

就汶川地震失报探讨地震预报的科学思路 ——再论李四光地震预报思想

赵文津

(中国地质科学院,北京 100037)

[摘要] 根据我国多年地震监测预报工作的经验和问题,就地震发生的机理、预报研究的基本途径以及汶川地震发生机理和失报问题做了探讨;分析了地震短临预报前兆、测震学应用的局限性及地应力转移和追踪;提出了今后地震预报工作的9点建议。

[关键词] 汶川地震;地震预报;地应力;李四光

[中图分类号] P315.7 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)06-0004-12

1 前言

我国是一个地震多发的国家,而且是大地震多发的国家,防震减灾是我国面临的最紧迫的课题。但是短临地震预报又是一个世界性的难题,迄今尚未找到有效的解决办法。

在2008年两院院士大会上,胡锦涛代表党和国家提出:“我们必须把自然灾害预测预报,防灾减灾工作作为关系经济社会发展全局的一项重大工作抓紧抓好”,“要加强自然灾害孕育、发生、发展、演变、时空分布等规律和致灾机理的研究,为科学预测和预防自然灾害提供理论依据”^[1]。

当前国内地震形势是严峻的,需要密切注意,严加监测,捕捉战机,边研究边预报;另一方面应当再深入总结探讨一下过去的工作经验(不仅是科技方面),地震预报问题如何进行,中国能否做到进一步改善地震预报工作?为此,笔者就如何评估当前地震科学的研究现状及如何开展地震机理研究进行地震预报工作,提出下述6个方面的看法,供讨论。

2 关于地震预报的基本思路

关于地震预报,李四光强调,一要调查研究地下发震层以上地层岩层的力学性质及破裂强度;二是

要抓地应力场及其变化,并研究两者的关系。这应是探索解决地震预报问题的基本途径^[2]。要说明的是,地应力增加导致岩层破裂而使地震发生,这一过程并不是一个平稳的过程,可能因潮汐作用,或异地地震的触发作用而引起的。地应力则既要关注地块所受到的稳定的外力作用,也要注意各块体内不同地段有无其他来源的外力作用。一些专家也提出要重视应力增大、岩层变形所产生的物理效应,研究用其做地震预报的可行性问题。李四光还强调:“(美国和日本)各有各的观点和作法。我们只能根据我国的实际情况进行摸索,不要先划框框,要从实际出发。……(对他们的作法)我们虽然不否定它,但也不必重视它。”^[2]

3 关于汶川地震发震机理及其失报问题浅析

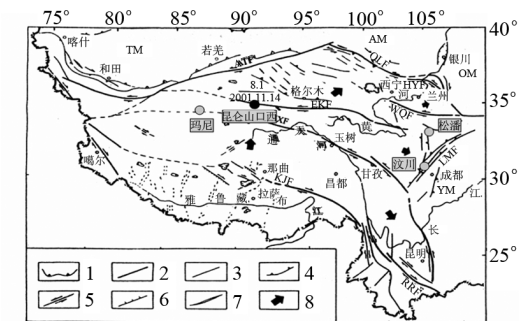
一种代表性的说法是,“在印度板块总体向北东方向作用下,青藏高原东缘沿龙门山构造带向东挤压,受到四川盆地的阻挡,地壳运动积累的能量在龙门山映秀—北川地带突然释放,引发汶川地震。”*这里,印度板块与亚洲板块是从6500万年前

* 马宗晋.2008年9月4日在国务院新闻办公室就汶川地震及灾损情况举行新闻发布会上的讲话

[收稿日期] 2009-03-13

[作者简介] 赵文津(1931-),男,北京市人,中国工程院院士,中国地质科学院研究员,研究方向为矿产地球物理勘察和深部地球物理

就开始发生碰撞和挤压作用后,一直持续到今天。为什么地震先后在松潘—甘孜地块的不同地段发生,如1976年在地块东部的松潘发生7.3级地震,1997年在西南边界发生玛尼7.9级大地震,2001年在北部边界发生昆仑山口西8.1级大地震,2008年又在东边界的龙门山构造带爆发了汶川大地震(见图1),孕震过程与地震发生的条件如何,这是预报地震需要回答的关键。



1—塔里木盆地边界; 2—主要活断裂; 3—活断层; 4—逆冲断层; 5—走滑断层; 6—正断层; 7—活褶皱; 8—块体滑动方向TM:塔里木块体; AM:阿拉善块体; OM:鄂尔多斯块体; YM:扬子块体; ATF:阿尔金山断裂; QLF:祁连山断裂; HYF:海原断裂; WQF:西秦岭断裂; EKf:东昆仑断裂; JXF:金沙江-鲜水河断裂; LMF:龙门山断裂; KJF:喀喇昆仑-嘉黎断裂; RRF:红河断裂

图1 青藏高原活动构造图(汪一鹏,2001)

Fig. 1 Active tectonic map of Qinghai-Tibet Plateau (Wang Yipeng, 2001)

人们还要进一步问,为什么在南边重点监测的鲜水河断裂带(GPS求出的剪应力最大的地段)上,或是北边的川甘陕交界地带却没有先发生大地震?从这个意义上讲,上述关于地震发生机理的论述,并未能解释清楚汶川地震产生的具体原因,因而对地震预报意义是很有限的。

许多构造地质学家描述了龙门山断裂带地表构造和历史上多次发生过地震的事实,也分析了不少深部地球物理的剖面,但这些都属于地震地质条件的内容,并未涉及现在发生地震的应力条件,而没有力的作用和应变能的积累地壳是不会发生破裂运动的,当然也就不会出现地震活动。葛肖虹教授引述了汶川地区震前地震活动记录*,但是并未能说明这些小震就是汶川大震的“前兆”,国家地震局也多次否认这些小震是“前兆”。

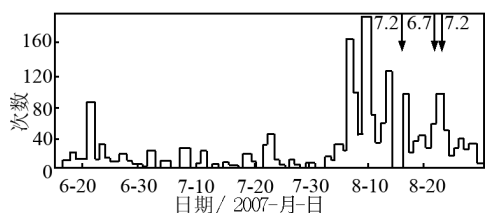
GPS观测的结果^[3](见89页彩图1),表明松潘—甘孜地块在向东运动,但是在解释其结果时形成两种意见:认为汶川地区“有应力应变积累”(依据两个地块间有 (6.7 ± 3.0) mm/a的速度差)和“无应力应变积累。”认为“无应力应变积累”是因为“青藏高原东边界与华南地块的速度差没有转换成逆冲和地壳缩短,而是被顺时针的旋转所调节和吸

