

IPCC 第六次气候变化评估中的气候约束预估方法*

周佰铨 翟盘茂

ZHOU Baiquan ZHAI Panmao

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2021-09-13 收稿, 2021-10-22 改回.

周佰铨, 翟盘茂. 2021. IPCC 第六次气候变化评估中的气候约束预估方法. 气象学报, 79(6): 1063-1070

Zhou Baiquan, Zhai Panmao. 2021. The constraint methods for projection in the IPCC Sixth Assessment Report on climate change. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(6):1063-1070

Abstract With the rapid development since the Fifth Assessment Report (AR5), observational constraints have become an important part of the lines of evidence used in the Sixth Assessment Report (AR6) of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group I (WGI) to improve the constraints on projections of future climate change. For the first time in the history of the IPCC, the WGI AR6 report uses multiple lines of evidence, including observational constraints based on past simulated warming, multi-model projections, as well as the updated climate sensitivity, to constrain the assessed future changes in global surface temperature, which reduces the uncertainty of the multi-model estimation. This paper reviews and introduces several main observational constraint methods and their applications involved in the WGI AR6 report, including model weighting, attribution-based constraint (ASK methods), and emergent constraint. No matter in AR6 or in many projection studies for different variables over various regions, observational constraints have shown the potential to correct model bias and improve model projections. In comparison, there are very few studies focusing on observational constrained projection in China. It is urgent to strengthen researches on observational constraint methods and their application in the projections of regional climate change in China, to provide more abundant climate information with narrowed uncertainty for policy formulation and adaptation planning in response to climate change.

Key words Climate projection, Observational constraint, Model weighting, ASK method, Emergent constraint

摘要 得益于第五次评估报告(AR5)以来约束预估研究的迅速发展, 观测约束成为政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组(WGI)第六次评估报告(AR6)提升对未来预估约束的证据链中的重要一环。IPCC 第一工作组第六次评估报告首次利用包括根据历史模拟温度升高幅度得到的观测约束、多模式预估以及第六次评估报告中更新的气候敏感度在内的多条证据链来约束全球地表温度未来变化的预估, 减小了多模式预估的不确定性。文中回顾并介绍了 IPCC 第一工作组第六次评估报告中涉及的几种主要观测约束方法(多模式加权方法、基于归因结论的约束方法(ASK 方法)、萌现约束方法)及其应用情况。在 IPCC 第一工作组第六次评估报告以及很多针对不同区域不同变量的预估研究中, 观测约束方法均显示出了订正模式误差、改善模式预估的潜力。相比而言, 目前中国在观测约束预估方面的研究还不多, 亟待加强观测约束方法研究以及在中国区域气候变化预估中的应用, 为中国应对气候变化的政策制定和适应规划提供更丰富、不确定性更小的未来气候信息。

关键词 气候预估, 观测约束, 多模式加权, ASK 方法, 萌现约束

中图法分类号 P426.6

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507700)、国家自然科学基金项目(41905082)。

作者简介: 周佰铨, 主要从事极端事件及气候变化研究。E-mail: zhoubq@cma.gov.cn

通信作者: 翟盘茂, 主要从事极端事件及气候变化研究。E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

1 引言

气候变化影响评估、适应规划以及政策制定均需要可靠的未来气候变化预估信息(Brunner, et al, 2020a)。预估气候变化最典型的方法就是借助多个气候模式的集合来估计最有可能的变化及其不确定性(Brunner, et al, 2020a; Hegerl, et al, 2021), 例如最新的第六次耦合模式比较计划(CMIP6, Eyring, et al, 2016)。然而, 由于不同社会经济路径下的排放及技术发展情景差异、气候模式存在的误差以及内部变率等带来的不确定性, 模式间的离差仍很大(Weigel, et al, 2010; Knutti, et al, 2017)。如何减小多模式预估的不确定性成为气候变化研究领域近十年来的热点问题。

