

秦四清, 薛 雷, 黄 鑫, 等. 山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区未来中强地震预测. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1539~1549, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.003.

Qin S Q, Xue L, Huang X, *et al.* A forward prediction of moderate-sized or strong earthquakes in Shandong, Hebei, Henan, Shaxi, Haicheng in Liaoning province and Beijing-Tianjin regions. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(5):1539~1549, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.003.

山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区 未来中强地震预测

秦四清¹, 薛 雷¹, 黄 鑫¹, 徐锡伟², 王媛媛¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘 要 运用孕震断层多锁固段脆性破裂理论与有关方法, 对山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区各地震区未来的地震趋势进行了分析, 给出了未来有中强地震发生的地震区地震震级、地点、临界应变(对应发震时间)、震源深度四要素在内的预测结果. 研究表明: 导致海城 $M_s 7.3$ 级地震发生的最直接原因是发生在 1944 年的丹东 $M_s 6.75$ 级地震事件, 该 6.75 级地震是引发海城大地震的直接导火索.

关键词 地震区, 锁固段, 预测方法

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.003

中图分类号 P315

文献标识码 A

A forward prediction of moderate-sized or strong earthquakes in Shandong, Hebei, Henan, Shaxi, Haicheng in Liaoning province and Beijing-Tianjin regions

QIN Si-qing¹, XUE Lei¹, HUANG Xin¹, XU Xi-wei², WANG Yuan-yuan¹

(1. *Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,*

Beijing 100029, China; 2. *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*)

Abstract The earthquake trend for Shandong, Hebei, Henan, Shaxi, Haicheng and Beijing-Tianjin regions, China, is analyzed in detail using the brittle failure theory of multiple locked patches in a seismogenic fault system. For the seismic zone where a moderate or strong earthquakes will occur, the prediction results including the magnitude, place, critical strain (corresponding to the occurrence time of earthquake), and the hypocentral depth of an oncoming earthquake are provided. It is shown that the most immediate cause leading to the $M_s 7.3$ Haicheng earthquake is attributed to the earthquake event with a magnitude of $M_s 6.75$ occurred in Dandong in 1944.

Keywords seismic zone, locked patch, prediction method

0 引 言

山东、河北、河南与京津地区是我国城市密集、经济发达的地区之一. 自上世纪 60 年代以来, 曾发

生过著名的 1966 年邢台 $M_s 7.2$ 级、1969 年渤海 $M_s 7.4$ 级、1976 年唐山 $M_s 7.8$ 级大地震. 这些地震造成了重大的人员伤亡与经济损失.

山西地堑系是华北地区西部的一条活动构造

收稿日期 2010-07-15; 修回日期 2010-10-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-113 和 KZCX2-YW-Q03-02113)联合资助.

作者简介 秦四清, 1964 年生, 河北行唐人, 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 主要从事工程地质、非线性岩土力学、岩土工程类研究. (E-mail: qsqhope@yahoo.com.cn)

带^[1],也是我国著名的强震集中带,以强度大、频度高、破坏性严重为特色,自公元前 780 年开始有地震记载至 1991 年 6 月止,共记录到 $6 \leq M < 7$ 级地震 15 次, $7 \leq M < 8$ 级地震 6 次, $M \geq 8$ 级地震 2 次. 自 1989 年以来,山西地堑系区内 5~6 级左右的地震频繁发生,可能标志着该区的地震活动进入了一个新的活跃期.

辽宁海城 1975 年 2 月 4 日 $M_s 7.3$ 级地震,是依据“小震闹、大震到”经验预报成功的一个地震实例. 尽管经过了诸多学者^[2]的深入研究,仍对其孕震过程不十分清楚.

山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区未来会有强震发生吗? 地震三要素如何预测? 海城 $M_s 7.3$ 级地震的孕震过程如何解释? 这些问题的解决对准确地分析上述地区的地震形势,判断其未来地震的危险性,减轻地震灾害具有十分重要的意义.

本文将在对这些地区地震区划分的基础上,运用作者最近发展的孕震断层多锁固段脆性破裂理论与相关预测方法,对该区未来的地震活动性进行探讨,并给出未来大地震震级、发震时间、发震地点、震源深度四要素的预测结果,得出的结论可供有关部门参考.

1 孕震断层的多锁固段脆性破裂理论简介

地震源自于沿断层的滑动. 已有研究发现^[3],断层的运动模式和相关的地震活动性受断层中一个或多个锁固段所控制. “锁固段”(诸如断层中所谓的岩桥、障碍或凸起体(Asperity))可定义为在断层面上具有较高强度且在地震中释放较大地震矩的部位. 例如,在断层面上不同类型、尺寸不一的凸起体,包括两断层面之间的非均匀接触体、不连续断层之间的未破裂区段、或蠕滑受阻区域. 一旦所有的锁固段被突破,主震将不可避免地发生.

作者^[4,5]应用重正化群理论导出了锁固体在其体积膨胀起点的临界破坏概率,基于材料脆性破坏的 Weibull 分布模型给出了单锁固体断裂点(大地震发生)与体积膨胀起点位移或应变的表达式为:

$$s_f = 1.48 s_c, \quad (1)$$

式中, s_f 和 s_c 分别为对应锁固体断裂点与膨胀起点的应变或位移值. 锁固体变形到膨胀点时,微破裂会向未来的主破裂面丛集,震群出现,在蠕变位移-时间曲线上表现为位移加速现象^[5],因此 s_c 容易从时间-位移观测曲线上确定. 由于沿断层面的深部滑动位移不能直接测量,应寻求位移的替代量,已有研

究表明 Benioff 应变^[4]可作为深部滑动位移的替代量.

实际上一个孕震断层可能含多个锁固段. 在式(1)的基础上,我们导出了适用于孕震断层中多锁固段破裂的临界应变的表达式,即

$$s_f(k) = 1.48^k s_c, \quad (2)$$

式中, $s_f(k)$ 为第 k 个锁固段断裂点(即将发生的中等强度预震或大预震)的临界应变. 在最后一个锁固段破坏后,主震将发生. 式(2)表明,失稳点的临界应变与加速应变始点和锁固段的数目有关,而与锁固段的尺寸和强度无关.

