

周依,曹筠,马旭东,等.2024.唐山老震区现今地震活动特征[J].地震研究,47(3):430-440,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0046.

Zhou Y, Cao J, Ma X D, et al. 2024. Characteristics of the recent seismicity in the Tangshan old seismic region[J]. Journal of Seismological Research, 47(3): 430-440, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0046.

唐山老震区现今地震活动特征*

周依^{1,2}, 曹筠², 马旭东², 单连君²

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北 邢台 054000; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要: 为分析唐山老震区地震活动背景, 对该区域现今地震活动特征进行研究。老震区现今地震活动与1976年唐山 $M_s7.8$ 地震早期余震密集区域存在一定差异, 结合区域背景地震活动统计结果, 认为该区域地震活动受唐山地震序列影响逐渐减弱, 逐步趋近于背景地震。地震分布呈现出明显的3分区差异, 主要集中于中区, 东区次之, 西区最弱。中等地震的空间分布特征显示, 地震活动存在东、中、西区交替发震的规律。目前, 唐山老震区构造应力积累加速, 存在地震活动水平由平静向活跃转变的可能, 需要重点关注唐山断裂带北段以及滦县—乐亭断裂和卢龙断裂的交汇区域。

关键词: 唐山地震; 地震活动特征; 背景地震; 迁移规律

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2024)03-0430-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0046

0 引言

1976年7月28日3时42分, 唐山发生 $M_s7.8$ 地震, 15个小时之后在其东部的滦县(现滦州市)发生 $M_s7.1$ 地震, 3个半月后在其西部的宁河再次发生 $M_s6.9$ 地震, 主震及两次强余震之后形成3个明显的余震区, 震中最高烈度XI度, 造成了严重的灾害损失(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982; 孙丽娜等, 2021)。唐山地震序列复杂且丰富, 由7.8级主震、两次7级左右强余震和一系列5级以上余震构成。随着时间推移, 序列总体呈衰减特征, 衰减过程中虽有阶段性起伏, 但是符合强震的衰减规律(张跃刚等, 2013; 郭蕾等, 2021)。

截至2022年, 唐山地震已过去46年, 该地区现今小震活动仍十分频繁。唐山老震区岩石圈黏弹性松弛模拟结果显示, 1976年唐山地震发生15

年内库伦应力变化显著, 而15年之后库伦应力呈现缓慢的稳定增加状态, 显示区域应力调整已基本稳定, 因此15年左右的时间尺度可能是唐山余震活动的一个时间分界点(朱琳等, 2021)。王想等(2012)认为唐山地区1992年进入余震活动晚期阶段之后, 受唐山 $M_s7.8$ 主震和强余震的控制减弱, 地震活动趋于稳定状态。1996年以来唐山老震区中等地震活动显示, 唐山 $M_s7.8$ 地震震中附近区域基本没有4级以上地震, 余震活动可能已经不受主震引起的局部应力状态变化所制约(张素欣等, 2020)。郑建常等(2014, 2022)通过对唐山地震序列不同时段进行丛集地震识别, 认为2011年之后唐山地震序列受主震和较大余震影响的事件越来越少, 更多小震已表现为彼此独立的随机事件。以上研究均表明, 唐山余震活动进入晚期阶段后, 地震活动受主震影响逐渐减小, 目前该区域发生的地震可看作背景地震。

唐山 $M_s7.8$ 地震属于大陆板块内部地震(Rob-

* 收稿日期: 2022-10-27.

基金项目: 河北省重点研发项目(20375404D); 河北省地震科技星火计划项目(DZ2021121700014、DZ2024112100001); 河北省地震局创新团队项目(DZ202109080114).

第一作者简介: 周依(1991-), 工程师, 主要从事数字地震学和地震活动性研究. E-mail: zhouyimondy@163.com.

inson, Zhou, 2005)。研究显示,板内地震衰减较慢,余震持续时间可达数百年(Stein, Liu, 2009)。仲秋和史保平(2012)根据对数线性回归和余震触发理论计算,得到唐山地震的余震序列还将持续近100年的结论。唐山老震区的GPS测量结果显示,唐山地区的地壳应变率高于华北地区的背景值,王辉等(2013)认为这一现象表明该地区现今仍受1976年唐山地震序列影响。关于唐山老震区现今地震活动是否为唐山 $M_s7.8$ 地震余震的讨论始终没有明确的结论。唐山地区如今经过40多年的恢复重建,经济发达、人口稠密,其所处的首都圈地区,一直是我国地震重点监视防御区(孙启凯等, 2017)。因此,开展唐山老震区现今地震活动特征研究,分析其是否为该区域的背景地震活动,对于进行唐山地区地震风险评估以及助力当地防震减灾建设具有一定的现实意义。

1 区域地质构造背景与资料选取

1.1 区域地质构造背景

唐山地区位于张渤地震带和华北平原地震带交汇处,受NEE向丰台—野鸡坨断裂、宁河—昌

黎断裂和NW向滦县—乐亭断裂、蓟运河断裂的切割,形成了一个NEE向菱形块体(虢顺民等, 1977)。菱形块体内部盖层发育有唐山断裂带,西南界的蓟运河断裂与块体西南发育的NNE向沧东断裂相交,东边界的滦县—乐亭断裂与NNE向卢龙断裂相交(图1)。块体内部的唐山断裂带是一条走向NE、具右旋走滑特征的褶皱断裂带,由陡河断裂、巍山—长山南坡断裂、唐山—古冶断裂等数条次级断裂组成,1976年唐山 $M_s7.8$ 地震序列主要沿唐山断裂带展布(徐杰等, 2012)。本研究区唐山老震区主要指唐山地震序列的小震密集区(张素欣等, 2017),其深部地球物理探测显示,在唐山断裂带的正下方存在一条倾角陡立,具有走滑性质的深大断裂,被称为“唐山地壳深断裂”。该断裂错断了上、下地壳分界和莫霍面,为幔源物质的侵入提供了通道(刘保金等, 2011)。据此推测,唐山地区深、浅部耦合的地壳构造系统可能是该区域地震活动频繁的原因(李赫等, 2020)。

