气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析

王国庆[1,2], 张建云[1,3], 刘九夫[1,3], 贺瑞敏[1,3]

(1.水利部应对气候变化研究中心, 210029, 南京; 2.黄河水利委员会, 450003, 郑州; 3. 南京水利科学研究院, 210029, 南京)

摘 要: 我国许多河流的径流量呈下降的趋势。在这些趋势变化中, 如何区分人类活动及气候变化的影响是当前流域水文和气候变化研究的热点和难点。简要介绍了气候变化和人类活动对河川径流影响定量评价中的关键问题, 以黄河中游三川河流域为例, 基于对天然径流过程的模拟, 采用流域水文模拟途径分析评估了气候变化和人类活动对该流域径流量的影响。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流变化; 聚类分析; SIMHYD 降水径流模型

Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff//Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, He Ruimin

Abstract: Recorded runoffs in many rivers in China have been decreasing. How to identify the quantitative effect of climate change and human activities on runoff is a hot topic, a difficulty problem as well. The key issues in assessment for the both factors impact on runoff were briefly introduced and discussed in the paper. Taking Sanchuan River in the middle Yellow River Basin as a case, the individual effect of climate change and human activities on runoff was analyzed with SIMHYD rainfall runoff model.

Key words: Climate change; human activities; runoff variation; cluster analysis; SIMHYD rainfall runoff model

中图分类号: P461+TV121 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-1123(2008)02-0055-04

当今世界, 人类的发展与进步始终面临着人口膨胀、资源短缺和环境恶化三大问题的严重挑战。这三大问题均与水资源有着密切的关系。我国以占全球约 6%的可更新水资源、9%的耕地, 支持了占全球 22%人口的温饱和经济发展。但是, 自 20 世纪 80 年代以来, 特别是近 10 多年, 我国的水资源问题日益突出。研究表明, 在我国各大江河中, 黄河、海河、珠江及闽江流域主要控制站实测径流量呈现显著减少趋势, 其中海河流域观台站实测径流量减少高达 78%; 尽管长江、淮河和松辽流域径流较多年均值变化不大, 但 90 年代频发洪水, 水文极端事件增加[1]。径流锐减、洪涝、干旱等自然灾害及其导致的有关社会事件已经引起了政府决策部门和公众的广泛关注。因此, 研究气候变化和人类活动对我国大江大河径流的影响, 对于提高气候变化影响认识、探讨流域综合开发利用、开展建设节水型社会及维持河流健康生命等都具有十分重大的意义。

河川径流是气候条件与流域下垫面综合作用的产物, 径流不仅受人类活动强度影响显著, 而且对气候变幅响应敏感; 现状的实测径流变化中同时包含了气候变化和人类活动的影响, 如何科学定量地界定二者对河川径流的影响不仅是环境变化影响研究领域中的科学问题, 也是目前水文科技工作者面临的难题。

一、影响流域水文变化的两大因素

流域水文变化是环境变化的结果, 环境变化主要指气候变化(或波动)和人类活动对流域下垫面等自然状况的改变两个方面。

河川径流源于降水, 气候条件的变化直接影响到河川径流的丰枯。政府间气候变化专业委员会 (IPCC)的系列报告表明, 在 20 世纪的 100 年中, 全球地面气温平均上升了 0.4℃~

收稿日期: 2007-12-06

作者简介: 王国庆(1971—), 博士, 高级工程师, 主要从事气候变化、流域水文模拟、环境变化影响评价及防汛业务管理等方面的研究。

基金项目: ①现代水利科技创新项目—全球气候变化对水利影响的预研究(XDS2008-01); ②江苏省博士后项目—黄河上游气候趋势诊断及对生态水文变量的影响(0701026C)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.8℃,根据不同的气候情景模拟估计未来100年中,全球平均温度将上升1.4℃~5.8℃[2-4]。当前,气候变化是最重要的环境问题之一,为应对未来的气候变化,近几十年来,由世界气象组织(WMO)、联合国环境规划署(UNEP)、国际水文科学协会(IAHS)等国际组织促进,先后开展并实施了世界气候影响研究计划(WCIP)、全球能量水循环试验(GEWEX)等项目的研究;20世纪90年代以来,在我国国家科委的支持下,在国家"八五""九五""十五"国家重大科技攻关项目中也先后设立了与气候变化及其影响相关的课题。目前,关于气候变化方面的研究主要采用流域水文模拟途径模拟不同气候情景下的水资源情势,其研究内容集中在水资源系统对气候变化的敏感性、脆弱性及适应对策方面的研究[5-7]。

