

环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究

王国庆^{1,2}, 张建云³, 贺瑞敏¹

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利委员会, 河南 郑州 450003; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 20 世纪 70 年代后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研究的热点和难点。提出了区分人类活动和气候变化影响的分析思路以及定量计算方法。介绍了 SIMHYD 概念性降水径流模型, 并应用黄河中游汾河流域“天然”时期的水文、气象资料率定了模型参数, 通过水文模拟还原了人类活动影响期间的天然径流量, 进而分析了汾河流域径流情势的变化原因。结果表明: SIMHYD 降水径流模型对汾河流域天然月径流过程具有良好的模拟效果; 就 1970 - 1999 年的平均状况而言, 气候因素和人类活动对径流的影响量分别占径流减少总量的 35.9% 和 64.1%, 人类活动是汾河流域径流减少的主要因素。

关键词: 汾河流域; 水文模拟; 气候变化; 水土保持; 径流变化

中图分类号: P333.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)06-0853-06

由于大气中二氧化碳等温室气体浓度的增加, 改变了气候系统中的能量平衡, 进而引起全球性的气候变化。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, 全球地面空气温度平均上升了 0.4 ~ 0.8 , 在未来 100 年中, 全球平均气温将每 10 年升高 0.2 , 降水也会出现明显的变化^[1]。人类生产活动的发展越来越突出地改变着自然环境, 气候变化和区域下垫面的变化均将对流域水文循环产生一定的影响, 致使人们在水文计算、流域规划、水资源评价等各个方面都不可避免地考虑这种影响。目前, 环境变化对水文情势的影响已成为国内外研究和关注的重要课题^[1~3]。

由于黄河中游地区大规模的水利水保工程建设和流域气候干旱化趋势性的影响, 20 世纪 90 年代以来, 黄土高原主要支流的径流量较五、六十年代显著减少^[4,5]。科学定量分析黄河流域径流量变化原因不仅是黄河流域水资源评价的重要内容, 而且也是流域水资源科学管理与合理开发利用的基础。

随着流域水文模拟技术的快速发展, 流域水文模型已较广泛地应用于洪水和泥沙预报、水质控制和流域治理的减水减沙影响评价等方面, 成为流域科学管理的有效手段^[6~9]。本文基于对黄河中游汾河流域天然水文过程模拟, 研究了气候变化和人类活动对该流域径流情势的影响。

1 分析方法

流域水文过程的变化是环境变化的结果, 环境变化主要指气候变化(波动)和流域内的人类活动。分离评估气候变化和人类活动对流域水文影响首先假定人类活动和气候变化是影响径流变化的两个相互独立的因子, 评价的关键包括两个方面, 其一为基准时期的确定, 其二是人类活动影响期间天然径流量的还原。在以往研究中, 通常将人类活动对流域显著影响之前的时期作为基准期, 人类活动影响期间天然径流量的还原则是通过分项计算一些主要人类活动的用水量, 然后与实测河川径流量叠加得到^[4,5]。然而, 这种分项还原方法不仅需要大量具体的人类活动资料及相应的影响定额, 而且难以全面考虑所有人类活动对流域水文过程的可能扰动, 因此, 不仅这种方法还原结果的可靠性难以保证, 而且对于多数流域来说, 大量的资料需求也很难满足。近些年

收稿日期: 2006-07-11; 修订日期: 2006-09-04

基金项目: 黄河水利委员会“十五”重点科技专项(2003H07)和国家“十五”科技攻关(2004-BA611B-02-04)联合资助项目

作者简介: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事流域水文模拟、环境变化影响等研究。

E-mail: gqwang0258@yahoo.com.cn

来, 流域水文模拟技术的快速发展, 使得人类活动影响期间的天然径流量还原成为可能, 若研究流域在人类活动显著影响前具有一定长度的实测天然水文气象资料, 则利用这些资料率定的水文模型参数基本上可反映流域的天然产流状况。然后, 保持模型参数不变, 将人类活动影响期间的气候要素输入水文模型, 进而可计算延展相应时期的天然径流量。通过对比人类活动影响期间的实测径流量、还原的天然径流量和基准时期的实测天然径流量, 进而可分离评判人类活动影响期间各因素对流域径流的影响。采用水文模拟途径研究气候变化和人类活动对流域水文的影响具有以下两个优点: 还原的人类活动影响期间的天然径流量与基准时期的实测天然径流量具有成因上的一致性, 不需要大量详细而具体的人类活动资料。采用该方法的关键是合适的水文模型的选取。

