

水科学博士文库

Uncertainty Research on Runoff Simulation Considering the Impact of Input Data Derived from Climate Models

考虑气候模式影响的径流模拟不确定性研究

董磊华　熊立华　张丛林　汪吉午　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水科学博士文库

Uncertainty Research on Runoff Simulation Considering the Impact of Input Data Derived from Climate Models

考虑气候模式影响的径流模拟不确定性研究

董磊华　熊立华　张丛林　汪吉午　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书基于贝叶斯理论，全面构建了气候模式影响下的径流模拟不确定性分析框架，包括模型参数、模型结构和输入不确定性。以汉江上游流域为例，针对模型参数不确定性，采用广义似然不确定性估计法（GLUE）分析了新安江模型、SMAR 模型和 SIMHYD 模型的参数敏感性；针对模型结构不确定性，采用贝叶斯模型加权平均方法（BMA）分析了上述 3 个水文模型和 3 个目标函数组合的模型不确定性；针对输入不确定性，采用 BMA 方法分析了 3 个气候模式和 3 种降尺度方法组合的降雨不确定性。最后，基于传统 BMA 方法提出了单层 BMA 和双层 BMA 两种方案，用于考虑气候模式和水文模型双重不确定性下综合径流的模拟计算，并选择最优的方案来预测未来气候情景下的径流。

本书可供水文模型及不确定性分析、全球气候变化与水文模型耦合等相关领域的科研人员阅读，也可作为高等院校水文及气象相关专业的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

考虑气候模式影响的径流模拟不确定性研究 / 董磊华等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2020.9
ISBN 978-7-5170-8938-4

Ⅰ. ①考… Ⅱ. ①董… Ⅲ. ①径流模型－研究 Ⅳ. ①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第187474号

书　　名	水科学博士文库 **考虑气候模式影响的径流模拟不确定性研究** KAOLÜ QIHOU MOSHI YINGXIANG DE JINGLIU MONI BUQUEDINGXING YANJIU
作　　者	董磊华　熊立华　张丛林　汪吉午　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规　　格	170mm×240mm　16 开本　11.25 印张　162 千字
版　　次	2020 年 9 月第 1 版　2020 年 9 月第 1 次印刷
定　　价	**88.00** 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

QIANYAN

随着全球气候的变化趋势，气候变化对水文水资源的影响成为当今水文研究中的热点。由于水文模型很难完整地描述现实中的水文过程，不确定性分析是水文径流模拟中不可缺少的部分。通常，径流模拟的不确定性来源于输入数据、水文模型参数和模型结构。但是，当以全球气候模式下的气象数据作为水文模型的输入数据时，气候模式、降尺度方法及排放情景的不确定性，将直接影响输入数据，从而间接影响径流模拟的效果。本书对径流模拟的研究，不仅用不确定性区间形式取代了过去的确定形式，还将气候模型的气象输出不确定性考虑在内，为气象预报和水文预报结合的不确定性分析提供了依据，并为如何减少不确定性、通过集合预报等方法来提高气象和水文综合预报精度提供了参考。

本书除对水文模型的参数和结构的不确定性进行了分析，还考虑了不同气候模式影响下的输入不确定性，旨在全面地研究气候模式影响下的径流模拟不确定性。本书的主要研究内容包括：①采用GLUE方法对新安江模型、SMAR模型和SIMHYD模型的参数进行敏感性分析，旨在识别模型参数对模拟精度的影响程度，为流域水文模拟提供参考，从而为利用BMA对多个模型的加权平均提供可靠的参数；②采用贝叶斯模型加权平均方法（BMA）对上述3个水文模型和多个目标函数组合后的多组预报值进行综合，并推算出综合径流的不确定性区间，用于比较分析多个水文模型内和模型间的误差；③采用BMA方法对3个全球气候模式（BCCR-BCM2.0、CSIRO-MK3.0和GFDL-CM2.0）和3种降尺度方法组合后的多组降雨模拟值进行综合，进而分析不同气候模式和不同降尺度方法对降雨模拟的不确定性；④基于BMA方法，首次提出了

