

·基础地质·

地震预报现状及相关问题综述

吴中海¹, 赵根模²

WU Zhong-hai¹, ZHAO Gen-mo²

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 天津市地震局, 天津 300201

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China*

摘要:虽然对“地震能否预报”一直存在争论,但众多大地震的震例研究表明,前兆异常会或多或少地出现在地震孕育过程的不同阶段。国内外针对活动断裂的行为方式、大地震复发规律、活断层分段与大地震活动、大地震复发的概率预测和地震孕育过程与机理等,都提出了不同的理论模型,促进了地震预报的发展。中国的地震预报工作现状面临地质构造与地震地质工作基础仍明显不足、中长期地震预报工作程度亟需全面提高、中短期预报衔接不够和防大震意识还相对薄弱等诸多问题。基于这一现状与快速城镇化的国情,需在坚持地震预报研究的前提下,全面做好新构造、活动构造与地震地质方面的调查研究工作,夯实中长期地震预报的基础,并加强中短期预报的衔接,坚定防大震意识。同时切实加强防震减灾工作,有效提高强震活动区带上的建筑物与重大工程的抗震能力,并增强全社会的防震减灾意识,从而为地震预报研究提供持续发展的有利环境。

关键词:地震预报;大地震;地震前兆;活动断裂;地震危险性评价

中图分类号:P315.75

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2013)10-1493-20

Wu Z H, Zhao G M. The earthquake prediction status and related problems: A review. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(10):1493-1512

Abstract: The problem as to "whether earthquakes can be forecast or not" has become a matter of intense debate both in China and abroad; nevertheless, many empirical and physical earthquake precursor phenomena have been discovered based on the analysis of a large number of strong earthquake examples, and the emergence of the precursors more or less exists in different phases of the seismogenic process. In regard to the important theoretical problems related to earthquake prediction, researchers of different disciplines have proposed many different theoretical models, such as the behavior of active faulting, the law of earthquake recurrence, active fault segmentation and large earthquake activity, the probability of earthquake recurrence prediction, the seismogenic process and the mechanism. These processes have also effectively promoted the development of earthquake prediction research. However, the situation of earthquake prediction work is not optimistic in China, and there are still many problems which require further improvement, such as obvious deficiencies of the basis of geological structure and seismic geology, the insufficiency of survey and study extent both in intermediate-term prediction and in long-term earthquake, the lack of cohesion between intermediate-term prediction and short-term earthquake prediction, and the relative weakness of the awareness of preventing large earthquakes. Based on this situation and the conditions of speeding up the urbanization process in China, the authors hold that at present the most realistic approach to mitigating earthquake disasters is the strengthening of the survey and study of geological structure and seismic geology on the premise of persisting in earthquake prediction research. At the same time, the work of preventing and mitigating earthquake disasters should be strengthened at several levels, the seismic resistance capabilities of major projects and buildings along the strong earthquake and active tectonic zones

收稿日期:2013-06-06;修订日期:2013-08-22

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011120163)、基本科研业务费项目(编号:DZLXJK201202)和国家自然科学基金项目(批准号:41171009)

作者简介:吴中海(1974-),男,博士,研究员,从事活动构造与地震研究。E-mail: wzh4488@sina.com

通讯作者:赵根模(1937-),男,研究员,从事地震活动性和预测研究。E-mail: zhaoming@ziffdavis.com.cn

or areas should be improved, and the whole society's consciousness of preventing and mitigating earthquake disasters should be heightened so as to create a favorable environment for the sustainable development of earthquake prediction research work.

Key words: earthquake prediction; large earthquake; earthquake precursor; active fault; seismic disaster evaluation

广义的地震预报(Earthquake prediction)实际上包含了地震预测(Forecast)与预报(Prediction)两个方面。前者是针对某一地区或明确的活动构造带或断裂带的具体段落未来某一段时间内发生地震的可能性、趋势或活动状况做出的科学预测。后者是狭义的地震预报,并对其具体科学内涵及法律与制度有所限定,特指针对1个未来地震事件发生的具体地点、震级和时间三要素进行准确预报的过程^[1-2]。后者又可分为2种:①根据观测到的前兆异常作出的预报,称为前兆性预报;②根据以往地震记录,经统计数学分析外推的预报,称作统计预报。这2种都是当前地震预报的主要方法。另外,地震专业部门还常通过综合多项方法进行预报,称为综合预报。总体而言,无论从科学研究角度,还是社会经济层面,对地震预报和预测做出相对清晰的区分是非常必要的,否则容易引起混乱或混淆视听。就目前的地震预报水平而言,所能做到的绝大多数都是地震预测,严格意义上的准确地震预报尚无法做到。现在所掌握的单项预报方法很难同时对3个要素都给出具体的和准确的答案,而只能概略地预测其中的1个或2个要素,属于不完全预报或预测,即使综合多项前兆对3个要素进行预报,仍只是概略性的,但这对于防震减灾同样具有重要的科学意义和实际价值。

地震预报研究工作是多种科学观测为基础,通过正确认识地震发生的机理与规律,能动地对地震三要素(时间、地点和震级)进行预测的科学探索过程^[3]。因此,无论是地震预报,还是地震预测工作,都必须建立在扎实可靠的前期工作基础之上,主要包括地震地质调查,重点是活断层鉴别与活动性分析,古地震(又称“史前地震”)研究、历史地震记录和考古地震资料分析、地震统计分析、地震危险性分析、地震烈度区划、震害预测等。在此前提下,还必须进一步开展的工作主要有:地震台站的观测记录与数据分析、现今地震活动性分析、地震前兆(物理、化学)观测与资料分析、宏观前兆分析与识别判断,最后综合上述结果作出综合预报。但由于地震预报是“人命关天”的问题,同时又对经济社会生活影响极大,因此,是非常严谨的事,既要严格依赖科学技术,还要考虑社会经济等多方面因素。

地震活动与地质构造,尤其是与现今正在活动的地质构造具有密切的成因联系,世界上绝大多数强震活动都发生在活动构造带或断裂带上。由于中国大陆地处欧亚板块东南部,其南部和东部分别被印度板块、太平洋板块和菲律宾板块所夹持,现今地壳运动强烈,活动断裂众多,因此,陆内强震活动极为频繁,历史上饱受地震灾害之苦,也是世界上地震灾害最为严重的国家之一。自1997年西藏玛尼发生7.5级地震以来,至2013年4月的四川芦山7.0级地震,在短短不到7年的时间内,中国大陆已接连发生了包括东昆仑8.1级地震和四川汶川8.0级2次特大地震在内的共6次7.0级及以上大地震,表明中国已经进入了新的大地震活跃期。在此背景下,中国现阶段的地震活动和相关的地震预报问题都备受关注。本文希望通过概述国内外关于地震预报工作的现状,总结目前存在的主要问题,以期进一步促进社会对地震预报工作及相关问题的了解与认识,从而科学地看待地震预报及相关问题。

1 地震预报的产生

1.1 社会需求催生地震预报

人类历史上遭遇过无数次灾难,有自然因素造成的,也有人类自身因素引起的。其中可短时间内致人类大量集中非正常死亡的直接原因有2个,一是战争,二是重大自然灾害。统计显示,除了相对少见的小行星撞击地球、特大洪水和全球瘟疫之外,“杀伤率”稳居所有自然灾害之首的就是地震,如1920年发生在中国宁夏海源的8.5级大地震,死亡23万人;1923年发生在日本的关东地震引发火灾,共有14万人毙命;1976年中国的唐山7.8级大地震几乎把整个城市摧毁殆尽,并导致24万多人死亡;1960年的智利9.5级大地震,不仅使1万人丧生,而且地震引起的海啸亦给万千米之遥的美国夏威夷和日本东海岸造成巨大损失。令今人印象尤为深刻的是21世纪后发生的几次特大地震造成的巨大伤亡事件。2004年印尼苏门答腊9.3级地震及其激发的海啸几十分钟内就致死24万人,2008年中国汶川的8.0级地震造成8万多人死亡,2010年的海地太子港7.3级地震致死近23万人,2011年日本的宫城福岛9.0

级地震不仅致死近2万人,还损坏核电站引起了严重核泄漏,其灾害影响可能还将延续百年。同时,上述发生在东亚板块边界的2次特大地震显示,福岛9.0级地震突破了日本长达2000年的历史地震最大震级记录,苏门答腊9.3级地震则突破了全亚洲地区历史地震的最大震级记录。发生于中国陆内的2008年汶川8.0地震也突破了四川省的历史最大震级记录。这些都充分显示,新一轮地壳运动的强度在升级。再有,太子港地震规模不大(7.3级),但几分钟内致死近23万人,也突破了死亡/震级比全球记录。此次地震中90%以上致人死亡是住房倒塌所致,对此联合国也束手无策。重大的地震灾害激起了社会与公众对地震预报的强烈需求,也引起公众和社会对地震预测预报和预防工作的重视,人们最大的希望就是地震能事先预报,对于人口众多,居住条件不良的发展中国家尤其如此。

伴随包括中国在内的全球地震活动的升级,人类对安全的忧虑也在升级,在此形势下,民众对地震预报的需求尤为迫切。实际上,人类自古就有地震预报的需求和意识,而中国也是最早关注地震预报的国家。1663年的宁夏隆德县志就曾记载:“地震之兆约有六端:井水突然浑如墨汁,泥渣上浮,池沼之水无端泡沫上腾…”^[4]。但由于古代科技水平低,做不到地震预报。直到20世纪中叶,第2次世界大战结束,伴随着和平环境的到来,科技水平的不断提高,地震预报工作终于开始起航。

1.2 地震预报的历史回顾

20世纪50~60年代是地球科学发展史上的重要阶段,有2件大事:①全球板块构造与海底扩张学说的正式提出及确立;②地震预报的开创和起步。

1948年10月中亚阿什哈巴德发生 $M_s7.5$ 级地震后,当地的水文地质工程师在整理自来水公司的地下水化学测试数据时,意外地发现震前水氢浓度异常增高,震后恢复。这一事件引起了前苏联地震学家的关注,认为地震是有前兆的,而且可以用现代精密科学仪器探测,于是开始了大量探索,并于1966年4月发生乌兹别克斯坦塔什干7.5级大地震之后,在中亚和远东地区设立了一系列地震预报试验场,随后开始了较系统的地震预报现场研究和基础性的理论与实验研究。

1962年日本恢复了因发动侵华和太平洋战争而中断的地震预报研究工作,并从1964年开始推行

地震预报的第一个五年计划,并持续至今。其重点是推进地震预报实用化和确立地震预报方法,并提高地震预报精度的观察与研究,同时,不断加强地震预报的基础研究和新技术开发工作^[5]。

美国在50年代为侦察苏联核试验布设了全球地震台网,记录了大量天然地震数据,并在地震波、震源物理研究方面获得重大进展。之后由于1964年阿拉斯加地震造成了1906年以来最严重的灾害,美国组织地震科学家制定了地震预报研究规划,开始地震预报试验工作。

同期,德国、法国、英国也与土耳其合作开展了地震预报研究,希腊、意大利则相继开展了地中海地震预报方法试验。

中国在1956年制定的10年科学规划中首次确立地震预报课题,1966年发生的邢台6.8级、7.2级大地震,拉开了中国地震预报的序幕,中国成立了专门负责地震预报的机构。经多年努力,于1975年成功地预报了辽宁海城7.3级大地震,经联合国调查核实确定为世界上第1次成功预报 $M_s \geq 7.0$ 级地震,政府在震前向社会公众正式发布,疏散了人口,极大地减少了伤亡,取得了国内外公认的减灾实效。但在第2年唐山大地震前,关于“有大震”与“无大震”2种意见争论不休,最终后者占上风,做出错误结论,导致了地震预报失败。而后接连出现的多次大地震的漏报或虚报,不仅给地震预报事业蒙上了一层又一层阴影,也使部分学者对地震预报的信心遭受重创。

