

黄土高原昕水河流域径流变化归因定量分析

王国庆^{1,2}, 张建云^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}, 金君良^{1,2},
刘翠善^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}, 严小林^{1,2}, 宋晓猛^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029)

摘要:近几十年来,黄土高原昕水河流域实测径流量减少显著,对区域生态环境及用水安全造成严重影响。采用水文模拟途径,还原了天然径流量系列,在此基础上,定量评估了气候要素和水土保持等人类活动对河川径流量的影响。结果表明,考虑融雪过程的水量平衡模型对昕水河流域径流量具有较好的模拟效果,率定期及检验期 Nash-Sutcliffe 确定性系数均在 70% 以上,模拟的相对误差也小于 3%。径流量系列自 1966 年发生了较为明显的变化,1966—2010 年流域径流量深较前期减少 29.2 mm,其中,包括流域水土保持措施的人类活动对河川径流量变化的影响约站 49.3%,气候要素变化的影响略微偏高,约占 50.7%。因此,在未来流域治理及生态文明建设中,气候要素变化对流域水文水资源的影响必须引起足够的重视。

关键词:昕水河流域; 径流变化; 水文模拟; 归因识别

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0295-04

Attribution of Runoff Change for the Xinshui River Basin in the Loess Plateau of China

WANG Guo-qing^{1,2}, ZHANG Jian-yun^{1,2}, HE Rui-min^{1,2}, JIN Jun-liang^{1,2},
LIU Cui-shan^{1,2}, BAO Zhen-xin^{1,2}, YAN Xiao-lin^{1,2}, SONG Xiao-meng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The recorded runoff of the Xinshui River has experienced significant declining trend during the past decades, which has taken a huge challenge to local ecological environment restoration and utilization of water resources. Runoff series was naturalized by using hydrological simulation approach, impacts of climate change and human activities, including soil and water conservation measures implementation, were then analyzed. Results show that SWBM model performs well for monthly discharge simulation, Nash-Sutcliffe coefficients for calibration and verification periods are both above 70%, while relative errors are less than 5%. The recorded abrupt change of runoff series has occurred since 1966. Runoff depth over the basin in 1966—2010 reduced by 29.2 mm as compared to that in previous period, in which human activities contributed 49.3% of total runoff reduction, while climate change contributed to 50.7%. Therefore, impact of climate change on hydrology and water resources of the Xinshui River basin should be attracted sufficient attention with respect to soil and water conservation and ecological civilization construction.

Key words: Xinshuihe River basin; runoff change; hydrological simulation; attribution identification

河川径流是受气候变化和人类活动影响最直接和最重要的领域^[1],也是支撑区域经济发展和生态环境改善的重要因素。科学认识江河径流变化成因,对

实现变化环境下流域水资源的有效管理和可持续开发利用等方面具有重要意义。黄土高原气候干旱,由于气候要素变化及水土保持建设等人类活动的影响,

位于黄土高原腹地的昕水河流域径流量发生了显著性变化,对区域工农业用水安全及生态环境造成严重影响。科学定量评估气候变化和人类活动对该流域河川径流变化的影响,是昕水河流域治理开发及水资源管理的重要基础工作。王国庆等基于近 60 a 的实测资料,分析了昕水河流域径流演变规律,并初步定性揭示了河川径流变化对环境变化的响应机制^[2]。基于这一分析成果,本文采用一个考虑融雪过程的水量平衡模型,模拟了昕水河流域的天然径流量过程,并定量评估分析不同环境要素变化(人类活动和气候要素变化)对流域径流量变化的影响。

1 资料与方法

1.1 流域概况

昕水河位于山西省境内,是黄河中游左岸的一级支流,流域面积 4 326 km²,干流长度 135 km。是山西省以及黄河流域生态建设的重点流域。

大宁是昕水河流域最下游控制站。收集整理了大宁站 1955—2010 年实测逐月径流量资料以及流域内及邻近周边 10 个雨量站 1955 年以来的长系列降水观测资料。昕水河流域多年平均降水量约为 510 mm,具有年际变化较大且年内分配不均的特点,最大年降水量约为最小年降水量的 2.2 倍。多年平均气温约为 9.0℃;6—8 月份气温较高,一般均在 20℃ 以上,12 月至次年 2 月份,气温一直在 0℃ 以下。大宁站多年平均年径流为 1.48 亿 m³,其中:汛期径流量约占年径流量的 62% 左右^[2]。

