

# 面向 21 世纪的地震科学技术 ——青年科学论坛

中国地震局人事教育司 编



地震出版社

## 前 言

21 世纪即将到来,新的世纪给地震科学技术必将带来新的挑战。作为跨世纪的青年科技人才,应当考虑如何面对 21 世纪的挑战,并为 21 世纪地震科学技术的进步和发展作出应有的贡献。为此,中国地震局人事教育司于 1999 年进行了一次青年科学论坛征文活动,论文征集对象以中国地震局《跨世纪科技人才培养系统工程》第一层次人选为主,同时也包括了其他优秀青年地震工作者。论坛主题是面向 21 世纪的地震科学技术。主要议题包括:①20 世纪地震科学技术的进展、经验和教训,21 世纪初地震科学技术发展的趋势;②中国地震科学技术中亟待解决的重要问题及解决途径;③21 世纪中国地震科学技术的战略和策略;④中国地震科学技术的发展对地震科学家的要求等。青年科学论坛贯彻百花齐放、百家争鸣的方针,倡导学术民主、学术自由的风尚,鼓励探索,文责自负。现将提交论坛的 38 篇短论结集成册,供交流参考。

中国地震局人事教育司

一九九九年十一月

## 目 录

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| 地震科学信息的社会理解问题 .....             | 吴忠良 (1)        |
| 数值模拟与 21 世纪地震预报系统 .....         | 张东宁 (7)        |
| 利用重整化群方法探讨非均匀介质的临界破裂概率 .....    | 张晓东 (13)       |
| 重视地震序列的研究 .....                 | 周仕勇 朱令人 (17)   |
| 反应谱特征值的统计分析 .....               | 薄景山 (22)       |
| 建筑结构计算机分析现状与常用程序 .....          | 孙景江 (28)       |
| 一种估计重大工程场地地震危险性的新方法 .....       | 金星 张明宇 (34)    |
| 设想中的天津市震害快速评估系统 .....           | 聂永安 (41)       |
| 揭示地震奥秘的必由之路——研究地球深部物质运动 .....   | 杜建国 (44)       |
| 地球自转变化——揭开地震场兆之谜的钥匙 .....       | 王庆良 (50)       |
| 地球的多维观测与现今地球动力学 .....           | 张培震 吴忠良等 (56)  |
| 断层的地震力学：实验与数值模拟 .....           | 何昌荣 (61)       |
| 中国地壳应力观测网络 .....                | 谢富仁 (68)       |
| 推进地震大形势研究 .....                 | 江在森 (72)       |
| 关于未来的地震预测技术 .....               | 牛安福 (77)       |
| 中国黄土地震灾害预防与减轻技术研究               |                |
| ——21 世纪初黄土动力学研究展望 .....         | 王兰民 石玉成等 (80)  |
| “地震野外实验室”是实现多学科综合研究方法和          |                |
| 突破地震学基础理论研究的重要基地 .....          | 侯康明 (85)       |
| 90 年代我国年度地震趋势会商的状况与评价 .....     | 刘杰 石耀霖等 (90)   |
| 我国地震科学现今面临的基本问题 .....           | 薄万举 (97)       |
| 21 世纪地震地下流体科学研究技术展望 .....       | 刘耀炜 (100)      |
| 活动断裂长期地震危险性研究的现状、问题与展望 .....    | 闻学泽 (106)      |
| 软弱地基上建筑物不均匀震陷问题研究设想 .....       | 袁晓铭 孟上九等 (113) |
| 区域及城市工程中的工程地震问题研究思考 .....       | 李小军 (118)      |
| 实验构造物理学中若干问题的进展和动态 .....        | 马胜利 (124)      |
| 关于 21 世纪初我国地震地质学发展方向的若干思考 ..... | 邢成起 (132)      |
| 对青藏高原深部构造及动力学问题研究的回顾与展望 .....   | 丁志峰 (138)      |
| 实验室声发射观测技术的历史与未来 .....          | 刘力强 (143)      |
| 现状·对策·使命 .....                  | 高孟潭 (151)      |
| 面向实际推进日常地震预测预报工作 .....          | 陈棋福 (156)      |
| 建立面向 21 世纪的地震信息处理技术开放实验室 .....  | 成小平 (161)      |

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| 美国核电厂厂址地震安全性评价工作进展评介 .....    | 赵凤新 (166)      |
| 21 世纪, 地震科学向空间发展的世纪 .....     | 尹京苑 (171)      |
| 加强中国东部构造活动的基础研究刻不容缓 .....     | 姚大全 (176)      |
| 工程地震与地震区划面临的机遇与挑战 .....       | 任金卫 周本刚 (180)  |
| 全球火山学研究综述 .....               | 宋建立 张先康等 (187) |
| 活动断裂与强震分布的空间定量关系研究 .....      | 邓志辉 全明纯等 (195) |
| 地震是否可以预报? ——世纪末地球科学界大辩论       |                |
| 及中国地震预报面临的现实问题 .....          | 陈 虹 (202)      |
| 杰克·奥立弗如是说——地球科学发现和创新的艺术 ..... | 苏小兰等 (207)     |

# 地震科学信息的社会理解问题

吴忠良

(中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081)

**摘 要** 信息服务是地震科学为社会服务的重要内容。地震信息作为一种专业信息如何才能为社会所正确地理解和使用, 并真正起到防震减灾的作用, 是一个有待深入研究的问题。这个问题中比较重要的两个方面, 一是地震速报信息, 二是地震预测信息。随着我国经济和社会的发展, 这个问题已经开始具有相当的迫切性。研究和解决这个问题, 是提高地震工作社会效益的关键。在实际操作方面, 本文提出三个建议: 一、在地震速报信息中给出关于误差范围的信息, 并将初报和终报分开; 二、在地震预测信息中给出必要的说明性信息; 三、面向社会开展地震科普工作, 主要内容是地震参数的测定过程、地震预测的定义, 以及怎样判断一条地震预测是否有科学根据的“运作规则”。此外, 为切实提高面向社会的地震信息服务的质量, 充分利用新技术也是必要的。