需注意的是, Benioff 应变计算依赖于一个地震周期内完整且准确的地震目录以及对孕震区域的准确识别,故观测和计算误差不可避免. 为此我们提出一种估算 Benioff 应变误差的方法.

若考虑应变误差 Δ , 那么加速应变起点和第一个锁固段断裂点的实际应变值分别为 $s_c^* + \Delta$ 和 $s_f^* + \Delta$, 其中 s_c^* 和 s_f^* 为观测值. 由式(1)可求得误差的表达式为

$$\Delta = \frac{s_f^* - 1.48 s_c^*}{0.48}. \quad (3)$$

利用式(3)可对含多锁固段的孕震断层观测数据进行误差改正,以提高预测精度. 对世界上典型大地震的回溯性预测验证表明^[6],该理论是可靠的,可用于实际地震预测.

2 强震四要素预测方法与孕震时空区域划分原则

作者已在文献^[7]中提出了确定包括大震震级、地点、临界应变(对应发震时间)与震源深度在内的四要素预测方法;给出了孕震周期的时间起点确定原则、孕震空间尺度确定原则、孕震时空范围内能量积累与释放的能量守恒原则与孕震规律合理性检验原则,根据这四项基本原则,并结合断裂分布与地震活动性,可划分合理的孕震时空范围.

3 山东、河北、河南、辽宁海城与京津地区未来大地震预测分析

根据上述方法,确定了这些地区地震孕震区域划分的合理方案,如图 1 所示.

现今地震目录与历史地震目录引自中国地震信息网站,数据为研究时段内的所有震级事件, Benioff 应变计算时,先把不同的震级单位统一换算为地方震级 M_L , 然后依次计算地震矩、地震能量与

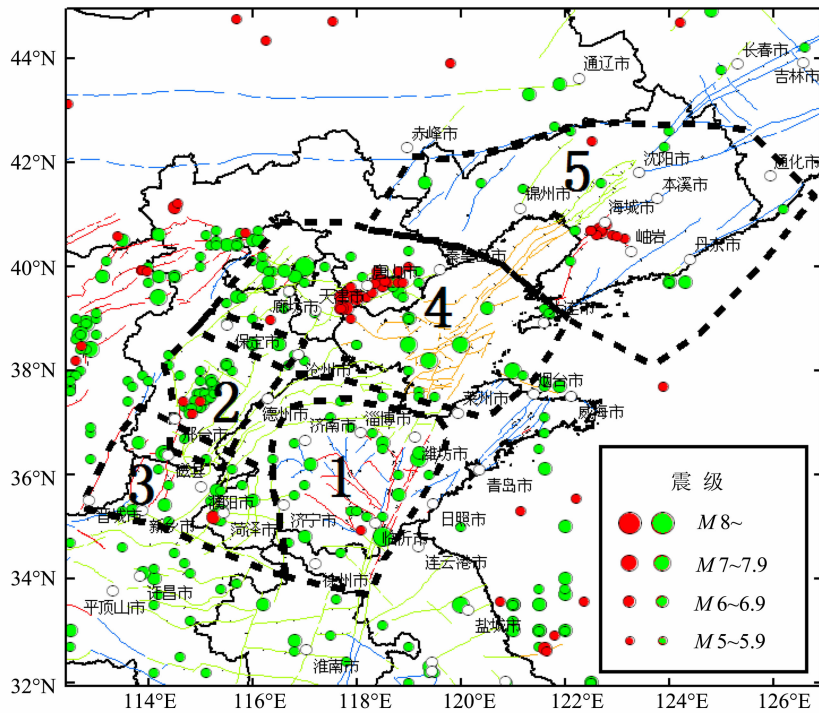


图1 山东、河北、河南、辽宁海城与京津地区地震区的划分

(绿圈和红圈分别表示研究区内1970年以前和1970年以后 $M \geq 5.0$ 级的事件,红色线为晚更新世—全新世以来的活动断裂,蓝色线为第四级活动过但晚更新世以来活动情况不清的断裂,绿色线为平原区与盆地区的隐伏断裂,橘红色线为海域断裂,闭合虚线为地震区)

地震区名称:1-郯庐断裂带山东段地震区;2-邢台地震区;3-山东菏泽-河南濮阳地震区;4-京津唐地震区;5-海城地震区

Fig. 1 Divisions of seismic zones in Shandong, Hebei, Henan, Haicheng in Liaoning province and Beijing-Tianjin zones

(The green and red circles denote the earthquake events with $M \geq 5.0$ in the research zone before and after 1970, respectively. The red, blue, green, orange and closed-dashed lines denote active fractures from late Pleistocene to Holocene, fractures which are active in the Quaternary period but whose activities are unclear since late Pleistocene, buried factures in plain terrain and basin, fractures in the sea area and seismic zones, respectively.)

No. 1: seismic zone in the Shandong section of Tanlu fracture zone; No. 2: Xingtai seismic zone; No. 3-Shandong-Heze and Henan-Puyang seismic zone; No. 4-Beijing-Tianjin-Tangshan seismic zone; No. 5-Haicheng seismic zone

Benioff 应变值. 运用孕震断层多锁固段脆性破裂理论方法,对各地震区的预测分析结果如下.

3.1 郯庐断裂带山东段地震区

在该地震区内曾先后发生了公元前70年 $M_s 7.0$ 、1668年7月25日 $M_s 8.5$ 级山东郯城大地震. 在1831年以后未有 $M \geq 6.0$ 级的地震发生,这说明 $M_s 8.5$ 级地震是该地区的历史最大地震,是主震事件.

