

Review for Impact Assessment of Climate Change on Hydrology and Water Resources in Uncertainties Research

Anfeng Qiang¹, Ni Wang^{1,2}, Shuhong Mo^{1,2}, Xia Wei¹

¹Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

²State Key Laboratory of Eco-Hydrologic Engineering in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

Email: 1446942310@qq.com

Received: Dec. 14th, 2019; accepted: Jan. 27th, 2020; published: Feb. 14th, 2020

Abstract

This paper summarized the research progress and application fields on hydrology and water resources on the uncertainty of climate change. It was mainly due to the limited understanding of human beings about the hydrology and water resources uncertainties under climate change. Although scholars and experts attributed many factors to human activities, they ignored the uncertainties of the system itself. The paper summarized the common uncertainty assessment methods and estimated the uncertainty of future climate change to study and forecast the hydrology uncertainty more accurately. At the same time, the paper came up with clear research direction and guidance recommendations. It is significant to seek change adaptation countermeasures and promote sustainable use of water resources in the context of global climate change.

Keywords

Climate Change, Uncertainties, Evaluation Methods

气候变化对水文水资源影响评价的不确定研究进展

强安丰¹, 汪妮^{1,2}, 莫淑红^{1,2}, 魏霞¹

¹西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安

²西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安

作者简介: 强安丰, 男, 汉族, 博士研究生, 主要方向为水文学及水资源。

Email: 1446942310@qq.com

收稿日期: 2019年12月14日; 录用日期: 2020年1月27日; 发布日期: 2020年2月14日

摘要

本文归纳总结了气候变化对水文水资源不确定性研究进展以及不确定性的应用领域。气候变化下的不确定性主要源于人的认识受限, 并将很多因素归结为人类活动导致引起, 却忽视了系统自身存在的不确定性。总结了常用的不确定评估方法, 对未来气候变化的不确定性进行了预估并提出了明确的研究方向和指导建议, 旨在更为准确地对水文不确定性进行研究和评估预测, 对全球气候变化背景下寻求变化相应对策、促进水资源可持续利用等方面具有重要意义。

关键词

气候变化, 不确定性, 评估方法

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着全球社会经济高速发展和人类活动影响加剧, 生态环境逐步恶化, 各类环境问题层出不穷, 自然灾害频繁发生, 其中水资源危机最具代表性, 研究自然变化和人类活动影响是目前甚至未来国际地球科学发展最为关键的问题[1]。全球变暖已经威胁到人类生存和发展, 也对地球环境造成严重影响, 引起全球广泛关注。全球变暖不仅对人类生存环境造成严重影响, 更会进一步对水资源、生态系统、社会经济发展、政治格局等产生深远影响[2]。气候变化是全球性、跨疆界性的现象, 在长时期内起作用[3]。大气圈-水圈-生物圈-土壤圈-岩石圈等几个圈层相互耦合和反馈以及地外因素等共同作用可能是导致气候变化的主要因素, 全球变暖原因的不确定性和多解性体现在增温幅度估算、碳排放测算、CO₂浓度与温度因果反馈机制、全球碳循环中“碳失汇”量化及未来气候预估等方面[4]。不同阶段对水文模型及气候变化认识不一致, 例如: 前20年的研究会选择一个或多个水文模型, 用历史资料作为参数来率定和检验模型, 用不同的方法产生将来的气候变化情景用于水文模型的输入, 用率定好的水文模型模拟将来的水文情景; 10年前认识到不同水文模型对非平稳水文过程的模拟差别巨大; 5年前认为不同的历史资料率定的同一个模型对非平稳水文过程的模拟差别巨大。针对复杂变化情境, 我们认识到大部分已有模型不具备在非平稳降雨径流关系情境下的转移功能, 需要进一步研究动态水文模型的问题。气候变化存在不同类型、不同程度的不确定性, 这种不确定性来源于未来受制的机会和存在的各种偶然性, 不同发展趋势导致未来是不确定的, 也就是未来难以预测的。因此人们利用不同手段、不同资料来预测未来变化和前景, 使我们尽可能细致的对未来有前瞻性和可见性, 作用当前局势并改善问题。

目前研究中存在的主要问题和未来研究中需要加强的方面, 旨在推动环境变化对流域水文过程影响机理研究, 最终为气候变化条件下流域水资源可持续管理提供借鉴和参考依据。气候变化和人类活动对流域水循环的影响缺乏真值, 因此开展多种方法比较研究才具有科学参考价值。开展气候变化趋势及其影响方面的研究, 不仅可为我国政府参与国际政府间气候变化会议以及环境外交活动提供科学的数字依据和对共建“一带一路”的

