

AI技术的持续融入和业务能力的有效提升 ——回望2024年全球气象科技发展的若干特点

■ 王卓妮 唐伟 雷蕾 贾朋群

“万物皆有AI”已经在2024年初步呈现，全球在气象观测、预报、服务、研究和管理等方面无不被注入了AI/DL（人工智能/机器学习）要素，呈现了既有遵循物理路线的持续进步，又不乏借助AI/DL让发展更具跨越性、变革性的特征。其中，气象机构与AI企业深度合作创新、气象卫星和雷达更新换代的加速推进、数字孪生技术催生新信息和服务业态，以及气象发展规划、管理在量化和可控两个方向的强化等，是2024年度尤其值得追踪和关注的内容。

中图分类号：P4

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.001

2024年岁末，人工智能（AI）学者荣获年度诺贝尔物理学奖，将大约于5年前开始的AI技术浪潮推向了顶峰。当下，全球气象学界再结合2021年气象学者真锅淑郎等因发展数值天气预报模式荣获诺贝尔物理学奖而有了更深入的思考：正如真锅淑郎等科学家的获奖主要研究成果源于数十年前，2024年诺贝尔物理学奖所表彰的AI基础性研究始于20世纪80年代初，这表明未来跨越式的成就往往源自今天的踏实创新。诺贝尔奖的启示或许还包括气象回归“物理学应用领域”的定位，这是能推动学科发展站到更高层面，具有更广阔视野的一个角度回归。此外，作为纳维-斯托克斯（N-S）方程的重要应用领域，数值天气预报（NWP）技术（始于理查孙1922年手工数值预报）经过整整一个世纪的发展，已经给气象或大气科学带来了全新的变革。在新的地球系统科学理念下，无论是在物理驱动或是数据驱动的背景下，气象或大气科学将依然是地球科学中重要的领头学科之一。气象或大气科学学者率先统一确立并几乎完美实践了一些核心概念和技术路径，包括数据同化、集合预报、圈层融合、数据再分析等。如今，在对地球系统更深入的研究中，气象或大气科学可以通过物理和数据“双引擎”驱动走得更稳、更远，并且辐射到水文学、地理学等地球科学的其他分支，加快地球系统/地球气候系统科学的发展和应用。

2024年7月，在美国国家海洋与大气局（NOAA）召开的预报能力创新学术会议上，学者概括了AI技术带来的预报能力的提升：物理驱动数值预报模式的第

10天预报技巧在过去10年提高了10%，而欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的数据驱动模型AIFS同样的预报技巧在过去6个月里提升了7%。这样的预报技巧提升速率对比，无疑让气象科学成为被AI技术和数据驱动理念成功“撬动”的重要领域之一。实际上，在包括观测、模拟和服务整个气象价值链上，“万物皆有AI”已经在2024年初步呈现。

本文主要基于2024年国际上气象领域相关的文献信息，特别是世界气象组织（WMO）以及主要气象业务和学术机构召开的学术会议信息，试图从一些视角回顾和分析2024年全球气象或大气科学领域的最新发展态势和演变脉络。特别关注在不断增长的业务服务需求下，气象或大气科学全面利用AI等新技术显现的新交叉融合领域，并分析这些新理念、新技术视角带来的新增长点。

1 地球系统模拟从物理动力学模式转变到与数据驱动大模型“双车道”并驾齐驱，影响深远

科学计算带给现代气象学三个快速发展的“革命”阶段：即伴随电子计算机发展初期NWP模式的成功（1950年）后模式预报能力逐步提升的“静悄悄”的革命（1980—2020年）、2015年以来高性能计算技术推动的包含更多中小尺度物理过程的高精度模式引发的“数字革命”（2015年至今）、AI推动的数据驱动预报模型引发的预报方式的“机器学习革命”（2022年至今）（图1）。值得注意的是，后两个阶段都只有起点而尚没有结束，换句话说，这两次革命都还没有走到

第一作者：王卓妮（1982—），Email: wangzn@cma.gov.cn
资助信息：国家自然科学基金项目（42342025）

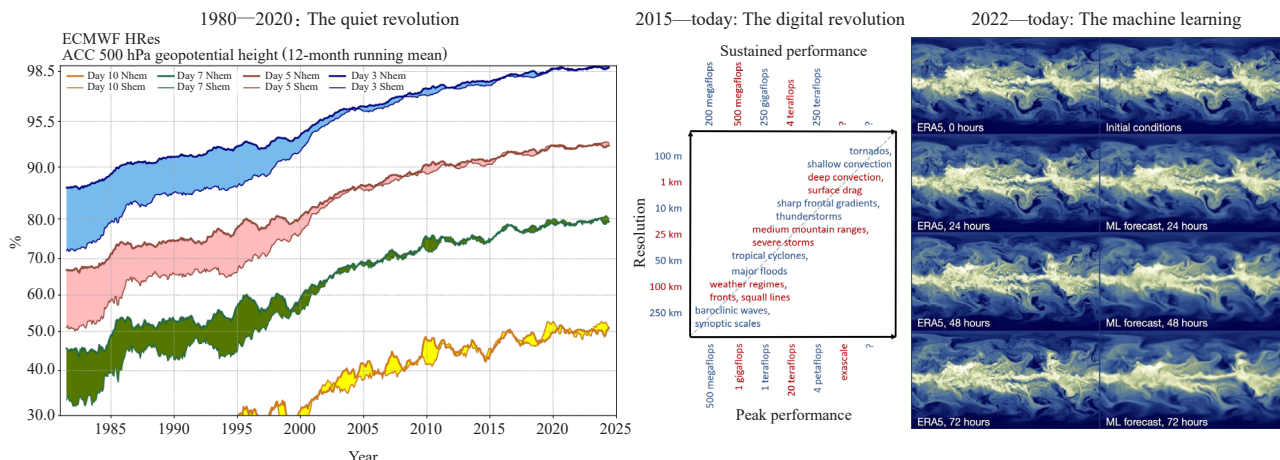


图1 1980年以来NWP发展的三个阶段 (来源: Wedi, 2023; Dueben, 2024)

终点，当下正是这两个革命携手共同发展时期，这无疑将给气象科学发展带来发展史上不多见的潜力、活力和持续力，是气象事业的繁荣期、扩展期和能力提升期。

分别从2015年和2022年开始的数字革命和机器学习革命，不仅在时间上紧邻，在本质上也存在很多共通和相互影响的要素，它们在21世纪20年代交汇，引发科学史上不多见的碰撞。这样的激烈和“多彩”的对话，是否最终能焕发出“指数级”的变革，不仅让全球气象界在2024年满怀期待，实际上也预示以NWP为代表的现代气象预报来到了又一个十字路口。尽管这样的十字路口不一定让以后的道路非此即彼，但物

理和数据驱动都会受益于AI并在其加持下以更多碰撞和融合的方式携手发展，这样的发展范式或能更全面地诠释气象现象的本质。2024年初，ECMWF学者在美国气象学会（AMS）第104届年会上指出，面对AI机遇和挑战，气象界唯一不可能发生的情况就是保持现状。这位专家甚至提出，当前的NWP工作流程或将终结，替代的方式可能有完全混合NWP和AI；物理模式仅用于同化而预报由数据驱动模型完成、训练基于分析数据；所有预报由数据驱动实现、训练基于观测等三种不同的方式（图2）。学者认为，高分辨率传统NWP系统和AI的完全混合研发是当务之急，它将为未来实现研究到业务的根本转化奠定基础。



图2 物理地球系统数据同化（DA）和预报（FC）的实现方式 (来源: McNally, 2024)

2024年，AI技术在气象领域的快速应用还体现在数据、模型建立等方面，其中很多实践更多更充分地体现了国家气象部门与研发机构和企业之间的协作，这样的协作不仅从技术层面，而且也在运作机制方面对全球气象事业发展带来深刻的影响。一些重要的主题概述如下。

1.1 气象数据和软件的FAIR原则成为大模型发展的重要推动和支撑

2024年9月，WMO召开了以未来数据基础设施（Future Data Infrastructure）为主题的研讨会，进一步明确了数据作为基础设施组成部分在未来的重要地位。会议探讨基于未来数据调整的应对方式，例如迁

