

邱宇,房立华,王蕊嘉,等,2021.“交通灯”系统及其在诱发地震监测中的应用.中国地震,37(2):349~367.

“交通灯”系统及其在诱发地震监测中的应用

邱宇¹⁾ 房立华^{1,2)} 王蕊嘉³⁾ 范莉苹^{1,2)} 蒋长胜¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

2) 中国地震局震源物理重点实验室,北京 100081

3) 新墨西哥大学,阿尔伯克基 87131

摘要 随着页岩气开采、地热能源开采、CO₂ 封存和水库蓄水等工业活动的开展,由此产生的诱发地震危害问题日益严重。为了对诱发地震进行有效监测和管控,地震学家设计了“交通灯”系统,当地震活动达到一定阈值时,相关人员可根据系统警报及时采取应对措施,减轻地震灾害。本文调研了近年来多个国家的“交通灯”系统研究和应用进展,介绍了其发展历史、设置原理及应用案例。“交通灯”系统的发展和完善应综合考虑震级、震动强度、 b 值和断层分布,以及建筑结构、城镇距离、人口密度、公众反应等社会因素。同时,在诱发地震频发区域,应建设密集的专用监测台网,提高微震检测和定位能力,并引入模板匹配和人工智能等新的自动处理方法,及时产出高完备性、高精度的微震目录,对微震的时空演化进行有效监测,形成时效性较强的“交通灯”系统。

关键词: 工业开采 诱发地震 “交通灯”系统 微震监测

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0349-19 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近年来,随着经济社会发展,人类对能源需求日益增大,伴随着技术进步,能源开发从传统方法扩展到页岩气压裂、地热资源开发、天然气储气库调峰、水库蓄水发电等,随之而来的是诱发地震频次的增加和灾害的日益严重,引起了社会公众的广泛关注(Healy et al, 1968; Nicholson et al, 1990; Giardini, 2009; Suckale, 2009、2010; Ellsworth, 2013; Cesca et al, 2014; Keranen et al, 2014; Guglielmi et al, 2015; Mignan et al, 2015; Van Thienen-Visser et al, 2015; Shirzaei et al, 2016; White et al, 2016; Yang et al, 2017; Tang et al, 2018; Porter et al, 2019; Zhou et al, 2019; Verdon et al, 2021)。尽管目前对有些地震活动是否与工业开采存在直接联系还存在较大争议,但相比于历史地震活动,这些工业活动区域的地震频次逐渐呈增加趋势(雷兴林等, 2020),甚至在一些原本构造地震很少或是几乎没有的地方,也发生了许多地震,例如美国俄克拉荷马州和得克萨斯州、加拿大阿尔伯塔省、荷兰格罗宁根、法国、英国、韩国浦项等国家和地区。

[收稿日期] 2020-12-20 [修定日期] 2021-03-06

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB20X07、DQJB20Y34)资助

[作者简介] 邱宇,女,1995年生,博士研究生,主要从事地震学研究。E-mail: qy@cea-igp.ac.cn

房立华,通讯作者,男,1981年生,博士,研究员,主要从事地震学研究。E-mail: flh@cea-igp.ac.cn

在各类工业开采活动中,以水力压裂技术为主的页岩气和石油开采引起了更多的关注(Healy et al, 1968; Nicholson et al, 1990; Suckale, 2009)。自 1947 年水力压裂技术开始实践,到 2009 年前后在水平井中大规模应用(Dusseault et al, 2011),北美地区现已在 180 多万口井中应用此技术(Nicholson et al, 1992)。在高压下注入大量流体,通常能够诱发地下深层的地震活动(Davis et al, 1993; Majer et al, 2007; Eaton, 2018)。加拿大地质调查局(GSC)认为页岩气水力压裂与诱发地震存在一定的关联性(Kao et al, 2016)。美国地质调查局 USGS(Rubinstein et al, 2015)和一些研究者(Keranen et al, 2013; Rubinstein et al, 2015; Walsh et al, 2015)认为,油气开采过程中产生的废水增压注入或直接注入废水井,是产生大部分诱发地震的主要原因,如 2011 年俄克拉荷马州 $M_w 5.7$ 地震(Keranen et al, 2013)和 2016 年俄克拉荷马州 $M_L 5.8$ 地震(Foulger et al, 2018)。近年来,地热资源作为新型能源得到不断开发,与油气开采的水力压裂技术类似,地热开采技术由于需要向地下注入大量流体,也会导致诱发地震的发生,如 2006 年瑞士巴塞尔 $M_L 3.4$ 地震(Majer et al, 2007)和 2017 年韩国浦项 $M_w 5.5$ 地震(Lee et al, 2019)。

在地震活动较弱的区域,由于发生中强地震的频次较低,当地抗震设防和应急响应能力一般较弱,诱发地震活动引起的危害可能会超过天然地震的危害(Atkinson et al, 2020)。例如,历史地震活动性较低的美国俄克拉荷马州在进行水力压裂生产后,于 1979 年首次报道了由工业注水引发的 $M 1.9$ 地震(Nicholson et al, 1992),之后随着注水量的增加,地震活动不断增强,仅 2015 年就发生了 840 次 $M \geq 3.0$ 诱发地震(Burnett et al, 2018)。另外,对于诱发事件,即使停止流体注入后的数天至数年内仍可能发生地震(Healy et al, 1968; Nicholson et al, 1990; Suckale, 2009; Ellsworth, 2013),因此对工业开采诱发地震进行监测和防控极为必要。

我国油气需求量大,但一直以来由于本土油气产量较低而需要每年大量进口。为解决这一问题,页岩气等能源开采已上升为国家战略(李建忠等, 2009; 唐海侠, 2018),形成了涪陵、长宁、威远、邵通、富顺-永川等 5 个勘探开发区(吕连宏等, 2017)。我国自 2005 年开始在四川盆地西南部进行规模性的页岩气地质评价与勘探开发实验(王玉满等, 2016),并于 2008 年开始进行页岩气开采实验(邹才能等, 2011)。在进行大规模工业开采的同时,相关的地震风险问题也带来了诸多挑战。在四川盆地,由于废水处理、井盐生产和页岩气水力压裂,诱发了大量的有感地震,甚至是破坏性地震(Lei et al, 2008, 2013, 2017, 2019a, 2019b; 张致伟等, 2012; Meng et al, 2019; 易桂喜等, 2019; 雷兴林等, 2020; Liu et al, 2020; Tan et al, 2020),例如,2018 四川兴文县 $M_L 5.7$ 、2019 年四川珙县 $M_L 5.3$ (Lei et al, 2019a)和 2019 年四川威远 3 次 $M_L > 4.0$ 地震(Sheng et al, 2020)。研究表明,2018 年兴文 $M_L 5.7$ 地震是目前为止发生的最大的水力压裂诱发地震(Atkinson et al, 2020; Schultz et al, 2020b),地震造成大规模滑坡,致使 17 人受伤、390 座房屋严重损坏、9 座房屋倒塌(Lei et al, 2019a)。为满足天然气随季节变化的需求,我国于 2011 年在新疆呼图壁建立了地下储气库(Underground Gas Storage, UGS),2013 年开始注入天然气后发生了一系列地震活动,其中最大震级达到 $M_L 3.5$ 。研究发现,不仅是流体,注入或抽出气体也可能引起孔隙弹性应力扰动而产生诱发地震(Yang et al, 2017; Tang et al, 2018; Zhou et al, 2019)。

因此,如何平衡地下能源的安全开采与地震活动之间的关系,已成为一个重要的研究课

题。Shapiro 等(2003、2010)和 McGarr(2014)认为流体注入诱发地震的最大震级与注入流体量成正比,并且在某些情况下,开采操作与诱发地震活动之间存在一定的时空相关性。因此,可以根据上述特点选取特定的参数阈值对诱发地震危害进行描述,一旦检测到超过阈值则立即控制流体注入,从而保证安全生产(Bommer et al, 2006)。为此,加拿大、韩国、美国、英国、瑞士等国家探索使用“交通灯”系统(Traffic Light System, TLS),对诱发地震活动进行监测和管控。本文调研了全球工业开采区使用的“交通灯”系统,介绍了该系统的发展历史、参数设置以及应用案例,并对现有系统的经验不足和改进方向进行了总结,以期为我国新型能源的安全开采和诱发地震管控提供参考。

1 “交通灯”系统的发展历史与设置原理

为了保证安全开采的同时监控诱发地震风险,地震学家提出了“交通灯”系统的概念,目前该系统已在许多地区投入使用。地震台网监测得到的数据是构建“交通灯”系统的重要参考,为监测工业开采诱发的地震活动,政府部门和许多企业采取了一系列应对措施。荷兰天然气开发公司自 1995 年开始在荷兰北部阿森(Assen)附近建设了一个井下地震观测系统(Dost et al, 2007),当地政府于 2003 年立法要求天然气开采区必须进行地震风险评估(Van Thienen-Visser et al, 2018)。法国的 EGS(Enhanced Geothermal System, 增强型地热系统)项目于 2012 年建立专门的微震监测台网(Maurer et al, 2015)。2012 年 5 月 20 日和 29 日,艾米利亚油气开采工业区发生了 $M_L 5.9$ 和 $M_L 5.8$ 地震,意大利政府、石油和天然气安全局提出了监测开采区及周边地震活动的准则,并制定了与工业开采相关的法规(De Landro et al, 2020; Braun et al, 2020)。

