第 30 卷 第 4 期
2008 年 7 月 (424-436)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 30, No. 4
Jul., 2008

欧阳新艳，张学民，申旭辉，刘静，钱家栋，蔡晋安，赵庶凡. 2008. 普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究. 地震学报，**30**(4)：424-436.
Ouyang Xinyan, Zhang Xuemin, Shen Xuhui, Liu Jing, Qian Jiadong, Cai Jin'an, Zhao Shufan. 2008. Study on ionospheric N_e disturbances before 2007 Pu'er, Yunnan of China, earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(4): 424-436.

普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究*

欧阳新艳 张学民♣ 申旭辉 刘 静
钱家栋 蔡晋安 赵庶凡

(中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所)

摘要 挑选普洱地震前邻近地震震中的 3 条轨道的电子密度(N_e)数据，分析其 1 年内的所有重访轨道，并提取了这次地震前的 N_e 前兆异常. 结果表明：① 夜间电离层 N_e 存在明显的季节变化，4 个季节呈现了各自不同的变化形态；② N_e 的主要变化形态有 3 种，即单峰、马鞍和平缓状，这些形态在各个季节都可能出现，但每个季节有相对集中的形态；③ N_e 空间图象在震前 30 天内在震中区附近形成高值，异常信息在空间和时间上都与地震分布有很好的相关性，反映空间出现的异常信息确与本次地震有关；④ N_e 重访轨道曲线形态有一定的相似性，可以为识别判定地震异常提供背景信息.

关键词 普洱地震 DEMETER 卫星 电子密度(N_e) 季节变化 地震异常
文章编号：0253-3782(2008)04-0424-13 **中图分类号**：P318.6+3 **文献标识码**：A

Study on ionospheric N_e disturbances before 2007 Pu'er, Yunnan of China, earthquake

Ouyang Xinyan Zhang Xuemin♣ Shen Xuhui Liu Jing
Qian Jiadong Cai Jin'an Zhao Shufan

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

Abstract: Selecting three half orbits near the epicenter of 2007 M_S6.4 Pu'er earthquake, we analyzed the N_e data recorded on their revisited orbit during a year before this earthquake, and extracted N_e precursors. The results show that: ① There are significant seasonal variations of ionospheric N_e in night time, with different varying style in the four seasons; ② There are three main types of N_e variation: single-peak, saddle-shaped, even-shaped, all of which may occur in four seasons, but each season has its relatively typical variation style; ③ Spatial images of N_e showed high values near the epicenter for 30 days

* **基金项目** 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费(0207690221)和国家科技支撑项目联合资助.
收稿日期 2008-03-03 收到初稿，2008-06-03 决定采用修改稿.
♣ **通讯作者** e-mail: zhangxm96@126.com

http://www.dizhenxb.org.cn

before the earthquake, and there is a good correlation between anomaly and distribution of earthquakes in space and time, implying that these spatial anomalies were indeed associated with the earthquake; ④ The N_e variation curves show a certain similarity among revisited orbit. This similarity may provide background information for distinguishing and identifying seismic anomaly.

Key words: Pu'er earthquake; DEMETER satellite; electron density (N_e); seasonal variations; seismic anomaly

引言

北京时间 2007 年 6 月 3 日 5 时 34 分 56.8 秒(世界时：2007 年 6 月 2 日 21 时 34 分 56 秒)，在云南省普洱市宁洱县境内(23.0°N，101.1°E)发生了 M_S6.4 地震. 由于这次地震震源深度比较浅，仅 10 km，形成比较严重的地面破坏，造成了通信中断、交通中断、人员伤亡等一系列重大损失. 本文利用法国 DEMETER 卫星的观测数据，对可能与该地震有关的前兆现象进行了分析研究，探索利用卫星在电离层的观测资料分析提取地震前兆的新技术和新方法.

法国 DEMETER(Detection of Electro-magnetic Emission from Earthquake Regions)卫星于 2004 年 6 月 29 日发射的准太阳同步圆形轨道，倾角 98.3°、重量 130 kg、高度 710 km(2005 年 12 月中旬开始降为 660 km)，是迄今第一颗专门服务于地震监测的卫星. 其主要的载荷包括感应式磁力仪(IMSC)、电场探测仪(ICE)、等离子体分析仪(IAP)、朗缪尔探针(ISL)和高能粒子探测仪(IDP). 各观测参量详细说明参见 Berthelier 等(2006a)、Lebreton 等(2006)、Parrot 等(2006a)、Sauvaud 等(2006). 本文主要基于朗缪尔探针测量的电子密度(N_e)数据，研究了参量自身的背景变化特征及普洱地震前多轨道的 N_e 前兆扰动现象.

前人对于地震前兆与电离层 N_e 之间的关系研究，主要集中于利用 GPS 观测推算的电离层总电子含量(TEC)的研究，已经在多次地震前发现 TEC 异常扰动现象(Calais，Minster，1995；Zaslavski *et al*，1998；Liu *et al*，2002，2004；Trigunait *et al*，2004；Lognonné *et al*，2006)，在此不作详细介绍. 在卫星观测数据分析方面，Isaev 和 Serebryakova(2001)利用 Cosmos-1809 卫星记录的 N_e 数据，研究了 1989 年 1 月 20 日 Spitak 地震的余震和 1989 年 1 月 17 日伊朗地震，发现扰动幅度达 5%左右. Parrot 等(2006b)在 2004 年 9 月 5 日 Kii 半岛地区地震时发现 DMEETER 卫星观测到 N_e 显著增加. Parrot① 在 DEMETER 国际会议上针对朗缪尔探针测得的 N_e 数据，给出了大震前 N_e 扰动的特定事件，同时利用 N_e 数据进行了统计研究. 其统计的数据为 2004 年 8 月—2006 年 4 月震级>4.8、震源深度<40 km 的 2718 个震例，选择的轨道数据包含升轨和降轨、磁纬<50°、K_p<4。. 结果表明，在震前约 17—25 小时，电子密度增加；震前 8—16 小时，电子密度有小幅度减少；而震后 22—26 小时，电子密度剧烈减少. 升轨和降轨分开后，降轨数据表明，在震后 22—26 小时，电子密度剧烈减少；升轨的数据表明，在震前约 17—25 小时，电子密度增加，震

① Parrot. 2006. Statistical study of the variation of the electron density observed by the ionospheric satellite DEMETER during seismic activity. DEMETER 卫星国际研讨会.

