

## 海洋气候变化预估及研究方法综述

何越<sup>1,2</sup>, 蔡怡<sup>2,3</sup>, 陈幸荣<sup>2</sup>, 王海燕<sup>2</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;  
3. 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 概述了目前预估的未来海洋气候变化状态,总结了在气候变化预估中常用的气候模式,包括简单概念性气候模式、中等复杂程度气候模式、气候系统模式和地球系统模式,介绍了海洋气候变化预估的多模式集合法和动力降尺度法。指出当前对一些对气候变化影响较大的区域海洋和气候系统自然变率的模拟预估研究还存在很多不足之处。高分辨率气候系统模式和基于多模式集合的概率预估可以在一定程度上减少海洋气候变化预估的不确定性,高分辨率气候模式的研究和概率预估的应用是当前的两个主要发展趋势。

**关键词:** 海洋气候变化预估;气候模式;多模式集合;动力降尺度

**中图分类号:** P732.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)06-0089-10

### 1 引言

20世纪以来,全球环境发生了前所未有的变化,全球降水量重新分配,冰川和冻土消融,海平面上升,极端气候事件如热浪、干旱和强降水等发生的强度和频率增加,一系列全球性重大环境问题对人类的生存和发展造成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。以全球变暖为主要特征的气候变化是这一系列全球环境问题产生的根源。联合国气候变化专门委员会第五次评估报告指出,气候系统的变暖是毋庸置疑的:自20世纪中叶以来,大气和海洋已变暖、积雪和冰量已减少、海平面已上升、温室气体浓度已增加。地球表面温度在近三十年中的每个十年都相继高于1850年以来的任何先前十年<sup>[3]</sup>。

海洋作为气候系统的重要组成部分,在气候系统的变化和调节方面发挥着重要作用。海洋表层吸收大量的太阳辐射,并通过潜热、长波辐射和感热交换的方式输送给大气,以能量形式来影响大气运动。近几十年来,气候系统约93%的热增量存储于海洋上700 m层中,并促使海洋热膨胀及其后的

海平面上升,另外少量的热增量使得大陆变暖、大气升温和冰川融化。海洋巨大的热惯性,使得其变化相对于大气变化一般会迟滞数月或更长,其年循环也要迟缓于陆地,陆地和毗邻海面的温度差,会引起季风环流等各种大气反应。海洋在风力和冷热造成的密度差异以及蒸发、降水和径流的影响下,会做水平和垂直运动,在运动过程中,海洋重新分配热量和盐分,其分配方式对决定地球气候的细节至关重要<sup>[4]</sup>。

对海洋气候变化的预估有助于增进对全球气候变化的理解,有助于更全面地评估未来气候变化带来的一系列影响,及早作出合理的适应对策。本文概述了目前预估的全球和区域海洋未来可能的气候变化状态,并介绍了气候预估所用数值模式的发展和主要动力预估方法,最后进行了总结和展望。

### 2 预估的未来海洋气候变化状态

作为由世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和联合国环境规划署(United

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-01-10。

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项(201505013)。

作者简介: 何越(1991-),女,硕士在读,主要从事海洋气候动力预测研究。E-mail: heyue1011@163.com

Nations Environment Programme, UNEP) 于 1988 年共同建立的政府间机构, 政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 是牵头评估气候变化的国际组织。IPCC 对气候系统变化的预估基于一系列气候模式得出, 包括简单气候模式、中等复杂模式、综合气候模式以及地球系统模式。国际耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) 由世界气候研究计划 (WRCP) 组织, 耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 于 2008 年启动, IPCC 第五次评估报告主要采纳了 CMIP5 气候模式的结果。这些模式对未来气候变化的预估基于一系列人为强迫的情景—典型浓度路径 (RCPs), 每种路径提供了不同程度的辐射强迫、温室气体 (气溶胶、化学活性气体) 排放和浓度及土地利用/覆盖<sup>[5]</sup>。

## 2.1 预估的未来全球海洋气候变化状态

根据 IPCC 第五次评估报告的结果, 在所有 RCP 情景下, 全球海洋都将会变暖。未来海洋平均温度将会上升 (见图 1)。2016—2035 年全球平均海表面温度和垂直平均海洋温度, 将会高于 1986—2005 年间对应的海洋平均温度。到 2090 年, 在 RCP8.5 情景下平均海表面温度将会比 1990 年高出 2.7 °C。到 21 世纪末, 在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下, 上层 100 m 内海洋增温分别约为 0.6 °C 和 2.0 °C, 1 000 m 深的海洋增温分别约为 0.3 °C 和 0.6 °C。预估热带和北半球副热带地区的海表面是变暖最强的区域, 而深海变暖最强的区域位于南大洋<sup>[6]</sup>。

研究表明<sup>[7]</sup>海洋热含量将增加, 热量从海面输送到深海。在 RCP4.5 情景下, 上 700 m 深的海洋表

层和次表层吸收的热能占海洋吸收总热能的 50%, 上 2 000 m 深的海水层吸收的热能占到 85%。海洋的热能从海表面输送到海洋深处需要持续很长时间, 即使从当前开始温室气体排放量减少或浓度保持稳定, 海洋变暖也仍将会持续几个世纪。

