

巴颜喀拉地块两次大震前地震活动图像与变形局部化*

石富强^{1,2)}, 杨晨艺^{1,2)}, 邹俊杰^{3)*}, 王朋涛⁴⁾, 王芃³⁾, 刘琦³⁾, 季灵运⁴⁾

1. 陕西省地震局 西安 710068

2. 陕西西安地球深部构造中国地震局野外科学观测研究站 西安 710068

3. 中国地震局地震预测研究所 北京 100036

4. 中国地震局第二监测中心 陕西西安 710054

摘要: 为深入认识与巴颜喀拉地块大震孕育有关的地震活动现象及其动力机制,本文并归纳了 2001 年昆仑山口西 8.1 级和 2008 年汶川 8.0 级地震前的区域地震活动图像时空演化及其共性特征,并基于岩石压裂的变形局部化理论定性解释了前述地震活动图像及其时空演化机理。发现两次大地震均发生在断层运动闭锁、应力增强且离逝率高的孕震晚期强震破裂空段,孕震过程符合准周期复发特征。孕震晚期震源附近地震活动水平不高,且在时空上表现出相似的演化过程,是典型的应力依从型前兆过程:震前数年至数十年地震活动图像异常及其时空演化是孕震晚期应力持续增强驱动下地壳岩石发生变形局部化的表现;震源区持续的地震活动平静,则与变形局部化过程中断层面的匀阻化作用有关。

关键词: 地震活动; 变形局部化; 扩容模式; 汶川 8.0 级地震; 昆仑山口西 8.1 级地震; 巴颜喀拉地块

中图分类号: P315.5; P642.3

收稿日期: 2026-3-25

Seismic Activity Patterns and Deformation Localization prior to the Two Great Earthquakes within the Bayan Har Block

Shi Fuqiang^{1,2)}, Yang Chenyi^{1,2)}, Zou Junjie³⁾, Wang Pengtao⁴⁾, Wang Peng³⁾, Liu Qi³⁾, Ji Lingyun⁴⁾

1. Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

2. Shaanxi Xi'an Deep Earth Structure Observation and Research Station of China Earthquake Administration, Xi'an 710068, China

3. Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036

4. The Second Crust Monitoring and Application Center, Xi'an 710054, China

Abstract: To further insights into the seismogenic mechanism of great earthquakes within the Bayan Har Block, this study revisits and synthesizes the previous research

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFC3012003), 中国地震局地震科技星火计划 (XH25035A), 中国地震局震情跟踪任务 (CEA-ZQGZ-202602015)、陕西省自然科学基金 (2024JC-YBMS-210) 和国家自然科学基金 (42542206、42202255) 联合资助。

作者简介: 石富强, 男, (1984—), 博士在读, 高级工程师, 主要从事地壳动力学和地震活动性研究。E-mail: shifuqiang121@163.com/ shifq@cug.edu.cn. ORCID: 0000-0003-1866-6014.

通讯作者: 邹俊杰, 男, (1991—), 博士, 副研究员, 主要从事活动构造、地震中长期预测及地震安全性评价研究。E-mail: zoujunjie@ief.ac.cn. ORCID: 0000-0002-7619-3772.

on the seismic hazard associated with the late-stage seismogenic phase of the 2001 *M* 8.1 Western Kunlun Pass earthquake and the 2008 *M* 8.0 Wenchuan earthquake, with particular focus on the spatiotemporal evolution of seismic activity patterns prior to the two great earthquakes; furthermore their common features are also comparatively discussed and mechanically interpreted by the deformation localization theory validated by rock mechanics experiments. This study found that both great earthquakes occurred in the late-stage seismogenic gaps characterized by fault locking, increased stress, and very high elapsed rate, exhibiting quasi-periodic recurrence behavior. The low level of seismicity near the seismic source during the late-stage seismogenic period, coupled with similar spatiotemporal evolution, represents a typical stress-dependent precursory process. The anomalies of seismic activity patterns and their spatiotemporal evolution observed years to several decades before the earthquakes are essentially manifestations of crustal deformation localization driven by continuously increasing stress during the late-stage seismogenic period. The sustained seismic quiescence in the source zone is related to the resistance-uniformization of the fault plane during the deformation localization.

Key Words: Seismicity activity; Deformation localization; Dilation model; 2001 *M* 8.1 Western Kunlun Pass earthquake; 2008 *M* 8.0 Wenchuan earthquake; Bayan Har Block

0 引言

大地震的发生与断层所受的周边岩石圈应力状态以及断层自身的强度密切相关(Kato and Ben-Zion, 2021)。实验室岩石力学破裂实验显示:随着围压的增加,岩石内部开始形成微裂隙发生宏观膨胀(Scholz, 1968),控制着岩石样品从分布式损伤向剪切局部化转变(Lockner *et al.*, 1991; Reches and Lockner, 1994);当微裂隙贯通岩石样本空间,岩石发生宏观破裂(Lockner *et al.*, 1991; Renard *et al.*, 2019);且在损伤剪切局部化过程中伴随着 *b* 值下降(Lockner *et al.*, 1991);这个过程被称之为变形局部化。陈颙院士研究发现,在岩石破裂前的变形局部化过程中,声发射频次还会表现出类似于地震活动活跃/平静的起伏过程(郑捷等, 1983)。这与一些大地震前地震活动图像的演化过程(Mogi, 1979; Kanamori, 1981; Kato and Ben-Zion, 2021) 相似。金森博雄认为在大震发生前地震活动的时空演化过程与孕震区断层系统强度分布不均匀有关:震源区外围次级断层强度低,在构造应力持续加载下提前破裂,甚至在一定时空范围出现密集震群活动;当外围次级断层全部破裂后,地震活动进入平静状态;构造应力继续加载,应力将集中在震源区内部孕震凹凸体上,导致孕震凹凸体破裂发生大地震(Kanamori, 1981)。该过程中,地震活动从外围逐渐向震中逼近,且伴随着地震活动增强/平静,前兆震群甚至前震。

加州地区大地震前也普遍观测到这种地震活动局部化现象(Kato and Ben-Zion, 2021; Girona and Drymoni, 2024)。不同于美国加州、日本俯冲带等相对简单的大型走滑构造和板块俯冲构造, 中国大陆西部受印度板块北东向推挤, 断层系统复杂, 地震前兆显著且广泛分布于复杂断层系统中(Mogi, 1981)。

巴颜喀拉地块构造复杂, 被称为“中国地质北慕大”(陈守建等, 2011), 是青藏高原受印度板块强烈推挤作用, 内部块体沿大型走滑断裂带东向逃逸最为活跃的活动地块之一(闻学泽等, 2011), 孕育了本世纪中国大陆 2 次 8 级以上地震和多次 7 级以上地震(图 1), 如 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震等。前人研究发现两次 8 级地震前, 也发现了一些可能与大地震孕育有关的地震活动现象(刘蒲雄等, 2003; Wen *et al.*, 2007; Huang, 2008; 梅世蓉等, 2009; 薛艳等, 2018)。两次大地震前是否存在共性的, 有助于理解大地震孕育过程的地震活动图像演化过程? 如何理解这些地震活动图像演化及其动力机制? 岩石变形局部化是否有助于解释这些地震活动图像异常与目标大地震的动力关系? 尚需进一步讨论。

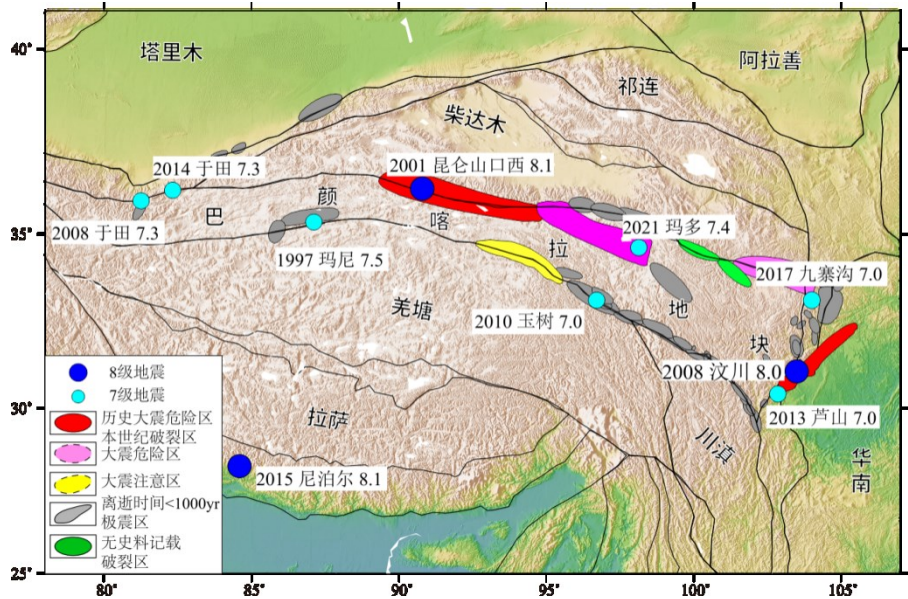


图 1 巴颜喀拉地块构造环境及强震活动. F1 昆仑断裂带; F2 甘孜-玉树-鲜水河断裂带; F3 龙门山断裂带.

