

河北平原地震带 b 值时空变化特征^①

王熠熙¹, 张 辉², 刘双庆¹, 曹井泉¹, 李 赫¹, 陈 嵩¹, 高 也¹

(1.天津市地震局 天津 300201; 2.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用华北地区近 44 年地震资料,在区域地震序列完整性分析的基础上,用最小二乘法进行 b 值时间扫描计算,用最大似然法进行 b 值空间扫描计算。时间扫描中的 b 值为研究区内每个扫描窗口的平均 b 值,因此其变化幅度不大,基本保持在 0.62~1.05 之间。研究区 b 值空间分布范围基本维系在 0.5~1.4,低 b 值区域为昌平—宝坻断裂段和唐山—迁安断裂段,变化范围为 0.5~0.7,表明该区域地壳介质正处于相对高应力或闭锁状态,存在未来可能发生中强以上地震的潜在危险。

关键词:河北平原地震带; b 值; 时间扫描; 空间扫描; 地震活动参数; 地震样本量

中图分类号: P315.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0188-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0188

Spatial and Temporal Variations of b -value in the Hebei Plain Seismic Belt

WANG Yi-xi¹, ZHANG Hui², LIU Shuang-qing¹, CAO Jing-quan¹, LI He¹, CHEN Song¹, GAO Ye¹

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

2.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: b -value is the basic parameter of seismic risk analysis and seismic prediction, describing the distribution characteristics of the magnitude frequency relation of earthquakes of study region. Actually it is a symbol that measures the seismicity levels in a certain region, and it is widely used in seismic prediction research and seismic risk analysis both at home and abroad. In this article, several important aspects of the influence of b value statistical are discussed. We draw some conclusions and hope to facilitate seismic prediction research. First of all, we studied the influence on the b -value by calculating seismic data integrity. Based on the observation bulletins and earthquake catalogues in the north China area, we analyzed temporal and spatial variations in seismic network monitoring capability. The effect of the b value curve to inspect network monitoring ability is discussed, and the results prove that the effect with regional b value curve fitting to ensure the network monitoring ability is not reliable. As the Hebei plain seismic belt is one of main activity areas of the strong earthquakes that occurred at the third and fourth activity times in North China, and it has complicated geological structure with relatively dynamic moderate-strong earthquakes in history and modern times. So according to seismic data records in the last 44 years, based on the complete analysis of seismic sequence in the district, least square method is used to conduct time-scanning calculations of b -value, and the maximum likelihood method is used to conduct space-scanning calculations of b -value. During the scanning time, b -value is the mean b -value of research zone in every scanning window, its amplitude of variation is not quite great, with a variation range

① 收稿日期: 2014-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(41304048); 地震科技星火计划(XH14002Y); 中国地震局定向跟踪任务(2014020306)

作者简介: 王熠熙(1985—), 女, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事地震活动性分析及地震学等研究. E-mail: wangyx123@163.com

of 0.62~1.05. Space-scanning results indicate that the space distribution range of b -values basically stays within 0.5~1.4. The low b -value zone is in the Tangshan—Qian'an section and the Changping-Baodi section, consequently, b -value range 0.5~0.7, which indicates that the earth crust medium of this region is in a state of high horizontal stress accumulation and it there is a probability of a moderate strong earthquake in future.

Key words: Hebei Plain seismic belt; b -value; time scanning; space scanning; seismicity parameter; seismic sample size

0 引言

强震与大地震通常发生在活动断裂带上的闭锁段落上或相对高应力积累区^[1]。近年来,在地震活动性研究方面,Wiemer 等^[2]及 Wyss 等^[3]利用古登堡—里克特公式中 b 、 a 值等地震活动性参数的空间分布特征,分析和研究活动断裂带现今相对应力积累的空间分布情况,据此从中区分出正处于相对闭锁的段落或高应力水平段落,为强震和大地震的长期、中-长期危险地段判定提供参考依据。这种思想来源于 Scholz 的岩石破裂实验研究^[4]以及 Urbancic 等的矿山岩石破裂观测^[5]实验结果,即特定岩体内构造应力大小与破裂产生的地震震级-频度 (M - N) 关系满足以下公式:

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

式中: N 代表震级 $M \geq M_c$ (最小完整性震级) 的所有地震的累积频度; 参数 b 表示研究区不同震级地震的相对分布情况; 参数 a 表示研究区的地震活动水平。茂木清夫^[6]对各种地震活动类型在实验室里进行了岩石破裂的模拟实验,发现在主破裂前,若岩石的均匀程度不同,微破裂有显著差异。Scholz^[4]在实验室里研究了不同应力作用下脆性岩石破裂的 b 值变化。他指出大量微破裂发生在主破裂前,并随应力不同而变化。发生在地壳中的浅源地震是某一地区应力不断积累引起岩石破裂的结果,而 b 值可以反映不同应力作用下的岩石破裂过程的一定特征。此外,相关研究^[7-8]发现 b 值除了随着同一时段的不同区域而产生差别外,还随着固定区域的不同时间而变化。

