

IAP-DecPreS 年代际气候预测系统及其预报技巧



通信作者简介:周天军,研究员/博士生导师,曾获国家杰出青年科学基金资助。任 WCRP SPARC 计划科学指导委员会委员、WCRP“耦合模拟工作组”(WGCM)委员、CLIVAR/GEWEX 联合季风委员会委员、“全球能量和水循环交换”国际计划(GEWEX)资料与评估委员会委员、CMIP6“全球季风模拟比较计划”(GMMIP)共同主席、英国牛津气候科学百科全书顾问委员会委员(Advisory Editor)、IPCC WG1 AR5 和 AR6 主要作者。任 *Advances in Atmospheric Sciences* 主编、*Science Bulletin* 副主编、*International Journal of Climatology* 副主编、*Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 编委。主要从事气候模拟、海气相互作用和季风研究;2014-2018 连续入选“Elsevier 中国高被引学者榜单”;2018-2019 连续入选 Web of Science、科睿唯安“全球高被引科学家”榜单。曾获国家自然科学二等奖(排名第五)。

* 联系人, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

2019-12-10 收稿, 2019-12-29 接受

国家自然科学基金资助项目(41775091);中国科学院“国际伙伴计划-国际大科学计划培育专项”项目(134111KY5B20160031)

周天军^{①②*}, 吴波^①, 胡帅^{①②}

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 大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要 针对未来 1~10 a 气候状态的近期气候预测(年代际预测)是当前国际气候领域的研究热点。本文综述了中国科学院大气物理研究所发展的基于耦合气候系统模式的年代际气候预测系统 IAP-DecPreS 相关的研究进展。IAP-DecPreS 系统的核心部分是耦合模式海洋分量初始化方案,“集合最优插值-分析增量更新”(EnOI-IAU)方案,该方案将集合最优插值(EnOI)和增量分析更新(IAU)结合起来,能够同化原始的海洋次表层温度廓线观测资料,对耦合模式进行初始化。系统的年代际回报试验表明,IAP-DecPreS 对太平洋年代际振荡和大西洋多年代际变率的预测技巧与耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)技巧较高的模式相当。IAP-DecPreS 系统被广泛应用于气候预测相关研究,包括火山气溶胶对年代际预测技巧的影响,全场同化和异常场同化两种不同的初始化方法对 ENSO、印度洋偶极子模态和印度洋洋盆模态等的预测技巧的影响。最后,结合国际发展态势,对未来 IAP-DecPreS 的发展进行了讨论。

关键词 年代际预测;耦合模式初始化;气候系统模式

年代际预测(或称“近期气候预测”)的预报对象是未来 1~10 a 多年平均的气候变化。这个时间尺度的气候预测问题介于季节-年际气候预测和长期气候变化预估之间,本质上是初值问题和外强迫响应问题的结合(Meehl et al., 2009)。一方面,需要在模式中给定辐射外强迫,预测温室气体和气溶胶排放等人类活动导致的外强迫,以及太阳和火山活动导致的自然强迫对气候系统的影响。另一方面,需要通过同化观测数据,将观测信息引入模式,令模式的初值接近观测,从而预测气候系统内部变率模态的时空演变(Meehl et al., 2014)。在年代际预测试验中加入的外强迫因子与历史气候模拟试验和未来气候预估试验类似。值得注意的是,在 1~10 a 范围内,气候系统对不同排放情景的差异不敏感(Meehl et al., 2007)。因此,年代际预测试验的主要技术难点在于采用准确、高效的方法对模式进行初始化。

年代际预测是气候预测领域新的热点之一。近年来,世界上的主要模拟中心均积极研发年代际预测系统,开展年代际预测试验(周天军和吴波, 2017;周天军等, 2019a)。最新的耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)专门组织了年代际气候预测计划(Decadal Climate Prediction Project, DCP; Boer et al., 2016)。相较于 CMIP5 的年代际预测

引用格式:周天军,吴波,胡帅,2020.IAP-DecPreS 年代际气候预测系统及其预报技巧[J].大气科学学报,43(1):159-168.

Zhou T J, Wu B, Hu S, 2020. Decadal prediction system IAP-DecPreS and its predictive skill[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1):159-168. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191210001. (in Chinese).

试验,CMIP6的起报频率从每5 a起报大幅提高到每年起报;集合数从3个大幅增加到10个(吴波和辛晓歌,2019)。世界气候研究计划(WCRP)为了应对社会可持续发展,提出了急需解决的七大科学挑战(Grand Challenges),其中将“近期气候预测”列为核心子计划之一。它的目标是解决年代际预测的核心关键科学问题,其中包括:年代际变率的可预测性来源,提高模式年代际预测技巧的途径和减少预测的不确定性等(Zhou et al.,2018a,Kushnir et al.,2019)。从业务应用的角度,由英国气象局发起,多国参与,建立了“年代际预测结果交流”机制,每年交流、发布年代际预测结果,作为世界气象组织(WMO)组织的年代际预测准业务运行的先期尝试(<https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/wmolc-adcp>)。

作为气候系统模式FGOALS研发的组成部分(周天军等,2019b),中国科学院大气物理研究所自2011年开始研发年代际预测系统IAP-DecPreS,先后发展了IAU和EnOI-IAU两个耦合模式初始化方案。本文的主要目的是,综述中国科学院大气物理研究所开发的年代际预测系统IAP-DecPreS相关的研究成果,内容包括:系统搭建方案、年代际预测和季节-年际预测的回报技巧,及基于该系统开展的气候预测方法的研究等成果。最后,展望未来IAP-DecPreS的发展方向。

1 IAP-DecPreS 介绍

1.1 发展历史

2012年,中科院大气所基于粗分辨率的海气耦

合气系统模式FGOLAS-gl(大气分辨率 5° (经度) \times 4° (纬度),海洋分量分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)(Wen et al.2007;Zhou et al.2008b),利用增量分析更新(Incremental analysis update,IAU;Bloom et al.,1996)方法同化英国Hadley中心提供的EN3海洋客观分析资料对模式进行初始化,构建了年代际预测系统的最初版本(Wu and Zhou,2012)。该预测系统是国内最早的年代际预测系统之一。后续,类似的初始化方法也被用在了FGOALS-s2模式。FGOALS-s2大气分辨率为 2.81° (经度) \times 1.66° (纬度),海洋分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,赤道加密到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Wu et al.,2015)。FGOALS-s2的年代际预测回报、预报试验提交至CMIP5,并被IPCC AR5报告引用(Kirtman et al.,2013)。

