

天气预报 由经验到物理数学理论和超级计算*

曾庆存[†]

(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

Weather forecast from empirical to physico-mathematical theory and super-computing system engineering

ZENG Qing-Cun[†]

(Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , china)

2012 - 11 - 16 收到

[†] Email zqc@mail.iap.ac.cn

DOI :10.7693/wl20130501

摘要 天气预报已由经验发展成物理数学理论和超级计算的复杂而严格的巨型系统工程。文章从物理学观点回顾了它的发展历程,探讨了它今后的发展,并将它拓宽到了更加巨大和复杂的气候与生态环境系统的预测和调控问题的建模,以及人工影响天气的工程理论问题。这些是跨学科的问题,需要地球科学、数学、物理学界以及化学界和生物学界共同合作研究。

关键词 数值天气预报, 经验, 准地转模式, 原始方程模式, 集合预报, 四维同化

Abstract Weather forecasting has developed from empirical practice to physico-mathematical theory and super-computing system engineering. The history of its development in the last decades is reviewed from a physical point of view, with a brief discussion of various problems in its further development, as well as its extension to the design of an Earth system model for the prediction and regulation of climate and ecosystem-environment systems and the engineering of artificial weather modification. Multi-disciplinary collaboration between the earth sciences, physical sciences, mathematical sciences, and other disciplines are needed.

Keywords numerical weather forecast, empirical, quasi-geostrophic model, primitive equations model, ensemble forecast, 4D data assimilation

* 国家自然科学基金(批准号:40830103)资助项目

1 气象和大气状态变量

人类生活在地球表面之上、大气之中，其活动与大气的状态和发生于大气中的现象息息相关。风雨、云雷、晴阴、冷暖等现象，就是人们最敏感和关心的对象，常简称为气象，或曰天气，或曰天气现象。观测和研究这些现象就形成了“气象学”(meteorology)，它既古老，又年轻。气象其实就是大气状态及其变化的各种反映，而用物理学的语言来定义大气状态，就得用“大气状态变量”，或曰气象要素。测量和研究这些变量及其变化规律就形成了现代的“大气科学”(atmospheric science)。“气象学”和“大气科学”是同出而异名，同是一门科学，但侧重面和研究方法有所不同，且后者是前者的拓宽和深化。

说“天气现象”，比较直观，也是形象思维及其表达；而从物理学上说“大气状态变量及其变化”，则不完全是直观，比较解析和必须定量表达。

在这里还要交代另两个词语：“天气”和“气候”。这二词在日常生活中常通用，指的都是大气现象(“气象”)的表现，“象”与“候”语意相通。不过“科学”的学问是“分科”的，各有其研究对象的范围，令有所属，因而在气象学或大气科学中，“天气”和“气候”就有不同内涵，二者定义不同，不可相混；“天气”(weather)指的是个体的大气现

象，是指如一天内等短期的现象；而“气候”(climate)指的是大量个体在较长时段(如一个月、一个季节、一年等)的统计平均状态。

气象学和大气科学研究的一个主要对象是“天气预报”(weather forecast)和“气候预测”(climate prediction)。这二者同是预测未来的事件，但时限不同。现今的天气预报业务是从初始时刻起，预报其后的每天的天气，目前最长已可达七天(即所谓“中期天气预报”)，力图可达半个月；而“气候预测”试运行的业务是预测下个月或下一个季度(三个月)的平均状态，第二个季度的平均状态(跨季度气候预测)，下半年或明年的气候变化趋势，等等。本文下面所讲的大都针对“天气预报”，只稍微涉及“气候预测”，因为目前气候预测业务还只处于试运行阶段，尚不成熟。

也许大家会问，第十天后(或半月后)至下个月前这一段时间的气象怎样预报或预测？这是个中间空白地带。就目前科学水平来说，真是“尺有所短，寸有所长”，两头都够不着。哪些属性是可预测的，哪些是不可预测的？有待将来探索。

2 观天和看天气图——经验的气象预报

人们观天，目见风起云涌、云收雨散，积累一定经验，可知道一地的某些天气变化的规律，甚至

某地与某外地区或广大地区的气象的关联性，从而在一定程度上可以进行当地的天气预报，甚至可以较准确预报。最著名的例子就是《三国演义》中的故事：诸葛亮借东风，预测到有东风到来和东风致雾，这是前科学时代的天气预报——凭个人的经验。

到了上世纪，已发明和应用了气象仪器来定量测量大气状态变量，如风速(矢量)、气压、气温、湿度(大气中的水汽含量)、辐射通量，等等，尽管仍然保留一些目测项目。于是气象学开始进入“科学时代”。特别是无线电的成功与大量应用，使得各地的气象观测数据可以适时(及时, real time)汇总到一个中心，绘成“天气图”(weather map 或 synoptic map)，看天气图就可掌握天气的三度空间的结构。由此人们发现了天气系统(weather system)，知道各地的天气原来是与盘踞该地区的天气系统密切相关的，例如刮风、降水、冷暖等对应于“锋面气旋”(frontal cyclon)这一天气系统的相应部位，晴空大多与“反气旋”(anticyclon)相关联。其中“气旋”和“反气旋”分别是指气流反时针方向和顺时针方向旋

转的涡旋。图1给出的是锋面气旋的结构示意图。

于是天气预报踏进了“科学时代”，人们觉得预报天气首先要预报天气系统的移动和强度变化(即所谓天气形势)。积累了一定经验，并简单运用一些物理规律(主要是流体力学的和热力学的)，就可以通过看天气图和做一些简单计算来进行短期天气预报。这种天气图法的预报是建立在科学分析基础上，但在很大程度上还依赖于“预报员”凭经验做出主观判断。这种方法是上世纪(尤其1980年前)的主要方法，至今仍在大量使用。

3 基于物理学原则的客观天气预报 ——数值天气预报及其蠢动期

人们认识到，天气预报首先要预报天气系统的演变，很自然就会想到：从原则上说，预报问题就可归结为加入一定边界条件和初始条件的斜压流体力学方程的求解问题，即求解数学物理方程。如果能实现它，则天气预报就是客观的和定量的，可以不以经验为主而上升到科学理论。

在上世纪初，这样的斜压流体力学方程组大体上已可列出来，但是很复杂。这是因为大气有可压缩性，内能与动能相互转换，密度、压力和温度三者包含于气体状态方程中，还有水汽相变、辐射能传输等各种复杂物理过程。它们构成了一组复杂的而且是非线性的偏微分方程组。且不论其中的不少物理过程还有待探讨，单就求解非线性偏微分方程组这个数学问题来说，当时还没有公式化的求解方法，气象学(也是物理学)大师 V. Bjerkness^[1]只好说：让上帝去积分(求解)它吧。

毕竟现实世界中众多的数理方程大多是非线性的，必须应用它解决实际问题，但没有现成的求解方法。于是数学家回到了微积分的本源，用有限差分来近似微分，用求和来近似积分，把求解微分方程变成算术运算过程，创造出“数值求解”法。学识渊博、多才多艺的Richardson 敏锐而大胆地尝试用

