

兰州马衔山北缘断裂地震潜势评估

梁明剑^{1,2}, 袁道阳^{1,2}, 刘百麓^{1,2}, 雷中生^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:马衔山北缘断裂为晚第四纪活动的左旋逆走滑断裂, 是对兰州市影响最大的控震断裂, 自东向西可分为内官营段、马衔山段、七道梁段和雾宿山段4条次级断层段。其中雾宿山段为1125年兰州7级地震的发震断层段, 其特征地震平均复发间隔为2 250~3 590年, 最晚离逝时间为882年, 在未来关注的200年内再次发生强震的可能性较小; 马衔山段特征地震平均复发间隔约为3 120年, 历史上曾发生过多中等破坏性地震, 其潜在地震危险性值得关注; 七道梁段和内官营段未获得古地震复发间隔等参数, 但历史上均发生过中等破坏性地震, 未来仍存在中等破坏性地震发生的可能, 其地震复发间隔可近似地参考马衔山断裂带上相应震级地震的平均值。

关键词: 兰州; 马衔山北缘断裂, 平均复发间隔; 地震潜势

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)04-0337-07

Seismic Risk Estimates for the Maxianshan North-margin Fault

LIANG Ming-jian^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}, LIU Bai-chi^{1,2}, LEI Zhong-sheng^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Maxianshan north-margin fault is a left-lateral reverse strike-slip fault during late Pleistocene to Holocene periods, and it primarily controls seismicity of Lanzhou city. From west to east, it can be divided into 4 segments; Wusushan, Maxianshan, Qidaoliang and Neiguanying segment. Wusushan segment is the seismogenic structure of Lanzhou M7.0 earthquake in 1125, and the average recurrence interval of its characteristic earthquakes is 2 250~3 590 a. Considering only 882 years have elapsed since 1125, probability of another strong event is low during future 200 years. Average recurrence interval on Maxianshan segment is about 3 120a, and there were several moderate destructive earthquakes occurred on it in history. So we should pay attention to the potential seismic risk on this segment. The paleo-earthquake recurrences interval on Qidaoliang segment and Neiguanying segment are not obtained yet, but moderate-strong earthquakes have occurred on them in history, and will occur in future. The recurrence of earthquakes on them can make reference to Maxianshan north margin-fault's approximately.

Key words: Lanzhou; Maxianshan north-marginal fault; Average recurrence interval; Risk estimates of earthquake

