

祝美英, 吴云, 林剑, 周义炎, 熊晶, 杨剑. 2009. 汶川地震前电离层 VTEC 的异常响应. 地震学报, 31(2): 180-187.
Zhu Fuying, Wu Yun, Lin Jian, Zhou Yiyian, Xiong Jing, Yang Jian. 2009. Anomalous response of ionospheric VTEC before the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 180-187.

汶川地震前电离层 VTEC 的异常响应^{*}

祝美英^{1,2),†} 吴 云^{1,2)} 林 剑^{1,2,3)}
周义炎^{1,2)} 熊 晶^{1,2)} 杨 剑^{1,2)}

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所
2) 中国武汉 430071 地壳运动与地球观测实验室
3) 中国武汉 430079 武汉大学卫星导航定位技术研究中心

摘要 2008年5月12日我国四川省汶川县发生了8.0级大地震, 基于中国地壳运动观测网络(CMONOC)的GPS观测数据, 解算得到了震中上空附近的电离层VTEC; 以VTEC的滑动均值为背景参考值, 以2倍均方差作为误差限值, 对临震一个月的VTEC资料进行了处理分析。结果显示, 在震前多次出现VTEC的异常扰动, 其中4月29日、5月6—7日为异常减少, 5月9日为异常增加, 而且电离层VTEC的异常驼峰有向磁赤道漂移的趋势, 由于距离发震时刻较近, 排除其它因素后可能源于此次地震引起的电离层效应。

关键词 GPS 垂直总电子含量(VTEC) 汶川地震 地震监测预报

文章编号: 0253-3782(2009)02-0180-08 **中图分类号:** P315.72 **文献标识码:** A

Anomalous response of ionospheric VTEC before the Wenchuan earthquake

Zhu Fuying^{1,2),†} Wu Yun^{1,2)} Lin Jian^{1,2,3)}
Zhou Yiyian^{1,2)} Xiong Jing^{1,2)} Yang Jian^{1,2)}

1) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China
2) Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071, China
3) Research Center of Satellite Navigation and Positioning Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: An earthquake of $M_8.0$ struck Wenchuan county of Sichuan province on 12 May 2008. In this paper, on the basis of the GPS observation data obtained from the reference stations of Crustal Movement Observational Network of China, the continuous 30-day VTEC (vertical total electron content) value over the epicenter is computed and then the abnormal signals are identified with 2-multiple standard deviation of 10-day VTEC value as limit range. The result shows that there are the ionospheric anomalies prior to the earthquake onset:

* 基金项目 国家支撑项目(2008BAC35B02)、国家“863”项目(2007AA12Z169)、国家自然科学基金(40774014)、地震科学联合基金(106006)和国家“973”项目(2009CB724002)资助。

收稿日期 2008-07-10 收到初稿, 2009-03-26 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zhufy00@126.com

the apparent anomalous reduction of VTEC occurred on 29 April and during 6th–7th of May, while the VTEC value abnormally increased on 9 May. It has also been shown that the anomalous crest of the VTEC moved towards equator. Due to the time is close to the moment of the Wenchuan earthquake occurrence, we may conclude that the ionospheric anomalies do exist and are possibly related to the earthquake, excluding other possible factors.

Key words: GPS; VTEC (vertical total electron content); Wenchuan earthquake; earthquake monitoring and prediction

引言

地震是人类面临的破坏性最大、危害最为严重的自然灾害之一，地震在我国造成的人员伤亡和经济损失十分惨重。为了减少地震灾难，地震学家长期坚持不懈地致力于地震的监测预报研究，也有过一些成功预报地震的案例，但地震预报的理论体系和地震前兆监测技术体系尚未建立起来，地震预报特别是短临预报在当今仍然处于一个探索阶段。为了推进地震预报研究，许多地震工作者不断地探索地震监测预报的新方法，其中地震孕育期电离层 TEC 的扰动以及地震电离层耦合机制的研究成为热点之一(Liu *et al*, 1996; 杜品仁等, 1998; 丁鉴海等, 2005; 吴云等, 2005; 张强, 2005; 卓裕荣, 2002; 杨剑等, 2008; 熊晶等, 2008; 赵必强等, 2008; 林剑等, 2009; 曾中超等, 2009)。

