

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.012

2018年阿拉斯加 Mw7.9 级地震同震电离层扰动研究

林清莹¹, 于忠海¹, 张永明¹, 陈鹏², 张硕³

- (1. 济南市勘察测绘研究院, 济南 250101;
2. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054;
3. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:2018年1月23日,阿拉斯加湾科迪亚克岛东南部海域发生了 Mw7.9 级地震,这是由于太平洋板块浅层岩石圈内的走滑断层造成的。采用美国连续运行参考站(CORS)的 GPS 观测数据(采样间隔为 15s),解算孕震区上空高精度的倾斜总电子含量(STEC),利用奇异谱分析(SSA)的方法提取电离层扰动信息,对阿拉斯加地震同震电离层扰动(CID)进行分析。结果表明,在震后 1h 内,STEC 探测到了明显的“N”形波扰动,扰动振幅超过了 0.16 个总电子含量单位(TECU),持续时间近 15min。CID 传播速度为 2.62km/s,在距震中 600km 的范围内传播,结合扰动信号频率,判断是由瑞利波向上传播至电离层引起的。由于受到地震破裂带和地磁场影响,CID 传播具有明显的方向差异性,探测到的 CID 点主要位于震中西南方向。此外,在 SWARM 卫星的垂直总电子含量(VTEC)数据中发现,震发当天震中上空区域 TEC 明显减小。

关键词:CID;STEC;瑞利波;SSA

中图分类号:P352 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)01-0117-08

Study of the 2018 Mw7.9 Alaska Earthquake Coseismic Ionospheric Disturbance Based on GPS Detection

LIN Qingying¹, YU Zhonghai¹, ZHANG Yongming¹, CHEN Peng², ZHANG Shuo³

- (1. Jinan Academy of Surveying and Mapping Research, Jinan 250101, China;
2. Xi'an University of Science and Technology, College of Geomatics, Xi'an 710054, China;
3. Shandong Agricultural University, College of Resources and Environment, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: On January 23, 2018, a Mw7.9 earthquake occurred in the southeast of Kodiak Island in the Gulf of Alaska, which was caused by strike slip faults in the shallow lithosphere of the Pacific plate. In this paper, the high-frequency GPS observations (sampling interval of 15s) of the continuously operating reference station (CORS) in the United States are used to solve the high-precision slant total electron content (STEC) over the earthquake preparation area. And the ionospheric disturbance information is extracted by using the method of singular spectrum analysis (SSA), and the coseismic ionospheric disturbances (CID) of Alaska earthquake are analyzed. The results show that the STEC shows an obvious "N" wave disturbance within 1h after the earthquake, the disturbance amplitude exceeds 0.16 TECU and lasts for nearly 15 minutes. The CID propagates within 600km from the epicenter with a propagation speed of 2.62km/s. Combined with the disturbance signal frequency, it is judged that the CID is caused by the upward propagation of Rayleigh

收稿日期:2022-07-29;修订日期:2022-09-22

基金项目:山东省企业技术创新项目(202160001034)

作者简介:林清莹(1989-),男,工程师,主要从事地球空间数据处理与分析、地理信息数据分析与应用方面的研究。

wave to the ionosphere. Due to the influence of seismic rupture zone and geomagnetic field, CID propagation has obvious directional differences, and the detected CID points are mainly located in the southwest of the epicenter. In addition, in the vertical total electron content (VTEC) data of SWARM satellites, it is found that the TEC in the area above the epicenter decreases significantly on the day of the earthquake.

Key words: CID; STEC; Rayleigh wave; SSA

0 引言

地震是由于地壳快速释放能量所造成的震动,对地表具有很强的破坏性,给人类造成严重的危害,因此探测地震引起的异常现象具有重要的意义。地震发生时释放的能量不仅会破坏地球表面,还会传播至电离层并引起电子密度(Ne)和总电子含量(Total Electron Content, TEC)的变化等异常现象。自1964年美国阿拉斯加大地震中首次探测到地震电离层异常扰动以来,电离层异常与地震之间的耦合关系已经引起了广泛关注^[1]。随着大量全球和区域卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)网的建设和使用,GNSS技术已广泛地应用于地球动力学研究中,突破了传统地震监测技术的时空限制。

