

回望2022：全球气象科技风云

■ 贾朋群 肖芳

2022年，在全球冲突和疫情持续的背景下，气象事业的发展依然势头旺盛。欧美气象强国加快气象卫星换代，2022年最新入轨卫星及其载荷仪器，将带来103项新的基于仪器观测卫星遥感产品。ECMWF预报水平继续保持全球领先，美国、英国和日本的模式研发也渐入佳境，气象事业的“芯片”工程已经走到一个历史的转折点，AI或成就更好的天气气候乃至地球系统模式。气候变化、气象服务和减灾方面也取得了新的认知和改变。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.01.002

2022年及其所在的2020年代初期，在气象和大气科学学科发展和应用研究的历史长河中，是一个重要的发展节点。

- 120年前的1903—1904年，V.皮叶克尼斯提出天气预报问题是物理初值问题，从而让发展了2个多世纪的近代气象学步入现代气象时代；

- 100年前的1922年，理查孙尝试手工计算天气并发表首部专著，具有物理科学属性和借助计算科学发展的数值天气预报（NWP）真正起步；

- 从一个世纪前的1920年代开始，基于1920年探空仪出现和开始获得高空气象数据，挪威学派绘制出天气图，创造性地提出了冷锋、暖锋、气团等现代

气象学概念，让动力气象学意义上的基于科学的天气预报服务起步；

- 从一个甲子前的20世纪60年代开始，自第一颗气象卫星于1960年进入轨道，气象卫星观测技术频繁换代、跳跃式发展，后劲依然十足，成就不可限量。

2022年，在全球冲突和疫情持续的背景下，气象事业的发展依然势头旺盛（图1）。本文试图在2022年全球气象和大气科学丰富的活动中，尝试拾取其中或许具有里程碑、或许酝酿发展拐点的重要或标志性的事件，力图揭示在学科领域发展的历史节点上，全球气象界共同创新的新动态和新方向。



图1 2022年全球气象风云点滴

资助信息：国家自然科学基金(42142009)；2023年中国气象局气象软科学重点研究项目(2023(13))

1 天基观测：欧美气象强国加快气象卫星换代

据地球观测卫星委员会（CEOS）于2022年12月的最新统计，2022年全球地球观测类卫星共计发射36项任务（全球更新的卫星任务总数达到了324个），47个全新卫星仪器载荷进入不同的地球观测轨道（全球更新的卫星载荷仪器达到177个）。2022年最新入轨卫星及其载荷仪器，带来103项新的基于仪器观测卫星遥感产品（图2）。

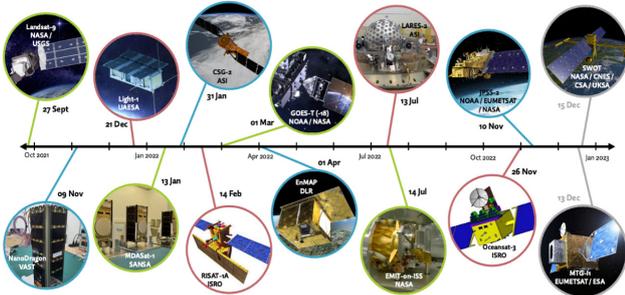


图2 2021年10月—2022年12月全球发射升空的主要地球观测卫星

1.1 美国在军用和民用两个平台加速气象卫星换代

美国军方在摇摆了数年后，终于敲定了用2个系列卫星（WSF-M和EWS分别为微波卫星和电光卫星）替代执行了60多年的国防气象卫星计划（DMSP），美国多家军工复合体公司参与其中，打造军用和民用气象卫星重新分离后的换代卫星，或可以为美国乃至全球下一代极轨气象卫星换代做出示范。WSF-M卫星早在2017年被确定，首颗卫星计划于2024年升空。2022年11月，第二颗WSF-M卫星被美国太空部队确定，价值7820万美元的合同依然交给首颗卫星的研发公司——Ball公司，后者已经获得4.173亿美元来研发首颗卫星，第二颗卫星计划于2028年发射。据美国军方介绍，每颗微波卫星估计耗资将达到5.11亿美元，负荷包括了微波成像仪，可采集气象数据，包括测量海面风速风向、冰层厚度、积雪深度、土壤湿度和局部空间天气。2颗卫星都将在极地轨道上运行。