地震电离层异常的发现源于 Barnes(1965)对美国阿拉斯加地震的研究，研究发现电离层扰动与地震存在一定的关联；Calais 和 Minster(1995)用 GPS 对 Northbridge 地震后的电离层总电子含量(total electron content, 简写为 TEC)扰动进行了研究，发现震后存在电离层的异常扰动；Liu 等(1996)用 GPS 计算电离层 TEC 经、纬向二维分布，结果表明震前的 TEC 和 f_0F_2 有相同的变化态势；Zaslavski 等(1998)用统计方法研究 TOPEX 卫星的 TEC 数据，检验了地震活动与电离层扰动之间的相关性；卓裕荣(2002)研究地基 GPS 数据，发现瑞里、集集和嘉义地震前 1—4 天均有明显的电离层异常；吴云等(2005)用地基 GPS 获得的电离层垂直总电子含量(vertical total electron content, 简写为 VTEC)数据，研究了亚洲的 3 次地震，结果显示震前 5 天，地震上空电离层均存在显著的负异常；杨剑等(2008)利用 GPS 无线电掩星技术对日本千岛地震、青海海西地震进行分析研究，得出临震发前孕震区上空的电离层峰值电子密度 $N_m F_2$ 均出现了异常变化。目前，全世界有 20 多个国家和地区进行地震电离层前兆研究，已有的研究(Pulinet, 1998a, b, 2003, 2004; Liu 等, 2000, 2001, 2004; Silina *et al*, 2001; Chuo *et al*, 2002)表明，由地震引起的电离层变化不仅确实存在，而且在震级大于 5 级的地震发生前的几天至几个小时会发生电离层扰动。北京时间 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 4.00 秒，在我国的四川省汶川县发生了 $M_s 8.0$ 大地震，震源深度 14 km，给我国造成了极大的破坏。赵必强等(2008)用传统的处理分析方法对汶川地震前的电离层特征进行研究，并获得了一些有价值的成果。本文基于中国地壳运动观测网络基准站的 GPS 资料解算的 VTEC 和 CODE 发布的 VTEC 数据，采用滑动均值作背景值，以 2 倍滑动均方差作检测异常的阈值，对临震一个月的电离层 VTEC 资料进行了分析和讨论。

1 电离层 VTEC 的解算

电离层主要指地球表面上空约 60—1000 km 的大气层。在 GPS 电离层 TEC 研究中，电离层被描述为距地面一定高度(H)的单球层，考虑到电离层 TEC 最密集区域位于距地面 300—400 km 处，本文选取的模型高度(H)为 400 km，通过映射函数将斜向 TEC 投影到单球壳高度上，便得到该球壳上的 VTEC。具体处理时，我们选取球谐函数作为电离层 VTEC 的拟合模型，用 GPS 双频载波相位平滑 P 码伪距作为观测量，通过最小二乘拟合求得球谐系数。

$$P_4 = P_1 - P_2 = a(1/f_1^2 - 1/f_2^2)F_I(z) \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta) [a_{nm} \cos(ms) + b_{nm} \sin(ms)] + b_4 \quad (1)$$

式中， $a = 4.03 \times 10^{17} \text{ ms}^{-2} \text{ TECu}^{-1}$ ； $F_I(z) = 1/\cos z$ ， z 为卫星在电离层星下点处的天顶角； β 为电离层穿刺点的地理纬度； s 为太阳系经度， $s \approx \text{UT} + \lambda - \pi$ (UT 为世界时， λ 为地理经度)； n_{\max} 为球谐函数(spheric harmonics，简写为 SH)的最大度数， b_4 为硬件延迟偏差； $\bar{P}_{nm}(\sin\beta)$ 为正交化的勒让德尔函数； a_{nm} 和 b_{nm} 为待定的 SH 系数(Wilson *et al.*, 1995; Yuan, Ou, 2003)。在计算 SH 系数时，式(1)取 5 阶，36 参数的球谐函数模型。考虑硬件延迟偏差的稳定性(1 天内可视为常数)， b_4 会同 SH 系数，按最小二乘原理联合求解，逐天计算不同时刻的 VTEC 值。