Fig.1 Tectonic setting and strong earthquake activities around the Bayan Har Block. F1 the Kunlun fault zone; F2 the Ganzi-Yushu-Xianshuihe fault zone; F3 the Longmenshan fault zone.

为此, 本文在回溯前人工作基础上, 对 2001 年昆仑山口西 8.1 级和 2008 年汶川 8.0 级地震前地震活动图像进行再研究。最后对两次地震前地震活动图像的共性特征进行讨论, 给出巴颜喀拉地块大震

孕育过程的岩石力学实验解释。相关工作可为理解巴颜喀拉地块，乃至中国大陆特大地震孕震过程提供参考。

1 地震活动图像异常概念

为方便读者理解，这里对文中涉及的概念做简单介绍。半个多世纪的地震预测研究实践，中国地震局积累了大量震例基础数据(杜方等，2018)，汇集了1970年以来中国大陆中强震前的地震活动、地球物理及地球化学观测异常现象。就2001年昆仑山口西8.1级地震和2008年汶川8.0级地震而言，涉及到的地震活动图像类异常主要有地震空区、地震条带、震群和地震活动平静。

地震空区，Mogi于1979年对其概念进行详细划分，将断裂带上没有发生历史大震的破裂空段定义为第一类空区，将强震发生前震源区及附近区域小震活动突然减少的现象定义为第二类空区(Mogi, 1979)。我国学者在长期的实践过程中将第二类空区进一步细化为背景空区和孕震空区(薛艳等，2018)。背景空区指主震前较长时段内、由较大地震活动形成的围空区，其空间演化范围广，可跨越多个断裂带；孕震空区在时空演化范围和震级规模都显著小于背景空区。

地震条带，是大震前中小地震由分散到集中成带状分布的图像(刘蒲雄和陈章立，1989)。条带形成后条带内地震活跃而外围平静，且通常情况下条带与活动构造展布不一致。研究表明地震条带可能与应力方向相关(韩渭宾和席敦礼，1985；刘蒲雄和陈章立，1989)。

震群，是一组震级相当的地震组成，在时间和空间上聚集且缺乏一个明显的主震(Mogi, 1963; Sykes, 1970; Hill, 1977)。震群活动是局部范围内发生微破裂时构造应力释放的表现，这些微破裂可能是由于介质强度较低或应力集中所致。国际上对震群没有统一严格的标准，本文考虑区域背景地震活动水平，定义3个月50km范围内发生2次5级以上地震且震级差小于1级认为是一组强震群或双震；2个月20km范围内发生3次以上3级以上地震且震级差小于1级认为是一组小震群。

地震活动平静，国际上对第二类空区没有明确的量化定义，通常以地震活动平静表征。如一些研究指出的地震活动平静(Katsumata, 2017; Kopnichev and Sokolova, 2025)，其地震活动空间分布完全符合我国学者对第二类空区的定义(薛艳等，2018)。本文分析中将不完全符合我国学者地震空区定义，且一定范围内地震活动减弱或缺乏某个震级档以上地震的现象定义为地震活动平静。

2 两次大地震前地震活动现象回溯

2.1 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震

2001 年昆仑山口西 8.1 级地震发生在巴颜喀拉地块北边界, 昆仑断裂中段的库赛湖段, 断层运动以左旋走滑为主, 长期滑动速率 11-12mm/yr(Wen *et al.*, 2007), 古地震平均复发间隔 3544 ± 416 年, 距离 2001 年地震最近的事件发生在 3100 ± 201 年前, 强震活动表现出准周期性复发趋势(胡道功等, 2007); 震前 100 年, 在破裂区东侧发生了 1902 年 $M_s6.9$ 和 1937 年 $M_s7.5$ 和 1963 年 $M_s7.0$ 级地震, 在破裂区西侧发生了 1973 年 $M_s7.3$ 和 1997 年 $M_s7.5$ 级地震, 这些地震对库赛湖段库仑应力加载大于 0.1MPa(万永革等, 2007); 基于震前变形的数值模拟研究显示, 该段同时是闭锁程度高, 地震矩积累显著的区域(程佳等, 2009); 地震前数十年至震前数月, 震源区地震活动水平不高, 空间上以空区收缩为主(董治平等, 2003; 刘蒲雄等, 2003; 宋治平等, 2003; 孙加林和曹井泉, 2003; 梅世蓉等, 2009); 是典型的孕震晚期大震破裂空段(邵志刚等, 2022)。

随着临震时刻的逼近, 不同震级档地震活动由震源区外围逐渐向震源区演化发展。1960 年至 1974 年, 青藏高原北部从唐古拉地区至祁连-阿尔金交汇地区大范围 6 级地震平静区(图 2a, 黑色虚线), 该区 6 级地震完整起始时间约 1920 年前后(黄玮琼等, 1994), 15 年没有 6 级以上地震发生可能预示着昆仑断裂库赛湖段可能正在孕育一次特大震。1975 年杂多 6.4 级、1977 年都兰 6.3 级和茫崖 6.4 级地震后, 6 级地震大范围平静向昆仑断裂收缩形成 6 级地震空区(图 2a, 蓝色虚线); 此后 23 年至 2001 年, 青藏高原北部 6 级地震在空区边缘频发, 空区进一步收缩为一个近东西走向长 600km, 宽 200km 的 6 级空区(刘蒲雄等, 2003; 孙加林和曹井泉, 2003)(图 2a, 红色虚线)。同期 5 级地震活动也表现出相似的特征, 1966 年至 1979 年青藏高原北部形成 5 级地震围空且呈现辐射花瓣样式(宋治平等, 2003; Wen *et al.*, 2007)(图 2b, 黑色虚线); 之后 10 年至 1990 年, 围空中部沿着 92°E 线附近发生 10 余次 5 级以上地震, 5 级地震围空被拆分为东西 2 个 5 级地震空区(孙加林和曹井泉, 2003; Wen *et al.*, 2007)(图 2b, 蓝色虚线); 在此之后的 10 年至震前青藏高原北部 5 级以上地震仍全部发生在 2 个 5 级地震空区的边缘附近, 昆仑山口西 8.1 级地震发生在西侧空区内, 余震活动充满东侧空区(刘蒲雄等, 2003)(图 2b, 红色虚线)。

在 5 级以上地震大范围平静和空区的收缩过程中,震前 4 年(1997 年 11 月以来)青藏高原 5.5 级地震图像由空间随机分布演变为带状有序分布,沿喜马拉雅弧至阿尔金-祁连山形成 2 个条带状分布,昆仑山口西 8.1 级地震发生在 2 个条带分布夹角的中间部位(宋治平等, 2003; 梅世蓉等, 2009) (图 2c, 黑色实线); 进一步, 2000 年至震前青藏高原 5 级地震活动在空间上呈现出 2 个显著的带状分布且交汇于昆仑山口西 8.1 级地震震中附近(董治平, 2003; 刘蒲雄等, 2003; 张晓东等, 2003) (图 2c, 蓝色实线)。同时段, 震中距 200 至 300km 范围小地震活动又表现为 4 级和 3 级地震空区的嵌套(孙加林和曹井泉, 2003; 梅世蓉等, 2009) (图 2c, 绿色和粉色虚线)。2001 年 1 月后, 震源区附近 $M_L 2.0$ 以上地震进入平静状态, 形成一个直径约 300km 的 $M_L 2$ 级地震围空区(孙加林和曹井泉, 2003) (图 2c, 红色虚线), 发展紧迫程度进一步增强。

