

汶川 Mw7.9 与日本 Mw9.0 地震 同震电离层扰动研究

蔡 华¹ 李子申² 王 敏¹ 孙汉荣¹

(1 中国地震局地震预测重点实验室,北京市海淀区复兴路 63 号,100036)

(2 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)

摘 要:通过分析研究 2008 年的汶川 Mw7.9 地震、2011 年的日本 Mw9.0 地震,发现伴随强震的发生,存在明显的同震电离层扰动现象。这种现象持续时间较短,一般在震前 30~40 min 出现,并在震后大约 10 min 达到极值,然后逐渐消失。持续时间及强度和震级存在着密切的关系,具体来说,震级越大其异常值也越大,持续时间也越长。另外一个值得注意的现象是,在震中附近出现较为明显的正异常的同时,距离震中较远的地区出现了负异常。

关键词:汶川 Mw7.9 地震;日本 Mw9.0 地震;地震前兆;同震电离层扰动;TEC

中图法分类号:P227.1

很多研究表明,强震与电离层存在密切的关系^[1-4],如周义炎等针对 2008 年汶川 Mw7.9 地震,利用地基 GPS 观测资料反演了汶川地区的垂直电子总含量(VTEC),认为 5 月 3 日下午和 5 月 9 日的 VTEC 正异常可能为汶川地震的电离层前兆^[5]。孟泱等针对 2004-12-26 的印度洋地震,选取印度洋区域 7 个 IGS 站地震前后 25 d 的 GPS 观测数据,计算分析高时空分辨率的 VTEC,发现地震前 TEC 减少的电离层异常现象^[6]。以上都是针对电离层 TEC 较长时间(一般数天至数周)进行研究分析的。不同于以上研究,Heki 针对 2011 年日本 Mw9.0 地震,通过分析日本 GEONET 监测网络基准站与卫星视线方向电离层 TEC 在地震发生前后数小时的变化,发现伴随该地震出现了明显的同震电离层扰动现象(co-seismic ionospheric disturbances,CID),这种现象持续时间较短,一般在震前 30~40 min 出现,并在震后 10~20 min 达到极值,然后逐渐消失^[7]。本文以汶川 Mw7.9 地震为重点研究对象,并结合日本 Mw9.0 地震辅助分析,通过同震 GPS 数据研究测站同震期间的电离层 TEC 变化,发现在震前约 30~40 min 就已经开始出现了 TEC 正异常。这种正异常持续增强,在震后 10~20 min 达到最强,然后逐渐回归正常,并且这种异常持续的

时间和强度与震级存在着密切的关系。

1 同震电离层扰动探测方法

1.1 基本原理

为了探测同震电离层扰动现象,首先需要获得卫星电离层星下点一系列视线方向上的电离层 TEC 值。本文使用由中国科学院测量与地球物理研究所针对陆态网络开发的“GNSS 电离层电子密度处理分析软件”进行数据处理,平均电离层薄层高度设为 350 km,并采用相位平滑伪距解算获得视线方向上的电离层 TEC 值,其具体计算方法可以参考相关文献^[8-10]。

为了更好地分析电离层 TEC 的异常变化,需要利用震前和震后的观测数据拟合出同震期间“正常”的电离层 TEC 值。首先设卫星的电离层星下点视线方向上的 TEC 连续变化值为时间 t 和电离层星下点处的天顶角 φ 的函数,即

$$\text{Slant TEC}(t, \varphi) = \text{VTEC}(t) / \cos \varphi \quad (1)$$

其中,Slant TEC 为电离层星下点视线方向上的 TEC;VTEC 是电离层星下点处的垂直分量;电离层星下点处的天顶角 φ 可以通过 GPS 卫星轨道和测站的坐标来确定^[8-9]。VTEC 在几个小时的变化可以认为是时间 t 的 3 次项函数,即

$$\text{VTEC}(t) = at^3 + bt^2 + ct + d + \epsilon \quad (2)$$
其中, ϵ 为观测噪声。通过多个历元的观测, 解算不受地震影响的观测数据可获得一系列视线方向的 TEC 值, 利用式(1)就可以解算出 VTEC 值, 然后按照最小二乘法则估算出 a 、 b 、 c 、 d 以及 ϵ 。通过估算的系数, 按照式(2)解算出同震期间“正常”的电离层 VTEC 值, 然后通过式(1)进一步推算出同震期间“正常”的视线方向上的 TEC 值。比较实测的 TEC 值与拟合的“正常”TEC 值, 就可以获得 TEC 的异常变化。