人类活动通过改变流域下垫面而影响产汇流机制,进而对河川径流产生影响。目前,根据不同人类活动作用情况及流域尺度大小,分别采用相似降雨对比方法、相似流域对比试验方法、分项计算组合方法等途径分析人类活动对河川径流的影响[8-10]。①相似降雨对比方法应用的前提是研究流域有较长的实测水文气象资料,这样可通过对比分析相似降水条件下的水文变化揭示人类活动的影响。但其难点是不容易寻求包括降水量、降水强度及其空间分布均相似的降水条件。②相似流域对比试验方法在同一气候区内,平行选择相邻的试验流域,要求一个流域保持原状,而在另一个流域进行一定规模的人类活动,通过对比这两个流域内水文变量的差异,进而分析人类活动对流域水文的影响。该方法的弊端是只适用于小流域,并且试验成本过高。③分项计算组合方法是基于不同人类活动类型(造林、种草、梯田修建)对水文影响的试验成果,通过调查研究流域内人类活动强度(各种水土保持措施面积),叠加得到人类活动对径流量的影响。该方法的局限性在于将小区试验指标移用到中大尺度流域,必须解决尺度差异的影响。

河川径流变化是气候变化与人类活动多因素综合作用的结果,近些年来,一些学者通过还原人类活动活动影响期间的天然径流量,进而分析评价气候变化和人类活动对河川径流的影响,然而需要解决两个方面的关键问题:①如何界定人类活动影响时期,②天然径流还原的可信度如何。若这两个问题不能得到较好解决,对同一流域分析的结果可能差异很大,甚至结论相反。

本文系统阐述了定量分析气候变化和人类活动对河川径流影响的分析方法及其中的关键问题,并以黄河中游三川河流域为例,定量研究了河川径流变化的原因,最后对结论及相关研究进行了分析讨论。

二、分析方法

1. 天然水文序列阶段划分方法

由于人类活动对流域不同强度的扰动,水文序列将呈现阶段性或趋势性的变化;为在一定程度上消除由于降水变化对流域水文的影响,以年径流系数序列为研究对象,分析由于人类活动影响引起的流域水文变化的阶段性。常采用的分析方法有序列滑动平均法、有序聚类法等[11-12]。

受人类活动或气候变化显著影响后的水文序列在某种意义上异于原天然序列;在"类"的角度上,可将影响后的序列和原有序列(天然序列)视为两类,利用有序聚类分析法推估水文序列的可能显著干扰点,其实质就是推求最优分割点,使同类之间的离差平方和最小,而类与类之间的离差平方和相对较大。

一般地,若序列有两个明显的阶段性过程,则总离差平方和的时序变化呈现单谷底现象;若有两个以上的明显阶段性过程,则总离差平方和的时序变化则有两个以上的谷底,这样,可以根据谷底发生的时间划分序列变化的阶段。

2.流域水文模拟计算

概念性流域水文模型是20世纪中期发展起来用于水文预报、水资源评价等方面的有效工具,近些年来,基于物理过程简化的概念性流域水文模型也应用到环境变化的影响研究。一般根据流域的地理及气候条件,首先选取适宜的水文模型,利用天然时期的气象水文资料率定模型参数,然后保持模型参数不变,将人类活动作用时期的气象资料输入模型,进而得到人类活动影响期间的天然径流量。

SIMHYD模型是20世纪70年代提出的一个简单的集总式降水径流模型,该模型的突出优点是考虑了超渗和蓄满两种产流机制,并且参数较少,共有7个参数。在模型计算过程中,河川径流由地表径流、壤中流和地下径流3种成分组成。模型的输入包括三部分:逐时段降水量、流域蒸散发能力和实测径流量。流域蒸散发能力通常由实测的水面蒸发代替,实测流量用于参数的优化率定。目前,该模型已在美国、澳大利亚、中国等多个湿润、干旱流域中得到应用,显示出良好的区域适应性[13-14]。因此,选用该模型作为黄河中游天然河川径流还原的工具。在SIMHYD模型中,降水首先被地表植被截留,若剩余部分降水超过流域下渗能力,则超过部分形成地表径流,下渗水量分别转化为壤中流、补充地下水和土壤水。根据地下水储蓄量,按照线性水库出流理论计算基流,基于蓄满产流机制,同时考虑流域空间不均匀的影响,引入土壤含水量线性估算壤中流;最后,线性叠加地表径流、壤中流和基流,得到模拟的河川径流。

3. 气候变化和人类活动对径流影响分离方法

以流域天然时期的实测径流量

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作为基准值，则人类活动影响时期实测径流量与基准值之间的差值包括两部分，其一为人类活动影响部分，其二为气候变化影响部分。人类活动和气候变化对流域径流影响的分割方法如下：

$$\triangle W_T = W_{HR} - W_B \quad (1)$$

$$\triangle W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (2)$$

$$\triangle W_C = W_{HN} - W_B \quad (3)$$

$$\eta_T = \frac{\triangle W_C}{\triangle W_T} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_C = \frac{\triangle W_C}{\triangle W_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中，$\triangle W_T$ 为径流变化总量，$\triangle W_H$ 为人类活动对径流的影响量，$\triangle W_C$ 为气候变化对径流的影响量，W_B 为天然时期的径流量，W_{HR} 为人类活动影响时期的实测径流量，W_{HN} 为人类活动影响时期的天然径流量，η_T、η_C 分别为人类活动和气候变化对径流影响百分比。