近年来,随着对 b 值理论研究和应用范围的不断深入, b 值在地震预测方面的作用日益突显,特别是在 1976 年唐山地震后,众多学者^[9-13]对 b 值进行了深入研究,提出采用 b 值时空扫描来识别孕育强震的潜在危险区等观点,并且通过大量震例研究了 b 值在大地震前震中附近的变化特征。本文在确定区域地震目录完整性的基础上,综合利用最小二乘法和最大似然法计算河北平原带 b 值时空变化特

征,据此判定研究区是未来可能发生中强以上地震的潜在危险区段。

1 研究区地质与地震活动概况

河北平原地震带是华北第三、第四活动期强震活动主体地区之一,主要发育一系列新生地震构造带。该地震带北起卢龙、滦县地区,向西南经唐山、宁河、武清、河间、深县、辛集、宁晋、任县、邯郸至磁县。呈 NNE 向展布于太行山东侧,北界位于燕山南侧,东与郯庐断裂带相邻,与东秦岭—大别构造带一起构成华北平原地震带^[9]。河北平原带属于晚第三纪—第四纪新生断裂带,主要发育着一系列 NNE—NE 走向的断裂带,全长 600 km,最新构造运动表现为引起河道变迁的 NE 向新(微)隆起带,与现代强震带在空间上重叠,又称为邢台—河间—唐山地震破裂带。

有历史记录以来,河北平原地震带发生过多次强震且造成巨大的人员伤亡和经济损失,如 1679 年三河平谷 8 级地震、1830 年磁县 7.5 级地震及 1966 年宁晋东南 7.2 级地震、1976 年唐山 7.8 级地震等。目前河北平原地震带正处于第二活跃期衰减阶段,至今已发生 4 次 7.0~7.9 级地震、12 次 6.0~6.9 级地震。

随着我国地震台网的逐步完善和不断扩充,记录到了大量地震,为研究地震活动规律提供了丰富的基础数据。本研究基于以上思想并利用近 44 年的区域台网地震资料,结合 b 值时空扫描以及 a 值、 a/b 值等地震活动性参数空间分布特征,综合分析研究区域应力积累水平。

1.1 地震目录完整性分析

本文资料采用中国地震台网中心提供的 1970 年 1 月 1 日~2013 年 12 月 31 日期间河北平原地震带地区的正式地震目录。为符合泊松模型,即地震的发生尽量满足平稳性和相互无关性,消除地震之间的相关影响因素。本文采用了 Keilis-Borok 和 Knopoff^[14-16]提出的余震时空窗与主震震级满足一

定经验关系的余震删除方法,删除 1970 年来中强震的余震,形成新的地震目录。

统计结果显示:未删除余震前共 36 565 次地震,删除余震后的独立主震目录有 27 001 条,约有 26.2% 的地震事件被移除。其中 0~0.9 共 859 次、1.0~1.9 共 18 511 次、2.0~2.9 共 6 529 次、3.0~3.9 共 907 次、4.0~4.9 共 170 次、5.0~5.9 共 22 次、6.0~6.9 共 2 次、7.0~7.9 共 1 次。由图 1 可见,震级主要集中于 M_L 1.0~3.0,且研究区地震发生频度自 2012 年以来突升,主要是受两方面因素影响:一是研究区地震活动水平显著升高;二是首都圈地区地震台站进行“十一五”数字化改造,使研究区地震监测能力大幅度提升。

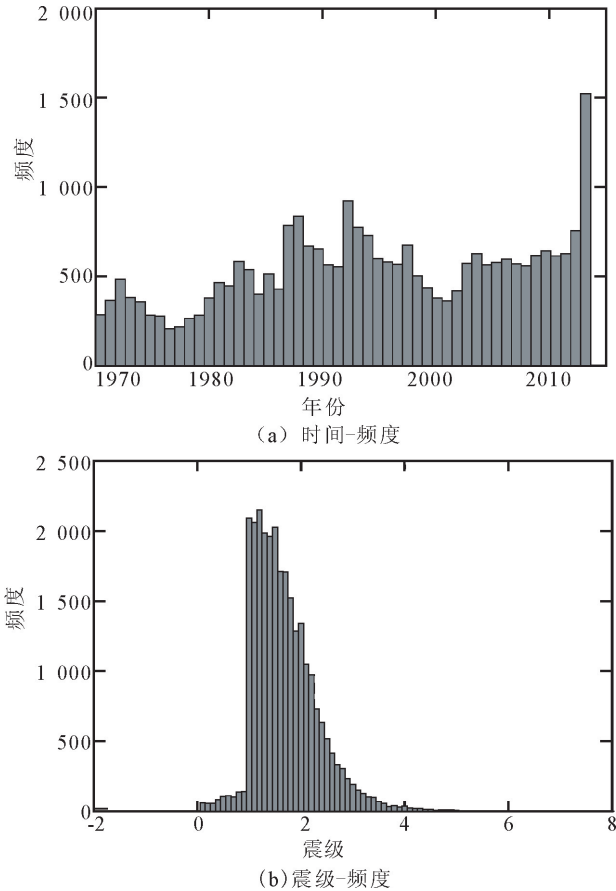


图 1 河北平原带时间-频度及震级-频度直方图
Fig.1 Histogram of time-frequency and magnitude-frequency in the Hebei Plane seismic belt

