

关于我国地震数值预报路线图的设计 ——汶川地震十周年反思

石耀霖^{1*}, 孙云强¹, 罗纲¹, 董培育², 张怀¹

1. 中国科学院大学, 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;

2. 湖北省地震局, 武汉 430071

* 联系人, E-mail: shiyl@ucas.ac.cn

汶川地震发生已经十年了. 汶川地震造成了巨大损失, 但是汶川地震未能预测, 是中国地震工作者心头永远的痛, 对地震预测研究的反思是一个重要课题. 中国地震局系统反思报告认为, “汶川地震未能预测, 一是地震成因尚不清楚; 二是地震前兆机理尚不清楚; 三是经验预报的局限性和不确定性; 四是地震前兆时空演化特征尚不十分清楚; 五是尚未形成全球地震预测研究机制^[1]”. 反思注意到“地震预测基础性研究落后”, 认为: “当今的地震预报仍处于经验性预报阶段, 认真总结未能做出汶川 8.0 级地震预报的教训, 就是要进一步丰富我们的地震预报经验, 减小经验性地震预报的局限性及不确定性^[2]”.

的确, 地震经验预报一直是我国目前实践中采用的主要地震预测方法, 可预见未来几十年内也仍将是主要方法. 但是, 从 1966 年邢台地震后开始, 按照经验预报的科学思路已经工作了半个多世纪, 没有见到显著的突破, 相反有关反思中指出: “参加过 1966~1976 年地震活跃期地震预测预报工作的绝大部分同志已经退出了工作岗位. 现在的地震预测预报工作骨干多数没有经历 7 级、甚至 6 级地震预报, 经验明显不足, ‘经验’出现了断层^[2]”. 如果情况真是这样, 我们是仍然坚持“进一步丰富我们的地震预报经验”作为主要途径, 还是在科学思路上要探索新的路子呢?

地震预报可以分为两大类: 基于地震活动性和其他多种前兆现象的经验预报, 和基于对地震孕育发生物理过程了解的物理预报. 经验预报可以进一步分成基于地震活动性、地应力、地形变、地震波、地下水、电磁等前兆的定性的初级经验预报, 和进一步把经验通过数学理论提炼而客观确切化、依托大量地震活动性和前兆数据提升了的量化统计预报. 物理预报也不能仅仅是对经验预报给一些物理解释和阐释, 必须对地震孕育发生的过程, 以严格数学物理方程表达的定量化的动力学建模为基础, 以获得监测区域结构、物性和状态的“透明地壳”模型为前提, 以实时获得的监测区域地震和前兆关键物理量四维数据为条件, 通过高性能计算平台对海量数据的处理和地震孕育发生过程的计算模拟, 才能实现基于物理模型的地震



石耀霖 1944 年生, 1966 年中国科学技术大学本科毕业, 1986 年在伯克利加州大学获博士学位. 现为中国科学院大学教授, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士. 从事固体地球物理、地球动力学研究.

数值预报.

天气预报的科学思路在一个世纪前就已经被提出, 但是限于计算能力, 直到 20 世纪后期才逐渐得以实际运用. 但说到地震预报也要搞数值预报, 有人可能觉得不大可能? 的确, 笔者在 1966 年邢台地震后也曾经认为, 地震孕育发生的机制我们还搞不清楚, 但是地震是有前兆的, 尽管尚不了解地震孕育发生的物理机制, 我们只要有数量足够多的地震和前兆台站及手段, 积累了足够多的经验, 就像中医把脉也能看病一样, “号准了大地的脉搏”, 就能够预报灾害性大地震. 然而, 从 1966 年中国开展地震预报研究已经半个世纪, 特别唐山地震到汶川地震相距三十多年, 看不出对灾难性大地震的预报能力有什么质的提升, 相反地震队伍内部还有“‘经验’出现了断层”这样的感叹. 但如果我们的地震预报真的在某种程度上变得依靠工匠式的个体经验积累和技艺传承, 恐怕并非喜讯. 半个世纪了, 笔者的认识发生了变化, 感到不能只靠“中医”, 还要发展“西医”. 地震预报需要改变科学思路, 开始地震数值预报的探索.

实际上早在 2003 年刘启元和吴建春^[3]就发表了《论地震数值预报——关于我国地震预报研究发展战略的思考》的论文. 2007~2020 年的《国家地震科学技术发展纲要》中, 明确写入了在“国家地震减灾科学计划”中, 应该安排“地震数值预测试验研究”的专项. 地震数值预报需要在科学上解决 5 个关键问题^[4,5]: 一是要对地震孕育发生物理过

程的定量化认识,这方面连续介质力学是成熟的科学,人们对地震破裂过程中断层速度-状态相关的本构关系也有了认识^[6];二是要对描述地震过程的偏微分方程具备数值求解的能力,我国已经是具有世界最快超级计算机的国家,理应走到世界前缘;三是要搞清地下结构、状态、物性,建立模型,虽然我们这方面还差得很远,但几十年来已经有了一定的积累,建立粗糙的模型已经不是不可能;四是要了解模型的边界条件,GNSS和GPS等现代高精度观测手段使我们对地表位移有了实时了解,但深部和底部边界条件不清楚,需要做一些简化的假定;五是要了解初始条件,现今地下的岩体、断层中的应力和运动速度是什么,这是最薄弱的环节,我们几乎一无所知.综合以上各点,现阶段实现地震数值预报是不可能的,因为我们几乎完全不知道初始条件,对边界条件、深部结构和物理过程的了解也都有限.但是在假设给定初始条件下,进行初步的科学计算已经是可能的,这些计算有助于我们对复杂断层系统中地震孕育发生过程的认识.是时候吹起地震数值预报的“起床号”了.

1 地震预报的简单回顾

从地震学诞生,地震学家研究的主要目标之一就是“发现一些能够使他们预测地震到来的手段^[7]”.1909年Gilbert^[8]在*Science*上发表的题为“地震预报”的文章从能量的积累和释放,地质构造、触发因素等方面讨论了预报地震位置和时间的有关问题.Gilbert激情地宣称:“曾经有这样的时代,天气被视为神所操纵.……现在天气被视为自然现象,祭司为气象局所替代……地震也同样曾是笼罩在神秘之中,只有占星家和甲骨文对它有神秘的预测;而现在神秘的阴影让位于知识之光,文明世界的人们期待着地震学家能兴奋地宣布,科学预测地震的时代已经到来”.然而,地震预报的进程远远落后于天气预报.20世纪30年代针对某些笼统的所谓地震“预报”,严肃的地震学家指出当时还不具备地震预报的条件^[9],Wood和Gutenberg^[10]提出了有实际意义的地震预报必须包含时间、地点、震级三要素的原则.

20世纪60年代,美国、日本、苏联等国家纷纷提出了地震预报研究的规划^[11,12].美国著名地球物理学家Press和Brace^[11]当时写道:“几年前,地震预测仅是占星家、被误导的业余爱好者、追求出名之徒和末日哲学宗教教派的议题,罕见哪个科学家冒着被同行鄙视的风险关于这个问题发表意见.在过去的三年里,这种情况已经发生了巨大的变化,日本最重要的地球科学家提出了一个研究方案,认为再‘经过十多年的数据积累,应该可以开展地震预报’.在美国科学与技术办公室特设的地震预测调研小组,经过15个月的审议,认为具备足够的可能性开展一项10年的研究计划”.日本1965年起制定第一个国家“地震

预报研究项目”,以应对预计不久的将来会发生在本州岛中部的东海大地震^[13].20世纪70年代初,人们发现岩石在接近破裂时微裂隙急剧增多会引起扩容,扩容时还会改变水的渗流,从而导致地震波速变化,使美国科学家认为找到了有理论基础的前兆手段^[14,15].

我国在20世纪60年代初,傅承义^[16]就探讨了地震预报科学问题,但大规模实施地震预报研究是1966年邢台地震之后,地震预报研究在文化大革命的年代艰难起步.20世纪60~70年代是中国,特别是华北,地震特别活跃的年代:1966年邢台 $M_s6.8$ 和 $M_s7.2$ 地震(死亡8064人)、1967年河间地震 $M_s6.3$ 地震(死亡19人)、1969年渤海 $M_s7.4$ 地震、1970年通海 $M_s7.7$ 地震(死亡15621人)、1973年炉霍 $M_s7.6$ 地震(死亡2175人)、1974年大关 $M_s7.1$ 地震(死亡1423人)、1975年海城地震 $M_s7.3$ (死亡1328人)、1976年龙陵 $M_s7.4$ 地震(死亡98人)、1976年唐山 $M_s7.8$ 地震(死亡242419人)、1976年松潘平武 $M_s7.2$ 地震(死亡38人).虽然在文化大革命中,国际科学交流也几乎停止,但我国地震科研却仍然进行,在1971年还成立了国家地震局,地震预报获得了更多重视和投入.1975年预报了海城地震,但1976年未能就唐山地震发出短临预报.

美、日、苏联在这段时间也都积极开展地震预报研究,特别是美国圣安德列斯断层的帕克菲尔德段,历史上曾经在1857,1881,1901,1922,1934和1966年发生了6级大小的地震,时间间隔平均约22年,似乎规律性相当明显.因此1985年有科学家预测95%的可能性是下一次地震将在1988年左右,最晚在1993年发生.国家地震预测评估委员会(National Earthquake Prediction Evaluation Council, NEPEC)对此进行了评估,并同意.美国地质调查局和加利福尼亚州把帕克菲尔德作为地震预测试验场^[17],超过100位美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)以及合作大学和政府实验室的研究人员布设了密集的仪器网络,以“捕捉”预计的地震并企求以前所未有的细节揭示地震过程.然而,1988年过去了,1993年也过去了,地震却一直没有发生.地震学家关闭了他们的预报窗口.最终在2004年9月28日Parkfield才发生了6.0级地震,而且尽管布设了密集的前兆台网,但是震前地震活动性、应变等均没有发现显著的前兆信息.

