

汶川特大地震前电离层主要参量变化

余涛, 毛田, 王云冈, 王劲松

国家空间天气监测预警中心, 北京 100081

E-mail: yutao@cma.gov.cn

2008-08-05 收稿, 2008-10-29 接受

国家自然科学基金(批准号: 40504023)和国家高技术研究发展计划(批准号: 500009003)资助项目

Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake.

Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 1086—1092, doi: 10.1007/s11434-008-0587-8

摘要 利用 GPS-TEC 和厦门电离层测高仪数据, 分析了汶川大地震前我国地区电离层的形态和变化. 其中, 利用 JPL 提供的电离层 TEC 地图数据分析发现, 在地震前 3 天的下午 16~18 LT, 汶川以东南约 20°范围内的我国地区电离层 TEC 出现了 10~15 TECU 的显著增强, 同时在南半球磁力线共轭区也出现了电离层 TEC 增强现象, 增强幅度约 10 TECU, 在此区域外全球其他地区未见明显 TEC 增加或减少. 从 TEC 数据中也可以看出在地震前 6 天(5 月 6 日)我国南方地区发生了电离层 TEC 减小现象, 与 9 日出现的电离层 TEC 增强现象相比, 此次减小的幅度较小(约 4 TECU)、区域较大(经度方向约 80°), 在南半球磁力线共轭区域未见如此大面积的 TEC 同步减小现象. 主要分析厦门站数据并参照少数其他台站测高仪资料的监测结果显示, 我国多个电离层垂测站均观测到电离层的异常扰动. 发现震前 3 天地震附近地区出现了电离层参量异常增加, 与以往研究发现的震前电离层参量异常减小的结果不一致, 初步分析此次震前震前 3 天电离层参量异常增加可能与该区域电场突然增加有关, 可能是本次地震的电离层前兆; 震前 6 天电离层参量的异常减小可能与发生在 5 月 5 日的地磁小扰动有关, 具体因素需进一步分析.

关键词
地震
电离层
先兆
TEC
foF2

地震是地球内部能量释放的一种形式, 越来越多的研究结果显示, 地震对地球环境的影响不仅集中在地球表面, 还可能影响到高空大气和电离层高度, 使得电离层电子浓度等参量出现异常.

自Barnes^[1]于 1965 年首次注意到电离层扰动和地震之间的关联之后, Weaver等人^[2]也发现 1969 年Kurile岛地震期间的电离层扰动现象, Antsilevich^[3]发现了 1966 年Tashkent地震时电离层电子浓度有增加的现象, 近年来台湾学者Liu等人^[4]分析了大量的地震电离层扰动事例, 研究结果表明, 在震级大于 6 级的地震发生前几天内, 地震地区及其附近一定范围内的电离层可能出现大范围的异常扰动现象, 这些异常扰动在排除空间天气和电离层本身的影响之外, 一般认为是和地震相关.

1 电离层主要参量

由于电离层本身是一个复杂的系统, 在无法全

面了解地震期间电离层系统全貌的情况下, 研究工作主要集中在地震期间几个电离层主要参量的扰动和变化方面: (1) foF2, 即电离层 F2 层临界频率, 它正比于电离层 F2 层最大电子浓度平方根. (2) TEC, 电离层电子浓度沿垂直高度的积分总含量, 它表征沿垂直方向上电离层电子的总数目. 这两个参量有很好的相关性, 都是电离层研究中最常用的参数, 下面简要地介绍一下利用这两个参量研究地震电离层扰动的成果.

1.1 电离层 foF2

F 层是电离层相对稳定的一层, 常常是在分析地震对电离层的影响时关注的重点, 通常的研究关注电离层 foF2 在地震期间的增加或减少, 以及在时间和空间上和地震的对应关系.