1.2 资料选取

1992年以来,唐山余震活动进入晚期阶段(王想等, 2012)。据此,本文基于河北地震台网

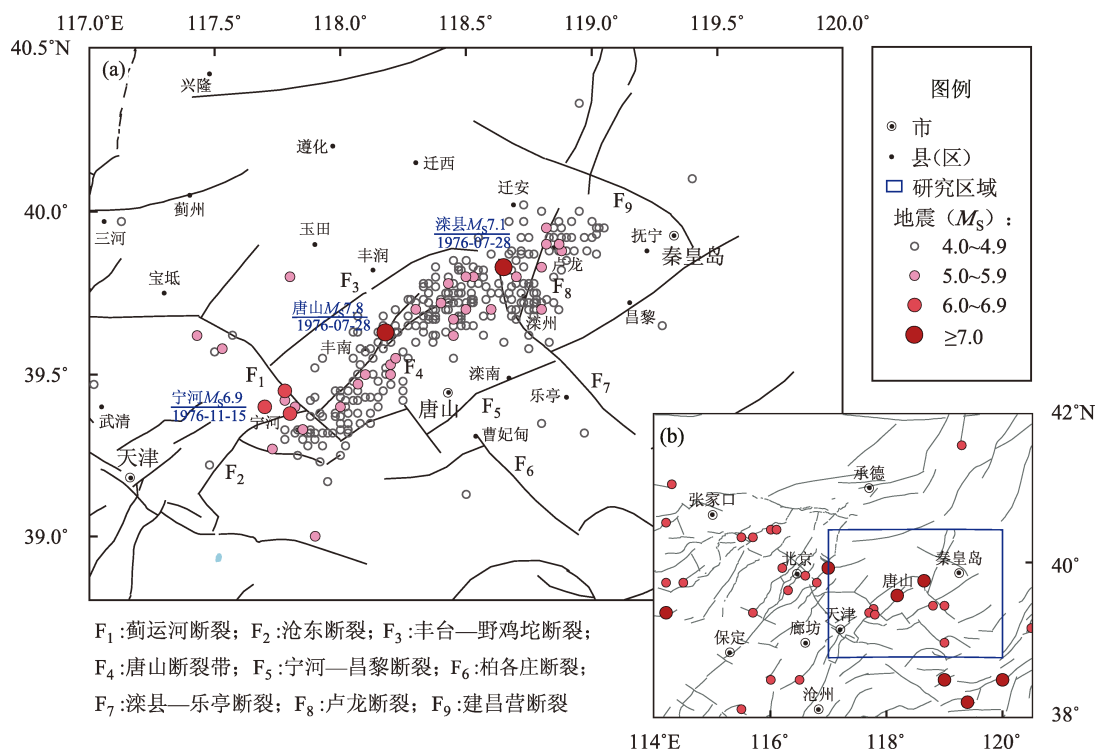


图1 1976年唐山 $M_s7.8$ 级地震序列(a)与区域历史地震分布(b)

Fig. 1 Distribution of the 1976 Tangshan $M_s7.8$ earthquake sequence (a) and historical earthquakes (b) in this region

资料，整理了 1992—2021 年唐山地区（38.8° ~ 40.5°N，117° ~ 120°E）地震目录，对该区域现今地震活动特征进行分析。为保证分析结果的可靠性，采用震级-序号法和多统计方法（蒋长胜等，2013）对最小完整性震级 M_c 进行评估。其中，多统计方法是使用最大曲率法（MAXC）和拟合优度法（GFT-90%、GFT-95%）的一种综合评估方法。如图 2 所示，两种方法计算得到的结果较为一

致，1992 年以来，唐山老震区最小完整性震级 M_c 为 $M_L2.0$ 左右；2008 年以来，随着“十五”数字地震观测网络项目投入运行，研究区的地震监测能力显著提升， M_c 已低于 $M_L1.5$ ；2015 年以后，得益于首都圈测震台站升级改造项目的完成，研究区地震监测能力进一步提升， M_c 达到 $M_L1.0$ 。因此，本文分析唐山老震区现今地震活动特征时，将地震起始震级设定为 $M_L2.0$ 。

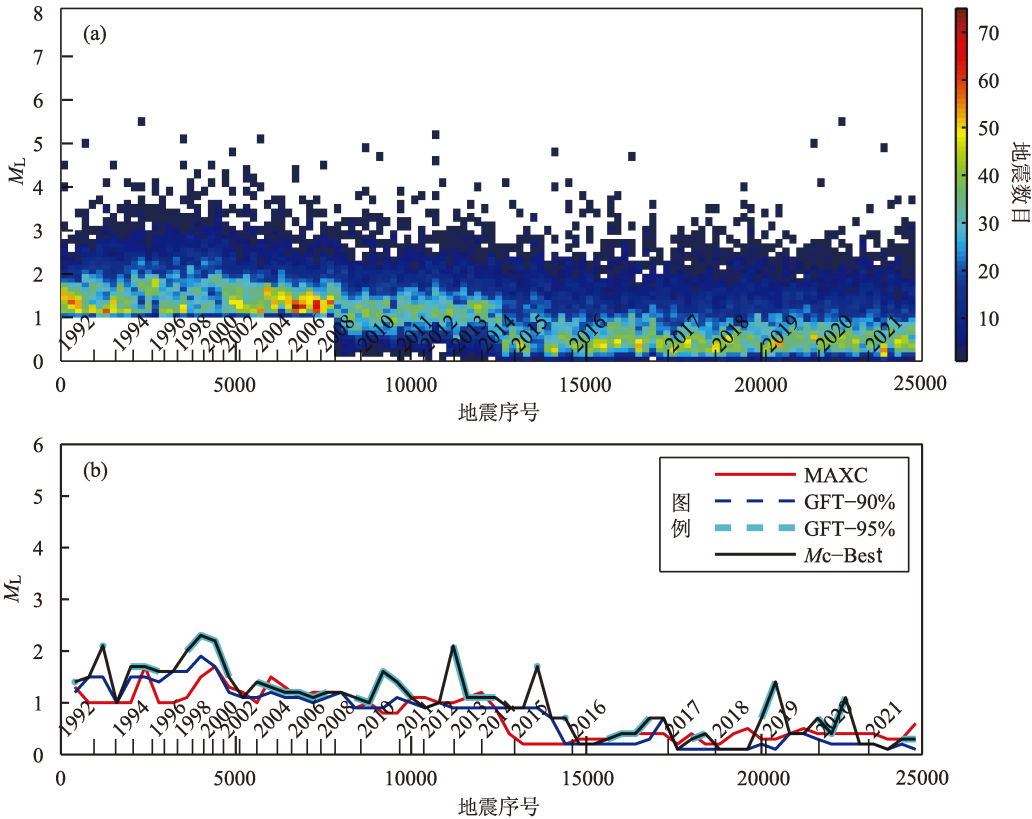


图 2 震级-序号法给出的地震密度分布 (a) 和多统计方法给出的最小完整性震级 M_c 的时间变化 (b)
Fig. 2 Seismic rate for different magnitudes in the index domain (a) and completeness thresholds of M_c estimated by three statistical methods (b)

