

波致混合对 CCSM3 气候模式预测能力的改进^{*}

宋振亚^{1,2} 乔方利^{1,2**} 赵伟^{1,2}

1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 青岛 266061

摘要 在海气耦合模式 CCSM3 基础上引入波致混合作用后建立了改进的海气耦合模式, 设计了 SST 同化方案, 并进行了 2005, 2006 和 2007 年 ENSO 的集合后报和 2008 年气候预测数值试验. 结果表明, 改进的海气耦合模式的同化效果优于原来的海气耦合模式 CCSM3 的同化效果. 集合后报与观测资料对比表明: 改进的海气耦合模式能够较好地预测当年 ENSO 事件的发生情况, 预报强度和成熟期特征与实际也较吻合, 波致混合可以明显地提升气候模式的预测能力. 在此基础上利用改进的海气耦合模式对 2008 年气候异常进行了集合预测, 结果表明: 始于 2007 年的 La Niña 事件将持续至 2008 年夏季, 2008 年 El Niño 事件出现概率很小; 2008 年夏季中国东南沿海、黄淮流域、东北东南部、新疆中南部以及青藏高原西部降水比往年偏多, 局部可能出现洪涝, 内蒙古西部、华南西南部以及青藏高原南部降水比往年偏少. 我国沿海除两广地区和长江口附近地区外, 均有不同程度的降水增加.

关键词 气候预测 气候模式 波致混合 ENSO

随着社会发展对气候依赖程度的增加, 短期气候预测在国际上越来越受到人们的重视, 已经成为“世界气候研究计划”(WCRP)的核心问题之一^[1,2]. 短期气候预测方法主要有两种——统计预测方法和动力数值预测方法. 近年来, 利用气候数值模式进行短期气候预测受到越来越多的关注. 气候数值模式的预测方法不仅有明确坚实的物理基础, 而且具有客观、定量的优点, 是气候预测方法的主体. 依靠气候模式开展季节到年际尺度的短期气候预测, 是当前发达国家气候预测的主流和国际上的发展方向. 在世界气象组织(WMO)未来发展战略目标中, 把利用气候数值模式进行预报列为一个具有挑战性的研究目标^[3].

目前, 世界上许多国家级研究所和业务气象、气候中心在使用复杂的海气耦合模式进行季节时间尺度的气候预测^[4-10], 如美国气候预测中心(CPC),

美国国家环境预报中心(NCEP), 哥伦比亚大学气候与社会研究所(IRI), 日本全球变化前沿研究中心(FRGC)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)等; 中国科学院大气物理研究所和中国气象局气候中心也积极开展气候数值预测系统的研究工作^[11-14], 并建立了我国动力气候模式预测系统^[15].

海气耦合模式作为气候研究和预报的工具, 其作用日益明显. 但是, 海气耦合模式仍然面临一些共性问题, 其中气候漂移是普遍存在的问题之一, 特别是非通量调整的海气耦合模式的模拟结果存在显著热带偏差, 如双热带辐合带(double ITCZ), 太平洋冷舌偏强(too cold tongue), 大西洋赤道 SST(sea surface temperature)梯度反向等^[16,17]. 改进海气耦合模式中所包含的物理过程应该是从本质上改善气候漂移问题、增强现有耦合模式预测能力的根本途径. 波致混合对海洋上层温度分布和环流

2008-06-17 收稿, 2008-08-08 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40730842)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403605)资助项目

^{**} 通信作者, E-mail: qiaofl@fio.org.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

系统有重要影响^{1) [18]}。并通过海—气相互作用过程, 形成海洋—大气之间的反馈, 从而对气候系统产生影响。研究表明, 将波致混合作用引入海气耦合模式中, 通过改善海洋环流中的垂直混合, 能够提高耦合模式的气候模拟能力^{19-21]}。

海气耦合模式 CCSM3 (The Community Climate System Model version 3) 是当前较为先进的海气耦合模式之一, 被广泛地应用于各种科学研究领域。研究表明, 在 CCSM3 中考虑波致混合的作用后建立的大气—海浪—海洋环流耦合数值模式, 对于东太平洋海表温度的季节循环也有明显改善²⁾。而东太平洋 SST 的季节循环对于 ENSO (El Niño and Southern Oscillation) 的周期和强度具有重要意义。因此通过增加波浪混合所显示的上述改进可望在 CCSM3 的气候模拟和气候预测中发挥新的作用。

本文基于改进 CCSM3 所建立的大气—海浪—海洋环流耦合数值模式, 首先进行了卫星 SST 资料同化, 然后对 2005, 2006 和 2007 年 ENSO 进行了集合预测(后报), 并将预测结果与卫星观测进行了对比检验, 以此验证、分析改进后耦合模式的预测能力。在此基础上, 利用该模式对 2008 年气候异常进行了预测试验。