在民用气象卫星方面，年初和岁末，两颗气象业务卫星基本按照计划发射升空，为2020年代卫星气象遥感搭建了骨干卫星框架。2022年3月1日，GOES-T升空，NOAA将其重新命名为GOES-18，定位于136.8°W，接替目前运行的GOES-West卫星。后者即是4年前同一个时间发射的GOES-17。该卫星上的主要气象仪器高级基线成像仪（ABI）出现故障问题，导致NOAA将其替换为GOES-18。替换完成后，GOES-17进入105°W的在轨备份位置，准备接管GOES-East，

即GOES-16。

GOES-T是洛克希德马丁公司建造的由4颗卫星组成的GOES-R系列地球静止气象卫星中的第三颗，最后一颗GOES-U计划于2024年发射。NOAA总是把最好的卫星设置为GOES-West，是因为大多数天气系统都是从西向东传播的，故定位在西部的静止卫星对于气象预报尤其重要。

2022年11月1日，在推迟10天后，美国新一代极轨气象卫星JPSS-2升空。该航天器业务化后将更名为NOAA-21，它将和第一颗JPSS卫星NOAA-20以及Suomi NPP一起，提供极地轨道的天气数据。JPSS-2的主要承包商是诺斯罗普·格鲁曼公司，该公司是美国所谓“军工复合体”中的重要成员，公司还将根据合同，在未来十年内生产和发射3颗极轨气象卫星，本次发射的卫星为其中的第一颗。而JPSS-2是JPSS星座中的第三颗卫星。第一颗是2011年10月发射的Suomi国家极地轨道伙伴卫星，后者是被终止的由NASA、NOAA和美国国防部联合国家极地轨道业务环境卫星系统（NPOESS）向JPSS过渡星。该星运行大约11年后，燃料将耗尽，因此JPSS-2的发射正是时候。

在JPSS-2载荷中，集中了美国卫星企业的智慧。例如：1）雷神航天和机载系统公司提供了可见红外成像仪辐射计套件（VIIRS），该套件收集22个光谱带中的云图像和其他数据，以帮助科学家更好地了解全球天气和气候模式。雷神公司是JPSS-1及其前身Suomi卫星类似仪器的供应商。气象界对VIIRS提供的数据表达了压倒性的积极反馈，VIIRS在低光图像方面树立了新的基准，并证明自己是开发高度准确、及时的预报不可或缺的工具。2）JPSS还搭载了与NOAA-20不同的臭氧测绘仪，该仪器由Ball Aerospace公司研发，包括臭氧测绘和剖面仪套件，该设备与Suomi NPP上的类似。3）来自L3Harris的交叉轨道红外探测仪，来自诺斯罗普格鲁曼公司的先进技术微波探测仪，来自雷声公司的可见红外成像辐射计套件。

2022年，NOAA完成了业务卫星换代的关键过渡。从2020—2040年一个较长周期看（图3）。新、旧卫星转化加快。

1.2 欧洲第三代静止卫星成功发射

欧洲气象业务卫星也开始了换代，其中，2022年底发射升空的第三代静止气象卫星（MTG-I1）尤其具有重要意义。这颗全新的气象卫星携带两个全新的仪器：欧洲第一台闪电成像仪和一个灵活的组合成像仪。闪电成像仪能捕捉天空中的单个闪电事件，这是地球静止气象卫星首次具备探测欧洲、非洲和周边海域闪

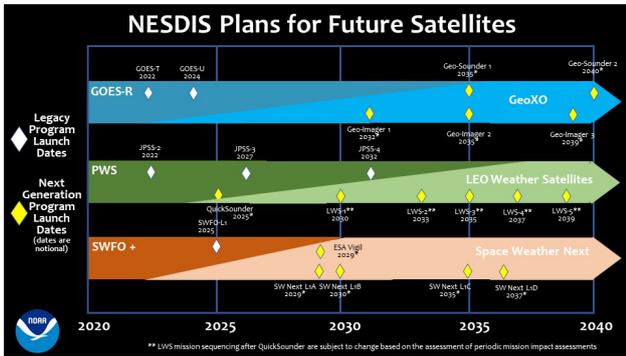


图3 美国NOAA卫星计划(2020—2040年)