**主题词:** 地震信息 社会

## 引言

在面向社会的地震信息服务中, 地震信息如何为公众所正确地理解, 是一个必须考虑的问题。没有这种考虑, 地震科学的社会效益就不能得到真正有效的发挥。在其他学科中, 类似地、不同程度地也存在科学信息不能被公众正确理解的情况, 但是这种情况却至少不像在地震科学中那样严峻。在国外, 同样不同程度地存在地震信息不能被公众所正确地理解的问题(例如 Miller, 1997), 但是由于我国的地震灾害比较严重, 抗御地震灾害的能力还比较低, 在经济、科学和教育方面还属于发展中国家, 因此这一问题就显得更突出一些。

应该指出, 科学信息不能被公众正确地理解, 这个问题的主要责任者不在社会公众, 而在科学机构。因为只有科学机构才有能力把科学概念说清楚。如果信息服务是科学机构的任务之一的話, 那么只有在科学信息能够为社会所正确地理解的情况下, 才能说已经达到了信息服务的目的。信息服务是一种“交互式”的过程。但是总的说来, 地震信息服务应该、而且必须以服务对象、而不是以服务者为中心。也就是说, 我们在把地震信息告诉社会公众或者为社会服务的决策部门的时候, 不应该要求他们已经具备地震学方面的基本知识。这种情况与医生不应要求患者已经具备医学方面的基本知识再来看病、商场不应要求消费者已经具备足够的电学知识再来买电视机是一个道理。

地震信息服务中比较重要的两个方面, 一是地震速报信息; 二是地震预测信息。这两方面的信息服务经常涉及很多牵动全局的问题, 具有高度的敏感性。但是, 这种情况并不意味着关于地震信息服务本身的讨论是一个研究的禁区。相反, 随着我国经济和社会的迅速发展, 这个问题已经开始具有相当的迫切性。而结合防震减灾的实际, 研究和解决这一问题, 将大大地提高地震工作的社会效益, 并进一步提高整个社会的抗御地震灾害的能力。

## 1 地震速报信息

地震速报信息不能为社会公众所正确地理解, 其中的一个关键性的科学问题是地震波传

播的速度是有限的、而地震波在地球内部传播的方式又是很复杂的。与此相关的一个实际问题是,如果我们要准确地测定地震的时间、位置和震级,就需要得到尽可能多的地震台站的资料,只有在地震记录资料比较多的情况下,由地球内部结构的复杂性所带来的干扰才能得到有效的压制。但是地震波传播速度的有限性使获得比较多的地震台站的资料需要一定的时间。这个时间差不是数字技术可以解决的问题,也不是使用计算机可以解决的问题,它是地震波的传播规律所决定的。我们当然可以用比较少的台站的资料,在比较短的时间内得到地震参数,采用计算机自动定位和数字通讯网络以后,这个过程还可以大大地加快。但是这样得到的结果是有很大的误差的。这种误差的产生不仅是由于台站数目太少,而且是由于地震波的传播很复杂,因此在识别地震波的时候,计算机常常弄错。所以,按照国际上通用的习惯,一般是在地震发生之后的非常短的时间内,用不多的台站的资料、由计算机给出初定的结果,然后再由分析人员进行校验。初定的结果一般很快,但是误差很大;比较精确的结果的产出,则需要长一些的时间。

因此对地震速报来说,做到“又快又好”是有限度的,这个限度不是技术上的,而是自然界所赋予的,如同蒸汽机的热效率无法达到 100% 一样。但是另一方面,从防震减灾的实际需求的角度说,社会对地震速报的要求实际上却并不是“又快又好”。两种极端情况,一是在地震发生之后的最初的反应,此时社会需要的是“快”。回答“是否需要启动应急系统”的问题,需要的主要是速度而不是精度。就是说,首先需要的,并不是精确的地震参数,而是大致的地震参数,对政府和社会公众而言,这时最需要回答的问题是这次地震究竟是大地震还是小地震,而决不是震级究竟是 6.5 还是 6.9。这个参数应该尽快地给出,即使它的误差很大。另一个极端情况是在地震发生比较长的时间之后,这时社会需要的是“好”,是尽量精确的、尽可能多的信息,需要的是精度和信息量,而不是速度。这时早两个小时、晚两个小时给出这些信息已不再是主要矛盾,但是仍旧重复原来的五个参数却是令人失望的。

因此,如果我们非要给政府和社会公众一个“又快又准”的印象(而这在实际操作中至少现在是完全做不到的),社会就不能正确地理解地震速报的信息。在这种情况下人们就会追问为什么北京台网报告的震级是 3.2 而河北台网报告的震级是 3.7,就会追问为什么昨天报道的震级是 6.1 而今天却“变成”了 6.5,为什么中国报道的震级是 7.8 而美国报道的却是 8.2,就会追问为什么美国、日本在地震发生的同时就能在电视上播放地震的参数,而我们却必须等待 15 分钟,等等。其实全部的这些问题只要采取两个措施就可以得到相当程度的解决:一是把速报分成两步走,计算机自动初报和分析人员校验后的终报;二是在报告地震参数时加上误差范围的信息。

震中位置与人文地理位置的对应是使社会公众正确地理解地震速报信息的又一个关键问题。1997 年河北省张北地震,北京遥测地震台网初定的震中位置为内蒙古自治区的兴和。与实际震中位置相比,这一结果在地震学上是无可挑剔的,但是这一“跨省界”的问题却在公众中造成一些不必要的误解。而假如在初定结果中附加误差范围的信息,并且把震中所在的地理位置粗定在“张家口一带”,则反而不会有这样的误解。对于美洲的一些国土较小的国家或地区的地震,由于震中范围处于我国地震台网的覆盖范围之外,经常会出现因为定位误差而将发生地震的国家“弄错”的问题。实际上,此时只要把初报和终报分开,并且把误差范围讲清楚,很多误解是不会发生的。

