第35卷 第4期(726~737)	中 国 地 震	Vol. 35 No. 4
2019年12月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Dec. 2019

梁向军、王霞、宋美琴等,2019,鄂尔多斯地块周缘应力状态与强震危险性分析,中国地震,35(4),726~737.

# 鄂尔多斯地块周缘应力状态与强震危险性分析

梁向军<sup>1,2)</sup> 王霞<sup>1,2)</sup> 宋美琴<sup>1,2)</sup> 陈慧<sup>1,2)</sup>

1)山西省地震局,太原 030021

2)太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站,太原 030025

**摘要** 针对鄂尔多斯周缘断陷盆地带,基于 b 值、Δb 空间扫描和多参数(b、√E、n、a/b)组合 计算结果,综合分析各段落的应力状态,进而判定它们的危险性。结果显示:整个周缘断陷带的 年发生率、年释放率均整体下降,揭示出该区域 2010 年 6 月以来呈现出地震弱活动状态;b 值较 1970~2010 年结果变化并不显著,内蒙古磴口-五原值得注意地区、同心-灵武值得注意地区、晋 冀蒙交界危险区和侯马-运城值得注意地区 4 个区域仍处于匀速的应力积累状态;结合多参数组 合揭示的应力状态和断裂习性,认为内蒙磴口-五原地区未来发震危险性最高,但近期发震的紧 迫性不强,同心-灵武地区危险性有所增强,侯马-运城地区危险性持续,晋冀蒙交界地区危险性 有所降低,其余段落近期复发强震的可能性不大。

关键词: 鄂尔多斯周缘 b Δb 多参数 强震危险性

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0726-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

CMYK

鄂尔多斯块体位于华北、华南和青藏高原东北缘3个陆块的汇聚部位,处于中朝准地台 和祁连褶皱系2个一级大地构造单元之间。作为一个稳定的块体,鄂尔多斯块体内部地震 活动频度和强度均低,但其周缘是一组具有活动特色的正断层系,有史料记载以来周边地震 活动强烈(国家地震局,1988)。

鄂尔多斯周缘发育一系列的断陷盆地和褶皱山系,其东西和南北两侧分别呈现出右旋 和左旋剪切拉张特征(邓起东等,1999)。北缘为河套断陷带,可划分为3个凹陷,即临河凹 陷、白彦花凹陷和呼和凹陷(李彦宝等,2015)。东缘为山西断陷带,平面上呈"S"型,总体走 向 NNE,由大小不等的 NE、NEE 走向的地堑或半地堑式盆地组成,自北向南右行斜列,依次 为大同、忻定、太原、临汾和运城盆地。南缘为渭河断陷带,总体呈近 EW 向分布,由渭河、运 城、灵宝3个断陷盆地及凸起和小型断块山地等构造单元组成。西北缘为银川-吉兰泰断陷

[作者简介] 梁向军,女,1978 年生,高级工程师,主要从事地震监测与分析工作。E-mail:liang\_xj2005@163.com 王震,通讯作者,女,1987 年生,工程师,主要从事测震学及地震综合预报等研究工作。 E-mail:365372858@qq.com

<sup>[</sup>收稿日期] 2019-04-04; [修定日期] 2019-06-28

<sup>[</sup>项目类别] 中国地震局地震预测研究所科研专项(2017IES010104、2017IES010105)、国家重点研发计划项目 (2017YFC1500502-01)、山西省科技厅项目(201801D221044)和 2019 年度震情跟踪专项工作任务 (2019010106)共同资助

带,由银川盆地、贺兰山地垒和吉兰泰盆地呈右行雁裂式排列组成(邓起东等,1985)。西南 缘(从宁夏南部中宁、中卫一带至陕西宝鸡)是一条特殊性质的边界,其没有发育拉张性质为 主的地堑式盆地,而是以一组向北突出的弧形断裂为特点;这些弧形断裂自第四纪以来以强 烈的挤压性质及左旋走滑运动区别于鄂尔多斯边缘的其它活动断裂(图1)。



图 1 鄂尔多斯周缘活动断裂和断陷盆地分区及 M<sub>L</sub>≥2.0 地震分布 ①大同盆地;②忻定盆地;③太原盆地;④临汾盆地;⑤运城盆地;⑥渭河盆地;⑦同心-灵武段;⑧银川盆地; ⑨吉兰泰盆地;⑩内蒙磴口-五原段;⑪白彦花凹陷;⑫呼和凹陷

M7专项工作组(2012)在鄂尔多斯西缘和东缘划定了5个未来十年及稍长时间7~8级 地震潜在危险区和值得注意地区,分别为六盘山南段-西秦岭东段危险区、内蒙古磴口-五原 值得注意地区和同心-灵武值得注意地区,晋冀蒙交界危险区和侯马-运城值得注意地区 (图1)。2015年4月15日,在内蒙古磴口-五原值得注意地区内发生5.8级地震,相对预期 震级能量释放偏低。鄂尔多斯地块周缘现今应力状态、具有强震潜势的段落等,成为中长期 地震预测研究中需要重点探讨的问题之一,也是地震学家关注的重要问题。利用以b值为 主的地震活动性参数的时空扫描结果,结合地震活动背景,分析活动断裂带的现今活动状 态,从而综合判定相对高应力和闭锁的断裂段,近年来已广泛应用于国内外中长期地震危险 性研究中(Wiemer et al, 1997; Wyss et al, 2000; Yi et al, 2004; 易桂喜等, 2004、2005、2006、 2007; 王霞等, 2015、2017)。因此,本文利用b值时空扫描,并结合以b值为主的多种地震活 动性参数分析,探讨鄂尔多斯地块周缘当前应力状态和强震危险性。