在上述地震活动图像演化过程中, 地震活动在时间上也表现出活跃/平静的交替的节律特征。前人对此开展了深入的讨论(董治平, 2003; 刘蒲雄等, 2003; 宋治平等, 2003; 孙加林和曹井泉, 2003; 陈玉华和张肇诚, 2009)。每次增强过程都伴随着上述地震活动图像的进一步演化。需要指出的是, 这些发生在增强过程中的地震, 其发生过程在时间并不随机分布, 而表现出“长期平静-短期活跃-再平静-主震”的节律特征(董治平, 2003)。不同学者研究选择目录的时空窗口不尽相同, 但整体上, 6 级地震的平静时间可达 3-4 年, 5 级地震平静时间 1-2 年, 3 级左右地震平静时间 1 年左右。另外还发现, 在上述图像演化过程中伴随中不同震级水平的震群活动, 这些强震群和小震群在空间上仍集中在上述研究给出的空区边缘 (图 2d), 且时间上可能在逐渐逼近大震的发震时间。

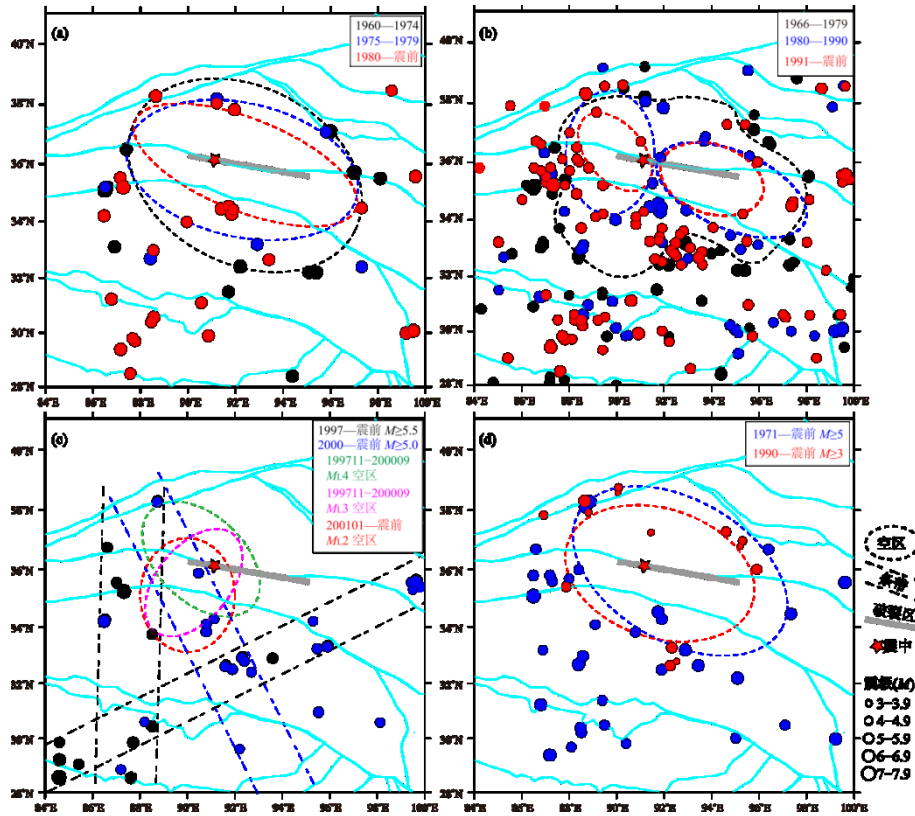


图2 2001年昆仑山口西8.1级地震前地震活动图像演化。(a) 1960年以来6级以上地震空区; (b) 1966年以来5级以上地震空区; (c) 1997年以来5级以上地震条带和5级以下地震空区; (d) 强震群和小震群形成的空区, 以震群中最大一次地震表示震群。

Fig.2 Evolution of seismic activity patterns prior to the 2001 M8.1 Western Kunlun Pass earthquake. (a) $M \geq 6$ seismic gaps since 1960; (b) $M \geq 5$ seismic gaps since 1966; (c) $M \geq 5$ seismic belts and $M < 5$ seismic gaps since 1997; (d) Seismic gaps are formed by strong and small earthquake swarms, and the swarms are displayed by the maximum earthquake in each swarm.

2.2 2008年汶川8.0级地震

2008年汶川8.0级地震发生在巴颜喀拉地块东边界, 龙门山断裂带, 断层运动以逆冲运动为主, 兼具少量右旋走滑分量, 长期滑动速率1-2mm/yr(Zhang, 2013)。古地震研究认为, 龙门山断裂大震活动具有明显的分段性, 其中北川-映秀和江油-灌县最为活跃, 大地震活动具有3000年左右的准周期复发特征(冉勇康等, 2018)。数值模拟研究发现, 龙门山断裂附近历史强震对汶川地震表现为应力加载(Zhu and Wen, 2010)。基于大地测量观测的断层运动反演出, 汶川地震前, 龙门山断裂处于强闭锁状态(赵静等, 2012)。地震前18年至震前数月, 龙门山断裂带地震活动水平不高, 空间上以空区及空区的收缩为主(陈章立和李志雄, 2009; 梅世蓉等, 2009; 薛艳等, 2009; 陈立德等, 2010; 薛艳等, 2018); 是典型的孕震晚期大震破裂空段(邵志刚等, 2022)。

龙门山断裂及附近区域 6 级以上地震记录完整起始时间约 1879 年, 5 级地震完整时间约 1931 年(黄玮琼等, 1994)。2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后至 2008 年 5 月 11 日, 青藏高原内部 5.5 级以上地震活动形成 2 个大型带状分布(梅世蓉等, 2009)(图 3a, 黑色实线), 甘东南至巴颜喀拉地块东段以及川滇菱形地块北部出现 5.5 级以上地震的大范围平静。事实上, 该区 6 级以上地震平静起始时间可追溯至 1990 年。1989 年阿坝 6.5 级地震后至 2000 年, 甘东南-巴颜喀拉地块东段-川滇菱形地块北段和羌塘地块东段形成大范围的 6 级地震平静(图 2b, 黑色虚线); 1994 年乐山 $M_s5.7$ 、1996 年巴塘 $M_s5.5$ 、2001 年雅江 $M_s6.0$ 和 2007 年江达 $M_s5.6$ 地震后, 平静区收缩至巴颜喀拉地块东段至甘东南地区(薛艳等, 2009)(图 3b, 粉色虚线)。同期的 5 级以上地震也表现出相似的特征, 1991 年阿坝 $M_s5.2$ 地震后至 1998 年, 巴颜喀拉地块东段至四川盆地龙泉山附近形成大范围 5 级地震平静区(梅世蓉等, 2009; 陈立德等, 2010)(图 3b, 蓝色虚线); 1999 年四川绵阳 2 次 $M_s5.0$ 地震和青海黄南州 $M_s5.1$ 地震后, 沿巴颜喀拉地块东段形成 M_s5 地震空区(薛艳等, 2018)(图 3b, 红山虚线)。2008 年汶川 8.0 级地震发生在该 5 级地震空区内部。

