

李正芳,周本刚,冉洪流. 运用古地震数据评价东昆仑断裂带东段未来百年的强震危险性. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3051-3065, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.023.

Li Z F, Zhou B G, Ran H L. Strong earthquake risk assessment of eastern segment on the East Kunlun fault in the next 100 years based on paleo-earthquake data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(9): 3051-3065, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.023.

运用古地震数据评价东昆仑断裂带东段 未来百年的强震危险性

李正芳, 周本刚*, 冉洪流

中国地震局地质研究所, 活动构造与火山实验室, 北京 100029

摘 要 通过收集、整理和分析青藏高原东北部 22 条断裂带上古地震定量数据, 拟定了该区的地震复发概率密度函数. 根据此函数对区内东昆仑断裂带东段不同段落上未来 100 年内强震原地复发的条件概率进行了初步研究. 结果表明, 该断裂带上自西向东的 3 个破裂段中, 玛沁段和塔藏段未来 20、50、100 年的复发概率值介于 0.76%~7.36% 之间, 玛曲段未来 20、50 年的复发概率值介于 2.0%~5.26%, 属于低概率事件; 玛曲段未来 100 年的复发概率值为 10.82%, 属于中概率事件; 整个段未来 100 年内至少发生一次 7 级以上强震的联合概率可达 21.87%, 属于中概率事件. 考虑到概率模型的不确定性, 进一步对各段进行了危险性的定性分类, 综合评价认为玛沁段在未来百年内发生大震的危险性较低, 玛曲段和塔藏段未来百年发生大震的危险性较高. 最后将本文拟合的概率密度函数与传统通用函数计算的条件概率值进行比较, 发现通用的复发概率函数随着自变量 t/R 的增大, 因变量 P 的反映不如本文拟合函数的敏感.

关键词 东昆仑断裂带东段, 地震复发概率密度函数, 强震危险性, 复发概率

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.023

中图分类号 P315

收稿日期 2011-09-29, 2012-08-23 收修定稿

Strong earthquake risk assessment of eastern segment on the East Kunlun fault in the next 100 years based on paleo-earthquake data

LI Zheng-Fang, ZHOU Ben-Gang*, RAN Hong-Liu

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

Abstract Based on the 22 data of paleo-earthquake in Northeastern Tibet Plateau, we established a probabilistic model of earthquake recurrence in the area, and studied the conditional probabilities for the recurrence of strong earthquakes in the eastern segments of East Kunlun fault zone in the next 100 years. The results show that two segments (Maqên and Tazang) of the fault zone have low probabilistic values between 0.76%~7.36% in next 20~100 years; The recurrence probabilities of Maqu segment in 20 and 50 years lie between 2.0%~5.26%, but the probability in 100 years is 10.82% which is relatively high. Based on the uncertainty of probabilistic model, we made a qualitative classification for different segment in terms of danger,

基金项目 地震行业科技专项“走滑活断层定量数据评定潜在震源区参数研究(200808018)”资助.

作者简介 李正芳, 女, 生于 1981 年. 中国地震局地质研究所在读博士研究生. 主要研究方向: 工程地震和地震危险性评价.

E-mail: lizhengfang07@163.com

* **通讯作者** 周本刚, 男, 生于 1964 年, 研究员, 主要研究领域: 地震构造、工程地震与地震区划. E-mail: zhoubg1964@263.net

and thought that Maqên segment has lower risk in next 100 years, Maqu and Tazang segment has higher risk in next 100 year. At last, through comparing probabilistic values computed by two different models, we found that dependent variable P is less sensitive with increasing of independent variable t/R in the general probability model of earthquake recurrence.

Keywords Eastern segment of East Kunlun fault, Probabilistic model of earthquake recurrence, Strong earthquake risk assessment, Recurrence probability

1 引言

东昆仑断裂带是印度板块向欧亚板块俯冲过程中在青藏高原内部沿东昆仑华力西期古构造缝合线形成的以左旋走滑运动为主的一条大断裂带,西起青海省可可西里湖北侧的布格达板峰以西,东终止于四川境内的玛曲一带,长约 2000 km,总体走向北西西^[1-2](图 1). 三叠纪时期,东昆仑地体和巴颜喀拉—松甘地体之间的斜向碰撞致使昆南—阿尼玛卿缝合带的西段发生大型走滑作用^[3],在 250~220 Ma 期间形成东昆仑左行走滑断裂,之后又经历晚侏罗世(150~140 Ma)、早白垩世时(120~100 Ma)和新第三纪(20 Ma)强烈韧性剪切作用的影响,地壳急剧抬升剥蚀,印度-亚洲碰撞以来,东昆仑断裂带再度被激活. 新构造运动时期,断裂带活动较强,控制了第四纪裂谷和断陷盆地的发育,且沿断裂的第四纪盆地、断裂谷、断陷湖呈串珠状展布^[4].

东昆仑活动断裂带位于青藏高原中部隆起区的北部边缘地区,主体处在走向近东西的莫霍面 64km 等深线左右展布,东南端的玛多—玛曲一线莫氏面等深度线向南偏转,而沿带地壳厚度逐渐变小^[1]. 通过最新的地震折射剖面资料揭示该断裂带以南的巴颜喀拉山区的地壳厚度为 64 km,向北至柴达木盆地南缘和都兰一带骤减至 60 km,形成一条北西西向的地壳厚度变异带,该断裂带自西向东以阿尼玛卿山为界的莫霍地形和地壳流动机制都发生了明显的变化^[5-6],因此,本文在断裂带的几何结构特征的基础上,进一步结合地球物理资料,以阿尼玛卿山为分段标志,将东昆仑断裂带分为东西两段.

自从 1900 年以来,在该断裂带上阿尼玛卿山以西发生了 5 次 7 级以上的地震,分别为 1997 年玛尼 $M_s 7.9$ 级地震、2001 年昆仑山 $M_s 8.1$ 级地震、1902 年秀沟 $M_s 7.0$ 级地震、1963 年阿拉克湖 $M_s 7.1$ 级地震、1937 年 $M_s 7.5$ 级托索湖地震(图 1). 从图 1 中可以看到,相比东昆仑断裂带的西段,东昆仑断裂带的东段历史上无大地震($M_s \geq 7$)记载,属于该断

裂带上典型的地震空区. 另外 2008 年发生的汶川地震增加了对东昆仑断裂带东段库仑应力的积累^[7],使该段的潜在地震危险性增高,因此,东昆仑断裂带东段作为整条断裂带人口最多的地震空区,对其进行地震危险性分析和大震预测显得尤为迫切.

对于中长期地震的预测,定量的方法是把地震发生的可能性表现为概率,假定地震发生的时间大致服从于某一个复发模型 $f(\tau)$,利用此复发模型可估算未来某一预测时段内大地震复发的概率值. 根据国内外发表的文献^[8-14], $f(\tau)$ 有多种分布类型,如正态分布、对数正态分布、威布尔分布等,闻学泽^[12]把已有的分布函数应用于鲜水河断裂带上,预测了鲜水河断裂带未来 30 年内的地震复发的条件概率;刘静等^[13]利用汾渭地震带上的活断层资料,评价了汾渭地震带中长期强震危险性;张培震^[14]利用地震矩计算了地震的平均复发周期,归纳和总结了活动大陆内部地震复发的通用概率分布. 但受种种构造条件的制约,不是每一条活动断裂上都可获取评价所需的定量数据,因此,利用研究程度较高的活动断裂定量数据建立一种地震危险性概率评价的方法尤为重要. 青藏高原东北部,强震发生的频次相对较密集,断裂带上的古地震研究程度较高,本文通过收集和整理该区的古地震资料,建立了样本参数,拟定了该区地震复发概率密度函数,将其应用于东昆仑断裂带东段的发震概率研究中.

