

徐志双,高小跃,李志强,等,2020. 矿震和水库地震等非天然地震的公共服务需求调查研究. 中国地震,36(3):630~638.

矿震和水库地震等非天然地震的 公共服务需求调查研究

徐志双 高小跃 李志强 吴天安 郑通彦
文鑫涛 何润良 李华玥 王尅丰

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 采矿、水库蓄水等人类活动可能伴随地震的发生,其突发性和破坏性会对公共安全、社会稳定和经济发展带来威胁。本文围绕国内外矿震、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,归纳得到以下针对地震部门和相关单位的应急处置对策建议:震前,完善和落实应急预案,提升建(构)筑物抗震设防等级,规范相关企业行为;震时,判别地震类型并核准地震信息,多部门联动开展应急响应,完善灾情收集渠道;震后,注重科普宣传和舆论疏导。平震结合,多方协调,可有效应对非天然地震事件,维护社会稳定和谐。

关键词: 人类活动 非天然地震 矿震 水库地震 应急处置

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0630-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地球上发生的地震大部分是天然地震,但也有一些地震与人类活动有关,被称为“非天然地震”或“人类活动伴随地震”。可能诱发地震的人类活动包括水库蓄水、架设高层建筑、海岸工程、采石、开采地下水、煤炭、矿产、天然气、石油和地热流体,开挖隧道、采矿时的流体注入、水压致裂、地下核实验、储气和固碳等,其中采矿和水库蓄水诱发地震占比最大(图1)(Davies et al, 2013; Foulger et al, 2018)。近年来,随着社会经济的发展,非天然地震的发生率呈现明显的上升趋势(Foulger et al, 2018)。我国境内也发生过较多非天然地震,如1962年3月19日广东河源6.1级(水库地震)、2015年4月1日辽宁康平3.3级(矿震)、2016年4月19日北京房山区2.7级(塌陷)、2017年5月23日北京门头沟2.6级(塌陷)、2019年6月9日吉林长春龙家堡矿2.3级(矿震)等地震。这些事件多发生在工业经济活动频繁地区,人口集中度高,社会反应较敏感,虽然不一定造成重大的生命和经济财产损失,但容易引发社会舆论强烈反响。因此,针对非天然地震事件,做好应急救援和控制伤亡的同时,如何采取必要的应对措施减少不良影响也是政府和地震部门面临的巨大挑战。

[收稿日期] 2020-03-20; [修订日期] 2020-06-19

[项目类别] 中国地震局2019年重大政策理论与实践问题研究课题(CEAZY2019JZ21)资助

[作者简介] 徐志双,女,1989年生,博士,工程师,主要从事地震应急方面的研究。E-mail: xzs0610@seis.ac.cn

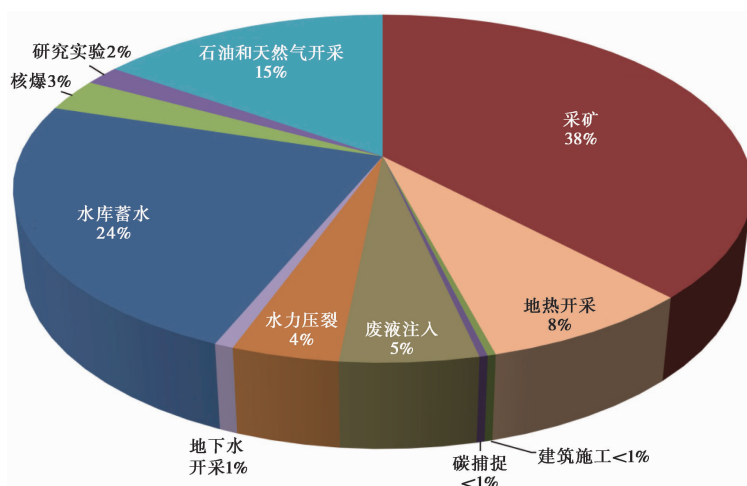


图1 非天然地震类别(Foulger等(2018))

