

气候模式与水文模拟关键技术研究进展及展望

张琴¹ 张利平^{1,3} 邓瑶² 王书霞¹ 肖宜^{1,3}

(1 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650041; 3 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 近几十年来国内外研究者针对全球气候变化与水文模拟相关的科学问题进行了大量的研究, 因此有必要对其进行系统的回顾。首先以降水 and 气温为例, 回顾了历史时期观测到的气候变化; 然后结合最新的CMIP6计划, 简要叙述了气候模式研究与水文模拟研究的关键技术方法, 包含气候模式的研究进展、气候变化情景的构建技术、气候模式的评估与未来的预估、水文模型的选择和气候模式-水文模型连接技术; 同时拓展到气候变化影响评估的不确定性来源及量化方法; 最后讨论了气候变化与水文模拟研究中存在的问题, 并结合国家和行业发展需求提出了研究展望。

关键词: 气候变化, 水文模型, 降尺度方法, 气候模式, 不确定性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.015

The Research Progress and Prospects of Climate Model and Hydrological Simulation Key Technology

Zhang Qin¹, Zhang Liping^{1,3}, Deng Yao², Wang Shuxia¹, Xiao Yi^{1,3}

(1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072

2 Kunming Engineering Cooperation Limited, Kunming 650041

3 Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072)

Abstract: In recent decades, researchers have conducted a lot of research on scientific issues related to global climate change and hydrological simulation, so it is necessary to conduct a systematic review of it. Firstly, the climate change from observations taking air temperature and precipitation as examples was presented. Then, combined with CMIP6, the key techniques and methods of research on climate models and hydrological simulation were briefly described, which included the research progress of climate model, the construction technology of climate change scenario, the evaluation and future projection of climate models, the selection of hydrological model and the connection technology of climate model and hydrological model. The uncertainty sources and quantitative methods of climate change impact assessment are further introduced. Finally, the problems existing in climate change and hydrological simulation research are discussed, and research prospects are put forward in light of the development needs of the country and industry.

Keywords: climate change, hydrological model, downscaling method, climate model, uncertainty

0 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次综合报告指出, 随着经济和人口的快速增长, 人为温室气体的排放量达到了前所未有的水平。温室气体浓度的增加打破了大气辐射平衡, 从而导致全球气温上升。多套独立数据集的计算结果表明, 1880—2012年, 全球平均温度升高了0.85 °C^[1-2]。全球增温将加速水循环, 致使降水、蒸散发、径流等水文气候变量的时空

特征发生变化, 同时经济和人口的增长增加了工农业与生活需水量, 进一步突显了水资源的供需矛盾。水不管是对于自然环境还是对于人类社会都有着重大的意义, 因此有必要深入探索全球气候变化是如何影响区域水循环以及水文水资源的相关问题^[3-7]。

气候模式与水文模型是研究未来变化环境下区域陆面水文情势必不可少的两个工具。全球气候模式(GCMs)是模拟历史气候状态并预估未来气候变化的唯一工具, 它可以很好模拟并预估空间尺度为100~500 km、时间尺度为季节一年的气候状态, 但是不能很好地表现更精细时空尺度的气候特征和动态^[8-9]。为了获取流域尺度的水文变量信息, 需要使用水文模拟技术, 即使用气候模式输出的相关气象变量来驱动水文模型, 得到更精细时空尺度的蒸散发、径

收稿日期: 2020年12月17日; 修回日期: 2021年5月8日
第一作者: 张琴(1995—), Email: zhangqinwhu@whu.edu.cn
通信作者: 张利平(1971—), Email: zhanglp@whu.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金重大项目(41890824), 国家重点研发计划课题(2017YFA0603704)

流、土壤含水量等陆面变量^[6, 10]。由于GCMs与水文模型存在多个层次的尺度不匹配问题, 要实现水文模型与GCMs的连接, 需要使用降尺度方法将GCMs输出的大尺度气象信息降解到区域尺度, 从而与水文模型的尺度相匹配^[4, 7]。

近几十年来国内外的研究者就全球气候变化与水文模拟相关的科学问题进行了大量的研究, 包括历史气候变化的检测与归因^[11]、气候模式机理过程的完善及时空分辨率的提高^[9]、未来气候情景的设计^[12-14]、降尺度方法^[15-16]、大尺度基于过程的水文模型的开发^[17-18]、气候变化影响评估等研究^[19-21]。本文将结合上述研究问题, 详细梳理气候变化与水文模拟相关的研究进展, 并提出目前研究存在的问题与展望。

1 观测到的气候变化

IPCC第五次评估报告指出, 全球气候系统的变暖

已经成为不争的事实。自20世纪50年代以来, 观测到气候系统的许多变化在几十年乃至上千年时间里都是前所未有的。大气和海洋已经变暖, 海平面已上升, 积雪和冰量已减少^[1-2]。这里选取全球气候系统中最重要的两个变量: 地表气温和降水, 来呈现历史时期观测到的气候变化。

对于全球气温的变化, 如图1a所示, 全球表面温度从1850—2012年有显著的上升趋势, 尤其是1970年至今气温攀升尤其明显, 近30年的地表温度依次升高, 比1850年以来的任何一个十年都偏暖。全球海陆综合表面平均气温在1880—2012年升高了0.85 °C。对于实测数据相对完整的时期1901—2012年, 全球几乎所有地区都经历了地表增温(图1b)。

