

国外气象业务中心核心预报能力的比较和发展

李婧华 田晓阳 贾朋群

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 基于文献和世界气象组织(WMO)世界气象中心以及部分国家气象中心网站的信息, 梳理了世界主要气象业务中心的全球天气预报模式预报指标, 分析了当前领先气象业务中心的预报水平, 并对反映其核心预报能力的天气和气候预报技巧指标进行了比较。在对过去10多年来预报技巧进步趋势分析的基础上, 对领先气象业务中心在2025和2035年可能达到的预报指标进行了推测。尽管未来各主要气象业务中心预报系统的提升速率将明显放缓, 但是可预报时效将会大大提高: 到2025和2035年, 500 hPa位势高度的预报时效将分别提高至8.5和10.5 d, 高分辨率模式的预报时效将分别提升至7.6和8.4 d, 而多种模式要素预报的有效性将全面接近并可能进入10 d。天气型转变预测和MJO预测是反映气候预测的两个核心指标。针对Niño 3.4海温距平的未来3和6个月预测, 相关性未来分别可能达到93%和86% (2025年) 以及96%和90% (2035年), 而气候模式对MJO的预报时效在2025年将可能达到49 d。新预报量的设计和业务化、下一代数值预报模式以及资料同化技术的研发等, 将成为数值天气预报领域发展的新趋势。

关键词: 气象业务中心, 预报能力, 量化分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.002

Key Forecasting Skill Scores of Leading Operational Centres: Comparison and Outlook

Li Jinghua, Tian Xiaoyang, Jia Pengqun

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 10081)

Abstract: This paper compares global weather forecast models of leading operations centres with their forecast skills based on reviews of literature and websites of World Meteorological Centers named by WMO. The skill scores currently applied in assessing core forecasting capabilities of leading operational centres are discussed. The skill scores of 2025 and 2035 are projected based on the progress-curves of forecast skill evolution over the past 10 years or more. Although the advance of forecast skill would obviously slow down, the improvement of skillful forecasts will be evident. Forecast lead of 500 hpa geopotential height would be 8.5 and 10.5 days by 2025 and 2035, respectively. The corresponding values would be 7.6 and 8.4 days for high resolution models and both 10 days for multi-model meteorological element forecasts. Prediction skills of Niño 3.4 SST anomaly for the next 3 months and the next 6 months are likely to reach 93% and 86% in 2025, and 96% and 90% in 2035. The MJO forecast lead might be 49 days in 2025. New predictors, next generation numerical models and improved data assimilation are key players in further advancing forecast skills.

Keywords: operational centres, forecast skill, quantitative analysis

0 引言

世界气象组织(WMO)为了促进气象科学的发展, 将天气和气候预报更加广泛地应用于世界各国, 尤其是发展中国家, 从而提升全球人民福祉, 近年来特别加

强和突出了对世界气象中心的建设。在1967年认定了美国、俄罗斯和澳大利亚等3个世界气象中心之后, 2017年, 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、英国、加拿大、日本和中国成为第二批被认定的世界气象中心。世界气象中心在推进数值天气预报(NWP)业务化进程中, 发挥着越来越重要的作用^[1]。并且, 在全球化背景下, 气象业务中心的职责还需在世界气象发展中发挥“中心”的作用和价值^[2]。

WMO作为联合国旗下各国气象部门的协调机构, 一直关注作为现代天气预报能力核心工具的各国业务数值天气预报模式能力的提升。在2011年第16次WMO大会上, 通过了在基本系统委员会(CBS)建立一个

收稿日期: 2018年8月25日; 修回日期: 2018年12月10日
第一作者: 李婧华(1987—), Email: lijinghua@cma.gov.cn
通信作者: 贾朋群(1961—), Email: jiapq@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局2018年局校合作项目“气象科技前沿动态研究”; 中国气象局科技与气候变化司委托研究项目“核心技术领域的发展动态和国别研究”

评估确定性NWP预报的验证中心（WMO LC-DNV）的决议，ECMWF被指定为该中心的责任机构，实时和分阶段针对各国NWP模式指标给出汇总和评价。

如何预测以上述气象中心为代表的气象预报能力的发展，具有很大的挑战性。尤其是，当预报水平更加接近可预报性的极限，预报能力的递增速度在最近10年已出现减缓的迹象。在这样的背景下，对预报预测能力进行评估和预测，不确定性会大幅度增加。

本文所指的“主要气象业务中心”，包含了截至2018年7月，在LC-DNV网页上针对各国业务预报模式能力进行实时验证的约10个国家气象业务中心。目前，进入实时验证结果监测的国家气象业务中心的数量还在增加。本文借助近年来针对主要气象业务中心模式预报能力的对比分析结果，用核心预报指标梳理了这些中心预报能力的进步，并在此基础上结合“领先水平”的发展痕迹，特别是过去10年里预报预测水平提升的幅度，在给出当前水平（2016—2017年）的同时，对未来10年（2025年）和20年（2035年）国际

