

段美芳, 陆丽娜, 李莹甄, 李宝君, 杨明, 贾建鹏, 2018. 张家口-渤海断裂带西段及中西段  $b$  值时空扫描. 震灾防御技术, 13(1): 138—148. doi: 10.11899/zfy20180112

# 张家口-渤海断裂带西段及中西段 $b$ 值时空扫描<sup>1</sup>

段美芳<sup>1, 2)</sup> 陆丽娜<sup>1)</sup> 李莹甄<sup>1)</sup> 李宝君<sup>3)</sup> 杨明<sup>1, 4)</sup> 贾建鹏<sup>1)</sup>

1) 防灾科技学院, 河北三河 065201

2) 云南省地震局洱源地震台, 云南洱源 671200

3) 辽宁金州地震台, 辽宁大连 116100

4) 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 张家口-渤海断裂带作为华北平原地区重要的活动断裂带, 地震活动频繁, 是我国地震监测预测重点区域之一。本文选取该断裂带西段及中西段 1970—2016 年的地震目录, 采用最大似然法进行时间扫描, 分析显示研究区  $b$  值为 0.28—1.52, 其随时间变化的特点是在大地震发生前降至最低, 震后逐渐恢复; 研究区空间扫描结果显示, 该区  $b$  值的平均值为 0.93, 其中怀安-万全盆地北缘断裂和蓟运河断裂平均  $b$  值较低, 反映该区域应力水平较高。综合以上结果, 本次研究揭示出研究区地震危险性的时间和空间差异, 为对研究区地震危险性评价提供基础数据。

**关键词:**  $b$  值 张渤断裂带西段及中西段 地震危险性

## 引言

地震作为地球上最具破坏性的自然灾害, 吸引着人们对其不断地思考和探索。地震  $b$  值就是源于前人 (Ishimoto 等, 1939; Gutenberg 等, 1954) 不断探索的地震研究工作以及他们建立的经验关系式。在著名的古登堡-里克特关系式中,  $b$  值是震级和频度关系中的比例系数, 反映区域内不同震级地震的相对分布。国内外众多学者对  $b$  值的计算方法 (张建中等, 1981)、时空变化特征 (王辉等, 2012; 谢卓娟等, 2015)、与环境应力的关系 (Khan 等, 2011)、与布格重力异常的关系 (Khan 等, 2007) 等方面做了大量研究工作, 使得  $b$  值已经成为衡量区域应力水平的重要指标, 亦成为地震危险性评价和未来地震危险性预测的重要参数。一次破坏性地震不是突然爆发的, 它要在相当大的空间范围内, 经历比较长时间的应力积累 (李全林等, 1978)。因此对于地震参数不断进行时间和空间扫描, 监视和探寻异常区的存在和变化, 理应成为地震监测预测的科学手段之一。所以, 应用  $b$  值在地震和活动构造上进行时空特征分析, 既有一定的物理学基础, 又符合地震监测预测的基本原理。

**1 基金项目** 防灾科技学院教研教改项目 (JY2016A01) 资助

**[收稿日期]** 2016-12-27

**[作者简介]** 段美芳, 女, 生于 1994 年。本科生。主要研究方向: 地震地质学。E-mail: lulina@cidp.edu.cn

**[通讯作者]** 陆丽娜, 女, 生于 1983 年。博士, 讲师。主要从事矿床学和地震地质的教科研工作。E-mail: lulina@cidp.edu.cn

张家口-渤海断裂带(张渤断裂带)西段及中西段是地震频发区,且经过北京、天津、河北等经济发达、人口密集的省市。中国东部曾发生过 1679 年 9 月 2 日三河—平谷 8 级和 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震,其震中都位于张渤断裂带西段及中西段(赖晓玲等, 2007)。此外,张渤断裂带西段和中西段内常发生不同规模的中、小型地震,严重影响着京津唐发达经济区的可持续发展。武敏捷等(2013)基于多地震活动参数对张渤断裂带整体进行地震危险性分析,认为延怀盆地这样的低  $b$  值区应为今后监测预测的重点地区。韩孔艳(2009)对张渤断裂带的西段、中西段、中东段、东段分别进行了布格重力异常研究。

为了探究张渤断裂带西段及中西段  $b$  值时空分布特征,本文收集 1970—2016 年近 50 年地震目录资料,对张渤断裂带西段及中西段  $b$  值特征进行分析。通过对张渤断裂带西段及中西段回溯性地段进行  $b$  值时空扫描,以期对研究区内潜在地震危险性评价提供基础数据。

