

# ECMWF成立50周年： 气象预报旗舰机构半个世纪发展的解读

■ 于丹 李洋 李婧华 贾朋群

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 作为专注于数值天气预报 (NWP) 的区域政府间组织, 自1975年成立以来, 凭借半个世纪的技术创新与机制优化, 实现了从后起之秀到全球NWP领先机构的弯道超车。文中基于文献资料及ECMWF成立50周年学术成果, 从技术、合作、管理3个维度分析其发展路径与特征。技术上, ECMWF通过数据同化技术持续突破、高频升级综合预报系统、迭代高性能计算设施、推动卫星数据融合、积极拥抱人工智能 (AI) 技术、推广集合预报及构建再分析数据体系等, 实现预报能力全球领先。合作上, 依托稳定决策机制、深化跨国跨组织合作、参与重大国际项目、推动数据开放共享, 提升全球影响力。管理上, 以“气象工匠精神”注重技术留痕与细节优化, 保障持续创新力。

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2026.02.002

20世纪20年代初, 随着天气预报问题被视为物理初值问题, 现代气象科学肇始。与此同时, 英国人理查孙率先开展数值天气预报 (NWP) 尝试, 但其手工NWP计算试验未能成功。1950年, 查尼等借助世界上第一台电子计算机, 在美国首次成功实现NWP, 现代气象科学发展的新格局开始逐步清晰: 通过计算控制大气运动的物理方程组来了解和预测天气。其中, 气象站网的出现, 催生了西方国家于19世纪中叶开始建立国家气象部门 (例如, 荷兰、法国和英国气象部门或其前身都在19世纪50年代成立); 而第一台电子计算机成功应用于NWP也给出启示: 气象机构本质上是一家“计算”机构。正是因为这两个因素, 在NWP成功发展25年和西方主要国家气象部门建立120多年后, 1975年欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 在NWP发源地英国成立。ECMWF作为专注于NWP的欧洲区域政府间组织, 虽然起步较晚, 却在过去半个世纪中成功实现弯道超车、后来居上, 成为全球公认的NWP领先机构。其发展历程不仅演绎了科技创新赋能气象事业突破的精彩实践, 诠释了现代气象科学不竭的应用前景, 也在不断改写着天气预报这个最难落地的科学目标的“世界纪录”。

文中基于文献资料, 特别是通过ECMWF庆祝其

成立50周年举办的相关学术交流活动, 试图从整体和细节两个方面, 捕捉和解读ECMWF在50年发展中的一些鲜明特征。

## 1 半个世纪的不凡成就：从起步晚到全球领先

ECMWF自1975年成立后, 1979年进行了首个试验性的业务天气预报, 并在随后的数十年里, 依靠强大的研究支撑不断更新其业务服务系统 (表1)。其中, 1993年推出再分析数据 (ERA-15)、1997年引入四维变分数据同化 (4DVar) 以及2025年发布首个业务机器学习模型AIFS Single等, 都具有里程碑意义, 极大地促进了气象科学和应用的发展, 也带来NWP能力的持续提升 (图1)。例如, 2020年7 d预报的准确度, 与2000年5 d预报相当, 最近20年依然保持了大约每10年NWP预报时效延长1 d的节奏。

分析ECMWF在过去50年实现的各种成就, 背后的一些理念和追求, 无疑是其“集大成”的持续支撑。

### 1.1 数据同化, 先学习再创新

ECMWF成立之初, 就深切意识到数据同化作为可靠模式初始化基础的重要性。虽然其最初开发的模式与同期其他模式类似, 采用最优插值 (OI) 方

收稿日期: 2025年10月31日; 修回日期: 2026年1月20日

第一作者: 于丹 (1992—), Email: 602351108@qq.com

资助信息: 中国气象局气象发展与规划院基础研究项目 (J CXM2025001); 国家自然科学基金项目 (42542016)

表1 ECMWF 50年发展的部分重要节点

年份	事件	主要内容	说明和影响
1979	推出试验性业务预报	N48模式，全球格点大气模式，水平分辨率1.875°；垂直15层	与美国地球物理流体动力学实验室（GFDL）合作，1980年业务化
1985	建立气象数据管理系统（MARS）	涵盖所有业务分析与预报数据，最初日数据量为270 MB	采用标准化归档流程确保数据的长期兼容
1987	启动综合预报系统（IFS）研发	采用Fortran语言，为变分分析系统做准备	与法国气象局合作，1994年业务化，模式版本周期重新编号（11r7）
1992	推出集合预报系统	33个成员，分辨率210 km	1994年开始每天运行
1993	推出再分析资料ERA-15	数据覆盖1979—1993年	1996年完成
1997	4DVar系统投入应用	数据同化时间窗口为6 h	全球首个业务4DVar
1997	发布试验性季节预报	基于IFS 15r8，海-气模式	成功预报1997—1998年厄尔尼诺事件
2004	月预报（32 d）业务化	采用海-气耦合的独立预报系统，分辨率T159	全球最早开展业务化月预报的业务中心之一
2010	集合数据同化（EDA）投入应用	为集合预报系统提供初始扰动	作为IFS 36r2的重大升级显著提升集合预报效果
2013	启动可扩展性计划	为期10年，汇集世界各地专家协调开发	确保NWP充分利用未来高性能计算的潜力
2014	运营哥白尼大气监测局和哥白尼气候变化局（C3S）	提供全球范围特别是欧洲每日空气成分预报和全面气候信息	欧盟旗舰项目，投资2.91亿欧元
2016	发布2016—2025年战略	未来10年内高影响天气概率预报提前3~6 d	设定了突破天气预报可预报性极限的宏伟目标
2017	成为世界气象组织（WMO）世界气象中心	提供全球确定性预报、集合预报、长期预报	机构的全球预报能力被明确认可
2021	承担目的地地球（DestinE）项目	研发数字孪生引擎、极端天气和气候数字孪生	推动极端天气和气候变化预测
2023	推出9 km集合预报系统	基于IFS 48r1	分辨率与高分辨率预报系统HRES相同
2025	AI模型业务化（AIFS Single v1.0和AIFS ENS v1.0）	N320网格，水平分辨率0.25°，垂直13层	与IFS并行运行，首个业务化天气预报AI模型
2025	向所有人开放实时数据目录	在CC-BY-4.0下免费开放，分辨率25 km	致力于开放世界上最大的气象数据集之一

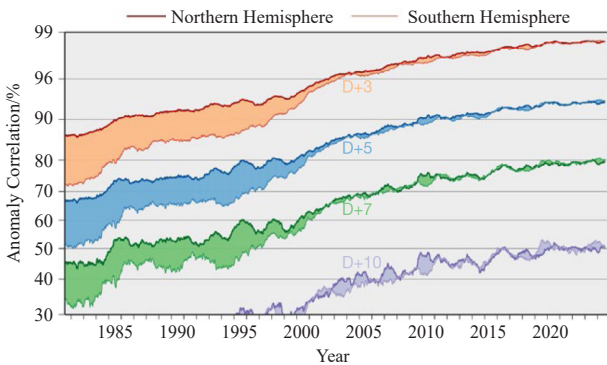


图1 1981—2025年ECMWF北半球和南半球500 hPa位势高度3、5、7和10 d预报距平相关系数变化（来源：ECMWF，2025b）

法，将分布不均的台站观测值输入模式。20世纪80年代开始，卫星观测数据日益丰富，然而当卫星数据被同化后，预报效果反而变差。主要原因是卫星辐射值与地球物理变量（如温度）之间的转换出现误差，而这一情况促使美国和欧洲发展更先进的变分同化技术，从而让卫星数据对预报产生正面影响。1995年，美国同行最先在业务中采用三维变分同化（3DVar），ECMWF随后于1996年也引入了该技术。尽管当时多数NWP中心发现3DVar将卫星观测数据同化为低垂直分辨率的反演大气廓线对预报技巧提升多呈中性，但ECMWF着眼于未来卫星数据的重要性，依然坚定选择了3DVar，并且确定了快速向4DVar过渡的方向——此举既能更好地考量观测结果的时间演变特

性，同时也可以改进分析更新后大气状态的动力一致性。1997年，ECMWF在全球率先采用4DVar，其预报系统利用的卫星数据在随后数十年里通过进一步完善4DVar，使得模式能力得到大幅度提升（图2），成为其预报系统持续领先的重要转折点。

## 1.2 业务系统升级，气象工匠的呼吸节奏

自1994年IFS投入使用以来，IFS从一个运行在单个百万次/秒浮点运算芯片上的仅大气模式，演变成一个在百亿亿次/秒浮点超级计算机上实现千米级分辨率运行的地球系统模式，对大气某一时刻所有网格点的模拟参数数量从不足100万增长至4520亿，实现了无缝应用于从短期到季尺度的各类预报、气候情景模拟和环境预报，其科学进步是全方位的。虽然近年来ECMWF将其核心预报系统IFS的升级频次放缓到大约每年1次，但在IFS业务化运行以来更长的时间里，基本保持每年3次或更多次的版本更新升级（表2）。升级过程几乎遵循着相同的节奏：先由团队人员注意到模式的具体短板，再由研究人员通过修正程序加以解决。单次升级带来的模式性能提升或许有限，但正是持续数十年的磨炼和坚持，让IFS在参数化算法优化、天气系统物理过程的描述精准度等方面不断突破，最终跻身全球领先行列。这种可以定义为“气象工匠”的精神，不仅诠释了ECMWF学者2015年在《自然》上发文提出的气象科学“静悄悄”的革命时期（20世纪80年代以来）的真谛，也让气象学成为地球科学中

