

刘哲, 李琦, 任鲁川, 田建伟, 张锬, 2017. 基于三参量威布尔分布的潜在震源区强震危险性估计. 震灾防御技术, 12 (2): 346—353. doi: 10.11899/zfy20170211

基于三参量威布尔分布的 潜在震源区强震危险性估计¹

刘 哲¹⁾ 李 琦²⁾ 任鲁川¹⁾ 田建伟¹⁾ 张 锬¹⁾

1) 防灾科技学院, 北京 101601

2) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

摘要 本文提出了一种基于三参量威布尔分布模型估计潜在震源区强震危险性的方法。选择日本东海-南海地震带为潜在震源区, 分别基于强震发震时间间隔服从二参量和三参量的威布尔分布, 估计该区强震危险性, 结果表明三参量威布尔分布的拟合效果优于二参量威布尔分布。选择马尼拉海沟俯冲带为潜在震源区, 基于三参量威布尔分布估计该区强震危险性, 结果显示未来 10、30 和 50 年该区强震 ($M \geq 7.5$) 复发概率分别为 62%、82% 和 89%, 最短发震时间间隔估计为 1.70 年。

关键词: 潜在震源区 强震危险性估计 威布尔分布

引言

潜在震源区强震危险性估计是地震危险性评价的重要组成部分, 主要包括潜在震源区界定和地震活动性模型的构建。中国的第五代烈度区划图中, 采用了新的地震统计区、背景源和地震聚集源三级潜在震源区划分标准, 依据截断的 G-R 关系构建地震活动性模型 (周本刚等, 2013; 潘华等, 2013; 高战武等, 2014)。潜在地震海啸源是指那些位于海域且在其内发生的强烈地震可能触发海啸灾害的潜在震源, 故其所在区域的强震危险性估计较为特殊, 首先要界定潜在地震海啸源区, 这个过程可借鉴潜在震源区的界定原则, 但由于海水覆盖, 包括特征地震法等用于估计陆地区域潜在震源强震危险性的地震地质学方法不适用于海域的潜在震源。目前对于这个问题, 众研究者大都采用地震统计学方法, 通过统计分析历史地震记录估计潜在地震海啸源强震危险性 (温瑞智等, 2007; 齐诚等, 2008; 任鲁川等, 2012)。

威布尔分布模型最初是由瑞典工程师 Weibull 在研究轴承寿命等问题时提出的 (张艳春, 2012)。后来, 一些学者 (李志雄等, 1993, 1995; 路鹏等, 2012) 探讨了基于二参量威布尔分布估计潜在震源区强震危险性的方法。例如, 李志雄等 (1993) 假设燕山带、山西带、华

1 基金项目 国家自然科学基金项目 (41276020), 中央高校基本科研业务费 (ZY20160311), 中央高校基本科研业务费 (ZY20160312)

[收稿日期] 2016-09-30

[作者简介] 刘哲, 男, 生于 1991 年。硕士研究生。主要从事地震灾害方面研究。E-mail: kuailixingyu@sina.com

[通讯作者] 任鲁川, 男, 生于 1958 年。博士, 教授。主要从事地震灾害预测、海洋灾害预测、灾害风险分析领域研究。E-mail: renluchuan@sina.com

北平原带和长江中下游带的地震发震时间间隔服从二参量威布尔分布，估计其未来 5—20 年的强震复发的累计概率；Rikitake (1999) 分段统计了 684—1946 年之间发生在日本东海-南海地震带的特大历史地震记录，并假设其强震发震时间间隔服从二参量威布尔分布，估计了日本东海-南海地震带未来 10—20 年特大地震的复发概率。

本文假设强震复发时间服从三参量威布尔分布模型，探讨潜在震源区强震危险性的估计方法。首先选择了日本东海-南海地震带作为潜在震源区进行案例研究，将之与相应的二参量威布尔分布模型估计的相关系数对比，发现三参量威布尔分布相关系数较二参量的大 0.09，表明前者的参数拟合效果要优于后者。尔后，用三参量威布尔分布模型估计马尼拉海沟俯冲带潜在震源区的强震危险性，结果显示，该区域未来 10、30 和 50 年强震 ($M \geq 7.5$) 复发概率分别为 62%、82% 和 89%，其最短发震时间间隔为 1.70 年。

1 原理与方法

取强震发震时间间隔 t 为随机变量，三参量威布尔分布的分布函数为：

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (1)$$

其概率密度函数表达式为：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

式中， α 、 β 、 γ 分别为形状、尺度和位置参数。其中， α 决定威布尔分布密度曲线的形状； β 是一种平均效应，表征威布尔分布中点的大致位置； γ 表征三参量威布尔分布的起算位置，当位置参数 $\gamma=0$ 时，三参量威布尔分布便退化为相应的二参量威布尔分布。

