

文章编号:1001-8166(2007)08-0777-07

气候变化对江河流量变化趋势影响研究进展

刘春蓁

(水利部水利信息中心,北京 100053)

摘要:气候变化对基于自然稳定气候假定的流量变化趋势的检测和水资源评价方法提出了挑战。在流量变化趋势的检测中分离出气候变化的影响,不仅对水资源管理和水利工程设计有重要的应用价值,而且有助于了解气候变化以何种方式、在何时、何地、已经或尚未对水文循环产生影响,对改进气候模型的模拟与预测有重要的科学价值。

统计方法是检验流量变化趋势显著性的有效工具。直接用气候模型模拟和预测未来径流变化的可靠性取决于模型对当代降水模拟的可信度。多个气候模型集合分析有可能在一定程度上减少模型对降水、径流模拟的不确定性。近年发展起来的多个气候模型集合分析与统计显著性检验技术结合的方法,有可能模拟并预测出气候强迫导致大尺度径流空间分布的变化。随着气候模型尤其是陆—气耦合的区域气候模型对降水模拟的改进,可以预见径流变化的检测、归因和预测的趋同化模拟已为期不远。将温室气体外强迫导致的水文气候变化作为一个因子引入到水资源评价中,对于水资源管理经济与生态评估,以及未来的发展规划将是一件十分重要的变革。

关键词:气候变化;流量趋势检测;归因;统计模型;气候模型

中图分类号:P467;P331 **文献标识码:**A

1 引言

流域实测流量系列变化趋势的统计分析对于水利工程的规划设计、水资源评价以及水资源管理等都是重要的水文应用研究。长期以来这一分析研究都是建立在气候稳定变化的假定下。流域出口断面水文站的观测流量作为稳定随机变量,由统计方法得到的周期变化和趋势变化外延用于对未来的估计。虽然在20世纪70年代后,随着人口的激增、城市化发展、灌溉农业的扩展,以及拦河修堤筑坝等各种水利工程设施的开发运用大大改变了下垫面条件及流域特性与河道水文情势,实测的流量已不再是天然状态下的流量,在流量系列的分析中开始考虑流域尺度上人类活动的水文效应,但稳定的气候假定仍是一个重要的前提条件。IPCC第一工作组第四次评价报告给出“自1906—2005年全球气温线性上升趋势为 $0.74(0.56 \sim 0.92)^\circ\text{C}$,近50年这一线

性上升趋势(每10年上升 $0.13(0.10 \sim 0.16)^\circ\text{C}$)为近100年的2倍”,“20世纪全球变暖很可能是由于人类活动使得温室气体浓度增加引起”,“21世纪末全球平均地表气温可能升高 $1.1 \sim 6.4^\circ\text{C}$ ”^[1]的结论。这意味着温室气体浓度增加引起的气温升高已经超过了气候系统内部自然变率引起的气温变化幅度。随着这一问题的提出,人们自然会问,全球变暖是否已经对自然、生物和管理系统产生了影响?影响有多大?对于水文气候工作者这是一个颇具挑战性的问题。气候变化使得未来水利工程设计,尤其对于长达100年甚至大于100年寿命的水利工程不能再简单地外延历史水文数据作为未来的依据。

全球尺度人为增暖几乎与流域尺度人类活动的加剧同时发生。众多研究表明20世纪70年代以来全球变暖的水文效应已经显现。如何在流量的实测系列中检测出气候变化的影响是水文气候学家面临的一个难题。近10年来,鉴于全球范围长系列观测

收稿日期:2007-04-09;修回日期:2007-06-18.

