

惠春, 潘华, 郭星, 李金臣, 郎从. 2018. 运用古地震数据分析布朗过程时间模型中强震复发间隔变异系数. 地震学报, 40(2): 241–253. doi: 10.11939/jass.20170146.

Hui C, Pan H, Guo X, Li J C, Lang C. 2018. Aperiodicity parameters of reoccurrence intervals of large earthquakes in the Brownian passage time model based on paleo-earthquake data. *Acta Seismologica Sinica*, 40(2): 241–253. doi: 10.11939/jass.20170146.

## 运用古地震数据分析布朗过程时间模型中 强震复发间隔变异系数\*

惠 春<sup>1)</sup> 潘 华<sup>1),†</sup> 郭 星<sup>2)</sup> 李金臣<sup>1)</sup> 郎 从<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100082 环境保护部核与辐射安全中心

**摘要** 在我国大陆广泛搜集到的 45 个地震序列的基础上, 首先利用最大似然估计法计算出不同样本量地震序列的变异系数值, 然后与其对应的断层源参数作相关性分析, 并对具有不同样本量地震序列中的变异系数值进行标准化处理, 进而计算得到一个通用的变异系数值( $\alpha_c=0.37$ ). 相关分析结果显示变异系数值与断层的长度和滑移速率呈负相关, 在此基础上本文对通用变异系数值( $\alpha_c=0.37$ )的应用进行了分析, 通过对  $\alpha_c$  进行一倍标准差运算得到 3 个变异系数值(0.21, 0.37, 0.53), 分别适用于特征性具有明显差异的活动断层.

**关键词** 复发间隔 变异系数 相关性 标准化

doi: 10.11939/jass.20170146 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Aperiodicity parameters of reoccurrence intervals of large earthquakes in the Brownian passage time model based on paleo-earthquake data

Hui Chun<sup>1)</sup> Pan Hua<sup>1),†</sup> Guo Xing<sup>2)</sup> Li Jinchen<sup>1)</sup> Lang Cong<sup>1)</sup>

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environment Protection, Beijing 100082, China*

**Abstract:** Based on the 45 seismic sequences collected in Chinese mainland, the maximum likelihood estimation method is used to calculate the variation coefficient of earthquake sequences with different sample size, and the correlativities with the parameters of the corresponding fault source are carried out, and then the estimated values are standardized. Finally, a general value  $\alpha_c=0.37$  of aperiodicity is given. The results of the correlation analysis show that the variation coefficient is negatively correlated with the length of the fault and the horizontal slip rate, so the application of the general aperiodicity value ( $\alpha_c=0.37$ ) is analyzed. The result show that the three  $\alpha$  values (0.21, 0.37, 0.53) obtained by performing standard deviation operation to  $\alpha_c$  are applied to the active faults with significantly differences in characteristics.

\* 基金项目 国家科技支撑项目(2012BAK15B01-08)资助.  
收稿日期 2017-07-12 收到初稿, 2017-08-28 决定采用修改稿.  
† 通信作者 E-mail: panhua.mail@163.com



**Key words:** recurrence interval; aperiodicity parameter; correlation; normalization

引言

依据 Reid (1910) 提出的弹性回跳理论, 断层源上强震的复发满足准周期性模型. 我国的海原断裂带、可可托海—二台断裂带、鲜水河断裂带、小江断裂带的古地震和历史地震资料均显示出强震的周期性复发行为, 因此特征地震的复发行为是普遍的(宋方敏等, 1998). 特征地震具有原地复发、震级相近、位错和破裂尺度大致相同的特点(Schwartz, Coppersmith, 1984). 现如今特征地震和准周期复发模型是活动断裂强震危险性评价的重要理论基础. 然而, 大多数活动断裂上地震的复发间隔并不满足准周期性, 而是表现为复发间隔的变化. 从本文搜集到的 45 条活动断层古地震复发间隔的统计来看, 经无量纲标准化处理(间隔/均值)的复发间隔分布在 0.26—2.95 之间, 具有较大的不确定性, 但是复发间隔数据的分布又大致满足正态分布(图 1). 这一统计结果与前人的统计结果是一致的(Nishenko, Buland, 1987). 可见, 大型活动断裂上强震的复发行为介于完美周期性与完全随机性之间, 为此, 概率方法被用于当前活动断裂未来强震危险性的评价, 诸如正态分布、对数正态分布、伽玛(Gamma)分布、韦伯(Weibell)分布等多种概率分布模型被用于表达强震复发间隔的概率分布特征, 其

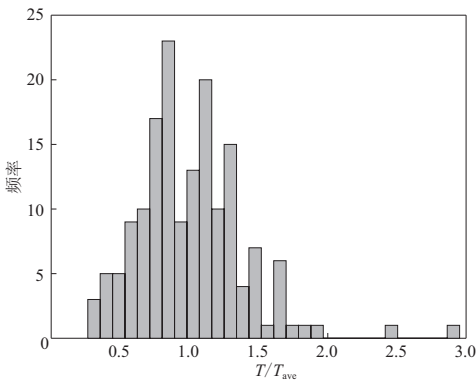


图 1 古地震复发间隔  $T/T_{ave}$  直方图

Fig. 1 The  $T/T_{ave}$  histogram of the recurrence interval for paleo-earthquake events

中, 考虑随机扰动的布朗过程时间(Brownian passage time, 简称为 BPT)模型是 Ellsworth 等 (1999) 和 Matthews 等 (2002) 在弹性回跳理论基础上提出的具有一定内在物理基础的强震复发模型, 该模型随着美国加州地震概率工作组 (Working Group on California Earthquake Probabilities, 简称为 WGCEP) 在对加州地区未来 30 年强震发生概率评价工作中的使用(WGCEP, 1999)逐步得到广泛重视; WGCEP (2003, 2007) 在其后续工作中时间相关的地震复发模型更是只采用 BPT 模型, 而放弃了其它模型, BPT 模型因而成为用于断层强震复发概率评估最重要的模型.

强震概率危险性评估假定某条大型活动断裂复发间隔的概率密度分布函数为  $f(t)$ , 前一次地震发生至今的时间为离逝时间  $T_e$ , 则该断裂上未来时段  $\Delta T$  内发生强震的概率  $P$  随着  $T_e$  而变化, 表示为 (Wesnousky, 1986)

$$P(T_e, \Delta T) = \frac{\int_{T_e}^{T_e + \Delta T} f(t) dt}{1 - \int_0^{T_e} f(t) dt}. \tag{1}$$

BPT 模型认为断层构造应力(或地震矩)在加载过程中会受到一些随机事件的干扰, 整个过程表现为一种稳定加载附加布朗扰动的随机过程. 复发间隔数据服从双参数的逆高斯分布, 其概率密度函数为

$$f(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^3 t^3}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\alpha^2 \mu t}\right], \tag{2}$$

式中:  $\mu$  为断层上强震的平均复发间隔;  $\alpha$  为平均复发间隔变异系数, 即  $\alpha$  越大表示随机干扰

对复发间隔的周期性影响越大,  $\alpha$  越小表示随机干扰越少, 周期性越明显. 一个完全没有随机干扰的规则地震序列的复发间隔变异系数  $\alpha$  为 0.

可见, 活动断裂的强震复发间隔变异系数  $\alpha$  是未来强震危险性评估的一个重要参数, 对评价结果具有重要的影响. 一般而言, 复发间隔均值可采用现有间隔时间数据近似替代, 而变异系数是不确定性的反映, 必须通过一定量数据的统计分析才能得到可靠的评估结果, 然而, 大多数断裂上强震数据均比较稀少, 无法得到较为可靠的变异系数值的统计结果. 解决该问题的现有主流方法是, 利用较大区域范围内不同断裂的复发间隔资料来统计分析强震复发间隔的分布规律, 得到“通用”的变异系数值并将其用于单条断层上复发间隔概率分布的表述. Ellsworth 等(1999)首先利用环太平洋地区的 37 个重复发生的地震序列来估计每个序列的复发间隔变异系数  $\alpha$ , 这些地震序列的震级范围为  $M0.7-9.2$ , 每个序列中的地震事件为 3—13 个(平均每个序列有 6 个地震事件), 这些地震序列所处的地震构造条件大不相同. 为了解决  $\alpha$  值偏小的问题, 他们利用每个地震序列中实际地震事件的数目模拟生成对应于不同值的地震序列集, 然后用与实际观测地震序列中估计  $\alpha$  值同样的计算过程估计合成地震序列的  $\alpha$  值, 其结果显示当  $\alpha=0.5$  时所合成的地震序列的变异系数与实际观测地震序列分布的一致性最好. 这一通用变异系数值可应用于大多数基于 BPT 模型的强震概率危险性评价中.

然而 Ellsworth 等(1999)的研究在合成地震序列的过程中并未考虑实测地震序列的  $\alpha$  值与其地震事件数目的对应关系, 针对这一问题, 郭星和潘华(2015)利用蒙特卡洛方法对地震序列中不同样本量统计得到的  $\alpha$  值与真实值的偏差进行了定量化研究, 最终也得到一个通用的变异系数值  $\alpha=0.34$ . 该值考虑了不同复发间隔数据序列样本量的多寡对于统计可靠性的影响差异.

通用变异系数值较好地解决了单条断层样本量不足无法得到变异系数值的问题, 但是所有活动断层选择一个通用的变异系数值, 尽管能够满足单条断层强震复发概率模型的构建需求, 但却无法体现断裂复发行为的差异性. 实际上, 断裂复发行为呈现如此大的不确定性, 正是断裂活动的差异性所致, 不同断裂活动的运动学和动力学特性往往具有很大差异, 不同活动断裂的地震构造条件及其与周边活动断层的交互影响也大不相同. 忽略这些具体构造条件, 无疑会对强震概率危险性评价的合理性产生影响.

为此, 本文拟针对通用变异系数在具体断裂复发间隔概率分布模型中的合理应用进行研究和探讨, 以期在联合断裂样本解决通用变异系数统计问题的同时, 寻找更为合理地应用通用变异系数解决具体断裂构造复发行为差异表述的可行途径, 改进断裂强震危险性概率评价.

## 1 复发间隔变异系数的计算

### 1.1 数据选择

在复发间隔变异系数的估算过程中, 若某条断层上的历史地震(或古地震)数据很多, 则可以利用统计方法得到该条断层的变异系数; 但实际上, 在地震序列的选择过程中, 地震序列中地震事件的数目往往都比较少, 一般来说, 对于包含 3 个或 3 个以上的地震事件的地震序列, 我们才可以同时估计其复发间隔均值和变异系数. Ellsworth 等(1999)选取了震级范围为  $M0.7-9.2$  的 37 个地震序列, 其中包含一些中小震级的地震. 郭星和潘华(2015)的研究则剔除了 Ellsworth 等(1999)样本集中的小震序列, 同时还增加了一些我国的板内强震序列.

为减少地震序列之间的差异,同时考虑到中小地震受周围地震活动的影响较大,本文选取了我国 45 个板内强震序列,每个序列的地震事件均不少于 3 个,具体资料列于表 1.

表 1 45 条活动断裂带的古地震数据资料及其变异系数

Table 1 Paleo-earthquake data of 45 active faults and corresponding aperiodicity parameters								
编号	断层分段	平均复发 间隔 $\mu$	归一化 $T_i/\mu$	变异系 数 $\alpha_i$	断层长 度/km	滑移速率 $\dot{\epsilon}/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	断层类型	参考文献
$F_1$	西秦岭北缘断裂鸳鸯凤段	3 922	1.274 9	0.30	75	1.89	左旋走滑	滕瑞增等(1994), 张波(2012)
			0.637 4					
			1.087 7					
$F_2$	西秦岭北缘断裂黄香沟段	2 463	1.457 3	0.26	72	2.3	左旋走滑	
			1.165 1					
			0.759 9					
$F_3$	海原断裂带南、西华山段	1 06 0	0.860 5	0.43	73	4.74	左旋走滑	张培震等(2003)
			0.757 1					
			0.754 7					
$F_4$	海原断裂带哈思山— 马厂山段(西段)	1 927	0.669 8	0.13	100	5.00	左旋走滑	
			0.575 5					
			1.707 5					
$F_5$	榆木山北缘断裂西段	2 177	1.292 5	0.37	50	1.50	逆断层	陈柏林等(2007), 金卿等(2011)
			1.131 5					
			1.043 3					
$F_6$	榆木山东缘断裂上龙王段	3 350	0.8253	0.48	25	1.10	逆断层	邹谨敞等(1993)
			0.643 2					
			1.516 1					
$F_7$	皇城—双塔断裂上寺段	3 808	1.432 8	0.13	36	2.10	逆断层	王永成和刘百篪 (2001)
			0.567 2					
			0.871 1					
$F_8$	昌马断裂	3 101	1.260 9	0.23	60	2.71	左旋走滑	康来迅(1986), 罗浩等(2013)
			0.722 3					
			1.016 4					
$F_9$	肃南断层中段	750	0.693 3	0.32	80	3.00	逆断层	刘百篪等(2008)
			1.306 7					
			1.375 4					
$F_{10}$	冷龙岭断裂西段	1 364	0.843 1	0.21	69	4.09	左旋走滑	李正芳等(2012)
			0.982 4					
			0.799 1					
$F_{11}$	鄂拉山断裂	2 475	1.010 1	0.37	207	2.23	右旋走滑	袁道阳等(2004)
			1.616 2					
			0.767 7					
$F_{12}$	罗山东麓断裂	2 584	0.606 1	0.28	60		右旋走滑	闵伟等(1993)
			1.238 4					
			0.657 9					
$F_{13}$	老虎山毛毛山断裂 (老虎山段)	1 150	1.103 3	0.24	78	4.82	左旋走滑	刘小凤等(1994)
			1.321 8					
			0.852 1					
			0.826 1					
			1.043 5					
			0.913 0					
			1.043 5					

续表 1

编号	断层分段	平均复发 间隔 $\mu$	归一化 $T/\mu$	变异系 数 $\alpha_i$	断层长 度/km	滑移速率 /(mm·a <sup>-1</sup> )	断层类型	参考文献
$F_{14}$	老虎山毛毛山断裂 (毛毛山段)	1 800	1.333 3	0.23	51	3.08	左旋走滑	刘小凤等(1994)
			0.888 9					
			0.722 2					
			1.055 6					
$F_{15}$	天桥沟—黄羊川断裂 (天桥沟段)	4 603	1.390 4	0.39	45	2.10	走滑+逆冲	郑文俊等(2004)
			0.977 6					
			0.673 5					
			0.738 6					
$F_{16}$	中卫同心断裂 大泉水—孤山子段(西段)	4 059	1.129 3	0.13	60	3.00	走滑+逆冲	闵伟等(2001)
			0.870 9					
			1.070 3					
			0.727 5					
$F_{17}$	中卫同心断裂 西梁头—双井子段(中段)	4 283	1.202 2	0.22	55	3.58	走滑+逆冲	
$F_{18}$	阿尔金断裂带 安迪尔河—车尔臣河段	1 153	0.902 0	0.35	330	9.50	走滑断层	国家地震局阿尔 金活动断裂带课 题组(1992)
			1.459 7					
			0.637 5					
$F_{19}$	阿尔金断裂带 索尔库里—阿克塞段	1 490	1.409 4	0.45	380	2.80	左旋走滑	
			0.590 6					
$F_{20}$	阿尔金断裂带 肃北—宽滩山段	5 005	1.204 8	0.24	260	1.95	左旋走滑	
			0.795 2					
$F_{21}$	怀涿盆地北缘断裂南段	5 120	1.074 2	0.49	58	0.47	正断层	冉永康等(1992)
			1.660 2					
			1.171 9					
			0.664 0					
$F_{22}$	玛多—甘德断裂甘德段	1 200	0.429 7	0.17	50	7.38	左旋走滑	熊仁伟等(2010)
			0.833 3					
			1.166 7					
$F_{23}$	东昆仑山断裂带库赛湖段	3 522	1.115 8	0.14	180	13.00	左旋走滑	
			0.910 0					
			0.787 9					
			1.094 5					
$F_{24}$	东昆仑山断裂带西大滩段	3 333	1.092 0	0.44	250	10.50	左旋走滑	
			1.200 1					
			1.290 1					
			0.510 1					
$F_{25}$	东昆仑山断裂带玛沁段	1 724	1.210 7	0.60	200	12.00	左旋走滑	李正芳等(2012)
			0.504 6					
			2.451 6					
			0.878 3					
$F_{26}$	东昆仑山断裂带玛曲段	1 964	0.595 5	0.75	200	12.00	左旋走滑	
			2.953 2					
			0.784 1					
			1.463 3					
			0.432 8					
			1.021 4					
			0.264 8					

续表 1

编号	断层分段	平均复发 间隔 $\mu$	归一化 $T_i/\mu$	变异系 数 $\alpha_i$	断层长 度/km	滑移速率 /(mm·a <sup>-1</sup> )	断层类型	参考文献
$F_{27}$	延矾盆地北缘断裂南段	5 412	0.942 4	0.35	45	0.37	正断层	国家地震局地质 研究所延怀课题 组(1995)
			1.293 4					
			1.293 4					
			0.591 3					
			0.609 8					
$F_{28}$	黄河—灵武断裂灵武段	5 250	1.269 8	0.46	48		正断层	柴炽章等(2001)
			1.333 3					
			1.333 3					
			0.457 1					
			0.876 2					
$F_{29}$	贺兰山东麓断裂	2 710	0.996 3	0.12	88		正断层	杜鹏等(2009)
			1.143 9					
			0.859 4					
$F_{30}$	华山山前断裂	1 766	1.070 2	0.21		1.86	正断层	刘静和汪良谋 (1996)
			0.770 1					
			0.849 3					
			1.309 7					
$F_{31}$	大青山山前断裂土右旗西段	2 290	0.676 4	0.61	35		正断层	
			1.841 0					
			0.390 1					
			1.091 3					
$F_{32}$	大青山山前断裂左旗土西段	2 948	0.855 9	0.37	56	4.75—6.46	正断层	冉永康等(2003)
			0.634 7					
			1.509 2					
$F_{33}$	大青山山前断裂呼和浩特段	2 460	0.745 9	0.15	46	2.40—3.50	正断层	
			0.957 7					
			1.130 1					
			0.957 3					
			1.071 1					
$F_{34}$	托莱山断裂硫磺沟— 油葫芦段(东段)	4 200	1.138 2	0.75			逆断层	国家地震局地质 研究所和国家地 震局兰州地震研 究所(1993)
			1.597 6					
$F_{35}$	色尔腾山山前断裂	814	0.402 4	0.59	150		正断层	陈立春(2002)
			1.117 9					
			0.737 1					
			0.270 3					
			0.884 5					
			1.142 5					
$F_{36}$	乌拉山山前断裂	1 346	1.689 2	0.53	110		正断层	
			1.154 8					
			0.869 2					
			0.951 0					
			1.341 0					
			0.360 3					
			1.478 5					

续表 1

编号	断层分段	平均复发 间隔 $\mu$	归一化 $T_i/\mu$	变异系 数 $\alpha_i$	断层长 度/km	滑移速率 /(mm·a <sup>-1</sup> )	断层类型	参考文献
$F_{37}$	则木河断裂带(扯扯街段)	2 657	1.130 2 0.869 4	0.13	85	7.29	左旋走滑	任治坤(2007), 王虎等(2014)
$F_{38}$	延庆盆地北缘断裂韩方段	4 846	0.794 5 1.133 9 0.806 0 1.265 6	0.21			正断层	陈立春(2002)
$F_{39}$	安宁河断裂带(南段)	569	1.268 9 0.7311	0.28	75	6.50	左旋走滑	王虎等(2014), 冉永康等(2008)
$F_{40}$	安宁河断裂带紫 马跨一段(北段)	635	1.181 1 0.818 9	0.18	55	4.00	左旋走滑	冉永康等(2008)
$F_{41}$	安宁河断裂带大海子— 干海子段(北段)	1 721	0.884 6 1.1154	0.12	50	4.00	左旋走滑	
$F_{42}$	西南天山东柯坪塔格	5 950	0.873 9 1.1261	0.13	85		逆断层	李安等(2011)
$F_{43}$	西南天山萨尔干塔格	5 100	1.176 5 0.823 5	0.18	55		逆断层	
$F_{44}$	天山北麓独山子—安集海 断裂带	3 143	0.445 5 0.286 3 0.477 3 0.540 9 1.686 4 1.654 5 1.909 1	0.79	110	1.80	逆断层	杨晓平等(2011)
$F_{45}$	龙门山断裂带中段	3 120	0.953 5 1.057 7	0.25	140	1.30	逆断层	冉永康等(2012), 梁明剑等(2016)

1.2 统计计算

根据最大似然估计法, 平均复发间隔  $\mu$  和相邻地震事件间隔的变异系数  $\alpha$  为

$$\mu=E[T_i],$$

(3)

$$\alpha_i^2=\mu E\left[\frac{1}{T_i}\right]-1,$$

(4)

式中,  $T_i$  为每个地震序列中相邻地震事件的时间间隔, 大部分相邻古地震事件的时间间隔均会有一些不确定性. 表 1 中所有断层源的  $T_i$  取值为复发间隔不确定性的中值. 利用上式计算得到地震序列的  $\alpha_i$  值处于 0.12—0.79 的范围内, 如图 2 所示.

首先按样本量对不同地震序列的  $\alpha_i$  进行分组, 然后进行均值标准化处理得到  $\alpha_j$ , 标准差为 0.16, 最后对具有相同样本量的不同地震序列的样本数  $N_j$  统计加权平均, 即可得到通用的变异系数值  $\alpha_c$ ,

$$\alpha_c^2=\frac{\alpha_1^2N_1+\alpha_2^2N_2+\cdots+\alpha_j^2N_j}{N_1+N_2+\cdots+N_j}.$$

(5)

通过搜集到的我国大陆内 45 条断裂上的古地震序列, 由上式计算得到一个通用的变异系数  $\alpha_c$  约为 0.37, 该值接近于郭星和潘华(2015)所得的通用变异系数值 0.34, 而小于 Ellsworth 等(1999)所取的 0.5, 这说明去掉小地震序列, 只分析强震序列时的变异系数偏小, 即强震



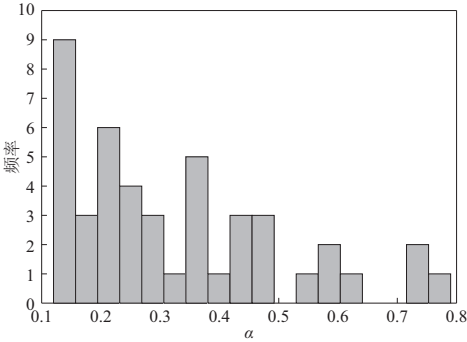


图 2 复发间隔变异系数  $\alpha$  的频率直方图  
Fig. 2 Frequency histogram for aperiodicity parameter  $\alpha$  of the recurrence interval

的特征性和周期性更明显。

2 变异系数与断层参数的相关性

变异系数反映的是强震复发间隔的非周期性，其产生原因主要是地震孕育过程中所受到的各种随机干扰。不同断层源的地震构造条件以及所受到的随机干扰并不相同，其强震复发间隔变异系数也应该不同。但囿于缺乏数据，统计确定每条断层的复发间隔变异系数不可能实现，因此，本文探讨是否可以将断裂进行适当的划分，并基于此考察变异系数是否存在变化的趋势与规律，据此改善断裂复发间隔概率分布模型。

鉴于本文所搜集到的 45 条断层上发生的地震序列的断层源参数之间差异很大，下面将讨论变异系数  $\alpha$  与活动断层参数(长度、类型、滑动速率)之间的关系，其中断层长度被认为与发震断层的厚度有关，而断层类型和滑动速率与断层破裂过程中的运动形式有关。

引入皮尔逊(Pearson)相关系数来表述变量之间的相关性，皮尔逊相关系数由两个变量的协方差除以两个变量的标准差得到。由协方差和标准差的定义可知，皮尔逊系数介于-1 与 1 之间，当两个变量的线性关系增强时，相关系数趋于 1 或-1；当一个变量增大，另一个变量也增大时，表明二者之间是正相关，相关系数大于 0；当一个变量增大，另一个变量却减小，表明二者之间是负相关，相关系数小于 0；若相关系数等于 0，表明它们之间不存在线性相关关系。

变异系数  $\alpha$  与对应断层源长度  $l$  之间的皮尔逊相关系数  $r_{\alpha l}$  为

$$r_{\alpha l} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})(l_i - \bar{l})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}}, \tag{6}$$

式中， $n$  为  $\alpha$  和  $l$  的样本量。为了避免可能存在的异常值对统计结果的影响，本文对  $n$  个数据的原始数据重新采样， $n$  次采样每次取  $n-1$  个子样本，这样对子样本的统计学处理结果比从完整的数据集计算得到的统计学参数(平均值、标准差、相关系数)能更好地反映数据集的总体特征信息。本文对数据进行 1 000 次重采样的结果显示，重采样数据的皮尔逊相关系数呈明显的高斯分布，取其平均值得到变异系数  $\alpha$  与断层长度  $l$  的皮尔逊相关系数，其有效估计仅为 0.251 6，即对本文搜集到的我国大陆内 45 条断裂上的古地震序列进行分析的结果是变异系数  $\alpha$  与断层长度之间无明显的相关关系(图 3)，同样可能由于不同断层类型的数据偏少，断层类型与变异系数  $\alpha$  之间也未呈明显的相关性，如图 4 所示。

为了更加准确地评估  $\alpha$  与断层参数之间的相关关系，本文对我国大陆内 45 条断裂上的古地震序列分析可知，其中 30 条断层的长度集中在 100 km 以内。由于本文所统计的断层长度侧重于表示活动断层可以孕育大地震的发震断层，而非大地震发生后断层破裂的整体长度，且长度大于 100 km 的活动断层数据量较少；再考虑到活动断层的研究程度，本文按照上述方法对断层的长度集中于 100 km 以内的地震序列作相同的相关性检验，得到变异系数  $\alpha$



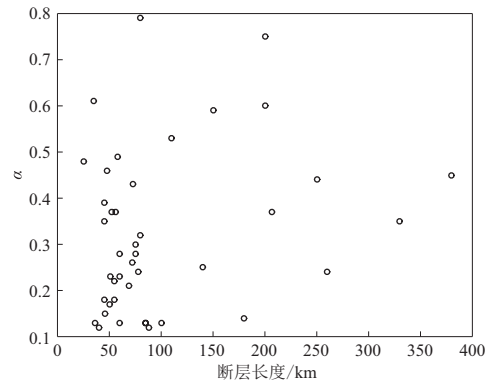


图 3 断层长度  $l$  与变异系数  $\alpha$  之间的关系  
Fig. 3 Relation between fault length  $l$

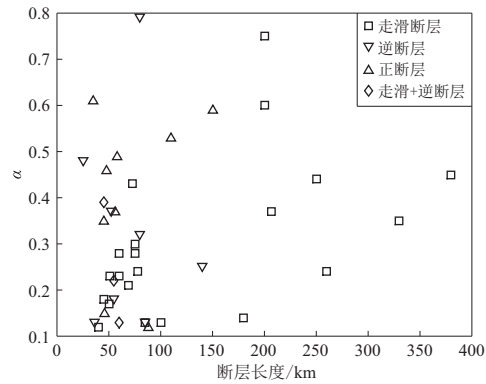


图 4 断层类型与变异系数  $\alpha$  之间的关系  
Fig. 4 Relation between fault type

与断层长度  $l$  的皮尔逊相关系数的有效估计为  $-0.418\ 2$ , 显示为负相关, 为中等程度相关 (图 5). 同理可得到变异系数  $\alpha$  与断层滑移速率  $v$  的皮尔逊相关系数的有效估计为  $-0.4736$ , 显示为负相关, 也为中等程度相关 (图 6), 这表明随着断层滑移速率和长度的增大, 变异系数  $\alpha$  有减小的趋势, 这也符合 Wesnousky (1986) 的断层演化模型: 长距离和高滑移速率的活动断层, 其断层线比较平滑, 即活动断层的“成熟程度”较高, 强震复发的特征性和周期性较稳定.

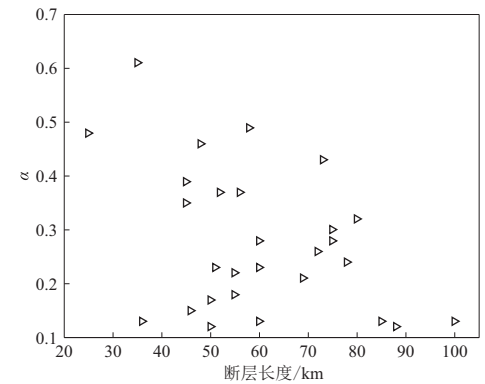


图 5 断层长度 ( $\leq 100\text{ km}$ ) 与变异系数  $\alpha$  之间的关系  
Fig. 5 Relation between fault length ( $\leq 100\text{ km}$ ) and aperiodicity parameter  $\alpha$

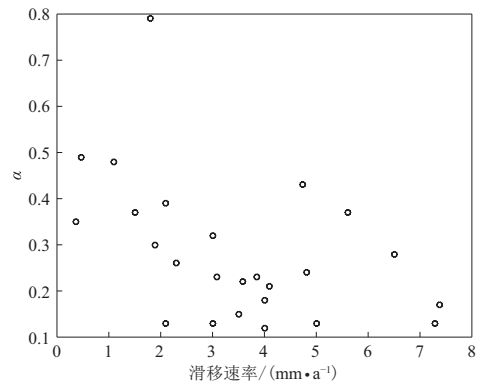


图 6 断层滑移速率与变异系数  $\alpha$  之间的关系  
Fig. 6 Relation between horizontal sliding rate and aperiodicity parameter  $\alpha$

为解决单个断层源上重复发生地震的历史数据稀少的问题而假定所有断层源上的强震复发间隔具有一个相同的变异系数, 显然缺乏可靠的科学依据, 所以加州概率工作组 (WGCEP, 2003) 在使用 Ellsworth 等 (1999) 统计得到的变异系数通用值 ( $\alpha=0.5$ ) 时, 采用对不同  $\alpha$  进行加权平均, 即  $\alpha$  (权值) 为  $0.3\ (0.2)$ ,  $0.5\ (0.5)$ ,  $0.7\ (0.3)$ ; 但由于该办法没有明确的物理意义, 其效果实际上与取通用值 ( $\alpha=0.5$ ) 几乎没有差别. 根据本文的上述分析, 考虑在对活动断层作概率地震危险性评估时, 对变异系数进行适当的调整. 本文提出利用上述计算得到变异系数  $\alpha_j$  的标准差, 对通用变异系数  $\alpha_c=0.37$  作一倍标准差 ( $0.16$ ) 运算, 将其应用

于具有巨大差异的地震序列. 具体而言, 当活动断层的“成熟程度”较高, 即强震复发的特征性和周期性较稳定时, 选择对  $\alpha_c$  少一倍标准差 ( $0.37-0.16=0.21$ ) 作为通用变异系数; 当活动断层的“成熟程度”相对较高, 即强震复发的特征性和周期性相对较稳定时, 选择  $\alpha_c=0.37$  作为通用变异系数; 当活动断层的“成熟程度”不高, 即强震复发的特征性和周期性一般时, 选择对  $\alpha_c$  多一倍标准差 ( $0.37+0.16=0.53$ ) 作为通用变异系数.

### 3 讨论与结论

本文广泛搜集了我国大陆内 45 个原地复发或准周期的古地震序列, 利用最大似然估计方法确定了每个地震序列的变异系数  $\alpha$  值, 并将具有不同样本量的地震序列的  $\alpha$  值进行标准化处理, 进而计算得到一个通用的变异系数  $\alpha_c$  约为 0.37. 同时对 45 条活动断层的参数与变异系数  $\alpha$  进行相关性分析, 其结果显示  $\alpha$  值与断层长度和类型并无明显的相关性. 但考虑到长度大于 100 km 活动断层的地震数据量过小, 进一步分析了长度在 100 km 以内的 30 条活动断层的地震序列, 结果显示  $\alpha$  值与断层长度和水平滑移速率呈负相关.

根据上述结论, 本文利用经均值标准化的变异系数  $\alpha_j$ , 对通用变异系数 ( $\alpha_c=0.37$ ) 作一倍标准差运算, 并提出以下建议: ① 若所评估断层的特征性很明显, 断层活动受外界干扰很小, 可以选择  $\alpha_c$  少一倍标准差 ( $\alpha_c=0.21$ ) 作为通用变异系数; ② 若所评估断层的特征性相对明显, 断层受周边地质构造影响不是很清楚, 可以选择  $\alpha_c=0.37$  作为通用变异系数; ③ 若所评估断层的特征性一般, 周边有其它多条活动断层及其它外界干扰, 可以选择  $\alpha_c$  多一倍标准差 ( $\alpha_c=0.53$ ) 作为通用变异系数. 但实际应用中对活动断层的分类以及变异系数的选择, 还需要进一步研究.

### 参 考 文 献

- 陈柏林, 王春宇, 宫红良, 刘建民, 张永双, 刘建生. 2007. 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[J]. 地质通报, 26(8): 976-983.
- Chen B L, Wang C Y, Gong H L, Liu J M, Zhang Y S, Liu J S. 2007. A new understanding of the characteristics of Late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 976-983 (in Chinese).
- 陈立春. 2002. 河套断陷带的古地震、强震复发规律和未来可能强震地点[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 16-48.
- Chen L C. 2002. *Paleoearthquake, the Law of Strong Earthquake Recurrence and Potential Sites for the Occurrence of Future Strong Earthquakes in the Hetao Fault-Depression Zone*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 16-48 (in Chinese).
- 柴炽章, 廖玉华, 张文孝, 许文俊, 申旭辉, 田勤俭. 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.
- Chai C Z, Liao Y H, Zhang W X, Xu W J, Shen X H, Tian Q J. 2001. Late Quaternary paleoearthquakes and their rupture features along the Lingwu fault[J]. *Seismology and Geology*, 23(1): 15-23 (in Chinese).
- 杜鹏, 柴炽章, 廖玉华, 宋方敏, 孟广魁, 雷启云, 王银. 2009. 贺兰山东麓断裂南段套门沟一榆树沟段全新世活动与古地震[J]. 地震地质, 31(2): 256-264.
- Du P, Chai C Z, Liao Y H, Song F M, Meng G K, Lei Q Y, Wang Y. 2009. Study on Holocene activity of the south segment of the eastern piedmont fault of Helan mountains between Taomengou and Yushugou[J]. *Seismology and Geology*, 31(2): 256-264 (in Chinese).
- 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组. 1992. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社: 42-47.
- Research Group of Altun Active Fault Zone, State Seismological Bureau. 1992. *Altun Active Fault Zone*[M]. Beijing: Seismological Press: 42-47 (in Chinese).

- 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 1993. 祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社: 25–29.
- Institute of Geology, State Seismological Bureau, Lanzhou Institute of Seismology, State Seismological Bureau. 1993. *The Qilian Mountain-Hexi Corridor Active Fault System*[M]. Beijing: Seismological Press: 25–29 (in Chinese).
- 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[M]. 北京: 地震出版社: 53–59.
- Research Group of Yanhuai Active Fault Zone, Institute of Geology, State Seismological Bureau. 1995. *Activity Fault and Strong Earthquake Hazard in Yanhuai Basin*[M]. Beijing: Seismological Press: 53–59 (in Chinese).
- 郭星, 潘华. 2015. 强震复发间隔变异系数的一种计算方法[J]. 地震学报, 37(3): 411–419.
- Guo X, Pan H. 2015. A method for computing the aperiodicity parameter of the strong earthquake recurrence interval[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 411–419 (in Chinese).
- 金卿, 何文贵, 史志刚, 袁道阳. 2011. 榆木山北缘断裂古地震特征研究[J]. 地震地质, 33(2): 347–355.
- Jin Q, He W G, Shi Z G, Yuan D Y. 2011. Palaeo-earthquake study on the northern Yumushan active fault[J]. *Seismology and Geology*, 33(2): 347–355 (in Chinese).
- 康来迅. 1986. 昌马断裂带古地震的探讨[J]. 地震学刊, (4): 16–22.
- Kang L X. 1986. Study of paleo-earthquakes in Changma fault zone[J]. *Journal of Seismology*, (4): 16–22 (in Chinese).
- 李安, 冉勇康, 徐良鑫, 刘华国, 李彦宝. 2011. 西南天山东柯坪推覆系古地震初步研究[J]. 地震地质, 33(4): 752–764.
- Li A, Ran Y K, Xu L X, Liu H G, Li Y B. 2011. A preliminary study on paleoearthquakes in the eastern Kalpin nappe system, southwestern Tianshan, China[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 752–764 (in Chinese).
- 李正芳, 周本刚, 冉洪流. 2012. 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[J]. 地球物理学报, 55(9): 3051–3065.
- Li Z F, Zhou B G, Ran H L. 2012. Strong earthquake risk assessment of eastern segment on the East Kunlun fault in the next 100 years based on paleo-earthquake data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(9): 3021–3065.
- 梁明剑, 陈立春, 冉勇康, 王虎, 李东雨. 2016. 龙门山断裂南段天全段的新活动特征与 1327 年天全地震的关系[J]. 地震地质, 38(3): 546–559.
- Liang M J, Chen L C, Ran Y K, Wang H, Li D Y. 2016. The discussion for the new activity of the Tianquan segment of Longmenshan fault zone and its relationship to the 1327 Tianquan earthquake, Sichuan[J]. *Seismology and Geology*, 38(3): 546–559 (in Chinese).
- 刘百麓, 曹娟娟, 袁道阳, 何文贵. 2008. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料[J]. 地震地质, 30(1): 161–175.
- Liu B C, Cao J J, Yuan D Y, He W G. 2008. Quantitative data of active faults within the active tectonic block in North Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Seismology and Geology*, 30(1): 161–175 (in Chinese).
- 刘静, 汪良谋. 1996. 运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性[J]. 地震学报, 18(4): 427–436.
- Liu J, Wang L M. 1996. Using active fault data to evaluate long-term earthquake risk in Fen-Wei earthquake zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 18(4): 427–436 (in Chinese).
- 刘小凤, 刘百麓, 吕太乙. 1994. 老虎山活动断裂研究[J]. 华南地震, 14(4): 9–16.
- Liu X F, Liu B C, Lü T Y. 1994. The research on the Laohushan active fault[J]. *South China Journal of Seismology*, 14(4): 9–16 (in Chinese).
- 罗浩, 何文贵, 王定伟, 袁道阳, 邵延秀. 2013. 祁连山昌马断裂晚更新世滑动速率[J]. 地震地质, 35(4): 765–777.
- Luo H, He W G, Wang D W, Yuan D Y, Shao Y X. 2013. Study on the slip rate of Changma fault in Qilian mountains since Late Pleistocene[J]. *Seismology and Geology*, 35(4): 765–777 (in Chinese).
- 闵伟, 张培震, 邓起东. 2001. 中卫—同心断裂带全新世古地震研究[J]. 地震地质, 23(3): 357–366.
- Min W, Zhang P Z, Deng Q D. 2001. Study of Holocene paleoearthquakes on Zhongwei-Tongxin fault zone[J]. *Seismology and Geology*, 23(3): 357–366 (in Chinese).
- 闵伟, 柴炽章, 王萍, 杨平. 1993. 罗山东麓断裂全新世古地震研究[J]. 高原地震, 5(4): 97–102.
- Min W, Chai C Z, Wang P, Yang P. 1993. The study on the paleoearthquakes on the eastern piedmont fault of the Luoshan mountains in Holocene[J]. *Earthquake Research in Plateau*, 5(4): 97–102 (in Chinese).
- 冉勇康, 方仲景, 李志义, 王景铎, 李如成. 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[J]. 中国地震, 8(3): 76–85.