收。地质构造和地震活动研究也揭示了这一顺时针旋转运动”。而“鲜水河断裂带上水平剪切应力变大”也支持了这一认识。彩图2(见89页)中亮绿色带即为鲜水河断裂带,而其东部的蓝色边缘即为汶川所在。“于是,地震局中长期预报意见确定龙门山断裂带中南段为2006—2020年全国24个地震重点监测防御区之一。2008年度会商意见未将龙门山断裂带中南段判定为年度重点地震危险区,2008年1—5月地震行业进行的月、周短临会商中亦未给出汶川地震的短临预报意见。在2008年度会商时就未将龙门山断裂带列入重点监测区,而将注意力集中到鲜水河断裂带上,放弃了对汶川地区的监测”。2007年下半年虽已出现了一些前兆现象:如汶川地倾斜,绵竹水位,松潘水氡,道孚水温等以及郫县地电阻率异常等,而且这些前兆异常还在持续发展(内部报告),也都被国家地震局轻率地放弃了!“有应力应变积累”的意见就这样被放弃了?放弃的依据是否是有道理?须指出的是1976年松潘地震时,地震前兆也是沿着龙门山构造带大量出现的^[4],1976年6月至8月14日出现的地电阻率,地下水位,水氡,地磁及动物习性等明显异常多达1000多起,以地光、火球、地下水为代表的宏观异常沿断裂带出现三次高潮(见图2)。水位和动物异常这两点与海城地震一样。人们认为松潘地震预报是成功的,唯一的问题是发震地点偏了点。发震地点不在龙门山断裂带附近,而是在北川西北的虎牙断裂上,是三震连发。汶川地震的调查也确定发现大量前兆现象,这些前兆现象与其很类似,从对比角度看也是应当重视的。此外,汶川地区本已拥有较齐全的前兆观测台站,但是令人难以置信的是有关部门却规定了120天观测一次(汶川地震前113天观测了一次,未见异常),导致地震发生时还没轮到做第二次观测^[5]。池顺良*等在2008年2—3月间进行体应变测量时,发现异常后,要求加强监测的意见也未受到重视(池顺良与笔者的个人通信);有不少专业的和业余的地震预报科技人员(包括一些已从地震预报工作岗位退下来的老专家)提出一些有参考价值的预报意见,也未得到有关部门的回应和采取必要的措施**。应当这既与确定“以鲜水河断裂

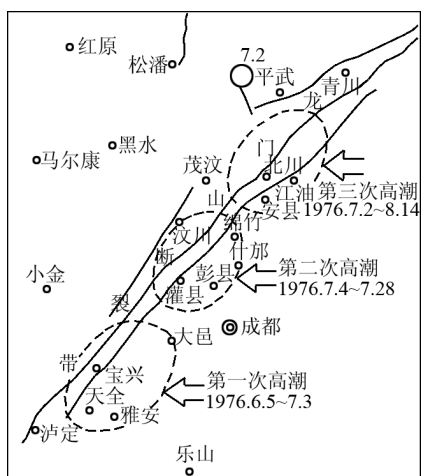
* 葛肖虹. 汶川地震形成背景分析, 科学网, 葛肖虹博客, 2008年6月26日

** 汪成民. 我们成功预测的汶川强余震, 重大天灾预测研究专刊第10期(国际天灾研究会编), 2008, 12

带为重点监测区”有关,也与对地震可预测预报学术观点不承认、不理睬的非理性态度有关。文献[6]也指出:“1995年1月17日日本阪神地震前,虽然在日本有密集的GPS观测网,但并没有观测到显著的形变异常;美国圣安德列斯断层上的帕尔姆地区,1959—1974年,虽然水准观测到最大达35cm的地面隆起异常,但是至今并没有发生显著地震。”这两个例子均表明利用GPS观测结果来预报地震依据并不可靠,还必须综合其他方法的观测结果。



(a) 龙门山构造带上宏观异常数量随时间变化



(b) 宏观异常分布地质随时间的迁移

图2 1976年松潘7.2级地震前宏观异常
Fig.2 Macroscopic anomaly before Songpan Earthquake (M=7.2) in 1976
(引自四川省地震局,1979)

由张培震先生主持的“国家地震减灾科学计划”,共分成4个课题:地壳变形观测与活动构造调查;深部结构和孕震环境探测(地下明灯);地震数值预测的试验研究;地震成灾机理与减灾技术。强调的是“以构造变形与地震的关系为切入点”,即以GPS观测成果为基础的应变应力分析(明灯计划除外),综合研究“地震孕育和发生的物理过程”。笔者认为在地球介质极不均匀的情况下,应力与应变关系很复杂,很难从GPS观测成果直接联系到应力的方向和大小,此外,应变大小和地震发生,及地震

大小的关系也是不清楚的。汶川地震预报的失报说明利用GPS结果的局限性,再不能继续沿着这一条思路走下去了!

汶川地震后,一些专家以研究地震预报为由,提出多项建议:a.在震中区打几个2000~3000m的深钻,在钻孔中放地震仪以监测地震;b.做一条高质量的综合地球物理大剖面,以获取地下弹性波速度、密度和电性结构剖面;c.部署大量地震台网,监测地震;d.建议布设地应力与多分量体应变测量台网;e.发射地震预报用的电磁卫星等。可谓五花八门。在某种程度上说,表明国家缺乏一个地震预报研究的战略性指导思想和工作的统一方案,这将会导致投入不少而收效甚微的结局。国家地震局也发布了一个2009年地震科研重点支持的7个领域^[7],其中关于地震预测领域列有4个部分:川滇强震短临预报的多学科、多手段的新技术新方法研究;地震前兆观测数据异常自动识别与动态演示判定技术研究;数字地震参数动态演化与震兆信息提取技术研究,获取深部应力场演化及介质参数动态变化图像,提取具有明确物理意义的强震前兆信息;电离层扰动及极低频观测技术研究。可见,研究的重点还是放在技术层面上,同样没有明确地提出川滇强震短临预报靠的是什么前兆异常?又有什么新技术新方法?

4 关于短临预报前兆问题探讨

4.1 中国地震局选用的短临地震前兆和进行地震预报的做法

地震前兆是指预示地震即将发生的一些现象。文献[8]指出“地震前兆应该是‘大’震孕育过程中,震源区及周围区域应力状态和介质性质变化的反映。在地震预报研究中,人们习惯于把‘大’震前在震中区及周围一定区域范围里所观测到的异常现象称为地震前兆。但由于对多数台站的观测资料,其异常与地震的关系不是一一对应的,因此,在多数情况下,所称的地震前兆,只能说是一种可能的前兆”。

“从学科观测角度来说,(地震前兆)主要包括地震活动性、地壳形变(应变),地下流体、地电、地磁、重力、地温,动物习性行为等”共8类^[9]。将地震活动性排在了首位。显然这些“地震前兆”属于文献[8]所说的“可能的前兆”,因为异常与地震的

* 张培震.2007年8月23日在全国地震科技大会上的报告

关系还不清楚,还不能确定一一对应的关系。文献[9]提出的地震前兆与文献[8]提出的基本一致,只是将地下流体分为地下水动态和水文地球化学;地震局预报司编写的《强地震短期预测综合预报方法与方案》中提出的西南地区地震前兆,也是上述的8种^[10],但增列了水温。具体做法是选取信度相对较高的异常,进行单项和合项(仅计总的异常月频次,而不问异常反映的地壳活动和受力情况!)并再利用其随时间的变化来预报,认为其增大时段可能是强震前的一个主要特征。

这些现象,可以分成4类:一是与地形变直接或间接有关的,如跨断层的短水准和短基线,地倾斜,水位等;二是震源区物性的变化,如地温、水温、地磁、地电阻率、微地震等,即文献[11]所说的震源区的“红肿效应”;三是大小动物的反应;四是因地发生裂隙而使地下物质上涌,如水氡,水文地球化学指标等。遗憾的是仍没有考虑“地应力”这个内容!对这些前兆现象,哪些是要优先考虑的,或哪些地区哪些前兆要优先,并没有个具体说法。

