

翟娟, 洪德全, 朱亮, 等. 地震活动性多参数方法研究华北地区强震危险性[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 63–72. [ZHAI Juan, HONG Dequan, ZHU Liang, et al. Study on the Risk of Strong Earthquakes in North China Based on Multiple Seismicity Parameter Method[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 63–72]

## 地震活动性多参数方法研究华北地区强震危险性

翟娟<sup>1</sup>, 洪德全<sup>2</sup>, 朱亮<sup>1</sup>, 赵梦强<sup>1</sup>, 杨震<sup>1</sup>

(1. 淮南市地震局, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省地震局, 合肥 230031)

**摘要:** 利用华北地区38年中小地震进行 $b$ 值扫描, 作为该区域背景应力水平, 结果显示华北平原地震带和郯庐断裂带渤海区 $b$ 值较低, 应力积累水平较高。依据一定分区原则, 将研究区划分为6个区域, 采用多参数组合分析方法, 并结合各分区历史强震活动水平, 初步判断出各区的地震危险性, 结果表明: 山西带、燕山带、郯庐断裂带安徽段、山东段都处于较低或中等偏低的应力背景下, 以中小地震滑动为特征, 未来发生大震的可能性较小。郯庐断裂带渤海区正处于较高应力状态下, 以平均震级较大的频繁中小地震滑动为特征, 属于华北地区未来最有可能发生强震的区域。华北平原带正处于高应力背景下以稀疏的中小地震滑动为主要特征, 未来存在发生大震的可能性。

**关键词:** 多地震活动性参数;  $b$ 值; 华北地区; 强震危险性

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0063-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.07

## Study on the Risk of Strong Earthquakes in North China Based on Multiple Seismicity Parameter Method

ZHAI Juan<sup>1</sup>, HONG Dequan<sup>2</sup>, ZHU Liang<sup>1</sup>, ZHAO Mengqiang<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>

(1. Huainan Earthquake Agency, Huainan 232001, China; 2. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Based on the small and medium earthquakes in recent 38 years in North China, this paper carries out  $b$ -value scanning as the background stress level of the region. The results show that the  $b$ -value of the North China Plain seismic belt and the Bohai section of the Tanlu fault zone is low, and the stress accumulation level is high. According to certain zoning principles, the study area is divided into 6 regions. By using the multi-parameter combination analysis method and combining with the historical strong earthquake activity level of each region, the seismic risk of each region is preliminarily judged. The results show that the Shanxi belt, Yanshan belt, Anhui section and Shandong section of Tanlu fault zone are all under the low or medium-low stress background, characterized by the sliding of small and medium earthquakes, and the possibility of large earthquakes in the

收稿日期: 2023-06-19

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(科技惠民专项)(2022 m07020002)和中国地震科技星火计划项目(XH20026)联合资助。

作者简介: 翟娟(1991-), 女, 工程师, 主要从事地震监测、数字地震资料应用等工作。

E-mail: 309602567@qq.com

通信作者: 洪德全(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事震源机制解、危险区判定、重复地震等数字地震学研究。

E-mail: dequanh@mail.ustc.edu.cn

future is small. The Bohai section of the Tanlu fault zone, characterized by frequent sliding of small and medium earthquakes with large average magnitude, is in a high stress state and belongs to the region where strong earthquakes are most likely to occur in the future in North China. The North China Plain seismic belt is under the background of high stress, which is characterized by sliding of sparse small and medium earthquakes, and there is a possibility of large earthquakes in the future if the strain energy continues to accumulate.

**Keywords:** Multiple seismicity parameters; *b*-value; North China; Strong earthquake risk

## 0 引言

华北地区( $110^{\circ} \sim 124^{\circ}\text{E}$ ,  $30^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$ )是我国政治、经济、文化发展中心,但历史强震活动非常频繁,有记载以来,发生过26次7级以上强震,其中5次8级以上强震(图1),这些地震对我国的国民经济和生产都造成巨大损失。但是自1998年张北6.2级地震以来,至今6级地震平静已达25.4年,自1976年天津宁河西6.9级地震以来,6.5级地震平静已达46.6年,为1820年以来最突出的平静现象。未来,一旦华北6级以上平静被打破,携带巨大能量的中强震将在哪里释放?

以***b***值为主的地震多参数研究可以为这个问题提供参考。前人利用此方法在不同地区取得了较为丰富的研究成果。易桂喜等<sup>[1-3]</sup>利用以***b***值为主的多地震活动参数值的组合分析方法,分析了安宁河—则木河断裂带、龙门山—岷山断裂带等断裂段的现今活动习性,并初步辨别出了潜在的强震危险段落。黄元敏等<sup>[4]</sup>利用该方法讨论了粤闽交界及近海地区各段落的现今地震活动特征。马禾青等<sup>[5]</sup>通过该方法研究了青海两次7级地震,显示出非常好的对应关系,该文章认为地震活动场的综合变量能将各个原变量所包含的不十分明显的差异集中地表现出来,使得反映出来的异常变化尽可能明显。而目前该方法在华北地区强震危险性判定方面的研究成果还不是很多。张恩立等<sup>[6]</sup>、王玉婷等<sup>[7]</sup>、武敏捷等<sup>[8]</sup>分别将多参数方法运用于华北局部地区,如安徽新生代构造变形带、华北平原地震带以及首都圈,但尚未开展针对华北地区的全面、系统的强震危险性研究。随着华北地区6级以上强震平静时间的延长,对其未来的强震趋势和可能的发震地点开展详细、系统地研究显得很有必要。基于此,本文利用近38年的测震台网资料,通过***b***值空间分布和多地震活动性参数组合分析方法研究华北地区各区域的现今地震活动特征及其强震危险性,以期能对华北地区的未来

