



区域气候动力降尺度方法研究综述

徐忠峰^{1*}, 韩瑛¹, 杨宗良^{1,2}

1. 中国科学院大气物理研究所, 东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;

2. Department of Geological Sciences, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, TX 78705, USA

* E-mail: xuzhf@tea.ac.cn

收稿日期: 2018-03-12; 收修改稿日期: 2018-05-14; 接受日期: 2018-08-16; 网络版发表日期: 2018-09-29

国家自然科学基金项目(批准号: 91637103、41675105、41675080)资助

摘要 传统意义上的动力降尺度是指利用全球模式的模拟结果直接驱动区域模式, 从而获得高分辨率气候信息的方法. 由于该方法具有坚实的物理基础并可以获得全套气候变化信息, 已经成为获取未来区域高分辨率气候信息的重要手段之一. 然而, 由于受模式系统误差的影响, 传统动力降尺度的模拟结果往往会出现较大的偏差, 这又在一定程度上限制了该方法在气候变化影响评估中的应用. 为了提高动力降尺度的效果, 近年来国内外发展了一系列改进的动力降尺度方法. 目前的动力降尺度方法大体可分为四类: 传统的动力降尺度方法、伪全球增暖方法、考虑全球模式误差订正的降尺度方法以及同时考虑全球模式和区域模式误差订正的降尺度方法. 文章归纳总结了近年来动力降尺度方法的主要研究进展, 分析了不同方法的优点和不足, 阐述了动力降尺度研究面临的问题与挑战, 最后提出了未来动力降尺度方法研究的潜在发展方向.

关键词 全球气候模式, 误差订正, 区域气候模式, 降尺度, 气候变化预估

1 引言

气候变化对自然生态系统、人类的生存环境和社会经济都有着十分深远的影响. 预估未来气候变化尤其是区域尺度的气候变化, 已经成为十分重要的课题. 大多数的气候变化影响评估与适应政策的制定都依赖于区域气候变化的信息. 与联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的前几次评估报告相比, 第5次评估报告更加强调气候变化的区域特征和差异(IPCC, 2013). 气候模式以及考虑了复杂的地球生物化学过程的地球系统模式是预估未来气候变化的重要工具(曾庆存等, 2008;

Prinn, 2013; IPCC, 2013). 目前, 这些全球模式(General Circulation Model, GCM)的水平分辨率大部分在 100~300km. 粗分辨率的GCM不能细致刻画下垫面特征, 对局地天气过程和极端天气气候事件的模拟能力有限(赵宗慈等, 2014). 然而, 在气象、水文、农业、生态、风能和大气环境等研究领域, 往往需要高分辨率的天气气候信息. 因此, 对全球模式的模拟结果进行降尺度有着十分广泛的应用前景和需求. 所谓“降尺度”, 简单来说就是基于粗分辨率的GCM结果或再分析资料, 通过统计或动力学方法获得高分辨的气候信息的过程(von Storch等, 1993; 刘昌明等, 2012).

常用的降尺度方法包括统计降尺度、动力降尺度

中文引用格式: 徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 2019. 区域气候动力降尺度方法研究综述. 中国科学: 地球科学, 49: 487–498, doi: 10.1360/N072018-00075

英文引用格式: Xu Z, Han Y, Yang Z. 2019. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. Science China Earth Sciences, 62: 365–375, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9261-5>

和动力-统计降尺度三种. 统计降尺度方法建立在观测的局地气候与大尺度场之间的统计关系基础上, 假定上述统计关系在未来的气候情景下仍然适用, 从而实现对全球模式未来气候变化预估结果的降尺度. 统计降尺度方法的优点是相对简单、计算量小, 可以将全球模式的结果降尺度到具体观测台站(范丽军等, 2005; Hanssen-Bauer等, 2005; Fan等, 2013; 陈杰等, 2016). 然而, 由于受到历史统计关系的约束, 统计降尺度方法无法描述历史上没有出现的规律, 也不适用于大尺度要素与区域要素相关不明显的地区(范丽军等, 2005; Maraun等, 2010). 与统计降尺度方法不同, 动力降尺度方法是建立在区域气候模式(Regional Climate Model, RCM)基础之上的, 全球模式为区域气候模式提供初边值条件, 通过高分辨率区域气候模式的数值积分获得高分辨率天气气候信息(Giorgi和Mearns, 1991). 区域气候模式采用数学物理方程描述气候系统内部的各种动力和热力学过程. 随着地球生物化学等过程的引入, 区域气候模式正逐渐向区域地球系统模式方向发展, 这些模式可以描述大气-陆地-水-经济等过程之间的相互作用(Adam等, 2015; Yang, 2015). 因此, 与统计降尺度方法相比, 动力降尺度方法具有更坚实的数学物理基础. 然而, 动力降尺度需要大量的计算资源, 随着模式分辨率的提高, 计算量呈指数形式增长. 动力-统计降尺度方法则试图将两种降尺度方法的优点结合起来(陈丽娟等, 2003; 韩雪和魏凤英, 2010). 为了弥补单一降尺度模拟无法研究未来预估不确定性的缺点, Walton等(2015)首先根据5组GCM和RCM的模拟结果建立统计关系, 然后将这一统计关系应用到其他GCM模拟结果, 从而实现对更多GCM结果的降尺度. 这一做法避免了大量的RCM集合模拟, 同时又实现了对所有GCM模拟结果的降尺度. 利用足够数量的降尺度结果, 可以给出未来气候变化的最优预估和不确定性(Sun等, 2015).

在过去的20多年里, 国内外学者已经在降尺度方面开展了大量的研究工作(Giorgi和Mearns, 1991; Wilby和Wigley, 1997; Wilby等, 1998; Lo等, 2008; Maraun等, 2010; Wang和Kotamarthi, 2015; Tang等, 2016b). 以往的动力降尺度研究表明, 影响RCM模拟效果的因素有很多, 其中包括模拟区域的大小、位置、水平和垂直分辨率、大尺度驱动场的质量和物理过程等(Jacob和Podzun, 1997; 赵宗慈和罗勇, 1998; Liang等, 2004;

Alexandru等, 2007; Xue等, 2007, 2014; Caron等, 2011; Pielke和Wilby, 2012; Chan等, 2013). 近年来的研究发现, 订正GCM的误差通常可以显著提高大尺度驱动场的质量, 进而改善动力降尺度模拟的效果(Xu和Yang, 2012; Bruyère等, 2014). 如何提高动力降尺度模拟能力逐渐成为国际上一个热点研究领域并已取得了较多重要的进展, 同时也还存在很多问题和挑战. 本文重点总结不同的动力降尺度方法的特点以及尚存在的问题, 以便相关学者更好地了解这方面的研究进展, 推进动力降尺度的应用和动力降尺度方法研究的深入.

