

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110313. 2241. 028

气候变化下水文极端事件变化预测研究进展

杨 涛, 陆桂华, 李会会, 何海, 王晓燕

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 全球气候变化对洪水、干旱等极端水文事件的影响已成为一个亟待解决的科学问题。针对国内外在气候变化下采用统计降尺度和降雨径流模型对水文极端事件进行预测的研究进展进行了系统分析, 在分类阐述的基础上, 总结了国内外最新的研究进展及在预估过程中存在的问题和解决方案, 试图凝练出一些气候变化背景下水文极端事件预估的新思路。结果表明: 为有效降低极端水文事件预估的不确定性, 各种集合模拟技术、数据同化方法、强化观测技术及水文模型的尺度转换理论将是有效的解决途径。

关键词: 气候变化; 统计降尺度; 水文模型; 水文极端事件; 不确定性; 尺度问题

中图分类号: P339; G353. 11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)02-0279-08

21 世纪以来, 全球气候变化异常, 洪涝、干旱等极端水文灾害事件频繁发生并不断加剧, 远高于同期多年平均, 发生时间也异于常年, 已经成为当今国际社会、各国政府和科学界愈来愈关注的焦点。据不完全统计^[1], 中国 21 世纪前 10 年每年因洪涝灾害造成的直接经济损失近千亿元, 因气候异常引发洪涝灾害所导致的经济损失有逐年上升的趋势, 由此引发的死亡人口数也在不断增长。另外, 长历时极端干旱事件也频频发生。例如: 2009 年 12 月~2010 年 4 月, 中国西南五省出现大范围特大旱情, 部分旱情超过 100 年一遇, 一些地区累计雨量已经打破历史极值, 给环境和社会经济发展造成了重大损失。全球和区域尺度的气候变化对洪水、干旱等极端事件持续加剧的影响研究, 已成为一个亟待解决的科学问题。随着全球及区域气候模型的不断改进, 人们对水文过程时空变化的归因和预测研究取得了长足的进步^[2], 近期水文学家和气象学家联合采用陆地水文模型与气候模型耦合的方法研究气候变化对水文水资源的影响。降尺度法一般分为统计降尺度与动力降尺度, 动力降尺度由于比较复杂, 专业性要求比较高^[3], 故在实际应用中一般采用统计降尺度。例如: Wilby 等^[4]将 3 种气候变化情景下 4 个 GCM、2 个统计降尺度模型 (SDM)、2 个水文模型耦合, 利用蒙特卡洛随机模拟方法研究了未来 100 年(2000~2100 年)英国泰晤士河枯季径流极值的变化规律, 定量评价了排放场景、GCM、统计降尺度模型、水文模型对模拟枯水极值分布的影响。Muller-Wohlfeil 等^[5]采用降尺度模型进行极端气候事件的模拟并进而进行未来水文过程模拟的研究。Xu 等^[6]在 2008 年利用统计降尺度法与 SWAT 模型耦合技术分析了气候变化对黄河流域径流极值的影响。荣艳淑等^[7]在对东江流域极端降水的未来情景预测时利用 SDSM 方法建立了统计降尺度模型。吴志勇等^[8]基于气候变化情景数据和 VIC 模型, 利用频率分析法预测了气候变化情景下黑河流域极端水文事件的变化趋势。

然而, 目前关于气候变化下水文极端事件的模拟和预估研究报道, 相对于气候变化下水资源的研究而言, 仍然比较薄弱, 亟需进一步加强, 以制定国家或区域应对气候变化的措施。本文对气候变化下采用统计

收稿日期: 2010-04-16; **网络出版时间:** 2011-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110313.2241.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40901016; 40830639); 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2010CB428405); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自主探索课题资助项目 (2009586612; 2009585512); 澳大利亚联邦政府“奋进”研究奖资助项目 (1472-2010)