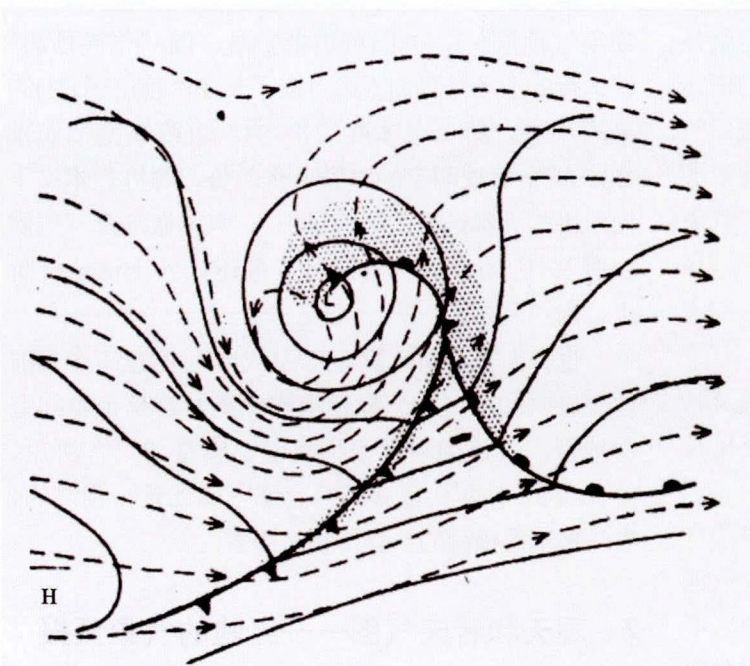


图1 锋面气旋示意图(引自 Palmen 文, 1950年)(实线是地面上等压线, 虚线是高空流线, 箭头表示风向, 粗黑线为锋面(冷暖空气分界线), 带▲者为冷锋(冷空气推进的前锋), 带●者为暖锋; 阴影为降水区)

它来求解斜压流体力学方程。他的书(1922年出版)冠名为 *Weather Prediction by Numerical Process*^[2], 由此催生了后来的术语“数值天气预报”(numerical weather forecast)一词, 尽管科学的天气预报应该由求解相应的数理方程而作出, 这是问题的物理本质, 数值求解只是一个方法问题。

作为例子, Richardson将欧洲区域分成网格, 将气象站的观测数值内插到网格点上, 然后对空间和时间作差分运算, 按一定步长一步步计算下去。按照当时的计算条件, 他声称: 给他一万个计算机, 昼夜不停地计算24小时, 可以算出未来一天的天气, 即做预报赶得上天气变化的速度, 后人称之为Richardson梦想。可惜Richardson个人小规模的计算试验却严重地失败了, 他算出的6小时地面气压变化大得离奇。这使气象界人士对这种方法失望之极, 在相当长时间内视为畏途。但无论如何, 数值天气预报作为新事物, 已蠢动于腹中, 只是还须待以时日且还须经过劫难考验后才能出世。

4 滤波模式和准地转模式——数值天气预报的初生

Richardson试验失败的原因, 固然是因当时的观测站太少, 不足以提供三度空间的初始场; 而且还在于误差太大(无论是观测值或是插值到网格点上的值), 此二者是显而易见的。后来人在再作盘点时, 发现他还在物理思考上和计算数学上犯了双重严重的错误。

从物理上说, 像天气系统这类相对缓慢、时间尺度以天为变化的大尺度涡旋运动, 其主要的力是重力、科里奥利力(地转偏向力)和气压梯度力, 而这三者是处于近似平衡状态的, 这是气象学上作为原则来谈的规律性, 即准静力(quasi-static)平衡和准地转(quasi-geostrophic)平衡。惯性力要比科里奥利力约小一个数量级。除涡旋外, 大气运动中还包含有像声波、湍流、阵风、对流和重力波等频率由秒级到小时级的相对快速变化的过程, 它们就是所谓的“噪音”(noises), 与反映天气系统变化的“信号”丛生, 它们也出现在上述初始场的误差之中。

由于上述三力的准平衡关系, 反映天气系统变化的惯性力部分本来就是较小的, 而观测误差等激发出的虚假且强大的“噪音”与之相混, 就掩盖了天气系统的变化信号。

用物理学观点分析可知, 要计算快速的运动过程应采取小的时间步长, 而计算慢过程则可用较大时间步长, 即对各类运动的计算来说, 时间步长与其相应周期(或更准确地说是特征时间尺度)之比应该是大约相同的一个分数, 这就是后来研究得出的计算稳定性判据之一。如果采取同一个时间步长, 结果是大大放大了快过程的计算误差。一步一步推下去, 便得到虚假的大振幅的快速运动, 淹没了慢过程运动变化的信息。

Richardson当时既未注意到大气运动中的多时间尺度特征, 也未注意到时间步长的限制, 犯了双重严重错误, 其预报结果就只能是虚假而强大的噪音, 毫无意义。

当人们认识到这些之后, 在高速电子计算机出世之前, 人们得想法先将大尺度涡旋运动分离出来单独计算, 这就是“滤波”(filtering)概念。在这里, 充分利用上述三力的准平衡是重要的, 于是建立了相应的逐级近似法, 初级近似是三力平衡, 即所谓的“地转风”(geostrophic wind), 再由地转风计算惯性力, 并与热力学方程联立, 得到“准地转模式”(quasigeostrophic model), 它确实只保留了涡旋运动。此法于1940年由Kibel^[3]提出, 他得到了很大的成功, 独自一人利用手摇计算机工作了6小时就完成了苏联欧洲部分的24小时天气预报图, 比较接近实况。后来Kibel^[4]著书, 形成了系统的理论。“准地转模式”成为研究大气和海洋动力学(主要是大尺度涡旋运动)的经典模式, 而且即使在高速电子计算出现后, 仍用它作数值天气预报, 直至上世纪70年代。

另一种滤波模式是1939年首由Rossby^[5]提出的。他把大气运动沿垂直方向对全气柱积分, 并认为积分后的二维速度场是没有散度的, 变成一个二维“正压涡度方程”(barotropic vorticity equation), 只包含有涡旋运动。不过当时Rossby主要用它分析和探讨高空天气图的大尺度长波(实为以波状气流形

式出现的涡旋运动)。其后, Charney 拟用作天气形势的预报图^[6], 但直至 1947 年世界第一台由电子管组成的电子计算机 ENIAC 出世后, Charney, Fjörtoft 和电子计算机之父 Von Neumann 合作, 于 1950 年用它对非线性正压涡度方程积分, 才得到世界上第一个由计算机做出的 24 小时天气预报图(图 2 是其中一例)^[7]。因为强调用计算方法和电子计算机, “数值天气预报”(numerical weather forecast)一词才被正式确定, 其名称掩盖了天气预报的流体力学方法, 尽管后者是更为反映本质的。

自 1954 年起, 数值天气预报在美国变成了日常业务, 供天气预报员参考。从此时起, 所用的大多已不再是正压而是斜压位涡度方程(baroclinic potential vorticity equation), 其实, 它完完全全就是准地转模式。