本世纪初, 2000 年以来巴颜喀拉地块东段小地震活动逐渐向龙门山断裂带收缩, 形成平行于龙门山断裂的 4 级地震空区(薛艳等, 2009)(图 3c, 黑色虚线); 2002 年后龙门山断裂带北段发生 4 次 3.5 级以上地震后, 沿龙门山断裂带中南段形成 3.5 级地震空区(陈章立和李志雄, 2009; 薛艳等, 2018)(图 3c, 红色虚线)。在这个过程中巴颜喀拉地块东段及邻近区域 4 级地震活动也逐渐调整为条带状有序活动, 2003 年以来在巴颜喀拉地块东段至祁连地块形成 2 个近似平行北西走向的 4 级地震条带(杜方等, 2018)(图 3a, 蓝色实线); 2005 年以后发生的多次 M_L4 ($M_s3.4$) 及以上地震仍集中在这两个 4 级地震条带上。2008 年 1 月后, 在龙门山断裂带中段、垂直于龙门山断裂带形成一个 M_L3 级地震条带(梅世蓉等, 2009)(图 3a, 红色实线), 可能预示着龙门山断裂进入临震破裂。2008 年汶川 8.0 级地震发生在 M_L3 级地震条带与龙门山断裂的交汇部位。

在上述地震活动图像演化过程中, 南北地震带中段不同震级档地震活动在时间上也表现出活跃/平静交替活动的韵律特征, 并认为四川地区中强地震的显著平静是 2008 年汶川地震前的显著地震活动异常(高立新等, 2010)。实际上四川地区中强地震的显著平静实际就是

巴颜喀拉地块东段的大范围平静和空区。而在空区外围，不同震级档地震逐渐向龙门山断裂迁移，经历“活跃—平静—再活跃”的过程(梅世蓉等，2009；薛艳等，2009；杜方等，2018)后发震，且不同震级档地震的“活跃—平静”交替活动的时间尺度不尽相同。2003 年以后的小震活动显示，2004 年巴颜喀拉地块东段小震活动在持续 1 年的显著增强后转为正常活动状态；2006 年底，巴颜喀拉地块东段小震活动出现持续 1 年多的异常平静；2008 年初转为正常活动状态后发震(Huang, 2008)。在这个过程中，巴颜喀拉地块东段及附近区域 5 级以上地震强震群和 3 级以上地震的小震群活动增强，且这些震群活动仍围绕在龙门山断裂外围，5 级以上强震群主要活动在巴颜喀拉地块东段 5 级地震平静区边缘；而 3 级小震群则围绕龙门山断裂中南段形成空区(梅世蓉等，2009)（图 3d）。

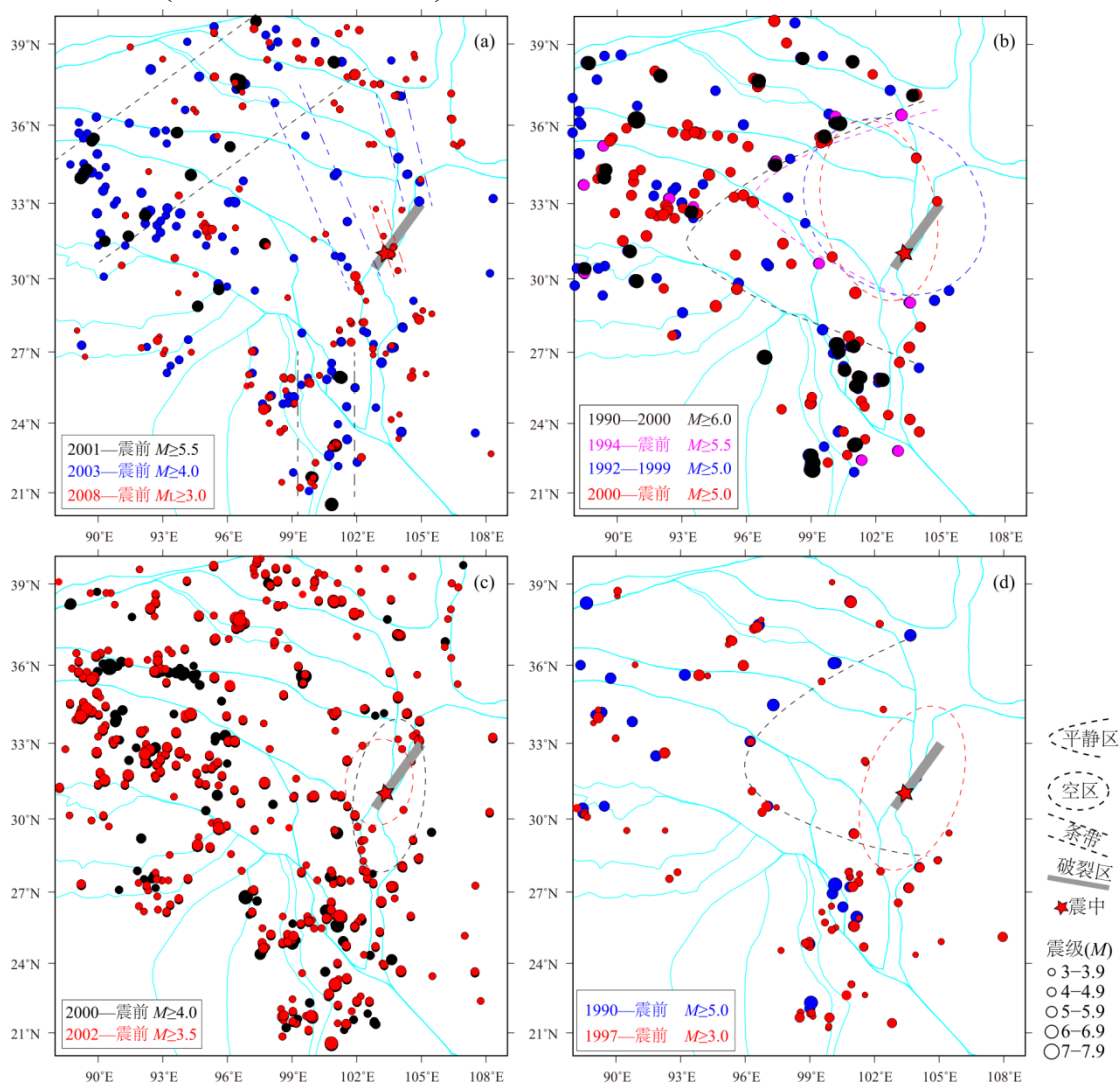


图 3 2008 年汶川 8.0 级地震前地震活动图像演化。(a) 2001 年以来不同震级档地震条带演化；(b) 1990 年以来 5 级以上地震空区/平静区；(c) 2000 年以来 4 级地震空区和 2002 年以来 3.5 级地震空区；(d) 强震群和小震群形成的空区/平静区。

Fig.3 Evolution of seismic activity patterns prior to the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake. (a) Seismic belts formed by earthquakes of different magnitudes since 2001; (b) $M \geq 5$ seismic gaps/quiescence since 1990; (c) seismic gaps associated with $M \geq 4$ earthquakes since 2000 and $M \geq 3.5$ earthquakes since 2002; (d) seismic gap/quiescence formed by strong and small earthquake swarms, and the swarms are displayed by the maximum earthquake in each swarm.

3 两次大地震震前地震活动的共性和个性特征

根据上述分析, 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震均发生在断层运动闭锁、应力增强显著, 且古地震离逝时间接近其平均复发间隔的孕震晚期强震破裂空段, 大震孕育表现为准周期复发趋势。孕震晚期震源区整体上地震活动水平不高, 且在时空上表现出较为相似的演化过程。空间上, 不同震级档地震时空有序活动是昆仑山口西 8.1 级地震和汶川 8.0 级地震前的共同特征, 具体表现为高震级档地震在“场”上的大范围平静以及由此演变后的背景空区的收缩; 随着发震时刻逼近, 孕震空区逐渐向“源”演化。背景空区在震前 20 年形成, 而孕震空区在震前 10 年内高频出现且相互嵌套。另外, 较空区和大范围平静, 地震条带通常出现在震前 5 年左右; 尽管不能直接指向“源”, 但其对发震时间的逼近比同震级档的大范围平静和空区的指示意义更强(图 4)。整体上, 高离逝率强震破裂空段叠加背景空区表明区域地壳介质受力扩容进入非弹性变形阶段, 而孕震空区和地震条带的嵌套演化是昆仑山口西 8.1 级和汶川 8.0 级特大地震从孕震晚期向震时逼近的共同特征, 反应震源区介质非弹性变形从弥散向集中演化的过程, 是变形局部化的宏观表现。

