大气科学的世纪进展与未来展望*

张大林

(美国马里兰大学大气海洋科学系,20742)

摘 要

今天的大气科学已从20世纪初经验的阐述转变为既有理论基础又有客观定量化的一门数理学科,其发展步伐在近50年来不断加快。文章回顾了近百年来大气科学在探测、数值天气预报和气候研究3方面所取得的主要成就,并对大气科学在21世纪的潜在发展作一展望。大气探测、计算能力和信息输送方面的技术进步无疑是近代和未来大气科学迅速发展的巨大动力。这些技术进步促使数值模式分辨率在不断提高,越来越多的实测和卫星等遥感资料在通过反演和同化进入模式初始条件和全球气象分析场,模式物理过程和参数化逐步趋向现实,从而使全球和区域数值预报水平持续提高。同时对大量观测资料的统计分析和许多气候子系统耦合模式的若干试验,大大提高了对造成气候变化和影响的物理、动力机制的认识;特别是对全球气温变暖,其中人类活动的影响,以及ENSO的发生、发展和消亡的机制和过程的认识。

近期数值天气预报则趋向于模式发展的统一、预报时效的增加和对有足够成员且有代表性的集合预报的日益重视。气候研究将致力于减少各物理和化学过程参数化、分辨率等因素在模式中的不确定性,逐步达到跨月、季节直至年代际气候变化的合理预测。可以预言在不久的将来,地球-空间系统各变量的观测和预报将逐步数字化、自动化,人们可提前3~5 d得知灾害性天气发生时间和地点的概率,人工影响天气等学科在21世纪将会有突破。同时,可以看到世界各国共同协作建立地球-空间综合观测系统,发展能"包罗万象"的地球-空间-减灾的统一模式。然后综合利用大量观测和模式资料,及时掌握地球-空间系统中的各尺度变化规律,以确保人类社会的持续发展。

关键词:大气科学,大气探测,天气预报,气候预测,计算技术。

1 引 言

大气科学(又称气象科学)是运用数学、物理、化学、计算和信息技术等方面的知识,设计各种探测仪器来监测、发展各种模式来预报(或模拟)大气和地球表面状态,揭示大气运动、天气演变和气候变化的规律,以及研究大气动力、物理、化学和热力学过程的一门学科。近年来由于土地沙漠化、温室气体和污染物过度排放,造成全球气候变暖、酸雨事件和灾害性天气频发。所以,大气科学已与水文、海洋、环境、地理、生态及其他学科相结合研究大气运动在不同时、空尺度上的演变特征。因此,大气科学的发展直接影响到与国计民生有关的工业、农业、国防、交通、能源、水资源、城市建设、污染控制、商业、体育、旅游直至人民生命和财产,并使她成为20世纪后叶最受各国人民和政府关注的重要科学领域之一。如在西方发达国家,气象信息已成为排在政经、社会和体育之后让公众关心的第4大日常新闻,且大约1/7的国民经济与气象有关。随着近代科学技术的飞跃发展,特别是高速电子计算机、卫星探测技术和互联网的迅猛发展,大气科学在近50年来取得很多辉煌成果,并且其发展步伐在不断加快。在庆祝《气象学报》创刊80周年之际,有必要对大气科学的过去进展作一世纪回顾,并对某些领域的未来发展作一些展望。

2 历史回顾

20世纪初,大气科学作为物理学科的分支起始

* 初稿时间:2005年8月2日;修改稿时间:2005年9月8日。
资助课题:美国国家自然科学基金会(ATM-0342363)。
作者简介:张大林,男,博士,教授。主要从事中尺度气象、强灾害性天气和区域气候的数值预报和研究。
E-mail:dalin@atmos.umd.edu。

于局地天气观测，用电报收集资料、绘制地面天气图并试作天气预报。第一次世界大战初，美国开始发布北半球气压和温度地面图。虽然许多地区仍无观测，但这些地面图显示了大尺度高、低压系统的移动特征。20 世纪 20 年代初，以挪威流体力学家 V Bjerknes 等[1]为首的 Bergen 学派根据地面资料分析提出了气旋、锋面和气团学说，为天气学分析和动力预报树立了一重要里程碑。不久，由于刚刚萌芽的航空业的需要，少数气象站开始了无线电高空探测。在此之前人们曾使用风筝测量近地面大气的温、湿度、气压和风场。

第二次世界大战期间，由于前线飞机轰炸等战争需要加速了欧、美高空观测网的建立，使天气分析从二维空间扩充到三维空间，展示了高空气流结构与地面气压系统的关系。更重要的是，以 Rossby[2]为首的芝加哥学派通过高空天气图分析，发现了高空急流和大气长波的运动规律并建立了长波的数学流体力学模型，从而开拓了作为天气分析、预报理论基础的大尺度大气动力学。不久在 Rossby 长波理论的基础上，Charney（1947 年）和 Eady（1949 年）提出了能解释温带气旋发展的斜压不稳定理论[2]。Sutcliffe（1947 年）导出了地面系统发展与高空动力过程的诊断关系。郭晓岚（1949 年）发表了能解释热带天气系统发展的正压不稳定理论。同时，Charney 等提出大气运动的尺度理论，导出了准地转大气运动方程，为后来建立各种滤波数值预报模式和多种近似理论（如半地转、非线性平衡、位涡反演等）奠定了基础[2]。从此大气科学从经验性阐述成为一门既具有理论基础又有客观定量化的数理学科。

在 20 世纪 40 年代末，随着计算机时代的到来，Neumann（1946 年）提出了用计算机积分大气运动偏微分方程组的设想。后来他和 Fjortoft 等在 Charney 的领导下，用一层正压、准地转模式作了 24 h 500 hPa 等压面上大气运动的计算机预报，从此揭开了近代动力数值天气预报和动力气候预报的序幕[3]。在此有必要提及早在 1904 年，V Bjerknes 就提出天气预报是一组数学物理方程的初始值问题。由于这组方程是高度非线性的，又具有很多待定的强迫、耗散项，无法得到解析解。是 Richardson（1922 年）首次提出了数值天气预报的概念，并用数值化解大气运动微分方程为代数方程，通过手工求解作了 6 h 地面气压预报。但气压变化的预报值比实际气压变化大两个量级。他的失败是由于当时无高空观测资料，又未考虑滤去气象“噪音”——即重力波和声波的干扰而造成的计算不稳定[3]。虽然这次数值预报以失败告终，但为以后 Charney 等的历史性成就提供了重要参考。

20 世纪 50 年代以来，大气科学研究的各分支领域均取得很大发展。但限于篇幅，这里仅对大气科学中进步最为显著的大气探测、天气预报和气候研究 3 领域作一总结，同时将述及与之相关的其他领域的成就。

2.1　大气探测

近代大气科学的飞跃发展离不开大气探测、计算技术和信息传播技术的进步。首先，第二次世界大战后，大批军事雷达转为民用来探测云和降水的形成和发展，为天气分析、临近（0～6 h）预报和降水天气的研究提供了重要手段，并开拓了雷达气象学[4]和中尺度气象学[5]。这些雷达在 20 世纪 90 年代被多普勒雷达网替代，使人们能得到高分辨率的云内降水强度和径向风速，这显著改善了对龙卷、下击暴流等中、小尺度强天气动力结构的认识和对其超短时（5～20 min）预报的能力[4]，也大大提高了在恶劣天气条件下飞机起落时的安全度。Gal-Chen（1978 年）提出了从雷达风场和辐射率反演云中温度和气压场的理论[6]，进一步丰富了雷达和中尺度气象学以及对流风暴动力学。

