

地震活动性概率分析研究的历史、现状与挑战

熊 熊¹ 吴 杭¹ 冯雅杉¹ 王 恺²

1 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,武汉市鲁磨路 388 号,430074

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,武汉市徐东大街 340 号,430077

摘 要: 地震危险性分析是地震学研究和防震减灾的重要内容之一,对城市规划、建筑物抗震设防标准制定、风险评估和减灾公共政策制定等具有重要的参考价值。地震危险性分析包括两个方面,即地震发生可能性的预测和地震破裂导致的强地面运动分布,其中,地震发生可能性或活动性预测,是地震危险性评估的基础,它给出在给定时间范围内关注地区发生地震的可能性。本文简要回顾地震活动性概率分析的研究历史,分析目前所面临的挑战,并展望未来努力的方向。

关键词: 地震活动性概率分析;地震危险性分析;地震预报

中图分类号: P315

文献标识码: A

1 地震预报的早期历史

基于科学的地震预报研究至少可追溯到 19 世纪,在地震学作为一门独立学科诞生之初,即将地震预报作为其主要任务之一^[1]。1910 年,Reid^[2]揭示了孕震阶段应力积累-发震过程应力释放-进入下一个应力积累阶段的地震周期过程,并提出弹性回跳理论。基于这一理论,学者们开始进行地震预报研究。到 20 世纪 30~40 年代,尽管探索并不成功,但一些地震后的回溯研究仍使多数学者对成功预报地震保持乐观的预期。

20 世纪 60~70 年代,在观测技术进步和板块构造学说建立的推动下,地震预报研究迎来一个高潮。日本制定了《日本大尺度地震对策法案》^[3],期望通过 10 年的努力实现对公众提供地震预报服务的目标;美国推出《国家地震减灾计划》,强调对地震前兆信号的观测和研究;前苏联和中国也相继制定了各自的国家计划。随着各国都宣称实现了一些成功的震例预报,学术界弥漫着乐观的气氛。1975 年,海城地震的成功预报将这种乐观情绪推向高潮,学术界认为,再经过 5~10 年的努力就可彻底解决地震预报问题。

1976 年,唐山大地震发生,导致 20 余万人丧生,震前没有探测到任何前兆信息,也没有进行预报。唐山地震的预报失败给盲目的乐观情绪浇上了一盆凉水,而基于实验室微观实验结果预报地

震的努力也举步维艰,毕竟,将实验室微观尺度的结果外推到真实的大自然,其中有太多的不确定性^[4]。

经过百余年的努力,人们对地震的认识较一个多世纪前清晰了许多;地震远比我们原来想象的复杂。此后,很多学者逐渐将兴趣转向了地震危险性分析^[5-7]。

2 概率地震危险性预测研究

地震危险性分析包括两个方面,即地震发生可能性的预测和地震破裂导致的强地面运动分布,其中,地震发生可能性预测是地震危险性评估的基础,它给出在给定时间范围内关注地区发生地震的可能性^[8-10]。研究方法主要有两类,即确定性和概率性分析方法^[11-12]。确定性方法基于相似构造条件具有相似地震活动性和历史大地震的原地复发性等假设,依据历史地震震级和断层规模,评估未来最可能的发震震级^[13]。但是,与断层和历史地震相关的参数难以精确确定,它更多地体现为一种概率。因此,基于统计方法的概率地震活动性分析受到大家的重视^[12]。事实上,基于统计方法的地震研究同样始于地震学创立初期。到 20 世纪中叶,人们对地震机理的认识仍然很贫乏,但统计学方法却早已在地震学研究中扮演了重要角色^[14]。

一般认为,基于统计的概率地震危险性分析始

于 Cornell^[15]。1968年, Cornell 假设地震在时间和空间上是随机独立的事件序列^[16], 服从泊松分布, 不同震级的地震发生率则遵从 Gutenberg-Richter 关系, 由此构成地震发生概率不随时间变化的时间独立模型^[17-18]。泊松模型数学形式简单, 需要参数少, 适用于多样化的区域构造。并且, 震源假设为简单的独立点源, 通过多点源的叠加可方便地组成线源^[16]。这些优势使泊松模型被广泛应用于地震危险性分析。但是, 泊松模型是“无记忆”的静态模型, 即后续地震的发生不受任何先发地震时间、震级或位置的影响。显然, 这与弹性回跳的物理机理相悖。观测表明, 许多断层的地震活动性具有时间上的非均匀性, 如果使用时间独立模型, 可能会导致对某个时间段内地震活动性的高估或者低估^[16]。此外, 泊松模型在表征不同模式的地震活动分布上存在局限性, 它更适用于以中等频度地震活动性为特征的区域^[16]。

