

基于 b 值分析宁夏吴忠—灵武地区强震危险性*

曾宪伟, 李文君, 马聃之, 蔡新华

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 利用1970年1月至2018年10月吴忠—灵武地区的地震精定位目录, 基于 b 值平面分布以及沿活动断裂的震源深度剖面和 b 值剖面图等, 分析了研究区发生强震的潜在危险性。结果表明: ①新华桥附近存在发生地震的潜在危险性, 强度为 $M_s 5.1 \sim 5.4$, 但 b 值时序曲线表明该区域短期内发生中强地震的紧迫性不强; ②吴忠/郭家桥—高闸地区很可能是1921年2月22日吴忠南 $M_s 6.0$ 地震的发震位置, 该地震震源深度应在15 km左右, 上地壳浅部很可能未破裂; ③吴忠/郭家桥—高闸地区地壳浅部依旧存在发生强震的危险, 孕震强度为 $M_s 6.2 \sim 6.3$, 孕震深度在10 km以内。

关键词: 吴忠—灵武地区; b 值; 极大似然法; 地震危险性; 小震稀疏段

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)01-0041-08

0 引言

宁夏吴忠—灵武地区 ($37.7^\circ \sim 38.2^\circ \text{N}$, $106.0^\circ \sim 106.5^\circ \text{E}$) 位于鄂尔多斯西缘的银川盆地南端, 该区主要发育有黄河断裂、银川隐伏断裂、新华桥断裂、崇兴断裂和关马湖断裂以及一些次级活动断裂等。来自青藏块体、阿拉善块体和鄂尔多斯块体相对运动的推挤作用, 为断裂活动提供了主要动力源, 也使得研究区多发育有近南北向以右旋走滑为主的活动断裂。20世纪七八十年代, 吴忠—灵武地区曾接连发生5次 $M_s \geq 5.0$ 地震, 分别为1971年6月28日吴忠 $M_s 5.1$ 地震、1984年11月23日灵武 $M_s 5.3$ 地震、1987年8月10日灵武 $M_s 5.5$ 地震、1988年1月4日灵武 $M_s 5.5$ 地震和1月10日灵武 $M_s 5.0$ 地震, 其中4次集中发生在1984—1988年。1988年灵武 $M_s 5.0$ 地震后, 吴忠—灵武地区 $M_s \geq 5.0$ 地震已平静近31年, 接近该区域1889年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震的平均复发周期(32年)。

1984—1988年吴忠—灵武地区发生的4次 $M_s 5.0 \sim 5.5$ 地震主要受黄河断裂中南段控制。该

断裂段自晚第四纪以来发生过5次7级以上古地震事件, 曾是一条活动性较强的活动断裂, 最近一次地震事件的离逝时间约6 ka, 已经超过或接近复发周期, 是银川盆地未来强震最危险的地区之一(柴焱章等, 2001)。南北地震带北段历史与史前地震破裂区展布结果显示, 吴忠—灵武地区的活动断裂存在大地震破裂空段(M7专项工作组, 2012)。同时, 该地区现今中小地震多发, 是银川盆地地震最为活跃的地区。因此, 有必要对吴忠—灵武地区开展强震危险性研究工作。

国内外很多学者曾利用异常低 b 值区勾画凹凸体的位置, 揭示和推断某个区域内活动断裂带不同段落的应力状态, 分析其潜在的强震危险性, 取得了较好的效果(Wyss *et al.*, 2000; Wyss, 2001; Schorlemmer, Wiemer, 2004; 易桂喜等, 2004, 2010, 2013; 朱艾澜等, 2005, 2009; 钱晓东, 秦嘉政, 2008; 谢卓娟等, 2015; 刘自凤等, 2019)。Wiemer和Wyss(1997)分析了1984年摩根山 $M_s 6.2$ 地震前 b 值的深度剖面图像, 发现异常低 b 值区与摩根山 $M_s 6.2$ 地震破裂位置一致; 易桂喜等(2013)利用 b 值平面图像和汶川地震前、后 b 值的差值 Δb 图像分析了龙门山断裂带南

* 收稿日期: 2019-11-28.

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH21040)、宁夏自然科学基金项目(NZ17221)、地震科技星火计划项目(XH18053Y)、强震危险性研究创新团队(CX2019-4)和国家自然科学基金(41604015)联合资助。

第一作者简介: 曾宪伟(1982-), 高级工程师, 主要从事地震活动性与数字地震学方面的研究。

E-mail: zeng_xw@126.com.