本研究针对矿震、水库地震等非天然地震事件,从工业生产、社会秩序稳定、应急管理服务等实际需求出发,采取现场调研和资料分析相结合的手段,调查这些地震事件中的公众反应和相关单位的应急处置措施,同时整理了国外类似事件中的一些做法,给出相关应急处置对策建议,旨在提升大应急框架下非天然地震的应急处置工作效率。

1 我国非天然地震应急处置方法

随着人类生活水平的不断提高、网络的不断发展和公众安全意识不断提升,非天然地震事件的社会影响愈发显著,可能直接或间接引发各种邻避运动和环境群体性事件,对公共安全和秩序产生严重威胁(Foulger et al,2018)。针对我国近年来发生的矿震和水库地震事件开展调研活动,归纳整理了相关应急处置办法。

1.1 矿震

我国对矿产资源的需求量高,采矿作业兴盛,开挖深部岩体导致应力重新分布,可能引起破裂的产生、传播和岩体沿现存破裂面的位移,矿震就是岩体对地下结构的变形和破裂的响应(Li et al,2007)。采矿过程中的矿井塌陷以及开采后未回填或回填不充分的采空区发生的矿井塌陷,都属于矿震的范畴。

北京房山、门头沟地区近年来的矿震多由于采空区矿井塌陷所致,震级一般不超过M4.0,地质破坏有限,但矿震的发生会在社会上造成一定影响。例如,2016年4月19日房山2.7级地震(塌陷)经媒体扩散,民众产生误解,误认为是地震引起了地表塌陷,造成一定程度的恐慌。由北京市地震局牵头,联合市安全监管局、门头沟区政府、房山区政府、京煤集团等十来家单位,于2个月内形成相关工作机制,规定2.0级及以上地震发生后,北京市地震局通报各单位联动开展地震应急处置。此外,2016年11月3日房山发生2.0级地震(爆破),由于速报信息包含“爆破”二字,需警方介入核实和追责,事件引起广泛关注。为了精确地震地点,明确事故责任,11月5日,房山区地震局新增4个地震台,将地震定位精度提升至1km。

北京房山、门头沟地区非天然地震应急处置流程主要包括地震通报、现场调查、灾情报告和舆情处置四部分。区地震局核准震中经纬度后,向区应急管理局和区政府报告地震三要素,同时迅速启动灾情收集,并将灾情信息报送至市地震局、区政府及区应急管理局。北京市房山、门头沟矿震应急处置表现出来的问题有:①矿震形势依然严峻。门头沟和房山煤矿区构造复杂、煤层范围大,虽然煤窑逐渐搬迁,但到全面关停前采空区仍可能发生地震。②事件责任落实困难。矿业可能为了躲避责任而想办法隐瞒、回避或否认开采作业导致地震,当地居民也可能虚报震情以获得拆迁补偿。③应急措施取决于地震类型。一般而言,爆破是人为的,需警方介入追责,但塌陷可能是关停的小煤矿,无需过多处理。④来自社会层面的压力很大。虽然政府主要关注有无破坏和伤亡,地震局反馈现场震感和定位精度即可,但网络对震情的推波助澜、百姓利益驱动等因素使得地震局面临一定压力。

1.2 水库地震

我国广东、湖北、辽宁、四川、云南、广西、浙江等省份都发生过水库地震或疑似水库地震(胡毓良等,1979;杜运连等,2008;廖武林等,2009;周斌等,2010;马文涛等,2010;李碧雄等,2014;阎春恒等,2015;Yao et al,2017;李伟等,2019)。我国最大的水库地震为1962年3月19日广东河源6.1级地震,造成7人死亡,63人受伤,有感范围较大,远至广西、江西、福建等地。当时的应急处置主要关注构造和成因,专家团队在这方面进行了深入的研究。近年来,河源地区多发中小地震,影响最大的为2012年2月16日东源4.8级地震,震中附近人烟稀少,地震造成的影响不大。虽然有研究成果认为该地区近年来的中小地震为水库地震(He et al,2018),但震时当地应急管理部门将其视为天然地震进行应急处置。