1 模式介绍及试验设计

本文的大气—海浪—海洋环流耦合模式是将 MASNUM (Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling) 海浪波数谱数值模式^[22] 与 NCAR (The National Center for Atmospheric Research) 海气耦合模式 CCSM3^[23] 进行耦合, 以下简称改进的海气耦合模式或气候模式。下面对该气候模式和试验设计方案进行简要介绍。

1.1 海气耦合模式

CCSM3 是美国 NCAR 于 2004 年 6 月发布的海气耦合的气候数值模式^[23], 包括大气、海洋、陆面、

海冰和耦合器 5 个部分。其大气模式为 CAM 3.0 版本^[24], 陆面模式为 CLM 3.0 版本^[25], 海冰模式为 CSIM 5.0 版本^[26], 海洋模式为 POP 1.4.3 版本^[27]。有关 CCSM3 的细节可参考文献[23]。

本文采用的网格配置为 T42_gx1v3, 即大气采用中等分辨率的 T42L26 网格设置; 海洋环流为近 1° 的水平分辨率, 垂直分为 40 层; 陆面模式的水平分辨率与大气模式相同, 海冰的水平分辨率与海洋环流模式相同。

1.2 海浪模式

采用的 MASNUM 海浪波数谱模式是本实验室发展的第三代全球海浪模式^[22, 28], 该波浪模式已多次经过实测资料验证, 并被广泛应用于海洋工程中。MASNUM 海浪模式采用了物理意义更合理的特征线嵌入计算格式, 即能量沿特征线传播。在物理空间中的格点分布取经纬度线平行的梯形网格, 在波数空间中的格点分布采用极坐标网格。

本文海浪模式的水平分辨率是 $2^\circ \times 2^\circ$, 波向分辨率为 30° , 波数模划分如下

$$K(i) = K_{\min} \exp((i-1)\Delta K), i = 1, \dots, N+1$$

其中

$$N = 25, K_{\min} = 0.0071, K_{\max} = 0.6894$$

$$\Delta K = \frac{1}{N} \ln \frac{K_{\max}}{K_{\min}}$$

1.3 耦合方案

乔方利等^[18]提出了一种将波致混合作用 B_V 表达为海浪波数谱并应用到环流模式中的方案

$$B_V = \alpha \left[\int_k E(k) \exp\{2kz\} dk \frac{\partial}{\partial z} \left[\int_k \omega^2 E(k) \exp\{2kz\} dk \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 $E(k)$, ω , k 分别为波浪的方向谱, 角频率和

1) Huang C, Qiao F, Wei Z. Effects of wave-induced mixing under the mixed layer on the oceanic circulation. (Submitted to Acta Oceanologica Sinica)

2) Song Z, Qiao F. The improvement of the simulated sea surface temperature seasonal cycle in the equatorial eastern Pacific by the surface wave-induced vertical mixing. (Submitted)

波数; z 为水深, $z=0$ 为平均海平面且向上为正; α 是一个常数, 在此取 $\alpha=1$.

在原海气耦合模式 CCSM3 基础上, 借助通量耦合器, 把 MASNUM 海浪波数谱模式耦合到 CCSM3 中, 每 6 h 通过耦合器进行一次数据交换: 海浪模式从耦合器中得到大气风场, 然后计算出波浪的方向谱, 得到波浪的方向谱后利用公式 (1) 计算波致混合系数 B_v , 并发送给耦合器; 海洋模式通过耦合器获得波致混合系数 B_v , 并将其迭加到动量控制方程中的垂向涡粘系数 K_{mc} 和温度、盐度控制方程中的垂向扩散系数 K_{hc} 中, 得到总的垂向混合系数 K_m 和 K_h , 即

$$K_m = K_{mc} + B_v, K_h = K_{hc} + B_v \quad (2)$$

由此建立起大气—海浪—海洋环流耦合的气候模式.

1.4 同化方案

设计了一种利用卫星 SST 日平均资料^[29] 对海洋模式中上混合层进行同化的方案. 如果利用 SST 直接同化海面温度存在以下几个问题: (i) 若只调整表层海洋温度, 对海洋模式表面的这一调整无法及时传播到下层; (ii) 有可能破坏模式系统的稳定性: 三维海水温度是连续的, 若只调整海面温度, 而不调整下层, 实际上是对表层的一种扰动, 而这种扰动在数值模式的积分中有可能起到负作用(可能逐渐消失, 导致同化无效; 或者可能快速增长, 导致模式不稳定); (iii) 破坏海洋上混合层结构: 由于海洋上混合层的混合较强, 温度梯度较小; 综合上述考虑, 在同化过程中增加了对下层的同化. 同化过程用公式表示如下

$$T_a = T_b + \alpha W (SS T_o - SS T_b) \quad (3)$$

其中 T_a 是同化后模式海水温度; T_b 是同化前模式海水温度; $SS T_o$ 是卫星观测 SST; $SS T_b$ 是同化前模拟的 SST; W 是松弛时间因子, 本文取 $1/30 \text{ d}$ $\alpha = 1 - \left| \frac{T_b - SS T_b}{\Delta_{mix} T} \right|$ 为混合层限制系数, 在混合层外为零; 混合层深度是由海水温度和表层之差判断得出, 参数 $\Delta_{mix} T$ 为其所用的阈值, 在本文

中选取 0.5°C . 在实现过程中则是通过这一阈值先确定要调整的层数, 然后利用公式 (3) 进行同化调整.