Burkett 等<sup>[8]</sup>研究显示海冰范围会进一步缩减 (见图 2)。21 世纪后期, 北极海冰盖将会继续缩小并变薄, 南极海冰范围和体积也将会减少。预估 2081—2100 年与 1986—2005 年相比, 北极海冰体积在 RCP2.6 情景下在二月份将减少 8%, 九月份将减少 43%, 在 RCP8.5 情景下二月份将减少 34%, 九月份将减少 94%。南极海冰体积在 RCP2.6 情景下二月份将减少 16%, 九月份将减少 8%, 在 RCP8.5 情景下二月份将减少 67%, 九月份将减少 30%。

Wong 等<sup>[9]</sup>指出全球平均海平面将会上升 (见图 3)。全球平均海平面在 2081—2100 年与 1986—2005 年相比, RCP2.6 情景下将会上升 0.26~0.55 m, RCP4.5 情景下将会上升 0.32~0.63 m, RCP8.5 情景

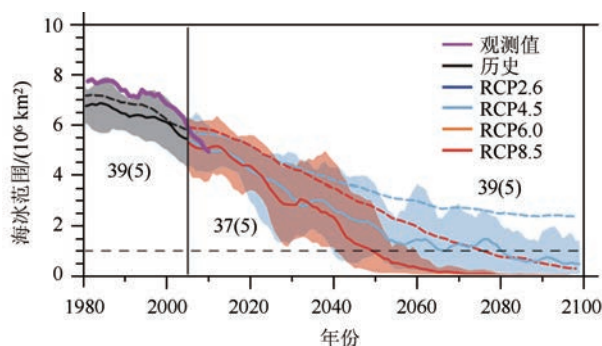


图2 CMIP5 多模式模拟的 1980—2100 年北半球 9 月海冰范围 (5 a 滑动平均)<sup>[3]</sup>

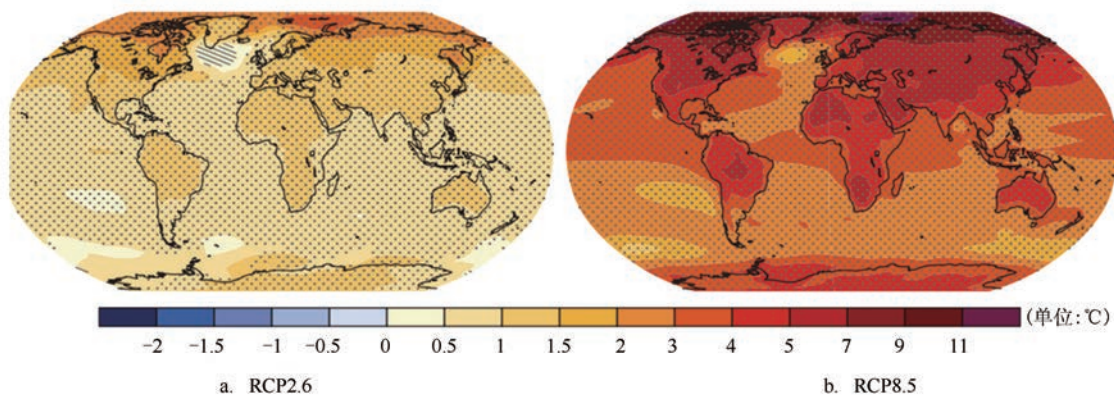


图1 CMIP5 多模式在不同情景下模拟的 2081—2100 年相对 1986—2005 年均表面温度变化<sup>[3]</sup>



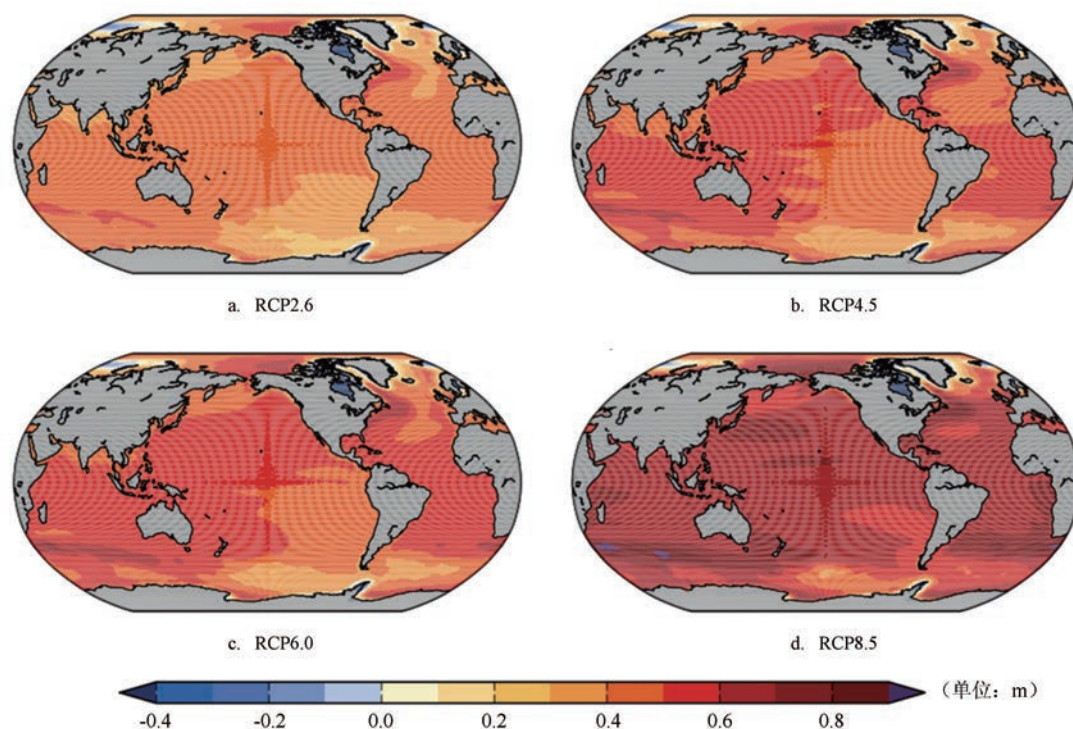


图3 CMIP5多模式在不同RCP情景下模拟的2081—2100年相对1986—2005年全球相对海平面的变化<sup>[3]</sup>

下将会上升0.45~0.82 m。在导致全球平均海平面上升的因素中,热膨胀贡献最大,占30%~55%,其次是冰川,占15%~35%。在南大洋和北美洲附近,区域海平面变化值比全球平均值高30%,在赤道地区比平均值高10%~20%,北极和位于南极附近的区域比平均值低50%,极端海平面出现率将会明显增加。预估2100年之后,全球平均海平面将会持续上升。海洋热膨胀随着全球变暖而加剧,引起的海平面上升将会持续数百年乃至数千年。

## 2.2 预估的未来区域海洋气候变化状态

海洋气候呈现出全球平均变化状态的同时,各区域海洋也呈现出各自不同的变化型态。IPCC第五次评估报告指出<sup>[3]</sup>,在21世纪末期,厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)将仍是热带太平洋区域自然气候变率的主导模态,并影响全球气候,ENSO引起的区域降水变率将会增强。在北太平洋和北美地区,与厄尔尼诺和拉尼娜(遥相关)有关的温度和降水距平型态未来可能东移。未来南太平洋辐合带纬向事件的年际发生率将会

增加,南太平洋辐合带将会南移,导致南美东南部降水增加,辐合带北部降水减少。在热带印度洋,东部升温幅度将会减小,降水将会减少;西部升温幅度将会增大,降水将会增多。印度洋年际变率的偶极子模态将保持活跃,并对东非、印度尼西亚和澳大利亚的极端气候产生影响。预估21世纪末,大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)将会减弱,在RCP2.6情景下约减弱11%,在RCP8.5情景下约减弱34%。

