

变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应

李镇洋,李国芳,高倩雨,尹俊凯

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以嫩江富拉尔基断面以上流域为研究区,分别采用统计方法和模型方法,评价土地利用变化和尼尔基水库运行对径流变化的影响,并分析两者综合影响下径流的变化趋势。结果表明:尼尔基建库前后流域土地利用变化不明显,而下游径流变化明显,水库对径流变化的影响更大;SWAT模型适用于研究区径流模拟,水库运行、土地利用变化对径流变化的影响分别占92.86%和7.14%;相同降水和水库运行条件下,1990—2020年土地利用变化具有使年径流量先减少后增加的效应,水库运行对径流的年内分配有显著影响。

关键词:嫩江流域;富拉尔基断面;SWAT模型;土地利用变化;尼尔基水库;径流模拟

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0035-06

Runoff response of Fulaerji station in Nenjiang River under changing environment//LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, YIN Junkai (*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The basin upstream the Fulaerji section of the Nenjiang River was selected as the study area. Statistical method and model method were used to evaluate the impact of land use change and the Nierji Reservoir operation on the runoff variation, and the change trend of runoff under the combined influence of the two factors was analyzed. The results show that, the land use change in the basin before and after the construction of the Nierji Reservoir is not obvious, while the runoff change in the downstream is obvious, and the reservoir has a greater impact on the runoff change. SWAT model is suitable for runoff simulation in the study area. The influence of reservoir operation and land use change on the runoff change is 92.86% and 7.14% respectively. Under the same rainfall and reservoir operation conditions, the annual runoff can be first decreased and then increased by the land use change from 1990 to 2020, and the reservoir operation has a significant impact on the annual runoff distribution.

Key words: Nenjiang River basin; Fulaerji section; SWAT model; land use change; Nierji Reservoir; runoff simulation

随着经济社会的发展,形成径流的环境在不断发生变化。一方面,温室气体排放增多使温室效应加剧,影响了降雨;另一方面,人类大规模改变下垫面,不断兴建水库、堤防等工程,影响了产流和汇流。变化的环境已经影响到水文循环过程,破坏了部分地区径流序列的一致性^[1],使水旱灾害防御和水资源开发利用面临诸多新问题^[2]。因此,研究变化环境对径流的影响,对区域水资源管理、水问题治理,乃至新时期水文循环的研究具有重要意义。

在人类活动较频繁的地区,相比于气候变化,短时间尺度上土地利用变化是区域水资源变化的主要驱动因素^[3]。传统对比流域试验方法是一种可靠有效的方法,通过对比相似流域受不同人类活动影响后的变化反映下垫面变化的水文响应,但其着重

于单一因子变化对径流的作用,且不同时期的变量不易控制^[4];随着水文模型的发展,基于物理过程模拟的分布式水文模型应用越来越广泛,如郭军庭等^[5]将SWAT模型应用于潮河流域,荣艳淑等^[6]将GAM模型应用于洪家渡地区,但分布式模型的参数通常很多且难以测定和校准^[7]。

水利工程的兴建在很大程度上改变了径流原有的自然规律^[8],因而水利工程对径流的影响也备受关注。Richter等^[9-11]提出的水文变异指标法(IHA)及变化范围法(RVA)均可有效评价水利工程对河流的影响,如陈伟东等^[12]采用IHA法分析锦江水库对径流的影响,黄草等^[13]运用IHA-RVA法分析水库群对拉萨河径流的影响;统计方法则是检测大流域长期水文资料变化趋势的常用方法之一^[14],如徐

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508001,2018YFC1508205)
作者简介:李镇洋(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文及水资源研究,E-mail:601206645@qq.com
通信作者:李国芳(1971—),女,教授,博士,主要从事水文及水资源研究。E-mail:liguofang@hhu.edu.cn

成汉^[15]基于倾向分析和趋势分析等方法评价三峡水库蓄水前后乌江流域径流的变化,赵萍等^[16]通过离散系数和年内不均匀系数等指标评价卡普恰盖水库对伊犁河径流的影响。但多数方法无法揭示水库对流域水文循环的作用机制,也不能有效分离出除水库外其他因素对径流的作用。