移更多的数据，将后处理和产品创建等流程迁移到大数据所在的位置，通过设立标准和提高互操作性等方式降低系统运行的障碍，等等。在科学界，FAIR（Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable，可查找、可访问、可互操作和可再用）是开放数据和软件的原则，对于海量数据，特别是对AI技术更加友好的标记数据（图3）尤其重要。

2024年6月，ECMWF将其预报系统IFS更新到48R1版后，集合预报模式分辨率达到9 km，模式产品格点数高达650万，与之前的高分辨率确定性预报产品相当。该业务系统每天进行4次预报，数据量从80 TB增长到了300 TB。如何从TB量级的数据中提取

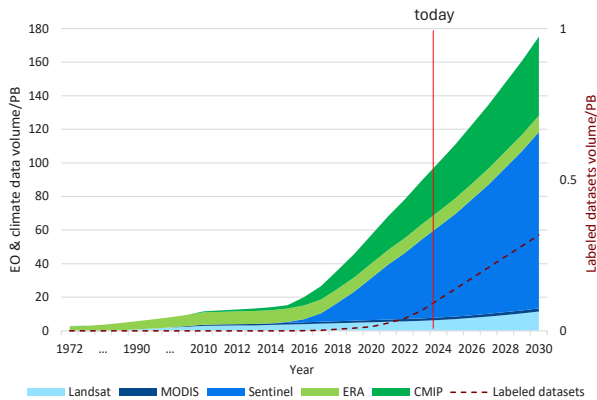


图3 1970—2030年全球地球观测和气候数据的体量变化和标记数据比例 (来源: Zhu et al., 2024)

比特级的高效决策信息，这一需求正是借助AI技术实现预报全链条创新的重要动力。

英国气象局强调数据可视化是大数据信息提取的重要方法，该局分别在气象卫星和超级计算机方面投入2.4亿和4亿英镑（折合21.7亿和36.2亿元人民币），其中300万英镑投入观测和模拟结果的可视化上。这样的可视化无疑将带来更多经济回报（图4）。

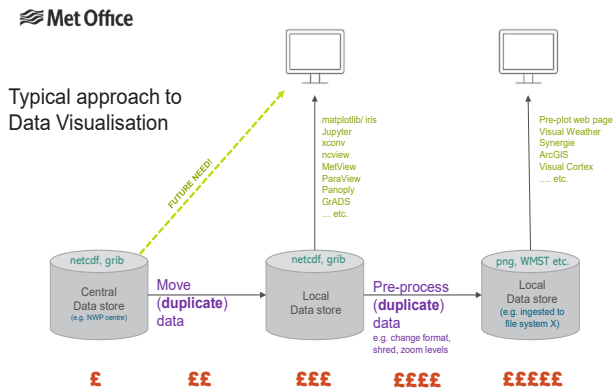


图4 数据可视化步骤和产生效益过程 (来源: Bain, 2024)

1.2 发展中国家积极抓住机遇

虽然基于AI的全球中期天气预报模型最早由美国知名AI企业推出，但以中国为代表的广大发展中国家也奋起直追。除了中国华为、中国气象局、清华大学、复旦大学等推出的全球中期预报AI模型外，发展中国家在临近预报上也开始广泛利用AI预报。2024年12月，在WMO召开的WIPPS科学委员会领导人会议上，列举了亚洲、拉丁美洲和非洲的发展中国家气象机构或组织和企业开发的基于AI的临近预报产品。这些提前时间为2~6 h的临近预报，主要利用AI技术，基于包括风云系列在内的气象卫星和雷达探测数据得到雷暴、定量降水预报（QPF）等产品（图5）。WMO还计划在2025年5—7月，由中国气象局在深圳主持开

展亚洲模型之间的比较活动，对比的临近预报领域包括中国南方和东南亚闪电和中国南方降水等。此外，非洲还建立了谷歌公司和德国气象局等参与的相关试验平台。

1.3 气象AI模型健康发展不可或缺要素：基础模型、工具和社区开发理念

不同应用领域AI模型的建立，一般需要基础模型（FM，又被称为底座模型等）的支撑。FM是在海量、多样化的数据集上以与任务无关的目标进行预训练形成的大型模型。FM提取的特征可以作为建立特定任务模型的基础，并按照任务的目标进行微调。

2024年5月，在欧洲航空局和ECMWF联合主办的“机器学习与地球系统观测和预报”研讨会上，德国学者列举了地球和气候FM必须具备的8个特征和3个高度理想化的特征（图6），其中最后一个特征就是AI协助。

美国国家航空航天局（NASA）借助其在地球观测数据积累方面的优势，较早关注利用AI的科学基础模型研发，强调以数据为中间位的上游（数据管理）和下游（数据分析和应用）中FM的重要作用。针对天气和气候，NASA最新构建了名为“Prithvi”的FM（图7），该模型的主要技术目标中，强调了多区域、多分辨率和多数数据集的功能，以及可以综合选定观测结果等。ECMWF于2025年2月启动天气发生器（Weather Generator）项目，将发展天气和气候基础模型，让AI技术更好地应用于天气、气候预报预测、可再生能源、洪水预报、粮食安全等22个领域。

在工具开发方面，ECMWF与多个欧洲国家的气象局（西班牙、丹麦、德国、芬兰、意大利、荷兰、挪威、法国、瑞士和比利时）在2024年10月联合推出一个基于Python的风神（Anemol）系统，用于帮助创建基于AI的天气预报模型。Anemol的目标是为构建最先进的数据驱动模型提供关键组件，帮助国家气象水文部门使用其数据训练模型，并在业务中运行。在美国，美国国家大气研究中心（NCAR）和NOAA等机构合作开发了第一代CCPP（通用社区物理包）软件包，各不同数值预报模式可以基于CCPP直接调用给定的物理参数化套件，即模式之间具有物理互操作性，2024年9月CCPP已更新到第7版。为推动NOAA统一预报系统（UFS）研发进程，NOAA推出一个统一工作流程工具包（UWTOOLS）。UWTOOLS拥有各种UFS组件的驱动程序，包括模式、耦合配置、统一后处理器（UPP）、数据同化框架（JEDI）组件和跨尺度预测模型（MPAS）等。UWTOOLS还允许用户自

Region	Products Type	Product Providers	Source data	Lead time (Hours)	Spatial-temporal resolution	Targeted Product Receivers
Asia	Thunderstorm	CMA	FY4B	2	15 min/4 km	VNMHA, TMD, etc.
		CIMSS	Himawari 9	2	10 min/2 km	
	QPF (Quantitative precipitation forecast)	Microsoft	FY4/Himawari 9/radar	2	4 min/1 km	VNMHA, TMD, etc.
		HKO	FY4/Himawari 9/radar	4	10 min/2 km	
		KMA	GK2A/radar/AWS	6	10 min/1 km	
		CMA	FY4/radar	3	10 min/1 km	
Latin America	Thunderstorm	CIMSS	GOES	2	10 min/2 km	Brazil, Argentina, Mexico
	QPF	Microsoft	GOES / radar	2	4 min/1 km	Brazil, Argentina, Mexico
		Japan RIKEN	GSMaP (microwave satellites, composite IR)	6	60 min/10 km	
Africa	Thunderstorm	DWD	MTG / MSG	2	15(10) min/ 5(3) km	Zambia, Mozambique, South Africa, etc.
	QPF	Microsoft	MTG / MSG / radar	2	4 min/1 km	
		Google	MTG / MSG	TBD (potentially up to 24)	15 min/5 km	
		Japan RIKEN	GSMaP	6	60 min/10 km	

图5 发展中国家基于AI的临近预报产品 (来源: Wong, 2024)

Must-have

1. Geolocation embedding
2. Balanced geographical representations
3. Scale awareness
4. Wavelength embedding
5. The time variable
6. Multisensory
7. Task-agnostic
8. Carbon minimized

