

## 现代数值天气预报之父

### ——记美籍匈牙利数学和气象学家冯·诺依曼

■ 贾朋群 张萌

1946年8月29—30日，在美国位于新泽西州的普林斯顿大学的高级研究院，召开了一次对现代气象学发展具有历史意义的重要会议，这次被认为是世界上第一次数值天气预报（NWP）学术会议的组织者和主持人，不是当时著名的气象学专家，却是普林斯顿大学高级研究院的数学教授冯·诺依曼博士。在这次之后的几年里，在冯·诺依曼博士的周围，总是聚集着一支来自美国乃至世界各地最优秀的气象学家队伍和电子工程师，他们的目标只有一个：用刚刚诞生的数字电子计算机做出准确的天气预报。这个目标终于在1950年4月初，在世界上一台电子计算机ENIAC（电子数字积分器和计算器）的输出结果中实现。在以1949年1月31日观测记录为初值，进行欧洲地区24小时数值预报的试验中，数值预报首获成功。计算机输出的结果将位于欧洲西部的风向转换和反映大气斜压特征的低槽延伸现象都正确地进行了预报。冯·诺依曼博士用他数学家的头脑，战略家的韬略，在不长的时间里，帮助气象学家完成了至少从20世纪初开始的梦想：用物理定律计算和预报天气，而他本人，无论他是否在意，也成为气象学家队伍中令人尊重和自豪的人物。

约翰·冯·诺依曼（John von Neumann, 1903—1957年，图1）1903年12月28日出生于匈牙利首都布达佩斯，他是当地一位小有成就和名气的银行家家中的第一个男孩，神采奕奕的父亲在他出生前，就花钱为他买了个头衔，诺依曼家族的后代也就首次获得冯·诺依曼的姓氏。冯·诺依曼没有辜负父亲的苦心，从小就表现出其他孩子想都不



这些气象界“大腕”和当局的所谓主流观点，却在冯·诺依曼项目取得成功，并从9年之后的1955年开始，陆续成为各国天气预报的主要手段的事实面前不攻自破。

会想的数学天赋。一次，母亲漫无目的看着前方时，只有6岁却可以心算两个8位数乘除法的冯·诺依曼感到奇怪，就问到：“妈妈你在算什么？”，他幼小的心里几乎所有一切都和数有关系。除了数学，冯·诺依曼8岁时还迷上了历史，家中44卷本的大学历史全书被他通读了一遍，似乎是向人证明他的大脑会在逻辑数学和社会应用两个领域显示才智。冯·诺依曼的天生数学天赋很令父母吃惊，但他们始终鼓励自己的孩子全面发展，特别是培养他良好的人格。

1914年，刚刚10岁的冯·诺依曼就进入大学预科班学习，但由于一次大战的爆发，冯·诺依曼随全家离开匈牙利，虽然学习受到影响，但在战后参加结业考试时，他还是以优异的成绩毕业。1921年冯·诺依曼17岁时，他的第一篇数学研究论

文在德国数学学会杂志上发表，就在这一年，他还和父亲达成一致，除了数学还要学习化学。于是冯·诺依曼进入柏林大学，两年后又转入苏黎世大学学习化学工程。与此同时，头脑灵活的冯·诺依曼没有忘记自己最喜爱的数学，他还在布达佩斯大学注册了数学博士课程。然而，身在苏黎世的冯·诺依曼并不听数学课，只是按时参加考试。1926年，22岁的冯·诺依曼同时获得了化学工程学学士和数学博士学位。获得学位后，冯·诺依曼来到哥廷根大学，成为著名数学家希尔伯特的助手，1927—1929年又成为柏林大学和汉堡大学的兼职讲师。在此期间，他致力于研究数理逻辑、集合代数和集合论等纯数学理论，取得了公认的成绩。1927—1929年，冯·诺依曼以每个月发表1篇论文的速度在所研究的领域获得许多成果，到1929年论文累计达到了32篇。他还积极参加各种学术活动，成为国际数学界知名的人物。1929年末，冯·诺依曼得到美国普林斯顿大学的邀请，对方希望通过邀请欧洲最优秀的数学家赴美国工作，刺激美国的数学界。1930年，冯·诺依曼首次赴美，成为美国普林斯顿大学客座讲师。1933年，33岁的冯·诺依曼博士成为著名的普林斯顿大学高级研究院聘任的包括爱因斯坦在内的6位教授中最年轻的一位。1937年，冯·诺依曼加入了美国国籍，同时因为他在数理逻辑和量子力学方面突出的