## 1 区域构造背景

张家口-渤海断裂带是华北活动地块和燕山活动地块边界一条规模巨大的北西西向活动断裂带,长约 700km(方颖等, 2008; 索艳慧等, 2013)。断裂带西起河北省张北和尚义一带,经张家口向东南延伸,穿过怀来、顺义、三河以及天津等地,再由渤海继续延伸至蓬莱以北的黄海海域,主要受太平洋板块北西西向俯冲以及印度洋板块北北东向俯冲作用,这使得郯庐断裂、太行山山前断裂带发生右旋走滑,从而在渤海湾盆地形成拉分盆地(侯贵廷等, 1999)。拉分盆地又导致了张渤断裂带发生北北东向的左旋走滑,故新生代渤海湾盆地内的次级断陷都成雁行排列,且新生代以来一直处于活动中。

研究表明,张渤断裂带处于地壳运动活跃地带,以正断层为主。前人将张渤断裂带按构造特征、断裂形态等分为 4 段,分别是:张北-南口段(西段),南口-宁河段(中西段),渤海段(中东段)和蓬莱-烟台段(东段)(高战武等, 2001; 韩孔艳, 2009)。本文选取张渤断裂带的西段和中西段(图 1)作为研究区。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

考虑到张渤断裂带西段和中西段的断裂和地震台网的分布情况,本文选取断裂带内  $38.5^{\circ}$ — $41.5^{\circ}$ N,  $114^{\circ}$ — $118^{\circ}$ E 为研究区,从西北至东南依次包括张家口断裂、新保安-沙城断裂带、蔚县盆地南缘断裂、顺义-良乡断裂、夏垫断裂和海西断裂等。

地震目录资料来自于国家地震前兆台网中心。选取的时间段为 1970 年 1 月 1 日至 2016 年 5 月 4 日,共 7596 个地震目录(表 1)。在我国地震区划和地震安全性评价工作中,通常使用面波震级  $M_S$ ,最新研究表明,面波震级  $M_S$  与近震震级  $M_L$  表示的地震震级基本一致(汪素云等, 2009)。由于本文获得的地震目录中近震震级  $M_L$  较完整,所以直接采用  $M_L$  进行统计和计算。

根据研究区地震目录统计,随着地震震级的增高,发生地震的频率逐渐降低,且研究区 1 到 2 级地震发生频率较高,5 级以上的地震相对较少,说明此区地震活动频繁,并以小震为主。前人认为小地震复发周期较短,地震活动性较强(陈培善等, 2003)。数据显示,全国 1996 年之前记录到的最小震级为 2.0 级,1996 年以后,记录到的最小震级精确到 1.0 级,原因可能是由于早期地震台网分布的不完善、地震分析方法和监测技术具有局限性,导致缺少

小地震记录（任雪梅等，2011；谢卓娟等，2012）。从研究区  $T-N$  图（图 2）可看出，随着时间的推移，记录到的地震次数 逐渐增加，1996 年地震目录总数迅速上升至 303 条，说明自该年后我国的地震监测水平有了明显提高。

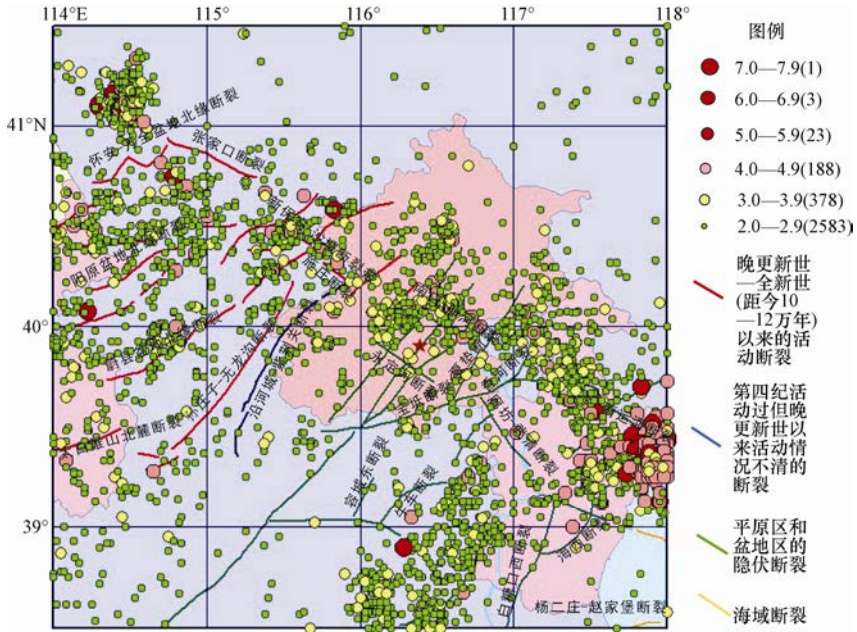


图 1 研究区地震地质简图（事件数目：3176，1970—2016 年）

Fig. 1 Simplified seismo-geological map of the study area

表 1 研究区地震数据统计结果（据国家地震前兆台网中心测定）

Table 1 The statistical seismic data of the study area

震级/ $M_L$	1.0—1.9	2.0—2.9	3.0—3.9	4.0—4.9	5.0—5.9	6.0—6.9	7.0—7.9	8.0—8.9
频数/个	4315	2688	378	188	23	3	1	0
震源深度/km	0—0.9	1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—61
频数/个	2200	593	2631	1132	603	289	130	18

