

周天军,吴波.年代际气候预测问题:科学前沿与挑战[J].地球科学进展,2017,32(4):331-341,doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.04.0331.[Zhou Tianjun,Wu Bo. Decadal climate prediction:Scientific frontier and challenge[J]. Advances in Earth Science, 2017,32(4):331-341,doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.04.0331.]

年代际气候预测问题:科学前沿与挑战*

周天军^{1,2}, 吴波¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:未来10~30年气候状态的预测是当前国际气候领域的研究热点,被包括世界气候研究计划耦合模式比较计划(CMIP)在内的国际科学计划列为核心内容。年代际气候预测已经从最早单纯关注未来10~30年的气候变化拓展为关注未来1~10年或者30年的逐年气候状态。国际上开始尝试基于年代际气候预测系统发布未来1年和5年平均的气候展望。针对年代际气候预测的科学前沿和挑战问题,从年代际气候可预报性的理论认知、当前国际上关于年代际气候预测的主要科学进展2个角度进行了总结,据此提出了该领域亟待解决的前沿科学问题,对提升年代际气候预测技巧的途径进行了讨论。

关键词:年代际;初始化;外强迫;耦合模式

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2017)04-331-11

1 引言

年际以上到未来10~30年时间尺度的气候变化及其对经济、社会发展的影响,是广受社会关注的问题,因其对国家中长期决策具有重要的科学参考价值,故逐渐受到国际科学界的重视^[1,2]。对未来10~30年的气候进行预测,最早国际上称之为“年代际气候预测”(Decadal Climate Prediction);由于对预测结果的关注,实际上涵盖未来1~10年或者30年之内的年平均、多年平均和年代际平均等多时间尺度平均的气候状态,因此,近年来国际上也将其称作“近期气候预测”(Near-term Climate Prediction),或者“近期年代际预测”;为叙述方便,本文将其统一称为“年代际气候预测”,与第六次国际耦合

模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase6,CMIP6)的称谓保持一致。当前,年代际预测问题作为一个国际科学前沿,已经成为气候领域的研究热点。世界气候研究计划(World Climate Research Programme,WCRP)第五次耦合模式比较计划(CMIP5)第一次将年代际预测列为核心试验之一^[3],其研究结果被政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告引用(AR5)。近期刚刚启动的CMIP6,围绕着年代际气候预测问题,亦设立了专门的科学计划——年代际气候预测计划(Decadal Climate Prediction Project,DCPP)^[4]。

年代际气候预测,简言之就是利用气候系统模式,通过综合考虑外强迫变化和初值,对年际以上到未来10~30年的气候变化进行预测。基于年代际

* 收稿日期:2016-11-22;修回日期:2017-01-20.

* 基金项目:公益性行业(气象)科研专项项目“基于FGOALS-s,CMA和CESM气候系统模式的年代际集合预测系统的建设与研究”(编号:GYHY201506012);国家自然科学基金项目“20世纪全球季风变化模拟和未来变化预估”(编号:41330423)资助。

作者简介:周天军(1969-),男,山东龙口人,研究员,主要从事气候模拟、海气相互作用和东亚气候研究。

E-mail:zhoutj@lasg.iap.ac.cn

预测模式系统,国际科学界开始尝试合作发布基于多模式集合的未来 1~10 年的气候预测产品。例如,欧盟多国联合制定的多模式集合(Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts,ENSEMBLES)计划的重要目标之一,就是合作开发年代际气候预测模式系统,预测未来 1~30 年的气候状态^[5]。在过去几年,英国气象局哈德来气候中心(Hadley Centre)开始尝试基于年代际气候预测系统,通过网站在线提前 1 年发布未来几年、基于多模式集合的气候预测结果。在上述实践的基础上,世界气象组织(World Meteorological Organization,WMO)目前正计划联合国际上主要的气候模拟和预测中心,争取在不远的未来基于年代际气候预测系统,正式官方发布未来 1~5 年平均的气候展望预测结果。

综上,年代际气候预测问题已经受到国际科学界的高度重视,基于年代际气候预测系统进行的未来 1~30 年的气候预测,已经有业务中心开始尝试进行准业务化发布。不过,围绕着年代际气候预测问题,从模式预测系统的开发到可预报性理论的研究,目前尚存在诸多有待解决的问题。本文的目的是总结当前关于年代际气候预测的理论认知水平,概述当前国际上关于年代际气候预测的主要科学进展,在此基础上,提出本领域亟待解决的前沿科学问题,对提升年代际气候预测技巧所面临的挑战进行讨论。

2 年代际气候预测的理论基础和实现方案

实际的气候异常是外强迫变化和内部变率共同作用的结果。如图 1 所示,1 周左右的天气预报属于典型的初值问题。从周到年际尺度,初值的作用逐渐减弱但依然发挥作用。而超过 10~30 年的未来气候预估,则主要受外强迫主导。在从年际到 10~30 年的时间段上,实际气候的变化既受到初值的作用,又受到外强迫变化的作用。因此,年代际预测实际上是与气候系统内部变率相联系的初值问题和外强迫问题的结合。在构建基于气候模式的预测系统时,既需要通过初始化来考虑气候内部变率的初始状态,又要考虑大气成分变化导致的辐射强迫变化。

在年代际尺度上,可预报性的来源主要包括以下 3 个方面:外强迫的变化、气候系统的惯性和气候系统内部变率导致的年代际振荡^[1]。气候系统的外强迫包括自然强迫(太阳活动、火山喷发到平流层的气溶胶影响等)和人类活动(温室气体、气溶胶

排放、土地利用变化等)^[6]。气候系统的惯性主要源于海洋稳定层结导致的系统慢变过程,例如,即使温室气体维持在现有水平,未来 40~50 年全球平均表面温度仍将以 0.1 °C/10a 的速度增加,到 2100 年将共增温 0.6 °C^[7]。

气候系统对外强迫变化的敏感度和气候系统的惯性一度是气候变化研究的重点。例如,IPCC AR4 重点关注在不同的排放情景下,2100 年全球表面温度增幅的变化。IPCC AR4 同时指出,IPCC AR4 耦合模式的集合结果表明,在未来 30 年内,全球表面温度的增温幅度和空间分布均对排放情景的变化不敏感^[8]。在未来 10~30 年这个时间尺度,气候系统内部变率对整个气候系统的影响与辐射外强迫相当,甚至超过后者^[1]。因此,年代际气候预测一方面需要对模式进行初始化,以考虑气候系统的内部变率和热惯性,另一方面也需要考虑辐射外强迫(包括人类活动和自然强迫)的影响^[3]。