为估计威布尔分布的三个参数，需对 (1) 式作如下变换：

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3)$$

将上式两边同时取两次自然对数得到：

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \alpha (\ln(t - \gamma) - \ln \beta) \quad (4)$$

令 $Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$ ， $X = \ln(t - \gamma)$ ， $A = \alpha$ ， $B = -\alpha \ln \beta$ ，则 (4) 式可改写为：

$$Y = AX + B \quad (5)$$

可见，在对随机变量 t_i 和分布函数 $F(t_i)$ 进行转换后，得到了一个关于 X 和 Y 的线性方程。

选用最小二乘法对其参数进行估计 (朱铭扬, 2006; 赵冰峰等, 2007)，且其估计效果的优劣可用相关系数表征，相关系数的值越接近 1，表明线性拟合的效果越好。其中， X 与 Y 的线性相关系数由最小二乘法原理可得：

$$R_{XY} = \frac{l_{XY}}{\sqrt{l_{XX} \cdot l_{YY}}} \quad (6)$$

式中, $l_{XX} = \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - n\bar{X}^2$, $l_{XY} = \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - n\bar{X} \cdot \bar{Y}$, $l_{YY} = \left(\sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) - n\bar{Y}^2$; 其中 $\bar{X} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)$ 。

为利用历史地震记录数据估计威布尔分布的 α 、 β 、 γ , 需计算累计概率 $F(t_i) = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N}$, 其中 n_i 是时间间隔 t_i 内的发震次数, N 为地震总数。由于受到地震记录不完整等条件的影响, 无法直接通过统计历史地震记录得到准确的累计概率 $F(t_i)$, 为方便研究, 我们采用 $F(t_i)$ 的无偏估计量 $\frac{i}{n+1}$ 。即:

$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \quad (7)$$

对于每个随机变量 t_i , 有 $X_i = \ln(t_i - \gamma)$, $Y_i = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t_i)}$ 。

由于 γ 表示三参量威布尔分布模型的起算位置, 因此每一强震发震间隔应大于等于 γ , 即 $t \geq \gamma$ 。

通常认为, 一个地震活动的全过程大致可以分为 4 个时间段: 应力积累期、活动加速期、能量释放期和应力调整期。理论上, 在地震发生之前应该存在一个最短的应力累积时间, 即应存在最短发震时间间隔。在研究器件失效问题时, γ 被称为最短寿命, 表明器件在最短寿命时间段内不会发生失效现象。现将器件失效过程与地震触发过程类比, 认为三参量威布尔分布模型中的 γ 表示潜在震源区强震的最短复发时间。

具体估计步骤总结如下:

(1) 收集潜在震源区的历史地震记录, 据其得到强震复发时间 (T_1, T_2, \dots, T_n) , 并对其按照从小到大的顺序依次排列 $(T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_n)$; 依次代入变换后的线性公式 (5)。

(2) 采用最小二乘法, 对 X 和 Y 进行线性拟合, 估计 α 和 β , 随后将 α 和 β 的估计值代入 $\gamma = T_i - \beta \cdot \left\{ -\ln[1 - F(T_i)] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}$ 中, 进而估计 γ 。

(3) 将 α 、 β 和 γ 的估计值代入公式 (6), 得到 X 和 Y 的最小二乘拟合相关系数 R_{XY} 。

(4) 最小二乘拟合效果的优劣依据相关系数 R_{XY} 数值的大小进行评判, 相关系数 R_{XY} 的值越大, 表明最小二乘拟合的效果越好。同时, γ 的估计值表示三参量威布尔分布的起算位置, 故其应小于等于历史地震记录的最小强震复发时间 T_1 , 即 $\gamma \leq T_1$ 。因此, 以 $\gamma \leq T_1$ 且相关系数 R_{XY} 最大为判断依据, 最终得到符合上述条件的 α 、 β 和 γ 的估计值。

(5) 将威布尔分布模型中各参数的估计值代入公式 (3) 中, 估计潜在震源区未来一段时间 t 内的强震危险性。

2 案例研究

2.1 日本东海-南海地震带强震危险性估计

Rikitake (1999) 在研究日本东海地区再次发生特大地震的概率时, 提供了日本中部及西南部太平洋南岸的日本东海-南海地震带特大地震目录 ($M \geq 7.9$) (表 1)。为比较三参量威布尔分布与二参量的拟合效果, 本文假设该地震带上的强震复发时间 t 服从二参量和三参量形