两种 BMA 方案（即单层 BMA 和双层 BMA）用于气候模式影响下径流模拟的不确定性研究，将两种方案得到的综合径流与实测径流进行比较，选择最优的方案用于未来气候情景下的径流模拟；⑤基于双层 BMA 方案，对未来 3 种气候排放情景 A1B、A2 和 B1 下的多组降雨和多组径流进行加权平均，最后得到未来 30 年 3 种气候情景下的综合降雨和综合径流，并利用对数正态分布对综合降雨和综合径流的频率分布进行拟合和比较。

本书由中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司董磊华、武汉大学熊立华、中国科学院科技战略咨询研究院张丛林主要撰写完成，参加本书编制和校审的人员还有汪吉午、乔海娟。感谢武汉大学林琳教授、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司万民博士、西安理工大学于坤霞副教授对本书的悉心指导。感谢挪威奥斯陆大学的 Lars Gottschalk 院士和 Irina Krasovskaia 博士对笔者学习上的指导。感谢 Upmanu Lall 教授在美国哥伦比亚大学交流学习期间，对笔者相关研究工作的指导和帮助。感谢第二次全国污染源普查国家数据第三方评估（Y902661901）对本书的资助。

在本书撰写过程中，笔者力求做到科学、全面地评价水文径流模拟中的不确定性，但考虑气候模式影响的径流模拟不确定性研究是一个复杂的问题，涉及甚广，本书的理论和实用性还有待于进一步检验。书中不当之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2019 年 11 月

目录

MULU

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　研究背景及意义 …… 1

1.2　径流模拟不确定性的研究进展 …… 3

1.3　考虑气候模式影响的输入不确定性研究进展 …… 6

1.4　不确定性研究方法 …… 10

1.5　本书主要内容 …… 15

第 2 章　水文模型参数的敏感性分析 …… 18

2.1　研究方法 …… 19

2.2　3 个水文模型及其参数物理意义 …… 21

2.3　应用研究 …… 25

2.4　本章小结 …… 37

第 3 章　基于 BMA 的综合多水文模型和多目标函数的不确定性分析 …… 39

3.1　BMA 方法及基本原理 …… 40

3.2　多水文模型和多目标函数的组合 …… 44

3.3　精度指标 …… 46

3.4　计算实例 …… 48

3.5　本章小结 …… 62

第 4 章　多气候模式和多降尺度方法的降雨模拟及其不确定性分析 …… 64

4.1　气候模式 …… 64

4.2　降尺度方法 …… 68

4.3 气候模式和降尺度方法的组合预报 …… 71
4.4 气候模式对月降雨的不确定性分析 …… 74
4.5 降尺度方法对月降雨的不确定性分析 …… 81
4.6 本章小结 …… 89

第 5 章 基于 BMA 的气候预测和水文模型对径流模拟的综合不确定性分析 …… 90
5.1 单层 BMA …… 91
5.2 双层 BMA …… 93
5.3 双层 BMA 中的不确定性区分 …… 95
5.4 实例分析 …… 96
5.5 本章小结 …… 127

第 6 章 基于双层 BMA 的未来气候情景下的降雨与径流预测 …… 129
6.1 3 种气候情景的描述 …… 129
6.2 3 种气候情景的月降雨预报区间 …… 130
6.3 3 种气候情景的月降雨结果 …… 133
6.4 第一层 BMA（9）的降雨综合结果 …… 142
6.5 第二层 BMA（3）的径流综合结果 …… 146
6.6 本章小结 …… 147

第 7 章 总结与展望 …… 149
7.1 总结 …… 149
7.2 展望 …… 151

参考文献 …… 153

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

根据全球地表温度的器测资料（自1850年以来），近12年（1995—2006年）中，有11年位列最暖的12个年份之中。最近100年（1906—2005年）的温度增加0.74℃（0.56～0.92℃）[1,2]。根据政府间气候变化专业委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）先后于1990年、1996年、2001年和2007年完成的4次权威评估报告，气候变化带来的影响不仅仅是全球变暖，对水文水资源也带来了前所未有的挑战[3]。气候变暖将加剧水循环过程，驱动降水量、蒸发量等水文要素变化，增强水文极值事件发生频率，改变区域水量平衡，影响区域水资源分布[4]。气候变化对区域径流的研究结果一般包括：径流量增大[5]、径流量减小[6]、径流量的季节性变化[7]。然而，气候变化对水文模型径流模拟的影响，主要是通过气候模型产生的气象数据来作为水文模型的输入数据，从而影响径流及其他水文过程的模拟。

