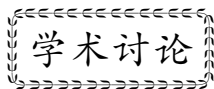


邱泽华. 2014. 关于用密集钻孔应变台网监测强震前兆的若干问题. 地震学报, 36(4): 738-749. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.019.

Qiu Z H. 2014. On monitoring precursors of major earthquakes with dense network of borehole strainmeters. *Acta Seismologica Sinica*, 36(4): 738-749. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.019.



关于用密集钻孔应变台网监测 强震前兆的若干问题^{*}

邱泽华^{*}

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

摘要 提出了地震前兆研究是地震预测研究的基础, 其研究的对象是个案. 地震前兆研究受到的最大限制, 是对个案的观测严重不足. 龙门山断裂带西南段仍然存在发生强震的危险性, 应该不失时机地在那里建立密集的钻孔应变观测网. 四分量钻孔应变仪是我国发明的、已经可以与地震仪和 GPS 相提并论的观测仪器. 对地震前兆研究而言, 钻孔应变观测在理论和实践两方面都具有优越性. 本文认为: 钻孔应变观测点应该建在应力集中的构造部位; 应该在钻孔选点和仪器安装两方面采取措施以保证观测点建设的成功; 四分量钻孔应变观测最重要的是数据自洽; 钻孔应变观测不必追求很深; 观测点建设不必进行绝对应力测量.

关键词 地震预测 地震前兆 钻孔应变仪 密集观测 个案分析

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.019

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

On monitoring precursors of major earthquakes with dense network of borehole strainmeters

Qiu Zehua^{*}

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

Abstract: This paper argues that the earthquake precursor research is the basis for earthquake prediction. Objects of the precursor research are individual cases. The major limitation on the earthquake precursor study comes from insufficient observation cases. Since high potential of major earthquake occurrence still exists along the southwestern Longmenshan fault zone, now it is due time to establish a dense network with four-gauge borehole strainmeters (FGBS) over the area. FGBS is a Chinese invention and has already been compared to seismometers. In the earthquake precursor research, FGBS has advantage both in theory

^{*} 基金项目 地震行业科研专项(201108009)资助.

收稿日期 2013-07-17 收到初稿, 2013-09-27 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: qzhhb@163.com

and in practice. We think that an FGBS site should be built in the site with stress concentration. Successful establishment of an observation site depends on good condition of the borehole location and right installation of the instrument. The key point of observation with an FGBS is self-consistency of the data from the four gauges. It is unnecessary to pursue the deep borehole strain observation and to conduct absolute stress measurements in order to build a site of FG-BS.

Key words: earthquake prediction; earthquake precursor; borehole strainmeter; dense network; case study

引言

我国开展地震预测和预报研究数十年,投入了大量资源.实践表明,地震预测并非如人们当初认为的那样简单,存在的困难可以归纳为“地球内部的不可入性、大地震的非频发性和地震物理过程的复杂性”(陈运泰,2008,2009).由此引申出一个特别深刻的教训:地震预测一步到位是不可能的,应该把这个艰巨的任务分解开来,循序渐进地完成.在最基本的层面上,应该把地震前兆研究与地震预测研究分开.

在国际地震学界,研究人员一直主要讨论的都是地震预测是否可能,应该如何判断一种预测方法是否可行,以及应该建立什么机制来实行预测等问题(Wyss, 1991, 1997a, b; Geller *et al*, 1997; Jordan *et al*, 2011).也许所有这些都言之过早.至少在中国,地震预测的基本思路是用地震前兆来预测地震,中国地震局建立地震前兆台网就是依据了这个思路.这就是说,地震预测的根据是地震前兆.由此我们得到一个简单而又重要的结论:预测地震须先把地震前兆搞清楚(丁国瑜等, 1981; 邱泽华, 2010a).没有地震前兆,地震预测就是无源之水,无本之木.

长期以来,地震前兆方面的研究都被简单化了,这方面的研究似乎只有一个目标,即找到“放之四海而皆准”的“确定性的地震前兆”.但关键是,这种简单的思路导致了简单的方法,就是对统计的简单强调和依赖.严格意义上,在地震前兆研究领域,“大地震的非频发性和地震物理过程的复杂性”,都决定了统计的局限性.我们需要的所谓“确定性的地震前兆”,可能并非某种简单的可以用来计算未来地震时间、地点和规模的普适信号.“眉毛胡子一把抓”的统计,往往不过是“豆腐渣工程”,其中充斥着滥竽充数的不可靠样本,经不起严格的科学检验.

在地震前兆研究领域,更有价值的方法是案例分析,也就是“解剖麻雀”的方法.地震前兆研究的对象是一个个的震例.对地震前兆研究而言,最重要的是观测.目前地震前兆研究受到的最大限制,就是观测不足.更准确地说,是对个案的观测严重不足.因此,我们今后要做的,就是加强对个案的密集观测.但是,所谓加强对个案的密集观测必须有的放矢,它依赖于对未来大地震发生地点的判定.

