

Lorenz混沌吸引子发现的方法论分析

戴新刚¹ 浦一芬² 汪萍³

(1 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 大气物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 简要回顾了20世纪中叶气象学家洛伦茨(E. N. Lorenz)研究混沌现象的历程, 梳理其中主要事件及其发生脉络, 剖析他的研究思路和科学方法特点, 绘制出他研究的技术路线图, 分析了科学方法论在其中的作用和意义。结果显示, 他发现的技术路线遵循科学方法论原则, 以质疑为起点, 经过猜想提出假设, 依靠数学物理建模, 最终用数值试验方法证实了猜想。其中简化与抽象的还原论思想贯穿始终。他的发现既有必然性, 也有偶然性, 体现了科学研究中偶然性与必然性的辩证关系, 可以作为方法论研究的一个范例, 对此深入剖析有助于大气科学的创新研究。

关键词: 创新, 方法论, Lorenz混沌吸引子, 可预报性, 技术路线图

引言

据说, 一只美丽蝴蝶在南半球的巴西煽动翅膀, 不久后有可能在美国德克萨斯引发一场龙卷风。这通常被称为“蝴蝶效应”^[1], 它源于洛伦茨(Lorenz)的混沌动力学研究^[2], 意味着大气对于小的扰动可能是不稳定的。例如, 两种大气状态仅在初始时刻存在一小的差别, 但随着时间的进程会不断被放大, 一段时间后会导导致完全不同的两种天气流型并伴有不一样的天气现象。这个问题显然同天气的可预报性有关。提为初值问题的可预报性与初始误差加倍的时间相关联, 这个时间越长, 可预报性就越大。按洛伦茨的通俗定义, 混沌是指对初始状态敏感的不规则或貌似随机的行为。一般非线性动力系统可以有混沌行为或存在混沌解, 混沌是和非周期联系在一起的。洛伦茨发现, 动力系统的演变缺乏周期性就意味着有限的可预报性。大气运动控制方程组是一个非线性耗散系统^[3], 其数值解是混沌的或非周期的, 解对初值极为敏感, 同实际大气运动的不规则行为非常相似, 说明大气运动缺乏可预报性。在初始场存在误差的条件下, 要仿照短期数值天气预报方法, 通过求解大气运动原始方程组的初值问题来制作长期天气预报几乎是不可能的。

洛伦茨的发现改变了人们对天气或气候可预报性的认识。自从1950年第一次成功的数值预报出现后^[4], 决定论方法即数值天气预报方法逐渐占据了统治地位, 科学家制作出越来越精细的天气或气候预测模式。同时, 为了提高预报精度设计出多种资料同化方法以减少初值的误差。但决定论模式的可预报性期限仍然没有超过洛伦茨指出的2~3周的界限。另一方面, 动力

系统混沌解对初值的敏感性揭示出确定论系统内在的随机性, 从根本上否定了单纯决定论的预报方法, 理论上要求引入概率统计描述, 实现动力—统计结合^[5]。目前天气与气候的预报已经从单一初值、单一模式的预报转变为集合预报或多模式超级集合预报。为了减少初始场误差, 已经发展了基于动力模式的四维变分同化方法及考虑统计平均性质的集合卡尔曼滤波技术等。大量数值试验已经证实引入这些动力和统计描述在提高模式预报准确率、延长预报时效方面是有效的。

混沌理论的发现颠覆了许多传统的观念, 对自然科学和社会科学产生了意义深远的影响。著名科普作家克雷科^[6]甚至认为混沌理论是可以同相对论和量子力学比肩的20世纪物理学革命, 并且正促成整个现代知识体系成为新科学。然而, 洛伦茨发现混沌吸引子的过程似乎具有偶然性和神秘感。回顾他的科学人生, 剖析其发现过程, 探索科学方法论在其中的作用无疑有着重要的科学价值。

1 天气预报困境——非周期

洛伦茨的发现源于对天气预报方法的检验。天气预报向来都是一个充满挑战性的课题。大气的不规则运动或非周期性给预报天气带来巨大困难。为了制作更准确的天气预报, 人们依据每日的天气图发展了天气学预报方法, 根据概率统计理论发展了天气或气候预报的统计学方法, 以及依据动力气象学发展了数值预报方法。简单地说, 天气学预报方法就是在每日天气图上寻找与天气现象有密切关系的大气特征结构或相干结构, 如气旋、反气旋、锋面等, 依据最近几张相继天气图观察它们的发生、发展、移动或消亡的规律, 据此推断未来可能发生的天气现象。统计预报方法是从历史观测记录中寻找统计规律, 如相关系数或回归方程等, 借此对未来天气气候做出统计推断或预测。数值预报方法是根据大气运动满足的物理定律或原理, 即大气控制运动方程组, 模拟实际大气运