4.2 关于地震活动性的作用

1) 地震学方法用来监测地震是绝不可少的。它对地震发生后进行快速测定其发生时间、地点和震级是不可或缺的;利用数字地震数据还可以计算地震位错发生的深度和位错大小,地震发生发展的过程,震源机制解,(求得地下震源区处的应力变化量的大小和方向)等等。这些工作对监测地震、研究地震过程都是非常重要。

2) 鉴于大震前无前震的情况,其在短临地震预报中的作用是很有限的。李善邦先生早就说过“主震发生前,若没有前震,则给地震预报研究带来很大困难,而这类地震还很多。即使现在观测技术大为提高了,也不是每个大地震都有前震记录的。而且各地区地质构造不同,情况也很不同。如日本中部,松代地区的地震约半数有前震,而在新潟一带的地震则很少有前震。我国情况亦相当复杂。有前震记录的地震为数很少。……若无前震,表明酝酿中的危险地震,在形变累积到后期时发生的微裂不发育,所引起的震源区体积膨胀很轻微,因而其他前兆现象并不明显^[12]。”梅世蓉先生总结几十年地震预报的经验时指出,“所谓地震学方法意指以观测的地震数据为基础,研究大震的可能孕育过程,进而对大震的发生做出预报的方法,即‘以小震报大震’的方法”。她又说:“仅从地震活动性特点,不能判定为

前兆,因为过去多次发生类似震群,其后并无大震。但与其他异常综合,结合震群本身的特殊性,可以得出可能是大地震前震的正确判断”^[13]。中国和日本,一个处于大陆边缘,直接受太平洋板块的作用,一个位于大陆内部,远离大洋的直接作用,都是很多地区大震前无前震;无前震的大震地区如何应用地震学方法来预报地震呢?

3) 从地震活动的时间序列特征和平面分布图案预测地震随意性较大。文献[14]指出,利用地震活动性显示的密集—平静现象来回答“未来若干年内大区域地震活动可能的总的态势;近期内哪些地区可能发生大震;丛集于局部区域的地震序列可能的发展态势。”应指出汶川地震的发生正是这种方法的重大失败。利用地震活动空间分布图像分析找出地震活动“空白地区”或“空白地段”来确定未来可能发震的地段。认为区域内长期的地震活动震中分布平面图可以反映在外力作用下,地球脆裂圈介质里利于应力增强的场所,长期外力作用下它具有相对稳定性;“以基本图像为主,辅以现今区域中小地震震中分布图像的分析来刻划所研究区域与地震孕育、发生有关的现今地壳活动块体的分布轮廓。”“这是国内地震预报使用最多的方法,也始终是近几十年来我国地震预报实践中应用最为广泛的方法。”

文献[15]的可公度法预测,也基本上是属于这一领域的结果,她所预报的发震地点是川滇地区,有几十万平方公里,范围太大了,所以对地震预报同样是没有实际意义的。

关于地震“空区”的普适性问题,文献[14]强调,“这里仅局限于物理含义较明确,且勾画空区的不确定因素相对较少,并更有实用意义的孕震空区”。“许多人的研究在肯定多数大震前观测到有孕震空区出现的同时,也有人指出有些地震前没有孕震空区出现”。而且空区空段的确定随意性较大,汶川地震就是又一个案例。

4.3 海城地震显示的前兆现象

1975年2月4日海城7.3级地震是新中国成功预报的实例之一。地震前后前兆现象的显示见图3^[16]。其中临震时地下水位和动物习性异常(除蛇外)显示很清楚,也比较肯定。其他“前兆”与将要发生地震的关系并不清楚,如地倾斜表现为单调增大,增大到什么程度就会发生地震,如何用它指示临震?同样,短水准也有类似情况,震前小震较多,地震频数呈现单调增长,与将要发生的地震是什么关

系? 地化指标(氯指标)在1975年的变化,从稳定到略有变化,有什么含义,是否与地震将要发生有关等等,仍有待深入研究。

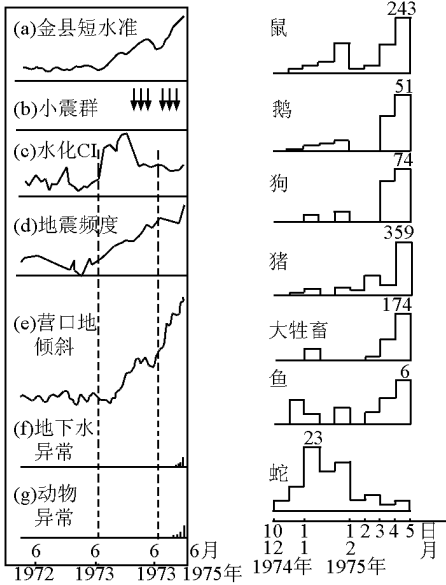


图3 海城地震震前观测到的主要异常现象
Fig. 3 The main observed abnormal phenomena before Haicheng Earthquake

4.4 唐山大地震

震源深度为 22 km。在唐山市 500 km 范围内有 136 个地震台(综合的和单项的),震前观测项目有地震活动性、地形变、地电阻率、地磁、重力、水化学、水位、地应力(电感法)、油井动态、气象等 36 项。“震前半个月为临震异常阶段,出现水氡、视电阻率、地下水位、油井流体动态、地应力(电感法)等的突变性异常;震前 1~2 天、动物、地下水等宏观异常现象也大量出现”^[16], 6 个参数的变化见图 4。这里,仍然没有列出地应力的数据! 其中电阻率曲线是宝坻台观测的,与震中有一些距离;地震次数是燕山带东区的,水氡是管庄的,都与唐山震中有较大距离。对这些前兆现象,文献[4]说,“唐山地震前唐山地区的地形变异常、重力异常、视电阻率异常是得到国际同行承认的可靠前兆。这些异常大多数是震前发觉,并非全是震后总结得出的。”但是,中国很多人并没有认可它。

1)关于前震。图 4 列有地震次数变化曲线,这是燕山带东区的记录。以前一直强调唐山地震没有前震,这一曲线列在这里要说明什么问题? 唐山地震、松潘地震和汶川地震,地震部门一直强调它们的震中区都是没有前震的,没有前震又如何用地震记

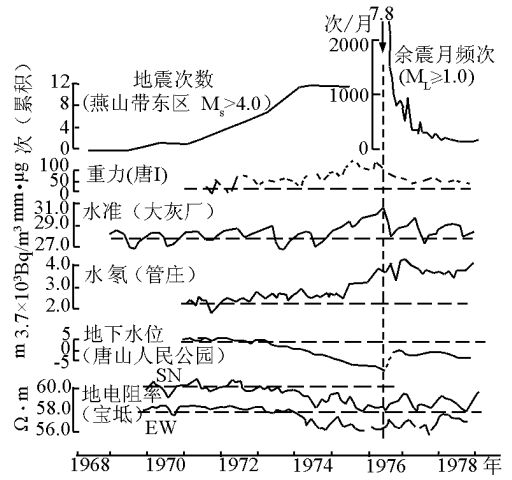


图4 唐山地震前后地震频次、重力、水准、水氡、水位、地电阻率变化曲线图

Fig. 4 The curves of earthquake frequency, gravity, level, water radon, water level and earth resistivity before and after Tangshan Earthquake