看来,在面向社会的地震信息服务中,单单追求准确是不够的,单单追求快速也是不够

的,地震部门要有效地进行地震信息服务,还必须考虑怎样才能使地震信息不被误解的问题。而要做到这一点,首先需要根据实际情况,对地震信息本身进行研究。

## 2 地震预测信息

地震预测信息不能被公众所正确地理解,这一问题已经并且正在给政府、社会以及地震科学研究机构本身带来麻烦,成为困扰地震研究的一个严重的社会问题(例如 Olson 等,1989; Spence 等,1993)。尽管现在我国已经有了地震预报方面的法律和规定,我们毕竟无法禁止社会公众在私下关心、议论甚至“传播”有关地震的“信息”,尤其是,我们无法保证正规的、按规定程序发布的地震预测信息能够被公众所正确地理解,我们同样无法保证正规的、按规定程序发布的地震预测信息能够被决策部门所正确地理解。事实上,我们已经多次遇到这样的问题,即地震预测方面的信息本身并没有问题,这些信息也是通过正规渠道、按规定程序发布的,但是政府部门或社会公众对这些信息的“误读”却造成了相当范围和相当程度的混乱。

地震预测信息为政府部门和社会公众所“误读”,一个主要的原因是对信息本身的说明不完备。面向政府和社会公众的信息与面向科学界的信息不同,政府官员和社会公众没有义务具备关于这些信息的背景知识,没有义务记得上一次提供的同类信息的内容,没有义务、也没有条件去查阅有关的参考文献。因此,对于地震预测这样一个复杂的问题,一个可能是实际的建议,在给出预测信息的同时,关于预测的根据,预测的时、空、强范围,预测的概率及其定义,预测的历史及其成功率等等的背景信息,甚至预测的定义,原则上都应该“不厌其烦”地给出。否则填补这些信息的空白的,将不是正确的信息或知识,而是正确与错误混杂在一起的想象。因此毫不奇怪,对同样的一条地震信息,地震科学工作者的反应和其他人的反应会大相径庭。

实际上,困扰地震工作发挥社会效益的一个主要原因,是社会公众对地震预报的定义缺乏准确的理解。而这种情况的主要原因是地震学家自己对“地震预测”的概念也缺乏清晰的说明,甚至在关于地震预测的科学争论中,也必须首先明确作者所指的到底是哪种意义上的“地震预测”(见 Geller 等,1997; Wyss, 1997)。因此结果是,时至今日,仍有相当多的人认为地震预测就是类似于天气预报那样的短临预测,而对于中长期预测及其重要性缺少足够的重视;相当多的人认为地震学中的中长期预测和气象学中的中长期预测是一样的,但实际上这种看法是完全错误的;相当多的人承认地震预测研究很困难,但同时又相信一些“前兆”、甚至一些“特异事件”,可以用来进行地震预测。

关于地震预测的另一个错误概念是,既然地震预测的水平至今还不高,那么地震部门对于一些“地震预测意见”是否有根据的判断,其权威性也是有限的。事实上,这是一个糊涂认识。因为不是运动健将的人不一定就分不清谁是好的运动员,尤其是当他们需要回答的问题不是列出健将的排行榜而是指出谁在犯规的时候。实际上,在一定程度上,地震机构在这方面也存在同样的糊涂认识,因此地震学家在对待一些“地震预测”的时候也表现出过分的谨慎,而缺少勇气理直气壮地说出这样的意见:“第一、某月某日到底会不会发生地震,回答这个问题超出了地震科学目前的能力,如同治疗艾滋病超出了目前医学的能力一样;第二,尽管地震科学预测地震的能力还很低,但我们却可以明确地知道某某某的预测意见是没有根据的,正如我们知道某种药物并不能治疗艾滋病;第三、从某某某过去的预测历史来看,即使

在他所预测的时间和地点发生那样的地震,从统计上说,这个地震也不是他所预测的那个。

### 3 面向社会的地震知识普及

地震知识的普及是地震信息服务的一个重要内容,并直接决定了地震信息服务的质量。在心理学中有 We see what we know 的说法,这一现象在地震信息服务中尤为突出。从某种意义上说,社会公众对地震信息的理解的正确程度,取决于他们平时对地震知识的理解的正确程度。而地震知识普及中两个重要的方面:一是地震台网是怎样确定地震参数的,以及为什么地震参数的确定需要一个过程;二是怎样才能判断一条地震预测意见究竟是不是有根据的,以及什么是科学的地震预测。

科学普及有很多方面,这里仅讨论一个可能是有趣的方面。在社会公众对于科学知识的理解中,类比是一个常用的工具。从更深的层次说,这相当于在文化的背景上去理解科学,类比则相当于用文化来理解科学知识的一个“思维模式”。这里有一个猜测,类比是我国社会公众理解科学知识的主要方式之一。在相当程度上,我国社会公众对地震知识的认识的偏差,很可能出现在用作类比的类比对象上。而地震科普工作的一个任务,就是帮助社会公众建立一个正确的类比对象,或者形成一个正确的“思维模式”。

我国社会公众用来理解地震速报的类比对象之一是火警、虫害、水文,或其他类型的“观察哨”,这种类比使人们过于强调反应速度和准确性,而对过程和复杂性重视不够;我国社会公众用来理解地震预测的类比对象之一是天气预报,这种类比使人们过于重视短临预测,过于相信前兆的作用,过于相信预测的能力。60 至 70 年代,更有很多人把地震速报与“站岗放哨”、把地震预测与“侦察敌情”联系在一起,这更是不恰当的。事实上,我们知道,地震速报的一个恰当的类比对象是天文观测,在那里光速是有限的,因此彗星和木星相撞,我们“看到”的是几分钟之前的情况,我们“看到”的类星体是在遥远的岁月以前的形象,太空中光波传播的复杂性经常导致我们“看到”的天体的形象发生畸变。而就现在地震学对于地震和地震预测的认识水平来说,把地震预测问题与火灾或交通事故问题进行类比可能更切合实际。在那里,我们可以知道“危险地区”和“危险时段”,可以采取的措施去避免事故的损失,对有些事故我们也能做出一定程度的预测甚至警报,但是,我们却无法准确地预测所有的事件。