2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震的发生,显示了龙门山断裂带的当代活动性.汶川地震后,陈运泰等(2013)通过对地震构造、地震活动性、地震矩释放“亏空”区以及余震活动规律的分析,提出了龙门山断裂带西南段宝兴—小金一带存在发生 $M_w6.7—7.3$ 地震危

险性的估计. 2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 地震的发生, 证明了这个估计的正确性. 重要的是, 芦山地震后, 陈运泰等(2013)根据进一步的分析结果表明, 芦山地震的发生并没有显著地缓解龙门山断裂带西南段的地震危险性, 该地段整体上仍存在发生 $M_w 7.2-7.3$ 地震的潜在危险性, 并提出应当加强对上述具有潜在地震危险性区域的监测.

我国数十年的地震预测预报实践, 对地震科学的一个实质性贡献, 在于创造性地研发了钻孔应变观测技术, 并且记录到一些大震前兆, 积累了一些宝贵的个案研究成果. 汶川地震后, 在强震带上建立密集钻孔应变观测网的讨论, 曾引起相当广泛的关注. 芦山地震又为我们重拾这个议题提供了新的契机. 陈运泰等(2013)对芦山地震的研究结果, 更为这个议题提供了一个具体的目标, 我们应该不失时机地在龙门山断裂带西南段建立密集的钻孔应变观测网.

本文将聚焦钻孔应变观测, 对一些重要的相关问题展开讨论.

1 我国对地球科学的重要贡献

钻孔应变仪包括分量式钻孔应变仪和钻孔体应变仪(Sacks, Evertson, 1971; 欧阳祖熙, 1977; 苏恺之, 1982; 池顺良等, 2009). 美国的板块边界观测(plate boundary observatory, 简称为 PBO)项目, 建设了 80 个分量式钻孔应变观测点. 以此为标志, 分量式钻孔应变仪脱颖而出, 成为可以与地震仪和 GPS 相提并论的地壳运动观测手段. 实际上, GPS 和地震仪观测的是某一点位移随时间的变化, 而四分量钻孔应变仪观测的是某一点位移的空间导数随时间的变化, 其提供的信息是另外两种观测手段无法提供的. 钻孔应变观测在时间变化上的分辨率, 比 GPS 观测至少提高 1—2 个量级, 其观测频带在长周期一端比地震仪要宽得多.

除地震前兆研究外, 钻孔应变观测数据在慢地震(Sacks *et al*, 1978; Linde *et al*, 1996)、同震应力触发(邱泽华, 石耀霖, 2004)、震颤(Johnston *et al*, 2006)、地球自由振荡(邱泽华等, 2007; 唐磊等, 2007)和地震波(邱泽华, 池顺良, 2013)等多方面的研究中, 均有不可替代的作用, 且已取得不少独特的成果.

从李四光的倡议开始, 我国几代科研人员为发明和完善分量式钻孔应力-应变观测仪付出了不懈的努力(欧阳祖熙, 1977; 潘立宙, 1977; 苏恺之, 1977; 欧阳祖熙, 张宗润, 1988; 骆鸣津等, 1989; 陈沅俊, 杨修信, 1990; 邱泽华等, 2005a, b; 池顺良等, 2009). 继我国开始研发分量式钻孔应变观测技术之后, 澳大利亚和日本也进行了类似的观测技术研发(Gladwin, 1984; Ishii, 2001). 以 YRY-4 型四分量钻孔应变仪为代表, 我国的观测技术由于传感器的突破性革新而趋于成熟, 在世界上一直处于领先地位(池顺良等, 2009). Qiu 等(2013a)系统阐述中国四分量钻孔应变观测理论的文章在 *Journal of Geophysical Research* 杂志上发表, 标志着我国发明的精密观测技术正式登上了国际地球科学的舞台.

四分量钻孔应变仪的设计源自四分量钻孔应力观测. 这是一个非常巧妙的设计, 简单而有效. 该设计最基本的优点, 是提供了对观测数据的可靠性进行自检的功能. 钻孔应变观测需要把探头与岩石耦合起来才能进行, 但二者耦合得到底好不好, 实际上我们难以得知. 四分量钻孔应变仪设计提供的自检功能, 就很好地解决了这个难题.

根据钻孔应变观测的理论模型, 四个分量的观测值 S_1 , S_3 , S_2 , S_4 之间存在自洽方程

(苏恺之, 1977; Qiu *et al.*, 2013a), 即

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4. \tag{1}$$

观测数据若满足自洽方程即为可靠, 否则不可靠. 之所以说 YRY-4 型四分量钻孔应变仪取得了突破性进展, 就是因为该仪器的观测数据绝大多数满足自洽方程.

回顾历史可以看出, 科学的重大进步往往与新观测技术的发明紧密相联. 钻孔应变观测技术的研发成功, 同样将有力地推动地球科学的发展. 目前我们需做的是, 建立更多的分量式钻孔应变观测点, 产出更多高质量的观测数据, 让更多的科研人员使用这种独特的数据, 取得更多的创新性科研成果.

2 监测地震前兆的有效手段

我国的钻孔应变观测起初是以地震预测为目的的(邱泽华, 2010b). 因为地震科学工作者普遍认为, 地震是由地壳中的应力(应变)变化造成断层运动所导致的, 所以观测应力(应变)变化对预测地震的发生特别重要. 所谓地震能不能预测的问题, 在逻辑上首先是地震有没有前兆的问题. 这其实不是理论问题, 而是必须依靠观测解决的问题. 必须强调, 在观测上所谓的地震前兆, 都是一些个案. 地震预测研究的基础是否稳固, 说到底, 取决于这些观测的地震前兆个案是否可靠.