更为重要的是，自 1960 年美国第一颗极轨卫星升空以来，美、欧、日本、前苏联和中国先后发射的静止气象卫星（现共有 20 多枚）在空中昼夜连续地监测全球大部分地区的天气演变，为改善天气预报和加速气象事业的整体发展奠定了科技基础。卫星气象学也因此而诞生[7]，并有力地促进了各种遥感探测技术的迅速发展。气象卫星以可见光、红外和水汽波段提供了闪电、云顶温度、整层水汽和三维风场的分布，使人们能跟踪各种灾害性天气系统（如热带风暴、温带气旋、飑线、梅雨锋降水）的演变。虽然它们的准确度和垂直分辨率还不够理想，但这些观测资料为解决海洋、沙漠、高山等地区记录稀少的问题开辟了新途径。20 世纪 80 年代以来发射的卫星还带有微波探测仪器（如 AMSU，SSM/I），用来探测云内温度和降水分布。气象卫星也提供地-气系统辐射收支、陆表植被、土地使用、土壤特征和海平面高度信息。地表特征的红外探测分辨率可达几米。美国和日本于 1997 年底联合发射了一枚名为 TRMM 的热带降水观测卫星[8]，第一次把雷达安装

在卫星上，能合理地观测出热带云团的垂直结构，并使反演热带潜热加热垂直廓线成为可能。美国1999年发射的新一代地球观测系统(EOS)的第一颗卫星TERRA还提供海陆生物圈演变、冰雪覆盖、海温和气温、宏观云物理、气溶胶、一氧化碳(CO)、甲烷(CH_4)和森林破坏状况，将为监测和研究全球气候变化提供重要依据。此外，美国在20世纪90年代(台湾将在近期)发射了多枚全球定位系统(GPS)的近地卫星，提供了高分辨率的中层至电离层的大气探测廓线。若使用双频率GPS地面接收器可获取大气整层可降水量，其误差小于2 mm。尽管人们还远远未能充分利用上述各种卫星资料，但它们的使用极大改善了数值天气预报模式的初始条件和对预报产品的验证（见下文）。结合地面的天文雷达观测，这些卫星超高空资料的开发也使空间气象作为一门新学科在近几年萌芽，监测和预报热层以上对各空载和地基技术系统能造成损失以及有害于人类生命和健康的地磁、太阳风等异常现象。中国气象卫星和卫星气象研究在过去30年也发展十分迅速[9]。目前正研制含有紫外、可见光、红外和微波段的风云3号极轨卫星和风云4号地球静止卫星。这些高分辨率探测资料的使用必将大大改善中国的天气分析、数值预报、气候研究和环境监测。

20世纪70年代开始建立至今已达1500个以上的海洋浮标站，美、欧许多商业船只和飞机还分别安装了海洋表面、洋流自动观测仪和气象自动探测器，加上卫星观测，基本覆盖了大部分海洋无资料区，同时也加密了陆面高空观测。此外，50年来全球地面观测站增加了近10倍，达7000多站点。高空观测站增加了3倍多，达1000多站点。美、欧还进行了风廓线、地面自动观测站、声雷达、激光雷达、微波辐射仪、灵敏微压计、天电观测站的布网，以弥补常规高空观测时、空资料信息的不足。虽然上述各种资料量十分庞大，但都可在2～4 h内经人工和计算机处理，然后通过区域气象中心传输到世界任何一个地方。

需要指出的是，上述新的观测仪器大多是应大规模野外试验对某些不确定性较多的天气、气候现象进行综合、加密观测试验的需要而设计和发展的。例如，世界气象组织针对天气可预报性于1979年进行的全球天气研究计划(GARP/FGGE)和1983年对ENSO(见本文第2.3节)进行的热带海洋-全球大气试验(TOGA)；美国于1979年以研究强风暴环境条件进行的AVE-SESAME试验、1985年针对强风暴预报和预警进行的PRE-STORM中尺度试验、以及2003年以研究对流涡旋而进行的BAMEX中小尺度试验；台湾于1987年以研究梅雨锋环流及其与地形相互作用的TAMEX中尺度试验；20世纪末，中国进行的4大气象试验(南海季风试验、灾害性天气观测和理论试验、华南暴雨试验和淮河流域能量与水分循环试验)以及在2001/2002年针对长江中下游梅雨锋暴雨研究进行的加密观测试验[10]。上述气象试验所得到的高质量资料大大增强了对各种尺度天气和气候系统的科学理解并为提高未来预测能力打下重要基础。

在此顺便提及过去50年来电子计算机的发展，它从1954年投入气象业务使用的第一台IBM-701型浮点运算速度为每秒10^3量级次，发展到20世纪80年代初为每秒10^9量级次的CRAY-1机，至今天单运算器速度近达每秒10^{13}量级次并有上千并行运算器的IBM SP型机。今天的“笔记本”计算机也要比30年前最快的大型计算机快若干倍。计算机的存储器和磁盘技术也发展得十分迅速。过去40年来计算机速度和存储量基本以每18月加倍、但价格减半、体积不断减小的规律发展。此外，气象信息传播从20世纪初的电报收发到60年代的电话专线，以及发展到今天不断更新的高速、宽频互联网。这些技术发展无疑都是数值天气预报、气候、气象和海洋观测资料的收集、交换和处理及其他大气科学领域进步的巨大动力。

2.2 天气预报和研究

50年前，最盛行的天气预报技术是沿袭Bergen学派使用过的运动学方法或外推法。自从首次数值天气业务预报模式问世以来，数值动力(和概率)预报逐步在各国气象中心普遍采用，以指导6～12 h以后的天气形势(要素)预报。数值模式发展和预报水平几乎每10年上一新台阶。如50年代中期Phillips(1956年)发展的二层模式到后期出现的多层准地转、静力平衡、斜压模式。这些简单模式虽然不能预报实际“天气”，但使人们看到了中纬度气旋系统和大气长波运动的特征。

20世纪60年代初，人们意识到滤波模式的局限性，并开始注意发展如Richardson当初所使用的含有重力波的原始方程模式。这些模式渐趋复杂但合理化，如考虑了地球形状、湍流交换(Smagorinsky，1963年)，地形、地表摩擦、海陆分布(Mintz，

1964 年)，地面辐射和水汽守恒(Manabe，1965 年)，以及积云参数化(Kuo，1965 年，1974 年)。早期 Rossby (1938 年)、Obukhov (1949 年) 提出的地转适应理论帮助理解了重力波在这些模式中的作用和一些数值技术的开发。曾庆存、丑纪范、廖洞贤和周晓平等在 1966 年前在数值技术、初始化和模式发展等方面作出不少重要贡献[11,12]。这些原始方程模式投入业务作天气和气象要素预报，其准确度逐步接近并超过有经验的预报员。在此期间，人们也开展了对各类天气现象可预报性的研究。Lorenz[13] 提出大气是一混沌系统，应使用概率观念预报天气变化。他的“吸引子”研究在许多流体力学领域得到了广泛应用。同时，许多模式试验发现初始条件中的微小误差随时间积分不断增大且向更大尺度扩散，故 Lorenz[14] 提出了模式可预报时限与天气系统生命史相当(如气旋为 3～5 d，雷暴雨为 1～3 h)。Lorenz 的这些工作为概率统计和数值统计(MOS)预报以及近年来发展的数值集合预报提供了重要理论基础。此外，在 60 年代后期，由于计算机的广泛应用，天气学从对天气现象和过程的经验艺术性描述逐渐走向对它们的动力和热力学诊断分析，促进了天气学与大气动力学的结合，使两者的差别逐渐缩小。

