

和人类活动对水文循环影响研究进展 (宋晓猛 张建云 占车生 刘春蓁)

摘要: 气候变化和人类活动是影响流域水文循环过程和水资源演变规律的两大驱动因素, 所引起的水文效应已成为当前全球变化研究领域的焦点问题。水循环系统是气候系统的重要组成部分, 气候变化对水循环要素的影响必然导致流域水资源的时空变化。同时, 人类活动对流域水循环的影响也日益显著, 主要表现为土地利用/覆被变化、修建大型水利工程等引起的流域下垫面条件变化, 进而影响流域内的产汇流机制。针对气候变化和人类活动对流域水循环要素的影响机制, 从水文要素时空变化检测与归因的角度对主要研究结果进行回顾, 探讨了变化环境下水循环要素变化的检测与归因分析研究方法, 并总结了定量区分气候变化和人类活动对水循环过程影响研究中的主要问题和不足, 提出了未来需要重点加强气候变化和人类活动对水循环要素变异的驱动机理及贡献分解研究、加强水循环要素时空变异特征的诊断以及模型评价技术和不确定性量化研究等。

关键词: 气候变化; 人类活动; 水文循环; 下垫面变化; 检测; 归因

中图分类号: P339 文献标识码: A 文章编号: 0559-9350 (2013) 07-0779-12

Review for impacts of climate change and human activities on water cycle

SONG Xiao-meng^{1, 2}, ZHANG Jian-yun^{1, 2}, ZHAN Che-sheng³, LIU Chun-zhen⁴

Abstract: The impacts of Climate change and human activities are two topics in the current evolution law research of hydrology and water resources. A lot of achievements have been found in the research of responses of water resources to climate change and human activities in recent years. The water circular system is an important part of the climate system, and climate change will result in temporal and spatial change in water resources. Meanwhile, human activities are another important driver in watershed hydrologic cycle system. Land use/cover changes and construction of large hydraulic engineering will affect mechanism of runoff yield and flow concentration through changing underlying surface. It is of importance to quantify the influence of climate change and human activities for the cognition of evolution law and sustainable development of water resources. In the paper, three aspects of the research have been concluded as following: the research progress of the hydrologic impacts caused by the two major driving factors respectively has been summarized; the methods of detection and attribution analysis for variation of water cycle elements in a changing environment have been introduced; and then based on the current research contents, the problems or shortage of quantitatively decomposing the influences of climate change and human activities on hydrologic cycle were discussed. Finally, the future research to be further studied in the field of climate change and human activities impacting on hydrology and water resources were addressed.

Key words: climate change; human activities; hydrologic cycle; underlying surface change; detection; attribution

1 研究背景

近百年来, 地球气候系统正经历着显著的变化, 加之剧烈的人类活动影响, 不同程度地改变了水文循环过程 [1-3]。因此,

变化环境下水文循环与水资源脆弱性成为水科学的研究热点之一，气候变化和人类活动作为变化环境的两个重要体现和组成部分，其带来的水文效应问题受得各国学者的广泛关注 [4-5]。特别是世界气象组织（WMO）、联合国科教文组织（UNESCO）、联合国环境规划署（UNEP）、联合国发展署（UNDP）和国际水文科学协会（IAHS）等陆续实施了一系列国际水科学方面的合作项目或研究计划，如政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）、世界气候研究计划（World Climate Research Programme, WCRP）、国际地球生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）、国际水文计划（International Hydrological Programme, IHP）和全球水系统计划（Global Water System Programme, GWSP）等。目的是从全球、区域和流域等不同尺度探讨变化环境下的水循环及相关的资源环境问题。与此同时，我国也积极开展了一系列的科学研究计划，以支持国内学者开展变化环境（全球变化和人类活动）对水循环的影响研究 [6]，探讨变化环境下的水循环过程及水资源演变机理，系统评价各种驱动因子的相对作用与贡献。这些工作对于我国未来水资源规划管理 [7]，防灾减灾及保证经济社会发展都具有重要的现实意义。

