

唐山大地震对相邻断裂段地震复发的影响*

闻学泽¹ 马胜利²

1. 四川省地震局地震预报研究所, 成都 610041; 2. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 1976年7月28日沿NE向唐山断裂发生的7.8级大地震破裂很快触发了相邻断裂段上的3次强震。其中, 被触发的滦县7.1级地震发生在唐山主震破裂NE端部外侧的近SN-NNE向滦县断裂段上。对历史地震资料的详细分析表明: 滦县断裂段在1976年之前的400多年中发生过5次中-强地震, 复发过程表现出“时间可预报”行为, 并可根据这种行为“预测”第6次地震应大致发生在22世纪上半叶。然而, 滦县断裂段在1976年唐山主震破裂后约15h即发生了一次7.1级地震, 比“预测”的平均时间提前了约160年, 强度上也明显超出该段的历史最高。这表明一个断裂段原有的、相对平稳的地震复发行为会因受到相邻断裂段大地震破裂的强烈影响而发生显著改变, 并使复发过程呈现局部的非线性。相关的实验结果为此提供了一种物理解释。

关键词 唐山地震 相邻断裂段 触发破裂 地震复发 历史地震

沿活动断裂带一个段落的地震破裂会影响或触发相邻断裂段的地震破裂^[1,2]。因此, 断裂的段与段之间相互力学作用的问题已在地震危险性评价和长期地震预测中受到重视^[3-6]。近十多年来, 探索这一问题的主要内容有: 简单断层几何条件下段与段相互作用的静力学效应分析^[3,4]和实验力学分析^[7]; 由粘弹性半空间位错理论或数值方法模拟计算沿断裂带地震破裂的历史以及引起相邻断层段的Coulomb破坏应力变化量, 进而推断未来强震的危险断层段^[5,8-10]; 等等。其中, 实验力学分析已揭示出断裂的段与段相互力学作用的4种类型: 静态促震或减震型、蠕动触发型、动态触发型和动态加载-松弛型^[7]。然而, 目前仍缺少与这些理论类型对应的实例, 特别是大地震破裂对相邻断裂段地震复发过程影响的实例。因此, 若能寻找出相关的例子, 是很有意义的^[11]。

与1976年河北唐山7.8级大地震的发震断裂相邻的滦县断裂段至少有400多年的完整破坏性地震记载。这可能为分析该断裂段的地震复发过程是否

受到邻段1976年唐山大地震的影响提供了机会。本文拟在说明唐山地区主要断裂格局与地震关系的基础上, 由历史地震资料分析滦县断裂段正常的地震复发行为, 进而揭示由于受到邻段1976年唐山大地震破裂的影响而产生的地震复发过程变化。

1 断裂格局与地震

河北唐山地区的主要活动断裂(图1)除了有局部出露外, 绝大部分隐伏于第四纪松散堆积层之下^[12-14]。其中, NE向唐山断裂(f1)是1976年7月28日7.8级唐山大地震的发震断裂^[12,15], 其为倾向北西的逆-右旋走滑断层^[13]。尽管地震时的地表破裂长仅8km^[12], 但根据震源位移场、震源过程的反演以及余震分布已推断相应的震源破裂几乎沿整条唐山断裂发生^[12,15,16]。唐山主震后约3.5h和约15h, 分别在蓟运河断裂(f2)和滦县-乐亭断裂(f3)上发生6.2级和7.1级地震; 1976年11月15日, 即主震后大约3.5个月, 在主震破裂的南西延伸断裂部位上发生了天津宁河6.9级地震^[12]。图1绘出

2005-11-16 收稿, 2006-03-03 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号: 2004CB418401)