- Ran Y K, Fang Z J, Li Z Y, Wang J B, Li R C. 1992. Paleoseismicity and segmentation along the active fault at the north boundary of Huailai-Zhuolu basin, Hebei Province[J]. *Earthquake Research in China*, **8**(3): 76–85 (in Chinese).
- 冉勇康, 张培震, 陈立春. 2003. 河套断陷带大青山山前断裂晚第四纪地震完整性研究[J]. 地学前缘, **10**(增刊1): 207–216.
- Ran Y K, Zhang P Z, Chen L C. 2003. Research on the completeness of paleoseismic activity history since Late Quaternary along the Daqingshan piedmont fault in Hetao depression zone, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(S1): 207–216 (in Chinese).
- 冉勇康, 陈立春, 程建武, 宫会玲. 2008. 安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为[J]. 中国科学: D辑, **38**(5): 543–554.
- Ran Y K, Chen L C, Cheng J W, Gong H L. 2008. Late Quaternary surface deformation and rupture behavior of strong earthquake on the segment north of Mianning of the Anninghe fault[J]. *Science in China: Series D*, **51**(9): 1224–1237.
- 冉勇康, 陈文山, 徐锡伟, 杨志成, 陈立春, 王虎. 2012. 龙门山断裂带晚第四纪破裂分段的古地震学证据[C]//第五届构造地质与地球动力学学术研讨会论文集. 武汉: 中国地质学会: 426–427.
- Ran Y K, Chen W S, Xu X W, Yang Z C, Chen L C, Wang H. 2012. Paleo-seismic evidence of the Late Quaternary rupture section of the Longmenshan fault zone[C]//*Proceedings of the 5th National Symposium on Structural Geology & Geodynamics*. Wuhan: Geological Society of China: 426–427 (in Chinese).
- 任治坤. 2007. 则木河断裂带古地震研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 125–136.
- Ren Z K. 2007. *Paleo-Earthquake of Zemuhe Fault System*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration: 125–136 (in Chinese).
- 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤. 1998. 小江活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社: 32–66.
- Song F M, Wang Y P, Yu W X. 1998. *The Active Xiaojiang Fault Zone*[M]. Beijing: Seismological Press: 32–66 (in Chinese).
- 滕瑞增, 金瑶泉, 李西候, 苏向州. 1994. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J]. 西北地震学报, **16**(2): 85–90.
- Teng R Z, Jin Y Q, Li X H, Su X Z. 1994. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling Mt.[J]. *Northwestern Seismology Journal*, **16**(2): 85–90 (in Chinese).
- 王虎, 冉勇康, 李彦宝, 陈立春. 2014. 川西地区安宁河断层古地震行为及其与则木河断层的比较[J]. 地震地质, **36**(3): 706–717.
- Wang H, Ran Y K, Li Y B, Chen L C. 2014. Paleoseismic behavior of the Anninghe fault and its comparison with the Zemuhe fault in western Sichuan[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 706–717 (in Chinese).
- 王永成, 刘百箴. 2001. 祁连山东中段断裂的地震危险性分析[J]. 西北地震学报, **23**(4): 330–338.
- Wang Y C, Liu B C. 2001. Analysis on seismic risk for faults in the mid-eastern Qilianshan area[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **23**(4): 330–338 (in Chinese).
- 熊仁伟, 任金卫, 张军龙, 杨攀新, 李智敏, 胡朝忠, 陈长云. 2010. 玛多—甘德断裂甘德段晚第四纪活动特征[J]. 地震, **30**(4): 65–73.
- Xiong R W, Ren J W, Zhang J L, Yang P X, Li Z M, Hu C Z, Chen C Y. 2010. Late Quaternary active characteristics of the Gande segment in the Maduo-Gande fault zone[J]. *Earthquake*, **30**(4): 65–73 (in Chinese).
- 杨晓平, 李安, 黄伟亮, 张玲. 2011. 天山北麓活动背斜区河流阶地与古地震事件[J]. 地震地质, **33**(4): 739–751.
- Yang X P, Li A, Huang W L, Zhang L. 2011. Paleoequake events and formation of river terraces in active anticline region, northern piedmont of Tianshan mountains, China[J]. *Seismology and Geology*, **33**(4): 739–751 (in Chinese).
- 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 刘百箴, 郑文俊, 何文贵. 2004. 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[J]. 地学前缘, **11**(4): 393–402.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu X L, Liu B C, Zheng W J, He W G. 2004. 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[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(4): 393–402 (in Chinese).
- 张波. 2012. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 86–98.
- Zhang B. 2012. *The Study of New Activities on Western Segment of Northern Margin of Western Qinling Fault and Laji Shan Fault*[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration: 86–98 (in Chinese).
- 张培震, 闵伟, 邓起东, 毛凤英. 2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学: D辑, **33**(8): 705–713.

- Zhang P Z, Min W, Deng Q D, Mao F Y. 2005. Paleoearthquake rupture behavior and recurrence of great earthquakes along the Haiyuan fault, northwestern China[J]. *Science in China: Series D*, **48**(3): 364–375.
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵. 2004. 祁连山东段天桥沟—黄羊川断裂古地震活动习性研究[J]. *地震地质*, **26**(4): 645–657.
- Zheng W J, Yuan D Y, He W G. 2004. Characteristics of palaeo-earthquake activity along the active Tianqiaogou-Huangyangchuan fault on the eastern section of the Qilianshan mountains[J]. *Seismology and Geology*, **26**(4): 645–657 (in Chinese).
- 邹谨敞, 姚顺民, 陈志泰, 代华光. 1993. 榆木山东麓断裂带晚第四纪活动特征的初步研究[J]. *高原地震*, **5**(2): 30–35.
- Zou J C, Guo S M, Chen Z T, Dai H G. 1993. Preliminary study on the Late Quaternary active feature of the Yumushan eastern marginal fault zone[J]. *Earthquake Research in Plateau*, **5**(2): 30–35 (in Chinese).
- Ellsworth W L, Matthews M V, Nadeau R M, Nishenko S P, Reasenberg P A, Simpson R W. 1999. *A Physically Based Earthquake Recurrence Model for Estimation of Long-Term Earthquake Probabilities*[R]. Reston, VA: US Geological Survey: 99–522.
- Matthews M V, Ellsworth W L, Reasenberg P A. 2002. A Brownian model for recurrent earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(6): 2233–2250.
- Nishenko S P, Buland R. 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4): 1382–1399.
- Reid H F. 1910. *The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906; Report of the State Investigation Commission, Vol. 2*[R]. Washington DC: Carnegie Institution of Washington.
- Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. *J Geophys Res*, **89**(B7): 5681–5698.
- Wesnousky S G. 1986. Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazard in California[J]. *J Geophys Res*, **91**(B12): 12587–12631.
- WGCEP. 1999. *Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2000 to 2030*[R]. Reston, VA: US Geological Survey: 99–517.
- WGCEP. 2003. *Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002 to 2031*[R]. Reston, VA: US Geological Survey: 3–214.
- WGCEP. 2007. *The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2*[R]. Reston, VA: US Geological Survey: 2007-1437.