国内外围绕变化环境下水循环过程变化的检测与归因方面开展了大量的研究工作 [8-9]，如变化环境下水循环要素的演变规律，气候变化和人类活动对水循环过程变化的主要贡献率的量化与分离等。其中多数研究集中于分析两者对单一水循环要素的影响，如从水分收入项（如降雨） [10] 和支出项（如蒸散发）的变化入手 [11]，或从地面径流量的变化入手 [12-13]，或单独研究气候变化或人类活动（如城市化）的水文效应。然而由于研究方法的单一性和不确定性，目前仍无法详细阐释两者对水循环过程及水系统的影响机理。因此，正确认识变化环境下水文情势演变规律、陆面水文过程的响应机制以及水循环要素变化检测与归因成为当前水科学研究的关键问题。通过对国内外相关研究进行梳理，剖析气候变化和人类活动对陆面水循环过程影响研究的主要成果，探析变化环境下水循环要素的演变规律，归纳和总结水循环要素变化的检测和归因方法以及当前研究所面临的主要问题，展望未来研究的总体趋势和方向，旨在为变化环境下的水循环过程驱动机制的理论研究提供借鉴和参考。

2 检测与归因的定义与方法研究

过去经常把系统或变量变化的检测与归因并提，认为检测和归因分析是研究观测到的系统或变量是否具有显著性，外强迫或驱动因素是否为所研究系统观测到的变化的原因 [14-15]。为了明确区分两者的差异，IPCC第三次和第四次评估报告都提供了明确的定义，其中第四次评估报告指出“气候有各种时间尺度的变化，气候变化的检测是一个过程，要证实气候在某种统计意义上发生了变化，但是并不涉及气候变化的成因，而气候变化的归因研究也是一个过程，要在一定置信度水平下确认检测到的气候变化的最可能成因” [16]。综合以上观点与认识，本文将检测定义为：基于某种或某些给定的统计方法或统计规律，从统计意义上对系统变量进行分析其变化过程及演变规律或发展趋势，而不提供该变化的原因或分析影响该变化的驱动因素。同样定义归因分析为：在某种可信度条件下或置信水平内，通过一些数学方法或统计模型评估或量化多个驱动因素对某一系统变量变化或某一事件演变过程的相对贡献的过程，而这种变量的变化过程或趋势必须能够通过某些途径检测出来。由此可知，变化环境下水循环要素的检测，主要研究环境变化引起的陆面水循环要素的变化及演变趋势，而归因分析则主要讨论引起上述变化的主要驱动因素，并定量或半定量区分各种驱动因素的主要影响及相应的贡献率。对于检测与归因的方法研究，国内外已经开展了大量的工作，取得了丰富的研究成果 [17-18]。表1给出了目前常用的变化环境水文响应的检测和归因分析方法，并总结了各种方法的主要特点。

表1 环境变化的水文效应检测和驱动因素归因分析方法



注：①归因分析中往往采用两个不同阶段的资料进行分析，即将长时间序列资料分成基准率定期和影响验证期。

3 变化环境下水循环要素变化的检测与归因

气候变化和人类活动共同影响着全球水循环过程，气候系统内部的任何变化以及人类活动每个环节影响都将在水文循环的关键要素中得到反映或体现，如图1所示。如气温升高时，蒸发加剧、土壤水分及下渗强度也将随之改变。反之，水文要素的变化同样对气候系统直接或间接地产生影响，陆地土壤湿度、反射率及植被的变化也将影响土壤蒸发、植被蒸腾及降水等。人类活动对水循环要素的影响主要体现在3个方面：（1）改变了流域的产汇流条件，主要包括土地利用变化、水保工程和流域河道整治等的影响；（2）人类直接取用水，主要包括跨流域调水及灌区等引水工程，地下水开采等；（3）影响河道的汇流过程，主要包括水库塘坝等蓄水工程的影响。通常，这两者共同作用且相互影响，往往很难精确地定量分离两者各自对水循环要素的影响。因此，如何定量检测变化过程或趋势以及如何有效实现归因分析的定量化，已成为水文科学界不断努力的方向。目前国内外在此方面已经取得了一些阶段性成果，以下分别从降水、蒸发和径流三方面来探讨变化环境下的检测和归因问题。