三、个例研究

1. 黄河中游三川河流域自然概况

三川河是黄河中游河龙区间左岸的一级支流，发源于山西省方山县东北赤尖岭，流经方山、离石、中阳、柳林四县区，在柳林县石西乡上庄村注入黄河，全长 176.4km，平均比降为 42.9‰，流域面积 4161km²。三川河流域水系呈树枝状，主要支流有北川、东川和南川。后大成水文站是三川河流域的出口控制站，控制面积 4102 km²。

三川河流域处于大陆性季风气候区，多年平均降水量 521mm。降水年际变化较大且年内分配不均，最大年降水量约为最小年降水量的 2.2 倍，近 70%的降水集中在汛期 6—9 月份，并主要以大雨或暴雨形式出现。高强度暴雨是流域内径流产生的主要原因，后大成站多年平均年径流为 2.602×10^8m³，其中，汛期径流量约占年径流量的 60%以上。

三川河流域地处黄土丘陵沟壑区和土石山区，上游土石山区为天然林覆盖，植被较好，中下游黄土丘陵沟壑区植被稀疏。自 20 世纪 70 年代以来，三川河流域水利化程度提高显著，截止到 1999 年，流域内共修建中小型水库 6 座，总库容达到 3470 万 m³，修建骨干工程 44 座，总控制面积 796km²；淤地坝 1950 座，谷坊 521 道，水窖 11667 眼；修建梯田 37137hm²，造林 75891hm²，种草 1810hm²，淤成坝地 4544hm²。治理面积约占流域面积的 28.7%。

2.天然时期的确定及模型率定

采用有序聚类的方法计算三川河流域年径流系数的离差平方和变化过程。结果表明年径流系数的离差平方和变化过程呈现单谷变化，因此，判定谷底对应年份 1971 年是流域天然时期与非天然时期的分界点。

利用 1971 年之前的水文气象资料率定并检验模型，为消除模型中间状态变量初始值人为给定的影响，资料的前 3 年作为预热期，选用 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 R2 和模拟总量相对误差 Re 为目标函数，对 SIMHYD 模型进行率定。图 1 给出了三川河流域后大成站的实测与模拟月径流量过程。

由图 1 可以看出，实测与模拟径流过程较为吻合，统计结果表明，计算年径流量与实测值非常接近，最大相对误差不超过 15%，率定期(1958—1966)和检验期(1967—1969)的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数分别为 87.4%和 79.6%，平均相对误差也均小于 3%。由此说明，应用该模型计算人类活动影响期间的天然径流量具有较高的可信度。

3. 气候变化和人类活动对三川河流域径流量的影响

根据三川河流域天然时期的模型参数和 1970 年以后的气象资料，计算该流域人类活动影响期间的天然径流量。天然时期的径流量作为基准(即背景值)，分析人类活动和气候变化对后期径流量的影响；表 1 给出

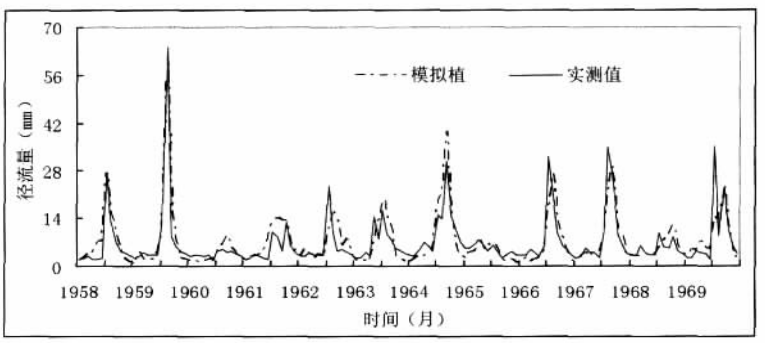

图 1 后大成站实测与模拟径流量过程

表 1 环境变化对三川河流域径流量的影响

起止年份	实测值 (mm)	计算值 (mm)	总减少量 (mm)	气候因素		人类因素	
					(%)	(mm)	(%)
背景值	83.28	83.31					
1970—1979	60.34	77.82	22.94	5.49	23.9	17.45	76.1
1980—1989	46.63	74.76	36.66	8.55	23.3	28.11	76.7
1990—2000	39.38	66.71	43.90	16.60	37.8	27.30	62.2
1970—2000	48.48	72.89	34.80	10.42	29.9	24.38	70.1