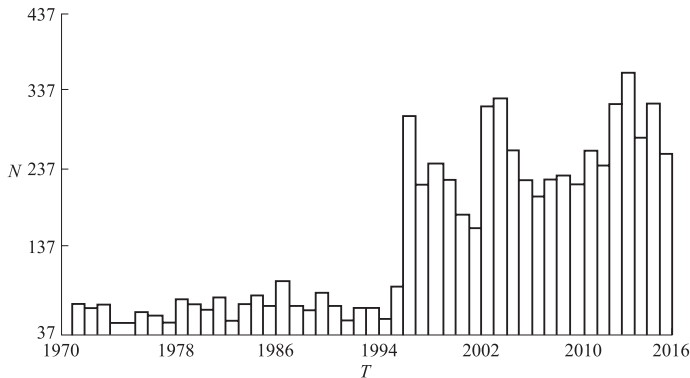


图 2 研究区  $T-N$  图

Fig. 2  $T-N$  diagram of the study area

删除余震可以消除地震之间的相关因素，使地震的发生尽量满足平稳性，并降低地震之间的相关性，即满足泊松模型（陈凌等，1998），对  $b$  值的研究分析起着至关重要的作用。本文选用 K-K 法（Keilis-Borok 等，1980）给出的时空尺度进行去余震处理，删除的余震有 1710 个，占全部地震的 22.52%。图 3 显示删除余震后的震级-频度关系（图 3（b））比删除余震前（图 3（a））更好地符合 G-R 关系式。本文采用最大曲率法获得最小完整震级  $M_c$ ，最大曲率处  $M_c$  为 2.0（图 3（b））。基于上述研究，本文用于计算的数据为删除余震后的地震目录，取震级下限为 2.0，上限为 4.6，共 2279 个有效地震。表 2 为删除余震后研究区  $M_L \geq 5.0$  的地震基本参数。

表 2 研究区  $M_L \geq 5.0$  的地震序列（据国家地震前兆台网中心测定）

Table 2 The earthquake sequence data ( $M_L \geq 5.0$ ) of the study area

日期(年-月-日)	时间	北纬/°	东经/°	震源深度/km	$M_L$	参考地点
2006-07-04	11:56	38.89	116.28	20	5.5	河北文安县
1999-03-11	21:18	41.16	114.39		5.5	河北张北县
1998-01-10	11:50	41.10	114.31	10	6.2	河北尚义县
1990-07-21	08:41	40.58	115.83	8	5.0	北京延庆县
1988-07-23	13:51	40.08	114.22		5.0	河北阳原县
1983-04-03	10:16	40.75	114.78	20	5.1	河北万全县
1980-02-07	13:31	39.52	117.90		5.2	天津宁河县

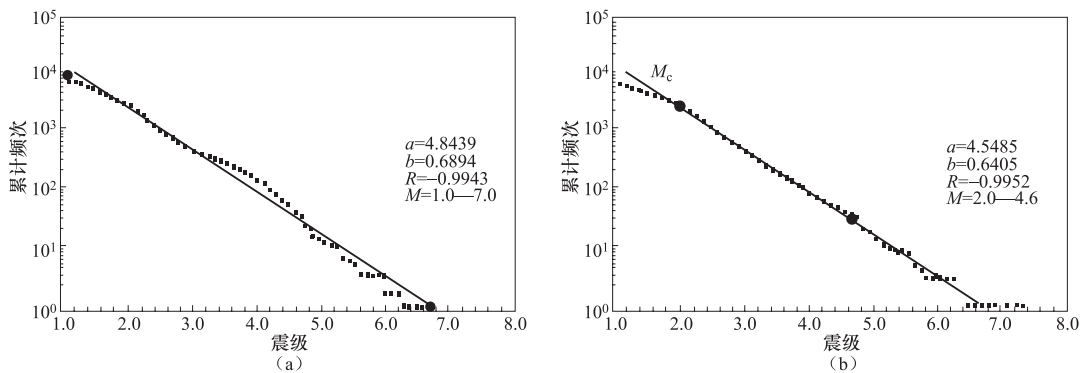


图 3 删除余震前 (a) 和删除余震后 (b) 震级-累计频次关系图

Fig. 3 Earthquake magnitude vs accumulative frequency before(a) and after (b) eliminating the aftershocks

## 2.2 方法

计算地震  $b$  值最通用的方法是线性最小二乘法和最大似然法（孙文福等，1992）。线性最小二乘法基于 1949 年 Gutenberg-Richter 提出的 G-R 公式，即：