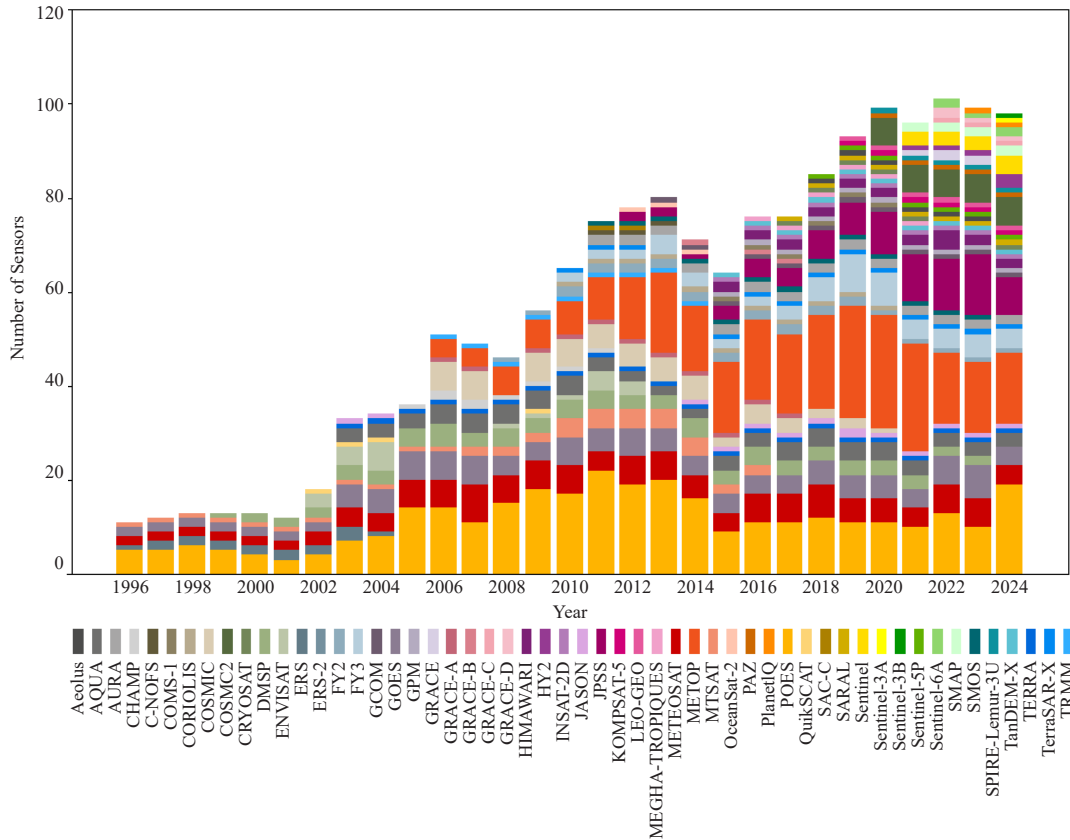


图2 1996—2024年ECMWF数据同化系统利用的卫星传感器数量变化 (来源: ECMWF, 2025a)

表2 ECMWF数值预报模式发展部分历史节点

日期	NWP模式节点	技术改进	提升效果
1979年8月1日	N48格点模式业务预报试运行	包含了多种物理过程参数化、海-气作用、对流等	ECMWF首个业务模式, 水平分辨率1.875°, 垂直15层
1987年1月1日	研发IFS	与法国气象局共同开发和维护模式, 单一Fortran代码	确保IFS套件计算保持高度一致
1988年1月5日	CYCLE 30	引入垂直扩散方案, 更新优化对流降水与陆面水文过程的耦合机制	垂直混合限定在边界层内
1991年9月17日	CYCLE 39	启用T213谱模式、31层的高分辨率分析与预报系统, 物理过程计算由高斯网格改为简约高斯网格, 优化模式动力框架	使海洋表面风速预报误差降低约3%, 陆地表面风速预报误差降低10%~15%
1993年10月5日	CYCLE 49	优化边界层参数化方案, 调整稳定条件下2 m气温廓线	减小了夜间气温预报偏低问题
1994年3月2日	IFS 11r7	湿度分析引入2 m露点数据, 新增感热通量	改善了降水及2 m气温预报效果, 是对原预报模式的一次重大改写, IFS版本被重新编号
1995年4月4日	IFS 13r4	平滑平均地形与全新次网格地形参数化方案	改善云量表征效果
1996年1月30日	IFS 14r3	引入3DVar	南半球预报技巧提升
1999年10月12日	IFS 21r4	T319垂直层数60层, 集合系统T159垂直40层, 修订4DVar背景误差统计, 新增10 m风场后处理, 引入O <sub>3</sub> 变量	500 hPa位势高度场的异常相关系数在欧洲和北半球地区显示出实质性改进
2004年6月29日	IFS 28r2	两个6 h 4DVar循环	预报产品提前3~4 h
2010年6月22日	IFS 36r2	引入EDA	显著改善集合预报系统的离散度表现, 提升热带地区预报技巧
2013年11月19日	IFS 40r1	升级卫星数据使用, 集合预报垂直91层, 实现集合预报海-气耦合	显著提高北半球HRES性能
2016年3月8日	IFS 41r2	引入全新八面体网格, 水平分辨率升至9 km	破纪录的分辨率实现了更优质的全球天气预报
2018年6月5日	IFS 45r1	增强海洋、海冰与大气动态耦合	提升了热带地区预报技巧; 改进了2 m气温预报
2020年6月30日	IFS 47r1	引入新热带气旋风半径产品	2 m温/湿度预报准确率提高0.5%~1%, 100 hPa以上气温预报偏差降低50%
2023年6月27日	IFS 48r1	集合预报分辨率9 km, 与HRES相同, 集合成员增加到101个	2 m气温和10 m风速预报技巧大幅度提升; 延伸期预报延长到46 d
2024年11月12日	IFS 49r1	2 m气温数据同化, 引入集合预报模式不确定性方案, 加入海冰表面的微波成像辐射观测数据	显著改善近地表风速和气温预报
2026年	IFS 50r1	引入NEMO4-SI3海洋和海冰模式, 修订平流层的垂直扩散和引力波阻力, 调整对流方案	提升4DVar数据同化系统中海-气耦合水平, 降低计算成本

冲破“混沌”局限，最大限度准确预报未来的代表性学科。

### 1.3 NWP是“算”出来的，保持“算力”是超越的前提

ECMWF成立伊始，保持机构高性能计算能力就成为最重要的任务之一。50年里，ECMWF通过不断更新其高性能计算机系统（图3），借助按照“摩尔定律”不断提升的计算机系统，为业务模式空间分辨率的持续提升奠定了算力基础。

ECMWF从最初没有自己的电子计算机，通过每周租用CDC 6600型计算机40 h开始，1976年引入Cray-1计算机（编号01），再到1979年购入Cray-1A计算机、20世纪90年代引入Cray-C90/16计算机，支撑模式分辨率从210 km提升到64 km。1994—2003年，ECMWF的计算机系统转向富士通，正式迈入分布式并行处理高速计算时代，令模式分辨率再次提高至40 km。2003年，ECMWF首次部署大规模并行计算机系统，选用IBM系列机型，模式分辨率提高至16 km。近10年，ECMWF通过采用Linux系统和尝试多元商业芯片，与更多厂家合作持续高频更新其高性能计算机系统。2022年推出高分辨率/集合预报分辨率约为9 km/18 km，到2023年集合预报系统的分辨率也达到了9 km。ECMWF计划未来将分辨率逐步提高到4.5 km和2.8 km，从而显著改进对热带气旋强度的预测。

2021年9月，ECMWF在意大利博洛尼亚正式启用

新的数据中心，该中心包括高性能计算设施（HPCF），并为后来推出的欧洲天气云业务系统提供支持。目前，ECMWF选择的Atos计算机系统已落地博洛尼亚数据中心。据国际TOP500组织（Top500.org）2025年6月发布的第65期全球超级计算机500强榜单，ECMWF不仅拥有全球排名前200的超级计算机，更为其在意大利的数据中心一次性配备4台相同计算机系统（Atos Sequana XH2000）。ECMWF几乎始终保持算力领先优势，为其持续开展的高质量研发铺平了道路，从而实现了快节奏的自我超越，让NWP数十年来始终充满活力。

### 1.4 拥抱卫星技术，确保数据同化效果的持续提升

2017年6月，ECMWF为担任研究部主任8年的学者埃兰德·卡伦举办卸任研讨会。WMO秘书长塔拉斯在会上向卡伦提问：若有100亿英镑投资观测系统，你会做什么？后者毫不犹豫地回答：投资卫星观测系统将带来最大收益，因为其具备全球覆盖能力。这一回答正是ECMWF 50年来将卫星观测数据应用作为其技术发展优先领域的真实写照。

ECMWF快速拥抱卫星探测新能力的典型案例，是对欧洲空间局2018年发射的具有开创性的Aeolus卫星多普勒测风激光雷达观测数据的快速同化。ECMWF于2020年1月开始同化Aeolus数据，不仅展示了新的基于空间的多普勒测风激光雷达能力，还为Aeolus后续业务化卫星起到积极促进作用。