1.2 EnOI-IAU 初始化方案

在IAU初始化方法的基础上,中科院大气所发展了EnOI-IAU初始化方案(图1)。该初始化方案是集合最优插值(Ensemble optimal interpolation,EnOI)和IAU的组合。利用EnOI-IAU方法将英国Hadley中心提供的EN4海洋温度观测廓线资料同化到耦合模式海洋分量,同化窗口设定为1个月。具体来说,对于每个同化窗口包括三个步骤。首先,耦合模式自由积分1个月,得到初猜场(first guess)。然后,利用EnOI方法将初猜场与观测值结合起来,计算分析增量。EnOI是基于集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman filter,EnKF;Ide et al.,1997)理论简化而来。EnOI与EnKF主要的区别在于前者的背景误差协方差矩阵是预先设定的,且不随时间变化。这里,利用3组历史气候模拟试验的

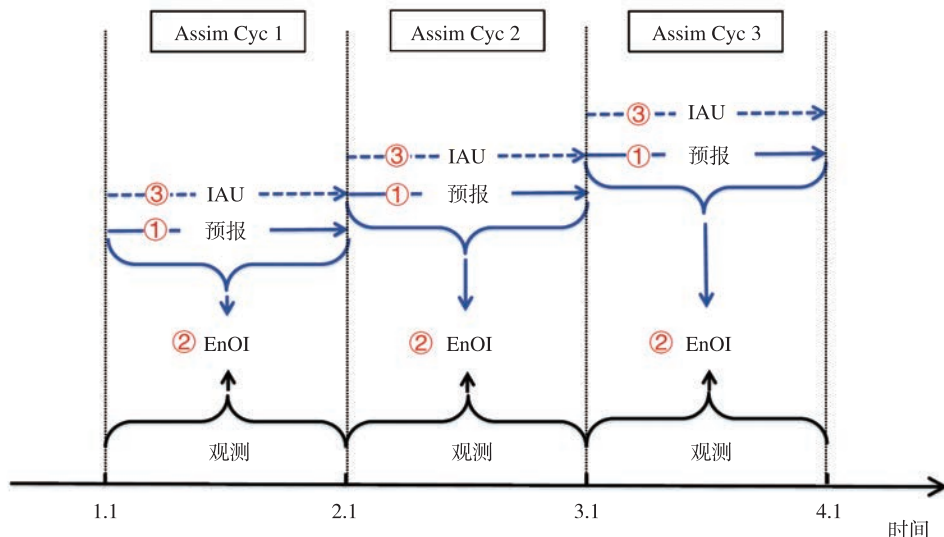


图1 EnOI-IAU初始化方案的流程(引自Wu et al.,2018)

Fig.1 Schematic diagram of the EnOI-IAU initialization scheme(from Wu et al.,2018)

1961—1995 年输出结果,共计 105 个成员,构建了包含年循环的背景误差协方差矩阵。最后,将模式退回积分的初始时刻,重新积分一个月。在此过程中利用 IAU 方法将第二步得到的分析增量逐步引入模式。这里 IAU 指,将分析增量根据总的积分步数等分,以保证在同一个窗口内,所有模式步中分析增量对模式的强迫保持不变。

相较于早期的 IAU 方法只能同化格点化的客观分析资料,EnOI-IAU 方法能够同化原始的观测廓线资料,对于提高预测的时效性有巨大帮助。为了提高同化的计算效率,该方案采用 Super-obing 的方法,构造了超级观测,即将一个同化窗口内的所有观测数据,根据模式的三维网格进行分离,所有落在一个模式网格内的数据求平均值。值得注意的是,虽然目前 EnOI-IAU 只同化了海洋观测数据,模式系统内的大气、陆面和海冰等分量会由于气候系统内部的相互作用过程,随着海洋分量一起调整。

中科院大气所基于 EnOI-IAU 初始化方法和 FGOALS-s2 模式 (Bao et al. 2013), 建立了 IAP-DecPreS 年代际气候预测系统 (Wu et al., 2018), 结果在“年代际预测结果交流”的平台上发布 (<https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/wmolc-adcp>)。

2 年代际预测

中科院大气所基于 IAP-DesPreS 预测系统开展了完整的年代际预测试验。其中包括同化试验和回报试验。其中,3 组初始化试验的初始条件来自 3 组历史气候模拟试验,试验覆盖时间段为 1950—2005 年,在积分过程中通过同化海洋观测数据,使

得模式中的气候系统内部变率的演变向观测靠近。基于 3 组初始化试验,通过初值扰动的方法,开展了 9 组年代际回报试验。回报试验覆盖时段是 1960—2005,每年 11 月起报。在积分的过程中同时考虑与历史气候模拟试验 (2005 年之前) 或 RCP4.5 预估试验 (2005 年之后) 相同的辐射外强迫 (Taylor et al., 2012)。

初始化试验的技巧代表预测试验初始条件的精确度。我们通过时间相关系数、均方根误差等指标检查了 EnOI-IAU 初始化试验对 SST 的模拟技巧。初始化试验中的赤道中东太平洋 (ENSO 关键区) SST 异常与观测的相关系数达到了 0.91 (图 2a); 中纬度北太平洋 (太平洋年代际振荡的关键区) 和北大西洋 (大西洋多年代际变率的关键区) 5 a 滑动 SST 异常与对应观测的相关系数分别达到了 0.73 和 0.9 (图 2b; Wu et al., 2018)。更加细致的分析表明,初始化试验对“SST-层积云”关系 (郭准和周天军, 2017)、“东亚夏季风-ENSO”关系 (陈晓龙等, 2017)、冬季 Hadley 环流 (孙咏等, 2018)、西北太平洋“降水-SST”关系 (邹立维等, 2018)、ENSO 衰减年西北太平洋异常反气旋 (江洁等, 2019) 等气候系统的关键因子都具有较高的模拟技巧。

以时间相关系数作为指标,检查了回报试验的技巧。对于回报时间段 2~5 a 平均,热带印度洋-西太平洋暖池区、南大洋、热带大西洋等区域存在显著的正相关 (图 3a)。对于回报时间段 6~9 a 平均,相关技巧也呈现类似的空间分布 (图 3c)。为了去除长期增暖的影响,突出回报试验对内部变率的预测技巧,对去趋势 SST 异常求了时间相关系数 (图 3b、d)。对于回报时间段 2~5 a 平均,在北太平洋、北

