论地震数值预报——关于我国地震预报研究发展战略的思考

刘启元[1],吴建春[2]

(1. 中国地震局 地质研究所,北京 100029;2. 中国地震局 科技发展司,北京 100036)

摘 要:随着中国工业化和社会现代化进程的加快,中国城市化进程必将进一步加速。如何减轻地震灾害的问题正变得日益严峻。尽管地震预测是一个举世公认的国际性科学难题,但在强化各种减轻地震灾害措施的同时,仍须大力推进地震预测研究。为此,需要打破长期徘徊在以地震前兆异常监测为基础的经验性预测局面,把注意力尽快转向研究以动力学为基础的数值预报。以GPS为代表的空间对地观测技术,岩石圈巨型高分辨率宽频带流动地震台阵观测技术以及数值模拟技术已经为地震数值预报研究提供了前所未有的技术基础。以地震数值预报为目标的GPS阵列地壳形变连续观测,高分辨率地壳上地幔结构探测,地壳动力学,地震孕育和破裂过程的理论、模拟试验和实际观测,数据同化和计算软件的开发应成为今后研究的重点。现在的问题是,需要积极借助数值天气预报的经验,强化多学科,多部门的组织协调,尽早在有条件的地区开展地震动力学数值预报的科学试验。地震数值预报研究必将极大地促进中国地震科学基础研究和地震预报的进一步发展。

关键词:数值模拟;地震台阵;GPS;地壳形变;数值预报;地震预报

中图分类号:P553;P228.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2321(2003)S0-0217-08

1 问题的提出

众所周知,中国近乎是世界上惟一设置国家专职地震机构并把地震预测作为常规职责的国家。如何总结30多年来我国地震预报事业走过的道路,如何客观评价目前我国地震预测的实际能力,特别是如何继续向前推进我国地震预测研究,在这方面虽有若干权威论文发表[1~7],但人们的认识未必一致。

另一方面,由于对近年来发生在全球,特别是工业发达国家和地区的一系列灾难性地震预先没有察觉,引发了国际地震科学界关于"地震能否预测","是否应该把地震预测作为研究目标"的激烈争论[8~12]。反对把地震预测作为科学目标的主要理论依据是地壳介质处于所谓自组织临界状态[13]。在这种状态下,介质处于进入混沌状态的边缘,并对初始条件极端敏感,或者更通俗地说,由于非线性相互作用,任何小事件都有可能自动演化成为地震。对国际上有关地震预测的争论,我国虽有若干文章介绍[14,15],但总体上国内学者参与国际上相关的讨论并不充分。这在某种程度上折射出我国学术界对如何推进地震预测研究尚无具体、明确的认识,甚至对是否应该把发展的重点放在地震预测也有不同的看法。

但是,防御和减轻地震灾害对我国来说是一个无法回避的重要问题。其发展战略和技术路线不但是专业部门的问题,同时也需要引起相关部门和相关学术领域的关注。这是因为地震孕育、发生的过程确实十分复杂。突破地震预报难关不但涉及若干地学分支,甚至远超出地球科学的范畴。开放的,而不是封闭或半封闭的研究和探讨,无论从那个角度来说都是绝对必要的。

近年来,地震基础研究得到了较大的关注,但多数研究给人以鞭长莫及的印象,同时也看不到地震预测有实质性的进展。今后的发展方向和发展战略问题已经到了必须进一步深思和研讨的时候。为此,本文试图对今后我国地震预报研究的发展问题

收稿日期:2003-04-24;**修订日期**:2003-06-06

基金项目:国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998040702)

作者简介:刘启元(1945—),男,研究员,博士生导师,中国地震局地质研究所所长,主要从事理论及应用地震学研究。

提出某些未必成熟的思考和建议,希望有助于打破某些固定的思维模式,有助于吸引其他部门领域的关注,有助于推进我国地震预报事业的发展。我们的讨论将从最基本的问题开始。

2 地震预报研究面临的社会需求和压力

众所周知,中国大陆地处欧亚板块的东南隅,东邻太平洋板块,南有印度板块和菲律宾海板块。由于印度板块与亚欧板块陆陆碰撞,太平洋板块的俯冲,中国大陆地壳发生了强烈的变形和运动,形成了中国大陆独具特色的地形、地貌和构造活动的分区特征[16]。菲律宾海板块与中国大陆的碰撞俯冲作用则导致了我国台湾地区地壳的增厚、隆升和强烈地震的频繁发生[17]。地壳形变观测的结果表明,中国大陆的现今变形运动仍然十分活跃[18]。这种基本的地质背景决定了我国必然长期面对大范围地震频繁活动和破坏性地震频发的局面。