Highly desirable

9. Uncertainty quantification
10. Physical consistency
11. AI assistants

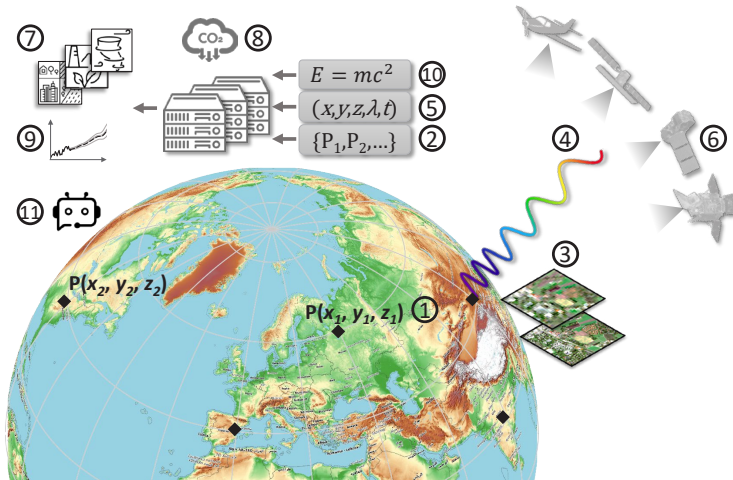


图6 地球和气候基础模型 (FM) 应具备的特征 (来源: Zhu, 2024)

**Prithvi-WxC :Foundation model for weather and climate****Technical Objectives**

- Multi-region, multi-resolution, multi-dataset
 - 1 model capable to work with multiple datasets (HRRR, ERA5, MERRA2) from 3 to 60 km.
- Supports spherical and Euclidean topology
- Generate Forecasting emulators by tuning
- Integrate select observations.

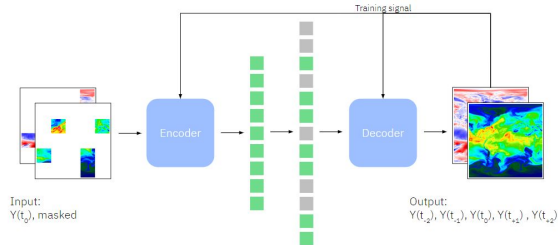


图7 NASA天气和气候基础模型Prithvi及其技术目标 (来源: Ramachandran, 2024)

主选择构建自己的驱动程序并通过UWTOOLS框架执行。该软件包还与NOAA全球系统实验室 (GSL) 开发的MPAS应用程序、UFS短期天气应用程序、UFS陆地数据同化应用程序和NOAA GSL 联合工作流程完全集成, 实现了在各种应用中利用UWTOOLS的最佳实践。

美国气象联邦协调机构ICAMS还组建了通用模型架构 (Common Model Architecture) 实施团队, 目的是促进与国际机构、模拟中心、大学和行业专家的沟通。这些模拟工具的开发, 不仅促进了AI技术的融入, 有效降低了模拟活动的门槛, 还因业务部门参与了其中元

数据、规范等的制定，从而使得更多研发成果实现快速业务化。

2 数据驱动加快观测发展，WIS 2.0带来全球气象数据新的运行图

尽管气象数据大模型的训练数据，大多采用规范性更好的气象再分析数据，但学界越来越多地意识到，大模型要想真正革命性地改变天气和气候预报，还要寄希望于更高质量、更好用（即所谓AI-Ready数据）的观测数据才有可能。2024年，活跃气象卫星数量达到约200颗，另有约100颗地球观测（EO）卫星。研究表明，如果在目前业务预报中排除卫星数据，预

报的时效将减少3 d。欧美多颗具有新功能的卫星在2024年成功发射，而面向21世纪30年代中后期全球气象业务换代卫星和地球观测卫星的布局也逐渐清晰，这些在未来可能给世界带来更多惊喜。随着欧洲空间局未来地球观测战略的最新发布和美国第二次“十年天基观测调查”（中期报告发布）渐入佳境，2024年已经开始为十年后全球地球观测遥感新格局定调。

2024年，全球气象观测每天达到8亿次，每12 h用于气象预报和服务的观测为1亿次左右，即大约1/4实时观测数据被预报模式利用，观测平台呈现地面、空中和天基全面布局和相互协作的良好态势（图8）。

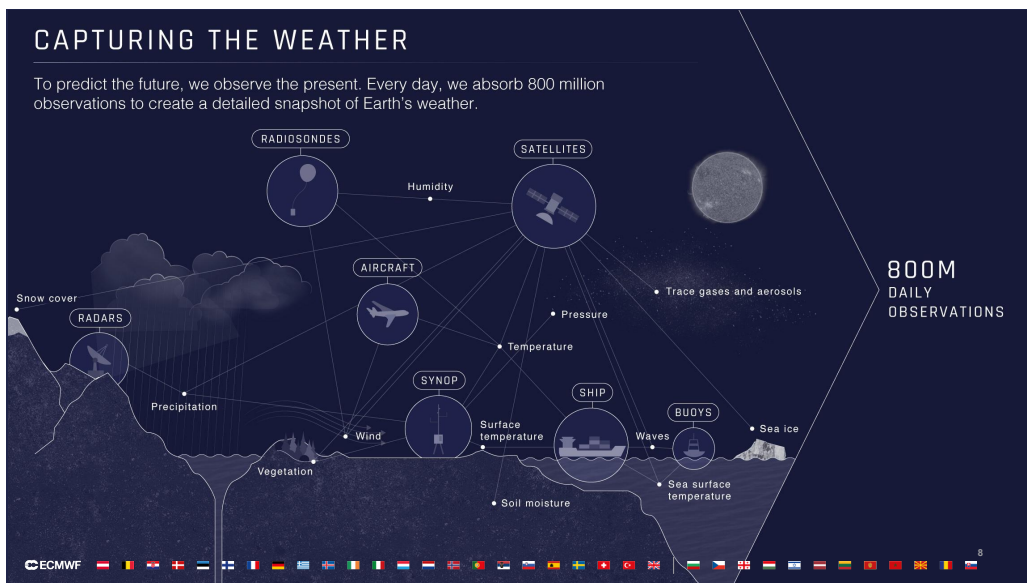


图8 全球每天气象观测达到8亿次，各种气象观测平台覆盖了地球多圈层（来源：Marsden, 2024）

全球气象观测网基本实现了对地球系统各圈层的全覆盖，虽然就观测数据量来看，天基遥感占比非常巨大，但是地面和海洋上的实地观测同样不可或缺，而且地面观测的覆盖，2024年出现相对均匀的发展趋势（图9）。

如图9所示，ECMWF针对全球地面监测的统计表明，2024年12月全球24 h地面站和船舶气象平均观测达到95569次，按照1~6区协和南极洲的分布为：6506（非洲）、19357（亚洲）、5050（南美）、8550（北美、中美和加勒比海）、15053（西南太平洋）、39306（欧洲）和1747次（南极）。

虽然WMO成员于2021年接受了以最低水平分辨率和时间分辨率获取和分享GBON（全球基本观测系统）观测结果的义务，但基本地面观测的不平衡依然在加大。目前地面观测的主要稀疏区分布在北非、南太平洋小岛屿国家等区域，这些区域满足GBON数据要求的国家仅占9%。这样的观测短板，未来几年有

望通过WMO提出的SOFF（Systematic Observations Financing Facility，系统性观测融资机制）得到缓解。

2.1 气象卫星更新换代进入实质阶段，卫星性能验证新理念上线

2024年6月第四颗也是最后一颗GOES-R卫星（GOES-U）发射，计划在2025年4月替代GOES-E卫星投入运行。

扩大卫星性能验证试验。2024年卫星观测的一个重要改变静悄悄地发生了，围绕卫星发射前后利用飞机、高空气球等手段进行验证和试验观测，以及卫星间的对比，尤其是在发射巨型卫星前用小卫星探路或类似PACE（2024年2月发射）和GLIMR（计划2027—2028年发射）卫星通过部署功能类似，但技术上有改进和新探索的“姊妹星”等。为了准备NOAA的GeoXO大气成分仪器ACX（紫外-可见光谱仪）数据反演气溶胶的算法，NOAA从2023年8月开始利用TEMPO 1B数据进行测试。欧洲的EarthCARE卫星2024年5