相比于气温的变化, 降水的变化则复杂得多。重建的全球陆面完整降水序列表明, 1900年以来陆面降

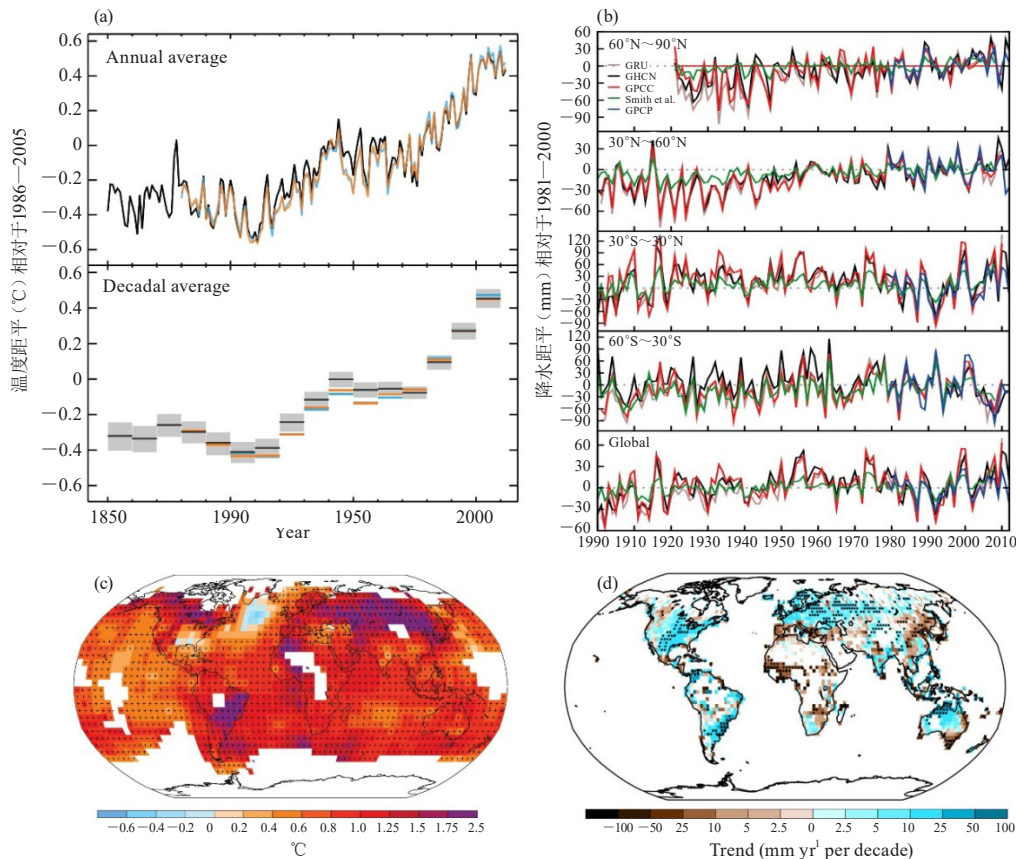


图1 观测到的全球气候系统中降水和气温的变化

(a) 观测到的全球陆地和海表1850—2012年相对于1986—2005年均值的综合平均温度距平; (b) 观测到的1901—2012年的地表温度变化空间分布; (c) 四个纬度带和全球陆面年平均降水距平; (d) 观测到的1951—2010年相对于1981—2000年均值的降水变化空间分布^[1-2]

Fig. 1 Observed surface temperature and precipitation of a changing global climate system
(a) Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomalies relative to the mean of 1986 to 2005 period; (b) Spatial distribution of the observed surface temperature change from 1901 to 2012; (c) Annual precipitation anomalies averaged over land areas for four latitudinal bands and the globe relative to a 1981-2000 climatology; (d) Spatial distribution of observed precipitation change from 1951 to 2012

水没有显著的变化。如图1c所示,除了北纬中高纬度带年降水有显著性的增加趋势外,全球或者其他区域并没有显著性的变化。图4d呈现了1950年以来降水的趋势变化空间分布,从图中可以看出相比气温,降水变化的空间差异性较大。降水显著性增加的区域有欧洲东北部、俄罗斯的西部地区、美国东部、南美洲的东南部、澳大利亚的西北部、中国新疆部分地区等;降水显著减少的区域有中国华北与东北地区、西非部分地区、环地中海部分地区等。

2 气候模式研究

历史时期观测到的气候变化已经成为了既定的事实,研究者与政策制定者更加关心未来时期气候将会怎么变,以及气候变化对自然系统和社会系统将会带来哪些影响,而气候模式正是当前预估未来气候变化的重要工具^[22-24]。国内外相关机构与研究学者对气候模式做了大量的科学研究^[24-28],取得了很大的进展,以下从模式的研究进程、气候变化情景的生成技术以及模式的评估与未来的预估进行概述。

2.1 模式评估研究进展

为了评估全球不同国家和研究团队开发的气候模式的模拟性能,世界气候变化研究计划制定了一系列的全球大气和耦合模式比较计划。1989年世界气候研究组织(WCRP)发起了大气模式比较计划(AMIP),对大气环流模式进行系统的检验、诊断和对比,从而评估大气模式的性能并识别其误差。而AMIP试验本身的设计相对简单,重点放在大气模式,而很少考虑气候系统中海-陆-气-冰反馈的复杂性,使模式不能用于气候变化的预测和预估^[24]。鉴于此,1995年WCRP的耦合模拟工作组(WGCM)发起并组织了一轮新的模式比较计划,即国际耦合模式比较计划(CMIP)^[23]。