上预报预测的先进水平将可能达到的高度进行讨论。

1 模式的可预报性

经典天气预报理论中，洛伦茨基于大气混沌的本质，认为天气的可预报性为16.8 d。随着模式模拟技术的发展、学界对非线性过程认识的进步以及计算、模拟技术改进带来的手段更新等，可预报性问题得到了更加清晰的解析和拓展。在2014年WMO世界天气公开科学会议上，多位学者从动力、数值方法、云及辐射和陆-气、海-陆等相互作用的角度，梳理了科学界对可预报性的最新认识进展^[3]。Buizza等^[4]重新综合审视可预报性时，从模式与预报对象的时空尺度出发，给出了新的可预报性2D分布（图1）。可预报性时效大大提高，其中可提前接近1年预报的要素为月平均海面温度距平和厄尔尼诺等与气候信号密切相关的变量统计值。其余预报要素从易到难的排列为：月平均2 m温度和气压、遥相关指数、高空场、地面场、降水和极端天气。这些要素的可预报性空间尺度范围从1万千米的大陆尺度到100千米及以下的中小尺度。

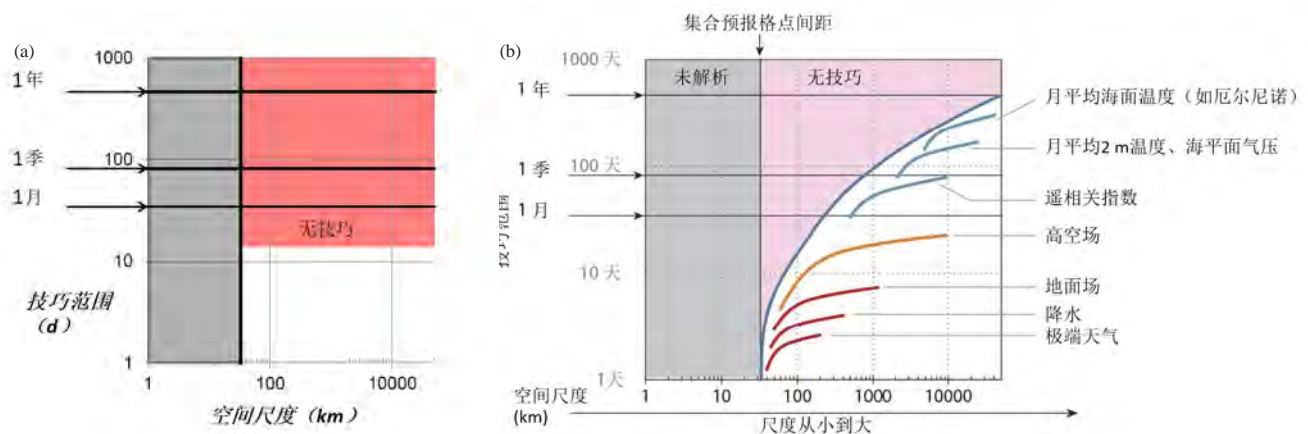


图1 洛伦茨经典可预报理论 (a) 和最新研究给出的可预报性2D分布 (b)

Fig. 1 Classical predictability theory by Lorenz (a) and 2D distribution of most recent predictability (b)

从更广泛的视野审视与预报相关的时空和地球圈层之间的联系，可以得到针对大气、陆地和海洋的可预报性分布。短期天气（7 d以内）和月预报之间时间尺度的预报预测，含有复杂的大气-陆地-海洋相互作用机制，而季节内到季节（S2S）预报中更多的信号来自海洋。

2 NWP全球业务模式核心指标

2.1 目前主要气象中心的全球天气预报业务模式

全球模式是气象业务中心开展确定性预报的核心工具，基于以往研究^[5-13]，表1梳理了目前部分气象中心业务数值预报模式的情况。当前全球数值天气预报模式主要基于初始时间概率分布函数估计模型，通过

集合系统对天气演变进行预报。先进的全球集合预报系统大约有20~50个成员，模式水平分辨率在9~50 km，垂直层数为100层左右。北半球500 hPa高度场最初集合离散度约2.5 m（大约是变率的3%），在预报最初24 h内以指数增长，10 d内发散到70 m左右。

预报系统性能领先的ECMWF，其模式水平分辨率达9 km，垂直层数为137层，预报时效在10~15 d。2017年，ECMWF将其综合预报系统（IFS）升级为IFS Cycle 43r3：改进了对流模拟，采用了新的辐射方案和气溶胶气候学，并且更好地利用了下投式探空仪数据和其他观测数据。

