

马衔山北缘断裂带及庄浪河断裂带的 地震危险性分析*

周德敏^{1,2}, 张效亮³, 梁诗明¹, 姜忠朋⁴

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013;
3. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 4. 中国石油长城钻探工程有限公司, 北京 100101)

摘要: 以 GPS 观测资料和部分地质方法所获得的断裂活动性参数为约束, 基于弹性半无限空间断裂位错理论, 反演获得庄浪河断裂、马衔山北缘断裂带各主要断裂段的现今滑动速率。结果表明, 马衔山北缘断裂带的马衔山段左旋走滑较明显, 量值达 3.91 mm/a, 而东、西两段走滑分量不明显, 整个马衔山北缘断裂带有较明显的逆冲分量, 以东段的内官营段逆冲倾滑最明显, 量值达 3.0 mm/a; 庄浪河断裂有 0.5 ~ 1.2 mm/a 的逆倾滑分量, 走滑分量不明显。在此基础上, 计算了各个断裂段的地震复发间隔, 并运用时间相依的概率模型计算了未来 30 a、50 a 和 100 a 的发震概率。

关键词: 马衔山北缘断裂; 庄浪河断裂; 地震危险性; 发震概率

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)01-0053-08

0 引言

青藏高原东北缘为整个青藏高原向大陆内部扩展的前缘部位及隆升变形的年轻地带, 发育有多条晚第四纪强烈活动的大型活动断裂带, 其主导性活动断裂有 NWW 向和 NNW 向两组。目前, 对于青藏高原东北缘的一系列主要活动断裂, 如海原断裂、西秦岭北缘断裂、香山—天景山断裂带等, 前人已通过传统的地质调查方法进行了大量研究, 特别是大比例尺断层填图, 不仅对断裂的空间几何展布和断裂分段有了比较详细的了解, 而且对部分区段的活动方式和滑动速率已有了较深入的研究 (赵国光, 1996; 柴炽章等, 1997; 邓起东等, 2002)。但部分出露不好、活动较弱或规模较小的断裂, 如庄浪河断裂、马衔山北缘断裂等, 传统的地质调查方法难以有效获得其活动方式及滑动速率。而这些断裂的危险性也是不容忽视的, 如庄浪河断裂周边发生多次中强地震, 马衔山北缘断裂是 1125 年兰州 7 级地震的发震构造 (袁道阳等, 2002a, 2003; 宋方敏等, 2007)。

近年来, 高精度、高密度、大范围的 GPS 被广泛用于观测地壳运动的精细变化, 国内外基于 GPS

观测结果开展较多研究: 确定一定区域内构造形变场及其时空的非均匀变化特征, 建立地壳形变场的运动学模型 (Gan, Prescott, 2001; 王敏等, 2003); 基于断裂位错模型等反演深部断裂的运动速率和有关几何参数等 (Savage *et al*, 1999; Gan *et al*, 2000; 周德敏等, 2006); 以地表位移场作为约束和边界条件, 通过有限元等力学方法, 研究构造形变场的动力学机制, 解释构造形变场的动力学成因 (吴云等, 1999); 利用应变率场和地震矩累积率之间的关系, 把 GPS 观测获得的表面应变率同地下深部的地震活动联系起来, 进行地震危险性分析 (Ward, 1994, 2007; Gan, Prescott, 2001; WGCEP, 2002; 周本刚, 周庆, 2005; Shen *et al*, 2007; 张效亮, 谢富仁, 2009)。

对于庄浪河断裂、马衔山北缘断裂这种传统的地质调查方法难以有效实施但其地震危险性仍不容忽视的活动断裂, 本文尝试利用 GPS 资料分析断裂活动性和地震危险性。首先以 GPS 观测资料和部分地质方法所得到的活动断裂段的滑动速率为约束, 基于弹性半无限空间断裂位错理论, 在反演获得庄浪河断裂、马衔山北缘断裂带各主要断裂段的现今滑动速率的基础上, 计算各个断裂段地震复发间隔和发震概率。

* 收稿日期: 2013-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原现今隆升扩展速率及构造形变模式的 GPS 观测研究 (41174082)”资助。

