

美国的业务数值天气预报

E. Kalnay等

(美国国家气象中心)

提要 在本文中，我们评论了近来美国国家气象中心的区域和业务数值天气预报的改进、所带来的预报技巧性能的发展，以及近来的主要研究领域。同时，也简要地介绍了在末年5年中可望出现的变化。

1. 引言

Brown(1987)评论了在一些主要业务中心的数值天气预报状况。他指出，一些中心具有两种类型的数值预报系统：(1) 高分辨率的大陆或次大陆规模的区域预报系统，它用于细致的短期预报(1或2天)，及(2)全球预报系统，它用于1或2天以上的大尺度预报，以及为区域预报系统提供侧边界条件。

最近几年，业务数值预报的水平已有显著提高，如图1所示。它给出500 hPa半球(两半球的 20° — 80° 纬度)5天美国全球预报与观测场(验证分析)之间的相关。因为从预报场和验证场减去了平均气候场，这种预报技巧水平的衡量称为“距平相关”。一般认为，为了对天气预报有用，数值预报必须

具有60%的距平相关。在图1中，为了抑制高频变化，对距平相关(ΔC)的逐日值做了季节平均。

得出的一些结果是值得注意的：(a) 预报水平具有较大的季节变化。冬季高度预报是最易预报的，它具有以大尺度大气波动为主的较强的振动；而夏季是最不易预报的，此时相对于气候值的偏差较小，并且在更大的程度上决定于像积云对流这样的小尺度效应。(b) 北半球(NH)5天预报水平方面有显著改进。直至1985年，冬季平均距平相关约为60%(勉强可用)，并且在其它季节低于60%。在最近两年，在夏季距平相关已达约70%，冬季则约达80%。因此平均说来，现在的5天预报其准确率相当于10年前的3天预报。(c) 南半球的预报水平远不如北半球，因为南半球的无线电探空测风网远不如北半球。然而，随着预报系统的改善及更好地利用卫星资料，南半球的预报水平也提高得很显著，5天预报的平均距平相关直至1986年为35—50%，而目前平均超过60%。

在本文中，我们简要地讨论了自1987年Brown的评论以来短期(2天)、中期(3—10天)和延伸时效(10天以上)的业务预报的某些发展。在美国海军和空军业务中心也已出现了许多变化，这些已列入参考文献，限于篇幅，我们将主要讨论美国国家气象中心的那些发展。另外许多近期文献已包括在美国

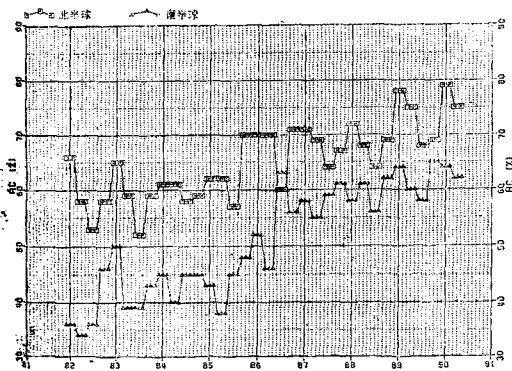


图1 5天预报的500 hPa高度距平相关(季节平均)，包括纬向波数0—12。上面的曲线：北半球(20° — 80° N)。下面的曲线：南半球(20° — 80° S)

气象学会的会议集(1991)中。

应指出的是,美国国家气象中心的业务预报的迅速发展明显地受益于与一些研究中心的协作,例如国家大气研究中心(NCAR)、地球物理流体动力学实验室(GFDL)、NASA的哥达德大气实验室(GLA)、大学的研究人员,以及海军和空军业务中心。这种协作已因两个新计划的实施而得到加强,这两个计划是:UCAR的访问学者计划,以及国家科学基金会和国家气象中心关于数值天气预报的联合计划。国际协作,特别是与像英国气象局(UKMO)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)这样的其它中心的协作也是卓有成效的,其结果是新概念能迅速地在多个中心得到试验,对大家都有益。