Pulinets等人^[5]分析foF2 日变化, 发现在 1979~

1981年发生的几个强震前一些电离层参数有扰动存在,其中,foF2会异常减小,h'F₂会异常增大.随后他统计了50个 $M \geq 5.0$ 的地震上空的电离层变化^[6],再次确认了foF2在地震前有明显降低的现象,并发现电离层异常区与震源区的位置是对应的,但是异常的峰值点与震中的投影点并不是重合的,发生扰动的异常区的直径大概是 $20^\circ \sim 30^\circ$ 量级,而且有时异常扰动区在相对应的磁共轭区也可以观测到.Ondoh^[7]分析1993年7月发生在日本Okushiri($M = 7.8$)级大地震,发现在震前后的3个晚上,foF2都小于其月中值.且从观测图上可以看出F层虚高h'F在震前的3个晚上高于其月中值,而在震后的3个晚上低于其月中值.Liu等人^[4]分析了台湾地区1994~1999年期间6.0级以上地震前的电离层F2层临界频率变化,其结果表明,地震前1~6天,当地时间12:00~17:00电离层foF2相对其前15天的中值有比较明显的下降,并将此现象作为一种地震前兆预报地震.Hobara等人^[8]也分析了一个大地震期间全球各地区的电离层扰动,结果表明,仅仅离震中较近的台站观测到foF2的明显下降,而且不仅地震前有下降,地震后此现象也有可能发生.丁鉴海等人^[9]利用中国地磁台网与电离层台站资料,对比研究了1997年11月8日玛尼7.5级与2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震前磁场与电离层异常分布及特征,结果显示两次巨大地震前磁场与电离层临频异常时空分布特征有较好的一致性,震中周围出现foF2日变异常、拉萨台出现电离层foF₂明显异常.

以上研究结果都排除了空间天气异常,可以得到如下基本结果:强度大于6级的地震,在震前1~5 d内可能发生电离层扰动,表明地震和电离层异常具有某种程度的关联性.震前电离层foF2出现减少的情况居多,对应的F2层的高度会增加.

1.2 电离层电子浓度总含量 TEC

全球的电离层垂测站数目非常有限,在大时空范围上观测震前电离层变化有很大的局限性,很难系统地吧地震活动与之关联在一起,不利于确定电离层异常区域及其与地震区的关系.目前有数以千计的GPS地面接收器被用于导航、测绘、气象、海洋和空间等领域,其数据可用来连续地监测电离层总电子含量(total electron content, TEC),人们也开始关心地震前后TEC的变化.

最早是Calais等人^[10]采用GPS探测1994年Northridge地震后电离层的TEC扰动情况.随后

Zaslavski等人^[11]统计研究了TOPEX-POSEIDON卫星的TEC数据,以检验地震活动和电离层扰动之间的相关性.最近,Liu等人^[12]分析了台湾GPS观测网监测的TEC数据,结果发现在地震前电离层的赤道异常峰值向地磁赤道方向移动,同时在震前的第1天、第3天和第4天,TEC显著减小.随后Liu等人^[13]分析了1999~2002年台湾 $M \geq 6.0$ 地震期间电离层电子含量的变化,发现地震前1~5天TEC也有显著的减少.吴云等人^[14]统计研究了亚洲3次大地震震前TEC变化,结果发现在临震前10天之内,孕震区上空的TEC均出现了明显的异常扰动,异常的增加一般出现在异常减少之前,且异常的增加距离发震时刻较远,认为该异常可能与太阳或地磁活动增强有关.异常的减少一般临近发震时刻,基本可以归结为地震引起的电离层效应.

以前研究结果表明地震前TEC会发生扰动,其变化趋势与foF2有类似,一般地震前几天TEC下降.

2 汶川大地震电离层监测结果

2008年5月12日北京时间14时28分,中国四川汶川县(31.0°N , 103.4°E)发生里氏8.0级大地震.此次地震由于震源较浅,造成的破坏力极大.在地震发生前的数天内,我国各地的电离层探测站都监测到各种异常扰动现象,主要观测现象如下.

