

国家地震局国际合作研究专辑

中国、比利时、卢森堡固体潮及 地球动力学研究

国家地震局国际合作司 编



地震出版社

前 言

中国、比利时、卢森堡科技合作是我国改革、开放以来最早的国家政府之间的合作项目之一。中国国家地震局与比利时皇家天文台开展的重力、固体潮合作研究开始于1979年。

第一阶段:从1979年9月至1980年9月。由国家地震局和中国科学院共同执行中、比科技合作协议,用比方的四台重力仪分别完成武昌、北京、广州、兰州、昆明、乌鲁木齐等6个地区的重力固体潮观测。观测资料各自进行处理,共同使用,并在1981年8月在美国纽约第九届国际固体潮科学讨论会上联合发表。

第二阶段:从1980年10月至1985年4月。由国家地震局执行政府协议所规定的内容:(1)在沈阳、青岛两地进行半年至一年的重力固体潮观测;(2)开展合作研制高精度水平石英伸缩仪,开展应变固体潮的合作研究。在中国黄石固体潮实验站组装,投入长期观测,其观测资料经过计算和调和与分析处理,十分理想。研究报告于1985年9月在西班牙马德里第十届国际固体潮科学讨论会上联合发表。

第三阶段:从1985年5月至1990年。根据中、比、卢经济联盟关于发展经济、工业、科学和技术合作协定,开展了ORBES系列地球动力学仪器合作研究(如ORBES-82微分温度量测仪,ORBES-83高分辨气压仪,ORBES-84垂直伸缩仪等);并分别在中国、比利时、卢森堡的实验室、台站中安装和长期试验。根据协议要求,中国研制的FSQ型水管倾斜仪安装在卢森堡的国际固体潮中心瓦尔费当日地球动力学实验室,参加多国十多种地球动力学仪器的联合观测和试验。中、比、卢十年地球动力学仪器的合作研究的成果报告于1989年9月在赫尔辛基召开的第十一届国家固体潮科学讨论会上联合发表。

中、比、卢的科学技术合作,将在90年代进一步向纵深方向发展。这项合作对推动地球科学的发展,对我国以更短的时间跃入国际先进行列,对我国地震科技研究水平的提高都将做出新的贡献。

回顾十多年来中、比、卢科技合作历程,可以认为是成功的,并获得了丰硕的成果。在一个较短的时间内,推动了我国重力、倾斜应变固体潮研究的理论、方法和观测技术及其地震应用的发展;这项科技合作,也展示了我国科技水平和实力,在国际地学界产生较大的影响。在我国改革开放之初,我们不失时机地打开了科学技术门户,对外开放了那么多台站,当时这在我国还是首次。实践证明,科学技术的开放,对加快一个学科的发展起到重要作用。随着我国进一步改革开放,我国地震研究领域的国际科技合作项目的前景将会更加扩展。本书的出版,通过合作历程的回顾,总结经验,为今后的工作提供借鉴。书中不足之处,企盼读者批评指正。

目 录

合 作 概 况

国家地震局与比利时皇家天文台政府间地震科技合作项目

——固体潮研究(A6)的工作总结	国家地震局国际合作司(1)
中国、比利时、卢森堡地球动力学仪器合作研制十年	蔡惟鑫 谭适龄 杜为民(3)
中国、比利时、卢森堡地球动力学仪器 ORBES 合作计划进展	M. Van Ruymbeke 蔡惟鑫(10)

观测技术与仪器

中国地球潮汐形变(应变)固体潮连续观测技术	蔡惟鑫(12)
中国国家地震局与比利时皇家天文台地球动力学仪器合作研究成果	蔡惟鑫 M. Van Ruymbeke 谭适龄 B. Ducarme 杜为民 J. Flick(18)
中国、比利时合作研制的 ORBES-81 高精度水平石英伸缩仪	蔡惟鑫 M. Van Ruymbeke 谭适龄(27)
中国黄石固体潮实验站 ORBES-81 型高精度水平石英伸缩仪	蔡惟鑫 M. Van Ruymbeke 谭适龄(35)
的试验结果	蔡惟鑫 M. Van Ruymbeke 谭适龄(35)
ORBES-81 型高精度水平石英伸缩仪的换能装置——电容传感器	张国安(42)
ORBES-82 型测温计在黄石固体潮实验站的实验结果	蔡惟鑫 谭适龄 丁伟民 程华春(48)
ORBES-84 型垂直伸缩仪试验的初步结果	M. Van Ruymbeke 刘序伊 蔡惟鑫 谭适龄(53)
ORBES-89 型电容水位仪及其实验	谭适龄 M. Van Ruymbeke 蔡惟鑫 周坤根 高伟民(61)
三台 LcR 重力仪的螺旋周期误差和 VRL-8350 反馈系统静电的影响	周坤根 B. Ducarme C. Poitevin(67)
用静电反馈系统改进后的 LcR 重力仪的实验与研究	周坤根 M. Van Ruymbeke(71)

理论研究与分析结果

中国固体潮观测研究	P. Melchior 方俊 B. Ducarme 许厚泽 M. Van Ruymbeke 李瑞浩 C. Poitevin 陈冬生(80)
-----------------	---