2. NMC的区域分析和预报系统

区域预报模式一般是在重要天气图时刻(00和12 GMT)进行运算,因此需要区域资料分析以提供初始条件。区域分析从12小时的全球预报开始,并利用可能得到的最新资料制作半球分析。这种方法对于其主要资料库为每12小时一次的无线电探空测风网资料的现行观测系统来说是适宜的。但是,它将不能满足国家天气局现代化计划的需要,此计划要求来自下一代雷达、风廓线仪、自动化地面观测系统、自动化飞机报告以及其它系统的全美国的新的频率、高分辨率的观测资料。从1992年起,这些新资料集将首次提供为探测和预报全国的局地小尺度天气事件所需要的关于高空大气状况的连续报告。为能利用新资料,现在的区域分析将在时间上更连续的“区域资料同化系统”所代替。类似地,70年代后期和80年代初期研制的现用模式将为新的中尺度模式所代替,新模式在流体动力学的数值处理和物理参数化方面将更为先进。

本文在2.1和2.2节中介绍了现行业务区域模式(套网格模式)和区域分析的主要特征和近来的变化。2.3节介绍了未来的中尺

度模式(MESO模式)和计划的区域资料同化系统。2.4节介绍了现在用于飓风预报的模式。

2.1 套网格模式和区域分析

从1985年起,美国天气局区域指导预报的主要来源是由区域最佳内插分析(ROI,见DiMego, 1988)和套网格预报模式(NGM,见Phillips, 1979, Tuccillo等, 1988)组成的区域分析和预报系统(RAFS,见Hoke等, 1989)。NGM在垂直方向取16层,覆盖北半球使用分辨率逐步提高的3重套网格,其最高分辨率(约85公里)在北美(图2)。RAFS的输出产品,为地方气象台的直接应用提供各种预报参数场(如地面气压和降水),也为模式输出统计(MOS)指导预报提供输入。

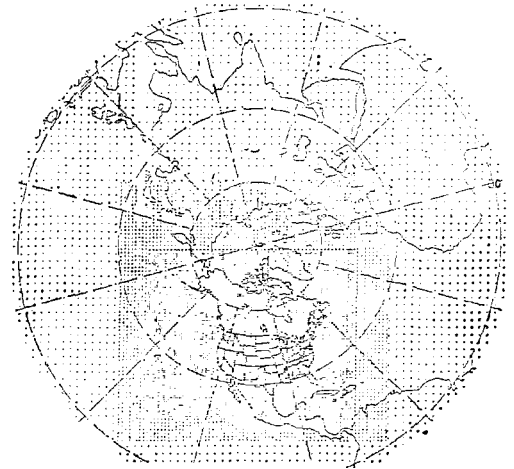


图2 三重套网格模式的网格系统。外围网格为半球,每一内部网格的分辨率为外围网格的1倍,最内部C网格的格点间距约为84公里(在45°N处)

在过去两年中,RAFS系统有了一些变化。变化的目的在于改善预报模式以及发展应用上述新的高频次资料集的能力。由于NGM的模式输出也用于统计预报,因此预报模式的改进要受到以下要求的限制:要尽可能小地改变预报的系统特性,从而不致改变用作MOS产品的基础的历史资料(Erickson等, 1991)。NGM的一些变化是(Pete-

rsen 等,1991);

高阶有限差分。为提高模式的流体动力学准确率,研制了4阶(而不是2阶)有限差分方案。正如对一个具有相当高的水平分辨率的模式所能期望的那样,这种修改使预报准确率稍有提高,水平截断误差也不再是主要的。

土壤温度的确定。过去 NGM 的土壤温度是通过利用瞬时的辐射平衡确定的。此公式现已由分析的近地面温度场的10天滑动平均代替。新方案减小了土壤温度的很大的周期性变化,并改善了过去近地面预报中的冷偏差。

改进的地形。关于 RAFS 北美地区的地形处理,原来在美国本土采用比其它地区分辨率较高的资料(Phillips, 1979, 见图3 a (译文略))。随后研制了新的分辨率较高的地形场(图3 b (略)),从而显著地提高了描写 Alaska、Canada 和 Mexico 地区山脉特征的细致程度,以及改善了美国其它地区的地形梯度。用新地形场作的试验表明,所预报的地形降水更接近实况,也减小了会出现错误的背风坡气旋发生的倾向。

改进的水上通量。使用与稳定度有关的水上通量(而不是采取中性稳定度)减小了加利福尼亚洋流上的通量并增大了大湖区及墨西哥湾流上的蒸发,从而改进了海洋气旋生成强度的预报。

预报模式中的这些变化改善了在所有时刻(直至48小时)以及大部分层次上的预报。48小时预报的850hPa的温度偏差从 -0.7°C 减少到 -0.5°C ,在850hPa和500hPa上标准差高度误差约减小5%。在2.4节中介绍了利用由区域资料同化系统所提供的分析进行的试验,它说明对小尺度预报也有改善。

