

闫相相,单新建,曹晋滨等. 2014. 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球  $M_w \geq 7.0$  地震的电离层电子浓度异常. 地球物理学报, 57(2):364-376, doi:10.6038/cjg20140203.

Yan X X, Shan X J, Cao J B, et al. 2014. Statistical analysis of electron density anomalies before global  $M_w \geq 7.0$  earthquakes (2005—2009) using data of DEMETER satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(2):364-376, doi:10.6038/cjg20140203.

# 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球 $M_w \geq 7.0$ 地震的电离层电子浓度异常

闫相相<sup>1,2</sup>, 单新建<sup>1</sup>, 曹晋滨<sup>3</sup>, 汤吉<sup>1</sup>

1 地震动力学国家重点实验室, 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

3 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

**摘要** 基于法国 DEMETER 卫星 ISL 探测器升轨数据, 统计分析了 2005—2009 年全球 37 个  $M_w \geq 7.0$  级地震前后电离层电子浓度变化. 结果发现, 共有 19 个地震(51%)前观测到了较为明显的电子浓度异常扰动现象, 其中大部分表现为异常增强; 观测到的电子浓度异常现象一般出现在震前 1~5 天内, 也有部分地震前出现两次及以上扰动现象. 分析表明, 在赤道和中低纬地区更容易观测到明显的电子浓度扰动, 即异常震例基本发生在纬度  $\pm 40^\circ$  以内(18 次), 更是以  $\pm 20^\circ$  内居多(13 次). 此外, 震源深度对电子浓度扰动的影响并不明显, 而震级大小则与扰动幅度基本上呈正相关; 震前出现的电子浓度异常有时会受到地磁活跃的共同影响, 此时的扰动幅度一般较大. 地震电离层扰动现象是复杂多变的, 需要联合地基和天基手段共同观测, 并从机理上加强研究.

**关键词** DEMETER 卫星, 电离层电子浓度, 强震, 统计分析

doi:10.6038/cjg20140203

中图分类号 P312

收稿日期 2013-04-12, 2014-02-12 收修定稿

## Statistical analysis of electron density anomalies before global $M_w \geq 7.0$ earthquakes (2005—2009) using data of DEMETER satellite

YAN Xiang-Xiang<sup>1,2</sup>, SHAN Xin-Jian<sup>1</sup>, CAO Jin-Bin<sup>3</sup>, TANG Ji<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

3 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

**Abstract** Based on the data of French DEMETER satellite, we attempt to make a statistical analysis of variations of electron density before 37  $M_w \geq 7.0$  earthquakes in the world during January 2005 to December 2009. The orbits, recorded in local nighttime by the satellite, were chosen by a range of longitude 20 degree and latitude 15 degree during the 9 days around these earthquakes, with 7 days before and 1 day after. Among the 37 earthquakes, electron density perturbations were detected before 19 events, accounting for nearly 51% of the total. The anomalies represent positive before 18 events and occurred mostly within 1~6 days before the shocks, part of which appeared more than one time. It is more easily to observe the electron density disturbance around the equatorial and low-latitude regions than high latitudes. The

**基金项目** 科技部国际合作项目“CSES(中国地震电磁卫星)计划第一期研究”(2009DFA21480)资助.

**作者简介** 闫相相,男,讲师,1986 年生. 2013 年 6 月毕业于中国地震局地质研究所,获博士学位. 现在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院任教,主要从事地震电磁学和空间对地观测技术等方面的研究, E-mail: ahuyanxiang@gmail.com

disturbance amplitude presents a positive correlation with the magnitude of earthquakes basically, while the depth of earthquakes does not show significant relationship with the perturbation. It is noted that before several events, the anomalies were likely associated with the combined effect of earthquakes and geomagnetic activity and revealed a higher disturbance level. As the seismo-ionospheric coupling process is complex, it is necessary to conduct more observations of multi-parameters on the ground, in the atmosphere and ionosphere synchronously.

**Keywords** DEMETER satellite, Electron density of ionosphere, Great earthquakes, Statistical analysis

## 1 引言

近年来,随着空间对地观测技术的发展,有关地震电磁电离层扰动的研究成为热点.主要集中在低频电磁辐射(VLF/ELF/ULF)和等离子体(电子浓度、离子浓度、电子温度、离子温度等)参量的观测与研究.在大量震例研究的基础上,关于地震电离层耦合机制的研究也有一定进展,主要概括为三种途径:电磁途径、化学途径、声学途径(Hayakawa et al., 2004).当然,围绕着地震电离层扰动的研究目前仍存在一些争议.一方面,目前对强震电离层异常震例资料的积累仍不够充分,尤其是天基资料;另一方面,由于岩石圈-大气层-电离层耦合过程的复杂性,加之电离层本身有着复杂的周日变化,如何确定不同形态的电离层扰动是否与地震等有关.

从第一个卫星观测实例,即 Alouette-1 卫星观测到 1964 年 Alaska 大地震震前电离层临界频率显著增高(Davis et al., 1965)开始,有关卫星上观测到与地震相关的电离层异常信息的报道陆续发表. Larkina 等(1989)利用 Intercosmos-19 卫星数据对 39 个  $M > 5.5$  级、深度  $< 60$  km 的地震进行统计分析时发现震前存在低频(0.1~16 kHz)电磁波辐射增强现象;Hayakawa 等(2000)在利用 Intercosmos-24 卫星的 3000 多个轨道数据对等离子体密度与地震活动的相关性进行统计研究时发现明显的相关性只发生在 LT10~16 h,高度在 500~700 km 的磁平静条件下;Molchanov 等(2002)基于 IK-24 卫星数据统计分析了位于赤道附近的 50 个  $M \geq 6$  级的地震时发现,在 500~800 km 高度地震引起的电离层赤道异常驼峰附近的等离子体密度发生异常变化.

法国 DEMETER 卫星于 2004 年 6 月 29 日发射,2010 年 12 月 9 日停止科学数据的接收.其主要科学目标是研究与地震有关的电离层扰动信息以及探测全球尺度的电磁环境.卫星采用准太阳同步圆形轨道,轨道高度 710 km(2005 年 12 月调整为 660 km).

卫星有效载荷包括:电场探测器(ICE, Instrument Champ Electrique)(Berthelier et al., 2006a)、感应式磁力仪(IMSC, Instrument Magnetic Search Coil)(Parrot et al., 2006a)、等离子体分析仪(IAP, Instrument d'Analyse du Plasma)(Berthelier et al., 2006b)、Langmuir 探针(ISL, Instrument Sonde de Langmuir)(Lebreton et al., 2006)和高能粒子探测器(IDP, Instrument for the Detection of Particle)(Sauvaud et al., 2006).其中 ISL 载荷用来观测电离层等离子体的电子浓度( $Ne$ )( $10^2 \sim 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ )和电子温度( $Te$ )(600~10000 K).

国内外已经逐渐有大量学者利用 DEMETER 卫星各载荷数据开展地震电离层效应研究(曾中超等, 2009;李新乔等, 2010;张学民等, 2010;朱涛等, 2011;刘静等, 2011;张振霞等, 2012;泽仁志玛等, 2012;万剑华等, 2012;Parrot et al., 2006a;Sarkar et al., 2007;Zhang et al., 2012). Parrot 等(2006)探讨了几次地震活动前 DEMETER 卫星记录的电磁波和电离层等离子体的扰动特征;Sarkar 等(2007)利用 ISL 和 IAP 载荷数据分析比较了三次地震前的电离层不规则特性和中纬度区域异常特征;Zhang 等(2012)则利用 ICE 载荷数据对 2005—2010 年间全球 69 个 7 级以上强震进行统计分析,发现其中 32 个地震前震中 2000 km 范围内存在 ULF 和 ELF 波段的静电扰动现象.刘静等(2011)对 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震研究时发现震前多天 DEMETER 卫星都观测到了不同程度的电子浓度扰动现象.此外,He 等(2011)利用 ISL 载荷统计分析了 2006—2009 年间全球 5 级以上地震前的电子浓度异常变化特征,总结了  $Ne$  变化与震中地理位置(南北半球)、地震类型(陆地和海域)和震源深度的统计关系,取得了一定的结论.然而值得注意的是,Heki(2011)和 Cahyadi 等(2013)的近期研究结果表明 7 级以上地震前的电离层电子浓度变化较为明显,因此本文将着重探讨 7 级以上强震前电离层电子浓度的异常变化特征.

