

天气的可预报性

〔日〕新田尚 著

气象出版社

天气的可预报性

[日] 新田尚 著

赵其庚 胡圣昌 译

侯 宏 森 校

气象出版社

内 容 简 介

本书以天气预报的科学基础为研究对象,以确定性方法(数学物理方法)的数值预报为中心,从气象观测、资料分析同化和初值化,直到预报的全过程,探讨短、中、长期天气预报的可预报性及其界限。并据此指出今后天气预报的发展方向及在近期有希望取得突破性进展的方面。

可供与天气预报和大气动力学有关的科研、业务人员及大专院校师生参考。

につ た たかし
新 田 尚

天気と予測可能性——ひとつの天気予報論——

東京堂出版 1982年

天气的可预报性

新田尚 著

赵其庚 胡圣昌 译

侯 宏 森 校

责任编辑 黄丽荣

* * *

高 等 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.75 字数: 168 千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷

印数: 1—1800

定价: 2.40元

ISBN 7-5029-0094-2/P·0062

前 言

天气,与人们的生活有密切的关系,是人人亲身感觉到的自然现象。特别是象日本这样地处温带,四季分明的国家,人类在社会生活中对天气的反应总会形成一种情绪,构成民间的历书,在某种意义上也可以说是合乎人性的自然演变。这大概是因为日本(进而包括人类或全部生物)的特征和气象环境有深刻的关系。但是从另一方面来说,这样的精神状态有碍对作为自然科学对象的天气现象的处理,也是不可否认的事实。

天气现象是由各种各样的时间尺度和空间尺度的基本过程组成的,故呈非常复杂的形态,结果使天气现象的分析和预报方法纳入了许多经验的因素。由于这个原因,客观地掌握天气现象,也曾不明确地作为自然科学的问题提出来。总之,想找到线索的思想逐渐明朗了。

剥下这许多“情绪性”和“经验性”的东西,客观地处理天气现象,把它作为自然科学的对象的尝试早就在进行了。但是这种尝试也存在容易过分理论化的倾向。极端地说,即常常是用数学的表示方法来代替天气现象,使所观测到的事实消失了。而且许多工作是只要在理论上被承认,就看作是可行的而结束了。

以这样的历史发展过程为背景,论述天气预报的书刊几乎从头至尾全都是“技术方法论”和“不成熟的理论介绍”,内容类同或互相抄引,用今天的话来说是千篇一律。由于这个缘故,社会上对于天气预报的理解也势必受到这种倾向的影

响，而局限于狭窄的范围内。

不受上述框框的限制来展开“天气预报论”，则是本书执笔的动机和目的。为此，首先就“天气”和“天气预报”的概念给以明确的定义，然后论述客观地获取形成天气的“气象场”的方法，接着讨论“可预报性”及其界限。最后，以这样的讨论为依据，展望“未来的天气预报”。因此，本书不想寻求“直接供实用”的天气预报方法，而始终把探讨通往“作为科学的天气预报”的途径作为本书的目标。

在本书中，对于用物理学方法或数理统计学方法来预报未来天气或气象场的情况，使用“预测”这个词，而对于在更普遍的意义上预报天气的未来状态并向社会发布的情况，使用“预报”这个词（在我国，对于这两种情况一般都称作“预报”，故在译文中不再加以区别——译者）。

本书也是《气象学丛书》系列中的一本，与其说是从正面讨论问题，倒不如说边散步边谈论问题的本质，把自由自在地寻求答案作为意趣。因而本书不是天气预报的教科书，而是试图打破既成的思想和见解的束缚的一种探索，以归纳顺从新时代潮流的天气预报的思想方法。

对通读本书原稿，并就最近的中期预报的问题和成就提出宝贵意见的金光正郎博士表示深切的谢意。关于本书中使用的资料，所搜集的材料至今国内外还未刊印的，大多是根据NCAR的利思(C. E. Leith)博士，ECMWF的本特森(L. Bengtsson)博士，GFDL的都田菊郎博士及这些研究中心的研究小组的工作。每逢这种情况都注明了出处，而且还把主要参考文献综合列表于卷末，这里谨一併表示衷心的感谢。