地震学家在几经曲折之后也逐渐认识到,目前无论在理论上还是实践中,地震预报仍然是一个悬而未解的重大科学难题。国际著名的日本地震学家安艺敬一(Keiiti Aki)曾在答记者“关于地震预报问题”的提问时指出,“海城地震预报成功了,但唐山地震预报失败了,这就是当前的地震预报现状。”这一回答非常巧妙地指出,正处于开创期的地震预报,实际上就是一个探索过程,有成有败,并不奇怪。由政府公开宣布的预报除了中国海城地震比较成功以外,尚没有其它国家取得成功,如美国1987年正式公开宣布的帕克菲尔德地震预报,以失败告终。但十几年后,该地震迟到一步发生了,震级、地点都很接近,只是时间比预计的晚。其它国家虽然也有零星关于较小地震预报取得成功或部分成功的例子或报道,但总体上是胜少败多,小胜大败就是现状。地震

预报现状也进一步使人们认识到:地震预报是一个全球性科学难题。正如前美国地震学会会长、地震预报评估委员会主席、加州理工学院教授克拉伦斯·艾伦(Clarence Roderic Allen)在评定地震预报进展情况时所说,地震预报的进展比初期预料的缓慢得多,地震预报的科学难度要比原先预料的困难得多^[6],而制约这一难题的关键之一是对地震前兆的认知程度和可观测性。

2 地震预报的依据、争论与困难

2.1 地震预报的依据——地震前兆

地震前兆是地震预报的重要依据和基础。大量震例表明,强震(指 $M_s \geq 6.0$ 地震)和大震活动(指 $M_s \geq 7.0$ 地震)往往都有种类和数量不等的前兆存在,并且地震前兆异常的平均数量、最长持续时间、最远距离等均随震级的增高而增加^[7-10]。中国是最早注意地震前兆并留下大量记载的国家。如《银川县志》记载了 17 世纪华北和甘肃、宁夏一带地震活跃期间群众总结的一些前兆现象,其中谈到,宁夏地震“大约春冬二季居多,如井水忽浑浊,炮声散长,群犬围吠,即防此患。至若秋多雨水,冬时未有不震者”^[11]。这几句话总结了发生地震的季节背景(春、冬二季居多),更重要的是概括了地下水、地声、动物、气象等前兆现象,展示了运用多种前兆变化进行综合预报的思想^[11]。

中国地震学者在 20 世纪 80 年代,通过对大量震例中的地震前兆或异常进行分析、梳理与总结^[7-9],将其中曾出现过的 927 条地震异常或前兆,归纳为

11 类观测手段、75 个项目^[10],充分显示了地震前兆的丰富性和多样性。张国民等^[11]将地震前兆分为趋势性异常和突发性异常,前者指可持续数月、1 年、甚至几年的趋势性异常,显示缓慢而稳定变化的特点;后者指在震前数小时、数天或十多天出现的突发性异常,具有快速变化特点。不同类型的异常实际上反映了孕震过程不同阶段的效应。20 世纪 80 年代后期,时任国际地震学和地球内部物理协会(I-ASPEI)地震预报委员会主席的怀斯(Wyss)曾组织了对全球典型地震前兆的遴选,应用孕震过程中震源应力(应变)场及其时、空、强分布的理论,对世界各国报来的前兆进行严格评审和检验,并于 1991 年和 1994 年分别公布了第 1 轮和第 2 轮评定结果^[9]。结果被接受的前兆占所提交前兆的 13%,不能肯定的占 14%,未被通过的占 73%。其中通过评审的包括了前震、强余震前的震兆式平静、地下水氢含量增高、地壳形变等前兆异常。

国内当前已发现、且较被普遍认可的地震前兆主要有十几种,根据感知方式不同可分为微观前兆和宏观前兆两大类(表 1)。前者指用精密仪器观测到的具有现代科学内涵的前兆异常,并且需专业台站观测,有地表、钻孔、山洞及海底、空间遥感等观测形式,很多仪器对环境要求很高,观测难度较大。另外,“微观前兆”的起源可归为 2 种^[12]:一是认为地震在孕育过程中会发出某些特定的“必震”信号;二是认为地壳内的应变动态演化总会表现出某种物理的、化学的异常变化,并通过异常变化有可能反演地壳介质的应变和应力的变化。需要指出的是,目前中

表 1 主要前兆类型与标志

Table 1 Major types of earthquake precursors and markers

类型	微 观 前 兆	宏 观 前 兆
主 要 前 兆 标 志	1) 地震活动性	1) 动物行为异常
	2) 大地形变(包括水平及垂直形变、GPS、INSAR、水准、跨断层伸缩仪、倾斜仪等观测)	2) 植物(如不适季节的发芽、开花、结果或大面积枯萎与异常繁茂等)
	3) 地球物理(重磁电等)	3) 气象(主要有震前闷热,人焦灼烦躁,久旱不雨或阴雨绵绵,黄雾四散,日光晦暗,怪风狂起,六月冰雹(飞雪)等,还有射线云与地震云等)
	4) 地球化学(地下水化学等)	4) 声光电(地声、地光和电磁异常)
	5) 地下水位	5) 地气或地雾
	6) 地应力与地应变	6) 水(包括井水、泉水等,主要异常有发浑、冒泡、翻花、升温、变色、变味、突升、突降、泉源突然枯竭或涌出等)
	7) 地震波速	
	8) 地温与远红外图像	
	9) 地脉动	
	10) 震源机制	
	11) 地震波形、高频地震、S 波分裂、尾波衰减等	

国用于地震活动性和前兆观测的台网分布十分不均匀,突出表现为西部地区台站很少,主要集中在东部人口密集区,这与中国地震活动性整体上西强东弱的特征恰恰相反。同时,中国利用人造卫星和航空航天技术进行与地震相关的观测研究还刚刚起步,自主型观测技术手段和资料积累还很欠缺,仍有很长的路要走。

地震的宏观前兆指由人的感觉器官能直接感知的前兆异常(表 1),其中比较常见的有井水陡涨陡落、变色变味、翻花冒泡,泉水流量的突然变化、温泉水温的突然变化、动植物的习性异常,临震前的地声、地光、地雾、电磁异常等。其中动物异常是震前征兆的普遍现象^[12],由于不同动物的生活习性和敏感程度的差异,所反映的异常状态和特征也不一样。如隆冬季节数百条毒蛇出“洞”或“自寻短见”,成千上万只青蛙携幼搬迁,离开震中数百米等。由于地震宏观前兆的特征突出,与老百姓的日常生活密切相关,并相对易于发现,因此是在大地震群测群防中最适合普及的方法。

上述常见的地震微观与宏观异常现象都曾在中国的多次大地震,包括龙陵地震、松潘地震、唐山地震中不同程度地出现,并得到了进一步证实^[13-15]。实践经验表明,地震前兆出现的时间(提前)和范围与地震的震级密切相关,并通常是与震级成正比的。大震的微观前兆一般在震前几年就已开始出现,几个月到几天最明显,种类也多,幅度从小到大,震前 2~3 天会出现突变性、突发性和大幅度异常。而宏观异常一半出现在震前几天、十几天,多集中在震前 1~3 天内,特别是大型哺乳动物异常,震前 1~2 天最多、最显著。虽然在强震或大地震活动前经常有前兆现象出现,但如何正确判定和利用震前异常来预报地震仍存在众多争论与困难。普遍面临的问题是^[12],这些异常的出现究竟和地震有多大的联系,成因与机理如何?前兆为什么有时出现,有时却不出现,原因何在?利用这些前兆异常预报地震的准确性和可信度究竟有多高,以及如何正确地对待和利用宏观异常?

前人在多年的实践中发现^[11],地震前兆现象非常复杂,已有的绝大多数异常与地震关系并不唯一,它们可能是地震异常,也可能只是一般的地壳变动所引起,所以有前兆观测异常出现不等于就有地震发生。迄今为止,地震前兆与孕震过程的内在成因联

系,地震前兆与地震之间是因果关系还是伴生关系,地震前兆是震源生成还是构造应力场生成等问题也都尚未解决^[12]。因此,始终贯穿地震预报实践的突出难题之一是地震前兆异常的识别问题,因为要从观测值的变化中判断“可能性前兆”,须识别正常变化背景和排除干扰性异常。如何用异常来准确判断可能发生地震的三要素也是同样的突出难题。另外,由于地震区域、地震类型、地质构造环境、震区受力过程等方面的差异,不同地震的异常表现会有显著差别,从而给地震预报造成很多困难,特别是短临预报,难度更大。如:同样是 7.0 级大震,有的趋势异常可持续 2、3 年甚至更长,有的仅 1 年左右。短临异常的差异性更加突出,海城、松潘等大震前短临阶段的宏观异常几起几落,持续了 1、2 个月,唐山的震前宏观异常主要集中在震前 1、2 天内。此外,有的地震前 1、2 天内有突出的前震群活动,而很多大震前却无特定的前震群发生。

总体而言,虽然地震常有多种前兆表现,但在目前的技术手段下,仍然无法在地震预报中做到利用前兆异常准确圈定地震的三要素,解决这一难题,除了必须进一步加强地震预报的基础性研究,包括地震发生的地质构造背景、地震地质条件、震源动力条件、地震破裂方式、前兆机理等,同时还要正确认识地震类型、孕震过程与机理、前兆表现的本质等,才能够逐渐使地震预报建立在更加可靠、可信的科学基础之上,而这个道路可能是漫长的。因此,地震前兆的判别与应用问题不仅是摆在地震预报工作者面前的重要科学难题,也是引起“地震能否预报”这一争论的重要因素。

2.2 关于地震预报的争论

关于地震预报的最大争论是“地震能否预报”。这一争论主要开始于 20 世纪 70 年代后期至 90 年代初,中国唐山大地震、美国帕克菲尔德地震、日本神户地震等的预报相继失败,致使一些学者对地震究竟能否预报产生疑问。一部分日本地震学者认为,地震是不能预报的,而希腊地震学家瓦洛特索斯(Varotsos)以利用测量地电场方法成功预报地震为依据^[9],认为地震预报已经过关,引起争议。至 90 年代后期,争议不断扩大和激化,于 1997 年和 1999 年分别在《Science》和《Nature》杂志专门发文展开辩论,引起了国内外社会各界对地震预报问题的广泛关注^[3, 16-17]。其中,以美国物理学家盖勒(Geller)和卡

甘(Kagan)等为代表的学者认为^[18-21],地震空间是开放性耗散结构,地震是自组织临界现象,具有非线性、随机性和混沌性,因此,地震很难准确预报,利用经验性的地震前兆预报地震准确性也很难保证。同时指出,当前对公众负责的地震工作重点应该是地震减灾,包括:对特定区域主要活动断裂带在未来数年内或 30~100a 期间的地震活动性与活动强度做出可靠的长期预测,为城镇规划与建筑物抗震设防提供重要依据;建立大震参数速报和实时警报系统,能够在震时为公众提供宝贵的逃生时间,并在震后及时地提供准确的震级与位置,从而有效促进救灾工作、地震海啸预警等。