## 2 数据情况

### 2.1 DEMETER 卫星数据

由于 DEMETER 卫星在发射伊始的半年和最后停止接收科学数据前的半年存在轨道不全和数据接收不稳定等因素,本文着重收集了 2005-01-01—2009-12-31 期间的 DEMETER 卫星 ISL 探测器上的电子密度  $Ne$  数据. 由于夜间电离层变化较白天更为宁静,有利于捕捉跟地震有关的扰动信息,因此本文只选取了升轨数据进行分析(升轨数据对应地方时的夜晚). 此外,由于卫星姿态调控、载荷的开关以及载荷的定标等事件会影响观测数据,我们根据

DEMETER 卫星科学数据中心提供的辅助数据文件剔除了在这期间记录有误的轨道数据.

### 2.2 地震事件

选取的地震事件为 2005-01-01—2009-12-31 期间全球 7.0 级以上地震,数据来自 USGS(<http://earthquake.usgs.gov/regional/ncic/>). 为了尽可能排除地磁活动的影响,去除在此期间所有磁暴日( $Dst$  指数  $\leq -40$  nT 或一天内  $Dst$  指数降幅  $> 40$  nT)以及 4 天内的地震事件. 此外,也去除了同一时期(15 天内)同一地理位置的地震事件(Le et al., 2011). 根据以上条件,得到符合条件的地震事件共 40 个. 其中还需要去除 DEMETER 卫星数据缺失的 3 个震例,最后统计分析的震例共计 37 个(图 1).

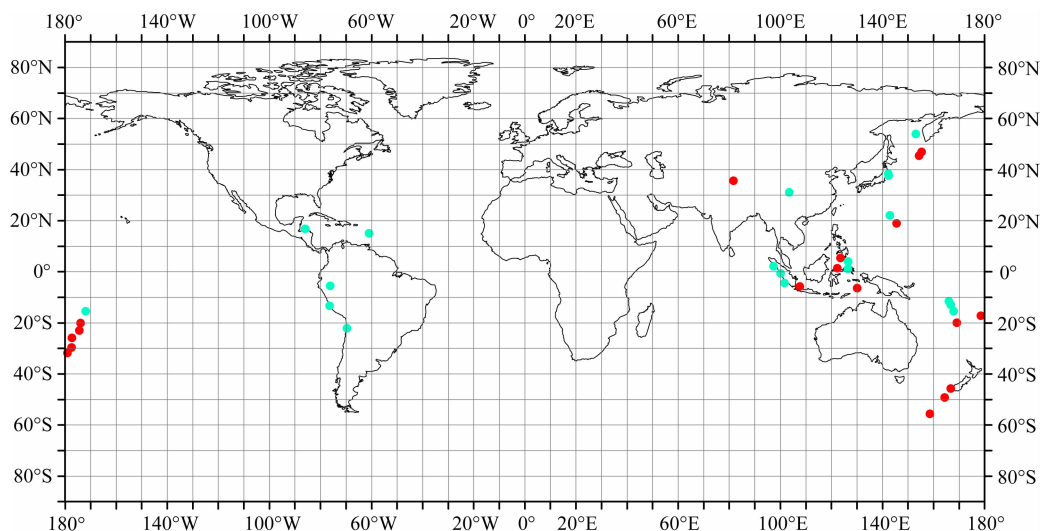


图 1 2005 年到 2009 年全球 37 个 7.0 级以上地震事件震中分布

蓝色圆圈表示观测到异常的 19 次地震事件,红色圆圈表示未见明显异常的地震事件

Fig. 1 Epicenter distribution of the selected 37 earthquakes with a magnitude above 7.0 during January 2005 to December 2009

Blue circles represent the events with electron density perturbations while the red circles indicate the events without the disturbance.

## 3 数据分析与结果

### 3.1 数据分析方法

研究表明,不同震级对应孕震区的范围不同,并存在经验公式  $R = 10^{0.43M}$  ( $R$  是孕震区半径,  $M$  为震级)(Dobrovolsky et al., 1979). 针对本文的 37 个地震事件,其孕震区半径约为:1000 km(7.0 级)~4500 km(8.6 级). 首先,需要根据震中位置来确定研究区域,即以震中为中心,参考地震的震级大小,将经度和纬度分别加减一定度数,形成一个矩形区域. 此外,还需要保证研究区域内每天至少有一条轨道经过. 所以,本文中我们选取的研究区域为:纬度

±15°,经度±20°,并以  $1^\circ \times 1^\circ$  进行网格划分. 鉴于电离层扰动信息的短临特性,设定分析时段为震前 7 天,震后 1 天,共 9 天的轨道数据. 这较 He 等(2011)中的震前 30 天作为分析时段更为合理. 考虑到电离层电子浓度具有较为显著的年变化和季节变化,将分析时段前后一个季度内数据作为背景数据(去除磁暴日数据). 同样将背景数据进行网格化,计算每个网格的中值作为背景场( $Ne$ ). 进而分析每个网格内所有轨道数据相对与背景值的变化( $\Delta Ne/Ne$ ).

我们以 2007 年 9 月 28 日(22.013°N, 142.668°E)  $M_w$  7.5 级地震为例具体说明. 按照以上分析原则,研究区域为:纬度(7°N—37°N),经度(123°E—163°E); 分析时段为 2007 年 9 月 21—29 日(9 月 22 日和 25

日数据缺失),背景时段为 2007 年 9 月—10 月期间去除分析时段和磁暴日的其他时段(9 月 6 日无数据,9 月 20 日  $Dst$  降幅超过 40 nT,10 月 25 和 26 日  $Dst < -40$  nT,去除).分别将分析时段和背景时段经过研究区域的各轨道数据以  $1^\circ \times 1^\circ$  进行网格划分,以相应的时间窗按克里金(Kriging)方法进行插

值,克里金插值考虑了数据的空间结构,能够较好地反映数据自身的特性,尤其在数据稀少时其优势更加明显.最后,计算背景时段每个网格的中值作为背景场,并求得分析时段相对于背景值的变化.图 2a 显示的分析时段  $Ne$  数据网格化后的分布情况,图 2b 则显示的是背景时段的中值.

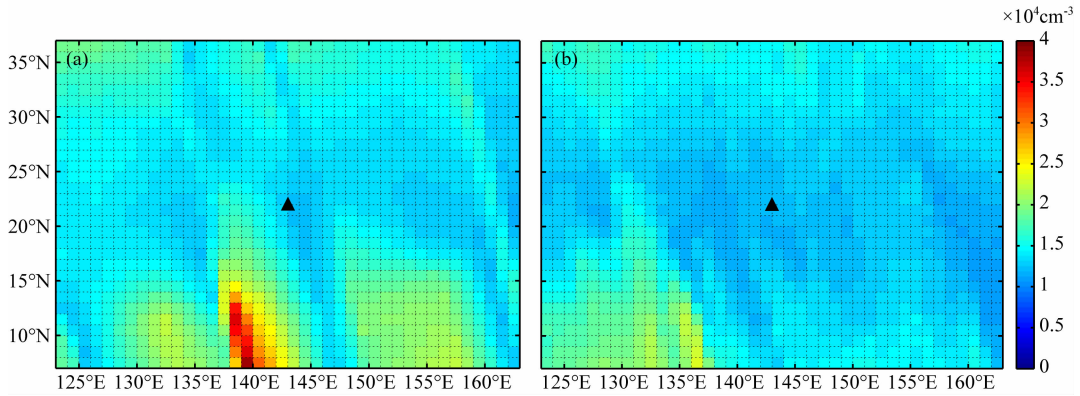


图 2 2007 年 9 月 28 日地震前震中附近区域电离层电子密度分布(a);背景电子浓度分布(b)(三角形表示震中位置)

Fig. 2 Map of  $Ne$  around epicenter before  $M_w 7.5$  earthquake on September 28 in 2007 (a); Map of reference background  $Ne$  around epicenter (b). Black triangle indicates the epicenter

### 3.2 典型震例对比分析

本节重点选取了分别位于赤道附近、中低纬和中高纬的三次典型地震,进行对比分析.一方面可以作为电子浓度异常信息提取的具体实例详细阐述,另一方面可以分析不同条件下(纬度、震级、地磁环境等)的震前电子浓度扰动异同.

#### 3.2.1 2005 年 3 月 28 日苏门答腊 $M_w 8.6$ 地震

根据 3.1 中所述的异常提取方法,以 3 月 22—29 日为分析时段,以 3 月和 4 月地磁活动平静日为背景时段,分析震中区域电子浓度相对于背景时段的变化情况.如图 3 所示.可以看出,在  $98^\circ E-106^\circ E$  和  $8^\circ N-25^\circ N$ 、 $91^\circ E-97^\circ E$  和  $10^\circ N-22^\circ N$  两个范围内电子浓度明显增强,最大增幅分别达到  $2.8 \times 100\%$  和  $2.6 \times 100\%$ .

