

# Several Key Issues in the Impact Evaluation of Climate Change on Hydrology\*

Jiali Guo<sup>1</sup>, Hua Chen<sup>1</sup>, Chongyu Xu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

<sup>2</sup>Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway

Email: [jiali.guo0725@gmail.com](mailto:jiali.guo0725@gmail.com)

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2012; revised: Mar. 14<sup>th</sup>, 2012; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** The impact of global climate change on hydrology and water resources has becoming a hot issue concerned by governments and the public of various countries. According to the shift of research pattern about climate change impact on hydrology and water resources in recent years, this paper proposed several key issues such as extreme events, comparative analysis of downscaling methods and uncertainty analysis, summarized the main research achievements at home and abroad in these areas, and pointed out the shortcomings between them.

**Keywords:** Climate Change; Hydrology and Water Resources; Extreme Event; Downscaling Method; Uncertainty Analysis

## 气候变化对水文影响评估中的几个热点问题\*

郭家力<sup>1</sup>, 陈 华<sup>1</sup>, 许崇育<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

<sup>2</sup>奥斯陆大学地学系, 奥斯陆, 挪威

Email: [jiali.guo0725@gmail.com](mailto:jiali.guo0725@gmail.com)

收稿日期: 2012年2月21日; 修回日期: 2012年3月14日; 录用日期: 2012年3月24日

**摘 要:** 全球气候变化对水文水资源的影响是各国政府和社会公众密切关注的热点问题。本文从近年来气候变化对水文水资源影响研究进展中提炼出几个越来越受到重视的热点问题, 如极值事件、降尺度方法对比、气候变化影响评价中的不确定性等展开探讨, 总结了目前国内外在以上三个方面的主要研究成果, 并对其中存在的不足进行了展望。

**关键词:** 气候变化; 水文水资源; 极值事件; 降尺度方法; 不确定性分析

### 1. 引言

以全球变暖为主要特征的气候变化及其影响已经是不争的科学事实<sup>[1]</sup>。气候变化受到各国政府、专家和社会公众的密切关注, 是需要共同致力解决的全球性重大问题之一。水循环是地球上最重要、最活跃

的物质循环之一, 是联系地球系统“地圈-生物圈”和“大气圈”之间的纽带, 它决定着具有战略基础性的水资源的形成及与水土相关的环境演变。气候变化将加剧水循环过程的速率和改变其复杂程度, 驱动降水、蒸发等水文要素的变化, 增强水文极值事件发生频率, 改变区域水资源分布, 从而进一步影响地区乃至国家层面的水资源开发利用战略规划。

关于气候变化对水文影响方面的综述文章, 国内

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51190094)。

作者简介: 郭家力(1984-), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 研究方向为气候变化对水文水资源影响。

很多学者已有介绍,如张建云和王国庆<sup>[2]</sup>,於凡和曹颖<sup>[3]</sup>,刘春葵<sup>[4]</sup>,杨涛等<sup>[5]</sup>。以上这些综述基本上都遵循“未来气候情景设计——输入水文模型模拟——影响研究评价”的写作思路。随着研究者们对气候变化对水文影响的热切关注,这一研究课题中的以下几点越来越受到重视,如:1) 研究关注的重点不再局限于区域可用水量的长期变化趋势,对洪水、干旱等极值事件的影响分析逐步受到重视<sup>[6]</sup>;2) 在为水文模型提供气候强迫数据时,研究者不仅采用全球气候模式(Global Climate Model, GCM)模拟数据,也逐渐重视采用区域气候模式(Regional Climate Model, RCM)的模拟结果<sup>[7]</sup>;3) 从应用的角度而言,采用多模式集合的研究越来越多<sup>[8]</sup>;4) 从理论研究的角度而言,研究重点从确定性的适用性和敏感性分析转为不确定性分析<sup>[9]</sup>。这四点可以归纳为气候变化对水文影响研究中涉及的极值事件、降尺度方法对比、不确定性分析等问题。本文从这三个方面展开,在综述相关研究进展的基础上,分析存在的问题及解决方法,探讨气候变化对水文水资源的影响及研究策略。

