



地震预测是一个世界性科学难题^[1]。但这并不等于说防震减灾(也应该)是一个实践难题。一定程度上,在防震减灾的实际应用中,不同时空尺度的不同地震现象的预测及其对减轻地震灾害风险的作用,是一个更重要的科学问题。

1 地震预测的作用的“现代”理解

减灾的“第一原理”^[2]是灾害风险(Risk, 简记为R)取决于三项的乘积(或褶积):危险性(hazard, 简记为H)、暴露度(exposure, 简记为E)、易损性(vulnerability, 简记为V)。这是思考减轻地震灾害风险的基本点,也是思考地震预测问题的基本点。

从减灾“第一原理”的角度看,传统意义上的地震预测是用科学的手段识别出短期尺度(数天)的H的增加,然后用组织震前撤离的手段来迅速地减少E,从而使R得到最大限度的降低。1975年海城地震就是这样的情形^[3]。预测所用的科学手段(目前常用的手段是:基于统计的、基于经验的、基于物理的,其中“基于物理”的手段目前包括两类:基于对冲击的响应的、基于模型的)并不成熟^[1]。因此海城

的成功直到现在还鲜有重现。

但另一方面,即使在海城地震这个“经典”案例中,一个不容忽视的情况是,基于中期尺度(数月)的H增加,辽宁南部地区针对化工厂等重要的工业设施采取了必要的防震、避震措施(或者说降低了V这一项),从而使地震灾害,特别是严重的次生灾害的风险降到最小。同时海城地震中仍有千人死亡的情况表明,仅用组织震前撤离的方式来降低E从而降低R,实际上是很不可靠的方法。唐山地震更清楚地表明这一方法的限度。值得指出的是,如果说在海城地震的时代这是“没有办法的办法”,那么现在我们不得不考虑更好的办法。

这方面的其他案例,还包括识别出时间尺度可能很长(如数十年到数百年)但空间尺度可能很小(如几十米)的H之后(这正是目前“活断层探测”所做的工作),采用避让的方法减低E,以达到降低R的效果。针对地震危险区(时间尺度约十年,空间尺度约数百千米),以“大震不倒、中震可修、小震不坏”的原则采用建筑加固的方式降低V,也可以有效地降低R。地震发生后,H在秒的时间尺度上骤然提升,这种情况下,采用地震预警(earthquake early warning, EEW)^[4]

技术,高效率地降低E(如关闭燃气)或降低V(如使高铁减速),也可以达到降低R的目的。

信息化的一个基本原则是,精准的信息与精细化的信息服务之间并不相等。从防震减灾的角度说,一方面固然要在科学研究上不断提升针对各时空尺度的地震预测的精准性^[5],另一方面,更要在现有的(有限的、但同时是有用的)地震预测能力的基础上,使地震灾害风险达到最大程度的降低。

2 与地震相关的各类预测及其物理问题

讨论未来,或者说预测(及与预测相关的预报、预警、预期、预防、预备、预见,……),是物理学一个永恒的主题。围绕地震,这一主题几乎无处不在。

地震预警,主要问题就是用地震的初至波(P波)的性质,对更强的、其后到达的地震波(S波)进行预测,从而在秒的时间尺度上采取有效措施(如自动关闭核反应堆),以最大限度减轻地震灾害的风险。其中异地预警(front detection EEW, 即地震台网探测到地震后,通过电磁波比地震波传播速度快得多的原理,发出预警信息)的主要问题,是

用P波预测地震的震级,或者S波的峰值。而现地预警(on-site EEW,即地震恰好发生在保护对象的直下附近)的主要问题,还涉及到如何在地震破裂尚在进行之中的情况下,用地震破裂的起始(onset)预测整个地震破裂的情况。操作上,现地预警用前3 s P波的性质来预测地震的最终震级,或预测地震的强地面运动的峰值。其中3 s很大程度上是一种“妥协”(trade-off)的结果:对于一个物理过程来说,掌握越长时间的情况,对过程全貌的估计就越准确;但另一方面,掌握情况的时间越长,“预警”的作用也就越小。在“时间就是生命”的语境下,“快”与“准”是最需要协调的一对主要矛盾。