段的强震危险性,认为天全至宝兴段具有发生中-强地震的条件,该危险段落与2013年芦山 $M_s7.0$ 地震震中吻合。本文利用吴忠—灵武地区的地震精定位目录,通过分析沿断裂的 b 值平面和剖面分布图像,揭示活动断裂不同位置的相对应力水平,判定研究区现今地震活动习性与强震潜在危险性。

1 资料选取

本文研究区($37.7^{\circ} \sim 38.2^{\circ} \text{N}$, $106.0^{\circ} \sim 106.5^{\circ} \text{E}$)位于宁夏中部—银川盆地南端,是1984—1988年4次 $M_s5.0 \sim 5.5$ 地震的震中区(图1)。本文数据选取1970年1月至2018年10月吴忠—灵武地区(图1)的地震资料,震相报告由宁夏地震局地震监测中心提供。依据“M7专项”工作成果,对模拟记录时期的震相报告和观测台站进行了校对,剔除错误的震相数据,以保证地震资料的可靠性。尽管不同时期的观测台站分布不同,但多为仪器型号的更换,少有台站位置的变动。对于位置变动而名称未变动的台站,笔者均进行了核对与修订,调整了震相报告中相应的记录,从而确保不同时期的台站观测资料合并结果

的可靠性。

1970年以来,研究区周围50 km范围内的5个观测台站布局均匀且运行稳定,有利于地震重定位。笔者首先利用Hyp2000定位方法(Klein, 2007)对研究区地震进行重新定位,将重新定位后得到的地震参数作为输入参数,再利用双差定位法(Waldhauser, Ellsworth, 2000)进行相对定位。由于双差定位导致丢失了37%的地震,为了保证目录的完整性,丢失的地震由Hyp2000方法定位结果补充。从整个地震目录的重定位误差来看,双差定位后99%以上的地震水平向和垂直向定位误差均小于1 km(相对震群矩心的相对误差),Hyp2000定位后水平向和垂直向误差均值分别为2.2 km, 2.5 km。重新定位后的地震震源精度明显提高,为 b 值空间计算提供了可靠的数据基础。

从研究区 $M-T$ 图(图2a)和 $N-T$ 图(图2b)可以看出,吴忠—灵武地区5次 $M_s5.0 \sim 5.5$ 地震余震丰富,导致该时段的地震活动频次高、强度大,其它时段的地震活动则明显较弱。自2010年以来,由于宁夏及邻区的测震台站数量增加,监测能力提升,记录到的小震频次有所升高。根据1921年吴忠南 $M_s6.0$ 地震和 $M_s \geq 5.0$ 地震

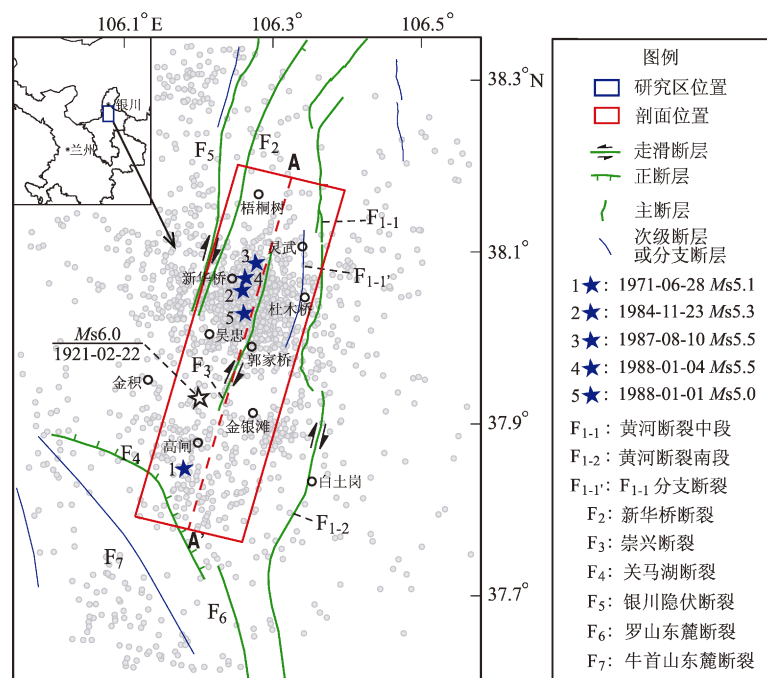


图1 研究区位置、构造背景及地震分布(1970年1月—2018年10月)

Fig. 1 Location of research area and distribution of tectonic background and earthquakes from Jan. , 1970 to Oct. , 2018

分布位置,以崇兴断裂(F_3)为主体进行 b 值剖面研究。相关地震地质研究表明,研究区内主要活动断裂为走滑型,断裂产状为倾角较大的花状构造,剖面半宽度选为 6.5 km 构成研究剖面区域(图1)。该区域涵盖了历史中强地震以及主要活动断裂,是吴忠—灵武地区的强震危险性分析的重点。

