

# 未来的天气气候预测体系

叶笃正<sup>1</sup> 严中伟<sup>1</sup> 戴新刚<sup>1</sup> 钱维宏<sup>2</sup> 叶 谦<sup>3</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所东亚中心, 北京 100029;  
2. 北京大学物理学院大气科学系; 3. 中国气象科学研究院)

**提 要:** 天气气候预测中的不确定性是不可避免的。它一方面给用户或有关决策者带来很大的困难, 同时也给科学工作者提出了新的研究课题。文章较为系统地评述了近几年出现的关于如何发展未来气象预测体系的若干观点, 根据风险经济学和决策理论, 构建了一个未来天气气候预测体系的概念模型。其主要思想是将气象预测过程同用户决策过程有机地结合起来, 充分利用来自用户的知识和风险管理经验, 形成一个相互作用协同发展的预测体系。

**关键词:** 天气气候预测 用户经验 风险评估 决策过程

## A Discussion of Future System of Weather and Climate Prediction

Ye Duzheng<sup>1</sup> Yan Zhongwei<sup>1</sup> Dai Xingang<sup>1</sup> Qian Weihong<sup>2</sup> Ye Qian<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;  
2. College of Physics, Peking University; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences)

**Abstract:** Uncertainty is unavoidable in weather and climate prediction, which gives rise to difficulties for societal decision-making, and meanwhile provides opportunity for developing the research of prediction. This note reviews the thoughts that have emerged in recent years towards the future development of the meteorological prediction system. And then it makes up an example to show how the user's knowledge can be combined with weather forecasting based on decision-making theory. Finally, a conceptual framework of the future prediction

system is proposed, which combines the meteorological models and the decision-making processes comprising risk assessments and other knowledge from various users.

**Key Words:** meteorological prediction user's knowledge risk assessment decision-making

## 引言

天气和气候预测水平近年来已有很大提高,但预测总是还有一定的不确定性。这种不确定性部分是由于我们对天气气候系统及其影响因子的认识不够全面,还有部分是来自系统内在的浑沌行为。不确定性意味着,在任何观测和模式基础上,都会预测到不止一种可能发生的变化。现行的集成预报方法,即是以多种结果为基础决定某种最佳预测。然而,天气气候预测不是为了预测而预测,而是为了使用。根据多年经验,使用者也都知道预测不是万分确定的。他们也都会准备一旦未来天气气候变化和预测有较大差异时,采取什么行动以减少损失。不同行业面临的风险不同,采取的对策也不同。这种情况下预测者仅给出一个“最佳”预测结果,是否十分恰当?天气气候预测涉及两个团体,即预测者和使用者。现行做法是,前者给出预测,后者被动接收,两者缺乏沟通和反馈。这种做法看来大有改变的空间。如何把带有不确定性的气候预测发展成比现在更有用的决策基础,是气候预测研究者和应用者共同面对的问题。目前一些国家已经开始对这一问题给予关注。美国气象学会会刊(BAMS)近两年来组织了多篇关于气象水文预测和应用决策关系的讨论文章。例如, Morss 等人<sup>[1]</sup>就讨论了针对预测的不确定性如何联系社会决策体系发展预测研究。英国气象学者 Thorp<sup>[2]</sup>指出,气象预测系统要获得进一步的发展,只有更深入地结合用户需求才能成功。这些观点和本文说法是类似

的。

毋庸置疑,预测研究者应下大功夫减小预测的不确定性。应用者为减小风险对具有不确定性的预测有其特殊的应用经验,他们也会认为应如何做预测才能更好地为他们服务。这种经验和需求总结成文交给预测者,可以帮助预测者从使用角度发展并改善预测。进一步地,如能把用户经验数学化,耦合到预测模式中,则可以能动地改进(而非被动地接受)预测。谈到风险,是指潜在的损害。在现代社会管理决策中,风险评估已成为不可或缺的组成部分<sup>[3,4]</sup>。就天气气候预测而言,所谓风险评估就是对未来发生某种变化的可能性、其可能产生的影响、和各种适应方法及其成本价值等进行评估。尽管现行预测可以给出某种“最佳”结果,但实际上仍可能发生理论上概率较小而破坏性更大的变化。天气气候预测之所以受到关注,正是因为应用者希望预知风险性的天气气候变化,以备应变或决策。结合用户知识发展天气气候预测的概念和方法,有利于拓展实际应用,也反过来促进预测研究。本文就此浅论,以抛砖引玉。

