

综述与评述

地震研究中的大地测量^{*}

黄立人

(中国地震局第一监测中心, 天津, 300180)

摘 要 本文简要回顾了我国大地测量工作者将大地测量技术应用于地震监测和预测的历程。介绍了过去几十年在地震监测和预测中大地测量工作取得的主要进展和成绩, 讨论了存在的不足和改进的地方。并且结合近二十年来以 3S (GPS、RS、GIS) 为代表的高新技术的引入给对地观测技术带来的革命性变化, 使得观测结果的精度和时空域中密度大为改观这一事实, 对地震研究中的大地测量的发展方向提出了一些看法和建议。

关键词 大地测量; 地震监测; 地震预测

中图分类号 P22; P315 **文献标识码** A

前言

翻开几十年前的任何一本大地测量学教科书都可以看到“大地测量是一门研究地球‘几何’形状的科学”这样的叙述。但是地球形状是在变化的, 这不仅被地质学、地球物理学观测结果从长时间尺度上被肯定, 而且随着科学技术的发展和高精度观测结果的积累, 地球形状的现时变化得到了现代大地测量结果的证实。这些事实被肯定的一个自然的发展是人们关心产生这种变化的原因是什么? 它将如何发展? 对人类社会的发展将会有什么影响? 人类应该如何应对和调整与自然和谐相处。在解决这些问题所面对的巨大挑战中, 大地测量一方面获得了自身发展的强大动力, 另一方面又可以作出自己的贡献。大地测量学与地球物理学和地质学一起被认为是地震科学的三大支柱学科就是这方面的例证之一。

1 地震研究中的大地测量

在我国将大地测量与地震研究联系起来, 最早出现在 1966 年的邢台地震之后, 当时为了了解这次强烈地震造成的地表破坏情况, 对地震的一些水准路线进行了复测, 为了比较又收集了该地区的旧水准资料。对资料分析的结果, 不但对这次地震的影响范围有了了解, 而且发现在旧资料中在地震前也有所变化。同时受到 1906 年美国旧金山地震前后的大地测量结果的启发 (美国人里德据此提出了弹性回跳理论, 该理论至今有时被用来作为根据大地测量结果预测地震的一种物理依据), 大地测量作为一种前兆手段被应用于地震的预测。以邢台地震为契机, 成立了中国地震局的前身——中央地震工作办公室, 此后又恰逢 1966 ~ 1976 年间在中国大陆发生一连串的七级以上的强烈地震, 地震成为文化大革命期间全国关注的大事。地震工作的队伍可能是那个时代唯一得

^{*} 收稿日期: 2004-05-17。

到发展的特例。也正是在这样一种背景下大量原来在测绘部门的大地测量单位和人员转而投身地震工作,组建了专门从事地壳形变测量的专业队伍。因此地震局的形变监测、研究单位和从业人员乃至其工作、研究的风格一开始就与传统大地测量的习惯和风格有着很深的联系。这一特点有其好的影响,即与地震部门的其它专业部门相比,它对观测数据的获取更注重质量和可靠性,有一整套严格的质量标准和管理体制。对于利用这些资料所得到的研究结果也更注重对可靠性的定量估计和评价。但也勿用晦言,其不足是知识结构比较单一,不能适应地震这一复杂自然现象研究的需要,思路不够开阔。这种情况虽然经过几十年的发展有所改进,但并未发生根本性的变化。

