

# 集合预报及其在季节尺度气候预测中的应用

陈溢豪<sup>1,2</sup>, 张蕴斐<sup>1,3</sup>, 周倩<sup>1,3</sup>, 祖子清<sup>1,3</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 系统回顾了集合预报技术的发展, 介绍了4种比较常用的集合构建方法, 重点关注这些方法在季节尺度气候预测领域的研究进展及应用, 特别是在 ENSO 集合预报领域。此外, 还从季节尺度气候预测系统的发展、集合设计方案和 ENSO 集合预报效果等方面介绍了国内外3个应用比较广泛的季节尺度气候预测系统, 可为集合预报技术和季节尺度气候预测系统的发展和应用提供参考。

**关键词:** 集合预报; 季节尺度气候预测; 厄尔尼诺; ENSO

**中图分类号:** P456.7; P732.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-0239(2020)06-0102-10

## 1 引言

因为初始条件的不确定性和模式物理参数化过程的不完美, 任何预报都难免存在误差。在大气非线性过程的作用下, 这些误差会慢慢增大, 最终造成预报完全失去预报技巧, 因此单一性的预报是不可靠的<sup>[1-3]</sup>。为了从单一性预报转向概率预报, Epstein<sup>[4]</sup>提出了随机动力预报。后来, Leith<sup>[5]</sup>通过一组大约10个预报的集合平均, 即“蒙特卡罗法”, 有效改善了预报的结果, 且更加实用。“蒙特卡罗法”有效降低了计算量, 使概率预报成为了可能, 并为后来集合预报技术的发展提供了理论基础。

所谓的集合预报是指一个集合由多个单一的预报组成, 因为大气或海洋的真实状态是未知的, 所以每个预报都代表了一个可能发生的情况。一个设计合理的集合应该与预报事件的概率密度分布相关。Leith<sup>[5]</sup>认为, 只要集合初始扰动能够很好地反映初始状态的不确定性, 集合平均的结果就会优于确定性预报。除此之外, 集合预报还可以用来评估预报的可靠性<sup>[6-7]</sup>, 通过 Talagrand 分布、Brier Score (BS) 评分、离散度、信噪比等方法提供概率预

报, 甚至可以通过集合来确定观测敏感区域。在这些敏感区域增加观测可以较大程度地提高初始条件的准确性<sup>[8-9]</sup>。

理论上来说, 一个集合的集合成员越多, 集合成员样本分布就越接近预报事件的概率密度分布。Lopez 等<sup>[10]</sup>通过将耦合模式积分 3~12 d 产生集合, 集合预报结果显示, 准确预报极端厄尔尼诺-南方涛动现象 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 需要超过 100 个集合成员。但是越多的集合就意味着越高的计算代价。目前业务化集合预报系统使用的集合成员数目在 10~50 个之间。气候系统历史预报项目 (Climate - system Historical Forecast Project, CHFP)<sup>[11-12]</sup> 和世界气候研究计划 (World Climate Research Programme, WCRP) 要求集合成员数目不应少于 10 个。因此, 在集合成员有限的条件下, 使用哪种初始扰动方法及如何选取合适的集合成员, 使得所选样本能够尽量代表预报事件的概率密度函数, 是集合预报的关键问题。构建集合成员的方法有很多种, 其中最具代表性的两种提供初始扰动的方法是奇异向量法 (Singular Vector, SV)<sup>[13-14]</sup> 和繁殖向量法 (Breeding Vector, BV)<sup>[15]</sup>, 分别由欧洲中期天

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-03-11。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604203)。

作者简介: 陈溢豪(1994-), 男, 硕士, 主要从事集合预报研究。E-mail: wscyh2953917@126.com

气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)于1992年应用于业务化天气预报中。

虽然大气的可预报性限度仅为两周左右,但是海洋和大气不同,海洋有“慢变”的特性。Charney等<sup>[16]</sup>认为,由海表面温度、气溶胶、土壤湿度等变量驱动的低纬变率有更长的可预报性期限,季节尺度的气候预测理论基础由此而来。后来,通过在热带地区增加观测<sup>[17]</sup>和对ENSO的成功预测<sup>[18]</sup>,人们对海气耦合系统有了更深入的了解,并逐渐认识到开展耦合系统气候预测的重要意义。一些预报中心也相继开始了业务化的季节尺度气候预测<sup>[19-21]</sup>。当然,因为海洋也是一个非线性系统,所以在气候预测发展的过程中,集合预报技术发挥了重要的作用。

集合预报技术从提出到现在已经有了长足的发展,一些构建集合的方法已经比较成熟。关于集合预报的综述有很多<sup>[22-27]</sup>,但是大部分文献发表时间较早,没有讨论集合预报最近的发展情况。此外,关于集合预报在气候预测领域的应用也鲜有论述。基于以上原因,本文对前人的文献进行总结,介绍了集合预报技术在季节尺度气候预测领域的最新研究成果。因为季节尺度气候预测的技巧主要来自ENSO预报,本文主要针对ENSO讨论集合预报的发展。文中第二部分探讨了几个常用的构建集合的方法以及这些方法在ENSO预测方面的应用;第三部分列出了国际和国内应用比较广泛的3个季节尺度气候预测系统;第四部分是全文总结以及对未来的展望。