E-mail: xzwen@eqsc.gov.cn

上述4次地震的相对重破坏区(次高或再次高烈度区)以及震源断层面解,同时结合地表调查结果^[12,16]确定或推断了相应的震源破裂段。很显然,

正如 Butler 等^[17]指出的,后3次地震是受唐山主震破裂影响而发生的触发型破裂事件,它们与主震破裂共同构成了一次复杂的板内地震破裂序列。

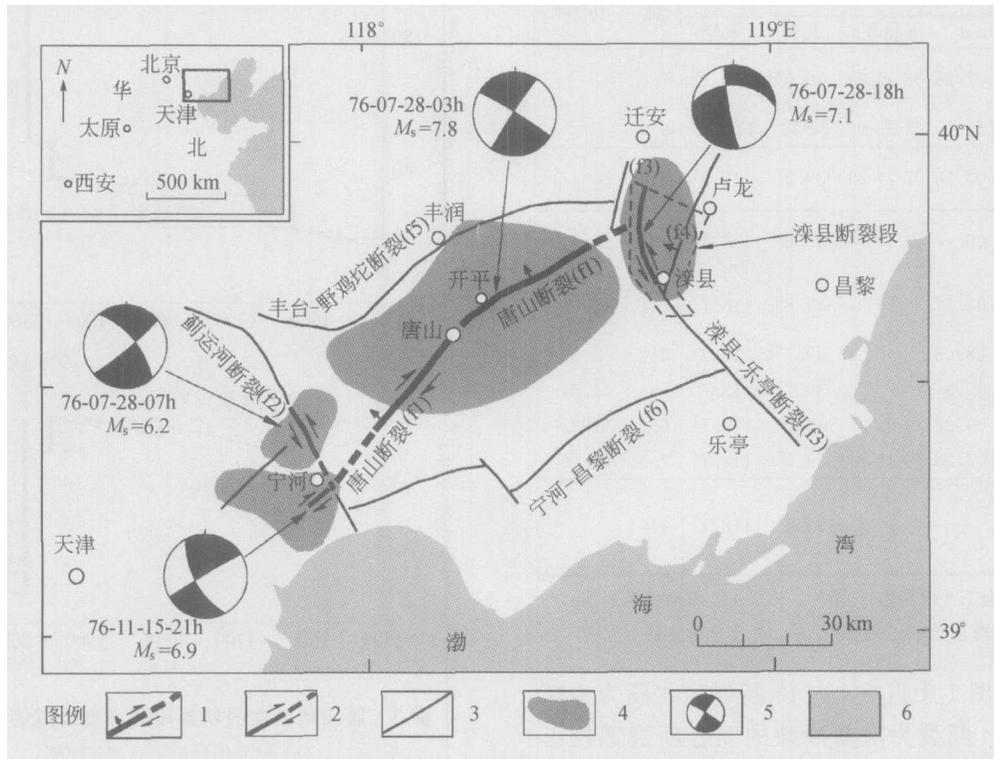


图1 河北唐山地区活动断裂与1976年主要地震事件关系图

左上角小图指示研究区(矩形框)在华北的位置。图例说明:1—唐山主震发震断裂及其旋性,虚线为推测,短箭头指示断面倾向;2—触发型强震发震断裂段及其旋性,虚线为推测;3—1976年未发生强震破裂的断裂;4—主震、触发型强震的相对重破坏区;5—上半球投影震源断层面解,黑色为主张应力轴所在象限^[18],旁侧注明地震年、月、日和面波震级 M_s ;6—海域

唐山地区由文字记载的最早破坏性地震是公元1481年卢龙东北的4¾级地震。明朝洪武二年(公元1369年)在卢龙设有平滦府(后改称永平府),管辖滦县、卢龙、迁安、抚宁、昌黎、乐亭等县;明朝永乐元年(公元1403年)设立“开平中屯卫”^[19],即现在的唐山市开平区(图1)。因此,至少在最近400多年中研究区的破坏性地震记载应是完整的。我们从历史记载^[20~22]中分析地震相对重破坏区的地理分布,进而分析地震的发生与断裂的关系,结果整理成表1。由此得知:在1976年之前至少400多年,沿唐山断裂(f1)无破坏性地震发生。