为使对可预报性的叙述尽可能地具体，本书尽量多用图，因而使用了许多作者的图。引用的图表及其出处如下

(略——译者)，谨向允许转载的作者和出版社表示由衷的敬意。

著 者

1982年8月

目 录

前言

第一章	天气	(1)
第二章	天气预报和气象要素预报	(5)
2.1	引言	(5)
2.2	获取预报的方法	(5)
2.3	天气预报	(6)
2.4	气象要素预报	(7)
2.5	天气要素预报	(28)
第三章	气象场的分析和初值化	(38)
3.1	引言	(38)
3.2	观测的问题	(38)
3.3	气象系统的分析问题	(75)
3.4	物理诊断的问题	(76)
3.5	四维分析问题	(78)
第四章	可预报性	(103)
4.1	引言	(103)
4.2	确定可预报性的方法	(104)
4.3	理论的可预报性	(108)
4.4	数值预报的特点	(117)
4.5	数值中期预报的建立	(162)
4.6	对动力学 1 个月预报的探索	(197)
第五章	今后的天气预报	(219)
后 记		(224)
参考文献		(226)

第一章 天 气

在表示“天气”的时候，通常使用晴、雨(雪、雹)、阴、雾(霭)、霜等这样一些表示“现象出现”的词汇。虽然这些词汇的本身有清楚的定义，但这些定义不管从哪方面来说都还是定性的，或者说是“现象的描述”。换言之，是把地面的或在地面上看见的气象和水象表示出来。

如果把天气中包含的内容加以具体区分，则包括气温、气压、湿度、风、云量、降水量和能见度等气象要素。可以说天气是综合了这些气象要素的大气状态，是指某时刻或某时间范围所具有的大气状态而言(《气象词典》)。日本气象厅对天气的分类如表 1.1(略)，还有专用的更细的分类(如世界气象组织(WMO)把现在天气分为 100 种，过去天气分为 10 种)。但无论把天气的分类搞得多么细，它与以上气象要素的关系在本质上是沒有变化的。只是分类的细致程度基本上同与气象要素分布相联系的大气运动的尺度的细致区分相对应。

于是，谈论天气预报就要由气象要素直接得出天气现象。大家都知道，实际的天气现象，例如在碧空时，空气中几乎没有水汽的凝结，看不见云滴的集合。相反在下雨时，凝结于凝结核周围的水滴要落下来，但是这样的认识还未深入到与此有关的凝结过程及降水过程的细节，可以说对所发生的这些具体过程还是模糊不清的“黑箱”(black box)，故要充分了解并预报与所谓的“气象学的波动”或称作“气象学的波型”的大尺度大气运动有关的气象要素的分布状态及其变动。然后从预报的气象要素的分布状态来推断未来的天气现象。这就产生了具有长时间尺度(即长周期)变化的气象要素与在短时间

尺度(即短周期)内生消的天气现象(及构成天气现象的天气要素)之间的联系问题。

当然这样的联系严格讲来不是“完全准确”的(注1),本书打算在整体上表示“达到一定可靠程度的关系”。为把天气预报百分之百的完全报准,必须深入研究所发现的天气现象的全部根本过程(如凝结过程),固然,这实际上是不可能的。我们不能在理论上完全理解包含这一切“所发现天气现象的全过程”,这是因为即使假定能够理解却也是不能完全观测到的缘故。幸而,由于上述那样的“飞跃的联系”,还留有改善的余地,通过改进,可以期望提高“这种联系的准确性”。

沿这样的方向开辟的学科是理论气象学。理论气象学以气象要素为对象,着眼于其中的气温、气压、风向风速和湿度等物理量,并表现它们的变化。即使用物理学的定律去处理气压(或等压面高度)、气温、风向风速和比湿(或混合比)的时间变化。具体地说是以气象的动力学和热力学基本方程为依据建立支配方程,组成一组联立的偏微分方程组。使用这种方程组,通过解适当的数值模式(注2)来模拟气象和水象现象。在这种情况下,作为初值,不管是使用实测气象要素观测值还是使用数学假定表现的气象要素场的分布状态,所模拟的结果均将描写出气象和水象现象的分布,如用与气象要素的分布有关的“天气”定义(注3)相对应,则可表示所模拟的天气。可是在数值预报的情况下,是以用实时资料表示天气为目标的,而数值实验则是用数学上假设的资料表示天气的。

