

# 印度尼西亚 $M_w$ 9.0 地震序列与 增温异常和天体引潮力的相关关系研究

马未宇<sup>1,2</sup>, 徐秀登<sup>2</sup>, 徐保华<sup>2</sup>, 张行才<sup>2</sup>, 徐杰<sup>3</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 321000; 2. 浙江师范大学, 浙江 金华 321004;

3. 中国地震局地震研究所, 北京 100029)

**摘要:**初步分析了2004年印尼苏门答腊岛西海岸  $M_w$  9.0 大地震的地质构造环境, 回顾性研究了震前 NCEP 增温异常和天体引潮力附加构造应力变化。结果表明: 主震临震期间 NCEP 全球分析温度资料(1 000 hPa) 沿岛弧地震构造带具有明显增温异常和清晰的初始增温→加强→高峰→衰减→发震的时空演变规律; 地震序列活动与增温异常起伏变化对应良好; 主震和强余震皆发生在发震断裂带上的天体引潮力附加应力绝对值最大时段。此典型大震再次说明: NCEP 温度资料与天体引潮力结合是地震短临预测的一个有希望的新思路。

**关键词:** 增温异常; 天体引潮力; 印度尼西亚 9.0 级地震; 地震序列

中图分类号: P423.7; P315.72\*8 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)02-0129-06

## Relationship between the Indonesia $M_w$ 9.0 Earthquake Sequence and the Temperature Increasing Anomaly with Astro-tidal-triggering

MA Wei-yu<sup>1,2</sup>, XU Xiu-deng<sup>2</sup>, XU Bao-hua<sup>2</sup>, ZHANG Xing-cai<sup>2</sup>, XU Jie<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 321000, China; 2. Zhejiang Normal University, Zhejiang Jinhua 321004, China;

3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The geological structure environment of Indonesia  $M_w$  9.0 earthquake on December 26, 2004, locate at west coast of northern Sumatra, is preliminary analyzed, and the changes of the NCEP data and the additive tectonic stress from astro-tidal-triggering are retrospectively researched. The result shows an evident temperature abnormal increase and spatial-time evolution rule of the original temperature rise→enhancing rise→pinnacle rising→attenuation, calmness→earthquake occurrence. Both main earthquake and strong aftershocks occurred at the time that the astro-tidal-triggering reach the absolute value apex. This special earthquake proved that a new thinking to utilize the NCEP data and the astro-tidal-triggering for short-term and impending earthquake prediction is feasible.

**Key words:** Temperature increasing anomaly; Astro-tidal-triggering; Indonesia  $M_w$  9.0 earthquake; Earthquake sequence

## 0 引言

2004年12月26日印度尼西亚苏门答腊岛西海岸发生了震动全球、震惊世界的  $M_w$  9.0 的大地震, 为上世纪后半叶以来的第五次大震, 近40年来最强的地震。大震引发了继1960年智利地震海啸

以后44年来最大规模海啸, 跨越辽阔的印度洋直达非洲, 使印度洋沿岸亚洲7国(印度尼西亚、马来西亚、斯里兰卡、印度、孟加拉、泰国、马尔代夫)和非洲3国(索马里、坦桑尼亚、肯尼亚和塞舌尔群岛等)遭受严重袭击。据统计死亡人数已达28万多,

收稿日期: 2006-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(40172101)

作者简介: 马未宇(1971—), 男(汉族), 甘肃兰州人, 博士, 讲师, 研究方向卫星遥感。

经济损失难计其数。

2003年前我们主要利用GMS、FY-2、NOAA等卫星云图的红外辐射异常图像进行地震预测。由于红外辐射难以穿透云层,故用卫星红外异常图像监测局限性较大。从2003年6月始开发试用美国NCEP全球再分析温度资料,探索以地震地质为基础、NCEP增温异常为主导、天体引潮力为诱导的地震预测新思路。