初始化具有 2 个方面的潜在价值,一方面它能够使模式获得观测中气候系统的内部变率信号(例如太平洋年代际振荡模态(Pacific Decadal Oscillation,PDO)、大西洋年代际振荡模态(Atlantic Multidecadal Oscillation,AMO)等),从而使模式对这些内部变率信号具有预测技巧;另一方面,它可能纠正模式对温室气体强迫响应的偏差^[9]。目前一般认为,初始化方案是年代际气候预测能否成功的关键。

基于在实际模式预测系统中充分引入观测的年代际气候变化信号这一思路,CMIP5 设计的标准年代际预测试验包括以下 2 步:①通过同化观测资料,对模式进行初始化,一般主要考虑海洋的状态;②使用初始化试验提供的初始条件,1960—2005 年,每隔 5 年(1960 年、1965 年,以此类推)开始 1 组预测试验,积分 10 年。在积分过程中,同时考虑与历史气候模拟试验(或 RCP45 试验)一致的、由温室气体和气溶胶变化引起的辐射外强迫的改变。

上述第一步由各个模拟中心自行设计同化方案;第二步为标准试验,所有 CMIP5 模式保持一致,试验结果需要上传至 CMIP5 网站节点,供国际科学界从不同角度进行多模式的比较研究^[3]。后续的模式比较分析发现,每隔 5 年进行 1 次 10 年的预测,回报试验的样本数太少,不便于进行预报技巧的检验。因此,随后 CMIP5 鼓励计算条件允许的气候模拟中心大幅度增加预测试验的密度,由原来的每隔 5 年 1 组,增加到每年 1 组,即每年进行 1 次 10 年的预测试验。这客观上使得年代际气候预测的产

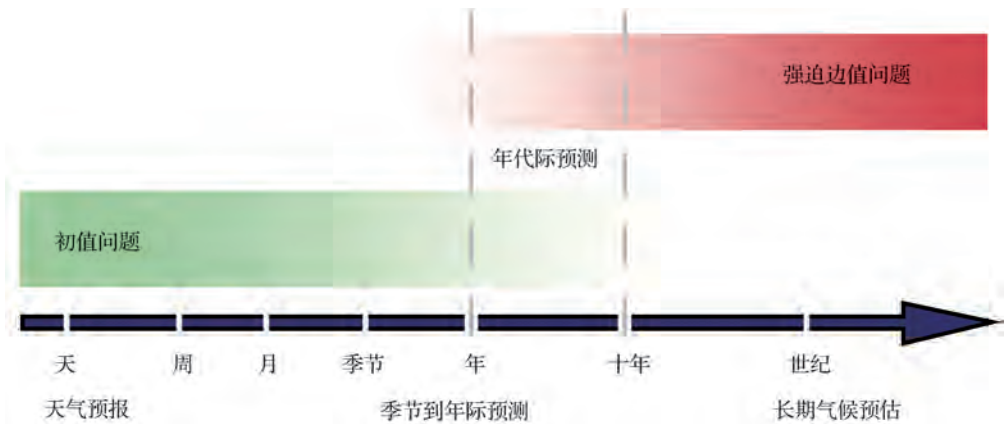


图1 从逐天的天气预报到未来百年的气候预测中初值和外强迫的贡献大小^[4]

Fig. 1 A schematic illustrating the progression from an initial-value based prediction at short time scales to the forced boundary-value problem of climate projection at long time scales^[4]

绿色(初值问题)和红色(外强迫)由深变浅,表示其贡献由大变小

Decadal prediction occupies the middle ground between the two

品具备分析未来1~10年和逐年气候展望的条件。此外,CMIP5还设计了一组未来30年气候的预测试验,具体方案同10年的预测试验,但只进行1960年和1990年2组起始初值的回报试验。

初始化的本质是合理设定气候系统各分量的初值。理论上,初始化应该考虑气候系统的所有分量,包括海洋、大气、海冰和陆地。但当前国际上的年代际预测系统的初始化方案主要考虑海洋的记忆力。有研究指出,除了海洋初始化之外,气候系统其他分量(例如,海冰、陆地、平流层、气溶胶等)的初始化也可能影响年代际预测的技巧^[10]。不过,由于这些子系统的热容量远小于海洋,它们对气候系统年代际变率的贡献尚有待明晰。同时,由于气候模式对这些子系统的模拟能力有待提高、可用于同化的可靠的观测数据也极为缺乏,因此,当前充分考虑了上述分量初始化的模式系统不多,相应地,关于这些子系统对年代际可预报性的影响目前知之尚少。不过,气候系统的各个圈层之间存在着复杂的耦合作用,存储在上述某一子系统信号,有可能通过气候系统不同分量之间的耦合作用与反馈过程在整个气候系统中得到传播和放大,因此,需要关注上述因子在提升预报技巧中的作用研究。例如, Khodayar等^[11]指出,土壤湿度的初始化不仅会影响干旱预测的技巧,还能够影响区域水循环(包括蒸发和降水)变化的年代际预测技巧。

年代际气候预测的可预报性来源,一是气候系统自身的记忆力(主要是海洋),二是外强迫的变化。目前年代际预测试验关注的气候异常,其实涵

盖了未来1~10年或者30年的气候展望。那么,在不同的预测年限上,初值即气候系统自身的记忆力和外强迫作用的贡献到底多大?为了回答这一问题,Corti等^[12]利用多个模式设计了敏感性试验,探讨外强迫和海洋初始化对年代际可预测性的影响。他们发现,在1年以上的尺度,全球表面海温的可预报性主要来自外强迫的贡献;而在某些区域海洋(例如大西洋、西北太平洋和南大洋),正确的海洋初始化对预报技巧有较大影响,具体表现是:如果考虑了次表层海洋的初始化,上述海域的预报技巧在时间上更长、具有显著预报技巧的区域范围更大。