2 青藏高原东北部古地震定量数据分析及地震复发概率模型建立

本文累计选用了 22 条青藏高原东北部活动断裂带上不同段的古地震数据资料(表 1),数据的选取主要采取三个原则:(1) 收集、整理和对比分析了活动断裂带上同一段上不同探槽剖面揭露的古地震事件,去除重复事件;(2) 去除距今时间太远的古地震事件;(3) 计算出每段古地震的复发间隔(T),求出其古地震复发间隔的平均值(T_{ave}),对各段古地震数据进行归一化处理(T/T_{ave}),减少数据的离散程度.

表 1 青藏高原东北部 22 条活动断裂带的古地震数据资料
Table 1 22 Paleo-earthquake datas of active faults in northeastern Tibetan Plateau

编号	断裂名称	分段情况	古地震事件年龄(a)	复发间隔(T)	平均复发间隔 (T_{ave})	归一化 (T/T_{ave})	资料来源	
F ₁	西秦岭北缘断裂	鸳鸯段	E1:12500±500					
			E2:7500±500	5000		1.2749		
			E3:5000	2500		0.6374		
			734	4266	3922	1.0877		
		漳县段	E1:9910—1310					[15-16]
			E2:4250—6930	5660	5660	1.0000		
			E1:12450					
		锅麻滩段	E2:5480±60	6970		1.1264		
			1936.2(74)	5406	6188	0.8736		
			E1:8330—9370					
F ₂	海原断裂带	硝口—蔡祥 断层段(东段)	E2:6800—7530	800		0.4975		
			E3:5690—6100	700		0.4353		
			E4:590—1260	4430		2.7550		
			E5:公元 1920(90)	500	1608	0.3109		
			E1:8330—9370					
		南、西华山 断层段	E2:6810—7530	800		0.7547		
			E3:5640—6100	710		0.6698		
			E4:4440—5030	610		0.5755		
			E5:2630—6710	1810		1.7075		
			E6:590—1260	1370	1060	1.2925		
		哈思山—马厂山 断层段(西段)	E1:8530—9370					
			E2:6150—6350	2180		1.1315		
			E3:3590—4140	2010		1.0433		
			E4:2000	1590	1927	0.8253		
F ₃	佛洞庙— 红崖子断裂	中西段(Q ₂)	E1:>4320±300					
			E2:2100±100	1820		1.0344		
			401	1699	1760	0.9656		
F ₄	榆木山北缘断裂	西段	E1:>10500±600					
			E2:7200—8500	1400		0.6432		
			E3:3700—3900	3300		1.5161		
			180 秋	1830	2177	0.8407		
F ₅	榆木山东缘断裂	上龙王	E1:10500±600					
			E2:8600±600	1900		0.5672		
			E3:3800±600	4800	3350	1.4328		
F ₆	皇城—双塔断裂	上寺段	E1:7700±600					
			E2:3400±300	4300		1.1292		
			83	3317	3808	0.8711		
F ₇	昌马断裂		E1:9520±90					
			E2:9380±150	140		0.0593		
			E3:5470±60	3910		1.6564		
			E4:3230±55	2240		0.9490		
			78	3152	2361	1.3353		

续表 1

编号	断裂名称	分段情况	古地震事件年龄(a)	复发间隔(T)	平均复发间隔(T_{ave})	归一化(T/T_{ave})	资料来源	
F ₈	肃南断层段	中段	E1:2200					
			E2:1680	520		0.6933	[25]	
			E3:700	980	750	1.3067		
F ₉	冷龙岭断裂	西段	E1:5926					
			E2:4050±160	1876		1.3754		
			E3:2900±270	1150		0.8431	[26]	
			E4:1560±360	1340		0.9824		
F ₁₀	老虎山— 毛毛山断裂	老虎山段	470	1090	1364	0.7991		
			E1:7700±50					
			E2:6180±150	1520		1.5833		
			E3:5200±100	980		1.0208		
			E4:4250±150	950		0.9896		
		E5:3050±150	1200		1.2500			
		E6:2000±300	1050		1.0938			
		E7:800±100	1200		1.2500			
		122	678		0.7063	[27-28]		
		20	102	960	0.1063			
毛毛山段	E1:9000±300							
	E2:6600±500	2400		1.3333				
	E3:5000±300	1600		0.8889				
	E4:3700±300	1300		0.7222				
	E5:1800±300	1900	1800	1.0556				
F ₁₁	天桥沟— 黄羊川断裂	天桥沟	E1:27700±2200					
			E2:21300±2400	6400		1.3904		
			E3:16800±1400	4500		0.9776		
			E4:13700±2000	3100		0.6735	[29]	
			E5:10300±1700	3400		0.7386		
			E6:7590±100	2710		0.5887		
83	7507	4603	1.6309					
F ₁₂	中卫—同心断裂	大泉水— 孤山子段(西段)	E ₁ :13150±800					
			E ₃ :6535±200	4584		1.1293		
		E ₅ :3000	3535	4059	0.8709			
		西梁头— 双井子段(中段)	E ₁ :13150±800					[30]
			E ₂ :8566±500	4584		1.0703		
E ₄ :5450±200	3116		0.7275					
301	5149	4283	1.2022					
F ₁₃	巴音郭勒河北缘断裂		E1:32700±1450					
			E2:15540±1320	17160		1.1652	[31]	
			E3:3245±330	12295	14727	0.8349		

续表 1

编号	断裂名称	分段情况	古地震事件年龄(a)	复发间隔(T)	平均复发间隔(\bar{T}_{ave})	归一化(T/\bar{T}_{ave})	资料来源	
F ₁₄	鄂拉山断裂		E1:12500±100					
			E2:10000±150	2500		1.0101		
			E3:6000±100	4000		1.6162	[32]	
			E4:4100±300	1900		0.7677		
			E5:2600±400	1500	2475	0.6061		
F ₁₅	东昆仑断裂带	库赛湖段	16865±1018					
			12935±774	3930		1.1158		
			9730±592	3205		0.9100		
			6955±425	2775		0.7879		
			3100±201	3855		1.0945		
			2001.11.14(9)	3846	3522	1.0920		
		东西大滩段	E1:11000					
			E2:7000	4000		1.2001		
			E3:2700	4300		1.2901		
			E4:1000	1700	3333	0.5101		
		秀沟—托索湖段	E1:8000					
			E2:6000	2000		1.0096		
			E3:1000	5000		2.5240		
			E4:637	363		0.1832		
			73	564	1981	0.2847		
托索湖— 下大武段	E1:10000							
	E2:6100—6700	3900		1.0400	[1,33-37,38-39]			
	E3:2500	3600	3750	0.9600				
	9900±200							
	7971—8050	1850		1.2107				
	7200±800	771		0.5046				
	3342—3454	3746		2.4516				
	2000	1342		0.8783				
	977—1090	910	1528	0.5955				
	15800±2500~ 24100±2900							
	9000—10000	5800		2.9532				
	7460±60~8690±40	1540		0.7841				
	4586±124~7460±60	2874		1.4633				
	3736±57~4586±24	850		0.4328				
1730±50~2530±40	2006		1.0214					
1210±50~1730±50	520		0.2648					
1055~1524	155	1964	0.0789					