以怀斯为代表的地震学者明确指出^[22],虽然目前地震经常是难以准确预报,但相信通过不断探索和研究,最终地震预报这一科学难题是可以解决的。因为,地震并不总是突然发生的,这一随机性系统在演化中可以出现短期有序性,表现为相当部分的地震在发生之前存在较明显的地震活动异常或前兆,根据这些异常已经对一些地震做出过正确预报,但当前不论是认为“地震是无法预报的”,还是认为“地震预报已经解决”,都是不正确的^[23]。同时建议,地震预报工作不能放弃,而必须坚持,并给予稳定的科研经费支持。

20 世纪 80 年代,针对地震预报的途径与方法也同样展开过激烈争论^[4]。一种观点认为,现在已经可以通过数理统计给出异常与地震之间的关系,对异常变化与孕震过程可以作出物理解释,因此,地震预报已经成为可能,当前主要的任务应该是加强观测,及时发现异常,进行预报,即所谓用经验反演法预报地震。另一种认识是,目前对孕震过程还缺乏认识,对前兆机理解释不清,必震信息尚未掌握,因此,现在的主要课题是实验研究和理论探索,建立地震孕育和前兆表现的物理模式,并以相关模式为依据,进行前兆观测和地震预报,即所谓用正演法预报地震。认识上的差异并没有影响预测预报工作的正常进行,国内外从事地震研究的国家很重视反演法,即地震前兆的观测工作,同样也在不断加强地震预报的正演法,即理论研究,并先后提出了许多重要的地震孕育模式和机理^[4,11]。客观上看,这些争论其实都是有利于地震预报的,因为,通过公开的辩论使公众明白了什么是经验性预报和物理性预报,为什么地震预报这么难,为什么是科学难题。地震预报的难

度、复杂性、多样性要比 50~60 年代开创期要大得多。因此,大辩论有利于提高地震预报的科学性、严密性和水平,但也给当时已不太景气的地震预报工作泼了冷水,导致这项工作进一步陷入低谷,也深刻影响了中国的地震预报工作及发展。近期在四川汶川、青海玉树和四川芦山接连发生的 Ms7.0 级以上的大地震皆发生在之前被地震预报部门认定的中长期地震危险区之外,表明中国当前的地震预报工作还明显滞后于地震活动的步伐,仍有大量基础性工作要做。

2.3 地震预报的困难所在

严峻的现实充分说明,地震预报是最为棘手的全球性科学难题。制约地震预报研究与发展的客观因素主要是^[24]地球本身极为复杂的系统,且处于非线性发展过程中。地震多发生在地壳内部 10~20km 及以下,远远超过了目前人类直接通过仪器观测到的深度。基于目前的技术手段,只能在地球表面及地表浅层利用数量有限、分布相当稀疏的台网进行地震活动和前兆观测,而利用在地表获取的很不完善、很不充足、有时还是很精确的资料去探测和反演地壳深部的震源过程显然困难重重^[25]。同时,大陆强震的小概率性使得在短期内积累足够多的震例资料,并揭示地震孕育模式和发生的规律是不现实的。因此,目前的地震预报主要是在对地震孕育、发展及发生规律等都尚不清楚的情况下进行的,这也从根本上制约了地震预报水平的提高^[26]。

从地震活动本身来看,地震预报的困难包括以下几方面:①地震活动具有浑沌性、随机性和自组织性,且影响因素众多,属极为复杂的地球物理现象,预报难度特别大;②由于目前人类还无法在地壳深部的震源附近布设仪器直接观测地震发生过程,因此,难以全面了解地震源发生的真实物理过程,比如根据现有的地震成因理论,地震是由于岩石中的应力积累达到了岩石强度时发生的,那么理论上只要能够测量到震源处的岩石强度与应力即可预报地震,但目前的技术方法无法实现直接测量震源处的岩石强度与应力;③大陆强震的孕育发生过程一般都很长,特别是 7.0 级以上的大地震,在一个地区,常常是百年一遇或千年一遇的,而人的寿命很短,因此,在一个地区难以重复试验,也难以多次观测其全过程;④岩石圈很不均一,地质构造与岩石性质因地

而异,比如有地方震前观测到大地电场、磁场有异常变化,在别的地方就不一定适用,前者可能地下有厚层花岗岩,压电、压磁效应显著,后者可能只有玄武岩或沉积岩,电磁效应不显著,区别很大;⑤预报靠的是前兆,但目前已提出的前兆有几十种,五花八门,种类繁多,并因地、因时而异,都有局限性,只有少数几种,如前震、空区、水氡等被多数人认可,而且前兆大多都有明显的“不确定性”,缺少普适性的必震前兆,使人难以判断。同时,还有很多前兆缺乏严格检验,充其量是强相关现象,但要检验证实也不容易,因为一个地方并非经常发生大震,大震的原地复发周期很长,对具有地方特色的前兆进行检验需要很长时间,这也不现实。

地震的前兆特征不同,可预报程度也存在差异,据此可将地震分为三大类。第 1 类是易预报型,前兆显著、种类丰富,时、空间集中性很强,容易观测到,易识别,如有明确前震序列和前兆异常的海城地震、邢台地震、玉树地震等;第 2 类是可预报型,前兆显著丰富,但没有前震,判断难度较大,有可能预报,但时间很难确定,比如唐山地震;第 3 类是甚难预报型,前兆异常不明显,没有前震,短期预报可能性极小,只能做出长、中期预报,临震预报几乎不可能。

地震预报所面临的诸多困难表明,实现真正的地震预报需要长期的科学探索和积累。多数地震学家也坚信,随着科技的发展,预报的总体难度会逐渐降低,成功率会逐步增加,但在相当长的时期,如几十年或上百年内,仍将以经验性预报为主,或逐步过渡到经验性与物理性预报并用状态。

3 与地震预报有关的主要理论模型

虽然在几十年的地震预报研究中,成功的预报不多,但关于活断层上的地震发生规律与孕震过程的研究一直在进行,认识也在不断加深,并先后提出了许多相关的理论模式,为利用活动断裂研究成果、古地震与历史地震资料开展地震危险性评价与中长期地震预报起到了非常重要的基础理论支撑作用。这方面的主要理论探索包括:活动断裂的行为方式及其地震活动特性与大地震复发规律、活动断裂分段与地震预报和强震的孕育过程等。

3.1 活动断裂的行为方式与大地震复发规律

3.1.1 活断层的基本行为方式

由于粘滑型断裂的活动主要是通过地震活动的方式来实现的,因此,活断层的行为方式与其上的大地震活动是密切相关的。目前对断裂活动习性及其上的大地震活动特征主要存在 2 种截然不同的观点(图 1):一种认为断裂活动符合“Reid 型”行为^[28],即断裂的平均活动速率在不同时间尺度上是稳定不变和近乎均匀的,符合线性行为,这时其上的大地震活动以周期性或准周期性活动为主^[29-31];另一种观点认为断裂活动行为主要为“Wallace 型”^[32],即断裂长时间尺度的活动速率可以是相对均匀的,但短时间尺度上的活动速率是可变的,即可以明显大于或小于断裂的长期活动速率,即表现为明显的不均匀性或非线性特征,对应的大地震活动主要以丛集性的方式出现^[32-38]。因此,不同的断层活动习性往往对应着存在显著差异的大地震活动方式。实际上,2 种不同的断裂活动方式都存在,其中前者

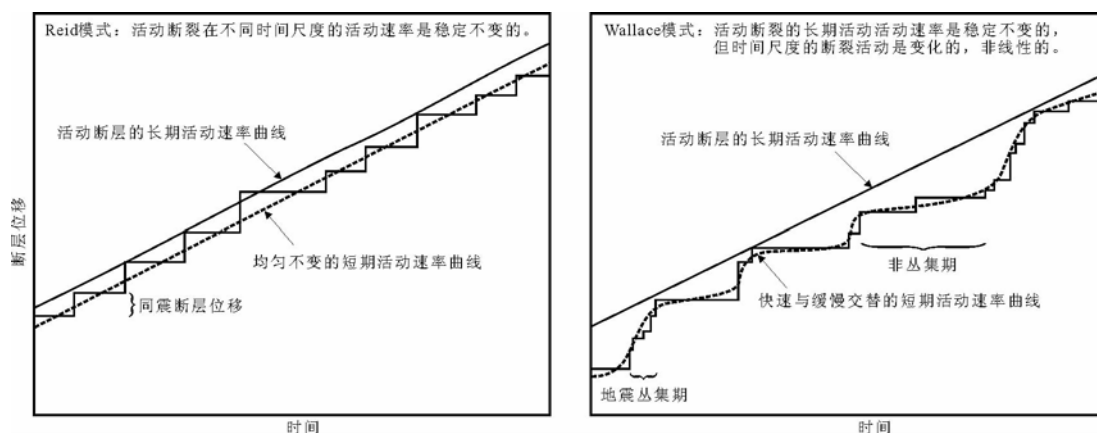


图 1 活动断裂行为的 2 种基本模式(据参考文献[27]修改)

Fig. 1 Two models for active faulting behaviors

常见于板块边界断裂带上,而后者主要出现在板内活动断裂带上。探索断裂活动习性与大地震活动方式之间的关系,主要是通过获得不同时间尺度的断裂活动速率,并进一步研究活动断裂带的晚第四纪活动历史及其古地震活动特征来实现的,相关方面的研究成果可为开展区域地壳稳定性评价和地震危险性分析等提供非常重要的理论支撑。所以,关于活动断裂的活动习性与大地震活动特征及内在的岩石圈变形机制等一直都是活动断裂研究领域的前沿课题。

3.1.2 强震的复发规律与主要模式

针对 1 个区域或 1 条活动构造带进行中长期地震预报,主要包含确定性预测和概率性预测 2 个阶段^[39]。前者是通过地震构造类比和地震活动性重复原则,回答“会不会发生地震”的问题。其中,地震构造类比原则指,与已发生地震的震例区的地震构造(主要是活动构造)具有类似特征的区域,未来也有可能发生类似相应震例的地震活动;地震活动性重复原则是,如果某一地区曾经发生过地震,那么该地区在未来仍有可能重复发生类似甚至更大的地震。概率性预测主要是解决地震发生的时间及可能性(即发生概率)的问题,需要通过不同的大地震复发模式及相应的概率模型来实现。

大地震原地复发模式与现有的地震成因理论密不可分。自 Gilbert^[40]首次提出“地震是弹性应变积累和释放过程的最后一站”的概念后,Reid 等^[28, 41]根据跨圣安德烈斯断裂带的地壳形变观测结果和相似强度的大地震在断层同一部位重复发生的现象,归纳出了关于地震成因的弹性回跳理论。基于这一理论模型,当断层运动以相对均匀的稳态滑动为主时,大地震活动会在同一位置周期性地重复发生。在此理论指导下,研究者先后提出了多种大地震原地复发模式,比较有影响的包括(图 2):Bufe 等^[43]提出的严格周期模式,Shimazaki 等^[42]提出的时间可预测模式与滑动(或震级)可预测模式和 Savage 等^[44]提出的准周期复发模式 4 种。这些模式对活动断裂带的地震原地重复活动规律的认识和解释都是不同的,并在中长期地震预报中起着重要指导作用。

(1)严格周期性复发模型:指断裂滑动速率恒定不变,每次发生大地震的断层破裂的极限应力值与震后的应力下降值也都是恒定不变的。这时,大地震在原地重复发生的震级和 2 次地震之间的时间间隔