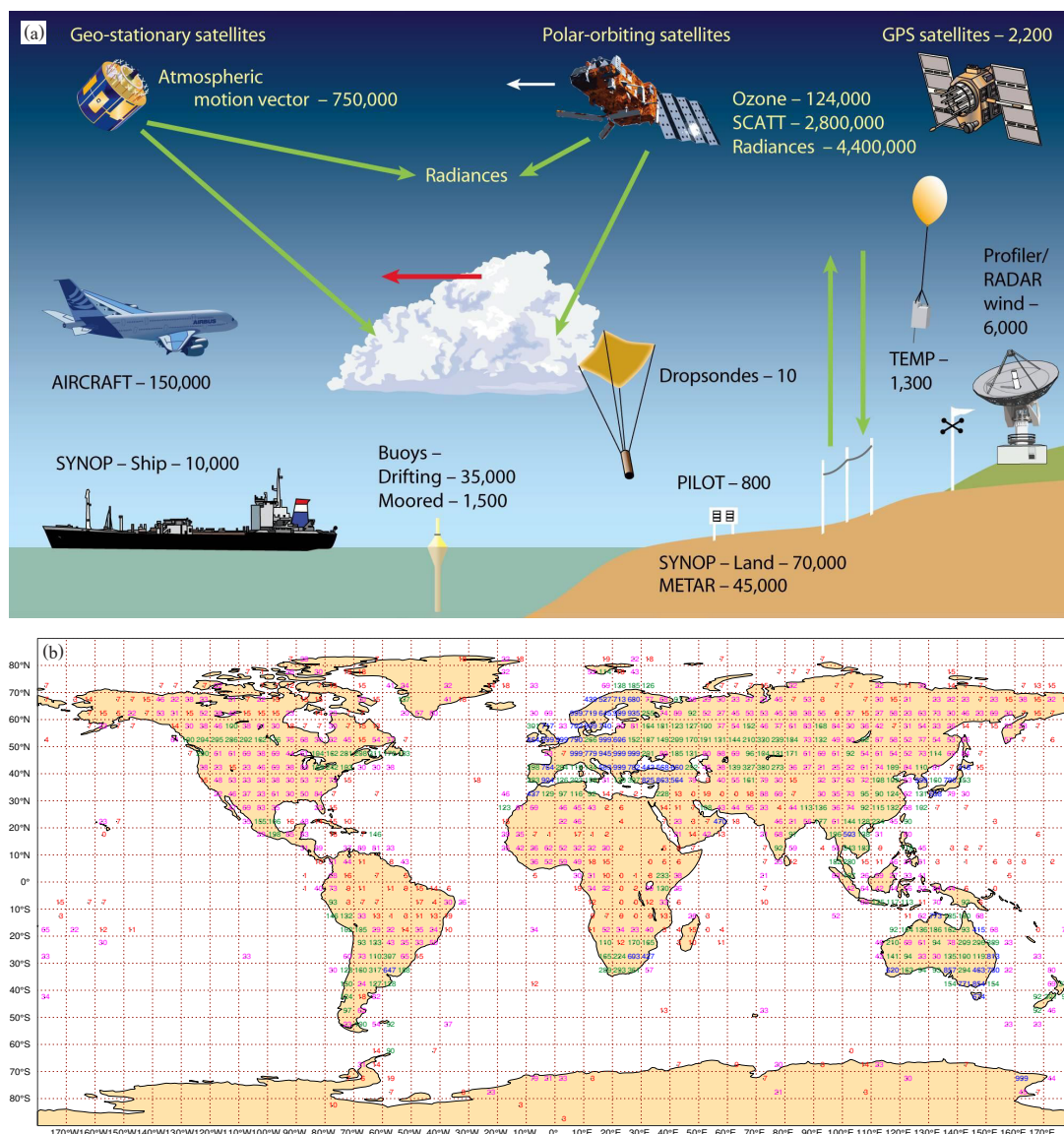


图9 不同平台观测次数 (a) 和2024年12月全球陆地和船舶24 h平均气压可用观测数据 (b) (来源: ECMWF, 2025)

月进入轨道后, 总计来自60多个机构组成的国际专家团队, 通过飞机、气球、地面站、研究船和无人机进行了大量验证实验活动(图10)。验证活动针对星上不同载荷展开, 涉及九架携带了模仿EarthCARE仪器的飞机, 飞越大西洋、北美和欧洲。许多飞行都经过仔细安排, 以便在EarthCARE卫星下飞行, 得到与卫星准同时测量的云和气溶胶。这种需要跨国多方协同和高层统筹设计的验证, 目标就是让卫星遥感观测更加准确和精细化, 或在改变气象卫星观测的规则。

合作让卫星效益放大。2024年末, 日本和澳大利亚气象部门签署了新战略协议, 根据该协议, 日本将向澳大利亚提供该国任何区域高影响天气事件每2.5 min的图像。日本葵花-9号卫星位于140.7°E, 这一位置使卫星能够出色地覆盖澳大利亚地区。两国自

1977年开展合作以来, 最新协议无疑意味着在位于南半球的澳大利亚需要的情况下, 葵花卫星可能启动加密观测, 让一颗卫星照顾到南、北两个半球。

购买和使用商业卫星数据的政府和学术机构在增加。2024年9月, NOAA签订了2份总价值超过420万美元的合同, 购买Tomorrow.io公司和Orbital Micro Systems公司的微波探测(Microwave Sounder, MWS)数据。在欧洲, “第三方任务”(Third Party Mission, TPM)理念被广泛接受, 自2008年以来, 为1.77万个以上应用开发项目提供了TPM数据, 使得更多商业化数据借助TPM被更大范围的科学界使用。

2.2 无人设备气象观测平台的业务化时代即将到来

2024年, 无人机系统(UAS)在AI分析和云计算等技术加持下, 向着实时和按需数据处理方向发展,



图10 验证EarthCARE卫星的飞机观测 (来源: Richardson, 2024)

加上燃料、电力混合推进,空中加油,蜂群无人机等技术的成熟,开始发生了彻底的变化,具备更加智能化的自主、大规模操作平台和执行更长时间任务能力,因而在不同行业和领域被广泛使用。

气象领域,WMO于2022—2024年通过召开8次无人机示范试验(UAS Demonstration Campaign)参与者会议,围绕2024年3—9月试验期(包括4月、8月和9月3个特别业务时段)开展技术和组织方面的研讨。随着全球首次无人机气象观测试验的顺利进行,全球基于无人机气象观测业务的布局 and 实现路线基本确定,示范试验展示了无人驾驶航空系统在大规模、常规和实时观测方面的潜力,让世界各国学者探讨实现这一场景需要面临的主要问题。

UAS收集了2024年3—9月覆盖全球12个国家的31

个城市,使用约50种气象观测无人机得到的大约1.2万份大气剖面资料。初步研究表明,无人机系统可以收集与无线电探空相似准确度的实际观测数据(图11)。由于无人机的可重复利用性,其平台可以用较低成本和对环境较小的影响收集气象数据。无人机还可以测量空气污染,甚至可以观测台风眼壁内的情况。目前无人机观测的主要障碍是有关机构是否允许,以及风和结冰等条件(UAS-DC中有近10%因此被停飞)对无人机飞行的限制等。

2024年11月,NOAA发布了《界定无人系统业务》(Defining Operational for Uncrewed Systems, UXS),为包括无人机和海上无人艇等组成的无人系统气象和海洋观测全面业务化确定了原则和方向。据2024年发表的无人机年度报告,2023年NOAA无人机飞行超过

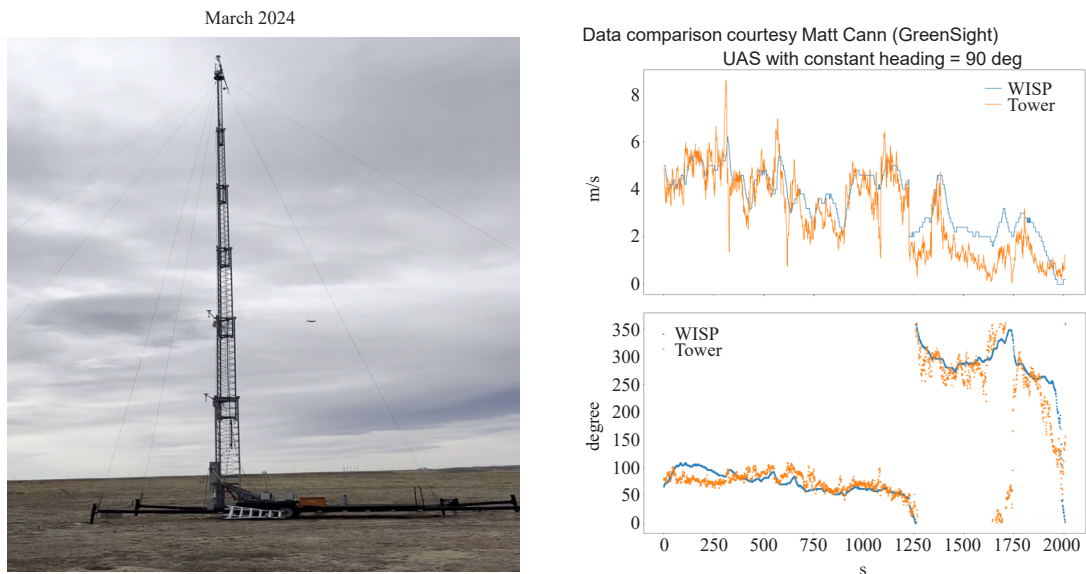


图11 WMO UAS-DC期间无人机与观测塔观测结果对比 (来源: Pinto, 2024)