由于这次地震发生于上空对流云系发育的赤道

地区,我们以前常用的气象卫星云图难以发现,震后用新开发的NCEP资料回顾性总结显示:震前增温异常明显,时空规律较清晰;地震序列活动与增温异常起伏变化对应良好;天体引潮力附加构造应力诱震作用显著。

## 1 地震参数和地震构造环境

### 1.1 地震序列

### 1.2 地震构造环境与发震原因初析

表1 地震序列(据中国地震信息网)

序号	发震时间	震级	震中地理位置	纬度(N)	经度(E)	深度/km
1	2004-12-26 00:58:50.7	$M_s 8.8$	苏门答腊岛西海岸	3.3°	95.8°	10
2	2004-12-26 02:51:59.2	$M_B 6.0$	印度安达曼岛	12.5°	92.6°	10
3	2004-12-26 03:08:42.1	$M_B 6.1$	印度安达曼岛	13.8°	93.0°	10
4	2004-12-26 04:21:26.0	$M_s 7.3$	印度尼科巴群岛	6.9°	93.0°	10
5	2004-12-26 10:19:29.7	$M_B 6.2$	印度安达曼岛	13.5°	92.8°	10
6	2004-12-26 11:05:00.5	$M_B 6.3$	印度安达曼岛	13.5°	92.9°	10
7	2004-12-27 00:32:13.1	$M_B 6.0$	印尼苏门答腊以北	5.5°	94.5°	10
8	2004-12-27 00:49:26.7	$M_B 6.1$	印度安达曼岛	13.0°	92.4°	10
9	2004-12-27 09:39:03.3	$M_B 6.3$	印尼苏门答腊以北	5.4°	94.7°	10
10	2005-01-01 14:25:47.2	$M_s 7.0$	印尼苏门答腊以西海中	5.2°	92.3°	10

被称作“千岛之国”的印度尼西亚所处地震构造环境属于岛弧俯冲型地震构造带<sup>[1]</sup>,整个岛弧呈向西南突出的“C”字型展布。以巽他海沟为界,西-西南侧为印度-澳大利亚板块,东北侧是欧亚板块组成部分的东南亚板块。印度尼西亚岛弧俯冲带北伸与喜马拉雅碰撞带相连,东延与西太平洋俯冲带相接。因其处于全球最大的两地震构造带靠拢汇聚地域,故构造活动及其派生的火山、地震活动都很强烈。频度高强度大是该地震构造带活动的一大特点,1900以来8级大震就有10次。现今苏门答腊震区西侧的印-澳板块以大约6 cm/a的速率呈NNE向以小角度(30度左右倾角)向东南亚板块下俯冲<sup>[2]</sup>。据美国USGS网测定的印度尼西亚地面加速度分布图(图1)可见,整个印尼群岛的运动加速度震前有很大提高,特别是震中附近的北苏门答腊地区的震前加速度超过50年均值的24%~32%。值得注意的是苏门答腊西南有一NE向断裂,是划分印度和澳大利亚板块的边界断裂,与巽他岛弧相交,形成三联点,其海底延长线正指向主震震中,是一个应力更易集中,从而地震活动性更强的地段之一。

印度尼西亚有四大板块(欧亚、印度、太平洋和澳大利亚)在该区连接,有两大地震带穿过该国,因此印度尼西亚是世界上多地震国家之一。近年来,GPS测量及其珊瑚礁资料分析<sup>[3]</sup>沿苏门答腊俯冲带存在面积很大的闭锁的断层面,印-澳板块斜向朝