3.1 降水变化检测及归因分析

自IPCC第二次评估报告发布以来,北半球中高纬度(除东亚地区)陆地降水量继续增加(约每10年增加0.5%~1.0%),副热带陆地地区平均降水量呈下降趋势(约每10年降0.3%),而热带陆地降水测量结果表明,20世纪降水量可能增加了约(0.2%~0.3%)/10a。与北半球相比,南半球整体没有检测到比较系统的变化[19]。另外有研究结果估计20世纪全球陆地上的降水量增加2%左右[20],但各个地区实际的变化并不一致[21-22],同样基于不同时间序列和站点资料得出的结果也存在较大差异。由此可知,由于降水变化存在极大不确定性以及全球变化的影响逐渐显著,使得准确估计全球平均降水量的变化趋势比较困难。但唯一明确的是全球变化使得全球水循环过程发生改变,且降水量变化进一步加速,使得降水的年际与年内变化增大,变差系数显著增加[3],因而增加了水文气象极端事件(如极端干旱、暴雨洪涝等)发生的概率。如美国国家海洋和大气管理局(NOAA)给出的全球和美国48个州(除阿拉斯加州和夏威夷州以外)的统计数据显示,在过去的20世纪,全球降水增加了1.9%,而美国48个州的降水增加了6.4%,除了美国夏威夷和西南部分地区减少外,其他地区均出现增加趋势①。同样由加拿大环境部提供的数据显示,1948—2011年加拿大的降水量呈现前降后升,分界点在1970年前后,近40年的降水相对增加了2%~3%①。根据我国《气候变化国家评估报告》的研究结果,我国近100年来平均降水变化总体趋势不显著,但存在显著的年际和年代际振荡以及区域性变化[19]。从降水量的季节变化来看,春季和秋季变化较显著,分别增加20.6mm和减少27.3mm。从降水量的空间分布区域变化来看,我国东北东部、华北中南部的黄淮海平原和山东半岛、四川盆地以及青藏高原部分地区出现不同程度的下降趋势,其中山东半岛负趋势特别显著[23],海河、黄河、辽河和淮河流域年降水量减少显著,而全国其他区域的年降雨量呈现增加趋势,其中长江下游、华南、东南地区以及西部内陆河显著增加[19]。这与其他研究结果[24-25]得到的中国年均降水变化和年内季节变化保持较好的一致性,但由于选择的时间序列不同而略有差异。表2给出了我国9大流域片区降水量变化的主要趋势。

表2 我国9大流域片区的降雨变化趋势分析



注:春季(3—5月);夏季(6—8月);秋季(9—11月);冬季(12—次年2月)。

降水变化还表现在区域性短历时暴雨强度和极端强降水日数急剧增加,即极端降水值和极端降水平均强度都有增强趋势,且极端降水量占总降水量的比率也趋于增大[26-29]。诸多基础理论分析、实验观测和气候模式模拟研究结果[30]均表明气温升高导致水汽增加,进而影响强降水事件的发生,即使在降水总量保持不变的条件下,强降水事件的发生频率有所增加[31]。

再如美国20世纪末比20世纪初日降雨量超过50.8mm和101.6mm的天数有所增加,降水强度和频率均有所提高,密西西比河流域、美国中西部、西南部以及大湖地区,极端降水总量占年降水总量的比重较20世纪初增加了约5%~10%[32]。Goswami等[33]根据印度的数据资料分析同样证实上述观点,得出1981—2000年的极端降水事件(日降水量大于100mm)比1951—1970年期间有了显著增加。

