

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.009

不同驱动因子对漳卫南运河流域径流变化的影响

付晓花¹,董增川¹,刘 晨²,徐 伟¹,谈娟娟¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 苏州相城区水利局太平水务站,江苏 苏州 215137)

摘要: 基于漳卫南运河流域 3 期(1985 年、1995 年和 2005 年)的土地利用图、土壤分布图和主要水文气象站 1960—2010 年温度、降水、径流等基本资料构建 SWAT 分布式水文模型,建立了基于 SWAT 模型的气候变化和人类活动对流域径流影响的分项量化方法。在量化分析气候变化和人类活动对漳卫南运河流域径流影响的基础上,通过对不同情景的模拟计算,定量分析了不同年代水土保持、城镇化、水利工程和社会经济用水等不同人类活动驱动因子对流域径流变化的贡献率。结果表明:相对于基准期(1960—1978 年),不同年代气候变化和人类活动对径流的影响程度不同,变化期(1979—2010 年)气候变化和人类活动对径流变化的贡献率为 29.39%和 70.61%;在不同人类活动驱动因子中,除城镇化使径流增加外,水土保持、水利工程和社会经济用水均使径流减少,且社会经济用水对径流变化的影响最大,超过人类活动引起的径流减少总量的 50%。

关键词: 气候变化;人类活动;驱动因子;SWAT 模型;径流变化;贡献率;漳卫南运河流域
中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)06-0555-07

Impact of different driving factors on runoff in Zhangweinan River Basin

FU Xiaohua¹, DONG Zengchuan¹, LIU Chen², XU Wei¹, TAN Juanjuan¹

(1. College of Hydrology and Water resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Taiping Water Station, Suzhou Xiangcheng Water Conservancy Bureau, Suzhou 215137, China)

Abstract: Based on land-use maps and soil distribution maps of three years (1985, 1995, and 2005) and basic information, such as temperature, precipitation, and runoff, from the main hydrological stations in the Zhangweinan River Basin during the period from 1960 to 2010, this paper establishes a distributed hydrological model, soil and water assessment tool (SWAT) model, and proposes an itemized quantitative method to measure the impact of climate changes and human activities on runoff. By simulating different scenarios, the contribution rates of different human-activity driving factors, such as water and soil conservation, urbanization, hydraulic engineering, and social economy water consumption, to runoff in different eras were quantitatively calculated based on the quantitative analysis of the impact of climate changes and human activities on runoff in the Zhangweinan River Basin. The results show that there are different impact degrees of climate changes and human activities on runoff in different eras. Compared with the baseline period from 1960 to 1978, the contribution rates of climate changes and human activities to runoff of the changing period from 1979 to 2010 are 29.39% and 70.61%, respectively. All driving factors of human activities caused runoff to decrease, except for urbanization. The impact of social economy water consumption is greatest, accounting for more than 50% of the total runoff reduction caused by human activities.

Key words: climate change; human activity; driving factor; SWAT model; runoff variation; contribution rate; Zhangweinan River Basin

河川径流作为最重要的淡水资源,其演变与人类息息相关。河川径流变化及其驱动力研究已备受关注。气候变化和人类活动是径流变化的主要驱动因子,如何从发生变异的水文要素中分离出 2 种因子的贡献率

成为当前流域水文研究的热点和难点^[1]。近年来,很多学者纷纷开展量化分析气候变化和人类活动两大主要驱动因子对河川径流变化的贡献^[2-9],而关于不同人类活动因子对河川径流的量化研究甚少^[10-12]。量化分析不同驱动因子对河川径流变化的贡献,对于认知径流演变规律和实现水资源的综合利用与综合管理具有重要意义。

漳卫南运河是海河流域最南部的防洪骨干水系,属于严重资源性缺水地区,水资源短缺已严重影响流域的经济发展。定量分析漳卫南运河流域径流变化的原因,是科学合理开发利用流域水资源的基础,对于保障流域社会经济可持续发展、促进和谐社会建设具有重要价值。本文基于 SWAT 模型对漳卫南运河流域径流进行模拟,分析气候变化和人类活动对流域径流变化的影响,并定量分析气候变化和不同人类活动驱动因子对漳卫南运河流域径流变化的贡献率。