图 2 显示删除余震后地震目录的时间-频度(图 2(b))比删除余震前(图 2(a))的关系曲线更加光滑,尤其是在 1976 年左右更为明显,这是由于唐山地震序列对地震累计频次造成的影响。图 2(c)、2(d)显示,删除余震后的地震记录(M_c 2.0 以上)比删除余震前能更好符合震级-频度关系。

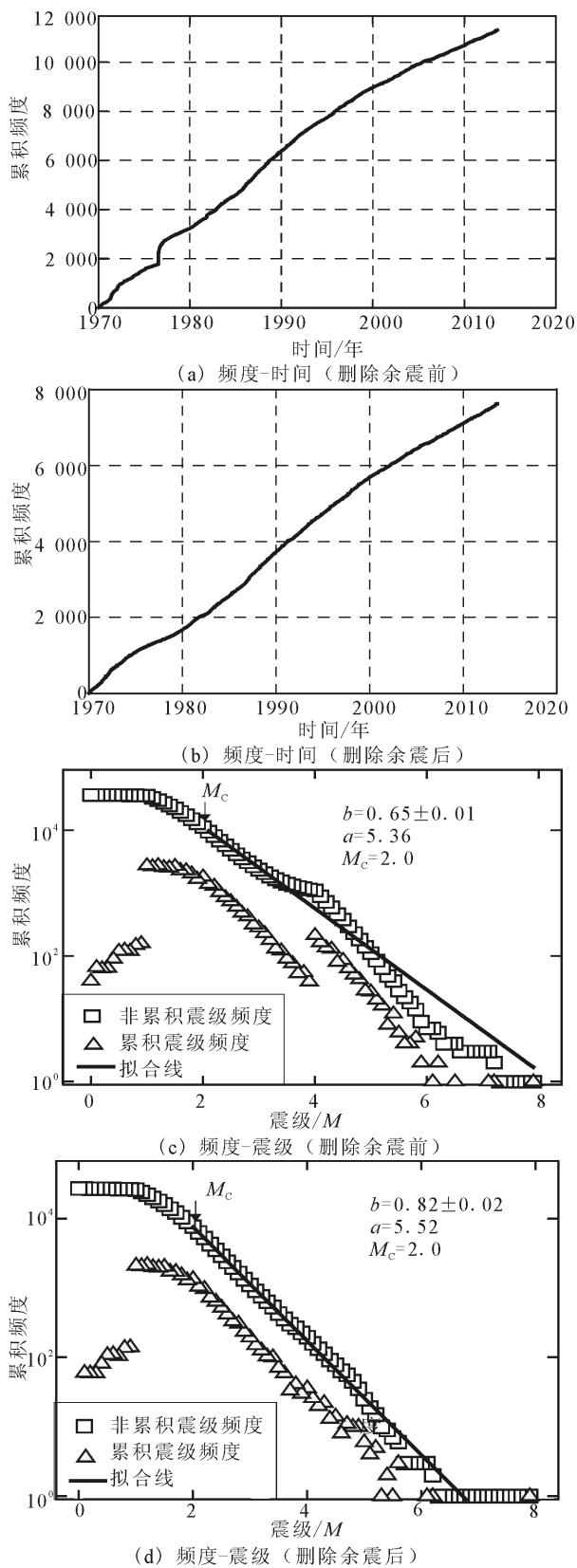


图 2 删除余震前后累积频度与时间、震级曲线图
Fig.2 Accumulative frequency vs time and magnitude curves before and after eliminating the after-shocks

本部分最小完整性震级的确定采用多方法的定量分析^[15-16],即通过 95% 拟合度检测法、90% 拟合度检测法和最大曲率法分别确定某统计单元内的最小完整性震级,以 95% 拟合度检测法优先于 90% 拟合度检测法,90% 拟合度检测法优先于最大曲率法的最佳结合方式给出该统计单元内的最小完整性震级,经计算得出河北平原地震带的最小完整性震级为 2.0,这与该区域的地震监测水平基本相符。

图 3 为最小完整性震级随时间的变化情况,可见,随着地震监测水平的不断提高和台网密度的逐步增加,遗漏的小震记录越来越少,根据震级-频度关系计算的最小完整性震级也随着时间推移而逐渐下降。1980 年之前,研究区的最小完整性震级为 $M_{2.0}$ 左右,2000 年之后,地震目录的最小完整性震级降低到 $M_{1.8}$ 以下。考虑到地震目录系统误差的影响,本文将计算中的震级下限统一设定为河北平原带的最小完整性震级 $M_L 2.0$ 。对 M_C 的不确定度 δM_C 使用 Bootstrap 方法的蒙特卡罗近似来估计。因为 Bootstrap 方法不需要对数据分布做任何事先的假定,所以可采用该方法较好地估计参数的不确定度。具体计算中每次 Bootstrap 重采样后计算 M_C , M_C 经验分布的二阶矩,即标准差被定义为 δM_C 。