VTEC 解算时所用的 GPS 数据取自于中国地壳运动观测网络(CMONOC)，选取的观测弧段为 2008 年 4 月 12 日—5 月 22 日，数据采样率为 30 s，卫星观测截至角取为 30°。观测台站有武汉、拉萨等共 24 个，其具体的地理位置分布如图 1a 所示。解算后的 VTEC 值均匀分布于震中上空附近的网格点(网格纬度间隔 1°，经度间隔 1°)，经纬度范围取 70°E—140°E, 15°N—55°N。通过计算我们得到了 2008 年 4 月 12 日—5 月 22 日震中上空附近的电离层 VTEC 分布图。作为代表，图 1b 给出了 2008 年 5 月 9 日，即震前第 3 天 8:00 (UT 时) 的 VTEC 分布情况。由图 1b 可以看出，VTEC 随着纬度的减小而增大，即在给定的区域内 VTEC 值由北向南递增，最大处位于最南端，约 40 TECu($1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ el/m}^2$)。

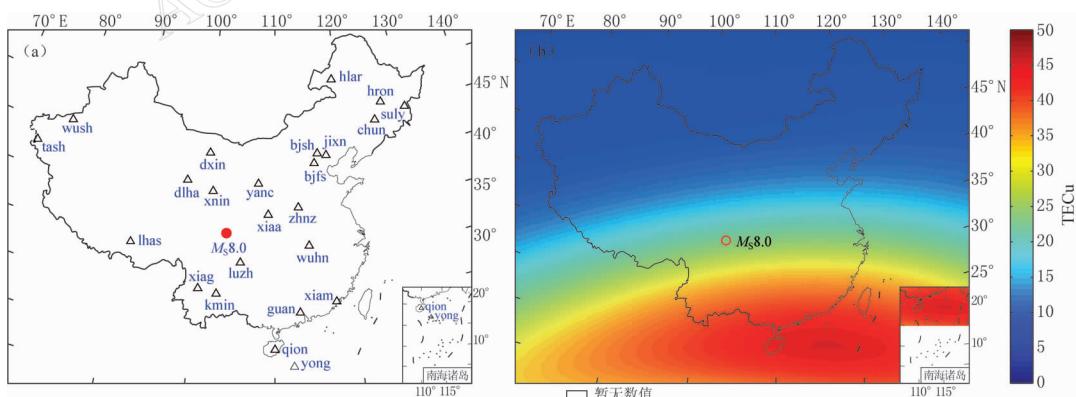


图 1 (a) 为 GPS 观测站分布图；(b) 电离层 VTEC 的分布图。三角形表示 GPS 观测台站，红色圆表示汶川地震的震中

Fig. 1 (a) Locations of GPS stations (triangles) in China; (b) distribution of the VTEC over China region. Red dot and circle stand for the epicenter of Wenchuan earthquake

2 电离层 VTEC 异常分析

以往的电离层扰动研究大多以单一个案发生的当月平均数或月中位数作为参考的背景值, 用当月标准偏差检测是否有电离层异常现象发生。由于检测的资料在时间上已经涵盖震后效应, 因此, 该研究方法已经混合了震前、同震及震后的异常现象。此外, 传统的方法没有扣除 VTEC 的长周期项成分, 因此, 结果往往含有一定的系统偏差(林剑等, 2009), 在结果上表现为出现连续的正异常或者负的异常。为了更加科学有效地考察震前的电离层效应, 本文进行 VTEC 异常分析时, 首先采用拟合法扣除其长周期性变化(图 2)。然后, 采用滑动均值作为背景值、2 倍滑动均方差作为检测异常的阈值, 对拟合后 VTEC 的剩余残差进行异常提取与分析。

