

科技自立自强之路

1954年,一场猝不及防的晚霜席卷河南,超四成小麦被冻死田间,严重影响当地的粮食产量。农民纷纷扼腕叹息。如果能提前知道天气情况就好了!
70年后,情况却完全不同。70年来,从静观风起云涌的经验判断,到以严格推理计算为凭据的数值预测,我国数值天气预报实现了从感性认识到理性认识的蜕变,已经赶上世界先进水平,同美、欧、日等的全

球气象中心并驾齐驱,可为全世界气象监测预警提供可靠参考。
其中,以国家最高科学技术奖获得者、中国科学院院士曾庆存为代表的中国科学院大气物理研究所(以下简称大气所)科学家和中国气象局的气象专家一道努力,为满足国家和人民的需要持续创新,为数值天气预报和气候预测的发展提供了源源不断的动能。

1 原始方程:一块“难啃的硬骨头”

1956年,刚从北京大学毕业的曾庆存被选拔派遣至苏联科学院应用地球物理研究所攻读研究生,主攻气象学。
彼时,新中国成立不久,百废待兴,国内外形势严峻,国家急需气象科学人才。
现已89岁高龄的曾庆存回忆道:“流体动力学、数学物理方法和计算数学,都是当时新兴的学科,我几乎没学过,但它们对研究气象学非常重要,得下狠心补习。”
于是,曾庆存常坐地铁到莫斯科大学去听数学课,去相关研究所听讲座和学术

报告。那些披星戴月的日子,为他以新的视野开展气象学研究奠定了坚实基础。
20世纪初,国际上提出描述大气运动的完整原始方程式组(以下简称原始方程),认定用这些方程组可做定量天气预报。
原始方程中需要计算的大气物理变量很多,包括温度、气压、湿度、风向、风速等,还包含涡旋和各种波动的运动过程。但在当时的条件下,要想以“追上天气变化的速度”将其计算出来,实现真正的“预报”,是不可能的事。

面对这块“难啃的硬骨头”,研究人员纷纷另辟蹊径,都想要大大简化原始方程,以适应当时的计算能力。1950年前后,美国气象学家查尼用计算机做出了世界上第一幅“数值天气预报图”。“数值天气预报”一词由此正式使用。
但在接下来几年的大规模应用验证中,研究人员发现,不管在欧美,还是在苏联,当时任何一种模式的预报正确率均小于50%,无法实现业务应用。
气象科学界认识到,真正实用的数值天气预报还是要依靠求解原始方程。

2 打破僵局:首创“半隐式差分法”

1960年,计算机能力得到提升。一开始,曾庆存想用准地转模式做气候预测(即长期天气预报)试验,但他的导师——国际著名气象学家、苏联科学院通讯院士基别尔告诉他,中国不应该跳过短期天气预报理论化的阶段。
基别尔建议曾庆存先加入破解原始方程难题的研究队伍。他的研究论文题目是《应用斜压大气动力学原始方程组做数值天气预报研究》,但这是理论分析十分困难,计算极其复杂,必须同时在气象科学和计算数学理论方面都有所突破才能解决的世界难题。
“当时所有的师兄都反对,认为我不一定能研究出来,可能拿不到学位。”但凭借初生牛犊不怕虎的劲头,以及学成报国的热情,曾庆存义无反顾地踏上了荆棘之路。
啃上这块“硬骨头”,曾庆存犯了难,“真是一点办法没有,到处都是问题,怪不得人家不敢动手”。彼时苏联计算机的内存只有2048个单元,他面临的第一个难题就是如何把原始方程里那么多的变量都放入这狭小的内存中。他左试右试,终

于找到了方法。
接下来更大的难题来了——怎样才能使计算速度满足做预报的要求?经过无数次思索和试验,曾庆存意识到,大气里有波动、涡旋,波动变化很快,涡旋变化则比较慢。既然难以兼顾,那为什么不先分开计算,经过一段时间再把二者综合起来。
这种分开计算的方法即曾庆存首创的“半隐式差分法”。其中波动过程采取一种算法,激发快波的项用隐式表示,而描述慢波的项则用显式表示。在计算若干步快波后再算一步慢波过程,这样构成差分格式。在保证计算稳定性的基础上,再相叠加,逐步前进,以达到应用原始方程做数值天气预报研究的最终目的。
1960年冬天的一个深夜,窗外下着鹅毛大雪,计算机发热的电子管烘得整个机房热乎乎的。午夜12点,轮到曾庆存使用计算机了,他迫不及待地想要验证他的算法。
由于计算量大幅减少,计算机算完时时针刚指向凌晨1点。“用那么小内存的计算机也可以算”,世界上第一幅以原始方程做真实预报的天气图成功问世!

