

李昌珑、高孟潭、徐伟进等,2016,时间相依的概率地震危险性分析研究现状及其在我国的发展前景,中国地震,32(1),1~10。

·研究综述·

时间相依的概率地震危险性分析研究现状 及其在我国的发展前景

李昌珑 高孟潭 徐伟进 吴健

中国地震局地球物理研究所,北京市民族大学南路 5 号 100081

摘要 通过综述时间相依的概率地震危险性分析的研究历史、发展现状,以及对未来在我国发展和应用前景的展望。本文认为,未来我国时间相依的概率地震危险性分析的发展趋势体现在地震活动性模型参数的确定、特征地震模型的适用性及判断准则、重复地震思想的应用、影响特征地震危险性计算因素的研究、大型构造上特征地震震源段落的识别划分、相邻构造相互影响机制研究等方面。未来时间相依的概率地震危险性分析在我国的应用领域主要是给定时间段内的地震风险评估、应急备灾、地震保险等方面。

关键词: 时间相依的地震危险性 特征地震 复发间隔 分段泊松分布 孕震机理

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0001-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震危险性分析是工程地震工作的重要内容,对震害防御工作的实施具有重要的指导意义(胡聿贤,1999)。地震危险性分析方法分为确定性方法和概率性方法。确定性方法是 20 世纪 50~70 年代使用较多的方法,其基于两个基本假设来估计一个地区可能遭受的最高烈度,即相似构造条件的地震活动性的相似性和历史大地震的原地复发性。概率地震危险性分析方法(Cornell,1968)是近年来普遍使用的方法,用某种地震动参数在一段时间内的超越概率作为评价地震危险性指标。

传统的概率地震危险性分析模型假设地震的发生服从泊松分布,各震级档的地震发生率都遵从古登堡-里克特的震级-频度(G-R)关系。这种模型的地震发生率不随时间变化,是时间独立模型。然而事实上,许多断层的地震活动性具有非平稳性,随时间有较明显的变化,如果用时间独立模型,可能会高估或低估一个时间段内的地震危险性。为解决这一问题,需要考虑时间相依的概率地震危险性分析模型。

自从 Cornell(1968)提出概率地震危险性分析方法以来,人们便开始尝试对其中基于泊

[收稿日期] 2015-06-15; [修订日期] 2015-11-20

[项目类别] 地震行业专项“庐山 7.0 级地震孕育发生机理及其影响研究”(201408014)资助

[作者简介] 李昌珑,男,1989 年生,在读博士生,从事地震活动性及地震危险性分析方法研究。E-mail:changlongli@163.com

松模型的假设进行改进,提出了多种时间相依的地震活动性模型。同时随着对地震构造、孕震、地震动传播机理认识的不断深入,将时间相依地震活动性模型与合适的潜在震源模型和地震动衰减关系模型配合使用,形成了时间相依的概率地震危险性分析方法。

本文介绍了时间相依的概率地震危险性分析研究的现状,对地震活动性模型的发展历史、当前研究水平和存在的问题进行了讨论,并对时间相依的概率地震危险性分析的未来发展方向作了展望。

1 时间相依的概率地震危险性分析研究和应用的历史

时间相依的概率地震危险性分析方法伴随人们对描述具有时间非平稳性的地震构造的需求而发展起来,且近年来在国内外的相关研究和应用愈加广泛。

美国联邦地质调查局(USGS)的加州地震发生率工作组(Working Group on California Earthquake Probabilities,简称WGCEP)在1988年就采用时间相依模型对美国加州的圣安德斯断裂的地震危险性进行了研究(WGCEP,1988)。此后这一研究作为WGCEP的日常工作,每隔几年就会发布关于加州地区的时间相依地震危险性研究报告(WGCEP,1988、1990、1996、1999、2003、2008;Field et al,2014)。在20余年的研究中,该工作组对加州地区的主要潜在震源区的地质构造、应力环境、断层运动状态、历史地震等方面进行了详尽的调查,取得了大量资料。该工作组使用地震的周期性和断层间相互作用与应力转移的相关资料进行时间相依的概率地震危险性研究,得到特定地区在未来特定时间段内发生特定震级的地震的概率定量估计结果。