2 小震密集分布特征分析

根据 1992 年以来唐山老震区最小完整性震级 M_c ，设置起始震级为 $M_L2.0$ ，绘制区域地震震中分布图。如图 3a 所示，地震表现出明显的密集分布特征，主要沿唐山断裂带和卢龙断裂呈 NE 向密集分布，沿着蓟运河断裂也存在少量地震呈 NW 向带状分布。在卢龙断裂和滦县—乐亭断裂交汇区域附近，地震密集活动出现“丁”字

形转折。为进一步分析地震活动的时空分布特征，沿地震密集区绘制了 AB 轴，长轴方向 NE。在分析小震时空分布图像时，设定 A 点为研究区轴线原点，根据距离轴线 20 km 范围内地震相对原点的距离，得到唐山地区小震时空演化图像（图 3b）。地震密集区集中在距离 A 点 50 ~ 110 km 处，该区域主要为唐山断裂带北段和卢龙断裂南段，大部分 $M_L4.0$ 以上地震都发生在该区域，其中包括所有 $M_L5.0$ 以上地震，其余的 $M_L4.0$ 以上地震主要分布在蓟运河断裂与唐山断

裂带交汇附近。2004 年 1 月 20 日昌黎 $M_L5.0$ 地震后，虽然小震活动仍然集中于该区域，但是地震密集范围明显收缩，更为集中在唐山断裂带北端和卢龙断裂与滦县—乐亭断裂的交汇区域，使得在唐山断裂带和滦县—乐亭断裂交而不汇的位置出现了一条清晰的地震分界线。

为了更直观地反映唐山老震区小震分布情况，区分地震活动相对密集地区与稀疏地区，本文基于小震震中分布绘制唐山地区地震密集分布图。对研究区域进行 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的网格划分，统计网格节点附近 10 km 范围内的地震次数并对其进行归一化处理，由此得到的密集程度值能够直观描述

研究区域的地震密集程度和密集区域。从小震密集分布特征来看，唐山老震区现今地震活动存在明显差异，呈现空间分布不均匀特征。结合区域构造环境并参考前人的分区规则（杨理华，赵喜柱，1985；张宏志等，2008），本文将唐山老震区划分为东区、中区和西区，其中滦县—乐亭断裂及以东为东区，唐山断裂带所在的菱形块体内部为中区，蓟运河断裂及以西为西区。如图 4a 所示，1992 年以来，中区地震密集程度尤为突出，地震密集区域主要集中在唐山断裂带北段，其南段地震分布相对稀疏；东区地震密集程度次之，主要集中在滦县—乐亭断裂与卢龙断裂交汇区域，卢龙

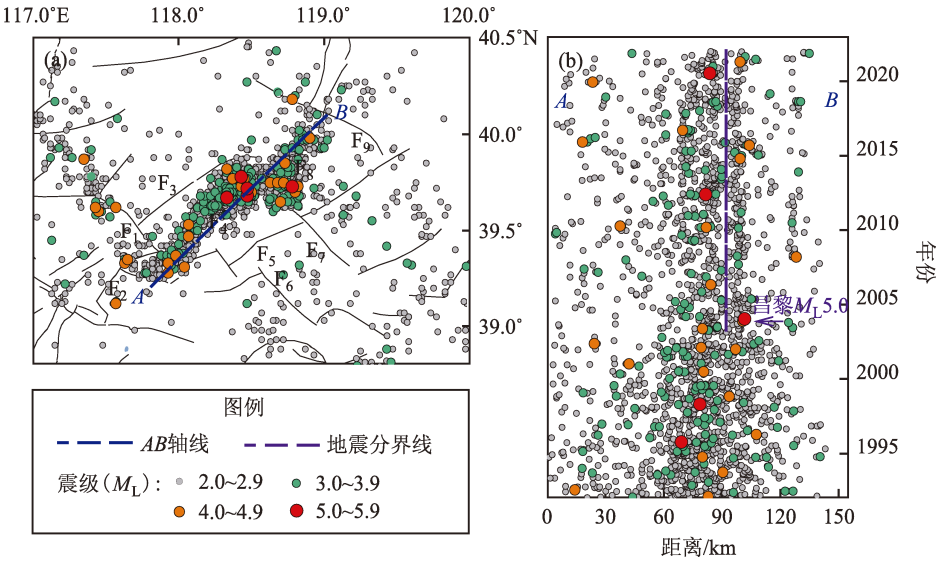


图 3 唐山老震区地震震中分布图 (a) 和时空演化图 (b)
Fig. 3 Epicentral distribution (a) and space – time evolution (b) of earthquakes in the Tangshan old seismic region

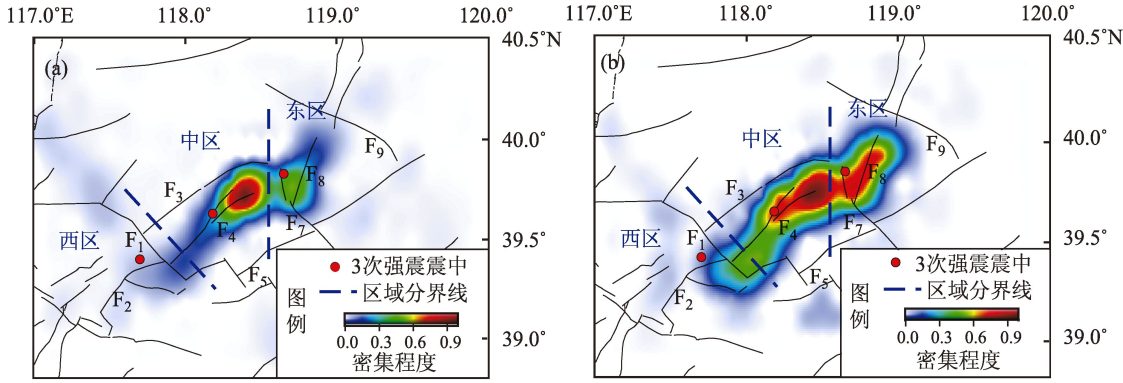


图 4 1992—2021 年 (a) 和 1976—1991 年 (b) 唐山老震区地震密集分布图
Fig. 4 Density distribution of earthquakes in the Tangshan old seismic region from 1992 to 2021 (a) and from 1976 to 1991 (b)