经过反复认真检查,确认结果无误的曾庆存不顾莫斯科冬天的彻骨寒风,抓起外套就往外冲,只想赶紧让老师知道这件事。此时天还没亮,曾庆存走了很长一段路,终于坐上了前往研究所的地铁,沉浸在无限的喜悦中。慢慢地,他的记忆出现一段空白——一夜未睡的曾庆存一出车厢就晕倒在地。清醒后,他迫不及待地走出地铁站,在及膝深的雪地里前行,鞋袜都被浸湿了。当他向导师和同事报告成功的消息时,大家都欣喜若狂。那天夜里,曾庆存又发起高烧,鼻血落在洗脸盆里,叮当有声。
最后,曾庆存只用10小时的计算机就把论文做完了。这个方法成为当年苏联科学院的重大成就之一。
基别尔立即让曾庆存的师弟用这一方程做每天的数值天气预报。该模式在莫斯科世界气象中心试用了一年,准确率超过60%,符合天气预报实际业务要求。1962年,莫斯科世界气象中心开始用该方法向全球发布数值天气预报。这是世界采用斜压原始方程做天气预报业务的开端。

3 没有计算机就先打好理论地基

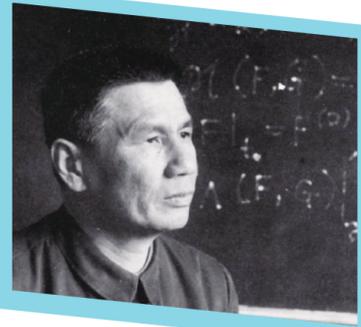
1961年,曾庆存从苏联学成归国。当时,我国高速计算机资源缺乏,无法用原始方程做短期数值天气预报业务。
“我当时想,大计算机中国将来必定也会有,为了未来更好地做短期数值天气预报,以及做长期的全球的延伸数值天气预报(今称短期气候预测),我要转入更深入、更抽象的基础研究,以做准备。”曾庆存说。
在那段艰苦又充实的日子里,曾庆存及合作者实现了一个又一个“首次”,创立

了数值天气预报与地球流体动力学的数学物理系统理论和计算方法,研制了数值天气和气候预测模式,建立了大气遥感系统理论,发展了定量信息提取方法。
1979年,曾庆存撰写的《数值天气预报的数学物理基础》一书出版,开创了大气和地球流体动力学的数学物理系统理论,在国际学界引发广泛关注。日本气象局局长新田尚1980年发表评论:“这是世界上第一本这样的书,是气象学理论化的完成。”国际数学家联盟原主席利

翁斯也大力推介这项成果。此后,应用数学界就形成了研究大气和地球流体力学问题的数学分支。
2012年,在曾庆存倡议下,中国气象局和广东省人民政府共同成立了区域数值天气预报重点实验室。中国科学院院士戴永宁说,该实验室研发建立了热带区域“9-3-1”高分辨率数值预报系统,建成了我国首个1公里分辨率的业务数值预报模式,其台风预报模式业务的评分跻身世界前列。



▲曾庆存(右)与同学在苏联留学。



▲曾庆存介绍“半隐式差分法”原理。



▲曾庆存(左二)与叶笃正院士(右二)等外出考察。



地球模拟实验室展厅。

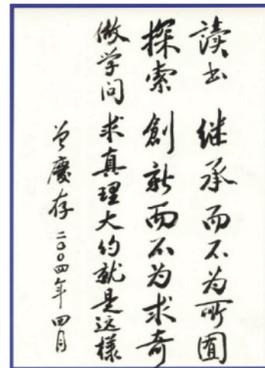
从望天到测天:他们用中国力量解密气象难题

■本报记者 李晨 实习生 杨晨

4 从天气预报到气候预测

1988年的夏天,酷热难当。每天的固定时间点,大气所博士生王会军都会推着自行车,驮着一个巨大的纸箱往返于公共计算机房和办公室之间。当时他们用的还是国外退役的两台计算机,运算性能加起来还不到美国一台在役计算机的1/4。
纸箱里通常装着几个或十几个偌大的计算机存储用磁盘。“我们在公共计算机房里运算完以后,需要用磁盘把计算机硬盘里的数据导出来。计算机房空间有限,磁盘不能存放,得运回办公室。下次用的时候再驮过来。”
如今已是中国科学院院士的王会军,当年成为曾庆存的学生后,对气候变化、古气候数值模拟很感兴趣;他的同学、大气所研究员胡非更关注大气和地球流体边界层;他的师弟戴永宁主要负责陆面过程模式的研发;他的另一位师弟、国家卫星气象中心首席科学家李俊主要研究气象卫星和相关的红外遥感。他们师从同一个人,研究方向如此不同,却都成长为我国气象研究的骨干。
戴永宁回忆道:“那时候曾先生很忙,把一个问题给我们时,会给我们足够的自由,并不要求马上出结果、发文章,而是非常耐心地给予指导。他的言传身教,为我今后的科研生涯树立了榜样。”
胡非记得很清楚,当时曾庆存很重视人才的培养和研究队伍的组建。那时曾庆存每个月给胡非30元,让他买糖果瓜子,把研究生组织在一起搞学术沙龙,畅谈学术和科学理想。“对我们来说,这是科学家