1.2 方法验证

为了验证该方法的正确性, 本文选用陆态网络基准站 BJFS 等 100 个基准站 2011 年年积日 100~164 d 的观测数据作为实验数据。综合分析这段时间的空间天气指数(地磁活动指数 Dst 、 K_p 及太阳活动指数 F_{107}), 选择太阳地磁活动均趋于平静期的观测数据。由于篇幅有限, 本文仅以 BJFS 观测卫星 G03 为例进行说明。首先选取该卫星视线方向上的电离层 TEC 的观测数据进行拟合(一般为 4 h), 并假设中间存在 1 h 的“异常时间”不参与数据拟合。这样, 从理论上说, 通过多项式拟合的这 1 h 的正常 TEC 值与实测值不应该存在大的差异。下面给出相关实验结果, 其中, 图 1 为连续 2 个月的拟合值与实测值偏差中误差的统计图, 图 2 为 2011 年年积日 100 d G03 卫星的视线方向上的 TEC 实测值与拟合值的时间序列。

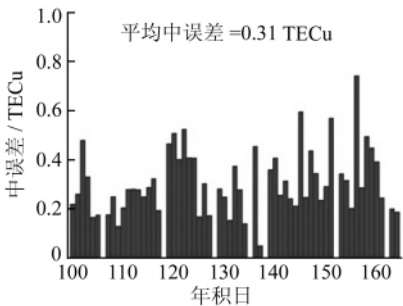


图 1 G03 号卫星视线方向上电离层 TEC 实测值与拟合值偏差中误差统计图

Fig. 1 Mean Square Error of the Biases between the Measured Slant TECs and the Fitted Ones with Satellite G03

从图 1、图 2 可见, 当观测数据正常, 即没有发生同震电离层扰动现象时, 实测值和拟合值非常吻合。因此, 可以通过检测卫星视线方向上电离层 TEC 实测值与拟合值是否存在较大偏差, 判断电离层 TEC 是否出现了异常。

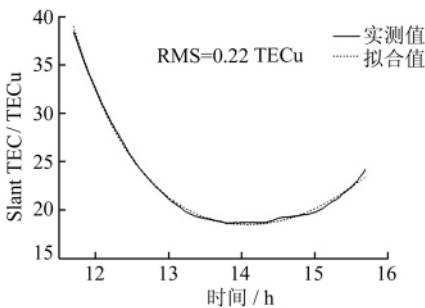


图 2 G03 号卫星 TEC 变化时间序列
Fig. 2 Measured Respectively Fitted Slant TEC Change Time Series with Satellite G03

2 汶川地震同震电离层扰动分析

2.1 地震概况与同震 GPS 数据来源

根据美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)测定, 2008-05-12 UTC6:28:01 在汶川地区发生了 Mw7.9 地震, 震中位置为 (30.986°N, 103.364°E)。此次地震使距离震中最近的 GPS 连续观测站数据中断甚至破坏。为了便于分析, 本文选取距离震中相对较远并且数据完整的 MEIG 等 12 个测站 2008-05-12(年积日 133 d)的 GPS 观测数据, 测站分布见图 3, 表 1 给出了测站的经纬度及震中距。

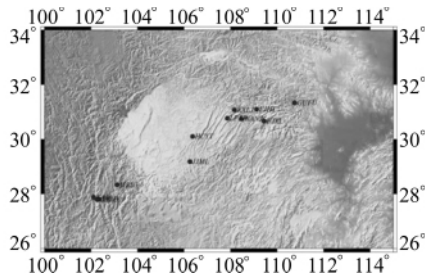


图 3 震中与测站分布图
Fig. 3 Locations of Earthquake Epicenter and GPS Observation Stations

表 1 测站经纬度及震中距

Tab. 1 Latitude and Longitude and Epicentral Distance of Station

站名	纬度/(°)	经度/(°)	震中距/km
MEIG	28.33	103.13	298
HCYT	30.10	106.36	301
JJML	29.18	106.25	341
KAIY	27.88	102.11	369
XICH	27.81	102.34	369
GYAO	27.79	102.26	373
LPFP	30.77	107.86	427
KXLJ	31.07	108.16	455
WANZ	30.75	108.46	484
FJHT	31.10	109.12	545
FJXL	30.66	109.44	579
GUFU	31.34	110.75	700

