

天地之间

天文地球动力学论文集

1991—1996

赵 铭 郑大伟 主编

马宗晋 副主编

上海科技教育出版社

书名:天地之间——天文地球动力学论文集(1991~1996)

主编:赵 铭 郑大伟(上海天文台)

副主编:马宗晋(国家地震局地质研究所)

出版:上海科技教育出版社

责任编辑:何燕萍

发行:上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号,邮政编码 200233)

上海印刷六厂印刷

开本:787×1092 1/16

印张:26 插页 2 字数:700000

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—1000

书号:ISBN7-5428-1518-O/P.4

定价:40.00 元

序

以叶叔华院士为首席科学家的国家攀登计划——“现代地壳运动和地球动力学研究”在“八五”期间的执行情况和所取得的研究成果,已在1996年7月由国家科委委托中国科学院所组织的专家验收组会议上,得到一致的高度评价。专家组并建议该项目在“九五”期间继续延伸,更深入、更集中地进行探索和研究。

“中国地壳运动的全球背景研究”是上述攀登计划的课题之一。该课题在“八五”期间共发表150余篇论文。课题的组织者从这些论文中挑选了一部分,编成专集供同行们了解本课题内容的最新进展,并定名为《天地之间——天文地球动力学论文集(1991~1996)》。

该课题在“八五”期间经过课题组成员的努力,取得了丰硕的成果,诸如:

依据甚长基线射电干涉测量(VLBI)和卫星(人造卫星)激光测距(SLR)的实测资料,测出上海与西欧、北美、太平洋、澳大利亚及非洲各大板块上的台站间的基线变化率,其精度高于10mm/a。研究还得出,中国东部相对于欧亚板块的稳定部分以大约8mm/a的速率向东偏南移动。

用全球VLBI、SLR和全球定位系统(GPS)的地壳运动实测资料建立了经过逐步精化的现时板块运动模型。依据建立的模型首次分离和导出了南中国板块相对于欧亚板块的运动的欧拉极和角速度($20^{\circ}.5S, 67^{\circ}.2W, 0^{\circ}.07/ma$),实测的数据还验证了地球北半球可能存在压缩现象。

根据丰富的观测资料与分析论证,提出了地球非对称性的重要科学问题,即南、北半球和大西洋与太平洋半球的非对称性。

发现了地球自转速率变化对海洋活动的反作用,并进行初步的动力学分析,提出了地球自转运动与热带海洋、大气活动相互作用的模式,为用地球自转资料预测厄尔尼诺(EI Niño)事件提供了理论依据。

首次精确地从理论上导出了地极运动钱德勒(Chandler)能动的耗散因子 Q 值,并提出了地幔滞弹性可能是其最主要耗散源的观点。

首次采用地面和空间多种观测技术综合研究了全球、太平洋海域和中国沿海海平面变化,发现我国东部沿海近30年来正处在太平洋海平面上升速率增加最快的海域,并对上海沿海海平面未来上升趋势作出了预测。

在精密地球和天球参考系的建立和维持,地球自转及其与地球各圈层物质运动的关系研究等方面都取得了很有深度的研究结果。

以上的列举对这么一个内涵极其丰富和重要的研究课题所取得的成果,总觉得挂一漏万之感,好在同行们在本论文集的各篇论文中可看到完整而详细的叙述。

综观上述各项研究结果,其结论有相当一部分并非是经典的天文学范畴。然而所有的研究结果无一不是以天文手段(含观测的和理论的)为基础,若不是有丰厚的天文学基础的天文学家的积极参与,要取得这些成果是不可能的。地震是人类所遭受的最大自然灾害之一,1976年唐山大地震的惨象,我们大家尚记忆犹新。“现代地壳运动和地球动力学研究”这一

