

继承和发展李四光地震预报思想

赵文津

(中国地质科学院, 北京 100037)

摘要：本文对李四光先生的地震预报思想做了较全面的阐述，强调了李四光提出走自己的路，开展地应力观测研究与活动构造体系调查的重要意义。结合 40 年来地震预报有关工作的实践经验，阐明在新的形势下应该对李四光地震预报思想和方法做出新的补充。在继续开展地震预报实践和总结的同时，要加强地震发生机制的研究，并对如何开展这项研究工作提出了一些具体建议。

关键词：李四光学术思想；地震预报；活动构造；地应力测量；深部调查

中图分类号：P315.0

文献标识码：A

我国是个地震多发国家，特别是在 60~70 年代先后发生了河北隆尧 6.8 级，宁晋 7.2 级（1966 年），河间 6.3 级（1967 年），渤海 7.4 级（1969 年），唐山 7.8 级（1976 年）等大地震，造成人民生命财产的巨大损失，仅唐山大地震造成人员死亡就达 24 万人之多，教训是惨痛的。周恩来总理亲自抓全国的地震防灾减灾工作，组织了中国科学院及各有关部门科技力量，动员有关地方政府及广大群众投入防灾减灾自救活动之中。渤海大地震以后，1969 年 7 月 18 日在周恩来总理的亲自主持下成立了中央地震工作小组，任命李四光为工作小组组长，刘西尧任副组长，加强国家对全国地震工作的统一管理。1971 年在中央地震工作小组办公室的基础上成立了国家地震局，使我国地震预报和减灾工作摆上了国家领导和管理工作日程之上。这一点充分地体现了我国政府对地震和其它灾害防灾减灾工作的重视。

在国家地震局的统一领导下执行了“专群结合、土洋结合、多兵种联合作战的基本路线”，取得了地震预报和防灾减灾工作的很大成就，多次成功地预报了大地震的发生（如海城、岫岩等地震），减少了人民生命财产损失，得到了国内外高度评价。多年的地震预报经验也表明，现在地震预报工作中存在的问题还很多。新世纪我们面临的迫切任务是，一改进现有预报方法的水平，将预报的准确性再提高一步；二如何使我国地震预报的基础科学水平有一个较大提高。这是人们广泛关注并进行热烈争论的战略性问题。这两者的关系是，虽然不知地震的物理过程也可以做一些地震预报，但是相信，只有了解震源的物理过程才能真正实现地震预报²¹。

现在我国在地震台站建设及大陆强震机理研究和 GPS 地壳运动观测等方面已取得了很大进展，发表了大量文章，这就为深化地震科学研究创造了新的条件。但是，大家也公认几十年来在地震的预报观测技术方法和预报理论等方面还没有重大本质上的进展，预报成功率

收稿日期：2005-01-05

作者简介：赵文津（1931-），男，研究员，中国工程院院士，长期从事深部地球物理探测研究及找矿勘探工作。

E-mail：zhaowj@cac.cn

较低的局面没有重大改观。总结经验,进一步提高地震预报准确性仍然是摆在我们面前的迫切任务。

1 发扬李四光先生急人民之所急,不计个人安危、名利得失的崇高精神,和不畏风险敢于创新、勇挑重担的献身精神

搞地震预报风险性很大。地震能不能预报?这是国内外长期争论的焦点之一。一些人仍然认为地下地震发生过程太复杂,根本无法弄清楚进行预报,一些人则认为地震是可以预报的,只是目前还不可能做到,要在研究中不断总结经验、不断进步、逐步达到这种可能。还有一些人认为自己已经找到有效的预报方法可以准确地进行地震预报,但是并没有得到太多的认可。邢台地震后,在人们对地震预报普遍心中无底的情况下,李四光曾在多次会议上正面阐述了地震可以预报的见解,提出道理,并身体力行地投入到地震预报活动之中。

面对巨大天灾,国际上还没有一个明确途径和预测把握进行地震预报的情况下,负责预报人员包括科学家和政府官员要有进行风险决策能力和不计个人得失的思想境界,提出预测报告勇气。李四光就是这样做的。早在1953年11月中国科学院设立地震工作委员会时李四光就担任了主任委员,先后研究了1952年的山西崞县地震和1954年甘肃山丹大地震以及中国历史上的许多大地震,并亲自领导编著了中国地震历史史料;在1966年3月邢台(隆尧)地震以后,他已77岁还毅然决然地投入到地震预报的防灾减灾活动之中,他亲自到地震现场,指导在尧山组建了第一个地应力观测站,进行地应力观测、地震地质调查和试验研究;编写了地震地质观测报告,取得了实际经验。同年4月参与周恩来总理的震情分析会,提出最近将在河北北部发生新的地震,国务院据此部署了防震减灾工作,事后不久很快就发生了河间6级以上的大地震。1967年12月寒冬,还亲自到房山歇息岗地应力站进行了一天的地应力观测和研究,感动得当地一位老工人激动地送给李四光先生一大把红枣,让他好好滋补身体;1969年5月渤海地震前,北京延庆地区地下水出现异常,李四光又亲自进行了实地调查。7月18日中央决定成立中央地震工作小组,统一领导全国地震预报和防灾减灾活动。他不顾自己80岁的高龄,在体弱多病的情况还欣然同意担任了组长为国家分忧。就这样,他一直在为我国的地震的防灾减灾工作呕心沥血,充分地表现出了一个人民科学家对人民安危的关怀情结和伟大的献身精神。这是一笔宝贵的精神财富,是从事地震防灾减灾工作的科技工作者和行政领导学习仿效的楷模。

