

## 区域地球系统模式研究进展

张焱,戴永久,张树磊

中山大学 大气科学学院,广东 珠海 519082

\* 联系人, E-mail: daiyj6@mail.sysu.edu.cn

2024-01-24 收稿, 2024-02-23 接受

国家自然科学基金资助项目(42088101)

**摘要** 区域地球系统模式是区域气候模式下一阶段的主要发展目标。本文阐述了发展区域地球系统模式的重要意义,分析了近年来区域地球系统模式的研究进展和典型案例,指出其多圈层通量耦合、空间分辨率提高以及耦合数据同化的三个共性特征。建议以开源共创的方式整合各界研究力量,加快建设我国自主可控的区域地球系统模式;围绕新建立的模式开展跨学科研究,特别关注其中多圈层、多尺度过程的相互作用;围绕高分辨率区域地球系统模式建立区域数字孪生监测预警平台,用于关键区域的防灾减灾和关键决策支撑。

### 关键词

区域地球系统模式;  
多圈层耦合;  
区域数字孪生监测预警平台

由温室气体排放驱动的全球气候变化对地球的生态系统 (Parmesan and Yohe, 2003) 和人类社会 (Adger et al., 2013) 产生了深远的影响。日益频发的热浪、干旱和洪水等极端天气气候事件导致全球农业 (Hasegawa et al., 2021)、基础设施 (Perera et al., 2020) 和社会经济活动 (Liang, 2022) 遭到严重破坏 (陈海山等, 2024)。准确理解地球系统变化的机制和定量预测地球系统变化的影响必须依赖地球系统模式的发展。地球系统模式通过数学物理建模刻画大气圈、水圈、陆地和生物圈 (包括人类活动) 的复杂过程以及不同圈层之间的相互作用和反馈机制,实现对地球系统整体状态的合理描述和预测。地球系统模式按照其模拟范围可分为全球地球系统模式和区域地球系统模式。本文通过回顾区域气候/地球系统模式的研究进展,探讨其未来发展方向和应用前景。

区别于全球气候/地球系统模式关注行星尺度的大范围趋势变化,区域气候/地球系统模式更专注于特定区域的中小尺度过程及其区域影响。自 Robert E. Dickinson 推出首个区域气候模式 (Dickinson et al., 1989) 起,区域模式的使命就是在同等计算资源消耗下实现更加精细的数值模拟。在

气候/地球系统模拟的范畴中,这种需求随着多圈层中众多的复杂计算而更为突出。全球气候/地球系统模式在常规科研应用时必须简化模拟过程或降低空间分辨率 (70~250 km) 以实现可接受的资源消耗和时间消耗。虽然提高全球气候/地球系统模式计算效率的努力从未中断 (Eyring et al., 2016; Bauer et al., 2021),但在现阶段高分辨率全球气候/地球系统模式的使用门槛仍然很高,这无疑阻碍了更广大科研群体的使用 (Iles et al., 2020; Schär et al., 2020)。在此背景下,所需计算资源更少、空间分辨率更高、过程刻画更细致的区域气候/地球系统模式成为解析区域多圈层相互作用的重要科研与应用工具。

在科学研究方面,区域气候/地球系统模式提供两点关键能力:一是得益于更高的空间分辨率和更详细的物理过程刻画,区域模式在重现、解析极端气候事件的研究中能降低全球模式的不确定性 (Iles et al., 2020; Jiang et al., 2021; Kim et al., 2022)。二是区域气候/地球系统模式能同时兼顾空间细节和过程细节,实现多圈层过程耦合效应的研究。例如 Reale et al. (2020) 使用包含海洋生物化学模块的区域气候/地球系统模式实现对气

引用格式:张焱,戴永久,张树磊,2024.区域地球系统模式研究进展[J].大气科学学报,47(2):216-223.

Zhang H, Dai Y J, Zhang S L, 2024. A review of Regional Earth System Model development[J]. Trans Atmos Sci, 47(2):216-223. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240124012. (in Chinese).