从1931年以来该地震区的 Benioff 应变分析结果(图2),可看出1995年9月20日 $M_L 5.3$ 级地震较好地满足了式(1),这说明确定的该地震区孕震时空研究范围是合适的. 根据2004~2005年的小震群事件,可确定下一个锁固段断裂时地震的震级为5.5~5.6级;依据小震群出现的位置及地震空区位置,可推断未来中级地震的震中位置在北纬35°,东

经117.8°;震源深度约为10~14km. 截止到2010年6月6日,应变监测值为 $1.176E+07$,当监测值接近或达到临界失稳应变值 $1.33E+07$ 时,该中级地震可被适当的扰动触发.

3.2 邢台地震区

根据该区的历史地震目录,在1966年3月22日 $M_s 7.2$ 级地震发生前,未有 $M \geq 7.0$ 级的强震发生. 从该地震区累积 Benioff 应变随时间变化关系图3可知,1966年3月6~8日以 $M_s 6.8$ 级地震为标志的震群事件已使第一锁固段破裂完毕,第二锁固段膨胀点的事件是1966年3月22日的 $M_s 6.7$ 级地震事件,利用该事件可准确预测到 $M_s 7.2$ 级地震,第三锁固段以震群形式破裂,其结束的标志性事件是1967年3月27日的 $M_s 6.3$ 级事件($M_s 7.2$ 事

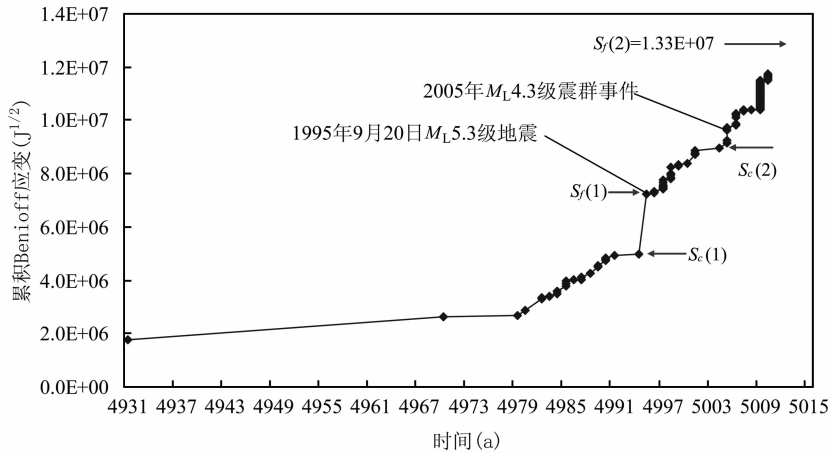


图 2 郯庐断裂带山东段地震区 1931. 7. 25~2010. 6. 6 间累积 Benioff 应变与时间关系
(横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 2 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 25 July 1772 to 6 June 2010 for the seismic zone in the Shandong section of Tanlu fracture zone
(The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

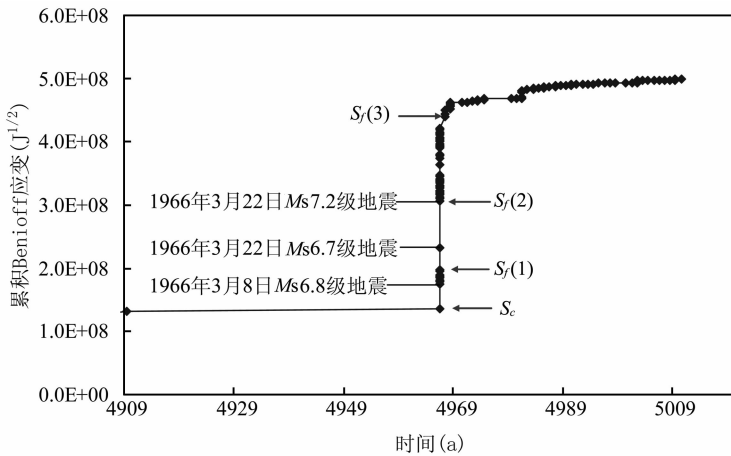


图 3 邢台地震区 777 年~2010. 5. 31 间累积 Benioff 应变与时间关系
(为使图件清晰, 1909 年以前的应变值作为初值. 横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 3 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 780 to 31 May 2010 for the Xingtai seismic zone

(The strain value prior to 1906 is regarded as an initial one for seeing a more clear figure.
The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

件后最大一次地震), 在 1967 年 3 月 27 日至 1968 年 1 月 7 日之间的事件可能为第三锁固段断裂之后的余震事件.

以 1968 年 1 月 7 日作为新一轮孕震周期的时间起点, 可对未来地震趋势进行预测. 从图 4 知, 经误差修正后, 根据 1973 年 M_s 5.3 级震群事件可预测到 1981 年 M_s 5.8 级地震, 且 M_s 5.8 级震群事件已使其对应的锁固段破裂完毕. 这意味着邢台大震

后余震的结束时间为 1968 年 1 月 7 日. 在 1981 年以后没有新的震群发生, 根据孕震断层多锁固段破裂理论方法, 暂时还无法对未来的强震作出预测. 但根据目前积累的能量, 可判断下一个锁固段膨胀点的标志性事件为 M_s 6.0 级地震震群.

比较我们已分析过的 100 多个大震实例, 邢台 M_s 7.2 级地震是一个特殊的地震实例. 一般在大震前的震群出现后, 经历几年乃至几十年或上百年, 后

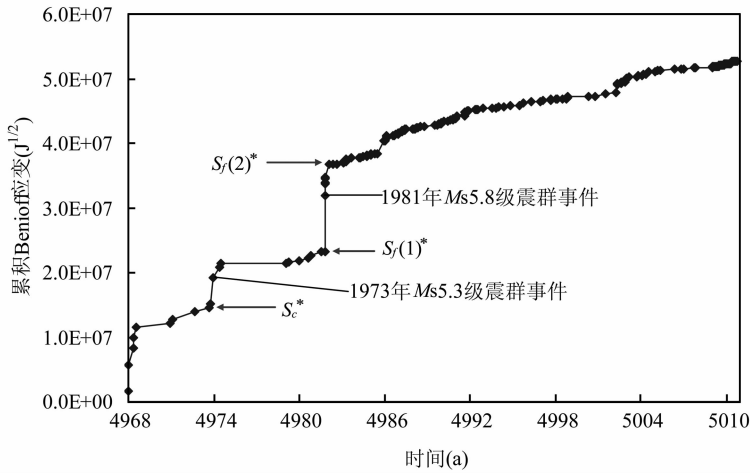


图 4 邢台地震区 1968. 1. 7~2010. 10. 7 间累积 Benioff 应变与时间关系
(横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份, 误差修正已被考虑。)

Fig. 4 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 7 January 1968 to 7 October 2010 for the Xingtai seismic zone.