为了描述地震行为在时间上的非平稳性, 一些学者提出了改良方案, 比如将地震活动分为平静期和活跃期的分段泊松模型^[19]、随机点过程模型^[20]、马尔柯夫模型^[21]、两状态马尔柯夫链模型^[22]和半马尔柯夫模型^[23]等。这些模型主要是拟合观测现象, 物理意义不足^[16]。

20世纪60年代, 一些学者通过对断层的考察发现, 大地震存在重复发生和位移量基本不变的现象^[24-25]。1984年, Schwartz 和 Copper-smith^[26]提出特征地震概念。特征地震模型假设同一条断层或一个断层段上的大地震具有相似的物理机制。在时间轴上, 表现为一定的规律性和周期性。重复发生的地震具有相同的地点、震级、破裂长度、震源机制等特征, 某些情况下还具有相同的震中和破裂传播方向^[27]。特征地震的物理基础是弹性回跳理论和断层上源于板块构造作用的均匀应力加载^[28], 这在物理上不难理解。地质学研究^[29]和大地测量观测^[30]表明, 全球绝大多数板块的运动速度至少在一万年尺度上是稳定的。由此推断, 板块构造的作用可视为均匀或准均匀的动力加载^[28]。表现在地震活动上则是一个周期性的弹性应变能积累-释放的更新过程^[31-33], 因此, 采用更新模型来描述比较适合, 比如高斯模型^[32]、Weibull 模型^[31, 34]、对数正态分布模型^[33, 35]和 Gamma 模型^[36-37]等。如此, 我们就可以结合概率更新模型和上次地震后的离逝时间, 预测未来地震发生随时间变化的条件概率。基于特征地震模型, 一些学者根据 San Andreas 断层 Parkfield 段存在一个约 22 年准周期地震复发现

象, 预测 1988~1993 年时间窗口将发生特征地震^[38]。但是, 直到 11 年后地震才姗姗来迟。这次地震预测的失败引起了对特征地震模型和地震周期性假设的质疑^[39]。学者们认为, 存在其他动力作用附加于均匀加载的构造应力之上, 改变了地震复发的周期性, 一个明显的例子是地震的应力传输和断层的相互作用^[40-41]。

3 顾及地震应力传输的概率地震活动性预测

对加州一个地震序列的研究^[40-41]表明, 地震释放断层上积累的弹性应力, 但应力不会凭空消失, 一部分应力转移到周边断层, 改变这些断层上的应力水平, 促进或延滞地震的发生, 改变其地震活动性和地震发生概率。Matthews 等^[42]基于这一思想, 将布朗点随机过程的运动特征引入模型构建, 将应力加载分解为两个部分: 构造作用以恒定速率加载, 而库仑应力则以随机游走扰动建模。由此, 他们提出了一个新的更新模型——布朗过程时间(BPT)模型, 从应力积累和应力触发两个方面描述大地震的发生机理。BPT 模型完美地将两种应力作用集成到一个模型之中, 现在的研究聚焦到库仑应力的传输和断层的相互作用对地震活动性的影响是否显著, 以及它在多大尺度上影响地震发生的规律性和概率分布等问题上^[28]。

对 San Andreas 断层的研究表明, 同震库仑应力的影响使地震的非周期性增强, 降低了断层上大多数区段地震发生的概率, Parkfield 段 1983~1993 年地震概率甚至由 95%^[27]下降为 32%^[43]。由此, 也解释了 Parkfield 段地震为什么没有如期而至。类似的研究^[44-47]证实了同震库仑应力变化对地震概率分布的显著影响。同时, 由下地壳和上地幔介质粘弹松弛效应引起的震后库仑应力变化的影响也引起了人们的关注。对 1906 年旧金山地震的研究表明, 特征地震后下地壳和上地幔的松弛效应可贡献随后发生的地震 60%~80% 的应力释放^[48]。而一个 $M_w \geq 6.5$ 地震产生的震后粘弹应力变化可影响更远距离的应力场分布, 作用时间长达百年^[49]。因此, 粘弹应力传输在长时间尺度过程中可能起重要作用^[50-52], 忽视库仑应力变化的影响, 可能会错误地估计地震发生的概率^[53-54]。

BPT 模型因其鲜明的物理背景和众多震例研究的支持而广受关注, 被很多学者^[54-56]和“加州统一地震破裂预测模型”(UCERF 模型)^[57]所采用。

4 预测实践

在理论研究不断取得进展的同时,实际的应用也已展开。美国率先开展区域范围的地震危险性概率分析工作。1988 年,美国组建加州地震概率工作组(WGCEP),推出加州地震危险性研究的系列报告^[58-61]。

1988 年, WGCEP 形成第一份报告^[58]。报告基于弹性回跳理论,考虑主要断裂,对 6.5 级以上地震进行时间相依的地震概率分析。1990 年的报告^[59]加入新的断层资料,并引入强震导致的同震库仑应力变化的影响。