除上述共性特征外, 两次 8 级以上地震前地震活动图像演化也存在一定的差异, 其中最主要的差异是演化时间长度的不同(图 4)。昆仑山口西 8.1 级地震前约 40 年, 唐古拉地区至阿尔金断裂带 6 级演化形成大范围的 6 级地震平静区; 之后的 30 年到 80 年末期, 区域地震活动图像仍以 6 级地震和 5 级地震形成的背景空区及其缓慢收缩为主; 1990 年后, 5 级以下中小地震活动图像快速演化, 形成不同震级档孕震空区的嵌套并逐步向震源演化。整体而言, 前期地震活动图像的演化过程较慢, 且对“源”的指示意义不强; 后期随着低震级档地震活动图像的快速演化收缩, 对“源”的指示意义逐渐明显。而对于汶川 8.0 级地震, 整体而言其演化过程较 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震更快(图 4)。1989 年四川阿坝 6.5 级地震后, 龙门山断裂带及邻近区域在形成 6 级地震大范围平静的同时, 在平静区边缘附近 5 级地震也开始同步演化, 形成背景空区。2000 年以来, 5 级以下地震活

动图像快速演化，形成孕震空区的嵌套逼近龙门山断裂。

此外，尽管 2 次 8 级地震前均出现有地震条带的演化，但二者在时间和空间上特征也不尽一致（图 2-4）。2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前仅在震前 4 年出现了 5.5 级以上地震条带且并在震前一年向震中略有收缩。而 2008 年汶川 8.0 级地震前地震条带的演化过程则更为清晰且对震源和发震时间的逼近更为显著。2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后，青藏高原内部 5.5 级以上地震活动主要沿着尼泊尔至祁连和滇西南 2 个区域呈带状分布，而在甘东南至巴颜喀拉地块东段以及川滇菱形地块北部出现 5.5 级以上地震的大范围平静（图 3a）。2003 年至 2008 年，祁连山地震带东段至巴颜喀拉地块东段 4 级地震活动形成 2 个北西-南东向条带状分布，且两个条带的南东段分别位于龙门山断裂带的南北端。2008 年 1 月后，龙门山断裂带周边 M_L3 级地震在空间上快速集中，在龙门山断裂带中段、垂直于龙门山断裂带形成一个 M_L3 级地震条带。地震活动从空间的随机分布向带状有序分布演化，并逐渐逼近震源，是否与 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震的应力调整有关尚不明确。但其从“场”至“源”的演化过程应该也反应了汶川地震孕震过程中岩石圈应力状态增强而致的应变局部化。

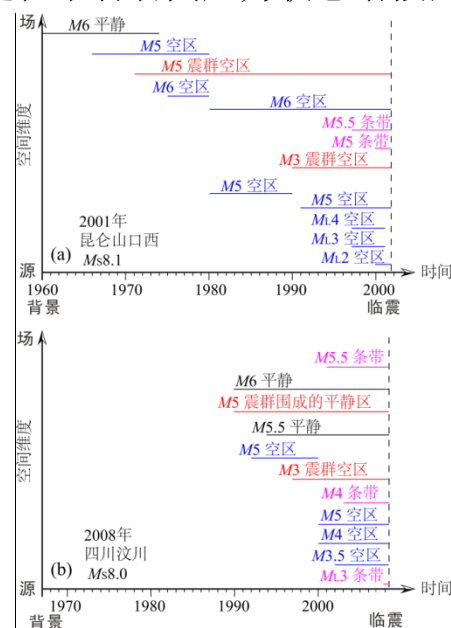


图 4 两次特大地震前地震活动图像的时空演化进程. (a) 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震; (b) 2008 年汶川 8.0 级地震.

Fig.4 Temporal and spatial evolution of seismic activity patterns prior to the two great earthquakes. (a) associated with the 2001 Western Kunlun Pass earthquake; (b) associated with the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake.

4 讨论

4.1 地震活动图像演化的构造应力依从

区别于加州地区强震前的变形局部化过程，巴颜喀拉地块边缘 2 次 8 级地震前的变形局部化并没有直接演化到主震破裂的断层面上，也没有观测到 Mogi“甜甜圈”模式(Kanamori, 1981)中的前震(图 5a)。地震活动主要在主震破裂区外围逐渐收缩演化至一个相对狭小的区域(图 2, 图 3 和图 5a)。意味着在孕震晚期区域构造应力持续增强背景下，扩容过程在地壳岩石裂隙节理中发育(Rudnicki, 1988)；相比断层带扩容，周边介质裂隙节理扩容可理解为岩石力学实验中的体积扩容，其前兆演化时间更长(Rice and Rudnicki, 1979)。同时，主震破裂所在的断层面在这个过程中逐渐匀阻化(图 5b)，地震活动表现为长时间的平静(马胜利等, 2004)；而凹凸体周边应力不断集中，出现第二类空区演化(Mogi, 1990)(图 5b)。因此，2001 年昆仑山口西 8.1 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震前长达数十年的背景空区和孕震空区嵌套演化，主震断层面地震活动长时间平静应该是区域应力增强背景下，地壳裂隙节理扩容表现出的变形局部化过程。

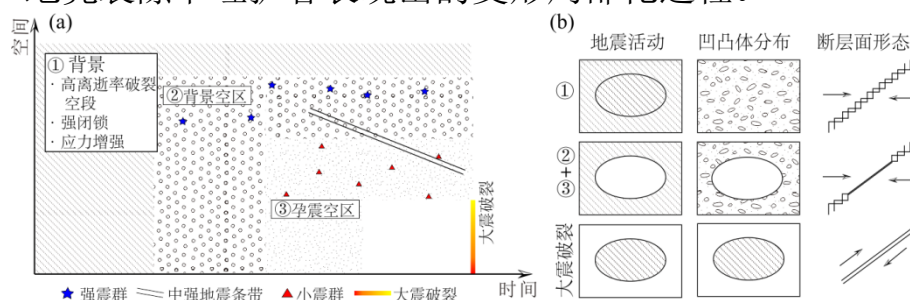


图 5 巴颜喀拉地块特大地震孕育模式. (a) 大震前地震活动时空演化模式(据 Kanamori, 1981. 改绘); (b) 地震活动图像变化机制(据 Mogi, 1990. 改绘).

Fig.5 Seismogenic model of great earthquakes within the Bayan Har Block. (a) Schematic seismic activity model prior to a great earthquake (modified from Kanamori, 1981); (b) Schematic model for the mechanical explanation of seismicity patterns (modified from Mogi, 1990).

实验研究发现微破裂稳定发展阶段新生的微裂隙并非完全随机，而是沿着与最大主应力近似平行的方向萌生和扩展(Renard *et al.*, 2019)。理论研究证实了这一现象，同时发现变形局部化带的演化与主应力方向相关，对于通常的三轴试验，局部化带的法线方向与中间主应力的方向垂直(Rudnicki and Rice, 1975)。巴颜喀拉地块周缘 2 次特大地震震前地震活动所揭示的变形局部化过程也与应力场表现出较好的依从关系(图 6)。对于 2008 年汶川 8.0 级地震，其发震构造为逆冲为主兼有少量走滑分量的龙门山断裂带。根据安德森断层理论(Scholz, 1990)，其最小主应力主要由重力引起，近似垂直于地表；中间主应力方向近似平行于龙门山断裂带，而最大主应力方向与龙门

山断裂近似垂直（图 6b，插图）。震前 20 年地震活动显示，形成背景空区的 5.5 级以上地震主要沿 2 个方向展布（一是从羌塘地块至巴颜喀拉地块平行于鲜水河断裂带，二是从巴颜喀拉地块东段至甘东南地区的北东东方向），二者均与区域最大主应力方向近似平行（图 3，图 6b）；孕震空区从巴颜喀拉地块东段逐渐向龙门山断裂收缩，2003 年以来在祁连山地震带东段至巴颜喀拉地块形成的 3 个地震条带近似垂直于龙门山断裂带（图 3，图 6b），佐证了 2008 年汶川 8.0 级地震孕育过程的变形局部化的法线发现与中间主应力方向垂直。同理对于 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震，其发震构造为走滑运动为主的昆仑断裂，其中间主应力主要由重力引起，近似垂直地表；最大主应力方向为近东西向，近似平行于昆仑断裂带；而最小主应力方向与昆仑断裂近似垂直（图 6a，插图）。形成背景空区的 6 级以上地震主要集中在祁连山地震带西段和羌塘地块，近东西向展布（图 2，图 6a）；孕震空区从羌塘地块至祁连山地震带南北向收缩向震源逼近（图 2，图 6a）。

