

唐山 4.8 级地震前后视应力变化研究^①

李 赫¹, 刘双庆¹, 刘文兵^{1,2}, 王熠熙¹, 尚先旗¹, 谭毅培¹, 胡培元¹, 高 也¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 2012年5月28日唐山发生 $M_s 4.8$ 地震, 之后宝坻发生 $M_s 4.0$ 和 $M_s 3.5$ 地震, 这三次地震是近十年来首都圈地区较显著的事件。本文利用首都圈数字化地震台网2011年1月至2013年6月唐山地区 $M_L \geq 2.5$ 地震的宽频带数字地震波资料计算地震视应力。首先采用傅里叶变换获得地震观测谱, 扣除仪器响应后进行非弹性衰减和几何扩散校正, 几何扩散采用 Gail 提出的震中距分段模型, 用随频率变化的 Q 值来表示非弹性衰减; 然后在 Brune 圆盘模型下利用遗传算法求出一组 f_C (拐角频率) 和 Ω_0 (零频极限), 使得理论震源谱和校正的观测谱残差最小; 通过零频极限求得地震矩 M_0 , 通过有限仪器带宽补偿并加上积分已校正的观测谱求得辐射能量 E_s ; 最后即可求出视应力。计算结果表明: $M_s 4.8$ 地震视应力表现出震前趋势上升, 震时达到峰值, 震后趋势下降的变化特点, 可以较清晰地反映出区域应力场的演化过程, 故可作为地震趋势判断的依据之一; $M_s 4.8$ 地震前后地震视应力与震级表现出一定的正相关, 随着震级增大视应力也增大, 但 $M_s 4.8$ 地震前视应力值总体上大于震后视应力。

关键词: 唐山 4.8 级地震; 视应力; 数字地震台网; 辐射能量; 地震矩

中图分类号: P315.727

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1019-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1019

Variations in Apparent Stress Prior to and after the Tangshan $M_s 4.8$ Earthquake

LI He¹, LIU Shuang-qing¹, LIU Wen-bing^{1,2}, WANG Yi-xi¹,

SHANG Xian-qi¹, TAN Yi-pei¹, HU Pei-yuan¹, GAO Ye¹

(1. Earthquake Administration of Tianjin, Tianjin 300201, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: On May 28, 2012, an earthquake of $M_s 4.8$ occurred in Tangshan, and was followed by earthquakes of $M_s 4.0$ and $M_s 3.5$ in Baodi. Data from this series of earthquakes (Tangshan $M_s 4.8$, and the Baodi $M_s 4.0$ and $M_s 3.5$ earthquake series, from January 2011 to June 2013), recorded by the Digital Seismic Network in Tianjin, were used to calculate the apparent stress in this region. First, the multi-window FFT was used to obtain the observed spectrum, and then after extracting the instrument response it was corrected for geometry spreading and attenuation. For geometry spreading correction, Gail's three section geometry spreading model was used. The frequency-dependent Q value was used for inelastic attenuation correction. A genetic algorithm was applied to determine the pair of f_C and Ω_0 of Brune's ω^2 model, which yields the least deviation between the theoretical ω^2 model and the corrected spectral. The seismic moment (M_0) was calculated from Ω_0 , and ES was obtained by integrating the corrected spectral with limited bandwidth compensa-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 地震科技星火计划(XH14002Y); 2014年度震情跟踪专项青年工作任务(2014020306); 天津市地震局局内课题(20131008)

作者简介: 李 赫(1987—), 男, 天津人, 助理工程师, 工学学士, 主要从事地震观测及预测的研究. E-mail: lihe200888@sina.com

tion. Apparent stress was calculated from M_0 and ES. Furthermore, the time distribution of apparent stress and the average value of apparent stress are presented. The results are as follows: First, a high apparent stress appeared before the $M_s 4.8$ earthquake and its peak value appeared at the mainshock; then, the apparent stress decreased after the $M_s 4.8$ earthquake. The size of the apparent stress accurately reflects the state of the stress field in the hypocenter region. Therefore, it can be used as the basis for determining the seismic trend. Second, the apparent stress before and after the $M_s 4.8$ earthquake is generally positively correlated. The apparent stress increases with magnitude, but, on the whole, the apparent stress value is greater before the $M_s 4.8$ earthquake than after.