CMIP计划的建立,是气候模式研究的里程碑。随着全球海-陆-气-冰耦合模式的快速发展,CMIP逐渐成为推动模式发展和增进对地球气候系统的科学理解的庞大计划^[27]。CMIP统一了各个气候模式的试验标准、制定了共享数据格式并开创了数据共享平台。到目前为止WGCM先后组织了5次模式比较计划,分别为CMIP1、CMIP2、CMIP3、CMIP5、CMIP6(没有严格意义上的CMIP4)。CMIP计划中的气候模拟与预估数据,将支撑未来5~10年全球气候研究,这些成果将为IPCC评估报告的撰写提供支撑材料,同时将构成未来气候评估和气候谈判的基础^[22-23]。

目前,CMIP6正在进行中,它是CMIP实施20多年来参与的模式数量最多、设计的科学试验最完善、

提供的模拟数据最庞大的一次^[22]。CMIP6的设计旨在解决目前的三大科学问题:1)地球系统如何响应外在强迫;2)当前气候模式存在系统偏差的原因及其影响;3)在考虑内部气候变率、可预报性和情景的不确定性的影响下,如何评估未来的气候变化。相比于以前的模式比较计划,CMIP6具有如下特点:1)考虑的物理过程更加复杂;2)大气和海洋模块的分辨率得到了明显提高;3)未来的情景设置考虑了人口、经济和城市化等因素,应用了新的组合情景设置(即SSP-RCP组合情景);4)参与的模式多,针对具体的全球性热点科学问题,批准了23个模式比较子计划(CMI6-endorsed MIPs)。由于驱动历史气候模拟的强迫场提供的时间滞后加上新冠疫情的影响,目前CMIP6的实际进展落后于原计划1.5~2年^[22-23]。CMIP6所有数据都通过地球系统网格联盟(ESGF)全球共享(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>),截止2020年11月,几乎所有模式公布了核心试验的数据,30多个模式根据自己的模式特点公布了自己参与的MIPs的数据。

2.2 气候变化情景的构建

由于气候系统本身的复杂性与不确定性,通过目前的气候模式或者地球系统模式难以准确预测未来的气候变化,而准确预估气候变化对自然和人类系统的影响是选择适应和减缓气候变化策略的基础,所以在评估气候变化的影响、脆弱性和适应性时,需要构建未来的气候变化情景。气候变化情景是在一系列的假设基础上对未来的气候状况的时空分布形式进行的合理描述^[4,8]。随着GCMs的快速发展,目前国内外构建气候变化情景绝大部分都是基于GCMs输出进行的。

基于GCMs输出的气候变化情景构建方法是根据当前的自然和人类系统的状态,设置未来的排放路径和社会发展路径,建立对应的情景,以此作为气候模式的初始边界条件,驱动气候模式得到不同情景下未来的气候状况。由于气候模式近几十年的快速发展,且具有很强的物理机制,这个方法得到了广泛的应用。基于GCMs的情景设计主要经历了增量情景、CO₂倍增情景和渐进递增情景^[8]。根据IPCC前五次评估报告建立并应用的情景和正在撰写的第六次评估报告,情景的发展历程可以分为三个阶段:1)排放情景,包含第一次评估报告使用的SA90情景、第二次评估报告使用的IS92情景和第三、四次评估报告使用的SRES情景;2)典型浓度路径(RCPs),第五次评估报告使用该情景;3)共享社会经济路径(SSPs),IPCC

第六次评估报告计划使用的情景，并与RCPs情景进行了组合^[9]。

2005年IPCC提出了RCPs的概念，对应的CMIP5计划中所使用的也是RCPs情景，而相对简单的SA90、IS92、SRES情景被逐渐淘汰。近十几年的未来气候变化及其影响的相关研究，基本都是基于RCPs情景进行的。使用较多的四种情景是RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5，数值表示到2100年对应的辐射强迫浓度，例如RCP4.5表示到2100年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 。其中RCP2.6代表低排放情景，RCP4.5与RCP6.0表示中等排放情景，RCP8.5为高排放情景^[24, 27]。

为了进一步反应未来情景中辐射强迫和社会经济发展间的关联，2012年在阿根廷召开的IPCC第五次评估报告的第二工作组的专题会议上，确定了SSPs的框架和五个基础型SSP的主要特征^[8]。其中SSP1表示可持续发展路径，SSP2是中间路径，SSP3是区域竞争路径，SSP4是不均衡发展路径，SSP5是一个以传统化石燃料为主的发展路径。随后CMIP6应用了SSPs情景，并组建了对应的情景模式比较子计划（ScenarioMIP）

（图2）。该计划设立的主要目的是：1）便于不同领域的综合研究，更好理解不同情景对气候系统的影响以及气候变化对社会的影响；2）为CMIP6的其他计划的特定科学问题提供数据基础；3）基于多模式集合研究量化预估的不确定性^[8, 14]。

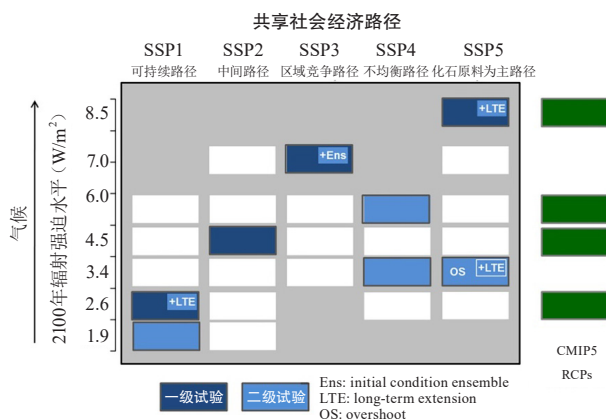


图2 CMIP6中ScenarioMIP计划对应的SSP-RCP情景矩阵（深蓝色的元素表示用于未来气候预估的基本情景，即一级试验；浅蓝色的元素是二级试验^[12]）