作者简介: 杨 涛(1974-), 男, 云南昭通人, 副教授, 博士, 主要从事气候变化下水文极端事件变化规律研究。

E-mail: enigama2000@hhu.edu.cn

降尺度和降雨径流模型对水文极端事件进行预估的研究进展进行了系统分析,旨在为气候变化条件下极端事件模拟和预估研究提供一些新的思路或借鉴。

1 统计降尺度在极端水文事件模拟预测中的研究进展

1.1 统计降尺度方法模型及分类

(1) 统计降尺度方法原理及步骤 统计降尺度就是利用多年的观测资料建立大尺度气候变量与区域和局地变量之间的统计模式,然后把气候模式模拟或预测结果作为预报因子输入统计模式,估算出相应的局地和区域气候特征。主要包括 5 个环节^[3]: ① 大尺度气候预报因子的选择; ② 统计降尺度模式的选择和标定; ③ 利用独立的观测资料检验模式; ④ 把统计模式应用于 GCM 模式结果,产生未来气候情景; ⑤ 对未来气候诊断分析。其中,预报因子的选择是统计降尺度法中一个非常重要的环节,许多研究指出,在统计降尺度方法中,应该尽可能应用物理意义较为明确的预报因子。预报因子的选择一般遵循 4 个标准^[9]: ① 选择的预报因子要与所预报的预报量有很强的相关; ② 它必须能够代表大尺度气候的重要的物理过程和大尺度气候变率; ③ 所选择的预报因子必须能够被 GCM 较准确地模拟,从而纠正 GCM 的系统误差; ④ 应用于统计模式的预报因子间应该是弱相关或无关的。

(2) 统计降尺度方法的分类 降尺度的主要思路是对粗分辨率全球模式的输出变量进行统计次网格化,常用的统计降尺度法主要有 3 种^[10](见表 1): ① 相关分析法,这个在统计降尺度法中应用最为广泛,分为线性和非线性两种类型。② 天气分型法,对与区域变化有关的大尺度大气环流进行分类,常见的分型技术一般有两种,即主观分型技术和客观分型技术。③ 天气发生器,它是一系列可以构建气候要素随机过程的统计模型,它们可以被看做复杂的随机数发生器。

表 1 统计降尺度方法的分类

Table 1 Classification of statistical downscaling approaches

统计降尺度法	相关分析法	{ 线性转换函数法 { 线性回归方法 { 典型相关分析 CCA { 非线性转换函数法: 神经网络(ANN)
	天气分型法	{ 主观分型技术: Lamb weather Type、Grosswetterlagen { 客观分型技术: PCA、CCA、平均权重重组法等
	天气发生器	{ 马尔可夫链方法 { 一阶自回归方程和干/湿延续天数计算方法

Wilby 等^[10-11]对统计降尺度做了系统的研究,比较了应用经验转换函数、天气发生器和环流分型技术在相同区域的气候变化模拟。Wetterhall^[12]构建了日降水过程统计降尺度模型并应用到瑞典,取得了一定的效果。Busuioc 等^[13]利用典型相关分析法(CCA),构建了罗马尼亚冬季降雨的统计降尺度模型。Haylock 等^[14]则利用 CCA、神经网络等 6 种统计降尺度方法和 HadRM3、CHRM 等两个高分辨率区域对英格兰西北和东南地区的极端降水指数进行降尺度效果对比,结果表明,不同降尺度模式对未来极端降水指数预估之间的差异与单个模式不同排放情景下的差异相当。SDSM 方法是 Wilby^[11]等人研制出的一种统计降尺度方法,它是基于多元回归和随机天气发生器相耦合的原理完成的,研究表明该方法对许多地区有较好的模拟能力。赵芳芳和徐宗学^[15]对统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景进行比较分析,结果表明,Delta 方法简单易行,但在精度方面要比 SDSM 方法略差,SDSM 模拟的气候变化更接近实际情况。黄俊雄等^[16]利用 SDSM 模型对太湖流域日最高气温和最低气温进行模拟,结果发现模拟效果较好,可以很好地模拟太湖流域未来的气温变化。王冀^[17]比较了两种统计降尺度方法(NCC/NG 天气发生器和 SDSM)对长江中下游地区极端气候的模拟,结果发现 NCC/NG 天气发生器虽然对降水、气温等气候变化具有比较好的模拟效果,但是在对极端值的模拟上存在着一定的缺陷,而 SDSM 在极端气候的模拟方面存在一定的优势。

