

地震预测预报 20 年发展设计研讨专栏

关于推进数值地震预测的思考*

黄辅琼^{1)※} 张晓东²⁾ 曹则贤³⁾ 李建平⁴⁾ 李世海⁵⁾

- 1) 中国地震台网中心, 北京 100045
- 2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036
- 3) 中国科学院物理研究所, 北京 100190
- 4) 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875
- 5) 中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 在广泛查阅国际地震预报研究动态的基础上, 根据当前数值地震预测研究中面临的问题和相关问题的研究进展, 对未来推动数值地震预测研究的有关方面进行了初步讨论, 以达抛砖引玉之效。借鉴数值天气预报的发展历程, 发展数值地震预报首先亟需就各种观测资料进行四维“同化”分析, 形成地震孕育过程中线性能量积累阶段、非线性转变到亚失稳阶段不同状态连续变化的“模式”地震资料构成的地下四维“云图”。不同途径观测资料的“同化”和亚失稳阶段的数学表达是数值地震预报技术的关键。

关键词 数值地震预测; 观测资料“同化”; “模式”地震; 亚失稳状态; 地下四维“云图”

中图分类号: P315.75; 文献标识码: A; doi: 10.3969/j.issn.0253-4975.2017.04.004

引言

自 1904 年挪威著名气象学家 Vilhelm Bjerknes 首先提出: 在掌握大气的初始状态后, 可通过积分一组完备的动力-热力学方程组来了解天气演变^[1]。经历了 100 多年的努力, 如今天气预报已经完全进入了数值预报阶段。几乎同时期, 1909 年美国地质学家 Gilbert 根据天气预报的发展, 在 Science 上也发表了一篇题为《地震预报》的文章: 宣称科学预测地震的时代已经到来^[2]。但是, 同样 100 多年过去了, 地震预报的数值预测模式才开始进入小规模的探索阶段^[3]。

虽然美国地震学家 Wood 和 Gutenberg

于 1935 年指出, 地震预报应包括“面积不太大的地点、确切或接近的时间以及地震震级”的三要素预报^[4]; 中国科学家傅承义先生也指出, (地震)预告的最直接标志就是前兆, 寻找前兆一直是研究地震预报的一条重要途径。但真正的地震预报探索里程开始于 1966 年邢台地震发生之后。也正是 1966 年, 在美国, 根据圣安德烈斯断层 22 年的地震发生周期, 促成了帕克菲尔德(Pakfield)地震试验场的建立。1966—1976 年是中国灾难性地震频发的 10 年, 也是世界地震活动强释放的 10 年, 在全球地震活动频发的国家和地区, 广泛开展了地震预报探索。

但是, 1975 年海城地震成功预报的经验与 1976 年唐山地震预报失败的教训形成了强烈反差; 在帕克菲尔德试验场, 1985 年发

* 收稿日期: 2017-02-28; 采用日期: 2017-03-14。

※ 通信作者: 黄辅琼, e-mail: hfqiong@seis.ac.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(41274061)资助。

布的5年尺度预测,38年以后才姗姗来迟^[5],而1989年在洛马普列塔(Loma Prieta)发生的 M_w 6.9地震和1992年在兰德斯(Landers)发生的 M_w 7.3地震距离帕克菲尔德试验场预测的地震目标区域都在上百公里以上。这些地震预测的实际表现使得地震预报科学实践遭到了长期的质疑^[6],对地震前是否存在前兆现象成为质疑的焦点。2009年4月6日意大利拉奎拉6.3级地震前的处置失当导致了地震学家被判过失杀人罪的结果使备受质疑的地震预报雪上加霜^[7]^①。原本在意大利国际理论物理中心设置多年的非线性动力学与地震预报高级研讨班于2011年终止。