## 2. 气候水文极值事件的研究

全球变暖以及由此引起的全球水循环变异,已经导致区域乃至全球范围内日益频繁的热浪、旱涝灾害等气候水文极值事件的发生,以揭示极端气象灾害与水灾发生机理与规律为目的的全球变化研究已成为当今重大科学前沿之一。相比于平均态,极端事件对气候变化更敏感,对经济、社会和自然生态系统造成的巨大影响也受到了人们的更多关注。

关于气候极值事件(Climatic Extreme Events)的定义,学者们做了很多研究:Easterling等<sup>[10]</sup>将气候极值事件分为两类,Beniston等<sup>[11]</sup>和封国林等<sup>[12]</sup>分别归纳了定义气候极值事件的标准和方法;而对于水文极值事件(Hydrological Extreme Events)并没有客观和一致认同的定义。概括起来的理解是指对于特定的时间和地点,气候(水文)分布中偏离平均态的小概率异常现象,只是相对于平均态而言。如寒潮、热浪、强降水、持续无雨期、年/季内最高/低气温等记录都是属于气候极值的范畴,水文极值主要是指洪水和枯水<sup>[6]</sup>。

研究气候极值事件的主要途径是应用极端气候指数与统计分析,具体从两个方面展开:第一,采用

历史气候资料和统计技术对极端气候事件频率和强度年代变化特点及长期趋势的分析;第二,采用气候模式模拟技术对未来可能气候极值事件发生频率变化的分析。任国玉等<sup>[13]</sup>从极端气候指数与统计分析、极端气温和降水变化等方面进行了回顾和展望,指出我国主要类型极端气候变化非常复杂,但没有表现出总体增多增强的变化趋势。现有的一些研究表明,对观测资料因环境改变和城市化进程导致一致性破坏如何深入评价和客观订正方面的研究还需加强。

相对于气候极值,水文极值的研究思路与方法略有不同。传统的频率分析方法利用一些观测数据或合成数据拟合某个特定的概率分布函数,因其计算简单、方便,常用来评估气候变化对水文极值事件的影响。研究中常见的极值分布函数包括广义极值分布,广义 Pareto 分布,对数正态分布,皮尔逊 III 型,对数皮尔逊 III 型等。Wilby 和 Harris<sup>[14]</sup>研究发现枯水的累积分布函数对来自于气候变化情景和降尺度方法的不确定性最敏感;Fowler 和 Kilsby<sup>[15]</sup>采用 RCM 集合结果驱动水文模型,结果表明气候的季节变化对高、低流量有明显影响,夏季枯水减少 40%~80%,冬季丰水增加最高达 25%,进一步增加了引发洪水的可能;郭生练等<sup>[16]</sup>建立了采用月水量平衡模型和洪水频率评价模型相结合的方法,以确定气候变化对洪峰流量和洪水频率的影响;程晓陶等<sup>[17]</sup>研究了淮河流域在气候变化影响下,流域三种类型洪水中,由持续一两个月的长历时降水形成的量大但不集中的洪水,对平原洼地农业发展及治理工程的影响最为显著;吴志勇等<sup>[18]</sup>研究了气候变化背景下黑河流域极端水文事件的响应,频率分析的结果表明气候变化将可能导致黑河流域的水文循环加剧,使一些集中的强降水事件和枯水事件出现的可能性增加。

实际上,气候变化改变着径流的时空分配,使得用于水文频率分析计算的极值系列失去了一致性,在这样的背景下,非一致性水文系列的频率分析伴随着气候变化衍生为一项新兴的研究课题。中外学者在这方面都做了很多有益的探索及研究,主要集中在两个方面:一是基于还原/还现途径;二是基于非平稳极值系列的直接水文频率分析途径<sup>[19]</sup>。