在 1966 ~ 1976 年的地震活动高潮期,大地测量在地震工作中的主要作用有两个方面:一是以传统的大地测量手段在全国主要地震活动区开展了区域形变测量工作,并利用全国的已有资料开展了全国尺度的形变研究工作,并尝试利用这些结果来作地震中长期预报。二是将传统的大地测量方法稍加改造,并引入了一些传统的精密工程测量的方法创立了流动和定点的地壳变形的监测工作,在全国建立了成百上千的观测台、点(还不算群测群防点),并利用这些结果作地震的中短期预报。从预报的依据上基本上是基于历史震例的分析类比,虽然也作一些数据的处理、干扰的排除,但着眼点仍然是历史的重演,在方法上则基本上是看图识字。但在当时特定的自然和社会条件下,大多数人们依然对地震预报有非常乐观的想法。尤其是 1975 年海城地震的预报成功,以及 1976 年的松潘-平武地震的预报(对于这个地震是否算是有成功预报还存疑),更是助长了这种情绪。

但是,接下来的十年,中国大陆的地震活动进入了一个平静期。以唐山地震的漏报

开始一直到后来的 1982 年差不多六、七年的屡报屡虚,这种乐观看法没有能经得住实际的验证,从而引起了人们的思考。在这段时间内大地测量工作者一方面继续做着做测量和资料积累工作,一方面也在开始思考过去的认识,以及用大地测量手段研究地震问题的复杂性。

从 1983 年开始,地震局系统相继实施了几次较为系统的专项计划。第一次是被称为“清理攻关”。对于大地测量手段来说主要进行了几项大的工作:对于区域形变测量,清理了截止到当时的地震部门所收集到的和测量得到的试策划者的全部水准测量、三角和三边测量和流动重力测量资料,经过校订、整理编印出版,留下了大量珍贵的历史资料。同时研究了这些资料的精度,结合地震预测工作的需要,对于这些用传统大地测量的方法得到的资料的可用性和局限性有了初步的认识。在这次清理攻关的基础上,因精度不足基本上停止了水平形变测量工作。同时利用清理后的全国精密水准资料研究和编制了第一张全国地壳运动速率图。另一项重要的工作是对截止到当时的断层形变台、点进行系统的清理,摸清各台、点观测环境、观测质量等基本情况,同时也结合唐山、海城等大地震,对断层形变的信息特征、映震能力进行了初步的研究。对于确立这一手段的地位起了作用,也为后来台、点布局的改造,观测环境的改造提供了背景资料。但当时的工作只涉及到全国形变台站的大约 80%,而且流动点只局限于东部地区,有不少遗漏,有一定的局限性。对于利用这些资料进行地震预报的依据也没有着重进行研究。

1986 ~ 1990 年全局部署了第二次称之为“实用化攻关”(也称“七五攻关”)的工作。从这一名称来看似乎地震预报科学方法的难点已经突破,问题是如何实际应用了。从当时的技术发展背景来看,这一时期是个

人计算机开始普及，计算机技术开始被人们普遍掌握。而从地震预测的状况来看，一方面地震预报的实际水平始终没有实质性提高，另一方面中国已经历了十年的地震活动平静期，而上一个 10 年的地震活跃期的紧张记忆犹新。因此“实用化攻关”可能反映了这种背景下人们对地震预报的焦急心态。这一攻关的主要成果反映在计划执行过程中编制了许多“实用化”软件。在对前兆机理没有作深入研究的情况下，单纯依靠数学方法来提取信息并试图用于预报。因此，在这一时期除了通常的统计、回归、拟合等统计学理论和方法之外，灰色理论、突变论、信息合成、分形理论等理论和方法被大量引入到地震预报中来。无论是区域变形还是流动和定点形变都是如此。当然这些方面的工作也是有一定作用的，对于其中某些理论和方法它们的适用条件和对于地震现象的统计特点有了新的认识。这项工作没有从地震机理的基础研究入手，急于完成预报任务在相当程度上反映了急功近利、急于求成的心态。同时，这一时期在大地测量的观测技术上则出现了以逐渐成熟的 GPS 技术为代表的新的观测手段。我局在国内较为领先地引入了这种新技术。而这个时期由于经费投入的原因，被认为是比较有效的垂直变形测量的规模也大大萎缩。重力测量也大为减少，定点和流动测量经过改造、新建和撤消，在较小的规模维持。

