

郭星, 潘华. 2016. 强震复发概率模型中的参数不确定性研究. 地震学报, 38(2): 298-306. doi:10.11939/jass.2016.02.013.

Guo X, Pan H. 2016. Parameter uncertainty analysis on probability model of strong earthquake recurrence. *Acta Seismologica Sinica*, 38(2): 298-306. doi:10.11939/jass.2016.02.013.

强震复发概率模型中的参数不确定性研究^{*}

郭 星¹⁾ 潘 华^{2),†}

1) 中国北京 100082 环境保护部核与辐射安全中心

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 在强震发生概率计算过程中,往往只考虑参数的随机不确定性,却很少考虑参数的认知不确定性.本文以布朗过程时间(BPT)模型为例,利用贝叶斯估计法定量分析了强震平均复发间隔的认知不确定性;研究了在强震发生概率计算过程中如何考虑这种认知不确定性.结果表明:采用不同的强震复发间隔参数估计方法,所得的参数认知不确定性存在明显差异;在计算强震发生概率时,是否考虑参数认知不确定性所得的结果存在较大差异.

关键词 强震发生概率 参数不确定性 随机不确定性 认知不确定性

doi:10.11939/jass.2016.02.013 中图分类号: P315.08 文献标志码: A

Parameter uncertainty analysis on probability model of strong earthquake recurrence

Guo Xing¹⁾ Pan Hua^{2),†}

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

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In the process of calculating probability for large earthquake occurrence, traditional methods often only consider aleatory uncertainty, but epistemic uncertainty is rarely taken into account. This paper takes Brownian passage time (BPT) model as an example, epistemic uncertainty of mean recurrence interval of large earthquakes is analyzed quantitatively by using Bayesian estimation method, and how to take epistemic uncertainty into the calculation of the occurrence probability of large earthquake is also studied. The results show that there is significant difference in parameter uncertainty among different methods for determining mean recurrence interval of large earthquakes, also there is remarkable difference between the results with and without considering the epistemic uncertainty of parameters in the process of calculating the probability for large earthquake occurrence.

Key words: probability for large earthquake occurrence; parameter uncertainty; aleatory uncertainty; epistemic uncertainty

* 基金项目 国家科技支撑项目(2012BAK15B01-08)资助.

收稿日期 2015-08-25 收到初稿, 2015-11-02 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: panhua.mail@163.com



引言

在计算强震发生概率时, 为考虑强震发生的时间记忆性, Utsu(1972), Rikitake(1974)和 Hagiwara(1974)基于弹性回跳理论(Reid, 1910)提出了一种更新概率模型, 该模型假定地震的发生符合更新过程。此后, 国内外研究人员先后提出了诸多符合更新过程的概率分布模型, 其中比较常用的有对数正态模型(Nishenko, Buland, 1987)和布朗过程时间(Brownian passage time, 简写为 BPT)模型(Ellsworth *et al*, 1999; Matthews *et al*, 2002)。

对于任意一种概率分布模型, 若已知强震发生的概率密度函数 $f(T)$ 和之前一次强震的离逝时间 T_e , 则可计算出断层源上未来一段时间 ΔT 内强震发生的条件概率(Wesnousky, 1986), 即

$$P(T_e, \Delta T) = \frac{\int_{T_e}^{T_e + \Delta T} f(T) dT}{\int_{T_e}^{\infty} f(T) dT}, \quad (1)$$

其中概率密度函数 $f(T)$ 的参数主要包括强震的平均复发间隔 \bar{T} 以及反映复发间隔 T 自然随机变异性(不确定性)的参数, 如标准差 σ_T 和变异系数 α 。

