

The Precursor of Wenchuan and Lushun Earthquakes That Helps to Predict Earthquake

Shunliang Chi^{1,2}, Liang Chi², Yi Chi³

¹Key Laboratory of Computational of Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Hebi Earthquake Administration, Hebi Henan

³Hebi Institute of Technology for Prevention of Earthquake Disaster, Hebi Henan

Email: chisl@263.net

Received: Apr. 6th, 2017; accepted: Apr. 26th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Whether there exist “earthquake precursors that facilitate earthquake prediction”? From rock experiments Ma Jin, Academician of CAS P, found that when the specimen is loaded near to its strength limit and enters a meta-instable stage, it emits characteristic signals of strain, displacement, and temperature, and then the rock specimen breaks. Before a large earthquake can we observe such signals? If we can, how do we know the stress has reached the peak strength? In 550 days before the Wenchuan earthquake the YRY 4-component strainmeter in Guzan seismic station received more than 3700 abnormal strain pulses, which were then attenuated after the earthquake. In the end of 2014 when the pulses started to appear, it is found that the k value, which characterized the self-consistency of pulse data, was greater than 0.99; whereas the k value decreased gradually till 0.4 immediately before the earthquake, and the data lost self-consistency. For self-consistency of the strain data the Earth strata should be continuous and without cracks, the loss of self-consistency indicates that the continuity of strata in the earthquake source region is increasingly damaged and a large earthquake may occur soon. About 5 months before the Wenchuan earthquake there was a quiet period without a single pulse in 5 days, then after the impulsive events increased again the great earthquake took place. This is similar to the acoustic emission phenomenon during rock loading; a quiet period appears when the load approaches to the peak strength, with continuing loading acoustic emission reappears then the rock specimen breaks. On a background of thousands of impulsive events, the loss of data self-consistency and the appearance of quiet period are two features that help to judge whether the loading of strata has entered the meta-instable stage and when it reaches to the strength limit, thus leading to the inevitable occurrence of an earthquake. In 440 days before the Lushan M7 earthquake of 2013, the Guzan station recorded again more than 1000 pulses, and a quiet period of 5 days appeared 2 months before the earthquake. By setting up a precise strain monitoring network in proper locations, we may be able to observe and identify “earthquake precursors that are useful for earthquake prediction”. Whether the knowledge acquired from Wenchuan and Lushan earthquake observations is general or specific, it remains to be tested in future practice.

Keywords

Wenchuan Earthquake, Four-Component Strain Observation, Quiet Period, Loss of Self-Consistency, Earthquake Nucleation

汶川地震和芦山地震的有助于预报的地震前兆

池顺良^{1,2}, 池亮², 池毅³

¹中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京

²鹤壁市地震局, 河南 鹤壁

³鹤壁市防震技术研究所, 河南 鹤壁

Email: chisl@263.net

收稿日期: 2017年4月6日; 录用日期: 2017年4月26日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

是否存在“有助于预报的地震前兆”? 马瑾院士由岩样加载实验发现岩石加载临近强度极值进入亚失稳阶段, 发出应变、位移、温度变化特征信号, 之后岩样破裂。大地震前是否能观测到这些信号? 观测到了, 如何识别应力已达峰值强度? 姑咱地震台YRY-4分量钻孔应变仪汶川大震前550天中接收到3700多个异常应变脉冲, 震后衰减。2014年底发现, 脉冲出现初期, 表征脉冲数据自洽性的k值大于0.99; 大震前夕k值逐渐减小至0.4, 数据失洽。地层连续无裂隙是应变数据满足自洽的条件, 失洽是震源区地层连续性破坏越来越严重, 大震将发生的标志。汶川大地震前五个月时出现5天中一个脉冲事件也没有的平静期, 脉冲事件再度增多后大地震发生。岩石加载声发射现象, 加载接近峰值强度出现声发射平静期, 继续加载声发射再现后岩样破裂。在数千脉冲事件背景下, 出现数据失洽及平静期, 这两项特征有助于判断地层加载进入亚失稳阶段及何时达到强度峰值, 地震必将发生。2013年芦山7级地震前的440天中, 姑咱台又记录到1000多个脉冲事件, 震前2个月时又出现5天平静期。在适当位置布设精密应变观测网, 有可能观测到, 并能识别出“有助预报的地震前兆”。汶川、芦山地震观测中得到的认识, 具有普遍性还是特例, 还要在实践中接受检验。

关键词

汶川地震, 四分量应变观测, 事件平静期, 数据失洽, 地震成核

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大地震能够被预测预报的前提是震前发出可被监测到的地震前兆。美国 Science 杂志在创刊 125 周年之际把“是否存在有助于预报的地震前兆”列为 125 个最具挑战性科学问题之一, 首先提出是否存在有助于预报的地震前兆这个前提条件。若这种前兆信号可被人类布设的精密观测仪器监测识别, 并据此定出相当精确的地震三要素, 大地震原则上就能被预测预报。但迄今地震学家仍未寻找到这种具有普适性的确定性地震前兆。所谓确定性地震前兆就是“在所有大地震之前必被无一例外地观测到, 并且一旦出现这种异常现象, 必无一例外地发生大地震”[1]。这样的确定性地震前兆若存在并能被观测到, 无疑有助于地震预报实现。

马瑾团队在无数次岩样压裂实验中观测到, 岩样加载临近强度极值进入亚失稳阶段, 会发出应变、位移、温度变化等特征性信号。这时即使外载不再增加, 断层亦进入不可逆自失稳演化阶段。“不可逆过程的存在是地震可预报性的基本逻辑基石。抓住亚失稳阶段的特点也就是找到了与地震发生有唯一关系的过程。以往从物理、化学以及生物角度的观测只是力学过程引起的结果, 它们与力学过程之间的关系不是唯一的, 而断层所处的应力状态才是本质…亚失稳阶段位于强度极限点(O)和失稳点(B)之间, 识别出亚失稳开始时间(O), 在实验室能屡屡提前预测失稳的开始, 问题在于在野外我们很难确定断层所处应力状态[2] [3] [4] [5]。”

岩样破裂前发出的应变、位移、温度变化等特征性信号, 就是“有助于预报岩样即将破裂”的“确定性前兆”。

实验室研究的动力学条件、构造条件、介质条件都比较简单, 野外地质构造复杂、加载条件多样、台站稀少。有没有观测到大地震发生前, 震源地应力作用下进入亚失稳应力状态, 发出“有助于预报地震前兆”的实例呢? 根据这种地震前兆我们能够判断识别出断层所处应力状态已达强度峰值, 大地震将不可避免地发生?

