0254-6124/2011/31(2)-236–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xing Nan, Wang Xiaoya, Hu Xiaogong. Study of ionosphere using GPS data and its application to analysis about earthquake. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 236-245

GPS 电离层反演方法研究及其在地震方面的应用*

邢 楠[1,2] 王小亚[1] 胡小工[1]

1(中国科学院上海天文台 上海 200030))

2(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要 利用地基 GPS 数据计算了电离层单球壳模型穿刺点上的垂向总电子含量 (VTEC), 根据 VTEC 和卫星及测站接收机的差分码间偏差 DCB 的不同时变特性采用了复弧法, 将 VTEC 作为局部变量 (每 30 min 一组, 可调), DCB 作为一天的全局量进行解算. 在解算的过程中, 充分考虑 VTEC 的空间分布特性, 利用变异函数通过 Kriging 插值法建立电离层 VTEC 的二维格网模型, 并给出了卫星和接收机的差分码间偏差 DCB. 通过与 IGS 结果的比较, 发现其结果可靠, 且时空分辨率和稳定性都有较大提高. 同时, 基于简化的三元样条插值基函数对电离层电子密度进行三维展开, 利用乘型代数重建技术 MART 算法构建了同批数据的四维层析成像结果, 获得了电离层电子密度的四维分布. 其结果与 CHAMP 无线电掩星结果非常一致. 利用上面两种算法又分别对 2008 年 5 月长江三角洲地区地基 GPS 数据进行处理, 简要分析了该时段该地区上空电离层总电子含量和电子密度的变化情况及其对汶川地震的响应.

关键词 GPS, 电离层, TEC, 克里格插值, 乘型代数重建技术

中图法分类号 V 524, P 353

Study of Ionosphere Using GPS Data and its Application to Analysis About Earthquake

XING Nan[1,2] WANG Xiaoya[1] HU Xiaogong[1]

1(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)

2(*Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing* 100875)

Abstract To obtain VTEC as well as DCB, a method is developed by using ground-based GPS data with multiple-arc method and Kriging interpolation. Assisted by multiple-arc method, VTEC was calculated every 30 minutes as local variables, and DCB was calculated every day as global variables. Kriging method, taking the spatial information of VTEC into account, helps us to establish a 2D model and get DCB of both satellites and receivers. The result shows itself reliably in comparison with IGS result, but more stable and precise in resolution. Meanwhile, grounded on 3-variable spline basis function, we unfold electron density into a linear combination of a set of grid point. With its contribution, CT result of ionospheric electron density was made by MART. This result is consistent

* 国家自然科学基金项目 (10873029, 10778716), 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA12A07), 上海市科学技术委员会 (06DZ22101) 项目、上海市自然科学基金项目 (07ZR14133) 共同资助

2009-12-04 收到原稿, 2010-04-28 收到修定稿

E-mail: nanx@shao.ac.cn, wxy@shao.ac.cn

with CHAMP result get by occultation method. These two ways are applied to the data of Yangtze River triangle region in May, 2008 when the shocking earthquake happened in Wenchuan. A simple statistic analysis reveals the response of ionosphere to the signal associated with earthquake but occurred before it.

Key words GPS, Ionosphere, TEC (Total Electron Content), Kriging, MART

1 引言

现代空间测量技术多采用无线电信号进行测量. 这些无线电信号穿过电离层时由于电离层的反射、折射、散射和吸收等发生信号失锁、色散和延迟, 是影响无线电通信、卫星导航定位、雷达测量等多种空间测量技术的主要因素. 电离层延迟的一阶项与频率的平方成反比, 与沿径的电离层总电子含量成正比, 高阶部分与电离层的电场和磁场强度有关 (通常可忽略), 通过双频或多频测量可获得电离层沿径的总电子含量 STEC. 目前利用卫星导航数据, 如 GPS 双频数据, 反演电离层电子含量已成为监测全球电离层变化的主要手段, 甚至是唯一手段 [1]. 与经验模型、电离层探测仪监测电离层等方法相比, GPS 反演电离层具有高精度、高时空分辨率和广泛的适应性等优点.

IGS (International GPS Service) 从 1998 年成立电离层工作组以来, 一直提供全球电离层总电子含量 (TEC, Total Electron Content) 分布图的日常服务, 以便有关用户可以消除电离层延迟 [2]. 但是该结果只能每两小时得到一幅空间分辨率为经度 5°、纬度 2.5° 的区域平均图像, 不能满足局部电离层研究与应用对精度、实时性和空间分辨率的需求, 尤其是当电离层在太阳、地磁等活动高峰期, 对太阳、地磁等活动的响应为小尺度变化时, 以及研究电离层异常变化期间. 另外, IGS 站在中国的分布较稀疏, 因此对于中国区域精密 TEC 分布图需要进行独立解算. 目前已有大量研究工作, 利用三角级数展开模型、多项式模型等求解区域 TEC 分布并应用于相关领域 [3−4], 这为提高 TEC 计算精度奠定了丰富的基础. 为进一步提高 TEC 的空间分辨率通过选择合理的空间插值方法是较为有效的办法. 毛田等 [5] 用 Kriging 插值方法对中纬度地区 TEC 进行了插值, 得到了比常用距离反比插值法更好的结果. 参考文献 [5] 并针对长江三角洲地区局域网数据的分布特点, 本文采用 Kriging 插值方法, 利用复弧法综合一天的数据, 得到每 30 min 一组 TEC 和一天一组卫星与测站接收机的硬件偏差 DCB 的最小二乘解.

GPS 不仅可以反演出二维 TEC 图, 也可以得到电子密度的四维分布信息. 早在 1986 年, Austen 等 [6] 就利用卫星无线电信标测量, 验证了联合计算机层析技术 (CT, Computerized Tomography) 反演电离层电子密度的可行性, 对研究电离层电子密度的垂直分布具有重要意义. 徐继生 [7], 金双根 [8] 等分别利用该技术实现了电离层电子密度的三维重建. 目前以级数展开型 CT 算法为核心的层析技术已日趋成熟. 本文以简化的三元样条插值为基函数对电离层电子密度进行了展开, 并用乘型代数重建技术 (MART, Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 实现了电离层电子密度的三维重建, 获得了高精度的电离层电子密度三维分布结果.