由于我国人口稠密,建筑物及各种生命线工程的抗震能力较低,地震对我国造成的灾害可谓全球之最。据统计,20 世纪我国地震造成的死亡人数占到全球的 50%左右[5]。随着我国工业化和社会现代化程度的不断提高,城市化进程正在日益加快。今后数十年内,我国农业人口将大量转入城镇。这意味着不但巨大城市将继续快速发展,城市数量和城市人口也将大幅度增加。因而,城市及工业系统遭受地震袭击和破坏的可能性将随之大大增加。由于现代城市及工业系统的脆弱性,地震,特别是破坏性地震造成的社会影响和经济损失将会不断加大[19]。我们必须对我国面临日益增加的地震威胁有足够清醒的认识。

为抵御和减轻地震灾害,最主要的措施可归结为两个方面:搞好抗震设防和加强地震的监测预报。抗震设防对于减轻地震的破坏和人员伤亡无疑具有极为重要的作用。这并没有异议。但是,大面积抗震设防是不现实的,对于我国的情况更是如此。同时,任何抗震设计都离不开对地震危险性的基本估计(烈度评估)。许多震例(如 1995 年日本阪神地震)业已表明,抗震设防并不能完全避免地震造成的破坏,特别是地震造成的次生灾害。地震预测最重要的价值在于提前采取必要的防范措施,这对于减轻地震灾害,保持社会稳定具有重要意义。因此,随着国民经济的快速发展,必须进一步加大对地震预测研究的投入,并应把多震区的工业城市,特别是巨型城市作为地震监测和预报研究的重点。这是我们无法回避的现实。

3 由地震能否预报争论引发的思考

我国的地震预报最早可以追溯到 1966 年的河北邢台地震。从那时起,我国走过了"专群结合","边观测、边研究和边预报"的发展道路,并在各级政府的大力支持下,依靠自己的技术,逐步在全国范围内建立起现代化地震观测和前兆监测系统。通过不断总结吸收国内外的经验,逐步形成了我国独具特色的多手段综合预报思路,"长、中、短、临"不同时间尺度渐进式地震预测程序和地震趋势会商会制度[2,5]。特别是,1975 年辽宁海城地震的预测成功得到了国际地震科学界的公认,并取得了明显的减灾效果。这成为鼓舞我们继续努力攻克地震预报难题的重要依据。

30 多年来,尽管我们在地震预测的研究和实践方面开展了大量有价值的工作,并取得了令世人瞩目的成绩,但我国地震预报一直徘徊在以捕捉地震前兆异常为基础的经验预测,却也是不争的事实。石耀霖等曾利用 R 评分方法对我国年度地震预测的效果进行了评价[4]。他们的评价结果表明,目前我国年度地震预测虽有一定成效,但仍处于相当初级的阶段,对 5 级以上地震预测的 9 年平均 R 评分仅略高于背景概率随机预测的期望值。张国民等对我国年度地震预测效果的检验也得到了大同小异结论[7]。上述研究结果应该说与人们的定性观察基本一致。但需要看到,这个结果是在动员了大量的人力、物力,并在发展了愈来愈多的前兆异常指标和预测方法的情况下才达到的。这固然说明对地震实现某种程度预测的可能性,但人们的疑问是:在原有的道路上,经验预测究竟还能走多远。

实际上,由于任何地震都不能脱离具体的地质构造环境,基于前兆异常的经验性认识必然都带有很强的地域性。如果不能建立地震预测的统一理论,地震预测的效果和水平将会长期停滞在目前的状况,难以适应我国地震灾害威胁日益增大的形势。另外,我们不难发现,各种统计方法充斥于现有的地震预测。这是经验预测合乎逻辑的必然结果。统计方法虽可用于寻求宏观规律或某种因子关系,并在研究的初级阶段具有某种价值和意义,但进一步的

深入则有赖于对问题本质的揭露。

许多学者都曾指出经验预报的局限性,提出加强地震科学基础研究,注重研究地震形成机理,逐步发展物理预报的思想,并在地震形成机理的研究方面作了许多有价值的工作,发展了某些以力学为基础的预报方法[20,21]。但总体上,定性的构造成因研究较多,定量的动力学研究相对不足,对今后的发展缺少明确、具体的突破方向。

不可否认,地震预测的确是一个国际性的科学难题。正因为如此,地震科学界至今对地震能否预测仍没有统一的认识,国际上某些地震学家甚至以非常率直的语言表达了明确的否定意见[8,9]。但是,1997 年以来有关地震能否预测的争论也促使我们从理论原则的高度,重新审视地震预测面临的困难和问题。