(The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years. The error correction is also considered.)

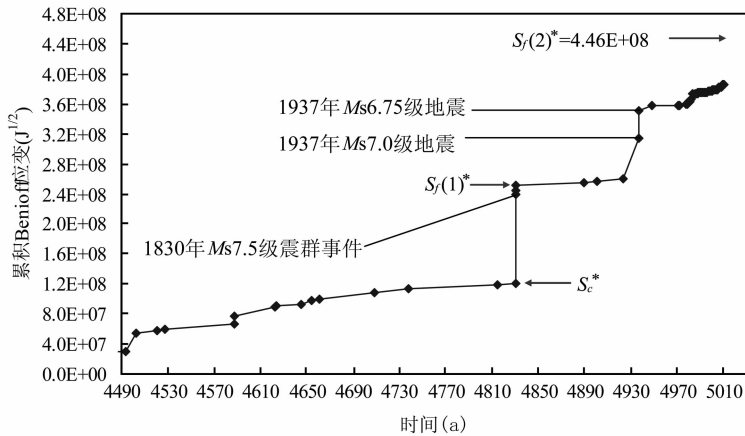


图 5 山东菏泽-河南濮阳地震区 334~2010. 6. 3 间累积 Benioff 应变与时间关系
(为使图件清晰, 1490 年以前的应变值作为初值. 横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份. 误差修正已被考虑)

Fig. 5 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 334 to 3 June 2010 for the Shandong-Heze and Henan-Puyang seismic zone.

(The strain value prior to 1490 is regarded as an initial one for seeing a more clear figure.

The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years. The error correction is also considered.)

续的大震才能发生. 邢台大地震与其它大震完全不同, 是一个在几天内多锁固段连续快速破裂的强震孕育实例, 值得重视其演化的特殊机制研究.

3.3 山东菏泽-河南濮阳地震区

在该地震区内曾先后发生了 1830 年磁县(北纬 36.4° , 东经 114.3°) $M_s 7.5$ 、1937 年菏泽(北纬 35.2° , 东经 115.3°) $M_s 7.0$ 级强震事件. 分析了这些强震事件的间隔周期、空间分布特征后, 我们怀疑在该孕震区内极有可能发生更大震级的强震事件, 其主

要理由如下:

(1) 如果 1830 年 $M_s 7.5$ 级地震是主震, 那么在时间间隔较短、空间距离较近的范围内, 不太可能再次发生 1937 年的 $M_s 7.0$ 事件.

(2) 在 1830 年 $M_s 7.5$ 事件发生后至 1937 年 $M_s 7.0$ 事件发生前, 从有文献记载的资料看, 仅发生了 5 次 $5.0 \sim 5.75$ 级地震, 如果 $M_s 7.5$ 事件与 $M_s 7.0$ 事件是各自独立主震事件, 则在 $M_s 7.5$ 主震结束后新一轮的地震周期内, 这 5 次不大于 6.0 级

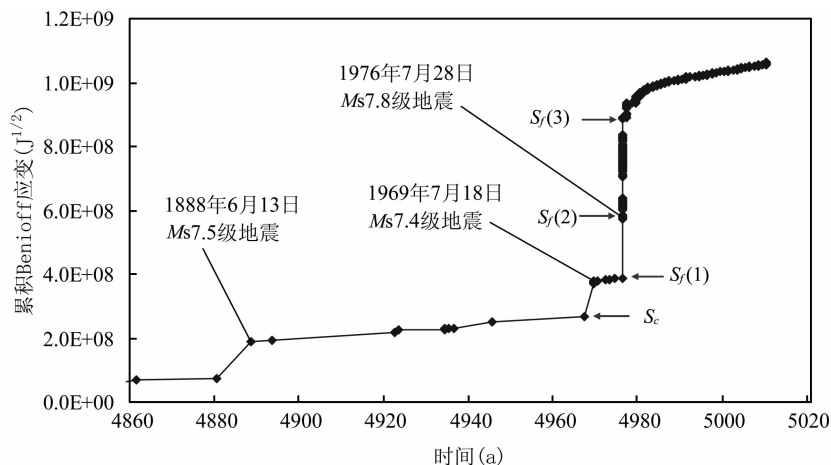


图 6 京津唐地震区 1730.9.30~2010.6.6 间累积 Benioff 应变与时间关系
(为使图件清晰,1860 年以前的应变值作为初值.横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 6 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 30 September 1730 to 6 June 2010 for the Beijing-Tianjin-Tangshan seismic zone.

(The strain value prior to 1860 is regarded as an initial one for seeing a more clear figure.
The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

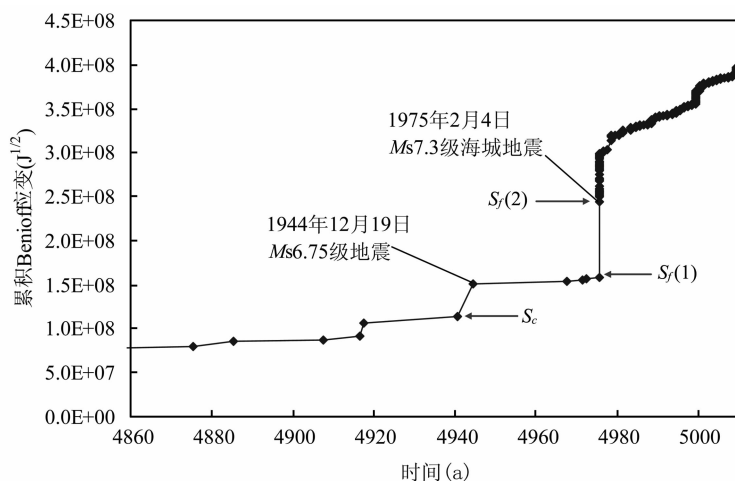


图 7 海城地震区 19 年-2010.6.5 之间累积 Benioff 应变与时间关系
(为使图件清晰,1860 年以前的应变值作为初值.横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 7 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 19 to 5 June 2010 for the Haicheng seismic zone.

