

# 无缝隙地球系统理念下世界气象中心发展趋势浅析

王毅<sup>1</sup> 刘爽<sup>1</sup> 代刊<sup>1</sup> 李嘉睿<sup>1</sup> 许万智<sup>2</sup> 郝伊<sup>—3</sup>

(1 国家气象中心, 北京 100081; 2 中国气象局国际合作司, 北京 100081; 3 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081)

**摘要:** 世界气象中心是世界气象组织(WMO)全球数据处理和预报系统(GDPFS)三级体系中的顶层业务机构, 通过提供全球监测预报信息产品为国际防灾减灾和可持续发展做出了突出贡献。本文系统回顾了目前世界气象中心的发展现状, 重点围绕无缝隙地球系统发展的理念, 介绍了无缝隙预报、人工智能、云计算等最新相关技术进展, 并结合先进全球业务中心的战略计划及WMO的最新政策对未来世界气象中心的发展趋势进行了初步展望。

**关键词:** 世界气象中心, 无缝隙预报, 地球系统, 数值天气预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.05.005

## Preliminary Analysis on the Development Trends of World Meteorological Centres under the Concept of Seamless Earth System

Wang Yi<sup>1</sup>, Liu Shuang<sup>1</sup>, Dai Kan<sup>1</sup>, Li Jiarui<sup>1</sup>, Xu Wanzhi<sup>2</sup>, Hao Yiyi<sup>3</sup>

(1 National Meteorological Centre, Beijing 100081; 2 International Cooperation Department, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3 Institute for Development and Programme Design, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The World Meteorological Centres (WMCs) are the top operational centres in the three-level Global Data Processing and Forecasting System (GDPFS) of the World Meteorological Organization (WMO). They have made outstanding contributions to international disaster prevention and mitigation as well as international sustainable development by providing global monitoring and forecasting information products. This paper systematically reviews the development status of WMCs at present. By focusing on the concept of Seamless Earth System, we introduced the latest development of seamless forecasting, AI, cloud computing, etc., and made a preliminary outlook on the future development trend of WMCs based on the latest strategic plans of the advanced operational centres around the globe and the latest policies of the WMO.

**Keywords:** World Meteorological Centres, seamless prediction, Earth System, numerical weather prediction

### 0 引言

世界气象组织(WMO)作为目前拥有193个会员国和会员地区的政府间组织, 是联合国的专门机构。由于天气、气候本身具有无国界的属性, 全球气象数据交换和共享对于气象观测和预报业务的发展至关重要。WMO于1963年在第四次世界气象大会上通过了启动世界天气监视网(WWW)计划的决议, 主要是为了加强气象卫星的国际合作。当前, WWW已发展到利用观测技术、通信系统和数值预报等在全球范围内规范、收集、分析、加工和分发天气、气候和其他环境信息, 促进各会员的国家气象和水文部门更好地应

对灾害性天气、气候变化等, 以减少生命财产损失、保护资源与环境, 并保障社会经济的发展<sup>[1]</sup>。WWW计划包括三个核心部分: WMO全球综合观测系统(WIGOS)、WMO信息系统(WIS)和全球数据处理和预报系统(GDPFS)。

GDPFS是由WMO各个会员的业务中心组成的网络, 按照WMO有关规范制作和提供天气、气候、水和环境相关产品和服务。GDPFS采用世界气象中心、区域专业气象中心和国家气象中心三层级联业务体系。世界气象中心主要通过其发展的全球数值预报模式(以及全球集合预报系统), 向WMO各会员, 特别是欠发达国家会员提供无缝隙的分析和预报产品, 以支持他们开展高影响天气早期预警<sup>[2]</sup>。

21世纪以来, 人工智能、云计算、新型观测等新一轮科技的迅猛发展为传统气象信息的收集、制作和分发带来了新的机遇<sup>[3]</sup>。全球气候变化背景下社会

收稿日期: 2022年4月1日; 修回日期: 2022年9月16日  
第一作者: 王毅(1982年—), Email: yiwang@cma.gov.cn  
资助信息: 中国气象局软科学研究项目(2021ZZXM25);  
气象联合基金项目(U2142207); 国家重点研发计划  
(2020YFE0201900)