海洋的西边界流区域展现出了最大的变暖速率,全球气候模式预测随着气候的变化西边界流系统将会继续加速变暖<sup>[10]</sup>。预估在全球变暖的背景下,由于夏季风增强冬季风减弱,中国东海黑潮很有可能会增强<sup>[11]</sup>。预估21世纪末,加勒比海和墨西哥湾海域的西边界流系统(包括加勒比海流、尤卡坦海流和环海流)的体积输运将会减少20%~25%<sup>[12-13]</sup>。到21世纪中期,澳大利亚西边界流的输运量将会减少15%,印度尼西亚贯穿流的输运量将会减少20%,澳大利亚东边界流的输运量将会增加12%,东边界流延伸体的输运量将会增加35%<sup>[14]</sup>。

21世纪末,我国近海的海温将会有有一个相对较大幅度的增加<sup>[15-16]</sup>。预估温度增量最大为2.5~4.5℃,最小为1.2~2.0℃。温度增加较大的区域位于渤海和黄海中部,增加较小的区域位于我国东南沿岸,朝鲜西海岸和东海南部附近<sup>[11]</sup>。宋春阳等<sup>[16]</sup>指出未来近100a我国近海海温有明显的升高趋势,在RCP4.5和RCP8.5情景下,平均增温分别可达到1.5℃和3.3℃,净热通量变化和平流变化共同促进了东海升温。对我国南海的预估表明,未来100a南海SST存在明显上升趋势,在RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 3种情景下,南海SST每百年的增温幅度分别为0.42℃, 1.50℃, 3.30℃,增温趋势随空间变化较小,随时间呈现出不均匀变化<sup>[17]</sup>。

### 3 海洋气候变化预估的气候模式

对于上述海洋气候变化的预估结果,目前主要是根据气候模式的计算得到的。气候模型是理解过去气候系统演变机理,预估未来气候系统潜在变化的重要工具。气候模型实际上是将气候系统的一系列基础过程用数学方程组表达出来,构成气候系统的数学物理模型,然后通过数值离散方法在大型综合计算机上进行求解,实现对气候系统行为和过程的模拟与预测<sup>[18]</sup>。气候系统的基础过程包括不同复杂程度的物理、化学和生物过程,根据数学物理模型对气候系统的大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈某一方面或多个方面基础过程表达的复杂程度,可以将其划分为不同的气候模式。

#### 3.1 简单概念性气候模式

简单概念性气候模式对气候系统进行高度整合,强调气候系统的主要气候特征和物理过程,如热力动力过程、辐射对流过程或关键反馈过程等,对气候系统的其他过程或细节描述较少,通常纬向平均,维数少,分辨率低,只能反映研究区域的一个平均过程。简单气候模式对计算机性能要求较低,可以进行长时间尺度的模拟,在对气候变化成因的模拟研究中应用较多<sup>[19-20]</sup>。常用的简单气候模式有气候系统概念模型、能量平衡模式、统计动力模式、辐射对流模式和海洋上翻-扩散模式等。在IPCC历次报告中,都引用了简单气候模式的结果。简单气