20 世纪 70 年代，数值模式逐步向时、空尺度两极方向发展，即中 (3～15 d)、长(15 d 以上)期大尺度形势预报和气候预测(见本文 2.3 节)的(粗网格)全球谱模式，和短期(1～3 d)日常天气预报的(细网格)区域或中尺度模式。前者于 80 年代初在美国投入业务预报，以首先满足航空界的需要，后者被用来预报和研究与暴雨、冰雹、龙卷、大风雪、下击暴流等有关的中尺度天气系统(如台风、飑线、对流复合体、冷暖锋，梅雨锋)。Anthes-Warner[15] 提出了即使用天气尺度的常规资料作为初值条件也有可能预报出上述中尺度天气系统和现象的假设。这一假设被一些用 AVE-SESAME 资料检验的数值模拟所验证，从此开始了强灾害性天气可预报性研究和中尺度对流系统预报的新阶段。这期间的一个重要特征是部分模式在许多大学诞生并逐步完善，如加利弗尼亚州洛杉机分校的大气环流模式、佛罗里达州立大学的热带大气模式、宾夕法尼亚州立大学和科罗拉多州立大学的中尺度模式。这大大加强了气象人才的培养和模式在中小气象单位的推广。此外在美国，这些模式输出的高分辨率的合理气象场也为当时解决美、加和各州之间空气污染物源地的纷争研究提供了基本依据，从而带动了空气污染气象学的进步。

20 世纪 80 年代，大气对内、外部强迫的响应普遍受到重视。与潜热释放、积云对流、边界层物理、大气辐射有关的物理过程通过参数化引入模式，这些物理参数化又被各种外场加密观测资料验证。虽仍有不少不确定性，但“模式大气”越来越接近实际大气，使短期数值预报逐渐成为天气预报技术的主流，并超过概率统计预报的准确率。尤其是对爆发性气旋和那些有一定斜压性的天气系统。中、长期预报模式中还考虑土壤、植被的影响以及大气与海洋、陆面的相互作用。这些模式的发展及其 MOS 产品的结合，提高了高空大尺度天气系统和地面气象要素的中、长期业务预报能力。Emanuel[16] 提出了飓(台)风强度由于海洋向大气输送水汽和感热而与表层海温直接有关，改变了原来用以解释热带气旋发生的第二类条件不稳定理论，使飓(台)风预报和研究走上一新的台阶。

由于套网格数值技术和更合理物理过程的使用，区域模式分辨率逐步提高，并以常规资料为初始条件复制出十几小时后发生的 100～200 km 尺度的雷暴高压和低压、飑锋、中尺度涡旋和与其有关的降水系统[17]。从而将对中尺度对流系统环境场的可预报性推进到对这些系统内部结构的可预报性的研究。这些成果不仅进一步验证了 Anthes-Warner 的可预报性假设，也显示 Lorenz 对中小尺度可预报性的推论是较“悲观”的。这主要是因为 Lorenz 理论是以干动力模式为基础，而湿物理过程在中、小尺度天气系统中占主导地位。“模式大气”接近实际大气使得数值模式也成为大气科学理论研究的重要工具。如 Rotunno 等[18] 使用云模式揭示了飑线对流和超雷暴单体的长生命史取决于环境场的对流能量、垂直风切变和对流产生的地面冷气堆强度，因而丰富了强风暴和云动力学。值得指出的是，这些区域模式模拟资料填补了常规观测网无法得到的许多中小尺度信息[19]，因此极大地改善了气象学家们对中小尺度现象的认识和预报能力。

20 世纪 90 年代，由于大容量、高速计算机的开发，模式二维(x,y)网格点数从 10 年前的 $10^2\times10^2$ 增到 $10^3\times10^3$。因此，全球模式的网格距从几百千米减至几十千米，而区域模式可减至 4～6 km。后者明显增强了模式对中小尺度天气波动和外强迫(如地形，感、潜热源)的分辨率，并增加数值模拟的

准确度，尤其是与地形有关的降水。如此细网格的使用，使原来的积云参数化不再合适，而需使用云物理方程组。同时，原来的静力平衡近似必须被非静力平衡和可压缩关系取代。这些细网格云模式的应用，促进了云物理和动力学科间的结合和相互渗透，有助于揭示目前观测手段还未能发现的一些小尺度天气现象和环流特征。以图 1 为例说明目前区域模式的能力，它是用网格距为 6 km 的区域云模式对 1992 年 8 月在美国东部登陆的一次飓风的三维模拟结果[20]。以美国气象中心分析场为初值和侧边界条件，模式较为准确地模拟出该飓风的 72 h 路径、中心气压和地面风强度随时、空的变化。其模拟的飓风眼随高度变化，飓风云墙和螺旋雨带的雷达回波强度，冷、暖云层分布以及高空与低层环流特征都与实况十分相似。这些模式资料的分析加深了对飓风眼形成机制、飓风云墙动力学、飓风内部结构以及近几年才提出的涡旋 Rossby 波动[21]的认识。有的飓风模式在近几年已与风驱动的海洋、洋面波动模式藕合，所用网格距可达 1～2 km。这些模式还可用以预报风驱动引起的海浪、海温变化。

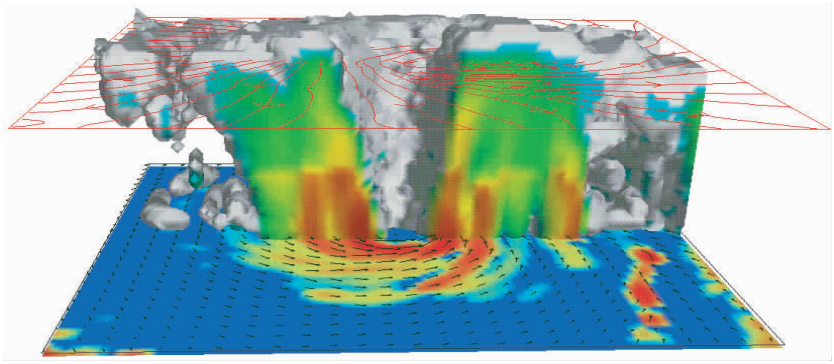


图 1 模式模拟的经过飓风 Andraw(1998 年)眼中心的“雷达”回波垂直切面和高、低层风场结构[20]

Fig. 1 Vertical cross section of the model-simulated radar reflectivity through the eye center of Hurricane Andrew (1992) and flow vectors at the lower and upper troposphere[20]

过去 10 多年里随着廉价、高速并行工作站的普及、宽频互联网的快速发展和区域模式的越来越成熟，使用区域模式和实时获取各国气象中心资料越来越方便。因此许多大学、中小气象单位和私营公司开始使用其国家气象中心的客观分析场为初值条件和预报场为侧边界条件以提供 36～48 h 区域数值天气预报，模式网格距可达到 4 km，同时其预报产品自动上网为社会服务。有兴趣的读者可上作者所在的马里兰大学大气海洋科学系网址 http://www.atmos.umd.edu/ 看到为华盛顿-巴尔的摩地区所提供的日常天气预报产品。区域模式的普及有利于提高人们对影响本地区天气因素的认识，同时也大大促进气象资料在各地环保、水文、交通、旅游、新闻等部门中的应用，从而改变了数值预报长期被国家气象中心垄断的局面。

此外，各种气象(模式和观测)资料的方便使用也使广播、电视气象学应运而生。日常电视播放的卫星云图、雷达回波和天气图以及天气频道的建立，大大改变了普通百姓对周围环境和大自然的认识，并提高了他们对大气科学、环境事业的兴趣和关注。同时，随着气象资料在近十多年来的飞速增长，如何通过网络实时传播、现场迅速处理和显示高达数千兆的多维动态气象信息(如雷达、卫星、高分辨率的模式积分结果)，并且具有一定“人机对话”智能和进行自动分析、天气解释、发布异常天气警报的功能，使得信息科学和工程与其他领域中的信息技术(IT)一样在近几年来引起重视。