候变化场景下的海洋净初级生产力空间分布的合理模拟、Furusho-Percot et al. (2022) 借助区域地球系统模式揭示包含地下水的水文循环过程对欧洲热浪模拟的影响。

在实际应用领域,区域气候/地球系统模式的作用可分为行业应用和系统性决策支撑两个层面。行业应用方面,在已有如 WRF-Hydro (Gochis et al., 2015)、WRF-Crop (Yu et al., 2022) 等专项耦合模式的基础上,区域气候/地球系统模式能进一步联动其他关键过程,建立体系化管理系统。例如在农业领域能够根据天气气候和陆面水文预测作物生长周期、产量和灌溉需求,帮助制定适应农业管理策略 (Odening and Shen 2014; Cogato et al., 2019); 在水文水资源领域将综合人类活动水需求与短期降水预估相结合,协助水库、人工河道进行水资源管理 (Teutschbein and Seibert 2010; Pandi et al., 2021) 等。在系统性决策支撑方面,得益于高分辨率的多圈层耦合特性,区域气候/地球系统模式可以推演不同决策场景下的多目标结果。以服务海岸带综合开发为例,对于诸如海岸带这种海陆气相互作用最剧烈、承载最密集活动社会经济活动的关键区域,传统大气、海洋、陆面模式无法综合推演决策的连带综合影响 (戴永久, 2020); 全球气候/地球系统模式的空间分辨率更无法解析其中海陆演替、生态环境和人类活动的精细结构。区域气候/地球系统模式的高分辨率和更加细致的耦合过程刻画则能同时实现以上目标。在以服务我国 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的宏观目标为例,区域气候/地球系统模式通过模拟不同减排减碳策略下人类活动和地球系统之间的相互作用,评估不同策略在中国区域的有效性及其对气候、生态系统和空气质量的影响。得益于高分辨率的多圈层耦合特性,不同场景下的减排减碳策略、适应策略和可持续发展目标之间的协同作用可以被量化为具体的指标。以造林汇碳决策支撑为例,采用目前常用的碳建模方法进行预估,无法显式刻画未来气候变化和植被-土壤-水之间的耦合关系对造林汇碳效率的影响 (Sun and Liu, 2020)。相比传统的离线模式预估,区域气候/地球系统模式中陆面土壤-水文-生物地球化学的显式耦合过程可以提供更加真实、复杂的场景下的预估能力以降低决策风险。因此,区域气候/地球系统模式在满足科研及应用需求和支持中国社会经济发展在气候变化方面的长期韧性和可持续性方面可以发挥关键作用。综上所述,区域气候/地球系统模式的开发与应用对于

应对气候变化带来的多方面挑战、实现中国碳达峰和碳中和目标至关重要。

随着近三十年地球科学、遥感技术和高性能计算技术的快速发展,区域气候/地球系统模式长期活跃于科学研究前沿和多行业实际应用领域,模式的空间分辨率快速提升、过程描述更加精细模拟精度日益提高,取得了一系列长足的发展。本文回顾了过去三十年区域气候/地球系统模式的研究历程,介绍了现代区域地球系统模式的典型范例及其共性特征,结合国内外研究前沿和当前国内研究现状给出一些研究建议和发展展望。

## 1 研究进展

### 1.1 模式类型

区域地球系统模式的概念最早在 1995 年前后由 Giorgi (1995) 提出,经过近三十年的长期发展,至今可以概括为两个层面:一是独立发展,即在应用目标指引下耦合特定专业模式的发展思路;二是整体融合层面,即以数字孪生区域地球系统为目标耦合多个圈层的专业模式的发展思路。

独立发展层面:在应用需求的推动下,出现了一批区域天气气候模式与专业模式进行耦合的实例。他们共同的目标是在相对可靠的大气、陆面和海洋描述下增强区域模式在特定领域的应用范畴。例如,用于水文过程模拟的 WRF-Hydro (Gochis et al., 2015)、PFWRF (Maxwell et al., 2011) 和 WRF-HMS (Wagner et al., 2016),用于湖泊模拟的 RegCM-FVCOM (Xue et al., 2017) 和 CWRF-FVCOM (Sun et al., 2020),用于作物产量模拟的 WRF-Crop 模式 (基于 Noah-MP 和 WRF 开发; Yu et al., 2022),用于大气环境模拟的 WRF-CMAQ (Wong et al., 2012) 和 WRF-Chem (Grell et al., 2005)。这些工作具有明确目标和应用范畴,外部模式通常采用直接耦合的方式与区域大气模式组合,因此结构相对简单且功能相对单一。

融合发展层面:融合发展层面的区域地球系统模式着眼于更为全面和深入的地球系统理解。不同于独立发展层面的直接耦合,这一层面强调的是各圈层模式之间的深度整合与协同,旨在构建一个更加统一协调的系统框架。这种方法不仅要求各圈层模式在技术上的兼容性,还需要在理论和方法论上进行创新,以便更好地模拟和理解复杂的地球系统动态和相互作用,以下为几个典型实例。