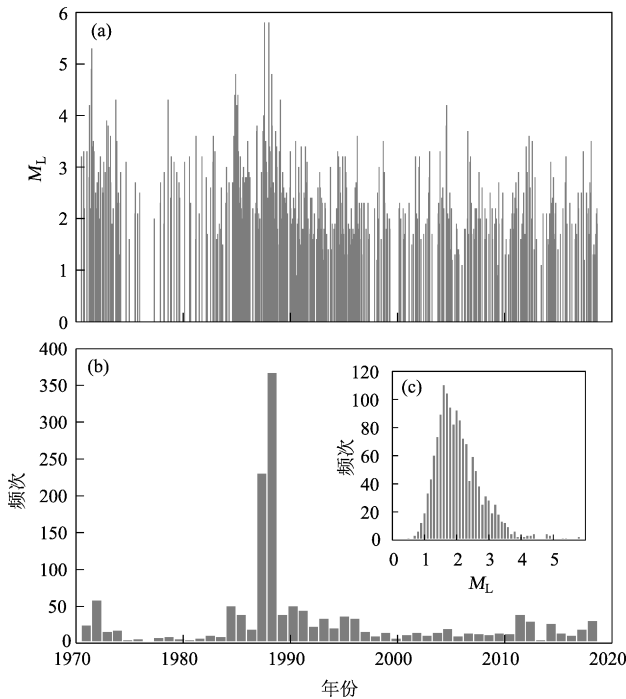


图2 1970年1月—2018年10月研究区 $M_L \geq 0$ 地震 $M-T$ (a)、 $N-T$ (b) 和 $M-N$ 图 (c)
Fig. 2 $M-T$ (a), $N-T$ (b) and $M-N$ (c) diagrams of the $M_L \geq 0$ earthquakes from Jan., 1970 to Oct., 2018

2 结果分析

2.1 预处理

一般常采用最小二乘法和极大似然法计算 b 值。最小二乘法简单易行,但存在一定的局限性,比如震级越大的地震所占权重越大, b 值易受少数几个大地震的影响,而极大似然法中所有地震都具有相等的权重,故在特定条件下可以作为最小二乘法的替代方法(吴果等, 2019)。为了分析不同最小完整性震级 M_c 对 b 值计算的影响,本文选取研究区 $M_L \geq 0.5$ 的地震,采用极大似然法计算 b 值(Ustu, 1966)及其标准差(Woessner, Wiemer, 2005)。图3结果显示, $M_c \leq M_L 3.2$ 时, b 值随 M_c

增大而增大; $M_c > M_L 3.2$ 时,由于计算样本量较少, b 值变化幅度较大; $M_c = M_L 2.0$ 时, b 值标准差最小。故取 $M_c = M_L 2.0$ 计算研究区所有地震的 b 值及其标准差(图4),分别为 0.8 和 0.05, b 值大小可表示为 (0.8 ± 0.05) 。

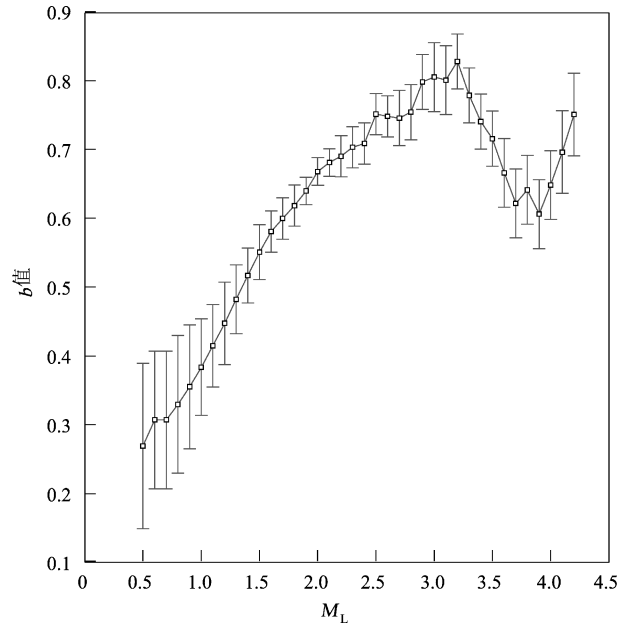


图3 b 值随震级的变化
Fig. 3 b -value changes with magnitude

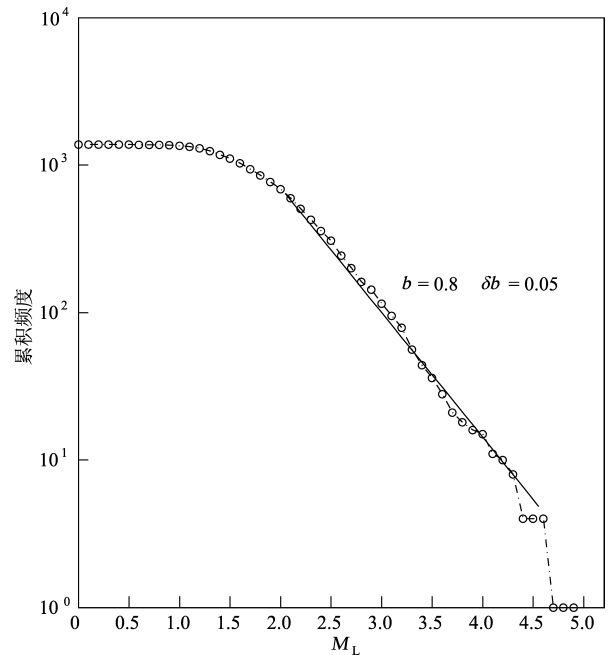


图4 研究区地震震级-频度关系曲线
(1970年1月—2018年10月)

Fig. 4 Magnitude - frequency curve of earthquakes in the study area from Jan., 1970 to Oct., 2018