从同期青藏高原地震活动情况看，尽管 1997 年昆仑断裂带还发生有玛尼 7.5 级地震，2008 年还发生有于田 7.2 级地震，但这些地震处于地震活动图像异常演化区域的外围甚至远离潜在震源区。表明不同震级档地震活动图像异常嵌套演化在大震地点判识中具有较强的指示意义。

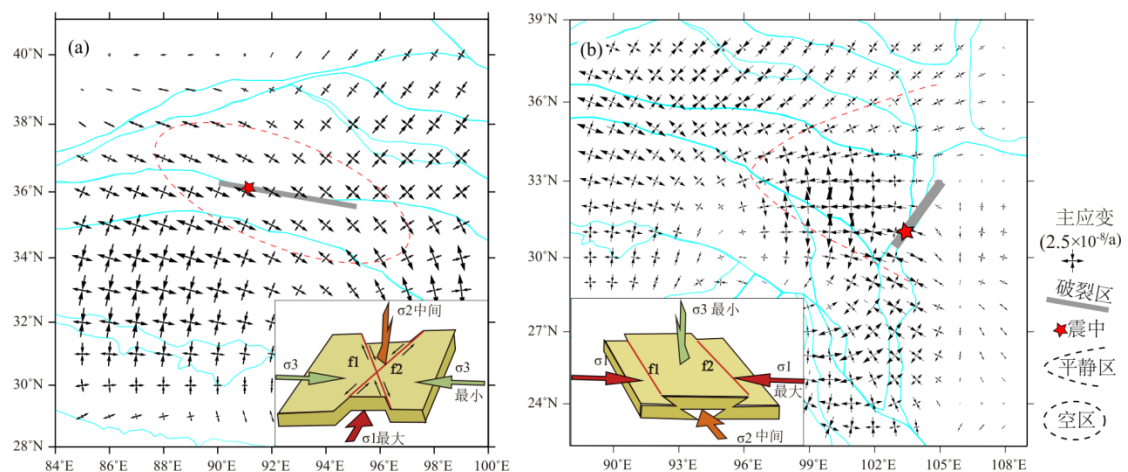


图 6 两次特大地震震前应力环境(据 Ma, *et al.*, 2024). (a) 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前主应变场; (b) 2008 年汶川 8.0 级地震前主应变场. 插图为对应的安德森断层应力模型.

Fig.6 Seismogenic stress environment prior to the two great earthquakes (modified from Ma *et al.*, 2024). (a) and (b) display the principal strain field prior to the 2001 Western Kunlun Pass earthquake and the 2008 Wenchuan earthquake, respectively. The illustrations show the corresponding Anderson fault stress model.

4.2 巴颜喀拉地块的主体控制作用

1997 年以来, 巴颜喀拉地块先后发生了 9 次 7 级以上地震(包括 2001 年昆仑山口西 8.1 级与 2008 年汶川 8.0 级地震), 是中国大陆强震活动最为活跃的区域。作为青藏高原物质东向“逃逸”最活跃的次级构造单元, 其整体向东—东南的刚性运动在不同边界转化为差异巨大的破裂方式: 在北边界沿东昆仑断裂发生大规模左旋走滑, 直接控制了昆仑山口西地震的孕震与破裂过程(Wen *et al.*, 2007); 当其东向运动遭遇坚固的华南地块阻挡时, 运动能量在东边界挤压转换为逆冲推覆(Qin *et al.*, 2014), 孕育了汶川地震。因此, 这两次震源机制截然不同的大地震, 本质上是同一块体统一运动的动力表现。此外, 地块的边界断裂系统还构成了这一系列的驱动与应力传递系统: 玛尼 7.5 级地震触发了昆仑山口西地震的发生; 而昆仑山口西地震释放的应力又进一步向汶川震区转移, 并在之后调整并加速了东缘 2013 年芦山、2017 年九寨沟等强震的孕育进程(图 1)。从力学本质看, 巴颜喀拉地块的持续运动为这两次大地震提供了根本的动力来源与构造统一性, 奠定了变形局部化的宏观构造背景。

4.3 地震破裂尺度的影响及其对中长期预测的科学启示

研究表明地震的破裂尺度可能与断层几何(杨宏峰等, 2022)、应力积累水平(Miller *et al.*, 2002)以及凹凸体规模(魏斌等, 2023)有关。断层几何与凹凸体规模在岩石压裂实验中表现为材料结构, 而应力积累水平在实验室体现在边界荷载。实验表明, 在粗糙断层上, 声发射事件空间分布更为弥散, 反映了断层带内应力场的强烈非均匀性, 这利于大地震的发生; 反之, 在光滑断层上, 变形集中于狭窄的剪切带内, 与之相伴的应力场较为均匀, 可以促进大尺度破裂的发生(Goebel *et al.*, 2017)。震级差异可通过变形局部化过程中“优势破裂簇”的最终贯通尺度加以统一理解。这一定性框架对于巴颜喀拉地块 7 级地震可能同样有一定的解释力: 以 2010 年玉树 7.1 级地震为例, 震前同样存在空区演化(刘艳辉等, 2014)。但可能由于震级差异, 其演化时空尺度和震级均存在一定的差异。因此, 地震活动图像异常的有序演化是变形局部化的应力依从表现, 将这一框架是否可以拓展至更低水平的目标地震或者其他构造区的强震活动, 目前还不能给出非常确切的认识和讨论, 可能需更高密度台网监测和更系统的回溯研究。

基于 2 次 8 级地震震前地震活动图像异常演化的回溯研究, 我们发现其不能直接给出短临预测的具体时间窗口, 但其对“地点”和“趋

势”的约束具有明确的物理意义：在大地震孕育晚期，地震活动向震源区的收缩方向与主应力方向具有明确的依从关系；背景空区和孕震空区的嵌套演化反映了岩石扩容阶段向局部化阶段过渡的不同阶段。本文分析过程中并没有应力加载动态过程的直接证据，仅是基于岩石力学理论和实验结果对震前地震活动现象及其时空演化过程的定性解释。实际由于地震孕育发生过程及地下深部介质物性条件复杂多变，很难准确给出地壳真实应力状态(蒋海昆等，2024)及其高时空分辨率的动态变化过程。未来高精度的断层几何和孕震凹凸体，精细的构造应力模型可为中长期大震危险地点和临震紧迫程度的逼近提供可借鉴的参考。

5 结论

本文系统回溯并归纳了前人关于本世纪以来巴颜喀拉地块边缘2次特大地震的发震构造、断层运动、应力变化以及震前地震活动图像演化过程研究；并对比讨论了震前地震活动图像演化的共性和个性特征。最后在岩石压裂失稳的变形局部化理论框架下对这些可能与大地震孕育过程相关的地震活动图像异常进行解释。得到如下认识：

(1) 两次特大地震均发生在断层运动闭锁、应力增强显著且古地震离逝时间接近其平均复发间隔的孕震晚期强震破裂空段，强震活动表现出准周期性复发趋势。孕震晚期震源附近地震活动水平不高，且在时空上表现出较为相似的演化过程。

(2) 两次特大地震前地震活动图像是典型的应力依从型前兆过程。震前地震活动由“场”及“源”的演化过程是地壳岩石在应力加载下变形局部化表现。震前数十年震源区外围由较高震级地震形成的大范围地震活动平静/背景空区预示着地壳岩石受压开始进入扩容阶段，岩石裂隙开始稳定发展。震前数年至十年尺度形成的孕震空区嵌套演化，以及地震条带预示着震前地壳岩石受压并进入变形局部化过程，裂隙在不断扩展贯通。震源区内部地震活动持续平静是断层面匀阻化所致。

