

初值信息在气候预测中的作用^{*}

范新岗^{**} 丑纪范

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

摘 要 应用胞映射全局分析方法, 研究初值信息在气候预测中的作用。针对人们认识气候的实际过程, 分别提出 4 种初始条件, 研究一个最大简化的大气模式做逐日级别预报和量值预报以及月平均级别预报和量值预报的能力。结果表明, 初值信息掌握得越多, 预报误差就越小, 预报的相对准确率就越高。

关键词 初值信息 气候预测 全局分析

1 引言

气候系统是一个极其复杂的具有强迫耗散的非线性系统。经过研究人们已经把它写成了一组偏微分方程, 并从理论上证明了状态空间存在有限维的吸引点集, 即混沌吸引子。由此可知, 系统的全局渐近行为只有有限个自由度, 可以精确地被有限个常微分方程来描述。这样, 从数学上又将其变为一个常微分方程组, 相应地, 状态空间就由无穷维的 H 空间变为有限维的 R^n 空间^[1]。该常微分方程组保持了原偏微分方程组算子的特性, 仍具有原系统最主要的三大特征——强迫、耗散和非线性。这种方程在建立数值模式的实践中, 由于难以包罗所有物理过程, 因此数值模式与实际气候系统相比仍极其简单, 而对于目前的研究条件来说仍然是十分复杂的。既然如此, 基于简化模式引入新颖的数学方法研究气候问题就有了其用武之地。本文结合简化模式研究法, 引入最新颖的胞映射全局分析方法, 研究对可预报性有着决定性影响的初值信息在气候预测中的作用, 并用全局分析意义下的预报结果辅以例证。

2 引入胞映射全局分析方法

2.1 模式简介

为便于引入新方法, 本文所用的简化模式是郭秉荣等^[2]建立的最简地-气耦合模式, 其中包含大气快变量和下垫面慢变量。本文仅用该耦合系统的大气模式进行研究与试验。其大气模式被简化为一个三阶常微分方程组

1997-07-29 收到, 1997-12-29 收到修改稿

^{*} 本文属攀登计划 95-预-21“气候动力学和气候预测理论的研究”的成果

^{**} 现在地址: 中国气象科学研究院, 北京 100081

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} - \sigma_1 X_2 & a_{13} - \sigma_1 X_3 \\ \sigma_1 X_2 - a_{12} & 0 & a_{23} - \sigma_2 X_1 \\ \sigma_1 X_3 - a_{13} & \sigma_2 X_1 - a_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $X = [X_1, X_2, X_3]^T$ 是无量纲大气变量, $a_{ij} (i \neq j)$ 和 $b_j (j = 1, 2, 3)$ 是无量纲下垫面温度强迫 $T = [T_1, T_2, T_3]^T$ 的函数, $a_{ii} (i = 1, 2, 3)$, σ_1 和 σ_2 为常量。这里 T 是大气模式的控制变量, 且相对 X 而言是慢变量, 故在本研究中假定 T 常定。该假定对于用大气模式研究预测问题不会产生本质的影响。

文献[2]表明, 模式(1)具有非线性气候系统的基本特征, 可以用来研究气候系统的基本性问题。该模式系统在既定的参数混沌域中存在混沌解。取定系统的控制变量, 对该模式进行长时间积分, 得到系统的状态空间为

$$X_1 \in [-3.1188, -0.9422], \quad X_2 \in [-2.0747, 0.4987], \quad X_3 \in [-1.2103, 1.9749], \quad (2)$$

2.2 胞映射方法

在为了进行数值模拟而把常微分方程组变为差分方程组的过程中, 自变量被离散化了。实际上, 由于计算机舍入误差的不可避免, 数值模拟过程中, 系统的状态变量也被离散化了, 胞映射的概念和算法就是在此基础上提出来的^[3]。如所知, 气候系统中的状态变量本来是 n 个实数, 对应于 R^n 空间中的一个点。从某一点出发, 由方程唯一地确定了下一时刻的状态。这个过程相当于 R^n 空间中的一个点映射。而现在, 计算机所能表示出来的数不再是连续的。当设其字长为 ξ 时, 计算机中的有理数 u , 代表了 $u \pm \xi/2$ 中的无穷个数, 显然状态空间是离散的。状态空间被划分为边长为 ξ 的一个个 n 维小立方体, 被称为胞。此时, 状态空间 R^n 被离散化为 n 维胞空间, 其中所进行的数值模拟不再是连续的点映射, 而是胞映射。从一个胞出发, 由方程唯一地确定了下一时刻系统状态所在的胞, 因此, 系统仍是一个确定论的系统。这种一个胞只有一个像胞的映射称为简单胞映射。