为了分析 $M_s \geq 5.0$ 地震前 b 值随时间的变化特征, 笔者选取研究区中部 ($37.8^\circ \sim 38.2^\circ \text{N}$, $106.1^\circ \sim 106.4^\circ \text{E}$) 的地震为分析对象, 该区域为 $M_s \geq 5.0$ 地震集中活动且小震密度最大的地区 (图 5)。笔者以 300 个地震样本为一个时间窗, 以一个时间窗为步长, 逐步滑动时间窗, 计算每一个窗口内的 b 值, 绘制 b 值时间进程曲线 (图 6)。图 6 显示, 1984 年 11 月 23 日灵武 $M_s 5.3$ 地震前, b 值一直呈现下降趋势, 于震后持平变化, 并在 1987 年 8 月 10 日灵武 $M_s 5.5$ 地震前出现小幅上升-下降变化, 震后 b 值继续上升, 直至 1988 年

1 月 4 日灵武 $M_s 5.5$ 地震发生, 之后 b 值一直处于缓慢上升状态。1984 年和 1987 年灵武 2 次 $M_s \geq 5.0$ 地震前均出现 b 值下降变化, 与以往中强震前多出现 b 值下降变化的研究结果一致 (李全林等, 1976; Wiemer, Wyss, 1997; 刘雁冰, 裴顺平, 2017; 史海霞等, 2018; 王新安等, 2020)。

2.2 b 值平面分布

根据前文得出的 b 值平均大小为 (0.8 ± 0.05) , 本文取 0.7 为低 b 值阈值是合理的, 亦与已有研究中 $b < 0.7$ 为低值异常的认识一致 (朱艾澜等, 2009; 易桂喜等, 2010)。将研究区划分为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的网格, 每个节点固定搜索地震数为 100 个, 即搜索到 100 个地震时停止搜索, 再设定大于 M_c 的地震数至少为 20, 利用极大似然法计算每个节点的 b 值, 即可获得研究区 b 值平面分布图像 (图 7)。图 7 显示: ① 低 b 值 (≤ 0.7) 区主要位于灵武以西地区 (面积约 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$) 和金积—白土岗地区 (面积约 $25 \text{ km} \times 20 \text{ km}$), 表明这 2 个区域应力水平较高, 为未来中强地震发生的有利地区; 前者低 b 值范围较后者小, 表明前者孕育地震的强度应小于后者。② 吴忠—灵武 (新华桥附近) $M_s \geq 5.0$ 地震频发的地区为低 b 值区, 范围较小, 说明该区域仍存在发生地震的危险性, 但强度不大。

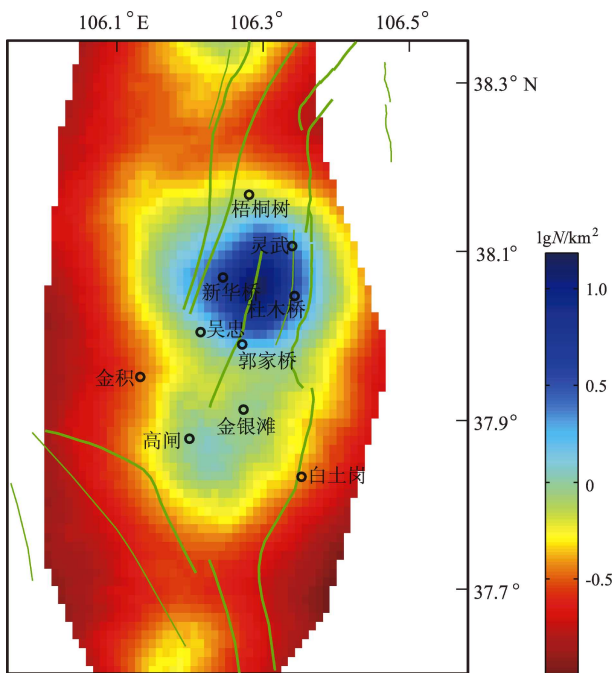


图 5 研究区地震密度分布

Fig. 5 Distribution of seismicity density in the study area

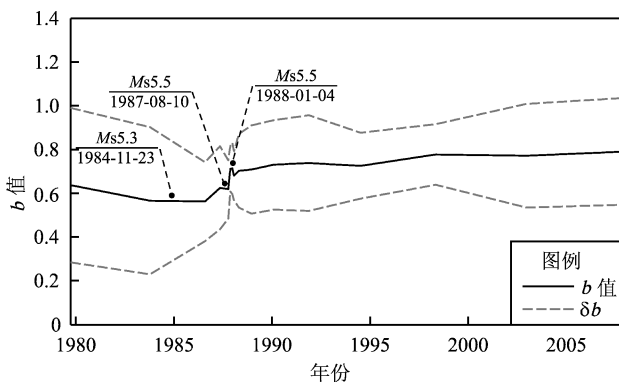


图 6 研究区中部地震集中区 b 值时间进程曲线

Fig. 6 Curve of b -value in the seismic concentration area in the middle of the study area

