

现代地壳运动和地球动力学研究

Contemporary Crustal Movement and Geodynamics Research

叶叔华

(上海天文台,中国科学院院士 上海 200030)

黄 斌

(上海天文台,研究员 上海 200030)

板块构造运动,特别在岩石圈板块的汇聚型边界地带的构造运动是高大褶皱山脉隆起、岛弧海沟形成的直接原因,也是与人类生存环境密切相关的岩石圈的地震活动、火山爆发、地热活动、海陆升降的动力学原因之一。过去传统方法能为地壳构造运动提供的依据主要是以地质时间为尺度(几百万年)的地质和地球物理资料,而无实时定量的实测资料。由于仪器精度与测定方法的限制,对板块构造运动状况更是知之甚微。

80年代以来,由于采用各种新的空间观测技术,例如人卫激光测距(SLR)、激光测月(LLR)、甚长基线射电干涉(VLBI)和全球卫星定位系统(GPS)等,使测定地面点位的精度已达厘米级。经过几年的观测,可以精确测出地壳移动速率,精度达到每年几毫米。空间新技术与传统方法相比有以下特点:一是精度高,测定点位的精度是传统方法的几十倍;二是实时性好,空间新技术可在较短时间(几年)内定量地测出地壳的移动,而传统方法测定地壳移动是几百万年平均的结果;三是范围大,传统方法很难精确测定相隔百千公里以上的地壳相对运动,而空间新技术却无此困难。图1反映了用VLBI技术测定上海—日本鹿岛站以及上海—澳大利亚DSS45站自1988~1992年期间基线变化的情况。由图可见,这两条基线明显地分别以27毫米/年和59毫米/年速率逐年缩短,充分显示了板块间的真实运动,而这恰恰是传统方法无法测到的。空间新技术这种能实时、精确地测定地壳运动微小动态变化的特点使地球动态变化的监测、研究和应用起了根本性的变化。地球科学的研究,从静态研究发展为动态研究,从运动学扩展到动力学,从三维空态拓展到四维时空,从刚体领域转变为弹性体和流变体的研究,从地球表面伸向地球外部空间,深入地球内部,从孤立的地球整体和地球各圈层(大气圈、水圈、岩石圈、地幔、地核)运动的研究,转变

为把地球整体和地球各圈层的运动看成一个完整体系,研究其相互激发、驱动和制约的动力学关系,从地球动态变化的一些定性假设到以高精度实测为基础建立精细的现代地球的定量模型、进而建立完整的动力学体系,从各学科封闭式的研究状态转向各学科交叉、综合的研究。地球科学随空间新技术的发展正经历一场深刻的变革。此外,通过空间新技术可发现传统方法无法测到的地壳运动非线性时变细节,进而能真正探索地震、火山喷发、海陆升降的成因过程与机制,为预测灾害、保护人类生存环境作出贡献。

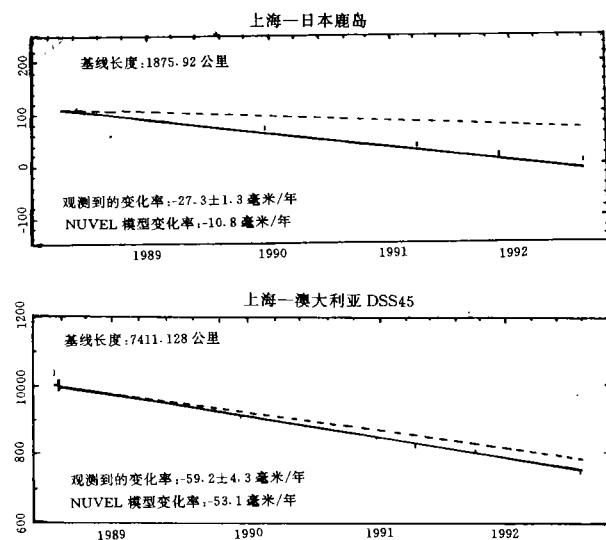


图1 用VLBI测量基线长度变化情况

现代地壳运动和地球动力学研究(国际上通常称为空间地球动力学研究)主要用空间技术精确测量地球的整体运动、地球各圈层(特别是岩石圈)的物质运动与形变,定量地给出地球随时间的变形过程,确定各种运动或变形过程的相互联系,探索它们的演化过程和动力学机制。