收稿日期: 2011年6月21日; 修回日期: 2011年7月28日

第一作者: 戴新刚(1958—), Email: daixg@mail.iap.ac.cn

资助信息: 科技部创新方法工作专项项目

(2008IM020500), 国家自然科学基金

(40775048, 41075058)

动过程，借助高速计算机及数值方法一步一步向前积分，超越实际天气演变进程，计算出未来大气运动状况和相应的天气现象，从而制作出天气预报。

20世纪50年代中期，一个偶然的机，偏爱动力气象学的洛伦茨接手了一个统计天气预报项目，在对各种统计预报公式进行了一番调查研究后他发现“实际做的统计方法在数值意义上是重复天气预报员已经做了许多年的方法”，即统计预报方法同天气学方法类似，都是对未来天气形势或天气现象的线性外推估计^[1]。而著名数学家维纳^[7]的观点似乎表明线性统计方法也一样能够完成数值天气预报或天气学预报方法能做的事。当时洛伦茨感觉很难接受这个观点并设法选择一个确实不是线性类型的方程组去检验这个假设。考虑到大气运动的不规则性，他猜想从不同初始条件出发的大气动力方程组的解应该收敛到某个特殊状态集合——实际状态集合。这个集合显然是一个非周期解集，并且确信这样的解集存在。在寻找解集的分析表达式未果后不久，他转入数值求解的途径。

电子计算机出现后，著名气象学家Charney等^[4]借此制作出第一次成功的数值预报。随后，数值试验方法逐渐成为大气科学最具特色的试验手段，使古老的气象学从此步入了科学殿堂。洛伦茨一直是数值天气预报的拥趸。他想到：“可以用计算机算出持续的数值解，然后将这个数值解看成是实际天气资料的一个集合，并用标准方法去确定一组最佳线性统计预报公式”。通过比较统计预报公式制作的预报与计算机输出结果就可以检验统计预报的效果。为此，1956年他在同事建议下购置了一台小型计算机（Royal-McBee LGP-30）并开始学习编制计算程序。一开始他选择了描述大气运动的简化方程组，在进行了一番尝试后，决定使用大大简化的所谓滤波方程组，它是一个非线性大气运动方程组。他将14个方程压缩成仅有12个变量的方程组，再进行离散化和编程，然后放在计算机上进行数值求解。结果显示，一些方程参数的组合不是产生定常解就是产生周期解。检验结果表明，对于周期解线性统计模型可以做出满意的预报。他立即意识到对于他要进行的试验需要寻找非周期解。

对于非线性方程组，不同的参数组合有时会给出完全不同的数值解。在模式参数配置中，一般非周期解存在的参数组合范围很小，用尝试法或试错法寻找这样的参数范围或参数组合如同大海捞针，在当时的计算机水平下很难找到非周期解。洛伦茨很快想到应该选择同实际大气相近的模型和参数。他说：“我感到，我需要研究一个耗散系统。这样我保持了试验参

数的新的组合，并使外热源随纬度和经度变化，最后终于找到了长期要寻找的非周期状态”^[8]。现在看来他开始可能使用了绝热无摩擦方程组，或许就是基于他不久前发表的“最大简化动力方程组”^[9]。他立即用计算机输出的非周期数值解检验了线性回归方程的预报效果。他发现，“当我把标准的方法（线性回归方程）应用到这种新的‘资料’时，结果得到很不好线性预报，我终于感到我的怀疑得到了证实”。查看相关文献^[7]得知维纳文章中的线性可预测结论是针对平稳随机信号的，而洛伦茨模型的非周期数值解属于非平稳信号，因而线性统计预报不可能成功。