前8—16小时，电子密度有小幅度减少. 而随机选取的轨道数据得到的结果表明，整个变化很均一，不存在电子密度异常增加和减少现象. Sarkar等(2007)利用DEMETER卫星上朗缪尔探针测得的 N_e 数据，观测到了中纬度地区3次地震前 N_e 异常，作者认为最大的变化幅度达20%. 目前，对 N_e 参量的研究多是采用空间相邻轨道的对比方法，缺乏对 N_e 实际空间背景信息的研究和长期的时间追踪. 本研究弥补了这方面的不足，并就空间地震异常的提取提出了新的分析思路.

1 电子密度(N_e)的背景资料分析

1.1 地震前 N_e 扰动图象

普洱地震前出现了DEMETER卫星记录到的多次异常扰动现象(朱荣等，2008)，这些异常一般均在多个参量上同步出现. 但从轨道的物理量图象中可以看出，异常扰动幅度比较小，相对于各参量随纬度的大幅度变化而言，有时难以识别，这给地震异常的提取和判定增加了很大的难度. 众多轨道的物理量图象对比发现，电离层 N_e 对于地震异常有较好地反映. 图1(图中蓝色线是1800 km范围)中我们选取了几个距离震中比较近的典型轨道的变化，这些轨道都出现在世界时13—16时之间，也就是地方时22时左右，即是北京时间的夜间. 可以看到，N_e 在整个轨道上的幅度变化特别大，进入40°S以南地区，N_e 快速下降，在几个轨道上都在图象设定的幅度范围之外. 在40°S以北地区 N_e 也不是稳定变化，而是呈现多组的起伏扰动，因此正常的变化形态就非常复杂. 结合超低频(very low frequency，缩写为VLF)电场在低频段的扰动增强现象，可以看到在 N_e 曲线上也观测到相应的扰动，但这些扰动既有快速的上升变化(15572_1)，也有快速下降变化(15542_1)，还有相对平缓的变化(15440_1)，当然还有一些轨道变化不明显(15484_1)，可以说是形态各异. 对一次地震而言没有统一的特征形态，反映了电离层 N_e 参量变化的复杂性. 因此在地震异常判定之前我们需要对该区域的背景变化进行充分的了解.

1.2 N_e 重访轨道数据采集

根据普洱地震前后1个月内轨道的物理量图象分析得到的统计结果可知，出现扰动信号的轨道绝大部分集中于夜间22点左右飞过震中区上空的升轨轨道(即从南纬飞向北纬). 整个轨道跨越3个小时的地方时，但所有地方时都分布在20—23时之间. 为便于对比，从中选取了3个轨道来做进一步的分析，其中两个轨道在普洱地震前出现异常扰动，另一个轨道无扰动异常，各轨道参数见表1. 图2a显示了3条轨道的空间分布位置. 可以看到距离普洱地震的震中相对都比较近，在1500 km以内. 因为卫星观测是在空间快速运动中的测量结果，因此与地面定点观测有很大差异，我们很难得到一个固定点的连续时间序列. 而相邻轨道之间的距离要超过2000 km，时间上相差1个小时左右，无论是空间还是时间都不方便直接进行对比. 根据DEMETER卫星的轨道设计特点，经过一段时间的资料积累后，我们发现了卫星轨道具有16天的重访周期，也就是说每隔16天卫星会在当日相同的时间段回到相同的轨道处. 虽然间隔比较长，但也为同一点、同时刻的数据对比提供了基础资料. 将选取的3个轨道往前追溯1年，所有重访轨道应该有24个(含作为追踪起点轨道本身)，但有的轨道数据在DEMETER库中缺失，数据获取情况见表2. 图2b，c，d是3条轨道的所有重访轨道，图中显示轨道之间具有很好的重叠性，经纬度之间的差异较小，反映这种方法可以用来对比相同地理位置的观测结果.

