



地球科学前沿论坛

导言: 为了弥补Nobel奖在学科设置方面的缺憾,瑞典皇家科学院在1982年设立了与Nobel奖对等的Crafoord奖,奖励那些在数学、天文学、地球科学、生命科学四大学科取得卓越成就的科学家,每四年每个学科轮到一次. 2014年8月,《中国科学》杂志社主办了第二届“地球科学前沿论坛”学术会议,会议邀请了十余位专家解读历届地学Crafoord奖获得者的成就和贡献,希望从中找出大师们在地球科学研究中的创新所在,激励中国地球科学家取得高水平成果. 本刊特邀这些专家将报告改写成文,以飨广大读者.

混沌理论之父——1983 年 Crafoord 奖获得者 洛伦茨教授成就解读

罗德海^{①*}, 穆穆^②

① 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

* E-mail: ldh@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2014-10-22; 接受日期: 2014-11-26; 网络版发表日期: 2014-12-15

摘要 爱德华·洛伦茨(Edward N. Lorenz)生前是美国麻省理工学院气象学教授, 他于1963年发表在 *Journal of the Atmospheric Science* 上的论文“Deterministic nonperiodic flow”, 被誉为混沌理论研究的里程碑和开山之作, 这一研究引发了自然科学的一场革命. 该论文发表后的十年里几乎没有人关注和引用, 但在随后几十年里却引起人们的广泛注意. 除此之外, 洛伦茨在大气科学的多个方面都做出了奠基性的贡献. 由于洛伦茨在对地球流体动力学特别是大尺度大气运动的深刻理解方面的奠基性的贡献(Crafoord 奖颁奖词), 他于1983年获得首批地球科学 Crafoord 奖. 本文简要介绍洛伦茨教授的生平、学习与科研工作经历、发表论文情况以及所取得的成就, 希望从中得到一些对中国科学家有用的启示和感悟.

关键词Crafoord 奖
洛伦茨教授
混沌理论之父

爱德华·洛伦茨(Edward N. Lorenz)是美国著名的气象学家, 大气环流理论的奠基人之一, 被称为混沌理论之父. 他于1963年发表在 *Journal of the Atmospheric Science* (简称为 *J. Atmos. Sci.*) 上的论文“Deterministic nonperiodic flow”引发了自然科学(特别是非线性科学)的一场革命. 并因此于1983年与著

名的物理海洋学家 Henry Stommel 教授共同获得瑞典皇家科学院颁发的首届地球科学 Crafoord 奖.

洛伦茨教授是国际大气科学界到目前为止唯一获得 Crafoord 奖的气象学家. 本文试图通过对洛伦茨教授的生平、学习工作经历、发表论文情况和所取得的成就的解读, 获取一些对中国科学家特别是气象

中文引用格式: 罗德海, 穆穆. 2015. 混沌理论之父——1983 年 Crafoord 奖获得者洛伦茨教授成就解读. 中国科学: 地球科学, 45: 1-7

英文引用格式: Luo D H, Mu M. 2015. Father of the Chaos—An understanding of the achievement of the 1983 Crafoord Prize winner: Prof. Lorenz (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 45: 1-7

学家有用的启示和感悟。

1 生平和工作经历简介

洛伦茨教授于1917年5月23日出生在美国的康涅狄格州, 2008年4月16日在美国马萨诸塞州去世, 终年91岁。洛伦茨在很小的时候就喜欢科学。“孩提时, 我最有兴趣做的事就是关心天气的变化”, 他后来在自传中写到。第二次世界大战期间, 洛伦茨从达特茅斯(Dartmouth)学院数学专业本科毕业, 然后在哈佛大学攻读数学硕士学位, 硕士毕业后进入MIT(美国麻省理工学院)攻读气象学硕士和博士学位, 在读学位的同时, 他作为气象预报员曾在美国陆军航空兵团服役。