2 传统的动力降尺度方法

在有限的计算资源限制下, 为了研究高分辨率的区域气候特征, Dickinson等(1989)发展了一个区域气候模式(RCM). RCM只覆盖地球上的有限区域, 并将RCM单向嵌套在GCM之中. 在RCM积分过程中, GCM不断为RCM提供侧边界条件(通常每6h更新一次侧边界条件), 从而获得高分辨率的区域气候信息, 这就是传统的动力降尺度方法. 在过去20多年里, 基于RCM的动力降尺度方法被广泛应用于气象(Giorgi等, 1994a; Leung等, 2003; 许吟隆等, 2006; Bukovsky和Karoly, 2011; Gao等, 2002; 高学杰等, 2010; Bao等, 2015; Niu等, 2015; Tang等, 2016a; El-Samra等, 2017; Sun等, 2017; 姚隽琛等, 2018)、水文(Giorgi等, 1994b; Feng等, 2011; Gao等, 2011; Shukla和Lettenmaier, 2013; 熊喆和延晓冬, 2014; Boulard等, 2016)和大气化学与空气质量(Varghese等, 2011; Tan等, 2015; Khairunnisa等, 2017)等研究领域. 在区域气候变化及其影响研究方面已经取得了很多重要进展. 然而, 由于GCM和RCM都存在显著的系统性误差, 这些误差会显著影响动力降尺度的结果, 这是动力降尺度结果不确定性的来源之一. 利用多个GCM驱动多个RCM, 开展多模式集合模拟试验可以研究未来区域气候变化预估的不确定性. 因此, 若干与区域气候模式相关的国际研究计划都开展了这样的集合模拟试验, 其中包括亚洲区域模式比较计划(Fu等, 2005)、基于集合方法的气候变化和影响预估(van der Linden和Mitchell, 2009)、北美区域气候变化评估计划(Mearns等, 2009), 以及协同区域气候降尺度试验(Giorgi等, 2009)等. 然而, 这些多GCM和多RCM的集合模拟试验需要大量的计算资源和人力

资源, 通常需要多个研究机构分工协作才能完成大量的数值模拟试验.

3 伪全球增暖动力降尺度方法

为了研究和预估未来区域气候对温室气体等外强迫的响应, 一些研究采用了伪全球增暖动力降尺度方法(Wu和Lynch, 2000; Sato等, 2007; Cook和Vizy, 2008; Kawase等, 2009; Lauer等, 2013; Yu和Wang, 2014; Kitoh等, 2016). 简单来说, 伪全球增暖方法是将GCM模拟的气候变化信息叠加到历史的再分析资料上:

$$BC_F = RA_H + \overline{GCM}_F - \overline{GCM}_H, \quad (1)$$

式中, BC_F 代表未来时段(2050~2080年)RCM边界场, RA_H 代表历史时期(1980~2010年)6h的再分析资料, “ $\overline{}$ ”代表时间平均, 下标H和F分别代表历史和未来时期, $\overline{GCM}_F - \overline{GCM}_H$ 代表GCM模拟的气候平均态变化. 伪全球增暖方法中RCM侧边界场的构造是建立在再分析资料基础上的, 这样就排除了GCM平均态误差对动力降尺度的影响. 此外, 还可以利用多模式集合代替单一GCM模拟的气候平均态变化, 从而显著减小未来气候变化情景预估的不确定性. 除了预估未来区域气候变化, 还可以利用伪全球增暖方法设计敏感性试验, 有效地将外强迫产生的气候影响从气候系统内部变率中分离出来(Xu和Yang, 2017). 在检测外强迫信号的影响时, 气候系统内部变率通常被看作是噪音, 噪音越大越难以分离出外强迫信号. 利用伪全球增暖方法构造的大尺度驱动场具有相同的内部变率, 通过两个RCM模拟试验相减, 可以在很大程度上消除共有的内部变率, 从而更有效地将外强迫的影响分离出来. 然而, 伪全球增暖方法也有其局限性: 从边界场的构造来看(式(1)), 未来时段RCM边界场的日变化、日际变化、季节变化以及年际变化均来自于历史的再分析资料, 只有未来相对于历史时期的气候平均态变化来自于GCM的模拟结果. 因此, 伪全球增暖方法仅适用于研究气候平均态对全球增暖的响应. 在用伪全球增暖方法研究未来情景下的日变化、季节变化、年际变化和年代际气候变化时需谨慎. 尽管RCM内部变量的时间演变特征也会对全球增暖的强迫产生响应, 但RCM侧边界中变量的变率也强烈地影响着区域模式内部变

率. 在伪全球增暖方法中, 历史时期和未来时段的侧边界场中的变率是相同的, 这在很大程度上限制了区域模式内部变率对未来气候变化情景的响应.

4 考虑GCM误差订正的动力降尺度方法

在RCM积分过程中需要GCM提供初边值条件. 因此, RCM的模拟在很大程度上受到GCM模拟能力的影响(Pielke和Wilby, 2012). 众所周知, 所有的GCM都存在显著的系统误差. 在动力降尺度模拟过程中, GCM的误差会通过侧边界传递给RCM, 从而影响RCM模拟结果(Wu和Lynch, 2000; Sato等, 2007). 此外, 历史时期的动力降尺度模拟误差也可能会传递到未来气候变化预估之中(Liang等, 2008). GCM的误差是动力降尺度模拟误差和不确定性的重要来源之一. 基于上述原因, 国内外学者发展了不同的大尺度驱动场构造方法, 然后利用重新构造的大尺度驱动场作为侧边界条件来驱动RCM. 下面总结近年来发展的、在动力降尺度模拟中采用的GCM误差订正方法.

4.1 GCM气候平均态误差订正

Holland等(2010)在研究大西洋热带气旋变化时, 发现传统的动力降尺度方法模拟的热带气旋数量异常偏少. 其主要原因是GCM在大西洋地区的高低层垂直风切变明显偏大, 在动力降尺度过程中, GCM的误差传递给RCM, 导致RCM模拟的热带气旋数量异常偏少. 为了解决这一问题, Holland等(2010)提出了一个简单的GCM平均态误差订正方法. 该方法的基本思想是在GCM的未来预测结果中扣除GCM模式中的气候平均态误差:

$$\begin{aligned} BC_F &= GCM_F - (\overline{GCM}_H - \overline{RA}_H) \\ &= \overline{GCM}_F + GCM'_F - (\overline{GCM}_H - \overline{RA}_H), \end{aligned} \quad (2)$$

上式中各量的含义与式(1)相同. 上式右端第三项 $(\overline{GCM}_H - \overline{RA}_H)$ 为历史时期GCM的平均态误差. 假定该误差不随时间变化, 即历史与未来时期GCM的气候平均态误差相同, 这样就可以从GCM未来时期模拟结果中扣除这一误差. 不难看出, 式(2)订正了GCM的气候平均态误差, 保留了GCM模拟的时间变化特征(GCM'_F), 即日变化、季节变化、年际-年代际变化等,

这些特征可以随时间发生变化. 因此, 该方法可以用于预估未来区域气候的时间演变特征的变化, 从而弥补了伪全球增暖方法的不足. 与传统动力降尺度方法相比, 该动力降尺度方法可以很好地再现观测的大西洋热带气旋生成数量和路径特征(图1; Holland等, 2010; Done等, 2015; Bruyère等, 2014). 类似的误差订正方法也被应用于数值天气预报和季节预测之中并取得了较好的预报效果(Peng等, 2013; 常俊等, 2015; Ratnam等, 2016). 最近Chen等(2018)又将该动力降尺度方法应用于中国地区的气候变化预估.

