

简单地球模型的研究进展

王勇^{1,2} 刘苏峡¹ 邵亚平³ 彭公炳^{1,4}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 3 德国科隆大学地球物理与气象研究所, 科隆 50923;

4 国际欧亚科学院中国科学中心, 北京 100107)

摘要: 以简单概念性气候模式 (SCMs) 和中等复杂程度的地球系统模式 (EMICs) 为对象, 介绍了简单地球模型的研究进展。在简单地球模型中, 简单概念性气候模式已经成为了解气候理论和气候变化规律的有效工具; 中等复杂程度的地球系统模式涵盖了地球系统的大多数组成部分, 对各部分之间的反馈和过程描述比较详细, 同时计算要求比较低, 使其应用几乎覆盖了简单概念性气候模式以及耦合气候系统模式的所有研究领域。EMICs 必定会有更大的发展, 从而在地球气候模拟中起到更加重要的作用。

关键字: 简单地球模型, 简单概念性气候模式, 地球系统模式 (EMICs)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.004

Progress in Simple Earth Models

Wang Yong^{1,2}, Liu Suxia¹, Shao Yaping³, Peng Gongbing^{1,4}

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 3 Institute for Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Cologne 50923; 4 China Science Center, International Eurasian Academy of Sciences, Beijing 100107)

Abstract: In this paper, by taking Simple conceptual Climate Models (SCMs) and Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs) as research objects, simple climate models and their application in climate modeling are introduced. Simple conceptual climate models have become effective tools to understand the theory of climate and climate-change law. Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs) cover most of the components in the Earth system, and describe the process and feedback among the various components in more details. Because EMICs have low computational requirements, modeling applications of EMICs cover almost all fields of simple conceptual climate models and CGCMs simulations. EMICs will surely achieve a greater development and play a more important role in the Earth's climate simulation.

Keywords: sample earth model, simple conceptual climate models, EMICs

1 引言

当今的地球, 气候变化无常, 这已为世人瞩目。人们一直不懈地从不同角度去探求其原因, 寻找合适的应对措施。在所有的归因研究方法中, 气候模式和地球系统模式等 (这里统称为地球模型) 是气候变化归因研究的重要工具。

地球模型的共性是在地球系统中的动力、物理、化学和生物过程基础上建立起来的数学方程组 (包括动力学方程组和参数化方案) 来确定其各个部分 (大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈) 的性状, 由此构成地球系统的数学物理模型, 然后用数值的方法

进行求解, 编制成一种大型综合性计算程序, 并通过计算机付诸实现对地球系统复杂行为和过程的模拟与预测的科学工具^[1-2]。

20世纪60年代末, 随着计算机技术的发展, 复杂耦合气候系统模式出现了, 这类模式包括了发展成熟的大气模式、海洋模式、陆面模式、海冰模式等模块, 用以研究包括海洋状况、冰雪过程、土壤温湿等在内的气候系统变化规律, 是目前研究大气、海洋及陆地之间复杂相互作用的主要工具^[1, 3]。这类模式基本出发点在于完善地描述气候系统的各种过程, 模型极其复杂, 计算时间和花费比较大。同时, 根据研究的实际需要, 陆续产生了大量不同种类的模式, 主要有概念模型、能量平衡模式 (EBMs)、辐射对流模式 (RCMs)、统计动力模式 (SDMs) 和地球系统模式 (EMICs) 等。目前, 依据复杂程度的不同, 广

收稿日期: 2013年12月17日; 修回日期: 2014年4月14日
第一作者: 王勇 (1979—), Email: wyong0210@igsrr.ac.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB957802)

泛得到应用的地球模式可分为3类^[4-5]：（1）简单概念性气候模式（SCMs）；（2）耦合气候系统模式（CGCMs）；（3）复杂程度介于前2类之间的中等复杂程度的地球系统模式（EMICs）。

