

# 浅谈技术革新对大气科学发展的推动 ——以数值天气预报为例

薛建军 吴灿 马杰 魏晓敏

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 随着电子计算机、卫星遥感观测、通信网络等技术的持续进步与革新, 数值天气预报从百年前的理论构想得以照进现实并不断发展。作为数值天气预报两大革命性进展, 资料同化和集合预报的发展既得益于数值天气预报相关交叉领域的技术进步, 同时又在技术和理念等方面推动了数值天气预报的百年发展。回望过去, 随着技术革新, 以统计和经验为主的天气图方法无法满足现代天气预报发展时, 数值天气预报应运而生; 着眼当下, 人工智能助力科学探索的新范式展现出巨大的技术优势, 在短时临近预报、气候预测和气象大模型领域迅速涌现出积极进展; 放眼未来, 我们应积极拥抱技术变革, 科学看待人工智能带来的利与弊, 不断强化政策分析与前沿战略研究, 加速和谋划大气科学的新发展趋势。

**关键词:** 数值天气预报, 资料同化, 集合预报, 技术革新, 人工智能

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.003

## An Insight on the Promotion of Technical Innovation to the Progress of Atmospheric Sciences: Taking Numerical Weather Prediction as an Example

Xue Jianjun, Wu Can, Ma Jie, Wei Xiaomin

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** With the remarkable progress of computer technology, satellite remote sensing and communication networks, numerical weather prediction (NWP) has been born from a theoretical conception 100 years ago to reality and developed continuously. As two revolutions in NWP, data assimilation and ensemble prediction have not only benefited from the technological improvements of NWP, but also promoted the century-long development of NWP both from the technical and from the conceptual point of views. Looking back to the past, with technological innovation, the statistical and empirical weather mapping method could not meet the requirements of modern weather forecasting, NWP came into being. Nowadays, the new paradigm of artificial intelligence (AI) for science is showing noteworthy advantages. It has led to unprecedented progress in nowcasting, short-range forecasting, climate projection, and large meteorological models. Looking into the future, we should actively embrace technological changes, objectively view the pros and cons of AI, and continuously strengthen policy analysis and frontier strategic research, to pursue the new development trend of atmospheric sciences.

**Keywords:** numerical weather prediction, data assimilation, ensemble forecasting, technological innovation, artificial intelligence

### 0 引言

纵观人类发展史, 科技创新始终是一个国家、一个民族发展的不竭动力和生产力提升的关键因素<sup>[1-2]</sup>。历史上科技领域的每次革命性突破, 都会引发生产

力、生产关系和国际格局的重大调整<sup>[3]</sup>。在学科前沿领域的发展中, 由于技术驱动而产生的带动效应是不可忽视的, 技术发展可以实质性地促进学科前沿的研究, 同时衍生出更多新的科学生长点<sup>[4]</sup>。

气象与人类生存发展息息相关, 人类在长期的生产生活实践中, 逐步认识天气现象, 探索自然规律, 形成了对气象科学的认识<sup>[5]</sup>。大气科学的学科独立、迅速发展与数学、物理、化学等学科的发展和科技进步密不可分<sup>[6-8]</sup>。自18世纪中叶以来, 在几次科技革命的推动下, 气象观测仪器更加完善, 地面观测站网相

收稿日期: 2024年6月13日; 修回日期: 2024年9月10日

第一作者: 薛建军(1986—), Email: xuejianjun@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象事业发展咨询委员会研究项目“提升我国气象科技核心能力的国际比较研究”(2023—2024年); 国家自然科学基金项目(42342025); 中国气象局青年创新团队(CMA2023QN10)

继建立；无线电技术的发明促使绘制地面天气图成为可能；高空探测技术等诸多领域的技术革新，加速了大气科学从定性描述到定量分析再到预报预测能力的日臻成熟完善。特别是进入20世纪以来，从Abbe<sup>[9]</sup>和Bjerknes<sup>[10]</sup>提出用物理定律预报天气到现代数值天气预报体系的建立和完善，数值天气预报在“初值”问题、模式改进（如模式动力框架、参数化方案、数值计算效率等）、“非线性”问题处理等多个方面快速发展。数值天气预报的巨大进步，既与该领域相关技术的快速发展密不可分（如资料同化、集合预报等），同时也得益于电子计算机、卫星遥感观测、通信网络等技术的持续进步与革新<sup>[11-14]</sup>。

作为数值天气预报两大革命性进展，资料同化和集合预报的发展既得益于数值天气预报相关交叉领域的技术进步，同时又在技术和理念等方面推动了数值天气预报的快速发展<sup>[13,15-19]</sup>。回望过去，随着技术革新，以统计和经验为主的天气图方法无法满足现代天气预报发展时，数值天气预报应运而生<sup>[13,20]</sup>。着眼当下，人工智能助力科学探索的新范式（AI for Science）显现出巨大的技术优势<sup>[21-22]</sup>。以“数据驱动”为核心的人工智能技术已在大气、海洋及其耦合系统的预报预测中涌现出积极进展<sup>[23-27]</sup>。放眼未来，我们应积极拥抱技术变革，客观看待人工智能带来的利与弊，不断强化政策分析与前沿战略研究，进而更好地把握、