4.2 GCM气候平均态和年际变率振幅订正

Xu和Yang(2012)发展了一个改进的动力降尺度方法, 即在Holland等(2010)发展的GCM气候平均态误差订正基础上, 进一步引入了GCM的年际变率振幅(标准差)订正. 把气候平均态误差和标准差的误差作为GCM的两类系统误差, 并假定这些系统误差不随时间变化. 利用历史时期的GCM模拟结果和再分析资料计算GCM的两类系统误差, 将这两类系统误差从GCM的未来时期模拟结果中扣除:

$$BC_F = \overline{GCM}_F - (\overline{GCM}_H - \overline{RA}_H) + GCM'_F \frac{S_{RA|H}}{S_{GCM|H}}, \quad (3)$$

式中, GCM'_F 代表未来时期GCM模拟的距平值(相对于未来时期的气候平均态), $S_{RA|H}$ 和 $S_{GCM|H}$ 分别代表历史时期再分析数据和GCM模拟结果的年际标准差. 上述误差订正可以分解为两步: 第一步扣除GCM的气候平均态误差, 相当于对GCM的时间序列进行平移; 第二步订正GCM年际变率幅度的误差, 相当于调整GCM时间序列的振幅. 利用经过误差订正的6h GCM数据驱动RCM, 并与再分析资料驱动的RCM模拟结果进行对比. 结果表明: 单纯订正GCM平均态误差, 可以显著改善RCM的气候平均态, 但RCM模拟的气温概率密度分布仍与参考试验存在显著差异. 如果同时订正GCM气候平均态和年际变率振幅的误差, 则RCM模拟的气温概率密度分布十分接近参考试验. 这说明改进的动力降尺度方法, 可以同时显著改善RCM对气候平均态和极端事件的模拟能力(图2). 除了地表气温, 改进的动力降尺度方法还显著提高了RCM对降水、大气温度、湿度、位势高度和风场的模拟能力(Xu和

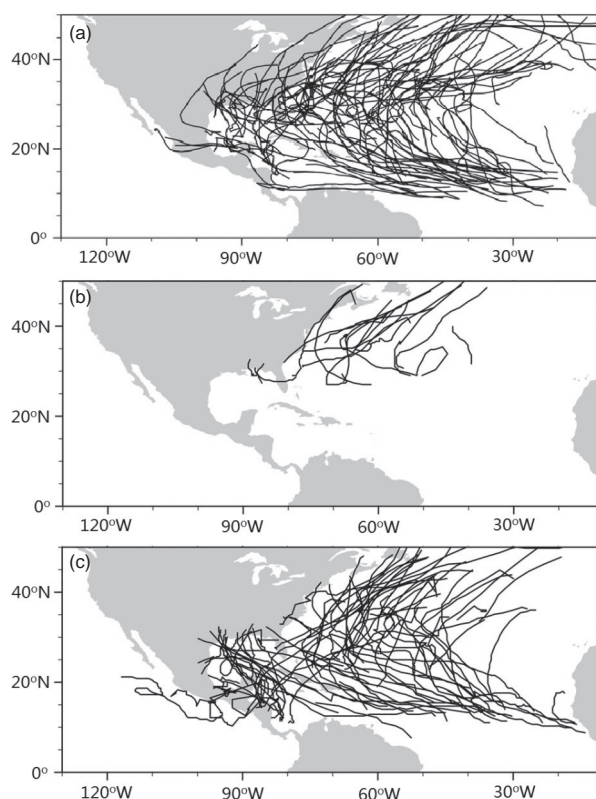


图1 观测和RCM模拟的1995–2005年热带气旋路径统计 (a) 观测; (b) 传统动力降尺度方法; (c) 考虑GCM气候平均态订正的动力降尺度方法. 图形根据Bruyère等(2014)制作

Yang, 2012). Hong等(2017)将该动力降尺度方法应用于东亚区域气候和空气质量模拟, 取得了较好的模拟结果. 需要注意的是: Xu和Yang(2012)采用的标准差订正方法会改变GCM模拟结果的趋势. 当某些变量存在非常显著的趋势时, 这一订正方法可能会虚假地放大或缩小GCM的趋势. 为了保持GCM原来的趋势, Hoffmann等(2016)在订正GCM标准差时, 首先将GCM和观测数据各自的趋势减掉, 然后再订正GCM的标准差, 最后再加上GCM的趋势项. 这样一来, 既订正了GCM的标准差误差, 又保持了GCM原来的趋势.

4.3 GCM误差的分位数订正

Colette等(2012)将分位数误差订正法引入到动力降尺度中. 该方法根据历史时期观测和GCM的累积概率密度函数来订正未来时期GCM累积概率密度函数(Déqué, 2007; Michelangeli等, 2009; 杨浩等, 2017). 与GCM平均态和标准差的误差订正不同, 分位数误差订

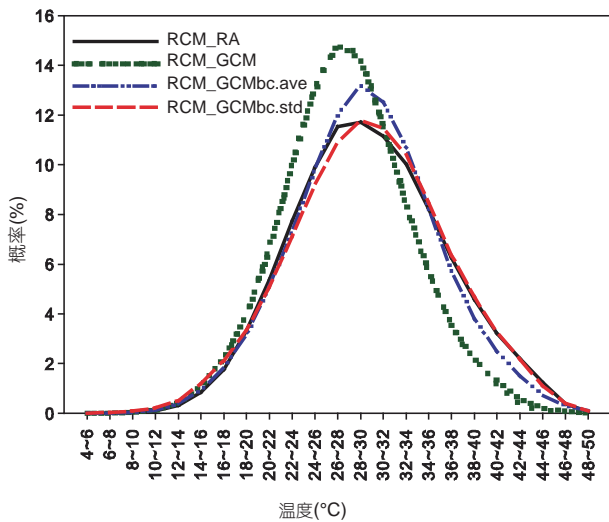


图2 不同动力降尺度方法模拟的美国大平原地区夏季日最高气温的频数分布

RCM_RA: 利用再分析资料作为驱动场的动力降尺度模拟, 作为参考试验. RCM_GCM: 传统的动力降尺度方法. RCM_GCMbc.ave: 考虑了全球模式平均态误差订正. RCM_GCMbc.std: 同上考虑了全球模式平均态和年际变化振幅的误差订正. 图形根据Xu和Yang(2012)稍作修改

正法对每个数据的订正幅度是不同的. 因此, 该订正将改变GCM的概率密度分布曲线的位置和形状, 使其接近观测的概率密度分布曲线. 与4.1、4.2节的误差订正方法相比, 分位数误差订正法对GCM的误差订正更加完善. 与传统的动力降尺度方法相比, 该动力降尺度模拟结果显著改进了地表气温和降水平均态的模拟(Colette等, 2012). 然而, 需要注意的是分位数误差订正会破坏变量之间的依赖关系, 还会额外引入变量空间分布的误差, 进而使得RCM产生虚假的降水变率(White和Toumi, 2013). 如果不同变量之间的平衡关系可以用一阶线性方程来描述(例如: 静力平衡关系、地转平衡关系), GCM的平均态订正并不会破坏变量之间的平衡关系. 但是, 分位数误差订正则破坏此平衡关系. 因此, 针对动力降尺度模拟, White和Toumi(2013)推荐采用GCM平均态订正而不是分位数误差订正法.