针对地震能否预测的争论,美国著名地震科学家 Sykes 等曾分别对不同时间尺度地震预测的物理基础和实现预测的可能性进行了分析[15]。他们从理论上批判了对地震预测全面否定的绝对化看法,认为地壳并非总处于自组织临界状态,地震作为一种复杂过程,与其他一些自然现象(如火山喷发,强风暴,天气变化等)一样,本身都存在能够预测,有可能预测以及根本不可预测的成分。他们认为地壳在构造加载的情况下,应力有一个缓慢增加的过程,混沌和非线性现象主要出现在地震破裂的非稳定滑动阶段,地壳进入自组织临界状态不应看作是地震预报的障碍,而应看作是地震形成的前兆。从他们的研究结论,我们得到如下的启示:(1)有必要进一步深入分析不同时间尺度地震预测的主要难点,并应遵循先易后难的原则,确定地震预测的突破方向,恰如其分地确定地震预测的内涵和阶段性目标。30 多年来,我国地震预测的实践和理论研究表明,对于以固体介质为研究对象的地震预报来说,恰恰与以流体介质为研究对象的天气预报相反,时间尺度越小,预测的难度越大。因此,现阶段研究的战略重点至少不应该是短、临震预报[2]。(2)必须充分重视不同时间尺度地震预测研究的科学基础,而不仅是所谓前兆现象的回溯,更不能把追逐不同时间尺度的地震前兆指标作为发展地震预测的基本思路。不管地震是预存断裂,还是新生断层失稳滑动的结果,地震的形成必然伴随地壳应力的积累和失稳过程。因此,相应的动力学研究应是解决地震预测难题最根本的科学基础,并应作为我们集中力量研究的重点。(3)天气变化和地震形成都是自然界中的非线性复杂过程。大气系统的变化非常迅速,而地壳的变化毕竟微小而又缓慢。就非线性复杂过程的预测本身来说,地震与天气一样,应是有可能做出某种时间尺度的预测。对地震预测研究来说,天气预报的经验值得借鉴。事实上,天气预报的发展也经历了从经验预测到物理预报的过程。但是,没有现代大气物理和动力气象学理论的发展,没有气象卫星等现代探测技术以及天气数值预报的成功,今天的天气预报可能仍然停留在动物异常和依靠民间谚语的阶段。在现阶段,没有必要把地震形成过程中的非线性混沌现象作为地震预测研究的障碍,而应把研究和发展地震动力学预报作为今后地震预测发展开拓的主要方向。

4 地震数值预报的可能性

地震动力学预测离不开对地震成因及其动力学过程的研究。现代地震科学虽然尚未在地震预测方面取得突破性进展,但对地震成因的研究已经取得了巨大进步。关于地震的成因,1910 年美国地震学家 Reid 根据 1906 年旧金山地震引发的圣安德烈斯断层形变的大地测量结果,给出了断层错动引发地震的观测证据,并证明地震前后存在地壳变形的积累和恢复过程[22]。此后,人们根据历史地震和古地震研究,进一步确认了地震存在复发间隔的准周期性,并把它作为地震中长期(10 a 以上尺度)预测的主要理论依据[23]。

现代地震学通过理论、观测及实验研究确认了动态断层作用是绝大部分地震的起因,并在岩石破裂机理,岩石破裂判别准则,断层相互作用等方面取得了一系列重要成果[24~26]。人们已经认识到,作为岩石破裂和摩擦的基本属性,岩石产生破裂以前必然存在加速变形阶段。如果没有加速变形,岩石的破裂失稳就不会出现。地震的成核理论认为成核是失稳过程的基本部分。如果用某种方法能够探测到它,那么地震的短、临预测就有可能实现。但是,在远离震源体的地表,难以保证对地震成核过程引发的地震前兆进行有效的监测。地震发生的时间、地点和强度与各种地震前兆现象之间的关系可能比地震本身更为复杂。这构成了目前根据前兆异常进行地震短、临预测的最大障碍[2]。

国内外在地震动力学应用研究方面也取得了令

人鼓舞的进展[27]。有限元等数值模拟方法已经广泛应用于地震成因和地震序列的研究[28,29]。地震波形数据的模拟已经能够成功地解释震源的破裂过程[30]。这些都构成了进一步深入开展地震动力学预测研究的理论和技术基础,而数值预报则是推进地震动力学预测最根本的途径。

所谓数值预报实质上就是根据物理问题的数学模型对系统的演变过程作出定量化的预测。天气预报开创了人类对复杂系统进行数值预报的先例。1950 年 Charney 等做出了世界上第一张北美地区 24 h 数值预报图。1955 年顾震潮先生等在我国也成功地进行了类似的数值预报试验[31]。但是,直到 20 世纪 90 年代,数值天气预报真正成为日常天气预报不可缺少的基本手段[32]。

与天气系统一样,地震的孕育和形成并不是一种孤立现象,而是多种因子相互作用的结果,并表现为一种复杂过程。因此,任何孤立因子的研究都不可能对地震的孕育和形成过程作出有效的预测。数值预报的优势恰恰在于对地震现象的完整过程进行系统的,而不是孤立的研究。现在的问题在于目前提出地震数值预报的问题是否恰当? 笔者认为,至少对于中期或中短期的地震预测来说,答案应该是肯定的。