借助连续的电离层总电子含量和电子密度四维分布, 分析地震前期电离层的异常变化是近年来电离层研究的热点. 目前大量研究显示 5 级以上强震, 震前存在 TEC 突然减少的现象, 并且出现频率为 80% 左右 [9]. 因此本文综合上述方法, 对汶川地震期间长江三角洲地区电离层异常情况进行分析研究.

2 利用地基 GPS 数据反演 VTEC 二维分布

2.1 VTEC 的解算

卫星信号经过电离层时会被折射, 从而产生与信号频率的平方成反比的延迟效应. 根据这一性质, 可以利用双频 GPS 数据把电离层信息提取出来. 对于 GPS 伪距和载波相位分别有如下观测方程:

$$\begin{cases} P_k = \rho + 40.3 I_{\mathrm{STEC}}/f_k^2 + \gamma B/f_k^2 + \varepsilon, \\ L_k\lambda_k = \rho - 40.3 I_{\mathrm{STEC}}/f_k^2 + \\ \qquad \lambda_k N_k + \gamma b_k/f_k^2 + \varepsilon'. \end{cases} \tag{1}$$

其中, P_k 和 L_k 分别为频率 f_k 上相应的伪距和载波相位观测量; ρ 包括了几何距离、钟差和大气延迟等与频率无关的量; 等号右边第二项表示电离层延迟, I_{STEC} 是信号沿传播路径上积分的电子总含量 STEC, 即

$$I_{\mathrm{STEC}} = \int_{R_{\mathrm{r}}}^{R_{\mathrm{s}}} N_{\mathrm{e}}(r,\lambda,\varphi)\mathrm{d}s;$$

N_k 是 f_k 对应的相位整周模糊度; B 表示差分码间偏差 DCB (Differential Code Bias), b 表示频间偏差 IFB (Inter-Frequency Bias), 它们都分别由卫星和接收机的偏差构成; $\gamma = 1/(1/f_1^2 - 1/f_2^2)$; ε 和 ε' 表示系统误差.

通过两个频率对应的方程 (1) 相减, 可消去与频率无关的量, 得到

$$\begin{cases} P_4 = P_1 - P_2 = 40.3I_{\mathrm{STEC}}/\gamma + B, \\ L_4 = L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2 = -40.3I_{\mathrm{STEC}}/\gamma + A + b. \end{cases} \tag{2}$$

$A = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon'$. 因此将式 (2) 两式相加, 将得到的时间序列根据周跳划分为不同片断, 针对每一片段取平均就可以得到组合整周模糊度 A 与 DCB 之和 [10], 即

$$B + A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_4 + L_4 - b)_i, \tag{3}$$

从而得到要进行最小二乘的最终观测方程, 即

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_4 + L_4)_i - L_4 = 40.3I_{\mathrm{STEC}}/\gamma + B. \tag{4}$$

如果假设电离层为一高度 375 km 的单球壳, 把 STEC 通过投影函数转化为信号传播在该球壳穿刺点垂直方向上的电离层总电子数 VTEC (Vertical Total Electron Content), 这样即可获得穿刺点上的 VTEC 分布.

不同于模型化解算 VTEC 的方法, 可以将式 (4) 中的观测量表示成模型参数和 DCB 的函数, 插值方法需要通过几何构型来解算 DCB. 目前常用的方法是利用测站天顶距展开和就近插值构型等方法来求解 DCB[11−12]. 但是对于局域网 GPS 数据来说, 前者不能充分利用数据, 后者也会因为观测到的卫星数过少, 轨迹在插值区域分布畸形而得出错误结果. 因此, 本文利用 Kriging 插值法考虑足够的空间信息来给出最优解. 可以将插值区域分成适当小网格, 这里采取 1° (经度) × 1° (纬度) 的划分方式, 任意点的 VTEC 都可以表示为这些网格点上的 VTEC 线性组合. 这样, 可以得到网格点 VTEC 和 DCB 的最小二乘最优解. 但是由于每 30 min 观测到的卫星及其个数不同, 求解出的 DCB 常因此发生跳变. 而 DCB 在短时间内 (一天) 应保持为常数. 所以将全天的数据放在一起最小二乘, 采用复弧法将网格点上的 VTEC 看为局部量求解, 每 30 min 解一组, DCB 作为全局量, 一天解一组. 由于理论上讲, 观测方程只能求解出精确的卫星与接收机硬件偏差的和, 因此在实际结算中, 我们需要给定一些假定条件, 如 IGS 假设所有卫星的 DCB 之和为 0. 本工作采用局域网中唯一的 IGS 基准站 SHAO 的 DCB 为已知值作为条件, 这是因为在观测数据中有一些卫星始终没有相应数据, 如果以所有卫星的 DCB 之和为 0 作为假设就不合理了. 可以看到本方法解出的 DCB 与 IGS 的基本相符 (见图 1).

2.2 利用 Kriging 方法对 VTEC 插值

Kriging 是一种针对有限区域进行无偏最优估计的线性插值方法. 与常用的距离反比法不同的是, Kriging 方法以变异函数为工具, 充分考虑了数据的空间分布统计特性. 变异函数, 即

$$\gamma(h) = E[Z(r) - Z(r+h)]^2/2.$$

其中, Z 表示某物理参量的空间分布函数, r 表示某点的空间位置, h 表示该点与另一个点之间的距离. 变异函数体现了空间两点间该物理参量的相关程度, 这样可以给出更精确的插值结果, 并且可以给出相应的插值精度. Kriging 方法一般先要确定变异函数的

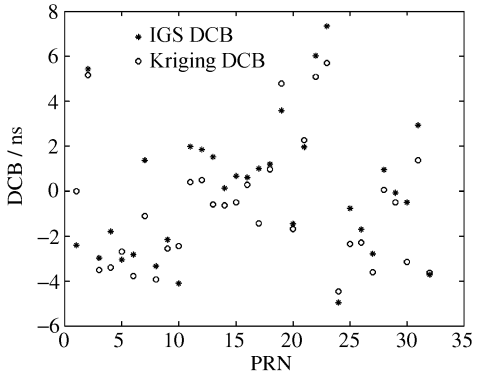


图 1 2008 年第 124 天 (5 月 3 日) IGS DCB 结果与本工作 DCB 结果的比较

Fig. 1 Comparison of IGS DCB (Differential Code Bias) result and our DCB result on 3 May 2008

形式, 然后利用已知的变异函数解算 Kriging 方程组, 方程组的解即是所需要的插值系数.