全球重力潮汐剖面	P. Melchior(95)
中国固体潮向量空间分布特征	李瑞浩 陈冬生 傅兆珠 魏望生 蔚大西(103)
石英弹簧重力仪流变模型	李瑞浩 陈冬生 傅兆珠 蔚大西(121)
组合滤波在标定重力仪灵敏度中的应用	李瑞浩 徐菊生 陈振邦 魏望生(127)
中国武昌固体潮基准台潮汐观测结果的系统归算	魏望生 蔚大西 傅兆珠(138)
中国首批应变固体潮观测结果	李 平 刘序伊(146)
对黄石固体潮实验站 ORBES-81 型高精度水平石英伸缩仪 长期观测资料的调和分析	刘序伊(154)
ORBES-81 型水平石英伸缩仪格值的标定与分析	蔡惟鑫 谭适龄 刘序伊(157)
应变固体潮理论值计算及调和分析	刘序伊 李 平(166)
中国黄石固体潮实验站两台伸缩仪观测资料的一致性 与仪器格值关系的分析	刘序伊 蔡惟鑫 谭适龄(175)
黄石台 ORBES-81 型伸缩仪观测资料的调和分析 及海潮改正	周坤根 B. Ducarme 胡延昌(178)
全球重力潮汐剖面测量中地球扁率和惯性效应与海潮效应	张国安(186)

附 录

中国、比利时、卢森堡三国地震科技合作交往纪事	(191)
------------------------------	-------

国家地震局与比利时皇家天文台 政府间地震科技合作项目 ——固体潮研究(A6)的工作总结

国家地震局国际合作司

一、项目的主要内容和取得的效果

中、比固体潮观测与研究合作始于1979年。由于固体潮是研究地球表面受外部影响(如日、月引力,海洋潮汐)所产生的潮汐形变的一门科学,它的发展不仅可以推动地球内部物理的研究(如地球内部的介质的弹性状态、地震的发生、岩浆的迁移等),而且对高精度的空间目标的准确测距和宇宙航行科技的发展都有重要的应用价值。为此,利用比方先进的仪器设备及理论和工作方法开展中、比固体潮观测研究将有着十分重要的意义。

在中、比三个阶段的合作研究中,首先在国家地震局下属的6个台站上架设由比利时皇家天文台提供的仪器设备,进行6至12个月的观测,共同分析和发表观测成果,交流观测技术,交流固体潮研究的理论和方法;第二阶段,共同合作研制新型地球物理仪器,改进固体潮及地壳形变的研究手段和方法,同时,利用比方仪器设备又增补了两个观测点,使第一阶段的合作得到了扩展;第三阶段的合作,从固体潮研究领域扩大到地震、地下水及有关地壳运动综合设备的研制,双方对新研制的仪器进行了测试和标定,使之达到世界先进水平。在中、比科技合作中取得的主要成果如下:

- 1)完成了国际固体潮中心“全球重力固体潮汐剖面测量”中国大陆部分的观测与研究,取得了大量的完整的高精度重力固体潮数据,中、比双方发表了不少有价值的学术论文;
- 2)交流了观测技术和研究方法,提高了我方研究人员和观测技术人员的工作水平;
- 3)成功地研制了ORBES-81型高精度水平石英伸缩仪,ORBES-82型高分辨测温仪,ORBES-83型高灵敏度电容气压仪和ORBES-84型垂直伸缩仪等;
- 4)就地球动力学台站环境干扰因素的排除进行了研究和学术交流;
- 5)将中方研制成功的FSQ水管倾斜仪以及合作研制的ORBES-84垂直伸缩仪等仪器安装在卢森堡国际固体潮中心瓦尔费当日地球动力学地下实验室,与十几个国家的仪器进行对比测试,取得了令人满意的观测资料,得到了国际同行专家的好评。中国的两位科学家高文学、蔡惟鑫在卢森堡被授予卢森堡国家荣誉勋章。
- 6)中国的形变观测技术引起了国际同行的广泛注意和兴趣,西班牙主动要求与中国进行将形变观测技术应用于地壳变动、潮汐观测和火山活动监测等方面的科技合作,欧洲地球动力

学与地震学研究中心表示希望加强和扩大同中国的合作；

7)加强了与国际固体潮中心的联系和交流。

本合作属于国家级政府间科技合作项目,1978年经国务院批准执行,以此列入中、比、卢经济、工业、科学和技术混委会批准执行项目。合作共分三个阶段:第一阶段:1978—1980年;第二阶段:1980—1985年;第三阶段:1985—1990年。

中方投入资金约30万元,利用实验设备及实验台站,投入人员为10人左右,每年花20个人/月,高级和中级职称人员比例为1:3。

对方投入资金折合人民币约30万元,利用实验室和台站设备,投入人员6—7人,年工作为15人/月,高级和中级职称人员比例为1:1。

二、主要收获和效果

- 1)提高了应变和倾斜观测仪器的研制水平;
- 2)推动了重力固体潮、倾斜应变固体潮研究的理论及其方法的发展并取得显著进展;
- 3)吸取了台站观测和管理经验,优化了台网管理,提高了观测技术和观测水平;
- 4)固体潮理论及计算方法的学习和引进,促进数据处理方法的完善;
- 5)培养了一批高级科技人员;
- 6)成果在地震科研和监测工作中被应用。

在重力固体潮与地形变(应变)台站上已应用了比方(及其消化的)理论、方法和技术手段,其成果已多次在国际学术会议上发表。

三、对本项科技合作的评估

国际固体潮中心在对世界230个台站的观测质量进行对比和评审时,对我国参加中、比合作的台站的评语是:“中国台站的观测质量是特别优秀的”。国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)秘书长、国际固体潮中心主任 P. Melchior 教授曾强调指出:“中国兰州台的观测工作是固体潮观测工作的典范”。他还专门致函通知“武汉固体潮台站被国际固体潮中心列为世界上为数不多的基准台站之一”。

这次中、比合作的成功在国际地学界有较大的影响,它有助于外国科技专家及其政府了解和认识我国对外开放的政策,理解我国对外开展国际科技合作的诚意以及为之而作出的努力。

四、合作成功的经验

1)国家科委对此项合作一贯给予支持和指导,中、比、卢科技合作混委会为加强两国科研机构 and 科技人员之间的协作关系进行着有效的计划和协调工作。

2)在合作过程中,双方形成了互相了解和互相信任的工作气氛。

3)合作中已经取得的成绩和随之而提出的新课题,使双方研究人员对继续合作有兴趣,双方科技人员已提出许多新的研究题目和技术方案,并对其科学意义和可行性作了详细的论证。

