

钱庚, 泽仁志玛, 张学民, 申旭辉. 2016. 强震前后空间电磁场时空演化特征. 地震学报, 38(2): 259–271. doi:10.11939/jass.2016.02.010.

Qian G, Zeren Z M, Zhang X M, Shen X H. 2016. Spatio-temporal evolution of electromagnetic field pre- and post-earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 38(2): 259–271. doi:10.11939/jass.2016.02.010.

强震前后空间电磁场时空演化特征^{*}

钱 庚^{1),*} 泽仁志玛¹⁾ 张学民¹⁾ 申旭辉²⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 本文利用 DEMETER 卫星观测到的电磁场数据, 统计分析了 2005—2009 年全球 $M_s \geq 7.0$ 强震前后空间电磁场的时空演化特征。在震中上空 $\pm 10^\circ$ 范围内, 使用震前 90 天至震后 30 天的 5 年同期观测到的电磁场极低频/甚低频(370—897 Hz)功率谱密度数据构建了稳定的背景场观测模型, 提取了震中上空的空间电磁场相对于背景场的扰度幅度, 并统计分析了强震前后空间电磁场的时空演化特征。统计结果显示: 45 次 $M_s \geq 7.0$ 强震中, 35 次强震在地震发生前后磁场最大扰动幅度超过 2.2 倍标准差, 39 次强震的电场最大扰动幅度超过 2 倍标准差; 最大的电磁扰动主要出现在震中 $\pm 4^\circ$ — $\pm 10^\circ$ 范围内。另外, 震中上空的电磁场扰动幅度时序变化表现为 3 种不同类型的扰动特征, 且震前出现电磁异常的强震震中位置的分布特征与纬度存在一定关系; 而随机选择的非震区上空空间电磁场的扰动幅度则比较小, 未呈现出明显的特征。

关键词 强震 电磁场 背景场模型 时空演化 统计分析

doi:10.11939/jass.2016.02.010 中图分类号: P318.5 文献标志码: A

Spatio-temporal evolution of electromagnetic field pre- and post-earthquakes

Qian Geng^{1),*} Zeren Zhima¹⁾ Zhang Xuemin¹⁾ Shen Xuhui²⁾

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

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: Utilizing the electromagnetic field observations of DEMETER satellite, we statistically analyze the spatio-temporal evolution of electromagnetic field during the strong earthquakes with magnitude over than 7.0 occurred from 2005 to 2009. For each earthquake, using the power spectral density data of electromagnetic field in the ELF/VLF frequency band (370—897 Hz) from 90 days before the earthquake to 30 days after the earthquake, in the area within $\pm 10^\circ$ in latitude and in longitude from the epicenter, the background model is built up with the same period. A formula is applied to extract the perturbation

* 基金项目 国家国际科技合作项目(SQS2014RR113)和地震基本科研业务专项(2014IES0102)联合资助。

收稿日期 2015-11-10 收到初稿, 2016-01-25 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: qiangeng121@163.com



amplitude of the electromagnetic field relative to the background field observation model during the earthquake time, and the perturbation amplitude is used to statistically study the spatio-temporal variations of electro-magnetic field for the 45 earthquakes, which had been chosen in this paper. Statistical analyses on the perturbation amplitude of magnetic field shows that 35 earthquakes exhibit anomaly that the maximum of perturbation amplitude exceeds 2.2 times standard deviation, while the result of the electric field shows that 39 strong earthquakes exhibit anomalies with the maximum perturbation higher than twice standard deviation, and the maximum electromagnetic perturbations mainly appear in the places within $\pm 4^\circ$ to $\pm 10^\circ$ in latitude and in longitude from the epicenter. The temporal variation of the perturbation amplitude shows there are three types of variation patterns. The abnormal electromagnetic perturbation that occurs before earthquakes displays that the distribution of epicenters is related to latitude. However, the perturbation amplitude of electromagnetic field over the random non-earthquake region is weak, without displaying prominent characteristic of anomalous variation.

Key words: strong earthquake; electromagnetic field; background field model; spatio-temporal evolution; statistical analysis

引言

全球每年发生多次 $M \geq 7$ 强震，给人类带来了巨大的灾难和损失，如 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_{\text{s}} 8.0$ 地震，2010 年玉树 $M_{\text{s}} 7.1$ 地震，2011 年日本 $M_{\text{s}} 9.0$ 大地震。但是地震监测预报作为当今世界科学难题，目前还不能达到准确预报预测地震的水准。所幸近年来随着电磁观测技术的发展，非力学的电磁学方法为实现地震短临预报带来了希望。大量的地基电磁观测(钱家栋, 1993; 丁鉴海等, 2008)和模拟实验研究(Huang, Ikeya, 1998)结果均已表明，在地震孕育发生过程中，地震电磁前兆信号会出现在较宽频段上(黄清华, 2005)，尤其在极低频/甚低频上更容易出现明显的地震电磁短临变化。

自 2004 年 6 月 29 日法国发射世界上第一颗专门用于地震监测的电磁卫星以来，地震空间电磁研究得到了飞速发展，已发现了大量的地震电磁短临异常现象。Molchanov 等(2006)利用 DEMETER 观测到的电场数据，采用信噪比方法分析了 2004 年 12 月 26 日苏门答腊 $M_{\text{s}} 9.0$ 地震，结果显示震中 2500 km 范围内人工源甚低频电场信号在震前 55—11 天内明显减弱；张学民等(2009)对汶川地震前甚低频电场频谱值变化特征进行了研究，其结果表明，在空间天气平静的 5 月 6—10 日，震中纬度上的电场能量多处可达或超过其背景场能量的 3 倍均方差。

为更准确客观地了解地震所引起的空间电磁异常现象，研究人员对大量地震进行了统计分析。例如：Němec 等(2009)通过对 2004—2008 年 5500 次 $M \geq 5.0$ 地震的电场垂直分量(E_z)进行分析的结果显示，在震中 $\pm 3^\circ$ 区域内，甚低频(1.7 kHz \pm 200 Hz)电场强度在震前 0—4 小时内降低至 3 倍标准差，且该异常位于震中以西 2° ；泽仁志玛等(2012)利用背景场观测模型方法提取了 2005—2009 年北半球 26 次 $M_{\text{s}} \geq 7.0$ 地震的空间磁场扰动特征，结果显示 77% 的地震在震前 30 天内变化磁场相对于背景场的扰动幅度超过 3 倍标准差。

泽仁志玛等(2012)仅研究了北半球地震前后的磁场扰动特征，本文拟在其基础上，将

研究区域扩大至全球范围，并补充电场观测数据，采用泽仁志玛等(2012)所用方法，对研究时段选取划分及数值计算作一定调整，统计研究 2005—2009 年 $M_s \geq 7.0$ 强震的空间电磁扰动情况，以揭示磁场、电场以及电磁场在地震前后的演化特征。此外，还将进一步获取强震前后电磁场的变化规律，使本文研究结果更加充分可靠。

