0254-6124/2014/34(6)-822–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhang Xuemin, Liu Jing, Zhao Biqiang, Xu Tong, Shen Xuhui, Yao Lu. Analysis on ionospheric perturbations before Yushu earthquake (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 822-829, doi:10.11728/cjss2014.06.822

玉树地震前的电离层异常现象分析*

张学民[1] 刘 静[1,2] 赵必强[2]
徐 彤[3] 申旭辉[1] 姚 璐[1]

1(中国地震局地震预测研究所 北京 100036)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

3(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘 要 分析了玉树地震前地基电离层探测临界频率、GPS TEC 和卫星探测原位等离子体参量等多个参数的扰动变化信息, 研究了不同高度异常变化的时空关联性. 分析发现, 在地震前一天的 4 月 13 日, 多个电离层参量出现同步扰动异常, 电离层临界频率 f_0F_2 异常相对滑动中值增大 40%, 异常空间上存在从震中东南向西南漂移的特性; GPS TEC 异常增强 15 TECU (1 TECU= 10^{16} m^{-2}) 左右, 分布于震中南部经度 15° 范围内, 且有明显的磁共轭效应; DEMETER 观测的原位氧离子密度 $N_{\rm i}(O^+)$ 4 月 13 日为 1—4 月中最强的一天, 异常分布偏向赤道区, 但仅局限在 30°—50° 左右的经度范围内. 综合三个参量的异常特征发现, 无论是空间的局地性还是时间上的密切关联均反映这次电离层扰动可能与玉树地震孕育有关. 结合其他观测信息, 进一步探讨了这次地震孕育过程的地震电离层耦合机理.

关键词 玉树地震, GPS TEC, f_0F_2, 氧离子密度, DEMETER 卫星

中图分类号 P 353

Analysis on Ionospheric Perturbations before Yushu Earthquake

ZHANG Xuemin[1] LIU Jing[1,2] ZHAO Biqiang[2]
XU Tong[3] SHEN Xuhui[1] YAO Lu[1]

1(*Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing* 100036)

2(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

3(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

Abstract In this paper, the ionospheric perturbations in three parameters have been analyzed around Yushu earthquake, including f_0F_2 from ionosonde, GPS TEC, and in-situ plasma parameters by satellite. Their temporal and spatial relationship with this event were studied, and the results

* 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费 (02132405), 地震行业专项 (201004008) 和中俄国际科技合作项目 (2014DFR21280) 共同资助
2013-11-11 收到原稿, 2014-09-05 收到修定稿
E-mail: zhangxm96@126.com

showed synchronous disturbances in multi-parameters on 13 April, just one day before the Yushu earthquake. The f_0F_2 abnormally increased 40% relative to its sliding median of 5 days before, and its anomalous center moved from southeast to southwest. GPS TEC with abnormal amplitude of 15 TECU (1 TECU= 10^{16} m^{-2}) concentrated in a longitudinal scale of 15° over the south of the epicenter, and similar anomalies were found at its conjugate areas. While the in-situ observation of oxygen ion density $N_i(O^+)$ from DEMETER reached its maximum on April 13 for the four months from January to April in 2010, with the anomalies deviating to the equatorial areas but limited in the longitude scale of 30°−50°. Summing up the anomalous characteristics in these three parameters, whatever the local feature in space, or the close relevance in time, both exhibited possible relationship with the Yushu earthquake. Combined with other observations, the seismo-ionospheric coupling mechanism was discussed during the preparation process of Yushu earthquake.

Key words Yushu earthquake, GPS TEC, f_0F_2, Oxygen ion density, DEMETER satellite

0 引言

2010 年 4 月 14 日北京时间 7 时 49 分 (4 月 13 日 23:49 UT), 青海省玉树县 (96.6°E, 33.1°N) 发生 Ms 7.1 级地震, 震源深度 14 km. 这是该区 (以震中 300 km 为界) 有记录以来发生的最为强烈的地震. 玉树地震发生在青藏高原巴颜喀拉地块南边界, 巴颜喀拉地块是青藏高原较为重要的地块, 近年来围绕地块边界附近强震活动频繁, 例如 2008 年连续发生的于田 Ms 7.2 级和汶川 Ms 7.9 级地震等.

关于地震电离层扰动效应的观测和研究已经开展多年 [1−5], 大量研究结果表明, 地震引起的电离层扰动一般出现在震前一周内, 具有十分明显的短临特性, 例如 Pulinets 等 [1] 综合了 10 年的地震电离层研究, 发现异常出现在强震前 5 天到震前几个小时; 刘正彦等 [3] 分析了台湾地区 1994−1999 年全部 6 级以上地震的 GPS TEC 异常, 结果发现异常集中在震前 1∼6 天出现, 其中比较典型的 1999 年集集 Ms 7.7 级地震分别在震前 1, 3, 4 天有明显异常; Malchnov 等 [4] 分析的 Intercosmos 卫星电磁场数据显示, 异常集中在震前 12∼24 h 出现. 围绕汶川地震已开展了大量电离层扰动信息研究, 例如 GPS TEC[6−7]、电离层垂测 [8]、电磁卫星 [9−11] 以及电磁多参量综合分析等 [12−14], 所有结果均显示汶川地震前 2∼3 天电离层具有明显的异常增强现象.