参数的不确定性包括随机不确定性和认知不确定性。随机不确定性反映的是参数的自然变异性, 这种参数本身所固有的随机性与当前人类的认知水平或地震资料的丰富程度无关, 不会随着人类认知水平或资料丰富程度的提高而减小; 认知不确定性反映的是人们对参数的主观认知不确定性, 这种不确定性一般由资料丰富程度、资料测定误差大小以及具体参数评估方法等多种因素所决定, 会随着人类认知水平或资料丰富程度的提高而减小。在以往的强震发生概率计算过程中, 往往只考虑强震复发间隔 T 的自然随机不确定性, 却很少考虑平均复发间隔 \bar{T} 的参数认知不确定性。不考虑断层上历史地震或古地震资料的丰富程度, 而只采用一个固定的平均复发间隔参数值来计算强震发生概率, 这显然不够严谨。

针对上述问题, 本文以较常用的 BPT 模型为例, 根据复发间隔数据量, 采用贝叶斯估计法对平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性进行定量研究, 并提出了一种考虑平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性的强震发生概率计算方法。

1 强震复发概率模型中的参数不确定性研究

BPT 模型是 Ellsworth 等(1999)和 Matthews 等(2002)在弹性回跳理论(Reid, 1910)基础上提出的强震复发概率模型。该模型假定构造应力(或地震矩)在稳定加载过程中会受到一些自然随机事件的影响, 其概率密度函数为

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

式中: \bar{T} 为断裂段强震平均复发间隔; α 为强震复发间隔的变异系数, 该系数反映的是强震复发间隔的自然随机不确定性, 可以通过对大量归一化复发间隔数据的统计分析得到。依据郭星和潘华(2015), 本文直接取变异系数 $\alpha=0.34$ 。

对强震平均复发间隔 \bar{T} 的估计通常采用以下 3 种方法：

1) 历史地震或古地震估计法. 若断层源上有 2 个以上的历史地震记载或古地震记录, 可以利用其时间间隔来估计强震的平均复发间隔.

2) 滑动速率法. 根据地震复发的时间可预报模型(Shimazaki, Nakata, 1980), 断层源上强震之间的平均复发间隔 \bar{T} 可由该断层源最近一次地震的同震位错 u 与断层地震平均滑动速率 v 的比值来估计, 即

$$\bar{T} = \frac{u}{v}, \quad (3)$$

式中, v 由较长时期内断层的平均滑动速率减去断层长期无震蠕滑的平均速率计算得到.

3) 地震矩释放率法(Wesnousky, 1986). 在历史地震或古地震资料不完整时, 根据断层的滑动速率, 可以采用地震矩释放率法来估计平均复发间隔 \bar{T} , 即

$$\bar{T} = \frac{\bar{M}_0}{\dot{M}_0}, \quad (4)$$

式中: \bar{M}_0 为地震矩, 由强震的平均特征地震震级确定; \dot{M}_0 为地震矩释放率, 由断层平均滑动速率、断层面长度和宽度等确定.

参考上述 3 种强震平均复发间隔 \bar{T} 的估计方法, 本文按照是否有强震复发间隔数据, 分别讨论了强震平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性. 其中, 对于有强震复发间隔数据的情况, 又分为已知一个和已知两个强震复发间隔数据两种情况. 由于不同数量的强震复发间隔数据的参数不确定性计算方法相似, 故本文仅对已知一个和已知两个强震复发间隔数据的情况进行研究.

综上所述, 本文分 3 种情况讨论平均复发间隔的认知不确定性计算: ① 使用一个强震复发间隔数据确定平均复发间隔 \bar{T}_1 的认知不确定性; ② 使用两个强震复发间隔数据确定平均复发间隔 \bar{T}_2 的认知不确定性; ③ 未使用强震复发间隔数据确定平均复发间隔 \bar{T}_3 的认知不确定性. 为便于对比, 不同情况计算实例中均设定所确定的平均复发间隔 \bar{T}_1 , \bar{T}_2 和 \bar{T}_3 为 100 年. 经验证, 所设定平均复发间隔参数的大小对不确定性评估方法本身及其具体计算过程并没有影响, 故本文统一设定所确定的平均复发间隔为 100 年是可行的.