相对于CGCMs来说，概念模型、能量平衡模式、辐射对流模式和统计动力模式属于SCMs，这些模式对气候系统高度整合，强调气候系统的主要气候特征和物理过程，空间分辨率较低，对计算机要求不高，能进行长尺度的模拟，故在地球模拟研究中得到广泛应用，在研究气候变化成因上发挥了重要的作用。在20世纪90年代末期，中等复杂程度的EMICs发展起来的，涵盖了CGCMs中的大多数过程，不过采用相对CGCMs更加简化的方法来表述，这里把这两类模式统称为简单地球模型。本文以简单概念性气候模式、中等复杂程度的地球系统模式为对象，介绍它们的应用以及存在的不足。

2 简单概念性气候模式简介

简单概念性气候模式中的能量平衡模式最先由前苏联的Budyko提出，美国的Sellers在1969年发表了类似的一维能量平衡模式，计算出的气候要素随纬度的分布与实测值吻合得很好。20世纪70年代是动力气候研究的春天，各种类型的模式相继出现，如辐射对流模式、统计动力模式、概念模型等。下文将对部分简单概念性气候模式进行详细介绍。

2.1 能量平衡模式

2.1.1 零维能量平衡模式

零维模式是最简单的能量平衡模式^[6]，把地球看成空间的一点。若 S 为太阳常数， R 为地球半径，单位时间内地球接受的太阳辐射能为 $\pi R^2 S$ 。因为地球总面积为 $4\pi R^2$ ，单位时间单位面积上的能量接收率为 $S/4$ ，不过由于地球反射，实际得到的能量为 $(1-\alpha)\frac{S}{4}$ ，这里 α 为行星反射率。同时，地球以有效平均温度 T_e 向外辐射能量 σT_e^4 ， σ 为Stefen-Boltzman常数。在全球能量平衡条件下，应有关系式：

$$(1-\alpha)\frac{S}{4} = \sigma T_e^4 \quad (1)$$

公式（1）未考虑大气中的辐射过程，如果考虑大气成分（CO₂和水汽等）不仅吸收辐射能，而且发射长波辐射，使大气气温增加，地球表面的气温 T_s 应该比有效辐射温度高。即：

$$T_s = T_e + \Delta T \quad (2)$$

如果进入大气的辐射和射出大气的辐射量不平衡，那么地球气温将发生变化，变化率 $\partial T_s / \partial t$ 可以表示为：

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{c} \left[(1-\alpha)\frac{S}{4} - \varepsilon \tau_a \sigma T_s^4 \right] \quad (3)$$

式中， c 为地球的比热容， τ_a 为大气红外传输率， ε 为比例参数。

2.1.2 一维能量平衡模式

一维模式不再将地球视为一点，引入地球气候系统的主要差异，即纬度变化特征，某一纬度带（ φ ）能量平衡公式为：

$$S_\varphi [1 - \alpha(T_\varphi)] = R^\uparrow(T_\varphi) + F(T_\varphi) \quad (4)$$

式中， $F(T_\varphi)$ 是附加项， $R^\uparrow(T_\varphi)$ 为射出大气的辐射量， S_φ 和 T_φ 都随纬度变化。显然，一维能量平衡模式是零维能量平衡模式的扩展。

将模式中附件项和射出大气的辐射量经过近似和简化，得到如下公式：

$$T_\varphi = \frac{S_\varphi (1 - \alpha_\varphi) + K_0 \bar{T} - A}{B + K_0} \quad (5)$$

再利用逐次迭代法，计算出各个纬度带的气温。

除了以上两种模式外，还可以引入二维（水平或者经向/垂直）的能量平衡模式，另外，还有盒式能量平衡模式（Box-EBM），Box-EBM将大气作为一层，陆面和海洋混合层为一层，海洋中间层和深海为另外两层，和其他EBM模式相比，Box-EBM强调深海内部的热量过程以及不同深度层上的能量交换。

2.2 辐射对流模式

辐射对流模式^[7]（RCM）把大气简化为一个铅直的大气柱，详细考虑大气柱内的辐射过程，通过对流调整来获取大气的垂直温度分布，是一种考虑时间变化的一维模式，此模式建立在以下两个原理上：