综上所述,不同的统计降尺度方法各有其优缺点。①相关分析法的优点是模拟软件现成,应用简洁,并可以利用所有的预报因子。缺点是大都假设模拟对象是线性和正态分布,对方差和极值模拟效果欠佳。②天气分型法的优点是应用广泛(如:气候变化、空气质量、洪涝事件及水土流失模拟),计算量适中,缺点是需要对天气状况进行合理分类,大气环流变化对未来气候强迫比较敏感,会影响模拟效果,另外模拟结果的空间分辨率低。③天气发生器法的优点是适合于对极值事件的长期模拟和集合分析,计算量适中,并可以模拟日内气象变量的变化。缺点是对未来气候变化参数的调整过于任意,缺乏客观性与科学性;在不同区域,不同的情形下,单一的降尺度模式进行未来极端气候预估存在较大的不确定性,极端降水指数的预估应尽可能采用多种模式的集合模拟结果。

1.2 在极端降水事件模拟中存在的问题

统计降尺度方法简便易行,研究区域及具体实施方案也有很大的灵活性。然而,相对气温和蒸散发能力而言,现阶段对极端降水的降尺度模拟研究仍然存在一定困难:

(1)对降水的预测不准确,特别是极端降水事件的模拟预测存在较大的误差。短历时降水不仅受大尺度气候控制还受当地和中小尺度天气过程的控制。陈华等^[18]采用NCEP的全球再分析日资料作为观测的大尺度气候资料,利用统计降尺度方法预测汉江流域降水变化,结果表明建立的日降水降尺度方法统计的月降水模拟和实测过程拟合较好,但对极值暴雨模拟不够理想。荣艳淑等^[7]在对东江流域极端降水的未来情景预测时利用SDSM方法建立了统计降尺度模型,模拟结果表明SDSM方法对东江流域年降水量模拟效果最好,对于最大日降水量的拟合效果略差,对第95百分位降水量、5日最大降水量的模拟不稳定。褚健婷等^[19]分析了SDSM模型在海河流域统计降尺度研究中的使用性,使用SMLR方法优选出适用于不同预报量的预报因子,对日平均气温、蒸发皿蒸发量以及降水的观测与模拟值的确定性系数分别达到99%、92%和73%,但是在对极端事件模拟时存在一定系统偏差,模拟的峰值略滞后。其次降水变化的影响因子更为复杂,它与气温之间也有密切的联系,气温的变化对降水有一定的影响,温度和蒸发则通过和陆面过程的相互作用在较长时间尺度上对水文情势变化发生间接影响。吴志勇等^[8]在对气候变化对黑河流域极端水文事件的影响研究中认为虽然莺落峡降水增加,但是由于气温升高,使得蒸发量增加,从而导致径流减少,可能会进一步加剧流域水资源在时程上分配的不均匀性。但是目前利用统计降尺度法对同一地区同时进行气温、降水及蒸发等的研究仍然比较薄弱。

(2)统计降尺度方法不能应用于大尺度气候要素与区域气候要素相关不明显的地区。小尺度上的水文过程机理在大尺度上几乎模糊到一种无法辨认的程度;反过来,大尺度上的水文机理在微观尺度上同样产生变异,如GCM模型给出的大范围水文气象参数无法满足区域尺度上的水文分析和水资源规划^[20]。所以针对这些地区需要了解大尺度气候和地面气候要素统计关系的时间尺度和空间尺度,以及建立统计关系随时间和空间变化的关系式。大气和水文时空差异很大,大气过程在空间变化上比较均匀、时间尺度上比较激烈,而水文过程正好相反。在空间尺度上,气候模式属于大尺度范畴,而水文模型通常活跃在流域尺度(102~104 m);时间尺度上,气候模式的积分步长从几分钟到1 h不等,水文模型的计算步长通常为小时、日、月、甚至年^[21]。所以研究资料在时间尺度上的解集方法,如将降雨资料解集到日,日资料解集到小时就为解决水文模型与气候模式在时间尺度上、匹配上提供了一种可行方法。叶爱中和夏军^[22]提出了一种由日降雨资料时间降尺度生成小时降雨资料的方法,选择长江上的沅江流域和黄河上的岔巴沟流域作为研究对象,分析发现该方法能保证模拟的日降雨的总量同实际的完全一致,模拟的雨强同实际的基本一致。