综上,土地利用变化和水利工程运行综合影响下区域径流响应研究是当前热点问题,但相关研究成果尚显不足,对嫩江流域径流演变的研究更是稀缺。因此,本文选取嫩江干流富拉尔基断面为典型,分别采用统计指标和 SWAT 模型,分析典型断面以上土地利用变化和水库运行对流域径流变化的影响,以期为嫩江流域水旱灾害防治和水资源开发利用提供参考依据。

1 研究区概况及数据资料

1.1 研究区概况

嫩江富拉尔基断面以上流域位于我国东北部,流域面积 12.39 万 km²,其中尼尔基水库以上地区主要为山区,尼尔基至富拉尔基断面区间为山区与平原过渡段,研究区地形及水系如图 1 所示。流域受温带大陆性季风气候影响,冬季干冷,夏季湿热,年平均气温为 2~4℃^[17],年降水量约 500 mm,降水主要集中在夏季。

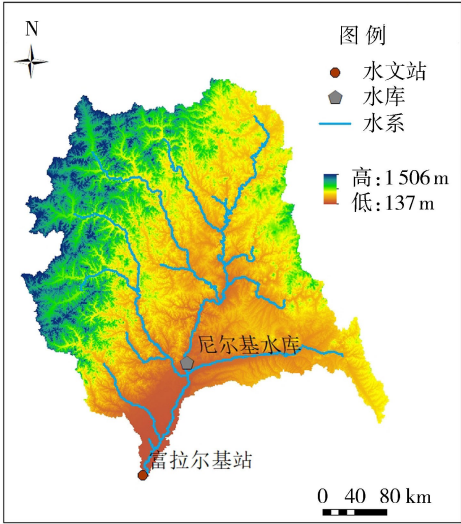


图 1 研究区示意图

尼尔基水库坝址以上集水面积 6.64 万 km²,总库容 86.1 亿 m³,于 2001 年 6 月正式开工,2006 年 12 月底主体工程全部完工,是以防洪、城镇生活和工农业供水为主的大型控制性工程。

1.2 数据资料

DEM 数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,分辨率为 90 m。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心,比例

尺为 1:10 万。土壤数据来自国家青藏高原科学数据中心,比例尺为 1:100 万。气象数据来自中国气象数据网,时间为 1981—2015 年。水文数据选用富拉尔基站与气象数据同时期的实测月径流资料。

2 研究方法

2.1 研究思路

本文采用统计分析和模型模拟两种方法,研究土地利用变化和水库运行对流域水文情势的影响,分析流域径流变化的趋势。研究思路如下:①采用统计分析方法,评价 1990—2010 年期间流域土地利用变化,以及尼尔基建库前后下游径流变化;②验证 SWAT 模型对流域径流模拟的适用性,并设置不同情景建立模型进行对比,定量分析土地利用变化和水库运行对流域径流变化的影响;③利用 CA-Markov 模型预测流域未来土地利用类型,基于预测结果设置情景,分析土地利用变化和水库运行综合影响下流域径流的变化趋势。

2.2 土地利用变化分析方法

2.2.1 土地利用动态度

该指标通过反映区域土地利用方式变化的速度和幅度,来描述土地利用类型变化的剧烈程度。

单一土地利用动态度^[18]的表达式为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为研究时段内某一土地利用类型的动态度; U_a 、 U_b 分别为研究时段初和时段末某一土地利用类型的面积; T 为时段长。

综合土地利用动态度^[19]的表达式为

$$L_c = \frac{\sum_{i,j=1}^n \Delta L_{Ui-j}}{2 \sum_{i=1}^n \Delta L_{Ui}} \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L_c 为研究时段内综合土地利用动态度; L_{Ui} 为研究时段初第 i 类土地利用类型的面积; ΔL_{Uij} 为研究时段内第 i 类土地利用类型转换为第 j 类土地利用类型的面积绝对值。

2.2.2 土地利用转移矩阵

该指标可反映区域内转入和转出的主要土地利用类型和土地利用类型间的转化趋势,表达式为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P 为土地利用转移矩阵; P_{ij} 为第 i 类土地利用转化为第 j 类土地利用的面积绝对值或占土地总面积的百分比。