在我国,华北地区年降水量趋于减少,虽然极端降水值趋于减弱,但极端降水量占总降水量的比重仍有所增加;长江及以南地区年降水量和极端降水量都趋于增加,极端降水值和极端降水事件强度都有所增强[19]。据大量研究结果显示[34-35],20世纪90年代以来,我国发生了多次短历时、点雨量实测或调查的极值接近或达到世界最高记录的暴雨事件,如陕西省坪坝调查暴雨为6~7h共计降雨量1300mm(1998年7月),超过了以往的世界暴雨记录;广东省湛江幸福农场实测暴雨1146.8mm/d(2007年8月)是21世纪以来我国大陆地区24h实测最大降水量。同时,文献[36]也指出在中国过去50年中,下半年极端降水事件增加的趋势虽然在西北地区和长江流域都有出现,但西北地区并未出现极端降水或极端降水强度的变化,只有长江中下游地区出现了显著增强趋势,从而导致20世纪80年代以来长江洪涝灾害事件频繁。

针对降水变化趋势时空差异和不确定性以及极端降水事件(或降水异常)增加等问题,归因分析显得颇为重要。许多研究都结合大气环流过程和全球气候变化,围绕气候系统变化机理方面展开了许多研究。如部分研究认为因我国地处东亚季风区,夏季降水异常可能引发大范围的旱涝灾害,而区域降水的多寡与大尺度环流背景下的水汽输送密切相关,因此从水汽输送和水汽收支的角度研究气候变化条件下降水异常成为一个重要的突破口。也有研究表明,通常到达我国的夏季平均水汽输送通道有孟加拉湾西南水汽输送通道、南海越赤道水汽输送通道、西太平洋水汽输送通道和中纬度西风带水汽输送通道[37],然而全球变化背景下印度季风区和南海的水汽输送成为我国南部和东部夏季强降水的重要条件[38],且西太平洋水汽输送通道对我国夏季降水异常影响较为显著[39]。还有研究强调青藏高原、南海季风和印度季风涉及的低纬活动源区构成的“大三角扇型”影响域的水汽输送对中国区域旱涝异常的重要性,指出高原大地形东南缘的水汽“转运站”效应也成为构成近年来长江中下游流域洪涝和北方干旱异常的关键因子之一[40]。然而,目前的研究工作多数从大气环流角度开展,仅考虑气候变化的影响,未能全面考虑人类活动因素对降水过

程的影响。因此，在今后需要强化人类活动对降水变化的影响机理以及两者共同作用的影响研究。

3.2 蒸散发变化检测与归因分析

蒸散发过程体现了物质和能量的交换，是全球气候系统动态平衡中的重要环节。既是连接全球水循环（包含大气水、地表水和地下水）过程的重要纽带，也是水陆表面热量平衡的关键因素，且受能量供给条件、水汽输送条件与蒸发介质的供水能力等3个方面的影响。其中能量供给主要来源于太阳净辐射，而太阳净辐射又受日照时数及气温等因子的影响；水汽输送条件取决于饱和差及风速的大小；而蒸发介质的供水能力则由下垫面性质及植被状况决定。因此，可以说蒸散发与气候变化和土地利用/覆被变化紧密联系，对蒸散发过程的精确估算是真实反映气候变化和人类活动对流域水文循环影响的重要前提和基础。