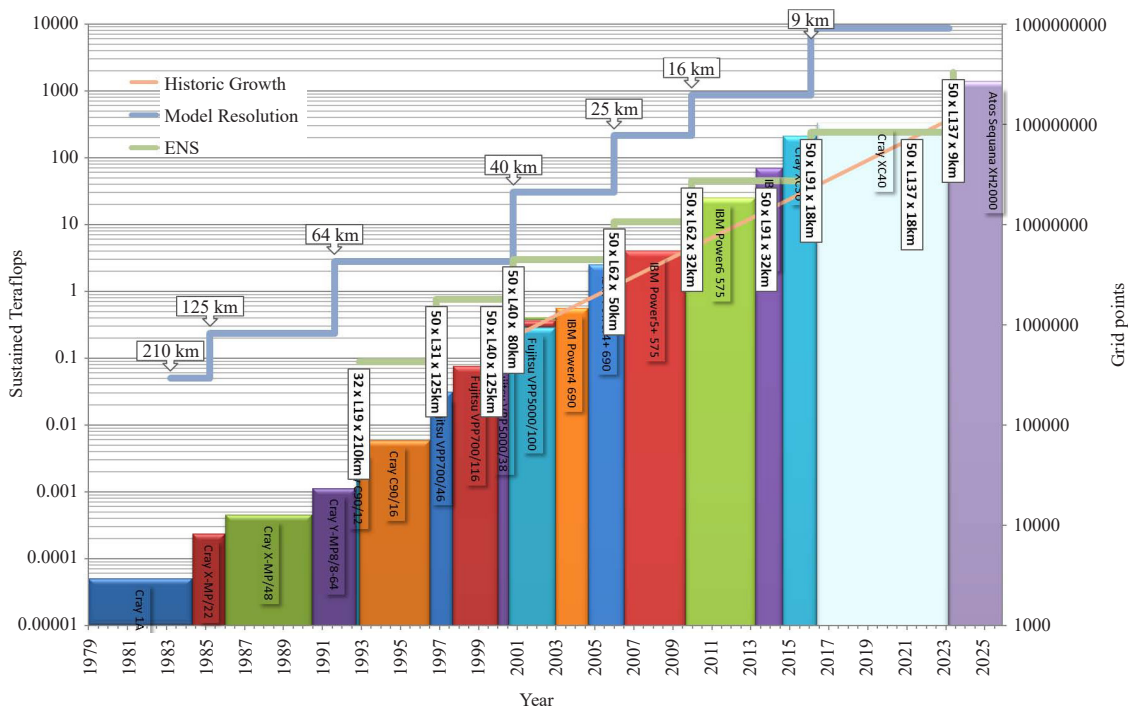


图3 ECMWF通过不断更新其高性能计算机系统适应预报系统分辨率的持续提升（来源：Hawkins, 2025）

ECMWF能够快速应用新的卫星及其他观测数据以不断提升预报系统性能，与该机构推出的关键工具EDA（集合数据同化）有关。EDA使用蒙特卡洛方法来估计短期预报误差统计量的大小，该方法在概念上与更传统的观测系统模拟试验（OSSE）不同，前者的优势在于可以将真实观测与模拟观测一起使用，此外，该方法还直接得益于NWP业务系统中用于背景误差模拟的任何改进。以Aeolus卫星为例，早在2007年卫星设计阶段，ECMWF学者就首先利用EDA评估了11年后才入轨的卫星数据将给IFS带来的能力提升，尤其是在热带对流层和海洋上。这样的预测在2020年Aeolus卫星数据应用于业务过程中得到了验证。同样的情况也发生在无线电掩星数据的业务应用中。另一个最新例子，是2024年5月瞄准云和气溶胶观测的EarthCARE（Cloud, Aerosol and Radiation Explorer）卫星入轨后，ECMWF快速将其数据纳入同化系统，成为全球数据同化系统中首次将雷达和激光雷达数据业务同化的机构，将全天空数据同化带到了新的维度。取得这样的成就，秘诀在于早在2016年，ECMWF就利用CloudSat和CALIPSO数据作为EarthCARE雷达和激光雷达的代理数据，开展在同化系统中直接同化空间雷达和激光雷达观测数据试验，确定了雷达反射率因子和激光雷达后向散射改善大尺度温度和风的预报，以及云和降水的分析等方面的巨大优势。虽然替代卫星从未被考虑成为业务任务，却凸显了EarthCARE卫星的潜在价值。这场有准备之仗让EarthCARE的数据以近实时的方式（通常在观测后的两小时内）释放其在业务预报中的潜力。

2025年7月，ECMWF再次率先将一颗开创性的小型卫星——北极气象卫星（AWS）数据纳入业务同化系统。ECMWF利用AWS携带的微波辐射计，补充目前气象业务卫星类似传感器数据的不足，特别是AWS首次在波长小于1 mm，被称为“亚毫米”的光谱波段中进行测量，从而提供有关冰云的新信息。ECMWF这次将最新卫星探测数据纳入业务同化系统，或许具有更大的意义：从一颗小型且相对经济的卫星上可以获得高质量和高影响力的观测数据。

### 1.5 集合预报，让预报更有信心

单一预报的一个重要缺陷，就是无法给出预测的不确定性。集合预报通过稍微不同的初始条件和模式近似值，生成一组未来天气预报结果，从而推断特定结果出现的可能性。换句话说，集合预报通过潜在结果的范围给出了预测的不确定性信息，但集合预报的计算成本更高。1992年ECMWF率先同时开展高分辨

率预报（HRES）和低分辨率的集合预报（ENS），其中集合预报业务化在某种程度上实现了思维改变：让预报尽可能覆盖大气的不确定性，从而得到对不确定性的度量。

集合预报的概念在20世纪80年代中期出现，在ECMWF任职多年的帕尔默（Tim Palmer）教授主导了ECMWF的集合预报系统开发，他意识到开发可靠和准确的集合预报系统的关键挑战是如何最好地表示初始条件和预测模型中的不确定性。为此，ECMWF开发了一种基于奇异向量的技术，通过对初始条件进行微小调整，有效且最大限度优化集合成员的分布。如今，奇异向量仍在ECMWF中使用，并在2010年将集合理念引入数据同化系统——EDA，以表示大气初始条件的预测不确定性。基于EDA扰动的加入，带来了预报技巧的重大改进。

集合预报提供的概率信息对于危险天气的早期预警具有重要价值，能够为灾害事件发生前的行动提供指导。2002年，基于集合预报的极端预报指数（EFI）正式开发使用，旨在为用户提供极端事件或灾害天气（例如强降雨、极端气温或大风）发生概率的信息，现已成为ECMWF最受用户欢迎的预报和预警产品之一。2023年6月，随着IFS版本升级到48r1，ENS预报分辨率提升到与HRES同样的9 km，标志着集合预报被赋予更重要的意义。

### 1.6 再分析和数据处理，为可持续发展提供支撑

再分析是应用现代地球系统数据同化系统建立近期（过去几十年到百年以上）气候记录的方法。2023年，ECMWF公开发布了其最新再分析数据ERA5，将过去气候数据记录开始时间从上一版本的1958年提前到1940年。ECMWF早就意识到，再分析数据的制作是一个持续的过程，而预报模式和数据同化系统的每一次改进，都为再分析能力提升带来了新的机会。除了方法的改进，ECMWF还一直努力利用更多的历史观测数据进行再分析，而下一个再分析版本ERA6，计划将在2026年推出。这个被推迟发布的版本，巨大的工作量可以从其对1979年前早期卫星观测数据的抢救利用可见一斑（图4）。

2022年，ECMWF开始了一项为期多年的迁移工作，将每日运营数据输出从GRIB第1版（GRIB1）迁移到GRIB第2版（GRIB2）。该项目旨在响应ECMWF战略（2021—2030年）中关于全球对流解析模式方面的要求。向GRIB2的迁移面临许多挑战：GRIB格式已经与ECMWF数据流紧密耦合，其许多工具都是为了利用GRIB数据格式而设计的。虽然大多数工具以临时方

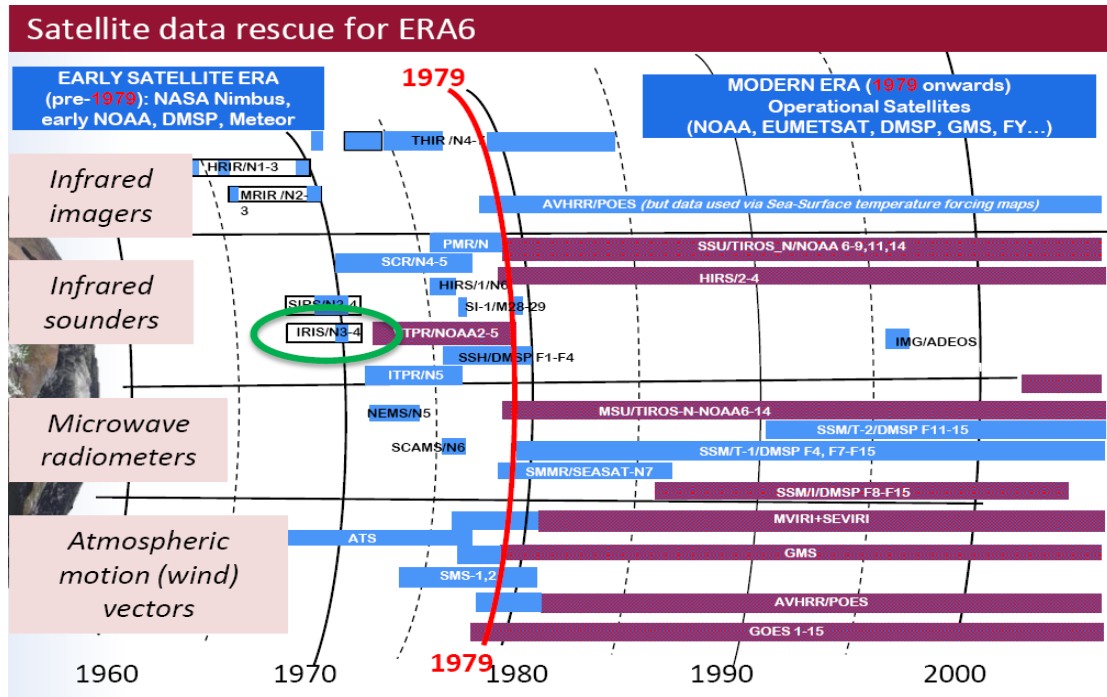


图4 计划于2026年发布的再分析换代产品ERA6抢救的卫星观测数据 (来源: Bell et al., 2025)