由于中期预报一半以上的误差来自于初始条件的不准确性(如观测、分析误差，测站资料不够稠密)，欧、美气象中心自 20 世纪 90 年代初就分别使用奇异矢量和繁殖法以其分析场为基础产生若干不同的初值条件进行中、长期集合预报[3]。有条件的大学和私营公司近几年也已开始操作短期集合预报。虽然这些集合预报由于计算量大而无法使用细网格和较为复杂的物理过程，但对某些气象要素变化的可能范围或发生某种天气的概率预报提供了合

理依据，并为有关部门应付可能出现的天气条件提供了十分有价值的战略性参考。故集合预报改变了统计预报在中、长期天气预报中一直占主导地位的局面，开始在中、长期气象要素的预报中起重要作用。另一方面，这些成果揭示了预报各类天气系统与初值条件有关的不确定性，改变了预报员习惯于模式确定性预报的意识。特别是美国通过中期集合预报分析，成功发现了东北太平洋地区为冬季预报误差来源，然后利用适应性(adaptive)观测概念，使用有限的飞机下投探空资料大大改善了冬季中期天气预报的准确度。由数值差分格式和物理参数化等不确定性对中、短期数值预报的影响在近几年也开始引起注意。此外，世界气象组织目前正着手开展一项为期 10 年的全球天气观测系统研究和可预报性试验(THORPEX)[22]，将进一步充实集合预报和适应性观测所获成果，以改进灾害性天气和降雨的 1～3 d 动力预报和 3～15 d 的概率预报[见 http://www.wmo.int/thorpex]。

20 世纪 90 年代，气象资料四维同化也随着数值预报模式的进步和日常大量遥感资料的产生得到长足发展[23]。10 多年前模式初始化一般采用逐步订正、最优插值和张弛逼近(Nudging)等方法。今天的四维同化已发展了以估计理论为基础、较为复杂的四维变分、倒积分和 Kalman 集合过滤技术[3,24]。这些新技术在如何将那些非常规的时、空观测以及不同仪器所测到的不同气象要素和非气象要素通过物理、动力模式产生一个常规分布、热力和动力都相容且接近实际大气的初值气象场方面，效果十分令人鼓舞。目前几乎每一数值预报模式都有一与之有关的四维同化系统。欧、美气象中心使用 3～6 h 的时窗，通过四维变分已将卫星和多普勒雷达资料的部分信息、商业飞机观测和风廓线资料加入其分析场，其中遥感资料约占总资料量的 85％左右。这些资料的加入显著改善了业务数值模式的初始条件和中、短期预报准确率。四维同化技术的使用，也为各种观测网的设计和理解某些天气现象的因果关系发挥了重要作用。

利用图 2 中 500 hPa 位势梯度的相对误差即 S1 评分总结过去 50 年来在数值预报方面取得的进步。一般来说，70％和 20％可分别用来判断某一预报是否“无参考价值”和“准确”。该图说明，今天对大气长波、大尺度气旋和反气旋的 36 h 预报接近于 30 年前的“准确”预报水平。而今天的 72 h 预报与 10～20 年前的 36 h 预报水平相当。同样，未来 5 d 的数值预报在 15 年前对预报员来说基本无参考价值，可在今天即使第二星期的长波预报仍然显示一定预报水平。至于对中小尺度系统预报的进展在 10～20 年前是无法预料的。如今天飓风路径的 5 d 平均预报误差为 300 km，与 10 年前的 3 d 预报误差相近。显然，这些进步可归结为计算机发展促使模式分辨率的不断提高，各种模式物理过程的不断改善，越来越多非常规资料的涌现，特别在海洋上空和南半球的卫星和飞机观测，以及各种四维同化技术的发展[3]。这也使今天南半球的预报水平跟北半球相似，同时也激发了一些科学家在近几年来开始制作极地区域的数值天气预报。

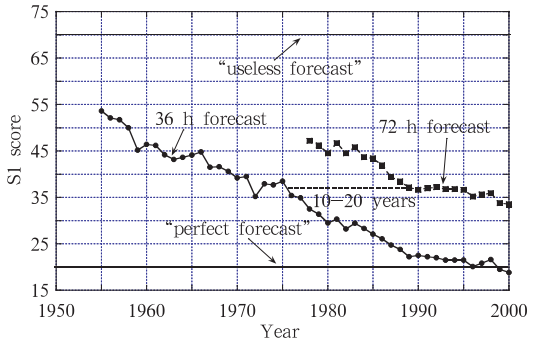


图 2　美国气象中心 500 hPa 高度场 S1 评分(即预报准确度)在 1955～2000 年期间的进步
(S1 评分用来表示水平气压梯度的相对误差[3])

Fig. 2　Time series of the operational forecast skill, denoted by S1 score of 500 hPa geopotential height, of the NCEP models over North America
(The S1 score measures the relative error in the horizontal pressure gradient, averaged over the region of interest[3])

2.3　气候研究和预测

50 年前，气候和大气环流(或大尺度动力学)是大气科学的两个不同分支。前者限于对地面气象要素(如温度、降水)统计特征的描述，而后者注重热力(如太阳辐射)、动力(如海陆分布、地形)和物理(如云、雾)过程对赤道至两极三圈环流的影响。随着全球高空观测资料的广泛使用，才逐步将大气环流的长期统计特征作为气候问题处理。但它们的真正合二为一要归结于全球数值模式的出现。尤其是 20 世纪 60 年代后期，以 Smagorinsky 为首的美国地球流体力学实验室(GFDL)，将大气环流模式与海洋环流、陆面模式耦合，模拟出北半球气候的某些距平和异常现象。这样在大尺度动力学的基础上产生出

一门新学科——气候动力学[25]。从此气候学不再仅考虑大气热量和水分收支,还研究大气中能量、水分、动量输送对不同时、空尺度气候的影响。

今天人们将气候学作为大气圈-水圈-冰雪层-陆面-生态耦合的复杂(地球科学)系统来认识[26]。故气候学的发展也显著带动了这些学科的进步和相互渗透。大气中的气溶胶、温室气体[如水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、一氧化二氮(N_2O)、臭氧(O_3)和氟氯化合物(CFC-11,CFC-12)]以及与大气运动有关的云和雾通过改变长、短波辐射的强迫作用来影响气候。水圈包括海洋、内河、湖泊和地下水。由于海洋的巨大热容量和质量,它通过与大气交换热量、水汽和CO_2制约着气候及其在不同时间尺度上的变化。格陵兰冰帽、极冰和陆地冰雪对气候的影响在于它们的低导热率和对太阳辐射的高反照率,以及对海平面高度的影响。同时它们也是全球大气运动的主要冷源。陆面的土壤、植被和粗糙度控制着接受太阳能的多少和与大气热量和水汽的交换。海、陆生物圈决定着植被变化以及温室气体的吸收和释放量。显然,上述每一子系统都有其内部独特而又复杂的动力学,而气候变化是这些子系统在太阳辐射强迫下相互作用造成的。大气和海洋环流仅是气候系统问题中的一部分,其中大气惯性最小,是最不稳定、变化最快的子系统。

气候系统中各过程的变化具有很宽的时间尺度,长至几万年,短至几天乃至几分钟。虽然不少地区自19世纪中叶就有地面温度和降水观测,但保存较完整的气象记录仅能合理提供地球上大部分地区的近代气象信息。几十至百年以上的气候往往不得不借助于地球上的"替代"物如树木年轮、岩石、冰川、湖泊和海洋沉积物、海岸沙丘和其他形态物[25,27]。对这些替代物的分析揭示了地球过去几百万年来的气候演变状况,使古气候学在近40年来得到迅速发展。尤其是20世纪90年代初,欧、美科学家在格陵兰冰帽最高点钻孔得到3 km深的冰芯,通过同位素、气泡成分和微量物质分析间接推得北大西洋区域地表温度和某些温室气体在过去10万年间的变化[28]。同样,前苏联和后来法、美科学家通过对南极钻得的深孔冰芯的分析得到过去40～70万年间地表温度和温室气体的变化[29]。这些成果显著提高了人们对全球气候变化的理解,并且大大丰富了极地气候学、极地气象学、极地大气化学、冰川学和地球物理学等其他学科。