1.2 考虑融雪过程的水量平衡模型

模拟流域的天然径流量过程是径流变化归因识别的重要关键^[3-4]。已有研究认为主汛期高强度暴雨下的超渗产流是昕水河流域 7、8 月份洪水及汛期水量的主要原因,3 月份气温升高引起的积雪消融是 3 月份凌峰产生的重要组成^[2]。因此,选用的流域水文模型不仅能够模拟半干旱地区的超渗产流过程,而且还必须适当考虑融雪过程及其气温变化对水文过程的影响。

根据物质守恒原理,综合考虑超渗与蓄满产流的特点,以及融雪产流的特征,王国庆等建立并逐步完善了月水量平衡模型^[5]。通过与其它模型的应用对比,该模型具有与其它复杂模型相当的模拟精度^[6],因此,本研究中选用该模型分析流域水文对气候变化的响应。

考虑融雪过程的水量平衡模型要求输入逐月面平均降水量、气温和蒸发能力(一般由 E601 实测的水面蒸发代替)资料,将河川径流划分为地面径流、地

下径流和融雪径流三种径流成分,不考虑地面径流的汇流过程,认为地下径流的出流在时间上滞后一个计算时段^[5]。

根据气温变化,对降水进行了雨、雪划分,降雨形成地面径流,降雪首先累积,然后融化形成融雪径流。部分降雨和融雪补充地下蓄水量;地下蓄水量一方面形成地下径流出流,同时以蒸散发的形式损失。假定地面径流是土壤含水量与时段降水量的线性函数,地下径流按地下蓄水量线性水库出流理论计算,融雪径流量是气温的指数函数,同时正比于流域内的积雪量。模型共有 4 个参数需要率定,这些参数的物理意义相对明确,分别为:土壤蓄水容量,表征了土壤层的最大蓄水能力;地面径流系数,是一个无量纲参数,取值大小与下垫面状况和植被覆盖度有关,植被较好的地区,取值相对较小;地下径流系数,与土壤类型密切相关;融雪径流系数,该参数反映了融雪产流的特性^[5]。

选用 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 R^2 和模拟总量相对误差 R_e 为目标函数进行参数率定,若 R_e 越接近于 0,同时 R^2 越接近于 1,说明模拟效果越好^[7]。采用人工交互对话或 Rosenbrock 等优化方法,进行水文模型参数优化。

2 结果与分析

2.1 昕水河流域天然径流量模拟

为防治水土流失,自 20 世纪 70 年代以来,昕水河流域水利化程度提高显著,流域内的这些人类活动在一定程度上改变了下垫面条件,使流域的水文状况发生了一定的变化。已有分析结果表明,大宁站实测流量系列以 1965、1980 年为分界点呈现三个阶段变化特征^[2]。1965 年以前由于人类活动较少,因此可将该时期作为天然时期进行模型参数的率定,率定出的模型参数可以反映天然径流量的变化特性。

以 1955 年作为模型预热期,利用 1956—1960 年的资料率定模型参数,将 1961—1965 年作为验证期检验模型的模拟效果。图 1 给出了 1955—1965 年大宁站实测与模拟的逐月流量过程。由图 1 可以看出,1956—1965 年期间实测径流量与模拟径流量总体较为吻合。统计结果表明,率定期和检验期模拟整体误差分别为 0.5% 和 2.7%,Nash-Sutcliffe 模型效率系数分别为 76.2% 和 71.3%,说明模型对昕水河流域具有很好的月径流模拟效果。

保持模型参数不变,将 1966—2008 年期间的气候要素资料输入模型模拟该时期的天然径流量过程,图 2 给出了大宁站 1955—2010 年实测与模拟的年径

流量过程。由图 2 可以看出,模型对前期(1955—1965 年)的年流量过程模拟效果较好,后期特别是 1979 年以后的模拟径流量明显高于实测径流量,由此说明,特别在 1979 年以来,人类活动对河川径流量的影响更为明显。