2 李四光先生的地震预报思想

2.1 强调从中国实际出发,走自己的路

李四光早在60年代中期就强调了地震可以预报,并阐述地震是自然界某种运动发展过程的一个阶段。因此,如果能够抓住地震发生前的变化,就可以预报地震的发生。他还指出构造地震总是地壳发生形变的结果。如果地壳的断裂、褶皱变化是缓慢的,往往是不易发生震动的。但在缓慢的变化过程中,某些构造某些地区或地点也有突然急剧的变化,这就容易在以急剧变化为中心的地方发生震动。在形变的地区,一定会有一种力量使它发生形变,要抓住这一点。李四光强调地震的发生是因地壳内应力集中并导致地层形变急剧变化的结果,地震预报要从研究应力集中的过程和产生的各种相应的现象入手。

1966年10月李四光在接见中科院兰州地球物理研究所的同志时说，地震预报是在摸索当中，没有经验，还要向他们学习。关于地震预报工作，美国和日本有个十年规划。他提出美日的作法，基本上是在断层带打深钻测形变。日本还利用倾斜仪测地壳的倾斜。他说，国人只能根据中国的实际情况进行摸索，不要先划框框，要从实际出发。对外国人的作法虽然不否定，但也不必重视。

1970年他在听取全国地应力测量工作经验交流会上强调各种方法中国人都要搞，外国有的，中国人要有，外国没有的，中国人也要有。地应力方法是外国没有的，这是走中国自己的道路。不要跟着别人跑，跟着跑，不知要跑到那一年。可贵的是他又一次表现了敢于大胆创新走自己路子的科学精神，这是留给后人的又一笔极其可贵的精神财富。《日本测量》1983年7号上还刊出日本京都大学的田中丰的文章，大谈1966年从中国学到用地应力方法进行预报地震，并介绍了日本从1978年开始做这方面的试验的进展情况。

2.2 地震预报工作方法

(1) 首先是要抓好地震地质调查。他认为地震的发生是一种地质构造现象，同时也是一种物理现象，这种物理现象是在地壳内发生的，地壳很不均匀，有很强的区域性，既分块，又有一系列的褶皱断裂等，它们的力学性质也很不同，地应力的分布图案和导致破裂情况可以有很大的差异。地震地质工作调查应该是地震预报工作的基础，其工作内容主要有以下4点：

①查明活动构造带的所在，追索它伸展的方向和范围，特别是活动性断裂向地下延伸情况以及深部的精细结构构造；

②测定活动构造带活动的程度和频度；

③鉴定活动构造带的结构和性质（压性或张性，或张扭性等）；

④尽可能地找出与这一构造带关系密切的其它构造带及相关联的构造体系。

要利用地质、地球物理、大地测量及多种手段方法去调查和厘定。

(2) 观测的对象要以地应力为主，另外也要重视水位的升降、地声、生物动态及地壳形变（既要研究垂直变化，也要研究水平变化）等的观测。他认为：

①引发地震的直接原因是地应力的作用，要测量地应力的变化，强调了这是观测预报的关键。要进行长期地应力观测，以了解地震发生前后的变化。

②要建立若干个综合性地震预测试验站，记录地应力、地震活动性、形变电阻率变化、地磁、重力、地下水水位水质、生物物理、地形变、海平面升降等的观测。用大地测量的方法去找地面的形变的现象，慢慢发现形变的规律，是一个重要的手段。

③认为测震学方法观测的结果并不能反映地震发生的原因。（傅承义先生也说：必须注意地震波是地震发生之后的产物，如果地震图上有什么信息，那只能是关于后来的地震，而不是本次地震的前兆。测震学方法是很有用的，但是不应忘记它们的局限性^[2]。）

④强调了天文方面因素不能忽略。（作者注：有人说天体的作用是体力，对各点都一起作用，但是，应当看到各点所处构造部位和所受的力时间上有先后，这样，将会产生的不同的效果，在一些点是稳定的，在另外一些点上就可能失稳，起到触发作用。此外，地球上远处的大地震，由于波的传播，如海啸那样，也可能触发了本地区内地应力的失稳而产生地震！）

(3) 在上述各项调查观测资料的基础上要做出地震预报。他认为正问题是肯定，但是反问题则是多解的，即观测到的物理量异常不一定是地震的反映，情况是很复杂的，因为我

们对观测到的现象和地震的发生两者之间的内在关系还不清楚。但是，当地应力加强了活动，不仅会引起地震，还几乎可以肯定地说，在一定的地区范围内，引起其他许多物理量的变化。譬如说，大地电流、电位场、磁场、重力场、地下水位和某些气体冒出等等异常现象，但反过来说，这些异常现象的产生，并不一定意味着局部地应力场的变化，它们产生的原因太复杂了。

他只强调了4种地质构造的部位，如两个构造带交叉部位，构造带曲折最突出的部位等易于发生地震。虽然他提出地应力的阶变异常与地震发生是有关系的，但对观测到的物理量变化与地震发生的内在关系，更多的是要求工作人员不断地从实际中总结经验，作深入研究，不断提高解释判断水平。他还指出地应力是直接作用因素，但还不是本质问题，本质问题是关于地应力产生的原因。