式使用GRIB数据, 仅需在ECMWF停用GRIB1时完成一次迁移, 但MARS档案需在未来几十年内持续处理GRIB1数据。

作为世界顶级NWP专门机构, ECMWF软件系统建设伴随其50年发展的始终(图5)。2023年, ECMWF发布了2023—2027年软件战略和路线图, 概述了最新的软件开发计划, 明确了软件开发的指导思想, 即软件应在社区的互动和反馈中公开开发, 软件组件需向轻量化、可重复使用、易集成方向优化。战略强调随着预报数据的快速增加, 改进数据处理的可扩展性十分关键。伴随战略的出台, ECMWF致力于提高软件的可复用性和组件化、进一步使用外部软件、采用开

放开发、确保数据可扩展到更高分辨率, 同时向新标准迭代, 以实现更高效的互操作性。

基于该战略最新研发的Earthkit(地球工具包)就比较好地体现了这些核心原则的落地。Earthkit通过提供基于广泛使用的开源Python库(如NumPy、pandas和Matplotlib)的多个可互操作的软件组件, 同时整合并利用了为人熟知的ECMWF业务系统(如ecCodes、Fields DataBase(FDB)等)的坚固且可操作的软件栈。与此同时, Earthkit还遵循多项面向未来的原则, 如无需存储介质读取或写入任何数据即可完成整个工作流程; Earthkit适配GPU架构, 确保数据处理管道能够支持GPU。所有Earthkit的源代码都可以在GitHub上公开

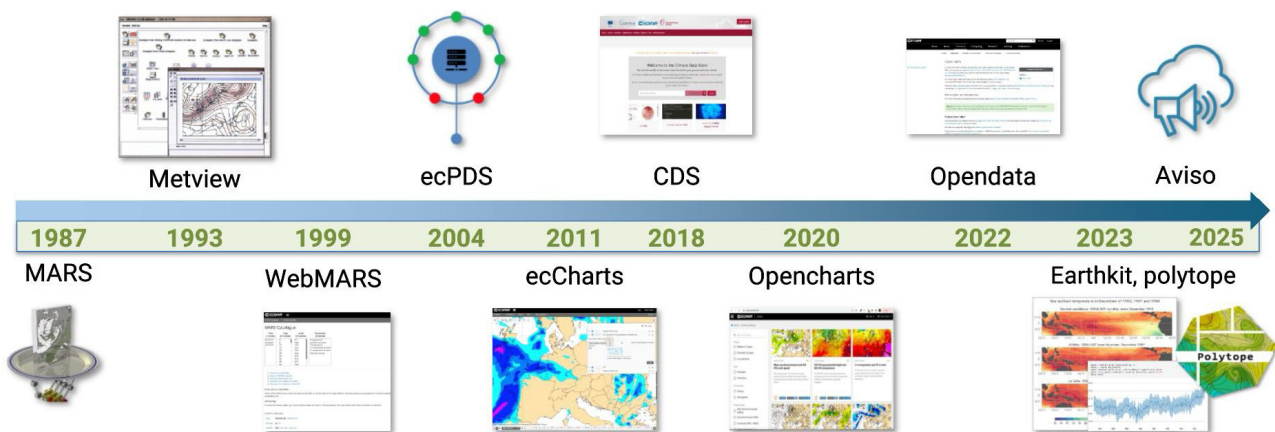


图5 数十年来ECMWF开发的支持NWP模式和用于产品生成和服务用户的软件平台 (来源: Russell, 2025)

获取，完全实现开放开发。ECMWF还计划公开开发代码库，使开发过程更透明，并从一开始就为与社区的互动提供机会。

### 1.7 人工智能 (AI) 技术与动力预报，在融合中探寻下一代NWP方案

2023年，ECMWF率先推出AI/综合预报系统(AIFS)测试版。这款向IFS致敬的全新预报系统，基于名为Anemoui的工具包(源自希腊语“Winds”)。该工具包提供高性能模块化组件和数据处理管道，用于创建和训练大规模并行的AI驱动的预报模型。AIFS的最初分辨率约为110 km，除了预报的初始条件外完全基于机器学习进行预报。ECMWF公开发布AIFS并借鉴IFS迭代模式，通过定期更新提高其分辨率、加入更多预报要素，同时开发成一个集合系统，表征天气预报固有的不确定性特征。这一举措，展示了其面对新科技浪潮时以不变应万变的鲜明态度：积极面对和谨慎研发。

在AIFS紧锣密鼓开发的同时，2024年初，ECMWF开始酝酿更为激进的直接利用气象观测数据通过机器学习进行天气预报。ECMWF认为，尽管通过再分析和数据同化生成的初始条件，对基于数据的AI预测至关重要，但未来是否仍会如此尚不清楚。而从根本上看，大气分析只是现有短期预报与可用气象观测数据的融合，一个明显的问题是机器学习预测系统是否可以直接用观测数据进行训练和初始化。机器学习模型的直接观测预报(AI-DOP)项目顺势而生，成为ECMWF对AI预报技术开展深层次探索的新方向。与AIFS等AI系统依然需要数据同化为预报提供最佳起点不同，AI-DOP无论是训练或是推理，均不使用数

据同化，仅基于观测数据开展预测。这种方法避免了需要对观测和预报状态的不确定性有详细了解，同时也无需非常准确地将观测(可能是卫星测量的辐射)与模式状态之间进行映射(如卫星辐射量观测与气温)，这就避免了很多复杂的计算，甚至无法建立这种映射。AI-DOP的24 h预报略优于IFS，120 h预报效果略逊，但在热带地区仍具有优势，其高纬度地区预报变差主要是因受雪盖影响(图6)。AI-DOP代表了一种彻底的变革，而该方法有望与其他方法融合应用，ECMWF正在持续探索这一极具潜力的研究领域。

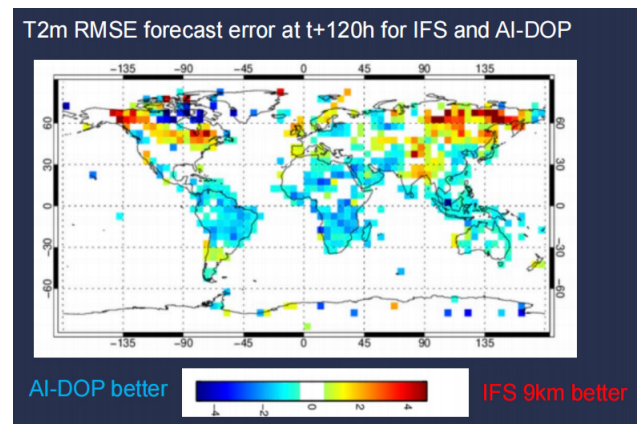


图6 AI-DOP和IFS预报对比(来源: McNally, 2025)

## 2 合作之本：用最大公约数推动和聚焦核心能力提升

ECMWF作为欧洲区域合作促成的机构，“合作”已经融入其基因(图7)。这种合作首先是其成员国内部合作，逐步扩大到与包括中国在内的欧洲以外国家或地区，并成为WMO实施全球战略的重要合作伙伴，

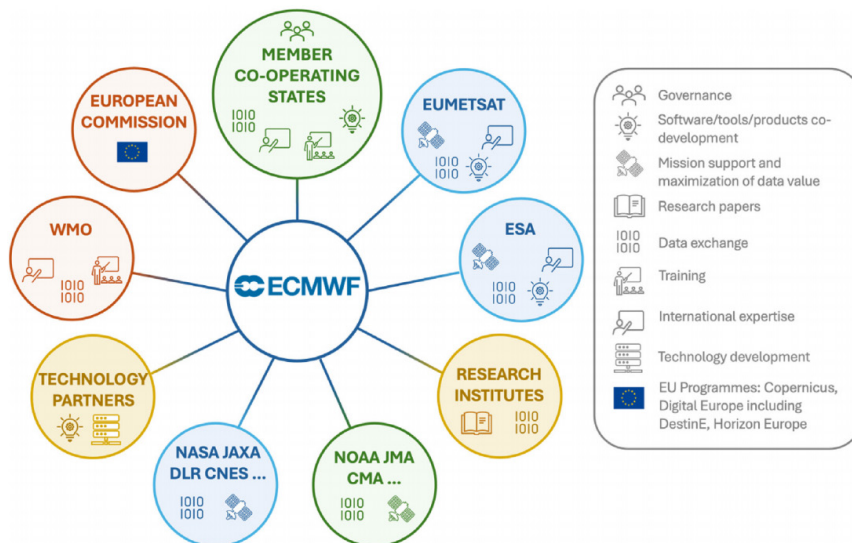


图7 ECMWF部分战略伙伴关系示意图(来源: Venuti et al., 2025)

