第48卷 第1期 气 象 学 报 Vol. 48, No. 1
1990年2月 ACTA METEOROLOGICA SINICA Feb.,1990

近10年我国数值天气预报的进展(1980—1989)*

廖洞贤

(国家气象局国家气象中心)

提 要

对近十年来我国的数值天气预报工作进行了回顾和分析。还对这时期前后的工作进行了比较。从中可以看出，我国数值天气预报的进展是巨大的。还估计了我国和世界先进水平之间的差距，并提出了应采取的措施。

一、引 言

近10年来我国数值天气预报获得了长足的进步。这主要表现在：自动化客观化的原始方程模式分析预报业务系统已建立了起来；还设计了各类研究试验模式，并投入使用，使数值模拟达到了空前的水平；物理过程从主要引进国外成果的状态进入了发展阶段；模式和模式设计，计算方法的研究比过去更深更广；四维同化和产品加工应用也开展了起来。下面我们将分别进行叙述。

二、业务分析预报

虽然早在1965年我国就已建立了北半球48小时正压过滤模式预报，但由于众所周知的原因，直到1982年2月北京气象中心才正式建立起，包括资料处理，客观分析和北半球5层非绝热原始方程模式在内的分析预报业务[1,2]，发布逐日分析预报和加工产品。目前每天传真图已达80张，在台站预报中发挥了作用。可以说，数值预报产品已成为我国短期天气预报的主要参考之一。

5层原始方程模式分析预报业务系统的建立，标志着我国数值天气预报进入了一个新的发展阶段。

还发展了几种有特色的有限区域多层原始方程细网格模式，其中包括针对降水，台风路径和热带天气的模式[3-6]它们在实际预报中都发挥了良好的作用，特别是降水和台风路径预报。

利用数值天气预报产品，全国台站广泛开展了中短期MOS和PP预报，如低温暴雨和台风路径预报等[7,8]。其中地方MOS方法有中国特色，比较注意吸收预报员经验，并采用多种统计模型。实践证明，人-MOS结合明显优于主观预报。

如果我们把10年前和近9年我国数值预报业务作一对比，我们可以得到表1。从表1我们容易看出：变化是明显的。

* 本文于1989年4月24日收到，1989年7月5日收到修改稿。

表 1 10年前和近10年我国数值预报业务对比

项目 \ 时期		1969—1979	1980—1988
模式	(北半球或有限区域)	3层，过滤(d=540km) 3层，绝热，原始方程(d=540km)亚欧，3层，绝热，原始方程(d=270km)	5层，非绝热，原始方程(d=381km) 东亚，非绝热，原始方程(d=190.5km)台风预报；热带天气
预报量		$\phi, T, \vec{V}$	$\phi, T, \vec{V}$，降水，台风路径
分析方案		逐步订正	逐步订正
分析、预报和加工产品		9	80

三、模式和模式设计

除了业务预报外，还曾设计过各种不同类型，有不同针对性的模式。还提出过设计垂直和水平分辨率的原则，以及分析模式合理性的方法。

文献[9]设计的两层全球模式是我国自己设计的第一个全球大气环流模式。它包括了全部物理过程，能保持微分方程的重要性质，如能量转换关系等。还设计过采用两种地图投影的9层全球模式[10]，和两层全球差分模式[11]，以及一些半球谱模式[12]，西南及其毗邻地区细网格模式[13]和P-σ混合坐标的5层原始方程模式[14]。

对于长期预报，有四种模式，是近十年中才开展的，即距平滤波模式；距平大气环流模式；考虑历史资料的距平模式和大气环流模式。

根据文献[15]，用距平滤波模式作8个月的试验表明：三层模式高度距平预报普遍高于持续性预报。文献[15]还用设计的距平大气环流模式与前一种模式比较，发现二者相差不大，后者低层比前者报得稍好，但前者所需机时要节省约200倍。考虑历史资料的距平模式，是把地-气作为统一系统，利用下垫面能量储放，以预报量为已知年变上的扰动的模式[16]。对其线性简化方案的计算表明，其平均预报略高于随机预报水平，是有希望的[17]。还设计过有各种物理过程的7层全球谱模式[18]，其月预报逐日误差比持续性误差小许多，低纬预报也令人满意。