值得指出的是,NGM 本来是作为完全覆盖北半球的套网格系列而建立的。这样就不需要使用当时尚很不准确的全球模式决定的边界条件。NGM 采取对赤道对称,并且由相当粗糙的A和B网格(分辨率分别约为

340和170公里)提供最里边的C网格所需要的边界条件。考虑到近来全球谱模式的改善(第3节),重要的是要试验对于NGM最里边的C网格,是否仍应优先采用从NMC全球模式得到的边界条件,而不用从较粗糙和准确性较低的A和B网格得到的边界条件。这种方法的缺点是,全球边界条件源于12小时前进行的预报,因而未利用最新资料。虽然在一些试验中,利用全球预报的边界条件使预报有所改善,但在远离北美的地方使用老资料常常会使模式的C网格区域西部的预报质量下降。因此,保留了在预报期间利用套网格A和B的方法。另一方面,在新的区域资料同化系统中,采用来自全球模式的同时刻边界条件已表明会比A和B网格更准确。

2.2 未来的区域/中尺度模式

到90年代中期,将首次利用新的高分辨率的资料集,为业务高分辨(中尺度)预报模式提供所需要的资料。对于这种尺度,有一些重要任务有待解决,这是现在的业务NGM所无能为力的,包括改善的地形和降水的处理。

NMC 已为满足这些需要研制了新模式。根据 Mesinger (1984) 原来的公式,已用80、50和30公里的分辨率试验了这种MESO模式的先进方案。与普通的 σ 坐标模式(它使用与较平滑的地形场相结合的垂直坐标系)不同的是,MESO模式使用山脉的台阶状表示及准水平坐标面(见图4)。模式中使用的先进的空间和时间差分格式可在不出现极度噪音或错误的能量转换的情况下有效地考虑非常陡峻的山脉。关于模式的“ η ”或“ σ ”坐标方案的比较表明,在“ η ”方案中的高度误差和冷偏差减小了,以及海平面气压型的预报有所改善。与NGM相比,MESO模式对湍流、辐射和对流的处理也更为先进。MESO模式的80公里方案与类似分辨率的NGM的比较证明了利用新模式取得了预期的改善。自从NGM开始用于业务以

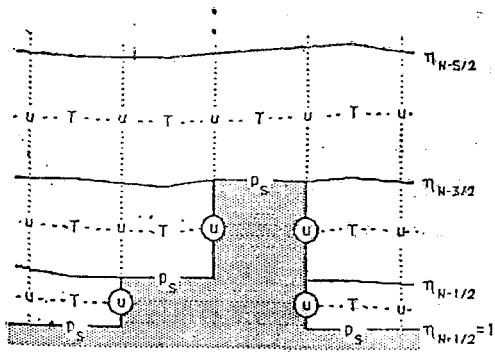


图 4 η 垂直坐标(示意图)

来,在洛矶山脉一线一直存在冷偏差,而在 MESO 预报中冷偏差已几乎不存在。而且, MESO 系统的降水预报评分表明,关于较大降水量预报偏低的情况已有改进,对于降水的地区分布的预报也有改进。利用模式的 50 公里方案所进行的试验已清楚地表明分辨率较高的地形对降水预报是有益的。例如在图 5(略)中,观测到跨越阿巴拉契亚山脉的两个降水区,在预报模式的较高分辨率方案中的预报位置更为准确,并在跨过地形最高处后进一步分开。作为比较,同期的 RAFS 预报仅仅报出了一个降水区。现正在利用覆盖美国 48 州及其周围海洋的模式 30 公里和 30 层方案作进一步试验和改善。此模式将是美国天气局现代化示范计划中的主要业务模式。

2.3 区域资料同化系统的发展

区域预报的改善将不仅要求改善的预报模式,而且也要求更先进的分辨率较高的分析。这种分析必须能够运用新的高时频资料(每小时报告一次,过去是 12 小时一次),并且能够将许多不同来源的资料融合为与预报模式兼容的、动力学上协调的格点资料集。此外,预报必须适合比目前更短的时效。为达此目的,已研制了区域资料同化系统(RDAS,见 DiMego 等,1989)。与现在的以全球模式提供的分辨率较低的背景场为基础的业务区域分析系统不同的是, RDAS 直接与