Fig. 2 SSP-RCP scenario matrix illustrating ScenarioMIP simulations. Dark blue cells indicate scenarios that will serve as the basis for climate model projections in Tier 1 of ScenarioMIP; light blue cells indicate scenarios in Tier 2

ScenarioMIP的气候预估情景采取不同SSP与辐射强迫的组合形式，即SSP与RCP的组合，对应的试验设计框架如图2。ScenarioMIP共包含8组未来的情景

试验，按照相对优先级可分为一级试验和二级试验，其中一级试验为核心试验包含的情景有：SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5，这四组试验是进行未来气候变化预估的基础试验^[12, 14]。

2.3 气候模式评估与未来预估

评估各个气候模式的性能是一个基本的科学问题，也是CMIP计划设立的初衷，同时也是进行未来气候预估的前提和基础。对于区域或流域尺度而言，对GCMs进行性能评估，可以有针对性地选择模拟性能好的模式来进行未来的气候预估及气候变化影响研究^[2, 8]。

气候模式最直接的评估方法是将历史模拟数据与同期的实测数据进行定量比较，该法可以用来评估气候模态的变化和对极端事件的模拟能力。对模式模拟的结果进行评估主要侧重三个方面：气候平均态、变率和趋势。一般使用统计评估指标来衡量模拟与实测数据之间的吻合或偏差水平，例如相对误差、均方根误差和相关系数等，也有一些把各个指标综合在一起与实测数据进行比较的方法，如广泛应用的Taylor图。其他的气候模式评估方法还有过程分离法、设备模拟器法、资料同化和初值技术法等^[2]。

对于未来气候预估，为了减少预估的不确定性，一般采用多模式集合的方法进行^[2, 8]。由于目前CMIP6模式的数据并没有全部上传，针对最新SSPs情景的预估研究较少，IPCC第六次评估报告也没有发布，所以关于未来气候变化的相关结论，这里主要引用IPCC第五次评估报告的结果，以气温和降水为例。

CMIP5中所有的情景均预估地表温度在21世纪呈上升趋势。很可能的是，热浪发生的频率更高，持续时间长，很多地区的极端降水强度和频次将会增加。RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景均预估，相对于1850—1900年，21世纪末期（2081—2100年）全球地表温度变化可能超过 $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时北极地区的变暖速率高于全球平均。而在全球增暖的环境中未来降水的变化是不一致的，表现出很强的空间差异性。其中，中纬度陆地和湿润的热带地区的极端降水可能频率增高、强度加大；全球范围内受季风影响的地区将增加，季风降水可能增强^[1]。

3 降尺度方法

进行气候变化的影响研究，特别是对水文循环的影响，需要应用气候模式的输出来驱动水文模型从而得到更加精确的陆面变量。目前，GCMs的模拟能力与水文模型的需求主要存在三个方面的不匹配问题^[7]：1）GCMs输出与水文模型要求的输入时空尺度

不匹配；2) 受下垫面因素的影响，越接近地表，对变量的空间异质性越高，而地表变量是直接参与水量平衡计算的，这与水文模型的需求不匹配；3) 水文模拟中输入变量的重要性与GCMs输出变量的精度不匹配。GCMs能够很好地模拟风场、温度场和气压场等气象变量，对降水和云层的模拟效果一般，而对那些在水文过程中最重要的变量，如径流深、土壤湿度和蒸散发，GCMs的表现并不好。

针对GCMs与水文模型之间尺度的不匹配问题，需要采取一定的方法技术将大范围粗糙分辨率的气候变量转化到区域或站点上，同时对GCMs进行偏差校正，降尺度方法得以开发，一般的降尺度可分为动力降尺度与统计降尺度^[15-16]。

3.1 动力降尺度

动力降尺度一般使用区域气候模式(RCMs)进行。它的基本思路是将GCMs的输出或再分析资料作为初始场和边界条件，来驱动区域模式，进行选定区域的气候模拟，从而得到大尺度背景下区域更准确、详细的气候特征。动力降尺度有明确的物理意义，可以描述更小尺度的天气系统和下垫面情况，且气候变量之间具有协调性，可以应用于全球任何区域不受观测资料的限制。它的缺点是计算量大，同时受GCMs提供的边界影响较大，而且无法无限提高RCMs的分辨率^[29-31]。

1990年左右，Robert Dickinson和Filippo Giorgi等首先提出区域气候模拟的概念，随后Giorgi等建立了第一个区域气候模式NCAR RegCM1。RegCM2形成后，区域气候模式得到了广泛接受，并在气候变化领域及世界各地得到了越来越多的研究和应用，目前最新的版本编号是RegCM4.5。除了该系列的区域气候模式外，在国内外应用较多的RCMs还有WRF、RAMS、RSM和CRCM等^[8, 32]。

3.2 统计降尺度

统计降尺度是通过建立历史时段GCMs输出的网格尺度气候变量与站点或区域尺度观测到的气候要素之间的统计关系，然后再将这种关系应用到GCMs输出的未来时段，从而得到站点或区域尺度未来气候特征的方法。相比于动力降尺度，统计降尺度具有计算量小、精度较高和使用简单等优点，可以获取更小尺度的信息，但是该方法对观测资料的需求较大，需要使用足够长的时间序列来率定并验证模型，在无资料地区该方法很难使用^[4, 16]。此外该方法将历史时期的这种统计关系直接应用到未来，而没有考虑到非一致性的问题。