在实际中, 对任何变量的了解都是通过观测进行的, 由于仪器精度的限制, 观测误差不可避免, 设为 η 。一般地, 观测误差比舍入误差要大得多, 因此, 一个观测值 v 实际上代表了 $v \pm \eta/2$ 中若干个简单胞。这样简单胞空间又被 η 再次离散化为一个个边长为 η 的更大的胞, 被称为广义胞。显然, 一个广义胞的像胞不再是惟一的, 因此, 原来一对一的简单胞映射变成了一对多的广义胞映射, 这就出现了由于观测误差引起的初值不精确造成的不确定性。虽然如此, 由某一广义胞出发映射到其他胞的概率是确定的, 这种概率的转移就是广义胞映射。原来的微分方程变成了离散的 Markov 链, 系统的演变转化为 Markov 链上的概率转移, 某一时刻系统的状态表现为广义胞空间中的一种概率分布。根据 Markov 链的知识, 系统的长期行为趋向于混沌吸引子上的极限概率分布, 具有确定性的一面^[4]。引入胞映射方法, 将状态空间(2)均匀分成 $N = 10 \times 10 \times$

$10 = 10^1$ 个胞, 构成模式的广义胞空间。

在已知胞空间中共有 N 个广义胞的情况下, 可以用样本法^[2,3]由数值模式求出每一广义胞中所有点经过给定时间尺度的一个时间步 τ 转移到其他各广义胞的概率, 得到系统的转移概率矩阵 $P = [p_{ij}]_{N \times N}$, 其中 p_{ij} 是第 j 胞经一步映射到第 i 胞的概率。当已知 $t = t_n$ 时刻系统状态为概率分布 $p^{(n)} = (p_1^{(n)}, p_2^{(n)}, \dots, p_N^{(n)})^T$ 时, 则在 $t = t_{n+1}$ 时系统的分布为

$$p^{(n+1)} = P \cdot p^{(n)}. \quad (3)$$

对于一个特定的演变系统, 当已知初始时刻状态为 $p^{(0)}$ 时, 则 $t = t_n$ 时刻的分布为

$$p^{(n)} = P^n \cdot p^{(0)}. \quad (4)$$

3 气候预测的初值信息分析

气候系统存在可预报性主要是由于初值误差造成的。初值误差越小, 可预报性越大^[2]。换句话说, 对初值信息掌握的精确程度和掌握的多少决定了可预报性大小。气候预测就是要在承认不确定性的前提下提为信息问题, 提炼所有实际存在着的, 对未来状态做出概率的估计^[5]。在已知概率分布 p 时, 可用信息熵

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (5)$$

来衡量系统的不确定性大小^[6]。

那么, 我们对气候系统的未来到底能够知道多少呢? 这都取决于我们现在掌握的关于气候系统的信息有多少。针对人们认识气候的实际过程, 存在 4 种初始条件: (1) 如所知, 气候系统的长期渐近态只有有限个状态, 如果知道了这有限个状态, 当然比对其一无所知要好, 至少可以据此对未来作出等可能性的预报, 这时的不确定性仍是很大的, 系统具有极大熵值; (2) 根据气候的定义^[1], 如果知道了控制变量及气候系统的一系列特性, 系统的长期渐近态将是一个决定于控制变量的极限概率分布 p^* , 这时气候的不确定性就大大减小了; (3) 当我们知道更多的信息, 如状态变量的初始状态 φ_0 , 它是气候系统演变至某一时刻 t_0 时的特解, 即在 t_0 时刻系统是确定的, 它的熵为零, 此时 φ_0 所含有的关于未来气候的信息量最大; (4) 现在, 由于观测的限制, 我们所能知道的只是状态变量 φ_0 的一部分, 其所含有的关于未来气候的信息量介于上述 (2) 和 (3) 之间。

4 初值信息量影响气候可预报性的试验研究

在气候的新定义—气候是吸引子上的概率分布的基础上, 从全局分析的观点来看, 当已知初始观测资料时, 由于观测误差的存在, 无法知道系统的确切状态, 只能知道系统在初始时刻处于某一个广义胞。根据非线性系统概率转移的知识, 对其后各个时刻系统的状态, 我们所能知道的即可以预报的只是一个概率分布。使用这样的预报产品是极

其困难的,不方便又不直观,更不利于检验预报水平是否有所提高。因此,我们还必须给出更具体的预报。基于概率分布可以做两种预报,一种是级别预报,另一种是量值预报,且预报准确率存在理论上限^[7]。然而,不论在人们对气候的认知过程,还是同一时间人们对气候的了解程度上,初始时刻并不一定能确切地知道某一广义胞,而是存在如上节所述的4种初始条件。

