

中国大陆强震孕育深处的变形模式构建^{*}

陈棋福^{1,2,3}, 李乐⁴, 姜金钟⁵

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 5. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对地震预测所面临的地球内部“不可入”和大地震“非频发”问题, 对重复地震探测获得的孕震深处滑动速率与浅表观测的结果进行对比分析, 采用空间换时间的方式初步构建了中国大陆强震孕育深处的变形模式; 还通过一些强震事例展示了利用重复地震进行陆内断裂带深部变形的原位探测的优势, 并提出应对断裂闭锁段和深浅构造变形差异显著地区的强震危险性加以深入研究。

关键词: 孕震模式; 深部变形; 重复地震; 强震危险性

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0232-09

0 引言

地震的突发性与巨大的破坏力给人类社会带来的巨大灾难, 激发了人们对地震的成因及其预测的探索。通过世界各国地震学家长期不懈的努力, 人们对地震的成因有了基本的了解, 在地震预测 (特别是中长期地震预测) 探索上取得了一些有意义的进展。但地震预测仍是极具挑战性、尚待解决的世界性科学难题之一, 地震预测的进展主要受到地球内部的“不可入性”、大地震的“非频发性”和地震物理过程的复杂性等因素的制约 (陈运泰, 2009)。地球内部的“不可入性”指的是人类目前还不能深入到处于高温高压状态的地球内部设置台站、安装观测仪器以对震源直接进行观测; 大地震是一种稀少的“非频发”事件, 通常情况下, 大地震的复发时间比人的寿命和现代仪器开展观测的时间长得多, 这限制了作为一门观测科学的地震学在对现象的观测和对经验规律的认知上的进展; 地震物理过程的复杂性体现在: 地震是发生于极为复杂的地质环境中的一种自然现象, 地震过程是高度非线性、极为复杂的物理过程, 地震震源区地质环境的复杂性以及地

震过程的高度非线性和复杂性则很可能导致地震前兆出现的复杂性和多变性 (陈运泰, 2009)。

地震复发概念可追溯到 1911 年 Reid 提出的弹性回跳理论, 他认为地震复发是应变能积累和释放过程的轮回。强震复发间隔常常长达数百年或上千年, 小地震的复发间隔则可能短至年尺度。Bufe 等 (1977) 以及 Geller 和 Mueller (1980) 对有限区域的地震活动进行了研究, 并考虑了不同频段的波形相似性, 确认了在美国加利福尼亚州中部断层上存在应变能重复积累释放的小震复发现象。近年来, 研究者在板块边缘的活动断裂带和俯冲带等不同的构造单元 (Nadeau *et al.*, 1995, 1999; Matsuzawa *et al.*, 2002; Peng, Ben-Zion, 2005; Chen *et al.*, 2009; Yu, 2013; Dominguez *et al.*, 2016) 及板内大陆地区, 如中国 (Schaff, Beroza, 2004; Schaff, Richards, 2011; Li *et al.*, 2007, 2011; 李乐等, 2008) 和韩国 (Kim, Kim, 2014) 相继发现了发生在同一断层部位, 且波形具有高度相似性、破裂面积相互重叠的小地震 (即重复地震或重复微震), 认为其属于孕育或发生过强震的大凹凸体周缘处于弱耦合状态的小凹凸体在区域构造加载作用下所发生的重复破裂 (Igarashi *et al.*, 2003)。Sammis 和 Rice (2001) 以

^{*} 收稿日期: 2019-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41874064 和 41774058) 资助。

及 Chen 和 Lapusta (2009) 通过数值模拟、理论分析和岩石实验等研究证实了这种重复地震发生的机理, 即重复地震的孕育发生过程实际上反映了其破裂区周围断层蠕滑区域的应变积累和滑动过程, 可以用以估算断层深部变形的滑动速率 (Nadeau, McEvilly, 1999), 即可作为天然的“地下蠕变计” (Turner *et al.*, 2013) 为探测“不可入”的地球内部和“非频发”大地震的孕震深处变形活动提供“原位”观测 (陈棋福等, 2015) 的重要信息。

笔者曾先后对曾发生 1976 年唐山 7.8 级地震、1996 年丽江 7.0 级地震、1998 年宁蒗 6.2 级地震、2001 年宁蒗 5.8 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震的唐山断裂带、丽江—宁蒗断裂带和龙门山断裂带开展了重复地震的分析研究 (Li *et al.*, 2007, 2011; 李乐等, 2008), 本文将在概述这些研究结果的基础上, 在强震孕育发展过程中遵循同一变形模式的地震成因认识框架下, 采用空间换时间的方式初步构建中国大陆强震孕育深处的变形模式, 并探讨了深浅变形差异与强震活动的关联性问题。

1 发震断裂的深部变形特征

1.1 唐山断裂带

唐山断裂带主要由 3 条平行的断裂组成 (国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982), 在 1976 年唐山大地震后, 该断裂带仍保持着较高的地震活动水平。

为研究唐山断裂带的深部变形特征, Li (2007) 等收集了 2001 年 10 月—2006 年 12 月首都圈数字化地震台网记录的 0.5~4.1 级地震资料, 利用唐山断裂带附近 150 km 范围内 46 个地震台记录的唐山断裂带周缘 619 次地震事件波形进行互相关分析, 把至少有一个台站记录到的 P 波前 1 s 至 S 波后 5 s 时间窗内 (下文中称为全波段) 相关系数 $cc > 0.8$ 的一组地震定义为相似地震, 并进一步采用如下原则来挑选多次相似地震对: ①相似地震的相关系数 $cc > 0.85$; ②到时拾取的误差小于 0.5 ms; ③平均重复间隔大于 100 d; ④到时拾取数大于 4 ($N-1$), 其中 N 是相似地震中的地震个数。对所选出的多次相似地震对, 用多事件相对定位方法进行重新定位, 经精定位确认后, 在唐