1 研究区域与数据选取

DEMETER 为太阳同步轨道卫星，于 2004 年 6 月 29 日—2010 年 12 月 9 日在轨运行，其轨道高度为 710 km(后降为 660 km)，轨道倾角为 98.3°(Cussac *et al*, 2006)。DEMETER 卫星携带了多个探测载荷，其中电场探测仪(instrument champ électrique，简写为 ICE)用于测量直流至 3.175 MHz 的电场(Berthelier *et al*, 2006)，感应式磁力仪(instrument of magnetic search coil，简写为 IMSC)用于观测 19.5 Hz—20 kHz 频段的变化磁场(Parrot *et al*, 2006)。

1.1 研究区域选取

根据 Dobrovolsky 等(1979)提出的岩石圈孕震区范围经验公式

$$\rho = 10^{0.43M} \quad (1)$$

可以估算出岩石圈孕震区的大小。式中 M 表示地震震级， ρ 表示孕震区长度，单位为 km。由于本文研究的地震均为 $M_s \geq 7$ ，根据式(1)计算得到孕震区长度为 1023 km 以上，相当于震中 ± 5° 的范围。根据 Pulinets 和 Boyarchuk(2004)对地震引发的电磁波向电离层传播机制的研究可知，岩石圈激发的电磁波从地表沿磁力线传播至电离层进而引起电离层的扰动，并且地震电磁扰动信号传播至电离层可能发生偏移，最大偏移量可超过 10°，故本文将研究区域的范围扩大至震中 ± 10° 的范围。

1.2 数据

卫星在轨运行期间载荷工作时会因微弱电流的产生而产生变化磁场，从而引起低频电磁扰动，这使得物理观测数据内含有一定的背景噪声。曹晋滨等(2009)和 Zeren 等(2012)对电磁卫星噪声水平的分析研究显示，200 Hz 以下的电磁信号受卫星本体影响较大，且有较强的背景噪声。Zeren 等(2012)针对 DEMETER 卫星噪声水平的测试结果表明，变化磁场观测数据在极低频/甚低频(370—897 Hz)频段的背景噪声较弱，较有利于提取地震前兆信号，故本文选取 DEMETER 卫星的电磁场极低频/甚低频(370—897 Hz)观测数据用于地震异常研究。

首先根据 DEMETER 卫星的辅助数据文件，剔除卫星记录有误的轨道以及在卫星姿态控制、载荷开关等事件期间的数据，以期最大限度地消除人工干扰。其次，由于太阳的作用，电离层在白天呈现非常复杂的变化，会对地震信息的提取造成影响。为了尽量减少地磁场活动带来的扰动，本文仅考虑 DEMETER 卫星 2005—2009 年在空间天气平静时期 IMSC 和 ICE 在夜间的观测数据。选取数据时，设定地磁指数 $D_{st} \leq -30$ nT, $K_p \geq 3$, $A_E \geq 200$ nT 的数据不参与计算。

2 研究方法

2.1 背景场与扰动幅度建立

在泽仁志玛等(2012)对 2005—2009 年北半球 $M_s \geq 7.0$ 地震前后的磁场扰动特征统计

分析的基础上,本文对研究时段选取划分及数值计算进行了一定调整,将进一步对全球发生的地震进行研究,并补充电场的研究结果。此处以南半球 2006 年 2 月 22 日发生的莫桑比克 $M_S 7.6$ 地震为例,说明本文的研究过程。

构建震中上空背景场观测模型的步骤如下。选取震中($20.87^{\circ}\text{S}, 33.1^{\circ}\text{E}$)经纬度 $\pm 10^{\circ}$ 的区域(10.87°S — 30.87°S , 23.1°E — 43.1°E),以 2° 为步长,构建 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 网格,并以震前 90 天至震后 30 天(2005 年 11 月 24 日—2006 年 3 月 24 日)的时段为例介绍计算过程。首先根据 2005—2009 年 DEMETER 卫星 5 年同时段的磁场极低频/甚低频(370—897 Hz)的功率谱密度(power spectral density,简写为 PSD)数据,计算每个网格的中值和标准方差,从而得到背景中值矩阵 β (如图 1a)和背景标准方差矩阵 σ (如图 1b);其次,利用地震当年震前 90—60 天(2005 年 11 月 24 日—12 月 24 日)的磁场功率谱密度数据,计算出该时段的中值矩阵 α (如图 1c);最后,根据扰动幅度提取公式

$$\theta = \frac{\alpha - \beta}{\sigma} \quad (2)$$

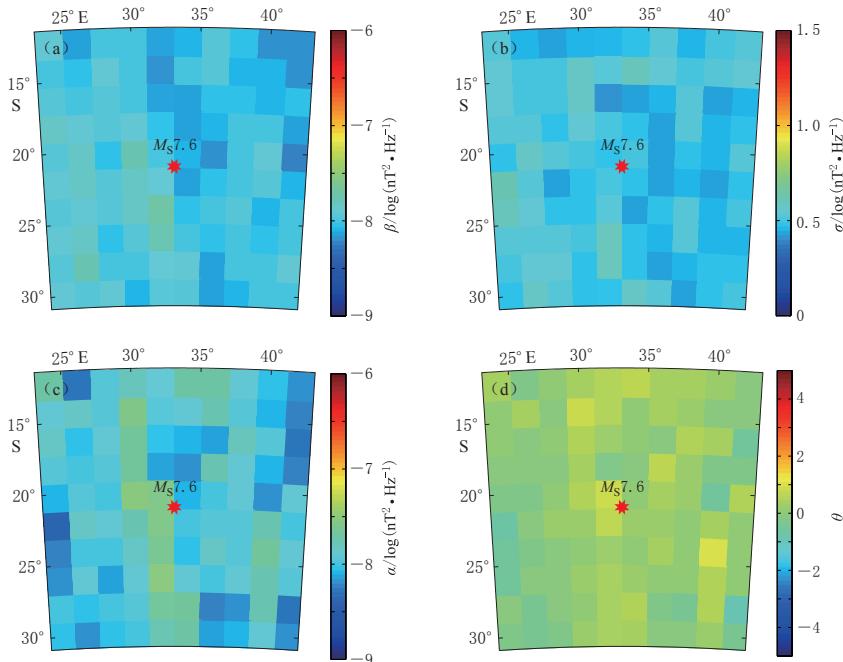


图 1 莫桑比克 $M_S 7.6$ 地震震中 $\pm 10^{\circ}$ 范围内磁场扰动幅度矩阵 θ 的构建过程

(a) 利用 5 年(2005—2009 年)同期(11 月 24 日—3 月 24 日)震前 90 天至震后 30 天的变化磁场功率谱密度数据构建的背景场中值矩阵 β ; (b) 由 5 年(2005—2009 年)同期震前 90 天至震后 30 天的变化磁场功率谱密度数据构建的背景场标准方差矩阵 σ ; (c) 由 2005 年 11 月 24 日—12 月 24 日的磁场功率谱密度数据构建的中值矩阵 α ; (d) 根据式(2)计算所得的矩阵 θ

