

2020年地震危险性分析热点回眸

李昌珑, 温增平*

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 2020年,地震危险性分析研究领域取得了一系列新进展,并在多个研究方向取得了新的成果。从确定性-概率地震危险性分析、海域地震危险性分析、全球地震危险性区划研究、新一代地震区划图中的地震危险性分析新技术、诱发地震危险性分析等5个研究方向回顾了2020年地震危险性分析领域的研究热点。

关键词 地震危险性;地震区划;海域地震;地震动模拟;诱发地震

地震危险性分析(seismic hazard assessment)即对一个地区在一定时间段内可能遭受的地震动的特征进行计算和分析,是工程地震工作的重要组成部分^[1]。地震危险性分析能够对一个地区可能遭受到地震动的强度、频次、频谱特征等做出分析结果,是实施地震灾害防御工作重要的科学依据^[1]。自20世纪中叶开始应用于建筑物抗震设防以来,地震危险性分析理论和方法伴随着人们对地震活动规律的总结、地下发震构造的认识、工程技术的进步和需求而不断发展。2020年,该领域的国内外学者在诸多热点领域取得了重要进展。

1 确定性-概率地震危险性分析研究

地震危险性分析方法分为确定性(determinis-

tic)方法和概率性(probabilistic)方法。确定性方法是20世纪50—70年代使用较多的方法,它基于2个基本假设来估计某一地区可能遭受的地震最高烈度,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(probabilistic seismic hazard assessment, PSHA)^[2]是一种普遍使用的方法,它采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。近年来,将2种方法结合使用的确定性-概率地震危险性分析方法(deterministic-probabilistic seismic hazard assessment, DPSHA)逐渐成为研究热点。在对断层结构、活动状态、发震规律的认识较为充分、基础资料详尽地区的较高震级的地震危险性分析中,DPSHA的应用逐渐增多。该方法对大地震的地震动影响场进行数值模拟,结合大地震

收稿日期:2020-12-20;修回日期:2020-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1500405);中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB19A0131, DQJB19B45, DQJB17T04)

作者简介:李昌珑,副研究员,研究方向为地震危险性和地震风险分析,电子信箱:changlongli@163.com;温增平(通信作者),研究员,研究方向为工程地震学、地震风险分析,电子信箱:wenzp@cea-igp.ac.cn

引用格式:李昌珑,温增平. 2020年地震危险性分析热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 97-104; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.007

的发生概率,得到概率地震危险性图。

2020年,确定性-概率地震危险性分析方法研究取得了较多进展。Irwandi等^[3]使用新的确定性地震危险性分析方法(neo-deterministic seismic hazard assessment, NDSHA)开展了印度尼西亚苏门答腊的地震危险性分析研究,并将地震危险性图结果同使用PSHA方法给出的地震危险性结果进

行了比较,认为NDSHA方法的分析结果具有合理性(图1^[3])。Ismail-Zadeh等^[4]分别使用NDSHA和PSHA方法进行了印度北部西隆高原(Shillong Plateau)的地震危险性分析,指出Oldham断层在PSHA方法中对地震危险性结果的贡献低于使用NDSHA方法的结果。