1 资料来源和处理

漳卫南运河水系位于太岳山以东,滏阳河、子牙河以南,黄河、马颊河以北,流经山西省、河南省、河北省、山东省及天津市,最后流入渤海。流域范围为东经 112°~118°,北纬 35°~39°,流域面积为 37 700 km²,其中上游山区 25 466 km²,中下游平原区 12 234 km²。流域地处温带半干旱半湿润季风气候区,四季分明,春季干燥多风,夏季湿润多雨,秋季秋高气爽,冬季寒冷少雪。由于地势和气候特性,该地区降水有明显的带性差异,且年内、年际分配极不均匀。容易形成春季干旱、夏季集中暴雨洪水。

研究区域为漳河和卫河交汇后卫运河临清站以上部分,如图 1 所示。临清站以下部分为狭长河道,水流演算相对简单,暂不考虑。SWAT 模型需要输入大量空间数据和属性数据,包括流域数字高程模型 (DEM)、土地利用图、土壤分布图、流域内气象数据、水文、水库、取用水等,本文所使用的 DEM 数据为 1:250 000 数字高程模型;3 期 (1985 年、1995 年、2005 年) 土地利用数据来源于美国 Landsat 卫星 TM 影像数据;土壤数据库采用中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1:100 万的土壤分布图;温度资料选用流域内 4 个气象站 1960—2010 年逐日观测资料,数据来源于中国气象科学数据共享服务网;降水资料选用研究区内 42 个雨量站逐日降水资料;水文资料选用研究区域出口站—临清站 1960—2010 年逐日流量资料,数据均来源于水文年鉴;水库选取流域内漳泽水库、后湾水库、岳城水库和小南海水库等 4 个大型水库 (均于 1959 年前后兴建) 逐日出库流量以及相应水库渠道引水流量资料;用水量数据来源于水资源公报、水利年鉴等;水土保持数据来源于有关水土流失综合治理、水土保持规划、水土保持情况普查等资料;城镇化数据来源于 1985—2010 年中国城市统计年鉴。



图 1 研究区概况
Fig. 1 Sketch map of study area

2 研究方法

2.1 基准期 and 变化期划分

采用流域水文模拟法分析气候变化和人类活动对径流的影响,通常需要根据实测资料将流域水文序列划分为基准期和变化期。本文以临清站为代表站,采用年径流量累积曲线法来界定人类活动显著影响时期。关于年径流量的累积曲线,对于正常的水文年,如果不受人类活动干扰,各年的来水量虽然有丰枯变化,径流累积点也会有波动,但没有系统偏离。如果受到外界人类活动影响,径流累积点据会发生明显的系统偏离^[13]。

根据临清站实测资料绘制的年径流累积曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,临清站在 1964 年第 1 次出现转折点,1978 年左右再次出现转折点,曲线偏离了原来的趋势。经研究,在此期间漳卫南运河流域降水要

素未发生突变^[14-15],说明漳卫南运河径流在一定程度上受到人类活动的影响。考虑研究系列的长度,综合流域实际情况,参考相关文献^[14,16],最终选取 1978 年作为划分基准期和变化期的突变点,即认为 1960—1978 年为基准期,1979—2010 年为变化期。

2.2 模型构建及参数率定

将 DEM 数据输入 SWAT 模型,由于漳卫南运河水系 DEM 提取的河网与实际河网偏差较大,故将实际河网数字水系通过 SWAT 模型中的 burn-in 命令来辅助生成河网水系。通过一系列分析计算,最终将研究区域划分为 67 个子流域(图 3)。