## 3. 降尺度方法的比较研究

降尺度方法是连接气候模式和水文模型的桥梁,

在气候变化对水文水资源的影响研究中起到承上启下的作用。它是基于这样一种观点:区域气候变化情景是以大尺度气候为条件的,把大尺度、低分辨率的GCM输出信息转化为区域(流域)尺度的地面气候变化信息(如气温、降水)。

### 3.1. 降尺度方法的分类

目前国内外一致认同的观点是将降尺度方法分为三类<sup>[20]</sup>:一类是统计降尺度法,该方法主要利用多年观测气候资料建立大尺度气候因子(主要为大气环流因子)和区域气候要素(区域内的气温、降水等)之间建立统计关系,并用独立的观测资料检验这种关系,最后将其应用于未来气候变化情景的GCM输出大尺度信息转化为区域气候变化情景;其优点是计算简便高效,易于移植,主要缺点就是模拟精度受预报因子的影响严重,需要可靠的较长实测资料率定模型。第二类是动力降尺度法,也就是区域气候模型RCM,其主要思想是通过建立与GCM耦合的高分辨率的有限区域模型(Limited Area Model, LAM)或RCM预估未来区域的气温、降雨等气候因素的变化情景,其优点是物理意义明确,能用于任何地方而不受观测资料影响,能根据需要设置不同的分辨率,缺点是计算复杂费时,费用昂贵。第三类是统计与动力相结合的降尺度法,它综合了二者的优势,是目前主要的发展方向。

### 3.2. 统计降尺度方法

统计降尺度法是基于三条假设条件<sup>[20]</sup>: 1) 大尺度气候场和区域气候要素场之间具有显著的统计关系; 2) 大尺度气候场能被GCM或RCM很好地模拟; 3) 在变化的气候情景下,建立的统计关系是有效的。Xu<sup>[21]</sup>将统计降尺度方法分为三类:转换函数法(传递函数法、回归方法)、环流分型法(天气形势法)和天气发生器。Maraun等<sup>[7]</sup>的分类略有不同,为理想预报方法(Perfect Prognosis, PP),模型输出统计方法(Model Output Statistics, MOS)和天气发生器(Weather Generator, WG)。PP是指建立大尺度实测预报因子和区域尺度的实测预报量之间的关系,然后将之应用于可靠的数值模型的模拟结果,它包括传统的回归方法和天气分类方法;MOS是指建立RCM模拟值和区域实

测值之间的统计关系以对RCM模拟值进行修正,这一类方法得益于RCM的发展;WG是指能够生成具有类似于实测天气统计特性的局地天气时间序列模型。

目前,统计降尺度方法相对较多。尽管各国学者们对不同的统计降尺度方法做出了比较研究<sup>[22-24]</sup>,但综合学者们得到的结论不难看出:不同的统计降尺度方法各有其优缺点,在不同区域、不同的情形下,选用不同的统计降尺度法模拟效果会不同。学者们在对如何评价统计降尺度的优劣判定、以及如何选用统计降尺度方法等方面的研究不足,但是已有学者们在这方面做出了尝试。Chen等<sup>[25]</sup>讨论了统计降尺度方法评价指标的选取,认为径流模拟结果应该作为气候变化对径流影响研究中统计降尺度方法评价的重要参考。Bronstert等<sup>[26]</sup>建立了未来气候情景的评价体系,包括气候评价和水文评价。气候评价是指所建立的区域气候情景既能描述历史的气候特征(即实现对历史气候的重现)——用可信度表示,又能对将来的气候状况做出一定可信度的预测,用合理度表示;水文评价包括对水文过程和人文要素的影响两方面内容。

### 3.3. 区域气候模式

气候具有明显的区域性特征。区域气候及其变化直接影响人类生活,对区域气候及其变化的模拟已经成为研究区域水平上的全球变化问题的关键性科学问题。

陆其峰等<sup>[27]</sup>系统地分析了区域气候模式的分类、发展和最新研究动态,指出区域气候模式在目前气候变化对水文影响评价中应用受到更多关注。本文作者分析主要原因有: 1) GCM模式网格分辨率一般都在100 km以上,这样的分辨率以及对次网格尺度的物理过程的描述缺陷不足以满足研究者的需求,而区域气候模式常用的分辨率为25 km~50 km,有的甚至低于10 km,很好地改善了对地形等要素的模拟; 2) GCM模式的时间步长一般在30 min以上,RCM的时间步长一般小于5 min; 3) 计算机技术的快速发展促进了RCM模式的发展。

