

# 运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性<sup>\*</sup>

刘 静 汪良谋

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

**摘要** 在收集、整理和分析汾渭地震带 21 个晚更新世晚期以来活动段落上的滑动速率、古地震、单次事件最大位移平均值等数据的基础上, 建立了该带强震复发模型, 并从 4 个方面评价了该带中长期地震的危险程度.

**主题词** 地震危险性评估 汾渭地震带 强震复发模型 条件概率

## 引言

汾渭地震带历史地震活动十分强烈, 有记载以来, 共发生  $M \geq 5.0$  地震 144 次, 其中 8 级地震 2 次, 7~7.9 级地震 6 次, 6~6.9 级地震 19 次, 关于汾渭地震带未来地震危险性, 不少研究人员做了研究和分析, 而大部分研究结果是利用历史地震资料得到的; 近年来, 在汾渭地震带延怀盆地北缘断裂、五台山北麓断裂、秦岭北麓断裂等主要活动断裂上开展了 1:5 万大比例尺地质填图和综合研究工作, 积累了大量的活断层、古地震等基础资料. 利用已获得的活断层资料进行地震危险性评价成为可能, 并将推动活断层填图的深入开展.

对于中长期地震预报, 定量的方法是把地震发生的可能性表示为概率, 即假定地震发生的时间大致服从于某一个复发模型  $f(\tau)$ . 在已知研究区最后一次地震发生的时间、震级及相应的平均复发间隔的前提下, 运用此复发模型估算未来某一预测时段内大地震复发的概率值. 地震发生的可能性用条件概率来表示.

文献中 (McCann *et al.*, 1979; Nishenko, 1985; Nishenko, Buland, 1987; Nishenko, Singh, 1987; Sykes, Nishenko, 1984; Working group on California earthquake probabilities, 1988, 1990),  $f(\tau)$  有多种分布类型: 正态分布、对数正态分布、韦布尔分布和伽马分布等. 闻学泽 (1990) 把已有的分布函数应用于鲜水河断裂带上. 由于汾渭地震带上古地震研究程度较高, 本文试图运用已有的数据建立本地区样本分布参数, 以进行强震危险性评价. 考虑到活断层、古地震数据的误差, 本文采取定性与定量相结合的综合评价方法.

\* 国家地震局 85-05-02 项目资助.

1995-03-25 收到初稿, 1995-11-03 收到修改稿, 1995-11-29 决定采用.

## 1 汾渭地震带活断层数据分析

依据活动性的不连续如活动时代、活动强度(滑动速率)以及古地震序列的独立性等，并以阶区、空段等标志为划分边界，对汾渭地震带上晚更新世以来有过活动的18条主要断裂进行分段(图1)，一般分为2~3段，并从中选择晚更新世晚期以来有活动的段落进行危险性评价，共21段。在收集、重新分析各段已有的活断层、古地震序列、古地震单次事件最大位移量估计值等资料(表1)的基础上，进行危险性评价。对断层滑动速率的重新分析包括：①查清每个速率值的来源，比较所有关于某段的活断层滑动速率值的可靠性或精度，去掉精度较差的值；②分析时间段的取法对滑动速率值的影响，选择晚更新世晚期以来(2~3万年)或1万年以来的平均滑动速率值。对古地震序列的重新分析包括：a. 去掉距今时间太远的事件；b. 对同一段上不同探槽剖面中揭露的古地震事件进行对比和综合分析，去除重复事件，用逐次限定法缩小事件年代的范围；c. 对古地震事件，给出其年代范围的中值作为其发生年代的估计值。年代差值的一半为误差，或根据提供的剖面，参考剖面描述，以偏向测年范围某一侧的值为其发生年代，并给出误差范围；d. 仅选用较完整、研究程度较高的古地震序列进行下一步的定量分析<sup>①</sup>。