1991 ~ 1995 年我局又部署开展了称之为“八五攻关”的专项工作。这一次“攻关”的指导思想与前一次一脉相承，即急于解决地震预报问题，重点寻找地震的“前兆标志”。并试图将各学科前兆的一般性特征标志综合起来建立起“前兆标志体系”。有了各单学科的实用化的方法、软件，结合“前兆标志”，和综合判别的“专家系统”和“前兆标志体系”，只要将观测结果输入计算机，输出的就是具体的预报意见。这种愿望当然

是好的，但是却不切实际，因此虽然广大地震工作者花了大量的时间和精力，但用于预测预报实践的效果却有限。这一情况甚至在课题实施之前、之中、之后就已经被许多人所关注和思考。

从大地测量观测技术来说，随着这一时期 GPS 卫星星座布设的全面完成、解算软件的逐步完善、IIRF 框架的不断精化，国内对 GPS 技术的逐渐熟悉和理解，已经以实际资料证明用 GPS 监测水平变形可以比传统测量方法高 2 ~ 3 个数量级。这个时期，大区域的水平变形的监测起死回生，重新受到重视。先后在一些重点监视区布设了 GPS 监测网，取得了一批高质量的观测成果。并第一次以计委专项的方式建立了首都圈 GPS 监测网。GPS 在攀登计划，APSG 计划等大的科研项目中开始崭露头角。与此同时，另一项空间技术 SAR (NSAR、D-NSAR) 技术开始引起地震工作者的注意。

1996 ~ 2000 年，地震局在一定程度上注意到了“七五”、“八五”攻关中的问题，又部署了“九五攻关”，这一次比较强调综合性的研究，就形变来说，注意点面结合和与其它学科的相互渗透，注意从中长期向中短期乃至短临阶段过渡的前兆特征。但是基本上仍然是立足于尽快将这十几年的结果用于当前的地震预测预报，提高预报水平。

运动观测网络全面的覆盖，已经取得了中国大陆的地壳运动的资料，得到了全国地壳运动的速度场，为以“973 项目”为代表的的基础研究提供了支撑，得到了一些有关地壳运动学和动力学的研究成果。在区域重力场的监测方面，网络工程首次建立了以基准站上高精度绝对重力测量为控制的，以高精度相对重力测量，将遍布全国的 56 个基本站和许多区域站、重力点联系起来的高精度重力网。NSAR 技术也开始在同震形变的研究中应用。但是这个科学与工程所涉及的关键技术和设备都是国际上先进的成熟技术和产

品。所有的主要硬件设备和软件都是引进的。尤其是处理软件我们基本上处于学习、消化和具体操作应用的水平,完全没有自己的知识产权。由于这一科学工程的成功和为了强化网络的功能,已经提出了规模更大的二期工程计划,争取在“十五”期间立项、实施。

2 大地测量在地震研究中的不足

通过上面的简单回顾和为了满足实现地震预报的最终要求,我们可以大致看到大地测量在实现这个目标中有那些不足。

2.1 思路不开阔

地震一种地球物理现象,大地测量所能观测到的只是在整个地震孕育、发生、以及震后调整整个复杂过程中伴生的变形,而且必须是在地表可以观测到的那一部分。因此,仅大地测量手段所能观测到的只是很有限的一部分信息。同时许多与地震无关的现象或事件也可能产生地表的变形而被观测到。因此,必须综合各方面的信息才有可能得到比较符合实际的认识,而这一方面又是在地震战线上的大地测量工作者的先天不足。

2.2 机理不清

地震的孕育过程是通过什么样的物理(动力学过程、化学?)途径转化为地表可见的变形?地壳中介质的性质、不均匀性、构造在这个过程中起什么作用?如何起作用?如果这些有关机理的问题不清楚就谈不上物理预报。经验预报或概率预报对于地震这样一种小概率事件预报效果不大可能有大的提高。总之,要从观测结果推断产生这些结果的过程是一个反问题。因而操之过急,在地震预报研究中的浮躁心态、忽略扎实的基础研究的结果可能是欲速则不达。