都相同,因此,如果古地震与历史地震资料符合要求,则震级与时间都可预测。

(2)时间可预测复发模式:指断裂滑动速率恒定不变,每次发生大地震的断层破裂的极限应力值也恒定不变,但震后的应力下降值不固定。这时,一次地震的大小与下一次地震的时间间隔成正比,因此,如果已知上次大地震的震级大小,则可以预测下一次地震的发生时间,但震级无法预测。

(3)震级可预测复发模式:指断裂滑动速率恒定不变,每次大地震后应力下降的终止应力值恒定不变,但导致断层破裂的极限应力值不固定。这时,下一次大地震的震级大小与其发生之前的应力积累时间呈正比,即如果已知 1 条活动断裂带距最近一次大地震后的持续时间(也称离逝时间),那么下一次大地震的断层错动量或震级是可以预测的,但时间无法预测。

(4)准周期模型:指某震源区或断裂段上每次大地震的断层破裂的极限应力值与震后应力下降后的极限值都可在一定范围内波动。这时大地震活动表现出地震之间的时间间隔与震级大小也大体在某一数值附近摆动,但摆动幅度不太大的行为特点。

在上述 4 种基本的地震原地复发模式中,前 3 种实际上属于准周期复发模式的 3 种极端情况,并且都属于“特征地震”复发行为^[45]。特征地震(characteristic earthquake)是指在同一震源区或特定断裂带上重复发生的震级大小与破裂长度都相同或相近的地震,即认为 1 条活断层或其特定段落上的发震规模与习性保持基本固定^[38]。必须指出的是,关于特征地震的复发行为模式都是基于对板块边界断裂带上地震活动的研究结果,包括环太平洋俯冲带和圣安德烈斯断裂带等,因此,它较好地反映了运动相对稳定,且比较符合 Reid 型断裂活动行为的板块边界断裂带上的大地震复发特征。但对于受应力传递与变化和断裂间相互作用影响显著的板内活动断裂,其地震活动会更多地时间和空间上表现出丛集性的特点^[32-34, 46],即大多数板内断裂活动与地震活动经常是非线性和不均匀的(图 1)。因此,在板内构造条件下,进行活动断裂的中长期地震预测,必须首先根据古地震和历史地震活动资料确定断裂带目前是处于丛集期还是非丛集期,进而再选择合适的模型进行未来大地震危险性评价。目前,前人对中国大陆一些典型活动断裂带地震复发行为的初步研究结果表

明,处于丛集期的地震活动多表现出较良好的准周期行为和ación可预测行为^[46-47]。

大地震危险性评价中,在确定或掌握了活动断裂的大地震复发模式的基础上,还需要进一步明确活动断裂带或其特定段落下一次大地震在未来某个特定时段内复发的可能性大小,即未来大地震发生的概率,这需要利用实时概率模型来分析评估^[48]。最早的地震中长期预测概率模型是 Cornell^[49]提出的泊松-指数模型,其假设在一条断裂带或震源带上,地震在时间和空间上都是随机发生的,且地震次数与震级呈指数关系,即地震活动遵循泊松随机发生的假设。该模型的主要特点是认为未来地震发生的概率独立于上次地震的离逝时间,由于该模型所需要的约束参数较少,适合于在对地震孕育和发生规律及成因机制都知之甚少的情況下运用,即在那些地质和地震资料比较缺乏的地区可发挥一定作用。但随着对地震成因的物理机制和复发规律的进一步认识,研究者发现地震的孕育和发生过程不是完全随机的,而是具有一定的内在规律性,因此,出现了更新模式。该模式认为地震是随时间变化的事件,每次地震的发生只是时间轴上的 1 个点,因此,地震的时间间隔是一些相互独立的随机变量,即地震是处于不断的更新过程中,但总可以用相同的概率分布来表示发生下一次地震的时间间隔^[50]。更新模式的最突出特点是,完全忽略了每次地震的大小对震后平静时间长短的影响,这在并不能确切地掌握一个活动断裂带上过去发生的每一次地震的大小时是非

常有用的^[45]。在更新模式中,常见的概率分布模型包括:对数正态分布(也称 NB 模型)、伽马分布、韦布尔分布和 BPT(Brownian Passage Time)分布(相当于醉步电梯模型,也称扶手电梯醉步模型)^[50]。其中 Nishenko 和 Buland 根据对环太平洋地震带的特征地震复发间隔的归一化拟合分析结果,建立的 NB 模型在早期得到了广泛应用^[48, 51]。该模型认为,地震的复发基本符合准周期模式,而复发间隔则主要服从对数正态分布。随着古地震研究的深入,越来越多的证据表明,地震的复发并非简单的准周期重复,而会表现出时空的不均一性、丛集性或者非线性^[48]。另外, NB 模型建模方法的理论依据和地质依据也并不充分,这给活动断裂地震潜势概率评估结果带来了很大的不确定性。因此,近年来,一些研究者开始放弃 NB 模型,转向从物理机制出发重新探讨大地震复发间隔所服从的概率分布模型,并提出了 BPT 模型。该模式认为地震的发生间隔犹如人乘坐扶手电梯到达终点的时间,如果人在电梯上不行走,开动的电梯始终以恒定的时间到达,但如果人在电梯上像醉汉一样时前时后地行走(这种现象即为醉步或称“布朗氏运动”),则到达的时间将或是提前,或是推后。因此,地震发生的时间间隔也同样会在时间上出现差异。BPT 模型将地震发生间隔的偏差归结于周边地震的影响,因为受周边地震的影响,发震断裂带上的应力会时而增大,时而释放一部分,这将导致地震的发生时间不是恒定的,断层滑动速率也是不稳定的。该模式近年来在美国加州和日本的地震危

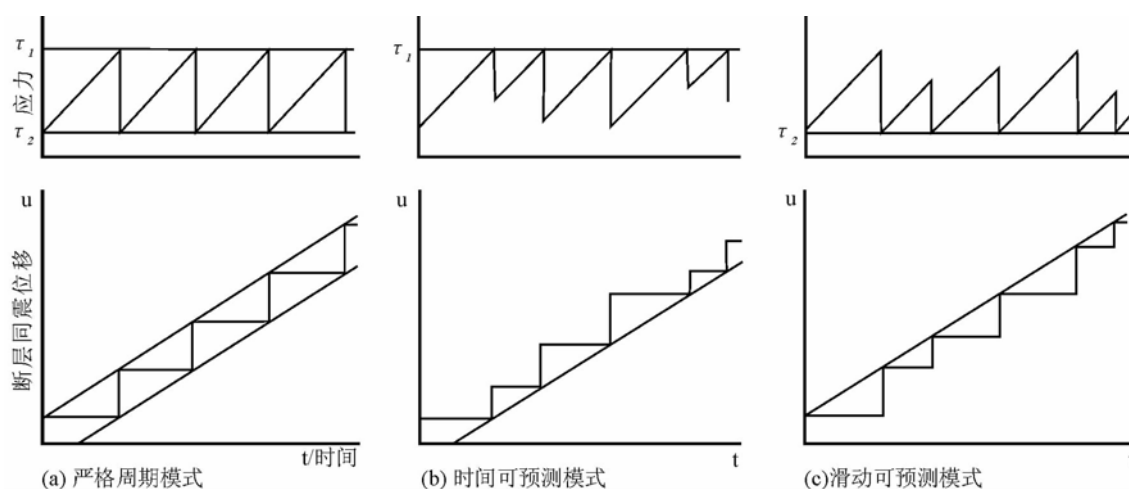


图 2 3 种基本的强震原地重复理论模型(据参考文献[42])

Fig. 2 Three basic types of in situ strong earthquake recurrence theoretical model

险性长期预测中正逐渐得到重视及应用^[50, 52]。

3.2 活动断裂的分段性与地震预报

规模较大的活动断裂通常会沿走向出现空间几何分布与活动性方面的差异,这种差异实际上就是断裂分段性的表现,而活断层的可分段性又与其上的大地震破裂过程紧密相关。因为 1 次独立的地震事件一般仅仅是使 1 条大断层上的一部分破裂,而整个断层的破裂活动是通过一个或多个破裂段的组合而完成的。因此,断裂的分段实际上也对应着地震破裂的分段现象。这一事实已为断层上大量的历史地震和古地震资料所证实^[6]。因此,活断层分段的实质是确定断层上大地震破裂活动的基本单元,即对断层进行独立破裂单元的划分。对 1 条活断层的分段主要包括了对断层不同段落的走向、连续性及其活动特点等的识别。前人将活断层的分段归纳为 4 种基本情况^[53]:①断层形态的几何学分段:根据断层的分布排列等几何学特征进行的段落划分;②断层的结构分段:包括根据断层带内及两盘岩性、地层结构的特征而进行分段;③断层的活动性分段:是根据断层长期以来的活动性差异进行分段;④断层的破裂分段:是针对断层上地震破裂发生、发育状况进行的断层分段。由于活断层分段研究的重要目的之一是确定 1 条活断层上未来地震破裂段落的位置和可能发生大地震的强度,因此,与其关系最密切的是断层的破裂分段,这意味着同一断层上不同段落的地震破裂活动历史可以是不同的。另外,活断层的破裂分段与特征地震活动、地震空区或空段、断层位移的累积亏损、地质障碍体等都密不可分^[53]。其中特征地震的出现可指示断层上独立破裂段落的存在,而地震空区揭示断裂活动是以段落式的地震破裂为单位出现的,为分段提供了更明确的标志。断层位移的累积亏损指多期地震破裂重复后,由于每次在破裂终止部位的位移量相对小,因此形成累计亏损现象,这也提供了破裂分段依据。地质障碍体,包括岩性障碍或构造障碍对破裂的扩展都具有阻碍作用,是断裂破裂分段的重要依据。

破裂分段的方法主要是利用断裂带上有关的地质构造及地震活动的各种信息,确定断层上一些稳定的破裂段落的范围。活断层上基本破裂单元终点的常见标志主要包括:断层的不连续或不平整部位、挤压或拉张阶区、断层走向的变化或弯曲部位、断层分支处、横向断层或其它构造的交叉

部位、断层活动性与活动速率变化等。依据这些特征,可限定活断层上的各个破裂段落,即确定大地震可能发生的位置及其破裂范围,并用段的长度估计未来大震的强度。这些在地震的长期预报及地震危险性评估中都具有非常重要的实际意义。但要把活断层破裂分段用于地震预测和危险性评价,还必须解决好 3 个重要问题^[6]:①确定未来的大地震破裂将发生在断层那一段,破裂起始与终止的位置,以及破裂引起地震动的空间影响范围;②获取断层各段落上地震复发间隔的定量数据,除了断层滑动速率外,更重要的是获取较长时间尺度(至少万年)内的历史地震和古地震事件的定量资料,建立不同段落的大地震活动时间序列,并推测未来断层破裂的发生时间;③估算断裂不同段落上大地震破裂事件的强度,特别是确定最大震级,主要利用未来强震破裂的发生范围来估算。在完成这些工作的基础上,更科学地判断与评价活断层上未来大震最可能出现的位置、最大震级、危险区范围及对地面振动的影响等,从而提高地震长期预测与危险性评价的可靠性,并为重点监测台网的合理布设提供依据。