4.4 考虑大气内部平衡关系约束的GCM误差订正

4.1~4.3节所采用的GCM误差订正法有一个共同特点, 即对各个物理量是分别进行订正的, 没有显式考虑这些变量之间的平衡关系. 由于描述大气运动的方

程组是非线性的, 分别订正各个变量会在一定程度上破坏变量之间平衡关系(Rocheta等, 2014). Meyer和Jin(2015)发展了一种考虑大气内部平衡关系约束的GCM误差订正方法. 其基本思想是: 首先订正气温和相对湿度场, 然后根据静力平衡关系计算位势高度场, 再依据地转关系计算地转风场; 利用模拟与观测风场之间的线性回归关系订正非地转风的误差; 经过误差订正的地转风加上非地转风得到误差订正后的总风场. 最后, 利用这些变量驱动RCM进行连续的动力降尺度模拟. 结果表明, 与传统动力降尺度方法相比, 该动力降尺度方法显著改善了降水和对流有效位能等的模拟(Meyer和Jin, 2015).

另外, Hernández-Díaz等(2017)提出的三步动力降尺度方法可以很好地保持大气各变量之间的依赖关系. 其主要做法是利用观测资料订正海气耦合模式模拟的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)和海冰的气候平均态误差, 然后利用订正过的SST和海冰数据作为全球大气环流模式的下边界条件并进行积分, 得到物理上协调的大尺度场, 最后利用上述大尺度场和订正后的SST及海冰数据驱动RCM. 所谓“三步”法(海气耦合模式-大气环流模式-区域气候模式)是相对于传统动力降尺度的“两步”法(海气耦合模式-区域气候模式)而言的. 三步动力降尺度方法订正了耦合模式模拟的SST和海冰的系统误差, 有利于提高大气环流模式内部动力过程的模拟, 同时保证了大气内部各个变量之间的平衡关系. 该方法的主要局限性在于仅订正SST和海冰的误差可能对GCM模拟能力的提升空间有限(Hoffmann等, 2016), 大气环流模式本身的系统误差仍会显著影响动力降尺度结果. 此外, 该方法的应用受区域海气耦合关系制约. 例如, 在赤道中东太平洋等地区以SST影响降水为主(Wang等, 2005), 降水潜热释放进一步影响大气环流, 在这样的区域订正SST误差有利于提高大气环流模式的模拟能力, 三步降尺度方法是适用的. 但是在亚洲季风区, SST的变化主要受降水、云量等大气条件影响, 这时考虑海洋的反馈作用是非常必要的, 采用给定的SST往往不能得到合理的模拟结果(Wang等, 2005), 在这样的地区采用三步动力降尺度方法是不合适的.

Dai等(2017)认为, GCM误差订正是针对模式每6h输出一次的变量进行的, 模式与观测之间的气候平均态差异通常明显小于变量在6h时间尺度上的变化幅

度. 因此, 误差订正所产生的不平衡对降尺度的影响可能比较小. 此外, 区域模式侧边界也会在一定程度上平滑误差订正所产生的不平衡. Xu和Yang(2015)分析了RCM内部的非地转风与地转风之间的比值. 结果表明, GCM误差订正对RCM内部的地转平衡关系的影响很小. 然而, 当区域模式积分过程中采用了谱逼近(spectral nudging)方法后, 非地转风的分量显著增大, 对区域模式内部的平衡关系产生了较大影响, 具体将在第5节讨论.

4.5 GCM低频变率误差订正

上述对GCM平均态、变率以及累积概率密度分布的误差订正方法, 都没有订正GCM变量的周期特征. 众所周知, 洪涝和干旱等很多天气气候现象持续的时间及其所造成的影响都与大气低频变率密切相关. 为了减小GCM模拟结果中的大气低频变率误差, Rocheta等(2017)将一种嵌套误差订正方法引入到动力降尺度研究之中. 该方法同时考虑了GCM平均态、标准差以及低频变率误差订正. 其中低频变率订正建立在一阶自回归模型的基础之上, 利用观测的一阶自相关替换模拟的一阶自相关. 嵌套订正方法显著改善了GCM的平均态、标准差以及一阶自相关特征. 然而, 利用订正过的GCM数据驱动RCM后, RCM模拟的低频变率改进主要来自GCM气候平均态订正, 订正GCM低频变率对RCM低频变率的改进不明显(Rocheta等, 2017). 此外, 嵌套误差订正对RCM变量之间的平衡关系是否有显著影响尚不清楚, 有待进一步研究.

4.6 基于多模式集合的GCM误差订正

以上各节介绍的GCM误差订正方法, 都是针对单一GCM进行的. 众所周知, 对于未来气候变化预估来说, 单一的GCM模拟结果具有很大的不确定性. 利用多模式集合可以显著减小预估结果的不确定性. 因此, Dai等(2017)提出了一个考虑多模式集合的GCM误差订正方法. 该方法与Holland等(2010)所采用的订正方法类似, 但是将式(2)中的单一GCM的气候平均态替换为多模式集合的气候平均态. 同时, 考虑到多个海气耦合模式集合会导致模式的内部变率相互抵消, 从而导致多模式集合的年际变率大大减弱. 大尺度驱动场变率减弱将直接影响RCM内部变率. 因此, 为了保证大尺度驱动场具有合理的年际变化幅度, 距平场仍然采

用单一GCM模式的结果. 这样, 式(2)可改写为

$$BC_F = \overline{GCM}_{EF} + GCM'_F - (\overline{GCM}_{EH} - \overline{RA}_H), \quad (4)$$

式中, 下标E代表多模式集合, 其他与式(2)相同. 可见, 未来相对于历史时期的气候平均态变化信息来自于多模式集合, 即 $\overline{GCM}_{EF} - \overline{GCM}_{EH}$. 相对于单一模式的气候平均态变化 $(\overline{GCM}_F - \overline{GCM}_H)$, 多模式集合对未来的气候情景预估结果更可靠. 此外, 单一GCM预估的未来气候变化包含气候系统内部变率和外强迫两部分信息. 在预估外强迫对气候的影响时, 常常需要排除气候系统变率的影响. 式(4)中采用了多模式集合在很大程度上抵消了气候系统内部变率. 因此, Dai等(2017)提出的GCM误差订正方法适用于预估未来区域气候对外强迫的响应. 需要指出的是: 式(4)中的 GCM'_F 代表单一GCM在未来时期的距平值, 该距平值包括除气候平均态之外的所有信息, 比如在未来时段的年际变化、年代际变化和趋势. GCM对这些时间变化特征的模拟也可能存在一定误差, 这些误差并没有在Dai等(2017)的方法中加以考虑.