1900次，总计飞行时间超过2.8万min，按照飞行目的，应用领域的前3位为动物调查、培训和水文制图。

2.3 圈层界面观测：认识地球系统运作的关键

界面（Interfaces）观测是指对多个地球系统组成部分（包括大气、陆地、海冰、雪和海洋）敏感的观测。界面观测是NWP和再分析的关键。与实地观测

相比，卫星获得的界面观测资料具有独特的应用潜力（图12），可以同时驱动各种地球分系统，为地球系统预测模型提供一致的初始和边界条件。2024年11月，ECMWF召开了以界面观测为主题的学术会议，探讨了气象卫星遥感平台的发展。

云、气溶胶和辐射的相互作用，是地球系统模拟

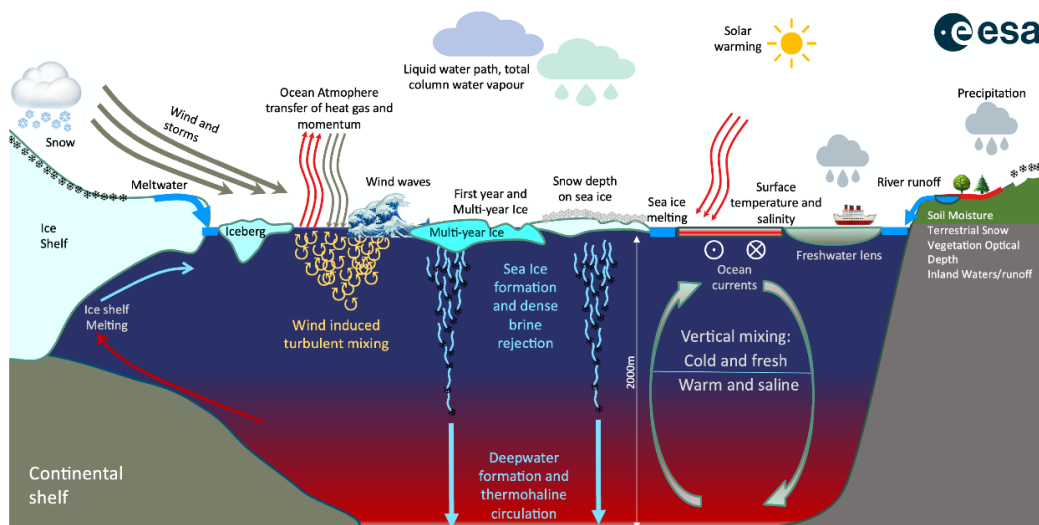


图12 卫星遥感界面观测的要素和过程示意图（来源：Catapano, 2024）

中最大的不确定性来源。这些相互作用主要发生在界面上，带来不同圈层之间的“互动”。欧洲和日本共同开发的EarthCARE卫星2024年5月进入轨道，通过多个传感器，试图从一个全新角度破解跨圈层的能量和物质交换。卫星上搭载的两个有源仪器ATLID（云气溶胶激光雷达）和CPR（云多普勒雷达），以及无源MSI（多光谱成像仪）和BBR（宽带辐射计），以协同方式反演云冰和液态水、气溶胶类型、降水以及加热速率、太阳和大气热层顶部辐射的垂直剖面。

界面上的观测值或许直接隐含了预报需要的关键信息，基于这样的想法，ECMWF相关学者构想了AI支持的直接观测预报（Direct Observation Prediction, DOP）方法（图13）。DOP为端到端（观测到预报）方法，无需明确的数据同化或物理建模步骤，而是直接利用对天气系统中通常具有挑战性的界面观测，并做出熟练的预测，包括海浪、海冰等界面变量的预测。与现有很多大模型不同，观测被认为是真实场，界面观测和尚未被同化的观测均可以利用。

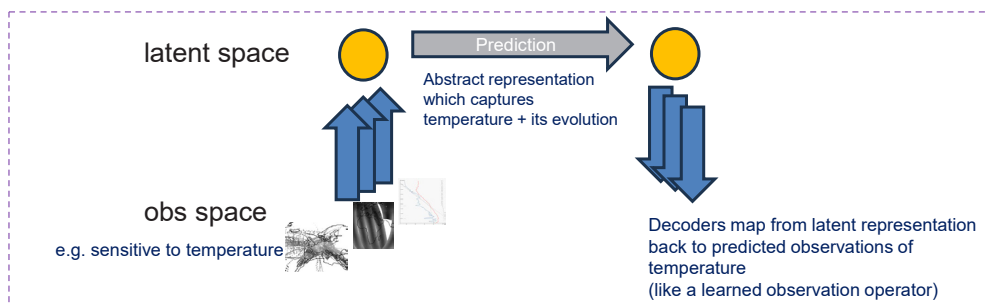


图13 基于AI的DOP框架（来源：Boucher et al., 2024）

实际上，AI-DOP模型的编码器将不同的观测类型映射到潜在空间中给出泛化的表示，之后完成预测，再通过解码得到结果。需要指出的是，DOP模型预测的并非物理变量（如温度）本身，而是与物理

量密切相关的辐照度等卫星直接观测量。研究人员通过实践数据表明：当向网络输入一些卫星数据和探空数据，仅优化探空和优化所有数据得到的误差完全不同，后者要好很多。这表明，模型先进行准确的辐射

预报，实际上就改进了地球系统的内部表示和动力学。下一步，AI-DOP还将通过控制生成格点预报时的误差增长和增加更多的高分辨率观测进行改进。AI-DOP模型的构想，从最直接的角度，发挥了数据最本真解释场变化规律的功能，同时利用了AI技术强大的学习能力。

2.4 WIS 2.0：从地球系统角度更好地协调全球气象观测

2024年，全球气象界作为整体的一个显著进步，就是WMO扎实推进了其信息系统升级换代：WIS 2.0隆重登场。以协调全球气象业务为己任的WMO，最早在1963年通过推出全球天气监测网（WWW），实现了全球气象观测整体上的管理，20世纪70年代GTS（全球电信系统）确保了规定时间世界各地气象站观测获得的数据能快速传送到气象数据中心。2007年，WMO信息系统（WIS）建立，之后于2019年引入了地球系统方法，2021年WMO的统一数据政策针对GBON进行了调整。WIS的升级版，即WIS 2.0（图14）实现了最初的WWW的再次升级。在2022年各种规则、规范完善和2023年示范阶段取得进步之后，2024年



图14 WIS 2.0对GTS和WIS 1.0的传承（来源：WMO，2024）

WIS 2.0实现了业务化前运行，为2025年全面业务化（图15）打下了基础。从这样的意义上看，2024年无疑是WIS 2.0的历史元年。

3 气象服务

2024年元旦，阿根廷人席列斯特·绍罗教授就任世界气象组织（WMO）秘书长。这位WMO历史上第一位女性掌门人，自2014年至2023年末一直担任阿根廷气象局局长，2018年4月至2023年底担任WMO第二副主席。来自发展中国家的绍罗，希望WMO能让所有国家，特别是最脆弱的国家，能通过气象服务具备对极端天气、气候、水和其他环境事件的抵抗能力。2024年1月16日，她在日内瓦联合国新闻发布会上指出，国际合作主要诞生于日内瓦，这是应对时代挑战的重要工具。