山断裂带周缘辨识出了一组准周期发生且破裂面积较为重叠的重复地震。进而由该组重复地震估算出其发震深处 (约 15 km 深度) 的滑动速率约为 2.6 mm/a, 这一结果与地表 GPS 观测给出的唐山—磁县断裂带的拉张速率为 2.5 mm/a 左右与走滑速率为 2 mm/a 左右的结果 (唐方头等, 2005) 较为一致。

1.2 龙门山断裂带

2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震发生在中国大陆南北地震带中段的龙门山断裂带, 该地震是中国继 1976 年唐山地震后发生的破坏性最强的一次大地震。汶川地震前, 龙门山断裂带地震活动较为平静, 没有 7 级以上地震的史料记载, 仅记录有 3 次 6 级以上强震, 分别为 1657 年汶川 6½ 级地震、1958 年北川 6.2 级地震和 1970 年大邑 6.2 级地震 (国家地震局震害防御司, 1995; 中国地震局震害防御司, 1999)。

许多学者对汶川地震前的构造地质和地貌等的研究表明: 龙门山断裂带的走滑滑动速率应不超过 3 mm/a (李勇等, 2008; Zhang *et al.*, 2010; Zhang, 2013)。汶川地震前的 GPS 观测表明: 横跨整个龙门山断裂带的滑动速率在 2~3 mm/a (Chen *et al.*, 2000; Shen *et al.*, 2005; Gan *et al.*, 2007; 王阆昭等, 2008)。尽管数千年尺度的地震地质研究和十年尺度的大地形变测量研究的结果稍有差异, 但相较周边的鲜水河断裂、安宁河断裂、昆仑断裂和小江断裂而言, 研究人员大都认为龙门山断裂带滑动速率较低 (King *et al.*, 1997; Holt *et al.*, 2000; Shen *et al.*, 2005; Gan *et al.*, 2007; 李勇等, 2008; 张培震等, 2008, 2009; Zhang *et al.*, 2010; Zhang, 2013), 以至于低估了该断裂带的地震危险性。

汶川地震后, Li 等 (2011) 收集了 2000 年 5 月—2008 年 4 月四川地震台网 (SSN) 和紫坪铺水库台网 (ZRSN) 记录的龙门山断裂带周缘 0.1~4.2 级地震资料, 基于重复地震分析研究龙门山断裂带的深部滑动速率。针对有可用数字波形资料的 5 246 次地震的原始波形做如下预处理: 先对波形进行 1~10 Hz 的带通滤波; 为了估算走时差, 对每秒 50 点或 100 点采样率的滤波后资料采用频域补零的方式进行内插来获取高采样率的波形, 内插后的采样间隔为 0.312 5 ms, 可视为相对到时

差的估计精度。对预处理后的资料通过波形互相关分析来挑选波形相似的地震,即以至少有一个台站记录到的全波段波形相关系数 $cc > 0.9$, 相对到时拾取误差小于 0.5 ms , 且平均复发间隔大于 100 d 的准则来挑选多重相似地震对。对于所筛选出的多重相似对, 地震的相对位置的确定方法如下: 首先简单地将同一个台站记录到的所有相似地震波形进行线性叠加后取平均值得到的波形作为这一相似地震对质心位置的参考地震波形; 然后求取相似地震对序列中的所有台站每一记录相对于参考地震波形的 $S-P$ 相对到时差, 采用多事件精定位方法 (Got *et al.*, 1994) 确定每一地震相对于序列质心的位置; 再基于圆盘破裂模型, 由地震震级计算出每个地震的破裂半径。对于龙门山断裂带东北段因地震台站分布稀疏而无法得到足够精确位置的多重相似地震对, 则采用基于 $S-P$ 到时差 Δt_{s-p} 约束地震对相对距离的方法 (Li *et al.*, 2011; 李乐, 陈棋福, 2010) 确定其相对位置。

在确定了每组多重相似对的地震相对位置后, 笔者识别出了 12 组具有准周期特性的重复地震。从采用改进的双差定位进行重定位的结果可见, 识别出的大部分重复地震分布在 2008 年汶川地震同震大破裂闭锁区的边缘, 揭示了重复地震活动与未来破坏性大震在空间位置上的密切关系。基于识别出的重复地震估算得到龙门山断裂带深部 $4 \sim 18 \text{ km}$ 的滑动速率为 $3.5 \sim 9.6 \text{ mm/a}$, 约为基于 GPS 和地质等浅表观测得出的滑动速率值的 $2 \sim 3$ 倍 (图 1), 所得到的深部高变形速率可以为解释不曾预料的汶川巨震的发生提供可能性。陈棋福等 (2015) 通过简单的黏弹性有限元模拟研究验证了重复地震的观测结果, 即龙门山断裂带深处的滑动速率比浅表的滑动速率大, 其 $5 \sim 19 \text{ km}$ 深度是高应力聚集成核区。对比同样基于重复地震估算得到的鲜水河断裂带南段 $3.6 \sim 18.7 \text{ km}$ 深度的滑动速率 ($3.0 \sim 10.2 \text{ mm/a}$) (李乐等, 2015) 和小江断裂带 $3.0 \sim 12.3 \text{ km}$ 深度的滑动速率 ($1.6 \sim 10.1 \text{ mm/a}$) (李乐等, 2013), 发现龙门山断裂带的深部变形速率和与其邻近的鲜水河和小江断裂带的基本相当。仔细分析龙门山断裂带中北段检测到的 10 组重复地震序列, 还发现虹口—汶川附近 $14 \sim 16 \text{ km}$ 深度的 S06 和 S07 这 2 组重复地震序列, 与北川附近 $4.3 \sim 9.5 \text{ km}$ 深度的 3 组重复地

