

气候变化影响下的流域水循环:回顾与展望*

徐宗学^{1)†} 刘晓婉¹⁾ 刘 浏²⁾

(1) 北京师范大学水科学研究院, 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 100875, 北京;

2) 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, 北京)

摘要 随着全球气候变化的影响日益加剧, 气候变化对流域水循环影响的研究成为普遍关注的焦点. 数理统计和水文模拟两大手段的运用贯穿于过去 30 余年的研究当中, 本文就其中所涉及的水文气象要素趋势分析、大气环流模式(GCMs)评估、降尺度技术及其选择、水文模型及其选择、不确定性分析 5 大内容的研究成果进行回顾与展望, 以拉萨河流域为例综合运用前述技术分析区域气候变化特征及其对流域径流的影响. 结果表明, 在未来经济社会发展与气候变化情景下, 流域径流时空分布不均匀性更加显著, 具体表现为集中性增强, 这给区域防洪抗旱与水资源配置等都带来了巨大挑战. 通过系统阐述如何开展气候变化对流域水循环的影响研究及所包含的关键问题, 可为后续相关研究和区域水资源管理提供科学依据与决策支撑.

关键词 气候变化; 水循环; 分布式水文模型; 不确定性; 雅鲁藏布江; 大气环流模式(GCMs); 统计降尺度
中图分类号 P463 **DOI:** 10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.06.009

全球气候变化已成为不争的事实, 气候变化不可避免地改变流域水循环状况, 而当前多地所面临的水资源短缺、时空分布不均等问题极其严峻. 因此, 气候变化对水循环影响研究课题受到了国内外学者甚至政府官员的高度重视. 从全球视角来看, 自 20 世纪 70 年代中期由世界气象组织(WMO)等牵头先后制定的全球大气研究计划(GARP)、世界气候研究计划(WCRP)和国际地圈生物圈计划(IGBP), 全面开启了气候变化及其影响研究^[1]. 我国也不甘落后, 同时期竺可桢教授号召开展我国气候变化研究, 此后“七五”“八五”“九五”期间相继启动实施了“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”“气候变化对水文水资源的影响及其适应对策研究”“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估研究”等重大研究课题. 并基于区域以及流域尺度水循环重要性 2 方面考虑, 近年来大批学者开始涉足气候变化对流域水循环影响的研究^[2].

20 世纪末以来, 刘春蓁等^[1]将随机天气模型降尺度方法结合多种水量平衡模型构建了较为完备的模拟系统, 并依此探索了我国区域水资源对气候变化的响应, 结果发现我国干旱地区河川径流相比湿润地区对气候变化更为敏感, 其中敏感性最强的区域为淮河、黄河与海河流域. “十五”攻关期间, 王国庆等^[3]在“气候变化对我国淡水资源的阈值影响及综合评价”专题中结合英国 Hadley 中心提供的区域气候模式 PRECIS

(providing regional climates for impacts studies) 数据, 耦合大尺度分布式水文模型 VIC (variable infiltration capacity) 模拟我国水资源对气候变化的响应. 何自立^[4]采用未来不同排放情景下 GCMs 输出数据驱动流域水文模型 HSPF (hydrological simulation program-*fortran*), 探究了美国圣华金河流域气候变化对径流的影响, 同时对模型参数不确定性进行了分析. Gaye 等^[5]分析了气候变化对水资源短缺问题严峻的非洲西部跨界塞内加尔河流域水资源的影响及其脆弱性.

然而, 目前国内外相关研究仍不成熟, 从其中所涉及的关键技术出发, 全面分析当前研究成果, 并就所存在的不足进行展望十分必要. 综合相关研究成果发现, 气候变化对水循环的影响研究主要包括数理统计与水文模拟 2 种途径, 就研究所涵盖的技术和内容而言可将其归结为以下几方面:

- 1) 水文气象要素变化趋势分析;
- 2) 不同排放情景下气候模式有效性评估;
- 3) 数据尺度转化方法研究;
- 4) 采用适宜的水文模型并将其与降尺度输出结果进行耦合, 模拟气候变化情景下流域的水文响应;
- 5) 诊断水文模型应用过程(包括其与不同气候模式数据或者降尺度后的气象数据耦合过程)中存在的确定性因素并进行不确定性分析.

本文将从这 5 个方面依次展开论述.

* 国家自然科学基金重大研究计划重点支持资助项目(91647202)

† 通信作者, e-mail: zxxu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-04

1 水文气象要素变化趋势分析

气候变化对流域水循环影响研究中涉及降水、气温、蒸散发、日辐射强度、风速、流量、水位等气象与水文要素,分析各气象与水文要素的特性是摸清其具体影响机理的基础,其中变化趋势分析是了解各要素特性的主要路径.通过选取不同站点相应时间尺度或同一站点不同时间尺度(年、季、月、日等)可能相关的因子,分析并对比相应变化趋势不仅能够直接得出各要素的演变规律,同时还能对比区域间表现的异同.在气候变化对水循环的影响研究中,对比水文要素(如流量)与气象因子(如降水、气温)变化趋势的关系,可在某种程度上作为评判气候变化是否影响当地水资源量的依据.这种手段不仅简便快捷,而且还能后续定量研究或未来情景构建奠定基础.水文气象要素变化趋势分析在国内外得到了极为广泛的应用,常用的变化趋势检测技术包括线性回归分析、Mann-Kendall 非参数检验(M-K 检验)和 Spearman 秩次相关检验等.而由于水文序列往往不遵循正态分布(非线性),适用于非线性分布的 M-K 检验技术在国内外得到了普遍应用^[6-9].

我国水文气象要素趋势分析研究已几乎遍及各地区与流域,本文仅以全国与塔里木流域、雅鲁藏布江流域为例进行简要介绍^[10].采用 M-K 方法检验中国大陆 141 个气象站近五六十年来观测降水量的变化趋势,结果表明自 20 世纪中期以来,66%的气象站点降水量有减少趋势.塔里木河流域内各站点平均气温与年降水量均表现为增加趋势,但降水量增加趋势不如气温显著;年平均流量变化较为复杂,源区的山区流量呈增加趋势,而源区控制站阿拉尔站与之相反,但总体都不显著.综合分析发现冰雪融化是源区径流的重要补给来源,增温导致冰雪融化使得山区径流增加,而平原区径流则随蒸发增加而减少.雅鲁藏布江流域内多数气象站点年、季降水量呈增加趋势但并不显著,而年平均气温和极值气温呈较显著的增加趋势.预估结果显示流域未来年降水量、年季平均气温也都将显著增加,而年、季径流总体变化趋势不明显.综合分析表明降水量变化是径流变化的主导因素,未来降水显著增加的趋势将直接作用于流域水循环过程.

