

FIO-CPS v2.0 对 2021 年冬季 ENSO 的预测

宋亚娟^{1,2,3,4}, 宋振亚^{1,2,3,4}, 魏 萌^{1,2,3,4}, 舒 启^{1,2,3,4},
鲍 颖^{1,2,3,4}, 乔方利^{1,2,3,4*}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘 要: 2020 年冬季(2020 年 12 月至 2021 年 2 月), 赤道中东太平洋海表温度持续下降, 形成了一次拉尼娜事件。2021 年春季, 海表温度回升, 转为中性状态。最新观测发现, 2021 年秋季以来海表温度再次降低, 冬季是否会再次形成拉尼娜事件, 其对我国冬季的气候有何影响? 本文利用自然资源部第一海洋研究所发展的短期气候预测系统 FIO-CPS v2.0, 以 2021 年 10 月 1 日为起报时间, 对冬季气候进行了预测。结果表明, 赤道中东太平洋冷异常将在 11 月达到鼎盛, 形成一次弱拉尼娜事件, 2022 年 1 月将转为中性状态。在连续 2 年出现拉尼娜现象的气候背景下, 2021 年 11 月, 除青藏高原、西南地区、东南沿海及台湾气温偏高外, 我国大部分地区气温将偏低。12 月之后, 我国北方气温偏高而南方气温偏低的概率较大。此外, 降水预测结果显示, 初冬, 南方降水偏多, 而华北、东北部分地区降水偏少。2022 年 1 月南方降水将偏少, 而华北和东北降水将偏多。不同集合之间降水预测结果存在较大差异, 表明降水预测结果仍有较高不确定性。

关键词: 短期气候预测; 拉尼娜; 海表温度; 气候模式

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)02-0165-10

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.of2021001

引用格式: 宋亚娟, 宋振亚, 魏萌, 等. FIO-CPS v2.0 对 2021 年冬季 ENSO 的预测[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2): 165-174. SONG Y J, SONG Z Y, WEI M, et al. The ENSO prediction in 2021 winter based on the FIO-CPS v2.0[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(2): 165-174.

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是赤道太平洋大尺度海气相互作用的异常信号。作为全球海洋-大气耦合系统中最强的年际尺度变化信号, ENSO 通过调整沃克环流, 直接引起热带区域大气环流、对流和海温异常^[1]。同时, ENSO 对热带外的气候和天气过程有重要影响。从季节内至年际尺度上, 我国天气和气候明显受到 ENSO 的调制, 其可通过遥相关引起西太平洋副高、季风系统等大气环流异常, 进而影响我国降水和旱涝分布^[2]。冬季, 拉尼娜会导致我国南方变冷, 甚至出现严重的冰雪冻雨灾害^[3]。在全球变暖的背景下, 受 ENSO 的影响, 我国极端事件发生频率增加, 强度也会发生改变^[4-5]。因此, 准确预测 ENSO 在月-季节-年际尺度上的变化是短期气候预测的核心内容, 对我国气候的预判具有重要指导意义。

能够利用海气耦合模式开展 ENSO 的模拟和预测, 是气候预测研究领域的里程碑之一。从最初简单的海气耦合模式, 至包含复杂物理过程的地球系统模式(简称为“气候模式”), 气候模式对 ENSO 的预测能力

收稿日期: 2021-10-20

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——ENSO、PDO 和 AMO 的非线性调制机理研究(2019Q08); 国家自然科学基金面上基金项目——海洋泡沫对亚洲季风区水汽输送的影响(41906186)

作者简介: 宋亚娟(1983—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事短期气候预测和季风海气相互作用方面研究. E-mail: songyj@fio.org.cn

*** 通信作者:** 乔方利(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事海洋环流数值模拟、海洋与气候变化等方面研究.

E-mail: qiaofl@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

逐步提高^[6-8],已成为动力预测中的核心工具。通过对多模式预测能力评估发现,大部分气候模式对 ENSO 具备较好的预测能力,超前 6 个月预测海表温度异常的相关系数高于 0.7,其中欧洲中期天气预报中心季节预测系统(ECMWF's fifth generation seasonal forecast system, SEAS5)的预测技巧甚至高达 0.85 以上^[9-11]。选取合适的同化方法、构造更为准确的初值场和不断改进气候模式中的物理参数化过程是提高 ENSO 预测能力的主要途径^[12-16]。

在全球变暖的背景下,ENSO 对全球和区域气候的调制过程不断发生变化,给短期气候预测带来了新的挑战。2020 年冬季,赤道中东太平洋形成了一次拉尼娜事件。但与以往拉尼娜事件的影响不同,此次拉尼娜事件并未导致我国冬季气温降低,反而使我国经历了一次暖冬过程。最新观测发现,2021 年秋季以来海表温度再次降低,冬季是否会再次形成拉尼娜事件,其对我国冬季的气候有何影响,我国将经历冷冬还是暖冬?针对这些备受关注的科学问题,本文基于自然资源部第一海洋研究所发展的短期气候预测系统开展预测,给出了 2021 年冬季 ENSO 的发展趋势,为我国气候形势预测和气候变化应对提供科技参考。