1.5 试验设计

为了考察改进海气耦合模式的预报能力, 我们设计了两套数值试验, 一个是利用原 CCSM3 进行气候预测, 称之为无波浪试验, 另一个是利用包含波浪作用的大气—海浪—海洋环流耦合模式进行气候预测, 称之为有波浪试验.

试验首先分别进行了 400 a CCSM3 和改进的海气耦合模式的耦合积分, 在大气和上层海洋基本达到平衡后, 再利用卫星 SST 日平均资料对海洋模式中上混合层进行同化, 同化时间从 1985 年开始. 其中: (i) 对于 2005, 2006 和 2007 年后报: 当两个模式分别同化至前一年的 12 月 31 日后, 再采用 Model-twin 方法^[30], 在初始场上分别叠加 20 个不同的小扰动, 形成含不同附加小扰动的初始场, 分别作 20 个个例的时间积分, 从而形成含 20 个集合成员的集合预报结果. 取算术平均作为集合预报结果; (ii) 对于 2008 年预报: 分别在原 2006 年同化基础上完成 2007 年卫星 SST 资料的同化. 然后采用相同集合预报方式对 2008—2009 年的气候异常进行预测.

2 同化与气候预测结果分析

2.1 同化结果

初始场(同化系统)对气候预测水平有着直接的影响, 对于物理框架合理的气候模式而言, 好的初始场才有可能得到好的预测结果. 因此先来分析一下两个气候模式的同化结果.

2.1.1 全球 SST 海面温度(SST)处于海洋和大气的交界面, 在海气相互作用中起着非常重要的作用, 直接关系到大气环流的模拟, 在一定程度上标志着整个耦合系统的模拟能力.

图 1 为耦合模式同化模拟全球平均 SST 与观测的对比. 从整体分布上看无波浪试验和有波浪试验的模拟结果与观测数据均十分一致. 从时间演变(图 1(a))来看, 两个耦合同化的 SST 随时间的变化趋势与观测一致, 最大误差不超过 0.14°C . 其中