Giorgi<sup>[28]</sup>把美国中尺度模式LAM与GCM模式单向耦合,用于区域气候的模拟研究,这即是RCM的雏形。美国国家大气研究中心建立了RegCM1模式,

后经过不断改进完善,目前已发展至第四代(RegCM4),该系列模式是世界范围内应用最广的区域气候模式之一,世界上其他国家或者机构的区域气候模式都是在RegCM的基础上改进而来,如中国的NCC/RegCM,英国的PRECIS、德国的REMO、日本的MRI和澳大利亚的DARLAM等。

区域气候模式是以GCM或者实测格点数据为侧边界条件,在关心区域采用高分辨率,而在其他区域采用低分辨率,这样既能使模式详细描述关心区域的物理过程,又不会使计算耗时大量增加。已有研究表明,RCM比GCM在模拟区域内产生了更有效的区域尺度信息,提高了模拟精度,具有良好的尺度转化效应:Cocke等<sup>[29]</sup>以美国北部和北美西部为研究区域作了模拟,发现GCM和RCM都能模拟出由ENSO导致的一些现象,但RCM能模拟出更详细的细节。同时,在将RCM的模拟结果驱动水文模型模拟区域径流时,也得到了较GCM更优的模拟效果。Akhtar等<sup>[30]</sup>采用PRECIS区域气候模式驱动HBV模型,其模拟的径流过程比GCM模式驱动得到的径流过程更接近实测值;Fowler和Kilsby<sup>[15]</sup>采用HadCM3H模式驱动简化的Arno模型,模拟结果表明得到的径流过程能很好地拟合丰水和枯水过程。

目前国内外围绕着RCM的研究多从区域气候模拟能力的检验、未来气候的模拟能力、敏感性实验、嵌套研究等方面展开。相关学者和研究人员利用区域气候模式开展了大量研究工作,一系列模式比较计划的开展,包括北美地区区域模式比较计划、北极区域模式比较计划、亚洲区域模式比较计划等,使得区域气候模式的逐步走向应用。Teutschbein和Seibert<sup>[8]</sup>回顾了近期区域气候模式对流域尺度的水文影响研究策略,认为目前的研究在朝两个方向努力:1)以检验模型适用性为目的,以单个RCM的模拟结果为基础的研究;2)以多个RCM集合而成的高度复杂和具有超强计算能力的系统。

从区域气候模式的研究和发展来看,近年来区域气候模式研究取得了很大的进步,但仍然存在许多问题:区域气候模式的移植与推广问题,数据共享问题等。特别是我国的区域气候模式研究起步稍晚,始于上世纪90年代初,对于目前研究中的问题如模式温度普遍低于实际观测值,大部分模式对降水模拟都具

有显著的雨带偏北的偏差等,需要进行深入系统地分析,以取得气候变化影响评估所需要的更加可靠的信息。

#### 4. 不确定性研究

水文学兼有地球科学和技术科学的特点,所涉及的水文现象具有复杂性。要完整地分析、描述水文现象的变化规律,不仅需要考虑其确定性,而且需考虑其多种不确定性。对于一个水文模型,不仅仅包括输入信息和输出信息,还有模型结构或模型方程式、初始条件、模型参数以及其他的模型组成部分,由此可知,水文系统模拟的不确定性来源大体上可以分为四类:模型结构不确定性、模型参数不确定性、模型初始条件不确定性以及模型输入资料不确定性等。