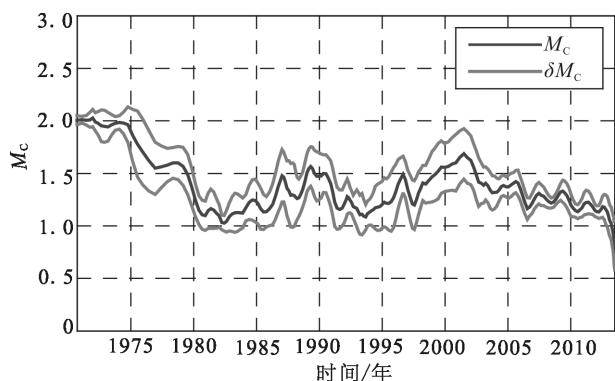


图 3 最小完整性震级随时间的变化

Fig.3 Variation of minimum magnitude of completeness with time

2 原理与方法

2.1 计算方法及参数确定

根据前人经验^[17-20], b 值时空扫描计算在针对较大范围的研究区域时,应注意以下几点:一是台网地震监测水平;二是研究区最小完整性震级的确定;三是采用的地震目录时间尺度;四为合理的时间窗、空间窗及相应的扫描步长的确定。但在实际计算中,地震样本量及震级分布情况是首先要考虑的,若

震级分布均匀,且地震样本数目较少,震级分档标准就必须适当提高;假如地震样本数目够多,并且震级分布较均匀,那么震级分档标准就可以适度降低,通常将分档步长设为 $\Delta M = 0.1$;如果震级分布均匀,并且地震样本数目充足,就可以采用微分频次进行震级分档。根据 1970 年以来河北平原带的地震活动情况,本文采用 $\Delta M = 0.2$ 进行震级分档,这样分档可使得较多的数据参与计算,并且结果可信度也得到间接提高。另外为了避免研究区内中强以上地震对计算结果的影响,保证有时间足够长的资料以满足样本量计算的需要,本文采用舍弃 5 级以上地震的截断方法来进行 b 值拟合计算,以消除高震级可能带来的影响。采用线性最小二乘法研究 b 值时间变化,用最大似然法研究 b 值空间变化。

2.2 线性最小二乘法

b 值时间扫描采用线性最小二乘法。令 $y = \ln n = a - bx$, 其中 $x = M - M_0$, M_0 是起算震级。对观测到的一组地震 $M_1, M_2, \dots, M_n$, 其 b 值估值为:

$$\hat{b} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2} \quad (2)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_k$, $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_k$, $\overline{xy} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_k y_k$, $\overline{x^2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_k^2$ 。相应的误差公式为:

$$\Delta b = 1.96 \sqrt{\frac{1}{(m-2)Lxx} \left[\sum_{k=1}^m (y_k - \hat{a} + b x_k)^2 \right]} \quad (3)$$

其中 $\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}$, $Lxx = \sum_{k=1}^m (x_k - \bar{x})^2$ 。

2.3 最大似然法

对 b 值空间扫描部分,本文采取最大似然法。最大似然法的基本原理是估计值能够满足在观察结果中的出现概率最大为条件,其实质是参数估计的一种方法,故称为最大似然估计。如果在一定时间段和一定区域内观测到的一组地震的震级分别是 $M_1, M_2, \dots, M_n$, 其 b 值为:

$$b = \frac{0.4343N}{\sum_{n=k}^M (k - \frac{1}{2}) \Delta M \cdot n_k} \quad (4)$$

其中 N 为该组地震总数; m 为震级分档总数; m^k 为第 k 档地震数; ΔM 为分档间隔,相应的误差公式为:

$$\Delta b = 1.96 \frac{\hat{b}}{\sqrt{N-1}} \quad (5)$$

3 研究区 b 值时空扫描变化特征

3.1 b 值时间扫描结果

为保证计算结果的可信度,借鉴前人经验^[21-22],并通过多次计算实验及对比,本文采用线性最小二乘法对研究区进行 b 值时间扫描计算。

在具体计算中,选取 50 个地震为窗长,10 个地震为扫描步长进行滑动扫描计算,得到了河北平原带 b 值随时间推移的变化曲线(图 4)。计算结果显示,1970 年以来,河北平原带地区 b 值变化范围基本在 0.62~1.05,由于时间扫描的 b 值为某一时段内河北平原带的平均 b 值,因此这个 b 值变化幅度不大。