分辨率较高的区域预报模式联接在一起。实际上,一系列由区域模式制作的甚短期(3—6 小时)预报是用一系列高分辨率分析反复地进行修改和更新的。在标准的预报开始以前 6—12 小时的时段内重复这种过程,不仅把新的非定时资料加进分析中,而且也允许分析中的梯度进一步发展,以及在此后的模式预报的初期使降水率充分地发展。

利用 6 小时循环及现有非定时资料(主要是飞机和地面报告)进行了以 NGM 为基础的 RDAS 方案试验。结果表明,美国东部的短期低空温度和高度预报有明显改善,过去在 NGM 预报的前 6 小时内出现的降水非正常运转现象(Spin-up)也有减轻。对各种高阶变量如地转涡度、涡度平流和温度倾向的系统比较(图 6),证明了在整个预报期间实现了在分辨率较高的初始条件中存

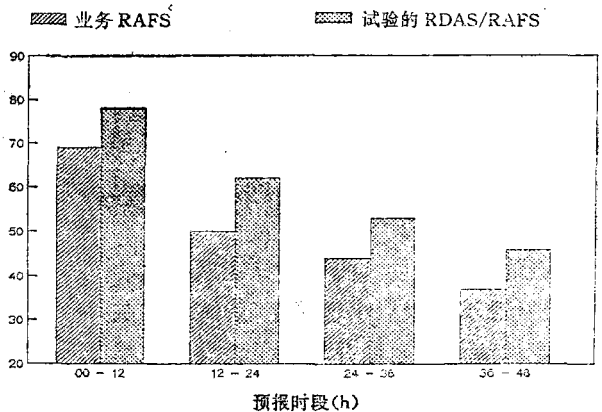


图 6 业务 RAFS 和试验的 RDAS/RAFS 系统的 850 hPa 12 小时温度倾向预报的评分比较(%)。较高的评分表示性能优越

在更多的信息,并从而改善了小尺度预报。

2.4 飓风模式和分析

对飓风路径预报,是当需要时用 Mathur (1983, Mathur 和 Shapiro, 1990) 研制的准拉格朗日模式(QLM)提供的。因为目前 NMC 的业务分析系统没有一个能够细到足以独自分辨飓风的结构,特别是在资料稀少地区,所以在业务上实行一种特殊分析。初始条件是通过将表示风暴环流的一个理想化涡旋合并到全球分析中而导出的。由于在全球分析中

的风暴中心常常被移至实测风暴中心以西，因此分析的环流常在风暴地区错误地出现非对称现象。这里一般是南风，使风暴路径向北偏移，特别是西移风暴。通过在风暴地区的初始分析中，根据实测初始风暴移动的方向附加一个引导气流，已显著地减小了这种错误的偏移。就9个个例平均，在72小时预报中误差约减小200公里，大于过去误差的35%。

另一项已在进行的工作是改善全球资料同化系统中的热带风暴分析。使用关于风暴位置、强度、侧向范围及中心气压的资料，在

同化过程中将人造的风速和风向资料加到风暴中心及其周围的分析中(S. Lord, 私人通信)。如图7所示，与业务分析相比，利用这种程序使对气旋的表示有了显著的改进。利用新分析制作的全球谱模式预报也说明对太平洋和大西洋海域飓风位置的48小时预报有所改进。

3. NMC的全球模式和分析系统

正如在引言中所讨论的，图1清楚地表明，近来全球预报的水平有了非常显著提高。这是由于在1986和1990年间NMC全球系统中出现的变化，它包括两方面的改进：全球模式本身及全球资料同化和质量控制系统。在Kalnay等(1990)的文章中对这些情况作了更详细的介绍，并包括了大量参考文献。在本节中，我们简要地介绍在模式(3.1节)、分析和质量控制(3.2节)中的主要变化，以及讨论模式技巧的演变(3.3节)和计划于1991年执行的系统(3.4节)。

3.1 近来全球谱模式的发展

对全球模式的修改所根据的思路是：全球预报特别是超过开头几天以后，重要的是尽可能真实地模拟发生在大气中的所有物理过程。因此，不仅要提高模式的分辨率，而且也要在次网格尺度物理过程的参数化方面取得显著改进。水平分辨率从菱形截断R40提高到三角形截断T80(相当于网格距160公里)。由于引进了日变化、GFDL研制的更准确的长波辐射方案，以及模式的诊断云，使得更逼真地模拟了辐射效应及其与云的相互作用。