各领域对气象预报信息的要求更多更高,未来需要采用综合地球系统的方法<sup>[4]</sup>,并朝着基于影响的预报和基于风险的预警方向发展<sup>[5]</sup>。另一方面,过去几十年WMO通过制定标准、规则、规范,实现了免费的国际数据共享,成为了全球性组织和国际合作的典范。为了更好地应对新时期数据交换需求的激增和促进国际社会加强合作,WMO修订了地球系统框架下的统一数据政策,将对世界气象中心的相关业务产生影响<sup>[6]</sup>。本文将介绍无缝隙地球系统背景下世界气象中心的现状,新技术发展趋势,并结合美欧国家和地区业务中心对世界气象中心的发展进行展望。

## 1 世界气象中心发展现状

### 1.1 世界气象中心概况

WMO框架下的GDPFS由世界气象中心(World Meteorological Centre, WMC)、区域专业气象中心(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)和国家气象中心(National Meteorological Centre, NMC)三层业务中心组成,分别在全球、区域和国家层面履行GDPFS的职能,向WMO会员及相关机构提供天气、水、气候、环境等分析和预报业务产品。WMO发布的《全球数据处理和预报系统手册》(WMO-No.485)(以下简称GDPFS手册)是各个GDPFS中心运行资料处理和预报系统的技术规则的唯一来源<sup>[7]</sup>,目的是确保各个中心业务运行采用的资料、信息及制作规范、规程和规格具备足够的统一性和标准化。

GDPFS手册规定,WMC须至少开展全球确定性数值天气预报、全球集合数值天气预报和全球长期数值预报这三项业务。截至2021年12月,WMO认定的WMC有10个(表1)。美国、俄罗斯、澳大利亚是在1967年WMO第五次世界气象大会被认定为WMC的,中国、英国、德国、加拿大、日本和ECMWF是在2017年WMO执行理事会第69次届会上被认定为WMC的,而法国是在2021年WMO执行理事会第73次届会上被认定为WMC的。不难看出,由于发展全球数值模式需要很高的计算机投资成本、业务运行和维护成本以及科研开发的大量投入,因此WMC绝大部分集中在发达国家。

承担WMC职责的国家气象水文部门也存在着同时承担WMO区域专业气象中心的情况,如表1所示。目前被WMO认定为至少三个RSMC的WMC有8个,其中,东京被认定的RSMC最多(7个)。北京被认定的RSMC有4个,包括核环境应急响应、沙尘暴预报、海洋气象服务和区域气候中心。一些RSMC除了提供实时业务产品以外还负责协调相关中心的非实时活动,

称为牵头中心。牵头中心的职责包括负责对其他中心提交的业务数值模式结果进行验证或检验。例如,ECMWF承担了确定性数值天气预报(NWP)检验牵头中心和海浪预报检验牵头中心的职责,负责汇集和发布各中心提交的检验结果,同时提供必要的指导。日本气象厅是全球集合预报模式检验的牵头中心。

表1 WMO认定的世界气象中心及其区域专业气象中心  
Table 1 WMO designated WMCs and corresponding RSMCs

世界气象中心	被认定的其他区域专业气象中心
澳大利亚墨尔本	RSMC海洋气象服务、RSMC核环境应急响应、RSMC数值海浪预报
中国北京	RSMC海洋气象服务、RSMC核环境应急响应、RSMC沙尘暴预报、区域气候中心
加拿大蒙特利尔	RSMC数值海浪预报、RSMC核环境应急响应、RSMC非核环境应急响应
德国奥芬巴赫	RSMC有限区域确定性NWP、RSMC有限区域集合NWP、RSMC核环境应急响应、RSMC非核环境应急响应、RSMC临近预报
欧洲中期数值预报中心	确定性NWP检验牵头中心、海浪预报检验牵头中心
日本东京	RSMC海洋气象服务、RSMC核环境应急响应、RSMC热带气旋预报、RSMC临近预报、RSMC数值海浪预报、区域气候中心、集合预报检验牵头中心
法国图卢兹	RSMC核环境应急响应、RSMC非核环境应急响应、RSMC海洋气象服务、RSMC数值海浪预报
美国华盛顿	RSMC海洋气象服务、RSMC核环境应急响应、区域气候中心、多模式集合长期预报牵头中心
英国埃克塞特	RSMC核环境应急响应、RSMC海洋气象服务、年到年代际预测牵头中心
俄罗斯莫斯科	RSMC有限区域确定性NWP、区域气候中心