(3)统计降尺度方法必须对每一个站点数据进行降尺度,然后应用内插方法得到区域的平均值,由于各个站点的随机成分及其空间特征存在很大的差异,加上各种内插方法本身亦存在很大的不确定性,因此就加剧了气候情景的不确定性。其次在对各个站点进行降尺度时需要有足够的资料来建立统计关系,但是在中国由于水文观测条件的限制,许多站点数据不足或是缺测,这就使得建立的统计关系不能反映真实的情况。

2 降雨径流模型在极端水文事件模拟预测中的研究进展

2.1 降雨径流模型概述与分类

降雨径流模型是模拟预测水文过程的重要工具,结合 GCMs 的降尺度输出,可以用于描述气候变化下极端气候事件相关水文过程(如:蒸散发、地表径流、土壤水、地下水等)变化规律。20 世纪 20 年代开始,以达西定律、霍顿下渗公式、彭曼蒸散发公式、圣维南方程组、Nash 瞬时单位线和线性水库法等重要的水文学原理和计算方法陆续出现,并在实践中不断得到发展和完善,为水文模型的建立和应用奠定了坚实的理论基础^[23]。20 世纪 60 年代开始了集总式水文模型的研究。集总式水文模型一般采用划分单元面积法,在该单元面积上采用集总输入和集总输出,最后将每个单元产流量线性叠加成出口断面流量。其中代表性模型有 SSARR、Stanford、Sacramento、Tank、HEC-1、HSPF、SCS、SWMM、HBV、新安江模型、以及 API 连续演算模型等^[24],它忽视了下垫面条件和影响流域径流形成的降雨分布的不均匀性。20 世纪 80 年代以后,流域水文模型开始面临水文效应的时空变化、水文过程与环境、生态、气候以及人类活动耦合等挑战,使得人们开始关注分布式水文物理的研究。分布式水文模型在模拟中考虑模型参数的空间变化,利用栅格化的土壤、降水等具有空间变异性数据来模拟地形、降水和土壤等的空间变化对径流产生的影响,从而更真实地描述降雨径流这一水文物理过程。90 年代后空间信息科学的发展为研制和建立分布式水文模型提供了技术平台,分布式水文模型成为水文研究的热点。目前国际上比较成熟的、影响较大的分布式水文模型有 TOPMODEL、SWAT、DHSVM、SHE、VIC 等^[24]。但这些模型对输入参数的要求和提供的参数库建立在欧美的数据集或观测标准之上,使得模型在中国的推广受到很大影响。

2.2 在极端水文事件模拟中存在的问题

相对于气候变化下的水资源研究,极端水文事件的模拟和预测面临着更多的问题和挑战,如下所述:

(1) 模拟预报水文极值事件的不确定性比预报年径流、月径流的更显著^[25-26]。由于气候变化下径流并非平稳系列,假如未来降水存在显著变化趋势的话,必将导致用历史水文资料率定的模型在未来水文极值事件预测时存在显著差异,因此如何在气候变化下进行水文极值事件预测,是未来水文模型必须加强的研究。

(2) 人类活动影响下流域下垫面对径流预测也是存在误差的,从水文水资源的角度来看,水资源的形成遵循自然的水循环规律,同时由于人类活动的影响,导致自然水循环发生显著变化。张建云等^[25-27]认为在未来实际中,区域内的人类活动将对流域的产汇流产生一定的影响,即使在气候条件没有发生任何变化的情况下也会影响到未来的水文情势,而目前常用的评价模型中缺乏对人类活动影响的足够考虑。夏军等^[28]分析了岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系的影响,结果表明土地利用类型的变化对黄土沟壑地区的降雨径流关系有很大影响,其中耕作措施的使用对降雨径流关系的影响远大于地表覆盖率所产生的影响。王浩等^[29]也指出分布式水文模型在开发研制过程中,未能妥善考虑人类活动对洪水的影响,其缺少对干扰的考虑和模拟,预报精度不高。随着地理信息系统的发展(GIS),将水文模型与地理信息系统耦合,水文模型利用 GIS 提供的空间数据,可以更准确地描述下垫面因素的空间变化对水文极端事件的影响。