WGCEP在2008年的研究中建立了统一的、全州范围内的时间相依模型——第2版全加州地震破裂预测模型,用于加州地震局的相关工作,并且为加州地震保险业务的建立提供了支持(WGCEP,2008)。该模型包括断层模型、形变模型、各震级档长期的地震发生率模型和一定时段内发生地震的概率模型。该研究获得了整个加州地区未来30年不同震级地震的发生概率,评价了结果的可信度,并与先前的研究做了比较。

WGCEP在2014年发布了第3版全加州地震破裂预测模型,对加州可能发生的潜在破坏性地震的震级、震中位置和平均发生率进行了权威的估计(Field et al,2014)。该研究完善了UCERF 2在断层分段和多断层破裂方面研究的局限,研究了UCERF模型中时间独立的部分,将之融入时间相依模型,得到了加州所有断层的精细资料。该研究指出UCERF3比UCERF2模型更接近观测数据,同时给出了未来模型发展的设想。

2007年,美国的USGS、加州地质调查局和美国一家灾难风险模型软件和咨询(EQECAT)公司等机构合作,分别建立了加州地区时间独立和时间相依的地震破裂预测模型(Petersen et al,2007)。该研究分别使用3种时间独立模型和3种时间相依模型,将各模型加权平均,分别计算了时间独立和时间相依模型下,加州地区从2006年起未来30年10%超越概率的峰值加速度图。并将时间独立和时间相依模型的计算结果进行了比较。

2008年,USGS的Boyd等人对美国阿拉斯加地区进行了时间相依的概率地震危险性分析研究(Boyd et al,2008)。该研究对1985年、1999年和2007年对同一地区的时间独立的概率地震危险性分析模型进行了改进,加入了新的地震复发信息和地震动衰减关系信息。该研究通过断层应力随时间的变化情况建立特征地震的BPT(Browuan Passage Time)模型

(Matthews et al, 2002), 得到阿拉斯加地区各断层未来 50 年的地震发生率。该研究讨论了应力改变对地震危险性的影响, 并将时间相依的地震危险性分析结果与时间独立的结果进行了比较, 提出了未来对模型中参数研究的思路。

同年, USGS 的 Parsons 对美国加州的 South Hayward 断层进行了基于古地震资料的时间相依概率地震危险性分析 (Parsons, 2008)。该研究利用在南海沃德断层收集的古地震目录, 用蒙特卡洛方法建立地震复发模型, 计算了该断层未来 30 年发生 $M \geq 6.7$ 地震的概率, 并与 WGCEP (2008) 使用 BPT 模型对同一断层的计算结果进行了比较, 分析了造成 2 种计算结果不同的原因。该研究认为, 造成 2 种计算结果差异的主要原因是, Parsons 用的是古地震目录资料, 而 WGCEP 用的是断层滑动速率资料。从而提出了用地震目录进行时间相依的地震危险性分析的新思路。

2009 年, 美国西北大学 (Northwestern University) 的 Hebden 等对 New Madrid 地震带和 Charleston, South Carolina 地区进行了时间相依的概率地震危险性分析 (Hebden et al, 2009)。该研究从特征地震假设、地震动衰减关系的确定、时间窗和概率水准的选取、复发周期的确定几个方面建立时间相依模型, 分别考虑了特征地震复发的正态分布和对数正态分布模型, 绘制了不同地震动参数和超越概率的地震危险性图, 并与时间独立模型的结果做了比较。

在日本, 东京都立大学 (Tokyo Metropolitan University) 的 Kumamoto (1999) 进行了板间地震的时间相依的概率地震危险性研究。该研究使用日本地区的四百多年的历史地震数据和部分古地震数据建立时间相依的地震发生率模型, 分别绘出了日本地区 2001~2050 年的 0.2g 峰值加速度超越概率分布图和同时期 10% 超越概率的峰值加速度分布图。该研究考虑了离逝时间、断层分段和断层滑动速率的不确定性, 并将时间相依模型的计算结果与时间独立模型做了比较。研究指出离逝时间和地震危险性存在正相关关系, 并且提出了几处需要特别关注的地震危险性较高的地区。