### 1.2 世界气象中心产品平台

根据GDPFS手册(2019版),世界气象中心须按照要求向WIS提供清单中规定的全球确定性NWP产品(预报时效至少达6 d)、全球集合数值天气预报产品(预报时效达10 d)和全球长期数值预报产品(预报时效至少达4个月),同时在网站上发布相关业务模式系统的说明文档及通过WIS提供的产品列表,并保持更新<sup>[7]</sup>。

各个WMC主要通过WIS的全球信息系统中心(GISC)提供相关产品的元数据,让WMO各会员能够发现、检索和获取所需的产品。此外,中国、德国等WMC建立了专门的网络平台或子网页来发布相关产品。例如,中国气象局在2018年建立了世界气象中心(北京)网站(<http://www.wmc-bj.net>),实时发布CMA-GFS全球确定性数值模式产品、CMA-GEPS全球集合预报系统产品和CMA-CPS全球气候模式产品,以及风云气象卫星观测产品和气候指数等产品,网站的用户访问量不断增加,2021年网页访问次数已达近30万。德国气象局在其官网上建立了世界气象中心子栏目,实时发布ICON全球确定性数值预报产品和全球集合预报系统图形产品,最长时效达7.5 d。ECMWF等其他世界气象中心也通过各自网站提供全

球或区域范围的数值预报模式产品。

GDPFS建立的目的之一是促进合作和信息交换,从而有助于发展中国家气象水文部门的能力提升。WMO自2006年启动了“灾害性天气预报示范计划”(SWFDP),包括中国在内的多个国家的WMC参与了SWFDP的亚洲、非洲等各个区域子计划,通过建立的网站平台提供全球NWP产品和集合预报(包含基于站点的)产品,并开展相关技术培训,为提升发展中国家灾害性天气预报预警能力,减少灾害和损失作出了积极贡献<sup>[2]</sup>。

## 2 无缝隙地球系统理念及技术发展趋势

WMO认定的WMC代表着当前国际气象业务的先进水平,在数值天气气候预报及应用等领域取得了显著的进步,并建立了相关的数据共享框架,促进WMO各个会员都能受益于这些进步。随着科学认识的不断深化,气象研究已越来越倾向于将地球系统作为一个整体来考虑。2015年,WMO第十七次世界气象大会提出了“综合无缝隙GDPFS”的发展方向,即构建从分钟到年代际,从局地到全球的全覆盖、无缝隙全球数据处理和预报系统。无缝隙预报理念、AI、云计算等新技术以及WMO地球系统框架下的统一数据政策将推动与影响未来WMC的业务发展。

### 2.1 无缝隙预报

2014年举办的首次世界天气开放科学大会以及2017年出版的“地球系统科学前沿”白皮书等将无缝隙预报作为未来几十年科学界指导方针的重要指标,提出从分钟级到世纪尺度、从米到全球空间尺度的预报发展趋势<sup>[8-9]</sup>。短时临近和延伸期时效是目前预报中备受关注的“缝隙”,也是预报的难点。德国气象局从2017年起启动了无缝隙综合预报系统(SINFONY)项目<sup>[10]</sup>,主要利用雷达、卫星资料和集合预报模式将临近预报与短期预报进行融合,旨在改善0~12 h时效的强对流天气预报。