进一步地,我们逐一分析了 3 月 22—29 日期间的  $Ne$  全球轨道散点图,发现 3 月 25 日和 28 日两天在震中附近电离层电子浓度明显偏高.为了分析震前电离层电子浓度扰动和磁暴期间电离层电子浓度扰动的异同,我们选取一次中等磁暴日 3 月 14 日( $Dst$  指数  $-45$  nT)和 25 日、28 日的电子浓度变化情况进行对比分析.图 4 显示的是 2005 年 3 月 14 日、25 日和 28 日  $Ne$  全球轨道数据散点图,其中 3 月 25 日部分轨道数据缺失.可以看出,3 月 14 日受到地磁活动的影响,DEMETER 卫星可以监测到全球范围内的  $Ne$  扰动情况, $Ne$  峰值达到  $7 \times 10^4 \sim$

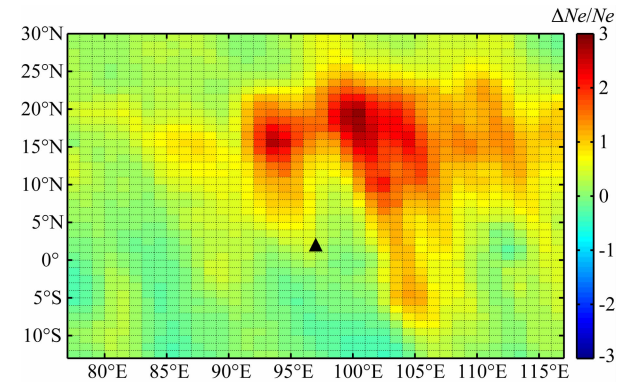


图 3 2005 年 3 月 28 日苏门答腊地震前震中附近区域电离层电子密度相对于背景值的变化( $\Delta Ne/Ne$ );三角形表示震中位置

Fig. 3 Map of  $\Delta Ne/Ne$  around epicenter before Sumatra  $M_w 8.6$  earthquake on March 28 in 2005. Black triangle indicates the epicenter

$1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ;3 月 25 日和 28 日则是在震中附近的两条轨道观测到明显的  $Ne$  增强现象,其他轨道  $Ne$  峰值偏低.我们分别选取了 3 月 14 日 3705\_1、3 月 25 日 3871\_1 和 3 月 28 日 3915\_1 三条轨道,对比分析它们的  $Ne$  变化曲线,如图 5 所示.三条轨道都显示了在电离层中低纬地区电子浓度典型的单峰变化结构.其中轨道 3705\_1 在  $2^\circ S-24^\circ S$  出现了明显的扰动,扰动峰值达到  $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ;轨道 3871\_1 (震前 4 天)在  $6^\circ N-14^\circ N$  出现扰动,峰值达到  $7.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;轨道 3915\_1 (震前约 20 min)在  $7^\circ N-16^\circ N$

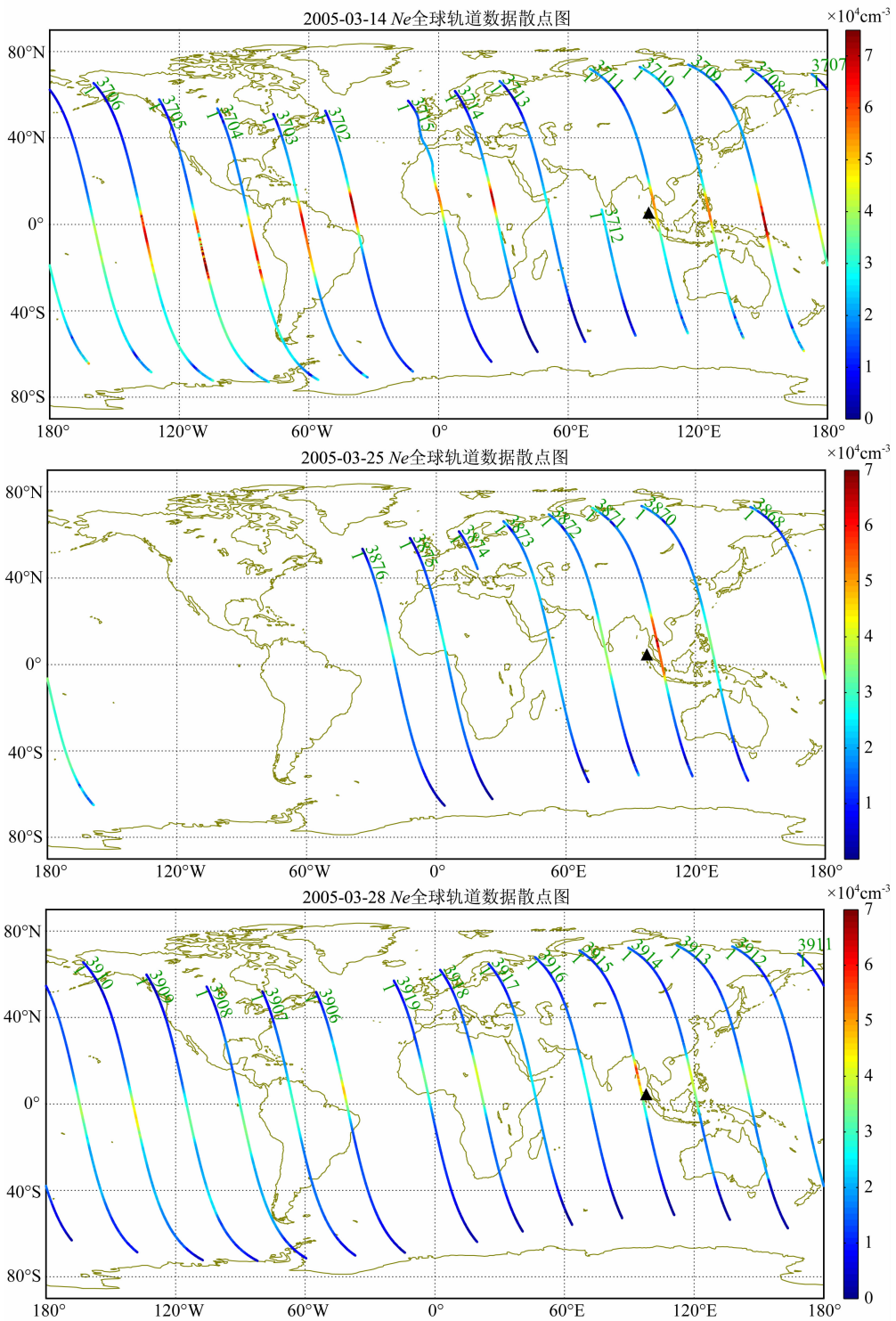


图 4 2005 年 3 月 14 日、25 日和 28 日 Ne 全球轨道数据散点图

Fig. 4 Scatter diagrams of electron density in the world on March 14, 25 and 28, respectively

出现扰动, 峰值达到  $6.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ .

综合以上分析, 我们认为由于受到 3 月 25 日和 28 日的扰动影响, 震中附近区域电离层电子浓度出现了明显的增强(图 3). 考虑到 3 月 25 日地磁活动达到活跃水平, 且 DEMETER 卫星经过震中位置时刻 (15UT) 的  $D_{st}$  指数达到  $-21 \text{ nT}$ , 应该说地磁活

动的影响对此也有一定贡献, 所以在震中附近出现的电子浓度增强从范围和幅度上都较 3 月 28 日更大.