根据天气数值预报的经验,对某种系统演化过程进行数值预测的必要条件首先是必须对研究的系统有较为充分的理论认识,即能够建立起充分反映问题本质的物理模型和数学模型。其次,必须能够对该系统进行符合客观实际的参数化。第三,必须具备相应的数据处理能力。

地震数值预报能否可行的最大疑问首先在于是否能够建立相应的物理模型和数学模型。在这方面,应该说已有的研究成果已经为此提供了相当的理论和实验基础。当前人类对地震形成过程认识的不足并不应该成为进行地震数值预报研究的障碍。恰恰相反,地震数值预报的实践将会进一步检验和有力地推进人类对地震复杂过程的认识,并将在很多方面弥补单纯理论研究和室内实验的不足。综观已有的地震数值模拟研究,我们不难发现,首要的问题并非来自物理模型本身的缺陷,而常常是因为缺少关于地壳结构复杂性的数据,以至于以往的动力学数值模拟研究不得不局限于大尺度的或者定性的研究阶段。

地壳、上地幔深部结构和物理参数的缺乏,结构的复杂性给建模带来的巨大工作量等曾被人们认为是地震数值预报的巨大障碍。但近 20 多年来,宽频带地震观测技术,特别是宽频带流动地震台阵观测技术的发展已经为探测大尺度、高分辨率三维地壳上地幔速度结构,包括 S 波速度结构提供了前所未有的技术基础[33,34]。基于远震体波波形数据的三维流动地震台阵探测技术,不但可以探测地下数百 km 深度范围内的地壳上地幔结构,而且在地壳及上地幔顶部深度范围内已可以达到足够高的垂向和横向分辨率[35]。这一方面是因为台阵探测技术不仅利用单个震相的走时数据,而且充分利用了波形信息,另一方面则是因为远震体波在接收区底部近乎垂直入射,地震波传播特性主要取决于台站下方及其附近的介质,以至于其横向分辨能力可以超过通常的人工地震折射和广角反射方法。正因为如此,近年来流动地震台阵观测技术日益受到国内外学术界的广泛重视,流动台阵观测的规模不断扩大。2000 年美国地震学联合研究会(IRIS)提出了建立由 500 个宽频带流动地震台站组成的美国大陆台阵计划[36]。其直接目的虽然在于对美国大陆岩石圈结构进行全面扫描,但其科学目标中也包括攻克地震预报。与此同时,我国建立由 800 个宽频带地震台站组成的巨型流动地震台阵计划也已经获得国家有关部门的资助①。这为开展地壳上地幔复杂介质结构及其动力学响应提供了前所未有的技术基础,并对以地震数值模拟为目标的模型参数化无疑具有重要意义。

迄今为止,人类监测地壳动力学变化过程的任何观测都只能限于地表或者地表附近。相对于其他观测物理量,地震孕育形成过程与由其引发的地表变形之间有着更为直接的联系。如果我们能够确定震源及其邻区地壳介质的应力、应变关系,就可以根据地表形变观测,定量地推测震源体及其邻近区域的应力状态。如果能够对地表变形进行连续观测,那么至少在理论上,就可以实现对地壳内部应力场动态变化的研究和监测。

自 20 世纪 90 年代以来,以 GPS 为代表的空间对地观测技术获得了重大发展,并在大地形变测量中获得了日益广泛的应用。地表形变观测的精度已经可以达到 $10^{-8}\sim10^{-9}$ 的水平。利用 GPS 数据研

① 刘启元. 大陆动力学与巨型台阵. 第 18 届中国地球物理学会年会. 广西北海,2002 年 10 月.

究中国大陆及某些特殊地域的地壳变形已取得了重要成果[37~39]。在利用GPS数据和有限元方法研究中国大陆地壳应力场方面也取得了初步结果,进一步深入研究的主要困难来自于地球介质模型的分辨率和GPS观测台站的密度和覆盖范围[40,41]。

值得关注的是,近年来国际上在GPS阵列观测技术方面取得的进展。美国在南加州建立了由250个观测台站组成的GPS阵列。自1994年以来,日本地理勘查院(Geographical Survey Institute)也已经逐步完成了在日本全国布设由1 000多个台站组成的GPS大地测量阵列的计划(GEONET)[42]。对于大地形变测量来说,GPS阵列观测的重要价值在于可以充分发挥其相对定位的优势,并可有效消除大气扰动产生的观测噪声,从而进一步提高了GPS对地观测的精度。利用GPS阵列已经可以实时监测地壳的变形运动。这意味着GPS阵列在研究地壳应力场方面酝酿着巨大的应用前景。