首先根据流域内人类活动状况, 将水文气象序列按时序划分为“天然阶段”和“人类活动影响阶段”, 将“天然阶段”作为基准期, 则气候变化指人类活动影响期间的气候要素较基准期的变化。以流域“天然时段”的实测径流量作为基准值, 则人类活动影响时期的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, 该部分可以由人类活动影响期间还原的天然径流量与相应时期的实测径流量计算得到; 其二为气候变化影响部分, 该部分为人类活动影响期间还原的天然径流量与基准值之间的差值。人类活动和气候变化对流域径流影响的具体分割方法表述如下:

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

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

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

$$H = \frac{W_H}{W_T} \times 100\% \quad (4)$$

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

式中 W_T 为径流变化总量; W_H 为人类活动对径流的影响量; W_C 为气候变化对径流的影响量; W_B 为天然时期的实测径流量; 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, 由率定的天然时期的模型参数和建立的水文模型计算得出。 H 、 C 分别为人类活动和气候变化对径流影响百分比。

2 SIMHYD 降水径流模型

SIMHYD 模型是 20 世纪 70 年代提出的一个简单的集总式概念性降水径流模型^[10,11], 该模型的突出优点是考虑了超渗和蓄满 2 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 3 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^[10~12], 显示出良好的区域适应性。因此, 选用该模型作为本研究的分析工具。模型结构框图如图 1 所示, 计算过程及原理简介如下:

模型计算过程: 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、补充土壤水和地下水。根据地下水储量, 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。

蒸发损失计算: 蒸发损失包括 2 部分: 地表植被截留水分蒸发和土壤水分蒸发, 其中, 植被截留水分按蒸散发能力的速率大小损耗, 而土壤水蒸发则根据土壤含水量和剩余蒸散发能力计算; 计算公式为

$$ET1 = \min\{INS, PET\} \quad (6)$$

$$ET = \min\left\{10 \times \frac{SMS}{SMSC}, POT\right\} \quad (7)$$

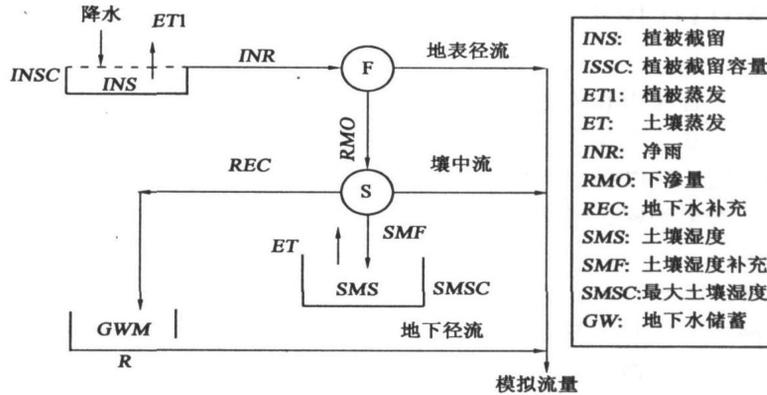


图 1 SIMHYD 降水径流模型的结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of SIMHYD rainfall runoff model

$$POT = PET - ETI \tag{8}$$

式中 PET 为流域蒸发能力，一般由实测水面蒸发替代； POT 为剩余蒸发能力。

土壤下渗量计算：下渗计算是整个模型计算的核心，假定下渗率与土壤含水量之间具有负幂指数关系，土壤下渗量计算公式为

$$RMO = \min\{ INF, INR \} \tag{9}$$

$$INF = COEFF \times \exp\left\{ -SQ \times \frac{SMS}{SMSC} \right\} \tag{10}$$

$$INR = \max\{ (RAIN + INS - INSC), 0 \} \tag{11}$$

式中 INF 为下渗率； $COEFF$ 为最大下渗损失，mm，与土壤类型有关； SQ 为下渗损失指数； $RAIN$ 为时段降水。

径流的计算：模型将河川径流划分为地表径流、壤中流和基流，计算公式分别为

$$IRUN = INR - RMO \tag{12}$$

$$SRUN = SUB \times \frac{SMS}{SMSC} \times RMO \tag{13}$$

$$BAS = K \times GW \tag{14}$$

$$RUNOFF = IRUN + SRUN + BAS \tag{15}$$

式中 $IRUN$ 为地表径流； $SRUN$ 为壤中流； BAS 为基流； $RUNOFF$ 为模拟的径流量； SUB 为壤中流出流系数； K 为地下径流系数。