加速和谋划大气科学的新发展。

## 1 技术进步促使数值天气预报梦想照进现实

数值天气预报是以大气动力学原理为基础，使用流体力学和热力学的方程组表征大气演变过程并建立偏微分方程数学模型，在一定的初值和边值条件下，用大型计算机对这些偏微分方程进行数值求解，从而预测未来一定时段大气运动状态和天气现象的方法<sup>[20,28-29]</sup>。不难看出，实现数值天气预报至少要“较好地”解决以下三个方面的问题：首先，是否有运算能力足够的大型电子计算机，没有计算能力的技术革新，数值天气预报也只能停留在纸上谈兵；其次，大气边值、初值条件的输入是否准确；再次，能否“准确地”求解出描述大气原理的流体力学和热力学偏微分方程组。

尽管在20世纪初科学界开始提出利用描述大气运动的原始方程组做定量天气预报的构思，但因为方程组非常复杂，数学基础理论研究在求解偏微分方程方面没有明显突破，所以无法人工直接求解<sup>[9-10,28]</sup>，最后尝试宣告失败。直到20世纪50年代初，数值天气预报借助电子计算机的问世才获得成功<sup>[29]</sup>（图1），并在随后70余年持续进步<sup>[11-13]</sup>。20世纪70年代中期，地球静止卫星提供高频率、实时云图监测的出现，预示着卫星遥感观测技术的巨大进步，大量的卫星遥感资料的应用极大加速了对同化理论与方法的研究，数值天气

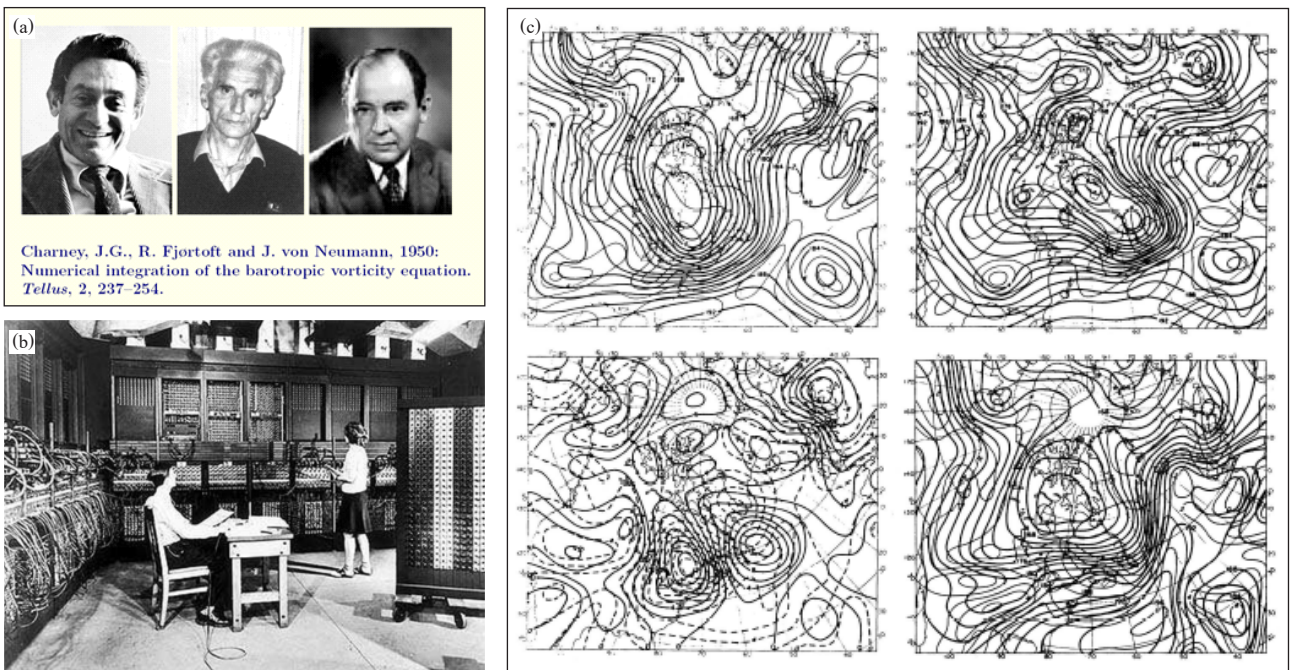


图1 Charney等 (a) 借助全球首台电子计算机<sup>[13]</sup> (b) 制作的数值天气预报产品<sup>[29]</sup> (c)

