

郝晓光,胡小刚. 强震短临预报研究战略思想探讨. 地球物理学进展, 2011, 26(2):456~461, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903. 2011.02.009.

Hao X G, Hu X G. Discussion on strategic thinking for short-term prediction of great earthquakes. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(2):456~461, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903. 2011.02.009.

强震短临预报研究战略思想探讨

郝晓光, 胡小刚

(中国科学院测量与地球物理研究所, 动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077)

摘 要 正当科学界对强震短临预报研究一筹莫展的时候,大自然送来了一份珍贵的礼物——某些强震在发生前数十小时出现的“震前扰动”现象. 本文依据“武汉大地测量国家野外科学观测研究站”Lacoste-ET 重力仪观测发现汶川大地震前约 48 小时的“震前扰动”现象和随后的一系列研究,分析了地震预报反对派代表人物 Geller 所谓“地震是自组织临界状态”的论点,讨论了有关强震的“地点问题”和“时间问题”,以及强震短临预报研究的战略思想.

关键词 强震,震前扰动,短临预报,战略思想

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.009

中图分类号 P315

文献标识码 A

Discussion on strategic thinking for short-term prediction of great earthquakes

HAO Xiao-guang, HU Xiao-gang

(Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077)

Abstract Scientists have had no efficient method for short-term prediction of impending great earthquakes, however, some significant tremors were found before some great earthquakes. According to observation of tremors 48 hours before the great Wenchuan earthquake recorded by Lacoste-ET gravimeter at National field observatory of Geodesy of Wuhan and following studies on the seismic phenomenon, we initially discuss the opinions of Geller that Earth is in a state of self-organized criticality where any small earthquake has some probability of cascading into a large event and thus individual great earthquakes are probably inherently unpredictable. Then we discuss the issues of specification of the time, location of earthquake within stated limits. At last we put forward a strategic thinking for a short-term prediction of impending great earthquake.

Keywords great earthquake, tremor before earthquake, a short-term prediction of impending great earthquake, strategy

0 引 言

“通过世界各国地震学家长期不懈的努力,地震预测、特别是中长期地震预测取得了一些有意义的进展.但是地震预测是极具挑战性尚待解决的世界性科学难题,目前尚处于初期的科学探索阶段,总体水平仍然不高,特别是短期与临震预测的水平与社会需求相距甚远”^[1]. 陈运泰院士这段话再清楚不过

的表达:地震中长期预报已取得一定进展,但强震(特大地震)短临预报还没有起色.

笔者认为,强震短临预报之所以没有起色是因为工作方法不得当,而工作方法不得当是因为缺乏一种精辟的战略思想来进行指导,所以必须建立强震短临预报研究工作的战略思想.建立战略思想不是写综述文章,综述文章是要“摆事实讲道理”,而战略思想则是要“拿主意”.战略思想不追求全面严谨,

收稿日期 2010-11-25; 修回日期 2011-02-15.

基金项目 国家自然科学基金项目(90814009)、质检公益性行业科研专项基金项目(10-215)和国家科技支撑计划项目(2008BAC35B05)联合资助.

作者简介 郝晓光,男,1958年生,上海人,博士、研究员,长期从事地球物理学的理论研究.(E-mail:hxg@whigg.ac.cn)

但追求简明深刻;战略思想不是工作方法,而是站在工作方法难以企及的高度,为其勾画蓝图、指明方向。

1 建立“地震越强越可能存在短临前兆”的思想

地震能不能预报?“地震不能预报”^[2]或“地震能预报”^[3],这种争论把地震预报的研究工作搞得不知所措^[4~10]。

实际上,“地震能不能预报”并不重要,但“特大地震能不能预报”却很重要。所以必须建立这样的战略思想:不是“地震能不能预报”而是“强震能不能预报”,不是“强震能不能预报”而是“强震必须预报”!