中国、比利时、卢森堡 地球动力学仪器合作研制十年

蔡惟鑫 谭适龄 杜为民^①

摘 要

本文简述中国、比利时、卢森堡三方科技合作十年来地球动力学仪器研制和实验的成果。同时也叙述十年科技合作中,以外促内,以科研促技术发展,在较短的时间里将我国地壳形变潮汐观测仪器、理论方法推向新的层次,为本学科领域发展跃入国际先进水平做出贡献。

一、由 来

1979 年秋,中国、比利时开展重力、固体潮汐观测以来,在重力固体潮国际剖面的研究和地震工作方面取得了良好的成果。为发展此后的合作奠定了基础^[1]。

为了推动地球动力学、地震学和固体潮汐的研究与发展,根据双方继续发展合作的愿望,在中国、比利时、卢森堡三方政府的批准和支持下,由 IUGG 秘书长、国际固体潮中心主任、比利时皇家天文台台长梅尔基奥尔(P. Molchior)教授与中国国家地震局于 1980 年 10 月共同确认:首先共同研制高精度水平石英伸缩仪一台,并在中国黄石固体潮实验站地下洞穴实验室中进行安装、调试与长期稳定性观测和科学研究^[2]。

国家地震局安排地震研究所蔡惟鑫教授领导的科学小组与比利时皇家天文台范隆贝克(M. VAN. Ruymbrke)博士领导的科学小组执行仪器合作计划。

1981 年 5 月,范隆贝克访华。双方交流了各自对合作研制仪器的技术思路、实施条件和技术基础,共同确定在合作研制的高精度水平石英伸缩仪计划中,由蔡惟鑫负责拟定仪器的总体设计方案,范隆贝克负责拟定传感器及仪器标定技术方案。

同年 9 月由蔡惟鑫率国家地震局仪器合作研制工作小组访问比利时、卢森堡。共同确认合作研制仪器的技术方案、分工和实施细则,并确定于次年 5 月双方共同在中国黄石固体潮实验室进行安装、调试。

1981 年 11 月比利时范隆贝克访华期间,将比利时皇家天文台的电容传感器和电子技术

^① 国家地震局地震研究所

的有关部分,交蔡惟鑫领导的实验室进行技术参数测试。

1982年5月,中、比双方专家在黄石对共同合作研制的高精度水平石英伸缩仪进行精度、调整测试和总装,合作研制的伸缩仪在总装一星期后,记录出漂移量小、幅度大的水平应变固体潮连续变化曲线^[3]。

经过一年多的观测实验,证实该仪器在相对灵敏度为 10^{-10} 量级时,实现了长期稳定、可靠的观测。技术指标均达到(或超过)原设计指标。

1983年5月范隆贝克米华,与蔡惟鑫共同就高精度水平石英伸缩仪在黄石连续、稳定记录的资料进行了计算和分析处理。分析结果经国内专家评审,并与国际固体潮计算中心对该仪器的观测数据进行调和分析的结果进行比较,一致认为各种波谱的计算结果都比较理想^[4,5]。

1983年11月,蔡惟鑫应卢森堡政府邀请,对卢森堡大公国的瓦尔费当日地球动力学地下实验室进行科学访问并在此工作期间,应邀出席了欧洲共同体地球动力学第54届学术讨论会。由蔡惟鑫代表中、比合作的高精度水平石英伸缩仪科学组宣读了该仪器在中国黄石固体潮实验站长期观测数据的计算分析结果,得到与会各国专家的高度重视。

合作研制高精度水平石英伸缩仪的成功,为研究固体潮汐构造效应,为地震监测分析工作提供了有价值的信息,为地球动力学、地壳形变测量学和地震学的研究提供了可信度高的数据。同时为今后地球动力学仪器的合作开拓了前景。合作双方把中、比地球动力学仪器合作研制计划定名为“轨道”(“ORBES”)计划,并将该仪器定名为“ORBES-81型高精度水平伸缩仪”。首次合作研制仪器的成功,表明通过对外合作,引进先进技术,吸取国外有益经验,有利于在较短的时间里取得较高水平的研究成果,缩短与国际上先进科技水平的差距,促进我国地震事业更好地发展,同时也显示了我国地球动力学观测技术的水平,为今后进一步开展新仪器新方法的研究奠定有益的基础。

二、扩 展

在中、比、卢政府间科技合作混合委员会的批准和支持下,蔡惟鑫在卢访问和工作期间与卢森堡欧洲地球动力学和地震研究中心主任福里克(J. Flick)先生、比利时范隆贝克博士、杜卡默(B. Ducarme)博士等共同探讨三国之间地球动力学仪器合作的可能性。共同认为高精度的ORBES-81型水平石英伸缩仪的研制成功,为了准确地分析地球水平应变潮汐对地壳运动和地核效应的贡献,必然要排除在信息获取中的气象(温度、气压)因素的干扰。共同建议合作研制高分辨温度量测仪(ORBES-82型)和高分辨气压量测仪(ORBES-83型)。其精度要求必须与水平石英伸缩仪、仪器安装的洞穴条件相匹配。

中国国家地震局和比利时皇家天文台共同认为通过高精度水平石英伸缩仪合作研究,为电容传感器、温度测量技术、电容气压等方面的进一步合作打下良好的合作基础,并及时开展研究和实验。