### 4 利用新技术提高地震信息服务的质量

让地震信息得到社会公众的正确理解,还需要从技术方面考虑问题。目前面向社会的地震信息服务中还有一些尚待开发的方面,这里我们从中期发展(下一个五年计划)和长期发展(再下一个五年计划)两个时间段来讨论这个问题。

在下一个五年计划中,可以考虑开展两项工作:①地震经验。目前,破坏性地震之后对于建筑物破坏、人员伤亡、救灾情况的经验总结,政府和社会了解得还不够。尤其是从科学角度报道的这方面的知识(而不是从宣传角度报道的这方面的新闻)还远远不够,而这些知识对于防震减灾具有重要的实际意义。②地震过程。在有影响的地震发生之后,从地质、地球物理的角度对地震之所以发生、以及怎样发生的原因和过程的说明,是一种重要的地震信息服务,这方面的工作,目前还几乎没有有效地开展起来。

在以前的科学宣传中,怎样让社会公众形象地了解高度量化的科学概念,曾经是一项



颇为困难的工作。近年来随着可视化技术的发展,这方面的工作开始具备比较成熟的条件。当然,如何把地震孕育过程、地震震源过程、地震波传播过程、建筑物破坏过程等变成生动的形象,还需要开展进一步的研究。

随着信息科学技术的发展,地震科学服务于社会的空间将越来越大。在再下一个五年计划中,可以考虑的发展方向有两个:一是发展“透明的地震学”,即把实时地震波形记录和实用的、操作简单的软件同时上网,让感兴趣的人自己进行地震定位,这不仅可以填补从地震发生和计算机初报到做出终报结果这段时间的“信息真空”,减少地震部门的压力,而且可以让社会公众自己去了解和体验地震定位的过程。之所以称为“透明的地震学”是因为原来地震定位的过程并不是一个对公众“透明”的过程,人们必须等待地震部门的结果,而随着现代通讯技术的发展,人们越来越喜欢“透明的”和“直播式的”信息发布方式。二是发展“虚拟工程地震学”,即对于某一建筑物或工程设施,在已知其结构的情况下,根据地震学和工程地震学研究的结果,通过虚拟现实技术,形象地给出在一个或若干个假想的地震中,地震破裂是如何发生的、地震波是如何传播的、地面是如何运动的、建筑物或工程设施是怎样破坏的。已有的观测资料可以用来对这样的系统进行“标定”和改进。这种信息要比一般的地震宣传对公众更有说服力,并且可以在论证建筑或工程设施的地震安全性,以及解决与此有关的民事纠纷方面提供科学依据。

## 5 结论和讨论

地震信息服务是地震工作服务于社会的重要内容。而只有当地震信息能够被社会所正确地理解的时候,地震信息服务才真正有可能在防震减灾工作中发挥作用。不可避免的是,由于种种原因,目前地震信息不能为社会所正确地理解的问题还不同程度地存在,其中两个突出的问题,一是在地震速报信息方面,二是在地震预测信息方面。

为了使地震信息能够为社会所正确地理解,我们提出如下实用性的建议:

(1) 在地震速报中给出误差范围的信息,并采用初报和终报的两步速报程序。

(2) 在表述地震预测信息的同时,给出必要的辅助信息。

(3) 在社会公众中广泛开展地震知识的普及,其中两个重要的方面:一是地震台网是怎样确定地震参数的,以及为什么地震参数的确定需要一个过程;二是怎样才能判断一条地震预测意见究竟是不是有根据的,以及什么是科学的地震预测。

此外,使地震信息为社会公众所正确地理解和应用,还需要充分地利用新技术的发展所提供的条件。而在这方面,目前还有一些尚待开发的领域。我们从中期(五年)和长期(十年)两个时间段对此进行了展望。从中期的角度说,我们提出应该从地震经验和地震过程两个方面发展面向社会的地震信息服务,可视化技术的发展为这方面的工作创造了条件。从长期的角度说,我们建议从“透明的地震学”、“虚拟工程地震学”的角度来发展面向社会的地震信息服务,这些工作的技术基础则是互联网、计算技术和虚拟现实技术的发展。

作者感谢中国地震局人事教育司的帮助;感谢中国地震局测震学科协调组、中国地震学会科普专业委员会的专家的帮助。但本文内容仅代表个人观点,有不当之处请批评指正。

## 参考文献

- [1] Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y. and Mulargia, F., 1997, Earthquakes cannot be

- predicted. *Science*. 275: 1616~1617.
- [2] Miller. S. , 1997, Earthquake prediction and the media-a case study in public understanding of science. *Geophys. J. Int.* , 131: 530~533.
- [3] Olson, R. S. , Podesta, B. and Nigg, J. M. , 1989. *The Politics of Earthquake Prediction*. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press.
- [4] Spence, W. , Herrmann, R. B. , Johnston, A. C. and Reagor, G. , 1993, Responses to Iben Browning's Prediction of a 1990 New Madrid, Missouri, Earthquake. U. S. Geological Survey Circular 1083.
- [5] Wyss, M. , 1997, Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278: 487~488.

**作者简介** 1963年5月生于辽宁铁岭,1991年在北京大学地质系获博士学位,现为中国地震局地球物理研究所研究员、副所长,主要研究方向为地震学。1992年获赵九章中青年优秀科技工作奖,1997年获国家杰出青年科学基金资助,1998年获中国青年科技奖。中国地球物理学会理事,中国地震学会常务理事。

# 数值模拟与 21 世纪地震预报系统

张东宁

(中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081)

**摘 要** 随着计算机性能和计算技术的飞速发展, 数值模拟方法在大型工程稳定性分析、油储模拟、大气动力学和气象预报领域已经得到广泛应用。在引入 GPS 测量结果等约束条件后, 一些国家也将数值模拟工作视为建立综合地震预报系统的希望所在。本文简单介绍了在即将进入 21 世纪之际, 数值模拟方法在地震学领域应用的一些尝试性工作, 以及要将数值模拟方法应用于建立中国大陆地震预报系统的一些难点所在。