这里使用普通 Kriging 方法并选取常用的标准球状模型为变异函数模型进行计算, 有

$$\gamma(h)=\begin{cases} c\Big(\dfrac{h}{2a}-\dfrac{3h^3}{2a^3}\Big), & h<a;\\ c, & h\geqslant a. \end{cases} \tag{5}$$

其中, c 为基台值, 用来表示空间相关性; a 为变程. 式 (5) 表示当两点距离超过变程时, 它们之间的相关性趋近于一个常数, 即基本不相关. 由于插值系数只与选定的变异函数变程有关, 考虑到在一个网格中的点与该网格的格点有关, 而与其他网格的格点关系较小, 所以变程取为 $a=\sqrt{x^2+S_{\rm d}y^2}$, x 和 y 分别为网格经纬度边长, $S_{\rm d}$ 为表征空间各向异性的尺度因子 [5].

选取长江三角洲地区东经 115° ~ 123°, 北纬 29° ~ 35° 之间的 60 个测站的 GPS 数据, 其分布如图 2 所示, 观测数据的时间采样率有 10 s 和 30 s 两种, 利用双频伪距与相位的线性组合得到信号沿径方向上的电子总含量 (STEC). 假设电离层为高度 375 km 的单球壳, 将 STEC 投影成垂直 TEC (VTEC), 可以得到经度、纬度和时间分辨率分别为 0.1°, 0.1° 和 30 min 的电离层总电子含量分布 (见图 3). 图 3 表明, Kriging 插值的结果与 IGS 的 TEC 结果基本相符, 但获得了更多细节信息. 对于该范围内东经 115°, 119°, 123°, 北纬 29°, 32°, 35° 九个点, 以 IGS TEC 为标准, 进行 5 月份全月的统计分析, 得到均方误差 $E_{\rm RMS}=3.80$ TECU.

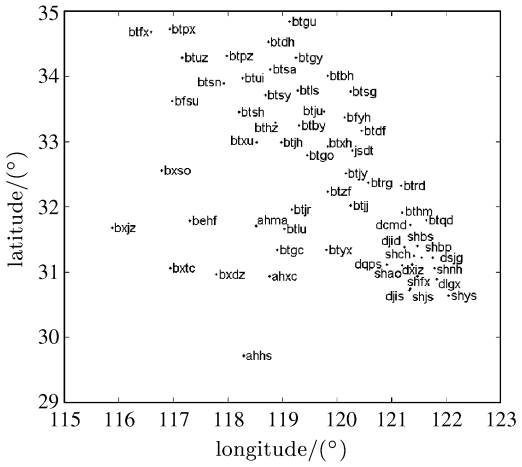


图 2 长江三角洲地区局域网测站分布

Fig. 2 Yangtze River regional GPS stations net

3 利用地基 GPS 数据层析四维电离层电子密度

层析算法多选用级数展开型算法, 即将待反演区域中的电子密度用某种基函数进行展开表达, 把反演问题转化为一个线性方程组的求解问题. 由于电离层层析数据分布的不完整性和不均匀性, 待求方程组往往存在秩亏的问题, 需利用相关函数法 [13]、奇异值分解法 [14]、代数重建技术 (ART)[15] 或乘型代数重建技术 (MART)[16] 等方法求解. 本文选择简化的三元样条插值基函数展开电离层电子密度, 利用 MART 方法迭代求解线性方程组.

3.1 观测方程的建立

假设将空间沿经度、纬度和高度均匀分成若干小网格, 那么可以把 $N_{\rm e}(r,\lambda,\varphi)$ 用样条插值的办法表示成它所在网格的 8 个顶点的线性组合:

$$\begin{aligned} N_e(x_1,x_2,x_3)=&\sum_{i=1}^{8}\sum_{a_1=0}^{1}\sum_{a_2=0}^{1}\sum_{a_3=0}^{1}\prod_{j=1}^{3}\cdot\\ &\Big[\Big(1+2\frac{|x_j-x_{ji}|}{\Delta x_j}\Big)(1-a_j)+(x_j-x_{ji})a_j\Big]\cdot\\ &\Big(1-\frac{|x_j-x_{ji}|}{\Delta x_j}\Big)^2\Big[(1-a_j)+a_j\frac{\partial}{\partial x_j}\Big]N_i. \end{aligned} \tag{6}$$

其中, x_1 为 r, x_2 为 λ, x_3 为 φ, N_i 表示 8 个顶点中第 i 个顶点, x_{ji} 表示该顶点 x_j 方向的坐标值, Δx_j 表示晶格 x_j 方向的边长, a_j 表示是否对 x_j 方向求偏导. 如果以研究区域的最外围为边界进行样条插值, 那么由于偏微分与很多顶点的值有关, 观测方程太过复杂, 运算时间令人无法接受. 因此权衡计算时间和精度, 这里仅考虑每个小网格的边界条件. 这样网格顶点对三个方向的混合偏微分值为零, 一次偏微分就等于该方向上两个顶点的差分值. 如果该方向的变化不是单调的话, 就认为微分值为零. 这样如果实际数据单调的话, 其形式就退化为线性插值, 在实际数据单调的情况下相邻差分值变化不大, 其遵循样条插值的条件, 变成了样条插值的简化形式. 根据 STEC 的定义对于插值系数沿路径有

$$I_{\rm STEC}=\int_{R_{\rm r}}^{R_{\rm s}}N_{\rm e}(r,\lambda,\varphi){\rm d}s=\sum_i a_{ij}N_i,$$

于是得到如下观测方程:

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon}. \tag{7}$$

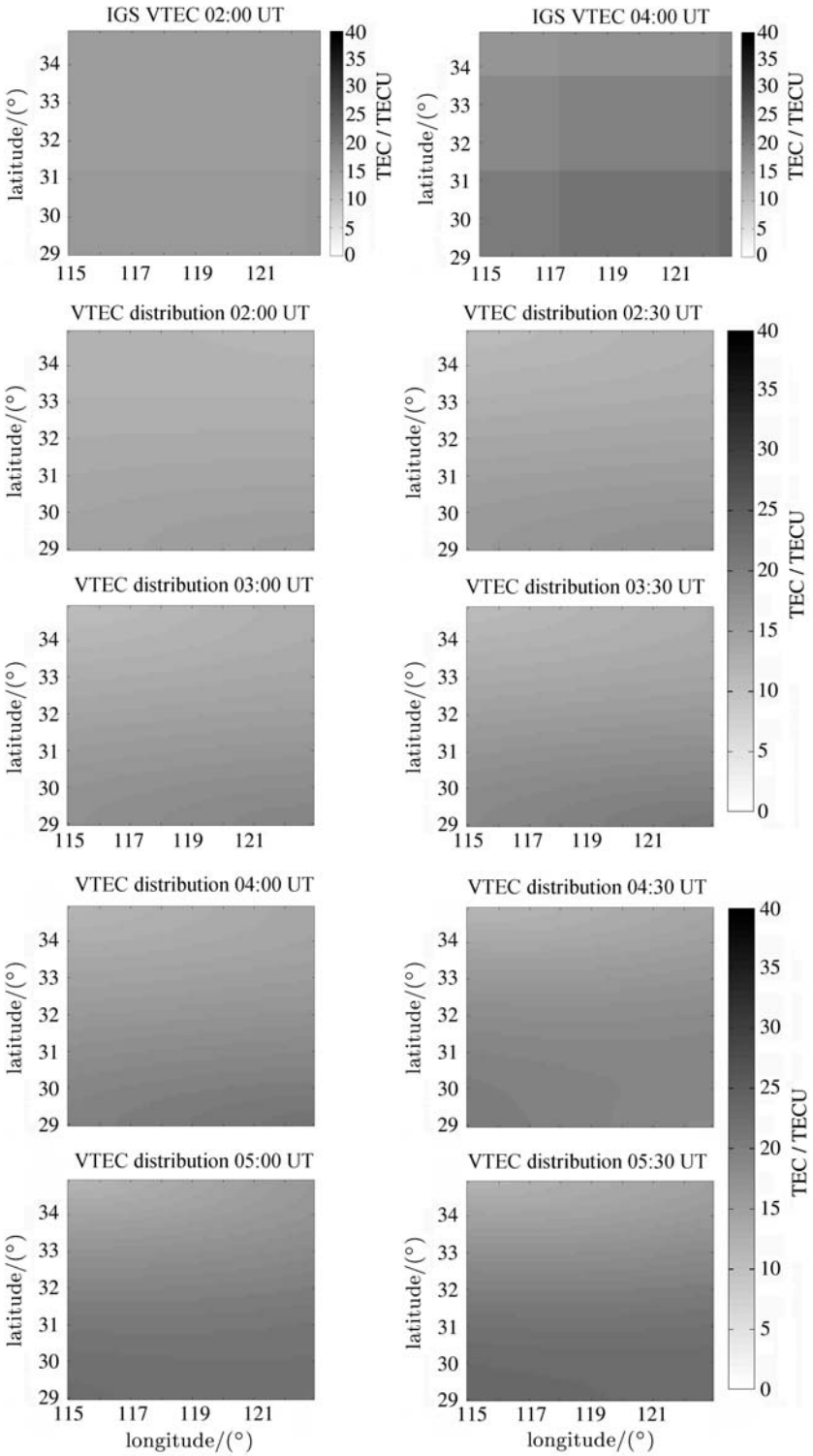


图 3 2008 年 5 月 19 日 02:00 UT, 04:00 UT IGS 的 TEC 分布和 02:00 UT—05:30 UT 的 Kriging 插值结果

Fig. 3 VTEC map made by IGS, interpolated with Kriging method at 02:00 UT—04:00 UT, May 19, 2008

其中, $\boldsymbol{y}$ 为各条路径上的 STEC 排列的矢量; $\boldsymbol{A}$ 为系数矩阵, 通过对之前所述的插值基函数积分获得; $\boldsymbol{x}$ 为所有网格点处的电子密度排列矢量; ε 为观测噪声.

3.2　应用 MART 方法层析

值得注意的是, 由于信号传播路径只经过层析区域的很小部分, 所以系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中大部分值为零. 系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 秩亏迫使必须选择类似乘型代数重建 MART 技术这样的方法迭代求解方程组, 而且对迭代初值要求很高, 一般以 IRI 等模型作为初值, 可以有效并快速逼近结果. 本文选用了 IRI2007 模型, 根据式 (7) 进行迭代, 有

$$x_j^{k+1} = x_j^k \Big(y_i \Big/ \sum_{j=1}^{n} a_{ij}\ x_j^k \Big)^{\lambda_i a_{ij}}. \tag{8}$$

其中, k 表示迭代次数, i 表示第 i 个观测值, j 表示 n 个未知数中的第 j 个, x, y, a 分别表示式 (7) 中各矩阵的分量. λ_i 是松弛因子, 指数的取值范围是 $0 < \lambda_i a_{ij} < 1$, 这里取 $\lambda_i = 1/\max\limits_{j=1}^{n}(a_{ij})$. 每 m 次迭代后, 即利用过所有观测量后, 以 $\max(y_i - \langle \boldsymbol{a}_i \cdot \boldsymbol{x} \rangle) < \sigma$ (σ 为给定的误差限) 来判别迭代是否收敛. 解算结果如图 4 所示. 图 4(a) 为 2005 年 5 月 15 日东经 38.8°、北纬 81.7° 本文结果, 与 IRI2007 模型和 CHAMP 无线电掩星计算结果电子密度垂直剖面的比较; 图 4(b) 为本文层析的四维电子密度分布 (为清晰起见, 中间进行了切片显示).

从图 4 可以看出, 层析结果与 CHAMP 结果基本符合, IRI2007 模型结果对电子密度略有低估, 以 300 km 左右最为显著. 由于该方法在具有相同观测方程的情况下, 每个方程牵涉了更多的自变量, 它的秩亏程度小于以常数展开电子密度的方法, 所以这种方法更适合于数据少的情况. 在数据量大时, 考虑将层析区域划分成更多的晶格, 会使常数展开法与该方法具有相似的精度, 因此, 该方法更适合将层析区域划分为略少的晶格. 这样一方面可以提高运算速度, 一方面又减少了其秩亏程度.

