***** ¥综述∦ *****

重复地震研究综述

王伟涛,王宝善

(中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘 要:重复地震是指发生在断层同一位置上的一组地震,一般具有相似的震源机制解和相近的震级,在同一地震台记录上具有高度相似的波形。本文总结了重复地震研究的现状,着重介绍了重复 地震的识别方法以及重复地震在估算断层深部滑移速率以及测量波速变化等方面的应用,并对重 复地震的发生机理进行了讨论分析。

关键词:重复地震;滑动速率;波速变化;相关系数;机理

中图分类号:P315.6 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2011)03-0305-07

Review on Study of Repeating Earthquake

WANG Wei-tao, WANG Bao-shan

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Repeating earthquakes (RES) are a series of earthquakes regularly occurring at the same patch of a fault plane, which usually have approximately same magnitude and focal mechanism, thus produce nearly identical waveforms recorded at same seismic station. In this paper, the studies on RES are introduced and some aspects as the identification methods of RES, the applications of RES on estimating fault slip rate at depth and detecting velocity variation are given more attentions. The possible mechanisms for different types of RES are also discussed.

Key words: Repeating earthquake; Fault slip rate; Velocity variation; Cross-correlation coefficient; Mechanism

0 引言

天然地震是给人类造成巨大经济损失和人员伤 亡的自然灾害,同时也是我们研究地球内部结构和 变化的重要工具。在天然地震中有这样一种地震, 它们发震时刻相距一定时间,但却具有几乎相同的 发震位置和震源机制解,这样的一组地震被称为重 复地震^[1-3]。一组重复地震中各个事件的震级相近, 并且在同一个地震台上不同事件具有几乎相同的波 形记录,如图1所示。重复地震在地震学研究中扮 演着重要的角色。

<u>地震学家早期在火山区</u>域发现了重复地震,并

认为其同岩浆侵入有关^[4]。之后在位于板块边缘的 多个断裂带上都发现了重复地震,并发现重复地震 的发生同断层的活动性具有很大关系。在美国的 Parkfield 断层^[2,5]、Calaveras 断层^[6]、Hayward 断 层^[7]、土耳其的 Aantolian 断层^[8]以及日本的的俯 冲带^[9-11]和中国台湾东部地区^[12]都发现有重复地 震。对板内地震的研究也揭示板内断层也伴有重复 地震现象。Schaff 和 Richard 的研究表明,中国境 内发生的地震约有 10% 为重复地震^[13]。李乐等在 中国唐山震区、云南地区以及北京平原区都发现了

基金项目:中国地震局地球物理研究所基本科研专项(DQJB09B07,DQJB10A01,DQJB10B20);国家自然科学基金(41004019, 40874095)

收稿日期:2011-03-30

作者简介:王伟涛(1979-),男,河北唐山人,博士,助理研究员,主要从事重复震源研究.

重复地震[14-16]。

目前,多数研究者认为,重复地震的发生同断层 内分布的凹凸体有关^[2-3,6-16]。当周围有蠕滑特性物 质存在时,在空间上相互独立的凹凸体在周围稳定 蠕滑加载下有可能会发生重复破裂,从而产生重复 地震。相关的数值模拟和实验研究进一步佐证了这 一机制^[17-19]。由于大地震的断层破裂长度较大,再 次发生原地重复破裂的可能性不大,因此重复地震 的震级较小,一般在3级以下。但也有研究人员在 Fiji一Tonga 地区,South Sandwich Islands 等地区 发现了5级以上的重复地震^[20-21]。重复地震一般以 浅源地震为主(深度小于100 km),但也有少数较深 的重复地震存在^[22]。这些震级较大、深度较深的重 复地震往往发生在俯冲带附近,可能跟这些地区特 殊的地质构造以及深部物质性质有关^[21]。





相比普通的地震现象,重复地震的孕震机制和 波形特征都具有一定的特殊性,重复地震研究是地 震学研究的一个重要方面。本文将从重复地震的识 别方法以及重复地震在地震学研究中的应用两个方 面对重复地震研究进行介绍,并对不同类型的重复 地震发震机理进行简单讨论。

1 重复地震的识别方法

一组重复地震的发震位置接近,破裂区域重合, 震源机制解相似,从而会在同一台站上产生高度相 似的波形。因此,重复地震的识别也主要依据空间 位置、波形相似性以及两者的结合来进行。