地震后即时公布的ShakeMap^[6],物理上就是要用地震参数(地震的位置、深度、震源机制等)预测地震的强地面运动的分布,从而给地震应急响应提供参考。随着观测资料的收集,这一预测很快为实测结果所取代(或者被实测结果所“标定”和修订)。但这一从预测结果到实测结果的时间差,也可以为地震应急处置提供难得的机遇。尤其是在实测所用的台站分布不理想的情况下,这种预测结果就成了唯一可以参考的结果。值得一提的是,这一预测,在科学上并不简单。从震源的角度,当超剪切破裂(super-shear rupture)发

生的时候,这种预测往往会大大地低估地震造成的破坏;从地震波传播的角度,当出现地震“射线”“聚焦”的时候,这种预测也会大大地低估地震造成的破坏。

有些预测(例如用P波预测S波,用地震的参数来预测地震烈度的分布)也许是建立在已知的物理规律基础上的(但即使如此,地震本身的复杂性和地震发生环境的复杂性也会带来很大的影响),而有些预测(例如用地震破裂的前3 s的性质预测整个地震破裂过程——对一次7级地震完成破裂需要10 s以上的时间,对一次8级地震完成破裂需要几十秒的时间,对一次9级地震完成破裂甚至需要数百秒的时间)则是物理学中的挑战性问题^[7]。

一次地震发生后,一项重要的工作是对地震的序列性质(主震—余震型、震群型、抑或前震—主震—余震型)做出预判,预判的基础是地震的性质(震源机制、震源环境)和震区历史上发生的地震序列的经验。在地震序列的“进行”过程中,需要对序列的可能的时间长度、序列中最大地震的震级(和地点)等做出预判,需要给出不同震级的地震的发生概率^[8]。这类预测,是目前地震科技中比较成熟的工作。

在更长的时间尺度上,用过去的和现在的地震活动,通过地震学

中特有的统计规律(如Gutenberg—Richter震级—频度关系)预测未来地震发生的概率,特别是这种概率的时间变化,目前可以做很多有用的工作,但同时也有很多问题。以中国地震来说,地震带的分布(例如“南北地震带”),应该说是众所周知的事实,

其总体格局与印度板块和欧亚板块之间的相互作用、与中国大陆地区“构造块体”的分布之间的关系,也有很好的理论解释。但是科学上说不清楚问题的是,为什么1997年以来中国大陆几乎所有7级以上的强震活动都发生在“巴彦喀拉地块”的边缘(尽管这些地震与“巴彦喀拉地块”的运动之间关系非常清楚)^[9],更不清楚的是,这一格局究竟会持续多长时间,会以怎样的方式结束。

3 关于预测的概念的讨论

预测的时间尺度和时间要求,随着应用目标的不同有很大的不同。但只要满足两个条件,预测就是“有用的”。一个是在“事前”做出,不管是在百年的时间尺度上(例如地震区划),还是在秒的时间尺度上(例如地震预警);另一个是可以指导实际的防灾措施,例如地震区划指导下的抗震加固、地震预警信息辅助下采取的紧急措施。

这里,也许需要澄清的一个概念是,地震预警,即接收到已经发生了的地震的P波信号后,对该地震引起的最大振动进行预测,从而指导实施紧急响应措施。如果从“地震业已发生”的角度看,这一工作显然并不属于“地震预测”。但无论是从用P波信号预测S波的大小的角度,还是从用前3 s onset预测整个破裂的情况的角度,都属于“预测”的范围。

还有一个有必要(反复)说清楚的概念是,物理学意义上的长期预测,通常是指从现在开始起算的若干时间之后(加减一个范围)——例如,100年后加减2年,会发生地震;而地震学意义上的长期预测,则通常是指从现在开始的一个时间范围内——例如100年之内,会发



中国地震台网中心。这里是提供防震减灾公共服务的窗口之一

生地震。因此从非线性动力学的角度,物理学意义上的长期预测会因为例如自组织临界性(SOC)等受到极大的限制,而地震学意义上的长期预测则是另一回事。之所以有不同的定义方式,其实也是应用导向的,毕竟抗震设计、抗震加固等都需要时间。