未来5~10年，随着各国气象部门业务主模式的

表1 部分气象中心全球业务模式
Table 1 Overviews of some operational NWP systems

机构	模式	水平分辨率	垂直层数 (模式顶)	集合 成员数	预报范围 (d)	初始状态	预报频次 (UTC)	方程*	时间 积分*	分类*	来源
欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)	IFS-HRES	T1279 (9 km)	L137 (0.01 hPa)		0~10		00, 12				
	IFS-ENS	T639 (18 km)	L91	51	0~15			H	SISL	PBTI	ECMWF ^[5]
美国国家环境预报中心 (NCEP)	GFS	T1534 (13 km)	L64 (0.27 hPa)								
	GEFS	T254 (55 km)	L42	20	0~8			H	SISL	PBTI	NCEP ^[6]
英国气象局 (UK Met Office)	UM	10 km	L70 (80 km)		0~6	混合增量 4D-Var和 MOGREPS集合	00, 06, 12, 18				
	MOGREPS-G	20 km	L70 (80 km)	控制成员 &17个扰 动成员	0~7	全球分析和44 个ETKF成员扰 动等	00, 06, 12, 18	NH	SISL	PBTI	UKMO ^[7]
日本气象厅 (JMA)	GSM	TL959 (20 km)	L100 (0.01 hPa)		3.5/11	4D-Var	00, 06, 12, 18				
	GEPS	TL479	L100 (0.01 hPa)	27	0~11	全球分析和集合 扰动	00, 12	H	SISL	PBTI	JMA ^[8] Ushiyama et al. ^[9]
法国气象局 (Meteo- France)	ARPEGE	7.5~37 km	L105 (70 km)			4D-Var	00, 06, 12, 18				
	PEARP	10~60 km	L65	35	0~4.5			H	SISL	PBTI	CNRM ^[10] Bouyssel ^[11]
德国气象局 (DWD)	ICON	13 km	L90 (75 km)		0~7.5		00, 12	NH	HEVI	EBTI	DWD ^[12]
加拿大气象局 (CMC)	GEM	Uniform 600×300 (33 km at 49°lat.)	L80 (0.1 hPa)					NH	SISL	PBTI	CMC ^[13]

*H表示流体静力模式，NH表示非流体静力模式；SISL表示半隐式半拉格朗日法，HEVI表示水平显式垂直隐式格式；PBTI表示路径时间积分，EBTI表示欧拉时间积分。

更新换代以及高性能计算机的发展，全球NWP业务模式分辨率将达到千米尺度。其中ECMWF的战略目标是，到2025年以5 km的分辨率进行全球集合预报。

反映各国NWP预报系统性能的指标，几乎与系统可输出变量一样多，但其中最关键的两项指标，是ECMWF认定的最能反映预报系统整体性能的500 hPa位势高度和850 hPa温度的可预报时效。本节主要围绕这两项指标及其他类似指标（如降水预报）展开。

2.2 ECMWF 为代表的全球领先模式核心指标现状

ECMWF给出的截至2017年底各种核心业务指标统计^[14]中，影响最大的预报产品——北半球中纬度24 h降水集合预报的进步明显，从21世纪初的2.5 d增加到7 d左右。尽管如此，对比21世纪前10年和最近10年的预报进步幅度，可以发现预报的改进速度明显“减缓”（图2），且在更多变量和时次预报中也是如此，但变缓的进步仍使10 d左右的预报具有价值。

从全球主要气象中心的预报指标演变和相互比较中看出，21世纪以来ECMWF的发展趋势也代表了世界预报业务整体上的进步。从图3中多个气象中心指标进步速度的比较^[15]可以看出，21世纪以来，第二个10年与第一个10年相比，各主要气象业务中心的预报系统性能提升速率都明显放缓。此外，在这张比较图中加入了再分析数据。这是因为模式的表现不仅依赖于预报系统，还与大气的可预报性和活跃程度等有关。再分析数据的加入，可以将某个时段内的实际业务预报系统表现与几年内不变的参考系统进行比较，



图2 ECMWF北半球中纬度24 h降水总量集合预报有效天数变化（2002—2017年）（图中给出预报时效（CRPSS≥0.1）的12个月滑动平均值）

Fig. 2 Ensemble forecast skill of predicting 24-hour precipitation totals in the northern hemisphere extratropics from 2002 to 2017. The computation of skill is based on the continuous ranked probability skill score (CRPSS). The chart shows 12-month running average values of the forecast range at which the CRPSS drops below 0.1

从而更加清晰地解读出预报系统的相对进步。

3 全球NWP模式2025和2035年性能进步预测

对世界上主要气象业务中心在未来10年甚至更长时间内预报水平提升幅度的估计，有多种方法和渠道。首先，各国气象部门在其战略中，定性或定量提出未来核心指标的改进目标，例如ECMWF制定的2016—2025年战略，在预报方面明确提出了“2+4+1”战略，即到2025年高影响天气的有效集合预报提前2周，大尺度形势和机制转化预报提前4周，

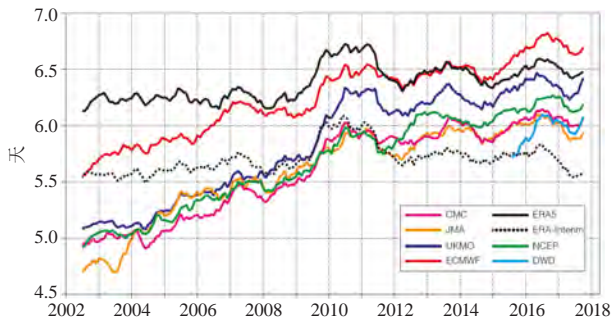


图3 世界上6个主要气象中心2002—2017年业务系统北半球中纬度500 hPa位势高度预报有效(距平相关 $\geq 80\%$)预报的天数变化,图中还给出2个再分析结果用于参考
Fig. 3 Lead time of anomaly correlation for 500 hPa geopotential in the northern hemisphere extratropics at global forecasting centres from 2002 to 2017. ERA-Interim and ERA5 are also shown for reference