以近代观测资料为基础,季节至年际变化是气候学20世纪70年代以来受到最广泛关注的研究课题。大量研究表明年变化与热带环流和海温异常关系密切,它常伴随着穿越赤道的南、北半球巨大的质量、水汽和能量交换。例如,Reed等(1961年)发现在热带平流层中存在着温度和纬向风的准两年周期振荡。Madden和Julian(1971,1972年)发现热带地区高空纬向风、气压和对流活动的40～50 d季节性振荡[30],但这两种振荡现象直到70年代末才受到广泛注意[27]。加上GARP/FGGE试验,掀起了一股平流层动力学和热带气象学的热潮。此外,Wallace和Gutzler[31]分析了冬季月平均海平面气压和500 hPa高度场,揭示了北半球大气环流中低频变化遥相关的5种不同流型,其中某些流型具有周期性振荡,并且是造成区域性气候年变化的主要因素。

ENSO也许是被研究最多也被广泛认为通过遥相关决定全球气候年际变化的最重要因子[25,27],它是Bjerknes J(1969年)将厄尔尼诺和南方涛动综合作为大尺度海、气相互作用的耦合现象。为理解ENSO形成的机制,以Wyrtki(1975年)为代表提出了赤道东太平洋对信风张弛响应的理论[32]。20世纪80年代,Philander等[33]又提出海气耦合不稳定理论,用以解释初始海洋或大气扰动为什么会增长到El Niño的强度。近20年来许多海气耦合模式被广泛用来研究ENSO发生、发展和消亡的机制,尤其是对1997～1999年ENSO循环作了详尽的分析。海-气相互作用的研究大大促进了海洋学的进步,以及大气和海洋两学科的相互渗透。由于大气和海洋运动都受到地球旋转、重力和热力影响,海-气相互作用的研究开创和发展了地球流体动力学。此外,为加深对全球气候变化的理解,各国政府自80年代以来显著加大了对气候研究的经费投入,由此吸引了许多科学家对该领域的兴趣,并加快对该领域年轻科学家的培养和科研队伍的迅速壮大。为此,多家大学气象系在过去20年里纷纷改名为大气和海洋科学系,包括作者所在大学;或与其他学科合并成为地球科学系。这明显促进了大气、海洋和其他地学学科之间的渗透,使气候研究在近年来相对于其他领域得到更明显的飞跃发展。

20世纪90年代,人们开始关注全球气候在近10～100年际的变化。这方面研究目前还存在很多不确定性,主要原因是由于无足够长时间、可靠的海

洋观测资料来研究海洋在此时间尺度上的作用。同时，此时间尺度与工业化以来造成温室气体上升的时段和其引起气候强迫的时间尺度相近。如何将大自然的变化和人类活动的影响分开是一重要但又复杂的科学难题。事实上，自发现南极臭氧洞[34]和平流层中臭氧被破坏以来，这些科学难题的研究大大促进了大气化学和环境科学在近 20 年来的发展[35]。长期气候研究需要回答如下问题：人类是否在进入全球增暖时期？是哪些因素造成这种气候变化？如果某种温室气体（如 CO_2）增加一定量将对今后全球气候有何影响？下面用世界气象组织气候变化国际专家组（IPCC）2001 年的报告[36]回答前两个问题：

全球平均地表温度自 1860 年以来上升（0.60±0.2）℃。这种增暖现象（图 3）主要发生在 1910～1945 年和 1976 年以来的两个时段，其上升率为每 10 年 0.2 ℃。与古气候资料相比，如此高的升温率和持续时间是过去几千年从未有过的，而且 20 世纪 90 年代（至今）是上千年最暖的 10 年。其中大部分增暖可归咎于人类活动[36]，主要是指大量森林砍伐、盲目垦荒和燃烧矿物燃料。地表温度的上升导致大陆雪盖面积和北半球海冰量在春、夏二季的减少和高山冰川的退缩，并使海平面高度以每年 1.5 mm 速率上升。这是过去 3000 年平均速率的 10 倍左右。

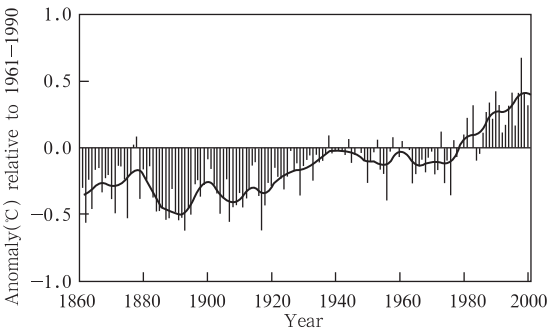


图 3　1861～2000 年全球陆面的年平均温度（℃）距平（相对于 1961～1990 年）[36]

Fig. 3　Annual anomalies of the global averaged land-surface air temperature (℃) during the period of 1861 to 2000 that are relative to its 1961 to 1990 values[36]

自工业化以来，由于人类活动使许多温室气体的浓度持续上升。如 CO_2 浓度由于森林面积的减少和矿物质的燃烧增加 30%。CH_4 和 N_2O 分别增加了 150%和 16%，在过去 20 年里以每年0.25%的速率增加。在所有温室气体中，CO_2 对气候的强迫作用居首（占 60%），故它是人类最应该控制的温室气体。人类活动对气候的影响一直是当代气候研究的最重要课题之一。

如要回答前面所提到的第 3 个问题需要使用较为复杂的气候模式。自 20 世纪 70 年代以来，出于对各时、空尺度气候变化的理解和预测的需要，各种简单和复杂的气候动力学和热力学模式纷纷涌现[37,38,25]。目前的气候模式已将大气、陆面、海洋和海冰过程耦合，并包括气溶胶、CO_2，O_3 等大气化学过程。如美国国家大气研究中心（NCAR）的气候模式，垂直高度可达 120 km，包括平流层、中层和热层以及与它们有关的热力学结构、化学和电磁过程。虽然许多物理、化学过程参数化还有待于改善，上述模式的使用使人们对过去、现在和将来的气候变化规律有了不同程度的认识。一般来说，与实况相比，大部分气候模式都能模拟出次大陆尺度和季节至年际变化的趋势和异常等主要特征，尤其是热带和亚热带地区的干、湿分布和季风环流；平流层 O_3 减少导致平流层低部气温降低的过程；跟 ENSO 有关的海洋、大气环流特征；土地利用的改变对区域和全球气候的影响以及在近期温室气体浓度的强迫下 20 世纪气候变化的主要趋势[36]。

20 世纪 90 年代，跨月至季节尺度的短期区域气候问题也受到广泛关注。这一问题主要是在给定的全球气候背景下了解大气辐射、云、雨、蒸发和淡水存量在区域性短期气候变化中的作用。它已作为世界气象组织的全球能量和水循环计划（GEWEX）来实施。以全球模式提供侧边界条件的区域气候模式在这方面发挥了重要作用，后者现已包括陆地积雪、地形、径流和植被的季节变化。由于使用细网格和更为合理的物理过程，区域模式能模拟出更为合理的区域性强迫作用以及与 ENSO 有关的气候特征，如地面热通量、地表温度和降水分布[36]。

随着气候模式可信度的提高，动力气候预测在 15 年前已经开始起步。虽然区域性气象要素的预报还不如统计预报方法，但它对季节气候异常趋势仍有一定预报能力。特别是气候模式现已能提前半年合理预报出热带风暴的发生频率以及提前 1 年成功预报出那些海-气相互作用较强的 ENSO 事件。要获得合理的长时间动力气候预测（模拟），需要运转高分辨率、各子系统过程高度耦合的综合性气候模式，这使得地球模拟器——一巨型计算机于上世纪末在日本诞生，从而大大加快了气候（和天气）模