录来预报地震? 如果想用“地震空区”的规律来预测,则地震活动性主要应当分布在震源区四周,列出燕山东区地震活动性是否说明本区处于地震“空区”,处于临震状态? 这一点还需要进一步说明。

2)关于地下水位。书中提出:“1976 年唐山地震前,分布在唐山、天津、北京和辽宁 30 多口地震专用观测井,普遍出现地下水异常变化^[4]。”图 4 中显示的唐山人民公园内地下水位在地震前是下降的,发震前后,地下水位转为上升,震前两小时甚至变为自流,表明地下水已受到挤压而变为承压水了。地下水的下降和上升,一定与地下应力变化造成的地壳浅层含水层的拉张与挤压有关。图 5 是文献[4]给出的唐山地区震前地下水位区域性异常图。图中仅标明水位异常,没有区分异常是指水位上升? 还是下降? 或者是跳动? 同样的是,文献[4]在提到京津冀水位变化时,也是只有异常,而无异常性质分析。如“据京津冀井孔统计,1981—1985 年在井网范围内发生的 7 次中强地震,在 22 井次地下水位异常中阶变型有 11 次,达 50%。”但阶变是向上变还是向下变没有说明! 也没有列出发生水位变化井点区域上的分布情况。水位异常形成与地质构造、水动力条件、应力应变增减的关系等都需要有更多的关联性的分析和陈述。

3)关于唐山地区的重力变化。图 4 中列出了唐山 1 号点上观测到的重力值逐年变化曲线。可以看出,在震前 5 年即开始了趋势性上升,到 1975 年

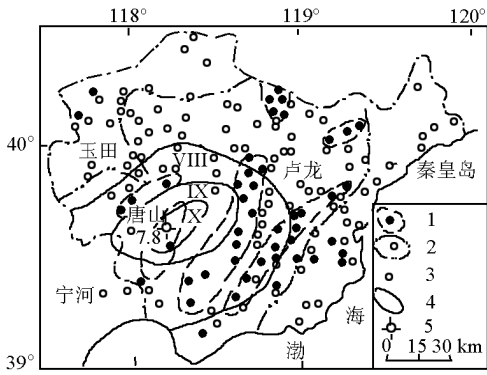


图5 唐山地震前地下水位异常时空图
Fig. 5 Space-time diagram of groundwater level anomaly before Tangshan Earthquake

大混乱,不利于地震预报探索。鉴于要在短时间内完成一个大区域的高精度重力多次测量是很难做到的(有说要大于半年),用它作临震预报是不适用的。但是通过建立区域性固定的重力台网进行连续观测有可能提供地下流体运移和地壳固体潮的基本资料,以协助判定大区域内孕震的形式。

4)关于地区视电阻率或变形电阻率的变化。测量是用直流电阻率法进行的,AB距为2~3 km,相当于几百米上下的探测深度。本区第四系地层厚度为170 m上下,其下为石炭二叠系煤系地层。电阻率曲线应当主要反映了煤系地层的电性变化。因为供电电极和测量电极都是固定的,深部岩性又不会有大的变化之故。1974—1978年间电性随时间的变化起伏较大,而且震前震后的变化也都很大,其主要原因是什么?图6列出的宝坻台记录的电阻率曲线。从1974年它就出现了下降趋势,到大地震后虽有升降,仍然是在一个宽阔的低电阻率区内,直到1981年卢龙5.3级地震后,才回复到1974年初下降前的数值,即正常值(见图6)。昌黎、青光台的记录显示,到1978年以后,地壳内的应力调整已完成,地下电性也稳定了,但是比1974年的值还是低一些,与宝坻台记录的不同,为什么会如此,需要研究弄清楚。图7为8个形变电阻率台的位置图,图8为1976年加密观测曲线^[14]。

从图6的记录来看,7.8级、6.9级、6.6级三个大地震发生前后,电阻率曲线的变化很不同。在唐

达到最大值,幅度约为98微伽以上,在1976年下降过程中发生了地震,到1977年才恢复正常。重力值变化规律与地下水位变化规律正好相反。文献[4]认为这一变化不可能是地形变引起的测点高程和地下密度变化引起的;认为用“地下质量迁移”来解释是一个值得重视的尝试^[16]。但是,并没有给出具体答案。“地下质量迁移”是地下什么物质的迁移及产生的重力影响?为什么在重力异常减小的过程中发震?文献[16]给出1996—1998年北京地区(包括唐山地区)高精度重力测量结果,共8张图,南北两个纬度,东西4个经度,图中小点是唐山震中区;每3—4个月观测一次,观测精度为3.7微伽,以10微伽为警示线。其间共发生7次5级以上地震,其中唐山有两次,大同有4次,张北1次,后两处已位于图外。区内重力长期在-5~+10微伽之间变化,+10微伽区,可能测量一次异常移动。怎样解释重力高的产生原因呢?这种大面积的质量流动最可能的推测将是浅层地下水在地下疏松的第四系地层内的流动。唐山地质点测结果表明含水层里水充填后井水上喷,微重力反而下降了,水位下降时,随着地层的压实或下陷而变得相对密实一些时含水层的密度又会变大,从而使微重力测量值抬升,故此推测重力变化是直接和浅层地下水流动导致的地表层密度变化相关。为此,应进一步了解各次地震发生的时间,及相应的地下水位变动和含水层密度变化的资料以求证这一推测,或者是找出其他成因。此外,还要研究致密岩石层出露区地下水不可能在其中大面积流动的条件下,是否也会出现重力高移来移去的情况。没有弄清微重力变化原因就直接将其与地震的发生联系起来,将会造成人们认识上的更

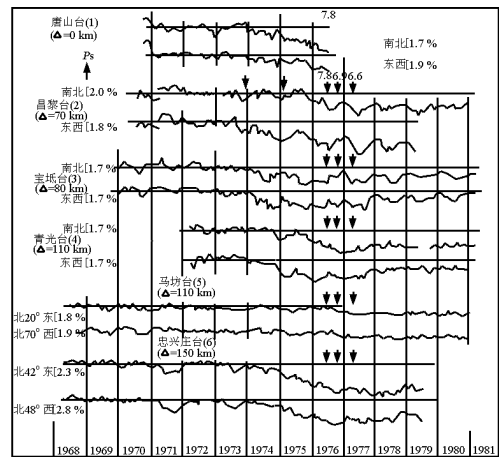


图6 唐山地震前后(1968—1981年3月)震中周围6个台的P_s曲线^[17](钱复业提供)
Fig. 6 The P_s curves of 6 stations around epicenter before and after Tangshan Earthquake (from 1968 to March, 1981, according to Qian Fuyue)

山近处的4个台,地震发生的时刻都是位于低阻区段内,但各台的曲线在发震区间的起伏变化是不一

台的记录,在发震时震中区及其附近有视电阻率的突然下降或上升是肯定的,变化开始时间看不清楚。为什么临震前视电阻率是下降的?或是上升的?或是两个方向分别一上升一下降?