通过提高边界层的分辨率、改善时间方案，以及采用Penman-Monteith地面蒸发公式，改善了地面通量(Pan, 1988, 1990)。模式中的湿层从12层扩展到全部18层。关于像土壤湿度、雪和海冰边界等初始地面场的确定，过去是取自气候值，而现在是由最近的分析和模式预报导出。引进了产生重力波曳力的山脉效应参数化，从而减小了北半球的西风偏差。

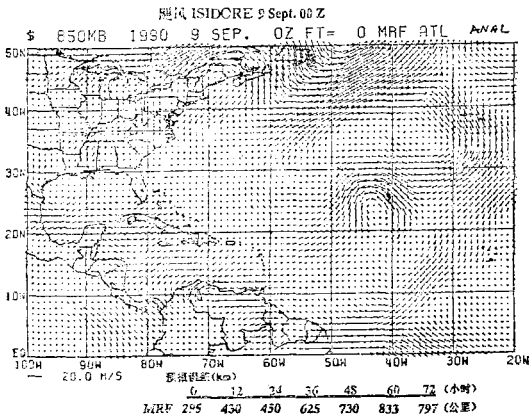


图7a 1990年9月9日00 UTC Isidore 飓风的850 hPa分析风场的对照试验(MRF, 无人造资料)。对试验的初始分析及直至72小时预报指出了位置误差

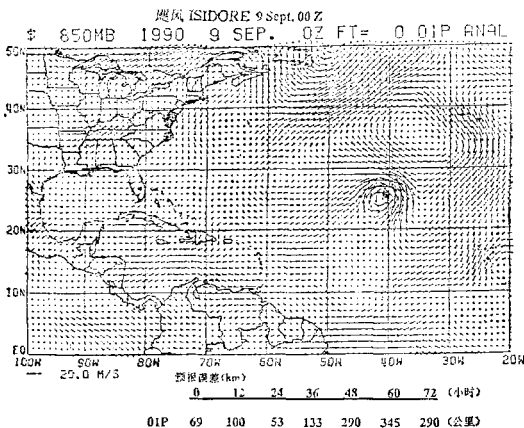


图7b 1990年9月9日00 UTC Isidore 飓风的850 hPa分析风场的试验(OIP, 有人造资料)。对试验的初始分析及直至72小时预报指出了位置误差

这些改变的结果是使模式得到改善，当长期积分时，能够非常逼真地模拟实测的气候特征(Kanamitsu等,1990)。但是，一些其它先进的大气环流模式都存在的问题，也仍然尚未解决。例如，仍然有待通过模式的进一步发展予以克服的缺陷是冬季平流层的冷偏差及在像Andes这样非常崎岖的山脉地区的过分降雨。

3.2 分析和质量控制

从1986年起，对分析系统已作一些改变，这在Kalnay等(1990)的文章中作了详细讨论。1986年，在同化过程中引用了具有完全的物理参数化的模式，取代了仅具有简单参数化的模式。结果是使散度分析更为真实。1988年，对分析过程中使用的预报误差统计和观测误差的估计作了更新，结果是使分析误差统计更为真实，特别是在热带。用于从初始条件中滤掉高频重力波振荡的称作“非线性正交模初值化”的常规方法也会造成模式潮汐波的虚假过滤，及热带降水在一定程度上的减弱。1989年引进分析增量(即在为下一次分析提供初估值的6小时预报与新分析之间的差值)的非线性初值化，也缓解了这些问题。1990年，由于在NMC得到的新CRAY YMP/832计算机上执行全球系统，使分析的分辨率加倍，达到 2.14° 经度 $\times 1.08^\circ$ 纬度。

另一个受到重视的方面是质量控制。1989年对标准气压层的无线电探空仪的高度和温度数据引用了“综合的静力平衡质量控制”系统。1990年扩展到特性气压层(Gandin,1988,Collins和Gandin,1988,1989)。综合质量控制方法与已有的其它方法是不同的，在这种方法中，“决策算法”(DMA)使用偏离静力平衡方程的几个余差来诊断并当可能时修改错误的信息。为达此目的，DMA应用各类误差的存在和大

小判据，检查数据，做出数字移位或温度符号的改变等简单修改。平均说来，在8%的无线电探空仪报告中发现有静力平衡差错，DMA对它们中的一半以上完成了“信得过的修改”。在3.4节中介绍了综合质量控制的进一步应用。