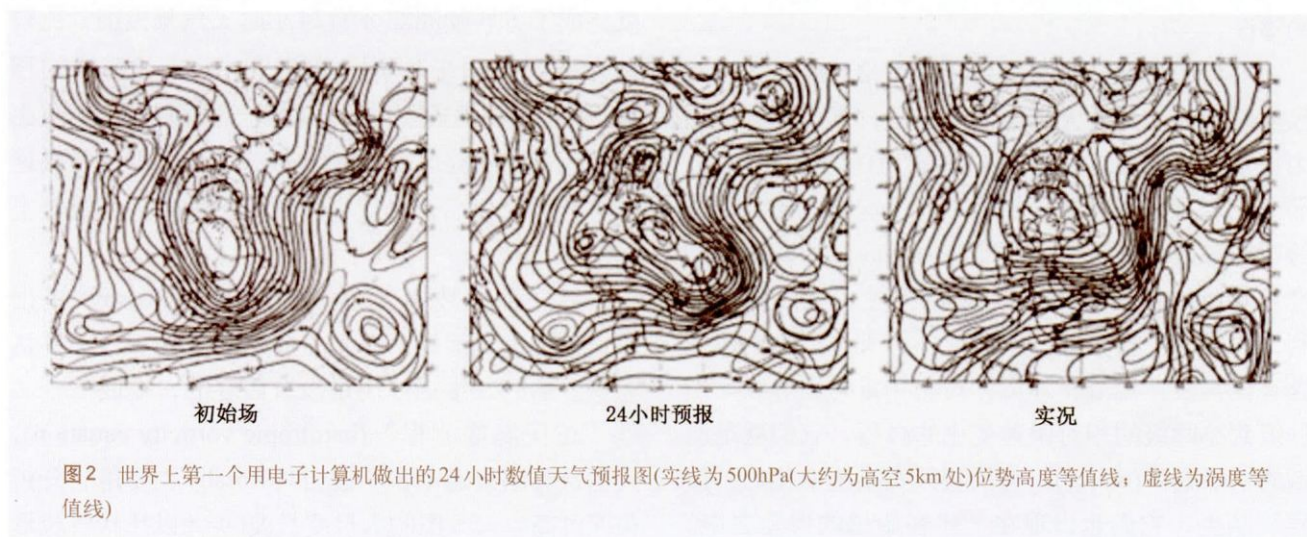
5 斜压流体力学原始方程模式——数值天气预报的青春

滤波模式抓住了天气系统主要是涡旋运动这个核心。就很大范围的平均而言, 惯性力的绝对值确实比科里奥利力的绝对值小一个量级, 但在有些(关键性的)局部地区二者甚至是相当的, 准地转模式精度不够。另外, 被滤去的像重力惯性波等“噪音”对真实大气中的涡旋运动有干扰, 且与之有相互作用, 实际上是不能简单分离出来且不考虑它们的作

用的。更何况像重力波和对流等在局部地区有时还可造成剧烈的天气现象, 故用滤波模式做出的数值预报只能达到可供天气预报员参考的水平。要使数值天气预报变成天气预报的主要依据, 还得回到使用斜压流体力学原始方程式组, 它后来被人们称为“原始方程模式”(primitive equations model)。要实现它, 在理论、计算方法和计算技术上都要经过很大的跨步甚至是飞跃。

首先, 在真实的大气中, 虽然总是以大尺度涡旋运动及其“演变过程”(evolutionary process)为主, 大体上可以“地转风”来近似; 但其他形态的运动(以风与地转风的偏差(简称“地转偏差”, geostrophic wind)为主要特征)又总是不断产生。是什么原因使准平衡状态总是保持着? 这就是所谓的“适应过程”(adjustment process)。理论分析表明: “适应过程”的物理机理是局地源区产生的波动通过快速的能量频散(dispersion)弥散到广大空间, 从而保留下涡旋运动, 且在科里奥利力作用下趋于准地转风平衡状态。而“演变过程”的物理机理则主要是涡旋通过较慢的能量频散过程而变形, 并以质点自身速度传播所致。

在求解原始方程过程中, 上述这二过程必须得到正确反映, 不能被初始场的误差和计算格式的误差所玷污, 否则就会得到 Richardson 的失败, 故计算格式必须在细心考虑物理机理的指导下设计。可以想象, 如果计算格式能保证各种波的相速和群速



算得好,这个目的就能达到。为此,有以下三种方法:第一种是时间步长取得很小,保证对最快的波能满足要求,那么对其余的波也就能满足要求了;第二种是对不同类型的运动(尤其是波)采取不同的时间步长,即所谓的分解格式(split scheme);第三种是所谓半隐式差分格式(semi-implicit scheme),对涡旋运动来说,能满足计算稳定性判据(criteria of computational stability)和较准确的相速和群速的要求,但对激发快波的项和快波随时间变化的项则采取隐式时间差分格式(implicit scheme),使那些不大重要的快波更快弥散,更快地达到准平衡状态,但不妨碍涡旋运动的演变。以所需的计算时间来说,第一种最多,第二种其次,第三种最省。这三种方法至今都仍然在有效地使用。

另一点要考虑的是关于计算过程中误差的累积问题。既然大气运动中有准平衡,就是有些力大抵相等而相消,例如设方程为 $A+B+C+D=0$,其中 B, C, D 都是大项,但大抵相互抵消,余额为小项,而反映演变的项 A 与此余额抵消。在计算机有效数字不多的时代,如果不把 $B+C+D$ 合起来作为一项($B+C+D$)计算,而分开单独计算,并逐一与 A 相加,则有可能 A 被淹没在舍入误差之中,而使得结果没有意义,所以如何应用组合率的顺序也要从物理观点去考虑。即使现代计算机的精度已相当高,但如果计算时间步数非常巨大(做气候预测尤其如此),准平衡态计算误差的长时间积累也有可能达到相当可观的地步而使预报变质。

还有一点是,滤波模式中只有一个变量,时间步长也相对较大,但原始方程模式中变量是数个,时间步长又短,故同样是做24小时预报,其计算量比前者至少高1—2个数量级。好在电子计算机发展迅速,到上世纪60年代初就出现了大型高速计算机,在技术上为应用原始方程模式提供了条件。

第一次用原始方程模式做出实际天气预报图是笔者1961年在莫斯科完成的^[8](见图3),采用的主要是半隐式差分法。旋即莫斯科世界气象中心将它用于日常业务;1966年起,美国也将其应用于日常业务,但增加了大气垂直层次,空间差分格式也不相同,用的是第一种时间步长取法。从

上世纪70年代起,世界各国就普遍使用原始方程模式了,数值预报已可超过预报员主观的天气形势预报,展现了其优势,从而成为做天气预报所必备的了。

原始方程模式还可以较好地预报垂直速度(速度的垂直方向分量),甚至可以算出其间歇性(见图3右下图,其中四点 A, B, C, D 位置见图3上图),这就为降水预报提供了一定的条件,尽管还不是降水量预报本身。

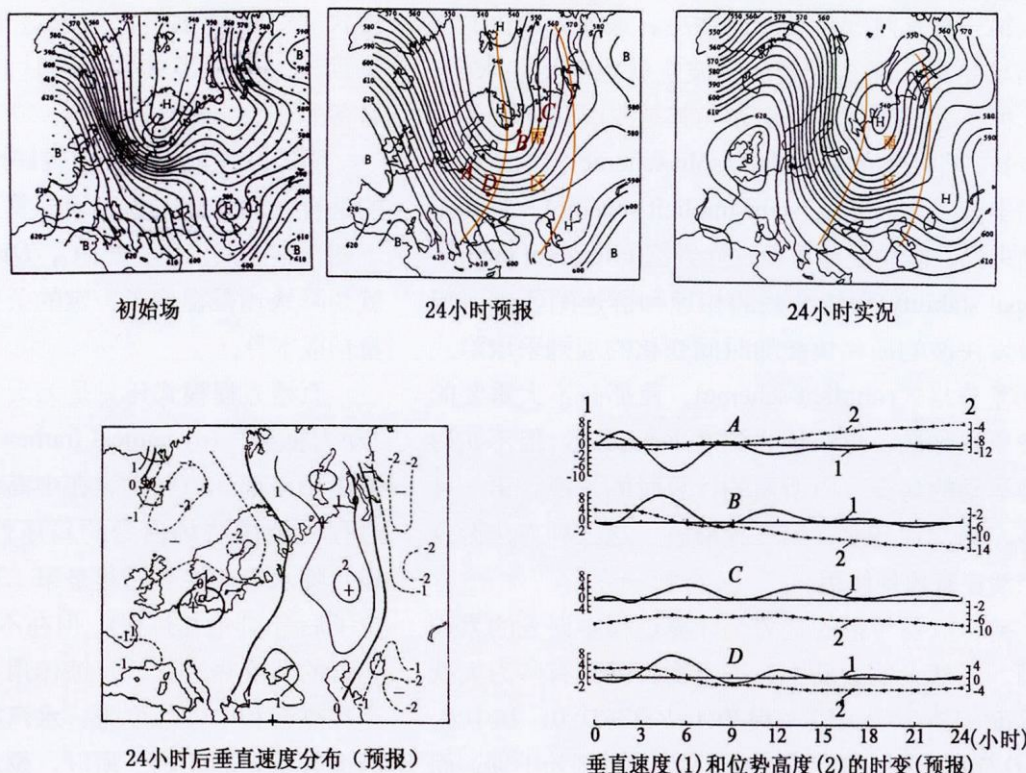
原始方程模式还只是为天气预报提供了较好的“动力框架”(dynamical framework),离预报天气现象还相差很远。其实,在中高纬度带,大气的演变过程主要由流场自身的斜压性和绝热动力过程所致,降水等非绝热过程是第二位的,前者大体上决定了后者(非绝热过程),但在不太少的情况下,后者包含的非绝热过程的反馈作用也是相当大的。特别是在热带和中低纬度带,水汽相变过程是大气运动的极其重要的能源。所以,像水汽相变、辐射能吸收和传输以及边界层的作用等物理过程,都必须进一步计入到模式中。同时,纯动力过程的物理规律(即大气动力学问题)也必须进一步深入研究,才能解决用物理观点预报天气问题,这些是自上世纪70年代起的重要研究课题。