中国地震局“数字地震网络工程”于2006年10月28日在四川姑咱地震台安装了YRY-4型分量钻孔应变仪, 11月1日产出数据, 一年半后汶川发生8.0地震。姑咱台记录下了汶川地震前550天中异常应变数据的变化。根据异常应变数据流的时间变化特征, 可以识别出断层所处应力状态何时达到强度峰值。这在世界上是第一次。

下文这份宝贵的应变记录数据告诉我们, 汶川8.0和芦山7.0两次大地震前, 大自然发出了“有助于预报的地震前兆”。

2. 由精密应变观测数据识别震源区进入亚失稳应力状态

大地震发生, 本质上属于力学过程。震源深达数十千米, 不可能直接测量震源区绝对应力是否达到强度极限。但震源应力临近强度极限进入亚失稳阶段, 地层蠕滑、应力释放调整发出的微弱应变信号能被安装在数十至百米深隔离地表噪声的精密应变仪器观测到。观测地层应力、应变变化有望获取地震孕育过程中发出的应变活动信息, 从而了解岩层断裂活动所处应力状态。

2.1. 分量钻孔应变观测的技术特性

地层应变观测早期用伸缩仪。山洞中相距约百米的基墩间悬吊石英管作长度基准, 测量基墩间距 L 变化 ΔL , 测得地层应变 $\varepsilon = \Delta L/L$ 。为获得平面应变三分量, 需设置不同方向三台伸缩仪。伸缩仪分辨率 $\sim 10^{-10}$, 可记录应变固体潮、应变地震波及断层预滑移或慢地震释放的应变阶跃等地层应变活动。但高昂的建设费用及选点困难限制了伸缩仪广泛使用。

上世纪六十年代, 美、日、中研制钻孔应变仪。钻孔仪将测长基线缩到 0.1 米, 装到固结于地层的圆筒形探头中。从圆筒三个不同方向直径变化, 可解出地层应力应变状态变化, 分辨率可达 $\sim 10^{-11}$ [6] [7] [8] [9] [10] [11]。

YRY-4 型应变探头有互成 45° 交角四条测线, 继承张衡地动仪平面布局。测线 1、3 路, 2、4 路互相垂直。只要钻孔地层满足连续弹性变形条件, 无论出现怎样的异常应变, 只要四路观测量满足: $(S1 + S3) = (S2 + S4)$ 自洽方程, 就能确定这是地下应变变化的真实反映[12]。

我们将两组面应变数据的相关系数 k 值是否接近于 1, 来表征钻孔应变观测数据是否自洽。

经过四十年试验、改进, $(S1 + S3)$ 与 $(S2 + S4)$ 的相关系数 k 值, 无论是短期数据还是长达数年的应变数据, k 值都能超过 0.999。我国在“十五”期间布设的分量钻孔应变仪, 产出资料质量比较高, 可以比

较可靠地用于科学研究和地震预测分析。

“十五”配置的数采器采样率每分钟一次，姑咱台仪器至今已连续工作 10 年，数据完整率 99.8%。

2.2. 汶川、芦山地震前异常应变事件数的时间变化

2006 年底投入运行的 38 个 YRY-4 型分量钻孔应变观测台分布在全国各地。2008 年 5 月 12 日汶川大地震发生，最近的姑咱台在汶川震中西南 150 千米处，其它台都在 280 千米外。

姑咱台位于南北流向大渡河西岸。图 1 是姑咱台 2006 年 11 月 1 日到 2016 年 12 月 31 日长达十年整点值观测数据。纵坐标应变单位为纳应变，定义压缩向负。

应变数据由以下几部分组成：仪器安装初期的快速漂移；因温度、降雨及大渡河水位引起的年变化 [13] [14]；幅度为 $1\sim 4 \times 10^{-8}$ 的应变固体潮以及幅度更小的气压扰动应变。不同成分应变都满足自洽条件。姑咱台十年数据(S1 + S3)与(S2 + S4)的相关系数 $k = 0.9997$ 。

数据漂移、温度及水位引起年变及气压扰动应变都与地震孕育无直接关系，与汶川大地震孕育过程有关的是周期约十至数十分钟的应变脉冲与阶跃信号，这种幅度较小的信号在多年变化整点值图上显示不出，需在日记录曲线上观察。

图 2 显示典型的日常应变记录曲线。以 2007 年 1 月 1~3 日应变曲线为例，固体潮光滑而规则，(S1 + S3)、(S2 + S4)两组面应变全日相关系数 $k = 0.9995$ 。在 $t = 2119\sim 2130$ 处出现一个幅度 2.7×10^{-9} 压性阶跃，阶跃数据组的 $k = 0.9997$ ，表明是地下真实的应变变化。

应变探头用水泥固结在 40 米深坚硬花岗岩钻孔底部。钻孔近旁要加数百吨载荷才能让 40 米深处地层产生 2.7×10^{-9} 应变。这些阶跃到底是什么力引起，必须引起高度重视。

之后，阶跃和脉冲更频繁，幅度更大，几乎没有一天固体潮是光滑、规则的。图 3 是 2008 年 3 月 28 日至 31 日 4 天的记录，与一年多前图 2 中光滑的固体潮记录相比，就像心脏病人的心电图。此时离地震发生只有一个半月。