**关键词:** 数值模拟 物理模型 边界条件 应变能 孕震环境

## 1 数值模拟——建立综合地震预报系统的希望所在

1998 年 4 月, 中国科学家开始启动关于大气科学的四大科学实验: 第二次青藏高原大气科学实验、南海季风实验、华南暴雨实验和淮河流域能量与水份循环科学实验。实验中取得的各种数据将通过卫星通讯网络系统输入到中国气象局的两台巨型计算机——CRAY-C92 和 SP-2 中进行储存、分析、计算, 使野外发现的观测事实, 通过数字手段转化为理论内容。这四项科学实验获取的野外观测资料转化为理论之后, 可望完善中国及亚洲大气物理数值模型。这标志了中长期天气数值预报工作已经由最早的尝试阶段进入到完善物理模型和提高应用水平的阶段。

目前地震学家已经在考虑像大气动力学数值模拟那样, 用计算应力变化来预测未来地震 (Kerr, 1995, 1996)。中外地震学家逐渐意识到, 某一断层上的破裂能够把应力转移到相邻断层上并激起它的反应, 或通过释放应力使它暂时沉默从而导致那个地区几十年的平静。断裂活动可能改变它周围断层上的应力分布, 可以用数学模型把地壳上层的 10 或 15km (断层就在其中破裂) 处理成一个像厚橡胶一样可伸展、压缩和变形的弹性层。在这一层中数米的断层滑动将改变它周围岩石中的应力场, 通常在断裂的端点外增强而在断裂的两侧应力降低。由于地震预报问题的复杂性和数值模拟手段的局限性, 即使乐观地估计, 用计算来预报地震也还需要一段时间, 单纯用这种方法似乎并不能告诉我们下一次哪些断层会发生破裂。尽管还有疑虑, 一些研究者正应用应力传递计算来理解加州历史地震活动的粗略图像并估计未来地震的可能性。美国科学家已经建立了加州南部现今应力变化的模型。在他们的模型中, “几乎所有 6 级及以上的地震发生在由巨大地震和构造应力所导致的接近破裂的地区”。反过来, “在应力松弛的地区很显然会缺少中强以上地震”。这种“应力阴影”被认为主导了 San Andreas 断裂两侧的广大地区。

经历了阪神大地震的失败后, 日本文部省最近提出了新的有关地震预报的报告, 拟建立“综合地震预报系统”。综合地震预报系统将从太空严密观测地球变动, 并用电脑预测地震发生的过程。该报告强调, 重要的工作是利用 GPS 系统严密观测大陆板块的移动和变形, 把握地震的全过程。在积累大量地震资料的基础上, 准备用计算机进行模拟实验进而制定出综合预报系统。

目前在国内已经开展了探讨构造应力场演化过程与强震活动之间关系的三维数值模拟工作。在“八五”地震预报科研攻关中,对地震前兆场物理模式的研究及前兆空间分布特征、物理机制研究已取得了阶段性成果。一些工作为模拟孕震环境应力场时空分布与演化过程而建立了计算模型(梅世蓉等,1989;张东宁等,1995a;张东宁等,1995b)。一些学者认为地壳应力、应变场的动态演化和迁移过程,导致了强震活动的成组性(张国民和傅征祥,1985)。

## 2 建立地震预报综合数值模拟系统的关键问题

### 2.1 岩石层动力学数值模型本构关系的确定

一般采用以下方法确定模型弹性参数:有限元模型内部代表不同构造层的杨氏模量的选取,主要参照地震波速度剖面资料。并根据杨氏模量、泊松比、密度以及 P 波和 S 波速度关系式计算出不同深度处地壳介质的杨氏模量和泊松比。

建立有限元数值模型研究岩石层动力学问题,必须能够给出模型的应变速率进而计算出物质运动的位移速率。往往有必要假定地壳岩石及岩石层上地幔具有理想的流变学特性。因本文述及的工作重点在研究大陆岩石层在水平方向的运动,粘滞系数受温度和压力的影响较小,因此采用的流变学模型为 Maxwell 体(Kusznir and Bott, 1977)。为了更简便地采用 Maxwell 体描述和比较岩石圈各层的流变性质,可使用有效粘滞系数的概念(Wang et al., 1982)。将岩石应变速率与剪切应力  $\tau$  的比值定义为有效粘滞系数。在滑动摩擦定律控制的岩层,  $\tau$  为岩石承受的剪切应力;对于稳态流动为主的中、下地壳和上地幔,剪切应力取最大差应力的一半。

此外,根据 Stacey (1977) 给出的地球热模型可以计算出地壳的平均热膨胀系数(约为  $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  左右)。进而可以根据大地热流测量值反演出的地温分布来计算出地幔侵入体产生的热应力。

### 2.2 中国大陆岩石层数值模型边界条件的确定

利用数值模拟方法得到岩石层应力场及应变场的基本前提之一,是选取合适的边界条件,在目前尚无法直接得到定量的边界条件。在建立中国大陆地球动力学数值模型时,选取边界条件的一般原则是:青藏高原南缘的边界条件应满足能克服高原地形附加重力作用而维持青藏高原持续抬升的要求。太平洋板块和菲律宾板块的挤压作用力大小则由中国大陆内部应力场图像来反演,或用试错法来推测。模型东部主要的边界为西太平洋板块及菲律宾海板块俯冲带。从中国大陆构造应力场辐射状的整体格局看,中国大陆构造应力场的主压应力方向在东部明显地向东偏转,在东北部近乎垂直于太平洋板块向欧亚大陆的俯冲带。因此太平洋板块对欧亚板块东部的作用是不能忽略的。依据丁国瑜(1991)主编的《中国岩石圈动力学概论》,青藏高原物质存在向北东及南东方向逸出的运动趋势。在模拟计算中如何体现青藏高原大规模的向东挤出也是正确模拟中国大陆应力场和应变场的基本条件。

在中国地震局“95-04”重点项目的工作中,张东宁和许忠淮(1999a)以中国大陆岩石层应力场的水平最大主压应力方向的最新研究成果,以及块体水平运动的方向及速率为约束条件,用试错法得到模型边界作用力的大小。数值模拟试验结果显示,青藏高原物质的水平侧向扩展是形成中国大陆现代构造特征的重要动力因素。模型东部所受到的边界挤压作用主要来自太平洋板块的俯冲作用,菲律宾板块对欧亚板块内部的挤压作用可能非常微弱(我国台湾省等俯冲边界地区除外)。