4　电离层电子密度在地震前后的异常分析

随着 GPS 的发展和应用, 越来越多的实时连续运行的 GPS 站建立, 这一方面提高了 GPS 应用的广泛性和实时性, 另一方面也引入了新的研究和应用领域, 如 GPS 应用于地震的监测. 除利用点位实时变化对地震进行 GPS 监测外, 近年来, 还发现电离层 TEC 在强震前后也有异常变化, 随之开展了大量电离层异常变化对强震的响应研究, 例如, 文献 [9] 和 [17–18] 分别用滑动平均 4 分位、1.5 倍标准差、差分等方法提取电离层异常信号, 从而揭示地震前后电离层异常变化的规律. 研究表明 5 级以上地震发生前, 电离层 TEC 多数可能会发生负异常现象.

本文选取 2008 年整个 5 月份长江三角洲地区的 GPS 数据, 分析 2008 年 5 月 12 日汶川地震前后电子密度的变化, 参考文献 [9] 的方法, 对数据时间序列取滑动平均作为正常 TEC 分布背景, 以偏离滑动平均值 4 分位数 (标准差的 1.34 倍) 并持续偏离两小时以上为异常的界定标准.　为了更加充分利用数

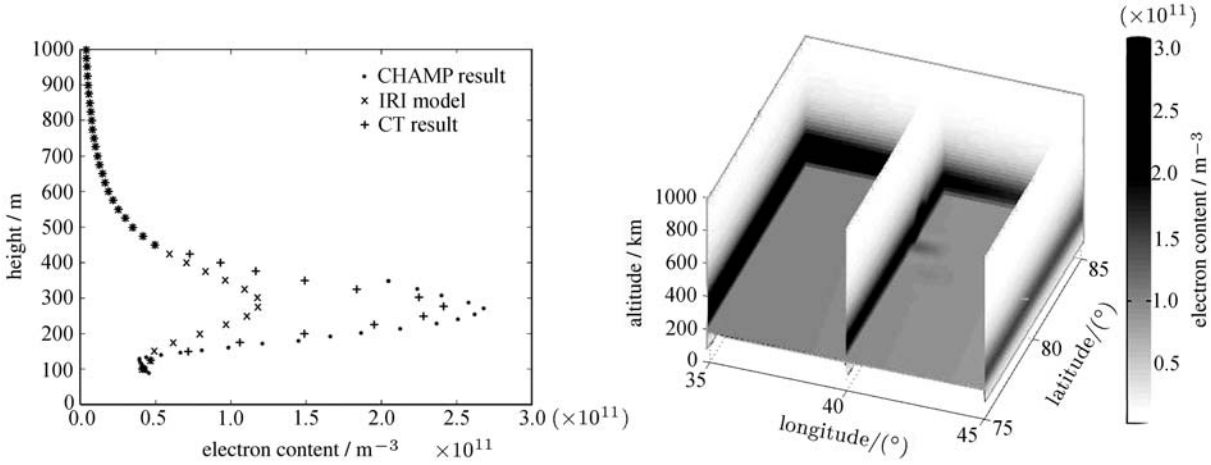


图 4　2005 年 5 月 15 日东经 38.8°、北纬 81.7°, 电子密度分布

Fig. 4　Electron density distribution at 20°E, 60°N, 15 May 2005

据和反应小时间尺度范围的异常变化, 这里以 5 天的滑动平均为正常背景值.