## 1 天气气候预测不确定性之源

为什么天气气候预测必然具有不确定性呢?原因大致可分为三类。其中最基本的原因是系统的浑沌行为。现行天气预报中的集成预报方法就是针对混沌系统发展而来的。气候变化的浑沌性质也已在许多研究中被揭示<sup>[5,6]</sup>。浑沌意味着,差异极小的两个初始场可以发展成大相径庭的状态。最近黄刚等

(个人通讯)用固定海温和只差一天的初始场启动一个 GCM 并积分 40 年,最后所得多年平均的气候场相差甚远。天气预测中初始状态来自观测,总是有某些(哪怕是很小的)误差的。假定那个真状态位于观测状态附近的一个小邻域内,我们可以在该邻域内选取足够大量的初始状态,预测得同样大量的未来状态。分析这些预测构成的集合或分布以形成最终的预测结果,就是集合预测之基本思路。集合预测本身就说明预测不是单一确定的。事实上,即使是同一模式同一初始条件,在不同精度的计算机上(也即计算过程中的截断误差不同),也可得出不同结果(王鹏飞,个人通讯),这是混沌的本质所决定的。

不确定性另一个重要来源在于人们对天气气候系统(包括其各子系统)物理机制的认识不够。为研究该系统中各种具体物理过程,不同研究者研制了很多子模式。现有的不同预测模式中的这些子模式并不十分一致。从而对于同一预测问题,不同模式往往得出不一致的结果。目前国际气候界开展了众多模式比较计划,以分析各模式之长短并进而改善之。然而,即使是对于某个具体的物理过程(例如陆面过程、云物理过程或海洋生化过程等),要取得完全共识也还有很长的路要走。

不确定性还来自关于外强迫的不准确认识。例如:学界普遍认为近百年全球变化受到人类活动影响,表现在大气温室气体和气溶胶浓度变化以及陆面生态状况改变等方面。然而,如何定量地描写人类活动这一“外强迫”,并无妥善的办法。而一些可能是相对次要的外强迫同样可以导致气候状态的大差异。例如,二十世纪 60 年代以来亚非季风带北缘降水普遍减少,反映了低纬季风系统整体变弱<sup>[7]</sup>。最近刘家铭等<sup>[8]</sup>把大气气溶胶(与人类活动有关)作为外强迫加入气

候模式,发现近几十年来的气溶胶变化足以解释亚非季风整体变弱的现象。这完全出乎以往关于气溶胶影响的认识范畴。显然,外强迫问题使得气候预测不确定性更为复杂。

综上所述,天气和气候预测总是带有某些不确定性的。预测结果往往不是也不应该是单一的值,而是一系列结果的集合或分布。理论上的某种“最佳”(如最大概率)结果,并不表示未来状态一定如此。应用任何一种预测结果,都是要担风险的。

## 2 结合用户知识的气候预测

从上述分布出发形成最终预测的办法很多。最简单地,可以取所有结果的平均。但这样往往抹杀了出现极端变化的可能性。较合理的做法是取上述分布中概率最大的状态。如此,错报的可能性在理论上应该最小。然而,从风险因素考虑,预测者也应向应用者指出发生高风险事件的可能性。进一步地,由于不同应用者面临的风险并不相同,因而,天气和气候预测对不同用户来说可以不尽相同。下面就对此作一原则性的讨论。

首先考虑结合用户因素决定预测。假设在动力统计预测中存在一个最大概率的结果。由于其它(发生概率较小的)天气气候变化会造成更大损失,需要对原概率取向作一修正。以降水为例(见图 1),设  $p$  是降水量,  $f(p)$  是降水预报的概率分布,其最大概率  $A$  对应的预测降水为  $P_1$ ; 又设  $l(p)$  是某一用户关于降水量的风险损失函数,损失随降水增大而增大;则由  $f(p)$  和  $l(p)$  可以定义一个新的函数

$$rf(p) = f(p) l(p) \quad (1)$$

也即考虑了特定用户所面临风险后的修正(或虚拟)预测分布。由图 1 可见,相对于降水预报的概率分布,修正分布的峰值

(B) 向着降水增加的方向漂移, 对应的降水  $P_2$  大于  $P_1$ 。这是损失函数的非对称引起的。对于该用户来说, 其最需要获知的预测信息应该是 B。决策分析中往往还要考虑为减少损失所采取的策略等因素, 从而可以构造比式 (1) 复杂的函数关系。这里只是通过简单例子说明: (a) 结合风险评估可以帮助定量地确定天气气候预测, 这也可以理解为风险管理原则在天气气候预测中的一种定量化分析; (b) 由于不同用户关于天气气候变化有不同的损失函数 (或面临不同风险), 所以相应的预测结果不尽相同。注意, 为了简单和直观起见, 这里构造式 (1) 的方式和已有的决策理论在表述方式不尽相同<sup>[9]</sup>, 根据图 1 中修正分布曲线峰值作预报, 可以理解为: 如果据此做预防准备, 在概率意义上可能的损失会最小或效用最大。