3 总结经验、补充新的工作，深化李四光地震预报思路

中国地震预报探索已过去了38年，我们已取得了丰富的实际经验，国际上也有了许多发展，这些是我们新世纪工作的起点。

3.1 对中国地震类型划分的思考

依据吴忠良的研究结果^[3]，作者设想浅层地震可以分为三种类型：

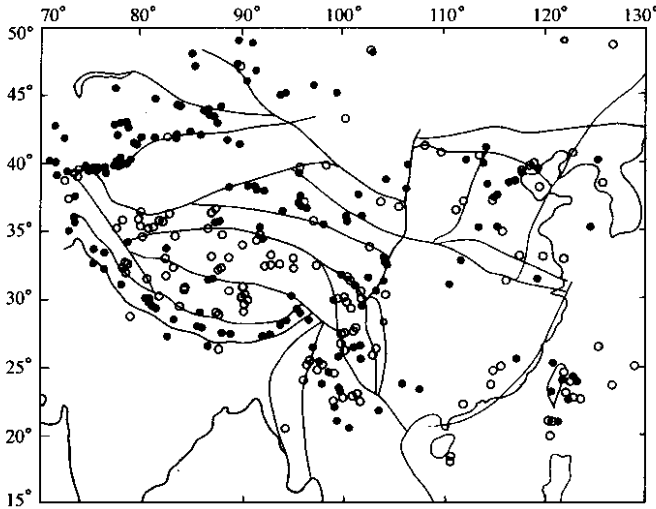


图1 中国地震类型分布图^[3]

Fig.1 Distribution of earthquake types in China

● 挤压型地震 ○ 拉张型地震

1) 拉张型 地壳发生张性或张扭性断裂产生的地震。在地应力作用下，加上外力的触发，可以从下向上地促成断裂带新的破裂而发生地震；

2) 压缩型 可能与地下挤压型或压扭型构造作用直接相关，在挤压型地应力作用下达到岩石极限而破裂，产生逆冲运动；

3) 混杂型 有的地震带内，有时发生压缩型，有时发生拉张型地震，要作具体分析。

拉张型地震的发生就可能与地壳内的部分熔融层热液流体的分布关系密切，在地壳内地

应力形成集中，并通过流体传递，然后在一个外在因素可能是天文因素触发下由下向上造成岩层破裂形成构造地震。也可能由于地壳负荷太重因失稳而产生地震，地应力集中则与区域构造运动有关。孕震过程引起的地表变形、地壳局部速度的变化及地球物理、地球化学场的变化，需要仔细分析，找出利用这些瞬态异常变化，开展预报地震的工作。压缩型的，则可能仅与地下构造直接相关，在地应力作用下发生构造作用或是由于达到岩石极限而破裂。从上述设想考虑地震地质工作的内容和方法，应该是利用构造地质和地球物理方法求出地壳内的地质的和地球物理的结构。显然，提出了地震地质和地震观测参数方面观测都要有所扩大。

3.2 地震地质调查的范围应扩大，内容要深化充实

李四光所列举的许多具体的工作内容，应当说还是偏重于较浅的深度，如 5 千米上下。可是我国实际的地震震源深度均位于 10 ~ 14km (东部)、21 ~ 33km (西部)，即在上地壳的下部与下地壳的上部，处于脆性与韧塑性交接地带。此外，从我国多年深部地质调查结果看，我国东、西部地壳内的结构构造是很复杂的，在地壳和上地幔内还存在较多的部分熔融层。而且还应看到地下岩层也有塑性大的，在应力积累过程，岩层则发生长期缓慢的变形而不发生地震，即形成“慢”地震。此外地应力也随深度发生变化。这些情况对分析应力分布和作用关系很大，显然仅作地面地震地质调查还是很不够的，还需要作不同层次的深部调查工作，浅层几百米深度内到几千米 ~ 几十千米的深度内的结构和构造调查，了解断裂延伸和其产状变化，了解深部地层的物理力学性质等。测震学方法是需要的，它可以记录地层内地震活动性和求取震源机制解以获得这方面的信息；深反射地震与密集台站的广角地震结合可有助于了解地壳内的精细的速度结构；大地电磁法及可控音频电磁法可了解地壳上部精细的电性结构及下地壳上地幔的电性结构，提供深部温度分布资料。

从研究 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 8.7 级大地震未来趋向及其影响来看，中国地壳运动与所受的地应力作用以及周边板块的应力分布和其演变有关，所以我们也必须了解其它国家的地块结构和地应力分布。同样，其它国家也需要了解中国的相应情况，因此，加强国际合作，实现信息共享十分必要。

3.3 关于地应力测量与其它物理量观测的一些想法

(1) 关于地应力观测

据新疆地震局多年观测统计结果^[4]，在 39 次地震事例中有阶变异常的为 33 次，约为 85%，而无异常的为 6 次，占 15%；乌鲁木齐 4 次地震均有异常发生；乌什台记录 7 次异常，5 次有震，占 71%。2001 年昆仑大地震，在昆仑山口附近两个点上震前测定地应力都很高，震后再复测地应力下降到震前值的 1/3，异常十分明显（图 2 和表 1^[5]）。

这些显示是很有意义的。但是这些数据还应该再作深入分析，作者对所用的观测仪器、数据的观测质量、观测工作条件和观测数据的连续性均缺乏说明和资料，特别是震前地应力异常连续变化资料。李四光提到当时所用的地应力的测量方法有五种（电感法、形变电阻率法、钢弦法等），都是有待进一步改进和完善的。应当说这些结果肯定了地应力是存在的，选择它是有依据的。还有人提出测得的地应力不是地应力，认为更可信的是地形变测量，这一点正确与否还需要有关专家们进一步加以论证。