气候格局深刻认识, 而且对于寻求环境变化适应对策、促进水源可持续利用等方面具有重要意义。

2. 气候变化对水文水资源研究进展

2.1. 不确定性研究进展

气候系统具有典型的混沌特征的复杂系统, 气候变化及其科学的不确定性是气候学科中的前沿领域[5]。气候变化的不确定性不仅存在于本身内部, 也普遍存在学科外部, 其本质是由自身内部结构特征决定, 也是气候科学不确定性的根本来源, 其结构敏感复杂、演变速度快、难以控制, 只有通过人为干预影响其结果变化, 很难预测和计算精确结果(人工增雨)。随着科学技术迅速发展, 我们量化自然的不确定性和降低认知上的不确定性的能力将会大大提高, 从而提高气候变化预估的可靠性[6]。王娜[5]从本体论、认识论、方法论及非科学因素等层面对气候科学的不确定性进行了分类, 本体论主要指其本身复杂的物理化学过程机制存在不确定性; 认识论分为两个层面, 一是人类认知能力受限, 二是对测量结果分析手段和水平带来的不确定性; 方法论角度是从简化实验、计算机模拟给出对不确定性的理解, 计算机模拟在一定程度上存在对不确定性的回避, 尤其对气候变化复杂问题并非为完全合适的工具; 非科学因素是现代科学与各领域相互作用和融合对科研本身的产生不可忽视的影响, 在某种程度上不断衍生出的不确定性。

气候变化会导致陆地水文循环过程改变, 影响水文水资源系统的结构与功能, 给水资源开发利用带来重大挑战[7][8]。一直以来在研究气候变化对水文水资源系统的影响时, 都是采用气候变化模式与水文模型单向路径耦合技术, 气候系统和水文循环二者被看作是静态的、相互独立的过程, 在某种统计平衡意义上, 这是一种被动反馈型模式。有学者综述了气候变化和人类活动对水文要素影响的区分和界定方法, 探析环境变化因素对流域水文水资源演变规律的影响机理, 提出以人为气候变化、气候自然变异和人类活动“三源”方式划分影响流域水文水资源的环境因素并对水文水资源影响的不确定性来源及评估方法进行归纳总结[9]。目前研究气候变化对水文过程影响的主要工具有 GCM (精度低、误差大)、RCM (精度高) 和水文模型等, 田焯[10]分析了在未来多重不确定性因素影响下气候变化对极端径流的影响, 包括排放情景、GCM、水文模型结构和水文参数的不确定性, 表 1 是气候变化下水文不确定性影响的主要来源、程度和本质。人们普遍认为水文影响下不确定性的主要来源是大气环流模式(GCMs)和温室气体排放情景(GGES)。由于技术和资料限制, 准确地预测未来气候变化情景相当困难, GCM 不完善, 定量估计第一类不确定性是不可能的, 只能采用假设气候变化情景值把 GCM 模型的输出加上置信区间来反映其不确定性[11]。但郭亚男[12]通过比较 6 种降尺度方法, 开展气候变化对加拿大魁北克省流域水文影响不确定性的量化研究发现, 在所有的变量中不确定性包络线与降尺度法的选择有关, 除了 CGCM-DASR, 所有方法产生的流量过程线非常接近实测降水和温度时间序列模拟的流量过程线。每一种降尺度方法特有的优点和缺点导致对未来气候预测的不同, 尤其是一些降尺度方法无法预测水文学中的极端气候事件, 未来气候预测的差异意味着降尺度方法增加了量化气候变化对水文影响的不确定性。

Table 1. The major resources, extent and nature of the uncertainty of the water resources under climate change

表 1. 气候变化下水文不确定性影响的主要来源、程度和本质

来源	程度	本质
情景模式	情景不确定性	由内部变动产生
大气环流模型结构	情景不确定性	由认识缺乏产生
水文模型结构	情景不确定性	由认识缺乏产生
水文模型参数	统计不确定性	由认识缺乏产生

2.2. 不确定性应用领域

气候变化和人类活动共同影响着全球水循环变化过程，气候系统内部的任何变化以及人类活动每个环节都将会在水文循环的关键要素中得到反映或体现，主要体现在大气环流变化(气象、降雨分配)、蒸发变化(水面、土壤)、降水条件变化(陆面降水、河湖降水)，这些条件变化通过改变降水持续时间、时空分布分配、截流、入渗等形式改变产流条件和方式来影响水文平衡要素，使水文循环过程发生变化，水文要素的变化同样对气候系统直接或间接地产生影响。归纳总结水文不确定性应用领域主要在水文模拟、地下水系统和水文预报中，主要包括气候变化、生态环境、农田灌溉、径流变化、优化管理、土地利用、电网设计、市政设计和人类活动等内(图 1)，这些内容几乎涵盖了水资源的全部方面。水文模型在水资源开发利用、防洪减灾、水库规划和设计、道路设计、城市规划、点面污染源评价、人类活动的流域响应等诸多方面应用十分广泛。在水资源研究方面均存在不同程度的不确定性，分析具体问题时应用具体方法，虽然存在的各种不确定性难以消除，但可通过不断的优化和改进来降低不确定性，使人类对问题的认识更深刻全面并使研究结果更理想化。