攀登计划肯定将为我国的地震监测提供强有力的依据。所以,天文学虽然原来只研究辽阔空间中的天体,现在有这么一个分支,逐步地以研究天体为手段走向研究与国计民生有关的理论和实践中去,应该说这是时代赋予天文学新的内涵和使命。我们不得不钦佩叶叔华院士的远见卓识,她在70年代后期高度概括地提出“天文地球动力学”这一崭新的学科。依赖广大天文工作者协同地学工作者一起努力,天文地球动力学正在我国生根发芽,开花结果。并引起了国际同行们的瞩目。

天文地球动力学的创立拓宽了天文学的研究领域,开辟了新的研究方向,它正以旺盛的生命力显示在人们面前。

本论文集的编辑出版,还有另一个重要意义,即庆贺叶叔华院士的七十华诞。本文集的作者中绝大多数为叶院士的学生或曾受教益于叶院士,故此文集亦为一件最有意义的庆贺礼物。

叶叔华院士生于1927年6月21日,1949年毕业于中山大学数学天文系,1951年来到当时的徐家汇观象台从事地球自转参数测定的研究工作,日以继夜从事天文观测和研究,为我国建立高精度的世界时系统作出重要贡献。80年代初,在她的领导和策划下,我国各天文台、站参加国际地球自转联测,我国经典时纬仪器观测质量在国际同类仪器中居领先地位,为国家争得了荣誉。早在70年代,她就多次强调,如不尽快地建立地球自转参数测定的新手段,我们今后在地球自转研究中将无法立足于国际学术之林。为此她提出研究SLR和VLBI技术。经过她不懈的努力,经受了人们所不可设想的困难,在同志们的一起努力下,可与世界先进国家媲美的大型天文观测设备,一一在东海之滨建立起来。在她任上海天文台台长期间,这些设备取得了很好的观测和研究成果,国际协作空前活跃。由于她对天文学所作出的贡献,她本人荣任国际天文学联合会(IAU)副主席。我国还以她的名字命名了一颗小行星。她虽已年届古稀,但还在为国家攀登计划的执行呕心沥血。

叶叔华院士对研究工作认真细致,孜孜不倦,到了废寝忘食的地步;她为人坦荡,待人真诚,深得国内外同行的敬重和爱戴。我相信,在她的言传身教下,我们年轻一代的科学家必将攀登天文地球动力学的新高峰,为学科本身的发展和为国家抗灾减灾工作作出新贡献。

韩天芑

1996年10月

于武汉东湖之滨

前言

自从叶叔华院士在 1978 年提出天文地球动力学的学科新概念以来,近 20 个年头过去了。在此期间,这门新兴的交叉学科经历了由浅入深,由表及里,由点到面的发展历程,逐步形成今天这样蓬勃发展的可喜局面。1991 年启动的国家攀登计划项目“现代地壳运动和地球动力学研究”和 1996 年开始的“亚洲和太平洋地区地球动力学研究计划”是天文地球动力学学科发展史上的两个里程碑,它们表明天文地球动力学的学科新概念已得到国内和国际上的广泛赞同和响应。

出版本书的目的既为了展示前几年天文地球动力学理论研究的部分成果,也为了对今后的进一步深入研究作一次发动,希望起到承前启后的作用。在此,再一次阐述天文地球动力学的内涵和学科意义也许是必要的。

一、天文地球动力学的内涵

根据过去 20 年学科发展的实际,天文地球动力学的研究目标可归纳为以下两方面:

1. 用天文学的方法、理论和资料监测、检测、分析和研究地球的运动和变化

例如:用 VLBI、SLR、GPS 等技术和天体测量、天体力学的理论研究成果,以 mm/a 的精度监测台站的位移,从而为研究板块运动、地球的潮汐形变、地壳的冰期后回弹、地球质心的位移等重大的地球动力学课题提供最精确、最根本的依据;

用经典的时间和纬度观测资料检测和分析地方铅垂线的变化,进行地震预报和地球内部物质运动的研究;

用地球自转资料序列分析研究地球的力学参数,研究地球各物质圈层的运动规律和相互作用;

用卫星测量资料研究地球的重力场和海平面变化;