输入流域土地利用图、土壤分布图,并对坡度进行划分,按照模型要求进行重分类,设定阈值后进行叠加,最终将漳卫南运河流域划分为 2276 个水文响应单元。

采用 SWAT-CUP 的 SUFI2 方法对模型参数进行敏感性分析和率定,模型模拟过程中敏感性参数主要有深蓄水层渗透系数、浅层地下水径流系数、土壤可利用水量、河岸基流 α 系数、SCS 径流曲线系数、主河道曼宁系数、地下水再蒸发系数、基流 α 系数、土壤蒸发补偿系数等。根据基准期和变化期的划分,利用基准期 1960—1978 年实测资料进行模型率定和检验,其中 1960—1961 年实测资料作为预热期,1962—1970 年用于模型参数率定,1971—1978 年用于模型验证。采用判定系数 (R^2)、纳什系数 (Nash-Sutcliffe) 以及相对误差 (δ) 对模拟误差进行分析。

从图 4 可以看出,率定期月径流模拟值和实测值变化趋势基本一致,取得了较合理的模拟精度,其中 R^2 、纳什系数以及 δ 分别为 0.88、0.87 和 -2.62%。验证期的模拟精度比率定期有所降低,其中 R^2 、纳什系数以及 δ 分别为 0.74、0.74 和 4.99%,模型模拟精度达到校准要求,表明 SWAT 模型在漳卫南运河流域应用中具有较好的模拟能力和适用性。

2.3 气候变化和人类活动对径流影响量化方法

由于受基准期和变化期划分的影响,2 个时期序列较短,进行量化分析时气候变化量受降水、温度丰枯变化影响较大。故本文考虑降水、温度丰枯变化影响,认为变化期的实测径流量与基准期的基准值之间的差值包括 3 部分:人类活动影响部分、气候变化影响部分、丰枯变化影响部分。具体气候变化和人类活动对径流影响量化方法见文献[17-18]、方案 1 和方案 2 参见文献[17],分割原理图如图 5 所示。

3 气候变化及人类活动对径流变化影响分析

漳卫南运河流域研究时段内的实测降水、温度数据输入模型模拟得到的径流结果和以还原降水、温度数据输入模型模拟的径流结果见表 1。

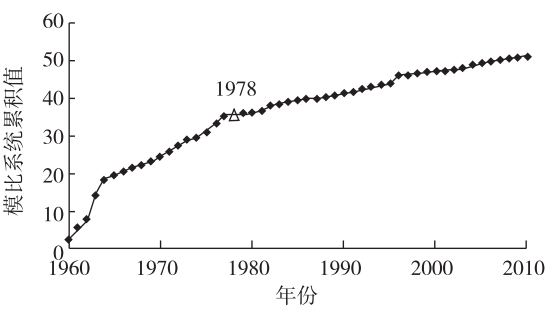


图 2 漳卫南运河流域临清站年径流累积曲线

Fig. 2 Accumulative curve of annual runoff at Linqing Station in Zhangweinan River Basin