对地震与形变视电阻率的关系,有三种说法:

(1)文献[4]引用了室内实验结果,认为它与王其允所作的粘滑实验结果中第一类电阻率变化相似,且仅指明它是与剪切应力有关,而未明确是压扭性应力或张扭性应力。该文献强调了南北向观测时,电性下降分两个台阶,东西向观测时则为一次陡降,与图8显示一致。同时还认为唐山地区视电阻率的下降和上升与基线测量的缩短和伸长相对应,与国外试验的结果类似。这里,基线缩短和伸长是地面两点的观测结果,而电性则是因地下岩层发生应变而导致地层块体的视电阻率下降或上升,两者是不同的。值得注意的是:第一,这是室内试验,与现场的基本条件并不一样;第二,电性变化仅与剪切应力有关,并没有说明电性是如何观测的,是顺着剪切带观测的还是跨越剪切带观测的,或者是远离剪切带观测的;第三,强调它仅与某一类电性变化相似,并没有肯定它的变化具有的普适性。

(2)在矿山巷道中对矽化灰岩进行加压试验,得到视电阻率与压力的负增长关系,认为视电阻率的变化是与加压引起岩层压实有关,即形变电阻率与加压相关,变化可达压缩线应变的1500倍(笔者:唐山现场土层没有试验数据);他们还认为唐山地区视电阻率的变化是与“震前2~3年来,地壳表层(笔者:是土层还是岩石地层,未指明)受到不太大的附加压力,造成体积压实的结果。”^[17]

应当说,文献[17]这个试验较之室内试验更符合实际一些,有意义得多。但是,第一,这一试验是在浅层,在没有地下水影响的情况下得到的,在几百米之下,华北地区地下水的影响必须考虑,地下应力不管是对地下岩层压缩,还是拉张都会产生微裂隙,从而会提供地下咸水或淡水的流动条件;第二,观测应当在距加压槽不同距离处进行,看电阻率的变化,以验证其与压力变化的关系;第三,笔者认为应当考虑唐山地震引起的地形变和对地下岩层造成的应变都是很大的,应变造成的电性变化也应是很大的,都将大大地超过小应变的范畴,但大应变条件的电性变化规律迄今仍缺乏基本试验数据。在岩层遭受挤压与拉张作用时引起地下水的运移情况将会不同。

(3)桂燮泰先生认为电阻率的变化主要与地下

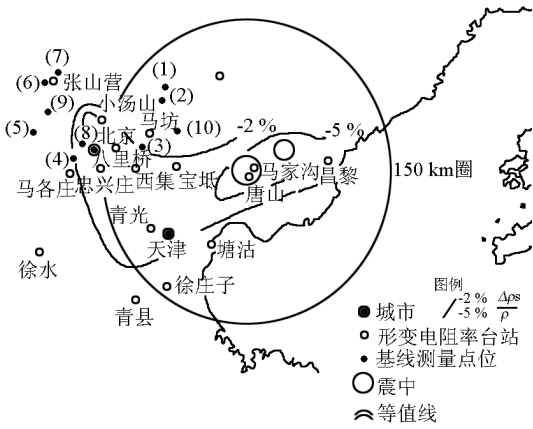


图7 京津唐地区形变电阻率台站分布图

Fig. 7 Station distribution of deformation resistivity in Beijing - Tianjin - Tangshan area

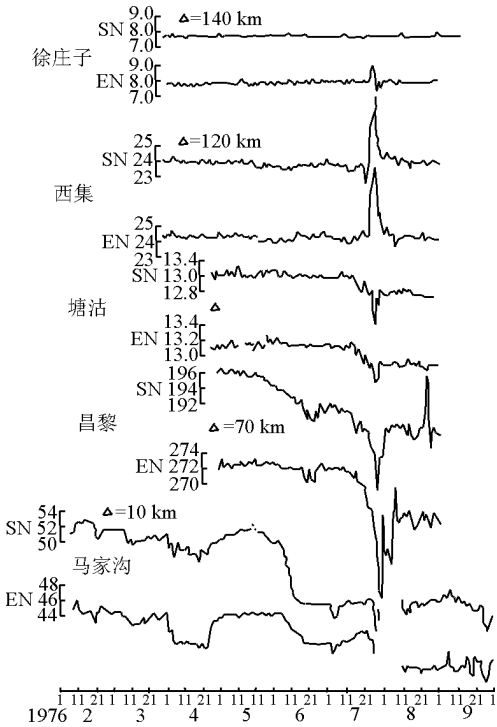


图8 视电阻率临震异常图(刘允秀编绘)

Fig. 8 Impending earthquake anomaly of apparent resistivity (drawn and edited by Liu Yunxiu)

致的。图8中的马家沟台在震前约一个月时出现下降,随后又上升,震前又出现大幅下降,这是唯一的一张记录。塘沽台出现震前即开始下降;昌黎台记录出现震前东西向和南北向曲线变化基本是同步的,但变化幅度更大,与图9的结果有所不同;西集台则是两个方向的曲线双双上升。图11仅有5个

岩层在增大应力的作用下发生了裂隙与破裂,随后充填了地下水,因地下水矿化度有变化而使视电阻率的显示就有低有高。地下应力的发展分两个阶段,开始时是区域性裂隙发育阶段;在临震阶段,岩层因应力产生大破裂。与这两个阶段相对应的电性先是出现区域性降低,到临震阶段电性发生突变,猛烈下降或上升*。西集合为什么两个方向观测双双上升?笔者与桂燮泰讨论此问题时,他说,他亲自去西集现场检查时确认电阻率的上升是与浅层地下水矿化度升高,而深层矿化度较低有关。笔者认为这一解释可能是比较合理的,可以作为基础去深化认识。图9是桂燮泰给出的唐山震区地震前地电阻率异常平面图*。该图是震前1975年所测。 $-2.2 \sim -2.5\%$ 的异常强度范围与震中区的范围很一致。震中区异常最大达 $5\% \sim 6\%$ 。这一低阻区开始于1974年,以后逐渐加大形成的,显然它仅仅反映了震前的状况。按照图8所示,在这一低阻背景下,临震前的短短时段才出现视电阻率的大幅下降或抬升,显示了大震即将来临。如此,则震前几年到半年测得的地下视电阻率下降区应该反映了震前区域性应力应变场变化所造成的效应,桂燮泰据此提出了孕震体的概念。唐山地区是在北东向断裂与北西向及东西向断裂的交叉处,断裂可能是闭锁段多,在区域北东东向挤压力作用下形成的不同应力集中使岩层产生大量裂隙所致。关于北西向断裂,可能是隐伏的,地表有潮白河通过,地裂缝也有显示(海城地震后出现)。笔者认为,在这方面还需要继续做调查。

5)关于地形变。这里主要指地表各点的相对抬升与下降,见图10^[4]。很明显,唐山市正处于北部上升与南部剧烈下降的过渡带上。其东部昌黎—秦皇岛一带也为上升地段,应当说这一地段地应力最为集中。但是,凭这张图又如何判断大震的来临?地变形达到一个什么程度才要发生地震?尚缺乏合理的阐述。

6)关于群测群防作用。唐山二中老师地震观测小组负责人王书蔚在接受记者采访时说:“我们唐山二中地震科研小组预测唐山大地震比较准,因为我们根据两年多的经验,发现一些外地地震对应很多异常数据,比如1975年的辽宁海城7.3级地震预报,所以我们大胆预测了唐山7月底8月初有7级以上大震,震级、方向和时间都比较准确。”^[18]当时,“一直上升的磁偏角曲线在地震前几天突然下

