

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.166

杨世莉, 董文杰, 丑洁明, 等. 对地球系统模式与综合评估模型双向耦合问题的探讨 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (4): 335-342

Yang S L, Dong W J, Chou J M, et al. Research progress for the bidirectional coupling of the Earth system model and integrated assessment model [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (4): 335-342

## 对地球系统模式与综合评估模型双向耦合问题的探讨

杨世莉<sup>1</sup>, 董文杰<sup>2</sup>, 丑洁明<sup>3</sup>, 刘昌新<sup>4</sup>

1 北京市气象探测中心, 北京 100089;

2 中山大学大气科学学院, 广州 510275;

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

4 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190



**摘要:** 概述了地球系统模式和综合评估模型在研究人类活动与气候变化问题上的优势和劣势, 明确了将二者进行双向耦合的必要性, 客观分析了综合评估模型耦合过程中存在的主要问题, 同时系统总结了国际和国内解决耦合难点的主要方法和最新进展, 最后分析和讨论了双向耦合模式的不确定性来源和解决方法, 为我国进行地球系统模式与综合评估模型双向耦合提供新思路和方法。

**关键词:** 综合评估模型; 地球系统模式; 双向耦合; 人类活动; 气候变化

### 引言

气候变化已经不再仅仅局限在气候系统, 而是深入到能源、政治、经济等人类活动领域, 且随着全球社会经济的发展, 人类活动与气候系统的相互作用会进一步加强。地球系统模式和综合评估模型是研究人类活动与气候变化关系的两类主要工具。前者描述了气候圈层以及圈层之间复杂的动力学、热力学和生物化学作用过程, 经历了从大气环流模式、大洋环流模式、海-气耦合模式、海-陆-气耦合模式, 以及海-陆-气-冰耦合模式的发展, 其在研究气候变化的机理、归因以及预估等方面具有非常大的优势<sup>[1-3]</sup>; 而后者整合了能源、经济、政策、气候变化, 以及气

候变化的影响等过程, 在研究有关气候变化的政策、影响方面具有明显的优势<sup>[4-6]</sup>。

但是随着人类社会与自然系统相互作用关系的加强, 地球系统模式和综合评估模型在研究人类社会系统与自然系统相互作用关系方面逐渐凸显出明显的不足。例如, 即使目前发展最完善的耦合地球系统模式, 也没有包含完整的人类经济活动模块和气候变化对社会经济的影响模块, 研究者们只是用碳排放(或CO<sub>2</sub>)代表人类活动, 并将其作为外强迫条件来研究人类主要的经济和土地利用活动对气候变化的影响, 但是这不能反映政策、技术进步等对气候变化的影响, 也不能完整地体现气候变化对人类社会各部门影响的反馈作用<sup>[7]</sup>; 同样对于综合评估模型来说, 虽然整

收稿日期: 2018-11-26; 修回日期: 2019-02-27

资助项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2016YFA0602703); 国家自然科学基金(41605036)

作者简介: 杨世莉, 女, 工程师; 董文杰(通信作者), 男, 教授, dongwj3@mail.sysu.edu.cn

合了能源、经济、气候变化和气候变化影响的过程，但由于其气候变化模块过于简单，因而无法详细地描述气候系统各个圈层和圈层间的动力和热力过程，这使得综合评估模型在气候变化的研究方面有较大的不确定性<sup>[8-9]</sup>。

另外，尽管利用地球系统模式进行气候变化预估所使用的未来碳排放情景是由综合评估模型根据描述的未来经济发展水平或条件预估的，但是地球系统模式和综合评估模型的发展历来都是各自独立的。总体来说，地球系统模式的模拟和预估结果被 IPCC 第一工作组所采用<sup>[10]</sup>，而综合评估模型的研究结果更多地服务于 IPCC 第三工作组<sup>[11]</sup>。但这种假设社会经济发展不受气候变化影响得到的经济情景，其本身就存在逻辑的不自洽问题，而事实上这也导致在有些问题上第一工作组和第三工作组无法在同一框架下取得一致的结论。