从 2008 年 5 月 6 日开始, 研究区域多时段出现负异常. 图 5—8 显示的是 5 月 12 日前持续两小时

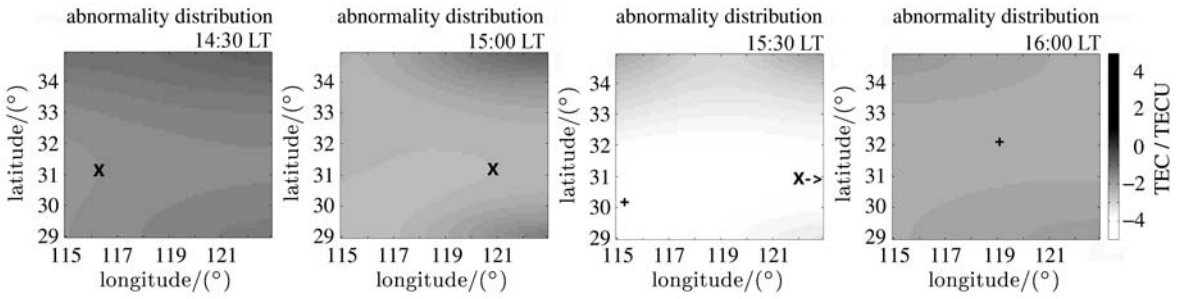


图 5 2008 年 5 月 6 日北京时间 14:30 TEC 异常情况

Fig. 5 TEC abnormality at 120°E, 14:30 LT, 6 May 2008

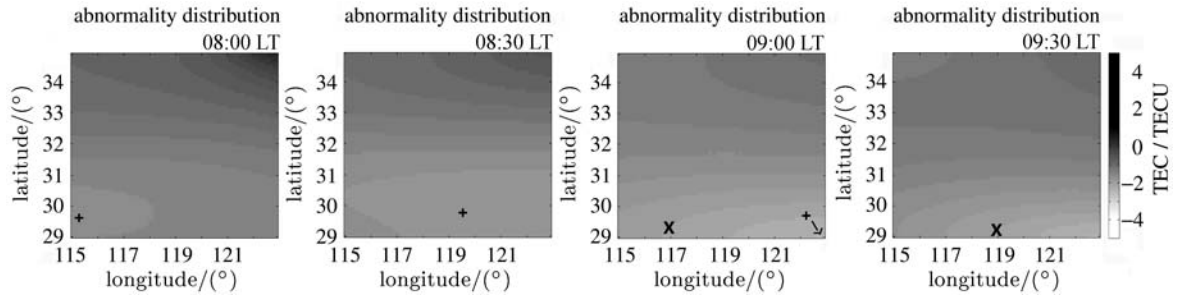


图 6 2008 年 5 月 8 日北京时间 08:00 TEC 异常情况

Fig. 6 TEC abnormality at 120°E, 08:00 LT, 8 May 2008

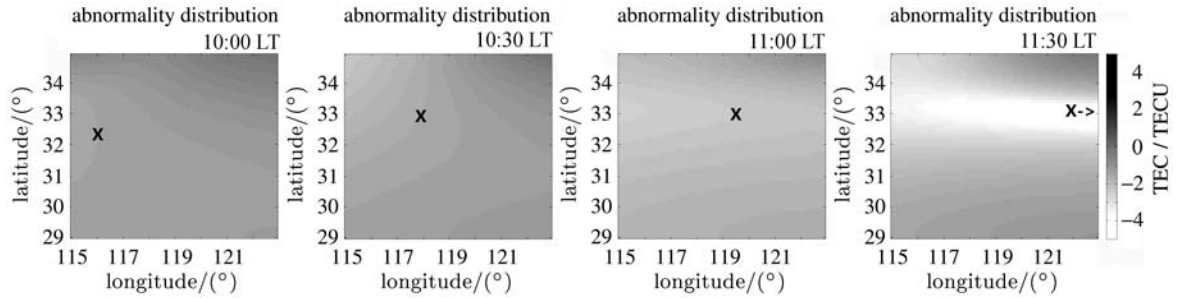


图 7 2008 年 5 月 10 日北京时间 10:00 TEC 异常情况

Fig. 7 TEC abnormality at 120°E, 10:00 LT, 10 May 2008

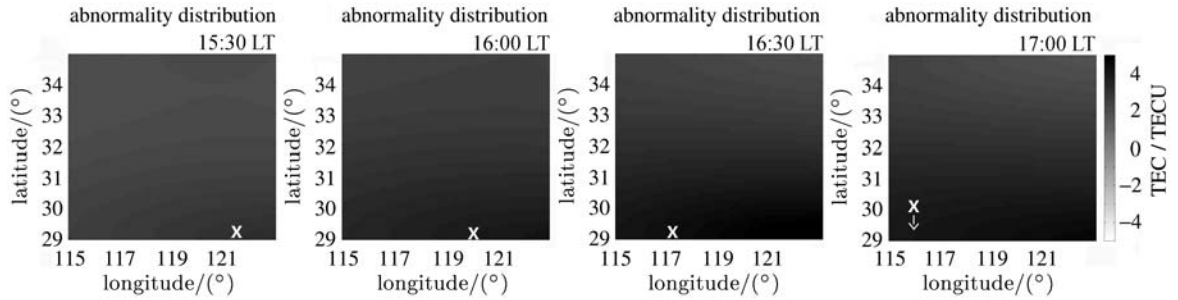


图 8 2008 年 5 月 9 日北京时间 15:30 TEC 异常情况

Fig. 8 TEC abnormality at 120°E, 15:30 LT, 9 May 2008

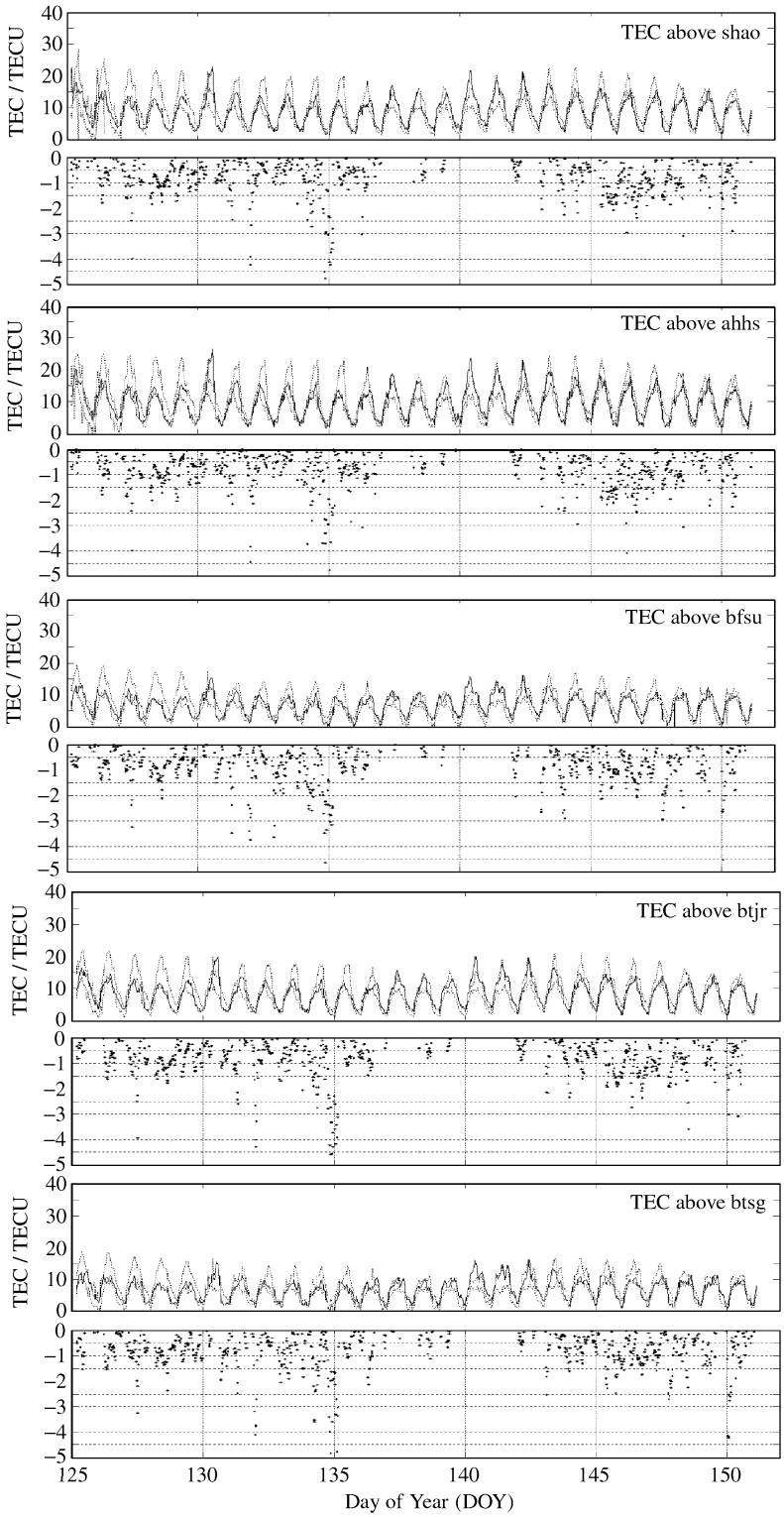


图 9　5 个测站的 TEC 时间序列 (每个测站的上图实线表示实测数据, 上下两条虚线分别表示背景值的上 4 分位数和下 4 分位数; 下图表示的是实测值与背景值之差除以标准差的 1.34 倍的结果)