1 从 FIO-CPS v1.0 到 FIO-CPS v2.0 的发展

1.1 气候模式的发展

FIO-CPS(First Institute of Oceanography-Climate Prediction System)基于自然资源部第一海洋研究所发展的地球系统模式 FIO-ESM(First Institute of Oceanography-Earth System Model)而建立。FIO-ESM 是在 Qiao 等^[17-18]提出的非破碎浪致混合理论基础上自主发展起来的地球系统模式体系,第一代模式 FIO-ESM v1.0(First Institute of Oceanography-Earth System Model version 1.0)和第二代模式 FIO-ESM v2.0(First Institute of Oceanography-Earth System Model version 2.0)先后参加了第 5 次和第 6 次国际气候模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 5/phase 6, CMIP5/6),是国际上首个耦合海浪模式的地球系统模式。FIO-ESM 包含物理模式和地球生物化学模块。短期气候预测系统主要基于物理模式建立,目前暂未考虑地球生物化学过程的预测。第一代气候模式 FIO-ESM v1.0 包含海洋、大气、陆地、海冰和海浪五个分量模式^[19]。其海洋模式采用美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)发展的适用于高性能计算的海洋环流模式 POP 2(Parallel Ocean Program version 2),模式水平网格为 B 网格,采用移动坐标投影点的两极曲线正交坐标,2 个投影点分别位于格陵兰岛和南极,垂向采用 z 坐标,共分为 40 层。其中,0~200 m 水深包含 14 层,经向水平分辨率为 1.1° ,纬向分辨率是变化的,在赤道地区其为 0.27° ,到南北纬 35° 时其为 0.54° 。大气分量模式为 CAM 3.5(Community Atmosphere Model version 3.5),采用欧拉谱动力核心方案,分辨率为 T42L26,即水平为三角截断谱,分辨率为 T42,约为 2.875° ,垂向分为 26 层。陆面分量模式为通用陆面过程模式 CLM 3.5(Common Land Model version 3.5),水平分辨率与大气分量模式相同。海冰模块海冰分量模式为 CICE 4(Community Ice Code version 4),是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室发展的海冰模式,水平分辨率与海洋分量模式相同。海浪模式为自然资源部第一海洋研究所自主研发的 MASNUM 海浪模式,水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$,波向分辨率为 30° 。大气、陆面、海洋、海冰和海浪模式通过美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)研发的 Coupler 6 耦合器实现数据的交换(图 1),其中,大气、陆面和海冰分量模式与耦合器的交换频率为 1 h,海洋模式与耦合器的交换频率为 24 h,海浪模式与耦合器的交换频率为 6 h。

2020 年 FIO-ESM 由 v1.0 升级为 v2.0, FIO-ESM v2.0 包含了大气、海洋、陆地、海冰、海浪和径流六个分量模式。模式采用当前流行的耦合架构,通过耦合器 Coupler 7 中单程序多数据流(Single Program Multiple Data, SPMP)方式实现各分量模式之间数据传输。FIO-ESM v2.0 的各分量模式情况^[20]为:大气分量模式是 NCAR 研发的 CAM 5(Community Atmosphere Model version 5),采用的动力框架为有限体积法,水平分辨率为 f09($0.9^\circ \times 1.25^\circ$)。陆面分量模式是 CLM 4(Community Land Model version 4),水平分辨率

与大气分量模式一致。海洋分量模式采用 POP 2, 纬向水平分辨率为 1.1° , 经向水平分辨率为 $0.27^\circ \sim 0.54^\circ$; 垂向加密到 61 层, 第 1 层为海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 日变化参数化方案诊断的 0 m 海温层, 第 2~61 层为海洋模式垂向分层, 其中海洋 0~1 000 m 水深分为 40 层。径流从陆地模式中分离出来, 变成单独的分量模式 RTM (River Transport Model)。海浪模式为 MASNUM 海浪模式, 并作为子程序直接嵌入到海洋分量模式 POP 2 中, 水平分辨率与海洋模式相同。采用此方案可减少浪致混合系数带来的三维数据插值和传输代价, 提高计算速度。海冰模式为 CICE 4, 分辨率与海洋模式相同。FIO-ESM v2.0 中各分量模式与耦合器的交换频率也大幅提高, 其中大气、陆面、海冰分量模式与耦合器的交换频率为 0.5 h, 海洋、径流和海浪模式与耦合器的交换频率为 3 h (图 1)。

