0254-6124/2011/31(5)-607–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Ouyang Xinyan, Zhang Xuemin, Shen Xuhui, Huang Jianping, Liu Jing, Zeren Zhima, Zhao Shufan. Disturbance of O^+ density before major earthquake detected by DEMETER satellite. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 607-617

DEMETER 卫星探测到的强震前 O^+ 浓度变化*

欧阳新艳[1,2] 张学民[1] 申旭辉[1] 黄建平[1]
刘 静[1] 泽仁志玛[1] 赵庶凡[1]

1(中国地震局地震预测研究所 北京 100036)

2(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘 要 利用 DEMETER 卫星观测数据, 采用 level-2 图像目视解译的方法和重访轨道对比方法, 对 2006 年 5 月 3 日发生在汤加群岛的 7.9 级地震进行分析. 从震前 6 天、震前 2 天、震前 1 天和震后 2 天的 level-2 图像可看到, 电场和等离子体参量在震中上空偏北的位置出现扰动信号, 震前的扰动信号幅度随地震时间临近有所增强, 扰动持续时间也相应增加; 震后 2 天扰动信号依然存在, 其幅度并未减弱. 通过对比震前 1 天的轨道在 2006 年至 2008 年内的重访轨道, 发现 O^+ 浓度存在三类较规律的变化特征, 即在夏季时, 北半球的值高于南半球; 冬季时则相反; 二分季节时, 南北半球含量相当. 本文给出了地震和磁暴对 O^+ 浓度的不同影响, 地震影响最靠近震中位置轨道上的 O^+ 浓度, 而磁暴影响全球轨道上 O^+ 浓度分布. 同时获取了 DEMETER 卫星上朗缪尔探针在上述重访轨道同步探测的电子浓度数据, 发现电子浓度与 O^+ 浓度存在同步增加. 等离子体浓度增加的现象可能与地震产生异常电场进而影响电离层结构有关.

关键词 O^+ 浓度, DEMETER 卫星, 地震电离层效应

中图法分类号 P 353

Disturbance of O^+ Density Before Major Earthquake Detected by DEMETER Satellite

OUYANG Xinyan[1,2] ZHANG Xuemin[1] SHEN Xuhui[1] HUANG Jianping[1]
LIU Jing[1] ZEREN Zhima[1] ZHAO Shufan[1]

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

2(*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract Based on the data observed by French DEMETER satellite, this paper analyzed anomalies which may be caused by Ms7.9 Tonga Islands earthquake (3 May 2006). Perturbations of electric field and plasma parameters above epicenter from observations six days, two days and one day before the earthquake can be seen by visual interpretation of level-2 images. The amplitude and duration of perturbations increased when the earthquake was approaching. Perturbation was also recorded two days after the earthquake and its amplitude was still large. The variation feature of O^+ density was more obvious than that of H^+ and He^+ density, and O^+ accounted for about 90% among total H^+,

* 地震行业专项 (201008007), 中意合作项目 (2009DFA21480) 和中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费共同资助
2010-03-29 收到原稿, 2011-03-03 收到修定稿
E-mail: oyxy@seis.ac.cn

He^+ and O^+ through analyzing the data detected by IAP (Plasma Analyzer Instrument) onboard DEMETER satellite which has a revisiting period of sixteen days. Compared with the revisiting orbits of a half orbit one day before the earthquake from 2006 to 2008, it was found that variations of O^+ density can be classified into three types: density in northern hemisphere is higher than that in southern hemisphere in summer; the situation is quite the contrary in winter; and O^+ density is almost equal in both southern and northern hemisphere in equinoxes season. This paper presented different effects on O^+ density under influence of earthquake and geomagnetic storm. The earthquake affects the distribution of O^+ density at an orbit close to the epicenter, while geomagnetic storm affects O^+ density at all orbits in a storm day. O^+ density increased 20% more at the orbit closest to the epicenter than the other orbits one day before the earthquake, and it increased nearly an order of magnitude referred to the mean of O^+ density in May from 2006 to 2008. In addition, we obtained electron density detected simultaneously by ISL onboard DEMETER at the above-mentioned revisiting orbits and discovered that electron density increased synchronously with O^+ density. The increment of plasma density may be related to the electric field anomaly which resulted from the earthquake and led to modification of ionospheric structure.

Key words O^+ density, DEMETER satellite, Seismo-ionospheric effect

1 引言

地震的电离层效应已有大量的研究, 卫星在震前观测到电离层异常现象, 例如 ELF/VLF 异常辐射现象 [1−4], ULF 异常辐射现象 [5−6] 和等离子体浓度及离子成分在震前的异常变化 [7] 等也早有报道. Intercosmos-24 卫星于 1990 年 5 月 28 日至 7 月 30 日伊朗地震孕育期内, 在 2500 km 高度发现离子浓度沿纬度出现异常分布 [8]. 2004 年 9 月 5 日 Kii 半岛 6.9 和 7.4 级地震前, DEMETER 卫星的等离子体分析仪记录到 750 km 高度离子浓度异常升高 [9]. 另外, DEMETER 卫星记录到 2005 年发生在中纬度地区三个 6 级以上地震前, 白天和夜晚均出现电子浓度和离子浓度异常, 主要表现为浓度变化的不规则性 [10]. 利用 DEMETER 卫星数据, 在中国多次 6 级以上地震前也发现了电离层离子浓度发生异常变化的情况 [11−13]. 虽然人们在很多地震发生前观测到了电离层异常现象, 但对于这种现象的产生机理仍然不清楚. 岩石圈–大气层–电离层的耦合过程仍有待通过更多震例研究和统计研究来完善.

2 数据及处理方法

本文的数据来自法国 DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emission from Earthquake Regions) 卫星数据服务中心*. DEMETER 卫星是由法国于 2004 年 6 月 29 日发射的一颗微小卫星 (质量 130 kg), 准太阳同步圆形轨道, 倾角 98.3°, 高度 710 km(2005 年 12 月中旬开始降为 660 km). 其科学目标为研究地震、火山和人类活动引起的电离层扰动, 提供全球电磁环境信息. 其主要的载荷包括电场探测仪 (ICE), 观测电场的三分量, 频段从 DC 至 3.175 MHz[14]; 感应式磁力仪 (IMSC), 由三个正交的探测线圈组成, 频段从 DC 至 17.4 kHz[15]; 等离子体分析仪 (IAP), 探测 H^+, He^+ 和 O^+ 的浓度、离子温度及等离子体速率 [16]; 朗缪尔探针 (ISL), 可获得电子密度、电子温度和等离子体电位等参量 [17]; 高能粒子探测仪 (IDP), 主要给出高能粒子通量和粒子计数 [18]. 卫星的工作模式分两种: 巡查模式 (survey mode) 和突发模式 (burst mode). 巡查模式以低采样率采集地球所有区域的数据; 突发模式在地震多发区域上空采集数据, 具有更高的时间和空间分辨率. 所有数据以半轨道组织, 全球每天 14 或 15 轨数据, 即有 30 条左右的半轨数据.