3 当前气候模式年代际预测试验的水平评估

3.1 年代际预测试验的回报技巧

自2007年开始,国际上一些主要的模式研发机构开始基于耦合气候系统模式,开展年代际气候回报和预测试验^[13~16]。与年际以下时间尺度的气候预测问题不同,年代际气候预测本质上是初值问题和强迫响应问题的结合,即模式初值和温室气体等外强迫因子均对预测结果有影响^[1]。从技术角度来说,给定模式外强迫的方法与以往的针对特定情景的气候预估试验类似,但围绕如何得到气候系统的初始条件,亦即如何对模式进行初始化,目前尚未有统一的或者说“最佳”的方案。客观上,由于不同研究机构关注的预报区域和预报对象不同,采取的初始化方案也难以完全相同。例如, Keenlyside

等^[14]采用表层海温(Sea Surface Temperature)“Nudging”方案进行初始化,即将耦合模式模拟的 SST 向观测值进行恢复。基于这一简单的海洋初始化方案,采用耦合模式 ECHAM5/MPI-OM 对大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)及北大西洋周边区域的气候进行年代际变化预估,结果显示显著的预报技巧。Mochizuki 等^[16]采用 IAU(Incremental Analysis Update)方案同化来自客观分析资料的海洋上层 700 m 的温度和盐度。基于该初始化方案,他们发现日本东京大学耦合模式 MIROC 对 PDO 具有显著的预报技巧。中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)发展的耦合气候系统模式 FGOALS-g2 和 FGOALS-s2 分别采用基于三维变分的 Nudging 方案^[17]和 IAU 方案^[18]开展了年代际预测试验,2 个方案在太平洋和大西洋均表现出显著的预测技巧。国家气候中心气候系统模式 BCC_CSM1.1 采用了 Nudging 方案把模式预报海温向观测的表层海温恢复进行初始化,其年代际预报试验对全球温度变化和中国东部降水年代际变化的再现较之历史气候模拟试验明显改善,但是在区域尺度,10 年平均的气候异常在 2 组试验中区别不显著^[19,20]。

自 CMIP5 年代际预测试验数据发布以来,国际科学界从不同角度对预报技巧进行了分析评估,发表了大量成果。Meehl 等^[21]系统总结了前期国际上已开展的年代际预测试验的回报技巧,指出年代际预测试验技巧较高的区域主要集中在北大西洋、西太平洋和印度洋。相对于没有初始化的、一般的历史气候模拟试验,年代际预测试验对 1970 年代中期的太平洋 SST 年代际位相转变、1990 年代中期的北大西洋年代际转变以及 21 世纪初的全球增暖停滞(又称全球增暖减缓)等现象具有更高的预测技巧。不过,初始化方案对区域气候预测结果的影响存在极高的模式依赖性,换言之,若把同样的初始化方案应用于不同的模式,得到的具有显著预报技巧的区域可能亦显著不同^[22]。LASG 气候系统模式的 2 个版本采用相同的 IAU 初始化方案,但年代际回报技巧在大西洋区域存在显著不同,这同样表明模式性能对于年代际预报技巧的影响^[18]。

海洋初始化和外强迫在提升年代际预报技巧方面的作用具有区域依赖性。北大西洋是年代际预测技巧最高的区域^[21],其预报技巧主要来自海洋的初始化方案^[23]。印度洋是全球年代际预测技巧较高

的区域,这种预报技巧主要来自辐射外强迫的贡献(即温室气体和火山气溶胶的强迫作用),原因是印度洋是外强迫导致变率与内部变率比值最大的区域,换言之,海洋内部变率对该区域 SST 年代际变化的贡献较少^[24~26]。印度洋的年代际变率在很大程度上来自太平洋 PDO 的驱动^[27]。

太平洋因其在年代际尺度上对东亚气候的驱动作用而备受我国学者关注^[28~32]。但遗憾的是,当前的年代际预测试验在太平洋的预测技巧较低。Lienert 等^[33]分析了英国哈德来气候中心 DePreSys 年代际预测系统的回报试验发现,该预测系统对北太平洋 SST 年代际变率的 2 个主导模态 PDO 和 North Pacific Gyre Oscillation(NPGO)的回报结果,在去掉趋势之后,存在显著预报技巧的年限仅为 1 年和 2 年。Kim 等^[34]认为模式对北太平洋的模拟存在系统性偏差,因此提出了一种基于统计的模式预测结果校正的方法,称之为 SPPM(Stepwise Pattern Projection Method),该方法能够显著提升北太平洋 PDO 关键区的海温预测技巧。

当前的年代际预测试验主要关注海温和表面气温的预报技巧。也有部分工作关注全球降水的回报技巧,但是,如图 2 所示,与温度的高预报技巧不同,研究发现降水在全球多数区域几乎没有预报技巧^[22]。不过,一个例外是非洲的萨赫勒地区(图 2b),该区域的夏季降水与北大西洋海温密切相关,由于北大西洋海温具有较高的预报技巧,因此,一些模式对该区域的降水预测具有一定技巧^[35]。对基于欧洲 ENSEMBLES 计划的多个耦合模式年代际回报试验的结果分析,也表明非洲季风区的回报技巧在全球季风区中是最高的^[36]。

近期有研究表明,当前的年代际预测系统对西北太平洋季风环流在 1~2 年的时间尺度上具有一定预报技巧^[37]。此外,基于北大西洋飓风活动和局地 SST 的统计关系,利用年代际预测试验的 SST 预报结果对飓风活动进行预测,得到的预报技巧相对于统计预测或非初始化预估具有更高的技巧^[38,39]。

综上所述,年代际预测由于关注的是近期气候变化,其结果对于政府决策具有重要参考价值,因此具有迫切的社会需求,但年代际预测系统的研发工作尚处于起步阶段,显著的预报技巧主要集中在未来 1~5 年,且主要集中在部分区域,从全球到区域、从温度到降水和大气环流,预测技巧都亟待提升。

目前,各个模拟中心都在积极改进年代际预测系统。例如,英国哈德来气候中心推出了第二代年

代际预测系统 DePreSys 2, 评估发现 DePreSys 2 对全球大部分区域的 SST、陆表温度和陆地降水等的预测技巧均优于 DePreSys 1。由于 2 代系统的初始化方案基本相同, 这些预报技巧的改进主要来自模式分辨率的提高和模式性能的改进^[40]。中国科学院大气物理研究所也在积极研发改进其年代际预测系统, 基于新的初始化方案的年代际预测系统较原系统在北太平洋 PDO 关键区技巧有显著提升^[41]。