虽然有一些地震震前有某种程度的预报,但总的情况远远低于20世纪60年代的乐观预期.1990年以来,地震预报科学问题引起了国际地震学家的激烈辩论.国际上一种极端的观点是认为地震不能预报(earthquake cannot be predicted)^[18,19].但很多学者,包括认为地震不能确定性预报的学者,仍然认为地震可以概率性预报,这些地震学家把Prediction定义为确定性的预报,中文被提议翻译为预报,Forecast则被他们定义为对在一定时空范围内发生一定震级区间内的地震概率预报^[20,21],中文被提议翻译为预测.但是中文里预报和预测还有另一种含义,1998年国务

院发布的《地震预报管理条例》把科学家和研究单位对未来地震发生的地点、时间和大小所做的研究结果称作“地震预测”，而把由政府主管部门依法发布的有关未来地震的警报称作“地震预报”^[22]。实际上，自然科学预报严格来说总是概率性预报，确定性预报只是在理论上发生概率逼近100%时的一种特例，或在实用上则是预报者认为概率足够大，已经值得提出预警的特例。中国地震学者过去实践中往往给出形似确定性的预报，其实并非有100%的把握，而是在没有科学依据给出发生的概率具体有多大的困境下，不能给出概率，实属不得已而为之。反之，虽然国内目前也有人试图与国外目前流行的 Prediction(预报)和 Forecasting(预测)一致，但我国在地震中期和短临“预测”中，基本尚未采用概率预报，按上述定义，我们仍然是在做地震“预报”而非“预测”。为了避免这种尴尬的局面，本文不刻意区分预报和预测，但我们下面的全部讨论，都是以地震概率性预报为内涵和目标的。

2 地震预测研究现状

虽然关于地震预报的争论不断，乐观或悲观的气氛交替起伏，“但国际地震学界对地震预测预报以及预防与减轻地震灾害的关注与研究从来没有停止和放弃过。近10~20年来，……地震预测预报问题在世界范围内重新引起界的关注，各国地震学家正在加紧努力，以更广阔、更新颖的视野审视地震预测预报^[22]”。

2.1 可操作的地震预测系统

意大利在拉奎拉地震后大力发展可操作的地震预测(operational earthquake forecast, OEF)^[23]。2009年4月6日凌晨3时意大利拉奎拉发生 M_w 6.3地震，死亡200余人。震前1个月意大利一位技术员曾宣称基于氡水平升高而预测要发生地震。但在政府重大风险委员会的咨询委员会会议上被科学家和政府有关官员认为证据不足而否定。因此，2011年，6名科学家连同1名公职人员因为他们在2009年3月31日举行的会议上提供的“不准确、不完全和自相矛盾”的信息受到审判，法官认为他们犯过失杀人罪，各判处6年监禁，这一判决引起了全世界地震学家的抗议。2014年11月10日，科学家的过失杀人罪的判决最终被推翻。这一事件推动了有关地震预报问题的思考。意大利政府组织了包括陈运泰在内的来自中国、法国、德国、希腊、意大利、日本、俄罗斯、英国和美国等国10位科学家组成国际民防地震预报委员会，于2009年5月12日在拉奎拉展开讨论，最后提交了《可操作的地震预测-认知状态与行动指南》的报告^[23,24]。该可操作的地震预测系统指导思想是透明、一致、客观、开放。虽然目前只能利用地震活动性资料、不能利用前兆资料，但他们发展一套算法，能够随时更新，给出监测区域未来一段时间发生不同震级地震

的概率空间分布图^[25]。

可操作的地震预测体系强调两个原则^[26]。一个原则是透明性，“关于未来地震活动的权威科学信息不应该对公众隐瞒”。方法是客观的，数据是公开的，信息是权威的、科学的、一致的和及时的。虽然不同研究者可以发展不同的算法，但只要采取同样的算法、参数和资料，就会得到同样的结果。这与我国目前中期和短临预报中，强烈依赖专家个体各自的定性的经验相比，形式上更透明和客观。另一个原则是独立性，“关于未来地震活动的权威性科学信息应该独立于风险评估和减灾的应用开发”，例如发布警报、命令撤离、改善建筑规范，执行分区条例以及所有其他实际事务，这些应该有其他机构或委员会负责，不是任何参与OEF的科学家的个人责任。这类似我国一些地震学家强调的预测和预报的另一层含义，科学家只管“预测”，行政部门负责“预报”。

可操作地震预测系统虽然可以提供不断更新的概率预报，但是一个突出问题是：往往较大地震预报的发生概率，虽然比背景概率可能有大的提高，但是概率自身的值仍然很低，一般高不过百分之几。例如采用传染型余震序列模型(epidemic type aftershock sequence, ETAS)对拉奎拉地震的回溯性预报发现，震前大面积地震概率增益提高了5~25倍，局部面积甚至达到了100倍；但即使这样，预测一天内发震的概率仍然不到1%^[23]。这种高概率增益、低概率的预测，如何向社会发布、民众应该如何理解和采取什么预防措施，仍然是一个突出的问题。

可操作地震预测系统目前对概率的预测算法，基本上依赖于地震目录提供的地震活动性资料。地震诊断性前兆目前尚没有能够被使用。因为各类前兆观测，什么是“异常”、什么叫“地震前兆”、“前兆”与后续地震在时空大小上有什么关系，这些自身目前都是难以量化的概念，基础不稳，就难以形成基于前兆的地震概率计算模型和算法。

2.2 统一的加利福尼亚州地震破裂预测系统

美国加利福尼亚州发展了“统一的加利福尼亚州地震破裂预测(Uniform California Earthquake Rupture Forecast, UCERF)”系统。加利福尼亚州地震概率工作组(Working Groups on California Earthquake Probabilities, WGCEP)，作为美国最官方的加利福尼亚州的地震预测研究主体，在2007年提出的UCERF2基础上，2014年又提出了3rd Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3)模型^[27]。它的基本构架，与本文建议的地震数值预测系统在基本构架上有某种程度类似。它不是一个固定的简单模型，而是一个可以吸纳包容不同研究者的工作、贡献和观点的开放系统。

该系统包括4部分：(1)断层模型，依据实测给出断层走向、倾角、长度、深度等要素，不同研究者可以提供不同的模型，在研究中可以选用一种，也可以都选用后对最

后结果的影响做加权平均; (2) 变形模型, 依据各类资料、例如空间大地测量、跨断层测量、历史和考古地震、地震目录等约束确定合理的变形错动模型; (3) 地震速率模型, 根据变形速率、地震矩的积累释放、历史地震复发频率等多种资料, 给出区域内各地段地震长期平均频度, 他们还考虑加利福尼亚州特点, 绝大部分地震发生在断层上, 但也有考虑了少量地震发生在没有明显断层的剪切地块内, 或更少量的地震可能发生在没有断层的地块内的不同情况; (4) 概率模型, 给出各个地段一定震级地震在一定时间窗口内发生的概率。断层不同段落, 哪怕具有相同的平均频度, 但各自距上一次大地震时间不同、变形速率不同, 因此下一次大地震的危险性也不同。要根据区域已经发生的地震情况, 具体给出未来一定时间区间内发生一定震级地震的概率。在变形模型、速率模型和概率模型中, 不是简单依赖于定性的经验, 而是规范为一定的数理统计算法, 有些还基于物理考虑(例如断层滑动速率、地震矩的积累释放等), 做出一些估算。可以说 UCERF 模型目前是一种渗入了物理概念的统计预报模型。在这些模型中, 和断层模型一样, 可以包容基于不同理念的不同算法, 使用者可以选择一种或使用多种分别计算, 最后做加权平均。

UCERF3 包括分层次的 3 个渐进模型 UCERF-TI, UCERF-TD 和 UCERF3-ETAS。UCERF-TI 是时间无关模型(time independent model)^[28], 即给出长期地震发生平均概率图。它把全加利福尼亚州断层分割成 350 个段落, 每个段落再分成 2606 个单元片段, 每个片段的错动速率依靠反演求出, 反演要满足区域大地测量和地质资料提供的数百处滑动量、历史地震发生率、震级频度关系等观测资料的约束, 在超级计算机上对 2606 个片段的错动进行“大反演”, 考虑断层系统作用, 而不仅仅是孤立的单个断层, 在此基础上求出地震发生速率和提出长期地震发生的概率模型。UCERF-TD 是长期预报中的时间相关模型(long term time dependent model)^[27], 根据弹性回跳模型, 地震时应力释放, 地震后有一个应力逐渐积累的过程。由于有的地方可能刚刚发生过大地震, 有的地方可能很长时间没有发生大地震, 因此不能仅仅知道长期平均地震速率, 还需要知道历史上已经发生过的地震对现今地震活动的影响, 这就是时间相关的模型。但是, 它与短临预报不同, 主要是在长时间尺度上概率预测时考虑时间因素。UCERF3-ETAS 是用于可操作地震预报的时空丛集模型(spatiotemporal clustering model for OEF)^[29], 目的是企图把 UCERF3 模型能够用于短临预报。特别是大地震后一些余震仍可能有破坏性, 因此把考虑余震时空丛集的 ETAS 模型引入来达到目的。原本 ETAS 模型是传染型余震序列统计模型^[30], 仅仅依靠地震目录推演地震活动性演变, 并不能考虑断层、历史地震等因素, UCERF3-ETAS 模型则把二者结合起来考虑。这 3 种递进的模型(UCERF-TI, UCERF-TD, UCERF3-ETAS), 可以在一定程度上覆盖长中短临地震概率预测。

UCERF3 给出两种预测: (1) 何时何处在众多断层中哪里可能会断裂的地震破裂预测; (2) 断层破裂时会造成不同地点震动的强地面运动风险预测。

尽管一些科学家认为 UCERF 是对加利福尼亚州破坏性地震的大小、位置和可发生概率的最佳模型, 但是它仍然存在很多问题。在有关讨论会上, Frankle 指出, 在“大反演”中, 约束条件仅产生 2630 个方程, 但是未知量有 22000 个, 未知数远大于方程, 因此没有唯一解, 解答取决于空间光滑、参数权重、约束权重等许多主观的选择(<https://www.slideserve.com/craig/comments-on-ucerf-3>)。Field 等人把 UCERF3 的 4 个组成部分之间的联系称为黑箱(black box)(<http://slideplayer.com/slide/7665511/>)。总之, UCERF3 是一个试着引入了物理概念和约束的经验统计模型。它比纯粹的经验统计模型增加了物理的约束和考虑, 但是它不是一个严格的物理模型。

2.3 NASA 的 QuakeSim 模拟平台

QuakeSim 是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开发的固体地球科学计算框架, 用以更好地理解活动构造和地震过程, 构建一个完全可互操作的工具系统以研究这些过程^[31]。在 2012 年已经推出了 QuakeSim 2.0。

QuakeSim 开发了 3 种主要的仿真工具 GeoFEST, PARK 和 Virtual California。GeoFEST 使用有限元方法对真实的包含任意断层网络的复杂地区(例如洛杉矶盆地)的地壳和上地幔在长期构造加载和系列地震发生条件下的变形和应力进行三维黏弹性模拟。PARK 是一个边界元程序, 它使用格林函数方法确定每个断层单元上的滑动而导致的断层其余各部位上的应力变化。例如, 它可以采用最先进的断层速率和状态相关的摩擦本构关系, 计算加利福尼亚州帕克菲尔德特定段落的滑动历史、滑动速度和断层面上的应力。虚拟加利福尼亚是一个利用蒙特卡罗方法模拟逼真地震的计算程序。它用许多独立的相互存在弹性作用的断层段来描述横跨加利福尼亚州地区的断层系统。QuakeSim 包含 QuakeTable 的断层数据库, 以及不断更新的地震活动性和 GPS 及 InSAR 的资料, 依靠这些仿真工具进行模拟。

3 关于中国地震数值预报系统框架的设想

为了开展地震数值预报, 国家应该建立地震数值预报系统。如图 1 所示。只有在地震物理机制基础研究的基础上, 才能建立这一系统。地震孕育和发生物理机制的理论、实验和野外基础研究(棕色椭圆框), 是整个工作的基础(第 1 节谈到的 5 个关键问题之一)。这一预报系统由地震概率预测分系统(红框部分)和地震风险概率预测分系统(蓝框部分)组成。地震预测分系统主要功能是在长中短临不同时