“交通灯”系统通常根据不同警报级别,通过修改流体注入参数(Bommer et al, 2006; Häring et al, 2008; Ellsworth, 2013; Bosman et al, 2016),对可能发生的重大地震事件做出响应(Bommer et al, 2006; Majer et al, 2012; Grigoli et al, 2017)。“交通灯”系统最初是为了控制由萨尔瓦多柏林(Berlin)地热项目引起的地震活动灾害而开发的(Bommer et al, 2006),之后陆续应用于瑞士巴塞尔(Basel) EGS 项目(Worrall et al, 2006; Häring et al, 2008)、法国苏尔特苏福雷特(Soultz-sous-Forêts)地热项目(Baisch et al, 2010)、英国布莱克浦(Blackpool)水力压裂作业(Green et al, 2012)、美国俄克拉荷马州(Oklahoma)水力压裂作业(Wong et al, 2015)、加拿大阿尔伯塔省(Alberta)和不列颠哥伦比亚省(British Columbia)注水工作(Kao et al, 2018)、韩国浦项(Pohang) EGS 项目(Kim et al, 2018; Lee et al, 2019)、芬兰赫尔辛基(Helsinki)地热项目(Ader et al, 2020)、意大利油气开采和废水注入活动(Braun et al, 2020)等工业生产项目。

“交通灯”系统基于决策变量(地震震级、峰值地面速度等)阈值和在该阈值以上所采取的措施而设计,其主要工作流程如图 1 所示。目前阈值的设定主要基于当地法规(Bommer et al, 2006; Häring et al, 2008; Bosman et al, 2016)和专家判断(Bachmann et al, 2011),而采取的措施通常是临时降低流体注入量或注入速率,以此来降低地震风险。

1.1 阈值参数

随着“交通灯”系统的发展和应用,根据当地不同的地质条件和开采需求,不同学者提出了不同的参数与阈值选取建议(表 1)。

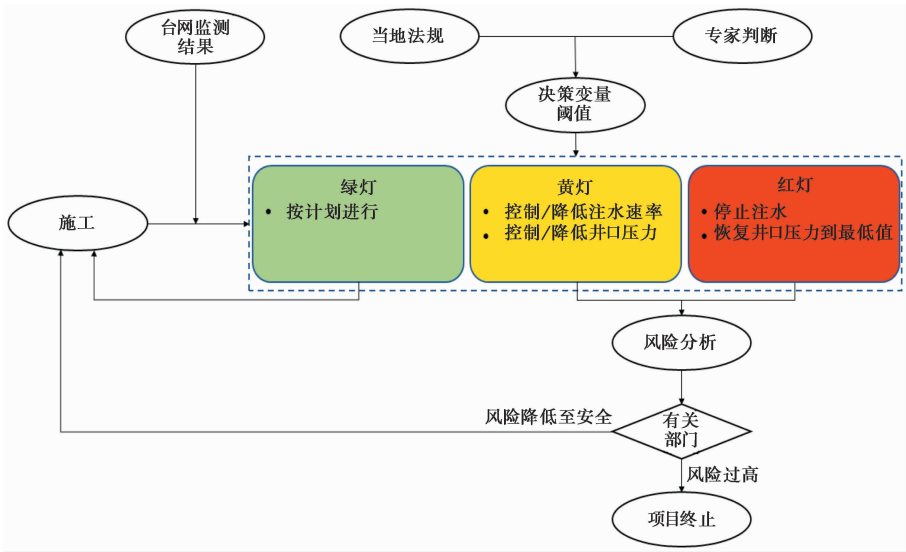


图 1 “交通灯”系统工作流程

表 1 不同参数的“交通灯”系统

研究	参数及阈值
Bommer 等, 2006	$PGV > 12 \text{ cm/s}$
Häring 等, 2008	公众反应、 $M_L > 2.9$ 、 $PGV > 5.0 \text{ mm/s}$
Bachmann 等, 2011	包含注水流量的 ETAS 模型构建系统
Green 等, 2012	$M_L > 0.5$
Baig 等, 2015	地面运动
Butcher 等, 2017	$M_L > 0.5$
Mignan 等, 2017	控制井口压力
Kao 等, 2018	人口分布、社区及工业设施位置、地质断层
Gulia 等, 2019	b 值降低 10% 以上
Schultz 等, 2020b	破坏风险曲线(概率最大震级、GMPE、人口密度、台站统计分布、群众感知或发生破坏的地面震动阈值)
Wei 等, 2020	断层倾角、注入井到断层间的距离 $< 230 \text{ m}$ 、断层埋深 $< 1196 \text{ m}$

1.2 PGV

PGV (Peak Ground Velocity, 峰值地面速度) 是“交通灯”系统中最常见的一种阈值参数。Bommer 等 (2006) 首次提出对中美洲萨尔瓦多柏林热裂隙岩 (Hot Fractured Rock, HFR) 地热项目应用“交通灯”系统。柏林地热田距萨尔瓦多首都圣萨尔瓦多以东 100km (Fabriol et al, 1998), 该地区地震活动非常活跃, 且当地建筑的抗震设防水平较低 (Bommer et al, 2002), 因此为确保 HFR 地热项目的顺利开展, 需要一套有效的实时震动监测管理系统。该“交通灯”系统选择 PGV (大致等同于地面震动的影响) 作为系统设置的唯一参数。根据下式对 PGV 水平进行预测 (Tromans et al, 2002)

$$\lg(PGV) = -0.527 + 0.521M_L - 1.058\lg(R)$$

(1)

其中, PGV 单位为 cm/s ; 震中距 R 单位为 km 。

对于 HFR 项目,并非所有的诱发地震都是有害的,需要区分有利于裂隙渗透达到增产的微震事件和可能引起灾害的地面震动,因此仅考虑是否超过某个单一阈值是不够的。因为对于一些 PGV 较高的地震,公众可能对其感知不明显;而对于一些 PGV 较低的地震,公众可能由于震感强烈而无法承受。Bommer 等(1999)认为可以增加一个参数,例如超过加速度绝对阈值的阿里亚斯烈度或持续时间,测量可感知事件的数量。由于 PGV 阈值可以促进其他参数阈值的衰减,Bommer 等(2006)提出使用 PGV 衰减方程定义等效震级的方法,来校正 PGV 阈值随阿里亚斯烈度或持续时间的衰减。

为确定 PGV 的阈值,基于衰减方程式(1),震源深度为 h 的事件的 PGV 等效震级计算如下

$$M_{\text{equiv}} = M + 2.0307 \left[\lg \left(\frac{2}{h} \right) \right] \quad (2)$$

其中,以震源深度 2km、震级 M 的事件产生的地表 PGV 为参考, M_{equiv} 为某震源深度(h)的事件产生等同于参考 PGV 所需的震级。该等效震级考虑了可能会发生诱发地震的大概震源深度,再从之前确定的参考 PGV 中计算出等效震级的 PGV 阈值。

由于地震的震源浅、震级小,结合当地台网记录的数据,Bommer 等(2006)认为根据式(1)估计的 PGV 过高,因此将式(1)调整为

$$\lg(\text{PGV}) = -2.701 + 1.022M - 1.058 \lg(R) \quad (3)$$

在该系统监测期间,存在实测的 PGV 超过阈值但未造成破坏的案例。但这并不意味着定义的阈值不准确,因为阈值是造成破坏的必要条件,不一定是充分条件,该系统的目的是提供安全余量,防止对当地居民造成不良影响(Bommer et al, 2006)。

1.3 地方震级

除 PGV 外,“交通灯”系统最常见的另一个设置参数为地震震级。 M_L 作为使用较多的震级标度,相比于 M_w 等具有测定容易、求解较快的特点,因而广泛应用于“交通灯”系统中。

在加拿大阿尔伯塔省和不列颠哥伦比亚省等人口稀少的地区,“红灯”阈值通常为 $M_L 4.0$,而在某些人口较为密集、感知地震较为广泛的区域则设定阈值为 $M_L 3.0$;但在英国,一些区域的“红灯”阈值仅为 $M_L 0.5$ (Clarke et al, 2019)。“交通灯”系统阈值如此巨大的差异反映出,与地震相关的灾害风险是随人口密度等其他因素变化的(Atkinson et al, 2020)。