### 3.2.2 2007 年 9 月 28 日太平洋海域 $M_w 7.5$ 地震

图 2 中已经显示了此次地震前分析时段和背景时段的 Ne 分布特征. 我们同样得到震中区域电子浓度相对于背景时段的变化情况(图 6). 可以看出,

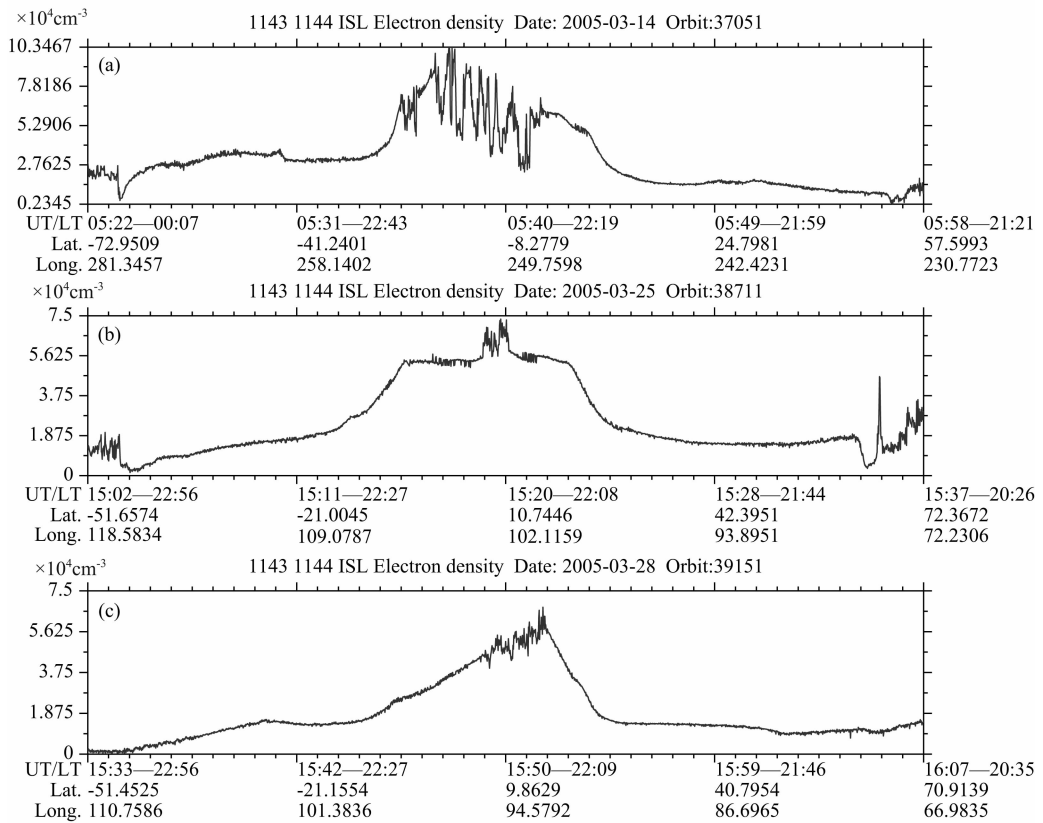


图5 2005年3月14日3705\_1轨道(a)、3月25日3871\_1轨道(b)和3月28日3915\_1轨道(c)  $N_e$  变化曲线

Fig. 5 Electron density curves along the orbit 3705-1 on March 14 (a), 3871-1 on March 25 (b) and 3915-1 on March 28 (c), respectively

在  $137^{\circ}\text{E}$ — $145^{\circ}\text{E}$  和  $5^{\circ}\text{S}$ — $20^{\circ}\text{N}$  范围内电子浓度比较背景时段数据有明显增强,增强幅度  $(1\sim 2) \times 100\%$ 。此外,电子浓度增强的范围相对震中向赤道方向有一定程度的偏移。

同样,我们将此次地震前9月21—30日共9天的轨道数据逐一分析,发现9月24日震中附近电离层电子浓度较其他区域明显偏高,其他日期电子浓度变化较为稳定。图7显示了9月24日  $N_e$  全球轨道数据散点图和震中附近轨道17245\_1的  $N_e$  变化曲线。可以看出,9月24日在震中附近的两条轨道17245\_1和17246\_1电子浓度偏高,达到  $3.8 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;此外全球其他轨道除17242\_1外,电子浓度峰值变化不大。而图7b中可以看出电离层电子浓度在中低纬地区同样呈现单峰变化结构,在靠近赤道的区域,纬度  $5^{\circ}\text{S}$ — $20^{\circ}\text{N}$  范围内峰值达到  $3.8 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。

### 3.2.3 2008年7月5日 $M_w 7.7$ 地震

在本文中统计的37个震例中,纬度在  $\pm 40^{\circ}$  以上的地震共有6个(图1),其中震前能够观测到较为明显的电子浓度扰动的只有此次地震。在其他的几次地震中,2008年4月12日和2007年9月30日

两次地震(表1)所在的高纬度研究区域中轨道数据较少,基本上很难捕捉电子浓度的变化信息;而2007-01-13、2009-07-15以及2009-01-15三次地震前则没有发现明显电子浓度扰动现象。

同样分析7月1—6日(6月28—30日轨道数据缺失)震中区域电子浓度相对于背景时段的变化可知(图8),在震中东南侧  $152^{\circ}\text{E}$ — $160^{\circ}\text{E}$  和  $37^{\circ}\text{N}$ — $51^{\circ}\text{N}$  范围内电子浓度较背景数据有微弱的增强,增强幅度  $(0.2\sim 0.45) \times 100\%$ 。进一步分析7月1—6日每一天的轨道数据,图9显示的是7月5日  $N_e$  全球轨道数据散点图和震中附近轨道21430\_1的  $N_e$  变化曲线。可以看出,电离层电子浓度呈现双峰变化的结构;21430\_1轨道显示的是7月5日震后约9h DEMETER 卫星过境时的数据情况,北半球震中空峰值明显较其它轨道增强,达  $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。

总结以上三次震例,可以看出,DEMETER 卫星记录的数据在赤道和中低纬地区更容易观测到明显的电子浓度扰动,而中高纬地区一般不利于观测震前电子浓度变化;地震引起的电离层电子浓度异常区域一般和孕震区有关,而地磁扰动时的电离层异常一般具有全球性的特征,这与前人结论也基本

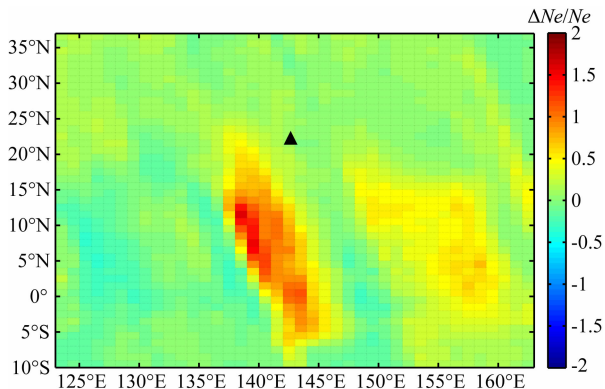


图 6 2007 年 9 月 28 日地震前震中附近区域电离层电子密度相对于背景值的变化( $\Delta Ne/Ne$ ) (三角形表示震中位置)

Fig. 6 Map of  $\Delta Ne/Ne$  around epicenter before  $M_w$  7.5 earthquake on September 28 in 2007. Black triangle indicates the epicenter

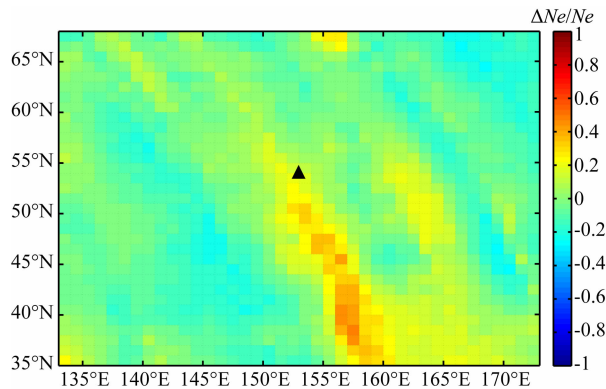


图 8 2008 年 7 月 5 日地震前震中附近区域电离层电子密度相对于背景值的变化( $\Delta Ne/Ne$ ) (三角形表示震中位置)

Fig. 8 Map of  $\Delta Ne/Ne$  around epicenter before  $M_w$  7.7 earthquake on July 5 in 2008. Black triangle indicates the epicenter