电的能力,持续监测地球圆盘80%以上的闪电放电,这些闪电放电发生在云层之间或云层与地面之间。两种探测载荷协调,能构建快速变化事件的图像,成像仪将在短短10 min内扫描整个地球圆盘,每2.5 min扫描一次欧洲和北非地区。

MTG-II是构成完整MTG系统的6颗卫星中的第一颗,它将为未来20年的天气预报提供关键数据。在全面运行中,该任务将包括两颗MTG-I卫星和一颗串联工作的MTG探测(MTG-S)卫星。

除了业务卫星,在科研星方面欧洲也走到了世界前列。在过去4年中,欧空局(ESA)的“风神”卫星一直在提供来自太空的地球风的剖面图,改进业务天气预报、气候模型等,这样的成就得益于其新颖的激光技术。“风神”卫星为欧洲带来了35亿欧元的经济效益,而后续任务,即目前研发中的“风神-2”卫星,可能会使这一数字增加1倍以上。这颗期待中的科研卫星的后继星,用ESA的语言描述,已经被过渡订购(oversubscribed),即将成为科研卫星转化为业务卫星的经典。

风神卫星所属的EE(地球探索者)系列卫星已经呈现丰硕回报态势。未来,欧洲还将在地球观测领域投入27亿欧元,确保已有和计划中的项目以及更多创新项目。

2 AI或成就更好的天气气候乃至地球系统模式

2022年是英国人理查孙尝试手工数值天气预报(NWP),发表第一本NWP著作《数值过程天气预报》(Weather Prediction by Numerical Process) 100周年。2022年8月,著名科学期刊《哲学学报A:数学、物理和工程科学》出版了“动力系统中的数据驱动预测”专辑,这是该刊继2021年出版了其他相关主题专辑,如“物理流体动力学中的数学问题”“复杂系统中的传输现象”“天气和气候模拟的机器学习”等后,从动力学、物理学、复杂系统、计算数学和气象科学等多个

视角,全面介绍以机器学习(ML)为代表的AI技术对包括天气气候预测等不同领域,数据驱动模拟技术革命性的促进所涉及的各种科学问题。该专辑直面动力系统的预报问题,与100年前理查孙的追求一致,但百年后的大数据,又给出了驾驭动力系统的另一条途径:即数据驱动。

然而,以数据驱动为特征的包括NWP在内的动力系统预报,并非另起炉灶。相反,在气象领域,过去百年,尤其是1950年NWP在世界上首台计算机上取得成功后的70多年,积累的大量模式模拟结果数据,是数据驱动AI类NWP模式培训数据的重要来源。一些AI公司已经率先给出数据驱动天气气候预报模式的研发结果,预示了这个领域更广泛的提升空间。

2.1 ECMWF预报水平继续保持全球领先

2022年春季,ECMWF技术咨询委员会的评估结果显示:2021年,ECMWF全球预报模式总体得分领先全球。与其他主要气象中心相比,ECMWF中期预报的高空大气参数预报水平继续保持领先(图4)。就地表参数而言,特别是在短期预报方面,其他一些中心的预报水平正在向ECMWF靠拢。

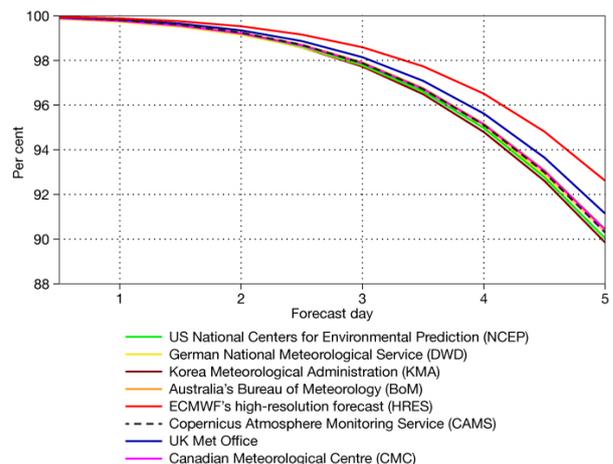


图4 2021年全球主要气象中心北半球500 hPa高度场预报ACC变化:前三甲(5 d)分别为ECMWF、英国和加拿大

ECMWF十分注重提高全球数值天气预报的网格分辨率。在1979年的第一次中期业务预报中,网格分辨率大约为200 km。之后,网格分辨率显著提高:1991年约为60 km,2006年高分辨率/集合预报为25 km/50 km,2022年高分辨率/集合预报为9 km/18 km。下一步模式版本升级48r1即将在2023年春季实施,主要内容包括:集合预报水平分辨率提高到9 km;每日开展101个集合成员的延伸期预报(2周到1个季度之间的预报);增加多层雪方案。此外,48r1还将引入一个新的、有效的、简单的迭代算法来