Fig. 1 Charney et al. (a) using the world's first electronic computer<sup>[13]</sup> (b) developed the numerical weather prediction products<sup>[29]</sup> (c)

预报的初值问题得以显著改善<sup>[13, 17, 19]</sup>。然而, 由于数学上偏微分方程还不能精确求解, 数值模式离散化求解还存在计算误差, 模式的次网格参数化方案也仅能近似描述实际大气动力和物理过程, 模式误差难以消除; 其次, 大气初始状态也难以准确获得; 加之, 大气及其耦合系统的“混沌”特征<sup>[30-31]</sup>。因此, 自数值天气预报诞生以来, 不确定性一直是困扰预报准确率的难题。

如何刻画数值天气预报的不确定性? 集合预报带来了新的变化。20世纪70—80年代, Epstein<sup>[32]</sup>和Leith<sup>[33]</sup>先后提出了动力随机预报理论框架和实用的集合预报法。20世纪90年代, 随着大规模并行计算技术的发展, 美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)率先运行集合预报系统<sup>[15, 34]</sup>, 随后, 英国、法国、加拿大、日本、中国等也建立了各自的集合预报系统<sup>[34-38]</sup>。

可以说, 伴随着电子计算机、卫星遥感观测、通信网络等技术的持续进步与革新, 资料同化、集合预报等技术方法的日臻完善, 数值预报从百年前的理论构想得以照进现实并不断发展, 数值天气预报的精度不断提高, 可用预报天数由3~5 d逐渐提升至7 d甚至10 d<sup>[39]</sup>。

## 2 先进的资料同化技术是数值天气预报突破的关键因素之一

初值问题是数值天气预报的核心问题之一。资料同化是有效的初值形成方法, 它能够“使用所有可用的信息, 尽可能准确地估计大气运动的状态”<sup>[15, 40-41]</sup>。早期资料同化的发展源于气象预报对客观分析的迫切需求。Richardson<sup>[28]</sup>在1922年就尝试把观测资料手动插值到网格点上作为数值预报的初始场。Panofsky<sup>[42]</sup>于1949年提出了区域多项式拟合的思想, 被认为是资料同化的开山之作。20世纪50年代, Charney、顾震潮等采用主观分析方法确定初值, 这是将同化的思想用于数值天气预报的有益探索<sup>[40, 43]</sup>。1955年, Bergthórsson等<sup>[44]</sup>提出了逐步订正法。Cressman<sup>[45]</sup>在此基础上引入迭代求解步骤, 从而提出了具有实际可操作性的逐步订正法, 为此后资料同化方法的发展确定了基本思路。20世纪60年代, Gandin<sup>[46]</sup>提出了最优插值法, 并在80—90年代得到广泛应用。最优插值法首次将统计估计理论引入资料同化领域, 成为资料同化方法发展过程中的里程碑。

随着观测技术的不断进步, 观测资料数目和类型不断增多, 尤其是卫星遥感等非常规观测手段的迅猛发展, 为资料同化提供了更多可能。在最优插值

法迅猛发展的同时, 一种基于变分目标函数的同化方法——变分同化方法逐渐成为资料同化研究的热点。作为三维变分在时间维度上的扩展, Le Dimet等<sup>[47]</sup>提出了四维变分同化方法(4DVar), 用于估计动态系统的状态和参数。基于最优控制理论的资料同化技术, 将观测数据与数值模型进行融合, 以提高数值模型的预测能力。1994年, Courtier等<sup>[48]</sup>进一步提出了四维变分的增量式算法, 使得四维变分同化方法的计算代价得到有效降低, 开始广泛应用于实际工作中。可以说, 变分同化技术方法的发展和卫星观测等非常规观测资料的大量使用, 是20世纪90年代数值天气预报质量不断提升的重要原因。

值得指出的是, 20世纪90年代以后, 与变分同化方法同时兴起的, 还有另一类同化方法——即包括集合卡尔曼滤波方法(EnKF)和粒子滤波方法等在内的顺序同化方法。基于Epstein<sup>[32]</sup>提出的随机动态预报理论, 1994年, Evensen<sup>[49]</sup>提出了集合卡尔曼滤波方法, 它是一种基于卡尔曼滤波的资料同化方法, 用于估计动态系统的状态。此外, 针对不同应用卡尔曼滤波还存在很多的变种方法, 例如集合调整卡尔曼滤波、集合平方根卡尔曼滤波、集合变换卡尔曼滤波等相继被提出。2000年, Hamill等<sup>[50]</sup>提出了EnKF-3DVar混合算法, 这是将变分同化方法与集合卡尔曼滤波方法相结合的新思路。它在变分同化系统的框架内, 用集合预报来构建流依赖的背景误差协方差, 从而有效融合了两类方法的优点, 成为当前资料同化领域发展的新趋势。近年来, 集合-变分混合算法进一步扩展到时间维度, 形成了集合与四维变分相结合的混合算法<sup>[51]</sup>。此外, 为了更加充分地利用观测数据、平衡分辨率提升后资料同化计算精度和效率等问题, 一种融合了机器学习方法的混合资料同化已悄然发展起来, 并显现出一定的应用潜力<sup>[52]</sup>。