地应力作用的分析必须放在一个地区的具体地震地质背景上进行，而不是脱离这一地质构造背景来考虑问题，进行地震预报。李四光反复强调地震地质的重要性，并在邢台地震地质报告中已为我们提供了一个很好的样板。

有人认为用地形变测量来代替地应力研究这是不合适的，因为应力是岩层发生变形的直接原因，而形变则是应力与岩层物理力学性质（不是稳定的）的复杂关系，而从形变来推测岩石破裂则是更为复杂的工作。

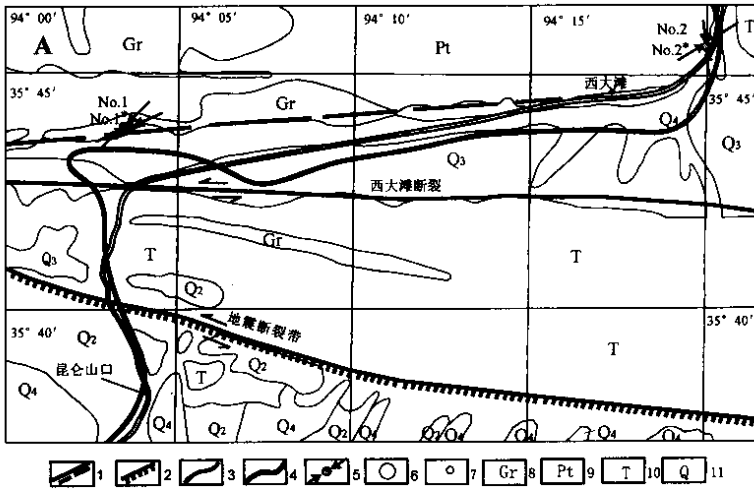


图 2 昆仑山地应力观测^[5]

Fig.2 Geostress measurements in the Kunlun Mountains

1. 活动断裂, 2. 地震断裂带, 3. 公路, 4. 在建青藏铁路, 5. 应力测点和最大主应力方向, 6. Ms8.1大地震震中, 7. Ms > 5余震震中, 8. 花岗岩, 9. 古生界地层, 10. 三迭系地层, 11. 第四系, No.1 No.1* No.2 No.2* 为测点位置

表 1 昆仑山 Ms8.1大地震前后断裂带附近地应力测量结果一览表^[5]

Table 1 Summary of the results of geostress measurements near the fault zone before and after the Kunlun Ms 8.1 earthquake

测点编号	岩性	深度 (m)	水平最大主应力 (MPa)	水平最小主应力 (MPa)	最大主应力方向	备注
1	花岗岩	18	12.9	12.1	N45°E	2001年8月测量, 大地震前
1*	花岗岩	18	3.5	3.2	N66°E	2002年7月测量, 大地震后
2	辉长岩	14	6.8	4.4	N58°E	2001年9月测量, 大地震前
2*	辉长岩	14	2.2	1.2	N5°W	2002年7月测量, 大地震后

(2) 除地应力之外还应当观测的物理量

顾功叙 80年代提出应从以下 8 种现象中选择少数重点研究^[6]: 大震前小震分布及震源参数变化规律、波速比变化、深层电性变化、地壳形变(地倾斜、应变、伸缩)、重力变化、地磁变化、浅部地应力变化、深层地下水水位、水化学变化等等。傅承义 80年代又提出以下 9 个方面^[7]: 前震和地下微弱震动(地声)、地壳形变(包括地面升降和倾斜)、地磁要素的变化、地震波波速变化、重力场改变、固体潮等、气象要素和天电梯度变化、地下水位、地温和地电的变化、生物的反应等进行了地震预报试验, 这些观测对象中每一个都有一些正面的地震预报结果。这里他没有提到各向异性的观测, 也没有提出应重点研究的对象。陈运泰介绍了 1989~1990 年国际地震学和地球内部物理学协会下属的地震预报分委员会对各国

专家提出的 28 项地震前兆进行了严格评议^[8]，认为只有三项通过认定，即：1) 强余震之前的地震的“平静”；2) 海城的地震前兆；3) 日本伊豆—大岛近海 $M = 7.0$ 地震前水氡含量减少。其它 20 项则未予认定。这里并未将地应力列到议程之内。……。文中还介绍了美国地震学家 Geller 在 1991 年《自然》杂志上著文批评日本，说“什么波速变化、地壳升降、地倾斜、地应变、地震活动性变化、地电和地磁异常、井水水位变化、地下水中同位素的变化以及动物异常等前兆现象十分纷繁复杂、甚至可以说是混乱，从中找不到什么灵丹妙药，从而认为常规的经验性的地震预测目前是不可能的^[7]。”这是最极端的说法。梅世蓉在文章^[9]中提出“通过对 60 多个震例资料的系统研究，确认大陆地震是有前兆的，而且是多样的复杂的。如 11 类观测手段、75 个项目所观测到的 927 条异常揭示了地震前兆的多样性……。唐山地震异常项目为 36 个，异常项次多达 147 次，……以应力应变为主的力学过程通过不同形式的能量转换，以多种地球物理和地球化学等异常变化表现出来。”显然这一总结提出的参数太多，过于统计性了，可能作者本意是着眼于统计预报分析，而没能给人们一个明确的概念。

李四光则比较简炼地提出以地应力为主，同时观测形变、形变电阻率、地磁、重力、地下水水位水质、生物物理等参数。

应当说除去地应力外，其它各项观测对象都是在应力集中和解除过程中地壳内岩层中派生出来的物理现象，是等权的，实际上可能还会有一些其他现象可观测到和被利用，问题是如何找出哪几种更有效和更易于操作的方法。