体现了大气无国界的理念和ECMWF已经成为广泛意义上的国际组织。

ECMWF从成立之初30~40人，发展到如今500人左右，不同国家和背景的研发人员为实现一个共同目标必须解决的首要问题，就是如何形成最佳的合力。而外部合作不仅能为机构的发展带来更好的环境，更重要的是只有汲取全球智慧，才可能走到世界最前列。

## 2.1 ECMWF长期和稳定的领导核心及决策机制是其重要的取胜之道

在内部合作方面，ECMWF实现可持续的发展，离不开多任来自不同国家的主任（表3）的努力，以及

人数更多的理事会主席率领理事会贡献的智慧和决策。实际上，正是行政领导和理事会长期的相互信任和支持，构成了ECMWF在机制上的优势。这些领导人并没有给机构留下仅属于自己的“标签”，而是全力让机构的“初心”不断聚焦和一步步成为现实。

ECMWF成立50年来，历经来自4个国家的7位主任，其中任职时间达到10年及以上的有2位，任期为6~9年的有3位，算上2026年任职的主任，8位主任中有5位任职前在ECMWF担任副主任或部门负责人。这样的安排对于机构的可持续发展至关重要：让最熟悉业务和创新的人选接力作为领头人。

表3 ECMWF历届主任概况

年份	姓名	国籍/任职前后经历	主要领域和成就
1974—1979	 Askel Wiin-Nielsen (1924—2010)	丹麦/1980年任WMO秘书长，1984年任丹麦气象研究所(DMI)所长	使ECMWF走上成为全球NWP领导者之路，2011年获得第56届国际气象组织(IMO)奖
1980—1981	 Jean Labrousse (1932—2011)	法国/1982—1986年任法国气象局局长，1987年任WMO研发部主任	建立ECMWF首个计算中心
1982—1990	 Lennart Bengtsson (1935—)	瑞典/1975—1981年任研究部负责人，1991年后任马克斯-普朗克气象研究所所长	在NWP领域做出开创性的研究，2006年获IMO奖
1991—2004	 David Martin Burridge CBE (1944—)	英国/1970年加入英国气象局担任研究科学家，1975年调入ECMWF	1995年被英国女王授予大英帝国司令勋章
2005—2011	 Dominique Marbouty (1951—)	法国/1999年任ECMWF业务部主任，1999年之前任法国气象局副局长	制定实现和保持ECMWF世界一流地位的适当战略
2012—2015	 Alan Thorpe (1952—)	英国/1999年任英国气象局哈得来中心主任	完成ECMWF重组，建立可扩展性计划
2016—2025	 Florence Rabier (1964—)	法国/2013年10月担任新成立的ECMWF预报部主任	1997年首个4DVar的关键贡献人
2026—	 Florian Pappenberger	2016年任ECMWF预报部主任	率领团队开发AI和机器学习(ML)工具，包括Anemoui框架等

## 2.2 与中国的合作呈现持续拓展和瞄准前沿之势

中国气象局和ECMWF在2008—2010年通过多次高层互访建立了直接联系。2012年，ECMWF主任Alan Thorpe博士访问中国气象局时双方启动了签署正式合作协议的进程。2014年1月正式签署《中国气象局与欧洲中期天气预报中心合作协议》。这是ECMWF第一次与非成员国签署正式的双边合作协议（1年后该机构才与美国气象机构签署合作协议）。随后，同年4月23—24日，中国气象局与ECMWF第一次双边会议在英国举行，会议讨论确定在数值天气预报等6个领域开展深入合作。这些文件和会议的一项重要成果之一，就是中国FY-3B卫星上的微波湿度探测仪（MWS）数据在中国学者的帮助下，于2014年9月正式进入ECMWF业务模式，帮助模式改进对流层中上层的湿度分析并增强卫星观测系统的鲁棒性。FY-3B卫星作为一颗试验卫星，其数据被业务化，充分体现了ECMWF用全球最好的数据作最好预报的理念，这一具有可比性的做法，直到数年后才在“风神”卫星上再次上演。ECMWF认为这项成果是双方合作中的一个里程碑，还在新闻稿里深刻指出：中国有望在不久的将来，在气象卫星数据的提供方面发挥引领作用，与目前主要提供卫星反演数据的欧洲和美国并驾齐驱。

双方签订协议前后，一些合作已经展开。例如，2008年北京奥运会、2014年南京青年奥运会期间，ECMWF提供了北京及周边地区的天气预报产品以及南京空气质量预报产品。2016年以来，中国与ECMWF科技合作（图8）表明，双方的前沿合作呈现持续加强态势：双方合作集中在数据同化与卫星资料应用、再分析的发展与验证和青藏高原气候影响研究、模型评估与比较以及S2S预报、洪水集合预报、极地预测等领域。2025年10月，中国气象局代表团再

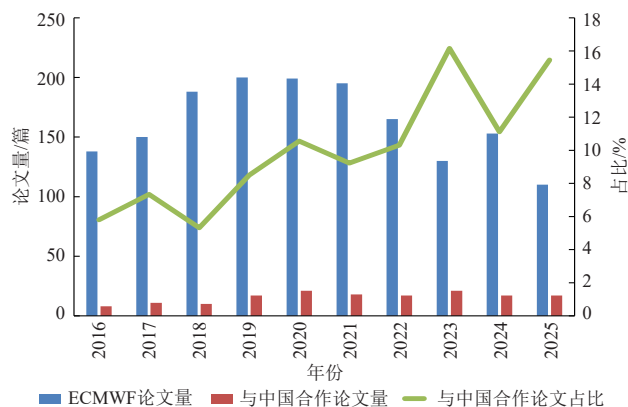


图8 2016年以来ECMWF发表论文量及与中国合作论文情况（基于SCI数据库，检索时间：2025年10月）

访ECMWF，双方在推进AI预报系统和探索气象科技的“无人区”等前沿领域再度深化合作，着眼未来共绘全球气象科技合作新蓝图。

## 2.3 与WMO的合作凸显了ECMWF对全球气象事业的巨大贡献

2017年5月，ECMWF成为WMO继华盛顿、莫斯科和墨尔本之后新的世界气象中心，凸显了ECMWF对WMO的重要作用。

在数据方面，随着开放数据政策的实施，ECMWF将通过取消WMO会员的全部数据和服务费，消除WMO会员的障碍，以支持联合国的全民早期预警等倡议。在2027年之前，将改善WMO所有会员的数据质量和可访问性。

2015年ECMWF庆祝成立40周年时，WMO秘书长Michel Jarraud高度评价ECMWF展示的通过国际合作取得的成就。他进一步指出：“在国际上，没有一个国家可以单独做到这一点，ECMWF是一个光辉的例子，说明将资源集中在一起可以获得比任何人在国家层面上获得的益处更多。”

## 2.4 执行哥白尼和目的地地球等项目成就欧洲领先地位

ECMWF在欧盟合作框架下成立，在与欧洲科技项目合作中，参与哥白尼和目的地地球（DestinE）两个项目的情况最具代表性：以其强大的数据管理服务能力和模拟能力，成为欧洲相关项目不二的选择。ECMWF承担了哥白尼气候变化局（C3S）和哥白尼大气监测局（CAMS）的职责，还为哥白尼应急管理局（CEMS）和哥白尼海洋环境管理局（CMEMS）提供支持。这些合作均通过扩展其模拟能力以涵盖更广泛的地球系统过程和相互作用来实现。

欧盟的DestinE计划旨在建立地球的数字复制品，ECMWF作为DestinE的3个关键机构之一，承担计划的前两个高优先级数字孪生引擎：气候变化适应数字孪生（Climate DT）和极端天气数字孪生（Extremes DT），均是DestinE的核心。不同于预报系统，数字孪生系统可以更好地用于决策，并具有前所未有的互动性，还可以测试“如果……”的情景。ECMWF联合欧洲90个机构共同攻关，显而易见，DestinE与其核心活动密切相关：开发尽可能好的全球数值天气预报系统，并使其让广泛的用户可用。这将使DestinE能够从其内部开发的天气预报系统进步中受益，包括越来越多地使用机器学习技术。

2019年，ECMWF和欧洲气象卫星开发组织（EUMETSAT）合作，共同开发和支撑一个社区云计算平台——欧洲天气云（EWC）。EWC概念来源于

ECMWF为其成员国和合作国提供计算访问的广泛经验。2023年9月EWC投入运行，极大促进了数据访问和数据处理能力的提升，并在ECMWF和EUMETSAT的成员国和合作国中的国家气象和水文部门及研究人员之间建立了新的合作形式。

## 2.5 开放数据夯实成功基础

ECMWF理事会于2019年12月批准了从2020年开始从有限数据访问过渡到完全开放数据的决定，并设定了在2026年前实现完全开放状态的目标（图9）。2025年3月17日，ECMWF宣布将全面开放气象数据的计划提前至2025年10月1日实施，较原定时间提前1年。ECMWF实时数据目录将以最高分辨率在CC-BY-4.0许可下完全免费开放，包括IFS和AIFS所生成的数据。不仅如此，ECMWF保持更广泛的合作视野，例如，其负责研发的哥白尼气候数据库（CDS，<https://cds.climate.copernicus.eu/>）提供了大量C3S信息，该数据库特别强调确保数字资产完全符合FAIR原则：即它们可发现、可访问、可互操作和可复用，也通过数据库的标准化成为促进整合和创新的催化剂。