在蒸发量的研究中，多数着眼于蒸发量的量测结果，即蒸发皿蒸发量，并用其代表区域蒸发量。近几十年来，许多地区蒸发皿蒸发量存在显著的减少现象，这种变化正是发生在全球气温显著增高时期 [41-42]。然而，这种现象与最初的科学认识存在不一致现象，即正常情况下气温升高会促进水分蒸发，即意味着蒸发皿蒸发量应该增大。但是观测的结果与理论发生严重不对应的现象，且这种现象在全球许多地方得到验证，如北半球的美国、中国、俄罗斯、印度、意大利和南半球的澳大利亚、新西兰等 [43]。因此，这种现象被称为“蒸发悖论” [41] 或“蒸发谬误” [44]。对于蒸发皿蒸发量减少的原因一直是这个问题讨论的重点，有些研究认为云量增多，日照时数减少，辐射能力下降，蒸发过程需要的能量减少，因而蒸发量下降 [45-47]。如左鸿超等 [45] 利用边界层梯度输送理论和能量守恒原理分析了蒸发皿蒸发量的物理意义，通过全国62个观测站1961—2000年间蒸发皿蒸发量变化趋势研究，发现其中41个观测站下降趋势明显（最大-24.9mm/a），其余21个站有上升趋势（最大10.4mm/a），同时指出蒸发量的变化受多个环境因子的影响，不能仅根据某个单因子变化来解释，但大气中水汽含量增加明显，导致云量增加，影响云物理属性变化，成为影响当前多数地区蒸发皿蒸发量下降的一个原因。Roderick和Farquhar [47] 则认为云量和气溶胶增加导致太阳辐射下降，使蒸发皿蒸发量下降，并从温度日较差变小的事实出发，从理论上解释了近年来太阳辐射总量减少引起的蒸发皿蒸发量减少。

通常认为蒸发皿蒸发只是有限水面的自由蒸发，严格意义上它仅代表一个地区接受太阳能量多少的指标，而不能代表水分的变化。而陆地表面的实际蒸发才是衡量水分变化的客观变量，两者有联系但不能相互替代。由于实际蒸散发难以直接观测，往往需要通过潜在蒸散发来间接求解，因此，潜在蒸散发的研究也成为蒸散发研究的重要环节。在全球变暖的大背景下，很多区域的潜在蒸散发量具有明显下降的趋势 [41, 44, 47]，这与蒸发皿蒸发量的下降趋势保持较好的一致性，诸多研究也表明了潜在蒸散发与蒸发皿蒸发之间的相互关系，特别在湿润地区更密切 [41]。

同样，气候变化（或区域气象要素的变化）会造成潜在蒸散发的变化，分析潜在蒸散发对气象因子的敏感性有利于定量研究气候变化对流域水循环的影响，对于理解水热转换也有一定意义。如Gong等 [48] 发现长江流域潜在蒸散发计算最敏感的气象因子是相对湿度；而Liu等 [49] 得出海河流域的研究表明影响潜在蒸散发的最重要因素是水汽压，而在青藏高原则是风速；Zhang等 [50] 分析中国各区的潜在蒸散发的气象影响因子的敏感度，得出不同区域的主要影响因子有差异，如东部地区的太阳辐射量是对潜在蒸散发影响最大的气象因子，而西北地区则是相对湿度最为敏感；Liu等 [51] 利用世界粮农组织修正Penman-Monteith方程和邱新法的太阳辐射优化公式，分析了中国10大流域片区的潜在蒸散发的敏感性因子的时空分布特征，指出各个流域片的最敏感因子存在差异。

由此可推断上述研究结果的不一致可能原因为：一部分由于不同的地区气候差异，一部分来自研究方法的差异，还有一部分来源于资料数据及实际蒸散发计算公式方面的不确定性，至于具体的差异影响因素仍需要今后进一步的深入探讨。

3.3 径流变化检测与归因分析

对于变化环境下河川径流的变化检测与归因研究，已经得到国内外水文科学工作者的广泛关注，取得了丰富的研究成果。然而，诸多研究结果表明，全球范围内全球变化和人类活动对区域径流的影响没有一致的变化趋势，且径流变化较温度等要素的变化存在较大的不确定性 [52]。全球大部分地区的径流量有明显减少趋势，如我国淮河以北的大部地区（其中黄河、海河、辽河流域特别显著） [19]、撒哈拉沙漠以南的非洲地区、欧洲南部、南美洲的南部地区、澳大利亚南部以及北美的西部地区等 [53]。同样，也有部分地区呈现增加趋势，如南美洲南部的拉普拉塔河流域、北美洲的中南部地区、澳大利亚的北部 [53]、我国的南方部分地区 [19]。此外，径流量的季节变化表现显著 [54]，如诸多研究结论表明，冬季气温升高将造成大部分降水以雨水形式降落，使得冬季径流量增加，而夏季径流量则呈现减少趋势 [55-56]。根据我国9大流域片区径流变化趋势分析的研究结果 [57]，表3总结了我国9大流域径流变化特征及其归因分析结果。