通过全球定位系统(Global Positioning System, GPS)观测数据探测发现,地震发生时激起的地震波向上传播至电离层高度,会引起电离层总电子含量的变化,产生同震电离层扰动(Coseismic Ionospheric Disturbances, CID)现象。E. Astafyeva等研究了1994年Kurile Mw8.1级地震同震电离层异常现象,发现CID出现的时间与距震中的距离存在相关性^[2]。通过CID的传播速度,可以研究电离层扰动的激发条件,如陈鹏和陈家君发现2004年苏门答腊Mw8.6级和Mw8.2级地震CID传播速度分别为0.73km/s与0.69km/s,与声波在0~450km内的平均传播速度一致^[3]。Liu J. Y.等发现1999年Chi-Chi Mw7.6级地震引起的两种CID传播速度分别为2.5km/s和370m/s,认为是由瑞利波和重力波引发的扰动^[4]。CID的传播方向也是一个重要特征,K. Heki等发现因受地磁场的影响,北半球的CID表现出向南传播的趋势,扰动幅度一般不超过2个TECU,扰动峰值点出现在震后10~20min,持续几分钟后逐渐消失^[5-6]。M. N. Cahyadi等发现破裂带走向也会对CID传播方向产生影响^[7-8]。同震地表垂直位移被认为是引发CID现象的主要原因,如Jin S.等发现瑞利波引起的CID主要受到垂直地面运动的影响,并会直接影

响CID波形^[9-10]。E. Astafyeva等发现CID的幅度和持续时间与地震的震级存在明显的正相关关系^[11]。此外,低轨卫星等空基数据也被用于CID研究。Ma X.等利用cosmic数据,发现汶川地震期间TEC和 N_mF_2 时空分布变化存在同震响应^[12]。

GPS数据为探测电离层活动提供了高时空分辨率数据支持,这有助于深入探测地震电离层异常效应,促进地震-电离层耦合机制的研究。本文对2018年1月23日在阿拉斯加湾科迪亚克岛东南部地区发生的Mw7.9级地震进行了研究,据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)公布,此次地震是由于太平洋板块浅层岩石圈断层走滑造成的,沿西南偏西或西北偏北方向发生破裂。本文采用美国连续运行参考站(Continuously Operating Reference Station, CORS)发布的GPS观测数据,解算孕震区周围倾斜总电子含量(Slant Total Electron Content, STEC)数据,利用奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)的方法提取电离层扰动信号,对CID现象和较高纬度地区卫星选取进行进一步分析,并利用SWARM卫星垂直总电子含量(Vertical Total Electron Content, VTEC)数据对震中上空的总电子含量变化进行研究。

1 数据和处理方法

1.1 电离层数据

本文采用CORS系统发布的GPS观测数据,反演阿拉斯加地震孕震区周围的震发1h内STEC数据,处理后精度达到0.01个TECU^[10],可用于阿拉斯加震后的电离层扰动探测。CORS系统在美国有1900多个观测站,并且在阿拉斯加地区分布非常密集,为研究电离层异常扰动提供了充足的数据,CORS系统在阿拉斯加地区的站点分布如图1所示。利用采样间隔为30s和15s的GPS数据反演的TEC中均发现了异常现象,为了提高精度,本文选取了采样间隔15s的GPS观测数据(ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/obs/)作为实验数据,

进行 CID 探测。

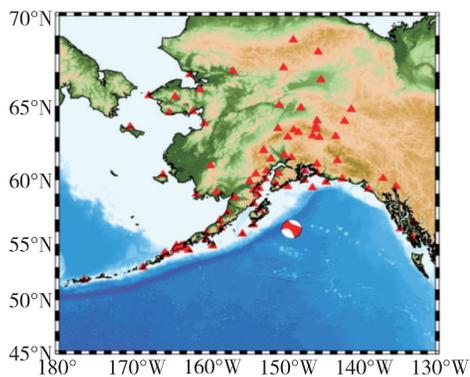


图 1 CORS 站点分布、震源球表示震中位置

Fig. 1 Distribution of CORS stations and epicenter location indicated by source sphere

利用 GPS 相位观测数据计算相对 STEC 的关系式

$$STEC_{\Delta} = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2 + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \epsilon) \quad (1)$$