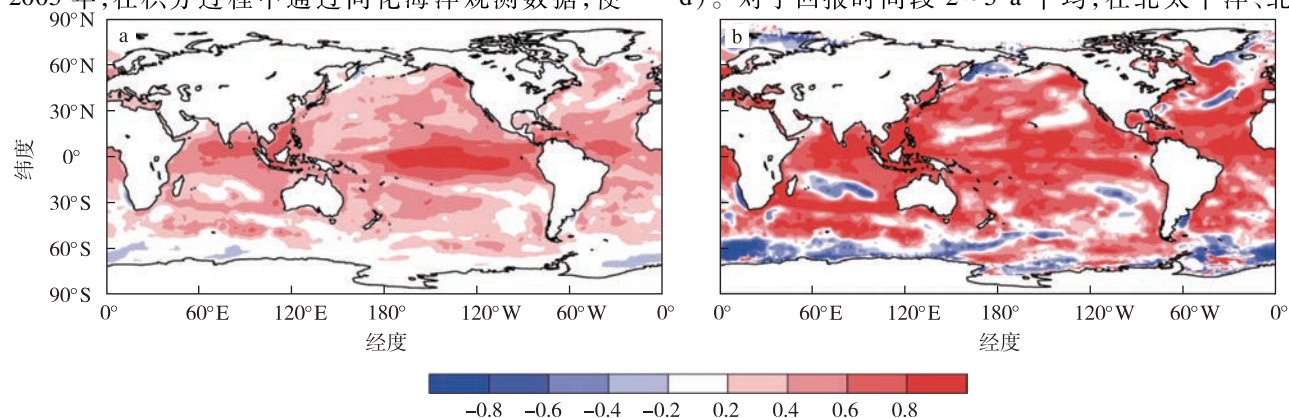


图 2 初始化试验模拟的 1960—2015 年 SST 异常 (a) 及 5 a 滑动平均的 SST 异常 (b) 与对应观测数据的时间相关系数的空间分布 (引自 Wu et al., 2018)

Fig.2 Correlation coefficients between the observations and the SST anomalies during 1960—2015 from (a) the initialization runs and (b) their 5-year running mean (from Wu et al., 2018)

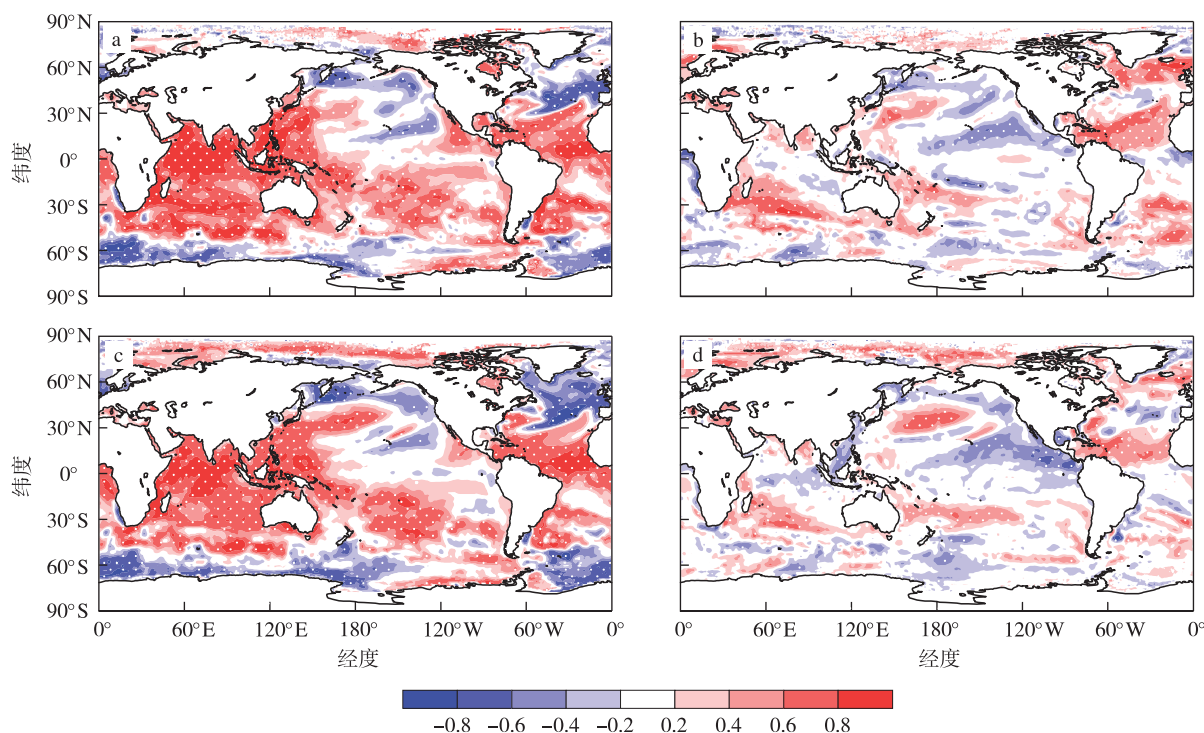


图3 基于 FGOALS-s2 模式和 EnOI-IAU 初始化方案的年代际预测试验技巧评估: 回报年 2~5 a 平均和回报年 6~9 a 平均 SST 异常的时间相关系数技巧(a,c; 白点代表通过 5% 信度的显著性水平检验); 去趋势的 SST 异常的时间相关系数技巧(b,d) (引自 Wu et al., 2018)

Fig.3 Predictive skill of the hindcast runs of the decadal prediction experiments based on the FGOALS-s2 model and the EnOI-IAU initialization scheme. Correlation skill of SST anomalies averaged over the hindcast years 2—5 and 6—9 (a, c; the white dots represent the 5% significance level). (b, d) Same as in (a, c), but for the detrended SST anomalies (from Wu et al., 2018)

大西洋和南大洋等区域存在显著的正相关, 表明回报试验对于与太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 和大西洋多年代际变率 (Atlantic Multidecadal Variability, AMV) 有关的 SST 异常具有一定的预测技巧。对于回报时间段 6~9 a 平均, 在北太平洋的相关系数甚至更高 (图 3d), 与提交 CMIP5 年代际预测试验表现最佳的模式技巧相当 (图 4; Wu et al., 2018)。