1999年，Xu^[30]将统计降尺度方法分为转换函数法、环流分型法和随机天气发生器法。Maraun^[31]于2010年结合最新的统计降尺度研究成果将该方法进行了重新分类，即理想预报、模型输出统计和随机天气发生器三种方法。理想预报方法原理是直接建立预报变量与多个大气环流因子即预报因子的线性或非线性关系并将该关系应用于未来。模型输出估计法一般采用偏差校正方法来实现，偏差校正又分为Delta法与基于变量分布的方法，例如应用广泛的分位数映射法(QM)及其衍生的变体，该方法可以很好地校正气候变量的分布情况^[33-34]。随机天气发生器是根据历史气象资料的统计参数采取统计方法产生具有与历史数据相同统计特征的随机模拟模型，其中代表性的方法有WGEN、CLIGEN、Wea GETS等^[16, 31]。

4 水文模拟研究

由于气候模式对陆面水文过程的描述比较粗糙，产流计算过于简化，且难以表示径流的空间分布，通过GCMs得到的径流量误差较大，很难直接应用到区域或流域尺度的气候变化研究，例如气候变化对水文水资源的影响研究。因此，需要应用水文模拟技术将GCMs输出的气温、降水等气象变量当作输入变量，驱动水文模型，得到更加精确的陆面水文变量，从而得到气候变化影响下的水文水资源情形^[4, 8]。针对GCMs输出的变量与水文模型要求的输入变量的尺度不匹配问题，需要采用降尺度技术，上一节已经详细介绍了降尺度方法。本节将从如何选择合适的水文模型和宏观大尺度水文模型的发展这两个方面展开阐述。

4.1 水文模型的选择

对于特定流域，水文模型的选择需要考虑多方面的因素，包括：模型的精度、模型率定与参数变化、资料的精度及其可用性、模型的通用性和GCMs的兼容性等。其中最主要的因素是研究的目的以及模型与数据的可用性^[4, 35]。随着计算机的快速发展、数据监测的逐渐完善、地理信息系统与卫星遥感技术在水文领域的应用等，大量的流域水文模型如雨后春笋般被提出并运用到不同的流域^[4, 36-37]。针对气候变化影响研究这个问题，可以将水文模型分为三种：经验统计模型^[37-38]、集总式概念模型^[37-38]和基于物理过程的分布式模型^[37-40]。

1) 经验统计模型

经验统计模型，又称黑箱模型，其最简单的数值形式就是建立模拟流量与其他观测变量之间的关系，而不考虑水文过程的物理机制。该类模型有两个基本

假设：首先，水文过程过于复杂，无法以有意义的方式纳入模型；其次，流域可用的水文数据包含足够多的信息来模拟流域的水文特征。基于数据的经验统计模型包含多元线性回归模型、自回归移动平均模型以及最近热门的人工神经网络（ANN）模型等。因为该类模型容易建立，所以在研究早期应用广泛，但是，由于模型无法解释对应的水文过程，且对于一个特定流域得到的结果无法应用到其他地形气候不一致的流域，缺乏通用性，通常被认为不是很可靠，因此，它们在气候变化影响研究中的使用受到限制。

2) 集总式概念模型

集总式概念模型是首次尝试运用数值形式来表达流域中不同水文过程的模型，它是以水量平衡等物理成因机制为基础，并将流域作为一个整体来描述降雨径流形成过程。由于该类模型的简单性和有效性，在气候变化影响研究中得到了广泛的应用。集总式模型无法考虑流域降水与下垫面要素在空间上的不均匀性，因此模型中引入了大量的参数，这些参数没有真实的物理意义，需要通过实测的径流资料率定得到，对于无资料地区，该方法几乎无法使用。在气候变化研究中具有代表性的集总式概念模型有：Stanford模型、Sacramento模型、HBV模型、SCS模型、新安江模型等。在过去的几十年里，有大量的研究者用GCMs的输出资料来驱动这些模型，进行气候变化影响研究，或者是陆面水文变量对气候变化的响应研究^[41-42]。

3) 基于物理过程的分布式模型

分布式模型最基本的特点是按流域各处的气候和下垫面信息不同，将流域划分为若干个水文响应单元，每个单元对应的参数是一致的，并且根据物理或力学的一些基本定理对水文现象进行描述，包括下渗、蒸散发、汇流等水文过程。该类模型从机理上考虑了流域降水与下垫面在空间上的不均匀对降雨径流的影响。1969年，Freeze和Harlan首次提出了数值模型的思想，在空间上运用一系列有物理意义的微分方程来表示对应的水文过程^[39-40]。而后随着计算机运算和存储能力的增强，这些概念被不同的机构和研究者付诸现实，得到的即是基于物理过程的分布式水文模型。从机制上来说这类模型是完全透明的，且不需要进行率定就能获取参数的空间分布，但是由于设置模型的初始值和进行参数化所需要的数据量太大，而真实能够获取的数据都是大尺度的点数据，难以表示参数的空间差异性，这类完全基于物理机制的分布式模型应用到具体流域尺度还有一定的困难。这类模型的