Fig. 1 Constructing process of the magnetic perturbation amplitude matrix θ in the studied area

- (a) Background median matrix β calculated by magnetic power spectral density (PSD) data during the same period (November 24 to March 24 of the next year) within five years (from 2005 to 2009);
- (b) Background standard deviation matrix σ computed by magnetic PSD data during the same period (November 24 to March 24 of the next year) within five years (from 2005 to 2009);
- (c) Median matrix α obtained with magnetic PSD data from November 24 to December 24, 2005; (d) Magnetic field perturbation amplitude matrix θ obtained by formula (2)

计算出相对于背景场的扰动幅度 θ (图 1d). 式(2)表示在某个特定时段内的空间变化磁场相对于其观测背景场偏离标准方差的倍数, 即相对于背景场的扰动幅度. 由于计算所得的矩阵 θ 是在背景场的基础上进行了归一化处理, 因此可信度更高.

从图 1 中背景场观测模型的构建及扰动幅度的提取过程可以看出: 背景场强度相对平静(图 1a), 其变化范围为 $10^{-8.1}—10^{-7.8}$ nT²/Hz; 背景场标准方差值稳定在 $10^{0.43}—10^{0.58}$ nT²/Hz(图 1b); 地震时段的矩阵 α 则表现出一定的变化(图 1c), 为 $10^{-8.3}—10^{-7.5}$ nT²/Hz; 磁场相对于背景场的扰动幅度显示出相对平静的状态(图 1d), 矩阵 θ 中的参数值保持在 0.8—1, 因此在背景场扰动幅度基础上所获得的研究结果将更加客观.

2.2 时间序列分析

为了更深入地研究震前 90 天至震后 30 天的电磁场扰动时序变化特征, 本文将研究时段每隔 15 天计算一次扰动幅度矩阵 θ 值, 然后利用定量分析方法, 计算出每个时段的最大扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 和平均扰动幅度 $|\theta|_{\text{avg}}$, 进而得到电磁场扰动的时间序列变化特征.

3 震例分析

利用上述方法, 本文对 2006 年 2 月 22 日莫桑比克 $M_S 7.6$ 地震前后空间电磁场的时空演化特征进行了分析. 选取震前 90 天至震后 30 天(2005 年 11 月 24 日—2006 年 3 月 24 日)

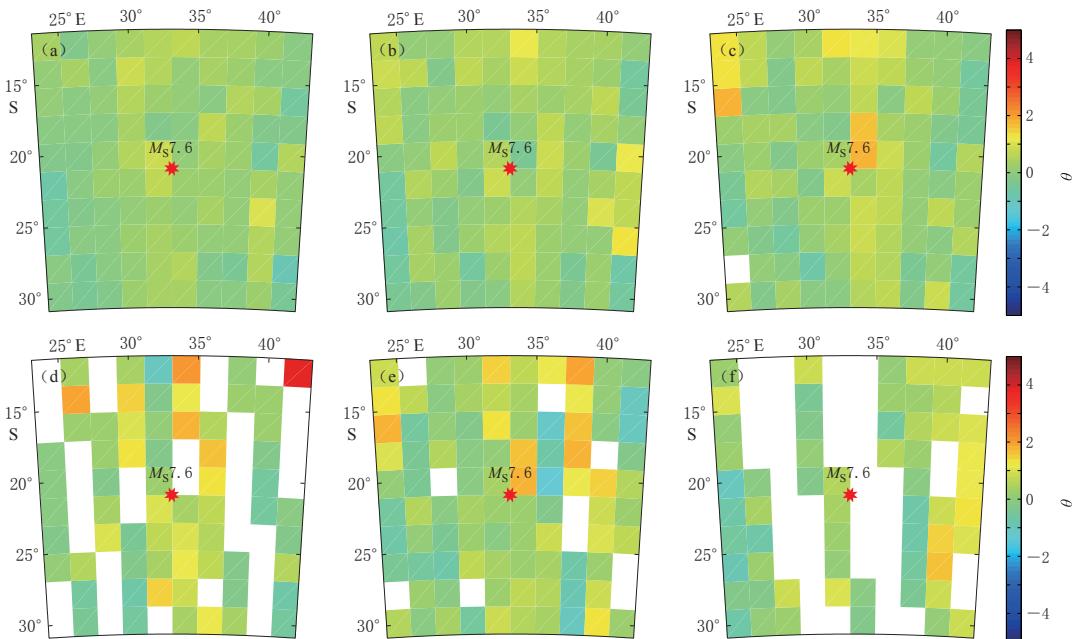


图 2 2006 年莫桑比克 $M_S 7.6$ 地震前后极低频/甚低频(370—897 Hz)磁场(θ 矩阵)时空演化特征

(a) 2005-11-24—2005-12-24; (b) 2005-12-24—2006-01-23; (c) 2006-01-23—2006-02-07;
(d) 2006-02-07—2006-02-22; (e) 2006-02-22—2006-03-09; (f) 2006-03-09—2006-03-24

Fig. 2 Spatio-temporal evolution of the magnetic field (matrix θ) at frequency band of ELF/VLF

(370—897 Hz) during the Mozambique $M_S 7.6$ earthquake in 2006

- (a) From November 24 to December 24, 2005; (b) From December 24, 2005 to January 23, 2006;
- (c) From January 23 to February 7, 2006; (d) From February 7 to 22, 2006;
- (e) From February 22 to March 9, 2006; (f) From March 9 to 24, 2006

为研究时段，将其划分为 6 个时段，即震前 90—60 天、震前 60—30 天、震前 30—15 天、震前 15 天—地震当天、地震当天—震后 15 天、震后 15—30 天，分别计算出各时段震中上空 ±10° 的电磁场背景观测模型矩阵 β 和 σ ，及其相应的 α 矩阵，并利用式(2)求取相应的 θ 矩阵，结果分别如图 2 和图 3 所示。