候模式以一套全球或者半球框的形式代表海洋-大气系统,利用能量平衡方程预测全球地表温度,与地球生物化学圈简化模式耦合后,可以快速估测气候系统对气候情景的响应,能够预估由热膨胀导致的全球平均海平面的上升<sup>[3]</sup>。简单概念性气候模式对简单背景下的探索性研究具有一定的参考意义,随着对气候变化动力机制研究的逐渐深入,需要考虑的物理过程也更多,对模拟精度也有了更高要求,简单概念性气候模式在海洋气候预估方面存在着局限性。

#### 3.2 中等复杂程度气候模式

中等复杂程度气候模式(EMICs)描述了包括人类与自然相互作用的气候系统,一般具有两个维度,两个水平维度或是一个水平与一个垂直维度,其复杂程度介于简单气候模式和气候系统模式之间,涵盖了气候系统模式(GCMs)中的大多数过程,但是对这些过程的表达要相对简化,整合程度没有简单气候模式高,细节描述相对简单气候模式更加丰富,兼顾简单气候模式和气候系统模式的部分优点<sup>[21-22]</sup>。根据EMICs在大气模块构成和简化程度方面存在的差异,可分为两类:一类是基于GCMs进行大气或者海洋过程的简化,总体复杂程度较高,对气候过程及反馈过程描述较为完善和细腻,如德国汉堡大学Planet Simulator模式<sup>[23-24]</sup>;另一类基于低分辨率且大量参数化的模式,这类EMICs在更长时间尺度气候变化的研究中有重要作用。从模式的复杂程度上看,前者更像是简化的GCMs,后者更接近于简单气候模式。在IPCC第四次评估报告中<sup>[25]</sup>,利用一个低分辨率的GCM和数个EMICs进行海平面上升的归因分析,得出海洋热膨胀是海平面上升的最主要促成因素之一,并对未来进行了预估。在IPCC第五次评估报告中<sup>[3]</sup>,EMICs在古气候模拟、未来气候预估等方面发挥了重要作用。EMICs能够刻画出气候变化的大体特征,同时计算要求低,其应用范围几乎覆盖了简单气候模式和气候系统模式的所有研究领域。但是分辨率比较低,相对GCMs而言,对气候系统的细节描述也是十分简化,尚不能达到GCMs的高度。

#### 3.3 气候系统模式

气候系统模式(GCMs)综合考虑了气候系统中



多个圈层及其相互作用的过程,可以对气候进行全三维的模拟,它以大气和海洋中诸多过程的平衡为基础,包括能量平衡、动力平衡、示踪体(如大气中的水蒸气和海洋中的温盐)平衡以及质量守恒的平衡,模式涵盖了诸如陆面、陆海冰、云、海冰结构、热力、湿度、动力和盐度的传送等过程<sup>[19]</sup>。GCMs采用模块化框架,利用耦合器将大气、海洋、海冰和陆面等子模式相互耦合在一起,各组分之间通过耦合器传递信息和数据。GCMs主要是利用大量的格点详细划分大气、海洋和地表条件,通过数字技术解决在不同小块上产生的一系列非线性平衡关系,应用时间步长的方法来进行计算<sup>[26-27]</sup>。国际耦合模式比较计划(CMIP)推动了耦合气候系统模式(CGCMs)的发展与应用,该计划主要研究CGCMs模拟的气候变率和可预报性,利用观测资料对模拟结果进行检验,并运用CGCMs预估未来气候变化。基于CMIP计划气候模拟和预估结果的大量科学论文,是IPCC编写科学评估报告的基础<sup>[28-29]</sup>。全球气候系统模式能够在全球尺度上对气候的未来情景进行宏观预测分析,但空间分辨率较低,难以描述区域尺度的复杂地形、植被分布和物理过程,对区域尺度的气候变化模拟与预报能力有限,故区域气候模式以及区域气候模拟研究近年来受到了较多关注。尤其是在大气和海洋相互作用的区域,其动力和热力机制主要受中小尺度海气相互作用过程的控制,区域海气耦合模式研究区域小,空间分辨率高,能较好地表示地形和海表状况,同时包含较详细的过程方案,对区域尺度的气候预估显示出巨大价值<sup>[30-32]</sup>。气候系统模式复杂程度相对较高,考虑的模块较多,参数化程度相对复杂,模式的初始状态和边界条件就相应很重要,参数条件的细微变化就可能对结果产生较大影响。另一方面,各个模块间的耦合作用需要耗费大量的计算时间来达到气候系统的平衡,因而对计算机水平的要求也高。

### 3.4 地球系统模式

地球系统模式把大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈作为一个相互作用的整体来考虑,能够反映地球各圈层之间的相互作用。王斌等<sup>[18]</sup>将地球系统模式的发展划分为基础阶段、过渡阶段和成型阶段。基础阶段即以地球流体(大气和海洋)为主体