下面简要介绍洛伦茨的主要学习和工作经历: 1938年, 达特茅斯(Dartmouth)学院毕业, 数学学士学位; 1940年, 哈佛(Harvard)大学毕业, 数学硕士学位; 1943年, MIT毕业, 气象学硕士学位; 1948年, MIT毕业, 气象学博士学位, 并成为MIT的教师(faculty), 年仅31岁; 1962年, 成为MIT气象学教授(45岁); 1987年, 从MIT退休(70岁); 2008年, 因癌症在马萨诸塞州的剑桥病逝, 享年91岁。

洛伦茨从小对天气预报很感兴趣, 大学和研究期间主攻数学, 后改学气象学, 并从此为气象科学的发展奋斗了一生。从他的人生经历来看, 洛伦茨在大气科学研究方面能取得这样大的成就可能与他从小对天气变化有浓厚的兴趣和具有强大的数理功底有关。

2 主要研究方向、发表论文情况和所取得的主要成就

2.1 研究方向及发表论文情况

洛伦茨教授的研究方向主要包括大气环流、大尺度动力学、天气的可预报性和气候变化等领域。他的博士导师是James Murdoch Austin (1915~2000), 新西兰人, 仅比洛伦茨大两岁, 研究方向为空气污染气象学, 因培养洛伦茨而闻名。

洛伦茨的学生不多, 他培养的博士只有几名, 其中著名的是Kevin E. Trenberth(1944~), 新西兰人, 工作于The National Center for Atmospheric Research, 为1995, 2001和2007年IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)的首席作者。因此洛伦茨教授并不像其他知名教授那样以学生研究工作出色而出名。

洛伦茨教授一生在正式刊物上发表论文61篇(1950~2008年), 年平均为1.05篇。有时几年没发表过论文, 发表论文数最多的年份也不超过4篇, 见图1所示。他发表的论文主要包括*Nature* 1篇, *Journal of Meteorology* 3篇, *Tellus* 15篇, *J. Atmos. Sci.* 16篇等。在这些论文中, 他很少与他人合作, 只与三人合作发表过三篇文章, 也没有和导师合作发表过论文。

从图1可以看出, 洛伦茨教授在50岁以前仅发表18篇文章, 而60岁以后发表了31篇文章, 他的创作高峰在45~75岁。洛伦茨教授一直坚持在科研的第一线, 晚年还在坚持做科研工作, 直到去世那年(2008年)还

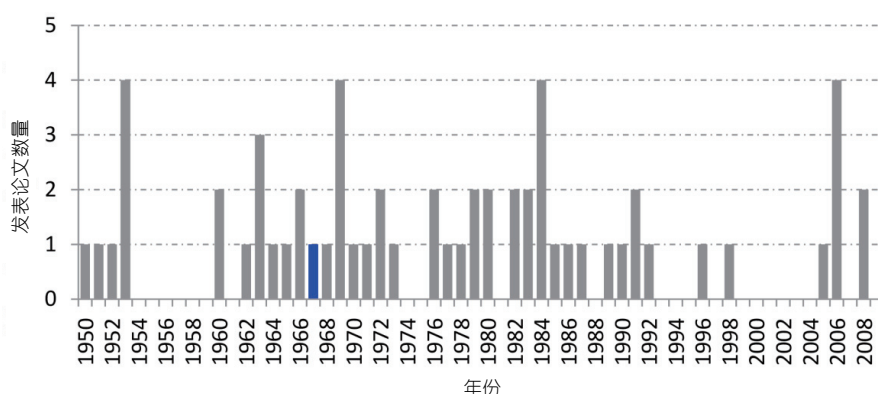


图1 洛伦茨教授从1950~2008年在正式刊物上发表论文数的逐年分布情况

蓝色示洛伦茨教授1967年写的书 *The Nature and Theory of the General Circulation of Atmosphere*, 据 Lorenz(1967)

有两篇文章发表.