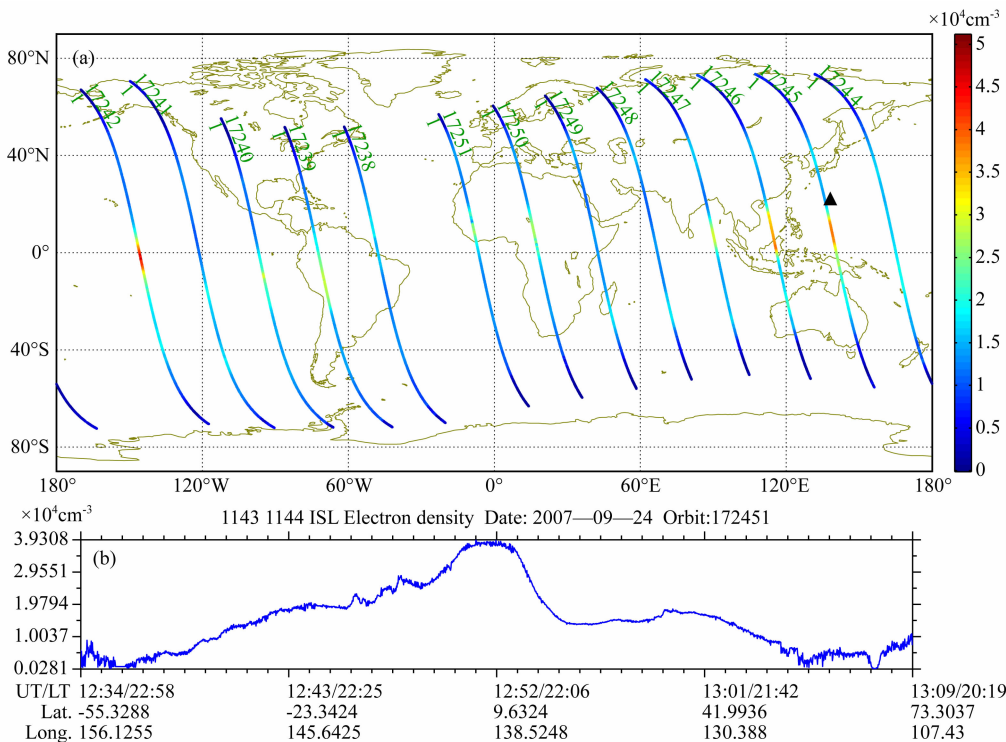


图 7 (a)2007 年 9 月 24 日  $Ne$  全球轨道数据散点图; (b)17245\_1 轨道  $Ne$  变化曲线

Fig. 7 (a) Scatter diagrams of electron density in the world on September 24, 2007; (b) Electron density curve along the orbit 17245-1

一致(欧阳新艳等, 2011)。此外, 从图 3、6 和 8 结果来看, 基本上观测到的电子浓度异常区在纬度上都偏离震中约  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$  左右, 并且在中高纬地区向赤道方向偏移。这与电磁信号在大气层、电离层中的传播路径有关。研究表明, 孕震区激发的低频电磁辐射传播至低轨卫星位置有两种可能路径 (Pulinets et al., 2004)。一种是电磁波由地下扩散到大气-电离

层波导, 沿波导传播并向上扩散到达卫星位置。另一种是电波扩散到大气-电离层波导后, 沿波导传播至接收点的“磁共轭点”, 然后沿地磁场磁力线方向传播, 经过高电离层和磁层到达卫星位置。后一种传播方式称为“哨声模”传播(潘威炎, 2004)。由于磁力线形态、卫星观测状态等影响, 一方面会导致异常区偏离震中区一定范围, 即在高纬和中纬地区会向赤道

方向偏移;同时也在一定程度上放大了扰动的区域范围.

### 3.3 震例统计分析结果

分析图 1 中 37 个地震事件,将异常情况统计在表 1 中,并将其标识在图 1 中(蓝色圆圈).表 1 中从左至右分别显示了地震时间(世界时)、震级( $M_w$ )、震中位置( $^{\circ}E, ^{\circ}N$ )、震源深度(km)、异常时间( $\Delta T$ )、异常范围( $^{\circ}E, ^{\circ}N$ )、异常幅度(包括  $\Delta Ne/Ne$  和  $\Delta Ne$ )以及  $Dst$  指数.结果显示,19 个地震前出现了较为明显的电子浓度异常扰动现象,占有地震事件的 51%;其中异常出现在地震前的事件共 14 个,出现在震后的有 5 次;电子浓度出现增强现象的事件占 18 个,只有汶川地震前发现了电子浓度降低的

现象;震前出现两次及以上扰动现象的震例共 5 个.有关汶川地震前 DEMETER 卫星的监测结果,国内外已经有了较为全面的研究(Zhang et al., 2009; Akhoondzadeh et al., 2010; 闫相相等, 2012; Yan et al., 2013),都明确指出了汶川地震前 DEMETER 卫星监测到了电离层电子浓度降低的现象,与我们的计算结果基本一致,在此不再赘述.

结合图 1 与表 1 结果可知,除 2008 年 7 月 5 日  $M_w 7.7$  地震外,其它异常震例都发生在纬度  $\pm 40^{\circ}$  以内,更是以  $\pm 20^{\circ}$  内居多;在所有异常地震中,有 1 次深源地震( $>300$  km),5 次中源地震( $70 \sim 300$  km),多数为浅源地震( $0 \sim 70$  km),而震源深度对电子浓度扰动幅度的影响并不明显;绝大部分异常地震都

表 1 利用 DEMETER 卫星数据分析的 2005 年 1 月 1 日到 2009 年 12 月 31 日  
全球 37 个  $M_w 7.0$  级及以上地震电离层电子浓度异常统计表  
Table 1 Summary of anomalous information in electron density related  
to strong earthquakes during January 2005 to December 2009

日期 年-月-日	时间 时:分:秒	震级 $M_w$	经度/ $(^{\circ}E)$	纬度/ $(^{\circ}N)$	震源深度 /km	$\Delta T$	异常范围/ 经度	异常范围 /纬度	异常幅度		$Dst$ 指数
									$(\Delta Ne/Ne)$ /100%	$\Delta Ne$ / $10^4 \text{cm}^{-3}$	
2005-03-28	16:09:36.53	8.6	97.108	2.085	30.0	-20 min	91 $^{\circ}E$ -97 $^{\circ}E$	10 $^{\circ}N$ -22 $^{\circ}N$	1~2.6	2~3.7	-16
						-3 day	98 $^{\circ}E$ -106 $^{\circ}E$	8 $^{\circ}N$ -25 $^{\circ}N$	1.5~2.8	3~4.4	-21
2005-08-16	02:46:28.40	7.2	142.039	38.276	36.0	+1day	157 $^{\circ}E$ -161 $^{\circ}E$	34 $^{\circ}N$ -45 $^{\circ}N$	0.2~0.4	0.3~0.6	-6
						+1.5h	281 $^{\circ}E$ -284 $^{\circ}E$	5 $^{\circ}S$ -22 $^{\circ}S$	1.5~2	2~3	-23
2005-09-26	01:55:37.67	7.5	-76.398	-5.678	115.0	-2day	300 $^{\circ}E$ -306 $^{\circ}E$	1 $^{\circ}S$ -17 $^{\circ}S$	0.8~1.2	1.5~3	-24
						-3day	286 $^{\circ}E$ -293 $^{\circ}E$	0 $^{\circ}$ -25 $^{\circ}S$	1.5~2.5	2.5~4	-18
2007-01-21	11:27:45.06	7.5	126.282	1.065	22.0	-4day	270 $^{\circ}E$ -280 $^{\circ}E$	6 $^{\circ}S$ -24 $^{\circ}S$	2~3	3.5~5	-22
						-5day	126 $^{\circ}E$ -132 $^{\circ}E$	6 $^{\circ}S$ -6 $^{\circ}N$	0.3~0.6	1~2	-3
2007-08-01	17:08:51.40	7.2	167.680	-15.595	120.0	-2day	178 $^{\circ}E$ -181 $^{\circ}E$	2 $^{\circ}S$ -14 $^{\circ}S$	0.4~0.9	0.5~1.3	-16
2007-08-15	23:40:57.89	8.0	-76.603	-13.386	39.0	-5day	288 $^{\circ}E$ -292 $^{\circ}E$	12 $^{\circ}S$ -2 $^{\circ}N$	0.4~0.7	0.5~1.2	0
2007-09-02	01:05:18.15	7.2	165.762	-11.610	35.0	-4day	169 $^{\circ}E$ -173 $^{\circ}E$	5 $^{\circ}S$ -15 $^{\circ}S$	0.5~1	1~1.5	-2
						-6day	182 $^{\circ}E$ -186 $^{\circ}E$	0 $^{\circ}$ -10 $^{\circ}S$	0.5~1.3	1.5~3	-3
2007-09-12	11:10:26.83	8.5	101.367	-4.438	34	-1day	91 $^{\circ}E$ -95 $^{\circ}E$	3 $^{\circ}S$ -10 $^{\circ}N$	1~1.5	1~1.5	-1
						-5day	96 $^{\circ}E$ -101 $^{\circ}E$	2 $^{\circ}S$ -10 $^{\circ}N$	0.5~1	1	-13
2007-09-28	13:38:57.88	7.5	142.668	22.013	260.0	-4day	137 $^{\circ}E$ -145 $^{\circ}E$	5 $^{\circ}S$ -20 $^{\circ}N$	1~2	1.5~2.5	-5
2007-11-14	15:40:50.53	7.7	-69.890	-22.247	40.0	-1day	296 $^{\circ}E$ -302 $^{\circ}E$	2 $^{\circ}S$ -20 $^{\circ}S$	0.5~1	1~1.5	-13
2007-11-29	19:00:20.42	7.4	-61.274	14.944	156.0	-5day	307 $^{\circ}E$ -309 $^{\circ}E$	5 $^{\circ}N$ -8 $^{\circ}N$	0.5~1	1~2	-29
						-1day	88 $^{\circ}E$ -92 $^{\circ}E$	16 $^{\circ}N$ -22 $^{\circ}N$	0.4~0.5	-0.4~-0.8	7
2008-05-12	06:28:01.57	7.9	103.322	31.002	19.0	-2day	118 $^{\circ}E$ -122 $^{\circ}E$	12 $^{\circ}N$ -23 $^{\circ}N$	0.5~0.6	-1~-1.5	5
						-3day	102 $^{\circ}E$ -105 $^{\circ}E$	16 $^{\circ}N$ -20 $^{\circ}N$	0.4~0.6	-0.5~-1	-6
2008-07-05	02:12:04.48	7.7	152.886	53.882	632.8	+9h	152 $^{\circ}E$ -160 $^{\circ}E$	37 $^{\circ}N$ -51 $^{\circ}N$	0.2~0.45	0.4~0.7	2
2008-07-19	02:39:28.70	7.0	142.214	37.552	22.0	+11h	147 $^{\circ}E$ -157 $^{\circ}E$	23 $^{\circ}N$ -47 $^{\circ}N$	0.4~0.8	0.6~1.1	1
2009-02-11	17:34:50.49	7.2	126.387	3.886	20.0	-5day	130 $^{\circ}E$ -136 $^{\circ}E$	5 $^{\circ}S$ -10 $^{\circ}N$	0.2~0.4	0.5~1	-2
2009-05-28	08:24:46.56	7.3	-86.217	16.731	19.0	-5day	285 $^{\circ}E$ -288 $^{\circ}E$	25 $^{\circ}N$ -29 $^{\circ}N$	0.5~0.7	0.5~0.8	-1
2009-09-29	17:48:10.99	8.1	-172.095	-15.489	18.0	-5day	190 $^{\circ}E$ -196 $^{\circ}E$	14 $^{\circ}S$ -6 $^{\circ}N$	1~1.5	2~2.8	2
2009-09-30	10:16:09.25	7.6	99.867	-0.72	81.0	+1day	112 $^{\circ}E$ -118 $^{\circ}E$	4 $^{\circ}S$ -15 $^{\circ}N$	1.5~2	2~2.9	-3
2009-10-07	22:03:14.47	7.7	166.510	-13.006	45.0	-2day	182 $^{\circ}E$ -187 $^{\circ}E$	3 $^{\circ}S$ -9 $^{\circ}S$	1.5~2	2~3	-2