图 2 给出了 2005 年 11 月 24 日—2006 年 3 月 24 日莫桑比克地震震中上空的变化磁场在极低频/甚低频(370—897 Hz)相对于背景观测模型的时空演化特征。可以看出：该地震前 90—30 天的磁场扰动幅度较为平静， θ 矩阵中的所有元素值保持在 0.8—1.3，未发现较大幅度的扰动(图 2a, b)；震前 30—15 天内，磁场扰动幅度略有增强，可达 1.8，表现为震中及其西侧的轻微扰动(图 2c)；震前 15 天至地震当天，震中以北地区的磁场扰动幅度逐渐加强，并在研究区东北角出现一处变化磁场的强烈扰动，其幅度可达 3.9σ (图 2d)；震后 15 天内，磁场扰动幅度开始回落， θ 矩阵的所有元素值最大值为 1.9(图 2e)，震后 15—30 天内，磁场强度继续下降至 1.6σ (图 2f)。

图 3 给出了莫桑比克地震前后的空间电场时空演化特征。与图 2 所示的地震期间变化磁场的演化特征相比较，电场的变化则相对稳定，仅震前 15 天至地震当天(图 3d)和震后 15 天内(图 3e)的 θ 值分别可达 2.5 和 -2.3 ，超过 2σ ，其余时段的 θ 值均为 0.9—1.5，未超过 2σ 。

为更清晰地提取莫桑比克地震的电磁场异常扰动，本文利用定量方法进行时间序列分

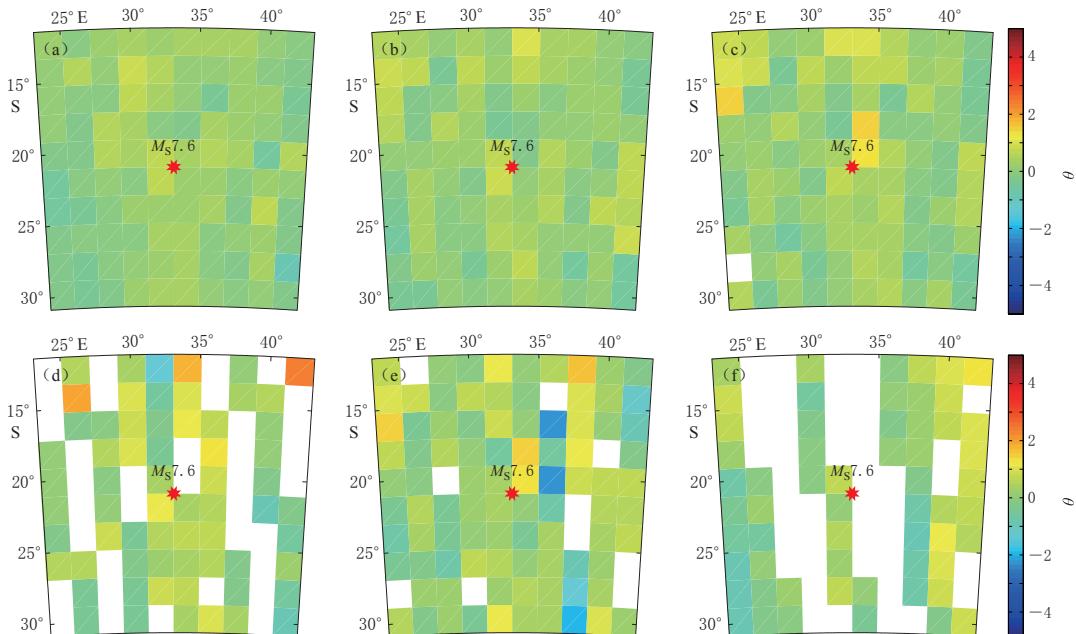


图 3 2006 年莫桑比克地震前后空间电场(θ 矩阵)的时空演化特征

- (a) 2005-11-24—2005-12-24; (b) 2005-12-24—2006-01-23; (c) 2006-01-23—2006-02-07;
- (d) 2006-02-07—2006-02-22; (e) 2006-02-22—2006-03-09; (f) 2006-03-09—2006-03-24

Fig. 3 Spatio-temporal evolution of electric field (matrix θ) during the Mozambique earthquake

- (a) From November 24 to December 24, 2005; (b) From December 24, 2005 to January 23, 2006;
- (c) From January 23 to February 7, 2006; (d) From February 7 to 22, 2006;
- (e) From February 22 to March 9, 2006; (f) From March 9 to 24, 2006

析。具体做法如下:对于研究时段2005年11月24日—2006年3月24日内的磁场与电场数据,每隔15天计算得到1个 θ 矩阵并取其所有元素的绝对值 $|\theta|$,以此计算出各个时段电磁场的最大扰动值 $|\theta|_{\max}$ 和平均扰动值 $|\theta|_{\text{avg}}$ 。由于 $|\theta|$ 进行了归一化处理,因此可以将磁场与电场的 $|\theta|_{\max}$ 值和 $|\theta|_{\text{avg}}$ 值分别求取二者的平均值,进而得到地震前后电磁场偏离背景场的方差倍数,即电磁场扰动。

图4分别给出了磁场、电场的 $|\theta|_{\max}$ 值及 $|\theta|_{\text{avg}}$ 值以及电磁场的扰动幅度在地震期间的时序变化特征。从图4a可以看出,震前90—15天内磁场扰动幅度较弱,均低于 2σ ,而在震前15天内磁场扰动幅度突然增强至 2.2σ 以上,可达3.9,并在此过程中发震,震后磁场扰动幅度则回落至较弱状态。从图4b可以看出:震前90—15天内电场变化平稳,均低于 2σ ,至震前15天内扰动幅度高于 2σ ,增强至2.5,地震在此期间发生,震后电场扰动幅度持续下降。由图4c可以看出,电磁场扰动曲线变化形态整体上与磁场极为相似,表现为震前15天内的明显异常扰动, $|\theta|_{\max}$ 达到 3.2σ ,其它时段扰动则相对平静。

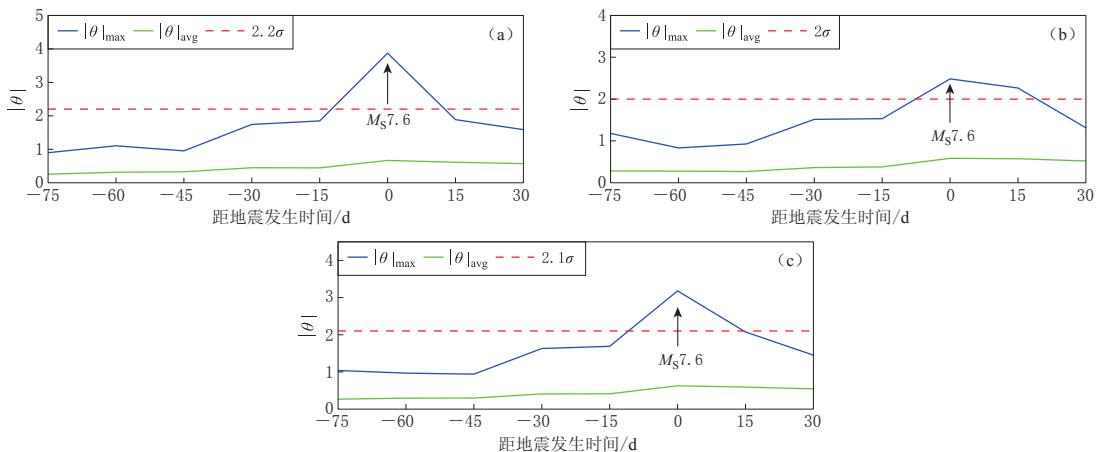


图4 2005年11月24日—2006年3月24日最大扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 与平均扰动幅度 $|\theta|_{\text{avg}}$ 的时序变化特征。(a) 磁场扰动;(b) 电场扰动;(c) 电磁场扰动