式发展和气候研究的步伐。此外，过去15年来，科学家们利用各自的气候模式对未来CO_2浓度可能加倍造成的气候变化作了评估。IPCC的2001年报告[36]综合了各种模式的结果，表明如果CO_2浓度未来加倍将会使全球地表温度上升1.5～4.5 ℃。这将导致冰川继续大规模退缩，海平面上升9～88 cm，全球平均水汽含量和降水的进一步增加，从而加重各地区的气候异常，使极端天气事件增多[36]。这些研究结果随着被未来观测事实的验证将日益受到各国政府和人们的注意。事实上，最近的研究[39]表明在过去35年来全球洋面温度在缓慢变暖，使每年强飓风发生的频率和给沿海地区造成的财产和环境破坏逐渐增加[40]。

3 未来展望

如上所述，大气科学的发展离不开探测、计算机、信息传播及其他学科的进步。当今科学技术发展迅速，不确定因素较多，很难对21世纪大气科学发展和研究范围作出准确预测，在此仅能作一些粗略展望[41]。

在未来10～20年，地面气象观测、遥感观测站将进一步加密且实现自动化。越来越多的商业飞机、火车、汽车、船只等其他运载工具都可提供自动测量的气象信息。常规高空观测将由GPS制导。美国现有的多普勒雷达将添加多变量、多偏振性能以增加云内水和冰含量、冰雹大小和降水量分布信息，还将在距离雷达5～100 km处安装地面微波接收器，以得到云内三维风场结构[42]。地面光雷达(LIDAR)和大气辐射干扰仪(AERI)将被布网以自动连续探测大气低层水汽和温度廓线。

现在人们都可从http://maps.google.com/看到经过卫星资料反演、分辨率为几米的道路、房屋和桥梁等其他地表状况。可以预言，不久的将来，人们将会从网上下载数字化的具有高分辨率、高质量的逐周全球地表信息(如地形、土地使用、植被、地表粗糙度、土壤条件)用作各种数值天气和气候预报模式的下边界条件。这必将显著减少模式地表过程参数化中的不确定性，从而改善未来各种尺度天气和气候的数值预报水平。

未来气象卫星将在过去靠接收地、气信号的“被动式”探测基础上，添加许多雷达波段进行“主动式”探测，以获取云区风场和可降水量的三维结构信息；安装多普勒声雷达以提供无云区高分辨率三维风场；安装红外干扰仪使红外波段从今天的几十波段增加到几千波段，旨在提高无云区温、湿度遥测的垂直分辨率。加上GPS卫星提供的整层可降水量信息和地面遥感资料可使时、空变化较大的水汽探测更为准确，并将使定量降水预报得到显著改善。

随着上述卫星探测精度以及水平和垂直分辨率的提高，卫星资料将会在21世纪中叶在天气分析、预报、气候研究和模式初始化中起决定性作用。在此之前，人们一方面将使用四维同化技术，充分利用当今观测资料以改善模式初始条件，另一方面需通过观测系统模拟试验(OSSE)和适应性观测决定各种观测系统的有效实用性，尤其是要决定其中某些系统是否被淘汰或被改造重新布网(如目前的气球探测)。并设法发现影响预报准确度的敏感区，消除观测空白区(如中国的西部和南海地区)。

由于气候研究的需要和一些发达国家对海洋资源利用和开发的日益重视，将会加大对海洋及海-气相互作用研究的经费投入。在近几年内，海洋上将通过飞机约每300 km投下具有周期性升、降能力和有几年运行寿命的遥感器以自动获取直至2 km深处的温度、含盐度和流速廓线。这被称为全球海洋ARGO观测计划[43]，并被列入全球气候观测系统(GCOS)。这将会使海洋学和地球流体力学成为更加活跃且具有挑战性的研究领域，并有助于推动10～100年际气候演变研究的进步。借助于卫星探测，海表气象要素和海浪、洋流速度的预报也许要比陆面上气象要素的预报准确。此外，与ENSO有关的大范围海温变化将能提前1～2年作出预报。这些海洋资料的使用也将使长期天气预报、全球区域性短期气候预报的可靠度得到显著改善。

由于气候和环境问题的逐步全球化、社会化，未来世界各国必然会加强合作、通过世界气象组织来综合气象、海洋、地理(如土地使用)、生态(如水循环、碳循环)等其他观测体系形成一地球综合观测系统，以时刻“把握着地球的脉搏”并为(如下所述的)未来地球-空间统一模式的发展和使用打下基础。

如何处理和充分利用日益增多的大量遥感和实测资料是各国政府和科学家们长期以来以及未来长期所面临的一大难题。为此，人们将会努力发展出具有自动分析、天气解释、发布异常天气警报的智能软件。各种快速、有效的三维和四维同化技术也将进一步发展，特别是Kalman集合和滤波法[3]。以便利用这些经过模式同化的资料来合理描述地球-大气系统的综合演变，改善全球气象、海洋分析场，同时用于各种数值模式的初值和边值条件以及全球

气候的研究。

未来 10 年左右，高速计算机的单运算器速度可发展达每秒 10^{16} 量级次并有数万并行运算器，这可使模式(x, y)二维网格点数增加到 $10^4\times10^4$。故区域模式可用几百米至 1 km 的网格距。这样，模式能够产生雷暴单体、龙卷、下击暴流尺度的“天气”现象，其预报准确度将取决于初始条件和模式物理过程的可靠度。为此在未来 10～20 年，除了需要进行大量陆面过程和湍流输送作用的研究外，还需要使用多偏振雷达、卫星和飞机在各种降水系统中的探测资料对现有云物理参数化[44]和各相水的模式处理进行严格验证、改进或发展新的更合理的参数化，以便能同时预报在同样中尺度环境条件下产生 20 mm/h 和 200 mm/h 不同量级降水的两个邻近云体。各种观测资料及时通过四维同化随时间积分滚动加入模式，将会显著提高灾害性天气的预报准确度。同时，需要大量工作来研究模式与各种观测仪器间的误差统计特征，以减少初始条件中的不确定性。在中小尺度天气系统远远超过自身生命史时段以后发生的概率(由地形决定的系统除外)，将依赖于能代表初值条件中和模式本身不确定性的有足够数量成员组成的集合预报。集合预报今后将成为大多数预报中心的主要产品，至少作为动力预报可信度使用。

上述模式条件的改进，将大大提高中尺度对流系统的预报准确度，使长期以来进展一直缓慢的夏季定量降水预报有显著改善。在未来 25 年内，短期连续滚动预报可使暴雨量和中心至少可提前 12～24 h 准确报出[45]。随着短期预报可靠度的提高，区域预报将会延伸 5～7 d 以上。在不久的将来，人们可提前一星期得知台(飓)风的大致路径和强度，或知道长江中、下游夏季发生大范围暴雨的概率。

随着全球范围初始条件的改善，大尺度天气系统的中、长期确定性预报在未来 20～30 年中将达到 Lorenz (1969 年)提出的可预报性理论极限。在此之前，集合和数值统计预报仍占主导地位。和短期集合预报一样，中期集合预报通过世界气象组织的 THORPEX 项目的实施将使一些模式中初始条件和物理过程中的不确定性大大减少。