用天体测量资料研究地球的岁差和章动,改进地球的动力学模型;

等等。

2. 从天体间的相互作用中寻找地球变化的动力学和物理学原因

例如:研究太阳活动、太阳系天体运行、地球轨道运动参数变化、地球自转的变化、太阳和月亮的引潮力、天体的陨落事件等天文因素对地震、火山、地质旋回、冰期形成、海浸海退、气候变迁、气象变化、地磁变化等地象的影响。

二、天文地球动力学的学科意义

天文地球动力学的发展已证明,天文学和地球科学的交叉研究,对地球科学和天文学的发展都起到巨大的推动作用。

1. 天文学的方法和理论运用于地学研究,为地学研究提供了新手段、新思路,因而为地球科学的发展提供了新的条件

例如:天文方法为地壳运动、海平面变化、铅垂线变化、地球质心位移等参数的测量提供唯一的或最有效的手段;

用天文方法预报地震、厄尔尼诺事件以及台风等气象灾害已被认为是有效的,甚至是各种预报方法中最有效的一种;

用天文因素解释某些地象变化(如气候变迁、冰期形成、地质旋回等)已引起地学界的广泛注意,有的已被普遍接受;

总之,天文学的介入推动了地球科学的发展。

在这种情况下,天文学家以其专业的天文研究背景和天文学特有数据分析处理能力在天文地球动力学这一交叉领域中,与地学专家紧密合作,以适当方式和程度介入有关的地质课题的研究,是学科发展的必然和必要的结果。

2. 地质问题作为天文学的研究对象向天文学提出新要求、新任务,因而为天文学的发展提供了新动力

例如:为描述和测量微小缓慢的地壳运动,需要毫米级精度的天球参考系与地球参考系以及毫米级的几何的测量精度和动力学的测量精度,这成为天体测量和天体力学近 20 年来蓬勃发展的主要动力之一。为满足这种极高的精度要求,从实测技术到理论研究,都取得了突飞猛进的发展;

为检测地球变化中时间尺度很短的分量,需要天文测量手段具有非常高的时空分辨率。这也是最近几年推动天体测量与天体力学实测技术与理论研究发展的又一重要动力;

长时间尺度的地球变化的研究推动了古代天文资料的研究,带动了古自转、古极移等一系列课题的开展;

总之,天文学(特别是天体测量和天体力学)介入地球科学研究为天文学找到了大量的基础研究与应用研究并重的课题,使天文学这门经典的基础科学开辟出与人类生产和生存密切相关的联系实际的研究领域,因而大大推动了天文学本身的发展。天体测量和天体力学是天文学中已趋于成熟的分支,天文地球动力学是它们的新的生长点。

赵 铭

目 录

第一篇 全球地壳运动与地球动力学参考坐标系

1. 现代地壳运动和地球动力学研究 叶叔华 黄 珏(3)
2. Tectonic Interpretation of the Earthquake Distribution in the Contiguous Continent of US Ma Zongjin Gao Xianglin Wang Qi L. Seeber J. Armbruster (10)
3. Tectonic Interpretation of the Epicenter Distribution Map of China Ma Zongjin (23)
4. Progress in the Research of Conventional Terrestrial Reference System Sun Fuping Zhao Ming(36)
5. 全球五大板块的运动和形变——用卫星激光测距数据导出的站速度分析 孙付平 赵 铭(50)
6. 现今全球构造特征及其动力学解释 马宗晋 高祥林 任金卫(60)
7. 地震迁移的规律、解释和预报——中国大陆四条地震带的地震迁移 马宗晋 李献智 金继宇(73)
8. 全球 $M_s \geq 7.8$ 级地震的定向迁移 马宗晋 李献智(84)
9. An Instantaneous Plate Motion Model from Integrated VLBI and SLR Data Sun Fuping Zhao Ming(94)
10. 地球质心的运动及其对地球参考系的影响 孙付平 赵 铭(103)
11. 全球构造的反对称性及其动力学意义 马宗晋 高祥林(107)
12. 毫米级地球参考系中的地球动力学问题 孙付平(111)
13. 地球参考系的实现 孙付平(117)
14. 现代板块运动的测量和研究:空间大地测量方法 孙付平 赵 铭(125)
15. 用甚长基线射电干涉(VLBI)测量数据导出的板块运动参数 孙付平(136)
16. 检测固体潮的新途径——脉冲星 P 和 $\dot{P}$ 分析 容建湘 萧耐园 赵 铭(141)
17. 相对论效应和行星际磁场对岁差章动影响的估计 李令怀 黄天衣(151)
18. 河外射电源光学对应体的“自行”和岁差常数 王叔和 须同祺 陆佩珍(159)
19. IERS 天球参考架的指向维持 李金岭 金文敬(166)
20. 我国经度原点经度改正值的重新归算

