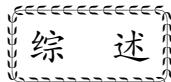


夏彩韵, 张永仙, 尼鲁帕尔·买买吐孙, 张小涛. 2015. 改进型图像信息方法提取地震电离层扰动异常研究进展. 地震学报, 37(1): 192-201. doi:10.11939/jass.2015.01.017.

Xia C Y, Zhang Y X, Nilupar T, Zhang X T. 2015. A review on modified pattern informatics method to extract ionospheric disturbance anomaly related to earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 37(1): 192-201. doi:10.11939/jass.2015.01.017.



## 改进型图像信息方法提取地震 电离层扰动异常研究进展<sup>\*</sup>

夏彩韵<sup>1)</sup> 张永仙<sup>2),\*</sup> 尼鲁帕尔·买买吐孙<sup>3)</sup> 张小涛<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

3) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

**摘要** 首先总结了国内外利用法国 DEMETER 卫星观测数据识别和提取地震电离层中主要参量扰动异常的常规研究方法, 介绍了图像信息方法(pattern informatics method, 简称 PI 方法)研究地震活动性异常及其应用于中长期地震危险性预测的研究进展和成果. 然后主要介绍了改进型图像信息方法(modified pattern informatics method, 简称 MPI 方法)在提取电磁卫星数据资料中的进展应用. 该方法的震例研究结果显示, 地震电离层中电子浓度( $N_e$ )、电子温度( $T_e$ )异常出现的时间一般在震前一个月左右, 相对于其它方法提取到的异常在震前几小时至数天内, 这一突出特点将使得 MPI 方法在短临地震预报中更具有可操作性. 然而, 该方法能否作为提取地震电离层异常扰动的实用数据处理方法并应用于地震短临预测中, 尚需要进一步深入研究. 最后本文提出了将 MPI 方法应用于提取地震电离层异常信息需要进一步解决的几个问题.

**关键词** 改进型图像信息方法(MPI) DEMETER 卫星 地震电离层扰动异常 震例研究

doi:10.11939/jass.2015.01.017 中图分类号: P315.75 文献标志码: A

### A review on modified pattern informatics method to extract ionospheric disturbance anomaly related to earthquake

Xia Caiyun<sup>1)</sup> Zhang Yongxian<sup>2),\*</sup> Nilupar Tursun<sup>3)</sup> Zhang Xiaotao<sup>2)</sup>

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

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

**Abstract:** This paper firstly summarized the main methods for identifying and extracting the abnormal disturbance of the ionosphere related to earthquake

\* 基金项目 十二五科技支撑项目(2012BAK19B02-05)和中美科技合作专项(2010DFB20190)共同资助.

收稿日期 2014-02-24 收到初稿, 2014-06-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: yxzhseis@sina.com

from the DEMETER satellite observation data. Then the modified pattern informatics (MPI) method, which is applied to extract the ionospheric disturbance anomaly from the French DEMETER satellite observation data, was mainly introduced. The results from the MPI method show that the abnormal disturbance of the ionosphere usually occurs about one month before an earthquake. Comparision of the MPI method with other methods shows that MPI method is more practical for earthquake prediction because the abnormal disturbance detected by other methods appears only a few hours to a few days before an earthquake and leaves only very short time for response. However, there is still a long way to go before MPI method can be applied to real time earthquake prediction. Finally, several issues about extracting ionospheric disturbance anomaly by MPI method are proposed to be solved in further study.

**Key words:** modified pattern informatics (MPI); DEMETER; satellite; seismo-ionospheric disturbance; earthquake case study

## 引言

迄今为止, 地震仍然是人类面临的重大自然灾害, 大量的灾难性地震造成了重大人员伤亡与财产损失。近年来, 全球大地震的频发, 让人类再次意识到防震减灾工作依然任重而道远。面对群灾之首, 通过地震预测以减轻地震灾害是千百年来人们的迫切希望, 但由于地震触发的机理还没有完全被揭示, 目前, 仍需要通过对地震前兆现象的识别和分析来探索地震预测方法(陈运泰, 2009; 方涵先等, 2010)。

电离层是日地观测空间的重要组成部分, 其动态变化观测研究以及震前电离层出现的短临异常现象已引起国内外科研人员广泛的关注(曾中超等, 2009)。多领域、多参数、多手段大量的观测数据表明, 地震前几小时至几天内电离层会发生强烈的扰动或出现异常(方涵先等, 2010)。近年来, 随着空间对地观测科学技术的发展, 对于如何识别和提取地震电离层异常现象已成为一个热点问题, 其优势在于电离层空间观测技术可以实现全天候连续场的观测, 从而弥补了地面非连续性观测的缺陷(卓贤军等, 2005; 郭亚红, 2006)。自法国DEMETER卫星发射后, 对其观测数据进行处理以期提取震前电离层扰动异常现象并将其应用到地震短临预测的研究中已成为备受关注的新方法(张学民等, 2009)。目前, 全世界已有 20 多个国家和地区进行地震电离层前兆研究(赵国泽等, 2007)。我国也即将发射地震监测研究的实验卫星, 因此需要实用的数据处理方法对其产生的海量大动态数据进行处理与分析, 以期能够获得与地震相关的电离层前兆异常信息并应用于地震短临预测中。