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

其中， $N$  为震级  $M$  以上地震的频度， $a$  和  $b$  均为常数， $b$  值代表区域内不同大小地震频度的比例关系。

计算  $b$  值常用的另外一种方法是最大似然法。 $b$  值的最大似然估计公式为：

$$\hat{b} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N M_i} = \frac{1}{\bar{M}} \quad (2)$$

$\bar{M}$  的计算公式为:

$$\bar{M} = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_0} = \frac{0.4343}{\bar{M} - M_0} \quad (3)$$

标准偏差为:

$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

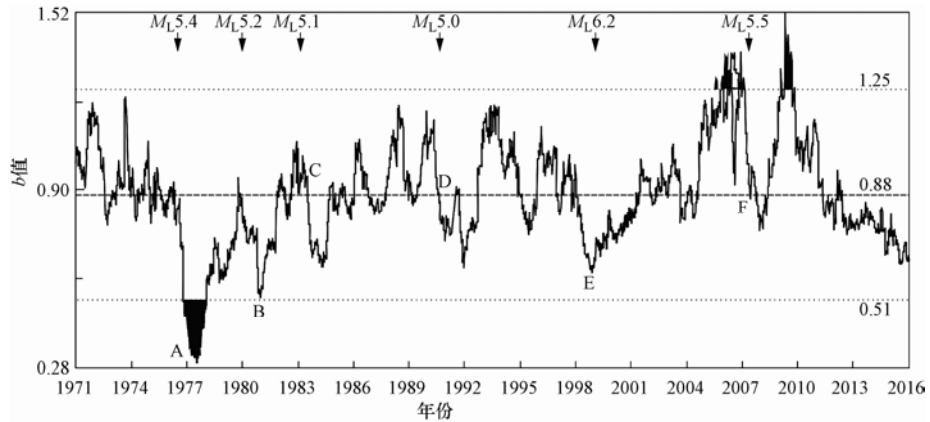
其中  $\bar{M}$  为已发生的一组地震的震级平均值,  $M_0$  为起算震级 (Shi 等, 1982)。在地震活动趋势分析中, 两种方法的侧重点不同。最小二乘法是以不同散点到拟合直线的距离为权重; 最大似然法则是基于概率密度函数, 对所有地震的震级用同样的权重求平均 (王辉等, 2012; 张琳琳等, 2015)。相比之下, 在地震数据量较少时, 最大似然法是常用的方法 (李涛等, 2010)。一般情况下, 地震目录中小震震级较多容易导致结果偏离 G-R 关系式 (沈繁鑫, 1999)。在本文统计的地震目录中 (图 3 (a)), 未删除余震之前的地震目录统计结果偏离了经典的 G-R 公式。因此采用最大似然法进行  $b$  值时间扫描。在本次计算中, 应用 Mapsis 软件, 选取 1 年为时间窗长, 1 天为滑动步长, 绘制出张渤断裂带  $b$  值随时间变化的曲线 (图 4)。

空间扫描分析上, 我们将研究区以  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  进行大网格划分, 计算得出每个网格的  $b$  值, 删除地震数目少于 20 的区域, 取步长为 0.1, 最小值取 0.4, 最大值取 1.5。基于地震预报分析系统, 对前文所得的有效地震目录的全部时段进行空间扫描, 并绘制出研究区  $b$  值等值线图 (图 5)。为了保证扫描结果的可靠性, 即每个网格内的有效地震数目应达到 20 以上, 图 5 中将地震数小于 20 的网格处理为空白区域。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 $b$ 值时间扫描特征

时间扫描结果显示, 1970 年以来, 研究区  $b$  值的变化范围较大, 总体在 0.28—1.25 之间波动。根据拟合曲线计算出  $b$  值平均值为 0.88, 以此作为最大似然法  $b$  值的参考临界值, 将 1.25 和 0.51 分别作为高、低  $b$  值的警戒线。如图 4 显示, 张渤断裂带  $b$  值一直处于起伏消长状,  $b$  值大小随时间分布不均匀。值得注意的是, 1976 年  $b$  值降到最低 (A 点), 而研究区内历史上 1976 年 7 月 28 日唐山曾发生 4 次 5 级以上地震 (包括余震)。从图中还可以观察到, B、E、F 处, 地震  $b$  值低于平均值, 而与之对应的几年之间 5 级以上地震频发, 如 1980 年 2 月 7 日, 天津宁河县发生 5.2 级地震 (B 点); 1990 年 7 月 21 日, 北京延庆发生 5.0 级地震 (D 点); 1998 年 1 月 10 日河北尚义县发生 6.2 级地震 (E 点); 2006 年 7 月 28 日河北文安县发生 5.5 级地震 (F 点)。而且这几次强震发生前  $b$  值都有一定幅度的下降, 震后逐渐回升。2004—2011 年间,  $b$  值都在平均值以上, 在相应的地震目录中, 都以小震为主, 且复发间隔较小。由此, 我们初步判断, 强震的发生与  $b$  值随时间的变化趋势基本吻合, 即: 强震发生一定时段内,  $b$  值较小; 小震频发的时段内,  $b$  值较大。这为根据  $b$  值分析地震危险性提供了有利依据。