## 2 构建集合的方法

根据初始扰动是否取决于基本流场的动力特点,可以将集合预报方法分为非动力学方法和动力学方法。“蒙特卡罗法”通过向初始条件添加随机扰动来产生集合,属于非动力学方法。该方法能较容易地产生大量的集合成员,但并未考虑初始分析误差的空间分布,且无法描述不稳定的随时间增长的初始扰动,因此在集合样本不足的情况下,该方法的集合平均预报技巧往往较低<sup>[28-29]</sup>。Hoffman

等<sup>[28]</sup>发展了滞后平均预报(Lagged Average Forecast, LAF)来代替“蒙特卡罗法”,通过延后不同长度的起报时间来构建集合。虽然LAF提供的初始扰动的增长速度仍然较低,但该方法考虑了动力影响,其预报技巧比“蒙特卡罗法”有较大改进,因此在一些业务中心得到了应用<sup>[30-33]</sup>。Toth等<sup>[29,34]</sup>认为相对非增长型的随机扰动,增长型扰动能够在预报的初始阶段快速放大,成为误差的主要来源,因此,快速增长型的扰动也是最优扰动。SV和BV就是两种常用的获取最优初始扰动的方法。除了这两种方法外,Kalnay<sup>[35]</sup>认为在动力学方法中还有两种非常有前途的方法,分别是基于资料同化的集合预报(以下简称“资料同化法”)和多系统集合法。构建集合的方法有很多种,因为篇幅有限,本文仅对SV、BV、资料同化法和多系统集合法这4种集合预报方法进行介绍。

### 2.1 SV

通过对切线性模式的传播算子进行奇异向量分解得到第一奇异向量,该奇异向量的模态就是在预报初始阶段增长最快的扰动<sup>[36-39]</sup>。Moore等<sup>[40-43]</sup>将SV应用在一个研究ENSO的中等复杂程度海-气耦合模式上,获得了耦合切线性模式的奇异向量模态。但是,同中等复杂程度的模式不同,全耦合模式有更多的维度和更完整的物理过程。在全耦合模式中,小尺度扰动的增长速率更快,从而会“淹没”气候态奇异向量的增长。为了滤掉这些小尺度的扰动,Kleeman等<sup>[44]</sup>提出了一种称作“气候态海温奇异向量”的方法,并在NSIPP(NASA Seasonal-to-Interannual Prediction Project)模式上进行了试验,将得到的奇异向量模态与在中等复杂程度耦合模式上精确计算得到的奇异向量进行比较,发现两者的模态具有很高的相关性。Tang等<sup>[45]</sup>利用这个方法研究了不同初始条件对奇异向量模态的影响,这些初始条件包括不同范围(Nino3、Nino4和整个热带太平洋地区)、不同ENSO位相(厄尔尼诺开始、成熟、中立阶段;拉尼娜开始、成熟阶段)以及不同深度(海表、模式第12层、模式第20层),其结果与中等复杂程度耦合模式的结果基本相同,表明该气候态海温奇异向量方法可以用于计算全耦合模式的奇异向量模态。除此之外,Kug等<sup>[46]</sup>通过近似计算

切线性算子得到奇异向量模态,并用该模态来构建初始扰动,其集合后报(Hindcast)试验结果表明该预报技巧有了显著的改进,他们认为该方法也具有应用于全耦合模式的可能。

当然,SV存在一定的缺陷。在计算奇异向量时要建立与切线性模式对应的伴随模式,这是十分困难的,而且相对其他初始扰动方法需要消耗更多的计算资源,所以通常需要对其进行近似计算。但经过近似的初始扰动可能无法充分反应非线性物理过程的影响,考虑到这个问题,Mu等<sup>[47]</sup>将SV拓展到了非线性领域,提出了条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)的方法。该方法是奇异向量法在非线性框架下的推广。与SV相比,CNOP的结果更能反映大气和海洋系统中的非线性运动特征。CNOP方法被应用到黑潮大弯曲的可预报性和热盐环流年代际变率等问题的研究<sup>[48-50]</sup>,以及确定目标观测敏感区<sup>[51]</sup>的研究中。Duan等<sup>[52]</sup>将CNOP方法推广到数值模式相互独立的相空间中产生正交CNOPs,并将其作为初始扰动应用于台风路径的集合预报研究<sup>[53]</sup>,得到的结果较正交SVs和随机扰动有更高的预报技巧。

## 2.2 BV

BV通过模式积分,将添加微小扰动的预报结果与未添加扰动的预报结果的差值尺度化后作为初始扰动,并通过不断地循环来估计增长最快速的扰动。Toth等<sup>[33-34]</sup>认为,此法模拟了增长型误差的发展。事实上,BV可以看作是李亚甫诺夫(Lyapunov)向量的一种近似计算。与SV相比,BV更为简便,且计算量较小。Toth等<sup>[33-34]</sup>首次将BV应用于天气预报系统,得到了广泛的关注。Cai等<sup>[54]</sup>将其应用到中等复杂程度的海气耦合Zebiak-Cane(ZC)模式上,他们发现使用BV有效提高了预报技巧,相比于随机初始扰动,预报技巧提高了30%左右;特别是当预报时间超过6M时,BV有效降低了“春季预报障碍”对ENSO预报带来的影响。Yang等<sup>[55]</sup>首次实现了将BV应用于全耦合模式NSIPP,并研究了在NSIPP耦合模式上得到的繁殖向量的主要特点。其结果显示,繁殖向量模态振幅的大值区分布在赤道东太平洋。另外,该繁殖向量模态对ENSO的相位有很强的敏感性,该结果同Tang等<sup>[46]</sup>