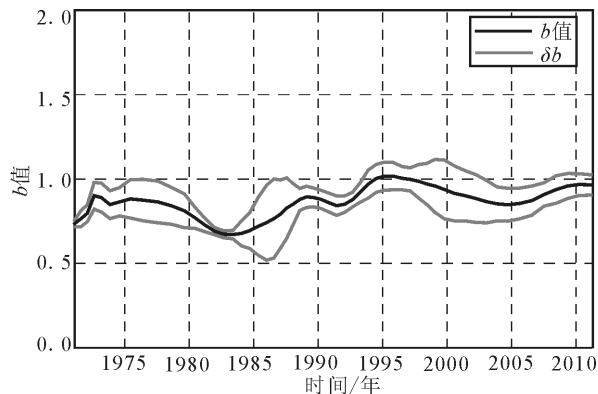


图 4 研究区域 b 值随时间的变化

Fig.4 Variation of b -value with time in study area

3.2 b 值空间扫描分布

考虑到河北平原带的地震分布情况^[23-27],本文以 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的间隔将研究区域网格化,挑选出以每个网格节点为圆心、半径为 r 的统计单元内的地震资料,分别确定出对每个网格节点的最小完整性震级 M_c ,并利用震级大于最小完整性震级的地震资料,根据最大似然法计算出震级 M -累积频度 N 关系中的 b 值,作为该网格节点计算的 b 值。最后根据得到的各单元中心点的 b 值绘制出河北平原带 b 值空间分布彩色编码图。

由上述方法计算获得河北平原带内最小完整性震级空间分布图(图 5(a))和河北平原带内 b 值空间分布图(图 5(b))以及 a 值(图 5(c))和 a/b 值空间分布图(图 5(d))。图 5(a)反映出研究区内沿主要断裂带的多数统计单元内的最小完整性震级在 $M_L 2.0 \sim 2.8$ 之间。图 5(b)可看出河北平原带上 b 值大小的空间分布具有显著差异,说明现今应力水平在不同断裂部位存在着明显不同,进而体现出不同断裂段在现今地震活动性上可能存在区别。基于

地震密度分布和计算结果可靠性的考虑,图 5(b)显示仅在地震分布较密的、地震样本量充足的主要断裂段上给出了 b 值的空间分布计算结果。

图 5(b)显示河北平原带内沿不同断裂段的 b 值空间分布具有明显差异。低 b 值区主要分布于昌平—宝坻断裂段和唐山—迁安断裂段。

(1)昌平—宝坻断裂段。该段 b 值 < 0.7 属于低 b 值异常区,并且具有较低的地震活动率(a 值 < 3.3),且具有研究区域较低的最大期望震级 a/b 。历史上曾发生 10 次 5 级以上地震,最大的地震为发生于 NE 向的夏垫断裂带上的 1679 年三河—平谷 8 级地震,反映了以昌平—宝坻断裂段为中心的该段处于较高的应力积累状态,现今地震活动率中等,可能是未来发生中强震的危险地段。

(2)唐山—迁安断裂段。该段历史强震和现代中小震活动十分频繁,历史上曾发生 5.0 级以上地震 32 次(包括唐山地震强余震),最大地震为在 NW 向蓟运河断裂和 NE 向唐山断裂交汇部位的 1976 年唐山 7.8 级大震。在滦县—乐亭断裂上曾发生 1624 年滦县 6.5 级地震和 1945 年滦县 6 级地震。图 5(b)显示该段仍以较低 b 值为主,且具有研究区域较高的 a 值和较高的最大期望震级 a/b ,表明唐山—迁安段虽然自 1976 年地震后积累多年的能量已经释放,闭锁状态已打开,在短期内不可能再复发强震,但震后中小震较活跃,因此并不排除中等地震的地震危险性。

由图 6 震级和 b 值关系曲线图可知,影响 b 值计算结果的两个主要因素是地震震级分档标准和地震样本数量。本文规定参与计算的每个窗长内的地震样本量不能低于 50,所以震级与 b 值的关系曲线在 $M_L > 4.7$ 时无法给出,这就是说当每个震级档内有充足的地震样本数量时, b 值计算结果变化幅度相对较小,计算结果稳定性好,否则稳定性较差。

4 结论与讨论

本文根据中国地震局台网中心提供的河北平原地震带近 44 年的正式地震资料,在区域地震目录完整性分析基础上、利用 b 值时空变化特征分布图像、地震活动水平 a 值、最大期望震级 a/b 值,结合历史强震及现今地震活动背景等综合分析方法,分析河北平原地震带的现今地壳应力积累水平,得到以下结论:

(1) 自 1970 年来,河北平原带小震记录的最小完整性震级为 $M_{2.0}$,且随时间推移研究区最小完整

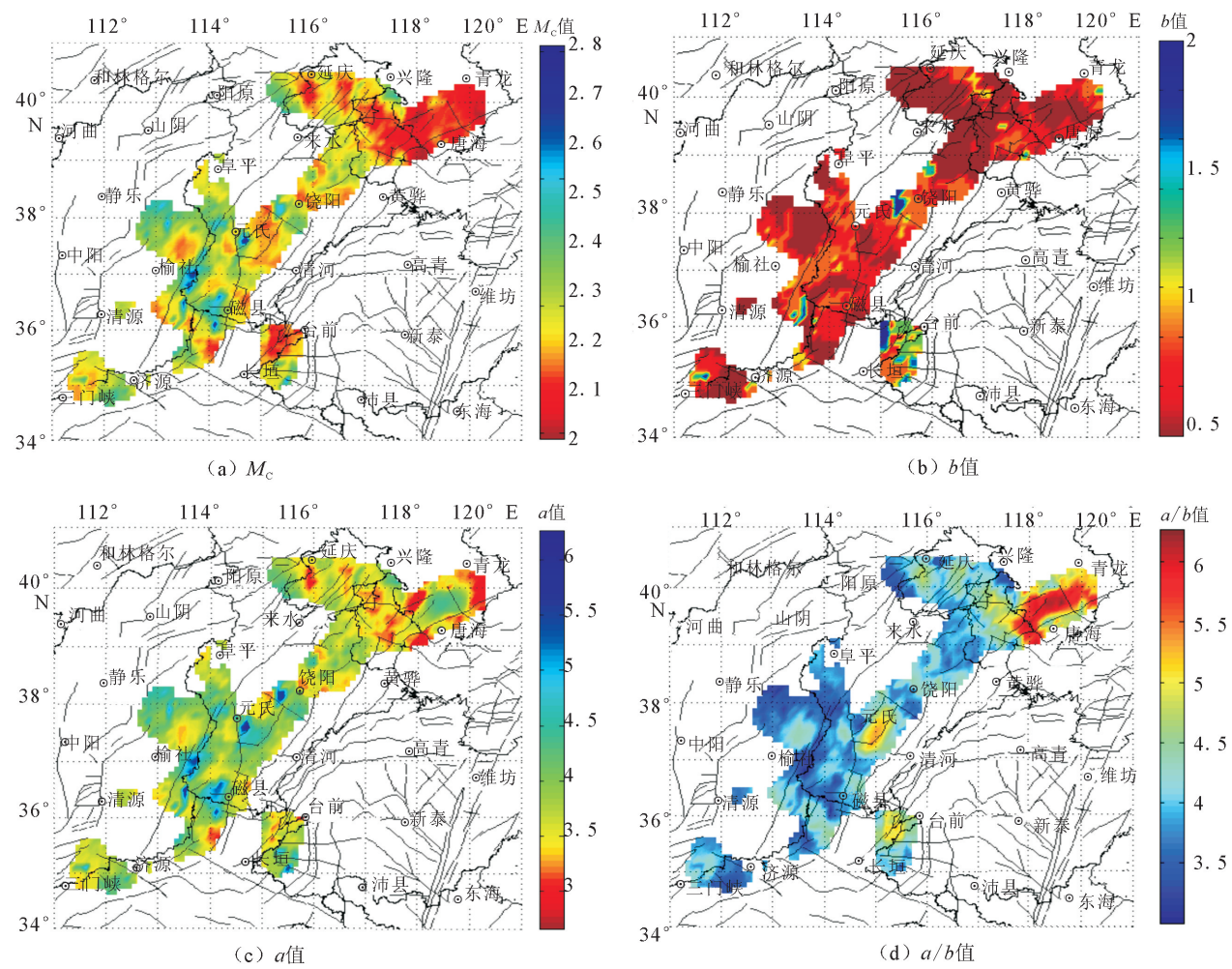


图 5 河北平原带内 b 值空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of b -value in the Helei Plane seismic belt

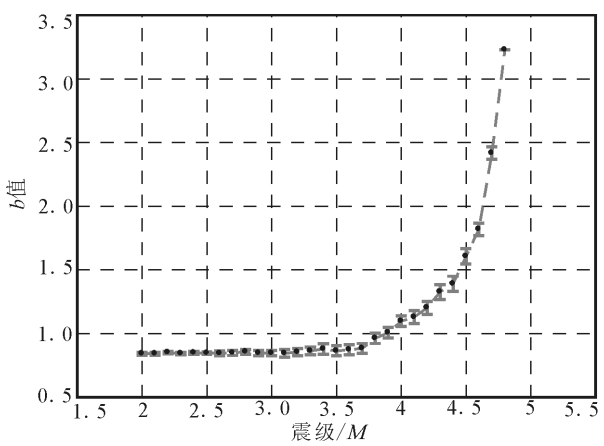


图 6 震级和 b 值关系图

Fig.6 Relationship between magnitude and b -value

性震级逐渐降低,2010 年后最小完整性震级为 $M_L1.5$ 左右,与研究区现今监测水平基本相符。

(2) 时间扫描中 b 值变化基本保持在 0.62~1.05 范围内。这是由于该 b 值为研究区内每个扫描

窗口的平均值,因此其变化幅度不大。

(3) 对研究区小震活动的 b 值、 a 值、最大震级 a/b 值的空间分布综合分析,初步认为昌平—宝坻断裂段和唐山—迁安断裂段的 b 值较低,属于高应力积累区或凹凸体,其未来强震危险性值得进一步研究。

(4) 本研究使用的地震目录时间长度为 44 年,是目前所能够收集到的最完整资料。时间尺度虽然小于河北平原带的地震活动周期和强震复发间隔,但得到的研究结果应该能够为河北平原带地区未来强震危险区的判定提供参考。

参考文献(References)

[1] Aki K. Asperities, Barriers, Characteristic Earthquake and Strong Motion Prediction[J].J Geophys Res,1984,89(B7): 5867-5872.