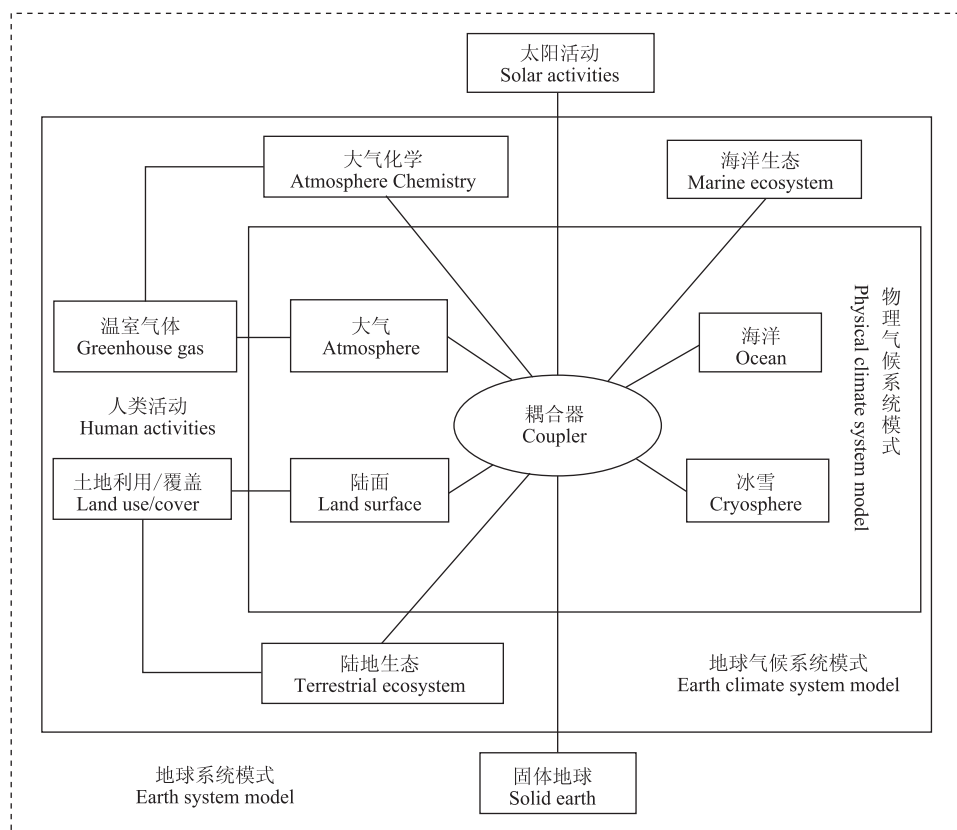
的物理气候系统模式阶段,固体地球部分只考虑了地球表层的陆面物理过程,过渡阶段是在物理气候系统模式的基础上考虑了大气化学过程、生物地球化学过程和人文过程的地球气候系统模式阶段,成型阶段是在地球气候系统模型的基础上考虑其与固体地球和空间天气相互作用的相对完整的数值模式阶段,也就是地球系统模式阶段(地球系统模式的框架如图4所示)。气候系统模式属于地球系统模式的雏形,目前国际上所说的地球系统模式是通过耦合器相联接的大气模式、海洋模式、大气化学模式、陆面模式、海冰模式、海洋生物地球化学模式、区域气候模式构成的模式系统,从严格意义上应该属于地球气候系统模式。在参加CMIP5的模式中,包括11个地球系统模式参与了对未来气候变化的预估试验,其中有5个包含完整的陆地、海洋碳循环以及大气化学过程,5个只包含海洋和陆地碳循环,1个只包含海洋碳循环<sup>[33-34]</sup>。地球系统模式所包含的物理、化学和生物过程几乎涵盖了地球科学中的绝大多数研究方向,远比一般的气候系统模式更复杂,对计算机的要求也相当高,其研制是一个巨大的系统工程。

## 4 海洋气候变化预估的主要动力方法

对海洋气候变化的预估主要是基于系列气候模式在未来特定情景下的模拟结果得出的。对大范围的全球海洋的预估常用多模式集合的方法,这类预估往往关注全球海洋的整体变化特征,忽略区域海洋的局部变化特征,对参与模拟的气候模式的分辨率没有特定要求。对相对小范围的区域海洋的预估常采用动力降尺度的方法,将研究区域设置在感兴趣的区域海洋,关注区域海洋变化的细节特征,要求参与模拟的气候模式的分辨率达到特定的精度。多模式集合法和动力降尺度法不是两种截然分离的方法,在对区域海洋进行预估时也可以结合多模式集合的方法。

### 4.1 多模式集合法

基于对数值模式模拟预估结果进行的气候变化预估总是存在着诸多不确定性。这些不确定性主要可以划分为4类,初始条件不确定性、边界条件

图4 地球系统模式框架<sup>[18]</sup>

不确定性、模式参数化过程不确定性和模式构建的不确定性<sup>[35-36]</sup>。其中,模式参数化过程的不确定性和模式构建的不确定性是最为主要的两个方面,通过提高模式的分辨率可以在一定程度上减少对模式参数化过程的依赖,减少模式通过次网格参数化产生的不确定性<sup>[37-38]</sup>,还有一类不确定性是在模式设计过程中引入的,每个模型的构架与所要模拟的真实系统之间存在固有的误差,即模式构建的不确定性,这些误差是无法通过调整其参数化过程加以消除的,这也是着眼于多模式集合的主要动机<sup>[35-36,39-40]</sup>。多模式集合是一系列结构不同的模式的模拟结果,这些模式的初始值或者是单个的,或者是一个集合<sup>[35]</sup>。有研究表明<sup>[41-42]</sup>,多模式集合对ENSO的预估通常要好于单个模式的预估结果。赵宗慈等<sup>[43]</sup>在对地球系统模式的评估中也指出所有气候模式的集合平均明显优于单个模式的模拟结果。多模式集合相对单个模式模拟精度的提高,不是针对某一特定要素而言的,而是从总体上提高了要素的平均模拟精度。多模式间的结合有不同的方法,常见的有贝叶