式的威布尔分布模型，按照前文介绍的原理与方法，可估计相应的两种威布尔分布形式的参数（表 2）。

表 1 日本东海-南海地震带上的特大地震

Table 1 Great earthquakes in the Tokai-Nankai zone

地震	东海地区				南海地区					
	年	震级	骏河湾（第 1 段）		东海近海（第 2 段）		纪伊半岛近海（第 3 段）		四国岛近海（第 4 段）	
			证据	间隔/a	证据	间隔/a	证据	间隔/a	证据	间隔/a
684	8.3			信度低		信度低		确认		
887	8—8.5							确认		
1096	8—8.5			确认						
1099	8—8.3							确认		
1361	8.3—8.5							确认		
1498	8.2—8.4			确认		确认		液化推测	137	
1605	7.9			确认	107	确认	107	确认	107	
1707	8.4	确认		确认	102	确认	102	确认	102	
1854	8.4	确认	147	确认	147	确认	147	确认	147	
1944	7.9			确认	90					
1946	8.0					确认	92	确认	92	

注：确认表示确认的历史地震；液化推测表示根据地面液化证据推测出的历史地震；信度低表示信度低的历史地震。

表 2 威布尔分布的参量及相关系数

Table 2 The parameters in the Weibull distribution and correlation coefficient

威布尔分布	形状参数 α	尺度参数 β	位置参数 γ	相关系数
二参量形式	6.08	122.28	0	0.88
三参量形式	0.83	26.70	89.06	0.97

依据二参量和三参量形式的威布尔分布模型的参数，并将其代入公式中，分别绘制出日本东海-南海地震带上强震（ $M \geq 7.9$ ）的发生率随时间变化的累积概率曲线（图 1），并可从图中找到该地震带对应未来 100 年、150 年和 200 年的累积概率。再将累积概率与 1 做差即可得到强震危险性估计值（表 3）。

由表 2 可知，本文得到的三参量威布尔分布拟合的相关系数较二参量大 0.09，表明对于同一组数据三参量的参数拟合效果优于二参量，估计的强震危险性更为可信。同时，三参量威布尔分布模型的最短发震时间间隔（即位置参量 γ ）为 89 年，与二参量相比更符合实际强震复发过

程。由表 3 和图 1 可见,三参量威布尔分布估计的该地震带未来 100、150、200 年的强震危险性较二参量威布尔分布得到的结果分别大 0.13、小 0.11 和小 0.04;在未来 150 年及其更长的时间段内,三参量威布尔分布模型估计的日本东海-南海地震带的强震危险性要小于等于二参量得到的结果。

2.2 马尼拉海沟俯冲带强震危险性估计

马尼拉海沟是由菲律宾板块向南海板块仰冲所形成的一种汇聚型边界,其位于中国南海东侧,起于台湾南部,途经吕宋岛西侧延至民都乐岛西边,空间上呈南北弧形展布(高翔等,2012)。从构造地貌上分析马尼拉海沟,其断裂面呈不对称的“V”型,海沟的底部宽 10km,水深

4800—4900m,地形平坦。马尼拉海沟俯冲带发生过多强震,且地震呈条带状分布,该区域被认为是南中国海最具威胁的潜在地震海啸源区(杨马陵等,2005;潘文亮等,2009)。本文选取马尼拉俯冲带作为案例研究区域,由国际地震中心(www.isc.ac.uk)检索得到 1900—2015 年该区域(12—22°N, 118—122°E)的地震目录($M \geq 7.5$)(表 4),并绘制 $M-T$ 图(图 2)和震中分布图(图 3)。

表 3 日本东海-南海地震带未来 100、150、200 年的强震危险性

Table 3 The strong earthquake risk in the Tokai-Nankai seismic zone in 100, 150, 200 years

威布尔分布	100 年	150 年	200 年
二参量形式	0.25	0.97	1
三参量形式	0.38	0.86	0.96

表 4 1900—2015 年马尼拉海沟俯冲带 7.5 级以上的地震目录

Table 4 The earthquake catalog in the Manila trench subduction zone from 1900 to 2015 ($M \geq 7.5$)

发震时间	震级/ M	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E
1934	7.6	17.4626	119.2
1937	7.6	14.5749	121.68
1942	7.5	13.061	120.48
1970	7.5	15.78	121.71
1972	7.5	13.3816	120.34
1990	7.7	15.7	121.22