有波浪试验与观测大部分误差不超过 0.12°C 。从图 1(b)可以看出, 绝大部分的蓝线都在红线下方, 也

就是说, 就全球平均 SST 同化效果来看, 有波浪试验要优于无波浪试验。

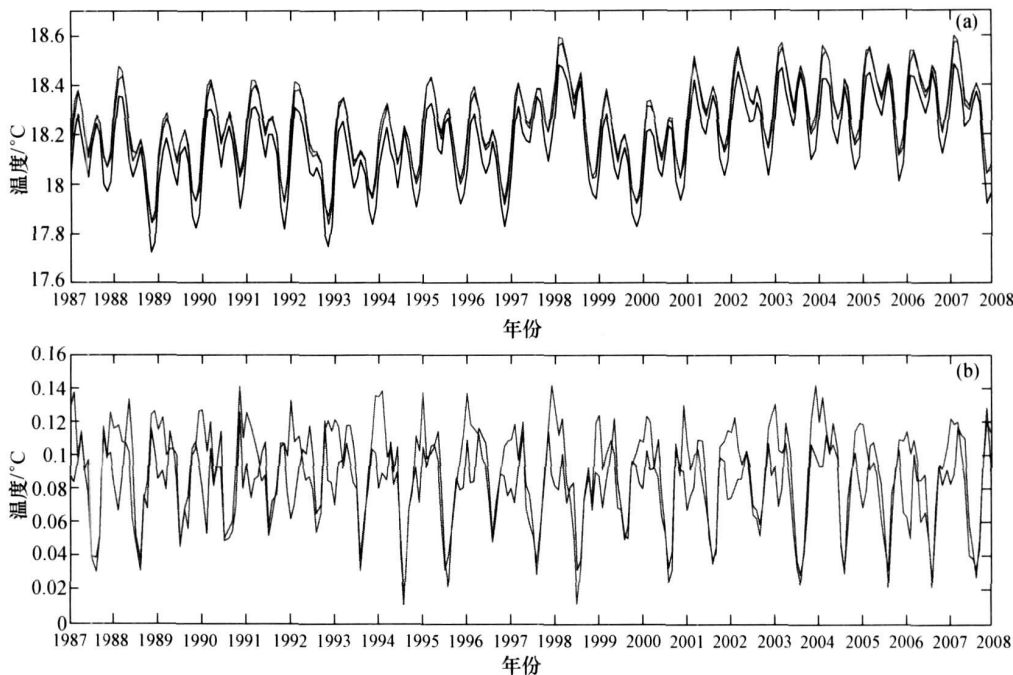


图 1 全球平均 SST 及误差随时间变化

(a) 全球平均 SST; (b) 两个试验与观测之差。黑线: 观测; 红线: 无波浪试验; 蓝线: 有波浪试验

2.1.2 海面温度距平 图 2 为模拟的 SSTA 在赤道的时间演化与观测的对比。从赤道太平洋(东太平洋)可以看出, 模式很好地模拟出了 El Niño 事件的演变过程, 历次 El Niño 过程在模拟结果中都有体现, 其强度与观测也比较接近。几次强的暖事件及随后的冷事件过程, 强度与位相模拟都基本一致。好的 SSTA 的模拟结果必然使得 Niño 指数模拟表现较好。图 3 为 Niño3.4 区 SSTA 的时间演变。从图中可以看出, 无浪和有浪两个气候模式同化的 Niño3.4 区 SSTA 随时间变化趋势与观测基本一致, 模拟误差在 $-0.4-0.4^{\circ}\text{C}$ 之间。在模拟的强度上, 除了 1998 年强 El Niño 事件中, 模拟的 SSTA 要高于观测外, 在其他 El Niño/La Niña 事件中, 模拟的 SSTA 都要低于观测, 因此模拟的 El Niño 事件偏弱, La Niña 事件偏强。从图 3 可以看出, 大部分 El Niño/La Niña 事件中, 红线要比蓝线更加偏离观测, 也就是说, 即使采用相同的 SST 同化方案对气候系统进行订正, 就 Niño3.4 区

SSTA 同化效果来看, 有波浪试验的模拟精度要好于无波浪试验。

2.2 ENSO 集合后报结果

通过上面对全球 SST 和 ENSO 试验结果分析发现, 海气耦合模式的同化模拟能够较好的重现海洋和气候系统的特征, 尤其在赤道地区, 耦合同化的模拟结果都比较令人满意。因此, 在此基础上, 我们利用原海气耦合模式 CCSM3 和改进的海气耦合模式对 2005, 2006 和 2007 年的 ENSO 事件进行集合后报试验, 以此检验改进的海气耦合模式的预测能力。

图 4 是 2005, 2006 和 2007 年 3 年的 ENSO 集合后报结果。从图中的 Niño3.4 区 SSTA 演化可以看出, 在定性上无波浪试验和有波浪试验都基本能够预测出当年 ENSO 事件的发生情况, 下面分别对这 3 个集合后报个例进行分析。

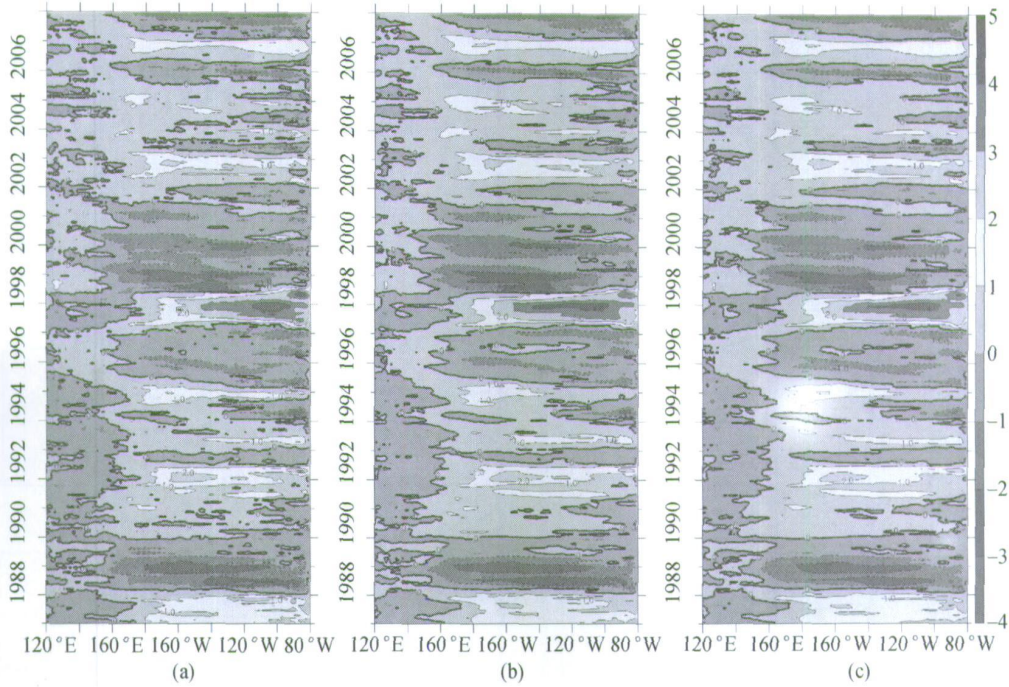


图2 赤道 SSTA 随时间变化(2°S—2°N 平均)