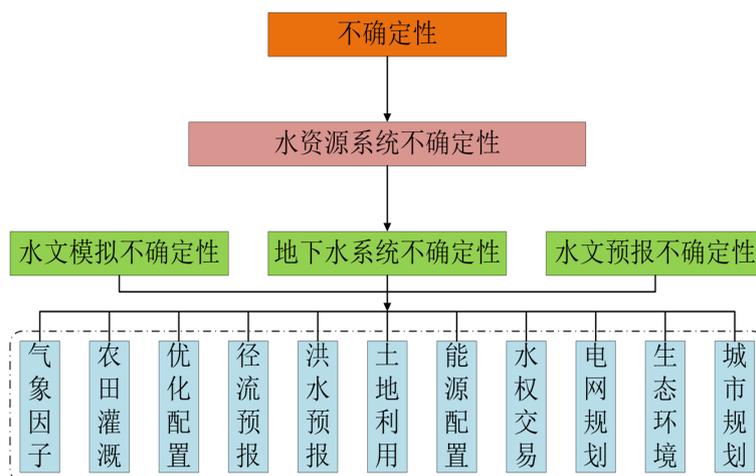


Figure 1. Application of uncertain systems in hydrology

图 1. 不确定性系统在水文中的应用领域

3. 气候变化对流域水文过程影响评价的不确定性

3.1. 不确定性来源

气候变化下流域水文水资源变化不确定性分析方法基本上是从水文模型的不确定性分析方法发展而来的，目前气候变化对水文影响、适应性和脆弱性是以定量的气候和非气候情景(非气候情景包括社会经济和环境情景)作为参数，利用不同的水文模型进行评价。图 2 为气候变化对流域水文过程影响评价不确定性的 6 个方面，气候变化情景的不确定性主要源于气候模式和温室气体排放造成对未来气候变化预测的不确定性，影响其评价最主要的来源是各种情景假设的不确定性和评价模型本身的不确定性，特别是对无资料地区或资料欠佳地区的评价[13]。Nemec 和 Schaake (1982 年)较早应用概念性流域水文模型分析了气候变化对干旱和湿润地区径流的影响[14]；Arnell, N.W. (1999 年)在水量平衡模型基础上研制了大尺度水文模型，用此模型和 HadleyCM2 及 CM3 等 6 个气候情景估算了气候变化对全球范围内 60 × 60 km² 格点上径流的影响[15]。

水文模型模拟能力是气候变化影响评价的关键，世界气象组织(WMO)和相关部门对一些水文洪水模拟效果及适应性给出对比分析，对湿润半湿润地区，大多数模型模拟效果均满意，但对干旱半干旱地区，模型水文模拟仍然是当今存在的挑战，水文模型结构及参数识别的不确定性依然是目前评价结果不确定性的主要来源之一

[16] [17] [18] [19] [20]。

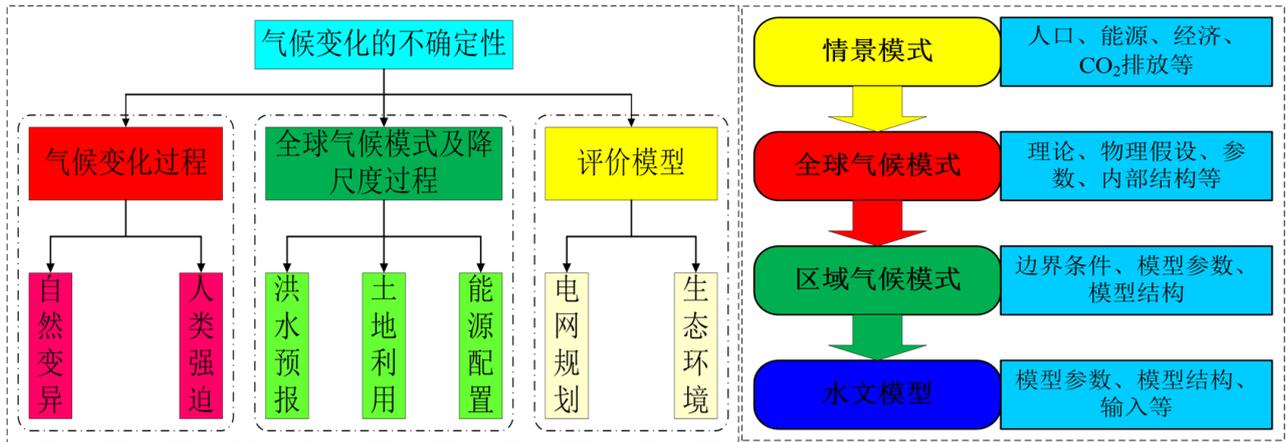


Figure 2. Sources of uncertainties in catchment hydrological processes under changing climate
图 2. 气候变化对流域水文过程影响评价的不确定性来源

3.2. 不确定性定量评估方法

目前在研究气候变化和水文模型不确定性方法有以下几种：

1) **蒙特卡罗法**(Monte Carlo Method, MCM)于 20 世纪 40 年代中期被提出的一种基于概率统计理论的独立方法，来估算和描述函数的统计量，求得问题的近似解。基本思想是通过实验方法(简单抽样 US、重要性抽样 IS、拒绝被抽样 RS)，当实验次数足够多时，凭借事件出现的频率来估计随机事件的概率或得到随机变量的某些数学特征，并将其作为问题的近似解。优点是对随机过程的模拟真实并能较好反应其统计规律，其缺点是受随机抽样的可靠性影响和模拟次数限制，解决复杂问题时收敛速度较慢。广泛应用于金融界、经济学、物理学和工程学等领域[21]。

2) **马尔科夫链蒙特卡罗法**(Markov Chain Monte Carlo Method, MCMC)是通过构建马尔科夫链使样本收敛至平稳分布，再进行抽样处理。相对传统静态的 MCM，MCMC 主要用来处理复杂高维积分运算，克服传统 MCM 静态缺陷并提高精度，其抽样方法有 Gibbs 抽样法、Metropolis-Hastings 抽样法和 Slice Sampling 抽样法。广泛用于贝叶斯统计、计算物理学、计算生物学等领域[22] [23]。