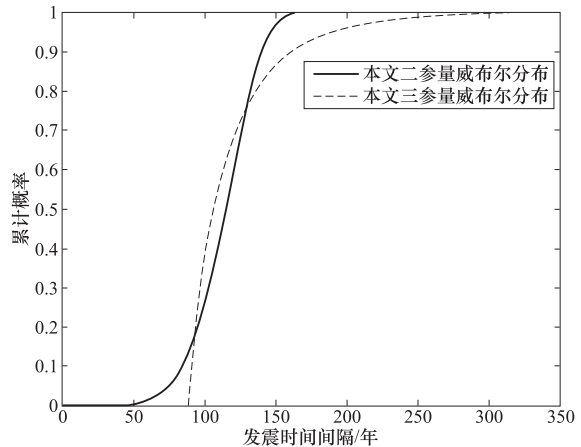


图 1 日本东海-南海地震带强震($M \geq 7.9$)累计概率

Fig. 1 The cumulative probability of strong earthquake ($M \geq 7.9$) hazard in the Tokai-Nankai seismic zone

假设强震发震时间间隔符合三参量威布尔分布, 采用最小二乘法估计得到三参量威布尔分布的位置参数 1.70、形状参数 0.47 和尺度参数 8.91, 拟合相关系数为 0.99。再将参数估计值代入三参量威布尔分布模型中, 得到马尼拉海沟俯冲带潜在地震海啸源区未来 10、30 和 50 年的强震危险性 (表 5) 并估计其最短发震时间间隔为 1.70 年。

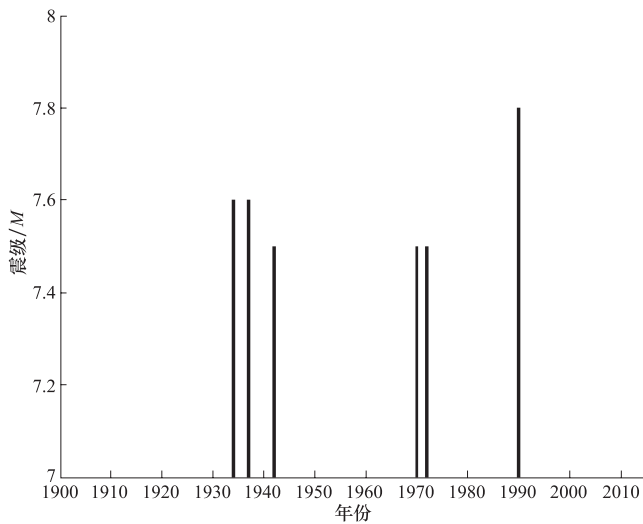


图 2 1900—2015 年马尼拉海沟俯冲带 7.5 级以上地震的 $M-T$ 图

Fig. 2 The $M-T$ plot of earthquakes in the Manila trench subduction zone from 1900 to 2015 ($M \geq 7.5$)

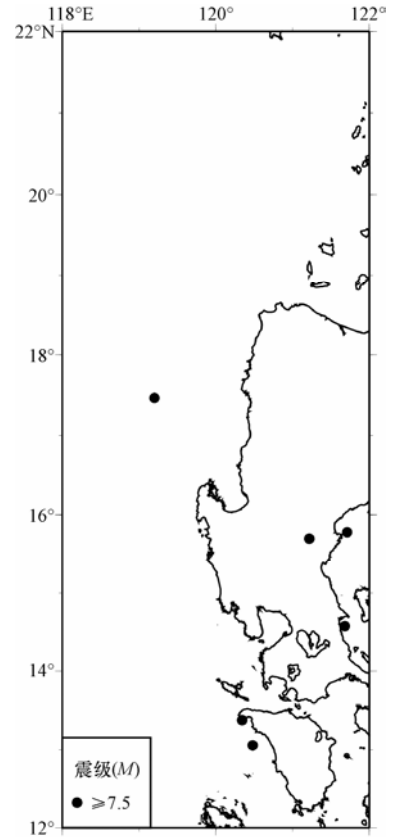


图 3 1900—2015 年马尼拉海沟俯冲带及其邻域的震中分布图 ($M \geq 7.5$)

Fig. 3 Epicenter in the Manila trench subduction zone and its adjacent region from 1900 to 2015 ($M \geq 7.5$)

3 结语

本文给出一种假设强震发震时间间隔服从三参量威布尔分布, 估计潜在震源区强震危险性的方法。由于潜在地震海啸源实际上是位于海域的一部分潜在震源, 所以本文给出的估计方法也可用于潜在地震海啸区强震危险性估计的工作中。