断裂北段有少量地震聚集；西区地震活动沿着蓟运河断裂呈 NW 向分布，地震密集程度较弱。将 1976 年唐山 $M_s7.8$ 主震及两次强余震的震中位置投影到地震密集分布图上发现，唐山 $M_s7.8$ 和滦县 $M_s7.1$ 地震震中均位于现今地震密集区域的边缘附近，宁河 $M_s6.9$ 地震震中位于现今地震活动较弱区域。而 1992 年以前的余震密集分布图显示（图 4b），唐山 $M_s7.8$ 和滦县 $M_s7.1$ 地震震中均处于地震密集程度较高区域，且宁河 $M_s6.9$ 地震震中也位于地震密集区域的边缘。与 1992 年以前相比，现今地震密集区域收缩，偏离 3 次强震震中，可能预示区域地震受唐山 $M_s7.8$ 强震序列影响减弱。

3 中等地震时空分布特征分析

3.1 时间丛集特征

区域地震活动时间分布特征研究是在一定统计区内（地震带或地震区内）进行的，描述在时间进程中不同时间段的地震活动特征。1992 年以来唐山老震区 $M_L4.0$ 以上地震累积应变能量释放曲线整体表现比较平缓，未出现较大波动，说明整体地震活动比较平稳。从细节上看，累积应变能量释放曲线在 2004 年和 2019 年出现了小的台阶，参考 1992 年以来唐山老震区 $M_L4.0$ 以上地震

的 $M-t$ 图，可以将该区域现今中等地震活动大致分为 3 个阶段（图 5）。第 1 阶段 1992—2004 年，累积应变能量释放用 J 来表示，其速率为 $11.2 J/a$ ， $M_L4.0$ 以上地震平均年频次为 1.7 次。期间发生了 3 次 $M_L5.0$ 以上地震，最大地震为 1995 年 10 月 6 日唐山 $M_L5.4$ 。该阶段地震发震时间间隔多集中在 $0.5 \sim 1 a$ ，最长发震间隔为 $2 a$ ，期间多次出现短期（3 个月内）地震成对发生。第 2 阶段 2005—2018 年，累积应变能量释放速率和地震平均年频次较第 1 阶段有所降低，分别为 $6.0 J/a$ 和 0.9 次。期间发生 $M_L5.0$ 以上地震 1 次，为 2012 年 5 月 28 日唐山 $M_L5.1$ 。该阶段地震存在 $2 a$ 左右的准周期特征，并且“双震”特征更加显著。但 2015 年 9 月 14 日昌黎 $M_L4.8$ 地震扰乱了 $2 a$ 左右的准周期特征，此后发震时间间隔缩短，此时可能处于这 1 阶段末期的剩余应变释放调整阶段。2016 年 9 月 10 日唐山 $M_L4.6$ 地震后，唐山老震区进入了长达 $3.2 a$ 的 M_L4 地震平静，直至 2019 年 12 月 5 日丰南 $M_L4.9$ 地震的发生，预示着进入了地震活动的第 3 阶段。目前处于第 3 阶段早期，共计发生 3 次 $M_L4.0$ 以上地震，最大地震为 2020 年 7 月 12 日古冶 $M_L5.4$ 地震，该阶段地震发震时间间隔保持在 $0.5 \sim 1.0 a$ ，目前累积应变能量释放速率为 $10.5 J/a$ 。

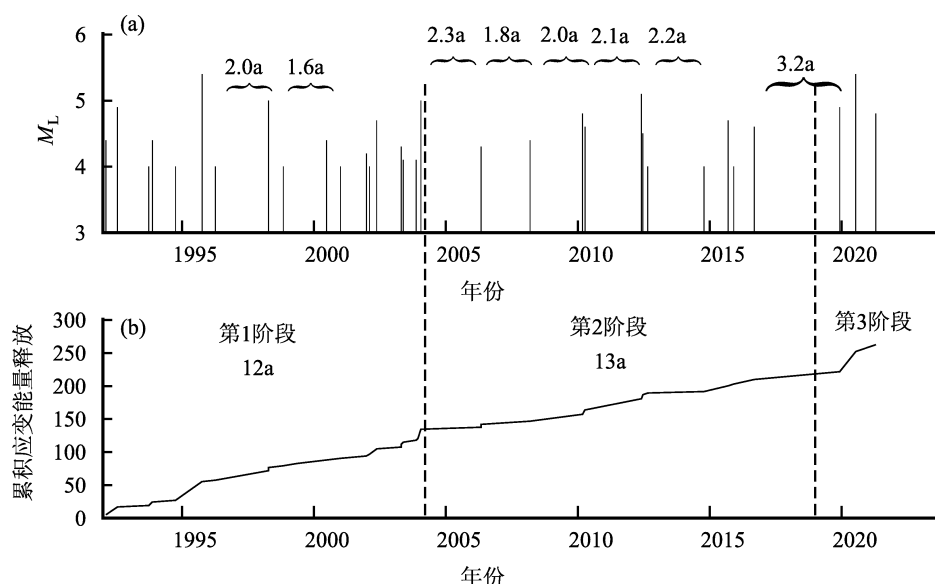


图 5 唐山老震区 $M_L \geq 4.0$ 地震 $M-t$ 图 (a) 和累积应变能量释放曲线 (b)

Fig. 5 $M-t$ diagram of $M_L \geq 4.0$ earthquakes (a) and cumulative strain energy release curve (b) in the Tangshan old seismic region

前2个阶段的持续时间均在10 a左右,第2阶段累积应变能量释放速率、地震平均年频次和最大地震震级均低于第1阶段,符合老震区地震衰减规律。但是从第3阶段唐山老震区目前发生的中等地震活动情况来看,累积应变能量释放速率和最大地震震级均有所回升, $M_L 4.0$ 以上地震的发震时间间隔缩短,存在地震活动水平由平静向活跃转变的可能,与衰减趋势相悖,可能意味着该区域地震的发生受唐山 $M_s 7.8$ 强震序列约束进一步减弱。

3.2 空间迁移特征

1976年唐山 $M_s 7.8$ 主震及两次强余震依次发生于3分区中的中、东和西区,存在空间迁移特征(图4)。众多专家学者已对其成因及动力机制进行了阐述(Butler *et al.*, 1979; 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982; 闻学泽, 马胜利, 2006)。本文对唐山老震区现今中等地震空间分布特征进行分析时,发现这一特征同样显著。