使用气候态海温奇异向量法得到的结果相似。

BV的主要缺陷是其数学理论基础不如SV完备,未必可以代表预报初始阶段快速增长的扰动。Mu等<sup>[47]</sup>认为BV适用于初始模态与最终模态具有相似结构的扰动。假如最终模态的结构不同于初始模态,将这种最终模态尺度化后作为初始扰动很有可能会降低误差增长率,从而无法得到快速增长的初始扰动。目前,NCEP不再使用该集合预报方法。

## 2.3 资料同化法

资料同化方法使用同化系统来产生初始集合。1995年,Houtekamer等<sup>[56]</sup>使用一个最优插值同化方法产生初始扰动并进行集合预报试验,后来,Houtekamer等<sup>[57]</sup>又在该同化系统中引入了模式的不确定性。他们在不同的分析循环中对所用模式的物理参数进行扰动,希望通过集合平均来消除模式本身存在的误差。虽然该方法存在一些问题,例如得到的扰动在经过数次同化循环后具有很强的非线性,并且集合离散度较低,但是它提供了一种通过扰动模式物理参数来产生集合成员的方法。资料同化方法中的一种具有代表性的方法是集合卡尔曼滤波法(Ensemble Kalman Filter, EnKF),由Evensen于1994年提出<sup>[58]</sup>。EnKF方法在给定时间段内通过不断的模式积分来产生集合,并使用预报集合的经验协方差来更新所有的集合成员<sup>[59]</sup>。EnKF方法在集合预报实验中取得了较好的结果。郑飞等<sup>[60-61]</sup>利用海气耦合模式构建了一个ENSO的集合预报系统,在这个集合预报系统中,初始扰动由EnKF产生,并用一个一阶马尔可夫微分方程来产生代表模式误差的扰动,该系统共有100个集合成员。集合后报试验结果表明,集合预报的结果优于确定性预报,甚至优于一些更加复杂的耦合环流模式。在Ham等<sup>[62]</sup>的实验中,他们在一个海气耦合的模式上使用EnKF产生了16个集合,然后通过计算误差增长率,选取增长率最大的两个成员认为是快速增长的扰动。结果显示,扰动快速增长的集合相比其他集合有更高的预报技巧,并且在ENSO发展和消亡这两个可预报性最低的时间段,预报技巧有了较好的改进。虽然EnKF同样需要消耗较大的计算资源,但是随着计算机性能的提高,该方法逐

渐被人们接受。但是 EnKF 同样存在不足,例如该方法假定观测误差符合高斯分布,那么对于非高斯分布的观测误差可能无法很好地描述其发展特征。基于相同的集合化思想,一系列 EnKF 的衍生算法也相继被提出,如集合变换卡尔曼滤波(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)、集合调整卡尔曼滤波(Ensemble Adjustment Kalman Filter, EAKF)、集合平方根滤波(Ensemble Square Root Filter, EnSRF)等。

最近,越来越多的研究提出<sup>[63-66]</sup>,模式误差对 ENSO 的预测有很大的影响。这里的模式误差不仅指模式物理过程参数化时产生的误差,还包括模式无法表达的但自然界存在的过程可能给模式带来的较大偏差。Zheng 等<sup>[67]</sup>在一个中等复杂程度的耦合模式中加入了一个一阶马尔可夫模式,用来近似描述由于缺少大气随机强迫、印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)等过程而造成的模式误差。另外, Tao 等<sup>[68]</sup>提出了基于非线性强迫奇异向量(Nonlinear Forcing Singular Vector, NFSV)的同化方法,也可用来描述模式误差。实验结果显示,这些同化方法可以更加真实地表达模式误差的发展,因而取得了更好的预报效果。

## 2.4 多系统集成法

通过改变模式的各种参数值或者参数化方案可能会造成一些问题,因为模式在被设计出来时已经经过了无数次的调试,达到了所谓的“最佳状态”,改变某些参数可能会对模式造成巨大的影响。同时,人们发现不同业务中心的模式的集合平均结果优于单个预报,于是提出了多模式集合的方法。多模式集合的优势在于该方法综合考虑了来自初始条件和模式不确定性的误差;另外,由于不同模式使用的参数化方案不同,多模式集合可能可以抵消一部分由于对大气的描述不够充分而带来的误差<sup>[69]</sup>。在多模式集合的思想又发展出了多系统集成。当前各气候研究机构都建立了独立的气候预测系统。一个气候预测系统不仅包括耦合模式,还包括了同化方案、构建集合的策略、评估系统等。制作一个顶尖的气候预测系统,并将其投入业务化运作的费用是非常昂贵的。为了将世界范围内各大研究中心最好的预测系统集成成一个超级集合,