3.3 模式性能的演变

从已讨论过的图1可明显地看出，中期预报的技术水平已显著提高。但是，因为全球系统的主要应用之一是为航空预报提供指导，所以重要的是要监视短期预报的水平，特别是对风。图8表示相对于102个北半球(NH)和31个南半球(SH)无线电探空站的标准站网进行验证的250 hPa 24小时预报的矢量风月平均rms误差。值得注意的是，北半球误差年变化的振幅明显减小。当冬季风本身最强时，最大误差已实际上看不出来，而且误差渐近于不到8 m/s。在南半球，现在的24小时风预报的准确率几乎与1982—83年的北半球一样好，但冬季误差仍远大于夏季，它说明需要进一步改善初值分析。图8b表示可能得到的最长的预报验证记录(R. Hirano,私人通信)。它相应于就北美验证的36小时500 hPa高度预报。它根据“S1”评

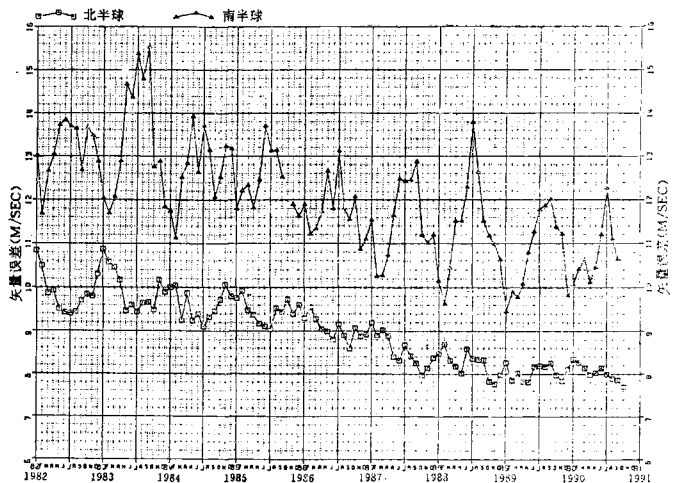


图8a 从1982年1月至1990年10月NMC的业务24小时预报的250 hPa rms 矢量风误差(与无线电探空资料相比)。上边的曲线：南半球(原文为北半球，似有误)。下边的曲线：北半球(原文为南半球，似有误)。——校注)

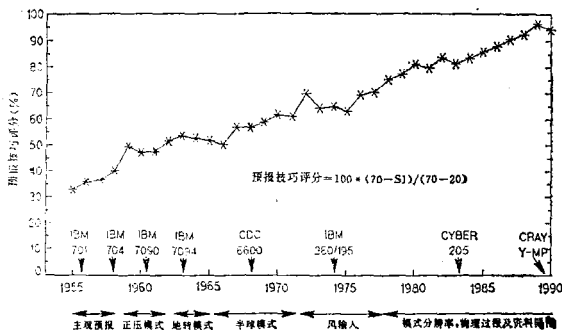


图 8 b 从 1955—1990 年北美地区 NMC 36 小时 500hPa 预报的年平均技巧评分

衡量气压梯度预报的相对误差。图中的预报技巧评分的标尺是，零分对应于 $S1=70\%$ ，预报员认为它是“无用”预报； $S1=20\%$ 相当于预报技巧评分为 100%，10 年前认为这是“完美”预报。1989 和 1990 年的年平均技巧评分约为 95%。

3.4 1991 年新的分析和预报系统

近来 NMC 已获得功能远高于现在的 Cyber 205 的新型 Cray YMP 超级计算机，因而 1991 年内将能显著地改善全球系统。水平分辨率将从现在的 T80(相当 160 公里)提高到 T126(相当于 105 公里)。垂直分辨率将从 18 层增至 28 层，并显著改善平流层中的分辨率。将改善关于云-辐射相互作用的公式，特别是对海洋层云。将重新建立海面温度分析的公式，将水平分辨率从 2 度增至 1 度，时间分辨率从 2 周增至 1 周。

现在的最佳内插分析系统将称为“谱最佳内插”的三维变分分析所代替，对此将在下节中作进一步讨论。关于“综合质量控制”的概念将被推广至所有可能得到的资料，将不仅根据静力平衡协调性，而且也要根据单变量、交叉变量和垂直最佳内插进行一些独立试验(Woolen, 1990, 私人通信)。然后将这些内插值与实测值相比较，DMA 使用这些以及其它像资料的及时程度及离急流的距离等信息，以对每个数据决定保留或舍弃。此程序要重复 3 次，从而使最初因附近的观测质量不高而舍弃的资料可在第二或第三次重