21 世纪的气候研究主要将围绕与 ENSO 有关的 El Niño-La Nina 现象的进一步认识和准确预报，温室气体和空气污染的监测和控制以及它们在近代气候变化中的作用，人类活动和大自然变化在气候变化中的相对重要性[36]。为此，需花大量工作构造过去 10～100 年间的气候变化，掌握 ENSO、热带大西洋海表温度、风驱动洋流及其与大气的相互作用和温盐合成环流的规律。同时动力(和统计)气候模式将不断完善来研究季、年至 10～100 年际变化中各气候现象的可预报性，以及造成这些时间尺度上气候变化的因子。这些科学问题已被列为世界气候研究计划中气候变化和可预报性(CLIVAR) 的重点项目。通过世界气象组织的地球系统综合观测和预报(COPES)项目的实施[见 http://copes.ipsl.jussieu.fr]，可以预言 10 年后人们对跨季度气候、季风和海平面上升可作出合理预测。此外，极地振荡以及全球气候变化对冰雪层、特别对极地冰原和高山冰川的影响将日益受到重视。

在未来 10～20 年，气候模式网格距可达 10 km 左右。模式将包括地气系统中所有的动力、物理、化学和生态过程。但不确定性较多的云过程和它与太阳辐射的相互作用，温室气体、地表植被、土地使用和水循环过程的参数化，将需要经历长时间的严格验证和改进，然后气候预测才会有突破性进展。尤其这些模式才可用来预测全球增暖后，气候各子系统(如降水、浅深海洋流、极地冰原、生态)的演变和对各地区气候变化的影响，自蒙特利尔协定后氟、卤碳物减少对平流层臭氧浓度变化的影响以及后者对地气系统的反馈，和区域性污染、森林面积减少、土地利用改变、水源变化对全球气候的影响[36]。

随着未来计算机速度、存储、网络和并行技术的进步，具有变网格、变时间步长且含有各种物理和化学过程相互作用的统一模式将成为未来模式的发展方向。最近美国很多气象学家正合作发展新一代开放式天气研究和预报(WRF)中尺度模式供各气象单位作科学研究或业务预报之用(见 http://www.wrf-model.org/)。同时中国也在发展类似的多尺度通用资料同化与数值预报系统(GRAPES)[12](或全球和区域统一模式)。未来 10～30 年，我们将先看到中、短期，全球和区域的统一模式[45]，然后看到与气候模式的统一。可以预料未来地球-空间统一模式还将包括地幔运动、太阳黑子活动，外空等离子流体运动。到那时，统一模式的使用将会促进地球-大气系统和生态环境变化的系统研究，且推动空间、大气和地球科学间的相互渗透。此外，结合遥感、地理信息系统(GIS)、GPS 和互联网技术的发展加上如前述及的地球综合观测系统，人们将可能建立一套有效地灾害和环境的科学监测、分析和(统一模式)预报体系。届时，一门地球-大气-环境系统预测

学科将会应运而生。通过各种敏感性模拟试验，科学家们将可使用这一监测、预报体系开展对人类和自然环境协调的研究，以实现人类社会的持续发展。

随着世界煤炭、石油等自然资源的逐渐短缺和价格变得不断昂贵，科学家们在未来20～50年必将研制出污染少的新能源（如植物燃料，环保氢气）大范围用于工业、交通等行业。同时由于全球气候变暖影响人类长期生存的压力，各国政府必将加强合作发展各种节能技术和温室气体（特别是CO_2）的“捕捉”、封存的环保装置。这些都将减少温室气体和污染物的排放，有利于减缓全球变暖速度、改变空气质量。

未来统一模式和卫星遥感、GPS制导技术的不断发展，将促使温室气体和空气质量的观测和预报会和天气观测和预报同步向前发展，届时，近地层的污染度、臭氧浓度、花粉浓度和人体舒适度等空气质量的预报将大大改善人们的生活质量。

20世纪60年代由于云动力学和中尺度气象学发展不够成熟，人工影响天气（包括局地人工降水）活动在国外逐渐销声匿迹。随着气象科技进步，这一课题可能会在本世纪中、下叶重新引起人们关注。但和过去不同的是，各种科学假设将先通过高分辨率、物理和化学过程完善的云模式试验后，才会进行大规模外场试验。

随着宽频互联网的进一步发展，20～30年信息传播也许如今天的无线电一样快速方便。这将促进世界范围内的气象资料和其他地球和环境信息实时交换和资源共享。各部门计算机系统可相互联网进行并行计算，分担统一模式中的各部分运算。此外，数值模式的进一步标准化、统一化将使气象业余爱好者能从气象部门及时获取实时观测资料，通过“笔记本”计算机或公共“计算机馆”进行模式运算、天气分析和预报。人们如要得到世界任一地点、任一时刻的气象和环境信息也许象“看手表”一样方便。

上述科学技术的进步加之信息压缩、虚拟现实、视窗技术和计算机智能的发展，在未来10～20年内所有气象操作（如电视、电话、广播）和信息都将会逐步数字化。然后，天气解释、预报和气象教育也将数字化、程序化，大多数预报员将被气象程序员代替。同时，日常天气和空气质量变化将以动态、立体图像通过电视、网络展现在人们面前。这将对社会大众产生巨大影响，大气科学将成为社会和经济发展以及人民生活中不可缺少的基础和内容。

最后，需要指出的是，在未来40年世界人口若如所预测的那样增加一倍达110～120亿。工业化、城市化的迅速发展必将消耗大量地球自然资源。如此将可能使CO_2增加15%～20%，全球气候进一步变暖1～2 ℃[36]，从而显著改变世界各地暴雨、风雪系统发生的强度和频率，加剧各地干旱、涝灾等气候异常。同时，这一变暖幅度会使海平面提高80～100 mm，将严重影响世界各沿海地区的工、农业发展和人民生活。特别是这些地区往往人口和生产力最集中、增长也最快，故对任何自然灾害的袭击都将显得格外脆弱和惨重（如去年发生在东南亚地区由海底地震引发的海啸和今年8月底发生在美国的飓风Katrina事件），甚至有一天可能出现这些地区的人口大迁徙。此外，一些目前还无法预测到的地球－大气异常现象，如70年代发现的“臭氧洞”[34]，有可能出现 。所有这些天气、气候和环境变化将会造成严重的社会影响（如 大范围生命和财产损失、粮食生产、疾病发生和传染以及动植物生长），给各国政府和科学家们提出许多困惑、挑战性的问题。所以，大气科学研究必将进一步走向全球化，多学科化和社会化，以便及时把握地球－大气系统的变化规律，共同采取对策以保证人类社会的持续进步。

致 谢：作者在写作中阅读了美国气象学会会刊2000年各期“Millennium Perspectives”一栏中的许多短文，受益匪浅。李小凡、杨崧、汪学良、翁富忠、蔡鸣、王兴宝和郑维忠博士对本文提出不少宝贵意见，王兴宝博士打字成文，特在此一并致谢。

参考文献

[1] Shapiro M, Grønås S. The Life Cycles of Extratropical Cyclones. Amer Meteor Soc, 1999. 359pp

[2] Holton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology, 4th Edition. San Diego: Academic Press, 2004. 535pp

[3] Kalnay E. Numerical Weather Forecasting and Predictability. Cambridge University Press, 2001. 341pp

[4] Doviak R J, Zrnici D S. Doppler Radar and Weather Observations. San Diego: Academic Press, 1993

[5] Ray P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Amer Meteor Soc,1986. 703 pp

[6] Gal-Chen T. A method for the initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations. Mon Wea Rev,1978, 106: 587－606

[7] Kidder S Q, Vonder Haar T H. Satellite Meteorology: An Introduction. San Diego: Academic Press, 1995.

[8] Tao W-K, Adler R. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measurements Mission (TRMM)——A Tribute to Dr. Joanne Simpson. Amer Meteor Soc, 2004.