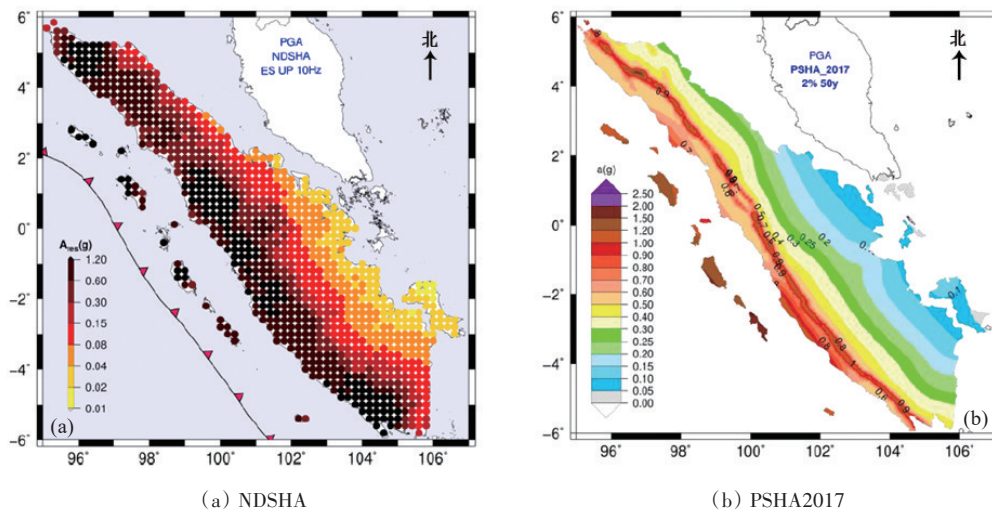


图1 印尼苏门答腊分别使用NDSHA(a)和PSHA(b)方法分析的地震危险性结果

2020年,国内学者也开展了确定性-概率地震危险性分析研究。高孟潭^[5]从确定性与随机性、地震危险性分析方法、地震统计的基本要求、数值模拟中的不确定性几个方面讨论了确定性-概率地震危险性分析方法如何考虑不确定性。潘华^[6]从抗震设计标准、关键性能目标、失效概率、抗震裕度、基于性能的地震动确定计算等角度研究基于性能的PSHA技术的理论基础和关键环节。张振国^[7]从基本原理、唐山地震和美国Ridgecrest地震模拟应用实例、未来发展前景等角度研究了基于物理过程的地震数值模拟的参数确定方法、模拟效果检验和比较研究的技术思路。刘爱文等^[8]进行了各类生命线工程抗震设防概率水准的比较研究,从抗震规范标准修订、生命线工程设防概率水准、适用范围等方面介绍了国内外各类生命线工程抗震设防概率水准的研究动态。陈学良^[9]从目的和意义、确定性模拟、中高频地震动模拟、高频地震动模拟方法探讨等方面探讨了确定性地震动数值模拟的研究案

例分析,并建议对不同频段的地震动采用不同的技术方法进行模拟。

2 海域地震危险性分析研究

以人类开发利用海洋的需求为导向,海域地震危险性分析和地震区划成为近年来的研究热点。与陆域有所不同,海域地震危险性分析面临俯冲带大尺度复杂发震构造、海水岛礁等特殊场地条件的地震动特性、震源破裂尺度和震源深度的地震危险性算法等新的科学问题,以及地球物理、地震、地质等数据资料缺乏的客观困难。

全球已有一些地震危险性研究涉及了海域部分工作。美国全国地震危险性区划图^[10]中考虑了阿留申俯冲带对阿拉斯加地震危险性的影响。欧洲地震危险性统一(seismic hazard harmonization in Europe, SHARE)项目^[11-12]研究海域俯冲带板间和板内2种类型的中深源潜在震源区模型,并应用

于对希腊、意大利等地的岛弧俯冲带分析。日本2018年公布了最新的全国地震动预测图^[13],给出了日本未来30年的地震区划结果。该研究考虑了日本东海、东南海、南海、琉球、千岛等海沟地震危险性对日本本土的影响。Danciu等^[14]对中东地区进行了地震区划研究,考虑了伊朗Makran俯冲带和Zagros俯冲带深源潜源的地震危险性,并对帕米尔高原的中源地震区进行了70~300 km深度的潜源划分。总体上,全球海域地震危险性研究还处在探索阶段。

2020年,海域地震危险性研究继续取得进展。国际上,Caklais等^[15]开展了美国加州中部沿海地区的地震危险性研究,基于当地断层地表破碎带的地质特征及其年代学结果,重新估计了断层运动状态及当前的地震危险性,减小了已有模型的不确定性并提高了结果的可靠性。Du等^[16]研究了新加坡及周边海域的地震危险性,主要考虑了苏门答腊俯冲带潜在震源区和远场大地震可能对新加坡产生的影响(图2),并给出了新加坡全国精细的50年超越概率10%峰值加速度(PGA)的地震危险性结果。