因此在未来的研究中，非常有必要将地球系统模式和综合评估模型进行双向耦合，刻画自然系统与人类社会经济交互影响机制，发展更为综合的人-地系统模式。另外，从地球系统模式和国内外的各种重大研究计划的发展历程中，也可以看出将地球系统模式和综合评估模型进行双向耦合的必要性。

在早期国际上推出的重大研究计划中，大多是针对地球系统中单个圈层或者自然系统，如 20 世纪 80 年代初国际上成立了世界气候研究计划 (WCRP)，开始着手组织、协调和发展与气候变化有关的观测系统和模式等，但这主要局限在对气候系统本身的研究。20 世纪 80 年代末到 90 年代，国际上又相继建立了国际地圈生物圈计划 (IGBP)，国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP) 和国际生物多样性计划 (DIVERSITAS)，开始关注和研究人类活动与地球生态和环境等之间的关系。在以上 4 个计划的推动下，有关气候变化、生态环境等的研究取得了重大的进展，尤其人们开始意识到气候变化与环境 and 生态等之间存在着密切的相互作用，而对单个圈层或者是自然系统分开进行研究都有一定的局限性，这种突破性的

认识又推动了 21 世纪初地球系统科学联盟的成立 (ESSP)，ESSP 由 IGBP、DIVERSITAS、IHDP 和 WCRP 组成，开始重视研究全球变化和地球系统不同圈层相互关系以及全球变化对未来全球和区域可持续发展的影响等<sup>[12]</sup>。目前国际上又提出了为期 10 年的未来地球 (Future Earth) 研究计划，该研究计划以“动态地球”“全球发展”和“向可持续发展的转变”为 3 个主要的研究目标，通过强调全球环境和人类的福祉和发展，重点关注自然系统和人类系统的相互影响。

在国内，早在 20 世纪 90 年代，针对全球变化大背景下中国生存环境和区域发展的特征，以叶笃正先生为代表的科学家就已经提出了“有序人类活动”的框架概念和确定有序人类活动过程的方法<sup>[13]</sup>。有序人类活动是指通过合理安排和组织，使自然环境能在长期、大范围不发生明显的退化，甚至能持续好转，同时又能满足当时社会经济发展对自然资源和环境需求的人类活动。而将人类活动过程子模式和气候系统模式进行耦合是确定有序人类活动方案的有效方法之一<sup>[14-15]</sup>。通过耦合建立的人-地关系，就可以构成地球系统各圈层的动力过程与人类圈的耦合模式，并利用其分析地球系统内部变化的机理和经济发展等对环境的敏感性，从而预测未来的可能变化趋势，人-地系统模式的基本框架见图 1。