0 引言

马衔山北缘断裂位于兰州市南部山区, 为一条晚第四纪活动的左旋逆走滑断裂。该断裂东起定西

内官营, 经庙湾、羊寨、银山, 在七道梁的摩云关与兴

隆山南缘断裂交汇后, 向西断续经过前泉村、湖滩、

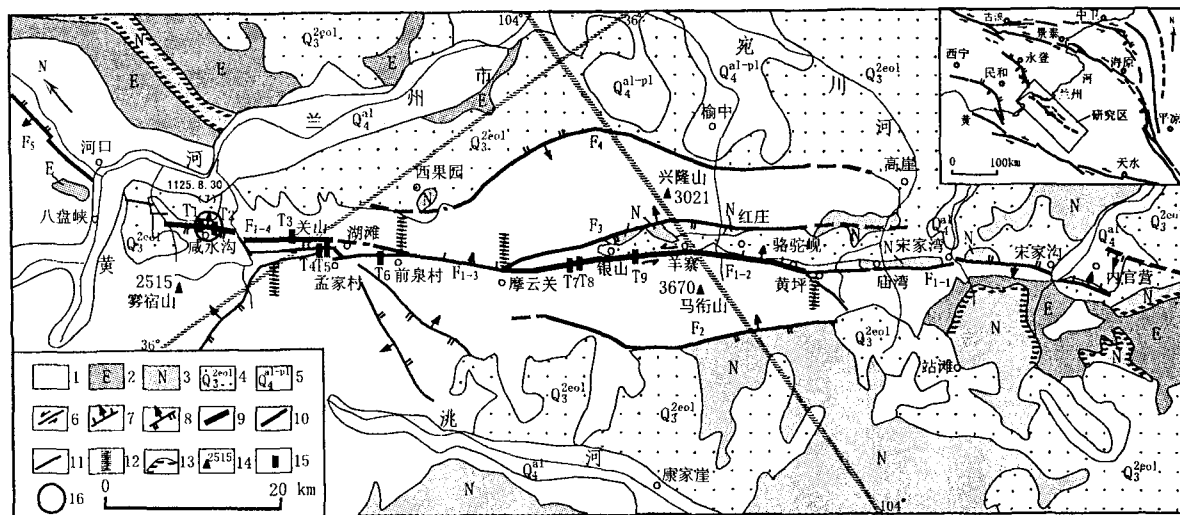
收稿日期: 2008-06-30

基金项目: 中国地震局“十五”国家重大建设项目; 甘肃省科技攻关基金项目(2GS054-A44-015); 中国地震局兰州地震研究所论著号: LC2008060

作者简介: 梁明剑(1979-), 男(汉族), 广西北海人, 在读硕士, 主要从事活动构造及地震危险性研究。

关山、咸水沟,至八盘峡止。全长约 115 km,总体走向 NW60°^[1]。根据断裂几何结构和活动性的差异大致可以划分为 4 条次级断层段,自东向西分别称为内官营段、马衔山段、七道梁段和雾宿山段,其长度分别为:27 km、40 km、28 km 和 40 km;其中七道梁段与雾宿山段在前泉村至关山一带因断裂分叉有约 20 km 的重叠。根据沿断层的最新考察结果,马衔山北缘断层具有分段活动性,东段的内官营段(F_{1-1})为晚更新世早期活动;中东段的马衔山段(F_{1-2})和中西段的七道梁段(F_{1-3})为晚更新世-全新世早期活动;而西段的雾宿山段(F_{1-4})为晚全新

世活动,并为 1125 年兰州 7 级地震的发震断层段^[2,3]。由马衔山北缘断裂西段 1/1 万地质填图研究结果^[3],以及利用马衔山断裂带上的几次历史破坏性地震,采用 Brune 公式^[4]估算全段断裂的平均滑动速率为 $0.93 \pm 0.45 \text{ mm/a}$ ^①。由于马衔山北缘断裂晚第四纪存在多期构造活动,其未来的新活动性及地震危险性对兰州的城市安全影响较大。本文基于断裂新活动性研究结果,采用古地震法、断层滑动法和地震矩法^[5,8]获得不同断裂段的地震平均复发间隔,并采用地震危险性概率评估方法^[5,6,9],评估雾宿山段与马衔山段未来 200 年的地震潜势。



1. 前第三系; 2. 下第三系; 3. 上第三系; 4. Q_3 风成黄土; 5. Q_4 冲洪积物; 6. 走滑断层; 7. 正断层; 8. 逆断层; 9. Q_4 断层; 10. Q_4 断层; 11. Q_4 断层; 12. 分段界限; 13. 不整合; 14. 山脉及高程; 15. 探槽位置; 16. 地震震中; F_1 . 马衔山北缘断层; F_2 . 马衔山南缘断层; F_3 . 兴隆山南缘断层; F_4 . 兴隆山北缘断层; F_5 . 庄浪河断

图 1 马衔山北缘断裂展布图

Fig. 1 Map of position of Maxianshan north-marginal fault.

1 马衔山北缘断裂新活动性参数

通过沿马衔山北缘断裂带的详细追踪考察和 1:1 万地质填图研究^[3],^①,马衔山北缘断裂的雾宿山段、七道梁段和马衔山段均发现了晚第四纪最新构造活动的证据。但遗憾的是,除了雾宿山段的 1 号和 2 号探槽外,其它的断层剖面未能获得多期古地震事件,大多仅是限定断层的最新活动时代而已。为了弥补古地震资料不足,在综合考虑探槽揭露的多期古地震事件和多个剖面揭露的最新构造事件(表 1)的基础上,我们采用逐次限定方法^[10]来获得各次构造事件发生的时间段。

从雾宿山段(F_{1-4})的古地震事件年代测试结果和图 2(a)分析: $X1_{p1}$ 和 $X2_{p1}$ 这两次古地震破裂分别断错了最新的地层^[3],年代测试结果与 1125 年 7 级地震时间相当,应同属 1125 年 7 级地震事件;