2024年是落实联合国全民早期预警（EW4ALL）倡议的重要实施年，全球气象服务展现出新特点。一是借助全球气候变化愈发严重的灾害和威胁，以及COP29、世界经济论坛等具有全球影响的全球治理事件，大力宣传气象服务在可持续发展中的巨大价值；二是在大数据和AI技术向全领域渗透的背景下，各国气象机构快速拥抱新技术，务实地让气象服务水平迈上新台阶；三是在气象大模型的发展强烈依靠IT和算力等尖端技术和气象快速成为新能源、碳排放监测等关键领域重要支撑背景下，大量企业加入气象服务阵营，与气象部门通过合作获取更完整的数据，发挥技术专长提供面向大众和行业的新服务，在客观上改进和拓展了气象服务。这些变化，无疑也在重构世界气象服务和发展的格局（图16）。

3.1 联合国全民早期预警倡议：关键进展需要更多技术引入和跨领域合作理念

为了响应联合国倡议，WMO于2024年部署了多个相关项目，例如，InPPHA（Integrated Prediction of Precipitation and Hydrology for Early Actions，支持早期行动的降水和水文综合预报，2024—2028）、PEOPLE（Progressing EW4All Oriented to Partnerships and Local Engagement，推进EW4All的伙伴关系和地方参与，2024—2028）和ADVANCE（Aiding Decision-making in Vulnerable Africa with Nowcasting of ConvEction，以对流临近预报帮助脆弱非洲决策，2024—2028）。其中，由NCAR主持的ADVANCE项目具有很好的启发性，这个采用伞式结构的项目，旨在改善非洲大陆对流及相关灾害临近预报。2024年，该项目在南部非洲成功进行了测试平台搭建，将为南部非洲国家提供快速更新的气象卫星产品和工具以改善预警。该项目

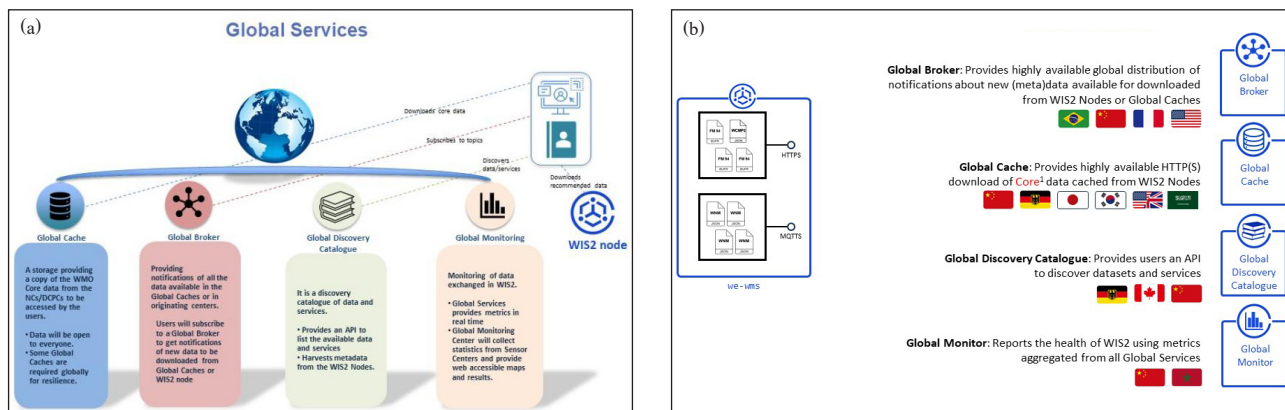


图15 WIS 2.0的结构(a)中,包括了全球代理、缓存、发现和监测四个功能块以及这些功能的承担国家(b) (来源: WMO, 2024)

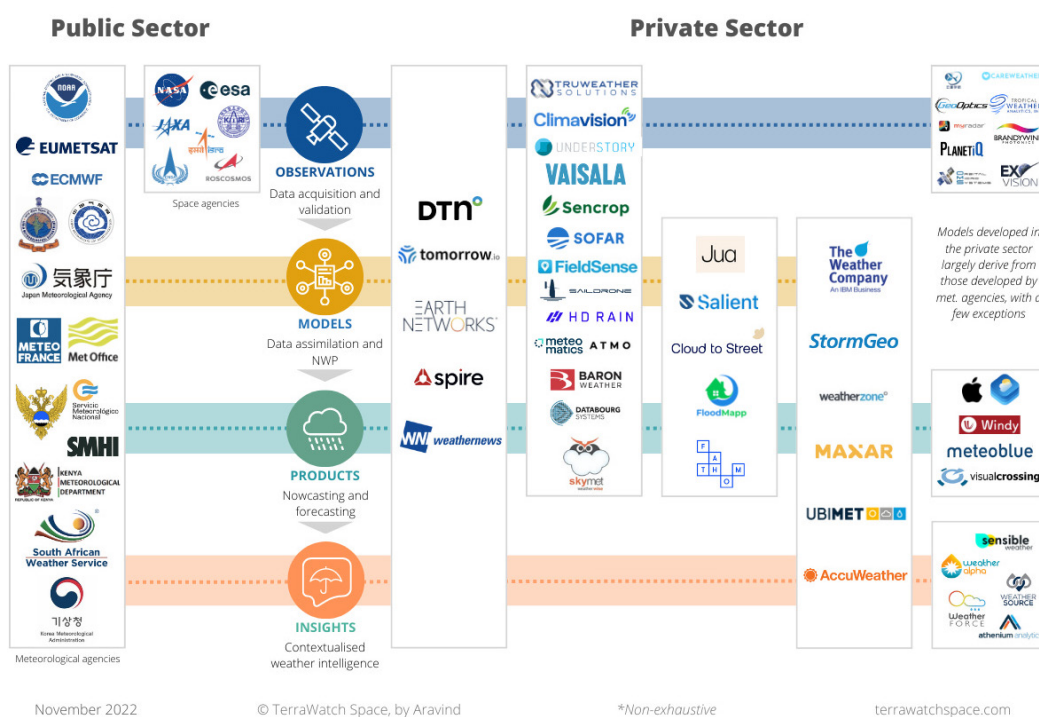


图16 国际智库TerraWatch Space对全球气象业务格局的划分 (来源: TerraWatch, 2025)

的实施,可以认为是未来几年,发达国家瞄准发展中国家早期预警软肋,升级和直接参与更大研发活动的信号。

3.2 数字媒体发展是挑战,更是机遇

全方位和全角度数字媒体的空前发展至少持续了10 a时间,这样的发展带来的一个结果,就是人们日常应用气象信息的场景发生了较大的变化:从传统的广播、报纸、电视和手机短信等,迈向具有高动态、高时效、高稳定、高精细、高覆盖、高数智等特征的数字媒体新时代。例如,通过社交平台更多了解气象信息的细节等,给更多的人群,也包括多领域的专家带来深入认识、开发和利用气象信息的新机会。在这样的背景下,一些机构,如AMS,在之前数十年开

展气象广播科学家认证基础上,最新开发了“数字气象学家”项目,这既代表气象界对数字媒体带来变化的接受,更是表达了积极拓展新的气象服务能力的态度。

3.3 围绕巴黎奥运会的气象服务

2024年巴黎奥运会,在开放的空间举办开、闭幕式给人留下了深刻印象。这样的举办形式,对气象保障工作无疑提出了更高要求。开幕式上因为巴黎骤雨的到来,大量参加入场式和表演人员不得不穿上已经准备好的透明雨衣,这让全世界的观众印象深刻。

巴黎奥运会期间,是巴黎城市及周边郊区人员最密集时段,无疑也是天气脆弱性最突出的一段时间。面对这样的重要活动和脆弱性,WMO在世界天

气研究项目实施计划（2024—2027）中，特意设置了“认识脆弱性，城市超精细尺度多灾种预报”（Understanding Vulnerability, Ultra-Fine-Scale Prediction for Multi-Hazards in City）项目，并在该项目中包括了巴黎奥运研究示范项目（Paris Olympics Research Demonstration Project）。该项目提出的科学问题有3个：临近预报和NWP、改进夏季极端事件（城区的城市热岛、空气质量、风暴）的认识和如何提供定制的城市基础设施服务。

