

# 天气和气候的可预报性

丑纪范<sup>1,2</sup>

(1 兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; 2 中国气象局培训中心, 北京 100081)

**摘要:** 从理论和实际角度描述了天气和气候可预报性的认识过程。天气和气候的可预报性, 特别是10~30天预报依赖于空间和时间尺度, 预报包含了可预报分量和混沌分量。可预报性研究的最大挑战, 来自气象极端事件的可预报性问题。

**关键词:** 可预报性, 天气和气候

在人类与自然的长期共生共存的历史长河中, 人们一直梦想着有朝一日能够准确预测未来, 从而进一步掌握自己的命运, 尤其是对于与经济社会发展及人们日常生活密切相关的天气气候的预测和预报, 更是人们每时每刻都关注的对象。随着科学技术的不断进步, 气象科学已经获得长足进展, 我们已经可以在一定程度上比较准确地预测未来的天气变化, 比如未来3~5天的天气预报的可信度是相当高的。但随着经济社会的发展, 人们对天气预报的要求越来越高, 目前的天气预报水平已远远满足不了日益增长的需求, 决策者和公众迫切需要更准确和更长时期的天气预报。

要解决这些问题, 首先要从理论上解决天气在何种条件下是可以准确预报的, 是否存在可预报的时间上限, 进而再从实践上去探索具体的预报方法。显然, 这是一个从社会需要提出的实用性和技术性的科学问题, 其一起步就必然面临着基础科学理论问题——天气和气候的可预报性。现在气象学家有一个共识, 逐日的天气预报不能超过两周。这样一来, 两周以上的预报(月、季、年乃至数十年)就全部都会首先面临着这个问题。当两周以上逐日的天气预报已不可能时, 能预报什么? 怎么预报? 实际上, 社会需求的月、季、年乃至数十年的天气和气候预报, 并非“科学难题”, “科学难题”应该是承前启后, 在可预见的将来有可能解决的问题。所以, 我们提出下面的“难题”: 预报未来10~30天的天气过程和特征的理论和方法。

为什么逐日的天气预报不能超过两周? 为什么天气预报不可能百分之百的准确?

可预报的前提是未来的状况现在已完全确定。但是世界的未来状况(包括天气和气候)确实有些方面是确定了的, 有些方面则是尚未确定的。针对确定的方面, 发展出了牛顿力学。拉普拉斯将牛顿哲学的决定论思想推到了巅峰, 他认为世界的未来是由已经发

生的事情决定了的, 只要知道了初始条件和它所服从的规律, 就可以预知今后的一切。数值天气预报就是基于这种观点建立起来的。可是对这种观点不乏置疑。1903年亨利·庞加莱在《科学与方法》一书中指出“即使自然规律完全为我们所掌握, 但无论如何我们却只能近似地知道初始条件, 我们未必能以同样近似程度预言后续状态, 初始条件的细小差别会酿成后者巨大的不同。准确的预言不再可能, 所发生的一切都成了偶然的事件。”20世纪40年代概率论的奠基人之一柯尔莫格洛夫、气象学家汤普生都有过类似的表述。然而, 这些并未引起科技界的关注。直至1963年美国气象学家洛伦茨发表了《确定性的非周期流》<sup>[1]</sup>一文, 才使得这个从确定论出发却走向了不确定、牛顿力学具有内在的随机性(混沌)与由此产生的可预报性问题引起了广泛的关注。这是因为洛伦茨不仅仅是定性的推论, 他还通过对三个变量的动力系统进行全面分析和数值计算, 定量地显示出确定论系统由于敏感地依赖于初始条件而走向了不确定, 即所谓的“蝴蝶效应”。更重要的是还由不确定出发又走向了确定, 一个非线性的强迫耗散系统(如大气)存在着向外源的非线性适应, 即在一定时间后, 不论何种初值都会演变成同一的“稳态”。这个“稳态”是非周期和对初值极端敏感的统一体, 是局部的发散性和全局稳定性的统一体, 具有无穷嵌套的自相似的复杂的分形结构等。与不确定的现象不同, 存在一个可预报时段, 在可预报时段内, 现象是可预报的。它的长期行为存在着总的统计特征, 由外源决定反而与初值无关<sup>[2]</sup>。所有这些的具体直观形象, 可以通过胞映射的概念和理论显现出来<sup>[3]</sup>, 并由此揭示出任何数值模式实际上是Markov链, 进而给出了“气候”、“可预报时段”等的精确的数学定义(图1、图2)。