但是在气候变化对区域水文影响评价研究中,不确定性来源进一步扩大和延伸,包括未来气候情景、气候模式模拟过程、降尺度过程和水文模型模拟过程。层层累加的不确定性最终反映在水文模型的输出中,作为决策者最直接的参考依据。因此,不确定性问题贯穿于气候变化影响评价过程的始终,这给研究者们提出了更大的挑战。Wilby<sup>[9]</sup>为解决这一问题提出五点需要注意的原则:1)量化所用于模型评价中的观测数据的不确定性;2)无论观测到的数据还是模拟的数据都是对自然实际状态的近似,需对二者进行比较;3)选择评价指标;4)评价与水文不确定性的其他部分相关的气候模型;5)用短期的应用实例来检验气候、降尺度和水文模型的联合应用。贺瑞敏等<sup>[31]</sup>系统地论述了降低评价结果不确定性的途径,即:a)提高区域变化情景预测精度;b)完善气候变化影响评价模型及评价过程。

世界气候研究计划开展的大气模式比较计划研究成果表明,几乎所有大气模式都能够模拟出大尺度大气环流的平均季节循环状况,模式集成结果要好于单个模式结果。同时其他研究机构和组织的广泛的数值模拟和预测研究证实,多模式集合是减少模式结果不确定性的办法之一。在不改进模式的情况下,采用多成员和多模式的集合模拟可以大大降低单个模式、单个样本的模拟误差和不确定性。现在这种模式集合方法已得到广泛的应用,如IPCC AR4关于未来气候变化的预估结果即建立在集合模拟之上。

多模式平均方法最主要的关键技术是权重的确定依据和分配方法。Wilby 和 Harris<sup>[14]</sup>建立的不确定性研究框架中,分别依据降水和径流的拟合效果分配 GCM 模式、水文模型和模型参数的权重;Giorgi 和 Mearns<sup>[32]</sup>提出的方法考虑了单个模式对当前气候的模拟和相对于集合结果的收敛程度;Robertson 等<sup>[33]</sup>的研究中以排序概率技术得分作为判定标准;Murphy 等<sup>[34]</sup>是以单个模式模拟结果与实测资料的似然度作为权重确定依据。

权重分配方法以简单算术平均和加权平均为主。简单算术平均方法是指对多个模式(情景、模型)的输出结果进行算术平均,是一种较为简单的方法,它在 Jiang 等<sup>[35]</sup>, Xu 等<sup>[36]</sup>的研究中被采用。但是这种方法赋予各个子集相同的权重,忽略了各模式模拟效果的差异,不够合理。因此,更多的学者研究加权平均方法。它使用了一个在实际中广泛应用的假设:模式对当前气候模拟的优劣将有可能影响对未来气候变化的预估结果。其要点为首先对单个模式对于当代气候的模拟能力进行检验,包括模式对当前气候平均态和气候变率的检验;然后在此基础上,定义一个权重因子系数,对当前气候模拟较好的模式得到的权重系数较大,模拟不好的权重系数较小,对未来预估结果的贡献也就较小。学者们多用贝叶斯方法进行多个模式的加权平均;如 Robertson 等<sup>[33]</sup>, Tebaldi 等<sup>[37]</sup>, Min 等<sup>[38]</sup>人的贝叶斯模型平均方法和 Giorgi 和 Mearns<sup>[32]</sup>提出的可靠性集合平均方法等。

随着 RCM 模式逐渐受到重视,多模式耦合方法同样也应用于动力降尺度的不确定性研究。Teutschbein 和 Seibert<sup>[8]</sup>的文章表 1 中详细列举了目前对于 RCM 耦合模式的研究,并通过研究实例证明 RCM 耦合模式优于单模式。统计降尺度方法由于应用简便,需要的研究资料相对较少,许多学者采用多个统计降尺度方法对比分析的方法以评估统计降尺度过程的不确定性。Chen 等<sup>[39]</sup>评估了 6 种统计降尺度方法的不确定性对加拿大魁北克省气候变化对水文过程的影响;Khan 等<sup>[40]</sup>也分析了统计降尺度方法 SDSM, LARS-WG 和 ANN 方法的不确定性并评价了其优劣;这些研究对于在气候变化对水文水资源的影响研究中如何选择统计降尺度方法提供了参考。