在英国布莱克浦的普雷斯霍尔(Prese Hall)附近,2011 年 4 月至 5 月的水力压裂作业期间发生了一系列地震,其中最大地震的震级为 $M_L 2.3$ 。Baisch 等(2011)使用 3D 有限元模型数值模拟储层中的力学过程,然后通过德国 DIN4150 标准估算了地面破坏运动的临界强度,并根据震级和距离对地面运动的简单关系进行了估算,认为造成破坏的最小地震震级约为 $M_L 2.6$,建议部署实时“交通灯”系统进行地震监测。而 Green 等(2012)认为其估计非常保守且最初由运营商建议的“交通灯”系统 $M_L 1.7$ 阈值过高,认为阈值的选取应以减少当地居民对事件的感知以及财产损失为目的,建议将阈值下限设为 $M_L 0.5$,并可根据经验随时间调整。英国“交通灯”系统是根据事件的 M_L 震级大小进行工作的,而现有的英国当地震级标准是基于震级大于 $M_L 2.0$ 、震中距大于 50km 事件的观测结果规定的(Ottmöller 等, 2013)

$$M_L = \lg(A) + 0.95 \lg(r) + 0.00183r - 1.76 \quad (4)$$

其中, A 是仿真为伍德-安德森地震仪后的水平分量位移值(单位: nm); r 为震中距(单位:

km)。由于现有的震级标准对震中距小于 5km 的事件观测精度较低,Butcher 等(2017)研究了当地地震记录,并通过最小二乘法改变衰减项更新了震级标准

$$M_L = \lg(A) + 1.17\lg(r) + 0.0514r - 3.0 \quad (5)$$

尽管地震震级不能准确、完整地表征地震危险性,但由于其能够简单快速获得,适用于需要具有时效性的“交通灯”系统。然而,由于诱发地震事件的震级具有不确定性,且震级标准测量方法因地不同,可能在建立“交通灯”系统时因无法统一而造成混乱。

1.4 b 值

对于正在进行的地震序列,实时地震灾害评估中最大的难题之一为判断最大事件(即主震)已经发生还是即将发生,目前尚无科学的方法来对正在衰减的余震序列和即将发生较大事件的前兆序列进行可靠的区分(Jordan et al, 2011; Lippiello et al, 2017)。研究发现, b 值对震后的应力变化敏感,可用于识别余震和前震序列以及对未来的地震灾害进行预测。

在大多数余震序列中, b 值在 6 级或更大的主震后通常会增加 20%(Gulia et al, 2018),Gulia 等(2019)在分析了 2016 年意大利阿马特里切-诺尔恰和日本熊本地震序列余震的 b 值分布之后,进一步认证了这一观点;如果 b 值保持不变或显著减小,那么发生更大事件的可能性就会增加几个数量级。由此,建议可以通过 b 值判断正在发生的地震序列是余震序列还是前兆事件,并提出了一种前震“交通灯”系统(Foreshock Traffic Light System, FTLS):“黄灯”表示 b 值相对于背景有 $\pm 10\%$ 以内的变化,此时不含有区分信息;“绿灯”表示 b 值增加 10% 以上,对应于余震序列,此时对大震的不确定性将大大减少,生产工作可以逐渐恢复;“红灯”表示 b 值降低 10% 以上,对应于前兆事件,此时应急部门应特别关注并考虑采取防灾行动。

由此可得到启发,在工业开采的诱发地震监测中,除了 PGV、震级等参数外,也可以考虑根据 b 值的时空变化指导生产。例如,当 b 值持续降低时,有可能表明地震危险增加,需要停止注水或压裂。但目前若要获得较为准确的 b 值,需要大量的地震事件数据、完备的地震目录、密集且具有准确地震识别和定位能力的台阵。

1.5 注入参数

大多数情况下,“交通灯”系统在达到预设阈值后,通过调整注入参数来降低诱发地震风险是最实用的方法(Kao et al, 2016),但一些学者认为将注入量或注入速率作为防控标准并不可靠。法国苏尔特苏福雷特地热项目深层储层的增产引发了地震事件,震级高达 $M_w 2.9$ (Dorbath et al, 2009),虽然在此之后降低了注水速率和流量,但较大事件通常发生在流体注入终止后的阶段,此时“交通灯”系统根据地震震级来调整注入操作的设定(Bommer et al, 2001)显然并不合理(Baisch et al, 2010)。韩国浦项(Pohang)EGS 项目的最大诱发地震为 2017 年 $M_w 5.5$ 地震,但其注入的流体量很小,甚至不到能够产生如此大的事件所需注入量的 1/500(Lee et al, 2019),与“最大地震震级受注入流体量控制”这一假设(McGarr, 2014)明显不符,表明诱发地震活动序列中的最大事件与注入量并非线性相关(Lee et al, 2019)。

Mignan 等(2017)通过控制压力大小,而并非通过控制流体的注入量,来建立未来的“交通灯”系统,并提出了一种自适应“交通灯”系统(Adaptive Traffic Light System, ATLS)。该系统的参数阈值基于定量风险评估以及当地的安全标准实时更新,从而可以在没有人工干预的情况下进行决策,所有参数和风险估计均可在分级贝叶斯框架中即时估计(Broccardo

et al, 2017), 所预测的每日诱发地震发生率为

$$\lambda(t, m \geq m_0; \theta) = \begin{cases} 10^{\alpha_{\beta} - \beta m_0} \dot{V}(t), & t \leq t_{\text{shut-in}} \\ 10^{\alpha_{\beta} - \beta m_0} \dot{V}(t_{\text{shut-in}}) \exp\left(-\frac{t - t_{\text{shut-in}}}{\tau}\right), & t > t_{\text{shut-in}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\dot{V}(t)$ 为注入流量与时间 t 的函数, 单位为 $\text{m}^3/\text{天}$; $\theta = [\beta, \alpha_{\beta}, \tau]$ 为一组描述地下特征的模型参数, 其中 β 为地震强度比, 激活因子 α_{β} 单位为 m^{-3} , 平均弛豫时间 τ 单位为天; m_0 为最小截止阈值; $t_{\text{shut-in}}$ 为关闭时间, 单位为天。然后, 将相应的安全标准转换为超出概率 $Pr(m \geq m_{\text{saf}})$

$$Pr(m \geq m_{\text{saf}}) = 1 - \exp\left\{-10^{\alpha_{\beta} - \beta m_{\text{saf}}} [V(t_{\text{shut-in}}) + \tau \dot{V}(t_{\text{shut-in}})]\right\} = Y \quad (7)$$

其中, Y 为安全标准; m_{saf} 为达到安全标准临界的阈值。为了避免超过 Y , 工业活动必须在达到阈值 m_{th} 时停止注入

$$m_{\text{th}} = \frac{1}{\beta} \lg\left[Y - 10^{\alpha_{\beta} - \beta m_{\text{saf}}} \tau \dot{V}(t_{\text{shut-in}})\right] + m_{\text{saf}} \quad (8)$$

ATLS 所用数据集相对较小, 该系统还需要更多的事件进行统计分析 (Braun et al, 2020)。He 等 (2020) 提出使用机器学习的方法来构建模型, 通过大量训练和样本学习获得反映参数和阈值取值之间复杂的非线性关系的模型, 来解决 ATLS 的问题。但对于机器学习方法, 收集、处理大量的相关数据是极大的挑战。

1.6 其他参数

针对仅用 PGV 或震级作为“交通灯”系统的设置参数, 一些学者提出了不同的看法, 并进行了使用其他参数阈值建立“交通灯”系统的尝试。

Häring 等 (2008) 提出了考虑公众反应、震级和 PGV 三个参数的四阶段“交通灯”系统, 分别为: “绿灯”对应于无公众反应、 $M_L < 2.3$ 、 $\text{PGV} < 0.5 \text{ mm/s}$; “黄灯”对应于少数人有震感、 $M_L \geq 2.3$ 、 $\text{PGV} \leq 2.0 \text{ mm/s}$; “橙灯”对应于多数人有震感、 $M_L \leq 2.9$ 、 $\text{PGV} \leq 5.0 \text{ mm/s}$; “红灯”对应于广泛区域内有震感、 $M_L > 2.9$ 、 $\text{PGV} > 5.0 \text{ mm/s}$ 。韩国浦项 EGS 项目的“交通灯”系统根据 PGV 和震级的相关方程, 通过地震仪记录的地震事件计算震级, 快速对系统警报做出反应 (Kim et al, 2018)。为提高“交通灯”系统的可靠性, 芬兰赫尔辛基地热项目也选择 PGV 和震级 2 个参数建立系统 (Ader et al, 2020)。

Bachmann 等 (2011) 针对巴塞尔 EGS 项目“交通灯”系统的不足, 提出一种包含注水流量的 ETAS 模型来预测潜在的较大破坏性事件随时间变化的发生概率, 再将其转换成地震灾害的时变估计, 旨在提出一种构建“交通灯”系统的替代方案。

Baig 等 (2015) 对加拿大不列颠哥伦比亚省东北部霍恩河盆地水力压裂完成井的相关数据进行研究, 建议对于潜在地震, 不要根据震级来量化事件的破坏程度, 而是根据能与建筑和构造设计相关的震动来设定“交通灯”系统。为了量化地面运动, Baig 等 (2015) 拟合了经验地面运动预测方程 (EGMPE) 相对标准的函数形式, 可以在给定事件震级和震中距的情况下插值得到地面运动