(a) 观测; (b) 无波浪试验; (c) 有波浪试验

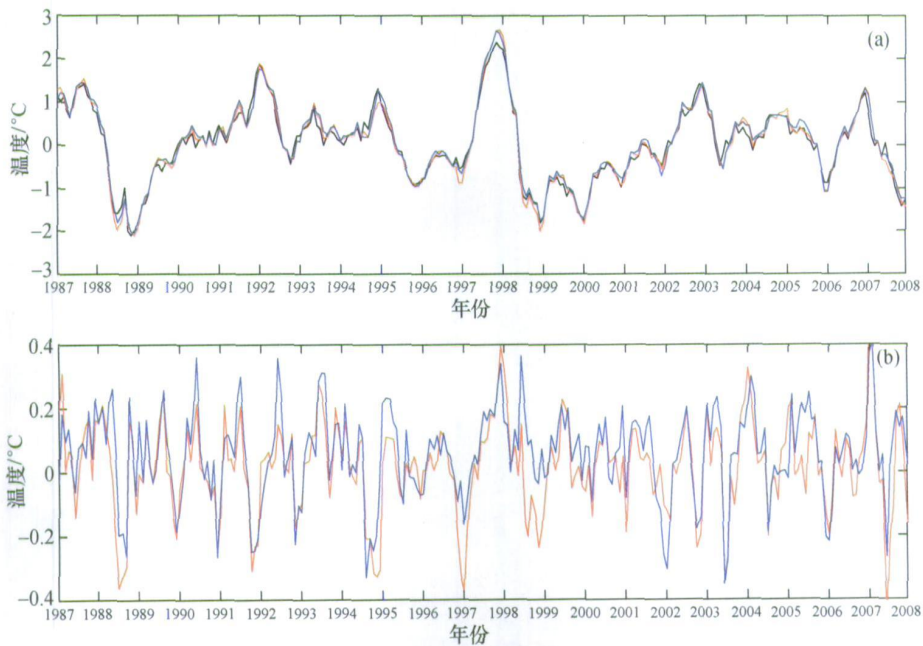


图3 Niño3.4 区 SSTA 及误差随时间变化

(a) Niño3.4 区 SSTA; (b) 两个试验与观测之差. 黑线: 观测; 红线: 无波浪试验; 蓝线: 有波浪试验

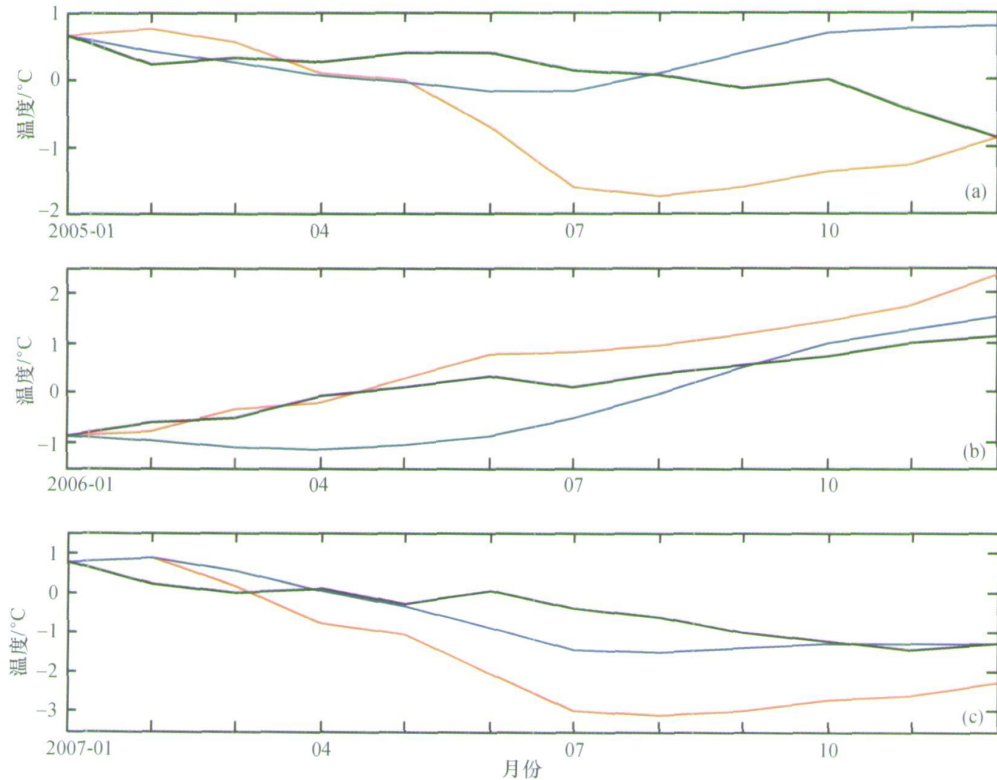


图4 Niño3.4区 SSTA

(a) 2005年; (b) 2006年; (c) 2007年. 黑线: 观测; 红线: 无波浪试验; 蓝线: 有波浪试验

2005年是一个正常年, Niño3.4区 SSTA 上半年为正常偏高, 下半年逐渐降低, 在10月份之后变为正常偏负. 从图4上图可以看出, 无波浪试验和有波浪试验对2005年上半年的预测与观测基本一致. 然而, 无波浪试验预测结果(图4(a)红线)从5月开始变为负值, 并且持续降低, 在7、8月达到 -1.8°C , 进入成熟期, 形成了一次 La Niña 事件. 相比无波浪试验, 有波浪试验预测结果(图4(a)蓝线)虽然从8月开始变为正值并且持续增长, 但是预测结果均在正常范围内, 未形成 El Niño 或者 La Niña 事件, 这与观测结果更加吻合.

2006年是一个弱的 El Niño 年, Niño3.4区 SSTA 从年初负值持续增长, 5月开始出现正值, 并继续增长, 从9月开始正值持续高于 0.5°C , 在下半年发展为一次弱的 El Niño 事件, 强度最大为 1.1°C . 从图4(b)可以看出, 无波浪试验和有波浪试验都能预测出此次 El Niño 事件. 但是无波浪试验预测的此次 El Niño 事件发生偏早, 强度偏强(图

4(b)红线), 从6月开始 Niño3.4区海面温度出现 0.5°C 的正距平, 并持续增加, 形成一次 El Niño 事件, 强度达到 2.3°C , 远远超过此次 El Niño 事件的实际强度; 而有波浪试验(图4(b)蓝线)从9月开始 Niño3.4区海面温度出现 0.5°C 的正距平, 并持续增加, 形成一次 El Niño 事件, 强度达到 1.5°C , 这与观测基本一致. 相比无波浪试验结果, 有波浪试验结果预测的2006年 El Niño 事件的发生、持续时间以及强度与观测更加吻合.