一、空间地球动力学研究计划的发展

70 年代末以来,美国国家航空和航天局(NASA)曾利用 SLR 和 VLBI 技术组织了全球规模的地壳动力学计划(CDP),通过对大量观测资料的分析研究,在验证板块间和区域性地壳运动速率、测定地球引力场和地球模型,以及地球内部物理结构的研究方面,取得了一批具有世界影响的重要成果。例如,实时、定量地测到了板块的运动,验证了刚性板块的假设。1992 年 NASA 在完成了 CDP 计划后又开始实施固体地球动力学(DOSE)计划作为 CDP 的后续。80 年代中,西欧提出了 WEGENER 计划,主要利用地中海地区的 SLR 网,研究该地区的地壳运动,包括欧亚、印澳、非洲和阿拉伯板块的相互作用。近年来已延伸到中亚,并开展了海平面变化和冰川后期地壳反弹的研究。最近,作为 DOSE 计划的一部分,美国、加拿大与瑞典、挪威、芬兰合作,在后面三个国家建立 GPS 网,监测该地区地壳运动与海平面变化,主要研究冰川后期地壳反弹效应。由欧洲联盟牵头的东南亚联盟 GPS 计划也在近期提出,并在 1994 年 12 月进行第一次联测。该计划将研究东南亚地区的板块运动和地壳形变及其与自然灾害的关系。我国对空间地球动力学的研究早在 70 年代末就开始了,特别是 1991 年启动的我国国家攀登计划(现代地壳运动和地球动力学研究)更使我国在这方面的研究走上了合作、健全发展的道路。该计划集中四个部门的有关研究所的力量,统一协调、通力合作,进行跨学科(天文、大地测量、地球物理、地质、地震、海洋等)的研究,已经在地球自转变化、精密地球参考坐标系建立和维持、板块运动和区域性地壳运动以及自然灾害预报方面取得了接近或达到国际先进水平的成果。该计划将延续十年。由中国倡议的亚太地区空间地球动力学计划已在 1994 年 9 月于北京召开的由亚太经济和社会委员会与中国国家科委联合组织的空间技术应用、促进持续发展专家会议上提出。该计划拟联合亚太地区的国家或地区的力量,对中国、日本和东南亚所在的西太平洋边缘地区以及中国青藏高原和东南亚所在的北印度洋边缘地区的现代地壳运动进行研究,并对该地区未来重大灾害事件,特别是地震、火山爆发、海浸等灾害的预测作出贡献。

二、空间新技术应用于现代地壳运动和地球动力学研究所取得的成果

1. 现代板块运动的监测和研究

传统的板块相对运动模型的建立依赖于以下

两条假设。一是板块被假设为刚性。在这样的假设下,几乎所有的板块间的相对运动都被假定为出现在板块边界的狭窄地带,而板内形变速率太小以致可视为刚性。二是组合不同时间尺度平均的资料。这一假设下,板块相对运动模型事实上反映了几百万年平均的板块运动。这样的模型是否能反映当今的板块运动呢?为了便于比较,一个全球板块相对运动模型 NUVEL-1 新近建立。该模型使用了比以前更多的传统资料(洋脊扩张速度、转换断层方位角和地震滑动矢量),并将印度和澳大利亚处理成分开的板块。CDP 组织了全球板块相对运动的实测,结果不论是 VLBI 技术还是 SLR 技术,所测得的与 NUVEL-1 模型比较,符合率达 95% 左右,这说明两者一致性非常好。特别是对板内基线的测量,例如用 VLBI 测定的北美板块内的三条基线(Fort Davis—Westford, Fort Davis—Green Bank 和 Pietown—Westford)变化率分别为-0.2、-1.0 和 -3.0 毫米/年,说明板内运动很小,即板块的刚性假设基本成立。这种与 NUVEL-1 模型的一致性被看成是 CDP 计划突出的重要成果之一。