3.3 孕震过程与主要模式

物理正演法地震预报的关键是对地震孕育过程的认识,即了解和掌握地震从孕育到发生整个过程的物理原理与机制。同时,通过对孕震过程与模式的研究,更科学、全面地了解前兆异常机制,提高对前兆的正确判别与认识,有助于在经验性反演法地震预报中提高短临预报的准确性。国内外关于震源孕育发生的理论研究,自 20 世纪 70 年代以来就开展了许多有意义的探索,并先后提出了许多比较有影响的理论模式^[54]。如美国学者提出的地震孕育的“膨胀-扩容模式”和前苏联学者提出的“雪崩式不稳定裂隙形成模式”。在实验研究和现场探索的基础上,中国学者也提出了若干关于震源孕育和地震前兆的理论模型,如郭增建等提出的“震源组合模式”和牛志仁等提出的“膨胀-蠕动模式”,其它还有地震孕育的“红肿”模式、流变介质的扩展模式和强震孕育的坚固体模式等^[25, 54]。

在现有的模式中,比较有代表性的包括以下几个。

(1)膨胀-扩容模型:指震前岩石介质发生体应变,体积增大,微裂隙增多,并吸纳地下水,发生

扩容,导致孕震体发生膨胀-收缩运动,孕震体在膨胀-收缩后期会导致其上部岩层发生破裂引发地震。

(2)断层粘滑机制:指大部分地震沿已有活动断层经长期闭锁后,由于应变积累超过断层所能承受的极限发生突然滑动。

(3)凹凸体模型:指断裂带并非是光滑的,其中通常都存在摩擦强度很大的凹凸体,从而易于导致闭锁,这些凹凸体部位便是发生地震的地点。

(4)障碍体-坚固体模型:该模型将孕震系统分为震源区和近源区 2 个部分,前者是破裂强度大于周围介质的相对坚固体,后者是包围震源区,并在构造力学上与其有紧密联系,但强度低于震源区的外围断层网络块体系统。由于前、后两者的介质结构和强度差异,会导致孕震过程中 2 个区之间的前兆性差异及前兆异常的时空动态演化。因此,该模式可较好地解释某些重要的前兆特征。

(5)震源组合模式:将震源区分为应力积累单元及其两端的应力调整单元,前者为高强度的闭锁区,后者是低强度的蠕动段。在构造应力作用下,后者通过蠕动不断向前者输送应力,从而在积累单元形成应力集中,最终发生地震。

(6)膨胀-蠕动模式:是震源组合模式的具体化和定量估算。该模型认为当调整单元向积累单元输送应力到达一定强度后,会引起积累单元岩石膨胀,并在进一步发展过程中导致断层蠕动及其加速破裂,进而发展为快速失稳破裂(地震)。该模式认为,震前的趋势异常机制是积累单元岩石膨胀的结果,而短临异常机制是震前断层蠕动和加速破裂引起的。

尽管现在的孕震理论研究距离实现地震预报的目标还有相当大的距离,但上述多方面的理论探索及研究成果都不同程度推动着地震物理预报工作的发展,为预报提供了重要的理论依据,并具有明显的创造性。此外,自 20 世纪 90 年代以来,围绕地震预报问题,在活动断层分段与地震预报^[9]、活断层上的大地震离逝时间、古地震事件及其复发特征与规律、强震触发作用与断层间相互作用、地震电磁学与地下流体学^[59]、空间遥感与观测(包括 GPS 和 INSAR 等)、地壳的三维层析成像、天体影响(如日月潮汐力作用)、地球旋转与地震关系以及工程地震等众多方面的研究,也均取得了一系列重要的进展,并

为地震预报工作的进一步持续发展创造了非常有利的条件。

4 地震预报体系、发布方式及其对策

4.1 地震预报体系

目前,国内外关于地震预报体系具有比较一致的看法。国际上常用的地震预报体系一般分为长期预报(Long-term prediction)、中期预报(Intermediate-term prediction)和短期预报(Short-term prediction)3 个阶段,但不同国家对地震预报阶段的时间划分多不相同^[9],其中最具代表性的是 Sykes 等^[56]的划分方案。该方案将地震预报分为长期潜力预测(Long-term potential)(>30 年)、长期预报(10~30 年)、中期预报(1 个月至 10 年)、短期预报(几小时至几周)和即时警报(Immediate alert)(0~20s)。

中国地震学界在对大量实际震例资料系统研究的基础上,结合对地震孕育过程和地震前兆机理等科学问题的实验和理论研究,在 20 世纪 90 年代逐步发展形成了“长、中、短、临”渐进式的地震预报科学思路,并建立起了具有自己特色的地震预报体系和工作程序^[29]。在中国的地震预报体系中,长期预报一般是数年至 10、20 年的地震形势预测,中期预报是几个月至几年的地震危险区及其强度预测,短期预报是震前几周至几个月的地震预报,临震预报则是震前几小时至几天的地震预报。

地震预报体系的阶段划分主要基于对大量实验结果和实际震例资料的综合分析结果。因为多年来对孕震过程阶段性及其发展特征的认识中发现,不同的地震孕育阶段,与地震震源区(即地震包体)的岩石应变积累变化过程具有很好的对应关系,总会出现或对应不同的前兆现象,同时又与不同的地震预报阶段相对应(图 3,表 2)。

总体而言,结合地震包体的孕震与破裂过程,可将地震预报过程与震后恢复划分为以下 7 个阶段,不同阶段的震源区岩石应变特征、前兆异常与地震预报工作重点都有所不同。

(1)长期预报:震前数年到几十年,岩石介质主要处于弹性应变积累阶段,在地震活动图像上会出现地震窗、地震空区或空段等现象。该阶段的地震地质工作重点包括:活断层与古地震调查研究、历史地震与考古地震研究、地震次生灾害调查与研究、未来大地震损失评估、地震烈度调查与区划、地

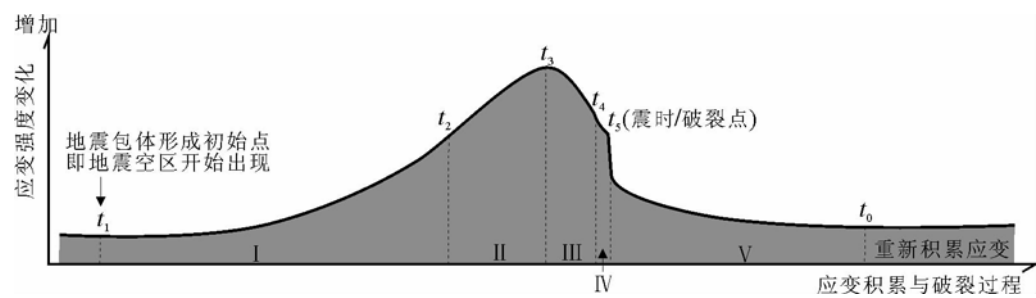


图 3 地震包体的应变积累与破裂过程及其与地震预报阶段的对应关系
Fig. 3 The corresponding relationships between strain accumulation of earthquake inclusion, earthquake rupture process and earthquake prediction stage
I—长期预报阶段; II—中期预报阶段; III—短期预报阶段; IV—临震预报阶段; V—震后;
 t_2 、 t_3 、 t_4 分别代表中、短、临震阶段地震前兆开始出现的时间节点

应力与地壳形变观测、现今地震活动性研究、地震空区分析等。

(2)中期预报:震前几个月到几年,首要任务是预报地点和震级。该阶段中,岩石介质已进入非弹性应变阶段,微破裂发育、发展,岩石体积膨胀,地形变加速,环形空区成形,水位、波速比和地震 b 值(指一定

区域内的中—小强度地震活动表现为服从于指数分布的古登堡—李克特震级—频度关系,并呈负相关性,即 b 值曲线,b 值为其斜率,其大小可反映区域大地震前的应力状态)一致出现下降,重磁电缓变。

(3)短期预报:震前几周到几个月,首要任务是预报地震发生的时间。此阶段的岩石介质进入

表 2 地震破裂过程与预报阶段划分及主要的前兆异常
Table 2 The major earthquake anomaly markers corresponding to different earthquake rupture processes and earthquake prediction stages

异常类型	长期 (数年—几十年)	中期 (数月—几年)	短期 (几周—月)	临震 (几小时—几天)	震 时	震 后
岩石应变	弹性应变积累	非弹性应变，裂隙发生、发展，出现流体和热物质运动等	断层蠕动，裂隙稳态亚稳态扩展	断裂开始失稳，预滑，出现流体和热物质剧烈运动等	断层失稳破裂，能量释放	剩余能量释放 介质破碎
地震活动	一类空区—环形空区 平静	前兆地震，地震条带 b 值下降—回升		前震—平静	主震	余震爆发—衰减
地震波	震源区波速与震源机制变化，波形（高、低频）异常，S 波分裂，尾波衰减异常 波速比下降—回升			前兆波形	震源机制，地震波的烈度效应，振动传播	
地形变	地壳缓慢隆起 出现大地测量、断层位移和地倾斜等异常	地形变异常加速	短基线、水准测量和地倾斜等形变异常出现转折	突变，倾斜暴	地面宏观变形	恢复调整
地应力	古应力场	井下应力测量曲线出现异常				区域应力调整，应力场变迁
重磁电	出现流动重磁电区测量异常和缓慢变化		重磁电异常大幅度变化	重磁电异常突变	不同程度的后效	
地下水	地下水径流异常，有缓慢升降		出现水位动态异常加速现象	水位突变	不同程度的后效	
水化学	少量变化		较明显变化，氦、氢、CO ₂ 增加和亚硝酸根含量异常		不同程度的后效	
气象	降水和气温的平均及极值和气压波分析			气象异常： 风、霞、雾 ...	极移及转速变化	
天文	太阳活动、地球自转和极移应力			朔望对应		
生物	小型、大型动物异常和植物异常					
其它				地声、光、电		

注:部分内容据参考文献[11]

破裂加速阶段,应变速率激增,微破裂数量和破裂幅度增加,形变幅度显著增大,b 值和波速比回升,地下水位急剧下降,重磁电异常幅度急增,地下水化学异常明显,并开始出现宏观异常,以小型动物异常为主。

(4)临震预报:震前的几小时至几天内,首要任务仍是时间的预报。该阶段内断层开始失稳、预滑动,前兆异常反向,倾斜暴与宏观异常突出,会出现突发性事件,如地下水与石油井井喷等。

(5)震时:几秒至几十秒瞬间,主破裂发生,能量大释放,地表或地层发生宏观破坏,地震波传播并辐射能量。

(6)震后:局部异常与能量大幅度剩余释放,岩石介质破碎,余震活动,区域应力场进行重新调整。其中余震活动和应力场调整过程可以持续几天、几个月至几年不等,特大地震的余震可持续几年至十几年。工作重点是地震地表遗迹考察和成因机理研究,总结发震特点与规律。

(7)恢复常态:破裂逐渐愈合,并重新开始积累应力。

另外,需进一步指出的是,大震后的强余震也会造成破坏,并可能加重震区人员伤亡,所以强余震预报,尤其是晚期强余震预报也很重要。由于余震的能量、震级和频度是按照幂函数曲线衰减的,很有规律,在余震初期观测掌握了衰减规律后,预报强余震会相对比较容易实现,只是晚期的强余震预报相对难一些。但总体而言,余震预报比主震预报容易,两者的难度相差千倍、万倍,不可同日而语,因此,两者不能混淆。