水库地震的诱发因素比较复杂,相关地震应急处置的经验特点为:①地震局相对被动,地震应急处置主要依据政府态度。河源市政府认为新丰江水库已经和地下融为一体,并且近年来河源地区地震频次和蓄水位关系不大,所以河源中小地震均视为构造地震,相关的震后应急也按照天然地震的办法处理。②非天然地震处置一定要了解当地情况。天然地震处置侧重“快”,非天然侧重“准”。因为涉及到追责问责,地震局作为第三方,需核准信息作为处置的依据,其他的处理由经验丰富的政府负责。③应急预案很重要,一定要有针对性 and 指导性。预案要及时更新,人员名单和联系电话需确保无误,可考虑固定岗位,精准职责,按岗按事而非按人设定岗位。震后按照预案流程进行应急处置才能有条不紊。④地震部门平时应加强与其他部门的联系,地震时借力、协同工作。⑤预防为主,学校和社会演练、房屋抗震设防很重要。河源市学校宣传、演练、培训都很到位,每年举办防灾减灾抗灾宣传教育3000余次,全市1000多所学校全覆盖,形成了应急逃生、安全防范、救援治疗的完整体系。目前河源市建筑物抗震设防烈度部分Ⅶ度设防,其余Ⅵ度设防。避难场所应在现有基础上进一步完善,相应的物资储备也需要不断优化。⑥灾情收集渠道待完善。市地震局转隶至市应急管理局,灾情信息员需重新登记,村、镇、县、市的相关人员都是兼职义务人员,需进行统一管理和培训。此外,可以考虑构建灾情信息管理系统,国家直接接收灾情信息。

2 国外非天然地震应对措施

美国中部历史上地震不多,但近年来,科罗拉多州、得克萨斯州、俄克拉荷马州、俄亥俄州和阿肯色州均发生较多中等地震,大部分地震位于废水注入井附近,其中一些已被证实由

人类活动引起,相关州政府严格审查地下注入许可证。2011年11月6日俄克拉荷马州5.7级地震是最大的废水注入引起的人工地震。震后,俄克拉荷马州地质调查局报告了相关断层的地震数据,提醒市民注意余震,防止余震造成额外伤害。各县应急管理机构报告受灾情况,州交通局负责基础设施受损情况通报,美国陆军工程兵团检查70英里(约112km)范围内的五座大坝后公开相关信息。

地热、油气、碳储等能源开采工程均可能引发不同程度的地震。得克萨斯州塔兰特县开采页岩气后地震频发,虽几乎无灾,但广受关注。研究者将地震的时空分布与天然气开采作业和天然地震相比较,认为该地区2008~2009年地震序列为开采页岩气所诱发,但鉴于得克萨斯州曾发生过7级以上构造地震,活动断层发育,因此开采作业引起的流体压力变化不太可能引发大地震(Frohlich et al, 2011)。美国4个联邦机构(环境保护局(EPA),土地管理局(BLM),美国农业部森林服务局(USFS)和美国地质调查局(USGS))以及各州立机构均承担着与能源技术相关的活动方面的法规制定或研究工作。其中,EPA设定饮用水水质标准,规范注入井的建造、运行、许可以及最终的封堵和废井处理,但不解决废水注入诱发地震问题,相关法规也不关注诱发地震可能性。USGS负责监测、研究和报告地震活动,但是主要集中于天然强震,要扩展到非天然地震的全面监测和研究,尚需大量投入(National Research Council, 2012)。美国国家地震信息中心(NEIC)负责确定和发布美国2.5级以上、全球4.5级以上地震的位置和震级,NEIC建设的“Did You Feel It?”(DYFI)项目让震区居民利用网络主动上报震感和位置信息,基于上报的信息分析得出修正的麦加利烈度(MMI)值并在线公布烈度分布图。地方报社也会征集和发布有感报告调查表(Frohlich et al, 2014)。