2.1 电离层 TEC 结果

JPL利用全球近千个台站的GPS观测数据,每2 h反演生成一张全球电离层TEC地图产品,其沿纬度和经度方向上的分辨率达到 $2.5^\circ \times 5^\circ$,该地图数据经过一定的数据插值和平滑处理,过滤了小的时空尺度电离层扰动,是研究全球大尺度电离层结构和变化的有效工具.本次汶川地震级别高强度大,根据以往的研究结果很可能引起较大尺度的电离层扰动.在JPL制作地震期间的全球TEC地图中,使用了我国北京、昆明、拉萨、乌鲁木齐、上海和武汉等6个GPS观测站数据,因此我们可利用JPL的电离层TEC分析地震期间的大尺度电离层TEC结构和变化.

利用下载JPL的格点数据文件,插值求出地震中心位置(31.0°N , 103.4°E)及其同一经度带上的电离层TEC值.为确定电离层的平均状态,我们从5月5~15日共11 d的数据中计算出每个格点每2 h的中值,作为参考日数据.结果见图1.图1显示,在5月5~15日期间震中上空电离层变化平稳,大部分日期电离

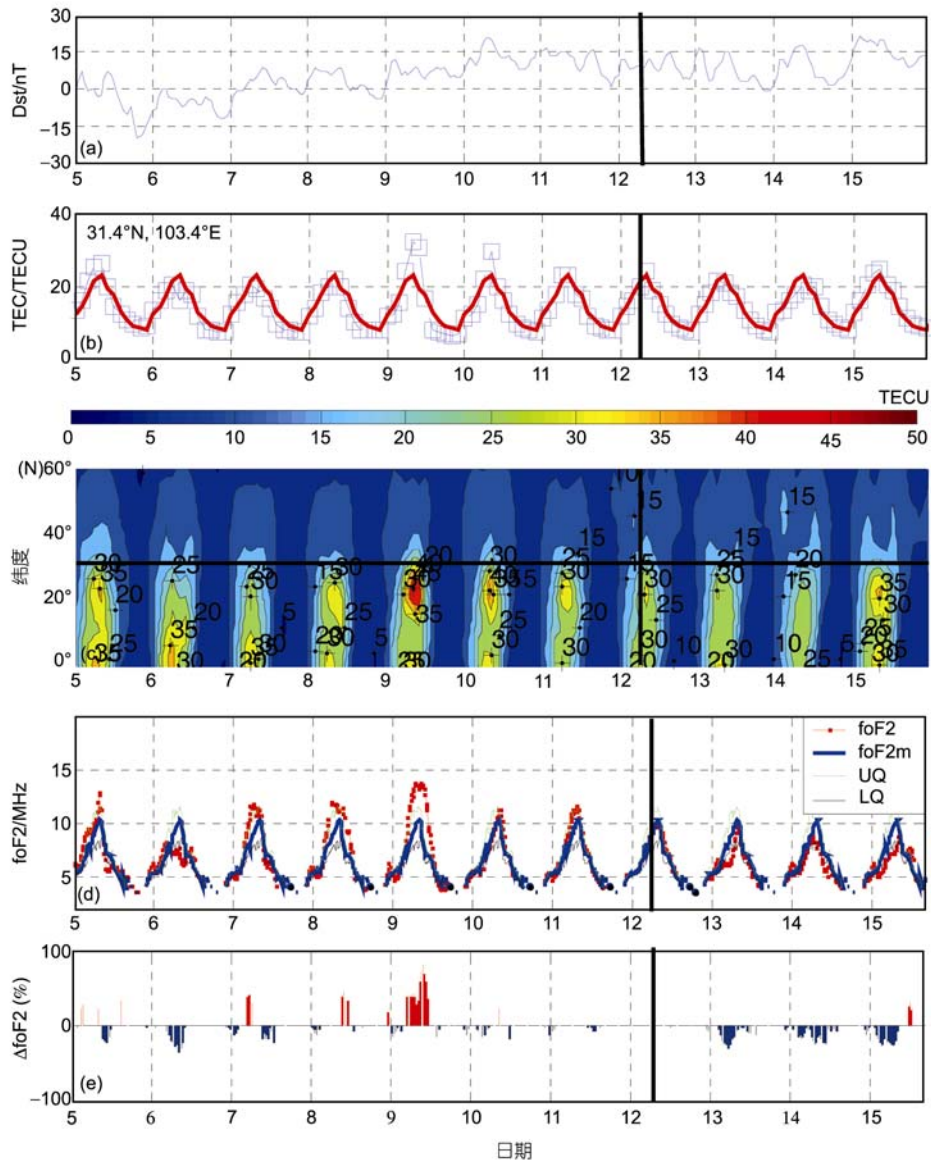


图 1 5月5~15日期间地磁活动、汶川和厦门地区电离层的信息

(a) 地磁 Dst 指数日变化; (b) 由 JPL 数据得到的汶川上空 TEC 日变化(兰色方框线示图 1(a)); (c) 汶川所在的 103.4°E 经度子午面电离层 TEC 日变化; (d) 厦门电离层 foF2 监测结果, 上部给出厦门电离层观测值(红点线)、中间值(蓝实线)、上四分值(绿线)和下四分值(黑线); (e) 给出当 foF2 扰动超过上分值和下分值期间, 观测 foF2 相当于中间值的相当差(红色为正、黑色为负)

层 TEC 相对于参考日变化不大, 但在 9 和 10 日出现了明显的增强. JPL 电离层 TEC 地图使用了我国 6 个 GPS 站, 得到的大尺度电离层扰动的变化结果应该是可信的, 因此我们可以用来研究此次地震引起的电离层大尺度异常现象.

从图 1(b)中看出, 在震前的第 7 天(5 月 5 日)和第 6 天(5 月 6 日)白天, 汶川上空电离层 TEC 分别出现了一次增强和减弱的现象, 与参考日值的相对幅度均不超