本文对 2010 年玉树 Ms 7.1 级地震期间电离层多个参量的演化特征进行了分析, 尝试基于不同探测技术获取的不同高度电离层探测参量揭示其时空关联, 为地震电离层耦合机理研究提供更多参考信息和约束条件.

1 电离层背景情况

由于电离层参数的变化与太阳活动紧密相关, 因此在地震电离层效应研究中必须密切关注磁暴活动等与电离层各参数变化相关性很高的因素影响. 图 1 给出了 2010 年 1 月 1 日至 4 月 30 日太阳射电通量 $F_{10.7}$、地磁活动指数 Kp 和 Dst 的变化情况. 从图 1 中可以看出, 反映太阳活动影响的指数 $F_{10.7}$ 在整个时段内变化幅度较小, 稳定在 70∼80 之间, 表明该时段太阳辐射影响相对较小. 根据 Kp 和 Dst 指数变化 (见图 1), 在 2010 年 1−4 月发生多次磁暴活动事件, 出现较大的 Kp 和 Dst 指数扰动, 尤其最为明显的是 4 月 4−7 日的磁暴事件, 地磁指数 Dst 极小值为 −84 nT, Kp 指数达到 7, 属于强磁暴级别, 之后 4 月 11−12 日再次出现磁暴活动, Dst 极小值为 −69 nT, Kp 指数达到 5.3, 为中等偏弱磁暴级别. 地震前几天这些磁暴事件的发生给玉树地震前电离层异常识别带来了一定困难.

2 探测参量数据分析

2.1 地基电离层垂测资料分析

基于中国电波传播研究所电离层垂测站资料, 图 2 给出了中国玉树震中周边最近的 4 个站在 2010 年 4 月 4−19 日期间电离层临界频率 (f_0F_2) 的时间

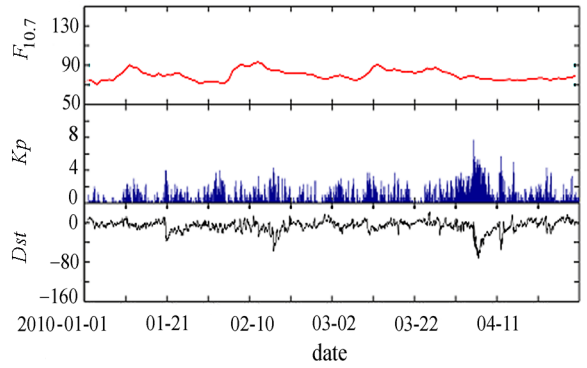

图 1 2010 年 1—4 月期间太阳及地磁活动指数时间序列

Fig. 1 Time series of solar and geomagnetic activity indices from January to April in 2010

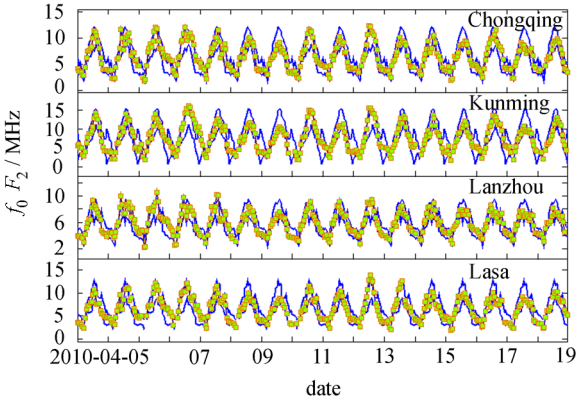

图 2 2010 年 4 月 4—19 日震中附近 4 站电离层 f_0F_2 的变化 (蓝色实线是上下四分位边界, 绿色方块为实测数据)

Fig. 2 Variation of f_0F_2 on four stations near the Yushu earthquake epicenter from April 4 to 19 in 2010 (blue lines are upper and lower quartile, and the green diamonds represent the observing data)

序列, 其中重庆、昆明、拉萨位于震中南部, 兰州位于东北方向. 利用分析当日的前 5 日滑动中值及四分位上下阈值 [8], 确定 f_0F_2 是否出现异常增加或减小. 如图 2 所示, 4 月 5—8 日兰州站发生明显正相扰动, 其中 6 日 15:00 LT 电离层 f_0F_2 最大值达 10.5 MHz, 超出四分位上阈值 17%, 8 日 14:00 LT—15:00 LT 相对扰动达 14%, 持续时间大于 2 h, 其他 3 个台站也存在一定扰动, 但幅度小于兰州台站. 与图 1 对比发现, 这个时段的扰动对应于 4—7 日的磁暴事件, 因此该时段电离层扰动与地震无关. 4 月 11—12 日中等磁暴期间, 4 个台站的电离层扰动均不是很明显, 但在 4 月 13 日, Kp 和 Dst 指数均恢复平静, 4 个台站却都出现不同程度正相扰动, 重庆站和拉萨站的扰动量甚至超过了 5—8 日磁暴期间的幅度, 拉萨站当日最大峰值达到 14 MHz 左右, 超出上限约 12%, 相对中值变化为 +40%, 为研究时段内最大值, 在排除太阳及磁暴活动影响的情况下, 认为该次扰动可能与玉树地震相关. 4 月 14 日拉萨站当日峰值依然超过四分位上阈值, 其他台站异常消失.