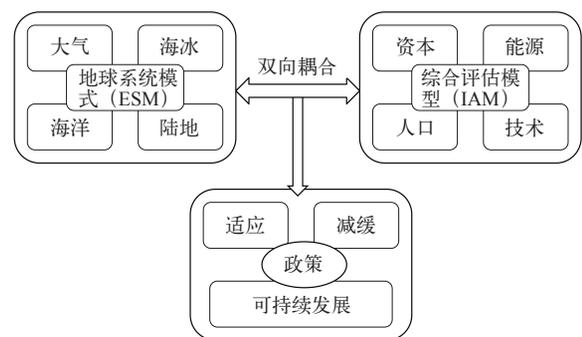


图 1 人-地系统模式框架图

Fig. 1 The framework of human-Earth system model

综上所述，无论是从深入探索人类活动与自然系统相互作用关系的角度，还是从国际或国内重大科学研究计划的角度，都有必要将地球系统

模式和综合评估模型进行双向耦合。但是到目前为止, 我们针对双向耦合的研究还比较少, 大部分研究还是主要针对人类活动与自然系统的单项作用过程, 例如土地利用(土地覆盖)和陆地生态系统变化、人类活动与气溶胶、人类活动与碳循环过程以及人类活动与气候变化的集成研究等<sup>[16-20]</sup>。造成这种现状的原因主要在于地球系统模式和综合评估模型在建模理论和思想、程序实现等方面遵循的是两套独立的方法, 不能直接将两类模式进行双向耦合。而要完成双向耦合的工作需要协调和克服模式之间的各种差异, 是一项非常庞大和具有挑战性的工作。

## 1 地球系统模式和综合评估模型双向耦合的难点

地球系统模式是以气候系统模式为雏形发展起来, 主要是为了研究全球变化引起的自然系统各个圈层的变化和机理, 经历了以地球流体(大气、海洋)为主体的物理气候系统模式阶段, 即基础阶段, 目前正处于增加了生物地球化学和人类活动的过渡发展阶段<sup>[21]</sup>。而综合评估模型是以经济模型为基础, 逐步建立经济总量、产业结构、能源结构与温室气体排放的关系, 建立温室气体减排的经济成本模块, 并通过构建损失函数在经济增长模型中纳入气候变化影响, 最终形成的用于评估减缓与适应气候变化政策的评估工具<sup>[22]</sup>。由于地球系统模式和综合评估模型一直以来都是各自独立发展的, 因此将两类模式直接进行耦合是具有一定难度的, 这种难度具体体现在以下两个方面。

### 1.1 建模思想和理论差异

地球系统模式以描述地球系统不同圈层(大气、海洋、陆地、冰雪等)的动力、物理、化学和生物等过程的数学方程组(物理模型)为基础, 在大型计算机上通过程序化完成和实现对这些方程组的数值求解, 从而确定不同时刻各个圈层主要要素的变化规律。由于地球系统模式涉及多圈

层、多尺度耦合、各种复杂的参数化过程以及大规模的计算和海量数据的诊断与处理, 因此其发展面临日益严峻的挑战。

与地球系统模式的建模基础和理论不同, 社会经济模式没有具体的物理定律作为基础, 对社会系统中人类行为的模拟受到很多因素的限制, 而这些因素往往是由规范和制度构成的, 具有一定的偶然性和社会性。针对不同层次的研究对象, 社会经济模型采用的建模理论和基础也不同, 例如个人、家庭等属于微观级别或层次上的个体, 其发展涉及心理学、神经学、社会学等领域, 而描述个人和家庭等行为的理论包括理性选择、有限理性选择、认知构架等; 社区、城市、政府和非政府组织等属于中间级别水平或层次上的个体, 这些个体的发展涉及社会学、政治学和城市研究等, 描述这些个体行为的理论包括战略决策、公共选择等; 而跨国公司、贸易网、政府间组织等, 涉及经济学、管理科学和跨国家政治学等, 描述其行为的理论包括理性选择、战略决策和成本效益分析等<sup>[23-24]</sup>。气候变化综合评估模型一般是基于微观经济学原理构建的成本效益分析模型。关注经济总量、产业结构、能源结构以及碳排放等变化趋势。

社会经济模型的理论有别于基于物理、化学、生物等理论的地球系统模式, 因此从建模的基础和理论来说, 不能将两类模式直接进行双向耦合。而解决理论基础的关键是要寻找自然系统与社会经济系统交互影响的机理。

### 1.2 时间和空间尺度差异

地球系统模式的高度数值化和程序化, 造成其根据一定的时间步长进行积分运行的特点, 其时间分辨率可以从分钟到世纪, 例如, 一般地球系统模式中大气分量模式的积分步长为 30 min, 可以按照天、月、年等的频率输出计算结果。另外, 离散化是数值求解偏微分方程的一个基本方法, 在地球系统模式的程序中, 地球表面可离散化为若干被称为格点的小区域, 因此, 地球系统模式的空间尺度可以从局地到全球, 空间分辨率可以