Key words: Tangshan $M_s 4.8$ earthquake; apparent stress; digital seismic network; radiated energy; seismic moment

0 引言

2012年5月28日河北唐山发生了 $M_s 4.8$ 地震。该地震是1976年唐山7.8级地震后,自1991年5月30日 $M_s 5.1$ 和1995年10月6日 $M_s 5.0$ 地震之后唐山老震区发生的最大地震事件。该地震发生后不久,天津宝坻在2012年6月18日和8月26日分别发生了 $M_s 4.0$ 和 $M_s 3.5$ 两次地震。值得注意的是,自2003年4月23日宁河 $M_s 3.6$ 、24日宁河 $M_s 3.8$ 和12月11日塘沽 $M_s 3.5$ 以来,天津地区近十年没有发生过 $M_s 3.5$ 以上地震。由此可见唐山及邻区的地震活动水平有所增强。对这三次显著地震的发生过程进行深入研究,对唐山老震区及邻区的地震监测预报工作将有一定参考意义。

用地震资料研究东亚大陆的地球动力学模型,已经在应力方向、应力状态(压缩状态、拉张状态或剪切状态)、应力来源等方面得到很多重要的结果^[1-2]。表征应力大小常用方法是视应力,其定义为^[3-4]

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式中, μ 为地球介质的刚性系数, 取常数 30 GPa^[5]; E_s 为地震波辐射能量; M_0 为地震矩。计算得到的视应力可作为当地绝对应力水平的一种估计^[6]。

在传统地震学中, E_s 和 M_0 是从震级出发通过经验公式换算得到, 计算结果与震级并不相互独立, 不能很好体现其应有的物理意义。Choy^[5]利用美国国家地震信息中心(NEIC)的宽频带辐射能量测定结果和哈佛矩心矩张量(CMT)测定结果讨论了全球地震视应力的分布; Newman^[7]将视应力作为海啸地震的一个判据; Pulido^[8]根据震源破裂过程的数字地震成像的结果, 通过地震能量和视应力的时间变化估算出地震破裂性质的动力学参数; 吴忠

良^[9]研究了中国西部地震视应力的空间分布, 给出了中国大陆地震视应力分布; 刘红桂^[10]计算了云南地区四个地震序列, 其平均视应力值为 0.8 MPa, 还研究发现云南地区中小地震视应力超过 0.9 MPa, 未来该地区将可能发生中强地震^[6]; 秦嘉政^[11]详细研究了云南地区两次余震序列和中小地震的地震视应力, 在空间分布上存在明显的非均匀性, 中小地震活动频繁地区与高视应力集中区相关。

唐山地区位于四条断裂带围成的菱形块体中, 它们分别是东面滦县乐亭断裂带、北面丰台野鸡坨断裂带。南面宁河昌黎断裂带和西面蓟运河断裂带。历史上该块体内曾发生过多次大地震。唐山和宝坻发生近些年来的最大地震, 说明地震活动性有所增强, 所以对该区进行视应力研究是很有必要的。本文计算了2011年1月至2013年6月唐山地区 $M_L \geq 2.5$ 及宝坻 $M_s 4.0$ 和 $M_s 3.5$ 地震视应力, 以期对唐山及邻区的地震预测提供依据。

1 唐山 $M_s 4.8$ 地震基本情况

唐山 $M_s 4.8$ 地震发生在河北省唐山市与滦县交界地区($N39.78^\circ, E118.475^\circ$), 震源深度 6 km。本次地震发生在唐山断裂带附近, 与 1976 年唐山 7.8 级地震震中相距约 28 km。

依据天津地震台网记录的地震波形, 采用 P 波初动^[12-13]求解得到的震源机制参数分别为: 节面 1: 走向 148° , 倾角 70° , 滑动角 -15° ; 节面 2: 走向 244° , 倾角 76° , 滑动角 -159° ; P 轴: 方位 107° , 倾角 25° ; T 轴: 方位 15° , 倾角 4° ; B 轴: 方位 276° , 倾角 65° 。震源机制类型是以走滑为主并带有正断分量, 与 1976 年唐山大地震基本相同。

截止到 2012 年 6 月 7 日, 河北省地震台网共记录到 78 次余震, 主要发生在 5 月 28 日, 其中 $M_{L0.0}$

~0.9地震21次, M_L 1.0~1.9地震47次, M_L 2.0~2.9地震9次, M_L 3.0~3.9地震1次。最大余震为 M_L 3.7, 发生在5月29日, 主震与最大余震震级差 $\Delta M=1.4$ 。该序列为主余型(图1)。从图2可看出唐山 M_S 4.8主破裂面为NE向, 与1976年唐山大地震破裂方向基本一致。