### 1.1.1 RegCM-ES

意大利国际理论物理研究中心 Filippo Giorgi 教授团队主导研发的 RegCM-ES 是其区域气候模式 RegCM 的地球系统版本。它采用地球系统模式框架 Earth System Modeling Framework (ESMF) 和 National United Operational Prediction Capability (NUOPC) 两个耦合层实现大气模块 RegCM、河道径流模块 ChyM 和海洋模块 MITgcm 的耦合。进一步将海洋生物化学模块 Biogeochemical Flux Model (BFM) 和海洋模块内部耦合。在中美洲、南大西洋和赤道带的模拟中,海气耦合的 RegCM-ES 相较于大气版本减少了降水模拟误差和更加真实的海气相互作用 (Sitz et al., 2017)。在印度地区的模拟中,耦合 CHyM 模式的 RegCM-ES 相比简易的水文模式能更加真实模拟孟加拉湾淡水河流通量。同时,海气耦合的 RegCM-ES 在印度季风的年际变率模拟上误差也更低 (Di et al., 2019)。

### 1.1.2 TerrSysMP

TSMP (Terrestrial Systems Modelling Platform) 模拟系统是德国尤利希科学研究中心推动研发的区域地球系统模式。TSMP 由区域大气模式 COSMO、陆面过程模式 CLM 和水文模式 ParFlow 通过 OASIS3 耦合器耦合成一个整体。TSMP 模式的突出特性是高分辨率模拟能力和并行数据同化能力,这使得 TSMP 可以作为区域甚至大洲尺度的监测预警系统 (Kollet et al., 2018)。在德国 Rur 集水区的真实模拟中,ParFlow 带来的三维地下水运动相比传统的一维地下水运动增强了土壤水的模拟能力 (Shrestha et al., 2014)。基于 TSMP 这个强化的陆气耦合模拟系统,水循环的多个过程研究得到加强,包括地下储水量评估、人类用水对大陆储水的影响、和地下水模式对热浪模拟的影响等多个方面 (Keune et al., 2018; Kollet et al., 2018; Hartick et al., 2021; Furusho-Percot et al., 2022)。在与另一个大气-水文耦合模式 PFWRP 的对比中,TSMP 因其更加先进的植被生理过程,参数化更加真实地模拟了地表蒸散发过程,这再次强调了多圈层过程之间相互作用的重要性 (Sulis et al., 2017)。

### 1.1.3 ROM

REMO-OASIS-MPIOM (ROM) 是由德国极地与海洋研究所支持研发的区域大气、海洋、海冰和海洋生物地球化学耦合模式。ROM 通过 OASIS 耦合器将区域大气模式 REMO、海洋模式 MPIOM、海洋碳循环模式 HAMOCC 和水文模式 HD 组装成耦合

模式。ROM 模式最大的特征是采用了全球海洋模式与区域大气模式耦合。在大气模式运行区域内, MPIOM+HAMOCC 模式与 REMO 进行通量交换,而在大气模式运行区域之外,海洋模式则直接从驱动区域模式的再分析资料(或全球模式资料)中读取大气强迫。这种独特设计的优点是无需对海洋开放边界进行设定,但是缺点是在模拟区域边界上存在潜在的不连续 (Sein et al., 2015)。得益于显式的海气耦合过程,ROM 在东亚夏季风模拟中降低了非耦合 REMO 模式对东亚夏季风的模拟误差 (Zhu et al., 2020)。

### 1.1.4 R-CESM

Fu et al. (2021) 在 CESM2 的框架下引入区域大气模式 WRF 和区域海洋模式 ROMS 构建了 R-CESM 模式。与前述几个模式相比,R-CESM 基于一个已有的全球地球系统模式框架,因此它可以更加方便地与全球地球系统模式“在线”耦合,实现全球-区域动力降尺度的嵌套模拟。与其他区域耦合模式类似,得益于更高的空间分辨率和匹配的物理过程刻画,R-CESM 的海气耦合模拟在热带气旋模拟、海气通量模拟方面展现出了优秀的性能。从模式构成上看,R-CESM 与另一个海气耦合区域模式 COAWST 存在一些共同点,其大气模块同为 WRF、海洋模块同为 ROMS。但 R-CESM 得益于 CESM2 框架,相比 WRF 中简化的 CLM4 模式,其陆面过程可以调用更加完整的 CLM4 模式。