References

- Chen, L. D., Fu, H., Zhao, X. Y., 2010. Comparative Study of $M \geq 5$ Seismic Activities Before Some Large Earthquakes. *Earthquake*, 30(4): 22–31 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. J., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2011. Lithostratigraphy Character and Tectonic-Evolution of Permian-Triassic in the Bayankala Tectonic Belt. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(3): 393–408. doi: 10.3799/dqkx.2011.044 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. H., Zhang, Z. C., 2009. Characteristics of Seismicity Anomalies Before the M_s 8.1

- Earthquake at the West to Kunlun Mountain Pass. *Northwestern Seismological Journal*, 31(4): 374–379 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Li, Z. X., 2009. Severe Failure and Important Recognition: Some Thoughts on Earthquake Monitoring and Prediction Research Due to the Wenchuan 8.0 Earthquake. *Earthquake*, 29(1): 182–192 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, J., Gan, W. J., Wang, Z. H., et al., 2009. The Simulation of Background Crustal Deformation Field of the M_s 8.1 Kunlun Earthquake of 2001. *Seismology and Geology*, 31(1): 97–111 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Z. P., 2003. Evolution Characteristics of Seismicity Pattern Before West to Kunlun Mountain Pass M_s 8.1 Earthquake. *Northwestern Seismological Journal*, 25(1): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Du, F., Jiang, H. K., Yang, M. L., et al., 2018. Chinese Earthquake Cases: May. 12, 2008 M 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China. Beijing: Press of Seismology (in Chinese).
- Gao, L. X., Sun, J. L., Zhang, H., et al., 2010. Moderate-to-Strong Earthquake Quiescence Is the Most Significant Seismic Anomaly Before the Wenchuan 8.0 Earthquake. *Earthquake*, 30(1): 90–97 (in Chinese with English abstract).
- Girona, T., Drymoni, K., 2024. Abnormal low-magnitude seismicity preceding large-magnitude earthquakes. *Nature Communications*, 15(1):7429. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51596-z>
- Goebel, T. H. W., Kwiitek, G., Becker, T. W., et al., 2017. What allows seismic events to grow big?: Insights from b-value and fault roughness analysis in laboratory stick-slip experiments. *Geology*, 45(9): 815–818. <https://doi.org/10.1130/G39147.1>
- Han, W. B., Xi, D. L., 1985. The Characteristics of Seismicity Belts Before Strong Earthquakes with Magnitude $M \geq 6$ in Sichuan. *Acta Seismologica Sinica*, 7(1): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Hill, D. P., 1977. A model for earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research*, 82(8): 1347–1352. <https://doi.org/10.1029/JB082i008p01347>
- Hu, D. G., Wu, Z. H., Wu, Z. H., et al, 2007. Late Quaternary Paleoseismic History on the Kusai Lake Segment of East Kunlun Fault Zone in Northern Tibet. *Quaternary Sciences*, 27(1): 27–34 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. Q., Li, W. X., Cao, X. F., 1994. Study on the Completeness of Earthquake Catalogs in Chinese Mainland (II): Spatial Distribution of the the initial year of the earthquake catalog completeness. *Acta Seismologica Sinica*, 16(4): 423–432 (in Chinese).
- Huang, Q., 2008. Seismicity changes prior to the M_s 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Geophysical Research Letters*, 35, L23308. doi:10.1029/2008GL036270
- Jiang, H. K., Deng, S. G., Yao, Q., et al., 2024. Integrated Interpretation on the Precursory Process Evolution in the Meta-Instability Stage of the Earthquake: A Case Study on 2014 Ludian M_s 6.5 Earthquake. *Seismology and Geology*, 46(3): 513–535. doi:10.3969/j.issn.0253- 4967.2024.03.001 (in Chinese with English abstract).
- Kanamori, H., 1981. The nature of seismicity patterns before large earthquakes. *Earthquake prediction: An international review*, 4: 1–19. <https://doi.org/10.1029/ME004p0001>
- Kato, A., Ben-Zion, Y., 2021. The generation of large earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1): 26–39. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00108-w>
- Katsumata, K., 2017. Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 2427–2442. doi:

10.1007/s00024-016-1415-8

- Kopnichev, Y. F., Sokolova, I. N., 2025. Ring-Shaped Seismicity Structures in South Kamchatka: Probable Preparation of a Great Earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 61(2): 207–212. <https://doi.org/10.1134/S1069351325700193>
- Liu, P. X., Chen, Z. L., et al., 1989. Seismicity Band and Preceding Earthquakes and Its Application in Earthquake Prediction. *China Earthquake*, 5(1): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. X., Zheng, D. L., Che, S., et al., 2003. Seismicity Anomalies Before the Great Earthquake of $M_S=8.1$ in the Kunlun Pass and Its Significance to Earthquake Prediction. *Acta Seismologica Sinica*, 25(2): 205–210 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. H., Zhao, G. M., Wu, Z. H., et al., 2014. Application of Spatial Database Technology and Seismic Gap Method to Seismic Hazard Analysis around South-eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 20(3): 254–273 (in Chinese with English abstract).
- Lockner, D., Byerlee, J. D., Kuksenko, V., et al., 1991. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 350(6313): 39–42. <https://doi.org/10.1038/350039a0>
- Ma, H. P., Meng, G. J., Zhang, H., et al., 2024. The relationship between crustal deformation characteristics and strong earthquakes in western China revealed by GNSS. *Scientific Reports*, 14, 28356. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78457-5>
- Ma, S. L., Jiang, H. K., Hu, X. Y., et al., 2004. A Discussion on Mechanism for Seismic Quiescence Before Large Earthquakes Based on Experimental Results of Acoustic Emission. *Seismology and Geology*, 26(3): 426–435.
- Mei, S. R., Xue, Y., Song, Z. P., 2009. Anomalous Seismic Characteristics Before Wenchuan $M 8.0$ and Kunlunshan $M 8.1$ Earthquakes and Their Implications. *Earthquake*, 29(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Miller, S. A., 2002. Earthquake scaling and the strength of seismogenic faults. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 27–1–27–4. doi:10.1029/2001GL014181.
- Mogi, K., 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms-the fracture of a semi finite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 41: 615–658.
- Mogi, K., 1979. Two kinds of seismic gaps. *Pure And Applied Geophysics*, 117(6): 1172–1186. <https://doi.org/10.1007/BF00876213>
- Mogi, K., 1981. Earthquake prediction program in Japan. *Earthquake prediction: an international review*, 4: 635–666. <https://doi.org/10.1029/ME004p0635>
- Mogi, K., 1990. Seismicity before and after large shallow earthquakes around the Japanese islands. *Tectonophysics*, 175(1-3): 1–33. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90127-T](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90127-T)
- Qin, X. H., Tan, C.X., Chen, Q., et al., 2014. Crustal Stress State and Seismic Hazard along Southwest Segment of the Longmenshan Thrust Belt after Wenchuan Earthquake. *Journal of Earth Science*, 25(4): 676–688. doi: 10.1007/s12583-014-0457-z
- Ran, Y. K., Wang, H., Chen, L. C., et al., 2018. Late-Quaternary Fault Activity of the Longmen Shan Fault Zone-Evidence from Paleoseismic Trenching. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 1938–1948. doi: 10.6038/cjg2018M0251 (in Chinese with English abstract).
- Reches, Z., Lockner, D. A., 1994. Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B9): 18159–18173. <https://doi.org/10.1029/94JB00115>
- Renard, F., McBeck, J., Kandula, N., et al., 2019. Volumetric and shear processes in crystalline rock approaching faulting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33): 16234–16239.