过 25%. 对照图 1(a)发现 Dst 指数在 5~6 日约 -20 nT 的负扰动. 从图 1(c)可以看出 5 月 6 日 TEC 驼峰发育的较弱并向磁赤道方向压缩, 北驼峰处 TEC 最大值约 35 TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{el/m}^2$). 在震前 3 天(5 月 9 日)白天震中位置上空电离层 TEC 出现了显著增强, 与参考日相比增幅达 60%, 当天夜间 TEC 与参考日相比出现了下降. 从图 1(c)也可以看出 9 日 TEC 驼峰显著的增强了, 驼峰处电离层 TEC 接近 50 TECU. 在震前 2 天(5

月10日)白天, 电离层 TEC 也出现了约 45% 的增强, 当天晚上未见 TEC 异常, 图 1(c)显示当天的 TEC 驼峰也有一定程度增强, 驼峰处 TEC 达到 40 TECU. 从图 1(a)的 Dst 指数来看 9~10 日 2 d 地磁非常平静. 在其余日期包括地震当天 TEC 变化平稳, 未出现明显的扰动.

图 1 的结果显示在 5 月 6 日 TEC 的减少和 5 月 9 日突然增强现象是震前较为突出扰动现象, 我们将这两次扰动最强时刻的全球 TEC 扰动分布结果于图 2 和 3. 图 2 是 5 月 6 日世界时 8 时全球电离层 TEC 扰动量(实际电离层 TEC 与参考日 TEC 的差). 图中可以看出在经度 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$, $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 范围内出现了 TEC 减小, 幅度约 $-6\sim -10$ TECU, 最强的 TEC 减小出现在汶川东南的中国东南地区, 达到 -10 TECU. 同时在全球范围内还出现了多个 TEC 增强和减小区域: 在印度半岛南部以及印度洋南部地区出现了 TEC 增强, 最大增幅约 6 TECU. 在太平洋中部的赤道海域出现了 $4\sim 6$ TECU 的 TEC 增强.

从图 3 中可以看出在 $90^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 范围内出现了显著的 TEC 增强, 最大幅度达 15 TECU, 增强的中心区域出现在汶川东南的中国东南地区. 同时, 在沿磁力线共轭的南半球地区出现了几乎等面积范围的电离层 TEC 增强区域, 增强幅度约 10 TECU, 与图 2 明显不同的是, 从全球范围来看此次增强仅集中在以上两个区域, 在全球其他地区未发现任何电离层 TEC 增加或减少的现象.