1.1 已知一个强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_1 的认知不确定性估计

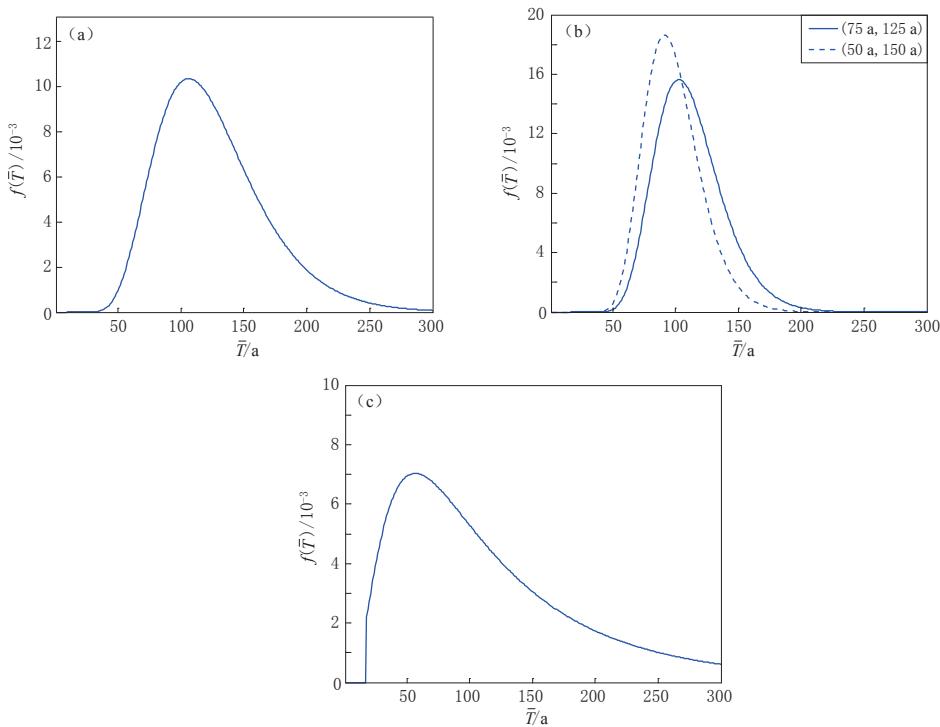
若已知一个强震复发间隔数据 T_{11} , 则可以直接取 T_{11} 为强震平均复发间隔 \bar{T}_1 . 对于任意平均复发间隔 \bar{T} , 根据式(2)可计算得到复发间隔为 T_{11} 的概率密度为

$$f(T_{11}|\bar{T}) = \sqrt{\frac{\bar{T}}{2\pi\alpha^2 T_{11}^3}} \exp\left[-\frac{(T_{11}-\bar{T})^2}{2T\alpha^2 T_{11}}\right]. \quad (5)$$

根据等可能(拉普拉斯)决策法, \bar{T} 为 $0-\infty$ 范围内任何一个值的可能性相同, 即先验密度为处处相等的常数, 定义该常数为 h . 根据贝叶斯估计法, 则可得到 \bar{T} 的认知不确定性的概率密度函数为

$$f(\bar{T}) = \frac{hf(T_{11}|\bar{T})}{\int_0^\infty hf(T_{11}|\bar{T})d\bar{T}} = \frac{f(T_{11}|\bar{T})}{\int_0^\infty f(T_{11}|\bar{T})d\bar{T}}. \quad (6)$$

本研究中设定 $\bar{T}_1=100$ 年, 根据式(6)可计算得到相应的概率密度函数 $f(\bar{T})$, 结果如图 1a 所示. 可以看出, \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_1 (100 年)以后的累积概率要大于在 1 倍 \bar{T}_1 (100 年)以前的累积概率.