2 大气环流模式评估

构建基于未来社会经济情景下的大气环流模式进而模拟各气象要素数据的变化,是目前预估气候变化的主要途径.然而,由于天气系统极为复杂,气候模式众多但结果各异.作者所在研究团队此前就 AR4 中的

19 种气候模式进行了中国区域适用性评估,结果显示 ECHAM4 和 ECHAM5 在松花江、长江和雅鲁藏布江应用效果均较好,而 GISS 模式在东部季风区、海河和珠江流域应用良好,淮河流域更适合在 GFDL 模式下进行研究^[10].IPCC 组织对发展全球大气模式高度重视,并在实施大气环流模式评估战略方面投资巨大,该组织也相继开展了“世界气候研究计划”(WCRP)、“大气模式比较计划”(AMIP)、“陆面过程模式比较计划”(PILPS)和“耦合模式比较计划”(CMIP)等项目,充分结合其中的有利资源,不仅可以验证模型模拟结果,还有助于提高自身研究成果的合理性.相关学者也对多种气候模式作了评估,如徐影等^[11]于 2002 年研究发现 ECHAM4 和 HadCM4 这 2 种气候模式对中国区域气候模拟效果相对较好.此外,目前应用较为广泛的模式有 CGCM2 和 HadCM3 等^[12-13],并取得了良好效果.

为合理评估各 GCMs 对各地区模拟结果的优劣,构建全面有效的大气模式评估体系尤为必要,其中应包括从气候平均态、气候变化与变率和趋势特征、气候变化的过程与相互作用和气候极值与极端事件,到气候敏感性、气候反馈的模拟效果评估指标.实际研究中,不同学者所选取的评估指标具有一定的相似性.如徐宗学等^[10]在上述评估工作中采用了 11 个衡量指标,包括均值、变异系数(标准差/均值)、均一化均方根误差 NRMSE(均方根误差/标准差)、时间序列和空间序列的 Pearson 相关系数、M-K 趋势分析特征值、经验正交函数 EOF(empirical orthogonal functions)的第一和第二特征向量及概率密度函数 PDF(probability density function)中的 BS(brier score)和 Sscore(skill score).唐伟等^[14]采用水量平衡系数 WBI、相似度 IOA 和标准化均方根误差 NRSE 这 3 个指标对模式的精度进行评价.

3 降尺度技术及其选择

3.1 降尺度技术概述 气候变化对流域水循环影响研究离不开流域气象数据的支撑,如得到了普遍认可的 GCMs 数据.虽然近年来开展的诸多全球气候模式计划已斩获大量大尺度气象数据,但受到实际成本的制约,当前获取的数据往往具有尺度大、分辨率低的特征,难以应用于区域尺度研究.众多学者倾向于结合 GCMs 模拟结果在区域内进行降尺度处理,然后将降尺度输出数据作为水文模型的输入,为开展气候变化对水循环的影响研究提供可靠的数据基础.因此,研制合理的尺度转化技术,从大尺度气象数据信息中获取较为精准的区域尺度气象数据十分重要^[10].

总结当前降尺度方法,可将其归类为动力降尺度、统计降尺度和动力—统计混合降尺度技术。其中,动力降尺度具有明确的物理意义,但由于机理复杂、运算量庞大及实际经济条件约束,使得基于统计学原理的统计降尺度方法得到了广泛应用。统计降尺度方法可归类为转换函数法、天气分型法和天气发生器法。目前应用最广的为转换函数法,依建模中所用统计函数的不同又可分为线性转换函数法和非线性转换函数法,其中线性转换函数法是较为常用的方法^[15-16]。一般情况下,线性转换函数法即可取得较好的降尺度效果^[17]。但区域气候的物理机制相对复杂、往往呈非线性关系,采用线性降尺度就会产生较大误差,此时非线性转换函数往往优于线性转换函数法。应用较多的非线性转换函数法是人工神经网络 ANNs (artificial neural networks)^[18-19]。

另一种统计降尺度方法为天气分型法,常用的天气分型方法有模糊规则法、人工神经网络分类法、气压梯度分类法、 K 均值分类法、非齐次隐马尔可夫过程等。此外,目前已被广泛用于多模型概率预测和气候影响评价中的降尺度方法为天气发生器法 (CLIGEN)。综合相关评估结果发现,CLIGEN 在对不同时间尺度降水均值的评估方面表现良好^[20-23],而就包括降水历时、降水极值、标准差等过程因子而言,其模拟效果欠佳^[24]。近年来的发展趋势表明以上 3 类方法并无严格界限,集合多元线性回归与天气发生器的 SDSM 模型降尺度方法应用较为广泛,天气发生器法常被作为转换函数法的输出后端。

3.2 降尺度技术的选择 相对于动力降尺度模型而言,统计降尺度方法的应用无需考虑区域气候特征,但受各种统计理论假设的约束。从实际条件出发,统计降尺度法适用性较强,一般线性函数法降尺度就能取得理想效果^[17]。但针对部分非线性问题,应用线性函数法就会出现较大误差甚至错误,因而作为典型非线性的人工神经网络模型取得了广泛的应用^[25-26]。然而,Wilby 等^[27]认为天气发生器方法在日尺度上相比于人工神经网络效果更好,Semenov 等^[28]认为采用复杂分布来表征气候变量的 LARS-WG 天气发生器相比传统类型效果更好,但应用于极端事件模拟时假设日尺度气温呈正态分布与实际情况存在偏差^[29],并于 2010 年使用半经验公式作为替代对该法进行了改进^[30]。简而言之,降水量短期预报应用线性或非线性的传递函数进行降尺度即可,如需进行长期预报,且为实现局地气候预报或获取气候变化信息,则可选用传递函数法,而结合传递函数法与天气发生器能够重建具有一定统计特征的时序资料。对于时空连续的变量如