利用全国 14 个电离层垂测站 f_0F_2 数据, 生成 4 月 13 日电离层临界频率相对其前 5 日滑动中值的绝对偏差 Δf_0F_2 的二维分布 (见图 3), 图中更加直观反映出电离层扰动的强度及其空间分布状态. 如图 3 所示, 4 月 13 日 12:00 LTB (北京时间) 电离层异常分布在以昆明为中心的南部, 15:00 LTB 电离层异常向拉萨方向转移, 最大异常幅度均达到 4 MHz. 整体而言, 异常的扰动覆盖范围仍然很大, 考虑到局地活动性是地震电离层扰动与空间其他因素引起的大范围电离层异常的重要区别之一, 而且这次临界频率的异常扰动部分与电离层赤道峰值异常重合, 受中国台站布局所限, 这是局地还是大区域扰动尚需要有更大范围资料进行佐证.

2.2 GPS TEC 扰动分析

利用 JPL 提供的全球 TEC 数据 (经纬度分辨率为 5° × 2.5°), 选取玉树附近的 TEC 进行残差分析. 使用前 N 天的数据建立正常参考背景的时窗长度, 在此 N 天内, 取每天同一时刻的 TEC 观测值, 在假设其服从正态分布的条件下, 计算其均值 μ 和上下四分位点 Q_u, Q_l, 从而建立初始参考背景模型. 为可靠识别电离层异常变化, 将观测值 TEC 的上下边界分别设定为 $E_\mathrm{lb} = \mu - 1.5(\mu - Q_\mathrm{l})$, $E_\mathrm{ub} = \mu + 1.5(Q_\mathrm{u} - \mu)$, 这样 TEC 观测值将以 68% 的概率落到此背景区间内, 将超出此区间上下边界线且持续时间长达 2 h 以上的 TEC 观测值视为异常值.

利用上面介绍的 TEC 异常提取方法, 分析玉树地震前全球 TEC 扰动, 结果发现在 2010 年 4 月 1 日和 4 月 13 日玉树震中附近 TEC 均出现了显著异常增强事件. 图 4 分别给出了 13 日和 1 日 07:00 UT 时 (相当于 15:00 LTB) 的异常空间分布结果, 为了比较 4 月 1 日和 4 月 13 日异常的空间尺度范围, 选取 N =11 进行计算, 可以看到, 玉树地震南部的异常在这两天均很明显, 而且表现为当日的全球最强值, 同时其磁共轭区显示同步异常. 就空间范围而言, 4 月 13 日正异常范围基本局限在玉树附近经度跨度 15° 以内, 而 4 月 1 日异常经度跨度向东到达日

本, 向西到达伊朗, 跨度超过 30°. 根据地震震级影响的空间范围公式 $R = 10^{0.43\,\mathrm{Ms}}$[15] 可以计算出玉树地震的影响范围在 1300 km, 即 12° 左右, 这与 4 月 13 日的异常范围比较吻合. 需要注意的是, 在驼峰最强值附近, 2010 年 4 月 6 日印度尼西亚的苏门答腊附近海域还发生另外一次地震, 震级为 Ms 7.8 (2.38°N, 97.05°E), 因此 4 月 1 日的强扰动事件可能与这次地震也存在关联, 由于这次地震震级较大, 因此电离层扰动范围也明显大于 4 月 13 日的 TEC 增强范围, 不过 4 月 1 日的异常范围仍然偏大, 作为地震扰动的信度略低, 有可能是地震与赤道电离层异常综合作用的结果, 如图 4 所示, 4 月 13 日在震中西南部仍存在两处共轭的异常区, 可能也是玉树地震电离层效应叠加在赤道电离层异常上引起的扩展影响.