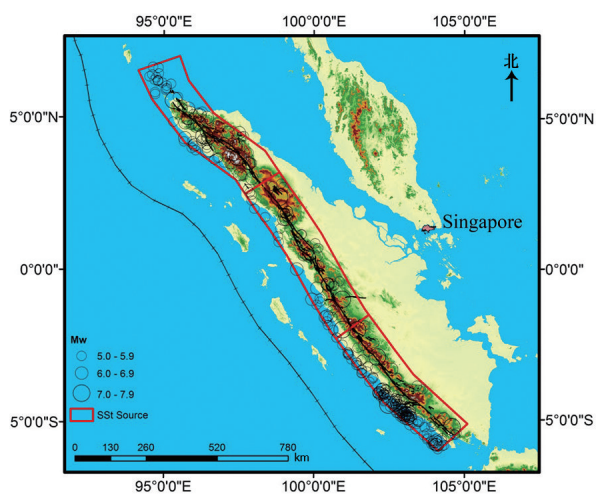


图2 新加坡地震危险性研究中对苏门答腊俯冲带潜在震源区划分示意

国内学者于2018—2020年持续开展了海域地震危险性分析涉及的地震构造和潜在震源区划分、地震活动性确定、地震动传播规律和场地效应、工程设计地震动确定、地震危险性计算和区划图编制

等研究工作。2020年,任治坤等^[17]开展海域活动构造框架和地震构造模型研究,建立了中国海域及邻区活动构造框架和地震构造模型,划分地震区带和包含琉球海沟、马尼拉海沟俯冲带的潜在震源区。吕悦军等^[18]开展海域地震活动性模型研究,编制了中国海域及邻区统一地震目录,建立了中国近海大陆架和俯冲带地震活动性模型,评价海域地震活动性参数模型的可靠性。李小军等^[19]开展海域地震动传播规律及场地影响模型研究,统计海域地震的强震动记录特征,模拟俯冲带地震的地震动影响场,分析海水、海底地形、厚软土层及礁岛对海域地震的地震动衰减特性的影响,建立俯冲带板缘与板内地震动的预测模型。童华炜等^[20]开展海洋工程抗震设防控制性地震动参数研究,分析了海洋平台类工程、跨海桥隧工程、海底管道与电缆工程和礁岛建设工程的抗震设防控制性地震动参数,进行了既有海洋工程抗震性能的评估地震动参数需求分析。温增平等^[21]开展了海域地震区划图编制技术研究,建立了海域地震区划图编制的原则和方法,发展了面向海域区划的概率地震危险性分析方法并分析了不确定性,选取示范区进行了海域地震区划图试编。研究形成了海域地震区划工作的初步技术规程,适用于中国海域及邻区的地震区划工作。

3 全球地震危险性区划研究进展

目前世界上大部分国家都将使用PSHA方法得到的全国性的地震危险性分析结果作为建筑抗震设防的依据。该方法通常在研究区域划分潜在震源区,为各潜在震源区分配地震活动性参数,使用地震动预测方程计算潜在震源区对场点造成的地震动影响,再考虑适用场地的调整系数,得到地震危险性分析结果。

意大利全球地震模型(global earthquake model, GEM)基金会将世界各国的地震危险性研究整合,于2018年底发布了《全球地震危险性图(2018版)》^[22]。此后,世界各国及分区的详细地震危险性模型由GEM陆续发布。截至2020年底,已有阿拉

伯半岛^[23]、中美洲及加勒比^[24]、南美洲^[25]、东南亚^[26]、南部非洲^[27]5个跨国区域的地震危险性模型数据公开发布。

《全球地震危险性图》的中国部分由中国地震局地球物理研究所与GEM合作完成,在第五代《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[28]的基础上进行了如下改进:(1)天山地区,在原有的中亚^[29]、西亚^[14]和中国地震危险性模型^[28]的基础上,进行了潜在震源区的重新划分和地震活动性参数的重新确定,使三方的潜源划分互相协调;(2)编写了适用于中国潜在震源模型^[30]和地震动衰减关系^[31]的Python语言地震危险性分析程序模块,并验证了其准确性;(3)使用GEM开发的地震危险性计算平台OpenQuake,集成Python语言模块,计算了中国大陆地区50年超越概率10%的PGA分布图,并与中国算法进行比较,表明OpenQuake平台与中国算法结果基本一致。