## 1 地震资料与方法

本文使用 1970~2018 年中国地震台网统一地震目录,研究区域为鄂尔多斯地块周缘地

4 期

35 卷

区。为了消除中强震的余震活动对 *b* 值的影响,采用 K-K 法进行了余震删除处理 (Keilis-Borok et al,1980),并对删除余震后的目录进行了完整性评估,即最小完整性震级  $M_c$ 的计算,使用的方法为震级-序号法(Ogata et al,1991)、最大曲率 MAXC 方法和拟合度分别 为 90%和 95%的 GFT 法(Wiemer et al,2000)。从时间演化来看(图 2、3),1970~1995 年 $M_c$ 处于 2.0 $\leq M_L \leq 2.5$ ,1995 年之后监控能力逐渐提高, $M_c$  降至  $M_L < 2.0$ ;参考张玲等(2011)、韶 丹等(2015)、韩晓明等(2016)、张帆等(2018)在鄂尔多斯周缘地区的  $M_c$  时空分布研究结 果,综合认为整个区域自 1970 年以来  $M_L \geq 2.0$  地震的记录能力比较平稳(图 4)。



图 2 鄂尔多斯地块周缘 1970 年以来地震事件的震级-序号



图 3 鄂尔多斯地块周缘最小完整性震级的时序变化曲线(多方法)

b值的计算方法主要有线性最小二乘法、非线性最小二乘法、极大似然法和矩估计方法 等4种。其中,矩估计方法得到的b值表达式与极大似然法相同,因此,矩估计方法可看作 是极大似然法中的变种。针对不同的方法,随着样本数目的增加,计算结果的差异会越来越 小,尤其当样本数目超过100时,4种方法基本表现出等同的计算效果(张建中等,1981)。 本文要求样本数≥100,由此认为不同方法的计算结果差别不大。

《中国大陆大地震中-长期危险性研究》(M7专项工作组,2012)将鄂尔多斯周缘分属在 华北构造区和南北地震带,其中涉及到的不同区域 b 值、多参数组合的起算震级均为 M<sub>1</sub>2.0。

728

MYK



综合上述最小完整性震级时空分析结果以及 b 值、多参数组合对样本数的最低要求,本文同样选取起算震级为 M<sub>1</sub>2.0。

b 值空间扫描规则为:①对研究区进行 0.1°×0.1°的网格化处理,统计单元以每个网格节 点为圆心,半径 r 为 20km 的圆形,利用最小二乘法计算 b 值,将其作为相应网格单元中心点 的计算值,从而获得 b 值空间分布;其中 b 值的计算可参考国家地震局预测预防司(1997)给 出的公式;②统计单元内最小地震个数为 100,当地震个数小于 100 时,扩大半径 r 至 40km, 若仍然不满足样本要求,则将该节点值置为空(易桂喜等,2011);③震级步长 0.2 级,拟合间 隔点不得少于 5 个。

M7 专项工作组(2012)的研究时段大多为 1970 年 1 月~2010 年 6 月,个别至 2010 年 8 月。为便于对比,统一选取截止时间为 2010 年 6 月的结果。

根据上述 b 值计算规则获得 1970 年 1 月~2018 年 12 月的 b 值空间扫描结果,与 1970 年 1 月~2010 年 6 月研究区域内 2 个时段同一节点的 b 值相减,获得 Δb 值,用来分析研究 区不同时期的应力水平变化(易桂喜等,2013),其中 Δb 为正值表示 b 值增高,应力水平下 降;负值则表明 b 值降低,应力水平有所升高。根据前人的研究经验(梅世蓉,1993),认为 b 值低于 0.7 作为异常。鄂尔多斯北缘最新研究结果将该区域 b 值低于 0.8 作为异常,预报效 能最高(张帆等,2018)。

考虑到鄂尔多斯西南缘为弧形断裂系,其动力学机理有别于其它拉张型断陷盆地,因此 重点分析鄂尔多斯周缘多个断陷盆地覆盖区域,对西南缘不做研究。M7 专项工作组(2012) 的研究仅有鄂尔多斯东缘 5 个盆地的多参数组合分析结果,为了更全面、系统地跟踪鄂尔多 斯周缘应力状态和活动习性,本文对周缘 12 个断陷盆地进行了 b 值、a/b 值、应变能年释放 率 $\sqrt{E}$ 、频度 n 值等多参数计算(易桂喜等,2007),获得各个段落的现今活动习性,并与 1970 年 1 月~2010 年 6 月结果进行了对比分析,以期了解近年来的动态变化。