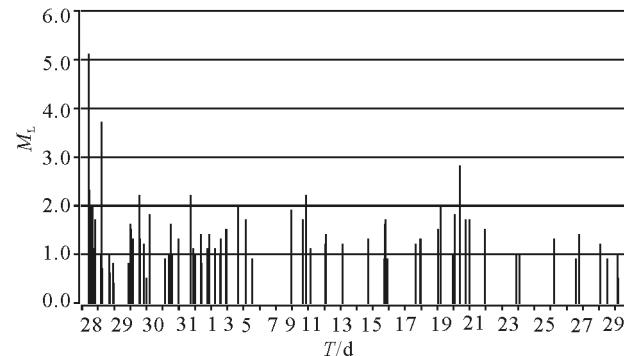


图1 唐山 M_S 4.8 地震序列图

Fig.1 Diagram of the Tangshan M_S 4.8 earthquake sequence

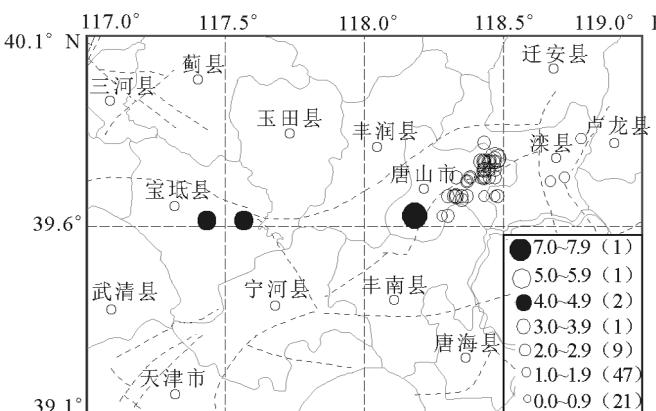


图2 唐山 M_S 4.8 地震序列震中分布图

Fig.2 Distribution of the epicenters of M_S 4.8 eartquake sequence in Tangshan

2 资料

首都圈作为全国政治经济中心, 其数字化地震台站密度属全国最高水平, 共有107个测震台站(图3)。2008年首都圈地震台网的监测能力已达到 M_L 2.0, 重点监视防御区且人口密集城市可达到 M_L 1.5^[14]。

首都圈地区测震仪器包括59台短周期地震仪, 观测频带为1~40 Hz; 43台宽频带地震仪, 观测频带为20 s~40 Hz; 5台甚宽频带地震仪, 观测频带为120 s~50 Hz^[15]。仪器性能状态良好。

选取首都圈数字化地震台网监测到的2011年1月至2013年6月唐山地区 $M_L \geq 2.5$ 和宝坻 M_L

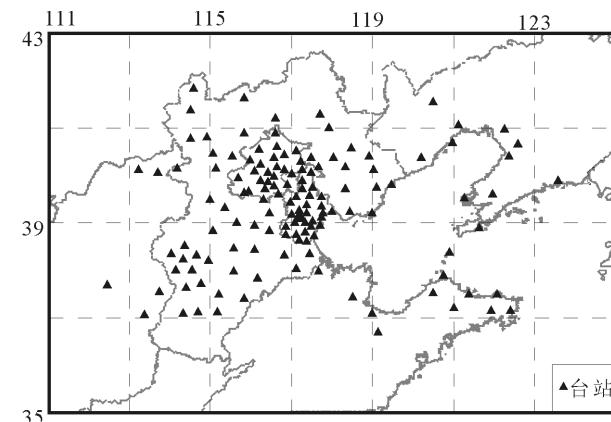


图3 首都圈数字地震遥测台站分布图

Fig.3 Distribution of digital seismic telemetry stations in capital circle

4.5和 M_L 4.0 地震波形。地震事件选取原则:①综合考虑台网监控能力、波形数据信噪比及破裂尺度的影响, 选取了震中距为0~200 km 台站记录到的波形数据。②由于小震高频成分较多, 短周期仪器响应带宽有限会丢失较多信息, 因此采用宽频带地震仪记录的 $M_L \geq 2.5$ 的地震事件。③为了降低震源辐射方向和台站场地响应的影响, 选取信噪比至少为2, 且5个以上台站记录的波形数据。