作者建议以下述 6 个参数为重点：

1) 地应力变化；

2) 地形变变化；这是一种震前震后都会发生的现象，现在有了 InSAR 卫星观测起来方便，相对精度又很高，可用的潜力很大。

3) 遥感红外变化。这是派生的物理现象，任何构造活动都会使地下温度场的分布发生变化，温度会升高。但是由于地面温度场本身的变化比较大，在强干扰背景上发现弱地温异常是较复杂的，不过不是没有办法的，本文引用了陈梅花等的结果^[10]，见图 3。表明昆仑山口西大地震是有地热异常的，应当重视。红外观测最大的方便是可以利用卫星进行实时观测，几天更新一次，数据便于快速对比分析。

耿庆国多年研究的旱—震现象也值得重视，可能这一现象与地壳内应力集中后引起的热场效应或“红肿区”效应直接相关。

4) 地震活动性。作者认为地震活动性既可以记录到震后的地壳活动，也可以记录到包含有地震前兆的内容，特别要注意反映地应力活动的低频成分变化；

5) 水位变化，它对地形变、地倾斜反映很灵敏，观测也方便，可能在大量汲取地下水的地区，地下水水面变动太大不便利用。

6) 动物异常现象，或称生物物理现象。动物肯定对地震引发的某些物理现象是敏感的，这次印尼大地震及海啸对许多动物伤害是小的，它们可能对地震海啸引起的低频或超低频的震动敏感，应予重视并要进行点面结合观测。

3.4 建立地震预报野外实验场，坚持多年系统的观测与研究

为了进一步提高观测与预报水平，或是为了进一步研究震源的物理过程，都需要深化地震多发区深部地震地质条件调查，为此，李四光曾建议建设 3 个^[1]，顾功叙先生曾特别强调在首都圈和地震多发地区建立试验场长期从事调查研究工作^[6]。

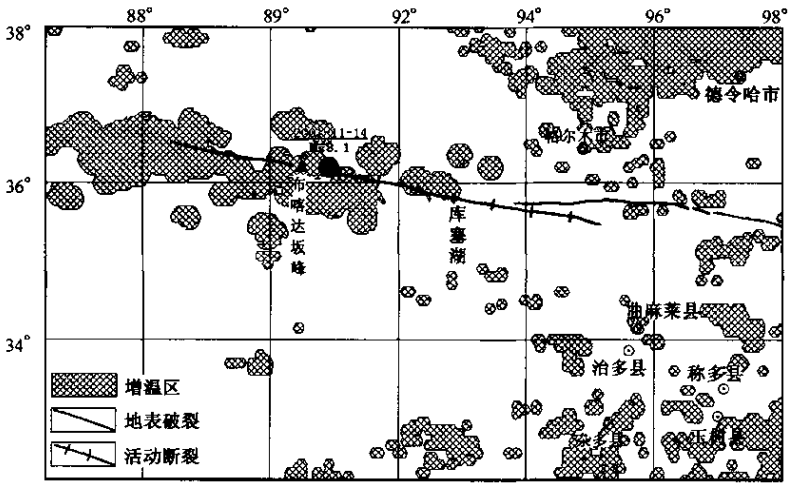


图 3 昆仑山口西地震的热红外异常图^[10]

Fig.3 Map showing the infrared anomalies for the west of the Kunlun Pass earthquake

作者建议按照我国的地震类型选建 3~4 个野外实验场，具体可选择：

- 1) 首都圈 1 个，拉张型或挤压型的；
- 2) 青藏高原中部或东部 1 个，拉张型的；
- 3) 天山—帕米尔带一个，挤压型的。

这些实验场应是以固定观测为主，与流动性台站观测结合，点面结合。地震预报野外研究实验场要将地震预报的科学研究与群众性的地震预报的调查工作结合起来。

3.5 建议开展深井实测深部震源处及其四周介质在地震发生过程中所产生的各种的变化

美国和日本打深钻直接了解深部震源附近及上覆地层介质的迁移和物性的变化，可以使人们了解地表测得的地应力随深度的变化，将地表观测结果与深层实际联系起来。否则利用地表观测结果来判断地下情况总是含混不清的。虽然打钻花费要大一些。但是，这是绝对不能少的工作。李四光并不是否定这项工作，他强调的主要是因为中国地震频繁发生急需对策减灾，在当时立即去强调它很不现实，但是要想知道地应力深部情况就必需打钻。李四光先生 1968 年听取尧山和新丰江地应力观测站同志汇报工作后指出，可以先搞一个 160 米深的孔，500 米深的孔可以放在后一步去做。应该上下、深浅都来搞，打个歼灭战^[11]。显然这并不是否定深孔内测地应力的。

美国和日本打深钻的思路和作法有不少内容还是可取的。如美国 1989 年执行的 30 年大陆动力学计划和后来的 NEPTUNE 计划，2004 年 4 月又批准了一个地球探测 (EARTHSCOPE) 计划所体现的是西方在高技术基础上提出的新世纪的地震预报研究方案。

计划内容^[11]中有：

1) 打一 4000 米深斜井穿过一个 6 级地震震源断裂带带中及两侧作长期观测，了解其成分和物理和力学状况的变化，包括压力、温度、应变及能量积累并作样品分析；这是直接了解深部及上覆地层的情况。