$X1_{pII}$ 与 $X2_{pII}$ 应属同一古地震事件,其时间更接近 $(3.0 \pm 0.3) \sim (4.1 \pm 0.4) \text{ ka}$ 区间,约距今 $(3.55 \pm 0.50) \text{ ka}$; $X1_{pIII}$ 应为一独立的古地震事件,发生年代约距今 $(7.6 \pm 0.7) \text{ ka}$; DPZ_p 也应为一次独立构造事件,发生在 $(9.73 \pm 0.83) \sim (15.38 \pm 1.31) \text{ ka}$ 这个时间段内,约距今 $(12.56 \pm 1.55) \text{ ka}$ 。

同理如图 2(b)所示:马衔山段(F_{1-2})上 S_p 和 YSS_p 应属同一次古地震事件,其发生年代更接近 $(6.57 \pm 0.56) \sim (6.87 \pm 0.58) \text{ ka}$ 时间区间,约距今 $(6.72 \pm 0.81) \text{ ka}$;而张家寺断层剖面所揭露的 3 次古地震事件应该是彼此独立的事件,发生年代分别距今约 $(9.88 \pm 1.19) \text{ ka}$ 、 $(12.17 \pm 1.46) \text{ ka}$ 、 $(16.53$

① 袁道阳. 兰州市活断层探测与地震危险性评价工程技术报告. 2007.

± 1.4) ka。

七道梁段(F_{1-3})上, $YJZD_P$ 、 $YJZX_P$ 和 DZS_{PI} 应属同一事件, 发生时间更接近 $(12.07 \pm 1.02) \sim (12.33 \pm 1.05)$ ka 这个时间段, 约距今 (12.20 ± 1.46) ka。由于古地震事件距今年代越久远, 年代

样品测试结果的误差也越大, 而且在探槽和剖面数目有限的情况下古地震事件被遗漏的可能性较大。因此这里认为较老构造事件 DZS_{PI} 之前存在古地震事件遗漏的可能性较大, 不宜与获得的前一次构造事件做比较分析, 从而未做考虑。

表1 马衔山断裂带各断层(段)构造事件表

断层(段)	断层剖面	所揭露的古地震时间年龄/B. P.	资料来源
F ₁₋₄	咸水沟 1 号探槽(T ₁)	X1 _{P I} (1.9 ± 0.2) ka	宋方敏等 (2006)
		X1 _Ⅱ (4.1 ± 0.4) ka	
	咸水沟 2 号探槽(T ₂)	X1 _{P Ⅲ} (7.6 ± 0.7) ka	
		X2 _{P I} (1.6 ± 0.1) ka	
		X2 _{P Ⅱ} (3.0 ± 0.3) - (1.9 ± 0.2) ka	
陡坡子断层剖面(T ₃)	DPZ _P (9.73 ± 0.83) - (15.38 ± 1.31) ka		
F ₁₋₃	杨家庄东侧断层剖面(T ₄)	YJZD _P (9.78 ± 0.83) - (12.33 ± 1.05) ka	袁道阳 (2007)
	杨家庄西侧断层剖面(T ₄)	YJZX _P (12.07 ± 1.02) - (15.83 ± 1.35) ka	
	大尖山断层剖面(T ₅)	DZS _{P I} (13.32 ± 1.60) ka	
		DZS _{P Ⅱ} (27.24 ± 3.31) - (31.14 ± 2.65) ka	
		上高家湾天然断层剖面(T ₆)	
F ₁₋₂	银山水泥厂断层剖面(T ₇)	YSS _P (7.53 ± 0.64) - (6.57 ± 0.56) ka	
	张家寺断层剖面(T ₈)	Z _{P I} (9.73 ± 0.83) - (10.04 ± 0.85) ka	
		Z _{P Ⅱ} 11.49 ± 0.98) - (12.85 ± 1.09) ka	
		Z _{P Ⅲ} (16.53 ± 1.4) ka	