还建立了11层，格距为30 km的细网格模式[19]和准静力、准2维的10层，格距为12.5 km的中尺度模式[20]。虽然还有不少须待完善之处，但它们对开展中尺度天气过程的研究是有益的。

还设计过行星边界层模式[21]。可以计算地面温度的日变化。其计算结果可以反映实际大气边界层的一些特点。

对于模式大气高度和垂直分辨率的设计，张可苏曾作过比较试验[1)]。结果表明：当模式高度取在250 hPa时，超长波中心高度比一般观测的显著低，其移速也大为夸大。看来，模式顶取在<10 hPa处较好，最好在0.01hPa。还分析了对称不稳定增长率对Richardson数和垂直分层的依赖。结果是：10层以上最好。至于水平分辨率，则给出了在考虑的最短波长和观测误差下的最佳格距公式[22]，还在计算稳定和垂直截断误差与水平截断误差

1) 张可苏等，离散化模式的垂直分层与预报系统的协调问题，'中期数值和灾害性天气预报研究'课题技术报告(尚未发表)，1987。

应为同量级的条件下给出了垂直网格距和水平网格距的关系式[23]。陆 维松等[1]又进一步给出了新的结果。这样，就减少了模式设计的盲目性，增加了合理性。

还讨论了嵌套网格因计算边界条件产生的伪反射和伪折射[24]。指出：当"超高频条件"满足时，在粗网格一侧会形成四倍格距振幅的放大的波。还进行了辐射边界条件等的比较试验[2]。

文献[25]曾就完全的原始方程的算子特性进行研究，指出初始场的作用随时间衰减，因而，设计的模式也应具有这种性质。

还发展了一些对模式进行检验并分析其合理性的方法。

虽然，国外也进行检验，但一般还限于用线性条件下简单波解和数值解相比较的方法在这方面，文献[26,27]曾在弱非线性条件下，给出过正压和斜压大气非线性波的二级近似的解析表达式，并用来和数值解比较；还提出利用大气对称运动的不变性和其他对称和反对称运动的性质来检验的方法[3]。前者是定量的，有一定限制；后者是定性的，限制较少。

四、物 理 过 程

物理过程是模式的核心之一。十年前主要是引用国外的。十年来已有一批令人鼓舞的成果。

在辐射方面，曾对$O_3$9.6μm波段的冷却率给出新的近似方法。和逐线计算结果相比，可以精确处理对波数域、天顶角和大气不均匀的积分[28]。还考虑一般大气红外辐射传输参数化方案精度受大气分层的影响很大，设计了不同分层的参数化方案。计算结果和逐线计算的相比，发现当层数为39和16时，基本上保持同样精度[29]。还提出了计算水汽吸收辐射和气溶胶减弱太阳辐射的方法[30]。还分析了云对地气系统太阳辐射能收支与大气加热率的影响，讨论了不同光学厚度的云反射率与吸收率[31]。还用7层谱模式对云、辐射及动力过程的相互作用作试验。发现云-辐射加强了低纬Hadley环流的上升支；在长期积分中对环流也有影响[32,33]。还提出过计算水汽和CO_2长波面透射率的方法[34]和大气长波辐射冷却率的省时算法[35]。

在积云对流方面曾提出过一个对温度和比湿同时作整层调整的方案，可避免在有限层作调整时所产生的上层静力不稳定现象[36]。还对梅雨暴雨区内的涡度平衡进行研究[37]。发现在对流层下层有涡度积累，在其上层有涡度亏损，积云对流在平衡中起重要作用。还就热带气旋提出在时间和空间尺度上与之相近的积云概念和对流凝结加热方案[38]。还就风切变对积云发展的影响进行了试验[39]，得出了一些有意义的结果。