3 计算方法

3.1 傅里叶变换

为了获得更稳定计算结果, 在傅立叶变换时使用延迟窗技术。采用窗长为256采样点, 步长为128采样点, 来截取S波窗若干个数据段, 对每段数据开始和结尾5%加入汉宁窗, 使用傅里叶变换, 由式(2)^[16-17]计算出傅立叶谱 $a(f)$ 。

$$a(f) = 2\pi f \left\{ \left[\sum_{i=1}^n v_i^2(f) \right] \cdot T / (n \cdot t) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $v_i(f)$ 为第 i 段 FFT 结果; T 为 S 波窗长; n 为数据段个数; t 为窗长。最后由式(3)计算出傅立叶谱 $A(f)$:

$$A(f) = \sqrt{a(f)^2 - N(f)^2} \quad (3)$$

式中, $N(f)$ 为噪声谱, 取P波前256点进行傅立叶变换得到噪声谱 $N(f)$ (变换结果乘以系数 n , 相当于 n 个数据段噪声的总和)。

3.2 观测谱校正

为了尽量减少场地响应、几何扩散和非弹性衰减带来的影响, 本文采用Gail^[18]提出的震中距分段几何模型, 由下式计算震源谱:

$$(1) R < R_{01}$$

$$[\lg A_{io}(f)]_j = \lg A_{ij}(f) + b_1 \lg R_{ij} + c(f) R_{ij} - \lg S_j(f) \quad (4)$$

$$(2) R_{01} < R < R_{02}$$

$$[\lg A_{io}(f)]_j = \lg A_{ij}(f) + b_1 \lg R_{01} + b_2 \lg(R_{ij}/R_{01}) + c(f) R_{ij} - \lg S_j(f) \quad (5)$$

$$(3) R_{02} < R$$

$$[\lg A_{io}(f)]_j = \lg A_{ij}(f) + b_1 \lg R_{01} + b_2 \lg(R_{02}/R_{01}) + b_3 \lg(R_{ij}/R_{02}) + c(f) R_{ij} - \lg S_j(f) \quad (6)$$

$$c(f) = \frac{\pi f \lg(e)}{Q(f) \cdot \beta} \quad (7)$$

式中, R 为台站与震中的距离; $S(f)$ 为场地响应, 场地响应比较复杂, 粗略取为 1^[19-21]; f 为频率; $R_{01} = 60 \text{ km}$, $R_{02} = 100 \text{ km}$, $b_1 = 1$, $b_2 = 0$, $b_3 = 0.5$; β 为 S 波速度; Q 为非弹性衰减系数, 随频率变化, 因此取 $Q(f) = 420f^{0.38}$ ^[22]; i 表示地震事件; j 表示离散频点。由每个地震事件的单台震源谱, 可求出多个台站平均震源谱 $[\lg A_o(f)]$ 。

3.3 通过遗传算法获取 Ω_0 和 f_c

在 Brune 圆盘模型下, 震源位移谱为^[23]

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left[\frac{f}{f_c} \right]^2} \quad (8)$$

式中, Ω_0 为零频极限; f_c 为拐角频率。由速度型地震记录, 可得到速度震源谱, 它们之间的转换公式为

$$D(f) = V(f)/2\pi f \quad (9)$$

式中, $V(f)$ 为速度震源谱。

最后, 通过遗传算法拟合出一组 Ω_0 和 f_c , 使这组 Ω_0 和 f_c 的理论震源谱和平均震源谱残差最小, 残差计算式为^[24]

$$\epsilon = \sum_{j=1}^n \frac{[\text{teo}(f)_j - A(f)_j]^2}{\sqrt{[\text{teo}(f)_j][A(f)_j]}} \quad (10)$$

即可求出地震矩 M_0 :

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0}{R_{\theta_\varphi}} \quad (11)$$

式中, β 为 S 波速度, 取 3.5 km/s; R_{θ_φ} 为震源辐射图形因子, 取为 $\sqrt{2/5}$; ρ 为介质密度, 取 2 700 kg/m³。

3.4 地震辐射能量和视应力

根据积分震源速度谱可得出辐射能量, 计算公式为^[25]

$$E_s = 8\pi\rho\beta \int V(f)^2 df \quad (12)$$

因为小地震包含较多高频成分, 计算 E_s 中高频成分所占成分较多; 地震仪器的带宽有限, 所以求得的辐射能量会被明显低估。为了减小这种影响,

本研究采用了 Ide^[6] 提出的 Brune 圆盘模型对高频成分进行补偿。即

$$F(f, f_0) = (-f/f_0) / [1 + (f/f_0)]^2 + \arctan(f/f_0) \\ R(f_m, f_0) = (2/\pi) F(f_m, f_0) \quad (13)$$

式中, $R(f_m, f_0)$ 是积分上限为 f_m 、拐角频率为 f_0 的频谱积分得到的能量和真实能量的比值。

为了对辐射能量进行校正需利用拐角频率, 即拐角频率越大相应校正量就越大, 为了能够包络 90% 的辐射能量, 积分上限应高于拐角频率的 10 倍^[27]。最后通过式(1)求得视应力。