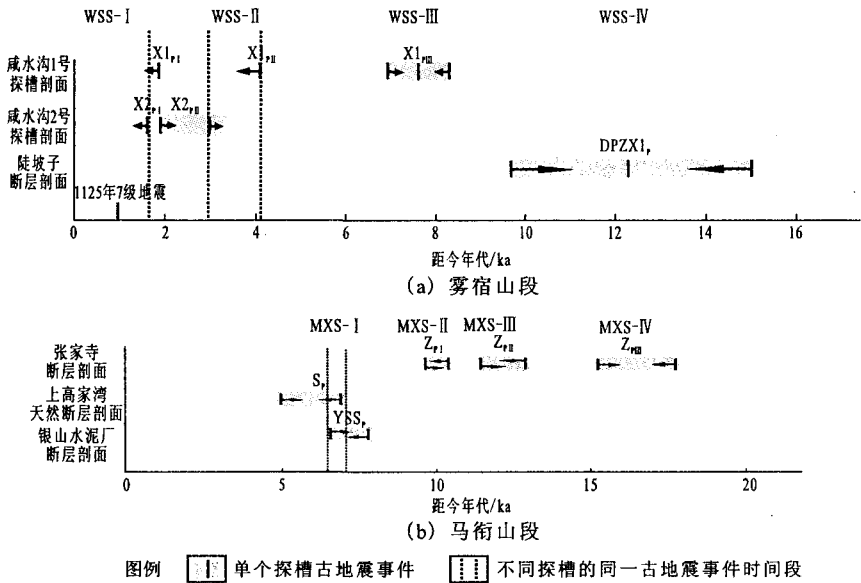


图2 马衔山北缘断裂各段的古地震序列

Fig.2 The paleoearthquake sequences on segments of Maxianshan north-margin fault.

综上所述,马衔山北缘断裂雾宿山段和马衔山段各获得了4次古地震事件;七道梁段虽获得2次古地震事件,但前后遗漏的可能性太大,未能估算其古地震的复发间隔;而内官营段由于活动强度较弱,其最新活动在地貌和地质剖面上均没有明显的显示(表2)。同时,由构造形变实测及历史地震考证等研究获得了马衔山北缘断裂雾宿山段和马衔山段的平均滑动速率分别为 1.11 ± 0.33 mm/a 和 0.93 ± 0.45 mm/a^①、1125年7级地震的同震位错2.50

m^[3]。

从图3可以看出,马衔山北缘断裂雾宿山段和马衔山段的古地震复发行表现出良好的准周期性,其中马衔山段最晚一次古地震事件约为6700年,自那以后的2次古地震事件均发生在雾宿山段上,其中的原因可能是沿马衔山北缘断裂的破裂以别的形式迁移到西北段,也可能是马衔山段近6700年来的确没有发生过古地震破裂,或者古地震事件遗迹保存不完整而被遗漏。

表2 马衔山断裂带各断层(段)活动性参数

断层(段)名称	分段长度/km	滑动速率/mm·a ⁻¹	同震位错/m	古地震事件距今年代/ka
雾宿山段	40	1.11±0.33	2.50	I:0.882; II:3.55±0.50; III:7.6±0.70; IV:12.56±1.55;
七道梁段	28	0.93±0.45		I:12.20±1.46;
马衔山段	40	0.93±0.45		I:6.72±0.81; II:9.88±1.19; III:12.17±1.46; IV:16.53±1.4
内官营段	27	0.93±0.45		

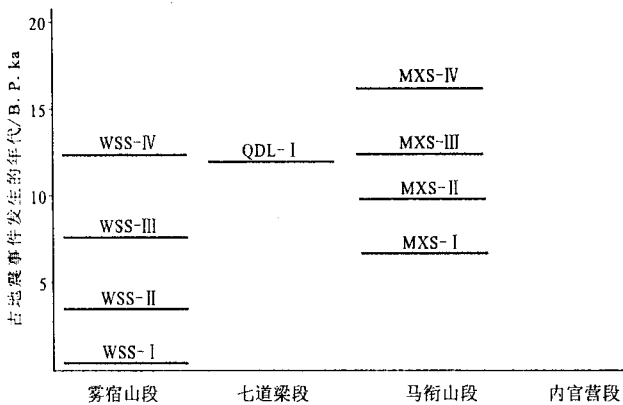


图3 马衔山北缘断裂不同段落古地震活动序列图

Fig.3 The paleoearthquake activity on different segments of Maxianshan north margin fault.