Fig. 4 The temporal variation of the perturbation amplitude value of $|\theta|$ from November 24, 2005 to March 24, 2006

- (a) Perturbation amplitude $|\theta|$ at magnetic field;
- (b) Perturbation amplitude $|\theta|$ at electric field;
- (c) Perturbation amplitude $|\theta|$ at electromagnetic field. $|\theta|_{\max}$ represents maximum of $|\theta|$, $|\theta|_{\text{avg}}$ represents the mean of $|\theta|$, σ denotes standard deviation

4 统计研究

由于单次地震的异常现象具有较大的随机性,不足以证明地震异常的客观规律,因此本文对2005—2009年全球发生的 $M_S \geq 7.0$ 强震进行统计分析,以期获取规律性认识。利用DEMETER卫星在轨运行期间积累的数据资料,结合上述方法进行统计研究。采用国家地震科学数据共享中心(2015)提供的地震目录,选取 $M_S \geq 7.0$ 且震源深度小于40 km的强震,共得到50条地震信息,但由于某些研究时段内没有观测数据,最终选取45次(北半球27次,南半球18次)地震用于统计分析。

4.1 强震前后空间电磁场的时空演化特征

对所选定的45次地震,将每次地震的研究时段划分为以下6个时段进行时空演化特

征研究：震前 90—60 天、震前 60—30 天、震前 30—15 天、震前 15 天至地震当天、地震当天至震后 15 天、震后 15—30 天。首先分别计算出每次地震的背景场中值矩阵 β 和标准方差矩阵 σ ，并计算出上述 6 个时段内的 α 矩阵，然后利用式(2)计算出每个时段的 θ 值。其次采用图 2 和图 3 的方法，绘制出每次地震在上述 6 个时段内的 θ 值分布图，逐一分析每次地震的 θ 值分布图。结果显示，45 次地震在震前 90—30 天的磁场变化相对平静，有 35 次地震的最大磁场扰动幅度在某一时段超过 2.2σ ，其中 12 次地震的磁场最大扰动幅度出现在震前 15 天至地震当天的时段内，5 次地震的最大扰动幅度出现在震前 30—15 天，18 次地震的最大磁场扰动幅度则出现在震后。从 θ 值的空间分布情况可以看出，超过 2.2σ 的扰动往往出现在距离震中一定范围的区域内，其中仅有 9 次地震的最大磁场扰动幅度出现在震中 $\pm 4^\circ$ 内，而其余 26 次地震的最大磁场扰动幅度则出现在震中 $\pm 4^\circ$ — $\pm 10^\circ$ 范围内。

利用上述磁场的时空演化特征分析方法，本文进一步分析了电场的时空演化。结果表明，45 次地震中，有 39 次地震的最大电场扰动幅度在某一时段超过 2σ ，其中 16 次地震的最大扰动幅度出现在震前 15 天至地震当天的时段内，4 次地震的最大扰动幅度发生在震前 30—15 天，19 次地震的最大扰动幅度出现在震后。此外，电场扰动的空间分布显示，仅有 4 次地震的最大电场扰动幅度出现在震中 $\pm 4^\circ$ 内，其余 35 次地震的最大电场扰动幅度均出现在震中 $\pm 4^\circ$ — $\pm 10^\circ$ 范围内。

4.2 强震前后电磁场的时序特征

对于上述 45 次地震，采用与莫桑比克地震相同的时间序列分析方法，将每次地震震前 90 天至震后 30 天每隔 15 天归为一个时段，分别计算出该地震不同时段的 α 矩阵和 θ 值，然后绘制 $|\theta|_{\max}$ 及 $|\theta|_{\text{avg}}$ 的时序变化曲线。

图 5 给出了变化磁场在强震前后相对于背景场的扰动幅度时序变化。我们定义变化磁场扰动幅度的阈值为 2.2σ ，结果表明，对于 78% (35/45) 的地震而言，在研究时段内其变化磁场扰动幅度出现超过阈值的现象，表现出异常特征，而 10 次地震期间的磁场扰动平

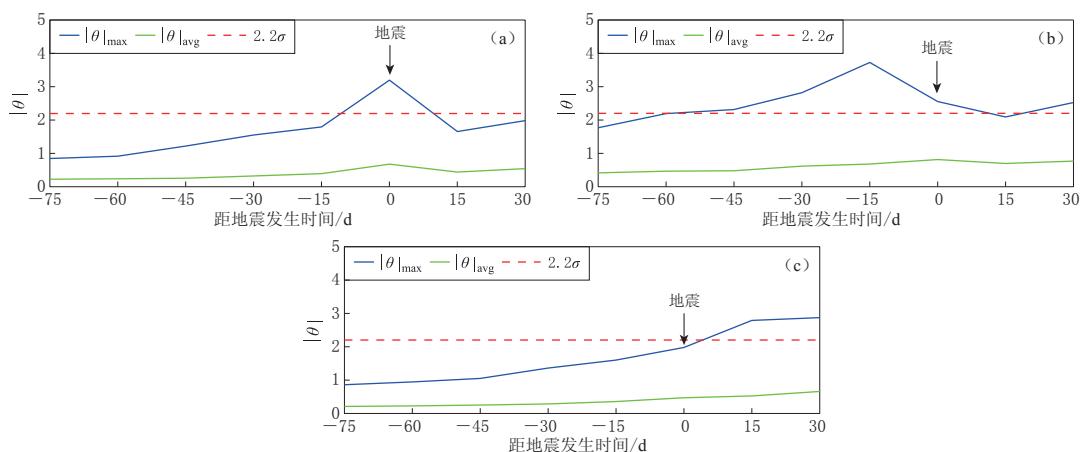


图 5 强震前后变化磁场相对于背景场的最大扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 和平均扰动幅度 $|\theta|_{\text{avg}}$ 的时序变化类型