作者简介:刘春蓁(1933-),湖北汉阳人,女,教授级高工,主要从事气候变化对水文水资源影响的研究. E-mail:liucz@mwr.gov.cn

的气候资料的改善和大气环流模型(GCM)对气候及其变率诸多方面模拟方法的改进,人们对气候变化的认知和归因研究取得了长足的进步,并促进了自然、生物的和管理系统变化的检测与归因研究。水文观测系列变化趋势的检测与归因正在从统计模型检验向着水文气候模型模拟以及物理模型与统计模型结合等归因的研究方法发展。

研究思路十分活跃,不同看法和争论也很多。尤其最近一些水文气候学家采用陆地水文模型与气候模型耦合的方法试图将水文观测数据趋势的检测,归因研究与对未来水文水资源的预测统一起来;虽然还存在很多难点与问题,但从目前的萌芽状态似乎可以看到未来的研究方向。这不仅对改进水文气候模型提出了很多亟待解决的科学问题,而且展现了在描写水文循环和水文水资源变化问题方面,水文与气候两门学科将在更高水平上融合。

本文从作者参与 IPCC 第四次评价报告撰写的实践和视角,试图对近年来国内外对流量变化趋势(包括极端水文事件洪水、干旱)检测与归因研究方法的进展与问题作一简要的介绍,希望能促进我国在这一领域的深入研究。

2 影响水文水资源的气候与非气候因素

流量变化趋势的检测是在一个长系列流量的历史资料中识别出它的变化特性是线性的或突变的增减,还是周期性的重复。归因是在变化的趋势中分离出气候因素,包括自然变化与人为强迫变化和非气候因素的贡献份额。

2.1 降水、气温与蒸发是影响水文水资源最重要的气候因素

这些要素一方面受到大气环流在区域尺度上的年际、年代际自然变化的影响,如太平洋 10 年振荡(PDO)、厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)、北大西洋涛动(NAO)以及大西洋涛动年代际振荡(AMO)等。另一方面它们受到温室气体浓度增加等人类强迫的气候变化影响。分离气候要素中的自然与强迫分量必须有足够长的历史资料。由于降水对温室气体浓度的敏感性小于气温,降水的时空变异性比气温大得多,在降水系列中气候变化的信号往往被其变异的噪音所掩盖。Groisman 等^[2]对空间变异性大的气象变量采用空间、时间平均的方法消除噪音。即使如此,仅从观测资料中用统计方法也很难分离出人为强迫和自然变异 2 个部分。

2.2 非气候因素的人类活动有直接与间接 2 种作用

直接作用指人口增加、经济社会发展引起用水量和消耗水量的增加以及从流域引出的水量和分洪水量等对流量的影响。间接作用指土地利用、土地覆盖变化对产流汇流过程的影响。为了扣除实测流量中人类活动的作用,一般有 2 种方法。一个是根据水量平衡将流域内的各种用水量、引水量、分洪水量计入到实测流量中,将其还原为天然流量;另一种认为水文模型对降水气温响应的流量为天然流量,它与实测流量之差为人类活动影响^[3]。这 2 种方法都有各自的局限性,第一种方法只考虑了人类活动的直接作用,第二种方法受水文模型参数率定方法的限制,很难充分反映土地利用及土地覆盖变化对水文过程的影响。

上述 2 种非气候作用无论从时间尺度或空间尺度都要比气候系统的人为强迫作用小得多。虽然对于一个流域,在某一个时间段内,高强度人类活动的水文效应可以大于人为气候强迫的影响,并对局部气候也可能产生反馈作用。然而人类活动的非气候作用,在一定的条件下,如其影响不是不可逆转的,可能再通过人为干预使其恢复。如通过调水调沙遏制了黄河下游河道生态系统的恶化和断流,从博斯腾湖调水恢复塔里木河下游被破坏的生态平衡等。但是人类不可能通过改变下垫面条件来消除气候变化对水文水资源的长期影响,而只能采取对策去适应它。人类的经济社会活动总是在某一气候背景下发生的,如果与气候变化的影响相悖,则其经济社会发展目的很难达到。从这个意义上,气候变化对于人们的社会经济活动起着重要的制约作用;在趋势检测与归因研究中必须将气候变异与变化的影响计入。