与此同时,还开展了观测资料的分析处理和数据库建设的合作研究。参与了1983年11月8日比利时列日(Liege)地震的考察工作。1985年在第十届国际固体潮学术讨论会(马德里)上宣读了中国黄石固体潮实验室ORBES-81高精度水平伸缩仪观测数据和资料计算分析结果,获得了西欧各国和日本专家的高度赞誉。通过中、比、卢在地学研究领域的合作,使得科技交流得到较大的发展,使该领域能够在世界同行前沿的层次上继续攀登。

1985年国家地震局代表团访问比利时、卢森堡,并签署了中、比、卢第三期科学合作计划。1986年蔡惟鑫科学小组为执行合作计划,在国际固体潮中心瓦尔费当日地球动力学地下实验室与比利时、卢森堡专家共同安装由中国制造的FSQ型水管倾斜仪,这是我国地球动力学专用科学仪器第一次在国外落户,蔡惟鑫、杜为民、范隆贝克、弗里克以及在比利时进修的周坤根等人在地下实验室奋战七昼夜,成功地安装了一台26米长的高分辨率水管倾斜仪。1986年4月11日(即安装后的第二天),这台中国地学仪器在西欧第一次记录出反映地壳受天体引力作用而产生倾斜变化的固体潮汐曲线,并引起了比、卢新闻界的高度重视,当地电台、电视台、报纸立即报道了中国地震仪器工作组的现场工作情况。这台仪器运转至今已近4年,一直长期、稳定、连续地记录着倾斜固体潮汐的变化。

为执行1985年签署的中、比、卢政府科技合作计划,于1987年由蔡惟鑫、谭适龄和范隆贝克共同研制了一台ORBES-84型垂直石英伸缩仪,并在中国黄石和卢森堡瓦尔费当日实验室里分别安装试验。近年来长期观测结果的计算分析,其潮汐因子中误差均已达到0.01。

1988年10月国家地震局代表团赴比利时和卢森堡共同检查中、比、卢在第三期科技合作项目的执行情况,代表团通过对合作项目的检查和学术交流,三方十分满意地评价了仪器合作计划(ORBES计划)取得卓有成效的进展。三方共同认为,近十年的合作已经成功地研制了观测地壳板块构造、地震和地球潮汐的多种地球动力学仪器。其中4种样机已研制成功,并投入使用(ORBES-81和84),其余几种仍在研制之中。

最近,根据合作计划,对比利时NTVOCAP水位仪进行合作开发,为了适应我国水网位移变化的监测和研究,合作研制的ORBES-89电容水位仪已试测成功,其仪器的水位变化分辨率为0.1mm,量程在1m以上,呈线性(即线性度小于1%),为我国水位监测仪器的改进提供了可喜的借鉴。

1991年4月卢森堡政府为了表彰为欧洲及世界地球科学和地球动力学发展做出贡献的科学家,对来自四个国家(中、法、德、比)的七位科学家授了勋,其中我国高文学教授、蔡惟鑫教授荣获卢森堡大公国颁发的国家荣誉勋章。中、比、卢地球动力学仪器和观测技术的合作成果不断呈现,对推动该领域的发展将起着愈来愈显著的重要作用。同时,在中、比、卢科技合作成果的影响下,与西班牙及其他国家开展地球动力学观测技术、火山、地震监测等方面的科技合作将成为可能。

三、评 价

IUGG秘书长、国际固体潮中心主任、比利时皇家天文台台长梅尔基奥尔教授根据在国际固体潮中心(布鲁塞尔)对ORBES-81型水平石英伸缩仪,1984—1985年间分别为100天和250天的两段记录进行的分析计算结果认为:该仪器具有高灵敏度和长期稳定的性能。记录曲线的振幅约为150mm,未见漂移现象,主要潮汐波振幅与相位的确定结果十分喜人。

这台伸缩仪上分别位于距仪器固定端45m和46.6m处装有两个传感器,分析工作对二者分别进行,结果极为一致(表1)。

尽管仪器安装的方位不超过18°,却以很高的精确度获得了勒夫数 l/h 之比(表2)。由此可以识别到空腔效应和地球液态核共振效应。

仪器对温度的微小变化并不敏感。但是, K_1 波略受气象波 S_1 亦代称气压效应的影响,待

到对为期一年的资料进行分析后,定会将其从 K_1 波中分辨出来。

还应指出,在 350 天段里 ($L = 45\text{m}$) $Q_1, NO_1, P_1, J_1, OO_1, 2N_2, N_2, L_2, K_2$ 等小波皆可分辨。

此外,应当注意的是有很好的标定稳定性(250 天里只有 0.7% 变化量)和该仪器在首期工作中的所表现出的高效率(在 259 天里唯有 9 次短暂间停造成总计 17 天资料的缺失,其有效率为 93%)。

表 1 黄石站 ORBES-81 水平石英伸缩仪两个传感器记录 O_1 波和 M_2 波调和分析结果

基 线 长 度	O_1 波		M_2 波	
	A	a	A	a
$L = 45\text{m}$	1.73 ± 0.03	4.4 ± 1.09	5.81 ± 0.02	-4.1 ± 0.18
$L = 46.6\text{m}$	1.79 ± 0.05	4.8 ± 1.62	5.86 ± 0.04	-4.1 ± 0.35

注: A : L 值的 10^{-10} 振幅; L : 46.6 传感器的分析资料为 170 天。

表 2 黄石站 ORBES-81 仪器勒夫数的理论值与实际值之比较

波	l/h	理论值
O_1	0.159 ± 0.003	0.147
K_1	0.168 ± 0.003	0.176
M_2	0.194 ± 0.002	0.146