地震发生后的次生灾害,例如火灾、滑坡、泥石流、海啸、有害物质扩散等,成为地震应急处置的重要问题。次生(secondary)灾害绝不具有“次要”的意义。这一点,只要看一下日本3·11大地震的情况就十分清楚。通过地震本身的信息(例如地震的震源机制、破裂过程)和当地的背景资料,对次生灾害进行尽可能及时的预测并发出相应的预警信息,成为地震应急处置的重要问题。不过严格地说,这类预测虽与地震密切相关,主要的却不是地震的物理问题,而是火灾、滑坡和泥石流、海啸及有害物质扩散的物理问题了。

地震风险预测,即用(时间相依的, time-dependent) H , 结合 E 和 V 的分布来预测 R , 使人们可以采取必要的措施,例如风险分配、风险防控、风险管理,以降低 R 对人类社会的影响,则不仅涉及地球上的物理,包括地震的物理,地震波激发、传播、衰减的物理,砂土液化的物理,滑坡的物理,海啸的物理等等,而且涉及到工程结构的物理,包括工程结构破坏的物理,工程结构火灾的物理,工程结构的抗震、减震、隔震的物理等等^[10]。从这一点来看,地震灾害风险的预测,复杂性实际上并不在其所涉及的物理定律本身。在物理领域我们早就知道,理解了分子的物理,并不等于理解了生命——在特定的层



中国地震科学实验场数据中心。这里是支持防震减灾公共服务产品的科技创新平台之一

次上,新的物理规律的“涌现”是一个不可避免的现象^[11]。至于在地震灾害风险这个层次上所“涌现”的物理规律是什么,我们现在至少还不能全面地回答这个问题。相关研究的前沿性,大约也就体现在这个地方。

致谢 本文为2019年8月9日作者在中国地震台网中心、中国地震局地震预测研究所举办的“中关村科学沙龙”活动学术报告,与会院士及专家围绕地震预测、地震预警、水库地震、群测群防、地震科学实验场等问题进行了热烈讨论,提出了有价值的意见建议。感谢活动主办方《物理》编辑部的邀请,感谢中国地震台网中心孙雄主任的帮助。沙龙活动中,中国地震局地震预测研究所付广裕研究员还为现场的小朋友做了减轻地震灾害风险方面的科普报告。一并致谢!

参考文献

[1] Hough S. Predicting the Unpredictable. Princeton Univ. Pr., 2010; 吴忠良. 物理, 2015, 44: 550
 [2] Madu C R, Kuei C H (ed). Handbook of Disaster Risk Reduction & Management, World Scientific, 2018; <https://www.preventionweb.net/risk/disaster-risk>
 [3] 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍等. 1966-1976年中国九大地震, 地震出版社, 1982; 郭增建, 陈鑫连(主编). 地震对策, 地震出

版社, 1986; Wang K, Chen Q, Sun S *et al.* Bull. Seism. Soc. Amer., 2006, 96: 757
 [4] Kanamori H, Hauksson E, Heaton T. Nature, 1997, 390: 461; Kanamori H. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2005, 33: 195; Satriano C, Wu Y M, Zollo A *et al.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31: 106
 [5] 地震预测预报二十年发展设计工作组. 地震预测预报相关的重要科技挑战(2017版、2018版、2019版). 地震出版社, 2017、2018、2018. 中国地震局地震预测研究所. 地震预测研究年报(2018年). 地震出版社, 2019
 [6] <https://earthquake.usgs.gov/data/shake-map/>
 [7] Olson E L, Allen R M. Nature, 2005, 438: 212; Rydelek P, Horiuchi S. Nature, 2006, 442: E5
 [8] Zhuang J C, Ogata Y, Vere-Jones D. J. Amer. Stat. Assoc., 2002, 97: 369
 [9] Wu Z L, Ma T F, Jiang H *et al.* International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 4: 21
 [10] Somerville P, Morivaki Y *et al.* International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, 2003(1065); Wyss M (ed). Earthquake Hazard, Risk, and Disasters. Elsevier, 2014
 [11] Licata I, Sakaji A (eds). Physics of Emergence and Organization. World Scientific, 2008