在处理过程中, VTEC 的初始均值 μ 和初始均方差 σ 取自 4 月 12—21 日连续 10 天的样本数据。由于电离层易受太阳活动、空间环境等因素的影响, 从而造成资料中出现异常的扰动而影响对照资料的选取, 为求稳健的检测资料, 在选取背景资料中采用剔除异常的方法。具体成图时我们选取如下映射函数

$$F_K^j = \begin{cases} F_K^j = 0, & |X_{N+1+K}^j - \bar{X}_K^j| < \alpha \cdot \sigma_K^j \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \\ F_K^j = X_{N+1+K}^j - (\bar{X}_K^j + \alpha \cdot \sigma_K^j), & X_{N+1+K}^j - \bar{X}_K^j \geq \alpha \cdot \sigma_K^j \quad K = 0, 1, \dots \\ F_K^j = X_{N+1+K}^j - (\bar{X}_K^j - \alpha \cdot \sigma_K^j), & X_{N+1+K}^j - \bar{X}_K^j \leq -\alpha \cdot \sigma_K^j \quad K = 0, 1, \dots \end{cases} \quad (2)$$

式中, $m \times n$ 为网格点数, K 为时间序列序号, \bar{X}_K^j 和 σ_K^j 分别是第 i 号、第 j 号网格的背景值和均方差, α 取为 2。 $F_K^j = 0$, $\Delta VTEC$ 在正常范围内; $F_K^j < 0$, $\Delta VTEC$ 为负异常; $F_K^j > 0$, $\Delta VTEC$ 为正异常。选用此种滑动平均的异常评判方法能有效避免其中个别异常因素的干扰, 利用其确定上下界限将更加科学合理。

图 3 是按上述方法获得的电离层 $\Delta VTEC$ 分布图, 参考时刻为 8:00 UT(震中区 15:00LT)。红色的小圆圈表示汶川地震震中的位置。我们承认 IGS 在解算 VTEC 方面的权威性, 所以选用同时段 IGS 发布的 VTEC 数据做比较。采用同样的方法, 我们处理了 CODE 公布的同时段的 VTEC 数据, 图 3d 是 5 月 6 日全球范围的 $\Delta VTEC$ 分布图。

图 3a 显示 $\Delta VTEC$ 在给定的范围的均处于正常变化, 电离层无异常扰动, 汶川地震前的 20 天多数时间属于这种状态; 图 3b 和图 3c 代表震前第 6 天和震前第 3 天时电离层 $\Delta VTEC$ 的分布情况; 图 3b 代表震前第 6 天由 CMONOC 的 GPS 数据计算的 $\Delta VTEC$ 分布情况; 图 3d 为基于 CODE 给出的 VTEC 解算的 $\Delta VTEC$ 分布图。红色代表正的异常扰动, 蓝色代表负的异常扰动, 其余时间的 $\Delta VTEC$ 的分布情况相类似, 限于篇幅限制, 这

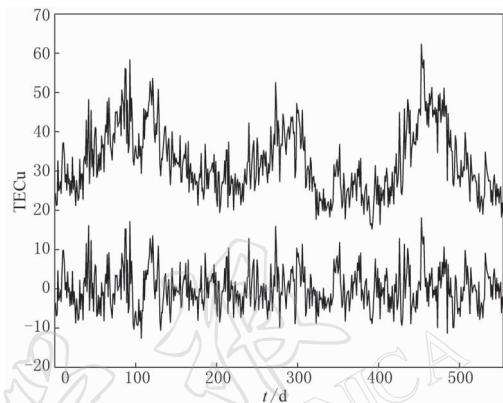


图 2 电离层 VTEC 的变化趋线。图中上线为原始的 VTEC 曲线, 下线为扣除长周期项后的 VTEC

Fig. 2 Variation of time series of VTEC value, upper line represents raw VTEC value and lower line shows the VTEC value after removing long period components