3 流量变化趋势检测与归因的统计方法研究

3.1 自然状态的水文变量的变化是气候变化的重要指标

近 10 年来国内外对自然水文系统变化趋势检测的水文变量有:年平均流量、月平均流量、日流量频率的百分位数^[4]、年最大日均流量、年最小日均流量^[5]、河冰封冻和解冻日期^[6]等。这些变量反映了以流域面积为整体的对气候变化的集总响应。趋势检验的统计方法很多,其中 Mann-Kendall 非参数检验方法由于其要求的假设条件比参数检验法少,最为常用。然而过去很多用此法进行趋势检测时往往对所用数据不作相关性检验。Douglas 等^[7]指出

忽略流域间的交叉相关可导致过高估计具有显著性趋势流域的数目,从而夸大趋势检测结果。Zhang Xuebin^[8]在用 Mann-Kendall 非参数检验方法研究加拿大境内河流流量的变化趋势时,首先对每个流域的流量时间序列进行白噪化处理以消除系列的相关性。Burn 等^[9]给出了检测趋势显著性的 4 个步骤:首先选择研究变量;再选择有较长观测记录的流域测站;采用 Mann-Kendall 非参数检验方法查看数据是否存在趋势;最后确定趋势的显著性。为了避免夸大 Mann-Kendall 非参数检验方法中数据无趋势假设的趋势数目,在确定趋势的显著性时,必须排除资料序列的序列相关与水文站水文变量间的交叉相关。在这方面 Vogel 等^[10]将破记录过程(record-breaking processes)的数学理论用于水文记录非平稳性的识别,并研究了美国 1 571 个洪水记录。其结果再一次表明,如果正确地考虑洪水事件空间相关的结构,截止目前美国的历史洪水记录没有显著的上升或下降趋势。

近年来,有些地区出现的稀遇性大洪水,如 1997 年 7 月和 2002 年 8 月欧洲奥得(Oder)河及易北(Elbe)河发生百年一遇,甚至超百年一遇的大洪水,1998 年长江发生 50 年一遇的全江性大洪水等,似乎显示出气候变暖空气湿度增加,水文循环加快,洪水开始增多。有人试图将极端水文事件变化趋势的检验作为气候变化,水文循环加快的一个证据。Milly 等^[11]通过对全球大河流域的数据分析提出了大于百年一遇的大洪水频率有增加趋势。Labat 等^[12]给出了全球气温升高,海洋蒸发增加,陆地降水量和径流量增加,水文循环加快,且气温每升高 1℃,全球径流增加 4% 的结论。但随着研究的深入,另一些水文气候学家对此提出了质疑。Mudelsee 等^[13]利用长系列资料研究了欧洲奥得河及易北河冬季与夏季洪水,并与气温和极端降水发生的趋势作对比分析,结果表明欧洲中部的冬季洪水呈下降趋势,夏季洪水无趋势。Kundzewicz^[14]研究了全球 195 个流域的实测洪水,发现在 20 世纪,只有 27 个流域洪水增加,31 个显著减少,剩余的 137 个流域的洪水无趋势性变化。Legates 等^[15]针对 Labat 所用的资料和采用的方法指出其结论是不正确的(见后所述)。Dai 等^[16]利用 1870—2002 年期间全球的逐月 PDSI(Palmer Drought Severity Index)指数研究了土壤湿度与气温升高的关系并指出,由于 ENSO 导致的降水减少和气温升高使得全球极端干旱面积($PDSI \leq -3.0$)自 20 世纪 70 年代以来增加

1 倍,并在 80 年代早期发生突变,而极端湿润的面积($PDSI \geq +3.0$)在 80 年代减少 5%。由于降水在时空上极大的变异性,目前缺乏对全球降水和径流增加趋势的证据。由此看来,虽然尚无证据说明全球水文循环已经加快,但水文现象变化更为剧烈,干旱日益增加的趋势值得重视。