不难看出, 随着综合观测技术的进步, 海量数据传输、处理分析、计算存储能力的提升, 新技术新方法的引入, 资料同化核心算法不断迭代革新, 资料同化理论及技术持续向前发展。当前, 先进的资料同化技术已被认为是数值天气预报不断取得突破的关键因素之一<sup>[19]</sup>。

## 3 集合预报技术让数值天气预报的不确定性趋向可能的“确定”

基于依赖数学物理方法的数值天气预报模式预测大气状态存在其固有的不确定性。既然不确定性“与生俱来”, 那么能否转换思路, 从不确定中趋近某些可能的“确定”? 集合方法提出的背后, 是考虑

到“单一”的初值（或模式）的不确定性不可避免，那么通过“一组”合理考虑了不同初值（或模式）不确定性影响后的“一群”预报结果，其大概率是要好于单个结果<sup>[17, 53-54]</sup>。集合预报技术路线主要有三类<sup>[17, 35-37, 53-54]</sup>：一是假定模式完美，主要解决初值带来的不确定性影响。通过“初值扰动”，生成一组考虑了不确定性的初值本来驱动模式，得到集合预报结果。二是假定初值精确，致力于解决模式引起的不确定性影响。随着观测和同化等技术快速发展，一些研究认为模式系统误差也是影响天气集合预报效果的主要原因，集合预报从仅考虑初值扩展到了考虑模式不确定性的影响。三是假定模式和初值都不够好，设法同时解决两者带来的不确定性影响。

具体来看，早在20世纪60年代就已经零星出现对集合预报相关问题的科学研究，但在科学内涵上与目前的集合预报概念有所差异。1963年，Lorenz<sup>[55]</sup>关于“确定性的非周期流”（Deterministic Nonperiodic Flow）的论文改变了人们对天气预报确定性的认识，并催动了集合预报的萌芽<sup>[14, 56]</sup>。1965年，Lorenz<sup>[57]</sup>发表了“28变量大气模式的可预报性研究”（A Study of the Predictability of a 28-Variable Atmospheric Model）一文，这很可能是SCI数据库记录的研究集合预报的最早文献。该论文通过三种不同波长的扰动之间的非线性相互作用讨论了微小初始误差增长等问题。1969年，Epstein<sup>[32]</sup>建立显式积分Liouville方程估计大气状态的概率密度分布。1974年，Leith<sup>[33]</sup>提出了蒙特卡洛方法。蒙特卡洛方法实现了集合预报从理论研究转向实际。20世纪90年代前后，集合预报相关文献开始集中涌现，对集合预报的研究更加深入<sup>[58-59]</sup>。比如，1988年，英国气象局的Murphy<sup>[58]</sup>在理想的“完美模型”条件下，开展了一组8个独立的50 d冬季集合预报试验，证实集合平均比单个预报的技巧有“显著的提升”。1992年12月7日，NCEP率先开展集合预报业务，同年12月19日ECMWF的集合预报系统开始准业务运行，并于18个月后（1994年5月）正式投入业务使用<sup>[17, 34]</sup>。这一时期，关于集合预报的技术方法也被大量提出并在实践中进行了检验<sup>[17]</sup>。

值得注意的是，文献计量显示，尽管早在20世纪60年代已有集合预报研究的文献，但1990年以前的研究文献非常少。20世纪90年代以来，集合预报研究文献呈现增长趋势，但年均文献数量较低。其中，1990—1996年，文献量平均在每年8篇左右，1997年相关文献超过20篇，之后数量快速增长。这很可能是由于20世纪90年代后，大规模并行计算技术迅速发展，以NCEP和ECMWF为首的全球各大气象中心陆续

运行集合预报系统，并广泛应用于预报业务，相关研究也更加深入，学者们开始探索模式物理过程扰动、多模式多分析初值的超级集合和热带地区集合预报等问题。近年来，利用人工智能方法改进集合预报的新思路新方法也受到关注。比如，可以利用机器学习等方法为集合预报生成更好的扰动初始条件；借助机器学习模型快速的预测能力可以构建更多的高分辨率集合成员<sup>[27, 60]</sup>。

总体来看，过去30余年来集合预报技巧显著增加（图2）。这一进展既归功于在数值模式、资料同化等方面不断取得的新进展，同时也不应忽视高性能计算等技术革新的基础性支撑作用。巨大的算力、电力保障是集合预报赖以生存和发展的基础，在模式分辨率和集合成员规模之间找到平衡是制约集合预报发展的主要问题之一<sup>[11]</sup>（图2）。当然，集合预报带给数值天气预报的发展不仅仅是技术上的革新，更是带来一种观念上的转变，某种程度上“为数值预报开创了一个新的纪元”<sup>[61-62]</sup>。