4.2 地震预报的发布方式

各国法律规定,地震预报须由相关职能部门提交判断依据、预报理由和预报建议,上报政府,由政府领导人决定并正式向公众发布,其他人或职能部门无权发布。

近年来一些国家还发展了地震预警系统,地震预警与地震预报仅一字之差,却有本质的区别。预警是在地震已经发生的情况下,向居民快速及时发出警报,以尽早采取躲避、关闭电脑、电源、火源、车辆停驶等措施,减少伤亡和经济损失,实际上是在预报不过关的情况下的实用性补救技术,可分为 2 种。

(1)利用无线电波比地震波传播速度快几万倍的时间差,地震发生时,地震台站将记录到的地震波

通过无线电(速度 $30 \times 10^4 \text{ km/s}$)通知城镇居民,在地震波到来之前(速度 $4.6 \sim 8.1 \text{ km/s}$)及时采取躲避等措施。

(2)利用横波速度比纵波慢 1.75 倍的时间差原理,当地震发生时,破坏力小的纵波先到达城镇(速度约 8.1 km/s),触发警报器,提醒居民趁破坏力大的横波(速度约 4.6 km/s)尚未到达的瞬间采取躲避等措施。

地震预警的原理决定了其预警效果与震源距成正比,越远时间差越大,避震效果越好,例如海沟地震,距岛弧内陆几百千米,时间差长,预警效果明显。因此,该方法对于沿海地区较适用。中国台湾海峡地震时,福州、厦门等城市可采用;东海地震时,青岛、上海、宁波可行;渤海地震时,天津、大连、烟台、威海、东营等城市可行。内陆性浅源地震由于震源距小,效果较差,城镇附近的地震(如城市直下式地震)效果不大,比如河北唐山、四川汶川、日本神户、台湾集集等城市的直下型地震,时间差很小,基本来不及预警,只能结合地方与震源带实际情况采用。

4.3 火山与海啸的预报发布

火山预报与地震预报的实质与方法技术相似,但因火山位置已知,监测目标清楚,比地震预报容易很多,技术方法也已经基本过关,不过也常有意外,比如较贫穷国家监测站不足等。火山预报中,可根据监测站记录到的火山地震、前兆波(火山颤抖),倾斜暴,火山口喷气、地温升高、动物迁移等前兆异常,及时发布预报,引导居民有序撤离,同时加强防护,减少人员和经济损失。

海啸预报或预警是在海底大地震和海底火山喷发后,监测台站根据波动方程计算出可能发生海啸的海岸及到达时间和海浪高度等信息,通过无线电通知居民采取躲避措施,通知船只驶离危险区。将其称做预报或预警都可以,也比地震预报容易。但是在发展中国家由于监测力量不足,往往出现意外。例如 2004 年印尼苏门答腊地震死难 24 万人,大部分是海啸造成的,主要是由于该地区海啸监测预警机构与设施缺乏所致。

4.4 国内外的地震预报对策

面对地震预报难题,由于国情不同,各国对策不同,作法不同,总体上可分为以防震减灾为主和以地震预报为主。以欧美国家的发达国家,在预报频

频失利后,决定以加强研究为主,放长线,不急于搞预报,但为了尽可能地减少伤亡损失,主要强调防震减灾,在居住政策和建筑抗震上狠下功夫。例如,欧洲发达国家法律规定房价与居民收入挂钩,国家限制房价收入比为 3.0~5.0,超出便违法,并严禁投资购房,以此保证人们大部分买得起房,住房平等均衡,居住安全保障比较到位,使地震伤亡率明显下降。同时,通过在民用建筑中推广先进抗震技术(或隔震技术),将防震减灾落实在实处,抓住关键,以保证做到地震低伤亡,有效降低了地震预报压力,可不急于搞预报。

大多数发展中国家人口多、宜居地少、地震灾害频繁、住房不均衡、居住条件拥挤、民用住房建筑质量普遍较差,且居住密度也很大,因此,地震伤亡率居高不下,如苏门答腊、太子港、汶川等,1 次地震死亡几万至几十万人。此形势下的地震预报压力也随之增大。

事实证明,无论是以防震减灾为主,还是以地震预报为主,实际上都存在缺陷。如在发达国家新西兰,极力推广抗震技术,2010 年 9 月 4 日凌晨当地最大城市克赖斯特彻奇遭遇该国 80 年来最严重地震(7.1 级强震)。地震造成多座建筑物损毁,道路桥梁严重破坏,但由于隔震技术发挥作用,做到了零伤亡,引起全世界注目。可是时隔 1 年,在 2011 年 9 月 24 日,该市又发生了 6.3 级强余震,却意外地造成 300 人死亡,主要原因是抗震结构在 2010 年的主震时已受到破坏,在第 2 次地震中已不起作用。因此,惨痛的教训表明,即使防震减灾技术过关了,也并非一劳永逸,地震预报仍不能放松,应该是两手抓,两手都要硬。

5 当前中国地震预报工作中存在的主要问题

近 30 年来科技飞速发展,监测仪器与设备等都在不断更新,并实现了现代化和数字化。但地震预报工作的进展并不大,甚至有所退步,其中既有科学技术的原因,也有主观因素,可概括为以下几个方面。

5.1 活动构造调查与研究基础相对薄弱,不能满足地震预报需要

地震是深部岩石破裂的过程,如果强烈的地震在原地长期、多次活动便会形成地表可见的活动断裂或活动构造带。因此,从地质的角度来看,地

震本质上是断层活动的表现,即属于一种地质构造活动方式。事实也表明,强震,特别是大地震绝大多数都发生在活动构造带上。地震预报中所涉及的基础地质研究主要是活动构造研究,或称之为地震地质研究,其主要任务是查明主要发震和控震构造带的空间展布及其几何学与运动学特征,同时,从长时间尺度(至少是万年至十万年尺度)查明主要活动断裂带的史前大地震(即古地震)的发生时间、期次、规模和活动规律等。有了可靠的地震地质研究工作,就可以从地质角度,分析判断哪些地方属于现今的构造活跃地带,未来的大地震活动将最可能发生在哪些部位,最大震级有多大,大地震活动的周期和未来危险性如何等重要问题。解决了这些问题,就可以为区域大地震活动的长期趋势预测、中长期地震预报,以及城镇化与重大工程建设过程中的防震减灾规划等提供重要和必需的基础地质依据。

中国的活动构造研究从 20 世纪 20~50 年代的萌发期以来,主要经历了 60~70 年代的重要地震区带地震地质调查、80~90 年代中期的活动构造定量研究、90 年代中晚期以来的活动构造研究快速发展及广泛应用阶段^[57-58]。在这些过程中,中国地震地质学家围绕重大工程建设的地震安全性问题以及城市建设的防震减灾规划需求,开展了大量的与地震活动相关的活动断裂调查与研究,基本查明了中国大陆的活动构造基本格局,并针对一些重大活动断裂带进行了断裂分段性与古地震活动性的定量研究,完成了一系列重要的地震地质基础图件编制和活动断裂研究专著,取得了许多重要成果^[57-58]。但中国陆域面积广,现今地壳活动性强,活动断裂数量多,长期缺乏区域性的活动断裂普查工作。因此,整体上看,目前中国活动构造的研究基础还比较薄弱,认识程度远不能满足进行可靠的大地震中长期活动趋势分析判断的需要。突出表现在以下几个方面。

(1)中国大陆的地质构造极为复杂,活动断裂众多,最近邓起东先生通过主持编制 1:400 万中国活动构造图,共梳理出各类活动断裂 800 余条^[59-60],但由于长期以来一直缺乏针对整个中国大陆的区域性活动断裂普查,因此,这一数量肯定还不到实际活动断裂数量的 1/2,而在已知的活动断裂中,据保守估计,研究程度相对较高的可能只占其中的 10%~

20%, 目前大量的研究工作也只是集中在其中的少数几条规模较大的断裂带上。因此, 总体而言, 中国活动断裂调查研究的系统性和全面性都明显不足, 这也显著影响到了全面准确地进行区域地震烈度评价与区划。

(2) 新构造方面可靠的年代地层数据匮乏, 导致地层的划分与对比相对混乱, 也制约了对断裂活动时代及其运动速率的正确分析和判断。同时由于对多数断裂的研究深度和详细程度不够, 经常缺乏可靠的断裂活动性、活动速率和古地震事件等方面的定量数据。仍以新编的中国活动构造图为例^[60], 其中有断裂活动速率数据的断裂只占到 1/4 左右, 而有古地震破裂研究资料的只占不足 1/10。这一研究现状必然严重阻碍着对大地震活动趋势、特征和规律等的更深入认识。

(3) 整体上对许多大型活动断裂带缺乏全面和系统的调查与研究, 由于很多研究往往只是集中在 1 个活动断裂带或构造带某一段上, 并且大部分活动断裂研究的定性资料多, 定量数据少, 不仅影响了对活动断裂带整体活动特征及其大地震活动规律的全面认识, 同时也阻碍了活动构造体系划分及大地震危险性评价等研究工作的进一步深入。

(4) 受研究与认识程度等限制, 对许多断裂的活动性和运动性质认识不同, 导致新、老断裂常常混淆, 从而对活动断裂序次与级别的认识出现严重分歧, 导致活动构造体系的研究明显滞后。因此, 目前已有的现今地壳运动学模式都难以合理或全面地解释中国强震区的现今地块运动特征与控震机理, 这不利于对大地震活动及其迁移特征与规律的认识。

5.2 地震预报的指导思想仍存在缺陷

活动构造研究程度不足所导致的最直接后果是中长期地震预报的可靠性较差。当前中国地震预报的主流观点认为中长期预报已基本过关, 关键是短临预报不过关, 因此, 近年来主要将重点放在抓短临预报上, 而相对忽视了中长期预报, 预报一旦失败一概归罪于前兆异常不清楚且难于判断, 但事实可能并非如此。以唐山地震为例, 当时在震前已观测到大量微观异常, 且数量和类型都远超海城地震, 包括重、磁、电、地形变, 地下水、水化学、地应力、波速比、b 值等, 异常出现区域包括

唐山市区和附近的昌黎、宝坻等地, 并经过了专家反复落实。到 1976 年 1 月金口地震会商时, 国家地震局地球物理研究所、天津市地震局、地震地质大队和分析中心等单位的代表与专家在会上发言宣布, 他们分别依据地电异常、波速比和 b 值异常, 地应力异常和华北干旱等, 估算认为即将发生地震, 且震级规模按以前震例统计将达 7~8 级左右, 此时距发震还有半年的时间。但这时开始了激烈争论, 专家分为无大震和有大震两派, 主要观点有: ①唐山、天津一带不存在深大断裂, 不具备发生 7~8 级左右大地震的地质构造条件; ②华北历史上从没有连年发生大于 7.0 级地震的先例, 1975 年海城发生大震, 所以 1976 年不可能再一次发生大震。因此, 这些大幅度异常不全是地震的前兆, 而是另有原因, 一是海城地震的“后效”, 二是京津之间和唐滦地区将发生 5~6 级左右中强地震的前兆, 这些因素叠加在一块, 显得异常很大。于是当时否定了主张“有大震”一派的意见, 并否定将发生大震。到 1976 年 3~5 月已出现宏观异常后, 例如河北青县石油废井自动喷油和唐山造纸厂出现地火等, 河北省地震局、天津市地震局及分析中心的部分专家要求紧急会商, 修改之前“无大震”的结论, 但遗憾的是, 有关领导和部门没有及时修正结论, 而是犹疑不决, 结果错过时机, 漏了大震, 预报失败。由于唐山地区是否具备发生特大震的地质条件这个本应在中长期预报中解决的基础地震地质问题没有及时解决, 导致当时的主要专家给出了错误答案, 即使到了短期阶段, 发现了大量前兆异常, 也没有被当作预报地震的证据, 而是加以否定, 认为是海城地震的后效。可见并非未发现短临前兆, 前兆很显著, 根本原因是中长期判断失误。