复检验时重新被接受。初步试验表明，使用这种新的综合质量控制方法已使预报水平有不大但却明显的提高。

由 NESDIS(国家环境卫星、数据和情报局)和 NMC 联合研制的新的“人机交互”分析/预报/反演系统将包括对卫星辐射的反演使用 6 小时模式预报作为初估值以得到温度和湿度探空资料。卫星探测仪器不具备高垂直分辨率，并且目前对初估值使用以气候资料为基础的库搜索(Fleming 等, 1986, 1988)，意味着未能分辨的垂直尺度是由气候统计资料导出的。另一方面，使用模式初估值，对于用卫星资料不能分辨的尺度，将确保通常是十分准确的模式短期预报不会改变。初步结果是十分令人鼓舞的，并表明对有云时的反演，近地面处的误差将减小 1K 以上。

4. 未来 5 年的前景

今后 5 年内可能达到的进展是：

新的区域观测系统的作用。随着美国国家气象局现代化建设的发展，新的非天气图资料的应用将可显著地改善中尺度分析和短期预报。除了包括从 ACARS、ASOS、廓线仪、NEXRAD 得到的逐小时更新的质量、风和湿度数据外，在分析系统中将使用改进的卫星资料(例如 SSM/1)。利用从 NEXRAD 和 GOES I-M 得到的降水率资料，通过确定正在降水的位置及在分析中加进适当的潜热加热信息，将大大地改善对中尺度天气事件的处理。这些资料对于改善各类强天气和强降水事件的甚短期预报将是特别重要的。

发展和应用非静力平衡模式。在现行的业务预报模式中，对大气中的许多小尺度特征是作为“次网格尺度”现象考虑的，并通过各种参数化予以处理。当预报模式的分辨率(及关于支持较高分辨率分析所需要的资料)增加时，将有较多的这种小尺度过程必须显式地包括在预报模式之中。特别重要的一些过程涉及对流性降水和非绝热强迫地面交换

的处理。对这些事件的显式处理需要在预报模式中包括非静力平衡过程,从而在预报系统中体现垂直加速及相联系的小尺度响应。虽然直至现在非静力平衡研究模式的应用主要限于风暴发展的研究,而计算机方面可望取得的进展将使在本世纪末将这些方法用于业务预报。

数值预报指导的新应用。本文中至此所介绍的分析和模拟能力的进展,只有当用户能更方便地得到模式输出结果时才具有利用价值。随着天气局的现代化,在气象台内将能更加有效和明智地利用来自这些先进系统的网格点资料。可以不再完全依靠所制作的较小的图形产品样本,而通过通用的、相互作用的诊断和显示系统,预报员将能直接利用数值模式输出产品。例如,预报员将能观察在可能出现强风暴的地区的逐小时的低空水汽辐合型的动画显示,追踪监视在不同的模式或相继的预报结果之间的差别的演变,将模式输出从等压坐标转换为等熵坐标,或观察剖面显示场。这些类型的能力对于预报员在他下决心的过程中进行正确的科学判断是很重要的。

高分辨全球模式。对于今后几年中全球模式的发展,提高垂直和水平分辨率仍然是一个关键因素。仍然可以指望使用很高的水平分辨率,通过更好地确定地形和海陆对比造成的外部强迫来改善短期和中期预报。NMC现正在计划实行 T150—T240 的水平分辨率(相当于约 90—50 km 的网格分辨率)和 30—50 层的垂直分辨率。因为在谱模式中,增加水平分辨率的代价的增长超过分辨率变化的三次方,所以半拉格朗日方法变得很具有吸引力(Robert,1981;Ritchie,1987;Bates和McDonald,1986)。Bates等(1990)正对全球模式研制这种方法,并将在NMC系统中进行试验。

新的资料分析方法。最佳内插法(OI)作为一种分析方案已成功地使用了多年(例如Gandin,1963;Lorenc,1981;DiMego,1988)。

在这种方法中,为了使分析误差的方差达到最小,人们采取了关于初估值和观测结果的误差统计方面的知识,并且在分析中解决给予观测资料的最佳权重。NMC 研制的一个非常有发展前途的全球分析的另一方案称作“谱最佳内插法”或 SOI 的三维变分法(Parrish和Derber,1990)。在三维变分方法中,类似于OI采用误差统计方面的知识,人们求解分析场本身,使分析误差的方差达到最小。在分析中可以直接使用模式变量。例如,在SOI中,代替在通常的OI方法中使用的纬向和经向速度分量,而使用模式 σ 坐标中的涡度和散度的谱系数。谱模的应用可较容易地实现动力平衡的制约条件。在OI中,分析是逐步在网格点上完成的,直至分析完整个区域,而在SOI中,一次使用所有数据求解一个巨大的矩阵问题。因此,可以消除目前的业务OI中许多数据分类和选择问题,并且与目前的分析系统相比,谱分析系统的整个计算较为有利。使用SOI的初步结果是令人鼓舞的,并且表明它将提高预报水平。