全球尺度异常预测提前1年^[16]。NOAA天气气候预报机构NCEP提出,未来5年部分预报系统升级的主要特征为:水平分辨率进入10 km,区域模式和预警服务进入1~3 km,集合成员数稳定在20~30个,最长预报时段超过1年,达到15个月^[17]。此外,在最新发表的一些评述文章中^[4,18],基于过去模式性能改进的技术和科学推动以及未来新技术在获取新资料和改进模式分辨率等方面发力的分析,给出了未来预报模式改进的乐观估计,以及面临的挑战(图4)。

3.1 基于全球预报过去20年的改进:2025和2035年预报时效将分别提高到8.5和10.5 d

图5分别给出过去22和18年ECMWF与NCEP全球预报系统的预报时效的改进进程^[4,19]。ECMWF当前5 d预报与22年前的2 d预报相当,而目前的15 d预报与过去的10 d预报相当;NCEP在截止2017年的过去18年里,预报时效提高了4 d。综合两个机构的预报时效提升速率,即如果平均每10年提高近2 d的进程在未来20年里持续,那么目前主要预报指标大约6.7 d的时效,在2025和2035年可分别提高到8.5和10.5 d。

3.2 基于高分辨率模式过去22年的改进:2025和2035年时效分别提高到7.6和8.4 d

高分辨率模式是目前各国气象部门、研究机构和企业重点研发的预报工具,其意义不仅在于大幅度提升观测大数据和区域预报两端的数据吸纳和服务能力,更在于未来人工智能(AI)更多地介入NWP后^[20],高分辨率模式可成为支持全球模式通过机器学习解读更多模拟中“灰色”地带的有效手段。图6给出过去20年,ECMWF高分辨率模式系统预报时效的改进:最近10年预报时效增加了0.8 d,从大约6.0 d提高到6.8 d^[4]。未来10~20年,预报时效持续进步将使高分

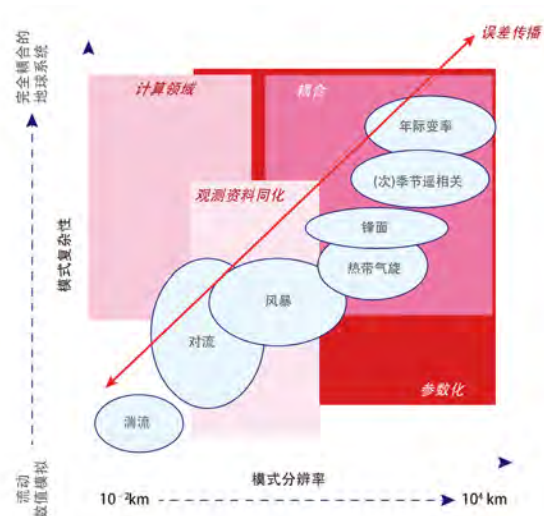


图4 未来数值天气预报的关键挑战领域。预测技术的进步来自计算科技的革新、物理过程的参数化表达、地球系统构件的耦合、先进观测资料同化算法的使用、通过集成方法对不确定性的一致描述以及它们在不同尺度的相互作用等。椭圆部分表示数值模式中解析的 $10^{-2} \sim 10^4$ km尺度范围内的主要现象,并展示出从小尺度范围流动到完全耦合地球系统的模拟复杂性;框表示未来预测技术改进遇到的最重要挑战;箭头表示跨分辨率尺度和地球系统显现的误差传播重要性

Fig. 4 Key challenge areas for NWP in the future.

Advances in forecast skill will come from scientific and technological innovation in computing, the representation of physical processes in parameterizations, coupling of Earth-system components, the use of observations with advanced data assimilation algorithms, and the consistent description of uncertainties through ensemble methods and how they interact across scales. The ellipses show key phenomena relevant for NWP as a function of scales between 10^{-2} and 10^4 km resolved in numerical models and the modelled complexity of processes characterizing the small-scale flow up to the fully coupled Earth system.

The boxes represent scale-complexity regions where the most significant challenges for future predictive skill improvement exist. The arrow highlights the importance of error propagation across resolution range and components of the Earth system

分辨率预报系统的时效分别提升到7.6和8.4 d,接近同期集合预报水平。

3.3 多种模式要素预报:过去10年进步在1~2 d

图7给出过去20年,ECMWF在温度和降水预报上的改进:其中最近10年预报时效增加了0.8~2 d,这些要素在未来10~20年持续改进,将让这些关键预报分别得到可期待的1~2 d和2~4 d的改进^[4]。对比前面针对可预报性的讨论,到2035年前后,各类集合和确定性模式预报的水平,预报有效性将全面接近和进入10 d,也更加接近可预报性的极限。