6 数值天气预报发展中提出的一些突出理论问题

6.1 模式的理性检验——数学物理基础问题

大气作为连续介质的流体,其动力学方程的每一项都是就每一个数学上的点而写出的,并且还做了一定的近似。这就产生了许多问题,例如单从这些偏微分方程出发,大气的整体是不是满足质量守恒、能量守恒和角动量守恒等定律?内能与动能和位能是怎样相互转换的?热机的效率如何?所引入的近似,如薄层近似(大气的有效厚度与地球半径相比非常小,在大气中各点离地心的距离可近似视为等于地球半径——如它以系数的形式出现在方程中的话),表观重力近似(重力加惯性离心力取为常数,

图3 用原始方程做出的天气形势和垂直速度的24小时数值预报图(黄线内为雨区。初始时刻为1959年11月21日03时。“垂直速度”是等效的量,指等压面位移的个别变化)



且垂直于球面)和准静力平衡近似(忽略了惯性力中的垂直分量)等,是否在整体上破坏了物理原则,或只改变了能量、角动量等的表达式?引入的近似是不是相容的或自洽的?大气有底界而无上界(在数学上讲是在无穷远处),边界条件应怎样提才是正确的和符合物理原则的?初始条件该怎样提法?等等。作为预报问题应怎样提才是物理上合理的且数学上也是严谨的和适定的?即是否有解,解是否唯一,和对初边值条件是否连续依赖?这些都是基础问题。我们不能满足于数值预报的一时胜利,而应就上述这些问题进行理性的检验,对离散化了的计算格式更应如此,这样才能把数值预报建立在坚实的严格数学物理基础之上,才能健康地发展。其实,在以往的某些个别的具体数值预报模式中,不乏有在整体上破坏物理原则的和不自洽的,甚至无解的或多解的。

笔者在实际工作中注意了这些问题,进行了长期研究,大部分问题大体上已给出了解答^[9]。自上世纪80年代中期起,在国内外已有许多进行理论研究

的大气科学家、地球流体力学(即大气和海洋动力学的共性问题)学家投身研究,为原始方程模式的具体形式打好了可靠的数理基础,但有些很抽象的理论问题还有待解决。

其次,大气运动演变的基本规律也得弄清,以便认识为何有些天气过程能预报得好,而另一些则预报得不好。例如大气中有各种尺度运动的相互作用,大气绕地轴旋转的环流称为带状环流(或基流),迭加于其上的就叫做扰动,包括大气长波和天气系统。在什么条件下和有什么样结构的扰动是发展的?什么样的条件和什么样结构的扰动是衰减的?等等,这些都是基本规律性的基础研究问题。

6.2 非绝热(adiabatic)物理过程

6.2.1 水汽相变和云雨(雪)物理过程的复杂性

水汽在空中凝结变成云滴(水滴、雪花、冰晶),释放出大量潜热,直接加热当地大气,并通过扩散混合和对流运动等进一步加热周围的大气;而当云

滴增大后由空中下降至地面，并不把已释放的热量带走，除非它在空气中又蒸发成水汽。在自然界大气中，不比在物理实验室中，凝结是在自然界尚未很好认识的凝结核和云滴表面上发生的，影响因素很多，非常复杂，就连饱和水汽压与温度的关系也不能完全依赖热力学理论推出，其中包含了不少经验的修正和经验常数。尽管如此，尚可以半理论半经验地将水汽相变过程引入模式之中，以计算其对大气运动场(天气系统)的影响，但因其复杂性，公式有待进一步改善。

由云滴增长到雨雪形式以及形成降水的过程更为复杂，还须考虑凝结、蒸发以及粒子在湍流、重力和电场作用下的碰并，在云中还有更复杂而尚不清楚的过冷却水滴的存在以及它与冰晶相互作用的过程，这些均是物理学研究的对象。在大气科学界中到目前也只能粗略考虑这些因素，故至今尚难准确预报降水量。

6.2.2 辐射传输过程和云与辐射相互作用的复杂性

大气对太阳光有散射和吸收作用，这些都可以用物理学的散射理论和量子力学进行计算，而对悬浮在大气中的粗粒子(包括云滴)的作用的计算则相当复杂，较密厚的云顶甚至可视为反射面。大气对红外辐射的吸收和发射的计算就更为复杂得多。就以纯粹的大气气体成分来说，例如 CO_2 和水汽(H_2O)对红外辐射的吸收是由众多的吸收谱线造成的，要对每条吸收线逐一进行积分才能得到一个谱带(仍然是很狭小的)的吸收，甚至是用现代的超级计算机来计算也是非常耗时的。大气科学界现在采用两种方法解决：一种是利用谱带吸收的实验资料拟合的公式；另一种是将吸收线吸收沿透过系数进行重整，将沿频率的黎曼积分变换成沿透过率的勒贝格积分。尤其是后者，既大为省时，又有相当好的精度(理论上说是完全精确的)，也是一个将物理问题和数学方法很好结合的典型例子。

难办的是大气中粗粒子(即所谓气溶胶，aerosol)和云雨的存在，它们的化学成分复杂，又与辐射有很复杂的相互作用。辐射作用使它们的微物理特性(如凝结率、粒径及其谱分布)发生改变，而这又反过来影响辐射传输过程本身。这些是直到目前数值天

气预报和气候预测中最不确定的问题，尤其是当云等为空间不均匀的情况时。

6.3 次网格尺度过程和参数化方法

进行数值计算总要离散化，于是在空间上总有一个可表达的最小尺度，俗称网格距(grid size)。小于网格距的过程称为次网格尺度过程(subgrid processes)，它们本来在计算模式中是没有的，但在实际大气中是客观存在的，而且多种多样，做天气预报时不能不考虑；它们甚至对模式中可表达的尺度过程(天气系统，或简称大尺度过程)还有强烈作用，故在数值天气预报中必须进一步考虑这一点。为此，就得使用参数化方法(parameterization)，即通过物理考虑(甚至是经验)，将次网格过程的特性及其对大尺度过程的影响用大尺度的状态变量来表达，得到一些公式，其中包括一些参数。下面举两个有名的例子。

6.3.1 积云对流参数化

在很多情况下，降水往往是由积云对流(cumulus convection)产生的，而一朵积云的水平尺度为几公里到几十公里，即使在现代数值天气预报模式中都无法很好表达，因此需要参数化处理。有两种典型的方法：郭晓岚(Kuo H. L.)方法^[10, 11]和荒川(Arakawa A)方法^[12]。目前使用的是它们的细化改进或混合改进。