图 4 研究区  $b$  值随时间变化Fig. 4 The  $b$ -value variation with time in the study area

据刘艳辉等(2015)用汶川地震、芦山地震验证,得出大震发生前后  $b$  值变化规律为“正常—低值—高值—回落—发震—正常”。通过研究区  $b$  值随时间变化(图 4)可以看出,1970—1975 年此地区  $b$  值一直处于平均水平,反映了研究区的孕震状态,1976 年河北唐山丰南一带(118.2°E, 39.6°N)发生了里氏 7.8 级( $M_w$  7.5)地震,并引发多次 5 级以上余震,大震频发,此年  $b$  值从高于平均值突降到 1970—2016 年的最低谷(A 点),其后逐渐回升至平均值。1980 年 2 月 7 日天津宁河县发生 5.2 级地震,  $b$  值降低到低于平均值,1 年后恢复正常。此震例周期性的特征印证了“正常—低值—高值—回落—发震—正常”的规律。2010 年  $b$  值达到峰值(1.52),此后一直处于下降水平,2016 年降到 0.65,已低于平均值,那么在未来的几年内  $b$  值是否会继续下降呢?关于这个问题,还需进行常态化监测。

### 3.2 $b$ 值空间扫描特征

空间扫描是为了研究  $b$  值在空间上的分布特征,为预测地震提供相应的依据。研究区  $b$  值随空间变化图(图 5)揭示出研究区  $b$  值分布不均匀,总体在 0.4 到 1.5 之间,平均值为 0.93,呈现出西北部和东南部相对偏低的特征。张渤断裂带西段及中西段的断裂密集,该带内大部分地区  $b$  值达到 0.78,低于平均值。结合研究区地震分布特点(图 1),5 级以上的地震多位于研究区东南部蓟运河断裂和西北部怀安—万全盆地北缘断裂附近,而此地区所对应的  $b$  值相对较低。这与本文  $b$  值低异常区的分布是吻合的。

$b$  值在空间上的分布可以大致反映应力的积累情况。据统计(表 1),此研究区的地震孕震层主要在 0—10km,即上地壳。而地壳越厚处  $b$  值越小(Maden 等, 2015)。全面了解区域活动断裂的发育程度及其活动和构造体系,是开展  $b$  值危险区研究和地震危险性分析的必要前提(谢卓娟等, 2015)。由空间扫描图像(图 5)结合断裂带  $b$  值分布特征(表 3)反映出研究区内  $b$  值随断裂带的分布有较大的差异,低  $b$  值区主要分布于西北部的怀安—万全盆地北缘断裂和东南部的蓟运河断裂;高  $b$  值区主要分布在研究区中部的保安—沙城断裂、永定河断裂和廊坊—武清断裂。

(1) 张家口断裂(F1): 张家口断裂总体呈北西西向展布,是一条高角度北倾逆冲或南倾正断的左旋走滑断层,也是张家口附近一条重要的地质地貌构造分界线,控制着第四纪构造演化和地质发育(周月玲等, 2010)。经统计,此断裂平均  $b$  值为 0.80。1970 年以来,张

家口断裂附近发生过 38 次 3 级以上地震。结合图 1 可看出, 该断裂附近中强震较多, 表明目前张家口断裂平均应力较低, 未来发生中强震的可能性较小。

表 3 研究区主要活动断裂和平均  $b$  值

Table 3 The main active faults and the average  $b$ -value of the study area

编号	断裂名称	平均 $b$ 值	长度 /km	产状			断裂性质	平均滑动速率/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	最新活动时代
				走向	倾向	倾角			
F1	张家口断裂	0.80	70	NNW	SE	$60^\circ$	正断层	$>0.1$	$Q_3$
F2	新保安-沙城断裂	0.76	32	NWW	SW	$50^\circ - 70^\circ$	正断层	0.2	$Q_4$
F3	南口-孙河断裂	0.78	58	NWW	SW, NE	$70^\circ$	正断层	0.3	$Q_4$
F4	夏垫断裂	0.78	23	NE	SE	$50^\circ - 70^\circ$	正走滑		$Q_4$
F5	永定河断裂	0.78	26	NW	SW, NE	$70^\circ - 75^\circ$	正走滑		$Q_2$
F6	廊坊-武清断裂	1.02	50	NW	SW		正断层		$Q_3$
F7	蓟运河断裂	0.68	50	NW	SW	$70^\circ$	正断层		$Q_4$

(2) 新保安-沙城断裂 (F2): 新保安-沙城断裂西起河北怀来新保安以西的梁家庄附近, 向西南经新保安北、良田屯、怀来县城、土木火车站北, 止于官厅水库西北的八营村附近 (盛艳蕊等, 2015)。1970 年以来在该断裂附近发生 3 次  $M_L 4.0$  以上地震。该断裂平均  $b$  值为 0.76, 处于高  $b$  值区。