图2为我们统计的洛伦茨教授发表论文和专著的引用情况(到2014年5月止), 洛伦茨教授的论文共被引用23200次, 年平均引用近380次.

2.2 主要成就

洛伦茨教授所取得的主要成就, 不是凭空得来的, 应该与他多年的执著的思考有关.

例如洛伦茨于1955年提出了有效位能是维持大气环流的主要能量(Lorenz, 1955), 解决了当时困惑国际气象学界的重大难题. 学过气象学的人都知道, 由于太阳在地球赤道的加热作用, 空气会在赤道地区上升, 副热带地区下沉, 形成所谓的Hadley环流. 而我们知道在中高纬度地区, 大气环流主要是以纬向(zonal)环流为主, 由于大气中存在强烈的摩擦作用, 纬向环流最终将被耗散掉, 是什么原因导致纬向环流得以维持的呢? 当时大气环流的能量来源问题一直未得到解决. 经过多年的探索, 他发现非绝热加热产生的内能或势能通过有效位能转化为动能是维持大气环流的主要原因, 由此提出了有效位能的概念, 并建立大气环流的能量学.

又如洛伦茨1963年提出的混沌理论(Lorenz, 1963), 是他的运气加洞察力的体现, 同时也是他长期积累的结果, 这在他1993年出版的《混沌的本质》(*The Essence of Chaos*)一书中有详细的描述. 洛伦茨教授在他提出混沌理论之前长期从事天气预报的工作, 他试图通过求解12个变量的大气运动方程来预

测天气; 然而, 他意外地发现, 即使初值差别不大, 其方程中有的变量也会出现明显的非周期性变化(或称缺乏周期性), 并确信小的差别的放大是缺乏周期性的原因. 由此他推测长期天气预报将是不可能的, 这对天气预报有重要的指导意义.

为了说明缺乏周期性, 洛伦茨一直试图用更加简单的方程组来代替他的12个变量模式, 但都失败了. 这个问题的转机出现在1961年洛伦茨拜访了Saltzman教授之后. 当时Saltzman教授正在研究非线性Benard对流, Saltzman教授通过谱展开的方法得到了一个7变量的非线性方程组. 在计算过程中, Saltzman教授感兴趣的是周期解, 他也得到了许多周期解, 但他向洛伦茨教授表明其方程中的一个解不能稳定下来. 洛伦茨教授仔细察看这7个变量的变化, 发现4个变量很快变得非常小, 而其他3个变量依然继续保持非周期性变化. 洛伦茨教授隐约感觉到这3个变量的方程组可以显示他期望的缺乏周期性. 洛伦茨回到MIT的第二天早晨, 他将仅保留3个变量的方程放入计算机里进行计算, 得到了与Saltzman已经发现的缺乏周期性同样的现象. 这3个变量的非线性方程就是著名的洛伦茨方程, 它是混沌理论第一个数学模型. 这个模型的提出也解决了困扰洛伦茨多年缺乏描述非周期性行为的数学模型.

虽然洛伦茨方程过于简单, 但是这为洛伦茨1969年提出天气预报存在内在可预报性上界打下了坚实的基础. 他将缺乏周期性的结果写成论文, 并投到*J. Atmos. Sci.*上, 原来的题目是“确定性的湍流”. *J.*