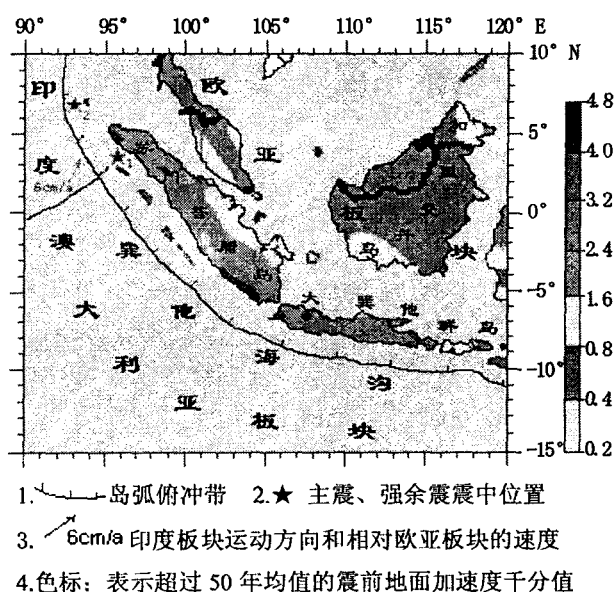


图1 印度尼西亚地震地质构造环境与震前地面加速度分布图

Fig.1 Sesimological tectonic environments and ground accelerati on before the Indonesia earthquake.

东南亚板块俯冲,其大部分运动转换为沿俯冲带的变形,在闭锁区域积累了巨大的弹性应变能;2004年,该 $M_s 8.9$ 地震前就具有 $M_s \geq 7.0$ 的地震7次,且具有快速从东部汤加群岛向西部苏门答腊群岛西北边缘迁移的特点<sup>[4]</sup>。据徐道一研究员用地震二倍法测算<sup>①</sup>,该地区2004年已到8级以上大震的复发期。故在天体引潮力等外力诱发下,上述闭锁断

层区的突然破裂和大尺度滑动是导致2004年12月26日地震的直接动力过程<sup>[2]</sup>。

## 2 震前 NCEP 增温异常时空演变

### 2.1 NCEP 温度分析资料及其增温异常图像的准备

NCEP 全球再分析资料是美国国家环境预测中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)的合作产品<sup>[5]</sup>,采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理,包括大量各等压面坐标上的再分析场和第一猜想场。该数据以标准的二进制形式(GRIB)存储在 $1^\circ \times 1^\circ \text{lon./lat.}$  网格点上。每天有4个时次(世界时00 h、06 h、12 h、18 h)的数据,通过网络接收,具有较强的准实时特点。虽然精度较差,但对于研究区域性的增温时空演变规律还是有效的。NCEP 资料优点是统观全球、时空连续、标准统一,特别是削弱了利用卫星红外异常研究地震前兆异常的云层阻挡,可一览无遗地观测震兆增温异常的时空演变。

为了降低地形、地物等因素比辐射率不同形成的静态增温“异常”,以有效提取由地震构造活动引起的异常增温,我们采用 NCEP 增温异常系列图像与正常背景相减获取  $\Delta T$  异常图像,再作动态分析的方法。本次地震在逐日连续观测基础上选取震前

2004年12月12日0时(世界时,下同)的温度为该图区的正常背景,因为这一天代表12月中上旬该图区范围(取主震区为中心, $10^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{S}, 90^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$ )、零点时刻相对稳定的温度背景值。然后将2004年12月13日—2005年1月2日(最后一次强余震后1天)期间,将逐日、同一时次、相同范围和相同海拔高度(1 000 hPa)的温度值与之相减,获得该时段与地震序列相应的增温动态系列图像,作为该次大震及其强余震序列临震增温异常分析的客观依据。

### 2.2 临震增温动态与地震活动关系分析

据对我国6级以上地震和国外  $M_s \geq 7.0$  地震统计分析,凡临震增温异常明显者皆具有共同的时空规律:异常空间展布上,从分散—扩展—集中成带,沿一定的地震构造带方向迁移;时间演变上:经历初始增温—加强—高峰—衰减—平静等阶段再发震,少数呈多旋回性和脉动性<sup>[6]</sup>。

对这次地震序列增温异常时空动态演变分析,主要关注安达曼群岛—苏门答腊东南岛弧俯冲带及其附近范围(在 $10^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{S}, 90^\circ\text{E} \sim 115^\circ\text{E}$ ,背景温度 $-1^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ )增温异常变化即可,该时段印度尼西亚所在的赤道上空对流云系发育,普遍被云层覆盖,气象背景相对稳定和一致(图2),因此沿着俯冲构造带的串珠状和带状增温异常是由临震构造活动造成的,与气象增温无关。