细化到几十公里。目前最先进的地球系统模式可以计算水平几十公里的气候变化。

相对来说,综合评估模型则不具备高的时间和空间分辨率特征,综合评估模型运行的时间步长较长,一般为5~10 a,而空间分辨率则以行政单元为基础,例如国家或省级区域等。

鉴于地球系统模式和综合评估模型存在以上两类最重要的差异,我们不能将两种模式直接进行耦合,而是需要根据所研究的问题探索和发展适宜的耦合方法。另外,两个模式耦合过程中的模拟稳定性也是需要重点关注的问题之一。

## 2 地球系统模式和综合评估模型双向耦合方法探索

综合评估模型和地球系统模式进行链接的关键参数是反映人类经济活动的碳排放,地球系统模式根据社会经济模型传递的碳排放进行碳在大气、陆地和海洋的分配和循环过程。因此,社会经济模型传递给地球系统模式的碳排放必须符合地球系统模式所需的时空分布特征。

另外,鉴于复杂而庞大的地球系统模式,需要保证新构建的双向耦合模式也具备可靠性、灵活性、可扩展性和可移植性等特点。最简单可靠的思路是修改经济模型来适应地球系统模式的算法、运行特点和输出输入数据格式等,然后将地球系统模式中读入碳排放数据的地方作为两个模式的接口,完成两个模式的双向耦合,而不是再重新修改地球系统模式的特点来适应经济模式的需求。

表1给出了目前国际和国内主要的双向耦合模式,从具体的实现技术看,目前学者们主要探索了以下3种方法进行耦合。

### 2.1 建立基于格点的社会经济模型

与传统基于区域的建模方法不同,根据地球系统模式的建模思路,建立基于一定格点分辨率的经济模型。例如 Navarro 等<sup>[25-26]</sup>根据人口与碳排放的关系,建立了基于格点( $1^\circ \times 1^\circ$ )的人口动力模型(POPEM),并且将其与美国国家大气研究中心(NCAR)的地球系统模式CESM成功进行单向耦合。POPEM和CESM的基本耦合方法为POPEM首先根据队列模型进行区域人口变化的预估,然后根据各个国家的人均碳排放,计算基于格点的历史碳排放,通过格点碳排放将两个模式进行耦合。耦合了POPEM的地球系统模式不仅可以模拟不同气候圈层的各个变量,如气温、降水等,而且能够模拟不同国家或者区域的人口和碳排放量等。

### 2.2 对基于全球或区域的经济模型计算的碳排放进行时空插值

这种方法不需要构建新的经济模型,而是将已经发展完善基于全球或区域经济模型计算的碳排放进行时空插值,使得其符合地球系统模式中碳排放的输入规则。具有代表性的研究如:Yang 等<sup>[27-28]</sup>根据历史碳排放的时空分布特征,定义了能反映碳排放时空分布的无量纲因子,并且将其作为连接动态气候变化经济学综合评估模型(DICE)和地球系统模式BNU-ESM的桥梁,成

表1 国内和国际具有代表性的双向耦合模式信息

Table 1 The information of representative bidirectional coupling models at home and abroad

模式名	单位	作者	地球系统模式(分辨率)	综合评估模型	耦合方式
*	卡斯蒂利亚-拉曼查大学	Navarro 等 <sup>[25-26]</sup>	CESM ( $1^\circ \times 1^\circ$ )	POPEM (人口)	单向
BNU-HESM	北京师范大学	Yang 等 <sup>[27-28]</sup>	BNU-ESM ( $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ )	DICE (人口、技术等)	双向
iESM	加州大学	Collins 等 <sup>[29]</sup>	CESM ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ )	GCAM (能源、土地利用等)	双向
MIT-IGSM	麻省理工大学	Sokolov 等 <sup>[30]</sup>	IGSM ( $4^\circ \times 4^\circ$ )	EPPA (能源、农业、健康等)	双向

