

邵志刚, 武艳强, 季灵运等. 2022. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定. 地球物理学报, 65(12): 4643-4658, doi:10.6038/cjg2022P0489.

Shao Z G, Wu Y Q, Ji L Y, et al. 2022. Comprehensive determination for the late stage of the interseismic period of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(12): 4643-4658, doi:10.6038/cjg2022P0489.

中国大陆活动地块边界带主要断层的 强震震间晚期综合判定

邵志刚¹, 武艳强², 季灵运³, 刁法启⁴, 石富强⁵, 李玉江⁶, 龙锋⁷,
张辉⁸, 朱良玉³, 陈长云², 王武星¹, 魏文薪¹, 王芃¹, 刘晓霞¹,
刘琦¹, 潘正洋¹, 尹晓菲¹, 刘月¹, 冯蔚¹, 邹镇宇¹, 曹建玲¹,
徐晶³, 韩立波⁹, 程佳⁶, 鲁人齐¹⁰, 徐岳仁¹, 李西¹¹, 孙鑫喆¹

1 中国地震局地震预测研究所, 地震预测重点实验室, 北京 100036

2 中国地震局第一监测中心, 天津 300180

3 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

4 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

5 陕西省地震局, 西安 710068

6 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

7 四川省地震局, 成都 610044

8 甘肃省地震局, 兰州 730013

9 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

10 中国地震局地质研究所, 北京 100029

11 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

摘要 由于中国大陆强震主要分布在活动地块边界带上, 所以活动地块边界带主要断层成为我国大陆型强震研究的重要目标, 各强震孕育阶段的判定是大陆型强震原地复发的动力学过程研究主要内容, 而目标断层是否处于震间晚期也是强震时间预测的重要研究基础. 虽然地震短临预测仍存在诸多科学难题, 但最近 20 年来全球若干强震相关研究表明, 如果放宽预测时间尺度的要求, 有些方法也可用于强震震间晚期的判定. 本文以中国大陆活动地块边界带的 391 条断层段为研究目标, 利用地震地质的强震破裂空段、大地测量的断层运动闭锁段、地震活动的中小地震稀疏段、数值模拟的库仑应力增强显著段等方法, 综合判定中国大陆活动地块边界带可能处于震间晚期的主要断层段. 本文结果仅是初步结果, 该结果的可靠程度有赖于监测条件, 其科学性有赖于大陆型强震孕育发生动力学过程的认识水平, 虽然本文尝试给出中国大陆活动地块边界带主要断层的震间晚期判定结果, 但其结果可靠程度、精细程度等均存在巨大的改善空间. 最后, 从断层孕震阶段判定需求的角度, 本文尝试给出大陆型震源物理模型的具体基础模型, 期望起到抛砖引玉的作用, 也期望更多地震学家关注大陆型强震的物理机制及其预测基础研究.

关键词 活动地块边界带; 强震震间晚期; 强震破裂空段; 断层运动闭锁; 中小地震活动; 库仑应力变化

doi:10.6038/cjg2022P0489

中图分类号 P313, P315

收稿日期 2021-07-12, 2022-08-27 收修定稿

基金项目 国家重点研发计划(2017YFC1500501)资助.

第一作者简介 邵志刚, 男, 1977 年生, 研究员, 2007 年博士毕业于中国科学技术大学, 主要从事地球动力学与地震活动性方面的研究.

E-mail: shaozg0911@126.com

Comprehensive determination for the late stage of the interseismic period of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland

SHAO ZhiGang¹, WU YanQiang², JI LingYun³, DIAO FaQi⁴, SHI FuQiang⁵, LI YuJiang⁶,
LONG Feng⁷, ZHANG Hui⁸, ZHU LiangYu³, CHEN ChangYun², WANG WuXing¹,
WEI WenXin¹, WANG Peng¹, LIU XiaoXia¹, LIU Qi¹, PAN ZhengYang¹, YIN XiaoFei¹,
LIU Yue¹, FENG Wei¹, ZOU ZhenYu¹, CAO JianLing¹, XU Jing³, HAN LiBo⁹,
CHENG Jia⁶, LU RenQi¹⁰, XU YueRen¹, LI Xi¹¹, SUN XinZhe¹

1 *Key Laboratory of Earthquake Forecasting, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2 *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*

3 *The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China*

4 *School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*

5 *Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an, 710068, China*

6 *National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China*

7 *Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610044, China*

8 *Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730013, China*

9 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

10 *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

11 *School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China*

Abstract Due to the earthquake being mainly distributed on the border of active blocks in Chinese mainland, major faults on block boundary belt become the main goal of continental earthquake research, and the determination of the seismogenic stage of strong earthquake is the main research content of continental earthquake recurrence in situ, whether the target fault is in the late stage of interseismic period is also an important research base of earthquake time forecasting. Although there are still many scientific problems in the prediction of impending earthquakes, some global studies on strong earthquakes in the last 20 years show that some methods can be used to determine the late stage of interseismic period if the prediction time scale is relaxed. The aim of this paper is based on the 391 faults on the block boundary belt section in Chinese mainland, using the seismic geological earthquake rupture empty segments, geodetic locking of fault movement and the scarce of small and moderate seismicity, and the numerical simulation method of the Coulomb stress, which significantly determines whether block boundary belt may be in the late stage of interseismic period. In this paper, the results are only preliminary results, the reliability of the results depends on the monitoring conditions, and their scientific significance depends on the understanding of the dynamics process of the continent earthquake. This paper tries to present the result of determining the late stage of interseismic period of the main fault on block boundary belt. However, there is a great room for improvement in the reliability and precision of the results. Finally, from the point of view of determining the fault seismogenic stage, this paper tries to give a specific basic model of the continental earthquake source physical model, hoping to attract more seismologists to pay attention to the physical mechanism of continental strong earthquakes and the basic research of their prediction.

Keywords Boundary zone of active tectonic blocks; Late stage of interseismic period; Seismic gap in fault rupture segments; Locking of the fault movement; Small and moderate earthquakes activity; Coulomb stress change

0 引言

强震因强烈破坏性和灾害的不可逆转性,成为影响社会发展和百姓福祉的严重威胁,因此强震预报有着强烈的社会需求.当然,对于地震综合预测结论必须给出确定的“时、空、强”三要素,而且最好能用定量的方式表述预测结果(陈运泰,2009).对于这三个要素,目前给出准确的预测结果仍比较困难,但是否可以针对单个要素适当放宽要求并通过不断改进和完善,以期达到提高地震预报准确性的效果.

其中对于时间预测来讲,针对强震孕育发生过程不同阶段,时间可分为:同震、震后、震间和震前四个时间段,而震间又分为:早期、中期和晚期(武力常次,1978;Scholz,1998).对于目标断层来讲,震前的时间尺度、物理机制、有效监测等方面仍存在诸多问题.比较现实的是,进一步放宽对时间精度的要求,能否利用现有技术方法来确定目标断层是否处于强震孕育晚期.

近20年来基于较密集观测资料的积累、理论计算方法的发展、实际地震活动的检验,在很多强震前地震地质、大地测量、地震活动、数值模拟等不同学科均有研究方法用于强震长期危险性分析,而且取得较好的长期预测效果.其中有些用于强震孕育晚期判定的有效研究方法,对2010年智利8.8级、2011年日本9.0级、2014年智利8.1级、2015年尼泊尔8.1级等地震做出了较好的强震背景预测(Madariaga et al., 2010; Hashimoto et al., 2009; Loveless and Meade, 2010; Schurr et al., 2014; Avouac et al., 2015);例如,2010年智利8.8级地震发生后就有学者在 *Science* 上发表文章称,早在十几年前就知道要发生大地震(Madariaga et al., 2010).因此,2011年日本9级地震后,著名地震学家金森博雄呼吁更好地利用已有技术手段来改进地震预报研究(Kanamori, 2012).

可用于震间晚期判定的方法,概括起来最具代表性的有,地震地质的强震破裂空段、大地测量的断层运动闭锁段、地震活动的中小地震稀疏段、数值模拟的库仑应力增强显著段等,从震例角度来讲,这些方法在很多强震之前都有很好的研究结果.但对于震间晚期来讲,这些方法给出的强震孕育晚期大多数判定依据是必要不充分条件,即断层处于强震孕育晚期时多呈现为强震破裂空段、大地测量的断层运动闭锁段、数值模拟的库仑应力增强显著段,部分

出现地震活动的中小地震稀疏段,但出现上述特征时,目标断层并不一定处于强震孕育晚期.因此,本文尝试根据以往震例表现,采用上述方法综合给出强震孕育晚期判定.

中国大陆是典型的大陆动力学环境,“垂向分层,横向分块”是大陆活动地块发生相对运动和变形是“陆内变形”的重要方式之一.而活动地块是指被形成于晚新生代、晚第四纪(10—12万年)至今仍强烈活动的构造所分割和围限、具有相对统一运动方式的地质单元(张培震等,2003),中国大陆地区共有6个I级活动地块,22个II级活动地块;而介于活动地块之间的便是活动地块边界带,目前确认的活动地块边界带有26个(图1).中国大陆主要构造变形和浅源强震大都发生在边界带上,有历史记载以来几乎全部8级和超过80%的7级以上强震发生在活动地块边界带上(张国民等,2005;张培震等,2013;图1).

所以,本文以中国大陆活动地块边界带为研究对象,根据活动断层研究结果,重点关注中国大陆地区的391个断层段(图2),尝试综合应用强震破裂空段、断层运动闭锁段、库仑应力显著增强段和中小地震稀疏段等方法来判定处于强震孕育晚期的断层段,期望能给长期地点预测提供可参考的科学依据.