1995 年的报告^[60]考虑“级联”事件的多段破裂,以概率危险图的形式量化潜在的地震动。报告预测加州今后 30 年 6.5~7.0 级地震的数量大约是以往观测值的 2 倍,这一结果引发巨大争论。第一个提出反对的是报告的主要作者 Jackson,而报告的另一位作者 Schwartz 则提出了相反的观点^[62]。争论达成的共识是:目前难以就地震预测模型达成共识。南加州地震中心认为,当缺乏共识时,发展多种模型对定义危险性评估不确定性是重要的。他们决定采取另一种方式组建地震工作组,研发区域地震似然模型(RELM)。工作组鼓励参与者提出他们自己认为合适的模型,而非建立单一的共识模型。他们希望这种“自由市场”的方式可以激发健康的学术竞争,避免在没有共识的情况下强迫达成并不存在的共识。从此后的实践看,这种开放的形式是成功的,它保证了参与者将最新、最好的成果及时融入地震危险性预测中,实现“best available science”的初衷。同时,也充分展示了结果的不确定度,使认识更为客观。

2002 年的报告^[61]强调“这不是一个共识的模型,而是一个共识的过程”。报告在处理认知不确定性方面采取创新方法,采用逻辑树模型,阻止系统误差的传播。报告取得的重要认识包括:不确定度最重要的来源是概率模型的选择,另一项来源是破裂模型,即是单一断层段的破裂,还是多段的同时破裂。此外,粘弹松弛效应导致的库仑应力变化被引入概率地震危险性分析^[63]。

在 WGCEP 系列模型报告的基础上,形成并推出系列“加州统一地震破裂预测模型”(UCERF)。2007 年、2008 年和 2015 年分别推出 3 个版本: UCERF 1.0^[64-65]、UCERF 2.0^[66-67]和 UCERF 3.0^[57,68-71],其中 UCERF 3.0 是迄今最先进的概率地震危险性预测模型,它包括 3 个子模型:长期危险性预测的时间独立模型(UCERF3-ID)、与上

次地震离逝时间和弹性应力恢复相关的时间相依地震概率模型(UCERF3-TD),以及与余震相关的时空丛集和概率变化的新的统计模型(UCERF3-ETAS)。总体上,UCERF3 继承之前地震概率模型的内核,但作了一系列重要的发展和改进,比如,放松断层分段的条件假设,使断层可以分段或整体破裂,以实现更为复杂的破裂构型^[72]。UCERF 系列模型目前已被广泛应用于全美地震灾害图编制、城市建筑抗震标准制定、加州地震保险赔率的设定等方面,为减轻地震灾害损失发挥了重要作用。

WGCEP 的工作受到了全世界的重视,基于类似的思路和方法,日本、意大利、希腊、新西兰、台湾等很多国家和地区也陆续发展了各自相应的概率地震危险性分析模型^[73-79],成为目前地震灾害防御中最为倚重的结果。根据地震概率预测模型结果,发达国家建立相应的建筑物抗震设防标准,将地震灾害降低到较低水平。

5 问题与挑战

在取得巨大进展的同时,地震概率分析也面临预测偏差、甚至预测错误的挑战^[80],其中最大的质疑来自对若干大震、甚至是巨震的错误预测。2011-03,日本东北发生 9 级地震,这大大出乎人们的预料,因为它发生在地震概率模型所预测的低风险区。日本地震研究委员会认为,日本海沟东北段处的分段断层不会同时发生破裂,由此预测该区地震的最大震级在 7~8 级^[81],阻挡海啸的防波堤也是按照这个标准设计的。但是,东北地震中,5 段断层同时破裂。同样地,因为断层被认为不会同时破裂,地震概率模型预测苏门答腊地区潜在地震的最大震级不会超过 8 级^[82]。2004 年,地震中多条断层发生级联破裂,直接将震级推高到 9.3 级。在我国,2008 年的汶川地震发生在 USGS 预测为低风险的龙门山断裂^[80],但是,地震中多条与龙门山断裂平行的断层同时发生了破裂。

这些失败的预测震例促使人们审视现有地震预测模型存在的问题。这些地震的一个共同特点就是都发生了多断层的级联破裂。追溯过往震例,1960 年智利 9.5 级地震远比典型的海沟地震大得多^[83],其原因也是多段断层同时破裂。显然,级联破裂成为困扰目前地震预测模型的一个难题,因为,大地震所造成的灾害损失远非中强地震可比。事实上,1995 年 WGCEP 的预测模型就已经允许级联破裂的发生。但问题是,到底什么

情况下会发生级联破裂? 又是哪些因素控制着级联破裂?