5 同时考虑全球和区域模式误差订正的降尺度方法

第4节介绍的降尺度方法都集中在GCM误差订正方面, 没有考虑RCM误差对降尺度模拟的影响. 在GCM气候平均态和年际变率振幅误差订正基础上, Xu和Yang(2015)进一步在降尺度中引入了谱逼近方法. 谱逼近是一种四维变分同化技术(Stauffer和Seaman, 1990; von Storch等, 2000), 利用该技术可以把大尺度驱动场的信息同化到区域模式内部, 既利用大尺度驱动场约束RCM的模拟结果, 同时又保留RCM产生的高分辨率信息. 不同的降尺度模拟结果表明: GCM和RCM误差都会显著影响降尺度的模拟结果. 当GCM和RCM误差同号时, 会放大降尺度模拟的误差; 当两个误差异号时会相互抵消, 得到看似接近观测的结果. 利用该降尺度方法, 可以有效限制GCM和RCM的系统误差. 从图3可以看出, 该降尺度方法的均方根误差是所有以GCM为驱动场的模拟结果中最小的. 当单独采用GCM误差订正时(RCM_GCMbc), 降尺度结果在对流层低层仍存在较

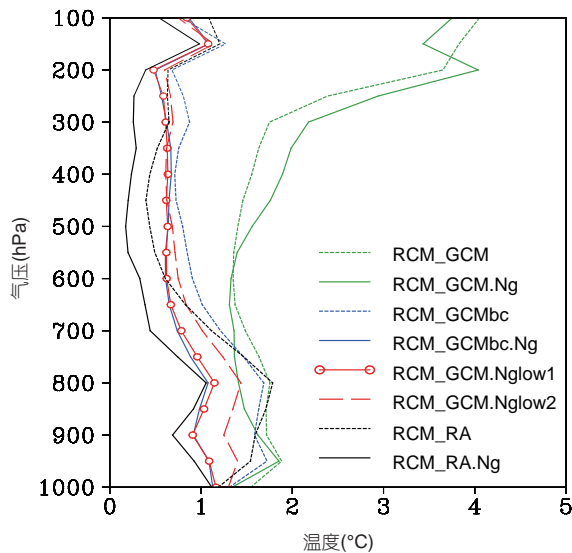


图3 不同动力降尺度模拟相对于北美区域再分析资料的年平均均方根误差

RCM代表区域模式; GCM代表RCM的驱动场为全球模式; bc代表全球模式做了误差订正, Ng代表区域模式采用了谱逼近方法; RA: RCM的驱动场为NCEP-NCAR再分析资料; low1和low2: 代表谱逼近的强度分别降低1个和2个量级. RCM_GCM: 传统动力降尺度方法; RCM_GCMbc.Nglow1是Xu和Yang(2015)推荐使用的新的动力降尺度方法; 其余以此类推. 图形根据Xu和Yang(2015)稍作修改

大误差. 当单独采用谱逼近方法时(RCM_GCM.Ng), 降尺度结果的误差也没有明显改善, 这主要是因为GCM的误差很大, 谱逼近使得RCM模拟结果向错误的方向同化导致的. 但是在对GCM误差订正以后再做谱逼近, 则可显著改进动力降尺度结果. 可见, 在动力降尺度过程中, 需要同时限制GCM和RCM的误差(即采用GCM系统误差订正+谱逼近方法), 这样才能得到更接近于观测的降尺度模拟结果(RCM_GCMbc.Ng和RCM_GCMbc.Nglow1). 该动力降尺度方法, 也可以显著改善对气候变率和极端天气气候事件统计特征的模拟(Xu和Yang, 2015).

这一动力降尺度方法的主要不足在于: GCM误差订正在一定程度上破坏了大气内部的平衡关系, 尤其是采用谱逼近方法以后, 大尺度驱动场内部的不平衡被引入到区域模式内部, 可能导致虚假降水的产生. 在采用谱逼近方法时, 即使用未做误差订正的GCM数据作为大尺度驱动场, RCM模拟的非地转风分量仍然显著增大, 说明RCM内部的平衡关系也受到明显扰动. 为了缓解这一问题, Xu和Yang(2015)建议将谱逼近强度从0.0003降低到0.00003, 这样既可以减少区域模式

内部虚假降水的产生, 又可以显著提高其他变量的模拟能力.

6 总语

本文总结了近年来国内外在动力降尺度方法研究方面的主要进展. 总的来说, 在RCM模拟之前对GCM系统误差进行订正, 可以在很大程度上阻断模式误差在模式链中的传递(Ott等, 2013), 从而显著提高RCM的模拟能力, 可以为“气候变化的影响与适应”研究提供更有价值的高分辨率区域气候信息. 因此, 近年来很多研究都尝试在动力降尺度过程中引入GCM误差订正, 主要包括GCM气候平均态误差、年际变率振幅误差、累积概率密度分布曲线的误差、GCM低频变率误差以及考虑多模式集合的GCM误差订正等. 不同的动力降尺度方法的侧重点不同, 各有优缺点(表1). 总的来说, 现有的GCM误差订正方法都有个前提假定, 即GCM的系统误差不随时间变化. 这一假定显然不是严格成立的. 一般来说, GCM的预测误差可以分解为GCM的气候平均态误差和GCM模拟的气候变化误差两部分. 这两个误差可能出现异号互相抵消的情况, 因此误差订正后的GCM结果并不总是比订正前更接近真值. 但是, 当GCM的系统性误差明显大于模拟的气候变化误差时, 订正GCM误差总是可以显著提高GCM数据的质量, 进而改善RCM的模拟能力.

由于不同研究所采用的数值模式、模拟区域、参数化方案、关注的变量等存在很大差异, 很难系统、定量比较不同方法之间的效果差异和相对优劣. 设计统一的模拟试验, 从多方面系统比较不同动力降尺度方法的效果, 显然是非常重要的. 这对客观评估和比较不同的动力降尺度方法对气候平均态、气候变率和极端事件的模拟能力, 以及不同的误差订正方法对大气内部各变量之间平衡关系的影响程度是十分有益的.

需要强调的是, 目前的订正方法只订正了GCM部分误差. 对GCM的时间演变特征的误差(例如变量的周期长度和位相特征)订正方法还比较缺乏. 虽然Rocheta等(2017)的研究试图订正GCM的低频变率误差, 但也只关注了部分时间尺度, 而且对RCM模拟的低频变率的改进并不明显. 不管采用哪种动力降尺度方法, 其模拟结果仍然强烈依赖于GCM和RCM本身的性能,

表 1 不同动力降尺度方法的比较

动力降尺度方法	优点及适用范围	不足之处
传统动力降尺度 (Giorgi和Mearns, 1999)	应用范围广泛, 可开展多GCM和多RCM集合试验, 研究GCM和RCM对动力降尺度结果不确定性的影响	没有考虑模式误差对降尺度结果的影响, 往往模拟误差较大
伪全球增暖 (Kawase等, 2009)	不需要6小时的GCM模拟结果, 月平均数据即可. 排除了GCM系统误差对动力降尺度的影响. 适用于研究未来气候平均态对全球增暖的响应.	只考虑了GCM模拟的气候平均态变化信息, 不适合于研究未来气候变率. 比如: ENSO与季风的关系、极端事件的变化等
GCM平均态订正 (Holland等, 2010)	订正了GCM的气候平均态误差, 方法简单, 对RCM气候平均态模拟的改进效果明显	没有订正除气候平均态以外的GCM误差
GCM平均态和标准差订正 (Xu和Yang, 2012)	方法较简单, 显著改进了区域模式对气候平均态和极端天气气候事件的模拟能力	当变量存在显著趋势时, 标准差订正可能会虚假地放大或缩小GCM的趋势
GCM分位数误差订正 (Colette等, 2012)	从累积概率密度分布的角度进行误差订正, 对GCM误差的订正更加全面	订正方法相对比较复杂, 额外引入变量空间分布的误差, 破坏大气变量之间的平衡关系
基于平衡关系的GCM误差订正 (Meyer和Jin, 2015)	在GCM误差订正过程中, 考虑了变量之间的静力平衡和地转平衡关系约束	订正方法相对比较复杂, 尚缺乏与其他GCM误差订正方法效果的比较
GCM低频变率订正 (Rocheta等, 2017)	除了订正了GCM气候平均态、标准差的误差, 还改进了GCM的低频变率特征	订正方法相对比较复杂, 与简单的GCM订正方法相比, 降尺度模拟结果没有很明显的改善
多模式集合的GCM误差订正 (Dai等, 2017)	方法较简单, 充分利用了多个GCM结果, 适用于预估未来外强迫对气候的影响	没有订正除气候平均态以外的误差. 不适用于研究GCM不确定性对动力降尺度结果的影响
GCM+RCM误差订正 (Xu和Yang, 2015)	采用了GCM误差订正和谱逼近方法, 同时约束了GCM和RCM误差. 有利于减弱模式误差在模式链中的传递, 改善了气候平均态和极端事件的模拟	GCM误差订正和谱逼近方法结合, 会在一定程度上破坏RCM内部的大气平衡关系, 可能会产生虚假降水