## 1.2 共性特征

在比较和分析当前存在的各种区域地球系统模式时,尽管这些模式在开发背景、目标应用和设计理念上存在明显的差异,我们依然能够发现一些关键的共性特征。在这些模式中,多圈层通量耦合、空间分辨率提高以及耦合数据同化等特点成为他们共同的核心要素。这些共性特征不仅定义了区域地球系统模式的基本属性,也为未来模式的发展和完善提供了方向。通过对这些共性特征的深入分析,能够更好地理解区域地球系统模式的发展趋势。

### 1.2.1 多圈层通量耦合

与全球地球系统模式相似 (Wang et al., 2009), 在区域地球系统模式中,多圈层通量耦合是一个关键特征。这种耦合不仅限于海气和陆气相互作用,包括多种相互作用关系 (图 1)。与区域天气气候模式相比,更加细致的陆面、海洋过程的刻画和在线的耦合是区域地球系统模式的基础,而生物地球化学、水文、人类活动和大气化学的加入使得模式能够更

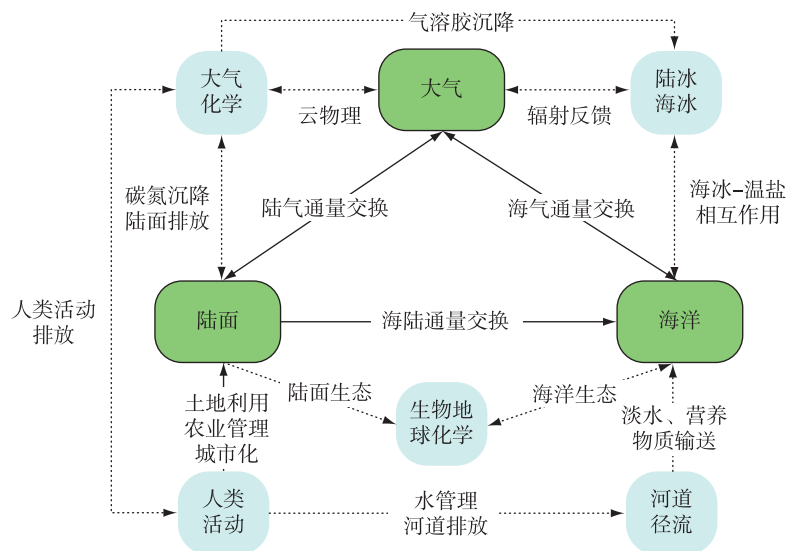


图1 区域地球系统模式结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the regional earth system model structure

全面地理解和模拟地球系统中各个组成部分的动态关系。这种多时空尺度的通量耦合,在区域地球系统模式中往往通过耦合器来实现。借助耦合器的运行调度和网格转换能力,发生在不同时空尺度的相互作用得以被量化,从而更精确地模拟地球系统的自然循环和人类活动对这些循环的影响。

### 1.2.2 更高的空间分辨率

空间分辨率提高是区域地球系统模式另一个显著的共性特征。如今全球模式的空间分辨率逐渐提高,甚至逐渐逼近常用的区域模拟分辨率水平(Haarsma et al., 2016),保持空间分辨率的优势是区域模式在节约计算资源之外的另一立身之本。高分辨率使模式能够更准确地模拟小尺度过程,包括显式刻画大气中对流和边界层过程、海洋中尺度涡过程、陆面复杂植被结构和土地利用变化等过程。由于这些过程在全球尺度模式中难以精确刻画,但对前沿科学研究和实际业务应用至关重要,因此在区域地球系统模式中精确刻画上述过程有助于更加精确地模拟、预测极端天气气候事件及其对局地环境的影响。

### 1.2.3 耦合数据同化

数据同化在区域地球系统模式中起着至关重要的作用。与传统区域大气模式不同,区域地球系统模式的初始状态涉及不同圈层的多个过程(物理、化学、生物和人类等)。正因为多圈层过程被耦合进一个模式系统,任一个变量的初始状态都有可能对整个模式造成影响,因此将多源多圈层的观测数据调和地融入模式初值不仅能降低相关过程的初始

