

观测应变阶在地震应力触发研究中的应用^{*}

邱泽华^{1, 2)} 石耀霖²⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

摘要 对中国钻孔应变台网观测到的昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震的应变阶资料的研究结果表明: ① 很多观测值与静力位错理论计算值不符合; ② 北方地震较活跃地区的很多台站观测到异常大的应变阶, 而南方构造运动较不活跃地区的台站虽然也观测到地震波动, 但是应变阶不明显. 由此推断, 地震的触发(可能是动态触发)作用对远场的实际地震应变变化具有重要影响. 也就是说, 远场的构造活动(可能是断层活动)是否曾被地震触发, 可能决定当地的应变场变化的主要特征. 进一步对昌平台 1999 年 3 月 11 日张北地震与 1999 年 11 月 1 日大同地震的观测资料对比分析表明: 断裂带的分布情况对实际地震应变变化有直接影响. 这证明观测到的异常大的地震应变阶可能是地震触发了当地的断层活动的表现.

关键词 应力触发 应变观测 地震应变阶

中图分类号: P315.72+7

文献标识码: A

引言

当代地震学认为, 地震是构造应力增大到一定程度使断层滑动造成的; 反过来, 断层滑动将释放应力. 实际上, 当一次大地震发生时, 发震断层的破裂并不导致所有断层的应力释放, 而是根据断层之间的几何关系, 在某些断层上造成应力卸载(释放), 使其趋于稳定; 而在另一些断层上造成应力加载, 使其趋于滑动.

作为近似, 断层的强度 τ 由 Byerley 定律决定: $\tau = \mu(\sigma_n - p)$. 其中, μ 为摩擦系数, σ_n 为正应力, p 为孔隙水压. 设 τ_0 为实际剪应力, 定义库仑应力函数

$$F = \tau_0 - \mu(\sigma_n - p) \quad (1)$$

$$\Delta F = \Delta\tau_0 - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p) \quad (2)$$

当 $\Delta F < 0$ 时, 应力状态远离破裂, 地震危险会减小; 当 $\Delta F > 0$ 时, 应力状态接近破裂, 地震危险会增加. 当断层因这种应力变化而发生活动时, 就称为地震应力触发断层活动. 对地震应力触发问题的探讨, 是国际地球动力学以及地震学研究的热点, 其基本思想是: 地震可以触发剪切应力接近强度的断层发生滑动. 有关的大量研究结果, 可以参见 Harris (1998)、石耀霖(2001)和万永革等(2002)文献.

^{*} 国家自然科学基金(40374011)和地震科学联合基金(1040037)以及大城市活断层探测项目共同资助.
2003-03-31 收到初稿, 2003-11-20 收到修改稿并决定采用.

长期以来,关于应力触发的讨论,一直停留于主要利用间接的测震资料,直接的应力(应变)变化观测资料非常稀少.中国的钻孔连续应力(应变)观测台网,有 30 多年的历史,目前仍在正常运行(邱泽华,张宝红,2002).高精度的数字化应变观测系统投入使用以来,由于采样率达到每分钟一次,已经观测到很多震时的应变阶跃变化.因为这些资料直接反映了实际的应力场变化,所以可以为应力触发问题研究提供新的证据.

利用中国地震局地壳应力研究所昌平综合地应力(应变)台的资料,我们研究了 1998 年 1 月 10 日和 1999 年 3 月 11 日的两次张北地震时的应变变化.结果表明:实际观测到的地震应变阶,比利用线弹性静力位错公式(Okada, 1985)计算得到的理论值大很多,甚至达到 1~2 个数量级(邱泽华,石耀霖,2003).为进一步探讨这种现象是否具有普遍性及其物理意义,我们搜集并研究了我国钻孔应变台网观测到的昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震的体应变阶数据,并对震级相当、与昌平台震中距也相当的 1999 年 3 月 11 日张北地震和 1999 年 11 月 1 日大同地震的应变阶观测资料进行了对比分析.结果表明,这种现象可能与地震应力触发断层活动有关.

1 对昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震体应变阶的观测和研究

中国钻孔应力-应变观测台网使用的体应变观测仪器,主要是中国地震局地壳应力研究所研制的 TJ 系列体应变仪(苏恺之等,1987).这种仪器的探头安装在岩石钻孔中,深度一般为 50~100 m.这种仪器的分辨率达到 10^{-9} ,可以清楚地记录到固体潮,并且有良好的稳定性. TJ 系列体应变仪从 1981 年开始投入观测,经过“九五”的建设,到目前为止,已在我国东部地区初步形成观测网络(图 1),成为钻孔应力-应变地震监测台网的骨干力量.