- 金文敬 唐正宏 廖德春 张 耀(170)
21. Deficiencies in the Nutation Model from VLBI Observations Xia Yifei Gao Jie(176)
22. Transformations among CISs Defined by Various ERP Series Xiao Naiyuan Zhang Hanwei(182)
23. Arc Length Difference Method in the Selection of Primary Sources of Combined
Extragalactic Radio Source Catalogues Li Jinling Jin Wenjing(188)
24. 高精度射电 — 光学参考系的进展 王叔和 须同祺(196)
25. 国际协议地球参考框架 朱华统(205)

第二篇 中国地壳运动的监测和研究

26. Horizontal Velocity of Shanghai VLBI Station Relative to Eurasian Plate from
VLBI Ye Shuhua Qian Zhihan(213)
27. 利用 SRD 方法监测区域性地壳形变 朱文耀 冯初刚 滕展明 朱元兰 Ch. Reigber S. Y. Zhu(217)
28. 中国—德国 VLBI 测地计划的第一年结果 罗时芳 钱志瀚(224)
29. Recent Geodetic VLBI Results from Shanghai Observatory Ye Shuhua Qian Zhihan Chen Gang Zhou Ruixian (233)
30. Eurasian - Pacific - N. American Plate Motion from VLBI Mao Ailin Qian Zhihan(236)
31. Crustal Motions between China and Australia by VLBI Ye Shuhua Qian Zhihan Zhou Ruixian Yang Zhigen(242)
32. 上海 VLBI、SLR 和 GPS 站站坐标的精密测定和精度估计 朱文耀 熊永清 程宗颐 张 华(245)
33. 上海 VLBI 站相对欧亚板块运动速率的测量 钱志瀚(256)

第三篇 地球自转与地球各圈层的运动

34. Earth Orientation Determinations by Short Duration VLBI Observations Axel Nothnagel Qian Zhihan George D. Nicolson Paolo Tomasi(263)
35. 地球自转速率对海平面纬向变化的影响 郑大伟 陈剑利 华英敏 萧耐园(272)
36. GPS 测定地球定向参数的高频分辨率 郑大伟 谢伯全(279)
37. 地球自转变化与全球地震活动关系的研究 郑大伟 周永宏(284)
38. Relation between Equatorial Oceanic Activities and LOD Changes Zheng Dawei Chen Gang(292)
39. 热带海—气的相互作用与地球自转——用天文方法预测 ENSO 事件 郑大伟(298)