尤其是模式对气候的时间演变特征的模拟能力. 从长远来看, 不断改进和完善GCM和RCM的物理过程、提升模式的模拟能力是提高动力降尺度效果的根本途径. 然而, 提高模式的模拟能力需要科学家们长期坚持不懈的努力, 不是一蹴而就的, 而且模式的误差也不可能完全消除. 因此, 考虑模式误差订正是一种快捷而有效的提高动力降尺度效果的途径之一, 值得继续深入研究.

目前, 绝大多数动力降尺度模拟都采用给定的SST, 没有考虑海-气双向耦合过程. 已有研究表明, 考虑海-气双向耦合过程可以显著提高区域气候模式对季风环流、降水和季节内变率的模拟能力(姚素香和张耀存, 2008; Ratnam等, 2009; Fang等, 2013; Liao和Zhang, 2013; Zou等, 2016). 如果在动力降尺度中直接采用区域海气耦合模式, RCM模拟的SST可能也会存在比较大的误差, 从而影响动力降尺度模拟的效果. 在区域海气耦合模拟过程中对SST做谱逼近可能是一个有效的方法. 这样, 既考虑了海气耦合作用又限制了SST的系统误差, 这是有待未来深入研究的科学问题

之一.

此外, 绝大部分的动力降尺度模拟都采用GCM与RCM之间的单向嵌套, 没有考虑RCM对GCM的反馈. 在某些情况下, 这种反馈可能是非常重要的. 例如, Lorenz和Jacob(2005)的研究表明, RCM能够很好地模拟了东南亚地区的强对流过程, 这些信息由RCM反馈给GCM后, GCM模拟的全球大气温度场误差显著减小. 为了考虑区域与全球之间的双向反馈, 一般有两个途径: (1) 采用GCM与RCM之间的双向嵌套, 但是目前这样的模式较少, 其动力降尺度模拟的效果也缺乏系统的评估与检验; (2) 采用变网格GCM开展动力降尺度模拟(McGregor和Dix, 2001; Fox-Rabinovitz等, 2006). 变网格GCM除了可以描述不同分辨率区域之间的双向相互作用之外, 还具有一致的模式框架, 避免了GCM与RCM在物理过程描述上的不一致. 近年来变网格GCM的发展取得了很大的进步(Harris和Lin, 2013; Zarzycki等, 2015; Huang等, 2016), 将成为未来气候模式发展的主要方向之一, 也为动力降尺度提供了一个有力的研究工具.

参考文献

- 常俊, 彭新东, 范广洲, 车玉章. 2015. 结合历史资料的数值天气预报误差订正. 气象学报, 73: 341–354
- 陈丽娟, 李维京, 张培群, 王锦贵. 2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用. 应用气象学报, 14: 648–655
- 陈杰, 许崇育, 郭生练, 陈华. 2016. 统计降尺度方法的研究进展与挑战. 水资源研究, 5: 299–313
- 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 3: 320–329
- 高学杰, 石英, Giorgi F. 2010. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. 中国科学: 地球科学, 40: 911–922
- 韩雪, 魏凤英. 2010. 中国东部夏季降水与东亚垂直环流结构及其预测试验. 大气科学, 34: 533–547
- 刘昌明, 刘文彬, 傅国斌, 欧阳如琳. 2012. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨. 水科学进展, 23: 427–437
- 熊喆, 延晓冬. 2014. 黑河流域高分辨率区域气候模式建立及其对降水模拟验证. 科学通报, 59: 605–614
- 许吟隆, 张勇, 林一骅, 林而达, 林万涛, 董文杰, Jones R, Hassell D, Wilson S. 2006. 利用PRECIS分析SRES B2情景下中国区域的气候变化响应. 科学通报, 51: 2068–2074
- 杨浩, 江志红, 李肇新, 王晓芳, 崔春光. 2017. 分位数订正法在北京动力降尺度模拟订正中的适用性评估. 气象学报, 75: 460–470
- 姚素香, 张耀存. 2008. 区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟. 气象学报, 66: 131–142
- 姚隽琛, 周天军, 邹立维. 2018. 基于气候系统模式FGOALS-g2的热带气旋活动及其影响的动力降尺度模拟. 大气科学, 42: 150–163
- 赵宗慈, 罗勇. 1998. 20世纪90年代区域气候模拟研究进展. 气象学报, 56: 225–246
- 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 2014. 极端天气与气候事件受到全球变暖影响吗? 气候变化研究进展, 10: 388–390
- 曾庆存, 周广庆, 蒲一芬, 陈文, 李荣凤, 廖宏, 林朝辉, 刘辉志, 王必正, 谢正辉, 徐永福, 薛峰, 曾晓东, 张凤. 2008. 地球系统动力学模式及模拟研究. 大气科学, 32: 653–690
- Adam J C, Stephens J C, Chung S H, Brady M P, Evans R D, Kruger C E, Lamb B K, Liu M, Stöckle C O, Vaughan J K, Rajagopalan K, Harrison J A, Tague C L, Kalyanaraman A, Chen Y, Guenther A, Leung F Y, Leung L R, Perleberg A B, Yoder J, Allen E, Anderson S, Chandrasekharan B, Malek K, Mullis T, Miller C, Nergui T, Poinssatte J, Reyes J, Zhu J, Choate J S, Jiang X, Nelson R, Yoon J H, Yorgey G G, Johnson K, Chinnayakanahalli K J, Hamlet A F, Nijssen B, Walden V. 2015. BioEarth: Envisioning and developing a new regional earth system model to inform natural and agricultural resource management. Clim Change, 129: 555–571
- Alexandru A, de Elia R, Laprise R. 2007. Internal variability in regional climate downscaling at the seasonal scale. Mon Weather Rev, 135: 3221–3238
- Bao J W, Feng J M, Wang Y L. 2015. Dynamical downscaling simulation and future projection of precipitation over China. J Geophys Res-Atmos, 120: 8227–8243
- Boulard D, Castel T, Camberlin P, Sergeant A S, Bréda N, Badeau V, Rossi A, Pohl B. 2016. Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation: A case study over northeastern France. Clim Dyn, 46: 2689–2716
- Bruyère C L, Done J M, Holland G J, Fredrick S. 2014. Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. Clim Dyn, 43: 1847–1856
- Bukovsky M S, Karoly D J. 2011. A regional modeling study of climate change impacts on warm-season precipitation in the central United States. J Clim, 24: 1985–2002
- Caron L P, Jones C G, Winger K. 2011. Impact of resolution and downscaling technique in simulating recent Atlantic tropical cyclone activity. Clim Dyn, 37: 869–892
- Chan S C, Kendon E J, Fowler H J, Blenkinsop S, Ferro C A T, Stephenson D B. 2013. Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? Clim Dyn, 41: 1475–1495
- Chen L, Ma Z G, Li Z H, Wu L, Flemke J, Li Y P. 2018. Dynamical downscaling of temperature and precipitation extremes in China under current and future climates. Atmos-Ocean, 56: 55–70
- Colette A, Vautard R, Vrac M. 2012. Regional climate downscaling with prior statistical correction of the global climate forcing. Geophys Res Lett, 39: L13707
- Cook K H, Vizy E K. 2008. Effects of twenty-first-century climate change on the Amazon rain forest. J Clim, 21: 542–560
- Dai A G, Rasmussen R M, Ikeda K, Liu C H. 2017. A new approach to construct representative future forcing data for dynamic downscaling. Clim Dyn, 43
- Déqué M. 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Glob Planet Change, 57: 16–26
- Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, Bates G T. 1989. A regional climate model for the western United States. Clim Change, 15: 383–422
- Done J M, Holland G J, Bruyère C L, Leung L R, Suzuki-Parker A. 2015. Modeling high-impact weather and climate: Lessons from a tropical cyclone perspective. Clim Change, 129: 381–395
- El-Samra R, Bou-Zeid E, Bangalath H K, Stenchikov G, El-Fadel M. 2017. Future intensification of hydro-meteorological extremes: Downscaling using the weather research and forecasting model. Clim Dyn, 49: 3765–3785
- Fan L J, Chen D L, Fu C B, Yan Z W. 2013. Statistical downscaling of