科学家统计发现,自2010年来全球地震能量释放再次呈现非线性加速增长态势,尤其是美国,在地震较少的中、东部地区,小震活动加速现象十分明显^[8]。虽然这些现象被首先解释为油气开发与废水处理等人类活动诱发的结果,但2016年发生的震级较大的人类活动“诱发”地震仍然引起了美国地震学家的高度重视。随着全球灾难性的地震频发,当前世界上关于地震预报的研究热度进入到了一个罕见的水平^[9]^②。意大利被判刑的科学家于2014年被宣布无罪,失败的拉奎拉地震处置催生了欧洲跨国地震减灾计划(REAKT)(<http://www.reaktproject.eu/>)和可操作的地震预报程序(OEF)(<http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/5350>)。美国科学家

为了获得地震预报有效方法,率先设立地震可预测性研究合作实验室(CSEP)(<http://www.cseptesting.org>)。目前,OEF和CSEP是国际地震预报研究领域的两大热点。

2016年12月初,美国地震预报试验场的首席科学家Jordan一行应邀来到中国访问,介绍了国际上地震预报的最新进展。结合中国行业内外开展的地震预报研究探索的进展与讨论^[11-12]和十三五规划的发展战略思想,提出了推进数值地震预测的有关问题的思考。

1 数值地震预测的早期探索与存在的基本问题

在1966—1976年地震频发的10年之后,科学家开始了地震物理预报的探索。北京大学王仁教授根据力学原理指出,预测未来地震趋势需要知道本地区当前的应力状态和该地区内岩体的强度分布,但是当时这两者都不是很清楚。王仁教授利用中国对地震有详细历史记载的有利条件,将断层带模拟成摩擦依从性的非线性节理单元进行了有限元模拟计算,逐次反演华北地区内700年来发生过的14次7级以上大震,寻求所积累的残余应力和模拟出不同断层的强度,最后得出唐山地震后的应力分布,预测了未来地震危险区^[13]。后来10多年发生的5~6级地震基本上都落在这些地区内,说明这个反演思路是正确的。

同时,原国家地震局地质研究所的宋惠珍研究小组,对我国尤其是华北地区的地应力场进行了模拟研究^[14],在国家地震局联合基金课题的资助下,利用断层形变测量结果,对华北地区的主要地震断层运动学特征与大震重复周期进行了数值模拟研究^[15],基于模拟结果对未来地震活动危险性的估计经过实际检验证明是合理的。

石耀霖院士小组的近期工作结果认为,若要实现基于物理原理的数值地震预报,必

^① 张永仙. Operational earthquake forecasting and decision making. Varenna, Italy. 2014, June 7-11. 国际会议总结报告.

^② 笔者在《Geodesy and Geodynamics》2017年第1期发表的综述文章“Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years”,从1月27日上线到3月31日,根据researchgate的统计结果,阅读人次达500以上,涉及20多个国家,收到了来自俄罗斯、日本、土耳其等国家的科学家反馈回来的科学文献7篇,相关地震预测前沿论著1部;瑞典、巴基斯坦、土耳其等国的科学家通过邮件向笔者咨询了中国关于地下水及其化学组分观测的技术与方法.

须解决5个关键环节的问题：①对物理机制的认识并通过数学公式和数理方程对物理机制进行定量描述；②解这些方程的计算能力；③对于特定的预报，还要了解所研究区域的结构、物性以建立模型；④边界条件及其随时间的变化；⑤初始条件。目前，随着高速发展的电子计算技术，解算方程的能力已经不是问题；关于地震孕育的过程也基本了解；认为：①最难的是关于地震临近发生的破裂过程与细节还不十分清楚；②地下结构与介质物性参数还不够详尽，以至于不能建立接近实际的模型；③边界条件如何界定是一个很困难的问题；而④初始条件则是了解最弱的问题^[3]。

在美国帕克菲尔德地震试验场，科学家利用观测、实验与数值模拟技术相结合，发展了圣安德烈斯断层帕克菲尔德断层段上的动力学模型，数值模拟的结果与 InSAR 和 GPS 观测结果有很好的吻合^[16]。基于单一断层的地震周期过程的模拟技术基本成熟，利用各种观测结果建立综合物理模型是可能的。