但是,在这里一定要重视把气象要素现在或未来(过去)的分布状态与天气联系起来的媒介,或者说是相互间的关系,也有把它称为广义的“大气模式”的。这种大气模式,通过理论的处理(或假定)成为数值模式,要求具有定量的关系,而用

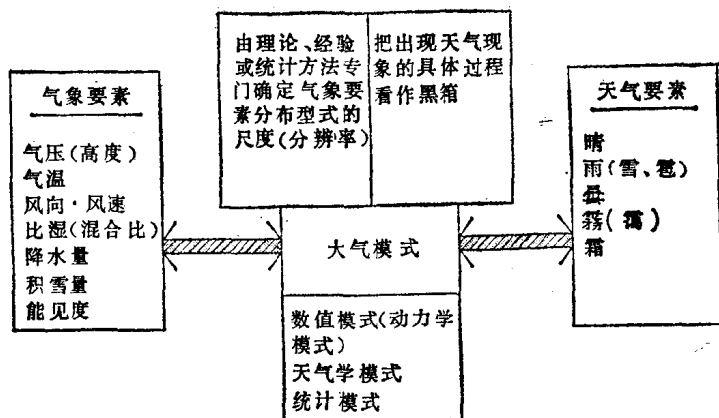


图 1.1 天气预报中表示“天气现象”与“诸气象要素”联系的模式图

经验的处理则成为气象学上独特的天气学模式，以定性的关系为主。另外，还可考虑通过对气象要素的分布状态与天气的关系进行统计求出的统计模式。在这种情况下，也是按在统计上有意义的那种定量关系进行的(图 1.1)。

气象要素的分布，具体地按我们能够表示出的分辨率而不同，同时这种分辨率也成为大气模式所具有的与气象要素分布状态的变化有关的某种大气运动尺度的表现能力。

进而，在最终用语言表示天气时(或者说转换成天气时)，大气中的水汽含量、分布状态及其相态(即气态、液态和固态三相)成为决定的要素，要使用绝热图用热力学分析方法专门地确定它们。这个过程也可看作是大气模式的一部分。例如，可参见斋藤直辅的《天气分析》(研究の一ト, 137, 1979 年, 日本气象学会)。

总之，如果我们不清楚叫做天气和天气预报的这种现象

在气象学中的位置，探讨起来就很难贴切。

(注1) 中山(1982)谈到，“预报员从天气图来考虑降水”这类事，有时为云物理学专家所讥笑。

(注2) 在本书中“模式”一词的使用有比较广泛的含意，希望理解为把自然现象理想化的一种模型。在数值预报等处给予限定意义时，将事先说明。

(注3) 这个定义终究是理论上和统计上的或者是经验上的，可用假定气象要素分布的尺度来给予定义。即天气这样的现象似乎是一看自明的，但严格来说，它依赖于定义的方法。前面所说的“飞跃的联系”就属于这类问题。

第二章 天气预报和气象要素预报

2.1 引言

如第一章所述,至今天气预报与气象要素预报之间的区别还常常搞不清楚(注4)。气象要素的预报,是把表现流体系统状态的物理量的变化规律,用物理定律或统计关系表示出来,在此基础上求出未来的状态。天气预报,虽也有类似的方面,但比气象要素预报复杂,它应该是根据预报的气象要素(换言之是以预报的气象和水象为基础),再通过云模式、锋面模式、扰动模式和环流模式决定的。

2.2 获取预报的方法

或许与人们通常的“预报”概念有所不同,这里想把它限定于科学上规定的方法。其方法如从方法论上大致地区分,可分为两种,即

- 技术的方法(统计和经验的方法)
- 数理的方法(动力学的方法)

进而从预报的内容来看,又可分为两个方面,即

- 量的方面
- 质的方面

在量的方面,是要根据第一章叙述的与气象要素的“飞跃的联系”,更定量更正确地表现出表示未来“天气”的气象要素组合(以下称为天气要素)的值。在质的方面,是要更详细地记述所预报的状态,在定性上更实际地逼真地表现所观测到的状态,可以再现更复杂的结构。