气温或气压等,无论是中长期预报还是短期预报,采用线性或非线性降尺度方法即可满足需求。降尺度模型一般遵循资料序列越长、采样点分布越密集、效果越好的规律,但不同模型对观测数据的要求也有所差异,含参数较少的模型一般可适用于观测序列较短的情形,天气分型法则对数据系列的长度与精度要求相对较高,结合天气雷达等获取的高时空分辨率数据才能取得理想的效果^[31]。针对缺资料地区,结合物理机制的统计降尺度方法、参照气候设定情景随机模拟技术、多种非线性模型是未来统计降尺度技术的主要发展方向。

4 水文模型及其选择

水文模型是定量研究气候变化对流域水循环影响的重要工具,但研究过程中往往会牵涉到研究区域范围广、地形地貌条件复杂、计算量庞大等问题,优选出囊括气象输入、地形地貌输入、计算单元划分、产汇流过程演算等模块的水文模型十分重要。同时,随着遥感技术与气象预报技术的发展,将所获取的大量气象数据耦合进现有水文模型,不仅能够模拟当前气候状态下的水循环过程,还能够对未来不同情景下的水循环过程进行预估与分析。然而,气候模式与水文模型耦合的过程中,不可避免地存在水文模型的选择问题,其中包括现有数据与模型要求数据的匹配性、研究区域与模型适用尺度的匹配性、模型结构与功能是否满足需求、模型参数能否准确获取或所设参数是否符合研究区域实际情况等。

4.1 水文模型 水文模型^[32]自 20 世纪 70 年代面世以来,一直活跃于水文水资源领域的研究中,包括水资源开发与利用、洪水预报与干旱预警、流域水量优化配置、水利工程规划管理、土地利用及生态环境评估等方面。此时,斯坦福 (Stanford) 模型、萨克拉门托 (Sacramento) 模型、水箱 (tank) 模型和 SHE (system hydrological european) 模型等相继出现,从最初的物理概念模型发展至考虑不同下垫面类型的分布式水文模型。伴随着计算机技术的迅猛发展,众多学者根据研究内容与目的、研究区域特性和时空分辨率等对模型的不同需求已开发出数百种水文模型,包括早期的黑箱模型、概念性降雨径流模型发展到今天的半分布式与分布式水文模型,目前实际应用较为广泛的是能够反映区域地形地貌差异的分布式水文模型。然而,在对待具体研究内容时,如何从中选取合理的、与研究目的相匹配的水文模型进行应用研究成为目前最为棘手的问题之一。

4.2 水文模型的选择 遍历目前已有的数百种水文

模型,试图从中选取合适的模型应用于相关研究十分复杂。然而,选用合理的模型包括数据配置、尺度效应、模型结构、模块方法、模型参数和运算速度等,使其与所开展研究工作的目的匹配程度达到最佳,规范水文模型选择流程与标准,尽可能降低盲目选取水文模型给研究结果带来不必要的误差,是研究工作得以良好有序开展的重要前提。结合具体的研究内容优选出适宜的水文模型进行应用研究迫在眉睫。回顾相关研究历史,水文模型的选取往往依赖于研究者的经验知识或获取资源的便利程度。其实,在水文模型不断涌现的过程中,水文模型的优选也伴随其中,如部分学者依据自身研究工作的需求提出并开发新模型或改进现有模型,不仅促进了水文模型的发展、丰富了水文模型库,同时还能对相关研究提供新的思路与参照。换个角度来看,当前水文模型库较为丰富、理论方面的发展已较为成熟,模型库中也涵盖面向不同研究目的、适用于不同研究区域的类型,部分模型也在较为广泛的区域内得到了良好验证。因此,多数学者倾向于在已有较为成熟的水文模型中挑选适用于其所开展研究工作的模型。

就“气候变化对流域水循环的影响”研究而言,早期出现并得到广泛而且成功应用的水箱模型、新安江模型、SCS 模型、斯坦福模型,没有考虑水文过程异质性和对土壤水分、蒸发和能量平衡过程的影响,无法预估气候变化及土地覆被变化等对流域水循环的影响。相反,后期研制的全面考虑流域地形地貌差异、土地利用方式并耦合气象模块的大尺度 Macro-PDM、VIC 等模型应用较为广泛。从模型功能、数据要求、适用尺度、模块设置等方面综合考虑,在气候变化对流域水循环模拟研究中 VIC^[33-35]、PRMS、SHE^[32] 和 LSX-HMS^[36-37] 模型是可以推荐的方案之一,四者均适用于大尺度的陆—气耦合分布式模拟,但不可避免存在对输入资料要求高、参数较多的特点,其适用性及应用实例如表 1 所示。

5 不确定性分析

未来排放情景的设定、气候模式的建立、降尺度技术的选择、水文模型构建与选择等环节都存在一定程度的不确定性,为降低这种不确定性对研究结果的影响,识别各环节存在的不确定性因素并加以量化,以便在结果中去除这些不确定因素的影响,尽可能还原近于真实的模拟结果。从分析流程上来看,气候变化对水资源影响不确定性的来源包括 3 个方面: 1) 气象数据; 2) 水文模型; 3) 耦合方式(气候模式输出数据与水文模型)。

表 1 水文模型功能特性列表

模型	主要功能与特性
VIC	大尺度陆面分布式模型,有能力与气候模型耦合;已在鄱阳湖流域、西北干旱地区、黑河流域、湖北白莲河流域、太湖流域等得到广泛应用
PRMS	定量、模块化和分布式的模型,能够自动率定模型中所采用的参数,提供参数优化与敏感性分析;可模拟一般降水、极端降水及融雪过程的水量平衡关系、洪峰及洪量、日平均径流、洪水过程及土壤水等的变化
SHE	基于物理机制的分布式模型,结合扩展模块能够模拟降水和降雪融化的水文响应过程,是气候变化及人类活动影响流域水循环影响研究的理想工具;目前已在欧洲、美国、印度、新西兰等国家和地区得到广泛应用
LSX-HMS	陆面-水文耦合模型,适用于大型流域或区域甚至大陆尺度的分布式水文模型;它已成功而广泛地应用于北美多个流域,国内的杨传国、刘德东、鞠琴等也将其应用于我国淮河与长江流域气候变化对水循环的影响研究