其中, f_1, f_2 为载波频率; L_1, L_2 为载波相位观测值; λ_1, λ_2 为载波的波长; N_1, N_2 为相位观测值的整周模糊度; ϵ 为观测噪声。由于本文采用高精度 GPS 数据, 求取 STEC 的相对精度很高, 为了减少电离层水平梯度的影响, 卫星的截止高度角选取为 15° 。

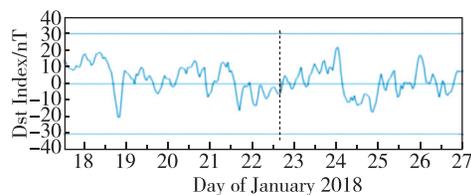
采用欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 发布的 SWARM 卫星 Level2 级 TEC 数据 (<https://swarm-diss.eo.esa.int/>), VTEC 数据采样间隔为 1Hz, 将相同经纬度格网点的 VTEC 数据求均值, 作为相应高度的电离层总电子含量。

1.2 太阳-地磁活动

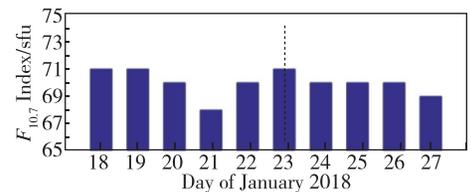
太阳和地磁环境的变化会造成电离层活动的异常干扰^[14-16], 在分析阿拉斯加地震同震电离层异常效应前, 应首先对太阳-地磁活动状况进行判断。Dst 指数可以反映地磁活动变化情况, 正常情况下在 $-30\text{nT} \sim 30\text{nT}$ 范围内, 而太阳辐射指数 $F_{10.7}$ 可以反映太阳活动的变化情况, 通常太阳活动平静时 $F_{10.7}$ 指数小于 90SFU。本文利用日本京都地磁数据中心提供的磁暴时变化指数 Dst (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>) 数据和空间环境预报中心提供的太阳辐射指数 $F_{10.7}$ (http://www.sepc.ac.cn/F107Index_chn.php) 的观测数据对太阳-地磁活动状

况进行分析。

图 2 给出了包括震发当天在内 10 天的地磁 Dst 指数和太阳射电量 $F_{10.7}$ 的变化。由图 2 可知, 在包括震发在内的 10 天时间里, $|Dst| < 30$, 地磁场比较平静; 同时太阳射电量 $F_{10.7}$ 指数 $< 90\text{SFU}$, 太阳活动在这个时期很稳定, 说明震发当天太阳-地磁活动对电离层造成的影响很小。



(a) Dst 指数



(b) $F_{10.7}$ 指数

图 2 阿拉斯加地震前后 10 天内太阳-地磁活动变化情况 (图中黑色虚线代表震发时刻)

Fig. 2 Changes of solar geomagnetic activity within 10 days before and after the Alaska earthquake (The black dotted line in the figure represents the earthquake occurrence time)

1.3 方法

从 STEC 中提取地震电离层扰动信号, 需要去除由 GPS 卫星的沿轨运动、电离层的空间变化和时间变化等引起的电离层 TEC 背景的趋势项。因此, 本文采用 SSA 的方法进行提取处理, 该方法通过对一维时间序列的分解与重构, 识别出原始序列中的不同信号, 提取出趋势分量、周期分量与噪声分量等。

(1) 构建迟滞矩阵

对反演出的震发时段 UTC 9-10h STEC 数据, 按照 15s 的采样频率, 将 1h 的 STEC 数据长度 N 定义为 240, 将其组成 x_1, x_2, \dots, x_N 的时间序列 $\{x\}$, 建立时滞矩阵。

(2) 奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)

定义矩阵 $S = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, \mathbf{X}^T 为 \mathbf{X} 的转置矩阵, 设 $\lambda_1, \dots, \lambda_M$ 为矩阵 S 的特征值, $\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M$ 分别为 $\lambda_1, \dots,$

λ_M 对应的特征向量,其中 $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_M \geq 0$ 。