2020年,GEM在国际工程地震学领域顶级学术期刊《Earthquake Spectra》上组织了题为“GEM's 2018 Global Hazard and Risk Models”的专辑,收录了10篇全球各国地震危险性研究方向的学术论文。其中,Pagani等^[22]从数据来源、参与机构、绘图参数、不确定性分析等方面系统介绍了GEM于2018年发布的全球地震模型的地震危险性部分。Allen等^[32]开展了澳大利亚全国的地震危险性分析研究(图3),并定量分析了新版(2018)地震危险性图与前版的变化,对模型不确定性也进行了分析。Peñarubia等^[33]开展了菲律宾全国地震危险性区划研究,对菲律宾东西两侧的俯冲带断层构造进行了调查,划分了潜在震源区,并分析了模型的不确定性,给出了菲律宾全国的地震危险性区划图。Ornthammarath等^[26]开展了中南半岛的地震危险性分析研究,基于地震活动性模型建立空间光滑的震源模型,指出缅甸和越南北部是中南半岛地震危险性较高的地区。Abbott等^[34]对使用OpenQuake的新西兰地震危险性建模方法进行了介绍,并指出了OpenQuake建立的模型的优缺点。该专辑为近年来全球地震危险性区划领域规模较大的期刊专辑,集中展示了世界各国地震危险性研究的最新成果。

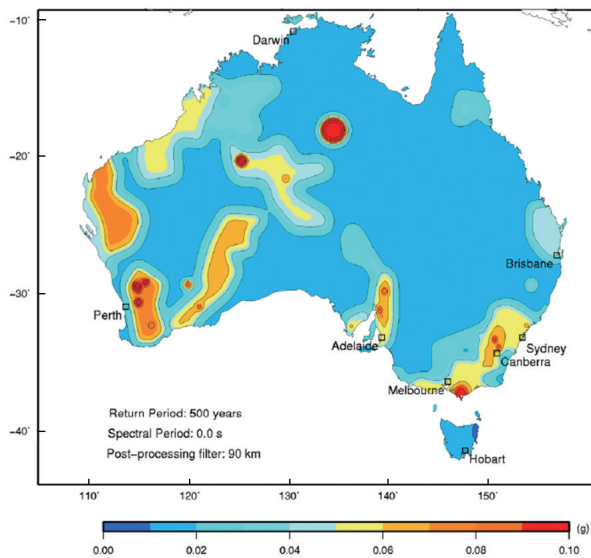


图3 澳大利亚50年超越概率10%的PGA分布

4 新一代地震区划图中的地震危险性分析新技术

地震区划即按照地震危险性的不同进行区域划分。为了描述不同地区的地震危险性,科学家最早使用地震统计方法,制作出历史地震震中分布图。历史地震分布密集的地区,被认为是地震危险性高的地区。后来,地震震中分布的区域被按照一定规律划分为地震带,形成了地震带分布图,如中国1923年发布的第1张全国地震带分布图^[35]。此后,出现了以地震统计方法结合地震地质方法编制出的地震区划图。

苏联是世界上较早进行地震区划研究的国家,在1933年开展了第一次全国性的地震区划^[36]。中国全国范围的地震区划图始自20世纪50年代后期编制的《中国地震烈度区域划分图》^[37]。当时使用地震危险性分析的确定性方法。1977年,中国编制第二代《中国地震烈度区划图》^[38]。该图预测自1973年以后中国未来百年内可能遭遇的最大地震烈度分布图,假设地震活动性服从古登堡-里克特震级-频度关系^[39]。1990年,国家地震局编制出版了第三代《中国地震烈度区划图》^[40-41],这是首次利用概率地震危险性分析方法编制的全国地震区划图。2001年,中国地震局编制完成了第四代《中国