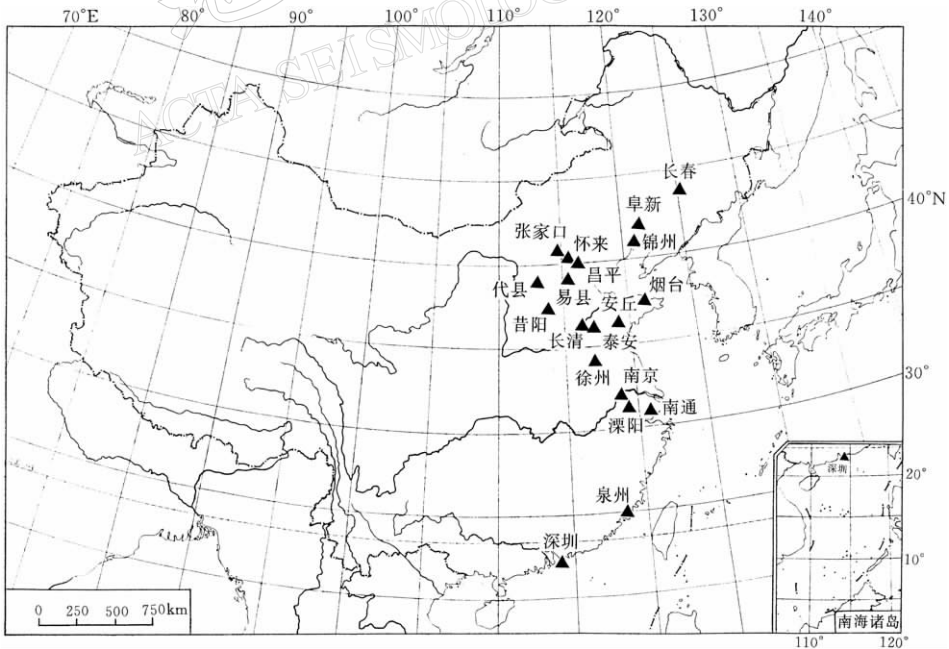


图 1 本文所用记录到昆仑山口西 8.1 级地震的体应变台站分布

1.1 观测资料

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s8.1$ 大地震(36.2°N , 90.9°E)是近年来中国大陆发生的最大地震之一,产生了长达 400 km 的地表破裂(Lin *et al*, 2002). 此次 $M_s8.1$ 大地震也是整个钻孔应力-应变观测台网共同记录到应变变化的第一次大地震:包括北到吉林的长春台,南至福建的泉州台、广东的深圳台,都清晰地记录到了大地震的分钟值应变波形. 更重要的是,很多台站都记录到明显的地震应变阶. 我们选用了其中固体潮清晰、观测比较可靠的资料进行研究(图 2). 安丘台资料噪声水平偏高,这里没有列入,可在赵银刚^①的观测报告中看到.