断层的结构无疑是控制级联破裂的关键因素之一。深大断裂往往不是一条断层,而是由多条断层构成的断层系,如龙门山断裂、鲜水河-小江断裂等。大地震的发生往往伴随着多条断层的破裂,破裂会从起破断层跳跃到其他断层,致其破裂,并形成更大的灾害^[84-86]。野外考察和数值模拟研究表明,破裂跳跃的空间尺度极限是 5 km^[87]。新的研究将这一极限外推到 8 km^[88],甚至约 50 km^[89]。需要指出的是,如果断层倾角随深度变化,断层间的距离在深部与地表是不一样的。因此,断层在深部是否相近或者互连^[90]成为我们认识断层几何形态对破裂能否发生跳跃,以及跳跃空间尺度的控制作用等问题的关键^[91]。解释这一问题需要对断层的深部几何构型进行精细尺度成像^[90]。同时,断层的闭锁和库仑应力变化的加载也对地震是否具有突破构造结构、形成更大破裂具有控制作用。

GPS 技术被认为是认识地壳运动和地震的有力工具,但如何使用这一工具也存在很多问题。日本地震被预测不会超过 8 级,因为这是历史地震的最大震级。但是,8 级地震仅能解释 GPS 测定的板块汇聚量的三分之一,显然,GPS 结果表明存在更大地震的风险^[92]。但是,地震学家们将三分之二的变形差异解释为被非震过程所吸收^[93]。汶川地震则是另外一种情况,GPS 测定的跨龙门山断裂的汇聚速率仅 1~3 mm/a^[94-95],由此断定其地震风险不高。地震后的回溯研究表明,尽管速率很低,但经历上千年,其积累的能量足以产生一个 8 级地震^[96]。看来,尽管我们拥有先进技术,但仍深陷“多解性”的困局和迷雾中。解决之道在哪里,尼泊尔地震或许给我们带来某些启示。

2015-04-25 尼泊尔发生 7.9 级地震,这被认为是“一个预料中的地震”^[97],因为在此之前,地震学家根据 GPS 观测给出的断层闭锁区状态^[98]推断,喜马拉雅尼泊尔段存在发生 8 级以上地震的危险性。当破裂模型给出后,人们发现,尼泊尔地震仅导致部分闭锁区的破裂,更大地震的危险并未解除。这一震例带给我们启示,如果我们希望得到更为可靠的证据,就不能仅停留在地表测量速度大小,或者用简单的算术计算出位移亏损,而必须深入探究其闭锁分布和状态,进而了解位移到底是被蠕变吸收了,还是转化为弹性应变储存在闭锁区。这一方面可使我们准确评估能量的

积累状态和未来地震震级的大小,另一方面,也可为我们研判破裂是否会贯穿构造节点、导致级联破裂提供深部结构的线索。关于震间断层闭锁新的研究进展更加剧了在地震危险性分析中引入这一证据的紧迫性。以往的断层闭锁研究主要基于弹性模型,近年来的研究表明^[99],深部介质的粘弹松弛效应可能扮演着不容忽视的角色。模拟研究表明,断层的滑移率和闭锁面积对上地幔粘滞度非常敏感,其结果与不考虑粘滞效应的弹性模型相差巨大。采用不同粘滞度会导致断层滑移率和矩能量积累率分别相差 1.5~4 倍和 2~13 倍^[100]。因此,基于弹性模型得到的断层闭锁状态必须要顾及粘弹松弛效应而重新评估^[101]。

此外,大地震的复发周期也是影响地震危险性分析的重要因素^[102]。由于大地震能量积累时间长,因此,复发间隔长、事件样本少,导致对地震周期估算的不确定度大^[42]。尤其是大陆内部地震,大陆内部的应力加载幅度小,所造成的地表变形和断层运动远比板块边界小^[1]。比如,新马德里地区地壳变形幅度与 GPS 速度的不确定度相当^[30],相应地,地震孕震周期更长(数千年甚至万年)^[30],不确定度更大。

总体上,地震活动性预测依赖关于断层(包括断层结构、断层分布和断层运动等)和历史地震活动性的信息^[74]。目前,这两类信息都存在严重不足。首先,大陆内部存在大量未曾探明的隐伏断层^[75],因此,对断层不明区域,目前的方法可能会低估其活动性和危险性^[1]。其次,目前的方法强烈依赖反映构造加载的背景地震活动性信息,而大陆内部应力加载小、地震间隔长以及地震目录不完备,导致反映构造应力加载的信息缺失,对现今地震活动性较弱的地区,目前的方法可能也会低估其未来的活动性和危险性^[1]。

6 结 语

地震活动性是地震危险性分析和评估的基础^[16],百余年的探索取得了巨大进步,对地震机理的认识不断深入,预测模型不断完善。而发展过程中的一些经验给我们很多启示。第一是它的开放性。尽管有共识的、真实反映地震机理和规律的模型是我们追求的目标,但就目前我们对地震的认识来看,这还是一个遥远的愿景。在难以形成共识的情况下,保持模型的开放性可保证新思想得以不断注入这个体系,真正体现“现有最好的科学(best available science)”这一特点。第二是强调物理机制探究,并与其他方法尤其是新方法的结合。事实