地震动参数区划图(GB 18306—2001)》^[42]。该图首次使用地震动参数(地震动峰值加速度和加速度反应谱特征周期)作为编图指标。2016年6月1日开始实施第五代《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015,简称《五代图》)^[28]。《五代图》通过系统研究全国不同地区中震(50年超越概率10%)与大震(50年超越概率2%)的比例及其与地震环境的关系,提出了地震区划中合理确定抗倒塌概率设计水准地震动参数的方法和技术途径。

《五代图》发布后,下一代地震区划图的预研究工作随即启动。2020年,国内学者对新一代区划图拟解决的新科学问题和拟实现的新技术突破开展了初步的预研究。其中,吴果^[43]开展了第六代区划图预研究资料收集工作,整理了美国加州地震区划研究中使用的UCERF3模型^[44]的震源参数确定方法,以及使用新的震源模型、地震活动性模型的地震危险性研究新进展。吴清^[45]讨论了目前国内地震目录的完备性及地震资料的清理与续编,介绍了历史地震目录和仪器记录地震目录研究的最新进展和存在的问题,并对全国地震目录进行了更新,编制了中国及周边地区的统一地震目录。周庆^[46]讨论了新一代区划图地震活动性参数研究拟采取的技术方案和地震发生率空间分布函数的确定方法,建议新一代区划图的地震活动性统计采用更小的地震统计区。李昌珑^[47]讨论了基于断层震源模型的地震危险性计算方法,介绍了断层源离散化方法、地震破裂面的设定方法和断层距的读取方法,并使用天山地区的断层模型进行了试算。沙海军^[48]开展了基于多模型的渤海地区地震危险性概率评估研究,使用基于多模型的地震危险性概率分析方法,给出渤海地区不同概率水平的地震危险性分析结果。并比较了不同方案的结果差异及不确定性。

5 诱发地震危险性分析研究

诱发地震(induced earthquake)被认为是发震机制有别于天然构造地震的一类地震。目前已知的能够诱发地震的原因主要有:水库的蓄水和排

水、地下(核)爆炸、矿坑塌陷、油气开采等。诱发地震不仅发生在地震活跃地区,在少震、弱震区也会发生诱发地震。目前较为公认的原因是在地壳的许多部分,甚至在平常不地震的“稳定”地区,断层也处在非常接近发震临界的准平衡状态,只要有微小的扰动有时就能导致地震。诱发地震的特征包括:震级较小,震级超过M5的地震只占极少数;震中区集中于库区、开采区等有应力干扰的地区;震源深度浅,通常不超过5 km;震群活动比例高。

水库诱发地震的研究已持续了数十年,近年来,由于地震监测、震源精定位等技术的进步,水库诱发地震研究进一步发展。2020年,阮杰和邱鹏^[49]开展了水库诱发地震危险性评价方法研究,总结了水库诱发地震的主要特点和诱震机理,根据诱震机理分析,利用BP神经网络算法建立了完善的水库诱发地震危险性评价模型。王明振等^[50]开展了长江三峡工程库区地震活动性规律研究,基于库区多年地震监测数据,统计分析了库区地震发生情况,并采用概率地震危险性方法对库区地震震级-频度关系模型、库区震级分布概率、库区地震发生次数概率等地震活动性规律问题进行了研究(图4),表明“触发型”水库地震的震级以微震及极微震为主。徐志双等^[51]开展了非天然地震的公共服务需求调查研究,围绕国内外矿震、水库地震等非天然地震事件的公共服务需求和相关部门的应急处置措施进行调研分析,发现对于不同类型的地震,公共服务需求存在差异,归纳了针对地震部门和相关单位的应急处置对策建议。

油气开采特别是页岩气诱发地震研究近年来成为研究热点。已有一些研究采用PSHA的技术体系研究页岩气诱发地震的地震危险性和地震风险^[52-55]。2020年,国际上也有一些研究将修正的大森定律^[56]和传染型余震序列(epidemic type aftershock sequence, ETAS)模型^[57]引入诱发地震危险性预测研究^[58-61]。在国内,吕晓健^[62]介绍了2018年四川兴文M5.7地震及其余震的时空分布、重定位结果,并分析了主震和余震震源深度的空间分布规律。郭志等^[63]研究了四川长宁6.0级地震及几次强余震的精定位和震源机制,指出主震及几次余震的