2.3 天气预报

关于天气预报,有个最本质的问题。总的来说,这就是可归因于地球大气这个流体系统所具有的“非线性”和“不稳定性”的问题。^[3]在把天气预报作为物理定律的对象的情况下,有必要就这一点给以切实强调。

在第一章中已经谈到了“天气现象”与“气象要素”之间的“飞跃的联系”,第二章一开头又定义了作为媒介的“天气要素”。由于这个假说是现代天气预报的大前提,所以是必须采纳的。

其次,在理论上进行气象要素(进而天气要素)预报的情况下,就要把前述的“非线性”与“不稳定性”作为研究的问题。关于这些,详细的讨论将在第四章进行,这里仅作概念性的说明而已。

在我们采用数理方法(如数值预报)进行预报时,是用表现支配流体系统运动的物理规律的方程系统(气象的动力学和热力学基本方程),从某初值出发,反复地进行时间的数值积分,求出所预报时刻的预报值。可认为这样的预报值是唯一确定的。也就是说,我们作的是“确定性的预报”(deterministic prediction)。如果作为对象的气象现象是完全闭合的系统,并且都完全受所用预报方程系统的支配,那么这种预报将是成立的。

然而,在实际气象现象的情况下,可以说大尺度运动能以较好的近似满足上面提出的条件,而较小尺度的现象(如从积云对流到湍流的现象)与上面的条件的距离就大了。因此,如大小两种尺度现象之间的相互作用增大,由于较小尺度现象的作用(影响大尺度现象的整体效应),预报的结果就不正确

了。而且,由于这种作用只能以各种各样的近似形式引入预报方程,因此即使使用同样的初值也未必能得出相同的预报结果。因而从确定性的预报又到了概率性的预报,进而成为受到统计的和随机性法则支配的预报。如果按照西奈(Yacob G.Sinai, 1981)派的说法,就是“非随机现象进入随机状态了”。这种相互作用的产生是通过“非线性”造成的,而相互作用的增大是由于“动力学和热力学的不稳定性”引起的。如果是以大尺度运动的不稳定性为主,其结果大尺度波动发展,那么其预报大体上可用确定性方法进行。相反在有不作为预报对象的较小尺度运动的不稳定性存在的情况下,与由确定性方法得到的预报的偏差就要扩大下去。

今天,有逐渐地向用概率表示的预报——概率预报接近的趋势,其必然性大概可作如下解释。

第一,是由于在第一章所述的天气现象与气象要素(天气要素)之间的“飞跃的联系”常常存在误差。因而在某种气象状态下是否下雨,用确定方法是不能断定的。

第二,是由于气象要素(天气要素)的预报(通常为数值预报)必然存在误差。就是说,有初值确定的误差,预报计算中由于对物理过程表现不完全而产生的误差,以及数值计算中的误差。与这些误差相应的不明确性也使所表现的结果变成概率性的。

2.4 气象要素预报

在这里先从气象要素预报开始讨论。气象要素预报有如下三种基本方法。即

{	天气学方法(synoptic method)	}	技术的 方法
	统计或随机性方法(statistical/stochastic method)		
	动力学方法(dynamical method)		

如下面所述,用天气学方法和统计或随机性方法,虽然有时也预报具体天气或天气要素,但基本上是先预报模式化的气象要素的分布状态。然后再通过“天气模式”预报具体的天气——这是多数的情况。相反,用动力学方法则经常是预报气象要素的分布状态,由此再通过“飞跃的联系”,根据天气要素预报天气。

(1) 天气学方法

简单地说,这种方法是假设一个大气扰动和局地环流现象的模式,根据这个理想化模式的结构和运行去推测现实中发生的气象现象的变化。其代表性的例子是卑尔根学派(Bergen school)提出的“锋面波动学说”中的气旋模式。这个模式的基本结构,到今天也还很常用,J. 皮叶克尼斯(J. Bjerknes, 1919)等对三维结构的透彻观察竟是如此惊人。至今很多教科书,还通俗易懂地把这个模式原封不动地载入,恐怕正是由于这个模式对中纬度地区的温带气旋给予了充分解释的缘故。后来,皮叶克尼斯(1926)又进一步考察了气旋的铅直结构,一直深入到斜压波的机制。其后,查尼(J. G. Charney, 1947)和伊迪(E. T. Eady, 1949)详细研究了斜压不稳定性,找到了皮叶克尼斯气旋模式的理论根据。豪斯今斯和布雷瑟顿(B. Hoskins 和 F. P. Bretherton)还对伴随温带气旋的锋面的发展和填塞过程作了理论分析。从那以后至今天,对于中纬度的斜压波积极地进行了许多研究。其结果使得我们所具有的气旋模式比皮叶克尼斯等的模式更为精密,希望能有与此相应的更完善的解释。