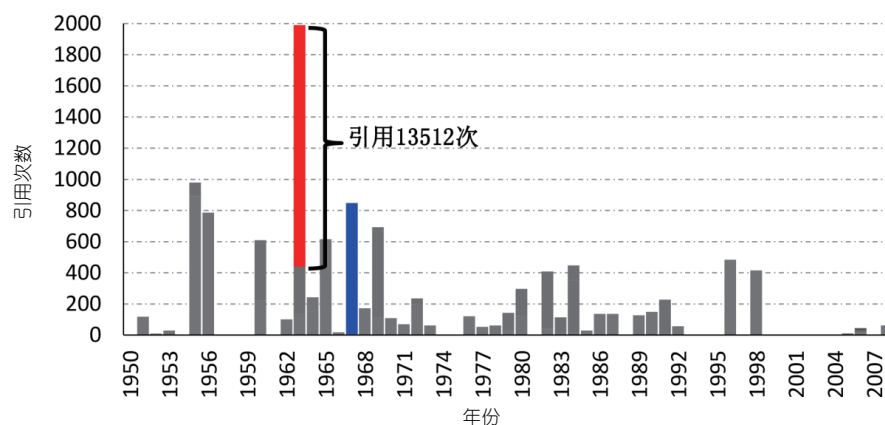


图2 1950~2008 年洛伦茨教授发表论文和主要专著被引用的次数

红色示“Deterministic non-periodic flow”的被引次数, 蓝色示洛伦茨教授1967年写的书 *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere* 的被引次数

Atmos. Sci. 杂志的编辑、大气环流模式的创始人N. Phillips教授认为该方程缺少通常与湍流性质有关的一些内容, 洛伦茨教授又将题目改为“确定性的非周期流”。在洛伦茨模型的基础上, 洛伦茨教授基于模型的解对初值的敏感性, 提出了所谓的“蝴蝶效应”(Lorenz, 1969)。

当然, 若没有洛伦茨那次访问以及他的直觉和洞察力, 混沌现象的发现可能会推迟若干年。洛伦茨教授的这个研究为今后非线性科学的大发展拉开了序幕。

洛伦茨教授一生发表的文章并不多, 然而他在几个方向都取得了重要突破。目前以他命名的理论、方程和方法包括: Lorenz Energy Box (洛伦茨能量框图)、Lorenz Equation (洛伦茨方程)、Lorenz Attractor (洛伦茨吸引子)、Lorenz-Hopf Bifurcation(洛伦茨-Hopf分叉)和Lorenz Butterfly Effect(洛伦茨蝴蝶效应)等等。

洛伦茨于1963年发表的文章“Deterministic non-periodic flow”引发了自然科学的一场革命, 由此诞生了非线性科学(数学和物理)。这篇文章是混沌理论的第一篇文章, 在随后几十年里引发了非线性科学的研究热潮, 也由此诞生了很多与非线性科学有关的期刊, 例如*Chaos*, *Soliton*, *Fractal and Chaos*, *Bifurcation and Chaos*, *Nonlinearity*, *Journal of Nonlinear Science*, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, *Nonlinear Dynamics*和*Physica D: Nonlinear Phenomena*等等。实际上他的混沌理论也影响到社会科学包括经济和股票等领域, 限于篇幅这里就不展开讨论了。

总结洛伦茨教授一生的科研工作, 可以归纳出他所取得的三个方面的主要成就:

(1) 提出了有效位能概念——洛伦茨能量框图(1955, 38岁)

在大气环流研究方面, 洛伦茨于1955年发表的文章“Available potential energy and the maintenance of the general circulation”提出了有效位能的概念(Lorenz, 1955), 使有效位能成为大气环流研究中的经典概念, 其能量框图被称为洛伦茨能量框图, 如图3所示。

从图3可以看出, 通过非绝热加热可以产生位能和内能, 这就是所谓的有效位能, 然后通过斜压运动转换成大气运动的动能, 来维持平均环流。该文章发表后目前引用次数为900余次(图4)。从图4可以发现, 这篇文章从1955年发表到2000年这35年里引用次数一直保持一个平稳的趋势, 到2006年以后, 这篇的引用次数出现明显的上升趋势。

(2) 提出混沌理论(1963, 46岁)

1963年洛伦茨发表在*J. Atmos. Sci.*上的论文“Deterministic nonperiodic flow”被认为是研究非线性混沌问题的第一篇论文, 它开创了混沌理论研究的里程碑(Lorenz, 1963)。他发现的“混沌理论”颇有