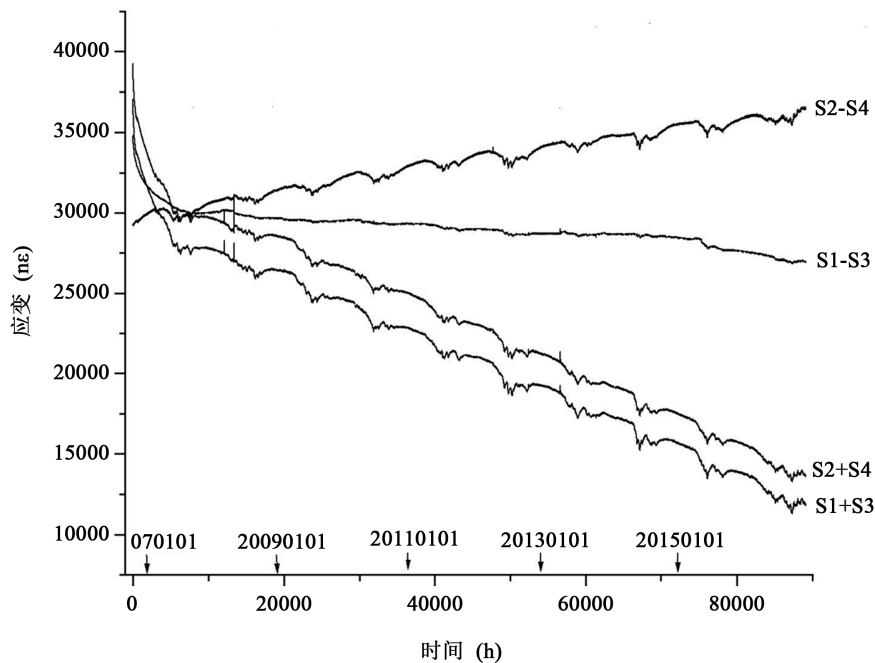


Figure 1. Guzhan station 2006/11/01 to 2016/12/31, ten years of hourly data
图 1. 姑咱台 2006 年 11 月 1 日到 2016 年 12 月 31 日十年整点值观测数据

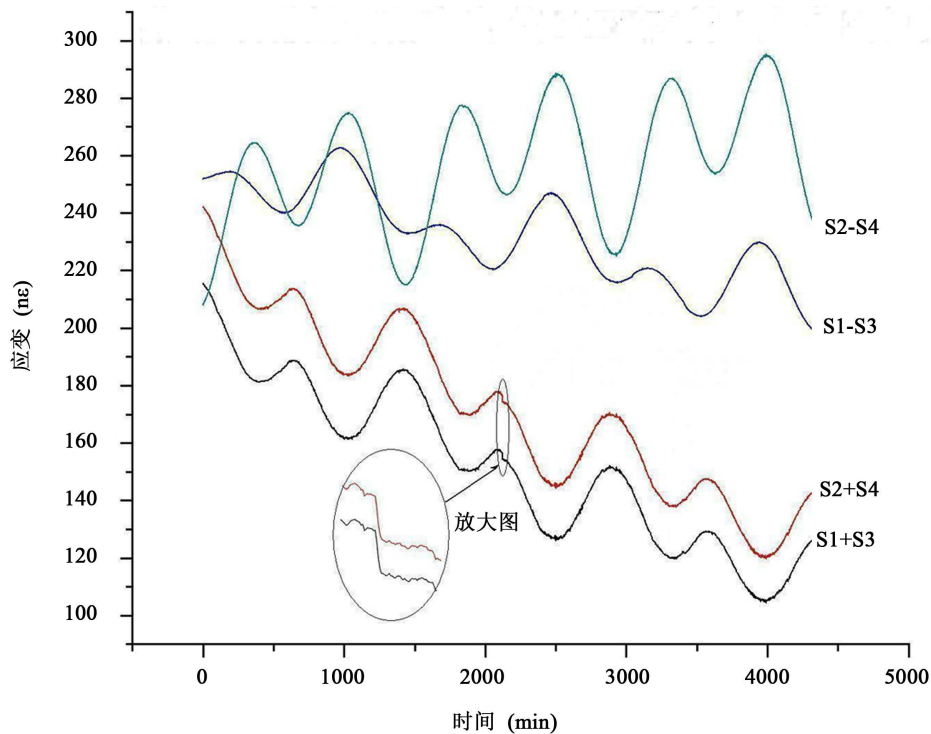


Figure 2. Guzan station 2007/01/1-3, strain data
图 2. 四川姑咱台 2007 年 1 月 1~3 日, 应变数据图形

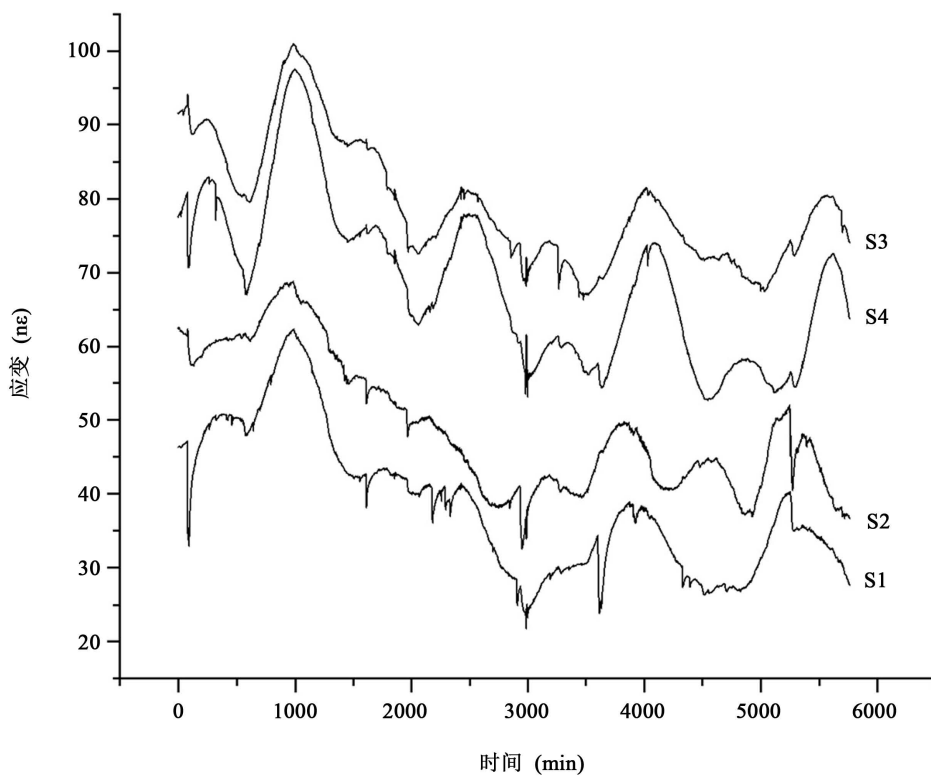


Figure 3. Guzan station 2008/3/28-31, 4 days, 1 - 4 strain data
图 3. 四川姑咱台 2008 年 3 月 28~31 日, 1~4 路应变数据图形

