

未来气候情景下气候变化响应过程研究综述

成爱芳¹, 冯 起¹, 张健恺², 李宗省¹, 王 岗¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 气候变化将会对生态系统、自然资源、极端气候和人类社会产生一定的影响, 科学评估未来气候变化响应是应对气候变化的前提。通过对当前研究成果的回顾, 建立未来气候情景下气候变化响应研究的系统思路, 并总结了研究所涉及的方法。系统论述了应用第5阶段耦合模式比较计划(CMIP5)气候模式前进行适用性评价的必要性; 分析了当前降尺度方法尤其是统计降尺度的主要方法及进展; 归纳了偏差校正过程中普遍使用的方法, 最后, 综合分析了整个研究过程中的不确定性。研究将为气候变化响应分析提供方法和思路指导。

关键词: 降尺度方法; 偏差校正方法; 气候变化响应; CMIP5

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2015)01-0084-07

1 研究意义

IPCC 第5次评估报告(AR5)指出: 自从19世纪后半期以来, 全球尺度的平均气温在不断升高, 过去的3个连续10 a的平均气温比有器测记录以来的任意一个10 a都高; 冰川、格陵兰和南极冰盖等累积冰量的减少导致海平面上升速率由1993~2009年间的(1.0~1.4) mm/a增加到2005~2009年间的(1.2~2.2) mm/a^[1]。报告中还指出, 1971~2010年间, 海洋表层0~700 m海温呈现正的变化趋势, 海洋热含量也在不断增加^[2]。报告通过新的科学观测事实, 更为完善的归因分析和气候系统模式模拟结果, 进一步确认了近年来气候变暖的事实^[3]。而气候变暖必然对水循环系统、农业及粮食安全、生态系统、异常气候、经济和人类社会等产生一定的影响^[4~12], 并且危及人类自身的安全。面对气候变暖的事实, 作为受气候变化影响较为直接的利益相关群体, 科学预估未来一段时期气候变化对各个自然环境要素及人类社会的响应, 从而能够适时调整应对策略显得尤为重要。本文综合分析未来情景下气候变化响应研究的一般思路, 系统论述了整个响应研究过程中各个环节涉及的方法和内容, 以便为气候变化响应分析提供研究框架和理论依据。

2 气候模式及适用性评价

世界气候研究计划(WCRP)耦合模式工作组(WGCM)联合国国际地圈-生物圈计划、地球系统集成与建模项目以及世界上20多个知名的气候模拟机构共同组织实施了第5阶段耦合模式比较计划(CMIP5)^[13]。参与CMIP5的气候模式在CMIP3基础上做了很大的改进, 许多新模式加入了该计划, 并且建立了新的排放情景——代表性浓度路径(RCP)^[14], 同时, 模式的模拟结果也被IPCC AR5所采用^[1]。全球气候模式(GCM)是现阶段预测未来气候变化及其响应研究的主要途径。但是值得注意的是, 在气候模拟过程中, 初始条件、边界条件、情景、观测、模型参数和结构均会导致模拟结果出现一定程度的不确定性, 尤其是在区域尺度上^[1,15~17], 不确定性更为突出。因此, 在运用GCM预测未来气候变化之前, 首先要进行模拟结果的区域适应性评价^[18,19]。

当前, GCM适用性评价主要采用3种方法: 定性的诊断学研究; 定量的利用一定的数学度量标准; 比较并评估前后两个时期模型性能的改进程度^[1,20]。具体而言, 在对模型模拟的整体性能进行评价时, 最为直接的方法是将模型模拟的变量和同期相应的观测值的分位数进行比较^[21,22]; 在对模型模拟的某一具体过程进行评价时, 需要基于相

收稿日期: 2014-04-14; 修订日期: 2014-06-14

基金项目: 中国科学院重点部署类项目(KZZD-EW-04-05)资助。

作者简介: 成爱芳(1982-), 女, 陕西澄城人, 博士研究生, 主要研究方向为气候变化水文响应。E-mail: aifangcheng@hotmail.com