（1）在任何高度上的太阳辐射和长波辐射通量与对流热通量保持平衡；（2）因辐射差异引起的温度垂直分布的不稳定由对流调整而达到平衡。

2.2.1 无对流调整的辐射平衡模式

假定大气气温的垂直分布是由辐射收支决定的，则温度变化方程为：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_r = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_s \quad (6)$$

式中，右边第一项、第二项分别代表长波辐射和短波辐射引起的温度变化。

2.2.2 有对流调整的辐射平衡模式

基本假定：（a）在大气层顶，净入射短波辐射等于射出长波辐射；（b）大气的净辐射冷却作用等于大气长波辐射与短波辐射之差；（c）温度垂直递减率小于规定值时，气层维持局地辐射平衡；（d）当气温直减率大于规定值 ε 时，对气温分布进行调整，以达到规定值。

模式方程为:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_a \quad (7)$$

式中, 右边第二项为对流调整项, 当不考虑对流调整时该项为零。在对流层质量守恒条件下有:

$$\frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n dp = \frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r dp \quad (8)$$

在地表面应满足热量平衡方程, 即:

$$\frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n dp = \frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r dp + [S_n - F_s] \quad (9)$$

同时可定义各层的短波辐射加热率和长波辐射冷却率分别为:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_s = \frac{g}{C_p} \frac{\Delta S}{\Delta p} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i = \frac{g}{C_p} \frac{\Delta S}{\Delta p} \quad (11)$$

方程的迭代求解:

$$T^{(n+1)} = T^{(n)} + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n^{(n)} \Delta t \quad (12)$$

当 $|T^{(n+1)} - T^{(n)}| \leq \varepsilon$ 迭代结束, 得到垂直温度廓线。

2.3 统计动力模式

将大气沿着纬度圈进行平均, 用纬度和高度组成的网格点来表示大气, 就构成了纬向平均动力模式 (ZADM), 该模式包括基本的动力和物理过程, 是介于二维大气模式和三维大气模式之间, 连接二维和三维模式的桥梁, 因此这类模式在气候模拟的研究中起着重要的作用。纬向平均模式的主要困难是涡旋输送的参数化。由于涡旋输送的处理是建立在统计近似的基础上, 所以这类模式也常称为统计动力模式^[6]。

一般是对运动方程中的涡旋输送量进行参数化, 基于经向温度梯度可以驱动大气斜压波的概念, 将涡旋热通量写成:

$$\langle v'T' \rangle = -K_T \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial y} \quad (13)$$

把涡旋动量通量写成:

$$\langle u'v' \rangle = -K_m \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \quad (14)$$

式中, K_T 和 K_m 分别为热量和动量传输系数, 可以视为常数或为温度梯度的函数, 纬向平均量用 $\langle \rangle$ 表示。涡旋输送的重要性实际上在于通过涡旋热通量和涡旋动量通量将大气积蓄的斜压和正压不能稳定能量释放出来, 这必然对大气环流和气候变化发生重要的作用。

2.4 各模式之间的关系

通过图1来表示简化气候模式间及其与CGCMs之间的关系, 图中三角锥的3条边代表模式的3个基本要素,

即辐射、地面过程和动力学。垂直方向表示模式的复杂程度, 越接近锥体顶端表示复杂程度越大。当到达顶端时, 模式已有了足够的分辨率, 所有因素都被正确而合理地考虑到模式里去了, 达到一个逼真的气候模式。在锥体的底部是最简单的气候模式, 它仅仅考虑一个主要的过程。同时, 锥体底部被认为是空心的, 因为在锥体的各边之间基本上没有相互作用。沿着金字塔越往上, 各主要过程之间的相互作用越大。