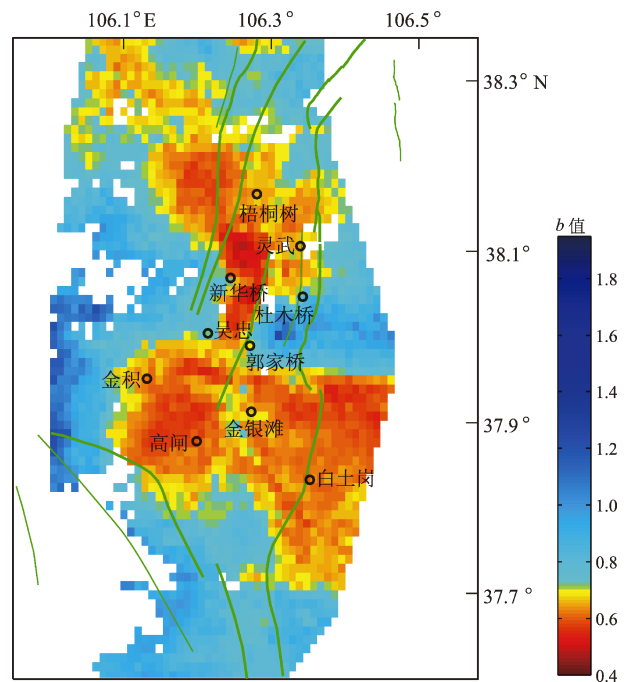


图 7 研究区 b 值平面分布

Fig. 7 Horizontal distribution of b -value in the study area

2.3 b 值剖面分布

将图1中NNE向深度剖面划分为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格, 每个节点固定搜索地震数为100个, 设定大于 M_c 的地震数至少为20, 利用极大似然法计算每个节点的 b 值, 就获得 b 值剖面分布图。结合小震震源深度剖面图可以看出: ①震源深度剖面存在4个小震稀疏段(图8a), 简称1段、2段、3段和4段。②1段和3段震源深度较浅, 分别在10 km和5 km以上, 主要集中在上地壳; 2段和4段震源深度分别分布在10~25 km和20~25 km, 主要集中在中地壳。③从小震稀疏段的空间尺度来看, 1段沿断裂走向和深度方向的空间展布分别为20和10 km; 2段空间展布尺度与1段接近, 2个方向上的尺度分别为13和15 km; 3段和4段空间展布尺度较小, 2个方向上的尺度均为5 km。④1段、3段和4段均对应剖面低 b 值区(图8b); 2段对应剖面高 b 值区(图8b)。⑤震源深度剖面的中小地震集中区, 对应的剖面 b 值偏高。

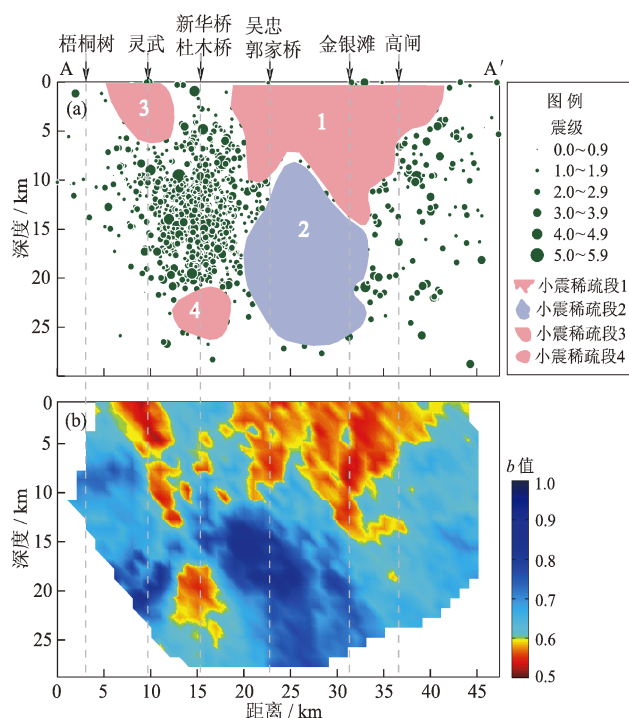


图8 沿断裂方向的地震深度剖面(a)和 b 值剖面分布(b) (剖面位置见图1)

Fig. 8 Depth profile (a) and b -value profile (b) along the active fault (profile location is shown in Fig. 1)

由于3段和4段震源深度剖面空间展布尺度较小(均为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$), 对应的剖面低 b 值异常区也偏小, 因此这2个区域(位于新华桥附近)的孕震强度偏小。从1段空间展布尺度和对应的低 b 值异常区来看, 该区域(吴忠/郭家桥—高闸地区)未来发生强震的危险性较大。虽然2段空间展布尺度较大, 但对应的剖面 b 值偏高, 说明应力积累水平不高, 故该区域发生强震的可能性偏小。

3 讨论

3.1 可靠性分析

最小完整性震级 M_c 的区域分布不同与测震台站的分布密切相关。台站分布较密的地方, 完整性震级下限偏小, 反之, M_c 下限偏大。进行 b 值空间扫描时应充分考虑 M_c 的区域差异, 相较于使用统一的 M_c 更能得到符合实际的计算结果, 从而提高了 b 值分布的可靠性。研究区 M_c 的空间分布如图9所示, 在中部 M_c 为 $M_L 1.5 \sim 1.6$, 北部为 $M_L 1.9$, 南部为 $M_L 2.2$ 。