1 强震破裂空段

强震破裂空段是指板块边界带或活动块体边界带等大型构造带内,长时间未发生强震破裂的断层段(Sykes, 1971),这些段落相对于发生强震破裂不久的断层段所积累的断层应力应变更高,因而,强震破裂空段成为强震预测的重要方法(M7 专项工作组,2012).

在上述强震空间和时间上并非完全随机的认识下,从长期预测角度来看,强震破裂空段取得较好的地点预测效果,成为高震级地震地点预测的重要地震地质学标志(徐锡伟等,2017).例如,2004年苏门答腊9.2级地震(Kagan and Jackson, 1991)、2014年智利8.1级地震(Kagan and Jackson, 1991; Nishenko, 1991)、2010年智利8.8级地震(Nishenko, 1991; Madariaga et al., 2010)、2015年尼泊尔8.1级地震(Bilham et al., 2001; Bollinger et al., 2014)等均发生在强震破裂空段.在中国大陆长期重点危险区判定中同样发挥重要作用,例如,2008年汶川8.0

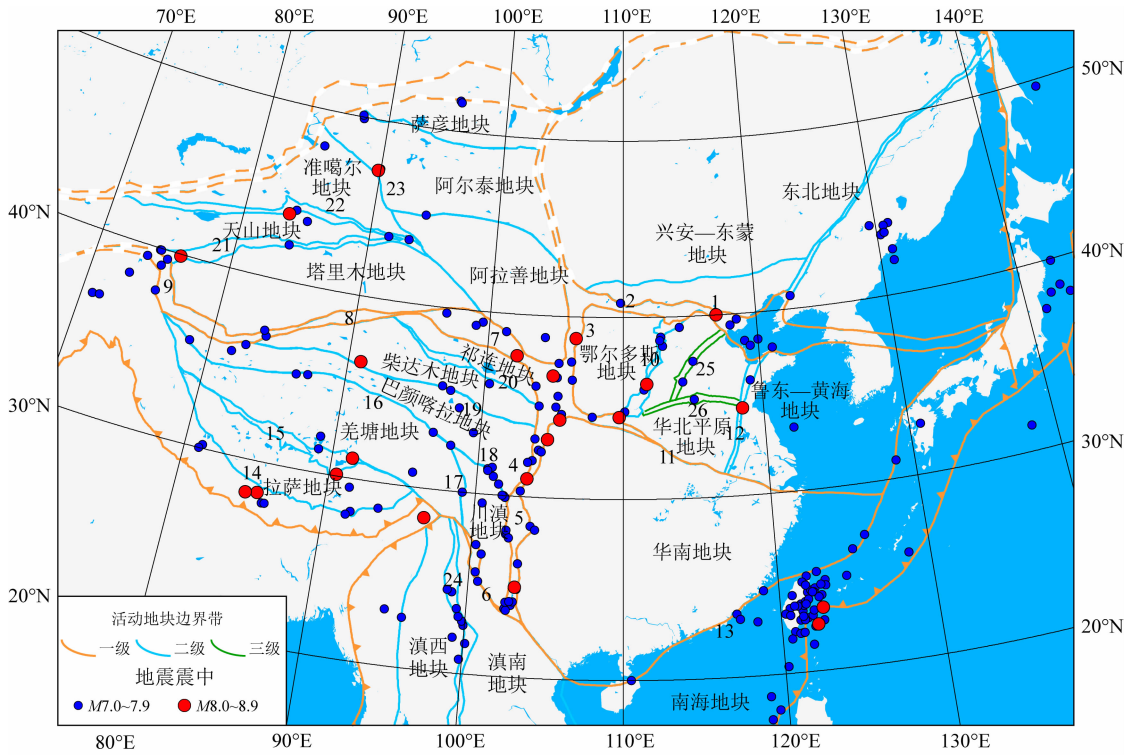


图 1 中国大陆地区活动地块与历史强震空间分布图

图中名称为二级活动地块名称, 编号为活动地块边界带编号(张培震等, 2003; 张国民等, 2004).

Fig. 1 Active tectonic blocks in Chinese mainland and its spatial distribution of historical strong earthquakes

The font is the name of secondary active blocks, the number represents the boundary zone of active tectonic block (Zhang et al., 2003; Zhang et al., 2004).

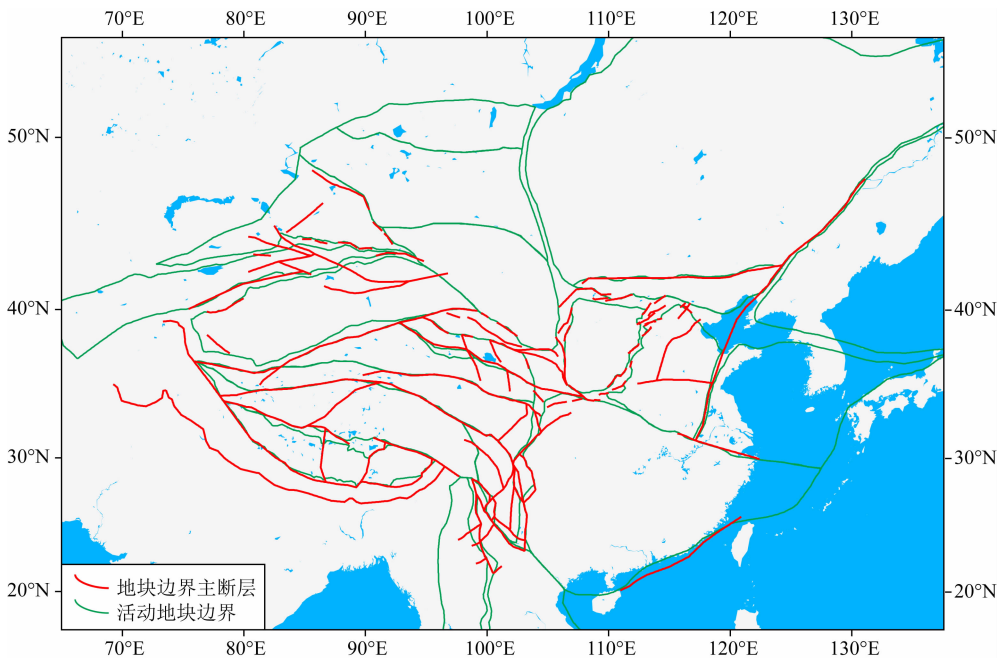


图 2 中国大陆地区活动地块边界带及其主要断层空间分布图(张培震等, 2003; 张国民等, 2004)

Fig. 2 The distribution of the boundary zone of active tectonic block and main faults in Chinese mainland (Zhang et al., 2003; Zhang et al., 2004)

级地震、2010年玉树7.1级地震、2013年芦山7.0级地震等均发生在强震破裂空段(M7 专项工作组, 2012;《2006~2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究》项目组, 2007)。

对于活动构造带内强震破裂空段的工作基础是古地震、历史地震和现代地震的同震破裂信息, 具体包括强震发生时间、同震破裂空间展布、同震破裂平均位错矢量或破裂过程等。对于保存于地质记录中的史前和历史没有明确记载的古地震事件, 一般通过强震破裂地表遗迹探测技术、古地震年代测定技术等确定古地震同震破裂信息(冉勇康和邓起东, 1999;冉勇康等, 2014)。对于历史地震, 还有地震灾害的历史文字记载可以用于判定极震区、地表破裂等空间展布(Wen et al., 2008);而对于现代地震, 可以用于同震破裂过程或同震位错反演的资料越来越多, 包括大地测量仪器、地震仪、强震仪等各种资料。依据古地震、历史地震和现代地震的同震破裂, 结合活动构造相关研究, 确定具体断层段的断层分段、滑动速率、强震离逝时间、复发周期等(邓起

东和闻学泽, 2008), 这些地震地质研究结果是长期地震预测的重要基础, 是判定强震破裂空段的主要依据。

而实际判定过程中强震破裂空段分为两类:(1)高离逝率空段(离逝率等于上次强震距离现在的时间与复发周期的比值), 上次强震离逝时间接近或超过复发周期的断层段;(2)历史缺震空段, 没有离逝率相关研究结果, 且没有历史强震记录的断层段(徐锡伟等, 2017)。本文收集整理了已有的研究结果, 主要包括“八五”期间中国大陆中长期强震预测研究结果(时振梁等, 1997)、第二版中国大陆地震重点监视防御区研究结果(《2006~2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究》项目组, 2007)、M7工作研究结果(M7 专项工作组, 2012)、活动断层探索等地震地质研究结果(徐锡伟等, 2016, 2017), 中国大陆目前能识别出的强震破裂空段共有66个, 其中高离逝率空段29个, 缺震空段37个(图3);当然, 现有结果的完备程度需要更全面的活动断层探索工作, 研究工作需要更准确的测试技术。