发展气候模式使其可以刻画更多尺度、更多过程, 提升模拟技巧是减小预估不确定性的重要手段, 但气候模式的发展与改进相对比较缓慢(Nijse, et al, 2018)。许多研究由此催生了利用多条证据链或者充分考虑不同来源的不确定性来约束预估的想法和相关技术。这些技术通常通过对比观测资料得到的模式性能或表现来实施对气候变化预估的约束, 所以常称为观测约束(observational constraint)(Borodina, et al, 2017; Ribes, et al, 2021; Hegerl, et al, 2021)。观测约束基于的假设是历史阶段评估得到的模式性能及表现与模式未来的行为存在可靠关系。这种关系可以是模式

历史模拟表现向未来预估的延续(Brunner, et al, 2020a), 也可以是历史或当今有观测资料的变量与待预估变量之间存在的某种统计关系(Rowell, 2019)。前者包括利用模式在历史阶段的性能及表现赋予模式相应的权重或直接筛选模式, 称作多模式加权(Knutti, et al, 2017; Lorenz, et al, 2018; Brunner, et al, 2020b); 也包括根据归因分析结果订正模式对不同外强迫的响应尺度, 称作基于归因结果的约束(Stott, et al, 2013; Shiogama, et al, 2016; Gillett, et al, 2021)。后者这种有观测资料的变量与待预估变量的统计关系往往不是通过单个模式诊断得到, 而是从多模式集合中“萌生”出来, 所以称作萌现约束(emergent constraint)(Hall, et al, 2019; Eyring, et al, 2019; Brient, 2020)。

观测约束在全球地表温度、全球降水、区域气候、极端事件、气候敏感度、云反馈、北极海冰、环流系统及碳循环等方面的预估中均有相关应用, 表1列出了近10年观测约束预估的一些代表性研究。基于对相关观测约束研究的综合评估, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组(WGI)第六次评估报告(AR6)明确指出, 此次报告在气候预估方面相比以往报告的进步主要体现在对未来气候变化的约束上。此次报告属IPCC首次在评估中综合利用了基于情景的多模式预估、基于历史温度升高模拟的观测约束以及更新的平衡态气候敏感

表1 近10年观测约束预估的一些代表性研究

Table 1 List of several representative projection studies in the recent 10 years using observational constraint

文献	约束方法	约束变量
Liang, et al, 2020; Brunner, et al, 2020b	多模式加权	全球地表气温
Brunner, et al, 2020a	多模式加权	区域气温、降水
Lorenz, et al, 2018	多模式加权	极端高温
Knutti, et al, 2017	多模式加权	北极海冰
Brunner, et al, 2020b	多模式加权	瞬变气候响应
Shiogama, et al, 2016; Gillett, et al, 2021	基于归因结果的约束	全球地表气温
Brunner, et al, 2020a; Zhou, et al, 2021	基于归因结果的约束	区域气温、降水
Sun, et al, 2014	基于归因结果的约束	极端高温
Li, et al, 2017	基于归因结果的约束	湿球温度
Wang, et al, 2020	基于归因结果的约束	昼夜复合型热浪
DeAngelis, et al, 2015; Tokarska, et al, 2020b	萌现约束	全球降水; 全球地表气温
O'Gorman, 2012; Borodina, et al, 2017; Freychet, et al, 2021	萌现约束	极端降水; 极端高温
Chen, et al, 2020; Wenzel, et al, 2016	萌现约束	西北太平洋副高; 急流位置
Sherwood, et al, 2014	萌现约束	平衡态气候敏感度
Siler, et al, 2018	萌现约束	云反馈

度(ECS)和瞬变气候响应(TCR)的评估结果,依此构建了未来全球地表温度变化的预估结果。报告指出,这些证据链的加入,包括在2019—2028年预估中使用的基于最近观测资料初始化的预测结果,减小了各个情景下评估的不确定性(IPCC, 2021)。除了全球地表温度的约束预估,IPCC第一工作组第六次评估报告中也对海洋热容量及海平面的未来变化用以上3方面的证据进行了约束。对其他变量,尚不存在此类稳健的约束方法来约束预估,所以在该报告气候变化预估的评估中绝大多数情况下用的还是CMIP6多模式的预估结果(IPCC, 2021; Lee, et al, 2021)。鉴于观测约束方法在预估研究中的兴起及其应用潜力和开阔前景,文中对IPCC第一工作组第六次评估报告中提及的几种主要观测约束预估方法进行回顾和介绍。