3.2 年代际预测试验相对于传统的气候变化模拟和预估试验的增量

年代际预测试验和传统的历史气候模拟试验或典型浓度路径下气候预估试验(RCP4.5, RCP8.5等情景)的主要区别, 在于前者通过同化观测数据, 得到了气候系统的初始状态, 使得随后的预测过程考虑了气候系统固有的记忆力^[3]。初始化的年代际预测试验相对于没有初始化的历史气候模拟试验或 RCP4.5 预估试验在技巧上是否提升, 是年代际预测领域关注的核心问题之一。

研究表明, 从表层海温预报技巧的角度, 初始化的年代际预测试验相对于未初始化的历史气候模拟试验的主要增量位于北大西洋。García-Serrano 等^[23]比较了 CMIP5 多模式历史气候模拟试验和年代际预测试验模拟的大西洋多年代际变率(Atlantic Multidecadal Variability), 指出年代际预测试验对于大西洋极地海洋锋区、副热带东大西洋等 AMV 关键海区的 SST 有很高的预报技巧, 而历史气候模拟试验则技巧较低。Karspeck 等^[42]对 CCSM4 基于 2 套不同初始条件进行的年代际预测试验结果进行了分析, 并与未初始化试验进行了比较, 发现前者的预报技巧只在北大西洋副极地锋区优于后者。年代际预测试验能够显著提升 AMV 预测技巧的原因在于初始化过程引入了合理的大西洋经圈翻转环流的初始状态, 从而使得模式能够更为真实地预测大西洋经向热输送的年代际变化, 从而提升对表层海温的预测技巧^[43]。基于中国科学院大气物理研究所 LASG 气候系统模式的年代际预测试验结果也支持这一结论^[18]。

此外, 有研究指出初始化的年代际预测试验对 21 世纪初的增暖停滞现象的预测技巧, 要显著优于未初始化的历史气候模拟试验^[44]。基于中国科学院大气物理研究所耦合气候系统模式 FGOALS-g1 的年代际气候回报和预测试验结果也表明, 在考虑了海洋的初始化之后, 预测的全球温度变化更为贴近观测, 尽管增暖停滞现象难以完全再现, 但其预测

的温度变化显著低于未考虑初始化的历史气候模拟实验的结果^[45]。国家气候中心气候系统模式的年代际预测回报试验亦呈现出类似的结果^[19]。

4 年代际预测试验的前沿问题

当前国际上关于年代际气候预测问题的前沿研究, 主要集中在 3 个方面, 这也是摆在国际科学界面前亟待解决的挑战问题:

(1) 耦合模式的初始化方案研究。许多模拟中心尝试将更加先进或者更为复杂的同化方法应用到模式初始化中。例如, Yang 等^[46]将美国地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)发展的集合耦合同化系统应用到年代际预测中; Counillon 等^[47]使用集合卡尔曼滤波方法(EnKF)同化 SST, 进行年代际预测。

中国科学院大气物理研究所最近完善了其 LASG 气候系统模式的海洋同化方案, 采用了集合最优插值 EnOI 和 IAU 相结合的同化方案来同化海洋表层及次表层的温度和盐度; EnOI 可以看作集合卡尔曼滤波(EnKF)的简化, 其最大的优点是不需要进行集合模拟, 可以大量节约计算资源, 其背景误差协方差矩阵来自模式长时间积分控制试验的结果。IAU 方案是一种结合了连续和间隔同化方法优点的同化技术, 曾广泛应用于大气再分析同化系统的构建。与 Nudging 方案不同, IAU 方案在一个同化循环过程中, 预报方程中的分析增量保持不变, 因而能够有效地减小同化过程中引入的短波噪音。通过使用 EnOI 方法得到分析增量, 然后通过 IAU 方案将分析增量引入模式积分, IAP 年代际预报系统的预测技巧得到显著提升^[41]。该方案也是 IAP 模式参加 CMIP6 年代际预测试验 DCP 拟采用的初始化方案。目前 IAP EnOI-IAU 方案已经成功应用于中国科学院大气物理研究所模式 FGOALS-s2 和中国气象科学研究院气候系统模式 CAMS-CSM(图 3), 显示出较高的回报技巧。

围绕着初始化策略问题, 当前气候模式的初始化主要有 2 种策略, 即全场初始化和异常场初始化, 2 种方法各有优缺点:

首先, 全场初始化的优点, 是在同化过程中, 通过约束模式, 使之趋近于观测, 从而去除模式固有的海温模拟偏差。但是大量研究表明, 在开始预测试验积分之后, 模式将很快滑向其本身固有的气候状态, 出现一个很强的模式气候态漂移, 这种现象在包括中国科学院大气物理研究所模式^[17]和国家气候