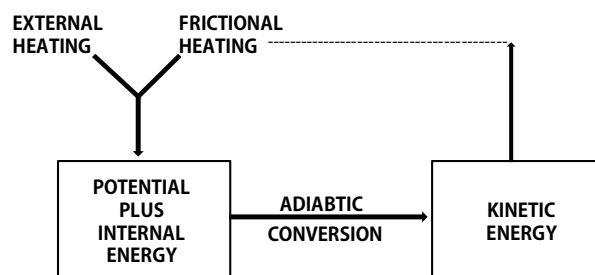


图3 洛伦茨的能量框图

它描述了各种能量之间的转换(Lorenz, 1955)

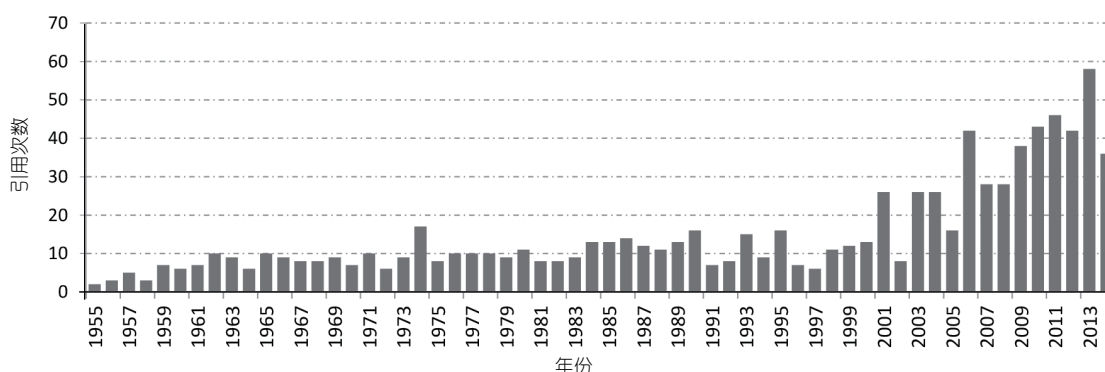


图4 洛伦茨1955年发表的文章“Available potential energy and the maintenance of the general circulation”逐年引用次数的变化

戏剧性,也可以算是再“混沌沌沌”中发现的. 1961年冬天,洛伦茨在使用电脑程序计算他所设计的模拟大气对流的数学模型时,发现初值有微小的不同会造成最后的结果完全不同,即两次计算的相似性完全消失了. 同时他发现变量的长期变化会出现非周期行为. 由此他于1963年基于Saltzman的对流模型提出混沌理论的第一个理论模型,即洛伦茨方程:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y-x), \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho-y)-z, \\ \frac{dz}{dt} &= xy-\beta z,\end{aligned}$$

式中, σ 是Prandtl数, ρ 是Rayleigh数, β 是一个常数. 取不同的初值和参数,可以得到洛伦茨方程的非周期解,即混沌解,这改变了Laplace以来人们的传统认识(确定论),即对于任何一个运动方程,只要给定初值就可以预测将来. 通过画出它的相轨线图,可以得到洛伦茨方程的吸引子结构,这就是所谓的洛伦茨吸引子(Lorenz Attractor),它的形状类似一个蝴蝶且它对初值极其敏感. 也就是说,如果青岛地区存在一个蝴蝶引起的小扰动,也可能会引起美国纽约地区的狂风暴雨,这种效应称为洛伦茨蝴蝶效应(Lorenz Butterfly Effect),如图5所示. 而方程中的混沌解是通过倍周期分叉而形成的,这种分叉称为Lorenz-Hopf分叉(bifurcation).

这篇文章发表后,十年时间里没得到人们的关注和引用,这可以从图6中该文章引用次数的逐年分布中可以看出. 这篇文章直到1975年以后才得到人

们的广泛关注和引用,引用次数呈指数增长. 特别是在2007年以后,每年该文章的引用在700~1000次. 因此一篇文章是否是经典可以从引用次数的逐年分布得到说明. 到目前为止,这篇文章被引用了13500次,仅2013年一年的引用次数就达987次.