2.3 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型是大中尺度的分布式水文模型,其在径流模拟、泥沙模拟等方面得到广泛应用。模型基于物理机制,将流域的水文过程分为陆面部分和水面部分。流域水循环过程遵循水量平衡原理^[20],表达式为

W_i = W_0 + \sum_{i=1}^t (P_{day} - R_{surf} - E_a - R_{seep} - R_{gw})(4)

式中:W_i 为第 i 天的土壤最终含水量;W_0 为第 i 天的土壤初始含水量;P_{day} 为第 i 天的降水量;R_{surf} 为第 i 天的地表径流量;E_a 为第 i 天的蒸散发量;R_{seep} 为第 i 天土壤剖面地层中的侧流总量;R_{gw} 为第 i 天的地下径流总量。

SWAT 模型基于数字高程模型,根据控制点先将流域划分为子流域,再结合土地利用和土壤类型来划分水文响应单元(HRUs),最后对 HRUs 作汇流演算,在流域出口断面得到总径流。

2.4 土地利用类型变化预测方法

CA-Markov 模型可用于预测流域未来土地利用类型。该模型由 Markov 模型和 CA 模型两部分组成;Markov 模型利用概率预测未来趋势,可作为自发性下流域土地利用类型变化的预测模型;CA 模型具有时空耦合特征,可用来预测自组织下流域土地利用类型变化的趋势。

Markov 模型的表达式为

X_{k+1} = P X_k (5)

式中:X_k、X_{k+1} 分别为趋势分析与预测对象在 T=k 和 k+1 时刻的状态向量;P 为土地利用转移矩阵。

CA 模型的表达式为

S_{t+1} = f(S_t, N) (6)

式中:S 为元胞的状态集合;t 和 t+1 为元胞所处的前后时刻;f 为元胞转化规则;N 为元胞邻域。

CA-Markov 模型利用土地利用数据计算 Markov 转移概率矩阵,并建立转变适宜性图像集,在确定 CA 滤波器和循环次数后,可得到预测的流域未来土地利用类型图。

3 土地利用变化和水库运行对下游径流影响分析

3.1 统计分析方法

3.1.1 土地利用变化分析

研究区 1990—2010 年间的土地利用动态度如表 1 所示,从中可以看出:水域和耕地的单一土地利用动态度最大,分别为 1.27% 和 1.20%;但流域的综合土地利用动态度为 0.25%。说明 1990—2010 年间流域土地利用类型的变化幅度并不大。

表 1 1990—2010 年土地利用动态度

土地利用动态度类别	土地利用类型	土地利用动态度/%
单一土地利用动态度	耕地	1.20
	林地	-0.26
	草地	-0.50
	水域	1.27
	建设用地	0.10
综合土地利用动态度	未利用土地	-0.36
		0.25

1990—2010 年间土地利用转移矩阵如表 2 所示,从中可以看出:土地利用的转移趋势主要是由林地、草地和未利用土地向耕地、水域和建设用地转化。但 1990—2010 年期间未变化的土地利用面积占全流域面积的 84.9%,说明流域土地利用类型间的转化并不明显。

表 2 1990—2010 年研究区土地利用转移矩阵 单位:km²

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	总计
耕地	23 189	224	87	115	34	83	23 732
林地	3 629	60 532	798	52	9	211	65 231
草地	2012	879	17 017	90	17	103	20 118
水域	68	4	1	941	0	1	1 015
建设用地	21	1	1	12	1 127	4	1 166
未利用土地	757	177	32	66	3	7 333	8 368
总计	29 676	61 817	17 936	1 276	1 190	7 735	119 630