在胞映射全局分析方法中,所谓初始条件就是给定的一种初始概率分布。对应于前述4种初始条件,存在4种初始分布:一是我们只知道系统本身的构造及其演变规律,但初始时刻没有任何信息,只能按各种状态会等可能地出现,即均匀分布;二是不仅知道非线性气候系统本身,还掌握了系统演变的气候情况,虽然初始时刻没有观测,我们仍可以依据气候情况,即气候吸引子上的概率分布做预报;三是我们有部分观测,但不完整,如假定 X_2 和 X_3 有观测,而 X_1 的取值不知道,这时初始分布只能在 X_1 方向取均匀分布,从全局角度考虑,对于 X 空间胞的划分,这种情况有100种,我们着重考察其平均情况;四是有确定的观测,即能知道初始时刻系统是在某一个确定的胞,同样,考察1000种初值下的平均情况。

4.1 级别预报

由于观测精度的限制,大多数情况下只需给出预报量的大致范围,在广义胞映射意义下,则只需预报系统状态将会出现在哪一个胞上,并依据概率分布给出这种预报的把握性大小,便于用户使用。据文献[7],按概率分布中最大概率 $P_{\max}$ 所在胞做级别预报,具有最大把握性和最高准确率。另外,由于级别预报的把握性和准确率非常接近,且近似于最大概率 $P_{\max}$,因此,仍用 $P_{\max}$ 的变化来衡量级别预报能力。图1给出在上述4种情况下系统的逐日级别预报结果,可以看出,气候预报的能力是稳定的;当初始时刻无任何信息时,其预报能力差且不稳定,这时它不如掌握了气候情况时的预报;在对初值有某些了解之后,显然要好于没有初值的及仅凭气候的预报;而最好的预报是完全掌握初值信息时的预报。当然,超过可预报期限之后的预报,由于初值信息衰减为零,所有预报只能是按气候预报去做了。总之,图1结果表明,对初始时刻的信息掌握越多,预报能力就越高。4种情况下月平均值的级别预报结果见图2,基本上有与逐日级别预报相类似的结论,只是当初值不完整时,对预报水平有较大的影响。

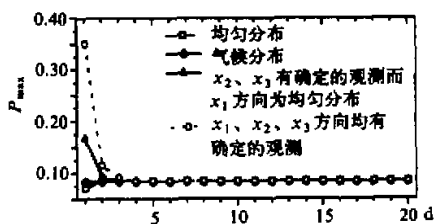


图1 4种初始分布的逐日级别预报

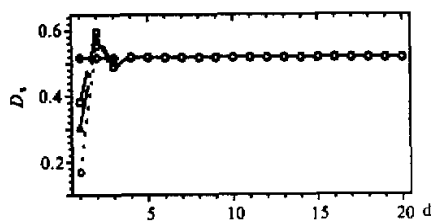


图2 4种初始分布的月平均级别预报

4.2 量值预报

顾名思义,量值预报就是根据已知概率分布预报某一预报量的具体量值。据文

献[7], 按照概率分布的期望值做量值预报, 误差最小。量值预报能力一般用预报的方差 D_s 来衡量, 方差越小, 预报准确率越高。图 3 是上述 4 种初始情况下逐日量值预报的结果。可见气候预报总是稳定的, 而其他 3 种情况下预报的误差也是有波动的, 然而比较一致的结论是, 关于初值的信息掌握得越多, 预报误差就越小, 预报的准确率就越高。月平均值预报的试验结果见图 4, 由于月平均值的胞空间相对于日预报已大大缩小, 这也许就是图 4 中按气候预报的误差总是最小的原因。但抛开这一点, 对其他 3 种情况来说, 仍然可以得到与逐日预报相同的结论。

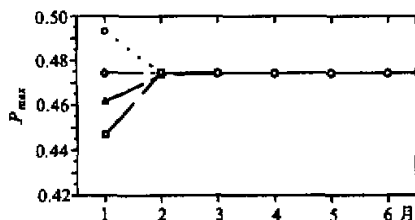


图 3 4 种初始分布的逐日量值预报

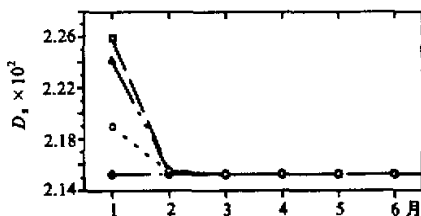


图 4 4 种初始分布的月平均量值预报

5 小结与讨论

虽然非线性系统对初值极其敏感的特点及观测误差的不可避免决定了系统个别状态的不确定性, 然而其吸引子上的概率分布具有一定的确定性, 是可以预报的。把预测问题提为信息问题, 依据概率分布对未来作出概率的估计, 即是气候预测。从全局分析结果知道, 初始时刻的信息掌握得越多, 预报能力就越强, 包括把握性和准确率。