\* 表示该模式由POPEM和CESM模型单向耦合组成的新模式,但未命名。

功构建了人-地系统模式 BNU-HESM<sup>[27]</sup>。BNU-HESM 运行的流程为: DICE 根据人口、技术等外生变量计算全球的碳排放, 然后根据无量纲因子进行时间和空间插值, 得到具有一定时间分辨率(月)和格点分辨率(约  $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ )的碳排放通量数据, 地球系统模式 BNU-ESM 根据碳排放通量数据进行基于格点的气候变化模拟或预估。另外, BNU-HESM 中也加入了简单的气候变化影响模块, 因此 BNU-HESM 算是经济模式和地球系统模式双向耦合的成功案例。BNU-HESM 能够根据给定的人口增长率、技术进步等外生因子的变化, 模拟或者预估这些外生经济条件下的碳排放和相应的气候变化<sup>[28]</sup>。BNU-HESM 的缺点在于其经济模型和气候变化影响模块较为简单, 不能完全反映复杂的社会系统和气候变化对经济的反馈过程。

### 2.3 建立灵活的区域-格点-区域的外部耦合模块

相对前两种方法, 通过建立基于区域-格点-区域的外部耦合模块将两类模型进行双向耦合的方法具有更大的灵活性和可移植性。例如 Conllins 等<sup>[29]</sup>采用这种方法将全球变化评估模式 (GCAM)<sup>[31-32]</sup>和全球土地利用模式 (GLM)<sup>[33]</sup>与 CESM 进行双向耦合, 发展了 iESM。相比原来的 CESM, iESM 增加了综合评估模块 (IAC), IAC 又包括 5 个子模块, 分别为原始的 GCAM 和 GLM 模式, 以及负责模式之间信息交换和传递的子模块 IAC2GCAM, GCAM2GLM 和 GLM2IAC。例如 IAC2GCAM 用来将空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的结果分配到 14 个区域供 GCAM 运行, 而 GCAM2GLM 则将具备 14 个区域空间分辨率的 GCAM 结果插值到  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的格点上供 GLM 模式使用, 除了负责格点-区域之间的信息传输之外, 这 3 个子模块还控制模式之间耦合的时间步长。iESM 可以用来研究气候变化对能源生产, 农业和土地利用等的影响<sup>[34]</sup>。由 Sokolov 等<sup>[30]</sup>开发的 MIT-IGSM 模式也是利用类似的方法将排放预估和政策分析模型 (EPPA) 和中等复杂

程度的地球系统模式 (IGSM) 进行了双向耦合。

## 3 地球系统模式和综合评估模型双向耦合的不确定性

尽管双向耦合模式在逻辑上解决了气候变化与社会经济的联动关系, 更为完善地刻画了人类活动与自然系统相互作用过程, 但是两类模式的双向耦合也带来了新的不确定性。总体来说, 除去综合评估模型和地球系统模式本身的不确定性之外, 双向耦合模式的不确定性主要来源于自然系统向社会经济系统的反馈过程, 即气候变化的影响过程。气候变化的影响过程涉及不同的经济部门或生态服务系统, 并且具有明显的区域差异, 因此如何准确衡量气候变化在全球或区域上的影响是一项十分困难的工作。目前主要利用损失函数反映气候变化对经济活动的影响, 但是损失函数缺乏确凿的理论支持和实证研究<sup>[35]</sup>, 尤其是无法详细刻画极端气候的经济影响机理以及气候变化带来的非线性增长的经济损失关系等。未来的研究中可以通过发展更为综合的气候变化影响模块, 采用多种类型模式耦合模拟结果的对比分析, 包括离线和在线耦合结果的对比以及不同地球系统模式双向耦合结果的对比分析等, 来减少双向耦合模式的不确定性。