2.2 数据解算及分析

首先,综合分析 2008-05-01~06-01 空间天气指数(地磁活动指数 Dst 、 K_p 及太阳活动指数 $F_{10.7}$)。如图 4 所示,在 2008-05-08~05-19,太阳地磁活动均趋于平静,对研究发生在这期间的同震电离层扰动没有影响。

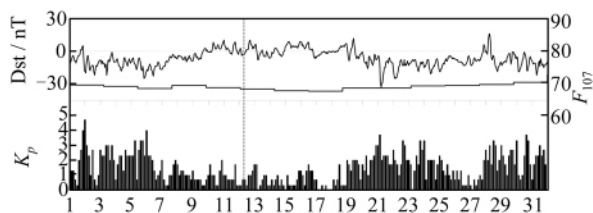


图 4 2008-05-01~06-01 空间天气指数

Fig. 4 Indices of Space Weather from 1st, May, 2008 to 1st, June, 2008

采用“GNSS 电离层电子密度处理分析软件”解算获得 2008 年年积日 133 d MEIG 等 12 个测站视线方向上的电离层 TEC 值,然后利用 5:00~9:00 的观测数据按照上文所述方法拟合出“正常”TEC 值。考虑到发震时刻为 UTC 6:28,UTC 6.0~6.8 时段内的观测数据由于受到地震的影响而没有被采用。图 4 给出了 MEIG 等 6 个测站的斜向 TEC 变化时间序列。

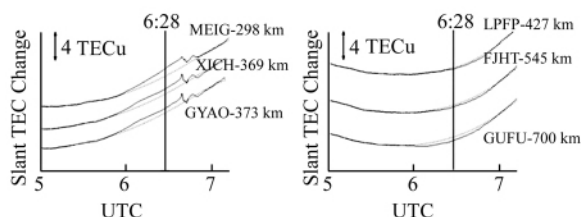


图 5 G09 号卫星 TEC 变化时间序列

Fig. 5 Measured Respectively Fitted Slant TEC Change Time Series with Satellite G09

从图 5(a)可见,距离震中较近的测站如 MEIG(震中距 298 km)、XICH(震中距 369 km)、GYAO(震中距 373 km)等从震前 30 min 开始已经出现了电离层 TEC 的正异常。随着时间变化,这种正异常越来越明显,并在震后 11 min 达到极大值,其中异常值最大接近 2 TECu。然后,这种异常现象逐渐消失,TEC 回归正常。但是从图 5(b)可见,距离震中较远的测站如 LPFP(震中距 427 km)、FJHT(震中距 545 km)、GUFU(震中距 700 km)等并没有出现这种明显的正异常现象,甚至 GUFU 出现了微弱的负异常现象。下面给出 MEIG 测站 UTC 4:00~9:00 时段内的 6 颗卫星观测数据计算的视线方向上的电离层 TEC 时间序列图。由于每颗卫星包含不同的测量偏

差,因此,对上述计算得到的 TEC 时间序列作了适当的平移。

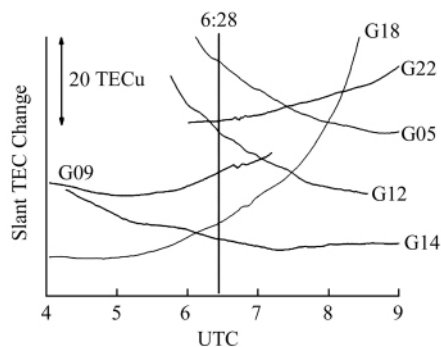


图 6 MEIG 的 TEC 变化时间序列图

Fig. 6 Slant TEC Change Time Series at MEIG

从图 6 可见,这种电离层 TEC 异常并不只出现在 G09 卫星,也同样出现在其他卫星上。为了更好地分析这种现象,下面给出了 12 个测站 G09 卫星 4 个时刻的 TEC 异常图。