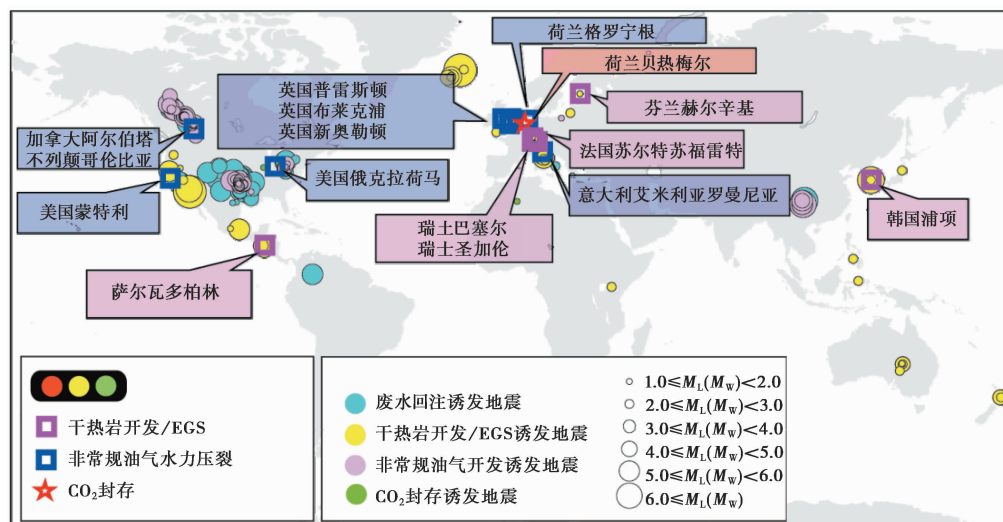
$$\ln(y) = a + bM + c \ln(R) + dR \quad (9)$$

其中, y 为地面运动(峰值加速度或速度), R 为震中距, M 为震级, a 、 b 、 c 、 d 为通过拟合数据确定的常数。一旦获得这一拟合关系, 就可以评估在研究区域发生特定地面运动的可能性。与依赖于震级阈值设计的“交通灯”系统相比, 这种 EGMPE 方法与地震活动的灾害和风险更加直接相关。

在研究了加拿大西部不列颠哥伦比亚省的“红灯”事件后, Kao 等(2018)认为“交通灯”系统的最终目标是有效降低诱发地震的风险, 因此可能有必要考虑地震震级之外的其他因素, 例如人口分布、社区位置、主要工业设施位置以及地质断层等。通过研究将其他风险指标加入“交通灯”系统的设计中, 可以提高系统的有效性, 使其更能适应当地的情况。

2 “交通灯”系统的应用

目前, “交通灯”系统已经在萨尔瓦多、瑞士、法国、英国、美国、加拿大、韩国、芬兰等国家投入使用(图 2)。



萨尔瓦多东部的地热项目建立了由 6 个检波器和 3 个加速度计组成的强地面运动监测台网, 该台网为“交通灯”系统提供 PGV 值, 并对该系统进行验证(Bommer et al, 2006)。其中, “绿灯”对应低于一般可探测阈值或地震发生率的震动; “黄灯”对应于人们能够感知但破坏程度不大的震动, 此时需要降低注水速率; “红灯”对应预计能够对该区域的建筑物造成破坏的震动, 此时需要停止注水。由于在运行期间观测到的诱发地震较少, “交通灯”系统仅显示了“绿灯”, 该系统并未得到完整的测试。

瑞士巴塞尔 EGS 项目位于莱茵河最南端, 该地具有较高的大地热流, 因此选择在此处进行干热岩的热-电联产。该项目在高压下通过注水井将常温流体注入目标区域深处, 压裂高温岩体进行地热开发(Smith, 1983; Tenzer, 2001)。作为瑞士第一个地热开采地点, 该项目在

^① <http://inducedearthquakes.org/>

瑞士联邦能源局的支持下于 1996 年正式开始,计划使用一口注入井和两口生产井在 200℃ 的岩石中钻探至 5000m 深度,来生产 3MW 的电力和 20MW 的热力。生产区域设有“交通灯”系统,“绿灯”为按计划进行,“黄灯”为持续注水但不增加流量,“橙灯”为停止注水并适当排水减少压力,“红灯”为停止注水并抽水排空使井口压力恢复原始最低值(Häring et al, 2008; Bachmann et al, 2011)。由于钻井问题,直到 2006 年 12 月 2 日该项目才开始大规模增产,通过注入流体来人工产生裂缝有利于增加产量,但这个过程可能会产生中到大型的地震(Giardini, 2009; Kraft et al, 2009)。在增产期间持续观察到微震事件且频率较高,最终发生 $M_L 2.6$ 地震,触发了“橙灯”警报,因此注水压力在 2006 年 12 月 8 日凌晨 4 时左右降低,并在同一天的上午 11 时 33 分压力完全复原(Häring et al, 2008)。但在 5h 后又发生了 $M_L 3.4$ 的事件,巴塞尔市内有震感。地震发生约 1h 后排空注水井,地震活动性逐渐减弱,但在之后 1~2 个月又发生了 3 次 $M_L > 3$ 地震。此后井下仪器仍能检测到零星的地震活动,EGS 项目被搁置。直到 2009 年 11 月, Baisch 等(2009)完成的风险分析研究表明,其发生潜在破坏事件的风险较大,故政府决定停止该项目(Bachmann et al, 2011; Majer et al, 2012; Bethmann et al, 2012; DiPippo, 2012)。Bachmann 等(2011)认为在巴塞尔 EGS 项目中的“交通灯”系统还不足以作为监测和警报的手段。Lee(2013)在对该项目的“交通灯”系统进行研究后,建议实时“交通灯”系统应考虑注水后的地震事件而建立一种新的微震安全管理系统。

美国俄克拉荷马州公司委员会(Oklahoma Corporation Commission, OCC)要求俄克拉荷马州的部分水力压裂项目建立“交通灯”系统,根据在该州中南部测得的最小事件震级,允许阈值范围设定在 $M_L 1.8 \sim 3.7$ 之间(Wong et al, 2015)。OCC 还建立了非实时的微震监测“交通灯”系统:如果该州发生 $M 4.0$ 以上的地震,则在震中周围 10km 内的区域内启动“黄灯”状态,需每周报告日流量及压力大小;若震级较大的地震事件被认为是由某生产井诱发的,则启动“红灯”(Wong et al, 2015)。通过管控,近年来俄克拉荷马州的诱发事件已有所减少。

加拿大阿尔伯塔省能源监管局(Alberta Energy Regulator)和不列颠哥伦比亚省石油和天然气委员会(BC Oil and Gas Commission)分别在加拿大西部阿尔伯塔省(AB)和不列颠哥伦比亚省(BC)的注水井周围布设了“交通灯”系统,其中“红灯”的震级阈值均设置为 $M_L(M_w)$ 4.0。2014 年 8 月 4 日,BC 区域内蒙特尼北部发生 $M_w 4.5$ 地震,震中位于注水点东北 1km 附近,这是不列颠哥伦比亚省的第一个“红灯”事件,最终使得注水井关闭。该处于 2014 年 7 月 25 日开始高频注水工作,持续了约两个星期,在 10 天后发生了 $M_w 4.5$ 地震。该地区在 2014 年 7 月 30 日,即 $M_w 4.5$ 地震发生 5 天前,发生了 $M_w 3.8$ 的“黄灯”事件。值得注意的是,在“黄灯”事件发生之前该地区没有地震活动历史,因此 $M_w 3.8$ 事件可被视为 $M_w 4.5$ 地震的前兆信号。Kao 等(2018)整理了 AB 区域和 BC 区域的所有“红灯”事件,发现存在“红灯”事件之前发生“黄灯”事件的现象,但并不是所有“红灯”事件发生之前都有前兆事件发生。2016 年 1 月 12 日在阿尔伯塔省福克斯克里克(Fox Creek)发生的 $M_L 4.1$ 地震,是过去十年 AB 区发生的最大事件。Wang 等(2017)通过矩张量反演确定了该地震的震源参数,认为该地震与附近的水力压裂井有密切关系,地震的产生原因可能是水力压裂作业使断层重新活化。研究人员对该地震进行调查,发现注水压力和注入速率等注入参数对地震活动的影响不明显。 $M_L 4.1$ 事件相比通过 McGarr 关系式(McGarr, 2014)理论计算的结果要大得多,这与在美国中部发现的注水速率对诱发地震有重要影响的结论不同(Weingarten et al,

2015)。

韩国浦项 EGS 项目于 2016 年 1 月 29 日至 2 月 20 日共进行了 23 天的增产工作。期间,最大井口压力达到 89.2MPa (井底压力 = 131.8MPa),最大流量记录为 46.8kg/s ($=2.81\text{m}^3/\text{min}$),在增产期间最大的地震事件发生在 2 月 2 日,震级约为 $M_w 1.4$ (Park et al, 2017),随后在 2017 年发生 $M_w 5.5$ 地震 (Lee et al, 2019)。该项目的“交通灯”系统是根据 PGV 与地震震级的相关方程设定的,PGV 值为 0.08cm/s、0.5cm/s、1.0cm/s 和 2.0cm/s 对应的震级大小分别为 2.2、3.6、3.8 和 4.1,在具体实施中则将震级阈值降低为 1.0、1.4、1.7 和 2.0。该项目“交通灯”系统的不同颜色对应于不同的注水操作:“红灯”表示地震活动可能会损坏建筑物,注水立即停止;“橙灯”表示民众能够感知到地震活动,但破坏可能性不大,注水应谨慎进行或降低流量;“绿灯”表示地面振动或地震大小低于一般可检测程度,注水作业按计划进行。由于该系统检测到的事件较少,Kim 等 (2018) 建议在未来可以通过更多的诱发地震事件来验证该系统的可靠性,并寻找震级和 PGV 之间新的联系来更新“交通灯”系统。

