

这些年,不遥远的地震

◎李娟

地震行为的多样性和不可重复性在不断考验和丰富我们既有的地震理论和认知,它的肆意性也在一次又一次冲击着原本渺茫的地震预测研究,甚至也对新兴的地震预警研究提出了严峻的挑战。

也许 21 世纪注定是地球不断“秀”出变化,带给人们诧异和审视的年代。十年前那场造成 23 万人死亡的苏门答腊 9.2 级大地震的阴影还未散去,汶川地震、智利地震、日本东北地震接踵而至。地震活动是否在增强? 本文将从这个困惑入手,说说近年来发生的几次“不同寻常”的地震及启示,包括 2009 年意大利拉奎拉地震,2011 年日本东北大地震,并最终回到近期我国云南相继发生的鲁甸地震和景谷地震。从这些串在一起的零乱地震中,能看到地震引发的新的社会效应,“隐藏”很久的大震发生新特点,以及地震行为的“深度”差异等。这些新认识都建立在惨痛的经验教训之上,但在理解地震现象本质,如何应对和有效减轻地震灾害方面,我们毕竟在前进。

大震活动增强了吗

地震离我们从来都不遥远。实际上,我们脚下每天都有成百上千次地震发生,但大部分是震级很小的 2 级、1 级甚至 0 级振动,只有十分精密、放大倍数很高的地震仪器才能检测到。平均来说,全球每年会发生近 20 次 7 级以上大地震,一次 8 级以上特大地震。稍留心些就会发现,21 世纪初,特大地震的报道十分频繁。从 2004 年至今短短十年里,全球已经发生了 18 次 8 级以上地震,8.5 级以上特大地震 6 次,包括至今让人不寒而栗、谈核色变的日本东北大地震。这期间,8 级以上大震发生的频度高达 20 世纪平均值的 2.5 倍。

无独有偶,这种大震频发的“不平静”期在历史上也曾出现过。1950—1965 年这 15 年内,全球一共发生

了 7 次 8.5 级以上地震,包括人类迄今为止遇到的最大地震——1960 年智利 9.5 级地震,其释放的能量相当于一个 100 万千瓦的发电厂 40 年的发电量。此后直到 21 世纪初,地球进入了近 40 年没有 8.5 级地震的“相对平静期”。

那么,现在地球是否进入了新一轮地震高发期?作为一种自然现象,地震有着漫长的历史。卡通电影《冰川时代》中用浓重笔墨描绘了板块开裂后造成的地动山摇景况,再现了远古时代地震破坏的可能场景。人类有现代仪器记录的地震历史仅有百年时间,其中有相对完整、完备的地震事件记录的时间则更短,充其量也不过 40 年。我们对地震活动性的认识,以及提取地震信息的各种现代分析方法,都不得不基于有限的、缺少 8 级大震的数据样本。事实上,对于每年发生数量十倍或百倍于此的 7 级、6 级地震,并没有证据表明它们的活动也出现了明显增强。因此,这种 8 级以上大震活动的变化更可能代表了一种统计上的涨落。

拉奎拉地震——送地震学家上法庭

2009 年 4 月 6 日,发生在意大利中部的拉奎拉(L'Aquila)地震堪称人类历史上一次极为特殊的事件。这是一次 6.3 级中强震,共造成 308 人丧生,1500 人受伤,经济损失约 30 亿欧元^[1]。从常规的地震强度、人员伤亡等方面衡量,这次地震并不十分吸引眼球,但它却是首例由于“预报不地震”,而将相关人员推上法庭的地震事件。

拉奎拉地区位于亚平宁(Apeninno)半岛中部。从地质构造上看,亚平宁半岛是由一系列板块俯冲产生的增生楔(Accretionary wedge)。半岛及邻近地区地质构造活动复杂,包括亚德里亚(Adria)微陆块自东往西向亚平宁半岛下的俯冲,欧亚大陆及非洲大陆的碰撞

李娟:副研究员,博士,中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029。

Li Juan: Associate Research Professor, Doctor, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029.