我们统计了 Nishenko 与 Buland^[11]、闻学泽^[9]和甘卫军^[12]建立地震潜势概率模型时所用的基础地震资料(历史地震数据 36 组,古地震数据 25 组),符合离逝时间 T_e 大于 2 倍地震平均复发间隔仍未再次发生特征地震的历史地震样本为 1 个,仅占 2.8%;古地震样本为 2 个,也仅占其样本总数的 8%(离逝时间 T_e 的截止时间为上述研究者文章发表时间)。由此可知:当离逝时间 T_e 大于 2 倍地震平均复发间隔时,仍未再次发生特征地震的机率很小;加上各种客观与主观的原因,估算的古地震复发间隔大多为千年以上,测年误差较大,这样所含的不确定因素就更大。结合马衔山段的情况,多数剖面古地震序列保存很不完整,大多仅得到最晚一次构造事件的年代。因此在它最晚一次古地震事件的距今时间大于 2 倍地震平均复发间隔仍未再次发生特征地震的情况下,我们认为其近 6 700 年存在古地震遗漏的可能性要更大。从而马衔山段不适合采取基于古地震数据的方法估算其地震潜势概率,这里采用其它的方法估算其发震概率。

2 地震潜势概率的估算

2.1 马衔山断北缘断裂各断层(段)的地震复发间隔

2.1.1 雾宿山段与马衔山段地震复发间隔

根据对马衔山北缘断裂雾宿山段和马衔山段的多个探槽古地震事件的对比分析,各揭露了 4 次古地震事件。我们采取古地震法^[5]估算该断层段的地震平均复发间隔的中位数及标准差(表 3)。

表3 雾宿山段与马衔山段的古地震平均复发间隔

断层(段)名称	古地震事件	距今时间/ka	地震重复周期/ka			
			复发间隔 T_w	复发间隔中位数与标准差 $\bar{T} \pm S_T$	变异系数 δ_T	
雾宿山段	I	0.882				
	II	3.55±0.50	2.67±0.50			
	III	7.6±0.70	4.05±0.86	3.89	3.80±0.76	0.20
	IV	12.56±1.55	4.96±1.70			
马衔山段	I	6.72±0.81	3.16±1.44			
	II	9.88±1.19	2.29±1.88	3.27	3.12±1.06	0.34
	III	12.17±1.46	4.36±2.02			
	IV	16.53±1.40				

基于实测雾宿山段的平均滑动速率为 1.11 ± 0.33 mm/a 和最后一次地震的同震位错为 2.50 m,采取断层滑动法^[5]估算雾宿山段特征地震的平均复发间隔为 2.25 ± 0.65 ka:

$$\bar{T} = \frac{2500}{1.11} = 2250(a)$$

$$S_T = 2250 \times \sqrt{(0)^2 + \left(\frac{0.33}{1.11}\right)^2} \approx 650(a)$$

2.1.2 七道梁段与内官营段的地震平均复发间隔

几百年来马衔山断裂带上曾发生多次中、强地震,它们与其新活动性有着密切的关系,其中包括:1901 年兰州西 5 级地震、1878 年榆中高崖 5 级地震、1629 年兰州 5 ½ 级地震、1590 年永靖东南 6 级地震、1524 年马衔山 4 ¾ 级地震、1371 年渭源北 5 级地震及 1125 年 7 级地震^{[1]⑩}。除了 1125 年 7 级强震外,这些破坏性地震分别发生在马衔山断裂带的各个断层段上(图 4),说明可以把马衔山断裂带作为一个整体来考虑,利用其上的破坏性地震求取其地震矩平均释放率,从而估算相应震级地震的平均复发间隔。

地震矩是剪切模量、断层破裂面积和断层平均位移的乘积。地震矩具有明确的物理意义,不存在震级饱和现象,可以真实地反映地震的大小^[7]。Wesnousky^[8]提出了利用地震矩方法获得地震平均复发间隔,该方法的核心是平均地震复发间隔 = 特征地震矩/平均地震矩释放率。