2 约束预估方法

2.1 多模式加权

在传统的气候预估中,多模式集合中的所有模式均被视为具有同等价值。所以,在估计目标变量的平均值或方差时,通常每个模式均赋予同等权重,也即所谓的“模式民主”。在IPCC第五次评估报告(AR5)对多模式预估的评估中,大多数时候均使用同等权重的做法(如图1左侧所示)。但在IPCC第五次评估报告对海冰的预估中仅使用了部

分通过检验评估的模式,即对模式进行筛选。筛选是直接某些历史表现不佳的模式剔除(属于多模式权重分配的极端情形),将其权重直接分配为0(如图1右上方模式C)。在第五次评估报告之后,多模式权重分配引发了广泛探讨和研究,因为同等权重的做法没有体现模式性能的优劣。目前已有相关证据证实对多模式集合进行同等权重分配并不一定是最优选择(Eyring, et al, 2019)。后续的研究除了集中在根据模式表现或其对预估信息的增量贡献进行模式筛选外,还有许多研究根据模式的模拟表现进行权重分配(如图1右下方所示)。这些多模式加权的研究根据一种或多种模式模拟表现的指标给模式分配权重以减小特定排放情景下气候预估的离差(Chen, et al, 2021)。

目前,越来越多的研究开始关注在设计模式权重分配策略的过程中模式之间的独立性问题。一些模式可能共享对某些过程的描述、参数化方案甚至部分代码,从而导致模拟结果存在同样的偏差(Herger, et al, 2018; Eyring, et al, 2019; Chen, et al, 2021),所以模式之间并不完全相互独立。这种不独立不仅挑战了模式具有同等价值或者说“模式民主”的理念,也可能使基于多模式得到的预估结果以一种还未完全研究透彻的方式出现偏差。由此促使一些研究开始在多模式加权的策略中同时考虑模式的模拟性能以及模式之间的独立性。许

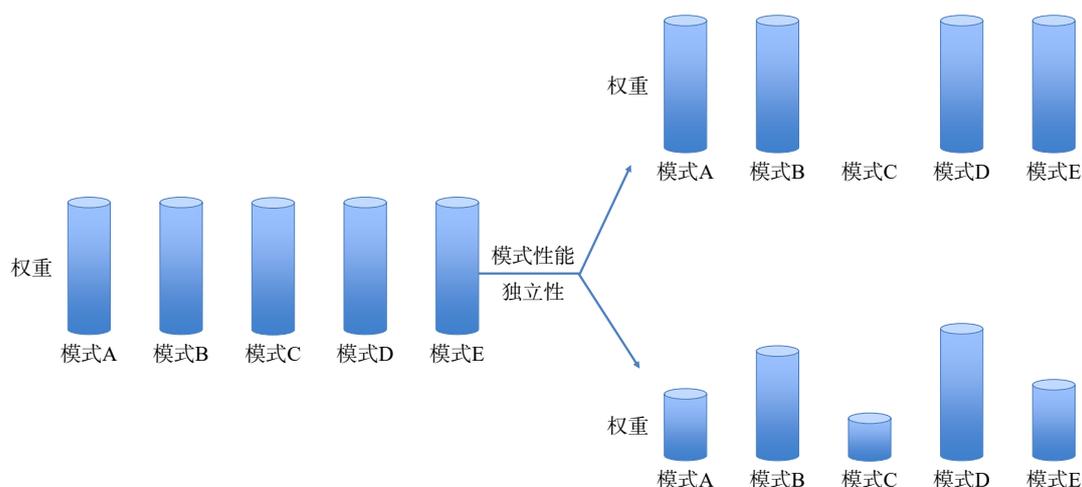


图1 多模式加权方法示意(柱代表多模式集合,5个模式示例分别为A、B、C、D、E,柱的高度代表权重;左侧是模式同等权重示意,右侧是根据模式性能和独立性赋予模式不同权重示意)