3) **贝叶斯理论**(Bayesian Decision Theory)把概率解释为人对某一事件发生的相信程度，参数的后验概率密度是在先验密度和实测数据的基础上得来的。贝叶斯优点在于它有着牢固的理论框架，能将先验信息和数据按照特定原理结合起来，贝叶斯法基于实际观测数据，对于任何数量的假设都能够直接赋予后验概率。同时它严格遵循似然原则，在水文模型中具有广泛应用[24]。缺点是贝叶斯统计中的先验概率分布选择没有标注，只能凭借主观判断选择，对水文频率和水文模型参数按照需信息原则会引起其它不确定性，计算成本高，模型参数较多时对后验分布的估计需要做复杂积分运算。

$$f_{post}(\theta|x) = \frac{P(x|\theta) \cdot f_{pri}(\theta)}{\int P(x|\theta) f_{pri}(\theta) d\theta} \quad (1)$$

式中 θ 为参数， x 为样本， $f_{post}(\theta|x)$ 是 x 的条件后验分布， $P(x|\theta)$ 为总体分布， $f_{pri}(\theta)$ 是参数的 θ 先验分布。

4) **GLUE 法**(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)是基于 MCM 的模型率定和不确定分析方法，主要思想是异参同效理论，即模型存在多组最优参数，在不确定分析中必须考虑进去。GLUE 法在进行不确定分析时通过四步来实现：① 基于参数的先验分布，通过随机抽样产生大量参数组。② 定义似然目标函数，设定

可行参数阈值，计算似然值。③ 计算可行参数的后验分布。④ 预估每个时间步长上模拟值的置信区间。

4. 气候变化预估不确定性

我国是世界上最大的碳排放和初级能源消耗国家，由于发展迅速、人口基数大、经济基础薄弱等原因导致在发展过程中，对当前全球变暖和温室气体的减排负有主要责任，因此科学合理地制定 CO₂ 减排战略和应对全球变暖提出对策建议刻不容缓。概率分布描述不确定性的优势是能够提供更多预报信息，不仅提供了最可能发生的结果，还能提供特定时间发生的可能性，也包括极端事件的发生概率。段青云[6]利用贝叶斯多模型推理方法预估不同变量的概率密度函数(PDF)，此研究选取了整个中国大陆、北方和南方典型流域进行对比，研究发现中国大陆、海河和珠江流域温度均呈逐年增加趋势。同时给出了地表温度概率分布变化，图 3(a)为假想地表气温概率分布，温度概率用高斯分布表示；图 3(b)中的地表温度概率分布呈现向右偏移，并伴随均值和方差变化。从图中看出相比现在气候，未来气候变化的不确定性区间在扩大，未来气候的均值在上升，尤其是极热高温出现概率大幅度增长，极冷低温变化不大但其范围向左延伸，意味着比过去更冷的温度可能会出现。Duan 和 Phillips [25]提出了贝叶斯多模式推理方法来评估气候变化预测的不确定性，该方法对全球气候变化背景下环境、生态系统、农业和经济带来有效利益。气候变化可能会带来更多极端事件和它灾害事件，如：干旱、暴雨、台风、泥石流等，因此基于全球气候模式来预测未来气候变化情况并给出不确定性信息具有重要意义。

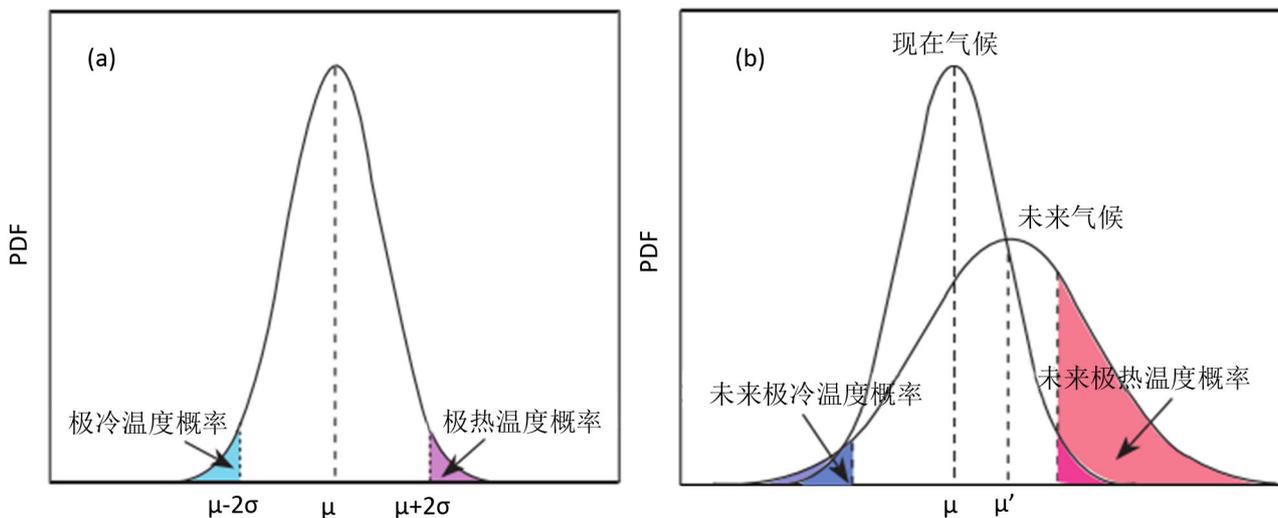


Figure 3. Probability distribution of surface temperature (PDF: probability density function) [6]