前文提到了 EnOI-IAU 初始化方法是从 IAU 方法发展而来。主要的变化是引入了 EnOI 方案, 从而能够同化原始观测廓线资料。基于同一个模式 (FGOALS-s2), 系统比较了两种初始化方法对年代际预测技巧的影响。时间相关系数、均方根技巧评分 (Root Mean Square Skill Score, RMSSS) 等指标均表明, EnOI-IAU 方案的回报试验对 PDO 相关的北太平洋 SST 异常的回报技巧显著高于基于 IAU 方案的回报试验。而对于气候系统另一个主要的年代际变率模态 AMV, EnOI-IAU 回报试验的技巧反而低于 IAU 回报试验。EnOI-IAU 回报试验的主要问

题是在 AMV 主要中心之一的北大西洋副极地大涡区域存在一个虚假的变冷中心 (吴波等, 2017)。虚假变冷中心的形成原因目前尚不清楚。

年代际预测的回报试验中考虑与历史气候模拟试验一致的辐射外强迫, 其中包括了火山气溶胶的影响。值得注意的是, 火山喷发目前难以预测, 因此, 考虑给定的火山气溶胶影响可能导致回报试验对实际预报技巧的高估。评估了 IAP-DecPreS 回报试验对火山喷发之后热带海温的预测技巧。发现回报试验对不同火山喷发之后的气候响应的预测技巧存在较大的不确定性。回报试验对 1982 年 El Chichon 火山爆发和 1991 年 Pinatubo 火山爆发之后的热带海温异常的预测技巧很低, 但对 1963 年 Agung 火山喷发之后的热带海温异常的模拟基本与观测一致 (满文敏和周天军, 2017)。火山气溶胶对年代际预测技巧的影响仍然是一个值得研究的问题。

3 季节-年际预测

利用 IAP-DecPreS 预测系统的灵活性, 我们开

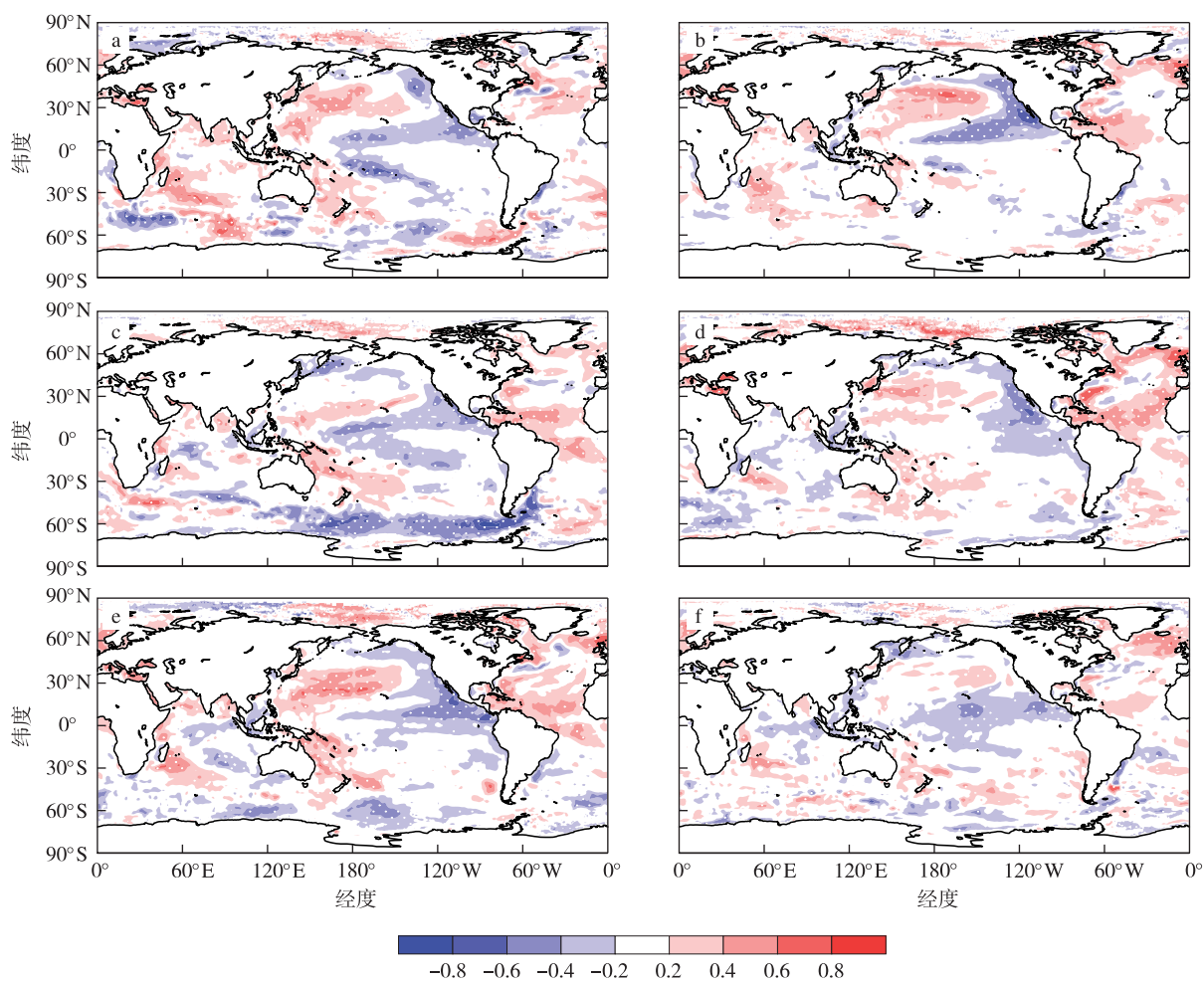


图4 基于6个CMIP5模式年代际预测试验预测技巧:(a) CanCm4模式;(b) HadCM3模式;(c) BCC-CSM1.1模式;(d) MIROC5模式;(e) GFDL-CM2模式;(f) MPI-ESM-LR模式(引自Wu et al.,2018)