(a) 第一类扰动；(b) 第二类扰动；(c) 第三类扰动

Fig. 5 The temporal variation of the maximum perturbation amplitude $|\theta|_{\max}$ and average

perturbation amplitude $|\theta|_{\text{avg}}$ of the magnetic field during the strong earthquakes

(a) The first type; (b) The second type; (c) The third type

静, 未超过 2.2σ . 对这 35 次地震进行分类统计, 发现其扰动特征可归纳为 3 类: 第一类与莫桑比克地震类似, 表现为震前 90—15 天磁场扰动幅度平静且低于 2.2σ , 而在震前 15 天至地震当天最大扰动幅度突然增大并显著大于 2.2σ , 震后则持续降低, 该类型地震有 12 次, 其磁场扰动平均值变化如图 5a 所示; 第二类表现为震前 30—15 天内扰动幅度超过 2.2σ , 达到最大值, 并在扰动下降过程中发震, 该类型地震仅有 5 次, 其磁场扰动平均值如图 5b 所示; 第三类则表现为震后异常, 即震前磁场扰动幅度低于 2.2σ , 而在震后其扰动幅度增大并超过 2.2σ , 该类型地震有 18 次, 其磁场扰动平均值变化如图 5c 所示.

图 6 给出了强震前后电场的时序变化. 由于电场的扰动幅度相比磁场来说弱一些, 因此本文将阈值设为 2σ . 结果显示, 87%(39/45) 的地震表现出了异常形态, 也表现为与磁场扰动相似的 3 种扰动类型, 如图 6 所示. 16 次地震表现出第一类扰动类型(图 6a), 仅 4 次地震表现为第二类扰动特征(图 6b), 而其余 19 次地震则显示出第三类扰动形态的震后异常(图 6c).

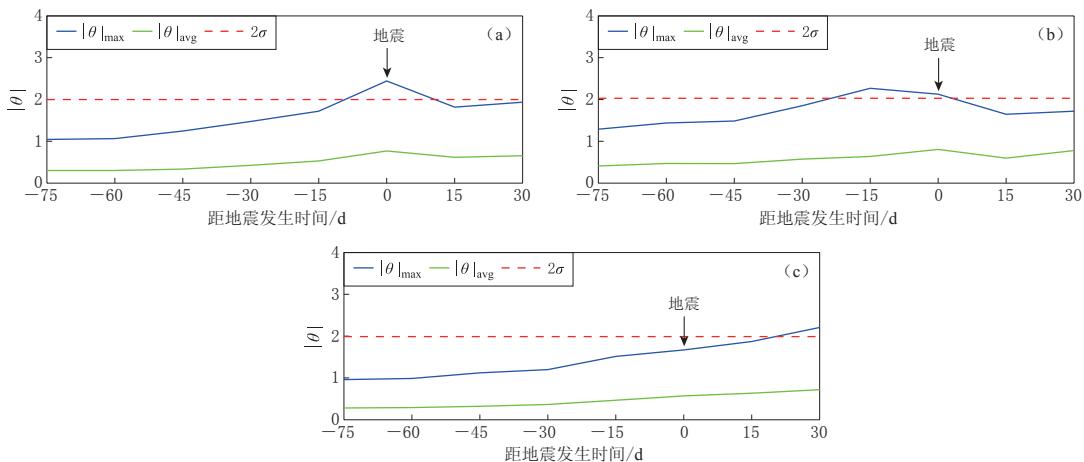


图 6 强震前后电场相对于背景场的最大扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 和平均扰动幅度 $|\theta|_{\text{avg}}$ 的时序变化类型
(a) 第一类扰动; (b) 第二类扰动; (c) 第三类扰动

Fig. 6 The temporal variation of the maximum perturbation amplitude $|\theta|_{\max}$ and average perturbation amplitude $|\theta|_{\text{avg}}$ for the electric field during the strong earthquakes
(a) The first type; (b) The second type; (c) The third type

由于磁场与电场的扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 及 $|\theta|_{\text{avg}}$ 为归一化结果, 因此对磁场与电场的扰动幅度求平均值, 即可得到地震前后电磁场的时序变化特征. 将具有相同扰动形态的地震磁场与电场进行叠加并分类绘制平均扰动幅度, 定义阈值为 2.1σ , 其结果与磁场的时间序列特征极其相似, 基中有 27 次地震存在磁场与电场同步异常反应, 同样划分为 3 种扰动形态如图 7 所示, 分别有 10 次、3 次和 14 次地震表现为第一类(图 7a)、第二类(图 7b)和第三类(图 7c)扰动时序变化.

4.3 非震情况对比

随机选取 35 个非震随机事件(发生前 90 天至发生后 30 天在随机点 $\pm 10^\circ$ 范围内无 $M \geq 7$ 地震发生), 使用相同的方法计算背景场及扰动幅度, 对比研究强震震中上空与非震区上空的电磁场扰动变化特征. 如图 8 所示, 35 个非震区上空电磁场扰动幅度时序变化结果显示: 71%(25/35) 的非震区变化磁场扰动幅度变化平缓, 均未超过 2.2σ ; 83%(29/35)

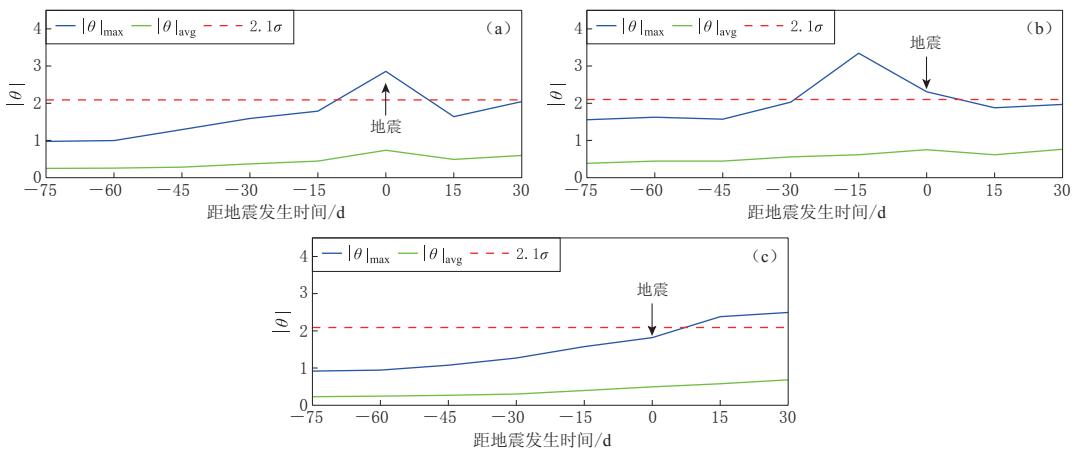


图 7 强震前后空间电磁场相对于背景场的最大扰动幅度 $|\theta|_{\max}$ 和平均扰动幅度 $|\theta|_{\text{avg}}$ 的时序变化