3 种水分储量的计算：模型中包括 3 种水分储量，分别为：地表植被水分储量、土壤湿度和地下水储量；其中土壤湿度是最为重要的中间状态变量，在一定程度上决定了壤中流、地下水补充的计算，根据水平衡原理分别计算三种水分储量。土壤湿度补充量和地下水储量补充量计算公式为

$$REC = CRAK \times \frac{SMS}{SMSC} \times (RMO - SRUN) \tag{16}$$

$$SMF = RMO - SRUN - REC \tag{17}$$

式中 $CRAK$ 为地下水补充系数。

表 1 SIMHYD 模型参数缺省值

模型参数：SIMHYD 模型共有 7 个模型参数，每个模型参数均具有一定的物理解释，表 1 给出了参数的缺省值及其变化范围。

Table 1 Default parameters values for the SIMHYD model

参 数	K	SUB	$CRAK$	SQ	$COEFF$	$SMSC$	$INSC$
缺省值	0.3	0.1	0.2	3	200	320	1.5
上 限	1.0	1.0	1.0	10	400	500	5.0
下 限	0	0	0	0	0	1	0

3 个例研究——SIMHYD 模型在汾河流域的应用

3.1 汾河流域自然概况

汾河发源于山西省境内的管涔山和天池两处，是黄河中游的一条较大支流，流域面积 39471 km²，河长 694 km，干流由北向南纵贯于云中山、吕梁山之间的谷地，经山西省的河津流入黄河。汾河左右岸水系基本对称，成羽毛状。大于 100 km² 的支流有 47 条，其中，超过 1000 km² 的支流有 7 条。

兰村以上为上游，区域沟壑稠密，河沟比降大，除高山有较好的植被外，其余地区水土流失严重。兰村至义棠为中游，该河段长 161 km，山高沟深，受地形条件限制，河道不稳定，泄洪能力小，洪水灾害频繁。义棠以下为下游，河道比降平缓，地势开阔，具有良好的农业灌溉能力。

汾河流域地处黄土丘陵沟壑区和土石山区，在 1970 年之前，汾河流域水土保持措施和水利工程相对较少，流域在该时期基本处于人类活动轻微的“天然状态”。20 世纪 70 年代以来，流域内的人类活动强度加剧，水利化程度显著提高，截止到 1999 年，流域内共修建大型水库 2 座，总库容为 7.32 亿 m³，中小型水库 232 座，总库容达到 7.13 亿 m³。修建梯田 2715.4 km²，造林 3304.2 km²，种草 446.6 km²，淤成坝地 434.6 km²，治理面积约占流域面积的 35.9%^[5]。

汾河流域处于大陆性季风气候区，据 1955 - 1999 年资料统计，多年平均降水量约 492.5 mm，降水量具有递减趋势。在 1970 年之前的基准期，平均年降水量为 528.8 mm，20 世纪 70 年代的年降水量较基准期减少 8.8%，而在 80、90 年代，年降水量较基准期偏少超过 10%，分别为 13.6% 和 12.3%。

3.2 汾河流域“天然”径流模拟

采用 1955 - 1969 年实测资料率定并检验模型，为消除模型中间状态变量初始值的人为影响，前 3 年资料作为预热期，利用 1958 - 1966 年的资料率定模型，后 3 年资料用来检验模型。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^[13]。图 2 给出了汾河河津站逐月实测与模拟径流过程。

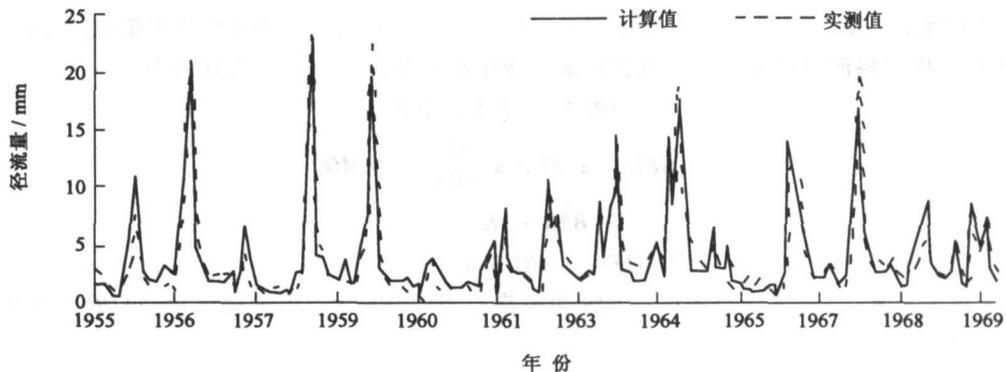


图 2 汾河流域河津站逐月实测与模拟径流量过程

Fig. 2 Monthly recorded and simulated discharge at Hejin hydrometric station of Fenhe River basin