在欧洲, 希腊塞萨洛尼基大学 (University of Thessaloniki) 的 Papaioannou 等 (2000) 对希腊地区的时间相依的概率地震危险性分析做了研究。该研究用地震活动性和震源参数信息, 对希腊地区的潜在震源区进行了重新划分, 并且使用了新的地震动衰减关系和场地效应数据。研究基于断层的应力积累建立地震发生率的正态分布模型, 计算了 1996~2010 年间的时间相依的地震危险性, 并与时间独立模型进行了比较。该研究没有仅仅局限在地震活动性模型的改进, 而是对震源模型和地震动衰减关系模型都做了调整, 并分析了所采用的时间相依模型的合理性。

中国台湾地区国立台湾大学 (National Taiwan University) 的 Chan 等 (2013) 将时间相依的方法应用于花莲地区的概率地震危险性分析研究。该研究利用了 1940~2005 年的地震目录建立时间相依的特征地震模型, 考虑了地震间相互作用和应力改变的问题, 并将地震预测的相关理论融入地震危险性分析的研究。该研究计算了花莲地区的峰值加速度的超越概率曲线, 并且与先前传统的地震危险性分析结果进行了比较。

在中国大陆, 闻学泽 (1998)、杨明等 (2000) 也对时间相依的概率地震危险性分析方法进行了研究, 分别用于四川省和祁连山中东段地区。这些研究主要使用特征地震的活动性模型, 通过特征震级和复发周期计算地震发生率, 与当前主流的时间相依方法差别不大。时间相依模型除了特征地震模型之外, 还有一种将地震活动性分为平静期和活跃期的分段泊

松模型。董瑞树等(1996)将分段泊松模型用于汾渭地震带的地震危险性分析,丰富了时间相依地震危险性分析的方法。

2014年,郭星(2014)提出了强震复发的随机特征滑动模型。该模型对弹性回跳理论做了改进,根据应力积累速率恒定的假设,提出了震级和地震发生率都是时间相依的模型,并用于中国大陆部分地震构造区。该模型为时间相依的地震危险性分析提供了新的思路。

综上所述,当前国内外的时间相依地震危险性分析使用的地震活动性模型中,仍以特征地震模型和分段泊松模型为主。下文将介绍时间相依的概率地震危险性分析方法的研究现状。

2 时间相依的概率地震危险性分析理论和方法的研究现状

地震活动性模型是时间相依与时间独立的概率地震危险性分析的最大区别所在。建立地震活动性模型的目的是计算出地震的年发生率,用于后续的地震危险性计算。20世纪70年代以来,人们已经提出了多种描述地震活动时空非平稳性的模型(高孟潭,1986),如认为地震活动存在平静期和活跃期的分段泊松模型(Kameda et al,1979;Bender,1984);描述地震活动在时间序列上疏密相间的随机点过程模型(Lomnitz-Adler et al,1979);基于地震活动时空转移的马尔可夫过程模型(Nishioka et al,1980)等。这其中使用较多的是分段泊松模型。自从Schwartz等(1984)提出特征地震的概念以来,基于特征地震的地震活动性模型得到广泛的应用。本节主要介绍特征地震模型和分段泊松模型的研究现状。

2.1 特征地震模型

在一些重复发生大地震的地区,大地震的规律性重复发生受到了人们的关注。1980年,Shimazaki等(1980)对Reid(1910)提出的弹性回跳理论做了改进,提出了大地震的复发模型可分为周期模型、时间可预测模型和滑动可预测模型。1984年,Schwartz等(1984)又提出了特征地震的概念,用来解释美国加州San Andreas断层和Wasatch断层周期性发生6级以上地震,而5级左右地震缺失的现象。特征地震活动性模型考虑特征地震的震级和复发间隔2个参数。对于给定断层,特征地震模型采用地震复发周期的概率密度函数来描述断层上的地震发生率随着最近发生大地震(特征地震)的离逝时间的增加而增大。由于特征地震模型的计算结果与地震发生的内在物理机制相吻合,因此这一方法受到地震学家的青睐。

杨明等(2000)提出特征震级存在一个范围,上限为所在地的震级上限 M_{μ} ,下限为 $M_{\mu}-0.5$ 。因此可认为特征震级 M_c 的分布是一个震级档 $[M_{\mu}-0.5, M_{\mu}]$ 。WGCEP(1988)的研究中采用了将特征地震与小地震分别计算地震危险性的思想,即使用混合地震模型。董瑞树等(2000)将混合地震模型用于中国西部的活动断裂,即建立一个特征地震的起算震级,起算震级以下的地震服从泊松分布,起算震级以上的地震为特征地震。