DEMETER 卫星数据服务中心提供用户自定义的 Level-2 数据 (以下称为二级图), 二级图是卫星各载荷观测数据的可视化图像. 除此之外, 数据中心还提供 Level-1 数据, 此即卫星实际观测的物理量数据.

*http://demeter.cnrs-orleans.fr/dmt/index.html

本文采用二级图可视化方法进行初步解译, 再利用 Level-1 数据开展深入研究. 首先围绕震中 2000 km 范围内获得震前 10 天、地震当天以及震后 7 天轨道的二级图, 初步解译出异常扰动的轨道 (异常扰动的轨道定义为一条轨道的二级图上多个参量存在异常扰动)[19−20]. 通过对大量 DEMETER 卫星数据的积累, 发现 DEMETER 卫星具有 16 天的重访周期. 重访轨道对比可以实现物理参量在同一地点的时间序列观测数据的对比, 为研究参量的变化规律和特征提供了可能. 在初步解译后, 挑选一条或多条异常扰动轨道, 追踪其重访轨道, 利用重访轨道对比的方法, 分析观测参量的背景变化特征和异常现象.

3 震例分析

3.1 震前二级图初步解译

本次研究所选取的震例为 2006 年 5 月 3 日 15:26:40 UT 在汤加群岛发生的一次 Ms7.9 级的地震, 震中位置 −20.19°N, −174.12°E. 在此次强震后, 2006 年 5 月 3 日 17:56:27 UT 和 2006 年 5 月 4 日 11:25:25 UT 在汤加群岛分别发生 Ms6.2 和 Ms5.9 级的两次强余震. 我们获取了主震前 10 天和主震当天 (2006 年 4 月 23 日至 2006 年 5 月 3 日) 距震中 2000 km 范围内的二级图, 获得夜侧轨道 (即升轨, 从南至北的轨道) 共 15 轨, 日侧轨道 (即降轨, 从北至南的轨道) 共 13 轨, 其中夜侧轨道中有 3 条为异常扰动的轨道, 分别为主震前 6 天 (2006 年 4 月 27 日) 的 09680_1 轨道、主震前 2 天 (2006 年 5 月 1 日) 的 09738_1 轨道和主震前 1 天 (2006 年 5 月 2 日) 的 09753_1 轨道. 另外, 为了解影响过程的演化, 获取了主震后 7 天 (2006 年 5 月 4 日至 5 月 10 日) 距震中 2000 km 范围的二级图. 所获得的 9 轨夜侧数据和 11 轨日侧数据中, 只有主震后 2 天 (2006 年 5 月 5 日) 夜侧的 09797_1 轨道存在异常扰动; 上述异常扰动轨道所在的这几天均为地磁宁静日, 相应的 Kp 指数之和在震前 6 天 (2006 年 4 月 27 日) 为 8, 震前 2 天 (2006 年 5 月 1 日) 为 2, 震前 1 天 (2006 年 5 月 2 日) 为 7, 震后 2 天 (2006 年 5 月 5 日) 为 16. 图 1 和图 2 即为主震前 6 天、2 天、1 天以及主震后 2 天的扰动轨道. 每幅图上的第 1 幅子图是电场探测仪得到的 VLF 频谱, 第 2 幅子图是感应式磁力仪得到的磁场频谱, 第 3 ∼ 5 幅子图为朗缪尔探针得到的电子浓度、电子温度和离子浓度, 第 6, 7 幅子图为等离子体分析仪得到的离子浓度 (H^+、He^+ 和 O^+ 浓度) 和离子温度. 最后一幅子图是地震事件, 三角形、圆和方块分别代表震前 (轨道在地震发生之前通过)、同震 (轨道在地震发生的同时通过) 和震后 (轨道在地震发生之后通过) 事件, 其大小代表震级的大小, 纵轴代表卫星距震中的距离. 从图 1 和图 2 中可以看到, 主震前 6 天 (4 月 27 日) 和主震前 2 天 (5 月 1 日) 的电场、电子浓度、电子温度、离子浓度和离子温度均出现持续时间很短的扰动信号; 在主震前 1 天时 (5 月 2 日) 多个参量的扰动幅度更大, 范围有所扩大, 扰动持续的时间更长; 主震后 2 天, 赤道附近区域依然存在多个参量同步的扰动现象. 竖线标示出异常所在的区域, 由此看到观测到的同步扰动现象都出现在震中上空偏北 10° 左右的赤道附近. 此类现象为赤道地区的静电湍流 (electrostatic turbulence)[14], 在云南普洱 6.3 级地震前 1 天距震中 2000 km 范围内夜侧的一条轨道上曾发现过静电湍流现象 [19−20]. 静电湍流现象主要出现在高纬度极光带或亚极光带区域内, 有时出现在赤道上空. 电离层中这类现象的产生具有复杂的影响因素, 此次地震前观测到的这类现象很可能是由于地震的影响产生了异常的电场, 进而影响赤道附近的环电流; 由于赤道附近电磁场的特殊形态, 在此会有电急流产生, 通过一定作用产生声重波, 又可由声重波影响产生异常电场, 进而异常信号传播到卫星高度而被记录到. 日侧各轨道上的参量变化平稳, 未见扰动. 在利用 DEMETER 卫星数据开展研究的过程中, 总是在夜间电离层发现扰动信号. 利用 DEMETER 卫星数据进行的统计研究还表明, 与地震相关的异常出现在夜间, 这可能是由于白天电离层电离作用更强, 而使得地震活动引起的潜在变化被掩盖 [21].