续表 1

编号	断裂名称	分段情况	古地震事件年龄(a)	复发间隔(T)	平均复发间隔(T_{ave})	归一化(T/T_{ave})	资料来源	
F ₁₆	阿尔金断裂带	安迪尔河— 车尔臣河段	E1:3800					
			E2:2760—2900	1040		0.9020		
			E3:1077	1683		1.4597		
			E4:342	735	1153	0.6375		
		黄土泉— 乌尊硝尔段	E1:6366					
			E2:2270—3500	2866	2866	1.0000		
			E1:3900—4130					[40]
		索尔库里— 阿克赛段	E2:1800—2170	2100		1.4094		
			E3:920	880	1490	0.5906		
			E1:16400±100					
E2:13500±180	2900		2900	1.0000				
肃北— 宽滩山段	E1:18620—18780							
	E2:11330—12590	6030		1.2048				
	E3:7080—7350	3980	5005	0.7952				
F ₁₇	玛多— 甘德断裂	甘德段 (Q3—4)	E1:4000—4700					
			E2:3000—3230	1000		0.8333	[27,41]	
			E3:1600	1400	1200	1.1667		
F ₁₈	托莱山断裂	硫磺沟— 油葫芦段 (东段)	E1:13240—13960					
			E2:>6080±450	6710		2.6733	[27]	
			E3:3570—4390	1690	2510	0.6733		
F ₁₉	昌马— 俄博断裂	昌马断层段 (Q4)	E1:12000—13000					
			E2:9520±90	2480		1.3333		
			E3:8020—8700	820		0.4409		
			E4:>6670±80	1270		0.6828	[27]	
			E5:>5470±60	1200		0.6452		
			E6:3230	2240		1.2043		
F ₂₀	黄河— 灵武断裂	灵武段	78	3152	1860	1.6946		
			E1:27000—7800					
			E2:20000	7000		1.3333		
			E3:13000—600	7000		1.3333	[42]	
			E4:10600—500	2400		0.4571		
E5:6000	4600	5250	0.8762					
F ₂₁	罗山东麓断裂		E1:8200±600					
			E2:5000±70	3200		1.2384		
			E3:3300±120	1700		0.6579	[27,43]	
F ₂₂	贺兰山东麓断裂		449	2851	2584	1.1033		
			E1:8400					
			E2:5700	2700		0.9963		
			E3:2600	3100		1.1439	[44-45]	
			271	2329	2710	0.8594		

通过上述原则最后用来做统计分析的 T/T_{ave} 的数据共 119 个,利用 SPSS 统计软件生成了青藏高原东北缘古地震复发间隔 T/T_{ave} 的频率分布直方图(图 2),从图上可以看到,虽然各段古地震的复发间隔相差较大,但经过归一化处理后差别较小,出现中间多两头少的分布形式, T/T_{ave} 集中分布于 1.0 附近的区间内;同时,认为这种频率分布可采用正态分布、对数正态分布和威布尔来拟合,下文中将利用 Q-Q 概率图检验几种分布形式(图 3—8)。

Q-Q 概率图是根据变量分布的分位数对所指定的理论分布分位数绘制的图形,用来检验样本分布的一种统计图形,如被检验的数据符合所指定的分布,代表样本数据的点簇在一条直线上。主要包括两种图形:正态概率图和反趋势正态概率图,正态概率图中的点由数据中的每一个观测值与其正态分布的期望值所组成,这些点落在斜线上的越多,说明数据的分布越接近正态。反趋势正态概率图纵轴表示的是差值,描述在正态概率图中各点偏离正态直线的偏差,如数据呈现出正态分布的特点,那么这些点应该随机的聚集在一条通过零点的水平直线的周围。通过上述分析,结合图 3—8,可见正态分布的拟合效果最好、威布尔分布次之、对数正态分布稍差,因此,本文选用正态分布作为其概率密度函数。

即有 T/T_{ave} 应服从于 $N(0.9538, 0.3879^2)$ 的正态分布,拟合的结果通过 95% 的置信区间的 χ^2 的检验,说明在地震的原地复发的事件中约有 95% 的置信区间位于 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 。

可得 T/T_{ave} 服从正态分布的概率密度函数为

$$f(T/T_{ave}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T/T_{ave} - \mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

可导出青藏高原东北缘的概率分布函数:

$$F(t) = \Phi\left[\frac{t/R - 0.9538}{0.3879}\right], \quad (2)$$

式(2)中的 Φ 是标准正态分布函数, R 是地震在原地的平均复发间隔、 t 为离逝时间(即最后一次地震发生距今的时间)。

利用上述的概率分布函数计算地震复发的条件概率应该满足:

$$P = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)}, \quad (3)$$

式(3)中 t 为离逝时间、 Δt 为预测未来发震概率的时间增量,我们只需要给定 t 、 R 和 Δt 三个基本参数,就可以计算地震复发的条件概率。

对于地震复发的条件概率模型,张培震^[14]曾利

用大陆内部 46 个古地震的复发间隔数据进行了整理和分析,用对数正态分布拟合累计频率,得出适用于活动大陆内部所有活动断裂的通用分布关系式:

$$f(T/T_{ave}) = \frac{T_{ave}}{T\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{T}{T_{ave}} - \mu\right)^2\right], \quad (4)$$

由最大似然法估计出均值 $\mu = -0.1206$, $\sigma = 0.5054$,相对应的概率分布函数为

$$F(t) = \Phi\left[\frac{\ln(t/R) + 0.1206}{0.5054}\right], \quad (5)$$

下文中我们将采取上述两种分布模型分别对东昆仑断裂带东段的地震危险性进行研究,进一步对比、分析和讨论结果,相互验证结果的可行度。

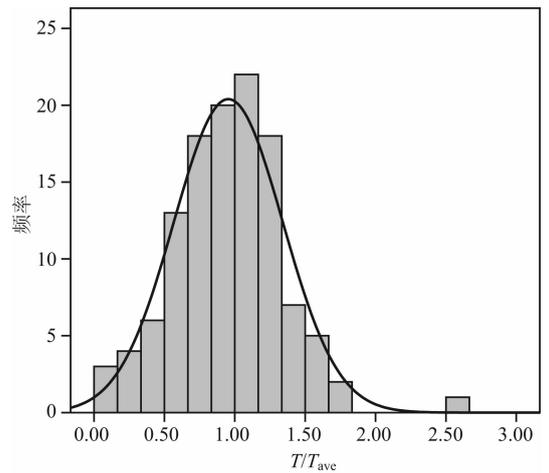


图 2 青藏高原东北缘古地震复发间隔 T/T_{ave} 直方图及正态分布拟合曲线

Fig. 2 The T/T_{ave} histogram of the recurrent interval for paleo-earthquake events and the curve of normal distribution in the northeast Tibetan Plateau