Fig.4 Predictive skill of the decadal prediction experiments from six CMIP6 models:(a) CanCm4;(b) HadCM3;(c) BCC-CSM1.1;(d) MIROC5;(e) GFDL-CM2;(f) MPI-ESM-LR(from Wu et al.,2018)

展了不同初始策略对“季节-年际”气候预测技巧的影响研究。全场同化和异常场同化是气候预测的两种截然不同的初始策略。如果将观测数据视为气候平均态和叠加在气候平均态上的异常(距平)场之和,那么全场同化就是同时同化气候态和异常场,而异常场同化则只同化后者,保持模式气候态基本不变。对于全场同化,模式的气候态漂移是难以避免的问题。相比于全场同化,异常场同化则能够显著减小模式气候态漂移。我们重点围绕 ENSO 和印度洋年际变率主导模态印度洋洋盆模态 (Indian Ocean Basin Mode, IOBM) 和印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD) 开展了研究。

基于异常场同化的回报试验对 ENSO 的预测技巧高于全场同化的回报试验(图 5; Sun et al., 2018)。异常场同化能够显著减小 FGOALS-s2 的模式漂移现象。对于全场同化,随着预测积分时间

的增加,热带中东太平洋海温的冷舌偏差问题逐渐增大。为了研究模式漂移如何影响 ENSO 预测技巧,选取 1997/1998 和 2015/2016 两次超级 El Niño 事件进行分析。提前 7 个月,异常场同化回报试验能够合理地预测出两次事件的振幅及时间演变,而全场同化下回报的 El Niño 振幅偏弱,并且衰减偏快。温跃层热量收支分析表明,在 El Niño 发展阶段,全场同化回报试验中的热带中东太平洋海温存在很强的模式漂移现象,它一方面减弱了模式固有的“海洋底层云-短波辐射-SST”正反馈,加强了短波辐射通量异常的衰减效应;另一方面增强了赤道太平洋次表层平均纬向洋流,加强了平均流导致的异常纬向温度平流,均不利于模式中 El Niño 的发展。该研究表明,季节预测中模式漂移对 ENSO 存在着非线性作用,其影响不能通过偏差订正去除,因此减小预测过程中的模式漂移十分必要(Hu et al.,2020)。

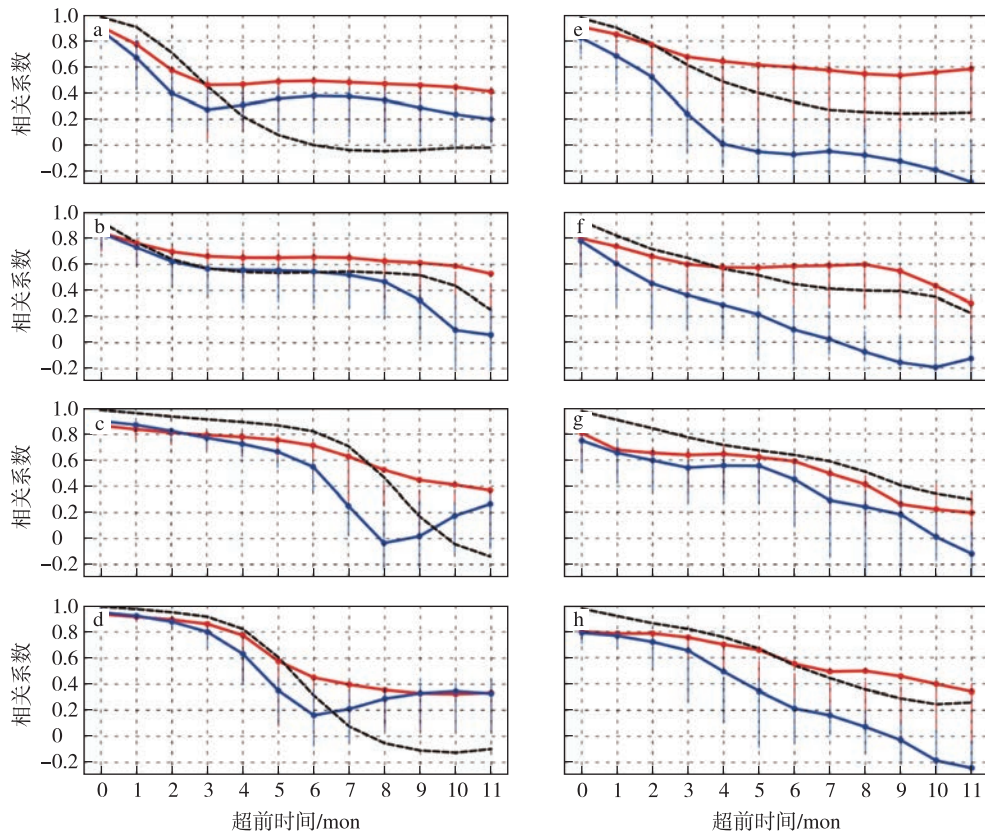


图5 基于异常场同化的回报试验(红线)和基于全场同化的回报试验(黑线)在不同起报月对 Niño3.4 指数(a—d)和 El Niño Modoki 指数(e—h)的时间相关技巧随预报超前时间的变化:(a,e)2月;(b,f)5月;(c,g)8月;(d,h)11月(黑色竖线代表技巧最高和最低的集合成员的差别,黑色虚线代表持续性预测;引自 Sun et al.,2018)

Fig.5 Correlation skill as function of lead time from the Hindcast-A (red line) the Hindcast-F (black line) for (a—d) the Niño3.4 index and (e—h) El Niño Modoki index, initialized from (a,e) February; (b,f) May; (c,g) August; (d,h) November. The vertical black bars represent the differences between the lowest and highest skill, and the dashed black lines represent the skill of the persistence predictions (from Sun et al.,2018)

对于 IOBM, 基于异常场同化的回报试验的预测技巧也高于基于全场同化的回报试验。观测中, IOBM 通常从 ENSO 成熟位相的冬季维持到次年夏季 (Klein et al., 1999)。11 月起报 IOBM, 基于两种初始化策略的回报试验都能合理地预测出 ENSO 成熟位相冬季印度洋海盆尺度的增暖, 但只有基于异常场同化的回报试验预测出 IOBM 维持至 ENSO 衰减年的夏季 (图 6)。异常场同化回报试验相对于全场同化回报试验的优势主要在 IOBM 的发展阶段。其中, 后者低估了热带南印度洋的增暖倾向。一方面, 全场同化回报试验中的 ENSO 衰减速度快于对应的观测和异常场同化回报试验, 导致模式模拟的 ENSO 遥强迫作用偏弱。另一方面, 由于模式背景气候态的影响, 全场同化回报试验低估了热带南印度洋表面向下短波辐射通量, 高估了向上的潜