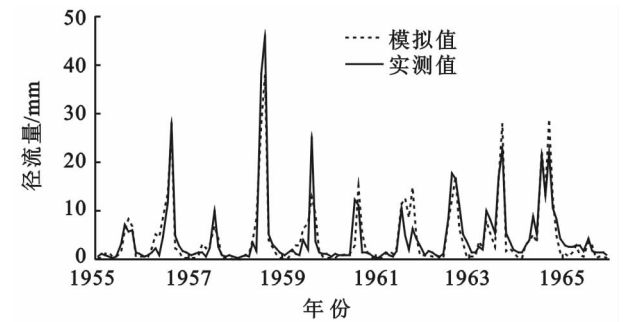


图 1 昕水河大宁站 1955—1965 年实测与模拟逐月径流量

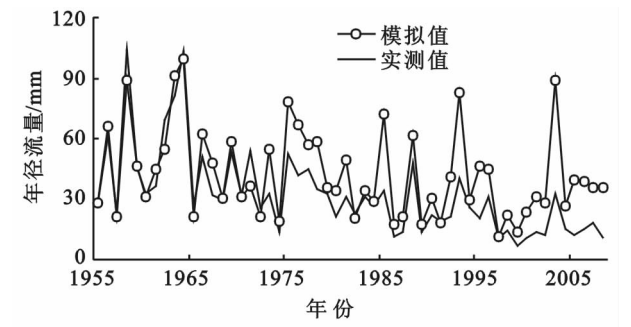


图 2 昕水河大宁站 1955—2010 年
实测与模拟的年径流量

2.2 昕水河流域径流量变化归因定量评估

对大宁站 1955—2008 年的实测年径流量序列诊断结果表明,大宁站实测流量变化具有较为明显的阶段性,总体可划分为三个阶段,1955—1965 年、1966—1979 年和 1980—2010 年。已有研究认为,气候要素变化和人类活动是昕水河流域河川径流量锐减的主要驱动因素^[2]。统计结果表明,截止到 2000 年,昕水河流域内共修建中小型水库 2 座,总库容达

到 710 万 m³,修建骨干工程 12 座,总控制面积 61 km²;淤地坝 885 座,谷坊 3 867 道,水窖 19 554 眼;修建梯田 17 951 hm²,造乔木林 23 793 hm²,种草 3 332 hm²,淤成坝地 1 794 ha。1966—1979 年和 1980—2010 年的年降水量分别为 536.8 mm 和 482.0 mm,较 1955—1965 年分别减少 41.5 mm 和 96.3 mm;后两个阶段气温升高幅度也较为显著,分别较 1955—1965 年升高 0.85℃和 1.76℃。

保持水文模型参数还原天然径流量具有成因上的一致性,径流量的变化则主要反映了气候要素波动或变化的影响,而实测径流量与模拟的天然径流量之间的差异则主要体现了人类活动对流域水文的影响。因此,以 1951—1965 年的实测径流量(55.58 mm)作为基准,1965 年之后不同时期实测径流量与基准值的差异则包含了两部分,一部分是由于气候要素包含影响造成的,另外一部分则是由人类活动影响造成的。表 1 给出了各阶段径流量变化的归因分析结果。

由表 1 可以看出:(1) 基准期 1951—1965 年天然年径流量约为 55.58 mm,其后各阶段的模拟的天然径流量均较基准期有不同程度的减少,说明气候要素变化引起了径流量的减少,1966—1979 年和 1980—2008 年由于气候变化引起的径流量减少量分别为 7.25 mm 和 18.43 mm,较基准期分别减少了 13.1%和 33.2%。(2) 1965 年以来的实测径流量较基准期偏少程度也较为明显,1966 年以来的两个时期内由于人类活动引起的径流量减少量分别为 10.46 mm 和 16.25 mm,占基准期径流量的 18.8%和 29.2%。(3) 人类活动和气候变化对河川径流量的影响均呈现增加趋势,相比而言,1980 年以来由于气候变化引起的径流量减少更多,就 1966—2010 年期间而言,人类活动和气候变化对径流量的影响基本相当,分别占径流量总减少量的 49.3%和 50.7%。