精神的传承。”
1990年前后,随着中国的经济发展和建设,中期天气预报和短期气候预测对于决策与规划越来越重要。同时,气候变化问题研究的紧迫性也日益凸显。
有了团队,大气所气象科学研究的布局逐渐成型。曾庆存带领团队开始进行跨季度气候预测研究。他们设计出大气环流模式、大洋环流模式,独创的动力框架跻身国际先进行列。该模式从1990年开始连续5年用于季度和跨季度气候预测,都取得了成功。1994年,他们建立了世界第一个实际应用的短期气候预测系统。



曾庆存手书的治学心得。

5 做中国人自己的地球系统模式

“陋巷雌风压语低,阔人高调与天齐。科坛似是容争辩,政界分明竞画皮……”1990年的一个深夜,在瑞士日内瓦参加第二次世界气候变化大会的曾庆存辗转反侧,忧心忡忡,写下这首诗。“我们当时还没有意识到气候变化问题已经演变为政治问题了。”
回国后,曾庆存立刻给当时的国家科委写了一封信,陈述我国也要及时研究相应问题,免得被动,并把在日内瓦的所见所闻告诉了学生们。王会军主动请缨挑大梁,研究气候变化与二氧化碳的关系。
他们很快得出二氧化碳含量翻倍后会导致大气升温1.75℃的结论,完成我国第一个基于自己的气候模式的全球变暖定量研究,这是当时全球最优计算结果。
1992年,这一结果被联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一次评估报告补充报告所引用。这是我国第一个被IPCC正式引用的结果。
也就是从那时起,曾庆存萌生了建立我国地球系统模式的念头。
地球可以简单归为大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈(包括人类活动),它们相互作用。地球系统模式既要揭示各圈层的演变,又要通过“耦合器”将各个独立运行的模式有机联合在一起,模拟出自然界相互作用的演变过程。这是数值天气预报的延伸——大规模的数值模拟研究。
当时国际上已经存在一些大体成型的气候变化研究模式。如美国国家大气科学研究中心向全球提供公用的气候系统模式,并开放共享源代码。
有人指出:与其费那么大的劲开发自己的系统,为什么不直接使用现成的开源系统?
曾庆存坚定地认为,中国必须有自己的地球系统模式。姑且不说哪个好,重要的是自己的,是“自主可控”的。“我们自己有模式、有计算数据,就有气候谈判的底气!”

“一方面,由于我国天气气候具有独特性,例如西北干旱、江淮流域梅雨天气等,在他国的气候系统模式中不一定能得到很好体现。”王会军解释说,“另一方面,如果天气气候的预报预测不能自主可控,将来会有一定风险。”
2003年,大气所正式提出研制地球系统模式的建议,2007年获中国科学院立项支持,其后又获国家的大力支持,并被命名为中国科学院地球系统模式(CAS-ESM)。
历经14年攻关,2021年,“寰”诞生了。它是我国首个研制成功的地球系统数值模拟大科学装置,能通过计算模拟真实地球的风云变幻和规划人类的一些建设方案。
戴永宁说:“在‘寰’中输入某一时刻的观测数据,就能通过大规模数值计算,推演出地球不同圈层的演化,就好像给地球做可视化CT一样。”
这种推演有什么用?作为中国科学院地球系统数值模拟科学中心副主任,大气所研究员曾晓东以生态系统演变为例解释说,小到一棵树能不能茁壮生长,大到在某种气候条件下植被如何自然分布,大科学装置都能为人们提供可靠的参考。
李俊说:“它可以帮助科研人员更好读懂地球,更精准、更全面认识地球变化,研究全球变化的机制和机理,预知地球的未来。”
“我国已向IPCC提交了‘寰’的模拟数据。”胡非说,“我们的模拟结果是比较好的,因为我们的模型构建有优势。”
除了为实现“双碳”目标提供科学支撑外,“寰”还被广泛应用于防灾减灾、环境治理、可持续发展与生态安全等重大科学领域,显著提升了我国地球科学的整体创新能力。
“我国大规模数值模拟研究在分辨率方面还需下大功夫,但我相信,中国的气象科学和地球系统科学事业的前途一定光明!”曾庆存说。