为了剔除 M≥5.5 地震对 b 值及多参数的影响,本文在 b 值时空扫描时,针对鄂尔多斯 周缘 1976 年和林格尔 6.2 级、1979 年五原 6.0 级、1996 年包头 6.4 级、1976 年阿拉善左旗 6.2 级、2015 年阿拉善左旗 5.8 级、1989 年大同阳高 6.1 级、1991 年大同阳高 5.8 级、1999 年大同 阳高 5.6 级、1981 年丰镇 5.8 级、1998 年张北 6.2 级、1999 年张北 5.6 级等地震,分别选取震 中周围 40km 范围内主震后 5 个月(认为序列目录已经衰减到背景水平)的目录作为起算时 间,原地发生 2 次以上中强震的则选取最后 1 次主震后 5 个月的目录作为起算时间;对多参

4 期

730	中	玉	地	震		35
-----	---	---	---	---	--	----

卷

数计算时,则是将包含上述地震的段落,同样选取主震后(大于2次强震区,选最后1次)5 个月的目录作为起算时间,截止时间分别为2010年6月、2008年12月。

## 2 b 值结果分析

СМҮК

鄂尔多斯地块周缘 b 值图像共分 3 个区域,在 2 个构造区分别展示(M7 专项工作组, 2012),为了便于跟踪其变化,本文重新再现了 1970 年 1 月~2010 年 6 月的 b 值图像,其中 鄂尔多斯周缘 1976 年和林格尔 6.2 级、1979 年五原 6.0 级、1996 年包头 6.4 级、1976 年阿拉 善左旗 6.2 级、2015 年阿拉善左旗 5.8 级、1989 年大同阳高 6.1 级、1991 年大同阳高 5.8 级、 1999 年大同阳高 5.6 级、1981 年丰镇 5.8 级、1998 年张北 6.2 级、1999 年张北 5.6 级等地震震 中周围 40km 范围内点的结果由上述相应起止时间的目录计算获得。图 5 为 1970 年 1 月~ 2018 年 12 月鄂尔多斯地块周缘 b 值空间分布图像,由图可见当前整体平均 b 值约 0.91,与 1970 年 1 月~2010 年 6 月获得的研究区的平均值 0.89 较为接近,变化不大;除个别统计单 元 b 值标准误差为 0.02 外(约占 2%),其余统计单元 b 值标准误差 < 0.01。目前,由 M7 专 项工作组(2012)划定的未来潜在大地震危险区和值得注意地区仍处于低值,除此之外,忻定 盆地南端和渭河盆地也呈现 b 值低值状态,表明这些地区当前处于较高应力水平,其余外围 边界区域不作为本文讨论的重点。鄂尔多斯地块周缘其它多数区域显示 b 值处于 0.9~1.5 之间,表明这些区域目前的应力水平不高。



图 5 鄂尔多斯地块周缘当前 b 值分布(1970~2018 年) ①大同盆地;②忻定盆地;③太原盆地;④临汾盆地;⑤运城盆地;⑥渭河盆地;⑦同心-灵武段;⑧银川盆地; ⑨吉兰泰盆地;⑩内蒙磴口-五原段;⑪白彦花凹陷;⑫呼和凹陷

为获取近几年研究区域 b 值的变化特征,引用易桂喜等(2013)提出的 Δb,即研究区域 当前 b 值与 1970 年 1 月~2010 年 6 月时段 b 值之间的差值(图 6),由图 6 可见,鄂尔多斯周



图 6 鄂尔多斯地块周缘 Δb 值分布(1970~2018 年,①~ ⑫标注同图 5)

缘断陷盆地区域变化相对平稳,绝大多数在±0.05,少部分区域为±0.15,个别区域可达±0.25。 其中内蒙古磴口-五原值得注意地区、同心-灵武值得注意地区、晋冀蒙交界危险区和侯马-运 城值得注意地区 4 个区域的 Δb 均在-0.05~0.05,反映出经过 8 年的时间演化,这些区域的 应力仍处于匀速的应力积累状态。忻定盆地东侧、临汾盆地北段、吉兰泰盆地南端、灵武地 区较其它区域呈现较为明显的 b 值降低,反映其应力水平有明显上升。

### 3 多参数结果分析

在 b 值时空扫描结果的基础上,结合 M7 专项工作组(2012)划定的危险区和值得注意 地区,开展多个地震活动性参数组合分析,除选取 2 个危险区、2 个注意地区外,将周缘剩余 区域按照断陷盆地划分成 12 段,除上述含大震的段落要选用主震后 5 个月的时间作为起算 时间外,其余均采用 1970 年 1 月~2010 年 6 月和 1970 年 1 月~2018 年 12 月 2 个时段的 M<sub>L</sub>≥2.0 地震资料,分别计算了鄂尔多斯地块周缘 12 个段落的多地震活动性参数组合。分 析可得,经过 8 年的演化,除第 8 段落外,整个周缘断陷带的年发生率、年释放率均整体下 降,揭示出这一区域自 2010 年 6 月以来呈现出地震弱活动状态(表 1、2)。其中,①~⑥段 属于鄂尔多斯东缘、南缘,⑦~⑫段属于鄂尔多斯西北缘(表 2)。目前,2 段呈现出显著的差 异,具体表现在:前者除第⑥段地震年发生率为 0.03 次/a/km 外,其余保持在 0.1~0.5 次/ a/km,后者除第⑨段在 0.1 次/a/km 外,第⑦、⑧、⑩段为 0.05~0.07 次/a/km;北缘的⑪和⑫ 也维持在0.09 次/a/km左右。约 80%的段落年释放率保持在 200~400J<sup>1/2</sup>/a/km,少数段落为 70~170J<sup>1/2</sup>/a/km。综上所述,鄂尔多斯东缘、西北缘、北缘活动特点分别为频繁小震活动、 频繁中小地震、稀疏中等地震活动,各段落具体分析如下。