图1 约翰·冯·诺依曼（John von Neumann, 1903—1957年）

研究工作，成为美国科学院院士。

正是从1933年任普林斯顿大学教授开始，冯·诺依曼将自己的研究领域逐渐从纯数学向应用数学转换，开始在脑子里酝酿研制计算机的计划。1937年冯·诺依曼作为顾问，开始与美国军方弹道研究实验室合作，针对弹道的研究面临很多计算问题，更加坚定了他要通过构建计算机代替人类完成科学计算的任务决心。而当时在数学界，更多的数学家沉溺于数学方程完整解的研究，对数学计算很是轻视，对计算机更认为那不过是更大更快的计算器而已。从小就对数学，尤其是数字计算特别敏感的冯·诺依曼却越来越清晰地认识到计算机高速和准确的计算，不但会给数学家，还会给自然科学各学科带来意想不到的结果和突破。1944年，冯·诺依曼来到宾夕法尼亚大学摩尔工程学院，正式成为美国第一台通用电子计算机ENIAC（图2、图3）研制项目的顾问，他也因此被誉为现代数值分析——计算数学的缔造者之一（链接-1）。1945年末，他成功地说服了高级研究院主任和理事会，在名义上和财政上（拨款10万美元，而当时的美国无线电公司也仅值10万美元）支持ENIAC项目。

冯·诺依曼大约在1945年末或更晚些时候，注意到了气象领域。他

很快就意识到，数值天气预报是计算机在数学应用领域面临的最重要的挑战之一。1946年5月，他向美国军方提出建议，在项目内成立气象组，同样期待着更为准确的天气预报的美国军方非常明智和快速的支持了冯·诺依曼的建议，从1946年7月开始支持和ENIAC项目捆绑的数值天气预报计划。于是，包括罗斯贝、查尼等一批美国当时最有思想的气象学家，通过文章开始讲述的那次有重要历史意义的会议走到了一起（链接-2），并且取得了不仅在气象科学领域，而且在应用数学和自然科学都具有划时代意义的成果。

1946年，罗斯贝在给赖克尔德弗的信中，更加深刻地认识和评价了冯·诺依曼气象项目的意义。曾经在1942年和冯·诺依曼一起讨论过预报问题的罗斯贝写到：“在某些情形下，冯·诺依曼的工作可以比肩数学在处理电学线性微分方程中的成功以及量子力学中数学在处理流体动力学非线性微分方程中的失败，他表现出这样的自信，即后者在计算机辅助的数值实验将带来不仅仅是实际上，更是数学上的进步。”在这里，罗斯贝意识到，冯·诺依曼可能带来的数值实验的方法，一方面能让科学家避免在似乎完美的数学定律面前，面对实际

问题无计可施；另外，也能从数值实验中，审视用微分方程或方程组表示的所谓自然规律是否真的很完美，其不足可能在数值实验中被昭示。冯·诺依曼的这一思想，被称为“启发式计算”，它从60年代开始，被更多的气象学者认识到并逐渐成为气象学科最先构筑的标准方法。数值模式也从单一的天气预报被赋予更多和更加丰富的职能，可以说数值模式的研制和应用，改变了气象学科的面貌，数值实验的开展，使得理论得以拓展，而更加合理和准确的理论或计算方案，又在不断改进着数值天气预报。可以说数值天气预报的成功随后带来的一系列改进，例如，大气运动偏微分方程数值解、数值模式各种近似和参数化等，都见证了大约70年前冯·诺依曼的初衷和罗斯贝的洞察。

1955年，一直关注数值天气模式进展的冯·诺依曼，在一次会议上总结了数值气象研究的3个方向：即短期天气预报（1~14天）、长期预报和大气环流模拟。其中大气环流研究会因为计算的加入而更加有效。然而，就在这年夏天，X射线检查说明在工作中容易感到疲劳的冯·诺依曼患有癌症，18个月以后的1957年2月8日，年仅53岁的冯·诺依曼英年早逝，令人痛惜不已。回顾冯·诺依曼一生的科学事业，与