以上研究表明,资料系列的长短和趋势检验方法对趋势检验结果的正确性有很大影响。

“趋势”有 2 种含意,一个是线性的逐渐上升或下降;另一种是间断的不连续的突变趋势。McCabe 等^[17]研究了美国 400 个水文测站在 1941—1999 年期间年平均最小、中等及最大日流量的时空变化的统计特性,结果显示了年最小和中等日流量自 1970 年出现了显著的增加,且呈阶梯式的而不是逐渐的变化,最大日流量没有增大或减少趋势。

趋势性研究只能告诉我们一个系列的变化特性,而不能回答趋势变化的原因,只有给出其变化的原因,即归因研究才能使人们对水文水资源的变化不仅知其然,而且知其所以然。

对于没有人类干扰的自然状态的水文系统,尤其对于以冰雪融水补给为主的河川径流,气温起着主导作用,其变化趋势的归因分析比较简单。只要将流量与对应的气温同步进行统计检验即可。Lammers 等^[18]、Serreze 等^[19]、Yang 等^[20]对北美和欧亚大陆北部流量的变化趋势研究结果表明,自 20 世纪 70 年代以来,气温的显著上升使得那里的流量显著增加,春汛洪峰流量提前。对于以降水补给为主的河川径流,一般只研究降水总量的变化趋势。Zhang Xuebin^[8]对 1847—1996 年间加拿大南部天然流量的研究表明,气温升高,蒸发加大,而降水量不变导致年最大日流量减少了 29%。曹建廷等^[21]研究了青藏高原 1956—2000 年 5 条天然状态河流的流量、流域降水量及气温的变化趋势,并得到在降水微量增加气温显著升高的气候条件下,总流量无显著增加或减少的趋势。

3.2 管理水文系统的水文变量变化趋势与归因研究

在人口激增、经济社会发展日新月异的今天,天然流域已很少见。尤其大江大河基本上都是人为干预调节的生态系统,前面提到的各种人类活动已使得观测到的流量远远偏离了天然流量。对于管理流域流量变化趋势的归因分析要十分谨慎,不可将其上升或下降的趋势简单地归结为气候变化结果,或单纯的流域下垫面变化的结果。Labat 等^[12]对 20 世纪全球 221 个河流流量的变化趋势研究指出:

“全球年平均气温与径流之间存在相关,即全球气温升高 1°C ,全球径流增加 4%”,并宣称其研究“首次以试验资料证实了全球变暖与全球水文循环加剧间的联系”。这篇文章遭到了 Legates 等^[15]的质疑,认为 Labat 等使用的实测流量记录反映了非气候的变化趋势,有些水文站仅有 10~40 年的记录,Legates 采用小波变换方法内差及外延长系列缺测流量数据时,没有有效地证实人类活动的影响已从测站记录中消除,也没有给出内差或外延误差对研究结果的影响。这些讨论再一次告诉我们虽然大坝修建或渠道整治导致观测径流的不连续变化可以较容易地由长系列数据检测出并去除,但城市化、土地利用、土地覆盖引起的连续不断的长期变化则较难从数据中与气候变化信号区分开。任立良^[22]以大量的观测数据研究了人类活动对中国北方不同时空尺度的河川径流的影响,从日,月,年,年代际到世纪尺度流量。其结果展示,我国北方流量减少趋势的直接原因是沿河取水量的增加。最小日流量的频率增加很快,而 20 世纪 80 年代和 90 年代平均流量与 50 年代及 60 年代比较,在相同的降水量条件下,减少了 10%~50%。Xu Jiongxin^[23]基于 1970 年以来黄河流域的降水、气温、实测的及自然的流量以及分水量、消耗水量、水土保持面积等测量数据,用统计方法研究了近 50 年黄河入海流量对气候变化及人类活动的响应。自 1970—1997 年黄河流域气温从 16.5°C 升高至 17.5°C ,与黄河产水量为负相关;在不同的水源区,降水减少对入海流量的影响不同;分水量和消耗水量的增加导致入海水量锐减;自 1960 年流域内的水土保持措施对入海水量减少影响的程度较小。他将入海水量与降水、气温、分水、消耗水、水土保持等因子变化建立了多元回归方程,得出分水,消耗水对入海水量变化的贡献为 41.3%,降水为 40.8%,气温为 11.4%,水土保持为 6.5%,气候因素对入海水量影响的比重为 52.2%,略大于人类活动的影响。