表3 我国9大流域片区径流变化特征检测与归因分析



对于河川径流量变化的归因分析一直被认为是当前水文科学界的热点和难点问题之一,即如何判断径流变化的驱动机制,建立径流量与相应驱动因子的关系,讨论影响河川径流量变化的主要因子。近年来,针对此问题的研究成果较多,观点各异[58]。如刘昌明等[59]根据黄河干流主要水文站近50年来观测资料,定量分析得出气候变化是黄河上游干流实际来水量不断减少的原因,即主要驱动力为气候变化,约占75%,同时分析得出中游干流的来水量减少受人类活动的影响偏多。Wang等[60]建立了分布式月水量平衡模型,通过设置人类活动影响背景参数集,来表述人类活动对水文过程的影响,并将该模型应用于华北地区密云水库以上潮白河流域,分别识别出白河流域气候变化对径流减少的贡献率为44%,人类活动导致下垫面变化使径流减少达54%,潮河流域气候变化的贡献率为24%,而人类活动的贡献率高达74%,是导致径流减少的主要原因。同样的结果也被其他学者通过不同的模型(如SIMHYD模型和VIC模型等)模拟得到[61]。

此外,还有部分研究指出人类活动和气候变化对不同年代或不同时间尺度的径流变化影响存在差异,如Qiu等[62]通过分析华北地区气候变化和人类活动对水资源的影响,指出20世纪70—80年代气候变化的影响占据主要地位,约80%,而到了80年代末90年代初两者的影响基本相当,90年代至今则表现为人类活动的影响较为显著,约55%。Guo等[63]利用SWAT模型分析气候变化和土地利用变化对年径流和季节径流变化的影响时指出,对年径流影响的主要因素是气候变化,而对季节径流变化的主要影响力则来自土地利用变化。

除了土地利用变化以外,人类活动对河川径流的影响还包括水利工程措施的影响。目前国内外对于水利工程建设和开发已经持续了很长时间,也将在未来很长时期内发挥重要作用,如水库兴利供水、大坝防洪发电和区域调水工程等,这对于解决水资源时空分布不均,发展社会经济都提供了强大支撑。但水利工程措施极大的改变了原有的自然水循环过程,对变化环境下的水循环演变研究也提出了诸多挑战和难题。2001年实施的GWSP研究将全球变化、大规模水利工程建设和跨流域调水对区域水循环与水安全影响作为重要的研究课题。GWSP主席V?rsmarty[64]认为各种人为因素以直接或间接方式对区域和全球水循环产生重要影响,且大量证据表明人类在更广泛的领域干扰水循环的基本特性,由此导致的水安全和生态安全问题日益突出。夏军[65]对当前跨流域调水及其对陆地水循环与水资源安全的影响进行了系统评述,指出对于水利工程设施或跨流域调水工程对水循环的影响需要加强。同时,我国的南水北调工程也得到全世界科学界的关注,如2006年Science发表专文报告了南水北调工程实施中所面临的一些水安全与生态安全问题,并就一些未知的风险或后果展开激烈讨论[66]。在国内,对于水利工程方面的影响也有部分研究,如任立良等[67]对中国北方的黄河、海河、辽河、松花江流域的长时间系列观测资料进行分析,认为这些流域的径流都存在不同程度减少,其中上游水库拦蓄和人类取水增加是造成径流减少的主要原因,计算发现1980s—1990s相同量级的降水量产生的径流量比1950s—1960s减少了20%~50%。