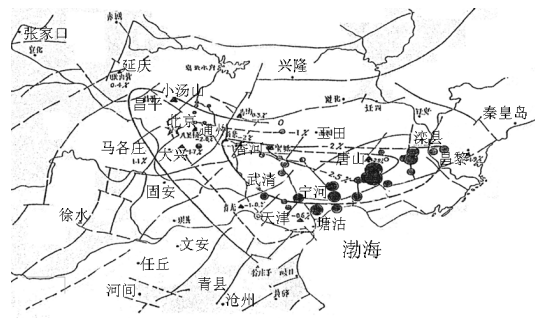


图9 京津唐地区地电阻率异常强度等值线平面图(1975年底所作,桂燮泰提供)
Fig. 9 Planar graph of resistivity anomaly strength isoline of Beijing - Tianjin - Tangshan area (drawn in 1975, according to Gui Xietai)

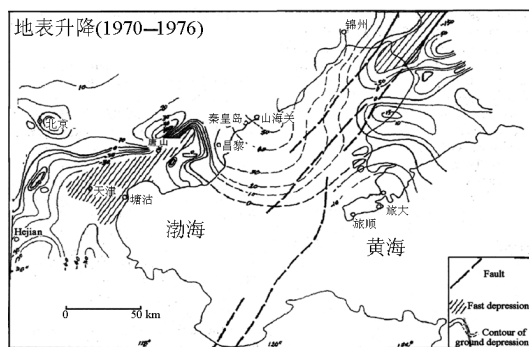


图10 地表升降变形图
Fig. 10 Ground lifting transformation

来了;保持上升趋势的土地电曲线进入7月份也渐渐达到高峰,然后又有规律地降了下来;地应力在1975年底达到峰值,到7月份又降落。”

看来这些“土”办法利用了异常突变现象推测地震将要发生,从规律性地掌握和取得的实际效果看,应当说是成功的。唐山二中观测点是在震中区内,异常反应强烈,地震局领导及专家们也现场参观检查了,但不幸的是他们仍然做出了否定地震将要发生的意见。

对过去的地震预报工作,文献[19]中是这样评议的:“大家都说目前地震预报处于以物理为基础的经验预报阶段,但实际工作中经验往往占主导地位,而物理及其他学科的基础地位却强调或重视不够,这样就造成有些预报方法缺乏物理基础,经不起推敲,……老是从现象到现象的重复讨论,有的科学

* 桂燮泰执笔. 解读视电阻率异常与大震震源体、震中、震级以及发震时刻关系(内部文章,2008年11月)

家曾批评地震预报实践和研究中‘有震无地’,意指地震预报人员缺乏地质学知识,预报中不讲或不研究地质构造条件,例如见到“空区”就报地震,这是不讲基础的典型,……。”马瑾院士也认为“预报意见的根据往往是罗列现象,含糊其词,缺乏认真的物理分析,成功失败均无明确的功过是非分析。”* 这里,“有震无地”应当是指就地震论地震,而没有将地震的发生与当地的地震地质条件和地壳受力情况联系起来做分析。

5 汶川大震后地震向哪里转移? 新的地应力集中点如何判断

汶川主震发生后,余震或下一个大地震将会在哪里发生? 这是两个相互关联的地震预报问题,但并不相同。前者是汶川地震直接引发的;后者则是在区域应力场作用下,由于大地震发生后地壳应力有大的调整,对在其他地点发生新地震的预测。

5.1 关于余震预测

现在已提出了以下三种做法:

1) 按照这次汶川大震的归类,认为它是“主震余震型”,主震过后,余震将可能沿龙门山构造带传递,向东北活动,不会有大地震;认为地震破裂沿龙门山向北东方向发展,是地震发生的不对称性所致。

2) 根据龙门山构造带上闭锁段的长短作推测,西南闭锁段长,东北闭锁段短,冲破长闭锁段就需要大的应变能,即要有个大震发生;这种说法,没有论及下一次地震为什么要发生在长闭锁段的道理。

3) T. Parsons 等人提出,利用模型计算研究了汶川地震触发后相邻断裂带上库伦破坏应力的变化,特别是根据各个断层(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m 等断层)应力增加的情况,推测哪个断层可能成为下一个发震地点^[20]。

此外,钱复业、赵玉林用 HRT,李均之用次声波测震法,沈宗丕用磁暴月相二倍法,耿庆国用磁暴组合法等等方法预报了多次余震**。

显然,第一种是凭借统计经验推测的;第二种是按照“打通”发震断裂带闭锁段所需要的能量考虑的;第三种是根据地震引起的有关的断裂库伦破坏应力的再分配情况所做的推测。只计算地震发生后引起的库伦应力变化是不够的,因为发不发生地震与总的应力有关,而不只是与库伦应力变化有关。

钱复业等多种预报方法成功率高,应予以重视研究。应加强对这些异常的性质及其与发震之间关联

性的研究。

5.2 如何预报下一个应力集中地点

文献[21]以华北为例,用光弹模拟方法试验得到图 13,可以作为定性说明应力集中点转移之例。图 11-I 中 D 点应力加强,发生地震后,应变能得到释放,于是应力转向图 11-II 中的 A 点;随后 A 点应力逐渐加强、相对集中,(见图 11-III、图 11-IV);在图 11-V 中表示 A 点发生地震后,应变能以释放,如一次未放完,则可以通过余震方式再释放;与此同时,B 点和 C 点应力又开始集中。以此解释地应力的转移现象,并强调目前还未能找到震前必然出现的必震信息。实际上地下应力的调整很难用一个光弹模型来实现。

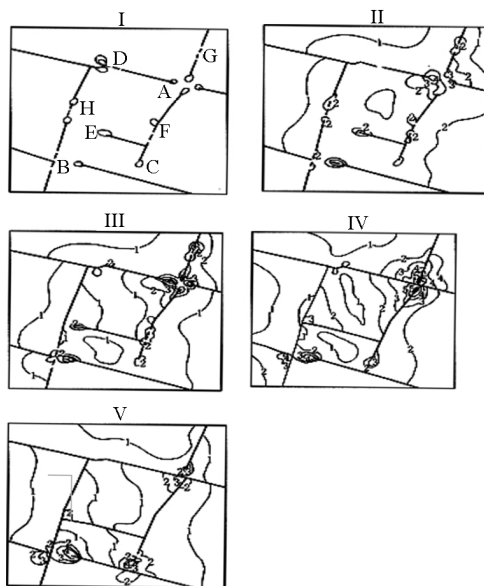


图 11 华北地区地应力分布图

Fig. 11 Earth stress distribution of north China

对此,笔者提出以下几点设想供探讨:a. 研究在一个地点发生大地震后,区域地下构造应力场就会发生调整,可以从构造体系整体思考应力和应变的迁移规律,以预测地壳发生地震的危险地段;b. 及时在野外追踪地应力的变化,找到应力集中地点,以期验证上述推论;c. 利用地下应力应变能集中过程伴随产生的物理、化学、生物等现象,探测地震危险地段,以与推论相互验证;d. 在一些地震带建立起构造体系模拟系统,长期试验,长期积累,不断修正。构造体系模拟已有多人试过多种方案,笔者建议可以多注意陈立德、付虹的作法^[19]。