强震趋势提供参考。

## 1 地质构造背景

受太平洋板块向西俯冲和印度板块向北推挤的共同作用<sup>[9]</sup>,华北地区是我国东部地震活动最活跃的地区,其内部不同部位的地质构造与和强震活动也存在明显差异(图1)。研究区北缘呈近EW向展布的阴山—燕山构造带从三叠纪以来一直处于典型的陆内造山环境<sup>[10]</sup>,新生代以来具有较强的构造活动,中强地震较为频繁<sup>[11]</sup>。研究区西部的山西地震带主要受新生代断陷控制,区内断裂发育,以正断活动为主,同时兼有一定的右旋走滑分量,掀斜式运动是断块活动的主要表现形式<sup>[12-13]</sup>,强震活动呈NNE向条带状分布。中部华北平原块体主要断裂带的滑移速率低<sup>[14]</sup>,南、北缘构造组合特征不同,强震分布也有一定差异性。北缘地带主要受NE—NNE向断层控制,强震沿活动断裂条带状分布;南缘河淮平原区构造线以近东西向为主,构造变形较弱,具有明显的弥散性特征<sup>[15]</sup>。NNE向的郯庐断裂带是我国东部规模最大的断裂带,起源于印支期华北与华南板块的碰撞造山运动,在长期演化过程中,空间上具有明显的分段特征<sup>[16]</sup>,这里根据其地质地貌和地震活动特征,由南向北初步分为安徽段、山东段和渤海段。安徽段新生代以来断裂活动的最新年代大多在新近纪—第四纪,至多到中更新世,晚更新世以来的活动断裂较少<sup>[17]</sup>,总体以低频、弱震为主要特征。山东段在早白垩世具有明显的走滑构造行迹,形成了大规模青山组火山岩,晚白垩进入伸展期,形成“两堑一垒”的正断层构造格局<sup>[18]</sup>,区域内强震活动集中分布在郯庐断裂带及其西侧。渤海段自中新世晚期开始的新构造运动使其基底主断裂不同程度地重新活动,在新构造应力场作用下产生了一系列新断裂,且局部断裂在第四纪仍持续强烈活动,这与渤海地区强震多发关系密切<sup>[19]</sup>。

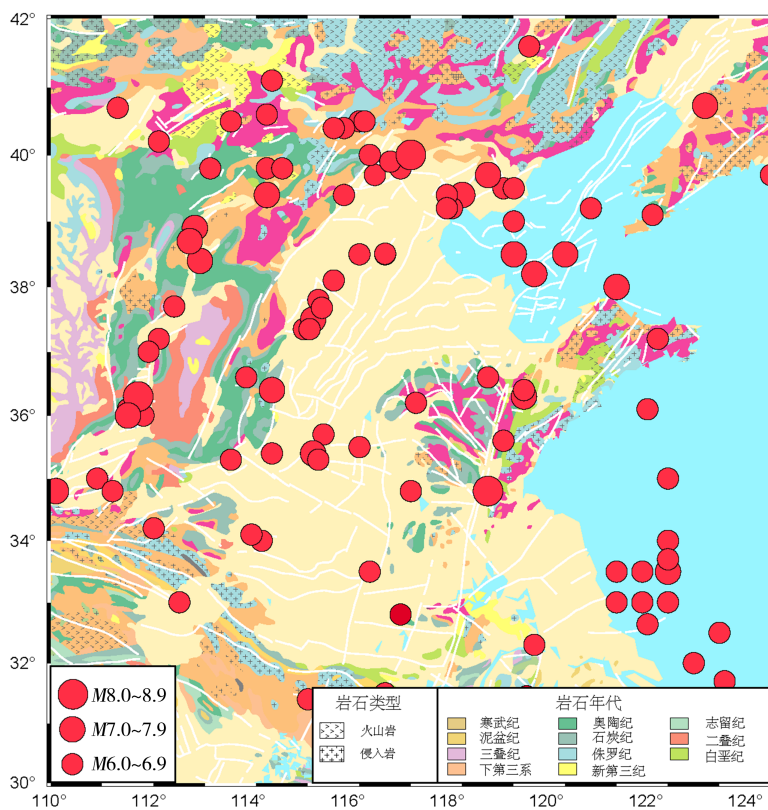


图1 华北地区地质构造背景

Fig.1 Geological and tectonic background of North China

## 2 方法及数据预处理

### 2.1 基本方法

岩石破裂实验研究结果认为<sup>[20-21]</sup>, 特定岩体内构造应力大小与破裂产生的地震震级—频度( $M-N$ )关系满足公式:

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

即古登堡—里克特公式, 简称G-R关系式<sup>[22]</sup>, 式(1)中:  $N$ 表示一定时间段中研究区域内震级 $\geq M$ 的地震累积频次,  $a$ 反应理论上的地震发生率,  $b$ 则反映了研究区域不同震级的相对比例。本文所采用的多参数以 $b$ 值为主, 包含 $\bar{a}/\bar{b}$ (针对的是整个段落的计算值, 相当于长期平均值, 反映的是最大期望震级)、 $n$ (地震年频度)、 $\sqrt{E}$ (断裂带单位面积的应变能年释放率)共4种参数<sup>[3]</sup>。近年来, 随着对 $b$ 值理论研究和应用范围的不断深入,  $b$ 值在地震危险性分析和地震预测方面的作用日益突显<sup>[23-29]</sup>。

现代地震研究中,  $b$ 值的计算方法主要有最小

二乘法 and 最大似然法。由于最小二乘法更重视含有丰富信息量的较大地震的作用, 最大似然法对所有地震的震级用同样的权重求平均, 相当于给数量较多的小地震信息加权, 因此利用小震目录对区域地震活动进行分析时, 可采用最大似然法<sup>[30-31]</sup>。本文以小震目录为主研究华北地区的背景应力水平, 结合历史中强震分析各段落的地震危险性, 故本文采用最大似然法计算以 $b$ 值为主的多参数, 其计算公式为:

$$\hat{b} = \frac{N \lg e}{\sum_{i=1}^N (M_i - (M_0))} \quad (2)$$

式(2)中:  $\hat{b}$ 代表 $b$ 值的估计量,  $N$ 为地震总个数,  $M_i$ 代表第 $i$ 个地震的震级,  $M_0$ 为起算震级<sup>[32]</sup>。