似的物理基础对系统过程进行分类,之后基于机制导向进行有针对性的分类评价^[23];另外,也有利用卫星观测数据^[24]和基于多模式集成的方法进行评价^[25]。

对于应用 CMIP5 气候模式在中国的适用性评价研究中,有学者基于 CMIP5 模式、CRU 数据和观测资料,从中亚地区及中国气温和降水的变化趋势、空间分布特征、空间相关系数和年际变率等角度评估了模式的模拟性能,结果表明:就气温而言,大部分模式能够模拟年平均气温特点,尤其是高、低值中心和等值线数值分布;就降水而言, MRI-CGCM3、CanESM2、MIROC5、CNRM-CM5、MPI-ESM-LR、MIROC-ESM 和 CCSM4 的模拟效果较好^[26-28]。也有学者基于 NECP 再分析资料和观测资料评估了 CMIP5 模式模拟的东亚环流、极端气温和地面风速的效果,认为模式对中国 8 个极端气温指数和 20 a 一遇最高(低)气温有模拟能力;对东亚地区环流场气候态模拟效果最好的 5 个模式是 CESM1-CAM5、MPI-ESM-P、EC-EARTH、ACCESS1-0 和 MPE-ESM-MR,而对冬、夏季大气环流场年际变率综合模拟能力最强的 5 个模式是 MPI-ESM-MR、FGOALS-S2、MPI-ESM-P、GFDL-ESM-2G 和 CanESM2;所有模式在模拟风速年际变率方面均较差^[29,30]。

对于应用 CMIP5 气候模式在国外的适用性评价研究中, Sillmann 等利用 31 个 CMIP5 模式, 4 个再分析资料和基于观测计算得出的极端气候指数 HadEX2 格点数据, 分析了模式对极端气候的模拟能力, 研究发现模式基本上能够模拟极端气候及其变化趋势^[31]。Perez 等运用基于天气型对天气进行分类的方法评估了 CMIP5 模式模拟的天气形势, 同时也利用历史实验数据分析了模式对气候变量历史年际多样性模拟的好坏, 评估发现模拟性能较好的模式为: ACCESS1.0、EC-EARTH、HadGEM2-CC、HadGEM2-ES 和 CMCC-CM^[32]。Elguindi 等利用修正的 Thornthwaite 气候分类法评估了 32 个 CMIP5 集成模拟结果对历史实验模拟和未来气候情景的模拟能力, 结果表明模式集合虽然能够模拟全球尺度的气候分布特征, 并且能够较好的模拟极端气候模, 但是个别区域的气候型模拟结果较差^[33]。另外, 也有学者评估了模式对季风系统、天气系统、云反馈机制等过程的模拟性能^[34,35], 综合以上国内外学者对 CMIP5 适用性评价的结果, 发现

各学者基于不同的研究过程与目的, 运用不同的评价标准, 结合再分析资料和观测资料, 来选择出适用于本地区的 GCMs, 因而, 在基于 GCM 模拟结果预估区域未来气候变化之前, 选择本区域最佳的 GCM 组合是非常必要的。

3 降尺度方法

GCM 的水平分辨率通常达到 250~600 km, 如果将它的模拟结果直接应用于区域尺度或者更小的尺度气候变化响应研究当中, 将会忽略小尺度上由于地形起伏、植被变化和微气候等因素产生的差异^[1]。降尺度方法是解决这种尺度不匹配问题的有效途径, 它是将大尺度、低时空分辨率的 GCM 或区域气候模式(RCM)的输出结果通过统计或动力学方法转化为小尺度、高分辨率的区域气候信息的过程^[36-38]。降尺度方法主要可分为统计降尺度和动力降尺度。

动力降尺度是将 RCM 嵌套于 GCM 当中, 基于一定的初始条件并以 GCM 为大气边界条件, 从而获得高分辨率的区域气候信息的方法^[36]。虽然动力降尺度基于一定的物理基础, 显著提高了模式的分辨率, 能够模拟区域气候信息, 如地形雨、极端气候事件、区域尺度的气候异常以及一些气候非线性效应, 如气候异常与厄尔尼诺和南方涛动的关系^[36,39], 但是, 该方法也有一定缺陷: 如无法获得 GCM 提供的驱动场与 RCM 模拟变量的双向反馈机制; 易受驱动场系统误差的影响; 同时对计算能力要求高; 另外, 代表次网格尺度气候过程参数化方案在未来气候应用中可能存在的问题^[37,40]。当前, 该方法的进一步发展主要体现在 RCM 上。从 AR4 以来, 典型区域气候模式分辨率由 50 km 提高到 25 km^[41]。但是长时间运行的较高分辨率的 GCM 仍然很少^[42]。同时, 综合考虑海洋甚至海冰的耦合气候模式也在发展当中^[43,44]。另外, 几十年尺度和百年尺度的 RCM 模拟及基于互相协作的 RCM 实验及集成研究当前也很普遍^[45,46]。