上,对地震物理机制的研究一直贯穿着探索的全过程,近年来,一些新的技术条件为我们提供了新的研究方法和途径,比如采用人工智能技术综合 GIS 等信息,进行地震活动性的预测^[103]。尽管这一方法目前存在样本数匮乏等因素制约,却不失为一项有意义的探索。随着地震活动性和危险性分析模型的日益复杂,引入的参数也越来越多,模型的不确定度相应不断增加。单纯基于统计学的方法面临至少可预见的未来样本点不足的问题,将更多更具物理背景的研究和成果引入地震危险性分析也许是我们可选之途。

回顾地震活动性和危险性分析、预测预报百余年的历史,面对困难与挑战,我们不得不承认,距离解决这一问题我们尚有很长的路要走。但是,人类探索的脚步从未停歇。令人欣慰的是,正是在不断探索的过程中,我们对地震的认识不断提高和深入,其进展就如同地震能量积累过程一样,即使不是惊人的,至少也是稳步的。

参考文献

- [1] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes Cannot be Predicted[J]. *Science*, 1997, 275(5306): 1 616
- [2] Reid H F. The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes[J]. *Bulletin of the Department of Geology, University of California*, 1911, 6(19): 413-444
- [3] Tsuboi C, Wadati K, Hagiwara T. Prediction of Earthquakes; Progress to Date and Plans for Further Development[M]. Tokyo: Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1962
- [4] Xia K W, Rosakis A J, Kanamori H. Laboratory Earthquakes; The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1 859-1 861
- [5] Geller R J. Shake-Up Time for Japanese Seismology[J]. *Nature*, 2011, 472(7344): 407-409
- [6] Mulargia F, Stark P B, Geller R J. Why is Probabilistic Seismic Hazard Analysis(PSHA) Still Used? [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2017, 264: 63-75
- [7] Lee Y T, Turcotte D L, Holliday J R, et al. Results of the Regional Earthquake Likelihood Models(RELM) Test of Earthquake Forecasts in California[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(40): 16 533-16 538
- [8] Boschi E, Gasperini P, Mulargia F. Forecasting where Larger Crustal Earthquakes are Likely to Occur in Italy in the near Future[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85: 1 475-1 482
- [9] Field E H. Overview of the Working Group for the Development of Regional Earthquake Likelihood Models(RELM) [J]. *Seismological Research Letters*, 2007, 78(1): 7-16
- [10] Mangira O, Kourouklas C, Chorozoglou D, et al. Modeling the Earthquake Occurrence with Time-Dependent Processes; A Brief Review[J]. *Acta Geophysica*, 2019, 67(3): 739-752
- [11] 高孟潭. 地震危险性分析方法概述[J]. *国际地震动态*, 1986, 16(11): 10-13(Gao Mengtan. An Outline of the Analytic Methods for Seismic Risk Assessment [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 1986, 16(11): 10-13)
- [12] Bormann P. From Earthquake Prediction Research to Time-Variable Seismic Hazard Assessment Applications [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, 168(1): 329-366
- [13] 秦四清, 李培, 薛雷, 等. 地震区危险性等级确定方法[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1 653-1 659(Qin Siqing, Li Pei, Xue Lei, et al. The Risk Classification Method of Seismic Zones[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1 653-1 659)
- [14] Ogata Y. Statistics of Earthquake Activity; Models and Methods for Earthquake Predictability Studies[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 497-527
- [15] Allin Cornell C. Engineering Seismic Risk Analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(5): 1 583-1 606
- [16] Anagnos T, Kiremidjian A S. A Review of Earthquake Occurrence Models for Seismic Hazard Analysis[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1988, 3(1): 3-11
- [17] Frankel A D, Petersen M D, Mueller C S, et al. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps[J]. *US Geological Survey Open-File Report*, 2002, 420:39
- [18] Wesson R, Frankel A, Mueller C, et al. Probabilistic Seismic Hazard Maps of Alaska [J]. *US Geological Survey Open-File Report*, 1999, 36:20
- [19] Bender B. A Two-State Poisson Model for Seismic Hazard Estimation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74(4): 1 463-1 468
- [20] Lomnitz-Adler J, Lomnitz C. A Modified form of the Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency Relation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1979, 69(4): 1 209-1 214
- [21] Nishioka T, Shah H C. Application of the Markov Chain on Probability of Earthquake Occurrence[J]. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1980(298): 137-145
- [22] Vagliente V N. Forecasting the Risk Inherent in Earthquake Resistant Design[M]. California: Stanford University Publication in Geological Sciences, 1973
- [23] Patwardhan A S, Kulkarni R B, Tocher D. A Semi-Markov Model for Characterizing Recurrence of Great Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, 70(1): 323-347
- [24] Wallace R E, Dickinson W R. Notes on Stream Channels Offset by the San Andreas fault, Southern Coast Ranges, California; Conference on Geologic Problems of the San Andreas Fault System[M]. California: Stanford University Publication in Geological Sciences, 1968
- [25] Wallace R E. Profiles and Ages of Young Fault Scarps, North-Central Nevada[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1977, 88(9): 1 267