2) 以 GPS 网 (1000 个点) 应变测量 (200 个点) 及 InSAR 卫星为基础了解和监测大陆边缘地表和地壳中与地震、火山活动有关的精密的动态位移和变形；这是以地表观测为主的。

3) 通过密集地震台阵 (USArray) (固定的和活动地震台站) 及 50 台大地电磁仪, 查明断层深度、地下岩浆房深度规模、壳、幔内构造之间的联系和相互作用以及岩石圈的温度和流体含量。这是从地表探测查明地下深部精细结构和构造的。

从上述的内容看来, 他们是从地震物理基础研究着眼的, 将地震预报、火山爆发预报及岩石圈结构构造和动力学研究结合起来了。

据上述计划内容可以归纳出以下几点认识:

1) 美国 (包括日本) 过去进行过长期的地震预报有关的研究, 布置了大量的地震台阵观测, 但是对地震发生的规律仍然是不清楚的, 地震常常发生在未预测到的地点, 但是他们仍然不断地开展有关的基础性调查研究工作;

2) 美国 (包括日本) 地震预报研究的方法途径还是较单一的, 以地震台阵为主, 现在进入到打深钻井开展井中长期观测震源和其周围介质的物性、成分、地应变和地应力的变化, 这是关于地震发生机制的研究。与这一研究相结合还进行地壳精细结构的探测, 包括地下断层的延伸、岩浆房的规模和运移, 以及地表微细形变等; 对大地电磁法和 InSAR 给予了更多的注意。

显然这类基础性的研究工作如果我们不做, 我们将是总在地表现象上绕圈子, 使研究工作难以深入下去, 长期下去会贻误时机的。建议我们应积极参与美国和日本的有关研究工作, 向他们学习, 为我所用。

在实验场内进行长期观测, 了解地震过程中物理量的垂向变化; 观测了解深部断裂带内外及地表与地下与地震预报有关参数 (岩层力学性质、地应力、地变形、电性、热参量、水位等) 震前、震时和震后的变化; 了解地下流体的流动变化, 可能对强蠕变岩层的变形灵敏。

3.6 加强前兆现象与地震孕育发展过程关系的研究

虽然不知地震的物理过程也可以做一些地震预报, 但是相信, 只有了解了震源的物理过程才能真正实现地震预报。因此为了深化对地震发生规律的认识, 提高地震预报的水平和准确性, 研究地震发生机理和规律及其与地震前兆现象的关系是至关重要。

今后建议在改进现有经验预报方法和统计预报方法的同时, 加强从地震发生机理和规律角度作研究。希望在下一个 40 年内中国将会在这方面有所突破, 取得本质认识的深化, 对人类做出新贡献。

(1) 关于震源的物理过程研究

傅承义提出要从三方面工作: 即从实验室研究, 实地可控试验地震前兆, 包括岩石破裂和前兆试验以及理论研究^[12]。但是未见到他对具体作法的更多的阐述。地震的“红肿区”假说^[13]认为, 地震过程就仿佛人身上长疮一样, 在一大片红肿的地方, 疮口的面积只占一个很小的比例。在地震过程中, 地面的‘红肿区’是很大的, 远远超过余震所限制的震源区。在这个‘红肿区’上, 随处都可以发出地震的前兆。并认为, 提出这一假说是企图通过有限的实践来纠正地震的断层成因假说的不完全性, 从而达到了一个新的认识。这个认识的根据还是不充分的, 还需要更多的实践来证实。

今天可以这样论述这一假说, 即中国大陆地壳是由许多块体拼贴组成, 每个拼贴块体结构不是均匀的, 在区域应力场作用下, 形成的地应力场分布的图案应是不均匀的, 在一些构造结点附近可能形成应力集中区并在区内产生各种形变、裂缝发育, 因而促成地壳物质物质和流体的重新分配, 地下热流分布的重新调整, 引起地形变、地倾斜、水位的变化、岩层密

度、速度、电阻率等的变化；当地震发生后将会引起震源区内的多种变化，其关系则是复杂的，需要深入研究获得更具体地了解，但是有一点则是明显的，即这些物理量的变化都将是与地震的发生相伴随。各点地应力的分布是随着一些地点上的应力变化（应力释放和加强）而变化，在一定时期内是缓变化的，但在另外一些时段内则是突变的。地震局总结了中国地震的活动性与四个结点（喜马拉雅山东构造结、帕米尔—天山的喜马拉雅山西构造结、台湾及日本海地区）的地震活动有直接关系。认为这四个结点地震活动后隔一定时间中国大陆内地震就活跃起来，可能这四点就是中国内陆地震的近触发点。

(2) 要研究一个构造体系内地应力的分布和演化

华北地区应力场发育过程示意图是一个很好的例子。图中给出了典型的光弹性模拟试验结果。见图 4。

图上表示了，随着作用力的加强，由于断块本身的应变及断块间沿断裂带的相对扭动，在断裂扭动带中的闭锁段和断裂端部引起应力集中，进而造成断裂的扩展、蠕动、串通或断错，显示了多个应力集中点的演化。I 图代表了某一地区地应力开始增强，应力开始在分散点上集中；II 图中 D 点处，由于发生了断裂闭锁段发生蠕动断通，或者产生一次快速错断，造成了中小地震，在那里局部应力得以释放。而在 A 点则由于多个断点形成的分散应力集中而构成一个新的较大的应力集中区；III 图显示，A 点应力进一步增强，又出现一个新的应力集中区；IV 图则显示出 A 点应力的增强，并可能造成大的断裂，释放出应变能。由于应变能量不能一次释放完，保留下的能量可能再次释放，而形成余震；V 图显示了 A 点震后，在应力重新调整的过程中，将会形成的新的应力集中点，如 B 点。B 点应力增强后，并在积累到一定程度后，如达到岩层破裂点则又会发生另一次地震。作者以此结果说明华北地区唐山、邢台等几个大震前兆之间的关系，它们是统一应力场持续作用下依序发生的结果。