综上,可以认为流域的土地利用变化并不明显,对径流变化的影响较小。

3.1.2 水库对下游径流影响分析

研究区水文站位置如图 1 所示,本文将 1983—2006 年作为建库前、2007—2015 年作为建库后,利用流域内气象站和富拉尔基水文站的实测资料,统计尼尔基建库前后流域降水量和径流量的变化,结果如表 3 和图 2 所示。从中可以看出:水库建成前后,流域的汛期降水量、非汛期降水量及多年平均降水量均差别不大;而水库建成后,水库下游多年平均径流量有较大程度的减少,其中汛期(6 月至 9 月)洪峰流量削减明显,非汛期(10 月至次年 5 月)枯季径流显著增加。据了解,这是由于尼尔基水库作为北水南调的水源地,是北部引嫩总干渠的源头、黑龙江省引嫩骨干工程的重要组成部分,年引水量超过 23 亿 m³^[21];同时,作为具有防洪、供水等多种功能的大型控制性工程,尼尔基水库也在年内发挥削减洪峰和调节径

表 3 尼尔基建库前后富拉尔基站降水量及径流量对比

项目	汛期		非汛期		多年平均	
	降水量/ mm	径流量/ 亿 m³	降水量/ mm	径流量/ 亿 m³	降水量/ mm	径流量/ 亿 m³
建库前	422.4	143.67	104.3	54.08	526.7	197.75
建库后	399.9	95.54	130.7	46.67	530.7	142.21
差值	-22.5	-48.13	26.4	-7.41	4.0	-55.54

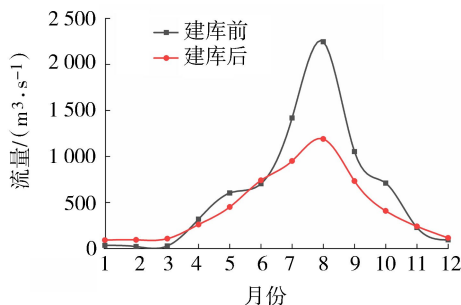


图2 尼爾基建库前后富拉尔基站月平均流量对比

流的作用。

与建库前相比,建库后流域降水量变化不大但下游径流变化明显,可以认为尼爾基水库运行对下游径流变化产生了较大的影响。

3.2 模型分析方法

3.2.1 SWAT 模型适用性分析

选取水库建成前的 1981—2000 年资料做 SWAT 模型适用性研究,其中,1981—1982 年为预热期,1983—1994 年为率定期,1995—2000 年为验证期。进行模型模拟效果评价时,采用纳什效率系数 N_{SE} 和决定系数 R^2 。根据相关研究与应用实例^[22],当 $N_{SE} > 0.5$ 、 $R^2 > 0.6$ 时,模型模拟的结果可被接受。

富拉尔基站 1981—2000 年的月径流模拟结果如图 3 和图 4 所示,从中可以看出,实测值在每年主汛期前均有一个小峰,分析是春汛,由于模型模拟过程中未考虑流域内冬季固态降水及春季融雪径流,所以模拟值中未出现春汛。率定期 $N_{SE} = 0.81$ 、 $R^2 = 0.82$,验证期 $N_{SE} = 0.84$ 、 $R^2 = 0.85$,均达到了精度的要求,故认为 SWAT 模型适用于嫩江富拉尔基站断面上游的径流模拟。

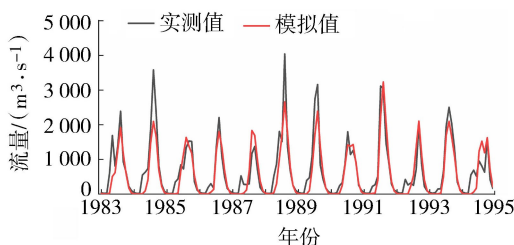


图3 富拉尔基站率定期(1983—1994 年)月径流模拟值与实测值对比

3.2.2 土地利用变化和水库运行影响模拟结果分析

为定量评估土地利用变化和尼爾基水库运行对径流变化的影响,设置了 3 种情景。情景 1:应用原 SWAT 模型;情景 2:应用只考虑土地利用变化的 SWAT 模型;情景 3:应用考虑土地利用变化和尼爾基水库运行的 SWAT 模型。选取水库建成后的 2008—2015 年资料进行模拟研究,其中 2008—2009 年为预热期,结果情景 1 $N_{SE} = 0.71$ 、 $R^2 = 0.80$,情景 2 $N_{SE} = 0.71$ 、 $R^2 = 0.81$,情景 3 $N_{SE} = 0.93$ 、 $R^2 = 0.94$ 。