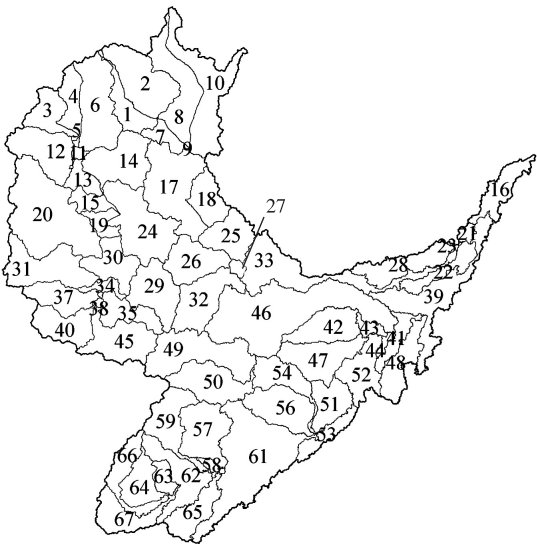


图 3 漳卫南运河流域子流域划分

Fig. 3 Sub-basin definition in Zhangweinan River Basin

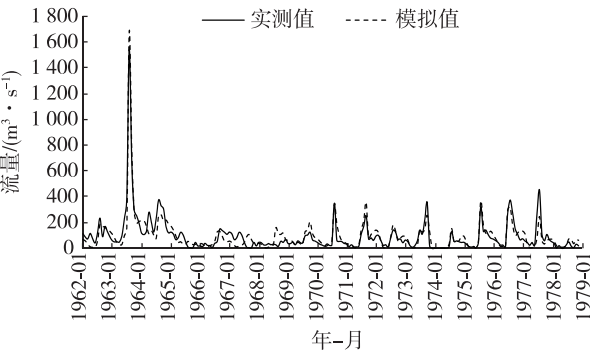


图 4 漳卫南运河率定期和验证期月径流模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between simulated values and measured values in calibration and verification terms in Zhangweinan River

表1 漳卫南运河气候变化和人类活动影响结果

Table 1 Impacts of climate changes and human activities on runoff in Zhangweinan River Basin m³/s

时期	径流量实测值	$\overline{Q'}$	$\overline{Q''}$	径流总减少量	Q_f+Q_q	Q_f	Q_q	Q_r
基准期	91.78	91.28	92.43					
20 世纪 80 年代	23.35	54.82	66.78	68.43	36.96	25.00	11.96	31.47
20 世纪 90 年代	17.32	46.36	59.34	74.46	45.42	32.44	12.98	29.04
21 世纪 00 年代	19.38	57.87	74.16	72.40	33.91	17.62	16.29	38.49
变化期	20.02	53.02	66.76	71.76	38.76	25.02	13.74	33.00

注: $\overline{Q'}$ 表示以实际降水、温度数据输入模型模拟径流量; $\overline{Q''}$ 表示以还原降水、温度数据输入模型模拟径流量; Q_f 、 Q_q 、 Q_r 分别代表丰枯变化影响量、气候变化影响量、人类活动影响量。

由表1可以看出,变化期相对基准期的丰枯变化影响量为25.02 m³/s,比气候变化影响量13.74 m³/s大,各年代丰枯变化影响量均较大,计算结果证实了漳卫南运河流域内丰枯变化对于分离气候变化的影响较大,不可忽略。变化期气候变化和人类活动均使径流减少,其影响量分别为13.74 m³/s和33.00 m³/s,两者对径流变化影响的贡献率为29.39%和70.61%,由此可得出径流变化的主要驱动力为人类活动影响,且各年代人类活动对径流量变化的贡献率均在70%左右,分析结果与客观实际认同一致。

不同年代背景下,气候变化和人类活动对径流的影响程度不同,20 世纪 80 年代人类活动对径流变化的影响达到72.46%,是各年代中影响最大的。这个数据与流域该时期沿岸工农业快速发展,1981 年和 1985 年开始通过民有渠、漳南渠分别向邯郸市和安阳市提供城市供水,四大灌区引水量增加等人类活动对水资源的需求及影响日益增长的趋势相符。

4 不同人类活动驱动因子对径流变化的影响

4.1 水土保持对漳卫南河流域径流的影响分析

利用 SWAT 模型模拟有无水土保持措施条件下径流变化过程。选取漳卫南河流域临清站实测水文过程,保持气象资料等输入条件不变,输入漳卫南运河流域 20 世纪 80 年代土地利用资料,得到无水土保持措施条件下的径流变化过程,该径流模拟值与基准期模拟径流量的差值,即认为是气候变化引起;将不同年代水土保持措施数据分别应用在 20 世纪80 年代土地利用状态下,输入该土地利用资料,得到有水土保持措施条件下的径流模拟变化过程,该径流模拟值与无水体保持措施条件下的径流模拟过程的差值,即认为是水土保持措施对流域径流量的影响量,模拟结果见表2。

由表2可以看出,水土保持措施减少了漳卫南河流域的径流量。其中 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年