(3) 分组

将初等矩阵 $\{1, \dots, d\}$ 划分为 m 个不相交的子集 I_1, I_2, \dots, I_m , 其中 $I = \{i_1, \dots, i_p\}$ 。轨迹矩阵 \mathbf{X} 的 SVD 可以表达为: $\mathbf{X}_I = \mathbf{X}_{I_1} + \dots + \mathbf{X}_{I_m}$ 。分组即指对 I_1, I_2, \dots, I_m 的确定过程。

(4) 对角平均化

将分组得到的矩阵转换为一系列新的长度为 N 的时间序列。长度为 N 的时间序列定义为重建成分 (Reconstruction Components, RC), 原始序列即所有重建成分之和。图 3 给出了前 15 重构成分的 w-correlation 图。由图 3 可知, 分解的前 5 项重构向量与其他重构向量独立性较好。

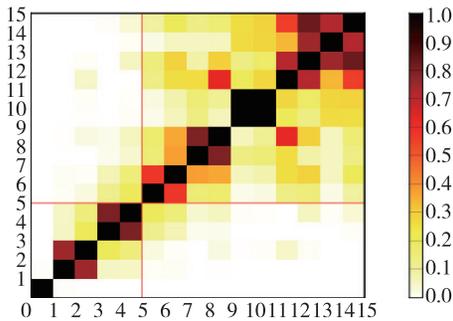


图 3 STEC 数据 SSA 前 15 重构成分的 w-correlation

Fig. 3 W-correlation of the first 15 reconstructed components of STEC data SSA

(5) 获取扰动信号

利用 SVD 得到 1 个重构分量和对应的特征向量 λ_i ($1 \leq i \leq l$), 将重构分量的特征值 λ_k 按照大小排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_l \geq 0$ 。特征值的大小对应的特征向量代表了 TEC 信号的变化趋势的大小。考虑到前 5 个重构分量的特征值累积贡献率超过 95%, 截取前 5 个较大的特征值, 找到对应的 x^k 之和, 即可以重建出充分反映 TEC 原序列的整体特征, 即

$$x = \sum_k^p x^k \quad 1 \leq p \leq l \quad (2)$$

定义包含电离层短周期信号的重构 STEC 时间序列主成分为 $\text{STEC}_{\text{main}}$, 为提取扰动信号提供高精度的背景参考值。

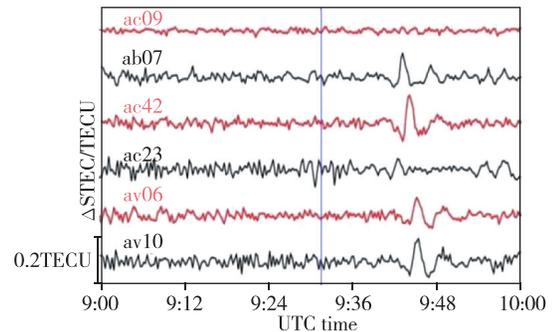
用原始 STEC 时间序列减去 $\text{STEC}_{\text{main}}$, 得到电离层 STEC 扰动信号