地壳应力场的模拟离不开边界条件的确定,但边界条件的确立可以看成是一个地表变形数据的反演过程。形变场的连续观测提供了不断修改边界条件,并逼近真实情况的可能性。除了区域构造应力场和岩石介质特性,地壳应力的积累和释放过程还取决于研究区域内的地震活动。研究区域内某个断裂的活动将改变相邻断裂的应变积累及其达到破裂临界值所需的时间。但是,地震观测台网(或台阵)可以提供地震活动性数据。通过相应的宽频带地震波形数据的数值模拟可以获得研究区域内地震破裂过程及其能量释放的各种信息和数据。

充分真实地模拟地震孕育和形成过程无疑是一项复杂和艰巨的任务。强大的数值计算能力是不可或缺的支撑条件。但是,现代数值技术和巨型计算机技术的迅速发展已经为此提供了前所未有的技术基础,并仍有巨大的发展潜力。1996年以来,我国国家气象中心以国产神威巨型计算机为运行平台,已经成功地建立起我国全球中期集合数值天气预报的业务系统。因此,对于地震数值预报来说,计算和数据处理能力应该并不存在不可逾越的技术障碍。

地震数值预报的基本构想可以概括为图1所示的结构性框图。图2则给出了日本地震学家目前正在开展的地壳活动性模拟研究的原理框图[42]。这实际上是日本地理勘察院等单位联合开展的,命名为CAMP(Crustal Activity Modeling Project)的地震数值预报计划。该项研究的主要目标是要利用日本全国的GPS台网观测的地壳形变数据,研究地震预报的数值方法。其数据处理的计算机平台采用了号称世界上速度最快的地球模拟器(Earth Simulator)巨型计算机。虽然该项研究尚处于软件研制阶段,并且面临着一系列理论和技术的问题仍然需要解决,但这标志着地震预测研究将开拓数值预报的新纪元。如果我国的地震预报研究仍然固守原有的研究思路而裹足不前,那么我们将面临失掉机遇的危险。

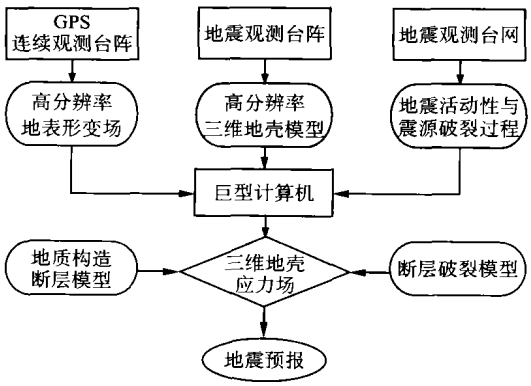

图1 地震数值预报的观测和技术基础

Fig. 1 Observations and technology for numerical earthquake forecast

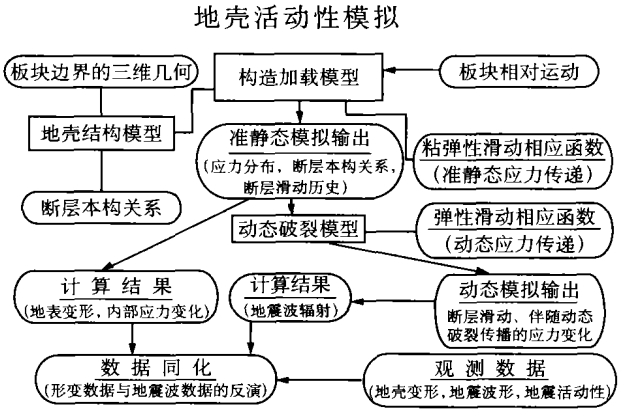

图2 地壳活动性模拟的原理框图

(据Sagiya等,2001)

Fig. 2 Schematic diagram of the crustal activity modeling

5 结论和讨论

地震预测的重要价值是不可否认的。为了解决社会发展对减轻地震灾害的需求与地震预测水平处于徘徊不前状况的矛盾,我们必须对我国地震预测研究发展的方向和重点作出新的战略决策。其根本出路在于必须尽快开拓以地震数值预报为导向的发

展道路。固守经验预测的后果将严重制约地震预测研究的发展,难以改变地震科研与预报实践脱节的状态。

马宗晋先生曾经指出,地震预报研究应该充分吸收和借鉴气象预报的成功经验,用GPS描述岩石块体内部的变形,而不仅仅是块体之间的相对运动[43]。地壳形变的GPS阵列观测已经为此提供了新的观测技术基础。以此为主要观测基础建立的地震数值预报系统实际上开辟了监测和研究地壳运动变形及动力学的"野外实验室"。可以预见,随着该系统的建设,实际观测经验的积累和相关理论研究的深入,地震的预测问题将会不断取得实质性的进展。