表 1 气候变化和人类活动对大宁站径流量的影响

时期	实测值/ mm	模拟值/ mm	总减少量/ mm	气候变化		人类活动	
				减少量/mm	百分比/%	减少量/mm	百分比/%
1955—1965	55.58						
1966—1979	37.87	48.33	17.71	7.25	40.9	10.46	59.1
1980—2010	20.89	37.15	34.69	18.43	53.1	16.25	46.9
1966—2010	26.42	40.79	29.16	14.79	50.7	14.37	49.3

尽管人类活动和气候变化对 1966—2010 年河川径流量的影响基本相当,但在季节分配上却存在明显的差异(图 3)。由图 3 可以看出,人类活动在 6 月份对河川径流量的影响具有增加趋势,在其他月份均为减少趋势,其中,在 7—12 月份影响较大,特别是 8 月份,该月平均径流量较基准期减少 6.74 mm。气候变

化对大宁站各月径流量的影响均为减少趋势,其中,对 5—10 月份径流量的影响更大,特别是 7—9 月份,该时期平均月径流量较基准期减少 2.80 mm 左右。

值得注意的是,尽管水土保持措施在一定程度上消减了河川径流量,但拦蓄的降水有效改善了区域生态环境,具有较好的生态环境效益。然而,以气温升

高、降水减少为特征的气候要素变化却是毫无疑问地减少了流域的可利用水资源量,进一步加剧了区域水资源供需矛盾。

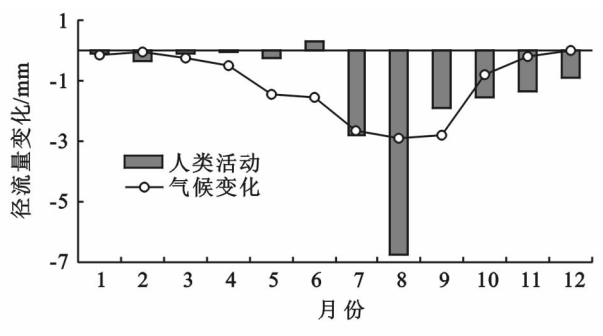


图3 人类活动和气候变化对大宁站
1966—2010年径流量影响的季节分配

3 结论

考虑融雪过程的水量平衡模型对昕水河流域天然径流量具有较好的模拟模拟效果,率定期和检验期的模拟相对误差小于3%,Nash-Sutcliffe模型效率系数均大于70%,可以采用该模型还原强人类活动影响时期的天然径流量过程。

大宁站实测径流量系列在1966年发生了较为明显的变化,1966—2010年流域径流量深较前期减少29.2 mm,人类活动和气候要素变化对河川径流量变化的影响各占50%左右,相比而言,气候要素变化的影响略微偏高。在季节分配上。人类活动对后半年(7—12月份)河川径流量的影响较大,而气候要素变化对径流量的影响主要发生在4—10月份。

昕水河流域水资源短缺,以全球气候变暖为主要

特征的气候变化将对区域水资源产生重大影响,并可能进一步加剧水资源利用压力。因此,科学评估未来气候变化对昕水河流域水资源的影响,探求有效的适应对策,将是昕水河流域实现水资源可持续利用和有效管理的重要工作和研究方向。

参考文献:

- [1] Bates B, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. Climate change and water [M]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- [2] 王国庆,张建云,李雪梅,等. 黄土高原昕水河流域径流变化及其对环境要素的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):192-196.
- [3] 贺瑞敏,王国庆,张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. 水土保持研究 2007, 14(2): 297-298.
- [4] Wang G Q, Zhang J Y, Pagano T C, et al. Identifying contributions of climate change and human activity to changes in runoff using Epoch detection and hydrologic simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 18(11):1385-1392.
- [5] 王国庆,李健. 气候异常对黄河中游水资源影响评价网格化水文模型及其应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(6): 22-26.
- [6] Wang G, Zhang J, He R. Comparison of hydrological models in the middle reach of the Yellow River [J]. IAHS-AISH Publication, 2007:158-163.
- [7] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.