对于行星边界层，曾提出过一个大气多尺度湍流交换的K理论[4]。将任一气象要素分解为多尺度的脉动量之和，从不同尺度运动相互作用方程推出了可以随时间和空间变化

1) 陆维松，垂直分辨率和水平分辨率的协调，'中期数值和灾害性天气预报研究'课题技术报告（尚未发表），1988。

2) 胡元龙等，粗细网格嵌套模式试验，上海有限域数值预报研讨会报告，1987。

3) 王诗文等，利用大气对称和反对称运动性质对模式进行合理性分析，'中期数值和灾害性天气预报研究'课题技术报告，1988。

4) 徐大海，关于不同尺度大气运动中的雷诺交换，已投"气象学报"。

的K值；在一定条件下可出现负粘性。这样，就把K理论推进了一步。还就Monin-Obuhov相似理论处理大气表面层梯度观测资料的问题，对近地面稳定大气层结中通量廓线的适用性作了研究[40]，提出了选最佳廓线的方法。还用近年的实测风资料，对行星边界层内扩散特征进行过数值研究[41]。

对于地形作用，曾提出过把高原当成静止空气的"软高原"，利用风压场平衡关系，算出各层位势高度的办法[42]。

还针对物理过程中参数选择的人为性，提出了模式参数化优化方法[43]。其适用范围相当广泛，具有很好的抗干扰性。

五、分析和四维同化

1980年以前，我国分析用的方案除逐步订正法外，还有多项式法。四维同化则很少开展。近年来分析用的最优插值法开展得比较广泛。为了避免该法引起的平滑，曾提出对高度分尺度逐次内插的方法[44]。还对东亚500hPa高度，700hPa温度，露点，温度露点差的方差，协方差，相关函数和结构函数进行了计算，发现了一些统计特征，如各向异性，尺度随纬度和天气形势而变等[45]。还对逐次订正法，用两种滤波方法改进[46]，发现Gauss法比选择滤波有更好性能。还用有次序的冒险函数极小法，解决插值多项式最优化问题[47]。

过去认为：风压场观测误差引起的不平衡可以导致虚假的重力惯性波。文献[48]指出：即使初始值没有误差，由于其和模式不协调，也可以引起虚假的重力惯性波，要处理好初值，必须消除或减小这种不协调，如尽量使资料满足模式的重要性质等。于是，提出了一些在总能量守恒和整层无辐散约束下的变分方案[49]。还通过正压原始方程的解析解和数值解，分析了初始风场不同假定对解的影响，提出将方程中反映不同物理过程的项区别处理的方案[50]对于非线性正规模和哈佛函数，也作过试验[51]。还提出用地面3小时变压作初值化[1]。还研究过次天气尺度和中尺度预报中的初值化问题。从试验发现，用天气尺度的初值，降水和低空急流的加强较慢，而结合次天气尺度的初值则较符合实况；但二者均能把锋生过程，露点锋的加强等预报出来[52]。还提出过边界层初值形成的方案[53]。

对于场的解析表示，文献[54]曾提出向量经验正交展开的方法。计算表明：它比标量经验正交展开好。这对在资料稀少地区用历史资料插补有好处。还有人用车贝雪夫多项式把资料在非均匀网格上展开[55]

对于四维同化，文献[56]和[57]曾利用多时刻常规资料和非常规资料进行低纬地区同化试验和考虑观测误差下的试验。后者指出，最优同化频率，与观测资料和同化过程的长短有关。