40. Chandler 摆动周期是稳定的吗?	高布锡(309)
41. Chandler 摆动周期和 Q 的理论值	朱耀仲(318)
42. 水分布激发与周年极移	雷小平 高布锡(325)
43. 滞弹地球的平衡极潮及其对 Chandler 摆动的影响	朱耀仲(331)
44. 滞弹地球自转速率的潮汐变化	朱耀仲(338)
45. 厄尔尼诺现象与地球自转运动	郑大伟(346)
46. 用地球自转的历史观测资料反演大气环流的年际变化特征	郑大伟(350)
47. Contribution of Time Series Analysis to Astronomical Data Processing in China Zheng Dawei Luo Shifang(356)	
48. IGS'92 联测期间地极坐标的高频波动	
..... 黄乘利 金文敬 廖德春 朱文耀 王解先(367)	
49. Remarks on Dynamical Ellipticity at the Earth's Core—Mantle Boundary	
..... Zhang Chengzhi Xia Yifei(375)	
50. VLBI Observations of Nearly Diurnal Free Wobble	Xia Yifei Gao Jie(382)
51. 地极运动与北大西洋涛动	
..... 周永宏 郑大伟 赵 铭 Benjamin Fong Chao(387)	
52. TOPEX/POSEIDON 卫星海洋测高资料的预处理	
..... 黄 斌 吴宏秋 郑大伟 董晓军(395)	

第 一 篇

全球地壳运动与 地球动力学 参考坐标系

1. 现代地壳运动和地球动力学研究^①

叶叔华 黄 珉

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘 要

本世纪 80 年代以来,应用各种现代空间大地测量技术对地面点的定位精度已达到厘米级。现代地壳运动和地球动力学研究(通常称为空间地球动力学研究)主要是应用空间技术,精确测定地球在空间的整体运动、地球各圈层的物质运动与形变,定量地给出地球的形变过程,确定各种运动或形变过程的相互联系,探索它们的演化过程和动力学机制。自本世纪 70 年代末,相继提出并实施了多项国际性或地区性的空间地球动力学计划,并取得了有世界影响的重要成果。本文中概略论述了空间地球动力学研究计划的发展及其在现代板块运动的测定与研究、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、天球与地球参考系的实现与维持和地球引力场的测定与研究等方面所取得的成果,并展望了今后 10 年的发展前景。

一、引 言

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尺度(几百万年)的地质和地球物理资料,而无实时的实测资料。由于仪器精度与测定方法的限制,对现代板块构造运动状况更是知之甚微。

本世纪 80 年代以来,由于采用各种新的空间观测技术,如卫星激光测距(SLR)、激光测月(ILR)、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优点: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几千千米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 技术测定中国上海—日本鹿岛站以及中国上海—澳大利亚 DSS45 站在 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 $27.3 \pm 1.3 \text{ mm/a}$ 和 $59.2 \pm 4.3 \text{ mm/a}$ 的速率缩短,充分显示了板块间的真实运动,而这恰恰是传统方法无法观测到的。空间新技术能实时、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、研究和应用发生了根本性的变化。地球科

^① 原刊载于《科技导报》1995 年,第一期。

学的研究随空间新技术的发展正经历一场深刻的变革;从静态研究发展为动态研究;从运动学扩展到动力学;从三维空间拓展到四维时空;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相互激发、驱动和制约的动力学关系的一个完整体系的研究;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。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、海陆升降的形成过程与

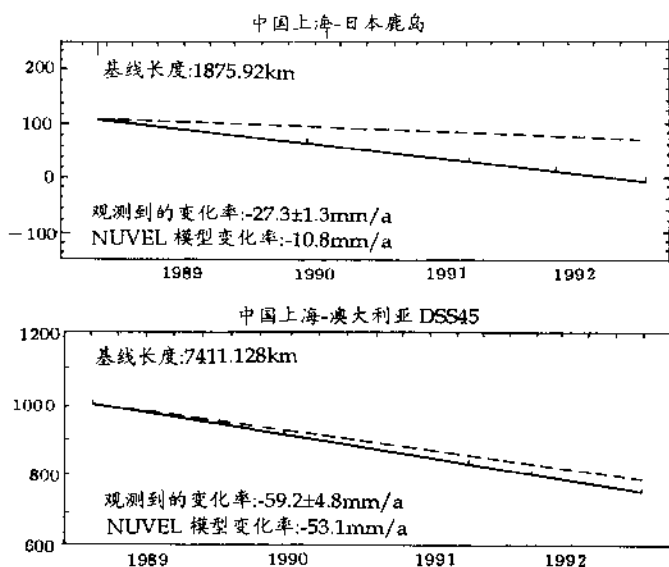


图1 用 VLBI 测量基线长度变化情况

机制,为预测灾害、保护人类生存环境作出贡献。

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形变过程,确定各种运动或形变过程的相互联系,探索它们的演化过程和动力学机制。