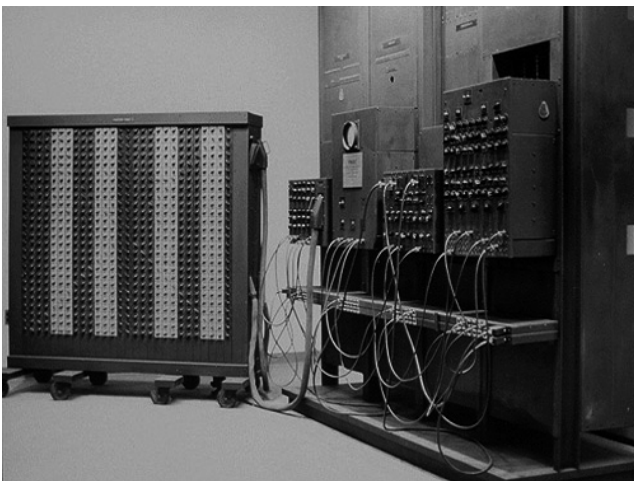


图2 世界上第一台电子计算机——ENIAC

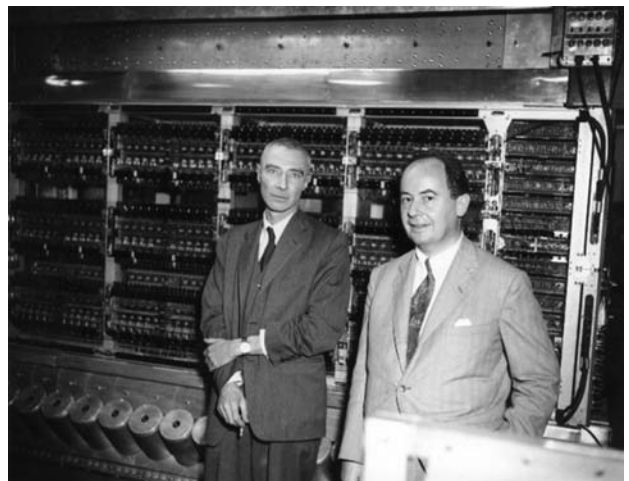


图3 冯·诺依曼（右）和同事Robert Oppenheimer（左）在位于普林斯顿的高级研究所第一台计算机前

集合论、量子理论及应用于经济和社会的对策论等多项数学理论的创立,以及在氢弹等核武器研究中的巨大贡献相比,组织和实施数值天气预报仅是他一生学术成就的很小一部分,甚至只是一段插曲而已。然而,正是由于这项工作,冯·诺依曼和一组优秀的气象学家一起改变了天气预报的历史。他在这项研究中提出并解决了计算机程序编制问题,即让快速运转的计算机自己读懂用所谓接近计算公式的“高级语言”编写的计算指令。冯·诺依曼是现代数值分析中计算数学的缔造者之一,他以数值天气预报为突破口,对非线性方程的离散化及计算稳定性等重要的数学应用问题,形成了一套理论和解决方案,其应用价值和受益领域远远不局限于气象科学。

回顾冯·诺依曼及其领导的团队,在开启了数值天气预报成功之门的历程中,在几次需要科技创新

和环境引领的时候,冯·诺依曼个人的超人智慧和协调能力,在保证气象项目的经费支持、在高级研究所成功立项、确保第一台电子计算机资源用于气象预报试验以及在全球范围吸纳最优秀和适合的气象学者加入其中等方面,都起到了不可替代的作用。冯·诺依曼个人,无论是科学层面还是在技术路线上,也无愧于领军者的角色。首先,在电子计算机研制阶段,就着手思考其应用价值并成功地与气象结合起来,是冯·诺依曼这位“全能型”科学家最难得的思想<sup>①</sup>。正是这一点,使得“一战”期间理查森的计算天气之梦是一个人在“单打独斗”,变为“二战”前后数值天气预报实践成为美国军方支持和科学界、舆论关注的事件,也让一直在美军方操控下的第一台电子计算机,为NWP成功做出了贡献。

再有,冯·诺依曼在加入ENIAC项目之初,就一直思考计算机的

“编程”问题。1945年6月,他的《EDVAC报告》初稿,第一次完整和详尽阐述了数字计算机编程的概念。正是他最先赋予的计算机“编程”能力,让依据物理偏微分方程反复和循环计算天气演变的数值预报模式方程,得以在电子计算机里持续演算。