我们选择日本东海-南海地震带

作为潜在地震海啸源区进行的案例研究, 结果表明三参量威布尔分布的拟合效果优于二参量威布尔分布。利用三参量威布尔分布估计潜源区的强震危险性, 其中的位置参量可表示最短发震时间间隔, 所以三参量威布尔分布所蕴含的物理意义更符合强震复发过程。据此, 我们

表 5 马尼拉海沟俯冲带潜在地震海啸源区未来 10、30 和 50 年的强震危险性

Table 5 The strong earthquake hazard in the Manila trench subduction zone in 10, 30, 50 years

时间段	强震危险性
未来 10 年	0.62
未来 30 年	0.82
未来 50 年	0.89

建议使用威布尔分布模型估计潜在震源区的强震危险性时, 采用三参量的形式。

参考文献

- 高翔, 张健, 孙玉军等, 2012. 马尼拉海沟俯冲带热结构的模拟研究. 地球物理学报, **55** (1): 117—125.
- 高战武, 陈国星, 周本刚等, 2014. 新地震区划图地震构造区划分的原则和方法——以中国东部中强地震活动区为例. 震灾防御技术, **9** (1): 1—11.
- 李志雄, 李献智, 傅征祥, 1993. 华北地区主要地震带中强震潜在危险性估计. 地震地磁观测与研究, **14** (3): 25—32.
- 李志雄, 高旭, 吕梅梅等, 1995. 中国大陆 7 级大震序列时间特征及中期预测方法. 地震, (2): 97—105.
- 路鹏, 袁一凡, 袁洪克等, 2012. 安宁河、则木河构造区近期强震危险性的概率估计. 地震, **32** (4): 62—72.
- 潘华, 高孟潭, 谢富仁, 2013. 新版地震区划图地震活动性模型与参数确定. 震灾防御技术, **8** (1): 11—23.
- 潘文亮, 王盛安, 蔡树群, 2009. 南海潜在海啸灾害的模拟. 热带海洋学报, **28** (6): 7—14.
- 齐诚, Ganas A., 黄辅琼等, 2008. 希腊 Ionian 海 Kefallinia 转换断裂带的地震复发行为. 中国地震, **24** (1): 1—10.
- 任鲁川, 洪明理, 2012. 地震海啸危险性分析研究进展. 防灾科技学院学报, **14** (2): 9—14.
- 温瑞智, 任叶飞, 2007. 我国地震海啸危险性分析方法研究. 世界地震工程, **23** (1): 6—11.
- 杨马陵, 魏柏林, 2005. 南海海域地震海啸潜在危险的探析. 灾害学, **20** (3): 41—47.
- 张艳春, 2012. 两参数 Weibull 分布的控制图设计. 杭州: 浙江工商大学, 1—56.
- 赵冰峰, 吴素君, 2007. 三参数威布尔分布参数估计方法. 金属热处理, **32** (S1): 443—446.
- 周本刚, 陈国星, 高战武等, 2013. 新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色. 震灾防御技术, **8** (2): 113—124.
- 朱铭扬, 2006. 三参数威布尔分布的参数估计. 江苏技术师范学院学报, **12** (6): 31—34.
- Rikitake T., 1999. Probability of a great earthquake to recur in the Tokai district, Japan: reevaluation based on newly-developed paleoseismology, plate tectonics, tsunami study, micro-seismicity and geodetic measurements. Earth, Planets and Space, **51**(3): 147—157.

Estimation of the Strong Earthquake Risk in Potential Seismic Source Based on 3-Parameter Weibull Distribution

Liu Zhe¹⁾, Li Qi²⁾, Ren Luchuan¹⁾, Tian Jianwei¹⁾ and Zhang Kun¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China

2) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract We propose a method to estimate the strong earthquake risk in the potential seismic source area based on 3-parameter Weibull distribution in this paper. We choose the Tokai-Nankai seismic zone as a case study area to estimate the strong earthquake risk on the assumption that the strong earthquake occurrence time interval in that area coincides with the 2-parameter or 3-parameter Weibull distribution respectively. The results show that the 3-parameter Weibull distribution is superior to 2-parameter Weibull distribution for estimation of strong earthquake risk. We also estimate the strong earthquake risk in the Manila Trench subduction zone based on 3-parameter Weibull distribution, and the results show that the strong earthquake ($M \geq 7.5$) recurrence probability in 10, 30 and 50 years are 62%, 82%, 89% respectively and the estimated shortest recurrence time interval is 1.70 years.

Key words: Potential seismic source; Strong earthquake risk estimation; Weibull distribution