统计降尺度方法主要是建立大尺度环流因子和区域气象要素之间的统计函数关系, 并用独立的观测资料检验这种关系的合理性。虽然统计降尺度模型缺少物理机理, 受训练模型的观测资料影响较大, 一般难以获得区域尺度空间上较为连续的结果, 但是, 由于它计算量小、简单灵活、节省机时以及方便使用多个 GCM 和不同气候情景的组合进行

降尺度分析以增加预测结果的可靠性等特点,是目前应用比较广泛的一种降尺度方法^[47-49]。统计降尺度方法主要分为以下3类:第1类为天气分型法,它主要是依据大尺度的天气信息对天气型进行归类,进而推断小尺度天气和大尺度天气型的关系^[50,51];第2类为回归模型,它主要是建立大尺度预报因子与区域尺度预报量间的线性与非线性函数关系^[52];第3类为随机天气发生器,最典型的方法表现在修正常用天气发生器如 WGEN 和 LARS-WG 的参数^[53,54]。统计降尺度方法的应用是基于以下假设:① 与当地尺度预报量有关的预报因子必须具有明确的物理意义,并且能够充分被 GCM 模拟;② 当前气候条件下建立的统计关系同样需适用于未来气候条件下;③ 预报因子应包含足够的并且稳定的未来气候变化信号;④ 决定当地尺度未来气候状况的预报因子不能与模型订正阶段的因子相同^[48,55,56]。

虽然当前涌现出了许多的降尺度方法的比较研究成果,但是它们都基于不同的空间区域,不同的预报量与预报因子,不同的评价标准,因此,直接比较不同的降尺度方法的相对性能是很困难的^[36]。自从 IPCC AR4 以来,统计降尺度方法就有了很大的发展^[36,52,54]。当前,在区域尺度上,基于统计降尺度的未来气候变化及其响应研究得到了广泛关注^[33,34,57],并且已经应用到了极端气候研究当中^[58]。

4 偏差校正方法

目前,由于我们对复杂大气缺乏深入理解以及 GCM 所采用的简单化的大气物理过程,现阶段的 GCM 模拟结果和观测资料会存在一定的偏差^[59,60]。例如,在降水研究中,典型的偏差通常表现在湿润天数的发生率增大、降雨的强度减小、对极端事件的错误模拟、高估或者低估了降水的季节差异^[61-63]。因而,在实际应用 GCM 结果之前,必须要经过偏差校正。偏差校正基于一定的转化方程,来调整模拟变量和观测变量之间的差异,它的应用前提是,当前气候条件下的校正关系同样也适用于未来气候条件下。偏差校正主要是针对2个不同的方向:第1个为直接校正 GCM 的输出结果或它们的统计量;第2个为直接校正 GCM 降尺度后的输出结果或它们的统计量。虽然,无论哪一种方式都无法纠正 GCM 模拟当中内在的物理和热力学过程所造成的偏差,但是,第2个方式在计算方面更加简单有效^[64]。常用的偏差校正的方法有:线性