5.1 不确定性来源

5.1.1 气象数据 结合气候变化对流域水循环影响分析流程来看,其不确定性主要来源于作为水文模型输入的气象数据存在的误差以及水文模型模拟过程中产生的误差 2 类。气象数据包括观测数据与气候模式输出数据,其中实测气象数据的不确定性源于气象站点的空间布局与站网密度,尤其对于小流域或者山坡地形较为广泛以及超渗产流机制发育的区域^[38-39]。除实测气象数据外,实际研究所需数据最初往往来自于某种气候模式模拟输出结果。以 IPCC 第 5 次评估中所采用的地球系统模式为例,评估报告指出模拟 5 大圈层多个变量的变化趋势及相互作用过程与极值事件方面存在较大的不确定性,特别是针对空间尺度小和时间尺度短的情形。国内学者唐伟等^[14]于 2014 年探究了输入气象资料误差对模型模拟效果的影响,发现降水量少的年份模拟效果较差,并指出输入降水资料的精度是水文模拟不确定性的主要来源之一。结合驱动水文模型所需气象数据的获取与应用路径来看,数据不确定性主要源于气候模式的构建和降尺度技术的选择,因此,提高气候模式的模拟精度和选取合理的降尺度方法或优化现有降尺度技术是降低模式输出数据不确定性存在的主要途径之一。

5.1.2 模型参数 针对不同类别的水文模型,模型参数往往可归为 2 类:一种是具有物理机制的参数,其往往出现于基于物理机制的模型中;另一种即为不具有物理机制的参数,这类参数伴随着概念性模型或经验模型而存在,一般只能通过数学推导或凭借个人经验来获取,往往缺乏合理性、难以满足模型精度要求,直接影响到模拟结果的有效性。Beven 等^[40]于 1992 年就

已注意到模型中“异参同效”现象的存在,其来源主要包括模型过于庞大或复杂、模型结构设置不合理和模型参数冗余,3种情况均会导致参数之间相关性太强^[41]。为避免或降低“异参同效”现象的负面影响,一方面可以从水文模型的优选环节着手,充分了解模型机制与结构特征,加强水文模型评估,优选出适宜的水文模型或针对项目需求对已有模型加以改进,另一方面,深入分析并摸清参数间的关联性,再对其进行不确定性分析,尽可能降低参数不确定性对研究结果的干扰。

5.1.3 耦合模式 数据尺度的不匹配是区域气候变化影响研究中所面临的巨大挑战,为实现气候模式输出数据与水文模型的对接,可以采用2种方式:一种是单向耦合,即气候模式只负责为陆面水文模型提供数据;另一种为双向耦合,即气候模式不仅为陆面水文模型提供输出数据,同时还会接受陆面水文模型的反馈^[42]。综合相关研究成果,双向耦合的反馈模式能够有效提升数据应用效果^[43-45],而单向耦合模式的应用效果往往较差^[46-47]。前述学者也指出采用不同的气候模式所得到的结果大相径庭,气候模式生成数据的不确定性直接影响到模拟结果的优劣,耦合系统的改进主要依赖于气候模式的改进。除单向耦合与双向耦合模式外,降尺度技术在实现大尺度的气候模式输出数据与水文模型的对接耦合中得到了广泛应用。相比于计算量庞大、应用起来费时费力且对基础设施支撑要求较高的动力降尺度而言,统计降尺度技术在实际中应用更加普遍,然而该技术是建立在一定的数学假设基础上,实际情况往往难以符合其假定条件,因此不确定性不可避免地伴随其中,对其进行不确定性分析不可或缺。

5.2 不确定性分析 当前分析模型参数不确定性的方法,主要有 Beven 等^[40]提出的广义似然不确定性估计(GLUE)、Thieman 等提出的贝叶斯概率模型估计(Bayes)和蒙特卡罗模拟(Monte-Carlo simulation)方法等^[48]。其中,广义似然不确定性估计 GLUE 是针对模型中“异参同效”现象提出的一种不确定性估计方法。卫晓婧等^[49]认为 GLUE 法推求后验分布的高概率区域是非连续的,无法准确区分其可行参数组的概率分布边界区域,他们采用 SCEM-UA (shuffled complex evolution metropolis algorithm) 代替传统 GLUE 方法中的蒙特卡罗随机取样法,发现该法能够推导出更优的不确定性区间。贝叶斯理论凭借其能够充分融入多种信息源及自身实践经验进而对研究对象作出合理预估的优势在水文不确定性分析中占据重要地位,并已得到广泛应用^[50-51]。然而,梁忠民等^[52]指

出,贝叶斯理论中存在的先验分布合理性、输入降水数据精度、后验分布估计时复杂积分方程变换与求解等问题仍亟待解决。此外,模糊不确定性分析方法是水文科学领域另一种应用较广泛的不确定性分析方法^[53],但就其自身隶属度与分布区间的确定方面而言,仍存在一定程度的未知性,因而加强水文系统的数学理论认识与研究,降低其不确定性分析过程中的盲目性十分重要。将模糊集分析理论与已发展较为完备的神经网络理论相结合也是一种具有良好应用前景的方法之一^[54]。

6 研究实例:气候变化对拉萨河流域径流的影响

6.1 概述

6.1.1 研究区域概况 拉萨河是雅鲁藏布江的5大支流之一,如图1(见插3)所示,发源于念青唐古拉山脉中段北麓。拉萨河流域呈东西走向分布于雅鲁藏布江中游北部,总长度约551 km,流域面积为32471 km²,是雅鲁藏布江流域面积最大的子流域。流域地势总体较为平缓,而气候寒冷干燥,年均降水量仅400~500 mm,且集中于5—9月;平均气温基本位于-14~31℃。拉萨河流域湿地系统是维持整个高原生态系统平衡的关键,并对整个流域乃至国家社会经济用水、航运保证、水能供给都意义重大^[10],因此,在气候变化大背景下研究该流域水循环的响应具有极其重要的理论价值与现实意义。