(3) 提出天气可预报性的上限(1969, 52岁)

洛伦茨于1969年在“The predictability of a flow which possesses many scales of motion”一文中提出了逐日的天气预报存在内在可预报性上界(Intrinsic predictability limit)在两周左右(Lorenz, 1969). 他利用正压准地转涡度方程,考察初始误差的发展,发现误差的空间尺度越小,随时间的增长率越快,随着时间增加天气尺度的信号会出现不可接受的预报误差,因而预报时效存在上限. Leith等(1972)进一步验证他的工作,使得大气科学界普遍接受了下述结论:对于逐日的天气系统,天气系统的预报上限一般是两周左右.

美国大气科学研究中心的科学家们(Tribbia和Baumhefner, 2004)使用美国国家大气研究中心(NCAR)

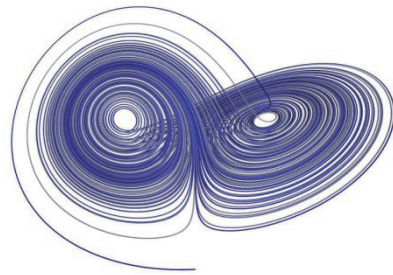


图5 洛伦茨方程中表示奇怪吸引子的相轨线图

引自 <http://royalsocietypublishing.org/content/369/1956/4705>

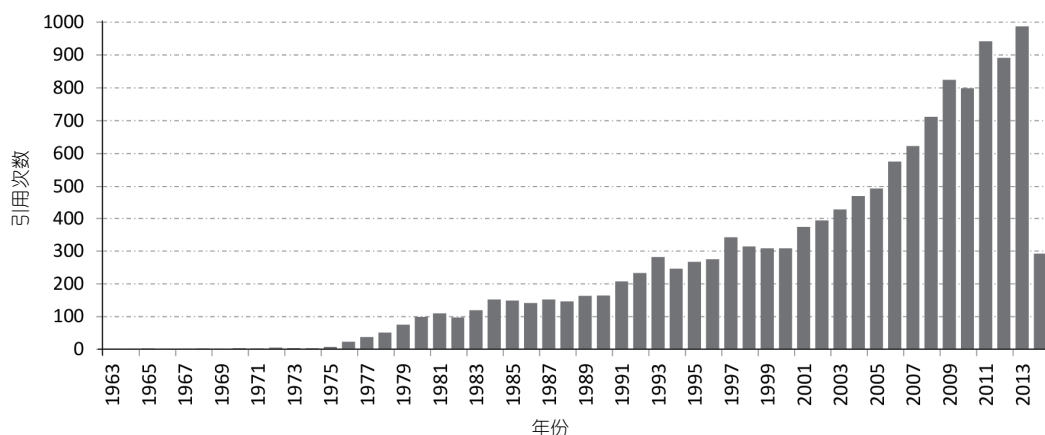


图6 洛伦茨1963年发表的文章“Deterministic non-periodic flow”逐年引用次数的变化

的Community Climate Model Version 3 (CCM3)模式与美国国家环境预报中心(NCEP)的资料,使用当时最先进的计算机进行了验证,结果发现洛伦茨的结论仍然成立.

从图7可以发现,“The predictability of a flow which possesses many scales of motion”一文在1995年以后引用次数有大幅度增加的趋势,这再一次说明经典性论文会有长久的生命力. 到目前为止,这篇文章的引用次数达700余次.

3 洛伦茨教授所获得的奖励和荣誉

由于洛伦茨教授对大气科学领域的贡献,他获得了许多奖励和荣誉.