加拿大安大略省的克雷顿是世界最深的地下矿区(>2km)之一,2006年11月29日发生 M_N 4.1地震(M_N 在矿震范畴内比近震震级 M_L 大0.3~0.6左右),13min和15min后分别发生2个中等余震,有感范围较大,修正的麦加利烈度最高达到Ⅵ度。加拿大地质调查局采用社区网络烈度项目^①(类似USGS的“DYFI”项目,用户以邮编报告位置)收集居民反馈的震感信息。对于已发生矿震的矿区,重新开采时需申请再入协议。再入协议是控制矿区地震的一项战略方针,矿区发生了较大地震后,必须经过一定的衰减时间,确认地震活动回到背景水平后才能再次作业(Vallejos et al, 2011)。

欧洲地热开采和二氧化碳气藏作业中的流体注入也导致一系列地震的发生。法国、德国、冰岛、意大利、瑞典、瑞士、英国、奥地利、丹麦、立陶宛、挪威、波兰等均存在地热开采诱发地震事件,与沉积岩相比,结晶岩中的流体注入更容易诱发地震。如果注入井附近存在断层,会增加发生有感地震事件的风险(Evans et al, 2012)。瑞士针对地热能源项目修订了“地热诱发地震风险诊断方法”,包括危害和风险评估、社会场所特征、地震监测、结构改造和交通信号灯系统等内容,可用来评估某项目诱发地震的可能性(Trutnevyte et al, 2017)。瑞士关于地震的官方单位是地震服务机构(SED),代表联邦政府负责地震监测、灾害评估和发布预警,其明确了地热项目分类,为每一类项目设置地震活动性阈值:0类项目——诱发地震的概率极低或为零;I类项目——不太可能诱发地震,每年诱发 $M_L \geq 2.0$ 地震的概率小于1%;II类项目——不太可能诱发有感或破坏性地震,每年诱发 $M_L \geq 3.0$ 地震的概率小于1%;III

^① <http://www.earthquakescanada.ca>

类项目——可能诱发地震,需预先评估和跟踪动态。在地震监测中,坚持分类监测、实时公布,建立通知和预警系统,以短信和邮件对外公布等方法。缓解和复原战略中,采用红绿灯系统确定诱发地震的风险程度是否超出可接受范围。红绿灯系统根据公众反应、观测到的地方震级和 PGV 3 个指标,确定一个四级行动计划:流体注入按计划持续进行(绿灯)、项目继续但流体不增加(黄灯)、停止(橙灯)、停止并开始泄流(红灯)(Wiemer et al, 2017)。

南非矿产储量丰富,以约翰内斯堡为中心的威特沃特斯兰德金矿产区于 1886 年投入开采。随着开采深度超过 1500m,诱发地震随之而来,岩爆和岩崩成为金矿事故和人员死亡的最主要原因。政府多次任命委员会监督和查处,采矿企业也坚持整改,但岩爆和岩崩的情况仍不见好转,如 1967 年至少 101 名矿工在矿震中死亡,1968 年矿震致死类新闻占满当地报纸媒体。1969 年,威特沃特斯兰德金矿的全部矿场提供资金,与南非矿商会合作建立永久的地震网络。1977 年成立岩爆和岩崩高级委员会,发布《改善岩爆和落石危害的行业指南》(Glazer, 2018),明确了地震监测和地震网络的使用。1982 年,他们宣称该地区全部大地震都与地质构造特征有关,发震原因是危险性断层和堤坝。后来,基于地震记录研发了新的采矿模式、穿越地质不连续面的开挖采取保护措施等,这些方法沿用至今。虽然数字地震网络兴起,但一些采矿企业却利欲熏心,不关心采矿诱发地震的问题,所以矿震情况并未好转。2005 年 3 月 9 日克拉克斯多普地区发生 $M_L 5.3$ 地震,导致 2 名矿工死亡,20 名矿工和 58 名居民受伤。2014 年 8 月 5 日该地再次发生 $M_L 5.5$ 地震,500 间房屋受损,多人受伤,1 人死亡。矿山首席监察员开始调查金矿区地震对矿工、矿山和公众的风险,发现南非矿业没有雇佣专业的矿震专家(Glazer, 2018)。