6.1.2 数据有效性验证 进行气候变化影响分析时,多数研究直接将 GCMs 降尺度数据输入已用历史气象资料率定和验证的水文模型,这样处理的一个前提是 GCMs 降尺度数据对水文模型也有较好的适应性,但并不是所有流域都能满足这个假设。因此,基于 GCMs 历史降尺度数据探讨 GCMs 对水文模型的适用性就显得十分必要。本研究在月尺度上分析 GCMs 降尺度资料在模拟流域径流序列的能力,评价指标包括 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{ns})、相关系数(r)、均方根误差(RMSE,即 E_{RMS})、确定性系数(R^2)以及水量平衡系数(E_r)。Echam5 与 Medres 模式简介及其降尺度结果参见文献^[55]。表2给出了基于气象站点资料(Mete)以及 Echam5 与 Medres 降尺度数据, VIC 模型模拟拉萨水文站流量序列的效果对比。结果显示,率定期(1976—1990年)与验证期(1991—2000年)将 Echam5 与 Medres 降尺度数据应用于 VIC 模型模拟的流量序列能较好地表征实测流量序列的统计指标。因此,本文将 Echam5 与 Medres 降尺度数据用于驱动水文模型。

表 2 GCMs 降尺度数据对 VIC 模型适应性评价

数据来源	率定期					验证期				
	$E_r/\%$	E_{ns}	r	R^2	E_{RMS}	$E_r/\%$	E_{ns}	r	R^2	E_{RMS}
Metec	1.67	0.94	0.97	0.94	73.88	9.15	0.92	0.96	0.93	96.53
Echam5	-4.31	0.63	0.83	0.68	179.87	5.13	0.71	0.85	0.72	182.84
Medres	-6.26	0.70	0.86	0.74	160.86	1.30	0.67	0.84	0.70	194.35

6.1.3 VIC 模型适用性验证 拉萨河流域属于半干旱半湿润地区,且地形复杂,对模拟结构要求较高.考虑到大尺度陆气耦合分布式的 VIC 模型能综合考虑不同类型产流方式,同时能够有效描述能量与水量平衡过程,可以较好反映海拔较高的拉萨河流域积雪特

性,因而 VIC 模型为首选模型;然后,结合实测数据探讨 VIC 模型模拟拉萨河流域水文变量的时空分布特征(表 3)发现,日尺度上 E_{ns} 和 R^2 均高于 0.85,月尺度甚至达到 0.90 以上.因此,无论是从模型机制还是从模拟效果上看,VIC 模型均能够适用于拉萨河流域.

表 3 VIC 模型在拉萨河模拟效果

模拟时段	$E_r/\%$		E_{ns}		r		R^2		E_{RMS}	
	年尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	
1976—1990 年	1.67	0.87	0.94	0.94	0.97	0.88	0.94	114.85	73.88	
1991—2000 年	9.15	0.86	0.92	0.93	0.96	0.86	0.93	142.22	96.53	

6.1.4 气象要素变化趋势分析 由图 2(见插 3)中未来 2 个时期降水量在月尺度上的变化情况可见,未来降水量主要在 7、8 月份呈增加趋势,6、9 月变化并不明显,其余的 1—5、10—12 月都呈明显的减少趋势.相对于流域未来降水量在年内变化趋势表现出来的巨大差异,日平均气温则表现出一致的增加趋势(图 3,见插 3).其中 2046—2065 年时段内变化由最低的 0.34℃ 增加到 3.40℃,而 21 世纪末期的变化幅度较 21 世纪中叶更为明显,增加值为 0.94~5.26℃.2 个时间段

里,5—6 月及 9—10 月增温较其他月份更为明显.在年尺度上(表 4),未来 2 个时期降水量都表现出一定的增加趋势,其中 2046—2065 年时段里,较基准期增加了 5.98%~20.09%,而 21 世纪末期的增加幅度更为明显,从 Echam5 在 B1 情景下的 14.3% 增加到 Medres 的 40.99%.气温都表现出增加趋势,日最高气温的增加趋势最为明显,日平均气温次之,日最低气温最低.日平均气温的增加幅度在 21 世纪中期为 0.98~1.93℃,末期为 1.67~3.47℃.

表 4 未来气候情景年尺度变化结果

因子	2046—2065 年						2081—2100 年					
	Echam5			Medres			Echam5			Medres		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
$\Delta P/\%$	10.10	9.09	5.89	18.67	20.09	13.04	26.11	39.14	14.32	31.91	40.99	19.39
$\Delta t/^\circ\text{C}$	1.45	1.06	0.98	1.93	1.71	1.43	2.33	2.59	1.67	2.90	3.47	2.15

6.2 流域径流对气候变化的响应

6.2.1 径流量 利用 Echam5、Medres2 种降尺度输出数据作为 VIC 模型的输入,利用模型模拟并输出流域 2046—2065 年与 2081—2100 年 2 个时段内径流要素的分布值,并以 1981—2000 年为基准期,全面分析未来径流的时空分布特征,并揭示气候变化对流域径流的影响机制.分别从流域未来径流的时间变化与空间分布特征进行阐述.

1) 时间变化特征. 月尺度上,未来 2 个时期拉萨河流域各月径流量以减少趋势为主,仅 7、8 月份为增加趋势(部分情景中 6、9 月也为增加趋势).其中:2046—2065 年 3—5 月径流量减少趋势明显,幅度超

过 20%,其中最大变幅出现在 4 月份、降幅值达 37.72%(由 A1B 情景下 Medres 模式模拟得到);1、2、9—12 月径流量减小趋势不明显,幅度在 10% 以内.2081—2100 年径流变化特征与 2046—2065 年类似,但变幅相对更大,其中最大减幅为 49.90%,最大增幅达 106.26%.由于径流量表现为减少趋势的月份普遍集中于径流量级较小的月份,因而流域径流年尺度上仍随径流量级较大的月份变化呈增加趋势.其中,2046—2065 年径流量增幅为 8.26%~14.23%,2081—2100 年达 7.84%~43.20%.年尺度上,河道流量呈增加趋势,其中 2046—2065 年内增幅为 6.04%~13.92%,增幅更大的 2081—2100 年量值为 7.46%~48.2%.