计算半拉格朗日平流，它涉及到热量、动量、水分和大气成分的传输。

过去3年，ECMWF不断加大探索AI计算改进模式性能之路，几乎在模式系统全链条，大量引入借助AI的新技术，或者改进算法，或者减少计算成本。ECMWF已经开始着手研究以下两个领域的仿真器：辐射方案ecRad（与英伟达公司合作）、重力波拖曳参数化方案（与牛津大学合作）。

ECMWF于2021年1月发布了《ECMWF未来十年机器学习路线图》。其目标是与成员国和合作国以及欧洲的天气和气候建模社区合作，充分利用机器学习，以期到2031年，机器学习能够完全融入数值天气预报和气候服务中，并在工作流程的许多领域改进数值预测和预报的释用。

2.2 美国 NOAA 下一代社区模式——统一预报系统 UFS 渐露端倪

2014年以来，美国为重回其数值预报世界领先地位，开始研发其下一代数值预报模式——统一预报系统（UFS）。统一预报系统是一个可提供短期、中期、次季节-季节、飓风、空间天气、近海、空气质量预报等多个应用的统一框架。其基础架构包括科学组件、配套基础设施和系统架构，基础设施的骨干是NOAA环境建模系统NEMS，通过统一的基础架构实现了系统中各组件实现“互操作”性。

从2020年开始，统一预报系统已经在NOAA业务体系中逐步落地，并在GitHub上发布其应用软件的源代码。2021年3月4日，统一预报系统开放短期天气应用v1.0。2022年6月23日，开放短期天气应用v2.0。根据统一预报系统业务实施计划表，到2024年将实现GFSv17和GEFSv13的业务化统一。届时，目前独立运行的总计21个业务模式系统将被更加集成的8个系统取代（图5）。

在业务实施效果上，统一预报系统也取得了一定成绩，其全球模式GFS在2021年3月有整整一周击败了ECMWF。取得这样的成绩，其中一个重要的原因就是NOAA首次真正实现了开放式创新——NOAA和NCAR以及高校、企业在模式研发上的联合创新，引领

业务数值预报模式走向了“众筹”之路。

2.3 英国、日本的模式研发和改进渐入佳境

2021年5月，英国气象局下一代模式的动力核心GungHo开始运行，第一次得到的天气和气候模拟结果非常令人鼓舞，结果与英国统一模式（UM）相当。

GungHo项目诞生于2011年，旨在规划一个新的动力核心——立方体球体网格的动态核心，以开发下一代数值模式系统NGMS。GungHo由英国气象局自然环境研究委员会和科学技术设施委员会召集了来自英国各地的研究人员和软件工程师一起设计和实现。为此，设计和建造了一个新的基础设施LFRic，它与GungHo协同工作；在可以使用什么网格方面更加灵活；以及对未来超级计算机体系结构的变化更加灵活。未来GungHo和LFRic将与数据同化系统集成，并与海洋和化学模型耦合。GungHo和LFRic计划在2026—2027年投入运行。

日本气象厅利用新的大气海洋耦合模型提高季节预报精度。日本气象厅2022年发表的厄尔尼诺监测速报、三个月预报、暖冬季节预报产品，已经开始使用新的大气海洋耦合模式，其预报可靠度比以往更高。新的大气-海洋耦合模式不仅提高了大气模式和海洋模式的分辨率，而且通过精细化积雨云的产生、发展等计算，改善了以厄尔尼诺现象为代表的大气和海洋变化的预测精度，体现在三个月预报和暖冬季节预报中高温和低温等天气特征预报的改善上。