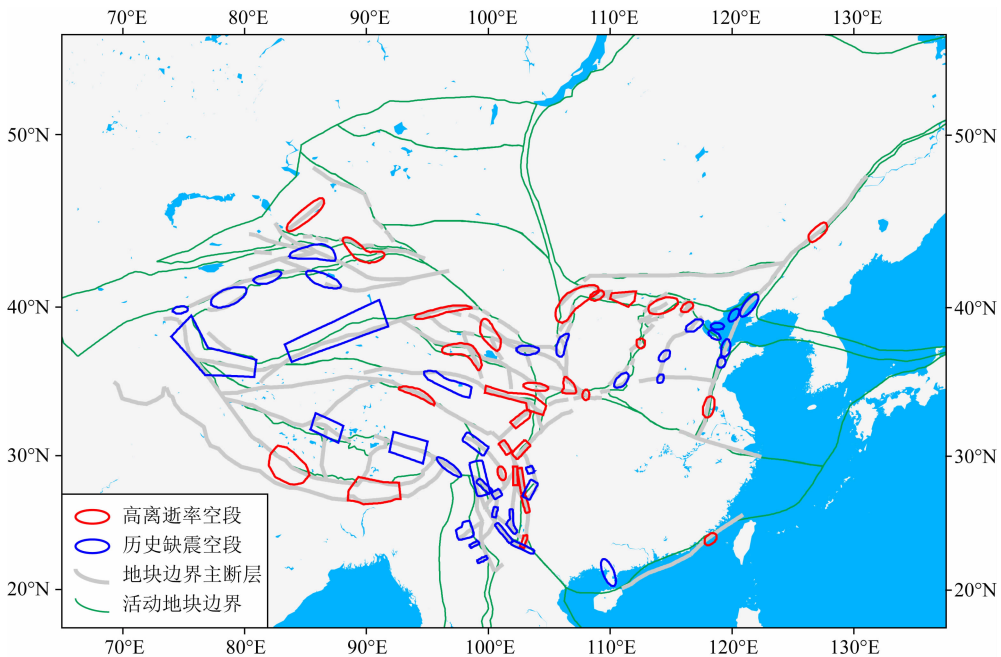


图3 中国大陆活动地块边界带主要断层与强震破裂空段分布图(张培震等, 2003;张国民等, 2004;徐锡伟等, 2017)

Fig. 3 The distribution of main active faults and some strong seismic rupture gaps in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland (Zhang et al., 2003; Zhang et al., 2004; Xu et al., 2017)

近年来随着地貌观测技术和测年技术的发展, 古地震和历史地震的同震破裂的相关信息越来越准确, 强震破裂空段的判定会越来越可靠、越来越完备。但是对于地震地质研究方法来讲, 强震破裂空段除了测年的精度、破裂空间展布等问题外, 还

有两个难题, 一是没有地表破裂或地表破裂不明显的古地震事件的判定, 另外一个复杂构造地区强震空区的确定。

另外, 强震离逝率是定量地描述特定断层是否处于强震孕育晚期的有效参数, 离逝率越大的强震

破裂空段时间上越逼近下次强震,一般认为接近 1 的强震破裂空段存在强震危险性,但实际上有些强震破裂空段的离逝率超过,甚至达到 4,仍没发生地震(徐锡伟等,2017). 由中国大陆强震原地复发时离

逝率的概率密度函数可知(闻学泽,1995),在离逝率为 1 左右的强震发生个数比例最高,但在离逝率为 0.5~1.5 范围之间,也即离逝时间达到复发周期的一半后,强震的危险性会越来越高(图 4b).

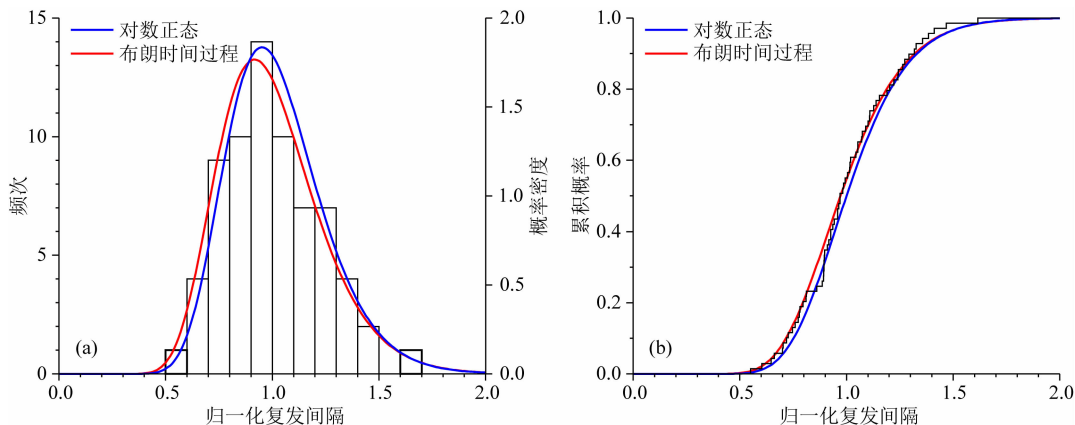


图 4 中国大陆强震发生时离逝率的概率密度函数(a)及积累概率函数(b)

蓝线和红线分别代表对数正态函数与布朗时间过程函数.

Fig. 4 Probability density function (a) and accumulation probability function (b) of lapse rate during strong earthquakes in Chinese mainland

Blue line and red line represent logarithm-normal function and Brownian time process function respectively.

2 断层运动闭锁段

弹性回跳理论的基础观测资料是 1906 年旧金山大地震震前、同震三角测量资料给出的地震前后地壳变形. 该理论认为,由于震前圣安德烈斯断层两侧地块存在相对运动,而断层处于闭锁状态,导致了

断层附近地壳中弹性应变能的积累,当应变积累到临界点后断层回跳发生错动,产生地震波动(Reid, 1910). 此后,随着大地测量观测仪器的不断改进和震例的不断丰富,逐渐认识到地震过程具体应分为震间(孕育)、同震(发生)和震后(后效)(力武常次, 1978). 而不同孕震阶段跨断层地壳形变具有不同的表现形式(图 5; Savage and Burford, 1973; Savage

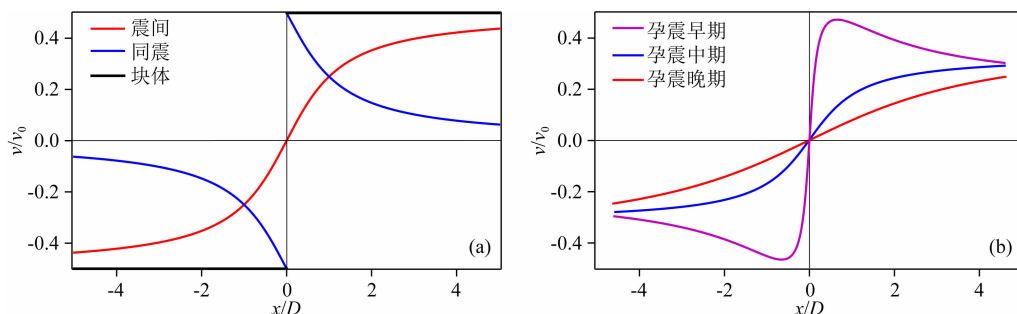


图 5 断层运动不同阶段地壳地表变形速率空间分布示意图(Meade and Hager, 2005)

(a) 断层处于同震(红色)、震间期(橙色)地表变形速率空间分布及和断层两侧地块平均相对运动速率(黑色)空间分布示意图; (b) 断层处于强震孕育阶段不同时期的地表变形速率空间分布示意图,黄色为孕震早期、橙色为孕震中期、红色为孕震晚期. 图中 v 是地表变形速度, v_0 是断层长期滑动速率, x 是点位与断层的距离, D 是断层闭锁深度.

Fig. 5 The map of spatial distribution of crustal surface deformation rate at different stages of fault movement (Meade and Hager, 2005)

(a) Spatial distribution diagram of surface deformation rate during coseismic (red) and interseismic period (orange) of the fault and the spatial distribution of average relative movement rate (black) of blocks on both sides of the fault; (b) Spatial distribution diagram of surface deformation rate at different stages of the fault in the strong earthquake preparation stage, yellow is the early seismogenic stage, orange is the epicenter stage, and red is the late seismogenic stage. In the figure, v is the surface deformation velocity, v_0 is the long-term slip rate of the fault, x is the distance between the point and the fault, and D is the fault locking depth.

and Prescott, 1973; Meade and Hager, 2005); 而且断层上地震应变的积累以及震后变形调整不仅与上地壳脆性层有关, 还与下地壳或上地幔深部韧性层长期稳态相对运动有关 (Nur and Mavko, 1974; Deng et al., 1998); 在大量研究基础上, Scholz (1998) 给出了断层运动在强震孕育发生不同阶段随深度变化的理论模式。处于震间不同阶段的断层运动与地表变形速率空间分布特征之间的理论关系, 是利用大地测量观测资料开展孕震阶段判定的理论基础。

而基于断层运动特征分析目标断层所处的孕震阶段的技术基础, 则是负位错、位错解析解、位错数值模拟等。Matsu'ura 等 (1986) 提出负位错理论模型, 该模型认为受震间构造应力的加载作用引起的是在深部“延性”区域相对运动, 可认为是无应变积累的刚性块体运动加上浅部“脆性”闭锁层的反方向均匀位错; 与此同时, 关于断层运动引起地壳变形的计算理论逐渐成熟, 尤其是 Okada 的解析解 (Okada, 1985, 1992) 为相关地震变形的模拟和反演提供非常坚实的理论基础。

近年来利用大地测量给出的地壳变形速率为约束, 基于 Okada 理论计算和负位错理论模型, 通过断层运动反演确定断层震间强闭锁区, 进而判定目标断层是否处于震间晚期阶段, 累积了越来越多的震例, 例如, 2010 年智利 8.8 级、2011 年日本 9.0 级、2014 年智利 8.1 级、2015 年尼泊尔 8.1 级等地震 (Hashimoto et al., 2009; Madariaga et al., 2010; Loveless and Meade, 2010; Schurr et al., 2014; Avouac et al., 2015)。其中对于观测比较好的地方, 应用比较多的软件是 DEFNODE (McCaffrey et al., 2000; McCaffrey, 2002), 该软件基于 Okada 模型, 以地表变形观测为约束, 反演断层运动速率, 结合地震地质研究给出的活动断层最新地质年代的断层平均运动速率, 给出断层运动闭锁程度, 一般认为处于震间晚期的断层运动闭锁程度较强。而对于观测基础不太好的地区, 基于负位错理论利用反正切的方法反演断层闭锁深度, 一般认为震间晚期的断层运动闭锁深度较深。