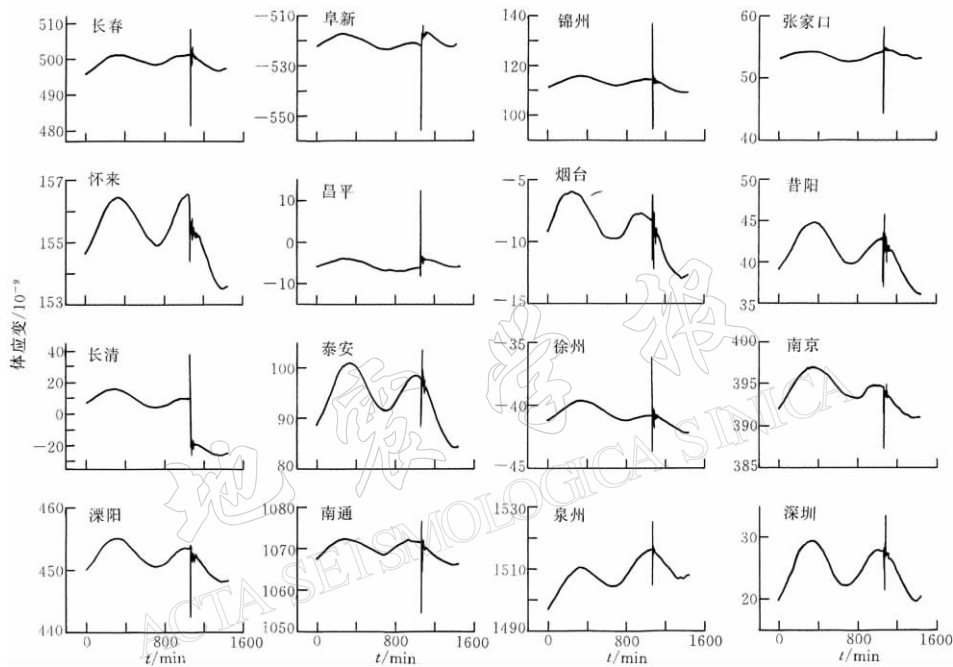


图 2 昆仑山口西 8.1 级地震的部分观测同震体应变变化(收缩为正, 膨胀为负)

因为我们选用的台站都记录到形态标准的固体潮变化,所以可以通过比较固体潮相位确定数据符号的正确性. 一般情况,对于阶跃变化明显的曲线,可以直接读出变化量,不会降低分析精度. 对于难以识别的情况,可能会出现一定的误差,但是不影响本研究的结论. 本研究给出的数据是直接读取的.

这里需要说明的是,早在 Sacks-Evertson 体应变仪刚投入使用不久,就观测到地震应变阶. 为确定这种应变阶的可靠性,研制者用人工爆炸源进行了观测实验. 对于不同的炸药量,发现其造成的应变阶不仅都是压缩的,而且其大小与炸药量成正比,与理论估计相符;并且即使加速度很大,仪器也能正常工作(Sacks *et al*, 1971). 后来在南非 ERPM 金矿中安装的 3 套仪器给出了更好的结果:大量(159 次)微震统计数据进一步证实了应变阶观测记录是可靠的(McGarr *et al*, 1982). 早期的 TJ-1 型体应变仪在原理和结构上,都与 Sacks-Evertson 体应变仪相同,后来研制的 TJ-2 型体应变仪的内部没有了活动部件,耐震

① 赵银刚. 2002. 安丘台昆仑山 8.1 级地震体应变观测报告. 地壳构造与地壳应力, (1~2): 33

和频响性能得到进一步改善.

1.2 分析结果

对于此次大地震, USGS(美国地质调查局)、Harvard、ERI(日本东京大学地震研究所)以及中国地震局地球物理研究所分别给出了不同的震源机制解. 根据 Lin 等,(2002)和陈文彬等(2001)的文献, 地震地表破裂整体走向为 $N80^{\circ}\sim 85^{\circ}W$, 并且有左旋水平运动的特点. 这与东京大学地震研究所给出的震源机制解(走向: $N89^{\circ}E$; 倾角: 98° ; 滑动角: -2°)比较符合.

对地震参数的统计研究给出了地震震级与一系列断层参数之间的经验公式. 宇津德治(1987)主编的《地震事典》对此进行过归纳:

断层滑动量 $D(\text{cm})$ 与震级 M 的关系: $\lg D = 0.5M - 1.3$ (3)

断层面积 $S(\text{km}^2)$ 与震级 M 的关系: $\lg S = 1.0M - 3.9$ (4)

断层长度 $L(\text{km})$ 与震级 M 的关系: $\lg L = 0.5M - 1.8$ (5)

作为初步研究, 我们采用了这些公式, 求出断层宽度约为 31 km(因为断层接近直立, 所以深度也近似为 31 km), 滑动量的估计值为 5 m. 基于所有这些参数, 我们利用应力触发研究中普遍使用的 Okada(1985)基于线弹性的方法, 对此次地震造成的同震体应变变化进行了计算. 其结果见表 1.

表 1 昆仑山 $M_s8.1$ 大地震的观测和理论体应变阶跃变化

台站	震中距/km	观测值/ 10^{-8}	理论值/ 10^{-8}	仪器
长春	3250	0.2	-0.04	TJ-2
阜新	2870	5.3	-0.05	TJ-2
锦州	2810	0.3	-0.05	TJ-1
张家口	2250	0.3	-0.11	TJ-1
怀来	2300	-1.2	-0.09	TJ-1
昌平	2360	2.3	-0.08	TJ-1
烟台	2780	0.0	-0.01	TJ-2
安丘	2580	0.1	0.00	TJ-2
昔阳	2090	-0.4	-0.04	TJ-2
长清	2330	-28.0	0.00	TJ-2
泰安	2390	0.1	0.00	TJ-2
徐州	2400	0.2	0.04	TJ-1
南京	2590	-0.2	0.05	TJ-2
溧阳	2650	-0.3	0.05	TJ-2
南通	2790	-0.3	0.05	TJ-2
泉州	2810	0.0	0.08	TJ-2
深圳	2610	0.1	0.11	TJ-2

注: “-”代表膨胀, “+”代表收缩.