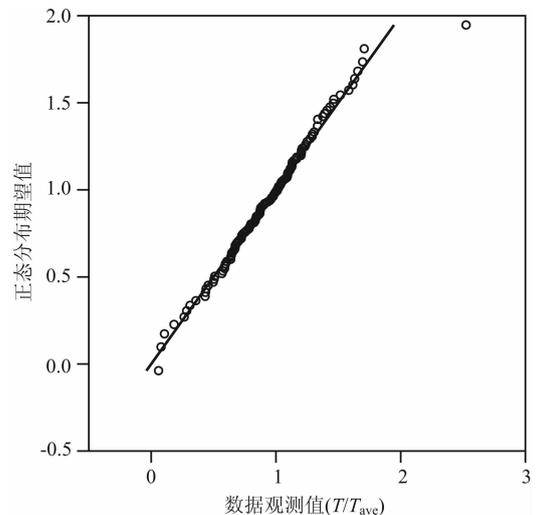


图 3 正态 Q-Q 概率图

Fig. 3 Normal Q-Q probability plots

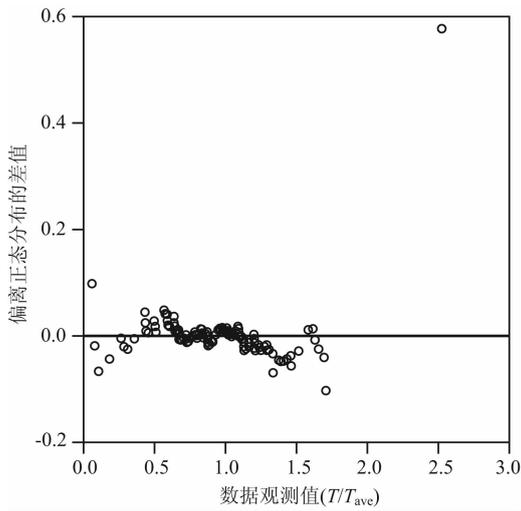


图 4 反趋势正态 Q-Q 概率图

Fig. 4 Detrended normal Q-Q probability plots

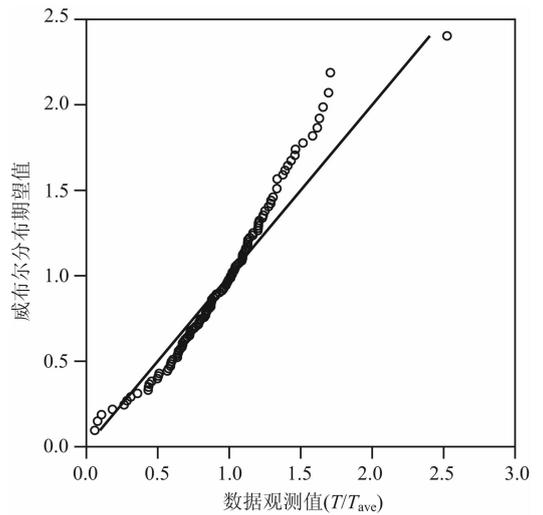


图 7 威布尔分布 Q-Q 概率图

Fig. 7 Weibull Q-Q probability plots

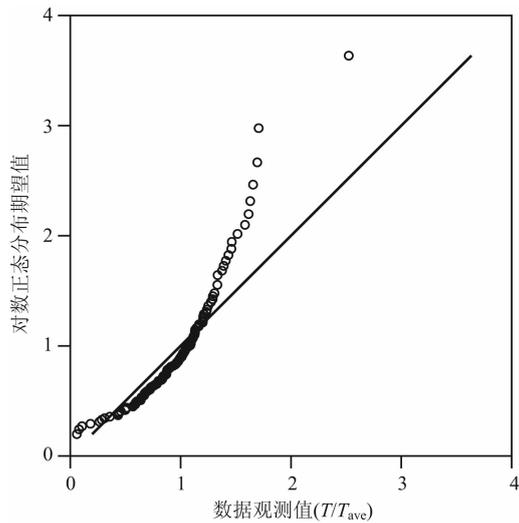


图 5 对数正态 Q-Q 概率图

Fig. 5 Lognormal Q-Q probability plots

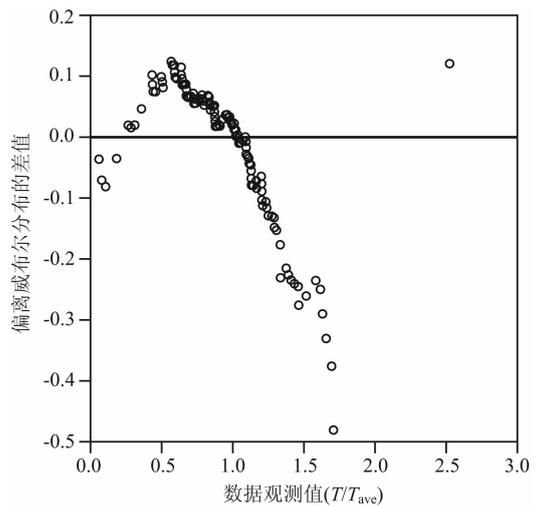


图 8 反趋势威布尔分布 Q-Q 概率图

Fig. 8 Detrended Weibull Q-Q probability plots

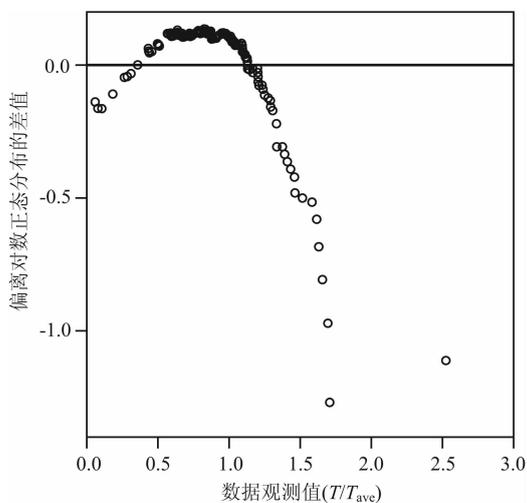


图 6 反趋势对数正态 Q-Q 概率图

Fig. 6 Detrended lognormal Q-Q probability plots

3 东昆仑活动断裂带东段的几何分段

3.1 东昆仑断裂带东段的几何分段

东昆仑断裂带东段地处甘川青三省交汇区,为柴达木块体和巴颜喀拉块体的边界断裂的东部。在空间展布上,西起阿尼玛卿山北麓,经过东倾沟北侧、大武滩、肯定那、西贡周、唐地、在克生托洛穿过黄河,经玛曲后延入若尔盖盆地,从罗叉北出沼泽地与塔藏断裂相交,全长约 330 km,总体走向北西 295° ,倾向以南西为主^[1]。通过寻找走滑断层分段边界的构造标志^[46],自西向东可划分为三个一级段:分别为玛沁段、玛曲段和塔藏段(图 9),各段落与西段的断裂划分边界标志为:玛积雪山隆起(挤压双弯

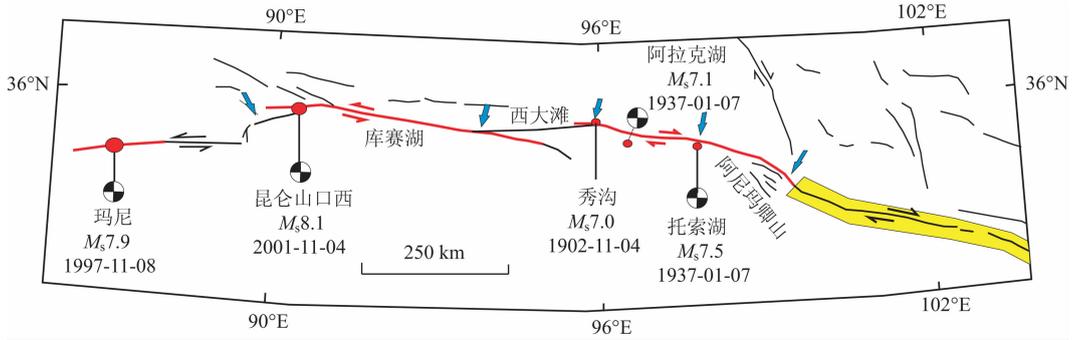


图 1 东昆仑断裂带破裂分段平面图^[2], 黄色区域为文章研究区范围

Fig. 1 The planar graph for rupture segmentation of the Eastern Kunlun active fault^[2], the study area in article is yellow

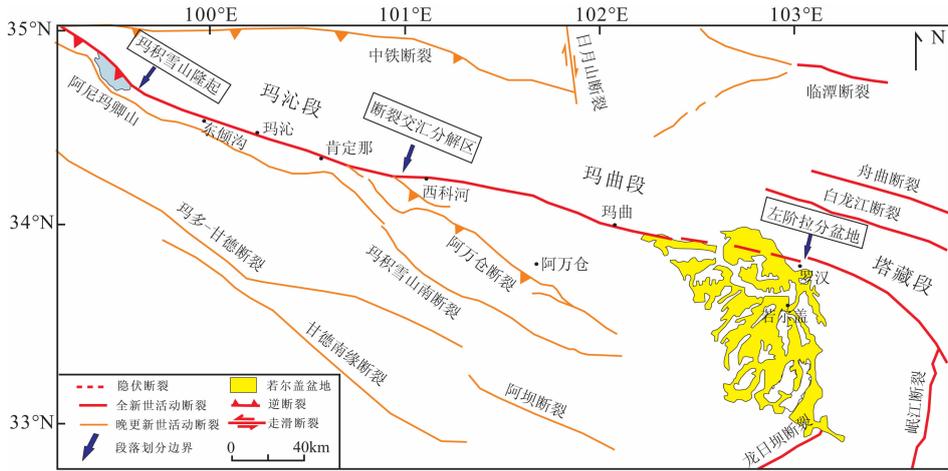


图 9 东昆仑活动断裂带东段几何分段示意图

Fig. 9 Geometric segmentation in eastern segment of the East Kunlun fault

曲)、断裂交汇分解区(玛沁断裂在西科河附近与阿万仓断裂交汇)、左阶拉分盆地(玛曲断裂通过若尔盖盆地与塔藏断裂的左阶排列). 结合三段全新世以来的滑动速率(表 2), 可判断该三段全新世以来均保持着各自的活动幅度, 滑动速率自西向东呈递减的趋势, 与整个东昆仑断裂带自西向东活动减弱的大趋势保持一致.