由图 2 可以看出，实测与模拟径流过程较为吻合，统计结果表明，年径流量计算值与实测值非常接近，最大相对误差不超过 15%，率定期(1958 - 1966 年)和检验期(1967 - 1969 年)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，应用该模型还原计算人类活动影响期间的天然径流量具有较高的可信度。

4 气候变化和人类活动对汾河流域径流量的影响

根据汾河流域天然时期的模型参数和 1970 年以后的气象资料，计算还原人类活动影响期间的天然径流量。以天然时期(1955 - 1969 年)的径流量作为基准值，根据基准值、人类活动期间的实测径流量及相应时期还原的天然径流量，利用式(1)~式(5)分析人类活动影响期间气候变化和人类活动对径流量的影响。表 2 给出了各种

因素对汾河流域径流量影响的分析结果。

表2 气候变化和人类活动对汾河流域径流量的影响

Table 2 Impacts of climate change and human activities on runoff of Fenhe River basin

起止年份	实测径流量 / mm	天然径流量 / mm	总减少量 / mm	气候因素		人类因素	
				/ mm	/ %	/ mm	/ %
1955 - 1969	45.63	45.62					
1970 - 1979	26.74	36.93	18.89	8.70	46.0	10.19	54.0
1980 - 1989	17.22	35.75	28.41	9.88	34.8	18.53	65.2
1990 - 1999	12.86	35.42	32.77	10.21	31.1	22.56	68.9
1970 - 1999	18.94	36.03	26.69	9.59	35.9	17.09	64.1

注: 表中天然径流量由水文模型还原计算得到, 下表同。

由表2可以看出: 汾河流域实测径流量和天然径流量均具有递减趋势, 相比而言, 实测径流量递减率更为明显; 其中, 20世纪90年代实测径流量和天然径流量分别为35.42 mm和12.86 mm, 分别为基准值的28.2%和77.6%; 与基准值相比, 人类活动影响期间的实测径流减少量具有递增趋势, 例如, 20世纪70年代的径流减少量为18.89 mm, 到90年代, 径流减少量增加到32.77 mm; 气候变化和人类活动对径流的绝对影响量均呈现增加趋势, 相比而言, 人类活动影响量的增加更为明显, 例如, 在70年代, 因人类活动影响和气候变化减少的径流量为10.19 mm和8.70 mm, 而在90年代的相应影响量为22.56 mm和10.21 mm, 较70年代的相应影响量分别增加了121.4%和17.4%; 气候变化对径流量的相对影响量呈现递减趋势, 而人类活动的相对影响量呈现递增趋势。在70年代, 气候变化的相对影响量为46.0%, 而到了90年代, 降低到31.1%; 人类活动的相对影响量由70年代的54.0%上升到90年代的68.9%; 就1970-1995年的平均状况而言, 气候因素和人类活动对径流的影响量分别占径流减少总量的35.9%和64.1%, 人类活动是汾河流域径流减少的主要因素。

根据人类活动影响期间的年降水量, 按照频率为10%、50%和90%分别选出丰、平、枯三个典型代表年, 根据还原的天然径流量及相应的实测径流量分析人类活动在不同水平年对径流量的影响(表3)。

由表3可以看出: 人类活动在不同水平年对径流量的影响不同, 总体看来, 人类活动对径流的绝对影响量在丰水年份最大, 而在降水较枯的年份最小; 但由于丰水年的天然径流量较大, 枯水年份的天然径流量较小, 从而导致人类活动在枯水年份对径流的相对影响量大于平水年份和丰水年份。尽管在所选择的三个典型年份内, 人类活动的规模及强度存在一定的差异, 但人类活动对不同水平年径流的减少作用却是毋庸置疑的。一般而言, 人类活动是逐年代递增的, 其对径流的影响也是逐步增强的, 结合表2中的分析结果, 不难推断, 如果在同样的人类活动前提下, 其不同水平年对径流绝对影响量的差异应该更为显著。