Fig. 1 The schematic diagram of model weighting (the bars represent multi-model ensemble, which is illustrated by 5 models here, model A, B, C, D, E, heights of these bars indicate the weighting; the left part shows that all models in the ensemble have equal weighting, while the right part shows the model weightings are specified based on model performance and independence)

多研究(Knutti, et al, 2017; Lorenz, et al, 2018)采用模式集合中模式表现的差异定义模式的独立性。然而这种定义对变量、观测数据集、模式性能指标、时段以及区域的选择都很敏感(Herger, et al, 2018)。另有一些研究(Sunyer, et al, 2014; Annan, et al, 2017)使用贝叶斯方法来考量模式的独立性或提出了独立于模式表现指标之外的、统计的、可量化的独立性定义。为防止得到的多模式最优权重出现过度拟合问题,一种方法是将观测数据集分为两个时段进行训练和验证,另一种新兴的方法是假设一个模式是完美的,然后开展交叉验证。后者这种“完美模式”方法在假设一个模式的模拟是真实值后,将集合中其他模式的权重向该模式订正,此后用该最优模式的预估数据来验证权重调整后的模式集合,重复该过程直到遍历多模式集合中所有模式。上述利用训练样本之外的数据进行测试及验证的做法还有一个优势,即可以考察针对某个变量或某种模式性能指标得到的最优权重是否对别的变量以及别的模式性能指标也适用(Eyring, et al, 2019; Chen, et al, 2021)。

尽管目前有一些多模式加权方法的应用取得了提升模式预估水平的效果,但尚无通用、稳健的方法来对多模式集合预估进行加权,所以IPCC第六次评估报告在多模式集合预估中仍然沿用第五次评估报告的做法,即多模式集合中的各个模式均为同等权重。利用模式集合的5%—95%离差范围指示预估可能的不确定性范围(Chen, et al, 2021; Lee, et al, 2021)。

2.2 基于归因结果的约束方法

在检测归因分析中运用指纹法可以得到不同强迫响应和观测的统计关系(Hasselmann, 1993, 1997; Allen, et al, 1999)。Allen等(2000)、Stott等(2002)和Kettleborough等(2007)将这种统计关系运用到预估不确定性的量化中,对预估形成约束,即基于归因结果的约束方法,也叫Allen Stott Kettleborough方法(简称ASK方法)。指纹法常用广义线性回归来实现,即观测到的气候变化 Y 被视作外部强迫的响应信号 X 和残留气候内部变率 u 的线性结合

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i X_i + u$$

式中, $a=[a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$ 是尺度因子矢量,用来调整不同响应模态的比重使其尽量与观测一致。当尺度因子在一定置信度下的置信范围显著大于0时,认为该尺度因子相对应的外部强迫信号是可检测的,且该尺度因子对应的统计关系在历史时期是稳健的。当尺度因子的范围包含1,说明对应的多模式平均强迫响应与观测基本一致。当尺度因子的范围全部大于(小于)1,说明对应模式模拟的强迫响应幅度与观测相比有所低估(高估)。当尺度因子稳健且假设其对应的统计关系在预估时段仍然有效,则该尺度因子可以作为调整模式模拟偏差的重要依据。将对应于不同强迫项的尺度因子直接乘到相应强迫的模式预估中并叠加,即可得到约束的预估及其相应的不确定性范围(Stott, et al, 2007)。此外,也有研究(Gillett, 2015; Tokarska, et al, 2020a)利用由该尺度因子调整过的对外强迫的响应评估各模式对该外强迫响应的模拟性能,从而进行模式筛选或赋予权重,再将筛选或加权后的模式集合应用到预估中形成约束预估。