斯法<sup>[39-40,44]</sup>、权重平均法和等权的算术平均法。IPCC第四次和第五次评估报告对长期气候变化的预估采用了多模式集合等权平均的方法。用于多模式集合平均的模式只有在相互独立的情况下,才能在集合平均时显著减少模拟误差,然而实际情况是虽然集合模式来自世界不同国家和机构,但是模式在很多方面具有共性,模式对于不能分辨的过程采取的次网格参数化方案是相似的,参数化过程中模型基本上都使用了相同的理论参数,模型网格和数值离散方案也基本上都是类似的,这些过程所引入的误差也是类似的,难以通过多模式集合平均消除掉<sup>[35,41,45]</sup>。Räisänen和Palmer<sup>[46]</sup>提出了在多模式集合的气候变化模拟中气候变化预估应该以一种概率预估的形式表达的观点。

## 4.2 动力降尺度法

对全球海洋气候变化的预估大多是基于全球耦合的大气海洋环流模式(AOGCMs)在未来特定情景下的模拟结果。全球AOGCM较粗的分辨率

往往达不到对特定区域海洋研究所需的精度,无法分辨出区域海洋复杂的地形和海岸线。主要可以通过3个途径提高区域海洋的气候变化模拟能力,一是增加现有全球耦合大气海洋环流模式的水平分辨率,二是在全球耦合大气海洋环流模式中采用变网格方案技术,三是采用高分辨率的区域气候模式与全球气候模式相嵌套,也就是动力降尺度技术<sup>[47-48]</sup>。前两种方法由于受到计算机性能的限制和变网格方案的复杂性,利用区域气候模式的动力降尺度方法较受青睐<sup>[11-15,49-50]</sup>。因此对区域海洋的预估常常利用区域气候模式通过动力降尺度的方法进行,将大尺度、低分辨率的全球气候模式输出的信息,转化为小尺度、高分辨率的区域气候变化信息。动力降尺度技术,基于区域气候模式详细的中小尺度物理过程和相应的空间分辨率,这种空间分辨率足以分辨区域海洋复杂的地形、海陆差异和涡动过程等,能够产生与提供驱动场的全球气候模式(GCMs)或全球再分析数据或观测数据的大尺度环流相一致的精细区域气候信息。运用动力降尺度对区域海洋气候变化进行预估的前提是,通过降尺度能够在再现全球气候模式中的大尺度特征的情况下,尽可能增加区域变化的更精细的细节信息。只有在满足一定的条件时,区域模式才能够达到降尺度的目的,这些条件包括合适的侧边界条件和区域设置、对流方案、陆地表面参数化方案、初始化条件、数值方案和足够大的研究域,其中任何一个条件存在较大问题时,都会严重影响降尺度结果。在气候变化预估中,用于提供区域模式驱动力的侧边界条件十分关键,如果使用对当前气候的模拟具有严重缺陷的GCM来提供侧边界条件,这种系统误差会传递到区域尺度的气候预估中,因此慎重选择提供侧边界的GCM并对侧边界进行误差校正是十分必要的<sup>[51-52]</sup>。

## 5 研究展望

海洋气候的变化决定陆地气候的变化,尤其是对长期气候变化进行预估时必须考虑海洋的情况,对海洋气候变化的预估可以更好地理解未来全球气候变化情况。随着计算机水平的发展和对气候系统基础相互作用过程研究的深入,用于气候变化预估的气候模式经历了从简单概念性气候模式、中

等复杂程度气候模式、气候系统模式到地球系统模式的发展历程,极大促进了对气候变化的预估研究。对海洋气候变化的预估也从全球的整体性平均预估扩展到对区域海洋的气候变化预估,逐渐向着精细化的方向发展。目前对海洋气候变化的预估还存在有待完善的地方:

(1)加强对气候变化影响较大的区域海洋和气候系统自然变率的模拟预估。一些对全球气候变化影响较大的区域海洋或流系的预估鲜有涉及,如西太平洋暖池区、赤道流系、黑潮及黑潮延伸体的变化都会极大影响全球气候的变化,对这些区域的气候变化预估有待加强。对典型的自然气候变率的预估不足,目前对热带太平洋ENSO、印度洋偶极子IOD未来变化的研究尚处于低信度水平,对太平洋年代际振荡PDO的预估还未见诸文献,需要加强对这些显著影响气候变化的气候系统自然变率的模拟预估。另外,对海洋的预估大多关注海洋表层和次表层,Meehl等<sup>[53]</sup>研究指出全球增暖停滞期间,海洋上700 m层增暖变缓,700~2 000 m深度的中下层海洋海温在持续上升,表明深海气候变化预估对于未来全球气候变化预估具有重要意义;