一个半月后，汶川 8.0 级地震爆发。图 4 是从 2006 年 11 月 7 日到 2008 年 5 月 10 日汶川地震发生前的 550 天中姑咱台每 10 天记录到的应变阶跃与脉冲事件数的变化。

图 4 显示，异常计数逐渐上升，到 2007 年 10 月，每日平均事件数达到 11 个。但在 2007 年 11 月 21 日至 25 日，脉冲和阶跃突然消失，这五天中竟然没有出现一次脉冲或阶跃事件！图 5 是这五天的记录图，固体潮记录突然变得规则而光滑，而这五天前后的潮汐图形就如图 3 所示，因叠加大量异常脉冲而“惨不忍睹”。

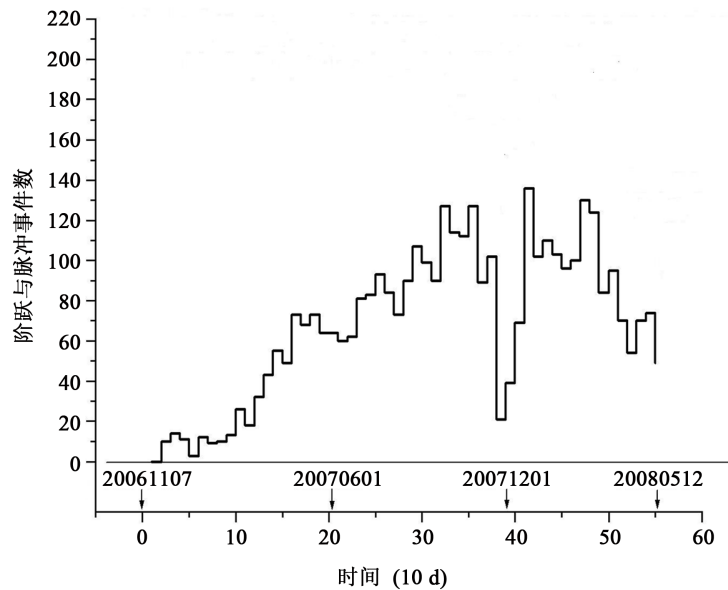


Figure 4. Before the Wenchuan earthquake, November 7, 2006 to May 10, 2008, Guzhan every 10 days record of the strain step and pulse number

图 4. 汶川地震前，2006 年 11 月 7 日至 2008 年 5 月 10 日，姑咱台每 10 天记录到应变阶跃与脉冲数的变化

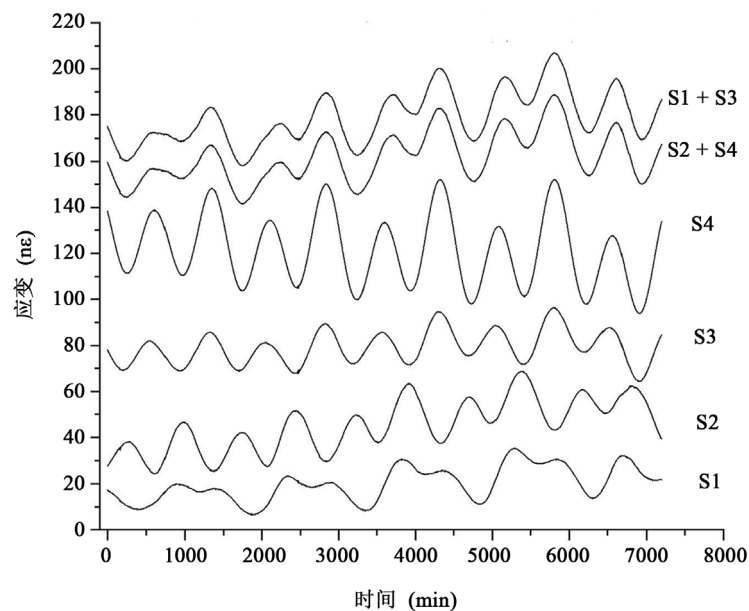


Figure 5. Guzhan station 2007/11/21-25, 5 days, 1 - 4 strain data

图 5. 四川姑咱台 2007 年 11 月 21~25 日，1~4 路应变数据图形

此时离汶川地震还有五个月。

在出现五天平静期后，异常应变活动再次活跃，5月12日汶川发生8.0地震。地震后应变固体潮上脉冲和阶跃的频率和幅度又逐渐减小。到2012年上半年，平均每天事件数降低到0.3个。

汶川大地震五年后，2013年4月20日，芦山发生7.0地震。与汶川地震前相似，异常脉冲计数在2012年底达到峰值后转为下降，在2013年2月10日~14日出现平静期，五天中没有一个脉冲与阶跃事件，固体潮记录与图5同样规则、光滑。之后，阶跃与脉冲再度出现，两个月后发生芦山7.0地震[15][16]。

图6是从2012年2月1日到2013年4月20日芦山地震发生前，姑咱台每10天记录到的应变阶跃与脉冲事件计数的变化。芦山地震发生前的444天中共发生应变阶跃与脉冲事件1066起。

图7是从2013年2月10日至14日五天的记录图，固体潮记录突然变得规则而光滑，图中横坐标 $t = 7100$ 处固体潮上的竖线是俄罗斯7.3级地震震波。两个月后，芦山地震发生。

汶川大地震发生前550天中有3766起阶跃或脉冲事件，平均每天6.8次。到2007年10月，事件数增加到每天11次。如果这些事件在时间上是随机分布的，5天时间中一个事件也不出现的概率极小，连续五天没有一次事件、这种概率上几乎不可能状况的出现究竟意味着什么呢？

五年后的芦山7.0地震前440天中有1000多起阶跃或脉冲事件。到2012年12月，事件数增加到平均每天10次。在7.0地震发生前2个月时，再次出现事件平静期。两次强震前均出现平静期这样的小概率事件，说明出现平静期现象与大地震发生之间存在必然性物理联系。