2.4 全球数值预报模式向多样化和“大众”化方向加速发展

基于WMO的最新统计，193个成员中拥有各类模式的成员不断增加（图6）。一方面因为模式的门槛不

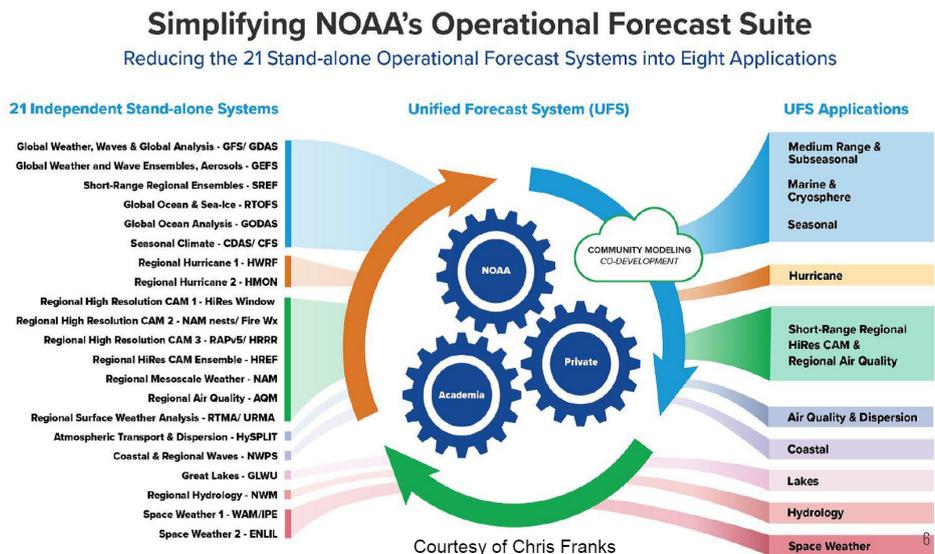


图5 NOAA通过UFS整合当前独立的预报系统

断降低，气象业务引入模式和维护带来能力的巨大提升；另一方面，全球模式研发开源和研究与业务并行趋势，为研究能力不足的国家地区引入模式开展业务预报和模式升级带来可行的技术路线。尽管如此，运行成本较高的全球业务NWP模式的机构依然不到30个，更多的国家和地区选择性价比更好的有限区域模式（75个），满足3 d左右的预报要求。值得注意的是，临近预报模式和海浪模式均超过40个，是发展最快的领域和模式类型，表征气象领域针对灾害和海运的优先考虑。

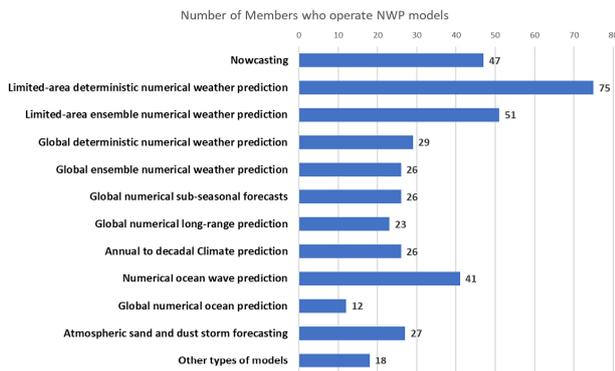


图6 WMO成员最新模式类型统计

与天气预报模式相比，包括气候模式研发的全球气候研究呈现出更加广泛的合作态势，其中，美国、中国和澳大利亚成为最有影响力的国家，牵头开展更多的双边和多变气候研究。

3 气象服务和减灾：飓风伊恩 (Ian) 带来的反思或会带来改变

2022年是历史上并不多见的连续拉尼娜年，带来的气候异常和气象灾害在全球分布较为广泛，而飓风伊恩造成重大灾情^①，引发全球变暖带来的危机感更加迫切，气象服务，尤其是并不稳定的模式预报结果，最好的与公众沟通和交流的方式是什么，成为媒体和学界2022年后3个月热议的问题。

11月，一份专业期刊的主编在社论里，结合9月伊恩飓风带来的惨痛灾害，指出目前全球风行的气象部门台风预报锥状图(“cone of uncertainty” graphic)是时候改变了。作者认为，锥图作为预报的交流工具，是一个危险的失败！目前的情况是，疏散是昂贵的，而误报却是常见的。于是，公众总能找到不撤离的理由，尤其是锥图中的一连串中心位置是最可能的预报地点，连起来不就是一根铁轨？既然我家不在铁轨上，是不是可以不撤？