关于罗斯贝波(Rossby wave),也有类似的情况。罗斯贝(C. G. Rossby)以其天才的直接观察力,根据霍夫(S. S. Hough)于19世纪对海洋中大尺度运动所作的理论解释,

推导出对大气中的大尺度波动也能适用的结果，这就是著名的罗斯贝波速公式(1939)：

$$C = \bar{U} - \beta(k^2 + l^2)$$

其中， C ，波的纬向相速度， $\bar{U}$ ，基本气流的纬向速度， β ，科里奥利参数随纬度的变化， k ，纬向波数， l ，经向波数。

遵从这个公式的水平二维正压波就是罗斯贝波。罗斯贝波的意义在于它指出了旋转流体中的大尺度扰动的一种形态是正压波动的水平二维运动，在这一运动中绝对温度守恒。这种波动的存在是由于科里奥利力随纬度的变化成为恢复力，即通常所说的 β 效应。

在高空天气图上，我们观测到的大尺度扰动的一种基本性质中包含着这种罗斯贝波的物理特性，但实际的对流层内的大尺度扰动并不是原来形态的罗斯贝波，而应该说是构造更复杂的斜化波。换句话说，具有三维构造的波动是其本来的型式，罗斯贝波的特性在很大程度上变形了。可是由于罗斯贝波在历史上很著名，因此即使到现在还有的教科书把实际对流层大尺度扰动直接解释为罗斯贝波。

天气学的方法，本来应该根据最新的知识经常更新，以气象现象的物理图象为基础。为此，要努力把下面将叙述的诊断分析结果与理论上的说明和解释综合起来，不断地坚持下去。即把综合结果所形成的物理图象当作模式，把现象推移和变化的统计学和运动学的规律作为预报的基础。天气学方法在运用上很容易有主观的倾向，最近，为使方法本身客观化，正在工程技术的处理方法上逐步作出努力。但是应当注意到，从所用的模式和规律来看，工程技术上的处理方法与天气学方法有本质上的区别。关于这一点下面将会看到。

(2) 统计和随机性方法

关于统计的方法,概括地说,据所用的基本原理大致可分为统计-经验方法(statistical-empirical method)和统计-动力方法(statistical-dynamical method)二种。

(a) 统计-经验方法

统计-经验方法的中心是回归预报(regression forecast)。现在对于预报问题也还常常使用这种统计学的回归方法,作为其背景,是认为对于大气状态,在相隔一定时间的两种状态之间存在着有意义的相关关系,知道现在的状态,就可用单纯的经验得到关于未来状态的情况。这样的过程可以看作是,在不考虑与流体流动有关的一般物理规律的情况下,对大气的活动进行观测,通过对其进行统计分析而直接导出大气的运动规律,以这种规律为基础来作预报。或者还可以认为,是把传统的主观预报方法客观化。

按照利思(C. E. Leith, 1978)的工作,看看这种方法的数学表达。

一般的多变量预报过程(general multivariate prediction process),可表示为二个随机列向量,即用被预报因子 x 和预报因子 y 表示。为了简化,假定 $\langle x \rangle = \langle y \rangle = 0$, 这里的括号 $\langle \rangle$ 表示对无限可实现集合的假定的平均值。还假定二次矩全部是已知的。即

$$X = \langle x x^* \rangle > 0$$

$$Y = \langle y y^* \rangle > 0$$

$$W = \langle x y^* \rangle, W^* = \langle y x^* \rangle$$

其中 * 号表示转置(transpose), $X > 0$ 意味着矩阵 $X = X^*$ 是正定的。由于 x 的维数与 y 的维数未必相同,故 W 不一定是方阵。

我们要解的问题,是用线性关系,