3 简单概念性气候模式的应用现状

简单概念性气候模式在气候模拟研究中应用广泛, 在研究气候变化成因上发挥了重要的作用。从第一、二次IPCC报告十几个气候模式参加评估, 到第三次报告34个模式被引用, 再到第四次和第五次评估报告更多模式被采用, IPCC历次报告所引用模式的数量在不断增加, 其中, 简单气候模式 (SCM) 一直未缺席 (IPCC第四次和第五次报告采用EBMs简单气候模式的结果)。利用简单气候模式能够估测由于热膨胀导致的全球平均温度的变化和海平面的上升, 此类模式以一套全球或者半球框的形式代表海洋一大气系统, 进而利用能量平衡方程预测全球地表温度, 能够与地球生物化学圈简化模式耦合, 而可以快速估测气候对各种气候情景的响应^[9-10]。Gilliland^[11]用零维能量平衡模式, 考虑在太阳辐射变化、温室气体以及火山气溶胶强迫情况下, 得出太阳活动变化、CO₂变化可以解释北半球气候变化中低频变化的93%左右。Schlesinger等^[12]也用类似的模式模拟得到温室气体、太阳活动和平流气溶胶三者可以解释1886—1985年全球气温变化的60%。毕鸣等^[13]用海气耦合的能量平衡模式研究了130年来全球气温的变化, 考虑温室气体、太阳活动、火山活动及ENSO的情况下, 模拟结

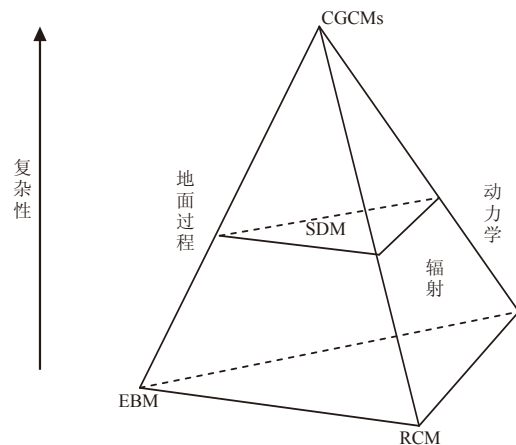


图1 气候模式的三角锥^[6]
(EBM: 能量平衡模式; RCM: 对流辐射模式; SDM: 统计动力模式; CGCMs: 耦合气候系统模式)

果与观测序列的相关系数达0.884,可解释77.8%的温度变化。Crowley^[14]利用EBM开展的研究指出,太阳辐射和火山活动可以解释工业化以前北半球气温低频变化的41%~64%,20世纪变暖主要来自温室气体的增加,自然变率的贡献只占25%。Zhao等^[15]用一维能量平衡模式研究下垫面改变对降水和温度造成的影响,取得一定的成功。王绍武等^[16]利用简化的能量平衡模式,综合考虑太阳、火山、温室气体的辐射效应,发现EBM能够较好模拟近千年的全球平均气温序列,能够成功再现中世纪暖期、小冰期和20世纪变暖等特征。Bertrand等^[17]利用二维纬向平均模式所开展的研究,同样表明太阳和火山活动可以解释小冰期和中世纪暖期,而20世纪后期的加速变暖,则只有温室气体可以解释;1850年以后气温的合理模拟,还需要考虑人为硫酸盐气溶胶强迫和森林采伐的影响。刘玉芝等^[18]利用一维辐射对流气候模式,详细研究了云量、云光学厚度以及云高等要素的变化对大气顶和地面太阳短波辐射和红外长波辐射通量以及云的辐射强迫的影响。丁仲礼等^[19]就晚更新世东亚古季风变化方面建立起一个概念模型,模型考虑了太阳辐射变化、中高纬、青藏高原、边缘海以及热带海洋等因素,得出东亚古季风主要由全球冰量通过极地冰盖扩张、边缘海变化以及青藏高原冰川作用3个过程来影响的,太阳辐射变化的直接控制作用相对较小,较合理地解释了黄土所记录的古季风变化特征。