4 计算结果及分析

(1) 视应力变化过程分析

由图 4 和图 5 可看出, 从 2011 年初开始视应力处于波动上升阶段, 在 $M_s 4.8$ 地震前地震视应力出现一个明显高值, 随后发生 $M_s 4.8$ 地震, 视应力达到峰值, 为 5.63 MPa, 相比较前后地震, 其视应力远高于其它地震。此后宝坻发生 $M_L 4.5$ 和 $M_L 4.0$ 地震, 震前都存在高值异常, 说明应力处于较高水平。之后, 除了一个视应力值相对较高, 为 1.63 MPa, 总体趋势表现为下降, 恢复到震前水平。这一变化说明, 在主震前期, 应力逐渐积累, 当应力累积到一定水平, 主破裂发生, 部分能量得到释放, 应力水平降低, 回复平稳状态。这一结果与滑动弱化模型^[28] 所描述的过程相一致。

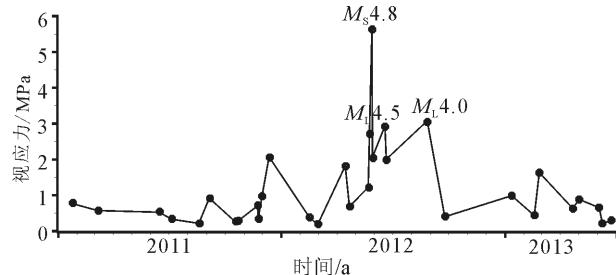


图 4 视应力数值变化曲线

Fig.4 The graph of apparent stress change

(2) 视应力与震级关系

从图 6 可看出, 地震视应力与震级表现出一定的正相关, 随着震级增大视应力也增大, 但 $M_s 4.8$ 地震前视应力值总体上大于震后视应力, 与李芳^[29]、程万正^[30]、刘红桂^[10]、王琼^[31]、吴晶^[32]和王卫东^[33]的观点基本一致。

(3) 视应力与震级再分析

易桂喜等^[34] 经过研究认为视应力与震级在一

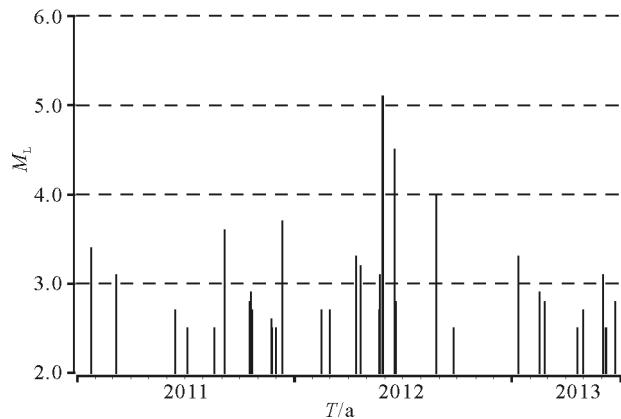
图5 唐山及邻区 M_L 2.5 以上地震 M -T 图

Fig.5 Magnitude-time diagram above M_L 2.5 in Tangshan and adjacent regions

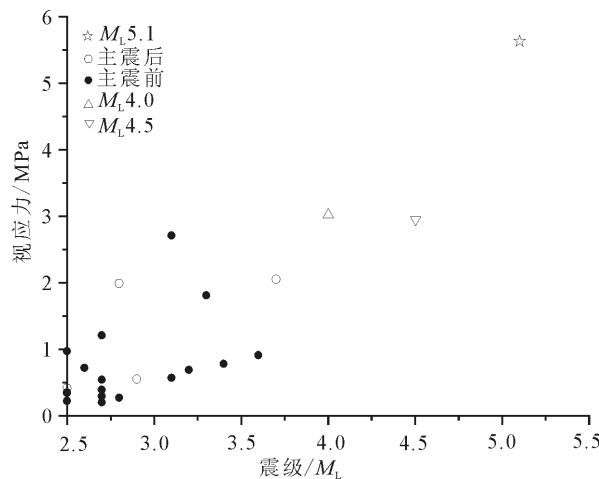


图6 视应力与震级关系图

Fig.6 The curve of apparent stress with the magnitude of change

定条件下存在相关性。具体分析原则为:震级相当时,视应力值相对高的震源区应力水平高;视应力值相等时,震级较低的震源区应力水平高。由图4、图5和图6可见, M_s 4.8 地震前 M_L 3.3、 M_L 2.7 和 M_L 3.1 地震视应力分别为 1.81 MPa、1.21 MPa 和 2.71 MPa。与相同或相近震级视应力作比较,发现上述三个地震视应力明显较大,说明该区应力已积累到较高水平。 M_s 4.8 地震后,最大余震 M_L 3.7 和 M_L 2.8 地震视应力分别为 2.05 MPa 和 1.99 MPa。与相同震级视应力相比,其地震视应力值仍较大,说明该区应力仍处于较高水平。随后宝坻发生 M_L 4.5 和 M_L 4.0 地震。