$$\Delta\text{STEC} = \text{STEC} - \text{STEC}_{\text{main}} \quad (3)$$

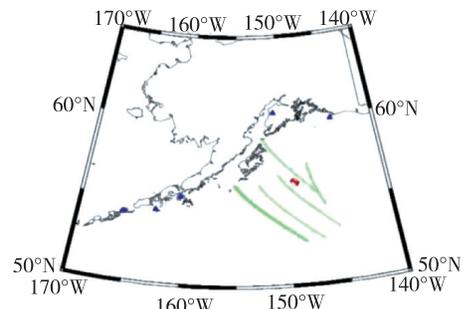
2 结果与分析

2.1 CID 现象

选取震中附近测站和 GPS PRN05 号卫星的 STEC 数据, 基于 SSA 方法提取震发时刻 UTC 9:00-10:00 ΔSTEC 时间序列。图 4 给出了各测站的 ΔSTEC 时间序列和卫星轨迹分布图。由图 4(a) 可知, 在震后 0.5h 内, 测站 ab07, ac42, av06 和 av10 的 ΔSTEC 序列出现了明显的 N 形波扰动, 且先后出现 2 个峰值点。在测站 ac42 的 ΔSTEC 序列中, UTC 9:39 开始出现扰动, 经过了 2 次由负到正的变化, 第 1 个峰值点出现在 UTC 9:43, 扰动幅度达到了 0.15 个 TECU; 经过几分钟后, 在 UTC 9:49 出现了第 2 个峰值点, 扰动幅度为 0.06 个 TECU, 在 UTC 9:54 后恢复平静, 整个扰动过程持续了 15min 左右。第 1 个峰值点的 SIP (Sub-Ionospheric Point) 距离震中 177.98km, 第 2 个峰值点的 SIP 距离震中 186.7km, 且 SIP 位于震中西南方向区域, 如图 4(b) 所示。



(a) ΔSTEC 时间序列



(b) 卫星轨迹

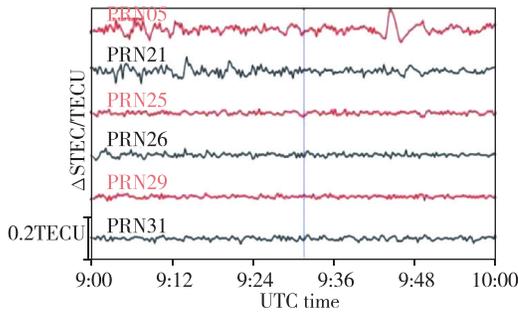
图 4 UTC 9:00-10:00 震中附近测站观测 ΔSTEC 时间序列及卫星轨迹分布, 蓝线代表震发时刻

Fig. 4 ΔSTEC time series at observation stations near the epicenter at UTC 9:00-10:00, and satellite trajectory distribution, the blue line represents the earthquake occurrence time

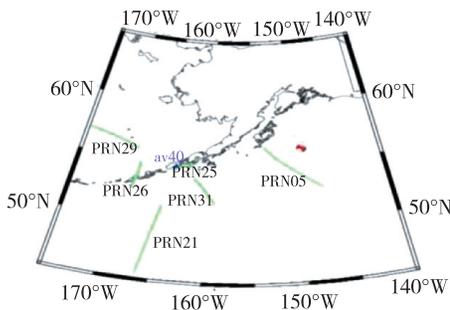
2.2 观测卫星选取

由于地震产生的声波会向各个方向传播,能量在传播过程中不断衰减,因此在基于 STEC 扰动分析同震电离层异常现象过程中,不仅要保证测站对于观测卫星有连续的观测信号,还要选取合适的 GPS 观测卫星,才能确保阿拉斯加地震同震电离层异常探测的有效性。

本文选取测站 av40 的 STEC 扰动结果进行分析,如图 5(a)所示,在 UTC 9:00-10:00 经过测站上空的 6 颗具有连续观测信号的卫星中,只有 PRN05 号卫星在 UTC 9:40 探测出了明显的扰动现象,扰动幅度达到 0.12 个 TECU,峰值点出现在 UTC 9:44 和 UTC 9:49,扰动过程持续了 15min,其他观测卫星未发现明显的扰动现象。图 5(b)给出了 6 颗卫星的 SIP 轨迹,可以看出只有 PRN05 号卫星 SIP 轨迹在地震附近区域。



(a) ΔSTEC 时间序列



(b) 卫星轨迹

图 5 av40 测站与上空卫星对应的 ΔSTEC 时间序列 (UTC 9:00-10:00), 蓝线表示震发时刻

Fig. 5 ΔSTEC time series (UTC 9:00-10:00) of av40 station and the corresponding satellite above, blue line indicates the time of earthquake occurrence

由于声波高度角低时,其在对流层和中气层中接近水平方向传播;高度角高时,声波沿着垂直方

向到达电离层,再沿水平方向在电离层中传播^[5],只有高度角较大的声波才能传播到电离层高度引起电离层扰动。声波只有通过卫星和测站的连线路径,才能探测到震中上空附近电离层扰动情况,而高纬度地区测站观测到的卫星数目较少且 SIP 大多距离测站超过 2000km,因此选择合适的 GPS 卫星对该地区同震电离层研究特别重要。