基于归因结果的约束方法能否在预估中使用取决于能否得到统计意义显著的尺度因子矢量,即外强迫驱动的信号能否在观测中被稳健地检测到。信号的可检测性受模式集合成员数量、观测数据的可用性(例如时间长短)以及空间尺度等因素影响(Brunner, et al, 2020a)。考虑到信噪比,基于归因结果的约束方法主要在全球及大洲尺度的温度(包括极端温度事件)预估中应用较多(Li, et al, 2017; Wang, et al, 2020; Gillett, et al, 2021)。受限于信噪比较低带来的尺度因子的低稳健性,该方法在其他变量及区域尺度预估中的应用相对较少(Jones, et al, 2016)。IPCC第一工作组第六次评估报告在所有时间范围的大尺度预估中均使用了该观测约束方法得到的预估结果,尤其是全球地表温度预估(Lee, et al, 2021)。区域尺度上的一些研究,如对欧洲多个区域的温度和降水变化约束预估表明,基于归因结果的约束方法并不能在所有区域都减小预估的不确定性(Brunner, et al, 2020a; Hegerl, et al, 2021)。

2.3 萌现约束

萌现约束是指多模式集合中萌现的未来气候变化不确定的某一方面与气候系统某一有观测特征的显著关系(Chen, et al, 2021)。萌现约束首先

要在多模式集合模拟中找到稳固的历史或当今可观测变量与待预估变量的统计关系,再利用观测约束历史变量的离差或调整模式的权重,并根据统计关系得出约束后的待预估变量的预估结果,达到减小预估不确定性目的(Eyring, et al, 2019; Brient, 2020; 张华等, 2021)。如图 2 所示,变量 X 和 Y 分别是多模式集合在历史阶段和未来预估阶段的两个变量,二者存在显著的线性关系。根据此线性关系,将变量 X 的观测值范围(绿色阴影)对模式模拟的约束映射到变量 Y ,即可得到约束后的变量 Y 及其不确定性范围(蓝色阴影)。约束后变量 Y 的预估不确定范围比原先多模式集合预估的不确定范围明显减小。约束后变量 Y 的不确定性主要取决于变量 X 观测的不确定性以及萌现统计关系的不确定性。将由观测资料得到的对模式历史模拟中某一变量的约束通过萌现的统计关系映射到待预估变量的过程为萌现约束。统计关系不一定是图 2 所示的线性关系,也可能是其他的经验关系或更复杂的统计关系。

由萌现约束方法的主要流程发现,其关键组成部分包括稳健的有物理意义的萌现约束关系以及待预估信息密切相关的气候系统变量的观测及其不确定性范围估计。该方法的实际应用存在几方面风险:(1)对多维度的模式数据不加研判的恣意挖掘可能会得到虚假的高相关统计关系或不稳健的对未来预估的萌现约束(Chen, et al, 2021);

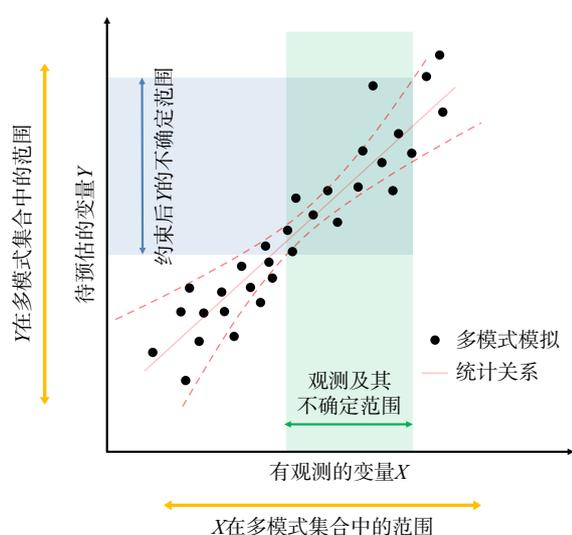


图 2 萌现约束方法示意

Fig. 2 The schematic diagram of emergent constraint

(2)当多模式集合内部存在的系统性偏差对萌现约束关系有影响或反映模式间共有的简化的参数化不能很好代表气候系统内部基础过程时,找出的萌现约束具有误导性;(3)萌现约束方法不适用于根据历史或当今的短期变率来约束气候变化中的缓慢反馈过程,因为缓慢的反馈过程对短期变率的影响可忽略不计(Eyring, et al, 2019)。为避免虚假的萌现约束关系出现,与多模式加权方法的训练-验证类似,可以用未包含在构建萌现约束关系的样本集中的另外一部分数据对萌现约束关系进行验证,还应始终秉持基于合理的物理解释和数学理论构建萌现约束关系(Chen, et al, 2021; Hall, et al, 2019)。在一套多模式集合中已经建立的萌现约束关系及相关结论在新一代的多模式集合中均需要重新评估。