(3) 南口-孙河断裂 (F3): 南口-孙河断裂是北京平原地区唯一一条北西向的活动断裂。该断裂北西端起自昌平县南口镇, 向南东方向经七间房、百泉庄、东三旗、孙河至通州 (张磊等, 2014)。平均  $b$  值为 0.78, 该断裂附近 3.0—3.9 级地震较多, 初步推测未来发生小震的可能性较大。

(4) 夏垫断裂 (F4): 夏垫断裂是首都东部地区一条 NNE 向的岩石圈尺度的区域性深断裂带。其形成和演化对北京平原地区的构造演化起着至关重要的作用 (何付兵等, 2013)。公元 1679 年在该断裂带上曾经发生历史上最大的一次地震, 即三河-平谷 8 级地震。本文计算得出夏垫断裂平均  $b$  值为 0.78, 结合地震地质简图 (图 1) 可知, 该断裂目前处于低应力状态, 未来发生强震的可能性较小。

(5) 蓟运河断裂 (F7): 通过统计显示该断裂平均  $b$  值为 0.68 (表 3), 是中强震高发区。该段历史上曾发生 108 次 3 级以上地震, 1976 年 7 月 28 日发生了 4 次 5 级以上的地震 (包括唐山地震的余震)。最大的一次地震是 1976 年 7 月 28 日 6.2 级 ( $117.78^\circ\text{E}$ ,  $37.45^\circ\text{N}$ )。由此可见, 此断裂应力较为集中, 1976 年积聚的能量被释放, 很可能产生破裂, 其后小震不断 (王熠熙等, 2015; 刘静伟等, 2016)。

基于由空间扫描获得的  $b$  值随空间变化特征, 结合研究区主要活动断裂带上  $b$  值空间分布特征 (表 3), 对张渤断裂带西段和中西段的综合分析认为, 未来的短期时间内, 小震多发生在研究区中部的高  $b$  值区, 而中强震多发生在低  $b$  值区。

### 3.3 $b$ 值影响因素的讨论

时间扫描 (图 4) 和空间扫描 (图 5) 分析显示, 不同时间段有不同的  $b$  值, 研究区内不同地区  $b$  值亦不相同。而导致这种差异存在的影响因素非常复杂, 主要有以下几个方面: 人

为因素，主要包括研究区的选择、地震资料的完整性、计算方法等；自然因素，包括当时的应力状态、介质的性质、地壳异质性、震源深度、孔隙压力、地温梯度和存在构造体等（李纪汉，1987；El-Isa 等，2014）。中介质的性质包括岩石的特性和种类，环境因素包括第四纪覆盖物较厚等。这一现象的物理机制可以用地壳介质的复杂程度和应力状态变化来解释，即在地壳介质相对均匀、岩石静压力较高的地壳深处容易成核形成大地震（沈小七等，2010）。

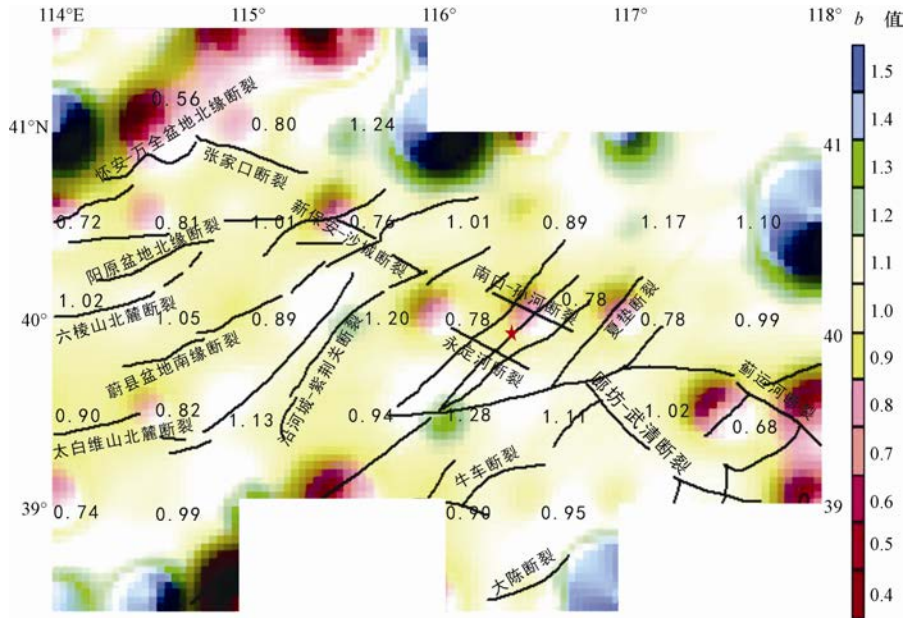


图5 研究区  $b$  值随空间变化

Fig. 5 The  $b$ -value variation in space in the study area

张渤断裂带作为首都圈地壳运动最为活跃的断裂带，由于长期处于伸展环境的大型拉分盆地中，导致地壳相对减薄，岩浆活动频繁（方颖等，2008；刘志宏等，2011）。基底断裂发育，地壳深部速度结构和构造在纵向与横向上有明显的非均匀性（王帅军等，2005）。上述复杂的构造特征导致研究区介质的不均匀、应力的不集中，从而使得  $b$  值不稳定，波动范围较大。