缩放、幂转换、方差比例变换、局部比例缩放、delta 变换和概率分布形式转化^[65]。

当前,有许多不同的偏差校正方法应用于 GCM 或者降尺度后的 GCM 的输出结果当中。Lafon 等利用线性、非线性、基于特定分布 γ 的分位数图和经验分布分位数图4种方法来校正 RCM 所模拟的日降水值,认为降水分布的一阶原点距和二阶中心距能够被正确的校正,但三阶原点距和四阶原点距校正的好坏程度取决于方法和率定时期的选择,但总体而言,非参数的方法能够更有效的校正偏差^[66]。Dosio 和 Paruolo 表明参数化尤其是非线性的转化方程较非参数化的转化方程在校正气候变量方面能够取得较好的效果,同时各个模式校正后的变量平均与观测结果较为接近^[67]。Sachindra 等利用等距分位数、月偏差校正和嵌套的偏差校正3种方法校正了降尺度后的降水的统计量,结果表明校正前高估的月降水的散点图在校正后更加趋于平衡,但是散点图的分散程度仍未改变,这3种方法能够精确的校正月降水的均值、方差和相关系数,但无法准确校正月降水的时间序列^[64]。Chen 等以北美洲10个流域为研究对象,采用基于平均值的方法和基于概率分布的方法,评估了不同校正方法的水文响应,结果表明基于经验分布的方法较基于平均值的方法评估效果更好,但响应模拟的好坏与校正方法的选择和流域地理位置有关,值得注意的是,所有的方法都无法准确校正降水发生的时间特征^[28]。Johnson 和 Sharma 利用嵌套的偏差校正方法纠正 GCM 模拟的月、年和年际间降水的统计量,发现该方法能够较好的纠正均值、方差和滞后一期自相关^[68]。Ines 等利用降水频率阈值校正了 GCM 模拟的降水频率,利用 gamma-gamma 分布转换校正了降水强度,最后将随机天气发生器嵌套于校正后的 GCM 结果中,对农作物的产量进行了预测^[69]。

5 整个响应研究过程的不确定性分析

在响应模型已经建立的条件下,未来气候变化响应量化的前提是利用经过前期适用性评价、降尺度、偏差校正和不确定性分析等程序评估后的未来气候情景数据(通常选用 CMIP5 的核心实验数据:RCP45 和 RCP85)作为初值输入来驱动响应模型。当前,基于未来气候情景的响应研究已经应用到生态系统、粮食生产、海岸带、水资源、冰

冻圈、生物健康和易受气候变化影响的工业、居住环境和社会群体等领域^[37,40,70,71]。这些研究有的侧重分析响应群体如生态系统定量的变化外,有的则侧重于整个响应研究过程中的方法突破,以实现准确预估的目的^[72,73]。

气候变化响应研究过程包含许多的不确定性,不确定性存在于研究的各个环节,如气候模式与情景、统计降尺度方法、偏差校正方法和响应模型。其中,气候模式的不确定性是最为关键的因素,它的不确定性主要来自于模型参数和结构方面,虽然自从IPCC AR4以来,大量的实验和研究使得我们更进一步的加深了对不确定性的认识,但是AR5中的不确定性来源与AR4并未有太大差别^[1,74]。在人类活动导致的气候变化的每一阶段都存在不确定性,具体而言温室气体、气溶胶的排放及前期活动均是不确定的,因此在把温室气体排放转化为辐射强迫集聚的过程中将会计算有关的强迫及预估相应的气候系统的响应,在这个过程中,地球气候系统过程的代表性及气候内部的可变性均会导致不确定性^[37]。

在使用统计降尺度方法的过程中,区域大小的选择决定了大尺度环流变量与当地尺度气候的相关程度,同时可获取的观测资料的序列长度及观测本身也存在不确定性,另外,不同降尺度方法和预报因子的选择,未来气候变化导致经验方程不稳定性均会产生不确定性^[75]。Lafon等指出由于偏差校正方法和校正时期的选择,尤其是随着降水的原点距阶数的增加,这进一步增加了响应分析过程的不确定性^[66]。Christensen等指出,基于当前气候条件下的校对方程,应用于未来气温较目前升高4~6℃时存在巨大的不确定性^[76]。Chen等表明,偏差校正方法在应用于极端降水研究方面,不确定性很大,尤其是在仅仅利用一个RCM模拟结果和一种偏差校正方法的情况下,另外,不确定性依赖于研究区域和所校正的气候变量^[77]。在未来响应情景中,不同的气候模式、气候情景、降尺度方法、偏差校正方法和响应模型组合,将会产生不同的结果,因此有必要权衡整个过程中的不确定性,增加研究的可信度。