有了这种战略思想,就不难面对地震预报反对派代表人物 Robert J. Geller 的诘难:“地球是处在一种自组织临界状态上的,其中任何小地震都有可能级联式地发展成一个大地震,这一想法得到除特大地震之外的所有地震的尺度不变性的观测事实的支持”^[10]。让我们对 Geller 的这段话进行逐句分析:

“地球是处在一种自组织临界状态”——笔者认为没有哪个严肃的科学工作者会认真对待这种莫名其妙的言论;

“任何小地震都有可能级联式地发展成一个大地震”——笔者认为这种观点不值一驳;

“这一想法得到除特大地震之外的所有地震的尺度不变性的观测事实的支持”——笔者认为这句话很有意义。

“除特大地震之外”?反对地震预报的代表人物 Geller 无意中提出了一个强震短临预报研究的重要思想:特大地震是不符合所谓“自组织临界状态”的,这就等于是在说:中小地震符合“自组织临界状态”,是无法预报的;而特大地震除外,是可以预报的。

反对地震预报的代表人物不慎提出了强震短临预报研究的战略思想,这种具有讽刺意味的现象正好出现在当前强震频发的时期,为地震预报的科学研究注入了活力。进一步的思考是,既然特大地震不符合“自组织临界状态”,那就是说强震不是随机的、是有规律可循的。于是就不难得到这样的推论:地震越强、随机性就越小、规律性就越强、预报的可能性也就越大。

梅世蓉教授在最近发表的文章中指出:“数量较多的中强地震可由各省分析预报部门负责,特大地震则由专攻地震预测预报的研究单位负责”^[11]。这就是说对待中小地震和强震不能一视同仁,前者可

以下放给地方机构去对待,而后者则必须提升到国家层面来对待。

2 强震短临预报应抛弃“即使对物理机制了解得不很透彻也可能对地震做出某种程度预报”的想法

海城地震的预报成功一度使地震学家们产生了“即使对物理机制了解得不很透彻也可能对地震做出某种程度预报”的乐观想法^[1],于是,大量的统计方法被应用到地震预报的研究工作中^[5]。

实际上,统计方法对中小地震和中长期预报研究是有一定意义的,但是对强震短临预报研究来说,统计方法无能为力。道理很简单,因为按照 Geller 的观点,中小地震符合“自组织临界状态”、是随机事件,而统计方法针对随机事件是行之有效的;然而,还是按照 Geller 的观点,特大地震不符合“自组织临界状态”、不是随机事件,所以不适用统计方法。

传统观念要求地震预报研究解决震级、地点和时间这三个基本要素(俗称地震预报“三要素”)。然而对于强震短临预报研究来说,只需解决地点和时间两个基本要素,因为既然是强震,应该定为 8 级左右,故可认为震级是已知的。抛开统计方法,必须对强震短临预报的“两要素”——“地点问题”和“时间问题”,从机制上进行深入研究。

3 对已发强震地区进行深部探测建立强震断裂模式确定未来强震预发地点

先来考虑强震短临预报研究“两要素”中的“地点问题”。

就像特大滑坡不可能出现在平原地区一样,特大地震也不可能出现在所有地区。强震的生成和发生地点,总是有其特定的地质和地球物理条件。要想了解强震生成和发生地点的机制,最直接的方法是对已发强震(例如 2001 年 8.1 级昆仑山地震和 2008 年 8.0 级汶川地震)的震源地区进行深部探测,研究建立特大地震的断裂模式,然后,利用中长期地震预报的研究成果在全国进行有选择的探测,查找类似“特大地震断裂模式”存在的地区,从而确定未来强震的预发地点。正如梅世蓉教授所指出的那样:为了寻找未来的特大地震震源区,有选择地在有关断裂开展深部构造探测是必要的^[11]。

当然,研究强震生成和发生机制,不能仅仅停留在探测和建模上,还应该研究更基础的理论问题:地

震成因与板块运动的关系问题. 例如,如果说汶川地震的原因是青藏高原的“物质东流”^[12],那“物质东流”的原因又是什么呢? 笔者近十年来对地表物质迁移的成因进行了系统和深入的研究^[13~20],希望能对进一步认识地震成因与板块运动的关系问题有所贡献.

4 深入研究台风触发地震和强震震前微破裂探索强震短临预报的“时间问题”

再来考虑强震短临预报研究“两要素”中的“时间问题”.

正当科学界对强震短临预报研究一筹莫展的时候,大自然送来了一份珍贵的礼物——某些强震在发生前数十小时出现的“震前扰动”现象,其中就包括我国近期发生的两次特大地震,2001年11月14日的8.1级昆仑山大地震和2008年5月12日的8.0级汶川大地震.

梅世蓉教授在最近发表的文章中高度重视“震前扰动”(又称为“地震前驱波”),特别指出了该现象在强震短临预报研究中的重要意义^[21],笔者也在近期对“震前扰动”现象进行了一系列深入的研究^[22~33].那么,“震前扰动”是怎么回事?其发生机理又是什么呢?