从上述模拟来看,简单概念性气候模式涵盖了主要气候特征和主要物理过程,如热力动力过程、辐射对流过程或关键反馈过程等,同时模式对计算机要求很低,能够进行长时间的模拟试验。不过,简单概念性气候模式通常采用纬向平均,最多二维,只能反映大区域的一个平均过程,空间分辨率不高。随着当前气候变化动力机制逐渐明确、考虑更多的物理过程的情况下,这种模式存在一定的局限性,体现在难以给出气候变化的高分辨率空间特征,同时还不包含气候系统内部变率过程。如果仅考虑“简单”背景下的研究,其研究结果具有一定的借鉴意义。

4 中等复杂程度的地球系统模式简介

中等复杂程度的地球系统模式(EMICs)于20世纪90年代末期建立,它一般具有二维(两个水平维向或垂直和一个水平维向)空间分辨率,能够描述包括人类和自然相互作用的自然地球系统,EMICs涵盖了CGCMs中的大多数过程,不过采用相对CGCMs更加简化的方法去表述,与CGCMs模拟的分辨率也有差别。EMICs的复杂程度介于简单概念性气候模式和

CGCMs模式之间,整合化程度没有简单概念性气候模式高,但比CGCMs要高,所包含的过程和描述较CGCMs更加简化,过程比简单概念性气候模式要多,细节描述也较之更加丰富,兼顾了简单概念性气候模式和CGCMs的部分优点(图2)。不难看出,相对于CGCMs模式,EMICs也是一种简化气候模式。

EMICs中的大气模块主要采用的是能量水汽平衡模式、准地转模式、统计动力学模式和大气环流模式。大气模块的分辨率通常比较低,大多采用纬向平均和能量水汽平衡模式。由表1可见,EMICs在大气模块构成和简化程度方面存在明显的差异,根据这种差异,模式可以分为两类:一类是基于CGCMs进行大气或者海洋过程的简化,使其总体的复杂程度较高,对气候过程及反馈描述比较完善,对气候过程描述比较细腻,如德国汉堡大学Planet Simulator模式^[21-22];而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(千年范围乃至冰期间冰期循环)气候变化的研究中有重要作用,如CLIMBER-2的大气模块是二维统计动力学模式。从模式的复杂程度上看,前者更像是简化了的CGCMs,而后者则更接近于简单概念性气候模式。综述所述,从整体上简化了EMICs的复杂程度,降低了对计算能力的要求,有助于在古气候资料的强迫下模拟出不同于今天的长尺度古气候状态,充分显示出了EMICs模式的优点;但EMICs的分辨率比较粗糙,对地球系统细节的描述也相当简化,因而模拟无法达到CGCMs的高度。

5 中等复杂程度的地球系统模式的应用现状

当前EMICs在气候研究中得到广泛的应用,虽然其对气候系统的描绘不如CGCMs细致,但是EMICs具有与简单概念性模式相当的计算效率,所以EMICs主要注重长期气候模拟,以足够的细节来刻画地球系统的长期演化。

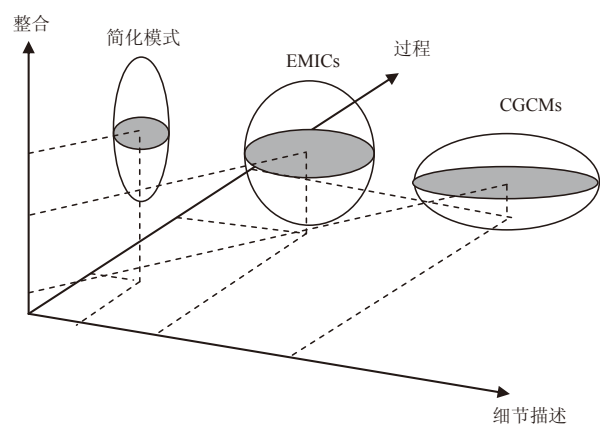


图2 EMICs的图解定义^[20]

表1 主要EMICs及相关介绍^[5]