2) 空间变化特征 从空间上看,模拟期径流量变化呈现出明显的空间差异。其中, Echam5 模式下 2046—2065 年内径流量最大变幅出现在 A1B 情景, 变幅位于 $-86.43\% \sim 91.72\%$ 之间; 而对于 Medres 模式, 其最大径流量变幅则出现在 A2 情景中, 量值介于 $-67.22\% \sim 111.09\%$ 。2081—2100 年径流量变动较 2046—2065 年更为明显, 2 个模式的变幅都出现在 A2 情景下, 其中 Echam5 模式下变幅达到 $-96.98\% \sim 217.55\%$, Medres 模式下径流量变幅处于 $-86.93\% \sim 173.84\%$ 之间。

6.2.2 流量 未来 2 个时期拉萨站流量较基准期均表现出显著变化形态。图 4-a(见插 3) 给出了 2046—

2065 年的月尺度变化情况, 可以看出 7—10 月为增加趋势, 1—6 月以及 11—12 月为减少趋势(6 月份部分情景表现出增加趋势); 最大减少趋势发生在 3 月份, 减少量达到 53.47% ; 最大的增加趋势则发生在 8 月份, 增加幅度为 51.77% 。2081—2100 年表现出与 2046—2065 年相似的年内变化特征, 在变化幅度上更加显著; 其最大减幅为 60.58% , 出现在 4 月份, 最大增幅依旧在 8 月份, 达到 118.28% (图 4-b, 见插 3)。年尺度上, 河道流量都呈现出增加趋势, 其中, 2046—2065 年内增加幅度为 $6.04\% \sim 13.92\%$, 最大增幅由 Echam5 在 A1B 情景下输出; 2081—2100 年的增幅为 $7.46\% \sim 48.2\%$ (表 5)。

表 5 主要水文要素未来年尺度变化结果

模拟因子	2046—2065 年						2081—2100 年					
	Echam5			Medres			Echam5			Medres		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
径流量	13.54	11.32	9.05	10.59	14.23	8.26	29.84	43.29	14.96	18.17	23.64	7.84
流量	13.92	10.91	7.86	9.27	13.16	6.04	34.05	48.22	16.91	18.62	24.92	7.46

7 结论与展望

从气候变化对流域水循环影响研究的过程出发, 重点论述了其中所涉及的 5 大关键技术, 全面回顾并分析了相关研究成果, 提出了相关建议并作出展望; 以拉萨河流域为例并融合主要技术, 研究了流域径流对气候变化的响应机制。

本文的主要结论为: 全面评估数据的有效性是保障研究良好开展的必要基础; 结合研究目标、区域特征及数据质量等, 选取适宜的水文模型是决定研究是否有效的关键环节; 综合数据有效性验证结果以及模型对数据的要求, 优选出合理的降尺度技术是保证气象数据与水文模型良好对接的重要手段; 考虑分析过程中不确定性的主要来源, 加强对结果不确定性的量化分析是改善研究结果的有效途径。

我们认为, 建立完善的大气模式评估体系、降尺度技术与水文模型优选体系、不确定性评估体系均是未来的研究重点, 强化大气模式机理与模式间耦合研究、改进降尺度技术或加强方法间的融合技术、发展全面服务于气候变化对水循环影响机制研究的水文模型、建立水循环对气候变化响应过程中不确定性分析的理论框架都是未来研究的重要内容。

8 参考文献

- [1] 刘春蓁. 气候变化对我国水文水资源的可能影响[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 220
- [2] 江涛, 陈永勤, 陈俊合, 等. 未来气候变化对我国水文水资源影响的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),

2000, 39(增刊 3): 151

- [3] 王国庆, 张建云, 章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 7
- [4] 何自立. 气候变化对流域径流的影响研究[D]. 陕西咸阳: 西北农林科技大学, 2012
- [5] Gaye C B, Diaw M, Malou R. Assessing the impacts of climate change on water resources of a West African trans-boundary river basin and its environmental consequences (Senegal River Basin)[J]. Sciences in Cold & Arid Regions, 2013, 5(1): 140
- [6] Esteban-Parra M J, Rodrigo F S, Castro-Diez Y. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880—1992 [J]. International Journal of Climatology, 1998, 18(14): 1557
- [7] Elagib N A, Mansell M G. Climate impacts of environmental degradation in Sudan[J]. Geo Journal, 2000, 50(4): 311
- [8] De Luis M, Raventós J, González-Hidalgo J C, et al. Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (east Spain)[J]. Int J Climatol, 2000, 20(10): 1451
- [9] Tabari H, Somee B S, Zadeh M R. Testing for long-term trends in climatic variables in Iran [J]. Atmospheric Research, 2011, 100(1): 132
- [10] 徐宗学, 刘浏, 刘兆飞. 气候变化影响下的流域水循环[M]. 北京: 科学出版社, 2015
- [11] 徐影, 丁一汇. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估[J]. 应用气象学报, 2002, 13(5): 513
- [12] Yukimoto S, Noda A, Kitoh A, et al. The new