印度的水库诱发地震研究始于 1962 年修建柯伊纳水库以后。1967 年 12 月 11 日,柯伊纳发生 6.3 级水库地震,180 人死亡,2000 余人受伤,这次地震是迄今已知的最大水库地震。截至 2019 年底,该库区记录到 $M \geq 5$ 的地震数十个, $M \geq 4$ 的地震数百个,还有数千个小震。建库以前,当地地震稀少,被认为是少震区,因此大坝设计未考虑地震设防。1962 年蓄水后地震活动增多,而且随着水位上升,地震活动逐渐增强。1967 年 9 月 13 日发生 5.5 级地震,这是该库区第一个显著地震,同年 12 月发生 6.3 级水库地震。震后水库蓄水量保持较低水平,直到 1968 年 10 月均未发生大震,于是同年水库开始蓄水。1973 年 8 月 15 日第一次蓄满水,10 月 17 日发生 5.1 级地震(Gupta et al, 1974)。1985 年在柯伊纳水库附近修建瓦尔纳水库,建好后印度水库地震增多,且地震位置由柯伊纳向瓦尔纳地区转移(Shashidhar et al, 2011)。柯伊纳-瓦尔纳水库附近地震活动与季风有关,8、9 月水位涨高和 4、5 月水库泄洪时地震活动性增强(Gupta, 2019)。针对水库地震,印度地质调查局进行柯伊纳水库及其外围地区的地质构造、地貌和新构造运动、水文地质等方面系统调查研究,发布地震灾害和地震风险分析报告(丁原章, 1983)。印度地球科学部(MoES)在柯伊纳-瓦尔纳地区进行了一项深度科学钻探实验,建立 2 个深井眼以研究水库地下地质构造(Yadav et al, 2016)。中央水利和电力研究站鉴别地震是否属于诱发地震;印度国家地震中心用 GPS 台站和 InSAR 观测数据研究该区域地块运动、水库的季节性填充和排空以及相应的应力场变化。国家地球物理研究所建立地震台站,进行水库地震诱发机制和地震活动规律性研究、水库水位变化与地震频度的相关性研究以及水库地震前后应力降和拐角频率变化研究(Pandey et al, 2003; Jain et al, 2004)。

3 非天然地震应急处置对策建议

部分非天然地震是由于科学研究产生的,例如人工爆破探测地球内部结构(边银菊等,2010;陈惠芳等,2018),爆炸事故中根据地震波估算爆炸释放的能量(刘瑞丰等,2019;江文彬等,2020)。但总体而言,作为伴随着人类活动的突发性事件,非天然地震对社会稳定、经济发展,乃至人员和财产损失带来一定威胁。与天然地震相比,这类事件具有特殊性,地震局和相关部门的应急处置措施应与天然地震有所区分,在调研分析的基础上归纳得出以下几点建议:

(1) 识别震相,判别地震类型并核准地震信息。

爆破、塌陷、化爆、核爆等非天然地震的波形震相特征与天然地震有明显的差异(Hong et al,2008;苏莉华等,2011;刘莎等,2012;杨芳等,2016;林鑫等,2019;任涛等,2019),快速准确地判定地震类型为应急处置提供了基础和依据。在处置方面,天然地震处置侧重“快”,非天然地震侧重“准”,地震局应坚持以科学为依据、事实为准绳,提升地震监测和震相识别能力,核准地震类型和三要素,为非天然地震事件处理提供客观依据。例如,在矿震事件中,精准的地震三要素是确定采矿企业责任的重要依据。