六、计算方法

1980年以前我国已对有关计算方法进行过很多研究，但有的还研究得不深（如σ-坐标系中气压梯度力的计算），有的还是空白（如非线性不稳定）。近十年这方面有许多更

1) 汪厚君，地面3小时变压在数值预报中的应用，硕士论文，北京气象中心，1988。

深的成果，有些空白也填补了。

在差分格式方面，曾提出几种时、空差分的完全能量守恒的分解格式[58]。还从标准层结近似下球面斜压原始方程出发，对两类常用的B网格和C网格，各设计出可以保持总动能、总有效位能和总有效表面位能之和守恒的差分格式[59]，使时间积分比过去有更有效的约束。还提出一种浮动的显式差分格式，是无条件稳定的，比国外提出类似格式还早[60]。还对发展方程

$$\frac{\partial F}{\partial t}+AF=0$$

的格式构造和应用进行了讨论[61]，证明带有非负算子 A 的强隐式格式为"绝对稳定"；而带反对称算子 A 的弱隐式和显式是绝对不稳定。

非线性计算不稳定是数值预报中的一个难题。对此，曾证明时空差分的完全平方守恒格式是长时间计算稳定的最好保证[62]。还讨论过 Galerkin 有限元近似的非线性计算稳定性问题[63]。还用 Ritchmyer-Shuman 方法分析了瞬时差分格式的非线性计算不稳定问题。指出：只要所用网格函数在空间或时间方向变号，就容易出现非线性计算不稳定，从而，修正了 Fornberg 的结论[64]。

还曾对 Poison 方程分解解法迭代参数的选择进行过讨论[65]。对混合型平衡方程的数值解法进行过试验研究[66]。

在 σ 坐标系中气压梯度力的计算是一个困难。我国气象工作者对此进行了大量的工作。文献[67]根据大气各向异性特点及差分-微分-差分相一致的观点推导出一般变换公式，讨论了常用变换公式与一般变换公式在差分计算中的差别；还用一般变换公式设计了几种计算方案。还提出了把位势高度 ϕ 分解为 $\phi(t_0)$ 和 $\phi'(t)$ 两部分，用以计算气压梯度力的方法；其中除初始时刻外，只有 $\nabla[\phi(t)-\phi(t_0)]$，需要计算，从而，使误差大为减小[68]。还提出了一种温压场三维插值方法，在陡坡地区计算气压梯度力有较好效果[69]。陈嘉滨等[1]还提出了一种改进的"静力扣除法"，可以使散度方程中的地形项由地形扰动项所取代，从而降低低截谱模式中因截谱带来的误差。

上面这些方法对改进气压梯度力的计算都各有一定特点，也各有不同程度的贡献。但是，它们之间还缺乏比较，还需要有统一的标准进行严格检验，分出优劣和各自的长短。这样，才能使这项工作获得进一步的发展。

七、有关的数值试验和数值模拟

10年前数值试验和数值模拟开展得很少。目前，它们作为强有力的试验工具，已深入到气象各个分支学科的研究中。为了使我们叙述的范围不和其他分支学科重复，我们把内容限制在只与数值预报有关的范围内。

对于天气尺度系统，文献[70]用全隐式6层原始方程模式对地面气旋形成和扰动的发展进行了试验。发现：如初始时在带状环流上加一类似锋区的扰动，则扰动位于低空比位于高空容易发展。还用 p-σ 5层模式模拟索马里低空急流[71]。发现在边界层中气流

1) 陈嘉滨等，克服 Gibbs 波多层谱模式的设计和试验，第4次全国数值预报会议论文，1987。

的发展主要决定于海陆分布不均匀引起的非绝热加热，与地形高低关系不大。还对东亚海岸气旋发展的影响进行研究[72]，发现潜热释放和反馈与由之产生的斜压不稳定是其爆发性发展的主要原因。