(The strain value prior to 1860 is regarded as an initial one for seeing a more clear figure.
The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

的地震积累的能量不足以引发 $M_s7.0$ 主震事件. 这说明 $M_s7.5$ 事件为 $M_s7.0$ 事件的发生提供了部分能量, 才能使后者发震满足所需的能量条件. 从原理上来讲, 主震前积累的能量应基本等于主震本身和主震后余震释放的能量之和^[6], 否则会违反世人公认的能量守恒原理.

(3) 从图 1 看, 在磁县和菏泽两次大震之间, 存

在一个未发生过 5.0 级及更大强度地震的空区. 这说明在该孕震区内具有发生更大震级事件的地质构造条件.

以上推论是否正确, 本文将展开进一步的理论分析. 从图 5 知, 与汶川大震类似, $M_s7.5$ 级事件已使第一锁固段破裂完毕, 但 $M_s7.0$ 级事件对应着第二锁固段的临界破坏起点, 即第二锁固段的变形膨

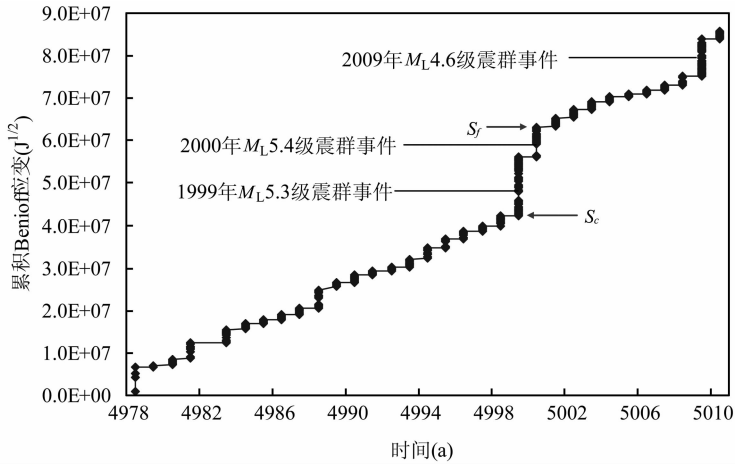


图 8 海城地震区 1978. 5. 18-2010. 6. 5 之间累积 Benioff 应变与时间关系
(横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 8 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 18 May 1978 to 5 June 2010 for the Haicheng seismic zone.
(The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

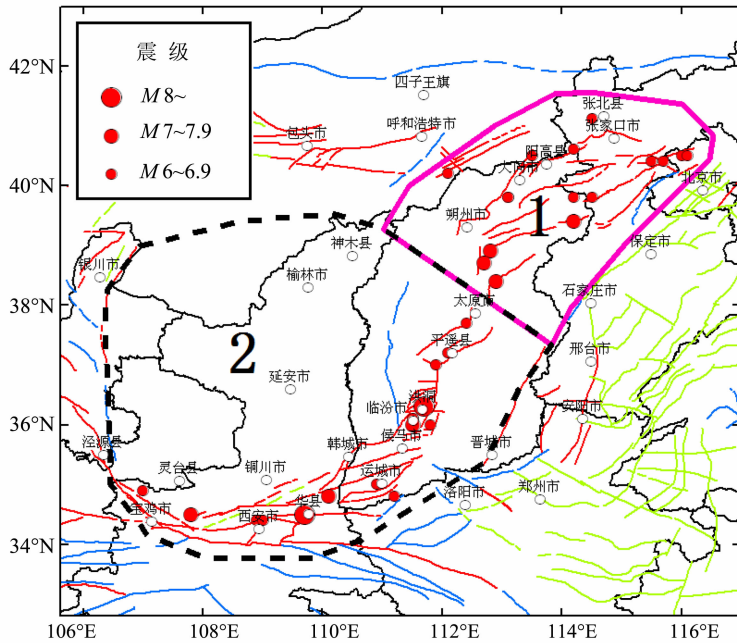


图 9 山西地堑系地震区的划分

(红圈表示研究区内公元前 780 年以来 $M \geq 6.0$ 级的事件, 红色线为晚更新世-全新世以来的活动断裂, 蓝色线为第四纪活动过但晚更新世以来活动情况不清的断裂, 闭合线为地震区)
地震区名称: 1-晋东北地震区; 2-晋西南地震区

Fig. 9 Divisions of seismic zones in Shanxi graben system, China

(The red circles, red lines, blue lines, and closed lines denote the earthquake events in the research zone with magnitude of more than 6.0 since 780 years BC, active fractures from late Pleistocene to Holocene, fractures which are active in the Quaternary period but whose activities are unclear since late Pleistocene, and seismic zones, respectively)

No. 1 : Shanxi northeast seismic zone; No. 2: Shanxi southwest seismic zone

胀点,由于其在加速破裂后还未到达峰值强度点,之后必有更大的事件发生.理论分析与上述推断完全一致.预测未来大地震的震级为7.6~7.7级;依据大事件出现的震中位置及地震空区位置,可推断未来大地震的震中位置在北纬35.4°,东经115°;震源深度为10~15km.截止到2010年6月3日,应变监测值为 $3.86E+08$,当监测值接近或达到临界失稳应变值 $4.46E+08$ 时,大震可被适当的扰动触发.