以巴黎市的昵称“PANAME”命名的气象试验于

2022—2023年开展，利用位于市区和郊区大学的辐射计获得的温度和湿度廓线、3D测风激光雷达和其他观测资料，还在巴黎市安装了31个IoT气象站和地表能量平衡站（图17）。

鉴于很多奥运比赛项目在巴黎市的公园里进行，2023年试验还增加了公园观测（图17、图18）。其中，在卢森堡公园、蒙苏里公园和埃利·维瑟尔公园开展了详尽的观测。

夏季奥运会，运动员和观众必须面对的就是暑热，为此，试验设置了热舒适度特征项目，通过在城

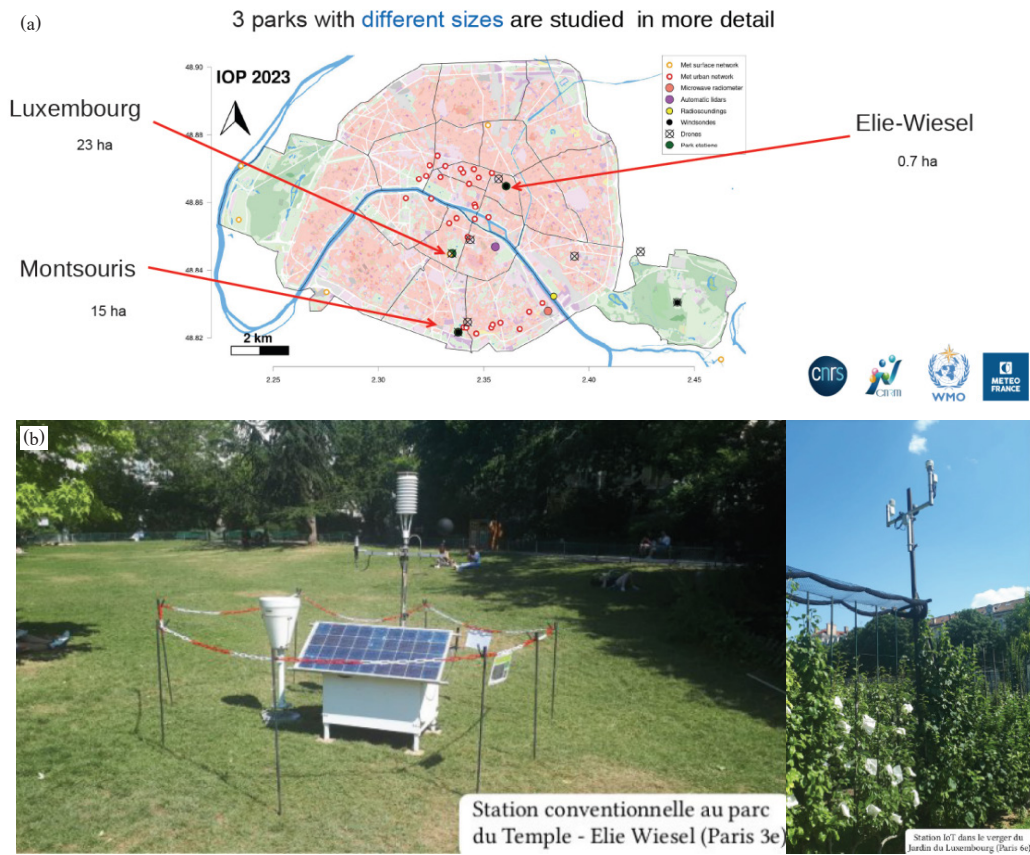


图17 2023年在巴黎开展气象观测，包括3座公园(a)以及在公园里设置的常规气象站和IoT气象站(b)（来源：Masson, 2024）



图18 热舒适度观测场景（来源：Masson, 2024）

市中心利用路灯杆设置IoT气象站并增加风和实感温度(Black Global Temperature)观测(图18)。试验数据分析表明,有树木公园的降温效果好于仅有草坪的公园。公园的降温效果,也得到模式模拟的支持。

来自法国、英国、加拿大、美国、德国等多家机构的8个模式参加了2024年夏季比较试验。这些模式除了法国气象局模式外,既有常用的业务模式,如英国气象局的UM和德国气象局的ICON,也有被广泛使用的业务和研究模式,如NCAR的WRF模式,其中仅美国Texas大学的模式被归类为AI模式(基于Graph-Cast),模式的分辨率从100 m到1.3 km。

围绕巴黎奥运会的气象活动,还开展了空气质量相互比较项目和融合社会科学研究活动。针对空气质量,相关项目确定了首席科学家并从与大涡模拟(LES)相互比较和区域模式间相互比较两条线上展开。参加区域模式比较的合作者众多,包括Airparif、CEREA、NCAR、东京大学、赫尔辛基大学、SMHI、UKMO、GRASP和WMO等。在融合社会科学方面,3支团队开展活动:NCAR学者Julie Demuth团队以“理解大型体育赛事的预测”为题、CNRM的A Lemonsu领导的团队以“城市热浪与健康”为题(描述灾害特征,以及热对发病率和死亡率的影响)、Paul Abeille带领的预报员团队以“全民马拉松比赛预报”为题开展研究。

围绕巴黎奥运会的气象活动,从2022年开始密集展开,法国气象部门依靠与WMO的合作,邀请欧洲和美洲等的相关机构广泛参与,为奥运会顺利进行保驾护航。其中针对热舒适度的研究颇有新意。

4 结果、讨论与展望:AMS 2025年年会的启示

2025年全球人口达80亿,实现联合国可持续发展目标对全球气象事业发展提出了更高要求。联合国秘书长古特雷斯在“使2025年成为一个新的开端”的新年致辞中指出,我们刚刚经历了十年的致命高温,这是气候崩溃,2025年,各国需要大幅度减排和支持可再生资源利用,“脱离这条毁灭之路”。这是必要的——而且也是可能的。

本文即将完成时,正值AMS 2025年年会召开之际,本文针对2024年国际气象事业发展几个视角的解读,大多可以在这个具有风向标意义的年会上找到更多和更具体的新线索,以下将结合2025年AMS年会和其他文献展示的新概念、新思路,对2025年气象科技发展进行探讨和展望。

4.1 新技术继续推动气象能力发展

量子驱动。2024年6月,联合国宣布2025年为“国际量子科学与技术年”,其中量子计算机和量子传感器尤其值得期待。量子计算机,是AI技术发展的重要物质基础,可以至少数万倍提升科学计算能力,从而满足物理和数据驱动的地球系统模拟对算力的要求。量子传感器依赖量子物理学的特性,利用被称为“纠缠”的粒子之间的联系,以及量子的另一个属性“叠加”,让依据经典物理学无法获得的测量成为可能。量子传感器具备的一些新能力,尤其是可以在没有全球定位系统的情况下开展对时间、温度、距离、重力和电磁场的精确观测,在地球系统领域的应用价值极大。AMS年会透露,美国将从联邦政府层面,强化包括量子系统在内的协调,以最大限度地扩大技术创新的推动。

用户参与。在气象界熟知的“研究到业务”(R2O)链条中,用户的位置并不确定,在第15届R2O会议上,“定制研究”(Tailoring Research)的概念被提出,目的是有效创新和完善产品与服务。定制研究面对的关键问题包括:例如,如何确保产品满足并超越用户的期望?如何确认这些创新有效地触及目标受众并使其受益?让用户为新技术和服务做好准备的最有效策略是什么?