^① 据NOAA于2022年12月一次会议信息，该飓风导致140多人死亡。慕尼黑再保险公司估计，该飓风带来的保险覆盖损失高达600亿美元，总计财产损失达1000亿美元。

2022年12月，《技术生活新闻》(TechLife NEWS)杂志更是将飓风伊恩的悲剧指向预报模式。这期刊载的以《一个计算机预报模式是怎样把伊恩搞砸了的》文章中，详细分析了预报、锥形图预警等环节各自出现问题，以及这些问题累积后造成重大人员损失的后果。先是NOAA的预报模式出现了严重错误，导致伊恩实际路径虽然没有跨出预警锥形图，但却来到了图形的边缘。另外，锥图也较少考虑飓风带来的风暴潮影响，伊恩代表的飓风，其风暴潮的致命性几乎与正面对台风难分伯仲。

2022年10月，美国学者在BAMS上发表的最新文章，调查了深受飓风灾害之苦的佛罗里达州各阶层民众，在2847份答卷中，针对锥状预报图5个问题，完全正确仅18%的。作者认为，没有一刀切的预测产品，应该为每个群体采取不同的预报产品形式或者是有益的方式。锥图的替代方案已经有人考虑，用4只箭替代，好处是即照顾了不确定性，还消除了轨迹的“中心”。

NOAA也在飓风伊恩后，反思这场被媒体称为“本可避免”的灾难。该机构借第三方给出的灾难发生地与飓风路径解析图(图7)，指出脆弱性、忽视预报和老年人固执居家不转移，是造成灾难的决定性因素。实际上针对“伊恩”的预报，虽然ECMWF模式总体预报最佳，但在路径和强度预报上英国和美国NOAA模式表现最好。这就带来了并没有超出预报误差的飓风预报，面对佛罗里达州时，该发生的灾害几乎都发生了，那么症结到底在何处，值得更多的人思考。

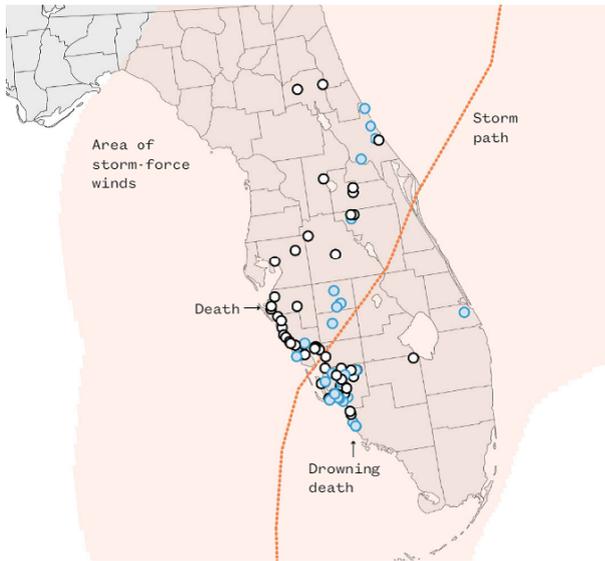
4 结语

2022年，全球气象科技继续在发展的快车道上奋力前行，突出的表现和反映出的趋势令人难忘。首先，全球气象发展已经形成国家主管部门与整个业界的联动，为未来在气象研究、业务能力、服务“最后一千米”全链条协同响应打下基础。这一点，从美国新的军用气象卫星系列主要承包商及NOAA在2022年发射的两颗气象业务卫星研发机构涉及目前国际上拥有最先进遥感探测技术的军工复合体，以及欧洲全力调动商业公司力争在地球观测领域走在世界前列，都给出最明显的例证。

再者，天气气候模式，乃至地球系统预报系统的开发，作为气象事业的“芯片”工程已经走到一个历史的转折点。AI计算全面介入的质量和深度，成为未

Where Hurricane Ian killed

More than 140 people died because of Hurricane Ian. Here is where 86 of those deaths took place.