发生在环太平洋地震带的板块边界,并且多为海域地震.进一步地,我们异常频次、空间分布以及震级大小与扰动幅度的关系等结果表示在图 10 中.分析可知,异常大多发生在震前 0~5 天,较好的体现了电离层扰动的短临特征;电子浓度在震中附近区域有显著的增强效应,增强较为明显的范围集中在纬度向 $\pm 10^\circ$ ,经度向则更广一些,增强幅度 0.4~0.8.此外,图 10b 表明震级大小与扰动幅度有较好的正相关,基本上震级越大扰动幅度越大.

表 1 中最右侧表示观测到的异常轨道过境时刻  $Dst$  指数大小,可以看出有少数地震前异常发生的当地地磁活动达到活跃水平,其它则都表现为地磁平静.3.2.1 节中我们已经提到,3 月 25 日的电子浓度扰动幅度较大,可能也受到地磁活动的影响.同样看到 2005 年 9 月 26 日  $M_w 7.5$  级地震当天和前几天监测到了几次较为明显的电子浓度增强现象.然而,2005 年 9 月太阳和地磁活动水平较高,虽然 9 月 22~26 日  $Dst$  指数没有达到我们限定的一 40 nT,但是基本维持在一 20 nT 上下.一方面我们提取的震前几次扰动信息都存在区域性,跟地震活动有较好的空间关联,但是另一方面扰动幅度与其它处于地磁平静期的震例相比增幅较大,可以认为这些电子浓度扰动同样受到了地磁活动作用的影响.

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

对比前人的相关研究结果,He 等(2011)利用 DEMETER 卫星 ISL 载荷统计分析了 2006—2009 年间全球 5 级以上地震前的电离层电子浓度异常变化,发现电子浓度在震中附近出现增强,并指出异常随着震级的增大而增强;Li 等(2012)和 Parrot 等(2012)基于 DEMETER 卫星 IAP 载荷数据对震前离子浓度( $N_i$ )进行统计分析后发现,离子浓度扰动同样以增强为主,扰动幅度与震级大小也存在正相关,而且发现出现离子浓度扰动的震例以海域地震居多;刘静等(2013)对国内  $M_s 6.0$  级以上地震前的等离子体参量异常统计分析结果显示,异常时间为 1~7 天,异常可能出现在震中东西两侧,而且多向磁赤道偏移.以上结论与本文的研究结果较为一致.值得注意的是,He 等(2011)的研究结果指出电子浓度异常区域在北半球向北偏移,在南半球向南偏移.而本文研究结果则表明观测到的电子浓度异常

区在纬度上都偏离震中约  $5^\circ \sim 10^\circ$  左右,并且在中高纬地区向赤道方向偏移,这与孕震区激发的低频电磁辐射在大气层、电离层中的传播路径(Pulinets et al., 2004; 潘威炎, 2004)是一致的.

强震孕育的过程中是如何激发电离层高度电子浓度异常扰动的呢? 我们试图从以下两方面来解释强震前可能导致电离层电子浓度变化的成因.

在强震孕育的过程中,孕震区中岩石受到应力作用,晶体结构变形,可以产生电子电荷载体(positive holes)和电流.而这种 p-holes 因应力的积累被激活,进而传播到周围的岩体中并到达地表(Freund et al., 2004; Takeuchi et al., 2006).在地表发生  $O_2 \rightarrow O_2^+ + e^-$  作用,形成一个正的地面电动势,产生向上的垂直扰动电场  $E$  和电流  $J$ ,并通过大气层穿透到电离层.传到电离层高度的扰动电场  $E$  对电离层主要产生两种作用,一种是  $E \times B$  漂移作用(Kuo et al., 2011),另一种是激发声重波(acoustic gravity waves, AGW)而导致电离层变化(Hegai et al., 2006).一方面,扰动电场渗透到电离层高度后,与磁场作用形成  $E \times B$  漂移.东向电场时,通过  $E \times B$  电子向上运动,会引起电离层抬高,峰值密度增大.西向电场时,则  $E \times B$  方向向下,电离层降低,峰值密度减少.所以针对不同地区的地震、同一地震的不同时刻,震前电离层电子浓度可能出现正异常也可能出现负异常.Kuo 等(2011)计算得到地震断层带中岩石电流密度为  $0.2 \sim 10 \mu A/m^2$  所产生的地表电荷可以引起电离层电子浓度变化幅度达 2%~25%.另一方面,扰动电场在电离层高度激发 AGW(Liperovsky et al., 1992),产生大气压强的扰动,造成中性粒子运动,形成中性风扰动分量,也可以造成对电离层峰值高度和峰值密度的改变.需要注意到,DEMETER 卫星轨道高度 660 km,处于电离层峰值以上(topside),其原位测量的电子浓度受到电离层  $E \times B$  的效应与地面台站观测结果存在一定的差异,这也造成了震前 DEMETER 卫星观测到的电子浓度与 GPS 观测的 TEC 的变化特征存在一定的异同.

