

基于 SWAT 分布式流域水文模型的下垫面变化和水利工程对径流影响分析

孙新国, 彭勇, 周惠成

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 近年来随着人类活动的加剧, 兴建了许多中、小型水利和水土保持工程, 迅速改变着流域的自然面貌, 因而改变了径流的原有规律。选取 1960 以前水利工程较少的时期作为人类活动不明显期来率定 SWAT 模型参数, 对于 1990 以后人类活动稳定期的径流分别设置 3 个情景: 应用原 SWAT 模型、应用只考虑下垫面变化的 SWAT 模型和应用考虑下垫面变化和水利工程影响的 SWAT 模型分别进行模拟。对于五道沟以上流域和流域内东丰、磐石、样子哨 3 个子流域模拟结果显示: 考虑下垫面变化和水利工程影响后的径流模拟相关系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 分别从 0.82、0.56 提高到 0.91、0.79, 分别提高了 11.0% 和 41.1%。其中模拟精度的提高量中 91.3% 是由于考虑水利工程作用所引起的, 剩余部分是由考虑下垫面变化引起的。相比下垫面变化, 水利工程运行对该流域径流变化占据主导作用。

关键词: SWAT 模型; 水利工程; 下垫面变化; 模型参数; 径流

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0033-07

Impacts of land cover change and hydraulic project on runoff based on SWAT distributed watershed hydrological model

SUN Xinguo, PENG Yong, ZHOU Huicheng

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: With the intensification of human activities, a lot of hydraulic projects such as reservoirs, dams, levees, flood storage and detention areas have been built, which have completely changed the natural water flow. The soil and water assessment tool (SWAT) was calibrated and verified in the baseline period before 1960s. It simulated the runoff after 1990s with stability human activity. It set up the three circumstances such as natural SWAT, SWAT with just concerning land cover change and SWAT with concerning hydraulic projects activities as well as land cover change. The simulated results of Wudaogou, Yangzishao, Dongfeng and Panshi hydrological station show that the correlation coefficient R^2 and Nash coefficient NSE increases from 0.82, 0.56 to 0.91, 0.79. The 91.3% precision of the increase value is due to the role of hydraulic project, and the remainder is caused by the change of underlying surface. The operation of hydraulic project plays a leading role in the runoff change of the basin.

Key words: SWAT; hydraulic project; land cover change; model parameter; runoff

1 研究背景

近年来, 世界上很多流域径流呈现下降趋势, 相比气候变化, 人类活动的影响在很多流域径流变化扮演更主要的角色。特别是在人口众多, 水资源紧张的流域, 经济的快速发展使得土地利用类型发生

显著的变化, 与此同时为了提高水资源的利用率修建了大量水利工程。这些水利工程的运行和土地利用的变化改变了原有水文循环过程, 使得原有水文模型精度下降, 不利于流域兴利和防洪工作的开展。因此识别下垫面变化和水利工程影响对径流的影响迫在眉睫, 国内外学者对此做了很多的研究^[1-5]。

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2015-10-29

基金项目: 重大国际(地区)合作研究项目(51320105010); 国家自然科学基金项目(51379027、51109025)

作者简介: 孙新国(1987-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 主要从事人类活动影响下的洪水预报方面研究。

通讯作者: 彭勇(1979-), 男, 湖北公安人, 博士, 副教授, 主要从事水文气象耦合不确定环境下的水库群优化调度。

下垫面变化通常与气候变化一起被认为是径流过程持续变化的两个因素, Wang Gangsheng 等^[6]使用改进 Bagrov 蒸发模型识别不同土地利用变化对径流的影响,并用月水量平衡模型模拟土地利用变化造成的径流变化量。随着 GIS 技术的发展,人类识别土地利用变化的精度越来越高,利用分布式模型模拟土地利用变化变得容易。Zhang Aijing 等^[7]用 SWAT 模型在不同年代径流模拟中使用不同土地利用 GIS 图,结果显示相比气候变化,土地利用变化等人类活动对径流影响程度更大。