1930年以后,Banerji、Ramirez和Deacon等人的论文指出,台风产生的海浪可以引起地脉动,但这种台风海浪引起的地脉动在波浪到达海岸数小时之前就被岸上的地震仪记录到了^[34~36].1950年,英国海洋学家Languet-Higgins在总结前人研究的基础上提出了著名的海浪波动非线性干涉理论^[37],用海浪驻波解释海洋引起的地脉动现象,Hasselmann和Tanimoto等则进一步扩充和发展了这一理论^[38~40].根据Higgins的理论,台风海浪可产生两种地脉动效应:一种是海浪拍岸直接产生的脉动,称为“第一类脉动”(原生脉动),其频率与海浪周期相同,频率范围大约为0.05~0.1 Hz(周期范围10~20 s);“第一类脉动”的能量不大,在陆地上传播数十公里后就逐渐消失了.另一种是海浪相互干涉,形成海水驻波在海底产生压力而引起的脉动,称为“第二类脉动”(次生脉动),其频率为海浪频率的2倍,频率范围大约为0.1~0.5 Hz(周期范围2~10 s).“第二类脉动”的能量比“第一类脉动”的能量大约100倍^[41],在陆地上可传播数千公里.因此,地脉动信号主要以“第二类脉动”的形式出现在0.1~0.5 Hz的频率范围,“第二类脉动”以瑞利波的形式向海岸传

播,瑞利波的速度比海浪的速度要快得多;所以台风海浪引起的地脉动(第二类脉动)在波浪到达海岸数小时之前就能够被岸上的地震仪记录到.

国内有专家在不了解上述理论的情况下对汶川大地震“震前扰动”现象的研究提出了质疑^[42,43],这种质疑正好说明了我国强震短临预报研究所面临的困境.然而,随着我们研究的深入,终于出现了有价值的线索,具体说有以下几点:

(1)从8.1级昆仑山地震(2001.11.14)、8.0级汶川地震(2008.5.12)、7.9级汤加地震(2009.3.19)、到7.3级海地地震(2010.1.12)，“震前扰动”现象都明显地出现在强震爆发前的数十个小时,这难道都是偶然巧合吗?

(2)采用全国200多个国家台和地方台站宽带地震仪的观测资料,我们对汶川大地震“震前扰动”信号的时频特征进行了细致分析,结果发现:汶川大地震“震前扰动”由两种信号构成,且两种扰动信号有着不同的动态特征.其中优势频率为0.2~0.25 Hz扰动信号的能量变化与台风的路径和强度的变化相关,该信号始于5月9日,并随台风的增强而逐渐增强,其能量最大值出现在5月11日(台风距离中国大陆最近的时候),随台风离去和风力的减弱开始逐渐减弱;这一信号在沿海地区较强,在内陆地区较弱,是一种扰动源在台风附近海底的扰动信号.第二种扰动信号的优势频率为0.12~0.17 Hz,其动态特征不同于第一种信号.第二种信号始于5月10日并在地震发生前约10小时急剧增加,其最大值出现在地震爆发时刻.这种信号在靠近震中的地区相对较强,特别是在靠近震中的四川、重庆、甘肃、陕西和湖北地区,其信号能量明显大于第一种信号的能量,大约是其2~3倍.但在沿海地区,这种扰动信号相对显得较弱.这些现象表明:这种扰动信号与台风无关,其扰动源不在海洋区域,而可能存在于靠近震中的内陆区域.为区别起见,不妨把汶川大地震“震前扰动”中的第一种信号称为“台风扰动”,而第二种信号则称为“非台风扰动”^[30].

(3)最近出版的《自然》(Nature)杂志上刊登了题为“台风触发慢地震”的论文^[44],这说明存在着台风触发地震的可能性.汶川大地震“震前扰动”的“非台风扰动”现象使我们开始考虑台风触发地震的机理问题:除了Higgins理论中的“第一类脉动”(原生脉动)和“第二类脉动”(次生脉动)外,是否还可能存在着“第三类脉动”(再生脉动)呢?驻波是行波在一定的边界条件下形成的,只要边界条件合适,瑞利波

的“行波”也可以产生“驻波”。于是我们推测:当“第二类脉动”以瑞利波“行波”的形式在陆地上传播时,受构造和断层的阻挡等因素的影响,形成了适合“驻波”的边界条件而产生了瑞利波的“驻波”,这种“驻波”对“基底”形成的压力变化则产生了“第三类脉动”;如果这种“基底”正好处在预发地震的区域之下,那么“第三类脉动”触发地震的可能性就会变为现实^[28]。