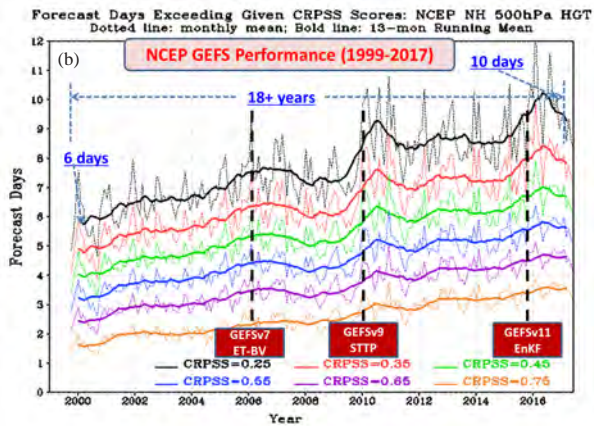
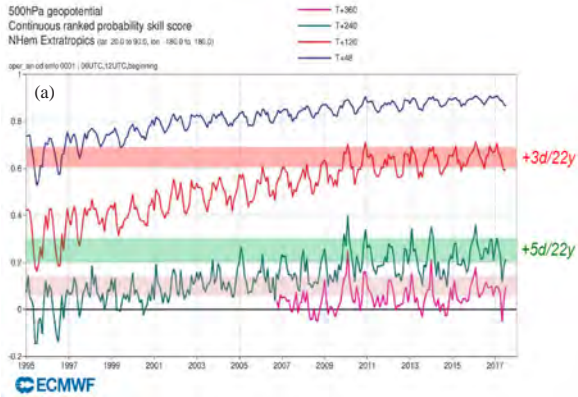


图5 ECMWF (a) 和NCEP (b) 预报系统对500 hPa位势高度预报指标的进步历程
Fig. 5 Improvement of forecast skill of 500 hPa geopotential height at ECMWF (a) and NCEP (b)

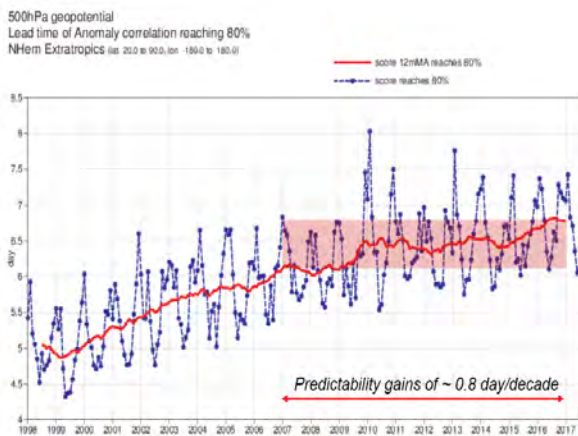


图6 ECMWF高分辨预报系统HRES对500 hPa位势高度预报的进步历程
Fig. 6 Improvement of 500 hPa geopotential height prediction by ECMWF high resolution model HRES

4 耦合气候模式和地球系统模式核心能力指标

1967年, Manabe等^[21]论述一维辐射对流平衡模式的论文, 被认为是现代数值气候模式研究的起点^[22]。在20世纪随后的时间里, 气候模式被加入了更多的要

(a) Results indicate that the reliability and accuracy of the ECMWF medium-range ensemble (ENS) has been increasing continuously, with gains of 1.5-2.0 days/decade.



(b) Supplementary score for HRES forecasts: 1-SEEPS (Stable Equitable Error in Probability Space) score for 24-h precipitation totals in the northern extra-tropics (verified against synop observations).



(c) Supplementary score for ENS forecasts: Continuous Ranked probability Skill Score (CRPSS) for 24-h precipitation totals in the northern extra-tropics (verified against synop observations).



图7 ECMWF 1998—2017年850 hPa温度 (a)、降水总量 (SEEPS验证, b) 和降水 (分级概率技巧, c) 预报进步历程和最近十年的进步幅度

Fig. 7 Forecast improvement of 850 hPa temperature (a), total precipitation (SEEPS, b) and precipitation (CRPSS, c) at ECMWF from 1998 to 2017

素, 模式的结构和计算也走向精细化。Manabe等最初的辐射对流模式已经演化为辐射驱动, 计算的复杂化也使模式发展成当前多圈层耦合的地球系统模式。最新地球系统模式的突出特点是包含了生物圈等相互作用, 如碳循环、陆地海洋生态系统和生物地球化学、大气化学以及自然和人为干扰^[23]。

20世纪90年代起, 世界气候研究计划 (WCRP) 耦合模拟工作组 (WGCM) 组织开展耦合模式比较计划 (CMIP)。前两个阶段影响范围局限在气候模式界, 第三阶段 (CMIP3) 起, 模式结果的公开性大大增加, 开始为其他研究团体所用。2008年启动的CMIP5, 已成为政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 评估报告的重要参考。当前试验阶段为CMIP6^[24], 共44家机构参与。参与CMIP6的气候中心及其耦合模式或气候系统模式的情况, 能够给出当前此类模式的全球概览。

4.1 耦合气候模式和地球系统模式的核心指标

关于模式分辨率, CMIP3周期的典型水平分辨率

为大气250 km, 海洋1.5°。7年后的CMIP5周期中, 分别缓慢进步到150 km和1°。截止到2016年, CMIP6部分模式分辨率能实现大气至少50 km和海洋0.25°。对于气候预测相关指标, CMIP6的一个目标是实现及时高效并长期的模式基准测试和评估, 并将其发展为常规操作^[25]。WGCM会议上, 通过了两个将用于CMIP6系统性和即时性能评估的工具ESMValTool (Earth System Model Evaluation Tool)^[26]和PMP (PCMDI Metrics Package)^[27]。这两个工具选择的指标基于IPCC AR5第一工作组报告第9章, 该章中给出了针对大气、臭氧和气溶胶、碳循环、海洋等35个指标。其他一些指标的选择思路^[28], 如对CMIP5部分模式进行的回顾性评估中, 选用的是与地球能量收支相关的44个指标。CMIP6的最新评估结果在两个工具网站上保持更新, 这项工作可对未来气候预测核心指标的选取起到重要指示作用。