重复地震是发生在同一位置的地震,因此可以 通过高精度的地震定位来进行识别。地震定位一直 是地震学研究的经典问题,台站分布、到时拾取精度 以及对地下速度结构的了解是影响地震定位精度的 主要因素。Waldhauser 和 Ellsworth 在 2000 年提 出了双差定位方法^[23],使用多个地震间的走时差和 理论计算值的残差来进行地震的相对定位,该方法 可以在一定程度上消除地下波速结构误差的影响, 并且通过波形互相关方法可以得到较为精确的震相 走时差,提高定位精度。在双差定位程序 HypoDD 中内置了地震群组(Cluster)识别功能,可以通过地 震的精确定位对重复地震进行群组识别和数目确 定^[24]。

重复地震的波形具有很高的相似性,波形不相 似的地震事件必然不是重复地震。利用互相关技术 计算事件波形的相似性,只对其中相似性较高的事 件进行重复地震识别,可以在一定程度上减小需要 精定位的地震事件的数目,并获得精确的震相相对 走时。Cheng 等^[25]首先分别计算两次事件 P 波和 S波的相关系数,将两个相关系数均大于 0.8 的地 震对作为相似地震,并选择其中相关系数大于 0.9 地震对参与后续精定位处理。Cheng 等^[25]指出,在 较高信噪比的情况下,可以通过互相关得到亚采样 点精度的走时差。在原始采样率100 Hz的情况下, 走时差拾取误差可以达到 0.1 ms 到 1 ms 之间,对 应的定位精度可以达到几米到几十米。Li 等[14] 利 用类似的方法对唐山震区的重复地震进行了识别, 并限定只有两个事件间隔时间大于100天时才将其 列为潜在的重复地震,进行后续定位计算。



图 2 联合相关系数和 P 波 S 波时距残差进行重 复地震识别的原理图(修改自文献[12])

Fig. 2 Schematic illustration of the composite criteria using cross correlation coefficient and dSmP for repeating earthquake identification (adapted from reference[12]).

对地震事件进行高精度的相对定位是进行重复 地震识别的一种重要方法,然而,当台站的分布方位 十分不均匀时,其定位精度很难达到进行重复地震 识别的标准。一个事件在某一台站上 P 波和 S 波 的到时差 SmP 可以反映该事件与此台站的距离。 据此,李乐等^[16]指出通过计算两个事件在同一台站 SmP 的残差 dSmP,也可以对事件的相对距离进行 约束。类似的处理方法也被 Chen 等用于台湾东部 的重复地震识别中^[12]。不同的是 Chen 等建立了由 相关系数和 SmP 残差 dSmP 组成的复合空间,同时 联合波形相似性和 dSmP 来对重复地震进行识别。 应用此种方法时,对某一台站记录到的两次地震事 件波形,选取 P 波到时之前 0.5 s 到之后 10 s 的窗 口计算波形最大相关系数 ccc,同时计算两个事件在 该台上的 dSmP。每一对地震事件在每个地震台上 得到的[dSmP,ccc]构成复合空间之后,通过设定相 所有可用的点投影到该复合空间之后,通过设定相 应 dSmP 和 ccc 的阀值,就可以进行重复地震的识 别,其识别原理可用图 2 来表示。

重复地震在同一地震台上具有高度相似的波 形,因此也可以通过直接测量波形的相似性对其进 行识别。Peng 等^[8]选择合适的窗口,对同一地震台 上记录到的事件进行了两两互相关计算,得到一个 相关系数矩阵,进而利用等价类分析理论直接基于 此矩阵来进行重复地震的识别。等价类分析理论指 出,通过设定一个阀值 T,当事件 A 和事件 B 的相 关系数大于 T,且事件 B 和事件 C 的相关系数也大 于 T 时,则可认为 A、B、C 三个事件为同一类。 Peng 等^[8]指出,当选择一个比较高的阀值 T,比如 T=0.95,就可以利用单个台站来进行重复地震识 别并可以联合多个台站的信息来进行进一步的确 认。类似的分析方法也被 Rowe 和 Myhill 用于相 似地震分析与重复地震识别中^[26-27]。