鉴于地震数值预报的技术特点,当前地震数值预报突破的目标无疑应首先主要集中在地震的中期或中短期预报。根据我国的具体情况,目前在全国范围内布设GPS阵列连续观测显然是不现实的,也是不必要的。在可以预见的将来,我们应把人口和工业密集的巨大城市所在的地震高烈度区域,或地震活动性较强的区域,作为研究的重点。现阶段的当务之急在于选择地震活动性较高的区域作为试验场,建立相应的观测系统,开展理论和方法研究,开发相应的技术软件,通过观测实践,尽快取得经验和实效。

地震数值预报是以高技术为支撑的复杂系统。除了面临的科学问题之外,必然涉及包括数据通讯,多种类观测数据同化,数据处理软件集成等一系列技术问题。在这些方面需要我们积极借助数值天气预报的经验。即使地震预测本身的许多科学问题也将涉及或需要吸收地震科学以外其它学科的知识和研究成果。因此,多学科,多部门的协调和合作是非常必要的。

在地震数值预报研究的带动下,地壳形变的GPS阵列连续观测,高分辨率地壳上地幔精细结构探测,高温高压条件下岩石介质物理性质,非均匀介质破坏的过程,破裂准则与触发地震的条件,地震孕育和破裂过程的理论、模拟试验和实际观测,非线性动力学等都将成为研究的重点。在推进地震预测取得实质性进展的同时,这也必将有力地推动我国地震科学及大陆动力学的快速发展,并在一系列关键性科学和技术问题的研究方面走向深入。

References[参考文献]:

[1] MEI Shirong. Progress in earthquake monitoring and prediction in China for recent forty years[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37 (Suppl I): 196-207(in Chinese). [梅世蓉. 40年来我国地震监测预报工作的主要进展[J]. 地球物理学报,1994,37(增刊I):196-207]

[2] ZHANG Guomin, LI Li, JIAO Mingru, et al. Development in earthquake prediction research during the last decade in China and its prospects[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 396-410(in Chinese). [张国民,李丽,焦明若. 我国地震预报研究近十年的发展与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(增刊):396-410.]

[3] CHEN Qifu, CHEN Yong, LI Juan, et al. Earthquake prediction research and its prospect[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 386-395(in Chinese). [陈棋福,陈颙,李娟,等. 地震预测研究与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(增刊):386-395.]

[4] SHI Yaolin. The evaluation of Chinese annual earthquake prediction in the 90s[J]. *Journal of Graduate School, Academia Sinica*, 2000, 17(1): 63-69(in Chinese). [石耀霖. 对我国90年代年度地震预报的评估[J]. 中国科学院研究生院学报,2000,17(1):63-69.]

[5] CHEN Zhangli. Review and prospects of the progress of seismological science and technology in China(I)[J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(3): 231-245(in Chinese). [陈章立. 我国地震科技进步的回顾与展望(一)[J]. 中国地震,2001,17(3):231-245.]

[6] CHEN Zhangli. Review and prospects of the progress of seismological science and technology in China(II)[J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(4): 326-341(in Chinese). [陈章立. 我国地震科技进步的回顾与展望(二)[J]. 中国地震,2001,17(4):326-341.]

[7] ZHANG Guomin, LIU Jie, SHI Yaolin. An scientific evaluation of annual earthquake prediction ability[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(5): 525-532(in Chinese). [张国民,刘杰,石耀霖. 年度地震预报能力的科学评价[J]. 地震学报,2002,24(5):525-532.]

[8] GELLER R S. Earthquakes prediction: A critical review[J]. *Geophys J Int*, 1997, 131: 425-450.

[9] GELLER R S, JAKSON D D, KAGAN Y Y, et al. Earthquakes can not be predicted[J]. *Science*, 1996, 275: 1616-1617.

[10] MAIN I. Long odds on prediction[J]. *Nature*, 1997, 385: 19-20.

[11] WYSS M. Can not earthquakes be predicted[J]? *Science*, 1997, 278: 487-488.

[12] SYKES L R, SHAW B E, SCHOLZ C H. Rethinking earthquake prediction[J]. *Pageoph*, 1999, 155(2): 207-232.

[13] BAK P, TANG C. Earthquake as a self-organized critical phenomenon[J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 15635-15637.

[14] WU Zhongliang. Self-organized criticality and earthquake prediction—A review on the current discussions about earth-

quake prediction (I) [J]. *Earthquake Research in China*, 1998,14(4):1-10 (in Chinese). [吴忠良. 自组织临界性与地震预测——对目前地震预测问题争论的评述(之一)[J]. 中国地震,1998,14(4):1-10.]

[15] JIAO Ruoming, ZHANG Guomin. Earthquake prediction—A century scientific sticker[J]. *Oversea Scientific Trends*, 2000 (1):4-7(in Chinese). [焦若明,张国民. 地震预报——世纪性科学难题[J]. 国外科技动态,2000(1):4-7.]