图 1 平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性概率密度函数图

(a) 已知一个复发间隔数据; (b) 已知两个复发间隔数据; (c) 无复发间隔数据

Fig. 1 The probability density function for epistemic uncertainty of average recurrence intervals \bar{T}

- (a) One known data of recurrence interval; (b) Two known data of recurrence interval; (c) Without recurrence interval data

对于已知一个强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_1 的认知不确定性计算方法适用于以下 3 种情况: ① 有一个复发间隔数据条件下的历史地震或古地震估计法; ② 滑动速率法; ③ 有一个现代的震级数据, 且震级测定误差非常小(可忽略)时的地震矩释放率法.

1.2 已知两个强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_2 的认知不确定性估计

若已知两个强震复发间隔数据, 则可直接取两个强震复发间隔数据 T_{21} 和 T_{22} 的均值作为平均复发间隔 \bar{T}_2 . 对于任意平均复发间隔 \bar{T} , 根据式(2)可计算得到复发间隔为 T_{21} 的概率密度为

$$f(T_{21}|\bar{T}) = \sqrt{\frac{\bar{T}}{2\pi\alpha^2 T_{21}^3}} \exp\left[-\frac{(T_{21}-\bar{T})^2}{2\bar{T}\alpha^2 T_{21}}\right], \quad (7)$$

复发间隔为 T_{22} 的概率密度为

$$f(T_{22}|\bar{T}) = \sqrt{\frac{\bar{T}}{2\pi\alpha^2 T_{22}^3}} \exp\left[-\frac{(T_{22}-\bar{T})^2}{2\bar{T}\alpha^2 T_{22}}\right]. \quad (8)$$

假定 T_{21} 和 T_{22} 这两个复发间隔数据的出现是相互独立的(独立事件的联合概率一般为乘积形式), 根据贝叶斯估计法, 则可得到 \bar{T} 的认知不确定性分布的概率密度函数为

$$f(\bar{T}) = \frac{h f(T_{21}|\bar{T}) f(T_{22}|\bar{T})}{\int_0^\infty h f(T_{21}|\bar{T}) f(T_{22}|\bar{T}) d\bar{T}} = \frac{f(T_{21}|\bar{T}) f(T_{22}|\bar{T})}{\int_0^\infty f(T_{21}|\bar{T}) f(T_{22}|\bar{T}) d\bar{T}}. \quad (9)$$

本研究中分别设定 $T_{21}=75$ a, $T_{22}=125$ a 和 $T_{21}=50$ a, $T_{22}=150$ a, 根据式(9)可计算得到相应的概率密度函数 $f(\bar{T})$, 结果如图 1b 所示. 可以看出: 对于不同的 T_{21} 和 T_{22} 历史强震复发间隔数据组合, 即使计算得到的平均复发间隔 \bar{T}_2 相同, 相应的概率密度函数 $f(\bar{T})$ 也不同. 如果设定 $T_{21}=75$ a, $T_{22}=125$ a, 则 \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_2 (100 年)以后的累积概率要大于在 1 倍 \bar{T}_2 (100 年)以前的累积概率; 而如果设定 $T_{21}=50$ a, $T_{22}=150$ a, 则 \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_2 (100 年)以后的累积概率要小于在 1 倍 \bar{T}_2 (100 年)以前的累积概率.

值得注意的是, 对于两个强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_2 的认知不确定性计算方法, 仅适用于有两个复发间隔数据条件下的历史地震或古地震估计法.

1.3 无强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_3 的认知不确定性估计

对于无强震复发间隔数据情况下的平均复发间隔的确定, 只能利用强震的特征地震震级进行估计. 根据特征地震的概念(Aki, 1984; Schwartz, Coppersmith, 1984), 某些断层源在长期活动过程中, 重复发生的大地震往往表现出相似的破裂尺度和震级大小, 即特征地震震级的大小存在一定的随机不确定性. 若要利用地震矩释放率法来估算大地震的平均复发间隔, 则必须首先确定其特征地震震级的均值.