- summer temperature extremes in northern China. *Adv Atmos Sci*, 30: 1085–1095
- Fang Y J, Zhang Y C, Huang A N, Li B. 2013. Seasonal and intraseasonal variations of East Asian summer monsoon precipitation simulated by a regional air-sea coupled model. *Adv Atmos Sci*, 30: 315–329
- Feng L, Zhou T, Wu B, Li T, Luo J J. 2011. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model. *Adv Atmos Sci*, 28: 464–476
- Fox-Rabinovitz M, Côté J, Dugas B, Déqué M, McGregor J L. 2006. Variable resolution general circulation models: Stretched-grid model intercomparison project (SGMIP). *J Geophys Res*, 111: D16104
- Fu C, Wang S Y, Xiong Z, Gutowski W J, Lee D K, McGregor J L, Sato Y, Kato H, Kim J W, Suh M S. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bull Amer Meteorol Soc*, 86: 257–266
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv Atmos Sci*, 19: 927–942
- Gao Y, Vano J A, Zhu C, Lettenmaier D P. 2011. Evaluating climate change over the Colorado River basin using regional climate models. *J Geophys Res*, 116: D13104
- Giorgi F, Mearns L O. 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Rev Geophys*, 29: 191–216
- Giorgi F, Mearns L O. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J Geophys Res*, 104: 6335–6352
- Giorgi F, Jones G, Asrar G R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull*, 58: 175–183
- Giorgi F, Shields Brodeur C, Bates G T. 1994a. Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model. *J Clim*, 7: 375–399
- Giorgi F, Hostetler S W, Brodeur C S. 1994b. Analysis of the surface hydrology in a regional climate model. *Q J R Met Soc*, 120: 161–183
- Hanssen-Bauer I, Achberger C, Benestad R, Chen D, Førland E. 2005. Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia. *Clim Res*, 29: 255–268
- Harris L M, Lin S J. 2013. A two-way nested global-regional dynamical core on the cubed-sphere grid. *Mon Weather Rev*, 141: 283–306
- Hernández-Díaz L, Laprise R, Nikiéma O, Winger K. 2017. 3-Step dynamical downscaling with empirical correction of sea-surface conditions: Application to a CORDEX Africa simulation. *Clim Dyn*, 48: 2215–2233
- Holland G J, Done J, Bruyere C, Cooper C, Suzuki A. 2010. Model investigations of the effects of climate variability and change on future Gulf of Mexico tropical cyclone activity. In: *Proc. Offshore Technology Conf.*, Houston. 20690
- Hoffmann P, Katzfey J J, McGregor J L, Thatcher M. 2016. Bias and variance correction of sea surface temperatures used for dynamical downscaling. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 12877–12890
- Hong C P, Zhang Q, Zhang Y, Tang Y H, Tong D, He K B. 2017. Multi-year downscaling application of two-way coupled WRF v3.4 and CMAQ v5.0.2 over East Asia for regional climate and air quality modeling: Model evaluation and aerosol direct effects. *Geosci Model Dev*, 10: 2447–2470
- Huang X, Rhoades A M, Ullrich P A, Zarzycki C M. 2016. An evaluation of the variable-resolution CESM for modeling California's climate. *J Adv Model Earth Syst*, 8: 345–369
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013*. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1535
- Jacob D, Podzun R. 1997. Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol Atmos Phys*, 63: 119–129
- Kawase H, Yoshikane T, Hara M, Kimura F, Yasunari T, Ailikun B, Ueda H, Inoue T. 2009. Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J Geophys Res*, 114: D24110
- Khairunnisa Y, Wang K, Campbell P, Chen Y, Glotfelty T, He J, Pirhalla M, Zhang Y. 2017. Decadal application of WRF/Chem for regional air quality and climate modeling over the U.S. under the representative concentration pathways scenarios. Part I: Model evaluation and impact of downscaling. *Atmos Environ*, 152: 562–583
- Kitoh A, Ose T, Takayabu I. 2016. Dynamical downscaling for climate projection with high-resolution MRI AGCM-RCM. *J Meteorol Soc Jpn*, 94A: 1–16
- Lauer A, Zhang C, Elison-Timm O, Wang Y, Hamilton K. 2013. Downscaling of climate change in the Hawaii region using CMIP5 results: On the choice of the forcing fields. *J Clim*, 26: 10006–10030
- Leung L R, Qian Y, Bian X. 2003. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981–2000. Part I: Seasonal statistics. *J Clim*, 16: 1892–1911
- Liang X Z, Li L, Kunkel K E, Ting M, Wang J X L. 2004. Regional climate model simulation of U.S. precipitation during 1982–2002. Part I: Annual cycle. *J Clim*, 17: 3510–3529
- Liang X Z, Kunkel K E, Meehl G A, Jones R G, Wang J X L. 2008. Regional climate models downscaling analysis of general circulation models present climate biases propagation into future change