2 重复地震在地震学研究中的应用

重复地震在地震学研究中发挥了重要作用,其 研究主要分为两个方面,一种是对重复地震本身性 质的研究,一种是利用重复地震激发出的高度相似 的波形来开展相应的研究。

2.1 利用重复地震估算断层深部滑移速率

断层滑动速率反映了构造变形的长期平均水 平,是度量断层活动程度的重要参数。利用地质学 方法、GPS 观测以及 InSAR 观测都可以对断层的 平均滑动速率进行测量^[28-30]。然而这些大都是对地 表观测的分析,缺乏地下深部的信息。Nadeau 和 McEvilly 提出,重复地震是在周围稳定蠕滑加载下 凹凸体的重复破裂引起的,因此可以联合重复地震 的地震矩和重复间隔来计算断层深部的平均滑移速 率^[31]。其具体原理为:

假定断层内物质的剪切模量为μ,断层面面积 为A,单次事件 *i* 的标量地震矩为 M_i,则一个重复 地震序列所释放的累积标量地震矩 M_{sum}和累积滑动量 d 可以表示为:

$$M_{\rm sum} = \mu A d \tag{1}$$

由于重复地震是由同一断层的重复破裂引起的,因此对于同一组重复地震而言 A 是恒定的。对于选定的重复地震间隔 T_i,断层的滑动速率 s 可以表示为

$$s = \dot{d} = \frac{\dot{M}}{\mu A} = \frac{M_{\rm av}}{\mu A T_i} \tag{2}$$

其中 Mav表示该重复地震序列的平均标量地震矩。

在断层深部滑移速率研究中,往往通过 Hanks 和 Kanamori^[32]提出的地震矩一震级关系

 $\log(M_0) = 16.1 + 1.5M_{\rm L} \tag{3}$

进行近震震级 M_L 和标量地震矩 M_0 之间的换算。 并根据 Kanamori and Anderson^[33]提出的应力降同 地震矩关系式以及断层破裂圆盘模型计算破裂面积 A_1

$$A = \pi \left(\frac{7M_0}{16\Delta\sigma}\right)^{2/3} \tag{4}$$

一般假定地震应力降 $\Delta \sigma$ 设定为常量 3 MPa,剪 切模量 μ 取 3×10¹⁰ N/m²计算^[14-16]。



图 3 1988-1998 年圣安德鲁斯断层滑移速 率的变化趋势(实线表示利用重复地震 估算的断层深部滑移速率;虚线表示光 电测距仪记录的断层地表滑移速率。) (修改自文献[31])

利用重复地震得到的滑移速率反映的是重复地 震所在深度的断层滑移速率,因此能反映孕震深度 上断层的活动特征。Nadeau 和 McEvilly^[31]利用 Parkfiled 地区的重复地震研究了 1987-1998 年之 间地表以下不同深度的断层滑动速率及其变化,其 结果同该地区的地震活动性以及地表形变记录都具 有良好的吻合,如图 3 所示。Isarashi 等^[34]利用重 复地震研究了日本东北俯冲带上滑动速率的空间分 布,为研究板间耦合的时空变化提供了定量的依据。 Li 等^[14]利用重复地震估算出唐山断裂带地下深处 约 15 km 的断层滑动速率约为 2.6 mm/a,其结果 同地面 GPS 观测结果相符,反映了 1976 年唐山大 地震破裂区在稳定的区域构造加载作用下正发生着 蠕滑。李乐等^[15-16]也对云南地区以及北京平原区的 断裂带的滑动速率进行了研究。这些结果为研究板 内活动断层的变形行为提供了极有价值的信息。

2.2 以重复地震作为震源的地震学研究

重复地震是一种天然的重复震源,利用其激发出的波形,可以进行多种地震学研究。Li和 Richard²¹等人利用识别出的重复地震检验了 PDE 和 ISC 的定位精度. 蒋长胜等^[35-36]利用 Schaff 和 Richards^[13]给出的中国及邻区"重复地震对"的结果,用类似的方法评估了中国地震台网的定位精度,并对定位精度的区域分布进行了统计分析。

随着地震学研究的发展,人们不仅关心获得地 下介质的静态图像,也越来越多的关注地下介质性 质的动态变化^[37 39]。对地下介质性质变化的研究往 往是通过重复震源进行重复测量实现的。重复地震 激发的信号波形高度相似,而且往往一个重复地震 序列会持续一定时间,对重复地震激发出的信号差 异进行分析,可以得出地下介质变化的信息。 Zhang等^[40]]就利用了识别出的中等尺度的重复地 震序列对地球的内核旋转进行了研究。