晋冀蒙交界区①:该段为 M7 专项工作组(2012)划定的危险区,由图 1可看出,这一区域

СМҮК

731

地震活动参数         ①         ②         ③         ①         ③         ①         ②         ③         ③         ③         ③         ③         ③         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ④         ●         ●         ●         ●         ●         ●         ●         ●<	表 1	매	<b>8 尔 多 斯 地</b> ち	<b>뇭</b> 周缘断陷盆	<b>社的地震</b> ;	活动参数值	组合与现今	活动习性(	1970年1月	]~2010年(	5月)		
地展出初学校         ①         ③         ④         ①         ③         ①<	部でする						盆地	[段					
$b$ $0.81\pm0.075$ $0.97\pm0.073$ $0.90\pm0.064$ $101\pm0.064$ $0.87\pm0.064$ $0.73\pm0.064$ $0.77\pm0.063$ $0.77\pm0.063$ $0.77\pm0.063$ $0.77\pm0.063$ $0.77\pm0.063$ $0.99\pm0.06$ $\sqrt{(V_{1}, u^{-1}, hm^{-1})}$ $2.41$ $3.31-65$ $3.81-65$ $3.81-65$ $3.81-65$ $3.81-65$ $3.81-65$ $3.81-65$ $3.75-0.64$ $2.75-0.3$ $9.21-50$ $N/(V_{1}, u^{-1}, hm^{-1})$ $0.216$ $0.117$ $0.319$ $0.148$ $0.110$ $0.023$ $0.141$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $u/b$ $4.976$ $4.874$ $5.312$ $4.896$ $5.173$ $4.412$ $5.120$ $5.081$ $5.163$ $5.773$ $5.012$ $0.102$ $0.110$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $0.074$ $0.102$ $0.112$ $0.1074$ $0.102$ $0.110$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $0.012$ $0.104$ $0.102$ $0.110$ $0.020$ $0.110$ <	地辰洦列奓致	Θ	0	3	4	9	9	©	0	6	9		3
(人()**** <sup>1</sup> ·km <sup>-1</sup> )         247.981         359.245         381.465         246.764         250.400         115.387         347.926         129.782         291.188         376.644         275.793         9.21.00 $n/()$ $4.976$ $6.117$ $0.319$ $0.148$ $0.102$ $0.112$ $0.312$ $0.116$ $0.074$ $0.102$ $0.110$ $n/b$ $4.976$ $4.874$ $5.312$ $4.806$ $5.173$ $4.412$ $5.120$ $5.081$ $5.608$ $4.827$ $5.012$ $n/k$ $m/k$	<i>b</i>	$0.81 \pm 0.075$	$0.97 \pm 0.073$	$0.99 \pm 0.064$	$1.01 \pm 0.064$	$0.87 \pm 0.064$	$0.97 \pm 0.086$	$0.85 \pm 0.058$	$0.83 \pm 0.072$	$0.92 \pm 0.067$	$0.78 \pm 0.063$	$0.77 \pm 0.043$	$0.99 \pm 0.061$
$N(K, a^{-1}, km^{-1})$ 0.216         0.117         0.319         0.148         0.110         0.023         0.141         0.069         0.201         0.074         0.102         0.110 $a/b$ 4.976         4.874         5.312         4.806         5.173         4.412         5.120         5.013         5.063         4.827         5.012 $a/b$ $M K$ $K$ $H M K$ $K$ $H M K$ $K$ $H M K$ $M$ $M K$ $K$ $K$ $M K$ $K$ </td <td><math>\sqrt{E}/(\mathbf{J}^{j_{a}}\cdot\mathbf{a}^{-1}\cdot\mathbf{km}^{-1})</math></td> <td>247.981</td> <td>359.245</td> <td>381.465</td> <td>246.764</td> <td>250.400</td> <td>115.387</td> <td>347.926</td> <td>129.782</td> <td>291.188</td> <td>376.644</td> <td>275.793</td> <td>92.126</td>	$\sqrt{E}/(\mathbf{J}^{j_{a}}\cdot\mathbf{a}^{-1}\cdot\mathbf{km}^{-1})$	247.981	359.245	381.465	246.764	250.400	115.387	347.926	129.782	291.188	376.644	275.793	92.126
u/b         4.976         4.874         5.312         4.896         5.173         4.412         5.120         5.163         5.608         4.877         5.012           相対成力水平         廣廣         廣低         低         低         中小震         廣雪         中小電         高         南         而         万         5.012         5.013         5.013         5.012         5.013         5.012         5.013         5.012         0.012	$N/( rac{1}{N} \cdot \mathrm{a}^{-1} \cdot \mathrm{km}^{-1})$	0.216	0.117	0.319	0.148	0.110	0.023	0.141	0.069	0.201	0.074	0.102	0.110
相対应力水平         備商         備、         市、         中小震         航         小震         南         市         1         1         <	a/b	4.976	4.874	5.312	4.896	5.173	4.412	5.120	5.081	5.163	5.608	4.827	5.012
段落语动习性         頻繁         中小震         頻繁         小震 中小震         頻繁         小震         小震         小震         小震         小震         前街         前街         前街         前街         前小         周小           表 2         小震浴动         滑动         中小震浴动         滑动         滑动         小震浴动         滑动         小震浴         滑动         小震浴         渦动         小震浴         渦动         小震浴         渦动         小震浴         渦动         小震浴         高小         四         0         四         0         四         0         1 <th1< th="">         1         <th1< th=""> <th1< th=""></th1<></th1<></th1<>	相对应力水平	偏高	偏低	低	魚	中偏高	魚	中偏高	偏高	中偏低	꺁	峘	低
表2         第小多斯地块周缘断陷盆地的地震活动参数值组合与现今活动习性(1970年1月~2018年12月)           地震活动参数         (1970年1月~2018年12月)           地震活动参数         ①         ②         ③         ④         ①         ②         ③         ①         ③           地震活动参数	段落活动习性	频繁 小震滑动	中 小 湯 之 能 之	频繁 中小震滑动	小 澹 动	中 小震 過効	微弱 小震滑动	中小濃 溜动	相 因 徴	小滑动	闭锁	稀疏中小 地震活动	竭小震 活动