1 活动断裂的滑动速率反演

1.1 深大断裂位错模型

根据半无限空间弹性体位错理论 (Okada, 1992), 弹性体内某一矩形几何面发生错动所引起的地表某一点的位移与错动面的错动量成正比, 比例系数由该点与错动面的相对位置、错动面的几何尺度、倾角、深度和弹性介质性质惟一确定。若地下有多个矩形错动面, 则在地表某一点所引起的位移, 就是这些矩形几何面各自错动在该点所引起的位移的叠加。深断裂位错模型是半无限空间弹性体位错模型的一种特殊情况 (图 1), 它将地球岩石圈介质看作半无限空间弹性体, 将实际断裂看作一系列上部断层面闭锁、下部断层面无限延伸并自由错动的“断层段矩形几何面”的组合, 每个断层段矩形几何面不仅尺度和倾角可以互不相同, 而且闭锁深度、错动速率 (或位错量) 和错动方式也可各异。作为一种经典模型, 深断

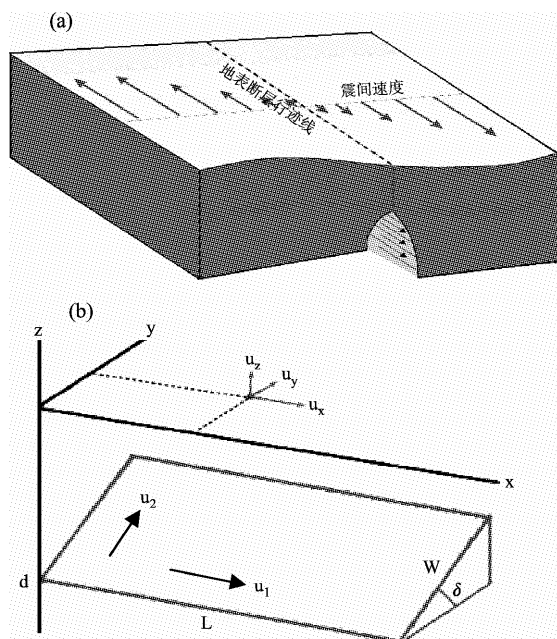


图 1 深断裂位错模型示意图

(a) 深部活动断裂与地表面形变场的关系模型;
(b) 有限矩形断层面

Fig. 1 Schematic diagram of “Three-dimensional Deep-fault Dislocation Model”

(a) Relationship model between deep active faults and surface deformation field; (b) finite rectangular fault plane

裂位错理论被广泛用于解释 GPS 等手段所直接获取的高精度地表形变场与活动断裂的相互关系 (Savage *et al*, 1999; Gan *et al*, 2000)。

1.2 GPS 资料

“九五”国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”、“十一五”国家重大科技基础设施建设工程“中国大陆构造环境监测网络”在马衔山北缘断裂带及庄浪河断裂带周边区域布设了密集的 GPS 站点, 并积累了多期观测数据, 为分析本区域主要活动断裂的现今滑动速率和地震危险性提供了很好的基础资料。本研究共选取庄浪河断裂、马衔山北缘断裂两侧 46 个 GPS 站点的速度资料 (图 2), 其中, 41 个 GPS 流动站点来源于“中国地壳运动观测网络”, 目前已完成了 6 次观测 (1999、2001、2004、2007、2009、2011); 5 个连续 GPS 站点来源于“中国大陆构造环境监测网络” (2009~2013-03)。因分布在该区域的“中国大陆构造环境监测网络”的流动站仅完成 2 期观测 (2009、2011), 未纳入本次研究。采用美国喷气推进实验室研制的 GIPSY/OASIS-II 软件对 GPS 数据进行处理: 第一步, 选取中国大陆及周边的 13 个 IGS 与区域站联合解算, 同时直接利用 JPL 的无基准轨道和卫星钟差, 最终计算的单日解包含测站三维坐标、方差、协方差的单日时段解; 第二步, 各单日时段解通过公共测站的 7 参数转换, 得到 ITRF2000 参考框架下的单日时段解; 第三步, 将