- [26] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B7): 5 681-5 698
- [27] Bakun W H, Lindh A G. The Parkfield, California, Earthquake Prediction Experiment [J]. *Science*, 1985, 229 (4714): 619-624
- [28] Ward S N, Goes S D B. How Regularly do Earthquakes Recur? A Synthetic Seismicity Model for the San Andreas Fault[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20 (19): 2 131-2 134
- [29] Argus D F, Gordon R G. No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model NUVEL-1[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(11): 2 039-2 042
- [30] Larson K M, Freymueller J T, Philipson S. Global Plate Velocities from the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102 (B5): 9 961-9 981
- [31] Hagiwara Y. Probability of Earthquake Occurrence as Obtained from a Weibull Distribution Analysis of Crustal Strain[J]. *Tectonophysics*, 1974, 23(3): 313-318
- [32] Rikitake T. Probability of Earthquake Occurrence as Estimated from Crustal Strain [J]. *Tectonophysics*, 1974, 23(3): 299-312
- [33] Nishenko S, Buland R. A Generic Recurrence Interval Distribution for Earthquake Forecasting[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77: 1 382-1 399
- [34] Abaimov S G, Turcotte D L, Shcherbakov R, et al. Earthquakes: Recurrence and Interoccurrence Times[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165(3): 777-795
- [35] Jackson D D. Seismic Hazards in Southern California: Probable Earthquakes, 1994 to 2024 [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(2)
- [36] Utsu T. Estimation of Parameters for Recurrence Models of Earthquakes[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1984, 59: 53-66
- [37] Corral A. Local Distributions and Rate Fluctuations in a Unified Scaling Law for Earthquakes[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2003, 68(3 Pt 2): 035102
- [38] Bakun W H, McEvilly T V. Recurrence Models and Parkfield, California, Earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B5): 3 051-3 058
- [39] Kagan Y Y, Jackson D D. Seismic Gap Hypothesis: Ten Years after [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B13): 21 419-21 431
- [40] Stein R S. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence[J]. *Nature*, 1999, 402(6762): 605-609
- [41] Stein S, Tomasello J, Newman A. Should Memphis Build for California's Earthquakes? [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2003, 84(19): 177-185
- [42] Matthews M V. A Brownian Model for Recurrent Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(6): 2 233-2 250
- [43] Parsons T. Significance of Stress Transfer in Time-Dependent Earthquake Probability Calculations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B5)
- [44] Harris R A, Simpson R W. In the Shadow of 1857-the Effect of the Great Ft. Tejon Earthquake on Subsequent Earthquakes in Southern California [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(3): 229-232
- [45] Jaumé S C, Sykes L R. Evolution of Moderate Seismicity in the San Francisco Bay Region, 1850 to 1993: Seismicity Changes Related to the Occurrence of Large and Great Earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B1): 765-789
- [46] Toda S, Stein R S, Reasenber P A, et al. Stress Transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, Shock: Effect on Aftershocks and Future Earthquake Probabilities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103 (B10): 24 543-24 565
- [47] Console R, Murru M, Falcone G, et al. Stress Interaction Effect on the Occurrence Probability of Characteristic Earthquakes in Central Apennines[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B8)
- [48] Kenner S J. Rheological Controls on Fault Loading Rates in Northern California Following the 1906 San Francisco Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1)
- [49] Verdecchia A, Pace B, Visini F, et al. The Role of Viscoelastic Stress Transfer in Long-Term Earthquake Cascades: Insights after the Central Italy 2016-2017 Seismic Sequence [J]. *Tectonics*, 2018, 37(10): 3 411-3 428
- [50] Freed A M, Lin J. Delayed Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by Viscoelastic Stress Transfer[J]. *Nature*, 2001, 411(6834): 180-183
- [51] Pollitz F F. The 1995 Kobe, Japan, Earthquake: A Long-Delayed Aftershock of the Offshore 1944 Tonankai and 1946 Nankaido Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(1): 1-10
- [52] Pollitz F F. Stress Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by Transient Deformation Following the 1992 Landers Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1 487-1 496
- [53] Verdecchia A, Carena S, Pace B, et al. The Effect of Stress Changes on Time-Dependent Earthquake Probabilities for the Central Wasatch Fault Zone, Utah, USA [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 219(2): 1 065-1 081
- [54] Biasi G P, Langridge R M, Berryman K R, et al. Maximum-Likelihood Recurrence Parameters and Conditional Probability of a Ground-Rupturing Earthquake on the Southern Alpine Fault, South Island, New Zealand[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(1): 94-106
- [55] Parsons T, Console R, Falcone G, et al. Comparison of Characteristic and Gutenberg-Richter Models for Time-Dependent $M \geq 7.9$ Earthquake Probability in the Nankai-Tokai Subduction Zone, Japan[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(3): 1 673-1 688
- [56] Murru M, Akinci A, Falcone G, et al. $M \geq 7.0$ Earthquake