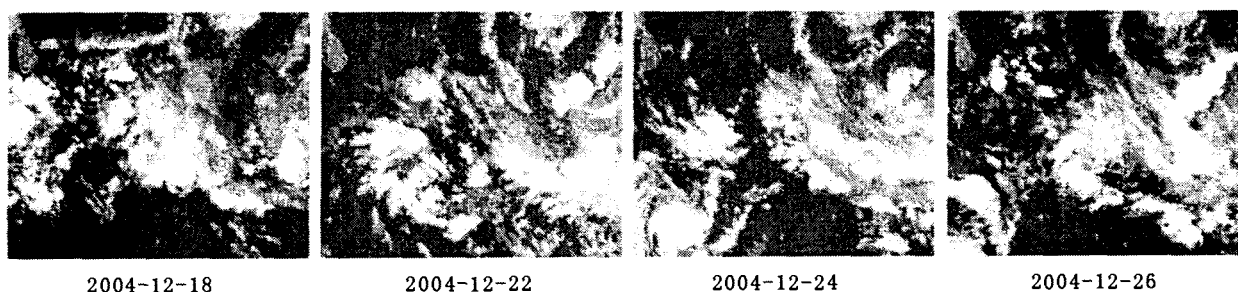


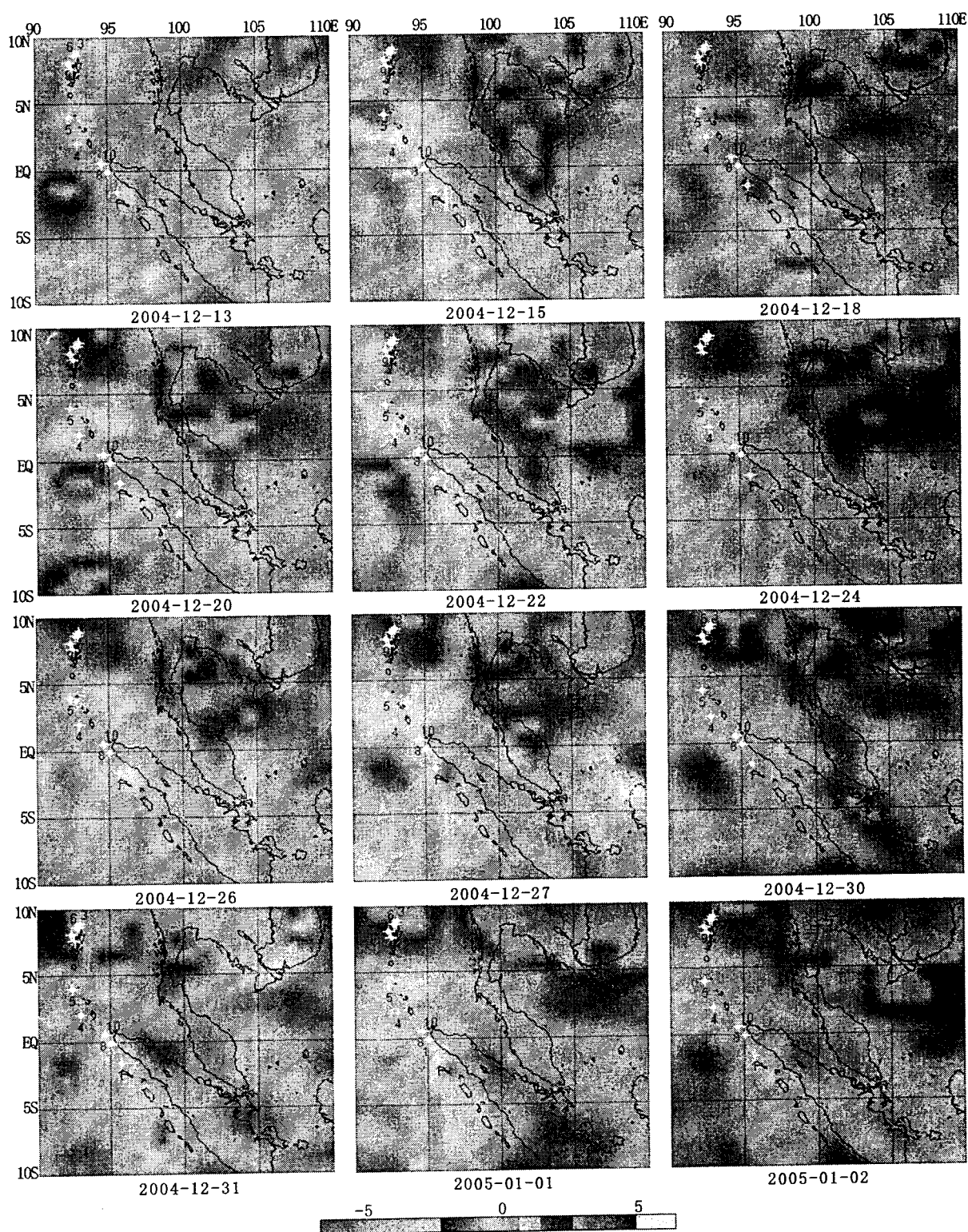
图2 静止气象卫星红外云图

Fig. 2 The infrared cloud imagery of geostationary meteorological satellite.

此次地震增温异常演变也清晰显示出上述一般的时空规律(图3):①起始增温(12月13—14日),沿NW向岛弧俯冲带,呈现分散状、面积不大、 $\Delta T$ 约 $2^\circ\text{C}$ 的三处增温异常;②加强增温(15—17日):增温展布从分散到扩展,增温面积、增温幅度从小到大,如西北端(图标“2”)异常面积约25万 $\text{km}^2$ , $\Delta T$ 最高达 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ ;③高峰增温(12月18日):异常面积达到40万多 $\text{km}^2$ ,增温幅度三处 $\Delta T$ 皆达 $4^\circ\text{C}$ 多;

④衰减(12月19—20日):增温面积、幅度皆下降,异常区缩至2处, $\Delta T$ 仅 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ ;⑤到21—22日异常面积稍有增加,属脉动性增温;⑥23—26日继续衰减(见041224图),到26日0时,发震前衰减到13日初始增温状态。因震后27日有三次 $M_s \geq 6.0$