国际上发起了许多合作项目,例如,欧洲多模式集合气候预测系统计划(Development of an European Multimodel Ensemble for Seasonal - to - Interannual Prediction, DEMETER)<sup>[70]</sup>、气候预测与社会应用项目(Climatic Prediction and its Application to Society, CliPAS)和 CHFP 等等。国内则由中国气象局国家气候中心建立了第一代的中国国家多模式集合预测系统,并在国家气候中心官网发布预测产品。但是,这些项目的实现存在许多挑战,例如要统一各个预测系统使用的变量、单位、数据的保存方式和预测的时间范围等。

Wang 等<sup>[71]</sup>评估了一个由 14 个模式组成的多模式集合的季节尺度气候预测能力。在 5 月起报超前 6 M 预报时,14 个模式集合平均的 Nino3.4 指数的相关性达到 0.87,而单一模式的相关性最高只有 0.66。这个集合中的 7 个模式来自 CliPAS,另外 7 个模式来自 DEMETER。Liu 等<sup>[72]</sup>用多模式集合研究了 IOD 的可预报性及潜在可预报性。他们发现多模式集合平均得到的结果优于单一模式的结果,符合其他研究的结论<sup>[73-75]</sup>。一般来说,由于模式数量有限,所得结果在统计上不够显著,而且模式间的不等同性较大,所得结果可能有较大系统偏差。此外,在构建多系统集成过程中,需要充分考虑每个预测系统的特点,分配不同的权重。如何构造多系统集成是集合预报领域中的一个前沿问题。

## 3 业务化的气候预测

气候预测能在社会各个方面发挥巨大作用,特别是对一些受自然环境影响较大的国家,气候预测不仅可以减少自然灾害带来的损失,还可以建议决策者们如何发展那些受气候影响较大的产业。从 20 世纪 80 年代起,一些业务预报中心就开始了季节尺度的气候预测研究<sup>[76-78]</sup>。随着对各种自然过程的深入理解和计算机技术的飞速发展,耦合模式取得了巨大进步。各个预报中心相继建立了业务化的季节尺度气候预测系统<sup>[21,79]</sup>,这些系统主要基于海气耦合或者海-陆-气耦合模式。最近,通过将海冰模块加入到耦合模式中,并考虑了二氧化碳、气溶胶和辐射等因素的影响,同时使用了更高的分辨率,气候预测又向前迈进了一大步。于是,

各个预报中心相继推出了新一代的季节性气候预测系统,并投入了业务化应用。例如,NCEP气候预测系统版本2(Climate Forecast System version 2, CFSv2)<sup>[80]</sup>、ECMWF季节尺度气候预测系统5(SEASonal Forecast System 5, SEAS5)<sup>[81]</sup>、国家气候中心第二代短期(季节尺度)气候预测系统(Beijing Climate Center Second-Generation Climate System, BCCv2)<sup>[82]</sup>等。本文对以上这3个具有代表性的、应用较为广泛的季节尺度气候预测系统进行介绍,并绘制了不同季节尺度气候预测系统对Nino 3.4指数的相关系数预报技巧及使用的集合预报方法(见表1)。

表1 不同预测系统对Nino 3.4指数的相关系数预报技巧及其使用的集合预报方法

预测系统	超前时间/M	Nino 3.4相关系数	集合预报方法
CFSv1	0.5	0.82	LAF
CFSv2	0.5	0.82	LAF
NMME	0.5	0.87	多模式集合
SEAS5	6	0.82	SV+同化
BCCv2	6	0.7	LAF+SV
SEMAP2.0	6	0.8	多方法集合

### 3.1 CFSv2

2004年,NCEP第一代季节尺度气候预测系统(Climate Forecast System version 1, CFSv1)投入业务化使用,这是NCEP第一个海-陆-气完全耦合的季节性气候预测系统。CFSv1得到了广泛的应用,并且因为其出色的表现,在2011年3月新系统CFSv2投入业务化使用的一年多后(2012年9月)才完全停止了CFSv1的使用。CFSv2在CFSv1的基础上有了全方位的改进,并且有许多创新,例如一个新的4层土壤模块、一个相互作用的3层海冰模块、增长的CO<sub>2</sub>浓度的过程等。CFSv2实时业务化预报的初始条件由气候数据同化系统(Climate Data Assimilation System, CDAS)提供。CFSv2采用LAF方法产生集合,业务化预报每天分4个时段(0、6、12、18时,世界时),每次运行4个预报,一共运行16个,其中4个超前9 M的预报,3个超前123 d

的预报,9个超前45 d的预报。CFSv2的后报由气候预测系统再分析数据(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)提供初始条件。CFSv2的后报和业务化预报在物理过程的参数化、参数值的设置和集合的设计上略有不同。同业务化预报相比,后报每天有同样的4个时段,不同的是每5 d做一次超前9 M的预报,即每个月做6次预报,一共24个集合;另外每年11月多做一次预报,因此11月有28个集合。超前9 M的后报时间范围从1982—2010年,共29 a。