不稳定小槽的发展有时和东亚寒潮有关。试验表明，某些小槽在初期以正压过程为主，以后斜压过程才明显起来；而斜压结构的形成则与上游脊的东移发展，北风加强有关[73]。

对于台风的发生发展，曾从辐射、积云动量输送、海温等进行模拟[74-76]。结果表明：如有辐射，发展得更早更强，考虑积云动量垂直输送，算得的"台风"比考虑 Ekman 抽吸的结果在结构上更接近实际。还曾模拟西太平洋热带辐合带上台风的发展[77]。发现除辐合带上水平切变外，地面上原有的扰动对台风形成很重要。还对台风眼进行模拟[78]。发现当台风发展时眼变小，积云对流动量输送对其眼维持有重要作用。

对于梅雨锋上低压和中尺度扰动的模拟，得出：在发生时，动力作用不能忽视，而在维持与发展时，潜热释放重要；但加热过程也应具有中尺度特征；还指出：扰动结构变化与降水强度关系密切[79]。还对两类飑线的发生发展进行模拟[80]。结果表明：因积云对流引起的加热至少对一类飑线生成重要，在其生成过程中扰动的非线性集中明显。对于暴雨的模拟，发现初始风对它有较大影响。还发现与暴雨伴生的低空辐合线和其上的涡旋，垂直环流等只有用湿模式才能模拟[81-82]。还对中尺度对流系统的形成进行试验[83]，发现用大尺度场可模拟中尺度系统的形成。

对于适应问题，曾对半球旋转适应和地转适应作过试验。发现如只有一位涡中心，环流将演变为纬圈环流；如有二个以上中心，则都将维持，但不会出现纯粹的纬圈环流[84,85]，还进行过次天气尺度系统地转适应过程的试验。在有热源的非线性适应过程中，系统发展，以后成为类似于热带气旋的系统[86]。还通过试验，发现青藏高原和落基山上空温度和位势高度有明显日变化，温度的日变化振幅随高度减小，而位势高度振幅在对流层中却随高度增大[87]。还对大气的对称和非对称运动，分别用正压和斜压模式进行试验，证明在一定条件下对称运动的不变性[1)]，[88]。还对沙尘暴的辐射特征及其辐射强迫对海陆风、锋生、局地环流的影响等进行试验，取得了一些有意义的结果[2)]。

八、结 语

综上所述，可以看出，近 10 年来我国数值天气预报和数值模拟的发展是迅速的、巨大的，涌现了大批优秀成果。业务预报已在国内生根，并深入到全国各气象台站的工作中。目前，我们已有了一批品种繁多，可以进行大中尺度数值模拟的模式。有的成果是独创性的，不仅推动了我们的工作，也对世界同行作出了贡献。

但是，也应当看到，我们和世界先进水平之间，在总的方面，还有相当大的差距。除了计算机等外，在资料同化和预报方面都还存在薄弱环节，甚至还有空白。比如，我们至今还没有建立起中期预报业务系统；业务模式中的物理过程考虑得很简单等。在研究中搞模式的多，搞资料同化的少；而在模式中的设计和计算方法搞的多，对物理过程搞的少。

1) 见19页 3)。

2) 申绍华，沙尘的辐射效应及其对环流系统的强迫，北京大学博士论文，1988。

由于这样，我们的人才不配套，工作不易得到协调的发展。这些都是值得我们深思并在前进道路上加以解决的。

过去，我们曾建议采取5项措施来缩短或消除我们和国外先进水平之间的差距[89]，即

1．有计划有针对性地大力培养人才；

2．集中力量攻关，解决几个关键问题；

3．大力研制计算机软硬件和有关设备；

4．发展探测技术，建立最优混合观测系统；

5．建立我国现代化的通讯网。

现在看来，这些建议仍然值得考虑。愿我们继续努力，为实现我国数值天气预报和数值模拟的现代化而不懈奋斗！

参 考 文 献

[1] 陈雄山等，初始方程三层模式，数值预报和数理统计预报会议论文集，1—18，科学出版社，1974。

[2] 章基嘉等，两年来北京气象中心业务数值预报的进展，气象学报，44，2，129—139，1986。

[3] 郭肖蓉等，一个适用于业务预报的细网格模式，数值天气预报文集，77—87，气象出版社，1984。

[4] 朱永禔等，台风路径预报套网格模式的业务应用初步结果，数值天气预报文集，88—96，气象出版社，1984。

[5] Xue Jishan et al.(薛纪善等), Test of a tropical limited area numerical prediction model including effect of real orography, *Advances in Atmospheric Sciences*, 5, 1—13, 1988.