热通量, 不利于 IOBM 的形成和发展。尽管全场同化能够减小模式对热带印度洋气候平均态固有的模拟偏差, 但它破坏了耦合模式中固有的, 与 IOBM 形成相关的印度洋局地海气相互作用过程, 使得其对 IOBM 预测技巧较之异常场同化偏低 (Hu et al., 2019)。

国际上的气候预测系统对 IOD 的预报水平明显低于对 ENSO 和 IOBM 的预报水平。以相关系数大于 0.5 作为有预报技巧的阈值, 预报时效仅为 3~4 个月 (Shi et al., 2012)。提前 1 个月预测 (8 月起报) 秋季 IOD, 不同于对 IOBM 和 ENSO 的预测, 基于全场同化的回报试验预测技巧高于异常场同化的回报试验 (胡帅等, 2019)。全场同化策略相对于异常场的优势主要源于它提高了对伴随 ENSO 发生的 IOD 的预报技巧。ENSO 遥强迫触发的热带

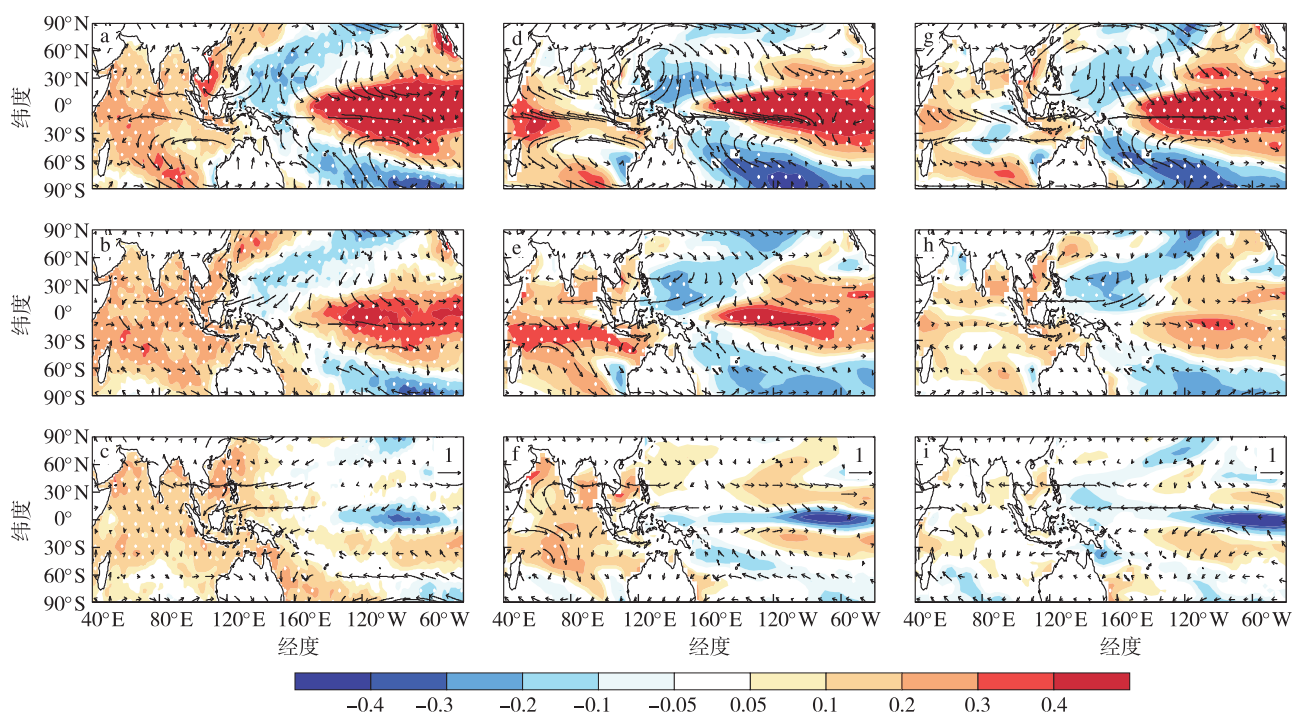


图6 回归到观测的 IOBM 指数上的 SST 异常(阴影;单位:°C)和 850 hPa 风场(箭头;单位:m/s)异常的分布:(a—c)观测数据;(d—f)基于异常场同化 11 月起报的回报试验;(g—i)基于全场同化 11 月起报的回报试验(引自 Hu et al., 2019)

Fig.6 Regression of the SST (shaded, unit: °C) and 850 hPa wind (vector, unit: m/s) anomalies onto the observed IOBM index for (a—c) observation; (d—f) hindcasts based on anomaly assimilation (Hindcast-A) initialized from November; (g—i) hindcasts based on full-field assimilation (Hindcast-F) initialized from November (from Hu et al., 2019)

东印度洋“风—蒸发—SST”正反馈过程是 IOD 发展和维持的关键。在提前 1 个月预测时,基于全场同化的回报试验中模式漂移尚未完全发展,全场同化能够减小模式对热带印度洋气候平均态降水固有的模拟偏差,从而提升了热带印度洋对 ENSO 遥强迫响应的模拟能力。而异常场同化保持了模式固有的气候平均态,因此模拟的热带印度洋对 ENSO 遥强迫的响应存在与模式自由积分类似的模拟偏差,使得 IOD 的预测技巧偏低。该结果表明,改善耦合模式中热带印度洋气候平均态降水的系统性模拟偏差,能够改进模式中印度洋对 ENSO 遥强迫的响应,进而提高 IOD 的预测技巧。

4 展望

未来 IAP-DecPreS 的发展目标是建成无缝隙气候预测系统。这里,无缝隙气候预测指基于同一个模式预测系统,开展次季节-季节-年际-年代际等不同时间尺度的气候预测。它是世界气候研究计划(WCRP)提出的“天气预报-气候预测-长期气候预估”无缝隙预报的重要组成部分(WCRP, 2005)。目前由于模式分辨率、物理过程复杂度等难以克服