特征地震模型的一个基本假设是在某一时间段内地震发生的概率密度函数符合某一更新模型(Renewal model)。最早的特征地震复发间隔模型研究是Nishenko等(1987)对环太平洋地震带多处地区的复发大地震的研究。该研究认为环太平洋地区特征地震的复发服从对数正态分布,并给出了适用于整个环太平洋地区的归一化的特征地震复发概率模型。之后,闻学泽(1998)、杨明等(2000)、Petersen等(2007)、Hebden等(2009)的研究中都使用了这一模型,闻学泽(1998)还提出了更适合于中国大陆地区的模型参数。

正态分布模型是特征地震复发模型中最简单的一种。Hebden 等(2009)对正态分布模型和对数正态分布模型进行了比较,得出正态分布模型和对数正态模型的地震发生率差别不大,“除了离逝时间非常大的时段。”

弹性回跳理论从地震构造和应力积累等内在物理机制的角度对地震的孕育和发生做了解释。Matthews 等(2002)依据这一理论,提出了地震复发的布朗过程时间模型(Brownian Passage-Time Model, BPT 模型)。该模型假设发震断层的应力以恒定的速率积累,而特征地震的复发间隔服从正态分布,均值和标准差与应力积累和扩散速率相关。在实际使用中,均值和方差可由测量断层滑动速率得到,也可由特征地震序列计算得到。由于在理论上反映了地震孕育与发生的内在物理机制,BPT 模型也是近年来使用较多的模型。

除了上述几种模型之外,描述特征地震活动性的模型还有韦布尔分布、伽马分布等。再洪流等(2004)对泊松、对数正态、韦布尔、伽马、BPT 等模型进行了比较研究,并应用于北京西北地区。该研究认为在离逝时间远大于复发间隔的地区,BPT 模型更为合理,但也存在特征地震模型是否适用的问题。

所有的特征地震模型都是建立特征地震发生的概率密度函数,再利用积分和全概率公式计算出某个时段内的地震发生率,再在该时段内用泊松公式计算出地震的年发生率,用于后续的计算。

2.2 分段泊松分布模型

分段泊松分布模型又称两态泊松模型,是泊松模型的一种改进,它认为地震活动分为平静期和活跃期,分别对应不同的地震发生率。Kameda 等(1979)提出了分段泊松模型地震发生率的计算方法。Bender(1984)的分段泊松分布模型中提出地震的平静期和活跃期可以以一定概率相互转换。该模型可用在诸如华北地震区等地震活动存在明显平静期和活跃期的地区。如董瑞树等(1993)研究华北地震区曾认为,大多数地震带都可以用 2 个发震速率去描述它们发生的规律。之后董瑞树等(1996)将分段泊松模型用于汾渭地震带,计算了山西临汾盆地和太原盆地的地震危险性。通过对结果的分析,该研究认为分段泊松模型比单纯的泊松模型更为合理。

闻学泽(1995)提出了根据复发间隔的标准差与均值的比值来定量描述地震发生的规律性,将地震复发模式分为泊松模式、特征地震模式和丛集模式。其中丛集模式和分段泊松模型描述的地震复发行类似,都存在平静期和活跃期。

3 时间相依的概率地震危险性分析的发展趋势及应用前景

作为一种考虑了地震发生的时间非平稳性的分析方法,时间相依的概率地震危险性分析将获得越来越广泛的应用。本节从时间相依的概率地震危险性模型的发展趋势和存在的问题等角度,对未来我国时间相依概率地震危险性分析方法的发展和应用作一展望。

3.1 时间相依的概率地震危险性分析方法展望

对于时间相依的概率地震危险性分析的研究,未来的发展方向主要有以下几个方面:

(1) 时间相依的地震活动性模型参数的确定方法。时间相依的概率地震危险性分析的核心是时间相依的地震活动性模型的建立。从时间相依的地震活动性模型的发展过程可看出,从对数正态分布模型和正态分布模型,到 BPT 模型,描述特征地震的模型已经从单

纯的地震复发时间的数学关系发展为包含断层应力积累过程等地震发生的内在物理机制的模型。可以预见,能够描述地震发生和孕震机理的模型将成为未来时间相依的地震危险性分析模型的发展趋势。张永庆等(2007)也指出,可用的概率模型很多,选择的要点不在于模型本身,而在于所采用的模型是否恰当反映了地震活动特性及地震孕育发生的基本规律。未来可以综合地震学研究(例如统计地震学、重复地震研究等)、活动构造研究(例如古地震)和地球动力学研究内容(例如长期的形变监测等),建立能更真实地反映地震活动特征的模型。