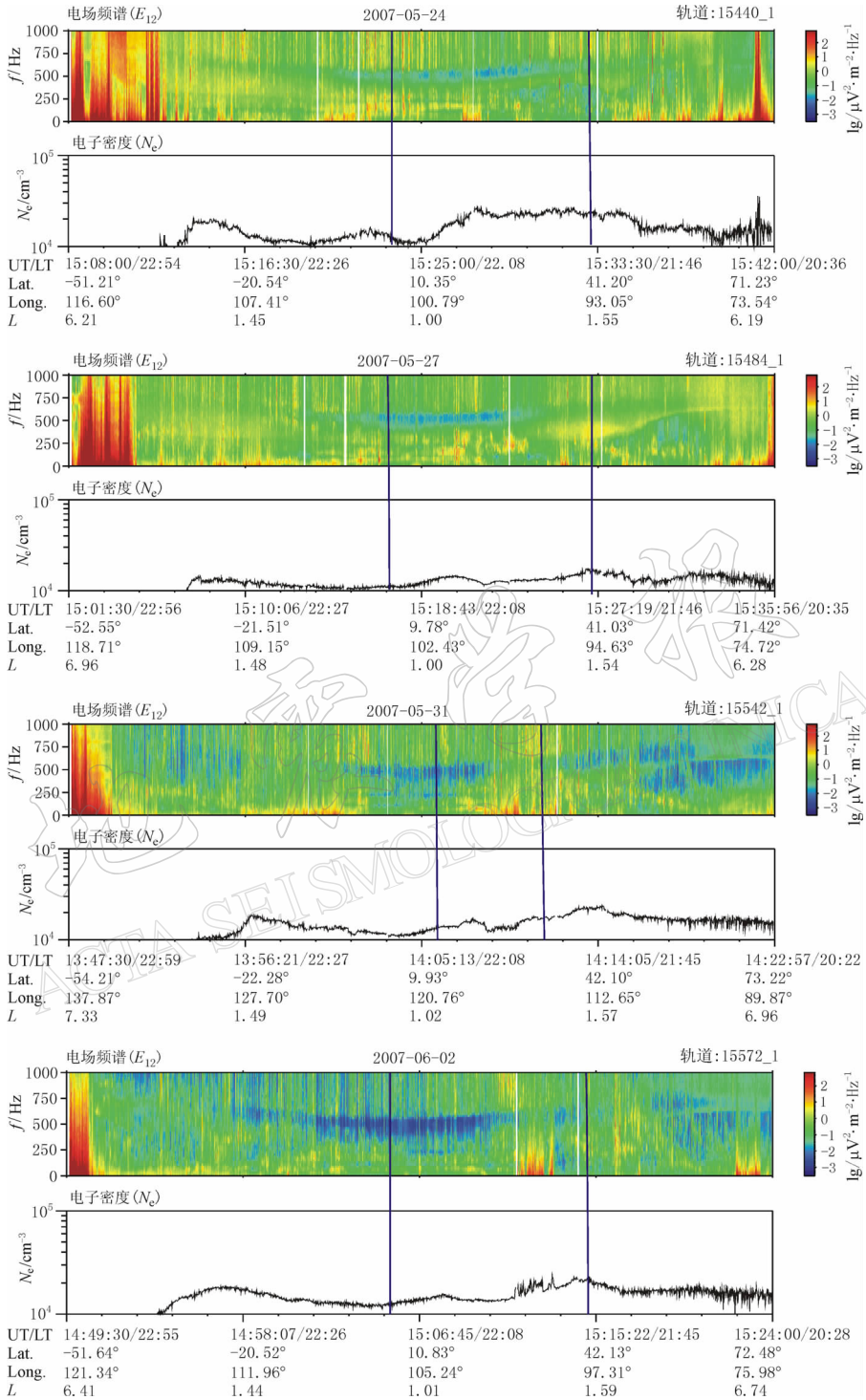

图 1　DEMETER 卫星在普洱地震前记录的超低频(VLF)电场和 N_e 变化图象

UT 表示世界时，LT 表示地方时，Lat. 表示纬度，Long. 表示经度，L 表示磁壳参数

Fig. 1　Images of VLFe "SP"(power spectrum of the VLF electric field) and N_e (electron density) recorded by DEMETER satellite before Pu'er earthquake

表 1 轨道特征表

Table 1 Characteristics of the orbits

序号	轨道号	轨道日期	距离地震的时间	是否为扰动轨道
1	15440_1	2007-05-24	震前 9 天	是
2	15484_1	2007-05-27	震前 6 天	否
3	15572_1	2007-06-02	震前约 6.5 小时	是

表 2 重访轨道数据情况表

Table 2 Available data of the revisited orbit

轨道号	追踪日期范围	应有重访轨道数	缺失轨道数	实有重访轨道数
15440_1	2007-05-24—2006-05-21	24	1	23
15484_1	2007-05-27—2006-05-24	24	2	22
15572_1	2007-06-02—2006-05-30	24	7	17

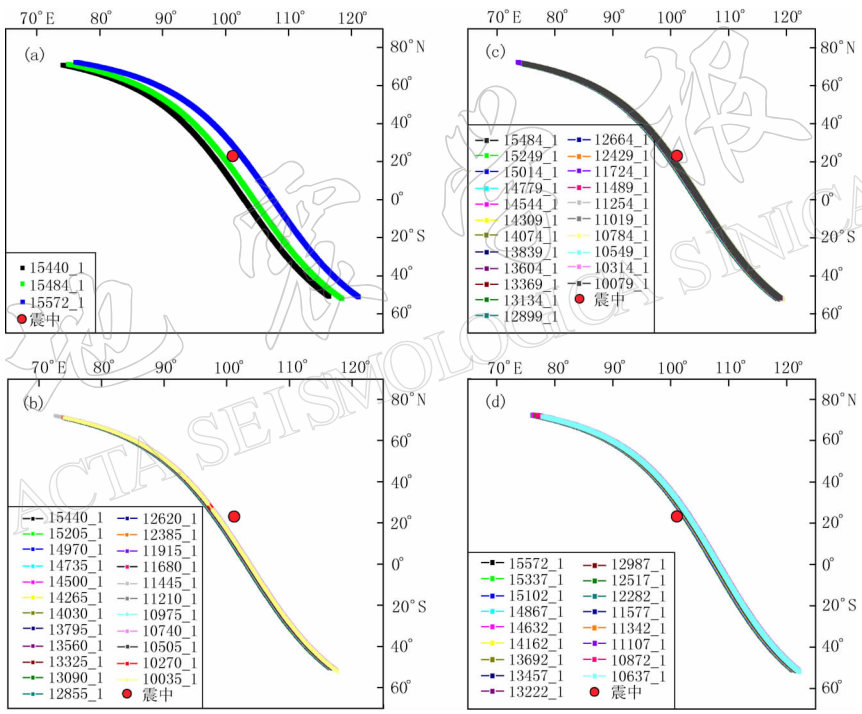

图 2 轨道与震中关系图

(a) 3 个轨道与震中关系图；(b)、(c)、(d)分别为 15440_1、15484_1 和 15572_1 的所有重访轨道与震中关系图

Fig. 2 Relative location of the epicenter and the orbits

(a) Relative location of the epicenter and the orbit 15440_1, 15484_1 and 15572_1; (b), (c) and (d) indicate the relative location of the epicenter and the orbit 15440_1, 15484_1 and 15572_1, respectively, as well as their revisited orbit

1.3 电子密度的季节变化特征

针对选取的 3 个轨道各自对应的重访轨道数据，将各条 N_e 观测曲线绘制在同一张图

中，发现曲线的变化形态非常复杂．为便于分析，按不同季节分类成图．季节的划分结合古代季节划分法和我国民间的习惯．古代划分法以立春(2 月 4 日或 5 日)、立夏(5 月 5 日或 6 日)、立秋(8 月 7 日或 8 日)和立冬(11 月 8 日或 9 日)作为每个季节的开始；民间习惯是每年阴历 1—3 月为春季、4—6 月为夏季、7—9 月为秋季、10—12 月为冬季．因此把 2—4 月的轨道归为春季，夏季指 5—7 月份的轨道，8—10 月为秋季的轨道，冬季为 11 月、12 月、1 月的轨道．结合轨道的实际记录发现，经过划分后曲线的同类形态特征更加统一，证明划分方法是合理的．下面分别对 3 条轨道的重访 N_e 曲线进行分析探讨．

1.3.1　15440_1 及其重访轨道的 N_e 变化特征

从图 3 中所有重复经过这条轨道的 N_e 曲线看出，除了在曲线的两端(高纬度地区)的跳跃点之外，N_e 有随纬度变化的背景特征，即在低纬和赤道附近呈现峰值，向南北高纬度地区发展 N_e 逐渐减小．这种特征在冬、春和秋季非常典型，曲线的极小值分布在 60°N 和 50°S 附近；而夏季不同，这个季节北纬地区的 N_e 明显增加，随着纬度的增大，N_e 一直保持在一个较高的水平．