### 2.2 数据预处理

为提高 $b$ 值计算结果的可靠性, 本文利用中国地震台网中心提供的1970年以来的 $M_L \geq 1.0$ 正式地震编目, 并基于G-R关系确定研究区最小完整性震级( $M_c$ )。确定 $M_c$ 的方法有多种, 如震级—序号法定性分析<sup>[33]</sup>, 多方法定量分析<sup>[34]</sup>, 以及震级—频度分布<sup>[35]</sup>。震级—序号法按地震发生先后顺序对地

震排序, 由对应的序号和震级的分布讨论地震完整性变化。图2显示, 1985年之后 $M_L \leq 2.0$ 地震记录明显增多, 目录的最小完整性震级 $M_c$ 介于1.0~2.0之间。

多方法定量分析含最大曲率方法(也称MAXC方法, 震级—频度分布曲线一阶导数的最大值对应的震级作为 $M_c$ )和拟合度检测法(也称GFT方法, 是通过搜索给定的实际与理论震级—频度分布下的拟合程度百分比来确定 $M_c$ , 这里分别称为GFT-90%和GFT-95%), 由于不同方法同时使用, 产生优选问题, 设定优先级为GFT-95%>GFT-90%>MAXC, 选取可计算且优先级高的 $M_c$ -Best为最终结果<sup>[36]</sup>。图3显示, 1985年后的地震目录在进行多种方法分析时, 能够满足设定的优先级(GFT-95%>GFT-90%>MAXC), 最优起算震级 $M_L \leq 2$ 。震级—序号法定性分析和多方法定量分析较为一致地

反映出: 1985年之后华北地区监测能力明显强于1985年之前。

为避免1985年以前监测能力不足对计算结果产生影响, 需进一步明确该时段内 $M_c$ 的取值。本文对研究区该时段内 $M_L \geq 1.5$ 地震进行震级—频度关系拟合(图4), 发现1.5级以上地震基本满足线性关系, 即研究时段内 $M_L \geq 1.5$ 地震的记录是完整的。因此, 本文选定华北地区1985年1月至2022年12月 $M_L \geq 1.5$ 作为地震目录资料。

为避免余震对研究过程及结果产生影响, 本文参考陈凌等<sup>[37]</sup>、韩晓明等<sup>[38]</sup>采用的余震剔除方法, 基于MATLAB软件在地震 $b$ 值计算程序中采用时空窗法(G-C法)进行余震剔除。利用去余震的地震目录进行震级—频度拟合, 所得 $b$ 值作为衡量该区域内近38年来的背景应力水平的指标。

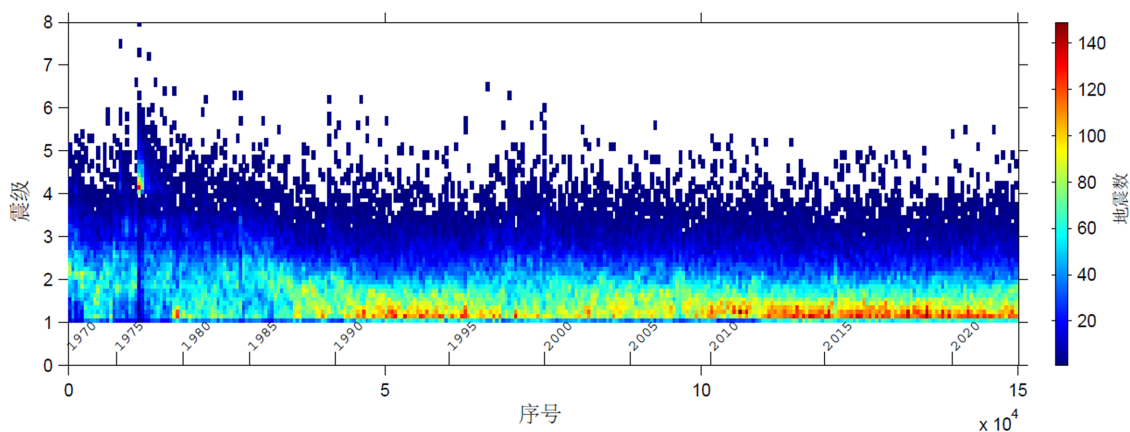


图2 1970年以来华北地区 $M_L \geq 1.0$ 地震事件震级—序号图  
(1970-01-01—2022-12-31)

Fig.2 Magnitudes-number diagram of earthquakes with  $M_L \geq 1.0$  in North China since 1970  
(1970-01-01—2022-12-31)

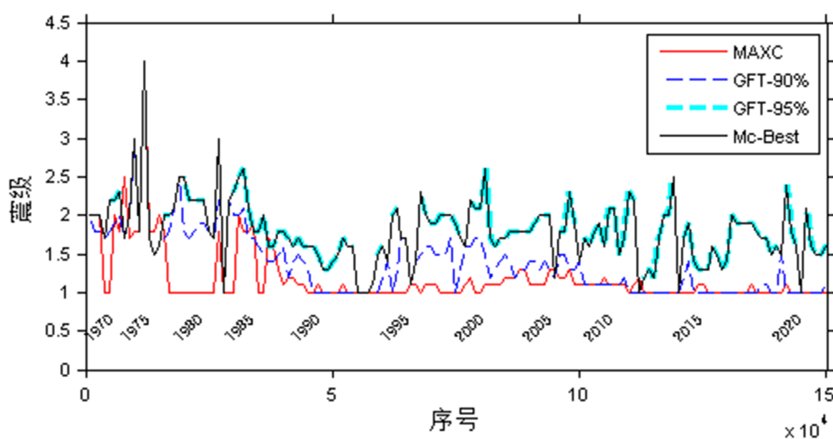


图3 华北地区最小完整性震级 $M_c$ 时序变化曲线(多方法)

Fig.3 Time series variation curve of the minimum completed magnitudes( $M_c$ ) in North China (multi-method)



