维普资讯 http://www.cqvip.com

地震预报研究的主攻方向：动力数值预测*

刘启元

（中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室，北京，100029）

摘 要 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，仍须把地震的监测和预报作为中国地震局最为重要的任务。为此，需要高举攻克地震预测难题的旗帜，打破长期以来地震预测研究徘徊不前的局面。我们必须充分认识近年来地球物理观测技术和计算机技术所取得的重大进步和发展态势，并在此基础上制定地震预测研究的发展战略。

以GPS为代表的空间对地观测技术，巨型高分辨率宽频带流动地震台阵观测技术以及电磁阵列观测技术的发展趋势表明，从布网观测走向阵列观测已经成为21世纪地球物理观测研究发展的基本方向。上述高新技术和计算机数值模拟技术的发展为地震动力学研究提供了前所未有的技术基础。为此，需要积极借助数值天气预报的经验，打破经验性地震预测的局限，把研究的注意力尽快转向以动力学为基础的地震数值预报。

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发展的重点。现在的问题是，需要我们强化多学科，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和相关的理论研究。这必将极大地促进我国地震科学基础研究的发展和地震预报水平的提高。

关键词 地震台阵；GPS阵列；数值预测；地震预报

中图分类号 P315.75 **文献标识码** A

1 地震预报研究面临日益严重的挑战

随着我国工业化和社会现代化程度的不断提高，今后数十年内，我国农业人口将大量转入城镇。这意味着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。城市及工业系统遭受地震袭击和破坏的概率将随之增加。

但是，我国作为发展中国家的地位并不会因为我国经济的快速发展而迅速从根本上改变。这意味着，在今后数十年的过渡期内，与发达国家相比，我国的实际抗震设防能力和水准仍将有相当的差距。然而，我国的工业化和城市化进程毕竟与1960～1970年代的情况不能同日而语。在这种状况下，不妨设想，如果1976年的唐山地震在我国东部地区重演，我们将面临什么样的局面！结论应是显而易见的，即地震造成的社会影响和经济损失将会大大增加。

问题的另一个方面是，三十多年来，尽管我国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

* 收稿日期：2005-04-15。

维普资讯 http://www.cqvip.com

成绩，在地震科学基础研究方面也取得了不少重要成果，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，这也是不争的事实[1]。

许多学者都曾指出经验预报的局限性，提出需要进一步重视地震科学基础研究。但是，近年来在我国地震监测系统的建设取得重大进展的背景下，相应的基础研究队伍的攻坚能力有所下降，基础科研的组织和经费投入相对不足，甚至出现了某种近似"各自为战"的局面。这对开拓地震预测研究的新局面，攻克地震预报难关十分不利。因此，在现有基础上，进一步转变观念，强化研究队伍建设，转变地震预测研究发展的战略方向，加大地震预报基础研究的投入，已成为我们的首要任务。

2 现代高新技术条件下的地震预报发展战略

回顾我国地震预报研究走过的道路，我国的地震预报最早可以追朔到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[2~3]。需要指出的是，我国地震预报研究发展的道路不可避免地局限于当时的地震科学水平，同时也局限于中国特定的政治、文化环境以及经济和技术的发展水平。但是，自1980年代以来，上述环境、条件已经发生了根本性的变化。除了我国社会发展水平的极大提高外，地球科学的理念及其外部技术环境已经完全不同。

首先，自1980年代以来，宽频带地震学理论及观测技术获得了空前的发展。宽频带地震波形数据的研究构成了当今宽频带地震学区别于传统地震学的主要特点。宽频带波形数据的模拟研究对于提高震源和地球内部结构成像的分辨率起着越来越重要的作用。特别是，宽频带流动地震台阵观测技术已经为探测大尺度、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[4~5]。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公里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公里级的垂向和横向分辨率[6]。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，由于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。宽频带流动地震台阵观测技术为探测大尺度、高分辨率三维地壳上地幔速度结构成像及地震学综合研究方面已经显示了独特的优势[7]。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。从1994年开始，美国地震学联合研究会(IRIS)酝酿并提出了建立由400个宽频带流动地震台站组成的美国大陆台阵计划[8]。