世界天气研究计划(WWRP)和WCRP S2S项目选择的关键指标, 一为MJO预测技巧, 二为天气型转变预测。在2013—2017年的第一阶段实施中, 10个S2S模式中, 有7个MJO提前20天预报的双变量相关技巧(bivariate correlation skill)超过0.5, 只有1个模式(ECMWF)预报时效达到30天(图8)^[4, 29]; 在天气型转变预测方面, 北大西洋涛动(NAO)正负转型预报可提前3周, 其他天气型的转化提前16天预报。

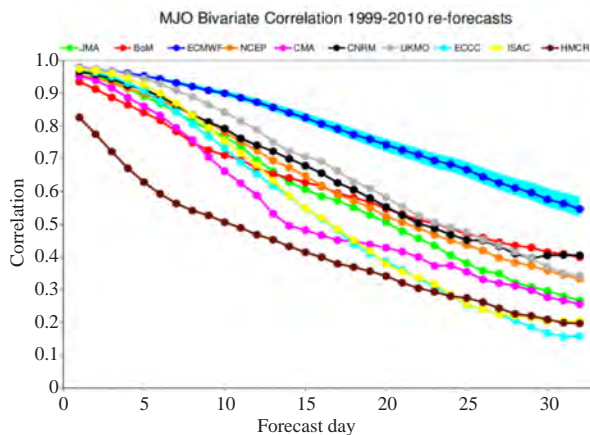


图8 10个S2S模式模型集合均值与ERA Interim之间的MJO双变量相关性相对提前期的演变

Fig. 8 Evolution of MJO bivariate correlation compared to lead time between the mean values of 10 S2S model sets and ERA-Interim

NOAA气候预测中心对季节温度的预报指标在2018年1月技巧达到36.9, 超过该年度的目标(26), 过去10年实现有效预报占比也保持上升^[30]。英国气象局季节和年代际预报系统对NAO的冬季预测技巧发展指出^[31], 1993—2016年间季节预报相关技巧为62%,

对下一个冬天预测的技巧为42%^[32], 并且随着集成员增加, 未来季节预报有可能接近0.8。

4.2 气候预测主要指标的进步和未来指标预测

根据ECMWF模式对MJO预报时效的发展, 2006—2016年, 预报时效(双变量相关 ≥ 0.5)10年约增加12 d^[15]。如保持此进步速度, 到2025年将达到49 d。

在2004年NCEP召开的纪念全球NWP业务开展50周年的学术会议上, Lord^[33]对那时NCEP的预报水平进行了阐述, 用Niño 3.4海温距平指标, 给出从1997年冬季到2003年冬季的历史回报结果(图9a), 其中提前3和6个月的相关性分别约为85%和76%(取6个月预报指标的中数)。同样的指标, 当前预报也有很多可比较的量化结果, 例如气候系统历史预报项目(CHFP)集合世界9个中心对1992—2010年历史回报3和6个月技巧分别能达到90%和82%(图9b)^[34]。这样的对比结果表明, 在Niño 3.4海温距平指标为代表的短期气候信号预测方面, 过去15年提前3和6个月的预测水平, 相关性分别提高了5%和6%。

综合考虑, 上述相差大约15年的气候预测指数的进展, 以及目前指标已经非常接近100%的情况, 未来3和6个月针对Niño 3.4海温距平预测的指标, 分别可能达到93%和86%(2025年)以及96%和90%(2035年)的水平。

5 讨论

天气和气候模式的发展, 主要以业务预报需求为导向。在当前预报时效已经接近可预报性极限的情况下, 借助高性能计算新技术和AI等新手段和思路, 以及围绕预报开发新产品支持各种业务服务, 成为推动模式预报有效性及其应用的主要手段。其中, 新预报量的设计和业务化、下一代预报模式和资料同化技术的研发等, 成为目前NWP领域发展的新趋势。

5.1 NWP水平提升的脚步没有停歇

ECMWF最新给出了世界领先的5个气象业务中心2018年和2017年3—5月预报指标的比较(图10)。其中, 在几乎所有的预报时段, 1年里的进步都是“可测量”且是正面的。ECMWF在不断改进和升级其业务预报模式的同时, 2018年, 在其模式输出端新增加了3个重要变量的模式预报场: 闪电、总水汽输送和最大对流有效位能, 以支持更多的模式应用和研究。这些新的预报产品提升了服务(如闪电)和天气诊断(如总水汽输送和对流有效位能)利用的可能。