地震活动参数         ①         ③         ③         ④         ⑤         ⑦         ⑨         ① </th <th>表 2</th> <th><b>訴</b></th> <th>《尔多斯地共</th> <th>€ ● ●</th> <th>地的地震。 </th> <th>5动参数值∮</th> <th>组合与现今</th> <th>活动习性(1</th> <th>970年1月</th> <th>~2018年1</th> <th>2月)</th> <th></th> <th></th>	表 2	<b>訴</b>	《尔多斯地共	€ ● ●	地的地震。 	5动参数值∮	组合与现今	活动习性(1	970年1月	~2018年1	2月)		
地處市初参致         ①         ②         ③         ④         ⑤         ⑦         ③         ①         ①         ②         ①         ③         ①<	正式書						館増	以段					
b         0.86±0.057         0.97±0.07         0.96±0.093         0.97±0.075         0.88±0.046         0.88±0.064         0.88±0.064         0.88±0.065         0.89±0.052         0.87±0.045         0.87±0.043         1.01±0.06           √E/(J <sup>N</sup> · a <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )         146.962         301.261         316.908         206.046         226.788         95.707         373.396         156.583         270.933         296.520         172.315         74.074           N/(次 · a <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )         0.498         0.194         0.540         0.283         0.200         0.030         0.050         0.068         0.133         20.033         0.093         0.093           N/(次 · a <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )         0.498         0.194         0.540         0.283         0.200         0.030         0.050         0.068         0.133         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.074         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.093         0.094         0.093         0.014	地晨泔初参数	Θ	0	3	<b></b>	2	9	0	0	6	8		3
$\sqrt{E}/(J^{5} \cdot a^{-1} \cdot km^{-1})$ 146.962 301.261 316.908 206.046 226.788 95.707 373.396 156.583 270.933 296.520 172.315 74.074 $N/(\check{K} \cdot a^{-1} \cdot km^{-1})$ 0.498 0.194 0.540 0.283 0.200 0.030 0.050 0.068 0.133 0.073 0.093 0.099 $a/b$ 5.091 4.957 5.389 5.096 5.234 4.632 4.952 5.140 3.656 5.641 4.736 4.986 相对应力水平 中偏高 低 偏 中偏高 伸高 偏高 偏高 伸高 偏高 中偏低 高 中偏高 低 膨 酸离 相对 小震 小震 物 化震 小震 物 和 小震 相对 小震 相对 小震 小震 小震 物 化震 小震 滑动 滑动 小震 滑动 小震 滑动 小震 滑动 小震 滑动 小震 滑动 小震 小震 小震 小震 水震 水震 化乙基乙基乙基乙基乙基乙基乙基乙基乙基乙基	b	$0.86 \pm 0.057$	$0.97 \pm 0.07$	$0.96 \pm 0.093$	$0.97 \pm 0.075$	$0.88 \pm 0.071$	$0.88 \pm 0.084$	$0.82 \pm 0.063$	$0.84 \pm 0.067$	$0.89 \pm 0.058$	$0.79 \pm 0.052$	$0.87 \pm 0.043$	$1.01 \pm 0.062$
N/(次・a <sup>-1</sup> ・km <sup>-1</sup> )       0.498       0.194       0.540       0.283       0.200       0.030       0.050       0.068       0.133       0.073       0.093       0.093       0.093         a/b       5.091       4.957       5.389       5.096       5.234       4.632       4.952       5.140       3.656       5.641       4.736       4.986         相対应力水平       中偏高       低       低       中偏高       中偏高       備高       中偏高       6       4.986         財幣       中小震       頻繁       小震       中小震       微弱       稀疏       相対       小震       小震       功       小震活动       小震	$\sqrt{E}/(\mathrm{J}^{j_{2}}\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot\mathrm{km}^{-1})$	146.962	301.261	316.908	206.046	226.788	95.707	373.396	156.583	270.933	296.520	172.315	74.074
u/b         5.091         4.957         5.389         5.096         5.234         4.632         4.952         5.140         3.656         5.641         4.736         4.986           相对应力水平         中偏高         低         低         中偏高         中偏高         4.63         4.952         5.140         3.656         5.641         4.736         4.986           相对应力水平         中偏高         低         低         中偏高         中偏高         備高         中偏高         低           频繁         中小震         频雾         小震         南小震         微弱         稀疏         相对         小震         功           段落活动习性         小震滑动         滑动         小震         小震活动         滑动         小震活动         小震活动         小震活动         小震活动         小震活动	$N/( rac{1}{N} \cdot \mathrm{a}^{-1} \cdot \mathrm{km}^{-1})$	0.498	0.194	0.540	0.283	0.200	0.030	0.050	0.068	0.133	0.073	0.093	0.099
相对应力水平 中偏高 低 偏低 低 中偏高 中偏高 偏高 偏高 中偏低 高 中偏高 低 频繁 中小震 频繁 小震 中小震 微弱 稀疏 相对 小震 力震 弱 段落活动习性 小震滑动 滑动 滑动 滑动 小震活动 中小震滑动 闭锁 滑动 滑动 小震活动	a/b	5.091	4.957	5.389	5.096	5.234	4.632	4.952	5.140	3.656	5.641	4.736	4.986
授落活动习性 頻繁 中小震 頻繁 小震 中小震 微弱 稀疏 相对 小震 闭锁 小震 弱 段落活动习性 小震滑动 滑动 中小震滑动 滑动 滑动 小震活动 中小震滑动 闭锁 滑动	相对应力水平	中偏高	低	偏低	魚	中偏高	中偏高	偏高	偏高	中偏低	恒	中偏高	庻
424/11-20-21E 小震滑动 滑动 中小震滑动 滑动 滑动 小震活动 中小震滑动 闭锁 滑动 <sup>内政</sup> 滑动 小震活动	计计计计算	频繁	中小震	频繁	小震	中小震	微弱	稀疏	相对	小震	21 6%	小震	弱
	权待迫例づ任	小震滑动	滑动	中小震滑动	滑动	滑动	小震活动	中小震滑动	闭锁	滑动	M 10	滑动	小震活动