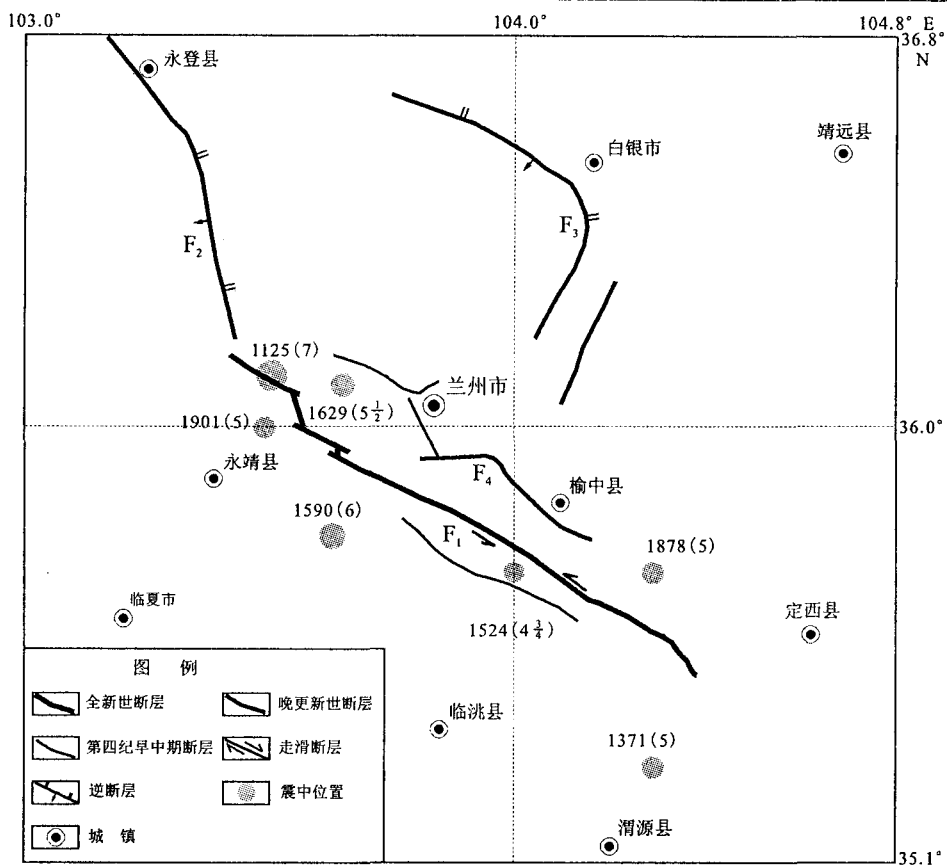


图4 马街山断裂带历史中强震震中分布示意图

Fig. 4 Historical moderate-strong earthquake epicenters related to Maxianshan fault zone.

闻学泽(2007)结合潜在震源区的历史破坏性地震和现今地震记录,估算特定断层(段)的地震矩年平均速率,用于计算其上地震平均复发间隔。具体估算公式^②

$$T = \frac{M_0}{V_{M_0}} \tag{1}$$

$$\lg M_0 = 0.89 \times M + 13 \tag{2}$$

$$V_{M_0} = \frac{1}{t} \sum_{i=2}^n M_{0,i} \tag{3}$$

上述式中, M 为地震震级; M_0 为地震矩; V_{M_0} 为地震矩平均年速率; $M_{0,i}$ 为第*i*次地震的矩。其中 M_0 的单位为Nm。

七道梁段由于未获得较完整地古地震序列,无法估算其地震复发间隔;而内官营段活动强度较弱,其最新活动在地貌和地质剖面上均没有明显的显示,也没有获得更多相关定量参数,但1878年榆中高崖5级地震震中可能落在该段上(图4)。因此,从保守角度上考虑,这里马街山北缘断裂七道梁段和内官营段的地震平均复发间隔近似参考马街山北缘断裂的地震平均复发间隔。

由公式(1)~(3)可估算马街山北缘断裂的平

均地震矩速率为 $0.51 \times 10^{16} \text{ Nm/a}$ (图5),从而估算马街山北缘断裂上震级为 $M_s 6.0、6.5、7.0$ 地震的平均复发间隔分别为430 a、1 200 a、3 330 a。这个结果与马街山北缘断裂几百年来发生过多次中等强度的破坏性地震,自1125年以来未发生过 $M \geq 7.0$ 强震的事实基本吻合。马街山北缘断裂七道梁段与内官营段上相应震级的地震平均复发间隔可参考上述估值。