3.4 存在的主要问题

虽然目前国内外水文气象学者已经意识到水文循环要素变异及其对应的水资源安全问题的重要性,并开展了大量的研究工作,对全球及区域尺度水文循环要素变化检测和归因分析取得了一定的进展,但仍然存在一些问题和困难有待解决,主要包括以下几个方面。

(1) 在针对气候变化和人类活动对水循环过程及水资源安全的影响模拟研究中,目前主要假定为确定的下垫面条件,或把上述因素作为水循环模型的输入因子考虑,而未能将社会经济变化、自然环境变化、人类活动影响及水循环系统耦合在一起构建广义水循环模型,这在一定程度上也阻碍了水循环模型作为基础模型研究变化环境下的水文过程模拟研究。

(2) 水循环要素变化的检测往往依赖于实测站点资料数据,依据各种统计方法对多年时间序列数据进行分析,可以认为是一种空间有限站点的时间尺度的研究,对于空间尺度上的演变特征考虑较少,且由于观测站点数据固有的不足,使得检测结果往往局限于点的时间序列分析或侧重于面的空间分布描述,而无法展现各要素的时空属性特性。

(3) 径流变化的检测归因分析比其他因素要困难,不仅由于土壤湿度和实际蒸散发缺乏观测数据,还由于其他众多的“混淆因子”的影响,不弄清楚它们内在的自然变化以及众多驱动因子对径流变化的影响,不能得到正确的检测与归因结果。虽说目前诸多的研究都针对径流变化的归因分析,但其中的一些多因素影响机理及相互作用问题仍然不清楚,无法简单地分离各类因素的影响,而忽视各因素的综合作用效果,如人类活动如何影响气候变化,以及气候变化对径流过程的影响有多少是人类活动引起的。此外对于常用的水文模拟技术方法,其本身的适应性和不确定性问题一直困扰着模型的应用,如何选择或构建一个合适的有效的评估模型进行径流变化归因分析也成为变化环境下水循环过程研究的关键,等等,这些问题都需要进一步的深入探讨。

(4) 对于我国以降水为主要补给的大江大河,流域尺度水文循环变化的检测与归因研究面对东亚季风年际年代际的变化,大规模的水资源开发利用等人类活动引起的环境变化以及人为气候变暖等多种驱动因子的影响。既要弄清水文循环要素变化趋势中的

自然变异, 还要了解观测到的变化是否已受到温度升高的影响, 与气候模型模拟或理论预期的变化是否一致, 以及人类活动影响和环境变化等众多“混淆”因子的影响以及相应的影响程度。

4 结论与展望

近年来, 伴随气候变化以及大规模工程建设, 快速城市化扩张等剧烈的人类活动, 水文要素发生了显著的趋势性变化, 极端水文事件发生的机率明显增加, 城市内涝灾害等突发事件日趋频繁, 致使当前的水资源安全压力不断加大 [68], 为区域水循环及水资源安全提出了诸多挑战。综合以上分析可知, 目前在变化环境下的水文效应机理研究尤其在量化研究、水文要素的变异性识别、时空尺度的复杂性问题以及两类要素对水循环过程的影响分离等方面仍然不足, 未来需要重点加强气候变化与人类活动对水循环要素变异的驱动机理研究, 强化水循环要素时空变异的诊断分析, 量化变化环境下的水循环过程的时空变异特征并揭示变化条件下的极端水文气象事件规律, 以便准确把握气候变化和人类活动影响下的水资源演变规律, 合理调控, 保障人类社会发展的水资源安全。为此, 在今后的研究中具体需要从以下几个方面努力:

(1) 对于实测系列水文循环要素资料的变化趋势分析, 需要通过物理及统计模型等多种方法检测其变化趋势, 从自然和人为等多种驱动因子变异程度及其对这些变化的响应寻求对水文要素变化影响最重要的因子。当然对于不同的时空尺度, 影响水文要素变化的驱动因子有所差异, 但首先需要突破的是流域尺度上的变化问题。同样需要特别关注径流变化的归因分析, 离不开不同土壤植被的蒸散发及蒸发潜力变化趋势的归因研究。目前大多数观测表明蒸发潜力呈减少趋势, 但实际蒸散发是增加还是减少, 它们与温度升高有怎样的关系, 这对于改进水文模型是非常重要的。在变化环境下, 需要综合考虑有关的水文气象要素(如温度、日照时数、水汽压、相对湿度、比湿、风速、降水、径流、土壤湿度、蒸发潜力、实际蒸发等)变化, 从陆-气水量能量交换的观点, 研究他们在气候变暖条件下的变化特点与变化趋势, 从最大限度地利用长系列水文气象要素观测数据, 物理模型与统计模型的模拟, 水文循环各分量变化趋势的检测与对各种驱动因子的响应分析, 到最后从数量上回答自然的与人为因子贡献的大小, 这种多要素检测与归因分析可能会揭示一些新的发现和认识。 [15]

(2) 水文与气象极端事件的变化格局的检测与归因分析是全球变化研究的关键部分, 因为其直接关系到社会经济的发展和国家安全等问题, 与国家有关决策直接相关, 同时也是受变化环境影响最为显著的问题。由于极端事件的变化格局与气候的自然变异及人为的强迫变化有着不同程度的密切联系, 因此采用什么样的技术手段或方法能定量给出自然的与人为强迫的影响, 且可以有效分析各自影响的不确定性程度或者贡献比, 可为决策者提供较高的可靠度和理论依据。随着科学技术的不断发展, 结合物理基础较强的模型和先进的统计技术方法来开展水文气象极值的变化格局也逐渐成为今后研究的一个亮点。

(3) 对于气候变化和人类活动对水循环过程响应的定量分离研究仍需进一步加强, 因气候变化和人类活动对水循环过程的影响机制的复杂性以及各影响因素的相关性, 导致简单水量平衡模型无法较好实现变化环境下的水循环过程模拟, 往往无法有效分离两者对水循环要素的影响, 这就需要讨论和研究气候变化及人类活动与水文循环间的相互作用。若单纯采用水文模型模拟分离人类活动对径流的影响, 即采用实测径流量扣除水文模型对降水变化响应的模拟方法进行估算, 这种笼统地将剩余值归结为人类活动影响, 没有说明以何种方式和多大程度影响了径流量, 没有考虑各种用水量重新返回土壤的回归水量, 也没有考虑气候变暖对消耗水量的影响, 从而使得分析结果的可靠性大大降低。为此, 需要综合考虑各方面因素, 选用一些合适的模型或多模式的集成研究分析各自的影响。

(4) 水文模拟技术的发展及其不确定性量化研究 [69-70]。水文模型作为变化环境下的水文响应机理研究的最有效的主要手段之一, 越来越受到人们的重视, 但是模型不确定性问题也一直困扰着研究者, 如何深入讨论模型的不确定性影响, 提高模型研究的可靠性, 需要进一步加强此方面的工作。水文模型的不确定性来源很多, 有输入输出资料的原因, 也有模型结构和模型参数的影响, 同样也受模型初始和边界条件等的影响, 在进行气候变化和人类活动的水循环过程影响评价中, 往往是需要耦合气候模式形成一个相对完整的陆气耦合模型系统, 这样就增加了气候模式预测的不确定性(或模型情景等选择的不确定性)以及模型系统内部耦合所产生的不确定性影响, 这些因素都迫切地要求我们在研究中能够开发一些有效的技术手段或方法, 定量评估上述不确定性因素造成的影响, 为模拟结果提高一些可靠的保障。

致谢: 感谢两位审稿专家的意见, 感谢水利部应对气候变化研究中心王国庆教授级高级工程师对本文提出的部分修改建议。

作者简介: 宋晓猛(1987-), 江苏徐州人, 博士生, 主要从事下垫面变化对产汇流的影响研究。

来源: 水利学报