挤压,以及更西端第勒尼安海盆(Tyrrhenian Basin)的打开等。有现代地震仪器记录以来,这个半岛一直地震不断,其中的拉奎拉地区一直被划归于地震灾害风险评估中的高危区。1997年,一次5.8级地震就发生在此次拉奎拉地震震中西北85公里处。

就是这么一次在已知高地震风险区发生的地震将7名人员送上法庭。其中6名地震学家是意大利国家重大风险评估委员会(Major Risks Commission)成员,另一名为民事防御局(Civil Protection Agency)官员。罪名为“过失杀人”罪——在拉奎拉地震发生前6天发布“不准确、不严谨且自相矛盾”的信息,麻痹了民众和政府,未能及时采取疏散措施,导致大量人员伤亡和财产损失。2012年10月法院判定罪名成立,7位相关地震学家和官员为其言行被判入狱6年。整个审判过程不仅在意大利国内引起巨大争议,在国际上也掀起轩然大波。国际科学界认为,地震预测作为地震科学家孜孜以求的圣杯,仅凭目前的认识还远实现不了。尽管几十年来,已在中长期尺度上对地震活动带有很好的认识和勾画,但实现地震的短临预测,即明确指出地震即将发生的地点、时间和大小,目前是不可能的。这些入狱的专家只是一场无法预料的自然灾害的“替罪羊”,审判结果只能令更多的地震工作者,特别是灾害分析和评估专家们寒心。2014年11月10日,意大利上诉法院推翻了2012年10月裁定的7名当事人犯有过失杀人罪的判决^[2],认定6名地震专家无罪,另一名政府官员被改判为两年监禁,缓期执行。宛若坐了趟“现实版”的“过山车”,专家们似乎洗脱了罪名,意大利学术界的声誉也暂时得以恢复,但拉奎拉事件的争议远未完结。

正是这次特殊的地震使得政府以及科学界开始重新评估、审视地震预报的现状,并思考与民众对话的正确途径。意大利政府邀请美、中、英、法、日、意、俄、德、希腊等9个国家的10位地球物理学家,组成“国际民防地震预报专家委员会”对国际地震预报的认知状况进行评估,并提供可操作的地震预报实施指南。委员会调研了中国、希腊、意大利、日本、俄国、美国等6个地震活动性较强国家的地震预测预报工作开展的情况,查阅了近500篇文献,对地震预测预报科学的认知状况进行了全面系统的总结评估,最后形成一份题为《可操作的地震预报》的报告(Operational Earthquake Forecasting),并最终提交给意大利政府^[1-3]。

报告中明确区分了预测和预报的概念。预测(prediction)定义为确定性的表述,即未来地震是否将在某一特定地理区域、时间窗口和震级范围内发生;而预报(forecast)是给出这样一个事件将要发生的概率(介于0和1之间)。报告强调,关于依据地震观测系统

记录到的现象来确定未来发生地震的程度,目前可谓知之甚少。因此,不可能在短时间尺度上可靠地预测地震活动地区的大地震。如果没有科学上的突破,在未来的一段时间内地震预报的现实可行性只能停留在一个概率很低的水平上。

拉奎拉事件揭示了一种矛盾,即民众的预期往往和科学认识不相匹配,随着经济的飞速发展,各种真假信息的零距离传播和对自身防护意识的加强,这种矛盾日益凸显。因此,在潜在自然灾害造成恐慌、担忧的情况下,面对民众对“是”或“否”答案的期盼,如何有效地和民众交流,正确、严谨、客观地传达科学信息是很重要的。无论是科学界还是政府,都需要正确认识并恪守自己的职责,角色的混淆会导致麻烦。科学界应该在目前认知的基础上使用概率而不是确定性的语言来表征地震危险性的短期变化;政府部门则应该基于科学界提供的自然灾害客观信息,在权衡各种预防措施以及误报、漏报的代价基础上,做出合适的决策。

日本东北地震——一次“超强”的震撼

2011年3月11日发生在日本仙台以东海域的大地震让全世界地震学家感到吃惊。发震的地点(本州东北部)原在意料中,但其释放的能量之巨远远超出了长久以来设防的8级地震“底线”。