赫尔辛基地区 6.1km 深地热井为目前世界上最深的地热开发项目,芬兰埃斯波市建筑部门要求在其增产阶段建立“交通灯”系统,其阈值为 PGV 和地震震级。Ader 等 (2020) 认为其原始阈值非常保守,而对于运营者来说,过于保守的系统阈值可能会造成沉重的经济负担 (Mignan et al, 2019),需要设计新的“交通灯”系统阈值。Ader 等 (2020) 使用经验地面运动预测方程 (GMPE),并在注水增产后更新调整了阈值:“绿灯” $M_L < 1.6$;“黄灯” $1.6 \leq M_L < 2.5$, $PGV \geq 1\text{mm/s}$;“红灯” $M_L \geq 2.5$, $PGV \geq 7.5\text{mm/s}$ 。投入生产后,特定地点的 GMPE 与初始设计相比,不确定性减少了 3 倍,因此认为采用新阈值的“交通灯”系统更加合理。

二氧化碳地质封存 (GCS) 技术向深层地下注入大量 CO_2 流体,这一过程可能会导致压力累积并引起应力变化,随着时间的推移会重新激活先前存在的断层 (Mazzoldi et al, 2012; Zoback et al, 2012),从而造成气体泄漏和诱发地震危害 (Lei et al, 2008; Li et al, 2013; Wei et al, 2020)。Wei 等 (2020) 认为可以通过建立“交通灯”系统,划分断层活化区域,之后再将 CO_2 注入井,放置在最佳位置,这样可以大大降低由流体注入引发的风险。该研究的“交通灯”系统以注入井到断层之间的距离 D 、断层倾角 Φ 和断层埋藏深度 H 作为阈值参数,并在简化为 $1500\text{m} \times 800\text{m}$ 的矩形沉积盆地下进行了数值模拟。其中,“绿灯”区域 ($D > 350\text{m}$): 在断层埋藏深度和断层倾角的全部范围内均不会发生诱发地震活动;“黄灯”区域 ($230\text{m} < D < 350\text{m}$): 在某些断层倾角 ($\Phi = 10^\circ$ 、 20° 、 30° 和 90°) 及埋藏深度 ($H > 1196\text{m}$) 的断层附近注入,仅可能出现小幅度的诱发断层滑动,此时流体操作较为安全,除此之外断层滑动强度会随埋藏深度的增加而增加,需谨慎操作;“红灯”区域 ($D < 230\text{m}$): 对于所有范围的断层倾角,在埋藏较浅 ($H < 1196\text{m}$) 的断层附近注入流体均有较高发生诱发地震活动的风险。

3 讨论

工业开采区地震监测的主要目的是区别天然地震和诱发地震,以便跟踪诱发地震活动的时空演变过程,从而在必要时对工业活动进行调整 (De Landro et al, 2020)。“交通灯”系统的主要目的是防止地面震动对当地居民和基础设施造成干扰和损坏。建立“交通灯”系统,可避免较大地震事件的发生,降低地震风险,并得到了一些政府和监管部门的认可

(Ellsworth, 2013)。例如,意大利石油和天然气安全局于 2014 年(Braun et al, 2020)、英国石油和天然气管理局于 2015 年(Department of Energy and Climate Change, 2015)、加拿大阿尔伯塔省能源监管局于 2015 年(Alberta Energy Regulator, 2015)和 2019 年(Alberta Energy Regulator, 2019)分别设立“交通灯”系统。在加拿大,“交通灯”系统取得了较好的成效。2015 年建立“交通灯”系统后,通过对加拿大西部的福克斯克里克地区 2013 年后的诱发事件进行评定,发现“红灯”事件频发,经过对注水活动的有效管控,该地 2017 年后再未发生“红灯”事件。同样,位于加拿大南部的红鹿市在 2019 年建立“交通灯”系统之后,诱发地震事件也较为平静。美国俄克拉荷马州 2015 年的地震数量比 2009 年之前增加了 900 多倍。通过管控,自 2016 年以来,俄克拉荷马州的诱发事件也大量减少。

尽管“交通灯”系统在一些地区取得了较好的应用,但也存在一些应用效果不佳的案例。例如,在瑞士巴塞尔 EGS 项目 2006 年增产期间,发生了 $M_L 2.6$ 地震,并触发了“橙灯”警报,但在注水压力恢复到最低值后仍然发生了多次 $M_L > 3.0$ 地震(Häring et al, 2008; Bachmann et al, 2011; Majer et al, 2012; Bethmann et al, 2012; DiPippo, 2012)。韩国浦项 EGS 项目 2016 年增产期间发生的最大地震事件仅为 $M_w 1.4$ (Park et al, 2017),但随后却在 2017 年发生了 $M_w 5.5$ 地震(Lee et al, 2019)。由此可见,现存的“交通灯”系统仍存在许多不足。目前,“交通灯”系统的建立主要基于 3 个假设(Kao et al, 2018):①大震之前会发生较小的前兆事件;②大地震会发生在注入点附近;③针对“交通灯”系统反馈所做出的响应会立即对诱发事件产生影响。但在对诱发地震的研究中发现,这样的假设在实际中并不完全成立。对于假设①,研究发现较大事件发生前兆事件的例子是存在的(Kao et al, 2018),随后会及时激发“交通灯”系统的不同警报级别,然后采取相应措施,但这个现象并不一定会发生。加拿大西部(Kao et al, 2018; Schultz et al, 2020)和美国中部(Van Der Elst et al, 2016)的注水诱发事件表明,诱发地震的前震-余震序列往往与天然地震不同,地震序列中的最大地震是随机出现的,是否发生前兆事件可能取决于地震的触发性质(Dieterich et al, 2015),所以难以从统计层面上进行风险管控。对于假设②,工业注水的影响范围可能达到 20km,诱发地震的发生可能不仅仅局限于注水点附近,而更多地取决于断层尺度和位置,因此对于工业开采区的地质构造背景研究至关重要(雷兴林等, 2020; Sheng et al, 2020)。Sheng 等(2020)在研究了四川威远 2019 年发生的诱发地震的震源参数后,发现水力压裂的应力主方向与该区域地震震源机制解的 P 轴一致,表明在这种应力状态下,断层极易被重新活化,因此更有可能发生破坏性的诱发地震;而对比断层密度较高的焦石坝地区,水力压裂产生的应力不足以激活断层,诱发地震数量较少。对于密集注水区(例如俄克拉荷马),4~5 级诱发地震的发生往往是多口井长时间共同作用的结果,而已有的裂缝或断层即使不孕育大地震,也可能作为流体通道使更远的断层发生错动。对于假设③,流体注入和诱发地震的时间相关性因地而异(受工业活动性质和地区的多方面影响),在注水停止后仍可能发生地震事件(Healy et al, 1968; Nicholson et al, 1990; Suckale, 2009; Ellsworth, 2013; Kao et al, 2018; Eyre et al, 2020)。有学者认为,突然停止注水可能会诱发震级更大的破坏性事件(Segall et al, 2015; Baisch et al, 2019)。因此,理想的“交通灯”系统的设计需要考虑(甚至预测)注水期之外的时段(Baig et al, 2015)。但是,受限于以上诸多因素,目前还没有一种可以解决此类事件的方法(Atkinson et al, 2020)。

一套科学的“交通灯”系统需要综合考虑多种因素,这对提升系统的有效性十分必要。目前许多“交通灯”系统主要考虑地震震级和 PGV 阈值,如 Bommer 等(2006)仅考虑了 PGV,Green 等(2012)、Ottemöller 等(2013)仅考虑了地震震级。工业开采能够引发足够大的诱发地震,其危害可能超过天然地震,而实际的破坏和影响不仅由震级和 PGV 决定,还取决于震动的强度、断层位置、断层粗糙程度、人口分布和附近基础设施的脆弱性等因素(Kao et al, 2018; Atkinson et al, 2020; Maurer et al, 2020)。例如,2019 年 2 月四川威远发生的 M_L 4.9 地震,虽然震级比之前的水力压裂诱发地震低,但是由于震源浅,造成的危害较高(Yang et al, 2020)。Shapiro 等(2010)提出了以注水量评估诱发地震风险的地震发生指数的概念,并由 Langenbruch 等(2018)进行修正,其采用应力变化而不是注水量来进行评估。Bachmann 等(2011)还考虑了注入流量,Baig 等(2015)提出用与建筑结构相关的地面震动来替代震级,Mignan 等(2017)建议在得到警报后通过控制压力大小而不是减少注入作为防控标准。Schultz 等(2020b)利用概率最大震级、GMPE、人口密度、台站统计分布以及群众感知或发生破坏的地面震动阈值来计算破坏风险曲线,以选择“红灯”与“黄灯”的阈值。Wei 等(2020)通过由注入井到断层的距离、断层倾角和断层埋藏深度建立的“交通灯”系统来划分断层活化诱发地震危险区域。