明确了需要解决的问题就等于找到了解决问题的方向。为此，本文将主要针对上述主要问题，结合近年来的相关研究进展，探讨一些可能的解决方向，期待抛砖引玉之效。

2 数值天气预报发展历程的启示：通过立体观测的四维“同化”，确立地下介质应力/应变状态与过程的参数及理论，或许是突破地震预报可借鉴的关键和基础之一

数值天气预报就是在给定初始条件和边界条件的情况下，数值求解大气运动基本方程组，由已知的初始时刻的大气状态预报未来时刻的大气状态。涉及的基本参数包括：风、气压、温度、湿度。假定大气运动满足以下基本定律：牛顿第二定律、质量守恒定律、热力学能量守恒定律、气体实验定律和水汽守恒定律等条件，支配大气运动的基本方程

包括运动方程、连续方程、热力学方程、状态方程和水汽方程，它们是制作数值天气预报的基础^[17]。数值天气预报之所以能够以数值模式运行，关键环节是确立气象预报所需的参数：温度、湿度、压力和风速（或风、气压、温度和水汽）；动力框架方面引进了静力近似；物理过程方面考虑了云、辐射、降水、湍流、摩擦、地形、冰、雪、海洋、土壤热传导、地面和大气之间的能量交换；而各种观测资料经过归一化，由初值条件和边值条件经差分数值计算，实现了时间上的外推来达到预测未来状态的目的，物理思路和技术路线都很明确。这个过程可作为数值地震预测发展的参考。

对于数值地震预测来说，哪些参数是必不可少的？目前虽然还没有定论，但是藉由已有的数值模拟研究表明，区域应力/应变、断层几何特征及其变形（如滑移速率/位移）、孔隙压力、介质物性（如密度与强度）等是模拟中需要涉及的主要参数。

我们目前的各种观测是否就是我们数值预报所需要的物理量也还不能简单地给予肯定的回答。但是，根据当前的观测，断层形变观测（点观测的定点/流动观测和面观测的 GPS/InSAR 等）、地下流体观测（可以获得孔隙压等参数）、地震活动观测（可以获得应力场）、电磁学观测与地质学调查（地层组成与分布，可以获得岩石物性参数）相结合，基本上可以反演或估算出上述模拟所需的参数。参照数值天气预报的四维资料同化形成模式大气的连续状态资料的分析方法，根据当前已经开展的地震观测资料基础，似乎也可以开展相应的资料同化分析，形成“模式”地震的连续状态资料。帕克菲尔德地震试验场针对圣安德烈斯断层的帕克菲尔德断层段的地震模拟研究^[16]，就基本上接近于上述过程的局域问题。

已经开展的从地表变形观测到地下结构探测的各种探索，值得问一问：我们在寻找什

么？在描述地下介质应力/应变状态的四维“云图”中，什么样的状态代表了进入必震阶段的状态？本构方程如何建立？则是当前国内外面临的共同问题。事实上，地震孕育发生的过程其实就是应变能积累与释放的过程，那就可以用应变能或者单位体积的应变能（即应变能密度）^[18]来描述地下介质应力/应变状态的四维“云图”。处于非线性应变能积累的区域就是未来具有发震危险的区域。但是，地震预报实践表明，并非进入非线性阶段的状态就是失稳破裂的必震阶段。那么应力/应变积累到什么样的过程是必震的状态呢？