将1992年以来唐山老震区 $M_L 4.0$ 以上地震分组讨论,若以发震时间间隔超过2.0 a作为分组条件,则大致可以分为5组,3个阶段分别存在2组、2组和1组地震活动。从地震迁移曲线上看(图6),存在东、中、西3个分区交替发震的特点。5组地震活动中有3组的始发地震出现在中区,即迁移过程大多从中区开始,而结束地震多发生在东区。从迁移特征来看,虽未发现较明显的优势迁移方向,但迁移过程中存在一定的有序性,当地震活动按经度从东向西或从西向东活动时,会在3个分区依次进行迁移,每个迁移过程中区都会参加。在19次不同分区的地震迁移过程中,仅有3次没有经过中区,其中有2次从东区直接跳跃到西区(第1、4组),还有1次则从西区跳跃到东区(第1组)。由此可以将中区作为唐山老震区地震活动的窗口。研究表明,在东、中、西3个分区均存在应力集中点(马瑾等, 1980; 刘蒲雄, 吕晓健, 2011),当区域应力积累到一定程度后,在其中一个应力集中点进行应力释放。1976年唐山7.8级地震后,由于老震区地质介质相对破碎,介质强度不易积累更大能量(Li *et al.*, 2007),较难阻止地震波能量的传播,初始破裂的冲击波诱发了其余两个应力集中点的应力释放,导致发震。3个分区中等地震空间迁移的现象,就是在3个应力集中点依次应力释放的过程。

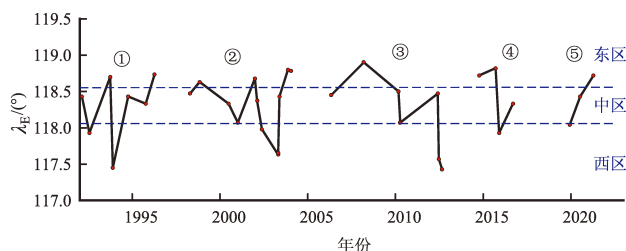


图6 唐山老震区地震时-空迁移

Fig. 6 Space-time migration of earthquakes in the Tangshan old seismic region

若以遍历东、中、西区为一重迁移,再一次遍历为二重迁移,则前2组地震活动存在二重迁移,后3组地震活动仅存在一重迁移。5组地震活动存在的7次迁移过程中,迁移路径为“西→中→东”模式的情况最多(图7a、b、e)，“东→中→西”模式次之(图7b、c)。还有2次迁移过程为跨区跳跃的模式:第1组地震活动的第一重迁移过程中,天津发生 $M_L 4.9$ 地震后,直接在东区发生了滦县 $M_L 4.0$ 地震(图7a);第4组地震活动迁移过程中,东区发生昌黎 $M_L 4.7$ 地震后,接着西区发生丰南 $M_L 4.0$ 地震(图7d)。但是从统计来看,跨区跳跃的情况较少发生,迁移过程主要遵循3个分区依次迁移的规律。

研究时段内最后一次 $M_L 4.0$ 以上地震为2021年4月16日滦州 $M_L 4.8$,位于东区。自此,第5组地震活动已经完成了一重迁移,迁移模式为“西→中→东”。参考前几次该模式下的迁移过程,在第1组地震活动的第二重迁移过程中,中区依次发生了唐山 $M_L 4.0$ 和 $M_L 5.4$ 地震后,再往东区迁移;第2组地震活动的第二重迁移过程,在东区接连发生了昌黎 $M_L 4.1$ 和 $M_L 5.0$ 两次结束地震。考虑到“西→中→东”迁移模式下“双震”现象的存在,第5组地震迁移过程有可能还没有结束,即下一次 $M_L 4.0$ 以上地震存在发生在东区的可能。

4 讨论

4.1 现今地震活动性质判定

1976年唐山 $M_s 7.8$ 地震早期余震主要分布在主震及两次强余震附近(Shedlock *et al.*, 1987; 张素欣等, 2017, 2020),且1992年前、后的余震密

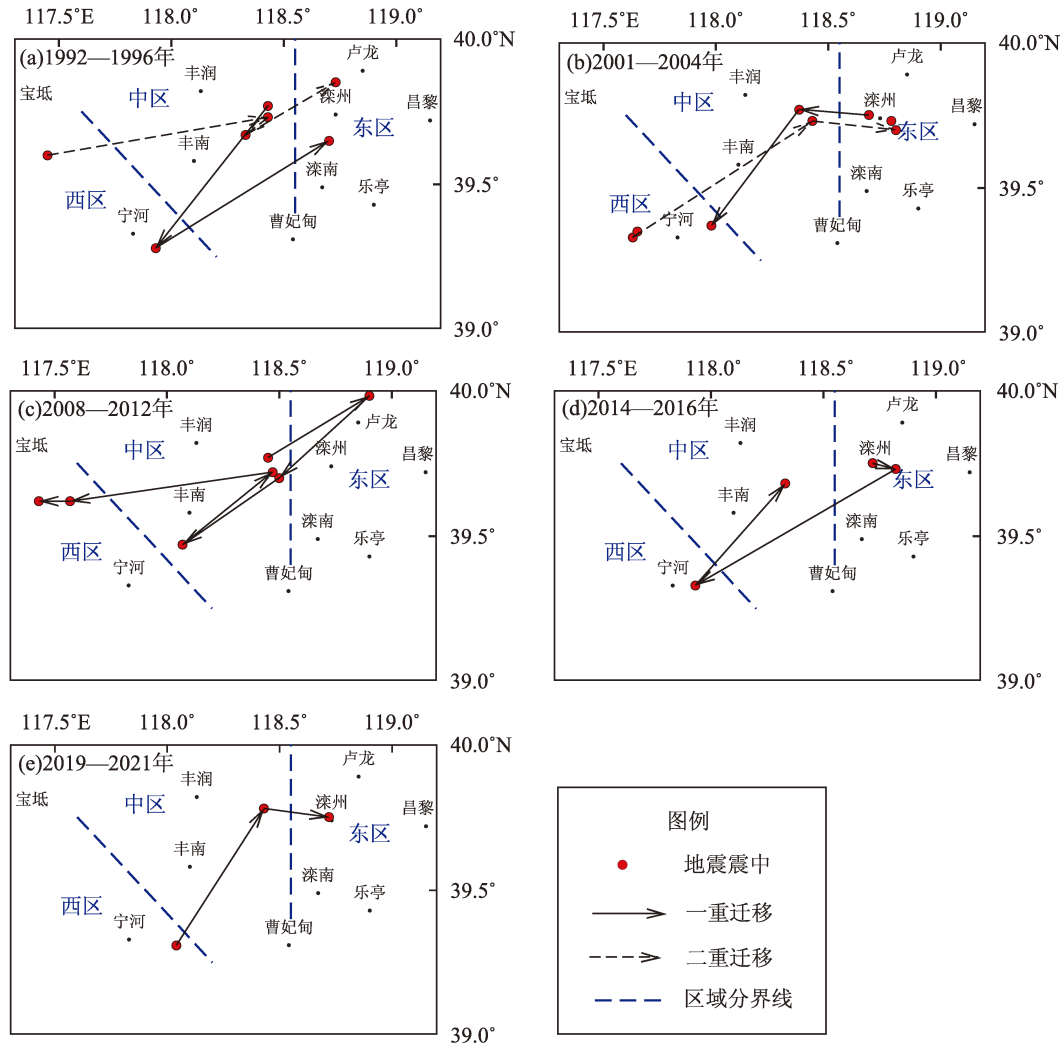


图7 不同活动时段唐山老震区地震空间迁移路径

Fig. 7 Earthquake migration route in the Tangshan old seismic region during different activity periods