需要注意的是尽管目前监测值距临界值较远,但考虑到在1937年至1970年间,由于监测技术的原因,4.5级以下的地震目录缺失会使实际应变监测值偏低,实际监测值离临界值可能不会太远.因此,本文提供的临界应变值仅供参考.从图5看出,在1972年后地震活动性有增强的趋势,在主震发生前可能会发生多个5.0~6.0级左右的中间过程事件,建议有关部门加强该地区的地震活动性和其它宏观异常监测,尤其重视未来10年间的震情趋势判断,以做出科学决策.

3.4 京津唐地震区

在该地震区内曾先后发生了1548与1597年渤海两次 $M_s7.0$ 、1679年河北三河 $M_s8.0$ 、1888年渤海 $M_s7.5$ 、1969年渤海 $M_s7.4$ 、1976年唐山 $M_s7.8$ 级大地震.由于 $M_s8.0$ 级和 $M_s7.8$ 级地震间隔时间较远且震级相差不大,可认为这两次地震是在同一个孕震区内的两次独立主震事件.从图6知,1969年 $M_s7.4$ 事件是唐山 $M_s7.8$ 级地震在其锁固段膨胀点处的标志性事件,依据该事件可准确预测到唐山大地震.预测的 $s_f(2)$ 值恰好对应着 $M_s7.8$ 级地震发生后的应变值,表示第二锁固段已破裂完毕.预测的 $s_f(3)$ 值对应着 $M_s7.8$ 级地震后发生在1976年11月15日的 $M_s6.9$ 级强余震事件.之后到1981年底,地震震级不超过6.2级且地震活动性趋于平稳,可解释为第三锁固段破裂后的余震事件.由于在该地震区内的锁固段都已破裂完毕,在短期内不会发生 $M_s>6.0$ 级破坏性地震.

1982年至2010年间,该地震区内发生过1995年的 $M_L5.0$ 级和2006年 $M_L5.4$ 级中级事件,没有更大的事件或显著性震群出现.根据孕震断层多锁固段脆性破裂理论,虽暂时还无法对以后的大震进行预测,但根据1982~2010年间累积的能量可估算下一个锁固段膨胀点的标志性事件为 $M_s5.9$ 级地震震群.

3.5 海城地震区

3.5.1 海城 $M_s7.3$ 级地震孕震过程

根据孕震区域范围内Benioff应变计算结果(图7),预测的临界应变值为 $1.69E+08$,在临界点处的实际监测值为 $1.58E+08$,相差 $0.11E+08$,海城地震在1975年2月3日曾发生过 $M_s4.6$ 级小震群事件,若结合该显著性地震活动性异常和宏观地震前兆,当发现监测值接近临界值时,可作出临震预报,这样根据我们提出的理论方法,海城 $M_s7.3$ 级地震也可提前一天预报成功;预测的震级为7.1级.海城 $M_s7.3$ 级地震已使其对应的锁固段破裂完毕,其后为主震发生后的余震事件,余震结束的标志性事件为发生在1978年5月18日的 $M_s5.9$ 级地震.

从图7知,发生在1944年12月19日的辽宁丹东 $M_s6.75$ 级地震,是1975年2月4日海城 $M_s7.3$ 级地震对应的锁固段在其膨胀点处的标志性事件.从孕震区内有文献记载的地震活动性看,海城大地震至少已孕育了1956年,是能量长期累积导致的结果.但导致其发生的最直接原因是1944年的丹东地震事件,该6.75级地震是引发海城大地震的直接导火索.

3.5.2 未来地震趋势判断

以1978年5月18日的 $M_s5.9$ 级地震为标志事件作为余震结束时间,则可根据其后的地震活动性预测新的孕震周期内未来大震的四要素.由图8知,辽宁岫岩1999年 $M_L5.3$ 级震群和2000年 $M_L5.4$ 级震群已使第一锁固段破裂完毕,即第一锁固段以震群方式破裂.以后发生在2009年的 $M_L4.6$ 级震群事件能否作为第二锁固段在膨胀点处的标志性事件预测未来大震,现在还难以得出结论,原因是震群事件的震级太小,建议根据未来5~10年间的地震活动性监测作出进一步判断.若假设该震群事件可作为第二锁固段在膨胀点处的标志性事件,则预测的临界应变值为 $1.123E+08$,截止到2010年6月5日的应变监测值为 $8.563E+07$,当前监测值离临界值很远,有充分的时间进行地震活动性监测,并作出进一步的分析判断.

4 山西地堑系未来大地震预测分析

根据上述方法,给出了山西地堑系地震孕震区域分区图,如图9所示.

4.1 晋东北地震区

作者已在文献^[8]中对晋东北地震区的地震活动性进行了初步分析,本文是依据地震地质资料进行的更为准确的分析结果.

在该区内曾先后发生了512年 $M_s7.5$ 、1038年

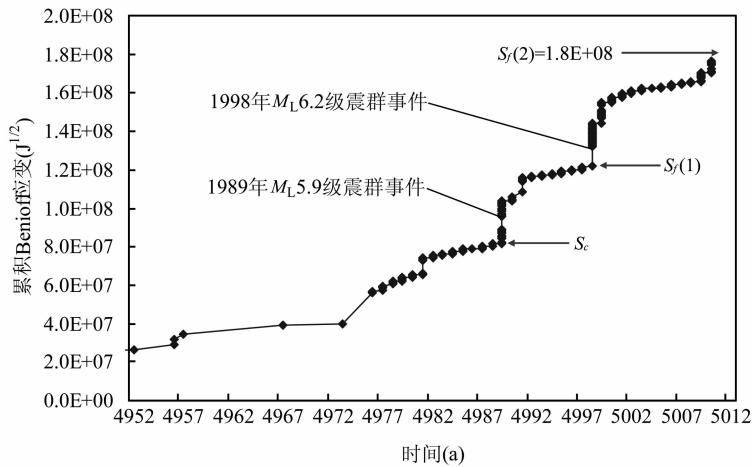


图 10 晋东北地震区 1772. 3. 1~2010. 10. 9 间累积 Benioff 应变与时间关系
(为使图件清晰,1952 年以前的应变值作为初值,横坐标对应的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 10 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 1 March 1772 to 9 October 2010 for the Shanxi northeast seismic zone.
(The strain value prior to 1952 is regarded as a initial one for seeing a more clear figure.
The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