两个重复地震事件所激发的信号具有极高的相 似性,因此可以用互相关的方法来对其波形的延时 进行精确测量。假定在两次事件发震间隔内,地下 介质中某个区域的波速发生了改变,则没有穿过这 个区域的射线其信号波形几乎重合,穿过该区域的 射线其信号波形具有时间延迟,如图 4 所示。通过 测量这个时间延时,可以对波速变化进行测量。一 般来说 S 波以及 S 波之后的尾波部分对介质波速的 变化较为敏感。尤其是地震波的尾波部分经过了多 重散射,在介质中的传播路径较长,对波速变化较为 敏感。因此利用波形互相关以及尾波干涉的方法可 以对介质波速的相对变化进行较为精确的测量^[41]。

重复地震同断层的行为具有密切的联系,因此 很多研究人员利用重复地震激发出的重复信号对断 层性质的变化进行了研究。

基于重复地震高度相似的波形,众多研究人员 对断层附近波速变化进行了测量。Baisch和Bokelmann^[42]研究了1989年Loma Prieta 地震前后5组 重复地震波形记录相似程度的变化。发现在地震之 后,临近破裂区的台站记录到重复地震波形相似程 度显著降低,距离破裂区较远的台站记录则变化不 大。同时,临近破裂区的台站记录到的重复地震的 波形相似程度随着时间的增加逐渐增加,显示了破 裂带的一个逐渐愈合的过程,他们将此解释为地震 引起的岩石微小裂隙的张开和闭合过程。

波形相似性的变化是对断层介质变化的定性描 述,随着记录质量的提高和数据处理方法的改进,利 用重复地震对断层介质性质尤其是波速相对变化的 定量研究也得到了较大的发展,其研究涵盖了震前 波速变化、同震波速变化以及震后断层恢复阶段的 波速变化多个方面。Ratdomopurbo 和 Poupinet[43] 利用重复地震研究了 1992 年 2 月印尼 Merapi 火山 喷发前波速的变化,发现在从 1991 年 5 月到 1991 年9月四个月中,地震波速增加了1.2%,反映了介 质中应力的增加和裂隙的闭合。Poupinet 等^[1]利用 重复地震研究了 1979 年加州 Coyote Lake 地震前 后 Calaveras 断层附近的波速变化,发现地震之后 在余震区域南端 5~10 km 的区域内波速大约降低 了 0.2%。Schaff 和 Beroza^[44]利用重复地震研究了 1989 年 Loma Prieta 地震和 1984 年 Morgan Hill 地震前后地震波波速的变化,发现 P 波速度减小了 1.5%,S波速度减小了3.5%。而且发现波速变化 的程度随着距离主震发生时刻的增加而迅速减小。 其结果显示了地震同震效应对破裂区内岩石的破坏 作用,以及震后初期较高的愈合速度。同时S波速 度比 P 波速度变化大,也表明流体可能在其中发挥 了重要作用。Li 等[45-46] 采用 2002 年到 2004 年在 San Andreas 断层附近记录到的重复地震分析了 2004 年 ParkfieldM_w 6.0 地震前后断裂带内波速的

变化。研究结果表明,在大约 200 m 宽,6 km 深的 区域内,同震作用对岩石的破坏使得地震之后波速 降低了 2.5%; 而在其后的 3~4 个月之内, 波速又 逐渐增大越 1.2%,表明断层存在一个刚性恢复的 愈合过程。同时他们发现,波速变化在时间和空间 上分布并不均匀。在垂直断层走向的方向上同震波 速降低的程度随着台站同断层距离的增加而逐渐减 小,波速显著降低的区域同破碎带的宽度相关。而 在断层愈合过程中波速增加的速度则随着时间的增 加而逐渐减小,显示了断层愈合在时间上的演化规 律。沿着断层走向的不同位置同震波速降低的程度 也不相同,在断层滑移量最大的区域波速降低最多。 他们还发现,P波和S波走时变化比率在破碎带内 的比率为 0.57 而在破碎带之外的围岩区内的比率 为 0.65,表明在破碎带内的岩石中可能存在流体的 参与。