① 中国地球物理学会天灾预测委员会. 印尼大地震专题学术研讨会论文. 2005.



☆1—☆10为震中位置, 序号与表2一致

图3 印度尼西亚  $M_w$ 9.0 地震前增温异常时空演变图

Fig. 3 Spatial - time evolution of temperature anomaly increase of Indonesia  $M_w$ 9.0 earthquake.

强余震,故26日尚存初始增温现象。27日0时增温进一步增强,面积近50万  $\text{km}^2$ ,最高处  $\Delta T$  约4

$^{\circ}\text{C}$ 。这是27日当日三次(0:32,0:49,9:39)  $M_s \geq 6.0$  强余震的积能反映。27日9时39分地震后迅速衰

减,到了 30 日基本恢复平静。但 31 日平行岛弧又出现面积达 25 万多  $\text{km}^2$  增温异常区,  $\Delta T$  最高达  $4^\circ\text{C}$ , 预示着又在孕育新的强余震。到 2005 年 1 月 1 日面积进一步扩大和增强,几近重复 27 日状况,14 小时后于当日 14:52 在异常面积最大的 NW 向的板块俯冲带与 NE 向异常带交汇处发生  $M_s 7.0$  大震。震后迅速衰减,第二天(1 月 2 日 0 时)就基本恢复正常;到 3 月 21 日前(3 月 28 日  $M_s 8.5$  地震震前 9 天)一直保持这种状态。随后进入  $M_s 8.5$  地震序列的活动及其相应的增温异常演变规律(另文描述)。