而依据现有中国大陆大地测量观测资料开展断层孕震阶段的判定, 对中国大陆活动地块边界带主要断层的 391 个断层段, 本文将闭锁程度结果分为 4 类, 即强闭锁、部分闭锁、不闭锁及无资料。强闭锁是指断层段的闭锁深度接近该区域孕震层深度, 且闭锁率不低于 0.8, 例如, 川滇地区小江断裂带南段、安宁河断裂带等。部分闭锁是指断层段的闭锁深度小于该区域孕震层深度, 但大于 10 km, 且闭锁率

不低于 0.8, 例如, 青藏高原北部地区阿尔金断裂 (Li et al., 2018); 或者断层段的闭锁深度接近该区域孕震层深度, 闭锁率在 0.6 至 0.8 之间, 例如, 川滇地区鲜水河断裂带中段等 (Jiang et al., 2015)。不闭锁是指断层段的闭锁深度小于 5 km, 例如, 川滇地区龙门山断裂带北段、小江断裂带中段等。无资料是指断层段附近区域的大地测量资料不充分, 无法得到可靠的反演结果, 例如, 川滇地区澜沧江断裂、新疆地区兴地断裂等。对于无法开展二维反演的部分地区采用反正切的方法确定闭锁深度, 如果闭锁深度达到或接近弹性层上地壳厚度则认为是强闭锁, 而闭锁深度较浅的认为不闭锁, 例如, 海原断裂带闭锁深度仅 1 km 左右 (Cavalié et al., 2008), 因此被认为有可能仍处于震后调整阶段 (M7 专项工作组, 2012)。

利用现有大地测量观测资料为约束, 反演中国大陆活动地块边界带主要断层 391 个断层段的断层运动闭锁程度, 目前能识别出强闭锁断层段 103 个, 部分闭锁断层段 58 个, 不闭锁断层段 64 个, 无资料断层段 166 个 (图 6)。

中国大陆活动地块边界带的 391 个断层段, 目前大约有 40% 无法开展断层运动反演工作。而监测能力的提升, 并非单靠简单的空间加密就能改变的, 因为地表变形观测对深度约束能力毕竟有限, 例如, 对于监测能力较好的美国圣安德列斯断层中段, 断层运动速率反演空间分辨率由浅层的 2~5 km, 到 20 km 深度会达到 20 km 左右 (Jolivet et al., 2015)。我们通过理论反演实验, 来讨论最优观测方案, 针对不同闭锁深度的断层运动模型, 通过理论计算地表运动速率, 对不同闭锁深度模型对应的跨断层地表运动速率剖面, 重点分析刻画地壳运动速率梯度所需的测点间距; 然后以理论计算地表运动速率为约束, 通过反演分析不同深度空间分辨率。理论分析认为, 每个断层分段布设跨断层 GPS 观测剖面, 断层附近 50 km 范围内台间距 2~5 km, 超过 50 km 台间距 20 km, 其单个剖面断层运动一维反演空间分辨率和精度如图 7; 剖面间沿断层两侧布设约 20 km 间距, 经过理论测试该综合加密观测方案的空间分辨率应该能满足识别出 7 级地震凹凸体的监测需求。

3 断层库仑应力显著增强段

断层应力累积水平计算的常用方法是断层面上库仑应力变化数值模拟, 而很多震例表明, 强震引起的库仑应力变化可以用于强震地点的长期预测。尤

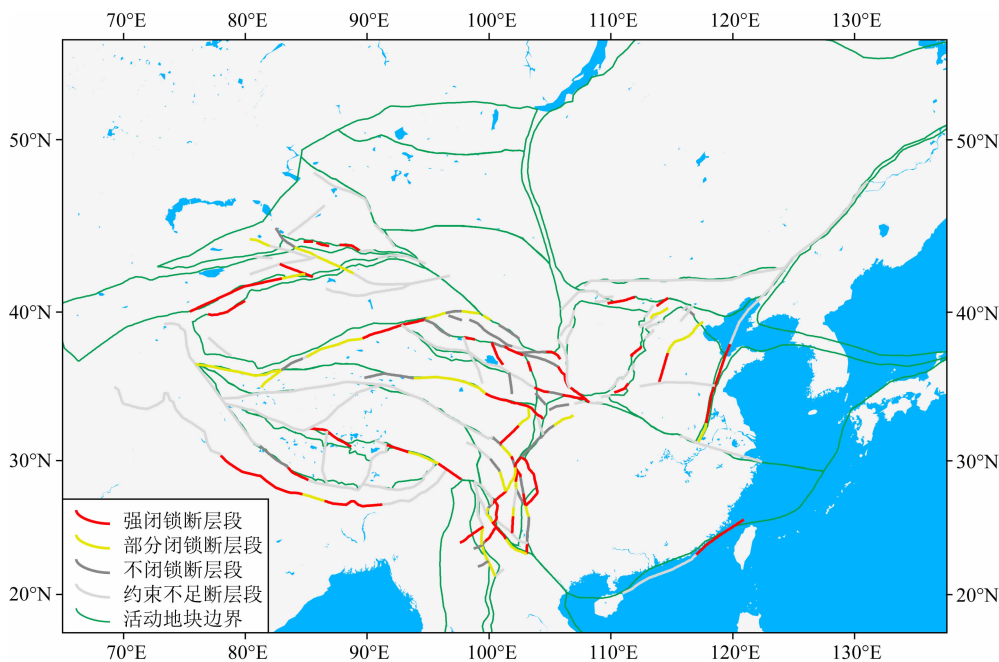


图6 中国大陆活动地块边界带主要断层与各断层闭锁程度结果分布图

Fig. 6 The distribution of main active faults and their locking degree in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland

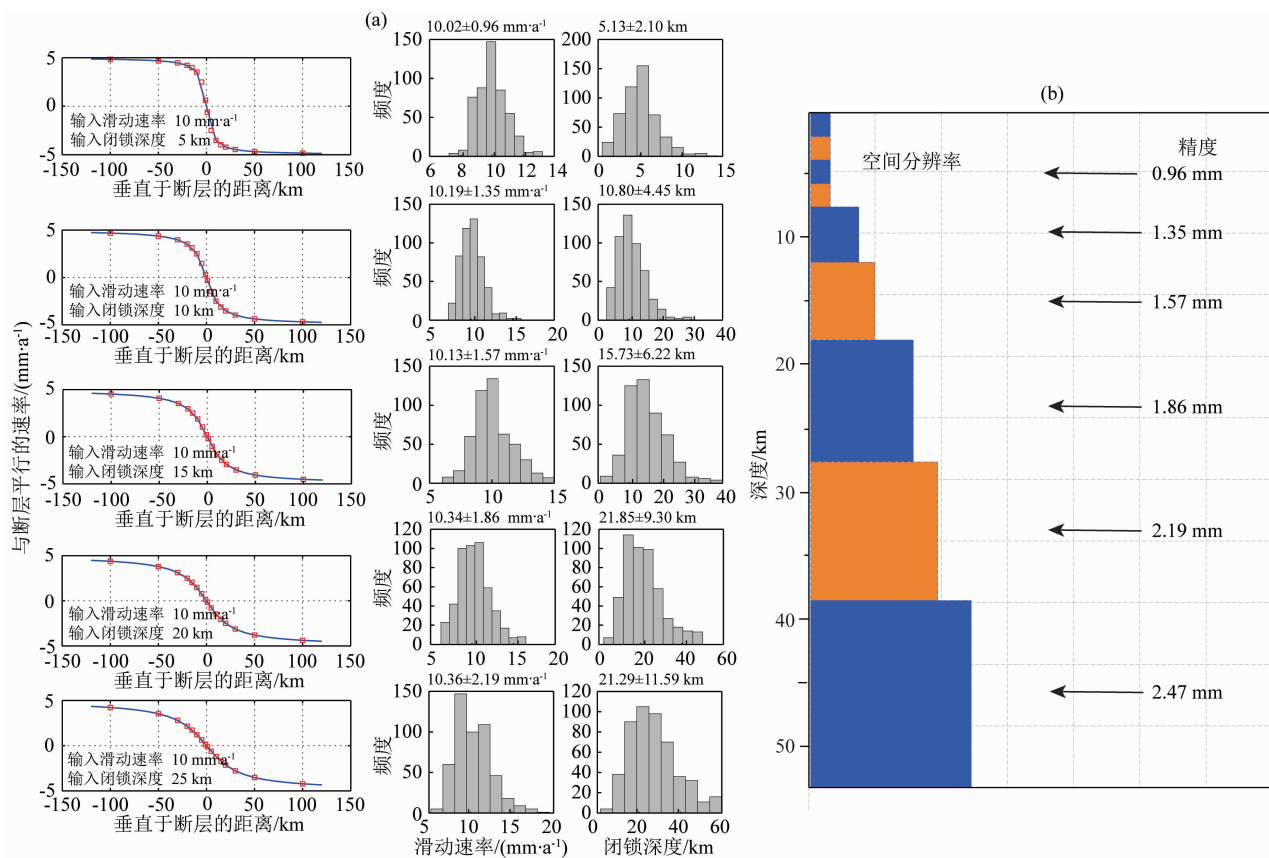


图7 不同断层闭锁深度反演分析(a), 垂向反演空间分辨率和精度(b)

(a) 依据不同闭锁深度断层运动模型给出的地表测点数值模拟结果做约束, 进行断层运动反演测试, 给出不同断层闭锁深度模型的空间分辨率(km)和反演精度(mm); (b) 为基于15—20测点跨断层GPS剖面观测方案的一维垂向反演的空间分辨率和精度。

Fig. 7 Inversion of different fault locking depths (a), Spatial resolution and accuracy of vertical inversion (b)
 (a) Inversion test of fault motion was conducted based on the numerical simulation results of surface measurement points given by fault motion models with different locked depths, and the spatial resolution (km) and inversion accuracy (mm) of models with different locked depths were given. (b) shows the spatial resolution and accuracy of one-dimensional vertical inversion based on GPS profile observation scheme across faults at 15—20 survey points.