里不再一一列出。由图 3b 可以看出：5月 6 日在震中上空以南的区域，相对于背景值，的确出现了明显的电离层 VTEC 异常扰动现象，电离层 VTEC 为异常减少，最大超出 2 倍标准差下限近 5 TECu，相对变化超过 30%；5月 9 日为电离层 VTEC 异常增加，最大超出 2 倍标准差上限约 4 TECu。由图 3b 和图 3c 还可以看出，正、负异常的空间展布有一些不同，负异常区似乎主要位于震中的正南方，而正异常区似乎在震中的东南、西南方都可以出现；电离层异常的另一特征是随着纬度减小异常幅度有所增加，即 Δ VTEC 的异常峰值区有向磁赤道漂移的趋势。这些特征与 Pulinets(1998a, b)、Pulinets 和 Boyarchuk(2004)的论述相一致：在低纬区，由于特殊的地磁与电动力学环境，地震电离层效应在一定的经度范围内整体改变赤道异常的分布状况，即电离层异常双驼峰存在向磁赤道漂移的趋势。图 3 中的 Δ VTEC 异常分布再次表明，电离层异常区并不在震中的正上空，而是向赤道方向偏移一定的距离，这个偏移距离与当地的地理纬度与地磁纬度的差大体相等，最大可达到 11° 左右。

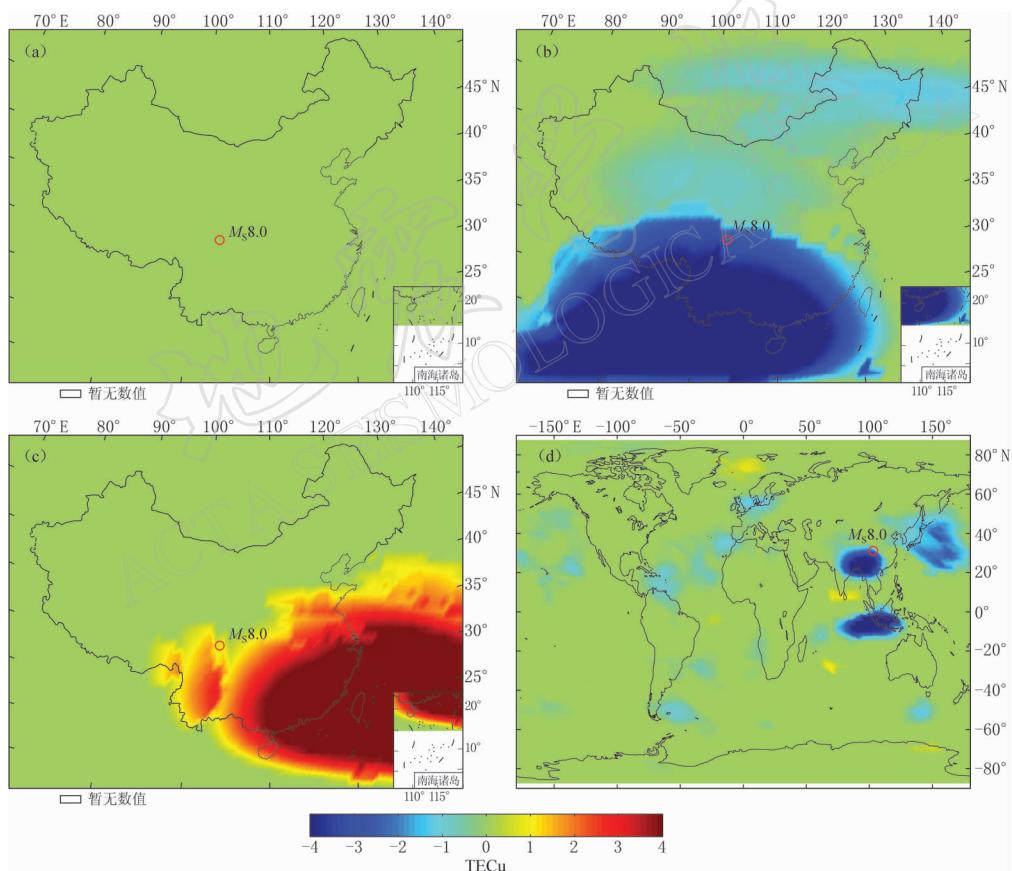


图 3 (a), (b), (c) 为由 CMONOC 的 GPS 数据计算的 Δ VTEC 分布图；(d) 为根据 CODE 发布的 VTEC 获得的 Δ VTEC 分布图。其中，(a) 为无异常扰动时的 Δ VTEC 分布图；(b) 和 (d) 为震前第 6 天(5月 6 日) Δ VTEC 分布图；(c) 为震前第 3 天 Δ VTEC 分布图