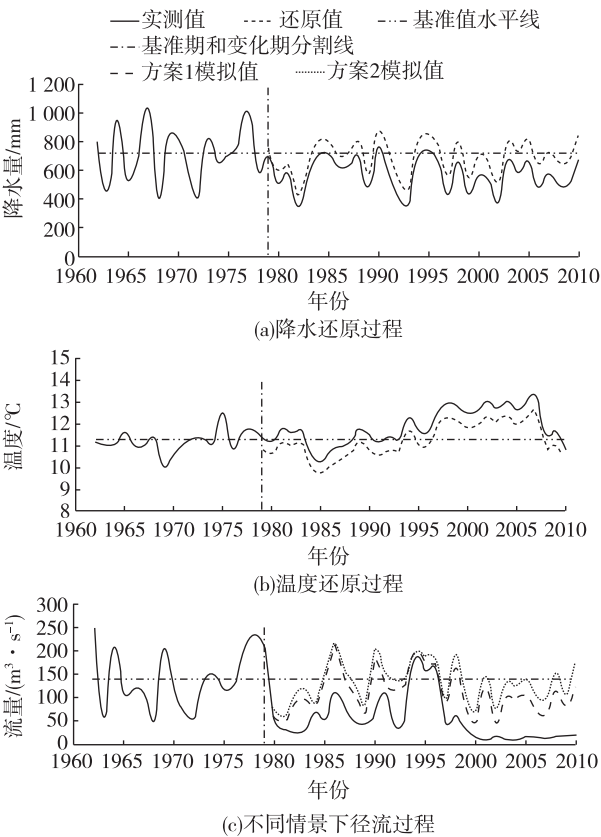


图5 气候变化和人类活动对径流变化定量分割原理

Fig. 5 Quantitative segmentation principle for impacts of climate changes and human activities on runoff

表2 有无水土保持措施条件下漳卫南河流域径流变化

Table 2 Runoff variation with and without water and soil conservation measurements in Zhangweinan River Basin

年代	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)		径流量变化/(m ³ ·s ⁻¹)	变化幅度/%
	无水土保持	有水土保持		
20 世纪 80 年代	54.82	52.31	2.51	-4.58
20 世纪 90 年代	46.36	41.86	4.50	-9.71
21 世纪 00 年代	57.87	49.14	8.73	-15.09

代和 21 世纪 00 年代贡献量分别为 $2.51\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.50\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8.73\text{ m}^3/\text{s}$,随着水土保持措施的不断加强,流域内治理水土流失面积不断加大,而减少流域内水土流失所带来的人力、物力损失,对于促进流域生态环境和经济的可持续发展具有巨大的经济效益。

4.2 城镇化对漳卫南运河流域径流的影响分析

利用 SWAT 模型构建城镇化前后径流模拟变化过程。保持气象资料等输入条件不变,输入 1985 年漳卫南运河流域土地利用资料,得到的径流模拟变化过程认为是城镇化前的径流过程。根据统计年鉴 1985—2010 年城镇化面积的变化,改变土地利用条件,保持其他条件不变,模拟得到不同时期流域城镇化后的径流过程。城镇化后与城镇化前的径流模拟过程的差值,即认为是城镇化对流域径流量的影响量,模拟结果见表 3。

由表 3 可以看出,城镇化增加了漳卫南运河流域的径流量,其中 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代贡献量分别为 $0.15\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.57\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.35\text{ m}^3/\text{s}$ 。城镇化对漳卫南运河流域径流影响较大,随着经济社会的发展,流域城镇化面积不断增加,改变了径流汇流的下垫面条件,城镇洪涝灾害将日益严重。流域内城镇化面积的显著增加应得到重视,流域内相关部门在做好经济发展的同时,应合理控制城镇化的飞速发展,为流域水资源的合理利用做出长远规划。