关于“交通灯”系统的未来发展方向,一些学者提出了不同的建议。Kao 等(2016)建议开发用于计算地震震级的标准化方法,以解决由于使用不同震级标准导致诱发事件震级不确定而造成混乱的问题。Meier 等(2019)根据 EGS 项目经验,提出一个多阶段操作系统来最大限度地提高 EGS 项目的效率和安全性,认为每次注水增产后均应排空以减轻发生地震的危险,并安装井下测量系统以指示刺激发生的位置并反馈到微震监测系统。Lee 等(2019)认为目前大多数“交通灯”系统监测的重点在于避免产生超过系统阈值的地震,而不是获得准确的震源信息并记录地震序列的演变,这使得不断变化的风险未能被及时发现。Aczel 等(2019)在研究了美国俄克拉荷马州的诱发地震活动规律后,对页岩气开发项目提出了建议,即更多地了解地质环境和流体注入风险,通过降低“交通灯”系统阈值来预防诱发地震风险,并开发替代方法来管理页岩气开采中产生的废液。芬兰赫尔辛基地热开采项目的“交通灯”系统将医院、学校等基础设施场所设为敏感受体而建立特定的阈值,此外还会通过报纸、邮件、网站为公众提供注水增产过程中的信息(Ader et al, 2020)。Schultz 等(2020a)建议谨慎选择“红灯”的阈值,并将“黄灯”的阈值设置成比“红灯”少 2 个量级,以确保具有充足缓解风险的操作空间。

许多诱发地震发生在未知断层上,即便在没有历史地震的地区,也有必要对地震危险性进行评估和预测(Schoenball 等, 2017)。Porter 等(2019)建议在流体注入前均应进行详细的地震危险性评估,以便在操作之前对断层进行成像和特征描述。震中和震源深度作为区分诱发地震与天然地震的关键参数,其测定误差受台站分布、台站间距等因素的影响(Sheng et al, 2020)。但由于工业开采区域的地震监测网络一般较为稀疏,对微震事件的检测能力较低,缺乏完备的地震目录,因此“交通灯”系统的可靠性尚未得到充分的验证(Bommer et al, 2006; Atkinson et al, 2020),也难以根据当地情况进行适当的调整和更新(Kim et al, 2018)。微震活动的时空演变是“交通灯”系统最重要的数据来源和决策依据。目前依赖于稀疏监测台网获得的震源位置测定精度不高,限制了诱发地震识别的准确性(Zhang et al,

2016; Sheng et al, 2020)。因此,在现有的国家和区域地震监测台网之外,还应在工业活动区附近设置专用的微震监测系统,建立具有高精度检测和定位能力的微震监测台网(De Landro et al, 2020)。由于工业活动现场通常噪声较高,这对微震监测是一个不利因素(Porter et al, 2019),需要发展如模板匹配和人工智能等新的微震检测和自动处理方法。另一方面,为深入研究诱发地震机理,管控诱发地震风险,需要工业界、学术界和政府监管部门的通力合作(雷兴林等, 2020; Wang et al, 2020),共享注水位置、时间、速率、压力等生产数据,并建立和完善相关的法律法规。

4 总结

针对近年来用于监测和管控诱发地震建立的“交通灯”系统,本文总结了其发展历史、基本原理和已经投入使用的典型案例,对其存在的问题和改进方向进行了分析讨论。“交通灯”系统曾成功地避免了一些破坏性地震的发生,降低了诱发地震的发生频次,在加拿大西部、南部和美国俄克拉荷马州以及英国取得了较好的应用。

由于大震前发生前兆事件的随机性、地震随裂缝或断层的可传递性以及注水结束后的延迟触发现象,“交通灯”系统的可靠性还存在争议,也存在未能避免破坏性地震发生的失败案例。“交通灯”系统的完善和发展需要综合考虑多种因素。单纯地以 PGV 或震级作为阈值参数虽然容易操作,但存在一定的局限性,有必要考虑延迟触发、 b 值等地震学参数和断层分布,以及建筑结构、城镇距离、人口密度、居民感知等社会学因素,以提高系统的有效性。

由于工业开采区的地震监测台网较为稀疏,现有数据不足以验证和更新“交通灯”系统。目前我国的地震台网间距通常大于 10km,难以对 0 级以下的微震进行有效监测和定位。而这些为数较多的负震级事件,对于监测流体运移、断层活化等极为重要。建议围绕可能发生诱发地震的区域,在国家和区域地震台网的基础上,建设千米至数千米间距的专用微震监测系统,以提高强噪声环境下的微震监测能力,形成具有较高监测能力和定位能力的微震台网。同时,工业开采区的微震震级小、数量多,随着台站的加密,人工处理已无法满足实时监测的需求,迫切需要引入模板匹配和人工智能等新的微震检测算法,发展地震数据自动处理系统,及时产出完备性较高、定位精度较高的微震目录,监控微震的时空演化。

我国自 2008 年开始页岩气等新能源开采以来,开采区的地震活动显著增加,诱发地震风险管控也随之成为一个新的科学难题。目前,我国监控诱发地震的“交通灯”系统还较为缺乏,对工业生产的指导作用还较弱。加拿大、美国和英国等国家的“交通灯”系统为我国诱发地震的管控提供了经验。在我国的页岩气开采区、地热开采区和诱发地震多发区域建立“交通灯”系统,对于降低诱发地震风险和保障工业安全生产具有重要意义。

参考文献

- 雷兴林, 苏金蓉, 王志伟, 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联. 中国科学: 地球科学, **50** (11): 1505~1532.
- 李建忠, 董大忠, 陈更生, 等, 2009. 中国页岩气资源前景与战略地位. 天然气工业, **29**(5): 11~16.
- 吕连宏, 张型芳, 庞卫科, 等, 2017. 实施《页岩气发展规划(2016—2020 年)》的环境影响研究. 天然气工业, **37**(3): 132~138.
- 唐海侠, 2018. 中国页岩气发展战略对策分析. 中国新技术新产品, (2): 116~117.

- 王玉满,黄金亮,王淑芳,等,2016. 四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖. 天然气地球科学, **27**(3):423~432.
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等,2019. 2019年6月17日四川长宁 M_s 6.0地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, **62**(9):3432~3447.
- 张致伟,程万正,梁明剑,等,2012. 四川自贡——隆昌地区注水诱发地震研究. 地球物理学报, **55**(5):1635~1645.
- 邹才能,董大忠,杨桦,等,2011. 中国页岩气形成条件及勘探实践. 天然气工业, **31**(12):26~39.
- Acel M R, Makuch K E, 2019. Shale, quakes, and high stakes: regulating fracking-induced seismicity in Oklahoma, USA and Lancashire, UK. *Case Stud Environ*, **3**(1):1~14.
- Ader T, Chendorain M, Free M, et al, 2020. Design and implementation of a traffic light system for deep geothermal well stimulation in Finland. *J Seismol*, **24**(5):991~1014.
- Alberta Energy Regulator, 2015. Subsurface Order No.2. <https://static.aer.ca/prd/documents/orders/subsurface-orders/SO2.pdf>.
- Alberta Energy Regulator, 2019. Subsurface Order No.7. <https://static.aer.ca/prd/documents/orders/subsurface-orders/SO7.pdf>.
- Atkinson G M, Eaton D W, Igonin N, 2020. Developments in understanding seismicity triggered by hydraulic fracturing. *Nat Rev Earth Environ*, **1**(5):264~277.
- Bachmann C E, Wiemer S, Woessner J, et al, 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. *Geophys J Intl*, **186**(2):793~807.
- Baig A, Viegas G, Urbancic T I, et al, 2015. To frac or not to frac: assessing potential damage as related to hydraulic fracture induced seismicity. *First Break*, **33**(7):67~71.
- Baisch S, Carbon D, Dannwolf U, et al, 2009. Deep heat mining Basel: seismic risk analysis. Trinational Seismic Risk Analysis Expert Group, <https://wellbore.lbl.gov/downloads/baselfullriskreport.pdf>.
- Baisch S, Koch C, Muntendam-Bos A, 2019. Traffic light systems: to what extent can induced seismicity be controlled. *Seismol Res Lett*, **90**(3):1145~1154.
- Baisch S, Vörös R, 2011. Geomechanical study of Blackpool seismicity. Q-Con report for Cuadrilla.
- Baisch S, Vörös R, Rothert E, et al, 2010. A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. *Int J Rock Mech Min Sci*, **47**(3):405~413.
- Bethmann F, Deichmann N, Mai P M, 2012. Seismic wave attenuation from borehole and surface records in the top 2.5km beneath the city of Basel, Switzerland. *Geophys J Int*, **190**(2):1257~1270.
- Bommer J J, Benito M B, Ciudad-Real M, et al, 2002. The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. *Soil Dyn Earthq Eng*, **22**(5):389~418.
- Bommer J J, Georgallides G, Tromans I J, 2001. Is there a near-field for small-to-moderate magnitude earthquakes. *J Earthq Eng*, **5**(3):395~423.
- Bommer J J, Martínez-Pereira A, 1999. The effective duration of earthquake strong motion. *J Earthq Eng*, **3**(2):127~172.
- Bommer J J, Oates S, Cepeda J M, et al, 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Eng Geol*, **83**(3):287~306.
- Bosman K, Baig A M, Viegas G, et al, 2016. Towards an improved understanding of induced seismicity associated with hydraulic fracturing. *First Break*, **34**(7):61~66.
- Braun T, Danesi S, Morelli A, 2020. Application of monitoring guidelines to induced seismicity in Italy. *J Seismol*, **24**(5):1015~1028.
- Broccardo M, Mignan A, Wiemer S, et al, 2017. Hierarchical Bayesian modeling of fluid-induced seismicity. *Geophys Res Lett*, **44**(22):11357~11367.
- Burnett J W, Mothorpe C, Jaime S C, 2018. Earthquake alley: unconventional oil and gas development, induced seismic activity, and housing price impacts. *Evolving Energy Realities: Adapting to What's Next*, 36th USAEE/IAEE North American Conference, Sept 23~26, International Association for Energy Economics.
- Butcher A, Luckett R, Verdon J P, et al, 2017. Local magnitude discrepancies for near-event receivers: implications for the U.K. traffic-light scheme. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(2):532~541.