云托管解决方案。该方案特别适用于数据分析、可视化和环境信息归档等应用。而如何将基于云的应用程序合并到不同的工作中是推进该方案的关键所在。从NOAA的天气系统高可用架构Netflix和亚马逊可持续发展数据计划(ASDI),到Google Earth Engine等,勾画了云托管的气象管理方案。

验证人工智能。AI无疑是对气象学和NWP“特别适用”的新技术,带来了实现突破的难得机遇。然而,越来越需要开发严格的测试、指标和验证框架来评估人工智能驱动模型的性能和可靠性。一些挑战需要面对:1)测试框架方面,可以采用哪些方法和程序来系统评估人工智能算法在数值天气预报中的性能?如何设计考虑不同天气模式、时空尺度和模型配置的综合测试框架?2)评估指标方面,哪些指标和绩效指标适合评估基于人工智能的数值天气预报模型的准确度、可靠性和技能?如何开发标准化指标来捕捉人工智能技术在捕捉复杂大气动态和现象方面的优势和局限?3)验证技术方面,如何根据观测数据、基准模型和集合预测来验证人工智能驱动的NWP模型?可以使用哪些策略来量化不确定性并评估基于人工智能的预测在不同环境条件和预测交付周期下的稳健性?如

何更新基于物理的传统方法的既定指标以纳入人工智能？在案例研究和应用方面，从人工智能在数值天气预报中的实际案例研究和应用中可以获得哪些见解？人工智能技术如何提高特定天气事件或地区的预测准确度、提前时间和空间分辨率？从这些经验中可以汲取哪些经验教训和最佳实践？需要哪些人工智能就绪数据来推动未来以数据为中心的数值天气预报人工智能开发？

4.2 企业全面介入气象业务

AMS年会从来都是政府、高校等学术机构和企业共同创新研讨的平台。不仅在数据驱动大模型研发等方面，企业已经利用优势抢占了半壁江山和制高点，而且深度参与其中整个国家气象事业的关键方面。

雷达网评估。美国NEXRAD在世纪之初彻底改变了天气预报员了解强风暴环境并及时发布准确警报的能力。但该系统已过时落后，并且新技术进步不断出现，更换NEXRAD网络的计划正在进行中。为了充分了解未来十年任务失败风险的严重程度，MITRE公司对当前NEXRAD系统的操作和系统可用性进行了全面评估。结果表明，当前NEXRAD系统可用性仅满足96%的业务可用性阈值。MITRE还研发了评估工具，以便快速关注关键组件和重大计划外的停机事件。

优化地面观测网络。地面气象观测网是基础气象工作中的基础。来自著名气象仪器公司维萨拉的专家明确指出，一刀切的地面观测网络方法是不够的。以美国为例，西海岸是大气河流、浓雾和空气质量等构成混合复杂情景；而在山区，背风槽和地形是导致降水变化及其预报复杂性的主因；在中西部则面临湖泊效应降雪等带来的独特困难；东海岸又面临飓风、热浪加剧和空气质量恶化的多重威胁。这位来自企业的专家指出，天气观测技术的进步，能够将人工智能与混合网络相结合，可提升自动地面观测系统（ASOS）

的未来适应性并增强其功能。

跨领域合作带来共赢。欧洲的“目的地地球”数字孪生项目不断进步是很多同行关注的话题，然而不是很多人都知晓，该系统开发出的第一个用于极端天气事件和气候变化的复杂地球系统应用，正在意大利电影公司经营的位于巴塞罗那的超级计算中心（BSC）的MreGINE5超级计算机（全球排名第八位）上运行。这一合作，很容易让人联想到地球系统模拟器与同样需要超算能力、善于拍摄数字科幻片的意大利电影界之间合作和互动：目的地地球演绎的地球天气、气候变化或许能给电影人更真实的感受；而以后更真实展示全球气候变化后果的“未来已来”科幻片会给更多的人带来警示。

4.3 气象服务是一场硬仗，需要跨学科、领域和层次的协同

2024年是全球温度升高1.5℃的第一年，灾害升级已经开始显现，其中野火的影响尤其值得关注。AMS从2025年年会开始，专门设立的“野火研究”系列会议，可谓恰逢其时。然而，会议期间，加州大火持续肆虐，给会场中研究野火的专家不时提供逐小时更新的事实和案例，另一边却是美国各方在应对中因各机构自行其是而难见高效的协同和高效的救灾。年会市政厅会议上，专门设立的“美国联邦机构气候适应行动协调：参与和合作机会”分会场，给出了联邦机构参与气候适应的四种方式，即开展适应研究、为适应决策者提供数据和工具、资助地方适应工作和提供适应技术的援助或指导。以趋利避害为主要特征的气象服务，实际上是年会最重要的话题。2025年将迎来联合国气候变化框架公约签订30周年，“三十而立”之年，全人类面临的气候变化挑战不减反增，将考验着更多学者、政府和大众，见证他们如何展示顶级智慧，如年会主题所言，让地球这颗星球保持繁荣。

深入阅读

周圻, 张伊, 贾朋群, 2024. 气象和大气科学新生长点——美国气象学会2024年年会带来的启示[J]. 气象科技进展, 14(1): 2-7.

Bain C, 2024. Data visualisation as a way to extract information from (big) data[C]//Study Group on Future Data Infrastructure (SG-FIT) Workshop. Geneva: WMO.

Boucher E, McNally T, Lessig C, et al, 2024. Learning from observations: AI-direct observation prediction (DOP)[C]//NWP SAF Workshop on Satellite Observations of the Earth System Interfaces. Reading, UK: ECMWF.

Catapano F, 2024. ESA's perspectives on interface observations[C]//NWP SAF Workshop on Satellite Observations of the Earth System Interfaces. Reading, UK: ECMWF.

Chen Y Q, 2025. Outcomes of INFCOM-3[C]//RA V Working Group on Infrastructure Meeting. Melbourne: WMO.

Dueben P, 2024. How new developments in science and AI are helping the EU with better weather forecasts[C]//Copernicus Emergency Management Service Annual Conference. EC.

ECMWF, 2024. ECMWF global data monitoring report[R].

Fan J F, Meng J, Chen X S, et al, 2025. Complexity science meets Earth system[J]. Science Bulletin, 70(1): 19-24.

Giraud R, Enrico F, 2024. WIS2 architecture, components and timeline[C]//Second FFGS Programme Management Committee (PMC) Meeting, Joint PMC-EG Meeting and EG Meeting. WMO.

深入阅读

- Marsden S, 2024. Introduction to training, training course[C]// EUMETSAT/ECMWF NWP-SAF Satellite Data Assimilation. Reading, UK: ECMWF.
- Masson V, 2024. Overview of the Pairs 2024 Olympics WMO Project[C]//Annual WWRP Scientific Steering Committee Meeting. Geneva: WMO.
- McNally T, 2024. ECMWF forecast improvements and future perspectives[C]//AMS 104 Annual Meeting.Baltimore: AMS.
- Morgan M C, 2024. Necessary investments to advance NOAA predictive capabilities[C]//Unifying Innovations in Forecasting Capabilities Workshop 2024. NOAA.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024. AI for Scientific Discovery: Proceedings of a Workshop[M]. Washington: The National Academies Press.
- Pinto O J, 2024. The 2024 WMO UAS demonstration campaign and ongoing UAS data assimilation studies[R]. Vienna, Austria: WMO.
- Quintino T, Leuridan M, Hawkes J, et al, 2024. Bytes from petabytes: Extracting usable data from very high-resolution datasets-a destination earth perspective[C]//Study Group on Future Data Infrastructure (SG-FIT) Workshop. WMO.
- Ramachandran R, 2024. AI-driven weather and climate forecasting[C]// Study Group on Future Data Infrastructure(SG-FIT) Workshop. WMO.
- Richardson D, 2024. INFCOM priorities 2024-27[C]//SC-WIPPS Leaders Meeting. Geneva: WMO.
- Von Bismarck J, Koopman R, Rusli S, et al, 2024. EarthCARE Cal/Val Campaigns: Overview[C]//EGU General Assembly 2024. Vienna: EGU.
- Wedi N, 2023. Destination Earth: Digital twins and innovative use of HPC[C]//Third International Workshop on the Future of Computing. Zakopane, Poland.
- Wong W K, 2024. Report of expert team on WIPPS development and evolution (ET-WIPPSDE)[C]//SC-WIPPS Leaders Meeting. Geneva: WMO.
- Zhu X X, 2024. Machine learning for earth observation and beyond[C]//The 4th ECMWF-ESA Workshop on Machine Learning for Earth System Observation and Prediction. Frascati, Italy: ESA Earth Observation Centre.
- Zhu X X, Xiong Z T, Wang Y, et al, 2024. On the foundations of earth and climate foundation models[J]. arXiv: 2405.04285v1.

(作者单位: 王卓妮、贾朋群, 中国气象局气象干部培训学院; 唐伟、贾朋群, 中国气象局气象发展与规划院; 雷蕾, 中国气象服务协会)
(编辑: 卢冰)