## 4 小结与展望

地球系统模式和综合评估模型在进行人类活动与气候变化相互影响方面具有各自的优势, 但是随着人类活动与自然系统相互作用关系的加强, 将两类模式进行双向耦合来综合发挥各自的优势已成为必然。由于两类模式在建模思路和时空分辨率等方面存在显著的差异, 不能直接进行耦合, 因此关于两类模式的双向耦合在很长一段时间内一直停留在框架和概念上面。

随着计算机和各种数值算法的发展, 目前学者们针对存在的问题已经探索和发展了不同的双向耦合方法, 并且利用双向耦合模式进行了相关

的模拟和研究。尽管针对不同的问题,新发展的双向耦合方法各有利弊,并且存在着一定的不确定性,但是这些新的探索方法为我们进行两类模式的双向耦合提供了一定的基础和参考,希望我们在借鉴已有耦合方法的基础上,发展更为灵活和全面的耦合方法,为人类活动与自然系统的相互作用研究提供可靠的工具。

当然,不管通过何种耦合方法进行综合评估模型和地球系统模式的双向耦合,我们都不能否认任何单个的综合评估模型或者地球系统模式在解决特定问题方面的优势。例如在解决减排的成本与效益问题以及单纯的未来社会情景开发方面,综合评估模型由于计算量小和易于运行等特点具有明显的优势,目前IPCC发布的最新情景共享社会经济路径(SSPs)仍然是以综合评估模型为主要工具开发的<sup>[36]</sup>;而地球系统模式在解决自然系统不同圈层物理、化学过程和圈层间的相互作用过程中是其他工具所无法替代的,如目前正在进行的耦合模式第六次比较计划(CMIP6)仍然是以单独的地球系统模式进行模拟或预估试验<sup>[37]</sup>。但是随着两类模式各自的完善和发展,以及双向耦合方法的发展,有关双向耦合模式的研究成果应该与CMIP6和综合评估模型的研究成果类似,一起被纳入到新的IPCC报告中,充实和丰富有关人类活动和自然系统变化的相关研究。■