其是 1999 年土耳其伊兹米特 7.4 级地震之后该研究引起地震学界普遍关注,在此地震前 Nalbant 等(1998)和 Stein 等(1997)利用历史强震引起的同震变化分析认为,土耳其北安纳托利亚断层存在强震危险.震后不同物理机制也在地震活动之间库仑应力的影响中发挥了关键作用,例如,1992 年美国兰德斯 7.3 级地震对 1999 年赫可托矿地震库仑应力影响中震后黏滞松弛作用起到关键作用(Freed and Lin, 2001).而震后黏滞松弛作用可能会持续数十年甚至上百年(Lorenzo-Martin et al., 2006),有些震例表明周边强震引起的震后黏滞松弛作用在某些

时段有可能达到构造加载作用的水平(徐晶等, 2013),例如,2008 年汶川 8.0 级地震震后黏滞松弛在鲜水河断裂带中段引起的震后库仑应力变化随着时间的累积量可能会达到甚至超过同震引起的库仑应力变化(图 8).而在震后黏滞松弛作用引起的库仑应力变化实际计算过程中,区域壳幔黏滞模型的确定非常重要(Freed and Lin, 2001),其主要方法有:(1)基于震后形变观测做约束反演得到区域壳幔黏滞结构(Deng et al., 1998;Diao et al., 2014);(2)基于地表运动速率和壳幔温度约束反演得到区域壳幔黏滞结构(Copley, 2008;石耀霖和曹建玲,2008).

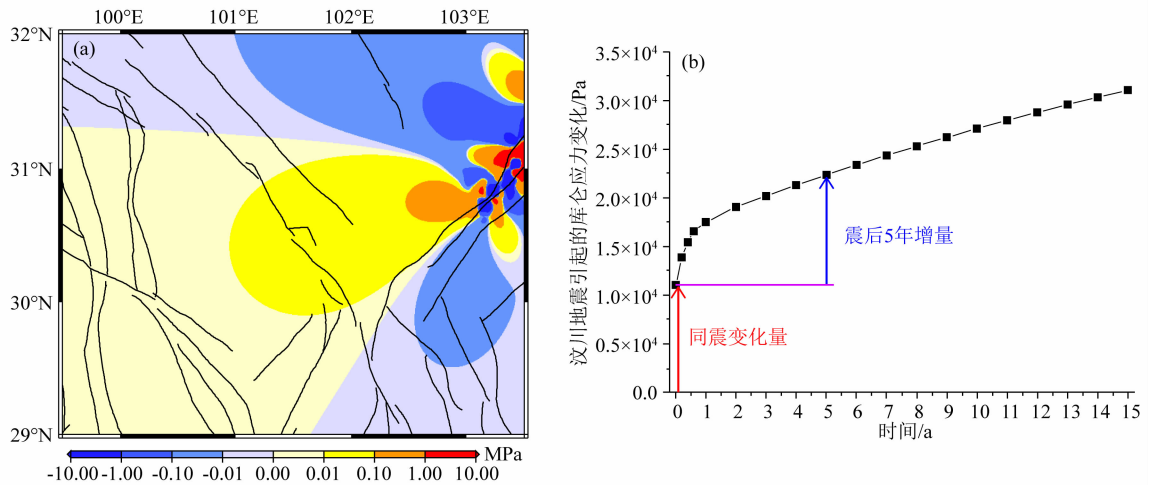


图 8 2008 年汶川 8.0 级地震在鲜水河断裂带色拉哈—康定段引起的库仑应力变化

(a) 2008 年汶川 8.0 级地震引起的同震库仑应力变化,接收断层为色拉哈—康定段的断层,深度 10 km;

(b) 汶川地震引起的同震和震后库仑应力累积变化.

Fig. 8 Coulomb stress changes caused by the 2008 $M_{8.0}$ Wenchuan earthquake in the Salah-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone

(a) shows the coseismic Coulomb stress change caused by the 2008 Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake. The geometry of the receiving fault is the fault geometry of the Salah-Kangding section, with a depth of 10 km. (b) shows the coseismic and post-seismic Coulomb stress accumulation changes caused by Wenchuan earthquake.

库仑应力计算基础资料包括历史强震同震位错信息、接收断层信息和壳幔黏滞系数.因此,在进行库仑应力计算前开展了大量基础资料收集工作.一是整理了中国大陆及周边 179 次历史强震同震位错,以及 391 个断层段的地震地质研究结果(徐锡伟等,2016).二是通过基于震源机制解的应力张量反演,确定缺乏明确地震地质研究结果的断层段和活动地块内部的接收断层参数(Toda and Enescu, 2011),共计得到中国大陆及周边地区 12424 次地震事件的震源机制解.三是系统梳理了利用中国大陆强震震后位移、地壳变形速率和温度模型等方法,给出的不同区域壳

幔短期黏滞系数和长期黏滞系数(石耀霖和曹建玲,2008).

基于收集的中国大陆及周边 179 次强震震源参数和不同分区壳幔黏滞系数,利用德国地学研究中心汪荣江研究员开发的库仑应力计算程序 PSGRN/PSCMP(Wang et al., 2006),分区计算了区域历史强震对活动地块边界带主要断层各断层段和活动地块内部的库仑应力变化.

中国大陆活动地块边界带主要断层 391 个断层段中,库仑应力显著增强(库仑应力增强不少于 0.1 MPa)的断层段有 107 个,库仑应力增强(库仑应力增强处于 0.01~0.1 MPa)的断层段有 84 个(图 9).

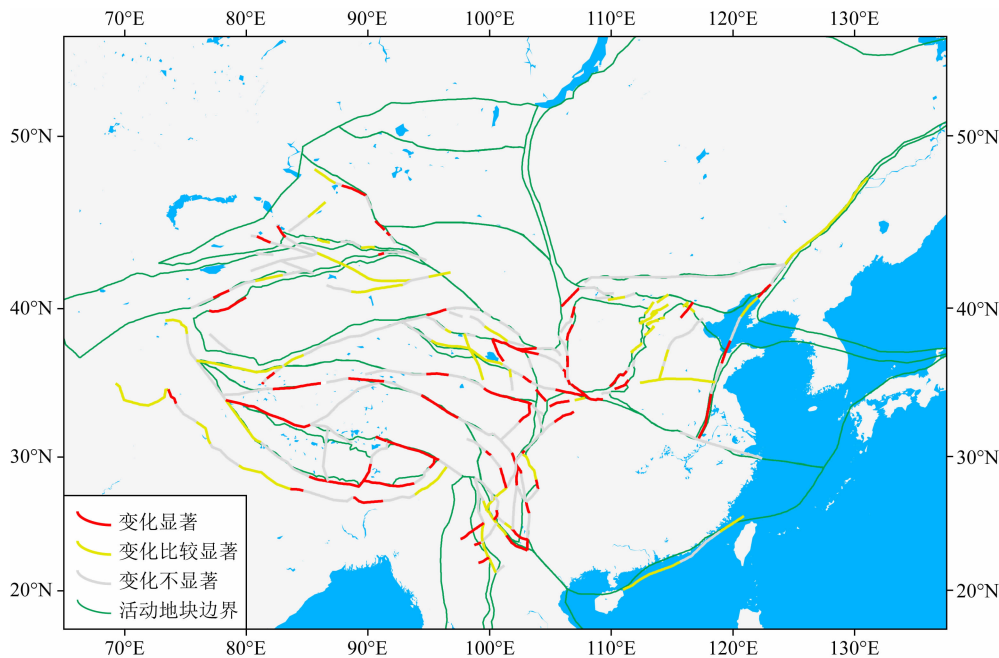


图 9 中国大陆活动地块边界带主要断层与库仑应力增强段判定结果分布图

Fig. 9 The distribution of main active faults and their Coulomb stress increasing segments in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland

4 中小地震稀疏段

根据以往震例,1999 年中国台湾集集 7.6 级 (Lin, 2001)、2004 年苏门答腊 9.0 级 (Katsumata, 2015)、2011 年日本 9.0 级 (Katsumata, 2011) 等地震震前震源区存在中小地震活动较弱区域。针对中国大陆活动地块边界带主要断层的各断层段,基于 1970 年以来中小地震目录,以断层节点为中心,统计该剖面内 3 级以上地震的数量,按照各断层段所在边界带进行活动程度归一化处理,若归一化地震活动程度小于 0.4,判定该断层段为中小地震稀疏段。例如,川滇地区龙日坝断裂带中段、安宁河断裂带南段。

另外,1989 年美国加州 7.1 级地震震前震源区中小地震呈现立体围空现象 (Olson, 1990),仅通过地震事件经纬度可能识别不出中小地震稀疏段。因此,针对南北地震带、天山地震带和华北地区等重点区域,采取中小地震重新定位方法 (Long et al., 2015),对区域剖面的定位结果进行分析,进而确定是否为中小地震稀疏段。例如,天桥沟—黄羊川断裂、小金河断裂南段。