除了台风触发地震的可能性之外,“非台风扰动”现象也可能跟强震发生前可能出现的“微破裂”有关,这两种思路考虑的都是强震短临预报研究“两要素”中的“时间问题”。“一个7级大地震释放的应变能的数量级达 10^{15} J,很难置信在如此巨大的应变能释放之前不出现任何讯号”^[1]。实际上,折断一根树枝和折断一颗大树是有本质区别的,树枝在折断前可能没有任何“前兆”;而大树的折断则应该有从“开始折断”到“部分折断”再到“完全折断”的步骤和过程,而“开始折断”和“部分折断”就是“完全折断”的“前兆”。所以,强震出现“震前微破裂”的可能性应该比中小地震要大得多。有关“震前微破裂”的研究可在实验中进行^[45],但模拟强震生成和发生的岩石力学过程要比模拟中小地震困难得多,这就形成了一对矛盾,关于“震前微破裂”的可能性与实验难度的矛盾。那么,是把这对矛盾看成是阻碍强震短临预报研究的铁门、还是把这对矛盾看成是打开强震短临预报研究之门的钥匙呢?

强震短临预报研究的“地点问题”和“时间问题”就这样摆在了我们面前,我们应该停止怀疑和争吵、停止“地震能不能预报”这种问题的争议和讨论,按照一种精辟的战略思想进行毫不犹豫的工作,直到解决这个世界科学难题为止、直到战胜地震这个可恨的恶魔为止。

参 考 文 献 (References):

[1] 陈运泰. 地震预测——进展、困难与前景[J]. 地震地磁观测与研究, 2007, 28(2): 1~24.
Chen Y T. Earthquake prediction: progress, difficulties and prospect[J]. Seismological and geomagnetic observation and research (in Chinese), 2007, 28(2): 1~24.

[2] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, *et al.* Earthquakes cannot be predicted[J]. *Science*, 1997, 275, 1616~1617.

[3] Cyranoski D. A seismic shift in thinking[J]. *Nature*, 2004, 431, 1032~1034.

[4] 吴忠良, 蒋长胜, 彭汉书, 等. 与地震预测预报有关的几个物理问题[J]. 物理, 2009, 38(4): 233~237.
Wu Z L, Jiang C S, Peng H S, *et al.* The physics of

earthquake prediction[J]. *Physics (in Chinese)*, 2009, 38(4): 233~237.

[5] 吴忠良, 朱传镇, 蒋长胜, 等. 统计地震学的基本问题[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 197~206.
Wu Z L, Zhu C Z, Jiang C S, *et al.* Beyond controversies and techniques: fundamental problems of statistical seismology [J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 2008, 24 (3): 197~206.

[6] 吴忠良, 蒋长胜. 统计预测、经验预测、物理预测——近期国际地震预测预报研究的启示[J]. 中国地震, 2007, 23(3): 211~224.
Wu Z L, Jiang C S. “Statistical”, “Empirical”, and “Physical”: approaches to earthquake forecast Prediction in recent years and their implications[J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 2007, 23(3): 211~224.

[7] 吴忠良, 蒋长胜. 近期国际地震预测预报研究进展的几个侧面[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 103~112.
Wu Z L, Jiang C S. “Earthquakes cannot be predicted” to “a seismic shift in thinking”: a review of some developing aspects in earthquake forecasting and prediction study[J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 2005, 21(1): 103~112.

[8] 吴忠良, 蒋长胜. 地震前兆检验的地球动力学问题——对地震预测问题争论的评述(之三)[J]. 中国地震, 2006, 22(3): 236~241.
Wu Z L, Jiang C S. Performance evaluation and statistical test of candidate earthquake precursors: revisit in the perspective of geodynamics—critical review on the recent earthquake prediction debate [J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 2006, 22(3): 236~241.

[9] 吴忠良, 蒋长胜. 地震前兆统计检验的地球学问题——对目前地震预测问题争论的评述(之二)[J]. 中国地震, 1999, 15(1): 14~22.
Wu Z L. Seismological problems of the statistical test of earthquake precursors—a review on the current discussions about earthquake prediction (II)[J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 1999, 15(1): 14~22.