[2] Wiemer S,Wyss M.Mapping the Frequency-magnitude Distribution in Asperities:An Improved Technique to Calculate Re-

- currence Times? [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B7): 15115-15128.
- [3] Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. Mapping Asperities by Minima of Local Recurrence Time; San Jacinto-Elsinore Fault Zones [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B4): 7829-7844.
- [4] Scholz C H. The Frequency-magnitude Relation to Microfracturing in Rock and Its Relation to Earthquakes [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1968, 58: 399-415.
- [5] Urbancic T I, Trifu C I, Long J M, et al. Space-time Correlation of b Value Spatial with Stress Release [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1992, 139: 449-462.
- [6] Mori J, Abercrombie R E. Depth Dependence of Earthquake Frequency-magnitude Distributions in California; Implications for the Rupture Initiation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 15081-15090.
- [7] 黄永祥, 谭承业. 序列活动特性与岩石破裂强度的实验研究 [J]. *地震研究*, 1982, 5(3): 324-331.
- HUANG Yong-xiang. An Experimental Study on the Features of the Sequence Activities and the Strength of the Rock Fracture [J]. *Journal of Seismological Research*, 1982, 5(3): 324-331. (in Chinese)
- [8] 张智, 吴开统, 焦远碧. 含有障碍体的岩石样品破裂发展过程中的 b 值变化 [J]. *中国地震*, 1987, 3(1): 68-76.
- ZHANG Zhi, WU Kai-tong, JIAO Yuan-bi. The Changes of b Value on Samples Contained Barriers During Rupture Process [J]. *Earthquake Research in China*, 1987, 3(1): 68-76. (in Chinese)
- [9] 朱红彬, 邢成起, 李红, 等. 华北构造区主要地震带分段与强震活动 [J]. *地震学报*, 2010, 32(6): 705-717.
- ZHU Hong-bin, XING Cheng-qi, LI Hong, et al. Segmentation of Main Seismicbelt and Strong Earthquakes in North China Tectonic Region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(6): 705-717. (in Chinese)
- [10] 李全林, 陈锦标, 于泳, 等. b 值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段 [J]. *地球物理学报*, 1978, 21(2): 101-125.
- LI Quan-lin, CHEN Jin-biao, YU Lu, et al. Time and Space Scanning of the b -Value——a Method for Monitoring the Development of Catastrophic Earthquakes [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1978, 21(2): 101-125. (in Chinese)
- [11] 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟. 山西断陷带太原—临汾部分的强地震平均复发间隔与未来危险段落研究 [J]. *地震学报*, 2004, 26(4): 387-395.
- YI Gui-xi, WEN Xue-ze, XU Xi-wei. Average Recurrence Intervals of Strong Earthquakes and Potential Risky Segments Along the Taiyuan—Linfen Portion of the Shanxi Graben System [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(4): 387-395. (in Chinese)
- [12] 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性及其地震危险性 [J]. *地震学报*, 2004, 26(3): 294-303.
- YI Gui-xi, WEN Xue-ze, FAN Jun, et al. Assessing Current Faulting Behaviors and Seismic Risk of the an Ninghe—Zemuhe Fault Zone from Seismicity Parameters [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(3): 294-303. (in Chinese)
- [13] 易桂喜, 闻学泽, 张志伟, 等. 川南马边地区强震危险性分析 [J]. *地震地质*, 2010, 32(2): 282-293.
- YI Gui-xi, WEN Xue-ze, ZHANG Zhi-Wei, et al. Study on Potential Strong Earthquake Risk in MaBian Area Southern Sichuan [J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(2): 282-293. (in Chinese)
- [14] Keilis-Borok V I, Knopoff L. Bursts of Aftershock of Strong Earthquakes [J]. *Nature*, 1980, 283(P5744): 259-263.
- [15] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 1970 年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究 [J]. *西北地震学报*, 2012, 34(3): 289-293.
- FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo, et al. Collection and Research Work for the Earthquake Observation Report of the Gansu Seismographic Network Since 1970 and Earthquake Relocation [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(3): 289-293. (in Chinese)
- [16] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析 [J]. *地震学报*, 2012, 34(5): 646-658.
- FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo, et al. Analysis on the Monitoring Capability of Seismic Networks and Completeness of Earthquake Catalogues in Gansu Region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012, 34(5): 646-658. (in Chinese)
- [17] 刘小凤, 梅秀苹, 冯建刚, 等. 青藏高原北部地区地震基本活动状态定量评价 [J]. *西北地震学报*, 2011, 33(2): 130-136.
- LIU Xiao-feng, MEI Xiu-ping, FENG Jian-gang, et al. Quantitative Estimating Basic State of Seismicity in Northern Region of Qinghai—Xizang Plateau [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011, 33(2): 130-136. (in Chinese)
- [18] 苏鹤军, 张慧, 李晨桦, 等. 西秦岭北缘断裂带断层气浓度空间分布特征与强震危险性分析 [J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 671-676.
- SU He-jun, ZHANG Hui, LI Chen-hua, et al. Geochemical Features of Fault Gas on Northern Margin Fault of Xiqinling and Its Seismic Hazard Analysis [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2013, 35(3): 671-676. (in Chinese)
- [19] 刘强, 王爱国, 邵延秀, 等. 甘肃古浪长岭山北麓断裂新活动特征与地震危险性 [J]. *西北地震学报*, 2011, 33(2): 123-129.
- LIU Qiang, WANG Ai-guo, SHAO Yan-xiu, et al. Active Characteristics and Seismic Risk of Northern Piedmont Fault of Changling Mountain in Gulang County, Gansu Province [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(2): 123-129. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 韩晓明, 薛丁, 赵星. 内蒙古东部扎兰屯地区的 b 值时空变化