当洛伦茨发现混沌的时候, 查尼等一大批气象学家正执行全球大气研究计划(GARP), 旨在将数值天气预报延长至两周。洛伦茨的发现使得查尼提出首先要解决两周的预报是否可能的问题。他提出大家

收稿日期: 2011年6月23日; 修回日期: 2011年7月28日

第一作者: 丑纪范(1934—)

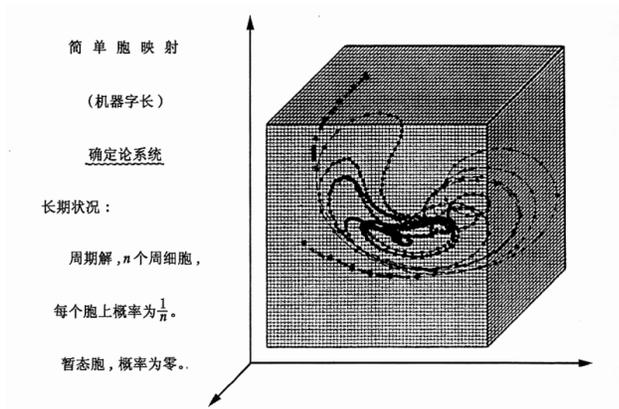


图1 简单胞映射

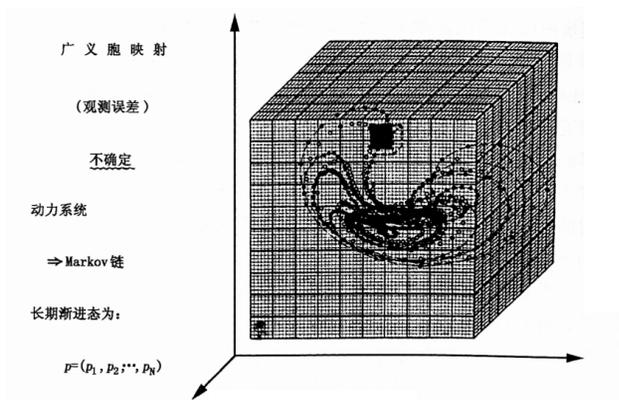


图2 广义胞映射

各自用自己的同一个模式，对两个差别相当于现在观测和分析误差的初始场进行积分，看多少天后两个解的差别超过了预报的允许误差。随后，进行了大量的数值试验，由于模式和初值不同，定量上说时限长度并不相同，平均说来逐日预报的理论上限为两周左右。这意味着逐日的天气预报不能超过两周。应该注意的是这里讨论的是理论的可预报性，即模式完美无缺（实际不是这样），预报误差仅仅来源于初值的不准确。可预报时段取决于初始误差的大小（观测和分析误差），误差的增长情况（误差增倍时间）和允许误差的大小（气候方差）。然而误差的增长率是与运动尺度有关的，尺度越小，误差增长率越大。影响局地天气的中小尺度运动，其可预报时段小于24小时，这使得天气预报（通常在24小时以上）不可能百分之百的准确。

混沌理论揭示出数值天气预报的技巧不仅仅像人们普遍认为的那样只取决于初值误差和模式误差，它还取决于初始误差的增长情况。当很小的初始误差增长到允许的大小时，初值的信息便丧失殆尽，这个期限就是可预报期限。然而，气象场的不同特征的误差增长情况是不同的，这就提出了如何定量研究误差增长和传播的规律，以及由此而产生的预报的不确定性