姑咱台记录到的应变异常与汶川地震发生时间上的相关性如此明显，2009~2011年间多位学者撰文，认为这些异常应变与汶川地震有关，记录到的异常应变是汶川地震孕育过程中发出的前兆信号[17][18][19][20]。

文献[18]指出：“该台钻孔应变观测良好的自检结果，说明了观测应变变化的可靠性…这种持续出现的异常变化与季节变化明显不同步，不是环境干扰因素造成。异常变化与同震阶跃变化的一致性，进一步说明这种异常应该是构造运动的表现。超限率分析结果显示：异常变化在汶川地震主震前逐渐增大，

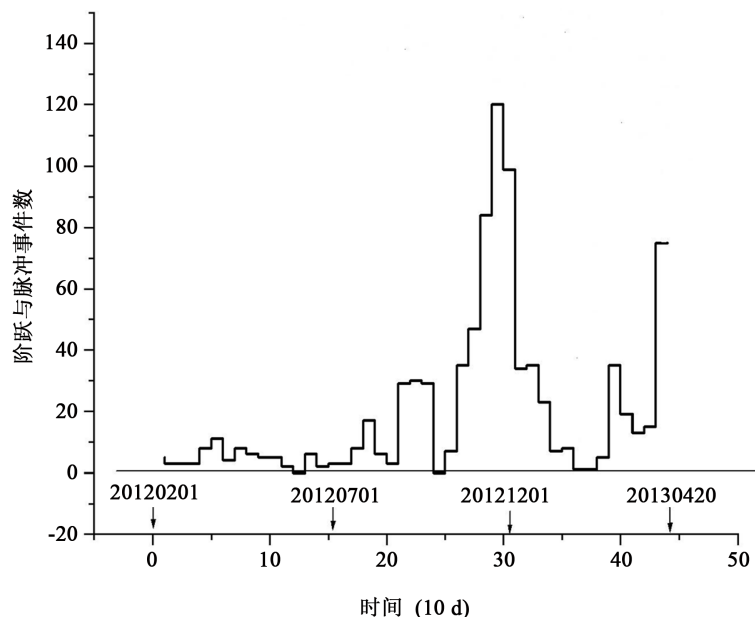


Figure 6. Before the Lushan earthquake, February 1, 2012 to April 20, 2013, Guzan every 10 days record of the strain step and pulse number

图6. 芦山地震前，2012年2月1日至2013年4月20日，姑咱台每10天记录到应变阶跃与脉冲数的变化

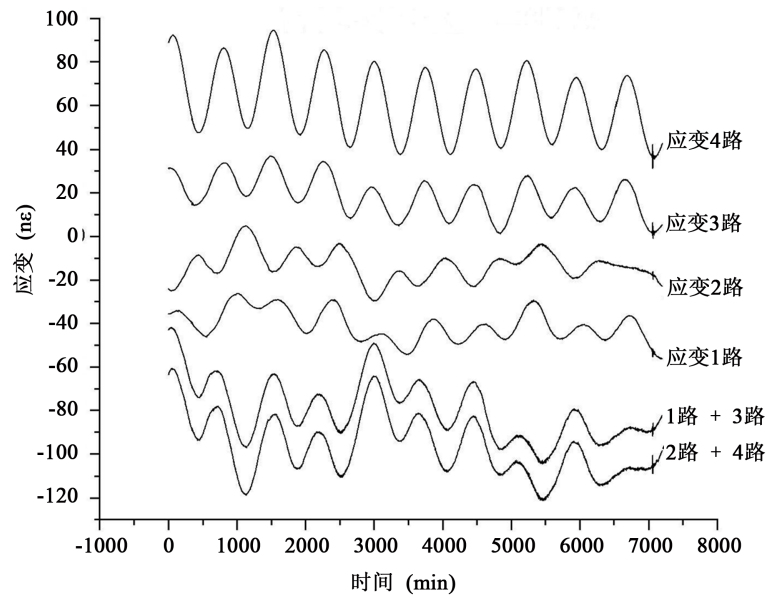


Figure 7. Guzan station 2013/2/10-14, 5 days, 1 - 4 strain data

图 7. 四川姑咱台 2013 年 2 月 10~14 日, 1~4 路应变数据图形

震时特别剧烈，震后逐渐衰减，显示了与该地震密切相关性…姑咱台观测到的异常应变变化可能是极其重要的。如果应变地震前兆是这种形态的，那么中短期地震预报研究就有希望迈出关键的一步。”

密切的相关性可以论证这些异常应变是汶川地震的前兆，但却不能确定之后不久大地震一定会发生。

文献[19]“对这种前兆异常进行了系统的、定量的分析。这种前兆现象与‘地震前驱波’相去甚远，其统计特征与岩石破裂前的声发射现象类同。”

对岩石加载破裂全过程声发射现象的研究指出，在加载接近峰值强度时监测到的声发射事件率明显下降，出现声发射平静期，岩土工程据此预测工程灾害事件[21] [22] [23] [24] [25]。

将汶川地震孕震过程与岩石破裂实验类比，应变脉冲异常事件看成岩石破裂实验中的“声发射”，出现脉冲异常事件平静期，表明加载已达峰值强度。此时段与马瑾岩石破裂实验中的“强度极限点 O”对应[2]。

平静期后事件计数恢复上升表明加载已越过峰值强度，进入“准静态向准动态释放转换点 A”，最后不可避免进入失稳点 B，岩石破裂。

马瑾院士岩石破裂实验中从“准静态向准动态释放转换点 A”到破裂发生的“失稳点 B”，只有 3 秒钟时间。汶川地震事件计数出现平静期到强震发生还有五个月，两者时间相差四百万倍。

岩石破裂实验应变加载速率为 $10^{-7}/s$ ，大地构造运动的应变速率通常在 $10^{-13}\sim 10^{-15}/s$ ，两者速率相差也达百万倍。大自然加载和人类实验室加载不同的时间标度，给了我们防备强震袭击的时间。