[6] 俞康庆等，1986年讯期暴雨数值试验，气象研究文集(一)，38，武汉暴雨研究所，1987。

[7] 倪允琪，应用数值预报的结果作西太平洋台风路径统计预报的尝试，气象学报，38，1，36—43，1980。

[8] 丁士晟，中国MOS预报的进展，气象学报，43，3,332—338，1985。

[9] LASG, The summary for scientific actions in the period 1986—1988, 335—347, Annual Report 1988, LASG, Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, 1988.

[10] 陈月娟、郭晓岚，一个同时采用两种地图投影坐标系的大气环流模式，大气科学，10，2，121—128，1986。

[11] 陈嘉滨，一个全球大气格点模式和超长波预报问题，大气科学，4，4，337—348，1986。

[12] 郑庆林，北半球4层初始方程谱模式，中国科学，1982年第2期，216—226。

[13] 颜宏等，陡地形条件下温压场的三维插值诊断及其在数值预报和分析中的应用，高原气象，6，2(增刊)，1—64，1987。

[14] 钱永甫等，大气动力学方程组在有地形的离散格点模式中的一般形式，高原气象，4，1，1—13，1985。

[15] 巢纪平等，长期数值预报和大尺度海气相互作用，大气科学(特刊)，79—93，1988。

[16] 郭秉荣等，以大气温压场连续演变表征下垫面热状况的长期天气数值预报方法，兰州大学学报(自然科学)，4，73—90，1977。

[17] 李小泉等，一个长期数值预报模式的初步试验报告，东北夏季低温长期预报文集，250—263，气象出版社，1983。

[18] 郑庆林，一个全球七层大气环流模式及其30天长期数值预报试验，气象科学研究院科技报告，8807号，1988。

[19] 章震越等，一次梅雨锋降水的数值试验，教学与研究(空军气象学院)，1985年第4期。

[20] 张维桓等，对流凝结潜热激发飑线的数值试验，气象学报，45，3，282—289，12987。

[21] 吴辉碇，大气边界层的数值模式，气象学报，42，3，290—300，1984。

[22] Liao Dongxian (廖洞贤), Determination of the distance between two adjacent stations, the observational vertical increment and the observational time interval in optimum sense, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2, 316—324, 1985.

[23] 廖洞贤等，适于数值天气预报的分解平流格式，气象科学，1—2，1—12，1982。

[24] 曾庆存等，不等距差分格式的计算紊乱问题，大气科学，6，4，345—354，1982。

[25] 丑纪范，初始场作用的衰减与算子的特性，气象学报，41，4，385—392，1983。

[26] Zhang Xuehong (张学洪), The second order approximation to the nonlinear wave in barotropic atmosphere, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2, 167—174, 1985.

[27] Zhang Xuehong (张学洪), Nonlinear barotropic Haurwitz waves, *Advances in Atmospheric Scie-*