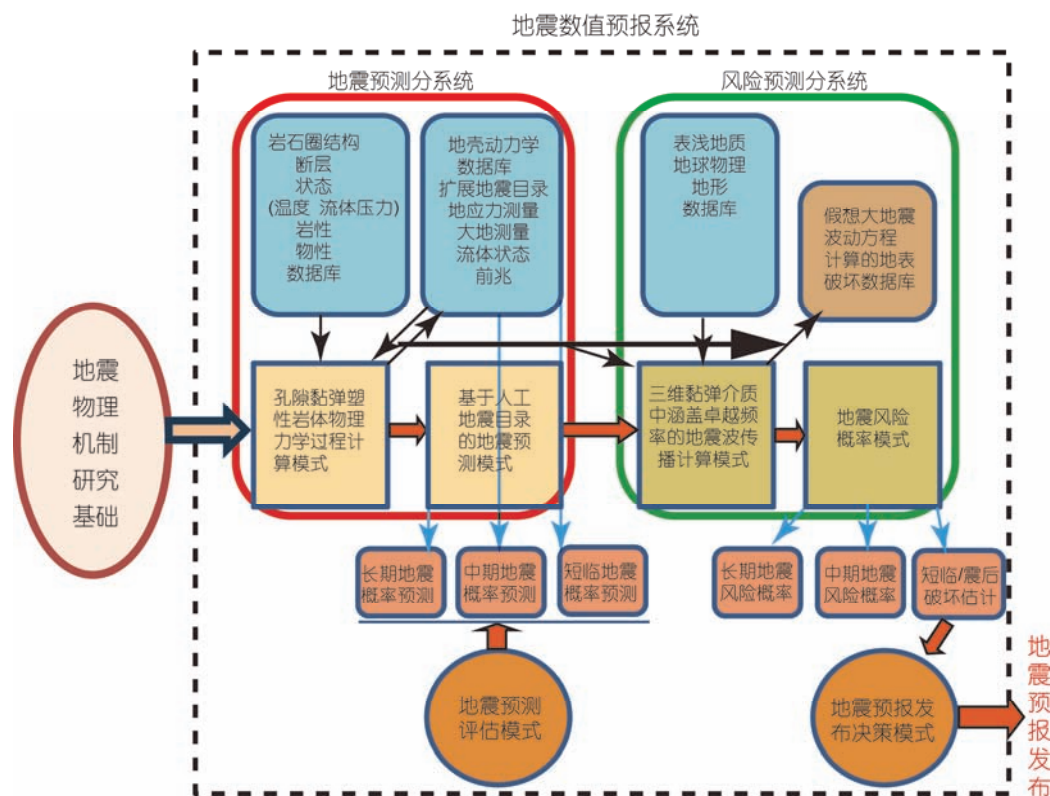


图1 地震数值预测系统组成框图

Figure 1 Earthquake numerical forecast system flow diagram

间尺度上实现对破坏性地震的概率预测。风险预测分系统主要根据地震概率预测结果对地震破坏风险给出预测,以利于抗震减灾。

3.1 地震预测分系统

地震预测分系统的核心是开发两个有自主知识产权的模拟工具(5个关键问题之二):一个是在存在断层的孔隙-黏弹塑性体中计算构造应力场作用和其他触发作用叠加下,复杂断层系统应力场的变化、亚临界态区域的发展和地震断裂发生扩展的计算模式,即地震预测分系统中的动力学计算模式。另一个是在前一模式产生的人工合成地震目录基础上,提供长期、中期乃至将来短临概率预报的计算模式。它们是地震预测分系统的核心攻关任务。

地震预测分系统要建立两个数据库:一是岩石圈基本数据库,包含基础地震地质资料^[32]和岩石圈结构、断层、热状态、流体状态、岩性、弹性、黏性、强度、渗透率等物理力学性质,它们是建立计算模型的基础(5个关键问题之三);二是地球动力学数据库,主要是指那些随时间变化的地震学观测、地应力观测、大地测量观测、地下流体状况观测和地震前兆观测的数据库,它们的一个主要功能是,有些资料,可以为数值模拟提供边界条件和初始条件(5个关键问题之四、五);另一些资料可以作为检验模型是否符

合实际的约束。

在 UCERF, QuakeSim 等模型系统中,也都有各自的数据库,如 UCERF 的断层模型, QuakeSim 的 QuakeTable 等。本文建议的数据库与他们有何异同呢?本文的岩石圈数据库偏重于基础资料,主要提供建立模型所需要的结构、状态、物性数据。不但要有 UCERF 那样的断层模型数据库,或 QuakeSim 的 QuakeTable 数据库中的古地震的断层数据,包含主要活动断层的走向、倾角、深度、长度、错动方向等几何参数,而且要包含更多的内容。包括地形、Moho 面深度、地壳分层、岩性等参数等。我们的岩石圈数据库,还应该包括地壳状态信息,其中最重要的是深部温度分布和深部流体状态。温度会影响岩体和断层物理力学性质;存在什么流体、孔隙压力如何、孔隙介质渗透率如何等会强烈影响地震的触发,特别在人类活动对地壳稳定性影响日益增加条件下更显重要。我们的数据库还应该包括地下特定岩石或断裂带,在特定温度和流体作用下的物理、力学性质。例如弹性性质、黏性性质、塑性屈服强度、断层本构关系、绝对渗透率、特定流体在不同温压下的黏滞系数等。有了这些这些数据,可以构建数值模拟需要的模型几何形状和物性参数。

地壳动力学数据库包含现在不断演变的时变观测数据。不但包括 QuakeSim 的数据库中的地震活动性数据、

GPS 数据和 InSAR 数据, 还要包括钻孔应力(变)数据, 地下流体相关数据, 跨断层大地测量数据, 以及我国已经观测的各种前兆数据. 地震数据不但要包含传统的地震目录, 而且要开发扩展了的“新地震目录^[33]”, 可以包含矩震级、震源机制、视应力、应力降等参数. 我国开展的气枪定点发射测量地震波速变化^[34]等独特资料也应该收录于数据库中.

目前我国的“透明地壳”为建设第一个数据库迈开了重要的一步, 但是迄今的研究偏重于地壳结构研究, 对岩石圈的状态、物性研究技术手段不足、研究程度偏低. 地震学研究历来是固体地球物理中最重要最有力的手段, 但在新形势下不应仅仅提供传统的地震目录, 而应该提供扩展的地震目录, 包含震源机制、大地震断裂错动模型、矩目录、应力降、低频地震事件等.

地震预测分系统提供的产品是, 近期可能只限于提供地震长期和中期概率预测, 最终应该也提供短临地震概率预测.

这个分系统中还有一个辅助模式, 即地震预测评估模式. 它的功能是对各种地震概率预报(确定性预报作为发生概率 100% 的特例)进行评估. 如果 A 发布了 10 次地震预测, 每次预测的发生概率是 40%, 实际发生地震 4 次; B 也发布了 10 次地震预报, 每次预测的发生概率也是 40%, 实际发生地震 4 次. 许多习惯于确定性预报的人可能会认为 A 比 B 预报得好, 但作为对概率预报的评价, B 应该比 A 预测得更准确. 另外, 预测的地区背景概率有大小, 预测的时空窗口有大小, 预测的难度因而不同, 在评估时也应该得到反映. 在我国地震预测工作中, 经常会遇到这类问题: 不同的方法或手段, 哪一种好一些; 不同的单位或个人, 谁的预报总体更成功一些. 地震预测评估模式就是要客观地做出评价, 以便我们不断改进预报模式, 提高地震预测水平.

3.2 地震风险预测分系统

我们提出的地震数值预报体系中另一个分系统是地震风险数值预测分系统. 对于长期和中期预测来说, 要发展三维地震波传播高性能计算方法, 在地震数值预测基础上, 解决强地面运动地震风险概率长期和中期预测问题. 对于短临预测和震后应急救灾来说, 它通过对大地震三维地震波传播计算模拟估计的破坏预测, 做出短临预报是否发布与如何发布的决策, 和万一发生大地震时采取救灾措施的预案.

地震风险预测分系统的核心是复杂地形和结构下包括高频段的三维地震波传播计算模式. 烈度或更量化的强地面运动预测, 历来是地震风险预测的关键问题. 最简单的方法是根据地震震级和深度经验统计出不同震中距的烈度^[35], 最理想的方法是三维波动方程的求解. 然而, 三维波动方程的计算曾经是难以实际实现的任务, 因此人

们发展了种种射线加波动、解析加经验的方法, 以求减少计算量, 而又能获得足够好的预测结果^[36]. 随着计算能力的提高和对地下结构了解的深入, 三维地震波传播的数值模拟已经成为可能^[37~39]. 然而, 提高精度, 计算地震破坏卓越频率(0.1~1 Hz)较高的地震波传播, 仍然是艰巨的任务. 也是地震风险预测分系统应该解决的核心问题.

地震风险预测分系统需要建立表浅地质地球物理数据库. 除了一般的地壳结构、物性数据库外, 为了真正发挥三维地震波预测强地面运动的威力, 需要对表浅地质地球物理状况有比较细致的了解, 才能更好地计算震源机制、地质构造、岩性不均匀、复杂地形、场地特征等对地震波传播的影响.

地震风险预测分系统的产品有两类: 一类是预测预报产品. 对于长期、中期地震灾害提供风险概率分布图, 对于短临预报、提供可能破坏分布图及提出抗震减灾措施, 并做是否发布、如何发布短临预报的决策. 另一类是数据库. 在分系统运行中要对大量可能发生的大地震三维地震波破坏灾害景象进行计算, 这些计算结果要储存于虚拟地震灾害数据库. 这样, 在破坏性大地震发生后, 不管这地震是短临预报了的还是没有预报的, 即使尚来不及确定该地震破裂模型和计算其三维地震波传播造成的效应, 马上可以从虚拟地震灾害数据库里调用已经计算过的虚拟地震, 选出一个或几个与实际地震情况类似的地震破坏图景, 用于抗震救灾实时决策. 这一产品也十分重要, 设想当年如果我们原来在库内就储存着类似汶川地震的虚拟地震破坏灾害分布图, 地震后如果能及时调用, 就可以在交通、通讯断绝, 阴雨飞机不能起飞的条件下, 及时为中央救灾决策提供参考.

本分系统也有一个辅助模式, 就是地震预报发布决策系统. 不管是数值预测, 还是统计预测, 当地震预测转变为概率预测后, 是否发布预报, 如何发布预报, 预报发布决策成为一个重要的问题. 国外开发了可操作地震预测系统的国家, 目前已经面对着高概率增益, 低概率地震预报如何发布的问题. 我们应该对此问题做好研究, 制定预案, 权衡利弊, 解决概率预报发布决策问题.

4 地震数值概率预测的科学思路

对长期、中期和短临地震预测的一些思考分别介绍如下.