6 结论与讨论

本研究概括了基于CMIP5气候模式核心实验情景数据来预估未来气候变化响应研究的一般思

路,以便为生态系统、水资源和农业生产等领域应对气候变化提供参考。当前,利用CMIP5气候模式数据并综合考虑未来响应预估的各个环节的研究相对较少。由于计算量、方法突破的难度、不确定性等因素的影响,大多数研究仅仅侧重于某一方面,如降尺度方法的改进与比较研究,但其他方面也是未来响应研究必不可少的环节,因此,本研究对整个未来影响预估过程中所涉及的关键问题与方法加以总结。论述了应用CMIP5气候模式前进行适用性评价的必要性;分析了降尺度方法尤其是统计降尺度的主要方法及进展;归纳了偏差校正过程中普遍使用的方法。另外,不确定性的评估也是未来气候变化响应研究较为关键的环节,从观测数据、再分析资料、气候模式、降尺度方法、偏差校正方法到响应模型,各个环节都存在一定的不确定性,我们对主要的不确定性的来源及判定方法进行了讨论,综合分析了整个研究过程中的不确定性。研究将为气候变化响应研究提供方法和思路指导。

参考文献:

- [1] IPCC.Climate Change 2013:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M].United Kingdom and New York,NY, USA:Cambridge University Press, Cambridge,2013:1535.
- [2] Levitus S,Antonov I J,Boyer T P,et al.World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2 000 m) 1955-2010[J]. Geophys.Res.Lett.,2012,**39**(10):1-5.doi.10.1029/2012GL051106
- [3] 张晓华,高云,祁悦,等. IPCC第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架条约》进程的影响分析[J]. 气候变化研究进展,2014,**10**(1):14~19.
- [4] Piao S,Ciais P,Huang Y,et al.The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J].Nature,2010,**467**: 43-51.doi.10.1038/nature09364
- [5] 岳天祥,范泽孟.典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究[J].科学通报,2014,**59**(3):217~231.
- [6] Wang W,Shao Q X,Yang T.Multimodel ensemble projections of future climate extreme changes in the Haihe River Basin, China [J].Theor. Appl. Climatol,2013.doi.10.1007/s00704-013-1068-9
- [7] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I):水文效应[J].冰川冻土,2013,**35**(3): 513~527.
- [8] 姜大膀,田芝平. 21世纪东亚季风变化: CMIP3和CMIP5模式预估结果[J].科学通报,2013,**58**(8):707~716.
- [9] 姚遥,罗勇,黄建斌.8个CMIP5模式对中国极端气温的模拟和预[J].气候变化研究进展,2012,**8**(4):250~256.
- [10] 潘威,闫芳芳,郑景云,等.1766年以来黄河上中游汛期径流