通过对CFSv2预测能力的评估发现,CFSv2在各方面都有不错的表现,其超前0.5 M和3 M平均的Nino3.4指数的相关性达到了0.82,优于美国国家多模式集合(National Multi-Model Ensemble, NMME)中的其他成员,等权重的多模式集合平均则达到了0.87。在概率性预报方面,同样选取15个集合,CFSv2的可靠性和BS评分都高于CFSv1,因此可以认为,拥有24个集合的CFSv2的概率性预报技巧比CFSv1有了很大改进。此外,CFSv2对热带季节内振荡(Madden Julian Oscillation, MJO)的预测有了较大改进,其有效的预报时长从6 d增加到了17 d,大大提高了次季节尺度的预测能力。

### 3.2 SEAS5

ECMWF从1997年开始运行业务化的季节性气候预测系统。该系统每5 a左右更新一次,SEAS5作为第五代气候预测系统于2017年11月被投入业务化应用。相较于上一代的预测系统,SEAS5的各个模块都得到了改进,其物理过程参数化更加完善,分辨率显著提高,同时也引入了一个海冰模块,这些变化使得SEAS5整体的预测能力有了很大提升。值得一提的是,SEAS5季节尺度预测和延伸期预测的系统设置之间几乎没有什么差别,也就是说,季节尺度预测和天气预测的系统设置之间的差别正在逐渐减小,SEAS5向无缝系统(Seamless System)又迈进了一步。SEAS5业务化预报使用ECMWF业务化的分析数据作为大气和陆地模块的初始条件,海洋模块则由业务化海洋分析系统5(OCEAN5)提供初始条件。业务化预报共产生51个集合成员,每个集合成员积分7 M。为了能更好预测ENSO的发展,分别在2月、3月、8月和11月的1日,对其中的15个集合多做6 M的预报。SEAS5

大气和陆地模块的初值扰动分别由SV方法和资料同化集合(Ensemble of Data Assimilation, EDA)产生。关于海洋模块的初值扰动,OCEAN5会提供5个初始成员,然后在这5个成员上添加扰动得到初值扰动集合。除了初值扰动,为了代表次网格尺度过程的缺失带来的不确定性,SEAS5对大气模块的物理过程进行扰动,主要使用了SPPT(Stochastically Perturbed Physical Tendency)和SKEB(Stochastic Kinetic Energy Backscatter)两种方案。同业务化预报相比,SEAS5后报的集合成员仅有25个,使用的初始条件也不同,后报时间范围从1981—2016年,其中,1993—2016年的后报数据集被用来计算业务化预报中的距平值。

通过对SEAS5的评估发现,SEAS5相比于上一代的预测系统在大部分情况下都有了显著的改进。SEAS5对Nino3.4指数的预测在超前6 M时的异常相关系数达到了0.84,而超前13 M的异常相关系数从上一个版本的0.48提升到0.63,均方根误差也有了显著的降低。

### 3.3 BCCv2

2005年,我国第一代海气耦合的季节尺度气候预测系统正式投入运行并发挥了巨大的作用。之后,国家气候中心启动了多圈层耦合的气候系统模式的研制工作,并于2012年发布了BCC\_CSM1.1和BCC\_CSM1.1m两个版本的海-陆-气-冰耦合的气候系统模式。这两个版本的气候系统模式得到了广泛的应用,并都被加入到耦合模式比较计划-第五阶段(Coupled Model Intercomparison Project-Phase 5, CMIP5)之中。随后,国家气候中心基于BCC\_CSM1.1 m建立了BCCv2并投入了业务运行。研究表明,BCCv2对东亚夏季风环流和降水表现出一定的预报能力<sup>[83-85]</sup>。BCCv2包含第二代海洋资料同化系统、陆面资料同化系统、月动力延伸预测模式系统和季节性气候预测模式系统4个子系统。2015年开始业务化的季节尺度气候预测,使用LAF方法产生15个集合成员,使用SV方法产生9个集合成员,共24个集合成员,积分13 M,后报范围从1991—2014年。

Ren等<sup>[86]</sup>检验了该气候预测系统对主要的气候变率模态的预测能力。他们发现该系统对印度洋

海盆模具有很高的预报技巧,超前12 M的预报相关系数仍高于0.5,但是对IOD的预测技巧仍然较低。此外,为了对不同类型的ENSO进行有效预测,国家气候中心基于BCC\_CSM1.1 m发展了新一代的ENSO检测、分析和预测业务系统(SEMAP2.0)<sup>[87]</sup>。SEMAP2.0提供了3种ENSO预测方法,分别为一个基于物理过程的统计模型、BCC\_CSM1.1 m和一个基于模拟的误差校正方案。评估显示,BCC\_CSM1.1 m对超前6 M预报的Nino3.4指数的相关系数达到了0.7,而3种方法平均的相关系数则达到了0.8。在实际的预报中,SEMAP2.0较为准确地预报出了2014/2015年弱中部型厄尔尼诺及之后的发展趋势和类型转换。

2017年底,国家气候中心发布了新一代的BCC气候系统模式(BCC\_CSM2.0)用于CMIP6计划<sup>[88-89]</sup>。BCC\_CSM2.0有3种设置,分别为BCC-CSM2-MR、BCC-CSM2-HR和BCC-ESM1.0。Wu等<sup>[89]</sup>比较了BCC-CSM2-MR和BCC\_CSM1.1 m的模拟能力,结果表明BCC-CSM2-MR在各方面都有较好的改进,BCC-CSM2-MR模拟的Nino3.4指数也更加符合HadISST观测资料。相比BCCv2,基于BCC\_CSM2.0建立的季节尺度气候预测系统的预测能力将会得到有效提升。