震序列在 2006 年前后开始出现不同程度的滑动短期加速变化迹象 (图 2), 这与赵祎喆等 (2008) 观察到的 2006 年 1 月 1 日至汶川地震发震前微震活动类似于指数上升的明显变化趋势较为相符。

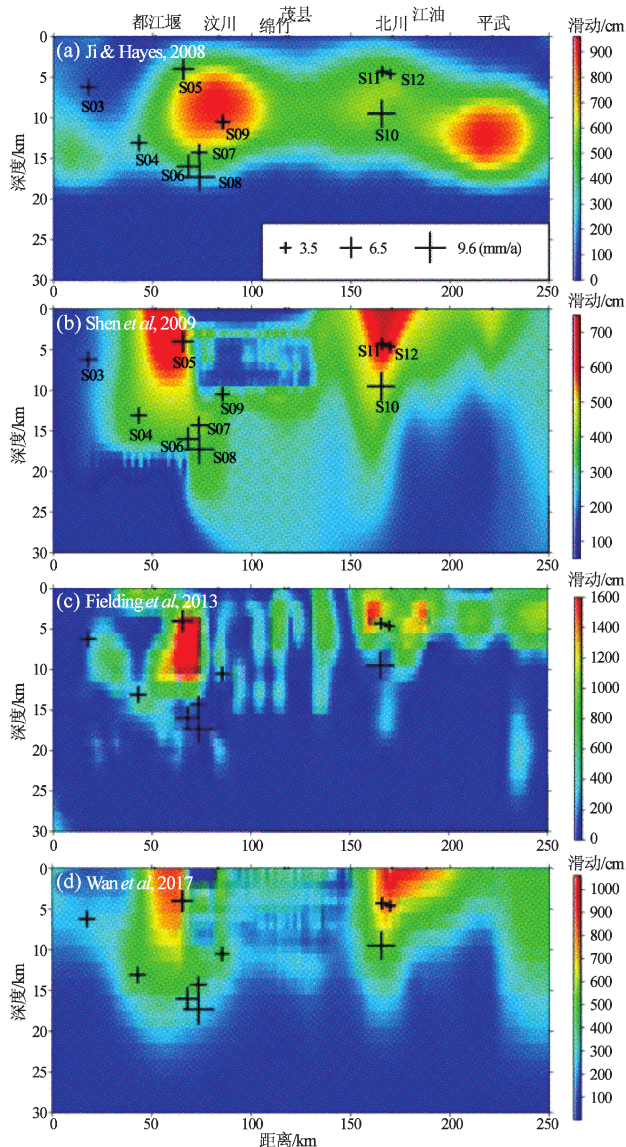


图 1 其它研究得到的汶川同震滑动分布与利用重复地震估算所得的滑动速率 (Li *et al.*, 2011) 的对比图 (图中十字大小与重复微震估算的滑动速率大小成正比, 源自: 陈棋福, 李乐, 2018)

Fig. 1 The comparison between the estimated slip rates from repeating microearthquakes (Li *et al.*, 2011) and the other research about different published distributions of the Wenchuan coseismic slips (the size of crosses is proportional to the slip rates, adapted from Chen, Li, 2018)

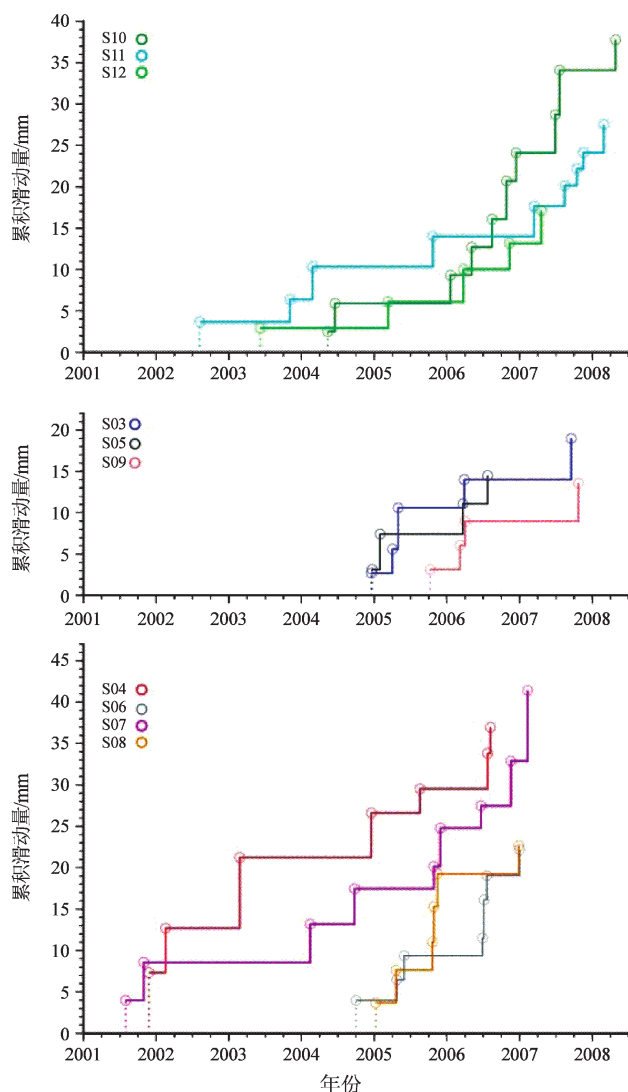


图2 龙门山断裂带中北段检测到的10组重复地震序列的时间-滑动量累积图
(修改自陈棋福, 李乐, 2018)