Fig. 3 (a), (b) and (c) are derived from GPS data of CMONOC, and (d) derived from VTEC data of CODE. (a) Normal distribution of Δ VTEC; (b) and (d) distribution of Δ VTEC on the 6th day prior to the earthquake; (c) distribution of Δ VTEC on the 3rd day prior to the earthquake

图3给出的是08:00 UT, 即震中为15:00 LT时的震中上空附近的电离层异常分布情况。为了更清楚地了解孕震区上空电离层VTEC随时间变化的规律, 我们给出了该时刻孕震区上空的VTEC时间序列图, 选取的考察弧段为震前20天至震后10天, 即2008年的4月22日—5月22日, 共31天。图4给出了震中附近几个考察点上空VTEC的异常时间序列分布情况。图中横轴表示时间, 为世界时(UT), 零点代表发震当天, 负号表示震前; 纵轴代表 $\Delta VTEC$ 量(单位: TECu)。为考察地震垂直电场可能产生的电离层经度变化, 我们在震中($31^{\circ}\text{N}, 103.4^{\circ}\text{E}$)附近选了3个考察点, 分别为: A点($31^{\circ}\text{N}, 103^{\circ}\text{E}$)、B点($31^{\circ}\text{N}, 91^{\circ}\text{E}$)和C点($31^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$)。其中, A点接近于震中的位置, B点和C点分别位于震中的西、东两侧。

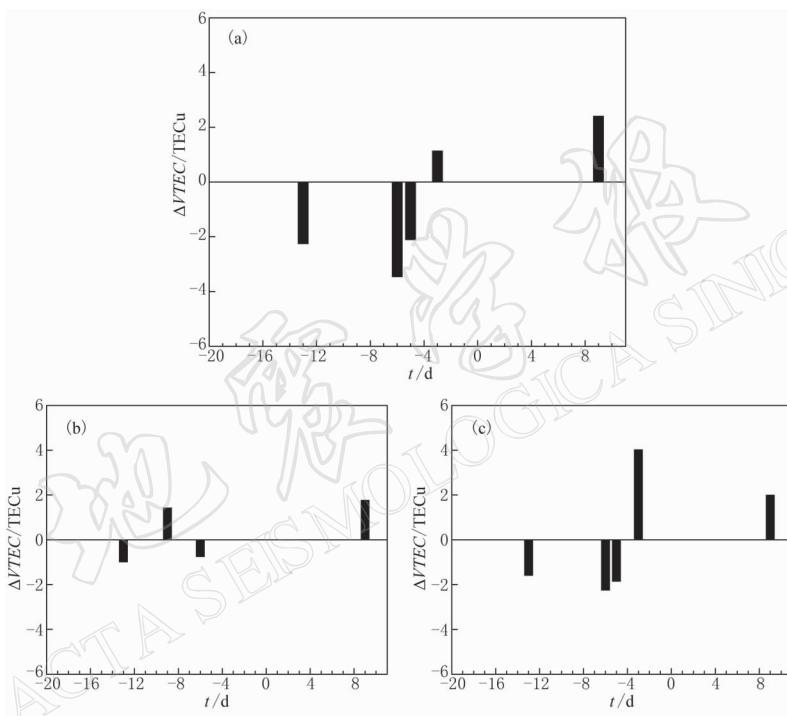


图4 考察点上空附近的 $\Delta VTEC$ 分布。(a)、(b)、(c)图分别表示考察点A, B, C上空附近的 $\Delta VTEC$ 分布

Fig. 4 Distribution of $\Delta VTEC$ near the reference point A, point B and point C