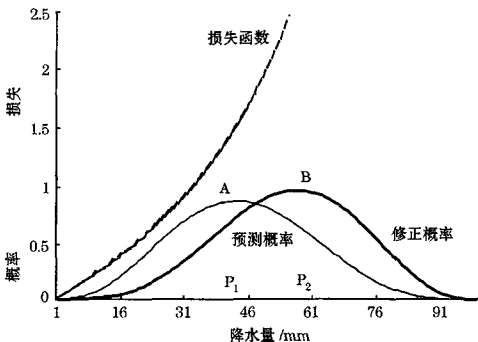


图 1 降水预报的概率分布 (细实线)、用户损失函数 (虚线) 和修正预测分布 (粗实线) 示意

原则上, 为满足所有用户, 预测者必须给出预测到的所有可能变化。发生概率较大的变化情景固然需要重视。例如现有气候模式大都预测, 由于人类活动影响, 在世纪尺度上未来全球将变暖  $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ 。很多国家政府和地区用户都在为此而制定长远发展规划。欧盟在 2006 年将启动的 ADAM (Adaptation and Mitigation) 研究计划, 就

是要研究全球变暖情景下欧盟如何应对、适应或减缓气候变化的负面影响, 并评估可能的投资、效用和实施方案等。不同区域在全球变暖情况下会表现出不同的变化, 这其中的不确定性还很大。进一步地, 从过去气候变化可以了解到, 由于气候系统内在的 (如北大西洋温盐环流) 负反馈机制, 全球增暖期间可能发生变冷的气候突变。在未来几十年内气候突变的发生概率可能并不大, 但它对社会各界 (众多用户) 都会带来巨大影响。这相当于图 1 中那条损失函数曲线在预测概率较低处趋向于无穷大, 从而使修正概率在此处表现出峰值。2004 年美国国防部就这种气候突变提出了各国国情分析及应对措施, 这是现代气候预测作为国家决策基础的典型例子。从气候预测角度来看, 也正说明不能忽视小概率事件。

上面的讨论已说明预测因用户不同而异, 但用户究竟对预测过程能起多大作用, 还不显然。下面进一步说明, 用户不仅仅是不同预测的接收者, 它们还可以更深入地影响预测过程。目前气象部门根据用户需求作所谓的专业天气预报并不鲜见, 但其中的用户却鲜有在形成预测的过程中发挥能动作用。那么用户如何影响预测过程本身呢? Thorp (2004) 在解释未来预测者和应用者相互作用的天气预报时, 举了如下例子。前面已提到, 集合预测需要一系列不同的初始条件样本。这些样本是通过数学方法求取的某些敏感扰动产生的, 而敏感扰动则随天气形势的变化以及预测区域和时间尺度之不同而不同。目前的大尺度天气预测往往是就半球范围来寻求有关的最佳扰动的。假设某特定用户尤其需要某地区某时段的准确预测, 则必须为此寻求相应的最佳扰动。这样一来, 用户需求从初始就改变了整个预测过程。

对于较长期气候预测, 由于人类活动

(用户)本身在不断适应气候变化,从而改变原预测所赖以开展的某些基本条件(如土地利用方式、温室气体排放速率等),预测也就必须不断重新调整。

用户决定的另一方面还体现在观测系统的建设上。对于天气气候预测来说,当然全球观测网分辨率越高越好。但受限于观测成本,实际上不可能无限制加密观测。除非某地区某时段某个用户需要且有足够投入(这里又涉及效益/成本问题),气象界是不可能随心所欲加密观测的。

谈到不同用户对天气气候预测需求之不同,还需要特别考虑极端天气条件。尽管目前气候预测界仍在为改善气候平均态的预测水平而奋斗,现实应用中却往往更需要了解极端天气气候条件。例如:某些疾病患者对夏季极端高温敏感;农业生产中很多作物则对生长期极端低温敏感;5%的季节降水增长如果是该季度内每天降水都增加一点则并不重要,但如果这5%是由于某些极端天气现象集中降在该季度内的几天内那就必然造成洪涝灾害。近年来世界气象组织(WMO)和国际气候研究规划(WCRP)等国际组织都成立了专家工作组,就气候极值问题开展研究。由于不同行业所最需了解的极端要素不同,结合用户知识开展研究是必需的。这又从另一个侧面说明了:结合用户需求发展未来的天气气候预测体系,势在必行。