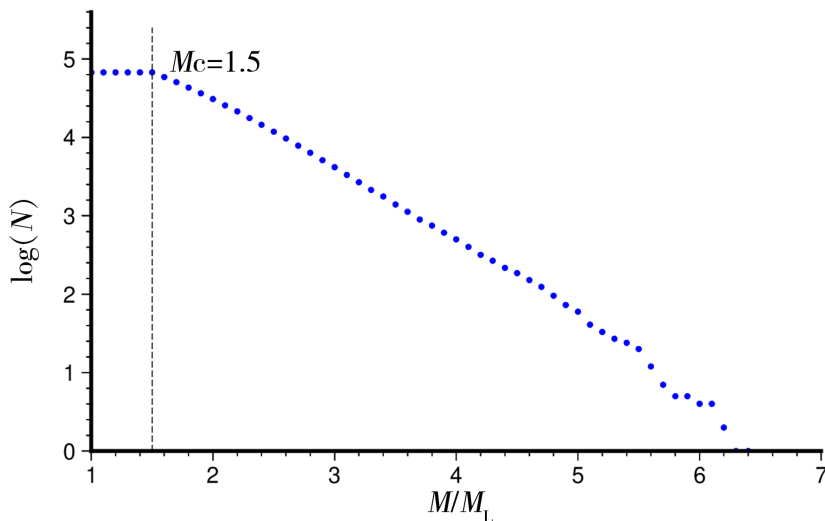


图4 华北地区地震震级与频度关系(1985-01-01—2022-12-31)

Fig.4 The relationship between the earthquake magnitude and frequency in North China(1985-01-01—2022-12-31)

对研究区域网格化时考虑到网格大小的划分对计算结果的影响,网格太小地震个数减少,达不到统计要求,网格太大会使研究区内的 $b$ 值空间分布特征不明显<sup>[39]</sup>。本文将研究区域1985-01—2022-12时段内的扫描窗长确定为 $1.5^\circ$ 、滑动步长确定为 $0.5^\circ$ ,为确保拟合结果的可靠性,计算时要求每个网格中的地震样本数不少于60个。我们使用人机交互式 $b$ 值和多参数程序<sup>[40]</sup>,分别计算了华北地区 $b$ 值和相应段落的 $\bar{a}/\bar{b}$ 、 $n$ 值、 $\sqrt{E}$ 值,组成多种参数值组合,进而综合分析研究区内各分区的强震危险性。

### 2.3 多参数的地震学意义

本文所选参数 $b$ 值、 $\bar{a}/\bar{b}$ 、 $n$ 值、 $\sqrt{E}$ 具有不同的物理意义,从不同侧面描述了同一区域同一时间段内的地震活动特征,反映了该期间的介质性质。若这些量在时空分布上确实反映了大震孕育发展中介质的某些特征,并且相互间存在着内在关系,那么这些量都可以作为预测地震和确定强震孕震区的标志量<sup>[41]</sup>,比单个参数值能更好地反应断裂运动状态,从而更好地分析不同断裂部位的现今活动习性。例如,具有低 $b$ 值(反映高应力)、低 $n$ 值(反映低频度)和低 $\sqrt{E}$ (反映低应变能释放率)以及较高的 $\bar{a}/\bar{b}$ 值(反映偏高的最大期望震级)的参数值组合的断裂段落,现今活动习性应处于高应力背景下的相对闭锁状态。具有高 $b$ 值和高 $n$ 值、中等或中偏低的 $\sqrt{E}$ 值以及较低 $\bar{a}/\bar{b}$ 值参数值组合的断裂段落,应具有以频繁小震滑动为主,无高应力积累的现今活动习性<sup>[2-4, 8, 42]</sup>。

### 2.4 研究区内各地震带分区

依据 $b$ 值的高低(图6)、6级以上中强震震中分布密度(图1)、断裂带几何结构的变化等多种因素,将研究区分为6个区域(图5)。虽然山西带、燕山带、华北平原带规模较大,但各自区域内的整体性较好, $b$ 值的空间分布差异不大,历史地震分布密度相当,可将各地震带整体作为一个分区考虑。而郯庐断裂带具有明显的分区特征,根据 $b$ 值的空间分布和断裂带的几何特征分成3个小区,分别为郯庐断裂带安徽区、山东区和渤海区。图5显示各分区内现代地震活动都处于较高水平,单位面积内震中分布密度较大,能够充分满足 $b$ 值计算的样本量要求,保证了 $b$ 值计算结果的可靠性。

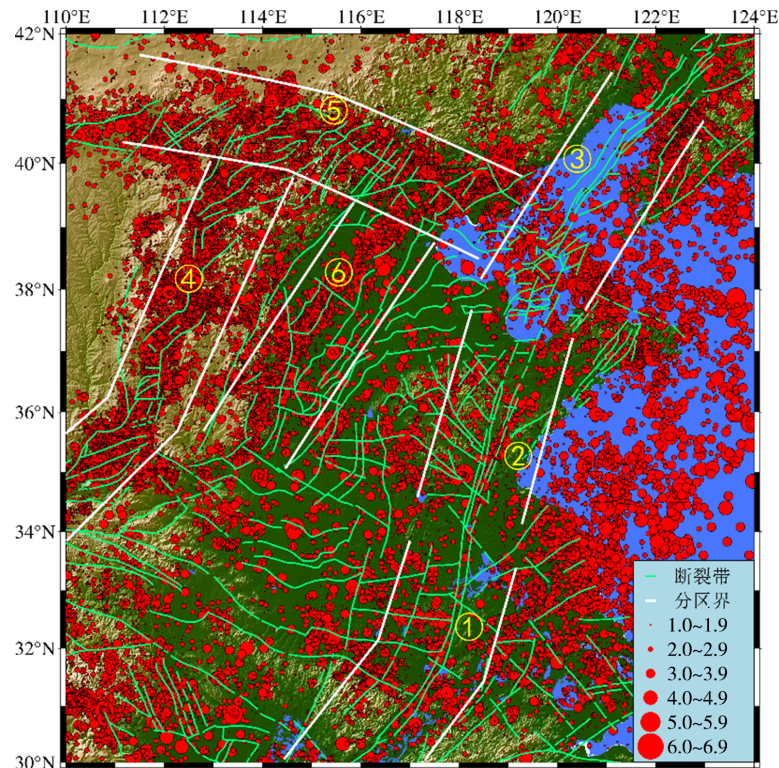
## 3 结果与分析

### 3.1 $b$ 值空间分布特征

图6是利用最大似然法计算所得 $b$ 值的空间分布图,对于地震数目非常有限未能算出 $b$ 值的地区,图中显现的是空白区域,本文采用插值方法对分布图的空隙进行了填充。