## 4 总结与讨论

### 4.1 积极拥抱技术变革，把握大气科学发展新机遇

当传统的以统计和经验为主的天气图方法越来越无法满足现代天气预报发展和要求时，基于数学物理学方法客观定量计算未来天气演变的科学——数值天气预报应运而生<sup>[13, 21]</sup>。数值天气预报的成果使天气预报由主观经验预报转变为客观定量预报，是“20世纪最伟大的科技发展之一”，可以说是在气象科学的发展和先进技术的革新中催动了其萌发、发展和壮大。经过百余年的发展，由于其科学理论尚未有新的突破，模式并不“完美”，初值难以“精确”，大气、海洋的“混沌”特性不可回避<sup>[17]</sup>，技术层面似乎已接近“可预报性”的天花板。受限于对复杂系统建模的理解，高维度预测的变量，以及大气、海洋等系统中的“混沌”特性等诸多因素的制约<sup>[63]</sup>，世界气象强国更加重视新兴技术在数值预报研究和业务实践中的布局<sup>[64-68]</sup>。数据收集和分析是科学理解和发现的基础。近年来，随着机器学习等人工智能技术的发展，利用“数据驱动”的方法求解具有组合结构的复杂高维问题，人工智能助力科学探索的新范式在多个领域展现出巨大的技术优势<sup>[21-22]</sup>。由于大气科学显著的非线性特征和该领域突出的成体系、大体量的数据资源，使得以“数据驱动”为核心的人工智能技术应用于大气、海洋及其耦合系统的预报预测具备天然优势<sup>[23-27]</sup>。我们应积极拥抱技术变革，牢牢把握住大气科学发展的新机遇。