从图 7 可见,震前 40 min 12 个测站没有任何异常现象出现。随着时间的变化,距离震中较近的测站出现了较为明显的正异常,距离震中越近,正异常越明显;随着时间变化,这些异常也越来越明显,在震后 11 min 达到极大值。同时,距离震中较远的测站出现了微弱的负异常,这种负异常距离震中越远越明显。这究竟是观测误差或其他因素造成的,还是客观存在的异常现象,有待进一步研究。

3 日本 Mw9.0 级地震同震电离层扰动分析

下面对 2011 年 Mw9.0 日本地震进行分析研究。

首先综合分析 2011-03-01~05-01 空间天气指数(地磁活动指数 Dst 、 K_p 及太阳活动指数 $F_{10.7}$),在 2011-03-10~03-13,发生了一个中等磁暴,因此这段时间的电离层 TEC 异常不排除有太阳电磁活动贡献的可能。然后,选取 2011 年年积日 70 d USUD、TSKB 两个测站 30 s 采样间隔的观测数据进行处理,并进行拟合。拟合时段覆盖 UTC 3:00~8:00,其中,舍去了受地震影响的 UTC 5.2~6.0 期间的数据。图 7 给出了 USUD、TSKB 两个测站的 TEC 变化时间序列。

从图 8 可见,TSKB(震中距 319 km)、USUD(震中距 431 km)从震前 40 min 开始已经出现了电离层 TEC 异常。随着时间变化,这种异常越来越明显,并在震后 10 min 达到极大值,其中

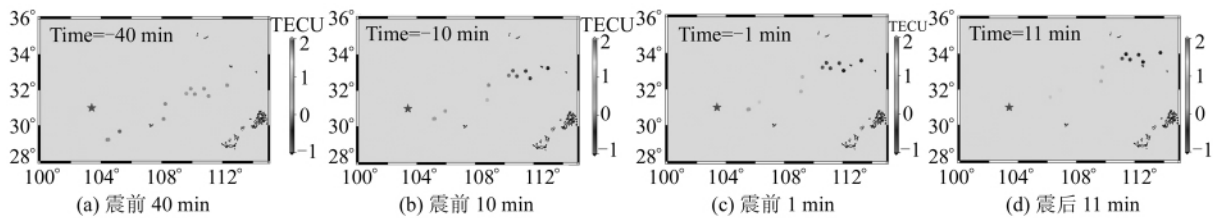


图 7 G09 卫星不同时刻的 TEC 异常变化图

Fig. 7 TEC Anomalies at Different Epochs with the Satellite G09

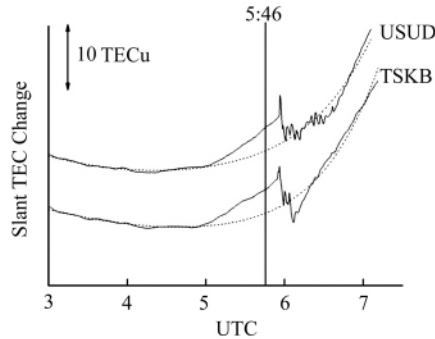


图 8 G26 号卫星 TEC 变化时间序列图

Fig. 8 Measured Respectively Fitted Slant TEC Change Time Series with the Satellite G26

TSKB 的异常值最大可达 7.5 TECu, USUD 异常值最大可达 6.3 TECu。然后,这种异常现象逐渐消失,TEC 回归正常。下面给出了 USUD 测站 6 颗卫星的时间序列图。由于每颗卫星包含不同的测量偏差,因此对 TEC 时间序列作了适当平移。从图 9 可见,这种电离层 TEC 异常现象同样出现在其他可视卫星上。

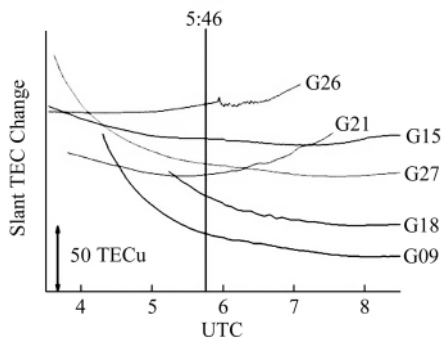


图 9 USUD 的 TEC 变化时间序列图

Fig. 9 Slant TEC Change Time Series at USUD

按照上述方法分析研究了 2010 年的智利 Mw8.8 地震以及 2004 年的苏门答腊 Mw9.2 地震,同样出现了这种同震电离层扰动现象。

致谢:感谢中国科学院测量与地球物理研究所提供的数据处理软件以及袁运斌老师的指导!