3.2 东昆仑断裂带东段不同段落最大震级估计

1994 年美国学者 Wells 等^[47] 基于大量的样品数, 建立了走滑地震地表破裂长度与矩震级的经验关系式, 简称 WC 经验关系: $M_w = 5.16 + 1.12LgL$, 剩余标准差为 0.28. 在应用 WC 等经验关系时, 会遇到矩震级 M_w 与面波震级 M_s 之间的转换问题, Wells 在 1994 年的工作中认为, 当 M_s 在 5.7~8.0 级之间, 两者之间不存在系统的差异, 即 $M_w \approx M_s$. 但由于我国采用的震级测定方法和所用的台站资料与美国存在一定的差异, 即我国大陆的 M_s 与 M_w 并不相同. 2009 年冉洪流^[48] 根据中国大陆 1973—

表 2 东昆仑断裂带东段的分段标志和全新世以来的滑动速率

Table 2 Criteria of segment and holocene slip velocity in the eastern segment of the East Kunlun fault

分段名称	段落长度 (km)	段落划分边界标志(与西段)	全新世以来的滑动速 (mm/a)	备注
			9	[1]
玛沁段	130	玛积雪山隆起	7	[33]
			9.3±2	[34]
			5.4	[1]
玛曲段	140	断裂交汇分解区	4.03~6.29	[35]
			3	[36]
			4.9±1	[33]
塔藏段	60	左阶拉分盆地	2.7~2.8	个人通讯 (何玉林)
			1	[37]

2008 年的地震数据, 得到了这两种震级的转换关系式: $M_s = 1.412 + 0.845M_w$, 剩余标准差为 0.11, 本

文利用了上述的统计关系式,结合断层的长度,求得该段可能发生的最大震级(表3):

表3 东昆仑断裂带东段各段落最大震级估算值
Table 3 Estimated value for the largest magnitudes in eastern segment of the East Kunlun active fault

名称	玛沁段	玛曲段	塔藏段
断层长度	130	140	60
M_w	7.5	7.6	7.2
M_s	7.7	7.8	7.5

4 东昆仑断裂带东段不同段落最后地震离逝时间和平均复发间隔讨论

在进行地震危险性评价时,需要全面了解该区的古地震平均复发间隔和最后一次地震的离逝时间.针对东昆仑断裂带东段的古地震定量研究开始于20世纪90年代,并陆续取得了一些研究成果,但成果之间的差异较大,本文将通过对比前人的研究成果,获得较为合理的古地震复发间隔和地震的离逝时间,为计算该段的复发概率提供较为准确的素材.

4.1 玛沁段

从该段地表保存的地震鼓包、断层陡坎等构造地貌,反映出该段全新世以来有过多次活动,前人通过开挖探槽和利用天然露头的方法,得出了该段不同期次的古地震事件(图10).图中不同研究者得到

的古地震发生期次和年代有所不同,李陈侠^[34]在格曲河东侧Ⅱ级阶地断层剖面的下盘(Tc3),获得了埋藏古地表最新的年龄为358~430 Cal a BP,其采样位置是古植物层,但查阅近400多年的历史文献资料,却没有发现有相关地震的记载,因此该年龄仍需要进一步的考证.从图10中发现古地震年龄为977~1090 Cal a BP时,研究者的结论基本保持一致^[33-34],且与历史文献中“格萨尔王传”中一段地震记载的时间相符,推测该年龄相对可靠,可作为该段地震发生的最后离逝时间.最后对比分析主要的研究成果,玛沁段的古地震事件主要可划分为6次事件:第一次为977~1090 Cal a BP;第二次为2000±300 Cal a BP;第三次为3342~3454 Cal a BP;第四次为6600±700 a;第五次为7971~8050 Cal a BP;第六次为10000±200 a.求得古地震的平均复发周期约为1765 a.

4.2 玛曲段

玛曲断裂的地震活动性相比玛沁断裂明显较弱,对于该段古地震资料前人也有较详细的研究(图11),西科河附近有两个探槽^[1],玛曲县城附近有四个探槽^[1,35-36],本文将对比前人的研究成果,得到地震的离逝时间和地震的平均复发间隔.何文贵^[35]等通过对玛曲县城附近的三个古地震剖面,利用毛凤英等提出古地震事件的逐次限定法,给出了该段古地震发生较为准确的事件,全新世以来的有4次,认为第一次和第二次的古地震时间较为可靠,但由