水文模型中的降雨、气温和蒸发等输入数据随着全球气候变化而变化，为了模拟这些输入数据对径流的影响，国外早期常用的方法是基于某个流域的气候和径流的历史数据，建立气候因子和径流之间的多元回归关系[8]，或者用一些指标来定量分析气候因子变化给径流带来的敏感性[9]。这些方法的不足之处在于，必须利用气候和径流的长期历史数据，因此不能应用于未来气候情景。目前常用的方法是采用全球气候模式（Global Climate Model，GCM）来模拟不同温室气体排放情景下的气候因子变化，然后利用降尺度方法将全球尺度的气候变化转化为流域尺度的气候变化作为水文模型的

输入[8]。但是这种方法中每一步都存在着误差，导致全球和区域尺度的气候变化情景有很大的差别[9,10]。虽然近几年区域气候模型（Regional Climate Model，RCM）被广泛采用，并被证实比 GCM 有更高的精度，能提供气候变化在流域尺度的空间分布[11,12]。但是由于目前对气候变化的预测精度有限，也只能给出一种可能的变化趋势。因此，气候模式产生的气象数据存在很大的不确定性。

此外，水文模型本身也存在很大的不确定性。由于水文现象的复杂性，加之不同流域的产、汇流机制以及下垫面条件的不同，水文模型很难准确地描述每一个流域的水文循环过程[13]。用相对简单的数学公式来概化高度复杂的水文过程往往会出现“失真”，从而造成水文模型的不确定性。通常，径流模拟的不确定性包括 3 方面：①输入不确定性；②水文模型参数不确定性；③水文模型的结构不确定性[14]。当考虑气候模式对输入数据的影响后，水文模型的输入不确定性主要包含了 GCM 不确定性、气候情景的不确定性，以及降尺度的不确定性。考虑气候模式影响的输入不确定性与径流模拟的关系如图 1.1 所示。

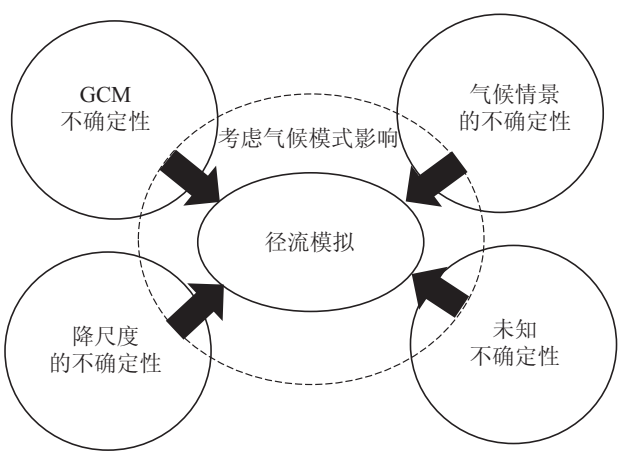


图 1.1　考虑气候模式影响的输入不确定性与径流模拟的关系

本书将径流模拟中的不确定性和考虑气候模式影响的输入不确定性结合起来，较完整地分析了从气候模型的降雨模拟到水文模型



的径流模拟这个过程中的不确定性。本书对径流模拟的研究，不仅用不确定性区间形式取代了过去的确定形式，还将气候模型的气象输出不确定性考虑在内。对以后将气象预报和水文预报结合的不确定性分析提供了依据，并对如何减少不确定性、通过集合预报等方法来提高气象和水文综合预报精度提供了参考。