## 参考文献

- [1] 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. Wang B, Zhou T J, Yu Y Q, et al. A perspective on Earth system model development [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(6): 857-869 (in Chinese)
- [2] 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. Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. A review on evaluation methods of climate modeling [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, 9(1): 1-8 (in Chinese)
- [3] 舒启,乔方利,宋振亚.地球系统模式FIO-ESM对北极海冰的模拟和预估[J].海洋学报,2013,35(5):37-45. Shu Q, Qiao F L, Song Z Y. The hindcast and forecast of Arctic sea ice from FIO-ESM [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(5): 37-45 (in Chinese)
- [4] 张雪芹,葛全胜.气候变化综合评估模型[J].地理科学进展,1999,18(1):60-67. Zhang X Q, Ge Q S. Integrated assessment models on climatic changes [J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 60-67 (in Chinese)
- [5] 张海玲,刘昌新,王铮.气候变化综合评估模型的损失函数研究进展[J].气候变化研究进展,2018,14(1):40-49. Zhang H L, Liu C X, Wang Z. Progress in damage function of integrated assessment models for climate change [J]. Climate Change Research, 2018, 14(1): 40-49 (in Chinese)
- [6] Edmonds J A, Calvin K V, Clarke L E, et al. Integrated assessment modeling [M]. Springer New York: Climate Change Modeling Methodology, 2012: 169-209
- [7] 董文杰,袁文平,滕飞,等.地球系统模式与综合评估模型的双向耦合及应用[J].地球科学进展,2016,31(12):1215-1219. Dong W J, Yuan W P, Teng F, et al. Coupling Earth system model and integrated assessment model [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(12): 1215-1219 (in Chinese)
- [8] Vuuren D P V, Lowe J, Stehfest E, et al. How well do integrated assessment models simulate climate change? [J]. Climatic Change, 2011, 104(2): 255-285
- [9] Tol R S J, Fankhauser S. On the representation of impact in integrated assessment models of climate change [J]. Environmental Modeling & Assessment, 1998, 3(1-2): 63-74
- [10] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [11] IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1535
- [12] Leemans R. Developing a common strategy for integrative global environmental change research and outreach: the Earth System Science Partnership (ESSP) [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2009, 1(1): 4-13
- [13] 叶笃正,符淙斌,季劲钧,等.有序人类活动与生存环境[J].地球科学进展,2001,16(4):453-460. Ye D Z, Fu C B, Ji J J, et al. Orderly human activities and subsistence environment [J]. Advance in Earth Science, 2001, 16(4): 453-460 (in Chinese)
- [14] 符淙斌,董文杰,温刚,等.全球变化的区域响应和适应[J].气象学报,2003,61(2):245-250. Fu C B, Dong W J, Wen G, et al. Regional response and adaptation to global change [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(2): 245-250 (in Chinese)
- [15] 叶笃正,符淙斌,董文杰,等.全球变化科学领域的若干研究进展[J].中国科学院院刊,2004,27(5):435-450. Ye D Z, Fu C B, Dong W J, et al. Some advance in global change science study [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2004, 27(5): 435-450 (in Chinese)
- [16] 董磊华,熊丽华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012(2):278-285. Dong L H, Xiong L H, Yu K X, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology [J]. Advances in Water Science, 2012(2): 278-285 (in Chinese)
- [17] 傅伯杰,牛栋,赵士洞.全球变化与陆地生态系统研究:回顾与展望[J].地球科学进展,2005,20(5):556-560. Fu B J, Niu D, Zhao S D. Study on global change and terrestrial ecosystems history and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 556-560 (in Chinese)
- [18] 葛全胜,王芳,陈泮勤,等.全球变化研究进展和趋势[J].地球