2 意外

科学探索中的“意外”很可能就是发现新事物的切入点，有时“副产品”可能是真正的科学发现。洛伦茨不仅擅长逻辑思维，也喜欢形象思维和细致地观察。在进行线性统计模型有效性检验的过程中，他偶然地发现了数值解的奇异现象。他不满足于只获得非周期解的输出数据，完成自己承担的研究项目，而是设法去考察数值积分中的细节并试图识别所发生的事件。起初，他将计算结果四舍五入，精确到小数点后三位打印输出。为了直观起见，他改用类似绘图式的输出方式，观察不断打印出的解曲线中“事件”的变化并尝试做出外推预报。接着偶然的事件发生了：“为了更详细地检查发生了什么，我决定重复某些计算。我停止了计算机计算，键入一行数，它们是前不久（注意不是最后一次输出）已经打印出来的模拟数值，然后再重新让计算机计算”。意外的是“打印出的数值怎么也不像老的数值”。因为在时间上新的打印输出存在与老的输出重叠的部分。他用了排除法试图找出“错误”的原因。“我决定看一看错误到底发生在什么地方，……，我发现，虽然新的计算初值重复了老的值，但不久以后，数值在小数点后最后一位上差一个，接着是几个单位，然后数值又在倒数第二位小数上有了不同，最后又在前面一位小数上有了不同。事实上这种不同大致总是每4天左右增加1倍。一直到2个月，新的输出和原输出完全不相似了。这就足以告诉我们发生了什么事：如果我键入的并不正好是原来的数值，而是键入打印输出结果的四舍五入值，那么这种初始的舍入误差是故障的真正原因，这种误差被不断放大，直到它们主宰了方程的解”。这就是上文所说的混沌解对初值的敏感性。他确信这种小差别的放大是缺乏周期性的原因，并据此推测长期天气预报不可能。因为气象观测的精度有限，初始场误差不可能完全消除。

3 奇怪吸引子

机遇对于一个人的科学生涯是可遇不可求的。李政道^[10]在回忆自己的成功之路时曾感叹道：“机遇也许是最重要的；但从它的本质来说，也是最难驾驭的。”现在看来，洛伦茨1950年代末在求12个变量简化大气运动方程组非周期数值解时已经找到了一个奇怪吸引子，只不过系统不够简化，变量数目较多，不容易看清吸引子的几何特征。他需要更加简化的模型以便观测其特征和属性。当时他试图对12个变量方程组做进一步简化，但未获成功。直到20多年后才找到了简化方法^[11]。1961年“幸运之神”降临了。洛伦茨在拜访旅行者天气中心的赛尔兹曼（B.Salzmann）时，了解到他的液体热对流方程组只有7个变量，比他本人先前导出的12变量模式简单。一个重要的现象是，在赛尔兹曼模式的数值解中有几个变量在时间积分中不能稳定下来。洛伦茨检查发现，其中有4个变量很快变得很小，只剩3个变量继续保持明显变化。这启发他可以将方程组进一步缩减成3个变量的模式。这就是后来著名的洛伦茨方程。数值积分显示3个变量的方程组同样给出了赛尔兹曼模式的非周期解^[1]。他惊喜地说到：“这就是我们长期寻找的系统，我已经毫不怀疑它是存在的”。“我还想办法实现了能直接观看吸引子的长期愿望”。他在相空间绘制出了吸引子的图像，看起来很像一只飞舞的蝴蝶，存在奇妙的几何结构。数学中的吸引子存在于相空间，是微分方程描述运动轨迹最终收敛其上的极限集合类型，如不动点或极限环等。一个耗散系统的吸引子是指不属于任何更大极限集且无轨道由其发出的极限集。通常，混沌吸引子具有分数维，例如Lorenz吸引子的豪斯道夫维数为2.06^[12]。

4 简化与抽象

简化是科学研究常用的一种方法，是进行抽象的前提之一。从科学方法论看简化方法，亦即李政道所称的“简化归纳法”，属于还原论。洛伦茨于1960年发表了《最大简化大气运动方程组》一文，显示出他科学研究的风格和方法论特点，即寻找所研究问题的最简模式。受大气运动非周期性和动力气象学的启发，他直觉地认为大气控制运动方程组或简化模式应该存在非周期解，其通解构成一个解集。实际大气运动问题非常复杂，影响因素众多，为了抓住主要矛盾的主要方面必须进行简化。1960年代初，他将大气运动方程组简化为14个变量的低谱模式，后又压缩成12个变量的方程组并求出了非周期数值解。但对12个变量方程组做进一步简化时没有成功。后来借助赛尔兹