表1 汾渭地震带各段活断层数据一览表

段编号	段名称	滑动速率 /mm·a <sup>-1</sup>	D <sub>max</sub> /m	事件距今 时间/a	T/a	T <sub>ave</sub> /a	T T <sub>ave</sub>	$\frac{\sigma_{ave}}{T_{ave}}$	资料 来源*
1	延箕盆地北缘断裂 北段	0.35	$1.35 \pm 0.05$	21 700±2 000					
				16 000±1 300	5 700		1.073		①
				10 880±3 000	5 120	5 312	0.979 0.065 2	[1]	
				5 756±1 100	5 035		0.947 8	[2]	
2	延箕盆地北缘断裂 南段	0.37	1.1	33 100±					
				28 000±	5 100		0.942 3		
				21 000±1 500	7 000		1.293 4		
				14 000±	7 000	5 412	1.293 4 0.337		
				10 800	3 200		0.591 3		①
				7 500±	3 300		0.609 8		
				658	6 872		1.269 8		
3	怀涿盆地北缘断裂 北段	0.41~0.55	1.5±0.2	20 500±1 180					
				14 500±710	6 000		0.869		①[8]
				6 700±600	7 800	6 900	1.13 0.184	[9][10]	
				<1 310	>5 390				
4	怀涿盆地北缘断裂 南段	0.47	1.5±0.2	30 000±1 400					
				24 500±700	5 500		1.0742		
				16 000±2 100	8 500		1.66		①[8]
				10 000±	6 000	5 120	1.172 0.359	[9][10]	
				6 600±400	3 400		0.664		
				4 400±500	2 200		0.429 7		
				<2 865	>1 535				
5	蔚广盆地南缘断裂东段	0.3	2	7 850±150		10 000±			②③

① 刘静，1994. 运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性. 国家地震局地质研究所硕士论文，8~27.

续表 1

段编号	段名称	滑动速率 /mm·a <sup>-1</sup>	D <sub>max</sub> /m	事件距今 时间/a	T/a	T <sub>ave</sub> /a	T T <sub>ave</sub>	σ <sub>ave</sub> T <sub>ave</sub>	资料 来源*
6	蔚广盆地南缘断裂西段	0.43	2	5 095±100		10 000±			[②③]
7	六棱山北缘断裂段	0.23	2±	13 000		10 000±			[③④]
8	灵丘盆地南缘断裂	0.35~0.4	0.98~1.4	20 000~6 000					
	东段			(3 次)		3 500~			
						6 000~3 000	4 000		[②⑤]
					366				
9	鹅毛口-口泉断裂中段	1.8~3.6(右)				2 000~3 000			[3][15]
10	恒山北麓断裂东段	1.57	6.6	>8 600					[②]
				<5 865		>2 735			
11	五台山北麓断裂东段	1.22~1.76	3	6 500±					
				4 000±	2 500		0.996		
				1 480	2 520	2 510	1.004	0.006	[5][7]
12	云中山山前和五 台山西麓断裂段	0.33		310					[5]
13	系舟山北麓断裂西段	1.41	1.8	6 200~955					[5][16]
				955	<5 285				
14	清徐-交城断裂中段	0.39	0.5	6 450±1 280					[5][6]
15	罗云山山前断裂中段	0.57	1.5						[5]
16	霍山山前断裂中段	5(右旋)	8.6	4 965±490					[⑥]
				3 015±460	1 950	2 137	0.9124	0.098	
				690	2 325		1.088		
17	韩城断裂段	0.16	>0.29						[12]
18	华山山前断裂段	1.86	3	7 500±					[5][14]
				5 610±	1 890		1.07		
				4 250±	1 360		0.77		
				2 750±250	1 500	1 766	0.849	0.242	[⑦][17]
				437	2 313		1.309		
19	骊山山前断裂段	0.1~0.2	1	13 820±400					[5]
				4 035±155	9 785	9 785			
20	秦岭北麓断裂东段	0.61~0.74	2.8	>13 065±183					[11][18][19]
				10 255±1 492	>2 810				
				3 180	7 075	7 075(?)			
21	秦岭北麓断裂西段	0.22	1.8						[11][19]

注: ① 国家地震局地质研究所延怀课题组, 1995. 延怀盆地的活动断裂与强震危险性. 148~187

② 国家地震局地质研究所, 1991. 陕甘宁气田—北京输气管道沿线主干断裂活动性勘察与地震烈度研究报告. 53~57, 104~107, 185~195, 214~221

③ 方仲景, 郑炳华, 1993. 晋冀北地区的活动断裂及其与地震相关的研究. 16~19, 24

④ 段瑞涛, 1994. 阳原盆地及邻近地区活动断裂与地震危险性研究. 国家地震局地质研究所硕士论文. 18~32

⑤ 申旭辉, 1990. 灵丘盆地及其邻区晚第四纪构造活动与强震研究, 国家地震局地质研究所硕士论文. 15~27, 78~84

⑥ 国家地震局, 山西省人民政府, 1993. 山西临汾地区地震区划与防震减灾规划. 75~82, 95~99

⑦ 国家地震局地质研究所等, 1991. 西部石油长输管道(乌鲁木齐—洛阳)沿线主干断裂活动性勘察与地震烈度研究报告. 217~222

\* 方括号内的数字与文后参考文献相应顺序一致.

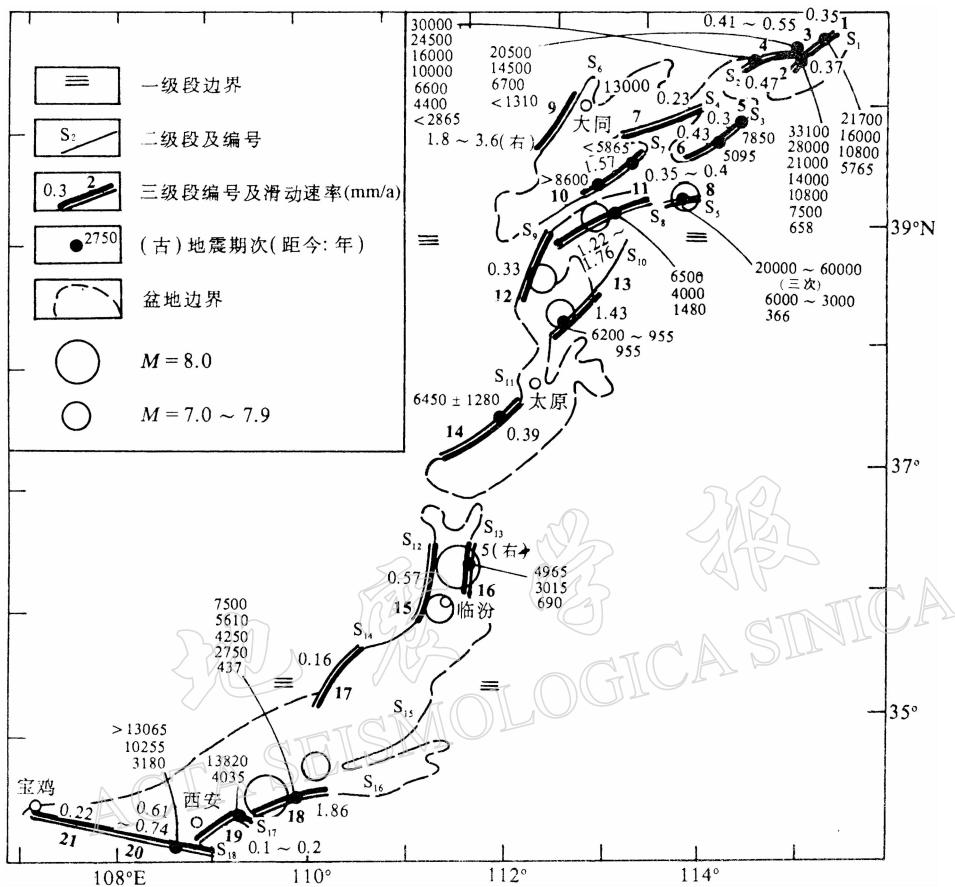


图 1 汾渭地震带多级分段图

图 2a 为汾渭地震带上  $T/T_{ave}$  分布直方图。

$$T_{ave,k} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} T_{ik} \quad \sigma_{ave,k} = \left\{ \frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (T_{ik} - T_{ave,k})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

从图上我们可以看出，虽然各段上地震的复发间隔相差很大，但是经过  $T/T_{ave}$  的均一化后差别减小，出现中间多两头少的正态分布形式。绝大多数落在  $T/T_{ave} = 1 \pm 0.5$  的区间内。图 2a,b,c 都表现出同样的  $T/T_{ave}$  集中在 1.0 附近的特征。说明同一段(地点)上地震的复发有一个固有周期，同时由于其它因素的干扰，使得重复间隔偏离这个固有周期，从而呈现正态分布特征。

当然，这些直方图与标准的正态分布之间有较大的差异，有畸变。在实际情况中，不同的样本，不同的地区、带上，畸变也不一样。图 2a 中峰值的两翼不对称，右边  $T/T_{ave} > 1$  部分频率偏高，且分布较分散，显得重，即复发间隔大于平均间隔的地震发生的频率要高于正常情况下的相对频率(Heavy-tailed)。这种地震事件延迟于平均周期发生的特点与图 2b 中的延迟特征类似，且更为显著。说明应力的变化使得地震拖延发生而不是触发加速(Nishenko, Buland, 1987)，这种特征在板内地震中更为常见。

对汾渭地震带，我们也进行了正态分布和对数正态分布的最大似然法估计。

随机样本

$$X_i = T_{ik} / T_{\text{ave}, i} \quad (k = 1, 2, \dots, n_i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$L(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{(\sigma \sqrt{2\pi})^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \right\}$$

故

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \quad \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

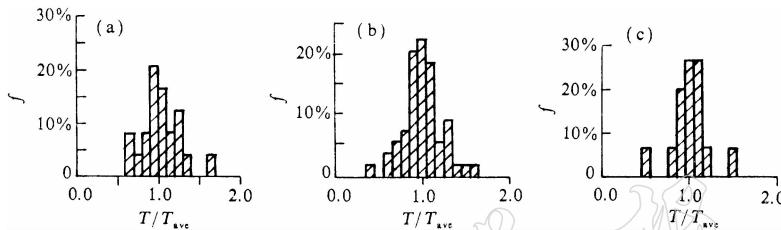


图 2 地震复发间隔  $T/T_{\text{ave}}$  频率直方图

(a) 汾渭地震带古地震; (b) 世界特征及准周期地震; (c) 邶连山带古地震带

根据样本观察值得  $\hat{\mu} = 0.9966$ ,  $\hat{\sigma} = 0.2665$ .

同理可求得  $T/T_{\text{ave}}$  的对数正态分布的参数估计

$$\hat{\mu} = -0.00432, \quad \hat{\sigma} = 0.2932$$

总样本数  $N = 24$ , 设  $\tau_j = \frac{T_{ik}}{T_{\text{ave}, i}}$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ).

将  $\tau$  按从小到大排列得一个序列:  $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3 \dots \leq \tau_N$  作为横坐标值, 对应于每一个  $\tau$ , 其纵坐标值为  $CDF_j = \frac{(j-1)/2}{N}$ .

两种分布与样本拟合情况见图 3. 从图上可看出正态分布、对数正态分布都拟合得较好, 对数正态分布稍差一些.

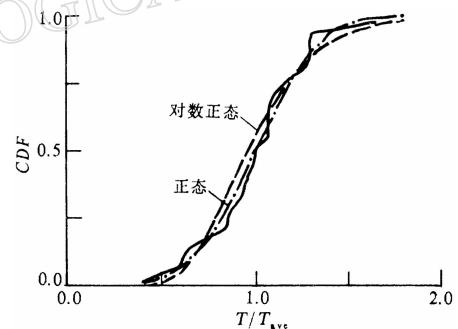


图 3 汾渭地震带样本累积曲线与分布拟合图

## 2 中长期地震危险性评价

### 2.1 汾渭地震带各段的强震复发周期

我们选出的 21 个评价段中, 根据古地震可推算实际大地震重复间隔均值的有 14 段, 还有 7 个段上无实际大地震重复间隔数据, 我们用平均大地震重复间隔代替.

汾渭地震带 14 个段上有比较精确的实际大地震重复间隔, 有公式  $C = S - D/R$  反推该段上的蠕滑速率, 并以  $P = C/S$  表示蠕滑速率占长期滑动速率的百分比, 再根据构造类比的原则确定另外 7 个段上的  $C/S$  值, 并计算  $C$  值, 然后用公式  $R = D/(S - C)$  求  $R$  值(表 2). 除 13 号外, 其它段上平均大地震重复间隔都比较大, 表明断裂活动程度较低.

表 2 汾渭地震带历史强震及间隔

地震事件	512	1 038	1 303	1 501	1 556	1 626	1 683	1 695	1 720
间隔/a		526	265	198	55	70	57	12	25

## 2.2 整个带上强震发生频率与水平

对于由多条断裂组成的汾渭地震带, 当已知带上某一段强震重复间隔, 我们可以引入一个参量  $T_g$ , 以估计整个带的强震发生水平

$$T_g = \frac{1}{f_g} \quad f_g = f_1 + f_2 + \cdots + f_{21}$$

其中,  $f_i = \frac{1}{T_i}$ ,  $T_i$  为第  $i$  段的大地震重复间隔.

$T_g$ ,  $f_g$  都是一种平均化的量, 由于它们是依据地质和古地震资料得到的, 不受历史地震资料的限制, 因此可以作为一个长期平均量对历史地震资料进行分析. 由于某一区域的地震活动在时间上体现为密集和稀疏相间的不均一性, 因此每两个地震之间的时间间隔大于或小于平均间隔在一个较长的时期内应该是比较稳定的, 而又是忽高忽低. 由此可以根据以往的地震活动情况判断目前处于什么样的活动水平.

$$f_g = 4.23 \times 10^{-3} (1/a)$$

$$T_g = \frac{1}{f_g} = 237 (a)$$

从公元 512 年以来, 汾渭地震带上共发生 9 次  $M \geq 7$  地震(表 3). 从 512 年到 1 303 年, 地震活动水平低于平均水平; 从 1 501 年到 1 720 年间, 每两次地震的时间间隔小于平均间隔(图 4); 从 1 720 年至今已 273 年, 超过平均间隔, 说明未来较长时期内地震活动低于平均水平, 不会像前四百多年前那样几十年甚至十几年就发生一次大地震, 每两次大地震的时间间隔至少大于 237 年, 但不排除目前几年或几十年内发生一次大地震的可能性.

表 3 汾渭地震带大地震重复间隔表

段编号	$R/a$	$P$	$R_{ave}/a$	$f(\times 10^{-4}) / a^{-1}$	段编号	$R/a$	$P$	$R_{ave}/a$	$f(\times 10^{-4}) / a^{-1}$
1	5 312	27%		1.883	12		70%	10 100	0.99
2	5 412	45%		1.848	13		70%	4 255	2.35
3	6 900	47%~60%		1.449	14		90%	12 820	0.78
4	5 120	38%		1.953	15		80%	8 771	0.93
5	10 000±	7%		1.000	16	2 137	20%		4.6
6	10 000±	34%		1.000	17		20%	7 182	1.39
7	10 000±	10%		1.000	18	1 766	9%		5.663
8	3 500~4 000	33%		2.667±	19	9 785	49%		1.022
9	2 000~3 000			4±	20	7 075	35%~46%		1.413
10		30%	6 000	1.667	21		45%	14 800	0.676
11	2 510	2%~32%		3.984					

## 2.3 各段危险的定性分类

考虑到板内地震复发间隔长的特点, 有必要对这 21 个段的地震危险程度做一个定性的分类. Matsuda(1977)用  $E=t/R$  来描述断层上地震发生的时间紧迫性, 但是忽略了  $R$  对

地震的时间紧迫性的贡献。也就是说,即使  $E$  值相同的两个地方,其  $R$  值不同,那么这两个地方的危险性程度是不等的,其中  $R$  值小的危险性较大。因此我们用两个参量作标准来划分危险性程度:①  $E < 0.3$  且  $R > 3000$  年为 D 类,表明该段千年或几千年无危险;②  $E > 0.3$  但  $R < 3000$  年或  $0.3 < E < 0.7$ ,且  $R > 3000$  年为 C 类,表明该段几百年内无危险;③  $0.3 < E < 0.7$  且  $R < 3000$  年或  $0.7 < E < 1$  且  $R > 3000$  年为 B 类,表明该段近几百年内有较小的危险;④  $E > 0.7$  且  $R < 3000$  年或  $E > 1$  且  $R > 3000$  年为 A 类,表明该段近几百年内危险性较大。

$E$  取  $0.3, 0.7, 1$  为临界值,是根据地震复发  $T/T_{ave}$  的分布特征。 $R$  取  $3000$  年为界,是因为汾渭地震带上有几个断裂段,如五台山北麓东段、华山山前断裂东段等段上地震重复间隔  $R$  都小于  $3000$  年,随着预测时段的增加,其危险度增长很快,即较敏感。

按照这个原则,汾渭地震带上属 A 类的有 1, 7 和 9 号;4, 5, 10, 11, 18 号为 B 类,18 号华山山前断裂东段上地震重复周期最短,在同样的时段内其危险性程度增长最快,故列为 B 类;其它为 C 或 D 类(表 4)。

#### 2.4 未来一段时间内发生大地震的概率值

由于  $T/T_{ave}$  的正态和对数正态分布拟合均较好,且本区地震复发间隔长,这两种分布得到的结果差别很小。为简单起见,我们只列出了用正态分布计算的条件概率

$$P = \frac{F(t_1 + \Delta t) - F(t_1)}{1 - F(t_1)} \quad F(t) = \Phi\left(\frac{t/R - 0.996}{0.266}\right)$$

计算所需参数为:重复周期  $R$ ,上一次地震发生到现在所经历的时间  $t_1$ ,预测时段  $\Delta t$ 。我们分别计算了  $\Delta t$  为 20 年、50 年和 100 年内的强震发生的条件概率,各段的参数和概率值列于表 4 中。其中,17 号韩城断裂段和 21 号秦岭断裂西段因目前古地震研究不够,最近一次地震事件距今的时间不能确定,无法进行定量计算。由于其复发周期很长,估计其发震条件概率值接近于零。从表 4 中可以看出:

(1) 汾渭地震带中、南段由于多次发生 7 级以上的历史强震,使得强震的危险性降低,绝大部分段落上未来百年内的发震条件概率为零;而汾渭地震带北段,特别是延庆盆地北缘断裂北段、六棱山北麓断裂、鹅毛口—口泉断裂段,条件概率值较大,不容忽视。尤其是六棱山北麓断裂段,  $t_1/R$  高达 1.3, 条件概率值也很高。

(2) 总体来看,各段未来 100 年内的发震概率均很小,这是由于  $\Delta t/T_{ave}$  很小造成的,这也说明了运用活断层数据进行地震危险性评价的局限性。

#### 2.5 汾渭地震带上至少发生一次 $\geq 7$ 级地震的概率

表 5 给出了汾渭地震带上发生一次以上大地震的联合概率。联合概率指总概率或综合概率,是根据表 4 中对断层段的概率总和得到的,总概率由下式得到:

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)\cdots$$

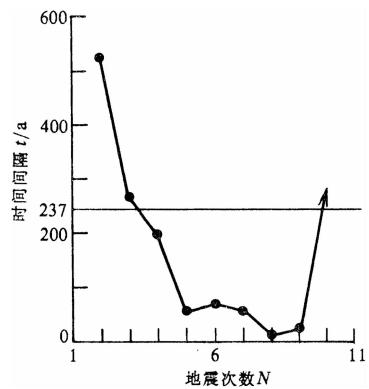


图 4 汾渭地震带强震

时间间隔特征

表 4 汾渭地震带各段未来时间段强震发生条件概率(以 1993 年起算)

段编号	段落名称	$R/a$	$T_1$ 距今 时间/a	$P(\%)$			危险性 分 类
				$\Delta t=20$	$\Delta t=50$	$\Delta t=100$	
1	延砚盆地北缘断裂北段	5 312	5 765	1.43	3.57	7.1	A
2	延砚盆地北缘断裂南段	5 412	658	0	0.02	0.03	D
3	怀涿盆地北缘断裂北段	6 900	<1 310	0	0.02	<0.03	D
4	怀涿盆地北缘断裂南段	5 120	<2 865	<0.17	<0.45	<1.0	B
5	蔚广盆地南缘断裂东段	10 000	7 850±	0.33±	0.7±	1.45±	B
6	蔚广盆地南缘断裂西段	10 000	5 059±	0.06	0.15	0.3	C
7	六棱山北麓断裂段	10 000	13 000±	1.25±	3.06±	6.04±	A
8	灵丘盆地南缘断裂段	3 500~4 000	366	0	0	<0.02	D
9	鹅毛口-口泉断裂中段	2 000~3 000	>1 500	>0.2~2.1	>0.5~3	>1~6.6	A
10	恒山北麓断裂东段	6 000	<5 865	<0.93	<2.31	<5.37	B
11	五台山北麓断裂西段	2 510	1 480	0.4	1.04	2.24	B
12	五台山西麓和云中山 山前断裂段	10 100	310	0	0	0	D
13	系舟山北麓断裂西段	4 255	955	0.01	0.03	0.06	D
14	清徐-交城断裂中段	12 820	6 450±1 280	<0.09	<0.22	<0.43	C
15	罗云山山前断裂中段	8 771	298(?)	0	0	0	D
16	霍山山前断裂中段	2 137	690	0.06	0.16	0.36	C
17	韩城断裂段	7 182	?				D
18	华山山前断裂东段	1 776	437	0.03	0.1	0.22	B
19	骊山山前断裂段	9 785	4 035	0.03	0.08	0.15	C
20	秦岭北麓断裂东段	7 075	3 180	0.05	0.14	0.28	C
21	秦岭北麓断裂西段	14 800	?				D

表 5 汾渭地震带至少发生一次大  
地震的概率(以 1993 年起算)

未来时段/a	20	50	100
概率值	6.7%	14.1%	27.7%

$P_1, P_2, P_3 \dots$  为某一时段内断层各段上发生地震的概率.

表 5 中显示未来 50 和 100 年内整个汾渭地震带上发生 7 级以上地震的概率分别为 14.1% 和 27.7%. 表中的总概率可能只代表了最小值,

因为汾渭地震带上其它断层, 如韩城断裂、秦岭北麓断裂西段以及不少盆地内部较大的断裂还没有足够的资料进行本文中所作的这种分析, 而这些断层中有些则存在发生大地震的潜在危险.

### 3 问题讨论

(1) 定量计算中的不确定性. 运用活断层和古地震数据进行地震危险性定量评价只是一种尝试, 因为这其中包含了很大的不确定性, 尤其是地质数据的获取, 由于人为因素占很大成分, 使得数据的可用性参差不齐.

古地震标志和年代的测定是研究地震复发的关键, 其不确定性主要存在 4 个方面: ① 测年方法中的误差; ② 测样数量少或采样位置不合适; ③ 在某些非典型剖面中, 对古地震事件与已知年龄的沉积物之间的关系难以或没有进行分析判断, 主观推断的成分较大. 但

应该指出,有些人为判断起到了减小数据误差的作用;④有些断层(段)上,古地震研究程度较低,随着探槽开挖个数增多,有可能发现更多的古地震,因此使计算的地震平均复发周期缩短。强震发生条件概率计算中的不确定主要出现在平均复发周期的计算中,即单次事件的最大位移估计和断层平均滑动速率所引起的误差,以及最近一次地震事件距今的时间估计。以上误差均难以给出定量估计。

概率模型的不确定性:每个段上地震复发周期的标准偏差为

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (T_{ik} - T_{ave, k})^2 \right\}^{1/2}$$

每个复发间隔数据的方差为  $Var(T_{ik}) = \sigma_{ik}^2$

各段复发间隔数据的方差为  $Var(T_{ik}/T_{ave}) = \frac{1}{T_{ave}^2} \sigma^2$

因此,  $T_{ik}$  估计  $T_{ave, k}$  中总方差为  $\sigma_{ik}^2 + \frac{1}{T_{ave}^2} \sigma^2$ .

由于概率分布密度是根据样本,用最大似然估计得出的,所以依赖样本,其参数估计是不稳定的。此外,虽然汾渭地震带上古地震研究较深入,但可用于分析的样本量仍然偏少。但是从目前的研究来看,函数的参数变化不是很大,如  $T/T_{ave}$  的正态分布参数  $\mu = 1.0 \pm 0.1$ ,  $0.1 < \sigma < 0.3$ , 板内地震对这个范围内的参数变化不敏感。

(2) 条件概率对预测时段的敏感程度与复发周期  $R$  的长短有密切关系。 $R$  越大,则  $P$  值随着  $\Delta t$  的增长增加越慢,对  $\Delta t$  的反映不灵敏。当  $R$  很大而  $\Delta t$  较小时,预测效果往往较差。因此需增加  $\Delta t$  的长度。对于板内大地震,其复发间隔往往是几千年,甚至上万年,可以做到  $\Delta t$  为 50~100 年的预测分析。当  $\Delta t$  更小时,则意义不大。这也是定量方法在强震中长期预报中常常会遇到的问题。

## 参 考 文 献

- 程绍平,方仲景,杨喆,等,1991. 北京延庆盆地北缘正断裂带姚家营地点的活动特征,活动断裂研究(1). 北京:地震出版社. 131~139
- 程绍平,方仲景,杨桂枝,等,1995. 论延庆盆地北缘断裂带的分段与地震预测. 地震地质, 17(3): 231~240
- 丁国瑜,卢演伟,1983. 华北地块新构造变形基本特点的讨论. 华北地震科学, (2): 1~9
- 方仲景,程绍平,王景钵,等,1989. 河北怀来黄土窑古地震剖面. 地震地质, 11(2): 66~68
- 国家地震局地质研究所《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京:地震出版社. 77~142, 238~253, 277~281
- 江娃利,聂宗笙,张康富,1992. 山西交城断裂错断全新世洪积扇. 地震地质, 14(3): 216
- 刘光勋,于慎谔,窦素芹,等,1991. 山西五台山北麓断裂带,活动断裂研究(1). 北京:地震出版社. 118~130
- 冉勇康,方仲景,李志义,等,1992. 河北怀来—涿鹿盆地北缘活断层的古地震事件与断层分段. 中国地震, 8(3): 74~85
- 冉勇康,方仲景,李如成,等,1991. 怀来—涿鹿盆地周缘的活动断裂及其特征,活动断裂研究(1). 北京:地震出版社. 156~163
- 冉勇康,方仲景,王景钵,等,1992. 怀涿盆地北缘断裂沈庄—郝家坡区间晚第四纪断层活动习性,活动断裂研究(2). 北京:地震出版社. 152~162
- 申屠炳明,宋方敏,汪一鹏,1991. 秦岭北麓断裂晚第四纪断层陡坎的初步研究. 地震地质, 13(1): 15~25
- 申屠炳明,徐煜坚,汪一鹏,1990. 韩城断裂的活动特征及断裂带古地震遗迹的初步研究. 华北地震科学, 8(1): 1~10
- 闻学泽,1990. 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, 8(4): 8~16

- 徐锡伟, 张宏卫, 邓起东, 1988. 渭河盆地华山山前古地震遗迹及其重复间隔. 地震地质, **10**(4): 206
- 闫王贺, 1992. 大同盆地西缘发现全新世古地震遗迹. 中国减灾报, 3月3日第三版
- 张世民, 杨景春, 苏宗正, 1989. 公元1038年定襄地震的地质、地貌遗迹的研究. 华北地震科学, **7**(3): 22~30
- 张安良, 米丰收, 种瑾, 1988. 1556年陕西华县大地震形变遗迹及华山山前断裂带古地震研究. 地震地质, **11**(3): 73~81
- 张安良, 种瑾, 米丰收, 1990. 秦岭北麓断裂带太平口古地震剖面. 地震地质, **12**(4): 333~334
- 张安良, 种瑾, 米丰收, 等, 1991. 秦岭北缘断裂带晚第四纪活动特征及其古地震研究, 活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社. 105~117
- Matsuda T, 1977. Estimation of future destructive earthquakes from active faults on land in Japan. *J Phys Earth Suppl*, **25**: 795~855
- McCann W R, Nishenko S P, Sykes L R, et al., 1979. Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries. *Pure Appl Geophys*, **117**: 1 028~1 147
- Nishenko S P, 1985. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal. *J Geophys Res*, **90**: 3 589~3 615
- Nishenko S P, Buland R, 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting. *Bull Seism Soc Amer*, **77**: 1 382~1 399
- Nishenko S P, Singh S K, 1987. Conditional probabilities for the recurrence of large and great inter-plate earthquakes along the Mexican Subduction zone. *Bull Seism Soc Amer*, **77**: 2 094~2 114
- Sykes L R, Nishenko S P, 1984. Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for San Andreas, San Jacinto and Imperial fault, California, 1983~2003. *J Geophys Res*, **89**: 5 905~5 927
- Working group on California earthquake probabilities, 1988. Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. *U S Geol Surv Open File Rep*, 88~398
- Working group on California earthquake probabilities, 1990. Probabilities of large earthquakes in the San Francisco Bay region. *U S Geol Surv Circular* 1035, 1~35