模式名称	大气组件模式	研究机构
MoBiDiC	纬向平均准地转模式	比利时Georges Lemaitre天文与地球物理研究所
MIT IGSM	2D统计一动力	美国麻省理工学院
Bern 2.5D	纬向平均、能量水气平衡	瑞士伯尔尼大学
Bremen	能量平衡	德国Bremen大学海洋环境科学中心
Climber-2	统计一动力	德国波茨坦气候影响研究所
ECBilt-CLIO	准地转谱模式	荷兰大气研究所
C-Goldstein	简单能量水气平衡	英国南安普敦国家海洋中心
IAP RAS	3D大尺度动力	俄罗斯科学院大气物理Obukhov研究所
ISAM-2	能量水气平衡	美国伊利诺斯大学大气科学系
Planet Simulator	三角切断谱模式	德国汉堡大学气象学院
PUMA	三角切断谱模式	德国汉堡大学气象学院
MPM-2	能量水气平衡	加拿大McGill大学大气和海洋科学系
UVic	能量水气平衡	加拿大维多利亚大学
GENIE	3D谱/2D能量水气平衡	英国布里斯托大学/东英格兰大学等
LLN 2-D	纬向平均准地转模式	比利时鲁汶大学

目前,国际古气候模拟比较计划(PMIP)已经历了PMIP1(1991—2001年)和PMIP2(2002—2007年)两个阶段,并正在开展第三阶段PMIP3(2008年至今)的研究。PMIP3阶段致力于利用地球系统模式对末次盛冰期和中全新世(距今最近的、最有代表性的寒冷和温暖的气候状态)的气候进行模拟。在古气候模拟的研究方面,产生了不少研究成果。Gallce等^[23]和Berger等^[24]的研究表明,气候模式LLN-2D在变化的太阳辐射强迫下,当指定的常量CO₂浓度低于220×10⁻⁶后,能够重现观测到的冰期—间冰期循环;而固定轨道参数,让CO₂依据Vostok重建记录变化,则LLN-2D无法再现冰期—间冰期循环^[25]。EMICs对冰期的开始和结束也进行了各种试验,Yoshimori等^[26]利用Uvic模式进行了末次冰期结束对轨道参数和CO₂强迫的敏感性试验,Meissner等^[27]使用UVic研究了植被对末次冰期开始的作用,Kageyama等^[28]使用CLIMBER-2探讨了末次冰期的开始特别是各种不同冰川的反馈作用。Wang等^[29]使用MPM-2对冰期气候突变和D-O震荡的机制进行了深入探讨,发现北大西洋经向翻转流(AMOC)状态的快速转换导致冰期气候突变,这一突变被海冰面积的扩张进一步强化。

另外,对历史、当今、未来气候模拟的应用研究,在IPCC AR4中,EMIC已较前几次评估报告被更多人使用并得到深入的评估,在海平面上升归因分析上,利用一个低分辨率CGCM和数个以气候敏感性最佳估计值3℃为基础的EMICs进行推估,得出海平面上升的促成因素是海洋热膨胀,并对未来进行了预估^[9]。在2013年出版的IPCC AR5中,EMICs在古气候模拟、未来气候预估等方面发挥了重要的作用^[10]。Loutre等^[30]使用LLN-2D对下次冰期的开始也进行了

探讨,研究了未来的气候及其对不同CO₂情景的敏感性,发现目前的气候很可能经历较长的间冰期(大约5万年),而在未来的6万年和10万年将可能出现较小和较大的冰期。Bertrand等^[31]和Bauer等^[32]分别使用MoBiDiC和CLIMBER-2对过去1000年的各种气候强迫年进行了评估,与高分辨率的重建数据进行比较,发现火山和太阳辐射作为自然强迫,是工业革命时期以前的主要气候强迫,能够很好地解释中世纪暖期和小冰期。但自然强迫不足以