(2) 完善和落实应急预案。

应急预案是政府部门和社会紧急启动应急响应的依据,制定高效精准的应急预案有助于震后有效采取应急处置。非天然地震与天然地震有明显的区别,应急处置的侧重点也有差异,所以应针对非天然地震制定专门的应急预案,作为应急处置的指导性文件。预案要有时效性和可操作性,但目前来看,各省市的应急预案准备工作良莠不齐,机构组成、处置流程和任务分工表述不清楚,预案更新不及时,处置手册编制方面尚缺乏规范性。机构改革转隶的过程中,预案的修订工作应放置首位。

(3) 建立健全协调机制,多部门联动开展应急响应。

地震部门平时时应加强与其他部门的联系,地震时合力、协同工作。例如与安监系统互通矿业信息,可在矿震后迅速确定安全事故责任归属。目前,地震局普遍面临机构整改和转隶,重新登记灾情信息员,需尽快培训这些兼职义务人员收集和上报灾情信息。除地震局外,参与应急处置的还有民政、财政、水利、交通、武装力量等部门,但各单位的灾情信息交流共享不够,如果灾情信息能及时共享和集中统计,可极大提升应急处置的效率(龚强等,2017)。此外,可参照 USGS 的“DYFI”项目和加拿大的社区网络烈度项目,调动民众,进行基于网络、手机 app 等的灾情主动上报。2020 年,应急管理部在全国范围内正式启用“国家应急指挥综合业务系统”,提供统一的灾情信息上报平台,由中国地震局直接接收和整合灾情信息,为应急救援部署提供基础和依据。

(4) 预防为主,提升建(构)筑物抗震设防等级,同时规范相关企业行为。

印度柯伊纳水库 6.3 级地震造成的灾害远大于我国新丰江水库 6.1 级地震,原因之一是新丰江水库地震发生于大坝加固工程之后,而柯伊纳水库并未进行任何抗震设防,可见提升构筑物抗震设防能力是降低地震影响的有效措施。自 1957 年起,我国已经编制完成了五代地震动区划图,前三版用地震烈度表述,从 2001 版(第四版)起采用地震动参数区划图——《中国地震动参数区划图》,给出工程设计所需的地震反应谱相关参数,为国家抗震设防提供

强制性的标准,城乡规划建设进程中必须严格执行该标准。此外,应建立健全约束矿产企业行为的政策制度,如建立风险等级制度,可参照瑞士等国家的红绿灯系统,明确伴随地震的风险程度是否超出可接受范围,进而约束相关企业开采行为;或采取强制性回填的奖惩办法,避免开采后未回填或回填不充分的采空区发生矿井塌陷,降低矿震的发生率。

(5) 注重科普宣传和舆论引导。

如今网络发达,信息传播迅速,对信息理解不到位或受谣言煽动,可能造成公众不必要的恐慌。2016年北京市发生的几例矿震,震级较小,但网民的关注度较高。公众想从北京市地震局微博寻找真相,但由于当时微博缺乏相应的管理机制,北京市地震局微博未发布相关地震消息,致使民众产生误解。事后北京市地震局、房山区地震局制定了相关办法,震后从公布地震信息、解释地震机理等方面对公众进行舆论疏导,有效降低了社会恐慌。虽然非天然地震一般震级较小、烈度较低,但公众关注度高,采取科学有效的宣传引导方式能够有效缓解这类地震事件的影响。