的难题,天气模式和气候模式尚难以融合,因此 WCRP 提出的无缝隙预报只存在理论上的可行性,业务上完全实现尚需要时间。相反,随着耦合气候系统模式对各个时间尺度气候变率模拟能力的提高,针对季节内、季节到年际、年代际等不同时间尺度的气候预测广泛开展,无缝隙气候预测成为可能。

目前气候预测领域存在两个相对独立的群体,即季节内-季节预测(S-S)和季节-年际-年代际预测(S-D)。两个群体的形成存在气候动力学和气候预测理论上深层次的原因。S-S 预测的数学本质是初值问题,因此初始条件的准确性是影响预报技巧的关键因子。S-D 中的年代际预测则初值问题和对外强迫响应问题的结合(Meehl et al., 2009)。但是,值得注意的是,气候系统间各个尺度变率之间实际上存在无法割裂的联系。无缝隙气候预测将 S-S 和 S-D 融合起来,可能将极大推动气候预测的发展。

无缝隙气候预测的核心技术是基于耦合气候系统模式的耦合同化系统。耦合同化系统能够同时同化气候系统多个分量的观测数据(主要是大气和海洋),对模式进行初始化,支撑各个时间尺度的气候预测。耦合同化可以根据复杂度分为如下三类:

1) 准弱耦合同化, 指在耦合模式框架下, 同化单个分量的观测数据(主要是海洋, IAP-DecPreS 现有初始化系统是一个例子), 观测信号通过模式耦合过程传递到其他分量; 2) 弱耦合同化, 指对耦合模式各个分量(例如大气、海洋和海冰)分别进行数据同化。求解分析增量的计算中, 某个分量的观测数据不影响其他分量。该分量的观测信号通过模式耦合过程传递到其他分量; 3) 强耦合同化, 求解分析增量过程中, 某个分量的观测数据会直接影响其他分量。目前我国尚没有弱/强耦合同化系统可以支撑实际的业务无缝隙气候预测, 相关研究相对于国际领先的气候研究机构也亟待加强。

关于 IAP-DecPreS 的未来发展, 我们将分别为大气、海洋和海冰分量建立同化系统, 在耦合框架下运行单个分量的同化试验。分析同化试验得到的分

析场的准确性, 逐步完善单个分量的同化系统。然后在单个分量同化系统的基础上搭建能够同时同化大气、海洋、海冰观测数据的弱耦合同化系统。基于该同化初始化系统开展无缝隙气候预测回报试验, 并逐步对其进行改进。在此过程中, 科研与业务应用的结合是推动系统发展的重要力量, 本文的 EnOI-IAU 初始化方案目前已经在国家气候中心和中国气象科学研究院得到推广应用。最后需要指出的是, 海洋分量的初始化方案是年代际预测系统的核心组成部分, 本文的 EnOI-IAU 初始化方案是诸多海洋初始化方案中的一种, 例如中科院大气所针对 FGOALS-g2 模式还研发了基于四维变分技术的初始化方案(Wang et al. 2013), 不同初始化方案的比较及其在耦合模式系统中的适用性, 也是未来亟待开展的工作。

参考文献(References)

- Bao Q, Lin P F, Zhou T J, et al., 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2[J]. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 561-576.
- Bloom S C, Takacs L L, da Silva A M, et al., 1996. Data assimilation using incremental analysis updates[J]. *Mon Wea Rev*, 124(6): 1256-1271.
- Boer G J, Smith D M, Cassou C, et al., 2016. The decadal climate prediction project (DCPP) contribution to CMIP6[J]. *Geosci Model Dev*, 9(10): 3751-3777.
- 陈晓龙, 吴波, 周天军, 2017. 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*, 32(4): 362-372. Chen X L, Wu B, Zhou T J, 2017. Interdecadal change of relation between east Asian summer monsoon and ENSO in previous winter in an ocean assimilation system based on FGOALS-s2[J]. *Adv Earth Sci*, 32(4): 362-372. (in Chinese).
- 郭准, 周天军, 2017. IAP 近期际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*, 32(4): 373-381. Guo Z, Zhou T J, 2017. The simulation of stratocumulus and its impacts on SST: based on the IAP near-term climate prediction system[J]. *Adv Earth Sci*, 32(4): 373-381. (in Chinese).
- 胡帅, 吴波, 周天军, 2019. 近期气候预测系统 IAP-DecPreS 对印度洋偶极子的回报技巧: 全场同化和异常场同化的比较[J]. *大气科学*, 43(4): 831-845. Hu S, Wu B, Zhou T J, 2019. Predictive skill of the near-term climate prediction system IAP-DecPreS for the Indian ocean dipole: a comparison of full-field and anomaly initializations[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(4): 831-845. (in Chinese).
- Hu S, Wu B, Zhou T J, et al., 2019. A comparison of full-field and anomaly initialization for seasonal prediction of Indian Ocean basin mode[J]. *Clim Dyn*, 53(9/10): 6089-6104.
- Hu S, Zhou T J, Wu B, 2020. Improved ENSO prediction skill resulting from reduced climate drift in IAP-DecPreS: a comparison of full-field and anomaly initializations[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(2). doi: 10.1029/2019ms001759.
- Ide K, P Courtier, M Ghil, et al., 1997. Unified notation for data assimilation: operational, sequential and variational[J]. *J Meteor Soc Japan*, 75: 181-189.
- 江洁, 周天军, 吴波, 等, 2019. 耦合模式 FGOALS-s2 海洋同化试验模拟的西北太平洋海气相互作用特征[J]. *大气科学*, 43(3): 467-482. Jiang J, Zhou T J, Wu B, et al., 2019. Ocean-atmosphere interaction characteristics over the northwestern Pacific simulated by an ocean data assimilation system based on the coupled model FGOALS-s2[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(3): 467-482. (in Chinese).
- Klein S A, Soden B J, Lau N C, 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. *J Climate*, 12(4): 917-932.
- Kirtman, B, Power S B, Adedoyin A J, et al. 2013. Near-term climate change: Projections and predictability[M]//Climate Change 2013-The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press: 953-1028.
- Kushnir Y, Scaife A A, Arritt R, et al., 2019. Towards operational predictions of the near-term climate[J]. *Nature Clim Change*, 9(2): 94-101.
- 满文敏, 周天军, 2017. 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*, 32(4): 353-361. Man W M, Zhou T J, 2017. The impact of volcanic eruption on decadal-scale climate prediction skill of pacific sea surface temperatures in the IAP near-term climate prediction system(IAP DecPreS)[J]. *Adv Earth Sci*, 32(4): 353-361. (in Chinese).
- Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. 2007. Climate change: the physical science basis[R]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Contribution