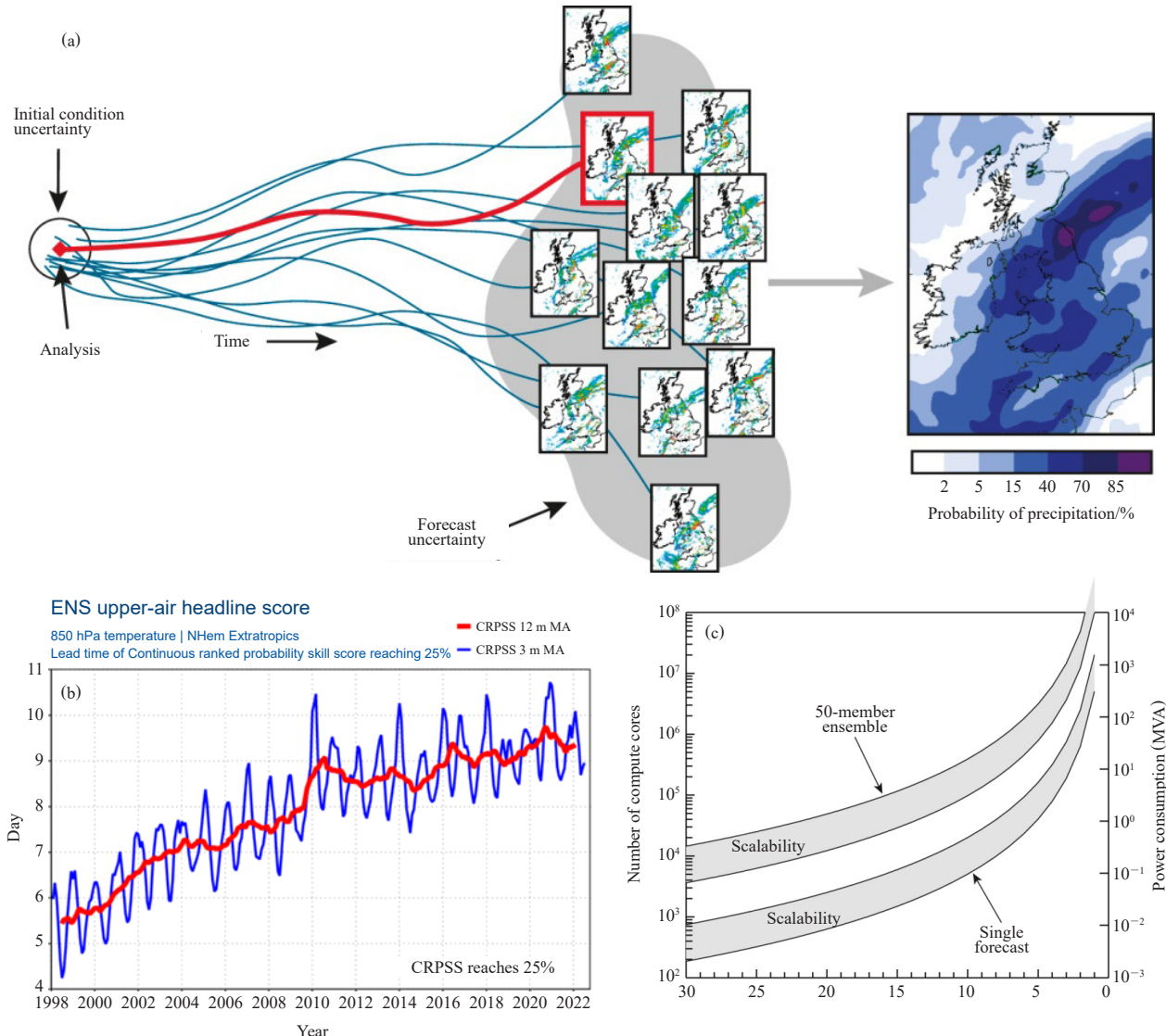


图2 英国地区36 h降水概率的集合预报示意图<sup>[11]</sup> (a), ECMWF集合预报系统30多年来的业务评分<sup>[16]</sup>(b), 模式分辨率和集合成员的增加对算力和电力消耗带来的挑战<sup>[11]</sup> (c)

Fig. 2 Schematic diagram of 36-h ensemble forecasts used to estimate the probability of precipitation over the UK<sup>[11]</sup> (a), the skill of ECMWF ensemble forecasts increased significantly over 30 years of operational use<sup>[16]</sup> (b), and the challenges posed by the increase in model resolution and ensemble membership in terms of computational power and power consumption<sup>[11]</sup> (c)

#### 4.2 科学看待人工智能利与弊，加速大气科学发展新引擎

回顾集合预报发展史，尽管在集合预报出现伊始，人们对其的未来前景曾经一度是完全不清楚的，但这仍然带来了天气预报的范式转变<sup>[16]</sup>：即第一次向预报员和用户提供了对未来可能的情景范围的可靠和准确的估计。同样，人工智能自20世纪50年代诞生以来，由于受限于自身技术方法的局限、计算能力和数据的不足、过分夸大导致预期落空等诸多因素，其发展历程也是高潮与低谷交替<sup>[69-70]</sup>。2010年以来，随着大数据、机器学习、深度学习等的兴起，人工智能又

进入了新的爆发期，特别是以大数据驱动的深度神经网络崛起产生了革命性的突破。

人工智能的本质可以被认为是处理匹配、决策和生成等任务，是模拟人类思维的信息过程。其通过学习和训练数据进行知识推理，从而模仿人类思考、认知、决策和行动。这是一种基于算法和数据的科学技术<sup>[66]</sup>，因此，要科学看待人工智能的优势与不足，既要充分利用人工智能方法在挖掘大数据非线性关系和空间建模能力上的优势，使其在传统技术方法能力较弱的领域发挥更大更好的作用，又要客观认识到当前人工智能在数据依赖性、透明度和可解释性、道德伦

理问题等方面存在的缺陷与风险<sup>[69-72]</sup>。要避免片面地看待问题，既防止过分夸大人工智能的能力和水平，也不应忽视其技术革新可能带来的大气科学研究范式变革。鉴于“数据驱动”在大气科学领域新赛道的竞争日渐激烈，应加速提升人工智能气象应用的科技创新能力，持续强化适用于特定气象应用的人工智能专有算法、预报预测大模型、基础框架、数据集等的研发，不断推进算法、模型的可解释性以及样本不平衡等问题的研究，加速大气科学发展新引擎。

### 4.3 强化政策分析与战略研究，谋划大气科学发展新布局

无论是数值天气预报技术还是人工智能技术，都汇聚了大量科学和工程技术的成果，其发展到今天已不再单纯是一个科学和技术问题。参考欧、美等先进气象机构的发展历程，成功无疑既与该领域科学技术突破“硬”实力直接相关，也与保障其良性发展的“软”实力密不可分，这是两者资源合理配置的结果。当前我们正在投入比以往更多的人力、物力和财力发展我国自主可控的地球系统数值模式<sup>[73-74]</sup>，也在以前所未有的力度加速推进人工智能气象融合应用<sup>[64, 70]</sup>，这些都是复杂的系统工程，有些内容甚至远远超出单一机构、行业乃至国家的能力。但相较于“硬”科技的研究，我们对数值预报、人工智能等领域发展背后的机制体制、发展脉络及其前沿动态、对学科发展影响等内容的分析研究还不够系统和深入。因此，还需有计划有布局地开展政策分析和发展战略研究，找准发展方向和优先领域，谋划大气科学发展新布局。