中国地震

35 卷

\_\_\_\_

CMYK

自有史料记载以来发生多次强震(怀仁 1022 年和 1305 年 6.5 级、阳高-天镇 1673 年 6.5 级和 1628 年 6.5 级地震),并在最近 40 多年中发生 5 次中强地震(1989 年、1991 年和 1999 年的 大同-阳高 6.1 级、5.8 级和 5.6 级地震,1998 年和 1999 年张北 6.2 级、5.6 级地震),是鄂尔多 斯东缘中强震活动最频繁的段落。b 值空间等值线图(图 5)显示这一段以中等偏低的 b 值 为主,自 1999 年大同-阳高 5.6 级地震、张北 5.6 级地震以来,呈现中偏低的 b 值、较低的  $\sqrt{E}$ 、较高的 n 值和 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于相对偏高的应力背景下,以频繁小震滑动为 特征,与 1970 年 1 月~2010 年 6 月的结果相比,其未来发生强震的危险性有所降低。



图 7 鄂尔多斯东缘多参数组合时序分布

忻定盆地至大同盆地南端②:历史上曾发生 512 年原平 7½级、1038 年定襄 7½级和 1683 年原平 7.0级地震,破裂已贯通整个忻定盆地。b 值空间等值线图(图 5)显示盆地南端 局部低 b 值,表明该段存在局部高应力,但因尺度较小,不具备发生大震的条件。该段落具 有偏高的 b 值、 $\sqrt{E}$ 、n 值和较低的 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于偏低应力背景下,以中 小震活动为特征,近期复发强震的可能性不大。

太原盆地③:历史上发生 1102 年清徐 6.5 级和 1614 平遥 6.5 级地震,但因强度偏低,并 未贯通两侧的控盆断裂。b 值空间等值线图(图 5)显示盆地南端存在局部低 b 值,表明该段 存在局部高应力区,但因尺度较小,不具备发生大震的条件。该段落具有偏高的 b 值、 $\sqrt{E}$ 、n值和 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于低应力背景下,以频繁中小震活动为特征,近期复发 强震的可能性不大。

临汾盆地北段④:历史上发生 1303 年洪洞 8.0 级、1695 年临汾 7¾级地震,破裂贯通整 个段落。b 值空间等值线图(图 5)显示这一区域以高 b 值为主,不具备发生大震的条件。该 段落具有偏高的 b 值、 $\sqrt{E}$ 、n 值和 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于低应力背景下,以小震

4 期

滑动为特征,断层面尚未耦合,近期复发强震的可能性不大。

侯马-运城地区⑤:该段为 M7 专项工作组(2012)划定的强震注意地区,历史上无强震记载, b 值空间等值线图(图 5)显示这一段以中等偏低的 b 值为主,具有偏低的 b 值、较低的  $\sqrt{E}$ 、 n 值和较高的 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于相对偏高应力背景下,以中小震滑动为特征。与前期各参数相比,变化不大,其强震危险性持续。