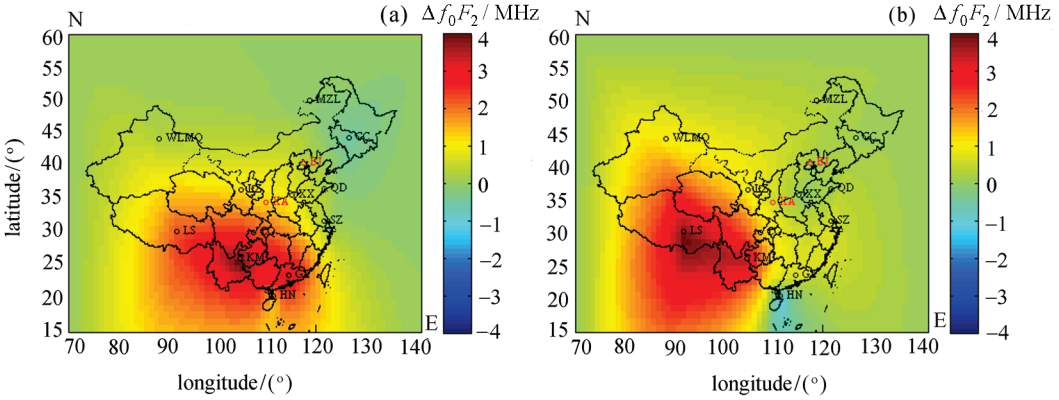

图 3 2010 年 4 月 13 日 12:00 LTB (北京时间) 和 15:00 LTB 全国电离层 Δf_0F_2 分布

Fig. 3 Δf_0F_2 in ionosphere over China at 12:00 LTB (Local Time of Beijing) and 15:00 LTB on April 13 2010

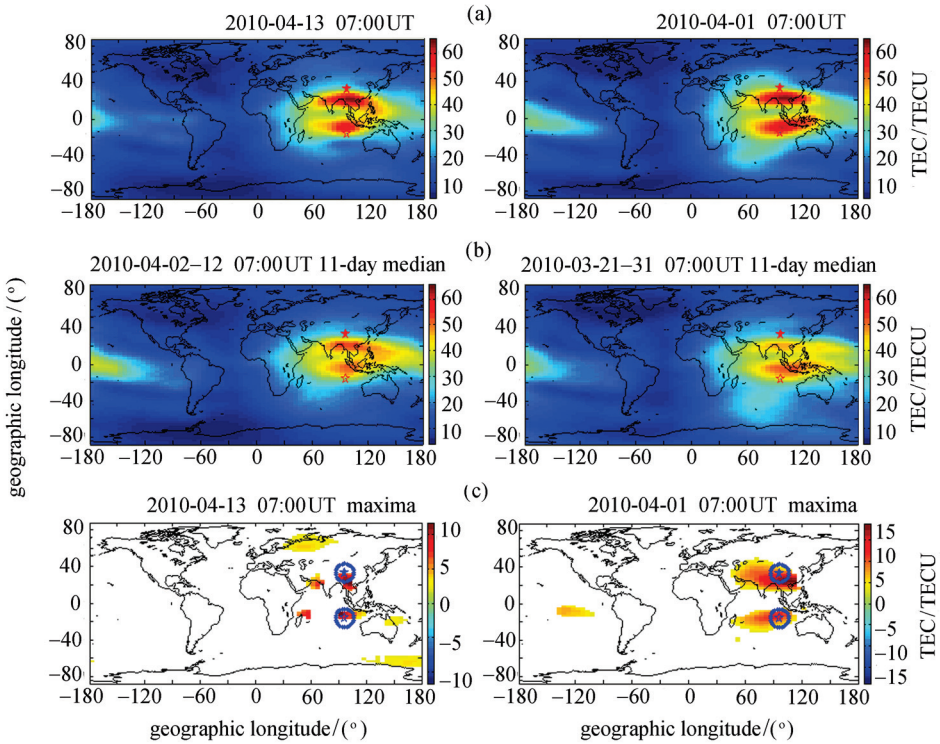

图 4 2010 年 4 月 13 日和 4 月 1 日 11 天滑动背景 GPS TEC 异常提取空间分布. (a) GPS TEC 原始观测, (b) 滑动中值背景, (c) 异常最大值累计

Fig. 4 Spatial distribution of anomalies in GPS TEC by moving days of 11-day sliding background on April 13 and 1. (a) raw data of GPS TEC, (b) the sliding median of background, (c) the maxima accumulation of GPS TEC

2.3 卫星探测原位等离子体扰动

为便于与前面的 GPS TEC 以及电离层垂测资料进行对比, 探索不同高度电离层等离子体参量的扰动特征, 在此收集了法国 DEMETER 卫星 (2004−2010 年期间在轨运行, 飞行高度 670 km) 白天 (10:30 LT) 过境的距离震中 2000 km 范围内的所有轨道, 在此仅对等离子体分析仪 (IAP) 观测的氧离子密度 $N_i(O^+)$ 参量进行分析. 为避开太阳活动及磁暴等影响, 剔除了 Kp 指数中显示的地磁扰动日数据, 将剩余数据按观测日期先后绘制氧离子密度随纬度变化的散点图, 图 5 给出了 2010 年 1−4 月每个月的氧离子密度变化情况, 在此仅截取了北纬 0°−50°N 区域的数据. 可以看到, 氧离子密度自进入 2 月份以后, 北半球 20° 以南地区氧离子密度相对 1 月份同区域明显增强, DEMETER 卫星观测在 670 km 高度, 该高度电离层在赤道附近一般不呈现双峰形态, 而以单峰分布为主 [10]. 2−4 月相对 1 月整体氧离子密度有所增强, 可能存在一定的自冬季向春季过渡的季节变化特征. 对比 2, 3, 4 月几次明显的高值 (2 月 12 日, 3 月 15 日, 4 月 13 日等), 最为突出的是 4 月 13 日的大幅度增强, 最大超过 $8\times10^4\,\mathrm{cm}^{-3}$, 相对 2, 3 月的峰值 (约 $6\times10^4\,\mathrm{cm}^{-3}$) 增加了 33%, 这条轨道是在玉树地震前 20 h 左右记录到的, 与玉树地震在时间上关联性比较强, 而且也与 GPS TEC 以及 f_0F_2 参量出现在同一天近似的时段内, 彼此之间有显著的时空对应关系, 反映出 4 月 13 日电离层不同高度不同观测参量呈现相对比较统一的扰动现象.