- of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R].Cambridge:Cambridge University Press: 747-845.
- Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al., 2009. Decadal prediction[J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(10):1467-1486.
- Meehl G A, Goddard L, Boer G, et al., 2014. Decadal climate prediction: an update from the trenches[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(2):243-267.
- Shi L, Hendon H H, Alves O, et al., 2012. How predictable is the Indian ocean dipole? [J]. Mon Wea Rev, 140(12):3867-3884.
- Sun Q, Wu B, Zhou T J, et al., 2018. ENSO hindcast skill of the IAP-DecPreS near-term climate prediction system: comparison of full-field and anomaly initialization[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 11(1):54-62.
- 孙咏, 周天军, 吴波, 2018. 耦合气候系统模式 FGOALS-s2 海洋数据同化试验模拟的冬季 Hadley 环流长期变化趋势[J]. 科学通报, 63(4):452-460. Sun Y, Zhou T J, Wu B, 2018. Simulation of long-term trends in Hadley circulation during boreal winter using an ocean data assimilation scheme with the coupled general circulation model FGOALS-s2[J]. Chin Sci Bull, 63(4):452-460. (in Chinese).
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bull Amer Meteor Soc, 93(4):485-498.
- Wang B, Liu M M, Yu Y Q, et al., 2013. Preliminary evaluations of FGOALS-g2 for decadal predictions[J]. Adv Atmos Sci, 30(3):674-683.
- WCRP, 2005. Strategic framework 2005—2015: coordinated observation and prediction of the Earth system [R]. WCRP Rep. 123 and WMO Rep. 1291, 65.
- Wen X Y, Zhou T J, Wang S W, et al., 2007. Performance of a reconfigured atmospheric general circulation model at low resolution[J]. Adv Atmos Sci, 24(4):712-728.
- Wu B, Zhou T J, 2012. Prediction of decadal variability of sea surface temperature by a coupled global climate model FGOALS_gl developed in LASG/IAP[J]. Chin Sci Bull, 57(19):2453-2459.
- 吴波, 辛晓歌, 2019. CMIP6 年代际气候预测计划 (DCPP) 概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 15(5):476-480. Wu B, Xin X G, 2019. Short commentary on CMIP6 decadal climate prediction project (DCPP)[J]. Clim Chang Res, 15(5):476-480. (in Chinese).
- Wu B, Chen X L, Song F F, et al., 2015. Initialized decadal predictions by LASG/IAP climate system model FGOALS-s2; evaluations of strengths and weaknesses[J]. Adv Meteorol, 2015:1-12.
- 吴波, 周天军, 孙倩, 2017. 海洋模式初始化同化方案对 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, 32(4):342-352. Wu B, Zhou T J, Sun Q, 2017. Impacts of initialization schemes of oceanic states on the predictive skills of the IAP near-term climate prediction system [J]. Adv Earth Sci, 32(4):342-352. (in Chinese).
- Wu B, Zhou T J, Zheng F, 2018. EnOI-IAU initialization scheme designed for decadal climate prediction system IAP-DecPreS[J]. J Adv Model Earth Syst, 10(2):342-356.
- 周天军, 吴波, 2017. 年代际气候预测问题: 科学前沿与挑战[J]. 地球科学进展, 32(4):331-341. Zhou T J, Wu B, 2017. Decadal climate prediction: scientific frontier and challenge[J]. Adv Earth Sci, 32(4):331-341. (in Chinese).
- Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al., 2008a. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration[J]. Adv Atmos Sci, 25(4):655-672.
- Zhou T J, Wang B, Yu Y Q et al., 2018b. The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting climate sciences: an overview[J]. Earth Planet Phys, 2(4):276-291.
- 周天军, 陈晓龙, 吴波, 2019a. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题[J]. 科学通报, 64(19):1967-1974. Zhou T J, Chen X L, Wu B, 2019. Frontier issues on climate change science for supporting future earth[J]. Chin Sci Bull, 64(19):1967-1974. (in Chinese).
- 周天军, 邹立维, 陈晓龙, 2019b. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述[J]. 气候变化研究进展, 15(5):445-456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L, 2019. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. Clim Chang Res, 15(5):445-456. (in Chinese).
- 邹立维, 李东欢, 周天军, 等, 2018. FGOALS 海洋同化试验对西北太平洋夏季 SST—降水关系的模拟评估[J]. 气候与环境研究, 23(2):139-149. Zou L W, Li D H, Zhou T J, et al., 2018. Summer rainfall-SST relationships in the western north Pacific simulated by the FGOALS model with ocean assimilation[J]. Clim Environ Res, 23(2):139-149. (in Chinese).

Decadal prediction system IAP-DecPreS and its predictive skill

ZHOU Tianjun^{1,2}, WU Bo¹, HU Shuai^{1,2}

¹State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Decadal climate prediction (near-term climate prediction) targeting the climate states over future 1-10 years is an international research hotspot of the climate area. This paper summarizes the progresses of a decadal climate prediction system, IAP-DecPreS, which was developed by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. The key part of the IAP-DecPreS is an initialization scheme for the ocean component of a coupled general circulation model. The initialization scheme was referred to as EnOI-IAU scheme, which is a combination of the Ensemble Optimal interpolation (EnOI) and Incremental analysis update (IAU). It can initialize the coupled model via assimilating raw observational oceanic temperature profiles. Hindcast experiments indicated that the IAP-DecPreS has predictive skill for the Pacific decadal oscillation (PDO) and Atlantic multi-decadal variability (AMV), comparable with the high-skill CMIP5 models. IAP-DecPreS has been widely used in the climate research, including the impacts of volcanic eruptions on the decadal predictive skill, the impacts of two distinct initialization approaches, full-field assimilation and anomaly assimilation, on the predictions of ENSO, Indian Ocean dipole and Indian Ocean basin mode. At last, the authors discuss the future development of the IAP-DecPreS under the guidance of global perspective.

decadal climate prediction, initialization of coupled model, coupled general circulation model

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191210001

(责任编辑:袁东敏)