3 构造物理实验结果表明：处于亚失稳应力状态的断层进入了不可逆变形状态

根据断层整体所处的不同应力阶段，可将其分为弹性变形为主的稳态、伴随局部破裂与应力局部释放的亚稳态、以整体应力准静态和准动态释放为主的亚失稳态和以动态应力释放为主的失稳态（强震发生）4 个阶段。亚失稳阶段位于峰值应力和失稳时刻之间，是地震发生前的最后阶段。峰值后发震断层进入了不可逆变形状态，它的存在是地震可预报性的基本逻辑基石。实验结果还显示，断层失稳滑动前（或破裂前）有前兆，高性能的仪器提高了采样频率，可以检测到前兆现象的时空演变过程^[19]。如果把这个亚失稳过程看作地震发生之前的临震过程，在实际观测中找到对应的观测异常信息，就相当于找到了必震的前兆信息，即真正的“地震前兆”。那么，这个“地震前兆”信息如何来识别呢？实验已经证明，系统空间各点上的“协同化”是一个特征性的表现。从一些实际地震发生过程的分析中已经找到了“协同化”过程的存在。协同化过程就像地下四维“云图”中“云”的流动过程。于是在地下四维“云图”上按照一定的时间间隔或进度来寻找“协同化”现象就可以达到地震跟踪预测的目的。

上述亚失稳过程的物理表述已经清楚，如果能够将上述物理过程用数学表述出来，运用于数值模拟计算中，是不是就可以实现通过数值运算来找到必震的区域了呢？

目前，一些钻孔应变的观测异常^①和地下流体的观测异常^②显示出，实际地震过程中我们似乎在适当的监测台网中相应的观测台站可以找到地震前亚失稳阶段的痕迹。各种观测资料的“同化”分析是寻找亚失稳阶段的必经途径。

如果将上述实验过程运用于实际地震预报过程中，介质精细结构与断层几何参数的探测就是数值模拟中模型概化与边界条件划分所要面临的主要问题。

4 大自然提供的重复地震现象和主动源探测技术的结合，为探测地下介质精细结构提供了强有力的武器

陈颢院士近年来一直致力于研究利用主动源探测地壳介质结构的技术与方法，其最终目的是要勾勒出地下介质应力/应变变化的四维“云图”。在各种尝试以后，遴选出气枪主动源探测技术。重复地震被证明是研究介质随时间变化最有利的办法。陈颢院士将气枪激发主动震源与重复地震的探测原理相结合，经过一定的主动源激发场点和激发方式的设计，可以实现所关注区域的地下介质精细结构探测^③。同时，根据波速的变化情况还可以计算出介质的应力/应变变化程度。初步研究表明，这个变化的大小很大程度上取决于介质孔隙流体压力的变化以及大气压力的影响^[20]。这从实证角度说明了，水在介质变形过程中的作用不可忽视，也说明了地球浅部是大气圈、水圈和岩石圈强烈相互作用

① 根据池顺良的观测，来自马瑾院士 2013 年的演讲。

② 黄辅琼 2015 年参加 IUGG 大会的张贴报告。

③ 陈颢等. 2016 年地球科学联合学术大会交流报告；部分研究成果论文已专辑发表在《中国地震》2016 年第 32 卷第 2 期。

用的场所。

然而,探测方法找到了,海量数据的解译却面临着人力物力的问题,以及解译数据的创新思维。令人欣慰的是,大数据思维与云计算技术的出现,正在为数据处理的瓶颈问题打开新的天地^①。

5 从微观介质结构特性到宏观断层和构造块体的变形行为的动力学过程:水在地壳运动与地震孕育中扮演的角色及其对地震预报的意义

地壳介质是由岩石、水、气等组成的多相体,也是地球大气圈、水圈和岩石圈强烈相互作用的场所。地震(尤其是大陆地震)的震源深度统计结果(20 km左右)和某些大地震发生前出现的异常天气过程表明,地震的孕育发生是这种强相互作用的结果。水的存在不仅改变介质的物理性质,还改变着介质的化学特性,但究竟水的什么性质对地震的孕育和发生起到关键性的控制作用,还不确知。但可以肯定的是,地震学家已经意识到:没有水就没有构造地震^[21]。越来越多的地震断层钻探结果表明,地震发生错动的地方都存在着被水充满的断层滑动面(如,1999年我国台湾集集地震的深钻结果)或破碎带(如,2008年我国汶川地震与2011年日本本州地震的深钻结果)。