nces, 3, 330—340, 1986.
[28] Shi Guangyu (石广玉), The cooling rate due to 9.6 μm ozone band-a new approximation, Scientia Sinica (Series B), XXVII, 947—957, 1984.
[29] 赵高祥，大气中红外辐射传输的参数化模式，科学通报，32，19，1479—1482，1987。
[30] 王尧奇等，太阳辐射在大气中的衰减，高原气象，4，1，34—35，1985。
[31] 李银海等，有云大气中太阳辐射传输的数值试验研究，高原气象，5，3，211—225，1986。
[32] 郑庆林等，北半球七层初始方程谱模式(II)及其中短期数值预报试验结果，气象科学研究院科技集刊，1985，75—85，8。
[33] Zheng Qinglin et al., The role of clouds/radiation in long-range numerical weather prediction, *Acta Meteorologica Sinica*, 3, 5, 603—617, 1989.
[34] 钱永甫，水汽和二氧化碳长波面透射率的一种计算方法，高原气象，3，3，24—37，1984。
[35] 钱永甫，大气中长波辐射冷却率的省时计算方法，高原气象，4，2，101—108，1985。
[36] 陈月娟，在数值预报中的一个对T和q的整层调整方案，高原气象，5，4，308—314，1986。
[37] 陈受钧等，梅雨暴雨的涡度平衡和积云对流，气象学报，37，1，8—13，1979。
[38] 李天明，一种改进的对流凝结加热方案，气象学报，46，2，251—255，1988。
[39] 徐华英等，风切变对积云发展影响的数值模拟研究，大气科学，12，4，403—411，1988。
[40] 张翼，近地面稳定大气层结中通量一廓线模式的适用性，科学通报，1987 年 1 期，52—55。
[41] 雷孝恩等，行星边界层内扩散特征的一个数值研究，气象学报，45，3，313—321，1987。
[42] 胡伯威等，数值预报模式中的"软高原"模型，气象研究文集(二)，武汉暴雨研究所，1987。
[43] 邱崇践等，预报模式参数化优化方法(《中国科学》即将发表)。
[44] 陈学中等，高度场的分尺度逐次最优内插试验，气象学报，40，3，371—375，1982。
[45] 陈学中等，东亚地区几种气象标量场的大尺度统计结构特征，气象学报，42，1，11—23，1984。
[46] 徐元泰等，气象场的客观分析和中尺度滤波，大气科学，12，3，274—282，1988。
[47] 马淑芬，插值多项式的最优化在客观分析中的应用，气象学报，38，1，73—79，1980。
[48] 廖洞贤等，关于处理初始资料和取某些参数的问题，气象学报，38，1，27—35，1980。
[49] 陈受钧等，应用测风资料形成原始方程初值的一种方法，气象学报，38，2，122—129，1980。
[50] 纪立人等，原始方程模式初值处理问题的初步研究，中期数值天气预报文集，25—38，1982。
[51] 吴洋生等，全球资料分析中重力波的重要性，气象学报，40，2，139—148，1982。
[52] 李毓芳等，次天气尺度和中尺度预报中的初值问题，气象学报，42，4，499—511，1984。
[53] 吴辉碇等，大气边界层的初值形成，气象学报，39，2，129—140，1981。
[54] 周紫东等，向量场的经验正交函数展开及其应用，气象学报，41，1，24—32，1983。
[55] 周家斌，一种气象资料插补方法，科学通报，1987 年 15 期。1199—1200。
[56] 冯灵敏等，利用多时刻资料作低纬地区风场同化的试验，气象学报，39，3，267—276，1981。
[57] 王诗文等，气象观测误差和四维同化数值模拟试验，气象学报，42，4，459—465，1984。
[58] 曾庆存等，完全保持能量守恒的可压缩流体的差分格式的设计和实现，数值天气预报文集，157—168，气象出版社，1982。
[59] 曾庆存等，球面上斜压原始方程组保持总有效能量守恒的差分格式，大气科学，11，2，113—126，1987。
[60] 王宗皓，天气方程初值问题的浮动算法，科学通报，1981 年 8 期，481—483。
[61] 季仲贞等，发展方程差分格式的构造和应用，大气科学，6，1，88—94，1982。
[62] Ji Zhongzhen et al.(季仲贞等), Problems on nonlinear computational stability in NWP, Collection of Papers presented at the WMO/IUGG NWP symposium, Tokyo, 4—8 August 1986.
[63] 季仲贞，Galerkin 有限元近似的非线性计算稳定性问题，力学学报，16，1，19—26，1984。
[64] 曾庆存等，关于非线性计算稳定性的若干问题，力学学报，13，3，209—217，1981。
[65] 严邦良等，泊松方程分解解法迭代参数的一种选择，气象学报，43，1，79—85，1985。
[66] 王崇皓等，混合型平衡方程的数值解法，大气科学，4，4，338—343，1980。
[67] 颜宏等，有地形数值模式中坐标变换和气压梯度力计算问题的讨论，大气科学，5，2，175—187，1981。
[68] 郑庆林等，青藏高原对中期数值预报影响的数值试验，气象科学技术报告，86010 号，1986。
[69] 颜宏等，陡地形条件下温压场的三维插值诊断及其数值预报和分析中的应用，高原气象，6，2，(增刊)，140—159，1987。
[70] 刘瑞芝，气旋形成与扰动发展机理的数值试验，大气科学，9，1，19—26，1985。
[71] 钱永甫等，温压场垂直插值若干方法的检验及静力学关系的新形式，大气科学，11，2，176—184，1987。
[72] 陈受钧，地面摩擦和青藏高原对东亚海岸气旋发展的影响，气象学报，45，4，495—499，1987。
[73] 纪立人等，一次冷空气过程的数值分析，中期数值天气预报文集，120—136，气象出版社，1982。
[74] 丁一汇等，三维热带气旋的数值模拟及辐射对其影响的研究，中国科学，1988 年第 3 期，867—898。
[75] 李崇银等，台风的数值模拟研究，气象学报，42，4，466—474，1984。
[76] 张铭，海温对台风影响的数值实验，科学通报，1985 年 18 期，1400—1410。
[77] 郑良杰等，热带辐合带上台风发展的数值模拟，气象学报，39，4，394—407，1981。