3 讨论与结论

虽然重复地震在地震学研究中得到了广泛的应 用,但是对于重复地震的定义、判别标准和发生机制 还有很多问题需要深入研究。

虽然重复地震概念提出较早,但对重复地震目 前尚没有一个统一的定义。Poupinet 等^[1]将两个发 生在同一位置,并且在同一台站具有高度相似波形 的地震事件称为重复地震; Schaff 和 Richards^[13]则 将在 P 波之前 5 s 至 Lg 波之后 40 s 的时间窗内具 有 0.8 以上相关系数的两地震事件定义为重复地 震;Rubin^[47]认为空间位置、波形和震级都具有较高 的相似性的事件才被称为重复地震。这些定义可以 视为广义的重复地震概念。Nadeau 和 Johnson^[3] 基于重复地震的发生机理提出,重复地震是为稳滑 区域(大的蠕变区)包围的强的凹凸体的重复破裂, 只有破裂区域几乎重叠的地震事件才能被称为重复 地震。这种定义是狭义的重复地震概念。然而,由 于地震过程的复杂性,两次地震破裂面积不可能完 全一样,而只是存在重叠程度上的差别,两个地震的 是否重复还是一个相对的概念。本文提到的重复地 震研究大多是基于狭义重复地震概念的。

波形的相关系数是识别和验证重复地震的重要 参数之一,然而选用多大的相关系数作为阀值没有 统一的标准。Schaff 和 Richards^[13]利用远震波形 和相关系数阀值 0.8 来定义中国境内的重复地震; 李宇彤等^[48]利用辽宁区域地震台网记录的波形资 料对其结果中分布在辽宁地区的 23 对重复地震进 行了检验,发现远震波形相关意义上的"重复地震"有一定差 与区域台网波形相关意义上的"重复地震"有一定差 别,它们只有部分交集;Geller 和 Mueller^[49]提出, 当两个地震相距超过 1/4 波长时就很难取得较高的 相关系数;Baisch等^[50]利用数值模拟检验了 Geller 和 Mueller 的理论,指出当相关窗口选择为 2.8 倍 的 SmP 且相关系数达到 0.95 时,可以确定两个事 件之间的距离小于 1/4 波长。然而实际的波形记录 中的嗓音干扰、滤波频段均会对波形的相关系数产 生影响。在实际研究中需要依据需要研究的问题以 及所用数据的质量来确定。对震源重复性要求较高 的研究,例如测量孕震过程中的波速变化,需要选择 较高的相关系数对地震波形进行约束并联合定位结 果来进行确认。

在稳定加载下蠕变区包围的凹凸体的重复破裂 是目前被大多数研究人员认同的重复地震发生机 制。这种机制作用下产生的重复地震间隔时间较 长,为几个月到几年的尺度。但也有研究人员发现 有些重复地震序列之间的时间间隔仅仅有几天甚至 几个小时,这种重复地震被称为频发重复地震 (Burst Type Repeating Earthquakes),无法用稳滑 加载模型来解释^[6,12]。Templeton 等^[6]认为凹凸体 周边的较大地震或者慢地震的发生,可以引起局部 应力的增加,从而加速凹凸体的破裂,这种机制可以 解释部分重复地震序列的频发特征。但也有部分频 发重复地震没有观测到相应的触发源。Evans 和 Baisch 等^[51-52]发现当高压流体侵入岩石时也可以引 发重复地震。他们认为,当流体侵入到已有的裂隙 后有效正应力减小,当剪应力和正应力之比超过摩 擦强度时就会导致剪切滑动引发重复地震。综合来 看,重复地震的发生机制也有待于进一步的细化和 深化研究。

近年来,研究人员越来越多的重视对断层演化 过程的描述,重复地震被广泛的关注。联合这种天 然重复震源和多种人工重复震源对断层进行动态的 监测和描述,是地震学研究的一个重要发展方向。

[参考文献]

- [1] Poupinet G, Ellsworth W, Frechet J. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras fault, California[J]. J. Geophys. Res. 1984, 89:5719-5731.
- [2] Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V. Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas fault at Parkfield, California[J]. Science, 1995,267,503-507.