早期的钻孔应力以及钻孔应变观测, 因为存在一些技术上的缺陷, 加之采样率低(最多一日数次)和没有辅助观测, 所以产出的数据难以用于科学分析, 很多所谓的地震前兆异常变化因而也无法得到验证. 中国地震局“九五”期间和“十五”期间制定的前兆台站观测的数字化和网络化, 特别是“十五”期间使用的 YRY-4 型四分量钻孔应变仪在探头技术上的突破性革新, 使我国的钻孔应变观测水平得到跨越式的提升, 从一种试探性的“土”观测, 一跃变成可靠的科学观测. 正是由于使用了这样的观测技术, 姑咱台在汶川地震和芦山地震前均观测到了尤为可信的地震前兆异常变化(池顺良等, 2009, 2013; 邱泽华等, 2010; Qiu *et al.*, 2013b).

图 1 为 2008 年汶川 $M_S8.0$ 地震前后(2006 年 12 月—2009 年 1 月)姑咱台钻孔应变仪记录到的异常变化. 图 1a 给出了面应变原始观测曲线(Sa), 图 1b 给出了其分钟差分曲线(DSa). 实际上, 位于龙门山断裂带西南端的姑咱台, 在汶川地震期间即观测到一系列“毛刺”变化(池顺良等, 2009), 只是由于距离震中较远(约 150 km), 所以毛刺较小, 只有在分钟差分曲线上才显示得清楚(邱泽华等, 2012). 其它钻孔应变观测点则距离震中更远, 至少在 300 km 以外.

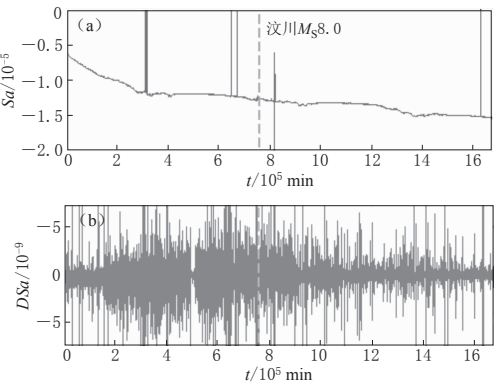


图 1 2006 年 12 月—2009 年 1 月姑咱台
观测面应变(a)(引自邱泽华等, 2012)
及其分钟差分(b)曲线

Fig. 1 Observed plane strain curve (a)
(after Qiu *et al.*, 2012) and the minute
differential curve (b) at Guzan station
during the period from December
2006 to January 2009

2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震前数天, 姑咱台又观测到显著的异常变化(池顺良等, 2013), 如图 2 所示. 该台是距离芦山地震震中最近的台站(约 70 km). 经过全面调查和深入分析, 现有的可靠证据表明, 这种异常变化不是任何已知干扰造成的, 应该是地震前兆(Qiu *et al*, 2013b).

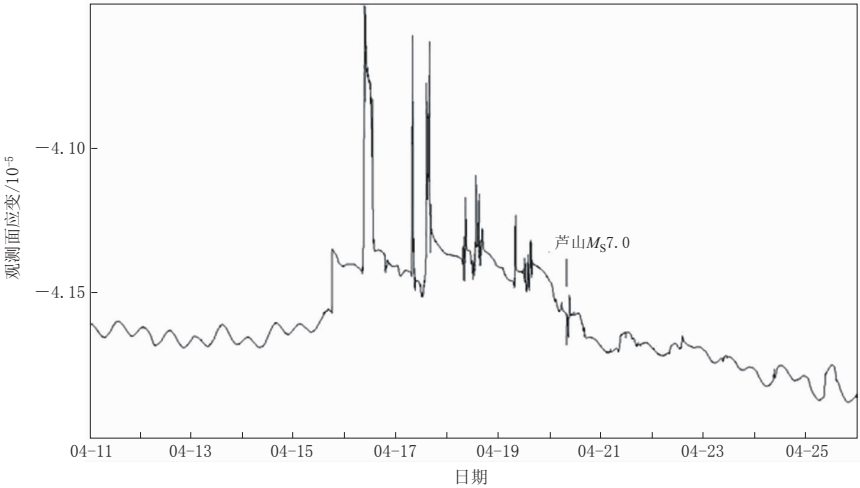


图 2 姑咱台 2013 年 4 月 11—25 日面应变观测曲线

Fig. 2 Observed plane strain curve at Guzan station during 11–25, April 2013

姑咱台钻孔应变仪观测到地震前兆异常, 进一步说明了一个重要的事实, 即地震是有前兆的. 特别值得注意的是, 所有这些观测前兆异常变化的基本特征, 都是一系列突跳(毛刺). 这种变化与实验室岩石破裂前的“声发射”是可以类比的(Armstrong, 1969; 陈颢, 1981; Mogi, 1982; 刘力强等, 1999).

必须正视这样的事实: 姑咱台安装了目前所有的常用形变观测仪器. 除钻孔应变仪外, 还有伸缩仪、水管式倾斜仪、摆式倾斜仪和地震仪. 而这些仪器中, 只有钻孔应变仪在汶川地震和芦山地震前记录到显著的异常变化, 其它仪器均没有观测到明显的变化. 这说明钻孔应变仪在观测地震前兆异常方面具有优越性.