二、空间地球动力学研究计划的发展

本世纪 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、定量地测到了现代的板块运动,检验了刚性板块的假设。1992 年 NASA 在完成了 CDP 计划后,以固体地球动力学(DOSE)计划作为 CDP 的后续。本世纪 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,他们已延伸到中亚,并开展了海平面变化和冰川后期地壳反弹的研究。作为 DOSE 计划的一部分,最近,美国、加拿大与瑞典、挪威、芬兰进行合作,并在后面三个国家建立了 GPS 网,用来监测该地区地壳运动与海平面的变化,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 月进行了第一次联测。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本世纪 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单位的力量,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的监测,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 10 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。

三、空间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的平均资料。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,所测得的数据与 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 -3.0mm/a ,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于大陆一侧的欧亚板块正以 9cm/a 和 4cm/a 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,已监测到位于北美南加利福尼亚两测站(PFO—GOLD)之间的基线在 1992 年地震前后的变化情况(图 2)。该基线(长 205km)在地震时突发地缩短 44mm ,并在震后十几天中缓慢地以 $1.1 \pm 0.4\text{mm/d}$ 速率变化,再后又趋向

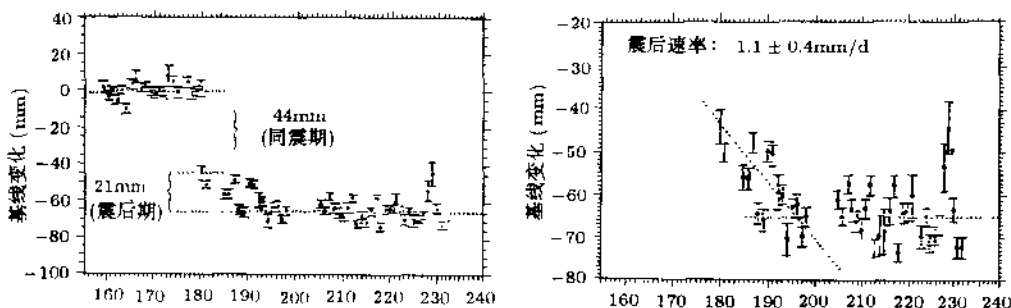


图2 利用GPS技术测定的位于北美南加利福尼亚两测站
(PFO—GOLD)之间基线在1992年地震前后的变化情况

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,在我国大陆板块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他台站之间12条基线,精度为每年几毫米(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1~2cm/a的向东运动。