4 个季节的图象对比发现：在春季，多数曲线呈马鞍状，整个曲线变化形态在南北半球有一定的对称性；赤道附近出现极大值，在 20000—30000 cm^{-3} 之间，整个高值区集中在 0°—20°N 范围内；0°—20°S 和 20°N—40°N 区域变化平稳，都在 15000 cm^{-3} 左右；南北再向高纬发展则出现快速下降．夏季，N_e 变化曲线整体呈双峰状，但两个峰值水平都比较低，其中一个位于 20°S 附近，另一个位于 10°N 左右，赤道附近呈现变化低谷现象；南半球高纬度地区 N_e 衰减比较快，北半球在较高值上持续发展．在秋季，大多数 N_e 变化曲线的变化特征与春季类似，峰值变化出现在 0°—20°N 区域内．冬季里整个 N_e 的变化趋势基本为：N_e 从 50°S 处开始逐渐增大，极大值出现在 10°S 附近，除个别曲线外，极大值小于 30000 cm^{-3}；0°—40°N 变化相对平缓，之后 N_e 快速下降．

从春夏秋冬 N_e 变化情况来看，冬季 N_e 的峰值较大，最高可达 45000 cm^{-3}．而夏季 N_e 的峰值水平较低，平均水平在 23000 cm^{-3} 左右，呈较平缓地变化．峰值分布的区域冬季出现在 0°—20°S；春秋两季分布在 0°—20°N；而夏季有两个峰值，南半球的峰值区相比冬季而言向南移动，出现在 25°S 附近，该峰值在春秋两季仍有一定显示，但相对北半球的高峰值而言特征不明显．

1.3.2　15484_1 及其重访轨道的 N_e 变化特征

图 4 展现的 15484_1 轨道在春、夏、秋、冬 4 个季节的整体变化形态与图 3 类似，显示出 N_e 峰值在冬季位于南纬，而春、夏、秋季峰值出现在北纬的特征．春季的 N_e 变化曲线多数呈对称的“凸”字状，只有一条曲线峰值出现在南纬，与其它曲线偏离较大．夏季的所有曲线可以分成两类：一类在 20°N 左右出现较大峰值，而另一类是自 30°S 向北变化平缓，在北半球也没有再出现快速升高的现象．在秋季，两条曲线峰值向南纬迁移，另两条曲线保留了“凸”字形特征．在冬季，各条曲线变化形态很相近，大都集中在一定的变化范围内，峰值分布在 10°S 附近．

1.3.3　15572_1 及其重访轨道的 N_e 变化特征

同样，图 5 给出的 N_e 季节变化图中各季节的极大值和极小值出现的位置及数值大小仍然类似于图 3 和图 4．由于这个轨道的重访轨道数据缺失比较多，春季的样本较少，从图上看，其中一条曲线出现较大峰值，而其它两条没有很突出的高值变化．在夏季，25°S处