利用上述方法,逐一对中国大陆活动地块边界带主要断层 391 个断层段进行分析,共识别出中小地震稀疏段 83 个 (图 10),需要说明的是,由于监测

能力的原因,并未对青藏高原内部进行中小地震稀疏段的分析。

5 强震孕育晚期综合判定与结果

从以往震例来看,强震破裂空段、断层运动闭锁段、断层库仑应力增强段是强震孕育晚期判定的必要不充分条件,而中小地震稀疏段的震例相对较少,基于国内外强震预测效果实际情况 (表 1),分别赋予强震破裂空段、断层运动闭锁段、中小地震稀疏段、断层库仑应力增强段等 4 个震间晚期判定方法 3.0、3.0、1.0、3.0 的权重,各类方法具体权重分配规则 (图 11): (1) 高离逝率强震破裂空段为 3.0,历史缺震空段为 2.0; (2) 断层运动强闭锁段为 3.0,部分闭锁为 1.5; (3) 中小地震稀疏段为 1.0; (4) 库仑应力增强 ≥ 0.1 MPa 为 3.0, (0.1~0.01) MPa 为 0.15,综合加权给出目标断层的震间晚期判定系数。这种策略与美国加州地区震级判定中间部分过程类似 (Field et al., 2014),只不过本文更多地参考方法在实际震例中的印证情况。

图 12 为中国大陆活动地块边界带主要断层各断层段的震间晚期判定系数空间分布图。一般情况,强震发生后,发震断层段的离逝率低,处于震间晚期的可能性相对较小;中国大陆 7 级浅源地震 (西部 1900 年以来,东部 1484 年以来) 的发震断层,约 90%

表 1 全球 10 次强震发震断层活动状态预测情况汇总表

Table 1 Summary of the predicted fault activity status of 10 strong earthquakes worldwide

序号	地震事件	强震破裂空段	断层运动闭锁段	中小地震稀疏段	库仑应力增强段	参考文献
1	2015 年尼泊尔 8.1 级	500 km 空段	闭锁率 > 0.8	> 0.15 MPa		Avouac et al., 2015; Bilham et al., 2001
2	2014 年智利 8.1 级	400 km 空段	闭锁率 > 0.6	> 0.1 MPa		Schurr et al., 2014
3	2011 年日本 9.0 级	500 km 空段	闭锁率 > 0.8	震前 23 年中等地震活动弱	> 0.2 MPa	Hashimoto et al., 2009; Loveless and Meade, 2010; Toda and Enescu, 2011; Kanamori et al., 2006; Katsumata, 2011
4	2010 年智利 8.8 级	200 km 空段	闭锁率 > 0.8	> 0.1 MPa		Madariaga et al., 2010
5	2010 年海地 7.3 级	200 km 空段	闭锁率 > 0.9	> 0.04 MPa		Prentice et al., 2003
6	2008 年中国汶川 8.0 级	200 km 空段	闭锁率 > 0.9	> 0.01 MPa		闻学泽等, 2009; 赵静等, 2012
7	2004 年苏门答腊 9 级	500 km 空段	闭锁深度达孕震层下界面深度	震前 13 年中等地震活动偏弱	> 0.1 MPa	Katsumata, 2015; Simoes et al., 2004
8	1999 年中国台湾集集 7.6 级	200 km 空段	—	震前数十年中小地震活动偏弱	> 0.01 MPa	Lin, 2001
9	1999 年土耳其 7.8 级	150 km 空段	—	—	> 0.01 MPa	Bohnhoff et al., 2013; Nalbant et al., 1998; Stein et al., 1997
10	1999 年美国加州 7.1 级	—	—	—	> 0.01 MPa	Freed et al., 2001
11	2013 年中国芦山 7.0 级	70 km 空段	闭锁率 > 0.9	震前 20 年中小地震活动偏弱	> 0.01 MPa	闻学泽等, 2009; 赵静等, 2012; Toda et al., 2008

注:其中红色是震前预测性工作,黑色是震后回溯性工作.

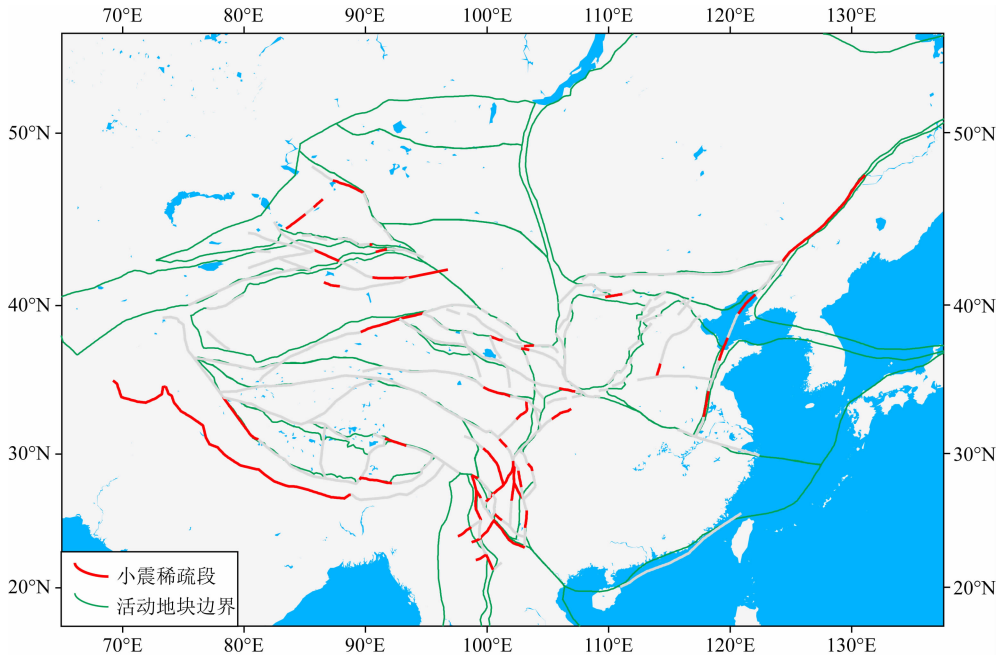


图 10 中国大陆活动地块边界带主要断层与中小地震稀疏段判定结果分布图

Fig. 10 The distribution of main active faults and their small-moderate seismicity scarce segments in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland

的震间晚期判定系数 < 5.0。因此,基于现有地震观测资料分析认为,震间晚期判定系数 ≥ 5.0 断层处于震间晚期的可能性较大。

由图 12 可见,中国大陆地区可能处于强震震间晚期的断层段主要有:

中国大陆东部的郯庐断裂带的宿迁—嘉山段、莱州湾段、下辽河段、五常段,河北平原地震带磁县—鹤壁段,环鄂尔多斯的桌子山西缘断裂、狼山山前断裂、黄河断裂临武段、六盘山东麓断裂、小关山断裂、渭河断裂、陇县—岐山—马昭断裂、大青山山

前断裂、怀安镇盆地北缘断裂、阳原盆地南缘断裂、交城断裂、中条山山前断裂、东南沿海的滨海断裂东北段；

青藏高原北部地区的托莱山断裂、冷龙岭断裂、日月山断裂、天桥沟—黄羊川断裂、长岭山北麓断裂、金强河断裂、毛毛山断裂、老虎山断裂、香山天景山断裂东南段，西秦岭北缘断裂的锅麻滩段、黄香沟

段、漳县段与临潭—宕昌断裂，东昆仑断裂带西大滩—东大滩段、玛沁—玛曲段、玛曲—荷叶段、塔藏段，阿尔金断裂阿克塞段、疏勒河段、玛依色列克—茫崖段、索尔库里段，康西瓦断裂；

青藏高原中南部及川滇地区的喜马拉雅主断裂中西段、中东段，嘉黎断裂，甘孜玉树断裂当江段，班公怒江缝合带东段，龙日坝断裂中段、北段，鲜水河断裂中南段，龙门山断裂带南段，小金河—丽江断裂中段，理塘断裂大毛垭坝段、沙湾段，安宁河断裂、大凉山断裂、马边断裂、昭通断裂、小江断裂巧家—东川段、小江断裂建水段，南汀河断裂南段、龙陵—瑞丽断裂、孟连断裂，楚雄—建水断裂、红河断裂中南段、程海断裂南段、元谋—昔格达断裂罗川以南段；

南天山地区的迈丹断裂、柯坪断裂、霍拉山断裂、库木格列木断裂，北天山地区的博阿断裂、阜康断裂、达尔布特断裂。

本文结果只是基于现有给出的判定结果，有些判定为处于震间晚期可能性较小的断层段是由于资料不完备的原因，例如，青藏高原西部地区的地震地质探察、大地测量观测等基础资料比较弱。

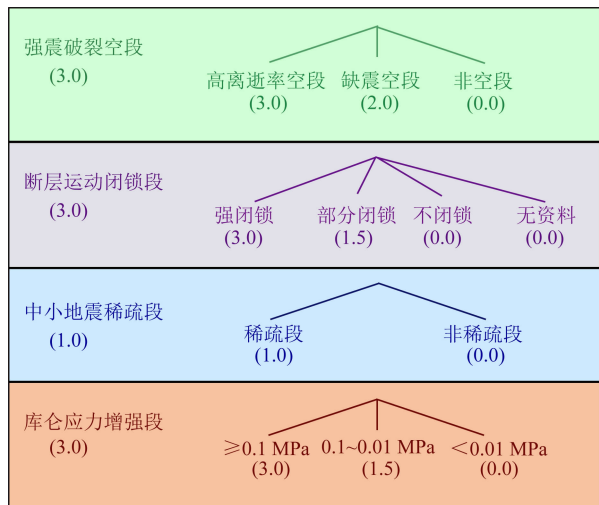


图 11 4 类方法的权重分配规则确定震间晚期判定系数
Fig. 11 The judgment coefficients of the late stage of interseismic period determined by the rules of the weight allocation in four kinds of methods