3.2 重访轨道对比

对等离子体分析仪测得的离子浓度 (图 1 和图 2 任意一图中的第 6 幅子图) 进行重点研究, 从中可以看出, 即使别的参量在相同位置有很大扰动, 等离子体分析仪观测的 H^+, He^+ 和 O^+ 浓度在二级图上的变化依然很小, 因而很有必要利用 Level-1 数据进行

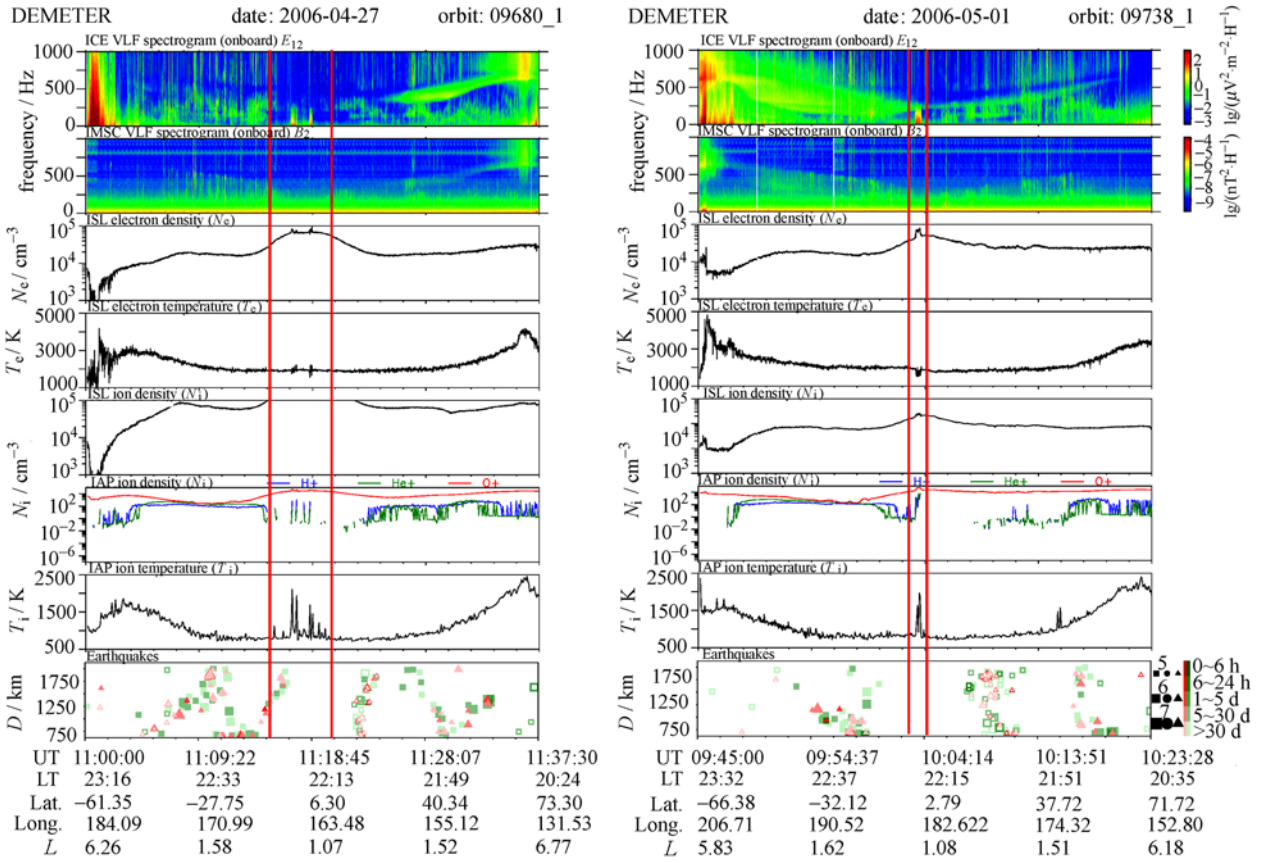

图 1 震前 6 天 (2006-04-27) 和 2 天 (2006-05-01) 的异常扰动轨道

Fig. 1 Orbits with perturbations six days (2006-04-27) and two days (2006-05-01) before the earthquake

深入分析. 选取图 2 所示震前 1 天的 09753_1 轨道追踪其重访轨道. DEMETER 卫星从 2004 年 7 月开始提供观测数据, 至今仍在提供观测数据, 其在 2005 年 12 月中旬轨道高度从 710 km 降至 660 km, 变轨之后卫星具有 16 天的重访周期. 另外, DEMETER 卫星设计寿命为 3 年, 目前仍超龄工作, 但可能卫星的状态已经不太稳定, 从 2008 年 6 月开始, 卫星没有严格的 16 天重访周期. 因而本次重访轨道追踪获得的轨道从 2006 年 1 月开始至 2008 年 5 月, 一共获得 42 条轨道, 其中 2006 年整年获得 19 条轨道, 2007 年整年获得 18 条轨道, 2008 年获得 5 条轨道. 表 1 给出了 2 年半时间内所有重访轨道的起止时间, 可以看到, 轨道开始时间在 10:15:00 UT 左右, 每条轨道开始时间误差不超过 2 min; 轨道结束时间在 10:54:00 UT 附近, 各轨道结束时间的误差也约在 2 min 内. 图 3 给出了 42 条重访轨道地理分布与震中的关系, 所有重访轨道位置重合很好, 经纬度的差异在 2° 之内. 可将所有重访轨道上的观测数据看成固定点的时间序列观测, 进而研究物理参量随时间的演变过程, 了解其背景变化特征.

图 4 给出了各重访轨道上 O^+ 浓度的变化情况, 图 4 中在轨道开始时标出轨道所在日期, 如 01-26 即为 1 月 26 日的一条轨道, 日期与轨道号的对应关系参照表 1. 每条曲线表示 O^+ 浓度沿轨道从南纬到北纬的变化情况. 这种表示方式清楚地展示了 O^+ 浓度从 1 月至 12 月的整个演化过程. 分析发现, O^+ 浓度在二分点 (春分、秋分) 前后南北半球含量相当, 此变化形态多发生于 4 月和 9 月; 而在 5 月至 8 月, O^+ 浓度在南半球含量低而北半球含量高, 在 10, 11, 12, 1, 2, 3 月, O^+ 浓度的变化形态正相反, 南半球含量高而北半球含量低. 这一结果与文献 [12] 所得结果类似, 但月份归类方法不同, 文献 [12] 将其归为 2 类, 即 4 月至 9 月和 10, 11, 12, 1, 2, 3 月. 通常地磁季节划分的春秋季 (二分点季节) 是 3, 4, 9, 10 月. 本次

