478
- [9] 姚宜斌, 翟长治, 孔建, 等. 2015 年尼泊尔地震的震前电离层异常探测 [J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 385-395.
- [10] 姜卫平, 许才军, 李志伟, 等. 利用空间观测技术研究青海玛多 7.4 级地震孕育发生变形时空特征 [J]. 地球物理学报, 2021, 44(1): 1-10.

- 2022, 65(2): 495-508.
- [11] 张一彬, 钟慧鑫, 张亭, 等. 2019-05-26 秘鲁北部地震前低纬电离层变化分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(2): 135-140.
- [12] 翟笃林, 祝芙蓉, 林剑, 等. 基于地基 GPS-TEC 的中国区域地震电离层效应研究 [J]. 中国地震, 2020, 36(4): 857-871.
- [13] 唐龙, 郭博峰, 李哲. 利用日本 GPS 网探测 2011 年 Tohoku 海啸引发的电离层扰动 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 507-513.
- [14] LARSON K, LAY T, YAMAZAKI Y, et al. Dynamic sea level variation from GNSS: 2020 Shumagin earthquake tsunami resonance and hurricane Laura[J]. *Geophysical research letters*, 2021, 48(4): e2020GL091378. DOI: [10.1029/2020GL091378](https://doi.org/10.1029/2020GL091378)
- [15] XU P L, DU F, SHU Y M, et al. Regularized reconstruction of peak ground velocity and acceleration from very high-rate GNSS precise point positioning with applications to the 2013 Lushan Mw6.6 earthquake[J]. *Journal of geodesy*, 2021, 95(1): 1-22. DOI: [10.1007/s00190-020-01449-6](https://doi.org/10.1007/s00190-020-01449-6)
- [16] SUN Y. GNSS brings us back on the ground from ionosphere[J]. *Geoscience letters*, 2019, 6(1): 1-9. DOI: [10.1186/s40562-019-0144-0](https://doi.org/10.1186/s40562-019-0144-0)
- [17] KING L S, UNWIN M, RAWLINSON J, et al. Towards a topographically-accurate reflection point prediction algorithm for operational spaceborne GNSS reflectometry-development and verification[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(5): 1031. DOI: [10.3390/rs13051031](https://doi.org/10.3390/rs13051031)
- [18] EH N. Elementary statistical methods[J]. *Nature*, 1934, 133(3349): 9. DOI: [10.1038/133009c0](https://doi.org/10.1038/133009c0)

作者简介

王旭科 (1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为摄影测量与遥感、三维重建、点云数据处理和地理信息工程. E-mail: wkggeo@lzre.edu.cn

陈良周 (1983—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为测绘成果质量检验. E-mail: 120284277@qq.com

姚伟 (1984—), 女, 高级工程师、注册测绘师, 主要研究方向为矿山测量、工程测量与矿区开采沉陷. E-mail: 295583080@qq.com

Analysis of anomalous environmental responses to the 5.5 earthquake in Pingyuan County, Dezhou in august 2023 based on GNSS

WANG Xuke^{1,2}, CHEN Liangzhou³, YAO Wei⁴

(1. Faculty of Surveying, Mapping and Geographic Information, Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Lanzhou 730021, China; 2. Institute of Yellow River Basin Ecotope Integration of Industry and Education Research, Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Lanzhou 730021, China; 3. Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou 311122, China; 4. Longkou Municipal Housing and Urban-Rural Development Administration, Yantai 265701, China)

Abstract: To investigate the abnormal environmental response caused by the magnitude 5.5 earthquake in Pingyuan County, Shandong Province, on August 6th, 2023, this study based on the Global Navigation Satellite System (GNSS) observation data located about 26 km northeast of the epicenter, proposes a moving time-varying frequency method and incorporates the interquartile range (IQR) method to analyze the abnormal environmental responses triggered by the earthquake. The results indicate significant anomalies in the N and E directional coordinate velocity time series at 9 to 10 seconds after the earthquake, with a minor anomaly in the U direction at 16 seconds. Moreover, the sliding time-varying frequency method detects noticeable changes 5 to 10 seconds before the abnormal jump in the velocity time series, demonstrating higher sensitivity. The study also discovered abnormal disturbances in the ionosphere above the epicenter the day before the earthquake, with the anomaly reaching 4 TECU. This research demonstrates the effectiveness of GNSS technology in detecting abnormal environmental responses during earthquakes, offering a new perspective and tools for earthquake monitoring and early warning.

Keywords: Global Navigation Satellite System (GNSS); moving time-varying frequency; earthquake anomalies; interquartile range method