[10] 吴忠良. 自组织临界性与地震预测——对目前地震预测问题争论的评述(之一)[J]. 中国地震, 1998, 14(4): 1~10.
Wu Z L. Self organized criticality and earthquake prediction—a review on the current discussions about earthquake prediction (I)[J]. *Earthquake research in China (in Chinese)*, 1998, 14(4): 1~10.

[11] 梅世蓉, 薛 艳, 宋治平. 汶川 8.0 级与昆仑山口西 8.1 级地震前地震活动异常特征与启示[J]. 地震, 2009, 29(1): 1~14.
Mei S R, Xue Y, Song Z P. Anomalous seismic characteristics before Wenchuan M8.0 and Kunlunshan M8.1 Earthquakes and their implications [J]. *Earthquake (in Chinese)*, 2009, 29(1): 1~14.

[12] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066~1073.
Zhang P Z, Xu X W, Wen XZ, *et al.* Slip rates and

- recurrence intervals of the LongmenShan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Chinese J. Geophysics (in Chinese), 2008, 51(4): 1066~1073.
- [13] 郝晓光,许厚泽,刘大杰. 地球的密度扁率与纬向正常密度假说[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(4): 436~441.
Hao X G, Xu H Z, Liu D J. Earth's density flattening and hypothesis of latitudinal normal density[J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 2000, 30(4): 436~441.
- [14] 郝晓光,刘根友. 地球纬向正常密度函数系数的修正[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 53~56.
Hao X G, Liu G Y. Modification of coefficient of the Earth latitudinal normal density function[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 2002, 22(2): 53~56.
- [15] 郝晓光,刘根友. 地幔纬向正常密度函数[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 105~109.
Hao X G, Liu G Y. Latitudinal normal density function of mantle[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese), 2004, 33(2): 105~109
- [16] 郝晓光,刘根友. 板块运动地球重力学机制研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 84.
Hao X G, Liu G Y. Discussion on Earth gravity mechanism for plate motion[J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 2004, 11(1): 84.
- [17] 郝晓光,方剑,刘根友. 纬向正常密度假说与内波假说的比较[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 991~996.
Hao X G, Fang J, Liu G Y. Comparison between latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(4): 991~996.
- [18] 郝晓光,方剑,柳林涛,等. 再论纬向正常密度假说与内波假说的比较[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 312~316.
Hao X G, Fang J, Liu L T, et al. Discussion on latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 312~316.
- [19] 郝晓光,胡小刚,刘根友,等. 地球的正常密度[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 377~382.
Hao X G, Hu X G, Liu G Y, et al. The distribution of the Earth's normal density[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese), 2009, 38(5): 377~382.
- [20] 郝晓光,方剑,刘根友,等. 地球正常密度假说——重力学的参数椭球与纬向密度理论[M]. 北京: 测绘出版社, 2009年7月, 44~51.
Hao X G, Fang J, Liu G Y, et al. Hypothesis of Earth's normal density: the gravity theory of parameter spheroid and latitudinal density [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009, 44~51.
- [21] 梅世蓉. 新形势下地震预报战略问题的探讨. 中国地震预报探索[M]. 北京: 地震出版社, 2008, 39~54.
Mei S R. Discussion on the strategy of earthquake prediction at the new situation, explore the method of earthquake prediction in China[M]. Beijing: Seismic Press (in Chinese), 2008, 39~54.
- [22] 郝晓光,许厚泽,郝兴华,等. 重力高频扰动与地震[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(3): 9~13.
Hao X G, Xu H Z, Hao X H, et al. Gravity high-frequency disturbance and occurrence of earthquake [J]. Crustal Deformation and Earthquake (in Chinese), 2001, 21(3): 9~13.
- [23] 郝晓光,胡小刚,许厚泽,等. 汶川大地震前的重力扰动[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 129~131.
Hao X G, Hu X G, Xu H Z, et al. Gravity disturbance before the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 2008, 28(3): 129~131.
- [24] 郝晓光,胡小刚. 宽带地震仪资料证实汶川大地震“震前重力扰动”[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1332~1335.
Hao X G, Hu X G. Disturbance before the Wenchuan earthquake by broadband seismometer [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(4): 1332~1335.
- [25] 胡小刚,郝晓光. 汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1726~1734.
Hu X G, Hao X G. The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(6): 1726~1734.
- [26] 胡小刚,郝晓光. 台风 Rammasun 和台风 LingLing 对汶川大地震和昆仑山大地震“震前扰动”影响的分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1363~1375.
Hu X G, Hao X G. An analysis of the influences of typhoon Rammasun and LingLing on anomaly tremors before the great Wenchuan and Kunlunshan earthquakes [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(5): 1363~1375.
- [27] 胡小刚,郝晓光. 2009年3月19日 $M_w 7.6$ 级汤加大地震的“震前扰动”现象[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 866~870.
Hu X G, Hao X G. Observation of fore-seismic disturbance of the $M_w 7.6$ Tonga earthquake (2009/03/19) [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2009, 24(3): 866~870.
- [28] 郝晓光,胡小刚. 汶川大地震“震前扰动”存在“第三类脉动”吗[J]? 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1213~1215.
Hao X G, Hu X G. Are “third microseisms” in anomalous tremor before the great Wenchuan earthquake [J]? Progress in Geophysics (in Chinese), 2009, 24(4): 1213~1215.
- [29] 胡小刚,薛秀秀,郝晓光. IRIS 台网地震仪资料出现 2010/01/12 海地大地震“震前扰动现象”[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 134~136.
Hu X G, Xue X X, Hao X G. Observation of microseism in IRIS records before the 2010/01/12 Haiti earthquake [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2010, 25(1): 134~136.
- [30] 胡小刚,郝晓光,薛秀秀. 汶川大地震前“非台风扰动”现象的研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2875~2886.
Hu X G, Hao X G, Xue X X. The analysis of non-typhoon-induced microseisms before the 2008 great Wenchuan