(1) 奖励

1969年获美国气象学会Rossby奖(Carl Gustaf Rossby Research Medal, American Meteorological Society); 1973年获英国皇家气象学会西蒙斯纪念金奖(Symons Memorial Gold Medal, Royal Meteorological Society); 1983年获瑞典皇家科学院克拉福德奖(Crafoord Prize, Royal Swedish Academy of Sciences); 1991年获京都地球与行星领域基础科学奖(Kyoto Prize); 2004年获荷兰皇家艺术与科学院巴罗特奖(Buys Ballot Medal); 2004年获俄罗斯罗蒙诺索夫金质奖章(Lomonosov Gold Medal).

(2) 学术荣誉

1975年当选美国国家科学院院士(Fellow, National Academy of Sciences of United States); 1981年当选挪威科学与文学学院院士(Member, Norwegian Academy of Science and Letters); 1984年当选英国皇家气象学会

荣誉会员(Honorary Member, Royal Meteorological Society).

4 研究特色

洛伦茨教授的研究不仅具有前瞻性,而且具有很强的学科交叉性.

(1) 前瞻性

洛伦茨教授的研究具有很高的前瞻性. 在上世纪60~70年代人们还没有关注全球气候变化时,他已开始将全球气候变化作为一个数学问题来研究(见Lorenz, 1970). 他所提出的混沌理论模型超越了时代,论文发表10多年后才被大家所关注和接受,并引发了非线性科学的大发展.

(2) 学科交叉性

洛伦茨教授的研究学科跨度大,他不仅在大气动力学和气候动力学开展研究工作,而且也从事非线性数学和物理方面的研究. 他发表论文的期刊不仅包括大气科学类,而且包括*Physica D*和*Journal of Statistical Physics*等数学、物理学期刊.

5 几点感悟和启示

通过对洛伦茨一生成就的解读,我们可以得到以下几点感悟和启示:

(1) 要有坚实的数理功底. 对于大气科学等数理基础较强的学科来讲,要取得重大科研成果是需要坚实的数理功底的,如果洛伦茨没有在大学和研究生期间主修过数学,也许他很难取得伟大的成就.

(2) 要有坚持不懈的精神. 科研是一种长期行

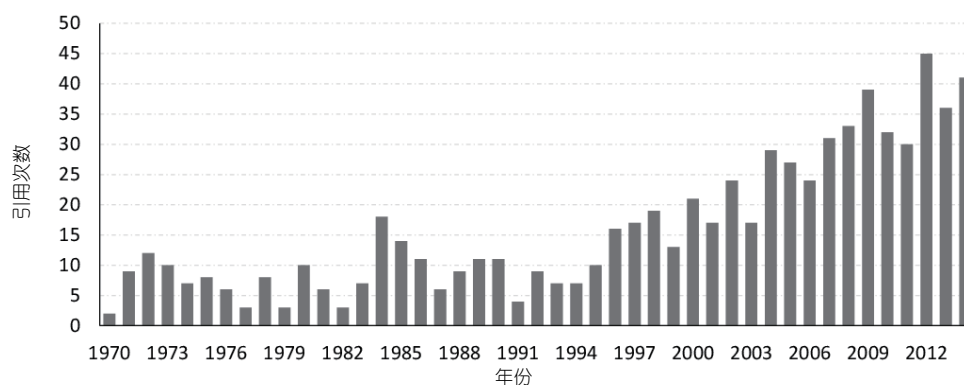


图7 洛伦茨1969年发表的论文“The predictability of a flow which possesses many scales of motion”逐年引用次数的变化

为,需要坚持不懈的努力.洛伦茨33岁发表第一篇文章,到2008年91岁去世始终坚持在科研的第一线,科研工作时长达58年.

(3) 要有强烈的兴趣.对科学研究要有浓厚的兴趣,不要计较一时的得失,以兴趣为主的科研才有长久的生命力.洛伦茨一生的科研就是最好的注释.

(4) 以质量为主,数量为辅.论文数量和发表的期刊并不能代表科研质量,要提倡出精品.洛伦茨教授在58年间共表文章61篇(另一位气象大师J. G. Charney一生的论文也不超过50篇).