- 量变化的同步性[J].地理科学,2013,33(9):1145~1149.
- [11] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457~464.
- [12] 方修琦,郑景云,葛全胜.粮食安全视角下中国历史气候变化影响与响应的过程与机理[J].地理科学,2014.doi:10.13249/j.cnki.sgs.20140121.014
- [13] Taylor K E,Stouffer R J,Meehl G A.An overview of Cmp5 and the experiment design[J]. B.Am.Meteorol.Soc.,2012,93(4):485-498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- [14] Moss R H,Edmonds J A,Hibbard K A,et al.The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J].Nature,2010,463(7282):747-756.doi:10.1038/nature08823
- [15] Trenberth K E.The use and abuse of climate models[J].Nature,1997,386:131-133.doi:10.1038/386131a0
- [16] Knutti R,Jan Sedláček J.Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections[J].Nature,2013,3:369-373.doi:10.1038/nclimate1716
- [17] 张世法,顾 颖,林 锦,等.气候模式应用中的不确定性分析[J].水科学进展,2010,21(4):504~511.
- [18] 张选泽.利用卫星观测MSU数据评估CMIP5中气候模式模拟的大气温度趋势[D].兰州:兰州大学,2013.
- [19] 李瑞青,吕世华,韩 博.10个CMIP5模式对亚澳季风环流及其变率的模拟[J].热带气象学报,2013,29(5):749~758.
- [20] IPCC.Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections[M]. Bern, Switzerland: IPCC Working Group I Technical Support Unit,University of Bern, 2010:117.
- [21] Gleckler P J,Taylor K E,Doutriaux C.Performance metrics for climate models[J].J.Geophys.Res.,2008,113(D6):1-20.doi:10.1029/2007JD008972
- [22] Reichler T,Kim J.How well do coupled models simulate today's climate?[J].Bull.Am.Meteorol.Soc.,2008,89(3):303-311.doi.org/10.1175/BAMS-89-3-303
- [23] Tsushima T,Ringer M A,Webb M J,et al.Quantitative evaluation of the seasonal variations in climate model cloud regimes[J].Clim. Dyn.,2013,41(9-10):2679-2696.doi:10.1007/s00382-012-1609.4
- [24] Jiang J H,Su H,Zhai C,et al.Evaluation of cloud and water vapor simulations in CMIP5 climate models using NASA "A-Train" satellite observations[J].J.Geophys. Res.,2012,117(D14):1-24. doi:10.1029/2011JD017237
- [25] Heinrich G,Gobiet A,Mendlik T.Extended regional climate model projections for Europe until the mid-twenty first century: combining ENSEMBLES and CMIP3[J].Clim.Dyn.,2014,42(1-2): 521-535.doi:10.1007/s00382-013-1840-7
- [26] 吴昊旻,黄安宁,何 清,等.10个CMIP5模式预估中亚地区未来50a降水时空变化特征[J].干旱区地理,2013,36(4):669~679.
- [27] 姜燕敏,吴昊旻.20个CMIP5模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估[J].气候变化研究进展,2013,9(2):110~116.
- [28] Chen L,Frauenfeld O W.Surface air temperature changes over the 20th and 21st centuries in China simulated by 20 CMIP5 models[J].J.Clim.,2014.doi:10.1175/JCLI-D-13-00465.1
- [29] 姚 遥,罗 勇,黄建斌.8个CMIP5模式对中国极端气温的模拟和预估[J].气候变化研究进展,2012,8(4):250~256.
- [30] 田 亮.CMIP5全球气候模式对东亚环流模拟的评估[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [31] Sillmann J,Kharin V V,Zhang X,et al.Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble:Part 1.Model evaluation in the present climate[J].J.Geophys.Res.,2013,118(4):1716-1733. doi:10.1002/jgrd.50203
- [32] Perez J,Menendez M,Mendez F J,et al.Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region[J]. Clim. Dyn., 2014. doi:10.1007/s00382-014-2078-8
- [33] Elguindi N,Grundstein A,Bernardes S,et al.Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification[J].Clim.Change,2013,122(4): 523-538.doi:10.1007/s10584-013-1020-0
- [34] Bracegirdle T J,Shuckburgh E,Sallee J,et al.Assessment of surface winds over the Atlantic, Indian, and Pacific Ocean sectors of the Southern Ocean in CMIP5 models: historical bias, forcing response, and state dependence[J].J.Geophys.Res.,2013,118(2):547-562.doi:10.1002/jgrd.50153
- [35] Tsushima Y,Ringer M A,Webb M J,et al.Quantitative evaluation of the seasonal variations in climate model cloud regimes[J].Clim.Dyn.,2013,41(9-10): 2679-2696.doi:10.1007/s00382-012-1609.4
- [36] Fowler H J,Blenkinsop S,Tebaldi C.Linking climate change modelling to impacts studies:recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling[J].Int.J.Climatol,2007,27(12):1547-1578.doi:10.1002/joc.1556
- [37] IPCC.Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M].United Kingdom and New York,NY,USA:Cambridge University Press, Cambridge,2007:996.
- [38] Maraun D,Wetterhal F,Ireson A M,et al.Precipitation downscaling under climate change:Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user[J].Rev.Geo-phys.,2010,48(3):1-34.doi:10.1029/2009RG000314
- [39] Frei C,Schöll R,Fukutome S,et al.Future change of precipitation extremes in Europe:an intercomparison of scenarios from regional climate models[J].J.Geophys.Res.,2006,111(D6):1-22. doi:10.1029/2005JD005965
- [40] IPCC.Climate Change 2001:The Scientific Basis.Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M].United Kingdom and New York,NY,USA:Cambridge University Press,Cambridge, 2001:881.