扫描所得 $b$ 值作为华北地区的背景应力水平,能够反映出华北地区承受平均应力和接近强度极限的程度<sup>[43]</sup>,显示出该区域应力积累水平在空间分布上具有明显的不均匀性,和区域地形地貌有着较好的对应关系(图6),Wierner等<sup>[34]</sup>认为应力的

高低与  $b$  值成反比，低  $b$  值区具有更高应力积累，大地震通常发生在断裂带的低  $b$  值区域。图 6 显示，阴山—燕山构造带、山西地震带、秦岭—大别造山带的东西两翼、郯庐断裂带山东区等山脉地区的  $b$  值总体偏高，介于 0.7~0.9 区间，反映出相对较低的地壳应力水平。



①郯庐断裂带安徽区;②郯庐断裂带山东区;③郯庐断裂带渤海区;④山西断裂带;⑤阴山—燕山断裂带;⑥华北平原地震带  
图 5 华北地区现代地震分布及各地震带分区示意图

Fig.5 Distribution of modern earthquakes and zoning diagram of each seismic zone in North China

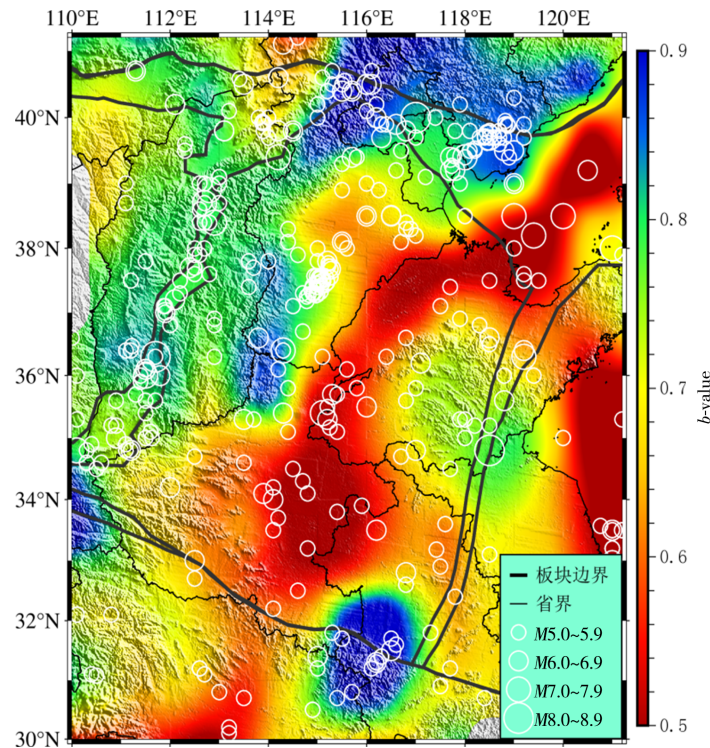


图 6 华北地区  $b$  值空间分布图  
Fig.6 Spatial distribution of  $b$ -value in North China



黄、渤海近岸海域及华北平原地区的 $b$ 值总体偏低,介于0.5~0.7区间,呈NE向条带状分布,反映出相对较高的应力水平,和现代强震活动水平及区域构造环境密切相关<sup>[11,44]</sup>。自1970年以来,黄、渤海及其周边只发生过一次6级以上地震,为1975年海城7.3级地震,华北平原地区没有6级以上强震活动,两个区域内现代地震活动都比较弱,应变能释放较少,处于应变能持续积累阶段<sup>[45]</sup>。从区域构造环境来看,黄、渤海受太平洋俯冲带影响,尤其渤海位于NNE向郯庐断裂带和NWW向燕山—渤海断裂带交汇部位,受断裂控制明显<sup>[46]</sup>,应变能积累较快,地震危险性有增强趋势<sup>[47]</sup>。华北平

原地区受到东部太平洋板块SW向俯冲和西南部青藏高原NE向推挤作用<sup>[48]</sup>,此外,华北平原作为北部阿穆里安块体和南部华南块体的衔接过渡带,其要吸收容纳阿穆里安块体和华南块体同步向东运动的每年大约6 mm速度差,这都加速了华北平原的构造变形和应力积累<sup>[49]</sup>,低 $b$ 值状态反映该区域现阶段地壳应力水平较高。

3.2 多地震活动性参数分析与讨论

采用地震活动性多参数组合分析方法综合判定华北地区6个分区的强震危险性,计算结果见表1、图7。

表1 华北地区各分区地震活动性参数值与现今活动习性  
Table 1 Seismicity parameter values and current activity features of different regions in North China

分区编号及名称	①郯庐安徽区	②郯庐山东区	③郯庐渤海区	④山西带	⑤燕山带	⑥华北平原地震带
$\bar{b}$	0.912	0.892	0.887	0.908	0.895	0.832
$\sqrt{E}/10^3 J^{1/2}/(a \cdot km)^{-1}$	5.951	17.732	28.890	67.369	71.807	22.570
$n/次 \cdot (a \cdot km^2)^{-1}$	8.547	7.020	35.774	40.500	31.260	16.914
$\bar{a}/\bar{b}$	5.389	5.320	6.279	6.037	6.057	6.053
相对应力水平	低	偏低	中等	低	偏低	高
现今活动习性	稀疏的中小地震滑动	稀疏的中小地震滑动	平均震级较大的频繁中小地震滑动	频繁的中小地震滑动	平均震级较大的频繁中小地震滑动	稀疏的中小地震滑动