M_s 7.25、1626 年 M_s 7.0、1683 年 M_s 7.0、1720 年 M_s 6.75、1976 年 4 月 5 日 M_s 6.2 和 1998 年 1 月 10 日张北 M_L 6.2 级强震事件。

从地震区(粉红色实线区域)的 Benioff 应变分析结果(图 10),可看出依据 1989 年阳高 M_L 5.9 级震群事件,可准确预测到发生在 1998 年 1 月 10 日的张北 M_L 6.2 级地震.这说明确定的该地震区孕震时空范围是合适的.预测未来大地震的震级为 6.8 级;依据 1989 年以来震群出现的位置及地震空区位置,可推断未来大地震的震中位置在北纬 40.3° ,东经 114.2° ;震源深度约为 $8\sim 12\text{km}$.截止到 2010 年 10 月 9 日,应变监测值为 $1.76\text{E}+08$,当监测值接近或达到临界失稳应变值 $1.8\text{E}+08$ 时,大震可被适当的扰动触发.目前的应变差值相当于一个 5.6 级的地震事件。

由于目前监测值距临界值很近,现在可作出短期预报.如果未来在阳高—张北间发生一个 5.0 级左右的事件时,结合其它前兆异常判断,可作出临震预报。

4.2 晋西南地震区

在该区内曾先后发生了公元前 780 年 M_s 7.0、1303 年山西洪洞 M_s 8.0、1501 年 M_s 7.0、1556 年陕西华县(北纬 34.5° ,东经 109.7°) M_s 8.25 和 1695 年山西临汾(北纬 36° ,东经 111.5°) M_s 7.75 级强震事件.分析了这些强震事件的间隔周期、空间分布特征

后,我们怀疑在该孕震区内极有可能发生更大震级的强震事件,其主要理由如下:

(1)如果 1556 年 M_s 8.25 级地震是主震,那么在时间间隔较短、空间距离较近的范围内,不太可能再次发生 1695 年的 M_s 7.75 事件。

(2)在 1556~1695 年,从有文献记载的资料看,仅发生了 4 次 6.0~6.75 级地震,如果 M_s 8.25 事件与 M_s 7.75 事件是各自独立主震事件,则在 M_s 8.25 级主震结束后新一轮的地震周期内,这 4 次不小于 6.0 级的地震积累的能量不足以引发 M_s 7.75 级主震事件.这说明 M_s 8.25 事件为 M_s 7.75 事件的发生提供了部分能量,才能使后者发震满足所需的能量条件.从原理上来讲,主震前积累的能量应基本等于主震本身和主震后余震释放的能量之和^[6],否则会违反世人公认的能量守恒原理。

(3)1695 年 M_s 7.75 事件发生后,在 1704 年和 1815 年曾分别发生过 M_s 6.0 级和 M_s 6.75 级地震.从历史地震目录判定,在 1695 年后不可能漏记大于 5.0 级的地震事件.这意味着 M_s 7.75 事件发生后没有强“余震”发生,可初步判定 M_s 7.75 事件也不是主震.该 M_s 7.75 事件极有可能是另一个锁固段在其膨胀点处的标志性事件,其后的两次强震是该锁固段膨胀点至峰值强度点之间的中间过程事件。

(4)从图 11 看,在运城市 and 侯马市之间,存在一个未发生过 6.0 级及更大强度地震的空区.在该区

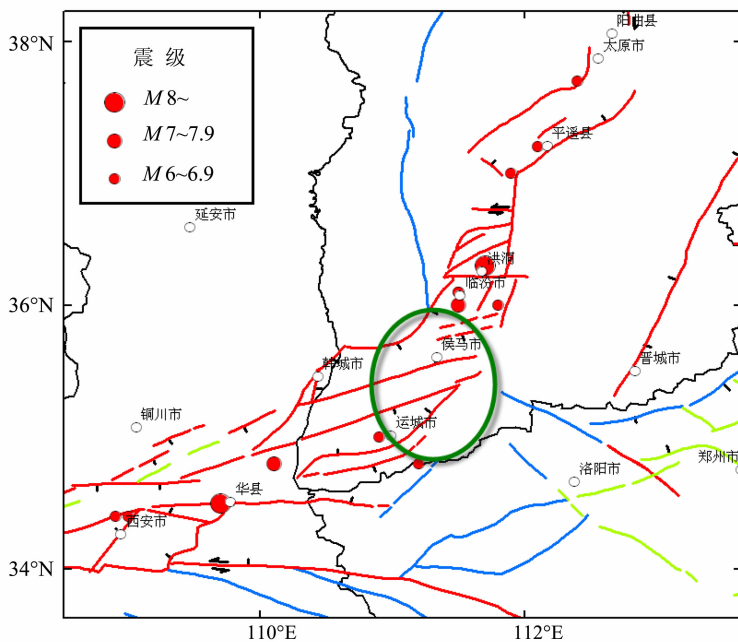


图 11 山西地堑系晋西南地震地质图

(绿色椭圆圈为未发生过 $M \geq 6.0$ 级地震的地震空区)

Fig. 11 A seismicogeological map in the Shanxi southwest seismic zone

(The green ellipse denote the seismic gap where the earthquakes with a magnitude of $M \geq 6.0$ have not occurred yet.)