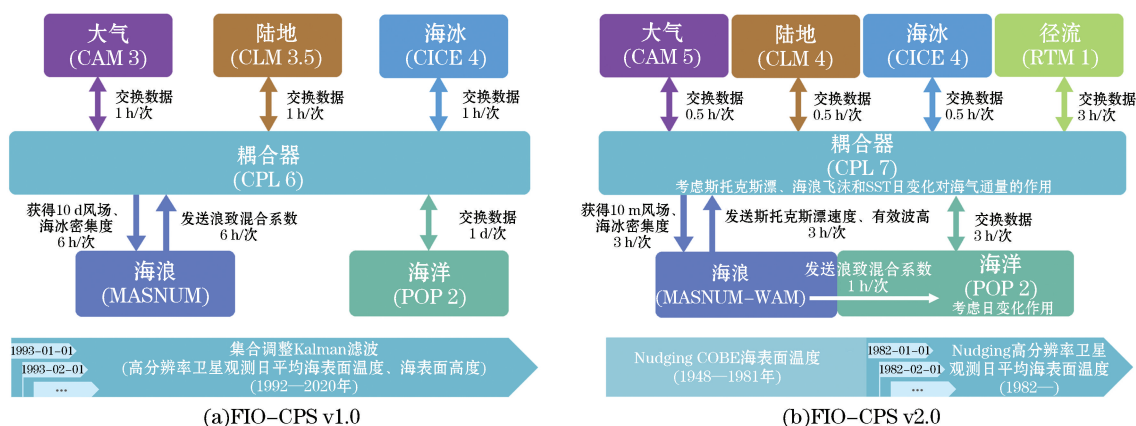


图 1 FIO-CPS v1.0 和 FIO-CPS v2.0 框架图

Fig.1 The flowcharts for FIO-CPS v1.0 and FIO-CPS v2.0

1.2 同化方法、数据和实验

以地球系统模式 FIO-ESM v1.0 为基础, 采用集合调整卡尔曼滤波 (Ensemble Adjustment Kalman Filter, EAKF) 同化方法, 在海洋模式分量中同化了高分辨率卫星观测数据^[21]。系统首先对观测数据进行质量控制、异常数据剔除和单位转换等, 然后采用 EAKF 方法进行数据同化。EAKF 充分考虑了模式变量之间的物理依赖性, 能够实现多变量集合滤波调整。第一套同化的观测数据是日平均海面高度异常 (sea level anomalies, SLA) 数据, 该数据是多颗卫星高度计观测数据的融合产品, 由法国 AVISO (Archive, Validation et Interpretation des données des Satellite Oceanographiques) 网站提供^[22], 其水平空间分辨率为 $(1/3)^\circ$ 。第二套同化数据是日平均卫星 SST 数据, 来自美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。该数据为气象卫星 NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 与微波扫描辐射计 AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) 等多种观测数据的融合^[23], 其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。在同化过程中, 需要调整的模式变量均包括三维海洋水平流速分量、温度、盐度和二维的海面高度。垂向流速和密度等非模式积分变量不做同化调整。同化和历史回报实验从模式稳定态启动, 对三维海温场进行 10^{-3} 量级的随机扰动, 构建了 10 个集合样本, 并开展了 2 年的扰动试验。该集合模式积分 2 个模式年后, 不同集合之间的 SST 差异达到 $0.1 \sim 1.0^\circ\text{C}$, 在 1 000 m 以深海温差异为 0.01°C 量级, 而且不同集合之间的发散度随时间也相对稳定, 以此作为同化实验的初始场。

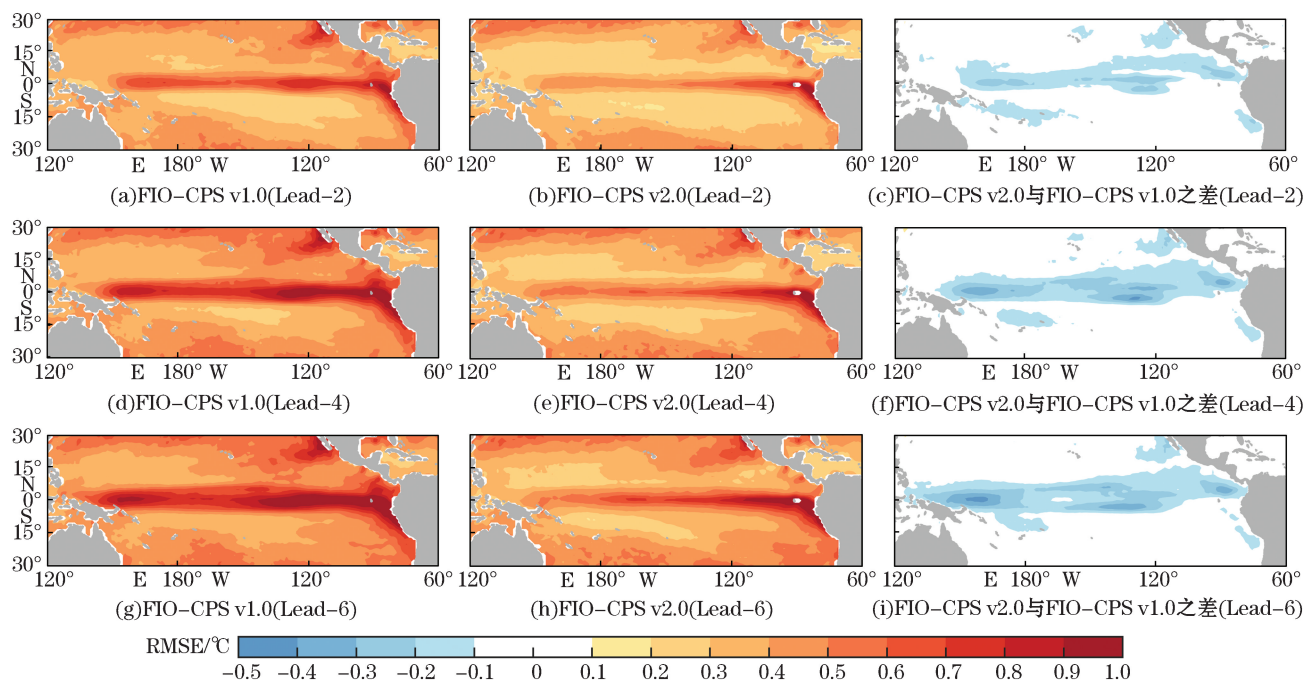
在第二代预测系统 FIO-CPS v2.0 中, 考虑到计算时效, 采用了 Nudging 方法将观测数据引入海洋上混合层, 本实验中对海温低于 SST 1°C 所在深度至海表层的海温进行了同化。Nudging 的时间窗口为 30 d。第一套观测数据是 COBE-SST (Centennial Observation Based Estimates of Sea Surface Temperature)^[24], 时间段为 1948—1981 年。第二套数据为 NOAA-AVHRR 日平均 SST, 时间段为 1982 年至今。同样采用

对三维海温微扰动的方式构建集合样本。历史回报实验时间为 1982 年至今,每月提供未来 13 个月的预测结果。FIO-CPS v2.0 可提供月平均、日平均和 3 h 平均等不同时间分辨率的多圈层数据产品^[25]。