(2)减少海洋气候变化预估的不确定性。气候系统模式和地球系统模式在研究气候系统演化机理、预测和预估未来气候变化中发挥了重要作用,但是模式性能尚不能完全满足气候变化模拟和预测与预估研究的需求。模式的模拟结果存在着诸多不确定性,其中参数化过程不确定性和模式构建不确定性是最主要的两大不确定性。高分辨率模式可以直接分辨更多的中小尺度动力过程,减少模式对次网格参数化过程的依赖,从而在一定程度上减少参数化过程不确定性。随着计算机水平的发展,高分辨率气候系统模式的研发成为当今气候模式研究领域的一个重要趋势。最新的国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)已经将高分辨率耦合模式模拟比较计划列为其子计划之一<sup>[54-55]</sup>。但是在高分辨率模式的发展中要注意气候系统模式的空间分辨率和次网格参数化过程应该相互匹配,而且必须同时兼顾动力框架和次网格参数化过程的改进<sup>[56]</sup>。对于模式构建不确定性,可以采取多模式集合平均的方法加以消除,但是要求参与集合平均的模式之间应该是相互独立的,在现阶段模式间尚不



可能达到完全独立,基于多模式集合的概率预估可以对模式间的不确定性进行量化,是相对于多模式集合平均确定性预估的一种改进,是未来的一个主要发展方向。对区域气候变化的预估而言,多模式集合与降尺度相结合能显著减少对区域海洋气候变化预估的不确定性,是未来提高区域海洋气候变化预估精度的重要手段之一;

(3)我国应加强对近海海洋气候变化的精细预估研究。我国近海作为西太平洋的边缘海,是世界上最大的大陆和最大的海洋之间的交汇区,流系错综复杂,其海洋环境的变化会对我国的陆地气候尤其是沿岸气候、海洋生态、渔业资源、沿岸经济发展、居民生活等产生一系列重要影响。我国沿海城市也面临着海平面上升的危险,近年来热带风暴登录我国东南沿岸一带的频率和强度都有所增加。目前对我国近海海洋气候变化预估的研究相对较少,而且预估精度也不够高。对我国近海未来海洋气候变化的精细预估,可以提供更多关于我国近海未来环境变化的细节信息,为决策者提供一些参考,及早做出合理的适应政策,以避免和降低未来气候变化所带来的风险。

#### 参考文献:

- [1] 陈宜瑜. 全球变化与社会可持续发展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 1-3.
- [2] 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策[J]. 科学通报, 2013, 58(21): 2100-2106.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Stewart R V V. Ocean and climate[J]. Impact of Science on Society, 1990, 166: 47-53.
- [5] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. Nature, 2010, 463(7282): 747-756.
- [6] Pörtner H O, Karl D M, Boyd P W, et al. Climate change 2013: Ocean systems[M]//Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press, 2013.
- [7] Guldberg O H, Cai R, et al. Climate change 2013: the ocean[C]//Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press, 2013.
- [8] Burkett V, Suarez A G, Bindi M, et al. Climate change 2013: point of departure[C]//Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press, 2013.
- [9] Wong P P, Losada I J, et al. Climate change 2013: coastal systems and low-lying areas[C]//Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Matear R J, Chamberlain M A, Sun C, et al. Climate change projection of the Tasman Sea from an eddy-resolving ocean model [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(6): 2961-2976.
- [11] Yu X L, Wang F, Tang X H. Future projection of East China Sea temperature by dynamic downscaling of the IPCC\_AR4 CCSM3 model result[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(5): 826-842.
- [12] Liu Y Y, Lee S K, Enfield D B, et al. Potential impact of climate change on the Intra-Americas Sea: Part-1. A dynamic downscaling of the CMIP5 model projections[J]. Journal of Marine Systems, 2015, 148: 56-69.
- [13] Nurse L A, Charlery J L. Projected SST trends across the Caribbean Sea based on PRECIS downscaling of ECHAM4, under the SRES A2 and B2 scenarios[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1-2): 199-215.
- [14] Sun C J, Feng M, Matear R J, et al. Marine downscaling of a future climate scenario for Australian boundary currents[J]. Journal of Climate, 2012, 25(8): 2947-2962.
- [15] Seo G H, Cho Y K, Choi B J, et al. Climate change projection in the Northwest Pacific marginal seas through dynamic downscaling [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(6): 3497-3516.
- [16] 宋春阳, 张守文, 姜华, 等. CMIP5 模式对中国近海海表温度的模拟及预估[J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 1-11.
- [17] 黄传江, 乔方利, 宋亚娟, 等. CMIP5 模式对南海 SST 的模拟和预估[J]. 海洋学报, 2014, 36(1): 38-47.
- [18] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- [19] 张冉, 李力, 郭庆春, 等. 古气候研究中气候模式的发展与应用 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 704-711.
- [20] 王勇, 刘苏峡, 邵亚平, 等. 简单地球模型的研究进展[J]. 气象科技进展, 2014, 4(3): 26-31.
- [21] Gallée H, Van Ypersele J P, Fichet T, et al. Simulation of the last glacial cycle by a coupled, sectorially averaged climate-ice sheet model: 1. The climate model[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(D7): 13139-13161.
- [22] Ganopolski A, Petoukhov V, Rahmstorf S, et al. CLIMBER-2: a climate system model of intermediate complexity. Part I: model description and performance for present climate[J]. Climate Dynamics, 2000, 16: 1-17.