5 结论和讨论

(1) 在传统地震学中,求解地震矩 M_0 和地震波辐射能量 E_s 时,一般使用震级换算方法,但是求

得的计算结果不相对独立,导致视应力计算结果可信度较低。本文为解决上述计算结果不独立的问题,在计算方法上使用遗传算法拟合最优零频极限和拐角频率、并补偿高频成分等;在数据资料上采用了宽频带数字地震波形资料,从而提高了计算结果的可信度。

(2) 目前国内关于视应力研究,震级下限为 M_s 5.0,研究区域多在中西部。本文研究区域为唐山及周边,震级为 M_s 4.8。所以本文采用首都圈数字地震资料得到的高精度视应力结果,是对视应力研究的一种补充。

(3) 通过对唐山地区地震视应力的计算,发现唐山 M_s 4.8 地震前后,及宝坻 M_L 4.5 和 M_L 4.0 地震之前,视应力有震前趋势上升—震时达到峰值—震后趋势下降的变化过程,与滑动弱化模型基本一致。视应力能清晰地反映出区域应力场的演化过程,故可作为地震趋势判断的依据。

(4) 通过计算得到唐山地区平均视应力为 1.01 MPa,与吴忠良^[9]的观点基本一致。

(5) 研究表明^[34-36],震级与地震视应力的相关性存在较明显的地区差异。为了消除震级与视应力的相关性,本文从视应力与震级曲线分析。遵从在相同和相近震级下,比较视应力数值大小;在相等视应力数值下,比较震级大小的原则。即可判断出震源区应力状态。

唐山老震区地质构造复杂,且中强震多发,如何准确判别当前地震形势是该区地震工作者的当务之急。近年来利用视应力研究地震活动水平的成果很多,但唐山地区视应力方面的研究结果较少。本文结果表明,将视应力方法应用于唐山地区的地震活动研究具有一定的实际意义,下一步应对该地区进行更深入研究,以期能够提供更准确的预测意见。

致谢:本文得到杨志高博士的软件支持,再此深表感谢。

参考文献(References)

- [1] 环文林,时振梁,鄢家全,等.中国及邻区现代构造变形特征[J].地震学报,1979,1(2):109-120
HUAN Wen-lin, SHI Zhen-liang, YAN Jia-quan, et al. Characteristics of the Recent Tectonic Deformations of China and Its Vicinity[J]. Acta Seismologica Sinica, 1979, 1(2): 109-120. (in Chinese)
- [2] Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. Tectonic Stress Field of China Inferred from a Large Number of Small Earthquakes[J]. J Geophys Res, 1992, 97: 11867-11877.