(2)特征地震模型对我国的适用性及其判断准则。对于特征地震模型的使用而言,要结合中国不同地区地震活动特点,判定是否适用于特征地震模型。Wensnousky(1994)对特征地震的特点进行了总结,并认为其研究的几条断层符合特征地震模型。但是,目前判断特征地震、确定特征地震的震级范围还多是根据经验设定,缺少对于特征地震的定量判据。今后特征地震的判据也是值得研究的问题。

(3)重复地震思想应用于特征地震研究。断层的应力积累和滑动经常伴随发生“重复地震”(Repeating earthquake)的现象。与特征地震相比,这种地震震级较小,通常在3级以下,但是拥有几乎相同的发震位置和震源机制解(Poupinet et al,1984)。目前研究认为,重复地震的发生与断层滑动的内在物理机制有关(Nadeau et al,1995)。对重复地震的研究有助于理解孕震机理,或将有助于BPT模型的发展。因此,借鉴重复地震的研究方法或能成为未来时间相依地震危险性分析的发展趋势。

(4)特征地震危险性计算中影响因素的研究,包括震源几何模型、震源过程、地震动预测方法(震源运动学或动力学模拟、经验/统计衰减关系)。震源模型本身不随时间变化,但是,由于地震活动性模型发生了变化(特别对于特征地震模型),为了计算地震危险性,必须考虑震源模型的适用性。当使用特征地震模型时,由于特征地震的震级通常较大,可达所在潜在震源区的震级上限,传统的点源、线源或面源模型可能不再适用。胥广银等(2007)提出了对较大震级的地震应使用潜在地震破裂面源模型,认为该模型对较大地震是合理的,并且地震破裂面源的大小和产状对地震危险性分析结果有明显的影响。相应地,对较大地震应使用场点到断层面的最短距离的断层面距(地震破裂面距)为参数的衰减关系,如Sadigh等(1997)提出的衰减关系。随着时间相依的地震活动性模型的发展,势必对震源模型等也要不断地作出相应的调整,形成理论上可靠、实用中可行的地震危险性分析方法。

(5)大型构造上特征地震震源段落的识别划分。大型构造通常可长达数百至上千千米。而特征地震并不总是在整个长度上都发生,而是集中在断层的某段或某几段。例如,对郟庐断裂的有关研究表明,莒县-郟城段是具有特征地震性质的断层段落(晁洪太等,1994)。前文提到的Kumamoto(1999)的时间相依的概率地震危险性研究也对日本的发震构造重新进行了段落划分。今后对于国内特征地震构造,应加强相关研究,得到细化的特征地震震源分布。

(6)相邻构造相互影响。断层间的相互作用和应力转移也是今后的时间相依概率地震危险性分析需要考虑的问题。一次较大地震的发生会引起周边范围内的应力环境发生一系列变化,认清断层的应力积累情况对建立正确的地震活动性模型具有重要意义。目前已经有研究开始考虑断层间的相互作用和应力转移对地震危险性的影响(WGCEP,2003),根据

对构造相互影响的认识建立相应的构造模型,将是未来的发展趋势。

综上,今后中国时间相依概率地震危险性分析可加强以下几个方面的工作:

(1)完善所关注区域内历史地震和古地震资料的分析研究,建立精细的地震目录。在特征地震模型下,历史地震和古地震资料是获得特征地震震级和复发周期的重要信息,详细的历史地震和古地震资料能提高时间相依模型的可靠性。中国东部地区历史地震记录较丰富,西部地区古地震遗迹保存较完好,拥有独特的优势,这使资料的收集具有可行性。

(2)加强对活动断层滑动速率和应力应变测量资料的研究和使用。此工作对认识地震的孕震机理具有重要意义,是对地震活动性资料的印证和补充。Boyd 等(2008)在对阿拉斯加地区的时间相依地震危险性研究中,精细的地质资料、精确的断层滑动速率和应力变化数据发挥了重要作用,对我国开展此项工作有重要参考价值。