马宗晋^[14]从中总结出以下几点结论：(a) 在一个断块拼合而成的多层弹性板状体内应力会在多个点处集中，(作者称其为多点场)；(b) 可形成连发的强震幕，即在一个较小的地区内，可接连发生一系列强震；(c) 目前还未能找到震前必然出现的必震信息。有前兆而没有地震的情况还是很多的。地震后出现的震前异常的迅速变化，即存在后效现象。

这一结果可以给我们一些很粗略的应力发展变化的概念。因为这个光弹模拟的设计条件

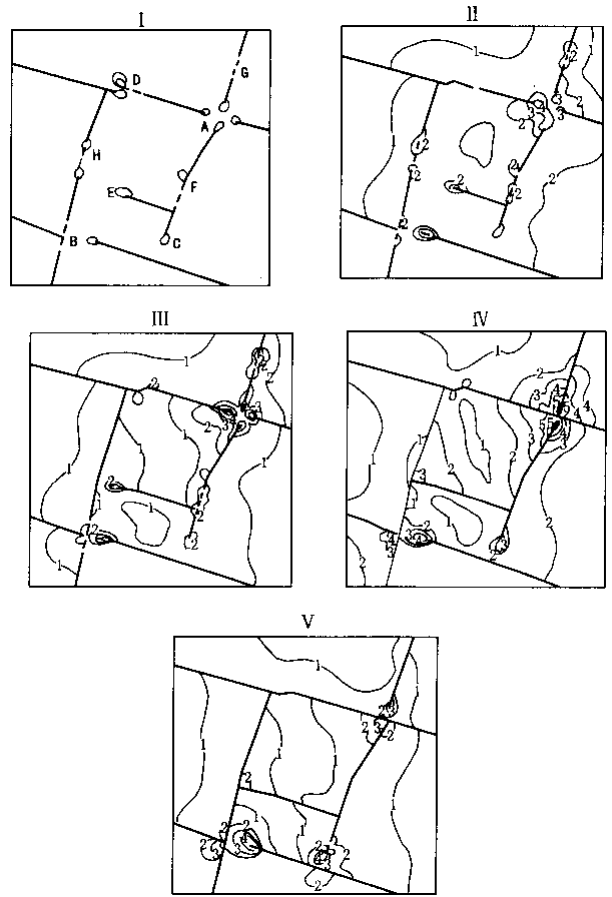


图 4 华北地区地应力分布图^[14]

Fig.4 Geostress distribution in North China

还需要加以说明和改进，①活动地块的划分与应力集中点分布关系很大；②区域的地应力的大小、方向和性质，也可能存在由于地下流体作用而形成的垂直方向的地应力；③地应力也是随深度有变化的，加之地壳不同深度区间结构的变化将可能使不同深度水平上地应力分布会有所不同。这样，地表模拟结果可能不一定会代表深部的情况，需要有个对比说明。此外，可能还有重力产生的山体大滑脱引发的应力作用等等。应力集中会造成一系列的小断裂，小裂隙，其分布和规模等可有多大，地段内流体的分布等等所造成岩层物性的变化。这将与地震前兆的形成有密切关系。光弹模拟及其它物理模拟方法应该是很有用的工具。

(3) 关于物理预报

文献[9]中提出过去“在地震预报物理方法方面也作了尝试。通过特定介质的本构方程和物质守恒方程建立了物质运动方程，经过复杂运算，形成了孕震动力方程组，据此对地震前兆的相互关系做了理论分析，将地震空区、条带、频率、 b 值、波速等异常，地下水、水化学、电阻率等多种前兆机制与内在关系，从理论上进行了解释，为综合预报提供了理论依据。”

建立这样一个孕震动力方程组正是我们建立地震预报科学基础所努力追求的。推导这一方程组时所设定的具体条件很重要，作者认为推导这一方程时需要处理好以下几点：

- ①具体的拼贴块体深部结构的划分和各块体力学性质的设定；
- ②主要地质块体在不同深度平面内所受的地应力大小、分布与作用方式；
- ③在地应力作用下“红肿区”的范围如何设定？物性如何设定？

地震空区、条带、频率、 b 值、波速等异常，地下水、水化学、电阻率等那些是地震的前兆现象尚未能完全肯定的情况下，如何能将它或它们与地壳断裂、发震联系起来？建立这一孕震动力方程组的目的是想从地震发生的本质上找到与其有联系的前兆现象，而不是在已肯定了上述各现象都为地震前兆的情况下，找一个方程将它们联系起来。

④在这样一个三相（弹性体、塑性体和流体）非线性连续介质的复杂体系下，如果考虑到红肿效应又应该加上一些过渡态（如何设定？）则更为复杂，受力情况也较复杂，仅仅提到本构方程和物质守恒方程是不够的，建立起孕震动力方程组很复杂很困难的工作，这是要很好研究解决的课题。