根据 $b$ 值空间分布(图6)、历史及近现代强震分布(图1),结合研究区内各断裂分区的地震活动性参数值计算结果(表1、图7),对华北地区郯庐断裂带、山西带、燕山带和华北平原带的现今地震活动习性 & 地震危险性进行如下分析:

郯庐断裂带安徽区(区域①)历史上曾发生3次6级以上地震,最近一次是1917年安徽霍山6 $\frac{1}{4}$ 级地震。图6显示该区 $b$ 值最高,且历史及现今地震活动水平相比其他区域明显偏低(图5),处于能量缓慢积累阶段<sup>[50]</sup>。图7(a)显示该区具有低 $\sqrt{E}$ 值、 $n$ 值、 $\bar{a}/\bar{b}$ 值和较高的 $b$ 值参数值组合。研究表明<sup>[2-4,8,42]</sup>该参数值组合反映了低应力水平下以较为稀疏的中小地震滑动为特征。曹志磊<sup>[50]</sup>和刘东旺<sup>[51]</sup>分别通过断层形变累积率和系统聚类分析的方法对郯庐断裂带安徽区地壳应力场和地震活动水平进行研究,一致认为该区发生中强地震的能量积累尚不足,地震活动水平未显示增强趋势,现今

断裂的活动性不强。结合前人研究成果,本文认为该区发生大震甚至中强震的可能性较小。

郯庐断裂带山东区(区域②)位于郯庐断裂带中段,历史上曾发生7次6级以上地震,有记载以来的最大一次地震是1668年郯城8 $\frac{1}{2}$ 级巨震,最近的一次是1829年益都6 $\frac{1}{4}$ 级地震。图6显示该区应力分布不均匀,但总体处于中等偏低的应力水平状态。图7(a)显示该区具有较低的 $\sqrt{E}$ 值、 $n$ 值、最低的 $\bar{a}/\bar{b}$ 值和中等偏高的 $b$ 值参数值组合。张鹏等<sup>[52]</sup>利用库伦准则计算得到郯庐断裂带山东区域处于稳定状态,发生强震的可能性不大的结论。李开洋等<sup>[53]</sup>通过断层面摩擦系数和应力累积指标得到该区浅部应力积累水平偏高,深部应力积累水平中等的结论。结合前人研究成果,本文认为该区在中等偏低应力水平下以稀疏的中小地震滑动为主,发生大震的可能性较小。

郯庐断裂带渤海区(区域③)历史上曾发生8次

6级以上地震,最近的2次强震分别是1975年7.3级地震和1969年7.4级地震。图6显示该区 $b$ 值较低,正处于较高应力状态下,是现今华北地区应变能积累最高的区域。图7(a)显示该区具有最高的 $n$ 值、 $\bar{a}/\bar{b}$ 值和 $\sqrt{E}$ 值以及最低的 $b$ 值。王华林<sup>[54]</sup>、邓起东<sup>[55]</sup>等一致认为渤海区现代构造环境复杂,地震活动具有频度高、强度大的特点,是华北地区强震多发区。结合前人研究成果,本文认为该区在较高应力状态下以平均震级较大的频繁中小地震滑动为特征,属于郯庐断裂带未来最有可能发生强震的区域。

山西带(区域④)历史上发生过20余次6级以上地震,强震数目为研究区内各分区之首,历史强震活动频繁,最近的两次强震分别为1998年6.2级地震和1976年6.2级地震。王晓山等<sup>[56]</sup>研究认为,山西带历史上强震频发,造成地壳介质破碎,不易积累足够的应变能,这一理论有力地解释了山西带现阶段较低的应力状态(图6)。图7(b)显示该区具有较高的 $\sqrt{E}$ 值、最高的 $n$ 值、较低的 $\bar{a}/\bar{b}$ 值及仅次于区域①的高 $b$ 值,反映出较低应力背景下以频繁的中小地震滑动为主要特征,与山西断陷带主要以微小地震活动为主的结果较为一致<sup>[56]</sup>。综合前人研究成果,本文认为该区未来发生大震的可能性较小。

燕山带(区域⑤)历史上发生17次6级以上地震,其中1976—1977年间发生6.2~7.8级地震多达6次。该区具有较高的 $b$ 值,并且局部偏高的 $b$ 值(图6)提示该地震带内存在局部低应力小区。图7(b)显示该区整体具有最高的 $\sqrt{E}$ 值、次高的 $\bar{a}/\bar{b}$ 值、中等偏高的 $n$ 值以及较高的 $b$ 值参数值组合,自1970年以来,燕山带发生7次6级以上地震,应变能得到极大程度释放。一次大地震发生后,在相当长的一段时间内,其周邻地区很少再发生6级以上地震<sup>[57]</sup>。通过结合现代中强震背景,本文认为该区现今正处于中等偏低应力状态下以平均震级较大的频繁中小地震滑动为特征,未来发生大震的可能性较小。

华北平原带(区域⑥)历史上发生过19次6级以上地震,其中1966—1967年发生6级以上地震6次(包含一组强震序列)。图6显示该区具有最低的 $b$ 值,反映出相对较高的应力水平。图7(b)显示该区具有较低的 $\sqrt{E}$ 值、 $n$ 值、中等偏高的 $\bar{a}/\bar{b}$ 值和最低的 $b$ 值参数值组合。王熠熙等<sup>[58]</sup>根据 $b$ 值时空变化特征,认为华北平原带正处于相对高应力或闭锁状态,存在发生中强以上地震的潜在危险。结合前人研究成果,本文认为该区在高应力背景下以稀疏的中小地震滑动为主要特征,未来存在发生大震的可能性。