- Cesca S, Grigoli F, Heimann S, et al, 2014. The 2013 September-October seismic sequence offshore Spain: a case of seismicity triggered by gas injection. *Geophys J Int*, **198**(2): 941~953.
- Clarke H, Verdon J P, Kettlety T, et al, 2019. Real-time imaging, forecasting, and management of human-induced seismicity at Preston New Road, Lancashire, England. *Seismol Res Lett*, **90**(5): 1902~1915.
- Davis S D, Frohlich C, 1993. Did (or will) fluid injection cause earthquakes? —Criteria for a rational assessment. *Seismol Res Lett*, **64**(3~4): 207~224.
- De Landro G, Picozzi M, Russo G, et al, 2020. Seismic networks layout optimization for a high-resolution monitoring of induced micro-seismicity. *J Seismol*, **24**(5): 953~966.
- Department of Energy and Climate Change, 2015. Onshore oil and gas exploration in the UK: regulation and best practice. London, England: DECC.
- Dieterich J H, Richards-Dinger K B, Kroll K A, 2015. Modeling injection-induced seismicity with the physics-based earthquake simulator RSQSim. *Seismol Res Lett*, **86**(4): 1102~1109.
- DiPippo R, 2012. Enhanced geothermal systems-projects and plants. In: DiPippo R. *Geothermal Power Plants*. Amsterdam: Elsevier, 443~481.
- Dorbath L, Cuenot N, Genter A, et al, 2009. Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5km deep massive water injections. *Geophys J Int*, **177**(2): 653~675.
- Dost B, Haak H W, 2007. Natural and induced seismicity. In: Wong T E, Batjes D A J, De Jager J. *Geology of the Netherlands*. Amsterdam: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 223~229.
- Dusseault M, McLennan J, 2011. Massive multi-stage hydraulic fracturing: where are we? Paper Presented at 45th US RockMechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA. http://tm.spbstu.ru/images/f/ff/Review_Massive_Multi-Stage_Hydraulic_Fracturing_Where_are_We.pdf.
- Eaton D W, 2018. *Passive Seismic Monitoring of Induced Seismicity: Fundamental Principles and Application to Energy Technologies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ellsworth W L, 2013. Injection-induced earthquakes. *Science*, **341**(6142): 1225942.
- Eyre T S, Zecevic M, Salvage R O, et al, 2020. A long-lived swarm of hydraulic fracturing-induced seismicity provides evidence for aseismic slip. *Bull Seismol Soc Am*, **110**(5): 2205~2215.
- Fabrial H, Rivas J, Handal S, et al, 1998. Microseismicity and geothermal exploitation of Berlin (El Salvador). *Geothermal Resources Council Transactions*, **22**: 159~163.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al, 2018. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci Rev*, **178**: 438~514.
- Giardini D, 2009. Geothermal quake risks must be faced. *Nature*, **462**(7275): 848~849.
- Green C A, Styles P, Baptie B J, 2012. *Preese hall shale gas fracturing: review & recommendations for induced seismic mitigation*. London: DECC.
- Grigoli F, Cesca S, Priolo E, et al, 2017. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: a European perspective. *Rev Geophys*, **55**(2): 310~340.
- Guglielmi Y, Cappa F, Avouac J P, et al, 2015. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip. *Science*, **348**(6240): 1224~1226.
- Gulia L, Rinaldi A P, Tormann T, et al, 2018. The effect of a mainshock on the size distribution of the aftershocks. *Geophys Res Lett*, **45**(24): 13277~13287.
- Gulia L, Wiemer S, 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, **574**(7777): 193~199.
- Häring M O, Schanz U, Ladner F, et al, 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, **37**(5): 469~495.
- He M, Li Q, Li X Y, 2020. Injection-induced seismic risk management using machine learning methodology-a perspective study. *Front Earth Sci*, **8**: 227.
- Healy J H, Rubey W W, Griggs D T, et al, 1968. The Denver earthquakes. *Science*, **161**(3848): 1301~1310.
- Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, et al, 2011. Operational earthquake forecasting state of knowledge and guidelines for utilization.

- Ann Geophys, **54**(4):315~391.
- Kao H, Eaton D W, Atkinson G M, et al, 2016. Technical meeting on the traffic light protocols (TLP) for induced seismicity: summary and recommendations. Geological Survey of Canada, Open File 8075, Natural Resources Canada.
- Kao H, Visser R, Smith B, et al, 2018. Performance assessment of the induced seismicity traffic light protocol for northeastern British Columbia and western Alberta. *Leading Edge*, **37**(2):117~126.
- Keranen K M, Savage H M, Abers G A, et al, 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 M_w 5.7 earthquake sequence. *Geology*, **41**(6):699~702.
- Keranen K M, Weingarten M, Abers G A, et al, 2014. Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, **345**(6195):448~451.
- Kim K I, Min K B, Kim K Y, et al, 2018. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea. *Renew Sust Energy Rev*, **91**:1182~1191.
- Kraft T, Mai P M, Wiemer S, et al, 2009. Enhanced geothermal systems: mitigating risk in urban areas. *EOS*, **90**(32):273~274.
- Langenbruch C, Weingarten M, Zoback M D, 2018. Physics-based forecasting of man-made earthquake hazards in Oklahoma and Kansas. *Nat Commun*, **9**(1):3946.
- Lee K K, Ellsworth W L, Giardini D, et al, 2019. Managing injection-induced seismic risks. *Science*, **364**(6442):730~732.
- Lee S, 2013. Case study of microseismic management systems for Basel EGS project. *Tunnel Undergr Space*, **23**(6):572~580.
- Lei X L, Huang D J, Su J R, et al, 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to M_w 4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Sci Rep*, **7**(1):7971.
- Lei X L, Ma S L, Chen W K, et al, 2013. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, Southwestern Sichuan Basin, China. *J Geophys Res Solid Earth*, **118**(8):4296~4311.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R, 2019a. The December 2018 M_L 5.7 and January 2019 M_L 5.3 earthquakes in South Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing. *Seismol Res Lett*, **90**(3):1099~1110.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R, 2019b. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan Basin, China. *EPP*, **3**(6):510~525.
- Lei X L, Yu G Z, Ma S L, et al, 2008. Earthquakes induced by water injection at ~3km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *J Geophys Res Solid Earth*, **113**(B10):B10310.
- Li Q, Liu G Z, Liu X H, et al, 2013. Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project. *Int J Greenh Gas Con*, **17**:504~514.
- Lippiello E, Giacco F, Marzocchi W, et al, 2017. Statistical features of foreshocks in instrumental and ETAS catalogs. *Pure Appl Geophys*, **174**(4):1679~1697.
- Liu J Q, Zahradnik J, 2020. The 2019 M_w 5.7 Changning earthquake, Sichuan Basin, China: a shallow doublet with different faulting styles. *Geophys Res Lett*, **47**(4):e2019GL085408.
- Majer E L, Baria R, Stark M, et al, 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, **36**(3):185~222.
- Majer E L, Nelson J, Robertson-Tait A, et al, 2012. Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. Department of Energy Geothermal Technologies Program Report, DOE/EE-0662, Washington; Department of Energy.
- Maurer J, Dunham E M, Segall P, 2020. Role of fluid injection on earthquake size in dynamic rupture simulations on rough faults. *Geophys Res Lett*, **47**(13):e2020GL088377.
- Maurer V, Cuenot N, Gaucher E, et al, 2015. Seismic monitoring of the Rittershoffen EGS project (Alsace, France). Melbourne, Australia: World Geothermal Congress, 19~25.
- Mazzoldi A, Rinaldi A P, Borgi A, et al, 2012. Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults. *Int J Greenh Gas Con*, **10**:434~442.
- McGarr A, 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *J Geophys Res Solid Earth*, **119**(2):1008~1019.
- Meier P M, Guinot F, 2019. Adapting unconventional oil and gas completion technology: a key factor in reducing risks associated to EGS projects. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, **249**(1):012024.