2.3 对新技术的学习、跟踪的层次较低

例如 GPS的处理软件(硬件先不谈,因为这可能更应该是信息产业部门的事),一

般满足于学会、会操作,算出结果来。但这种状态对于一般产业部门取代传统测量完成生任务是可以的,但是对于研究地震来说则远远不够。网络工程项目取得的观测资料,不同部门计算结果存在差别,至今尚未公布一个统一的被大家接受的结果就是一个例子。长此以往,我们在这个领域是不会有出头之日的。NSAR的情况也类似。要不要根据地震研究的需要开发有自己独立知识产权的软件在局系统内部是有争议的,不同意的同志主要的看法是,在地震研究工作中的大地测量工作者是 GPS和 NSAR技术的用户。这类大型软件涉及的知识领域很宽。没有力量和能力开发这类软件。但是有无可能由国内一些主要部门联合攻关,我们参与其中与地震研究有关的部分?

2.4 认清困难,放眼长远

解决地震预测问题的科学思路还未找到,而且可能短期内尚无法解决。因而要有长期摸索的准备和甘于寂寞,不提不切实际的指标、同时政策上要为此创造比较宽松的环境。

3 “十五”和“十一·五”期间大地测量在地震研究中可以做些什么

如果认同地震预测研究的长期性这一基本认识,那么在“十五”和“十一·五”的安排中是否可考虑:

3.1 加强复合型人才培养

从大地测量这一学科来说,我国目前的教学体制所培养的大地测量专业人才不能适应地震研究的需要,建议鼓励大地测量专业的毕业生攻读地球物理或地震地质的第二学位。或者反过来地球物理或地震地质专业的毕业生攻读大地测量的第二学位。也可以吸收数学、物理专业的毕业生进入大地测量这一专业。

3.2 加大大地震科研基金投入,鼓励自选题

目和学术思想的交锋

过去十几年来地震科学联合基金的投入较少而任务性的工程项目投入较大。考虑到地震研究是探索性很强的工作, 而且攻克地震预报难关的科学思路也未清晰, 活跃学术思想就特别重要。工程性的项目是必要的, 因为地球科学是一门建立在观测基础上的科学, 观测手段的改进, 观测条件的改善都会促进这门科学的发展。但是另一方面, 由于解决地震预报的科学思路并未真正找到, 地震预报又不是一个单靠投入就能解决的问题, 因此, 相比之下目前更缺的是基础研究的投入。

3.3 鼓励争论

由于地震预报预测的基本科学思路没有解决, 因此, 对于目前一些观测手段、方法、以及观测到的究竟是什么是有不同看法的。例如, 有的专家认为目前的跨断层流动观测手段落后, 跨距短, 干扰严重, 而且揭示的断层活动的信息大多数是地壳盖层块体的伸展滑脱运动, 使用这种信息很难获得深部蕴震构造的信息。建议全面停止跨断层流动和定点地壳形变的监测, 集中力量进行改造与研究。建立较大跨距和全自动的“跨断层”的观测台站。对于类似的问题应鼓励争论, 并开展相应的研究、论证。

3.4 若干具体研究课题

在“十五”、“十一·五”期间大地测量至少可开展以下几个方面的具体研究课题:

3.4.1 新技术的消化吸收及处理软件的研究

在“十五”期间, 国家重大科学工程有望启动、前兆观测网络(28亿项目)已经启动。在这些项目中 GPS、NSAR 等一类新技术都是其中的重要部分。目前我们应用的都是引进的国外软件, 但一般仅处于掌握会用水水平。没有独立的知识产权, 不大可能根据需要增、改以满足研究工作的需要, 比较被动。建议利用十五网络工程二期由国内一些