## 4 总结及展望

集合预报不仅可以通过集合平均等方式提高预报技巧,还可以提供预报概率和预报可靠性等更多有用的信息,近年来,集合预报技术得到了广泛应用。本文从ENSO集合预报的角度介绍了4类常用的构建集合的方法,分别是奇异向量法、繁殖向量法、资料同化法和多模式集合法。这些方法各有优劣,需要根据不同的情况选择合适的方法。集合预报方法总体的发展趋势是从考虑初值误差到考虑模式误差,再到多模式集合,最后到多系统集成。

此外,本文从气候预测系统的集合设计方案和对ENSO等气候变率的预报技巧的角度,介绍了国外比较先进的两个气候预测系统和国内使用的比较广泛的一个气候预测系统,即CFSv2、SEAS5和BCCv2。除了国家气候中心之外,国内许多科研和业务单位在这方面也做了大量的工作。中科院大

气物理研究所基于气候系统模式(Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, FGOALS)<sup>[90]</sup>建立的FGOALS-s2<sup>[91]</sup>和FGOALS-f2<sup>[92]</sup>,作为中国国家多模式集合的集合成员,都在国家气候中心得到了业务化的应用。国家海洋环境预报中心从2008年开始进行业务化的气候预测<sup>[93]</sup>,后来基于通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM),采用牛顿松弛逼近(Nudging)的海洋资料同化方法,建立了新一代的业务化全球气候预测系统<sup>[94-95]</sup>,后报结果的评估表明该系统具有较好的预测能力<sup>[96-97]</sup>。总体上来说,从“蒙特卡洛法”的提出到现在,集合预报方法的研究取得了较大的进展,但是考虑到计算效率等因素,许多集合预报方法还无法应用到实际的预测之中,目前广泛使用的季节尺度气候预测系统仍然选用较为简单、计算成本较低的集合预报方法。因此,如何将先进的集合预报方法应用到实际的业务系统中也是一个亟需解决的问题。另外,和国际最先进的气候预测系统相比,国内气候预测业务系统的发展较为迅速,但仍存在一些差距。国家海洋环境预报中心计划发展以气候态奇异向量、CNOP或以资料同化方法为基础的集合预报系统,以提升我国高影响海气环境事件的预测能力。

#### 参考文献:

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130-141.
- [2] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. *Tellus*, 1965, 17(3): 321-333.
- [3] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion[J]. *Tellus*, 1969, 21(3): 289-307.
- [4] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction[J]. *Tellus*, 1969, 21(6): 739-759.
- [5] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6): 409-418.
- [6] Wobus R L, Kalnay E. Three years of operational prediction of forecast skill at NMC[J]. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(7): 2132-2148.
- [7] Buizza R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system [J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(1): 99-119.
- [8] Bishop C H, Toth Z. Using ensembles to identify observations likely to improve forecasts[C]//Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction. Norfolk, VA: American Meteorology Society, 1996: 72-74.
- [9] Feng R, Duan W S, Mu M. Estimating observing locations for advancing beyond the winter predictability barrier of Indian ocean dipole event predictions[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48(3-4): 1173-1185.
- [10] Lopez H, Kirtman B P. WWBS, ENSO predictability, the spring barrier and extreme events[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(17): 10114-10138.
- [11] Kirtman B, Pirani A. The state of the art of seasonal prediction: outcomes and recommendations from the first world climate research program workshop on seasonal prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(4): 455-458.
- [12] Tompkins A M, De Zárate M I O, Saurral R I, et al. The climate-system historical forecast project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(11): 2293-2301.
- [13] Palmer T N. Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(1): 49-66.
- [14] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122(529): 73-119.
- [15] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the national meteorological center: practical aspects[J]. *Weather and Forecasting*, 1993, 8(3): 379-398.
- [16] Charney J G, Shukla J. Predictability of monsoons[M]//Lighthill J, Pearce R P. *Monsoon Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981: 99-108.
- [17] McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. The tropical ocean-global atmosphere observing system: a decade of progress [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7): 14169-14240.
- [18] Zebiak S E, Cane M A. A model Niño - southern oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(10): 2262-2278.
- [19] Alves O, Wang G, Zhong A, et al. POAMA: Bureau of meteorology operational coupled model seasonal forecast system [C]//Science for Drought: Proceedings of the National Drought Forum. Brisbane: Queensl. Dep. of Primary Ind., 2003.
- [20] Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. The NCEP climate forecast system[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(15): 3483-3517.
- [21] Stockdale T N, Anderson D L T, Balmaseda M A, et al. ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(3-4): 455-471.
- [22] Palmer T N, Mureau R, Molteni F. The Monte Carlo forecast[J]. *Weather*, 1990, 45(6): 198-207.
- [23] Sivillo J K, Ahlquist J E, Toth Z. An ensemble forecasting primer [J]. *Weather Forecasting*, 1997, 12(4): 809-818.