1.2 径流模拟不确定性的研究进展

径流模拟的不确定性分析是对水文模型失真现象的一种概率描述，是径流模拟分析中不可或缺的一部分。下面将综合阐述径流模拟中的 3 种不确定性的国内外研究进展。

1.2.1 输入不确定性的研究进展

水文气象数据作为水文模型中的重要输入数据，其不确定性对径流模拟结果有着重要的影响。其中最重要的气象输入资料包括降雨、蒸发和气温资料。而在这 3 种气象资料中，降雨资料对模型的参数率定和模拟结果起着至关重要的作用。而且，降雨资料的不确定性，对比水文模型的结构不确定性和参数不确定性，往往占有更大的比重。降雨不确定性的主要来源有降雨时空变异性，还有观测站网固定点同时间观测之间的差异。目前对降雨的空间变异程度、前期土壤含水状况、流域特征（地形、河网、土壤等）以及流域响应之间的复杂关系等问题的研究都处于初级阶段，而且大多数的研究主要考虑的是洪水过程中的两种降雨变异性（降雨空间变异性、降雨强度的时间变异性）对径流总量、峰现时间和洪峰等因素的影响[15]。

在 Shah 和 O′Connell[16-17]对降雨的空间变异性以及流域响应之间的关系的研究中，通过建立一个降雨随机场模型，并把它与 SHE 模型结合起来，然后应用于 Wye 流域的上游区[18]。试验发现，在“湿”的状态下，降雨采用流域平均，径流模拟的效果较好；但是，在“干”的状态下，径流的模拟效果要比“湿”的状态

差，流域平均后的降雨没有分布输入的降雨的效果好，土壤含水量的空间分布随着降雨的空间分布变化，流域的降雨径流响应呈现高度非线性[18]。Chaubey 等[19]应用 AGNPS 模型详细分析了降雨的变异性对流量过程线的影响，其研究表明降雨数据的空间分布和观测精度对流量过程线起着直接的影响作用。说明降雨的空间变异性，会直接影响模型参数的变异性，从而影响径流模拟结果。Bronstert 和 Bardossy 研究发现，在山坡或小流域尺度上，特别是超渗产流条件下，降雨在水文过程中扮演了重要的角色，而且降雨强度的时间变异性相对于平均情况而言增加了产流量[20]。Lopes 将一个径流侵蚀的分布式模型运用在小流域上，然后用模型的模拟效果来检验降雨空间分布不确定性分别对径流量、洪峰流量及产沙量的影响[21]。结果发现，雨量站的空间布局和站网密度，以及暴雨的时空特性对径流模拟都有较大的影响[18]。

鉴于降雨等输入资料不确定性对径流的影响，如果模型的输入数据用随机变量的形式取代过去的确定值，那么输入的不确定性就可以被量化，从而也能得到模型输出的不确定性[18]。例如，美国国家气象局没有采用点的观测数据，而是用降雨的概率分布来预报降雨，这样就可以推算输入的不确定性对预报输出的影响[22]，从而不会错过一些降雨径流的极值事件。

1.2.2　模型参数不确定性的研究进展

Beven 等[23]发现，在参数的取值范围内，在一个特定的目标函数下，可能存在许多组参数值组合得到十分相似的模拟结果。这种现象反映了模型结构组成之间的相互作用，也反映了参数对流域特征的敏感性，是参数不确定性的原因之一。模型参数不确定性的另外一个主要来源就是参数优化过程中的不确定性。在水文模型中，多数模型参数都是由实测资料和参数优化方法在目标函数的限制下得到的最优解[24]。因此参数率定资料、参数优化方法、目标函数的选取都影响到参数值，给模型参数的确定带来了诸多不确定性。敏感性分析是评价模型参数或者输入数据误差对结果影响的重

要方法，它分为局部敏感性分析和全局敏感性分析两种。其中局部敏感性分析是每次变动一个参数或一个输入因子，来计算模拟结果的差别，从而分析参数或者输入因子的敏感程度[25]。这种方法简单易行，但是不能反映非线性复杂模型的参数之间的相关性。而全局敏感性分析方法可以同时分析多个参数或者多个输入因子对模拟结果的影响[26,27]。