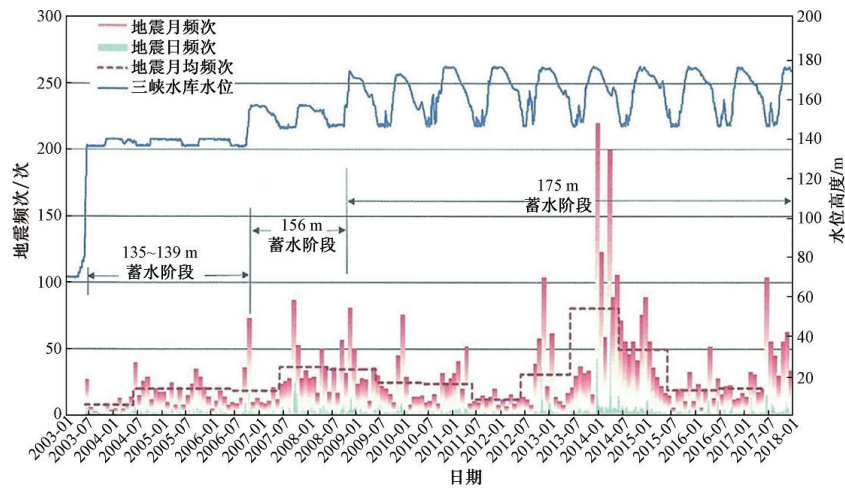


图4 三峡库区历年最高水位及地震发生年频次

震源深度较浅,但仍超过5 km,是否是诱发地震还需进一步研究。

6 结论

2020年,地震危险性分析研究在理论创新和应用推广方面都取得了较多的发展。随着人类社会的现代化,安全、舒适的生活环境将成为人们普遍的需求,这将对地震危险性分析的研究水平提出更高的要求。未来,地震危险性分析研究将有更广泛的应用领域。提高模型的精准性、利用高新技术、增加多学科融合、提供更满足社会需求的产品和服务是地震危险性分析研究的可提高和改进的方向。

参考文献(References)

- [1] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[D]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [2] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [3] Irwandi I, Umar M, Khaizal J, et al. The neo-deterministic seismic hazard map (NDSHA) of Sumatra compared with official 2010 and 2017 derived from PSHA method [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 712(1): 012017.
- [4] Ismail-Zadeh A, Baro O, Kumar A. Deterministic versus probabilistic seismic hazard assessment for the Shillong Plateau[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. 2020: 3834.
- [5] 高孟潭. 地震危险性分析中的确定性和不确定性[R]. 重庆: 中国地震学会第十六次学术大会专题报告, 2020.
- [6] 潘华. 基于性能的概率地震危险性分析[R]. 重庆: 中国地震学会第十六次学术大会专题报告, 2020.
- [7] 张爱国. 基于物理过程的地震数值模拟方法以及应用 [R]. 重庆: 中国地震学会第十六次学术大会专题报告, 2020.
- [8] 刘爱文. 各类生命线工程抗震设防概率水准的比较研究 [R]. 重庆: 中国地震学会第十六次学术大会专题报告, 2020.
- [9] 陈学良. 宽频带强地震动数值模拟中的一点认识[R]. 重庆: 中国地震学会第十六次学术大会专题报告, 2020.
- [10] Petersen M D, Moschetti M P, Powers P M, et al. The 2014 united states national seismic hazard model[J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(S1): 1-30.
- [11] Giardini D, Woessner J, Danciu L, et al. Mapping Europe's seismic hazard[J]. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 2014, 95(29): 261-268.
- [12] Woessner J, Laurentiu D, Giardini D, et al. The 2013 European seismic hazard model: Key components and results[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13 (12): 3553-3596.
- [13] 地震调查研究推进本部, 地震调查委员会. 全国地震动预测地图2018年版[R]. 东京: 地震调查研究推进本部事务局, 2018.
- [14] Danciu L, Şeşetyan K, Demircioglu M, et al. The 2014 earthquake model of the middle east: Seismogenic sour-