震前出现数千异常应变脉冲事件，在计数不断上升过程中突然出现平静期，之后事件计数又恢复上升直至地震发生这一现象，是汶川、芦山地震孕育进入“亚失稳状态”发出的地震先兆，“标志着地震发生已不可避免，因此这个阶段与地震发生有唯一性的关系[2]”，这些异常应变脉冲信号是“有助于预报的地震前兆”。

2.3. 汶川大地震前异常应变数据从自洽向失洽的变化

汶川地震前，异常应变数据从自洽向失洽有规律的演变是确定这些信号的确是汶川地震“有助于预

报地震先兆”的又一判据。

仪器安装初期, 固体潮记录上横坐标 $t = 2119 \sim 2130$ 阶跃图形的 $k = 0.9997$, 表明早期的阶跃异常应变也满足自洽条件(图 2)。这些压性应变阶跃, 压力增强时间在 4~12 分钟, 这种时间尺度数百秒的应变阶跃, 具有尖锐起始、且全部带有压性特征看, 它们正是与断层滑动破裂发生的慢地震活动有关[26] [27] [28]。

2007 年 8 月前, 每日全天的 k 值大于 0.999。2007 年 8 月后, 阶跃与脉冲应变数据的 k 值变小。图 8 是 2008 年 2 月 18 日的应变数据。当天脉冲数不下 16 个, 图上 6 个脉冲的 k 值在 0.65~-0.3 之间, 当天全日 k 值为 0.9745。

到 2008 年 4 月 24 日, 全日相关系数降低到 $k = 0.9414$, 18 天后汶川地震爆发。

异常脉冲在两路差应变曲线上也同时出现相应跃变。设(S2-S4)差应变跃变幅度为 S_{24} 、(S1-S3)差应变跃变幅度为 S_{13} , 可求出附加应力方位 ϕ , θ_1 是元件 1 的方位角[29]。

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_{24}}{S_{13}} \right) + \theta_1 \quad (1)$$

各个脉冲的附加应力方位十分分散。姑咱台位于汶川西南, 找出附加应力方位在 $44^\circ \sim 57^\circ$, 大致对着震源方位不同时间段的 15 个事件的 k 值, 绘出异常脉冲 k 值的时间演变图(图 9)。

图 9 显示, 震源方向应变脉冲的 k 值从 2007 年初的 0.99 逐步下降, 到汶川大地震临震前夕降低到 0.38。

姑咱台接收到的应变信号中包含了不同成分, 强震到来前自洽性下降的是那些幅度很小的“脉冲和阶跃”异常应变部分。没有叠加脉冲的固体潮的自洽性并不随着大震临近而降低, 大渡河水位变化应变也如此。

为什么汶川强震发生前, 异常应变数据失洽逐渐加剧?

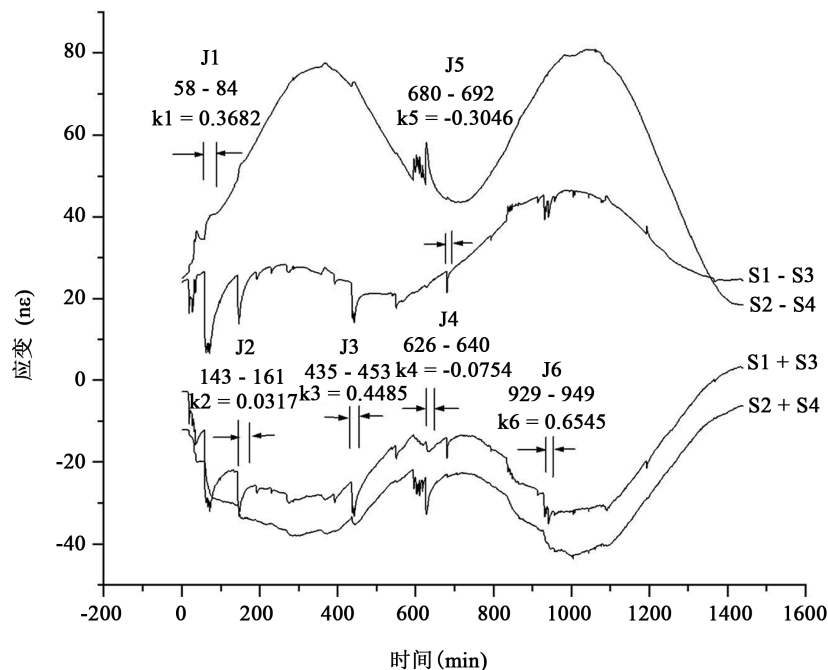


Figure 8. Guzan station 2008/02/18, strain data

图 8. 四川姑咱台 2008 年 2 月 18 日, 应变数据图形

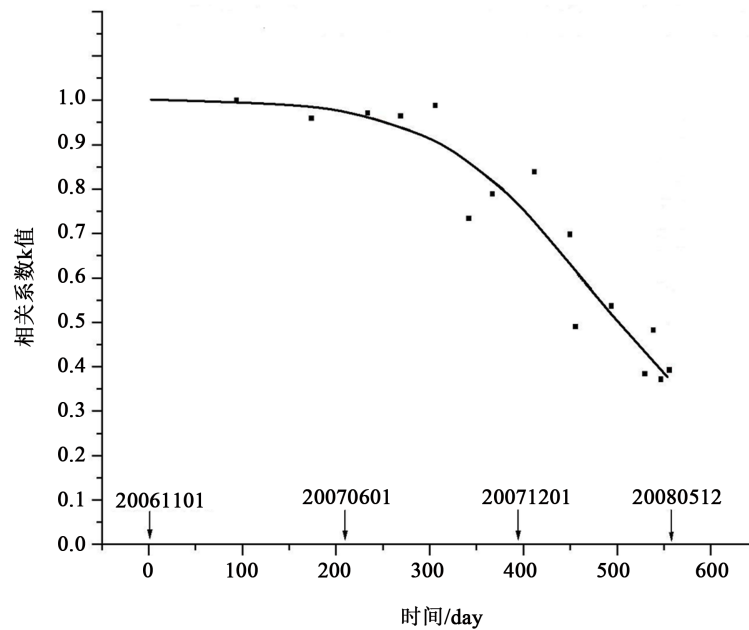


Figure 9. The time evolution of the K value of the strain pulse (the additional stress in the range of 44 DEG to 57 DEG)