- [3] Nadeau R M, L R Johnson. Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquake[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1998, 88(3); 790-814.
- [4] Okada H. Watanabe H, Yamashita H, et al. Seismological significance of the 1977 – 78 eruptions and magma intrusion process of Usu volcano[J]. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1981,9:311-334.
- [5] Ellsworth W L. Characteristic earthquakes and long term earthquake forecasts: implications of central California Seismicity[A]//Cheng F Y, Sheu M S eds. Urban Disaster Mitigation: the Role of Science and Technology [G]. [s. l.]: Elsevier Science Ltd., 1995;1-14.
- [6] Templeton D, R M Nadeau, R Burgmann. Behavior of repeating earthquake sequences in central California and the implications for subsurface fault creep [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2008, 98(1); 52-65.
- [7] Burgmann R, D Schmidt, R M Nadeau, et al. Earthquake potential along the northern Hayward Fault, California [J]. Science, 2000, 289:1178-1182.
- [8] Peng Z, Y Ben-Zion. Spatio-temporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 M7.
 4 Yizmit and M7. 1 Duzce, Turkey, earthquake sequences[J]. Geophys. J. Int., 2005,160, 1027-1043.
- [9] Matsuzawa T, T Igarashi, A Hasegawa. Characteristic small earthquake sequence off Sanriku northeastern Honshu Japan
 [J]. Geophys. Res. Lett., 2002, 29(11).
- [10] Matsubara M, Y Yagi, K Obara. Plate boundary slip associated with the 2003 Off – Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data[J]. Geophys. Res. Lett., 2005, 32;L08316.
- [11] Uchida N, T Matsuzawa, T Igarashi, et al. Interplate quasi - static slip off Sanriku NE Japan estimated from repeating earthquakes[J]. Geophys. Res. Lett., 2003, 30(15):1801.
- [12] Chen K H, R J Rau, J C Hu. Variability of repeating earthquake behavior along the Longitudinal Valley fault zone of eastern Taiwan[J]. J. Geophys. Res., 2009, 114:B05306.
- [13] Schaff D P, Richards P G. Repeating seismic events in China[J]. Science, 2004, 303:1176-1178.
- [14] Li L, Q F Chen, Xin Cheng, et al. Spatial clustering and repeating of seismic events observed along the 1976 Tangshan fault, North China[J]. Geophys. Res. Lett., 2007,34(23); L23309.
- [15] Li L, Q F Chen, F L Niu, et al. Slip rate in the Lijiang-Ninglang fault zone estimated from repeating microearthquakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3):447-455.
- [16] 李乐,陈棋福.利用重复地震估算北京平原区隐伏断裂深部 活动速率[J].地震地质,2010,32(3):508-519.
- [17] Anooshehpoor A, Brune J N. Quasi-static slip-rate shielding by locked and creeping zones as an explanation for repeating earthquakes at Parkfield [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2001,91(2): 401-403.

- [18] Beeler N M, Lockner D L, Hickman S H. A simple stick -slip and creep-slip model for repeating earthquakes and its implication for microearthquakes at Parkfield [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2001,91(6);1797-1804.
- [19] Sammis C G, Rice J R. Repeating earthquakes as low-stressdrop events at a border between locked and creeping fault patches[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2001,91(3):532-537.
- [20] Isacks B L, L R Sykes, J Oliver. Spatial and temporal clustering of deep and shallow earthquakes in the Fiji - Tonga -Kermadec region [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1967, 57: 935-958.
- [21] Li A, P G Richards. Using earthquake doublets to study inner core rotation and seismicity catalog precision [J]. Geochem. Geophys. Geosyst., 2003,4(9):1072.
- [22] Wiens D A, N Snider. Repeating deep earthquakes: Evidence for fault reactivation at great depth[J]. Science, 2001, 293: 1463-1466.
- [23] Waldhauser F, W L Ellsworth. A double-difference earthquake location algorithm. Method and application to the northern Hayward fault[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90:1353-1368.
- [24] Waldhauser F. Hypo D D: A computer program to compute double-difference earthquake locations [R]. [s. l.]: USGS Open File Rep., 2001, 01-113.
- [25] Cheng X, F L Niu, P G Silver, et al. Similar microearthquakes observed in western Nagano, Japan, and implications for rupture mechanics[J], J. Geophys. Res., 2007,112,1-13.
- [26] Rowe C, Aster R, Borchers B, et al. An automatic, adaptive algorithm for refining phase picks in large seismic data sets [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2002, 92(5):1660-1674.
- Myhill R, D McKenzie, K Priestley. The distribution of earthquake multiplets beneath the southwest Pacific [J].
 Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301:87-97.
- [28] 闻学泽.活动断裂地震潜势的定量评估[M].北京:地震出版 社,1995.
- [29] 张培震,王敏,甘卫军,等. GPS 观测的活动断裂滑动速率及 其对现今大陆动力作用的制约[J]. 地学前缘,2003,10:81-92.
- [30] 孙建宝,徐锡伟,石耀霖,等.东昆仑断裂玛尼段震间形变场的 INSAR 观测及断层滑动率初步估计[J].自然科学进展, 2007,17(1):1361-1370.
- [31] Nadeau R M, McEvilly T V. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes [J]. Science, 1999, 285:718-721.
- [32] Hanks T C, Kanamori H. A moment magnitude scale[J]. J. Geophys. Res., 1979, 84:2348-2350.
- [33] Kanamori H, Anderson D L. Theoretical basis for some empirical relations in seismology[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1975, 65:1073-1095.
- [34] Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa A. Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan

subduction zone[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108:2249.

- [35] 蒋长胜,吴忠良.由"重复地震"给出的中国地震台网的定位精 度估计[J].中国地震,2005,21(2):147-154.
- [36] 蒋长胜,吴忠良,李宇彤,等. 首都圈地区"重复地震事件"及其 在区域地震台网定位精度评价中的应用[J]. 地球物理学报, 2008,51(3):817-827.
- [37] 秦建增,李德庆,谢汝一,等. 2008 年河南封丘 4 级震群前后 重力场时空演化特征[J].西北地震学报,2010,32(3):300-306.
- [38] 陆明勇,范雪芳,周伟,等.华北强震前地下流体长趋势变化特 征及其产生机理的研究[J].西北地震学报,2010,32(2):129-138.
- [39] 王宝善,王伟涛,葛洪魁,等.人工震源地下介质变化动态监测 [J].地球科学进展,2011,26(3):249-256.
- [40] Zhang J, X Song, Y Li, et al. Inner core differential motion confirmed by earthquake waveform doublets [J]. Science, 2005, 309: 1357-1360.
- [41] Wang B, Zhu P, Chen Y, et al. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry [J]. J. Geophys. Res. 2008,113:B12313.
- Baisch S, G R Bokelmann. Seismic waveform attributes before and after the Loma Prieta earthquake: scattering change near the earthquake and temporal recovery[J]. J. Geophys. Res. 2001,106:16323-16337.
- [43] Ratdomopurbo A, Poupinet G. Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano; application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia) [J]. Geophys. Res. Lett., 1995,22(7):775-778.
- [44] Schaff D P, G C Beroza. Coseismic and postseismic velocity

changes measured by repeating earthquakes[J]. J. Geophys. Res. ,2004,109: B10302.

- [45] Li Y G, P Chen, E S Cochran, et al. Seismic evidence for rock damage and healing on the san andreas fault associated with the 2004 M6. 0 parkfield earthquake[J]. Bull. Seismol. Soc. Am, 2006,96(4B):349-363.
- [46] Li Y G, P Chen, E S Cochran, et al. Seismic velocity variations on the San Andreas fault caused by the 2004 M6 parkfield earthquake and their implications[J]. Earth, Planets and Space, 2007,69:21-31.
- [47] Rubin A M. Aftershocks of microearthquakes as probes of the mechanics of rupture[J]. J. Geophys. Res., 2002,107 (B7):2142.
- [48] 李字彤,吴忠良,蒋长胜,等.利用辽宁区域地震台网记录分析"重复地震"[J].地震学报,2008,4:1-10.
- [49] Geller R J, C S Mueller. Four similar earthquakes in central California[J]. Geophys. Res. Lett., 1980,7(10),821-824.
- [50] Baisch S, Ceranna L, Harjes H P. Earthquake cluster; what can we learn from waveform similarity? [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. 2008,98 (6);2806-2814.
- [51] Evans K F, H Moriya, H Niitsuma, et al. Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3 km depth at the Soultz HDR site[J]. Geophys. J. Int., 2005, 160: 388-412.
- [52] Baisch S, R Weidler, R. Vörös, et al. Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin (Australia) [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. 2006,96(6):2242-2256.



Fig.6 The shapes of surface slip and safety factors under different loads.