4.1 长期时间无关地震概率预测

长期地震概率预测实施方案如图 2 所示. 根据深部探测结果给出的地壳结构、断层参数、岩体和断层的物理力学性质等建立模型, 根据大地测量结果等确定边界条件, 在任意初始条件下, 开展黏弹塑性有限元计算. 中国大陆内部地震与断裂带切割的活动地块变形密切相关^[40], 地震触发往往还与孔隙流体作用有关, 开发被断层切割的孔隙

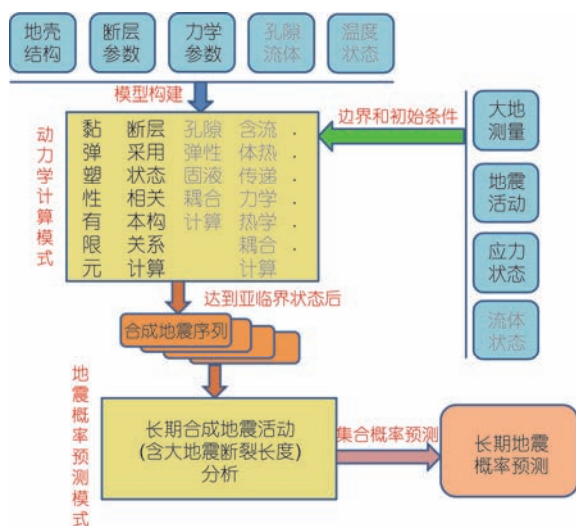


图2 时间无关长期地震概率预测技术路线图

Figure 2 Time-independent long-term earthquake probabilistic forecast flow chart

黏弹塑性体内应力、变形和破裂的计算程序是本系统中的核心,即图2中的动力学计算模式。计算中随时间增长和应力变化,一个单元屈服破坏,代表一个小地震;一个单元屈服破坏诱发多个单元相继屈服破坏,代表大地震。从错动量和错断的断层面积可以计算相应的地震震级。单元的屈服破坏可以试着采用不同的准则,例如库仑-摩尔破坏准则、塑性屈服准则、或者断层速度-状态相关的本构关系等。计算最初的结果受初始条件强烈影响,不能作为讨论的依据。在计算足够长时间步长后,模型进入亚临界状态,计算结果可以形成人工合成地震目录。计算的位移场可以与实际GPS测量比较,计算的应力场可以与实际应力测量和震源机制比较。在模拟结果与实际观测结果大体一致时,

可以认为该模型一定程度上反映了实际地质构造运动情况。根据这样得到的人工合成地震目录可以分析不同地点地震震级、复发频率、G-R关系等地震活动性特征。这种模型与UCERF3-TI类似,提供的是长期时间无关的地震速率,从而作出预测。

应该指出,每一个算例都是确定性的,但是由于模型参数、边界条件、初始条件的不确定性,只计算一个算例是不够的,要在合理范围内调整模型参数计算大量算例。另外,也可以采用不同的计算程序,例如断层错动不是采取塑性屈服原则,而是采用断层状态相关和速度相关的本构关系,也可以产生相应的一系列算例提供结果。对所有结果适度加权可以产生未来地震发生的集合概率预测。从大量人工合成地震目录计算未来地震发生的集合概率,由图2中的地震概率预测模式完成,这种模型与时间无关的UCERF3-TI类似,产生的是长期平均的地震概率。

我们已经发展了有关计算方法和程序^[41]。以青藏高原东北缘为例进行了初步研究。研究区域的黏弹塑性有限元模型如图3所示。模型包含了研究区域内一些主要断层。边界条件由区域边界附近GPS测量结果插值而定。计算进行了50000年后,断裂系统已经进入亚临界状态,依据50000~70000年计算产生了该区域人工合成地震目录绘出的M-t图(图4)。

该区域有些部分有考古地震研究成果^[43],9000年来识别出24次大地震,平均时间间隔368年。其中海原断层10次(41%)、香山天景山断层5次(21%)、贺兰山断层5次(21%)、罗山断层4次(17%)。计算模型20000年来7级以上地震69次,平均时间间隔280年。其中海原断层44次(64%)、香山天景山断层17次(25%)、贺兰山断层5次(7%)、罗山断层3次(4%)。虽然考古地震资料是比较粗糙的,但是计算与观测到的地震发生频度相对高低的排序是吻合

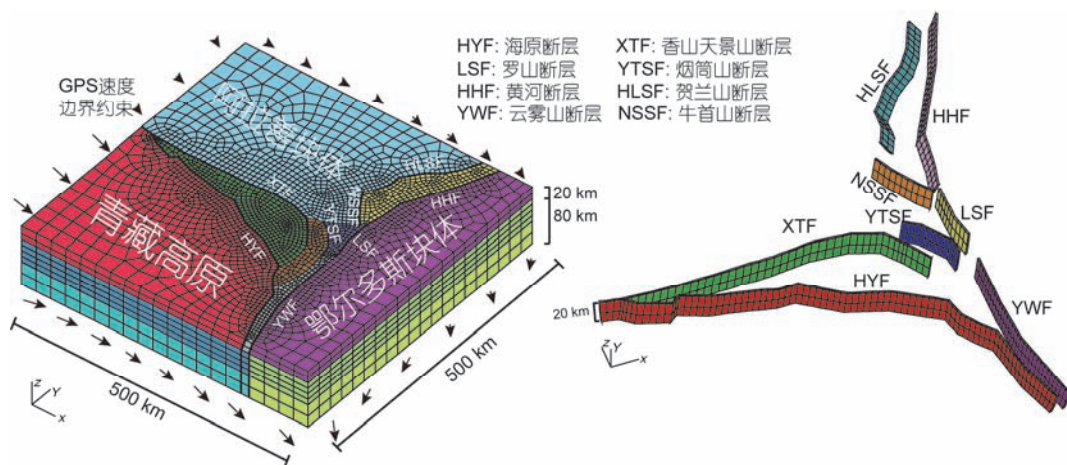


图3 青藏高原东北缘断裂体系和地震活动计算模型,主要断层在右侧显示。修改自文献[42]

Figure 3 Fault system and seismicity computation model of northeastern Tibetan Plateau, with major faults shown on the right. Modified from Sun and Luo^[42]

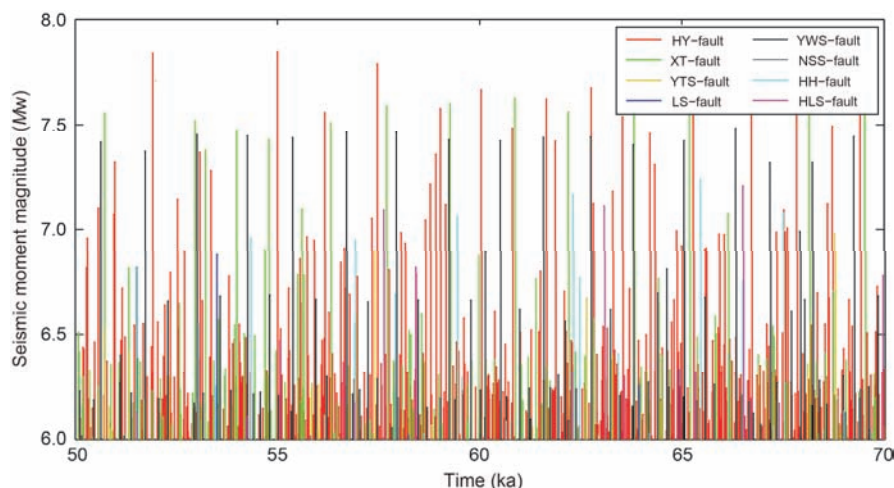


图4 模拟区域从50000~70000年的人工合成地震目录,不同断层上发生的地震用不同颜色表示.这8条断层的名称和位置已在图3中解释和显示

Figure 4 Synthetic earthquake catalog in the simulated region from year 50000—70000. Earthquakes that occur on different faults are represented by different colors. The names and locations of the 8 faults have been explained and shown in Figure 3

的. 计算的地震平均间隔时间 280 年似乎显著低于观测值 368 年,但这可能是因为计算区域比考古地震研究区域要大,例如海原断层有近一半段落尚没有进行考古地震考察,如果除去发生在地震考古区域以外的 20 个合成地震,则计算平均间隔为 390 年,略大于观测值. 这些结果表明计算模拟在一定程度上反映了区域地震活动的整体特征.

进一步可以根据人工合成地震目录和地震考古预测分别计算地震转移概率,即一条断层上发生大地震后,下一次大地震发生在本断层上,或其他各断层上的概率(频度). 由于贺兰山、罗山等断层上地震数目太少,因此重点关注海原地震发生后转移到其他断层或仍然在本断层发生的概率(频度). 结果见图 5, 计算结果与实际观测显示不错的吻合,结果尚可令人乐观. 是否可以利用人工合成目录展示的大地震发生在不同断层间的转移概率去预测一次大地震后,下一次大地震发生地点的概率,是一个值得进一步探讨的问题.

4.2 中长期时间相关地震概率预报

中、长期时间相关地震数值预测方面的技术路线图见图 6. 其基本构架与长期时间无关地震概率预报模式类似,但关键不同点是,模拟从一特定选择的时间点(例如几十年前)开始,给定该时刻初始应力状态,使得应力演化过程中能够重现历史上发生过的大地震序列,然后继续计算未来可能发生的地震序列,从而达到能够进行预测的目标.

给定几十年前地壳内各点的初始应力?乍一看似乎是不可能完成的任务. 然而这个问题可以这样来尝试. 初始应力的给定要区分两种情况:对于发生过大地震的特定部位,由于地震破裂时应力应该达到了断层强度,所以如果对构造应力增加速率和断层强度有大致了解,则可以在

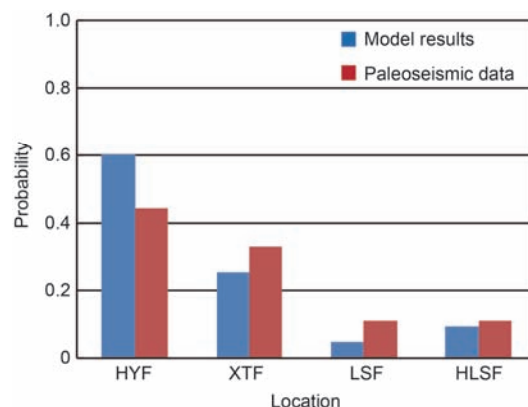


图5 海原地震后下一个地震发生在哪一个断层的转移概率(频度),蓝色柱体为人工合成地震目录 44 个地震的统计结果,红色柱体为地震考古 10 个地震的统计结果. 修改自文献[42]

Figure 5 Transfer probability (frequency) of earthquake occurred in different fault next to earthquakes in Haiyuan fault. The blue columns show the statistics of 44 synthetic earthquakes. The red columns show the statistics of 10 paleoearthquakes. Modified from Sun and Luo^[42]