敏感性分析可以减小模型参数的不确定性，但是没有考虑模型结构的不确定性，可能会误将模型结构的不确定性引入参数的不确定性分析中[28]。目前对模型参数不确定性采用的主流方法是广义似然不确定性估计（GLUE)[23]。

1.2.3 模型结构不确定性的研究进展

模型结构是水文模型的核心，是建模者基于水文现象的知识与经验对水文过程的数学描述。水文模型结构的不确定性主要来源于以下 4 个方面：

（1）水文过程和数学描述之间的误差。自然界非常复杂，水文过程很难用简单的数学公式去表达。而且用数学公式来描述的时候，通常要用到合理的假设，求解数学微分方程也需要假定。

（2）不同水文机理的水文模型适用于不同的流域。例如，新安江模型被广泛应用于我国大大小小的流域，但是其产流机理是建立于蓄满产流之上，因此它只能适用于湿润和半湿润地区。对于干旱地区，应该采用以超渗产流为主的产流机制的水文模型。

（3）分布式水文模型虽然考虑了水文信息的空间分布，综合了更多的水文资料，但是其参数较多，结构相对更加复杂，势必会有更大的不确定性。

（4）模型尺度的不匹配也是模型结构不确定性的主要来源。其中尺度不匹配包括空间和时间尺度两方面。时间尺度上，有短期水文预报模型和长期水文预报模型之分。空间尺度上，很多模型是由实验室研究出的水运动的“点”方程，用到流域尺度的径流模拟。

目前考虑到单个水文模型结构的不确定性，很多水文集合预报

的方法得到了广泛的关注。水文集合预报的优点在于可以集合几个水文模型，吸取几个模型在径流模拟中的优势，规避其短处。把不同模型组合起来的想法最早由 Reid[29]在 1968 年提出，并大胆应用于经济学领域。Bates 和 Granger[30]在 1969 年更详细地讨论了多模型组合的理论。接着 Dickson（1973）等[31]完善了多模型综合方法的理论，但是主要将其应用于经济学和天气预报等领域。1997 年，Shamseldin 等[32]首次将多模型综合方法应用于水文预报之中，选择了 5 个水文预报模型在 11 个流域进行预报应用，采用简单平均法（SAM）、加权平均法（WAM）和神经网络法（NNM）3 种方法将各个预报结果进行综合。2001 年，Xiong 等[33]利用 Takagi - Sugeno 模糊系统对各个模型的预报结果进行模糊结合，取得了令人满意的结果。

近年来，贝叶斯模型加权平均方法（BMA）在统计学、管理学、医药学和气象学等领域得到了广泛的应用。BMA 方法与其他多模型综合方法一样，是各个模型预报结果的加权平均，但不同于它们的是，BMA 方法还能计算模型间和模型内的误差。BMA 方法最早是由 Hoeting 等[34]在 1996 年提出。2003 年，Neuman 等[35]首次将 BMA 方法应用于水文学领域，例如地下水的模拟。2006 年，Ajami 和 Duan 等将该方法应用于水文模型结构不确定性分析之中[36]。

1.3　考虑气候模式影响的输入不确定性研究进展

目前，当全球气候模式通过降尺度得到区域的气候预测后，一般将此气候数据作为流域水文模型的输入，用来计算分析气候变化给水文水资源带来的影响。全球气候模式是目前生成未来气候变化情景的最有效方法，广泛被用于评价气候变化对流域水文水资源的影响之中。在评价气候变化对水文的影响时，一般首先选定全球气候模式中的气候因子，然后选定特定的气候情景，对这些气候情景下的全球尺度气候数据进行降尺度到研究区域，最后将区域气候数

据作为水文模型的输入数据来预测未来气候变化对水文因子的影响。在这个过程中，与气候预测有关的输入数据的不确定性通常来源于以下 3 个方面：气候模式的不确定性、气候情景的不确定性和降尺度方法的不确定性。