文中选用美国 NOAA 提供的月平均最优插值海表面温度数据集 OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)和 ERSST v5(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5)资料进行模式验证^[26-27]。OISST 基于综合海洋-大气资料集(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set,COADS),利用最优插值方法融合卫星、浮标、船测等数据而成,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。另外,ERSST 覆盖时间段更长,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。本文使用的降水资料为全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project,GPCP)提供的全球降水格点数据^[28],水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,该数据由地表雨量计观测数据和红外、微波等不同卫星遥感资料通过最优估计方法综合而成,能较好地反映热带降水的时空分布和变化。

2 对 2021 年冬季气候的展望

基于 1993—2019 年历史回报实验结果,首先对 FIO-CPS v1.0 和 FIO-CPS v2.0 的预测能力进行了评估。分析不同超前月份预测的热带太平洋海表温度异常(Sea Surface Temperature Anomaly,SSTA)相对于 OISST 的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)可知,赤道太平洋、加利福尼亚沿岸海域 SSTA 的预测误差偏大,且随着预测时间增加,误差逐渐增大(图 2),而赤道外海域 SSTA 的均方根误差相对较小。对比两代气候预测系统结果可知,FIO-CPS v2.0 对海温异常的预测能力相较 FIO-CPS v1.0 有明显改进,尤其是在赤道太平洋海域,SSTA 的均方根误差明显减小,部分海域的误差减小 0.4°C 以上,这表明第二代气候预测系统对 SSTA 具备更好的预测能力。Bao 等^[20]系统地评估了 FIO-ESM v2.0 的模拟性能,结果表明,相比于 FIO-ESM v1.0,FIO-ESM v2.0 对赤道太平洋 SST 的模拟暖偏差有明显改进,且 ENSO 的模拟结果更接近于观测结果。气候模式模拟性能的提高是赤道太平洋 SSTA 均方根误差减小



注:图 a~图 c 中 Lead-2 表示超前预测 2 个月,图 d~图 f 中 Lead-4 表示超前预测 4 个月,图 g~图 i 中 Lead-6 表示超前预测 6 个月。

图 2 FIO-CPS v1.0 和 FIO-CPS v2.0 预测的 SSTA 相对于 OISST 的均方根误差

Fig.2 Spatial distribution of the RMSE (Root Mean Square Error) of the SSTA between the prediction results (FIO-CPS v1.0 and FIO-CPS v2.0) and OISST

的重要原因。

图 3 是基于观测和超前 2、4、6 个月预测的 Niño 3.4 和 Niño 3 指数时间序列。虚线和实线分别代表 FIO-CPS v1.0 和 v2.0 不同超前月份的预测结果。相比于 FIO-CPS v1.0, FIO-CPS v2.0 预测的 ENSO 指数更接近于观测。尤其对于拉尼娜事件, FIO-CPS v2.0 预测技巧要明显优于 FIO-CPS v1.0。与观测相比, FIO-CPS v1.0 预测的 Niño 3.4 和 Niño 3 指数偏低, 强拉尼娜发生更加频繁。此外, 我们也注意到两代系统对于 1997—1998 年强 ENSO 事件具备较好的预测能力, 但对 2015—2016 年 ENSO 事件的预测能力相对较差, 厄尔尼诺强度偏弱, 同时, FIO-CPS v1.0 预测的拉尼娜强度偏强。整体而言, FIO-CPS v2.0 对 Niño 指数的预测能力明显优于 FIO-CPS v1.0。

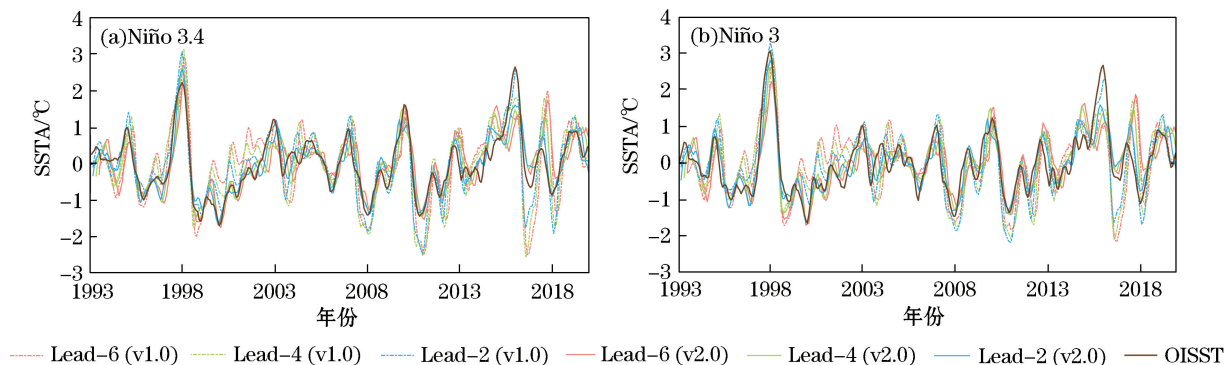


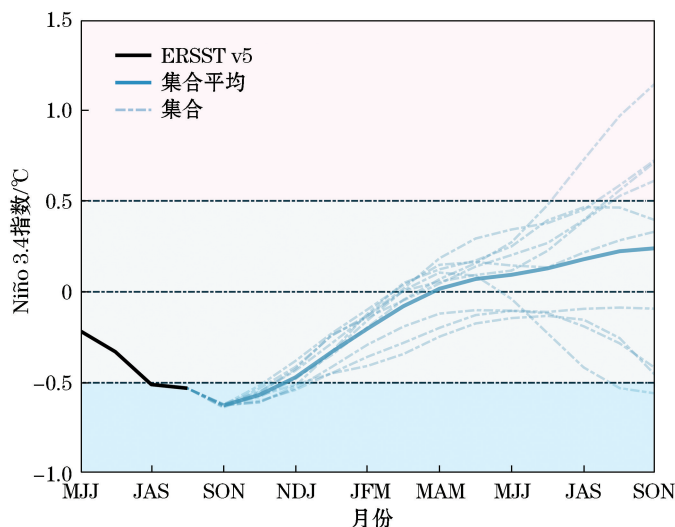
图 3 观测与 FIO-CPS v1.0 和 FIO-CPS v2.0 超前 2、4、6 个月起报的 Niño 3.4 和 Niño 3 指数