图 9. 震源方向应变脉冲(附加应力方位在 44°~57°范围内) k 值的时间演变

钻孔应变观测计算公式由力学家潘立宙根据无穷大弹性薄板圆孔变形模型导出，由这个公式体系，我国的 4 分量应变观测具有 $(S1 + S3) = (S2 + S4)$ 数据自治特性。

潘氏公式理论推导中隐含了一个前提：无穷大弹性薄板是均匀、连续的。均匀、连续假定是实际地层状况的近似。我国分量钻孔应变前兆台网一批台站观测数据自治，说明均匀、连续性假定是足够精确的。

地震学研究指出，大地震发生前，微破裂首先在孕震区的“脆弱区域”发生，随着区域构造应力增大，通过震前断层蠕动、静地震与慢地震活动等方式，脆弱区范围逐步扩大直到边界应力集中，微裂隙区域不断扩展、连通，达到岩石强度时，地震发生。地震发生前的这一过程称为“地震成核”[30][31]。

汶川地震成核区不断生长扩大，破坏了介于震源和姑咱台之间介质的连续性条件，自治方程的理论前提遭到破坏，潘氏公式适用的条件就不再成立。这就是姑咱台观测到的应变脉冲和阶跃数据从自治向失治转变的原因[32]。

从震源处发出的异常脉冲和阶跃应变，需要通过震源成核过程中不断扩大的裂隙区传递到台站钻孔处，其自治性随裂隙区的扩大不断降低。而固体潮、大渡河水位变化引起的应变传递到钻孔中，无需经过震源区，自治性始终不变。

异常应变数据自治性分析让“有助预报的地震先兆”又多了一个判据。

姑咱台连续观测数据记录了这些应变扰动信号的发生 - 平静 - 再发生及自治性受到破坏，接着汶川大地震发生的过程。在大地震发生前，大自然向我们发出了“有助于预报的地震先兆”，只是，当时我们没有看懂这些信息。

3. 讨论

姑咱台分量钻孔应变仪接收到汶川大地震前大量异常应变脉冲信号，这些信号是否也被其它观测仪器接收到了？

离震中 70 千米的成都郫县有一台 JCZ-1 型超宽频带地震仪, 仪器的 BB 通道频带 50 Hz~360 秒。姑咱台分量钻孔应变仪接收到大量异常应变脉冲时, JCZ-1 地震仪上并无相应记录。但从 2008 年 4 月 30 日开始, JCZ-1 地震仪记录中出现超过噪声背景几倍的微弱脉冲。从 5 月 11 日 3 时起, 记录到一系列周期约 200~500 s 的脉冲, 次数随强震临近明显增多、强度增大, 直至强震发生。

姑咱台 YRY-4 型分量钻孔应变仪 2008 年 5 月 11 日分采样记录上, 1: 54、3: 58、4: 25、9: 58 记录到 4 个压性应变脉冲, 脉冲最大幅度达到 1×10^{-8} , 19: 38、22: 36 记录到 2 个压性阶跃。

郫县台 JCZ-1 型超宽频带地震仪 2008 年 5 月 11 日, BB 通道东西分量记录, 有 3 个事件与姑咱台 4: 25、9: 58 出现的压性脉冲事件、22: 36 出现的压性阶跃事件相对应。脉冲事件可视为连续出现的压性一张性阶跃, 在地震记录图上显示为位移方向相反的一对脉冲。

郫县台距震中更近, 5 月 11 日记录到的事件比应变仪更多, 尽管也只有单台记录, 无法定位, 但从接收到这些脉冲一天后大震即发生看, 这些脉冲从震源区发出的可能性极大。

姑咱台位于汶川震中西南, 成都郫县台位于汶川震中东面, 两台不在同一位置, 中间隔着龙门山断裂带, 两个台记录的物理量也不同, 上述比对说明两种仪器在临震前出现都较为剧烈的反映, 部分事件在时间上被同步接收到。

4. 结语

1966 年邢台大地震后, 我国科技工作者开始探索地震预报, 李四光领衔攻关任务。李老认为: “地震是可以预报的, 不过我们得艰苦细致地工作, 以探索发生地震的规律是什么…地震与任何事物一样, 它的发生不是偶然的, 而是有一个过程的。地震就是岩石受到力的作用, 达到某一个临界程度, 岩石承受不了的时候, 便会发生破裂而产生震动” [33]。

为观测岩石中应力变化, 他组织技术人员研制钻孔应力应变观测仪器。初期的“电感地应力仪”灵敏度低、抗干扰能力差, 观测不到能检验仪器客观性能的固体潮。经四十年台站观测试验改进, 我国四分量钻孔应变仪终于达到科学观测仪器要求: 观测到清晰、可比对的固体潮和地震波; 观测数据满足自治性要求, k 值达到 0.999 以上($k = 1$ 为理想值)。38 套四分量钻孔应变仪于 2006 年底被布设到地震活动带。

2008 年汶川大地震对中国是一场巨灾, 但经四十年攻关研制成的四分量钻孔应变仪记录下了汶川地震期间海量数据, 震后八年的回溯性研究, 从中找到了“有助于预报地震先兆”的踪迹, 找到从中判别何时进入亚失稳阶段的特征和参量, 在掌握大地震发生规律的征程中迈出了重要的一步。

实验室岩石加载试验与强震发生现场条件存在巨大差异。孕育地震的地质构造类型众多, 从汶川、芦山地震观测实践中得到的认识, 具有普遍性还是特例, 要回到实践中接受检验、充实完善。

在密度较高的应变观测网中, 有三个以上台记录到异常脉冲或阶跃, 就可能确定异常源位置; 追踪其分布、扩散情况及应力状态的演变, 能获得强震孕育过程中更丰富的时、空、强信息。

汶川大地震前姑咱台接收到的这些异常应变阶跃和脉冲, 按现有认识, 属于基本不发射地震波的“静地震”或“慢地震”。当真正观测到它们的时候, “人们突然发现, 这些“地震”的性质, 比如它的标度性质, 与“可见的”地震完全不同。并且比最初想象的要复杂得多。目前, 甚至还没有一个恰当的、为大多数人所接受的“静地震”、“慢滑动”、“深低频脉动”等的分类, 来描述这一全新的“地震家族” [34]。