## 3 全球样板：细节更能诠释工匠精神

全面阐述ECMWF成功的原因，不仅是一个大课题，也远非本文作者能力所及。但可以从一些看似“无关大局”的做法发现ECMWF成功的底蕴：当NWP

科学原理已经成为共识时，打造最优预报模式或模型的比拼，更多表现在一些“细节”上；同样，NWP机构发展和管理的一些“细节”，可能反映了机构持续创新的“续航”力和效率。本节试图归纳的几个或可纳入ECMWF成功的“标签”，可能不算是最重要的因素，但却是ECMWF之外机构不易做到的。这些做法不仅值得其他气象中心学习和借鉴，更会在效仿中随着时间的推进倍感收获，感叹作为样板，ECMWF能够于无声处听闻“惊雷”的奥秘。

### 3.1 连续出版物全程可获取是对历史进程和遗产最大的尊重

50年来，ECMWF发展轨迹的每一步都有翔实、清晰、连续和透明的记录。以其年度报告为例，任何人在其网站上都可以调出该机构1976年的第一份年度报告（图10）。按照惯例，年度报告应该给出上一年的工作进程报告，因为ECMWF公约于1975年11月才生效，因此第一份年度报告仅覆盖该机构1975年11—12月的工作。拥有易于获取、持续发布的年度进展报告，对于科技机构来说，其意义是广泛和巨大的。这种高透明的做法，不仅提示机构内部的员工不忘前人的努力，更让期待加入其中的潜在人群找到属于自己价值释放的最好时机和位置，这对于作为独立的政府间机构来说，无疑是保持其长期可持续发展的重要保障。

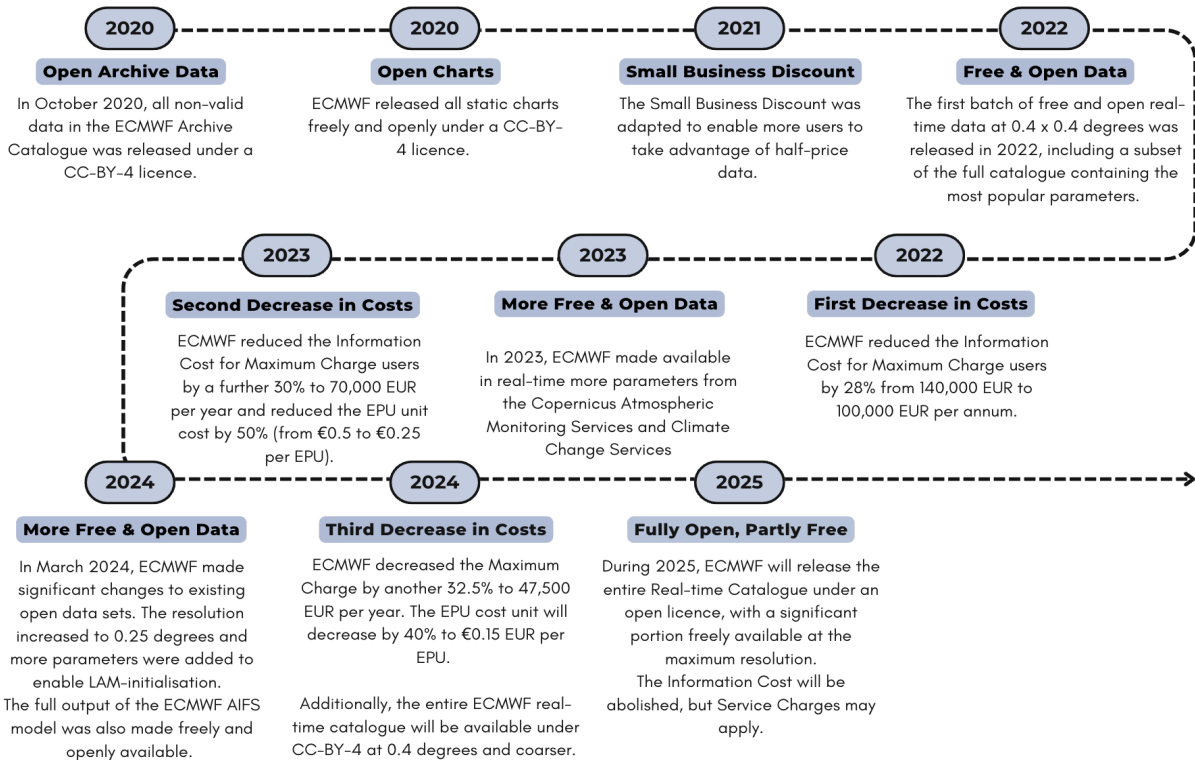


图9 ECMWF数据开放时间线（来源：Becky, 2025）

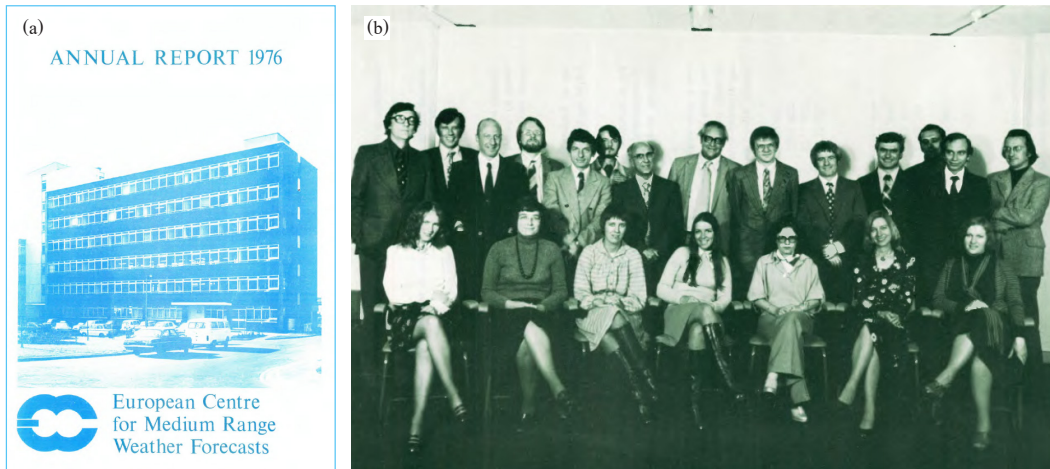


图10 ECMWF第一份年度报告封面(a)和年度报告中给出的机构部分员工合影(b) (来源: ECMWF, 1976)

### 3.2 《ECMWF 通信》拥有机构技术留痕的重要功能

与年度报告相得益彰且同样高度开放的出版物《ECMWF通信》，则更多从技术角度实现了为机构的科技进步留痕。1977年8月，第一期《ECMWF通信》问世(图11)，这份最初被命名为《计算机通信》的内部出版物按季刊的节奏编辑，刊出11期后于1979年更名为《技术通信》并双月刊发，从1980年开始改为现名称并重新累计编号，到2025年秋季共出版了185期(总计为202期)。超过200期的《ECMWF通信》，不仅是主办机构的重要财富，而且也为全球科技界探索物理和计算机等基础学科应用领域成长壮大的历程提供了重要参考。

此外，ECMWF还从1979年开始编辑出版《技术备忘录》(Technical Memorandum)，截至2025年12月，已经编辑出版935期。该技术出版物从更加专业视角解读机构各种业务系统、产品和服务能力提升的细节以及相

关研究与业务的交流，针对新技术业务化适用性、服务新领域拓展的潜在可能等进行前瞻性的技术探讨。

### 3.3 ECMWF 网站成为全球业内影响力最大的社区

ECMWF成立之时，正是以互联网为代表的全球通联旺盛时期，顺应技术的发展，ECMWF网站(可通过<https://sites.ecmwf.int>访问的网页平台，托管网站数据已经超过300个，图12)不断发展和改进，目前已成为全球气象界最知名的网站，不仅在传播其预报产品方面起关键作用，而且还在与科学家、政策制定者和普通公众等多元化群体合作和交流研究结果方面发挥了重要作用。ECMWF网站经过2018年和2021年两次较大的开发，显著更新能够带来最大价值且最常使用的网站内容。例如，图表仍然是ECMWF网站上访问和使用最频繁的内容之一，目前用户只需点击一个按钮即可可视化实时预报数据。通过改进交互式在线图表“ecCharts”的性能，让用户可以得到所需的或定

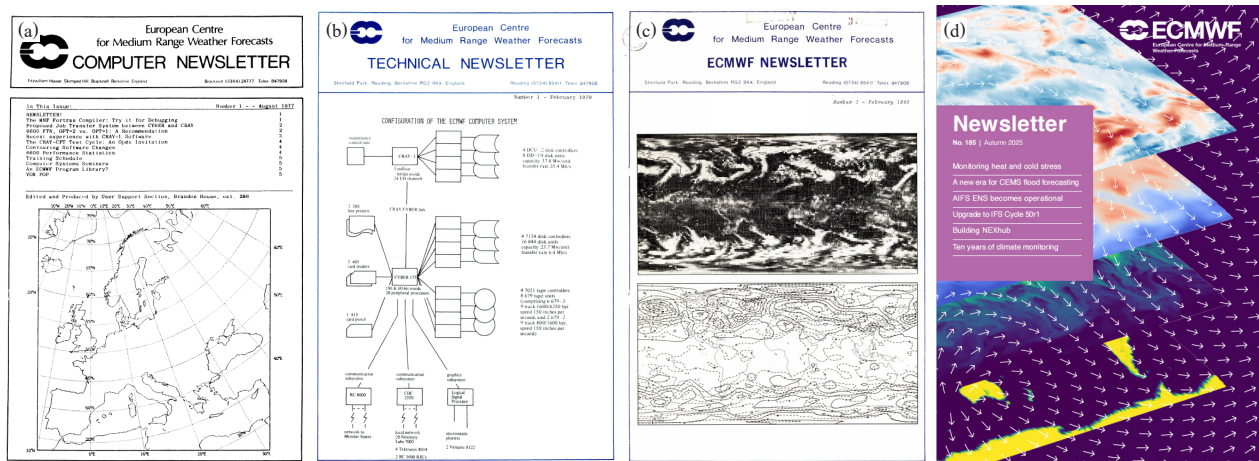


图11 《ECMWF通信》的前身(a, b, 来源: ECMWF, 1977; ECMWF, 1979)和第1期(c, 来源: ECMWF, 1980)及第185期(d, 来源: ECMWF, 2025d)