(3) 在某些内陆干旱及大量抽取地下水地区,地下水的影响可能比下垫面对水文模拟的误差影响更大,应该引起重视。地下水位的时空分布在很大程度上受地形、植被、气候条件及人类活动的影响,反过来地下水的变化又影响着土壤含水量的分布和变化,进而影响土壤蒸发、植被蒸腾、地表感热和潜热通量,在研究气候变化对水文极端事件的影响时应充分考虑地下水位的动态变化。王蕾等^[30]等通过对沁河流域地表水与地下水转换模拟,当年超采和连续 4 年超采河川年径流量分别减少 2.38 亿 m^3 和 3.18 亿 m^3 。目前在径流计算中,一般只考虑地表水开发对河川径流的影响而不考虑地下水对河流产生的水文效应。地下水开采对河流水文效应的影响可概括为增水或减水两个方面。一方面,地下水和地表水开采产生地下水位下降后,地表水和地下水补排关系发生变化,造成河流激化补给地下水,使河川径流量较天然状态有所减少;另一方面,经开采利用的地下水会以废污水的形式直接进入河道,使河川径流量增加。

3 统计降尺度和降雨径流模型耦合存在的问题

对 GCM 输出的情景预估进行降尺度, 使得得到的数据尺度与水文模型的尺度相一致, 将其作为水文模型的输入, 以此来实现两者的耦合(图 1)。随着全球气候变暖日渐加剧, 极端气候事件的频繁出现, 尤其是极端降水事件的变率加大, 对于当前和未来人类社会与生态环境的影响将更加明显。在这一领域中, 尽管在观测、理论和模拟等各方面的研究都已取得了不少进展, 但仍存在许多薄弱环节。

3.1 不确定性问题

首先, 未来气候变化情景一般是用气候模式做数值试验得到的, 目前开发的全球气候模型 GCMs 具有一定的模拟全球、半球和纬向平均气候条件的能力。尽管不同气候模式可以给出较为一致的未来气候变化趋势, 但不同气候模式输出的气候情景结果存在较大的差异。其次, 由于统计降尺度法在建立大尺度气候预报因子与区域气候预报变量间的统计函数关系式时需要足够的观测数据来支撑, 但是由于观测技术的限制, 以及中国水文站分布不均匀, 使得许多地区缺少实测资料或是所得到的资料不准确, 那么在此基础上所得到的统计关系也就很难反映真实情况。最后, 分布式水文模型的精确程度与模型的参数有着直接的关系, 但在实际应用中模型的待定参数通常是通过率定得到的, 这种通过率定获得的参数间存在着较大的干扰, 对所确定的参数的独立性无法准确衡量, 同时由于水文现象本身的复杂性和不确定性, 所率定的参数不可能适用于所有情况, 使得模型有不同的适用范围, 张建云等^[25]认为由于人类活动和气候变化的加剧, 流域的水文基本规律也在不断地发生变化, 用原来的水文序列率定的模型参数不能完全反映现在的流域特性, 进而给模拟结果带来一定的误差(图 2)。不确定性问题是个十分棘手的问题, 应当积极推动 PUB 计划^[31], 采用多元数据对比方法对模式的不确定性进行量化, 用数据同化技术来提高对数据、参数的优化能力, 为气候模式提供更好的初始场。