- [41] Christensen J, Kjellstrom E, Giorgi F, et al. Weight assignment in regional climate models[J]. *Clim. Res.*, 2010, **44**(2-3): 179-194. doi.10.3354/cr00916
- [42] Chan S C, Kendon E J, Fowler H J, et al. Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation?[J]. *Clim. Dyn.*, 2013, **41**(5-6): 1475-1495. doi.10.1007/s00382-012-1568-9
- [43] Artale V, Calmanti S, Carillo A, et al. An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: Assessment of a present climate simulation[J]. *Clim. Dyn.*, 2010, **35**(5): 721-740. doi.10.1007/s00382-009-0691-8
- [44] Doscher R, Wyser K, Markus Meier H E, et al. Quantifying Arctic contributions to climate predictability in a regional coupled ocean-ice atmosphere model[J]. *Clim. Dyn.*, 2010, **34**(7-8): 1157-1176. doi.10.1007/s00382-009-0567-y
- [45] 符淙斌, 王淑瑜, 熊 喆, 等. 亚洲区域气候模式比较计划的进展[J]. *气候与环境研究*, 2004, **9**(2): 225~239.
- [46] Mearns L O, Arritt R, Biner S, et al. The North American regional climate change assessment program: overview of phase I results [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2012, **93**: 1337-1362. doi.10.1175/BAMS-D-11-00223.1
- [47] Wilby R L, Charles S P, Zorita E, et al. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling method [R]. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA), 2014, http://ipcc-dde.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown_Guide.pdf
- [48] Wilby R L, Dawson C. W. The Statistical DownScaling Model: insights from one decade of application[J]. *Int. J. Climatol.*, 2013, **33**(7): 1707-1719. doi.10.1002/joc.3544
- [49] 刘昌明, 刘文彬, 傅国斌, 等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J]. *水科学进展*, 2012, **23**(3): 427~437.
- [50] Charles A, Timbal B, Fernandez E, et al. Analog downscaling of seasonal rainfall forecasts in the Murray Darling Basin[J]. *Mon. Weather Rev.*, 2013, **141**: 1099-1117. doi.10.1175/MWR-D-12-00098.1
- [51] Shao Q, Li M. An improved statistical analogue downscaling procedure for seasonal precipitation forecast[J]. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2013, **27**(4): 819-830. doi.10.1007/s00477-012-0610-0
- [52] Nasser M, Tavakol-Davani H, Zahraie B. Performance assessment of different data mining methods in statistical downscaling of daily precipitation[J]. *J. Hydrol.*, 2013, **492**: 1-14. doi.10.1016/j.jhydrol.2013.04.017
- [53] Khalili M, Brissette F, Leconte R. Stochastic multisite generation of daily weather data[J]. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2009, **23**: 837-849. doi.10.1007/s00477-008-0275-x
- [54] Wilks D S. Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator[J]. *Clim. Res.*, 1999, **11**: 125-136.
- [55] Hewitson B C, Crane R G. Climate downscaling: techniques and application[J]. *Clim. Res.*, 1996, **7**: 85-95.
- [56] Giorgi F, Hewitson B. Regional Climate Information—Evaluation and Projections, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]// [Houghton J T. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, US: Cambridge University Press, Cambridge, 2001: 88.
- [57] van Vliet M T H, Blenkinsop S, Burton A, et al. A multi-model ensemble of downscaled spatial climate change scenarios for the Dommel catchment, Western Europe[J]. *Clim. Change*, 2012, **111**(2): 249-277. doi.10.1007/s10584-011-0131-8
- [58] Flaounas E, Drobinski P, Vrac M, et al. Precipitation and temperature space-time variability and extremes in the Mediterranean region: evaluation of dynamical and statistical downscaling methods[J]. *Clim. Dyn.*, 2013, **40**(11-12): 2687-2705. doi.10.1007/s00382-012-1558-y
- [59] Li H, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(D10): 1-20. doi.10.1029/2009JD012882
- [60] 陶 辉, 黄金龙, 翟建青, 等. 长江流域气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景下的预估[J]. *气候变化研究进展*, 2013, **9**(4): 246~251.
- [61] Ines A V M, Hansen J W. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies[J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 2006, **138**(1-4): 44-53. doi.10.1016/j.agrformet.2006.03.009
- [62] Terink W, Hurkmans R T W L, Torfs P J J F, et al. Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2009, **6**: 5377-5413. doi.10.5194/hessd-6-5377-2009
- [63] 陈活泼. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估[J]. *科学通报*, 2013, **58**(8): 743~752.
- [64] Sachindra D A, Huang F, Barton A, et al. Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation-part 1: calibration and validation[J]. *Int. J. Climatol.*, 2014. doi.10.1002/joc.39
- [65] Terink W, Hurkmans R T W L, Torfs P J J F, et al. Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, **14**: 687-703. doi.10.5194/hess-14-687-2010
- [66] Lafon T, Dadson S, Buys G, et al. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods[J]. *Int. J. Climatol.*, 2013, **33**(6): 1367-1381. doi.10.1002/joc.3518
- [67] Dosio A, Paruolo P. Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: evaluation on the present climate[J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(D16): 1-22. doi.10.1029/2011JD015934
- [68] Johnson F, Sharma A. A nesting model for bias correction of variability at multiple time scales in general circulation model precipitation simulations[J]. *Water Resour. Res.*, 2012, **48**(1): 1-16. doi.10.1029/2011WR010464
- [69] Ines A V M, Hansen J W, Robertson A W. Enhancing the utility of daily GCM rainfall for crop yield prediction[J]. *Int. J. Climatol.*,