Fig. 9　TEC time series at 5 stations (In the top panels for each station, the solid lines represent observation data, and the dash lines up and down represent higher and lower quartile respectively. The bottom panel shows the normalized difference between the observation and the background, where 1.34 times standard deviation of the background was taken as the normalization coefficient)

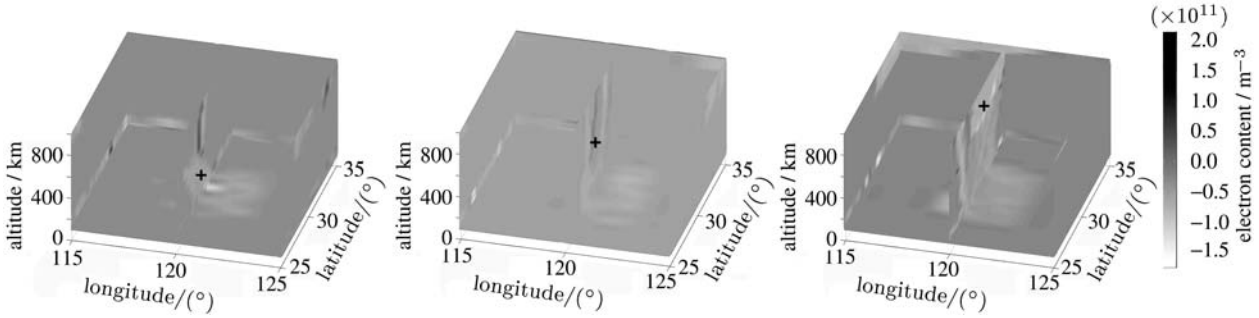


图 10 2008 年 5 月 6 日北京时间 14:00 TEC 异常情况 (+ 号表示异常区域中心的大致位置)

Fig. 10 TEC abnormality at 120°E, 14:00 LT, 6 May 2008 (+ marks the approximate center of TEC abnormality)

以上的较显著的异常情况, 图中灰度值表示的是实测值与背景值之差除以标准差的 1.34 倍, 色标中 0 刻度处的灰色表示正常, 白色表示负异常, 黑色表示正异常. 为了更清晰地显示异常区域运动情况, 图中以 "+" 标记异常区域中心的大致位置, 以 "×" 标记明显可以观察到运动变化的等值线. 图 5 显示 5 月 6 日北京时间 14:30, 异常区域从西南向东北方向运动; 图 6 显示 5 月 8 日北京时间 08:00, 异常区域从西向东运动; 图 7 显示 5 月 10 日北京时间 10:00, 也有异常从西向东运动. 由于只有长江三角洲地区 GPS 数据, 研究区域有限, 所以不能精确计算异常区域运动速度, 但根据异常区域等值线和梯度走向, 可以大概估计出其数值在 0.8~1.2 km/h 左右. 通过对 shao, ahhs, bfsu, btjr, btsg 几个考察点的时序分析 (见图 9), 可以看到该次地震震前几个考察点几乎都存在明显异常, 除 9 日 TEC 大幅增加外, 其余时段 TEC 均处于较低水平. 这些异常区域基本都是由西向东运动, 因此极有可能是由于地震引起的. 这个结论与赵必强 [19], 祝芙英 [20] 等的结果基本一致. 且通过异常的运动走向加固了地震与电离层异常的因果关系. 但是对于 9 日的正异常, 由于异常传播方向为自东向西 (见图 8), 因此作者认为它应与汶川地震没有联系, 这与余涛 [21] 等的结果稍有相左.

对于 VTEC 统计分析得到的 2008 年 5 月 12 日汶川地震前后几个比较明显的异常时段, 应用与二维分析相同的方法进一步研究电离层电子密度的三维变化情况. 其三维层析结果都有相应的负异常出现. 图 10 所示为 2008 年 5 月 6 日北京时间 14:30—15:30 的异常三维层析情况, 图中显示的这些异常自下至上运动. 该现象暗示了存在从下垫面传播上来的信号. 虽然这并不能确定为地震与电离层的联系, 但进一步增强了异常是由地震引发的这一推论的可能性.

一般认为, 电离层震前异常有可能来自内重力波、声重波、电磁辐射垂直分量或某些化学途径 [22], 其中内重力波理论认同度比较高. 就目前有限的分析区域得到的数据而言, 还不能对这些理论进行证实, 对于地震与电离层之间的联系及其物理机制还有待进一步研究.

5 结论

利用 Kriging 插值计算格网电离层总电子含量分布, 以及用三次样条插值作为基函数展开电离层电子密度实现乘型代数重建 MART 技术, 构建四维电离层电子密度的方法, 可以提高 GPS 反演电离层信息的精度, 有助于小尺度电离层异常活动的监测和电离层延迟改正精度的提高. 对于局域网利用 GPS 数据计算 TEC, 最好采用复弧法将 DCB 作为全局变量解算, 这样可以有效地消除卫星分布对 DCB 解算造成的不良影响.

如果能获得分布更广的数据, 并进一步提高 TEC 解算精度的话, 将可以确定异常中心, 精确测定异常运动速度, 与理论异常和其他方法得到的传播速度相比较, 从而对研究地震影响电离层的机制起到促进作用.