[16] MA Xinyuan. *Lithospheric Dynamics Atlas of China* [Z]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989(in Chinese). [马杏垣. 中国岩石圈动力学图集[Z]. 北京:中国地图出版社,1989.]

[17] WU F T, RAU R J, SALZBERG D, Taiwan orogeny: Thin-skinned or lithospheric collision[J]? *Tectonophysics*, 2000, 274:191-220.

[18] WANG Xiaoya, ZHU Wenyao, FU Yang, et al. Present-time crustal deformation in China and its surrounding regions by GPS[J]. *Chinese J of Geophysics*, 2002,45(2):198-209 (in Chinese). [王小亚,朱文耀,符养,等. GPS监测的中国及其周边现时地壳变形[J]. 地球物理学报,2002,45(2):198-209.]

[19] MA Zhongjing, GAO Qinghua. Calamity protection and reduction state of 21th century in China and sustainable development[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2001,11(2):122-125 (in Chinese). [马宗晋,高庆华. 中国21世纪的减灾形势与可持续发展[J]. 中国人口、资源与环境,2001,11(2):122-125.]

[20] Department of Earthquake Prediction and Monitoring, China Seismological Bureau. *Physical Basis of Middle-Short Term Earthquake Prediction* [M]. Beijing: Seismological Press, 2002. 302(in Chinese). [中国地震局监测预报司. 地震中短期预报的物理基础研究[M]. 北京:地震出版社,2002. 302.]

[21] YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, Song Zhiping. The load-unload response ratio theory: A new approach to earthquake prediction[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994,37:767-775(in Chinese). [尹祥础,陈学忠,宋治平,等. 加卸载相应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报,1994,37:767-775.]

[22] GUO Zengjian, QIN Baoyan. *Physics of Earthquake Source* [M]. Beijing: Seismological Press, 1979. 274(in Chinese). [郭增建,秦保燕. 震源物理[M]. 北京:地震出版社,1979. 274.]

[23] ZHANG Qiuwen, ZHANG Peizhen. Progress and prospect in the studies on long- and medium-term earthquake prediction [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 147-152(in Chinese). [张秋文,张培震. 地震中长期预测研究的进展和方向[J]. 地球科学进展,1999,14(2):147-152.]

[24] SCHOLZ C H. *The Mechanics of Earthquakes and Fault* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[25] MA Jin, MA Shengli, LIU Liqiang, et al. Laboratory study on the types of interacts between faults[J]. *Advance on Natural Science*, 2002,12(5):503-508(in Chinese). [马瑾,马胜利,刘力强,等. 断层相互作用的实验研究[J]. 自然科学进展,2002,12(5):503-508.]

[26] ZHANG Zhili. Interaction among fractures and stress field computation of fracture systems[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994,16(1):32-40(in Chinese). [张之立. 断裂之间的相互作用和应力场计算[J]. 地震学报,1994,16(1):32-40.]

[27] WANG Ren. Progress and outlook of geodynamic research in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 50-57 (in Chinese). [王仁. 我国地球动力学的研究进展与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(增刊):50-57.]

[28] WANG ren, SUN Xun Ying, CAI yongen, et al. Numerical modeling of seismic sequence for 700 years in the north China [J]. *Science in China* (Series B), 1982,12(8):745-753(in Chinese). [王仁,孙旬英,蔡永恩. 华北地区近700年地震序列的数值模拟研究[J]. 中国科学(B),1982,12(8):745-753.]

[29] CAI Yongen, HE Tao, WANG Ren, et al. Modelling the source dynamic process of the 1976 Tangshan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1999,21(5):469-477(in Chinese). [蔡永恩,何涛,王仁. 1976年唐山地震震源动力过程的数值模拟[J]. 地震学报,1999,21(5):469-477.]

[30] CHEN Y T, XU L S, LI X et al. Source process of the 1990 Gonghe, China, earthquake and tectonic stress field in the northeastern Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau[J]. *Pageoph*, 1996,146:697-715.

[31] KOO Chengchao. On the equivalency of formulations of weather forcasting as an "evolution"problem[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1958,29(2):93-98(in Chinese). [顾震潮. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变作预报的等值性[J]. 气象学报,1958,29(2):93-98.]

[32] ZENG Qingchun. Advances on atmospheric dynamics and numerical weather forecast in China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1979,3(3):256-269(in Chinese). [曾庆存. 我国大气动力学和数值天气预报研究的进展[J]. 大气科学,1979,3(3):256-269.]

[33] LIU Qiyuan. Passive seismic studies in terms of the large-size portable seismic array[J]. *Advances of Seismology and Geology*, 1986(6):43-47(in Chinese). [刘启元. 大型轻便地震台阵的天然地震研究[J]. 地震地质译丛,1986(6):43-47.]