这些参数化方法都将大尺度大气变量看作在水平方向是均一的，只有垂直结构。小尺度扰动在这种环境中发生，特别是因地面不均匀，总有气块上升，若环境合适(即达到对流发展的判据)，使其所受到的浮力大于其自身的重力时，气块就能继续上升而温度降低，达到一定高度后，其中的水汽就会凝结成云，释放的潜热使气块温度升高而更易上升，释放更多的热量，最终使网格内的大气加热。设定扰动的类型(云体形态)和取某种统计分布，就可算得网格内积云对流加热率的垂直分布。郭晓岚方法设定云为云泡，内部均匀，成云降水的总量由大气最底层的水汽辐合量决定，不必考虑云尺寸的分布，由此得到的加热率垂直廓线很简明，即其参数化公式

主要由“水汽辐合量”这个参数决定。荒川方法则设每朵云是互相独立的，都有相似的结构，其水平尺寸有谱分布，决定于云底的风速辐合量。假设云的发展在瞬间即达平衡态，由此决定谱形，对云谱积分就可算出加热率曲线。这种参数化方法看似更仔细，但仅是有相似的云形这点就与实际不符。所以两种方法都留有很大的改进空间，但无论如何，都使在数值天气预报中计入积云的影响成为可能而被大量应用。

6.3.2 不均匀云与辐射的相互作用参数化

大气中的云种类繁多，按其出现的高度分，有低层云、中层云和高层云；按其状貌来分，有积状云、层状云、浅薄的卷状云以及三者的混合，它们的微物理特性各不相同，对辐射传输的影响也各异。严重的是，它们在一个网格内很不均匀，沿高度又可能相互重叠。它们对辐射的影响不是相互独立的，例如，当太阳光垂直下照时，要先经过上层云的削弱，才能达到下面一层云的顶部，经它的削弱后再向下传输，这种影响是以乘积的形式出现的。但我们无法确知次网格的云在三度空间中的分布，故要计算一个网格上的辐射量，必须按某种物理的或纯粹计算上的考虑，对云分布的几何学和微物理特性做种种统计考虑，从而得到次网格云与辐射相互作用的参数化方案，它由各种云的参数化、云的微物理特性参数化以及辐射传输计算的参数化方案等组成，十分复杂。大抵这样的次网格云与辐射相互作用的参数化方案就是几个非线性算子的乘积，不满足交换律和分配律，各家方案各有所长，计算得到的辐射值则有可观的差异。于是人们尝试将各种参数化拆开，再进行重组，用统一的计算顺序和统一的编程，进行集合平均，结果是在相当程度上消去不确定度。此外，按此法还可找到合理且最优的参数化方法^[13,14]，目前正在全面探索之中。

6.3.3 大气边界层和下垫面的影响

大气的最低层就是所谓的边界层(boundary layer)，它与地表面接触而产生一些特有的相互作用过程，影响着热量传输、水汽传输以及相变、动量传输和表面摩擦等过程。这些都会影响边界层上的大

气运动，甚至会影响到一些剧烈的天气系统发展与否，例如海面的蒸发和水汽在边界层内的辐合量是台风形成与发展的重要过程，陆表上的对流和积云的生成亦大多由边界层内的扰动演变而成，而这些扰动则大多是由地形和陆表特性的不均匀所致。正如一般流体力学中边界层问题一样，大气边界层也只能半理论、半经验地将动量、能量、物质等的传输作为湍流扩散过程来处理。此外，如果地表特性的不均匀性与随机性相差很远，即可有次网格尺度的结构，则不能套用统计模式计算网格上边界层的通量等，而必须用小范围但具有更高分辨率的模式计算，如山谷风环流、海陆风环流等，然后再嵌入到原来的模式中。

6.4 可预报时限和预报能力

由于观测资料的不完备，且必有误差，模式又有各种各样的简化，其中的参数也有不确定性，再加上计算上的截断误差和舍入误差，这些必然会通过误差的累积过程(非常复杂而大多尚不可知)使预报越来越不准确，而最终使某时刻的预报不可信，这个时刻离始报时刻的时间长度就称为可预报时限。它是考察一种模式或一种预报方法的能力的一种指标，通称为预报能力(predictability)。这是很重要的实际问题。

就用模式做预报来说，可有两种方法确定可预报时限。一是在模式中引入随机误差，无论是引入到初始场中，还是引入到模式中所包含的诸多参数中，误差的标准方差(standard deviation)应等于实际的标准方差。于是预报场就是一个集合，研究其离散度随时间的变化，当它达到大气变量自身变化的方差时，这个时刻离初始时刻的时间长度就是可预报时限。此后的预报就是不可信的。另一种方法是根据已累积的预报个例的集合，计算预报和实况的离散度来定出可预报时限。最初人们是按第一种方法，所用的模式相当简单，得到了较乐观的估计，可预报时限为半个月。但后来，按第二种方法计算，即使到现在，可预报时限也只有7天。其原因除模式的复杂性和观测的误差之

外，也许还因为模式中还包含有未被我们认识的过程以及模式无法表达的天然不确定性或测不准之处，这些都是数值天气预报发展过程当中必须逐步研究解决的。

6.5 突变、分叉、混沌和韵律

无论是实际的天气过程还是数值天气预报，都发现有突变现象(abrupt change)和分叉现象(bifurcation)，尽管不像数学上定义的纯粹突变和分叉那样。还有混沌现象(chaos)，就是现在大家早已熟知的所谓“蝴蝶效应”，首先是由气象学家Lorenz^[15, 16]通过非常简化的大气动力—热力学方程而发现的。Lorenz的原话是，南方一只海鸥(并非蝴蝶)鸣叫会引来北方一场大雪。这当然是文艺的极度夸张譬喻，而非科学的真实。其实，海鸥(或蝴蝶)的动作只能引起它周边空气的极微小的运动，经过气体分子或湍流扩散，信号很快会在很小范围内消散殆尽。他只是以譬喻方式强调初值的误差会使预报差别很大，即中国战国时期的思想家早已指出的“差之毫厘，谬以千里”。后来，这个问题便用来讨论中期天气预报问题^[17]。

从统计意义上说，突变、分叉和混沌就是限制可预报时限的一些主要动力学过程，而就个例而言，它们都是很难预报的对象——如果未明了其动力学机理和规律的话，但它们的发生往往对应于剧烈的甚至形成重大灾害的天气。关于这些，正是天气学和数值天气预报应加以针对性研究的对象，理当别论。

天气和气候中还有所谓的“韵律”现象(rhythm)，例如，一种天气(或气候)形势在某地域某时段出现后，就会减弱甚至消失到无痕，可是经过一定时段之后，又会在原地域或别地域出现相似天气(或气候)形势。它主要是由动力学过程自身或模式结构自身所决定，初值误差的影响并不大。它在气候预测中尤其具有很重要意义，即寻找所谓的遥相关型(teleconnection pattern)。

突变、分叉和混沌现象，在经过初值误差决定的可预报时限之后，都可能产生韵律现象。但即使

没有上述三者，也可以产生韵律现象。一个简单的物理例子是：两个频率相差不大的振动叠加起来，会产生一种被很低频率调制的群波传输出去，群波的包络线幅度就是一种韵律，它是动力过程自身所具有的特性。下面一个例子说明，并非在上小节定义的模式可预报时限之外，该模式就不具有预报能力。例如：对一个线性的简谐波 $f=\cos(x-ct)$ 来说，如果计算模式给出的相速为 $c+\Delta c$ ，预报的波就是 $f_p=\cos(x-(c+\Delta c)t)$ ，预报误差为 $\Delta f=(f_p-f)$ ，它是 t 的函数，如果取 $|\Delta f|$ 第一次达到 $1/2$ 的时刻为可预报时限 t_p ，则在 t_p 之后，但在 $\frac{2}{c} < t < \frac{2}{c} + t_p$ 之间，又有一段时间 $|\Delta f| \leq 1/2$ ，也就是预报仍可满足要求。可见，如果人们有长时期的经验积累，不论是主观的，还是通过数值预报等总结出来的，只要善于总结，总可以参透玄机，悟其妙道，找到尽可能多的可以预报的天气和气候的类型。上节所定义的可预报时限和预报能力并非绝对的，天气的演变及其预报有许多奥妙呵。