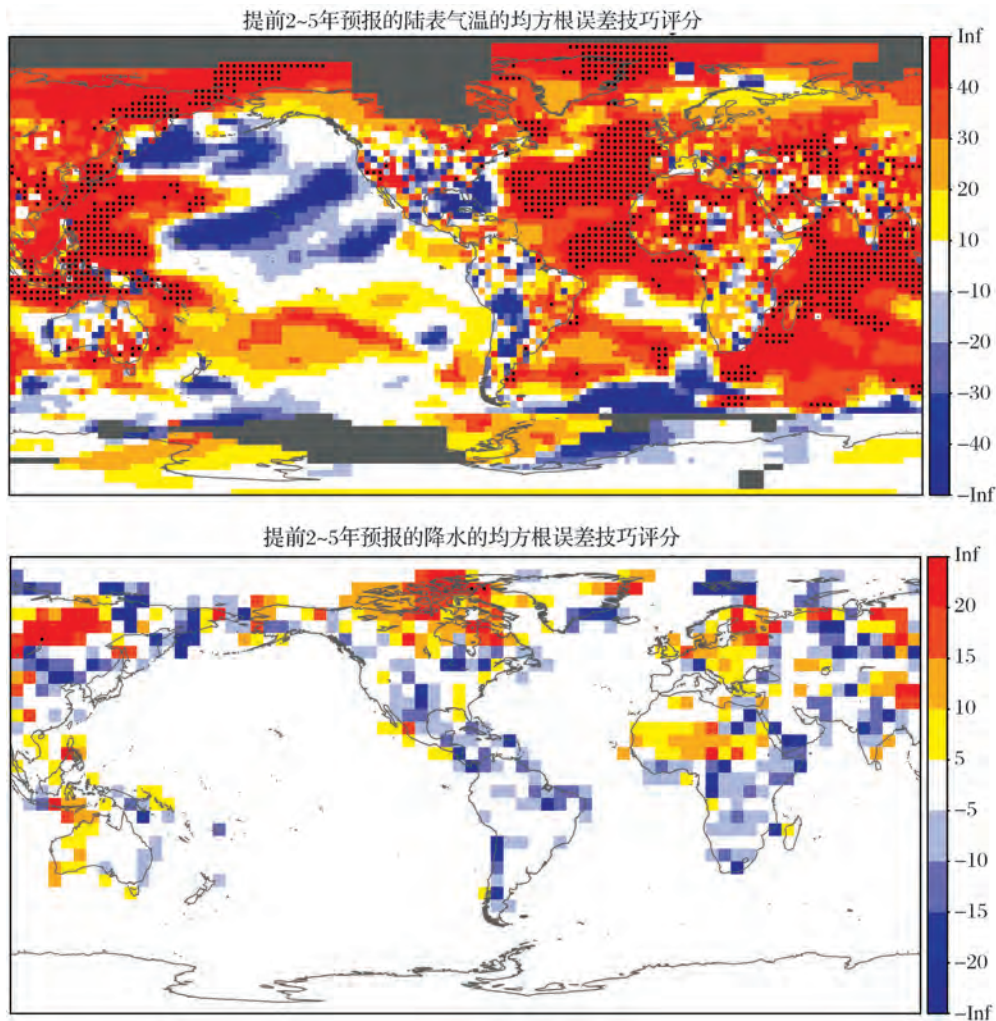


图 2 CMIP5 多模式集合对表面温度 (a) 和降水 (b) 在 2~5 年时间尺度上的回报技巧^[20]

Fig. 2 Prediction skills of the multi-model ensemble mean of the CMIP5 on surface temperature (a) and precipitation (b) for hindcast year 2~5^[20]

技巧评估的指标为均方根技巧评分 (RMSSS), 分数越高, 技巧越高; 打点区域表示通过 5% 的显著性检验

The skills are measured by Root Mean Square Skill Score (RMSSS); The higher the score, the higher the skill;

Dots denote that the values passing 5% significance level

中心模式^[19]在内的所有采用全场海温资料进行初始化的模式中都存在。

其次是异常场初始化。异常场初始化是指在同化过程中扣除观测的气候平均, 只同化观测海温的异常场, 这能够让模式在初始化过程中始终保持在自身固有气候态的附近, 当开始预测试验积分时, 模式不会出现显著的气候态漂移现象。但是, 由于某些气候变率模态可能受到气候平均态的调制, 采用异常场初始化可能会降低对某些变率模态的模拟技巧。目前, 国际上对哪种初始化方案效果更优尚无定论。Smith 等^[9]基于英国哈德来气候中心的年代际预测系统, 比较了全场初始化和异常场初始化对

预测结果的影响, 发现在年代际尺度上两者的区别并不显著。

此外, 目前国际上许多气候预测中心开始考虑不仅同化海洋资料, 还同时同化大气资料、陆面资料、海冰资料乃至气溶胶资料等。不同来源的不同要素资料, 存在着相互协调性问题, 如何在耦合同化过程中令大气、海洋、陆面和海冰的变化保持协调, 这是耦合同化亟待解决的问题。

(2) 关于外强迫在提升年代际预测技巧方面的作用问题。例如, 最新的 CMIP6 子计划 DCPD 专门设计了敏感性试验, 来讨论火山气溶胶对年代际气候预测技巧的影响。从辐射强迫的角度, 火山气溶

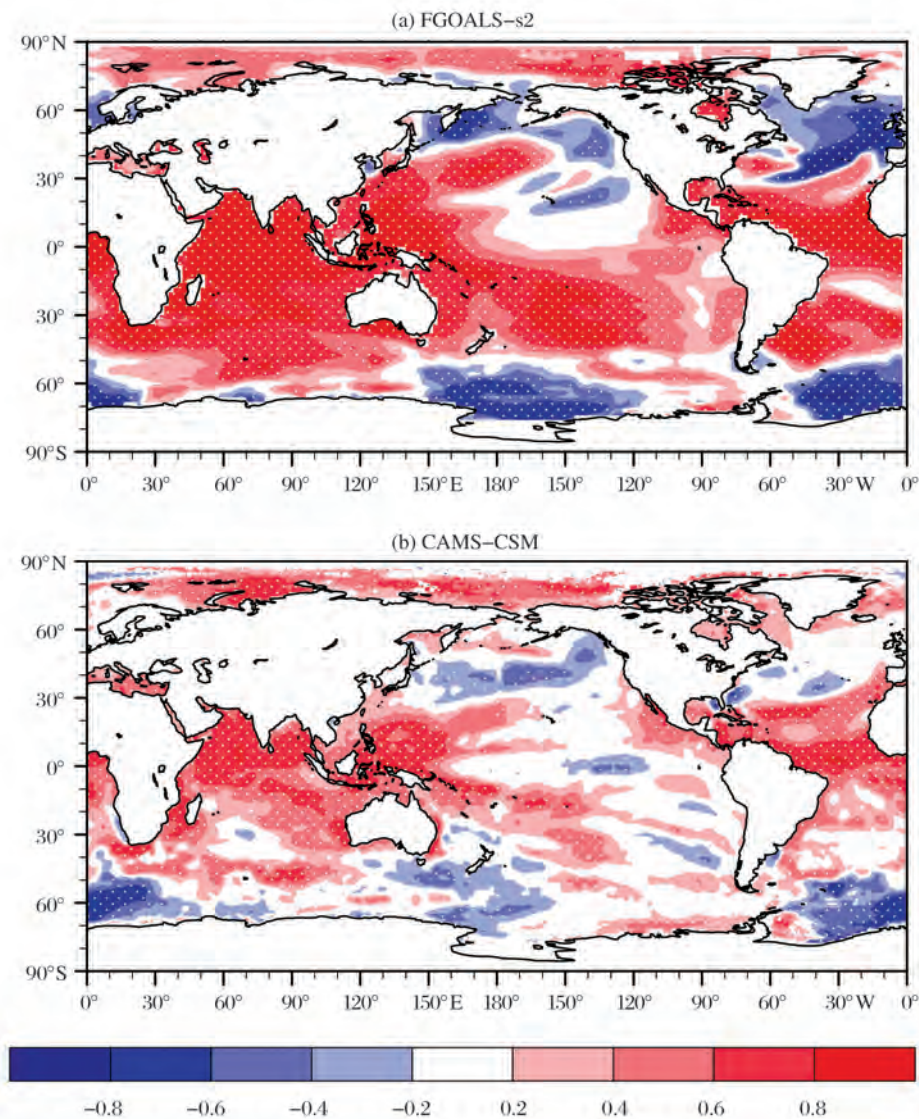


图3 FGOALS-s2 (a) 和中国气象科学研究院气候系统模式 CAMS-CSM (b) 年代际回报试验 (1960—2015年) 在第6~9年的回报技巧

Fig. 3 Prediction skills of FGOALS-s2 (a) and CAMS-CSM (b) on surface temperature for hindcast year 6~9