特征[J].地震,2012,32(3):142-149.

HAN Xiao-ming,XUE Ding,ZHAO Xing.Spatio-temporal *b*-value Variation Characteristics in the Zhalantun Area of the Eastern Part of Inner Mongolia[J].Earthquake,2012,32(3):142-149. (in Chinese)

[22] 王辉,曹建玲,申旭辉.华北地区的背景地震活动及区域未来强震危险性[J].地震,2011,31(2):11-23.

WANG Hui,CAO Jian-ling,SHEN Xu-hui.Background Seismicity and Its Application to Seismic Hazard Assessment in the North China Region[J].Earthquake,2011,31(2):11-23. (in Chinese)

[23] 王玉婷,吕悦军,谢卓娟,等.河北平原地震带的现今活动性分析[J].地震地磁观测与研究,2012,33(2):6-14.

WANG Yu-ting, LV Yue-jun, XIE Zhuo-juan, et al. Modern Activity Characteristics of the Hebei Plain Seismic Belt Based on Seismic Activity Parameter Analysis[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2012,33(2):6-14.(in Chinese)

[24] 陈凌,刘杰,陈颢,等.地震活动性分析中余震的删除[J].地球物理学报,1998,41:244-252.

CHEN Ling,LIU Jie,CHEN Yong,et al.Aftershock Deletion in Seismicity Analysis[J].Acta Geophysica Sinica,1998,41:244-252. (in Chinese)

[25] 易桂喜,闻学泽.多地震活动性参数在断裂带现今活动习性与地震危险性评价中的应用与问题[J].地震地质,2007,29(2):254-271.

YI Gui-xi,WEN Xue-ze.The Application and Limitation of Mulyiple Seismicity Parameters to Assessing Current Faulting Behavior and Seismic Potential of Active Fault Zones[J].Seismology and Geology,2007,29(2):254-271.(in Chinese)

[26] 张恩立,陈德兴,李昊,等.由地震活动参数分析安徽省新生代构造变形带现今活动习性与地震危险性[J].华南地震,29(2):55-61.

ZHANG Enli,CHEN De-xing,LI Hao,et al.Analysis of Current Seismic Activity Features and Seismic Risk of Anhui Cenozoic Tectonic Deformation Zones Based on Seismic Activity Parameters[J].South China Journal of Seismology,29(2):55-61.(in Chinese)

[27] 武敏捷,朱红彬,岳晓媛,等.基于多地震活动参数的首都圈地区地震危险性分析[J].华北地震科学,31(1):25-30.

WU Min-jie,ZHU Hong-bin,YUE Xiao-yuan,et al.Analysis on Potential Earthquake Risk of Capital Zone Based on Multiple Seismicity Parameters[J].North China Earthquake Sciences,31(1):25-30.(in Chinese)

(上接 174 页)

[23] 陈彦杰,郑光佑,宋国城.面积尺度与空间分布对流域面积高程积分及其地质意义的影响[J].地理学报(台湾),2005(39):53-69.

CHEN Yan-jie,ZHENG Guang-you,SONG Guo-cheng.Influence of Area and Space Dependence for Hypsometric Integral and Its Geological Implications[J].Journal of Geographical Science(Taiwan),2005(39):53-69.(in Chinese)

[24] Pike R J,Wilson S E.Elevation-relief Ratio,Hypsometric Integraland Geomorphic Area-altitude Analysis[J].Geological Society of America Bulletin,1971(82):1079-1084.