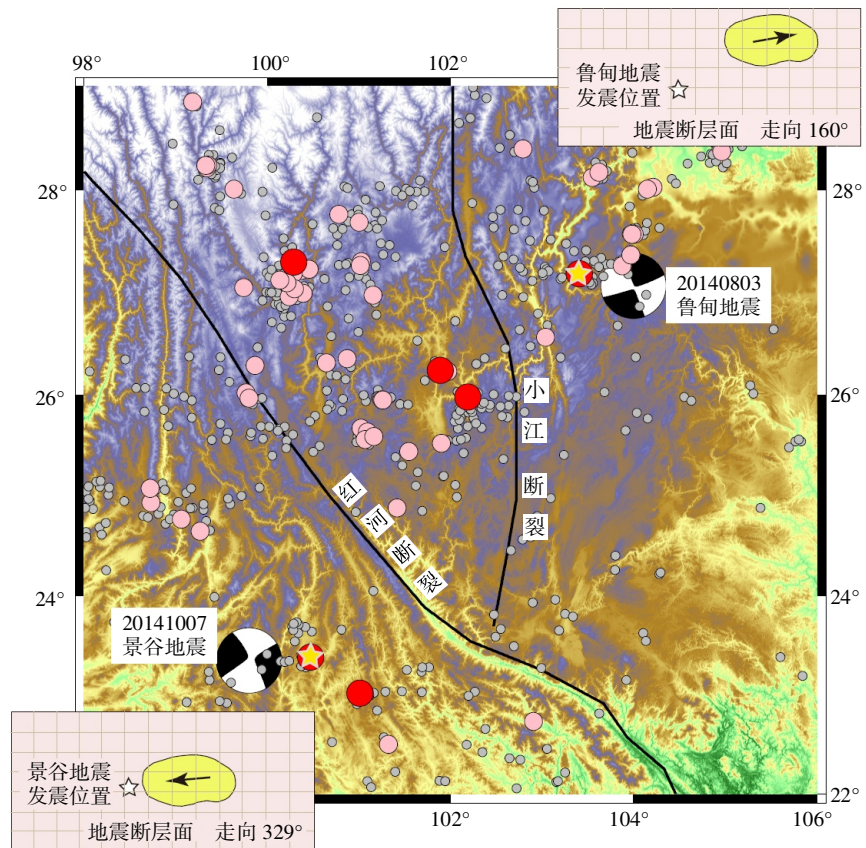
并非没有充分的准备,甚至可以说由于长久以来生存环境的多变和脆弱,日本人民对地震危险的认识和准备远胜于世界上的其他国家和地区,从房屋建筑、堤坝的修筑、抗震防震宣传和灾害意识的加强等方面都堪称全球典范。但在高出堤坝3~15米的海啸面前,耗时30年设计修筑的海岸防护墙显得苍白无力,海浪越过沿岸平原深入内陆十数公里之远。整个地震破裂过程持续了150多秒,产生超乎想象的60~80米地表位移,令日本海岸线东移5米,使至少15000公里²的海底抬升5米,甚至地球的形状也出现扭曲,一天的长度减少了1.8毫秒^[4]。

科学家不得不重新审视已经形成的地震观念。20世纪初,美国学者里克特(C. F. Richter)根据1906年旧金山大地震地表断层观测提出了著名的地震断层理论(也称弹性回调说),这一理论已成为现代地震学的基石。岩石应力的不断积累使断层错动,释放大量能量从而产生地震。1980年左右,基于对地震破裂过程的详细研究,地震学家提出了一套似乎行之有效的“障碍体”(asperity)模型,用以解释在环太平洋俯冲地区观测到的地震活动。所谓的“障碍体”即指断层面上滑动较大的区域,大地震就主要发生在这些障碍体上。障碍体的面积可以根据余震的分布和(或者)海啸源区的面

积来界定,其面积控制了最终发生地震的大小。以日本东北为例,70多年来,十余个7级以上强震都以约30年的周期重复发生在断层面上5~10个大小为50~100公里的固定障碍体上。根据这一特性,地震学家预期该处地震不会超过8级。然而,能量40倍于预期地震的事实却开了个惨烈的玩笑。