本文分析、总结了国内外关于利用卫星观测数据提取地震电离层异常信息的主要研究方法, 并介绍了图像信息方法(pattern informatics method, 简称为 PI 方法)在地震活动性中长期预测中的基本原理, 然后深入分析和总结了改进型图像信息方法(modified pattern informatics method, 简称为 MPI 方法)应用于提取地震电离层扰动异常的研究进展, 最后提出了 MPI 方法在提取地震电离层各参量扰动异常研究中仍需要进一步解决和完善的几个重要问题。

## 1 利用 DEMETER 卫星观测资料识别和提取地震电离层异常的方法

目前利用法国 DEMETER 卫星观测数据尝试提取震前电离层扰动异常信息主要集中

在回溯性震例检验上(朱荣, 2007; 欧阳新艳, 2008), 而震例研究又是利用识别和提取地震电离层异常信息进行地震预测由理论转向应用型和实用化研究中不可或缺的重要环节(朱荣等, 2007).

现阶段国际上通用的地震电离层异常震例的研究方法所采取的步骤中, 异常识别和提取是整个研究的重点(王春红, 2009). 综合分析国内外利用 DEMETER 卫星观测数据尝试识别和提取电离层前兆信息的数据处理方法, 主要分为以下几种:

1) 直观分析方法. 利用 DEMETER 卫星观测网站所提供的高分辨率 2 级图像直接分析, 选择离震中较近的轨道图像, 若多个参量在同一时刻有较剧烈的扰动并排除非明显的自然背景变化(如地磁活动、太阳黑子引起的变化、高纬度各种复杂变化等)即认为可能是由地震引起的异常(朱荣, 2007; 欧阳新艳等, 2008).

2) 重访轨道对比分析方法. 为了获得电离层物理量的变化规律以便提取异常信息, 需要大量的可对比数据开展研究, 而重访轨道上的观测数据则可以满足这一要求. DEMETER 卫星轨道重访周期一般为 16 天, 该方法可以在较长时间尺度上通过对同一研究区域上空电离层各参量扰动情况进行分析对比(朱荣等, 2008).

3) 小波分析方法. 利用小波系数叠加法来突出卫星原始数据中异常的部分. 该方法将卫星原始数据分解成高频和低频两种信息, 通过分析各频段形成的原因, 来寻找地震前兆异常信息(熊攀, 2009).

4) 功率谱分析方法. 该方法是数据处理中经典的一种时频联合估计方法, 其可以在短时间内分析信号的时频特性. 又因为自功率谱是场强幅值的平方, 所以利用该方法可以对异常电磁场引起的背景场变化效应进行放大(王春红, 2009).

5) 不同参量之间的相关性分析方法. 利用 DEMETER 卫星上同一荷载测量的至少两种参数作相关性分析, 则可以增加异常信息的可靠性, 同时也可以为判断各参数的变化是否来自同一扰动源提供依据(朱荣, 2007; 欧阳新艳, 2008).

综合上述几种方法, 大量的震例研究结果显示震前确实存在一定程度的电离层异常现象(Pulinets, 1998; Chuo *et al*, 2001). 但大部分地震电离层各参量中所出现的异常现象都是瞬时的, 仅存在某个轨道很短的时间, 由于电离层本身存在随时间、空间背景变化的特征(张学民等, 2008), 这种瞬时异常在大量的数据中很难被提取并应用于地震短临预测中(朱荣等, 2007). 如果不能很好地消除电离层本身背景场的变化, 则地震异常信息的可靠性就难以保证. 目前大多采用的异常提取方法均不能很好地消除强背景的干扰(丁鉴海等, 2006; 张学民等, 2009). 所以, 充分利用 DEMETER 卫星观测数据, 尝试新的数据处理方法, 为我国地震电磁卫星资料处理积累经验, 是一项很有意义的工作.

## 2 图像信息(PI)方法

PI 方法最初由 Rundle 等(2000a, b)提出. 该方法能够识别某一段时间内某研究区域的地震活动性是否显著偏离自己的历史和周边大区域的平均状态, 认为那些显著偏离了自己的历史和周边大区域平均状态的区域发生强震的概率较高, 并将其定义为“地震热点(hot spot)”.