区分地震扰动与磁暴等活动的一个很重要的评判标准为异常是否具有局地性特征, 鉴于 2010 年 4 月初磁暴活动比较剧烈, 图 6 给出了 6−7 日地磁活动比较剧烈时 DEMETER 卫星观测数据与 13−14 日地磁活动平静期氧离子密度全球图像的对比. 结果发现, 磁暴活动期间, 连续两天的轨道记录均在较大范围内记录到较强的峰值密度, 异常增强经度跨度超过 200°, 而玉树地震前后 13−14 日, 异常明显范围缩小, 仅在中国区域上空 70°−120°E 范围内, 说明地震前后的电离层扰动异常确实有一定的局地效应, 与 GPS TEC 的分析结果一致. 另外, 从图 6(b) 可以看到, 13−14 日 180°E 附近也有两轨异常扰动, 附近并没有强震发生, 这给玉树震中附近的异常判定造成了困惑, 是否这些异常仍然是 11−12 日磁暴效应的后续响应, Li 等 [16] 曾利用 DEMETER 卫星观测资料统计分析了不同地磁环境下电子密度的空间分布

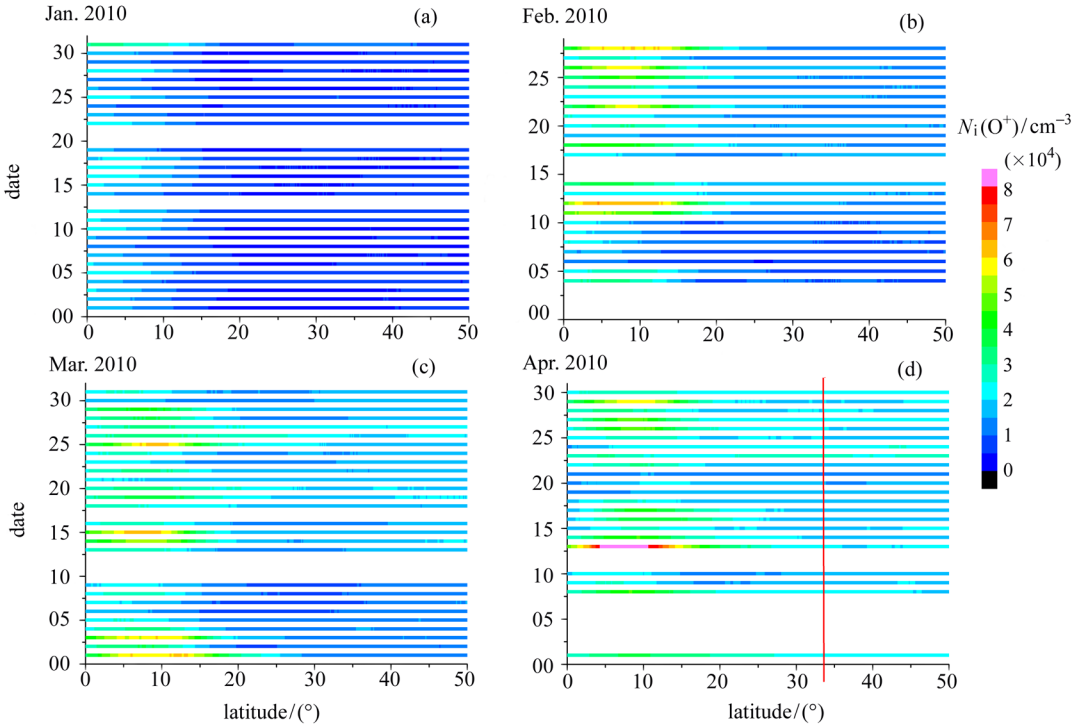

图 5 DEMETER 卫星观测的氧离子密度日时序结果 (红色竖线表示玉树地震震中纬度)

Fig. 5 Daily series of oxygen ions from DEMETER (the red line points to the latitude of Yushu earthquake)