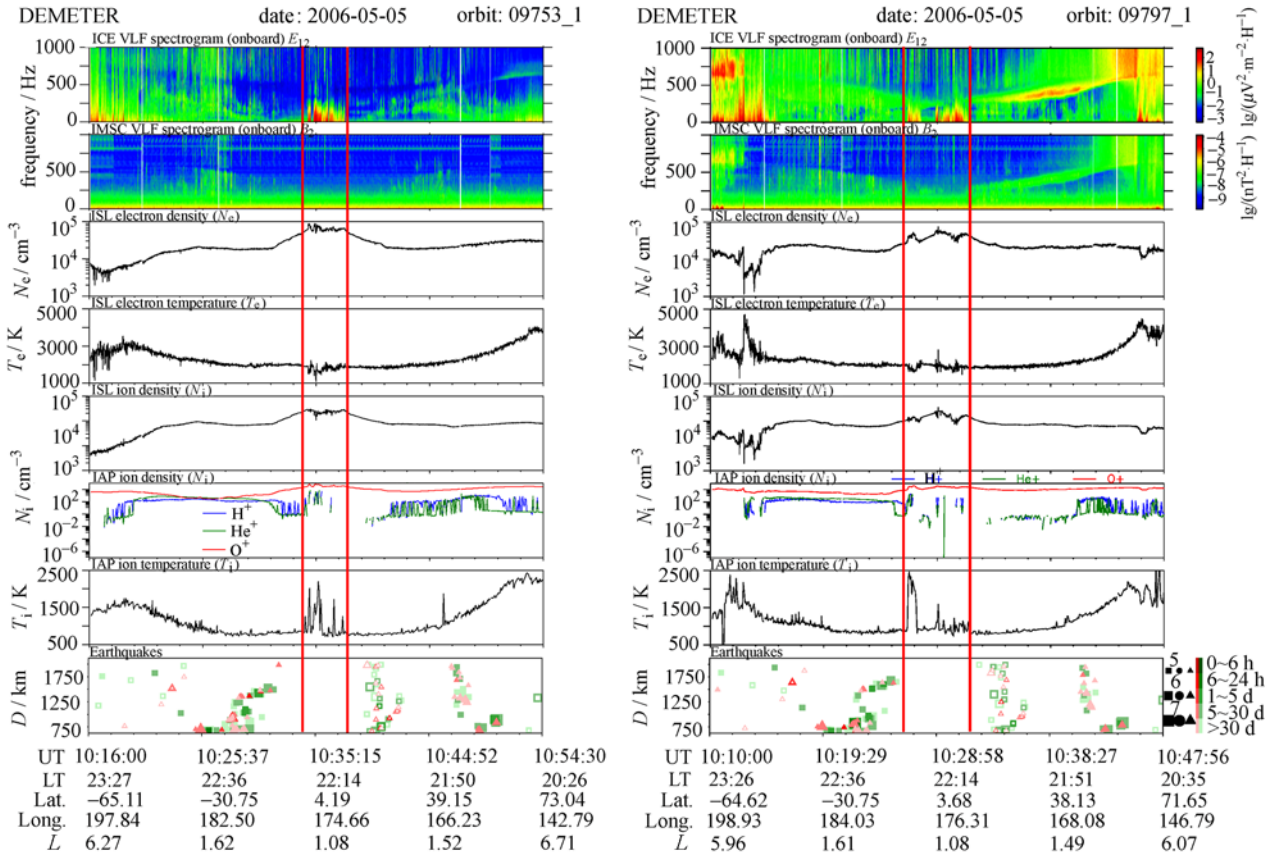

图 2　震前 1 天 (2006-05-02) 和震后 2 天 (2006-05-05) 的异常扰动轨道

Fig. 2　Orbits with perturbations one day (2006-05-02) before the earthquake and two days (2006-05-05) after the earthquake

研究中 O^+ 浓度的变化形态无法精确地满足地磁的季节划分方法, 可能由于地磁的影响, 具有局地性的特征. 但从中也可看出, 选择地磁季节划分方法比其他季节划分方法来研究等离子体参量的季节特征更具科学性. 有研究表明, 电离层中等离子体参量的分布不仅受化学作用影响, 受到动力学过程的影响. 等离子体参量表现出的季节变化特征既受太阳辐射强度影响, 还受到大气的原子与分子比率 ($[O]/[N_2]$) 的影响, 有的还依赖于中性背景风场 [22−23]. 因而, 本文中 O^+ 浓度的季节变化特征可能是由于上述因素影响所致. 通过对 O^+ 浓度在三种离子浓度中所占比重的计算发现, 在轨道的绝大部分位置, O^+ 浓度占到三种离子浓度之和的 0.9~1.0, 所占比重最大, 与文献 [24] 给出的约 660 km 高度电离层中的电离成分结果一致. 三种离子之和的变化形态与 O^+ 浓度变化形态基本一致, O^+ 浓度变化规律好于 H^+ 和 He^+ 浓度.

从图 4(a) 可以看到, 09753_1 轨道 (图 4 箭头所示, 即 2006 年 5 月 2 日震前 1 天的扰动轨道) O^+ 浓度的极大值接近 10^5 cm^{-3}, 虽然夏季 O^+ 浓度在南半球含量低而北半球含量高的特征依然存在, 但这条轨道明显比其他轨道上 O^+ 浓度的极大值高很多. 将震前 1 天的轨道观测的 O^+ 浓度与相同位置上 2007 年和 2008 年同期 (5 月附近) 轨道观测的 O^+ 浓度进行比较, 仍可发现震前 1 天 O^+ 浓度出现了增强现象. 无论横向或纵向比较, 均显示出震前 1 天 O^+ 浓度增加. 图 5 展示了 2006 年至 2008 年 3 年间 5 月重访轨道观测的 O^+ 浓度. 从图 5 可知, 震前 1 天 (2006 年 5 月 2 日) 所观测的 O^+ 浓度与 5 月其他轨道观测结果相比, 在赤道附近有很明显的增强. 将 5 月其他重访轨道数据进行平均后得到了 5 月的参考 O^+ 浓度, 震前 1 天的观测结果比 5 月参考 O^+ 浓度高出将近一个数量级.