4 结论

通过调查研究,不同类型非天然地震各有其特点,如矿震具有持续发生、责权落实困难、社会压力大等问题,水库地震涉及成因机制问题。针对这些问题,地震局和相关部门的处置可从以下几个方面入手:震前,以防为重,完善和落实应急预案,提升建(构)筑物抗震设防等级,同时规范相关企业行为;震时,识别震相,判别地震类型并核准地震信息,多部门联动开展应急响应,完善灾情收集渠道;震后,注重科普宣传和舆论疏导。非天然地震仍将与人类长期共存,这些地震一般损失不大,但是往往对社会造成一定影响,其处置也应与天然地震有所区分。对地震部门而言,相较于震后采取紧急措施,平时的科普工作更能有效降低非天然地震的社会影响。总之,平震结合,多方协调,可有效应对非天然地震事件,维护社会稳定和谐。

参考文献

- 边银菊,黄汉明,郭永霞,2010. 明灯一号及邻近地区地震与爆炸的识别. 地震地磁观测与研究,31(5):49~55.
- 陈惠芳,康兰池,金星,等,2018. 利用福建爆破实验记录检验华南速度模型. 中国地震,34(2):270~282.
- 丁原章,1983. 印度的水库诱发地震研究概况. 国际地震动态,(8):9~11,32.
- 杜运连,王洪涛,袁丽文,2008. 我国水库诱发地震研究. 地震,28(4):39~51.
- 龚强,李永强,白仙富,2017. 我国地震应急救援对策存在问题及建议初探. 中国应急救援,(1):32~35.
- 胡毓良,陈献程,1979. 我国的水库地震及有关成因问题的讨论. 地震地质,1(4):45~57.
- 江文彬,陈颢,彭菲,2020. 2019年3月江苏响水化工厂爆炸当量的估计. 地球物理学报,63(2):541~550.
- 李碧雄,田明武,莫思特,2014. 水库诱发地震研究进展与思考. 地震工程学报,36(2):380~386,412.
- 李伟,储日升,王烁帆,2019. 2017年6月16日湖北秭归 M_s 4.3地震成因初探. 地震,39(3):28~42.
- 廖武林,张丽芬,姚运生,2009. 三峡水库地震活动特征研究. 地震地质,31(4):707~714.
- 林鑫,王向腾,赵连锋,等,2019. 核实验监测的地震学研究综述. 地球物理学报,62(11):4047~4066.
- 刘瑞丰,李赞,张玲,等,2019. 爆炸当量估算的初步研究. 地震地磁观测与研究,40(4):1~7.
- 刘莎,杨建思,田宝峰,等,2012. 首都圈地区爆破、矿塌和天然地震的识别研究. 地震学报,34(2):202~214.
- 马文涛,徐长朋,李海鸥,等,2010. 长江三峡水库诱发地震加密观测及地震成因初步分析. 地震地质,32(4):552~563.
- 任涛,林梦楠,陈宏峰,等,2019. 基于 Bagging 集成学习算法的地震事件性质识别分类. 地球物理学报,62(1):383~392.
- 苏莉华,魏玉霞,2011. 河南省非天然地震的波形特征及识别方法. 高原地震,23(2):30~34.