- es[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018(16): 3465–3496.
- [15] Caklais A, Rood D, Stirling M, et al. Earthquake hazard assessment uncertainty reduced by fragile geologic features in coastal Central California[C]//EGU: General Assembly Conference Abstracts. 2020: 14971.
- [16] Du W, Pan T C. Probabilistic seismic hazard assessment for Singapore[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(3): 2883–2903.
- [17] 任治坤, 高战武, 李正芳, 等. 海域活动构造框架和地震构造模型研究报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020.
- [18] 吕悦军, 冉洪流, 徐伟进, 等. 海域地震活动性模型及其评价方法研究报告[R]. 北京: 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 2020.
- [19] 李小军, 胡进军, 陈苏, 等. 海域地震动传播规律及场地影响模型研究报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020.
- [20] 童华炜, 李亚东, 黄帅, 等. 海洋工程抗震设防控制性地震动参数研究报告[R]. 广州: 广州大学, 2020.
- [21] 温增平, 胥广银, 李昌珑, 等. 海域区划图编制技术及典型海区示范报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020.
- [22] Pagani M, Garcia-Pelaez J, Gee R, et al. The 2018 version of the global earthquake model: Hazard component [J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(S1): 226–251.
- [23] 中国地震动参数区划图(GB 18306—2015)[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2015.
- [24] Zahran H, Sokolov V, El-Hadidy Y S, et al. Hazard model for the Arabian Peninsula[R]. Report of GEM Foundation, 2018.
- [25] Benito M B, Lindholm C, Camacho E, et al. A new evaluation of seismic hazard for the Central America region [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102(2): 504–523.
- [26] Garcia-Pelaez J, Pagani M, Johnson K, et al. Hazard model for South America (SAM) [R]. Report of GEM Foundation, 2018.
- [27] Ornthammarath T, Warnitchai P, Chan C H, et al. Probabilistic seismic hazard assessments for Northern Southeast Asia (Indochina): Smooth seismicity approach[J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(S1): 69–90.
- [28] Ayele A, Midzi V, Ateba B, et al. Earthquake hazard and risk in Sub-Saharan Africa: Current status of the global earthquake model (GEM) initiative in the region [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2013, 15: 1181.
- [29] Ullah S, Bindi D, Pilz M, et al. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia[J]. *Annal Geophysis*, 2015, 58(1): 0103S.
- [30] 周本刚, 陈国星, 高战武, 等. 新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(2): 113–124.
- [31] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(1): 24–33.
- [32] Allen T, Griffin J, Leonard M, et al. The 2018 national seismic hazard assessment of Australia: Quantifying hazard changes and model uncertainties[J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(S1): 5–43.
- [33] Peñarubia H C, Johnson K L, Styron R H, et al. Probabilistic seismic hazard analysis model for the Philippines [J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(S1): 87552930199005-21.
- [34] Abbott E, Horspool N, Gerstenberger M, et al. Challenges and opportunities in New Zealand seismic hazard and risk modeling using OpenQuake[J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(S1): 210–225.
- [35] 翁文灏. 理论的地质学与实用的地质学[R]. 北京: 中国地质学会第三次年会, 1925.
- [36] Mushketov D I. Experience of seismic zoning of USSR [J]. *Materialy Seismotektonike*, 1933(1): 1.
- [37] 李善邦. 中国地震烈度区域划分图说明[J]. *地球物理学报*, 1957, 6(2): 127–158.
- [38] 邓起东, 张裕明, 环文林, 等. 中国地震烈度区划图编制的原则和方法[J]. *地震学报*, 1980, 2(1): 90–110.
- [39] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4): 185–188.
- [40] 中国地震烈度区划图编委会. 中国地震烈度区划图(1990)及其说明[J]. *中国地震*, 1992, 8(4): 1–11.
- [41] 陶夏新. 我国新的地震区划编图和中国地震烈度区划图(1990)[J]. *自然灾害学报*, 1992, 1(1): 99–110.
- [42] 高孟潭. 新的国家地震区划图[J]. *地震学报*, 2003, 25(6): 630–636.
- [43] 吴果. 六代图预研究资料收集[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.
- [44] Field E H, Arrowsmith R J, Biasi G P. Uniform California earthquake rupture forecast, version 3 (UCERF3) – the time-independent model[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(3): 1122–1180.
- [45] 吴清. 地震资料的清理与续编[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.