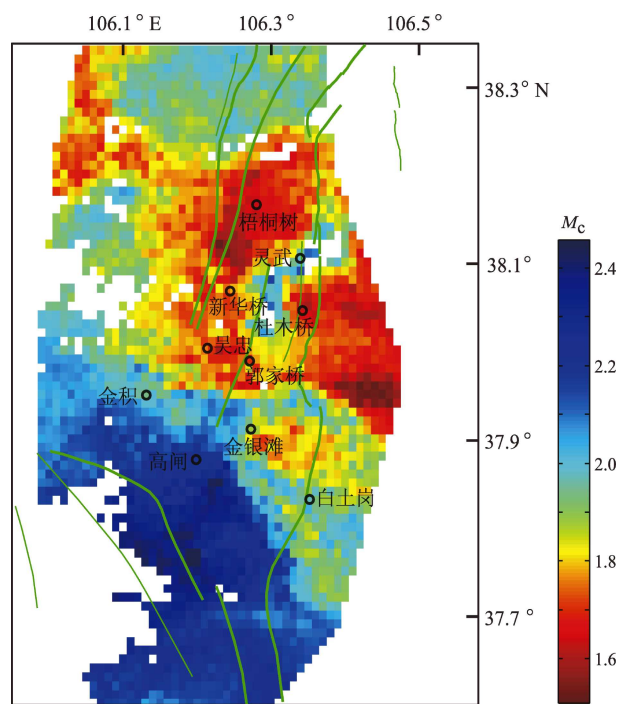


图9 研究区 M_c 空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of M_c -value in the study area

地震往往受控于活动断裂,空间分布并不均匀, b 值空间扫描时需要考虑参数设置与地震密度之间的关系。参数设置一般采用固定搜索半径或固定计算样本量的方式。固定搜索半径可以保证各个节点的 b 值计算范围相同,但地震稀疏区往往因为不满足最小计算样本量而无法计算 b 值,有的研究者通过增大搜索半径实现这些区域的 b 值计算。比如谢卓娟等(2015)进行 b 值空间扫描时将滇西南地区划分为 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 的网格,但为了保证有足够的计算样本,搜索半径取为40 km(网格大小的20倍左右);朱艾斓等(2009)进行 b 值剖面扫描时将剖面划分为 $3 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格,搜索半径取为50 km。通过增大搜索半径固然可以提高可计算 b 值的节点数,但搜索半径过大将使得 b 值空间分辨率降低。本文采用固定节点计算样本量的方式,地震越密集的节点,搜索半径越小,反之,搜索半径越大。这种根据地震分布密度设定每个节点的搜索半径的做法,可以有效提高地震密集分布地区的 b 值空间分辨率(Wyss *et al*, 2000; Wiemer, 2001),得到更合理的 b 值分布。

本文基于前文节点搜索样本量(100)和大于 M_c 的样本量(20)的参数设置,对 b 值空间扫描的所有节点的搜索半径进行了统计分析(图10),发现85%以上节点的搜索半径在5~14 km。从图5和图7可以看出,低 b 值区基本处于地震分布

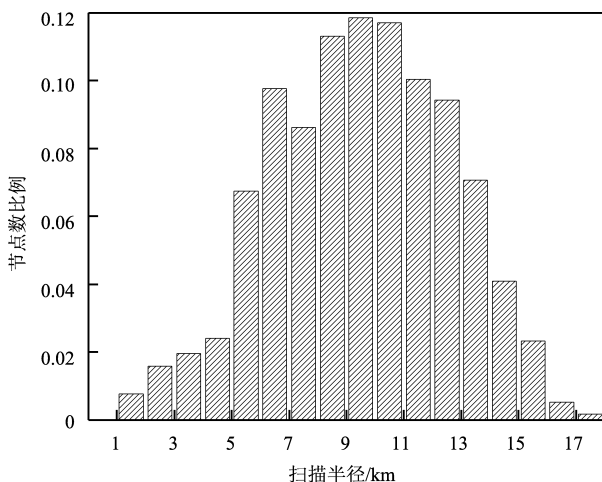


图10 不同扫描半径所占节点的比例数

Fig. 10 Proportion of nodes with different search radius

较密集的地区,这些地区亦是搜索半径偏小、 b 值空间分辨率较高的地区。因此,尽管搜索半径为5 km和14 km的面积差异很大(近8倍),但低 b 值区空间分辨率较高,计算结果合理可靠。

3.2 1段、3段和4段危险性分析

根据上文分析结果,未来发生强震的危险区域为吴忠/郭家桥—高闸地区,该区域孕震深度较浅,主要位于上地壳,地震可能会造成较严重的破坏。考虑到本文研究区活动断裂以走滑错动为主,笔者将图8中1段(也是剖面低 b 值区)的长度 $L=20 \text{ km}$ 和面积 $A=20 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 分别代入龙锋等(2006)统计的华北地区走滑型地震的震级与震源破裂长度的关系式 $M_s=1.860\lg L+3.821$ 以及震级与震源破裂面积的关系式 $M_s=0.954\lg A+4.134$,估算震级分别为 $M_s6.2$ 和 $M_s6.3$ 。