- Rupture Forecast and Time-Dependent Probability for the Sea of Marmara Region, Turkey[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(4): 2 679-2 707
- [57] Field E H, Biasi G P, Bird P, et al. Long-Term Time-Dependent Probabilities for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast(UCERF3)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 511-543
- [58] Agnew D C, Allen C R, Cluff L S, et al. Probabilities of Large Earthquakes Occurring in California on the San Andreas Fault[R]. US Geological Survey, 1988
- [59] Dieterich J H, Allen C R, Cluff L S, et al. Probabilities of Large Earthquakes in the San Francisco Bay Region, California[R]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science, 1990
- [60] Jackson D. Seismic Hazards in Southern California: Probable Earthquakes, 1994 to 2024[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85(2): 379-439
- [61] Probabilities W W G O. Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002 - 2031[R]. US Geological Survey, 2003
- [62] Schwartz D P. Opinion Letter[J]. *Seismological Research Letters*, 1996, 67: 5-6
- [63] Parsons T. Post-1906 Stress Recovery of the San Andreas Fault System Calculated from Three-Dimensional Finite Element Analysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B8): 2 162
- [64] Petersen M D, Cao T, Campbell K W, et al. Time-Independent and Time-Dependent Seismic Hazard Assessment for the State of California: Uniform California Earthquake Rupture Forecast Model 1. 0[J]. *Seismological Research Letters*, 2007, 78(1): 99-109
- [65] Petersen M D, Frankel A D, Harmsen S C, et al. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps[R]. US Geological Survey, 2008
- [66] Field E H, Dawson T E, Felzer K R, et al. The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2 (UCERF 2)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(4)
- [67] Field E H, Dawson T E, Felzer K R, et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2(UCERF 2)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(4): 2 053-2 107
- [68] Field E H, Arrowsmith R J, Biasi G P, et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3(UCERF3): The Time-Independent Model[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(3): 1 122-1 180
- [69] Field E H, Jordan T H, Page M T, et al. A Synoptic View of the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast(UCERF3)[J]. *Seismological Research Letters*, 2017, 88(5): 1 259-1 267
- [70] Field E H, Milner K R, Hardebeck J L, et al. A Spatiotemporal Clustering Model for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast(UCERF3-ETAS): Toward an Operational Earthquake Forecast[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(3): 1 049-1 081
- [71] Page M T, Field E H, Milner K R, et al. The UCERF3 Grand Inversion: Solving for the Long-Term Rate of Ruptures in a Fault System[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(3): 1 181-1 204
- [72] Shaw B E, Milner K R, Field E H, et al. A Physics-Based Earthquake Simulator Replicates Seismic Hazard Statistics across California[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8)
- [73] Stirling M W, Wilson C J N. Development of a Volcanic Hazard Model for New Zealand[J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2002, 35(4): 266-277
- [74] Hebden J S, Stein S. Time-Dependent Seismic Hazard Maps for the New Madrid Seismic Zone and Charleston, South Carolina, Areas[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(1): 12-20
- [75] Wesson R L, Boyd O S, Mueller C S, et al. Challenges in making a seismic hazard map for Alaska and the Aleutians[J]. *Active Tectonics and Seismic Potential of Alaska Geophysical Monograph Series*, 2008, 179: 385-397
- [76] Koravos G C, Tsapanos T M, Bejaichund M. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Japan[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(1): 137-151
- [77] Papaioannou C A. Time-Independent and Time-Dependent Seismic Hazard in Greece Based on Seismogenic Sources[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(1): 22-33
- [78] Cheng C, Chiou S, Lee C, et al. Study on Probabilistic Seismic Hazard Maps of Taiwan after Chi-Chi Earthquake[J]. *Journal of Geoengineering*, 2007, 2(1): 19-28
- [79] Wong I G, Lund W R, Duross C, et al. Earthquake Probabilities for the Wasatch Front Region in Utah, Idaho, and Wyoming[R]. Utah Geological Survey, 2016
- [80] Stein S, Geller R J, Liu M. Why Earthquake Hazard Maps often Fail and What to Do about It[J]. *Tectonophysics*, 2012, 562-563: 1-25
- [81] Committee E R. Long-Term Forecast of Earthquakes from Sanriku-Oki to Boso-Oki (Revised)[J]. *Headquarters for Earthquake Research Promotion*, 2009, 80
- [82] Mc Caffrey R. The Next Great Earthquake[J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1 675-1 676
- [83] Stein S, Engeln J F, DeMets C, et al. The Nazca-South America Convergence Rate and the Recurrence of the Great 1960 Chilean Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13(8): 713-716
- [84] Lozos J C. A Case for Historic Joint Rupture of the San Andreas and San Jacinto Faults[J]. *Science Advances*, 2016, 2(3)
- [85] Liu J W, Zhang L F, Du Y. Seismic Hazard Assessment of the Mid-Northern Segment of Xiaojiang Fault Zone in Southwestern China Using Scenario Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(3): 1 191-1 210
- [86] Harris R A, Day S M. Dynamics of Fault Interaction: Parallel Strike-Slip Faults[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B3): 4 461-4 472