- 科学进展, 2007, 22 (4): 417-427. Ge Q S, Wang F, Chen P Q, *et al.* Review on global change research [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22 (4): 417-427 (in Chinese)
- [19] 李家洋, 陈泮勤, 葛全胜, 等. 全球变化与人类活动的相互作用: 我国下阶段全球变化研究工作的重点 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (4): 4-10. Li J Y, Chen P Q, Ge Q S, *et al.* Global change and human activities priorities of the global change research in next phase in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (4): 4-10 (in Chinese)
- [20] 史培军, 宋长青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究: 从荷兰“全球变化开放科学会议”看人地系统动力学研究的发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17 (2): 161-168. Shi P J, Song C Q, Jing G F. Strengthening the study of land use/cover change and its impact on eco-environmental security: the trend of the study of the dynamics of human-nature system based on “global change open science conference 2001” in Amsterdam, Netherlands [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17 (2): 161-168 (in Chinese)
- [21] 王斌. 地球系统模式的发展 [C]. 北京: 气候变化与科技创新国际论坛, 2009: 61-66. Wang B. The development of Earth system model [C]. Beijing: International Forum on Climate Change and Scientific and Technological Innovation, 2009: 61-66 (in Chinese)
- [22] Liu C, Zhang H, Wang Z. Study on the functional improvement of economic damage caused by climate change for the Integrated Assessment Model [J]. *Sustainability* 2019, 11: 1280. DOI:10.3390/su11051280
- [23] Müllerhansen F, Schlüter M, Mäs M, *et al.* Towards representing human behavior and decision making in Earth system models: an overview of techniques and approaches [J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 8 (4): 977-1007
- [24] Gerten D, Schonfeld M, Schauburger B. On deeper human dimensions in Earth system analysis and modeling [J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9: 849-863
- [25] Navarro A, Moreno R, Jiménez-Alcázar A, *et al.* Coupling population dynamics with Earth system models: the POPEM model [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017 (2): 1-12
- [26] Navarro A, Moreno R, Tapiador F J. Improving the representation of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions in climate models: impact of a new parameterization for the Community Earth System Model (CESM) [J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9: 1045-1062
- [27] Yang S L, Dong W J, Chou J M, *et al.* A brief introduction to BNU-HESM1.0 and its Earth surface temperature simulations [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2015, 32 (12): 1683-1688
- [28] Yang S L, Dong W J, Chou J M, *et al.* Global warming projections using the human-Earth system model BNU-HESM1.0 [J]. *Science Bulletin*, 2016, 61 (23): 1833-1838
- [29] Collins W D, Craig A P, Truesdale J E, *et al.* The integrated Earth system model version 1: formulation and functionality [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8 (7): 381-427
- [30] Sokolov A P, Schlosser C A, Dutkiewicz S, *et al.* The MIT Integrated Global System Model (IGSM) version 2: model description and baseline evaluation [R/OL]. 2005 [2018-11-26]. [http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC\\_Rpt124.pdf](http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt124.pdf)
- [31] Marshall W, Calvin K, Kyle P, *et al.* Economic and physical modeling of land use in GCAM 3.0 and an application to agricultural productivity, land, and terrestrial carbon [J]. *Climate Change Economics*, 2014, 5 (2): 123-272
- [32] Calvin K, Wise M, Clarke L, *et al.* Implications of simultaneously mitigating and adapting to climate change: initial experiments using GCAM [J]. *Climatic Change*, 2013, 117 (3): 545-560
- [33] Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, *et al.* Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands [J]. *Climatic Change*, 2011, 109 (1-2): 117
- [34] Thornton P E, Calvin K, Jones A D, *et al.* Biospheric feedback effects in a synchronously coupled model of human and Earth systems [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 496-500
- [35] Monier E, Paltsev S, Sokolov A, *et al.* Toward a consistent modeling framework to assess multi-sectoral climate impacts [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 660
- [36] Riahi K, Vuuren D P V, Kriegler E, *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview [J]. *Global Environmental Change*, 2016, 42: S0959378016300681
- [37] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. CMIP6 的设计 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12 (3): 258-260. Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. The design of Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12 (3): 258-260 (in Chinese)

## Research progress for the bidirectional coupling of the Earth system model and integrated assessment model

YANG Shi-Li<sup>1</sup>, DONG Wen-Jie<sup>2</sup>, CHOU Jie-Ming<sup>3</sup>, LIU Chang-Xin<sup>4</sup>

*1 Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100089, China;*

*2 Atmospheric Science School, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;*

*3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875,*

*China; 4 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

**Abstract:** This paper summarizes the advantages and disadvantages of the Earth system model (ESM) and integrated assessment model (IAM) in investigating the human activities and climate change, and then clarifies the necessity of bidirectional coupling of these two kinds of models. The main difficulties in the bidirectional coupling process are objectively analyzed, and the methods and latest development in solving the coupling difficulties are also summarized at the international and domestic levels, and the uncertainty of bidirectional coupling and the method to solve the uncertainty are discussed in the last part. This paper provides a new guidance for the bidirectional coupling between the ESM and IAM in China.

**Keywords:** Integrated assessment model (IAM); Earth system model (ESM); Bidirectional coupling; Human activities; Climate change

### 声明

《气候变化研究进展》2019年第3期有一篇文章——京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究，其中第272页公式(1)的内容有误，现进行更正说明。

原公式为“ $ASI = 8.64 \times 10^{-2} \times \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times V_E + \sum_{i=1}^n (0.17 \times R \times \sqrt{S} \times 10^3) \right] \times C_S$ ”，

修改为“ $ASI = 8.64 \times 10^{-2} \times \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times V_E + \sum_{i=1}^n (0.17 \times R \times \sqrt{S} \times 10^3) \right] \times C_S / \sqrt{S}$ ”。

《气候变化研究进展》编辑部