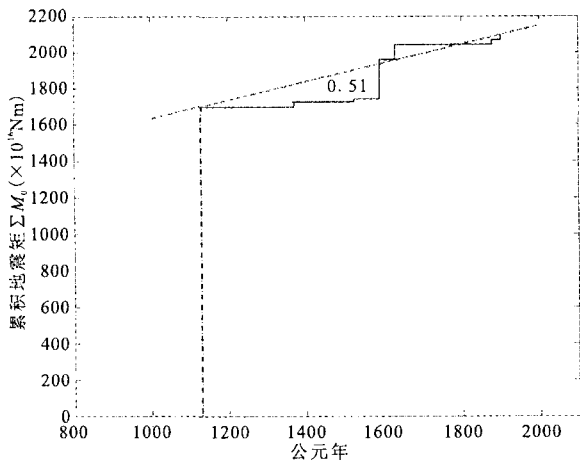
2.2 地震潜势概率估算

2.2.1 雾宿山段

闻学泽(1999)统计了中国大陆主要活动断裂上多轮回原地复发的历史地震资料,结果表明^[9]:对于时间可预报行为,归一化的复发间隔 $T/\bar{T}$ 很好服从于对数正态分布 $\text{LN}(\mu_q = 0.00, \sigma_q^2 = 0.15^2)$;而且合并文献[11]建立概率模型中的历史地震资料,得到一个更稳定的准周期对数正态分布 $\text{LN}(\mu_q = 0.00, \sigma_q^2 = 0.22^2)$ 。

雾宿山段获得了4次古地震、滑动速率和最晚

② 闻学泽. 中强—弱及隐伏活动断层的现今活动习性与地震危险性评价方法. 2007.



(图内的小数为斜虚线的斜率, 即平均地震矩速率/ $10^{16}\text{Nm}\cdot\text{a}^{-1}$)

图5 马衔山断裂带地震矩累积及平均地震矩速率图

Fig. 5 Cumulation and average velocity of seismic moment of Maxianshan fault zone.

表4 雾宿山段的特征地震潜势概率

断层段 名称	复发间 隔/a	离逝时 间/a	未来50年		未来100年		未来200年		方法与 模式
			累积概率	条件概率	累积概率	条件概率	累积概率	条件概率	
雾宿山段	3 590	882	1.14×10^{-6}	0.69×10^{-6}	2.67×10^{-6}	2.22×10^{-6}	11.95×10^{-6}	11.50×10^{-6}	古地震法与准周期模式
	2 250	882	0.89×10^{-2}	0.30×10^{-2}	1.29×10^{-2}	0.70×10^{-2}	2.45×10^{-2}	1.87×10^{-2}	断层滑动法与时间可预报模式

2.2.2 马衔山段

马衔山段仅获得4次古地震参数,但对该段的离逝时间不能完全确定,不适宜采用“时间相依”的方法评估其地震潜势概率,这里采用泊松模型^[13]来估算其发震概率。

闻学泽(2007)在研究东部地区中—弱活断层地震危险性评价时,利用震级—频度关系,划分断层小区或构造小区的方法,拟合它们中不同震级档地震的年发生率与震级关系,间接地评估其地震危险性^②。为了能够综合利用历史破坏性地震,把不同震级档(M_i)的地震在其完整记载或记录时段($t_0 - t_i$)中的频数 $n(M_i)$ 归算到同一个时间长度 t 上去,就可得到某震级档地震在 t 内的频数^②:

$$n(M_i)_t = \frac{n(M_i) \times t}{(t_0 - t_i)} \quad (4)$$

式中, t_0 为使用地震目录资料的截止年限; t_i 为第 i 震级档地震的有完整记录的起始年限。

基于该思路,以马衔山段为一个断层小区,将不同震级档的统一归算时间段为500年,即是兰州地区破坏性历史地震记载基本完整的时间段^①,具体设置为 $2.5 \leq M_i < 4\frac{3}{4}$, $t_i = 1971$; $M_i \geq 4\frac{3}{4}$, $t_i = 1506$ 。

这里采用最小二乘法拟合了马衔山段上不同震级档(0.5级分档)地震的年发生率—震级关系:

一次地震(1125年7级地震)的同震位错等参数,其潜势概率的评估分别采用古地震法与准周期模式、断层滑动法与时间可预报模式^[5]进行评估。依据马衔山北缘断裂的实际情况,笔者选用闻学泽(1999)建立的通用概率分布模型^[9]对雾宿山段的地震潜势概率进行估算。马衔山北缘断裂雾宿山段在未来50、100和200年中特征地震的潜势概率估算结果如表4。