4.3 水利工程对漳卫南运河流域径流的影响分析

利用 SWAT 模型构建有无水库条件下径流模拟变化过程,利用漳卫南运河流域基准期率定好的模型参数,将变化期的气象资料等输入模型,不加载水库资料,得到各水库所在子流域出口流量过程,即无水库情况下的径流过程。保持其他输入条件不变,分别加载各水库资料,模拟得到有水库条件下各水库所在子流域出口流量过程。认为有水库和无水库条件下各子流域出口流量的差值为各水库对流域径流量的影响量。分别对 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代漳卫南运河流域漳泽水库、岳城水库、后湾水库和小南海水库对径流的影响进行分析,结果见表 4。

表 4 有无水库条件下漳卫南运河流域径流变化

Table 4 Runoff variation with and without reservoirs in Zhangweinan River Basin

年代	径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)							
	无岳城水库	有岳城水库	无漳泽水库	有漳泽水库	无后湾水库	有后湾水库	无小南海水库	有小南海水库
20 世纪 80 年代	25.98	20.48	4.28	3.79	1.59	1.49	4.25	4.35
20 世纪 90 年代	25.47	22.07	4.34	2.91	1.51	1.20	2.61	2.22
21 世纪 00 年代	35.02	30.96	5.41	4.20	2.89	1.78	4.52	4.24

水库是在江河上筑坝(闸)所形成的能拦蓄径流、调节水量的蓄水工程。通过水库调节,既可削减汛期洪水的下泄流量,减轻下游洪水灾害,又可以提高水的利用率,获得发电、灌溉、供水、养殖以及发展旅游等综合效益。在河流上兴修水库虽然效益明显,但同时改变了天然河流的水文情势,其对河流及其周围生态系统的破坏也是不言而喻的。20 世纪 60 年代以后,漳卫南运河流域上游修建了大量的引水、蓄水工程,水资源开发量急剧增加,造成下游来水量剧减。跨流域引水改变了河流天然径流的时空分布,为此有必要研究水利工程对流域径流的影响程度,算清水账,以全面、优质的数据资料为社会服务。

由表 4 可以看出,不同年代,岳城水库、漳泽水库和后湾水库对漳卫南运河流域径流的减少做出了贡献,20 世纪 80 年代小南海水库使径流略有增加,但增加不明显,这可能与水库调节蓄水有关,也可能由于数据统计和模型误差引起,具体原因有待进一步深入探讨。对比 4 个大型水库,岳城水库对漳卫南运河流域径流的减少贡献量较大,其中 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代分别使漳卫南运河流域径流减少 $5.50\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.40\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $4.06\text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,漳卫南运河流域水利工程对径流影响较大。

4.4 社会经济用水对漳卫南运河流域径流的影响分析

由于渠道取用水主要用于流域内和流域外工业、农业等社会经济发展,因此采用渠道取用水反映社会经

济用水对流域径流的影响。利用 SWAT 模型构建有无取水条件下径流模拟变化过程。利用漳卫南运河流域基准期率定好的模型参数,将变化期的气象资料等输入模型,模拟得到的径流量反映了原始土地利用和用水结构状态下的产汇流过程,即无取水情况下的径流过程,该径流模拟值与基准期模拟径流量的差值,即认为是由气候变化引起;分别加载输入不同年代漳卫南运河流域模型需要的状态参数,并在模型文件.wus 中分别输入实测各取水口流量资料,得到有取水情况下的径流过程,该径流量与基准期径流量之间的差值包括两部分:一部分为气候变化影响部分,另一部分为取用水影响部分。而有无取水条件下径流量的差值即为取用水对径流量的影响量,结果见表 5。

由表 5 可以看出,取用水对漳卫南运河流域径流的减少做出了较大贡献,其中 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代贡献量分别为 $25.00\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $23.13\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $21.56\text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,取用水对漳卫南运河流域径流减少的贡献量逐年代递减。随着社会经济不断发展,流域内对水资源的需求越来越大,大量开发地下水资源,导致地下水超采,不利于水资源的可持续利用。为使流域水资源得到合理利用,相关部门应采取措施,合理控制社会经济用水,为流域水资源的可持续利用做出合理规划。