分数越高技巧越高;打点区域表示通过5%的显著性检验

The higher the score, the higher the skill; Dots denote that the values passing 5% significance level

胶喷发的直接气候影响至多持续1~2年^[48~50],但是通过气候系统的耦合作用和反馈过程,它可能显著触发气候系统固有的年代际变率模态的位相转换,从而显著影响年代际的预报技巧。关于火山气溶胶强迫如何触发气候系统内部变率模态的位相转换,这是当前国际科学界关注的热点话题之一。

(3) 年代际气候变率可预测性的理论研究。不同区域的年代际尺度气候变化的可预报性上限到底多长是科学界关注的一个重要话题。Meehl等^[51]开展了理想预测试验,即让模式在年代际尺度上回报

其自身的演变。在这种情况下,模式物理过程与预报对象完全一致,预报误差的唯一来源是初始条件。他们发现在全球变暖背景下,太平洋大部分区域的海温具有约20年的可预测性,这一可预报时间的理论上限,远高于当前基于耦合模式的年代际预报试验的实际技巧。

基于气候模式的预测系统代表着年代际预测的主要技术发展方向。与此同时,也有学者尝试基于时间序列周期分解技术,采用纯粹的统计方法来预测未来年代际的气候状态。例如,在工程领域得到

广泛应用的经验模分解技术 (Empirical Mode Decomposition, EMD), 已经被推广到气候变化研究领域, 许多学者开始利用 EMD 方法来对全球、区域或者代表性站点的长期观测温度序列进行分解, 得到其变化趋势和年代际变化部分, 然后, 利用它们建立起回归方程, 对未来几十年的温度变化进行预测^[52~55]。

动力—统计相结合也是一种有效的预测手段。由于当前的耦合模式年代际预报系统的预测能力主要体现在海温上, 而对大气环流的直接预报能力较低, 因此, 针对我们关注的预测对象, 例如台风/飓风, 可以基于观测资料建立起它们与海温的统计关系, 然后, 利用预报的海温, 采用构建的统计关系再来预报台风或者飓风的变化^[38,39]。

年代际预报关注的对象, 目前主要集中在海温的预报上, 并在向大气要素拓展。随着气候系统模式向地球系统模式发展, 未来将有能力预报地球系统生物地球化学循环过程的变化。例如, 德国马普气象研究所 (Max Planck Institute for Meteorology, MPI-M) 已经开始尝试对北大西洋的二氧化碳吸收能力进行年代际预测^[56]。

5 结 语

未来 1~10 年或 30 年的气候预测问题是国际科学前沿, 已经成为气候领域的研究热点, 包括 CMIP 在内的许多国际科学计划都把年代际预测问题作为核心内容。WCRP 明确把年代际气候预测问题列为七大科学挑战问题之一, 专门成立了“年代际气候变率和可预报性工作组”(International Workshop on Decadal Climate Variability and Predictability, DCVP), 在年代际气候预测方面提出三大目标: 一是提高采用了初始化方案的年代际气候预测的质量; 二是确保预测产品能够适应用户的需求; 三是从技术上向用户明晰预测产品的可靠性和不确定性。其中目标一是实现总目标的关键科学基础, 为确保其实现, WCRP 明确提出要加强以下研究:

(1) 认识和理解年代际可预报性的来源; 评估和改进气候模式对年代际变率的模拟能力; 理解观测的年代际变化的机理; 定量评估年代际预报的技巧。

(2) 改进模式的初始化方案, 更完善地考虑外强迫在年代际气候预测中的作用, 包括太阳辐照度变化、气溶胶和火山活动。

(3) 减少年代际预报试验中的初始化冲击、模

式漂移和模式偏差的影响。

(4) 发展克服模式漂移和进行误差订正的方法, 针对特定区域需求进行降尺度。

围绕着目标二和目标三的实现, WCRP 的核心举措是在年代际预测中采用集合预报技术, 以提高预测产品的信噪比, 并基于集合预报产品来预测极端事件发生风险的概率变化; 同时通过与用户以及各国气象、水文业务机构的合作, 基于年代际气候预测系统尝试发布未来 1 年和 5 年平均的气候展望产品, 在应用中不断提升能力。

我国的年代际预测研究尚处于起步阶段, 亟需加强基于耦合气候模式的年代际预测系统的开发和研究。在公益性行业(气象)科研专项项目的支持下, 中国科学院大气物理研究所联合中国气象科学研究院、国家气候中心等单位, 基于各自的耦合气候系统模式, 建立起多模式集合的年代际预测系统初始版本^[41,57], 形成具备准业务化运行能力的模式系统; 不过, 现有系统在预测主要的年代际变率模态的位相转换^[41]、合理再现火山气溶胶的影响^[58]、层积云对海温的影响^[59]、海温变化与季风变化的联系^[60]等方面, 能力尚有待提升, 有待通过试验运行不断发展完善和提升系统的预测能力, 为未来正式开展年代际气候预测业务奠定科学基础。

参考文献 (References):

- [1] Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al. Decadal prediction: Can it be skilful? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: (10) 1 467-1 485, doi: 10.1175/2009BAMS2778.1.
- [2] Hurrell J, Meehl G A, Bader D, et al. A unified modeling approach to climate system prediction [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(12): 1 819-1 832.
- [3] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 93(4): 485-498.
- [4] Boer G J, Smith D M, Cassou C, et al. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(10): 3 751-3 777, doi: 10.5194/gmd-9-3751-2016.
- [5] Bellucci A, Haarsma R, Gualdi S, et al. An assessment of a multi-model ensemble of decadal climate predictions [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 44(9/10): 1-20.
- [6] Lee T C K, Zwiers F W, Zhang X, et al. Evidence of decadal climate prediction skill resulting from changes in anthropogenic forcing [J]. *Journal of Climate*, 2010, 19(20): 5 305-5 318.
- [7] Meehl G A, Washington W M, Collins W D, et al. How much more global warming and sea level rise? [J]. *Science*, 2005, 307