误差,更能最大限度避免误差在整个地球系统内部的传播,从而缩短模式的启动时间、提升模拟精度。

## 2 研究建议与展望

目前包括德国、美国、意大利在内的多个国家的科研团体正积极发展区域地球系统模式,这些模式在过程刻画和空间分辨率等方面都显示出不同程度的先进性。RegCM模式团队由Filippo Giorgi创立,长期活跃于区域气候模式和区域地球系统模式研发领域;TSMF模式团队则由德国尤利希科学研究中心联合多个跨学科团队联合维护研发,引入了欧洲和美国多个领域先进团队的研究成果。相比之下,我国在区域地球系统模式领域尚处于起步阶段,目前尚不存在与RegCM-ES和TerrSysMP相近的先进高分辨率区域地球系统模式,也缺乏与之配套的长期持续专研团队。与之形成鲜明对比的是,我国在全球地球系统模式的发展上已经接近或达到国际领先水平,建立起多个地球系统模式研发团队并取得了一系列研究成果和大量的研发经验。这为我国发展国际先进水平的高分辨率区域地球系统模式提供了重要基础和保障。基于上述区域地球系统模式的分析梳理,建议进行以下几个方面的研究与发展。

### 2.1 模式研制

对标国际先进区域地球系统模式,基于我国在区域天气气候模式、全球地球系统模式及其他分量模式研发中的已有成果,加快研制自主可控的国产区域地球系统模式。首先建立起大气-海洋-陆地全

耦合的区域模式,再逐步加入海岸带、河道径流、生物地球化学、人类活动和大气化学等过程,以“小步快跑、快速迭代”的方式完善功能。格外关注模式在高分辨率场景下的高性能计算能力,紧跟技术前沿引入异构计算、高性能IO等优化方法提升模式运行效率、降低应用门槛。

## 2.2 学科交叉研究

区域地球系统模式的多圈层耦合特性和高分辨率的细节刻画能力有助于交叉学科研究的开展。地球系统模式的研发难点之一是协调不同时空尺度的多圈层过程,区域地球系统模式属于中小尺度模式,相比大尺度的全球模式,它能容纳和发生显式相互作用的过程更多。例如土地利用变化、植被结构变化、海陆岸线变化等在大尺度模式中较难捕捉或计算开销巨大的细节过程,可以在区域地球系统模式中得到较好的模拟。这有助于理解其区域地球系统敏感性和评估某一过程对区域多个分系统的影响。

## 2.3 建立区域数字孪生监测预警平台

基于高分辨率区域地球系统模式和多源数据观测,对目标范围(城市带-关键区域)建立实时监测和短时预警平台。借助区域地球系统模式多圈层耦合的特性,实现对目标区域天气、环境、水文、农业、近岸环流的准实时监测。目前基于德国TSMP模式的欧洲区域监测预测系统已经投入实际业务(Kollet et al., 2018),除了提供传统的天气气候状态

的检测预测之外,此系统还有能力提供植被可用土壤水、地下水位深度以及地下水量的增减。这些过程在传统天气气候监测平台中是难以做到的。美国海军的区域北极监测系统(<https://nps.edu/web/rasm>)建立在区域海-陆-气-冰-水文耦合的区域地球系统模式RASM的基础上,被用于预测未来六个月北冰洋海温、海冰厚度和面积等关键信息(Cassano et al., 2017)。基于这些已有的实例我们可以推断,借助多源观测资料,以数字孪生为目标的区域地球系统模式可以被用于对目标区域内的各种关键过程进行可靠的监测和预测。与目前已有的数据驱动离线模式的做法相比,完全耦合的模式系统可以直接显式刻画模块间的相互作用。换言之,当出现突发灾害性事件时,相比于现在常用的多个独立模块,基于耦合模式的预警系统可以直接提供量化的灾害次生影响,协助防灾减灾降低损失。

## 2.4 开源共创

开发区域地球系统模式这样的复杂系统需要融合地球科学、计算机科学甚至社会科学领域内众多学科的专业研究能力。而开发好用、管用的模式系统则更需要大量用户的反馈与贡献。参考国际领先的数值模式开发范例,以开源共创的方式集合各个领域专家和真实用户的社区力量来共同发展区域地球系统模式或是我们对标国际领先模式、迎头追赶的合理选择。