### 3 理想的天气气候预测体系

综上所述,为使天气气候预测成为有效的决策基础,一方面必须加强天气和气候系统本身的研究,使得预测所赖以进行的理论基础更加完善。另一方面则应该通过和应用者的协作,对各种可能天气气候变化的风险及其应对措施进行评估,针对不同用户决定

各预测报告。用户则可以从应用角度分析何种天气气候情形下预测者易于出现何种差错,从风险角度总结如何使用预测并提炼对预测者的进一步需求,加以总结并进而模式化,反馈给预测体系以求改进。这样的预测体系就不仅仅由气象学知识构成,而是包含了各种用户各自的知识体系。

图2概括了对未来天气气候预测体系的构想。

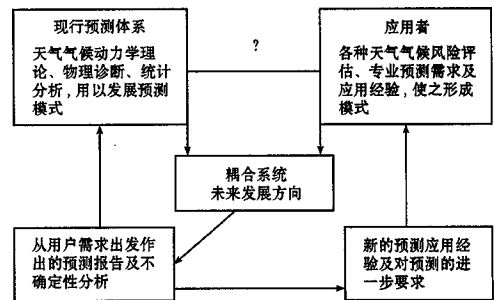


图2 未来天气气候预测体系构想

框图勾画的未来天气气候预测是一个通过自我反馈逐步完善(而非一蹴而就)的体系。实现这一新体系的基础包括:

(1) 气象预测理论、模式和观测的进一步发展。毋庸置疑,向着地球系统和高分辨率方向发展气象预测模型,是新体系得以形成的基础。缺乏高分辨率,很多用户需求都谈不上。

(2) 计算机和信息技术的进一步发展。高速计算机和全球共享的资料信息,是实现新体系的保障。

(3) 风险评估和决策理论的应用<sup>[3, 4, 9]</sup>和定量化发展。这是结合用户知识的关键所在。

(4) 社会计算,也即对相关人文、政治、经济等非自然科学因素的模式化。目前这正在成为一个新的发展领域<sup>[10]</sup>。

显然,新体系不仅仅涉及科学问题,还

涉及社会人文因素。构建如此复杂的体系不是短期内能够完成的。可以考虑先就某个特殊应用者（如某地区农牧业或水利部门），初步构建一个与该应用体系相耦合的预测系统，然后逐步扩展到对所有可能用户。

框图中在预测和应用各界之间的连接线上有个问号。这里存在一个实际问题，即从国家到个人这样广泛的用户群通过何种机制来联系天气气候预测专家这一特殊群体呢？前面指出，应用具有不确定性的气候预测是有风险的。这个风险任何个体都不宜承担，而是应该由整个体系承担。最自然的办法就是通过保险业，使该体系成为一项能够自行发展的产业。这样气候预测才能真正深入各行各业，为民所用。当然，要实现这一宏图，还有很多具体问题要探讨解决。本文谨抛砖至此。

### 参考文献

- 1 Morss R E, Wilhelmi O V, Downton M W et al. Flood risk, uncertainty and scientific information for decision making. *Bull. A. M. S.*, 2005, 86 (11): 1593—1601.
- 2 Thorp A J. Weather Forecast: a century perspective. *Weather*, 2004, 59: 332—335.
- 3 刘燕华, 葛全胜, 吴文祥. 风险管理. 北京: 气象出版社, 2005.
- 4 于川, 潘振锋. 风险经济学导论. 北京: 铁道出版社, 1994.
- 5 严中伟. 历史旱涝振荡谱的演变. *科学通报*, 1994, 39: 431~434.
- 6 严中伟. 华北历史旱涝变化的混沌性质分析. *气象学报*, 1995, 53: 232~237.
- 7 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 60年代北半球夏季气候跃变—1. 降水和温度变化. *中国科学*, 1990, 1: 97~103.
- 8 Lau, K. -M., M. -K. Kim, and K. -M. Kim. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing - the role of the Tibetan Plateau. 2005. Submitted to *Climate Dynamics*. (Conditionally accepted).
- 9 岳超源. 决策理论与方法. 科学出版社, 2004.
- 10 王飞跃. 社会计算: 科学-技术-人文. *中国科学院院刊*, 2005, 20: 370~376.

1 Morss R E, Wilhelmi O V, Downton M W et al. Flood