2007年是一个 La Niña 年, 从5月开始, Niño3.4区海面温度出现负距平, 从8月开始负距平持续低于 0.5°C , 并且强度仍在加强, 10月份负距平低于 1.0°C , 11月开始负距平强度保持稳定, 此次 La Niña 事件进入成熟期, 强度为 1.2°C . 从图4(c)可以看出, 在定性上两个数值试验都能够预测出此次 La Niña 事件, 2007年下半年 Niño3.4区海面温度都持续出现超过 0.5°C 的负距平. 然而, 无波浪试验预测的此次 La Niña 事件发生偏早、强

度偏强(图4(c)红线),从3月开始, Niño3.4区海面温度开始出现负距平,强度迅速加强,达到了 -3.0°C ,远远超过了此次 La Niña 事件的实际强度,在7,8,9月达到最大进入成熟期,随后进入衰退期.相比无波浪试验预测结果,有波浪试验(图4(c)蓝线)预测情况要好得多.与观测一样,从5月开始, Niño3.4区海面温度出现负距平,负距平强度持续增强,8月达到 -1.2°C 并基本保持稳定,此次预报的 La Niña 事件进入一个持续时间较长的成熟期,这与此次 La Niña 事件的实际强度和成熟期特征基本一致.值得注意的是,有波浪试验与无波浪试验一样,预报的 La Niña 事件进入成熟期时间都要早于观测约3个月,这应该是与耦合模式本身的特性有关,需要进一步对模式进行研究分析.

2.3 2008年预测

通过上面对 ENSO 集合后报结果的初步分析,可以看出,相比原 CCSM3,改进的海气耦合模式能够较好的预测出 ENSO 事件的发生情况,预报强度和持续时间与实际也较吻合.改进的海气耦合模式对 ENSO 预报能力有较显著的提高,其预测结果对2008年的气候预测有一定的参考意义.因此我们利用此耦合模式进行了2008年气候集合预测试验,在此主要对2008年 ENSO 事件和中国夏季降水异常进行分析.

2.3.1 2008年 ENSO 集合预测 图5是2008年1月1日起报的 Niño3.4区 SSTA (其中2009年的预测作为参考).从图中可以看出,在2008年,始于2007年的 La Niña 事件仍将继续.不同的是,无波浪试验预测的 La Niña 事件持续时间较短,强度迅速减弱,4月份的时候此次 La Niña 事件已经衰退,5月份海面温度距平为零,随后正距平强度随时间增加,在2008年下半年形成一次 El Niño 事件;而有波浪试验预测的 La Niña 事件将持续到2008年的夏季,9月份此次 La Niña 事件已经衰退,10月份海面温度距平变为正,以后持续上升,到12月底距平达到 0.5°C .虽然正距平强度在增加,但是直至2008年底未形成 El Niño 事件.