产生近代以来的全球变暖,人类活动排放的温室气体是造成全球变暖的主要强迫,而且研究表明所有的气候强迫对模拟过去千年气候变化都是重要的。Petoukhov等^[33]对目前气候和CO₂加倍模拟的EMICs进行比较,充分显示EMICs对目前气候的模拟非常接近观测结果,而且EMICs模拟误差均在CGCMs误差的范围之内。Wang等^[34]和Marsh等^[35]分别使用MPM-2和GENIE对温盐环流进行研究,发现温盐环流这个洋流系统最少有两种稳定的气候状态,其中一种是目前所出现的,即环流非常强劲和向极地方向传输大量热能,从而带来温暖气候的状态;另一种则是环流非常微弱,甚至接近于停止的状态,从而带来寒冷的气候状态。数值模拟试验还显示,这两种状态之间是可能出现相互转化的。另外,利用EMICs对陆地、海洋、全球碳循环等多个方面的问题也进行了探讨。

结合当前EMICs的应用和发展,可见EMICs应用范围很广,模拟能力很强,未来如在下面几个方面取得突破,必定会有更大的发展,从而在地球系统模拟中起到更加重要的作用:(1)加入人类活动、考虑固体地球过程和太阳活动的影响,使EMICs成为真正意义上的地球模式;(2)注重气候突变机理的研究,区分自然和人为因素在突变中的相对贡献;(3)改进模式算法,提高硬件设备的运算能力,使其耗费更少的计算时间,能够进行更长时间尺度上的模拟研究。

6 结论

本文介绍了以简单概念性气候模式(SCMs)和中等复杂程度的地球系统模式(EMICs)为代表的简单地球模型,它们在气候模拟方面都有不凡表现。简单概念性气候模式将对气候变化的研究拓展到了古气

候领域, 已经成为了解气候理论和气候变化规律的有效工具。EMICs涵盖了地球系统的大多数组成部分, 对各部分之间的反馈和过程描述比较详细, 同时计算要求比较低, 使其应用几乎覆盖了SCMs以及耦合气候系统模式(CGCMs)的所有研究领域。EMICs必定会有更大的发展, 从而在地球气候模拟中起到更加重要的作用。

EMICs也有其自身的缺点, 分辨率比较低, 对地球系统细节的描述也相当的简化, 尚不能达到CGCMs的高度。但是, EMICs能够刻画出气候变化的大体特征, 更能进行CGCMs在目前计算条件下无法比拟的长期气候变化模拟。2005年, 德国汉堡大学完成了Planet Simulator模式, 此模式属于典型的EMICs模式, 由全球大气环流模式、海洋—海冰模块和陆地土壤—生物圈模块组成, 以并行计算机为硬件支撑, 支持地球和类地球行星的气候动力学数值试验, 同时还具备结构简单、可视化界面和开放源代码便于改造等特点, 依托此模式使改进模式、模拟长尺度的古气候和开展敏感性试验成为了可能。

EMICs从出现到发展到今天不过短短的十几年, 尚处于发展的初始阶段, 随着计算机硬件水平的提高、模式的不断改进和对气候系统认识的不断加深, 在未来的几十年或者更长的时期内, 对气候时间尺度(千年甚至更长)的气候变化的研究, EMICs很可能依然是比较理想的选择。今后一段时间, 如何利用EMICs就一些重要驱动因子(如天文和地球因子)进行敏感性试验, 如何采用混沌理论研究其非线性问题^[36], 如何改进对重点区域和重点过程的模拟, 将是气候数值模拟领域面临的重要课题。