致谢：感谢许小峰研究员、杨萍研究员对本研究的悉心指导。

#### 参考文献

- [1] 戴小河, 胡喆, 吴慧璐. 新华社评: 坚持科技创新引领发展——加快形成新质生产力系列述评之一[EB/OL]. (2023-09-18) [2024-06-10]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202309/content\\_6904805.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202309/content_6904805.htm).
- [2] 求是网. 加快实施创新驱动发展战略[EB/OL]. (2022-12-20) [2024-06-10]. [http://www.qstheory.cn/international/2022-12/20/c\\_1129220876.htm](http://www.qstheory.cn/international/2022-12/20/c_1129220876.htm).
- [3] 曲永义. 把握科技革命和产业变革机遇的战略选择[N/OL]. 经济日报, (2023-10-24) [2024-06-10]. [http://paper.ce.cn/pd/content/202310/24/content\\_283023.html](http://paper.ce.cn/pd/content/202310/24/content_283023.html).
- [4] 中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)项目组. 中国学科及前沿领域2035发展战略总论[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [5] 温克刚. 中国气象史[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [6] 约翰·M. 华莱士, 彼得·V. 霍布斯. 大气科学[M]. 何金海, 王振会, 银燕, 等译. 2版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 杨萍, 叶梦姝, 陈正洪. 气象科技的古往今来[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [8] 张静. 气象科技史[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] Abbe C. The physical basis of long-range weather forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 1901, 29(12): 551-561.
- [10] Bjerknes V. The problem of weather prediction, considered from

- the viewpoints of mechanics and physics[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(6): 663-667.
- [11] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [12] Alley R B, Emanuel K A, Zhang F Q. Advances in weather prediction[J]. *Science*, 2019, 363(6425): 342-344.
- [13] Benjamin S G, Brown J M, Brunet G, et al. 100 years of progress in forecasting and NWP applications[J]. *Meteorological Monographs*, 2019, 59(1): 13.1-13.67.
- [14] Randall D A, Bitz C M, Danabasoglu G, et al. 100 years of earth system model development[J]. *Meteorological Monographs*, 2019, 59(1): 12.1-12.66.
- [15] Buizza R, Richardson D. 25 Years of ensemble forecasting at ECMWF[EB/OL]. (2017-10) [2024-06-10]. <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/153/meteorology/25-years-ensemble-forecasting-ecmwf>.
- [16] ECMWF. 30 Years of ensemble forecasting at ECMWF[EB/OL]. (2022-11-24) [2024-06-10]. <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2022/30-years-ensemble-forecasting-ecmwf>.
- [17] 薛建军, 贾朋群, 肖子牛. 集合、同化思想在大气科学中的渗透[J]. *气象科技进展*, 2022, 12(6): 64-72.
- [18] 陈超辉, 王勇, 杜钧, 等. 欧洲业务集合预报系统进展[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(2): 19-29.
- [19] 龚建东. 同化技术: 数值天气预报突破的关键——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(3): 6-13.
- [20] 曾庆存. 天气预报——由经验到物理数学理论和超级计算[J]. *物理*, 2013, 42(5): 300-314.
- [21] 李国杰. 智能化科研(AI4R): 第五科研范式[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(1): 1-9.
- [22] 杨小康, 许岩岩, 陈露, 等. AI for Science: 智能化科学设施变革基础研究[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(1): 59-69.
- [23] Pathak J, Subramanian S, Harrington P, et al. FourCastNet: a global data-driven high-resolution weather model using adaptive fourier neural operators[Z]. arXiv: 2202.11214v1, 2022.
- [24] Chen L, Zhong X H, Zhang F, et al. FuXi: a cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2023, 6(1): 190.
- [25] Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks[J]. *Nature*, 2023, 619(7970): 533-538.
- [26] Schneider T, Behera S, Boccaletti G, et al. Harnessing AI and computing to advance climate modelling and prediction[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(9): 887-889.
- [27] Bouallègue Z B, Clare M C A, Magnusson L, et al. The rise of data-driven weather forecasting: a first statistical assessment of machine learning-based weather forecasts in an operational-like context[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2024, 105(6): E864-E883.
- [28] Richardson L F. *Weather Prediction by Numerical Process*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.
- [29] Charney J G, Fjörtoft R, von Neumann J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1950, 2(4): 237-254.
- [30] Lorenz E N. Energy and numerical weather prediction[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1960, 12(4): 364-373.
- [31] Lorenz E N. The predictability of hydrodynamic flow[J]. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 1963, 25(4 Series II): 409-432.
- [32] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction[J]. *Tellus*, 1969, 21(6): 739-759.
- [33] Leith C E. Theoretical skill of monte carlo forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6): 409-418.
- [34] 刘东贤, 张庆阳. 集合预报及其发展趋势[J]. *中国科技信息*, 2007(20): 268.
- [35] 段明镗, 王鑫兴. 集合预报方法研究及应用进展综述[J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27(2): 279-288.
- [36] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 497-507.