234pp

[9] 方宗义，许健民，赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展. 气象学报，2004，62(5)：550～560
Fang Zongyi，Xu Jianmin，Zhao Fengsheng. Progress and prospect of China meteorological satellite and satellite meteorology. Acta Meteor Sinica (in Chinese)，2004，62(5)：550－560

[10] 倪允琪，周秀骥. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究. 气象学报. 2004，62(5)：647～662
Ni Yunqi，Zhou Xiuji. Study for formation mechanism of heavy rainfall within the Meiyu front along the middle and downstream of Yangtze River and theories and methods of their detection and prediction. Acta Meteor Sinica (in Chinese)，2004，62(5)：647－662

[11] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础. 北京：科学出版社，1979. 543pp
Zeng Qingcui. Mathematical and physical foundation of numerical weather prediction. Beijing：Science Press，1979. 543pp

[12] 陈德辉，薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望. 气象学报，2004，62(5)：623～633
Chen Dehui，Xue Jishan. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models. Acta Meteor Sinica (in Chinese)，2004，62(5)：623－633

[13] Lorenz E N. Deterministic non-periodic flow. J Atmos Sci，1963，20：130－141

[14] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. Tellus，1969，21：289－307

[15] Anthes R A. Recent applications of the Penn State/NCAR mesoscale model to synoptic，mesoscale，and climate studies. Bull Amer Meteor Soc，1990，71(11)：1610－1629

[16] Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones，Part I：Steady-state maintenance. J Atmos Sci，1986，43：585－604

[17] Zhang D L，Gao K，Parsons D B. Numerical simulation of an intense squall line during 10－11 June 1985 PRE-STORM. Part I：Model verification. Mon Wea Rev，1989，117：960－994

[18] Rotunno R，Klemp J B，Weisman M L. A theory for strong，long-lived squall lines. J Atmos Sci，1988，45：463－485

[19] Keyser D，Uccellini L W. Regional models：Emerging research tools for synoptic meteorologists. Bull Amer Meteor Soc，1987，68：306－320

[20] Liu Y，Zhang D L，Yau M K. A multiscale numerical study of Hurricane Andraw (1992). Part I：Explicit simulation and verifications. Mon Wea Rev，1997，125：3073－3093

[21] Montgomery M T，Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. Quart J Roy Meteor Soc，1997，123：435－465

[22] Shapiro M A，Thorpe A J. THORPEX：a global atmospheric research programme for the beginning of the 21st century. WMO Bulletin，2004，54(3)：See http://www.wmo.int/thorpex/

[23] Ghil M，Ide K，Bennett A，et al. Data Assimilation in Meteorology and Oceanography：Theory and Practice. Meteorological Society of Japan，1997. 496pp

[24] Daley R. Atmospheric Data Analysis. Cambridge University Press，1991. 457pp

[25] 李崇银. 气候动力学引论. 北京：气象出版社，2000. 515pp
Li Chongyi. Climatic Dynamics. Beijing：China Meteorological Press. 2000. 515pp

[26] Peixoto J P，Oort A H. Physics of Climate. American Institute of Physics，1992. 466pp

[27] Rasmusson E M，Chelliah M，Ropeleinski C F. The Observed Climate of the 20th Century. Elseviev Science B V，1999. 1－138

[28] Johnsen S J，Dahl-Jensen D，et al. Greenland plateau temperature derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profile. Tellus，1995，47：624－629

[29] Petit J R，Jonzel J，et al. Climate and atmospheric history of the past 420，000 years from the Vostok ice core，Antarctic. Nature，1999，429－436

[30] Madden R A，Julian P R. Detection of a 40－50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci，1971，28：702－708

[31] Wallace J M，Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev，1981，109：784－811

[32] Wyrtki K. El Niño the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. J Phys Oceanogr，1975，572－584

[33] Philander S G. El Niño，La Nina，and The Southern Oscillation. San Diego：Academic Press，1990. 289pp

[34] Krueger A，Schoeber l M，Newman P，et al. The 1991 Antarctic ozone hole：TOMS observations. Geophys Res Lett，1992，19：1215－1218

[35] 王明星. 大气化学. 北京：气象出版社，1999. 467pp
Wang Mingxing. Atmospheric Chemistry. Beijing：China Meteorological Press，1999. 467pp

[36] IPCC Third Assessment Report. Climate Change 2001：The Scientific Basis. Cambridge University Press，2001. 881pp

[37] Webster P J，Holland G J，et al. Changes in tropical cyclone number，duration，and intensity in a warming environment. Science，2005. 309，1844－1846

[38] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature，2005. doi：10.1038/nature03906

[39] Trenberth K E. Climate System Modelling. Cambridge University Press，1992. 788pp

[40] Goddard L，Mason S J，Zebiak S E，et al. Current approaches to seasonal-to-interanual climate predictions. Inter J Cli-

mate, 2001, 21: 1111－1152

[41] AMS. Millennium Perspectives. Bull Amer Meteor Soc, 2000 (1－12)

[42] Serafin R J, Wilson J W. Operational weather radar in the United States: Progress and opportunity. Bull Amer Meteor Soc, 2000,81:501－518

[43] 张人禾,刘益民,殷永红等. 利用ARGO资料改进海洋资料同化和海洋模式中的物理过程. 气象学报, 2004, 62(5): 613～622
Zhang Renhe, Liu Yimin, Yin Ronghong, et al. Utilizing ARGO data to improve the ocean data assimilation and the relative physical processes in ZC ocean model. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2004, 62(5): 613－622

[44] 黄美元,徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社,2001. 291pp
Huang Meiyuan, Xu Huaying. Cloud and Precipitation Physics. Beijing: Science Press, 2001. 291pp

[45] NWS Tech. Infusion Plan. A Science and Technology Roadmap to Weather Services in 2025. 2001. 36pp

AN OVERVIEW OF CENTENARY ADVANCES AND PROSPECTS IN ATMOSPHERIC SCIENCES

Zhang Dalin

(*Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland* 20742, *U. S. A.*)

Abstract

The atmospheric science has been advanced from a subjective "art" to a mathematical and physical science during the past century, with an accelerated pace in the recent 50 years. Major advances in atmospheric measurements, numerical weather prediction and climate research were reviewed and prospects of the atmospheric sciences in the 21st century were speculated. Undoubtedly, the rapid progress in atmospheric sciences in both the past and the future is highly determined by the technical developments in atmospheric measurements and computing power as well as information technology. As a result, the model grid resolution has continued to increase with time; a growing amount of in situ and remote sensing (e. g., satellite) data, after retrieval and assimilation, has been incorporated into the model initial conditions and the global meteorological analysis; model physical processes and parameterizations have become more realistic, thereby leading to the persistent improvements in the global and regional meteorological predictions. Similarly, the statistic analysis of tremendous observed data and the conduct of many coupled climate-model simulations have considerably advanced our understanding of the dynamical mechanisms by which climate change and its impact occur, particularly for those associated with the global warming, the effects of human activity, and the development of the ENSO-related events.

Recently, it appears today that unified regional and global models tend to be developed; model-prediction periods for our daily weather and larger-scale flows will be extended; and more efforts will likely be devoted to ensemble forecasts with sufficient numbers of members to represent uncertainty in both initial conditions and models. Climate research will focus more on minimizing uncertainties in the parameterization of various physical and chemical processes, and in the model grid resolution, in order to reasonably predict the regional to global climate changes at the monthly to intra-seasonal and decadal time scales. It is speculated that in the near future measuring and forecasting various (meteorological or biological) variables in the earth-space system will be gradually digitized and automated; the location and timing of severe weather events may be predicted 3－5 days in advance; and some breakthroughs in weather modification could be made in the 21st century. Meanwhile, we may see the coordinated efforts from all the countries that are devoted to the establishment of a comprehensive earth-space-observing system, and the development of a unified, sophisticated earth-space-disaster mitigation modeling system. Then, the observed and modeled data will be used to monitor closely the natural variability of the earth-space system at all spatial scales to ensure the persistent advances in human society.

Key words: Atmospheric sciences, Atmospheric measurements, Numerical weather forecasts, Climate prediction, Supercomputing.