如何根据多台观测数据确定异常源位置、震级等参数, 地层中断裂及不同物性界面对应变传播的影响, 需要在实际观测中积累知识。

李四光当年在力学家帮助下得出了由钻孔观测数据计算应力、应变场变化的理论公式。这适用于地

层中无强震孕育的状态, 作为正常背景很重要。但强震正在孕育, 地层中裂隙在不断生长扩展的理论模型还未建立。

地震科学是观测科学。大地震发生本质上属于力学过程, 观测地层应力应变与大地震孕育的关系最为直接。在高精密应变观测仪器性能达到科学性要求后, 加速观测台网建设, 布下“天罗地网”, 不放过每一个强震震例并仔细解剖, 总结出强震孕育的可相互验证、更为全面的认识和规律, 世人关切的地震预报难题就能尽早破解。

马瑾在岩石压裂实验中发现进入亚失稳阶段, 应变、位移、温度变化出现协同化进程。除了应变, 位移、温度观测, 也有助于判断地层失稳的不可逆转和临近[2]。

一次未能作出预报的强震会夺走数万生命, 我们必须“在战争中学习战争”, 在实践中, 某些强震袭击的伤害也许就能得以避免[35]。

致 谢

本文撰写过程中, 得到中国地震局地质研究所马瑾院士的启示和帮助。中国科学院大学石耀霖院士对文章提出宝贵意见, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 陈运泰, 吴忠良, 吕苑苑. 地震学今昔谈[M]. 济南: 山东教育出版社, 2001, 56-63.
- [2] 马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 2016, 61(4-5): 409-414.
- [3] 马瑾, Sherman, S.I., 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 633-645.
- [4] 马瑾, 郭彦双. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 547-561.
- [5] 冯德益, 潘琴龙, 郑斯华等. 长周期形变波及其所反应的短期和临震地震前兆[J]. 地震学报, 1984, 6(1): 41-56.
- [6] Gladwin, M.T. (1984) High Precision Multi-Component Borehole Deformation Monitoring. *Review of Scientific Instruments*, 55, 2011-2016. <https://doi.org/10.1063/1.1137704>
- [7] 邱泽华, 石耀霖. 国际钻孔应变观测的发展现状[J]. 地震学报, 2004, 26(s1): 162-168.
- [8] 邱泽华, 张宝红. 我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状[J]. 国际地震动态, 2002(6): 5-9.
- [9] 潘立宙. 测量地应力的钻孔变形法[M]//中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队, 编. 地应力测量的原理和应用. 北京: 地质出版社, 1981: 1-47.
- [10] 潘立宙. 与地应力测量有关的几个公式的推导和讨论[M]. 中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队编, 地应力测量的原理和应用. 北京: 地质出版社, 1981, 163-203.
- [11] 张晶, 刘琦. 四分量式钻孔应变观测资料的处理与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(6): 6-9.
- [12] 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 四分量应变观测的实地相对标定[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1): 118-122.
- [13] 张凌空, 牛安福. 姑咱台钻孔应变观测曲线年变现象成因探讨[J]. 国际地震动态, 2015(9): 104-104.
- [14] 邱泽华, 杨光, 唐磊. 芦山 M7.0 地震前姑咱台钻孔应变观测异常[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 158-161.
- [15] 池顺良, 刘琦, 池毅, 等. 2013 年芦山 M_s7.0 地震的震前及临震应变异常[J]. 地震学报, 2013, 35(3): 296-303.
- [16] 刘琦, 张晶, 池顺良, 等. 2013 年芦山 M_s7.0 地震前后姑咱台四分量钻孔应变时频特征分析[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 770-779.
- [17] 池顺良, 池毅, 邓涛, 等. 从 5.12 汶川地震前后分量应变仪观测到的应变异常看建设密集应变观测网络的必要性[J]. 国际地震动态, 2009(1): 1-13.
- [18] 邱泽华, 周龙寿, 池顺良. 用超限率分析法研究汶川地震的前兆应变变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4), 1-4.
- [19] 邱泽华, 张宝红, 唐磊, 等. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(8): 1031-1039.

- [20] 刘琦, 张晶. S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4): 6-9.
- [21] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147-152.
- [22] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s2): 3383-3390
- [23] 尹贤刚, 李庶林. 岩石受载破坏前兆特征——声发射平静研究[J]. 金属矿山, 2008, V38(7): 124-128.
- [24] 徐东强, 周昌达, 许昭永. 岩石试件刚度及压力机刚度对岩石主破裂前声发射相对平静的影响[J]. 地震研究, 1994, 17(8): 802-807.
- [25] 马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等. 基于声发射试验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 426-435.
- [26] 川崎一郎, 陈会忠等译. 何谓慢地震: 探索巨大地震预报的可能性[M]. 北京: 地震出版社, 2013, 25-38.
- [27] 王迪晋, 李正媛, 吕品姬. 慢地震研究综述[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(s1): 21-25.
- [28] 吴忠良. 地震学中的“暗物质”——静地震与地震预测研究的未来[J]. 国际地震动态, 2001(9): 1-5.
- [29] 池顺良, 武红岭, 骆鸣津. 钻孔应变观测中潮汐因子离散性与各向异性原因探讨——“十五”数字地震观测网络分量钻孔应变仪首批观测资料分析解释[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1746-1753.
- [30] Dodge, D.A. and Beroza, G.C. (1995) Foreshock Sequence of the 1992 Landers, California, Earthquake and Its Implication for Earthquake Nucleation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **100**, 9865-9880. <https://doi.org/10.1029/95JB00871>
- [31] Ohnaka, M. (1992) Earthquake Source Nucleation: A Physical Model for Short Term Precursors. *Tectonophysics*, **211**, 149-178.
- [32] 池顺良, 张晶, 池毅. 汶川、鲁甸、康定地震前应变数据由自洽到失洽的转变与地震成核[J]. 国际地震动态, 2014(12): 3-13.
- [33] 李四光. 论地震[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 5, 130-136.
- [34] 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, 38(4): 233-237.
- [35] 马钦忠. 中外几次重要地震预测与预报结果之启示[J]. 地震学报, 2014, 36(3): 500-513.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org