7 大气环流模式的应用和集合预报方法——数值天气预报的成年

有了原始方程自治的动力框架和合理的大气上下界边界条件之后，计入上节所述的物理过程，并将预报区域扩展到全球，数值天气预报模式就从物理和数学上说是理论严谨的了。不仅可以提高短期数值天气预报的精度，而且可以做全球范围和中期数值天气预报(即尽量达到自然的可预报时限)。所谓中期是指三天以上至一周或两周，而短期则指直到第三天。

1980年前后，欧盟成立了中期天气预报中心(ECMWF)，凝聚全欧科学家进行研究，并建立了日常业务，很快就发现数值预报中出现了本文第6.4和6.5节中提到的问题，并设想必须解决提高模式的精度问题(本文第6.2和6.3节)和碰到的与6.1节有关的计算方法问题。上世纪90年代，中期数值天气预报进入了成年期。

这里单讲提高可预报时限的一些问题。由观测

资料得到的初始场中含有误差不可避免,但又不能确切知道其大小和分布。若模式足够好,则预报中所出现的巨大误差,尤其是由此引起的虚假的突变等现象,必定是由初始场中误差的某些有组织的结构及其演变所致。记误差场为 (x, y, z, t) , 其范数为 $\sigma(t)$ (例如其全空间在 t 时刻的能量)。显然,在初始时刻 $t=0$ 时, $\sigma(0)$ 就是初始场的观测误差的范数 σ_0 , 它等于观测误差的均方差。不难由模式推出误差场 随时间的演变方程,故在 t 时刻范数最大的误差场就是在限制 $\sigma(0)=\sigma_0$ 条件下, $\sigma(t)$ 为最大的那种结构 (x, y, z, t) , 这可由数学运算求得(在数值预报情况下,当然要通过数值求解)。在上世纪 90 年代初,Palmer 等^[18, 19]最初设误差为小扰动,于是问题归结为求线性算子的一系列特征值和特征函数(在离散情况下为特征向量,Palmer 等称之为奇异向量(singular vector))。穆穆^[20]则进一步求解非线性扰动方程的特征向量。不难想象,这样的由奇异向量或特征向量表达的扰动在初始时刻必定是发展型的(否则不足以强大到改变原流场形态),但演变后期则可能变成衰减型(把能量反馈回已变形的基本流场),这正是本文 6.1 节最后一段所指出的研究对象。将各个这样的向量 $(x_n, y_n, z_n, 0)$, $n=1, 2, \dots$ 加到初始场中去做预报,于是得到一个预报集合,取这个集合的数学期望作为正式的预报,这就叫做集合预报方法(ensemble forecast)。后来的实践表明,这样做确实既提高了预报准确度,也延长了模式的可预报时限。

8 四维同化方法和广义的初值问题 ——数值天气预报的成熟

将数值天气预报作为一个由初始场决定的初值问题,只用到了初始时刻的观测资料。其实我们有很多资料,也应该想办法在数值预报中应用起来,以提高预报精度和可预报时限。例如,我们还有卫星遥感、雷达观测、飞机观测、船舶观测、海上浮标观测等非定点定时的所谓非正规或非直接的观测资料。特别是随着预报的进行,还有不同时刻的观测资料逐次而来。而历史天气的某些有

用的统计特性,则既可用于检验预报,更可以把这些检验结果作为订正,引入到预报模式和预报方案中去。这样的方法则不是狭义的初值问题,而是更实际、更有用的广义初值问题:从过去的经历预报未来,尽管这些经历在任何时刻都有误差,而且往往是往是不完全的。

这样,就发展出四维同化方法(4D data assimilation)。在有观测资料的三维子空间和时刻,使观测到的量和由模式直接算得的或间接推出的量相接近(融合),而没有观测资料的地域和时刻又有预报场作补充,于是在一定时段内就有一套更好更全面的混合而成的资料,故不断地随时有资料更新的预报必定比只用原来方法预报为好。欧洲中期天气数值预报就是这样做的,其预报是当今世界上最好的,其全球平均的可预报的时限已超过 7 天,有望达到 10 天^[21](图 4)。这里可预报时限是取距平相关系数 $r_{op} \geq 0.5$ 的时段, r_{op} 是指气象变量与其标准值之差的实况和预报值的相关系数,一般取为在一定区域内(如全球或半球)的平均。

这种方法在世界各地和 ECMWF 同时发展和应用,而且模式的分辨率和物理过程的精细程度都已大为提高,其计算量之大则是“超级的”。好在电子计算机的进展能够与数值天气预报发展的速度同步,今天的数值预报已经变成数学物理理论和超级计算很好结合的成熟的巨大系统工程。

在全球中期天气预报发展的同时,区域性的短期天气数值预报也已发展到用更精细和分辨率更高的模式和四维同化方法,并把它嵌套到全球模式中去。图 5 和图 6 就是中国气象局做出的一个台风路径和强度预报及台风登陆时的天气形势预报图(钱传海和高拴柱提供)。

9 数值天气预报的未来发展和气象预报的拓广

数值天气预报已经成熟,其前景更辉煌。在前进的道路上,人们的需求将提出更多的有待解决的问题,而且受数值天气预报成功的鼓舞,气象预报也已逐步拓广到新领域中去了。

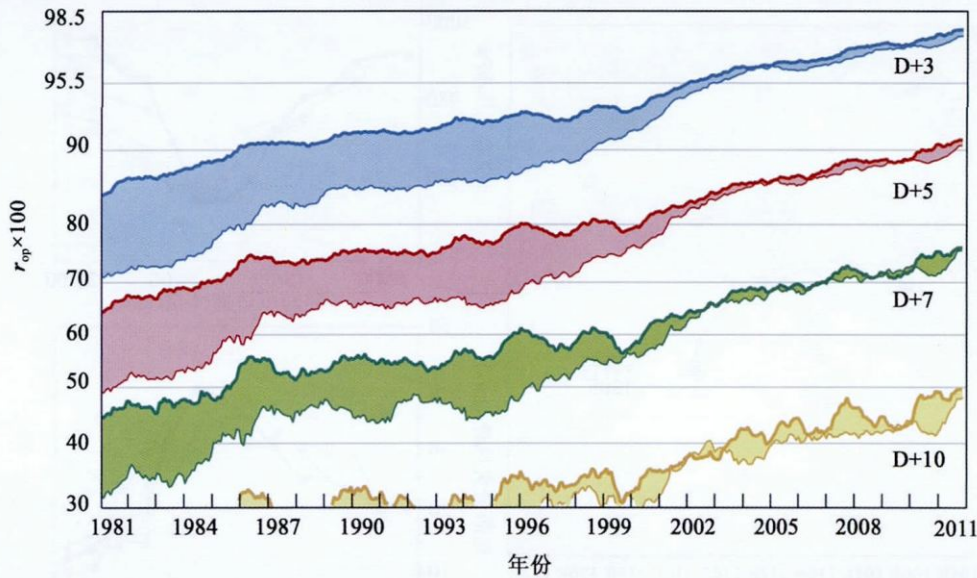


图4 ECMWF 500hPa 位势高度的预报能力逐年提高(纵坐标 $r_{op} \times 100 \geq 50$ 被认为预报可信。D+n 为第 n 天的预报。上下曲线各为北半球和南半球)