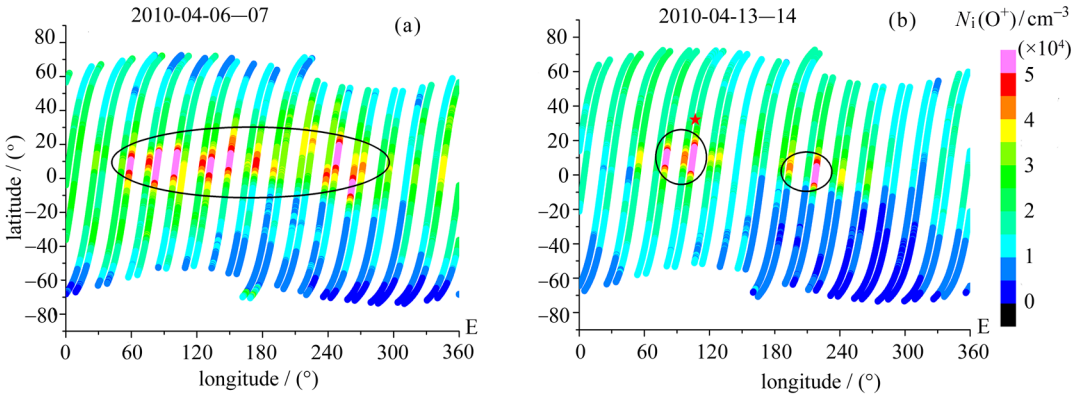

图 6 DEMETER 卫星在 2010 年 4 月 6—7 日和 13—14 日观测的氧离子密度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of oxygen ion density from DEMETER on April 6—7 and 13—14

状态, 结果发现太阳磁暴活动引起的磁层向内入侵造成高纬电离层/磁层区域向低纬移动, 电子密度普遍增大, 赤道峰值向中纬区扩宽. 考虑到卫星高度电子密度与离子密度分布的近似性, 图 6 中磁暴引起的电离层变化特征与地磁活动时期电子密度的扰动特征非常接近, 而 13—14 日的分布形态整体氧离子密度除赤道区域的两处增强异常外, 其他区域并没有明显增加的迹象, 同时高纬度地区尤其是北半球高纬地区并没有磁层侵入迹象, 这与磁暴活动时期还是存在一定差异的. 由于 180°E 附近的赤道异常目前未能找到相邻区域地震或其他扰动源, 其孕育机制还有待深入研究.

对比图 4 与图 5 的分析结果, 4 月 1 日 GPS TEC 在赤道附近印尼苏门答腊地震上空及其共轭区发现了比 4 月 13 日更大范围的强异常, 而 DEMETER 卫星观测氧离子密度当日并未呈现明显扰动现象 (由于两次地震的经度接近, 因此图 5 中使用的轨道可以应用苏门答腊地震分析), 因此 4 月 1 日的电离层扰动与 4 月 13 日是明显不同的. 如果均采用具有全球分布特征的两种数据源来约束地震电离层异常扰动, 单独选择一种参量分析时, 13—14 日 180°E 区域的氧离子异常和 4 月 1 日的 GPS TEC 异常可能均与地震的关联性不大. 而使用多种数据源无疑会大大降低获取的异常次数, 使地震电离层异常的信度相对得到提高, 但也因此会损失掉只存在于单一参量上的扰动异常, 毕竟地震–电离层耦合机理非常复杂, 地震孕育的环境背景也均存在明显差异, 不能保证每一次地震引起的电离层扰动一定会在多个参量上均有反映. 鉴于地震电离层扰动时空形态的复杂性, 判识电离层异常是否与地震相关还有大量问题亟待解决.

综合以上分析结果, 4 月 13 日由地基垂测观测的电离层临界频率 f_0F_2、沿传播路径积分的 GPS TEC、位于 670 km 高度的卫星原位等离子体参量, 在地震前一天 10:00 LTB—15:00 LTB(玉树地震发震时间为 14 日 07:49:38 LTB), 电离层自下而上均出现明显的等离子体参量增强现象, 而全球观测 GPS TEC 和卫星资料处理分析发现, 这次异常有明显的局地性特征, 符合地震电离层异常判定标准, 因此可能与该次地震的孕育发生有一定关联.

3 讨论与结论

玉树震区位于中国的西北部, 是地基前兆监测台比较稀疏的地区, 震前观测到的前兆异常非常有限. 由于卫星观测不受地理条件的制约, 因此在玉树地震分析中发挥了较大优势. Cui 等 [17] 利用高分辨率遥感卫星数据反演地表温度、水气、CO 总量和 CH_4 体积分数的时空变化, 研究了玉树地震前后大气物理化学参量的扰动特征. 由 MODIS 反演的地表温度在 3 月 18 日、4 月 12 日和 4 月 18 日显示高值, 3 月 29 日、4 月 7 日显示低值异常. Kang 等 [18] 利用美国 NOAA-18 极轨卫星观测的长波辐射 (Outgoing Long Wave Radiation, OLR) 数据, 研究了玉树地震前 OLR 涡度变化空间及时间序列图像, 发现 4 月 12 日青海玉树显示出一个涡度值高达 + 46.5 $W\cdot m^2$ 的