- 阎春恒,周斌,陆丽娟,等,2015. 龙滩水库蓄水后库区中小地震震源机制. 地球物理学报, **58**(11):4207~4222.
- 杨芳,朱嘉健,刘智,等,2016. 广东地区地震与爆破事件识别方法研究. 华南地震, **36**(3):110~115.
- 周斌,薛世峰,邓志辉,等,2010. 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例. 地球物理学报, **53**(11):2651~2670.
- Davies R, Foulger G, Bindley A, et al, 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. *Marine Pet Geol*, **45**:171~185.
- Evans K F, Zappone A, Kraft T, et al, 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe. *Geothermics*, **41**:30~54.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al, 2018. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Sci Rev*, **178**:438~514.
- Frohlich C, Ellsworth W, Brown W A, et al, 2014. The 17 May 2012 *M*_{4.8} earthquake near Timpson, East Texas; an event possibly triggered by fluid injection. *J Geophys Res Solid Earth*, **119**(1):581~593.
- Frohlich C, Hayward C, Stump B, et al, 2011. The Dallas-Fort worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(1):327~340.
- Glazer S N, 2018. *Mine Seismology: Seismic Warning Concept*. Cham: Springer, 19~51.
- Gupta H K, 2019. Koyna, India, an ideal site for near field earthquake observations. *Proc Indian Natl Sci Acad*, **85**(2):469~480.
- Gupta H K, Rastogi B K, 1974. Will another damaging earthquake occur in Koyna? *Nature*, **248**(5445):215~216.
- He L P, Sun X L, Yang H F, et al, 2018. Upper crustal structure and earthquake mechanism in the Xinfengjiang water reservoir, Guangdong, China. *J Geophys Res Solid Earth*, **123**(5):3799~3813.
- Hong T K, Baag C E, Choi H, et al, 2008. Regional seismic observations of the 9 October 2006 underground nuclear explosion in North Korea and the influence of crustal structure on regional phases. *J Geophys Res Solid Earth*, **113**(B3):B03305.
- Jain R, Rastogi B K, Sarma C S P, 2004. Precursory changes in source parameters for the Koyna-Warna (India) earthquakes. *Geophys J Int*, **158**(3):915~921.
- Li T, Cai M F, Cai M, 2007. A review of mining-induced seismicity in China. *Int J Rock Mech Mining Sci*, **44**(8):1149~1171.
- National Research Council, 2012. *Induced seismicity potential in energy technologies*. Washington D.C.: The National Academies Press.
- Pandey A P, Chadha P K, 2003. Surface loading and triggered earthquakes in the Koyna-Warna region, western India. *Phys Earth Planet Inter*, **139**(3~4):207~223.
- Shashidhar D, Rao N P, Gupta H, 2011. Waveform inversion of broad-band data of local earthquakes in the Koyna-Warna region, western India. *Geophys J Int*, **185**(1):292~304.
- Trutnevyte E, Wiemer S, 2017. Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects; an application to Switzerland. *Geothermics*, **65**:295~312.
- Vallejos J A, McKinnon S D, 2011. Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development. *Int J Rock Mech Mining Sci*, **48**(4):616~625.
- Wiemer S, Kraft T, Trutnevyte E, et al, 2017. "Good Practice" guide for managing induced seismicity in deep geothermal energy projects in Switzerland. Zürich: Swiss Seismological Service.
- Yadav A, Bansal B K, Pandey A P, 2016. Five decades of triggered earthquakes in Koyna-Warna Region, western India-A review. *Earth-Sci Rev*, **162**:433~450.
- Yao Y S, Wang Q L, Liao W L, et al, 2017. Influences of the Three Gorges Project on seismic activities in the reservoir area. *Sci Bull*, **62**(15):1089~1098.

Investigation on Public Service Demand of Earthquakes Induced by Human Activities Including Mining and Reservoir Impoundment

Xu Zhishuang Gao Xiaoyue Li Zhiqiang Wu Tian-an Zheng Tongyan

Wen Xintao He Runliang Li Huayue Wang Keifeng

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Human activities such as mining and reservoir impoundment may induce earthquakes, in which suddenness and destructiveness pose threats to public safety, social stability and economic development. Research and analysis have been taken on the demand for public service and the suggestions for emergency response to human-induced earthquake events including mining and reservoir-induced earthquakes in domestic and overseas. It is demonstrated that the public shows different demands in various types of earthquakes. Consequently, the following suggestions for the earthquake agency and related departments have been revealed: upgrading and implementing emergency plans, improving seismic rating of buildings and structures, while standardizing corporate behaviors before earthquakes; identifying earthquake types, checking and verifying earthquake information, uniting multiple departments to make emergency response and improving disaster information collection methods during earthquakes; paying attention to popular science promotion and media guidance after earthquakes. Taking efforts in peacetime and during earthquakes for the earthquake agencies and related departments helps to effectively deal with human-induced earthquakes, therefore maintaining social stability.

Keywords: Human activities; Induced earthquake; Mining-induced seismicity; Reservoir-induced seismicity; Emergency response