为了满足日益增长的水利需求,流域修建了很多大型水利工程。然而社会经济和环境的后果有时会超过其带来的效益。中小水利工程可以满足不同类型的用水需求的同时避免大型水利工程的很多弊端。然而大量的中小水利工程由于人工控制能力差,会导致流域实测径流发生变化,生态系统较难恢复。目前大多数研究集中在中小水利工程的生态效应上,其水文效应研究较少。Deitch 等^[8]使用基于 GIS 的水文模型研究水利工程对径流的影响,结果发现干旱年影响程度达到 40%,常规年份影响程度为 50%。雒文生等^[9]从研究流域上大中水库及小水库群(包括塘堰)在防洪、灌溉、发电中的调蓄作用及运用基本规律出发,在天然流域产汇流预报原理基础上,提出了一种能考虑上游水利水电工程影响的径流预报方法。目前的研究大都将水利工程对径流的综合效应模拟出来,没有考虑不同类型水利工程的运行方式和他们的空间拓扑关系,同时水利

工程和土地利用作为人类活动的两个主要因素,二者的影响程度并没有很好的区分。

因此本文使用 SWAT 模型,结合水利工程的空间分布、不同类水利工程的运行方式和水利工程空间上的串并联关系,使用土地利用类型 GIS 图模拟了水利工程和下垫面变化下的径流变化,为流域水文工作提供了一定的参考。

2 研究流域下垫面变化及其水利工程建设概况

丰满Ⅱ区子流域内的辉发河是第二松花江上游的一个较大支流,全长 26 717 m,发源于辽宁省清原县龙岗山脉中部,流经清原、东丰、柳河、梅河口、辉南、磐石和桦甸 7 个县(市),在桦甸市头道沟附近注入松花江,最后一并汇入松花湖。本文选取丰满Ⅱ区子流域为研究区域,该流域属于半湿润地区,降水量年内分配不均,其中汛期 7、8 月降水占全年降水量的 44.7%,多年平均降水量为 720 mm,汛期年均降水量达 510 mm,占全年降水量的 70% 以上;流域出口控制站为五道沟水文站,流域面积 12 411 km²,其中流域内各类水利工程控制流域面积为 7 421.27 km²,占总流域面积的 63.98%。

2.1 下垫面变化

将 GIS 中提取的土地利用图整理为 8 大类型土地利用(林地、草地、湖泊、滩地、城镇及居民、沼泽、裸土裸岩、旱地)进行分析,20 世纪 80 年代和 90 年代各类型土地利用变化情况如表 1 和图 1 所示。

表 1 20 世纪五道沟以上流域下垫面变化分析表

分类	面积/km ²			变化比例/%	变化面积占总面积的比例/%
	80 年代	90 年代	变化值		
林地	5961.3	6215.8	254.5	4.27	2.09
草地	163.8	349.5	185.8	113.43	1.53
湖泊	136.3	140.7	4.4	3.23	0.04
滩地	104.2	31.5	-72.7	-69.77	-0.60
城镇及居民	420.6	417.8	-2.9	-0.69	-0.02
沼泽	9.4	13.6	4.2	44.68	0.03
裸土裸岩	0.2	0.8	0.5	250.00	0.00
旱地	5377.3	5003.4	-373.9	-6.95	-3.07

2.2 水利工程建设情况

第二松花江丰满以上流域位于吉林省中南部地区,流域内水利工程众多,人类活动影响复杂。2002 年丰满发电厂利用卫星遥感资料进行水体识别,发现整个流域内水面面积大于 4 000 m² 的明水水体个数

竟达到了 9 335 个^[10]。产汇流预报时整个丰满水库流域划分为 3 个区:丰满水库蓄水(Ⅰ区)、五道沟以上(Ⅱ区)与白山水库以上(Ⅲ区)。总体来讲,相比Ⅲ区,Ⅰ、Ⅱ两区的水利工程建设更为突出,小型水库数以百计,塘坝更是不可胜数。Ⅰ、Ⅱ两区水库与塘坝的