利用空间技术实时、精确的特点,开展了板块边界与区域性形变的测量,例如用 SLR 和 VLBI 技术测定了日本列岛处,俯冲的太平洋和菲律宾板块分别相对大陆一侧的欧亚板块正以 9 厘米/年和 4 厘米/年的速度插入日本列岛下面。

此外,沿北美和太平洋板块边界以及在东地中海的区域性形变测量大大增加了我们对当前发生的形变的理解。例如利用 GPS 技术,我们监测到位于北美南加利福尼亚两测站(PFO—GOLD)之间基线在 1992 年地震前后变化情况(图 2)。基线(长 205 公里)在地震时突发地缩短 44 毫米,并在震后十几天中缓慢地以 1.1 毫米/天速率变化,再后又趋向平稳不变的状态。如此详细地监测这十几天的变化,这对传统方法来说简直是不可思议的。

我国自 1991 年启动了国家攀登计划(现代地壳运动和地球动力学研究)后,在我国大陆板内现今地壳运动和青藏高原的地壳运动,以及东部沿海地区地壳运动和海平面变化的研究方面取得了不少成果,例如:

——用 VLBI 测量了上海与国外其它台站的 12 条基线,精度为几毫米/年(图 3),同时计算出上海相对欧亚板块的稳定区域(欧洲中部)存在 1~2 厘米/年的向东运动。

——用 1992 年 GPS 联测资料,得到上海、武汉、长春、乌鲁木齐、台北基线,内符精度好于 1 厘米。

——利用 GPS 技术先后完成了青藏网(16 个测点)、河西走廊网(32 个测点)、滇西网(20 个测点,两期)、川西网(16 个测点)、华北网(37 个测点)

和鲜水河断裂带、京津唐等地区的地壳运动监测,取得了重要资料,基线矢量的测定精度为厘米级。此外,完成了中尼边境(喜马拉雅)的首期地壳运动监测网。

——综合利用 GPS、水准、重力、导线、天文测量的结果,测得世界第一高峰——珠穆郎玛峰的水平位移速度为 19 厘米/年,方位角为 253°,高程每年升高 37 毫米。

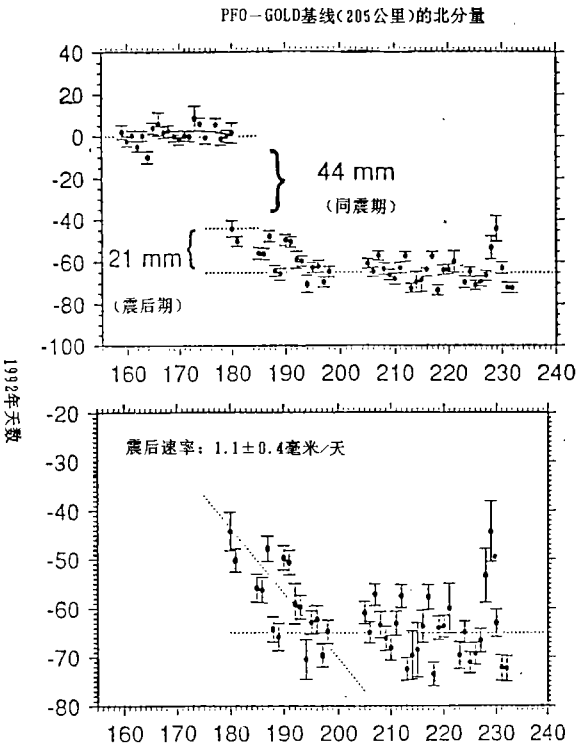


图 2 利用 GPS 技术测定的位于北美南加利福尼亚两测站 (PFO—GOLD) 之间基线在 1992 年地震前后的变化情况



图 3 上海天文台求得的最新 VLBI 基线测量结果

发现它们的最大相关系数分别为 0.70 和 -0.64,存在着很大的相关性。而将日长的年际变化与东太平洋赤道地带的海面温度变化比较,上海台已经成功地预测了两次厄尔尼诺事件(分别为 1991 与