图 3. 地表温度的概率分布示意图(PDF: 概率密度函数) [6]

工业革命以来人类活动是当前全球碳循环过程中重要的“碳源”，完全否认人类活动对全球变暖的影响可能是不恰当的，而人类活动完全主导当前气候变化的看法也可能是不全面的。图 4 显示工业革命以来全球 CO₂ 收支和通量，人类活动是最主要的“碳源”，2006~2015 年人类活动导致增加了 $16.4 \pm 0.4 \text{ Gt} (10^9 \text{ t}) \text{ CO}_2$ 。人类活动影响是造成 20 世纪全球变暖 90%~95% 的可能性，但过分强调人类活动影响也是片面的，也不能忽视气候系统内部一些其它因素变化产生对气候变化的影响[26]。IPCC 对截至 22 世纪初积极减排(温度约 1℃)和无节制排放(约 4℃)两种情况下的全球地表平均温度进行了预估，这两种排放情况下的温度预估仍然存在较大的不确定性，因为在当前大气中高浓度温室气体气候背景下，即使不再排放温室气体，受大气中留存温室气体时间尺度的影响，地球温度仍然会继续增长。因此，在坚持温室气体减排的前提下，应坚持“适应为主、减缓为辅”的原则来应对全球变暖。

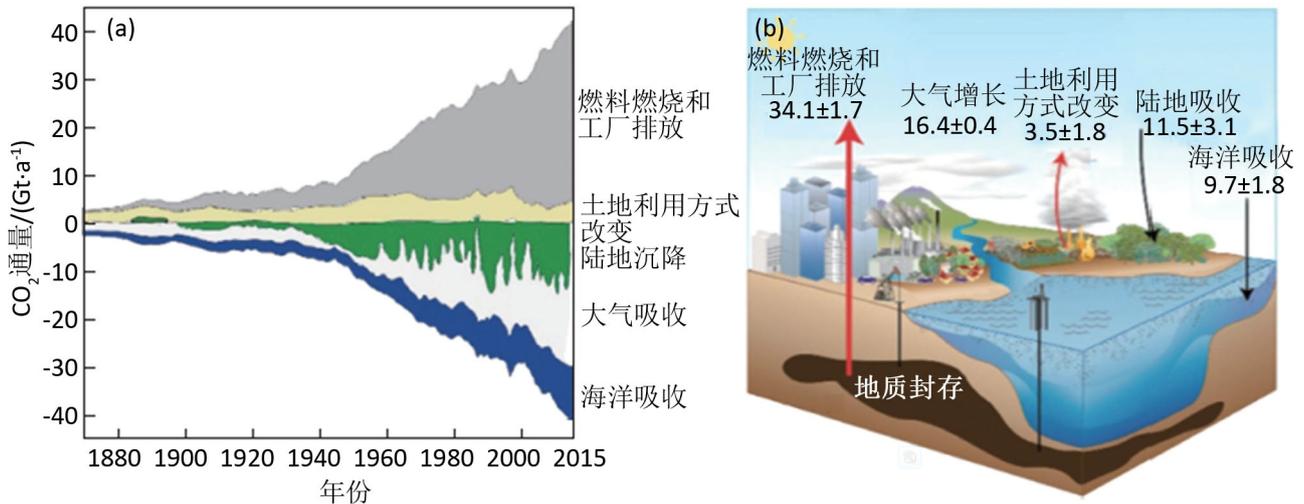


Figure 4. Global CO₂ budget and flux [27]. (a) The annual flux of CO₂ since the industrial revolution (the greater than 0 is “carbon source” and less than 0 is “carbon sink” in the ordinate); (b) Increased CO₂ in the atmosphere due to human activities from 2006 to 2015
图 4. 全球 CO₂ 收支和通量[27]。(a) 工业革命以来的 CO₂ 年通量(纵坐标大于 0 为“碳源”，小于 0 为“碳汇”)；(b) 2006~2015 人类活动导致大气中增加的 CO₂

5. 应用实例

黄河源区隶属于三江源，生态环境脆弱，对气候变化的响应非常敏感。本文选用以黄河源区作为研究区，研究气候变化环境下，运用新安江模型和 HBV 模型对黄河源区径流过程进行模拟，并采用 GLUE 方法对新安江模型和 HBV 模型模拟结果进行不确定性对比分析，分别选用 0.7、0.6 和 0.5 作为目标似然函数阈值获取洪水和枯水的水文极值(见图 5~6)。结果表明两个水文模型均可以有效模拟洪水且模拟不确定性较低，新安江模型的不确定性水平优于 HBV 模型；随着阈值的降低，新安江模型的模拟效果越来越好，HBV 模型模拟效果越来越差[28]。