忽略其他历史地震对该部位应力影响的条件下,从地震时向前反推出模拟时间起点时的大致应力状态. 例如图 7 中历史地震 1,知道它的发震时间和岩石强度的话,又在特定边界条件下可以模拟计算出该处构造应力增长速率,这样就可以估算出该处起始时刻的应力状态. 历史地震 2 可以类似决定,不过历史地震 1 可能对它应力积累过程有点影响,这种影响需要在迭代中矫正. 类似地,估计出所有发生过历史大地震处的初始应力状态. 对于没有发生过大地震的绝大多数地方,无法确切了解,但由于它们一直没有发生地震,应力上限应该低于一定的水平(图 7 中的粗绿虚线);地壳系统应力总体可能处于亚临界状态,因此预期

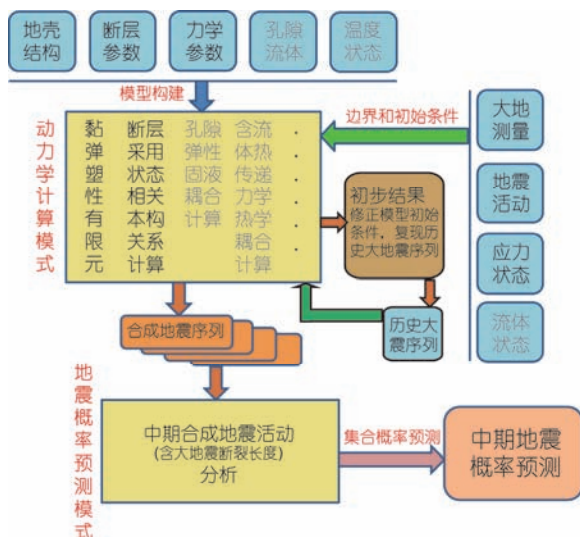


图6 时间相关中、长期地震概率预测技术路线图

Figure 6 Time-dependent medium and long-term earthquake probabilistic forecast flow chart

不会太低,可以指定一个合理的地壳应力下限.对于一个算例,没有发生过历史地震地区的初始应力,可以在一定的范围内随机产生.对每一个算例都可以计算模拟从时间起点到现今的大地震序列.如果算例不能在时空震级上

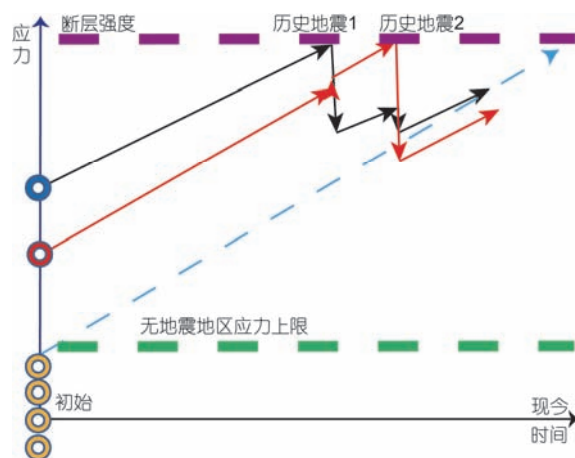


图7 地壳应力随时间演变示意图.在给定边界条件下,各处的应力增长速率可以在模拟中计算出来.发生过历史地震处:初始应力=断层强度-应力增加率 $\times$ 地震时间(如图中的蓝圈和红圈);没有发生过地震处,应力在绿色粗虚线下的范围内随机产生(如图中的橙色圆圈)

Figure 7 Evolution of crustal stress over time. Under given boundary conditions, the stress growth rate at each location can be calculated in the simulation. Where historical earthquakes have occurred: the initial stress=fault strength-stress increase rate $\times$ seismic time (as shown in the figure blue circle and red circle); where no earthquake occurred, the stress is randomly generated within the range under the thick green dashed line (orange circles in the figure)

重复历史地震序列,则需要对初始条件或模型参数微调,直到模型模拟的地震序列能够完全重现历史地震序列为止.对这样成功的算例,可以继续计算今后数十年,什么时候在哪里发生多大地震,作为预测的基础.

这种模拟复现历史地震迁移过程,探索未来地震发生趋势的思路,王仁等人^[44]1980年就曾经提出.当然这样一个单一的算例,模拟虽然能够重复历史地震序列,但并不能令人信服,它显示今后发生的地震,不一定会发生,因为它的初始条件太具随意性.但是我们可以随机生成初始应力为不同状态的成千上万的算例,而且这成千上万个算例都能够重现历史地震序列,那么它们预测的结果的集合,就有可能提供我们对未来地震活动的概率估计.我们已经在二维模拟中进行了这种试验^[45].利用GPS约束的边界条件,在弹性模型中计算了青藏高原地区各地的构造应力增长速率.根据上述原则,计算了1000个算例,它们都能够复现1904~2014年26个 M_w 大于6.8大地震,综合它们的结果,图8显示了模拟预测的2015~2114年百年内青藏高原内发生大地震可能性最大的断层段落.

这种模型与UCERF3-TI类似,是中长期预报中考虑时间相关因素的预测模型.这种思路是否可行,还要在实践中考验和改进.固然,把二维弹性模型推广到三维黏弹性模型,把仅考虑7级以上大地震推广到6级以上的地震,还有许多困难.既包括地质上对活动断层的掌握不够,也包括对岩体或断层强度和物性了解不够,计算程序和计算能力仍然不足.如果能够对6级以上地震开展预测研究,则可以有更多的检验、比较的机会,考验和完善地震数值预测的思路和方法.

4.3 地震短临概率预报

关于地震短临预报,是世界公认的难题.中国地震局陈建民^[46]曾撰文表示“中国先后对20多次^[47]地震作出了较为成功的预报,为当地政府的震前准备、震后应急处置和救援,以及稳定社会等起到了非常重要的作用,大大减轻了人员伤亡和财产损失,取得了显著的减灾效益”.不过把有所预测或预报的地震数目与全部破坏性地震数目可以作一比较,例如1990~2001年的12年间共130次地震成灾事件中,仅有13次成灾地震有所预测或预报,占10%^[48].意大利国际民防地震预报委员会则“确认没有一种短期预测大地震的方法被证明是可靠和有效的”.“虽然诊断性前兆的探索应当继续作为基础研究的一部分,但委员会对于在不久的将来诊断性前兆将会为确定性地震预测提供可操作的基础并不乐观.最可行的战略是加速发展概率地震预报^[23]”.

对于地震短临概率预报,我们还没有成熟的设想.一种可能的方案是类似UCERF3-ETAS的做法,先对大地震的余震或临近断层的续发地震进行概率预报探索.

(i) 库仑应力的计算和应用.大地震后的同震和震

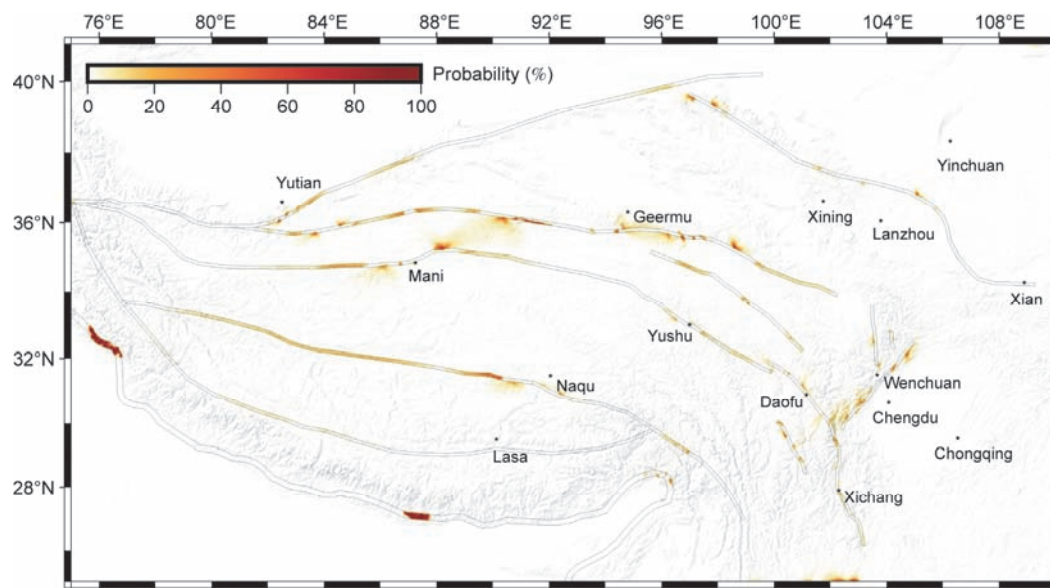


图8 利用本节科学思路的二维模拟,对青藏高原2015~2114年的百年地震危险性的估计

Figure 8 100-year probability of earthquakes in the Tibetan Plateau, based on two-dimensional simulation of scientific ideas in this section

后效应对余震和后续其他断层上的地震活动性通过库仑应力作用而产生的影响是一个近20年来人们关注的问题。库仑应力变化模型已用于在伊斯坦布尔^[49]、东京^[50]和其他地区构建中期预报震例。虽然库仑应力增加有利于触发余震在物理上似乎是合理的,但实际问题有时未必如期待的那么简单,Parsons^[51]对全球基于已知断层走向的代表性地震样本的研究认为只有61%的触发事件发生在库仑应力增加的区域。不过在库仑应力的计算和与余震关系的统计中有些问题早期的研究考虑并不周到。过去库仑应力多为按半无限空间或分层介质简单模型进行计算,张贝等人^[52]发展了可以对考虑地球曲率地形和横向不均匀性的特大地震库仑应力的数值计算方法以后,许多问题得到新的结果。黄禄渊等人^[53]发现,以智利2010年Maule M_w 8.8地震为例,如果按主震破裂面投影计算库仑应力,仅63%余震落在库仑应力变化大于10 kPa区域内,但按投影到最优破裂方向的库仑应力变化则显示71%余震落在库仑应力变化大于10 kPa的区域内。瞿武林等人^[54]发现,2004年苏门答腊 M_w 9.3地震余震原来被认为余震落在库仑应力增加区的比例并不高,甚至被认为不到50%^[55],然而,使用球形对称模型计算,有67.6%的余震发生在库仑应力增加区,而使用横向不均匀球形地球模型时,计算的这一比率可高达72.3%。因此,把横向不均匀地球内的库仑应力数值计算作为地震数值短临预测的一个切入点,仍然不失为可能的选择之一。

在具体操作上,与我们前面设想的中长期数值预测技术路径不同,不妨参考UCERF3-ETAS的做法,在统计模型的基础上,增加物理的考虑。数值计算同震和震后应力

变化,参照这种变化修订统计模型中对后续地震发震概率的估计。

(ii) 人为和自然的地震触发因素。地震短临数值预测研究中的另一个重点是人类活动引起的载荷和孔隙流体压力变化对地震的触发作用,例如水库地震^[56]、各种目的的钻井注水地震,如废水注入钻孔^[57]、地热开发^[58]、页岩油气开发^[59,60]等引人注目的现象,这些地区的地震比起天然地震孕育过程来,人们对边界条件有更多的了解和控制,孕震区域空间尺度比较小,应力状态的变化过程更为迅速,并且往往可以建立密集台站全程监测这种变化,因此可以成为数值模拟认识地震孕育发生的很好的试验场。近年来在数值模拟它们的触发过程中有许多研究成果^[61,62]。