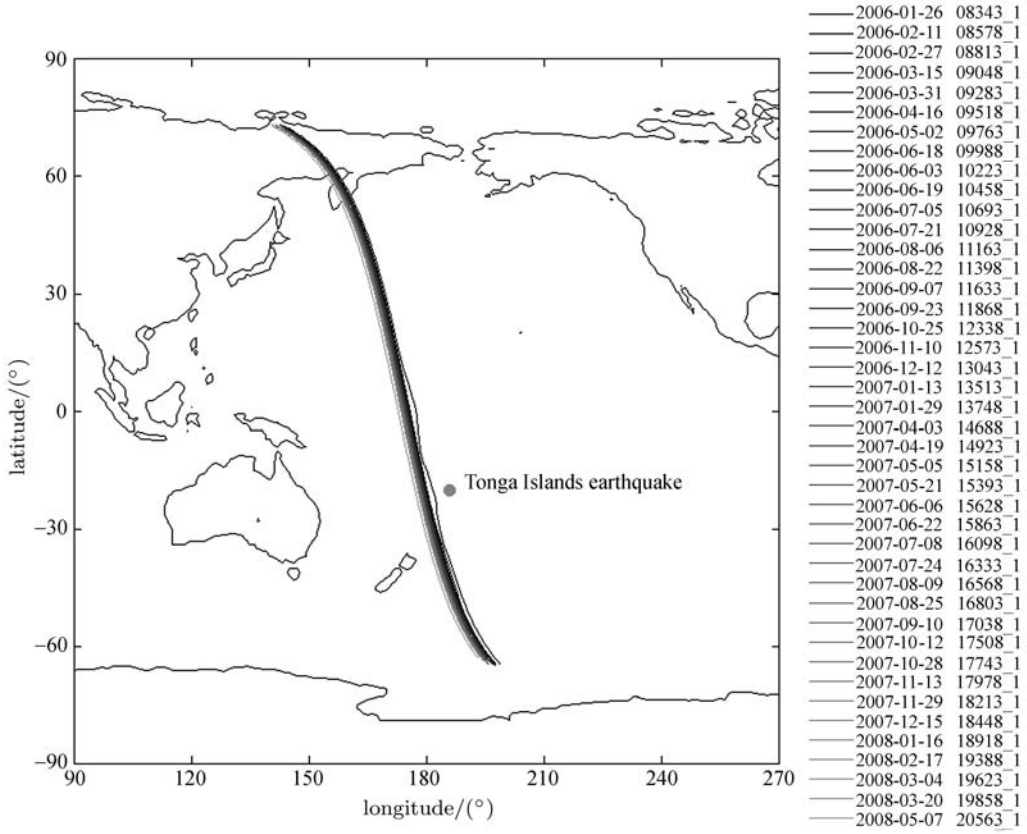

图 3 汤加群岛地震震中与重访轨道位置

Fig. 3 Position of Tonga Islands earthquake epicenter and the revisiting orbits

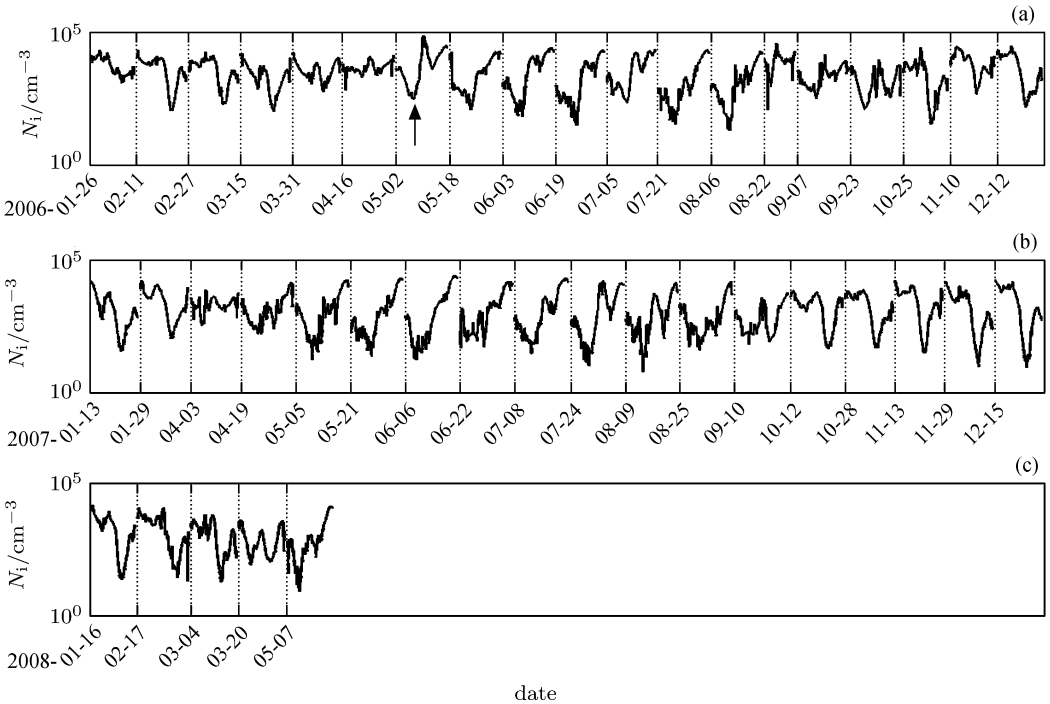

图 4 2006 年 5 月 2 日 09753_1 轨道在 2006 年至 2008 年重访轨道观测的 O^+ 浓度对比

Fig. 4 O^+ density recorded by the revisiting orbits from 2006 to 2008 based on the orbit 09753_1 of May 2, 2006

表 1　重访轨道起止时间对比表

Table 1　Start time and finish time of the revisiting orbits

日期	轨道号	起止时间 (UT)
2006-01-26	08343_1	10:15:09–10:53:26
2006-02-11	08578_1	10:15:40–10:53:56
2006-02-27	08813_1	10:16:10–10:53:55
2006-03-15	09048_1	10:16:09–10:53:55
2006-03-31	09283_1	10:16:10–10:54:27
2006-04-16	09518_1	10:16:10–10:54:26
2006-05-02	09753_1	10:16:10–10:54:26
2006-05-18	09988_1	10:16:10–10:54:26
2006-06-03	10223_1	10:16:09–10:54:26
2006-06-19	10458_1	10:16:10–10:54:28
2006-07-05	10693_1	10:16:10–10:53:57
2006-07-21	10928_1	10:15:39–10:53:56
2006-08-06	11163_1	10:15:40–10:53:56
2006-08-22	11398_1	10:16:10–10:53:57
2006-09-07	11633_1	10:16:10–10:53:55
2006-09-23	11868_1	10:16:10–10:53:55
2006-10-25	12338_1	10:16:10–10:54:26
2006-11-10	12573_1	10:16:10–10:54:26
2006-12-12	13043_1	10:16:10–10:54:26
2007-01-13	13513_1	10:16:10–10:54:26
2007-01-29	13748_1	10:16:10–10:54:26
2007-04-03	14688_1	10:16:11–10:54:27
2007-04-19	14923_1	10:16:10–10:54:27
2007-05-05	15158_1	10:16:11–10:54:29
2007-05-21	15393_1	10:16:11–10:54:29
2007-06-06	15628_1	10:16:11–10:54:29
2007-06-22	15863_1	10:16:41–10:54:28
2007-07-08	16098_1	10:17:10–10:54:56
2007-07-24	16333_1	10:17:41–10:55:28
2007-08-09	16568_1	10:17:40–10:55:27
2007-08-25	16803_1	10:17:41–10:55:23
2007-09-10	17038_1	10:17:10–10:54:56
2007-10-12	17508_1	10:16:40–10:54:27
2007-10-28	17743_1	10:16:11–10:54:27
2007-11-13	17978_1	10:16:10–10:54:27
2007-11-29	18213_1	10:16:11–10:54:27
2007-12-15	18448_1	10:16:40–10:54:27
2008-01-16	18918_1	10:15:40–10:53:30
2008-02-17	19388_1	10:15:11–10:52:59
2008-03-04	19623_1	10:15:11–10:53:00
2008-03-20	19858_1	10:15:41–10:53:30
2008-05-07	20563_1	10:16:40–10:54:28