表3 人类活动在不同水平年对径流量的影响

Table 3 Effects of human activities on runoff in Fenhe River Basin under different rainfall conditions

项目	年份	降水量 / mm	天然径 流量/ mm	实测径 流量/ mm	绝对影 响量/ mm	相对影 响量/ %
枯水年	1999	376.9	22.3	4.7	17.6	78.9
平水年	1989	475.9	31.6	11.8	19.8	62.7
丰水年	1983	559.4	43.9	21.8	22.1	50.3

5 结 论

受流域内人类活动及气候变化等因素的影响, 我国许多河流的径流量均呈现下降的趋势。但是, 在这些趋势变化中, 有哪些影响因素? 各种影响因素作用的大小? 是当前流域水文问题研究的热点和难点。本文提出了应用“天然”条件(人类活动影响较小的情况)的水文气象资料率定模型参数, 然后利用水文模型外延模拟变化环境下的天然径流, 进而区分人类活动和气候变化的影响的分析思路和计算方法。该方法应用的关键是确定人类活动较小的时期作为“天然”条件和选择合适的流域模型。

基于SIMHYD模型对汾河流域天然径流过程的模拟, 分析了该流域实测径流情势的变化原因, 结果表明, SIMHYD模型对汾河流域天津站天然月径流过程具有良好的模拟效果, 人类活动是汾河流域径流减少的主要因

素, 并且人类活动在不同水平年对径流的影响具有一定的差异。

汾河是山西省境内的一条大河, 也是当地的重要水源。近年, 汾河流域径流量锐减, 严重影响到当地工农业的发展, 加之河流水质的不断恶化, 对当地的用水安全造成严重威胁。因此, 在开展环境变化对水量研究的同时, 也应进一步加强环境变化对汾河水质的影响研究, 为汾河流域水资源的科学开发利用提供依据。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change, Impacts, Adaptation, and Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Schwarz H E. Climate change and water supply: how sensitive is the Northeast? [M]. Washington D C: National Academy of Science, 1977.
- [3] 施雅风. 中国气候与海面变化及其趋势和影响, 气候变化对西北华北水资源的影响[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.
- [4] 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.
- [5] 汪 岗, 范 昭, 等. 黄河水沙变化研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [6] Arnell N W. A simple water balance model for the simulation of stream flow over a large geographic domain[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217: 314 - 355.
- [7] Kachroo R K. River flow forecasting. Part 5. Applications of a conceptual model[J]. Journal of Hydrology, 1992, 133: 141 - 178.
- [8] O'Connell P E, Nash J E, Farrel J P. River flow forecasting through conceptual models, part 2, the Brosna Catchment at Ferbane[J]. Journal of Hydrology, 1970, (10): 317 - 329.
- [9] 张建云, 刘九夫. 气候异常对水资源影响评估分析模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(增刊): 1 - 9.
- [10] 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[R]. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, 2002.
- [11] Roger N, Jones, Paul J, et al. Estimating the Impacts of Climate Change on Victoria's Runoff using a Hydrological Sensitivity Model, Victorian Department of Sustainability and Environment [EB/OL], http://www.greenhouse.vic.gov.au/CSIRO_Report_-_Runoff.pdf, 2005.
- [12] 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, (3): 28 - 31.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, (10): 282 - 290.

Impacts of environmental change on runoff in Fenhe river basin of the middle Yellow River

WANG Guo-qing^{1,2}, ZHANG Jian-yun³, HE Rui-min¹

(1. Department of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Runoff in many rivers in China have presented decreasing trend over the past decades. How to identify the effects of climate change and human activities in the trend variation are a current hot topic, a difficulty problem as well. An assessment method to quantitatively distinguish the effects of climate change and human activities was put forward in the paper. SIMHYD rainfall runoff model was briefly introduced and calibrated with "natural" hydro-meteorological data in Fenhe River basin. Based on simulation of natural runoff in human-disturbed period with hydrological model, causes of runoff variation were analyzed. And results show that SIMHYD rainfall runoff model has good performance for natural monthly discharge simulation. On average, 35.9% and 64.1% of total annual runoff reduction from 1970 - 1999 were induced by climate change and human activities respectively. Human activities are main reasons of runoff reduction in Fenhe River basin.

Key words: Fenhe River basin; hydrological simulation; climate change; soil and water conservation; runoff variation