我国现有的钻孔应变观测点, 包括体应变观测点和四分量观测点, 有 100 个左右. 虽然数量不少, 但是分布却非常不合理(图 3). 本来是为地震预测建立的观测点, 但相当一部分却位于地震并不活跃的地区; 而在地震带上的观测点又很稀疏, 间隔甚远. 迄今所记录到的一些大震的前兆异常变化, 由于均为个别观测点所记录, 难以用来进行深入分析.

国际上, 用钻孔应变仪监测地震前兆已是常规做法. 例如, 美国的帕克菲尔德地震预报试验场以及日本对预期的“东南海大地震”的监测, 钻孔应变仪都是主流仪器之一. 在这两个国际著名的地震预测试验项目中, 都采用了密集监测的方法. 前者共布设了 10 个钻孔应变观测点, 其中 7 个体应变, 3 个分量式; 后者布设了 27 个钻孔应变观测点, 其中 16 个体应变, 11 个分量式. 这体现了科学家们的共识, 亦即须对个案进行密集观测, 才有可能比较全面、可靠地认识地震前兆. 我们要坚持对地震预测展开进一步探索, 也必须加强对地震的密集监测.

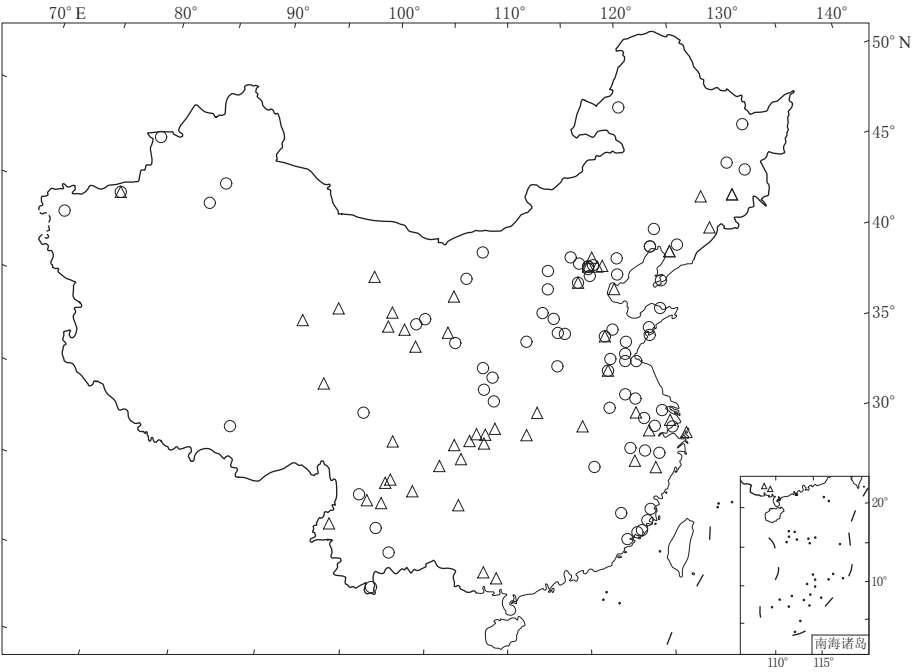


图 3 前兆台网钻孔应变观测点分布图

圆圈代表体应变观测点，三角形代表分量应变观测点

Fig. 3 Borehole strain observation sites of the precursor network

Circles represent body strain observations, triangles denote component strain observations

3 讨论

3.1 如何解释玉树地震前没有观测到异常

2010 年 4 月 14 日青海玉树发生 $M_s7.1$ 地震。恰巧玉树布设了一个钻孔应变台，且工作基本正常。但是，玉树台并未观测到与玉树地震明显相关的异常变化。玉树台距地震破裂起点有 60 多千米，但距破裂终点不远。由此很容易让人联想到美国帕克菲尔德地震预报试验场。2004 年发生的 $M_w6.0$ 地震，虽然比原预测时间晚了很多年，但是位置还算接近，事后也几乎没有观测到任何可靠的前兆变化(Bakun *et al*, 2005; Johnston *et al*, 2006)。

综合各种事实，我们只能得出这样的结论：地震前兆现象是非常复杂的。我国几十年的地震预测实践证明：对于各次地震，前兆现象并非都一样；对于同一次地震，并非各个地点都能观测到显著异常。无论是姑咱台观测到地震前兆，还是玉树台没有观测到地震前兆，都进一步证明了这个事实。这种认识正是我国几十年地震预测实践的一个重要成果。

没有观测到地震前兆的事实，不能用来否定可以观测到地震前兆的事实。我们下一步要努力研究清楚的是：到底在什么条件下最有可能观测到地震前兆。换句话说，就是“把观测点建在什么地方”。这已经成为一个关键的问题。

对于钻孔应变观测而言，以往过于强调观测点要远离断层，以避免复杂地形变化。今后应该要求建立在接近断层且地形变化剧烈的部位。因为在这种部位会发生应力集中，地震前兆变化会被放大，从而容易被观测到。相反，在不发生应力集中的地方，应力变化通常是极其微小的，难以被捕捉到。