由于电离层等离子体呈现宏观电中性的特点, 离子浓度增加, 相应的电子浓度应该也会增加, 因而获取了 DEMETER 卫星上朗缪尔探针同步探测的电子浓度. 图 6 给出了相应的观测结果 (坐标含意与图 4 完全相同), 除 2008 年 1 月 16 日 18918_1 轨道电子浓度观测结果缺失外, 表 1 给出的其他轨道均有相应的观测结果. 电子浓度同样存在季节变化特征, 大概在 1, 2, 10, 11 和 12 月, 电子浓度在北纬有极低值, 峰值出现在南半球; 在 3 月和 4 月, 在南北半球的高纬地区都会出现极低值, 峰值出现在赤道附近; 而在 5, 6, 7, 8 和 9 月, 极低值出现在南半球的高纬地区, 峰值出现在北半球. 通过对比可以发现, 震前 1 天 (2006 年 5 月 2 日) 的电子浓度比同在夏季的其他轨道的电子浓度整体有所增加, 极大值接近 $10^5\,\mathrm{cm}^{-3}$; 比 2007 和 2008 年同期观测的电子浓度峰值升高约 1 个数量级. 纵观 09753_1 轨道在 2006 年至 2008 年重访轨道观测的电子浓度的变化情况, 可知震前 1 天电子浓度达到了最大水平.

通过以上分析, 得到 O^+ 浓度和电子浓度在震前 1 天的轨道上存在同步增加, 两者的极大值接近 $10^5\,\mathrm{cm}^{-3}$. 震前 1 天的 Kp 指数之和为 7, 属于地磁宁静日, 并未受到地磁活动的影响. 等离子体浓度的增加可能与此次地震有关, 但有研究指出, 即使在磁宁静日, 区域电离层有时也可以出现很强的增加, 这表明低层大气的扰动或许是电离层异常增加的重要影响因素 [25−26], 而要确定这次增加现象是否为地震异常, 还需要更多的证据来支持.

3.3　震前 1 天与磁暴当天全球轨道对比

为了对比震前 1 天全球其他位置的轨道 O^+ 浓度的变化情况, 我们获得了这一天全球的夜侧轨道, 理论上共 15 条半轨, 数据库中缺失 3 条半轨, 共获得 12 条半轨数据. 其时间均在 20:30–23:30 LT, 轨道按照图 7(轨道标示如 20060502 097531 即表示 2006 年 5 月 2 日的 09753_1 轨道, 1 为夜侧轨道的代号) 所示从东向西覆盖全球. 图 8(a) 中箭头所示即为最接近震中的轨道 O^+ 浓度的观测值 (图 7 中 2006 年 5 月 2 日 09753_1 轨道). 此条轨道的 O^+ 浓度整体高于当天其他轨道, 并且其他轨道 O^+ 浓度的变化基本处于相同的水平. 排除地磁的干扰, 发现地震确实使得震中上空偏北约 10° 的位置 O^+ 浓度

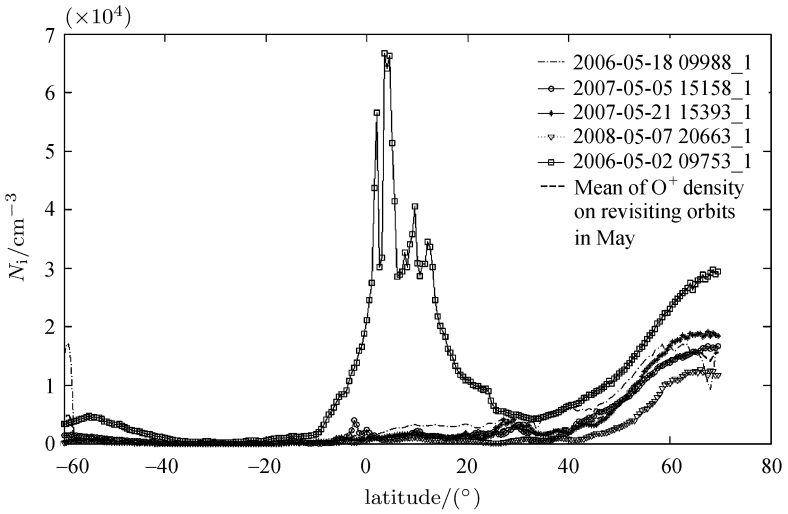

图 5 2006 年至 2008 年 5 月重访轨道观测的 O^+ 浓度对比

Fig. 5 O^+ density recorded by the revisiting orbits in May from 2006 to 2008

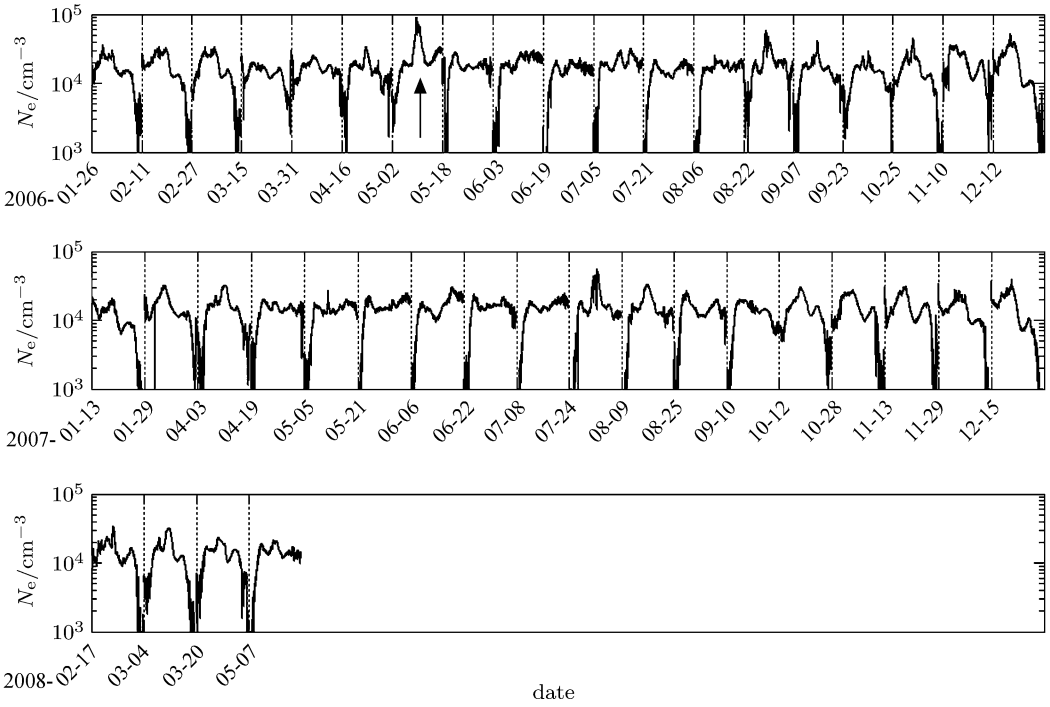

图 6 2006 年 5 月 2 日 09753_1 轨道在 2006 年至 2008 年的重访轨道观测的电子浓度对比

Fig. 6 Electron density recorded by the revisiting orbits from 2006 to 2008 based on the orbit 09753_1 of May 2, 2006