4 流量变化趋势检测与归因的气候模型与统计模型相结合的研究

近年来全球及区域气候模型对气候及其变率诸多方面模拟的改进为水文趋势和归因的深入研究提供了科学基础。用气候模型研究变化趋势的归因问题最初应用在生物系统,如 Gillett 等^[24]用气候模型研究了加拿大森林火灾,Root 等^[25]用气候模型研究了和野生动植物变迁的原因。他们首先用统计方法

将区域尺度上物种显现出的变化与区域上的气温联系起来,再用气候模型确定气温的变化主要由人为强迫引起。这种由两步完成的归因称之为联合归因^[26]。通过气候模型的归因研究提高了人们对变化原因的认知。Peterson 等^[27]采用统计方法综合研究 1936—1999 年期间 6 个欧亚最大河流流入北冰洋的实测的流量、气温以及北大西洋涛动指数 (NAO) 的变化趋势时指出,1936—1999 年这 6 个最大的欧亚河流流入北冰洋的流量增加了 7%,并归因于 NAO 的自然变化与气温升高的共同作用。随后 Hadley 中心^[28]利用他们的气候模型模拟了这 6 个欧亚最大河流在 20 世纪流入北冰洋流量的自然与人为强迫分量。其结果表明,如果只考虑自然强迫,则模型的模拟结果没有明显的变化趋势,只有将自然与人为强迫的影响都考虑进去,模型才模拟出与观测相一致的流入北极的流量增加趋势;即人为的气候强迫是流量增加的主要原因。

在 IPCC 的支持下,很多气候模型中心针对 19 世纪末和 20 世纪完成了描写大气成分和太阳辐射变化等外强迫的“20C3M”气候模拟。外强迫不是通过模型来识别,而是通过估算辐射活跃的气体和气溶胶的历史变化来识别。即由工业化前强迫驱动的控制性试验 (“PICNTRL”) 和设定的未来强迫驱动的试验 (“SRESAIB”) 分离出气候的自然变异与变化。

Gedney 等^[29]用 Hadley 中心气候模型的陆面过程方案和优化的足迹统计方法 (optimal fingerprinting statistical techniques) 研究了气候变化变异、气溶胶浓度、大气 CO_2 浓度对植被蒸腾影响以及土地利用等 4 个因子对 20 世纪全球观测的径流变化贡献的份额。他用 20 世纪观测的气候数据集驱动陆地过程。陆面过程方案包含了 CO_2 浓度对叶面气孔阻抗的影响,土地利用变化由植被类型变化描写。利用 HadGCM1 气候模型的顺变气候模拟将气溶胶的影响加入到强迫数据中。结果得到:气候变化与 CO_2 对植被的影响有显著作用,Gedney 首次通过数值模拟给出了人为导致的大气 CO_2 浓度升高引起径流增加的试验证据。虽然在径流的模拟中,没有考虑农业灌溉耗水量以及流域对径流的调蓄作用,其结论也未得到实际观测的证实,但将检测与归因的物理模型与统计方法结合起来是有意义的尝试,值得借鉴。

用气候模型直接预测未来径流变化的可靠性取决于模型对当代径流的模拟精度,或者说,模型对降

水模拟的可信度。由于降水的时空变异性大,在相同的温室气体排放情景下,不同气候模型往往给出完全不同的降水分布。为了减少模型的不确定性,近年来水文气候学家采用了模型集合方法,即多次运行数个具有不同参数的 GCMs^[30],或者反复运行一个,但具有不同初始条件的 GCM^[31],最后将模拟结果集合成条件概率分布。