应该对姑咱台所处位置进行专门研究,找到该台站观测到汶川地震和芦山地震前兆变化的原因。同时,对没有观测到玉树地震前兆的玉树台的位置也要进行研究,找到其原因。总之,要总结正反两方面的教训,为未来的钻孔应变观测点建设提供依据。

3.2 如何保证观测点建设的成功

对四分量钻孔应变观测而言,最重要的就是数据的自洽性,即所谓“一加三等于二加四”,它甚至比分辨率还重要。即使观测的固体潮变化不很清晰,只要自洽性很好,我们就可以认为观测是正确的,数据是可靠的。反之,当四分量数据不满足自洽方程时,就会出现混乱,无法进行应变换算。对于一种型号的仪器或一个观测点,其观测数据必须满足自洽方程才是合格的,否则即不合格。

与其它地面观测仪器不同,钻孔应变观测具有特殊的风险,即探头安装到钻孔中便不能取出维修。一旦安装失败,探头不能取出,很可能需要重新钻孔和安装仪器。更有甚者,观测点带病运行,白白浪费人力和财力,这已经有大量的案例,教训沉痛。

造成建设观测点失败的因素主要在于打孔和安装探头两个方面:

1) 打孔方面。一些观测点的仪器不能正常产出数据,是由于探头安装深度的岩石不完整。因为打孔费用通常比较高,所以即使发现了岩石不完整,也不愿意再重新打孔。结果是勉强安装探头,应付完成项目任务,造成浪费。我们在山西进行了实验,证明在打孔之前,可以用高密度电法预先探查地下岩石的完整性(邱泽华等,2013)。这种方法不但有效,而且成本不高,切实可行。在打孔之前,用高密度电法等方法探查地下岩石的完整性,如果岩石明显不完整,就更换其它地方,这样可以大大降低打孔失败的概率。

2) 安装探头方面。仪器本身质量不过关,或者探头安装操作失误,均可能导致仪器不能产出合格的数据。要解决好这个问题,必须制定严格的合同。仪器生产厂家要事先进行钻孔质量检查,一旦认可钻孔质量合格,进行了仪器安装,就要对后续的观测质量负责。只要观测质量不合格,就必须在规定的期限内重新进行仪器安装。如果不履行这一职责,就要受到经济制裁,赔偿相应损失。我们判断一个钻孔应变观测点是否合格,已经有了定量的信度指标(Qiu *et al*, 2013a)。这个指标的计算方法有严格的规定,是公开、公平的,必须在与仪器生产厂家的合同中明确规定:如果仪器产出数据不能达到规定的信度指标,就要认定观测质量不合格。

“十五”期间地震前兆台网建设,钻孔应变仪安装的成功率超过70%,这是一个很了不起的成绩。将来的仪器和观测点,观测数据的自洽程度,都应不低于“十五”的水平。除此之外,避雷问题也必须在合同中给出严格要求。“十五”以来,钻孔应变观测点的避雷已有相当成功的经验,必须认真借鉴。

3.3 要不要“深井观测”

近年来,有很多关于开展大规模“深井观测”的提议。实际上,按照此种提议的说法,“深井观测”的深度不过300—400 m,相对地壳厚度或者震源深度都是很浅的,解决不了什么问题。更重要的是,对钻孔应变观测而言,“深井观测”是不现实的。目前钻孔应变观测的对象,不是地壳深部的应变变化,而是地面的变化情况。下面从多个方面进行说明:

1) 按照四分量钻孔应变观测的理论模型,只有当垂直地面的应力分量为零时,这种观测才能给出正确的数据。而此条件只有在地表附近方可满足。

2) 钻孔应变观测的探头放在钻孔中,其主要目的是避免来自天气(例如气温)的变化

或人类活动而产生的地表干扰。

3) “十五”期间的四分量钻孔应变观测深度只有 40 m, 但是观测数据的质量一般说来是令人满意的, 与国外几百米深的观测相比并不差。这说明几十米深度与几百米深度的观测数据差别不是很大。

4) 科研人员经常要求将钻孔应变观测结果与 GPS 以及 InSAR 的观测结果作比较。如果钻孔应变观测的是地面的情况, 那么这种比较就可行; 如果把探头放到几百米深处, 这种比较的结果自然是不可靠的。

5) 对于数据应用, 这种观测深度的差别尚不明确。在实施中, 几百米观测深度带来的风险却大得多, 影响最大的一个例子就是美国的 PBO 项目。美国科学家原计划安装 200 套钻孔应变仪, 但最终只完成了约 80 套, 其主要原因就是钻孔费用估计不足。我们的“深井”仪器安装技术远不如美国, 风险更大。

因此, 需要根据我们目前的认识, 平衡利弊。除特殊情况外, 未来的四分量钻孔应变观测不需要追求更深, 关键是观测探头安装深度的岩石必须完整。

3.4 要不要绝对应力测量

钻孔应变观测本身只能给出应变随时间的变化, 即所谓相对变化。一种建议是, 应该把绝对应力测量与这种观测结合起来, 在每一个钻孔应变观测点上都测量一下绝对应力。这只是想当然。