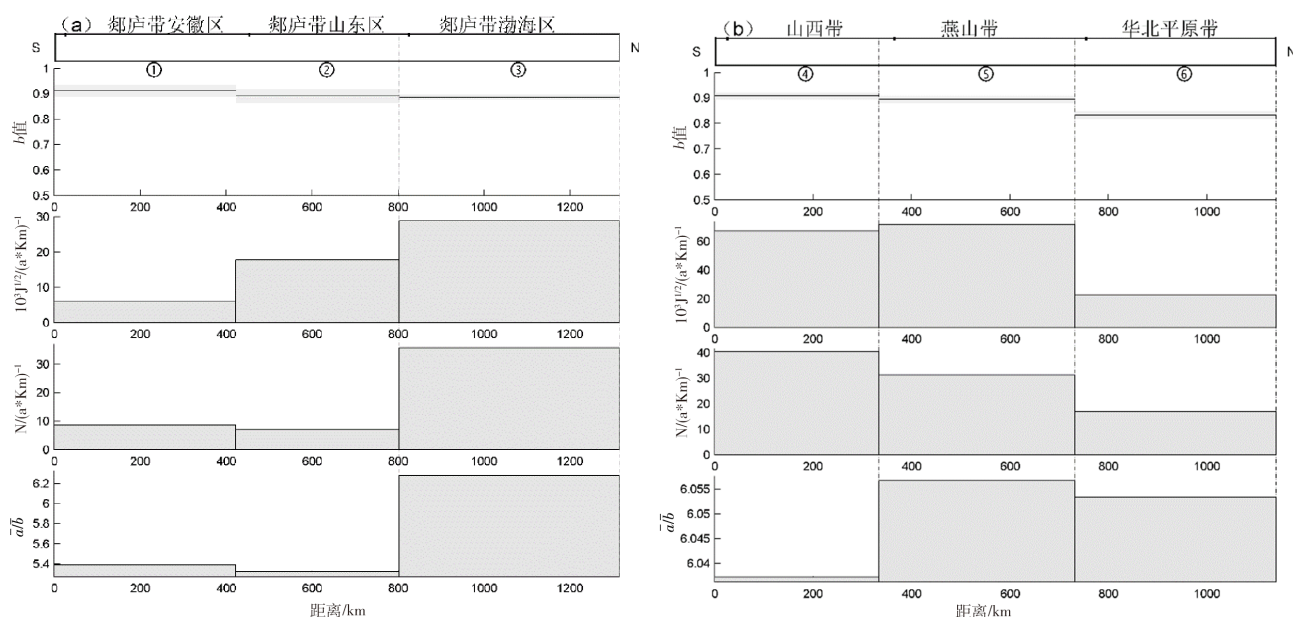


图7 华北地区各分区多地震活动性参数值组合图像

Fig.7 Combined images of multiple seismicity parameter values in each zone of North China



## 4 结论

(1)华北地区的6个区域均具有不同的地震活动习性,但可以粗略归纳为3类。其中,山西带、燕山带、郯庐断裂带安徽区、山东区都处于较低或中等偏低的应力背景下,以中小地震滑动为特征,未来发生大震的可能性较小。郯庐断裂带渤海区正处于较高应力状态下,以平均震级较大的频繁中小地震滑动为特征,属于郯庐断裂带未来最有可能发生强震的区域。华北平原带正处于高应力背景下以稀疏的中小地震滑动为主要特征,未来存在发生大震的可能性。

(2)从 $b$ 值空间分布图可以看出,研究区内华北平原地区、郯庐断裂带渤海区以及黄海沿岸的 $b$ 值较低,处于高应力状态。尤其渤海区受断裂控制,应变能持续积累,是研究区内最有可能发生强震的地方;华北平原地区整体地震活动水平较低,但构造运动复杂,具有高应力背景,未来存在发生大震的可能性。

本文是基于近38年中小地震活动性,结合历史强震做出各分区的危险性判断,在预测预报的时间尺度上应属于中—长期,难以对危险的时间界限给出确切的定义,但对各分区的应力背景水平、相对地震危险性具有较强的参考意义。

## 参考文献

- [1] 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 & 地震危险性[J].地震学报,2004(03):294-303.
- [2] 易桂喜,闻学泽,王思维,等.由地震活动参数分析龙门山—岷山断裂带的现今活动习性与强震危险性[J].中国地震,2006(02):117-125.
- [3] 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 & 问题[J].地震地质,2007(02):254-271.
- [4] 黄元敏,杨马陵,叶秀薇.多地震活动性参数在粤闽交界及其近海地区的应用[J].华南地震,2011,31(02):71-78.
- [5] 马禾青,杨明芝.地震活动多参数综合变量的异常分析方法——以青海两次7级地震为例[J].地震,2017,37(04):50-57.
- [6] 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,2009,29(02):54-61.
- [7] 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(02):6-14.

- [8] 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,2013,31(01):25-30.
- [9] 邓起东,张裕明,许桂林,等.中国构造应力场特征及其与板块运动的关系[J].地震地质,1979,1(1):11-22.
- [10] 邱爱金,张万良.阴山—燕山造山带的“开合”历史[J].地学前缘,2002(02):414.
- [11] 苏鸾声.燕山渤海地震带两端地震活动的特征[J].地震研究,2000,23(3):314-317.
- [12] 郭秋娜.汾渭地震带地震活动性研究[D].北京:中国地震局地震预测研究所,2012.
- [13] 沙海军.山西地震带 $b$ 值空间分布与构造应力场的关系研究[J].地壳构造与地壳应力文集,2016(02):12-18.
- [14] 王晓山.华北平原块体地壳应力场与强震震源断层参数的研究[J].国际地震动态,2018(02):40-41.
- [15] 张岳桥,施伟,董树文,等.华北新构造:印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用[J].地质学报,2019,93(05):971-1001.
- [16] 李康.郯庐断裂带(张渤带以南)地震破裂综合分段研究[J].国际地震动态,2017(11):43-45.
- [17] 张杰,姚大全,刘东旺,等.安徽及邻区中长期地震危险区的预测研究[J].地震地磁观测与研究,2006,27(003):29-39.
- [18] 张鹏,王良书,钟锴,等.郯庐断裂带的分段性研究[J].地质论评,2007(05):586-591+721-722.
- [19] 高战武,侯亚森,钟慧,等.中国东部海域断裂构造格架与地震活动研究[J].震灾防御技术,2021,16(01):11-18.
- [20] Scholz C H. The Magnitude-frequency relation of microfracturing in rock and its relation to earthquake[J]. Bull. seism. Soc. Am, 1968(58):399-415.
- [21] Urbancic T I, Trifu C I, Long J M, et al. Space-time correlation of  $b$ -values with stress release [J]. Pure and Applied Geophysics, 1992, 139(3):449-462.
- [22] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Nature, 1944(156):71-371.
- [23] Schorlemmer D, Wiemer S. Earthquake statistics at Parkfield: 1. stationarity of  $b$ -value[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B12):B12308[2023-06-01]. <https://doi.org/10.1029/2004JB003234>
- [24] Nanjo K Z, Hirata N, et al. Decade-scale decrease in  $b$ -value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(20):L20304.
- [25] Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto-Elasino Fault Zone[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B4):7829-7844[2023-06-01]. <https://doi.org/10.1029/2012GL052997>