表 3 黄石站 ORBES-81 仪器三年数据的 M_2 波调和分析结果

日 期	幅 值	标准误差	相 位	标准误差
1984.08	0.4254	0.0084	41.3469	1.1314
1984.09	0.4460	0.0100	41.9768	0.2803
1984.10	0.4076	0.0040	40.1587	0.5629
1984.11	0.4173	0.0063	38.4376	0.8658
1985.07	0.4007	0.0102	38.2457	1.4538
1985.08	0.4158	0.0070	39.2949	0.9620
1985.09	0.4137	0.0087	38.1632	1.2101
1985.10	0.4201	0.0060	37.8854	0.8230
1985.11	0.4222	0.0026	38.2340	0.3552
1985.12	0.4256	0.0038	39.2924	0.5086
1986.01	0.4169	0.0099	40.1589	1.3617
1986.02	0.4185	0.0061	38.4240	0.8273

国家地震局于 1986 年组织了对 ORBES-81 高精度水平石英伸缩仪的技术鉴定,审议中方

专家提供的研制报告、电路和实验报告、经济分析报告、仪器性能测试报告。ORBES-81 仪器三年数据的 M_2 波调和分析结果示于表 3。

用维涅第科夫方法,杜卡默程序,在国际固体潮中心对瓦尔费当日地球动力学地下实验室的 ORBES-84 垂直伸缩仪,1987 年 11 月—1988 年 12 月的记录数据的调和分析结果示于表 4。

表 4 WLF 实验室的 ORBES-84 垂直伸缩仪的调和分析结果 (资料天数,68 天 1392 数/小时)

波 群				应变		应变		应变		残 差	
辐	角	N	波名	估计 振幅	均方根	振幅 因子	均方根	相位 滞后	均方根	振幅	相位
133—139	30		Q_1	1.38	0.60	0.4508	0.1993	6.091	24.793	1.63	174.8
143—149	26		O_1	6.81	0.62	0.4352	0.0394	-0.238	5.210	8.84	-179.8
161—168	33		$P_1S_1K_1$	8.55	0.50	0.3886	0.0229	-2.820	3.451	13.47	-178.2
243—248	24		N_2	1.72	0.43	0.5568	0.1394	7.919	14.255	1.40	170.3
252—258	26		M_2	8.77	0.42	0.5442	0.0259	18.525	2.740	8.28	160.3
267—277	21		S_2K_2	5.06	0.49	0.6747	0.0648	25.801	5.572	3.68	143.2
327—375	17		M_1	0.19	0.18	1.3624	1.3459	-72.782	55.545	0.20	-114.6

标准偏差(10^{-9}): $D=16.58$, $SD=8.99$, $TD=3.93$ 质量因子: $Q_1=0.7$, $Q_2=1.7$

真方位角的残差: $Q_1/K_1=1.1199$, $(1-O_1)/(1-K_1)=0.9238$, $M_2/O_1=1.2504$

中心历之儒略日: $T_0=2447160.0$

瓦尔费当日地球动力学地下实验室的中国的的水管倾斜仪长期、连续稳定的记录(1986.4—1988.3),用维涅第科夫方法,杜卡默程序,在国际固体潮中心调和分析结果示于表 5:

表 5 WLF 实验室中国水管倾斜仪器的调和分析结果

波 群				倾斜		倾斜		倾斜		残 差	
辐	角	N	波名	估计 振幅	均方根	振幅 因子	均方根	相位 滞后	均方根	振幅	相位
105—111	14		$SIGMQ_1$	0.01	0.01	1.4454	1.3177	31.996	52.295	0.01	54.9
124—126	10		$2Q_1$	0.02	0.01	0.5987	0.3763	-141.896	35.991	0.01	120.3
127—129	11		$SIGMA_1$	0.04	0.01	1.0711	0.3523	-22.905	18.830	0.02	-54.3
133—136	20		Q_1	0.17	0.01	0.7280	0.0525	10.397	4.132	0.03	77.8
137—129	10		RO_1	0.05	0.01	1.0763	0.2978	19.068	15.840	0.02	46.9
143—145	16		O_1	0.81	0.01	0.6660	0.0106	-2.265	0.913	0.04	-130.5
146—149	10		TAU_1	0.03	0.02	2.0715	1.2439	46.987	34.401	0.03	64.4
152—155	15		NO_1	0.06	0.02	0.5797	0.1565	0.069	15.477	0.01	179.6