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了环境变化对三川河流域径流量影响的分析结果。

由表1可以看出:①三川河流域实测径流量具有明显的递减趋势,其中,1990—2002年期间的年均径流量不到基准值的50%。②不同时期人类活动和气候变化对径流的影响程度不同,气候因素对径流量的影响程度呈增加趋势,例如,在20世纪90年代,受气候变化影响的径流减少量(16.6mm)基本是70年代相应减少量(5.49mm)的3倍。③人类活动对径流的绝对影响量也基本呈增加趋势,在20世纪70年代,人类活动影响的径流减少量为17.45mm,而在80、90年代,相应的绝对影响量均在28mm左右。④平均而言,人类活动和气候变化对径流的影响量约占径流总减少量的29.9%和70.1%,人类活动是三川河流域近些年径流减少的主要原因。

气候变化和人类活动是流域水文变化的主要动因,人类活动对黄河径流的影响约占近年径流减少总量的60%[16]。但对一些典型流域的分析结果表明,不同流域气候变化对径流的影响程度是不一样的,人类活动的影响占黄河中游渭河、汾河和沁河近年径流减少总量的50%以上,而气候变化对孤山川、清涧河和伊洛河等流域的影响相对显著,也超过径流减少总量的50%[17-18]。究其原因,主要由于不同流域内的人类活动规模不同,同时气候变化的幅度也存在差异,从而导致其对径流变化影响所占的比重存在差异。

四、结论

客观定量评价气候变化和人类活动在这些江河和全国范围内的水资源变化中的作用不仅是我国水资源评价的基础工作,而且有助于未来我国水资源的合理开发和可持续利用,对于适应气候变化的对策研究同样具有重要意义。本文介绍了气候变化和人类活动对河川径流影响评价方法,指出河川径流变化成因分析的关键是流域天然时期的确定和人类活动影响期间"天然径流量"的还原。以黄河中游的三川河流域为例,采用有序聚类分析方法推估了人类活动对流域水文序列显著干扰的转折起始年份,选出了流域的"天然时期",利用SIMHYD降水径流模型还原了人类活动影响期间的天然径流量,进而定量评价了人类活动和气候变化对三川河流域径流的影响,就1971—1999年的平均状况而言,人类活动是三川河流域径流减少的主要因素,气候变化对径流的影响量约占径流减少总量的30%。

本文所指的人类活动是一个相对广义的概念,包括引起流域下垫面显著改变的水土保持、水利工程等对水产生直接影响的人类有目的的水利活动和对水产生间接影响的如经济社会结构调整等非水利目的的人类活动。在本研究中,将这种广义的人类活动和气候变化视为相互独立的变量,定量分离评估二者对河川径流的影响。由于人类活动包含了多个方面,如何进一步区别不同人类活动对径流变化的作用仍然是目前水文学者面临的一个难题。■

参考文献:

[1] 张建云,章四龙,王金星,等.近50a来我国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2).
[2] IPCC. Climate Change and Impact 1990 [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
[3] IPCC. Climate Change 1995, Impacts, Adaptation, and Mitigation [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
[4] IPCC. Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
[5] 水利部水利信息中心. "八五"国家科技攻关计划(85-913-03-03)"气候变化对中国水文水资源影响及适应对策研究"[R]. 1996.
[6] 水利部水利信息中心. 国家"九五"重中之重科技攻关专题(96-908-03-02)"气候异常对我国水资源及水分循环影响评估模型研究"[R]. 2000.
[7] 水利部水利信息中心. 国家"十五"科技攻关专题(2001-BA611B-02-04)"气候变化对我国淡水资源的阈值影响及综合评价"[R]. 2003.
[8] 张胜利,李倬,赵文林. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
[9] 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.
[10] 陈江南,王云璋,徐建华,等. 水土保持生态建设对黄河水资源、泥沙影响评价方法研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
[11] 王国庆,贾西安. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析[J]. 西北水资源与水工程,2001,(3):13-15
[12] 丁晶. 随机水文学 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1988
[13] Chiew F H S, Peel M C, Western A W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In: Mathematical Models of Watershed Hydrology [M]. Littleton: Water Resources Publication, 2002.
[14] 王国庆,荆新爱,李皓冰. 流域水文模型在清涧河流域的比较[J]. 灌溉排水学报,2005,17(3).
[15] 王国庆,陈江南,李皓冰,等. 黄土高原孤山川流域水沙变化研究综述[J],西北水资源与水工程,2003,3.
[16] 刘昌明,陈效国.黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[M].北京:科学出版社,2004.
[17] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究 [M]. 山东科学出版社,2007.
[18] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河流域径流情势的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(6).

责任编辑 李建章

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net