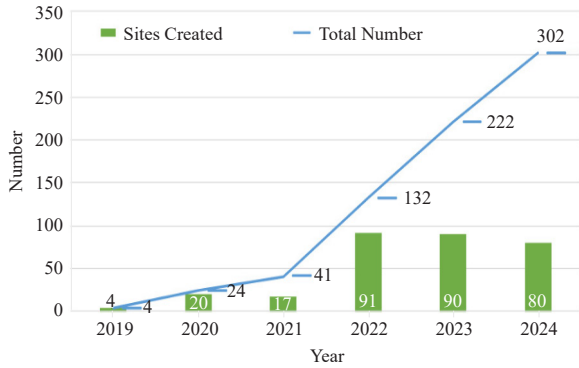


图12 2019—2024年ECMWF托管网站的发展  
(来源: Martins, 2025)

制的统计图。

此外，网站通过新闻、博客、社交媒体、出版物、员工简介等方式，提供了更多的在线参与和知识共享机会。例如，在线出版物文献库 (<https://www.ecmwf.int/en/publications>) 利用数字对象唯一标识符 (DOI) 和开放研究者、贡献者标识符 (ORCID)，将ECMWF员工及其出版物与更广泛的社区联系起来，为各种合作提供了方便渠道。

### 3.4 学术会议、培训交流的形式取决于内容

ECMWF作为研究型业务机构，每年主办的大量学术会议 (表4) 不仅成为业内口碑，而且这些会议交流活动往往能反映气象研究和业务融合的重要发展趋势。同一些学会组织的系列会议有所不同，ECMWF主办的会议几乎都没有届别，而是基于学科和业务发展态势设置不同的主题。即使是每年都要举办的会议，如用户会议、高性能计算会议和年度会议等，也是用不同的主题加以区分，客观上起到了引导业内认识和关注会议主题所代表的领域最新进展的功能。此外，ECMWF主办的一些重要会议，几乎全程都是30 min或更长时间的“长报告”，目的是要求每个报告人就论述的主题给出透彻、完整的阐述，较少受到发言时间的局限。此外，针对过去50年来几乎所有的会议，ECMWF给出完整记录并完全公开。ECMWF更加“务实”的学术会议风格，契合了气象科学和业务在过去数十年来快速发展，需要对其细节复杂性展开深刻思考的节奏。

## 4 结语和展望

1975年成立的ECMWF，到21世纪初就超越了欧美众多气象业务和研究机构，走到了全球前列并成为学习的样板。展望未来，除了持续发展IFS、AIFS和DestinE等系统外，其下一代物理模式动力核心系统PMAP (Portable Model for Multi-Scale Atmospheric

Prediction, 多尺度大气预报便携模式, 曾用名Finite Volume Model, FVM) 也已经浮出水面。PMAP一方面拥抱新技术, 例如完全用Python语言构建, 可采用GT4Py指令集进行高效开发; 另一方面更好地弥补全球千米尺度和区域亚千米尺度(如云层属性、复杂地形作用和城市气象)的预报和应用短板, 并将二者有机融合。GT4Py方法在降低维护成本和资源消耗、提高研发效率、降低入门门槛和实现功能与代码系统分离、提高代码灵活性等方面的优势, 或许将改变未来NWS的发展范式。而PMAP与DestinE等形成合力, 或许能够提供包括城市气象等更多具体预报和应用问题 (图13)。

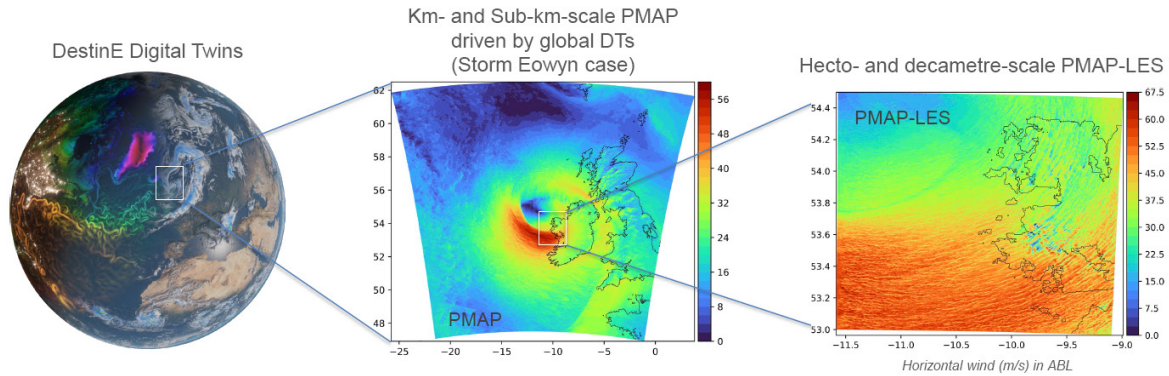
展望未来半个世纪, 虽然当ECMWF成立100周年之时气象预报会是什么样子我们尚难以设想, 但NWP会因ECMWF的存在和影响, 选择和引领最好的前进之路, 应该是越来越多人的共识。

WMO秘书长席列斯特·绍罗参加ECMWF成立50周年的庆典时对ECMWF 50年的发展给出评价: “ECMWF已成为全球预报系统的基石, 其基于共享标准、开放数据和科学严谨性的工作, 直接助力WMO保护社区、支持经济活动和提升全球韧性。”ECMWF的50年成功之路, 除了在战略制定、机制选择、人才政策等“主流”方面的独特性外, 一些细节上的做法和坚持, 如古人云“天下难事, 必作于易, 天下大事, 必作于细”, 或许更能让人透彻感悟: 为什么世界上很多在“主流”方面的把握上类似的NWP机构, 对比ECMWF只能“望尘莫及”。基于前文, 凝练出ECMWF前50年发展的5个值得借鉴的鲜明特点: 一是追求物理科学真谛发展NWP, 坚持气象科学是物理学应用分支的经典思想, 即使进入AI时代, 数据驱动预报模型的物理约束, 一直是ECMWF开展AI研究的重中之重; 二是领导人的可持续性选择与理事会的多视角战略把舵形成互补合力, ECMWF前50年的7任主任, 既是著名学者, 更是业务创新的实干家, 他们总能在科学和技术发展的不同阶段找到机构最重要的发力点; 三是从工程的视角、借助强大的验证和标准化的工具持续推进模式发展, 虽然ECMWF拥有世界上最强的数据同化系统, 但面对全球每天大约7亿条观测数据, 进入同化系统的也仅约4000万条, 占数据量的约5%, 这也为机构后续能力提升预留了巨大空间; 四是战略目标和质量第一意识的充分融合, 例如, 原计划在成立50周年之际发布IFS 50r1版和EAR6等计划, 都因为无法达到质量标准而延期, 看似尴尬的结果实际代表质量至上的理念; 五是服务意识贯穿全链条, 以文中介绍的ECMWF网站丰富的科学报告为例,