- [24] 杜钧. 集合预报的现状和前景[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [25] 关吉平, 黄泓, 张立凤. 集合预报中初始扰动生成方法的探讨[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 87-90.
- [26] 王辉, 刘娜, 李本霞, 等. 海洋可预报性和集合预报研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1212-1225.
- [27] 段晚锁, 汪叶, 霍振华, 等. 数值天气预报和气候预测的集合预报方法: 思考与展望[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(3): 396-406.
- [28] Hoffman R N, Kalnay E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1983, 35(2): 100-118.
- [29] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [30] Schubert S D, Suarez M. Dynamical predictability in a simple general circulation model: average error growth[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(3): 353-370.
- [31] Murphy J M. Assessment of the practical utility of extended range ensemble forecasts[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116(491): 89-125.
- [32] 杨学胜, 陈德辉, 冷亭波, 等. 时间滞后与奇异向量初值生成方法的比较试验[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 62-66.
- [33] Arribas A, Glover M, Maidens A, et al. The GloSea4 ensemble prediction system for seasonal forecasting[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(6): 1891-1910.
- [34] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [35] Kalnay E. 大气模式、资料同化和可预报性[M]. 蒲朝霞, 译. 北京: 气象出版社, 2005.
- [36] Farrell B F. Optimal excitation of baroclinic waves[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(9): 1193-1206.
- [37] Mureau R, Molteni F, Palmer T N. Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119(510): 299-323.
- [38] Palmer T N, Buizza R, Molteni F, et al. Singular vectors and the predictability of weather and climate[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1994, 348(1688): 459-475.
- [39] Palmer T N, Zanna L. Singular vectors, predictability and ensemble forecasting for weather and climate[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2013, 46(25): 254018.
- [40] Moore A M, Kleeman R. The singular vectors of a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. I: thermodynamics, energetics and error growth[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(540): 953-981.
- [41] Moore A M, Kleeman R. The singular vectors of a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. II: sensitivity studies and dynamical interpretation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(540): 983-1006.
- [42] Moore A M, Kleeman R. Skill assessment for ENSO using ensemble prediction[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, 124(546): 557-584.
- [43] Moore A M, Kleeman R. The differences between the optimal perturbations of coupled models of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(2): 138-163.
- [44] Kleeman R, Tang Y M, Moore A M. The calculation of climatically relevant singular vectors in the presence of weather noise as applied to the ENSO problem[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(23): 2856-2868.
- [45] Tang Y M, Kleeman R, Miller S. ENSO predictability of a fully coupled GCM model using singular vector analysis[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(14): 3361-3377.
- [46] Kug J S, Ham Y G, Kimoto M, et al. New approach for optimal perturbation method in ensemble climate prediction with empirical singular vector[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 35(2-3): 331-340.
- [47] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, 10(6): 493-501.
- [48] Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(1): 118-134.
- [49] Zu Z Q, Mu M, Dijkstra H A. Optimal nonlinear excitation of decadal variability of the North Atlantic thermohaline circulation[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(6): 1368-1374.
- [50] Zu Z Q, Mu M, Dijkstra H A. Three-dimensional structure of optimal nonlinear excitation for decadal variability of the thermohaline circulation[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(6): 410-416.
- [51] Zhou F F, Mu M. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 997-1010.
- [52] Duan W S, Huo Z H. An approach to generating mutually independent initial perturbations for ensemble forecasts: orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(3): 997-1014.
- [53] Huo Z H, Duan W S, Zhou F F. Ensemble forecasts of tropical cyclone track with orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 231-247.
- [54] Cai M, Kalnay E, Toth Z. Bred vectors of the Zeblak-cane model and their potential application to ENSO predictions[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(1): 40-56.
- [55] Yang S C, Kalnay E, Cai M, et al. ENSO bred vectors in coupled ocean-atmosphere general circulation models[J]. *Journal of Cli-*