另外自然界对地震触发因素的数值模拟研究也是一个重要课题。例如旱季和雨季交替对地壳变形和地震活动性的影响^[63]。与人为因素相比,虽然强度一般较小,但涉及的面积大,持续的时间长,对研究天然地震的触发更有意义。潮汐触发是另一个重要的自然触发因素。月球深震受地球潮汐作用触发明显。地球受月球的潮汐应力量级要小很多,因此没有那么明显,但Heaton^[64]早在1975年对中、强震研究表明,较大浅震(<30 km)斜滑和倾滑地震是由潮汐应力触发的;而浅源走滑地震或任何类型的中、深源地震,都没有发现触发效应。Tanaka等人^[65]统计了9350个5.5级以上地震,也认为走滑断层与潮汐无关,逆断层和正断层显示相关性。最近的研究还发现低频地震与潮汐应力也有关系^[66]。对潮汐触发作用的定量研究,也许为今后短临预报高发震概率时段提供依据。

(iii) 地震前兆物理机制和时空演变分布的数值模拟。半个多世纪以来, 中国地震预报主要依靠经验预测, 虽然漏报了主要的大地震, 但毕竟也成功地预测了少量破坏性地震, 并取得了一定社会效益。进一步研究前兆的物理机制, 从实验和理论上对前兆时空演变特征加深了解, 是一个重要的理论和实际问题。实验表明岩石破裂前出现亚失稳应力状态^[67], 如何在实际观测中才能识别和利用它识别前兆呢? 马瑾^[68]指出可能与台网覆盖率、仪器分辨率和频率范围等有关, 被活动断裂切割的地体中亚稳态部位与地震位置也可能存在“场兆”与“源兆”复杂关系。在野外实际条件下, 这种亚失稳应力状态的时空分布和演变特征是什么样的? 需要用多密集的台网, 什么样的频率和分辨率的仪器才能观测到前兆? “场”与“震源”的关系是怎样的? 微破裂如何发展成破裂链^[69], 数值模拟对在复杂地质构造条件下应力场演变和逼近亚稳态时的特征可以提供进一步的了解。Crampin 等人^[70,71]一直强调监测应力变化作为发现地震前兆的可能性和重要性, 陈颙等人^[34]利用气枪震源已经具备长期监测潮汐应力引起的地震波速变化的能力, 如果开展这类密集观测, 并与数值模拟区域应力场变化结合起来, 应该可以对亚失稳应力状态的地震前兆有更深刻的认识和识别能力。

5 讨论和结论

(i) 地震数值预报与现行经验预报的关系。气象预报从提出到比较成功地在实际预报中应用, 走过了半个世纪。地震数值预报要实现实用化, 恐怕会经历更加漫长艰辛的过程, 经验预报和基于经验而发展的统计预报, 在很长时间内仍然是地震预测中的主要方法。此外, 即使有了地震数值预报, 并不意味着排斥经验预报和数据统计预报。地震研究中不断有新技术手段、不断有新现象被发现、人类对他们的认识总是从感性到理性, 因此即使在未来, 也会不断有新的感性经验, 经验预报也会不断更新和提高。固然仅仅依靠积累经验, 特别是对于发生频度很低的大地震积累经验是不够的, 积累经验是缓慢而漫长的过程, 获得的经验也充满了不确定性。物理研究和数值预报也许有一天会成为主导, 但即使那时也会与统计预报和经验预报并存。

(ii) 经验预报与统计预报。2008 年汶川地震后中国地震局反思中提出的预报人员“经验明显不足, ‘经验’出现了断层”问题, 反映出我国地震预报中的一个突出问题, 预报很大程度上依赖预报者个体的定性的技能和经验, 缺乏把经验量化、一代一代的可靠传承。我国从 1966 年开始地震预报探索时, 这类问题就开始出现, 例如那时有所谓磁暴二倍法, 但众多的磁暴, 怎样选取两个磁暴去做二倍法, 完全是个人的经验。几十年来类似的情况并不少见。因此, 虽然目前的统计预报仍旧是基于地震活动性或其他

前兆, 本质上仍然是经验预报, 但把简单的定性的经验预报, 提高到严格的定量化的统计预报, 仍然是一个重要的任务。即使在过渡的过程中, 可能会淘汰现有的某些经验预报准则, 也是值得的。随着大数据和人工智能的发展, 利用人工智能对大数据深度挖掘, 也有可能找出一些我们初级经验预报中认识不到的经验规律, 产生新的更有效的统计模型。在统计预报和大数据挖掘利用过程中, 也可以提高研究人员的数理素质和超级计算机技能, 为地震数值预报的发展创造条件。当然, 虽然地震研究中存在大数据, 例如通过噪声地震成像新技术, 把过去的极大量的地震记录中的“噪音”变成了宝贵的数据, 但是对于地震预报、特别是特大地震的预报来说, 大数据可能还只是“伪”大数据, 我们只有几个 8 级以上地震的经验, 几十个 7 级地震的经验, 在研究特大破坏性地震预测时, 对此要有清醒的认识。

(iii) 为什么要开展地震数值预报研究。既然地震数值预报在可预见的将来上不可能投入实用, 为什么要大力促进地震数值预报的研究呢? 因为地震数值预报将更新我们地震预报研究的科学思路, 改变我们地震工作的战略部署, 对发展地震科研起先导作用。

在地震科学研究思路和地震工作的战略部署上, 如果强调的是经验预报, 则期望的是找到一种不漏报、不虚报的有效手段或方法, 不管是上天还是下地, 不管是地震、地形变、电磁、还是地下水, 能抓住地震前兆就是好方法。而如果要开展地震数值预报, 其基本关注点是如何量化地认识地应力超过岩体断层强度而破裂的物理过程, 地震预测技术手段的研发上、台站网络的布局和建设上, 要有主次、有重点、必要时组织攻关突破。

地震数值预报的研究将对地震科研起先导作用, 带动地震科学和地震预报研究的发展。地震数值预报研究, 对地震孕育发生的物理过程研究有更直接和迫切的要求, 对了解岩石圈的结构、状态和物理力学性质以及岩石圈动力学相关的各种动态观测有更具体的需求, 反之也使这些基础性研究和资料能更直接地发挥实际作用, 而不是基础研究与实际经验预报两层皮。地震数值预报研究必将引起巨大的新思考和新变化, 对地震科研和地震工作发挥促进和先导引领作用。数值地震预测研究自身短期内虽然不会成为主要地震预测手段, 但它促进的高性能计算和大数据分析, 也会促进从简单的经验预报向统计经验预报转化, 并逐步增加预报中对物理机制的考虑, 有助于把我国目前的经验预报提高到新水平。

(iv) 地震预测评估体系。地震预测需要科学的评估方法和体系。对一种方法、一种手段、一个单位或个人, 究竟预报能力如何? 不能“以一时一事论英雄”, 而需要一种客观、科学、均一的评价打分方法, 对足够长的一段时间和足够数量的预测进行整体评价。我国过去确定性的预报, 曾经采用 R 评分方法^[72], 但是对概率性地震预测的评价尚未开展。我国一贯侧重于地震预报的研究, 对如何评估预

报相对研究较少. 国外有许多工作值得借鉴^[73-76]. 不仅要发展评估的科学方法, 而且要设立相应的机构来执行评估. 例如南加利福尼亚州地震中心(Southern California Earthquake Center, SCEC)得到了 Keck 基金会(W. M. Keck Foundation)120 万美元资助建设“地震可预测性协作实验室”(CSEP-Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)的基础设施, 主要目标是对断层系统破裂的预测进行严格的评估. 它联合世界各国组成一个虚拟的、分布式的协作实验室, 其网络基础设施足以支持全球地震可预测性研究计划. CSEP 测试中心评估了 442 个以上的模式, 包括加利福尼亚州、西太平洋和全球不同地区测试不同时间尺度(30 min、1 天、3 个月、1 年和 5 年)的预测^[77]. 我国在这方面需要给予更多的关注和投入.

(v) 地震预报发布决策系统的建立. 随着地震概率预测研究的发展, 我们的预测工作会越来越“透明”, 但在预报发布、特别是短临预报最后是否发布警报、如何发布警报, 科学决策的问题会越来越突出. 在文化大革命的年代, 常常会有这样的情景出现, 行政领导对科研人员说, “你们就大胆地报吧, 责任我们承担”. 在当时工业化、信息化程度很低的年代, 发布警报也无非是工厂停产, 人员转移到空地, 住几天帐篷或窝棚, 经济损失有限. 今天无论是没有预防措施条件下发生破坏性地震造成的经济损失, 或者是虚报地震后造成的经济损失和社会效应, 都远远大于半个世纪前. 目前欧美的可操作地震预测系统面临的一个重要困难就是, 那种虽然高概率增益、但低发生概率的地震预测, 如何向公众发布、应该采取何种措施的问题. 仅仅简单地确定地震概率阈值以指导警报等级是远远不够的. 地震预报发布决策系统, 应该对代价和收益量化权衡, 才能决策. 因此, 对于一个地区, 白天或夜间, 多大的地震会造成多大的经济损失和人员伤亡, 要有定量的估计; 反之, 对于不同等级的地震预报和相应措施, 如果地震发生会取得什么样的收益, 如果地震不发生会造成多大的经济损失和社会影响, 也要有定量的估计. 只有这样, 才能根据预测地震的位置、大小和发生的概率, 确定在地震学家做出预测后, 是否发布、如何发布预报和采取什么样的预防措施.

(vi) 地震数值预测系统与群策群防. 群策群防也是地震预报工作中曾经引起争议的问题. 地震数值预测虽然无疑是高科技, 但在地震数值预测系统中, 群策群防工作也有重要的地位. 它主要涉及地震数值预测的最后一环, 也是是否能够取得社会效益的最关键一环, 即敢不敢、能

不能及如何发布地震预报和预警问题. 地震数值预测系统中的群测群防工作, 首先是普及地震科学知识, 了解什么是地震预报、什么是地震预警, 能够在不同等级的预报、预警下, 采取正确的应对措施, 而不会陷于慌乱. 上一节谈到的地震预报发布决策系统, 强烈地依赖于公众的知识水平和发布机构与公众的交流能力. 信息化社会的发展, 也使得群策群防与几十年前不同, 可以采取更丰富的形式, 具备更深刻的内涵. 例如可以开发一些手机 App, 不仅便于群众及时向地震机构上报宏观异常^[78], 地震机构迅速向群众普及地震知识和通告地震信息. 而且可以把每一台手机变成一台强震仪^[79], 在地震波到达之时, 能用人工智能自动从干扰中识别地震的 P 波、S 波, 提供给地震预警系统^[80], 这将大大提高预警系统的能力, 特别在特大地震断层破裂向数百公里外延伸的情况下, 其功效有可能超过目前有限数目的专业地震台网. 甚至特大地震破坏了手机基站的情况下, 失去信息联络也是一种信息, 它告诉我们哪些区域烈度最高、破坏最严重, 是最需要救援的地区.