### 2.3 地震原地重复周期

确定某一地区或某一活动断裂带上的强震重复周期,对利用数值模拟方法建立地震预报系统来说是非常重要的。古地震研究给出的强震重复周期可以用来检验数值模型的正确性。一个地区或一段活动构造的强震重复周期,还可以用来建立应力或应变能积累速率的数值模拟结果与实际地震活动之间的定量关系。由实际资料作为数值模拟的约束条件,可以由数值模拟结果给出一些估计未来地震活动危险性概率的判定指标。邓起东(1994)在总结中国活动构造的研究进展时,给出了一些活动构造的大震重复间隔时间。研究表明,在西藏地区7.5~8级大地震重复间隔约为几百年至1000年。在华北平原及周围地区活动断裂的大地震重复间隔一般都在3000年以上。冉勇康等(1997)通过探槽开挖和断层陡坎分析,揭示出在1679年三河-平谷8级地震的发震断层——夏垫断层上,距今2万年以来共发生过4次地震事件。这些地震属震级接近的特征地震。4次地震事件的发生时间分别为距今20000年、13000年、7500年和317年,平均重复间隔时间为6561(±691)年,显示了准周期重复的特征。

### 2.4 对地壳应变能密度状态的基本估计

地壳中积累的应变能密度可能是地震释放的能量的来源,是影响地震活动的重要因素。利用各种方法估计地壳内应变能密度变化率动态图像,可以分析中国大陆地震的活动规律,研究强地震在中国大陆的分布特征和重复周期,为年尺度的中期地震预测工作提供参考依据。

由于一次地震释放的只是震源区积累的应变能的一部分,所以很难根据地震的震级来估计震源区的应变能密度。为研究地壳内部应变能密度变化趋势,进而确定强地震活动的危险区,有必要从其它途径来获取地壳内部应变能密度的信息。坪井忠二(Tsuboi, 1933)根据丹后地震引起的剪切应变场重复三角测量结果,发现除了断层带以外,地壳应变为 $10^{-4}$ 量级或更小。他分析了伴随几个地震发生的地壳应变,估计极限地壳应变为 $(1\sim2)\times 10^{-4}$ ;当小于此应变时,地壳应变一直可以是弹性的,而一旦实际应变超过这一极限应变值,则将发生破裂。坪井忠二(Tsuboi, 1956)在假定地壳介质刚度为 $5\times 10^4\text{MPa}$ 时,计算出单位体积地壳介质的应变能为 $2.5\times 10^4\sim 1.0\times 10^5\text{J/cm}^3$ 。此外,利用强震地表效应和余震区尺度估计出震源有效半径在6级地震时为10km,在8.6级地震时为120km。将震级和震源有效半径的关系公式变换成地震释放能量和震源体积关系式,可以计算出单位应变能约为 $1\times 10^{-4}\text{J/cm}^3$ 。这和坪井忠二给出的临界状态应变能密度为同数量级(Utsu and Seki, 1955)。

根据这些研究结果,坪井忠二(Tsuboi, 1956)提出地震震源体积概念:①地壳中积累的应变能可能是地震释放的能量的来源;②震源释放能量的能量密度基本上不依赖于震级,每次地震释放能量的能量密度相当均一,约为 $10^{-4}\text{J/cm}^3$ ,与岩石极限应变状态的能量密度相似。③因此,应变释放区的体积决定了地震释放能量的多少,因而也是决定地震震级的首要因素。

### 2.5 应用实例

以现代构造应力场和地壳运动的观测结果为约束条件,张东宁等(1999b)利用有限元方法计算了中国大陆地壳应变能密度年变化率。三维有限元模型采用弹塑性和蠕变本构关系,包含了中国大陆主要活动断裂带。在青藏高原考虑了因高海拔地势蓄集的附加重力势能和地壳山根浮力作用。边界条件主要考虑了印度洋板块和太平洋板块对欧亚板块的挤压作用。把模拟结果与强震活动的时间和空间分布特征相比较,讨论了中国大陆强地震活动规律的复杂性。地壳应变能密度年变化率正、负值过渡带分别对应着龙门山断裂带、燕山-阴山东西向构造带、

天山构造带、鲜水河-小江断裂带、红河断裂带、鄂尔多斯周边断裂带。而这些构造带均是历史上强地震的多发带。由应变能密度年变化率的数值估计,中国西部地震活动带的强震重复周期应该在 250 年左右。而华北中、南部地区的强震重复周期要长得多。

### 3 大陆强震孕震应力环境的数值模拟

#### 3.1 强地震区构造应力场的数值模拟——邢台强震区孕震环境研究

总结邢台地震的一系列研究成果可以知道(曾融生等, 1991), 1966 年 3 月 8 日强震的断层面解为近于垂直方向的右旋走滑断层。3 月 22 日 7.2 级强震的断层面解也为走滑断层。1976 年 7 月 28 日唐山主震亦为走滑断层类型地震(震源深度约为 10km)。而在这两个地区地壳浅部构造活动均为正断层类型。说明盆地内部构造应力场是随深度而变化的。

曾融生等(1991)在讨论唐山地震的动力来源时,注意到地幔热物质侵入到地壳内部的可能性。根据物探资料显示,在华北盆地侵入体可能上升到距地表 20km 深度处。岩浆侵入体的温度通常比周围地壳介质的温度高。热物质的侵入使地壳内温度场受到扰动。温度场受扰动前后差异导致地壳物质的变形,进而引起构造应力场的重新分布。张东宁等(1995a)利用有限元数值模拟方法,分析地幔热物质侵入到地壳内,对华北新生代盆地构造运动方式的影响。模拟结果显示,地幔热物质的侵入在冀中凹陷上地壳造成张应力区,随时间推移,上地壳的拉张应力状态基本不变,与凹陷区上地壳现代正断层活动行迹基本一致;而侵入体上方中地壳深度范围内,由于粘滞系数大于破碎的上地壳和温度更高的中地壳,造成水平向压应力向中地壳集中,随着水平向压应力的集中,发育出走滑断层应力状态的应力场。这样,在侵入体上方的中地壳具备了孕育走滑断层类型地震的应力状态。模拟结果和地质资料及地震震源机制解资料反映出的构造应力场性质随深度而变化的实际图像是一致的。