传统逐日至周尺度上的天气预报多依赖于高分辨率大气数值模式,而月至季节尺度上的气候模拟和预测考虑了海-陆-气耦合过程,但模式分辨率低于天气预报模式。无缝隙天气气候一体化模式是当前国际研究的前沿,目前有个别业务中心能够运行无缝隙的数值模式,如英国气象局基于相同的模式框架构建了无缝隙预报体系,即统一模式(UM),包含1.5 km的区域对流尺度模式,几十公里的气候模式及上百公里的地球系统模式<sup>[11]</sup>。

在次季节至季节(S2S)尺度上,WMO发起的S2S预测计划<sup>[12]</sup>汇集了来自全球11个业务预报中心制作的次季节预报产品(预报时效长达60 d),包括近实时集

合预报和集合再预报,旨在重点改进两周以上异常天气事件的预报能力。

面对不同尺度多模式的海量信息,很多业务中心通过发展模式后处理技术来降低模式的偏差,从而得到协调一致的预报结果。例如,英国气象局融合多模式信息发展了综合模式后处理和检验系统(IMPROVER)<sup>[13]</sup>,提供无缝隙格点化概率预报产品。我国近些年利用多源观测、模式数据及新技术、新方法,初步建立了针对不同预报时效的无缝隙精细化网格预报技术,提高预报的准确度和精细度<sup>[14]</sup>。

### 2.2 人工智能和机器学习

以机器学习、深度学习为代表的人工智能(AI)技术近些年已经开始在气象观测、预报、服务等各个方面发挥作用<sup>[15]</sup>。WMO研究理事会在2020年设立了百万兆级计算、数据处理和AI任务组,并开展概念指南的编写,将在AI相关领域通过国际协调来促进提升地球系统预报能力。WMO还加入了国际电信联盟“自然灾害管理AI焦点组”,将提炼最佳实践,为自然灾害管理的AI国际行动制定路线图。英国气象局在其《数据科学框架(2022—2027)》明确提出了将机器学习和AI融入到天气气候科学和服务中。

传统数值天气预报过程主要涉及初值生成(观测资料预处理、资料同化)、模式积分(后处理)、产品应用和高性能计算,AI技术已经被应用于各个环节来优化和改善数值预报的性能<sup>[16]</sup>。从不同时间尺度预报上来看,目前AI技术主要在短时临近预报、季节预报方面较传统方法体现出了一定的优势。基于雷达、卫星等观测资料,以神经网络模型为代表的深度学习方法已经成为短时临近强对流天气预报的有效途径<sup>[17]</sup>。此外,物联网及新兴观测数据也为发展基于AI的短时临近预报提供了更多可能性。在季节尺度上,很多学者采用机器学习方法开展了对重要信号(例如ENSO)的预报,取得了较好的效果<sup>[18]</sup>。也有学者采用纯数据驱动的AI技术发展了次季节至季节尺度的预报模型,能够在3分钟内生成预报时效长达6周的320个成员的预报,对4周以上的温度预报效果较好,并且计算效率较数值预报模式显著提升<sup>[19]</sup>。对于中期时效的预报,当前机器学习方法还无法取代数值预报模式,其中最重要的一个原因是缺乏高质量的训练样本,尤其对于极端天气事件,其对训练样本的要求更高。因此,如何将数值模式和AI技术相融合,构建无缝隙的高分辨率天气气候模型将是未来预报业务以及研究需要考虑的重要方向。

### 2.3 云计算

近年来逐步成熟的云计算技术由于其弹性计算、

虚拟化、分布式存储等特性可以为气象大数据的存储和服务提供支撑。通过研发用户友好的工具,可以将数据进一步集成到用户的业务流程中。利用云资源,可以实现数据的高交互操作(如数据裁剪和转换),使得访问和应用预报信息及产品更加便捷。

WMO的WIS 2.0虽然不会强制使用云计算基础架构,但鼓励WIS中心逐步采用云技术,以提供最有效的解决方案。目前,国家气象部门等公共部门考虑到数据的可靠性、安全性以及高性能计算机的前期投资,尚未大规模将数值模式部署到云上运行。德国气象局利用试点项目尝试在商业云上运行针对中亚地区的ICON区域数值模式,并开展计算测试和成本评估。作为学术研究机构,美国国家大气研究中心(NCAR)已将其全球应用范围最广的中尺度数值天气预报模式(WRF)搭建到云环境<sup>[20]</sup>,并提供在云环境运行WRF的文档和教程。相关私营部门对待云计算则更为开放和积极,亚马逊、微软和谷歌等云服务提供商(CSP)发展了各种商业云服务和开源平台,利用云计算和机器学习等研发精细化的预报服务。对于用户而言,云计算和传统计算孰优孰劣并没有统一的答案,这取决于用户的需求、资源等具体情况。