(vii) 中国地震数值预报路线图实施可能性. 在 2007~2020 年的《国家地震科学技术发展纲要》中, 明确写入了在“国家地震减灾科学计划”中, 应该安排“地震数值预测试验研究”的专项. 但在数十万字的汶川地震的反思中, 地震数值预报没有被提到. 过去十多年中, 关键词为“地震数值预报”的学术文章也不过寥寥数篇^[3-5,81-84]. 但是, 这种情况近年来开始有了转变. 一些研究所的科研指南中开始提出了地震数值预报问题. 国家自然科学基金委员会——中国地震局地震科学联合基金 2018 年度项目指南中首次列入了“地震数值预测探索”. 《国家地震科技创新工程》的“解剖地震”计划, 可以为地震数值预报提供更坚实的物理学基础, 而“透明地壳”计划的实施, 可以提供更丰富地壳结构、状态、物性资料, 成为数值预测建模的具体依据; 反之地震数值预测探索可以服务于“韧性城乡”和“智慧服务”. 我国在地震孕育和发生的数值模拟方面, 也有许多学者开展了探讨和研究^[41,85-87], 为地震数值预测的探索打下了基础. 气象方面, 关于数值预报, 中国气象局在 2016 年底已经有了清晰的路线图. 地震数值预报虽然和天气数值预报远不在一个水平, 但希望本文可以起到一个抛砖引玉的作用, 从现在到 2020 年, 可以理清学术界科学思路, 制定一个我国地震数值预测发展的路线图. 在 2021~2030 年的时间内, 初步建立起一个地震数值预测系统的综合、开放、先进的基础架构, 在这样一个架构下, 使我国地震数值预报起步研究踏上征途.

致谢 感谢两位审稿人的意见. 本研究得到国家自然科学基金重大项目(41590865)和中国科学院国际合作创新团队(Y329002JED2)资助.

推荐阅读文献

- 1 Scientific Working Committee Bureau System Report Group. Scientific summary and reflection report of Sichuan 5.12 Wenchuan M8.0 earthquake (in Chinese). February 2009 [科学工作委员会局系统报告组. 四川 5.12 汶川 8.0 级地震科学总结与反思报告. 2009 年 2 月]
- 2 Wenchuan Earthquake Summary and Reflections Earthquake Prediction Working Group. Wenchuan earthquake scientific summary and reflection report (earthquake prediction) (in Chinese). February 12, 2009 [汶川地震总结与反思地震预报工作组. 汶川地震科学总结与反思报告(地震预报领域). 2009 年 2 月 12 日]
- 3 Liu Q Y, Wu J C. On numerical forecast of earthquakes—Thinking about the strategy for promoting earthquake prediction (in Chinese). *Geosci Front*, 2003, 10: 217–223 [刘启元, 吴建春. 论地震数值预报——关于我国地震预报研究发展战略的思考. 地学前缘, 2003, 10: 217–223]
- 4 Shi Y L, Zhang B, Zhang S Q, et al. Earthquake numerical prediction (in Chinese). *Physics*, 2013, 42: 237–255 [石耀霖, 张贝, 张斯奇, 等. 地震数值预报. 物理, 2013, 42: 237–255]
- 5 Shi Y L, Zhang B, Zhang S Q, et al. On numerical earthquake prediction. *Earthq Sci*, 2014, 27: 319–335
- 6 Rice J R. Constitutive relations for fault slip and earthquake instabilities. *Pure Appl Geophys*, 1983, 121: 443–475
- 7 Milne J. Seismic science in Japan. *Trans Seismol Soc Jpn*, 1880, 1: 3–33
- 8 Gilbert G K. Earthquake forecasts introduction. *Science*, 1909, 29: 121–138
- 9 Landsberg H. The problem of earthquake prediction. *Science*, 1935, 82: 37
- 10 Wood H O, Gutenberg B. Earthquake prediction. *Science*, 1935, 82: 219–220
- 11 Press F, Brace W F. Earthquake prediction. *Science*, 1966, 152: 1575–1584
- 12 Hagiwara T, Rikitake T. Japanese program on earthquake prediction. *Science*, 1967, 157: 761–768
- 13 Mogi K. Recent earthquake prediction research in Japan. *Science*, 1986, 233: 324–330
- 14 Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 1973, 181: 803–810
- 15 Main I G, Bell A F, Meredith P G, et al. The dilatancy-diffusion hypothesis and earthquake predictability. *Geol Soc London Spec Publ*, 2012, 367: 215–230
- 16 Fu C Y. Several questions about earthquake prediction (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1963, 8: 30–36 [傅承义. 有关地震预告的几个问题. 科学通报, 1963, 8: 30–36]
- 17 Bakun W H, Lindh A G. The Parkfield, California, earthquake prediction experiment. *Science*, 1985, 229: 619–624
- 18 Geller R J. Earthquake prediction: A critical review. *Geophys J Int*, 1997, 131: 425–450
- 19 Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 1997, 275: 1616–1617
- 20 Jackson D D. Hypothesis testing and earthquake prediction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93: 3772–3775
- 21 Marzocchi W, Zechar J D. Earthquake forecasting and earthquake prediction: Different approaches for obtaining the best model. *Seismol Res Lett*, 2011, 82: 442–448
- 22 Chen Y T. Earthquake prediction: Retrospect and prospect (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39: 1633–1658 [陈运泰. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1633–1658]
- 23 Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, et al. Operational earthquake forecasting—State of knowledge and guidelines for utilization. *Ann Geophys*, 2011, 54: 351–391
- 24 Chen Y T. Operational Earthquake Prediction (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2015 [陈运泰. 可操作的地震预测预报. 北京: 中国科学技术出版社, 2015]
- 25 Marzocchi W, Lombardi A M, Casarotti E. The Establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy. *Seismol Res Lett*, 2014, 85: 961–969
- 26 Field E H, Jordan T H, Jones L M, et al. The potential uses of operational earthquake forecasting. *Seismol Res Lett*, 2016, 87: 313–322
- 27 Field E H, Arrowsmith R J, Biasi G P, et al. Uniform California earthquake rupture forecast, version 3 (UCERF3)—The time-independent model. *Bull Seismol Soc Am*, 2014, 104: 1122–1180
- 28 Page M T, Field E H, Milner K R, et al. The UCERF3 grand inversion: Solving for the long-term rate of ruptures in a fault system. *Bull Seismol Soc Am*, 2014, 104: 1181–1204
- 29 Field E H, Milner K P, Hardebeck J L, et al. A spatiotemporal clustering model for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3-ETAS): Toward an operational earthquake forecast. *Bull Seismol Soc Am*, 2017, 107: 1049–1081
- 30 Ogata Y, Zhuang J C. Space-time ETAS models and an improved extension. *Tectonophysics*, 2006, 413: 13–23
- 31 Donnellan A, Rundle J, Fox G, et al. QuakeSim and the solid earth research virtual observatory. *Pure Appl Geophys*, 2006, 163: 2263–2279

- 32 Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Active tectonics and earthquake activities in China (in Chinese). *Geosci Front*, 2003, 10: 66–73 [邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造与地震活动. 地学前缘, 2003, 10: 66–73]
- 33 Wu Z L. Apparent stress obtained from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its seismological significance (in Chinese). *Earthq Res China*, 2001, 17: 8–15 [吴忠良. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义. 中国地震, 2001, 17: 8–15]
- 34 Chen R, Wang B S, Yao H J. Seismic air gun exploration of continental crust structures (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2017, 47: 1153–1165 [陈颀, 王宝善, 姚华建. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用. 中国科学: 地球科学, 2017, 47: 1153–1165]
- 35 Liu Z R. A graticule for the macroseismic determination of the depth of focus of an earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1961, 10: 113–119 [刘正荣. 同宏观方法测定震源深度的量版. 地球物理学报, 1961, 10: 113–119]
- 36 Xie X B, Zheng T Y, Yao Z X. Methods of synthetic seismograms—A review (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1992, 35: 790–801 [谢小碧, 郑天愉, 姚振兴. 理论地震图计算方法. 地球物理学报, 1992, 35: 790–801]
- 37 Zhang H, Zhou Y Z, Wu Z L, et al. Finite element analysis of seismic wave propagation characteristics in Fuzhou basin (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 1270–1279 [张怀, 周元泽, 吴忠良, 等. 福州盆地强地面运动特征的有限元数值模拟. 地球物理学报, 2009, 52: 1270–1279]
- 38 Zhang W, Zhang Z G, Chen X F. Three dimensional elastic wave numerical modeling in the presence of surface topography by a collocated-grid finite-difference method on curvilinear grids. *Geophys J Int*, 2012, 190: 358–378
- 39 Zhao H Y, Chen X F. Simulation of strong ground motion by the 1975 Haicheng $M_S7.3$ earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 2707–2715 [赵宏阳, 陈晓非. 1975年海城 $M_S7.3$ 地震强地面运动模拟. 地球物理学报, 2017, 60: 2707–2715]
- 40 Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2013, 43: 1607–1620 [张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1607–1620]
- 41 Zhang H, Wu Z L, Zhang D N, et al. Virtual Chuandian—A parallel numerical modeling of Sichuan-Yunnan regional strong earthquake activities: Model construction and parallel simulation (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2009, 39: 260–270 [张怀, 吴忠良, 张东宁, 等. 虚拟川滇—基于千万网格并行有限元计算的区域强震演化过程数值模型设计和构建. 中国科学: 地球科学, 2009, 39: 260–270]
- 42 Sun Y Q, Luo G. Spatio-temporal migration of earthquakes in northeastern Tibetan Plateau: Insights from a finite element model (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2018, 61: 2246–2264 [孙云强, 罗纲. 青藏高原东北缘地震时空迁移的有限元数值模拟. 地球物理学报, 2018, 61: 2246–2264]
- 43 Min W, Zhang P Z, Deng Q D. The preliminary research on the regional paleoearthquake recurrence behavior (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2000, 22: 163–170 [闵伟, 张培震, 邓启东. 区域古地震复发行为的初步研究. 地震学报, 2000, 22: 163–170]
- 44 Wang R, He G Q, Yin Y Q, et al. A mathematical simulation for the pattern of seismic transference in north China (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 1980, 2: 34–44 [王仁, 何国琦, 殷有泉. 华北地区地震迁移规律得数学模拟. 地震学报, 1980, 2: 34–44]
- 45 Dong P Y, Hu C B, Shi Y L. Numerical Simulation of stress evolution and earthquake sequence of the Tibetan Plateau. *EGU General Assembly*, 2015, 17: EGU2015-624
- 46 Chen J M. Honoring the 30th anniversary of the Tangshan earthquake and solidly promoting China's earthquake prevention and disaster mitigation. July 15, 2006 [陈建民. 纪念唐山地震 30 周年扎实推进我国的防震减灾事业. 2006 年 7 月 15 日, http://www.sxdzj.gov.cn/manage/html/8abd83af1c88b3f2011c88b74299001f/_content/09_04/01/1238570012694.html]
- 47 Yue M S. Reflections on the development strategy of earthquake prediction research (in Chinese). *Recent Dev World Seismol*, 2005, (5): 7–21 [岳明生. 地震预测研究发展战略几点思考. 国际地震动态, 2005, (5): 7–21]
- 48 Chen Q F. Earthquake prediction in China: Discussions after the 2008 Wenchuan earthquake (in Chinese). *Quat Sci*, 2010, 30: 721–735 [陈棋福. 汶川地震引发的中国地震预报探讨. 第四纪研究, 2010, 30: 721–735]
- 49 Parsons T, Toda S, Stein R S, et al. Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation. *Science*, 2000, 288: 661–665
- 50 Stein R S, Toda S, Parsons T, et al. A new probabilistic seismic hazard assessment for greater Tokyo. *Philos T R Soc A*, 2006, 364: 1965–1988
- 51 Parsons T. Global Omori law decay of triggered earth-quakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2002, 107: 2199
- 52 Zhang B, Zhang H, Shi Y L. Equivalent-bodyforce approach on modeling elastic dislocation problem using finite element method (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1666–1674 [张贝, 张怀, 石耀霖. 有限元模拟弹性位错的等效体力方法. 地球物理学报, 2015, 58: 1666–1674]
- 53 Huang L Y, Zhang B, Qu W L, et al. The co-seismic effects of 2010 Maule earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 972–984 [黄禄渊, 张贝, 瞿武林, 等. 2010 智利 Maule 特大地震的同震效应. 地球物理学报, 2017, 60: 972–984]