## 参考文献(References)

- Adger W N, Barnett J, Brown K, et al., 2013. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation [J]. *Nat Clim Change*, 3: 112-117. doi: 10.1038/nclimate1666.
- Bauer P, Dueben P D, Hoefler T, et al., 2021. The digital revolution of Earth-system science [J]. *Nat Comput Sci*, 1(2): 104-113. doi: 10.1038/s43588-021-00023-0.
- Cassano J J, DuVivier A, Roberts A, et al., 2017. Development of the regional Arctic system model (RASM): near-surface atmospheric climate sensitivity [J]. *J Climate*, 30(15): 5729-5753. doi: 10.1175/jcli-d-15-0775.1.
- 陈海山, 张耀存, 张文君, 等, 2024. 中国极端天气气候研究: “地球系统与全球变化”重点专项项目简介及最新进展 [J]. *大气科学学报*, 47(1): 23-45. Chen H S, Zhang Y C, Zhang W J, et al., 2024. Research on weather and climate extremes over China: brief introduction and recent progress of the National Key R & D Program of China for Earth System and Global Change [J]. *Trans Atmos Sci*, 47(1): 23-45. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240110007. (in Chinese).
- Cogato A, Meggio F, De Antoni Migliorati M, et al., 2019. Extreme weather events in agriculture: a systematic review [J]. *Sustainability*, 11(9): 2547. doi: 10.3390/su11092547.
- 戴永久, 2020. 陆面过程模式研发中的问题 [J]. *大气科学学报*, 43(1): 33-38. Dai Y J, 2020. Issues in research and development of land surface process model [J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 33-38. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200103006. (in Chinese).
- Di S F, Coppola E, Farneti R, et al., 2019. Indian Summer Monsoon as simulated by the regional earth system model RegCM-ES: the role of local air-sea interaction [J]. *Clim Dyn*, 53(1): 759-778. doi: 10.1007/s00382-019-04612-8.
- Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al., 1989. A regional climate model for the western United States [J]. *Clim Change*, 15(3): 383-422. doi: 10.1007/BF00240465.
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geosci Model Dev*, 9(5): 1937-1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