采用气候模型直接模拟径流^[32,33~35]的工作中,Milly^[34]用多种气候模型集合方法与径流变化的显著性检验技术结合,将径流变化趋势的检测、归因以及未来径流的预测统一起来。Milly 从“20C3M”的气候模型中,选择了误差最小的 12 个模型,对全球在 1900—1998 年期间,具有 28~99 年观测系列的 165 个流域的流量(它们由 663 个全球水文站选出)进行模型集合分析。利用一个线性水库模型,将气候模型模拟出的网格上的径流系列演进到流域出口,得到流域出口断面流量时间系列。考虑了最重要的人类活动——农业灌溉对流量的影响,计算了大流域的作物灌溉分水量。用模型集合和统计显著性检验技术模拟了 1900—1998 年的多年平均径流;1900—1970 年(气候变化不显著)和 1971—1998 年(人为气候强迫显著)两段时间年径流的变化;以及在一种给定的温室气体排放情景下,未来 50 年径流的变化。为了检验模型模拟结果的可信度,对多种模型集合平均值单个模型模拟值以及相应的观测值进行了对比。结果得到:

(1) 模型集合输出的年平均径流的均值与标准差一般是观测值的 1/2~2 倍。在非洲的大部、南美的北部和北美的西北部,集合均值偏大;美洲低纬的北部和南美的南部则偏小。虽然与观测比,流量的模型集合值存在较大的区域性差异,但从全球分布看,模拟结果与实况很接近。

(2) 由趋势的集合平均给出的水文气候变化分布,定量上类似于观测变化的分布。表明气候强迫已对 20 世纪 70 年代以来全球性径流的分布产生了影响,尤其在欧亚大陆北部和北美西北部,集合径流表现出很强的上升趋势,并与观测的径流变化趋势以及气候模型模拟的降水增加趋势完全一致。

(3) 预计 21 世纪 50 年代,全球流量空间分布与 20 世纪流量变化的分布基本一致,但变化幅度有所不同。在北美和欧亚的高纬度,参与模拟的所有气候模型都给出了径流增加,在 21 世纪 50 年代流量增加幅度为 10%~40%。这一结果与用多种气候模型模拟 21 世纪高纬度降水的集合平均大于模

型的标准差是一致的。在南美、中东、北美西部、地中海地区及南非等地径流均在减少,一般减少 10%~30%。自 20 世纪末至 21 世纪中期,流量增加的面积减少,流量减少的面积增加,全球尺度的干旱进一步扩展。

目前用气候模型直接模拟径流,尚只能限于大尺度流域。在降水的气候变化信噪比大的地区,模拟效果好。虽然与观测值比较,模拟值还存在地区差异。但采用多个气候模型集合分析与统计显著性检验技术相结合,有可能模拟并预测出气候强迫导致大尺度径流空间分布的变化。进而将强迫的水文气候变化,作为一个因子引入到水资源评价中。随着气候模型尤其是陆—气耦合的区域气候模型对降水模拟的改进,可以预见,径流变化的检测、归因和预测的趋同化模拟,已为期不远。这对于水资源管理、经济与生态评估,以及未来的发展规划将是一件十分重要的变革。

5 结 语

众多的研究表明 20 世纪 70 年代以来全球变暖的水文效应已经显现。气候变化使得长期以来建立在自然稳定气候条件下的流量变化趋势的检测分析受到挑战。

对流量变化趋势的气候变化影响检测,不仅对水资源管理和水利工程设计有重要的应用价值,而且有助于了解气候变化以何种方式、在何时、何地、已经或尚未对水文循环产生影响;无疑,这对改进气候模型的模拟与预测有着重要的科学价值。