2.2 电离层 foF2 结果

为了验证 TEC 的监测结果, 我们将国家空间天气监测预警中心在厦门(24.4°N , 123.9°E)的电离层垂测站在地震前后监测到电离层 foF2 的结果示于图 1(d)和(e), 图 1(d)是 foF2 的观测值和参考日值, 其中参考日中值(foF2m)、参考日上四分值(UQ)和下四分值(LQ), 分别表示 5 月 5~15 日期间电离层 foF2 测量的中间值、中间值及其以上数据的中间值(上四分值)、中间值及其以下数据的中间值(下四分值), 具体计算方法见文献[4]. 图 1(e)给出了实际测量值大于上四分值(绿线)或小于下四分值(黑线)的期间的 foF2 扰动量, 这种方法可将电离层逐日变化的幅度考虑在内, 只有较大幅度的变化才被记录.

从图 1(d)可以明显看出, 在此次地震期间, 即使太阳、地磁等空间天气均很平静、无地面剧烈气象事

件(如台风等)的情况下, 厦门电离层的逐日变化比较明显. 在部分考虑了逐日变化的幅度后, 我们可从图 1(e)可以看出电离层仍出现多次正扰和负扰, 其中最明显的正扰出现在 5 月 9 日, 从正午到日落的一段时间内, foF2 出现了 40%~80% 的增强. 在 5 日, 7 日, 8 日和 10 日, 以及震后 15 日出现了短时间的 foF2 增强, 这些时间增强的幅度和时间连续性与 9 日相比明显不同. 另外, 从图 1(d)和(e)中可以看出 foF2 负相扰动出现得较多, 震前的 6 日出现的负扰与 TEC 观测结果一致. 利用这种方法来识别地震电离层前兆, 卓裕荣[15]发现有近 74% 的 M5 级以上地震可以看到前兆, 从我们的结果看, 在太阳、地磁等空间天气因素非常平静的情况下, 汶川地震前 3 天出现的电离层临频和 TEC 增强可能与地震有密切相关.

3 总结和讨论

一般认为, 在地震的孕震期、临震前、主震和余震中, 形变和电磁等地球物理场都要发生不同程度的变化. 这些变化将不同程度地影响震区周围的大气圈, 直到电离层高度. 比较公认的地震影响电离层的理论有两种: 一是地震区产生的内重力波对电离层的影响, 二是地震区的异常垂直电场进入电离层, 引起电离层扰动. 通常认为前一种假设引起的电离层扰动幅度较小, 范围有限, 后一种机制引起的电离层扰动强度大, 范围广. 以往的研究结果显示, 对于 5 级以上的大地震, 在地震附近地区电离层一般会出现电离层扰动(约 74.1% 的概率), 扰动的异常区域可达 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$. 主要表现在电离层 foF2 出现异常减小, 但也有增加的情况. 电离层 TEC 的扰动也较明显, 通常出现减小, 并有使得赤道异常峰向地磁赤道方向移动的特点.

利用 JPL 的 TEC 地图和厦门的测高仪等多种观测手段显示, 汶川地震前中国上空的电离层也有明显的扰动. 从 TEC 数据来看, 经过平滑插值后得到汶川上空电离层 TEC 逐日变化较小, 但在震前 3 天仍看到显著的 TEC 增强, 其中在 5 月 9 日世界时 10 时, 汶川以东南 20° 范围均出现了 TEC 增加, 并且在南半球磁力线共轭区域也有增加现象, 而其他地区无明显的 TEC 扰动. 此次地震的电离层先兆异常现象已有报道[16], 但也未对异常的原因给出明确的结论, 我们分析此次增强可能与电场增加相关, 电离层电场的