- mate, 2006, 19(8): 1422-1436.
- [56] Houtekamer P L, Derome J. Methods for ensemble prediction[J]. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(7): 2181-2196.
- [57] Houtekamer P L, Lefaivre L, Derome J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction[J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(6): 1225-1242.
- [58] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [59] 沈浙奇, 唐佑民, 高艳秋. 集合资料同化方法的理论框架及其在海洋资料同化的研究展望[J]. *海洋学报*, 2016, 38(3): 1-14.
- [60] Zheng F, Zhu J, Zhang R H, et al. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical pacific using an intermediate coupled model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): L19604.
- [61] 郑飞, 朱江, 王慧. ENSO 集合预报系统的检验评价[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(5): 587-594.
- [62] Ham Y G, Kug J S, Kang I S. Optimal initial perturbations for El Nino ensemble prediction with ensemble Kalman filter[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(7-8): 959-973.
- [63] Kirtman B P. The COLA anomaly coupled model: ensemble ENSO prediction[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(10): 2324-2341.
- [64] Zheng F, Wang H, Zhu J. ENSO ensemble prediction: initial error perturbations vs. model error perturbations[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(14): 2516-2523.
- [65] Zheng F, Zhu J, Wang H, et al. Ensemble hindcasts of ENSO events over the past 120 years using a large number of ensembles [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(2): 359-372.
- [66] Feng L S, Zheng F, Zhu J, et al. The role of stochastic model error perturbations in predicting the 2011/12 double-dip La Niña[J]. *SOLA*, 2005, 11: 65-69.
- [67] Zheng F, Zhu J. Improved ensemble-mean forecasting of ENSO events by a zero-mean stochastic error model of an intermediate coupled model[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(12): 3901-3915.
- [68] Tao L J, Duan W S. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(5): 1321-1342.
- [69] Yan X Q, Tang Y M. An analysis of multi-model ensembles for seasonal climate predictions[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(674): 1179-1198.
- [70] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (Demeter)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(6): 853-872.
- [71] Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/ClipAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004) [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(1): 93-117.
- [72] Liu H F, Tang Y M, Chen D K, et al. Predictability of the Indian ocean dipole in the coupled models[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 48(5-6): 2005-2024.
- [73] Palmer T N, Doblas-Reyes F J, Hagedorn R, et al. Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 1991-1998.
- [74] Doblas-Reyes F J, Déqué M, Piedelievre J P. Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(567): 2069-2087.
- [75] Yun W T, Stefanova L, Mitra A K, et al. A multi-model super ensemble algorithm for seasonal climate prediction using DEMETER forecasts[J]. *Tellus A*, 2005, 57(3): 280-289.
- [76] Lau N C. Modeling the seasonal dependence of the atmospheric response to observed El Niños in 1962-76[J]. *Monthly Weather Review*, 1985, 113(11): 1970-1996.
- [77] Ji M, Kumar A, Leetmaa A. A multiseason climate forecast system at the national meteorological center[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, 75(4): 569-578.
- [78] Stockdale T N, Anderson D L T, Alves J O S, et al. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean - atmosphere model[J]. *Nature*, 1998, 392(6674): 370-373.
- [79] Takaya Y, Yasuda T, Fujii Y, et al. Japan meteorological agency/meteorological research institute-coupled prediction system version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational seasonal forecasting [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48(1-2): 313-333.
- [80] Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [81] Johnson S J, Stockdale T N, Ferranti L, et al. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(3): 1087-1117.
- [82] 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 533-543.
- [83] Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. Performance of the seasonal forecasting of the Asian summer monsoon by BCC\_CSM1.1 (m) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(8): 1156-1172.
- [84] 顾伯辉, 郑志海, 封国林, 等. 季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力及其对热带海洋的响应分析[J]. *大气科学*, 2017, 41(1): 91-105.
- [85] 郭渠, 刘向文, 吴统文, 等. 基于 BCC\_CSM 模式的中国东部夏季降水预测检验及订正[J]. *大气科学*, 2017, 41(1): 71-90.
- [86] Ren H L, Jin F F, Song L C, et al. Prediction of primary climate variability modes at the Beijing climate center[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(1): 204-223.
- [87] 任宏利, 刘颖, 左金清, 等. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014 / 2016 年超强厄尔尼诺事件的预测[J]. *气象*, 2016, 42(5): 521-531.
- [88] Yu R C, Zhou T J, Wu T W, et al. Development and evaluation of

- high resolution climate system models[M]. Singapore: Springer, 2016.
- [89] Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. The Beijing climate center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1573-1600.
- [90] Zhou T J, Yu Y Q, Liu Y M, et al. Flexible global ocean-atmosphere-land system model: a modeling tool for the climate change research community[M]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [91] Bao Q, Lin P F, Zhou T J, et al. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(3): 561-576
- [92] 包庆, 吴小飞, 李矜霄, 等. 2018-2019年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测[J]. *科学通报*, 2019, 64(1): 73-78.
- [93] 凌铁军, 王彰贵, 王斌, 等. 基于CCSM3气候模式的同化模拟试验[J]. *海洋学报*, 2009, 31(6): 9-21.
- [94] 李熠, 陈幸荣, 谭晶, 等. 基于CESM气候模式的同化模拟实验[J]. *海洋预报*, 2015, 32(3): 1-12.
- [95] 李熠, 陈幸荣, 谭晶, 等. 基于CESM气候模式的ENSO后报试验[J]. *海洋学报*, 2015, 37(9): 39-50.
- [96] 张守文, 宋春阳, 王辉, 等. 基于CESM预测系统对全球关键海区海温主要模态后报能力评估[J]. *海洋学报*, 2018, 40(9): 18-30.
- [97] 宋春阳, 姜华, 张守文, 等. 基于CESM模式同化及后报实验的南海气候特征分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(6): 48-57.

## Ensemble forecasting and its application in seasonal climate forecast

CHEN Yi-hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-fei<sup>2,3</sup>, ZHOU Qian<sup>2,3</sup>, ZU Zi-qing<sup>2,3</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005 China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China )

**Abstract:** This paper systematically reviews the progress of ensemble forecasting and four frequently used methods in generating ensembles with focus on their application in the seasonal climate prediction, especially in the area of ENSO ensemble prediction. Meanwhile, three seasonal climate forecasting systems widely used at home and abroad are introduced in terms of evolution, ensemble design and prediction skill for ENSO, which provides a reference for the development and application of ensemble forecasting techniques and of seasonal climate prediction systems.

**Key words:** ensemble forecasting; climatological forecast on seasonal time-scale; El Niño; ENSO