#### 3.2 青藏高原正断层地震活动的一种可能解释

根据近年来对青藏高原地震震源机制解的分析(Molnar et al., 1989),青藏高原内部正断层地震活动反映出地壳上部存在着张性应力状态。而如果认为印度洋板块对欧亚板块向北的强烈挤压是造成青藏高原抬升的主要动力来源,则高原构造应力场的最大主压应力轴方向应为水平的近南北方向。这和地震资料反映出的上地壳拉张应力状态似乎有些矛盾。一个可能的解释是最大主压应力轴为近南北水平方向的应力状态只局限于柔性而少地震的地壳中下部,而在脆性的上地壳最大主压应力轴方向为垂直方向。

陆地卫星 MSS 图像显示高原内部发育有大量新构造断层(Rothery and Drury, 1984)。这说明碰撞初期承受水平向压应力较大的上地壳脆性层,在强烈挤压作用下已经破碎,因此从整体上降低了有效粘滞系数。这样,其所承受的水平向压应力逐渐转移到中、下地壳中。随着应力转移的进行,上地壳因水平方向压应力的释放, $\sigma_1$ 可能已转为垂直方向,处于拉张减薄状态。这样,在上地壳深度范围内就可能发育出正断层地震活动。而目前在中、下地壳内 $\sigma_1$ 可能仍为近南北的水平方向。在印度洋板块的强烈挤压下,该深度范围内柔性的中、下地壳物质仍在垂直方向继续膨胀、增厚,并导致青藏高原的继续抬升。为了验证这个想法,可以通过建立了一个简单的青藏高原三维数值模型,用有限元方法模拟青藏高原正断层地震的可能形成机制(张东宁等, 1995b; 1997)。

#### 4 真实性——建立地震预报数值系统的难题

在国际上,建筑工程、石油和国防领域受巨大利润机制和政府支持的驱动,各种数值模拟工作发展迅速。油田的成油构造模型、核实验的数值模拟、巨型计算机数值风洞技术已投入使用。然而,数值化地震预报工作因其研究对象的神秘,目前还面临巨大的困难。

深部物探、地质、岩石学等资料的缺乏,使得岩石圈结构物理模型建立工作在很大程度上处于估计阶段。目前对各种力学参数的选取和模型的不均匀性还需依赖覆盖程度较低的地球物理测点和剖面进行外推。这种现状严重影响着数值模拟工作的精度。在难以揭示岩石层真实面目的同时,在模拟应力、应变动态演化图像时,因应力应变测量、强地震活动资料的时间尺度太短,与地质演化的时间尺度无可比性。利用短时间内得到的各地球物理量的动态演化趋势来约束岩石圈数值模型也是不完善的。

即使对地壳结构有了初步的了解,其复杂性也使得建模工作难以承受巨大的工作量。地球物理观测结果显示,华北地区地壳结构非常复杂(王椿镛,1997)。其上部地壳厚度为10km左右,并可以进一步划分为3层,上层速度梯度较大,包括第四纪、第三纪和部分中生代的沉积构造,中层为结晶基岩顶部的古生代沉积层,下层速度6.1~6.3km/s,为结晶基岩的下部;中地壳主要为低速层,在低速层内具有高低速相间的特征;下地壳为正速度梯度层。此外,邢台地震区的反射剖面显示了盆岭相间、不对称的断陷盆地、铲状正断层。剖面还清晰显示出大型的中地壳滑脱构造带。此外,一些壳幔过渡构造可能源于岩浆的底侵作用。此外,有研究表明(孙武城等,1988),在华北地区,强地震震源一般位于地壳薄壳区边缘的地壳厚度变异带的上方,莫霍面起伏的“拐点”附近上方,或莫霍面不连续的突变带附近的上方等。刘福田等(1986)给出的地震层析成像结果也表明,强震几乎都发生在高速与低速区的过渡带上。上述震源分布特征说明地幔物质侵入等垂直向的外部动力来源及地壳内部物质分布的三维不均匀性,导致的应力场及应变能密度不均匀分布与华北地区强地震活动关系密切。一个有效的模拟华北地区地震活动的数值模型必须准确地考虑到这些外部和内部因素,才具备应用于地震数值预报工作的基本条件。

#### 参考文献

- [1] 邓起东,1994,活动构造研究的进展,现今地球动力学研究及其应用,211~221,国家地震局地质研究所编,地震出版社。
- [2] 丁国瑜主编,1991,中国岩石圈动力学概论,123~141,地震出版社。
- [3] Kidd, W. S. F. and Molnar, P., 1990, 拉萨至格尔木第四纪和现代活动断层,青藏高原地质演化,中一英青藏高原综合地质考察队,348~371,科学出版社。(中文)
- [4] 刘福田、曲克信、吴华、李强等,1986,华北地区地震层析成像,地球物理学报,29,442~449。
- [5] 梅世蓉、梁北掇,1989,唐山地震孕震过程的数值模拟,中国地震,5,3,9~17。
- [6] 冉勇康、邓起东等,1997,1679年三河-平谷8级地震发震断层的古地震及其重复间隔,地震地质,V.19,3,193~202。
- [7] 孙武城、祝治平、张利、宋松岩等,1988,对华北地壳上地幔的探测与研究,中国大陆深部构造的研究与进展,19~32,国家地震局科技监测司编,地质出版社。
- [8] 王椿镛,1997,中国岩石层结构研究的回顾与展望,地球物理学报,40,增刊,82~109。
- [9] 曾融生、朱露培、何正勤、丁志峰、孙为国,1991,华北盆地强震的震源模型兼论强震与盆地成因,地