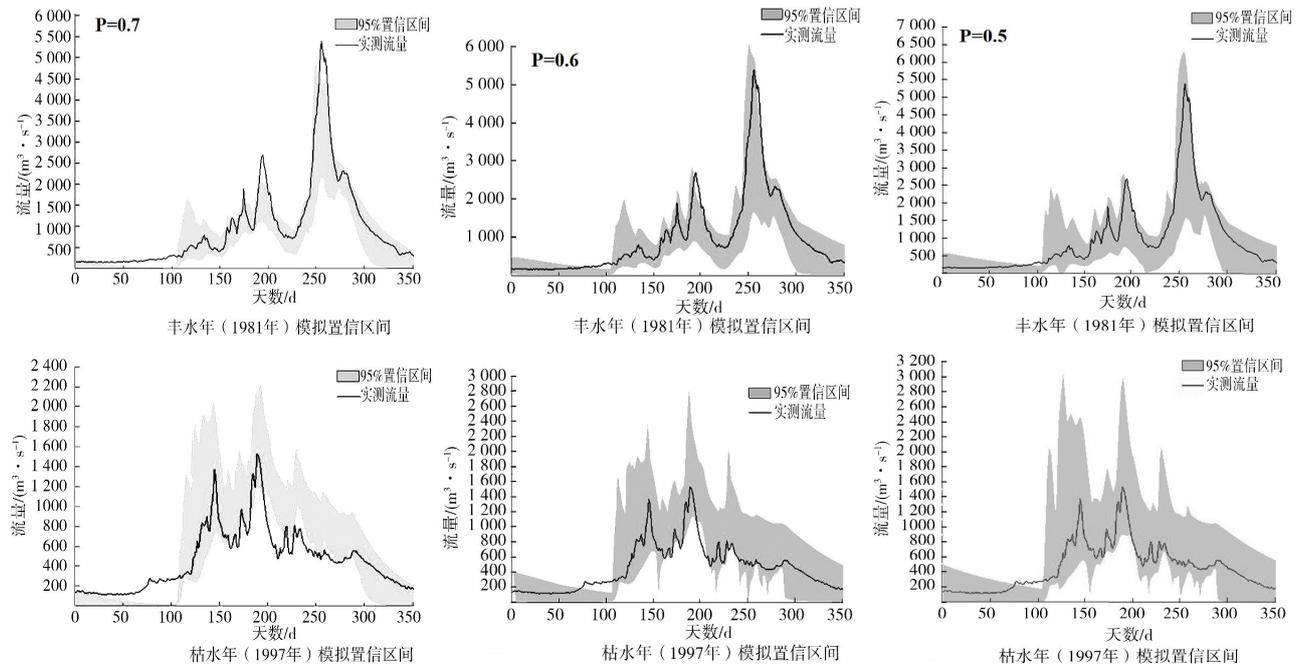


Figure 5. The HBV model simulates the 95% confidence space between wet and dry years [29]
图 5. HBV 模型模拟丰水与枯水的 95% 置信空间[29]

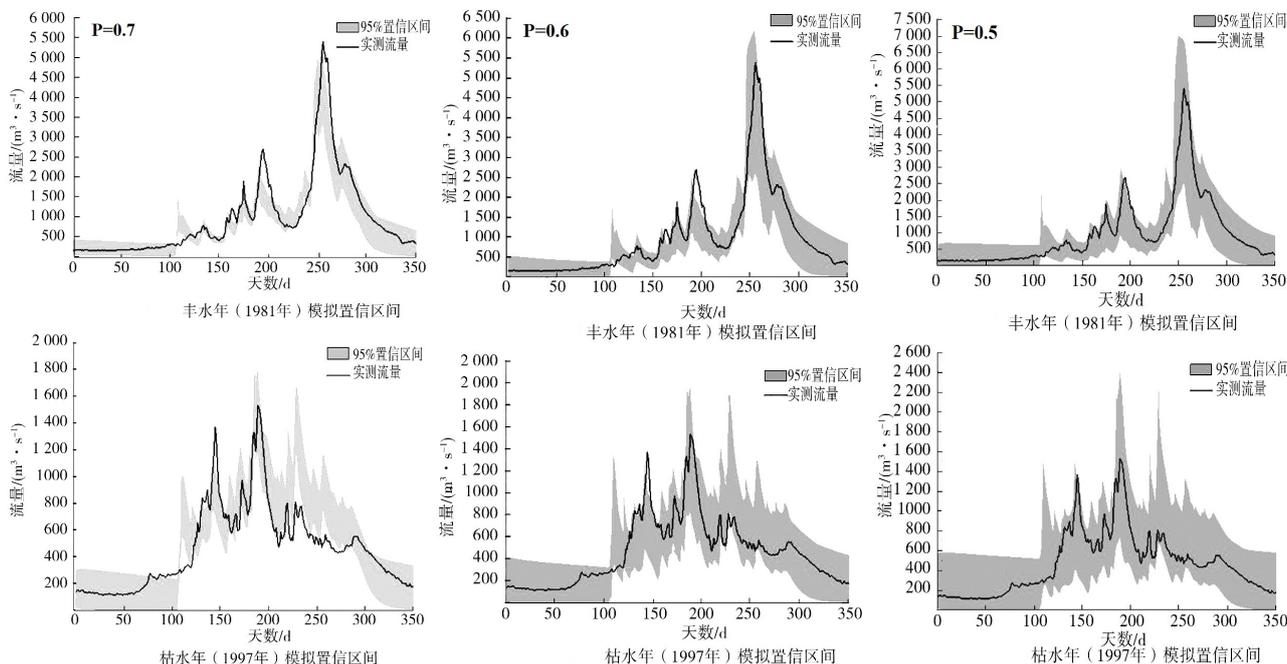


Figure 6. Xinjiang model simulates the 95% confidence space between wet and dry years [29]