- (5 716):1 769-1 772.
- [8] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D. Contribution of working group I to the fourth assessment report [C] // Climate Change 2007: of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.
- [9] Smith D, Eade R, Pohlmann H. A comparison of full-field and anomaly initialization for seasonal to decadal climate prediction[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 41(11/12):3 325-3 338.
- [10] Bellucci A, Haarsma R, Bellouin N, et al. Advancements in decadal climate predictability: The role of nonoceanic drivers [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2):165-202.
- [11] Khodayar S, Sehlinger A, Feldmann H, et al. Sensitivity of soil moisture initialization for decadal predictions under different regional climatic conditions in Europe[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(8):1 899-1 915.
- [12] Corti S, Palmer T, Balmaseda M, et al. Impact of initial conditions versus external forcing in decadal climate predictions: A sensitivity experiment[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(11):63-65.
- [13] Smith D M, Cusack S, Colman A W, et al. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model[J]. *Science*, 2007, 317(5 839):796-799.
- [14] Keenlyside N, Latif M, Jungclauss J, et al. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector[J]. *Nature*, 2008, 453(7 191):84-88.
- [15] Sugiura N, Awaji T, Masuda S, et al. Potential for decadal predictability in the North Pacific region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(20), doi:10. 1029/2009GL039787.
- [16] Mochizuki T, Wallace J M. Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(5):1 833-1 837.
- [17] Wang B, Liu M, Yu Y, et al. Preliminary evaluations of FGOALS-g2 for decadal predictions[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(3):674-683.
- [18] Wu B, Chen X, Song F, et al. Decadal predictions by a coupled global climate model FGOALS-s2[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, (6):1-12, doi:10. 1155/2015/904826.
- [19] Gao Feng, Xin Xiaoge, Wu Tongwen. A study of the prediction of regional and global temperature on decadal time scale with BCC_CSM1. 1 Model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(6):1 165-1 179. [高峰, 辛晓歌, 吴统文. BCC_CSM1. 1 对 10 年尺度全球及区域温度的预测研究[J]. *大气科学*, 2012, 36(6):1 165-1 179.]
- [20] Wei Linxiao, Xin Xiaoge, Cheng Bingyan, et al. Hindcast of china climate with decadal experiment by BCC_CSM1. 1 climate model[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 12(4):294-302. [魏麟骁, 辛晓歌, 程炳岩, 等. BCC_CSM1. 1 气候模式年代际试验对中国气候的回报能力评估[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4):294-302.]
- [21] Meehl G A, Goddard L, Boer G, et al. Decadal climate prediction: An update from the trenches[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(2):243-267.
- [22] Doblas-Reyes F J, Andreuburillo I, Chikamoto Y, et al. Initialized near-term regional climate change prediction [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(7):1 078-1 090.
- [23] García-Serrano J, Guemas V, Doblas-Reyes F J. Added-value from initialization in predictions of Atlantic multi-decadal variability[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(9/10):2 539-2 555.
- [24] Guemas V, Corti S, García-Serrano J, et al. The Indian Ocean: The region of highest skill worldwide in decadal climate prediction [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(3):726-739.
- [25] Dong L, Zhou T. The Indian Ocean sea surface temperature warming simulated by CMIP5 Models during the 20th Century: Competing forcing roles of GHGs and anthropogenic aerosols [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(9):3 348-3 362, doi: 10. 1175/JCLI-D-13-00396. 1.
- [26] Dong Lu, Zhou Tianjun, Wu Bo. Indian Ocean warming during 1958-2004 simulated by a climate system model and its mechanism[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(1/2):203-217, doi: 10. 1007/s00382-013-1722-z.
- [27] Dong L, Zhou T, Dai A, et al. The footprint of the inter-decadal Pacific oscillation in Indian Ocean sea surface temperatures[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6, doi: 10. 1038/srep21251.
- [28] Zhou T, Yu R, Li H, et al. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half-century[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(15):3 833-3 852.
- [29] Li H, Dai A, Zhou T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34(4):501-514.
- [30] Zhou T, Song F, Lin R, et al. The 2012 North China floods: Explaining an extreme rainfall event in the context of a long-term drying tendency[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(9):S49-S50.
- [31] Qian C, Zhou T. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900-2010 [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(3):1 210-1 222.
- [32] Wu B, Zhou T, Li T. Impacts of the Pacific-Japan and circum-global teleconnection patterns on the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2016, 2(9):3 253-3 271.
- [33] Lienert F, Doblas-Reyes F J. Decadal prediction of interannual tropical and North Pacific sea surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(12):5 913-5 922.
- [34] Kim H M, Ham Y G, Scaife A A. Improvement of initialized decadal predictions over the north pacific ocean by systematic anomaly pattern correction [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(13):5 148-5 162.
- [35] Gaetani M, Mohino E. Decadal prediction of the sahelian precipitation in CMIP5 simulations [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(19):7 708-7 719.
- [36] Zhang Lixia, Zhang Wenxia, Zhou Tianjun, et al. Assessment of the decadal prediction skill on global land summer monsoon precipitation in the coupled models of ENSEMBLES [J]. *Advances*