参考文献

- 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- 《10000个科学难题》地球科学编委会. 10000个科学难题·地球科学卷. 北京: 科学出版社, 2010.
- 周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于LASG/IAP大气环流谱模式的气候系统模式. 气象学报, 2005, 63(5): 702-715.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2001.
- 张冉, 李力, 郭庆春, 等. 古气候研究中气候模式的发展与应用. 干旱区研究, 2007, 24(5): 704-711.
- 李崇银. 气候动力学引论(第二版). 北京: 气象出版社, 2000.
- 于革. 古气候动力模拟. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 曹鸿兴. 气候模式与气候模拟. 气象, 1987, 13(11): 3-6.
- IPCC. IPCC fourth assessment report (AR4). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- IPCC. IPCC fifth assessment report (AR5). Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Gilliland R L. Solar, volcanic and CO₂ forcing of recent climatic changes. Climate Change, 1982, 4: 11-13.
- Schlesinger M E, Ramalakutty N. Implication for global warming of intercycle solar irradiance variations. Nature, 1992, 360: 330-333.
- 毕鸣, 王绍武, 李晓东. 130年来全球气温变化的模拟. 第四纪研究, 1997(1): 21-27.
- Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. Science, 2000, 289: 270-277.
- Zhao M, Zeng X. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse. Adv Atm Sci, 2002, 19: 45-63.
- 王绍武, 谢志辉, 蔡静宁, 等. 近千年全球平均气温变化的研究. 自然科学进展, 2002, 12(11): 1145-1149.
- Bertrand C, Loutre M F, Crucifix M, et al. Climate of the last millennium: a sensitivity study. Tellus, 2002, 54A: 221-244.
- 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 一维辐射对流模式对云—辐射强迫的数值模拟研究. 大气科学, 2007, 21(3): 486-493.
- 丁仲礼, 刘东生. 晚更新世东亚古季风变化动力机制的概念模型. 科学通报, 1998, 43(2): 122-132.
- Claussen M. Earth system models // Ehlers E, Krafit T, eds. Understanding the Earth system: compartments, processes and interactions. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 2000.
- Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: Green planet and desert world. Meteorologische Zeitschrift, 2005, 14(3): 305-314.
- Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: towards a user friendly model. Meteorologische Zeitschrift, 2005, 14(3): 299-304.
- Gallee H, Ypersele J P, Fichefet T, et al. Simulation of the last glacial cycle by a coupled, sectorially averaged climate-ice sheet model II. Response to insolation and CO₂ variation. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(15): 713-715.
- Berger A, Loutre M F, Gallee H. Sensitivity of the LLN climate model to the astronomical and CO₂ forcings over the last 200kyr. Climate Dynamics, 1998, 14: 615-629.
- Loutre M F, Berger A. No glacial-interglacial cycle in the ice volume simulated under a constant astronomical forcing and a variable CO₂. Geophysical Research Letters, 2000, 27(6): 783-786.
- Yoshimori M, Weaver A J, Marshall S J, et al. Glacial terminations: sensitivity to orbital and CO₂ forcing in a coupled climate system model. Climate Dynamics, 2001, 17: 571-588.
- Meissner K J, Weaver A J, Matthews H D, et al. The role of land surface dynamics in glacial inception: a study with the Uvic Earth System Model. Climate Dynamics, 2003, 21: 515-537.
- Kageyama M, Charbit S, Ritz C, et al. Quantifying ice-sheet feedbacks during the last glacial inception. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L24203, doi: 10.1029/2004GL021339.
- Wang Z, Mysak L A. Glacial abrupt climate changes and Dansgaard-Oeschger oscillations in a coupled climate model. Paleoclimatology, 2006, 21: PA2001.
- Loutre M F, Berger A. Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long Interglacial. Climatic Change, 2000, 46: 61-90.
- Bertrand C, Loutre M F, Crucifix M, et al. Climate of the last millennium: a sensitivity study. Tellus, 2002, 54A: 221-244.
- Bauer E, Claussen M, Brovkin V. Assessing climate forcings of the Earth system for the past millennium. Geophysical Research Letters, 2003, 30(6): 1276-1280.
- Petoukhov V, Claussen M, Berger A, et al. EMIC intercomparison project (EMIP-CO₂): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO₂ doubling. Climate Dynamics, 2005, 25: 363-385.
- Wang Z. Two climatic states and feedbacks on thermohaline circulation in an Earth system model of intermediate complexity. Climate Dynamics, 2005, 25: 299-314.
- Marsh R, Yool A, Lenton T M, et al. Bistability of the thermohaline circulation identified through comprehensive 2-parameter sweeps of an efficient climate model. Climate Dynamics, 2004, 23: 761-777.
- Shao Y, Peng G, Leslie L M. The environmental dynamic system // Peng G, Leslie LM, Shao Y. Environmental modelling and prediction. Berlin: Springer-Verlag, 2002.