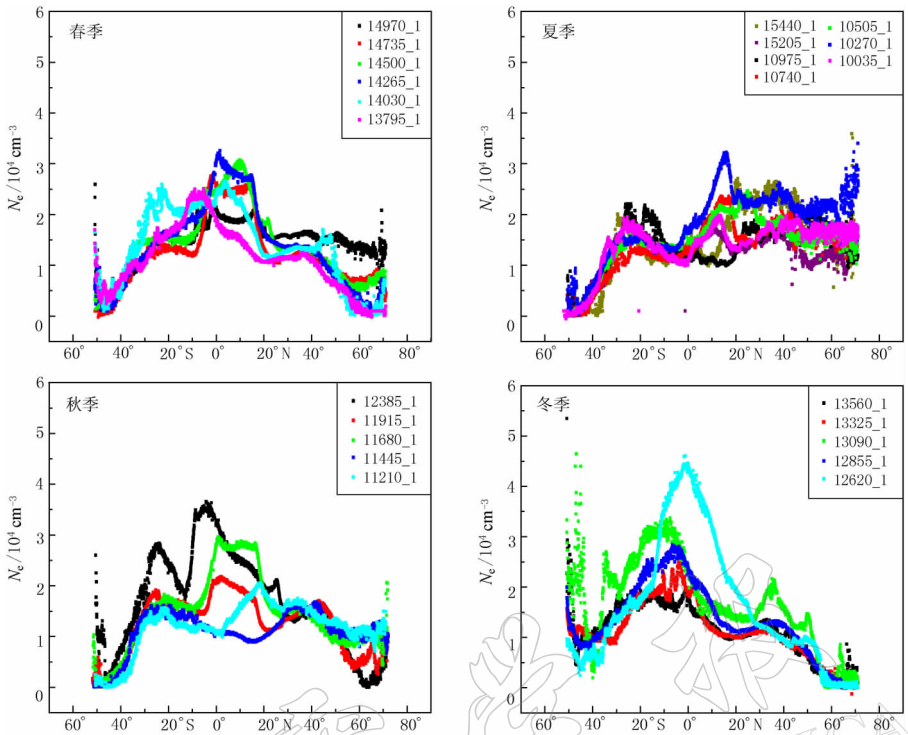

图 3 15 440_1 电子密度(N_e)季节变化图

Fig. 3 Seasonal variations of N_e for the orbit 15 440_1 and its revisited orbit

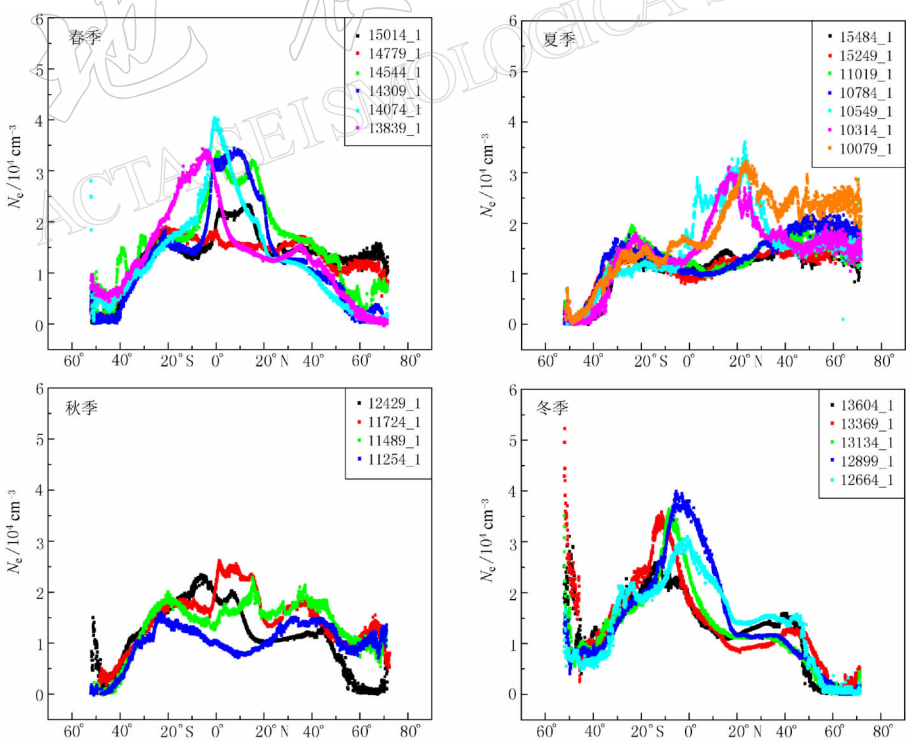

图 4 15 484_1 电子密度(N_e)季节变化图

Fig. 4 Seasonal variations of N_e for the orbit 15 484_1 and its revisited orbit

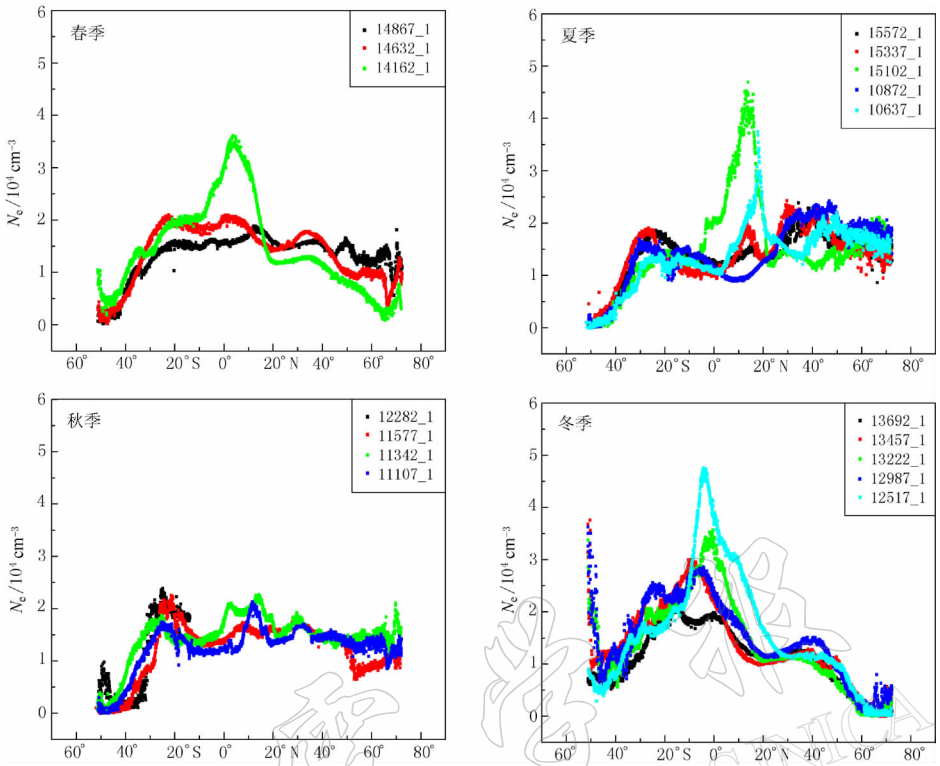

图 5　15 572_1 电子密度(N_e)季节变化图

Fig. 5　Seasonal variations of N_e for the orbit 15 572_1 and its revisited orbit

有一峰值，且夏季所有曲线的峰值在此重合的较好；到赤道附近有一极小值，而到 15°N—20°N 处，有些曲线呈现更大的峰值，最大值达到 45 000 cm^{-3}，而有些曲线位于变化的低谷，曲线之间的可比性较差. 这个轨道在秋季的各曲线变化较平缓，最大值也仅在 20 000 cm^{-3}左右，"凸"字对称特征被破坏. 南半球的峰值水平与北半球相当，同时北半球高纬地区的 N_e 也没有出现快速的下降现象. 冬季峰值变化在南半球低纬区域非常突出.

由于电离层还会受到太阳等空间活动的影响，对于收集的重访轨道的研究，我们同样考虑了各轨道时间对应的磁扰情况. 图 6 给出了 3 条轨道和对应的重访轨道的 K_p 指数，图 6a对应15 440_1及其重访轨道，从左往右为15 440_1开始至前一年各轨道对应的K_p

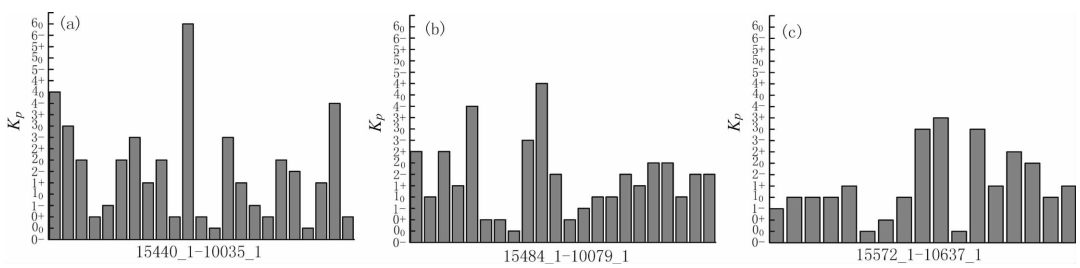

图 6　15 440_1(a)，15 484_1(b)和 15 572_1(c)的所有重访轨道的 K_p 指数图

Fig. 6　K_p index of the orbit 15 440_1 (a)，15 484_1 (b) and 15 572_1 (c)，and their revisited orbit

指数；图 6b 则对应 15484_1 及其重访轨道；图 6c 为 15572_1 及其重访轨道. 由图可知，总共有 2 条轨道对应的 $K_p > 4_0$，在所有 62 条轨道中只占到 3%. 并且，把这两条轨道与其它轨道对比后并未发现明显的异常变化. 因此我们认为，此次研究中用到的轨道数据能够反映一般情况下 N_e 的背景变化规律.