从表 1 可见, 在距震中 2 000 km 以外的我国东部地区, 除张家口、代县和深圳外, 体应变变化的理论值一般为 10^{-10} 量级或者更低, 小于观测仪器的分辨率. 然而很多台站实际记录的体应变变化都在 10^{-9} 量级上, 不少还达到了 10^{-8} 量级, 长清台甚至记录到 10^{-7} 的体应变变化. 更有甚者, 至少有一半台站记录到的变化与理论变化符号相反. 实际上, 山西代县台和河北易县台也记录到超大幅度的地震应变阶, 超出仪器量程, 无法读取应变阶大小, 因而本研究都没有选用.

记录的阶跃变化分布看起来有这样的特点：地震比较活跃的北方地区(泰安以北)，例如山西代县、河北的易县和怀来、北京昌平、山东长清、辽宁阜新等台，在 2 000 km 外，都观测到比理论值大 1~3 个量级的体应变阶跃变化；而构造比较稳定的南方地区(徐州以南)，就没有一个台有明显的应变阶跃变化。由此我们产生这样的推断：远处地震所造成的观测点的应力变化，并非只决定于震源的断层滑动，而是同时与观测点附近的构造以及地震活动性相关。

2 对昌平台附近两次地震的观测和研究

我们重点讨论过昌平台观测到的 1998 年 1 月 10 日和 1999 年 3 月 11 日两次张北地震的异常大的应变阶(邱泽华，石耀霖，2003)。我们曾经提到，1997 年以来，台站附近共发生过 3 次较大的地震，除两次张北地震外，还有一次是 1999 年 11 月 1 日大同地震。从表 2 可见，大同地震与 1999 年 3 月 11 日张北地震的震级相当，到昌平台的距离(约 170 km)也相当。然而有趣的是，大同地震昌平台没有记录到明显的应变阶。

作为地应力(应变)综合观测台，除体应变观测外，昌平台还有分量应变和差应变两种观测。3 种仪器的探头分别安装在 3 个钻孔中。对于两次地震，3 种仪器观测变化呈现相同的特征：1999 年 3 月 11 日的张北地震造成了异常大的应变阶，1999 年 11 月 1 日大同地震没有造成明显的应变阶(图 3 和图 4)。这说明观测到的两次地震的这种特征是对事实的可