本文研究表明,发生异常的地震大多发生在环太平洋地震带的板块边界,并且以海域地震为主(图 1),考虑到如果是岩层破裂、应力积累导致的岩层介电常数改变等引起的电磁异常,有可能会被海洋屏蔽,因为当电磁波在水中传播时将快速衰减,很难穿透海水到达大气层和电离层.尽管海水可以吸收电磁波,但它很好的传递机械运动.强震前沿着板

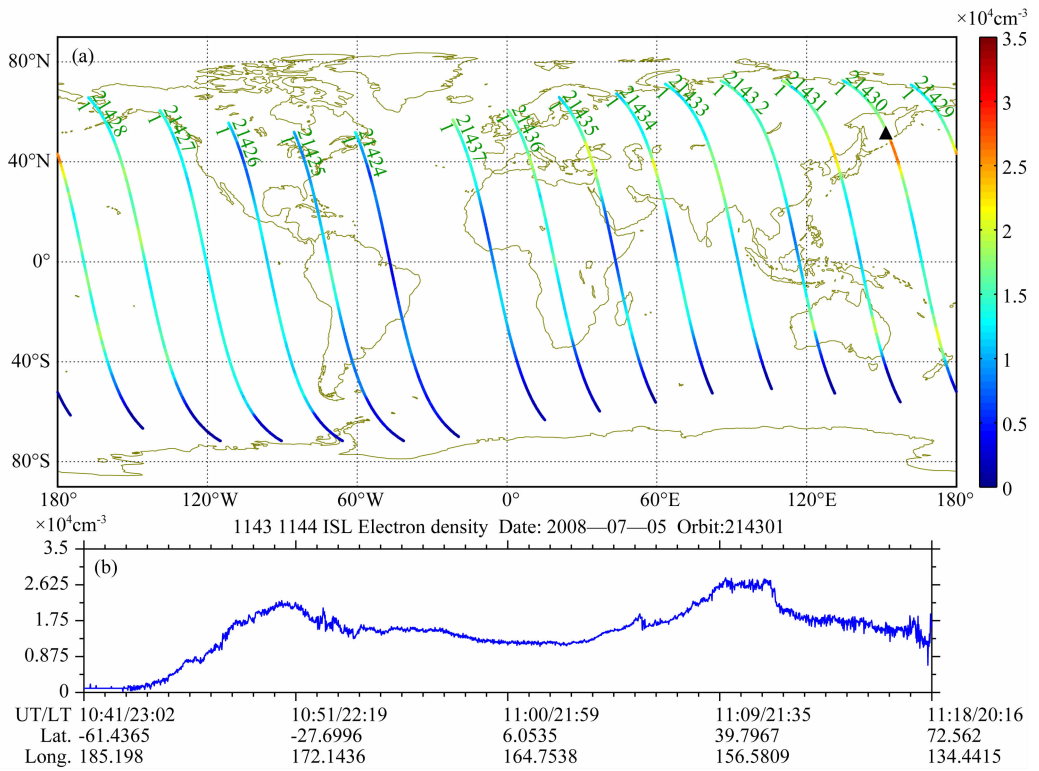


图 9 (a)2008 年 7 月 5 日  $N_e$  全球轨道数据散点图;(b)21430\_1 轨道  $N_e$  变化曲线

Fig. 9 (a) Scatter diagrams of electron density in the world on July 5, 2008;

(b) Electron density curve along the orbit 21430-1

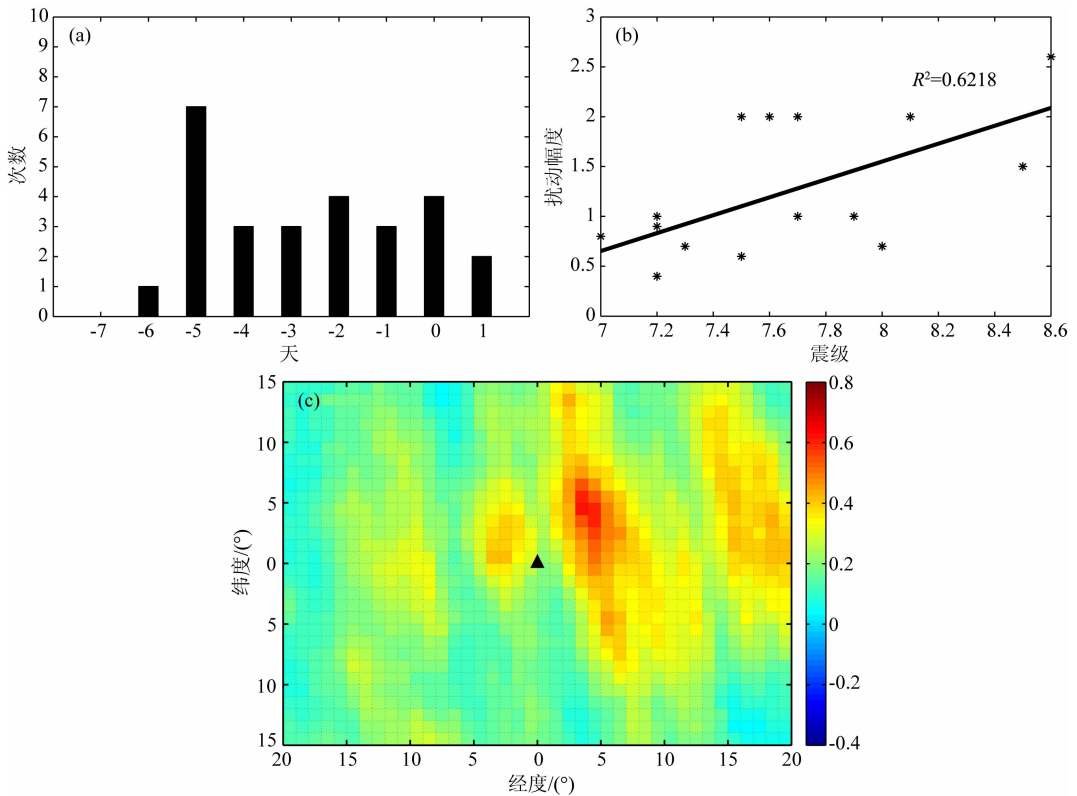


图 10 (a)异常发生的频数;(b)震级大小与电子浓度扰动幅度的相关性;(c)异常显现空间的统计分析 其中黑色三角形代表震中位置,X 轴和 Y 轴分布表示以震中为中心,经度  $\pm 20^\circ$ ,纬度  $\pm 15^\circ$  的研究区域.

Fig. 10 (a) Frequency of electron density anomalies; (b) Correlation between magnitude of earthquakes and disturbance amplitude of electron density; (c) spatial distribution of electron density anomalies

块边缘发生的缓慢错动可能会在海水中激发长周期机械波,从而扰动大气层,进而以声波方式传播到电离层底部 (Ducic et al., 2003; Heki et al., 2006; Zhang et al., 2012), 激发电离层电场及等离子体参量扰动,这类机械波在海水中的传播耦合机理已经有很多现象可以证实,如台风及地震发生时激发的海啸等。Zhang 等 (2012) 在利用 DEMETER 卫星数据统计分析 2005—2010 年间全球 69 个 7 级以上强震的静电扰动现象时,就发现其中存在 ULF 和 ELF 波段的静电扰动现象的多为海域地震。

#### 4.2 结论

本文基于法国 DEMETER 卫星 ISL 载荷数据,对 2005—2009 年全球 37 个 7.0 级以上地震前电离层电子浓度变化进行统计分析。主要结论如下:

(1) 共有 19 个地震 (51%) 前观测到了较为明显的电子浓度异常扰动现象,其中电子浓度大部分表现为异常增强;异常现象大部分出现在震前 1~5 天内;震前出现两次及以上扰动事件的地震也较为常见,一方面表明强震前地震孕育过程中电磁信号持续时间较长,另一方面也受到了 DEMETER 卫星过境时间和重访周期的影响。

(2) 异常震例基本都发生在纬度  $\pm 40^\circ$  以内 (18 次),更是以  $\pm 20^\circ$  内居多 (13 次),表明在赤道和中低纬地区更容易观测到明显的电子浓度扰动,而中高纬地区一般不利于观测震前电子浓度变化。

(3) 震级大小则与扰动幅度基本上呈正相关,而震源深度对电子浓度扰动的影响并不明显;

(4) 磁暴期间电子浓度变化和地震引起的电离层电子浓度异常有所不同,前者一般具有全球性的特征,而后的异常区域一般和孕震区有关;震前出现的电子浓度异常有时会同时受到地磁活跃的影响,此时的扰动幅度一般都较大。