1.4 电子密度变化的 3 类形态总结

综合以上曲线及其特征分析，将其变化形态分为 3 类：单峰状、马鞍状及平缓状. 对于 3 个轨道及其重访轨道 N_e 变化形态的总结见表 3. 图 7 为 3 类形态的示意图，图 7a，b 和 c 分别为单峰、马鞍和平缓状. 由表 3 可知，对于 15440_1 及其重访轨道 N_e 变化形态，春季变化的主要形态为马鞍状，其次为单峰状；夏季 N_e 变化最主要的形态为平缓状，而秋季变化的主要形态为马鞍状；冬季 N_e 最主要的变化形态为单峰状. 对于 15484_1 及其重访轨道 N_e 变化形态，春季变化的主要形态特征为马鞍状，其次单峰状；夏季变化的主要形态特征是平缓状；秋季 N_e 也主要表现为马鞍状；而冬季变化的形态特征全部为单峰状. 对于 15572_1 及其重访轨道 N_e 变化形态，春季变化的主要形态为马鞍状；夏季主要形态为平缓状；秋季变化的形态全为平缓状；而冬季变化的主要形态为单峰状.

表 3 各形态曲线分属的季节表

Table 3 Styles of N_e variation curves for 4 different seasons

N_e 变化形态	15440_1 及其重访轨道				15484_1 及其重访轨道				15572_1 及其重访轨道			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
单峰状曲线数目	2	1	0	4	2	2	1	5	1	2	0	3
马鞍状曲线数目	4	0	3	0	4	1	2	0	2	0	0	2
平缓状曲线数目	0	6	2	1	0	4	1	0	0	3	3	0

由上可知，夜间电离层 N_e 存在一定的季节变化规律. 春、秋季节 N_e 的变化形态以马鞍状或“凸”字形变化为主，峰值出现在北纬地区. 冬季主要表现为单峰状，峰值出现在南纬，而且一年中的最大值往往出现在这个季节. 冬季 N_e 出现极小值和极大值的位置和数值大小都极其类似. 夏季主要有两种形态：一种是平缓变化，即南、北半球都没有明显的峰值；另一种是北半球出现一个较大峰值，而峰值位置相比春、秋季节更加偏向北方. 因此可以看出，3 个轨道都反映了 N_e 的季节性特征，其峰值的迁移与太阳相对地球的位置关系密切. 冬季太阳偏离北半球，N_e 峰值就偏向南纬地区，而且整个南半球的 N_e 平均水平要高于北半球；而自春季开始峰值就移动到北半球，夏季的部分高值甚至更加偏北，而且北半球 N_e 整体水平增加；秋季峰值会有两个分布区，分别分布在南北半球的低纬地区，反映出 N_e 峰值南迁的特征. 因此 N_e 的变化形态充分反映了太阳与地球相对位置的变迁，也就是说即使在卫星观测高度，即在 660 km 的电离层高空中 N_e 的夜间变化并没有随高度而衰减，仍然保留了明显的季节特征. 这种最直接的观测结果填补了对电离层 660 km 高度 N_e 在夜间变化的认识空白.

2 异常信息提取

2.1 重访轨道数据对比

重访轨道虽然时间上间隔比较长，但轨道之间的地理位置却非常接近，其数据之间的

http://www.dizhenxb.org.cn

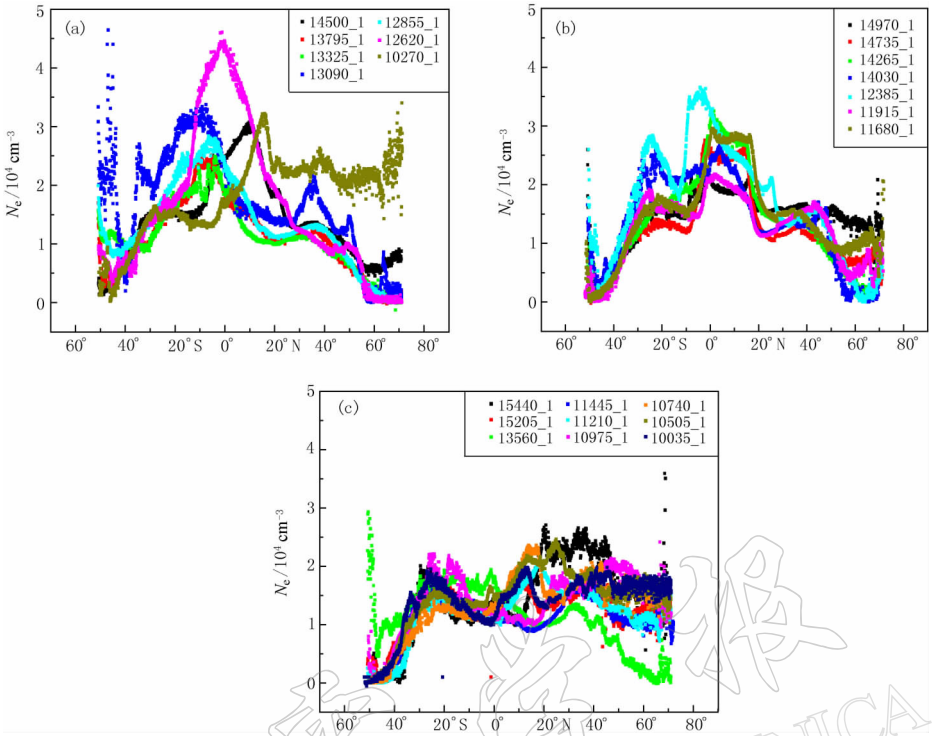

图 7　15 440_1 电子密度(N_e)变化形态图

(a) 单峰状；(b) 马鞍状；(c) 平缓状

Fig. 7　Variation style of N_e for the orbit 15 440_1 and its revisited orbit

(a) Single-peak; (b) Saddle-shaped; (c) Even-shaped

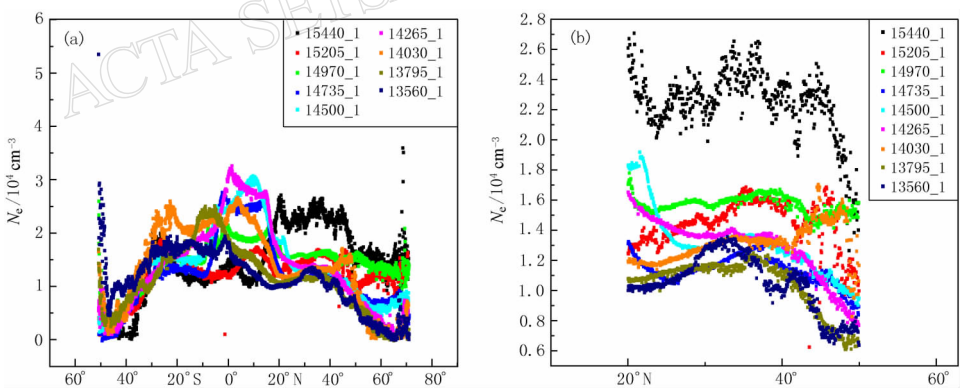

图 8　15 440_1 及其在 2007 年的重访轨道的电子密度(N_e)变化图

(a) 完整轨道的 N_e 曲线；(b) 20°N—50°N 局部截取图

Fig. 8　Variation style of N_e for the orbit 15 440_1 and its revisited orbit in 2007