- 54 Qu W L, Zhang B, Huang L Y, et al. Coulomb stresses induced by the 2004 M_w 9.3 Sumatra earthquake (in Chinese). *J Univ Chin Acad Sci*, 2017, 34: 86–98 [瞿武林, 张贝, 黄禄渊, 等. 2004 年 M_w 9.3 苏门答腊地震产生的库仑应力. *中国科学院大学学报*, 2017, 34: 86–98]
- 55 Miao M, Zhu S B. A study of the impact of static Coulomb stress changes of megathrust earthquakes along subduction zone on the following aftershocks (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 2982–2993 [缪森, 朱守彪. 俯冲带上特大地震静态库仑应力变化对后续余震触发效果的研究. *地球物理学报*, 2012, 55: 2982–2993]
- 56 Simpson D W, Leith W S, Scholz C H. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bull Seismol Soc Am*, 1988, 78: 2025–2040
- 57 Hsieh P A, Bredehoeft J D. A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1981, 86: 903–920
- 58 Majer E L, Peterson J E. The impact of injection on seismicity at the Geysers, California Geothermal Field. *Int J Rock Mech Min*, 2007, 44: 1079–1090
- 59 Atkinson G M, Eaton D W, Ghofrani H, et al. Hydraulic fracturing and seismicity in the western Canada sedimentary basin. *Seismol Res Lett*, 2016, 87: 631–647
- 60 Castro-Alvarez F, Marsters P, Barido D P L, et al. Sustainability lessons from shale development in the United States for Mexico and other emerging unconventional oil and gas developers. *Renew Sust Energy Rev*, 2017, 82: 1320–1332
- 61 Cheng H H, Zhang H, Shi Y L. High-resolution numerical analysis of the triggering mechanism of M_L 5.7 Aswan reservoir earthquake through fully coupled poroelastic finite element modeling. *Pure Appl Geophys*, 2016, 173: 1593–1605
- 62 Baisch S, Vörös R, Rothert E, et al. A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. *Int J Rock Mech Min*, 2010, 47: 405–413
- 63 Johnson C W, Fu Y, Bürgmann R. Seasonal water storage, stress modulation, and California seismicity. *Science*, 2017, 356: 1161–1164
- 64 Heaton T H. Tidal triggering of earthquakes. *Geophys J R Astr Soc*, 1975, 43: 307–326
- 65 Tanaka S, Ohtake M, Sato H. Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2002, 107: 2211
- 66 Royer A A, Thomas A M, Bostock M G. Tidalmodulation and triggering of low-frequency earthquakes in northern Cascadia. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2015, 120: 384–405
- 67 Ma J, Sherman S I, Guo Y S. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2012, 42: 633–645 [马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 633–645]
- 68 Ma J. On “whether earthquake precursors help for prediction do exist” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 409–414 [马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起. *科学通报*, 2016, 61: 409–414]
- 69 Teng J W, Zhang Y Q, Yan Y F. Deep process of the rupture of strong earthquakes and exploration for the impending earthquake prediction (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 428–443 [滕吉文, 张永谦, 闫雅芬. 强烈地震震源破裂和深层过程与地震短临预测探索. *地球物理学报*, 2009, 52: 428–443]
- 70 Crampin S, Evans R, Atkinson B K. Earthquake prediction: A new physical basis. *Geophys J R Astr Soc*, 1984, 76: 147–156
- 71 Crampin S, Volti T, Stefánsson R. A successfully stress-forecast earthquake. *Geophys J Int*, 1999, 138: F1–F5
- 72 Shi Y L, Liu J, Zhang G M. An evaluation of Chinese annual earthquake predictions, 1990–1998. *J Appl Probab*, 2001, 38: 222–231
- 73 Zechar J D, Schorlemmer D, Liukis M, et al. The collaboratory for the study of earthquake predictability perspective on computational earthquake science. *Concurr Comp-Pract E*, 2010, 22: 1836–1847
- 74 Zechar J D, Jordan T H. Testing alarm-based earthquake predictions. *Geophys J Int*, 2008, 172: 715–724
- 75 Zhuang J C. Gambling scores for earthquake predictions and forecasts. *Geophys J Int*, 2010, 181: 382–390
- 76 Ogata Y, Katsura K, Falcone G, et al. Comprehensive and topical evaluations of earthquake forecasts in terms of number, time, space, and magnitude. *Bull Seismol Soc Am*, 2013, 103: 1692–1708
- 77 Zechar J D, Gerstenberger M C, Rhoades D A. Likelihood-based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts. *Bull Seismol Soc Am*, 2009, 100: 1184–1195
- 78 Crooks A, Croitoru A, Stefanidis A, et al. Earthquake: Twitter as a distributed sensor system. *Trans GIS*, 2013, 17: 124–147
- 79 Takeuchi K, Kennelly P J. iSeismometer: A geoscientific iPhone application. *Comput Geosci*, 2010, 36: 573–575
- 80 Zambrano A, Perez I, Palau C, et al. Quake detection system using smartphone-based wireless sensor network for early warning. In: *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Budapest: IEEE, 2014. 297–302
- 81 Shi Y L. Earthquake numerical prediction—A dream of drifting, or a realistic way (in Chinese)? *Sci Chin*, 2012, 11: 18–25 [石耀霖. 地震数值预报——飘渺的梦, 还是现实的路? *科学中国人*, 2012, 11: 18–25]
- 82 Huang F Q, Zhang X D, Cao Z X, et al. The roadmap of numerical earthquake prediction in China (in Chinese). *Recent Dev World Seismol*, 2017, 4: 4–10 [黄辅琼, 张晓东, 曹则贤, 等. 关于推进数值地震预测的思考. *国际地震动态*, 2017, 4: 4–10]

- 83 Liu Q Y. Main task of earthquake prediction research: Numerical dynamic forecast (in Chinese). *Recent Dev World Seismol*, 2005, 5: 63–68 [刘启元. 地震预报研究的主攻方向: 动力数值预测. *国际地震动态*, 2005, 5: 63–68]
- 84 Ma T F, Wu Z L. Physical and seismological challenges in numerical earthquake forecasting: A discussion on the key issues in the physics of earthquakes (in Chinese). *Physics*, 2013, 42: 256–262 [马腾飞, 吴忠良. 数值地震预测的关键物理问题. *物理*, 2013, 42: 256–262]
- 85 Cai Y E, He T, Wang R. Numerical simulation of the source dynamic process of the 1976 Tangshan earthquake (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 1999, 21: 469–477 [蔡永恩, 何涛, 王仁. 1976年唐山地震震源动力过程的数值模拟. *地震学报*, 1999, 21: 469–477]
- 86 Luo G, Liu M. Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 great Wenchuan earthquake. *Tectonophysics*, 2010, 491: 127–140
- 87 Zhu S B, Yuan J. Mechanisms for the fault rupture of the 2008 Wenchuan earthquake ($M_S=8.0$) with predominately unilateral propagation (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2016, 59: 4063–4074 [朱守彪, 袁杰. 2008年汶川大地震单侧破裂过程的动力学机制研究. *地球物理学报*, 2016, 59: 4063–4074]

Summary for “关于我国地震数值预报路线图的设计——汶川地震十周年反思”

Roadmap for earthquake numerical forecasting in China—Reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake

Yaolin Shi^{1*}, Yunqiang Sun¹, Gang Luo¹, Peiyu Dong² & Huai Zhang¹

¹ Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

* Corresponding author, E-mail: shiyl@ucas.ac.cn

Failure of forecasting the 2008 Wenchuan earthquake has been a shake up for Chinese earthquake forecast research. Since 1966, Chinese have been trying to predict earthquakes by empirical method. This method obtained limited success, but has not been able to make break though after hard work of half a century. Many Chinese seismologists believe that earthquake forecast should be changed from empirical forecast mainly based on precursors to physical forecast based on understanding of earthquake mechanics. We therefore propose a frame of earthquake numerical forecast system.

Earthquakes occur in the lithosphere when tectonic stress increases and exceeds the crustal strength in the dynamic earth. With growing knowledge of the geological structure, thermal state, porous fluid conditions, physical properties of the lithosphere, and in depth understanding of the earthquake mechanics in the poro-elasto-plasto-viscous rock mass cut by active faults. People now have the capacity to perform massive computation to model the evolution of stress field the occurrence of series earthquakes to produce the synthetic earthquake catalog. The synthetic sequence may help us to understand the real regional earthquakes as better data are obtained model parameters, boundary and initial conditions. It is time to start exploring earthquake numerical forecast, although there is a long way to go to be actual practiced. Weather numerical forecast took about half century from idea to reality. Earthquake numerical forecast may take even longer time.

Ten years ago, China had issued the *National Earthquake Science and Technology Development Program (2007–2020)*, which claimed to start “the earthquake numerical forecast test research”. To implement such a program, a route map of numerical earthquake forecast is necessary. We suggest a frame work for such a route map. A single synthetic earthquake model can produce a deterministic series of events, but uncertainties in the model as well as in boundary and initial conditions may lead to different series of events. Ensemble forecast therefore can be made for time independent model of long term forecasts. If the sequences can be made to repeat historical earthquakes, by properly adjust the initial conditions, then, time dependent ensemble forecasts can be made for midterm forecasts. Short time numerical forecasts, however, are not practical at present time.

Empirical forecasts play hard to search any possible precursors, numerical forecasts, however, try to understand the physics and obtain data to constrain the boundary and initial conditions. They have different ideas to spend financial and human resources. Numerical forecast research will be a pilot program to lead essential progresses in earthquake science.

earthquake forecast, earthquake prediction, numerical forecast, probabilistic prediction, Wenchuan earthquake, geodynamics

doi: 10.1360/N972018-00335