代表有SHE模型、DBSIN模型等。

鉴于完全基于水文过程物理机制的分布式水文模型在流域尺度应用的困难，一种将大流域划分为众多的小流域或者是网格，然后在子网格尺度应用集总式的模型，再结合河网进行汇流的模型被开发，即半分布式水文模型^[36-37]。它是介于集总式模型与分布式模型之间的模型，即考虑了流域降水与下垫面在空间上的异质性，同时对数据的要求也不是太高，具有代表性的半分布式水文模型有TOPMODEL模型、TOPKAPI模型等。

4.2 大尺度水文模型的开发

随着计算机运算与存储能力的提升以及卫星遥感数据量的激增，使发展宏观大尺度水文模型（Macroscale hydrologic models, MHM）成为可能^[43]。不同于降尺度技术，将GCMs的输出转化到流域或区域尺度以适应水文模型，MHM方法是对水文模型进行升尺度，一般针对大流域、大洲甚至全球尺度，来适应气候模式对应的大范围，实现气候模式与水文模型连接。1986年，Peter Eagleson提出了全球尺度水文的概念，他认为水文循环是一个全球的现象，人类社会对水文的影响已经超越了流域尺度^[44]。随后水文水资源研究领域，不同的MHM被开发出来，德国斯图加特大学Döll教授建立了WaterGAP全球尺度水文模型^[45]、美国新罕布什尔大学Vörösmarty教授开发了WBM模型^[46]、英国南安普顿大学Arnell基于新安江的蓄水容量曲线开发的MacPDM模型等^[47]。之后水资源利用模块被加入这类模型之中，因此产生了全球水文水资源模型（GHWM），包括日本东京大学Hanasaki等开发的H08模型^[48]和荷兰乌特勒支大学van Beek等开发的PCR-GLOBWB模型等^[49]。尽管这类模型取得了很大的进展，但仍然有一些无法解决的问题，包括产流的机制、模型的率定与参数确定方法等。同时MHM一直面临的一个问题就是，在很多流域是缺少实测径流数据的，由于降水、产汇流、蒸发等过程的不确定性，重建的径流资料准确性仍然较低^[50]。

5 气候变化对水文水资源影响评估的不确定性

由于自然过程的复杂性，单纯应用一定的数学物理方法去描述气象水文过程，只是一种抽象的理想情况，而真实的每个环节都存在一定的误差，这些误差直接导致了气候变化影响评估的不确定性^[8]。目前，这些不确定性的来源主要有四个方面^[51]：气候变化情景的不确定性、气候模式的不确定性、降尺度方法的

不确定性和水文模型的不确定性。

1) 气候变化情景的不确定性

由于人类活动变化的复杂性,未来全球各个国家将会采取什么样的路径发展存在很大的不确定性,即气候变化情景存在不确定性。鉴于此,未来的气候特征都是在一定的假设情景下进行估计的,例如CMIP5计划设计的RCP排放情景,最新的CMIP6计划中SSP-RCP组合情景,这些情景是未来社会一种假设的可能发展路径,并不代表着未来社会按照这样的路径去发展。尽管如此,仍可以通过比较不同情景下未来的气候变化特征来指导国家政策的制定,从而减小气候变化所带来的风险^[52]。

2) 气候模式的不确定性

地球气候系统是相当复杂的,现阶段人类对它的理解是有限的,因此当前国际各个研究团队开发的气候模式本身也存在着较大的不确定性,产生不确定性的原因归纳起来有:①由于气候系统本身的复杂性,目前尚无法全面了解气候变化的内在规律,人们对气候系统过程和反馈的认知存在不确定性;②由于海洋、高山和极地的气象台站稀少,导致观测的气象数据无法满足气候研究和气候系统模拟的要求,因此带来的不确定性;③目前研究者对温室气体、气溶胶的源汇和分布及其与辐射强迫的关系并不完全清楚,因此在模拟温室气体的气候效应时存在不确定性;④气候模式自身的代表性和可靠性。气候系统的复杂性和观测资料的有限性注定了气候模拟的过程中存在缺陷,例如,采用有限的时空网格来刻画真实的无限时空,利用次网格的参数化的物理量来描述真实的物理过程,是存在误差的;气候模拟准确的初始值和边界值难以获取等。同时模式自身的结构、参数和数值算法也存在不确定性^[51-52]。

3) 降尺度方法的不确定性

应用不同的降尺度方法来进行气候模式与水文模型的对接,得到的气候预估的结果是不同的,尤其是一些降尺度方法无法预估未来的极端水文事件。由于GCMs本身的不确定性无法解决,不管采用哪种降尺度方法,都可能使这种不确定性在降尺度的过程中被放大。同时降尺度方法对观测的气象数据依赖较强,观测数据自身的不确定性也会影响到降尺度的结果^[38,51]。

4) 水文模型的不确定性

受水文过程的复杂性及水文地质参数空间异质性的影响,水文模拟的结果存在很大的不确定性,例如“异参同效”现象。其中水文模型的不确定性主要有四个来源:一是模型输入数据的不确定性,例如降

水、气温、蒸散发、前期土壤湿度等输入自身存在偏差;二是用于模型率定的实测数据的不确定性,包含观测的径流量、土壤湿度等;三是模型参数的不确定性,率定得到的模型参数不一定是模型的最优参数方案;四是模型结构的不确定性,任何水文模型都只是对真实水文过程的一个简化的数学表达,而这个简化的过程肯定存在一定的误差^[51-52]。