(a) N_e curves for integrated orbits; (b) N_e curves in the range of 20°N —50°N

可对比性比较强. 从以上的分析也可以看出，轨道虽然存在季节变化，但相邻月份间的数据曲线仍具有很好的相似性，这为提取异常扰动提供了一定的依据. 将以上 3 个轨道在 2007 年以来的所有重访轨道图汇总，发现 15 440_1 轨道在 20°N—50°N 处有明显高于其它

轨道 N_e 的值(图 8a). 截取 15 440_1 轨道在 20°N—50°N 处 N_e 的值进行重点研究，如图 8b 所示，15 440_1轨道的 N_e 的值平均水平约为 23 000 cm^{-3}. 而其它的轨道，N_e 的值最低约为 10 000 cm^{-3}，N_e 的值最高约为 16 000 cm^{-3}，平均水平约为 13 000 cm^{-3}. 由此来看，15 440_1 轨道的 N_e 值比其它轨道高出 10 000 cm^{-3}，增幅达 77%左右. 由于15 440_1轨道是 5 月份记录的数据，也就是说已经进入夏季，而夏季北半球 N_e 整体水平会增加，所以 77% 的变化可能不完全是与地震相关的信息，而是包含了部分背景变化. 另外两条轨道异常不明显.

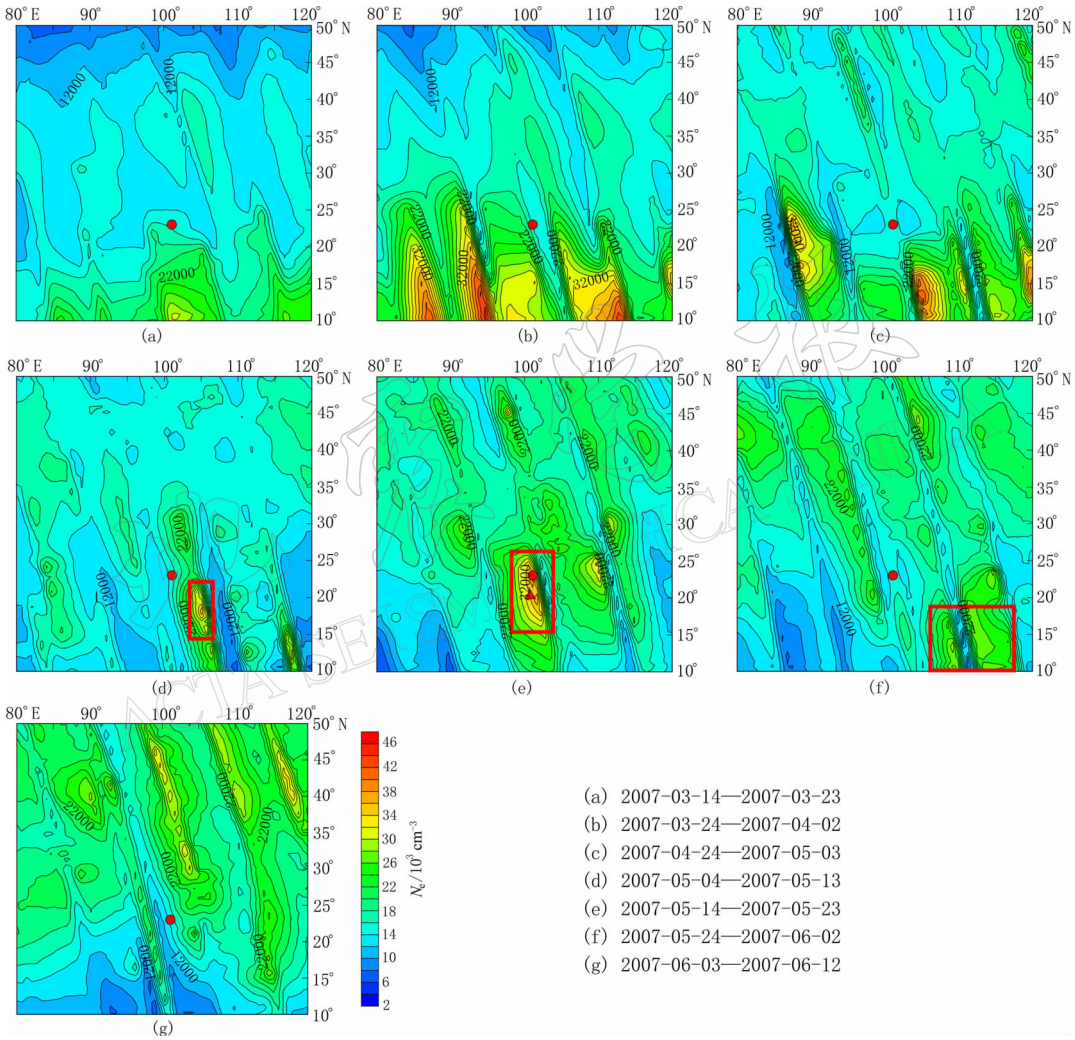

图 9 电子密度(N_e)时空演化图. 红实心圆表示普洱地震震中，红三角形表示老挝地震震中，红框内为异常区. 所有图的周期均为 10 天

Fig. 9 N_e temporal-spatial variation image

Red circle: Epicenter of Pu'er quake; Red triangle: Epicenter of Laos's quake; Red rectangle: Area of anomaly. The period of all maps is 10 days