(5) 研究工作的重要性与期刊的高影响因子相关性不高.洛伦茨三个最重要的工作是发表在专业性刊物*Tellus*和*J. Atmos. Sci.*上,而不是影响因子更高的*Nature*和*Science*上.

(6) 敢于开垦新的研究领域.在洛伦茨教授1993年出版的《混沌的本质》一书中,说过一句意味深长的话.他指出:现在的年轻科学家急于得到赏识和奖励的最快的一个方法是去解决一个已知的问题.寻找这种赏识和奖励的人很少能有从事研究全新问题的激情.历史告诉我们,围绕着新问题的数量未被开发的领域,有时候正是解决老问题的钥匙.

(7) 有些重要发现与科研团队不存在必然的联系.洛伦茨教授所取得的重大成就主要是由他自己独立完成,很少与他人合作,这说明有些基础学科的重大成果与科研团队之间不存在必然的联系.在自然科学的基础研究方面,最重要的是让科学家聪明才智的能量达到极大的释放.在鼓励协作提倡团队精神的同时,应该允许一些科学家潜心“单干”.

(8) 在人才建设方面不要以年龄界限划分科学家.洛伦茨教授提出的混沌理论是在他46岁时,而他提出可预报性上界时则是52岁.洛伦茨教授的例子

告诉我们,一个人要取得重要的成就除了靠机遇和运气外,还要靠积累、直觉和洞察力.因此用年龄来划分是否给予科学家资助是不科学的.在经费资助上既要重视年轻科学家,也要重视中老年科学家.

(9) 要有耐心和信心.真正创新性的理论并不能马上得到大家认同,人们需要时间才能认知到它的真正价值(如孟德尔(Mendel)的遗传理论和洛伦茨的混沌理论),因此我们需要耐心.混沌理论在最初提出时并没有被人们所理解,前十年几乎没有被引用,直到十多年后它的价值才真正被认识.同时还必须有强大的信心:这主要来源于对所研究问题的深刻理解和认识.真如遗传学家孟德尔去世前对朋友所说的那样:我的世纪即将来临.这充分体现出研究者的一种强大的自信.

6 总结

通过以上的解读,获得如下一些启示:

(1) 科研工作最重要的是要去掉功利心,更多的是要有一个平常心.对科研工作要保持强烈的兴趣,始终把科研工作作为一种乐趣,而且要具有坚持不懈的精神(耐心),加上广博的知识、强大的数理功底和敏锐的洞察力,这才是取得重大成就的关键.

(2) 要敢于做超前的研究,不必计较一时的引用率 and 是否能得到承认.有时学者的研究在若干年后才会被认为是一个重大的进展,所以要鼓励学者去做超前研究.就目前我国学术环境来讲,做超前研究是我国学术界的致命弱点,目前的中国迫切需要引领科学新时代的科学家.

(3) 要鼓励出精品,而不是强调数量.洛伦茨教授所取得的成就恰恰给了我们一个最好的注解.

致谢 感谢主编郑永飞院士的热情鼓励和支持,同时也非常感谢肖贻青硕士在作者撰写本文时所提供的帮助.

参考文献

- Leith C E, Kraichnan R H. 1972. Predictability of turbulent flows. *J Atmos Sci*, 29: 1041–1058
- Lorenz E N. 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 7: 271–281
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 20: 130–141
- Lorenz E N. 1967. The nature and theory of the general circulation of atmosphere. *World Meteorological Organ.* 218
- Lorenz E N. 1969. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21: 1–19
- Lorenz E N. 1970. Climatic change as a mathematical problem. *J Appl Meteorol*, 9: 325–329
- Lorenz E N. 1993. *The Essence of Chaos*. Seattle: University of Washington Press. 227
- Tribbia J J, Baumhefner D P. 2004. Scale interactions and atmospheric predictability: An updated perspective. *Mon Weather Rev*, 132: 703–713