冯·诺依曼一生涉猎领域众多,但他的主要研究领域数学、物理,尤其是流体动力学只是他感兴趣的领域之一。这样的全学科科学家,在气象科学的重大突破过程中,其“领袖”的作用是不可替代的。尤其难得的是,NWP项目中,冯·诺依曼借助了当时以查尼为代表的,最具活力、年轻和创新能力极强的团队。正是这样的组织架构,才让NWP作为20世纪下半叶气象领域最为重要的扩展领域之一,持续发展下去。其中,查尼在NWP成功的第二年(1951年),就洞察到和提出利用理查森所用的“原始方

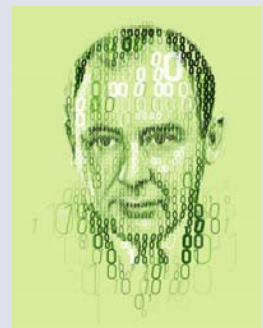
#### 链接-1 ENIAC项目和冯·诺依曼

ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) 是电子数值积分计算机的缩写,简称为伊尼亚克,是世界上第一台通用电子计算机。在二战期间,美国军方资助了ENIAC项目,其设计和建造合同在1943年6月签订,实际的建造在7月以“PX项目”为代号秘密开始,在宾夕法尼亚大学穆尔电气工程学院进行。建造完成的机器在1946年2月14日公布,并于次日在宾夕法尼亚大学正式投入使用。ENIAC包含了17468个真空管、7200个晶体二极管、1500个继电器、10000个电容器,还有大约五百万个手工焊接头。它的重量达27吨,体积大约是2.4m×0.9m×30m,占地167m<sup>2</sup>,耗电150千瓦,其计算速度较之前的计算器提高了1000倍,其可编程能力也令科学家们激动不已。ENIAC在1946年11月9日关闭,并在1947年转移到了马里兰州的阿伯丁试验场。1947年7月,它在那里重新启动,继续工作到1955年10月。

ENIAC为美国军方的弹道研究实验室(BRL)所使用,但其最初的应用不仅局限于弹道的计算,也用于天气预报、原子能量计算、热燃烧、随机数研究、风洞涉及等其他领域。其中,在计算天气方面的应用,与ENIAC的主要贡献者冯·诺伊曼有直接的联系。

1944年,在洛斯阿拉莫斯国家实验室研究氢弹的冯·诺伊曼,在ENIAC项目进行了一年后注意到这台计算机,以他的敏感,他所在的实验室随后深入参与了ENIAC项目,以至于对ENIAC的第一次测试运行是计算氢弹相关数据。

随后来到位于普林斯顿高级研究所的冯·诺伊曼,将该项目研制的重要目的之一一定为,用一个实际的科学问题,展示计算机潜在的革命性力量。这时他的目光投向了气象。1946年,就在ENIAC研制成功之际,他也在高级研究所建立了气象项目。到1956年气象项目结束时,冯·诺伊曼开始时的所有预期,都伴随数值天气预报的成功得以实现:即项目表面,基于物理定律的数值算法可以用于预报大尺度大气运动,借此进行的天气预报。准确性与预报员水平相当。计算机能使这种计算足够快和准确,从而用于天气预报。



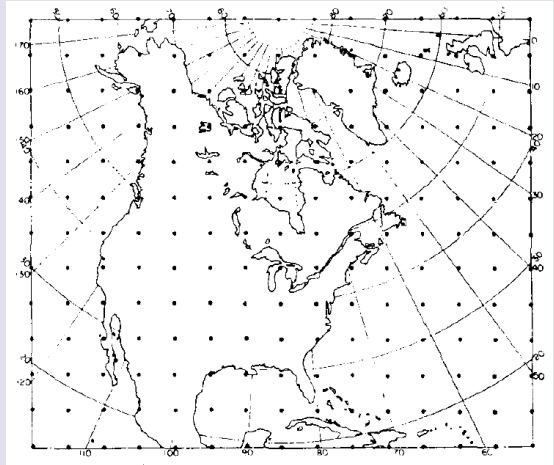
<sup>①</sup> 作为计算数学创始人的冯·诺依曼,在介入电子计算机项目之初,就明确了其目的之一就是“要用一个实际的科学问题,展示计算机潜在的革命性力量”。虽然他最早找寻的领域并非气象,瞄准的是包括弹性力学和塑性力学理论、光学、电动力学以及原子和分子的量子理论等。他最终选择气象,可以说既是气象界的幸运,也是他本人最大的“胜算”之一,因为数值天气预报推进了一个学科并使大众受益,也是这位科学巨匠辞世前最关心的科学问题之一。