[34] LIU Qiyuan. Portable broadband seismic array: Inevitable trends of technological advances in the continental lithosphere survey[J]. *International Earthquake Disaster Mitigation*, 1994(1):9-13(in Chinese). [刘启元. 宽频带流动地震台阵:大陆岩石圈探测技术发展的必然趋势[J]. 国际地震减灾,1994(1):9-13.]

[35] LIU Qiyuan, CHEN Jiuhui, LI Shuncheng, et al. Passive seismic experiment in Xinjiang-Jiashi strong earthquake region and discussion on its seismic genesis[J]. *Chinese J of Geophysics*, 2000,43(3):356-365(in Chinese). [刘启元,陈九辉,李顺成,等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔S波速度结构及其地震成因的探讨[J]. 地球物理学报,2000,43(3):356-365.]

[36] LIU Qiyuan. Research on high-resolution seismic imaging: An important development trend of seismology in the 21st centu-

ry[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2000(4): 9-11(in Chinese). [刘启元. 高分辨率地震成像研究——21世纪地震学发展的重要趋势[J]. 国际地震动态,2000(4): 9-11.]

[37] WANG Qi, DING Guoyu, QIAO Xuejun, et al. Current quick shortening of the crust beneath Tian Shan and relative movement between the north and south block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(14): 1543-1547(in Chinese). [王琪, 丁国瑜, 乔学军, 等. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动[J]. 科学通报, 2000, 45(14): 1543-1547.]

[38] GU Guohua, SHEN Xuhui, WANG Min, et al. General characteristics of the recent horizontal crustal movement in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(4): 362-369 (in Chinese). [顾国华, 申旭辉, 王敏, 等. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 362-369.]

[39] YANG Guohua, LI Yanxing, HAN Yueping, et al. Current horizontal strain field in Chinese mainland derived from GPS data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(4): 337-347 (in Chinese). [杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 由GPS观测结果推导中国大陆现今水平应变场[J]. 地震学报, 2002, 24(4): 337-347.]

[40] DANG Yamin, CHEN Junyong, CHAO Dingbo. Numerical study on stress characteristic in China[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2001, 26(2): 11-14(in Chinese). [党亚民, 陈俊勇, 晁定波. 中国及其邻区地壳应力场数值特征的研究[J]. 测绘科学, 2001, 26(2): 11-14.]

[41] HU Mingcheng. Recent advances of global positioning system (GPS)-I[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2000, 25(4): 54-59 (in Chinese). [胡明城. 全球定位系统(GPS)的最新进展(上)[J]. 测绘科学, 2000, 25(4): 54-59.]

[42] TAKESHI Sagiya, MITSHIRO Matsuura, CHIHIRO Hashimoto, et al. Monitoring of crustal deformation and crustal activity modeling for forecast[A]. *Proceedings of the First China-Japan Workshop on Earthquake Disaster Mitigation, Beijing, China*[C]. 2002. 333-339.

[43] MA Zongjin. Review and prospect of earthquake prediction in the 20th century[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2000(6): 1-4(in Chinese). [马宗晋. 20世纪地震预报科学的回顾与展望[J]. 国际地震动态, 2000(6): 1-4.]

ON NUMERICAL FORECAST OF EARTHQUAKES —THINKING ABOUT THE STRATEGY FOR PROMOTING EARTHQUAKE PREDICTION

LIU Qi-yuan[1], WU Jian-chun[2]

(1. *Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing* 100029, *China*;
2. *Department of Research and Development, China Seismological Bureau, Beijing* 100036, *China*)

Abstract: With quick progress of the industrialization and societal modernization of China, the urbanization process will be also accelerated. Earthquake hazard mitigation becomes a challenge more severe in the future. Although the earthquake prediction is a sticker recognized universally, it will be still necessary to push forward the earthquake prediction investigation, simultaneously with strengthening the earthquake hazard mitigation. The case of stagnating at the empirical prediction based on earthquake precursors must be changed and it will be necessary to focus our much attention on the numerical forecast based on earthquake dynamics. The modern technologies of satellite geodesy represented by the GPS, broadband seismic observations by the aid of portable mega-array as well as numerical simulation have provided with unprecedented technical sustention. Various projects like the GPS array observation, the crust and upper mantle structure exploration with high-resolution, the crustal dynamics, theoretical, laboratory and observational studies of earthquake gestation and rupture process, data assimilation and software development should be integrated and become the key points emphasized in the future earthquake numerical forecast studies. Now the problem is to strengthen and to coordinate multidisciplinary and branch cooperation, and especially, we need to be aided in the experience of weather numerical forecast to carry out the earthquake numerical forecast in some appropriate region as soon as possible. This will promote greatly the progress of earthquake science and earthquake prediction of China.

Key words: numerical simulation; seismic array; GPS; the crustal deformation; numerical forecasting; earthquake prediction