主要单位共建的优势组织联合攻关。经过 5 年或更长一些时间搞出有自主知识产权的软件。对于我局的大地测量工作者, 则建议开展较为系统的变形分析方法研究, 开发相应的软件。

3.4.2 区域变形及成因机制的研究

从当前大地测量在地震预报中所起的作用来看, 一般认为区域变形场对未来地震危险区的中长期预测效果相对好一些, 而对短、临预报还难以起到作用。但是区域变形与未来地震的关系仍然还是不清楚的。依据的只是为数不多的震例总结。因此, 每年根据形变观测结果和几条区划标志圈定的危险区大部分是虚报, 在与其它手段综合时也由于机理不清无法有机地综合, 只能是投票式地少数服从多数, 难以保证科学性。因此, 在“十五”期间应在加强区域变形的监测(包括 GPS、NSAR、水准测量和重力测量)的同时, 加强这些变形测量的机理研究, 争取首先能从机理上将这些变形观测结果有机地整合起来, 进而再考虑与其它观测手段的整合。

3.4.3 板内变形的研究

随着全球的 GPS 观测资料的积累, 对大尺度的全球板块运动研究已经对全球的板块运动速率有了比较一致的认识。但是稍加注意就会发现这些速率值是根据为数不多的全球站观测资料计算得到的(例如 IGS 公布的有运动速率值的 GPS、SLR、VLBI 站约有 6 百多个, 但用于计算板块运动速率的仅几十个到 100 多个), 其原因是许多站位于板边缘或者有明显的局部变形, 不能代表所在板块的整体运动。这反过来也证明板块运动只是地球表层运动的一级近似。我国的地壳运动观测网络 4 年的观测结果也证明, 位于欧亚板块东南部的中国大陆内部的变形差异很大。板内的这些形变大的地方常常是板内地震(或大陆地震)的多发区。因此, 研究板内变形(变形的大小、空间上分布上的差异、

变形的时间进程)对于我国这样一个大陆地震多发国家的地震预报具有特殊的意义。而且要将板内变形放到全球运动的背景下来研究,可能更有利于了解变形的动力源。

3.4.4 断层变形研究

断层形变测量在我国测点多,积累资料时间长,对于它的作用一直有不同的认识。国外也有类似的监测方法,如日本、美国也有类似的断层监测(例如在加州的圣安德烈斯断层)。但监测目的很明确,即查明要监测的断层的活动状态。只有当有其他证据表明该断层可能要发生地震时,跨断层监测才被用来确定断层的闭锁段,作为危险段的依据之一。在我国断层形变测量的规模和作用要大得多,而且由于技术的限制,许多测点还布设在一些主干断裂附近的小断裂上。许多研究者通过形变场的概念将这些方圆上千公里的观测点联系起来,作未来地震的预测预报。但这种场的联系多少有点抽象(即内在关系说不清楚)。有人研究了诸如灰色理论、突变论、信息合成等方法,实际应用效果都不能令人满意。因此,目前的情况是,一部分主要承担短临预报的同志在各种方法上下工夫,而有的同志则认为目前要下决心停止这种状态,从思路、目标、应用上做大的调整。因此,很有必要开展跨断层测量手段的研究。这里包括:

3.4.4.1 对断层形变监测的现状再次进行全面的清理

近二十年来,断层形变监测系统发生了很大的改变,许多台点淘汰了,一些台点新建了,更多的是进行了观测场地的改造,而且不论新老场地,其地质背景资料都不甚确切,甚至各有各的解释。可以说,我们目前还没有一整套完备无误而又详细的资料。我们急需建立关于全国断层形变的一整套完整的静态和动态资料,同时要将全部已有的观测资料按照统一的格式建立数据库。完成这项工作难度并不大,因为都有一定的基础。