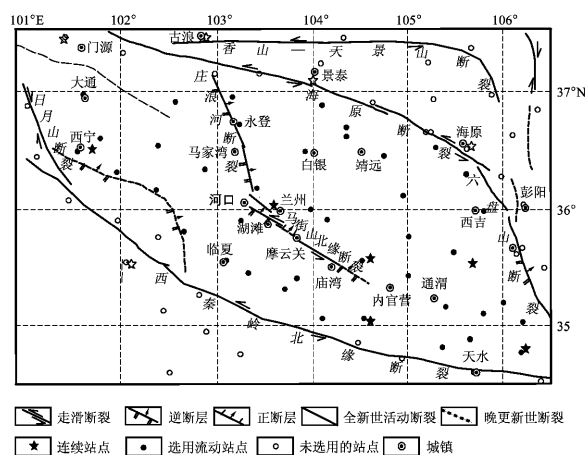


图 2 庄浪河断裂带、马衔山北缘断裂带及附近 GPS 站点分布

Fig. 2 Distribution of the selected GPS stations cross Zhuanglanghe Fault and Maxianshan North Edge Fault

ITRF2000 参考框架下的所有单日时段解作整网动态平差,得到各测站在 ITRF2000 下的三维地心坐标和运动速率以及对应的方差—协方差(牛之俊等,2007)。

1.3 活动断裂模型化

马衔山北缘断裂带位于兰州市南部山区,为区内的控震断裂,在其南北两侧还形成多条次级断裂,如马衔山南缘断裂、兴隆山南缘断裂和兴隆山北缘断裂等,与马衔山北缘断裂统称为马衔山—兴隆山左旋逆走滑活动断裂系(袁道阳等,2003)。

庄浪河断裂带位于兰州市河口以北的庄浪河谷地西侧,断裂南起河口,往北经苦水、马家湾、大同至永登县以北,总体呈北西 15°方向展布,长逾 100 km(图 2)。袁道阳等(2002a)的地质调查结果表明,该断裂由几条小断裂雁列而成,构成一个以挤压逆冲—褶皱为主的弧形构造带,该构造带自晚新生代形成以来到晚更新世甚至全新

世仍在活动。

考虑到马衔山南缘断裂带、兴隆山南缘断裂带和兴隆山北缘断裂带均为马衔山北缘断裂伴生的逆断裂,它们在深部均可以归并到马衔山北缘走滑断裂带上,故我们将这些断裂带模型化为马衔山北缘断裂带,并分为 4 段:雾宿山段、七道梁段、马衔山段及内官营段。对于庄浪河断裂带,划分为 2 段:河口—马家湾段和马家湾以北段。依据自 1970 年全国区域地震监测台网建立后记录的大量微震($M_s \geq 2.0$),兰州地区的弱震活动主要集中在距地表约 20 km 的深度范围内,最大深度为 25 km,属地壳中上部的浅源构造地震(袁道阳等,2003),假定该地区断裂模型的闭锁深度为 20 km。对于各断裂段倾角,由于本区域缺乏历史地震的震源机制解资料,仅根据经验与零星地质资料进行大致估计。具体的断裂带分段划分情况见表 1。

表 1 庄浪河断裂及马衔山北缘断裂带各段划分情况

Tab. 1 Classification of each segment of the Zhuanglanghe Faults and the Maxianshan North Edge Fault							
断裂名称	主要断层段	长度/km	倾角/(°)	最新活动年代	滑动速率/mm·a ⁻¹	活动特征	备注
马衔山北缘断裂带	雾宿山段	40	倾角陡,倾向北	全新世	1.1(走滑);1.6(倾滑)	逆断层为主	袁道阳等(2002a,2003,2013);梁明剑等(2008);宋方敏等(2007)
	七道梁段	28	51~80	晚更新世晚期	/	逆断层和正断层	
	马衔山段	40	36~78	全新世早中期	3.73(走滑)	左旋走滑为主	
	内官营段	27	倾角陡,倾向南	晚更新世	/	逆断为主	
庄浪河断裂带	河口—马家湾段	50	45	晚更新世	/	逆断为主	袁道阳等(2002b)
	马家湾以北	55	45	晚更新世	/	同上	