另一方面，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}~10^{-9}的水平。特别值得关注的是，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)[9]。对于大地形变测量来说，

维普资讯 http://www.cqvip.com

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。

上述情况表明：地球物理观测系统正在从传统的台网观测转向更加注重地球物理场的阵列观测。这种转变相应于高分辨率地球物理观测的强大需求，为地球内部介质精细结构的认知和地壳瞬态变形场的研究提供了前所未有的技术支撑条件。上述动向不但反映了在解决"上天易，入地难"问题方面的巨大进步，同时也使人类有可能像观测气象卫星云图一样，研究地壳的运动变形。如果研究一下大气物理观测技术的发展历史，我们不难发现固体地球物理的观测技术正在遵循类似的发展道路。在这种新的技术环境条件下，需要我们更新观念，重新思考地震预报的发展道路。

3 动力数值预测应成为地震预报研究的主攻方向

不可否认，地震预测的确是一个尚未解决的国际性科学难题。但是，地震预报研究徘徊不前的现实要求我们必须开拓新的研究方向。1997年以来，有关地震能否预测的争论促使我们不得不从理论原则的高度，重新审视地震预测面临的问题和困难[10~13]。为此，有必要深入分析不同时间尺度地震预测的主要难点，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。

几十年来，我国地震科学积累的研究成果表明，至少强震发生的区域和地点是有某种规律可寻的[14]。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。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[15~17]。

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。地震的成核是失稳过程的基本部分。没有加速变形，岩石的破裂失稳就不会出现。如果用某种方法能够探测到它，那末地震的短、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。因此，相应的动力学研究应是解决地震预测难题最根本的出路，并应作为我们集中力量研究的重点。

迄今为止，国内外在地震动力学的基本理论和应用研究方面已经取得了令人鼓舞的进展。有限元等数值模拟方法被广泛应用于地震成因和地震序列的研究[18~19]。地震波形数据的模拟已经能够在相当程度上成功地解释震源的破裂过程。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。因而，地震的数值预测应成为我们进一步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做出定量化的预测。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做出有效的预测。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。

维普资讯 http://www.cqvip.com

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能否建立相应的物理和数学模型。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。另一方面，地震数值预报的实践将有力地推进人类对地震复杂过程的认识，并将弥补单纯理论研究和室内实验的不足。

地震数值模拟研究首要的问题并非来自物理模型本身的缺陷，而在于缺少关于地壳结构复杂性的数据，以至于以往的研究不得不限于大尺度的定性研究。但是，近20多年来，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提供了前所未有的技术基础和经验。2000年美国地震学联合研究会(IRIS)提出利用30年的时间攻克地震预报。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已经获得国家资助。这使地壳上地幔复杂介质结构及其动力学响应的研究成为可能。现在的问题是，我们还没有下定决心，尽快建立中国的地壳形变的GPS阵列。应该看到，地壳形变的GPS阵列和巨型流动地震台阵构成了地震数值预报的“野外实验室”。

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。地震台阵观测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。

强大的数值计算能力是充分真实地模拟地震孕育和形成过程不可或缺的支撑条件。现代数值技术和巨型计算机技术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。日本地理勘察院等单位正在联合开展命名为CAMP(Crustal Activity Modeling Project)的研究计划。其主要目标是要利用日本全国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，但这标志着地震预测研究将开拓数值预报的新纪元。

对于以固体介质为研究对象的地震预报来说，时间尺度越小，预测难度越大。现阶段研究的战略重点至少不应该是短、临震预报。这与以流体介质为研究对象的天气预报正好相反。当前地震数值预报突破的目标应主要集中在地震的中期或中短期预报。鉴于地震数值预报的技术特点，应把人口和工业密集的巨大城市所在的地震高烈度区或地震活动性较强的区域，作为研究的重点。当务之急在于尽快建立试验场，开展理论和方法研究，开发相应的技术软件，通过观测实践，取得经验和实效。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，那末我们将面临失掉机遇的危险。