为了确定估算震级的合理性,笔者将1段的长度 $L=20 \text{ km}$ 代入不同研究者统计的震级与震源破裂长度的关系式 $M_s=3.3+2.1\lg L$ (郭增建,秦保燕,1979), $M_s=6.11+0.86\lg L$ (邓起东等,1992), $M_w=4.33+1.49\lg L$ (Wells, Coppersmith, 1994)以及 $M_s=6.0705+0.8205\lg L$ (叶文华等,1996),估算震级分别为 $M_s6.0$, $M_s7.2$, $M_w6.3$ 和 $M_s7.1$,震级差异较大。分析认为,邓起东等(1992)和叶文华等(1996)统计震级与震源破裂长度的关系式时,使用的地震资料相同,几乎均为 $M_s \geq 7.0$ 地震,使得本文估算震级明显大于其它估算结果。2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震的余震展布长度为35 km左右(曾宪伟等,2019),也说明20 km长的小震稀疏段孕育的地震强度应达不到7级。再结合图1所示1984—1988年灵武4次 $M_s5.0 \sim 5.5$ 地震的余震展布长度 $L=9 \text{ km}$,笔者将其代入 $M_s=1.860\lg L+3.821$ (龙锋等,2006),得到估算震级为 $M_s5.6$,与实际地震震级($M_s5.5$)比较接近。因此,笔者认为龙锋等(2006)统计的震级与震源破裂长度的关系式更适用于本文研究区,由此估算1段孕震震级为 $M_s6.2 \sim 6.3$ 。

3段和4段(也是剖面低 b 值区)空间展布尺度较小,均为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,笔者将 $L=5 \text{ km}$ 和 $A=5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 分别代入 $M_s=1.860\lg L+3.821$ 和 $M_s=0.954\lg A+4.134$ (龙锋等,2006),估算震级分

别为 $M_s5.1$ 和 $M_s5.4$ 。由此推断 3 段和 4 段区域 (新华桥附近) 孕震震级为 $M_s5.1 \sim 5.4$ 。目前该区域 b 值时序曲线未出现下降变化 (图 6), 表明新华桥附近短期内发生中强地震的紧迫性不强。

3.3 2 段危险性分析

1921 年 2 月 22 日, 吴忠南发生 $M_s6.0$ 地震 (图 1), 造成吴忠/郭家桥—高闸之间 (金积及邻区) 多处出现冒黑水现象 (宁夏回族自治区地震局, 1982)。从此次地震的震中位置和地震时的宏观现象推测, 2 段的位置很可能是本次地震的震源位置。将 2 段的长度 $L=13$ km 和面积 $A=13$ km \times 15 km 分别代入 $M_s=1.860\lg L+3.821$ 和 $M_s=0.954\lg A+4.134$ (龙锋等, 2006), 估算震级分别为 $M_s5.9$ 和 $M_s6.3$, 与 1921 年吴忠南 $M_s6.0$ 地震的震级吻合。此次地震造成 2 段区域介质较为破碎, 与该区域小震稀少、剖面 b 值偏高 (图 8b) 的分析结果是一致的。因此, 2 段再次发生强震的危险性较低。

另外, 上文分析认为 2 段以上区域 (即图 8a 中 1 段区域) 依然存在发生强震的危险, 由此推测 1921 年吴忠南 $M_s6.0$ 地震很可能未破裂至地表。

4 结论

本文利用 1970 年 1 月至 2018 年 10 月吴忠—灵武地区的地震精定位目录, 基于极大似然法得到了地震集中区的 b 值时间进程图, 以及研究区的 b 值平面分布图和沿活动断裂的震源深度剖面、 b 值剖面图。通过综合分析平面低 b 值区、震源深度剖面小震稀疏段和低 b 值区, 判定了研究区发生强震的潜在危险性, 得到以下结论:

(1) 平面低 b 值区揭示吴忠—灵武 (新华桥附近) 地区仍存在发生地震的危险性, 但强度不大。该区域还存在震源深度剖面的小震稀疏段 3, 4 和剖面低 b 值区。根据震级与震源破裂长度的统计关系式, 推断吴忠—灵武 (新华桥附近) 存在发生 $M_s5.1 \sim 5.4$ 地震的可能, 且新华桥以北地区的孕震深度较浅。

(2) 目前基于新华桥附近密集分布的地震资料得到的 b 值时序曲线未出现下降变化, 表明该区

短期内发生中强地震的紧迫性不强。

(3) 结合 2 段和剖面高 b 值区的分布, 认为吴忠/郭家桥—高闸地区很可能是 1921 年 2 月 22 日吴忠南 $M_s6.0$ 地震的发震位置, 推测该地震震源深度应在 15 km 左右, 上地壳浅部很可能未破裂, 依旧存在发生强震的危险。根据震级与震源破裂长度的统计关系式推测该区孕震强度为 $M_s6.2 \sim 6.3$, 孕震深度在 10 km 以内。