- 2011, **31**(14):2168-2182. doi.10.1002/joc.2223
- [70] 何 勇,武永峰,刘秋峰.未来气候变化情景下中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性评价[J].科学通报,2013, **59**(9):833~839.
- [71] 王晓东,刘惠清.长白山北坡林线岳桦种群动态对气候变化响应的坡向分异[J].地理科学,2012, **32**(2):199~206.
- [72] Hallegatte S, Henriet F, Corfee-Morlot J. The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework[J]. Clim. Change, 2011, **104**(1):51-87. doi.10.1007/s10584-010-9976-5
- [73] Kumar S, Dirmeyer P A, Merwade Venkatesh, et al. Land use/cover change impacts in CMIP5 climate simulations: A new methodology and 21st century challenges[J]. J. Geophys. Res., 2013, **118**(12):6337-6353. doi.10.1002/jgrd.50463
- [74] 董思言,高学杰.长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读[J].气候变化研究进展,2014, **10**(1):56~59.
- [75] Etemadi H, Samadi S, Sharifikia M. Uncertainty analysis of statistical downscaling models using general circulation model over an international wetland[J]. Clim. Dyn., 2013. doi.10.1007/s00382-013-1855-0
- [76] Christensen J H, Boberg F, Christensen O B, et al. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation[J]. Geophys. Res. Lett., 2008, **35**(20):1-6. doi.org/10.1029/2008GL035694
- [77] Chen J, Brissette F P, Chaumont D, et al. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins[J]. J. Hydrol., 2013, **479**:200-214. doi.10.1016/j.jhydrol.2012.11.062

A Review of Climate Change Scenario for Impacts Process Study

CHENG Ai-fang¹, FENG Qi¹, ZHANG Jian-kai², LI Zong-xing¹, WANG Gang¹

(1. Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. School of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Global climate change will have great effects on ecological systems, natural resources, food security, climate extremes, cryosphere and the damage to human social living conditions. Scientific assessment of projected climate change impacts is a vital way for stakeholder and policymaker to adjust strategies at the local scale. Outline of contents and related methods and key issues are discussed for climate change impacts study on RCP45 and RCP85 scenarios of Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) climate models by the summary of the current literatures. The article investigates the necessity of applicability evaluation before using the climate models from CMIP5 at the region and summarizes the methods applied to metric whether the model is reasonable to project the climate scenarios in the region. Downscaling methods that can bridge the gap between the coarse spatial resolution of global circulation model (GCM) and high resolution of climate variables are required for impacts evaluation at the local scale. The review introduces the fundamental principles and current main methods for downscaling climate variables, especially for statistical downscaling, and summarizes the latest progresses in this field. The GCM often show significant biases that include systematic model errors caused by imperfect conceptualization, discretization and spatial averaging within the grid cell. So bias correction methods are applied to remedy the biased output of GCM, RCM and downscaled them. We conclude with the commonly using bias correction method and recent development in this field. How to deal with uncertainties from GCM, downscaling method and bias correction is also a challenge for impact study. The article discusses the uncertainties in every step of the whole process. The review will provide the guideline for projection of climate change impacts in the region.

Key words: downscaling methods; bias correction; climate change impacts; CMIP5