PI 方法具体实现过程(Holliday *et al*, 2005)如下:

1) 构建时间序列  $N_i(t)$ . 将研究区域网格化, 以  $\Delta x$  为边长进行网格划分. 对每个网格

创建一个时间序列  $N_i(t)$ ,  $N_i(t)$  为  $t$  时刻在第  $i$  个网格内发生的震级大于  $M_0$  的地震次数, 其中  $M_0$  的取值需大于完备地震目录的下限震级(图 1a).

2) 定义 3 个时间段. 定义背景参考时间段  $t_b-t_1$ 、变化时间段  $t_1-t_2$  和预测时间段  $t_2-t_3$ . 其中,  $t_0$  为研究资料的起始时刻,  $t_b$  为以  $\Delta t$  为步长从  $t_0$  时刻向  $t_1$  时刻滑动的时间, 一般情况下取  $t_2-t_1=t_3-t_2$ (图 1b).

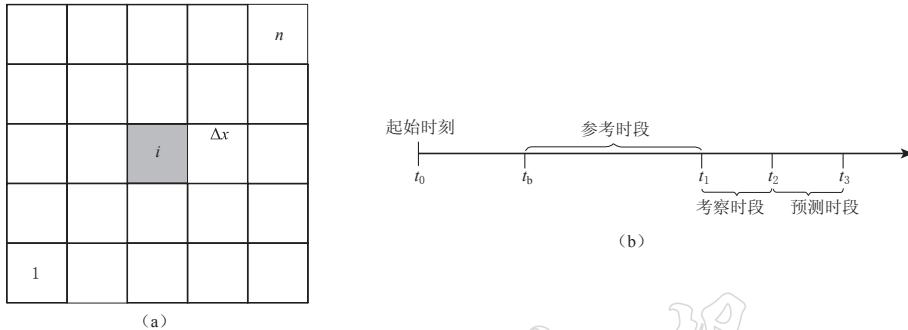


图 1 PI 方法时空参量示意图

(a) 空间网格划分示意图; (b) 时间参数定义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatio-temporal parameters associated with pattern informatics method

(a) Spatial grids; (b) Temporal parameters

3) 计算地震强度函数  $I_i(t_b, t)$

$$I_i(t_b, t) = \frac{1}{t - t_b} \sum_{t'=t_b}^t N_i(t'). \quad (1)$$

4) 将地震强度函数  $I_i(t_b, t)$  标准化

$$\hat{I}_i(t_b, t) = \frac{I_i(t_b, t) - \langle I_i(t_b, t) \rangle}{\sigma(t_b, t)}, \quad (2)$$

其中,  $\langle I_i(t_b, t) \rangle$  为所有网格在  $t$  时刻地震活动强度函数的平均值,  $\sigma(t_b, t)$  为所有网格在  $t$  时刻地震活动强度函数的标准偏差.

5) 计算  $t_1-t_2$  时间段标准地震强度函数的变化量

$$\Delta I_i(t_b, t_1, t_2) = \hat{I}_i(t_b, t_2) - \hat{I}_i(t_b, t_1). \quad (3)$$

6) 计算  $\Delta I_i(t_b, t_1, t_2)$  的平均变化

$$\overline{\Delta I_i(t_b, t_1, t_2)} = \frac{1}{t_1 - t_0} \sum_{t_b=t_0}^{t_1} \Delta I_i(t_b, t_1, t_2). \quad (4)$$

7) 求发震的概率函数

$$P_i(t_0, t_1, t_2) = \overline{\Delta I_i(t_b, t_1, t_2)}^2. \quad (5)$$

8) 求概率增益

$$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) = P_i(t_0, t_1, t_2) - \langle P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle, \quad (6)$$

式中  $\langle \Delta P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle$  为所有网格发震概率的平均值. 将  $\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) > 0$  的网格(地区)命名为地震热点(危险区), 并假设在  $t_2-t_3$  时间段内热点区将发生  $M_f$  ( $M_f \geq M_0 + 2.0$ ) 以上的地震(Holliday *et al*, 2005).