一方面, 地应力测量, 包括水压致裂法、套芯法和钻孔崩落法等, 都很不精确, 无法与钻孔应变观测相比, 但是成本却很高。2011 年 10 月, 在北京召开的第五届国际地应力会上, Haimson 提到岩石性质、非均匀性、地形和断层对水压致裂应力测量的影响, 以及用其它独立的证据支持测量结果的重要性(Haimson, 2010); Stephansson 报道如何生成一个地区最终的应力测量模型(Stephansson, Zang, 2010); Hudson 则着重分析了原地应力的变化(Hudson, Feng, 2010)。实际上, 他们想传递的信息就是: 地应力测量是很复杂的, 不要将其简单化。要得到一个比较可靠的结果, 需要进行大量的、多方面的测量与分析。

另一方面, 因为钻孔应变观测的是地表附近的情况, 而地震是发生在地壳深处, 所以观测点所在部位的绝对应力大小与地震的发生并无直接联系。例如, 2010 年吉林敦化台 YRY-4 型钻孔应变仪观测到大幅度的压性变化, 基本符合自洽方程。该变化持续了数月, 直到探头被压坏。根据事后的调查结果可知, 井下电视发现了孔壁崩落块体, 表明钻孔可能发生了破坏变形(毕永强等, 2013)。这表明钻孔岩石所受应力应该已经达到其强度水平。重要的是, 至今当地并未发生地震。这说明, 即使地表附近岩石所受应力达到岩石强度水平, 也不意味着地壳深处就要发生地震。因此, 对于地震预测而言, 测量地表附近的绝对应力意义不大。

另外, 在钻孔中进行水压致裂应力测量, 将破坏原地的岩石完整性, 对钻孔应变观测会产生严重影响。四川攀枝花台 YRY-4 型钻孔应变仪原来观测情况良好, 后来在旁边进行水压致裂应力测量, 结果大大降低了该仪器的数据质量, 这是一个典型案例。

综上, 根据目前的认识, 建设钻孔应变观测点不必进行绝对应力测量。

4 结论

本文指出地震预测研究当前所面临的最大问题是对个案的观测严重不足, 建议在龙门

山断裂带西南段建立密集的四分量钻孔应变观测网。四分量钻孔应变观测是我国发明的一种重要的地球动力学观测技术,其在理论和实践两方面均已趋于成熟。特别是在地震前兆观测方面,这种观测技术具有优越性。在建立钻孔应变观测点时,要注意选择应力集中部位,同时要用这种观测的自洽性来检验建立的观测点是否合格。建立钻孔应变观测点不需要追求更深,也不必要进行水压致裂应力测量。

“十五”期间,中国地震局共安装了约 40 套四分量钻孔应变仪。我们应该利用“十五”的经验,采取分步推进,步步为营的策略,用 3 年时间完成建设 50 个观测点的任务。与以往不同的是,这些观测点将以无人值守为主。可以预期,只要下一次大震发生在我们建好的密集观测网之内,我们必将观测到更加充分的地震前兆现象,地震前兆研究以及地震预测探索一定会有突破性的进展。此外,我们还将在钻孔应变观测网建设,以及区域应变场变化图像观测等方面取得重大的进步。这种观测数据在地壳运动、固体潮、地震和地球自由振荡等研究中,也将发挥其特殊的重要作用,有助于加快这些领域的科学进步。

审稿专家认真细致地审阅本文,提出了大量宝贵的修改意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 毕永强,郑国栋,武成智,韩忠民. 2013. 敦化地震台 2010 年 9 月钻孔应变观测曲线异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, **34**(1/2): 140-144.
- Bi Y Q, Zheng G D, Wu C Z, Han Z M. 2013. Discussion of the abnormal curve record by borehole strainmeter at Dunhua in September 2010[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **34**(1/2): 140-144 (in Chinese).
- 陈颢. 1981. 不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射[J]. 地震学报, **3**(1): 41-48.
- Chen Y. 1981. Acoustic emission of rocks under triaxial compression along various stress paths[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **3**(1): 41-48 (in Chinese).
- 陈沉俊,杨修信. 1990. 双衬套钻孔应变测量的计算[J]. 华北地震科学, **8**(4): 80-89.
- Chen Y J, Yang X X. 1990. Calculations of strain observation in the borehole with two cases[J]. *North China Earthquake Sciences*, **8**(4): 80-89 (in Chinese).
- 陈运泰. 2008. 地震预测要知难而进[J]. 求是, (15): 58-60.
- Chen Y T. 2008. Research on earthquake prediction should advance despite difficulties[J]. *Qiu Shi*, (15): 58-60 (in Chinese).
- 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).
- 陈运泰,杨智娴,张勇,刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1064-1072.
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, Liu C. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. *Scientia Sinica Terrae*, **43**(6): 1064-1072 (in Chinese).
- 池顺良,池毅,邓涛,廖成旺,唐小林,池亮. 2009. 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, (1): 1-13.
- Chi S L, Chi Y, Deng T, Liao C W, Tang X L, Chi L. 2009. The necessity of building national strain-observation network from the strain abnormality before Wenchuan earthquake[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (1): 1-13 (in Chinese).
- 池顺良,刘琦,池毅,邓涛,廖成旺,阳光,张贵萍,陈洁. 2013. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震的震前及临震应变异常[J].

地震学报, **35**(3): 296–303.

Chi S L, Liu Q, Chi Y, Deng T, Liao C W, Yang G, Zhang G P, Chen J. 2013. Borehole strain anomalies before the 20 April 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(3): 296–303 (in Chinese).