——测得我国东部沿海地区陆地和海平面平均以每年 0.14 厘米的速率上升。

2. 地球自转的高精度监测,及其与地球各圈层运动间动力学关系的研究

在地球动力学研究中,高精度全球大地控制网的建立、全球板块运动和地壳形变的测量和研究都需要厘米级的地极位置精度。地球自转参数(地球自转速度和极移)的变化中包含着各种地球物理因素的变化信息,精确的、高分辨率的、长期的地球自转参数资料是探索这些地球物理因素的变化在激发维持地极的摆动、长期漂移和地球自转速度变化等方面所必需的。VLBI、SLR 的 GPS 等空间新技术的发展为地球自转参数高精度测定,进而为地球动力学研究带来新的曙光。1988 年起建立的新的国际地球自转服务(IERS)已由 VLBI、SLR 和 LLR 三门空间新技术全面替代经典光学的地球自转观测。我国自 IERS 成立起已成为这三门空间新技术资料分析中心。空间技术测定的地球自转参数精度比经典的提高 1~2 个量级,极移精度达 0.1 毫角秒,日长达 0.01 毫秒/天,世界时达 0.01 毫秒。而且分辨率也大大提高,GPS 测定的地球自转参数分辨率已达几个小时。

大气对地球自转变化的激发作用的研究在 80 年代已取得显著进展。近代的空间技术观测和全球气象观测资料已经证实,地球自转速率变化从亚季节到年际时间尺度与大气角动量存在着强耦合关系,说明大气是地球自转速率变化的主要激发源,在地极运动中大气激发也起着显著作用。

地球自转与热带海洋的关系随着空间技术的发展也得到了更深入的研究。利用空间技术测定的日长年际变化与全球高、低纬度海平面变化比较,

1993 年)。最新的天文观察的日长变化资料表明,又一次新的厄尔尼诺事件正在形成过程中。

在地球自转与核幔耦合研究方面,发现了地磁资料(磁偏角)与日长资料在几十年尺度上具有强

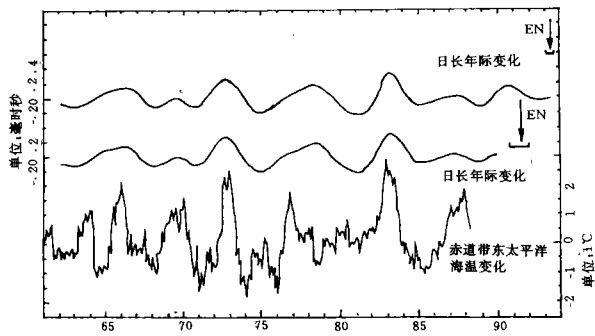


图4 用天文观测的日长变化资料预测厄尔尼诺事件(EN表示厄尔尼诺事件时期)

的相关性。在空间技术测定的日长变化中,存在着时间尺度为几十年的显著波动过程。经排除法排除了大气、海洋激发的可能性后,这种日长变化的几十年起伏主要归因于与地球的核幔耦合作用,而地磁场的变化表征着导电率很高的地核的流体运动过程。因此利用地磁资料和日长变化之间的关系可研究核、幔的运动状态和力学过程,还可确定有关的物理参数。研究表明,磁偏角变化比日长的几十年尺度的变化超前5~10年,这说明地核运动有可能也超前地幔运动5~10年。

在地球自转与地震的关系方面已发现日长40年波动、地极移动的钱德勒摆动与全球地震活动存在着约40年时间尺度的韵律关系。

3. 天球和地球参考系的建立和维持

地球在空间运动,可以用一个紧密联系地球的地球参考系相对于空间惯性参考系——天球参考系的运动来描述。协调的地球和天球参考系的建立和维持对地球在空间运动的研究、现代地壳运动和地球动力学的研究都具有重要意义。