渭河盆地⑥:历史上发生 1501 年朝邑 7.0 级、1556 年华县 8¼级、1568 年西安 6¾级地 震,破裂贯通整个段落。b 值空间等值线图(图 5)显示华县震源区为高 b 值,其余段落以中 等偏低的 b 值为主,具有较低的 b 值、 $\sqrt{E}$ 、n 值和 a/b 值(图 7、表 2),表明该段处于低应力 背景下,以微弱小震活动为特征,断层面尚未耦合,近期复发强震的可能性不大。

同心-灵武地区⑦:该段为 M7 专项工作组(2012)划定的强震注意地区,历史上无大地震破裂,古地震复发间隔 5000~6000 年,最晚古地震事件离逝时间距今约 6000 年。b 值空间等值线图(图 5)显示这一段存在多处局部低 b 值区,且局部  $\Delta b$  呈现应力积累加速趋势。从 多参数计算结果看,具有较低的 b 值、n 值、偏低的 a/b 值和较高的  $\sqrt{E}$ ,表明该段处于相对偏高应力背景下,以中小震滑动为特征。与前期各参数相比,b 值有所降低,强震危险性有所增强。

银川盆地⑧:历史上曾发生 1739 年宁夏平罗、银川间 8 级大震,破裂贯通整个盆地。b 值空间等值线图(图 5)显示这一段以相对偏低的 b 值为主,具有偏低的 b 值、√E、n 值和高 的 a/b 值(图 8、表 2),表明该段处于偏高应力相对闭锁背景下,以稀疏小震滑动为特征,具 有复发中强震的可能性。



图 8 鄂尔多斯西北缘分段多参数组合时序分布

734

吉兰泰盆地中南段⑨:该段1976年和2015年分别发生阿拉善左旗6.2级、5.8级地震,b

值空间等值线图(图 5)显示较高的 b 值;多参数具有中偏高的 b 值、较高的  $\sqrt{E}$ 、n 值和最低的 a/b 值(图 8、表 2),表明该段处于相对偏低应力背景下,以小震滑动为特征,近期复发强震的可能性不大。

内蒙古磴口-五原地区⑩:该段为 M7 专项工作组(2012)划定的值得注意地区,区内五原 1934 年、1979 年分别发生 6.2 级、6.0 级地震,但破裂尺度有限,整个区域 b 值空间等值线图 (图 5)显示低 b 值,但  $\Delta b$  变化不大;多参数具有低 b 值和 n 值、较高的  $\sqrt{E}$  和最高的 a/b 值 (图 8、表 2),表明该段处于相对较高应力闭锁背景下,稀疏中等地震滑动为特征,与其它段 落相比,发生强震危险性最高。

白彦花凹陷①:849 年、1995 年分别发生包头 7.0 级、6.4 级地震, 剔除包头 6.4 级地震影响后的 b 值等值线显示以中偏低 b 值为主, 多参数具有中偏低的 b 值、n 值、 $\sqrt{E}$ 、a/b 值, 显示该段目前以中偏高应力下的小震滑动为特征, 近期复发强震的可能性不大。

呼和凹陷⑫:1929 年发生毕克齐 6.0 地震,b 值等值线显示以高 b 值为主,具有最高的 b 值、最低的  $\sqrt{E}$ 、中等 n 值和 a/b 值参数组合,反映其正处于低应力背景下的小震弱活动状态,近期复发强震的可能性不大。

### 4 结论与讨论

基于鄂尔多斯地块周缘 1970 年 1 月~2018 年 12 月的 b 值、近 8 年的 Δb 和分段多参数 组合结果,综合分析认为:

(1)与1970~2010年的结果相比,鄂尔多斯地块周缘 b 值变化并不显著,内蒙古磴口-五 原值得注意地区、同心-灵武值得注意地区、晋冀蒙交界危险区和侯马-运城值得注意地区仍 处于匀速的应力积累状态,并未出现大震前的加速现象。仅在上述区域之外的忻定盆地西 侧、临汾盆地北段、吉兰泰盆地南端、灵武地区出现小范围的局部应力积累加速现象。

(2)对鄂尔多斯周缘断陷盆地 12 个段落的多参数组合结果综合分析显示:①当前处于 高应力相对闭锁的区域主要为鄂尔多斯地块西北缘临河凹陷磴口-五原地区,与张帆等 (2018)对鄂尔多斯地块北缘 b 值的研究结果一致,而近年来该区域的 b 值变化不大,反映其 应力水平处于匀速积累状态,表明该区域具有长期强震潜势的背景,与其它段落相比,危险 性最高。②同心-灵武地区表现出局部偏高应力下的中小震滑动特征,与 1970 年 1 月~2010 年 6 月的结果相比,应力水平有所增高,危险性有所增强。③侯马-运城地区表现为中偏高 应力背景下的中小震滑动状态,近 8 年来该区域 b 值和多参数变化比较平稳,强震危险性维 持。④晋冀蒙交界区表现为中偏高应力下的频繁小震活动,与 1970 年 1 月~2010 年 6 月的 结果相比,应力水平有所减弱,危险性有所降低。⑤其余段落表现为相对偏低或低应力下的 频繁小震、稀疏中小地震和稀疏小震活动,意味着自当地最晚的大地震破裂后断层面尚未重 新耦合,未来复发大震的可能性不大。

#### 参考文献

邓起东、程绍平、闵伟等,1999,鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论,地质力学学报,5(3),13~21. 邓起东、尤惠川,1985,鄂尔多斯周缘断陷盆地带的构造活动特征及其形成机制,见:国家地震局地质研究所,现代地壳运动研究(1),58~78,北京:地震出版社.