然而,1976年之前在滦县—乐亭断裂(f3)北段和卢龙断裂(f4)的交汇区附近发生5次5—6¼级的中-强震,加上1976年唐山主震后约15h发生的滦

县7.1级地震共6次^[20~22]。这6次地震的震中集中于北纬39.6°—39.9°、东经118.7°—118.8°之间的近SN向狭长地带(表1)。其中,1976年7.1级地震的重破坏区和余震区^[12]几乎覆盖了前5次地震的震中,并已根据相对重破坏区分布、震后调查发现的近SN向地表破裂以及震源机制解等信息判定该7.1级地震主要是沿f3断裂北段破裂的结果^[12,16,18](图1),但其余震除了沿f3断裂北段发生外,还沿f4断裂发生^[23,24]。根据三维地震透射研究结果^[14],f4断裂倾向北西,向下至少延伸到8—9km,并很可能于中地壳深度与f3断裂的北段相交,成为后者的分支。这些反映f3断裂北段与f4断裂在深部有紧密联系。

表1 16世纪以来唐山地区 $M_s \geq 5$ 级地震事件及其与断裂(段)的关系^{1,2)}

断裂名称及代号	断裂段	地震时间		震中位置		震级 ³⁾ M_s	应变能 $e/10^6 J^{1/2}$
		y-m-d	h-min-s	北纬	东经		
唐山 (f1)	唐山	1976.07.28	03-42-54	39.6°	118.2°	7.8	
	宁河	1976.11.15	21-53-01	39°20'	117°30'	6.9	
蓟运河 (f2)	汉沽	1976.07.28	07-17-29	39.3°	117.8°	6.2	
滦县-乐亭 (f3)	滦县	1562.06.—	—	39.6°	118.7°	5	1.41
		1624.04.17	—	39.8°	118.7°	6¼	11.22
		1795.08.05	—	39.7°	118.7°	5½	3.35
		1880.09.06	—	39.7°	118.7°	5	1.41
		1945.09.23	23-34-21	39.7°	118.7°	6¼	11.22
丰台-野鸡坨 (f5)	丰润	1527.—.—	—	39.8°	118.1°	5½	
		1976.07.28	18-45-34	39.9°	118.7°	7.1	53.09

1) 1976年唐山7.8级地震序列中小于6.0级的地震未列出; 2) 历史地震的参数整理自文献[20—22]; 3) M_s 为面波震级

因此, 以图1中近SN向f3断裂的北段为主断裂、NNE向f4断裂为次要断裂的复合断裂部位已在过去的400多年中发生6次 $M_s \geq 5$ 地震(不计1976年7.1级地震的余震), 属于一个地震重复发生的断裂部位. 我们将这一断裂部位简称为滦县断裂段, 即图1虚线框的范围.

2 唐山主震破裂对滦县断裂段地震复发的影响

对于滦县断裂段的6次地震, 根据公式 $e = \sqrt{10^{4.8+1.5M_s}}$ [25] 由相应的面波震级 M_s 换算成应变能 e (表1). 其中, 前5次地震的应变能 e 释放随时间 t 的累积基本呈线性增长, 平均增长速率约为 $0.0454 \times 10^6 J^{1/2}/a$ (图2(a)). 根据这一速率可绘出应变能 e 随时间 t 的积累-释放图像(图2(b)).