Fig.3 Time series of Niño 3.4 and Niño 3 indexes based on prediction results (FIO-CPS v1.0 and FIO-CPS v2.0) and OISST

2.1 ENSO 预测

2020 年冬季, 赤道中东太平洋形成了一次拉尼娜事件。至 11 月, 赤道太平洋海表温度达到最低值, 基于 ERSST v5 资料所获得的 Niño 3.4 指数为 $-1.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27]。春季, SST 回升, ENSO 转为中性状态。最新观测表明, 2021 年 8 月以来 SST 再次降低, Niño 3.4 指数为 $-0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2021 年冬季是否会再次形成拉尼娜事件, 其对我国冬季的气候有何影响, 再次成为气候预测和社会的关注焦点。

本文基于 FIO-CPS v2.0 最新的预测结果(2021 年 10 月 1 日起报), 给出了未来 13 个月 Niño 3.4 指数的预测结果(图 4)。相对于 1993—2019 年气候态, 2021 年 10 月至 12 月, 赤道太平洋 SST 为负异常, Niño 3.4 指数持续低于 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将形成一次弱拉尼娜事件。鉴于 2020 年已出现拉尼娜事件, 今年将成为“双拉尼娜年”。2022 年 1 月之后, 温度将回升, Niño 3.4 指数将高于 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进而转为中性状态。至 2022 年 4 月, 10 个集合样本中有 7 个样本的 Niño 3.4 指数高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



注: 横坐标的英文字母为连续 3 个月份的英文首字母缩写, 每个点为 3 个连续月份的滑动平均结果。

图 4 观测(黑线)和 FIO-CPS v2.0 预测(蓝线)的 Niño 3.4 指数

Fig.4 Observation (black line) and predicted (blue lines)

Niño 3.4 indexes based on FIO-CPS v2.0

2.2 气候形势预测

我国冬季气候受到 ENSO 的影响,在拉尼娜年冬季,东亚冬季风一般会偏强,影响我国的冷空气活动比常年更加频繁,我国气温显著偏低^[2-3]。在全球气候变暖的背景下, ENSO 对我国气候的调制作用也表现出年代际变化特征^[5]。1980 年之前,在拉尼娜年冬季,东亚冬季风偏强,受偏北风影响,我国南方气温偏低,降水偏少。而 1980 年之后,华南地区降水偏多,易出现冷湿气候特征。

2021 年冬季,赤道中东太平洋将再次形成拉尼娜事件,从预测结果看(图 5),2021 年 11 月,除青藏高原、西南地区、东南沿海及台湾气温偏高外,我国大部分地区气温将偏低。进入 12 月,西北和东北地区气温将升高,转为暖异常。2022 年 1 月至 2 月,我国北方将显著偏暖,冬末春初南方气温会降低,出现冷异常。从气温异常的概率预测结果(图 6)可看出,2021 年 11 月,华北、华东地区偏暖概率小于 0.3,说明超过 6~7 个集合样本预测气温偏冷。12 月,多数集合结果显示我国西部和东部地区将偏暖。中部和东部地区的不确定性增加,变暖和变冷的概率相当。进入 2022 年 1 月,多集合预测结果较为一致,大部分集合预测气温将偏暖。同时可以看出,我国南方从 2021 年 11 月至 2022 年 2 月偏暖的概率较小,说明气温可能偏低,将有强冷空气活动。