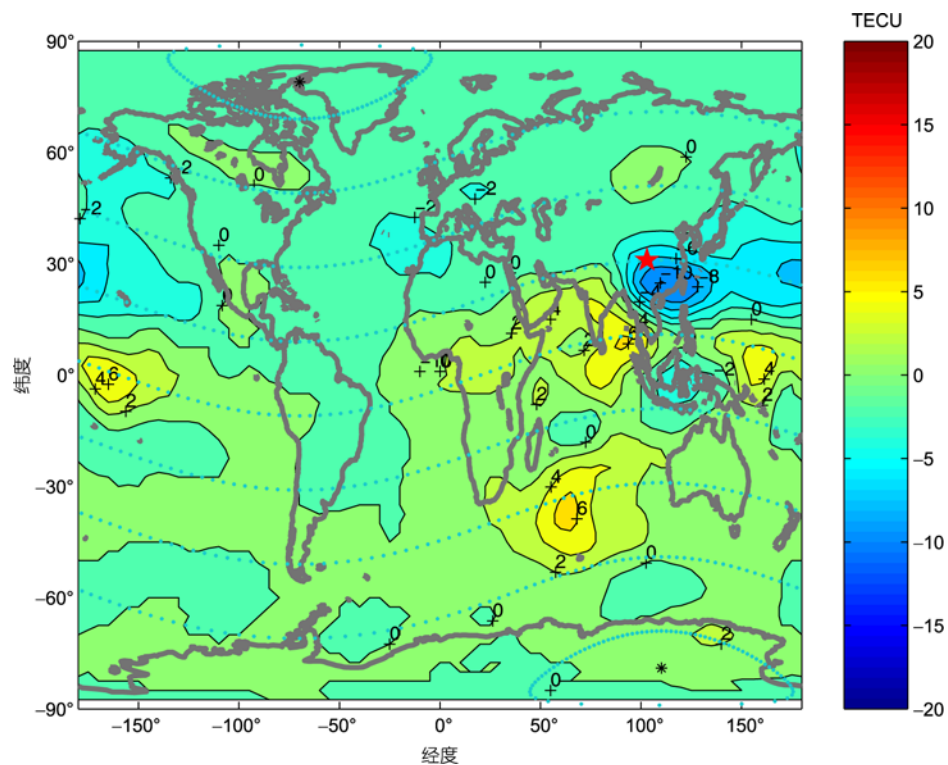


图2 5月6日世界时8时电离层TEC扰动量的全球分布图
红色五角星代表汶川的位置

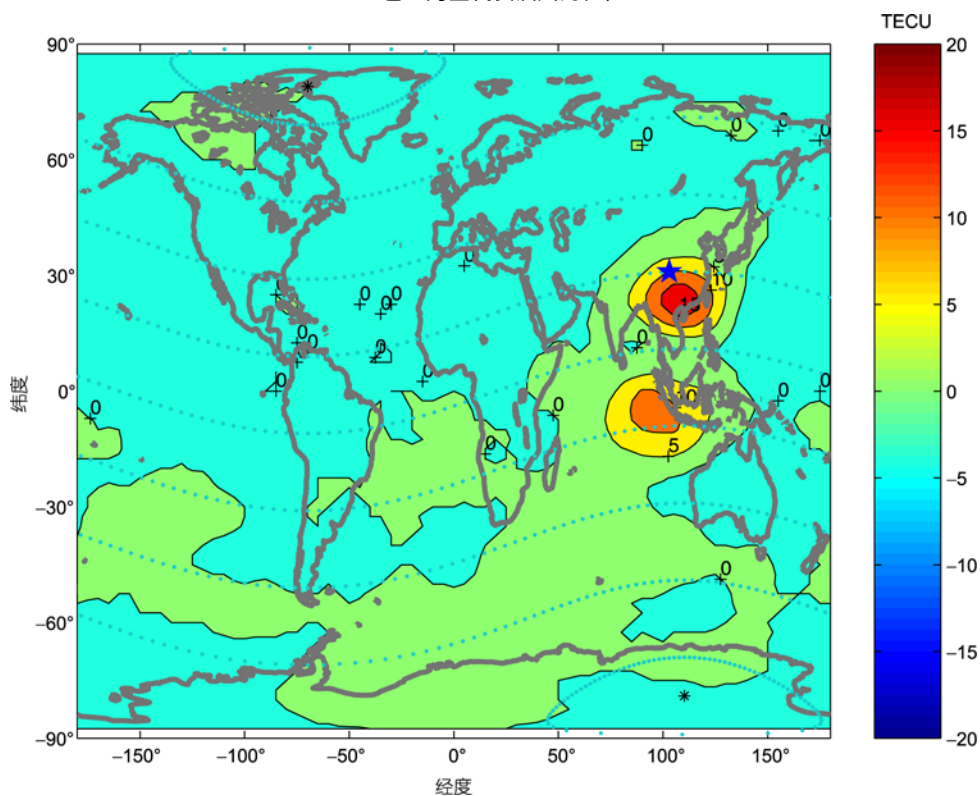


图3 5月9日世界时10时电离层TEC扰动量的全球分布图
蓝色五角星代表汶川的位置

增加可能导致喷泉效应的加强,从而在沿磁力线对称的区域出现TEC增加现象,具体结果有待进一步的观测资料验证.地震对电离层后效的观测事实较多且理论解释较为明确^[17~19],其中Hao等人^[18]报道了Sumatra和Mount Pinatubo两次地震后在北京监测到的电离层多普勒扰动,认为地震通过波动方式传播到大气-电离层高度是这两次地震电离层扰动的主要原因,同时也认同Iyemori等人^[19]提出的利用大气波动调制电离层E区发电机电场来解释监测到Sumatra地震后地磁扰动的重要理论.以上这些地震-大气-电离层的耦合机制也可能在地震前产生作用,如震前地壳运动引起的重力振荡以内重力波形式传播到电离层高度引起电离层扰动、震前地壳形变产生的压电场映射到电离层高度调制发电机电场引起电离层等离子体的运动和重新分布等.

而在5月6日的TEC减小的时刻,在全球范围内均看到TEC增加或减小的扰动,在前一日Dst有一个-20 nT的负扰,此次电离层TEC减少可能是由于地磁活跃引起的.