9.1 灾害天气及相关灾害的预报和防治

目前,对灾害天气还预报得不好。例如大多的暴雨的强度预报得太弱,甚至连落区都预报得不好;台风的预报精度也需提高;龙卷风和猛烈的雷暴对流及雷电过程还基本上无法预报。这些需要有更好的探测手段,也需要有针对性的特殊数值预报模式。至于由灾害天气引发的次生灾害,如山崩、泥石流和滑坡、林火、水库和河流溃坝等,也是更需要预报和防治的对象,为此需要建立相应的物理数学模式,与数值天气预报模式耦合起来。

9.2 探测网的完善和规划

不能想象,只用一个探测网就可以将所有要预报的天气现象“一网打尽”。其实,现有的探测网(包括其时空分布和探测的变量)是相当不完全和不够精确的,从而有漏网的和探测模糊的天气。因此,很自然就会提出这样的问题:为了在某地域和对某种危险的天气(例如台风和暴雨)预报好,应在何时何地做何种更精确的补充探测?这就是确定“观测目标区”问题,今已开始了研究^[22],其本质上仍然是

求优化问题,与求奇异向量和四维同化等的方法类似,但具体方法不同。

9.3 气候预测

作为数值天气预报的直接拓宽就是气候预测的动力学方法,或简称为动力学气候预测(dynamical climate prediction)或数值气候预测(numerical climate prediction)。它几乎与数值预报同时发展,也经历过从滤波模式(但计入与陆表和海表的热量交换)^[23, 24]到全球原始方程模式等阶段,但由于其更为复杂和更为长期,短期气候预测至今只达到可准业务使用的阶段。

气候的成因和演变更为复杂,影响因素更多。首先,海洋(包括洋冰)和陆表层状态及其演变对大气中的气候有重大的影响,故预测气候,除大气环流模式外,还必须建立较好的大洋环流模式和陆表过程模式,并将大气环流模式与之耦合起来,这是一个更为复杂的模式系统。

海洋和陆表层的观测资料更为不足,四维同化就更显得重要。集合预测显然也是必须的。注意到气候预测的时段已完全超出初值问题的可预测时

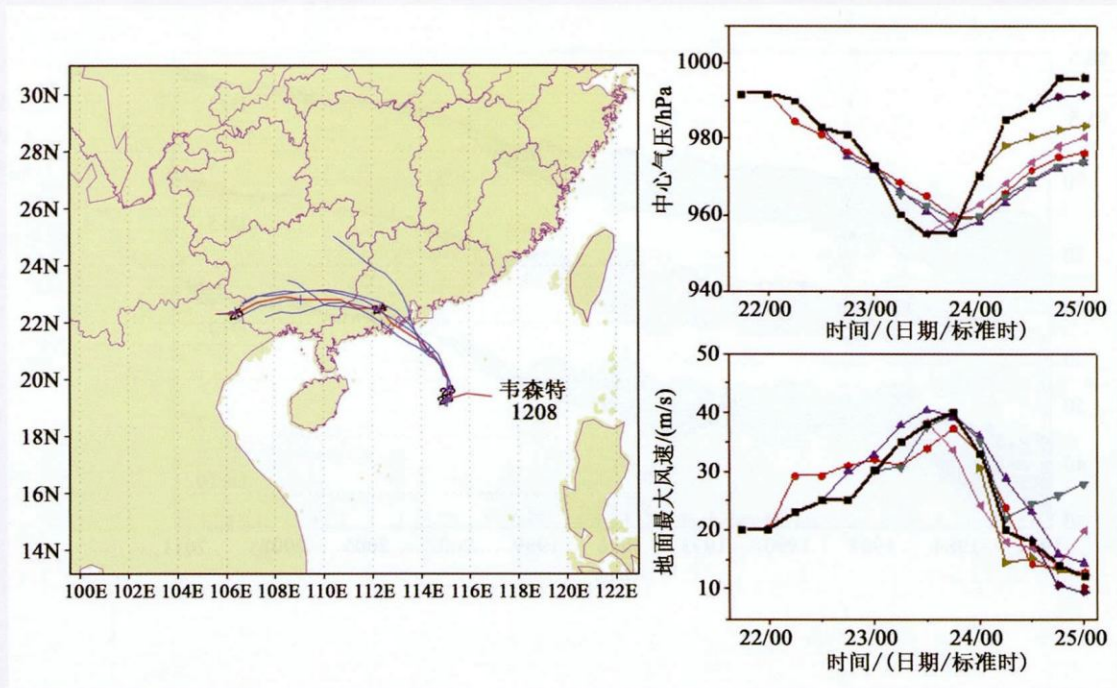


图5 2012年韦森特(1208)台风路径(左图)和强度(右图)的24小时预报(粗黑线为实况, 其余是集合预报中的一些个例)

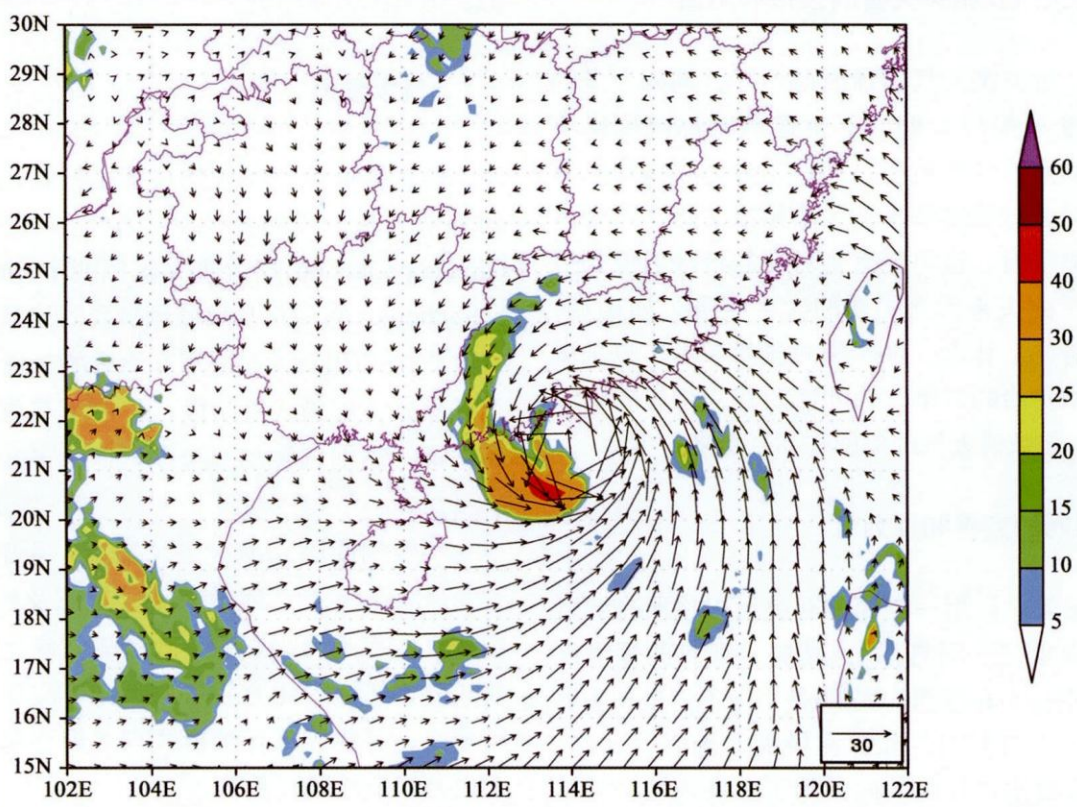


图6 韦森特(1208)台风登陆时的地面天气形势预报图(箭头为风速矢量, 风速大小用线之长短表示。彩色为观测到的雷达回波强度, 它越强则降雨越强)