从图2看出: 滦县断裂段前5次地震的复发过程基本遵循“时间可预报”行为, 即地震越大、至下一次地震的时间间隔越长[26]. 根据这种复发行为可预测第6次地震应发生在22世纪上半叶, 即图2垂直虚线或点线的时间位置附近. 然而, 1976年7月28日沿NE向唐山断裂发生7.8级主震破裂后仅

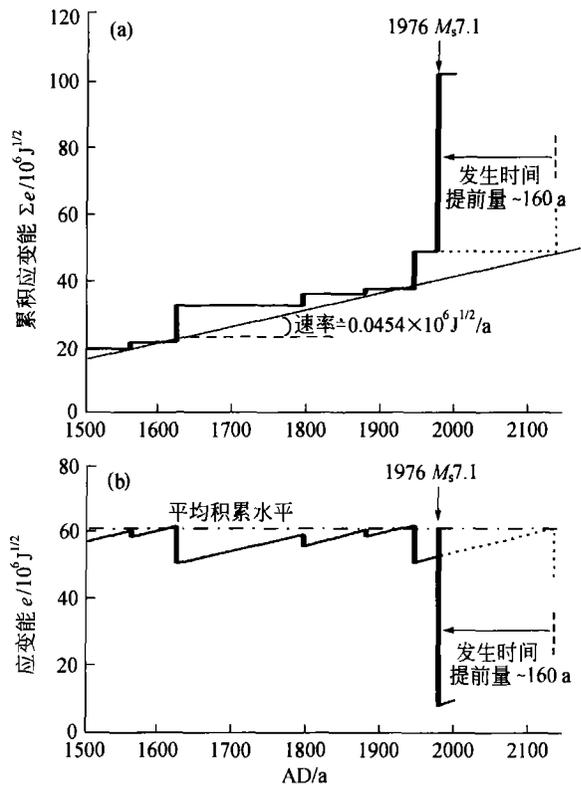


图2 唐山地区滦县断裂段破坏性地震的复发图像
(a) 应变能释放随时间累积图;
(b) 应变能积累-释放随时间变化图

粗实线的长度代表应变能释放的大小, 细斜线的斜率代表平均释放速率, 点虚线为根据前5次地震的复发过程“预测”的第6次地震的应变能积累-释放路径. 1976年唐山 $M_s 7.8$ 级地震在滦县 $M_s 7.1$ 级地震之前约15h发生

大约15h, 即在滦县断裂段发生第6次地震—7.1级地震, 比根据前5次地震的复发行为预测的平均时间提前了大约160年. 这一地震发生时间提前量的估计值显然远大于由于历史地震震级的不确定性而可能造成的估计误差. 因此, 沿NE向唐山断裂发生的7.8级地震破裂, 对于滦县断裂段、特别是对于与唐山断裂近于正交的f3断裂北段具有非常强烈的影响. 不仅破坏了那里已至少持续400多年、表现出相对平稳的时间可预报复发行为的中-强地震复发过程, 而且还造成滦县断裂段地震强度明显增大—1976年7.1级地震要比当地历史最大地震(约6¼级)高出0.8—0.9级, 而能量(e^2)释放则相应高出约22倍, 致使整个复发过程在第5次至第6次地震之间呈现明显的局部非线性(图2).

3 机理分析

根据震源机制解^[18], 1976年唐山地震序列的4次主要地震中, 主震及两次发生在宁河附近的强震是在近EW向近水平挤压作用下以走滑断层作用为主的破裂结果(图1)。然而, 滦县7.1级地震震源机制解的节面之一与f3断裂北段的实际展布和错动方式相一致^[16,18](图1), 反映出是在NE-SW向近水平拉张作用下以近SN向左旋-正断层作用为主的断层错动结果。Shedlock等^[27]也指出滦县7.1级地震的机制解表现出明显的正断层作用。另外, 数值计算表明: 发生7.1级地震的滦县断裂段也是唐山主震破裂引起的Coulomb破坏应力值增加最多的部位^[10,28]。因此, 可以做出推论: 7.8级主震破裂发生时沿NE向唐山断裂产生较大幅度的右旋同震运动^[15,29]; 由于唐山断裂倾向NW^[13], 对于主震破裂NE端部外侧近于正交的f3断裂北段来说, 应主要受到唐山断裂南东盘突然朝南西方向的同震运动而产生的NE-SW向近水平拉张作用。这种突发的强烈拉张作用使得f3断裂北段在很短的时间内发生左旋-正断层错动、产生超出历史最大地震强度的7.1级地震, 同时还破坏了当地正常的地震复发行与