(a) 第一类; (b) 第二类; (c) 第三类

Fig. 7 The temporal variation of maximum perturbation amplitude $|\theta|_{\max}$ and average perturbation amplitude $|\theta|_{\text{avg}}$ of spatial electromagnetic field
(a) The first type; (b) The second type; (c) The third type

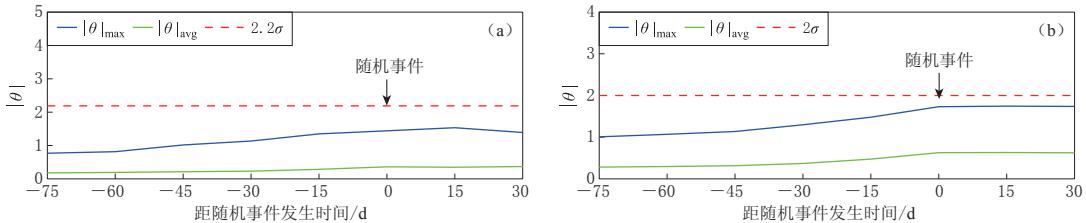


图 8 随机非震区上空电磁场相对于背景场的扰动幅度时序变化

(a) 变化磁场扰动幅度; (b) 电场扰动幅度

Fig. 8 The temporal variation of the perturbation amplitude over the random non-earthquake region
(a) Perturbation amplitude of magnetic field; (b) Perturbation amplitude of electric field

的非震区电场扰动幅度变化平缓, $|\theta|_{\max}$ 未超过 2σ .

5 讨论与结论

对于地震发生前后空间电磁场的时空演化特征, 前人已基于 DEMETER 卫星的磁场或电场观测数据, 采用不同方法对地震电磁异常进行了相关统计研究(Němec *et al*, 2008, 2009; 泽仁志玛等, 2012; Píša *et al*, 2013). 本文在泽仁志玛等(2012)研究的基础上, 综合利用磁场和电场数据, 并采用了长达 5 年的长期观测资料构建了稳定的背景场, 在此基础上提取了相对于背景场的扰动特征, 对比分析了地震期间磁场与电场在强震前后的演化特征, 进一步得到电磁场的统计规律, 一定程度上弥补了前人单一场统计研究的不足. 本文的主要结论如下:

1) 2005—2009 年全球发生的 45 次地震的统计结果表明, 地震前后电磁场的异常扰动主要出现在震前 30 天至震后 30 天内, 并且最大幅度的磁场与电场扰动主要集中于震中 $\pm 4^\circ$ — $\pm 10^\circ$ 范围内.

2) 强震前后震中上空的电磁场相对其背景场的时序变化特征表现出了3种不同的扰动形态，并且其最大异常扰动幅度分别出现在震前15天内、震前30—15天以及震后15—30天。

3) 不同扰动特征的地震震中分布情况显示：变化磁场相对于背景场的第一种扰动类型的地震主要集中在北纬30°、赤道地区以及南纬20°附近；第二种扰动类型地震主要发生在北半球地区；震后异常扰动类型的震中则无明显的分布特征。电场的3种不同扰动类型的地震震中分布规律与磁场极其相似。

4) 非震随机地区上空的电磁场时序变化特征研究结果表明，71%的随机地区在研究时段内变化磁场最大扰动幅度从未超过 2.2σ ，而83%的随机区电场最大扰动幅度均低于 2σ ，表现为平静的扰动特征。

关于地震电磁扰动机理的研究目前还处于探索阶段，Hayakawa(1999)提出的岩石圈-大气层-电离层耦合模型在一定程度上解释了空间存在地震电磁异常的可能性。地震孕育过程中所释放的化学气体(氯气)可以改变大气成分和电导率的大小，从而为电磁波动的产生提供扰动源；另外，地震波动也可以引发大气低频振动从而引起电离层扰动，岩石圈电磁辐射也可沿磁力线向空间传播到达电离层，甚至到达磁层(Hayakawa, 1999; Pulinets, Boyarchuk, 2004)。因此地震前兆信号可以直接或间接地传播至空间，但其具体传播机理或电磁耦合机理目前尚不确定。

本文统计结果表明地震期间会产生不同类型的电磁扰动特征，一定程度上反映了地震电离层耦合机理的复杂性。在地震孕育机理尚不明确的情况下，通过研究不同类型的地震震中分布，我们尝试研究其是否与孕育地震的岩石圈环境有关。图9给出了磁场与电场不同扰动类型的地震震中分布情况。从图9a可以看出，第一种扰动类型的地震主要发生在北纬30°、赤道地区以及南纬20°附近，第二种扰动类型的地震主要分布在北半球，第三种扰动类型的震后异常地震则未呈现清晰的区域性特征。图9b给出了地震期间电场的3种扰

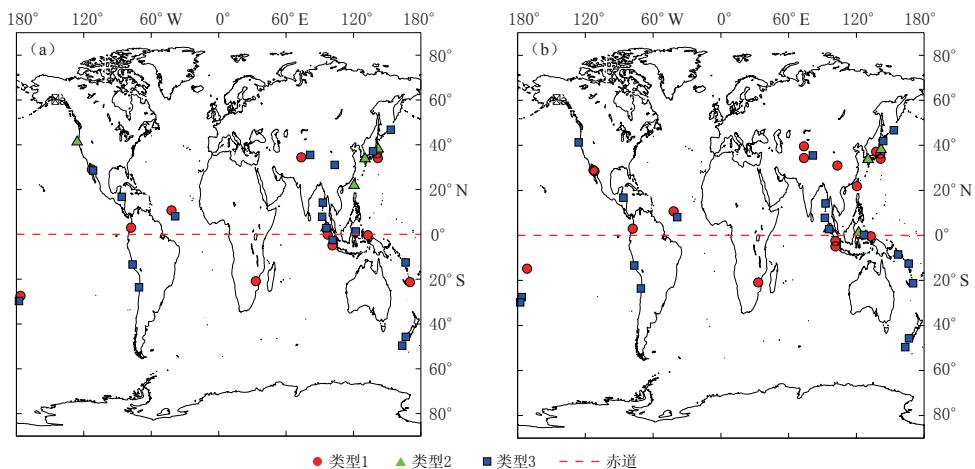


图9 磁场观测(a)和电场观测(b)所获得的具有不同扰动类型的地震震中分布

Fig. 9 Distribution of epicenters for three perturbation types revealed by the magnetic observations (a) and electric measurements (b)
 The red solid circles represent the first type, the green triangles represent the second type, and the blue squares indicate the third type