ECMWF已经明确将其业务集合预报系统的分辨率从当前的18 km提高到5 km, 且试验表明, 提高预

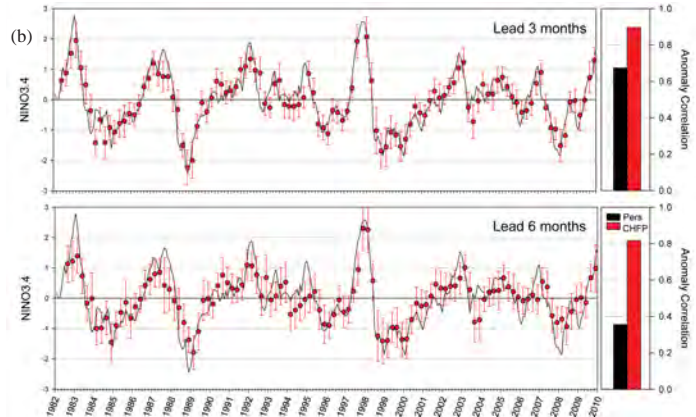
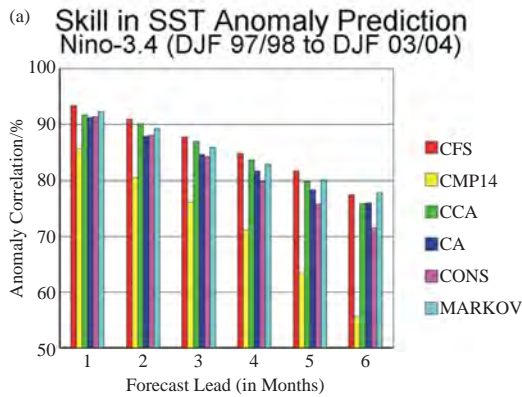


图9 2000年前后NCEP (a) 和CHFP项目给出的9个主要气候预测中心 (b) 针对Nino3.4海温距平指标的历史回报结果
Fig. 9 Hindcast results of Nino-3.4 SST anomaly at NCEP from DJF 1997/1998 to DJF 2003/2004(a) and 9 climate prediction centres in CHFP project(b)

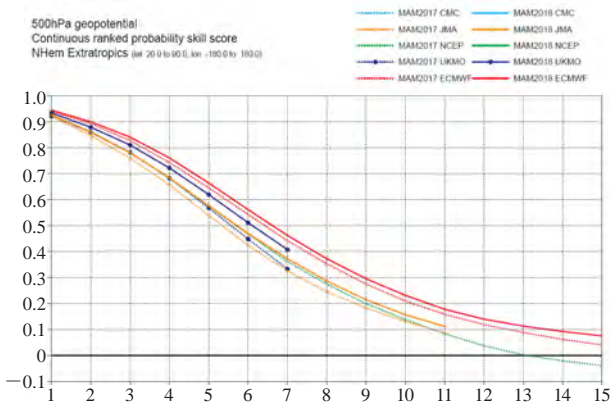


图10 2017和2018年ECMWF (红色)、UKMO (深蓝)、NCEP (绿色)、JMA (橙色) 和CMC (浅蓝) 对北半球中纬度地区500 hPa位势高度预报技巧得分对比
Fig. 10 Forecast skill scores of north hemisphere 500 hPa geopotential at ECMWF (red), UKMO (dark blue), NCEP (green), JMA (orange) and CMC (blue) in 2017 and 2018

报系统分辨率, 将提升预报的准确性。针对2017年9月Irma飓风强度预报表明, 5 km模式试验结果显示出更准确的预报结果。而当集合预报模式的分辨率提高之后, ECMWF当前集合预报系统的模式数量(50个)是否可以大幅度减少, 仍然在试验中。目前的试验表明, 减少模式数量会使中期概率预报的技巧降低。

5.2 2025 和 2035 年两个时段可期的预报指标

针对学者最新给出的可预报性2D分布图^[4], 基于文献研究成果, 本节选取了反映世界气象中心的核心业务指标, 给出当前以及未来10和20年可能的发展趋势(表2)。在分析这些指标过去10~20年进步的基础上, 同时考虑了指标接近可预报极限, 增幅减缓的可能。

表2中反映气象业务中心整体能力的所谓核心指

标, 实际上是气象业务中心一系列研发工作及其综合能力在一个总体上的考量。要有效地提升核心能力指标, WMO天气公开科学会议^[3]提出至少以下8个方面高水平的研发工作: 1) 理论进步; 2) 重大国际外场试验和观测技术(雷达、廓线仪和卫星等)复杂研发互动; 3) 数值方法挖掘(谱方法、有限元等); 4) 次网格尺度物理参数化(深对流、云、山脉等); 5) 大气-海洋-海冰和陆面-水文耦合; 6) 大气扩散和空气质量; 7) 地面、高空和卫星观测系统的资料同化; 8) 高性能计算系统。

目前世界上领先的数值天气预报机构ECMWF, 在酝酿其2016—2025年战略时, 前任中心主任作为作者之一, 在著名期刊*Nature*上发表了评述NWP进步的评述文章, 指出天气气候预报技术的巨大进步是“静悄悄的革命”, 文后给出了多达100篇文献, 这些文献在指明了NWP进步所依据的更广泛领域科学和技术进步的同时, 更意味着数值模式能力的提升, 需要多领域日积月累的创新研发活动才有可能。