## 2.4 WMO全球数据交换政策进展

2021年10月,WMO世界气象大会特别届会批准了“地球系统数据国际交换的统一政策”这一具有里程碑意义的决议,将以往天气、气候、水等单独的资料交换政策转换为统一的政策。该决议将资料划分为“核心数据”和“推荐数据”两类,包含天气、气候、水文、大气成分、冰冻圈、海洋、空间天气等七个领域,将有利于在地球系统框架下提供统一的解决方案,也有利于加强各国公共、私营和学术部门的合作。值得指出的是,该政策也提出除了各会员提交核心观测数据以外,发达国家会员也须将利用数据加工而成的高质量产品(数值模式预报等)免费和无限制地反馈给其他会员,形成互利互惠的资料交换格局。在此背景下,未来包括WMC在内的GDPFS业务职责将可能随着地球系统数据政策的实施和相关技术规则的更新而调整和扩充。

## 3 世界气象中心发展趋势

2019年3月,WMO在北京召开了首届“世界气象中心研讨会”,会议取得了六个方面的成果,并提出了未来无缝隙GDPFS的行动领域和优先重点,包括系统和服务、研究和创新、资料可及性和平台<sup>[21]</sup>。针对未来发展,各WMC也根据战略目标和业务特点制定了各自的发展战略和计划,下面将以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国和中国的气象中心(WMC)为例分别进

行介绍。

### 3.1 欧洲中期天气预报中心

ECMWF在其《欧洲中期天气预报中心战略(2021—2030)》(以下简称战略)<sup>[22]</sup>中提出了三大支柱,包括科学技术(世界领先的天气和地球系统科学、前沿技术和计算科学)、影响(提供适合需求的高质量产品,方便用户高效便捷地获取)、组织和人才(实施多站点有效组织,聚焦人才)。

在科技方面,ECMWF将进一步发展对流可分辨尺度(3~4 km)的集合预报,并探索地球系统各个子系统的集合变分同化方法,重点提升两周以上延伸期时段的预报能力。同时,战略中还提出要应用先进的高性能计算、AI和机器学习以及天气云发展一个高精度的地球数字模型,即“数字孪生地球”,以监测和模拟人类活动和极端天气气候事件。

ECMWF还重视加强与其他组织的合作,例如,ECMWF和欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)合作开发的“欧洲天气云”正处于试验阶段,目的是促进各成员、机构和气象数据用户之间以数据为驱动的新型合作。ECMWF还参与了欧盟的哥白尼计划,加强气候变化和空气质量监测等。此外,ECMWF近年来加快了数据开放政策的步伐,从2020年10月起将其实时全球模式预报图形产品通过其网站向公众免费开放,以更好地为用户提供服务。

### 3.2 美国国家海洋和大气管理局

为了加强气象服务的协调与合作,确保美国通过地球系统方法引领气象服务,2020年美国成立了推进气象服务机构间委员会(ICAMS)<sup>[23]</sup>。这是近几十年联邦机构间协调工作的一次重要重组,该委员会由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)局长与白宫科学与技术政策办公室(OSTP)主任共同担任联合主席,其职责范围超越了狭义上的天气范围,而是包含地球系统背景下所有涉及陆地、海洋、大气的服务。

面对过去美国国内数值预报发展不集约、不协调的问题,2020年NOAA成立了地球创新预测中心(EPIC)<sup>[24]</sup>,旨在联合政府、科研部门及企业共同研发一个用户友好和可访问的数值预报业务模式,将采用“开放式创新”模式重点推进统一预报系统(UFS)的研发。UFS是一个基于社区的、耦合的综合地球模拟系统,涵盖从局地到全球,从小时到季节尺度的预测,并将主要依靠云计算方式为开发人员和用户提升访问数据和资源的便捷性。