3.7 需要制定一个长远的地震预报科学研究规划

(1) 长远科技规划的必要性

顾功叙说“实现准确地震预报方法的突破为期还很遥远，我们不能等待。应该想些办法来预报大地震的发生，尽管科学上还不成熟。”另一方面他强调“同时要开展大量的基本研究工作，弄清各种现象的所以然^[6]。鉴于实现这一突破的难度大和长期性，他大声疾呼要有一个突破地震预报的科学设想，要有一个长期的科学规划。为此，他在每次会上都不顾一切地提出自己的建议，为我们树立了一个良好的榜样。

地震局宋瑞祥局长早在2003年地震预报协商会上就提到要研究和制定一个地震预报研究的长远规划，这是十分正确的。这样才能抓住地震预报工作中的关键问题，经过长期不断的努力，我们才可能在多年以后对地震发生机理取得新的认识，提高地震预报的准确率，做出中国人的贡献。否则，将会像顾老所说，“只能是工作不断重复，而地震预报的突破变成更为遥远之事。”

(2) 地震预报研究长远规划中不应缺少的内容

建议规划中给地应力及有关内容以一席之地，继承和发展李四光先生的地震预报思想！

具体建议加强以下几个方面的工作：

①提高野外现场地应力及其它观测结果的质量，并扩大观测与系统化，避免数据零散不便利用。

②高温高压下岩层的物性变化及地震过程模拟试验（物理的和数学的）。重点是上地壳。

③将地震发生的模拟试验、计算地球动力学研究，与实验场观测结合，加强综合研究，提出地震过程的动力学模型。

④改进野外观测数据的处理软件系统，提高分辨率。

⑤不能忽视面上观测结果的总结。因为地震预报问题很复杂，重点抓的几种现象不一定是对的，必须注意出现的新情况；面上研究应适当加强调查研究性和总结，力争减少一些不确定性的说法。

地震预报是一件重大工作，吸引着广大群众和科技人员的关注，专业人员应与各部门业余爱好者有联系和交流。在统一规划下发动大家参与地震预报的研究和总结工作，这样可以将我国现代地球科学整体带动起来。

此外还需要国家有关部门（国家发改委、科技部、自然科学基金会等）重视地震预报研究，给予必要的支持。

（3）未来 15 年达到的科学目标

①争取能扑捉到 2~3 个震例，取得较完整的孕震、发震和停震的丰富记录；

②对一些异常现象的认识有所深化，可以讲些道理，并使国外同行重视；

③在中国大陆结构构造及陆内地震形成机理方面取得较高水平的成果；

④建立起地震预报研究数据库，供社会公用共享。

致谢：在本文成文过程中马宗晋院士、郭云麟研究员、张国民研究员、廖春庭研究员、苗培实研究员等专家仔细审阅了原稿并提出许多宝贵建议，作者在修改稿件时都已采纳，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 李四光. 谈地震预报问题 [M]. 论地震. 北京：地质出版社，1977. 9, 11, 123.
- [2] 傅承义. 序，中国地震预报概论 [M]. 北京：地震出版社，1993.
- [3] 吴忠良，黄静，刘培洵，等. 地震矩张量元素 M_{TT} 的空间分布与中国大陆岩石层地块 [J]. 地震地质，2003，25 (1) : 33 ~ 38.
- [4] 蒋靖祥，尹光华，王在华，等. 新疆分量式钻孔孔应变异常的统计特征及其在地震预测中的应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2004，23 (3) : 4072 ~ 4078.
- [5] Chunting Liao, Chunshan Zhang, Manlu Wu, Yinsheng Ma, Mingyi Ou. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake. GRL, 2003, 30 (20) : 2027.
- [6] 顾功叙. 在国家地震局制定规划的全国局长会议上的发言 [A]. 顾功叙文集 [C]. 北京：地质出版社，1999，191 ~ 198.
- [7] 傅承义. 有关地震预报的几个问题 [J]. 科学通报，1963，3.
- [8] 陈运泰. 地震预测研究概况 [J]. 地震学刊，1993，1，17 ~ 23.

- [9] 梅世蓉. 40 年来我国地震监测预报工作的主要进展 [J]. 地球物理学报, 1994, 37 (supp. 1): 196 ~ 207.
- [10] 陈梅花, 邓志辉, 贾庆华. 地震前卫星红外异常与发震断裂的关系研究 [J]. 地震地质, 2003, 25 (1): 100 ~ 108.
- [11] 美国国家科学基金会、美国地调局、美国国家宇航局. Earthscope-Scientific targets for the world's largest observatory pointed at the solid earth [M]. 2003.
- [12] 傅承义. 地球物理学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 401 ~ 410.
- [13] 傅承义. 关于地震发生的几点认识 [J]. 地震战线, 1971, 8, 35 ~ 36.
- [14] 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.

INHERITING AND DEVELOPING LI SIGUANG'S THOUGHT ON EARTHQUAKE PREDICTION

ZHAO Wen-jin

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

Abstract : This paper reviews Li Siguang (J. S. Lee) 's thought on earthquake prediction and emphasizes the great significance of the view of following China's own road to carry out geostress observation and research and investigation of the active tectonic systems proposed by Li Siguang. According to the practice and experience in the work relating to earthquake prediction over the past 40 years , the paper further elucidates the idea that in the new situation we should make new supplements and developments of the thought and method. It is suggested that in the future , while we should continued to undertake earthquake prediction practice and sum up the experience , we should strengthen the study of the seismogenic mechanism. In addition , some concrete suggestions about how to carry out this research work is put forward.

Key words : Li Siguang's academic thought ; earthquake prediction ; active structure ; geostress measurement ; investigation of the deep interior of the Earth