- meteorological research institute coupled GCM (MRI-CGCM2). Model climate and variability[J]. *Papers in Meteorology & Geophysics*, 2001, 51(2): 47
- [13] Kitoh A, Hosaka M, Adachi Y, et al. Future projections of precipitation characteristics in East Asia Simulated by the MRI CGCM2 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(4): 467
- [14] 唐伟, 林朝晖, 杨传国, 等. 基于陆面水文耦合模式 CLHMS 的淮河流域水文过程的模拟评估及其不确定性分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(4): 463
- [15] Sachindra D A, Huang F, Barton A, et al. Least square support vector and multi-linear regression for statistically downscaling general circulation model outputs to catchment streamflows [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(5):1087
- [16] Goyal M K, Ojha C S P. Evaluation of linear regression methods as downscaling tools in temperature projections over the Pichola Lake Basin in India[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(25): 1453
- [17] Huth R, Kliegrová S, Metelka L. Non-linearity in statistical downscaling: does it bring an improvement for daily temperature in Europe? [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(4): 465
- [18] Mpelasoka F S, Mullan A B, Heerdegen R G. New Zealand climate change information derived by multivariate statistical and artificial neural networks approaches[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(11):1415
- [19] Coulibaly P, Dibike Y B, Anctil F. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(4): 483
- [20] 和清华. 用天气发生器 CLIGEN 预报日太阳辐射和气温的适用性研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2009
- [21] 张光辉. CLIGEN 天气发生器在黄河流域的适应性研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 175
- [22] 史婉丽, 杨勤科, 穆婉红. 随机气候生成器在黄土高原的适用性检验[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 18
- [23] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 等. CLIGEN 降水要素在黄土塬区的适应性评估[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6): 31
- [24] Johnson G L, Hanson C L, Hardegree S P, et al. Stochastic weather simulation: overview and analysis of two commonly used models[J]. *J Appl Meteor*, 1996, 35(1996): 1878
- [25] Hoai N D, Udo K, Mano A. Downscaling global weather forecast outputs using ANN for flood prediction [J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2011, 28(1): 223
- [26] Hassan Z, Shamsudin S, Harun S, et al. Suitability of ANN applied as a hydrological model coupled with statistical downscaling model: a case study in the northern area of Peninsular Malaysia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 463
- [27] Wilby R L, Wigley T M L, Conway D, et al. Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 2995
- [28] Semenov M A, Brooks R J, Barrow E M, et al. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates [J]. *Climate Research*, 1998, 10(2): 95
- [29] Semenov M A. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator[J]. *Climate Research*, 2008, 35(3): 203
- [30] Semenov M A, Stratonovitch P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts[J]. *Climate Research*, 2010, 41(1): 1
- [31] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 等. 气象资料的统计降尺度方法综述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 837
- [32] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [33] 赵登忠. 集成 PRISM 的 VIC-3L 分布式水文模型在黑河流域的应用[D]. 南京: 南京大学, 2004
- [34] 宋星原, 余海艳, 张利平, 等. VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用 [J]. *水文*, 2007, 27(2): 40
- [35] 郭生练, 郭家力, 郭海晋, 等. 鄱阳湖区流域水文模型比较研究[J]. *水资源研究*, 2014, 3(6): 486
- [36] 杨传国. 区域陆面-水文耦合模拟研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2009
- [37] 翟春玲, 余钟波, 杨传国, 等. 极端土地覆被情景下的水文响应模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(4): 127
- [38] 尹雄锐, 夏军, 张翔, 等. 水文模拟与预测中的不确定性研究现状与展望[J]. *水力发电*, 2006, 32(10): 27
- [39] Bronstert A, Bárdossy A. Uncertainty of runoff modelling at the hillslope scale due to temporal variations of rainfall intensity[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2003, 28(6/7): 283
- [40] Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279
- [41] 熊立华, 郭生练. 三水源新安江模型异参同效现象的研究[C]// 第二届全国水问题研究学术研讨会论文集. 北京: 中国自然资源学会, 2004: 151
- [42] 陆桂华, 吴志勇, 雷文, 等. 陆气耦合技术应用研究进展[C]// 2004 年全国水文学学术讨论会论文集. 南京: 中国水利学会, 2004: 14

- [43] Yu Z, Lakhtakia M N, Yarnal B, et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 218(1/2): 72
- [44] Lin C A, Wen L, Béland M, et al. A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Québec, Canada[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(2): 131
- [45] Seuffert G, Gross P, Simmer C, et al. The influence of hydrologic modeling on the predicted local weather: two-way coupling of a mesoscale weather prediction model and a land surface hydrologic model [J]. *Journal of Hydro-meteorology*, 2002, 3(5): 505
- [46] 王超. 祁连山区出山径流对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010
- [47] 雍斌. 陆面水文过程模型 TOPX 构建及其与区域气候模式 RIEMS 的耦合应用[D]. 南京: 南京大学, 2008
- [48] 李向阳. 水文模型参数优选及不确定性分析方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006
- [49] 卫晓婧, 熊立华, 万民, 等. 融合马尔科夫链-蒙特卡洛算法的改进通用似然不确定性估计方法在流域水文模型中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 464
- [50] 刘攀, 郭生练, 田向荣, 等. 基于贝叶斯理论的水文频率线型选择与综合[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(5): 36
- [51] 韩京成, 黄国和, 李国强, 等. 基于贝叶斯理论的 SLURP 水文模型参数不确定性评估及日径流模拟分析 [J]. *水电能源科学*, 2013(12): 13
- [52] 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 274
- [53] 陈守煜, 李庆国, 李敏. 基于模糊优选神经网络与 GIS 结合的流域面雨量预测方法[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(2): 162
- [54] 陈守煜. 相对模糊集理论、模型与方法: 模糊水文水资源学数学基础[C]// 第二届全国水问题研究学术研讨会论文集. 北京: 中国自然资源学会, 2004: 19
- [55] 刘文丰. 拉萨河流域水文过程分布式模拟及其对气候变化的响应研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2013

Impact of climate change on hydrological cycle in river basins: past, present and future

XU Zongxue¹⁾ LIU Xiaowan¹⁾ LIU Liu²⁾

(1) College of Water Sciences, Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, 100083, Beijing, China)

Abstract Study on the impact of climate change on hydrological cycle in river basins has received much attention worldwide. Mathematical statistics and hydrological modeling are widely used for impact assessment. A summary of the impact of climate change on hydrological cycle in river basins is presented in five key aspects: trend analysis of hydro-meteorological factors, performance assessment on General Circulation Models (GCMs), selection of downscaling technique, selection of hydrological model and uncertainty analysis. The Lhasa River, the biggest tributary of the Yarlung Zangbo River, has been selected for the case. It has been found that future runoff exhibited much more spatio-temporal heterogeneity due to significant increase of runoff during flood seasons and significant decrease in dry seasons; this will be a great challenge for flood control and drought relief in the study area. Systematic explanation and in-depth understanding of how climate change affects hydrological cycle in river basins, and associated key issues on impact assessment are of great importance for future water resources management.