通过寻找在一定期限内能最好地拟合观测资料的模式轨迹,可将SOI扩展到4维。通过在最小化过程中使用伴随模式,这种大型变分问题在计算上成为可行的(Lewis和Derber,1985;Courtier和Talagrand,1987)。目前在美国(Navon等,1991)和在欧洲(Courtier和Talagrand等,1990)正在积极地探讨这种方法。

另一种有希望的分析方法是Kalman过滤(Ghil等,1981)。遗憾的是,在最初提出此方法时,它需要预报整个预报误差协方差矩阵,这是个比通常预报大 n 倍的问题,此处 n 是模式中的因变量的数目。但近来Cohn(私人通信)指出,对于像大气动力学中那样的双曲线方程,问题可基本上简化为预报误差方差,这种计算具有与标准预报同样的量级,从而是十分可行的。这种方法与谱OI法相结合,可能是用于四维分析的一种有同样发展前途的待选方案。

卫星资料的新应用。在 90 年代后期,可望能够利用一种新的、更精确的温度和风的卫星传感器。同时,有可能改善现有卫星观测系统的应用质量和效率。

代替气候值,利用模式的 6 小时预报值作为初估值,应能简化从现在的极轨探测系统得出许多附加的卫星反演产品(即厚层可降水量、陆面和海面温度、总臭氧、降水估计,及云顶气压和温度)的反演过程。根据 NASA、NESDIS 和 NMS 的联合计划,目前正在研制这种先进的反演系统,其重点放在改善清除云的算法。在模式和观测的辐射率显著不同的地区,可使用与模式无关的初估值(例如气团分类,McMillin,1986)。对这种“相互作用方法”的结果也将与欧洲正在研制的“变分”反演方法作比较(Eyre,1989),此方法的优点是辐射率的误差统计比较简单,但对云效应的处理可能更为困难。

上述卫星产品将与从其它传感器得到的附加卫星资料相结合:特殊传感器微波成像仪(SSMI)能提供海洋上总可降水量,以及洋面风速和冰雪覆盖的准确估计。未来的欧洲研究卫星(ERS-1)将提供海面风及海上浪高。更准确的反演云迹风的方法将显著提高它的准确率。这些新型资料不仅将用于改善模式参数化,而且也将用于分析阶段。例如,为了同化热带降水的卫星估计值,正在试验一种物理初值化方法(Krishnamurti等,1988)。

动力延伸预报。NMC 和 CAC(气候分

析中心)负有发布月和季预报的责任。近来,作为这些预报的指导,更为重视试验性的动力学延伸预报系统(DERF, Tracton等)。平均说来,超过 10 天的预报其水平是很低的。尽管如此,有许多个例,其时间平均预报仍然是有一定水平的,完全超过了经典的两周的可预报时限(Lorenz,1962)。目前正在进行关于“预测预报技巧”的研究(Branstator, 1986; Kalnay 和 Dalcher, 1987; Palmer 和 Tibaldi, 1988; Tracton等, 1989; Chen, 1989; Kalnay和Ham, 1990; Monleni等, 1991)。如果事前能够辨别哪种预报以及在哪个地区将是可靠的,则长期预报的利用价值将会显著提高。

最后应说明的是,对于季节到年际预报问题,将大气模式与海洋模式相耦合是很重要的,这样可以抓住甚至可以预报像 ENSO 这样的耦合系统的慢振荡(Cane 和 Zebiak, 1986)。近来,Leetmaa(私人通信)完成了用 NMC 全球大气模式和 GFDL/NMC 的海洋模式的耦合积分,并且甚至在当缺少一般认为为避免强气候漂移所需要的统计订正的情况下,耦合系统一般仍会是真实的。在今后 5 年中,将可能预报与 ENSO 相联系的重大的年际变化。

殷显曦译自 Review of Geophysics,
Supplement, April 1991

郝望校