2.3 CID 传播速度和扰动幅度

为了进一步分析 CID 传播特征,利用高度为 350km 的电离层单层模型获得 CID 的位置信息。在分析 STEC 扰动过程中,由卫星接收机连线与电离层薄层的交点可以获得电离层穿刺点 (Ionospheric Pierce Point, IPP) 位置。IPP 在地面上的投影点为层下点 SIP,计算 CID 峰值点处的 SIP 经纬度,根据 CID 出现的时间和对应的 SIP 点震中距即可计算 CID 的水平传播速度。

图 6 给出了 2018. 1. 23 UTC 9:00-10:00 震中附近 ΔSTEC 扰动序列的时间-距离图。根据 CID 峰值点出现的时间和相应的位置,利用最小二乘进行线性拟合,斜率近似等于震后 UTC 9:00-10:00 出现的 CID 传播速度。

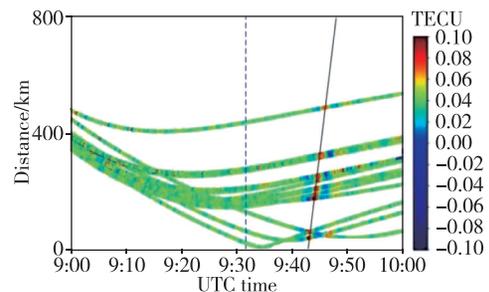


图 6 阿拉斯加地震 ΔSTEC 变化走势 (UTC 9:00-10:00), 蓝色虚线表示震发时刻,黑线代表根据 CID 峰值点拟合的趋势线

Fig. 6 The change trend of ΔSTEC (UTC 9:00-10:00) of Alaska earthquake, the blue dotted line represents the time of earthquake occurrence, and the black line represents the trend line fitted according to the CID peak point

由图 6 可以看出,CID 按照特定的速度进行传播,并且发现 CID 振幅随着距离增加而减小。CID 在震后 8min 距离震中 42.91km 处最先被探测到,出现在震后 10~20min 内,和 2011 年 Mw9.1 级日本地震、2008 年 Mw7.8 级汶川地震的 CID 出现时间一致^[17]。CID 的传播速度为 (2.62 ± 0.04) km/s,符合地震产生的瑞利波向上传播到电离层高度引起的 CID 水平传播速度^[5]。

2.4 CID 方向性

利用 GPS 跟踪站的观测信号,可以得到 GPS 跟踪站与 PRN05、23、31 卫星的 SIP 轨迹,同时得到跟踪站与卫星连线的 STEC 扰动信息。本文基于阿拉斯加地震震中附近 CORS 网测站,并分析这些站点上空的电离层扰动情况,结果如图 7 所示。

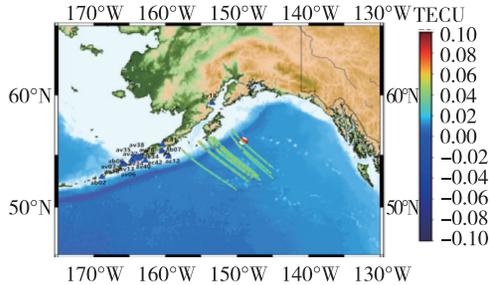


图 7 UTC 09:00-10:00 阿拉斯加地区 SIP 点分布图,震中上方和西南方向扰动情况及 SIP 分布,颜色深浅代表电离层扰动幅度

Fig. 7 SIP points distribution map in Alaska (UTC 09:00-10:00), disturbance above and southwest of the epicenter and SIP distribution, and the color depth represents the ionospheric disturbance amplitude

图 7 给出了震发当天 UTC 9:00-10:00 在震中上方和西南方向探测到的电离层异常和 SIP 轨迹,可以看到明显的 CID,扰动幅度达到 0.16 个 TECU,出现在距离震中 42.9~488km 范围内。图 4(b)给出了震中东北方向的电离层扰动和 SIP 轨迹,并没有探测到明显的 CID 信号,CID 传播表现出了明显的方向差异性。

由图 7 可以看出,CID 从震中沿着西南方向传播,一方面由于瑞利波的传播受到地震破裂带的影响,引起 CID 传播方向和破裂方向保持一致;另一方面,由于 CID 现象的存在主要是通过带电粒子的运动形式反映的,地磁场施加的库仑力使其更容易沿着磁力线运动,因此在北半球的 CID 表现出向南传播的趋势。