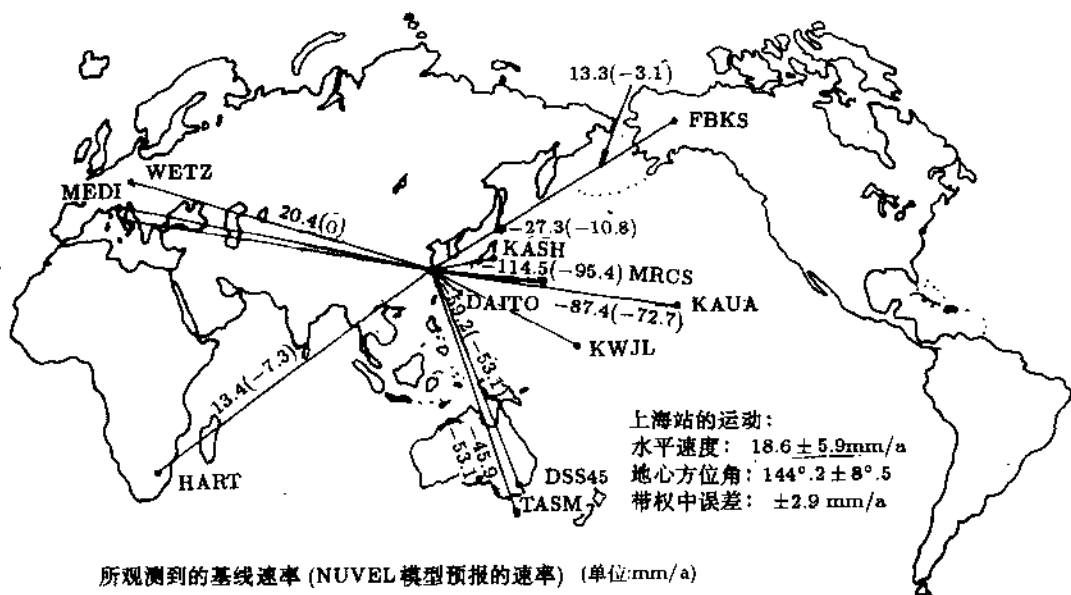


图3 上海天文台求得的最新VLBI基线测量结果

——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1cm。

——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(珠穆朗玛峰)的水平位移速度为 15mm/a , 方位角为 253° , 高程每年上升超过 10mm 。

——测得我国东部沿海地区陆地和海平面平均以 1.4mm/a 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 和 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 三种空间新技术全面替代经典的光学地球自转观测。我国自 IERS 成立起已成为这三种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 $1\sim 2$ 个量级, 极移精度达 0.1mas , 日长达 0.01ms/d , 世界时达 0.01ms 。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, 在本世纪 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, 大气的激发也起着显著作用。

地球自转与热带海洋的关系随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, 发现它们的最大相关系数分别为 0.70 和 -0.64 , 存在着很强的相关性。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作比较, 上海天文台已经成功地预测了两次厄尔尼诺事件(分别为 1991 年与 1993 年, 见图 4)。最新的天文观测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 $5\text{年}\sim 10\text{年}$, 这说明地核运动有可能也超前地幔运动 $5\text{年}\sim 10\text{年}$ 。

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 Chandler 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架以克服恒星自行测定不准而引起的光学参考架的不稳定性。1990 年 IERS 用 VLBI 技术初步建立了这样的准惯性天球参考架, 内含 228 个射电源, 其中 51 个射电源的定位精度达到 0.3mas, 该参考架的总体内符精度和时空稳定性已达 1mas。

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 全会上被确定是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 1cm、5cm 和 3cm 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。近几年来, 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 1 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} 。

四、今后 10 年空间地球动力学研究发展的前景

展望今后的 10 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 200km 到 20000km 合理分布。本世纪 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 Doppler 观测 (DORIS), 空对地精密测速测距系统 (PRARE), 以及双色 SLR 系统、空间 VLBI、空间光干涉系统、GPS 洋底监测系统 etc 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、观测精度极高的、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

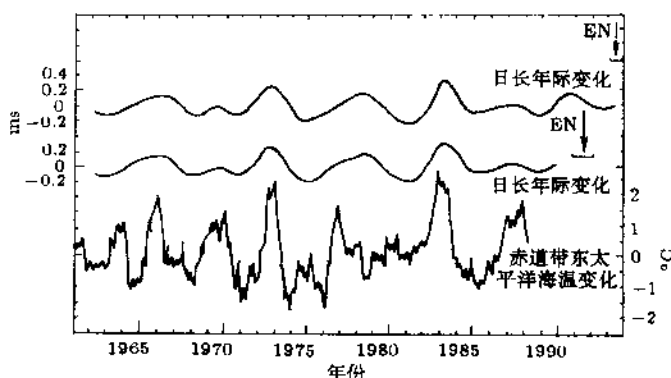


图 4 用天文观测的日长变化资料预测厄尔尼诺事件 (EN 表示厄尔尼诺事件时期)