- <https://doi.org/10.1073/pnas.1902994116>
- Rice, J. R., Rudnicki, J. W., 1979. Earthquake precursory effects due to pore fluid stabilization of a weakening fault zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5): 2177–2193.
<https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02177>
- Rudnicki, J. W., 1988. Physical models of earthquake instability and precursory processes. *Pure And Applied Geophysics*, 126(2): 531–554. <https://doi.org/10.1007/BF00879009>
- Rudnicki, J. W., Rice, J. R., 1975. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *Journal of the Mechanics And Physics of Solids*, 23(6): 371–394.
[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(75\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0022-5096(75)90001-0)
- Scholz, C. H., 1968. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 73(4): 1417–1432. <https://doi.org/10.1029/JB073i004p01417>
- Scholz, C. H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge university press.
- 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 Journal of Geophysics*, 65(12): 4643–4658, doi: 10.6038/cjg2022P0489 (in Chinese with English abstract).
- Song, Z. P., Xue, Y., Mei, S. R., et al., 2003. Seismic Characteristics Before the M 8.1 Earthquake in the West to the pass of the Kunlun Mountain. *Earthquake*, 23(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. L., Cao, J. Q., 2003. The Pregnant Process of West to Kunlun Mountain Pass Earthquake with M_s 8.1 in 2001 and Seismicity Image Evolution of Moderate Strong Earthquakes. *China Earthquake Engineering Journal*, 25(1): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- Sykes, L. R., 1970. Earthquake swarms and sea-floor spreading. *Journal of Geophysical Research*, 75(32): 6598–6611. <https://doi.org/10.1029/JB075i032p06598>
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Zeng, Y. H., et al., 2007. Evolution of Cumulative Coulomb Failure Stress in Northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Its Effect on Large Earthquake Occurrence. *Acta Seismologica Sinica*, 29(2): 115–129 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., Du, F., Zhang, P. Z., et al., 2011. Correlation of Major Earthquake Sequences on the Northern and Eastern Boundaries of the Bayan Har Block, and Its Relation to the 2008 Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(3): 706–716, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.010 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., Yi, G. X., Xu, X. W., 2007. Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the M_s 8.1, 2001, Kokoxili earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(1): 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.07.008>
- Wei, B., Liu, Q., Wang, Z. Y., et al., 2023. Review on the Research of Asperity Identification and Cascading Rupture in Forecasting of Earthquake Magnitude. *Earthquake*, 43(3): 1–17. doi: 10.12196/j.issn.1000-3274.2023.03.001 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y., Liu, J., Mei, S. R., et al., 2009. Characteristics of Seismic Activity Before 2008 Wenchuan M_s 8.0 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 31(6): 606–619 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y., Liu, J., Song, Z. P., et al., 2018. On the Universality and Mechanism Interpretation of the Seismicity Characteristics Before the 2008 Wenchuan M_s 8.0 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 1891–1906. doi: 10.6038/cjg2018M0164 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. F., Yao, S. L., Chen, X., 2022. Rupture propagation on heterogeneous fault: Challenges for predicting earthquake magnitude. *Chinese Science Bulletin*, 67(13): 1390–1403. doi:

10.1360/TB-2021-1086 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P. Z., 2013. Beware of slowly slipping faults. *Nature Geoscience*, 6(5): 323–324.

<https://doi.org/10.1038/ngeo1811>.

Zhang, X. D., Zhang, Y. X., Lv, M. M., et al., 2003. Discussion on the Feature of Strong Earthquake Distribution in Time, Space and Magnitude Order Before Kunlunshan 8.1 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 25(6): 583–590.

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*, 55(9): 2963–2972. doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015 (in Chinese with English abstract).

Zheng, J., Yao, X. X., Chen, Y., 1983. A Experimental Study on Localization of Deformation of Rock. *Chinese Journal of Geophysics*, 26(6): 554–563 (in Chinese with English abstract).

Zhu, H., Wen, X. Z., 2010. Static stress triggering effects related with M_s 8.0 Wenchuan earthquake. *Journal of Earth Science*, 21(1): 32–41. doi: 10.1007/s12583-010-0001-8

中文参考文献

陈立德, 付虹, 赵小艳, 2010. 汶川等巨震前 $M \geq 5$ 地震活动对比研究. 地震, 30(4): 22–31.

陈守建, 李荣社, 计文化, 等, 2011. 巴颜喀拉构造带二叠–三叠纪岩相特征及构造演化. 地球科学: 中国地质大学学报, 36(3): 393–408. doi: 10.3799/dqkx.2011.044

陈玉华, 张肇诚, 2009. 昆仑山口西8.1级地震前地震活动性异常特征. 西北地震学报, 31(4): 374–379.

陈章立, 李志雄, 2009. 严重的挫折, 重要的启示–汶川8.0级地震引发的对地震预测研究的某些科学思考. 地震, 29(1): 182–192.

程佳, 甘卫军, 王泽河, 等, 2009. 2001年昆仑山口西 M_s 8.1地震前背景形变场的模拟研究. 地震地质, 31(1): 97–111.

董治平, 2003. 昆仑山口西8.1级地震前的地震活动图像演变特征. 西北地震学报, 25(1): 59–63.

杜方, 蒋海昆, 杨马陵, 等, 2018. 中国震例: 2008年5月12日四川汶川8.0级地震. 北京: 地震出版社.

高立新, 孙加林, 张晖, 2010. 中强地震平静是汶川8.0级地震前最显著的地震活动异常. 地震, 30(1): 90–97.

韩渭宾, 席敦礼, 1985. 四川六级以上地震前地震活动条带的特征. 地震学报, 7(1): 1–16.

胡道功, 吴中海, 吴珍汉, 等, 2007. 东昆仑断裂带库赛湖段晚第四纪古地震研究. 第四纪研究, 27(1): 27–34.

黄玮琼, 李文香, 曹学锋, 1994. 中国大陆地震资料完整性研究之二–分区地震资料基本完整的起始年分布图象. 地震学报, 16(4): 423–432.

蒋海昆, 邓世广, 姚琪, 等, 2024. 地震亚失稳过程中前兆异常演化的综合解释–以2014年鲁甸6.5级地震为例. 地震地质, 46(3): 513–535. doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2024.03.001

刘蒲雄, 陈章立, 1989. 地震条带及其在地震预报中的作用. 中国地震, 5(1): 23–32.

刘蒲雄, 郑大林, 车时, 等, 2003. 2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震前地震活动性异常及其思考. 地震学报, 25(2): 205–210.

刘艳辉, 赵根模, 吴中海, 等, 2014. 地震空区法在大地震危险性初判中的应用–以青藏高原东南缘为例. 地质力学学报, 20(3): 254–273.

马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等, 2004. 基于声发射实验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制. 地震地质, 26(3): 426–435.

梅世蓉, 薛艳, 宋治平, 2009. 汶川8.0级与昆仑山口西8.1级地震前地震活动异常特征与启示. 地震, 29(1): 1–14.

- 冉勇康, 王虎, 陈立春, 等, 2018. 龙门山断裂带晚第四纪的大地震活动—来自古地震研究的资料. 地球物理学报, 61(5): 1938–1948. doi: 10.6038/cjg2018M0251
- 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
- 宋治平, 薛艳, 梅世蓉, 等, 2003. 昆仑山口西8.1级地震的地震活动特征. 地震, 23(1): 15–22.
- 孙加林, 曹井泉, 2003. 2001年昆仑山口西8.1级特大地震孕育过程及中强地震活动图像演化. 地震工程学报, 25(1): 28–34.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 29(2): 115–129.
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 等, 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与2008年汶川地震. 地球物理学报, 54(3): 706–716. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.010
- 魏斌, 刘琦, 王振宇, 等, 2023. 强震震级预测中凹凸体识别与级联破裂相关研究综述. 地震, 43(3): 1–17. doi: 10.12196/j.issn.1000-3274.2023.03.001
- 薛艳, 刘杰, 梅世蓉, 等, 2009. 2008年汶川 M_s 8.0地震前地震活动异常特征. 地震学报, 31(6): 601–619.
- 薛艳, 刘杰, 宋治平, 等, 2018. 汶川地震前地震活动特征的普遍性及其机理探讨. 地球物理学报, 61(5): 1891–1906. doi: 10.6038/cjg2018M0164
- 杨宏峰, 姚素丽, 陈翔, 2022. 非均匀断层上的破裂传播及对震级预测的挑战. 科学通报, 67(13): 1390–1403. doi: 10.1360/TB-2021-1086
- 张晓东, 张永仙, 吕梅梅, 等, 2003. 青海昆仑山口西8.1级地震时空强有序特征探讨. 地震学报, 25(6): 583–590.
- 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
- 郑捷, 姚孝新, 陈颢, 1983. 岩石变形局部化的实验研究. 地球物理学报, 26(06): 554–563.