图 6. 新安江模型模拟丰水与枯水的 95% 置信空间[29]

6. 总结与讨论

气候变化对流域水文循环过程研究和水资源可持续利用带来了更困难的挑战。为更深刻认识气候变化的不确定性信息，首先要从气候系统内部认识存在的偶然性，再从不确定性类型到评估方法进行研究。气候变化作为目前水文气象交叉学科的热点和难点，未来加强对其不确定性研究和评估预测不仅对“一带一路”战略具有深远意义，也为全球气候变化下寻求变化适应对策、促进水资源可持续利用等方面具有重要意义。

1) 目前对气候变化研究多部分归结于人类活动带来的影响，缺乏对气候系统本身的研究。事实上人类活动和气候系统自身均存在不确定性，两者之间相辅相成、相互反馈，是一个相互复杂不可分割的体系，因此在今后的研究中应加强对气候系统自身的模拟探索并融入其它因素，不断完善知识体系和对方法、模型的改进。

2) 20 世纪 40 年代出现的高温、50~70 年代出现的降温无法用温室气体变化解释，表明自然因素，如太阳活动、火山活动乃至大洋热盐环流在年代际温度变化中具有重要作用，太阳辐射照度已不足以解释相应的气候变化。目前，大多数学者已经注意到银河宇宙线的作用，太阳活动减弱，银河宇宙线增强，地球大气低云量增加导致气候变冷，但该影响机制有待进一步深入研究。

3) 气候变化相关的性质、原因和效应的不确定性与我们过去、现在和未来决策在某种连续但非线性的动态当中的影响息息相关。在今后气候变化发展和研究中必须重视伦理义务，承担减缓和适应气候变化以及承担国际合作义务，并有效地协调气候变化方面的国际合作。

4) IPCC 目前对气候科学的定量评估仍基于可能性描述，定性评估建立在一致性和普遍性的结论基础上，明确有效性的信度和可能性的概率作为对不确定性进行定性和定量表达的衡量标准，作为区别于可能性和信度的相对统一的标准方法。将定性和定量评估统筹到处理不确定性方法中，为处理不确定性提供更合理的综合型框架，也在某一程度上确保了所提供信息的质量。但这样的探索方式是否能够满足决策层对于科学信息质量的要求，还需实践的进一步检验。

7. 建议与方向

水文不确定性属客观现象, 只能通过对初始条件的确定、模型的优化才能使输出结果更加精确, 但这种不确定性无法消除, 加之未来气候变化导致初始边界条件、模型复杂程度加剧导致未来水文不确定性程度增加。基于现已存在现象, 提出对未来水文不确定性的研究建议与方向主要集中在以下几方面:

① 从数据获取分析与野外实验方面相结合来减少不确定性(高分辨率、遥感、地面雷达信息同化融合, 建立多时空尺度数据集, 加强野外试验观测); 基于大数据技术融合多源数据, 增加输入资料的精确性与完备性。② 改进已有模型(需考虑模型不均匀性、量化水文模型、改善模型结构)。③ 新方法的研究(发展基于尺度及多尺度理论、非线性水文动力模式和生态水文关系、复杂系统分析方法、计算智能模拟方法等新的水文理论; 开发新的多尺度水文空间分布式模拟方法, 以描述内在的水文多尺度不均匀性、非线性、复杂性和尺度现象), 加强完善理论方法, 在提高水文循环过程机理认识和减少不确定性应用中发展变化环境下的水文学理论(随机水文学、模糊水文学、灰色系统水文学的学科体系)。④ 未来应加强以气候自然变异、人为气候变化和人类活动三源分解的环境变化影响研究, 增加水文模型与区域气候模式的多项耦合程度。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0401408); 国家自然科学基金项目(51679188, 51979221)。

参考文献

- [1] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.
XIA Jun, TAN Ge. Hydrological science towards global change: Progress and challenge. Resources Science, 2002, 24(3): 1-7. (in Chinese)
- [2] 夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
XIA Jun, LIU Chunzhen and REN Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 1-12. (in Chinese)
- [3] 卡米莉·费特尔, 让-菲利普·瓦奥布, 张海燕. 气候变化、不确定性和伦理视角: 决策工具的作用[J]. 国际社会科学杂志(中文版), 2015, 32(3): 49-66 + 6-7 + 11.
FERTEL, C., WAAUB, J.-P. and ZHANG Haiyan. Climate change, uncertainty and ethical perspectives: The role of decision-making tools. International Social Science Journal (Chinese Edition), 2015, 32(3): 49-66 + 6-7 + 11. (in Chinese)
- [4] 魏军晓, 岑况. “深时”古气候对现代全球变暖及不确定性的启示[J]. 自然杂志, 2018, 40(6): 451-458.
WEI Junxiao, CEN Kuang. Paleoclimate implication for the global warming and its uncertainties. Chinese Journal of Nature, 2018, 40(6): 451-458. (in Chinese)
- [5] 王娜. 对气候科学不确定性的分析[J]. 科技风, 2017(5): 127-128.
WANG Na. An analysis of uncertainty in climate science. Technology Wind, 2017(5): 127-128. (in Chinese)
- [6] 段青云, 夏军, 缪驰远, 等. 全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性[J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 182-188.
DUAN Qingyun, XIA Jun, MIAO Chiyuan, et al. The uncertainty in climate change projections by global climate models. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 182-188. (in Chinese)
- [7] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(6): 391-397.
ZHANG Liping, YU Songyan, DUAN Yaobin, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River Basin. Climate Change Research, 2013, 9(6): 391-397. (in Chinese)
- [8] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Study on the impact of climate change on hydrology and water resources. Beijing: Science Press, 2007: 1. (in Chinese)
- [9] 刘艳丽, 张建云, 王国庆, 等. 环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 102-110.
LIU Yanli, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Review for impacts assessment of environmental change on hydrology and water resources and uncertainty in catchment scale. Climate Change Research, 2015, 11(2): 102-110. (in Chinese)
- [10] 田焯. 气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.