宏观上,地壳中的断裂不是扮演着导水通道的角色就是扮演着阻隔水通过的角色。随着孕震阶段的演化,导水的断层与阻水的断层在角色上将发生转化,水的存在或增加断层润滑作用而促进断层的滑动,或降低断层强度而促进断层的滑动,这些都是水对地震产生的“积极”作用。从水库蓄水引起地震活动增加或减少的观测事实还发现,水也可

能会阻止地震的发生,也就是说,水对于地震的发生还有减缓的“消极”作用^[22]。而微观上,尽管物理学家已经发现了水的各种特殊的物理性质;从已经开展的地震前兆观测中也初步了解到水通过孔隙压力变化来对区域介质的应力-应变状态发生影响,但究竟水的什么特殊性质在地震起始成核过程中起到了什么样的作用,一方面还需要更多更深入的实验与观测的结合确定;另一方面,如何借助构造物理实验模拟和我国地震实验场的试验来实现这个过程,将是十分有意义的探索。

6 基于断层模型的数值地震预报解决办法无法胜任块体构造框架下的中国大陆地震孕育发生的过程

当前国际流行的概率式数值地震预测是以美国加州帕克菲尔德地震预报试验场的地震断层模式为主要代表,它包括概化断层几何特征模型、断层滑动速率等变形方式、破坏性地震发生的频率以及每一个可能的地震在给定的相应时空条件下的发生概率4个部分^②。该实验场对每一条断层的问题都作了精细刻画。然而,对于中国大陆来说,研究表明,中国大陆地震的发生机理与大陆块体构造模型特征密切关联。如果仅仅引入国外的断层孕震模型,则难以满足我国的地震孕育的块体构造环境。基于大陆块体构造模型的数值地震预报则成为我国发展数值地震预测创新的关键点。

7 结语

综上所述,从技术上讲,数值地震预测既然是地震预报未来发展的一个模式,那么数值模拟技术以及数值模拟中的模型化等问

^① 中国地震局地球物理研究所王伟涛博士正在致力于该方面的大数据分析方法探索。

^② Thomas Jordan. Deterministic prediction vs. probabilistic forecasting. 2014年意大利可操作地震预报国际会议报告。

题是不得不面临的基本技术问题。借助数值天气预报的发展,观测资料的四维“同化”技术是数值地震预报的关键技术问题。

从理论上讲,地球表层介质是含水的多相体,长期基于固体模型假设的理论,在运用到实际问题的模拟中必然失去真实的一面;而考虑了流体(水)的作用以后的理论可能需要首先从实验中开始探究。

从方法上讲,数值模拟是把实际问题进行模型化以后才能简化实际问题,进行数值运算。而模型化的实际问题如何能够接近现实中的实际问题,并对现实中的实际问题进行预测是数值预测方法中需要解决的基本矛盾。

从实验室探索的亚失稳过程经过数学表述,以用在地下四维“云图”中寻找出现或处于亚失稳状态的区域或断层,应是数值地震预测的根本任务。

利用云计算和大数据的优势,把当前的各种观测资料进行“同化”变成“模式”地震状

态的连续资料,当作边值条件和初值条件送入系统判定地下介质破裂呈现的状态或所处的阶段,结合观测的各种短临前兆异常信息,判定地震临近发生的时间和空间范围,是数值地震预测实现的基本技术路线。

要完成数值地震预测绝非本文所说的这么简单,本文仅针对其中的几个部分抛砖引玉,希望能够引出更多更精妙的方法、理论与技术,促成数值地震预测梦想的最终实现。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所吴忠良所长的约稿。感谢马瑾院士对亚失稳物理过程描述的审鉴与修订。感谢中山大学刘洁教授为本文提供了部分参考资料,限于篇幅,本文参考文献未全列出。感谢孟宪森研究员、杨军研究员提出了有益的修改意见。感谢编辑的辛勤劳动和审稿人的修改建议,使本文更加完善。最后,特别致谢郑国光研究员对本文的审阅。