对于特征地震平均震级 \bar{M} 的确定, 可以由历史地震震级得到, 也可以由震级-破裂尺度的经验关系计算得到, 但这样得到的特征地震平均震级仅为最大可能的特征地震平均震级, 即特征地震平均震级的认知不确定性分布的均值. 不论采用何种方法, 所确定的特征地震平均震级均存在认知不确定性, 而直接得到的特征地震震级不确定性分布同时又包括了特征地震平均震级的认知不确定性和其本身的随机不确定性. 因此, 若要定量得到特征地震平均震级的认知不确定性分布, 须首先根据误差的传播理论对震级的不确定性进行分离, 即

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_A^2}, \quad (10)$$

式中, σ_M 为震级总的不确定性分布的标准差, σ_E 和 σ_A 分别为特征地震平均震级的认知不确定性分布标准差和特征地震震级的随机不确定性分布标准差. 由式(10)可知, 只要 σ_M , σ_E 和 σ_A 这 3 个参数中确定了任意两个参数, 即可计算得到另外一个参数.

强震平均复发间隔的认知不确定性由特征地震平均震级的认知不确定性所决定. 假定特征地震平均震级的认知不确定性分布满足均值为 \bar{M}_m , 标准差为 σ_E 的正态分布(或截断正态分布), 则该正态分布的概率密度函数为

$$f(\bar{M}) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\bar{M} - \bar{M}_m)^2}{2\sigma_E^2}\right]. \quad (11)$$

震级为 M 的地震所释放的地震矩 M_0 可以由郭星(2014)给出的我国面波震级与地震矩的经验关系式计算得到, 即

$$\lg M_0 = 1.5M + 8.61, \quad (12)$$

式中, 地震矩 M_0 的单位为 N·m. 若已知将要发生的潜在地震震级 M 和断层源上的年平均地震矩释放率 \dot{M}_0 , 则可计算出该潜在地震与前一次地震的复发间隔 T , 即

$$T = \frac{M_0}{\dot{M}_0}. \quad (13)$$

将式(12)带入式(13)并整理得:

$$\lg T = 1.5M + 8.61 - \lg \dot{M}_0. \quad (14)$$

将常用对数换为自然对数, 则上式变为

$$\ln T = \ln 10 (1.5M + 8.61 - \lg \dot{M}_0). \quad (15)$$

由于特征地震平均震级 \bar{M} 的认知不确定性满足正态分布(或截断正态分布), 则可根据式(11)计算得到 \bar{T} 的认知不确定性符合对数正态分布, 即

$$f(\bar{T}) = \frac{1}{\bar{T} \sigma_{\ln \bar{T}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \bar{T} - \mu_{\ln \bar{T}}}{\sigma_{\ln \bar{T}}} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

如果采用截断正态分布, 则 \bar{T} 的取值范围为 $10^{1.5(\bar{M}_m - 2\sigma_E) + 8.61} / \dot{M}_0 - 10^{1.5(\bar{M}_m + 2\sigma_E) + 8.61} / \dot{M}_0$, 并须对结果作归一化处理. 其中 $\ln \bar{T}$ 的均值 $\mu_{\ln \bar{T}}$ 和标准差 $\sigma_{\ln \bar{T}}$ 分别为

$$\mu_{\ln \bar{T}} = \ln 10 (1.5\bar{M}_m + 8.61 - \lg \dot{M}_0), \quad (17)$$

$$\sigma_{\ln \bar{T}} = 1.5 \ln 10 \sigma_E. \quad (18)$$

本文设定强震平均复发间隔 \bar{T}_3 为 100 年, 设定 $\sigma_E = 0.22$, 而特征地震平均震级的认知不确定性分布均值 \bar{M}_m 和地震矩释放率 \dot{M}_0 则可根据所设定的平均复发间隔进行任意组合. 例如, 若 $\bar{M}_m = 7.5$, 若要使平均复发间隔为 100 年, 根据震级-地震矩的经验关系式, 计算可得地震矩释放率为 7.9×10^{17} N·m. 根据式(16)可以计算得到相应的概率密度函数 $f(\bar{T})$, 结果如图 1c 所示. 可以看出, \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以前的累积概率要大于在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以后的累积概率.