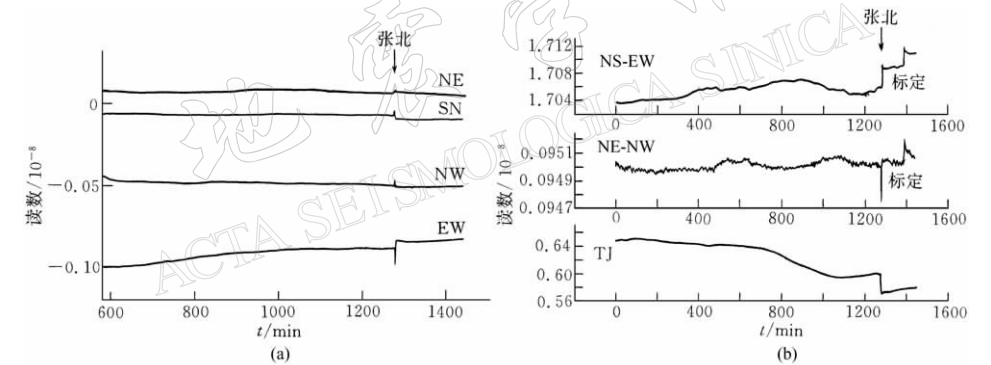


图 3 1999 年 3 月 11 日张北地震昌平台观测到的应变变化

(a) 分量应变观测曲线；(b) 差应变(NS-EW, NE-NW)和体应变(TJ)观测曲线

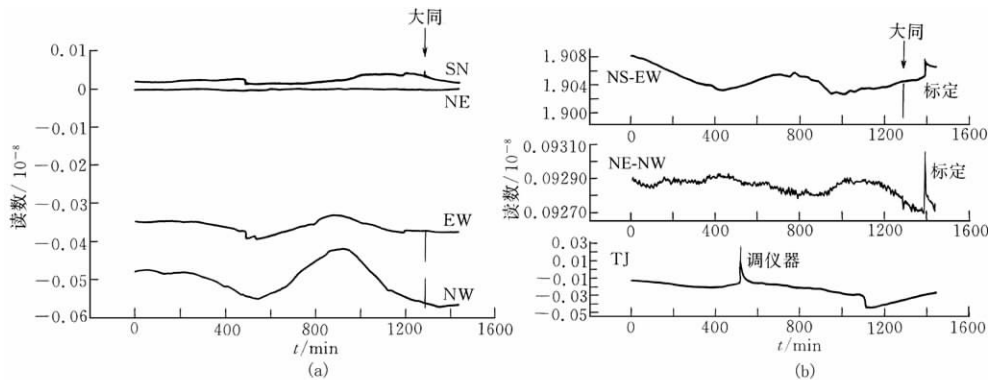


图 4 1999 年 11 月 1 日大同地震昌平台观测到的应变变化

(a) 分量应变观测曲线；(b) 差应变(NS-EW, NE-NW)和体应变(TJ)观测曲线

表 2 不同资料来源给出的两次地震的震级和深度

资料来源	1999 年 3 月 11 日张北地震		1999 年 11 月 1 日大同地震	
	M_s	深度/km	M_s	深度/km
中国地震台网	5.6	17	5.6	10
Harvard	5.2	15	5.3	15
USGS	5.1	33	5.3	33

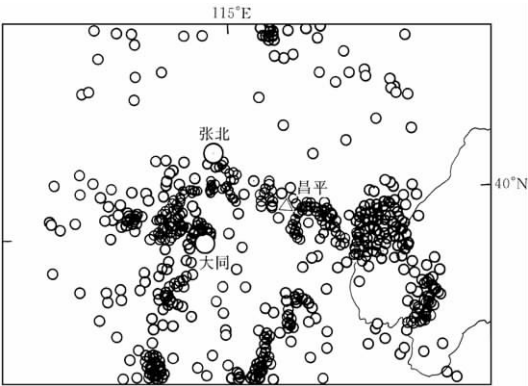


图 5 昌平台站, 张北地震和大同地震震中位置以及 1978 年以来 3 级以上地震分布

靠的反映。

实际上, 根据表 2 中 Harvard 和 USGS 的数据, 大同地震的震级比张北地震还稍大。同时, 根据中国地震台网的数据, 大同地震的震源深度比张北地震还稍小。如果不考虑其它因素, 这些都应该使大同地震产生比张北地震较大的应变阶, 而事实却是相反。为探讨出现这种情况的原因, 我们将 1978 年以来附近地区的 3 级以上地震的震中绘在图 5 上, 发现这可能与地震活动相关。地质上, 北西走向的震中密集分布的条形地区被称为张家口—渤海断裂带。我们注意到: 张北地震

的震中因为与昌平台同处于张家口—渤海断裂带上, 所以造成比理论值大得多的应变阶跃变化; 而大同地震的震中因为与昌平台不在同一条断裂带上, 所以没有明显的应变阶跃变化。

我们认为, 异常大的观测地震应变阶与断裂带的这种关系, 只能用应力触发来解释。目前还没有充分的证据说明张家口—渤海断裂带的性质究竟如何, 是否存在一条贯穿整个断裂带的大断层, 或者是否整个断裂带由一系列互相不连接的小断层构成。但是, 两次张北地震对该断裂带上的断层活动很可能有触发作用, 因此昌平台才会观测到异常大的地震应变阶。至于这种触发断层活动对应小地震还是静(慢)地震, 还需要进行更深入的研究。

3 结语

就本质而言, 地震应力触发问题不过是: 一条断层滑动使应力场变化, 在有利的条件下, 可以触发其它断层滑动。用测震资料研究这种现象, 优点是地震的发生密切相关, 但是这同时又是缺点。因为当地震比较小或者台网密度不够时可能监测不到, 所以只用测震资料研究这种现象, 难免丢失很多信息, 导致研究结论的偏差。作为补充, 观测地震应变阶资料可以为地震应力触发研究提供新的证据。这里有两方面的有利条件: 一方面, 观测地震应变阶是比较确定的应变变化; 另一方面, 计算地震应变场变化的静力位错理论得到比较普遍的公认。当然, 如果有资料的话, 还可以利用其它与地震相关的观测应变变化(例如慢地震变化)来开展研究。