Fig. 2 Cumulative slip calculated from the 10 repeating earthquake sequences in LMSFZ
(modified from Chen and Li, 2018)

1.3 丽江—宁蒗断裂带

丽江—宁蒗地区内 NW 向的中甸断裂、近 NS 向的程海断裂与 NE 向的丽江—宁蒗断裂相互切割交错, 构成了大型的共轭断裂网络。在这些断裂的联合作用及区域应力场的共同影响下, 该区陆续发生了 1511 年永胜西北的 6 级以上强震、1996 年 2 月 3 日丽江 7.0 级地震、1998 年 11 月 19 日宁蒗 6.2 级地震和 2001 年 5 月 24 日宁蒗 5.8 级地震。丽江—宁蒗断裂属于丽江—小金河断裂的南段, 是云南地区中强震非常活跃的地带之一。第

四纪具有强烈左旋走滑运动的丽江—小金河断裂带把川滇菱形块体分割成南北 2 个活动地块 (徐锡伟等, 2003; 向宏发等, 2002), GPS 观测结果表明控制着丽江—小金河断裂的川滇菱形块体主要表现为向 $NE120^{\circ} \sim 165^{\circ}$ 方向的运动 (张培震等, 2003)。川滇菱形块体北部和南部的运动速率分别为 13 mm/a 和 9 mm/a , 反映了川滇菱形块体整体向 SSE 方向的运动和顺时针的旋转。

李乐等 (2008) 利用 1999—2006 年云南数字地震台网记录的 1 532 次 0.1 ~ 5.8 级地震资料, 对全波段波形进行互相关分析, 并采用如下原则进一步筛选出由至少 3 个地震构成的“重复地震”: ①全波段的波形相关系数 $cc > 0.9$; ②亚采样条件下的到时拾取误差小于 0.5 ms; ③平均的重复间隔大于 100 d。结合双差精定位结果, 最终筛选出由 5 个以上地震组成的 2 组“重复地震”, 并基于这 2 组“重复地震”估算出约 23 km 深处的滑动速率分别为 $(5.4 \pm 0.4) \text{ mm/a}$ 和 $(4.3 \pm 0.9) \text{ mm/a}$, 这一结果和地质研究结果 (向宏发等, 2002; 沈军等, 2001) 以及同时期 GPS 观测结果 (Shen *et al.*, 2005) 相符。

因当时可用的地震台网分布有限, 李乐等 (2008) 无法确认上述 2 组“重复地震”的破裂面积是否相互重叠, 故不能排除这 2 组地震并非发生在同一凹凸体上的可能性, 因而它们所释放的应变能也不能简单地视为是在同一重复地震序列累积的, 也不能排除在研究时段 (1999—2006 年) 前发生的 1996 年丽江 7.0 级地震和 1998 年宁蒗 6.2 级地震不存在一定程度的震后滑移的影响因素, 因此由这 2 组“重复地震”估算出的约 23 km 孕震深处的断层滑动速率可能应较客观地被视为滑动速率的最高估计, 即滑动速率的上限。

2 中国大陆强震孕育深处的变形模式

地震活动是断裂活动的最直接体现, 精定位的震源深度客观反映了断裂深部发生地震滑动变形的起始位置, 断裂深部发生的慢滑动和重复地震等对揭示断裂深部行为具有重要的指示意义 (Harris, 2017)。在同一构造部位重复发生并具有高度相似波形的重复地震可作为天然的“地下蠕变计”, 具有地质地貌和大地测量等浅表观测难得的“原位观测”优势, 为探测断裂深部变形信息

提供了有效的途径（陈棋福，李乐，2018）。

长达数百年甚至数千年的强震在原地复发的时间，较现代仪器开展地震观测的时间长得多，致使人们至今难以完整地获得一次对强震孕育发展复发轮回全过程的认识，即从初始应变能积累发展到释放发震至再次积累的过程。尽管我们缺乏对同一地点复发的强震孕育、发展、发生的轮回全过程的观测资料，但却有着不同地点发生的强震及强震前后不同时段观测资料。强震孕育发展过程遵循同样的应变能积累变形这一基本成因共识下，则可将发震地点不同的强震发生前后位于不同孕育发展阶段的孕震深处的变形特征组合起来，采用空间换时间的方式（即将空间中不同地点发生的强震，其所属

不同孕震时段的变形特征归换为同一强震孕育轮回过程中相应时段的变形特征）初步构建中国大陆强震孕育深处的变形模式。

强震复发轮回的过程以发震时间为标志大体可划分为震前、震后和震间 3 个时段，需要注意的是这 3 个时段的具体时间长短很可能是不均一的。根据前述利用重复地震获得的几个发震断裂带的深部滑动速率结果，即将龙门山断裂带、丽江—宁蒗断裂带和唐山断裂带等孕震深处的变形信息分别视为震前、震后和震间 3 个时段的深部变形信息，结合地质地貌和大地测量等获取的浅部变形信息，则可以初步构建出中国大陆强震孕育深处的变形模式（图 3）：震前深浅变形差异明显且存