国内其他电离层垂测站也探测电离层异常现象,中国电子科技集团公司第22研究所在重庆(106.5°E, 29.6°N)和昆明(102.8°E, 25.0°N)地区的电离层垂测站结果显示:在5月9日重庆站电离层foF2出现了90%以上的增强,10日的增强也达40%.而昆明站显示在9,10两日电离层foF2的增强都达到40%左右.中国科学院地质与地球物理研究所在北京(115.9°E, 39.6°N)和武汉(114.4°E, 30.5°N)的电离层垂测站也观测到foF2的增加,其中武汉站的增强幅度达80%以上.从TEC增强区域分布图(图3)看,重庆和昆明的电离层增加应该高于厦门地区,武汉可能处于此次电离层临频和TEC增强的中心,这与地面垂直站观测结果较一致.

值得注意的是,以往的统计结果显示震前电离层参量一般出现减小,而此次地震前3天的电离层foF2, TEC的增强现象非常明显,这与以往的观测的foF2以减少为主的结果相反.一般认为采用地震前7天至后3天的中值建立参考日数据的时间段可能稍短,可能无法完全剔除地震电离层的扰动信息,通过加长参考日数据时段的分析显示结果变化并不大,说明此次震前增强的确存在.而地震前6天foF2, TEC减小的观测结果虽然与以往的研究较一致,但从全球结果来看此次减小可能与Dst负扰相关.依据Kim等人^[20]的理论计算显示:地震电离层前兆可能出现增强和减弱两个区域,我们此次仅观测到电离层临频和TEC增强的区域而未见减弱的区域,可能与探测数据缺少有关,也可能是此次地震电离层前兆的特殊性.