续表 5

波 群				倾斜		倾斜		倾斜		残 差	
辐	角	N	波名	估计 振幅	均方根	振幅 因子	均方根	相位 滞后	均方根	振幅	相位
156—158	7		CHI ₁	0.01	0.01	0.5545	0.6817	20.037	70.441	0.00	131.6
161—162	3		PI ₁	0.02	0.02	0.7484	0.4674	-0.962	35.751	0.00	-13.6
163—163	7		P ₁	0.34	0.02	0.6009	0.0280	-7.808	2.675	0.08	-141.9
164—164	3		S ₁	0.07	0.02	5.2971	1.7404	-151.900	18.454	0.06	32.2
165—165	11		K ₁	1.06	0.01	0.6149	0.0082	-8.868	0.764	0.27	-142.8
166—166	2		PSI ₁	0.02	0.02	1.5581	1.1401	59.104	41.606	0.02	78.1
167—168	7		PHI ₁	0.00	0.02	0.1554	0.6923	47.908	254.992	0.01	168.2
172—174	8		TETA ₁	0.02	0.01	1.2729	0.7274	56.920	32.749	0.02	89.4
175—177	14		J ₁	0.04	0.01	0.4419	0.0997	7.670	12.939	0.02	166.5
181—183	7		SO ₁	0.01	0.01	0.7449	0.7422	-140.184	57.091	0.01	103.3
184—186	11		OO ₁	0.06	0.01	1.0593	0.1831	11.725	9.907	0.02	31.5
191—193	19		NU ₁	0.00	0.01	0.4782	0.8094	-25.490	96.973	0.00	-141.0
207—22×	21		EPS ₂	0.04	0.01	0.6498	0.1134	-0.092	10.026	0.00	-178.4
233—236	10		2N ₂	0.10	0.01	0.4922	0.0372	-7.136	4.337	0.04	-162.8
237—23×	10		MU ₂	0.17	0.01	0.7034	0.0275	0.051	2.236	0.00	2.1
243—245	13		N ₂	0.78	0.01	0.5179	0.0045	-9.754	0.494	0.30	-153.5
246—248	11		NU ₂	0.14	0.01	0.4791	0.0221	-12.150	2.650	0.07	-155.2
252—258	26		M ₂	3.87	0.01	0.4930	0.0008	-8.075	0.092	1.65	-160.8
262—264	5		LAMB ₂	0.04	0.01	0.6225	0.1055	12.765	9.714	0.01	120.0
265—265	9		L ₂	0.11	0.00	0.4803	0.0170	3.729	2.025	0.05	171.4
267—272	5		T ₂	0.09	0.01	0.4420	0.0276	0.937	3.572	0.05	178.3
273—273	4		S ₂	1.81	0.01	0.4972	0.0016	-3.921	0.190	0.71	-169.9
274—277	12		K ₂	0.50	0.00	0.4992	0.0045	-4.899	0.514	0.19	-167.3
282—285	15		ETA ₂	0.03	0.00	0.4625	0.0811	-14.269	10.044	0.01	-154.4
292—2×5	14		2K ₂	0.01	0.00	0.3539	0.1865	18.139	30.208	0.01	162.5
327—347	6		MU ₃	0.02	0.00	0.6114	0.1229	11.145	11.534	0.01	150.0
353—375	11		M ₃	0.06	0.00	0.6344	0.0335	-1.253	3.019	0.02	-175.4

标准偏差(10^{-9}): $D=1.03$, $SD=0.42$, $TD=0.22$ 质量因子: $Q_1=35.2$ $Q_2=83.4$

真方位角的残差: $Q_1/K_1=1.0834$, $(1-O_1)/(1-K_1)=0.8671$, $M_2/O_1=0.7401$

中心历之儒略日: $T_0=2446877.0$

四、效 果

中、比、卢地球动力学仪器合作研制和科学实验十年期间,通过对外合作,引进先进技术,吸取国外有益经验,使之在较短的时间里取得较高水平的研究成果,缩短了与国外先进技术水平之间的差距,为促进我国地震科研和监测工作的更好开展,取得如下效果:

1)十年对外合作,以外事促内事,促科研,使地球动力学观测技术、地球程序形变监测技术和仪器得以发展,出现了一批适应地震预报科学发展的精良仪器,并使我国在该领域的观测仪器基本上实现国产化。

2)十年对外合作,广开技术思路,了解国际发展动向,特别是通过对具体的技术合作,能深入地了解国外先进技术要点,使先进技术更快地移植,推动了国内科研和技术的发展,如洞体式,钻孔式的各类倾斜和应变测量仪器的技术指标,分析方法,标定手段,综合评价标准,资料处理方法,干扰因素排除和分解等方面都得到有效的启迪,为本学科结合我国地震预报科学发展的特色,研制出了十余种品种精良的仪器设备。

3)十年对外合作,广开了更多方面地学领域的门路,如西德波恩大学重力仪器的改进,西班牙火山及火山地震监测,日本的地壳变动监测等方面的专家,都表示与我们共同开展地球动力学观测仪器和技术的合作愿望,不久将有可能在该领域形成多国参加的广泛合作,为我国的地壳形变观测技术进一步发展创造优良的条件。

4)十年对外合作,推动资料分析处理方法的水平的提高,改善和发展了该类资料分析和综合判别能力;与此同时,对今后断层形变监测综合技术和仪器的发展奠定了技术基础。

5)十年对外合作,特别是我国水管倾斜仪,合作研制的垂直伸缩仪,高分辨率气压仪在国际固体潮中心瓦尔费当日地球动力学地下实验室的安装成功和长期连续工作,以及在中国黄石固体潮实验室里安装的 ORBES-81 水平石英伸缩仪近 8 年来长期、连续、稳定可靠的观测资料,对国际同行专家的影响极为深远,为今后走向世界,面向减灾安全和工程变形监测服务等方面的研究和生产都将有深远的影响。

6)十年对外合作,培养了人材,以合作任务带动学术交流,多次参加 IUGG 所属组织的各种国际学术活动和交流,广开思路,广交朋友,深化和发展新的合作内容。

参 考 文 献

- [1] 蔡惟鑫等,中国比利时合作研制的高精度石英伸缩仪,地壳形变与地震,4,2,1984。
- [2] Cai WeiXin, Van Ruymbeke, M., Tan Shiling, Test results for horizontal quartz tube extensometer ORBES-81 with high precision at the Huangshi laboratory, China, Proceedings of the Tenth Int. Symp. on Earth Tides, Madrid, 1985。
- [3] 蔡惟鑫等,中国国家地震局与比利时皇家天文台地球动力学仪器合作计划的实施结果,第 11 届国际固体潮会议(赫尔辛基),1989。
- [4] 蔡惟鑫等,ORBES-81 型垂直伸缩仪研制、试验的初步结果,地壳形变与地震,11,1,1991。
- [5] 刘序俨等,黄石站两台伸缩仪观测资料的一致性与仪器格值关系的分析,地壳形变与地震,8,4,1986。
- [6] Melchior P., The Tides of the Planet Earth, Pergamon Press, Oxford, 1978。