2.3.2 中国夏季降水异常集合预报 图6是2008

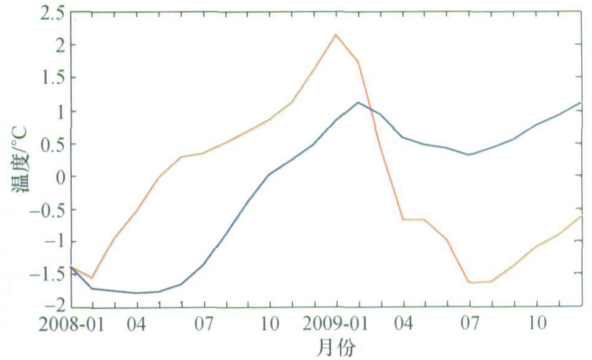


图5 2008年1月1日起报 Niño3.4区集合平均 SSTA
红线: 无波浪试验; 蓝线: 有波浪试验

年1月1日起报的中国夏季(2008年的6,7,8月平均)降水异常的集合平均结果.从图6可以看出,东南沿海、黄淮流域、东北东南部地区、华北南部、华中地区和华南地区北部以及青藏高原西部和新疆北部降水偏多,并可能局部出现洪涝;内蒙古西部、华南西南部以及青藏高原南部降水偏少;华北北部和东北北部降水正常.不同的是,无波浪试验预测长江中下游地区降水偏多,降水异常在沿海地区甚至达到5成,而有波浪试验预测长江中下游

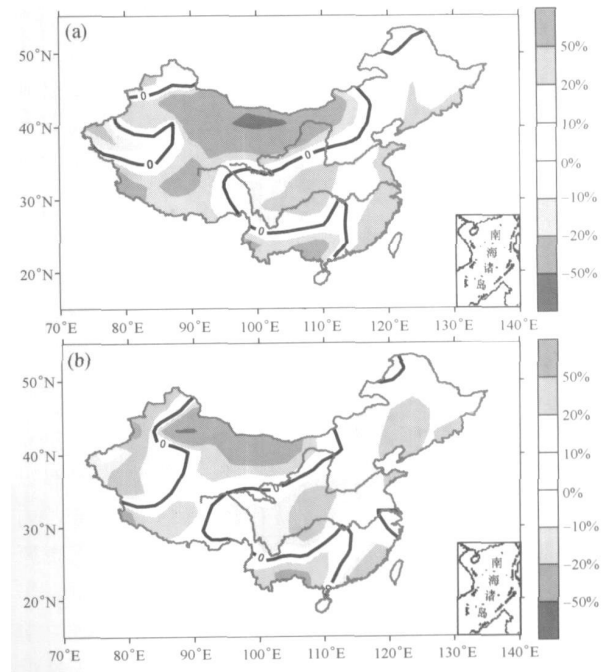


图6 2008年1月1日起报的中国2008年夏季降水异常
(a) 无波浪试验; (b) 有波浪试验

地区降水正常, 沿海地区正常偏少; 无波浪试验预测内蒙古地区降水偏少超过5成, 有波浪试验预测此地区降水偏少2—5成; 无波浪试验预测青藏高原南部降水偏少2—5成, 而有波浪试验预测此地区偏少1成; 无波浪试验预测新疆中南部降水偏少1成, 而有波浪试验预测此地区降水偏多2成。由于目前的气候模式不含台风等强降水过程, 因此上述预测结果是指不含台风降雨的统计结果。

3 结论与讨论

海气耦合模式作为气候研究和预测的主流工具, 其功能日益强大, 改进海气耦合模式中所包含的物理过程, 以增强耦合模式的气候模拟和预测能力对于科学研究和国家减灾防灾具有重要意义。本文通过增加考虑波致混合作用, 基于海气耦合模式CCSM3建立了大气—海浪—海洋环流耦合数值模式, 并利用改进前后的模式进行了2005, 2006和2007年ENSO集合后报和2008年气候异常集合预测。初步分析表明:

(1) 从同化效果来看, 改进后的海气耦合模式在同化模拟全球SST、赤道SSTA和Niño3.4区SSTA方面要优于改进前的CCSM3;

(2) 从2005, 2006和2007年ENSO集合后报情况来看, 相比原CCSM3, 改进的海气耦合模式能够较好地预测出当年ENSO事件的发生情况, 并且对ENSO事件的强度和成熟期特征预测与实际更为一致;

(3) 原CCSM3预测始于2007年的La Niña事件将持续至2008年春季, 在2008年冬季将出现一次El Niño事件; 改进后的海气耦合模式预测始于2007年的La Niña事件将持续至2008年夏季, 2008年无El Niño事件出现;

(4) 对于我国降水, 原CCSM3预测2008年夏季东南沿海、长江流域、黄淮流域、东北东南部以及青藏高原西部降水偏多, 局部可能出现洪涝, 内蒙古西部、华南西南部、新疆中南部以及青藏高原南部降水偏少; 改进的海气耦合模式预测2008年夏季东南沿海、黄淮流域、东北东南部、新疆中南部以及青藏高原西部降水偏多, 局部可能出现洪涝, 内蒙古西部、华南西南部以及青藏高原南部降水偏少, 长江中下游地区降水基本正常, 靠近沿海