### 3.3 世界气象中心(北京)

中国气象局自2017年被WMO认定为世界气象中心以来,重点结合“全球监测、全球预报、全球服

务”的战略，采用“小实体、大网络”的方式由国家气象中心牵头各业务单位联合履行世界气象中心（北京）职责。除了做好WMO规定业务以外，世界气象中心（北京）还建成了自主可控的全球数值预报预测产品、风云卫星全球监测产品以及中国全球大气和陆面再分析（CRA）产品的业务体系，通过世界气象中心（北京）门户网站和GISC北京对外共享。同时，还开辟了多个栏目及时发布权威技术进展报告以及全球重大（热点）天气的业务监测预报英文简报。

世界气象中心（北京）统筹协调GDPFS框架下中国承担的海洋、沙尘、气候、核应急等相关RSMC以及WIS、WIGOS区域中心，联合各中心及专家深度参与国际气象治理。此外，世界气象中心（北京）还积极开展国际天气会商和技术培训，为“一带一路”沿线重点国家气象部门开通专门通道，支持欠发达国家会员能力发展和国际防灾减灾。在模式检验方面，世界气象中心（北京）除了开展规定的全球确定性和全球集合模式的检验之外，还开展了区域高分辨率数值模式的检验。

2021年，中国气象局成立了“中国气象局地球数值预报中心”，聚焦关键核心技术，发展我国自主可控的地球系统数值预报模式。2022年发布的《气象高质量发展纲要（2022—2035年）》中明确提出了“到2035年，气象关键科技领域实现重大突破，气象监测、预报和服务水平全球领先，国际竞争力和影响力显著提升”等远景目标。

## 4 存在问题

当前被WMO正式认定的世界气象中心已经有10个，意味着已经有10个全球业务预报模式并提供业务预报指导产品。从地理分布上看，欧洲、美洲、亚洲、大洋洲的世界气象中心分别有5个、2个、2个和1个，北半球占了9个，欧洲占了半数。因此，从全球业务预报模式的发展上看，存在着明显区域不平衡的问题。随着未来向计算效率更快、分辨率更高的全球集合预报系统发展，目前多中心的确定性全球模式将如何发挥作用，是否还需要更多的全球业务中心等都尚待讨论<sup>[25]</sup>。其次，面对日益增加的全球极端天气气候事件及防灾减灾需求，世界气象中心的功能还有待进一步发挥。据估计，到2030年全球业务中心每天产生的分析和预报数据的量级将达到PB级，然而现阶段这些中心可供用户使用或再处理的数据或产品还比较有限。由于互联网带宽以及海量数据本身的复杂性，国际用户特别是欠发达地区下载和应用这些数据还存在诸多不便。最后，在地球系统框架下，全球水文、海洋、冰冻圈和其他环境数据的交换相比于传统气象

数据的交换会面临更复杂的挑战。对于世界气象中心（北京）而言，未来如何在无缝隙地球系统理念下更好地提升能力、发挥作用和提升国际影响力还存在着很多的挑战。一方面需要进一步提升自主核心业务能力，加强地球系统模式和无缝隙预报技术研发，加快与AI、云计算等新技术融合；另一方面需要积极适应WMO新数据政策，发展高质量高分辨率的全球数值模式产品及高交互便捷的访问途径，同时还要拓展国际合作交流，借鉴世界先进中心经验，积极牵头国际试点计划，发展更广泛的国际用户。