- projections. *Geophys Res Lett*, 35: L08709
- Liao Z J, Zhang Y C. 2013. Simulation of a persistent snow storm over Southern China with a regional atmosphere-ocean coupled model. *Adv Atmos Sci*, 30: 425–447
- Lo J C F, Yang Z L, Pielke Sr. R A. 2008. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *J Geophys Res*, 113: D09112
- Lorenz P, Jacob D. 2005. Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation. *Geophys Res Lett*, 32: L18706
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson A M, Chandler R E, Kendon E J, Widmann M, Brien S, Rust H W, Sauter T, Themeßl M, Venema V K C, Chun K P, Goodess C M, Jones R G, Onof C, Vrac M, Thiele-Eich I. 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev Geophys*, 48: RG3003
- McGregor J L, Dix M R. 2001. The CSIRO conformal-cubic atmospheric GCM. In: Hodnett P F, ed. *UTAM Symposium on Advances in Mathematical Modelling of Atmosphere and Ocean Dynamics*. New York: Springer. 197–202
- Mearns L O, Gutowski W, Jones R, Leung R, McGinnis S, Nunes A, Qian Y. 2009. A regional climate change assessment program for North America. *Eos Trans AGU*, 90: 311
- Meyer J D D, Jin J. 2015. Bias correction of the CCSM4 for improved regional climate modeling of the North American monsoon. *Clim Dyn*, 46: 2961–2976
- Michelangeli P A, Vrac M, Loukos H. 2009. Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys Res Lett*, 36: L11708
- Niu X R, Wang S Y, Tang J P, Lee D K, Gao X J, Wu J, Hong S Y, Gutowski W J, McGregor J. 2015. Multimodel ensemble projection of precipitation in eastern China under A1B emission scenario. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 9965–9980
- Ott I, Duethmann D, Liebert J, Berg P, Feldmann H, Ihringer J, Kunstmann H, Merz B, Schaedler G, Wagner S. 2013. High-resolution climate change impact analysis on medium-sized river catchments in Germany: An ensemble assessment. *J Hydrometeorol*, 14: 1175–1193
- Pielke Sr R A, Wilby R L. 2012. Regional climate downscaling: What's the point? *Eos Trans AGU*, 93: 52–53
- Peng X D, Che Y, Chang J. 2013. A novel approach to improve numerical weather prediction skills by using anomaly integration and historical data. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 8814–8826
- Prinn R G. 2013. Development and application of earth system models. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 3673–3680
- Ratnam J V, Behera S K, Doi T, Ratna S B, Landman W A. 2016. Improvements to the WRF seasonal hindcasts over south Africa by bias correcting the driving SINTEX-F2v CGCM fields. *J Clim*, 29: 2815–2829
- Ratnam J V, Giorgi F, Kaginalkar A, Cozzini S. 2009. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model. *Clim Dyn*, 33: 119–139
- Rocheta E, Evans J P, Sharma A. 2014. Assessing atmospheric bias correction for dynamical consistency using potential vorticity. *Environ Res Lett*, 9: 124010
- Rocheta E, Evans J P, Sharma A. 2017. Can bias correction of regional climate model lateral boundary conditions improve low-frequency rainfall variability? *J Clim*, 30: 9785–9806
- Sato T, Kimura F, Kitoh A. 2007. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J Hydrol*, 333: 144–154
- Shukla S, Lettenmaier D P. 2013. Multi-RCM ensemble downscaling of NCEP CFS winter season forecasts: Implications for seasonal hydrologic forecast skill. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 10770–10790
- Stauffer D R, Seaman N L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon Weather Rev*, 118: 1250–1277
- Sun F P, Walton D B, Hall A. 2015. A hybrid dynamical-statistical downscaling technique. Part II: End-of-century warming projections predict a new climate state in the Los Angeles region. *J Clim*, 28: 4618–4636
- Sun Y, Zhong Z, Li T, Yi L, Camargo S J, Hu Y, Liu K, Chen H, Liao Q, Shi J. 2017. Impact of ocean warming on tropical cyclone track over the western north pacific: A numerical investigation based on two case studies. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 8617–8630
- Tan J, Zhang Y, Ma W, Yu Q, Wang J, Chen L. 2015. Impact of spatial resolution on air quality simulation: A case study in a highly industrialized area in Shanghai, China. *Atmos Pollut Res*, 6: 322–333
- Tang J P, Li Q, Wang S Y, Lee D K, Hui P H, Niu X R, Gutowski J W J, Dairaku K, McGregor J, Katzfey J, Gao X J, Wu J, Hong S Y, Wang Y Q, Sasaki H. 2016a. Building Asian climate change scenario by multi-regional climate models ensemble. Part I: Surface air temperature. *Int J Climatol*, 36: 4241–4252
- Tang J P, Niu X R, Wang S Y, Gao H, Wang X, Wu J. 2016b. Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China: Present climate evaluations and future climate projections. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 2110–2129
- van der Linden P, Mitchell J F B. 2009. ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre Rep, 160

- Varghese S, Langmann B, Ceburnis D, O'Dowd C D. 2011. Effect of horizontal resolution on meteorology and air-quality prediction with a regional scale model. *Atmos Res*, 101: 574–594
- von Storch H, Zorita E, Cubasch U. 1993. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime. *J Clim*, 6: 1161–1171
- von Storch H, Langenberg H, Feser F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon Weather Rev*, 128: 3664–3673
- Walton D B, Sun F, Hall A, Capps S. 2015. A hybrid dynamical-statistical downscaling technique. Part I: Development and validation of the technique. *J Clim*, 28: 4597–4617
- Wang B, Ding Q, Fu X, Kang I S, Jin K, Shukla J, Doblas-Reyes F. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys Res Lett*, 32: L15711
- Wang J, Kotamarthi V R. 2015. High-resolution dynamically down-scaled projections of precipitation in the mid and late 21st century over North America. *Earth's Future*, 3: 268–288
- White R H, Toumi R. 2013. The limitations of bias correcting regional climate model inputs. *Geophys Res Lett*, 40: 2907–2912
- Wilby R L, Wigley T M L. 1997. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Prog Phys Geography*, 21: 530–548
- Wilby R L, Wigley T M L, Conway D, Jones P D, Hewitson B C, Main J, Wilks D S. 1998. Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resour Res*, 34: 2995–3008
- Wu W, Lynch A H. 2000. Response of the seasonal carbon cycle in high latitudes to climate anomalies. *J Geophys Res*, 105: 22897–22908
- Xu Z F, Yang Z L. 2012. An improved dynamical downscaling method with GCM bias corrections and its validation with 30 years of climate simulations. *J Clim*, 25: 6271–6286
- Xu Z F, Yang Z L. 2015. A new dynamical downscaling approach with GCM bias corrections and spectral nudging. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 3063–3084
- Xu Z F, Yang Z L. 2017. Relative impacts of increased greenhouse gas concentrations and land cover change on the surface climate in arid and semi-arid regions of China. *Clim Change*, 144: 491–503
- Xue Y, Vasic R, Janjic Z, Mesinger F, Mitchell K E. 2007. Assessment of dynamic downscaling of the continental U.S. regional climate using the Eta/SSiB Regional Climate Model. *J Clim*, 20: 4172–4193
- Xue Y K, Janjic Z, Dudhia J, Vasic R, De Sales F. 2014. A review on regional dynamical downscaling in intraseasonal to seasonal simulation/prediction and major factors that affect downscaling ability. *Atmos Res*, 147–148: 68–85
- Yang Z L. 2015. Foreword to the special issue: Regional earth system modeling. *Clim Change*, 129: 365–368
- Yu M, Wang G. 2014. Impacts of bias correction of lateral boundary conditions on regional climate projections in West Africa. *Clim Dyn*, 42: 2521–2538
- Zarzycki C M, Jablonowski C, Thatcher D R, Taylor M A. 2015. Effects of localized grid refinement on the general circulation and climatology in the Community Atmosphere Model. *J Clim*, 28: 2777–2803
- Zou L W, Zhou T J, Peng D D. 2016. Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX East Asia domain: A comparison of regional ocean-atmosphere coupled model to stand-alone RCM simulations. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 1442–1458

(责任编辑: 黄建平)