1.4 滑动速率反演结果及其分析

为了解庄浪河断裂带是否存在走滑分量,在反演时,赋予断层段 0.5 mm/a 的左旋走滑先验值,反演结果显示其走滑分量很小。马衔山北缘断裂带雾宿山段反演拟合结果与地质参考值很吻合,且以逆断为主,兼左旋走滑;马衔山段在倾向滑动方面,地质上的一些证据显示了微弱的正断特性,而反演拟合得到其为逆冲特性。其原因很可能是我们只考虑了马衔山北缘断裂带,而未完全考虑其两侧的马衔山南缘断裂带、兴隆山南缘断裂带等;从反演结果看,内官营段走滑分量很小,而其垂向分量比前两段的分量都大。总体而言,反演结果与地质调查所获得的有关信息是吻合、一致的(图 3、表 2)。其中,马衔山北缘断裂带的马衔山段左旋走滑较明显,量值达 3.91 mm/a

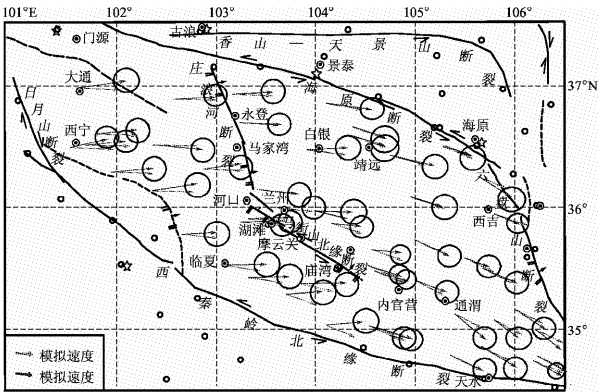


图 3 庄浪河断裂及马衔山北缘断裂带邻近区域的 GPS 站点观测速度与反演速度对比图
Fig. 3 Comparision of observation and inversion velocity field of GPS sites cross the Zhuanglanghe Fault and Maxianshan North Edge Fault

表 2 基于 GPS 数据反演得到的庄浪河断裂及马衔山北缘断裂带各断裂段现今滑动速率

Tab. 2 Sliding velocity of each segment of Zhuanglanghe Fault and Maxianshan North Edge Fault inversed based on GPS data

断裂带名称	主要断层段	地质结果/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$		先验值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$		模拟结果/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	
		走滑速率	倾滑速率	走滑速率	倾滑速率	走滑速率	倾滑速率
		(右旋+左旋-)	(逆冲+拉张-)	(右旋+左旋-)	(逆冲+拉张-)	(右旋+左旋-)	(逆冲+拉张-)
马衔山北缘断裂带	雾宿山段	1.1	1.6	-1.1 ± 0.6	1.6 ± 0.6	-0.4 ± 0.7	1.8 ± 0.6
	七道梁段	/	/	-0.5 ± 1.0	0.5 ± 1.0	-0.6 ± 1.1	1.1 ± 1.0
	马衔山段	3.73	/	-3.73 ± 0.3	-0.5 ± 0.3	-3.91 ± 0.4	0.2 ± 0.3
	内官营段	/	/	-0.5 ± 1.0	1.0 ± 1.0	-0.1 ± 1.6	3.0 ± 1.6
庄浪河断裂带	河口—马家湾	/	/	0.5 ± 1.0	0.2 ± 1.0	0.21 ± 0.9	0.5 ± 1.2
	马家湾以北	/	/	0.5 ± 1.0	1.0 ± 1.0	-0.15 ± 0.8	1.2 ± 1.1

左右,东、西两段走滑分量不明显,整个马衔山北缘断裂带有较明显的逆冲,以东段的内官营段逆冲倾滑最明显,量值达 3.0 mm/a ,其它两段的逆冲倾滑速率在 1.6 mm/a 左右。庄浪河断裂带的走滑分量较小,马家湾以北段有 1.2 mm/a 的逆倾滑。

需要指出的是,尽管对马衔山段进行强制约束,其反演获得的断裂滑动量值要高于地质研究所得速率,其原因为:(1)本文模型是对复杂断裂系统的一个简化,地质上的速率一般是针对某一具体断裂而言,本文的结果是马衔山—兴隆山左旋逆走滑活动断裂系的整体活动速率,因而会造成模型滑动速率偏高;(2)GPS数据结果是近十几年来结果,基于其所反演的滑动速率与地质上考察得到的断裂长期平均滑动速率存在一些不同;(3)由于野外地质工作的局限性,并不是所有断裂所有段落都能获取可靠的结果,因而反演结果与地质速率会存在一些差异。