升高. 结合异常出现的位置, 图 7 中用双箭头标明此次地震电离层异常在轨道上出现的相应位置. 图 8(b) 给出在地磁扰动日 (2006 年 4 月 14 日, 全天 Kp 指数之和为 43) 全球夜侧轨道上 O^+ 浓度的变化. 4 月处在春分点附近, O^+ 在南北半球含量相当, 与图 4 所示 4 月的轨道比较可以看出, 磁暴的影响使得全球轨道的 O^+ 浓度整体升高. 从这两天全球轨道的比较可以发现, 地震致使离震中最近轨道观测的 O^+ 浓度升高, 而磁暴的影响却是使全球的轨道 O^+ 浓度升高.

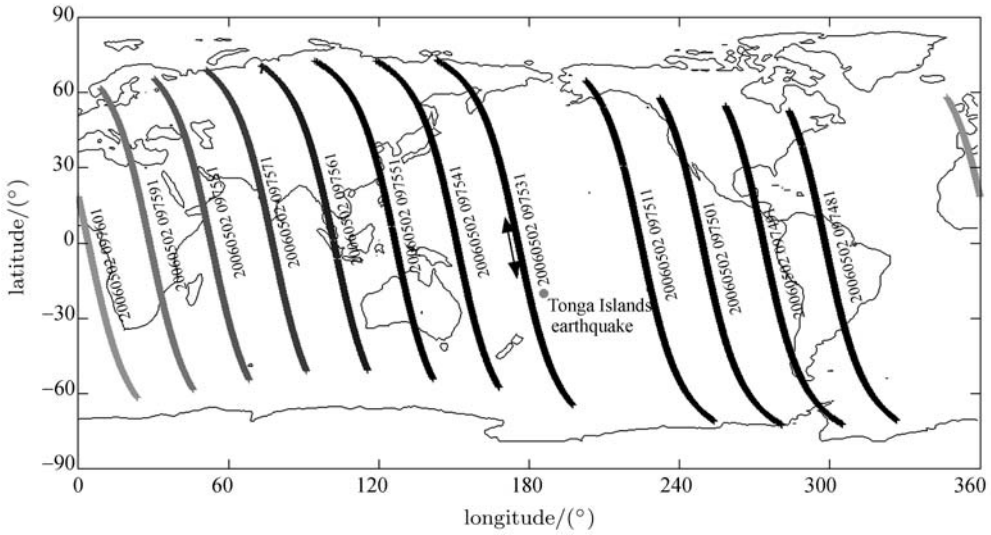

图 7　2006 年 5 月 2 日全球夜侧轨道与震中位置

Fig. 7　Position of epicenter and all orbits in the night of May 2, 2006

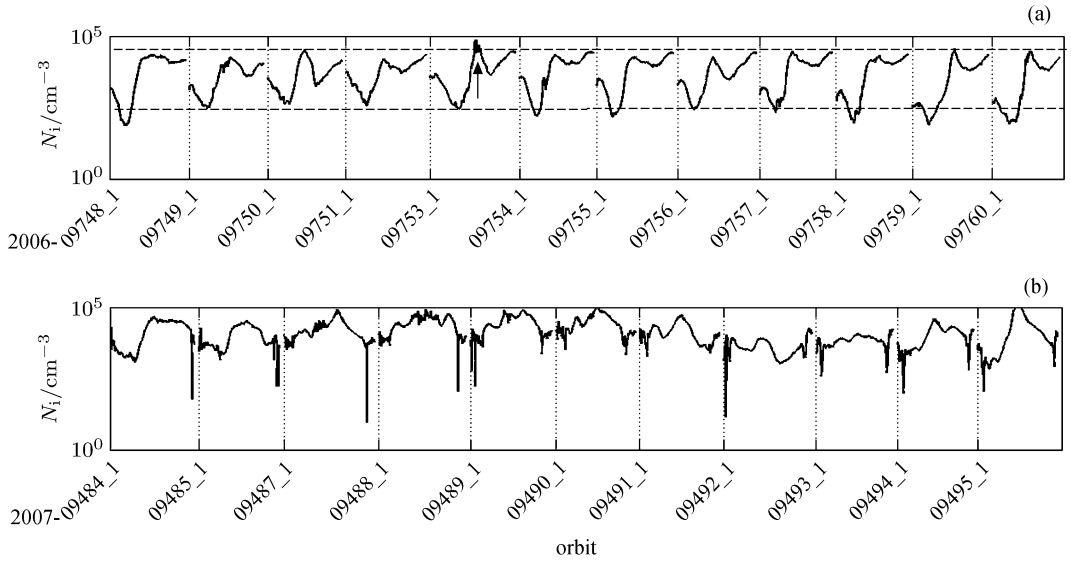

图 8　2006 年 5 月 2 日全球夜侧轨道 O^+ 浓度的变化 (a) 及 2006 年 4 月 14 日磁暴当天全球夜侧轨道 O^+ 浓度变化 (b)

Fig. 8　O^+ density recorded by all orbits in the night of May 2, 2006 and O^+ density recorded by all orbits in the night of April 14, 2006 with occurrence of geomagnetic storm

4　讨论与结论

地震电离层效应的耦合主要有三类途径: 电磁途径、光化学途径和声重力波途径 [27−28]. 特定的耦合途径与特定的震源及电离层特征有关. 另一种可能是地震电离层效应并不是由一类耦合过程单独形成, 而是由多种耦合途径共同作用导致的. 在地震的孕育过程中发生氡、惰性气体和温室气体成分等溢出现象. 气体成分溢出后会产生两种效应: 一种是气体成分被电离从而产生异常的电场, 另一种则是由于空气的运动产生声重力波进而产生异常的电场. 异常电场产生后穿透至电离层引起等离子体的不稳定, 致使离子组成成分和浓度发生变化 [29]. 本文观测到的 O^+ 浓度和电子浓度升高的现象, 很可能就是由于

地震孕育区气体成分溢出后产生异常电场导致电离层中的效应.