设定合理的预测“阈值” $w$ , 其值等于  $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$  (Rundle *et al*, 2000a; Tiampo *et*

*al, 2002).*

PI 方法应用于南加州(Rundle *et al*, 2002)、全球(Holliday *et al*, 2005)、日本中部(Nanjo *et al*, 2006)和中国台湾地区(Chen *et al*, 2005)及川滇(蒋长胜, 吴忠良, 2008)、云南、大华北(张小涛, 2009)等地震活跃地区, 取得了比较好的回溯性检验及向前预测效果. Zhang 等(2011)以 2008 年于田  $M_s7.3$  地震和汶川  $M_s8.0$  地震为例, 对中国西部地区( $20^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ}\text{--}110^{\circ}\text{E}$ )进行了回溯性预测检验, 并进一步对 PI 方法计算参数的合理选取进行了深入研究。

### 3 改进型图像信息(MPI)方法

PI 方法应用于地震活动性中长期预测中能够提取时空异常, 从理论上讲也能够提取电离层卫星观测数据. 然而, 电磁卫星资料与地震目录资料不同, 电离层参量的离差量很大. 鉴于此, 武安绪等(2011)对 PI 方法进行了如下改进:

1) 创建时间序列  $N_i(t)$  时, 取消累积时序计算方式, 采用微分方式计算, 其输入量为卫星的观测数据.

2) 取消 PI 方法式(5)的平方形式, 采用指数形式  $P_i(t_0, t_1, t_2) = e^{\Delta I_i(t_b \cdot t_1 \cdot t_2)}$ , 在不改变其异常形态下, 只调整数值的相对大小, 从而起到数值的拉伸与放大作用, 突出了隐藏在强扰动背景场中的微弱地震电离层异常信息.

3) 为了形成更客观、连续、线性变化的前兆空间演化场, 取消了 PI 公式中阈值取对数的变换, 使空间演化图像更具有直观的可对比性.

4) 以固定的时间窗长和空间步长为滑动方式, 形成 MPI 时空图像的演化过程. 在消除卫星观测数据背景变化趋势的同时, 提取震前可能存在的微弱异常变化信息. 利用 MPI 方法对汶川大地震进行分析研究, 获得了震前 42 天电离层中电子浓度、电子温度的 MPI 方法的时空演化图像.

由于篇幅有限, 本文仅给出研究区域( $10^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$ )内电子浓度时空动态的演化特征(图 2). 可以看出, 震前 31 天至 7 天左右电子浓度存在明显的由强变弱的异常变化信息. 通过改变不同计算参数, 其异常均明显存在, 但出现异常时间并不一致. 其原因是数据处理中所选取的参数不同, 因为参数不同所包含的信息也就不同, 这是数据处理中的普遍现象. 但在不同的计算参数中均提取到了汶川地震前的异常图像的稳定演化图像, 即在震前 10—30 天存在显著的异常变化信息, 而在震前 10 天左右这些异常信息又基本消失, 显示了 MPI 方法提取地震电离层异常的稳定性和可行性.

虽然利用 MPI 方法得到了汶川大地震前一个月左右的稳定异常演化图像, 但该方法没有考虑剔除背景场, 也未对其它震例开展研究, 因此对异常特征的描述还不具有普遍意义.

尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)对应用于电离层异常提取中的 MPI 算法作了进一步改进, 将研究区域进行  $2^{\circ}\times 5^{\circ}$  的网格划分, 针对落入每个网格内的观测参量按日取平均值, 并赋值到当天, 然后将每年同一天的数据求平均, 经过平滑差值得到每个网格 365 天的连续变化, 建立电离层中电子浓度( $N_e$ )、电子温度( $T_e$ )全年逐天的动态连续背景场. 为了剔除电离层强背景场的扰动影响, 将原始观测值与背景值求差得到的差异值(差异场)代替 PI 方

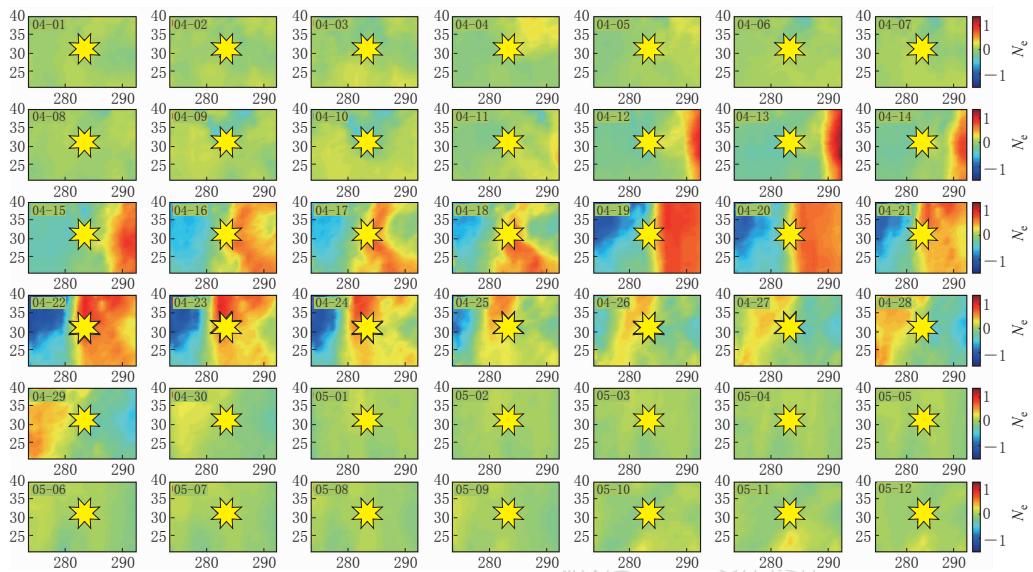


图 2 汶川大地震前 2008-04-01—05-12 MPI 方法计算的电子浓度( $N_e$ )时空演化(引自武安绪等, 2011)