集分布也表现出不同特征（图4）。许忠淮等（1983，1985）利用唐山地震前10年的小震P波初动数据，得到震前区域主压应力方位约为 $N60^{\circ}E$ ，而震后早期表现为近EW方向，顺时针旋转了约 30° 。之后，唐山老震区的主压应力方向长期处在近EW向（李瑞莎等，2008）。但是，2002年以来的地壳应力场反演结果和GPS应变场显示，该区域目前主要受NEE向的主压应变控制（陈长云，2016；王晓山等，2020）。表明唐山老震区现今主压应力方向较1976年唐山地震序列早期可能发生了调整，趋于恢复到震前水平。而唐山老震区现今地震活动密集区域的变化，也是区域应力场调整下的一种间接表现。

从唐山 $M_s7.8$ 地震序列时序变化来看（图8），地震频度随时间呈指数衰减，地震强度逐渐减弱

但存在起伏变化。在序列早期，余震衰减较快，2年内最大余震衰减至 $M_L5.0$ 左右，85%左右的余震活动集中在该时间段内。其后余震年频次减少，地震强度较为稳定，直至1991年5月30日发生唐山 $M_L5.6$ 地震，地震强度出现起伏。此后老震区 $M_L4.0$ 以上地震年频次进一步减少，地震活动呈现阶段性变化，与余震衰减趋势相悖，可能意味着唐山老震区现今地震活动受1976年唐山 $M_s7.8$ 地震序列影响较弱。通常定义余震活动持续时间为余震活动减弱到与背景地震活动水平相当的时间（蒋海昆等，2006），1992年以来区域 $M_L4.0$ 以上地震平均年频次为1.2次，与震前区域地震平均年频次（1.3次）基本相当（图8b）。推测唐山老震区现今地震活动趋近于震前活动水平，发生的地震可能为背景地震。

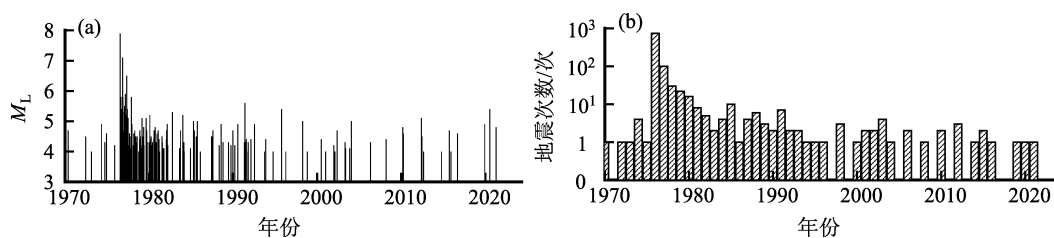


图8 1970年以来唐山老震区 $M_L \geq 4.0$ 地震 $M-t$ 图 (a) 和地震年频次 (b)

Fig. 8 $M-t$ diagram (a) and annual numbers (b) of $M_L \geq 4.0$ earthquakes in the Tangshan old seismic region since 1970

4.2 地震活动趋势分析

唐山老震区现今中等地震活动存在3个阶段,目前处于第3阶段早期。从累积应变能量释放速率、地震平均年频次和最大地震震级的计算及统计结果来看,第2阶段均低于第1阶段,地震活动由活跃转为平静,符合老震区地震衰减规律。小震密集分布显示,第2阶段之后(即2004年之后),唐山老震区密集活动范围收缩。因此,大致可将2004年看作该区域地震活动由活跃转为平静的一个时间节点。2004年以来唐山老震区中等地震活动形态呈现出“平静—丛集”的周期性变化。2019年以后,累积应变能量释放曲线显示区域构造应力积累加速(图5b),存在地震活动水平由平静向活跃转变的可能。结合小震密集分布特征,唐山断裂带北段以及滦县—乐亭断裂和卢龙断裂的交汇区域可能是未来中强地震活跃的场所以。

唐山老震区3个分区的地震活动差异显著,并且存在中等地震东、中、西区交替发震的规律。依据对中等地震迁移过程的统计,迁移过程大多从中区开始,即构造应力多数从中区积累释放。并且中区也是小震活动最为密集的区域,因此可以将中区作为区域地震活动的窗口,中区开始活动,意味着唐山老震区可能开启活动。

本文对唐山老震区现今中等地震迁移现象的分析,结果可以尝试应用于区域地震迁移趋势分析,对未来中强地震发震位置的判定提供一定参考。根据迁移模式分析,认为2021年4月16日滦州 $M_L 4.8$ 地震是一重迁移过程的结束地震,但考虑到以往震例中双震情况的出现,认为东区还有可能发生一次 $M_L 4.0$ 以上地震。2022年5月21日卢龙 $M_L 4.1$ 地震的发生也验证了这一预测结论。

5 结论

本文根据唐山老震区现今地震的最小完整性震级,利用1992—2021年的小震目录,对该区域现今地震活动特征进行了分析,得到以下结论:

(1) 1992年以来唐山老震区小震密集分布于唐山断裂带北段以及滦县—乐亭断裂和卢龙断裂的交汇区域,与1976年唐山 $M_s 7.8$ 地震早期余震密集区域存在一定差异,可能是区域地震活动受强震序列影响减弱的表现。唐山 $M_s 7.8$ 地震前、后老震区中等地震频次统计结果显示,现今中等地震年频次与震前基本相当,区域地震活动趋近于震前活动水平,由此认为该区域所发生地震逐步趋近于背景地震。

(2) 唐山老震区现今地震分布3个分区的差异显著,主要集中于中区,东区次之,西区最弱。中等地震活动存在较为明显的迁移规律,即地震在东、中、西区交替发震。将这一规律应用于区域地震迁移趋势预测,可以对未来中强地震发震位置的判定提供一定的参考。

(3) 唐山老震区现今地震活动呈现阶段性变化,2019年以来,区域构造应力积累加速,地震活动水平存在由平静向活跃转变的可能。现今小震活动密集分布于唐山断裂带北段以及滦县—乐亭断裂和卢龙断裂的交汇区域,上述地区可能成为未来中强地震活跃的场所以。

文中图件使用 GMT 软件绘制,在此表示感谢。

参考文献:

- 陈长云. 2016. 张家口—渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 36(1): 1-11.