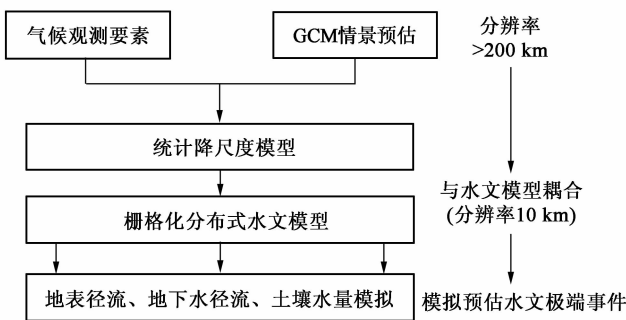


图 1 统计降尺度和水文模型耦合示意图

Fig.1 Coupling framework of statistical downscaling and hydrologic models

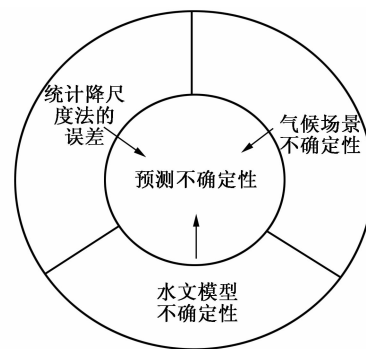


图 2 气候变化下模拟不确定性构成示意图

Fig.2 Uncertainty sources in hydrological modelling

3.2 尺度问题

GCM 输出的数据是基于栅格尺度, 而雨量资料是基于站点的, 所以统计降尺度是要先将 GCM 的栅格数据转换为站点尺度的数据。而水文模型又是基于栅格尺度的, 因此, 对于分布式水文模型而言, 统计降尺度输出的降水, 需要进行空间转换或插值到栅格单元。经过两次转换误差会进一步加大。李新和程国栋^[32]介绍了每一种插值方法的适用范围、算法和优缺点, 指出没有绝对最优的空间内插方法, 必须对数据进行空间探索分析, 根据数据的特点选择最优的方法。此外关于站点气候资料插值的方法已经有许多研究, 降水具有间断性和空间不连续性, 而且降水量零值较多, 因此降水的空间插值与其它要素相比具有更大的困难。朱芮芮等^[33]采用 5 种插值方法对无定河流域 1980 ~ 1990 年的降雨量时空变异情况进行了定量分析和插值成图,

把各种插值的连续空间分布与实际观测数据进行比较,结果表明普通 Kriging 法和逆距离加权法整体效果最好。在耦合过程中要充分考虑各种插值方法的优缺点,尽可能使误差达到最小。

4 结论与展望

全球气候变化对洪水、干旱等极端水文事件的影响研究已成为一个亟待解决的科学问题。多种统计降尺度模型和水文模型在不同时空尺度上的耦合将是进行气候变化下水文极端事件变化预测的有效途径之一。

在机理研究方面,大气运动过程中物理作用、化学作用与水圈的耦合过程是目前国内外研究的重要难点,而在研究方法上,更加侧重多学科方法的综合应用及交叉研究。其中尤其值得重视的是:

(1) 由于全球气候模式分辨率较低,极端降水事件时空尺度较小,还具有突发性或转折性,气候模式所给出的预估降水极端值往往偏低。因此,利用全球模式的预估结果,深入地研究各种集合模拟技术,并应用于未来不同气候情景下极端水文事件的变化预测,将是降低气候变化下水文极值预测研究中不确定性的关键手段。

(2) 在资料方面需要进一步强化水文气象观测,并对现有不同来源(如:卫星遥感、气象雷达、地面观测等)的观测资料进行整理分化,如进行数字化、严格的质量控制和同化处理等,得到关于高时空分辨率的网格化观测资料系列,以用于模式检验及最后成果的合理性分析。

(3) 在水文模型研究方面,水文模型不确定性与研究区域、地形地貌、植被覆盖等下垫面因素以及人类活动之间关系的定量研究也是今后需要加强的。

(4) 水文过程在不同时空尺度的转换理论和方法,一直是困扰气象学家、地理学家和水文学家的难题之一,也是目前制约统计降尺度和水文模型改进的瓶颈,现代数学和统计学理论的应用,将有助于解决这一科学问题。

参考文献:

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报[EB/OL]. <http://fxkh.mwr.gov.cn>. [2010-04-02]. (Office of state flood control and drought relief headquarters. Bulletin of Flood and Drought Disaster in China[EB/OL]. <http://fxkh.mwr.gov.cn>. [2010-04-02]. (in Chinese))
- [2] IPCC. The fourth assessment report [EB/OL]. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>, 2007.
- [3] 范丽军. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2006. (FAN Li-jun, On statistical downscaling approach and future projection of regional climate scenarios over China[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese))
- [4] WILBY R L, HARRIS I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK[J]. Water Resource Res, 2006, 42: W02419.
- [5] MÜLLER-WOHLFEIL D I, BÜRGER G, LAHMER W. Response of a river catchment to climatic change: Application of expanded downscaling to Northern Germany[J]. Climatic Change, 2000, 47: 61-89.
- [6] XU Z X, ZHAO F F, LI J Y. Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin[J]. Quaternary International, 2008, 208(1/2): 62-75.
- [7] 荣艳淑, 王文, 王朋, 等. 用统计降尺度方法做东江流域极端降水的未来情景预估[J/OL]. [2010-03-08]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201001-978>. (RONG Yan-shu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Projection of extreme precipitation scenarios of Dongjiang basin using statistical downscaling method[J/OL]. [2010-03-08]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201001-978>. (in Chinese))
- [8] 吴志勇, 郭红丽, 金君良. 气候变化对黑河流域极端水文事件的影响[J]. 水电能源科学, 2010(2): 7-9. (WU Zhi-yong, GUO Hong-li, JIN Jun-liang. Impacts of climate change on extreme hydrological events in the Hei-he River basin[J]. Water Resources and Power, 2010(2): 7-9. (in Chinese))
- [9] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3):

- 320-329. (FAN Li-jun, FU Zong-bin, CHEN De-liang, Advances in constructing future climate scenarios using statistical downscaling approaches[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 320-329. (in Chinese))
- [10] WILBY R L, WIGLEY T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations[J]. Progress in Physical Geography, 1997, 21: 530-548.
- [11] WILBY R L, DAWSON C W, BARROW E M. SDSM-a decision Support tool for the assessment of regional climate change impacts user manual[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17: 147-159.
- [12] WETTERHALL F, BÁRDOSSY A, CHEN D, et al. Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output [J]. Theor Appl Climatol, 2009, 96: 95-103.
- [13] BUSUIOC A, TOMOZEIU R, CACCIAMANI C. Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region[J]. Int J Climatol, 2008, 28: 449-464.
- [14] HAYLOCK M R, CAWLEY G C, HARPHAM C. Downscaling heavy precipitation over the UK: A comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios [J]. Int J Climate, 2006, 26: 1397-1415.
- [15] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报, 2007, 65(4):653-662. (ZHAO Fang-fang, XU Zong-xue. Intercomparison of constructing climate scenarios in the Yellow River basin using statistical downscaling and Delta methods[J]. Journal of Meteorology, 2007, 65(4):653-662. (in Chinese))
- [16] 黄俊雄, 徐宗学, 刘兆飞, 等. 统计降尺度法分析太湖流域未来气候变化情景[J]. 资源科学, 2008, 30(12):1811-1817. (HUANG Jun-xiong, XU Zong-xue, LIU Zhao-fei, et al. Projected climate scenarios of Taihu Lake basin using statistical downscaling method[J]. Resources Science, 2008, 30(12):1811-1817. (in Chinese))
- [17] 王冀. 长江中下游地区最高气温的统计降尺度方法模拟研究[C]//中国气象学会. 2007 年年会气候变化分会场论文集, 2007:687-692. (WANG Ji. Simulating the daily maximal temperature in the middle and lower Yangtze River basin with statistical downscaling method[C]//Chinese Meteorological Society. Proceedings of Annual Conference on Climate Change, 2007: 687-692. (in Chinese))
- [18] 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. (CHEN Hua, GUO Jing, GUO Sheng-lian, et al. Predicting precipitation change of Han River basin using statistical downscaling method [J]. Yangtze River, 2008, 39(14): 53-55. (in Chinese))
- [19] 褚健婷, 夏军, 许崇育. SDSM 模型在海河流域统计降尺度研究中的适用性分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12):1825-1832. (CHU Jian-ting, XIA Jun, XU Chong-yu. Application suitability of SDSM in statistical downscaling investigation for the Haihe River basin[J]. Resources Science, 2008, 30(12):1825-1832. (in Chinese))
- [20] 刘贤赵. 论水文尺度问题[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3):84-88. (LIU Xian-zhao. On hydrological scaling issue[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3):84-88. (in Chinese))
- [21] 戚晓明. 流域水文尺度若干问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (QI Xiao-ming. Study on several watershed hydrological scaling issues[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [22] 叶爱中, 夏军. 降雨时间尺度上的降尺度分析研究[J]. 水文, 2007, 27(5): 16-20. (YE Ai-zhong, XIA Jun. Study on temporal downscaling of precipitation series[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(5): 16-20. (in Chinese))
- [23] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. [S. l.]: McGraw-Hill Publishing House, 2007.
- [24] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Zong-xue. Hydrological models[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [25] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源的影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. Impacts of climate change on hydrology and water resources [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [26] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443. (ZHANG Jian-yun. Review and thinking: Development of hydrologic forecasting technique in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [27] 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. (HE Rui-min, LIU Jiu-fu, WANG Guo-qing, et al. Uncertainty issues in assessing the climate change impacts[J]. China Water Resources, 2008(2): 62-64 (in Chinese))
- [28] 夏军, 乔云峰. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析[J]. 资源科学, 2007, 29(1):71-76. (XIA Jun,