(作者电子信箱，刘启元：qyliu@ies.ac.cn)

维普资讯 http://www.cqvip.com

参考文献

[1] 石耀霖，刘杰，张国民. 对我国90年代年度地震预报的评估. 中国科学院研究生院学报，2000，17(1)：63-69

[2] 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. 地球物理学报，1997，40(增刊)：396-410

[3] 陈章立. 我国地震科技进步的回顾与展望(二). 中国地震，2001，17(4)：326-341

[4] 刘启元. 美国大陆岩石圈的地震台阵研究计划. 地震地质译丛，1985，8(2)：21-22

[5] IRIS Consortium. 1998 Annual Report. 1998

[6] 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. 国际地震减灾，1994(1)：9-13

[7] 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. 地球物理学报，2000，43(3)：356-365

[8] IRIS. USArray：A Synoptic Investigation of the Structure，Dynamics and Evolution of the North American Continent. 2003

[9] Takeshi Sagiya，Mitshiro Matsuura，Chihiro Hashimoto，*et al.* Monitoring of Crustal Deformation and Crustal Activity Modeling for Forecast. Procedings of the First China-Japan Workshop on Earthquake Disaster Mitigation. Beijing，China，2002：333-339

[10] Geller R S. Earthquakes Prediction：A Critical Review. Geophys. J. Int，1997，131：425-450

[11] Geller R S，D D Jakson，Y Y Kagan，*et al.* Earthquake Scan not be Predicted. Science，275：1 616-1 617

[12] Main I. Long Odds on Prediction. Nature，1997，385：19-20

[13] Wyss M. Can not Earthquakes be Predicted? Science，1997，278：487-488

[14] 张培震，邓起东，张国民，等. 中国大陆强震活动与活动地块. 中国科学(D辑)，2003，33(增刊)：12-20

[15] Scholz C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press，1990

[16] 马瑾，马胜利，刘力强，等. 断层相互作用的实验研究. 自然科学进展，2002，12(5)：503-508

[17] 张之立. 断裂之间的相互作用和应力场计算. 地震学报，1994，16(1)：32-40

[18] 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. 中国科学(B辑)，1982，12(8)：745-753

[19] 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(5)：469-477

Main Task of Earthquake Prediction Research: Numerical Dynamic Forecast

Liu Qiyuan

(State Key Laboratory of Earthquake Dynamics，Institute of Geology，CEA，Beijing，100029，China，E-mail：qyliu@ies.ac.cn)

Abstract The earthquake prediction is a sticker recognized universally. Nevertheless，simultaneously with strengthening earthquake hazard mitigation，the earthquake monitoring and prediction are still the priority task of China Earthquake Administration. Therefore，we should hold high the banner of earthquake prediction，and make our efforts to change the status of stagnating at the empirical prediction based on earthquake precursors.

维普资讯 http://www.cqvip.com

The great advances in the modern technologies, like satellite geodesy represented by the GPS, broadband seismic observations by the aid of portable mega-array as well as EMAP (ElectroMagnetic Analysis Program), demonstrate that the main stream of solid earth observation techniques in 21st century will be shifted from network observation to the array observation. These high technologies mentioned above as well as computer simulation technique have provided with unprecedented technical sustention for earthquake dynamics study. For this purpose, we need to be aided in the experience of the weather numerical forecast to break through the limitation of the current empirical earthquake prediction, and shift our attention to the earthquake numerical forecast based on the earthquake dynamics as early as possible.

Various projects, like the GPS array observation, the high-resolution study of the crust and upper mantle structure, 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. Now our problem is to strengthen and to coordinate multidisciplinary and branch cooperation, and start scientific experimentation and theoretical study of 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 seismic array; GPS array; numerical forecasting; earthquake prediction