由图4可以看出, 在震前第13天、震前第6天和震前第3天, 3个考察点上空的电离层VTEC基本上均有明显的异常扰动现象, 考察点A和考察点C上空在震前第6和第5天出现了负的异常扰动。不同的是在5月3号位于震中西侧的点B有明显的异常增加, 而位于B点东侧的考察点A和C则没有明显的变化, 也即该天的异常扰动位于震中的西侧。其中, 扰动最为明显的5月9日这天, 我们看到自西向东 $\Delta VTEC$ 逐渐增大, 表现在上图中为C点异常增加最为明显, 最大超出上限达4 TECu; A点约为1 TECu; 而在震中西侧的B点并没有异常变化, 即该天正异常分布区域位于震中的东部。自5月9日起至震后第8天, 3个考察点上空每天均没有出现明显的VTEC负异常扰动现象。这与前面给出的二维 $\Delta VTEC$ 的分布情况完全一致, 即电离层的正异常扰动主要位于震中上空的东、西两侧。

从电离层异常发生的时刻来看, 我们选取时间为 UT 时 8 点, 转化为地方时是 15 点, 此时, 考察点上空的电离层 VTEC 接近达到最大峰值而且趋于稳定。虽然 VTEC 的异常变化量不太明显, 一般超出下限约 2 TECu, 但孕震区上空附近在震前数天多次出现电离层异常扰动的现象, 也许是起因于此次地震引起的短临异常效应。4月 24 日至 5月 25 太阳 $F_{10.7}$ 通量非常稳定(图 5a), 表明太阳活动较低; 但 4月 29 日地磁 K_p 指数值略接近于 4, 在 5月 1 日、2 日、6 日及 21 日 K_p 指数值均超过了 4, 有低水平磁扰活动(图 5b), 可能会对 VTEC 有所影响。因此, 4月 29 日、5月 6 日和 5月 21 日的 VTEC 异常减少不排除受地磁活动的影响, 但 6 日之后的一段时间地磁活动平静, 空间天气未出现大范围的异常, 而且也没有出现明显的磁暴活动。因此, 排除其它空间环境因素的影响, 由于距离发震时刻较近, 5月 9 日孕震区上空的电离层 VTEC 的异常增加有可能与此次地震有关。

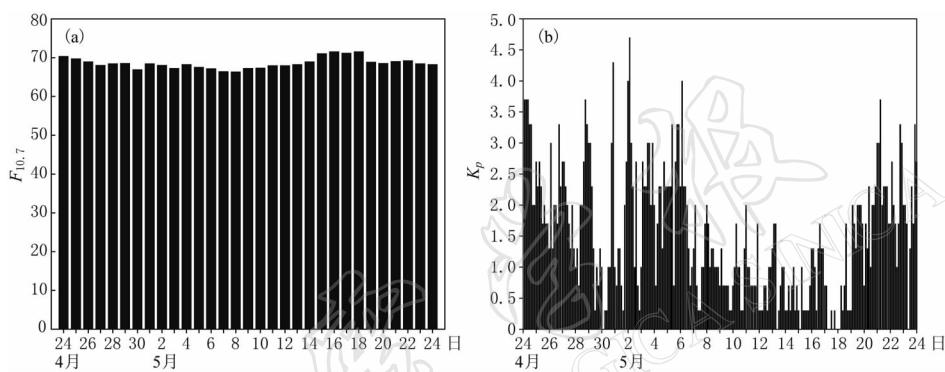


图 5 2008 年 4 月 24 日至 5 月 24 日太阳 $F_{10.7}$ 通量(a)和地磁 K_p 指数序列(b)图

Fig. 5 Solar $F_{10.7}$ flux and the geomagnetic K_p index from April 24th to May 24th, 2008

3 结果和讨论

基于中国地壳运动观测网络提供的 GPS 连续观测数据, 解算得到了震中上空的电离层 VTEC 的分布情况。之后, 对拟合后的 VTEC 剩余残差采用滑动均值的统计方法进行了处理分析, 清晰地展示了电离层 VTEC 的异常扰动现象: 在汶川地震前数天内, 电离层 VTEC 多次出现了显著的异常; 采用同样的方法, 对 CODE 公布的 VTEC 数据进行处理分析。结果显示, 在相同的时间和空间内均出现了明显的电离层 VTEC 异常扰动, 两者结果基本一致。由此可见, 在震前数天内, 震区上空附近电离层 VTEC 的异常扰动的确存在; 排除太阳和地磁活动的影响, 5月 9 日出现的 VTEC 异常增加可能为此次地震引起的电离层异常效应。这种异常所具有的短临时间尺度, 对地震短临预报具有非常重要的意义, 同时验证了利用 GPS 技术确实可以探测到电离层 VTEC 的异常扰动。