- earthquake[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(12): 2875~2886.
- [31] 吴琼,胡小刚,郝晓光,等. 莲花等三台风的地磁效应与“第三类脉动”有关吗[J]? 地球物理学进展,2011,(in press).
Wu Q, Hu X G, Hao X G, et al. Is the “Third microseisms” related with the geomagnetic effect of Linfa and other three typhoons[J]? Progress in Geophysics (in Chinese), 2011, (in press).
- [32] Hao X G, Hu X G. The analysis of microseism prior to the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China. 2009 AGU Fall Meeting, 14~18 December, San Francisco, California.
- [33] Hao X G, Hu X G. Anomalous microseism before the 2010 Haiti earthquake. 2020 AGU Meeting of the Americas, 8~13 August 2010, Iguazu Falls, Brazil.
- [34] Banerji S K. Phil. Trans. A, 1930, 229, 287.
- [35] Ramirez J E. Bull. Seism. Soc. Amer. 1940, 30, 35~84.
- [36] Deacon G E R. Ann. N. Y. Acad. 1949, 51, 3, 475.
- [37] Longuet-Higgins M S. A theory of origin of microseisms[J]. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 1950, 243, 1~35.
- [38] Hasselmann K A. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. Rev. Geophys., 1963 (1):177~209.
- [39] Tanimoto T. Excitation of normal modes by nonlinear interaction of ocean waves[J]. Geophys. J. Int., 2007, 168: 571~582.
- [40] Tanimoto T. Excitation of microseisms[J]. Geophys. Res. Lett., 2007, 34, L05308.
- [41] Haubrich R A, Munk W H, Snodgrass F E. Comparative spectra of microseisms and swell [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(1):27~37.
- [42] 傅容珊,万柯松,崇加军,等. 地震前兆还是其它因素? ——与“汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探”作者商榷[J]. 地球物理学报,2009,52(2):584~589.
Fu R S, Wan K S, Chong J J, et al. Earthquake auspice or other factor? — Discuss with authors of the paper “The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China” [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(2): 584~589.
- [43] 郝晓光,胡小刚. 震前扰动现象:从模糊走向清晰——对傅容珊教授商榷文章的回答[J]. 地球物理学报,2011,(in press).
Hao X G, Hu X G. Pre-earthquake-tremor maze, from confusing to gradually crystal—answer to the comment by Professor Fu Rong-Shang on The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, (in press).
- [44] Liu C C, Linde A T, Sacks I S. Slow earthquakes triggered by typhoons. Nature. 2009, 459:833~836.
- [45] 许昭永,杨润海,王彬,等. 突发应变扰动:一种新的破裂前兆的实验研究[J]. 地震学报,1998,20(6):628~634.
Xu Z Y, Y Hi, Wang B, et al. Sudden strain disturbance: A new experimental study on rupture precursor [J]. Acta Seismologica Sinca (in Chinese), 1998,20(6):628~634.