## 5 结论和讨论

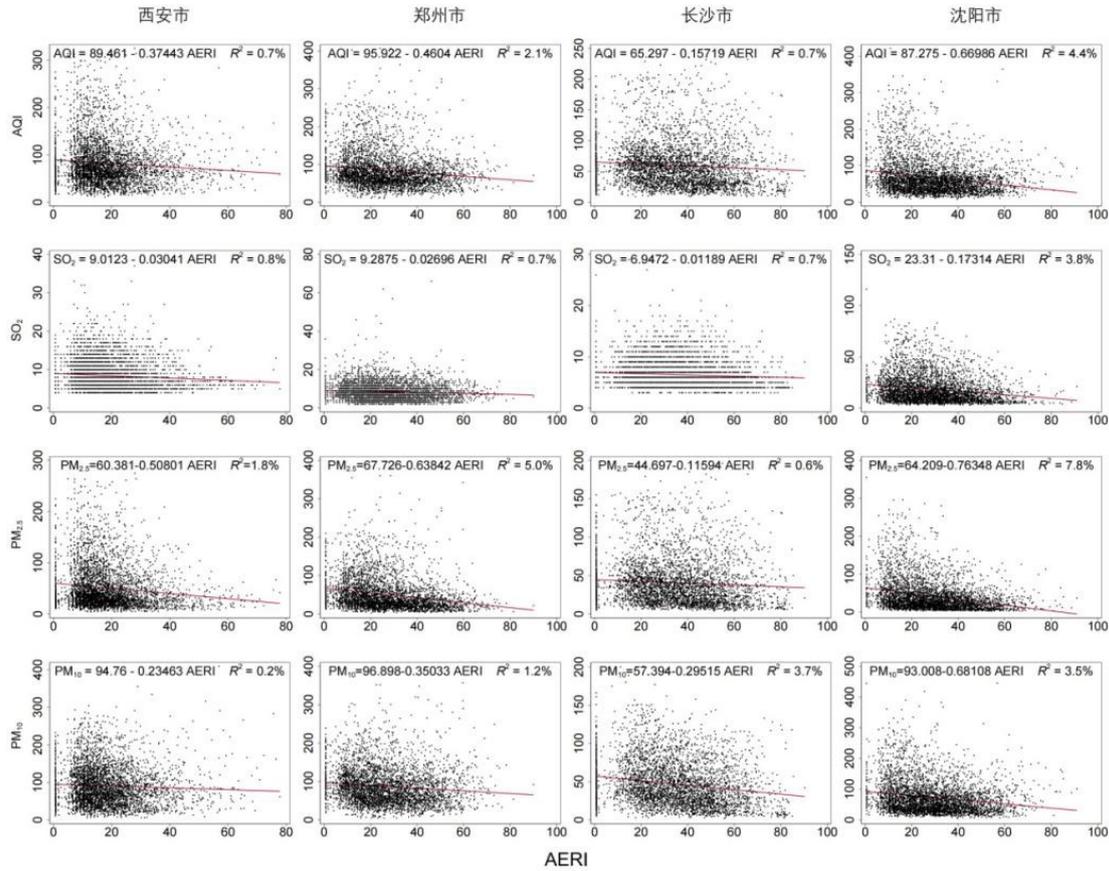
本文主要介绍了WMO框架下世界气象中心的现状，重点围绕无缝隙地球系统理念梳理了相关技术发展趋势和WMO数据交换政策的进展。可以看出，作为GDPDS三级体系中的顶层业务机构，世界气象中心通过发展先进的全球数值预报模式，制作全球监测预报产品并向WMO各会员共享信息，为全球防灾减灾和可持续发展作出了突出的贡献。

当前国际气象界已越来越认识到，需要通过综合无缝隙的地球系统方法，来认识并改进各个时间尺度和连续空间尺度上的陆地、海洋、海冰以及极端天气的预测，而建立地球系统无缝隙预报需要跨学科和跨部门的合作和协调才能成功。为了迎接时代发展带来的挑战，世界气象中心需要向着更加高效和更具适应性的方向发展：一方面通过加强与科研部门、私营部门的合作，充分发挥机器学习等AI技术在不同时空尺度预报中的优势，统筹集约地构建天气气候一体化的数值预报模式，同时加强对全球产品的本地化释用，借助云计算等平台提高产品的可及性和适用性。另一方面，针对WMO新的全球数据交换政策，世界气象中心需要建立与国家气象水文部门的互惠合作机制，开展极端或高影响天气气候事件的快速响应服务，助力发展中国家提升早期预警和防灾减灾能力，促进这些国家更积极开展互动反馈，为全球观测数据共享作出贡献，从而实现互利共赢的新发展格局。