和可预报期限的问题。

洛伦茨在1965年提出了线性奇异向量理论，设想气象场的特征的演变（发展）可以用动力系统加以描述<sup>[4]</sup>，一个 $n$ 维动力系统

$$\frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{X}(t))$$

这里 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ， $\mathbf{F}$ 为 $n$ 维向量场，令 $\sigma(t) = \mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_0(t)$ 为与 $\mathbf{X}_0(t)$ 的偏差，则有

$$\frac{d\sigma}{dt} = \mathbf{J}(\mathbf{X})\sigma + \mathbf{G}(\mathbf{X}, \sigma)$$

其中 $\mathbf{J}(\mathbf{X})$ 为 $n \times n$ 的Jacobi矩阵， $\mathbf{G}(\mathbf{X}, \sigma)$ 为偏差的高阶非线性项，当初始扰动充分小、时间短时，可以将非线性项略去，从而消除了由非线性带来的困难。此时， $\sigma$ 为线性方程控制，由此，定义最快增长扰动（线性奇异向量），Lyapunov指数（初始扰动的平均增长率），对预报不确定性和预报时效进行定量研究。这被称为初始误差的增长的线性理论。

线性理论的缺陷是明显的，随着误差的很快增长，切线性方程不再适用。我国学者发展了非线性误差增长理论。在预报的不确定性方面，穆穆等提出了条件非线性最优扰动（CNOP）<sup>[5]</sup>，克服了国际上广泛使用的线性奇异向量（LSN）方法的局限性，CNOP是在一定误差范围内，在预报时刻对预报结果不确定性有最大影响的初始误差。国内外学者用CNOP方法，研究了ENSO可预报性、海洋热盐环流敏感性、台风目标观测以及湿大气的可预报性，揭示了CNOP的非线性特征以及其物理本质；王斌等基于集合投影方法，发展了计算CNOP的高效算法；CNOP在模式是完美的条件下，讨论了大气或者海洋或者海气耦合过程的误差增长，但是模式总是存在误差的，关于实际大气或海洋的情况如何，仍是有待研究和解决的问题。为了研究实际大气或海洋的情况，洛伦茨提出考察实际资料中初始相似发展演变的情况，但实践中找到符合要求的相似场是非常困难的。李建平等提出了非线性局部Lyapunov指数（NLLE）<sup>[6, 7]</sup>，克服了基于线性误差增长理论的Lyapunov指数的局限性，证明了非线性混沌系统相对误差随时间发展的“饱和定理”，提出同时考虑初始信息和初始演化信息来确定局部动力相似的方法。这样一来，可直接用观测资料定量估计实际大气（海洋）的不同变量的可预报期限。基于观测资料，李建平等用NLLE方法揭示了热带季节内振荡（MJO）以及天气和气候不同变量的可预报期限的时空分布，指出可预报性是一个局部概念，它随空间和时间变化。

上述这些研究虽然为可预报性理论的发展做出

了重要贡献，但依然需要开拓新的领域。莫宁指出：“确定可预报期限本身并不是一个建设性的课题（本身也不应该是目的），建设性地解决某个长时期的可预报性问题应该是指指出这时期中所能预报的气象场的特征”<sup>[8]</sup>，也就是两周以上，当逐日的天气预报已不可能时，那么能预报什么？怎么预报？因此，可预报性理论面临的问题是对于未来的时刻 $T$ ，如何将气象场一分为二，分解为可预报分量（对初值不敏感）和混沌分量（初值信息已丧失殆尽，但存在着由外强迫和可预报的稳定分量决定的与初值无关的统计特征）。然后，分别情况，区别对待，采用不同的预报方法。

值得注意的是对8~14天的逐日天气预报，目前数值模式向精细化发展，引入了愈来愈多的不可预报的中、小尺度混沌分量，它们对天气尺度的统计作用是否会比参数化的好，是否应该区分可预报分量和混沌分量而采取不同的预报方法是一个待研究的难题。