### 3 天体引潮力附加构造应力

对天体引潮力附加构造应力的诱震作用的分析研究,则是根据开尔文的计算方法<sup>[7-8]</sup>,先计算出天体日、月对地球引潮力总和,再利用震源机制解将其分解到增温异常区发震构造的主压、主张应力轴上,探索该附加应力  $\partial_p$  与  $\partial_T$  的大小、方向和发震时间与发震区域的关系。计算方程如下:

$$\begin{aligned} \partial_p = & (-\cos[V]\sin[Q] - \cos[Q]\sin[H] \\ & \sin[V])^2\delta_{xx} + (\cos[Q]\cos[V] - \\ & \sin[H]\sin[Q]\sin[V])^2\delta_{yy} + \\ & \cos[H]^2\sin[V]^2\delta_{zz} \\ \partial_T = & (-\cos[Q]\cos[V]\sin[H] + \sin[Q] \\ & \sin[V])^2\delta_{xx} - (\cos[Q]\sin[V] + \\ & \sin[H]\sin[Q]\cos[V])^2\delta_{yy} + \\ & \cos[H]^2\cos[V]^2\delta_{zz} \end{aligned}$$

$Q, V, H$  为坐标变换的旋转角度<sup>[9]</sup>;  $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$  为震源直角坐标系下日、月潮汐应力分量<sup>[7]</sup>。

对 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚  $M_w 9.0$  地震,我们利用上述方法和自编的计算程序,按照美国 USGS 提供的震源机制解,计算了 2004 年 12 月 16 日—2005 年 1 月 5 日天体引潮力对主震发震断裂的附加构造应力  $\partial_p, \partial_T$  (图 4)。

天体引潮力附加构造应力变化存在 15 天左右的周期<sup>[10]</sup>。从图 3 可见,天体引潮力在发震构造带的主压、主张应力轴上产生的附加构造应力从 2004 年 12 月 20 日—2005 年 1 月 5 日的一个变化周期中,12 月 26 日主震和之后的  $M_s 7.0$  强余震都正发生在天体引潮力附加主压应力  $\partial_p$  负值最大或较大的时段,即处在天体附加引潮力变化的低谷区。表明天体引潮力是使压应力处于高值临界状态的俯冲带地震构造带(据 NCEP 增温异常图)诱发地震的外部因素。其诱发方式是减少俯冲带地震构造带上

的正压力,从而降低处于临震状态断层面的滑动阻力而发震。

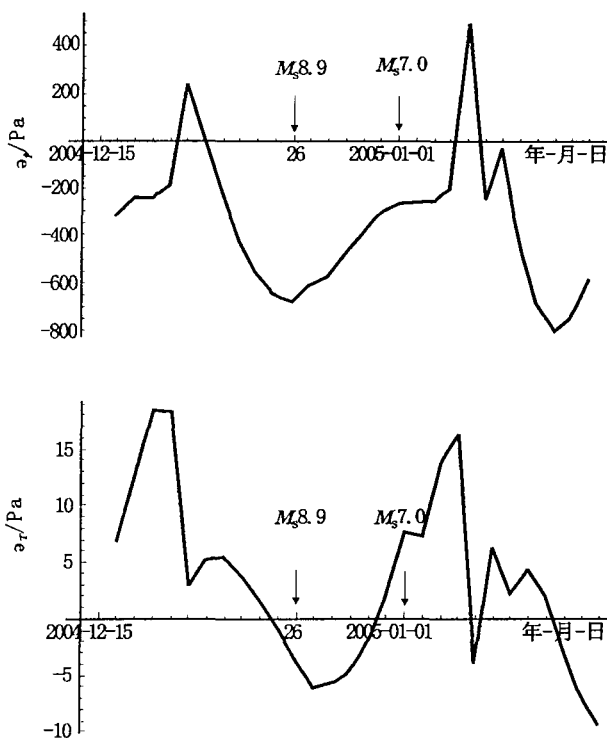


图 4 天体引潮力附加构造应力  $\partial_p, \partial_T$  值变化图

Fig. 4 The  $\partial_p, \partial_T$  value change of the additive tectonic stress from astro-tidal-triggering.