* 马瑾. 在地震预报战略论坛上发言,2006

** 汪成民. 我们成功预测了汶川强余震,重大天灾预测研究专刊

5.3 陈立德、付虹的作法

他们以南北地震带的中北部(北纬 $34.0^{\circ} \sim 38.5^{\circ}$, 东经 $98.0^{\circ} \sim 106^{\circ}$)为研究区的对象。取介质厚 20 km , 不另分层。将介质分为断裂带内(弹塑性体)与断裂带外(弹性体)的两类介质, 后者不发生破裂。分别赋予不同的弹性模量、泊松比和密度。将全区划分成 482 个 6 面体, 984 个节点, 各节点在 20 km 深处无位移。设边界作用力为 36 MPa , 方向是 $N43^{\circ}E$ 。计算求得共和 7.0 级地震前, 共和地震后景泰 6.2 级地震前平面剪应力情况(见图 12, 13)。符合甚好。在共和震后景泰地区剪应力增加突出, 可以引起人们警觉。这一模型是加了外力的。不足之处是将一条断层带看成是同一的物性体, 实际上还应加以划分, 即由不同焊合程度的多段所组成, 其中闭锁段成为新地震的发生地。

通过不断改进参数选取和改近模型有可能摸索出适宜一个地区的构造模拟方案, 并可能成为地震预报的基础或是地震预报的“沙盘”。

国家地震局总结多年中国地震活动的规律是, 中国四周有四个“触角”——台湾、东北珲春、喜马拉雅

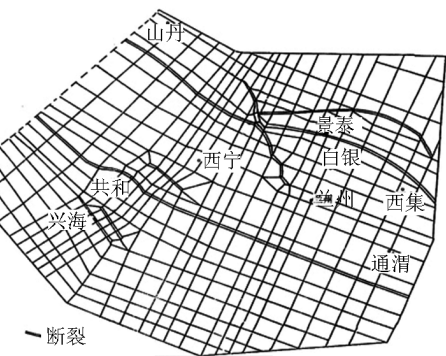
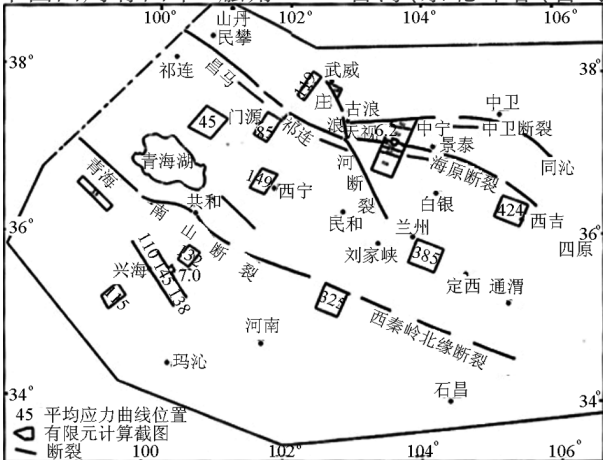


图 12 青藏高原北部地区有限单元网格划分图
Fig. 12 Finite element mesh generation of the north part of Qinghai - Tibet Plateau

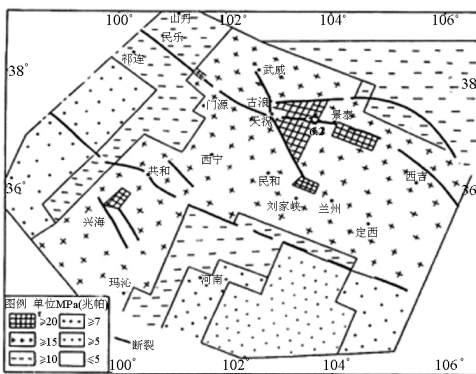
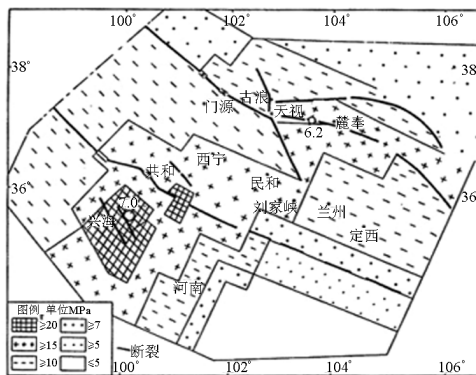


图 13 共和 7.0 级地震后研究区平面剪应力分布图
Fig. 13 Shear stress distribution of the studied area after Gonghe Earthquake ($M = 7.0$)

拉雅东构造结及帕米尔, 四个构造结有一个活动都会引发大陆内部的地震活动增强。表明这 4 个触角对大陆施加的外力对中国地震活动性影响大, 需要格外关注并研究其与大陆内部地震的关系。

6 对今后地震预报工作的建议

1) 加强地表和深部地震地质调查。从汶川地震看, 为什么上次松潘地震和这次汶川地震, 其地壳破裂都是从西南向东北方向发展? 有人解释说是地震发展的“非对称性”, 笔者认为更应从龙门山断裂带与鲜水河断裂带控制区的地下地质不均匀性找原因。这次汶川地震带还发现汶川北还出现一条北西向地震带, 似乎没有充分发展, 它可能与马尔康附近的北西向断裂平行。这次地震有小活动, 今后会不会有大活动?! 应加以关注。

统计示中国东部的震源层主要位于 $10 \sim 20\text{ km}$ 深度, 中国西部的震源层位于 $25 \sim 40\text{ km}$ 深度(但龙门山地区和昆仑山地区也是 $10 \sim 20\text{ km}$ 深), 这些岩层应以结晶基底为主, 是深变质岩带(在地下高温高压条件下应与地表所见不同)。所以, 为研究震源区发生地震的机制就应当以震源层研究为

主;深部地震地质调查还应查明地下的拆离层,破裂带和弱化带,以及刚性块体和断裂带中的闭锁段的分布;鉴于深部地应力的作用可能因地壳内存在的低速体、高导体而使力的作用方向发生变化,所以也要注意这方面的调查。不同地块的结构不同,受力的体系也不同,地震发生的特点也会不同。

2) 关于地应力数据的采集和分析。邢台地震后,1967年李四光提出观测地应力的意见,并亲自到邢台地震现场观测摸索经验,1968年成功地预报了河间地震。

现在,国内有关部门对地应力的观测和分析是很不重视的,认为人们无法取得震源区的岩石介质的性质、破坏强度、应力状态和积累速度,以及其随时间的区域演化状态,……。但是,总不能认为深部地应力不能测量而放弃对其进行观测和研究,应积极开展探索研究,在一定的情况下地表浅层的地应力还是有用的。因为上地壳震源点受力,可能在上地壳内很大范围内形成应力集中区,构成一个范围较大的应力场,我们没有办法找到应力集中点,但可能测到应力增高区。

应当重视油田深井中地应力数据的收集和应用,注意不同地区(地震地质情况不同)浅层测量结果与深部地应力的关系等。还要重视地震带的重力不均衡力的作用,以及如汶川地区紫坪铺水库储放几亿方水时可能对地震的触发作用等。