过程。这种机理解释符合“动态触发型”断层相互作用理论^[7]。基于实验岩石力学研究, 马瑾等^[7]揭示: 交叉断层系统中一条断层失稳会动态地为另一条正交的断层加载, 使后者的剪应力瞬时增加并超过其强度, 从而发生失稳。

最近一组关于应力扰动对断层摩擦性状影响的实验结果为理解上述现象的机理提供了更充分的依据。在双轴压缩、等位移速率加载(σ_1 方向上)的条件下, 含有与轴向夹角 45° 滑动面的花岗闪长岩标本(图3(a))在 σ_2 无扰动的情况下表现出类似于规则粘滑的行为(即应力降相差不大的准周期性粘滑), 而在 σ_2 有扰动(周期为16s、振幅0.1MPa的正弦波扰动)的情况下, 粘滑间隔和应力降大小发生了很大的变化, 特别是出现了应力降很大的事件(图3(b)); 而且, 大小应力降事件均发生于应力扰动波谷附近。分析表明, 这种变化主要归因于断层面上正应力变化的影响, 正应力的快速、小幅下降不仅会触发粘滑失稳, 而且可能会引起“低摩擦”现象, 导致应力降成倍增加^[30]。该实验结果意味着, 当一次强震活动造成一条断面上的正应力突降时, 有可能打破该断层的强震活动规律, 触发震级更大的地震。

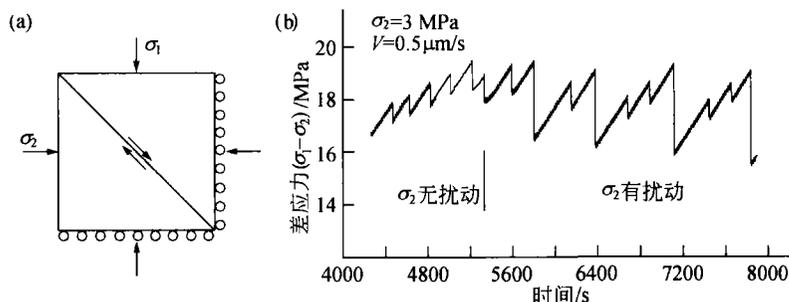


图3 应力扰动对断层摩擦滑动影响的实验结果

(a) 标本结构及加载方式示意图; (b) 差应力时间曲线

标本为花岗闪长岩, 尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 含一条与轴向成 45° 的模拟断层面, 实验条件为轴向(σ_1 方向)加载点速率 $0.5\ \mu\text{m/s}$, 侧向应力 $\sigma_2 = 3\text{ MPa}$, σ_2 上的扰动为正弦波状扰动(周期16s, 振幅0.1MPa)

4 结论与讨论

唐山地区以f3断裂北段为主的滦县断裂段在1976年之前的400多年中发生过5次中-强地震, 复发过程相当好地遵循“时间可预报”行为。根据

这种行为推测的第6次地震应发生在22世纪。然而, 在1976年沿唐山断裂(f1)发生7.8级大地震破裂的强烈“动态触发作用”下, 滦县断裂段的第6次地震平均提前了约160年发生, 强度也超出当地的历史最高。

本研究的例子说明：一个断裂段原有的平稳地震复发时间过程和强度范围可能会因受到相邻断裂段罕见大地震破裂的强烈影响而显著改变，从而表现出地震复发过程的局部非线性。相关实验结果为这种现象提供了一种物理解释。今后还应注意在不同断层几何关系条件下大地震对相邻断裂段地震复发的影响问题。