这次超强地震的发生似乎撼动了曾经看起来“完美”的观测与理论的结合。果真如此吗?其实,问题在于人们对地震的观测局限在有限的时间尺度内。现代地震理论都是基于有仪器记录以来的“百年”地震观测,人们的认知和经验也就局限在了这貌似合理实则片面的百年观测中。早在公元869年日本贞观年间,史书上就有记载,一次巨大的海啸席卷了宫城、茨城沿岸。通过对仙台平原上探槽取样等分析,古地震学家再现了那次巨大的贞观地震。他们发现地震引起的海啸规模巨大,深入内陆范围超过4公里,直抵仙台,而其罪魁祸首则为一次重复周期约1000年的8.3级大地震^[5]。两次地震在震源破裂区、海啸规模上的相似程度似乎表明了这次大地震的发生与现有理论并不矛盾,只是人们被短时间有限的观测模糊了视线,忽略了产生巨大滑动危险的可能性。

反思和探索还远不止这些。巨大海啸的发生使科学家认识到,板块边界巨大逆冲断层浅部可承受的应力远比过去认识到的要强,从而累积更多的形变,酿成特大地震和超级海啸。为探明罕见的40~80米地表位移原因,国际综合大洋钻探计划(Integrated Ocean Drilling Program, IODP)组织实施了日本海沟钻探工程(Japan Trench Fast Drilling Project, JFAST),从7000米深的海底开始,在地震发生的东北断层上打钻。3个钻孔上获取了855米深的断层岩心样品。研究人员测量了不同深度上断层的温度,恢复了发震时刻断层受力状态分布,发现地震时断面上的摩擦力极小,造成滑移极易发生,而导致这种“小摩擦大滑动”的根源来自于断层区附近富含的软弱泥层^[6]。



我国云南地区地震活动分布及主要断裂 云南地区地震活动十分强烈,1990年代以来,6级以上地震发生过多次。研究表明鲁甸和景谷地震的震源机制解也很接近。右上和左上插图示意给出了有限断层模型的震源破裂滑动结果。对于鲁甸地震,主滑动区较浅;而景谷地震断层面上主滑动区较深,从发震特性上决定了两个地震具有不同的破坏力。

从鲁甸到景谷地震——同或异

我国云南地区活动断裂纵横密布,地质构造复杂,从来就是一个高地震危险区。2014年8月3日,昭通市鲁甸县发生了一次6.2级地震,造成600多人死亡,3000多人受伤,损毁房屋8万多间。两个月后,在鲁甸西南500公里处,景谷6.2级地震发生,造成1人死亡,300多人受伤,7000多间房屋倒塌。这两次地震震级大小相当;震源深度相当,都在9~11公里左右,属于浅源地震;震源机制解分析表明两次地震的滑动类型也很接近,近乎为纯走滑型地震。什么原因使得两个貌似“孪生”的地震造成截然不同的破坏?

鲁甸地震后有大量报道分析了造成人员伤亡的客观原因。震级较高,系2000年1月姚安地震以来云南最强的一次地震;灾区人口稠密,平均人口密度达到每平方公里200多人,是全省平均水平的2倍;鲁甸属于国家级贫困县,经济条件差,建筑物多数为土坯房和砖

混房,抗震能力差或根本就没有;复杂的高山峡谷地貌,加上正逢雨季,引发了严重的滑坡、泥石流以及堰塞湖等次生灾害,加重了这次地震造成的灾害。相反,景谷地区位于山村,人烟稀少,平均每平方公里40人;房屋建筑采用滇西南一带典型的木质结构,房梁和屋柱之间有锁扣连接,房屋虽会晃动,但不易发生直接垮塌;灾区植被覆盖较好,泥石流、滑坡等次生地质灾害发生的可能性很小。

近距离的对比可以看出,地震危险性并不等同于地震危害性。危险性是对自然事件本身的描述;而危害性则是具有危险性的事件施于易损建筑物或人类群体的后果。在从地震危险性向地震危害性转换过程中,一个重要的因素在起作用,即易损性,它是指一个确定区域内由地震发生造成损失的期望程度,通常在0~1内取值。举个极端的例子:一次7级地震中,土坯房建筑完全倒塌,几乎没有抵御这次地震的能力,易损性为1;相反经过抗震设计的钢筋混凝土建筑在地震中完好无损,它的易损性接近为0。当生命、建筑等各种社会财富置于地震危险中,且易损性很高时,地震造成的危害才会很高;相反,在人口密度稀少,防震安全设施较好,地震准备充足的地区,即便地震危险性很高,其可能遭受的地震损失也不会很大。像1989年美国东部洛马普列塔地区的7.1级强震,造成60多人死亡,3000多人受伤;与此能量相当的1999年土耳其地震却导致了数万人伤亡,60多万人无家可归。