- in *Earth Science*, 2017, 32(4):409-419. [张丽霞, 张文霞, 周天军, 等. ENSEMBLES 耦合模式对全球陆地季风区夏季降水的年代际预测能力评估[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):409-419.]
- [37] Choi J, Son S, Seo K, et al. Potential for long-lead prediction of the western North Pacific monsoon circulation beyond seasonal time scales[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(4), doi: 10.1002/2016GL067902.
- [38] Vecchi G A, Msadek R, Anderson W, et al. Multiyear predictions of north Atlantic hurricane frequency: Promise and limitations[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15):5 337-5 357.
- [39] Caron L P, Jones C G, Doblas-Reyes F. Multi-year prediction skill of Atlantic hurricane activity in CMIP5 decadal hindcasts [J]. *Climate Dynamics*, 2013, 42(9/10):2 675-2 690.
- [40] Knight J R, Andrews M B, Smith D M, et al. Predictions of climate several years ahead using an improved decadal prediction system[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(20):7 550-7 567.
- [41] Wu Bo, Zhou Tianjun, Sun Qian. Impacts of initialization schemes of oceanic states on the predictive skills of the IAP near-term climate prediction system[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4):342-352. [吴波, 周天军, 孙倩. 海洋模式初始化方案对 IAP 近期气候预测系统回报试验技巧的影响[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):342-352.]
- [42] Karspeck A, Yeager S, Danabasoglu G, et al. An evaluation of experimental decadal predictions using CCSM4[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 44(3/4):907-923.
- [43] Robson J, Sutton R, Smith D. Decadal predictions of the cooling and freshening of the North Atlantic in the 1960s and the role of ocean circulation[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(9/10):1-13.
- [44] Guemas V, Doblas F J. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7):649-653.
- [45] Wu Bo, Zhou Tianjun. Decadal evolution of the sea surface temperature predicted by IAP/LASG climate system model FGOALS-gl[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(13):1 168-1 175. [吴波, 周天军. IAP/LASG 气候系统模式 FGOALS-gl 预测的海表面温度年代际尺度的演变[J]. 科学通报, 2012, 57(13):1 168-1 175.]
- [46] Yang X, Rosati A, Zhang S, et al. A predictable AMO-like pattern in the GFDL fully coupled ensemble initialization and decadal forecasting system [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(2):650-661.
- [47] Counillon F, Bethke I, Keenlyside N, et al. Seasonal-to-decadal predictions with the ensemble Kalman filter and the Norwegian Earth System Model: A twin experiment[J]. *Tellus*, 2014, 66(1):159-163.
- [48] Man W, Zhou T, Jungclaus J H. Effects of large volcanic eruptions on global summer climate and east asian monsoon changes during the last millennium; Analysis of MPI-ESM simulations [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27:7 394-7 409.
- [49] Man W M, Zhou T J. Regional-scale surface air temperature and East Asian summer monsoon changes during the last millennium simulated by the FGOALS-gl climate system model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(4):765-778.
- [50] Man Wenmin, Zhou Tianjun, Jungclaus J H. Simulation of the East Asian Summer Monsoon during the Last Millennium with the MPI Earth System Model [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(22):7 852-7 866.
- [51] Meehl G A, Hu A X, Tebaldi C. Decadal prediction in the Pacific region [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(11):2 959-2 973.
- [52] Fu C B, Qian C, Wu Z H. Projection of global mean surface air temperature changes in next 40 years; Uncertainties of climate models and an alternative approach[J]. *Science in China(Series D)*, 2011, 54:1 400-1 406.
- [53] Qi Yajie, Qian Cheng, Yan Zhongwei. An alternative multi-model ensemble mean approach for near-term projection[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, doi: 10.1002/joc.4690.
- [54] Wei Meng, Qiao Fangli, Deng Jia. A quantitative definition of global warming Hiatus and 50-year prediction of global-mean surface temperature[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72(8):3 281-3 289.
- [55] Wu Kaijun, Qian Weihong. Secular non-linear trends and multi-timescale oscillations of regional surface air temperature in Eastern China[J]. *Climate Research*, 2015, 63(1):19-30.
- [56] Li Hongmei, Ilyina T, Müller W A, et al. Decadal predictions of the North Atlantic CO₂ uptake [J]. *Nature Communication*, 2016, doi:10.1038/ncomms11076.
- [57] Han Zhenyu, Wu Bo, Xin Xiaoge. Decadal prediction skill of the global sea surface temperature in the BCC_CSM1.1 climate model[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4):394-405. [韩振宇, 吴波, 辛晓歌. BCC_CSM1.1 气候模式对全球海表温度年代际变化的回报能力评估[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):394-405.]
- [58] Man Wenmin, Zhou Tianjun. The impact of volcanic eruption on decadal-scale climate prediction skill of Pacific Sea surface temperatures in the IAP decadal climate prediction system[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4):352-360. [满文敏, 周天军. IAP 年代际预测试验中火山活动对太平洋海温预测技巧的影响[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):352-360.]
- [59] Chen Xiaolong, Wu Bo, Zhou Tianjun. Interdecadal change of relation between East Asian summer monsoon and ENSO in previous winter in an ocean assimilation dystem based on FGOALS-s2 [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4):362-372. [陈晓龙, 吴波, 周天军. FGOALS-s2 海洋同化系统中东亚夏季风和前冬厄尔尼诺—南方涛动关系的年代际变化[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):362-372.]
- [60] Guo Zhun, Zhou Tianjun. The simulation of stratocumulus and its impacts on SST: Based on the IAP near-term climate prediction system[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4):373-381. [郭准, 周天军. IAP 近期气候预测系统海洋初始化试验中海表温度和层积云的关系[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4):373-381.]

[61] Kirtman B, Power S B. Near-term climate change: Projections and predictability[M]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assess-

ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge, UK:Cambridge University Press, 2013.

Decadal Climate Prediction: Scientific Frontier and Challenge*

Zhou Tianjun^{1,2}, Wu Bo¹

(1. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The prediction of climate change in the future 10 ~ 30 year is a hot research area of the international community of the climate science, which has been listed as a core content of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) and some other important international scientific projects. The forecast object of the decadal climate prediction has been extended from averaged state over the future 10 ~ 30 years to temporal evolutions in future 1 ~ 10 or 30 years. Recently, the World Meteorological Organization (WMO) has been preparing to issue climate states in the near future based on decadal climate prediction systems. Focusing on the cut-edging and challenging scientific questions of the decadal climate prediction, we reviewed the theoretic basis of the predictability of the decadal climate and recent progresses of the practical decadal prediction experiments by international modelling centers in the paper. Finally, we summarized the core scientific questions to be solved in the area and discussed possible pathways to improve the skills of the decadal climate prediction.

Key word: Decadal variability; Initialization; External forcing; Coupled model.

* **Foundation item:** Project supported by the R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) "Development and research of ensemble decadal climate prediction system based on global climate models FGOALS-s, CMA and CESM" (No. GYHY201506012); The National Natural Science Foundation of China "Global monsoon: 20th century change simulation and future change projection" (No. 41330423).

First author: Zhou Tianjun (1969-), male, Longkou City, Shandong Province, Professor. Research areas include climate modelling, monsoon and air-sea interaction. **E-mail:** zhoutj@lasg.iap.ac.cn