- [26] Wyss M. Locked and creeping patches along the Hayward fault, California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18):3537-3540.
- [27] 苏珊, 郭培兰. 广西及邻区  $b$  值变化特征[J]. *华南地震*, 2022, 42(04):102-108.
- [28] 邓远立, 何萍. 广东新丰江水库区地震活动  $b$  值时空分布特征研究[J]. *华南地震*, 2016, 36(03):61-67.
- [29] 张洪艳, 卢燕红, 康建红, 等. 吉林前郭震群  $b$  值的深度变化特征分析[J]. *华南地震*, 2015, 35(02):96-99.
- [30] 陈顺云, 刘力强, 马胜利, 等. 构造活动模式变化对  $b$  值影响的实验研究[J]. *地震学报*, 2005(03):317-323.
- [31] 吴果, 周庆, 冉洪流. 震级-频度关系中  $b$  值的极大似然法估计及其影响因素分析[J]. *地震地质*, 2019, 41(1):21-43.
- [32] Aki K. Maximum likelihood estimate of  $b$  in the Formula  $\log N=a-bM$  and its confidence limits[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 1965, 43(2):237-239.
- [33] Ogata Y, Imoto M, Katsura K. 13-D spatial variation of  $b$ -values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto-district, Japan[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 104(1):135-146.
- [34] Wiemer S, Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. *Bull. seism. Soc. Am*, 2000(90):859-869.
- [35] 韩立波, 蒋长胜, 李艳娥, 等. 用于地震可预测性 CSEP 计划的南北地震带地区地震最小完整性震级  $M_c$  研究[J]. *地震*, 2012, 32(01):17-27.
- [36] 王培玲, 胡玉. 青海地区地震目录最小完整性震级研究[J]. *地震研究*, 2014(S1):40-44.
- [37] 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(S1):244-252.
- [38] 韩晓明, 张文韬, 王树波, 等. 河套地震带的  $b$  值时空变化特征分析[J]. *中国地震*, 2016, 32(03):522-532.
- [39] 吴萍萍, 李振, 叶庆东, 等. 郯庐断裂带南段及邻区地震  $b$  值的空间分布特征[J]. *中国地震*, 2015, 31(02):372-381.
- [40] 冯建刚, 张辉, 杨萍. 2013年岷县漳县6.6级地震前地震  $b$  值异常特征研究[J]. *地震*, 2016, 36(01):32-37.
- [41] 马鸿庆, 王荣君. 大、中地震前能量  $E$  的异常变化[J]. *地震学报*, 1982(01):35-44.
- [42] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2008年汶川  $M_s$ 8.0地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(06):1490-1500.
- [43] 李平, 朱元清, 肖兰喜, 等. 华北地区强震前兆空间动态场中短期综合预报研究[J]. *地震*, 2000(02):37-47.
- [44] El-Isa Z H, Eaton D W. Spatiotemporal variations in the  $b$ -value of earthquake magnitude-frequency distributions: classification and causes[J]. *Tectonophysics*, 2014(615-616):1-11.
- [45] 董旭光, 周翠英. 燕山—渤海地震带的现今构造应力环境[J]. *华南地震*, 2000, 20(1):16-23.
- [46] 王华玉. 中国近海海洋地震活动时空分布特征及构造环境分析[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [47] 石玉燕, 颜启, 李振军, 等. 燕山—渤海地震带中强地震的分析研究[J]. *华南地震*, 2006, 26(2):61-65.
- [48] 冯向东, 魏东平, 陈棋福. 基于观测应力场的大华北地区动力学机制探讨[J]. *地震学报*, 2005(01):1-10+119.
- [49] Zhang Y G, Zheng W J, Wang Y J, et al. 全球定位系统数据所显示的华北平原现今形变[J]. *世界地震译丛*, 2020, 51(01):75-85.
- [50] 曹志磊, 周琼, 鲍玉静, 等. 郯庐断裂带中南段断层形变累积率长期变化特征[J]. *国际地震动态*, 2018(12):22-28.
- [51] 刘东旺, 夏瑞良, 刘泽民, 等. 郯庐断裂带安徽段现代地震活动及应力场特征[J]. *地质科学*, 2006(02):278-290.
- [52] 张鹏, 秦向辉, 丰成君, 等. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(08):2329-2336.
- [53] 李开洋, 王成虎, 邢博瑞, 等. 郯庐断裂带区域应力状态研究综述[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(06):1-8+13.
- [54] 王华林, 王永光, 刘希强, 等. 渤海及周围地区断裂构造与强震活动研究[J]. *地震研究*, 2000(01):35-43.
- [55] 邓起东, 闵伟, 晁洪太, 等. 渤海地区新生代构造与地震活动[C]//卢寅畴主编. 新构造与环境. 北京: 地震出版社, 2001.
- [56] 王晓山. 华北平原块体地壳应力场与强震震源断层参数的研究[J]. *国际地震动态*, 2018(02):40-41.
- [57] 谢智, 刘尧兴, 胡凤英, 等. 中原地区  $M \geq 6$  级地震后的减(增)震效应[J]. *地震研究*, 2002(02):149-154.
- [58] 王熠熙, 张辉, 刘双庆, 等. 河北平原地震带  $b$  值时空变化特征[J]. *地震工程学报*, 2015, 37(1):188-195.