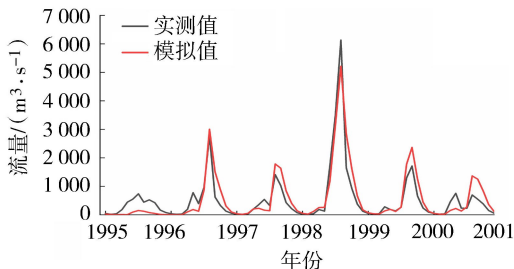


图4 富拉尔基站验证期(1995—2000 年)月径流模拟值与实测值对比

以 2014 年为例,3 种情景下模拟流量与实测流量的对比如图 5 所示。

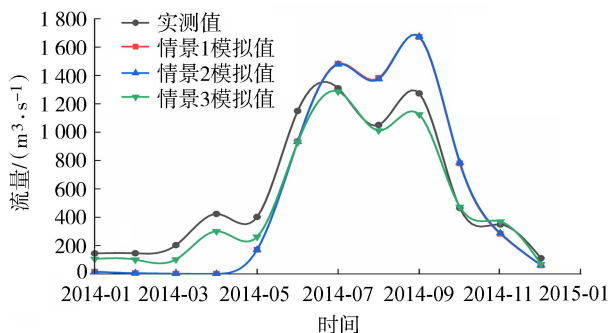


图5 富拉尔基站(2014 年)月径流模拟值与实测值对比

情景 2 和情景 1 相比, N_{SE} 没有变化, R^2 从 0.80 提高到 0.81,且两者的模拟结果均与实测径流过程差距明显;两者的月径流模拟值十分相近,径流量主要集中在汛期,非汛期径流量很小,年内分配极不均匀。可见,仅考虑土地利用变化以使得模拟值接近实测值的作用有限,土地利用变化对流域径流变化的影响并不大。

情景 3 和情景 2 相比, N_{SE} 和 R^2 分别从 0.71 和 0.81 提高到了 0.93 和 0.94,且情景 3 的模拟结果与实测径流过程十分接近;考虑水库运行后,水库发挥削峰滞洪和调节径流的作用,月径流模拟值在非汛期有所增大,在汛期普遍减小,径流量在年内的分配更为均匀。可见,考虑水库运行以使得模拟值接近实测值的作用显著,水库运行对流域径流变化的影响较大。

综上,选取 R^2 作为定量分析指标,计算所得到的流域径流变化,7.14% 是土地利用变化引起的,92.86% 是尼爾基水库运行引起的。这与孙新国等^[23]在研究丰满Ⅱ区子流域时得出的结论一致:水利工程运行对径流变化占主导作用。

4 不同土地利用和水库运行情景下的径流变化

4.1 流域未来土地利用类型预测

为进一步研究变化环境下流域径流的变化趋

势,利用 CA-Markov 模型模拟预测流域未来土地利用类型。先利用 1990 年和 2000 年的土地利用类型图预测得到 2010 年的土地利用类型图,并与实际图进行对比,利用 Kappa 系数衡量模型预测的准确性。通常,当 Kappa 大于 0.6 时,认为具有高度的一致性。经计算,2010 年土地利用类型模拟结果的 Kappa 系数为 0.921 7,即模拟结果与实际结果相近,表明 CA-Markov 模型可用于研究区土地利用类型的预测。因此基于该模型,利用 2000 年和 2010 年的土地利用类型图,预测得到 2020 年的土地利用类型图,如图 6 所示。