6 结论与讨论

发震断层的震间晚期判定是强震时间预测的基

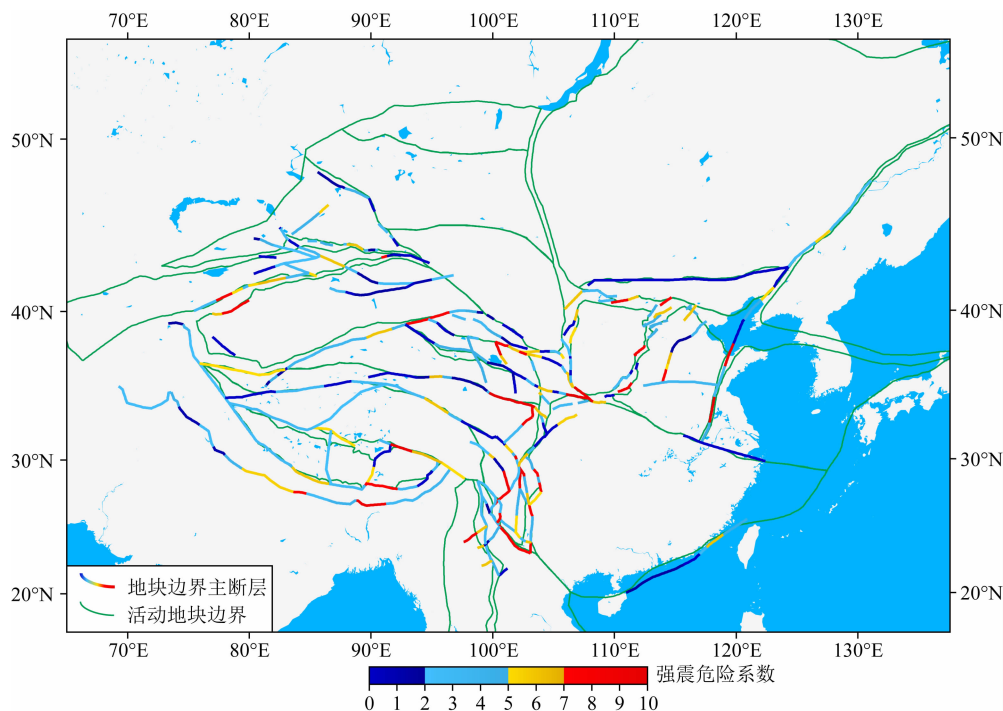


图 12 中国大陆活动地块边界带主要断层及其震间晚期判定系数空间分布图
Fig. 12 The spatial distribution of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland and their judgment coefficients of the late stage of interseismic period

础工作,虽然本文尝试给出中国大陆活动地块边界带主要断层的震间晚期判定结果,但结果的可靠程度、精细程度等均存在巨大的改善空间.其主要原因在于,目前有些区域的地震监测能力较弱,例如,青藏高原中西部地区的大地测量、测震以及地震地质探察均比较薄弱,另外,现今对于大陆型强震原地复发的动力学过程更多地停留在宏观概念理论模型.

早在美国南加州地震中心成立时,地震学家们便期望通过努力构建包括孕震断层在内的岩石圈应力应变时空演化模型,基于该模型能像气象预报一样开展物理预报(Aki, 2002);数十年来,全世界地震学家积累了大量地震学、大地测量、地震地质等野外观测资料,就断层运动、断层应力、破裂模型等等涉及震源物理的众多基础研究逐渐深入,使得地震学家在强震物理预测方向有了更多期待(Avouac, 2015).断层是否处于震间晚期,只是时间预测最初步工作,但对于这个问题,我们基本监测和基础研究仍有很大改善空间,另一方面,从震间晚期到震前阶段的更进一步的时间预测判定,尚需更多的震例积累和理论研究.

基于板块俯冲百年尺度强震轮回过程给出断层运动模式,与断层活动和强震孕育密切相关的地壳变形在时空上是不均匀的,这导致了震间不同阶段的判定与强震原地复发的动力学过程密切相关,而中国大陆多数地区 7 级强震原地复发周期长达数千年(邓起东等, 1994),相关的断层运动模式是否适用于中国大陆地区,也即描述不同孕震阶段断层运动时空演化特征的中国大陆地区强震断层运动模式尚

未明确.虽然与强震动力学过程有关的现代观测涉及的频段越来越宽,但均无法弥补数十年现代地球物理和大地测量观测时间太短的缺陷.数百年至数千年的强震原地复发间隔正处于上述两者间隙中,地震位错、非地震断层运动和区域地壳变形所形成的永久形变在强震轮回中的时空演化特征很难用现代观测完整覆盖(Tectonics Program, 2003),因此,对中国大陆地区处于不同孕震阶段的断层段,开展地震地质、大地测量、地震学和地球化学等加密观测,以“空间换时间”的思路分析其整个强震过程不同阶段的断层运动、断层应力等震源物理特征,以此构建大陆型震源物理动力学模型,然后逐渐积累更多的资料不断完善模型,为大陆强震物理预测不断提供更好的研究基础.

另外,2021 年玛多 7.4 级地震发生在巴颜喀拉块体内部,是我国大陆记录到为数不多的活动地块内部的浅源 7 级地震,而活动地块内部的地壳变形机制、活动断层形成与演化、强震孕育发生过程等与活动地块边界带相关问题是不同的.而对于不同区域、不同学科,震源物理模型具体内容存在较大差异,而且随着监测条件和科学认识不断改进,既定震源物理模型也不断调整与完善(Aki, 2002; Jordan, 2006; 2017SCEC).根据本文断层震间阶段判定过程和相关基础研究,震源物理模型至少包括:断层破裂模型、断层运动模型、断层应力模型、地震活动模型等,为做好上述模型还需要更基础的大地测量模型、流变模型、热力学模型、结构模型、介质模型、地块模型等(图 13).只有针对中国大陆活动地块边界带的震源物理模型不断细化和完善,我国的主要断

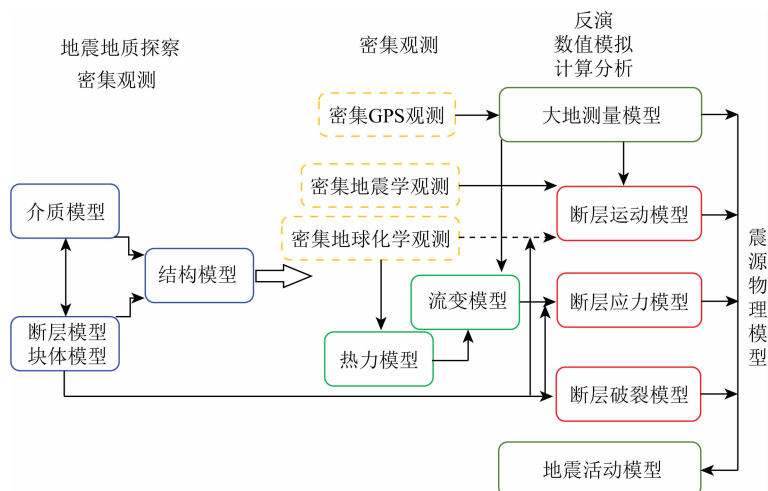


图 13 中国大陆活动地块边界带主要断层震间晚期判定所需震源物理模型

Fig. 13 Physics of earthquake source model required for determining late stage of interseismic period of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland

层孕震阶段的判定才更科学、更可靠,才能有效加强震预测的物理基础。

致谢 衷心感谢中国科学院地质与地球物理研究所滕吉文院士、中山大学张培震院士、国家自然灾害防治研究院徐锡伟研究员和崔俊峰研究员、北京大学沈正康教授、GFZ 中心汪荣江研究员、中国地质大学(武汉)熊熊教授和单斌教授、四川地震局闻学泽研究员、中国地震局地震预测研究所江在森研究员和田勤俭研究员、广东工业大学王华教授、新疆地震局李杰研究员等对本工作的指导,资料的分享、软件的帮助以及结果的讨论;衷心感谢中国地震局科技与国际合作司车时司长、监测预报司马宏生副司长、张浪平处长、中国地震局地震预测所吴忠良所长、张晓东书记、中国地震局地球物理研究所王曙光处长等的指导、协调与帮助;还有国内外关注地震研究的近百位老师、领导和同事为本次工作提供诸多无私帮助,由于篇幅所限,不能一一列出,在此一并表示感谢。