对于无强震复发间隔数据的平均复发间隔 \bar{T}_3 的认知不确定性计算方法适用于以下两种情况:

1) 无历史地震(或古地震)数据条件下的地震矩释放率法. 特征地震平均震级的认知不确定性分布的均值 \bar{M}_m 可由震级-破裂尺度经验关系式直接计算得到; 特征地震震级的不确定性分布的标准差 σ_m 则由震级-破裂尺度经验关系式的统计误差所决定, 这种震级不确定性同时包括了震级的认知不确定性和随机不确定性. 已知震级总的不确定性分布的标准差 σ_m (本文取 $\sigma_m = 0.24$), 若利用式(16)计算平均复发间隔的认知不确定性概率密度函数 $f(\bar{T})$, 则还需要确定特征地震平均震级的认知不确定性分布的标准差 σ_E .

对于特征地震震级随机不确定性分布的标准差 σ_A 的确定, 根据 BPT 模型的概率密度函数及其变异系数 $\alpha = 0.34$, 本文提出利用蒙特卡罗法随机生成 10 万个复发间隔数据, 再利用地震矩释放率即可得到 10 万个合成的震级数据, 对这些震级数据进行统计即可得到随机不确定性分布标准差 σ_A , 再根据式(10)计算得到震级认知不确定性分布标准差 σ_E .

2) 有一个历史地震震级数据, 且震级测定误差较大(不可忽略)时的地震矩释放率法. 其特征地震平均震级 \bar{M}_m 由历史地震震级所确定, 震级的认知不确定性分布标准差 σ_E 则由历史地震震级的误差所决定.

2 考虑参数认知不确定性的强震发生概率计算

若考虑 BPT 模型中参数 \bar{T} 的认知不确定性, 则平均复发间隔 \bar{T} 不再是一个固定参数, 而是一个变量. 对于给定的 \bar{T} , 其所对应的 BPT 模型的概率密度函数为 $f(T|\bar{T})$, 因此可将式(1)修改为

$$P(T_e, \Delta T|\bar{T}) = \frac{\int_{T_e}^{T_e + \Delta T} f(T|\bar{T}) dT}{\int_{T_e}^{\infty} f(T|\bar{T}) dT}. \quad (19)$$

若已知平均复发间隔认知不确定性的概率密度函数 $f(\bar{T})$, 利用全概率公式, 则可计算分段断层源上未来一段时间 ΔT 内强震发生的条件概率, 即

$$P(T_e, \Delta T) = \int_0^\infty f(\bar{T}) P(T_e, \Delta T | \bar{T}) d\bar{T}. \quad (20)$$

利用式(20), 即可在强震发生概率计算中将平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性考虑在内. 针对不同平均复发间隔 \bar{T} 的确定方法, 本文依然分 3 种情况分别进行讨论.

2.1 已知一个强震复发间隔数据的强震发生概率计算

对于已知一个强震复发间隔数据的情况, 平均复发间隔为 \bar{T}_1 , 将式(6)带入式(20)即可计算得到未来一段时间 ΔT 内的强震发生概率. 为了进行对比, 图 2a 给出了同时考虑 \bar{T} 认知不确定性和不考虑 \bar{T} 认知不确定性的 BPT 模型在未来 10 年的强震发生概率. 可以看出, 在已知一个强震复发间隔数据的情况下, 考虑 \bar{T} 认知不确定性与不考虑 \bar{T} 认知不确定性的结果存在明显差异. 当 $T_e < 0.5\bar{T}_1$ 时, 考虑 \bar{T} 认知不确定性的强震发生概率大于不考虑 \bar{T} 认知不确定性的发生概率; 当 $T_e > 0.5\bar{T}_1$ 时, 考虑 \bar{T} 认知不确定性的强震发生概率要小于不考虑 \bar{T} 认知不确定性的发生概率.