目前我们没有直接证据表明这些变化是由地震活动直接导致的,但由于在震前的第3天空间天气参数非常平静,基本可以排除太阳、地磁等空间天气等因素直接引起的电离层异常增强.值得注意的是由于电离层本身较强的逐日变化、来自低层大气的扰动也可能导致电离层出现一些异常增强或减弱,最新的一些研究结果显示在磁暴前的低地磁活动期间电离层可出现较大的增强^[21,22],甚至在地磁非常平静的时期,电离层可出现高达200%的增强现象^[23].这些研究结果提示也许来自低层大气的行星波影响和极光活动等因素是低纬电离层异常扰动的重要因素.我们还应寻找其他证据,如在地震区域的重力波活动是否增强?电离层电场是否存在大范围的变化等,通过更多的资料分析此次大地震期间电离层的异常与地震的关联,为将来的地震监测预警提供有用的参考手段.

致谢 感谢中国电子科技集团第22研究所提供电离层监测信息.

参考文献

- 1 Barnes R S. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *J Geophys Res*, 1965, 70(5): 1250—1253[[doi](#)]
- 2 Weaver P F, Yuen P C, Prolss G W, et al. Acoustic coupling in the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11. *Nature*, 1969, 226: 1239—1241[[doi](#)]
- 3 Antsilevich M G. The influence of Tashkent earthquake on the Earth's magnetic field and the ionosphere, Tashkent earthquake 26 April 1966. Tashkent FAN, 1971. 187—188
- 4 Liu J Y, Chen Y I, Pulintins S A, et al. Seismo-ionosphere signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquake. *Geophys Res Lett*, 2000, 27:

- 3113—3116[[doi](#)]
- 5 Pulnits S A, Legenka A D, Karpachev A T, et al. The earthquakes prediction possibility on the base of topside sounding data. IZ-MIRAN preprint N 34a, 1991, 981: 25
- 6 Pulnits S A, Legenka A D, Zelenova T I. Dependence of the seismo-ionospheric variations in the F-layer maximum on the local time. *Geomag Aeron*, 1998, 38(3): 188—193
- 7 Ondoh T. *Seismic-ionospheric Effects, Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. 789—803
- 8 Hobara Y, Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2005, 67: 677—685[[doi](#)]
- 9 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系. *空间科学学报*, 2005, 25(6): 536—542
- 10 Calais E, Minster J. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(9): 1045—1048[[doi](#)]
- 11 Zaslavski Y, Parrot M, Blanc E. Analysis of TEC measurements above active seismic regions. *Phys Earth Planet Inter*, 1998, 105: 219—228[[doi](#)]
- 12 Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, et al. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(7): 1383—1386[[doi](#)]
- 13 Liu J Y, Chen Y I, Shan S J, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement. *Ann Geophys*, 2004, 22: 1585—1593
- 14 吴云, 乔学军, 周义炎. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2): 36—40
- 15 卓裕荣. 电离层地震前兆之研究. 台湾: 中央大学太空科学所, 2002
- 16 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. *科技导报*, 2008, 26(11): 30—34
- 17 Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary. *Ann Geophys*, 1985, 3: 673—688
- 18 Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. Responses of the ionosphere to the Great Sumatra earthquake and volcanic eruption of pinatubo. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(7): 1955—1957[[doi](#)]
- 19 Iyemori T, Nose M, Han D. Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L20807, [[doi](#)]
- 20 Kim V P, Hegai V V. *A Possible Presage of Strong Earthquakes in the Night-time Mid-latitude Region Ionosphere, Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquake*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. 619—627
- 21 Liu L B, Wan W X, Zhang M L, et al. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms. *Ann Geophys*, 2008, 26: 893—903
- 22 Liu L B, Wan W X, Zhang M L, et al. Prestorm enhancements in NmF2 and total electron content at low latitudes. *J Geophys Res*, 2008, 113: A02311, [[doi](#)]
- 23 Zhao B Q, Wan W X, Liu L B, et al. Anomalous enhancement of ionospheric electron content in the Asian/Australian region during a geomagnetically quiet day. *J Geophys Res*, 2008, 113, [[doi](#)]