(3)进一步丰富研究成果,便于交流和使用。例如,制作一个地震复发周期内不同时段、多种地震动参数的地震危险性图,既能直观地展现研究成果,也能提高所取得成果的说服力,更便于进一步的研究及其在震害防御中的应用。

(4)继续对地震的发生和孕震机理进行理论研究。2002年提出的BPT模型试图从地震的内在物理机制上构建时间相依的概率地震危险性模型,今后这一理论还将发展下去。同时,也应加强对断层间相互作用与应力转移对地震危险性的影响的研究。地震学面临许多世界性难题,理论研究还将在相当长的时期内持续下去。有了理论的支持,时间相依的概率地震危险性分析方法才能得到正确的应用。

3.2 时间相依概率地震危险性分析方法的应用前景

时间相依的概率地震危险性分析将会在我国得到更为广泛的应用。在闻学泽(1998)、杨明等(2000)、董瑞树等(2000)、冉洪流等(2004)研究的基础上,参考国际上最新的应用实例(Peterson et al, 2007; Hebden et al, 2009; Field et al, 2014),未来时间相依概率地震危险性分析方法在我国还可以加强以下几方面的应用:

(1)给定时间段内的地震风险评估。计算出给定地区给定时间段内的地震危险性之后,再结合该地区的易损性,可得到该地区在给定时间段内的地震风险。时间相依的地震风险评估对地震社会学具有重要意义。

(2)应急备灾。用时间相依概率地震危险性分析方法可筛选出未来某时间段内大地震的高危地区。对这些地区进行重点设防,做到有备无患,便于在地震发生后迅速反应,减小损失。

(3)地震保险。大地震可能造成严重的财产损失,地震保险业应运而生。目前在美国等发达国家,地震保险已经实现了商业化、市场化,业务量迅速增长。我国地广人稠,经济发展迅猛,将时间相依概率地震危险性分析的结果用于地震保险业拥有广阔的前景。

4 结语

近几十年来,概率地震危险性分析从时间独立发展到时间相依,从一种时间相依模型发展为多种模型,并且呈现出跨学科、跨领域的趋势,应用范围也迅速拓展。人们对地震的认识和了解远远没有结束,时间相依的概率地震危险性分析的理论体系也在不断地发展和完善,时间相依的概率地震危险性分析方法将成为未来地震危险性分析的重要方法。