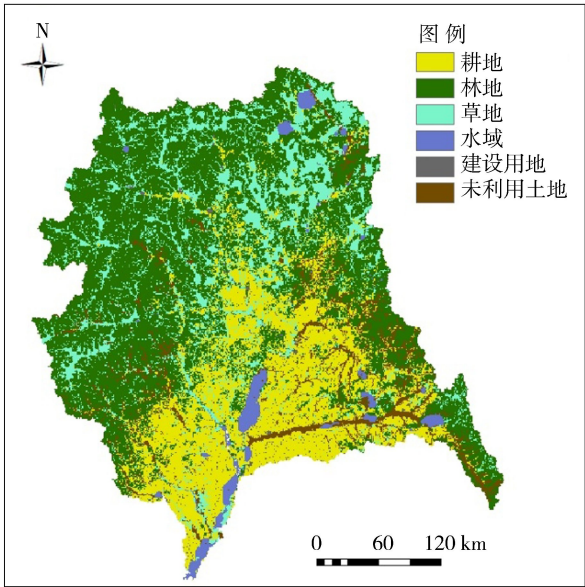


图 6 研究区 2020 年土地利用模拟图

4.2 情景建立与模拟结果分析

为研究在相同条件下流域径流受土地利用变化和水库运行综合影响的变化趋势,本文在 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 种土地利用方式下设置有/无水库运行情景,采用 2008—2015 年的气象资料,选取流域出口处的富拉尔基站作为监测站,基于 SWAT 模型进行径流模拟,结果如表 4 和图 7、图 8 所示。

由表 4 和图 7、图 8,可以得出以下结论:①在相同的降水和水库运行条件下,随着土地利用的变化,研究区年均径流量呈先下降后上升趋势。其中,1990—2010 年为下降趋势,2010—2020 年为上升趋势。分析原因可能是,1990—2010 年流域的土地利用变化趋势是林地、草地转化为耕地,在国家政策的影响下 2010—2020 年土地利用变化趋势是耕地、林地转化为草地、水域;而耕地、林地面积和径流量是负相关,草地面积和径流量是正相关^[24]。②相比无水库运行的情景,有水库运行的情景下,流域多年平均月径流年内变化有所减小。其中,汛期的洪峰流量有所削减,非汛期的枯季径流有所增加。说明水

库发挥了削峰滞洪和调节径流的作用,对流域径流的年内分配有明显的影。

表 4 富拉尔基站不同情景多年平均径流量模拟结果

土地利用方式	水库情景	多年平均径流量/亿 m ³	与前一种土地利用方式比较	
			多年平均径流量变化值/亿 m ³	多年平均径流量变化率/%
1990 年方式	无水库	166.78		
	有水库	167.26		
2000 年方式	无水库	166.70	-0.08	-0.05
	有水库	167.20	-0.06	-0.04
2010 年方式	无水库	166.66	-0.04	-0.02
	有水库	167.19	-0.01	-0.01
2020 年方式	无水库	167.37	0.71	0.42
	有水库	167.69	0.50	0.30

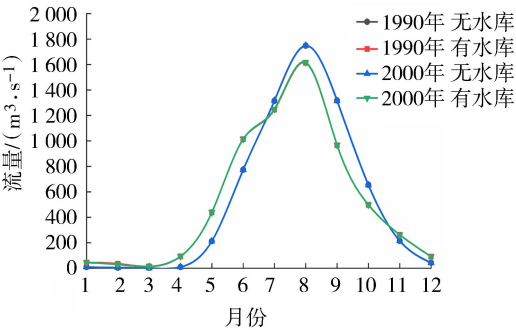


图 7 富拉尔基站 1990 年和 2000 年不同情景下月径流模拟结果

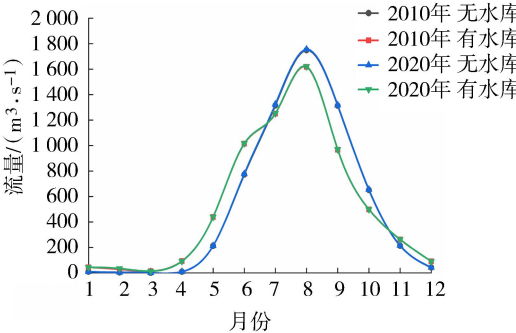


图 8 富拉尔基站 2010 年和 2020 年不同情景下月径流模拟结果

5 结 论

a. 1990—2010 年流域综合土地利用动态度为 0.25%,土地利用类型未变化的面积为 84.9%,流域整体的土地利用变化不明显,对径流变化影响较小;尼尔基水库运行后下游径流量变化显著,其中汛期洪峰流量削减,非汛期枯季径流增加,对径流变化影响较大。

b. 利用 1981—2000 年资料验证了 SWAT 模型适用于研究区径流模拟;利用 2008—2015 年资料定量评估了土地利用变化和水库运行对径流变化的影响,水库运行占 92.86%,土地利用变化占 7.14%。相比土地利用变化,水库运行对流域径流变化的影