曼方程组及其积分性质才最终得到3个变量的Lorenz模型。

抽象是典型的数学思维方法之一，抽象是为了探究问题的本质。洛伦茨本来就是学数学出身，曾经在美国著名数学家伯克霍夫指导下攻读数学学位。他本人自称是“专业气象学家和业余数学家”。他擅长数学抽象，在完成了寻找非周期解和线性统计预报检验项目后仍继续深入他的研究。他跳出具体问题的框框，转而研究微分方程非周期解的本质问题。这一次他的数学背景帮了忙。他说到：“这三个方程并不能非常好地描述实际对流运动。但是对我的目的，这并不重要。作为一个数学的抽象，这个方程组说明，一个确定性的系统能够以最简单的方式表现出非周期的形态”。他认为混沌吸引子几乎代表了微分方程的通解。这就是他当学生时曾经猜到的“方程组中的各种解必须收敛到一个特殊的状态集合”。那时他误认为这个集合可以用解析形式表示出来，并进行了不成功的尝试。可见抽象是科学研究深入和创新的途径之一。正如李政道所言：“科学对自然界的现象进行新的准确的抽象，这抽象的阐述越简单，应用就越广泛，科学就越深刻”^[13]。

5 偶然性与必然性

洛伦茨混沌吸引子的发现既有偶然性，也有必然性。他感慨到，“无论如何我是很幸运的”。因为不知为什么作为气象学家的赛尔兹曼鬼使神差般地选择了10作为模式中的普朗特（Prantl）数——流体粘滞系数与热传导系数之比。这是针对液体水的，而对于空气，这个数应该是1。但若用1，模式只能得到周期解，根本发现不了非周期解。对此，他道出：“因此或许我就绝不会有理由想到从原来的7个方程去提取成3个了”，从而也发现不了这个貌似蝴蝶的混沌吸引子。这个案例说明偶然性在科学发现中的重要性。这种机遇可遇不可求，展示了科学发现的“神秘”一面。科学发现中的偶然性与必然性的关系无疑是值得探讨的。

洛伦茨混沌吸引子的发现既有必然性也有偶然性。爱因斯坦曾说，“机遇偏爱有准备的头脑”。展示了科学发现中必然性与偶然性的关系。偶然性与机遇有关，机遇往往可遇不可求。但“尽管机遇不可能预定，但它的出现几率至少在统计的意义上却可以人为增加”^[10]。洛伦茨发现混沌过程存在这样几个机遇或偶然因素：

(1) “二战”中断了他的数学学业，他转而参加了天气预报员培训，由此进入气象学领域；

(2) Thomas Malone辞职，洛伦茨被要求填补空

缺并接手他负责的统计天气预报项目，于是引出了寻找非周期解的过程；

(3) 12个变量模式积分中的偶然停机和在重新计算中输入的舍入近似，从而发现了解对初值的敏感性，并猜测起因于解的非周期性；

(4) 气象学家赛尔兹曼竟然构造了水的热对流模型，洛伦茨的偶然造访并得到该模型，从而简化得出三个变量的模型，发现了混沌吸引子。

不难推测，如果没有第二次世界大战，洛伦茨不大可能成为一名气象学家；如果他不接手统计预报项目也就不会激起他寻找非周期解的热情；如果对12个变量简化数值模式积分中不停机检查，在重新输入时不做四舍五入近似，也不从先前输出一段的某个数字开始重新积分，他就不会发现解对初值的敏感依赖性；如果没有得到赛尔兹曼的液体对流方程组，他也不会想到要简化成3个变量方程组并发现混沌吸引子。当然历史没有“如果”。在这里不难看出，必然性通过一系列偶然性展现出来^[14]。

必然性在这里可以理解为时代背景和“有准备的头脑”。计算机的发明和数值天气预报的成功为洛伦茨简化大气运动模式和寻求非周期数值解提供了强有力的工具和必要的启发。他本人的知识积累和科学素养在识别应遵循的前进道路中起了重要作用。正是电子计算机的发明和动力气象学的发展才使得科学家克服了制作数值天气预报的巨大计算量，在1950年完成了第一次成功的天气预报。1956年菲利普斯^[15]对大气环流基本状况的成功模拟也为洛伦茨简化大气模式^[16]的构造提供了成功的范例和启发。洛伦茨购置了计算机才有可能亲自动手求数值解并发现非周期解及混沌吸引子。因此，当时科学发展的整体水平为洛伦茨发现混沌吸引子提供了必要的背景知识和工具。