参考文献

- 晁洪太、李家灵、崔昭文等,1994,郯庐断裂带中段全新世活断层的特征滑动行为与特征地震,内陆地震,8(4),297~304。
- 董瑞树、谷德贵、冉洪流,1993,更新过程与概率分配模式在潜在震源区发震概率计算中的应用,地震地质,15(3),239~246。
- 董瑞树、冉洪流、高维安,1996,双泊松过程在地震危险性评估中的应用,中国地震,12(增刊),52~56。
- 董瑞树、冉洪流、任国强,2000,混合地震模型的建立及其科学意义,西北地震学报,22(4),390~396。
- 高孟潭,1986,地震危险性分析方法概述,国际地震动态,(11),10~13。
- 郭星,2014,强震复发的随机特征滑动模型及其应用方法研究,博士学位论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 胡聿贤,1999,地震安全性评价技术教程,北京:地震出版社。
- 冉洪流、周本刚,2004,布朗模型在北京西北地区的应用,地震学报,26(增刊),96~102。
- 闻学泽,1995,活动断裂地震潜势的定量评估,北京:地震出版社。
- 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。
- 胥广银、高孟潭,2007,潜在地震破裂面源模型及在概率地震危险性分析中的应用方法,地震学报,29(3),285~294。
- 杨明、刘百麓,2000,时间相依的地震危险性概率分析,西北地震学报,22(1),10~15。
- 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。
- Bender B,1984,A two-state Poisson model for seismic hazard estimation,Bull Seism Soc Am,74(4),1463~1468.
- Boyd O S,Zeng Y,Bufe C G, et al,2008,Toward a time-dependent probabilistic seismic hazard analysis for Alaska,Geophysical Monograph,179,399~416.
- Chan C H,Wu Y M,Cheng C T, et al,2013,Time-dependent probabilistic seismic hazard assessment and its application to Hualien City,Taiwan,Natural Hazards and Earth System Sciences,13,1143~1158.
- Cornell C A,1968,Engineering seismic risk analysis,Bull Seism Soc Am,58(5),1583~1606.
- Field E H,Arrowsmith R J,Biasi G P, et al,2014,Uniform California earthquake rupture forecast,version 3(UCERF3)~the time-independent model,Bull Seism Soc Am,104(3),1122~1180.
- Hebden J S,Stein S,2009,Time-dependent seismic hazard maps for the New Madrid seismic zone and Charleston,South Carolina, areas,Seism Res Lett,80(1),12~20.
- Kameda H,Ozaki Y,1979,A renewal process model for use in seismic risk analysis,Memoirs of the Faculty of Engineering,Kyoto University,41,Part 1.
- Kumamoto T,1999,Seismic hazard maps of Japan and computational differences in models and parameters,Geographical Review of Japan, Series B,72(2),135~161.
- Lomnitz-Adler J,Lomnitz C,1979,A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation,Bull Seism Soc Am,69(4),1209~1214.
- Matthews M V,Ellsworth W L, Reasenber P A,2002,A Brownian model for recurrent earthquakes,Bull Seism Soc Am,92(6),2233~2250.
- Nadeau R M,Johnson L R,1995,Seismological studies at Parkfield VI,Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquake,Bull Seism Soc Am,88(3),790~814.
- Nishenko S P,Buland R,1987,A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting,Bull Seism Soc Am,77(4),1382~1399.
- Nishioka T,Shah H C,1980,Application of the Markov chain on probability of earthquake occurrence,Proc of JSCE,298.
- Papaoannou C A,Papazachos B C,2000,Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources,Bull Seism Soc Am,90(1),22~33.
- Parsons T,2008,Earthquake probability calculated from paleoseismic observations on the south Hayward Fault,Proceedings of the Third Conference on Earthquake Hazards in the Eastern San Francisco Bay Area,2008(October),22~24.
- Petersen M D,Cao T,Campbell K W, et al,2007,Time-independent and time-dependent seismic hazard assessment for the State of California,Uniform California Earthquake Rupture Forecast Model 1.0,Seism Res Lett,78(1),99~109.

- Poupinet G, Ellsworth W, Frechet J, 1984, Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doubles, An application to the Calaveras fault, California, *J Geophys Res*, **89**(7), 5719~5731.
- Reid H E, 1910, The mechanics of the earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington Publication.
- Sadigh K C, Chang Y, Egan J A, et al, 1997, Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seism Res Lett*, **68**(1), 180~189.
- Schwartz D P, Coppersmith K J, 1984, Fault behavior and characteristic earthquakes, Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, *J Geophys Res*, **89**(7), 5681~5698.
- Shimazaki K, Nakata T, 1980, Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophysical Res Lett*, **7**(4), 279~282.
- Wensnousky S G, 1994, The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, which is it? *Bull Seism Soc Am*, **84**(6), 1940~1959.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 1988, Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas Fault, USGS Open-file Report, **88**, 398.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 1990, Probabilities of large earthquakes in the San Francisco Bay Region, California, USGS Survey circular, 1053.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 1996, Seismic hazards in Southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024. *Bull Seism Soc Am*, **85**(2), 379~439.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 1999, Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region, 2000~2030—a summary of findings, USGS Open-file Report, 99, 517.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003, Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region, 2002~2031, USGS Open-file Report, 03, 214.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 2008, The uniform California earthquake rupture forecast, Version 2(UCERF 2), USGS Open File Report 2007, 1437.

Progress and prospect in China on time-dependent probabilistic seismic hazard analysis

Li Changlong Gao Mengtan Xu Weijin Wu Jian

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

Abstract This paper reviews the history and progress of time-dependent probabilistic seismic hazard analysis, and makes a simple prospect on its future development and application prospect. It declares that future study tendency on time-dependent probabilistic seismic hazard analysis will be reflected in the determination of seismicity model parameters, applicability and judgment rule of characteristic earthquake model, application of ideas of repeating earthquake, studies on factors of effecting the calculation of characteristic seismic hazard, recognition of seismic source segmentation on large structures and mechanism of adjacent structure interaction. Seismic risk assessment in a certain period, emergency disaster preparedness and earthquake insurance will be future application areas of time-dependent probabilistic seismic hazard in China.

Key words: Time-dependent seismic hazard Characteristic earthquake Recurrence interval Dual Poisson distribution Seismogenic mechanism