2 复发间隔估算

地震复发间隔是地震危险性分析的重要参数,其精度的高低决定了结果的可靠性。为了确保地震复发间隔的计算精度,本文主要利用断层滑动法和古地震法(闻学泽,1995),对庄浪河断裂和马衔山北缘断裂的地震复发间隔进行计算。同时根据资料的可靠度和完整程度,将上述结果分别赋予适当的权重,获得了地震平均复发间隔(表3)。

马衔山断裂雾宿山段有4次古地震事件和1次历史地震(梁明剑等,2008),分别距今(12.56 ± 1.55)ka、(7.6 ± 0.70)ka、(3.55 ± 0.50)ka,历史地震为1125年兰州7级地震,根据袁道阳等

(2003)、宋方敏等(2007)以及古地震法(闻学泽,1995)得到该断裂段地震平均复发间隔约3050a,离逝时间为888a。根据袁道阳等(2003)和宋方敏等(2007)对1125年兰州7级地震的历史记载考证和野外地质考察,此次地震为逆冲性质,该断层段咸水沟的一个II级阶地上出露的断层剖面显示也是逆冲,通过实测小冲沟的水平位移量和地震陡坎的高度,得到此次地震左旋水平位错为2.5m,垂直位错为0.7m。考虑到断层的逆冲性质,本文利用垂直方向的同震位错0.7m除以GPS得到的垂直滑动速率 1.6 mm/a ,得到复发间隔为480a。梁明剑等(2008)曾利用水平位错2.5m除以地质方法得到的水平滑动速率 1.11 mm/a ,得到雾宿山段7级地震复发间隔2250a。两者差异比较大,其原因可能是逆冲断层的垂直位错量没能在冲破地表时充分表现,导致实际观测的垂直位错量偏小,也可能是根据冲沟位移得到的水平位错量包含非构造因素,导致水平位移量偏大。考虑到断层滑动法所得结果的不确定性较大赋予较低权重0.3,而古地震资料较为齐全完整性较好赋予较高权重0.7,最终得到雾宿山段7级地震平均复发间隔为2280a。

马衔山段以走滑为主,含少量逆冲,共有4次古地震事件,分别距今(16.53 ± 1.40)ka、(12.17 ± 1.46)ka、(9.88 ± 1.19)ka、(6.72 ± 0.81)ka(袁道阳等,2002b)。该断裂段最晚一次古地震事件距今时间6700a,约为地震复发间隔的2倍,至今仍未发生地震,由于地质剖面古地震序列保存不完整,该断裂段6700a来的古地震可能存在遗漏,因此不能使用距今最近一次的古地震资料作为离逝时间的确定依据,而6700a前的

古地震资料的完整还是可信的, 由此得到复发间隔 3 270 a。假设马街山段发生 7 级地震产生相同的 2.5 m 水平位错, 除以 GPS 得到的水平滑动速率 3.1 mm/a, 得到复发间隔为 900 a。对于古地震资料得到的复发间隔赋予较高权重 0.7, 断层滑动法所得结果赋予权重 0.3, 得到马街山段平均复发间隔 2 510 a。

七道梁段以走滑为主兼少量逆冲, 该断裂段只有一次古地震事件, 距今 (12.20 ± 1.46) ka (袁道阳等, 2003), 难以获得完整的古地震序列, 无法使用古地震资料估算地震复发间隔。依据 GPS 反演得到的滑动速率, 类比该段与马街山段的复发间隔, 得到七道梁段的平均复发间隔 2 510 a。

内官营段活动强度较弱, 为马街山北缘断裂中唯一的晚更新世活动断裂, 1878 年榆中高崖 5 级地震可能与该断裂段活动有关, 但是没有相应的地质调查定量参数, 无法用于复发间隔计算。依据 GPS 反演得到的滑动速率, 从保守角度考虑, 内官营段复发间隔参考马街山段复发间隔, 也取为 2 510 a。

庄浪河断裂发生过多中强地震, 如 1440 年永登 6¼ 级地震、若水 5½ 级地震和 1995 年永登 5.8 级地震, 以历史上发生的最大地震 6.3 级作为特征震级。由于 1440 年地震距今比较久远, 没有相应的地震位错参数, 因此根据 Wells 和 Copper-smith (1994) 震级—破裂尺度统计关系, 得到 6.3 级地震对应的垂直位错约 0.53 m, 除以 GPS 得到的滑动速率, 得到河口马家湾段地震复发间隔为 1060 年, 马家湾以北段地震复发间隔为 440 a。