如何量化并减小气候变化影响评估的不确定性是相关研究者一直想解决的科学问题。对于未来气候变化情景、气候模式和降尺度方法的不确定性,目前并没有系统的量化方法。针对未来气候变化情景与气候模式的不确定性,一般采用多模式集合的方法得到一个不确定性区间来进行量化;对于降尺度方法的不确定性一般通过对照不同降尺度方法的结果以及与实测数据的比较来进行不确定性的量化;而对于水文模型的不确定性研究则比较系统全面,主要有Beven^[53]等提出的广义似然不确定性估计方法(GLUE)、蒙特卡罗模拟法和贝叶斯概率模型估计等方法^[54]。

6 存在问题及展望

本文全面系统地介绍了现有气候变化与水文模拟的研究进展,为广大水文气候学相关科研和业务工作者提供参考。下面就气候变化与水文模拟研究中需要注意的几点问题进行讨论。

1) CMIP计划的间隔时间偏短,随着各模式数值试验的快速增加,部分模式研发中心疲于应付模型试验,而对模式研发和改进的时间偏少,许多模式的性能从CMIP3到CMIP5、CMIP6没有显著提升^[23]。同时很多耦合气候模式的分量存在交叉,真正独立的气候模式远低于注册模式的数量,对于采取简单集合平均的方法预估未来的气候变化及其影响时,将会造成一定程度的系统偏差。

2) 采取多模式集合平均进行气候预估和应用降尺度技术进行气候变化影响研究,一定程度上削减了气候和水文极值的量级,即坦化效应。气候变化除了气候的平均态发生变化外,气候极值也发生了变化,而极端气候水文事件对自然和社会系统带来的损失是巨大的。

3) 近十几年,随着计算机技术、地理信息系统、卫星遥感和大数据处理技术的发展,分布式水文模型取得了很大的进展。但是,这些模型仍然无法突破Freeze和Harlan提出的基于物理过程的数值模拟水文响应模型的蓝图^[40],也就是说在对降雨径流形成过程的机制理解上没有重大突破。对于今后的研究,除了在微观尺度上对水文过程的机理进行进一步完善

外,在宏观尺度上还需要发展超大尺度(洲或全球尺度)水文模型^[50],在方法上同时发展非率定的水文模型^[55],从而可以更好地实现与GCMs的对接或者是嵌套进地球系统模式当中;

4) 当前气候模式与水文模型的连接方法,绝大多数都是单向连接,而真实的水文过程和气候系统是相互作用、相互影响的,气候变化会对陆面水文变量产生影响,同时陆面的水文过程的改变也会影响到气候系统。真实的地球系统中大气圈、水圈、岩石圈和生物圈之间的关系是错综复杂的。未来研究有望实现气候模式和水文模型的双向耦合,同时加强水文过程、气候系统与地表其他圈层的耦合研究,开发出物理机制更加完备的地球系统模式。

5) 非一致性(或非稳定性)问题。无论降尺度方法还是水文模型,都需要使用历史观测数据来率定模型参数,并将这一套参数应用到未来。而全球气候系统已经发生了变化,历史时期的参数应用到未来的气候变化预估或气候变化影响研究当中是否合适,仍然是一个问题。当前有大量的文献研究非一致性问题,但是并没有一个系统的完整的方法来解决这个问题。

6) 不确定性问题。如何量化并减小气候变化及其影响研究的不确定性,一直是水文气象学家力图解决的问题,但是目前并没有很完整的方法来量化不确定性。而不确定性的根源仍然是对水文过程和气候系统的机制理解不够完善,想要减小不确定性,需要从根源入手。

7) 气象水文监测站网有待进一步完善。研究表明,受多种因素的影响,全球可用的气象水文站点的数量近20年在急剧减少^[56],况且在海洋、高山和极地地区本身的站点就稀少,这对水文模拟和气候变化研究来讲是相当不利的。近些年,随着遥感水文的兴起,利用卫星遥感影像来获取地表的水文信息成为了现实,这大大地提高了可用的气象水文信息量,但是数据的准确性问题仍需进一步完善。欧美2022年即将启动的SWOT(The Surface Water Ocean Topography)计划,有望提供大多数研究者们需要的地表水变量^[57]。

8) 全球突发性事件以及大国的重大气候决策对气象水文的影响有待进一步研究。例如,2019年底至今席卷全球的新冠肺炎疫情^[58];2020年11月4日美国正式退出《巴黎协定》^[59];以美国特朗普政府为代表的逆全球化浪潮;单边主义、宗教冲突、恐怖主义等社会问题^[60]。这些相关的全球问题,不管是对人类社会

还是自然生态系统都会产生一定的影响,如何量化这些因素对气候和水文的影响,以及如何在未来的气候变化情景中考虑这些因素,仍然是当前或以后需要进一步研究的科学问题。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.
- [2] 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. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [4] 张利平, 陈小凤, 赵志鹏, 等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 60-67.
- [5] 徐宗学, 刘晓婉, 刘浏. 气候变化影响下的流域水循环: 回顾与展望. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 722-730, 839.
- [6] Loaiciga H A, Valdes J B, Vogel R, et al. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, 1996, 174: 83-127.
- [7] Xu C Y. Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 1999, 13(5): 369-382.
- [8] 秦大河. 气候变化科学概论. 北京: 科学出版社, 2018.
- [9] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 气候模式. *气候变化研究进展*, 2013, 9(2): 150-154.
- [10] Praskievicz S, Chang H. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2009, 33(5): 650-671.
- [11] Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y. A review of climate change attribution studies. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32(5): 671-692.
- [12] Neill B C, Tebaldi C, Vuuren D P, et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3461-3482.
- [13] Riahi K, Vuuren D, Kriegler E, et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153-168.
- [14] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519-525.
- [15] 徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 487-498.
- [16] 陈杰, 许崇育, 郭生练, 等. 统计降尺度方法的研究进展与挑战. *水资源研究*, 2016, 5(4): 299-313.
- [17] Simone F, Enrique R, Vivoni F L, et al. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 45-60.
- [18] Sood A, Smakhtin V. Global hydrological models: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(4): 549-565.
- [19] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1370-1379.
- [20] 张利平, 曾思栋, 王任超, 等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟. *资源科学*, 2011, 33(5): 966-974.
- [21] Jonas O, Berit A, Matthias B, et al. Hydrological climate change impact assessment at small and large scales: key messages from recent progress in Sweden. *Climate*, 2016, 4(3): 39.
- [22] Veronika E, Sandrine B, Gerald A M, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [23] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456.
- [24] Knutt R, Masson D, Andrew Gettelman. Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophysical*