Keywords climate change; hydrological cycle; distributed hydrological model; uncertainty; Yarlung Zangbo River; GCMs; statistical downscaling

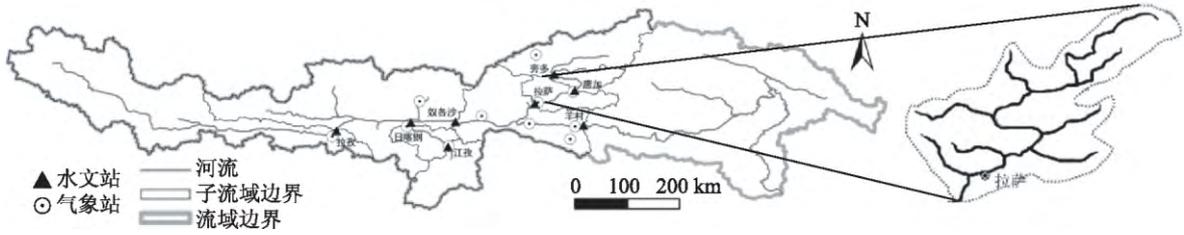


图 1 拉萨河流域位置

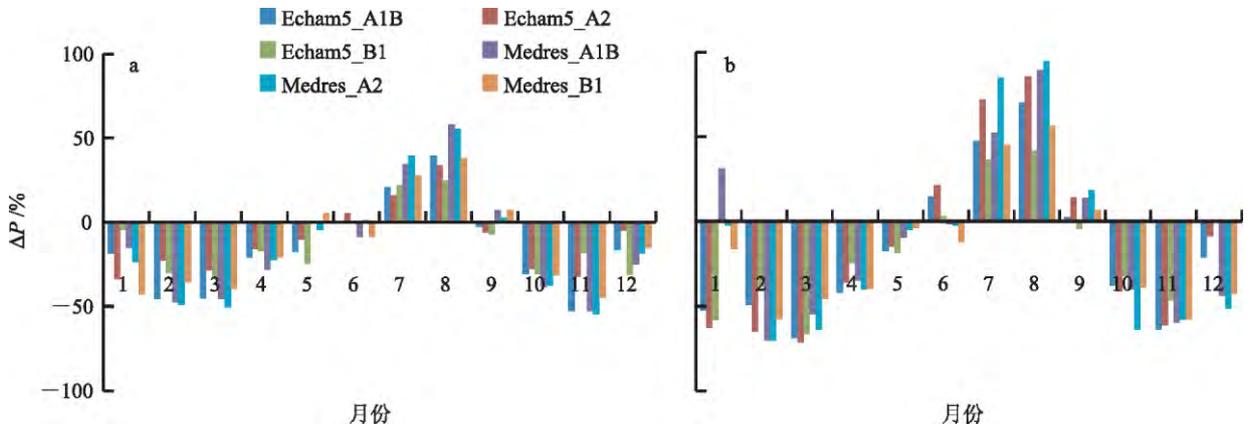


图 2 降水量月尺度变化(ΔP)结果(a. 2046—2065 年;b. 2081—2100 年)

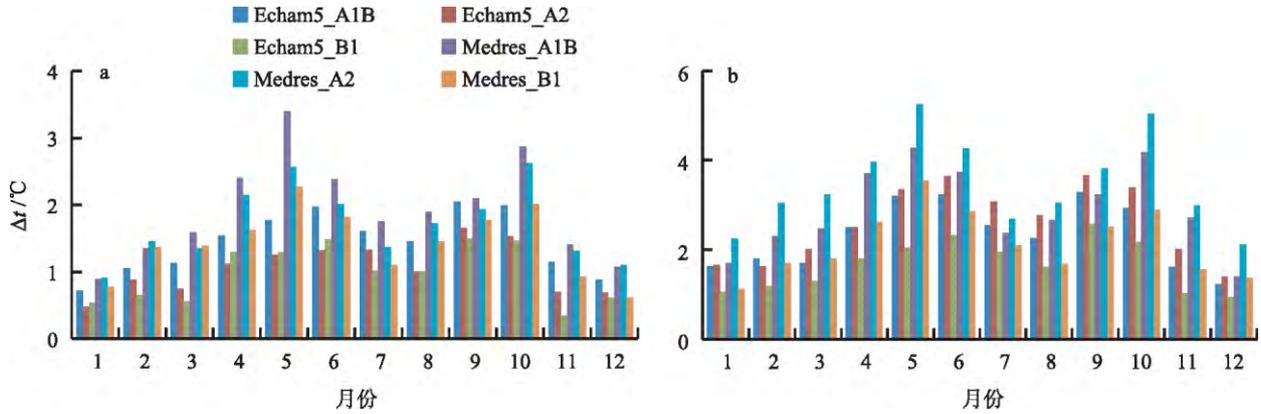


图 3 日平均气温月尺度变化(Δt)结果(a. 2046—2065 年;b. 2081—2100 年)

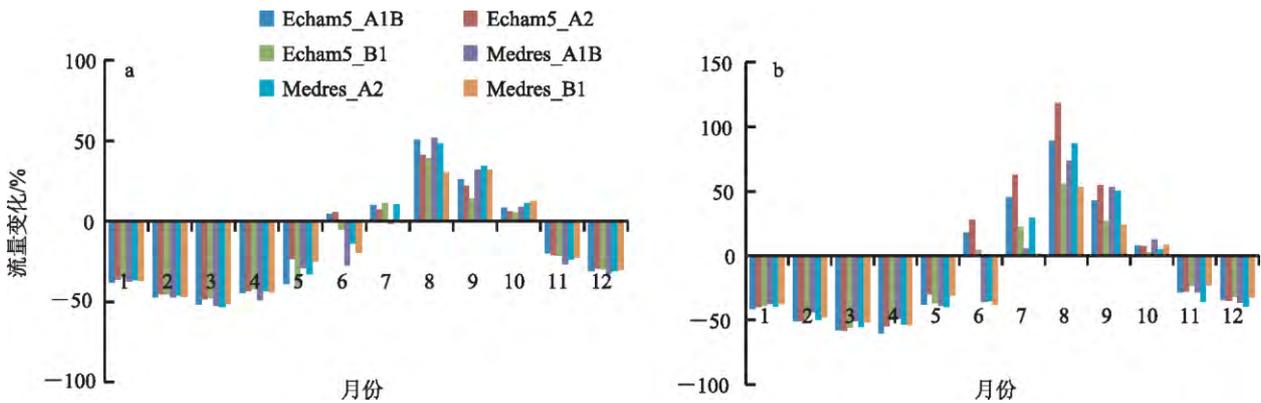


图 4 拉萨站流量月尺度变化结果(a. 2046—2065 年;b. 2081—2100 年)

徐宗学等：气候变化影响下的流域水循环：回顾与展望