对于平衡态气候敏感度,基于萌现约束方法,结合对反馈过程的深入理解、器测资料及古气候信息,IPCC 第一工作组第六次评估报告得到的不确定性范围(2.5—4℃)小于第五次评估报告(1.5—4.5℃)。对于瞬变气候响应,基于萌现约束、过程认识以及器测时期的温度升高,第六次报告评估得到的可能范围也比第五次评估报告有所缩小。第六次评估报告对使用不同历史时期或当今有器测资料的变量(如过去全球或近全球尺度的变暖或云反馈相关的变量等)开展萌现约束得到的平衡态气候敏感度和瞬变气候响应的预估结果进行了详细对比和评估,指明了不同方法的优劣(Forster, et al, 2021)。第六次评估报告在碳循环相关的预估中也评估了大量第五次评估报告以后才出现的萌现约束预估的研究。目前,萌现约束在极端温度、极端降水、环流系统及北极海冰等预估中已有广泛应用(Hall, et al, 2019; Brient, 2020; 表 1)。

3 总结及展望

文中回顾了最新发布的 IPCC 第一工作组第六次评估报告提及的多种观测约束预估方法(多模式加权方法、基于归因结果的约束方法即 ASK 方法和萌现约束方法),并简要总结了这些方法的应用情况。相比而言,多模式加权方法应用面更广,但找到非常合适的调整模式权重的方案具有一定挑战性(Knutti, et al, 2017)。基于归因结果的约束方法更多应用于信噪比较高变量的预估中,相比噪声

大的变量可展现出更小的不确定性(Hegerl, et al, 2021)。萌现约束方法则仅在多模式集合中萌现出稳健的物理上可解释的统计关系时适用(Hall, et al, 2019)。虽然上述3种观测约束预估方法基于的假设条件、内在特点及适用范围均不相同,但本质上都包含了模式评估的过程。多模式加权方法通过对待预估变量或与待预估变量有已知联系的单个或多个变量开展模式评估,根据评估结果调整模式权重。基于归因结果的约束方法常直接对待预估变量进行指纹法归因分析,评估模式的响应是否存在高估或低估,进而在预估中调整响应尺度。萌现约束方法则是针对与待预估变量有紧密关系的变量开展模式评估,利用萌现的统计关系约束待预估变量(Chen, et al, 2021)。

观测约束方法并不局限于以上3种,还有诸如贝叶斯概率预估、订正的大样本集合预估等(Brunner, et al, 2020a)。这些观测约束方法在IPCC第一工作组第六次评估报告及不同特定情形的应用中都一定程度体现出改进多模式预估的潜力和希望(Hegerl, et al, 2021; IPCC, 2021)。由于方法基于的假设和内在特点、考量的不确定性以及研究所使用的观测资料的差别,对同一区域相同变量运用不同的观测约束方法得到的约束预估结果往往会有一定差异(Brunner, et al, 2020a; Hegerl, et al, 2021)。对于如何综合多种方法得到的不一致的约束预估结果,IPCC第一工作组第六次评估报告在全球地表温度的预估中采用的做法是将不同约束预估方法视为平等。即在综合约束预估结果时,将按照Liang等(2020)、Tokarska等(2020b)和Ribes等(2021)研制的3种约束预估方法得到的全球地表温度的预估结果按相应的百分位进行了平均(Lee, et al, 2021)。此外,Hall等(2019)和Brunner等(2020a)提出了一些有关传达、综合及应用约束预估结果的探讨,如选用结果更为一致的方法或基于一致的技巧评估指标取舍约束预估方法,或在进行约束预估前将用于约束预估的关键信息(例如历史趋势、模式在区域内的表现及模式独立性)进行综合。