- [3] Wyss M, Brune J N. Seismic Moment, Stress and Source Dimensions for Earthquakes in the California Nevada Region[J]. *J Geophys Res*, 1968, 3: 4681-4694.
- [4] Wyss M. Stress Estimates for South American Shallow and Deep Earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 1970, 75(8): 1529-1544.
- [5] Choy G L, Boatwright J L. Global patterns of Radiated Seismic Energy and Apparent Stress[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 18205-18288.
- [6] 刘红桂, 王培玲, 杨彩霞, 等. 地震视应力在地震预测中的应用[J]. 地震学报, 2007, 29(4): 437-445.
LIU Hong-gui, WANG Pei-ling, YANG Cai-xia, et al. Application of Apparent Stress in Earthquake Prediction[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(4): 437-445. (in Chinese)
- [7] Newman A V, Okal E A. Teleseismic Estimates of Radiated Seismic Energy: The E/M₀ Discriminant for Tsunami Earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 1998, 102: 26885-26898.
- [8] Pulido N, Irikura K. Estimation of Dynamic Rupture Parameters From the Radiated Seismic Energy and Apparent Stress[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3945-3948.
- [9] 吴忠良, 黄静, 林碧苍. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 293-301.
WU Zhong-liang, HUANG Jing, LIN Bi-cang. Distribution of Apparent Stress in Western China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(3): 293-301. (in Chinese)
- [10] 刘红桂, 刘杰, 丁页岭, 等. 地震视应力在云南地震序列中的前兆特征[J]. 地震学报, 2006, 28(5): 462-471.
LIU Hong-gui, LIU Jie, DING Ye-ling, et al. Precursory Specialties of Apparent Stress in Yunnan Earthquakes Series[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(5): 462-471. (in Chinese)
- [11] 秦嘉政, 钱晓东. 云南地区地震视应力的时间和空间分布研究[J]. 地震学报, 2006, 28(3): 221-229.
QIN Jia-zheng, QIAN Xiao-dong. On Temporal and Spatial Distribution of Seismic Apparent Stresses in Yunnan Area [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(3): 221-229. (in Chinese)
- [12] 刘杰, 郑斯华, 康英, 等. 利用P波和S波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解[J]. 地震, 2004, 24(1): 19-26.
LIU Jie, ZHENG Si-hua, KANG Ying, et al. The Focal Mechanism Determinations of Moderate-small Earthquakes Using the First Motion and Amplitude Ratio of P and S Wave[J]. *Earthquake*, 2004, 24(1): 19-26. (in Chinese)
- [13] 王熠熙, 张辉. 利用多个震源机制解求祁连山西段平均应力场方向[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 289-295.
WANG Yi-xi, ZHANG Hui. Determination of the Direction of the Mean Stress Field in the Western Qilian Mountains Through Focal Mechanism Solution Analysis[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2013, 35(2): 289-295. (in Chinese)
- [14] 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报, 2008, 30(5): 533-539.
LIU Rui-feng, GAO Jing-chun, CHEN Yun-tai, et al. Construction and Development of Digital Seismograph Networks in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 30(5): 533-539.
- (in Chinese)
- [15] 杨志高, 张晓东. 首都圈地区地震视应力的计算及空间分布[J]. 地震, 2009, 29(4): 32-43.
YANG Zhi-gao, ZHANG Xiao-dong. Computation of Apparent Stress and its Spatial Distribution in the Capital Region of China[J]. *Earthquake*, 2009, 29(4): 32-43. (in Chinese)
- [16] 黄玉龙, 刘杰, 郑斯华, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 54-61.
HUANG Yu-long, LIU Jie, ZHENG Si-hua, et al. Attenuation of Ground Motion and Site Response in Guangdong Region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(1): 54-61. (in Chinese)
- [17] 刘红桂, 缪发军, 吴晶. 场地响应、震源参数和介质衰减的联合反演[J]. 地震, 2004, 4(24): 27-36.
LIU Hong-gui, MOU Fa-jun, WU Jing. Simultaneous Inversion of Site Response, Source Parameters, Geometrical Attenuation Factors and Inelastic Coefficient of Medium[J]. *Earthquake*, 2004, 4(24): 27-36. (in Chinese)
- [18] Gail M, Atkinson, Robert F. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [19] 王勤彩, 高景春, 郑斯华, 等. 华北中北部地区震源参数和场地响应的联合反演[J]. 中国地震, 2004, (20)2: 187-196.
WANG Qin-cai, GAO Jing-Chun, ZHENG Si-hua, et al. The Joint Inversion of Source Parameters and Site Effects in Central and Northern Area of North China[J]. *Earthquake Research in China*, 2004, (20)2: 187-196. (in Chinese)
- [20] 卞真付, 姚兰予, 庞群英. 利用井下数字地震记录反演非弹性衰减系数真元参数和场地响应[J]. 西北地震学报, 2005, 27(增刊): 58-64.
BIAN Zhen-fu, YAO Lan-yu, PANG Qun-ying. The Inversion of Non-elasticity Attenuation Coefficient, Source Parameters and Site Response Using Borehole Digital Seismic Recordings [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2005, 27(Sup.): 58-64. (in Chinese)
- [21] 郭晓, 张元生, 萧海亮, 等. 祁连山中段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 319-325.
GUO Xiao, ZHANG Yuan-sheng, SHEN Hai-liang, et al. Study on Inelastic Attenuation Coefficient, Site Response and Source Parameters of the Middle-east Segment of Qilianshan Area[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2007, (29)4: 319-325. (in Chinese)
- [22] 王勤彩, 高景春, 郑斯华, 等. 华北中北部地面运动衰减研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 313-319.
WANG Qin-cai, GAO Jing-Chun, ZHENG Si-hua, et al. Attenuation of Ground Motion in Central and North Area of North China[J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng*, 2004, 24(3): 313-319. (in Chinese)
- [23] Brune J N. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Waves From Earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 1970, 75: 4997-5009.
- [24] Moya A, Jorge Aguirre, Kojiro Lrikura. Inversion of Source