丁国瑜, 梅世蓉, 马宗晋. 1981. 地震预报方法[C]//丁国瑜, 马宗晋编. 国际地震预报讨论会论文选. 北京: 地震出版社: 174–179.

Ding G Y, Mei S R, Ma Z J. 1981. Methods of earthquake prediction[C]//Ding G Y, Ma Z J eds. *Selected Papers of the International Symposium on Earthquake Prediction*. Beijing: Seismological Press: 174–179 (in Chinese).

刘力强, 马胜利, 马瑾, 雷兴林, 楠濂勤一郎, 西泽修, Jouniaux L. 1999. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. 地震地质, **21**(4): 377–386.

Liu L Q, Ma S L, Ma J, Lei X L, Kusunose K, Nishizawa O, Jouniaux L. 1999. Effect of rocks structure on the statistic characteristics of acoustic emission[J]. *Seismology and Geology*, **21**(4): 377–386 (in Chinese).

骆鸣津, 顾梦林, 李安印, 睢建设. 1989. 用引潮力进行钻孔应变-应力的原地标定[J]. 地壳形变与地震, **9**(4): 51–62.

Luo M J, Gu M L, Li A Y, Sui J S. 1989. In-situ calibration of borehole strain-stress with tidal force[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **9**(4): 51–62 (in Chinese).

欧阳祖熙. 1977. RDB-1 型电容式地应变计[C]//全国地应力专业会议论文选编(下): 337–348.

Ouyang Z X. 1977. RDB-1 type capacitance ground strainmeter[C]//*Selected Papers of the National Conference on Stress Measurement, Part 2*: 337–348 (in Chinese).

欧阳祖熙, 张宗润. 1988. 钻孔应变仪与井壁耦合方法的研究[G]//中国地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(2). 北京: 地震出版社: 1–10.

Ouyang Z X, Zhang Z R. 1988. Studies of method for coupling strain gauge with borehole wall[G]//Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration eds. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (2). Beijing: Seismological Press: 1–10 (in Chinese).

潘立宙. 1977. 关于地应力测量的几个公式的推导及讨论[C]//全国地应力专业会议论文选编(上): 1–41.

Pan L Z. 1977. On the formulae of ground stress measurement[C]//*Selected Papers of the National Conference on Stress Measurement, Part 1*: 1–41 (in Chinese).

邱泽华. 2010a. 关于地震前兆的判据问题[J]. 大地测量与地球动力学, **30**(增刊 II): 1–5.

Qiu Z H. 2010a. How to identify earthquake precursor[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(Suppl. II): 1–5 (in Chinese).

邱泽华. 2010b. 中国分量钻孔地应力-应变观测发展重要事件回顾[J]. 大地测量与地球动力学, **30**(5): 42–47.

Qiu Z H. 2010b. A review of the continuous borehole observation of stress-strain in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(5): 42–47 (in Chinese).

邱泽华, 池顺良. 2013. YRY-4 型钻孔应变仪观测的 P 波剪应变[J]. 地震, **33**(4): 64–70.

Qiu Z H, Chi S L. 2013. Shear strains of P-wave observed with an YRY-4 borehole strainmeter[J]. *Earthquake*, **33**(4): 64–70 (in Chinese).

邱泽华, 石耀霖. 2004. 观测应变阶在地震应力触发研究中的应用[J]. 地震学报, **26**(5): 481–488.

Qiu Z H, Shi Y L. 2004. Application of observed strain steps to the study of remote earthquake stress triggering[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(5): 481–488 (in Chinese).

邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 2005a. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(1): 118–122.

Qiu Z H, Shi Y L, Ouyang Z X. 2005a. Relative in-situ calibration of 4-component borehole strainmeters[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(1): 118–122 (in Chinese).

邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 2005b. 四分量钻孔应变观测的实地绝对标定[J]. 地震, **25**(3): 27–34.

Qiu Z H, Shi Y L, Ouyang Z X. 2005b. Absolute in-situ calibration of 4-component borehole strainmeters[J]. *Earthquake*, **25**(3): 27–34 (in Chinese).

邱泽华, 马瑾, 池顺良, 刘厚明. 2007. 钻孔差应变仪观测的苏门答腊大地震激发的地球环型自由振荡[J]. 地球物理学报, **50**(3): 797–805.