- 球物理学报, 34, 288~301。
- [10] 张东宁、许忠淮, 1994, 青藏高原现代构造应力状态及构造运动的三维粘弹性数值模拟, 中国地震, 10, 2, 136~143。
  - [11] 张东宁、曾融生, 1995a, 冀中拗陷滑脱构造动力的数值模拟, 地震学报, 17, 4, 414~421。
  - [12] 张东宁、许忠淮, 1995b, 青藏高原南部正断层地震活动的可能机制, 地震学报, 17, 2, 188~195。
  - [13] 张东宁、许忠淮, 1997, 西藏南部地堑造成成因的数值模拟, 中国地震, 13, 4, 349~357。
  - [14] 张东宁、许忠淮, 1999a, 中国大陆岩石层动力学数值模型的边界条件, 地震学报, 21, 2, 133~139。
  - [15] 张东宁、许忠淮, 1999b, 中国大陆地壳应变能密度年变化率图像与强震活动关系的初步探讨, 地震, 19, 1, 26~32。
  - [16] 张国民、傅征祥, 1985, 华北强震的时间分布及物理解释, 地球物理学报, 28, 6, 569~578。
  - [17] Chen, W. P. and Molnar, P., 1983, Focal depths of intracontinental and their implications for the thermal and mechanical properties of lithosphere, J. Geophys. Res., 88, B5, 4183~4214。
  - [18] Kerr, R. A., 1995, Bigger jolts are on the way for Southern California, Science, Jan. 1, 1995, 176。
  - [19] Kerr, R. A., 1996, Seismologists learn the language of quakes, Science, V. 271, Feb. 16, 1996, 910~911。
  - [20] Kusznir, N. J. and Bott, M. H. P., 1977, Stress concentration in the upper lithosphere caused by underlying visco-elastic creep, Tectonophysics, 43, 247~256。
  - [21] Molnar, P. and H. Lyon-Caen, 1989, Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins, Geophys. J. Int. 99, 123~153。
  - [22] Rothery, D. A., and S. A. Drury, 1984, The tectonics of the Tibetan Plateau, Tectonics, 3, 19~26。
  - [23] Tsuboi, C., 1933, Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means, Jap. J. Astron. Geophys., 10, 93~248。
  - [24] Tsuboi, C., 1956, Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area and strength of earth's crust, J. Phys. Earthq. No. 4, 63~66。
  - [25] Utsu, T. and A. Seki, 1955, A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock, Zisin, J. Seismol. Soc. Japan, Vol. 7, 233~240。
  - [26] Wang Chi-yuen, Y. L. Shi and W. H. Zhou, 1982, On the tectonics of the Himalaya and the Tibet plateau, J. G. R., 87, B4, 2949~2957。

**作者简介** 张东宁, 1963年6月出生于长春市。1985年7月在北京大学地球物理系获学士学位。1993年3月在中国地震局地球物理研究所获博士学位。现任地球物理研究所计划科研处处长, 第十三研究室副主任、副研究员。从事流动数字地震监测、分析和研究; 地震形成机制的数值模拟研究; 在巨型并行计算机上实现地震学问题大规模数值计算等。1997年获国家地震局科技进步一等奖。



# 利用重整化群方法探讨非均匀介质的临界破裂概率

张晓东

(中国地震局分析预报中心, 北京, 100036)

**摘 要** 以往人们探讨理想介质破裂时, 利用的重整化群方法是一种既简便又快速的处理手段。从单纯考虑破裂到考虑破裂后的应力转移, 从考虑 2 维的破裂到考虑 3 维的破裂(郭大庆等, 1994 年), 这些研究结果对人们深入理解介质的破裂起到了十分重要的作用。由于目前人们利用重整化群方法考虑的仍然是均匀介质的破裂, 所以利用重整化群方法考虑非均匀介质的破裂就显得十分必要。因为它更接近实际的岩石破裂。对于非均匀介质来说, 其破裂的复杂性是均匀介质难于相比的。本文探讨的仅仅是一种十分简单的情况, 但得到的结论可能有一定的参考价值。

**关键词:** 重整化群 岩石破裂 概率 模型

## 1 引言

在非线性科学中, 利用重整化群方法讨论复杂的岩石破裂问题是非常有效的, 它使问题变的简单和易于理解。在地震科学中利用重整化群方法讨论岩石的破裂已经从 2 维发展到了 3 维, 并考虑了破裂后应力的转移现象。按照目前的地震成因理论, 地震的孕育和发生同介质的不均匀的关系很大。郭增建提出的组合模式和梅世蓉提出的硬包体模式(中国地震局预测预防司, 1998 年)都认为震源介质比周围介质在强度上要硬一些, 它是应力的积累单元。另外, 地震地质和地球物理学科都认为地震在原有的断层上发生的现象十分普遍。断层带是介质的破碎带, 是介质的薄弱面。因此地震的震源可以是强度高的地方也可以是强度低的地方, 为什么会出现这样的结果, 如何理解这样的结果, 是地震成因理论需要解决的问题。

组合模式为了解释更多的理论问题, 发展出了立交模式(郭增建等, 1991)。它认为上地壳的脆性断层被下地壳的韧性剪切断层闭锁, 成为应力的积累单元。

一般来说, 介质或应力分布的不均匀是其破裂之源。在一定的应力作用下, 无论是硬的介质中存在软的介质, 还是软的介质中存在硬的介质, 在一定的条件下都会发生破裂。只要介质不均匀就可能发生破裂。在均匀介质中的破裂大都是应力分布的不均匀引起的。大多数情况是应力达到一定的程度时, 应力分布的不均匀可能引起介质的不均匀, 反之亦然。

本文利用重整化群方法初步讨论了非均匀介质的破裂问题。由于目前人们利用重整化群方法考虑的仍然是均匀介质的破裂, 利用重整化群方法考虑非均匀介质的破裂是一种尝试。为了简便, 这里仅考虑 2 维的非均匀破裂问题, 其模型也是最简单和理想的。

## 2 非均匀介质破裂的重整化群模型与方法

### 2.1 模型的建立

为了使讨论的问题简单明确, 这里仅假设在一个平面上存在一条同周围介质不同的线(或称构造)。它的强度可以比周围介质的强度高或低, 当然也可以一样, 这时就是均匀介质的情况。

取一个正方形  $ABCD$ , 见图 1。