只要充实、完善、纠错和系统化即可。

3.4.4.2 关于断层形变观测结果性质的研究

这项工作简单说来就是:这种手段的资料积累了这么多年,究竟反映了什么量的变化?要一个一个台点地去再次核实,尽可能搞清楚。

所测的资料是否主要反映了表层的干扰或地面沉降而不是深部的构造信息?可结合周围大面积形变的观测结果,从形变速率等指标来判断。也应从覆盖层厚度、地面沉降数据等资料来推断。

所测的资料是否真正代表了构造形变?可结合周边断层形变的平均水平、断层活动一般强度,测点所处块体的部位,参照其它断层形变测点的结果综合判断。

所测的资料的噪音水平如何?是否在合理范围之内?是否出现过与地震无关的或任何因素均难以解释的变化?这些变化是否可以用一定的方法加以消除?按现今的监测水平,“观测误差”已经不是信息噪音的主要成分了。

测点所处的地质环境和历史地震环境如何?是否处于发震概率极小的地区?如果从大形势来看此处发生地震的可能性极小,这样的测点应考虑取消。

通过对各个台点的逐一研究,我们就可以对现有的台点进行分类。然后存优汰劣,提高整个监测网的功能。

3.4.4.3 断层形变对历次强震前兆反映能力及映震机理的研究

以上各次专题研究(攻关)实际上都是围绕若干震例来做文章的。不仅由于震例少、标志体系难以建立,而且这些震例是否经得起时间的考验也还是个问题。从1975年海城7.3级地震后,我们确认了以金州台水准为代表的一些震例(包括后来的唐山地震前的大灰厂水准、大同地震前的一批断层形变等等),现在回过头来看,当时的认识

水平和资料处理方法都没有错, 我们也不能要求每一个震例都具有事后的可重复性和再次检验的正确性, 但这些地震发生后至今已过了十多年甚至二十多年了, 有必要以今天的观点和认识方法对这些震例再次进行反思和检验, 这其中免不了有些震例很可能要被否定(例如大灰厂水准, 八十年代和现在的变化要比唐山地震时大几倍甚至十几倍, 但毕竟没有地震对应)。此外, 东部地区地震少、资料多, 西部地区资料少、地震多, 历次攻关研究中侧重面和研究方法也有较大差别, 现在如果从“基础研究”做起, 应该以一种统一的标准来进行重新评价。

3.4.4.4 点、线、面结合的研究

点、线、面结合是我国的地震监测体系的一大特色。从哲学上来说以点、线、面结合的方式来观测和认识事物应该是正确的。

但点、线、面上观测到的结果怎样结合的问题却没有解决。即我们只做到了观测布局上的点、线、面结合, 但没有做到解释上的点、线、面结合。观测手段的空间上的联系还不能转化为对一个事物认识上的深层联系。

3.4.4.5 着手并完成形变测量数据库的建设和相应管理、应用程序的研制

形变测量数据库建设问题至少已经提上议事日程十年了。而且在“八五”期间即组织部分同志做过方案的预研究。但由于一直得不到重视而未实施。这种状态已经为相应研究工作造成不便。许多使用这些资料的同志大多按自己的习惯将自己工作中用到过的资料收集来以数据文件的方式保存在计算机里。现在要改变这种落后状态技术上已没有困难, 资金投入也不高。

Geodetic Measurements for Earthquake Researches in China

Huang Liren

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin, 300180, China)

Abstract The application of geodetic techniques in the earthquake monitoring and prediction by Chinese geodesists is reviewed briefly in this paper. The main achievements and progress in earthquake monitoring and prediction during the past several decades are introduced. Considering the new high techniques represented by so-called 3S (GPS, RS and GIS) leading into geodesy driving a revolutionary development in the observation techniques from space to the Earth in past twenty years, and considering the fact that the observational accuracy and density both in space and time fields are greatly improved, some points of view and proposals on the developing directions of geodesy in earthquake research are proposed.

Key words geodesy; earthquake monitoring; earthquake prediction