- Qiu Z H, Ma J, Chi S L, Liu H M. 2007. Earth's free torsional oscillations of the great Sumatra earthquake observed with borehole shear strainmeter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(3): 797–805 (in Chinese).
- 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 唐磊, 宋莱. 2010. 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*, **40**(8): 1031–1039.
- Qiu Z H, Zhang B H, Chi S L, Tang L, Song M. 2011. Abnormal strain changes observed at Guzan before the Wenchuan earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, **54**(2): 233–240.
- 邱泽华, 唐磊, 张宝红, 宋莱. 2012. 用小波-超限率分析提取宁陕台汶川地震体应变异常[J]. *地球物理学报*, **55**(2): 538–546.
- Qiu Z H, Tang L, Zhang B H, Song M. 2012. Extracting anomaly of the Wenchuan earthquake from the dilatometer recording at NSH by means of wavelet-overrun rate analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(2): 538–546 (in Chinese).
- 邱泽华, 张国宏, 张宝红, 唐磊, 宋乃波, 郭燕平, 周龙寿, 赵京轶, 苏文浩. 2013. 用高密度电法勘探预判钻孔应变观测点岩石完整性[J]. *地震地质*, **35**(4): 805–816.
- Qiu Z H, Zhang G H, Zhang B H, Tang L, Song N B, Guo Y P, Zhou L S, Zhao J Y, Su W H. 2013. Prospecting underground condition for borehole strain-monitoring location by means of resistivity imaging survey[J]. *Seismology and Geology*, **35**(4): 805–816 (in Chinese).
- 苏恺之. 1977. 地应力相对测量方法[C]//全国地应力专业会议论文选编(上): 42–61.
- Su K Z. 1977. Methods of relative measurement of ground stress[C]//*Selected Papers of the National Conference on Stress Measurement, Part 1*: 42–61 (in Chinese).
- 苏恺之. 1982. 液位型体积式应变仪的工作原理[J]. *地震科学研究*, **4**: 57–62.
- Su K Z. 1982. How does hydraulic dilatometer work?[J]. *Research of Earthquake Science*, **4**: 57–62 (in Chinese).
- 唐磊, 邱泽华, 阚宝祥. 2007. 中国钻孔体应变台网观测到的地球球型振荡[J]. *大地测量与地球动力学*, **27**(6): 37–44.
- Tang L, Qiu Z H, Kan B X. 2007. Earth's spheroidal oscillations observed with China borehole dilatometer network[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **27**(6): 37–44 (in Chinese).
- Armstrong B H. 1969. Acoustic emission prior to rockbursts and earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(3): 1259–1279.
- Bakun W H, Aagaard B, Dost B, Ellsworth W L, Hardebeck J L, Harris R A, Ji C, Johnston M J S, Langbein J, Lienkaemper J J, Michael A J, Murray J R, Nadeau R M, Reasenber P A, Reichle M S, Roeloffs E A, Shakal A, Simpson R W, Waldhauser F. 2005. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake[J]. *Nature*, **437**(7061): 969–974.
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted[J]. *Science*, **275**(5306): 1616–1617.
- Gladwin M T. 1984. High precision multi-component borehole deformation monitoring[J]. *Rev Sci Instru*, **55**: 2011–2016.
- Haimson B C. 2010. The effect of lithology, inhomogeneity, topography, and faults, on in situ stress measurements by hydraulic fracturing, and the importance of correct data interpretation and independent evidence in support of results [C]//*International Symposium on In-Situ Rock Stress*. Salzburg: International Society for Rock Mechanics; 11–14.
- Hudson J A, Feng X T. 2010. Variability of in situ rock stress[C]//*International Symposium on In-Situ Rock Stress*. Salzburg: International Society for Rock Mechanics; 3–10.
- Ishii H. 2001. Development of new multi-component borehole instrument[J]. *Report of Tono Research Institute of Earthquake Science*, **6**: 5–10 (in Japanese).
- Johnston M J S, Borchardt R D, Linde A T, Gladwin M T. 2006. Continuous borehole strain and pore pressure in the near field of the 28 September 2004 M_{6.0} Parkfield, California, earthquake; Implications for nucleation, fault response, earthquake prediction, and tremor[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(4B): S56–S72.
- Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, Madariaga R, Main I, Marzocchi W, Papadopoulos G, Solovlev G, Yamaoka K, Zschau J. 2011. Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for utilization[J]. *Ann*

Geophys, **54**(4): 315–391.

Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, Gwyther R L, Bilham R G. 1996. A slow earthquake sequence near San Juan Bautista, California in December 1992[J]. *Nature*, **383**: 65–69.

Mogi K. 1982. Earthquake as acoustic emission: 1980 IZU Peninsula earthquake in particular[J]. *J Acoust Emission*, **1**(1): 37–44.

Qiu Z H, Tang L, Zhang B H, Guo Y P. 2013a. In situ calibration of and algorithm for strain monitoring using four-gauge borehole strainmeters (FGBS)[J]. *J Geophys Res*, **118**(4): 1609–1618.

Qiu Z H, Yang G, Tang L, Guo Y P, Zhang B H. 2013b. Abnormal strain changes observed by a borehole strainmeter at Guzan before the $M_s 7.0$ Lushan earthquake[J]. *Geodesy and Geodynamics*, **4**(3): 19–29.

Sacks I S, Evertson D W. 1971. A sensitive borehole strain-rate meter[J]. *Carnegie Inst Washington Yearbook*, **68**: 448–455.

Sacks I S, Linde A T, Suyehiro S, Snoke J A. 1978. Slow earthquakes and stress redistribution[J]. *Nature*, **275**: 599–602.

Stephansson O, Zang A. 2010. How to generate the Final Rock Stress Model (FRSM) at a site or an area[C]// *International Symposium on In-Situ Rock Stress*. Salzburg: International Society for Rock Mechanics; 15–26.

Wyss M. 1991. *Evaluation of Proposed Earthquake Precursors*[M]. Washington D C: American Geophysical Union; 1–94.

Wyss M. 1997a. Cannot earthquakes be predicted? [J]. *Science*, **278**(5337): 487–490.

Wyss M. 1997b. Second round of evaluations of proposed earthquake precursors[J]. *Pure Appl Geophys*, **149**(1): 3–16.