### 4 结论

对印度尼西亚主震及其震后强余震序列与增温异常动态关系的初步总结表明:

(1) NCEP 温度动态图像克服了云层阻挡,能全天候较清晰反映地震前兆与地震能量积累和释放相关的增温异常时空动态过程,主震和几次强余震的增温异常都循环式地经历从初始→加强→高峰→衰减→地震→恢复正常的周期性的演变过程;

(2) 天体引潮力作用于临界状态的地震断裂带的附加构造应力是诱发地震的重要外部因素。

(3) 该震例分析研究再一次表明,地震地质为基础、NCEP 增温异常为主导,天体引潮力附加构造应力为诱导的综合分析方法,是短临地震预测、预警的很有希望的新武器。

(下转 158 页)

添加 WEPS 颗粒的轻质混合土试样。这两种轻质混合土试样强度的差距随着泡沫塑料颗粒添加量的增加而降低。

(2) 与添加 WEPS 颗粒的轻质混合土试样相比,添加 EPS 颗粒的轻质混合土试样等向压缩曲线向右偏移,曲线的平缓段较长,卸荷曲线的斜率较大。

(3) 添加 EPS 颗粒的轻质混合土试样随着围压的增大,固结排水剪时应力-应变关系曲线由软化型向硬化型转化;剪切时体积变化由剪胀转化为剪缩。固结不排水剪时,孔压随轴向应变的增大由低围压时的先上升然后下降型,向上升并趋向于一个稳定值转化。

(4) 添加 WEPS 颗粒的轻质混合土试样,固结

排水剪时应力-应变关系曲线始终为硬化型;剪切时体积变化始终为剪缩。固结不排水剪时,孔压随轴向应变的增大而增大。

#### [参考文献]

- [1] 例えば,浜野正光,今井五郎,等. 発泡ビーズを混合した軽量安定処理土の力學特性[A]. 見:第27回土質工學研究發表會演講集[C]. 1992,251 5-251 8.
- [2] 及川研,松永康男,池上騰己,等. 岸壁背後土壓軽減のための各種セメント處理土の特性[J]. セメント系安定處理土に関するシンポジウム,1996,2:103-110.
- [3] たとえば,長坂勇二,山田純男,等. 発泡ビーズと建設發生土を用いた軽量混合土[J]. 土と基礎,1994,42(10):25-30.
- [4] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学,2001,9(2):245-248.

(上接 133 页)

#### [参考文献]

- [1] 张裕明. 欧亚地震构造图说明书[M]. 北京:地震出版社,1981.
- [2] 徐杰,高祥林. 2004年12月26日印度尼西亚8.7级大地震构造背景的初步分析[J]. 地震地质,2005,27(2):324-331.
- [3] Simoes M, Avouac J P, Cattin R, et al. The Sumatra subduction zone: A case for a locked fault zone extending into the mantle[J]. J. Geophys. Res., 2004,109:B10 402.
- [4] 林怀有,吴延河,周翠英,等. 印度洋8.7级地震及对未来地震趋势的讨论[J]. 国际地震动态,2005,(1):31-36.
- [5] Kalnay E, MKanamitsu, RKistler, et al. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996,77(3):437-471.
- [6] 徐秀登. 卫星红外异常预测短临地震的系统研究 II——异常的基本特征与新方法基本思路[J]. 科学技术与工程,2003,3(6):540-543.
- [7] 吴庆鹏. 重力学与固体潮[M]. 北京:地震出版社,1997. 206-212.
- [8] Melchior P 著. 杜品仁,等译. 行星地球的固体潮[M]. 北京:科学出版社,1984. 8-79.
- [9] 朱介寿,等. 地震学中的计算方法[M]. 北京:地震出版社,1988. 181-189.
- [10] S R McNutt, R J Beavan. Volcanic earthquakes at Pavlof Volcano correlated with the solid earth tide[J]. Nature, 1981, 294(17):615-618.