- TIAN Ye. Uncertainty analysis of the extreme flows under the impact of climate change. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [11] CARTER, T. R. Preliminary guidelines of assessing impacts of climate. Working Group II of the Intergovernmental Panel of Climate Change, 1993.
- [12] 郭亚男. 量化气候变化对水文影响的降尺度方法的不确定性[J]. 水利水电快报, 2012, 33(8): 15-19 + 24.
GUO Yanan. Uncertainty in scale-down methods for quantifying the effects of climate change on hydrology. Express Water Resources & Hydropower Information, 2012, 33(8): 15-19 + 24. (in Chinese)
- [13] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.
WANG Guoqing. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River Basin. Nanjing: Hehai University, 2006. (in Chinese)
- [14] NEMEC, J., SCHAAKE, J. Sensitivity of water resources system to climate variation. Hydrological Science, 1982, 27(3): 327-343. <https://doi.org/10.1080/02626668209491113>
- [15] ARNELL, N. W. A simple water balance model for the simulation of stream flow over a large geographic domain. Journal of Hydrology, 1999, 217: 314-355. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00023-2)
- [16] WMO. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational hydrological report No. 7. Geneva: WMO, 1975.
- [17] WMO. Simulated real-time intercomparison of hydrological models. Operational hydrological report No. 38. Geneva: WMO, 1992.
- [18] 王国庆, 荆新爱, 陈江南, 等. 流域水文模型在清涧河流域的比较[J]. 灌溉排水学报, 2005(3): 28-31.
WANG Guoqing, JING Xinai, CHEN Jiangnan, et al. Application comparison of hydrological models in Qingjianhe River Basin of Middle Yellow River. Journal of Irrigation and Drainage, 2005(3): 28-31. (in Chinese)
- [19] 李琪. 全国水文预报技术竞赛参赛流域水文模型分析[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 191-195.
LI Qi. Analysis and discussion related to the hydrological watershed models used in the first hydrological forecasting technology competition of China. Advances in Water Science, 1998, 9(2): 191-195. (in Chinese)
- [20] HU, C. H., GUO, S. L. Intercomparison of watershed hydrological models based on the storage curve of watershed. In The proceedings of the second international yellow river forum volume 3. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2005: 297-308.
- [21] 赵宇, 陈松涛, 钱键. Monte-Carlo 法在测量不确定度评定中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2004(4): 501-504.
ZHAO Yu, CHEN Songtao and QIAN Jian. Application of monte-carlo method for evaluating uncertainty of measurement results. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(4): 501-504. (in Chinese)
- [22] GILKS, W. R. Markov chain monte carlo. In Encyclopedia of Biostatistics. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2005: 1-8.
<https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a14021>
- [23] HASTINGS, W. K. Monte carlo sampling methods using Markov chains and their applications. Biometrika, 1970, 57(1): 97-109. <https://doi.org/10.1093/biomet/57.1.97>
- [24] YANG, J. Hydrological modeling of the Chaohe Basin in China: Statistic model formulation and Bayesian inference. Journal of Hydrology, 2007, 340(3): 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.006>
- [25] DUAN, Q. Y., PHILLIPS, T. J. Bayesian estimation of local signal and noise in multimodel simulations of climate change. Journal Geophysics Resources, 2010, 115: D18123. <https://doi.org/10.1029/2009JD013654>
- [26] 王绍武. 全球气候变暖的争议[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1529-1531.
WANG Shaowu. The global warming controversy. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(16): 1529-1531. (in Chinese)
- [27] CDIAC. Monthly carbon dioxide concentration. 2016. <http://cdiac.ornl.gov>
- [28] 王思媛, 孙利敏, 胡高辉, 等. HBV 模型与新安江模型在黄河源区的应用比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 41-45+14.
WANG Siyuan, SUN Limin, HU Gaohui, et al. Comparison of HBV and Xin'anjiang model's application of source region of Yellow River. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 41-45+14. (in Chinese)
- [29] 王思媛, 胡高辉, 孙利敏, 等. 水文模型模拟水文极值的不确定性分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 1-9.
WANG Siyuan, HU Gaohui, SUN Limin, et al. Uncertainty analyses of hydrological model to hydrological extremum. Yellow River, 2018, 40(2): 1-9. (in Chinese)