- [23] Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: green planet and desert world[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, 14(3): 305-314.
- [24] Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: towards a user friendly model[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, 14(3): 299-304.
- [25] IPCC. IPCC fourth assessment report (AR4). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Haltiner G J, Williams R T. Numerical prediction and dynamic meteorology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [27] Hansen J, Russell G, Rind D, et al. Efficient three-dimensional global models for climate studies: models I and II[J]. *Monthly Weather Review*, 1983, 111(4): 609-662.
- [28] 罗勇, 王绍武, 党鸿雁, 等. 近20年来气候模式的发展与模式比较计划[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 372-377.
- [29] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近20年回顾[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 892-907.
- [30] Wang Y Q, Leung L R, McGregor J L, et al. Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(6): 1599-1628.
- [31] 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 区域气候模式研究进展[J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26(4): 557-565.
- [32] 彭世球, 刘段灵, 孙照渤, 等. 区域海气耦合模式研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(9): 1301-1316.
- [33] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485-498.
- [34] Anav A, Friedlingstein P, Kidston M, et al. Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(18): 6801-6843.
- [35] Tebaldi C, Knutti R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1857): 2053-2075.
- [36] Van Oldenborgh G J, Doblas-Reyes F J, Wouters B, et al. Decadal prediction skill in a multi-model ensemble[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(7-8): 1263-1280.
- [37] Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. Breaking the cloud parameterization deadlock[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(11): 1547-1564.
- [38] Bony S, Dufresne J L. Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(20): L20806, doi: 10.1029/2005gl023851.
- [39] Min S K, Hense A. A Bayesian assessment of climate change using multimodel ensembles. Part II: regional and seasonal mean surface temperatures[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(12): 2769-2790.
- [40] Duan Q Y, Ajami N K, Gao X G, et al. Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5): 1371-1386.
- [41] 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.
- [42] Arzhanov M M, Semenov V A, Mokhov I I, et al. Climate change projections in the Black Sea region based on CMIP5 model ensemble[J]. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 2013, 43(7): 5-6.
- [43] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 对地球系统模式评估方法的回顾[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 1-8.
- [44] Robertson A. W, Lall U, Zebiak S E, et al. Improved combination of multiple atmospheric GCM ensembles for seasonal prediction[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(12): 2732-2744.
- [45] Semenov M A, Stratonovitch P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts[J]. *Climate Research*, 2010, 41(1): 1-14.
- [46] Räisänen J, Palmer T N. A probability and decision-model analysis of a multimodel ensemble of climate change simulations[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(15): 3212-3226.
- [47] Cohen S J. Bringing the global warming issue closer to home: the challenge of regional impact studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1990, 71(4): 520-526.
- [48] Wilby R L, Charles S P, Zorita E, et al. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods [EB/OL]. IPCC Publications, 2004, [http://www.ipccdata.org/guidelines/dgm\\_no2\\_v1\\_09\\_2004.pdf](http://www.ipccdata.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf).
- [49] Ådlandsvik B, Bentsen M. Downscaling a twentieth century global climate simulation to the North Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2007, 57(4-5): 453-466.
- [50] Ådlandsvik B. Marine downscaling of a future climate scenario for the North Sea[J]. *Tellus A*, 2008, 60(3): 451-458.
- [51] Meier H E M. Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios[J]. *Climate Dynamics*, 2006, 27(1): 39-68.
- [52] Xue Y K, Janjic Z, Dudhia J, et al. A review on regional dynamical downscaling in intraseasonal to seasonal simulation/prediction and major factors that affect downscaling ability[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 147-148: 68-85, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.05.001.
- [53] Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus

- periods[J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1(7): 360-364.
- [54] 宇如聪. 高分辨率气候系统模式的研制与评估[J]. *中国基础科学·研究进展*, 2015, (2): 27-37, doi: 10.3969/j.issn.1009-2412.2015.02.005.
- [55] 栾贻花, 俞永强, 郑伟鹏. 全球高分辨率气候系统模式研究进展[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(3): 258-268.
- [56] Bennartz R, Lauer A, Brenguier J L. Scale-aware integral constraints on autoconversion and accretion in regional and global climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10809, doi: 10.1029/2011GL047618.

## Review on the projection and study methods of ocean climate change

HE Yue<sup>1,2</sup>, CAI Yi<sup>2,3</sup>, CHEN Xing-rong<sup>2,3</sup>, WANG Hai-yan<sup>2</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 3. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, State Oceanic Administration, Beijing 100081 China)

**Abstract:** The projection of the main ocean climate changes in the future are generalized. The major climate models used to simulate the ocean climate are summarized, including Simple Conceptual Climate Models (SCMs), Earth System Models of Intermediate Complexity (EMICs), General Circulation Models (GCMs) and Earth System Models (ESMs). The methods of multi-model ensemble and dynamical down-scaling in the ocean climate change projection are introduced. The paper points out some proposals on the projection of ocean climate change research. The projection of some regional oceans and climate system natural variabilities which have great values to the climate change is still under a low level. High-resolution climate system models and probabilistic prediction can efficiently reduce the projection uncertainty. The research and development of high-resolution climate models and application of probabilistic prediction are the two main study direction.

**Key words:** ocean climate change projection; climate model; multi-model ensemble; dynamical down-scaling