未来10~30天预报，如何确定可预报分量。对一个确定的数值模式（ $n$ 维动力系统），由初值积分到 $T$ 时刻（这里 $10\text{天}\leq T\leq 30\text{天}$ ）可视为一个非线性映射，

$$U(T)=M(U_0)(T), U(T)+u(T)=M(U_0+u_0)(T)$$

这里 $u(T)$ 为初值扰动 $u_0$ 的发展，构造目标泛函

$$J(U_0)=\|M(U_0+u_0)(T)-M(U_0)(T)\|$$

当 $\|u_0\|$ 足够小时它的切线性算子的最大特征值所对应的特征向量就是CNOP，现在反过来考虑其最小特征值（次小， $\dots$ ）可以找出对初值不敏感的分量，是值得探索的。不过这样得到的是该模式大气的可预报分量，至于实际大气的可预报分量如何得到是有待研究的难题。

预报由两部分组成，一部分是可预报分量（信息 $\sigma_A$ ），另一部分是混沌分量（噪音 $\sigma_n$ ），这就产生一个问题，这样的预报其应用价值如何评估？信噪比（ $\frac{\sigma_A}{\sigma_n}$ ）能否反映？如何计算？也都是有待解决的难题。

应该强调指出的是上述的工作都是理论的可预报性研究，即在模式准确，初始资料有误差的条件下，能在何种水平上预报天气和气候。然而可预报性研究早已在深度和广度上与日俱增，由理论的可预报性研究发展为实际的可预报性研究，即研究当前实际的数值预报结果的不确定性（即预报误差）产生的原因和机制，寻找减小不确定性的方法和途径。由可预报性理论引导产生的集合预报方法（初值集合、模式参数集合，多模式集合等）是近年来数值天气预报的

重大进展。实际的可预报性和集合预报都取得了大量成果，也提出了大量有待解决的难题。限于篇幅，难以详述，可参阅文献<sup>[9]</sup>。

在可预报性研究领域，真正的难题是气象极端事件的可预报性问题。对未来的气象状况，决策者和公众最想知道的并不是降水的偏多偏少，温度的偏高偏低，而是暮春三月，江南草长之时，未来汛期我国什么地区，什么时段防汛会非常紧张，或者旱情会非常严重（如果有的话）。这种对社会经济和人民生活有严重影响的小概率极端天气气候事件是否能提前预测？能提前预测的时间与该事件的时空尺度（影响范围和持续时间）是否有某种关系？用什么方法预测？这些都是待研究的难题。之所以说是真正的难题，是因为这些问题用现行的观念和方法难以解决，需要重大的创新。这主要是因为现行的方法与要解决的问题之间存在两大差别：一是现行方法是作为正向问题，预报出未来的全部情况（可能出现的情况的概率分布）。而极端事件的预报把问题集中在某一地区某一时段出现某种极端事件的可能性（概率）上，无需涉及这以外的气象情况的预测。二是现行方法是作为初值问题，做预报时依据的是某一时刻的气候系统的初始状况，而所要求的初值有的没有观测因而不得而知，有观测的也存在观测误差，由此导致预报的不确定性（转向概率）。更甚者，初始时刻的选取有任意性，不同初始时刻的同一预报结果可能差别很大。而极端事件的预报与此相比有本质的不同。做预报时依据的是现有的全部观测资料，是将它作为一个整体，一个信息源来考虑的。当应用海—陆—气—冰气候系统模式来探讨某种极端事件可能出现的概率时，本质是个倒向问题。笔者认为彭实戈院士创立的倒向随机微分方程理论提供了重要的启示和借鉴。由于涉及观念和方法的创新，所以才说它是可预报性研究领域的真正难题。

传说每当亚历山大的胜利捷报传回时，他的儿子就哀叹：“父王把什么都征服了，我还有什么可干咧！”，从事天气和气候的可预测性研究的后来者，却不可能有这种哀叹。因为在这个领域已解决的问题远没有待解决的难题多，众多的难题正在等待着有理想、有抱负、去功利化的创新型的人去探索和解决。勇敢的后来者，祝你们幸运！

#### 参考文献

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 131-141.
- [2] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [3] Chou J F. Predictability of the Atmosphere. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6(3): 335-346.
- [4] Kainay. 大气模式, 资料同化和可预报性. 蒲朝霞, 杨福全, 邓北胜,

- 等译. 北京: 气象出版社, 2005.
- [5] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2003, 10: 493-501.
- [6] 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 大气可预报性的回顾与展望——21世纪大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 2006.
- [7] Ding R, Li J. Nonlinear finite time Lyapunov exponent and predictability. *Physics Letters A*, 2007, 364: 396-400.
- [8] Monin A C. 天气预报——一个物理学的课题. 林本达, 王绍武译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [9] Palmer T, Hagedorn R. *Predictability of Weather and Climate*. New York: Cambridge University Press, 2006.