- Meng L Y, McGarr A, Zhou L Q, et al, 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(1):348~357.
- Mignan A, Broccardo M, Wiemer S, et al, 2017. Induced seismicity closed-form traffic light system for actuarial decision-making during deep fluid injections. *Sci Rep*, **7**:13607.
- Mignan A, Karvounis D, Broccardo M, et al, 2019. Including seismic risk mitigation measures into the Levelized cost of electricity in enhanced geothermal systems for optimal siting. *Appl Energy*, **238**:831~850.
- Mignan A, Landtwin D, Kästli P, et al, 2015. Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project; Influence of uncertainties on risk mitigation. *Geothermics*, **53**:133~146.
- Nicholson C, Wesson R L, 1990. Earthquake hazard associated with deep well injection: a report to the U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC: US Government Printing Office.
- Nicholson C, Wesson R L, 1992. Triggered earthquakes and deep well activities. *Pure Appl Geophys*, **139**(3~4):561~578.
- Ottmøller L, Sargeant S, 2013. A local magnitude scale M_L for the United Kingdom. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(5):2884~2893.
- Park S, Xie L M, Kim K I, et al, 2017. First hydraulic stimulation in fractured geothermal reservoir in Pohang PX-2 well. *Procedia Eng*, **191**:829~837.
- Porter R T J, Striolo A, Mahgerefteh H, et al, 2019. Addressing the risks of induced seismicity in subsurface energy operations. *Wiles Energy Environ*, **8**(2):e324.
- Rubinstein J L, Mahani A B, 2015. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismol Res Lett*, **86**(4):1060~1067.
- Schoenball M, Ellsworth W L, 2017. Waveform-relocated earthquake catalog for Oklahoma and southern Kansas illuminates the regional fault network. *Seismol Res Lett*, **88**(5):1252~1258.
- Schultz R, Beroza G, Ellsworth W, et al, 2020a. Risk-informed recommendations for managing hydraulic fracturing-induced seismicity via traffic light protocols. *Bull Seismol Soc Am*, **110**(5):2411~2422.
- Schultz R, Skoumal R J, Brudzinski M B, et al, 2020b. Hydraulic fracturing-induced seismicity. *Rev Geophys*, **58**(3):e2019RG000695.
- Schultz R, Wang R J, 2020. Newly emerging cases of hydraulic fracturing induced seismicity in the Duvernay East Shale Basin. *Tectonophysics*, **779**:228393.
- Segall P, Lu S, 2015. Injection-induced seismicity: poroelastic and earthquake nucleation effects. *J Geophys Res Solid Earth*, **120**(7):5082~5103.
- Shapiro S A, Dinske C, Langenbruch C, et al, 2010. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations. *Leading Edge*, **29**(3):304~309.
- Shapiro S A, Patzig R, Rothert E, 2003. Triggering of seismicity by pore-pressure perturbations: permeability-related signatures of the phenomenon. *Pure Appl Geophys*, **160**(5~6):1051~1066.
- Sheng M H, Chu R S, Ni S D, et al, 2020. Source parameters of three moderate size earthquakes in Weiyuan, China, and their relations to shale gas hydraulic fracturing. *J Geophys Res Solid Earth*, **125**(10):e2020JB019932.
- Shirzaei M, Ellsworth W L, Tiampo K F, et al, 2016. Surface uplift and time-dependent seismic hazard due to fluid injection in eastern Texas. *Science*, **353**(6306):1416~1419.
- Smith M C, 1983. A history of hot dry rock geothermal energy systems. *J Volcanol Geoth Res*, **15**(1~3):1~20.
- Suckale J, 2009. Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Adv Geophys*, **51**:55~106.
- Suckale J, 2010. Moderate-to-large seismicity induced by hydrocarbon production. *Leading Edge*, **29**(3):310~319.
- Tan Y Y, Hu J, Zhang H J, et al, 2020. Hydraulic fracturing induced seismicity in the southern Sichuan Basin due to fluid diffusion inferred from seismic and injection data analysis. *Geophys Res Lett*, **47**(4):e2019GL084885.
- Tang L L, Lu Z, Zhang M, et al, 2018. Seismicity induced by simultaneous abrupt changes of injection rate and well pressure in Hutubi gas field. *J Geophys Res Solid Earth*, **123**(7):5929~5944.
- Tenzer H, 2001. Development of hot dry rock technology. *Bull Geo-Heat Center*, **32**(4):14~22.
- Tromans I J, Bommer J J, 2002. The attenuation of strong-motion peaks in Europe. In: Proceedings of the 12th European Conference

- on Earthquake Engineering. London.
- Van Der Elst N J, Page M T, Weiser D A, et al, 2016. Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected. *J Geophys Res Solid Earth*, **121**(6):4575~4590.
- Van Thienen-Visser K, Breunese J N, 2015. Induced seismicity of the Groningen gas field: history and recent developments. *Leading Edge*, **34**(6):664~671.
- Van Thienen-Visser K, Roholl J A, Van Kempen B M M, et al, 2018. Categorizing seismic risk for the onshore gas fields in the Netherlands. *Eng Geol*, **237**:198~207.
- Verdon J P, Bommer J J, 2021. Green, yellow, red, or out of the blue? An assessment of Traffic Light Schemes to mitigate the impact of hydraulic fracturing-induced seismicity. *J Seismol*, **25**:301~326.
- Walsh F R, Zoback M D, 2015. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Sci Adv*, **1**(5):e1500195.
- Wang R J, Gu Y J, Schultz R, et al, 2017. Source characteristics and geological implications of the January 2016 induced earthquake swarm near Crooked Lake, Alberta. *Geophys J Int*, **210**(2):979~988.
- Wang R J, Weingarten M, Langenbruch C, et al, 2020. Introduction to the Special Section on Observations, Mechanisms, and Hazards of Induced Seismicity. *Bull Seismol Soc Am*, **110**(5):1999~2004.
- Wei X C, Li Q, Li X Y, et al, 2020. Traffic light detection method for underground CO₂ injection-induced seismicity. *Int J Geomech*, **20**(2):04019162.
- Weingarten M, Ge S, Godt J W, et al, 2015. High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science*, **348**(6241):1336~1340.
- White J A, Foxall W, 2016. Assessing induced seismicity risk at CO₂ storage projects: recent progress and remaining challenges. *Int J Greenh Gas Control*, **49**:413~424.
- Wong I, Nemser E, Bott J, et al, 2015. White paper induced seismicity and traffic light systems as related to hydraulic fracturing in Ohio. Ohio Oil and Gas Association, Columbus, Ohio, 74 pp. http://c.ymcdn.com/sites/www.ooga.org/resource/resmgr/Files/OOGA_IS_TLS_White_Paper_fina.pdf.
- Worrall B, Ladner F, 2006. Basel 1 (BS1) cleanout and stimulation programme. Geothermal Explorers LTD.
- Yang H F, Liu Y J, Wei M, 2017. Induced earthquakes in the development of unconventional energy resources. *Sci China Earth Sci*, **60**(9):1632~1644.
- Yang H F, Zhou P C, Fang N, et al, 2020. A shallow shock: the 25 February 2019 ML 4.9 earthquake in the Weiyuan shale gas field in Sichuan, China. *Seismol Res Lett*, **91**(6):3182~3194.
- Zhang H L, Eaton D W, Li G, et al, 2016. Discriminating induced seismicity from natural earthquakes using moment tensors and source spectra. *J Geophys Res Solid Earth*, **121**(2):972~993.
- Zhou P C, Yang H F, Wang B S, et al, 2019. Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility. *J Geophys Res Solid Earth*, **124**(8):8753~8770.
- Zoback M D, Gorelick S M, 2012. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc Natl Acad Sci USA*, **109**(26):10164~10168.

Traffic Light System and Its Application on Induced Earthquake Monitoring

Qiu Yu¹⁾ Fang Lihua^{1,2)} Wang Ruijia³⁾ Fan Liping^{1,2)} Jiang Changsheng¹⁾

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

2) Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) University of New Mexico, Albuquerque NM 87131, USA

Abstract The continuous expansion of unconventional resource exploitation is often accompanied by the threat of induced seismicity, where fluid extraction and injection involved with industrial activities like shale gas exploitation, mining and CO₂ storage have all led to unexpected earthquakes around the world. Regulation of such anthropogenic seismic events lead to the establishments of traffic light system in various regions, in which as a near real-time response, the system often demands reduction or shut down of industrial activities, aiming to minimize the potential seismic hazard and risk after the occurrence of certain magnitude earthquakes. In this paper, we review the traffic light systems in the world by revisiting their development history, regulation principles and application outcomes. Overall, the development of traffic light system should integrate parameters such as magnitude, vibration intensity, b -value and fault distribution, as well as social factors like building structure, urban distance, population density and public response. In areas where unexpected earthquakes are frequently induced, dedicated dense seismic monitoring network should be deployed to enhance microseismic detection and location, whereas the state-of-the-art methods (i.e., template matching, artificial intelligence) should be adopted to provide timely catalogs that reflects detailed spatial-temporal evolution of microseismic, serving for time-sensitive traffic light systems.

Keywords: Unconventional resource exploitation; Induced seismicity; Traffic light system; Microseismicity monitoring