3 发震概率计算

未来时段中, 地震复发的可能性大小可以用条件概率表示:

$$pc(t_e \leq t \leq (t_e + \Delta t)) = \frac{\int_{t_e}^{t_e + \Delta t} f(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} f(t) dt} = \frac{F(f_e + \Delta t) - F(t_e)}{1 - F(t_e)} \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 为复发间隔概率密度函数; $F(t)$ 为累积概率分布函数, $F(t) = \int_0^t f(t) dt$; t 为复发间隔;

t_e 为离逝时间; Δt 为预测时段, 本研究取 10 a、30 a、50 a 和 100 a。

可用于地震危险性分析的概率模型很多, 本研究选取对数正态分布模型、BPT 模型和 Poisson 模型 3 种模型计算研究区未来一定时段的发展概率。它们的概率密度函数分别为

$$f(t/T) = \frac{T}{t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(t/T) - u]^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$$f_{BPT}(t) = \sqrt{\frac{T}{2\pi\alpha^2 r^3}} \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2tT\alpha^2}\right], \quad (3)$$

$$f_{exp}(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

(2)、(3)、(4) 式中各参数的含义参见文献闻学泽 (1995)。

目前所能获得的资料样本量太少, 采用单一模型存在可信度问题, 故本研究还给出上述 3 个概率模型的综合评价, 即给出联合模型。美国加州概率工作组 (WGCEP, 2002) 在对 San Andreas 概率地震危险性分析中采用了对各模型结果进行专家打分, 给出各模型分别赋予不同权重的方法, 权系数分别为: BPT 模型为 0.72, Poisson 模型为 0.28。由于对数正态模型和 BPT 模型为与离逝时间有关的实时概率模型, 而 Poisson 模型与离逝时间无关, 故本研究对上述 3 种模型分别赋予 0.36、0.36、0.28 的权重。张效亮等 (2009, 2010) 曾利用这 3 种概率模型和相同的权重分析了川滇南部地区主要断裂发震概率。联合模型的计算公式为

$$P = 0.36P_{log} + 0.36P_{BPT} + 0.28P_{exp}. \quad (5)$$

式中 P_{log} 为对数正态模型计算得到的条件概率, P_{BPT} 为 BPT 模型计算得到的条件概率, P_{exp} 为 Poisson 模型计算得到的条件概率。

研究区活动断裂未来一段时间强震的发震概率计算即是求相应模型的条件概率。根据复发间隔和离逝时间数据, 计算了 4 种模型未来 10 a、30 a、50 a、100 a 特征地震发震概率, 其中联合模型的结果如表 3 所示。

总体来看, 马街山北缘断裂带和庄浪河断裂带各断裂段特征地震复发条件概率都较低, 再次发生强震的可能性不大, 但仍具有发生中强破

坏性地震的可能性。雾宿山段最近一次 1125 年兰州 7 级地震距今已 888 a，与其约 2 000 a 的平均复发间隔相比，离逝时间较短，但是从表 3 可以看出，随着预测时间窗的拉长，其发震概率快速增长，仍应对该断层的地震活动性高度关注。马衔山段和七道梁段均为全新世早期活动，虽然有多次古地震记录，但无法确定其离逝时间，只能采用时间不相依的 Poisson 模型，得出 7 级地震发震概率较低，但是在该断裂周边发生过多次中强破

坏性地震，该断裂段未来中等强度地震危险性不可忽视。内官营段活动强度较弱，也没有相应的地质调查定量参数，但是 1878 年榆中高崖 5 级地震可能发生在该断裂段上，未来该断裂段仍有发生中等强度破坏性地震的可能。庄浪河断裂河口—马家湾段未来发生 6.3 级左右地震的概率不高。马家湾以北段历史上发生过 1440 年永登 6¼ 级地震，距今已 573 年，随着预测时间窗的拉长，地震复发的概率比较高，需要注意。

表 3 马衔山北缘断裂及庄浪河断裂地震复发间隔和条件概率

Tab. 3 Earthquake recurrence interval and condition probability of the Maxianshan North Edge Fault and the Zhuanglanghe Fault