[78] 周晓平等，梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟试验，大气科学，8，4，353—361，1984。
[79] 高坤等，梅雨锋上中间尺度扰动的模拟试验，大气科学，11，3，289—296，1987。
[80] 张维恒等，对两个飑线个例的数值试验，气象学报，46，1，92—95，1988。
[81] 赵思雄等，风场在预报暴雨发生中的作用，大气科学，8，1，1—16，1984。
[82] 张玉玲，暴雨与次天气扰动和低空急流的生成，气象学报，39，3，257—266，1981。
[83] 夏大庆等，大尺度环境中中尺度对流系统生成的数值模拟试验，大气科学，11，2，183—194，1987。
[84] Zeng Qinchen et al. (曾庆存等),Numerical experiment of hemispheric rotational adaptation process, Scientia Sinica, XXIII, 11, 1405—1416, 1980.
[85] 陈秋士等，地转风适应过程的数值试验研究，气象学报，44，3，282—292，1986。
[86] 张铭，次天气尺度系统地转适应过程的数值试验，大气科学，8，1，46—53，1984。
[87] 钱永甫等，P-σ 混合坐标系初始方程模式的若干改进及其在直角网格中的试验结果，高原气象，1，4，28—45，1982。
[88] 廖洞贤等，在正压过滤模式中地形和水平扩散对产生反对称运动所起的作用，气象学报，47，1，17—25，1989。
[89] 王世平等，我国当前数值预报水平与国外先进水平的差距和解决的途径，2000 年的我国大气科学，25—29，气象科学技术情报研究所，1984。

PROGRESS OF NWP IN CHINA IN THE PAST DECADE

Liao Dongxian

(*National Meteorological Center, State Meteorological Administration*)

Abstract

Review and analysis of NWP in China in the past decade have been made. Also comparison has been done between NWP ten years ago and that of today. From them it will be seen how tremendous the progress is during that period. Finally, the differences between the advanced world level and ours in areas in NWP are estimated and the steps we should take in order to catch up the former, are suggested.