4 期

**MYK** 

国家地震局预测预防司,1997,测震学分析预报方法,79~81,北京:地震出版社.

韩晓明、张文韬、王树波等,2016,河套地震带的b值时空变化特征分析,中国地震,32(3),522~532.

李彦宝、冉勇康、陈立春等,2015,河套断陷带主要活动断裂最新地表破裂事件与历史大地震,地震地质,37(1),110~125.

M7专项工作组,2012,中国大陆大地震中-长期危险性研究,北京:地震出版社.

梅世蓉,1993,中国地震预报概论,65~69,北京:地震出版社.

韶丹、贾宁、王莹,2015,陕西地区地震目录完整性分析,地震地磁观测与研究,36(4),30~35.

王霞、宋美琴,2017,大同窗地震活动频次和应变能特征,中国地震,33(2),328~337.

王霞、宋美琴、王亮等,2015,口泉断裂及其邻近地区的地壳速度结构,地震地质,37(4),939~952.

易桂喜、范军、闻学泽,2005,由现今地震活动分析鲜水河断裂带中-南段活动习性与强震危险地段,地震,25(1),58~66.

易桂喜、闻学泽,2007,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,地震地质,29(2), 254~271.

易桂喜、闻学泽、王思维等,2006,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,中国地震,22 (2),117~125.

易桂喜、闻学泽、辛华等,2011,2008 年汶川 M<sub>s</sub>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,地球物理学报,**54**(6),1490~1500.

易桂喜、闻学泽、辛华等,2013,龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究,地球物理学报,56(4),1112~1120.

易桂喜、闻学泽、徐锡伟,2004,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,地震学报,26(4), 387~395.

张帆、韩晓明、陈立峰等,2018,鄂尔多斯地块北缘 b 值的时空特征及其地震预测效能分析, 地震学报, **40**(6), 785~796. doi:10.11939/jass.20180020.

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.

张玲、梁向军、赵晋泉等,2011,山西数字测震台网监测能力及其构造意义,山西地震,(4),21~24.

Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotvain I M, 1980, Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes, Nature, 283 (5744), 259~263.

Ogata Y, Imoto M, Katsura K, 1991, 3-D spatial variation of *b*-values of Magnitude-frequency distribution beneath the Kanto district, Japan, Geophys J Int, **104**(1), 135~146.

Wiemer S, Wyss M, 1997, Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? J Geophys Res, **102**(B7), 15115~15128.

Wiemer S, Wyss M, 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan, Bull Seismol Soc Am, 90(4), 859~869.

Wyss M, Wiemer S, 2000, Change in the probability for earthquakes in southern California due to the Landers magnitude 7.3 earthquake, Science, **290**(5495), 1334~1338.

Yi G X, Wen X Z, Fan J, et al, 2004, Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe-Zemuhe fault zone from seismicity parameters, Acta Seismol Sin, 17(3), 322~333.

736

ТМҮК

## Stress State and Strong-earthquake Risk around the Ordos Block

Liang Xiangjun<sup>1,2)</sup> Wang Xia<sup>1,2)</sup> Song Meiqin<sup>1,2)</sup> Chen Hui<sup>1,2)</sup>

1) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China

2) National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan Seismic Station, Taiyuan 030025, China

Abstract Based on the calculation results of *b*-value,  $\Delta b$  spatially scanning and multipleseismicity-parameter-value combinations  $(b, \sqrt{E}, n, a/b)$ , we comprehensively analyze the stress state of basins around the Ordos block and then determine their risks. The results show that annually seismicity rate and annually strain-release-rate generally decrease in the fault depression belt around the Ordos block, revealing the weak seismicity of this region since June, 2010. The difference of *b*-value between 1970 ~ 2018 and 1970 ~ 2010 is not obvious. The areas that are worthy of attention, including Dengkou-Wuyuan in Inner Mongolia, Tongxin-Lingwu, the junction zone of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia and Houma-Yuncheng, remain constant stress accumulation state. Combined with the stress state reflected by multiple-seismicity-parameter-value combinations and fault habit, the probability of strong-earthquake is the highest in Dengkou-Wuyuan, Inner Mongolia, but the urgency of that in the near future is not strong. The risk of Tongxin-Lingwu area enhances a little. The risk of the Houma-Yuncheng area still continues. The risk of junction zone of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia decreases a little. The probability of strong-earthquake on other sections is small in the near future.

Key words: Around the Ordos block; *b*-value;  $\Delta b$ ; Multiple-seismicity-parameter; The risk of strong-earthquake