问题似乎得以圆满解答。但当抛开基于“地震点源假设”的相似外表后,用“有限断层”方法进一步剖析发震时的细节,情况变得更令人深究。所谓的点源假设是指在远场情况下,可以忽略掉震源破裂的空间尺度,把震源简化作一个点源处理。有限断层模型则要充分考虑发震断层几何的空间展布,把地震断面离散为多个子断层面源的叠加,通过波形反演研究每个子断层面的滑动情况,重建震源破裂过程细节。就像两个放大倍数不同的望远镜一样,都是震源研究中常用的工具。

综合利用远场和区域范围布设的密集地震台站波形记录,研究人员利用有限断层方法模拟了发震时刻断层面的破裂时空过程,发现尽管鲁甸和景谷这两个地震无论在震级、深度,甚至主滑动方式上都表现出高度的相似性,但在断层面上的滑动细节却截然不同^[4]。对于鲁甸地震,断层面上的滑动除表现出较大的走滑特征外,还有明显的向浅部滑移的分量,导致断层面上较大的滑动聚集在很浅的深度范围;整个断层面的滑动还具有明显的方向性,使得沿该方向上的地震破坏更为明显。景谷地震的平均滑动与鲁甸地震相当,都为0.11米,但最大滑动发生于9公里处,比鲁甸地震要深

4公里,断层面上滑动较大区域位置整体偏深,最深可达到18公里。断层面上主滑动区域位置的“一深一浅”,从发震特性上已然决定了地震破坏力的强弱。

地震行为的多样性和不可重复性在不断考验和丰富既有的地震理论和认知;它的肆意性也在一次又一次冲击着原本渺茫的地震预测研究,甚至也对新兴的地震预警研究,即通过较早到达的弱地动信号估计整个地震强度,在破坏性地动到来前做出快速预警,提出了严峻的挑战。灾难让人们失去了很多,但同时也学到了很多。越来越多的人和社会财富正在而且还将源源不断地暴露在地震灾害中。所幸的是,人们已经开始接受这些事实——地震会以远大于设想的强度发生;表象的一致会掩盖真实的过程。能做的也许是不再多焦虑预测目前不可能预测的事情,而是着手做更多事情来应对和理解不可避免的事情,这或许才是目前明智的选择。

致谢:中国地震局地球物理研究所陈运泰院士“关于可操作的地震预测预报”精彩报告并提供有关拉奎拉地震文献资料,使笔者受益匪浅;中国科学院地质与地球物理研究所陈棋福研究员在地震灾害和应急、地震预测方面给予了很好的讨论;美国莱斯大学钮凤林教授早期对日本东北大地震的剖析给了笔者很多启发;中国科学院地质与地球物理研究所郝金来博士等提供了最新的有关鲁甸和景谷地震震源破裂过程细节研究结果。在此一并表示诚挚谢意。

- [1] Jordan T H, Chen Y T, Madariaga R, et al. Operational earthquake forecasting—state of knowledge and guidelines for utilization. reported by the International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection. *Annals of Geophysics*, 2011, 54(4).
- [2] Rosen J. Six of the L' Aquila seven acquitted in appeal. *EOS*, 2014, 95: 18.
- [3] 乔丹 T H, 陈运泰, 伽斯帕里尼 P, 等. 可操作的地震预报——认知状态与应用指南. 世界地震译丛, 2013(1).
- [4] Lay T, Kanamori H. Insights from the great 2011 Japan earthquake. *Physics Today*, 2011, 12:33-39.
- [5] Minoura K, Imamura F, Sugawara D, et al. The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan. *Journal of Natural Disaster Science*, 2001, 23(2), 84-88.
- [6] Feder T. Scientists dig deep in Tohoku fault to crack earthquake's secrets. *Physics Today*, 2013, 8:22-23.
- [7] Hao J L, Wang W M, Yao Z X. Comparison of the source process of 20140803 Mw 6.1 Ludian earthquake and 20141007 Mw 6.1 Jinggu earthquake, Yunnan, China. *Geophysical Research Letter*, 2014 (Submitted).

关键词:地震 拉奎拉地震 日本东北地震
鲁甸地震 景谷地震