- [37] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [38] 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 451-476.
- [39] WGENE overview of plans at NWP centres with global forecasting systems-2021[EB/OL]. [2024-06-10]. <https://wgne.net/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/>.
- [40] 朱国富. 数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述[J]. 气象, 2015, 41(8): 986-996.
- [41] 朱国富. 理解大气资料同化的内在逻辑和若干共性特征[J]. 气象, 2015, 41(8): 997-1006.
- [42] Panofsky R A. Objective weather-map analysis[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1949, 6(6): 386-392.
- [43] 官元红, 周广庆, 陆维松, 等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 1-8.
- [44] Berghórsson P, Döös B R. Numerical weather map analysis[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 1955, 7(3): 329-340.
- [45] Cressman G P. An operational objective analysis system[J]. Monthly Weather Review, 1959, 87(10): 367-374.
- [46] Gandin L S. Objective Analysis of Meteorological Fields[M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965: 242.
- [47] Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 1986, 38(2): 97-110.
- [48] Courtier P, Thépaut J N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(519): 1367-1387.
- [49] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [50] Hamill T M, Snyder C. A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(8): 2905-2919.
- [51] Tian X J, Zhang H Q, Feng X B, et al. Nonlinear least squares En4DVar to 4DVar methods for data assimilation: formulation, analysis, and preliminary evaluation[J]. Monthly Weather Review, 2018, 146(1): 77-93.
- [52] Bonavita M, Schneider R, Arcucci R, et al. 2022 ECMWF-ESA workshop report: current status, progress and opportunities in machine learning for Earth System observation and prediction[J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2023, 6(1): 87.
- [53] 王太微, 陈德辉. 数值预报发展的新方向——集合数值预报[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(1): 6-12, 24.
- [54] 段晚锁, 汪叶, 霍振华, 等. 数值天气预报和气候预测的集合预报方法: 思考与展望[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(3): 396-406.
- [55] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(2): 130-141.
- [56] Lewis J M. Roots of ensemble forecasting[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(7): 1865-1885.
- [57] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 1965, 17(3): 321-333.
- [58] Murphy J M. The impact of ensemble forecasts on predictability[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114(480): 463-493.
- [59] Déqué M. The probabilistic formulation: a way to deal with ensemble forecasts[J]. Annales Geophysicae: Atmospheres, Hydrospheres and Space Sciences, 1988, 6(3): 217-223.
- [60] de Burgh-Day C O, Leeuwenburg T. Machine learning for numerical weather and climate modelling: a review[J]. Geoscientific Model Development, 2023, 16(22): 6433-6477.
- [61] 刘金达. 集合预报开创了业务数值天气预报的新纪元[J]. 气象, 2000, 26(6): 21-25.
- [62] 许小峰. “精准”预报的追求与误区[J]. 气象科技进展, 2022, 12(4): 2-6.
- [63] Ghadami A, Epureanu B I. 2022 Data-driven prediction in dynamical systems: recent developments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2022, 380(2229): 20210213.
- [64] NOAA. NOAA Artificial Intelligence Strategic Plan 2021-2025[R]. NOAA, 2021.
- [65] Düben P, Modigliani U, Pappenberger F, et al. Machine learning at ECMWF: a roadmap for the next 10 years[R]. ECMWF, 2021.
- [66] JMA. JMA's NWP strategic plan toward 2030[R]. Japan Meteorological Agency, 2018.
- [67] WMO. Future of weather and climate forecasting[R]. WMO, 2021.
- [68] 中国气象局. 《人工智能气象应用工作方案(2023—2030年)》印发 气象如何应用人工智能, 指挥棒来了[EB/OL]. (2023-07-28)[2024-06-10]. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202307/t20230728\\_5677975.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202307/t20230728_5677975.html).
- [69] 斯图尔特·罗素, 彼得·诺维格. 人工智能: 现代方法[M]. 张博雅, 陈坤, 田超, 等译. 4版. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- [70] 尼克. 人工智能简史[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
- [71] 张志华. 智库观点 | 张志华: 现代人工智能的本质、技术和途径[EB/OL]. (2023-04-11)[2024-06-10]. <http://bda.pku.edu.cn/info/1024/2162.htm>.
- [72] 孙凝晖. 人工智能与智能计算的发展[EB/OL]. (2024-04-30)[2024-06-10]. [http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202404/t20240430\\_436915.html](http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202404/t20240430_436915.html).
- [73] 中国气象局. 中国气象局印发“十四五”数值预报发展规划[EB/OL]. (2021-10-12)[2024-06-10]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content\\_5641984.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content_5641984.htm).
- [74] 国务院. 气象高质量发展纲要(2022—2035年)[EB/OL]. (2022-05-19)[2024-06-10]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/19/content\\_5691116.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/19/content_5691116.htm).

(编辑: 郑秋红)