- [46] 周庆. 区划图地震活动性参数[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.
- [47] 李昌珑. 断层源地震危险性算法原理及试算示例[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.
- [48] 沙海军. 基于多模型的渤海地区地震危险性概率评估[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.
- [49] 阮杰, 邱鹏. 水库诱发地震危险性评价方法研究[J]. 建筑安全, 2020, 35(9): 78-80.
- [50] 王明振, 李珊, 高霖. 长江三峡工程库区地震活动性规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7865-7869.
- [51] 徐志双, 高小跃, 李志强, 等. 矿震和水库地震等非天然地震的公共服务需求调查研究[J]. 中国地震, 2020, 36(3): 630-638.
- [52] van Eck T, Goutbeek F, Haak H, et al. Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands[J]. Engineering Geology, 2006, 87(1-2): 105-121.
- [53] Dost B, Ruigrok E, Spetzler J. Development of seismicity and probabilistic hazard assessment for the Groningen gas field[J]. Netherlands Journal of Geosciences, 2017, 96(5): 235-245.
- [54] Petersen M D, Mueller C S, Moschetti M P, et al. Incorporating induced seismicity in the 2014 United States national seismic hazard model—results of 2014 workshop and sensitivity studies[R]. U.S.: Geology Survival Open File Report, 2015: 1070.
- [55] Petersen M. D, Mueller C S, Moschetti M P, et al. 2016 One-Year Seismic Hazard Forecast for the Central and Eastern United States from Induced and Natural Earthquakes[R]. U.S.: Geology Survival Open File Report, 2016: 1035.
- [56] Omori F. On the aftershocks of earthquakes[J]. Journal College Science Improve University Tokyo, 1894, 7: 111-200.
- [57] Ogata Y. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes[J]. Journal of the American Statistical association, 1988, 83(401): 9-27.
- [58] Llenos A L, Michael A J. Regionally optimized background earthquake rates from ETAS (ROBERE) for probabilistic seismic hazard assessment[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(3): 1172-1190.
- [59] Wang Z, Lei X, Ma S, et al. Induced earthquakes before and after cessation of long-term injections in Rongchang gas field[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(22): e2020GL089569.
- [60] Davoudi N, Tavakoli H R, Zare M, et al. Aftershock probabilistic seismic hazard analysis for Bushehr province in Iran using ETAS model[J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 1159-1170.
- [61] Teng G, Baker J W. Short-term probabilistic hazard assessment in regions of induced seismicity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(5): 2441-2453.
- [62] 吕晓健. 余震及诱发地震活动特征分析[R]. 北京: 中国地震局第六代地震区划图预研究研讨会, 2020.
- [63] 郭志, 高星, 路珍. 2019年6月17日四川长宁地震重定位及震源机制研究[J]. 地震学报, 2020, 42(3): 245-255, 377.

Review of hot topics on seismic hazard assessment in 2020

LI Changlong, WEN Zengping*

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

Abstract In 2020, a series of new progress were made in the field of seismic hazard analysis and research and new results were achieved in many research directions. This paper selects five research directions as representatives: global seismic hazard research, marine seismic hazard assessment, deterministic-probabilistic seismic hazard assessment methods, hazard assessment of induced earthquake, and new technologies for seismic hazard assessment in the next-generation zoning map, so as to review the hot researches seismic hazard assessment in 2020.

Keywords seismic hazard; seismic hazard mapping; marine earthquake; ground motion simulation; induced earthquake ●



(责任编辑 徐丽娇)