现有的研究表明,统计方法是检验流量变化趋势显著性的有效工具。为了避免夸大趋势的显著性水平,在检测中,排除资料系列中的序列相关与水文变量间的交叉相关是十分必要的。完整的变化趋势检测研究,不能只限于描写径流系列的变化特性,还应给出其变化的原因。对于无人干扰的天然流域,径流变化只受气候的自然波动以及人类强迫的气候变化影响。对于人为干预调节的管理系统,除气候因素外,径流变化还受直接或间接的非气候因素影响。多因子统计相关分析有助于识别每个因子的贡献份额,但仅用统计方法很难区分出气候的自然变异与人为强迫变化对径流的影响。

直接用气候模型模拟和预测未来径流变化的可靠性取决于模型对当代降水模拟的可信度。由于降水的时空变异性大,在相同的温室气体排放情景下,不同气候模型往往给出完全不同的降水分布。气候

模型集合分析有可能在一定程度上减少模型的不确定性。近年发展起来的多个气候模型集合分析与统计显著性检验技术结合的方法,有可能模拟并预测出气候强迫导致大尺度径流空间分布的变化。随着气候模型尤其是区域气候模型对降水模拟的改进,可以预见,径流变化的检测,归因和预测的趋同化模拟,已为期不远。将温室气体外强迫导致的水文气候变化,作为一个因子引入到水资源评价中,对于水资源管理,经济与生态评估,以及未来的发展规划将是一件十分重要的变革。

参考文献(References):

- [1] IPCC 2007: Climate change. The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers[R]. 2007.
- [2] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R, et al. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 64-85.
- [3] Yue Chunfang, Xie Xinmin, et al. Analysis of impacts of intensive human activities on runoff generation and concentration of stem river Huangshui in Qinghai Province[J]. *Water Problem Forum*, 2003, 38: 35-38. [岳春芳, 谢新民, 等. 人类大规模活动对青海省湟水干流产生的影响分析[J]. 水问题论坛, 2003, 38: 35-38.]
- [4] Lins H F, Slack J R. Streamflow trends in the United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 227-230.
- [5] Cayan D R, Kammerdiener S A, Dettinger M D. Changes in the onset of spring in the western United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82: 399-415.
- [6] Hodgkins G A, Dudley R W, Huntingo T G. Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th Century[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1/4): 244-252.
- [7] Douglas E M, Vogel R M, Kroll C N. Trends in floods and low flows in the United States: Impacts of spatial correlation[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 240: 90-105.
- [8] Zhang X B, Harrey K D, Hogg W D, et al. Trends in Canadian streamflow[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 987-998.
- [9] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255: 107-122.
- [10] Vogel R, Zafirakou-Koulouris M A. Frequency of record-breaking floods in the United States[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1723-1731.
- [11] Milly P C D, Wetherald P T. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 514-517.
- [12] Labat D, Godderis Y, Probst J L, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(6): 631-642.
- [13] Mudelsee M, Borngen M, Tetzlaff G, et al. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe[J]. *Nature*, 2003, 425: 166-169.
- [14] Kundzewicz Z, Graczyk W D. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow[J]. *Hydrological Sciences Journal/ Journal des Sciences Hydrologiques*, 2005, 50(5): 797-810.
- [15] Legates D R, Lins H F, McCabe G J. Comments on "Evidence for global runoff increase related to climate warming" by Labat et al[J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 20(12): 1310-1315.
- [16] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effect of surface warming[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 117-130.
- [17] McCabe G J, Wolock D H. A step increase in streamflow in the conterminous United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 381-384.
- [18] Lammers R B, Shiklomanov A I, Vörösmarty C J, et al. Assessment of contemporary Arctic river runoff based on observational discharge records[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, 106(D4): 3321-3334.
- [19] Serreze M, Bromwich D, Clark M P, et al. Large scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 108.
- [20] Yang D Q, Kane D L. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107(D23): 4694-4703.
- [21] Cao J T, Qin Dahe, Kang Ersi, et al. River discharge changes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 5594-5600.
- [22] Ren L, Wang Meirong, Li Chunhong, et al. Impact of human activity on river runoff in the northern area of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 261: 204-217.
- [23] Xu Jiongxin. The water fluxes of the Yellow river to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 620-631.
- [24] Gillett N P, Weaver A J. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L18211, doi:10.1029/2004GL020876.
- [25] Root T L, Price K R. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [26] IPCC 2007: Climate Change. Impact, Adaptation and Vulnerability(Chapter 1)[R]. Cambridge, 2007.
- [27] Peterson B J, Holmes R M, McClelland J W, et al. Increasing river discharge to the arctic ocean[J]. *Science*, 2002, 298: 2171-2173.
- [28] Hadley Centre. Climate change, rivers and rainfall: DEFRA. Recent research on climate change science from the Hadley Centre[R]. 2005.
- [29] Gedney N, Cox P M, Betts R A, et al. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records[J]. *Nature*, 2006, 439(4504): 835-838.
- [30] Murphy J M, Sexton D M H, Barnett D N, et al. Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulation[J]. *Nature*, 2004, 430: 768-772.
- [31] Palmer T N, Raisanen J. Quantifying the risk of extreme seasonal