汶川地震也与唐山地震具有相似之处, 因为事先大多数专家依据有限的活动构造调查资料和 GIS 观测结果认为龙门山断裂带整体上属于晚第四纪活动性弱、发生大震能力较差的断裂带, 其中仅有一小段断裂属于全新世活断层, 且滑动速率不高, 因此, 该断裂发生大震的可能性很小。震前一年, 虽有地质学家根据最新的地质构造调查研究结果, 在国际期刊发文指出, 沿龙门山中段未来具有发生大于 7 级大地震的危险^[61], 但未被引起重视和广泛认可。甚至在震前有专家发现前兆异常并预报地震时, 也被

上级否定。这其实也是长期以来忽视了该断裂带的地震危险性,属中长期判断有误所致,是可以理解的。因为龙门山断裂的晚第四纪滑动速率低是事实,事出有因,但也恰好说明,如果地震活动性的中长期判断失误,即使出现短临前兆(包括大量宏观异常)也不会实现成功预报。以上 2 个例子也说明中国目前的中长期预报工作仍存在明显不足,工作程度亟需进一步全面提高。同时也说明,目前对断层活动性的认识还很不全面,或只知其一,不知其二,中国的地震地质工作基础也有待进一步夯实。另外,唐山地震和汶川地震,都是在之前烈度区划的 7 度区发生 11 度地震,可以说是长期地震危险性预报失败导致中期和短期预报失败的典型事例。因此,这一问题比已知的要复杂、难得多,关键问题也不全在短临前兆。总体而言,中长期预报和短临预报哪个也不能轻视,都应重视,都要加强。正确可靠的中长期地震预报也是指导城镇规划与重大工程建设抗震减灾工作的基础,有利于更好地防范大震、减少损失。

5.3 中期与短期预报衔接不够

发现短临前兆很难得,确定性的更难得,这是很宝贵的信息。中国地域广,断层多,地形地貌复杂,地震台站偏少,不易捕捉到短临前兆。但充分利用中期预报可以缩小重点监视区的范围,可将有限的监测仪器、人员与设备等投入到缩小的范围,这比稀疏的台站,更可能捕捉到前兆异常。比如汶川地震前几年有中期预报的信息可将范围缩小到川北一带,如果当时在川北加强前兆异常监测,则有可能报出大震。但遗憾的是,当时并没有注意到这些中期预报方法提供的宝贵信息(大自然送给地震学家的信息),或是忽视了已很成熟的中期预报方法(国家地震局 85 攻关项目推荐方法),在此情况下,否定了一些专家提出的短临前兆,甚至在媒体上辟谣,结果让人后悔莫及。因此,如果有良好的中期预报,将有助于促进或保障短临预报的成功率,也就有可能尽量避免“大震漏报”的发生。

5.4 须正确应对虚报与漏报问题

由于地震预报的难度很大,虚报与漏报在所难免,但漏报的后果很严重,因为人命关天。而虚报又会引起社会混乱,同样能造成重大的经济损失。因此,地震界长期存在“宁可虚报也不漏报”和“宁可漏报也不虚报”2 种截然相反的主张和争论。

当前,地震相关部门频频辟谣,主要是因为担心虚报引发混乱。汶川地震就是如此,但导致了漏报悲剧。在唐山地震前的 7 月 9 日,国家地震局在唐山专门召开了华北地震群测群防交流会,目的也主要是辟谣,安定人心,结果导致 7 月 28 日的地震中损失惨重。究竟应如何应对复杂情况?太过谨慎,失掉时机,容易漏报,不谨慎又容易虚报,很矛盾。妥善解决这一问题,需要从 2 个方面入手:①加强防震减灾工作,切实加强建筑物的抗震性能,真正做到“小震不坏、中震可修、大震不倒”,只有生活环境安全了,民心才能安定;②通过地震科学知识的普及,加强和提高民众在地震防范和面对地震谣传方面的科学与法律素质,有效避免虚报引起的动乱。

同时,还需要创造有利于地震预报工作健康发展的自由环境。事实上,很多大震漏报或预报失败后,仅仅是停留在编写学术性的震例总结报告层面,这显然是不够的。如果对震前的监测预报过程、争论与观点分歧、会商的不同意见和决策过程等真相,不是科学地进行公开总结和讨论,而以“地震预报不过关”搪塞或掩盖过去,则对于地震预报究竟是什么环节出现了失误谁也不清楚。长此以往,不及时深刻地总结经验 and 反省教训,地震预报便不会有进步,不利于地震预报工作的发展,并导致漏报大地震悲剧一再重演。因此,科学需要公开讨论,比如爱因斯坦的相对论和魏格纳的大陆漂移学,都是在争论中确立和完善的。在国际上,地震预报大辩论自由讨论很活跃,但国内近年来对于地震预报的自由讨论氛围已明显不如早期,如 20 世纪 70~80 年代,在一些公开出版的关于大地震的总结性专著中,虽然没有披露预报过程,只限于震后的统一认识,但仍有关于地震前兆异常的详细内容。而汶川大地震后已 5 年,至今无汶川地震前兆总结方面的成果公开出版。如果自由的科学讨论氛围得不到改善,也不利于中国地震预报的顺利推进。

5.5 重视地震前的基础工作,努力克服地震健忘症

在汶川地震前几年,当时朱镕基总理曾批示地震部门“应把主要工作做在地震发生以前”,这实际上是希望地震预报工作要尽量避免“马后炮”的现象。在 1976 年唐山大地震后,中国中东部大部分地区经历了持续 30 年之久的大震较少的相对平稳时

期,中国的地震预报工作也随之经历了多年的低潮期,相关部门的防大震意识已大大减弱,出现了麻痹思想。在汶川地震发生前,有四川地震部门的专家向上汇报地震异常情况,但未引起足够重视,也未能认真检验报上来的微观与宏观异常,而是忙着辟谣灭火。等到大震发生并造成重大伤亡后就很被动。因此,由于震前的地震地质和相关基础工作不到位,在认为是全新世不活动或活动弱的构造带上却发生了大地震或特大地震。在大地震发生后发现了多期古地震遗迹和发震断裂等晚第四纪强烈活动的证据,为什么震前没有发现呢?可以说,从唐山到汶川大震,都存在典型的“马后炮”现象,这一现象的反复出现,反映出中国的地震地质工作基础还不扎实,仍有很多工作要做,中国属于大震多发国家,这一现状亟需改变。又如,2010年4月14日,青海玉树7.1级主震发生之前的2h曾发生4.7级前震,但又是因为对玉树断裂带大地震的危险性缺乏中期预报,出现前震却未引起警觉,当作了一般地震,未能对后来的震情发展做出及时、正确的判断,从而导致了相对严重的人员伤亡。

同时,必须极力避免“地震健忘症”问题。地震专家常常指出,大地震的复发周期很长,是小概率事件,瞬间成灾,是“一过性”事件,而不是经常发生。因此,一系列历史经验表明,往往是当地震造成了大量人员伤亡时,公众的恐怖感和威胁感便会在短期内快速上升,这期间也会对地震预报很重视,发誓要把预报搞成功。但过一段时间,待地震活跃期已过,进入相对稳定期后,公众和社会就会逐渐淡忘曾经发生过的灾难。因为人的寿命比地震周期短很多,经历过地震的逐渐逝去了,而新一代人没经历过,没体验过,当然不会重视,更不会耗费财力去搞预报。等重新进入地震活动期,地震又发生了,又造成了大量人员伤亡,于是又重视了,又发誓要搞预报,可过一段又会遗忘了。如此循环往复,地震预报工作便不能持续健康发展。任何科学的突破都是需要有长期稳定的积累过程,所以,如果地震预报工作总是如地震的活跃与平静期一样,重视一阵放松一阵,忽热忽冷,便总是搞不好,这也是当前人能上天却不能预报地震的重要原因之一。

5.6 责任不清,防大震意识相对薄弱

日本神户地震预报失败后(实际上是一次漏报),

气象厅地震课长(相当于中国的地震局局长)石川友三主动辞职,并向国民谢罪,勇于担当,让人敬佩。反观中国的地震预报工作,一直存在责任不清的问题。如汶川地震是否属于漏报,至今没有结论,仅以“地震目前无法预报”为由作解释,这显然是不科学和缺乏责任感的做法。既然无法预报,在出现异常时,公开向社会辟谣“不会有大地震发生”,事实上是在发布无震预报,岂不是也属于“地震预报”?自相矛盾。最近,在意大利,因地震学家在强震发生前,当前震发生之后,公开否认前震,并发布“不会有强震”的言论,导致部分民众放松警惕而出现伤亡事件,最终被判入狱。这一事例表明,地震辟谣不当,同样危害无穷,并且出了问题也须负责。因此,不能总以“地震无法预报”做挡箭牌,如长此以往,报不报都没有关系,缺乏责任和担当,只会让公众对地震预报的误解更深,也对中国地震预报工作的推进不利。

国家设置地震机构的初衷是专门负责研究和探索地震成因与机理,并尽快实现预报地震。但由于各方面原因,结果是败多胜少,非常吃力。于是国内一些专家利用国际上对地震能否预报的辩论机会,建议学习国外,降低预报职能,提出了“淡化预报”,并为政府采纳和贯彻实施。在对外宣传上淡化预报保持低调是对的,但必须指出的是,内部不但不应淡化,反而应该强化,即对外低调,多练内功。但近几年的趋势却是,把原来的外松内紧变成了外紧内松,从内部放松了预报。汶川地震即是这一现状下的惨痛教训,并引起广大民众对中国地震预报现状的高度不满。同时,科技界也应进行深刻反思。在强震形势不断严峻的当前,应该牢记大震随时可能发生,并在内部提高防大震的意识,在不断加强基础研究的基础上,绷紧神经,努力捕捉各种大震活动的前兆信息。人命关天,地震预报还淡化不得。

防大震的同时,也要正视现实,因为地球和地震都是开放系统,影响地震发生的因素非常多,既包括岩石圈本身,也有地外天体。由于影响因素是多方面的,所以地震发生的时间很难准确预报。因此,在现有的技术条件下,比较现实的做法是,先把地点和震级报准,这通过扎实可靠的地质和地震工作是可以做到的;时间预报只能是逐步接近,同时,必须要尽快做好未来大震危险区的防震减灾和地震科学普及

工作。如果平时多注重宣传沟通,民众的科学文化素质和法律意识提高了,抗震措施到位了,安全有保障了,遇到突然出现的情况时,就能冷静应对,做到有条不紊,避免出现混乱。

6 对未来的展望

随着科技的快速发展,过去很多神话梦想都已实现。正如中国地球物理学家赵文津先生在汶川大地震之后所言“地震作为一种自然现象,其规律性早晚会被人类认识”^①,随着各种探测技术(包括深部探测)和地球科学与非线性物理学的发展,地震预报肯定会实现,只是时间早晚的问题。事实上,地球科学的每一点进步都在无形中推动着地震预报的前进。同时,也希望能够在不断夯实地震地质基础工作的前提下,进一步稳定、持续地加强地震预报研究与实践,继承老经验,创造新方法,多路探索,积极推进,发扬学术民主和创新精神,争取尽快实现地震预报工作的新突破。