References

- Aki K. 2002. 5-Synthesis of earthquake science information and its public transfer: a history of the Southern California Earthquake Center. *International Geophysics*, 81: 39-49.
- Avouac J P, Meng L S, Wei S J, et al. 2015. Lower edge of locked Main Himalayan Thrust unzipped by the 2015 Gorkha earthquake. *Nature Geoscience*, 8(9): 708-711.
- Avouac J P. 2015. From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 233-271.
- Bilham R, Gaur V K, Molnar P. 2001. Himalayan seismic hazard. *Science*, 293(5534): 1442-1444.
- Bohnhoff M, Bulut F, Dresen G, et al. 2013. An earthquake gap south of Istanbul. *Nature Communications*, 4(1): 1999, doi: 10.1038/ncomms2999.
- Bollinger L, Sapkota S N, Tapponnier P, et al. 2014. Estimating the return times of great Himalayan earthquakes in eastern Nepal: evidence from the Patu and Bardibas strands of the main frontal thrust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9): 7123-7163.
- Cavalié O, Lasserre C, Doin M P, et al. 2008. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3-4): 246-257.
- Chen Y T. 2009. Earthquake prediction: retrospect and prospect. *Science in China Series D: Earth Science* (in Chinese), 39(12): 1633-1658.
- Copley A. 2008. Kinematics and dynamics of the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Geophysical Journal International*, 174(3): 1081-1100.
- Deng J S, Gurnis M, Kanamori H, et al. 1998. Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake. *Science*, 282(5394): 1689-1692.
- Deng Q D, Wen X Z. 2008. A review on the research of active tectonics—History, progress and suggestions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 30(1): 1-30.
- Diao F Q, Xiong X, Wang R J, et al. 2014. Overlapping post-seismic deformation processes: afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 M_w 9.0 Tohoku (Japan) earthquake. *Geophysical Journal International*, 196(1): 218-229.
- Field E H, Arrowsmith R J, Biasi G P, et al. 2014. Uniform California earthquake rupture forecast, version 3 (UCERF3)—The time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3): 1122-1180.
- Freed A M, Lin J. 2001. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer. *Nature*, 411(6834): 180-183.
- Hashimoto C, Noda A, Sagiya T, et al. 2009. Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion. *Nature Geoscience*, 2(2): 141-144.
- Jiang G Y, Xu X W, Chen G H, et al. 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuibe-Anninghe-Zemuhe fault system, southwest China, with a new 3-D viscoelastic interseismic coupling model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3): 1855-1873, doi: 10.1002/2014JB011492.
- Jolivet R, Simons M, Agram P S, et al. 2015. Aseismic slip and seismogenic coupling along the central San Andreas Fault. *Geophysical Research Letters*, 42(2): 297-306, doi: 10.1002/2014GL062222.
- Jordan T H. 2006. Earthquake system science in Southern California. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo*, 81: 211-219.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1991. Seismic gap hypothesis: ten years after. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B13): 21419-21431.
- Kanamori H, Miyazawa M, Mori J. 2006. Investigation of the earthquake sequence off Miyagi prefecture with historical seismograms. *Earth, Planets and Space*, 58(12): 1533-1541.
- Kanamori H. 2012. Earthquake hazards: putting seismic research to most effective use. *Nature*, 483(7388): 147-148.
- Katsumata K. 2011. A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ($M=9.0$). *Earth, Planets and Space*, 63(7): 709-712.
- Katsumata K. 2015. A long-term seismic quiescence before the 2004 sumatra (M_w 9.1) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1): 167-176.
- Li Y C, Shan X J, Qu C Y, et al. 2018. Crustal deformation of the Altyn Tagh fault based on GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11): 10309-10322, doi: 10.1029/2018jb015814.
- Lin C H. 2001. The 1999 Taiwan earthquake: a proposed stress-focusing, heel-shaped model. *Bulletin of the Seismological Society of*

- America*, 91(5): 1053-1061.
- Long F, Wen X Z, Ruan X, et al. 2015. A more accurate relocation of the 2013 $M_s 7.0$ Lushan, Sichuan, China, earthquake sequence, and the seismogenic structure analysis. *Journal of Seismology*, 19(3): 653-665.
- Lorenzo-Martin F, Roth F, Wang R J. 2006. Inversion for rheological parameters from post-seismic surface deformation associated with the 1960 Valdivia earthquake, Chile. *Geophysical Journal International*, 164(1): 75-87.
- Loveless J P, Meade B J. 2010. Geodetic imaging of plate motions, slip rates, and partitioning of deformation in Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2): B02410, doi: 10.1029/2008JB006248.
- Madariaga R, Métois M, Vigny C, et al. 2010. Central Chile finally breaks. *Science*, 328(5975): 181-182.
- Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. 1986. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12): 12661-12674.
- McCaffrey R, Long M D, Goldfinger C, et al. 2000. Rotation and plate locking at the southern Cascadia subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 27(19): 3117-3120.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotations and plate coupling. // Stein S, Freymueller J T eds. *Plate Boundary Zones*. Washington: American Geophysical Union, 101-122.
- Meade B J, Hager B H. 2005. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3): B03403, doi: 10.1029/2004JB003209.
- Nalbant S S, Hubert A, King G C P. 1998. Stress coupling between earthquakes in Northwest Turkey and the North Aegean Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24469-24486.
- Nishenko S P. 1991. Circum-Pacific seismic potential; 1989—1999. *Pure and Applied Geophysics*, 135(2): 169-259.
- Nur A, Mavko G. 1974. Postseismic viscoelastic rebound. *Science*, 183(4121): 204-206.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135-1154.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2): 1018-1040.
- Olson J A. 1990. Seismicity in the twenty years preceding the Loma Prieta California earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17(9): 1429-1432.
- Prentice C S, Mann P, Pena L R, et al. 2003. Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American-Caribbean plate boundary, Dominican Republic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B3): 2149, doi: 10.1029/2001JB000442.
- Ran Y K, Deng Q D. 1999. History, status and trend about the research of paleoseismology. *Chinese Science Bulletin*, 44(10): 880-889.
- Ran Y K, Wang H, Yang H L, et al. 2014. Key techniques and several cases analysis in paleoseismic studies in China's mainland (4)—Sampling and event analysis of paleoseismic dating methods. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(4): 939-955.
- Reid H F. 1910. The mechanics of the earthquake, the California earthquake of April 18, 1906 Report of the State Investigation Commission, Vol. 2. Washington: Carnegie Institution of Washington, 16-28.
- Savage J C, Burford R O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5): 832-845.
- Savage J C, Prescott W H. 1973. Precision of Geodolite distance measurements for determining fault movements. *Journal of Geophysical Research*, 78(26): 6001-6008.
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391(6662): 37-42.
- Schurr B, Asch G, Hainzl S, et al. 2014. Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514): 299-302.
- Shi Y L, Cao J L. 2008. Effective viscosity of China continental lithosphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 15(3): 82-95.
- Simoes M, Avouac J P, Cattin R, et al. 2004. The Sumatra subduction zone: a case for a locked fault zone extending into the mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B10): B10402, doi: 10.1029/2003JB002958.
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 128(3): 594-604.
- Sykes L R. 1971. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians. *Journal of Geophysical Research*, 76(32): 8021-8041.
- Toda S, Enescu B. 2011. Rate/state Coulomb stress transfer model for the CSEP Japan seismicity forecast. *Earth, Planets and Space*, 63(3): 171-185.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 2008. 12 May 2008 $M = 7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophysical Research Letters*, 35(17): L17305, doi: 10.1029/2008GL034903.
- Wang R J, Lorenzo-Martin F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Computers & Geosciences*, 32(4): 527-541.
- Wen X Z, Ma S L, Xu X W, et al. 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(1-2): 16-36.
- Wen X Z, Zhang P Z, Du F, et al. 2009. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 $M_s 8.0$ Wenchuan, Sichuan, earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(2): 444-454.
- Xu J, Shao Z G, Ma H S, et al. 2013. Evolution of Coulomb stress and stress interaction among strong earthquakes along the Xianshuihe

- fault zone. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(4): 1146-1158, doi: 10.6038/cjg20130410.
- Xu X W, Wu X Y, Yu G H, et al. 2017. Seismo-geological signatures for identifying $M \geq 7.0$ earthquake risk areas and their preliminary application in China's mainland. *Seismology and Geology* (in Chinese), 39(2): 219-275.
- Zhang G M, Ma H S, Wang H, et al. 2004. The relationship between active blocks and strong earthquakes in mainland of China. *Science in China Series D: Earth Science* (in Chinese), 34(7): 591-599.
- Zhang G M, Ma H S, Wang H, et al. 2005. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(3): 602-610.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 13-24.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China. *Scientia Sinica Terrae* (in Chinese), 43(10): 1607-1620.
- Zhao J, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. 2012. Study on fault locking and fault slip deficit of the Longmenshan fault zone before the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(9): 2963-2972, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.
- 成因. // 中国活动断裂研究. 北京: 地震出版社, 1-15.
- 邓起东, 闻学泽. 2008. 活动构造研究——历史、进展与建议. *地震地质*, 30(1): 1-30.
- 力武常次. 1978. 地震预报. 冯锐, 周新华译. 北京: 地质出版社.
- 冉勇康, 邓起东. 1999. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势. *科学通报*, 44(1): 12-20.
- 冉勇康, 王虎, 杨会丽等. 2014. 中国大陆古地震研究的关键技术与案例解析(4)——古地震定年技术的样品采集和事件年代分析. *地震地质*, 36(4): 939-955.
- 石耀霖, 曹建玲. 2008. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. *地学前缘*, 15(3): 82-95.
- 时振梁, 汪良谋, 傅征祥等. 1997. 中国大陆中长期强震危险性预测方法研究. 北京: 海洋出版社.
- 闻学泽. 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京: 地震出版社.
- 闻学泽, 张培震, 杜方等. 2009. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景. *地球物理学报*, 52(2): 444-454.
- 徐晶, 邵志刚, 马宏生等. 2013. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系. *地球物理学报*, 56(4): 1146-1158, doi: 10.6038/cjg20130410.
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平等. 2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京: 地震出版社.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华等. 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. *地震地质*, 39(2): 219-275.
- 张国民, 马宏生, 王辉等. 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2004(7): 591-599.
- 张国民, 马宏生, 王辉等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. *地球物理学报*, 48(3): 602-610.
- 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. *中国科学 D辑*, 33(S1): 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. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1607-1620.
- 赵静, 江在森, 武艳强等. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究. *地球物理学报*, 55(9): 2963-2972, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.

(本文编辑 何燕)

附中文参考文献

- 《2006~2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究》项目组. 2007. 2006~2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究. 北京: 地震出版社.
- M7专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究. 北京: 地震出版社.
- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望. *中国科学 D辑: 地球科学*, 39(12): 1633-1658.
- 邓起东, 徐锡伟, 于贵华. 1994. 中国大陆活动断裂分区特征及其