3) 要研究地应力在地块内和地块间或构造带内各断层之间转移的规律,即在一个地点发生地震,应变能得到释放以后,地应力和地应变如何向地块内其他地段转移的规律。为此,要坚持长期开展各地区的地震构造模拟工作,不断改进模拟方案,研究地应力集中点的迁移规律,并将其作为一个基本方法。由于全球板块运动,板块之间必然有相互作用力,这一个力作用在非均质体上就会产生应力的集中现象,在应力超过发震层岩石抗压强度时便会发生地震;要注意作用在发震层的力,还应有如潮汐共振的力,地壳内出现的局部热应力等等。必须按照应力集中构造模拟的要求,对重点研究区的浅层和深层的地震地质条件调查加以细化;要加强对地下发震层及上覆岩层从蠕变到破裂过程的研究,深化对其认识。为了及时掌握沿断裂带或薄弱带应力变化情况有必要开展野外追踪测量,李四光建议的成立野外队进行观测可能就是这个意思。

4) 在研究岩层变形及挤压破裂过程中伴生的

地球物理及地球化学现象,开发其探测方法,以进行地震预报。要研究岩层受强力作用后产生的效应,设计出相应的探测方法。鉴于临震前兆都是短时间发生的,不可能延续几个月,所以必须是能进行大面积快速侦查的方法。这里温度场与电磁场可能是有前途的,如遥感测温方法,地震电磁卫星,遥感干涉雷达测地形变方法,地电阻率变化;此外,地下水水位变化和动物异常也是很灵敏的,有可能发挥很大作用。有一些专家提出了“HRT(称潮汐谐振共振波)”,或是“次声波”方法,建议给予重视,进一步探讨其本质,而不应放在一边,任其自生自灭,有可能会是一个新技术的“生长点”。

5) 在重点地震地区建立若干个试验区(不是局部性的试验场),把地震发生机理研究与地震监测预报工作结合起来。包括打不同深度的钻孔进行综合观测。对国内国外深钻地应力数据进行采集,建立数据库,系统收集与地震预报有关的数据以供综合研究之用。并根据不同方法研究的需要建立一些联合观测台网。

6) 坚持“群测群防”的方针。中国地域太大,各地区构造和动力学条件差异很大,当地群众对本区地震活动规律有切身地感受,这些朴素的感受非常宝贵,是专业队伍的重要补充。对他们的工作不能轻视,更不能忽视,还应主动去做好这件事,发动地方中学老师和广大志愿者群众参与。中国大地震还吸引了一批各行各业的科技专家,自筹资金,自制仪器设备开展观测,探索地震预报问题,他们急国家人民之所急的拳拳之心,勇于探索科学难题的精神,是值得人们尊敬的,国家有关部门应予以重视,并将他们组织起来,给予帮助和指导,并纳入总的规划之中。

7) 加强风险决策研究。现阶段地震预报风险性很大,但又不能不报,决策人责任大,压力大,而决策人及时做出决定又是防灾减灾的关键所在。应研究如何使领导者敢于及时做决定,敢于承担必要责任。这方面唐山大地震的失败与青龙县领导的成功经验都是非常宝贵的,应很好地加以总结,不能再讳疾忌医了。

8) 组织起来,发挥集体优势。中国部门分隔,学科分隔现象严重,而地震预报研究则是一个大系统工程,要全国共同努力,形成国家优势,要多学科多部门集思广益,要多路探索,一家一业甚至唯我独尊地独搞是很难胜任的,也是最不可取的。建议国家地震局除按照自己原定规划开展工作外,也应发挥国土资源部、国家测绘局、教育部、中国科学院、民

政部等部门各自的业务专长,群策群力,共同攻关,不能再人为地将统一的地壳活动自然现象分隔开来研究,工作重复做,而数据又不能共享,经费要多花上很多,成效很难提高。具体建议由国家地震局、国土资源部、教育部和中国科学院联合主持,成立领导小组同心同德地推进此事,请国家科技部、国家自然科学基金会和国家发改委给予指导和支持。

9)要大力加强多种临震现象的综合研究。将多种临震与地壳运动及地应力的变化联系起来,将地壳应变与地震发生联系起来,使地震预报逐步走上有所依据的阶段。用 $M-t$ 曲线判断近期地震有无和大小是缺乏依据的,教训已很多,不能再把它当成一个“好方法”抱住不放了。

参考文献

- [1] 胡锦涛.在两院院士大会上的讲话[N].科学时报,2008,6-24
- [2] 李四光.谈论地震预报问题[M].李四光文集第七卷,武汉:湖北人民出版社
- [3] 张培震,王琪,马宗晋.青藏高原现今构造变形特征与GPS速度场[J].地学前缘,2002,4,9(2):442-450
- [4] 梅世蓉,冯德益.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993
- [5] 田毅文.那五处形变观测点[N].第一财经日报,2008-05-14
- [6] 张国民,张晓东,吴荣辉,等.地震预报回顾与展望[J].国际地震动态,2005,(5)
- [7] 甲丁.我国明年(2009年)地震科研重点支持7个领域[N].

地质勘查导报,2008-10-18(3)

- [8] 陈章立.地震预报的实践与思考[M].北京:地震出版社,63
- [9] 梅世蓉,冯德益.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993
- [10] 中国地震局监测预报司.强地震短期预测综合预报方法与方案[M].北京:地震出版社,2002
- [11] 傅承义.关于地震发生的几点认识(红肿现象)[J].地震战线,1971,(8):35-36
- [12] 李善邦.中国地震[M].北京:地震出版社,1978
- [13] 梅世蓉,冯德益,等.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993.28
- [14] 陈章立.浅论地震预报地震学方法基础[M].北京:地震出版社,2-3
- [15] 龙小霞,延军平,孙虎,等.基于可公度方法的川滇地区地震趋势研究[J].灾害学,2006,31(3):9
- [16] 中国地震局监测预报司.强地震中短期预报方法及其效能研究[M].北京:地震出版社,2002.11
- [17] 赵玉林,钱复业.唐山7.8级强震前震中周围形变电阻率的下降异常[J].地球物理学报,1978,21(3):181-190
- [18] 易蓉蓉.人们何时能准确预报地震[N].科学时报,2006-07-26(A2)
- [19] 陈立德,付虹.地震预报基础与实践[M].北京:地震出版社,2003.8
- [20] Tom Parsons, Chen Ji, Eric Kirby. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. Nature, doi10.1038/nature07177, 2008
- [21] 马宗晋.华北地壳的多(应力集中)点场与地震[J].地震地质,1980,2(1):39-47

Pondering over the scientific thinking of earthquake prediction from the miss report of Wenchuan Earthquake—re-discussing Li Siguang's earthquake prediction thought

Zhao Wenjin

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

[Abstract] According to the experience and problems of seismic monitoring and earthquake prediction for many years in China, it was discussed the earthquake mechanism, preliminary methods for prediction research and the mechanism and miss report of Wenchuan Earthquake, analyzed prediction precursor of short-term and impending earthquake, seismometry application limitation and ground stress transfer and track, and put forward 9 suggestions for future earthquake prediction.

[Key words] Wenchuan Earthquake; earthquake prediction; ground stress; Li Siguang