为了进一步分析瑞利波传播至电离层高度引起的扰动情况,图 8 给出了震中上方和西南方向 CID 峰值点分布位置,可以看出地震上空的扰动值最大,达到 0.16 个 TECU,CID 幅度沿着西南方向随着距离增加而减小,然后逐渐消失,这进一步证明了瑞利波引起的 CID 沿着西南方向传播,并且 CID 能量以较快速度衰减,符合瑞利波特异性^[17]。

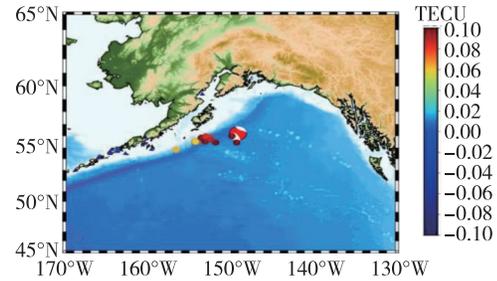


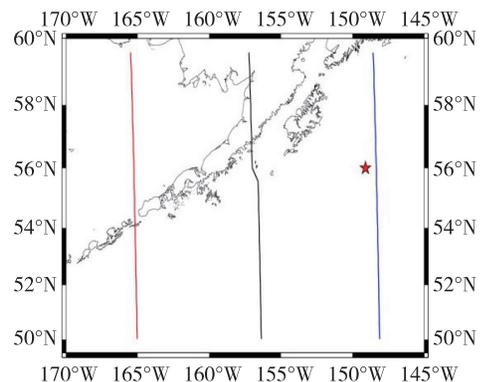
图 8 震中上方和西南方向 CID 峰值点示意图,震源球代表震发位置,颜色深浅代表峰值点幅度

Fig. 8 Schematic diagram of CID peak points above and southwest of the epicenter, the source sphere represents the location of the earthquake, and the color depth represents the amplitude of the peak point

2.5 SWARM 卫星数据

利用轨道高度为 460km 的 SWARM-A 卫星观测得到的 VTEC 数据,选取了包括震发当天在内前后 3 天的观测数据,对震发上空电离层异常进行研究。SWARM 卫星在固定轨道高度运行,在经过同一区域时相对于地面高度一致,且穿过电离层高度。

图 9(a)给出了卫星经过的 SIP 轨迹的位置及震中位置的分布图,可以看到,SWARM-A 卫星经过震中和西南方向区域上空,持续时间为 3min 左右。震发当天从 UTC 20:08(黑色轨迹)开始经过震中区域,与相同区域前一天 UTC 20:43(红色轨迹)和后一天 UTC 19:17(蓝色轨迹)总电子含量进行对比。图 9(b)给出了前后 3 天在相同高度 444~446km 上的 VTEC,可以看出震发当天与前一天和后一天相比,总电子含量明显变小。在排除了太阳和地磁活动影响的情况下,电子含量明显降低可能是由于地震造成的。



(a) 卫星轨迹及震中位置

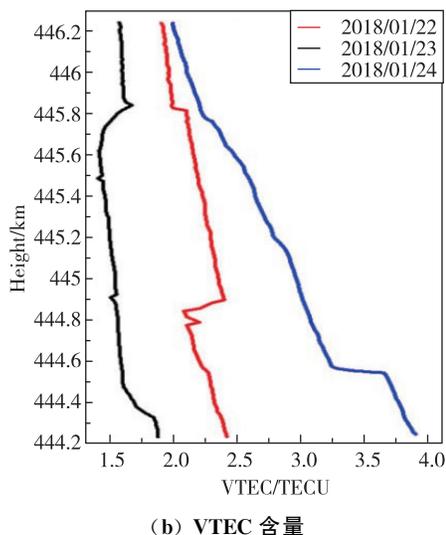


图 9 震中上方和西南方向 SIP 轨迹和总电子含量,红色五角星代表震发位置,红色线为震发前一天,黑色为震发当天,蓝色为震后一天

Fig. 9 SIP trajectories and total electron content above and southwest of the epicenter, the red pentagram represents the location of the earthquake, the red line is on the day before the earthquake, the black line is on the day of the earthquake, and the blue line is on the day after the earthquake