降水正常偏少;

在气候预测中, 改进预报模式的初值和模式本身都可能改善预报性能。一方面从本文2.1同化结果可以看出, 引入波致混合后能够改进耦合模式的同化效果, 得到较好的初始场; 另一方面在海气耦合模式中引入波致混合作用后, 通过改善海洋的垂直混合, 能够改善海气耦合模式的气候模拟效果。因此这两方面的改进使得海气耦合模式的预报性能有所提高。

本文只是初步分析了2005, 2006和2007年的历史回报结果以及2008年的预测结果, 预报个例有限, 改进的海气耦合模式的预测能力仍需进行长期的统计分析, 并进行进一步的机理探索。

参 考 文 献

- 1 WCRP. CLIVAR Science Plan, WCRP Pub. No. 89, WMO/TD-No. 690. World Meteorological Organization, Geneva, 1995
- 2 WCRP. The world climate research programme strategic framework 2005—2015 coordinated observation and prediction of the Earth system (COPES). World Meteorological Organization, Geneva, 2005
- 3 WMO. WMO Strategic Plan, WMO-No. 1028. World Meteorological Organization, Geneva, 2007
- 4 Molteni F, Buizza R, Palmer TN, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 73—119
- 5 Behringer DW, Leetmaa MJ. An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization Part II: The coupled model. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 1022—1034
- 6 Schneider EK, Huang B, Zhu Z, et al. Ocean data Assimilation, Initialization, and Predictions of ENSO with a coupled GCM. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 1187—1207
- 7 Masao K, Kumar A, Juang H, et al. NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 1019—1037
- 8 Wang G, Kleeman R, Smith N, et al. The BMRC coupled general circulation model ENSO forecast system. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 975—991
- 9 Barnston AG, Mason SJ, Goddard L, et al. Multimodel ensemble in seasonal climate forecasting at IRI. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(12): 1783—1796
- 10 Saha S, Nadiga S, Thiaw G, et al. The NCEP climate forecast system. *J Climate*, 2006, 19(15): 3483—3517
- 11 王会军, 周广庆. 我国近年来短期气候预测研究的若干进展. *气候与环境*, 2002, 7(2): 220—226

- 12 丁一汇, 刘一鸣, 宋永加, 等. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 236—246
- 13 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 2004, 62(5): 598—612
- 14 李清泉, 丁一汇, 张培群. 一个全球海—气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估. 气象学报, 2004, 62(6): 740—751
- 15 李维京, 张培群, 李清泉, 等. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. 应用气象学报, 2005, 16(3): 1—11
- 16 McAvaney BJ, Covey C, Joussaume S, et al. Model Evaluation. Climate Change 2001, The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- 17 AchutaRao K, Covey C, Doutriaux C, et al. An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations. http://www-pcmdi.llnl.gov/model_appraisal.pdf [2008-06-10]
- 18 Qiao F, Yuan Y, Yang Y, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. Geophys Res Lett, 2004, 31, L11303, doi: 10.1029/2004GL019824
- 19 Song Z, Qiao F, Yang Y, et al. An improvement of the too cold tongue in the tropical Pacific with the development of an ocean-wave-atmosphere coupled numerical model. Progress in Natural Science, 2007, 17(5): 576—583
- 20 宋振亚, 乔方利, 雷晓燕, 等. 大气—海浪—环流耦合数值模式的建立及北太平洋 SST 模拟. 水动力学研究与进展(A), 2007, 22(5): 543—548
- 21 Huang C, Qiao F, Song Z. The effect of the wave-induced mixing on the upper ocean temperature in a climate model. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 27(3): 104—111
- 22 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用. 海洋学报, 2005, 27(2): 1—7
- 23 Collins WD, Bitz CM, Blackmon ML, et al. The community climate system model: CCSM3. J Climate, 2006, 19(11): 2122—2143
- 24 Collins WD, Rasch PJ, Boville BA, et al. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3). J Climate, 2006, 19(11): 2144—2161
- 25 Dickinson RE, Oleson KW, Bonan G, et al. The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. J Climate, 2006, 19(11): 2302—2324
- 26 Briegleb BP, Bitz CM, Hunke EC, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, Version Three. Technical Report NCAR/TN-463+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 80307—3000, 2004, 78
- 27 Smith RD, Gent PR. Reference manual for the Parallel Ocean Program (POP), ocean component of the Community Climate System Model (CCSM 2.0 and 3.0). Technical Report LA-UR-02-2484, Los Alamos National Laboratory, 2002, <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm3.0/pop>
- 28 Yuan Y, Pan Z, Hua F, et al. LAGDF-WAM numerical wave model. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 10: 483—488
- 29 Reynolds RW, Smith TM, Liu C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. J Climate, 2007, 20(22): 5473—5496
- 30 Gent PR, Tribbia JJ. Simulation and predictability in a coupled TOGA Model. J Climate, 1993, 6(10), 1843—1858