全区域最大异变中心, 远高于 2009 年同期水平; 震中区域从震前 10 天至震后 1 天的 OLR 时序曲线显示, OLR 自 4 月 11 日快速上升, 12−14 日维持在高值, 震后恢复. 本文分析的玉树震前电离层数据发现, GPS TEC, f_0F_2 及卫星原位氧离子密度 $N_{\rm i}(O^+)$ 在震前一天即 4 月 13 日均出现了扰动现象, 与卫星观测地表温度以及 12−14 日红外 OLR 涡度高值异常时段比较吻合.

地震电离层耦合机理研究目前大多还处在定性分析阶段, 一些数值模拟理论还在不断发展, 目前相对比较被认可的耦合机理有电磁波传播模型、异常电场模拟和声重力波传播理论 [19], 其中声重力波理论在同震电离层 TEC 异常分析以及震后海啸等引起的电离层扰动等现象解释中得到了比较广泛的应用 [20−23], 但由于地震孕育过程很难达到震时那么强烈的破裂及地面震动效应, 所以可能引起的电离层扰动幅度较小, 因此这个理论假设还很难解释地震前电离层的强扰动现象. 由于震前曾观测到大气电场异常以及氡辐射增强等现象, 异常电场假说被较多的研究者所接受. Kuo 等 [24] 提出了一个受压岩石–地表充电–大气层–电离层系统的耦合模型, 认为受压岩石可以激发带电空穴载体, 并沿应力梯度方向形成电流, 从而在地表引起正电荷的积聚, 导致震中上空大气电导率增强, 最终引起电离层扰动现象. 根据文献 [24] 的计算, 岩石中电流密度 $J_{\rm rock}$ 为 0.2 ∼10 μV·m^{-2} 时就可以引起白天电离层 TEC 上升 2%∼25%, $J_{\rm rock}$ 为 0.01 ∼ 1μV·m^{-2} 时电流就能导致 1%∼30% 夜间 TEC 扰动及夜间 F 层等离子体泡的出现. Ding 等 [12] 根据经验公式由电离层参量估算了 F 区异常电场, 结果显示汶川地震前 2∼5 天重庆台电离层 F 层临界频率增加 4.5%, 推测该区异常电场为 0.24 mV·m^{-1} 左右. 由于玉树地震相对汶川地震震级小, 本次异常分析结果显示的电离层异常幅度也低于汶川地震前的结果, 以幅度大小而言, 引起电离层扰动的异常电场是可能存在的. 结合地表温度、OLR 等异常现象 [17−18] 分析, 可以看出玉树地震孕育区存在化学物质积聚、地表温度增加以及正电荷积累的可能, 因此直流电场的叠加耦合效应可能是导致本次地震电离层异常的主要因素. 而全球 GPS TEC 提取到的异常图像还发现共轭异常, 如图 4(c) 所示, 反映出电离层电子在异常电场 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 作用下聚集于电离层峰值高度, 并在中性风作用下向南北两侧运移的效应, 这与 Kuo 等 [24] 通过叠加外部异常电场的耦合模拟计算结果是基本吻合的.

通过对玉树地震前后空间电磁场数据的研究, 发现对于地基电离层探测 f_0F_2, GPS TEC 和卫星原位等离子体观测三种参量, 在 4 月 13 日相近时间段内均观测到异常增强现象, 反映了电离层自下而上的一次同步扰动事件, 异常持续时间超过 4 h, 相对变化幅度大于 30%, 各参量异常均分布在震中的南方及西南方向, GPS TEC 还呈现明显的共轭效应, 这些异常现象与地震电离层耦合模拟呈现的特征一致, 是电离层中带电粒子在附加异常电场作用下受地磁场及中性风等因素综合控制的结果. 结合地温等观测数据在相近时段内的异常, 4 月 13 日电离层扰动空间分布的局地性及在时间上与玉树地震关系密切, 认为可能是玉树地震孕育过程中地震破裂带化学物质激发积累, 产生大气电场异常, 进而叠加作用于电离层, 引起赤道峰值的北向移动和等离子体参量的强烈扰动. 本次地震的研究结果进一步佐证了地震电离层效应的短临特征和局地性特点, 多参量的同步分析为地震电离层扰动判识及地震–电离层耦合机理研究提供了更多约束条件. 但值得注意的是, 不同类型数据在分析处理过程中除发现与地震及磁暴活动相关的异常扰动外, 单一参量还存在一些局地异常, 无法用地震加以解释, 采用多参量综合分析确实可以排除一些局地异常, 但也损失掉一些可能与地震相关的单一参量异常, 未来在地震电离层异常识别和判定的过程中还需结合地震–电离层耦合机理, 综合更多资料开展深入研究.