我们用中国现有的数字化钻孔应力-应变观测台网的地震应变阶资料研究地震应力触发问题, 结果表明: ① 大地震可能触发远处的同震断层活动; ② 这种地震触发的同震断层

活动与断裂带的分布有直接关系. 这种触发很可能是动态的, 但是又导致了“静态”应变场的异常变化. 从近场变化到远场证据, 从静态影响到动态作用, 实际上应力触发的概念一直在发展. 在时间上, 人们以前特别注意有时间延迟的情况, 但是最近的观测表明, 地震的同时也有这种现象发生(Fialko *et al.*, 2002). 可以这样设想: 地壳是由很多断块拼合而成, 断块之间存在断层; 当受到震动时, 断块之间就可能因“松动”而发生相对错动. 有关论述可以参见 Marone(2000)的文章. 目前尚无法说明的是直接应观测值的断层尺度, 可能是相当大规模的断层, 也可能是比较小的断层. 但是, 多个仪器在不同钻孔中观测到相同的现象, 这说明不是钻孔中的裂隙活动导致的.

本研究得到张国民研究员、苏恺之研究员、王勇研究员, 以及张国红和刘福生等的帮助. 在此表示衷心地感谢.

参 考 文 献

- 陈文彬, 徐锡伟, 张志坚, 等. 2001. 2001 年 11 月 14 日青新交界 $M_s 8.1$ 地震地表破裂带的初步调查[J]. 西北地震学报, **23**(4): 313~317
- 邱泽华, 石耀霖. 2003. 地震造成远距离应力阶变的观测实例[J]. 中国科学, **33**(增刊), 60~64
- 邱泽华, 张宝红. 2002. 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, (6): 5~9
- 石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考[J]. 地震, **21**(3): 1~7
- 苏恺之, 刘瑞民, 裴玉珍, 等. 1987. 液位型和液压型体积式应变仪[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(1)[C]. 北京: 地震出版社, 131~135
- 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2002. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, **24**(5): 533~551
- 宇津德治主编. 1987; 李裕彻, 卢振业, 丁鉴海, 等译. 1990. 地震事典[M]. 北京: 地震出版社, 317~318
- Fialko Y, Sandwell D, Agnew D, *et al.* 2002. Deformation on nearby faults induced by the 1999 Hector Mine earthquake [J]. *Science*, **297**: 1 858~1 862
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24 347~24 358
- Lin A, Fu B, Guo J, *et al.* 2002. Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 $M_s 8.1$ Central Kunlun earthquake[J]. *Science*, **296**: 2 015~2 017
- Marone C. 2000. Earthquake science: Shaking faults loose[J]. *Nature*, **408**: 533~535
- McGarr A, Sacks I S, Linde A T, *et al.* 1982. Coseismic and other short-term strain changes recorded with Sacks-Evertson strainmeters in a deep mine, South Africa[J]. *Geophys J R astr Soc*, **70**(3): 717~740
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**(4): 1 135~1 154
- Sacks I S, Suyehiro S, Evertson D W, *et al.* 1971. Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Pap Met Geophys*, **22**: 195~207

APPLICATION OF OBSERVED STRAIN STEPS TO THE STUDY OF REMOTE EARTH- QUAKE STRESS TRIGGERING

Qiu Zehua^{1, 2)} Shi Yaolin²⁾

1) *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China*

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Abstract: A study of the Kunlun Mountain earthquake of $M_s=8.1$ based on observed coseismic strain steps from the borehole strain monitoring network over China has been carried out with some interesting results. Firstly, many recordings disagree with theoretic calculation using static dislocation model. Secondly, abnormally large strain steps are observed at quite a few stations in the tectonically active east-northern China, while in the relatively inactive east-southern China no obvious steps are recorded. It is inferred that seismic stress triggering may significantly affect remote seismic strain field. In other words, whether remote faulting be seismically triggered or not may determine the pattern of local seismic strain changes. Further comparison study results of March 11, 1999 Zhangbei earthquake and November 1, 1999 Datong earthquake show that the specific pattern of seismic zones has obvious influence on seismic strain changes in the region. This supports the idea that observed abnormal strain steps might be produced by coseismically stress-triggered local faulting.

Key words: stress triggering; strain observation; seismic stress step