1.3.1 气候模式不确定性的研究进展

气候系统由大气圈、水圈、冰雪圈、陆地和生物圈 5 个主要部分组成，是一个复杂多样的系统。气候的变化不仅受内部大气-海洋-陆地-冰雪系统相互作用的影响，还受外部的自然因素（如太阳活动变化）及人为活动（如土地利用）变化的影响。气候模式是用来描述气候系统、系统内部各个组成部分以及各个部分之间、各个部分内部子系统间复杂的相互作用，已经成为认识气候系统行为和预估未来气候变化的定量化研究工具。

随着计算机技术和人们认识水平的提高，全球气候模式已具有一定的模拟全球、半球和纬向平均气候条件的能力，在 IPCC 的报告中不同气候模式可以给出较一致的气候变化趋势。气候模式大体可分为简单气候模式、耦合气候模式和中等复杂的地球系统模式(EMIC)。简单气候模式概化了海洋-大气系统，并与简化的地球生物化学圈模式耦合，能大致估测气候对各种情景的响应。耦合气候模式囊括了大气、海洋、陆地模式，甚至包括碳循环等模块，能够用于研究大气-海洋-陆地的相互作用和气候系统变化规律。其中，全球海气耦合模式（AOGCM）是目前最全面的气候模式，可以用来研究海洋状况和土壤湿度等因素的变化规律。中等复杂的地球系统模式基于简单气候模式，但加入了大气和海洋的动力过程，能对未来的气候概率进行预估。IPCC 报告主要采用的是耦合气候模式来评估气候变化。目前，世界各国已经研制了 40 多个全球气候模式，其中，耦合气候模式（如英国 Hadley 气候预测与研究中心的 HADCM3、美国国家大气研究中心的 NCAR2PCM 和德国马普实验室的 ECHAM5/MPI2OM）最具影响力。

尽管气候模式在不断改进，但是由于气候变化的复杂性、多样

性和计算分析的困难性，目前世界各国研制的全球气候模式（GCM）的模拟能力仍然有限，模拟的气候状况与真实情况存在着较大差距[37,38]。

气候模式的不确定性主要是因为对云-辐射-气溶胶相互作用和反馈过程、大气中各种微量气体与辐射之间的关系、水循环过程、陆面过程、海洋模式的逼近程度、海-气-冰之间的相互作用和反馈的认识和了解有限。对地球辐射能量平衡的模拟，对云的模拟和对降雨的模拟都存在很多不确定性因素。尤其是对降雨的模拟，尽管许多模式可以模拟一些区域大尺度的降雨趋势，但在小尺度上模拟能力很差。Lebel 等比较了非洲西部在 1960—1990 年间 GCM 模式的模拟结果和实测数据，得出结论：GCM 模式对降雨的季节变化和年际变化模拟效果不佳。同样，对于印度夏季降雨的预测，也不能预测到降雨变化的信号、时间以及年际变化[39]。在国内，赵宗慈等将 1961—1990 年 5 个海气耦合模式预测的表面大气温度和降雨与实测数据对比，结果表明，这 5 个模式对东亚包括中国区域的气候都有一定的模拟能力，但模拟场仍存在较明显的系统误差[40]。

1.3.2　降尺度方法不确定性的研究进展

全球气候模式预测的气候因子一般都是基于全球这个大尺度的，如果要将这些大尺度的输出数据输入流域水文模型中来评价气候变化对水文水资源的影响，必然会产生数据之间的空间分辨率不一致、尺度不匹配的问题。因此 GCM 数据很难直接用于小尺度的水文模型，必须采用一些例如降尺度和插值等后期处理的方法来解决尺度不匹配的问题。所以动力降尺度方法得到的区域气候模式（RCM）和统计降尺度方法得到的 RCM 应运而生，它们是基于 GCM 初始的和时变侧边界条件开发的，仅适用于限定的区域内。

降尺度技术大体分为 3 类：统计关系法、环流分型技术和天气发生器法[41,42]。统计关系法的基本思想是：建立区域气候变量和全球气候模式中预报因子之间的线性或非线性关系。但是由于预报因子和预报量之间的关系并不稳定，而且这种关系会随着时间的变