断裂带	断裂分段	复发间隔/a	离逝时间/a	预测时间窗/a	特征地震模型条件概率			
					Poisson	Lognormal	BPT	综合模型
马衔山 北缘断裂	雾宿山段	2 280	888	10	0.44%	0.25%	0.22%	0.29%
				30	1.31%	0.78%	0.69%	0.90%
				50	2.17%	1.32%	1.19%	1.51%
				100	4.29%	2.80%	2.56%	3.13%
	七道梁段	2 510	—	10	0.40%	—	—	0.40%
				30	1.19%	—	—	1.19%
				50	1.97%	—	—	1.97%
				100	3.91%	—	—	3.91%
	马衔山段	2 510	—	10	0.40%	—	—	0.40%
				30	1.19%	—	—	1.19%
				50	1.97%	—	—	1.97%
				100	3.91%	—	—	3.91%
	内官营段	2 510	—	10	0.40%	—	—	0.40%
				30	1.19%	—	—	1.19%
				50	1.97%	—	—	1.97%
				100	3.91%	—	—	3.91%
庄浪河断裂	河口—马家湾段	1 055	—	10	0.94%	—	—	0.94%
				30	2.80%	—	—	2.80%
				50	4.63%	—	—	4.63%
				100	9.05%	—	—	9.05%
	马家湾以北段	439	573	10	2.25%	4.53%	4.79%	3.98%
				30	6.60%	12.99%	13.75%	11.47%
				50	10.76%	20.74%	21.91%	18.36%
				100	20.35%	37.25%	39.24%	33.24%

4 结论与讨论

本文以 GPS 观测资料和部分已通过地质方法得到的活动断裂段的滑动速率为约束，基于弹性半无限空间断裂位错理论，反演拟合获得该断裂各段的现今滑动速率。结果表明，马衔山北缘断裂带的马衔山段左旋走滑较明显，量值达

3.91 mm/a，东、西两段走滑分量不明显，整个马衔山北缘断裂带有较明显的逆冲分量，以东段的内官营段逆冲倾滑最明显，量值达 3.0 mm/a；庄浪河断裂有 0.5 ~ 1.2 mm/a 的逆倾滑，走滑分量不明显。同时，基于反演获得的断裂滑动速率，结合实施概率模型估算了各断裂段复发间隔和发震概率。总体来看，马衔山北缘断裂带和庄浪河断裂带各断裂段特征地震复发条件概率都比较低，

再次发生强震的可能性不大,但仍具有发生中强破坏性地震的可能性。

针对像庄浪河断裂这种传统的地质调查方法难以有效实施但其地震危险性仍不容忽视的活动断裂,本文尝试利用GPS资料分析其活动性,作为对地质资料的一种有效的补充。但是用深断裂位错模型反演断裂滑动速率时,深断裂位错模型的完全弹性体假设与实际的岩石圈介质不完全相符,并且未能完全考虑断裂端点塑性消减及褶皱等对结果的影响,需要在以后的研究中加以完善。

参考文献:

- 柴炽章,张维歧,焦德成,等. 1997. 天景山断裂带晚第四纪水平活动强度的分时、分段研究[J]. 中国地震,13(1):35-42.
- 邓起东,张培震,冉永康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学,32(12):1020-1031.
- 梁明剑,袁道阳,刘百箴,等. 2008. 兰州马衔山北缘断裂地震潜势评估[J]. 西北地震学报,30(4):337-343.
- 牛之俊,游新兆,杨少敏,2007. 利用GPS分析天地现今地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学,27(2):1-9.
- 宋方敏,袁道阳,陈桂华,等. 2007. 1125年兰州7级地震地表破裂类型及其分布特征[J]. 地震地质,29(4):834-844.
- 王敏,沈正康,牛之俊,等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑),33(增刊):21-33.
- 闻学泽. 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京:地震出版社.
- 吴云,帅平,周硕愚,等. 1999. 用GPS观测结果对中国大陆及邻区现今地壳运动和形变的初步探讨[J]. 地震学报,21(5):430-436.
- 袁道阳,贾亚会,才树华,等. 2002a. 兰州马衔山北缘断裂带古地震初步研究[J]. 西北地震学报,24(1):99-205.
- 袁道阳,梁明剑,雷中生,等. 2013. 兰州马衔山北缘断裂中段晚第四纪活动的新证据[J]. 地震工程学报,35(1):145-153.
- 袁道阳,刘百箴,才树华,等. 2002b. 兰州马衔山北缘断裂带的新活动特征[J]. 地震地质,24(3):315-323.
- 袁道阳,刘百箴,张培震. 2002c. 兰州庄浪河断裂带的新构造变形与地震活动[J]. 地震学报,24(4):441-444.
- 袁道阳,刘小凤,郑文俊,等. 2003. 兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的构造变形特征和机制[J]. 中国地震,19(2):125-131.
- 张效亮,谢富仁,史保平. 2010. 利用GPS数据估算川滇南部地震($M_s \geq 6.5$)平均复发间隔[J]. 地震学报,32(1):23-32.
- 张效亮,谢富仁. 2009. 利用GPS数据和实时概率模型评估川滇南部中长期地震危险性[J]. 大地测量与地球动力学,29(3):38-41.
- 赵国光. 1996. 青藏高原北部的第四纪断层运动[J]. 中国地震,12(2):107-118.
- 周本刚,周庆. 2005. 对现今地壳变形资料在地震区划中应用的初步探讨[J]. 中国地震,21(2):155-164.
- 周德敏,甘卫军,任金卫. 2006. 基于GPS观测资料反演庄浪河断裂带、马衔山北缘断裂带滑动速率[J]. 地震地质,27(4):706-714.
- Gan W. J., Svarc J. L., Savage J. C., et al. 2000. Strain Accumulation across the Eastern California Shear Zone at Latitude 36 Degrees 30' N[J]. Journal of Geophysical Research,105:16229-16236.
- Gan W. J., Prescott W. H. 2001. Crustal Deformation Rates in the Central and Eastern U. S. Inferred from GPS[J]. Geophys. Res. Lett., 28, (19):3733-3736.
- Okada Y. . 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bull Seismol. Soc. Am., 82:1018-1040.
- Savage J. C., Svarc J. L., Prescott W. H. . 1999. Geodetic Estimates of Fault Slip Rates in the San Francisco Bay Area[J]. Journal of Geophysical Research,104:4995-5002.
- Shen Z. -K, Jackson D. D. Kagan, Y. Y. . 2007. Implications of Geodetic Strain Rate for Future Earthquakes, with a Five-year Forecast of $M5$ Earthquakes in Sout Southern California [J]. Seismol. Res. Lett., 78(1):116-120.
- Ward S. N. . 1994. A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 84(5):1293-1309.
- Ward S. N. . 2007. Methods for Evaluating Earthquake Potential and Likelihood in and around California[J]. Seismol. Res. Lett., 78(1):121-133.
- Wells D. L., Coppersmith K. J. . 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture area, and Surface Displacement [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 84(4):974-1002.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 2002. Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region, 2002-2031 [R]. US. Geol. Surv. Open-File Rept. :3-214.

Seismic Risk Analyze on the Northern Marginal Fault of Maxianshan and Zhuanglanghe Faults

ZHOU De-min^{1,2}, ZHANG Xiao-liang³, LIANG Shi-ming¹, JIANG Zhong-peng⁴

(1. *State Key of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China*)

(2. *China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China*)

(3. *China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China*)

(4. *CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China*)

Abstract

Constrained by the fault active parameter which is obtained by the GPS observations data and the geology method, based on elastic semi-infinite space fault dislocation theory, we obtained the current sliding rates of the main segments of the Zhuanglanghe Fault and Maxianshan North Edge Fault by inversion method. The result suggests that the left-lateral strike-slip of Maxianshan segment of the Maxianshan North Edge Fault is obvious and its rate is 3.91 mm/a, while the strike-slip of eastern and western segments is not obvious. The whole Maxianshan North Edge Fault has the obvious thrust component, and the thrusting dip-slip of eastern segment is the most obvious and the rate reach to 3.0 mm/a. The Zhuanglanghe Fault has the reverse dip-slip component of 0.5 ~ 1.2 mm/a, and the strike-slip component is not obvious. On the basis of it, we calculate the earthquake recurrence interval for each fault segment, and the probability of earthquake occurrence in the next 30, 50 and 100 years by use of time-dependent probabilistic model.

Key words: Maxianshan North Edge Fault; Zhuanglanghe Fault; seismic risk; probability of earthquake occurrence