- Fu D, Small J, Kurian J, et al., 2021. Introducing the new regional community earth system model, R-CESM [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 102(9): E1821-E1843. doi: 10.1175/bams-d-20-0024.1.
- Furusho-Percot C, Goergen K, Hartick C, et al., 2022. Groundwater model impacts multiannual simulations of heat waves [J]. *Geophys Res Lett*, 49(10): e2021GL096781. doi: 10.1029/2021GL096781.
- Giorgi F, 1995. Perspectives for regional earth system modeling [J]. *Glob Planet Change*, 10(1/2/3/4): 23-42. doi: 10.1016/0921-8181(94)00018-9.
- Gochis D, Yu W, Yates D, 2015. WRF-Hydro Model Source Code Version 3 [CP/OL]. UCAR/NCAR [2023-12-29]. [https://ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro](https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro). doi: 10.5065/D6DN43TQ.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al., 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. *Atmos Environ*, 39(37): 6957-6975. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
- Haarsma R J, Roberts M J, Vidale P L, et al., 2016. High resolution model intercomparison project (HighResMIPv1.0) for CMIP6 [J]. *Geosci Model Dev*, 9(11): 4185-4208. doi: 10.5194/gmd-9-4185-2016.
- Hartick C, Furusho-Percot C, Goergen K, et al., 2021. An interannual probabilistic assessment of subsurface water storage over Europe using a fully coupled terrestrial model [J]. *Water Resour Res*, 57(1): e2020WR027828. doi: 10.1029/2020WR027828.
- Hasegawa T, Sakurai G, Fujimori S, et al., 2021. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs [J]. *Nat Food*, 2(8): 587-595. doi: 10.1038/s43016-021-00335-4.
- Iles C E, Vautard R, Strachan J, et al., 2020. The benefits of increasing resolution in global and regional climate simulations for European climate extremes [J]. *Geosci Model Dev*, 13(11): 5583-5607. doi: 10.5194/gmd-13-5583-2020.
- Jiang R S, Sun L, Sun C, et al., 2021. CWRWF downscaling and understanding of China precipitation projections [J]. *Clim Dyn*, 57(3): 1079-1096. doi: 10.1007/s00382-021-05759-z.
- Keune J, Sulis M, Kollet S, et al., 2018. Human water use impacts on the strength of the continental sink for atmospheric water [J]. *Geophys Res Lett*, 45(9): 4068-4076. doi: 10.1029/2018GL077621.
- Kim G, Kim J, Cha D H, 2022. Added value of high-resolution regional climate model in simulating precipitation based on the changes in kinetic energy [J]. *Geosci Lett*, 9(1): 38. doi: 10.1186/s40562-022-00247-6.
- Kollet S, Gasper F, Brdar S, et al., 2018. Introduction of an experimental terrestrial forecasting/monitoring system at regional to continental scales based on the terrestrial systems modeling platform (v1.1.0) [J]. *Water*, 10(11): 1697. doi: 10.3390/w10111697.
- Liang X Z, 2022. Extreme rainfall slows the global economy [J]. *Nature*, 601(7892): 193-194. doi: 10.1038/d41586-021-03783-x.
- Maxwell R M, Lundquist J K, Mirocha J D, et al., 2011. Development of a coupled groundwater-atmosphere model [J]. *Mon Wea Rev*, 139(1): 96-116. doi: 10.1175/2010mwr3392.1.
- Odening M, Shen Z W, 2014. Challenges of insuring weather risk in agriculture [J]. *Agric Finance Rev*, 74(2): 188-199. doi: 10.1108/afr-11-2013-0039.
- Pandi D, Kothandaraman S, Kuppasamy M, 2021. Hydrological models; a review [J]. *Int J Hydrol Sci Technol*, 12(3): 223. doi: 10.1504/ijhst.2021.117540.
- Parmesan C, Yohe G, 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 421(6918): 37-42. doi: 10.1038/nature01286.
- Perera A T D, Nik V M, Chen D L, et al., 2020. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems [J]. *Nat Energy*, 5: 150-159. doi: 10.1038/s41560-020-0558-0.
- Reale M, Giorgi F, Solidoro C, et al., 2020. The regional earth system model RegCM-ES; evaluation of the Mediterranean climate and marine biogeochemistry [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(9): e2019MS001812. doi: 10.1029/2019MS001812.
- Schär C, Fuhrer O, Arteaga A, et al., 2020. Kilometer-scale climate models; prospects and challenges [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 101(5): E567-E587. doi: 10.1175/bams-d-18-0167.1.
- Sein D V, Mikolajewicz U, Gröger M, et al., 2015. Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM; 1. description and validation [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 7(1): 268-304. doi: 10.1002/2014MS000357.
- Shrestha P, Sulis M, Masbou M, et al., 2014. A scale-consistent terrestrial systems modeling platform based on COSMO, CLM, and ParFlow [J]. *Mon Wea Rev*, 142(9): 3466-3483. doi: 10.1175/mwr-d-14-00029.1.
- Sitz L E, Di Sante F, Farneti R, et al., 2017. Description and evaluation of the Earth System Regional Climate Model (RegCM-ES) [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 9(4): 1863-1886. doi: 10.1002/2017ms000933.
- Sulis M, Williams J L, Shrestha P, et al., 2017. Coupling groundwater, vegetation, and atmospheric processes; a comparison of two integrated models [J]. *J Hydrometeorol*, 18(5): 1489-1511. doi: 10.1175/jhm-d-16-0159.1.
- Sun L, Liang X Z, Xia M, 2020. Developing the coupled CWRWF-FVCOM modeling system to understand and predict atmosphere-watershed interactions over the great lakes region [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(12): e2020MS002319. doi: 10.1029/2020MS002319.
- Sun W L, Liu X H, 2020. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. *For Ecosyst*, 7: 4. doi: 10.1186/s40663-019-0210-2.

- Teutschbein C, Seibert J, 2010. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies [J]. *Geogr Compass*, 4(7): 834-860. doi: 10. 1111/j. 1749-8198. 2010. 00357. x.
- Wagner S, Fersch B, Yuan F, et al., 2016. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: development, application, and analysis of WRF-HMS [J]. *Water Resour Res*, 52(4): 3187-3211. doi: 10. 1002/2015WR018185.
- Wang B, Zhou T J, Yu Y Q, 2009. A view of earth system model development [J]. *Acta Meteor Sin*, 23(1): 1-17.
- Wong D C, Pleim J, Mathur R, et al., 2012. WRF-CMAQ two-way coupled system with aerosol feedback: software development and preliminary results [J]. *Geosci Model Dev*, 5(2): 299-312. doi: 10. 5194/gmd-5-299-2012.
- Xue P F, Pal J S, Ye X Y, et al., 2017. Improving the simulation of large lakes in regional climate modeling: two-way lake-atmosphere coupling with a 3D hydrodynamic model of the great lakes [J]. *J Clim*, 30(5): 1605-1627. doi: 10. 1175/jcli-d-16-0225. 1.
- Yu L X, Liu Y, Liu T X, et al., 2022. Coupling localized Noah-MP-Crop model with the WRF model improved dynamic crop growth simulation across Northeast China [J]. *Comput Electron Agric*, 201: 107323. doi: 10. 1016/j.compag.2022. 107323.
- Zhu S P, Remedio A R C, Sein D V, et al., 2020. Added value of the regionally coupled model ROM in the East Asian summer monsoon modeling [J]. *Theor Appl Climatol*, 140(1): 375-387. doi: 10. 1007/s00704-020-03093-8.