参考文献

- [1] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik [J]. Meteorol. Z., 1904, 21: 1-7
- [2] Gilbert G K. Earthquake forecasts[J]. Science, 1909, 29(734): 121-138
- [3] 石耀霖,张贝,张斯奇,等.地震数值预报[J].物理,2013,42(4):237-255
- [4] Wood H O, Gutenberg B. Earthquake Prediction[J]. Science, 1935, 82(2123): 219-220
- [5] Bakun W H, Aagaard B, Dost B, et al. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature, 2005, 437(7061): 969-974
- [6] Geller J R. Earthquake prediction: A critical review[J]. Geophys. J. Int., 1997, 131(3): 425-450
- [7] 陈运泰.可操作的地震预测预报[M].北京:中国科学技术出版社,2015
- [8] Parsons T, Geist E L. The 2010—2014.3 global earthquake rate increase[J]. Geophys. Res. Lett., 2014, 41(13): 4479-4485. doi:10.1002/2014GL060513
- [9] Huang F Q, Li M, Ma Y C, et al. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years[J]. Geodesy and Geodynamics, 2017, 8(1): 1-12
- [10] Jordan T H, Chen Y T, Gaspatini P, et al. Operational earthquake forecasting. State of knowledge and guidelines for utilization report by the International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection[J]. Annals Geophys., 2011, 54(4): 315-391. http://dx.doi.org/10.4401/ag-5350
- [11] 张晓东,黄辅琼.勤于创新思考、勇于科学探索、促进学科融合,为推进地震预报研究做出新贡献!中国地震预报论坛2015年郑州学术交流会议纪实[J].国际地震动态,2015(12):34-38

- [12] 张晓东, 黄辅琼, 田文君. 中国地震预报论坛 2016 长春学术交流会议纪实[J]. 国际地震动态, 2016 (11): 41-44
- [13] 王仁, 孙荀英, 蔡永恩. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟[J]. 中国科学(B 辑), 1982(8): 745-753
- [14] 宋惠珍, 黄立人, 华祥文. 国家地震局地震地质研究专辑: 地应力场综合研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 458-476
- [15] 宋惠珍, 刘洁, 巫映祥, 等. 地震危险性估计的一种尝试[J]. 华北地震科学, 1994(2): 27-32
- [16] Barbot S, Lapusta N, Avouac J P. Under the hood of the earthquake machine: toward predictive modeling of the seismic cycle[J]. Science, 2012, 336(6082): 707-710. doi:10.1126/science.1218796
- [17] 沈桐立, 田永祥. 数值天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 2010
- [18] 黄辅琼. 轮南地区奥陶系碳酸盐岩储集层裂缝定量研究[D]. 北京: 国家地震局地质研究所, 1993
- [19] 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 633-645
- [20] Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry[J]. J. Geophys. Res., 2008, 113(B12): 36-44. doi:10.1029/2007JB005023
- [21] Bruce A B. 地震九章[M]. 马杏垣, 吴刚, 余家傲, 等译. 北京: 地震出版社, 2000
- [22] 黄辅琼. 水岩相互作用与地震过程的成因机制[G]//10000 个科学难题·地球科学卷. 北京: 科学出版社, 2010: 649-651

The roadmap of numerical earthquake prediction in China

Huang Fuqiong¹⁾, Zhang Xiaodong²⁾, Cao Zexian³⁾, Li Jianping⁴⁾, Li Shihai⁵⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

3) Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

4) College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

5) Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

Abstract Based on the current progress in earthquake modelling for prediction consulting articles of international research, with throwing a sprat to catch a whale, we show the roadmap of numerical earthquake modelling for prediction in China. Referring to the course of numerical weather prediction development, the observation data assimilation should have priority to form 4D subsurface “cloud map” of the continuous model earthquake data in the earthquake preparing process of energy accumulation in linear to nonlinear stages and energy release from meta-instable to unstable slipping stage. The key steps of the roadmap for numerical earthquake prediction techniques are the assimilation of observation data and the mathematical expression for the meta-instable stage of earthquake process.

Keywords numerical earthquake prediction; data assimilation in 4D; “model” earthquake; metainstability subsurface; 4D “cloud map” of energy