- [87] Wesnousky S G. Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(4): 1 609-1 632
- [88] Biasi G P, Wesnousky S G. Steps and Gaps in Ground Ruptures: Empirical Bounds on Rupture Propagation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(3): 1 110-1 124
- [89] Nissen E, Elliott J R, Sloan R A, et al. Limitations of Rupture Forecasting Exposed by Instantaneously Triggered Earthquake Doublet[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(4): 330-336
- [90] Field E H. Improving Earthquake Rupture Forecasts Using California as a Guide[J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 89(6): 2 337-2 346
- [91] Peshette P, Lozos J, Yule D, et al. Dynamic Rupture Modeling to Investigate the Role of Fault Geometry in Jumping Rupture between Parallel-Trace Thrust Faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(6): 2 168-2 186
- [92] Loveless J P, Meade B J. Geodetic Imaging of Plate Motions, Slip Rates, and Partitioning of Deformation in Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B2)
- [93] Sagiya T. Integrate all Available Data[J]. *Nature*, 2011, 473:146-147
- [94] Meng G J, Ren J W, Wang M, et al. Crustal Deformation in Western Sichuan Region and Implications for 12 May 2008 M_s8.0 Earthquake[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(11)
- [95] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812
- [96] Wang H, Liu M, Cao J L, et al. Slip Rates and Seismic Moment Deficits on Major Active Faults in Mainland China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B2): B02405
- [97] Bilham R. Raising Kathmandu[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(8): 582-584
- [98] Ader T, Avouac J P, Jing L Z, et al. Convergence Rate across the Nepal Himalaya and Interseismic Coupling on the Main Himalayan Thrust: Implications for Seismic Hazard[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4)
- [99] Johnson K M, Hilley G E, Bürgmann R. Influence of Lithosphere Viscosity Structure on Estimates of Fault Slip Rate in the Mojave Region of the San Andreas Fault System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B7): B07408
- [100] Johnson K M, Fukuda J. New Methods for Estimating the Spatial Distribution of Locked Asperities and Stress-Driven Interseismic Creep on Faults with Application to the San Francisco Bay Area, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B12): B12408
- [101] Wang K L, Hu Y, He J H. Deformation Cycles of Subduction Earthquakes in a Viscoelastic Earth[J]. *Nature*, 2012, 484(7394): 327-332
- [102] Fitzenz D D. Conditional Probability of What? Example of the Nankai Interface in Japan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(6): 3 169-3 179
- [103] Jena R, Pradhan B. A Critical Review on Artificial Intelligence on Earthquake Probability Assessment[A]// Ahire K D, Attitalla I, Vasileva V. Scenario of Environmental Research and Development[M]. *IJMIR*, 2019

History, Present Situation and Challenge of Probabilistic Analysis of Seismic Activity

XIONG Xiong¹ WU Hang¹ FENG Yashan¹ WANG Kai²

¹ School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430079, China

² Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China

Abstract: Seismic risk analysis is one of the important contents of seismological research and earthquake disaster prevention and mitigation, it has important reference values for urban planning, development of seismic standards for buildings, risk assessment and disaster mitigation public policy formulation. Seismic risk analysis includes two aspects: prediction of earthquake occurrence possibility and distribution of strong ground motion caused by earthquake rupture, where the prediction of earthquake occurrence probability or activity, which is the basis of seismic risk analysis, gives the probability of earthquake occurrence in the area of concern within a given time frame. In this paper, we briefly review the history of research from earthquake forecasting to probabilistic analysis of earthquake activity, summarize the current challenges faced, and look forward to future efforts.

Key words: probabilistic analysis of seismic activity; seismic risk analysis; earthquake prediction

Foundation support: National Key Research and Development Program of China, No. 2022YFF0800703; Key Project of National Natural Science Foundation of China, No. 42230309.

About the first author: XIONG Xiong, PhD, professor, PhD supervisor, majors in geodynamics and seismology, E-mail: xxiong@cug.edu.cn.