本文结论使我们明确初始信息在气候预测中的作用的同时, 给改进气候预测又提供了另一条途径, 即充分利用历史演变, 增加初始信息量, 并把预测问题提为反问题, 反演修正初值改进预报。

致谢: 本文完成过程中得到武汉大学郭秉荣教授、北京气象学院江剑民教授、兰州大学张红亮博士的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 丑纪范, 1995, 大气动力学方程组的全局分析, 北京气象学院学报, 第1期, 1~12.
- 2 郭秉荣等著, 1996, 气候系统的非线性特征及其预测理论, 北京: 气象出版社.
- 3 Hsu, C. S., 1980, A theory of Cell-to-cell mapping dynamical systems, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 47, 931~939.
- 4 丑纪范, 1996, 大气动力学研究的若干进展和趋势, 现代大气科学前沿与展望, 北京: 气象出版社, 71~75.
- 5 丑纪范、邵吉东, 1995, 长期数值天气预报 (修订本), 北京: 气象出版社.
- 6 张学文, 1981, 气象预告问题中的信息分析, 北京: 科学出版社.
- 7 范新岗、丑纪范, 1997, 基于概率分布的级别预报和量值预报方法, 南京大学学报 (自然科学), 33, 10月专刊, 277~279.

Role of Initial Information in Climate Prediction

Fan Xingang and Chou Jifan

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract The role of initial information in climate prediction is studied in this paper by using the global analysis method, cell-to-cell mapping. Corresponding with the actual procedure of recognizing the climate, there are four kinds of initial conditions in climate prediction. Using these four kinds of initial conditions, the forecast capability of hierarchy prediction and value prediction in a most simplified atmospheric model is studied in this paper. The results indicate that the more initial information is grasped, the less the prediction errors are caused, and then the higher prediction accuracy the model will have.

Key words initial information climate prediction global analysis

王昂生研究员荣获联合国防御灾害奖

最近, 中国国际减灾委员会副主任、国家民政部副部长多吉才让和中国科学院减灾中心主任、中国国际减灾十年委员会专家组组长、中国科学院大气物理研究所研究员王昂生, 共同获得 1998 年度联合国防御灾害奖。这是联合国国际减灾十年委员会秘书处首先从全世界 50 多名推荐名单中预选出得奖候选人, 然后经过有关国家评选而最后选定的。我国政府官员和科学家获此殊荣, 尚属首次。颁奖仪式已于 1998 年 10 月 14 日在日内瓦联合国总部隆重举行。

联合国防御灾害奖创立于 1986 年, 它由联合国人道主义事务办公室负责管理。其宗旨是: 促进以有效减轻自然灾害或其他紧急事件对人们生命和财产所造成的损失为目的的人道主义活动和科学研究。联合国防灾奖每年评选一次, 每次一人获奖。今年将此奖项共同授予多吉才让部长和王昂生研究员, 旨在表彰我国在减灾工作和减灾研究中的巨大成就, 尤其是今年抗洪救灾所取得的伟大胜利。它表明, 我国的减灾工作及相关的科学研究已得到联合国和国际社会的充分肯定。

在 1987 年的第 42 次联合国大会上, 决定将本世纪的最后十年作为“全球减轻自然灾害十年”, 并成立了联合国国际减灾十年委员会秘书处。为响应联合国的号召, 我国政府于 1989 年 4 月成立中国国际减灾十年委员会。中国国际减灾十年委员会由国务院直接领导, 办公地点设在民政部。

1995 年 9 月成立的中国科学院减灾中心挂靠在中国科学院大气物理研究所, 该中心是中国科学院 40 多个减灾研究单位的联合体。其宗旨和任务是: 充分发挥减灾研究学科多、技术雄厚, 综合性基础理论强的优势, 积极参与有关减灾学科领域规划及相应优先项目的制定; 协助中国国际减灾十年委员会和国家有关部门贯彻、制定国家减灾方针和规划, 组织科技攻关; 重点承担减灾研究中涉及交叉学科的基础理论及系统工程项目; 组织开展多种形式的学术交流及国际合作。近年来, 该中心在自然灾害和减灾方面进行了卓有成效的研究, 尤其在台风、暴雨的预报预警系统及减灾对策研究方面, 取得重大成果, 该课题分别获得国家“八五”科技攻关重大科技成果奖、中国科学院科技进步一等奖和国家科技进步二等奖。

(李 平)