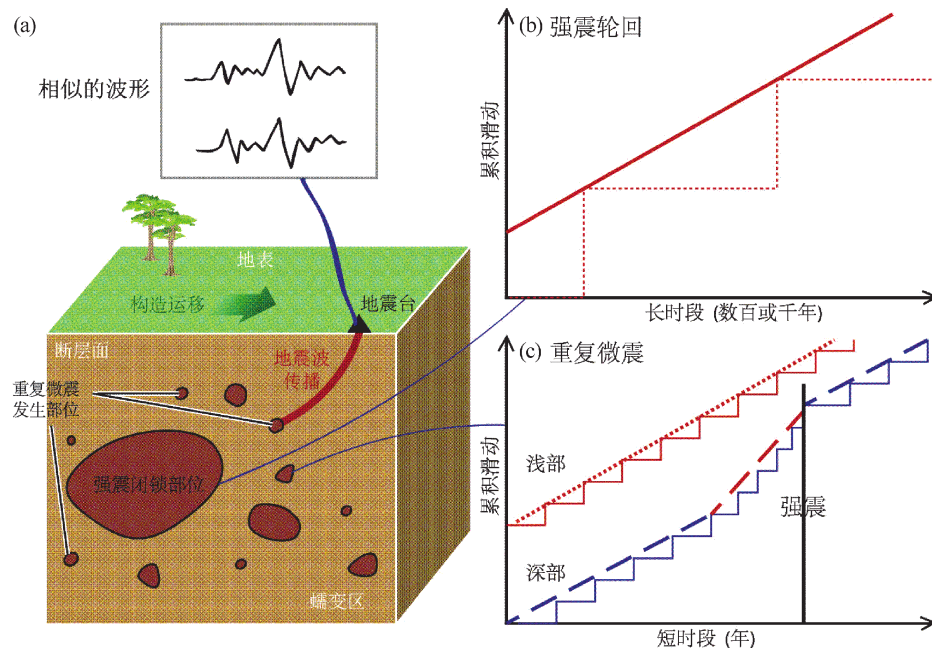


图 3 (a) 板内强震孕育发生轮回的凹凸体变形模式强震闭锁区及其周围重复地震发生部位的示意图（修改自 Uchida, Bürgmann, 2019），图上方展示了地震台站记录到的重复地震的相似波形；
(b) 强震轮回过程中的长时段累积滑动量（红虚线），红实线的斜率代表长期滑动速率；
(c) 利用重复地震获得的强震发生（粗黑竖线）前后深部和浅部累积滑动量（蓝色和红色实线），深部的滑动速率（蓝色和红色虚线）在强震前后存在明显变化，浅部的滑动速率（红点线）与长期滑动速率基本一致

Fig. 3 Schematic model of asperities and their accumulated slips of an intraplate earthquake cycle

(a) A schematic diagram showing the distribution of small repeating earthquakes surrounding an asperity of major earthquake (modified from Uchida and Bürgmann, 2019). The repeating earthquakes produce similar waveforms when observed by the same station (left top) because the seismic patch is loaded by creep in the surrounding area and repeat rupture at the same place. (b) The long-term accumulated slip of a major earthquake cycle shown in red dotted line. The slope of the solid line in red represents the long-term slip rate. (c) The accumulated slips of repeating earthquakes in the deep and shallow parts before and after a major earthquake (vertical line in black) were shown in solid lines in blue and red respectively. The slip rate inferred from deep repeating earthquakes (dashed lines in blue and red) exhibits significantly variation before and after the major earthquake, and the slip rate in the shallow part (dotted lines in red) is consistent with the long-term slip rate

在临震前深部变形加速的特征，震后深浅变形相当、震间深浅变形一致。

从图 3c 可以看出，深部的滑动速率（蓝色和红色虚线）在强震前后存在明显变化，浅部的滑动速率（红点线）与长期滑动速率基本一致。该模式采用的唐山 7.8 级地震发生后第 25 ~ 30 年（2001 年 10 月—2006 年 12 月）的地震波形资料所得到的孕震深处滑动速率极可能是强震轮回过程中震间变形特征的反映。如果说唐山 7.8 级地震发生后第 25 ~ 30 年的地震波形资料分析得到的重复地震估算的滑动速率不能完全算作强震轮回过程中震间变形信息的话，则由 1999—2011 年地震波形资料获得的 1833 年嵩明 8 级地震附近 4 ~ 12.3 km 深度的 2.7 ~ 8.9 mm/a 滑动速率（李乐等，2013）属于震间变形过程的信息应是确切无疑的；从重复地震观测结果与地质地貌和 GPS 观测给出的小江断裂带西支 4 ~ 10 mm/a 的滑动速率基本一致的事实（李乐等，2013），也可见我们构建的震间深浅变形一致的模式是有较充足的依据的。而由 2000 年 5 月—2008 年 4 月地震波形资料获得的龙门山断裂带深浅部滑动速率，则无可置疑地反映了汶川 8.0 级地震前的变形特征。利用 1999—2006 年的地震波形资料估算得到约 23 km 孕震深处的丽江—宁蒗断裂滑动速率，其是否确实反映了强震震后深部变形的信息还有待进一步的研究，但考虑到在所分析时段前的 1996—2001 年，丽江—宁蒗断裂带周围陆续发生丽江 7.0 级地震及宁蒗 6.2 级、5.8 级地震，在暂时缺乏更可信的观测约束结果（如汶川 8.0 级地震后的结果）的情况下，本研究暂且将其作为强震后深部变形信息来使用。