- Parameters and Site Effect from Strong Ground Motion Records Using Genetic Algorithm[J].Bull Seis Soc Am,2000,90(4):977-992.
- [25] Andrews D J.Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size[J].Geophysical Monographs,1986,37(6): 259-267.
- [26] Ide S,Beroza G C.Does Apparent Stress Vary with Earthquake Size[J].Geophys Res Lett,2001,28:3349-3352.
- [27] 华卫,陈章立,郑斯华.2010年4月14日青海玉树7.1级地震序列中小地震辐射能量的估计[J].地球物理学进展,2012,27(1):8-17.
HUA Wei, CHEN Zhang-li, ZHENG Si-hua. Estimation of Radiated Seismic Energy for Moderate and Small Earthquakes in $M_{\text{S}}7.1$ Sequence on 14 April 2010 Yushu, Qinghai[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 8-17. (in Chinese)
- [28] 张国民,傅征祥,桂燮泰.地震预报引论[M].北京:科学出版社,2001.
ZHANG Guo-min,FU Zheng-xiang,GUI Xie-tai. Introduction to Earthquake Prediction[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [29] 李芳,李宇彤,刘友富.视应力方法在震群性质判定中的应用研究[J].地震,2006,6(4):45-51.
LI Fang, LI Yu-tong, LIU You-fu. Research on the Apparent Stress Method Applying to Judge the Characteristics of Earthquake Swarm[J]. Earthquake, 2006, 6 (4): 45-51. (in Chinese)
- [30] 程万正,陈学忠,乔慧珍.四川地震辐射能量和视应力的研究[J].地球物理学进展, 2006, 21(3): 692-699.
CHENG Wan-zheng, CHEN Xue-zhong, QIAO Hui-zhen. Research on the Radiated Energy and Apparent Stress of the Earthquakes in Sichuan Province[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3)692-699. (in Chinese)
- [31] 王琼,陈学忠,王林瑛.岫岩地震序列视应力变化及其预测意义[J].地震,2005,25(2):91-97.
WANG Qiong, CHEN Xue-zhong, WANG Lin-ying. Change of Apparent Stress of Xiuyan Earthquake Sequence and its Prediction Significance[J]. Earthquake, 2005, 25(2): 91-97. (in Chinese)
- Chinese)
- [32] 吴晶,顾瑾萍.甘肃景泰 $M_{\text{S}}5.9$ 地震前后小地震视应力计算讨论[J].地震,2004,24(1):170-174.
WU Jing, GU Jin-ping. Discussion on Apparent Stress of Small Earthquakes before and after Jingtai Earthquake with $M_{\text{S}}5.9$ in Gansu Province[J]. Earthquake, 2004, 24(1): 170-174. (in Chinese)
- [33] 王卫东,彭建兵,张永志,等.泾阳5.2级地震前后视应力变化特征[J].地震研究,2005,28(3):274-276.
WANG Wei-dong, PENG Jian-bing, ZHANG Yong-zhi, et al. Features of Apparent Stress Changing before and after the Jingyang, Shaanxi, $M_{\text{L}}5.2$ Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(3): 274-276. (in Chinese)
- [34] 易桂喜,闻学泽,辛华,等.龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J].地球物理学报,2013,56(4):1112-1120.
YI Gui-Xi, WEN Xue-Ze, XIN Hua, et al. Stress State and Major-earthquake Risk on the Southern Segment of the Longmenshan Fault Zone[J]. Progress in Geophysics, 2013, 56(4): 1112-1120. (in Chinese)
- [35] 李艳娥,陈学忠,付虹.2007年云南宁南 $M_{\text{S}}6.4$ 地震前滇西南地区震源动力学参数时空变化特征[J].地震,2012,32(1):28-39.
LI Yan-e, CHEN Xue-zhong, FU Hong. Temporal and Spatial Variation of Focal Dynamic Parameters in Southwest Yunnan before the 2007 $M_{\text{S}}6.4$ Ning'er Earthquake[J]. Earthquake, 2012, 32(1): 28-39. (in Chinese)
- [36] 李艳娥,陈学忠,王恒信.汶川8.0级地震前四川地区地震视应力时空变化特征[J].地震,2012,32(4):113-122.
LI Yan'e, CHEN Xue-zhong, WANG Heng-xin. Temporal and Spatial Variation of Apparent Stress in Sichuan Area before the $M_{\text{S}}8.0$ Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake, 2012, 32(4): 113-122. (in Chinese)
- [37] 郭良迁,周海涛,杜雪松,塔拉.中国大陆应变应力场研究[J].华南地震,2012,32(1):1-10.
GUO Liang-qian, ZHOU Hai-tao, DU Xue-song, TA La. Studies on Stress-strain Field of Chinese Mainland[J]. South China Journal of Seismology, 2012, 32(1): 1-10. (in Chinese)