混沌的发现过程体现了科学发现历程中必然性与偶然性的统一。1892年庞加莱在研究天体运动三体问题时首次发现了混沌现象^[17]，70年后（1963年）洛伦茨发现混沌吸引子，10多年后李天岩和约克发表了著名的文章“周期3意味着混沌”^[18]，随后出现了混沌研究的热潮^[12]。在这个过程中还有许多科学家在求解非线性微分方程或迭代运算中发现了混沌现象或混沌吸引子^[14]，说明混沌的发现是一个必然的过程。与微积分^[19]和量子力学的发现^[20, 21]类似，即使Lorenz没有发现混沌吸引子，其他人也会发现。但历史选择了洛伦茨，只不过是他的“机遇”更好些。连洛伦茨本人也在日本京都奖（Kyoto price）获奖演说中诙谐地说到：“曾经有一个会议主办方介绍我时称我为“可预报性先生”，……，可是如果当时没有输入错误的数

字（四舍五入近似），天知道我会不会卷入到可预报性问题的研究”。显然，偶然性可以看成是一个选择机制，是它决定了谁，在什么时间成为重大科学发现的第一人。不过，“尽管机遇不可能预测，但它出现的几率至少在统计意义上却可以人为增加”^[10]。在混沌发现的历程中不难看出偶然性与必然性的辩证关系：偶然性镶嵌在必然性中，必然性通过偶然性表现出来，偶然性又转化为新的必然性，如此循环往复，推动科学向前发展。

6 技术路线图

Lorenz混沌吸引子的发现过程是大气科学原始创新的一个范例，也必将成为科学方法论研究的经典案例之一。Lorenz混沌吸引子发现的技术路线图概括如图1。

7 结语

洛伦茨发现混沌吸引子有着重要的方法论意义。其发现历程可以简化为质疑—猜想—验证。他首先质疑维纳的观点，即线性统计预报可能不适用于实际天气预报。接着他猜想大气运动方程组的解可能收敛到一个特殊的解集上。这个猜想就是一个假设，在科学研究中十分重要。好的猜想往往能指出科学研究的方向^[22]。洛伦茨检验这个假设的方法遵循了西方传统的科学研究方法论。科学研究方法源于古希腊哲学，包括：自然主义、还原论和形式逻辑等，在伽利略（J. G. Galilei）引入实验，即实证主义后成为科学方法论。自然主义不必说，洛伦茨的简化和抽象分析方法源于还原论，他的研究思路或推理过程符合形式逻辑并最终用数值试验证实了他的猜想，揭开了20世纪混沌科学研究热潮的帷幕。

科学方法论是科学研究中必须遵循的原则，否则不能称其为科学。但在具体问题的研究中必须发展相应的方法。庞加莱认为，要进行创造性研究首先需要创造方法^[23]。洛伦茨研究中最主要的问题是要发展一种简化方法，得到简化模型。第一步是选择合适的大气运动简化方程组。他在1960年发表的两篇论文^[9, 16]已经从物理上解决了这个问题，即寻找最大简化方程组以及在保持能量及其转换性质条件下的大气简化模式。后者可能参考了Phillips的斜压两层模式^[15]。第二步是将方程组离散化并进一步简化。他用双重傅立叶级数离散化动力方程组并进行了恰当的截断，得到了12个变量的常微分方程组或称“低阶谱模式”，并求出了非周期解。因此，洛伦茨可能是大气科学领域中率先使用伽辽金（Galerkin）方法^[24]求解微分方程的人之一。不过他当时并没找到进一步简化自己12个变量方程组的方法，直到1983年才最终找到一种近似的