总之,地震电离层扰动现象是复杂多变的,目前仍有很多问题需要探索 and 解决,需要地基和空间的联合立体观测来支持;另一方面,地震电离层耦合机理的研究仍需要加强。

**致谢** 作者感谢 DEMETER 卫星数据中心提供的科学数据以及审稿专家提出的宝贵意见,感谢中国地震局地震预测研究所张学民研究员在文章结果分析中的有益讨论。

#### References

Akhoondzadeh A, Parrot M, Saradjian M R. 2010. Electron and ion density variations before strong earthquakes ( $M > 6.0$ ) using

- DEMETER and GPS data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10:7-18.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. 2006a. ICE, the electric field experiment on DEMETER. *Planetary and Space Science*, 54(5): 456-471.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. 2006b. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER. *Planetary and Space Science*, 54(5): 487-501.
- Cahyadi M N, Heki K. 2013. Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118(4): 1777-1787.
- Davis K, Barker D M. 1965. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March, 28, 1964. *J. Geophys. Res.*, 70(9): 2552-2553.
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Applied Geophysics*, 117(5): 1025-1044.
- Ducic V, Artru J, Lognonne P. 2003. Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh surface waves. *Geophys. Res. Lett.*, 30(18), doi: 10. 1029/2003GL017812.
- Freund F T, Takeuchi A, Lau Bobby W S. 2004. Stress-induced changes in the electrical conductivity of igneous rocks and the generation of ground currents. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3): 437-468.
- Hayakawa M. 2000. Plasma density variations observed on a satellite possibly related to seismicity. *Advances in Space Research*, 26(8): 1277-1280.
- Hayakawa M, Molchanov O A. 2004. Achievements of NASDA's earthquake remote sensing frontier project. *Terrestrial and Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3): 311-328.
- He Y, Yang D, Qian J, et al. 2011. Response of the ionospheric electron density to different types of seismic events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 2173-2180.
- Hegai V V, Kim V P, Liu J Y. 2006. The ionospheric effect of atmospheric gravity waves excited prior to strong earthquake. *Adv. Space Res.*, 37: 653-659.
- Heki K. 2011. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17312, doi: 10. 1029/2011GL047908.
- Heki K, Otsuka Y, Choosakul N, et al. 2006. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, 111, B09313, doi: 10. 1029/2005JB004202.
- Kuo C L, Huba J D, Joyce G, et al. 2011. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges. *J. Geophys. Res.*, 116, A10317, doi: 10. 1029/2011JA016628.
- Larkina V I, Migulin V V, Molchanov O A, et al. 1989. Some statistical results on very low frequency radio wave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones. *Phys. Earth Planet. Int.*, 57(1-2): 100-109.

- Le H, Liu J Y, Liu L. 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736  $M_6.0+$  earthquakes during 2002—2010. *J. Geophys. Res.*, 116, A02303, doi: 10. 1029/2010JA015781.
- Lebreton J P, Stverak S, Travnicek P, et al. 2006. The ISL Langmuir Probe experiment and its data processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results. *Planet Space Sci.*, 54(5): 472-486.
- Li M, Parrot M. 2012. “Real time analysis” of the ion density measured by the satellite DEMETER in relation with the seismic activity. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 2957-2963.
- Li X Q, Ma Y Q, Wang H Y, et al. 2010. Observation of partial on space electro-magnetic satellite during Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2337-2344.
- Liperovsky V A, Pokhotelov O A, Shalimov S L. 1992. Ionospheric precursor of earthquakes. Moscow: Nauka, 304.
- Liu J, Huang J P, Zhang X M, et al. 2013. Anomaly extraction method study and earthquake case analysis based on in-situ plasma parameters of DEMETER satellite. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(1): 72-83.
- Liu J, Wan W X, Huang J P, et al. 2011. Electron density perturbation before Chile  $M_8.8$  earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(11): 2717-2725.
- Molchanov O A, Hayakawa M, Afonin V V, et al. 2002. 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, Tokyo, Terrapub, 275-285.
- Ouyang X Y, Zhang X M, Shen X H, et al. 2011. Disturbance of  $O^+$  density before major earthquake detected by DEMETER satellite. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 31(5): 607-617.
- Pan W Y. 2004. Propagation of long wave, ultra-long wave and extremely long wave. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology.
- Parrot M. 2012. Statistical analysis of automatically detected ion density variations recorded by DEMETER and their relation to seismic activity. *Annals of Geophysics*, 55, 1, doi: 10. 4401/5270.
- Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, et al. 2006a. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results. *Planetary and Space Science*, 54(5): 441-455.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, et al. 2006b. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Phys. Chem. Earth*, 31(4-9): 486-495.
- Pulinets S, Gaivoronska T A, Leyva-Contreras A, et al. 2004. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4: 697-702.
- Sarkar S, Gwal A K, Parrot M. 2007. Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 69: 1524-1540.
- Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, et al. 2006. High energy electron detection onboard DEMETER: the IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. *Planet Space Sci.*, 54(5): 502-511.
- Takeuchi A, Lau B, Freund F. 2006. Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(4-9): 240-247.
- Wan J H, Wang F F, Shan X J, et al. 2012. Preliminary application of energetic particle on DEMETER Satellite in Wenchuan earthquake. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 27(6): 2279-2288.
- Yan X, Shan X J, Cao J B, et al. 2012. Seismoionospheric anomalies observed before Wenchuan earthquake using GPS and DEMETER data. *Seismology and Geology* (in Chinese), 34(1): 160-171.
- Yan X, Shan X, Zhang X, et al. 2013. Multi-parameter Seismo-ionospheric Anomalies Observation before the 2008 Wenchuan, China  $M_w 7.9$  Earthquake. *J. Appl. Remote Sens.*, 7(1): 073532.
- Zeng Z C, Zhang B, Fang G Y, et al. 2009. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(1): 11-19.
- Zeren Z M, Shen X H, Cao J B, et al. 2012. Statistical analysis of ELF/VLF magnetic field disturbances before major earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(11): 3699-3708.
- Zhang X M, Liu J, Shen X H, et al. 2010. Ionospheric perturbations associated with the  $M_8.6$  Sumatra earthquake on 28 March 2005. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(3): 567-575.
- Zhang X, Shen X, Liu J, et al. 2009. Analysis of ionospheric plasma perturbations before Wenchuan earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 1259-1266.
- Zhang X, Shen X, Parrot M, et al. 2012. Phenomena of electrostatic perturbations before strong earthquakes (2005—2010) observed on DEMETER. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 75-83.
- Zhang Z X, Li X Q, Wu S G, et al. 2012. DEMETER satellite observations of energetic particle prior to Chile earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(5): 1581-1590.
- Zhu T, Wang L W. 2011. LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(3): 717-727.

## 附中文参考文献

- 李新乔, 马玉蓓, 王焕玉等. 2010. 空间电磁卫星的粒子探测与汶川地震. *地球物理学报*, 52(10): 2337-2344.
- 刘静, 黄建平, 张学民, 申旭辉. 2013. 基于 DEMETER 卫星原位等离子体参量的震前异常提取方法研究及震例分析. *地震学报*, 35(1): 72-83.
- 刘静, 万卫星, 黄建平等. 2011. 智利 8.8 级地震的震前电子浓度

- 扰动. 地球物理学报, 54(11): 2716-2725.
- 欧阳新艳, 张学民, 申旭辉等. 2011. DEMETER 卫星探测到的强震前  $O^+$  浓度变化. 空间科学学报, 31(5): 607-617.
- 潘威炎. 2004. 长波超长波极长波传播. 成都: 电子科技大学出版社.
- 万剑华, 王飞飞, 单新建等. 2012. DEMETER 电磁卫星高能粒子数据在汶川地震中的初步应用. 地球物理学进展, 27(6): 2279-2288.
- 闫相相, 单新建, 曹晋滨等. 2012. 利用 GPS 和 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前电离层变化. 地震地质, 34(1): 160-171.
- 曾中超, 张蓓, 方广有等. 2009. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常. 地球物理学报, 52(1): 11-19.
- 泽仁志玛, 申旭辉, 曹晋滨等. 2012. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究. 地球物理学报, 55(11): 3699-3708.
- 张学民, 刘静, 申旭辉等. 2010. 2005 年 3 月 28 日苏门答腊 8.6 级地震前的电离层扰动. 地球物理学报, 53(3): 567-575.
- 张振霞, 李新乔, 吴书贵等. 2012. 智利地震前 DEMETER 卫星对空间高能粒子的观测. 地球物理学报, 55(5): 1581-1590.
- 朱涛, 王兰炜. 2011. DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有关的 LF 电场异常. 地球物理学报, 54(3): 717-727.

(本文编辑 汪海英)