由重复地震估计的滑动速率变化提供了断层变形活动的重要信息，笔者在中国大陆观测到的孕震深处滑动速率变化现象（图 2，3）在板缘的重复地震研究中也发现（Uchida, Bürgmann, 2019）。如由重复地震推断出的美国圣安德烈亚斯断层中央蠕变段的滑动速率表现出周期性变化（Nadeau, McEvilly, 2004; Turner *et al.*, 2015），在日本东北俯冲带也发现了类似的周期性滑动速率变化现象（Uchida *et al.*, 2016）。地表蠕变仪、GPS 和 InSAR 数据都为推断出的美国圣安德烈亚斯断层和日本东北部巨型逆断层的滑动速率变化提供了支持（Khoshmanesh *et al.*, 2015; Nadeau,

McEvilly, 2004; Uchida *et al.*, 2016）。

Nadeau 和 McEvilly（1999）利用圣安德烈亚斯断层 Parkfield 地区的重复地震获取的断层滑动速率，显示出浅部与大地测量和蠕变仪观测的滑动速率值相当，而深部滑动速率增大呈现深浅滑动差异分布的图像，且重复微震不发育的区域（即断层闭锁区）在 2004 年发生了 6.0 级地震；Igarashi 等（2003）通过重复地震分析发现日本东北俯冲带滑动速率差异明显，且在显著的滑动亏损区发生了超出预估强度的 2011 年日本东北近海 Tohoku - oki 9.0 级地震。2011 年日本 9.0 级地震（Igarashi *et al.*, 2003）、2008 年汶川 8.0 级地震（Li *et al.*, 2011）以及 1984 年美国 Morgan Hill 6.2 级地震（Templeton *et al.*, 2009）等同震破裂区周缘发育的重复地震事例，都说明了利用重复地震空间分布勾画潜在强震闭锁区的可能性。

在 1989 年美国加州 Loma Prieta 6.9 级地震（Turner *et al.*, 2013）、2011 年日本东北近海 Tohoku - oki 9.0 级地震（Uchida *et al.*, 2016）、2014 年智利西北部海域 Iquique 8.2 级地震（Kato *et al.*, 2016）以及 2008 年中国四川汶川 8.0 级地震（陈棋福，李乐，2018）前，重复地震序列记录还展示出在震前 1 ~ 2 年或震前几天存在深部滑动速率的加速变化特征。这些事例为笔者应用强震孕育过程的变形模式（图 3）进行强震危险性分析提供了有效的途径，即充分利用微小的重复地震探测断裂深部变形的原位观测优势，融合地质地貌、大地测量和地震学等多学科结果，就强震相关的断裂深浅部变形信息进行综合分析。对断裂闭锁段或低滑动部位，如果发现其深浅构造变形存在显著差异，则应对该区段的强震危险性进行强化跟踪研究。断裂闭锁段或低滑动部位（图 3a）很可能处于强震积累应变能闭锁阶段，表现为浅部的活动（滑动量）较弱，而其周缘发生的重复地震则可能体现了闭锁区深部的区域构造运动处于定常活动状态或强震前的非线性变形阶段，故深浅部的重复地震所释放的累积滑动量表现出明显差异（图 3c）。对于临震前的深部变形加速变化，笔者推测很可能是进入强震成核阶段（Kato *et al.*, 2016）或断层亚失稳阶段（马瑾，2016）的表现。

活动断裂是地震的发震构造，断层（断裂）活动性的研究是认识和理解地震过程与有效进行

地震灾害防御的重要基础。在过去 20 多年,尽管在识别活断层的能力方面已经取得了显著进展,但大陆内部如 2008 年汶川 8.0 级地震出乎意料的发生等事例说明对陆内断层的认知还很有限(England, 2011)。对龙门山断裂带发生的 2008 年汶川 8.0 级地震的危险性低估的重要原因之一是地质地貌和 GPS 观测等给出的龙门山断裂带滑动速率较低(张培震等, 2008, 2009; Zhang, 2013)。断层滑动速率是衡量断层(断裂)活动性及分析地震危险性的一个非常重要的参数(邓起东等, 2004; Bergen *et al.*, 2017), 由地质学、地貌学、大地测量学和地震学等分析研究给出的滑动速率(张培震等, 2013)各有其优势与局限性(陈棋福, 李乐, 2018)。利用微小的重复地震作为“深部蠕变”计来探测断裂深部变形, 不可避免地受到地震台网分布间距及其可检测到重复地震的能力的局限, 且所检测到的重复地震序列是否在观测时段内完整而无遗漏, 对于客观估算断裂深部的滑动速率也是十分重要的。为能够更好地与地质地貌和大地测量的结果进行对比分析, 尝试获取微小的重复地震震源机制解, 结合重复地震的破裂节面解或可能确定的破裂方向, 来约束所估算滑动速率的滑动方向也是十分必要的。

3 结语

本文针对地震预测这一科学难题中缺乏强震原地复发全过程的变形观测资料的问题, 基于强震孕育发展过程遵循同样的应变能积累变形的基本成因认识, 利用重复地震探测获得的孕震深处滑动速率与浅表观测的对比分析结果, 采用空间换时间的方式初步构建了中国大陆强震孕育深处的变形模式, 即: 震前深浅变形差异明显且存在临震前深部变形加速的特征, 而震后深浅变形相当且震间深浅变形一致的模式。对于由 1976 年唐山 7.8 级地震、1996 年丽江 7.0 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震等中国大陆强震相关的深浅部变形特征, 以及板缘的重复地震研究得到的深浅部变形特征而言, 本文构建的孕震深处变形模式中的几个时间段很可能是: 震前为 10 年至发震时, 临震则可能为震前 1~2 年至震前几天, 震后则指的是强震后几个月开始, 震间则可能为强震后至少