参 考 文 献

- 1 Ambraseys N N. Some characteristic features of the Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, 1970, 9: 143—165
- 2 Scholz C H. *The Mechanics of Earthquake Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 439
- 3 Dieterich J H. Probability of earthquake occurrence with non-uniform stress rates and time-dependent failure. *Pure Appl Geophys*, 1988, 126: 589—617
- 4 Cornell C A, Wu S, Winterstein S R, et al. Seismic hazard induced by mechanically interactive fault segments. *Bull Seism Soc Am*, 1993, 83: 436—449
- 5 Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys J Int*, 1997, 128: 594—604
- 6 闻学泽. 时间相依的活动断裂分段地震危险性评估及其问题. *科学通报*, 1998, 43(14): 1457—1466
- 7 马 瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 断层相互作用型式的实验研究. *自然科学进展*, 2002, 12(5): 503—508
- 8 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seism Soc Am*, 1992, 82: 1018—1040
- 9 Papadimitriou E, Wen X, Karakostas V, et al. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. *Pure Appl Geophys*, 2004, 161: 1683—1707
- 10 刘桂萍, 傅征祥. 1976年7月28日唐山7.8级地震触发的区域地震活动和静应力场变化. *地震学报*, 2000, 22(1): 17—26
- 11 闻学泽. 山西1303年大地震破裂对相邻断裂段地震复发行为的影响. *中国地震*, 2000, 16(1): 22—27
- 12 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 1982, 4—23
- 13 尤惠川, 徐锡伟, 吴建平, 等. 唐山地震深浅构造关系研究. *地震地质*, 2002, 24(4): 571—582
- 14 张先康, 杨玉春, 赵 平, 等. 唐山滦县震区的三维地震透射研究—中、上地壳速度层析成像. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 759—766
- 15 陈运泰, 黄立人, 林邦慧, 等. 用大地测量结果反演唐山7.8级主震位错模型. *地球物理学报*, 1979, 22(2): 201—217
- 16 王景明, 郑文俊, 陈国顺, 等. 唐山地震地面主断裂带及地震成因探讨. *地震研究*, 1981, 4(4): 437—450
- 17 Butler R, Stewart G S, Kanamori H. The July 27, 1976 Tangshan, China, earthquake: A complex sequence of intraplate events. *Bull Seism Soc Am*, 1979, 69(1): 207—220
- 18 张之立, 李钦祖, 谷继成, 等. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. *地震学报*, 1980, 2(2): 111—129
- 19 (清)张廷玉等著. 明史·卷四十, 志第十六, 地理一. http://www.booksir.com/books/history/lishizhuanzhu/24shi/mingshi/ms_040.htm
- 20 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所. 中国历史地震图集(明时期). 北京: 中国地图出版社, 1990, 1—194
- 21 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录. 北京: 地震出版社, 1995, 1—514
- 22 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录. 北京: 中国科学技术出版社, 1999, 1—637
- 23 张四昌, 刁桂苓. 唐山地震序列的构造过程. *中国地震*, 1992, 8(2): 73—80
- 24 傅征祥. 中国大陆地震活动性力学研究. 北京: 地震出版社, 1997, 245—247
- 25 Gutenberg B, Richter C F. *The Seismicity of the Earth*. Princeton: Princeton University Press, 1954
- 26 Shimazaki K, Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys Res Lett*, 1980, 7: 279—282
- 27 Shedlock K M, Baranowski J, Xiao W, et al. The Tangshan aftershock sequence. *J Geophys Res*, 1987, 92(B3): 2791—2804
- 28 Zhao S, Takemoto S. Aseismic fault movement before the 1976 Tangshan earthquake detected by leveling: Implications for pre-seismic stress localization? *Geophys J Int*, 1999, 136(1): 68—82
- 29 Huang B S, Yeh Y T. The fault ruptures of the 1976 Tangshan earthquake sequence inferred from coseismic crustal deformation. *Bull Seism Soc Am*, 1997, 87: 1046—1057
- 30 崔永权, 马胜利, 刘力强. 应力扰动对断层摩擦影响的实验研究. *地震地质*, 2005, 27(4): 645—652