4.5 不同人类活动因子对漳卫南运河流域径流减少的贡献率汇总

根据前文研究结果,给出不同人类活动因子对漳卫南运河流域径流减少的贡献率,见表 6。

由表 6 可以看出,不同人类活动因子对径流减少的贡献率之和不为 100%,这主要是由于统计数据和水文模型都不可避免地存在一定误差。从表 6 中可以看到,漳卫南运河流域不同年代

社会经济用水对径流减少的贡献率最大,已超过人类活动引起的径流减少量的 50%。而在这个经济发展的社会,一旦水资源紧张,便会产生城市和工业用水挤占农业用水,农业用水挤占生态用水,靠牺牲环境谋求一时的经济发展,从而导致生态、环境的大范围急剧恶化。从长远来看,生态破坏如果得不到有效遏制,将影响民族的生存和繁衍,威胁社会经济的可持续发展。为此,相关部门应采取相应措施,合理利用水资源,高度重视流域生态问题,抓好流域的水生态恢复和保护工作,这是现代水利的要求,更是水利工作者义不容辞的责任。

5 结 语

应用年径流量累积曲线法界定人类活动显著影响时期,确定了漳卫南运河流域的基准期(1960—1978 年)和变化期(1979—2010 年)。采用 SWAT-CUP 的 SUFI2 方法对 SWAT 模型参数进行敏感性分析和率定,并采用判定系数(R^2)、纳什系数(Nash-Sutcliffe)以及相对误差(δ)对模拟误差进行分析,结果表明 SWAT 模型在漳卫南运河流域应用中具有较好的模拟能力和适用性。为削弱变化期降水、温度丰枯变化对分离气候变化和人类活动影响量的干扰,将有无丰枯变化的 2 种气候情景输入模型中,构建有无降水和温度还原计算的 SWAT 模型,并建立了相应的气候变化和人类活动对径流影响量化方法,定量分析了漳卫南运河流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。在此基础上,通过对不同情景的模拟计算,定量分析了水土保持、城镇化、水利工程和社会经济用水等不同人类活动因子对漳卫南运河流域径流变化的贡献率。结果表明,1979—2010 年气候变化和人类活动都对径流的减少做出了贡献,而人类活动是导致漳卫南运河流域径流减少的主要原因,其贡献率为 70.61%。不同人类活动因子中,除城镇化使径流增加外,其他各因子都对径流的减少做出了贡献,其中 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代水土保持对径流的贡献率分别为 7.98%、15.50%、22.68%;城镇化对径流的贡献率分别为 -0.48%、-1.96%、-3.51%;水利工程对径流的贡献率分别为 19.02%、19.04%、17.28%;社会经济用水对径流的减少贡献率最大,各年代的贡献率

表 5 有无取水条件下漳卫南运河流域径流变化

Table 5 Runoff variation with and without water consumption in Zhangweinan River Basin

年代	径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		径流量变化/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变化幅度/ %
	无取水	有取水		
20 世纪 80 年代	54.82	29.82	25.00	-45.60
20 世纪 90 年代	46.36	23.23	23.13	-49.89
21 世纪 00 年代	57.87	36.31	21.79	-37.26

表 6 不同人类活动对漳卫南运河流域径流减少的贡献率

Table 6 Summary of contribution rates of different human activities on runoff reduction in Zhangweinan River Basin

年代	贡献率/%				人类活动 总贡献率/%
	水土保持	城镇化	水利工程	社会经济用水	
20 世纪 80 年代	7.98	-0.48	19.02	79.43	105.96
20 世纪 90 年代	15.50	-1.96	19.04	79.65	112.22
21 世纪 00 年代	22.68	-3.51	17.28	56.61	93.06

