

陈中天, 郭星, 潘华, 李金臣. 2016. 中国大陆特征地震震级分布规律. 地震学报, 38(6): 898-905. doi:10.11939/jass.2016.06.009.

Chen Z T, Guo X, Pan H, Li J C. 2016. The magnitude distribution law of characteristic earthquakes in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 38(6): 898-905. doi:10.11939/jass.2016.06.009.

中国大陆特征地震震级分布规律^{*}

陈中天¹⁾ 郭 星^{2),*} 潘 华¹⁾ 李金臣¹⁾

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 根据特征地震的震级分布符合正态分布的基本假设, 对特征地震的震级分布规律进行定量研究. 考虑到原地复发型大地震的震级数据稀少, 提出利用大地震的同震位移转换得到震级数据, 再对不同观测点所得到的震级数据进行归一化处理, 使所有归一化震级数据均服从均值为 0 的同分布, 进而可以统计得到反映特征地震震级变异性的标准差 σ . 最后基于广泛搜集的中国大陆 54 个特征地震的同震位移, 利用本文给出的统计方法得到一个通用的标准差 $\sigma=0.08$, 为进一步研究特征地震的发生概率模型提供了重要依据.

关键词 特征地震 震级 同震位移 小样本

doi:10.11939/jass.2016.06.009

中图分类号: P315.08

文献标志码: A

The magnitude distribution law of characteristic earthquakes in Chinese mainland

Chen Zhongtian¹⁾ Guo Xing^{2),*} Pan Hua¹⁾ Li Jinchen¹⁾

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 fundamental assumption that the magnitude distribution of characteristic earthquakes obeys the normal distribution, the quantification research are carried out on the magnitude distribution of characteristic earthquakes. Given sparse magnitude data of large earthquakes recurrence in situ, this paper uses magnitude data converted by coseismic displacement data, and each magnitude obeys identical distribution after normalization, then the standard deviation σ which reflects the variability of the normalized magnitude can be got by statistic analysis. Using the approach proposed in this paper, analysis of coseismic displacements of 54 characteristic earthquakes in Chinese mainland suggests a generic value of $\sigma=0.08$, which provides an important basis for further studying occurrence probabilistic model of characteristic earthquakes.

Key words: characteristic earthquake; magnitude; coseismic displacement;

* 基金项目 国家科技支撑项目(2012BAK15B01-08)资助.
收稿日期 2016-02-17 收到初稿, 2016-06-15 决定采用修改稿.
† 通讯作者 e-mail: guoxing@chinansc.cn



small sample

引言

Aki(1984)和 Schwartz 和 Coppersmith(1984)以弹性回跳理论(Reid, 1910)为基本物理假设,在分析圣安德烈斯断层上反复发生的大地震资料基础上,提出了“特征地震”的概念,即特征地震是指在某些断层长期活动的过程中,反复发生的并往往表现出相似破裂长度、位错分布和震级大小的多次大地震.

考虑到特征地震的震级存在不确定性,一般认为特征地震震级的变化区间大约在 0.5 个震级单位(闻学泽, 1995; 杨明, 刘百箴, 2000; 陈立春, 2002),但相关的定量化研究鲜有报道. 本文基于特征地震模型和特征地震震级符合正态分布的基本假定(Schwartz, Coppersmith, 1984; Youngs, Coppersmith, 1985),对特征地震震级分布规律进行定量化研究. 本研究不讨论其它有别于特征地震的大地震破裂模型,那些不符合特征地震模型的断层源也不予考虑.

欲研究特征地震的震级分布规律,需对不同断层源上特征地震的震级进行归一化处理,再对归一化的数据进行统计分析. 然而,对于某个断层源,很难获得两个以上特征地震的精确震级数据,但考虑到同震位移的大小直接与震级大小相关,我国很多断层上可以观测到大量同震位移数据,因此,本文提出利用特征地震的同震位移数据转换得到归一化震级数据,进而通过对归一化震级数据的统计分析来对特征地震的震级分布作定量化研究.

此外,考虑到每个观测点上的地震事件个数均非常有限,基于多组小样本数据的统计分布与实际分布也可能存在一定的差异,本研究对这种差异性进行定量化分析,并对每个归一化震级数据进行修正,使所有震级数据符合正态分布.

本文广泛搜集了中国大陆 54 个特征地震的同震位移数据,拟将同震位移数据转换为归一化无量纲震级数据,并对每个无量纲震级数据进行修正;然后通过统计分析,计算得到归一化震级分布的标准差 σ .

1 利用同震位移数据研究特征地震的震级分布规律

一般定量化研究特征地震的震级分布规律,需对不同断层源上的特征地震震级进行归一化处理,再对归一化的数据进行统计分析得到. 然而,大地震的复发周期一般都很长,人类有较精确的大地震震级记载的时间又很短,任何断层源上都很难得到两个以上特征地震的精确震级数据. 但是,很多断层上可以通过地质手段观测得到大量同震位移数据,而同震位移的大小直接与大地震的震级大小相关,因此可以考虑利用断层上的同震位移数据来研究特征地震的震级分布规律.

1.1 利用特征地震的同震位移数据确定归一化震级数据

地震矩与断层运动所释放的能量直接相关(Kanamori, 1977),其中地震矩可以表示为

$$M_0 = \mu AD, \quad (1)$$

式中: M_0 为地震矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$; μ 为断层附近的岩石剪切模量,单位为 N/m^2 ; A 为断层面积,单位为 m^2 ; D 为平均同震位移,单位为 m .

地震矩 M_0 与震级 M 存在以下经验关系:

$$\lg M_0 = 1.5M + C, \quad (2)$$

式中 C 为常数项, 根据郭星(2014)对震级-地震矩关系的统计分析可知, 当震级为我国面波震级 M_s 时 $C=8.61$, 当震级为矩震级 M_w 时 $C=9.05$.

联合式(1)和式(2), 可得

$$\lg D = 1.5M + C - \lg(\mu A). \quad (3)$$

若基于 Schwartz 和 Coppersmith(1984)提出的特征地震模型(图 1), 对于同一断层或同一断层段, 式(3)中的 $\lg(\mu A)$ 为一常数, 则震级 M 与平均同震位移 D 之间的关系可表示为

$$M = \frac{2}{3} \lg D + C'. \quad (4)$$

若有 n 个同震位移数据 D_1, D_2, \dots, D_n , 则可计算出特征地震的平均震级 \bar{M} 为

$$\bar{M} = \frac{2}{3} \lg \sqrt[n]{D_1 D_2 \cdots D_n} + C'. \quad (5)$$

对于任一平均同震位移数据 D_k , 根据式(4)和式(5)可以得到一个归一化无量纲震级数据 M_k , 即

$$M_k = \frac{2}{3} \lg \frac{D_k}{\sqrt[n]{D_1 D_2 \cdots D_n}}. \quad (6)$$

大量古地震研究(钱洪等, 1990; 王华林, 1995; 万永魁等, 2014)表明: 大地震在断层上各处的同震位移符合特征地震模型, 在断层或断层中间段的同震位移较大, 至两端则趋于零; 对于断层上反复发生的多次特征地震事件, 不同位置处的同震位移数据则保持固定的比例关系不变. 因此, 对于式(6), 并不要求 D_k 必须为平均同震位移, 仅保证在归一化无量纲震级数据计算过程中所使用的同一断层上的同震位移数据是出于同一观测点即可.

1.2 归一化震级数据的不确定性处理

由于每个观测点上的地震事件个数非常有限, 而基于多组小样本数据的统计分布与实际分布可能存在一定的差异(郭星, 潘华, 2015). 为此, 本文设定初始正态分布的均值 $\mu=0$, 标准差 $\sigma=0.01$, 利用蒙特卡罗方法给出了分别对应于每组抽取 2 次、3 次、4 次、5 次地震同震位移数据的 M_k 值分布(图 2), 随机抽取的次数为 2 万次. 结果表明: 每组抽取样本数不同, 所对应的 M_k 值分布的标准差也是不同的. 这样对于同震位移数据量不同的观测点, 所统计得到的 M_k 值分布就不是独立同分布的, 而不是同分布的数据很难放在一起进行统计分析. 因此, 在对实际归一化震级数据 M_k 进行统计分析的过程中, 需要对数据进行修正, 使多组小样本震级数据尽量满足同分布.

为了对每一个归一化无量纲震级数据进行修正, 本文定义修正系数 ρ 为初始分布的标准差与多组小样本数据统计分布的标准差之比. 在最终的统计分析之前, 需要根据该组同震位移数据的个数, 对计算得到的每个归一化无量纲震级数据进行修正, 即乘上一个修正系数 ρ . 经过反复检验, 结果显示: 初始分布标准差不同, 计算所得到的修正系数 ρ 也会有一定差异, 虽然这种差异无规律, 但差异很小, 对最终的计算结果影响也很小. 因此本文直接选取初始正态分布($\mu=0, \sigma=0.01$)计算得到一组修正系数: $\rho(2)=1.41, \rho(3)=1.22$,

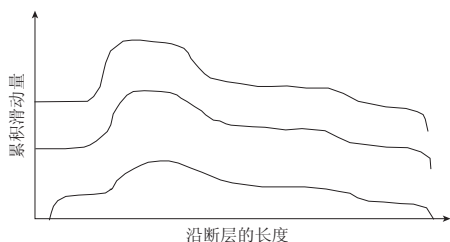


图 1 特征地震模型(引自 Schwartz, Coppersmith, 1984)

Fig. 1 Characteristic earthquake model (after Schwartz, Coppersmith, 1984)

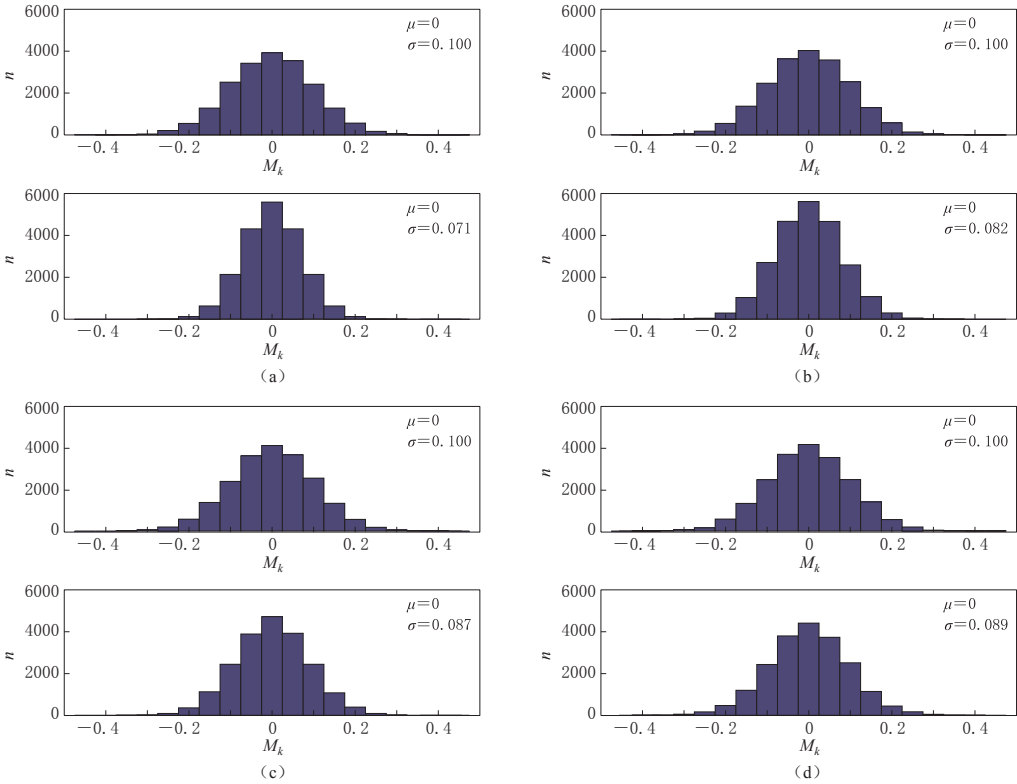


图 2 抽取 2 次(a), 3 次(b), 4 次(c), 5 次(d)地震事件的 M_k 值初始分布(上)和基于小样本的分布(下), 图中 n 为地震事件个数

Fig. 2 The initiatory distribution of M_k (upper panels) and the distribution of M_k based on small sample (lower panels) for 2-event (a), 3-event (b), 4-event (c) and 5-event (d) synthetic earthquakes

$\rho(4)=1.15, \rho(5)=1.12.$

2 中国大陆地区特征地震震级分布的标准差计算

2.1 数据选取

通过对断层的实际观测可以获得大量同震位移数据, 但并不是所有同震位移数据均属同一级别的特征地震. 例如, 海原断裂带分为全段破裂、中段破裂、西段破裂等 3 种破裂方式, 其中全段破裂的震级高, 同震位移大, 而中段和西段破裂则属于次一级破裂(冉永康, 邓起东, 1998). 此外, 并非所有大地震的发生均满足准周期模式, 对于一些大地震的复发规律异常或不明确的断层, 大地震的发生是否符合特征地震模型尚需进一步考证. 基于以上考虑, 本研究确定了选取大地震同震位移数据的基本原则如下:

- 1) 断层源或断层分段上大地震的复发必须符合准周期模型;
- 2) 同震位移数据须属于同一个断层源或断层分段, 不可以是不同级别的特征地震, 若无法明确是否为同一级别的大地震, 则不可选用;
- 3) 每个断层上的一组同震位移数据必须为同一观测点所获取.

根据以上原则, 本文在中国大陆 16 个不同断层上选取了共计 54 个同震位移数据, 具体列于表 1, 其中夏垫断裂上有来源于不同观测点的两组数据, 分别作为单独的数据集参

表 1 本文所用的中国大陆 16 个断层上的同震位移数据

Table 1 The data of coseismic displacement on 16 faults of Chinese mainland used in this paper

断层(段)	同震位移/m	归一化无量纲震级	修正系数 ρ	数据来源
鲜水河断裂炉霍段	1.50	-0.0183	1.22	钱洪等(1990)
	1.70	0.0179		
	1.60	0.0004		
鲜水河断裂道孚段	0.78	0.0644	1.41	Papadimitriou <i>et al</i> (2004)
	0.50	-0.0644		
夏垫断裂(东柳河屯探槽)	1.75	0.0313	1.41	冉永康等(1997)
	1.41	-0.0312		
夏垫断裂(齐心庄探槽)	1.0	-0.1022	1.15	江娃利等(2000)
	1.2	-0.0494		
	1.8	0.0680		
	1.9	0.0836		
包代河断裂	0.34	0.0697	1.15	董治平等(2002)
	0.30	0.0335		
	0.20	-0.0839		
	0.25	-0.0192		
北京南口—孙河断裂	0.8	-0.1100	1.12	张世民等(2008)
	0.8	-0.1100		
	1.0	-0.0454		
	1.8	0.1248		
	1.9	0.1405		
色尔腾山山前断裂大余太段	2.6	0.0920	1.15	陈立春等(2003)
	1.6	-0.0485		
	2.2	0.0437		
	1.4	-0.0872		
色尔腾山山前断裂乌兰忽洞段	2.6	0.1328	1.15	陈立春等(2003)
	1.8	0.0263		
	1.3	-0.0679		
	1.2	-0.0911		
贺兰山东麓断裂中北段	1.5	-0.0392	1.15	邓起东等(1984)
	2.0	0.0441		
	2.0	0.0441		
	1.45	-0.0490		
贺兰山东麓断裂南段	0.34	-0.1343	1.41	杜鹏等(2009)
	0.86	0.1343		
灵武断裂	1.5	-0.0454	1.22	柴炽章等(2001)
	1.8	0.0074		
	2.0	0.0379		
山西大同盆地恒山北缘断裂	2.0	0.0287	1.22	江娃利等(2003)
	1.5	-0.0555		
	2.0	0.0278		
山西交城断裂带	3.2	0.0238	1.22	谢新生等(2007)
	2.5	-0.0477		
	3.2	0.0328		
云南龙蟠—乔后断裂剑川段	1.0	0.0476	1.41	汤勇等(2014)
	0.72	-0.0476		
海原断裂全段	5.6	-0.0323	1.41	冉永康和邓起东(1998)
	7.0	0.0323		

续表 1

断层(段)	同震位移/m	归一化无量纲震级	修正系数 ρ	数据来源
海原断裂中段	1.5	-0.0278	1.22	冉永康和邓起东(1998)
	1.5	-0.0278		
	2.0	0.0555		
郯城断裂中断	6.0	0.0132	1.15	王华林(1995)
	5.0	-0.0396		
	6.0	0.0132		
	6.0	0.0132		

与统计分析.

2.2 计算结果

基于本文搜集的 54 个同震位移数据,根据式(6)可以计算得到 54 个归一化无量纲震级数据,并对其进行修正,得到归一化无量纲震级数据 M_k 的分布图,如图 3 所示.

假设特征地震的震级分布满足正态分布,对 54 个修正后的归一化无量纲震级数据进行统计分析,结果显示其均值为 0,标准差 σ 为

0.08. 图 3 的直方图直观地显示出, M_k 的分布接近于正态分布,而且此数据集可通过显著性水平为 0.05 的正态分布假设检验. 考虑到同震位移数据量较少,要获取更为精确的特征地震震级分布,尚需积累更多更精确的同震位移观测资料.

根据郭星(2014)对特征地震复发周期的变异性研究,若取强震复发周期变异系数大于 0.35,假设地震矩累积率是恒定的,强震复发周期的变异性均由特征地震的震级不确定性所造成,则可计算得到特征地震震级分布的标准差应大于 0.1. 根据本文的统计结果标准差为 0.08,则可推测出断层上的地震矩累积率并不是恒定不变的.

3 讨论与结论

研究特征地震的震级分布规律,可以为研究大地震复发的地震矩累积和释放过程提供重要依据. 考虑到很难直接获取足够多的特征地震震级数据,本文提出利用同震位移数据研究特征地震震级的分布规律. 由于未涉及其它有别于特征地震的大地震破裂模式,本研究具有一定的局限性,需要同特征地震模型一起不断完善和更新.

由于每个断层观测点上的同震位移数据量非常有限,基于多组小样本数据的统计分布与实际分布可能存在一定的差异,因此本文定义初始分布的标准差与多组小样本数据分布的标准差之比为修正系数 ρ . 在最终统计分析之前,需要根据该组同震位移数据的个数,对每个计算所得到的归一化无量纲震级数据进行修正,即乘以修正系数 ρ ,使得修正后的数据尽可能符合同分布.

本文在中国大陆 16 个不同断层上选取了共计 54 个同震位移数据,将同震位移数据转换为归一化无量纲震级数据,并对每个无量纲震级数据进行了修正. 基于特征地震的震级分布满足正态分布的基本假设,统计得到其标准差为 0.08,据此推测断层上地震矩累积率并不是恒定不变的,而对于地震矩累积率变异性的定量化研究将在下一步工作中开展.

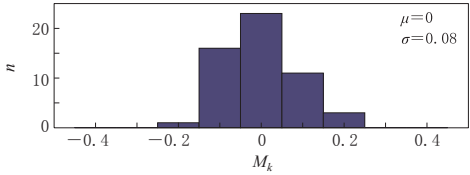


图 3 本文所统计的 54 个特征地震的 M_k 值分布直方图

Fig. 3 Histogram of M_k values for 54 characteristic earthquakes

参 考 文 献

- 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).
- 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: 49-67.
- Chen L C. 2002. *Paleoearthquakes, 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: 49-67 (in Chinese).
- 陈立春, 冉勇康, 常增沛. 2003. 色尔腾山山前断裂得令山以东段晚第四纪活动特征与古地震事件[J]. 地震地质, **25**(4): 555-565.
- Chen L C, Ran Y K, Chang Z P. 2003. Characteristics of Late Quaternary faulting and paleoseismic events on the east of Delingshan segment of the Sertengshan piedmont fault[J]. *Seismology and Geology*, **25**(4): 555-565 (in Chinese).
- 邓起东, 汪一鹏, 廖玉华, 张维岐, 李孟奎. 1984. 断层崖崩积楔及贺兰山山前断裂全新世活动历史[J]. 科学通报, **29**(9): 557-560.
- Deng Q D, Wang Y P, Liao Y H, Zhang W Q, Li M L. 1984. Colluvial wedges and Holocene activity along the range-front fault of Helan Shan[J]. *Chinese Science Bulletin*, **29**(9): 557-560.
- 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—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).
- 董治平, 何文贵, 戴华光. 2002. 包代河断裂古地震初步研究[J]. 西北地震学报, **24**(3): 225-229.
- Dong Z P, He W G, Dai H G. 2002. Preliminary research on paleoearthquakes of the Baodaihe fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **24**(3): 225-229 (in Chinese).
- 郭星. 2014. 强震复发的随机特征滑动模型及其应用方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 44-70.
- Guo X. 2014. *Stochastic Characteristic-Slip Model and Its Application Method* [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 44-70 (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).
- 江娃利, 侯治华, 肖振敏, 谢新生. 2000. 北京平原夏垫断裂齐心庄探槽古地震事件分析[J]. 地震地质, **22**(4): 413-422.
- Jiang W L, Hou Z H, Xiao Z M, Xie X S. 2000. Study on paleoearthquakes of Qixinzhuang trench at the Xiadian fault, Beijing plain [J]. *Seismology and Geology*, **22**(4): 413-422 (in Chinese).
- 江娃利, 谢新生, 王焕贞, 冯西英, 张康富. 2003. 山西大同盆地恒山北缘断裂全新世古地震活动[J]. 中国地震, **19**(1): 8-19.
- Jiang W L, Xie X S, Wang H Z, Feng X Y, Zhang K F. 2003. Holocene paleoseismic activities along the northern piedmont fault of Hengshan mountain, Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Earthquake Research in China*, **19**(1): 8-19 (in Chinese).
- 钱洪, 罗灼礼, 闻学泽. 1990. 鲜水河断裂带上特征地震的初步研究[J]. 地震学报, **12**(1): 22-29.
- Qian H, Luo Z L, Wen X Z. 1990. Preliminary study of characteristic earthquakes in the Xianshuihe fault zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **12**(1): 22-29 (in Chinese).
- 冉勇康, 邓起东, 杨晓平, 张晚霞, 李如成, 向宏发. 1997. 1679 年三河—平谷 8 级地震发震断层的古地震及其重复间隔[J]. 地震地质, **19**(3): 193-201.

- Ran Y K, Deng Q D, Yang X P, Zhang W X, Li R C, Xiang H F. 1997. Paleoearthquakes and recurrence interval on the seismogenic fault of 1679 Sanhe-Pinggu M8 earthquake, Hebei and Beijing[J]. *Seismology and Geology*, **19**(3): 193–201 (in Chinese).
- 冉勇康, 邓起东. 1998. 海原断裂的古地震及特征地震破裂的分级性讨论[J]. 第四纪研究, (3): 271–277.
- Ran Y K, Deng Q D. 1998. Paleoearthquakes along Haiyuan fault and discussion of grading on rupture of large earthquakes[J]. *Quaternary Sciences*, (3): 271–277 (in Chinese).
- 汤勇, 胡朝忠, 田勤俭, 王林, 杨攀新, 熊仁伟. 2014. 云南龙蟠—乔后断裂剑川段古地震初步研究[J]. 地震, **34**(3): 117–124.
- Tang Y, Hu C Z, Tian Q J, Wang L, Yang P X, Xiong R W. 2014. A preliminary study of paleo-earthquake in the Jianchuan section of Longpan-Qiaohou fault zone, Yunnan Province[J]. *Earthquake*, **34**(3): 117–124 (in Chinese).
- 万永魁, 沈军, 于晓辉, 戴训也, 王雷, 邵博, 李祥. 2014. 北京平原区夏垫活动断裂滑动速率及古地震复发间隔[J]. 防灾科技学院学报, **16**(3): 38–45.
- Wan Y K, Shen J, Yu X H, Dai X Y, Wang L, Shao B, Li X. 2014. The slipping rates and ancient earthquake recurrence interval at Xiadian fault, Beijing plain[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, **16**(3): 38–45 (in Chinese).
- 谢新生, 赵晋泉, 江娃利, 安卫平, 李自红, 张大卫, 程新源, 高树义, 王春和, 孙昌斌, 闫成国. 2007. 山西交城断裂带西张探槽全新世古地震研究[J]. 地震地质, **29**(4): 744–755.
- Xie X S, Zhao J Q, Jiang W L, An W P, Li Z H, Zhang D W, Cheng X Y, Gao S Y, Wang C H, Sun C B, Yan C G. 2007. Study on Holocene paleoearthquake in Xizhang trench on the Jiaocheng fault zone, Shanxi Province[J]. *Seismology and Geology*, **29**(4): 744–755 (in Chinese).
- 王华林. 1995. 1668 年郯城 8.5 级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期[J]. 西北地震学报, **17**(4): 1–12.
- Wang H L. 1995. Holocene slip rate, paleoearthquakes, and recurrence interval of strong earthquakes along the fault where 1668 Tancheng $M=8\frac{1}{2}$ earthquake occurred, Shandong Province[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **17**(4): 1–12 (in Chinese).
- 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: 1–150.
- Wen X Z. 1995. *Quantitative Estimates of Seismic Potential on Active Faults*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–150 (in Chinese).
- 杨明, 刘百箴. 2000. 时间相依的地震危险性概率分析[J]. 西北地震学报, **22**(1): 10–15.
- Yang M, Liu B C. 2000. Probabilistic seismic hazard analysis depending on time[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **22**(1): 10–15 (in Chinese).
- 张世民, 王丹丹, 刘旭东, 张国宏, 赵俊香, 罗明辉, 任俊杰, 王瑞, 张英礼. 2008. 北京南口—孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析[J]. 中国科学: D 辑, **38**(7): 881–895.
- Zhang S M, Wang D D, Liu X D, Zhang G H, Zhao J X, Luo M H, Ren J J, Wang R, Zhang Y L. 2008. Using borehole core analysis to reveal Late Quaternary paleoearthquakes along the Nankou-Sunhe fault, Beijing[J]. *Science in China: Series D*, **51**(8): 1154–1168.
- Aki K. 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction[J]. *J Geophys Res*, **89**(B7): 5867–5892.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **82**(20): 2981–2987.
- Papadimitriou E, Wen X Z, Karakostas V, Jin X S. 2004. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**(8): 1683–1707.
- Reid H F. 1910. *The Mechanics of the Earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906*[R]. Washington: State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington: 43–47.
- 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.
- Youngs R R, Coppersmith K J. 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(4): 939–964.