虽然中国过去在地震预报领域曾取得过令世界瞩目的成绩,但正如丁国瑜先生曾总结的“地震预报涉及的许多实质性问题并未彻底解决,在关键性的短期预报方面的进展近几年来是迟缓的,必须正视过去的经验与问题,进行必要的回顾与分析,开展新的探索与研讨,才能更快地前进”^②。因此,在当前还不能完全实现地震预报,而中国又正面临更为严峻的强震活动的形势下,切实加强防震减灾工作是最现实的做法。应该在正在或即将启动的新一轮城镇化进程中,抓住机遇,重视地震预报研究中的地质基础工作,将地质与地震研究紧密结合,全面和切实加强活动构造的基础调查与研究。同时,在做好城镇区和重大工程沿线的地壳稳定性综合评价和地震危险性评估工作基础上,通过科学的指导,并在国家法律法规的保障下,引导全社会共同参与,有效提高中国主要强震区带上建筑物的抗震性能及重大工程的抗震设防标准,为公众和社会打造可靠的防震安全网。这不仅可以切实减轻民众的地震恐慌感,也可减缓地震预报的压力,为地震预报营造健康的发展环境。

同时,还应在政府引导下,在全社会普及地震防灾科学知识,提高全社会的防灾意识与能力,冷静面对地震灾害,走出辟谣防动乱一漏报伤亡的

恶性循环怪圈。如果一发生地震就把责任和希望都推到地震预报上,显然是不全面、不客观、不科学和不现实的。因为地震死亡 90%以上是房屋倒塌和损毁所致,所以防震减灾有 2 个关键:①住房问题;②预报问题。展望未来,地震不会停止,预报长期不过关,肯定还会有数以千万计的民众生活在地震阴影之下,随时可能牺牲性命,地震-伤亡-救灾-重建的循环还会重演若干次。因此,预报工作仍要坚持,但又不可能一蹴而就,太不现实。那就只有解决好国民住房问题,减少伤亡。欧洲发达国家法律规定实行住房平等和低房价政策,致力于改善大多数民众的住房条件,所以地震伤亡很小,有利于防震减灾,受到联合国的肯定与推广,应该引进借鉴。在明知地震预报不过关,并要淡化的形势下,必须把防震减灾措施落实到位,切实改善民众住房条件及建筑物的抗震性能,否则大震导致的重大伤亡惨剧必将重演。

地震预报研究是个系统工程和科学难题,应尽早摒弃部门割裂和学科分割,在地震监测预报中加强相关学科的相互协作,联合攻关,共同推进。同时,在地震预报中应牢固树立防大震的意识。因为,中国处于东亚地壳十分活跃的构造环境下,地域面积广,活动断裂众多,陆内强震活动相对频繁,造成人员伤亡与财产损失更大的是 7.0 级及以上的大地震活动。因此,应该把重点放在防大震上,这样有利于把有限的人力、物力和财力都用在刀刃上,避免平均分配和使用,尽量保证对可能发生在人口密集区的大震危险性及时作出判断,并及时向政府决策者提供预报的科学依据和恰当的建议,尽最大努力避免漏报 7.0 级以上大震,有效减少伤亡,推进预报事业健康发展。同时,中国大陆的强震活动具有西强东弱的特点,但人口密度是东大西小,经济发达程度东高西低,且目前正值城镇化与工业化加快发展和西部大开发快速推进的阶段。因此,在未来的地震预报工作中,须综合考虑中国的强震活动分布、人口密度分布、经济发达程度和地区差异等国情,将地质工作与地震预报工作紧密结合,城镇化发展与防震减灾规划紧密结合,围绕人员伤亡损失最小化和国家经济安全最大化的目标,制定更为科学的地震地质工作部署、地震预报思路和切实可行的防震减灾规划,为国家经济建设发展提供安全保障。

致谢:中国地质科学院地质力学研究所殷伟德高级工程师在成文过程中协助完成部分文字编辑工作,审稿专家对本文提出宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Allen C R. Responsibilities in earthquake prediction [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1976, 66: 2069–2074.
- [2] Kanamori H. Earthquake prediction: An overview. In: International handbook of earthquake and engineering seismology[C]//Edited by Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C. Academic Press 200381B: 1205–1216.
- [3] 黄福明.地震预报的现状与动态[J]. 国际地震动态, 1990, 2:4–10.
- [4] 单修政.地震灾害与地震预报[J]. 山西地震, 1987,3:39–41.
- [5] 张国民,尹京苑.地震预报研究的发展展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 83–90.
- [6] 丁国瑜.地震预报与活断层分段[J]. 地震学刊, 1993,1:8–10.
- [7] 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 等. 中国震例(1966—1975)[M].北京:地震出版社, 1988.
- [8] 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 等. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [9] 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 等. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [10] 张肇诚, 郑大林, 罗咏生.《中国震例》前兆资料的初步研究[J]. 地震, 1990, 10(5): 9–24.
- [11] 张国民, 陈章立.我国地震前兆和预报的探索[J]. 中国地震, 1987,3(增刊): 1–11.
- [12] 郑永通.对当前地震预报现状的思考[J]. 山西地震, 2007, 4:40–42.
- [13] 朱皆佐, 江在雄. 松潘地震[M]. 北京:地震出版社, 1978.
- [14] 陈非比, 张建华, 刘秉良, 等. 唐山地震[M]. 北京:地震出版社, 1979.
- [15] 陈立德, 赵维城, 阚荣举, 等. 一九七六年龙陵地震[M]. 北京:地震出版社, 1979.
- [16] Aceves R L, Park S K. Cannot earthquakes be predicted[J]. Science, 1997, 278: 488.
- [17] Scholz C. Whatever happened to earthquake prediction[J]. Geotimes, 1997, 42(5): 16–19.
- [18] Geller R J. Earthquake prediction: A critical review[J]. Geophys. J. Int., 1997, 131: 425–450.
- [19] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes cannot be predicted[J]. Science, 1997, 275: 1616–1617.
- [20] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Cannot earthquakes be predicted[J]. Science, 1997, 278: 488–490.
- [21] Kagan Y Y. Are earthquakes predictable[J]. Geophys. J. Int., 1997, 131: 505–525.
- [22] Wyss M. Cannot earthquakes be predicted[J]. Science, 1997, 278: 487–488.
- [23] Wyss M. Not yet, but eventually[C]// Nature debate on earthquake prediction. week 1, 1999.
- [24] 张国民. 我国的地震预报研究亟待加强[J]. 中国科技论坛, 1998, 3:31–33.
- [25] 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993.
- [26] 陈运泰. 地震预测研究概况[J]. 地震学刊, 1993,1:17–23.
- [27] Chéry J, Vernant P. Lithospheric elasticity promotes episodic fault activity[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243: 211–217.
- [28] Reid H F. The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission[C]// Two Volumes: The Mechanics of the Earthquake[M]. Carnegie institution of Washington, 1910: 192.
- [29] Thatcher W. Present-day crustal movements and the mechanics of cyclic deformation[J]. The San Andreas Fault system, California, Geological Survey Professional Paper, 1990, 1515: 189–205.
- [30] Dickinson W R, Wernicke B P. Reconciliation of San Andreas slip discrepancy by a combination of interior Basin and Range extension and transrotation near the coast[J]. Geology, 1997, 25: 663–665.
- [31] Sella G F, Dixon T H, Mao A. REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy[J]. J. Geophys. Res., 2002, 107(B4), doi: 10.1029/2000JB000033.
- [32] Wallace R E. Grouping and migration of surface faulting and variation in slip rates on faults in the Great Basin province[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987, 77: 868–877.
- [33] Ritz J F, Brown E T, Bourles D L, et al. application to the Bogd Fault, Gobi–Altai, Mongolia[J]. Geology, 1995, 23(11): 1019–1022.
- [34] Marco S, Stein M, Agnon A. Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben[J]. J. Geophys. Res., 1996, 106: 4103–4120.
- [35] Tapponnier P, Ryerson F J, Van der Woerd J, et al. Long-term slip rates and characteristic slip: keys to active fault behaviour and earthquake hazard[J]. C. R. Acad. Sci., Sér. 2, Sci. Terre Planète/Earth and Planetary Sciences, 2001, 333: 483–494.
- [36] Friedrich A M, Wernicke B P, Niemi N, et al. Comparison of geodetic and geologic data from the Wasatch region, Utah, and implications for the spectral character of Earth deformation at periods of 10 to 10 million years[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B4), 2199, doi:10.1029/2001JB000682.
- [37] Friedrich A M, Gans C, Furlong K, et al. Significance of temporal and spatial variations of geological fault slip rates for models of lithospheric deformation[J]. Geophysical Research Abstracts, 2006, 8: 10965.
- [38] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquake: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 5681–5698.
- [39] 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.
- [40] Gilbert G K. A theory of the earthquakes of the Great Basin, with a practical application, Salt Lake City Tribune[J]. Sept. 30, 1883 (reprint: American Journal of Science, 1884, 27: 49–53).
- [41] Reid H F. The elastic-rebound theory of earthquakes[M]. University of California Press, 1911.

- [42]Shimazaki K, Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 1980, 7: 279-282.
- [43]Bufe C G, Harsh P W, Burford R O. Steady-state seismic slip—A precise recurrence model[J]. Geophysical Research Letters., 1977, 4 (2): 91-94.
- [44]Savage J C, Cockerham R S. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978-1986 Bishop-Mammoth Lakes sequence, eastern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4): 1347-1358.
- [45]闻学泽, 张培震. 地震的原地复发模式理论及其有关问题[C]//邓起东, 汪一鹏, 张培震, 等. 活动断裂研究(5). 北京: 地震出版社, 1996: 1-11.
- [46]张培震, 闰伟, 邓起东, 等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(8): 705-713.
- [47]闻学泽. 中国大陆活动断裂的段破裂地震复发行为[J]. 地震学报, 1999, 21(4): 411-418.
- [48]邓起东, 陈立春, 冉永康. 活动构造研究与应用[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 383-392.
- [49]Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Am, 1968, 58: 1583-1606.
- [50]岛崎邦彦. 大地震发生的长期预测[J]. 罗岚译, 许晏平校, 2003. 国际地震动态, 2001, 9: 30-33.
- [51]Nishenko S P, Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull Seism Soc Am, 1987, 77: 1382-1399.
- [52]Working Group on California Earthquake Probabilities. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2000 to 2030—a summary of findings[M]. U. S. Geological Survey Open File Report, 1999: 99-517.
- [53]丁国瑜. 活断层的分段模型[J]. 地学前缘, 1995, 2(2/3): 195-202.
- [54]张国民. 我国地震监测预报研究的主要科学进展[J]. 地震, 2002, 22(1): 2-8.
- [55]张晓东, 傅征祥, 张永仙, 等. 1999—2002 年地震预报研究进展[J]. 地震学报, 2003, 25(5): 453-464.
- [56]Sykes L R, Shaw B E, Scholz C H. Rethinking earthquake prediction[J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155: 207-232.
- [57]邓起东. 中国活动构造研究的进展与展望[J]. 地质论评, 2002, 48 (2): 168-177.
- [58]邓起东, 闻学泽. 活动构造研究——历史、进展与建议[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 1-30.
- [59]邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1021-1030.
- [60]邓起东, 冉永康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图(1:400 万)[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [61]Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26, TC4005. doi:10.1029/2006TC001987.
- ①赵文津. 地震预报: 从反思中前进——介绍李四光开展地震预报的思路(内部出版物). 2009.