参考文献

[1] Wang Xiaoya, Zhu Wenyao. Methods and progress on monitoring ionosphere activity by GPS [J]. *Prog. Astron.*, 2003, **21**(1):33-40. In Chinese (王小亚, 朱文耀. GPS 监测电

离层活动的方法和最新进展[J]. 天文学进展, 2003, **21**(1):33-40)

[2] Feltens J. The international GPS service (IGS) ionosphere working (IGS) group 2003, **31**(3):635-644

[3] Yuan Yunbin, Ou Jikun. Study on the new methods of correcting ionospheric delay and ionospheric model using GPS data[J]. *J. Grad. School Chin. Acad. Sci.*, 2002, **19**(2):209-214. In Chinese (袁运斌, 欧吉坤. 基于 GPS 数据的电离层模型和电离层延迟改正新方法研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, **19**(2):209-214)

[4] Zhu Wenyao, Zhang Hongping, Huang Cheng. Monitoring of small-scale ionospheric heterogeneities using local GPS network[J]. *Chin. J. Geophys.*, 2002, **47**(6):941-948. In Chinese (朱文耀, 章红平, 黄珹. 利用 GPS 监测电离层不均匀结构探讨[J]. 地球物理学报, 2002, **47**(6):941-948)

[5] Mao Tian, Wan Weixing, Sun Lingfeng. Central and northern china TEC map using the Kriging method[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(4):279-285. In Chinese (毛田, 万卫星, 孙凌峰. 用 Kriging 方法构建中纬度区域电离层 TEC 地图[J]. 空间科学学报, 2007, **27**(4):279-285)

[6] Austen J R, Franke S J, Liu C H, *et al.* Application of computerized tomography technique to Ionospheric research[R]//Tauriainen A ed. Proceedings of URSI and COSPAR International Beacon Satellite Symposium on Radio Beacon Contribution to the Study of Ionization and Dynamics of the Ionosphere and to Corrections to Geodesy and Technical Workshop, Part I. Oulu, Finland, 1986. 25-35

[7] Xu Jisheng, Zou Yuhua. Reconstruction formula of time-dependent 3D computerized ionospheric tomography[J]. *Chin. J. Geophys.*, 2003, **46**(4):438-445. In Chinese (徐继生, 邹玉华. 时变三维电离层层析成像重建公式[J]. 地球物理学报, 2003, **46**(4):438-445)

[8] Jin Shuanggen, Zhu Wenyao. Mapping 3D ionospheric profiles using ground-based GPS measurements[J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2007, **27**(5):49-53. In Chinese (金双根, 朱文耀. 用地基 GPS 观测资料映射三维电离层剖面[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, **27**(5):49-53)

[9] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, *et al.* Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements[J]. *Rec. Dev. World Seism.*, 2005, **11**:63-70. In Chinese (Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, *et al.* 借助连续的 GPS TEC 测量记录到的地震前电离层异常[J]. 国际地震动态, 2005, **11**:63-70)

[10] Tian Yantao, Wang Xiaoya, Huang Cheng. Real-time precise monitoring TEC based on ground GPS network[J]. *Astron. Res. Tech.*, 2008, **5**(1):25-29. In Chinese (田言涛, 王小亚, 黄珹. 利用地基 GPS 网高精度实时监测电离层 TEC[J]. 天文研究与技术, 2008, **5**(1):25-29)

[11] Li Qiang, Feng Man, Zhang Donghe, *et al.* Methods of estimation of GPS instrumental bias from single site's GPS data and comparative study of results[J]. *Acta Scient. Natur. Univ. Pekin.*, 2008, **44**(1):149-156. In Chinese (李强, 冯曼, 张东和, 等. 基于单站 GPS 数据的 GPS 系统硬件延迟估算方法及结果比较[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2008, **44**(1):149-156)

[12] Xia Chunliang, Wan Weixing, Yuan Hong, *et al.* An analysis of the ionospheric disturbances during a magnetic storm observed with a GPS network[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(5):326-332. In Chinese (夏淳亮, 万卫星, 袁洪, 等. 磁暴期间电离层扰动的 GPS 台网观测分析[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(5):326-332)

[13] Ruffini G, Flores A, Rius A. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, **36**(1):143-153

[14] Wall M E, Dyck P A, Brettin T S. SVDMAN–Singular value decomposition analysis of microarray data[J]. *Bioinformatics*, 2001, **17**:566-568

[15] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three dimensional electron microscopy and X ray photography[J]. *J. Theor. Biol.*, 1970, **29**:471-481

[16] Raymund T D, Austen J R, Franke S J, *et al.* Application of computerized tomography to the investigation of Ionospheric structures[J]. *Radio Sci.*, 1990, **25**:771-789

[17] Zhang Qiang, Wu Yun, Lin Jian, *et al.* On ionospheric TEC anomaly before earthquake. *J. Geod. Geodyn.*, 2007, **27**(3):91-96. In Chinese (张强, 吴云, 林剑, 等. 震前电离层 TEC 异常分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, **27**(3):91-96)

[18] Garcia R, Crespon F, Ducic V, Lognonne P. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data. *Geophys. J. Int.*, 2005, **163**:1049-1064

[19] Zhao Biqiang, Wan Weixing, Wang Min, *et al.* Recent advances on the ionospheric pre-cursors of eartquakes and ionospheric variations prior to Wenchuan earthquake[J]. *Sci. Tech. Rev.*, 2008, **26**(11):30-34. In Chinese (赵必强, 万卫星, 王敏, 等. 震前电离层扰动研究进展及汶川地震前电离层变化[J]. 科学导报, 2008, **26**(11):30-34)

[20] Zhu Fuying, Wu Yun, Lin Jian, *et al.* Study on ionospheric TEC anomaly prior to Wenchuan ms 8.0 earthquake[J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2008, **28**(6):16-21. In Chinese (祝芙英, 吴云, 林剑, 等. 汶川 Ms8.0 地震前电离层 TEC 异常分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, **28**(6):16-21)

[21] Yu Tao, Mao Tian, Wang Yungang, *et al.* Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(4):493-499. In Chinese (余涛, 毛田, 王云冈, 等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. 科学通报, 2009, **54**(4):493-499)

[22] Cao Bingxia, Xue Jinghong, Qiao Xiaolin. Research progress on detection technology of seism-ionospheric disturbances[J]. *Progr. Geophys.*, 2009, **24**(1):51-57. In Chinese (曹丙霞, 薛敬宏, 乔晓林. 地震–电离层扰动探测技术的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2009, **24**(1):51-57)