Fig. 2 The spatio-temporal variation images of original electron density ( $N_e$ ) and related images processed by the MPI method before the 2008 Wenchuan earthquake (after Wu *et al.*, 2011 )

法式(1)中的  $N_i(t)$ 作为 MPI 方法的输入量, 其目的是消除年动态背景变化, 提取更为可靠的地震异常。通过利用 DEMETER 卫星观测的电子浓度和电子温度数据, 对 4 次全球  $M7.9$  以上地震、6 次中国大陆  $M6.0$  以上地震共 10 个震例进行了回溯性研究。

图 3 为引自尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)对汶川  $M_8.0$  地震的电子浓度经 MPI 方法处理后的时空演化图。从原始观测值为输入量的时空分布图(图 3a)中, 可以看出电子浓度在震前 30 天左右均出现异常扰动, 震前 6 天左右异常变弱; 而在电子浓度基于剔除背景场所建立的差异场的 MPI 方法时空演化图(图 3b)中, 可以明显看出震前具有规则性变化的异常扰动, 震前 39 天至 10 天左右出现明显的异常变化过程, 随之异常变弱消失, 更好地突出了震前异常现象。

尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)利用 MPI 方法结合 DEMETER 卫星观测数据所得到的 10 个震例结果中, 有 8 个震例在剔除背景场后异常信息比较明显, 其异常一般都出现在震前一个月左右, 震前十天开始减弱、消失。这一结果与张学民等(2009)、武安绪等(2011)研究结果基本一致。该结果进一步验证了 MPI 方法的可行性, 显示了该方法值得进一步深入研究。然而, 在 2006 年 1 月 1 日—2009 年 12 月 31 日 DEMERTER 卫星运行范围内, 全球  $M7.0$  以上、国内  $M6$  共发生 119 次地震(地震目录引自中国地震台网中心, <http://www.ceic.ac.cn/>), 而尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)仅研究了 10 个震例, 其震例数量很少, 对异常特征的描述显然不具有普遍性; 在剔除背景场的扰动时, 该研究只考虑了背景场的年变背景, 未考虑背景场的长趋势变化的背景。所以, 将 MPI 方法应用于地震电离层参量异常提取中还需进行深入研究与探索。