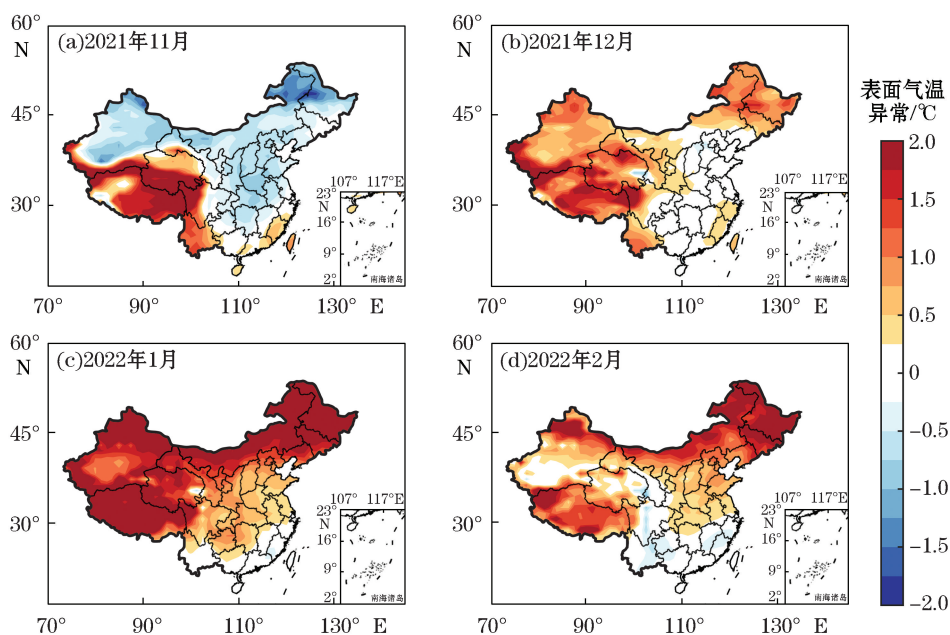
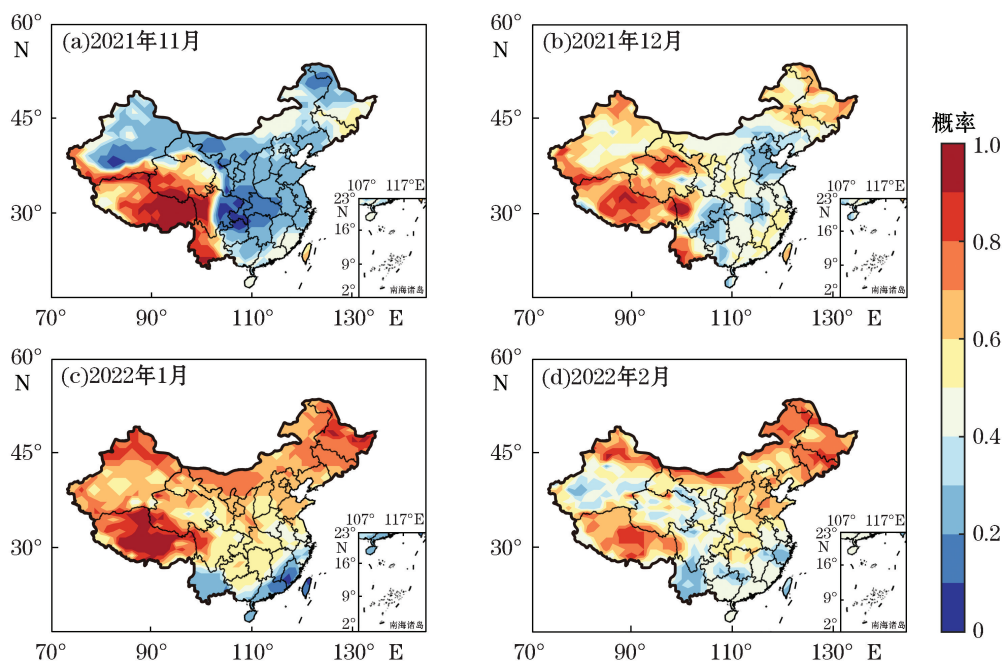


图 5 FIO-CPS v2.0 对冬季表面气温异常(单位:℃)的预测结果

Fig.5 The predicted surface air temperature anomaly by FIO-CPS v2.0 (unit:℃)

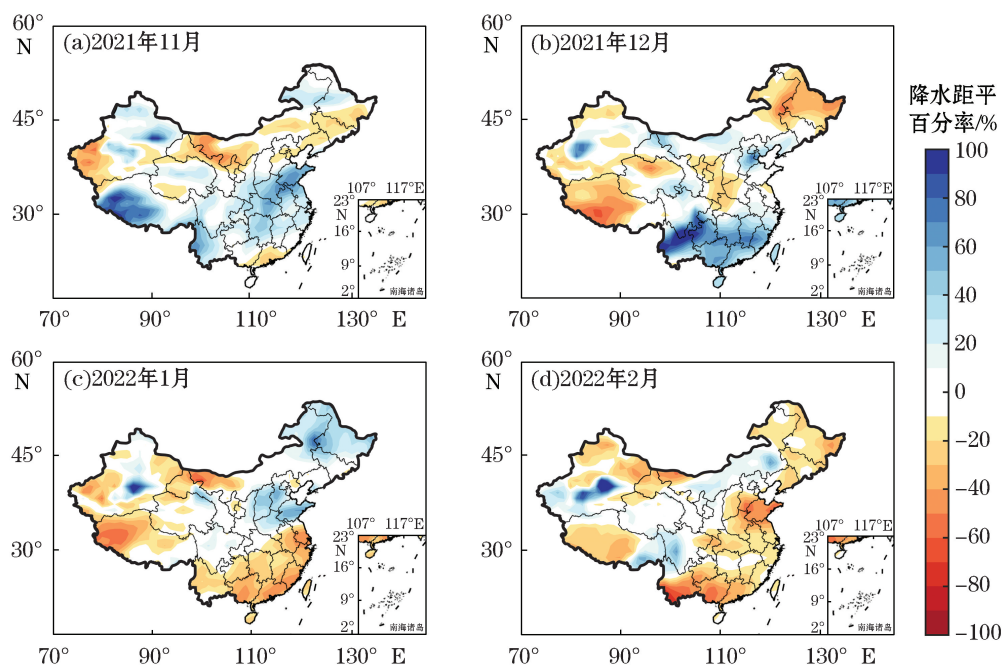
降水距平百分率在冬季前期、后期的空间分布将有明显变化,南北向出现反转(图 7)。2021 年 11 月至 12 月,华东、华南降水将会偏多,新疆、内蒙古和东北部分地区降水偏少。2022 年 1 月至 2 月,南方降水将减少,距平百分率表现为负值。1 月,华北、东北降水将会偏多,进入 2 月,降水距平百分率则为负,降水量比平均态偏少。从降水距平百分率高于 20% 的概率图(图 8)看到,降水预测结果比气温的不确定性更大。2021 年 11 月至 12 月,华东和南方地区降水将偏多,10 个集合中有超过半数以上预测降水距平百分率高于 20%,其他地区降水偏多或偏少的概率基本相同。2022 年 1 月至 2 月,我国大部分地区将以降水偏少为主,在我国南部、东部和西北地区,超过半数以上集合模拟的降水距平百分率将低于 -20%。同时,在华东地区,尽管降水偏少的概率将高于 50%,但降水距平为正值,这说明集合之间存在较大差异。