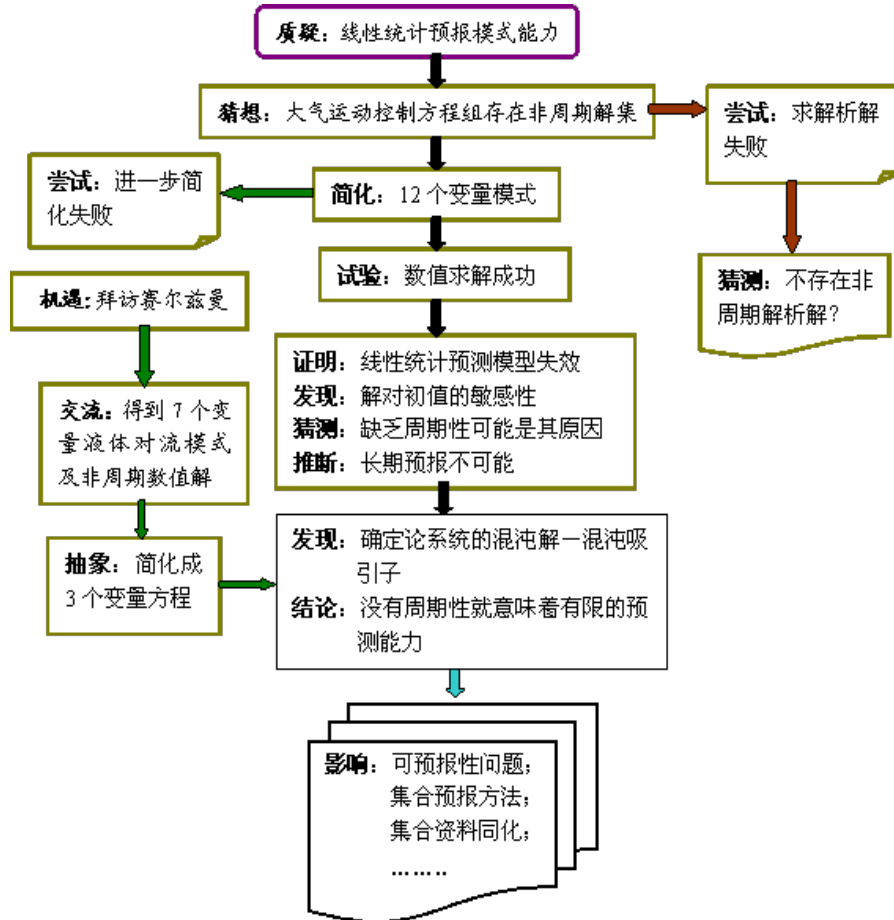


图1 Lorenz混沌吸引子发现的技术路线图

简化方法。不过他从赛尔兹曼模式的数值解中看出了简化方程组的可能性，从而得到了Lorenz方程组，其解保持了原模式解的主要特征。从科学方法论看，洛伦茨猜想或假设给出了正确的研究方向，还原论是他研究的指导思想，发展数学或物理的简化方法与数学抽象结合是他成功的关键。

致谢：本研究得到符淙斌院士和丑纪范院士指导。

参考文献

- [1] 洛伦兹 E N. 混沌的本质. 刘式达, 等译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [2] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130-141.
- [3] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [4] Charney J G, Fjørtoft R, von Neumann J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 1950, 2(4):237-254.
- [5] 丑纪范. 为什么要动力—统计相结合? *高原气象*, 1986, 5(4): 367-372.
- [6] Gleick J. 混沌：开创新科学. 张淑誉译. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [7] Wiener N. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. Cambridge: Technology Press, New York: John Wiley and Sons, 1947.
- [8] Lorenz E N. The statistical prediction of solutions of dynamic equations. *Proc. Internat. Sympos. Numerical Weather Prediction*, Tokyo, 1962: 629-635.
- [9] Lorenz E N. Maximum simplification of the dynamic equations. *Tellus*, 1960, 12: 243-254.
- [10] 李政道. 往事回忆：早期芝加哥的岁月和宇称不守恒. 李政道文选. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
- [11] Lorenz E N. Irregularity: A fundamental property of the atmosphere. Crafoord Prize Lecture, presented at the Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, September 28, 1983. *Tellus*, 1984, 36A:98-110.
- [12] 舒斯特 H G. 混沌学引论. 朱鋆雄, 等译, 成都: 四川教育出版社, 2010.
- [13] 李政道. 让科学在中国大地生根. *科学文化评论*, 2004, 1(1):12-14.
- [14] 尼科里斯, 普利高津. 探索复杂性. 罗久里, 等译, 成都: 四川教育出版社, 1986.
- [15] Phillips N. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1956, 82: 123-164.
- [16] Lorenz E N. Energy and numerical weather prediction. *Tellus*, 1960, 12:364-373.
- [17] Poincaré H. *Les méthodes nouvelle de la Mécanique Céleste*. Paris: Gauthiers-Villar, 1892, 8: 206-214.
- [18] Li T Y, York J A. Period three implies chaos. *Amer Math Monthly*, 1975, 82(10): 985-992.
- [19] Dunham W. 微积分的历程——从牛顿到勒贝格. 李伯民, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [20] 赛格雷 E. 从X射线到夸克——近代物理学家和他们的发现. 夏孝勇, 等译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984.
- [21] Blaedel N. *Harmony and Unity: The Life of Niels Bohr*. Madison: Science Tech Publishers, Springer-Verlag, 1988.
- [22] 李心灿, 高隆昌, 邹建成等. 当代数学精英. 上海: 上海科技教育出版社, 2009.
- [23] 彭加勒 H. 科学与假设. 李醒民译, 北京: 商务印书馆, 2006.
- [24] 亚历山大洛夫 A И. 数学——它的内容、方法和意义(第二卷). 秦元勋等译. 北京: 科学出版社, 1986.