限, 预测误差最主要的来源可能是模式自身的误差, 故不能像中期天气数值预报那样, 由初始场加小扰动产生集合, 我国的经验是可用逐天做的预测作为集合, 这是因为这样有前后一大串预报, 它们合在一起, 可在一定程度上反映模式误差导致的大范围较长期的流场系统间的相互作用。更长时段内的流场即气候系统(以别于天气系统), 才是产生气候异常的主要载体。尽管如此, 气候预测仍然还有较大的不确定度, 需要由过去的样品集里找出一些统计特性来建立预报的订正系统。除此之外, 不只给出数学期望, 同时给出集合预测的离散度和某种气候型(例如多雨型)的概率, 可能对用户更为有益, 这是因为气候预测主要用于规划, 而规划是可以有多种方案选择的。我国最早就是这样做的^[25], 现今世界上也大体这样做, 大同小异。

9.4 气候与生态和环境系统的预测及调控

人们的居住和活动与其周围的生态和环境系统更为密切相关, 这里的“生态”是指有生命活动的植物界(在这里称为“植被”)、动物界和微生物界的状态。它们和气候变化等一起, 还有物种演替等的演变进展和灾害过程(如荒漠化、传染病和病虫害的发生和传播等过程)都是人类所关心的。人们在更长时期内的活动规划, 尤其是为了可持续发展, 正在要求对气候与生态和环境系统的变化做预测和调控规划。预测的需求不说自明, 调控规划的例子如大规模改变自然环境、城市化和工业化、人类活动带来的排放和污染等等。总之, 人们应如何顺应自然之理来合理规划自身的活动, 使自然环境能承载人类的可持续发展。

参考文献

- [1] Bjerknes V, Bjerknes J, Solberg H *et al.* Physikalische Hydrodynamik mit Anwendung auf die Dynamische Meteorologie. Berlin: Springer-Verlag OHG, 1933(最早发表于 Carnegie Institution, Washington, 1910, 1911 很难找到)
- [2] Richardson L H. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1922

现在, 科学界已经在建立“气候与生态和环境系统模式”, 或简称为“地球系统模式”(Earth system model)。大体上可归纳为7个分系统模式, 即大气环流模式(AGCM)、大洋环流加洋冰模式(OGCM+OICM)、陆表物理过程模式(LSM)、植被动力学模式(DGVM)、气溶胶和大气化学模式(AACM)、陆地生物地球化学模式(LBCM)和海洋生物地球化学模式(OBCM)及其耦合。这样的地球系统模式雏形虽已建立起来了^[26, 27], 但对这样超大规模的系统模式的合理研制和模拟, 对它演化过程的研究、预测和调控, 还要求地球科学、数学、物理学以及化学和生物学界共同合作才能有成。

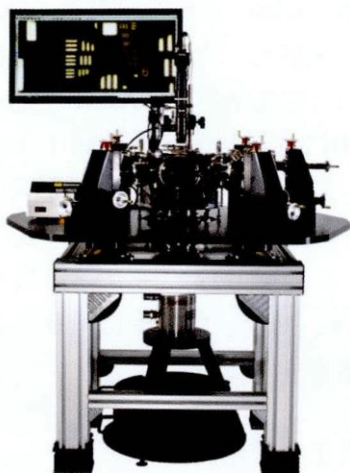
9.5 人工影响天气工程理论问题

人工影响天气(如增雨、消雹、消雾等)有巨大现实意义, 其提出已有几十年历史, 主要方法是通过在云雾中撒播催化剂来控制其中各态水滴的变化过程, 以达到人们的目的。无疑, 即使在现有方法和技术条件下, 要达成目的, 必须将观测、预报、作业方案和效果检验一体化, 提成一个“自然控制论”问题, 这里包括资料同化、适时和滚动方式预报和最优规划问题等, 大约5年后可变成可行的业务。至于更进一步的提高则要在催化材料和物理过程方面多下功夫, 还要探索人工控制雷电的可能性, 这些也都需要多学科共同努力。

致谢 本工作得到了中国气象局李泽椿院士与陈德辉、钱传海和高拴柱诸位数值天气预报专家提供的资料以及中国科学院大气物理研究所吴琳博士的协助, 谨此致谢。

- [3] Кибель И А. Приложение к метеорологии уравнений механики баро-клининой жидкости. - Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1940, М 5, 627—638
- [4] Кибель И А. Введение в гидродинамические методы краткосрочно-го прогноза погоды. — М.: Гос. изд-во технико-теор. лит-ры, 1957, [Ш, VI]. 20 (中译本: 基别尔. 短期天气预报

超低温真空探针台



- 无需制冷剂
- 直流, 微波, 光纤
- 4K-800K
- 可增加磁铁
- 多达8个探针臂
- 客户定制
- 模块化设计

实验室低温制冷系统



超低振动
显微应用

样品在气体中
可快速更换



**Advanced Research
Systems**

Email: ars@arscryo.com

www.arscryo.com

报的流体力学方法引论.北京 科学出版社 ,1959)

- [5] Rossby C G *et al.* J. Mar. Res. ,1939 2 :38
- [6] Charney J G. J.Meteorol. ,1949 6 :371
- [7] Charney J G ,Fjörtoft R ,Von Neumann J. Tellus ,1950 2 :237
- [8] ЦЗЭН ЦИН-ЦУНЬ. Применение Полной Системы Уравнений Термогидродинамики К Краткосрочному Прогнозу Погоды В Двухуровневной Модели ,ДАН СССР ,Т.137 ,No.1 ,1961 ;Scientia Sinica ,Vol. ,No.3 ,1963
- [9] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础(第一卷).北京 :科学出版社 ,1979
- [10] Kuo H L. J.Atmos.Sci. ,1965 ,22 :40
- [11] Kuo H L. J.Atmos.Sci. ,1974 ,31 :1232
- [12] Arakawa A ,Schuber W H. J.Atmos. Sci. ,1974 ,31 :674
- [13] Liang X Z ,Zhang F. Cloud-Aerosol-Radiation (CAR) Ensemble Modeling System. Atmos. Chem. Phys. 2013
- [14] Zhang F ,Liang X Z *et al.* Cloud-Aerosol-Radiation(CAR) Ensemble Modeling System : Overall accuracy and efficiency. Adv.Atmos.Sci. ,2013 doi :10.1007/S00376-012-2171-Z
- [15] Lorenz E N. Trans. New York Acad. Sci. ,Ser.2 ,1963 ,25 :409
- [16] Lorenz E N. J.Atmos.Sci. ,1963 ,20 :130
- [17] Palmer T N. Bull. Amer. Meteor. Soc. ,1993 ,74 :49
- [18] Palmer T N ,Molteni F *et al.* Ensemble prediction. In :Proc.1992 ECMWF Seminar , Validation of Models over Europe ,Reading ,U.K. ,ECMWF ,1992 285
- [19] Burzza R ,Palmer T N. J.Atmos.Sci. ,1995 ,52 :1434
- [20] Mu M *et al.* Nonlinear Process in Geophysics ,2003 ,10 :493
- [21] Simmons A *et al.* The ECMWF forecasting system : data impacts and prospects for ADM-Aeolus. http://esamultimedia.esa.int/docs/4-4_Simmons.pdf
- [22] Mu M ,Jiang Z. J. Atmos. Sci. ,2011 ,68 :2860
- [23] Блинова Е Н. Гидродинамическая теория волн давления и центров действия атмосферы. Доклады АН СССР ,т. XXXIX ,No. 7 ,1943
- [24] 长期数值预报小组(巢纪平等).中国科学 ,1977 2 :162
- [25] Zeng Q C. Experiments of seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation (invited paper). WCRP-84 ,Proceedings of International Conference on Monsoon Variability and Predictability ,ICTP ,1994 ,9-13 May ,WMO/TD - No.619 ,Vol. ,452-459
- [26] Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Earth System Model. <http://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model>
- [27] National Center for Atmospheric Research. Community Earth System Model. <http://www.cesm.ucar.edu>