分别为 79.43%、79.65%、56.61%。可见,随着社会经济的发展,流域对水资源的需求越来越强,相关部门应采取综合措施着力解决漳卫南运河流域水资源问题,使经济社会和生态环境真正实现可持续发展。

参考文献:

[1] 王国庆,张建云,刘九夫,等.气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J].中国水利,2008(2):55-59. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J].China Water Resources, 2008(2):55-59. (in Chinese))

[2] 刘学锋,向亮,翟建青.环境变化对滦河流域径流影响的定量研究[J].自然资源学报,2013,28(2):244-252.(LIU Xuefeng, XIANG Liang, ZHAI Jianqing. Quantitative study of impacts for environmental change on runoff in Luanhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(2):244-252. (in Chinese))

[3] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.(SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J].Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(7):779-790. (in Chinese))

[4] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.(DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science, 2012,23(2):278-285. (in Chinese))

[5] 许炯心,孙季.近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响[J].水科学进展,2003,14(6):690-695.(XU Jiongxin, SUN Ji. Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 years[J].Advances in Water Science, 2003,14(6):690-695. (in Chinese))

[6] LI Lijuan, LU Zhang, HAO Wang, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China[J].Hydrological Processes, 2007,21(25):3485-3491.

[7] SUN Yu, TIAN Fuqiang, YANG Long, et al. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods[J].Journal of Hydrology, 2014,508:170-180.

[8] YAN B, FANG N F, ZHANG P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modeling and partial least squares regression[J].Journal of Hydrology, 2013,484:26-37.

[9] MA Zhenmmei, KANG Shaozhong, ZHANG Lu, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China[J].Journal of Hydrology, 2008,352:239-249.

[10] 刘佳嘉,周祖昊,贾仰文,等.水循环演变中多因素综合影响贡献量分解方法[J].水利学报,2014,45(6):658-665.(LIU Jiajia, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. A new method to quantitatively separate the effects of multi-factors on the water cycle evolution[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(6):658-665. (in Chinese))

[11] 张淑兰,王彦辉,于彭涛,等.定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):53-58. (ZHANG Shulan, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Study for separating the impact of precipitation variation and human activities on runoff change of the upper reaches of Jing River[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4)53-58. (in Chinese))

[12] YANG Yanghui, TIAN Fei. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J].Journal of Hydrology, 2009,374:373-383.

[13] 黄领梅,沈冰.人类活动对旱区流域水文情势影响研究:以新疆和田河流域为例[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[14] 蔡锡填,徐宗学,李占玲.漳卫南运河流域水文气象要素长期变化趋势分析[J].资源科学,2008,30(3):363-370. (CAI Xitian, XU Zongxue, LI Zhanling. Analyzing long-term trend of hydrological and meteorological changes in Zhangweinan River Basin[J].Resources Science, 2008,30(3):363-370. (in Chinese))

[15] 于磊,李巍,徐丽梅,等.近 55 年来漳卫南运河流域降水量变化特征分析[J].海河水利,2013,(5):30-32. (YU Lei, LI Wei, XU Limei, et al. Analysis of rainfall changes in recent 55 years in in Zhangweinan River Basin[J].Haihe Water Resources, 2013(5):30-32.(in Chinese))

[16] 张利平,曾思栋,夏军,等.漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应[J].自然资源学报,2011,26(7):1217-1226. (ZHANG Liping, ZENG Sidong, XIA Jun, et al. Simulated hydrologic responses to climate change of the Zhangweinan river basin[J].Journal of natural resources, 2011,26(7):1217-1226. (in Chinese))

[17] 仕玉治.气候变化及人类活动对流域水资源的影响及实例研究[D].大连:大连理工大学,2011.

[18] 刘晨,董增川,方庆,等.气候变化与人类活动对滦河流域径流变化响应[J].水电能源科学,2013,31(9):12-15.(LIU Chen, DONG Zengchuan, FANG Qing, et al. Runoff changes in response to climate change and human activities scenarios of Luanhe River Basin[J].Water Resources and Power, 2013,31(9):12-15. (in Chinese))