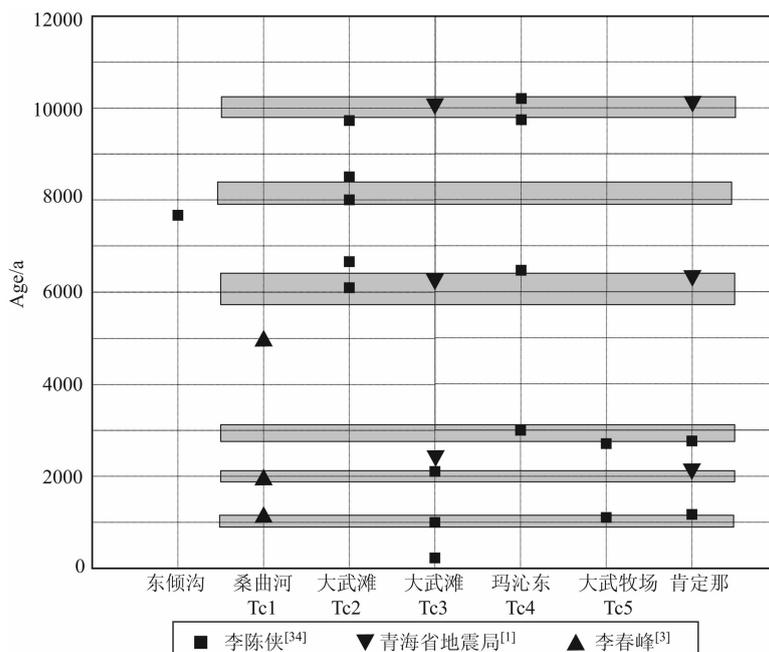


图10 玛沁段古地震发生期次统计图

Fig. 10 Occurrence time of paleoearthquake in Maqên segment

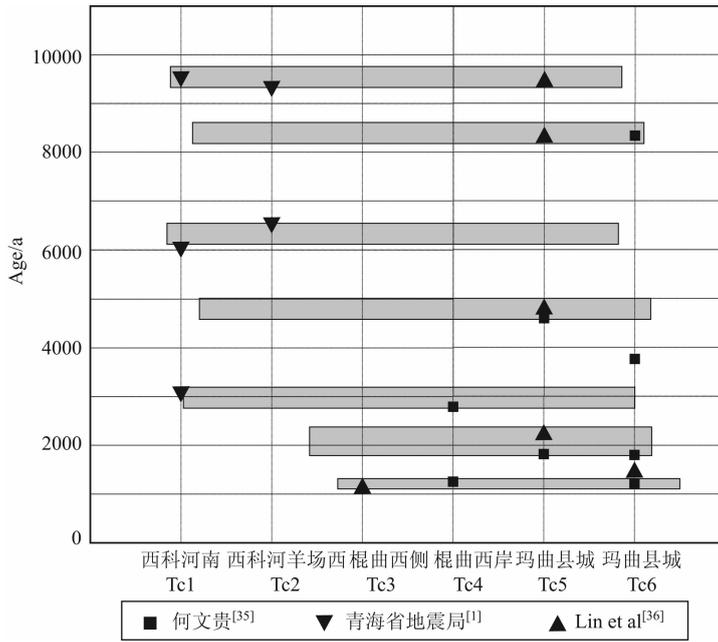


图 11 玛曲段古地震发生期次统计图

Fig. 11 Occurrence time of paleoearthquake in Maqu segment

于探槽的数量少,古地震的记录仍存在不完整性. Lin 等^[36]通过对玛曲段三个天然露头 and 两个探槽剖面的分层和采样,共识别出 5 次古地震事件,其中有一个探槽剖面的位置和何文贵^[35]研究的位置一致,研究得到的古地震的年龄结果相差不大. 本文通过对比前人的研究成果,进一步结合露头和探槽剖面的采样位置和测年方法,给出了 7 次较为可靠的古地震事件:第一次为 1210 ± 40 a; 第二次为 1730 ± 50 a~ 2530 ± 40 a; 第三次为 3736 ± 57 ; 第四次为 4850 ± 40 a; 第五次为: $6100 \sim 6700$ a; 第六次为 8590 ± 70 a; 第七次为 $9000 \sim 10000$ a. 可得最新一次古地震的离逝事件为 1210 ± 40 a, 古地震的平均复发周期约 1465 a.

4.3 塔藏段

从断层形迹分布的连续性看,塔藏断裂属于东昆仑断裂玛曲以东段的阿西—塔藏断裂的一条分支断裂,倾角 $50^\circ \sim 75^\circ$,西起拉来坝南,向东经过塔藏、九寨沟口、彭丰、马家、务角以东消失,总长度在 50 km 以上,控制了塔藏沟的发育,在坡麓地带形成断层残山或边坡脊地貌,新活动迹象明显. 其中一条冲沟(若尔盖的阿西乡罗叉村东约 7 km)形成的 II 级洪积台地侧缘(顶部 TL 年龄值为 54000 ± 4100 a)被左旋位错了 150 m, I 级洪积台地侧缘(顶部 TL 年龄值为 7300 ± 500 a)被左旋位错了 20 m, 据此估计的断层平均滑动速率为 $2.7 \sim 2.8$ mm/a (个人通讯). Kirby^[37]在若尔盖盆地东北方向,沿着塔藏断

裂西侧开挖了探槽,得到的两次古地震年龄,分别为 4689 ± 151 a B. P、 9132 ± 131 a B. P^[37]; Nathan Harkins^[49]对大致相同位置的古地震剖面进行采样,测得的古地震年龄为: 4752 ± 137 a B. P、 9173 ± 111 a B. P, 两者年龄结果相差不大. 结合何玉林(个人通讯)提供的该段的年龄值,可给出该段的古地震发生期次,分别为: 4689 ± 151 a B. P、 7300 ± 500 a、 9132 ± 131 a B. P, 古地震事件的平均复发间隔约为 2220 a 左右.

据历史文献记载,公元 638 年(唐贞观十二年)、1630 年(明崇祯十二年)在四川松潘(位于塔藏段落东南向约 50 km)发生地震,“河涨水赤,山崩城倒,坏人庐舍,压死兵民”. 如果塔藏段在此期间发生过 $M_s 7.5$ 以上的强震,应该有相应的历史记载,由此可推测塔藏段的最后地震离逝事件应该在公元 638 年之前,即最后地震的离逝时间应该介于 $1373 \sim 4689 \pm 151$ a 左右.

5 东昆仑断裂带东段不同段落未来百年强震复发概率

5.1 各段危险程度的定性分类

基于本文所求的地震平均复发间隔长的特点,对东昆仑断裂带东段的三个段落的地震危险程度做出一个定性的分类. 我们通常用 $E = t/R$ 描述断层面上地震发生时间紧迫性^[50],却在一定程度上忽略了

R 对地震时间紧迫性的贡献. 即使 E 值相同, R 值不同的两个段落, 地震危险程度是不同的, 一般来说, R 值越小的, 危险程度就越高. 因此, 可以给定两个参量来划分危险性程度: ①: $E < 0.5$ 且 $R > 2500$ 年为 C 类, 表明该段千年内无危险; ②: $0.5 < E < 0.8$ 且 $R < 2500$ 年为 B 类, 表明该段近几百年有较小的危险; ③: $0.8 < E < 1$ 且 $R < 2500$ 年为 A 类, 表明该段近百年内危险性较大. E 取 0.5、0.8 和 1 为临界值, 是根据地震复发 T/T_{ave} 的分布特征来定的, R 取

2500 年是由于三段的重复间隔小于 2500 年, 随着预测时间的增加, 危险度的增加也会较快. 按照此原则划分: 玛沁段和塔藏段属于 B 类, 玛曲段属于 A 类.

5.2 各段未来一百年内发生强震($M_s \geq 7$)的概率值

根据文中拟合的概率分布函数(2)和适用于中国大陆内部所有活动断裂的概率分布函数(5), 结合东昆仑活动断裂带上各段的最后地震离逝时间和平均复发间隔, 分别计算该断裂带各段落自 2011 年起, 未来 20、50 和 100 年期间, 地震复发的条件概率(表 4).

表 4 东昆仑活动断裂带东段未来 20 年、50 年和 100 年强震复发条件概率

Table 4 Strong earthquake recurrence conditional probability in different rupture segmentation of the Eastern Kunlun active fault for the next 20 years, 50 years and 100 years

分段名称	最后一次地震的离逝时间	古地震平均复发间隔	危险性定性分类	概率分布函数关系式	$(M \geq 7)$ 条件概率 $P(\%)$		
					2011~2031 ($\Delta t=20$)	2011~2061 ($\Delta t=50$)	2011~2111 ($\Delta t=100$)
玛沁	977-1090a	1765a	B	(2)	0.81~1.00	2.09~2.55	4.33~5.26
				(5)	1.11~1.09	2.65~2.72	5.19~5.33
玛曲	1210a	1465a	A	(2)	2.13	5.35	10.82
				(5)	1.19	2.94	5.76
塔藏	1373	2220a	B	(2)	0.79	2.02	4.15
				(5)	0.85	2.12	4.19

1984 年 Wallace 等^[51] 在研究地震危险性的概率分析时提出: 复发概率在 0~10% 之间的, 属于低概率事件; 11%~49% 之间的属于中概率事件; 50%~100% 之间的属于高概率事件. 从表 4 中计算的复发概率的数据中发现, 玛曲段在未来 100 年的复发概率属于中概率事件, 其余均属于低概率事件.

5.3 东昆仑断裂带东段未来至少发生一次 $M_s \geq 7$ 级地震的概率

根据上述表 4 中各个断层段的复发概率(本文拟合函数)计算了东昆仑活动断裂带东段未来至少发生一次以上大地震的联合概率:

$$P = 1 - (1 - P_1) * (1 - P_2) * (1 - P_3) \dots$$

$P_1, P_2, P_3 \dots$ 为东昆仑活动断裂带东段不同段落发生地震的概率.

表 5 中显示东昆仑断裂带东段未来 20 年发生强震的概率属于低概率事件、未来 50 年、100 年间的发震概率属于中概率事件、表 5 中的概率可能仅代表此活动断裂带的最小概率值, 因为古地震数据可能不是很充分, 如缺乏某活动期次事件, 就会高估复发间隔和离逝时间的值.