20 年至下一强震前 10 年的数百或上千年时段。

尽管本文所构建的中国大陆强震孕育深处的变形模式和关于相关时间段的说明及解释还有待进一步的检验和完善, 但在人类对大陆内部深部构造变形探测程度还较为有限的情况下, 充分发挥重复地震探测断裂深部变形的“原位观测”优势, 可为探测“不可入”的地球内部和“非频发”大地震的孕震深处变形活动提供重要的约束信息。通过集成地震学、大地测量学和地质地貌学等学科对断裂变形活动的综合分析, 将有可能对断裂闭锁段和深浅构造变形差异显著地区的强震危险性进行科学有效的预判。

参考文献:

- 陈棋福, 华诚, 李乐, 等. 2015. 龙门山断裂带深部构造变形的黏弹性模拟及其与强震活动的关联性探讨[J]. 地球物理学报, 58(11): 4129–4137.
- 陈棋福, 李乐. 2018. 2008 年汶川地震与龙门山断裂带的深浅部变形及启示[J]. 科学通报, 63(19): 1917–1933.
- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 39(12): 1633–1658.
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用[J]. 地学前缘, 11(4): 383–392.
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组. 1982. 一九七六年唐山地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京: 地震出版社.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 2008. 利用“重复微震”估算丽江—宁蒗断裂带的深部滑动速率[J]. 科学通报, 53(23): 2925–2932.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 2013. 基于重复微震的小江断裂带深部滑动速率研究[J]. 地球物理学报, 56(10): 3373–3384.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 2015. 鲜水河断裂带南段深部变形的重复地震研究[J]. 地球物理学报, 58(11): 4138–4148.
- 李乐, 陈棋福. 2010. 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, 32(3): 508–519.
- 李勇, 周荣军, 董顺利, 等. 2008. 汶川地震的地表破裂与逆冲—走滑作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 404–413.
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 61(增刊 1): 409–414.
- 沈军, 汪一鹏, 任金卫. 2001. 中国云南德钦—中甸—大具断裂带第四纪右旋走滑运动[M]. 北京: 地震出版社, 123–135.
- 唐方头, 张培震, 邓志辉, 等. 2005. 华北地区主要断裂带的现今运动特征[J]. 煤田地质与勘探, 33(1): 4–6.
- 王闰昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 582–597.
- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 等. 2002. 丽江—小金河断裂第四纪以来左旋逆推运动及其地质构造意义[J]. 地震地质, 24(2): 188–198.

- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊1): 151–162.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊): 12–20.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1607–1620.
- 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2009. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 54(7): 944–953.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 2008年汶川8.0级地震震源断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066–1073.
- 张培震. 2013. 活动断裂研究方法. 固体地球科学研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 923–936.
- 赵伟喆, 吴忠良, 蒋长胜, 等. 2008. 用地震资料估计的龙门山断裂深部形变及其对于汶川地震成因的意义[J]. 地质学报, 82(12): 1778–1787.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元1912年—1990年 $M_s \geq 4.7$) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 637.
- Bergen K J, Shaw J H, Leon L A, *et al.* 2017. Accelerating slip rates on the Puente Hills blind thrust fault system beneath metropolitan Los Angeles, California, USA [J]. *Geology*, 45(3): 227–230.
- Bufe C G, Harsh P W, Burford R O. 1977. Steady-state seismic slip: a precise recurrence model [J]. *Geophys Res Lett*, 4(2): 91–94.
- Chen K H, Rau R J, Hu J C. 2009. Variability of repeating earthquake behavior along the Longitudinal Valley fault zone of eastern Taiwan [J]. *J Geophys Res*, 114(B5): 306.
- Chen T, Lapusta N. 2009. Scaling of small repeating earthquakes explained by interaction of seismic and aseismic slip in a rate and state fault mode [J]. *J Geophys Res*, 114(B1): 311.
- Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, *et al.* 2000. Global positioning system measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation [J]. *J Geophys Res*, 105(B7): 16215–16227.
- Dominguez L A, Taira T, Santoyo M A. 2016. Spatiotemporal variations of characteristic repeating earthquake sequences along the Middle America Trench in Mexico [J]. *J Geophys Res*, 121(12): 8855–8870.
- England P, Jackson J. 2011. Uncharted seismic risk [J]. *Nat Geosci*, 4(6): 348–349.
- Fielding E J, Sladen A, Li Z, *et al.* 2013. Kinematic fault slip evolution source models of the 2008 $M7.9$ Wenchuan earthquake in China from SAR interferometry, GPS and teleseismic analysis and implications for Longmen Shan tectonics [J]. *Geophys J Int*, 194(2): 1138–1166.
- Gan W, Zhang P Z, Shen Z K, *et al.* 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, 112(B8): 416.
- Geller R J, Mueller C S. 1980. Four similar earthquakes in central California [J]. *Geophys Res Lett*, 7(10): 821–824.
- Got J L, Fréchet J, Klein F. 1994. Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea [J]. *J Geophys Res*, 99(B8): 15375–15386.
- Harris R A. 2017. Large earthquakes and creeping faults [J]. *Rev Geophys*, 55(1): 169–198.
- Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, *et al.* 2000. Velocity field in Asia inferred from quaternary fault slip rates and global positioning system observations [J]. *J Geophys Res*, 105(B8): 19185–19209.
- Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa A. 2003. Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone [J]. *J Geophys Res*, 108(B5): 2249.
- Ji C, Hayes G. 2008. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w 7.9$ eastern Sichuan, China earthquake [EB/OL]. (2008–05–12) [2019–10–18]. <http://quake-rc.info/SRCMOD/searchmodels/viewmodel/s2008WENCHU01J1xx/>.
- Kato A, Fukuda J, Kumazawa T, *et al.* 2016. Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile $M_w 8.2$ Earthquake [J]. *Sci Rep*, 6: 24792.
- Khoshmanesh M, Shirzaei M, Nadeau R M. 2015. Time-dependent model of aseismic slip on the central San Andreas Fault from InSAR time series and repeating earthquakes [J]. *J Geophys Res*, 120: 6658–6679.
- Kim A, Dreger D S, Taira T A, *et al.* 2016. Changes in repeating earthquake slip behavior following the 2004 Parkfield main shock from waveform empirical Green's functions finite-source inversion [J]. *J Geophys Res*, 121(3): 1910–1926.
- Kim W Y, Kim K H. 2014. The 9 February 2010 Siheung, Korea, earthquake sequence: Repeating earthquakes in a stable continental region [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 104(1): 551–559.
- King R W, Shen F, Clark B B, *et al.* 1997. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China [J]. *Geology*, 25: 179–182.
- Li L, Chen Q F, Cheng X, *et al.* 2007. Spatial clustering and repeating of seismic events observed along the 1976 Tangshan fault, north China [J]. *Geophys Res Lett*, 34(23): 123309.
- Li L, Chen Q F, Niu F, *et al.* 2011. Deep slip rates along the Longmen Shan fault zone estimated from repeating microearthquakes [J]. *J Geophys Res*, 116(B9): 310.
- Matsuzawa T, Igarashi T, Hasegawa A. 2002. Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan [J]. *Geophys Res Lett*, 29(11): 1543.
- Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V. 1995. Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas fault at Parkfield, California [J]. *Science*, 267(5197): 503–507.
- Nadeau R M, McEvilly T V. 2004. Periodic pulsing of characteristic microearthquakes on the San Andreas Fault [J]. *Science*, 303(5655): 220–222.
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1999. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes [J]. *Science*, 285(5248): 718–721.
- Peng Z, Ben-Zion Y. 2005. Spatio-temporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 $M7.4$ Izmit and