参考文献

[1] Pulinets S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, Depuev V Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2003, **65**(16-18):1337-1347

[2] Pulinets S A, Liu J Y, Safronova I A. Interpretation of a statistical variation in the f_0F_2 critical frequency before earthquake based on data from Chung-Li ionospheric station (Taiwan) [J]. *Geomag. Aeron.*, 2004, **44**(1):102-106

[3] Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, Tsai Y B, Chuo Y J. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geqslant 6.0$ Taiwan earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(19):3113-3116

[4] Molchanov O A, Mazhaeva O A, Goliavin A N, Hayakawa M. Observations by the Intercosmos-24 satellite of ELF-

VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes [J]. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**:431-440

[5] Parrot M. Statistical studies with satellite observations of seismogenic effect [C]//Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Tokyo: TERRAPUB, 1999. 685-696

[6] Zhao B, Wang M, Yu T, Wan W, Lei J, Liu L, Ning B. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A11304, doi: 10.1029/2008JA013613

[7] Lin Jian, Wu Yun, Zhu Fuying, *et al*. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(1):297-300. In Chinese (林剑, 吴云, 祝芙英, 乔学军, 周义炎. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常 [J]. 地球物理学报, 2009, **2**(1):297-300)

[8] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, *et al*. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:1585-1593

[9] Zeng Zhongchao, Zhang Bie, Fang Guangyou, *et al*. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(1):11-19. In Chinese (曾中超, 张蓓, 方广有, 等. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(1):11-19)

[10] Zhang X, Shen X, Liu J, *et al*. Analysis of ionospheric plasma perturbations before Wenchuan earthquake [J]. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 2009, **9**(4):1259-1266

[11] Zhang X, Shen X, Liu J, *et al*. Ionospheric perturbations of electron density before the Wenchuan earthquake [J]. *Int. J. Rem. Sen.*, 2010, **31**(13):3559-3569

[12] Ding Zonghua, Wu Jian, Sun Shuji, *et al*. The variation of ionosphere on some days before the Wenchuan earthquake [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2010, **53**(1):30-38. In Chinese (丁宗华, 吴健, 孙树计, 等. 汶川大地震前电离层参量的变化特征与分析 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(1):30-38)

[13] Zhang Xuemin, Ding Jianhai, Shen Xuhui, *et al*. Electromagnetic perturbations before Wenchuan M8 earthquake and stereo electromagnetic observation system [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **24**(1):1-8. In Chinese (张学民, 丁鉴海, 申旭辉, 王敏, 等. 汶川 8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系 [J]. 电波科学学报, 2009, **24**(1):1-8)

[14] Zhang Xuemin, Shen Xuhui. Electromagnetic anomalies around the Wenchuan earthquake and their relationship with earthquake preparation [J]. *Int. J. Geophys.*, 2011, doi: 10.1155/2011/904132

[15] Dobrovolsky I R, Zubkov S I, Myachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1979, **7**:1025-1044

[16] Li Liuyuan, Yang Junying, Cao Jinbin, *et al*. Statistical backgrounds of topside-ionospheric electron density and temperature and their variations during geomagnetic activity [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2011, **54**(10):2437-2444, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.001. In Chinese (李柳元, 杨俊英, 曹晋滨, 等. 顶部电离层电子密度和温度的统计背景及其地磁活动变化 [J]. 地球物理学报, 2011, **54**(10):2437-2444)

[17] Cui Y, Du J, Chen Z, *et al*. Remote sensing signals of atmospheric physics and chemistry related to 2010 Yushu Ms 7.1 earthquake [J]. *Adv. Earth Sci.*, 2011, **26**(7):787-794. In Chinese (崔月菊, 杜建国, 陈志, 等. 2010 年玉树 Ms7.1 地震前后大气物理化学遥感信息 [J]. 地球科学进展, 2011, **26**(7):787-794)

[18] Kang Chunli, Liu Defu, Jing Feng, *et al*. Study on the indication of infrared radiation prior to impending strong earthquakes [J]. *Prog. Geophys.*, 2011, **26**(6):1897-1905. In Chinese (康春丽, 刘德富, 荆凤, 等. 大地震红外辐射异常信息时空特征分析 [J]. 地球物理学进展, 2011, **26**(6):1897-1905)

[19] Pulinets S, Ouzounov D. Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling (LAIC) model—An unified concept for earthquake precursors validation [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2011, **41**(4/5):371-382

[20] Artru J, Ducis V, Kanamori H, *et al*. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis [J]. *Geophys J. Int.*, 2005, **158**:1067-1077

[21] Artru J, Farges T, Lognonné P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: Propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling [J]. *Geophys. J. Int.*, 2004, **158**:1067-1077

[22] Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**, A02305, doi:10.1029/2011JA017036

[23] Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. Responses of the ionosphere to the Great Sumatra Earthquake and volcanic eruption of Pinatubo [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(7):1955-1957

[24] Kuo C L, Huba J D, Joyce G, Lee L C. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A10317, doi:10.1029/2011JA016628