## Predictability of Weather and Climate

Chou Jifan<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The evolution of the understanding process for the predictability of the weather and climate is described both in the view of theory and practice. The predictability of weather and climate, especially for 10~30 d forecasting, depends on the spatial and temporal scales, and the forecasting includes predictable components as well as chaotic components. The biggest challenge in the study of predictability comes from the issue for meteorological extreme events.

**Key words:** predictability, weather and climate

### 会议信息

- ◆ 减少航空和航海排放影响会议 (Reducing the impact of emissions from aviation and shipping), 2011年9月9日, 英国, 爱丁堡 (<http://www.conference.tri-napier.org/conference-programme>)
- ◆ 气候系统数学学术会 (Mathematics of the Climate System Conference), 2011年9月12—15日, 英国, 里丁 ([http://www.ima.org.uk/conferences/conferences\\_calendar/mathematics\\_of\\_the\\_climate\\_system.cfm](http://www.ima.org.uk/conferences/conferences_calendar/mathematics_of_the_climate_system.cfm))
- ◆ 第11届EMS年会暨第10届欧洲应用气象学术会 (11<sup>th</sup> EMS Annual Meeting & 10<sup>th</sup> European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) 2011), 2011年9月12—16日, 德国, 柏林 (<http://meetingorganizer.copernicus.org/ems2011/sessionprogramme>)
- ◆ 第8届欧洲气候数据管理学术会议 (8<sup>th</sup> European Climate Data Management Workshop), 2011年10月12—14日, 英国, 爱丁堡 (<http://www.metoffice.gov.uk/conference/ecsn-workshop/>)
- ◆ 气象技术世界博览会 (Meteorological Technology World Expo), 2011年10月18—20日, 比利时, 布鲁塞尔 (<http://www.meteorologicaltechnologyworldexpo.com/>)
- ◆ 第七届NOAA GOES用户会议 (Seventh NOAA GOES Users Conference), 2011年10月20—21日, 美国, 伯明翰 ([www.nwas.org/meetings/nwa2011/](http://www.nwas.org/meetings/nwa2011/))
- ◆ 世界气候研究计划: 气候研究服务于社会 (World Climate Research Programme: Climate Research in Service to Society), 2011年10月24—28日, 美国, 丹佛 ([conference2011.wcrp-climate.org/index.html](http://conference2011.wcrp-climate.org/index.html))
- ◆ 第6届非CO<sub>2</sub>温室气体国际学术会 (Sixth International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (NCGG-6)), 2011年11月2—4日, 荷兰, 阿姆斯特丹 (<http://www.ncgg.info/>)
- ◆ CLIMATE/KLIMA 2011: 气候变化和灾害风险管理 (CLIMATE/KLIMA 2011: Climate Change and Disaster Risk Management), 2011年11月7—12日, 德国, 汉堡 (<http://www.climate2011.net/>)
- ◆ 新西兰气象学会2011年年会 (Meteorological Society of New Zealand Annual Conference 2011), 2011年11月14—15日, 新西兰 (<http://metsoc.rsnz.org/>)
- ◆ 第四届可持续能源和环境国际研讨会: 向低碳社会转变的范例 (Fourth International Conference on Sustainable Energy and Environment: A Paradigm Shift to Low Carbon Society), 2011年12月23—25日, 泰国, 曼谷 (<http://www.jgsee.kmutt.ac.th/jgsee1/>)
- ◆ 第五届国际验证方法学术会 (The Fifth International Verification Methods Workshop), 2011年12月1—7日, 澳大利亚, 墨尔本 (<http://cawcr.gov.au/events/verif2011/>)