动类型的震中分布。可以看出：第一种扰动类型的地震震中分布特征与磁场类似，第二种扰动类型的地震亦分布在北半球，而第三种异常扰动类型的地震震中分布则较为随机。进一步观察可以看出，两者的震中分布情况较为相似，均表现出与纬度变化存在一定关系。因此，我们推测强震前后空间电磁场不同类型的扰动特征似乎与地震发生在岩石圈的不同部位有一定关联。但是孕震区位置、孕震机理以及地震空间电磁异常机理等均需更深入的探索，这也是我们即将要开展的研究。

未来遵循天地一体化观测体系(申旭辉等, 2011)的思路，综合地基与空基观测数据，在大量震例分析的基础上，客观认识地震电磁异常的存在性，加强对地震电磁波传播机制的研究显得尤为重要。

衷心感谢法国 DEMETER 卫星科学中心给予数据下载权限。

参 考 文 献

- 曹晋滨, 杨俊英, 袁仕耿, 申旭辉, 刘元默, 燕春晓, 李文曾, 陈涛. 2009. 卫星低频电磁辐射在轨探测研究[J]. 中国科学: 技术科学, **39**(9): 1544–1550.
- Cao J B, Yang J Y, Yuan S G, Shen X H, Liu Y M, Yan C X, Li W Z, Chen T. 2009. In-flight observations of electromagnetic interferences emitted by satellite[J]. *Science in China: Technological Sciences*, **52**(7): 2112–2118.
- 丁鉴海, 余素荣, 王亚丽. 2008. 地磁“低点位移”现象与强震预测研究[J]. 电波科学学报, **23**(6): 1011–1017.
- Ding J H, Yu S R, Wang Y L. 2008. Geomagnetic low-point displacement phenomena and strong earthquake prediction research[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **23**(6): 1011–1017 (in Chinese).
- 国家地震科学数据共享中心. 2015. 中国地震台网统一地震目录[EB/OL]. [2015-09-18]. <http://data.earthquake.cn/data/index.jsp>.
- China Earthquake Data Center. 2015. Uniform earthquake catalog of China Earthquake Networks Center[EB/OL]. [2015-09-18]. <http://data.earthquake.cn/data/index.jsp>.
- 黄清华. 2005. 地震电磁观测研究简述[J]. 国际地震动态, (11): 2–5.
- Huang Q H. 2005. The state-of-the-art in seismic electromagnetic observation[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (11): 2–5 (in Chinese).
- 钱家栋. 1993. 与大震孕育过程有关的地电阻率变化研究[J]. 中国地震, **9**(4): 341–350.
- Qian J D. 1993. A study on the changes in geoelectrical resistivity associated with preparatory process of great earthquake in China[J]. *Earthquake Research in China*, **9**(4): 341–350 (in Chinese).
- 申旭辉, 王兰炜, 吴云, 单新建, 张景发, 康春丽, 张学民, 洪顺英, 荆凤, 陈立泽, 袁仕耿. 2011. 地震立体观测体系空间段发展规划框架与进展[J]. 卫星应用, (6): 9–15.
- Shen X H, Wang L W, Wu Y, Shan X J, Zhang J F, Kang C L, Zhang X M, Hong S Y, Jing F, Chen L Z, Yuan S G. 2011. The framework of development and process in stereo seismic observation system of space segment[J]. *Satellite Application*, (6): 9–15 (in Chinese).
- 泽仁志玛, 申旭辉, 曹晋滨, 张学民, 黄建平, 刘静, 欧阳新艳, 赵庶凡. 2012. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究[J]. 地球物理学报, **55**(11): 3699–3708.
- Zeren Z M, Shen X H, Cao J B, Zhang X M, Huang J P, Liu J, Ouyang X Y, Zhao S F. 2012. Statistical analysis of ELF/VLF magnetic field disturbances before major earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(11): 3699–3708 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 欧阳新艳, 蔡晋安, 黄建平, 刘静, 赵庶凡. 2009. 汶川 8 级地震前空间电离层 VLF 电场异常现象[J]. 电波科学学报, **24**(6): 1024–1032.
- Zhang X M, Shen X H, Ouyang X Y, Cai J A, Huang J P, Liu J, Zhao S F. 2009. Ionosphere VLF electric field anomalies before Wenchuan M8 earthquake[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **24**(6): 1024–1032 (in Chinese).

- 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. 2006. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planet Space Sci.*, **54**(5): 456–471.
- Cussac T, Clair M A, Ultré-Guerard P, Buisson F, Lassalle-Balier G, Ledu M, Elisabelar C, Passot X, Rey N. 2006. The DEMETER microsatellite and ground segment[J]. *Planet Space Sci.*, **54**(5): 413–427.
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. *Pure Appl Geophys.*, **117**(5): 1025–1044.
- Hayakawa M. 1999. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated With Earthquakes*[M]. Tokyo: Terra Scientific Publication Company: 996.
- Huang Q H, Ikeya M. 1998. Seismic electromagnetic signals (SEMS) explained by a simulation experiment using electromagnetic waves[J]. *Physics Earth Planet Inter.*, **109**(3/4): 107–114.
- Molchanov O, Rozhnoi A, Solovieva M, Akentieva O, Berthelier J J, Parrot M, Lefevre F, Biagi P F, Castellana L, Hayakawa M. 2006. Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci.*, **6**(5): 745–753.
- Němec F, Santolík O, Parrot M, Berthelier J J. 2008. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity[J]. *Geophys Res Lett.*, **35**(5): L05109. doi:10.1029/2007GL032517.
- Němec F, Santolík O, Parrot M. 2009. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study[J]. *J Geophys Res.*, **114**(A4): A04303. doi:10.1029/2008JA013972.
- Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, Błęcki J, Chapuis Y, Colin F, Elie F, Fergeau P, Lagoutte D, Lefevre F, Legendre C, Lévéque M, Pinçon J L, Poirier B, Seran H C, Zamora P. 2006. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planet Space Sci.*, **54**(5): 441–455.
- Piša D, Němec F, Santolík O, Parrot M, Rycroft M. 2013. Additional attenuation of natural VLF electromagnetic waves observed by the DEMETER spacecraft resulting from preseismic activity[J]. *J Geophys Res Space Phys.*, **118**(8): 5286–5295.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. New York: Springer: 174, 195.
- Zeren Z M, Shen X H, Zhang X M, Cao J B, Huang J P, Ouyang X Y, Liu J, Lu B Q. 2012. Possible ionospheric electromagnetic perturbations induced by the $M_{\text{S}}7.1$ Yushu earthquake[J]. *Earth Moon Planets*, **108**(3/4): 231–241.