## 链接-2 数值天气预报 (NWP) 的发端

1945年底,有着“电视之父”称号的,俄裔美国人Vladimir Zworykin和有着“计算机之父”称号的冯·诺伊曼见面,后者讲述了如果将初步研制成功的电子计算机用于天气预报,将会带来什么样的改变。主要关注人工影响天气,但对于在电视节目里及时向观众预告天气变化也感兴趣的Zworykin,听取了冯·诺伊曼的建议,决定支持冯·诺伊曼的数值天气预报项目。让二人一拍即合的根源还在于,他们共有一个梦想,就是让电视和电子计算机以某种形式联系在一起,而天气的演化和预报,正是联系电视和电子计算机的最好应用领域。二人随后共同参加了美国气象学会的年会,作为“外行”,他们在会上靠近了气象学者,和他们共同感悟和领会气象学者们的工作,从而找寻进一步的灵感。

正是这次会面,让冯·诺伊曼坚定了用计算机开展天气预报的信念。1946年初,他先和罗斯贝的研究团队取得了联系,找寻数值天气预报之路。后者向冯·诺伊曼解释了为什么纬向平均的动力模式无法工作,进而建议冯·诺伊曼用Victor Starr在1941年提出的正压模式。然而,后者当时并不满足较为简单的正压方法,依靠新研制出来的电子计算机,他希望能够更加准确,或者说尽可能少地采取近似的方法计算天气的演化。

1946年夏,本文开始描述的对NWP具有历史意义的会议在普林斯顿召开。然而,会后很长一段时间,项目组毫无进展。而在这关键时候,曾经参加了普林斯顿会议,并在会上提出了用少数几层来表示整个大气的垂直结构思想的查尼,在前往挪威的途中访问了芝加哥,从而与项目组建立了更加紧密的联系。后来加入这个团队的查尼,参考了1922年理查森用手算预报天气实践的经验,确定了第一次用电子计算机进行预报试验采用J. Bjerknes的趋势方程的方案。最终,在1948—1949年间,借助冯·诺伊曼在计算机上“存储程序”,即编程,项目组利用一个一层正压过滤模式,历史上第一次利用位于马里兰美军基地的世界上第一台电子计算机ENIAC,进行了24h天气预报。预报的区域和格点分布在图中给出。



程”模式进行NWP的可行方案及其带来的预报技巧的提升。

此外,在这样的过程中,冯·诺伊曼的“非气象学者”身份,也帮助了团队不顾当时美国“主流”学者的观点,坚持进行数值预报实践。就在本文开始描述的普林斯顿会之后4个月,1946年12月在芝加哥大学召开的一次气象学术会上,作为会议主题之一讨论了数值天气预报问题,但会议给出的结论却是“目前构建数值预报系统的时机还不成熟”,会议给出的主要原因是,这样的预报基于“粗暴的”(brutal assault)大气运动方程,后者中的地转项和其他项比较大得多,但其他项也对天气变化起重要作用。同月举行的另一次会上,美国气象学会主席也指出:完全基于正确的物理定律的客观预报方法目前还遥不可及。美国加州理工学院年轻气象学者埃利奥特(Robert D Elliott)甚至模仿理查森的做法,

通过简化算法,写成名为《计算的天气预报》于1943年提交给美国气象局,但是当局对这位热心探索的青年气象学家的创新实践,却没有任何表示。然而,这些气象界“大腕”和当局的所谓主流观点,却在冯·诺伊曼项目取得成功,并从9年之后的1955年开始,陆续成为各国天

气预报的主要手段的事实面前不攻自破。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项(优秀科技社团奖)项目资助。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

### 深入阅读

- Bochner S. 1958. John von Neumann (1903—1957), A Biographical Memoir. Washington D C: National Academy of Sciences.
- Charney J, Fjörtoft R, von Neumann J. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2(4): 237-254.
- Harper K C. 2008. *Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Kalnay E. 2002. *Atmospheric Modeling Data Assimilation and Predictability*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Metropolis N. 1980. *A History of Computing in the Twentieth Century: A Collection of Essays with Introductory Essay and Indexes*. Waltham: Academic Press, INC.
- Nebeker F. 1995. *Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century*. Waltham: Academic Press.
- Uccellini L W, Kocin P J, Sienkiewicz J M. 1999. Advances in forecasting extratropical cyclogenesis at the National Meteorological Center. In Shapiro M, Grønås S. *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*. AMS/Canterbury Press.