观测约束不仅要关注其方法,更需关注方法存在的根基——观测。观测资料覆盖区域、时间长度及质量都会对观测约束中的模式评估产生影响(如

可能因为观测系统性的偏差导致得到的模式集合权重并不准确)。此外,稳健的模式评估还可能受到内部变率的阻碍,特别是用于评估的历史时段较短时(Borodina, et al, 2017; Eyring, et al, 2019)。对模式及其评估手段的大幅度优化、观测资料的进一步完善,以及对观测约束方法机理的深入认识有望加速推动气候变化学界对气候系统行为的认知,从而在真正意义上减小气候系统更多方面预估的不确定性(Hall, et al, 2019; Eyring, et al, 2019)。

对比国际上观测约束预估研究,目前中国的研究还不多,仅有几篇文献(Sun, et al, 2014; Li, et al, 2017; Wang, et al, 2020; Chen, et al, 2020; Zhou, et al, 2021),利用基于归因结果的约束方法和萌现约束方法分别对夏季极端高温、青藏高原温度、极端湿热、昼夜复合型热浪以及西北太平洋副热带高压开展了约束预估。鉴于此,亟待加强观测约束预估方法研究及其在中国区域气候变化预估中的应用,从而为中国应对气候变化的政策制定和适应规划提供更丰富、不确定性更小的未来气候信息。

参考文献

- 张华,王菲,汪方等. 2021. 全球气候变化中的云辐射反馈作用研究进展. 中国科学: 地球科学, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0052>. Zhang H, Wang F, Wang F, et al. 2021. Research progress of cloud radiation feedback in global climate change. *Scientia Sinica Terrae*, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0052> (in Chinese)
- Allen M R, Tett S F B. 1999. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dyn*, 15(6): 419-434
- Allen M R, Stott P A, Mitchell J F B, et al. 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, 407(6804): 617-620
- Annan J D, Hargreaves J C. 2017. On the meaning of independence in climate science. *Earth Syst Dyn*, 8(1): 211-224
- Borodina A, Fischer E M, Knutti R. 2017. Potential to constrain projections of hot temperature extremes. *J Climate*, 30(24): 9949-9964
- Brient F. 2020. Reducing uncertainties in climate projections with emergent constraints: Concepts, examples and prospects. *Adv Atmos Sci*, 37(1): 1-15
- Brunner L, McSweeney C, Ballinger A P, et al. 2020a. Comparing methods to constrain future european climate projections using a consistent framework. *J Climate*, 33(20): 8671-8692
- Brunner L, Pendergrass A G, Lehner F, et al. 2020b. Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth Syst Dyn*, 11(4): 995-1012