- M7.1 Duzce, Turkey, earthquake sequences[J]. *Geophys J Int*, 160(3):1027–1043.
- Sammis C G, Rice J R. 2001. Repeating earthquakes as low – stress – drop events at a border between locked and creeping fault patches[J]. *Bull Seismo Soc Am*, 91(3):532–537.
- Schaff D P, Beroza G C. 2004. Coseismic and post seismic velocity changes measured by repeating earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 109(B10):302.
- Schaff D P, Richards P G. 2011. On finding and using repeating seismic events in and near China[J]. *J Geophys Res*, 116(B3):309.
- Shen Z K, Lü J N, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, 110(B11):409.
- Shen Z K, Sun J, Zhang P Z, *et al.* 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Nat Geosci*, 2(10):718–724.
- Templeton D C, Nadeau R M, Bürgmann R. 2009. Distribution of postseismic slip on the Calaveras fault, California, following the 1984 $M_6.2$ Morgan Hill earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 277(1–2):1–8.
- Turner R C, Nadeau R M, Bürgmann R. 2013. Aseismic slip and fault interaction from repeating earthquakes in the Loma Prieta aftershock zone[J]. *Geophys Res Lett*, 40(6):1079–1083.
- Turner R C, Shirzaei M, Nadeau R M, *et al.* 2015. Slow and go: pulsing slip rates on the creeping section of the San Andreas Fault[J]. *J Geophys Res*, 120(8):5940–5951.
- Uchida N, Bürgmann R. 2019. Repeating Earthquakes[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 47:305–332.
- Uchida N, Iinuma T, Nadeau R M, *et al.* 2016. Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan[J]. *Science*, 351(6272):488–492.
- Wan Y, Shen Z K, Bürgmann R, *et al.* 2017. Fault geometry and slip distribution of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements[J]. *Geophys J Int*, 208(2):748–766.
- Yu W C. 2013. Shallow – focus repeating earthquakes in the Tonga – Kermadec – Vanuatu subduction zones[J]. *Bull Seismo Soc Am*, 103(1):463–486.
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, *et al.* 2010. Oblique, high – angle, listric – reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38:353–382.
- Zhang P Z. 2013. Beware of slowly slipping faults[J]. *Nat Geosci*, 6(5):323–324.

Deep Deformation Pattern of Strong Earthquakes in Mainland China

CHEN Qifu^{1,2,3}, LI Le⁴, JIANG Jinzhong⁵

(1. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4. Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

(5. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In view of problems of the “inaccessible” deep Earth and “non-frequent” strong earthquakes in the earthquake prediction, this paper finalizes a deep deformation pattern of strong earthquake cycles in mainland China based on the comparative analysis of the slip rates inferred from repeating earthquakes and from surface GPS and geological data by piecing together slip rate ‘snapshots’ from different stages of the earthquake cycle. Slip rate increases with depth and accelerated slip were thought to have preceded a number of recent large subduction zone earthquakes and the 2008 Wenchuan earthquake, and repeating earthquakes may document short-term precursory slip at depth. We suggest that slip rates at seismogenic depths are of critical importance in seismic hazard analysis. Repeating earthquakes can be regarded as “deep creepmeters” that measure the in-situ deep slip rate of active faults. The potential earthquake hazard of locked faults with unusually high inferred deep slip rates should be paid more attention.

Keywords: seismogenic pattern; deep deformation; repeating earthquakes; strong earthquake hazard