· ARTICLE ·

## A review of Regional Earth System Model development

ZHANG Han, DAI Yongjiu, ZHANG Shulei

*School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*

**Abstract** An accurate understanding of Earth system change mechanisms and predicting their impacts relies on the development of Earth system models. Compared to global models, Regional Earth System Models (RESMs) concentrate more on medium-to small-scale processes and their regional impacts within specific areas, featuring higher spatial resolution and more detailed physical processes. RESMs enable coupled simulations of multi-layered Earth interactions, thereby enhancing the ability to reproduce, analyze, and forecast extreme climate events. Consequently, the development and application of RESMs hold significant scientific and practical importance for addressing various climate change-related challenges and assisting in prediction and decision-making across multiple fields, including disaster prevention and mitigation, water resources management, agriculture, energy, environmental conservation, and resource exploitation.

The concept of RESMs was initially proposed by Giorgi around 1995. Over the past three decades, their development has primarily followed two approaches. The first approach, known as independent development, involves coupling regional weather/climate models with specialized models tailored to specific application goals. This method aims to broaden the application scope of regional models in specific fields based on reliable atmospheric, land surface, and oceanic descriptions. Typically, specialized models are directly coupled with regional weather/climate models, resulting in relatively simple model structures and limited functions. Representative models include WRF-Hydro, PFWRF, WRF-HMS, RegCM-FVCOM, CWRF-FVCOM, WRF-Crop, WRF-CMAQ, and WRF-Chem. The second approach, holistic integration, seeks to construct a comprehensive model of coupled multi-sphere processes for digital twin regional Earth systems. This approach aims to create a unified and coordinated framework that emphasizes deep integration among various models. Such an approach not only requires technical compatibility among the models but also demands theoretical and methodological innovations to better simulate and understand the complex dynamics and interactions within Earth systems. Representative models of this approach include RegCM-ES, TerrSysMP, ROM, and R-CESM.

Irrespective of the development approach, RESMs exhibit the following common characteristics: (i) Multi-layer coupling: RESMs provide a more detailed representation and online coupling of land surface and ocean processes compared to regional weather/climate models. They integrate biogeochemical, hydrological, human ac-

tivity, and atmospheric chemistry processes, enabling a comprehensive understanding and simulation of the dynamic relationships among various Earth system components. Through the use of couplers, RESMs achieve flux coupling and interactions across different spatiotemporal scales, thereby enhancing the precision of simulations of natural cycles and the impacts of human activities on these cycles. (ii) Higher spatial resolution: RESMs can simulate small-scale processes, explicitly representing atmospheric convection, boundary layer processes, oceanic mesoscale eddies, complex vegetation structures on land surfaces, and changes in land use. These capabilities lead to more accurate simulations and predictions of extreme weather and climate events and their effects on local environments. (iii) Integration of data assimilation: The initial state in RESMs involves multiple processes across different layers, and the initial value of any variable can influence the entire model. Assimilating observational data from multiple sources and layers into the model's initial state not only reduces the initial errors of related processes but also minimizes error propagation throughout the entire system, thereby shortening the model's spin-up time and enhancing simulation accuracy.

In light of the overview provided, this study advocates for the integration of interdisciplinary research efforts through open-source collaboration to expedite the development of RESMs in China. There is an urgent need to conduct interdisciplinary research utilizing the newly established model, with a particular focus on interactions among multi-layer and multi-scale processes. Additionally, efforts should be directed towards establishing a regional digital twin platform for monitoring and early warning based on high-resolution RESMs. Such platform could play a crucial role in disaster prevention and mitigation in critical regions and support vital decision-making processes.

**Keywords** Regional Earth System Model; multi-sphere coupling; regional digital twin monitoring and early warning platform

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240124012

(责任编辑:刘菲)