化而发生变化，这种方法降解得到的区域气候数据有很大的不确定性[41,42]。环流分型技术是首先将与 RCM 变化有关的大气环流因子进行筛选和分类，然后建立区域气候变量与不同种类大气环流因子之间的关系。这个方法是基于大气环流和区域气候的紧密关系，但是其可靠性也取决于这种关系的稳定性，仍然存在不确定性，例如降雨与大尺度环流之间的关系往往没有那么明显。天气发生器法是以气候模型预测的变化因素的扰动为基础，它能够迅速产生一系列气候情景用于研究罕见气候事件的影响和自然的变异性。

每一种降尺度方法都有优势和劣势，有些方法无法预测水文中的变异性，有些方法无法预测水文中的极端气候事件。即使采用相同的全球气候模式，不同降尺度方法得到的气候预测结果也会不同，这些结果的差异无疑导致了量化气候变化对水文影响的不确定性[43]。

1.3.3 气候情景不确定性的研究进展

情景是指在基于连贯的和内部一致的一组有关驱动力和主要关系的假设之下的一种关于未来如何发展的一种合理的、通常简化的描述[44]。情景通常是对未来状况的一种预测，通过它能对未来的潜在影响、不确定性、风险和利益作出一定程度的分析，为决策者的决策和管理提供参考[45,46]。气候情景是指一种关于对辐射有潜在影响的物质（如温室气体、气溶胶）未来排放趋势的合理表述，它是基于连贯的和内部一致的一系列有关驱动力（如人口增长、社会经济发展、技术变化）及其主要相关关系的假设[47]。

IPCC 共发布了两套气候情景：第一套是第二次评估报告中的 IS92 情景[48]；第二套就是 SRES 情景[1,2]，它包含 A1、A2、B1 和 B2 4 种不同情景。A1 描述的是经济高速发展、全球人口在 21 世纪中达到峰值、高排放情景的世界；A2 描述的世界，假设人口持续增长，而且全球化不明显，考虑人均经济增长和技术变化等因素，都带有明显的地方特性；B1 描述的世界从全球化角度出发，比较理想，是低排放经济，社会和环境都是可持续性发展的；B2

描述的世界跟 B1 的不同之处在于，从局域发展的角度来解决可持续发展问题[49]。

温室气体排放预测是气候模式的重要输入条件，其不确定性必然会导致气候模式输出结果的不确定性。温室气体排放情景的不确定性主要来源于，未来社会经济、环境、土地利用和技术进步等社会、自然和技术因素的变化难以准确地描述和预测。而且这些因素对气候影响的不确定性也是很难预估的。

1.4　不确定性研究方法

用于水文模型不确定性分析的方法有很多种[50]。从最早的仅仅用于量化模型参数不确定性的方法，例如 Beven 和 Binley[23]在 1992 年提出的广义似然不确定性估计方法（GLUE），Thiemann 等[51]提出的贝叶斯递推估计（BaRE），Vrugt 等[52]提出的 SCEM 方法（the Shuffled Complex Evolution Metropolis），还有 Kuczera 和 Parent[53]提出的 MCMC 方法（Markov Chain Monte Carlo）。近十年来，大多数不确定性分析方法主要用来量化模型的综合不确定性[54]，或者用不同确定性来源的概率描述来分析不同的不确定性。基于状态空间的过滤方法有 SODA 方法（the Simultaneous Optimisation and Data Assimilation）[55]和 DPE 方法（the Dual - state Parameter Estimation）[56]，还有多模型平均方法（Multimodel Averaging）[57]、非概率方法（Non - Probabilistic Methods）[58]，以及经典或者修改过的贝叶斯方法[59,60]。这里根据不确定性分析方法的数学原理的不同，将不确定性分析方法分为以下 5 类[61]。

1.4.1　随机不确定性分析方法

确定性水文模型很难描述自然界中水文现象的复杂性，因此水文系统研究中引入了随机理论[14]。随机水文学是以随机水文过程为研究对象，运用随机过程理论与方法描述和处理水文复杂性和不确定性问题的一门交叉学科[62,63]。随机水文学理论基础部分，是