参 考 文 献

- [1] USGS(United State Geological Survey)[EB/OL]. <http://earthquake.usgs.gov>
- [2] Xia C, Yang S, Xu G, et al. Ionospheric Anomalies Observed by GPS TEC Prior to the Qinghai-Tibet Region Earthquakes[J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2011,22(2):177-185
- [3] Namgaladze A A, Zolotov O V, Zakharenkova I E, et al. Ionospheric Total Electron Content Variations Observed before Earthquakes: Possible Physical Mechanism and Modeling[J]. Proc of the MSTU, 2009,12(2):308-315
- [4] Zhao B, Wang M, Yu T, et al. Is an Unusual Large Enhancement of Ionospheric Electron Density Linked with the 2008 Great Wenchuan Earthquake? [J]. J Geophys Res, 2008,113:A11304
- [5] 周义炎,吴云,乔学军,等.汶川 Ms8.0 地震前电离层 VTEC 的异常变化[J].地球物理学报,2010,53(3):556-566
- [6] 孟泱,王泽民,鄂栋臣,等.基于 GPS 数据的地震前电离层 TEC 异常研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(1):81-84
- [7] Heki K. Ionospheric Electron Enhancement Preceding the 2011 Tohoku-Oki Earthquake[J]. Geophysical Research Letters,2011,38(17):1 585-1 593
- [8] 袁运斌.基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D].武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2002
- [9] 章红平.基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D].上海:中国科学院上海天文台,2006
- [10] 李子申,袁运斌,霍星亮,等.GNSS 电离层电子密度处理分析软件说明书[R].武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2011

第一作者简介:蔡华,博士,主要研究方向为 GNSS 数据处理方法研究以及在地震学中的应用。

E-mail:hcai@gps.gov.cn

(下转第 724 页)

Regularization by Grouping Correction in Downward Continuation of Airborne Gravity

GU Yongwei¹ GUI Qingming¹ HAN Songhui¹ WANG Jinhui¹

(1 Institute of Science, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: During downward continuation of airborne gravity, ill-condition causes different effects to different parameters. In order to eliminate or alleviate the effects to an appropriate level, we put forward a new algorithm named regularization by grouping correction. Using the signal-to-noise ratio to assess the ill-condition effects, parameters are grouped. Regularization matrix is constructed by grouping amendment idea. Regularization parameter is selected by minimizing the mean square error. Using the simulative airborne gravity data based on the EGM2008 as true values of the gravity field, the effectiveness of the method is verified. Comparing with three other methods, the new method has higher accuracy.

Key words: airborne gravity; downward continuation; ill-condition; signal-to-noise ratio; regularization

About the first author: GU Yongwei, associate professor, Ph. D, majors in theory of surveying error and data processing.

E-mail: gyw1019@sina.com

.....
(上接第 719 页)

Coseismic Ionospheric Disturbances of Mw7.9 Wenchuan Earthquake and Mw9.0 Japan Earthquake

CAI Hua¹ LI Zishen² WANG Min¹ SUN Hanrong¹

(1 Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science, CEA, 63 Fuxing Road, Beijing 100036, China)

(2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 340 Xudong Road, Wuhan 430077, China)

Abstract: Coseismic ionospheric disturbances(CID) obviously exist when large earthquake occurs by analysis of Mw7.9 Wenchuan Earthquake and Mw9.0 Japan Earthquake. The duration of CID is short, usually starts 30~40 min before earthquake and reaches the extreme value about 10 min after earthquake. Then it disappears. The duration and amplitude of CID depends on seismic magnitude, specifically, magnitude greater and the duration and amplitude greater. In addition to clear precursory positive anomaly of ionospheric TEC around the earthquake epicenter, it's mentionable that weak negative anomaly of ionospheric TEC exist far away from the earthquake epicenter.

Key words: Mw7.9 Wenchuan Earthquake; Mw9.0 Japan Earthquake; earthquake precursor; coseismic ionospheric disturbances; TEC

About the first author: CAI Hua, Ph. D, majors in GNSS data processing and its application to seismology.

E-mail: hcai@gps.gov.cn