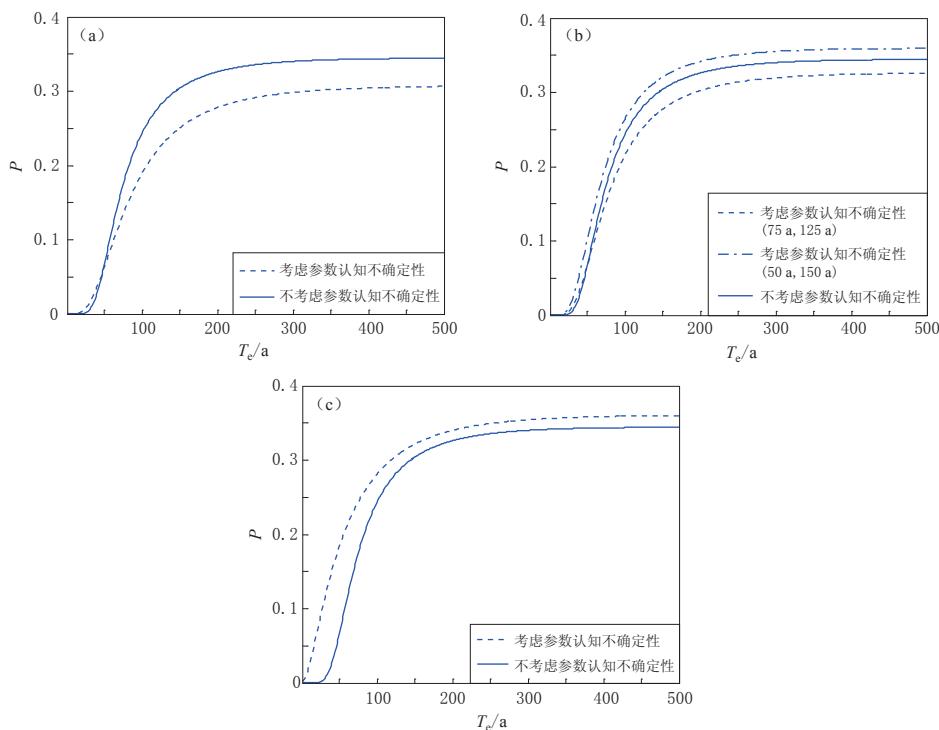


图 2 考虑参数不确定性和不考虑参数认知不确定性情况下的 BPT 模型
在未来 10 年强震发生概率计算结果的对比

(a) 已知一个复发间隔数据; (b) 已知两个复发间隔数据; (c) 无复发间隔数据

Fig. 2 Comparison of probability for large earthquake occurrence in the next ten years between BPT model with and without considering parameter epistemic uncertainty

(a) One known data of recurrence interval; (b) Two known data of
recurrence interval; (c) Without recurrence interval data

2.2 已知两个强震复发间隔数据的强震发生概率计算

对于已知两个强震复发间隔数据的情况, 平均复发间隔为 \bar{T}_2 , 将式(9)带入式(20)即可计算得到未来一段时间 ΔT 内的强震发生概率。为了进行对比, 图 2b 也给出了同时考虑 \bar{T} 认知不确定性和不考虑 \bar{T} 认知不确定性的 BPT 模型在未来 10 年的强震发生概率。可以看出, 在已知两个强震复发间隔数据的情况下, 考虑 \bar{T} 认知不确定性与不考虑 \bar{T} 认知不确定性的结果也存在一定差异。此外, 本文还同时给出了 75 年, 125 年和 50 年, 150 年两组不同的 T_{21} , T_{22} 历史强震复发间隔数据所对应的计算结果。结果表明, 相同的 \bar{T}_2 而不同的 T_{21} , T_{22} 组合, 其发震概率计算结果相差较大。