Assessing the Methodology for Finding Lorenz Chaos Attractor

Dai Xingang¹, PuYifen², Wang Ping³

(1 RCE-TEA, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029 2 Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029 3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

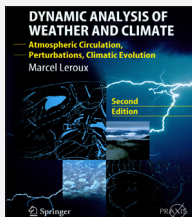
Abstract: A first chaos attractor was found in Lorenz's study at the beginning of 1960s. This paper tries to make an analysis on the methods used in his innovation. At first, we briefly reviewed the story of his study and then followed the major events which occurred afterwards and methods used in his study, and finally drew a technology roadmap for his innovation journey. It turns out that his technology road fits the philosophy of general methodology in scientific community, of which simplification or abstraction is the dominant method resulting from reductionism. He started from a question about the predictability of linear regression equation in weather forecasting and then developed a simplified model based on mathematics and physics. The numerical solution of the model shows to be irregular, with which he proved his suspicion. This case also shows the importance of the chanciness in connection with inevitability on dialecticism for the innovation and can be regarded as a classical one for methodology study. The insight of the case is evidently helpful to innovation in atmospheric sciences.

Key words: innovation, methodology, Lorenz chaos abstractor, predictability, technology roadmap

新书架

NEW BOOK

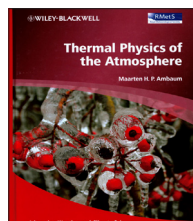
感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或据索书号借阅



Dynamic Analysis of Weather and Climate: Atmospheric Circulation, Perturbations, Climatic Evolution (Second Edition)

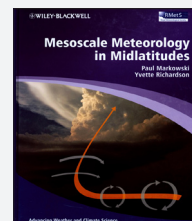
《天气与气候动力学分析: 大气环流, 微扰与气候演变(第二版)》

编著者: Marcel Leroux
出版者: Praxis Publishing
Chichester, UK.
出版年: 2010



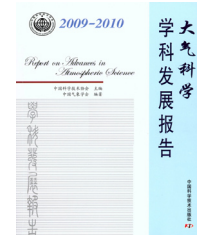
Thermal Physics of the Atmosphere
《大气热物理学》

编著者: Maarten H.P. Ambaum
出版者: Wiley-Blackwell
A John Wiley & Sons, Ltd., Publication
出版年: 2010



Mesoscale Meteorology in Midlatitudes
《中纬度中尺度气象学》

编著者: Paul Markowski 等
出版者: Wiley-blackwell,
A John Wiley & Sons
Ltd., Publication
出版年: 2010



《大气科学学科发展报告》

编著者: 中国气象学会
出版者: 中国科学技术出版社
出版年: 2010
索书号: P4-1/28/2009-2010



《气候系统监测诊断年报 (2009年)》

编著者: 中国气象局
国家气候中心
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: P468/9/2009



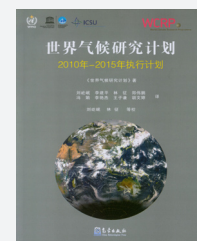
《中国海洋发展报告》

编著者: 高之国主编,
国家海洋局海洋发展战略研究所课题组编
出版者: 海洋出版社
出版年: 2010
索书号: P74/10/2010



《美国流域水环境保护规划手册》

编著者: 美国环境保护局
译者: 李云生, 孙娟,
吴悦颖等
出版者: 中国环境科学出版社
出版年: 2010
索书号: X321.7-62/1



《世界气候研究计划: 2010—2015年执行计划》

编著者: 《世界气候研究计划》
译者: 刘屹岷等
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: P46-110.2/2