- Chen D L, Rojas M, Samset B H, et al. 2021. Framing, context, and methods//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Chen X L, Zhou T J, Wu P L, et al. 2020. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High. *Nat Commun*, 11(1): 2802
- DeAngelis A M, Qu X, Zelinka M D, et al. 2015. An observational radiative constraint on hydrologic cycle intensification. *Nature*, 528(7581): 249-253
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 9(5): 1937-1958
- Eyring V, Cox P M, Flato G M, et al. 2019. Taking climate model evaluation to the next level. *Nat Climate Change*, 9(2): 102-110
- Forster P, Storelvmo T, Armour K, et al. 2021. The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Freychet N, Hegerl G, Mitchell D, et al. 2021. Future changes in the frequency of temperature extremes may be underestimated in tropical and subtropical regions. *Commun Earth Environ*, 2(1): 28
- Gillett N P. 2015. Weighting climate model projections using observational constraints. *Philos Trans Roy Soc A Math, Phys Eng Sci*, 373(2054): 20140425
- Gillett N P, Kirchmeier-Young M, Ribes A, et al. 2021. Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period. *Nat Climate Change*, 11(3): 207-212
- Hall A, Cox P, Huntingford C, et al. 2019. Progressing emergent constraints on future climate change. *Nat Climate Change*, 9(4): 269-278
- Hasselmann K. 1993. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *J Climate*, 6(10): 1957-1971
- Hasselmann K. 1997. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dyn*, 13(9): 601-611
- Hegerl G C, Ballinger A P, Booth B B B, et al. 2021. Toward consistent observational constraints in climate predictions and projections. *Front Clim*, 3: 678109
- Herger N, Abramowitz G, Knutti R, et al. 2018. Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties. *Earth Syst Dyn*, 9(1): 135-151
- IPCC. 2021. Summary for policymakers//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jones G S, Stott P A, Mitchell J F B. 2016. Uncertainties in the attribution of greenhouse gas warming and implications for climate prediction. *J Geophys Res*, 121(12): 6969-6992
- Kettleborough J A, Booth B B B, Stott P A, et al. 2007. Estimates of uncertainty in predictions of global mean surface temperature. *J Climate*, 20(5): 843-855
- Knutti R, Sedláček J, Sanderson B M, et al. 2017. A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. *Geophys Res Lett*, 44(4): 1909-1918
- Lee J Y, Marotzke J, Bala G, et al. 2021. Future global climate: Scenario-based projections and near-term information//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Li C, Zhang X B, Zwiers F, et al. 2017. Recent very hot summers in northern hemispheric land areas measured by wet bulb globe temperature will be the norm within 20 years. *Earth's Future*, 5(12): 1203-1216
- Liang Y X, Gillett N P, Monahan A H. 2020. Climate model projections of 21st century global warming constrained using the observed warming trend. *Geophys Res Lett*, 47(12): e2019GL086757
- Lorenz R, Herger N, Sedláček J, et al. 2018. Prospects and caveats of weighting climate models for summer maximum temperature projections over North America. *J Geophys Res*, 123(9): 4509-4526
- Nijse F J M M, Dijkstra H A. 2018. A mathematical approach to understanding emergent constraints. *Earth Syst Dyn*, 9(3): 999-1012
- O'Gorman P A. 2012. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nat Geosci*, 5(10): 697-700
- Ribes A, Qasmi S, Gillett N P. 2021. Making climate projections conditional on historical observations. *Sci Adv*, 7(4): eabc0671
- Rowell D P. 2019. An observational constraint on CMIP5 projections of the East African long rains and southern Indian Ocean warming. *Geophys Res Lett*, 46(11): 6050-6058
- Sherwood S C, Bony S, Dufresne J L. 2014. Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, 505(7481): 37-42
- Shiogama H, Stone D, Emori S, et al. 2016. Predicting future uncertainty constraints on global warming projections. *Sci Rep*, 6(1): 18903
- Siler N, Po-Chedley S, Bretherton C S. 2018. Variability in modeled cloud feedback tied to differences in the climatological spatial pattern of clouds. *Climate Dyn*, 50(3): 1209-1220
- Stott P, Good P, Jones G, et al. 2013. The upper end of climate model temperature projections is inconsistent with past warming. *Environ Res Lett*, 8(1): 014024
- Stott P A, Kettleborough J A. 2002. Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise. *Nature*, 416(6882): 723-726
- Stott P A, Forest C E. 2007. Ensemble climate predictions using climate models and observational constraints. *Philos Trans Roy Soc A Math,*

- Phys Eng Sci, 365(1857): 2029-2052
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Climate Change*, 4(12): 1082-1085
- Sunyer M A, Madsen H, Rosbjerg D, et al. 2014. A Bayesian approach for uncertainty quantification of extreme precipitation projections including climate model interdependency and nonstationary bias. *J Climate*, 27(18): 7113-7132
- Tokarska K B, Hegerl G C, Schurer A P, et al. 2020a. Observational constraints on the effective climate sensitivity from the historical period. *Environ Res Lett*, 15(3): 034043
- Tokarska K B, Stolpe M B, Sippel S, et al. 2020b. Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Sci Adv*, 6(12): eaaz9549
- Wang J, Chen Y, Tett S F B, et al. 2020. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nat Commun*, 11(1): 528
- Weigel A P, Knutti R, Liniger M A, et al. 2010. Risks of model weighting in multimodel climate projections. *J Climate*, 23(15): 4175-4191
- Wenzel S, Eyring V, Gerber E P, et al. 2016. Constraining future summer austral jet stream positions in the CMIP5 ensemble by process-oriented multiple diagnostic regression. *J Climate*, 29(2): 673-687
- Zhou T J, Zhang W X. 2021. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection. *Environ Res Lett*, 16(4): 044039