审图号:GS(2022)2071 号

图 6 预测的冬季表面气温异常高于 0.5 °C 的概率

Fig.6 The probability of surface air temperature anomaly winter higher than 0.5 °C based on the prediction results

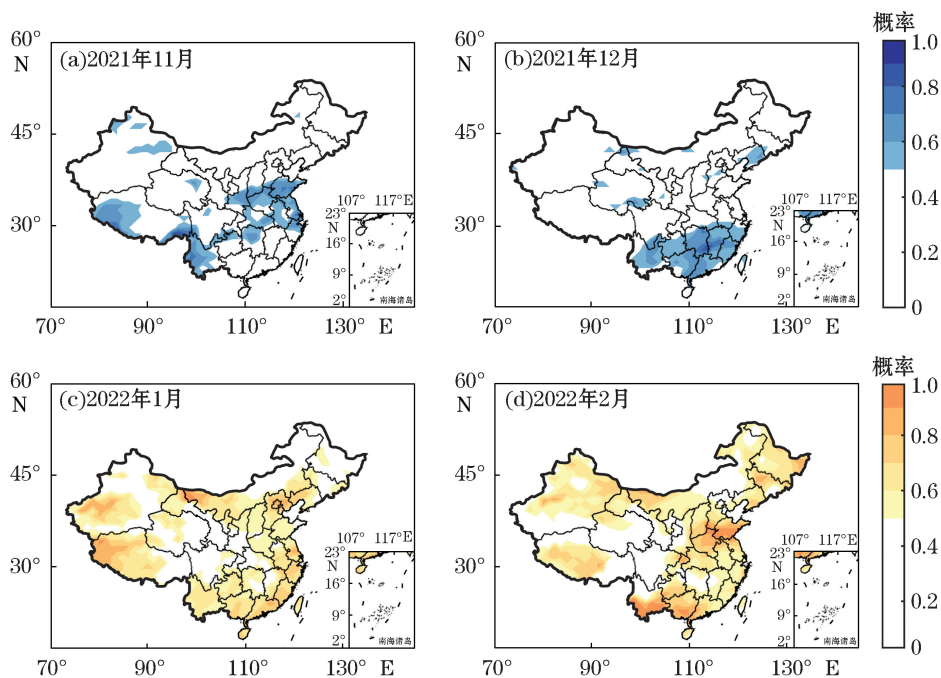


注:气候态选取为 1993—2019 年的平均。

审图号:GS(2022)2071 号

图 7 FIO-CPS v2.0 对冬季降水距平百分率的预测结果

Fig.7 The predicted precipitation anomaly percentage in the winter by the FIO-CPS v2.0



审图号:GS(2022)2071号

图8 降水距平百分率高于20%(a,b)和低于-20%(c,d)的概率

Fig.8 The probability of predicted precipitation anomaly percentage higher than 20% (a, b) and lower than -20% (c, d)

3 结 论

短期气候预测是国际气候和环境领域的科学前沿问题,对经济建设、农业生产和防灾减灾具有重要意义。基于自然资源部第一海洋研究所发展的地球系统模式 FIO-ESM,通过海温微扰动的方式生成集合样本,同化高分辨率海温观测资料,建立了短期气候预测系统 FIO-CPS,并实现了从 FIO-CPS v1.0 至 FIO-CPS v2.0 版本的升级。相比于 FIO-CPS v1.0,升级后的预测系统 FIO-CPS v2.0 对 SST 的预测能力有了显著提高。

利用短期预测系统 FIO-CPS v2.0 起报于 2021 年 10 月 1 日的结果对 2021 年冬季 ENSO 和气候形势进行预测,得出结论:

1)2020 年冬季,赤道中东太平洋海面温度偏低并发展成一次拉尼娜事件。ERSST v5 观测显示 2021 年 8 月(秋季)以来 Niño 3.4 指数再次低于 -0.5°C 。2021 年冬季,赤道中东太平洋将再次形成弱拉尼娜事件,并在 11 月达到鼎盛。2022 年春季 ENSO 将转为中性状态。

2)在连续 2 年出现拉尼娜现象的气候背景下,2021 年 11 月我国大部分地区偏冷,仅青藏高原、西南地区、东南沿海及台湾偏暖。进入冬季后,预测结果显示,我国北方气温明显偏暖,南方气温偏低的概率较大。2021 年 11 月南方冷异常及 2022 年 1 月至 2 月北方暖异常的分布特征在大多数集合预测结果中较为一致。

3)降水预测结果显示,降水距平百分率在 2021 年冬季前期、后期的空间分布有明显变化。从降水距平百分率的概率来看,不同集合中对降水距平百分率的预测结果并不一致,且差异较大。目前,青藏高原地形降水误差、双赤道辐合带等仍是气候模式的共性问题。初始场中降水的模拟相对于观测仍有较大偏差,且误差随着预测时间增长而变大,这严重制约了短期气候系统对降水的预测能力。改进降水的模拟和预测能力仍是短期预测面临的重要挑战之一。

参考文献(References):