地震-电离层的耦合是非常复杂的物理和化学过程。对电离层的扰动现象, 至今尽管已经有许多值得关注的物理解释, 但还没有提出好的合理的物理解释模型。在本文的处理分析过程中发现, 电离层 VTEC 异常的提取方法至关重要, 选取的观测弧段, 背景值及检测异常的阈值不同, 得出的结果会有所不同。因此, 如何科学、合理、有效地定义 VTEC 异常的评判标准, 以及如何客观地分离地震电离层扰动与其它人为噪声、天电、降雨以及空间环境等因素引起的电离层扰动, 有待于进一步地深入研究。

感谢中国地壳运动观测网络和 CODE 中心提供的相关资料。

参 考 文 献

- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 2005. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. 空间科学学报, **25**(6): 536–542.
- 杜品仁, 蒋和荣, 郭兼善. 1998. 电离层异常能否作为地震前兆的研究[J]. 地震, **18**(2): 119–126.
- 林剑, 吴云, 祝英等. 2009. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常[J]. 地球物理学报, **52**(1): 297–300.
- 吴云, 乔学军, 周义炎. 2005. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(2): 36–40.
- 熊晶, 吴云, 祝英等. 2008. 汶川地震前电离层 NmF2 异常扰动[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(6): 22–26.
- 杨剑, 吴云, 周义炎. 2008. 利用 GPS 无线电掩星数据研究震前电离层异常[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(1): 16–22.
- 张强. 2005. 地基 GPS 监测电离层 TEC 及其与地震活动关系的研究[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所: 43–51.
- 赵必强, 万卫星, 王敏, 刘立波, 宁百齐. 2008. 震前电离层扰动研究进展及汶川地震前电离层变化[J]. 科技导报, **26**(11): 30–33.
- 卓裕荣. 2002. 地震电离层前兆[D]. 台湾: 国立中央大学: 34–47.
- Barnes R S. 1965. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. *J Geophys Res*, **70**(5): 1250–1253.
- Calais E, Minster J B. 1995. GPS detection of ionospheric TEC perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **22**, 1045–1048.
- Chuo Y J, Liu J Y, Kamogawa M, Chen Y I. 2002. The anomalies in the f_0Es prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[C] // *Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. TERRAPUB, 309–312.
- Liu J Y, Tsai H F, Jung T K. 1996. Total electron content obtained by using the global position system[J]. *Terr Atmos Oceanic Sci*, **7**: 107–117.
- Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, Tsai Y B, Chuo Y J. 2000. Seismo-ionospheric signature prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(19): 3113–3116.
- Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, Tsai H F. 2001. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **28**(7): 1383–1386.
- Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J. 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements[J]. *Ann Geophys*, **22**: 1585–1593.
- Pulinets S A. 1998a. Strong earthquakes prediction possibility with the help of topside sounding from satellites[J]. *Adv Space Res*, **21**(3): 455–458.
- Pulinets S A. 1998b. Seismic activity as a source of the ionospheric variability[J]. *Adv Space Res*, **22**(6): 903–906.
- Pulinets S A. 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **65**: 1337–1347.
- Pulinets S A, Boyarchuk K. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. Springer, Berlin, Germany: 315–316.
- Silina A S, Liperovskaya E V, Liperovsky V A, Meister C V. 2001. Ionospheric phenomena before strong earthquakes [J]. *Nat Haz Earth Syst Sci*, **1**: 113–118.
- Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. 1995. Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers[J]. *Radio Science*, **30**: 639.
- Yuan Y B, Ou J K. 2003. Preliminary results and analyses of using IGS GPS data to determine global ionospheric TEC [J]. *Prog Natu Sci*, **13**(8): 446(in Chinese).
- Zaslavski Y, Parrot M, Blance E. 1998. Analysis of VTEC measurements above active seismic regions[J]. *Phys Earth Planet*, **105**: 219–228.