尽管气候变化影响评价过程中的不确定性来源

于上述四个方面,但是从系统的角度来讲,不确定性问题不应该将些分割开来研究,因为对于所有情景、模式、方法的评估最终的落脚点是流域的径流过程,而且,很难区分不同的不确定性来源对于最终结果的贡献。

## 5. 结语

气候变化是各国政府和学者们共同关注的热点话题,作为与大气圈联系最紧密的水圈,水文循环过程及水资源开发利用不可避免地受到气候变化的影响。极值事件对人类生命财产安全造成毁灭性危害,降尺度技术是构建气候水文耦合模式的桥梁,不确定性问题贯穿于气候变化影响评价的整个过程。本文综述了气候变化对水文水资源影响中的极值事件、降尺度方法以及不确定性等关键问题的研究进展,并建议加强以下几个方面的研究:

1) 极值事件综合分析(包括极值事件的强度、频率历时等)以及机理研究;

2) 建立降尺度方法的评价体系,不仅包括对气候变量如降水、气温等的考量,而且应该包括将其应用于评价模型后的模拟结果的评估;

3) 气候变化中的不确定性是目前研究中的难点问题,且尚处于对不确定性进行定性识别和预估的起步阶段,如何量化不同的不确定性来源并进行综合分析还有待探索与发展。

## 参考文献 (References)

- [1] SOLOMON, S. Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.  
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Impact study of climate change on hydrology and water resources. Beijing: Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 於凡,曹颖. 全球气候变化对区域水资源影响研究进展综述[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4): 92-97, 102.  
YU Fan, CAO Yin. Research progress summarization for the impacts of global climate change to the regional water resources. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(4): 92-97, 102. (in Chinese)
- [4] 刘春蓁. 气候自然变异与气候强迫变化对径流影响研究进展[J]. 中国水利, 2008, 2: 41-46.  
LIU Chunzhen. Advances in studying impacts of climate natural variability and forced change on stream flow. China Water Resources, 2008, 2: 41-46. (in Chinese)
- [5] 杨涛,陆桂华,李会会,等. 气候变化下水文极端事件变化预