本文的 b 值计算和绘图程序来自 zmap 程序包, 审稿专家提出了很好的意见和建议, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 柴炽章, 廖玉华, 张文孝, 等. 2001. 灵武断裂晚第四纪古地震及其破裂特征[J]. 地震地质, 23(1): 15-23.
- 邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[M]//国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社. 247-264.
- 郭增建, 秦保燕. 1979. 震源物理[M]. 北京: 地震出版社, 104-158.
- 李全林, 陈锦标, 于泳, 等. 1976. 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, 21(2): 101-125.
- 刘雁冰, 裴顺平. 2017. 汶川地震前后 b 值的时空变化及构造意义[J]. 地球物理学报, 60(6): 2104-2112.
- 刘自凤, 龙锋, 彭关灵, 等. 2019. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 42(3): 330-337.
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟. 2006. 华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系[J]. 地震地质, 28(4): 511-535.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 宁夏回族自治区地震局. 1982. 宁夏地震目录[M]. 银川: 宁夏人民出版社.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2008. 小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 31(4): 354-361.
- 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等. 2018. 汶川地震前的 b 值变化[J]. 地球物理学报, 61(5): 1874-1882.
- 王新安, 黄继攀, 雍珊珊, 等. 2020. 2017 年 $M_s7.0$ 九寨沟地震前后 AETA 数据分析[J]. 华南地区, 40(1): 21-28.
- 吴果, 周庆, 冉洪流. 2019. 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, 41(1): 21-43.
- 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[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 40(10): 1755-1766.
- 叶文华, 徐锡伟, 汪良谋. 1996. 中国西部强震的地表破裂规模与震级、复发时间间隔关系的研究[J]. 地震地质, 18(1): 37-44.
- 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 2004. 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, 26(3): 294–303.
- 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[J]. 地球物理学报, 56(4): 1112–1120.
- 易桂喜, 闻学泽, 张致伟, 等. 2010. 川南马边地区强震危险性分析[J]. 地震地质, 32(2): 282–293.
- 曾宪伟, 闻学泽, 龙锋. 2019. 由初至 P 震相重新定位 2017 年九寨沟地震序列的主震与 $M_L 3.0$ 余震并分析发震构造[J]. 地球物理学报, 62(12): 4604–4619.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 甘卫军, 等. 2009. 鲜水河—安宁河—则木河断裂带上可能存在的凹凸体: 来自背景地震活动性的证据[J]. 地学前缘, 16(1): 218–225.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 胡平, 等. 2005. 首都圈地区 b 值随震源深度的变化: 对地震成核的意义[J]. 科学通报, 50(8): 788–792.
- Klein F W. 2007. User's guide to HYPOINVERSE – 2000, a fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes[R]. U S Geological Survey Open – File Report.
- Schorlemmer D, Wiemer S. 2004. Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of b values[J]. Journal of Geophysical Research, 109(B12): B12308.
- Ustu T. 1966. A statistical significance test of the difference in b – value between two earthquake groups[J]. Journal of Physics of the Earth, 14(2): 37–40.
- Waldhaue F, Ellsworth W L. 2000. A double difference earthquake location algorithm: method and application to the north Hayward fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(6): 1353–1368.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974–1002.
- Wiemer S, Wyss M. 1997. Mapping the frequency – magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times[J]. Journal of Geophysical Research, 102(B7): 15115–15128.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seismological Research Letters, 72(2): 374–383.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2): 684–698.
- Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto – Elsinore fault zone[J]. Journal of Geophysical Research, 105(B4): 7829–7844.
- Wyss M. 2001. Locked and creeping patches along the Hayward fault, California[J]. Geophysical Research Letters, 28(18): 3537–3540.

Strong Earthquake Risk in Wuzhong – Lingwu Region of Ningxia Based on b -value

ZENG Xianwei, LI Wenjun, MA Chongzhi, CAI Xinhua

(Ningxia Hui Autonomous Region Earthquake Agency, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract

In the paper, we relocated the earthquakes in Wuzhong – Lingwu region from Jan. , 1970 to Oct. , 2018 based on Hypo2000 and HypoDD methods. Then, analyzing the horizontal distribution of b -value, focal depth profile and b -value profile along active fault, we studied the potential risk of strong earthquakes in the study region. The results show that: ① There is a risk of $M_s 5.1 \sim 5.4$ earthquakes near Xinhuiqiao area. However, the b -value time series curve does not support the occurrence of medium-strong earthquakes in the region in a short time. ② The Wuzhong $M_s 6.0$ earthquake on Feb. 22, 1921 is likely to occur in Wuzhong – Gaozha region. The focal depth of the earthquake is about 15 km, and the shallow part of the upper crust is probably unbroken. ③ There is still a risk of strong earthquakes with $M_s 6.2 \sim 6.3$ in the shallow crust of the Wuzhong – Gaozha region and the focal depth is within 10 km.

Keywords: Wuzhong – Lingwu region; b -value; the maximum likelihood method; seismic risk; sparse segment of small earthquakes