## 4 讨论与结论

通过总结并分析国内外利用卫星观测数据来识别和提取地震电离层异常扰动方法的研

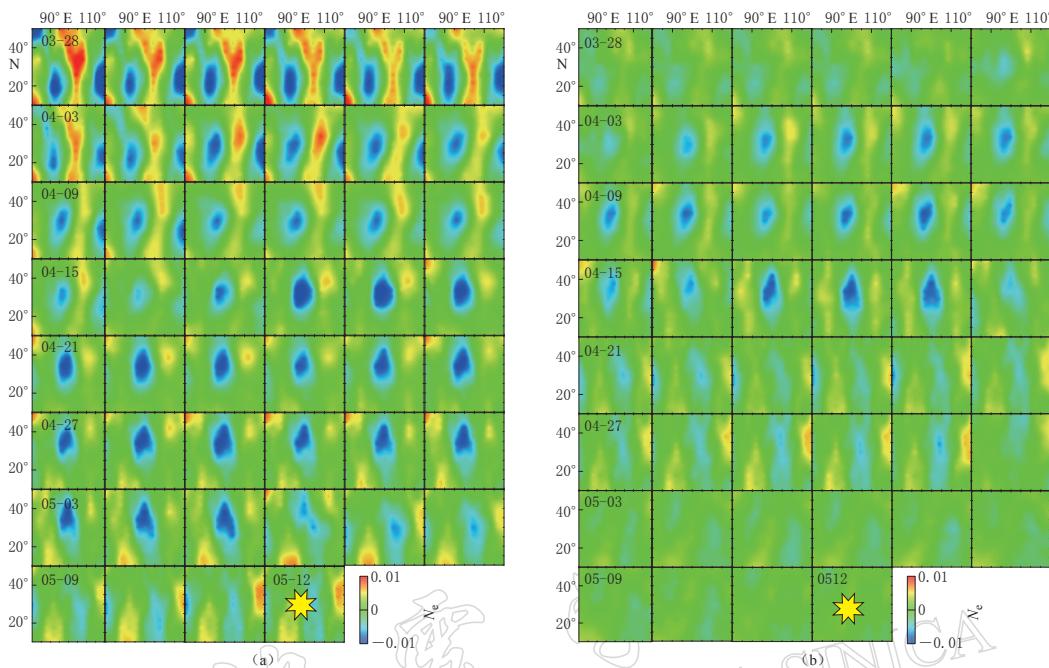


图3 汶川大地震前电子浓度原始观测值 MPI 方法处理后的时空演化图( $t_0$ : 2007-12-23,

$t_1$ : 2008-02-24,  $t_2$ : 2008-03-28)(a)与电子浓度基于差异场的 MPI 方法异常演化图

( $t_0$ : 2007-12-23,  $t_1$ : 2008-03-12,  $t_2$ : 2008-03-28)(b)(引自尼鲁帕尔·买买吐孙, 2012)

Fig. 3 The spatio-temporal variation images of original electron density ( $N_e$ ) processed by MPI method ( $t_0$ : 2007-12-23;  $t_1$ : 2008-02-24;  $t_2$ : 2008-03-28) (a) and the spatio-temporal variation images of the differential data (difference between the observation data and daily background field data) processed by MPI method ( $t_0$ : 2007-12-23;  $t_1$ : 2008-03-12;  $t_2$ : 2008-03-28) (b) (after Nilupar, 2012) before the Wenchuan earthquake

究, 总体而言, 在震例研究上, 地震电离层的前兆一般都出现在大震前很短的时间内, 可在接近地震震中的上空区域内观测到。而在武安绪等(2011)、尼鲁帕尔(2012)利用MPI方法, 借助DEMETER卫星观测数据提取地震电离层扰动异常的震例中, 其结果显示异常出现时间在震前一个月左右, 相对于前人其它方法的结果显示异常出现时间一般在震前几小时至数天内(Chuo *et al*, 2001; Pulinets, 2004), 这一突出特点将使其在短临地震预报中更具实用价值(尼鲁帕尔·买买吐孙, 张永仙, 2012)。通过利用MPI方法对实际震例的定量计算与分析, 可以获得以下结论:

1) MPI方法重新构建了同一时刻地震电离层参数的空间变化, 客观反映地震电离层异常的时空演化过程, 利于异常的识别, 克服了其它处理方法仅获得单轨道瞬时变化的离散性及获取信息不完备性的缺陷。

2) MPI方法在应用于提取电离层各参量异常所获得的10个震例结果表明, 经过该方法处理后的电子浓度、电子温度时空演化图像表现出震前异常形态为持续显著异常→异常消失(趋于平静)→出现异常→震前几天平静(武安绪等, 2011)。与直接分析原始观测数据得到的图像相比, 该现象更能反映出震前电离层扰动异常信息, 对地震发生时间具有一定可操作性。

3) MPI 方法在电磁卫星数据处理过程中, 其计算参数  $t_1 - t_0$ (背景资料时段)和  $t_2 - t_1$ (变化资料时段)的选取对异常图像的时空演化过程有一定影响, 但是不同的参数选取均可获得地震电离层异常图像的稳定变化过程, 显示了 MPI 方法的稳定性和可靠性, 在电离层数据地震异常提取中具有应用前景。

虽然前人所得到的震例研究结果显示 PI 方法具有较高的实用价值, 但目前将应用于地震目录中的 PI 方法进行改进引入到电磁观测资料提取中的研究尚处于探索阶段, 还需要继续从以下几个方面进行深入探讨与研究:

1) 武安绪等(2011)、尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)已通过回溯震例检验、方法测试与特征信号分析, 证实了 MPI 方法应用到地震电离层前兆观测异常提取的可行性。但在 2006—2010 年 4 年期间, 在纬度( $60^{\circ}$ S,  $60^{\circ}$ N)范围内全球  $M7.0$  以上和国内  $M6.0$  以上浅源地震共发生 119 次, 其对震例的研究十分有限, 还没有得到普遍的验证, 也未获得电离层异常与地震关系的统计特征, 尚需对震例作进一步充分研究。

2) 在剔除背景场时, 尼鲁帕尔·买买吐孙(2012)的研究只考虑剔除年变的背景, 未考虑剔除长趋势变化的背景, 因此在算法上还有待改进, 以便提取到明显的地震电离层异常。