- 测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286.
- YANG Tao, LU Guihua, LI Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 279-286. (in Chinese)
- [6] KUNDZEWICZ, Z. W., KACZMAREK, Z. Coping with hydrological extremes. *Water International*, 2000, 25(1): 66-75.
- [7] 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(3): G3003.
- [8] TEUTSCHBEIN, C., SEIBERT, J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: A review of recent modeling strategies. *Geography Compass*, 2010, 4(7): 834-860.
- [9] WILBY, R. L. Evaluating climate model outputs for hydrological applications. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 2010, 55(7): 1090-1093.
- [10] EASTERLING, D. R., MEEHL, G. A., PARMESAN, C., et al. Climate extremes observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068.
- [11] BENISTON, M., STEPHENSON, D. B., CHRISTENSEN, O. B., et al. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 2007, 81: 71-95.
- [12] 封国林, 龚志强, 文蓉. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 892-905.  
FENG Guolin, GONG Zhiqiang and ZHI Rong. Latest advances of climate change detecting technologies. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(6): 892-905. (in Chinese)
- [13] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.  
REN Guoyu, FENG Guolin and YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese)
- [14] WILBY, R. L., HARRIS, I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 2006, 42(2): W2419.
- [15] FOWLER, H. J., KILSBY, C. G. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Climatic Change*, 2007, 80(3): 337-367.
- [16] 郭生练. 气候变化对洪水频率和洪峰流量的影响[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 224-230.  
GUO Shenglian. Impact of climate change on flood frequencies and peak discharges. *Advances in Water Science*, 1995, 6(3): 224-230. (in Chinese)
- [17] 程晓陶, 王静, 夏军, 等. 气候变化对淮河防洪与排涝管理目的影响及适应对策研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 324-329.  
CHENG Xiaotao, WANG Jing, XIA Jun, et al. Impacts of climate change on flood control and land drainage management project in the Huaihe River Basin and adaptive measures. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(6): 324-329. (in Chinese)
- [18] 吴志勇, 郭红丽, 金君良, 等. 气候变化情景下黑河流域极端水文事件的响应[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 7-9, 46.  
WU Zhiyong, GUO Hongli, JIN Junliang, et al. Extreme hydrologic event response to climate change scenario in Heihe Basin. *Water Resources and Power*, 2010, 28(2): 7-9, 46. (in Chinese)
- [19] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 864-871.  
LIANG Zhongmin, HU Yiming and WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 864-871. (in Chinese)
- [20] FOWLER, H. J., BLENKINSOP, S. and TEBALDI, C. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(12): 1547-1578.
- [21] XU, C. From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 1999, 23(2): 229-249.
- [22] 陈华, 郭靖, 郭生练, 等. 应用统计学降尺度方法预测汉江流域降水变化[J]. 人民长江, 2008, 39(14): 53-55, 102.  
CHEN Hua, GUO Jing, GUO Shenglian, et al. Application of statistical downscaling method in precipitation prediction for the Hanjiang River Basin. *Yangtze River*, 2008, 39(14): 53-55, 102. (in Chinese)
- [23] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 18-22.  
GUO Jing, GUO Sheng-lian, ZHANG Jun, et al. Prediction of rainfall and runoff changes in the Hanjiang Basin. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(5): 18-22. (in Chinese)
- [24] 郭家力, 郭生练, 郭靖, 等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(8): 20-24.  
GUO Jiali, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Prediction of precipitation change in Poyang Lake Basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(8): 20-24. (in Chinese)
- [25] CHEN, H., XU, C. Y. and GUO, S. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 2012, 434: 36-45.
- [26] BRONSTERT, A., KOLOKOTRONIS, V., SCHWANDT, D., et al. Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(12): 1579-1594.
- [27] 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 区域气候模式研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 557-565.  
LU Qifeng, PAN Xiaoling, ZHONG Ke, et al. Advances in regional climate model studies. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(4): 557-565. (in Chinese)
- [28] GIORGI, F., BATES, G. T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 2325.
- [29] COCKE, S., LAROW, T. E. Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(3): 689-708.
- [30] AKHTAR, M., AHMAD, N. and BOOIJ, M. J. Use of regional climate model simulations as input for hydrological models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2008, 5(2): 865-902.
- [31] 贺瑞敏, 刘九夫, 王国庆, 等. 气候变化影响评价中的不确定性问题[J]. 中国水利, 2008, 2: 62-64, 76.  
HE Ruimin, LIU Jiufu, WANG Guoqing, et al. Analysis on uncertainty in assessment of climate change effects. *China Water Resources*, 2008, 2: 62-64, 76. (in Chinese)
- [32] GIORGI, F., MEARNES, L. O. Probability of regional climate change based on the reliability ensemble averaging (REA) method. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1629-1632.
- [33] ROBERTSON, A. W., LALL, U., ZEBIAK, S. E., et al. Improved combination of multiple atmospheric GCM ensembles for seasonal prediction. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(12): 2732-2744.
- [34] MURPHY, J. M., SEXTON, D. M. H., BARNETT, D. N., et al. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 2004, 430(7001): 768-772.
- [35] JIANG, Z., SONG, J., LI, L., et al. Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection. *Climatic Change*, 2011: 1-17.
- [36] XU, Y., XU, C., GAO, X., et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st century. *Quaternary International*, 2009, 208(1-2): 44-52.
- [37] TEBALDI, C., SMITH, R. L., NYCHKA, D., et al. Quantifying

- uncertainty in projections of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 2010, 18: 1524-1540.
- [38] MIN, S. K., SIMONIS, D. and HENSE A. Probabilistic climate change predictions applying Bayesian model averaging. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1857): 2103-2116.
- [39] CHEN, J., BRISSETTE, F. P. and LECONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 2011, 401: 190-202.
- [40] KHAN, M. S., COULIBALY, P. and DIBIKE, Y. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1-4): 357-382.