Source: Staff reporting, Florida Department of Law Enforcement
Graphic: Nigel Chikwaya / NBC News

图7 伊恩飓风路径及造成死亡和重伤地理分布

来竞争成败的关键，而企业携AI方面优势的“捷足先登”或将开始改变世界NWP格局。自英国人理查孙在尝试手工制作NWP失败，发表最早探索数值天气预报的著作《数值过程天气预报》100年来，NWP彻底改变了气象和大气科学的学科发展路径和在科学界的影响力。2021年2位气象学者获得诺贝尔物理学奖，也是始终把物理学作为母学科的气象科学，回报物理学发展的最好代表。

从2022年最新进展来看，AI技术实际上已经开始为气象科学发展范式的下一个改变做好了准备。

第三，卫星遥感能力的创新已经成为地球系统视角下气象科技竞争的重中之重。2022年，各国气象“出彩”的机会，几乎全部来自气象卫星的升级换代。其中尤其值得关注的是ESA科研卫星“风神”的快速业务化，彰显了“转化”（R2O）的迫切性：业务能力除了“万无一失”，更要“得寸进尺”，快速跟进技术换代。“风神”卫星之所以在第一时间被业务化，全凭“特色”使然：风场观测，涉及物质流动交换，是天气气候变化“动因”的直接解读，是观测网（尤其是海上）的“准盲区”，代表遥感平台直接“接驳”业务模式开启风场涉及动量、热量从不平衡到平衡循环发展的最直接表征，因此也是模式模拟的关键（尤其是涉

及初始条件和验证、诊断等过程）。

2022年1月发生的汤加火山喷发，被更加严密和准确的全球无缝隙气象监测网捕捉并被证实火山物质到达58 km的中间层，提示科学家之前判断的一些重要火山喷发，其火山气溶胶仅仅到达平流层低层可能有误。2022年发生的这类现象和最新观察数据的解读，可能会纠正和改变我们对过去气候变化事实和机制的认知，代表了气象科学进步不可阻挡的进程。

前ECMWF主任索普先生，在2022年12月发表的以“全球气象事业”为主题的系列文章里，将这一伟大的事业比做一张由个人、公共、私人 and 学术机构共同面对的复杂且全球相互关联的“拼图”。各方努力与合作是为了给出一张清晰和完整的图片，而审视这张图片的镜头，是气象价值链。

公元2022年11月，国际计量大会确定，在国际单位制（SI）中引入4个前缀并立即生效：ronna和quetta（分别代表 10^{27} 和 10^{30} ），以及ronto和quecto（分别代表 10^{-27} 和 10^{-30} ）走进大众。虽然学者面对它们心情或许是复杂的，但2022年，因新生量的量纲单位及其代表的科技发展向更广、更详尽迈进，如同气象科学的走势一样，将成为值得铭记的一年！

深入阅读

樊奕茜, 肖芳, 贾朋群, 2022. 美国国防气象卫星 (DMSP) 60年发展回望和换代计划初探. 气象科技进展, 12(3): 2-8.

贾朋群, 关敏, 张萌, 2022. 欧空局EE10“和谐”卫星: 如何让地球系统观测走向和谐? 气象科技进展, 12(5): 2-5.

贾朋群, 唐伟, 张萌, 2022. 数据驱动: 理查孙手工NWP实践百年后的新引擎. 气象科技进展, 12(6): 2-6.

谭娟, 樊奕茜, 贾朋群, 2022. 天基遥感观测如何改变地球科学的面貌——ESA活力星球2022年研讨会评介. 气象科技进展, 12(4): 80-84.

Borenstein S, 2022. How one computer forecast model botched Ian. Techlife News, 2022-10-12.

Haiden T, Richardson D, 2022. Forecast performance 2021. ECMWF Newsletter, 171: 4-5.

Iannotta B, 2022. It's time to replace those hurricane cone graphics. AEROSPACE, 60(10): 4.

Proud S R, Prata A T, Schmauß S, 2022. The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano reached the mesosphere. Science, 378(6619): 554-557.

Stephan S, Dorothy K, 2022. Summary of NOAA Response to the Priorities for Weather Research (PWR) Report, NOAA SAB Meeting, 30 November and 1 December, 2022.

Thorpe A, 2022. The global weather enterprise, part 1: the jigsaw pieces. Weather, 77(10): 349-351.

(作者单位: 中国气象局气象发展与规划院)