参考文献

- [1] 贾朋群, 胡英, 薛纪善. 业务化数值天气预报50年: 科学传承与未来展望. 气象, 2004, 12(12): 32-35.
- [2] 周庆亮. 世界气象中心设置、认定与履职简析. 气象科技进展, 2018, 8(4): 129-131.
- [3] WMO. Seamless prediction of the Earth system: From minutes to month. 2015, WMO-No. 1156.
- [4] Buizza R, Leutbecher M, Janousek M. The forecast skill horizon, ensemble prediction: Past, present and future. ECMWF Annual Seminar 2017.
- [5] ECMWF. Operational configurations of the ECMWF Integrated Forecasting System (IFS). 2018. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support>.
- [6] NCEP. Global Forecast System (GFS). 2018. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
- [7] UK Met Office. Met Office Numerical Weather Prediction models. 2017. <https://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/>

表2 世界领先水平核心预报预测指标目前值和未来（2025年和2035年）估计

Table 2 Current values of state-of-the-art core forecast indicators and their extend values in the future (2025 and 2035)

预报业务关键指标	指标说明	当前数值	2025年	2035年
全球NWP模式 核心指标1	500 hPa高度有效预报天数	有效6.7 d (距平相关 $\geq 80\%$)	8.5 d	10.5 d
全球NWP模式 核心指标2	850 hPa温度有效预报天数	有效9 d (CRPSS ≥ 0.25)	10.5 d	12 d
高分/集合预报	24 h降水总量预报	有效4.3 / 7 d	5.2 / 7 d	6.1 / 8.7 d
气候预测	提前3 / 6个月预测 Niño 3.4海温距平	相关性 90 % / 82 %	相关性 93 % / 86 %	相关性 96 % / 90 %
	MJO有效预报天数	有效38 d (BC ≥ 0.5)	49 d	—

unified-model/weather-forecasting.

- [8] JMA. Numerical Weather Prediction models and related application. 2018. <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/nwp.html>.
- [9] Ushiyama T, Sayama T, Iwami Y. The present state of flash flood forecasting utilizing numerical weather prediction in Europe. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 2017, 30(2): 112-125.
- [10] CNRM. ARPEGE. 2018. <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article121>.
- [11] Bouyssel F. Météo-France report. WGNE-30, 23-26 March 2015. http://polar.ncep.noaa.gov/conferences/WGNE-30/pdfs/day2/06-Met-France_report.pdf.
- [12] DWD. The actual operational numerical weather prediction and emergency response system. 2018. https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/06_nwp_emergency_response_system/num_weather_prediction_emergency_system.html?nn=480860.
- [13] CMC. The Global Deterministic Prediction System (GDPS) version 6.0.0 of the Meteorological Service (MSC) of Canada. 2017.
- [14] ECMWF. ECMWF Annual Report 2017, 2018.
- [15] Bauer P, Brown A, Buizza R, et al. ECMWF 2016-2025 strategy: moving towards seamless ensembles. EGU General Assembly 2018, April 8-13 2018.
- [16] 贾朋群. ECMWF未来10年“2+4+1”战略, 将天气气候预报引向极致. *气象科技进展*, 2016, 6(4): 29.
- [17] Tolman. NOAA Modeling Forum, Prediction Suites in 2018. AGU Fall Meeting, 2017.
- [18] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55
- [19] Zhu Y J. Potential operational capability for S2S prediction, metrics, post-processing, and products for S2S workshop, 28 Feb. - 2 Mar. 2018, College Park, MD, USA.
- [20] 许小峰. 从物理模型到智能分析——降低天气预报不确定性的新探索. *气象*, 2018, 4(3): 341-350.
- [21] Manabe S, Wetherald R T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Science*, 1967, 24(3): 241-259.
- [22] Forster P. In Retrospect: half a century of robust climate models. *Nature*, 2017, 545(7654): 296-297.
- [23] Bonan G, Doney S. Climate, ecosystems, and planetary futures: the challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 2018, 359(6375): eaam8328.
- [24] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 1937-1958.
- [25] Eyring V, Gleckler P, Heinze C, et al. Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(4): 813-830.
- [26] Eyring V, Righi M, Lauer A, et al. ESMValTool (v1.0) - a community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, 2015, 9(5): 1747-1802.
- [27] Gleckler P, Doutriaux C, Durack P, et al. A more powerful reality test for climate models. *Eos*, 2016, 97.
- [28] Baker L H, Shaffrey L C, Sutton R T, et al. An intercomparison of skill and over/underconfidence of the wintertime North Atlantic Oscillation in multi-model seasonal forecasts. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 7808-7817.
- [29] WMO. WWRP/WCRP Sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) phase I final report. 2018, WWRP 2018-2. World Meteorological Organization.
- [30] DeWitt D. CPC Current capabilities and metrics (Part I) and key science challenges to improving S2S forecast skill (Part II). 2018.
- [31] Scaife A. Skilful Long Range Forecasts for Europe. 2018.
- [32] Dunstone N, Smith D, Scaife A, et al. Skillful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead. *Nature Geoscience*, 2016, 9(11): 809-814.
- [33] Lord, S. The Future of NWP. 2004.
- [34] Tompkins A M, Zárate M, Saurral R et al. The climate-system historical forecast project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 2293-2301.