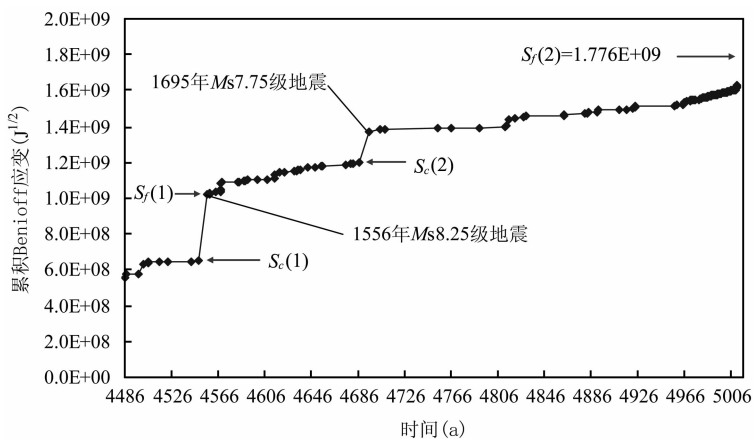


图 12 晋西南地震区公元前 780 年~2010. 6. 6 间累积 Benioff 应变与时间关系

(为使图件清晰, 1486 年以前的应变值作为初值. 横坐标对应的的时间减去 3000 年为实际年份)

Fig. 12 Temporal distribution of cumulative Benioff strain in the period from 780 years BC

to 6 June 2010 for the Shanxi southwest seismic zone.

(The strain value prior to 1486 is regarded as an initial one for seeing a more clear figure.

The real time is the value on the horizontal axis minus 3000 years)

内断裂带较发育, 但未有强震发生, 而在其外围则强震频发. 这说明在该孕震区内具有发生更大震级事件的地质构造条件.

以上推论是否正确, 本文将展开进一步的理论

分析. 从图 12 知, 与汶川大震类似, $M_s 8.25$ 级事件已使第一锁固段破裂完毕, 但 $M_s 7.75$ 级事件对应着第二锁固段的临界破坏起点, 即第二锁固段的变形膨胀点, 由于其在加速破裂后还未到达峰值强度

点,之后必有更大的事件发生.理论分析与上述推断一致.预测未来大地震的震级为 8.5 级;依据大事件出现的震中位置及地震空区位置,可推断未来大地震的震中位置在北纬 35.5° ,东经 111.4° ;震源深度为 8~18km.截止到 2010 年 6 月 6 日,应变监测值为 $1.629E+09$,当监测值接近或达到临界失稳应变值 $1.776E+09$ 时,大震可被适当的扰动触发.目前的应变差值相当于一个 7.7 级的地震事件.

需要注意的是尽管目前监测值距临界值较远,但考虑到在 1695 年至 1970 年间,由于监测技术的原因,4.5 级以下的地震目录缺失会使实际应变监测值偏低,实际监测值离临界值可能不会太远.因此,本文提供的临界应变值仅供参考.从图 12 看出,在 1966 年后地震活动性有增强的趋势,在主震发生前可能会发生多个 6.0 级左右的中间过程事件,建议有关部门加强该地区的地震活动性和其它宏观异常监测,尤其重视未来 15 年间的震情趋势判断,以做出科学决策.

5 结 论

(1)本文在对山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区地震区合理划分的基础上,依据孕震断层多锁固段脆性破裂理论,分析了上述地区未来地震危险性,给出了有中强地震发生的地震区未来中强震的震级、地点、临界应变值(对应发震时间)、震源深度四要素预测结果.据此地震部门可作出地震烈度分布图,以制定相应的防震与抗震措施.

(2)导致海城 $M_s 7.3$ 级地震发生的最直接原因是 1944 年的丹东 $M_s 6.75$ 级地震事件,该 6.75 级地震是引发海城大地震的直接导火索.

致 谢 感谢刘光鼎院士、滕吉文院士、朱日祥院士、吴福元研究员、常旭研究员对第一作者的鼓励,感谢王思敬院士、张倬元教授和第一作者的有益讨论.

参 考 文 献 (References):

- [1] 徐锡伟,董瑞树,张崇立,等.山西地堑系强震的活动规律和危险区段的研究[J].地震地质,1992,14(4):305~316.
Xu X W, Dong R S, Zhang C L, *et al.* Study on strong earthquake

- activity and risk areas in the Shanxi graben system[J]. Seismology and Geology (in Chinese), 1992, 14(4): 305~316.
- [2] 刘武英,李龙海.唐山地震与海城地震之共性特征及有关问题的讨论[J].地震研究,1995,18(2):161~167.
Liu W Y, Li L H, Common features of 1976's Tangshan earthquake and 1975's Haicheng earthquake and discussion on some questions [J]. Journal of Seismological Research (in Chinese), 1995, 18(2): 161~167.
- [3] Lei X. How do asperities fracture? an experimental study of unbroken asperities[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213: 347~359.
- [4] 秦四清,徐锡伟,胡平,等.孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J].地球物理学报,2010,53(4):1001~1014.
Qin S Q, Xu X W, Hu P, *et al.* Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2010, 53(4): 1001~1014.
- [5] 秦四清,王媛媛,马平.崩滑灾害临界位移演化的指数律[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):873~880.
Qin S Q, Wang Y Y, Ma P. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 837~880.
- [6] 秦四清,薛雷,王媛媛,等.对孕震断层多锁固段脆性破裂理论的进一步验证及有关科学问题的讨论[J].地球物理学进展,2010,25(3):749~758.
Qin S Q, Xue L, Wang Y Y, *et al.* Further verifications on the brittle failure theory of multiple locked patches along a seismogenic fault system and discussions on some science issues[J]. Progress in Geophysic (in Chinese), 2010, 25(3): 749~758.
- [7] 秦四清,薛雷,黄鑫,等.青海、甘肃与宁夏地区未来大地震预测分析[J].地球物理学进展,2010,25(4):1168~1174.
Qin S Q, Xue L, Huang X, *et al.* A forward prediction of strong earthquakes in Qinhai, Gansu and Ningxia regions[J]. Progress in Geophysic (in Chinese), 2010, 25(4): 1168~1174.
- [8] 秦四清,徐锡伟,薛雷.运用孕震断层多锁固段脆性破裂理论探讨大同-阳高-张北地区未来地震活动性[J].工程地质学报,2010,18(2):190~191.
Qin S Q, Xu X W, Xue L. Discussion on the future seismicity in Datong-Yanggao-Zhangbei area using the brittle failure theory of multiple locked patches along a seismogenic fault system [J]. Journal of Engineering Geology (in Chinese), 2010, 18(2): 190~191.