## 4 结论

本文主要基于地震目录，应用最大似然法获得张渤断裂带西段和中西段的地震  $b$  值，并进行时空扫描分析，得出如下结论：

(1) 利用最大似然法对地震目录进行时间扫描，显示张渤断裂带西段及中西段地区的地震  $b$  值在大震时降至最低，震后逐渐恢复为正常，且中强震发生时段内  $b$  值较低。

(2) 通过对研究区进行空间扫描，得到研究区内  $b$  值为 0.4—1.5，平均值为 0.93，呈现出西北部和东南部相对偏低特征，应力积累程度较高的断裂附近平均  $b$  值较低，这可能是受岩石的性质和构造复杂的影响。

(3) 综合以上分析， $b$  值在时间上突然下降之处，以及在空间上平均  $b$  值较低之处，如



怀安-万全盆地北缘断裂段和蓟运河断裂段(平均  $b$  值分别为 0.56 和 0.68 左右),应作为今后张渤断裂带西段及中西段地震监测预测的重点对象。

**致谢:**感谢防灾科技学院地震预测实验室给予的帮助和支持。感谢盛书中博士、吴萍萍老师在成文过程中给予的指导。审稿专家提出了宝贵意见;编辑老师给予了成文过程中的帮助,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 陈凌,刘杰,陈颀等,1998.地震活动性分析中余震的删除.地球物理学报,41(S1):244—252.
- 陈培善,白彤霞,李保昆,2003. $b$ 值和地震复发周期.地球物理学报,46(4):510—519.
- 方颖,江在森,张晶等,2008.张家口-渤海断裂带现今运动状态分析.大地测量与地球动力学,28(1):11—15.
- 高战武,徐杰,宋长青等,2001.张家口-蓬莱断裂带的分段特征.华北地震科学,19(1):35—42,54.
- 韩孔艳,2009.张家口—渤海构造带的分段性与地震活动特征研究.北京:中国地震局地质研究所.
- 何付兵,白凌燕,王继明等,2013.夏垫断裂带深部构造特征与第四纪活动性讨论.地震地质,35(3):490—505.
- 侯贵廷,叶良新,杜庆娥,1999.渤张断裂带的构造机制及其地质意义.地质科学,34(3):375—380.
- 赖晓玲,李松林,孙译,2007.渤海及邻区3次7级以上地震的深部构造背景.大地测量与地球动力学,27(1):31—33,54.
- 李纪汉,1987. $b$ 值影响因素的初步研究.地震学刊,7(2):49—53.
- 李全林,陈锦标,于录等,1978. $b$ 值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段.地球物理学报,21(2):101—125.
- 李涛,吴小平,王莹,2010.基于分区空间扫描研究云南地区 $b$ 值分布特征.云南大学学报(自然科学版),32(6):670—675.
- 刘静伟,吕悦军,谢富仁,2016.利用 $b$ 值空间分布解析2014年11月22日康定 $M_S$ 6.3地震的发生.地球物理学进展,31(2):553—558.
- 刘艳辉,赵根模,吴中海等,2015.青藏高原东南缘及邻区近年来地震 $b$ 值特征.地质通报,34(1):58—70.
- 刘志宏,梁一鸿,徐仲元等,2011.构造地质学.2版.北京:地质出版社.
- 任雪梅,高孟潭,冯静,2011.地震目录的完整性对 $b$ 值计算的影响.震灾防御技术,6(3):257—268.
- 沈繁鑫,1999.地震活动性参数 $b$ 值和年发生率的一种取值方法.华南地震,19(4):41—45.
- 沈小七,姚大全,陈安国等,2010.江淮地区地震精定位及 $b$ 值随深度的变化研究.地震地磁观测与研究,31(6):1—7.
- 盛艳蕊,张子广,周晓成等,2015.新保安-沙城断裂带土壤气地球化学特征分析.地震,35(4):90—98.
- 孙文福,顾浩鼎,1992.怎样正确计算 $b$ 值.东北地震研究,8(4):13—27.
- 索艳慧,李三忠,刘鑫等,2013.中国东部NWW向活动断裂带构造特征:以张家口-蓬莱断裂带为例.岩石学报,29(3):953—966.
- 王辉,曹建玲,荆燕等,2012.川滇地区强震活动前 $b$ 值的时空分布特征.地震地质,34(3):531—543.
- 王帅军,张先康,刘宝峰等,2005.张渤地震构造带中西段及邻区深部构造探测.大地测量与地球动力学,25(3):110—115.
- 汪素云,俞言祥,2009.震级转换关系及其对地震活动性参数的影响研究.震灾防御技术,4(2):141—149.