2.2　N_e 时空演化图象

将震前 3 个月的数据按每 10 天进行分割，取震中附近 20°左右的范围作为研究区域，将所有经过研究区域的轨道数据绘制成等值线图(图 9). 其中图 9a，b，c 为 3 月 14 日—5 月 3 日的数据图，是地震前 2 个月的图象，可以看作是这个区域的正常变化图象；图 9d，e，f 为普洱地震前 1 个月的 N_e 图象；图 9g 为震后图象. 可以看出，2007 年 3 月、4 月份 N_e 变化的整体态势为低纬度 N_e 比较高，越往高纬 N_e 越低. 这也符合 N_e 在春季的变化规律：赤道附近出现最大值，越往两极走值越低. 图 9d，e，f，g 四幅图也大致符合 N_e 在夏季的变化规律：10°N—15°N 区域内 N_e 的值较低，约从 20°N 处开始向北 N_e 整体在较高水平上变化. 从图 9 中也能看出，约从 20°N 都呈现较均一的颜色，代表 N_e 值比较接近. 比较明显的变化出现在图 9d 和 e 两幅图中，围绕震中附近表现出了异常的高值. 特别是图 9e，震中区域是整幅图中 N_e 最高的区域. 图 9d 和 e 中的 N_e 高值异常区与图 9a—c 图象中不同，后者在整个 10°N —20°N 区域都呈现高值，反映的是大的空间背景变化；而图 9d 和 e 中的高值异常明显集中在震中区上空，反映了局部的变化特性，可能与这次 6 级地震引起的扰动有关. 根据地震目录，在此期间内还发生了老挝地震(世界时：2007 年 5 月 16 日 8 时 56 分 17 秒，震级为 6.3)，与普洱地震距离非常近(图 9e)，因此图 9d，e 中的 N_e 变化可能是由这两次地震的共同影响所导致的 N_e 异常高值. 而到了普洱地震临震前 10 天的图象(图 9f)，N_e 异常高值往震中的东南方向移动，不再位于震中的正上方，而且幅度有所降低. 震后图象(图 9g)显示 10°N —25°N 范围内所有高值异常消失，N_e 变化平稳. 由此看出，地震孕育过程中，电离层 N_e 确实出现了扰动异常. 另外，使用的所有数据中，4 月 1 日 K_p 指数的总和为 33_-、4 月 28 日为 32_+、5 月 23 日为 34_-、5 月 24 日为 32_0，其它时间 K_p 平均都小于 4_0. 在所研究的 70 天内，扰动的天数(K_p 平均大于 4_0)只占到 5%. 由此可以认为，本研究选定的时间范围内并未受到地磁干扰的明显影响.

3　结论

本文利用 DEMETER 卫星上朗缪尔探针(ISL)仪器测得的 N_e 重访轨道数据，研究了普洱地震前的 N_e 背景变化特征和前兆信息，得出以下结论：

1) 在 70°E —120°E 范围内，夜间 20:30—23:00 时段内 660 km 高空的 N_e 变化存在明显的季节性特征. 其中冬季南半球 N_e 整体比较高，峰值也分布在南半球低纬度区；而春秋两季为对称形状，峰值多分布在北半球；夏季北半球整体 N_e 偏高，峰值一般也迁移到 20°N左右.

2) N_e 变化形态主要有 3 种类型，即单峰、马鞍和平缓状. N_e 变化比较复杂，但每个季节仍有一定的规律可循，有各自比较典型的形态.

3) 震前 2 个月的空间图象反映了地震异常在震前 1 个月左右开始在震中区呈现高值，震前 10—20 天异常达到最大，临震前 10 天内异常区域有漂移现象，而且幅度减弱，震后异常消失. 因此电离层异常信息无论在空间和时间上都反映了其与地震发生孕育过程的显著相关性.

4) 利用重访轨道的数据对比方法获得了明显的前兆异常，异常增幅达到 77%左右. 但其中可能包含了一定的背景变化信息，不完全是地震引起的异常. 重访轨道数据对比可以为异常提取提供一定的背景基础.

参 考 文 献

朱荣，杨冬梩，荆凤，杨俊英，欧阳新艳. 2008. 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，**30**(1)：76-81.

Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Malingre M, Menvielle M, Lagoutte D, Brochot J Y, Colin F, Elie F, Legendre C, Zamora P, Benoist D, Chapuis Y, Artru J, Pfaff R. 2006a. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 456-471.

Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Seran E, Peschard D, Gilbert P, Artru J. 2006b. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 487-501.

Calais E, Minster J B. 1995. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **22**: 1045-1048.

Isaev N V, Serebryakova O N. 2001. Electromagnetic and plasma effects of seismic activity in the earth ionosphere[J]. *Chem Phys Reports*, **19**: 1177-1188.

Lebreton J P, Stverak S, Travnicek P, Maksimovie M, Klinge D, Merikallio S, Lagoutte D, Poirier B, Blelly P L, Kozacek Z, Salaquarda M. 2006. The ISL langmuir probe experiment and its data procession onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results [J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 472-486.

Liu J Y, Chuo Y J, Pulinets S A, Tsai H F. 2002. A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi, and Chia-Yi earthquakes[C]// Hayakawa M, Molchanov O A eds. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company: 297-301.

Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, Tasi Y B, Chen Y I, Pulinets S A, Yu S B. 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies monitored by GPS TEC[J]. *Ann Geophys*, **22**: 1585-1593.

Lognonné P, Artru J, Garcia R, Crespon F, Ducic V, Jeansou E, Occhipinti G, Helbert J, Moreaux G, Godet P E. 2006. Ground-based GPS imaging of ionospheric post-seismic signal[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 528-540.

Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, Blecki J, Chapuis Y, Colin F, Elie F, Fergeau P, Lagoutte D, Lefeuvre F, Legendre C, Lévêque M, Pincon J L, Poirier B, Seran H C, Zamora P. 2006a. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 441-455.

Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvaud J A, Santolik O, Blecki J. 2006b. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**: 486--495.

Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, Treilhou J P, Jacquey C, Cros A, Coutelier J, Rouzaud J, Penou E, Gangloff M. 2006. High energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 502-511.

Sarkar S, Gwal A K, Parrot M. 2007. Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **69**: 1524-1540.

Trigunait A, Parrot M, Pulinets S, Li F. 2004. Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event[J]. *Ann Geophys*, **22**: 4123-4131.

Zaslavski Y, Parrot M, Blanc E. 1998. Analysis of TEC measurements above active seismic regions[J]. *Phys Earth Plan Inter*, **105**: 219-228.

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA