

活断层定量资料在大震年发生率 评定中的应用¹

任俊杰^{1,2)} 张世民¹⁾ 冉洪流²⁾

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要 大震年发生率的评定在地震区划中是一项非常重要的工作。但由于大震复发行为的复杂性, 目前尚未建立合理的大震复发模型。本文通过美国地震区划图的截断 G-R 关系模型和特征地震模型组成的混合模型, 利用活断层地质定量资料(滑动速率、古地震等)评定了大震的年发生率。结合我国的地震构造环境特征和资料的精细程度, 将以上方法加以修正, 并选择典型断裂进行了计算, 同时还把计算结果与我国第三代、第四代地震区划图进行了比较和分析。

关键词: 定量资料 年发生率 截断 G-R 关系模型 特征地震模型

引言

我国第四代地震区划图关于对大震年发生率的评定仍采用由中强地震和小震目录通过地震带内的指数分布关系外推得到(高孟潭, 2003), 尚未考虑离逝时间对大震复发危险性的影响。而对编制我国第五代地震区划图, 提出了要把地质定量资料应用到大震复发周期和年平均发生率的评价中(高孟潭等, 2006)。如何合理地定量评价高震级档潜在震源区大震复发的危险性, 是现在急需研究的一个课题。由于高震级档地震复发周期较长, 历史大震记录有限, 因此难以确定其复发特征。近些年来, 在许多活动断裂上开展了系统的地质学定量研究, 从而为利用地质学方法研究高震级档潜源大震复发特征提供了重要的基础资料(张永庆等, 2007; 邓起东等, 2008)。国内外很多学者在这方面也进行了尝试, 例如利用断层滑动速率、古地震序列资料估算大震重复周期。美国从编制 1996 年地震区划图开始, 就引入了特征地震模型和地震矩率释放模型, 并将活断层地质定量资料应用于大震年发生率的评定, 而在 2002 年和 2008 年的地震区划图中又将这种评价方法不断改进, 引入了多段破裂与丛集特征等概念(Frankel 等, 1995; 2002; Petersen 等, 2008)。相比之下, 由于我国陆内大震复发机制的复

1 基金项目 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2007-12)、国家科技支撑计划课题(2006BAC13B01)和中国第五代区划图编制项目资助

【收稿日期】2008-08-16

【作者简介】任俊杰, 男, 1979 年生。中国地震局地壳应力研究所助理研究员, 中国地震局地质研究所在职博士。主要从事活动构造、构造地貌与地震危险性分析等方面的研究。Email: renjunjie@gmail.com

杂性及活断层研究相对滞后，目前尚未把断层的地质定量数据研究结果直接应用到地震区划图的编制中（闻学泽，1998；1999；沈军等，1999；冉勇康等，2003；张培震等，2003）。

将地质定量资料应用到大震危险性的评定中，其最大的障碍是对大震复发模型难以达成共识，目前主要采用截断 G-R 关系模型和特征地震模型两种（Petersen 等，1996）。在地震统计学中，G-R 关系是假定一个地震带内发生的所有地震的震级-频次关系符合指数分布，而本文所指的截断的 G-R 关系是假定单个断层上发生地表破裂型地震的震级-频次关系符合截断的指数分布，它强调了地震复发在大震范围内符合 G-R 关系，震级越大，发生的次数越小。特征地震模型是假定特征地震只发生在某一个较小的震级范围内（Schwartz 等，1984），而在这个震级范围之外，地震不会发生，该模型在一些活断层的古地震研究中有所表现（冉勇康等，2003；张培震等，2003；Weldon 等，2004；2005；Gurpinar, 2005）。从实际震例来看，大震复发行为既不是完全的指数分布模型，也不是简单的特征地震模型，而应当是居于二者之间。在目前地震复发行为尚未完全清楚的情况下，通常赋予上述两种地震复发模型一定的权重，从而建立一种混合模型（Frankel 等，1995；2002；Petersen 等，2008），进而计算大地震年平均发生率。本文结合我国的地震构造环境特征和资料的精细程度，将上述方法加以修正，提出了针对我国不同地震区的计算方案，并选择典型断裂进行了计算，同时还把计算结果与我国第三代、第四代地震区划图进行了比较和分析。

1 原理与方法

为了刻画大震的震级-频率分布，采用加权的特征地震模型与截断 G-R 关系模型组成的混合模型。这一组合方式允许比 G-R 模型更多的大地震发生，同时还允许比特征地震震级小的地震发生。对两种模型计算出来的地震年平均发生率分别赋予不同的权重，进而得到综合模型的高潜在震源区分震级档的地震年平均发生率（图 1）。

1.1 特征地震模型

(1) 特征地震震级和复发周期的确定

特征地震模型中最为关键的是对特征地震震级和复发周期这 2 个参数的估计。特征地震震级可以从以下两个方面来估计：①利用已发生过的多次历史大震估计；②根据断裂长度 L 和破裂面积 A ，利用震级 M_S-L 或 M_S-A 的经验关系估计。

该模型假定所有破裂源的特征地震震级分布均符合均值为 M_i 的正态分布，即

$$f_i(M) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(M - M_i)^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

式中， $f_i(M)$ 为第 i 个破裂源的特征地震长期的震级分布； M_i 为第 i 个破裂源的特征地震的中值； σ_i 为第 i 个破裂源的特征地震震级分布的剩余标准差。参照美国加州概率工作组（Working Group on California Earthquake Probabilities）和美国地震区划方案，特征地震震级的不确定性（uncertainty）定为 ± 0.2 （Petersen 等，2008；WGCEP，2008）。

对特征地震复发周期的估计可以采用以下三种方法：

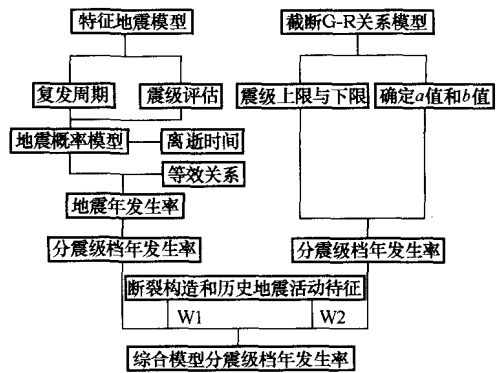


图 1 研究思路框图

Fig. 1 Block diagram of our research approach

方法一 历史大震或古地震估计法

断裂段发生过 2 次以上的历史大震或已揭示距今完整的 2 次以上的古地震记录, 可以利用其间隔作为特征地震的复发周期。

方法二 滑动速率法

根据地震原地复发的时间可预报模型 (Shimazaki 等, 1980), 一个断裂段的特征地震之间平均时间间隔 \bar{T} , 可由该断裂段最晚一次地震的同震位错量 \bar{u} 与断层的平均地震滑动速率 \bar{v} 两者的比值估计, 即

$$\bar{T} = \frac{\bar{u}}{\bar{v}} \quad (1)$$

式中, \bar{v} 为利用地质学方法得到的较长时期中断裂的平均滑动速率减去断裂无震蠕滑长期平均速率。

方法三 地震矩释放率法

已知活动断裂带的分段及各段的滑动速率可以用该方法。平均复发间隔为

$$\bar{T} = \frac{\bar{M}_0}{\dot{M}_0} \quad (2)$$

式中, \bar{M}_0 为地震矩, 可由特征地震的矩震级确定; \dot{M}_0 为地震矩释放率, 由断裂段平均滑动速率、断裂段长度、断裂面宽度、地震比例因子等确定。其中地震比例因子是指发生地震的滑动占断层总的滑动的比例, 参照加州概率工作组和美国地震区划图, 地震比例因子取 0.9 (Frankel 等, 1995; 2002; Petersen 等, 2008; WGCEP, 2008)。

(2) 未来百年大震发震概率

特征地震未来复发的概率利用条件概率进行计算。如果已知上次特征地震过后的时间长度 T_e , 在特征地震未复发的条件下, 则地震再发生的条件概率为:

$$P(T_e \leq T \leq T_e + \Delta T | T > T_e) = \frac{\int_0^{T_e + \Delta T} f(T) dT - \int_0^{T_e} f(T) dT}{1 - \int_0^{T_e} f(T) dT}$$

式中, T_e 为地震离逝时间; ΔT 为预测地震时段; $f(T)$ 为概率密度函数。

目前, Poission 模型、对数正态模型和 BPT 模型是较为常用的地震危险性概率计算模型 (Frankel 等, 1995; 2002; 任俊杰等, 2004; 冉洪流等, 2006; 张永庆等, 2007; Petersen 等, 2008), 可分别选取上述三种地震复发概率模型, 计算未来百年内大震的复发概率。

模型一 Poission 模型

该模型的密度函数为: $f(T) = \lambda e^{-\lambda T}$; 而未来 ΔT 年内发生的概率为: $P = 1 - e^{-\lambda \Delta T}$ 。在 Poission 分布下, 地震复发的条件概率与离逝时间无关, 其未来 ΔT 年内地震年发生率是不变的, 等于平均复发周期的倒数, 即 $1/\bar{T}$ 。但其不具备内在的物理基础, 是一种较保守的模型。

模型二 对数正态分布模型

该模型的密度函数为: $f(T) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi T}} \exp\left(\frac{-[\ln(T/\bar{T}) - \mu_D]^2}{2\sigma_M^2}\right)$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_p^2}$$

式中, \bar{T} 为大地震复发间隔; σ_D 为数据内在的不确定性; σ_M 为参数的不确定性。

模型三 BPT 分布模型

该模型的密度函数为:

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

式中, μ 为断裂段平均复发间隔; α 为平均复发间隔的变异系数。

(3) 地震年平均发生率的计算

把未来预测时段内大震的复发概率等效于 Poisson 模型的概率, 进而计算出未来预测时段内大震的年平均发生率 λ (周本刚等, 2006; Petersen 等, 2008):

$$\lambda = -\ln(1-P)/\Delta T \quad (3)$$

我们强调时间相依模型的比重, 对以上三种概率模型分别赋予 0.2、0.4 和 0.4 的权重, 则可得到三种概率模型综合的地震年平均发生率。

1.2 截断的 G-R 关系模型

截断的 G-R 关系模型反映了单个断层(段)上的大震复发的震级-频度规律, 需要确定出该关系中的 a 值和 b 值。在美国加州地震危险性评价中, Petersen 等(1996)推导出了单个断层(段)上 a 值的计算公式:

$$a = \log \left[\frac{(c-b)M_0^g \ln(10)}{10^d [10^{(c-b)M_{\max}} - 10^{(c-b)M_{\min}}]} \right] \quad (4)$$

式中, M_0^g 为通过断层滑动速率得到的地震矩释放率; M_{\min} 和 M_{\max} 为地震的下限和上限, 这里 $M_{\min}=6.5$, M_{\max} 取特征地震震级; b 值为震级-频度关系的斜率, 可用地震带的 b 值代替; c 和 d 为常数, 分别取 1.5 和 9.1。该公式的前提条件是, 地震矩率全部通过震级区间为 M_{\min} 至 M_{\max} 的地震释放。

通过获得的截断 G-R 指数关系, 进而求得各个震级档上的地震年平均发生率。

1.3 混合模型权重的确定

中国大陆西部地区发育着大型走滑断裂系, 构造出露清楚; 中部地区为张性构造带; 而东部地区为隐伏断裂发育区, 与美国大陆地震构造格架较为相似 (Frankel 等 1995; 2002; Petersen 等, 2008)。而且已有的研究表明, 中国西部地区的大型活动断裂多表现出更多的特征地震特征, 同时, 参照美国地震区划方案 (Petersen 等, 2008) 特征地震模型与 G-R 关系模型的权重分配, 本文取两种模型在我国东部地区的权重分别为 0.5 和 0.5, 而在我国西部地区的权重分别为 0.67 和 0.33。在上述两种模型中都考虑了认识不确定性 (epistemic uncertainty) 和偶然不确定性 (aleatory uncertainty), 并分别满足地震矩平衡。

2 试算与分析

本文分别选择我国东、西部地区研究程度较高的炉霍 8.0 级潜源和三河 8.0 级潜源, 利用上述方案进行了试算, 并将试算结果与我国第三代、第四代地震区划图综合方案的计算结果

进行了分析和对比。

2.1 炉霍 8.0 级潜源

该潜源主要由鲜水河断裂炉霍段与倡促段之间的拉分盆地组成，它是鲜水河断裂带西北端的一条次级剪切断裂，长 140km，走向北 45°西左右，倾角 75°，历史上曾发生过 1816 年 7½级地震和 1973 年 7.6 级地震(图 2)。强烈地震多发生在 10km 的深度上(王椿镛等, 2003)，晚第四纪以来断层的平均滑动速率为 (14±2) mm/a (徐锡伟等, 2003)。据李天昭等(1997)研究，鲜水河断裂带上断层的蠕滑速率很小，一般小于 1mm/a，因此取小震和蠕滑共占 10%，即断层的平均粘滑速率为 $\bar{v} = (12.6 \pm 2) \text{ mm/a}$ 。潜源所处地震带的 b 值为 0.685，由式(4)计算得到的 a 值为 2.49。

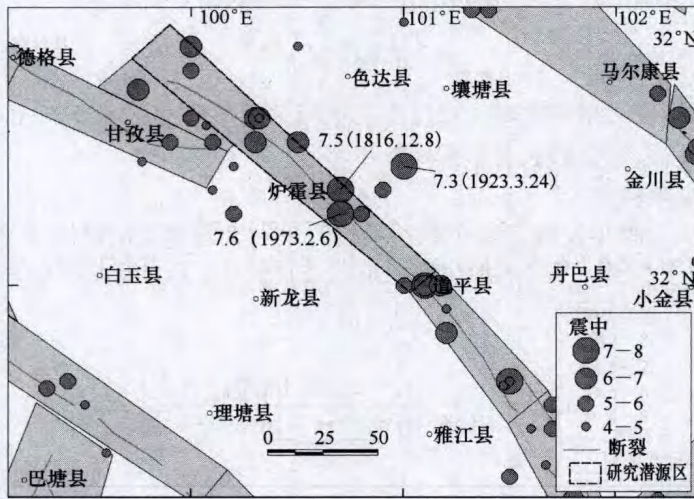


图 2 炉霍潜源地震构造特征简图

Fig. 2 Seismotectonic sketch of Luhuo region

利用特征地震模型估计该潜源特征地震的震级为 (7.6±0.2) 级。利用历史地震、滑动速率、地震矩释放率和闻学泽(1995)关系式计算的复发周期如表 1 所示，其中闻学泽(1995)推导出的鲜水河断裂北西段的平均复发间隔估计关系式为：

$$\lg \bar{T} = 0.4697 M_s - [\lg(V - C) + 0.2621]$$

式中， \bar{T} 为平均复发间隔； M_s 为特征地震震级； V 为断层平均滑动速率； C 为断层平均蠕滑速率，按 1mm/a 估算。根据这个估计关系式得到的炉霍段特征地震的平均复发间隔 \bar{T} 为 (173±40) a。

对表 1 所示 4 种方法分别赋予 0.25 的权重，加权平均得到炉霍段特征地震的平均复发间隔 \bar{T} 为 (159±40) a；大震的离逝时间为 35a。同时，根据前述三种概率模型计算未来百年的发震概率，并由式(3)计算出三种概率模型的

表 1 炉霍段特征地震复发间隔的估算结果

Table 1 Estimated results of recurrence intervals along the Luhuo fault segment

方法	平均复发间隔/a	权重	加权平均复发间隔/a
历史地震法	157	0.25	159±40
滑动速率法	170±46	0.25	
地震矩率法	134±33	0.25	
闻学泽(1995)	173±40	0.25	

年平均发生率，按照权重对三种模型进行加权平均，获得的综合模型地震年平均发生率如表 2 所示。从表 2 可以看出，试算得到的加权结果与我国第四代、第三代地震区划图方案得到的结果是可比的，但最高震级档的结果显然要大于我国两代地震区划图的结果。

表 2 炉霍潜源综合模型地震年平均发生率与我国第四代、第三代地震区划图结果的比较

Table 2 The comparison of average annual rate in Luhuo potential zone between combined model and the results from the third and fourth seismic zonation maps of China

震级档	地震年平均发生率						
	截断 G-R 指数分布模型	权重	特征地震模型	权重	综合模型	第四代地震区划图	第三代地震区划图
6.5—6.9	0.00731	0.33	0	0.67	0.00241	0.000831	0.00317
7.0—7.4	0.00332	0.33	0	0.67	0.00109	0.00104	0.00158
7.5—7.9	0.00151	0.33	0.0041	0.67	0.00324	0.00254	0.00171

2.2 三河 8.0 级潜源

该潜源的发震断裂为夏垫新断裂，它是华北平原区北部一条重要的发震断裂，走向 50°，倾向南东，倾角 50°—70°，是大厂第四纪凹陷和通县凸起 2 个最新构造单元间的边界断裂(图 3)。1679 年三河-平谷 8.0 级地震是其最新的一次地表破裂型地震事件，在地表形成了长约 10km 的地震断层陡坎。全新世以来断层的平均垂直位移速率为 $\bar{v} = (0.45 \pm 0.12) \text{ mm/a}$ 。已有的古地震研究表明，该断裂的复发符合准周期模型(徐锡伟等，2002)。

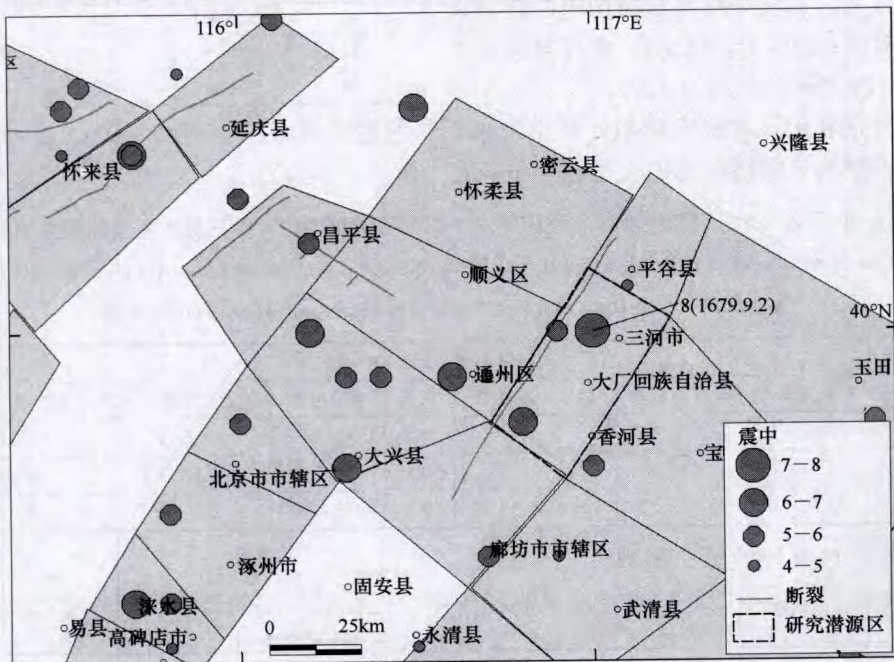


图 3 三河-平谷 8.0 级潜源地震构造特征简图

Fig. 3 Seismotectonic sketch of Sanhe potential zone with upper magnitude of M=8.0

(1) 特征地震震级的估计

关于夏垫新断裂的几何特征(长度、震源深度等)和运动特征目前尚无定论，无法通过断裂的长度来反推特征地震的震级。而我国第四代地震区划图中潜源的长度也只有 45km，

无法与一个 8.0 级潜源相匹配。另外, 1679 年三河-平谷 8.0 级地震距今有 300 多年, 只能根据地震破坏程度来确定震级。同时, 历史地震震级的精度为 $1/4-1/2$ 级。综合上述原因, 确定其特征地震震级为 (8.0 ± 0.2) 级。

根据三河-平谷 8.0 级地震的地震地表位错详细调查和研究结果(表 3), 通过闻学泽(1995)的平均同震位错计算方法, 得到的 1679 年三河-平谷 8.0 级地震的平均同震垂直位错 \bar{u} 为 (1.40 ± 0.5) m, 由式(1)得到的地震平均复发周期 \bar{T} 为 (3111 ± 1386) a。

已有的古地震探槽研究揭露了 4 次断层错动事件, 它们分别为距今 (10280 ± 570) a、 (7035 ± 355) a、 (3824 ± 1591) a 和公元 1679 年三河-平谷 8.0 级地震(徐锡伟等, 2002), 则计算得到的地震平均复发周期 \bar{T} 为 (3336 ± 792) a。

因为通过古地震法得到的地震平均复发周期较为直接和准确, 所以对滑动速率法和古地震法得到的地震复发周期的数值分别赋予 0.4 和 0.6 的权重, 加权平均得到潜源内的特征地震的平均复发周期 \bar{T} 为 3246a; 变异系数 α 为 0.5048; 地震的离逝时间为 329a。

进而分别利用三种概率模型计算出未来百年的发震概率, 并利用式(3)和赋予的权重获得三种模型的分震级档的加权地震年平均发生率(见表 4)。

表 4 三河-平谷 8.0 级潜源综合模型地震年平均发生率与我国第四代、第三代地震区划图结果的比较

Table 4 The comparison of average annual rate in the Sanhe potential zone between combined model and the results from the third and fourth seismic zonation maps of China

震级档	年平均发生率						
	截断 G-R 指数分布模型	权重	特征地震模型	权重	综合模型	第四代地震区划图	第三代地震区划图
6.5—6.9	$7.88E \times 10^{-5}$	0.5	0	0.5	$3.94E \times 10^{-5}$	8.49×10^{-4}	0.00113
7.0—7.4	$3.58E \times 10^{-5}$	0.5	0	0.5	$1.79E \times 10^{-5}$	6.28×10^{-4}	4.47×10^{-4}
≥ 7.5	$2.97E \times 10^{-5}$	0.5	$5.99E \times 10^{-5}$	0.5	$4.48E \times 10^{-5}$	2.29×10^{-4}	5.92×10^{-4}

(2) 截断 G-R 指数分布模型

由于该模型中需要断裂的平均地震矩释放率, 但目前得到的该断裂的长度 20km 与 8.0 级大震不相适应, 所以对平均地震矩我们采用通过全新世以来的 4 次古地震震级来估计。

据王辉等(2005)关于华北地区震级 M_S 与地震矩 M_0 之间的统计关系: $\lg M_0 = 12.29 + 0.93M_S$, 计算出最近 3 次地震的地震矩, 并除以 3 个地震的持续时间, 计算得到该断裂的平均地震矩释放率 $\dot{M}_0 = 8.5155 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 。该潜在震源区的 b 值为 0.6863, 由式(4)求出 a 值为 0.62。进而获得分震级档的年平均发生率(见表 4)。

然后, 根据截断 G-R 指数分布和特征地震模型, 利用前述的三种概率模型分别计算出未来百年的发震概率和年平均发生率, 最后得到对于两种模型加权平均的结果(见表 4)。由于

表 3 1679 年三河-平谷 8.0 级地震地表破裂垂直位移

Table 3 Vertical displacement of the surface rupture produced by Sanhe-Pinggu earthquake ($M=8.0$)

雁列分段	走向	垂直位移/m	资料来源
1	N48°E	1.9	孟宪梁等 (1983)
2	N50°E	1.4	
3	N48°E	2.5	
4	N70°E	0.7	
5	N50°E	1.36	
6	N20°E	0.55	向宏发等 (1988)
7	N48°E	1.73	
8	N58°E	1.8	
9	N55°E	2.73	
10	N55°E	3.16	
11	N50°E	1.52	
12	N55°E	2.0	
13	N50°E	1.67	
14	N50°E	1.61	

该潜源震级上限是 8.0 级, 两代区划图只给出了 7.5—7.9 级地震的年发生率, 因此把特征地震模型计算得到的大于 8.0 级的年发生率归至 $M \geq 7.5$ 级的范围内。

从表 4 可以看出, 试算得到的结果与第三代、第四代地震区划图方案得到的结果相比偏小, 相差几倍至几十倍, 造成这么大差距的主要原因是: 第三代、第四代地震区划图方案是整个地震带统计结果的分配, 而该地震带内的发震构造尚未完全搞清, 所以造成了年平均发生率分配的偏差。另外, 第三代、第四代地震区划图方案没有考虑到地震离逝时间的影响。而本文计算的结果, 利用了时间相依的发震模型, 并且考虑了地震复发间隔的不确定性。

3 结论和讨论

地震的发生即地震能量的释放, 在一次大震发生之后, 需要一段时间的能量积累过程即地震复发间隔, 才会发生下一次大震。因此, 大震复发应与最后一次大震的离逝时间相关, 并非像 Poission 分布那样认为未来一段时间内大震的年发生率是相等的, 即大震复发模型应是时间相依的。

截断 G-R 指数分布关系受统计区的大小和中小地震完整性的影响。我国西部的高震级潜源缺少足够的地震统计样本, 往往造成截断 G-R 指数分布统计关系存在很大的不确定性。而地质定量数据包括断层的滑动速率、古地震序列等, 它们与大震的发生相关, 可以直接反映大震的复发特征。从活动断裂的古地震研究来看, 在多数活动断裂上发生的大震更多地表现为特征地震模型。如果利用中小地震的截断 G-R 指数分布规律来推测大震的分布特征, 就会夸大大震的年发生率; 而如果完全按照特征地震模型, 就会忽略中小地震对于地震矩的释放作用。因此, 实际上的地震复发模型可能是位于两种模型之间。

试算结果表明, 对于构造形迹清楚、断层滑动速率大、大震复发周期小的西部地区, 由于获得的断层定量数据较为准确, 所以综合模型的计算结果与第三代、第四代地震区划图的结果是可比的。而我国东部断层的特征地震复发间隔较长, 通常为数千年, 同时离逝时间又较短(一般为几十或数百年), 所以综合模型的计算结果小于第三代、第四代地震区划图的结果。这种综合模型可以作为高震级档地震年平均发生率评定的一种方法。关于综合模型中的权重分配, 需要建立在对发震构造的活动特征、活动强度、历史地震和古地震等进行全面了解和分析的基础上。

在美国 2002 年地震区划图中, 引入了多段破裂模型 (multi-segment ruptures) 与不固定的分段模型 (unsegmented model) (Frankel 等, 2002), 而在美国 2008 年地震区划图中, 又引入了大震丛集模型 (Peersen 等, 2008), 这些模型对于刻画一些较大规模断裂的地震复发明显优于单段破裂模型, 但需要更为精细的地质研究资料作为基础。因此, 不作为一般性技术方案内容。但对于我国鲜水河断裂带、海原断裂带等规模巨大, 且研究程度较高的地震源, 在实际应用中可进行特殊的考虑, 借用以上较复杂的模型。

中国地震局地球物理研究所金严研究员和黄玮琼研究员对本文的写作提出了宝贵的建议和修改意见, 在此表示感谢。

参考文献

- 邓起东, 闻学泽, 2008. 活动构造研究——历史、进展与建议. 地震地质, 30 (1): 1—30.
高孟潭, 2003. 新的国家地震区划图. 地震学报, 25 (6): 630—636.