- 王熠熙, 张辉, 刘双庆等, 2015. 河北平原地震带  $b$  值时空变化特征. 地震工程学报, **37** (1): 188—195.
- 武敏捷, 朱红彬, 岳晓媛等, 2013. 基于多地震活动参数的首都圈地区地震危险性分析. 华北地震科学, **31** (1): 25—30.
- 谢卓娟, 吕悦军, 彭艳菊等, 2012. 东北地震区小震资料完整性分析及其对地震活动性参数的影响研究. 中国地震, **28** (3): 256—265.
- 谢卓娟, 李山有, 吕悦军, 2015. 滇西南地区主要活动断裂的  $b$  值空间分布特征. 地球科学——中国地质大学学报, **40** (10): 1755—1766.
- 张建中, 宋良玉, 1981. 地震  $b$  值的估计方法及其标准误差——应用蒙特卡罗方法估计  $b$  值精度. 地震学报, **3** (3): 292—301.
- 张磊, 白凌燕, 蔡向民等, 2014. 北京平原南口-孙河断裂带北西段活动性分析. 中国地质, **41** (3): 902—911.
- 张琳琳, 唐兰兰, 2015. 新疆天山地区  $b$  值时空变化特征. 地震, **35** (3): 93—101.
- 周月玲, 尤惠川, 2010. 张家口断裂第四纪构造变形与活动性研究. 震灾防御技术, **5** (2): 157—166.
- El-Isa Z. H., Eaton D. W., 2014. Spatiotemporal variations in the  $b$ -value of earthquake magnitude-frequency distributions: classification and causes. Tectonophysics, 615—616: 1—11.
- Gutenberg B., Richter C. F., 1954. Seismicity of the earth and associated phenomenon. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press.
- Ishimoto M., Iida K., 1939. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently. Bulletin of the Earthquake Research Institute, **17**: 443—478.
- Keilis-Borok V. I., Knopoff L., Rotvain I. M., 1980. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes. Nature, **283**(5744): 259—263.
- Khan P. K., Chakraborty P. P., 2007. The seismic  $b$ -value and its correlation with Bouguer gravity anomaly over the Shillong Plateau area: tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, **29**(1): 136—147.
- Khan P. K., Ghosh M., Chakraborty P. P., et al., 2011. Seismic  $b$ -value and the assessment of ambient stress in Northeast India. Pure and Applied Geophysics, **168**(10): 1693—1706.
- Maden N., Öztürk S., 2015. Seismic  $b$ -values, Bouguer Gravity and heat flow data beneath eastern Anatolia, Turkey: tectonic implications. Surveys in Geophysics, **36**(4): 549—570.
- Shi Y. L., Bolt B. A., 1982. The standard error of the Magnitude-frequency  $b$  value. Bulletin of the Seismological Society of America, **72**(5): 1677—1687.

## The Spatial and Temporal Scanning of the $b$ -value in the Western and Mid-western Section of the Zhangjiakou-Bohai Fault Belt

Duan Meifang<sup>1,2)</sup>, Lu Lina<sup>1)</sup>, Li Yingzhen<sup>1)</sup>, Li Baojun<sup>3)</sup>, Yang Ming<sup>1,4)</sup>  
and Jia Jianpeng<sup>1)</sup>

1) Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

2) Eryuan Seismic Station of Yunnan Earthquake Agency, Eryuan 671200, Yunnan, China

3) Jinzhou Seismic Station of Liaoning Earthquake Agency, Dalian 116100, Liaoning, China

4) State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** The Zhangjiakou-Bohai fault belt, as one of the important active faults in North China, as well as earthquake-prone area, becomes one of the crucial region to monitor the earthquake activities in China. In this paper we select the western and mid-western section of the Zhangjiakou-Bohai fault belt as the study region, and apply the maximum likelihood as calculating method to conduct analysis of earthquake catalogue during 1970-2016. The temporal analyses indicate that the seismic  $b$ -value ranges from 0.28 to 1.52 and drops to the lowest before the great earthquake and gradually recovers after the earthquake. The spatial analyses illustrate that the  $b$ -value shows 0.93 in average, and that in the lower average  $b$ -value region, such as north rim fault of the Huai 'an-Wanquan basin and Jiyunhe fault shows stronger regional stress level. The spatiotemporal characteristic analyses of the  $b$ -value, indicates that the degree of seismic risk varies in time and space in the study area. Our results provide basic data for seismic hazard assessment for the Zhangjiakou-Bohai fault belt.

**Key words:**  $b$ -value; The western and mid-western section of the Zhang-Bo fault belt; Seismic hazard