1985年国际天文学会(IAU)大会决议,建立以河外射电源为基准的惯性参考系以克服恒星自行测定不准而引起的光学参考系框架不稳定性。1990年IERS用VLBI技术初步建立了这样的准惯性天球参考系,内含228个射电源,其中51个射电源的定位精度达到0.3毫角秒,该参考系的总体内符精度和时空稳定性已达1毫角秒。VLBI技术对联系地球和天球参考系的岁差、章动常数高精度的检测起了很大作用,有力地推动了新的章动理论模式的建立。高精度的地球参考系ITRF90也已由IERS建立,并在1991年8月于维也纳召开的IUGG/IAG全会上被确定为目前用于大地测量和地球动力学的国际地球参考系。由IERS建立并维持的该参考系的三维坐标精度已达厘米级。我国在地球参考系方面的工作也已展开,目前能以1厘米、5厘米和3厘米的精度测定VLBI、SLR和GPS测站的地心坐标。

4. 地球引力场的测定和研究

利用人造卫星观测资料和地面重力资料建立地球模型,测量地球引力场球谐系数是地球动力学

研究的另一个重要方面。近几年由于高精度的SLR资料和卫星测高资料的大量使用,地球引力场模型的建立和精化取得了较大的进展。根据协方差分析,这些新建的模型精度比以前提高一倍,特别是对低阶球谐系数,精度提高了一个量级。这些新引力场模型建立的最大特点是地球引力场系数与海潮模型系数、长波长的海平面地形参数联合求解,一个新的地球引力场模型通常均有一个自洽的海潮模型和海平面的动力地形模型与之相应。利用空间技术研究地球引力场的另一个重要进展是利用十几年的LAGEOS和Starlette激光卫星的高精度SLR资料成功地检测到地球引力场的变化,目前测得的 J_2 变化率为 -3.6×10^{-11} 。

三、今后十年空间地球动力学研究发展的前景

展望今后十年,空间技术将得到进一步的发展。SLR、VLBI和GPS的测量精度将由目前的厘米级提高到毫米级。SLR观测对象将增加到十几颗,而且激光卫星从200公里到20000公里合理分布。90年代将发射近30颗GPS卫星,组成在空间上更均匀的GPS星座。此外新的观测技术,如卫星测高技术、空对地多普勒观测(DORIS)、空对地精密测速测距系统(PRAPE),以及双色SLR系统、空间VLBI、空间光干涉系统、GPS洋底监测系统等将不断涌现和投入工作。上述空间新技术的发展和全球均匀分布的测站网的建立将为地球科学研究提供丰富的、观测精度极高、时空分辨率密集的素材。

今后,将建立和维持更高精度的天球和地球参考系,其中包括含400个射电源,精度更高(射电源定位精度好于0.3毫角秒)的准惯性天球参考坐标系。并将建立一个基于SLR、VLBI和GPS技术的亚厘米级精度并考虑了全球速度场的地球参考系。美国DOSE计划的重要组成部分FLINN网就是这样一个全球性的空间大地测量观测网,是一个理想的亚厘米级的地球参考系。它将由全球均匀分布的、彼此间相距约1000公里的200多个基准站组成,每个主要板块上至少设置3个测站。

在现代板块运动的监测和研究方面,将提供板块边界区域详细的形变过程,包括对垂直运动的描述,进而研究板块边界的演化。将改进对板内形变如何局部化的了解,进而了解板内和板下应变和流变的情况,并开始对全球地壳运动演化图和动力学机制的研究。研究中将更多地考虑地球在空间的整体运动,地球大气、水圈、岩石圈、地幔和地核的物质运动及其相互关系,以及大尺度自然灾害(地震、火山爆发、海浸等)的发生规律,对灾害趋势作出预报,为防范措施提供依据。(责任编辑 肖庆山)