- precipitation events in a changing climate [J]. *Nature*, 2002, 415:512-514.
- [32] Manabe S, Milly P C D, Wetherald R. Simulated long term changes in river discharge and soil moisture due to global warming[J]. *Hydrological Science Journal*, 2004, 49(4):625-642.
- [33] Manabe S, Wetherald R, Milly P C D, *et al.* Century scale changes in water availability: CO₂ quadrupling experiment[J]. *Climate Change*, 2004, 64:59-76.
- [34] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. *Nature*, 2005, 415(9687):514-517.
- [35] Nohara D, Kitoh A, Hosaka M, *et al.* Impact of climate change on river runoff[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7:1 076-1 089.

The Advances in Studying Detection of Streamflow Trend Influenced by Climate Change

LIU Chun-zhen

(Water Resources Information Center, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: Detection of streamflow trend and water resources assessment based on the natural and stationary climatic condition have been challenged by global warming. Identifying and separating contribution of climate change in streamflow trend, facilitate not only in water management practice and water project construction, but also enable understanding where, when and by which way the impact of climate change on hydrological cycle becomes detectable or not yet.

The statistical test is a powerful tool for the detection of hydrological trend. It is necessary to consider both the serial correlation of the data series and the cross-correlation between the hydrological variables at different locations for correctly determining the significance level. A complete study of the detection of streamflow trend includes description of trend characteristics and its attribution as well.

For natural river basin fed by snow and glaciers melt, the streamflow trend is determined mainly by temperature variation, associated with natural climate variability and external forcing produced climate warming. For managed water systems, supplied by precipitation, streamflow trend is affected not only by climatic variables, but also by anthropogenic disturbances-direct and indirect factors. The methodology of statistical interrelation of multi-factors is helpful to determining contribution of each element in streamflow trend. However, by only relying on statistical method alone, it is hard to weigh the interaction among factors as well as to identify the impact of climatic variability and forced climate change on streamflow.

The reliability of simulation and projection on future streamflow with climate model directly is directly determined by the ability of the climate model to simulate precipitation of current time-horizon.

The ensemble mean from a subset of climate models could reduce uncertainties in precipitation and runoff simulations. Recently developed methodology of ensemble mean of multi-climate models combined with statistical analysis has been used to show the potential in simulation and projection of spatial pattern of macro-scale streamflow trend caused by forced climate change. In the course of improving climate model and regional climate models' simulation of precipitation in particular, it is anticipated that the detection, attribution and projection of streamflow alteration tend to be simulated in an identical way in the near future.

Key words: Climate change; Streamflow trend detection and attribution; Statistical and climatic models.