表 5 东昆仑断裂带东段未来 20 年、50 年和 100 年至少发生一次大地震的概率(以 2011 年起算)

Table 5 Probability of the occurrence of strong earthquake for at least one in the eastern segment of the East Kunlun active fault in the next 20 years, 50 years and 100 years (beginning form 2011 years)

未来时段/a	20	50	100
概率值	4.53%	11.21%	21.87%

6 结论和讨论

通过收集和整理青藏高原东北部的古地震资料, 建立了该区的复发概率模型, 并将其应用于东昆仑活动断裂带东段中长期强震的预测, 取得的认识和存在的问题如下:

(1) 由强震复发概率模型计算的东昆仑断裂带东段的复发概率值, 只有玛曲段在未来 100 年的复发概率值为 10.82%, 属于中概率事件, 其余两段计算的复发概率值都小于 10%, 属于低概率事件. 考虑模型的不确定性, 概率事件只能反映地震发生危

险性的高低,对各段的危险性进行定性分类,综合认为玛沁段近百年内的危险程度稍低;玛曲段近百年内的危险性较高,值得重点防御;塔藏段由于古地震研究的程度较低,文中计算发震概率采用的离逝时间为最小值,相应计算的发震概率稍低,结合该段的构造特征,认为该段在未来百年内强震发生的危险性仍较高。

(2)由强震复发概率模型计算的条件概率 P 对预测时段 Δt 的敏感程度与复发周期 R 的长短有密切的关系,一般来讲, R 越大,概率值 P 随着预测时段 Δt 的增长相应的增加越慢,当 R 很大而 Δt 很小,预测效果较差,这也是复发模型在预测地震的局限性.东昆仑断裂带东段的不同段落的复发间隔都在千年左右,计算所得的条件概率值整体较小,但在一定程度上仍反映出该三段在未来百年内的发震水平。

(3)利用青藏高原东北部 22 条断裂带的古地震定量数据,将其进行归一化处理,建立的强震复发概率模型,仍包含了很大的不确定性,如测年方法的误差、采样位置的合适度、古地震数据的遗漏等,这些误差是无法用定量的方法作出估计的.但将本文拟合的模型与目前通用的发震模型计算的概率值进行比较,发现通用模型的自变量 t/R 越接近 1 的时候,计算的复发概率值 P 增长的幅度不如本文拟合模型敏感.因此,对于古地震数据研究程度较高的断裂带,利用本文拟合的模型评价其未来大震的危险性可能更为准确,尤其是对平均复发间隔小,离逝时间长的段;而目前通用的复发模型针对那些古地震研究程度较低的断裂带,复发间隔较长的段落,可能更适用。

致 谢 感谢匿名审稿人和编辑部为作者提供了好的意见和建议,使本文得以改进和完善。

参考文献(References)

- [1] 青海省地震局,中国地震局地壳应力研究所.东昆仑活动断裂带.北京:地震出版社,1999:1-186.
Seismological Bureau of Qinghai Province. Institute of Crustal Deformation, China Seismological Bureau. East Kunlun Active Fault Zone. Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1999: 1-186.
- [2] Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Uniform postglacial slip-rate along the central 600km of the Kunlun fault, from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophysical Journal International*, 2002, 148: 356-388.
- [3] 许志琴,杨经绥,李海兵等.青藏高原与大陆动力学—地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力.中国地质,2006,33(2):221-238.
Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau. *Geology in China* (in Chinese), 2006, 33(2): 221-238.
- [4] 许志琴,杨经绥,李海兵等.印度—亚洲碰撞大地构造.地质学报,2011,85(1):1-33.
Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. On the Tectonics of the India—Asia Collision. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(1): 1-33.
- [5] Zhang Z J, Klemperer S, Bai Z M, et al. Crustal structure of the Paleozoic Kunlun orogeny from an active-source seismic profile between Moba and Guide in East Tibet, China. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 994-1007.
- [6] Karplus M S, Zhao W, Klemperer S L. Injection of Tibetan crust beneath the south Qaidam Basin: Evidence from INDEPTH IV wide-angle seismic data. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2011, 116: B07301, doi: 10.1029/2010JB007911.
- [7] Parsons T, Chen J, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, 454(7203): 509-510.
- [8] Nishenko S P. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(B5): 3589-3615.
- [9] Nishenko S P, Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1987, 77(4): 1382-1399.
- [10] Nishenko S P, Singh S K. Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican Subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1987, 77(6): 2094-2114.
- [11] Sykes L R, Nishenko S P. Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial faults, California, 1983-2003. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(B7): 5905-5927.
- [12] 闻学泽.鲜水河断裂带未来三十年内地震复发的条件概率.中国地震,1990,6(4):8-14.
Wen X Z. Conditional probabilities for the recurrence of earthquakes on the Xianshuihe fault zone within the coming three decades. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1990, 6(4): 8-14.
- [13] 刘静,汪良谋.运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性.地震学报,1996,18(4):427-435.
Liu J, Wang L M. Evaluate the middle-and longterm seismic risk in the Fen-Wei seismic belt by using the active fault data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, 18(4): 427-435.
- [14] 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.//活动断裂研究(5).北京:地震出版社,1996:12-31.
Zhang P Z, Mao F Y. Active faulting and fault specific

- probabilistic seismic hazard assessment. // The active fault in China(5). Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1996: 12-31.
- [15] 滕瑞增, 金瑶全, 李西侯等. 西秦岭北缘断裂带新活动特征. 西北地震学报, 1994, 16(2): 85-90.
Teng R Z, Jin Y Q, Li X H, et al. Recent activity characteristics of the faultzone at Northern nedge of Western Qinling Mt. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1994, 16(2): 85-90.
- [16] 曹娟娟, 刘百箴, 闻学泽. 西秦岭北缘断裂带特征地震平均复发间隔的确定和地震危险性评价. 地震研究, 2003, 26(4): 372-381.
Cao J J, Liu B Z, Wen X Z. Determination of the average recurrence intervals of characteristic earthquakes and estimate of earthquake risk on northern Xi Qinling faults. *Earthquake Research* (in Chinese), 2003, 26(4): 372-381.
- [17] 国家地震局地质研究所, 宁夏地震局. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1990.
Institute of Geology, State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. Research on the Active Haiyuan Fault Zone (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1990.
- [18] 张培震, 闵伟, 邓起东等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律. 中国科学(D辑), 2003, 33(8): 705-713.
Zhang P Z, Min W, Deng Q D, et al. Paleoeearthquake and strong earthquake recurrence interval in Haiyuan active fault. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, 33(8): 705-713.
- [19] 郑文俊. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
Zhen W J. Geometric Pattern and Active Tectonics of the Hexi Corridor and its Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.
- [20] 陈柏林, 王春宇, 宫红良等. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识. 地质通报, 2007, 26(8): 976-983.
Chen B L, Wang C Y, Gong H L, et al. A new understanding of the characteristics of Late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, 26(8): 976-983.
- [21] 邹谨敬, 貌顺民, 陈志泰. 榆木山东麓断裂带晚第四纪活动特征的初步研究. 高原地震, 1993, 5(2): 31-35.
Zhou J S, Mao S M, Chen Z T. Preliminary study on the late quaternary active feature of The Yumushan eastern marginal fault zone. *Earthquake Research in Plateau* (in Chinese), 1993, 5(2): 31-35.
- [22] 王永成, 刘百箴. 祁连山东中段断裂的地震危险性分析. 西北地震学报, 2001, 23(4): 330-338.
Wang Y C, Liu B C. Analysis on seismic risk for faults in the mid-eastern Qilianshan Area. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 2001, 23(4): 330-338.
- [23] 康来迅. 昌马断裂带古地震的探讨. 地震学刊, 1986, (4): 16-21.
Kang L X. Study of Paleo-earthquakes in Changma fault zone. *Journal of Seismology* (in Chinese), 1986, (4): 16-21.
- [24] 郭敬信, 侯珍清, 侯康明. 昌马—祁连断裂带中段全新世活动特征与古地震. 西北地震学报, 1990, 12(3): 38-43.
Guo J X, Hou Z Q, Hou K M. Active character and palaeo-earthquake on median section of Changma-Qilian fault zone in holocene. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1990, 12(3): 38-43.
- [25] 刘百箴, 曹娟娟, 袁道阳等. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料. 地震地质, 2008, 30(1): 161-175.
Liu B C, Cao J J, Yuan D Y, et al. Quantitative data of active faults within the active tectonic block in North Qinghai-Xizang Plateau. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(1): 161-175.
- [26] 何文贵, 刘百箴, 袁道阳. 冷龙岭断裂带古地震研究. // 中国地震局地质研究所编. 活动断裂研究(8), 北京: 地震出版社, 2000: 64-74.
Hen W G, Liu B J, Yuan D Y. Preliminary research on the paleoearthquakes along the LengLongLing active fault zone. // Institute of Geology, China Seismological Bureau (ed). Research on Active Fault(8) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2006: 64-74.
- [27] 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系. 北京: 地震出版社, 1993.
Institute of Geology, State Seismological Bureau, Lanzhou Institute of Seismology, State Seismological Bureau. The Qilian Mountain-Hexi Corridor Active Fault System (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993.
- [28] 刘小凤, 刘百箴, 吕太乙等. 老虎山活断层研究. 华南地震, 1994, 14(4): 9-16.
Liu X F, Liu B Z, Lü T Y, et al. The research on the Laohushan active fault. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 1994, 14(4): 9-16.
- [29] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵. 祁连山东段天桥沟—黄羊川断裂古地震活动习性研究. 地震地质, 2004, 26(4): 645-657.
Zhen W J, Yuan D Y, He W G. Characteristics of palaeo-earthquake activity along the active Tianqiaogou Huangyangchuan fault on the Eastern section of the Qilianshan mountains. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, 26(4): 645-657.
- [30] 闵伟, 张培震, 邓起东. 中卫—同心断裂带全新世古地震研究. 地震地质, 2001, 23(3): 357-366.
Min W, Zhang P Z, Deng Q D. Study of holocene paleoearthquakes on Zhongwei-Tongxin fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, 23(3): 357-366.
- [31] 刘小龙, 袁道阳. 青海德令哈巴音郭勒河断裂带的新活动特征. 西北地震学报, 2004, 26(4): 303-308.
Liu X L, Yuan D Y. Study on the new active features of bsy in Guole River active fault, Delingha, Qinghai Province. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 2004, 26(4): 303-308.
- [32] 袁道阳, 张培震, 刘小龙等. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2004, 11(4): 393-402.

- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu X L, et al. The tectonic activity and deformation features during the late Quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for the deformation of the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)* (in Chinese), 2004, 11 (4): 393-402.
- [33] 李春峰, 贺群禄, 赵国光. 东昆仑活动断裂带东段古地震活动特征. *地震学报*, 2005, 27(1): 60-67.
- Li C F, He Q L, Zhao G G. Paleo-earthquake studies on the eastern section of the kunlun fault. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2005, 27(1): 60-67.
- [34] 李陈侠. 东昆仑断裂带东段(玛沁—玛曲)晚第四纪长期滑动习性研究. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
- Li C X. The long-term Faulting Behavior of the Eastern segment (Maqin-Maqu) of the East kunlun fault since the Late Quaternary. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration (in Chinese), 2009.
- [35] 何文贵, 熊振, 袁道阳等. 东昆仑断裂带东段玛曲断裂古地震初步研究. *中国地震*, 2006, 22(2): 126-134.
- Hen W G, Xiong Z, Yuan D Y, et al. Palaeo-earthquake study on the Maqu fault of east Kunlun active fault. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2006, 22(2): 126-134.
- [36] Lin A M, Guo J M. Nonuniform Slip Rate and Millennial Recurrence Interval of Large Earthquakes along the Eastern Segment of the Kunlun Fault, Northern Tibet. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(6): 2866-2878.
- [37] Kirby E, Harkins N, Wang E Q, et al. Slip rate gradients along the eastern kunlun fault. *Tectonics*, 2007, 26(C2): 1-16.
- [38] 胡道功, 吴中海, 吴珍汉等. 东昆仑断裂带库赛湖段晚第四纪古地震研究. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 27-34.
- Hu D G, Wu Z H, Wu Z H, et al. Late quaternary paleoseismic history on the Kusai lake segment of East Kunlun fault zone in northern Tibet. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2007, 27(1): 27-34.
- [39] 胡道功, 叶培盛, 吴珍汉等. 东昆仑断裂带西大滩段全新世古地震研究. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 1012-1020.
- Hu D G, Ye P S, Wu Z H, et al. Research on Holocene paleoearthquakes on the Xidatan segment of the East Kunlun fault zone in Northern Tibet. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2006, 26(6): 1012-1020.
- [40] 国家地震局“阿尔金活动断裂带”课题组. 阿尔金活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1992.
- Task Group of Altun Active Fault Zone. State Seismological Bureau. Altun Active Fault Zone. Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1992.
- [41] 熊仁伟, 任金卫, 张军龙等. 玛多—甘德断裂甘德段晚第四纪活动特征. *地震*, 2010, 30(4): 65-73.
- Xiong R W, Ren J W, Zhang J L, et al. Late quaternary active characteristics of the Gande Segment in the Maduo-Gande Fault Zone. *Earthquake* (in Chinese), 2010, 30(4): 65-73.
- [42] 柴炽章, 廖玉华, 张文孝等. 灵武断裂晚第四纪古地震及其破裂特征. *地震地质*, 2001, 23(1): 15-23.
- Chai Z Z, Liao Y H, Zhang W J, et al. Late quaternary paleoearthquakes and their rupture features along the Lingwu fault. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, 23(1): 15-23.
- [43] 闵伟, 柴炽章, 王萍等. 罗山东麓断裂全新世古地震研究. *高原地震*, 1993, 5(4): 97-102.
- Min W, Chai Z Z, Wang P, et al. The study on the paleoearthquakes on the eastern piedmont fault of the luoshan mountains in Holocene. *Earthquake Research in Plateau* (in Chinese), 1993, 5(4): 97-102.
- [44] 国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社, 1988.
- The Research Group on Active Fault System around Ordos Massif, State Seismological Bureau. Active Fault System around Ordos Massif. Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1988.
- [45] 杜鹏, 柴炽章, 廖玉华等. 贺兰山东麓断裂南段套门沟—榆树沟段全新世活动与古地震. *地震地质*, 2009, 31(2): 256-264.
- Du P, Chai Z Z, Liao Y H, et al. Study on holocene activity of the south segment of the eastern Piedmont fault of Helan mountains between Taomengou and Yushugou. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, 31(2): 256-264.
- [46] 丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣等. 活断层分段. 北京: 地震出版社, 1993.
- Ding G Y, Tian Q J, Kong F C, et al. Segmentation of active fault (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993.
- [47] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1994, 84: 947-1002.
- [48] 冉洪流. 潜在震源区震级上限不确定性研究. *地震学报*, 2009, 31(4): 396-402.
- Ran H L. Research on uncertainty of upper limit earthquake magnitude in potential seismic source zone. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, 31(4): 396-402.
- [49] Harkins N, Kirby E, Shi X, et al. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia. *Lithosphere*, 2010, 2 (4): 247-266.
- [50] Matsuda T. Estimation of future destructive earthquakes from active faults on land in Japan. *J. Phys. Earth*, 1977, 25(S1): 795-855.
- [51] Wallace R E, Davis J F, McNally K C. Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1984, 74(5): 1819-1925.