3) 目前关于岩石圈-大气层-电离层的耦合机制尚处于探索之中。MPI 方法处理的震例研究结果表明, 高空电磁卫星客观上确实可以观测到地壳内部地震在孕育过程中岩石破裂产生的可能异常变化, 但在今后的深入研究中还需与其它方法研究的相关成果进行对比分析, 并结合诸如地壳形变、地下流体、气体等地面观测资料, 以期能够探索两者之间的内在联系, 推动我国地震预报事业的发展。

## 参 考 文 献

- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学:D 辑, **39**(12): 1633–1658.
- Chen Y T. 2009. Earthquake prediction: Retrospect and prospect[J]. *Science in China : Series D*, **39**(12): 1633–1658 (in Chinese).
- 丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 张晶, 余素荣, 李纲, 关华平. 2006. 地震电磁前兆研究进展[J]. 电波科学学报, **21**(5): 791–801.
- Ding J H, Shen X H, Pan W Y, Zhang J, Yu S R, Li G, Guan H P. 2006. Seismo-electromagnetism precursor research progress[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **21**(5): 791–801 (in Chinese).
- 方涵先, 翁利斌, 王威, 张建斌, 韦浩. 2010. 电离层在地震短临预报中的应用[J]. 科学技术与工程, **10**(27): 6694–6706.
- Fang H X, Weng L B, Wang W, Zhang J B, Wei H. 2010. The application of ionosphere in short-term and imminent earthquake prediction[J]. *Science Technology and Engineering*, **10**(27): 6694–6706 (in Chinese).
- 郭亚红. 2006. 地震前的电磁效应[J]. 地震地质, **28**(3): 481–486.
- Guo Y H. 2006. Pre-seismic electromagnetic effect[J]. *Seismology and Geology*, **28**(3): 481–486 (in Chinese).
- 蒋长胜, 吴忠良. 2008. 对地震预测的一个统计物理算法在川滇地区的回溯性预测检验[J]. 中国科学:D 辑, **38**(7): 852–861.
- Jing C S, Wu Z L. 2008. Retrospective forecasting test of a statistical physics model for earthquake in Sichuan–Yunnan region[J]. *Science in China : Series D*, **51**(10): 1401–1410.
- 尼鲁帕尔·买买吐孙. 2012. PI 算法提取 DEMETER 卫星地震电离层扰动异常的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 25–53.
- Nilupar T. 2012. *Study on Pattern Informatics (PI) Method for Detecting Seismo-Ionospheric Disturbances in DEME-*

- TER Satellite Data[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration; 25–53 (in Chinese).
- 尼鲁帕尔·买买吐孙, 张永仙. 2012. 地震电磁卫星电离层扰动研究进展综述[J]. 地震, **32**(1): 103–117.
- Nilupar T, Zhang Y X. 2012. Recent research advances on ionospheric disturbances from seismo-electromagnetic satellite [J]. *Earthquake*, **32**(1): 103–117 (in Chinese).
- 欧阳新艳. 2008. 利用DEMETER卫星数据提取地震异常的方法初探: 以普洱地震为例[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 30–55.
- Ouyang X Y. 2008. *Study on Methods for Extracting Earthquake-Related Anomalies Using Observations of DEMETER Satellite Illustrated by the Case of Pu'er*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration: 30–55 (in Chinese).
- 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[J]. 地震学报, **30**(4): 424–436.
- Ouyang X Y, Zhang X M, Shen X H, Liu J, Qian J D, Cai J A, Zhao S F. 2008. Study on ionospheric  $N_e$  disturbances before 2007 Pu'er, Yunnan of China, earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(4): 424–436 (in Chinese).
- 王春红. 2009. 基于DEMETER卫星地震电磁数据处理方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学信息科学与工程学院: 7–16.
- Wang C H. 2009. *Research on Progressing Method for Seismo-Magnetic Data on DEMETER Satellite*[D]. Harbin: School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology: 7–16 (in Chinese).
- 武安绪, 张永仙, 周元泽, 张小涛, 李国江. 2011. 基于改进型图像信息方法的汶川地震前电离层参数时空特征研究[J]. 地球物理学报, **54**(10): 2445–2457.
- Wu A X, Zhang Y X, Zhou Y Z, Zhang X T, Li G J. 2011. On the spatial-temporal characteristics of ionospheric parameters before Wenchuan earthquake with the MPI method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(10): 2445–2457 (in Chinese).
- 熊攀. 2009. 小波方法在地震遥感信息提取中的应用[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 7–18.
- Xiong P. 2009. *Wavelet-Based Methods for Detecting Earthquake Information in Remote Sensing Data*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration: 7–18 (in Chinese).
- 曾中超, 张蓓, 方广有, 王东峰, 阴和俊. 2009. 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, **52**(1): 11–19.
- Zeng Z C, Zhang B, Fang G Y, Wang D F, Yin H J. 2009. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 11–19 (in Chinese).
- 张小涛. 2009. 图像信息(PI)方法在我国大陆部分地区的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 4–49.
- Zhang X T. 2009. *Study on the Earthquake Potential Regions in Most Parts of China by Pattern Informatics Method*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration: 4–49 (in Chinese).
- 张学民, 刘静, 钱家栋, 申旭辉, 蔡晋安, 欧阳新艳, 赵庶凡. 2008. 西藏改则6.9级地震前的电离层电磁扰动[J]. 地震, **28**(3): 14–22.
- Zhang X M, Liu J, Qian J D, Shen X H, Cai J A, Ouyang X Y, Zhao S F. 2008. Ionospheric electromagnetic disturbance before Gaize earthquake with  $M_s$ 6.9, Tibet[J]. *Earthquake*, **28**(3): 14–22 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 钱家栋, 路立, 陈化然, 欧阳新艳. 2009. 我国地震电磁卫星数据分析及应用研究进展[J]. 地震, **29**(增刊): 34–45.
- Zhang X M, Shen X H, Qian J D, Lu L, Chen H R, Ouyang X Y. 2009. Advances in the analysis and application of seismo-electromagnetic satellite data in China[J]. *Earthquake*, **29**(Suppl.): 34–45 (in Chinese).
- 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 2007. 电磁卫星和地震预测[J]. 地球物理学进展, **22**(3): 667–673.
- Zhao G Z, Chen X B, Cai J T. 2007. Electromagnetic observation by satellite and earthquake prediction[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(3): 667–673 (in Chinese).
- 朱荣. 2007. 从卫星观测数据提取地震电离层前兆信息的初探[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 1–44.
- Zhu R. 2007. *Preliminary Study of Extract Earthquake-Related Information in Ionospheric from Satellite Data*[D].

- Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 1–44 (in Chinese).
- 朱荣, 杨冬梅, 荆凤, 欧阳新艳. 2007. 从卫星观测数据提取地震前兆信息的震例研究[J]. 地震地磁观测与研究, **28**(4): 7–14.
- Zhu R, Yang D M, Jing F, Ouyang X Y. 2007. Analysis of case studies of search for earthquake precursors from satellite data[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **28**(4): 7–14 (in Chinese).
- 朱荣, 杨冬梅, 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.
- Zhu R, Yang D M, Jing F, Yang J Y, Ouyang X Y. 2008. Ionospheric perturbations before Pu'er earthquake observed by the satellite DEMETER[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(1): 76–81 (in Chinese).
- 卓贤军, 赵国泽, 王继军, 汤吉, 詹艳. 2005. 地震预测中的电磁卫星[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(2): 1–5.
- Zhuo X J, Zhao G Z, Wang J J, Tang J, Zhan Y. 2005. Seismo-electromagnetic satellite in earthquake prediction[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(2): 1–5 (in Chinese).
- Chen C C, Rundle J B, Holliday J R, Nanjo K Z, Turcotte D L, Li S C, Tiampo K F. 2005. The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(22): L22315. doi:10.1029/2005GL023991.
- Chuo Y J, Chen Y I, Liu J Y, Pulinets S A. 2001. Ionospheric foF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area [J]. *Adv Space Res*, **27**(6): 1305–1310.
- Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F. 2005. Earthquake forecasting and its verification[J]. *Nonlinear Proc Geoph*, **12**(6): 965–977.
- Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R, Turcotte D L. 2006. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2417–2432.
- Pulinets S A. 1998. Seismic activity as a source of the ionospheric variability[J]. *Adv Space Res*, **22**(6): 903–906. doi:10.1016/S0273-1177(98)00121-5.
- Pulinets S A. 2004. Ionospheric precursors of earthquakes: Recent advances in theory and practical applications[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, **15**(3): 413–435.
- Rundle J B, Klein W, Turcotte D L. 2000a. Precursory seismic activation and critical-point phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**(11/12): 2165–2182.
- Rundle J B, Klein W, Gross S J, Tiampo K F. 2000b. Dynamics of seismicity patterns in systems of earthquake faults[C]//*Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*. Washington: AGU: 127–146.
- Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Martins J S S. 2002. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near-mean field dynamics and its implications for earthquakes, neuro-biology, and forecasting[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **99**(S1): 2514–2521.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S, Gross S J, Klein W. 2002. Mean-field threshold systems and phase dynamics: An application to earthquake fault systems[J]. *Europhys Lett*, **60**(3): 481–487.
- Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J, Yin X C. 2011. Retrospective study on the predictability of pattern informatics to the Wenchuan M8.0 and Yutian M7.3 earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **170**(1/2): 197–208. doi:10.1007/s00024-011-0444-6.