- [1] BJERKNES J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97: 163-172.
- [2] WANG B, WU R, FU X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 1517-1536.
- [3] CHEN W, WANG L, FENG J, et al. Recent progress in studies of the variabilities and mechanisms of the East Asian monsoon in a changing climate[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36: 887-901.
- [4] HU K, HUANG G, WU R. A strengthened influence of ENSO on August high temperature extremes over the Southern Yangtze River valley since the late 1980s[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 2205-2221.
- [5] 袁媛,李崇银,杨崧. 与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征[J]. *气象学报*, 2014, 72: 237-255. YUAN Y, LI C Y, YANG S. Decadal anomalies of winter precipitation over southern China in association with El Niño and La Niña[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(2): 237-255.
- [6] ZHENG F, ZHU J, ZHANG R, et al. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical Pacific using an intermediate coupled model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L19604. DOI: 10.1029/2006GL026994.
- [7] 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: 3901-3915.
- [8] REN H L, ZHENG F, LUO J J, et al. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34: 43-62.
- [9] BARNSTON A G, TIPPETT M K, RANGANATHAN M, et al. Deterministic skill of ENSO predictions from the North American multimodel ensemble[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 7215-7234.
- [10] JOHNSON S J, STOCKDALE T N, FERRANTI L, et al. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12: 1087-1117.
- [11] REN H L, WU Y, BAO Q, et al. The China multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33: 540-552.
- [12] ZHANG S Q, LIU Z Y, ZHANG X F, et al. Coupled data assimilation and parameter estimation in coupled ocean-atmosphere models: a review[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54: 5127-5144.
- [13] ZHU J, HUANG B, BALMASEDA M A, et al. Improved reliability of ENSO hindcasts with multi-ocean analyses ensemble initialization[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 41: 2785-2795.
- [14] SONG Y J, ZHAO Y D, YIN X Q, et al. Evaluation of FIO-ESM v1.0 seasonal prediction skills over the North Pacific[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 504.
- [15] ZHENG F, ZHU J. Coupled assimilation for an intermediated coupled ENSO prediction model[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60: 1061-1073.
- [16] ZHU J, KUMAR A, WANG W, et al. Importance of convective parameterization in ENSO predictions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 6334-6342.
- [17] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L11303. DOI:10.1029/2004GL019824.
- [18] QIAO F L, YUAN Y L, EZER T, et al. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60: 1339-1355.
- [19] QIAO F L, SONG Z Y, BAO Y, et al. Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 4514-4524.
- [20] BAO Y, SONG Z Y, QIAO F L. FIO-ESM version 2.0: model description and evaluation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125, e2019JC016036. DOI:10.1029/2019JC016036.
- [21] CHEN H, YIN X Q, BAO Y, et al. Ocean satellite data assimilation experiments in FIO-ESM using ensemble adjustment Kalman filter[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(3): 484-494.
- [22] DUCET N, TRAON P, REVERDIN G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105: 19477-19498.
- [23] BANZON V, SMITH T M, STEELE M, et al. Improved estimation of proxy sea surface temperature in the Arctic[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37: 341-349.
- [24] HIRAHARA S, ISHII M, FUKUDA Y. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty[J]. *Journal of Climate*,

- 2014, 27: 57-75.
- [25] SONG Y J, SHU Q, BAO Y, et al. The short-term climate prediction system FIO-CPS v2.0 and its prediction skill in ENSO[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 759339. DOI: 10.3389/feart.2021.759339.
- [26] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20: 5473-5496.
- [27] HUANG B, THORNE P W, BANZON V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSST v5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 8179-8205.
- [28] ADLER R F, HUFFMAN G J, CHANG A, et al. The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979—present)[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6): 1147-1167.

The ENSO Prediction in 2021 Winter Based on the FIO-CPS v2.0

SONG Ya-juan^{1,2,3,4}, SONG Zhen-ya^{1,2,3,4}, WEI Meng^{1,2,3,4}, SHU Qi^{1,2,3,4},
BAO Ying^{1,2,3,4}, QIAO Fang-li^{1,2,3,4}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China;*

4. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National
Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)*

Abstract: In the winter of 2020 (from December 2020 to February 2021), the observed Sea Surface Temperature (SST) in the equatorial eastern Pacific continues to decrease, and a La Niña event is developed. In the spring of 2021, the SST increases, and the ENSO (El Niño-Southern Oscillation) returns to neutral conditions. The latest observations suggest that SST in the equatorial eastern Pacific has dropped again since autumn 2021. Whether La Niña events will happen again in the coming winter of 2021, and how does this affect the winter climate? In this paper, the winter conditions of ENSO, surface air temperature, and precipitation over China are predicted by the FIO-CPS v2.0, a short-term climate prediction system developed by the First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources of China. Prediction results starting from October 1 of 2021 show that the Niño 3.4 will be below $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ from October to December of 2021, which indicates a weak La Niña event will appear with the lowest value in November. In the spring of 2022, the ENSO will return to neutral state. Under the background of La Niña, the surface air temperature will decrease over most parts of China in November 2021, except for the Qinghai-Tibet Plateau, southwest region, southeastern coastal areas and Taiwan of China. After that, the surface air temperature will be warm in the north of China from December 2021 to February 2022, and the southern parts of China may experience a cold winter. Moreover, there will be more precipitation in the south and less in the north in the coming early winter, and the pattern will be reversed in the late winter of 2021. Note that there are significant differences in precipitation prediction results among different ensembles, indicating the higher uncertainty for precipitation prediction than that of air temperature.

Key words: short-term climate prediction; La Niña; Sea Surface Temperature (SST); climate model

Received: October 20, 2021