- Chen C Y. 2016. Characteristics of segmentary motion and deformation along the Zhangjiakou – Bohai fault[J]. *Earthquake*, 36(1): 1 – 11. (in Chinese)
- 郭蕾, 孙丽娜, 周依, 等. 2021. 唐山地区近十年地震的重定位研究[J]. *地震学报*, 43(6): 706 – 715.
- Guo L, Sun L N, Zhou Y, *et al.* 2021. Relocation of earthquakes in Tangshan area in the recent decade[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 43(6): 706 – 715. (in Chinese)
- 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.
- Editorial Group of The Tangshan Earthquake of 1976, State Seismological Bureau. 1982. Tangshan Earthquake of 1976 [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 毓顺民, 李志义, 程绍平, 等. 1977. 唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论[J]. *地质科学*, 12(4): 305 – 321.
- Guo S M, Li Z Y, Cheng S P, *et al.* 1977. Discussion on the regional structural background and the seismogenic model of the Tangshan earthquake [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 12(4): 305 – 321. (in Chinese)
- 蒋长胜, 吴忠良, 庄建仓. 2013. 地震的“序列归属”问题与 ETAS 模型——以唐山序列为例[J]. *地球物理学报*, 56(9): 2971 – 2981.
- Jiang C S, Wu Z L, Zhuang J C. 2013. ETAS model applied to the Earthquake – Sequence Association (ESA) problem; the Tangshan sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(9): 2971 – 2981. (in Chinese)
- 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 2006. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. *地球物理学报*, 49(4): 1110 – 1117.
- Jiang H K, Qu Y J, Li Y L, *et al.* 2006. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1110 – 1117. (in Chinese)
- 李赫, 董一兵, 王熠熙, 等. 2020. 唐山地区地震成因初探——以丰南 2010 年 M_{4.1} 和 2019 年 M_{4.5} 地震序列为例[J]. *地球物理学进展*, 35(4): 1276 – 1283.
- Li H, Dong Y B, Wang Y X, *et al.* 2020. Discussion on the seismogenesis of Tangshan area; take the sequence Fengnan M_{4.1} in 2010 and M_{4.5} in 2019 as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 35(4): 1276 – 1283. (in Chinese)
- 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 2008. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. *地震学报*, 30(6): 570 – 580.
- Li R S, Cui X F, Diao G L, *et al.* 2008. Temporal and spatial variation of the present crustal stress in northern part of North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 30(6): 570 – 580. (in Chinese)
- 刘保金, 曲国胜, 孙铭心, 等. 2011. 唐山地震区地壳结构和构造: 深地震反射剖面结果[J]. *地震地质*, 33(4): 901 – 912.
- Liu B J, Qu G S, Sun M X, *et al.* 2011. Crustal structures and tectonics of Tangshan earthquake area; results from deep seismic reflection profiling[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 901 – 912. (in Chinese)
- 刘蒲雄, 吕晓健. 2011. 唐山地震序列空间分布复杂性原因研究[J]. *地震*, 3(4): 1 – 14.
- Liu P, Lyu X J. 2011. On the causes of the spatial distribution complexity of the 1976 Tangshan earthquake sequence[J]. *Earthquake*, 31(4): 1 – 14. (in Chinese)
- 马瑾, 张渤海, 袁淑荣. 1980. 唐山地震与地震危险区[J]. *地震地质*, 2(2): 43 – 54.
- Ma J, Zhang B T, Yuan S R. 1980. Tangshan earthquake and the earthquake risk area[J]. *Seismology and Geology*, 2(2): 43 – 54. (in Chinese)
- 孙丽娜, 齐玉妍, 陈婷, 等. 2021. 震源机制和场地条件在河北地震影响场判定中的应用研究[J]. *地震学报*, 43(4): 508 – 520.
- Sun L N, Qi Y Y, Chen T, *et al.* 2021. Research on application of focal mechanism and site conditions in judgment of Hebei earthquake influence field[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 43(4): 508 – 520. (in Chinese)
- 孙启凯, 池国民, 徐东卓. 2017. 首都圈地区地壳垂直形变特征及剖面分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 37(5): 497 – 501.
- Sun Q K, Chi G M, Xu D Z. 2017. Characteristics of vertical deformation and profile analysis for the capital circle[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 37(5): 497 – 501. (in Chinese)
- 王辉, 刘勉, 李振, 等. 2013. 华北地区大地震的长余震序列[J]. *地震*, 33(3): 1 – 12.
- Wang H, Liu M, Li Z, *et al.* 2013. Long aftershock sequences of major earthquakes in North China[J]. *Earthquake*, 33(3): 1 – 12. (in Chinese)
- 王想, 冯向东, 宫猛, 等. 2012. 唐山老震区地震活动特征[J]. *地震地磁观测与研究*, 33(S2): 44 – 48.
- Wang X, Feng X D, Gong M, *et al.* 2012. Study on seismicity features of Tangshan seismic region[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 33(S2): 44 – 48. (in Chinese)
- 王晓山, 冯向东, 赵英萍. 2020. 京津冀地区地壳应力场特征[J]. *地震研究*, 43(4): 610 – 619.
- Wang X S, Feng X D, Zhao Y P. 2020. Characteristics of crustal stress field in Beijing – Tianjin – Hebei region[J]. *Journal of Seismological Research*, 43(4): 610 – 619. (in Chinese)
- 闻学泽, 马胜利. 2006. 唐山大地震对相邻断裂段地震复发的影响[J]. *自然科学进展*, 16(10): 1346 – 1350.
- Wen X Z, Ma S L. 2006. Effect of strong Tangshan earthquake on seismic recurrence in adjacent faults[J]. *Progress in Natural Science*, 16(10): 1346 – 1350. (in Chinese)
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 等. 2012. 华北渤海湾盆地大震发震构造的基本特征[J]. *地震地质*, 34(4): 618 – 636.
- Xu J, Zhou B G, Ji F J, *et al.* 2012. Features of seismogenic structures of great earthquakes in the Bohai Bay Basin area, North China[J]. *Seismology and Geology*, 34(4): 618 – 636. (in Chinese)
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和, 等. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. *地震学报*, 5(3): 268 – 279.
- Xu Z H, Yan M, Zhao Z H, *et al.* 1983. Evaluation of the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 5(3): 268 – 279. (in Chinese)