响占主导作用。

c. 基于 CA-Markov 模型预测的土地利用,设置情景分析得到,在相同的降水 and 水库运行条件下,1990—2020 年的土地利用变化具有使流域年均径流量先减小后增大的效应;相比土地利用变化,水库运行对径流变化的影响更明显,对其年内分配有显著影响。

参考文献:

[1] 李继清,朱一鸣,李建昌,等. 变化环境对潮河下游径流一致性的影响[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(3):5-12. (LI Jiqing,ZHU Yiming,LI Jianchang,et al. Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of Chao River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3):5-12. (in Chinese))

[2] 王启猛,张捷斌,付意成. 变化环境下塔里木河径流变化及其影响因素分析[J]. 水土保持通报,2010,30(4):99-103. (WANG Qimeng,ZHANG Jiebin,FU Yicheng. Runoff change and its influencing factors under changing environment in Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4):99-103. (in Chinese))

[3] 李昌峰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤,2002,34(4):191-196. (LI Changfeng,GAO Junfeng,CAO Hui. Current situation and trend of research on the impact of land use change on water resources[J]. Soils, 2002, 34(4):191-196. (in Chinese))

[4] BROWN A E,ZHANG Lu,MCAHON T A,et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology,2005,310(1/2/3/4):28-61.

[5] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报,2014,34(6):1559-1567. (GUO Juntao,ZHANG Zhiqiang,WANG Shengping,et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a watershed of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6):1559-1567. (in Chinese))

[6] 荣艳淑,胡玉恒,冯瑞瑞,等. 广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):121-126. (RONG Yanshu,HU Yuheng,FENG Ruirui,et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(2):121-126. (in Chinese))

[7] BORMANN H. Evaluation of hydrological models for

scenario analyses: signal-to-noise-ratio between scenario effects and model uncertainty [J]. Advances in Geosciences,2005,5:43-48.

[8] 郭生练,王金星,彭辉,等. 考虑人类活动影响的丰满水库洪水预报方案[J]. 水电能源科学,2000,18(2):14-17. (GUO Shenglian,WANG Jinxing,PENG Hui,et al. A flood forecast model taking into account the human activity impact[J]. Water Resources and Power, 2000, 18(2):14-17. (in Chinese))

[9] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.

[10] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,BRAUN D P,et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. River Research & Applications, 1998, 14(4):329-340.

[11] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):1-7. (BAN Xuan,SHI Chongwen,GUO Hui,et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4):1-7. (in Chinese))

[12] 陈伟东,包为民,张乾,等. 基于 IHA 分析锦江水库对下游径流的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2015,37(3):23-27. (CHEN Weidong,BAO Weimin,ZHANG Qian,et al. Evaluation of influence of Jinjiang Reservoir on downstream hydrological regimes based on IHA [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015,37(3):23-27. (in Chinese))

[13] 黄草,黄梦迪,胡铁松,等. 拉萨河干流梯级水库库容—径流响应关系[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):64-70. (HUANG Cao,HUANG Mengdi,HU Tiesong,et al. Storage-runoff response of cascade reservoirs in mainstream of Lhasa River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(1):64-70. (in Chinese))

[14] COSTA M H,AURÉLIE B,CARDILLE J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1/2/3/4):206-217.

[15] 徐成汉. 三峡水库蓄水前后对乌江流域径流影响分析[J]. 长江工程职业技术学院学报,2017,34(2):4-7. (XU Chenghan. Analysis of influences of Three Gorges Reservoir on runoff of Wujiang Basin before and after impoundment [J]. Journal of Changjiang Institute of Technology,2017,34(2):4-7. (in Chinese))

(下转第 62 页)