- 高孟潭, 卢寿德, 2006. 关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的初步探讨. 震灾防御技术, 1 (1): 1—6.
- 李天招, 杜其方, 游泽李, 1997. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估. 成都: 成都地图出版社, 1—230.
- 孟宪梁, 杜春涛, 王瑞, 1983. 1679年三河-平谷大地震的地震断裂带. 地震, 13 (3): 18—23.
- 冉洪流, 何宏林, 2006. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级 ($M \geq 6.7$) 及复发间隔研究. 地球物理学报, 49 (1): 153—161.
- 冉勇康, 陈立春, 杨晓平等, 2003. 鄂尔多斯地块北缘主要活动断裂晚第四纪强震复发特征. 中国科学 (D 辑), 33 (B04): 135—143.
- 任俊杰, 陈虹, 2004. 东昆仑断裂带地震复发周期及发震概率研究. 大地测量与地球动力学, 24 (3): 51—56.
- 沈军, 汪一鹏, 1999. 用断裂滑动速率估计小江断裂带的地震危险性. 地震研究, 22 (3): 251—259.
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 2003. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构. 地震学报, 25 (3): 229—241.
- 王辉, 张国民, 江在森, 2005. 利用多种地震学参数研究中国大陆地壳应变场. 地震, 25 (2): 9—18.
- 闻学泽, 1995. 活动断裂的地震潜势的定量评价. 北京: 地震出版社, 1—146.
- 闻学泽, 1998. 时间相依的活动断裂分段地震危险性评估及其问题. 科学通报, 43 (14): 1457—1466.
- 闻学泽, 1999. 中国大陆活动断裂的段破裂地震复发行为. 地震学报, 21 (4): 411—418.
- 向宏发, 方仲景, 徐杰, 1988. 三河-平谷 8 级地震区的构造背景与大震重复性研究. 地震地质, 10 (1): 15—28.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学 (D 辑), 33 (增刊): 151—162.
- 徐锡伟, 吴卫民, 张先康等, 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京: 科学出版社, 118—133.
- 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. 中国科学 (D 辑), 33 (8): 705—713.
- 张永庆, 谢富仁, 2007. 活动断裂地震危险性的研究现状和展望. 震灾防御技术, 2 (1): 64—74.
- 周本刚, 沈得秀, 2006. 地震安全性评价中若干地震地质问题探讨. 震灾防御技术, 1 (2): 113—120
- Frankel A., Petersen M., Mueller C. et al., 2002. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps. Open-file Report 02-420, Washington DC: U.S. Geological Survey, 2-31.
- Frankel A., Mueller C., Barnhard T. et al., 1995. National Seismic Hazard Maps: Documentation June 1996. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-532, Denver: U.S. Geological Survey, 1-110.
- Gurpinar A., 2005. The importance of paleoseismology in seismic hazard studies for critical facilities. Tectonophysics, 408 (1-4): 23—28.
- Petersen M.D., Bryant W.A., Cramer C.H. et al., 1996. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for the State of California. California Division of Mines and Geology Open-File Report 96-08, USGS Open File Report 96-706.
- Petersen M.D., Frankel A.D., Harmsen S.C. et al., 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1128.
- Schwartz D.P., Coppersmith K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas faults. Journal of Geophysical Research, 89 (5): 873—890.
- Shimazaki K. and Nakata T., 1980. Time-predictable recurrence of large earthquake. Geophys. Res. Lett., No. 7: 279—282.
- Weldon R., Sharer K., Fumal T. et al., 2004. Wrightwood and the earthquake cycle: What a long recurrence record tells us about how faults work. GSA Today, 14 (9): 4—10.

Weldon R., Fumal T., Biasi G. et al., 2005. Past and future earthquakes on the San Andreas fault. *Science*, **308**: 966—967.

Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP), 2008. The Uniform California Earthquake Rupture Forecast. Version 2 (UCERF 2): U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1437 and California Geological Survey Special Report 203.

Application of Quantitative Data of Active Faults in Estimating Annual Reoccurrence Rate of Large Earthquake

Ren Junjie^{1,2)}, Zhang Shimin¹⁾ and Ran Hongliu²⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract The estimation of annual rate of large earthquakes is a very important job in seismic zonation. Due to the complexity of the recurrences behavior of large earthquakes, the ideal model of large earthquake recurrences have yet not been developed. In this paper we evaluate the average annual rate of high earthquake intervals with application of a combined model used in the U.S. seismic hazard maps by the weighted cut-off G-R relationship model and characteristic earthquake model and fault quantitative data (slip rate and paleoearthquake sequence et al.). So the above method is revised according to the characteristics of China's seismic tectonic environment and the research precision of quantitative data on active faults. With this combined model we calculate earthquake recurrence rates along some typical faults. Our results are compared with that from the third and forth seismic zonation maps of China.

Key words: Quantitative data; Average annual rate; Cut-off G-R relationship medel; Characteristic earthquake model