2.3 无强震复发间隔数据的强震发生概率计算

对于无强震复发间隔数据的情况, 平均复发间隔为 \bar{T}_1 , 将式(16)带入式(20)即可计算得到未来一段时间 ΔT 内的强震发生概率。为了进行对比, 图 2c 亦给出了同时考虑 \bar{T} 认知不确定性和不考虑 \bar{T} 认知不确定性的 BPT 模型在未来 10 年的强震发生概率。可以看出, 在无强震复发间隔数据的情况下, 考虑 \bar{T} 认知不确定性与不考虑 \bar{T} 认知不确定性的结果也存在明显差异, 前者的计算结果要明显大于后者的计算结果。

综上所述, 在强震发生概率计算中, 考虑和不考虑平均复发间隔 \bar{T} 认知不确定性的结果存在明显差异, 故不能忽略参数认知不确定性对计算结果的影响。而这种差异是由平均复发间隔 \bar{T} 认知不确定性的概率密度函数直接决定的, 例如, 如果 \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以前的累积概率小于在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以后的累积概率, 则考虑 \bar{T} 认知不确定性的计算结果要明显小于不考虑 \bar{T} 认知不确定性的计算结果; 如果 \bar{T} 在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以前的累积概率大于在 1 倍 \bar{T}_3 (100 年)以后的累积概率, 则考虑 \bar{T} 认知不确定性的计算结果要明显大于不考虑 \bar{T} 认知不确定性的计算结果。

3 讨论与结论

本文以 BPT 模型为例, 首先对强震复发概率模型中的参数不确定性, 特别是平均复发间隔 \bar{T} 的认知不确定性进行了定量研究; 其次针对不同的平均复发间隔 \bar{T} 估计方法, 分别给出了不同的平均复发间隔 \bar{T} 认知不确定性的概率密度函数; 最后利用全概率公式, 对强震发生概率计算中考虑参数认知不确定性与不考虑参数认知不确定性的计算结果进行了对比分析。

在强震发生概率计算过程中, 根据地震资料的丰富程度, 可以选取相应的平均复发间隔 \bar{T} 估计方法。本文利用贝叶斯估计法计算参数认知不确定性的概率密度函数, 结果表明: 采用不同的强震复发间隔 \bar{T} 估计方法, 所得参数 \bar{T} 认知不确定性的概率密度函数是不同的; 而在强震发生概率计算中, 是否考虑平均复发间隔 \bar{T} 认知不确定性的结果也存在明显差异, 故不能忽略参数认知不确定性对计算结果的影响。

本研究仅对强震复发概率模型中的参数不确定性的定量研究方法进行了探讨, 并未涉及强震复发概率模型本身的认知不确定性。各种强震复发概率模型均基于一定的假设, BPT 模型仅是其中一种较常用的强震复发概率模型。在强震发生概率计算过程中还可以选用其它概率模型, 而采用不同的概率模型所得到的计算结果也是不同的, 这种因模型选择而带来的认知不确定一般可以采用逻辑树的方式进行处理。

参 考 文 献

- 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; 39-43.
- Guo X. 2014. *Stochastic Characteristic-Slip Model and Its Application Method* [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration; 39-43 (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).
- Aki K. 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction[J]. *J Geophys Res*, **89**(B7): 5867-5872.
- 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: U S Geological Survey Open-File Report; 99-522.
- Hagiwara Y. 1974. Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain [J]. *Tectonophysics*, **23**(3): 313-318.
- 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 A. 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* [R]. Washington: State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington; 43-47.
- Rikitake T. 1974. Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain[J]. *Tectonophysics*, **23**(3): 299-312.
- 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.
- Shimazaki K, Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **7**(4): 279-282.
- Utsu T. 1972. *Large Earthquakes Near Hokkaido and the Expectancy of the Occurrence of a Large Earthquake Off Nemuro* [R]. Hokkaido: Coordinating Committee for Earthquake Prediction; 7-13.
- Wesnousky S G. 1986. Earthquake, quaternary faults, and seismic hazard in California[J]. *J Geophys Res*, **91**(B12): 12587-12631.