- 许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 7(4): 349–362.
- Xu Z H. 1985. Mean stress field in Tangshan aftershock area obtained from focal mechanism data by fitting slip directions[J]. Acta Seismologica Sinica, 7(4): 349–362. (in Chinese)
- 杨理华, 赵喜柱. 1984. 1976年唐山地震为三主震型地震[J]. 地震研究, 7(6): 639–648.
- Yang L H, Zhao X Z. 1984. The Tangshan earthquake of 1976 – an event of triple main shock pattern[J]. Journal of Seismological Research, 7(6): 639–648. (in Chinese)
- 张宏志, 刁桂苓, 陈祺福, 等. 2008. 1976年唐山7.8级地震震区现今地震震源机制分析[J]. 地震研究, 31(1): 1–6.
- Zhang H Z, Diao G L, Chen Q F, et al. 2008. Focal mechanism analysis of the recent earthquakes in Tangshan seismic region of $M7.8$ in 1976[J]. Journal of Seismological Research, 31(1): 1–6. (in Chinese)
- 张素欣, 孙丽娜, 李永庆, 等. 2020. 2019年12月5日河北唐山 $M4.5$ 地震的发震背景[J]. 华北地震科学, 38(S1): 76–79.
- Zhang S X, Sun L N, Li Y Q, et al. 2020. The seismogenic background of the $M4.5$ earthquake in Hebei Tangshan on December 5, 2019[J]. North China Earthquake Sciences, 38(S1): 76–79. (in Chinese)
- 张素欣, 王晓山, 陈婷, 等. 2017. 唐山老震区40年地震时空演化特征分析[J]. 华北地震科学, 35(1): 32–37.
- Zhang S X, Wang X S, Chen T, et al. 2017. Seismic space – time evolution characteristics in Tangshan old seismic region during the past 40 years[J]. North China Earthquake Sciences, 35(1): 32–37. (in Chinese)
- 张跃刚, 王玉珍, 尹宝军, 等. 2013. 2012年5月28日河北省唐山4.8级地震[J]. 中国地震, 29(2): 219–229.
- Zhang Y G, Wang Y Z, Yin B J, et al. 2013. The Tangshan $M_{\text{s}}4.8$ earthquake on May 28, 2012 in Hebei Province[J]. Earthquake Research in China, 29(2): 219–229. (in Chinese)
- 郑建常, 李东梅, 王鹏, 等. 2014. 基于最邻近事件距离算法的丛集地震识别方法及应用[J]. 地震, 34(4): 100–109.
- Zhang J C, Li D M, Wang P, et al. 2014. Method and application of clustering seismicity identification based on nearest – neighbor distance[J]. Earthquake, 34(4): 100–109. (in Chinese)
- 郑建常, 李冬梅, 冀东普, 等. 2022. 日本与华北地区强震活动相关性再讨论[J]. 华南地震, 42(4): 7–19.
- Zheng J C, Li D M, Ji D P, et al. 2022. Rediscussion on the correlation of strong earthquake activities between Japan and North China[J]. South China Journal of Seismology, 42(4): 7–19. (in Chinese)
- 仲秋, 史保平. 2012. 1976年唐山 $M_{\text{s}}7.8$ 地震余震序列持续时间及对地震危险性分析的意义[J]. 地震学报, 34(4): 494–508.
- Zhong Q, Shi B P. 2012. Aftershock duration of the 1976 $M_{\text{s}}7.8$ Tangshan earthquake and implication for seismic hazard estimation[J]. Acta Seismologica Sinica, 34(4): 494–508. (in Chinese)
- 朱琳, 李腾飞, 石富强, 等. 2021. 1976年唐山强震群震后库仑应力演化及其与2020年古冶5.1级地震的关系[J]. 地震研究, 44(1): 1–8.
- Zhu L, Li T F, Shi F Q, et al. 2021. The coulomb stress evolution after the 1976 Tangshan strong earthquake swarm and its relationship with the 2020 Guye $M5.2$ earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 44(1): 1–8. (in Chinese)
- Butler R, Stewart G S, Kanamori H. 1979. The July 27, 1976 Tangshan, China, earthquake; a complex sequence of intraplate events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 69(1): 207–220.
- 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]. Geophysical Research Letters, 34(23): L23309.
- Robinson R, Zhou S. 2005. Stress interactions within the Tangshan, China, earthquake sequence of 1976[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6): 2501–2505.
- Shedlock K M, Baranowski J, Xiao W W, et al. 1987. The Tangshan aftershock sequence[J]. Journal of Geophysical Research, 92(B3): 2791–2803.
- Stein S, Liu M. 2009. Long aftershock sequences within continents and implications for earthquake hazard assessment[J]. Nature, 462(5): 87–89.

Characteristics of the Recent Seismicity in the Tangshan Old Seismic Region

ZHOU Yi^{1,2}, CAO Jun², MA Xudong², SHAN Lianjun²

(1. *Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, Hebei, China*)

(2. *Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

Abstract

To analyze the seismic background in the Tangshan old seismic region and provide earthquake trend predictions, we describe the characteristics of the recent seismicity in this region. Results show that the recent seismicity in the Tangshan old seismic region is different from the early aftershock intensive area of the 1976 Tangshan $M_s 7.8$ earthquake. Considering the statistical results of regional background seismicity, the influence of the Tangshan earthquake is gradual weakening, and the recent seismicity in the Tangshan old seismic region can be considered as background seismicity. The characteristics of seismicity are different in the three sub – areas of the Tangshan old seismic region, the earthquakes mainly concentrate in the central area, followed by the eastern area, and the western area was the weakest, and the moderate earthquake following a law of alternate occurrence in the east, central and west sub – areas. This seismic migration law constitutes a reference for the determination of the locations of future moderate – to – strong earthquakes. At present, the accumulation of tectonic stress is accelerating in the old seismic region of Tangshan. Seismicity changing from quiet to active is possible, and moderate – to – strong earthquakes may occur at the northern segment of the Tangshan Fault and the intersection of the Luanxian – Laoting Fault and the Lulong Fault in the future.

Keywords: the 1976 Tangshan $M_s 7.8$ earthquake; characteristics of seismicity; background seismicity; seismic migration law