本文在震前 6 天、震前 2 天、震前 1 天和震后 2 天的二级图 (见图 1 和图 2) 上, 发现多个参量表现出了异常扰动, 包括电场仪探测的 VLF 电磁辐射、朗缪尔探针探测的电子浓度和电子温度, 等离子体分析仪探测的离子浓度和离子温度. 这些扰动现象出现在震中正上空偏北 10° 左右的赤道附近. 有研究认为, 在赤道双峰处附近, 地震引起的等离子体浓度的改变可出现在 500~800 km 高度, 在靠近磁赤道和磁纬 20° 左右扰动最剧烈, 这种现象可能与地震引起声重波进而影响电离层赤道异常的结构有关 [30].

利用 DEMETER 卫星数据, 通过二级图像初步解译、重访轨道对比和同一天全球轨道的对比, 从多个角度分析震前 O^+ 浓度的变化情况, 可以得到如下结论.

(1) 震前多次出现电离层扰动现象, 其中以 2006 年 5 月 2 日扰动幅度最大, 最靠近震中的一条轨道整体的 O^+ 浓度高出同一天全球其他轨道约 20%, 此条轨道观测的 O^+ 浓度相比 2006 至 2008 年 5 月的参考 O^+ 浓度升高约一个数量级. O^+ 浓度与电子浓度出现了同步增加现象.

(2) 震前异常与磁暴引起的电离层扰动对比表明, 2006 年 4 月 14 日磁暴时, 全球的夜侧轨道 O^+ 浓度均呈现较高水平, 而可能由地震引起的扰动只出现在最靠近震中的轨道上.

(3) 利用重访轨道分析, 发现 O^+ 浓度存在三类变化特征: 地磁春秋季时, O^+ 浓度在南北半球分布相当; 地磁冬季时, 南半球 O^+ 浓度高于北半球; 地磁夏季时, 北半球 O^+ 浓度高于南半球.

本文尝试寻找与地震相关联的电离层异常信息, 从震前 6 天开始观察到扰动信号, 到震后 2 天, 扰动信号依然存在. 扰动信号均出现在赤道附近, 而赤道地区的电离层成因是比较复杂的. 目前尚不能明确观测到电离层扰动信号是由地震直接导致的, 需要了解地震释放能量的过程, 进而结合地面的一些观测结果, 例如地电、地磁、氡的变化及重力波的变化等进行更深入的分析.

致谢 感谢法国 DEMETER 卫星数据中心提供的大量数据.

参考文献

[1] Parrot M. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 1995, **99**:339-347

[2] Chmyrev V M, *et al.* Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over an earthquake region [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1997, **59**:967-974

[3] Serebryakova O N, *et al.* Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:91-94

[4] Parrot M, *et al.* VLF emissions associated with earthquakes and observed in the ionosphere and the magnetosphere [J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1989, **57**:86-99

[5] Matthews J P, *et al.* A Search for Seismic Related Wave Activity in the Micropulsation and ULF Frequency Ranges Using GEOS-2 Data [M]. Gauthier-Villars, 1985. 749-754

[6] Chmyrev V M, *et al.* Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake centre [J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1989, **57**:110-114

[7] Boskova J, *et al.* Is the ion composition of the outer ionosphere related to seismic activity [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**:1689-1695

[8] Boskova J, *et al.* Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the Intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990 [J]. *Studia Geophys. Geod.*, 1994, **38**:213-220

[9] Parrot M, *et al.* Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions [J]. *Phys. Chem. Earth*, 2006, **31**:486-495

[10] Sarkar S, *et al.* Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2007, **69**:1524-1540

[11] Zhang Xuemin, *et al.* Ionospheric electro-magnetic disturbances prior to Yutian 7.2 earthquake in Xinjiang [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(2):213-221. In Chinese (张学民, 等. 新疆于田 7.2 级地震前的电离层电磁扰动 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(2):213-221)

[12] Zhang X M, *et al.* Analysis of ionospheric plasma perturbations before Wenchuan earthquake [J]. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 2009, **9**:1259-1266

[13] Zeng Zhongchao, *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, 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)

[14] Berthelier J J, *et al.* ICE, the electric field experiment on DEMETER [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**:456-471

[15] Parrot M, *et al*. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**:441-455

[16] Berthelier J J, *et al*. IAP the thermal plasma analyzer on DEMETER [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**:487-501

[17] Lebreton J P, *et al*. The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**:472-486

[18] Sauvaud J A, *et al*. High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**:502-511

[19] Zhu Rong, *et al*. Ionospheric perturbations before Pu'er earthquake observed on DEMETER [J]. *Acta Seismol. Sinica*, 2008, **21**(1):77-81. In Chinese (朱荣, 等. DEMETER 卫星观测到的云南普洱地震前的电离层扰动 [J]. 地震学报, 2008, **30**(1):76-81)

[20] Ouyang Xinyan, *et al*. Ionospheric N_e disturbances before 2007 Puer, Yunnan, China, earthquake [J]. *Acta Seismol. Sinica*, 2008, **21**(4):425-437. In Chinese (欧阳新艳, 等. 普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究 [J]. 地震学报, 2008, **30**(4):424-436)

[21] Nemec F, *et al*. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**, L05109, doi:10.1029/2007GL032517

[22] Liu L, *et al*. Yearly variations of global plasma densities in the topside ionosphere at middle and low latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, A07303, doi:10.1029/2007JA012283

[23] Liu L, *et al*. Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate mission radio occultation measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A02302, doi:10.1029/2008JA013819

[24] Johnson C Y. Ion and neutral composition of the ionosphere [J]. *Ann. IQSY*, 1969, **5**:197-213

[25] Liu L, *et al*. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**:893-903

[26] Zhao B Q, *et al*. Anomalous enhancement of ionospheric electron content in the Asian/Australian region during a geomagnetically quiet day [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A11302, doi:10.1029/2007JA012987

[27] Hayakawa M. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated With Earthquakes [M]. Tokyo: TERRAPUB, 1999

[28] Hayakawa M, Molchanov O A. Seismo electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling [M]. Tokyo: TERRAPUB, 2002. 477

[29] Pulinets S, Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes [M]. New York: Springer Verlag. 2004

[30] Molchanov O A, Hayakawa M, Afonin V V, Akentieva O A, Mareev E A. Possible influence of seismicity by gravity waves on ionospheric equatorial anomaly from data of IK-24 satellite 1. Search for idea of seismo-ionosphere coupling [G]//Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. Hayakawa M, Molchanov O A ed. Tokyo: TERRAPUB, 2002. 275-285