3 结论

本文基于 CORS 提供的 GPS 观测数据,解算震中上空高精度的 STEC 数据,利用 SSA 方法提取电离层扰动信息,分析阿拉斯加 Mw7.9 级地震 CID 现象。

分析表明,震后 8min 出现了明显的电离层扰动,先后出现 2 个峰值点,扰动幅度达到 0.16 个 TECU,扰动时间持续了 15min。CID 在距震中 600km 的范围内传播,传播速度为 2.62km/s,与瑞利波水平方向传播速度一致,利用频谱分析发现异常时刻中心频率为 4.87mHz,符合瑞利波频率。在阿拉斯加地震的 CID 现象中,发现扰动具有明显的方向性,CID 传播方向受到地震破裂带和地磁场的影响。CID 在西南方向传播的过程中,能量以较快速度衰减,符合瑞利波特性的。结合声波传播高度角和卫星 SIP 轨迹,发现纬度较高地区的 CID 探测需要先选取合适的观测卫星。最后,利用 SWARM 卫星的 VTEC 数据,发现震发当天震中上空区域总电子含量明显减小,进一步证明了阿拉斯加地震存在电离层扰动现象。

上述研究表明,利用 SSA 方法处理由 GPS 数据反演得到高精度的 STEC 数据,可以探测电离层异常效应。此外,需要充足的高时空分辨率的电离

层数据进行更详细的探测,并结合大量震例研究地震释放能量方式对电离层的影响,进一步了解地震电离层耦合机制。

参考文献

- [1] Leonard R S, Barnes R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1965, 70(5):1250-1253.
- [2] Astafyeva E, Heki K, Kiryushkin V, et al. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionospheric disturbances [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A10): A10307.
- [3] 陈鹏, 陈家君. 2012-04-11 苏门答腊地震同震电离层异常研究. *武汉大学学报*[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2015, 40(7):882-886.
Chen Peng, Chen Jiajun. Coseismic ionospheric anomaly of Sumatra earthquake in April 11th, 2012 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7):882-886(in Chinese).
- [4] Liu J Y, Tsai H F, Lin C H, et al. Coseismic ionospheric disturbances triggered by the Chi-Chi earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(A8):A08303.
- [5] Heki K, Ping J. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005, 236(3-4): 845-855.
- [6] Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17):1585-1593.
- [7] Cahyadi M N, Heki K. Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(4):1777-1787.
- [8] Cahyadi M N, Heki K. Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(1): 116-129.
- [9] Jin S, Jin R, Li J H. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations [J]. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 2015, 119: 7914-7927.
- [10] Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: recent observation evidences and characteris-

- tics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 147: 54-64.
- [11] Astafyeva E, Shalimov S, Rolland L M, et al. Ionospheric response to earthquakes of different magnitudes: larger quakes perturb the ionosphere stronger and longer [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (9): 1675-1681.
- [12] Ma X, Lin Z, Chen H, et al. Analysis on ionospheric perturbation of TEC and $N_m F_2$ based on GPS and COSMIC data before and after the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57 (8): 2415-2422.
- [13] Li W, Yue J, Guo J, et al. Statistical seismo-ionospheric precursors of M7.0+ earthquakes in Circum-Pacific seismic belt by GPS TEC measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(5):1206-1219.
- [14] Ram S T, Sunil P S, Kumar M R, et al. Coseismic travelling ionospheric disturbances (CTIDs) during the Mw 7.8 Gorkha, Nepal earthquake on 25 April 2015 from ground and space borne observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 10669-10685.
- [15] Afraimovich E L, Ding F, Kiryushkin V V, et al. TEC response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13): 3601-3613.
- [16] 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.
- Cai Hua, Li Zishen, Wang Min, et al. Coseismic ionospheric disturbance of Mw7.9 Wenchuan earthquake and Mw9.0 Japan earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 716-719(in Chinese).
- [17] Zhang Y, Liu X, Guo J, et al. Coseismic ionospheric disturbance with Alaska strike-slip Mw7.9 earthquake on 23 January 2018 monitored by GPS[J]. *Atmosphere*, 2021, 1(83): 3889-3902.

(编辑:孟彬)