- QIAO Yun-feng, Impacts of different land covers on rainfall-runoff relationship of Chabagou basin[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1):71-76. (in Chinese))
- [29] 王浩, 王建华, 汪党献. 现代环境下的水资源综合评价体系及其方法研究[J]. *水科学进展*, 2003, 14(增刊 1): 110-117. (WANG Hao, WANG Jian-hua, WANG Dang-xian. Integrated indices and methodology for water resources assessment in current environment [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(Supp 1): 110-117. (in Chinese))
- [30] 王蕾, 倪广恒, 胡和平. 沁河流域地表水与地下水转换的模拟[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(12): 1978-1984. (WANG Lei, NI Guang-heng, HU He-ping. Simulation of interactions between surface water and groundwater in Qin River basin[J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science*, 2006, 46(12): 1978-1984. (in Chinese))
- [31] 谈戈, 夏军, 李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 192-196. (TAN Ge, XIA Jun, LI Xin. Hydrological prediction in ungauged basins[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 192-196. (in Chinese))
- [32] 李新, 程国栋. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3):260-265. (LI Xin, CHENG Guo-dong. Comparison of spatial interpolating methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(3):260-265. (in Chinese))
- [33] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性和空间插值方法的比较研究[J]. *中国农村水利水电*, 2004(7):25-28. (ZHU Rui-rui, LI Lan, WANG Hao, et al. Comparative study on the spatial variability of rainfall and its spatial interpolation methods[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004(7):25-28. (in Chinese))

Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes *

YANG Tao, LU Gui-hua, LI Hui-hui, HE Hai, WANG Xiao-yan

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The study of climate change impacts on hydrological extremes including floods and droughts has been widely recognized as one of the main scientific issues that need to be addressed with priority. This article reviews recent advances in the relevant study with emphasis on the methodologies used for statistical downscaling and the approaches of using rainfall-runoff models to construct extreme scenarios under climate change conditions. The pros and cons of the methodologies and approaches are also discussed in order to propose some novel ideas dealing with hydrological extremes under climate change conditions. As the result, we recommend the use of multi-model ensemble techniques, data assimilation methods, and scale transformation in hydrological modeling. This could potentially reduce uncertainties in the construction of extreme scenarios under climate change conditions.

Key words: Climate change; Statistical downscaling; hydrological model; hydrological extreme events; uncertainty; scaling issue

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40901016; No. 40830639) and the National Basic Research Program of China (No. 2010CB428405).