## 参考文献

- [1] 王毅, 周庆亮, 代刊, 等. 全球数据处理和预报系统发展及展望. 气象科技进展, 2019, 9(2): 6-10.
- [2] 王毅, 周庆亮, 佟华, 等. 灾害性天气预报示范计划技术进展. 科技导报, 2020, 38(20): 86-96.
- [3] Dewitte S, Cornelis J P, Müller R, et al. Artificial intelligence revolutionises weather forecast, climate monitoring and decadal prediction. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3209.
- [4] Ruti P M, Tarasova O, Keller J H, et al. Advancing research for seamless earth system prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(1): E23-E35.
- [5] WMO. WMO-No.1150. WMO guidelines on multi-hazard impact-based forecast and warning services. WMO, 2015. <http://library>.

(下转44页)



附图2 西安、郑州、长沙和沈阳市2020年空气质量与AERI的相关性

Attached Fig. 2 Correlation between AERI and air quality in Xi'an, Zhengzhou, Changsha and Shenyang in 2020

(上接32页)

- wmo.int/pmb\_ged/wmo\_1150\_en.pdf.
- [6] Hooke W. Three policies shape enterprise value: minor adjustments could enhance the societal benefit. An AMS policy program study. Washington: The American Meteorological Society, 2022.
- [7] WMO. WMO-No. 485. Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System. WMO, 2019.
- [8] Brunet G, Jones S, Ruti P M. Seamless prediction of the earth system: from minutes to months. WMO Rep. 1156, 2015. [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_1156\\_en.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1156_en.pdf).
- [9] Rauser F, Alqadi M, Arowolo S, et al. Earth system science frontiers: an early career perspective. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(6): 1119-1127.
- [10] Trömel S, Chwala C, Furusho-Percot C, et al. Near-Realtime Quantitative Precipitation Estimation and Prediction (RealPEP). Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(8): E1591-E1596.
- [11] Hanley K E, Whitall M, Stirling A, et al. Modifications to the representation of subgrid mixing in kilometre-scale versions of the Unified Model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019, 145: 3361-3375.
- [12] Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(1): 163-173.
- [13] Vannitsem S, Bremnes J B, Demaeyer J, et al. Statistical postprocessing for weather forecasts: review, challenges, and avenues in a big data world. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(3): E681-E699.
- [14] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进步与挑战. 气象, 2019, 45(4): 445-457.
- [15] Schultz M G, Betancourt C, Gong B, et al. Can deep learning beat numerical weather prediction? Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2021, 379(2194): 20200097.
- [16] 孙健, 曹卓, 李恒, 等. 人工智能技术在数值天气预报中的应用. 应用气象学报, 2021, 32(1): 1-11.
- [17] 周康辉, 郑永光, 韩雷, 等. 机器学习在强对流监测预报中的应用进展. 气象, 2021, 47(3): 274-289.
- [18] Ham Y G, Kim J H, Luo J J. Deep learning for multi-year ENSO forecasts. Nature, 2019, 573: 568-572.
- [19] Weyn J A, Durran D R, Caruana R, et al. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2021, 13(7): e2021MS002502.
- [20] Powers J G, Werner K K, Gill D O, et al. Cloud computing efforts for the weather research and forecasting model. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(6): E1261-E1274.
- [21] 周庆亮, 任璐, 王蒙. 首届世界气象中心研讨会简评. 气象科技进展, 2020, 10(3): 154-155.
- [22] Pappenberger F, Rabier F, Venuti F. Invited perspectives: the ECMWF strategy 2021-2030 challenges in the area of natural hazards. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(7): 2163-2167.
- [23] Droegemeier K K, Jacobs N A. Restructuring of US federal coordination to advance meteorological services. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(2): E230-E247.
- [24] Jacobs N A. Open innovation and the case for community model development. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102: E2002-E2011.
- [25] Palmer T. A vision for numerical weather prediction in 2030. arXiv, 2020: 2007.04830.