从表4可知,未来200年内由于离逝时间为882年,雾宿山段的特征地震潜势概率累积概率和条件概率均较低,再次发生强震或大地震的可能性小。不过若保守地从2250年的地震复发间隔来看,尽管雾宿山段的条件概率较低,但开始进入了条件概率快速增长的时间域,仍应对该断层段的地震活动保持关注。

$$\lg \lambda(M) = 1.60 - 0.70 \times M_L \quad (5)$$

再由修正后的Connell^[13]泊松分布后的公式估算断层小区发生 n 次震级 $\geq M$ 的破坏性地震的平均复发间隔 $T(M)$ 和发生概率^②:

$$T(M) = \frac{1}{\lambda(M)} \quad (6)$$

$$P\{\Delta t \text{ 内发生 } n \text{ 次震级 } \geq M \text{ 的地震}\} =$$

$$\frac{(\lambda \times \Delta t)^n}{n!} \exp(-\lambda \times \Delta t) \quad (7)$$

从而获得马衔山段的地震平均复发间隔与发生概率(表5)。

表5 马衔山段地震平均复发间隔与发生概率

震级 $\geq M_s$	$M_s 6.0$	$M_s 6.5$	$M_s 7.0$	
平均复发间隔/a	550	1 230	2 750	
未来关注时段内发生	50 年	0.09	0.04	0.02
1 次地震的概率	100 年	0.17	0.08	0.04
	200 年	0.31	0.15	0.07

从表5中可以看出,采用震级—频度关系和泊松模型估算马衔山段上地震平均复发间隔与其上古地震分析的结果接近,也符合马衔山北缘断裂地震活动水平的基本状况。

3 结论与讨论

(1)马衔山北缘断裂雾宿山段特征地震的平均复发间隔约为2250~3590年,距离最晚一次强震

1125年7.0级地震仅过了882年,离逝时间短。未来关注的200年内,该段的地震潜势概率累积概率和条件概率均较低,发生强震的可能性小;但其地震潜势概率开始进入快速增长的时间域。

(2)马衔山北缘断裂马衔山段特征地震的平均复发间隔约为3120年,该段多个剖面显示其全新世早期有活动,而且其上发生过多次中强破坏性地震。由泊松模型估算其未来关注200年内地震的复发概率较高,相对危险程度较高。

(3)马衔山北缘断裂七道梁段未能获得较完整的地震序列,但晚更新世—全新世早期有过一次古地震事件;内官营段活动强度弱,也未获得断层的定量参数,而1878年榆中高崖5级地震可能与其新活动有关。在未来关注时段内,这2个断层段仍存在发生中等破坏性地震的可能,其上的地震复发间隔可近似地参考马衔山断裂带相应震级平均复发间隔。

致谢:感谢四川省地震局闻学泽研究员在活断层地震危险性评价的新思路、新方法上给予启示与指导。

[参考文献]

- [1] 袁道阳,雷中生,刘百簎,等. 兰州1125年7级地震考证与发震构造分析[J]. 中国地震,2002,18(1):67-75.
- [2] 袁道阳,刘小凤,郑文俊,等. 兰州地区活动构造格架与变形特征[J]. 地质学报,2004,78(5):626-632.
- [3] 宋方敏,袁道阳,陈桂华,等. 甘肃马衔山北缘断裂西北段几何结构及其新活动[J]. 地震地质,2006,28(4):547-560.
- [4] J N Brune. Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones[J]. J. Geophys. Res., 1968,73:777-784.
- [5] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京:地震出版社,1995.
- [6] 闻学泽. 准时间可预报复发行为与断裂带分段发震概率估计[J]. 中国地震,1993,9(4):289-300.
- [7] 张培震,毛凤英. 活动断裂定量研究与中长期强地震危险性概率评价[A]//活动断裂研究理论与研究(5)[G]. 北京:地震出版社,1996,3-12.
- [8] Wesnousky S G. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: case study of Japan[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1984,74:687-708.
- [9] 闻学泽. 中国大陆活动断裂段破裂地震复发间隔的经验分布[J]. 地震学报,1999,21(6):616-622.
- [10] 毛凤英,张培震. 古地震研究中的逐次限定法与新疆北部主要断裂带的古地震研究[A]//活动断裂研究(4)[G]. 北京:地震出版社,1995:153-164.
- [11] Nishenko SP, Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987,77:1382-1399.
- [12] 甘卫军,刘百簎,黄雅虹. 板内大震原地准周期复发间隔的概率分布[J]. 西北地震学报,1999,21(1):7-16.
- [13] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1968,58(5):1583-1606.