- Research Letters, 2013, 40(6): 1194-1199.
- [25] 丁一汇, 孙颖. 国际气候变化研究新进展. 气候变化研究进展, 2006(4): 161-167.
- [26] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 我国地球气候系统模式研究进展: CMIP计划实施20年回顾. 气象学报, 2014, 72(5): 892-907
- [27] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 从检验CMIP5气候模式看CMIP6地球系统模式的发展. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 643-648.
- [28] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. CMIP6的设计. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 258-260.
- [29] 张磊, 王春燕, 潘小多. 基于区域气候模式未来气候变化研究综述. 高原气象, 2018, 37(5): 1440-1448.
- [30] Xu C Y. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 1999, 23(2): 229-249.
- [31] Maraun D, Wetterhall F, Ireson A M, et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Reviews of Geophysics, 2010, 48: RG3003, doi:10.1029/2009RG000314.
- [32] Gao X J, Giorgi F. Use of the RegCM System over East Asia: Review and Perspectives. Engineering, 2017, 3(5): 766-772.
- [33] Maraun D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. Journal of Climate, 2013, 26(6): 2137-2143.
- [34] Yang Y, Tang J P, Xiong Z, et al. An intercomparison of multiple statistical downscaling methods for daily precipitation and temperature over China: present climate evaluations. Climate Dynamics, 2019, 53(7-8): 4629-4649.
- [35] 刘松, 张利平, 余敦先, 等. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5): 384-390.
- [36] 张文华, 郭生练. 流域降雨径流理论与方法. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2007.
- [37] Davie T, Quinn N W. Fundamentals of hydrology. New York: Routledge, 2019.
- [38] Singh R, Biswal B. Assessing the impact of climate change on water resources: The challenge posed by a multitude of options. In: Singh S, Dhanya C. Hydrology in a Changing World. Cham: Springer, 2019.
- [39] Loague K, Heppner C S, Ebel B A, et al. The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface: Horton, Dunne, Duntun, and the role of concept-development simulation. Hydrological Processes, 2010, 24(17): 2499-2505.
- [40] Simmons C T, Brunner P, Therrien R, et al. Commemorating the 50th anniversary of the Freeze and Harlan (1969) Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124309.
- [41] 王书霞, 张利平, 李意, 等. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 23-32.
- [42] 丁凯熙, 张利平, 余敦先, 等. 全球升温1.5℃和2.0℃情景下澜沧江流域极端降水的变化特征. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 466-479.
- [43] Mujumdar P P, Nagesh K D. Floods in a changing climate: Hydrologic modeling. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [44] Bierkens M F P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. Water Resources Research, 2015, 51(7): 4923-4947.
- [45] Schumacher M, Forootan E, Schmiel H M, et al. Improving drought simulations within the Murray-Darling Basin by combined calibration/assimilation of GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 212-228.
- [46] Vörösmarty C J, Federer C A, Schloss A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. Journal of Hydrology, 1998, 207(3): 147-169.
- [47] Arnell N W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. Journal of Hydrology, 1999, 217(3): 314-335.
- [48] Hanasaki N, Kanae S, Oki T, et al. An integrated model for the assessment of global water resources— Part 1: Model description and input meteorological forcing. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 12(93): 1007-1025.
- [49] Edwin H, Sutanudjaja R Beek V, et al. PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model. Geoscientific Model Development, 2018, 11(6): 2429-2453.
- [50] 段青云, 徐宗学. 未来水文气候情景预估及不确定性分析与量化. 北京: 科学出版社, 2017.
- [51] 罗勇, 姜彤, 夏军. 中国陆地水循环演变与成因. 北京: 科学出版社, 2017.
- [52] Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279.
- [53] Bates B C, Campbell E P. A Markov Chain Monte Carlo Scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. Water Resources Research, 2001, 37(4): 937-947.
- [54] Gao H K, Birkel C, Hrachowitz M, et al. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(2): 787-809.
- [55] 高红凯, 赵劼. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望. 冰川冻土, 2020, 42(1): 224-233.
- [56] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 79-107.
- [57] Elmer N J, Hain C, Hossain F, et al. Generating proxy SWOT water surface elevations using WRF-Hydro and the CNES SWOT hydrology simulator. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027464.
- [58] François G, Gemenne F, Depoux A. What our response to the COVID-19 pandemic tells us of our capacity to respond to climate change. Environmental Research Letters, 2020, 15(10): 101002.
- [59] 柴麒麟, 傅莎, 祁悦, 等. 《巴黎协定》实施细则评估与全球气候治理展望. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 232-242.
- [60] Zoi V, Ioannis C, Leonidas P. What are the impacts of climate policies on trade? A quantified assessment of the Paris Agreement for the G20 economies. Energy Policy, 2020, 139: 111376.