表4 1975—2025年ECMWF年会和其他学术会议主要主题

年份	年会主题	学术活动数/其他会议主题	年份	年会主题	学术活动数/其他会议主题
1975	中短期预报的科学基础	1	2001	次网格物理过程参数化	4/海浪预报、再分析资料
1976	NWP边界层处理	1	2002	天气与气候	5/湿度分析、上层海洋数据在中期和延伸期预报中的作用
1977	自由大气物理过程参数化	2/经验正交函数(EOF)应用	2003	大气与海洋数据同化	5/降水分析、平流层与对流层顶模拟和同化、季节内变率模拟与预测
1978	NWP产品解读与应用	2/积云对流参数化	2004	大气与海洋建模数值方法	7/水文集合预报试验(HEPEX)、浅水环境波浪、高光谱数据同化、高性能网络、陆面数据同化
1979	动力气象与NWP	4/山地、图形系统、随机动力	2005	全球地球系统监测	7/随机动力模型与次网格过程、数据同化、欧洲区域再分析计划
1980	数据同化方法	3/辐射和云、非绝热过程诊断	2006	极地气象学	7/全球环境与安全监测、再分析、集合预报、大尺度模式云参数化
1981	中长期预报的问题和展望	6/热带气象、图形核心系统、图像应用、边界层参数化、局地高带宽网	2007	卫星观测在NWP中应用	5/验证方法、数据同化、集合预报
1982	NWP产品解释	4/延伸期预报模式比较、数据处理、数据同化	2008	次网格物理过程参数化	6/气候变化、无线电掩星技术、海-气相互作用、地理信息系统/开放地理空间联盟(GIS/OGC)标准
1983	天气预报的数值方法	2/大尺度对流	2009	预报与数据同化系统	6/欧洲洪水预警系统、红外大气探测干涉仪数据同化、陆面模拟与数据同化
1984	数据同化和观测系统试验	5/观测质量控制、云参数化、多处理器、并行处理机使用	2010	欧洲及大西洋区域日到年尺度可预测性	7/大气成分与气候监测(MACC)项目、工作站、卫星云和降水、安全风电项目、非静力模拟
1985	大气物理参数化	2/高分辨率分析	2011	大气与海洋数据同化	4/数值天气与气候预测、昼夜周期与稳定边界层
1986	地形效应观测理论模拟	2/中长期可预报性	2012	季节预测	6/MACC-II项目、海浪及大气成分观测模拟试验、云和降水参数化
1987	热带气旋天气系统的性质和预报	5/水平离散化、非绝热强迫、探空质量与监测	2013	大气与海洋建模数值方法	7/GIS/OGC标准的应用、极地预测、观测监测、逆向模拟、高光谱红外卫星观测
1988	数据同化与卫星数据使用	5/中长期可预报性、陆地表面通量参数化、并行处理机使用、气象学中图形学	2014	卫星数据应用	28/产品应用、全球洪水、可扩展性、浅水环境波浪、掩星测量应用、GRIB/NetCDF格式、水文卫星应用设施(H-SAF)与水文集合预报试验(HEPEX)联合水文耦合、ERA气候再分析二期项目(ERA-CLIM2)
1989	中短期天气预报10年	4/数值质量、卫星数据	2015	当前及未来大尺度模式中的物理过程	30/MACC-III项目、产品使用、随机过程、卫星数据同化、OpenIFS用户、可视化、OGC海洋气象互操作性、次季节可预报性
1990	热带与非热带相互作用	3/云辐射传输和水循环、并行处理机使用	2016	地球系统建模	32/强降水洪涝、全球洪水预警系统、计算设施、MARS、模式不确定性、ERA-CLIM2、阻力过程、欧洲预报员合作、面向百亿吨次天气预报的节能可扩展算法(ESCAPE)成果推广、地球辐射收支、热带模式与同化、卫星气候数据、海-气集合预报、次网格物理、可视化
1991	大气模式的数值方法	4/精细尺度模拟、预测能力新进展	2017	集合预报	34/GAIA-CLIM项目、FIDUCEO项目、开放数据、ANYWHERE项目、IMPREX项目、动力气象学与NWP、OpenIFS用户、ESCAPE项目、灰色地带机理、地球科学Python框架开发、低频被动微波测量
1992	欧洲地球模式验证	3/3DVar、并行处理机使用	2018	地球系统同化	37/海表温度与海冰、4DVar 20周年、CO <sub>2</sub> 人为排放、水可持续发展、下一代模式辐射过程、多灾种预警、云计算、无线电频率干扰、地球系统科学Python框架
1993	卫星数据在NWP中应用进展	4/云顶边界层、平流层与NWP	2019	次季节与季节尺度预报	43/数据行业、天气代码、Fortran现代化、集合预报、探空仪改进NWP网络、IFS升级网络、OpenIFS、地球大气能量谱
1994	子网格物理过程参数化	3/云模拟、并行处理机使用	2020	大气与海洋模式数值方法	43/卫星云和降水观测同化、航空气象观测及应用、预报挑战、天气代码、地球系统观测与预测机器学习、欧洲气象云、机器学习讲座
1995	可预测性	3/半拉格朗日算法	2021	观测系统	51/航空数据、预报技巧评估、季节预报、云端气象、潜热、数字孪生、欧洲气候状况、海洋数据同化、水文模拟、气候代码
1996	数据同化	4/数据同化非线性、对流参数化、并行处理机使用	2022	无缝隙预测中的物理过程挑战	44/射频干扰、目的地地球、MAELSTROM成果推广、CAFE项目、模式不确定性、Atos专家讲座、微波光子学、模式调优
1997	大气-地表相互作用	4/可预测性、地形学	2023	地球系统再分析	41/CEMS全球洪水预报与监测、大气河流、地球代码日、应对气候变化、能见度集合预报、美国洪水风险预测
1998	大气模式数值方法最新进展	4/陆地表面过程与同化、数据同化诊断、并行处理机使用	2024	目的地地球	44/欧洲气象云、海浪、目的地地球、Anemoi、网络地图服务、环境数据、FAIR原则
1999	模式诊断和数据同化	4/季节预报应用、卫星垂直探测器数据应用	2025	气候变化背景下的预测	42/Anemoi、AIFS Single v1系统、非洲早期预警、50周年系列庆典、陆面与地球系统模拟、地表过程耦合、CATRINE项目、AIFS ENS v1系统
2000	新一代卫星NWP应用	3/高分全球模式、云降水同化			

注：1) 学术活动包含学术会议、网络研讨会、非正式研讨会、培训课程、在线培训课程等；2) 高性能计算相关研讨会基本每两年一届；3) 气象业务系统研讨会基本每两年一届(1987—2017年)；4) 哥白尼气候变化局相关研讨会基本每年一届(2014—2025年)。



Setup and validation of **PMAP** at kilometre, subkilometre and decametre resolutions on EuroHPC GPU systems

图13 ECMWF的下一代模式PMAP与目的地地球等系统融合带来千米和亚千米预报和应用的更好解决方案(来源: Wedi, 2025)

当那份你心仪的文件无论时间过了多久，都有信心只要在线即可获取，这种信心就演变成了一种力量，它能鉴定所有号称是“科技型”机构的真正含金量：一

些气象机构并非因技术原因没有做或不屑于做，而ECMWF做到了；另一些气象机构做到了，但ECMWF做得更好！

### 深入阅读

Bauer P, 2019. Where our science ambitions meet computing and data handling limitations[C]//ECMWF Annual Seminar 2019. Reading, UK: ECMWF.

Becky H, 2025. ECMWF products—Use of ensemble products including ENS meteoagrams[C]//CREWS/SWFP-Eastern Africa-Training Workshop on Severe Weather and Impact-Based Forecast and Warning Services. Entebbe, Uganda: ECMWF.

Bell B, Hersbach H, Berrisford P, et al., 2025. The ERA6 reanalysis[C]//ECMWF Annual Seminar 2025. Bonn, Germany: ECMWF.

Bonavita M, 2025. What is the role of DA in the ML age[C]//Workshop on Data Assimilation: Initial Conditions and Beyond. Bonn, Germany: ECMWF.

Bormann N, Healy S, Lean K, et al., 2023. Predicting the forecast impact of potential future observing systems[J]. ECMWF Newsletter, 174: 12-17.

ECMWF, 1976. Annual Report 1976[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 1977. Computer Newsletter[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 1979. Technical Newsletter[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 1980. ECMWF Newsletter[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 2025a. Fifty years of data assimilation at ECMWF[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 2025b. Fifty years of Earth system modelling at ECMWF[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 2025c. The critical role of high-performance computing in medium-range weather forecasting: Half a century of technology innovation[R]. Reading, UK: ECMWF.

ECMWF, 2025d. ECMWF Newsletter[R]. Reading, UK: ECMWF.

Fielding M, Janisková M, Mason S, et al., 2025. EarthCARE data begin to make an impact[J]. ECMWF Newsletter, 183: 21-27.

Grafl H, 2019. ESA and EUMETSAT on a par with NASA and NOAA[EB/OL]. (2019-06-03)[2026-01-15]. <https://docslib.org/doc/11529139/esa-and-eumetsat-on-a-par-with-nasa-and-noaa>.

Hawkins M, 2025. Past, present, and future of HPC at ECMWF[C]//21st ECMWF Workshop on High Performance Computing in Meteorology. Bologna, Italy: ECMWF.

Martins M, 2025. ECMWF sites: Websites as a service[J]. ECMWF Newsletter, 182: 33-41.

McNally T, 2025. Observations: The noisy revolution[C]//ECMWF Annual Seminar 2025. Bonn, Germany: ECMWF.

Modigliani U, 2025. The history of ECMWF forecasts and UEFs: (Co-) evolution of ECMWF forecasts and the important role of engagement and feedback[C]//Using ECMWF's Forecasts (UEF2025). Bologna, Italy: ECMWF.

Russell I, 2025. Online training course: Introduction to ECMWF computing services (including MARS)[EB/OL]. (2025-10-16)[2025-01-15]. <https://events.ecmwf.int/event/480/registrations/351/>.

Setchell H, Lamy-Thépaut S, Brady A, 2021. ECMWF online-community, collaboration and empowerment[J]. ECMWF Newsletter, 167: 23-27.

Tan D G H, Andersson E, Fisher M, et al., 2007. Observing-system impact assessment using a data assimilation ensemble technique: Application to the ADM-Aeolus wind profiling mission[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133(623): 381-390.

Venuti F, Rabier F, Andersson E, et al., 2025. ECMWF's societal impact through service provision, partnerships and collaborations[J]. Journal of the European Meteorological Society, 2: 100013.

Wedi N, 2025. Implementing digital twin technology keynote presentation[C]//21st ECMWF Workshop on High Performance Computing in Meteorology. Bologna, Italy: ECMWF.

Wedi N, Sandu I, Bauer P, et al., 2025. Implementing digital twin technology of the Earth system in Destination Earth[J]. Journal of the European Meteorological Society, 3: 100015.

(作者单位: 于丹, 中国气象局气象发展与规划院、中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室; 李萍, 中国气象局气象发展与规划院; 李婧华, 中国气象局气象干部培训学院; 贾朋群, 中国气象局气象发展与规划院、中国气象局气象干部培训学院)

(编辑: 卢冰)