中国、比利时、卢森堡地球动力学仪器 ORBES 合作计划进展

M. Van Ruymbeke^① 蔡惟鑫^②

摘 要

本文综述中、比、卢三国十年之地球动力学仪器及其观测技术研究的成果。展望未来合作计划的可能。

一、合作项目成果

自 1981 年以来比利时皇家天文台、卢森堡欧洲地震与地球动力学研究中心与中国国家地震局开展科技合作,已达 10 年之久。国家地震局委托地震研究所蔡惟鑫及其科研小组执行此项合作计划。双方在友好和推进科学发展的愿望下,共同努力,完成以下工作。

1) ORBES-81 型高精度水平石英伸缩仪的合作研制和试验:1982 年安装在中国黄石固体潮实验站的 ORBES-81 仪器,工作已 8 年之久。灵敏度达到 10^{-10} 应变变化,长期资料达到国际同类仪器的先进水平,其应变固体潮的振幅和相位变化皆达到理想状态,将转为监测使用。

该项合作研究曾得到国家地震局重点科技项目经费的资助。

2) ORBES-82 型高分子测温仪的研制和试验:已在中国黄石等 4 个台站共 16 个探头被中国地震台网或工程部门使用。测量 dT/d 值,灵敏度分别为 0.01°C 和 0.001°C 。

该项目是合作研究派生成果,在范隆贝克博士已有原理样机基础上,共同完善提高而成。

3) ORBES-83 型高分子气压量测仪研制的试验:亦为合作派生成果。根据共同试验的水银式以及模盒式的结果,采用蔡惟鑫提出的模盒方案进行相对气压量测,灵敏度为 $0.05 \text{ mbar}^{\text{③}}$,测量范围 $850-1050 \text{ mbar}$ 。在中国黄石、比利时皇家天文台进行长期试验,其结果与比利时皇家气象科学研究所多年公布资料吻合,实现自记,达到预期效果。

4) ORBES-84 型垂直伸缩仪研制:中方负责整体设计和结构研制,相对灵敏度 10^{-8} 量级,测量范围 10^{-6} 。比方负责电容传感。采用磁传感和电容传感两种换能器,石英和超铌钢基线相结合。在中国黄石和卢森堡瓦尔弗当日地球动力学实验室各安装一台,已进行近 5 年的长期

① 比利时皇家天文台

② 国家地震局地震研究所

③ $1 \text{ mbar} = 10^2 \text{ Pa}$

试验,获得良好效果,推动三分量及垂直方向应变理论的发展。

该合作研究曾得到国家地震局重点科技项目经费的资助。

5)ORBES-85型数据采集装置的研制:根据中、比专家共同讨论的方案,由谭适龄高级工程师负责实施采用单片机作中心控制,通过4.5位A/D转换器,输入8—16路模拟电压信号,在人为设定的时间段,自动寻集数据并打印,已在鲜水河断层多路监测系统中应用。

6)ORBES-86型胀盒标定装置的研制:采用比利时皇家天文台的设计思路和原理,由中方负责设计和实施,用LVDT标测检验,用于中国洞体应变台网中的伸缩仪上标定,已生产50多台,与SSY-I型仪器配套使用。

7)ORBES-87型温度梯度仪的试验:测量值(dT°/dx),仪器灵敏度分别为 0.001°C 和 0.01°C ,在黄石固体潮实验室和卢森堡瓦尔弗当日试验室长期使用。

8)ORBES-88型时间服务系统:采用高精度数字石英表,整点值输出信号,经放大后延时带动继电器,输出四组信号开关,时间误差 $<1\text{s/d}$ 。已在南极中山站等部门使用5台左右。

9)ORBES-89型水位量测仪:依照皇家天文台的NIVOCAP水位仪原理进行研制,仪器分辨率为 0.1mm ,在大于等于 1m 的范围内呈线性。能大幅度地记录面应变潮汐值。

过去的十年间,中、比、卢科技合作共同研制ORBES-81至ORBES-89型仪器共9种,在此期间根据中、比、卢合作计划要求将中国制造的FSQ水管倾斜仪及ORBES-84垂直伸缩仪、ORBES-83气压仪等三种仪器,安装在卢森堡瓦尔弗当日地球动力学实验室和比利时皇家天文台进行试验,经过6年的长期试验分析,在欧洲地球动力学界得到很高的赞誉。在第10、第11届国际固体潮会议以及欧洲地球动力学学术研讨会上多次发表文章,通过10年合作使本专业开始进入世界,推动我国地震前兆监测工作的发展和广泛的国际交流与合作。

二、未来合作计划

范隆贝克博士1991年11月在武汉国家地震局地震研究所与蔡惟鑫研究员及其科学小组的会晤中共同认为,根据地壳运动(形变、应变)观测技术更新的发展趋势,在ORBES计划的成果和经验的基础上加强断层形变仪器的研制,期望开展两种新仪器原理样机的合作试验:

1)ORBES-90型电容式静力水准仪合作试验:以不用浮体、造价低廉为目标。

2)ORBES-91型反馈式电容垂直摆倾斜仪的合作研制:以期望代替目前台站大量使用的水平摆,并要达到台站监测的技术要求。

共同认为:ORBES计划的新仪器探头的发展应暂告一段落,今后合作的重点将为:

把ORBES计划中10余种仪器的研究样机形成系列并转化为生产产品。为地震、火山、滑坡等灾害,为地球潮汐与地球动力学关系的研究服务。

共同合作研制国际统一的潮汐及其相关参量的数据采集系统和微处理系统,提高ORBES计划的现代化水平。

范隆贝克博士对黄石实验室的记录系统陈旧,近年没有什么发展表示遗憾,希望在中国有一个素质更好的台站参加台站之间的国际交往。

3)范隆贝克博士希望中国方面能够派出青年学者赴比利时短期进修,同时执行ORBES计划及其数采和微处理系统的合作研制计划。

中国地球潮汐形变(应变) 固体潮连续观测技术

蔡惟鑫^①

摘 要

本文回顾了我国地球潮汐形变(应变)固体潮连续观测技术 20 年来的发展,概述了为提高第二代观测技术所做的努力及取得的成就,提出本领域进一步发展的建议。

一、概 述

自 1966 年邢台地震以来,我国地震前兆的监测和研究工作蓬勃发展。为了适应地震监测和研究工作的需要,地壳形变(应变)连续观测技术开始兴起。我国在 70 年代的近十年时间里,借助地球物理、计量技术、工程变形监测和空间技术等方面的技术成果,结合潮汐形变(应变)连续观测技术的特点,相继研制成功了几种分辨率为 10^{-7} — 10^{-8} 量级的观测仪器,并在一百多个地壳形变(应变)连续观测台站安装使用。这些观测室大部分为浅山洞或地下室。以 JB-1 型金属水平摆倾斜仪、SQ-70 型石英水平摆倾斜仪的使用最广泛。在近 20 个有条件的台站里安装了目视水管倾斜仪和目视伸缩仪。

第一代地壳形变(应变)连续观测技术为我国地壳形变(应变)与地震关系的研究奠定了初步基础,对本学科的发展起了启蒙作用。第一代观测仪器的灵敏度、长期稳定性、格值的准确程度以及数据采集的方式皆处于低水平。由于观测条件较差,在观测资料中包含着大量干扰。为适应地震预报研究工作的的发展和采集可信的数据,迫切需要在实践的基础上,总结和分析过去的工作,提出发展第二代地壳形变(应变)连续观测技术的思路。

根据国内外实测地壳运动资料可以认为,震前震中区有持续数年甚至几十年的构造应力的积累,引起的地壳应变可达 10^{-4} ,年应变速率可以达到 10^{-5} 。一般地壳变形的最小年应变效率约为 10^{-6} ;天体运动引起的应变潮汐幅值为 10^{-8} ;还有震前及震时较高频率的断层活动及震后出现大约为 10^{-8} — 10^{-9} 量级的应变阶。国家地震局 1977 年在芜湖召开的地震系统第三次地应力学术讨论会以及 1978 年在长沙召开的地震观测仪器工作会议(地震前兆观测技术部

^① 国家地震局地震研究所

分),根据我国地壳运动观测技术发展的实际状况,确定了地壳形变(应变)连续观测技术发展的重点,首先是能够明显地观测到地球潮汐,以此来选择仪器的技术参量和观测条件。利用地球潮汐的振幅和相位变化等,综合评述形变(应变)地壳变动连续观测仪器内符合精度,检查观测条件中环境干扰因素的影响程度。另外,在地壳运动与地震关系研究领域里,人们也迫切需要这样高灵敏度、高稳定性、高可信度的观测仪器来采集该频段的地壳运动信息。1980年初国家地震局在上海召开的地壳变动观测仪器座谈会上对部分仪器研制的技术方案进行了论证和确认,从此全面地开展了我国地球潮汐形变(应变)连续观测技术与仪器的研究。

二、 中国地球潮汐形变(应变)观测技术

在国家地震局组织和统筹安排下,中国地震学会观测技术委员会和有关单位、专家通过学术讨论和研究,相继开展着十余种高灵敏度、长期稳定的新型的现代化仪器的研制,探讨和分析环境干扰因素与观测条件的关系。在短短的6年时间里,国家地震局系统内定点形变(应变)连续观测技术的发展日新月异,不仅成功地研制出一系列具有国际水平的新型仪器,而且在观测条件的研究、台站建设、数据分析等方面都获得了可喜的成果,使我国定点形变(应变)观测技术进入国际水平行列。

1. 地球潮汐形变(应变)连续观测仪器

(1)应变类(洞体型)

1)SSY-I型水平石英伸缩仪,由国家地震局地震研究所1983年研制成功,国家地震局组织鉴定。该仪器采用磁传感器换能,模拟连续可见记录,整体标定。灵敏度为 $3 \times 10^{-9} - 5 \times 10^{-9}$ 量级,能够明显地记录到水平应变固体潮,零漂呈线性,日漂移量小于 10^{-8} 量级,标定非线性误差小于1%,该仪器已达到同类仪器的国际水平。现在正小批量生产,并在十余个I类台站上安装使用。

2)ORBES-81型高精度水平石英伸缩仪,由国家地震局地震研究所与比利时皇家天文台在1986年合作研制成功。1986年5月IUGG秘书长、国际固体潮中心主任梅尔基奥尔教授根据记录资料的计算和分析进行评述后,同年由国家地震局组织中方专家进行评审并通过技术鉴定。该仪器采用电容换能和整体标定。灵敏度为 $1 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-10}$ 量级,能十分清晰而又连续不断地记录到水平应变固体潮,零漂呈线性,日漂量小于 10^{-9} 量级,非线性误差小于1%,多年来格值变化小于3%,记录长期连续稳定。该仪器已达到同类仪器的国际先进水平。

3)ORBES-84型垂直伸缩仪,由中国国家地震局与比利时皇家天文台于1985年开始研制,分别于1986年在中国黄石台、1987年在瓦尔弗当日地球动力学实验室安装并做长期稳定试验,几年来一直获得理想的垂直应变地球潮汐应变记录。填补了我国垂直应变潮汐量测的空白。

(2)井下应变类

1)ZX-79型弦频式钻孔应变仪,由河南省地震局研制成功,国家地震局组织技术鉴定。该仪器灵敏度为 10^{-9} 量级,日稳定度为 10^{-9} 量级。能够记录到明显的固体潮,现正在扩大试验。

2)YRY-2型压容式钻孔应变仪,在1983年由河南省鹤壁市地震办公室研制成功,国家地震局和河南省科委共同组织技术鉴定。该仪器灵敏度达 2×10^{-11} ,日漂量小于 1×10^{-8} 量级,