控制面积达到 8 445 km²,占相应流域面积的 35.94%;可蓄水量达 10.21 亿 m³,是丰满水库总库容 110 亿 m³ 的 9.28%,是防洪库容 27 亿 m³ 的 37.81%。其中Ⅱ区水库与塘坝的控制面积竟达到 7 421 km²,占相应流域面积的 63.98%,对产汇流的影响最大;近年的洪水预报实践也表明,Ⅱ区内小水库塘坝拦洪或泄洪作用明显。因此,本文以丰满Ⅱ区为典型开展研究,该流域属半湿润地区,降水量年内分配不均,7、8 月降水占全年降水量的 44.7%,多年平均降水 720 mm,汛期年均降水 510 mm,占全年降水量的 70%以上;流域出口控制站为五道沟水文站,流域面积 12 411 km²,其中流域内各类水利工程控制流域面积为 7 421.27 km²,占总流域面积的 63.98%;流域中共有雨量站 14 个,流量站 4 个。根据最大库容大小将流域内水库(塘坝)划分成 $r_{\max} = 5$ 种类型。流域内水系、水库与站点分布情况及流域内不同水文站(东丰、磐石、样子哨和五道沟)控制流域的分布情况如图 2 所示。根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL252-2000 统计流域内的各类型水利工程库

容和控制面积如表 2 所示。

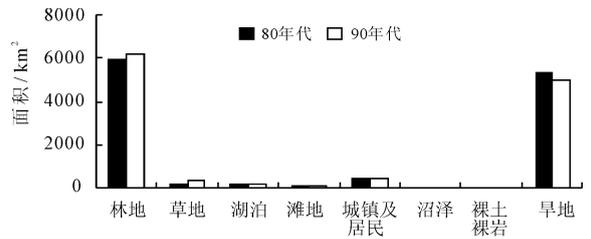


图 1 五道沟以上流域 20 世纪 80、90 年代土地利用变化对比图

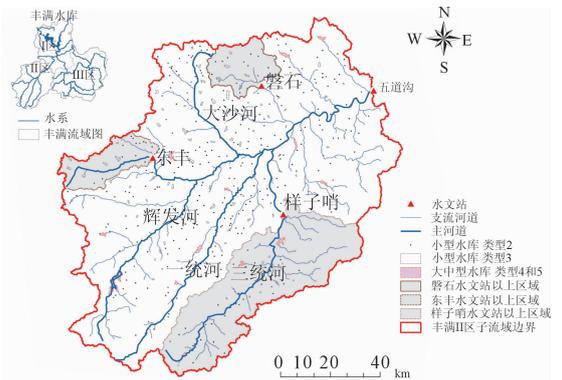


图 2 丰满Ⅱ区子流域内不同水文站控制流域图

表 2 丰满Ⅱ区各量级水库基本情况统计表

类型	分级库容/ 10 ⁶ m ³	个数/座	库容/ 10 ⁶ m ³	占总库容 比例/%	控制面 积/km ²	占总控制 面积比例/%
1(塘坝)	≤0.1		54.62	5.70	2252.06	30.35
2(小Ⅱ型)	0.1~1	390	152.63	15.93	1989.37	26.81
3(小Ⅰ型)	1~10	86	255.07	26.62	1902.19	25.63
小型汇总	0.1~10	476	407.7	42.55	3891.56	52.44
4(中型)	10~100	12	179.82	18.77	729.65	9.83
5(大型)	≥100	1	316	32.98	548.00	7.38
合计			958.14	100	7421.27	100

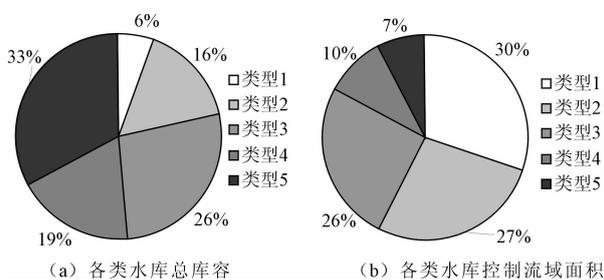


图 3 丰满Ⅱ区流域内每类水库(塘坝)总库容、控制流域面积百分比

研究流域调查显示,流域内共有大型水库 1 座,中型水库 12 座,小Ⅰ型水库 86 座(其中 23 座有运行资料),小Ⅱ型水库 390 座,塘坝更是无以计数。从表 2 也可以看出,小型水库和塘坝控制的流域面

积达到近 83%,从表 2 和图 3 中可看出,小型水库(类型 2 和 3)控制流域面积和最大库容所占比重均为最大,小型水库(类型 2 和 3)的蓄放作用会对流域径流模拟造成较大影响。

在丰满Ⅱ区子流域内,不同水文站(东丰、磐石、样子哨和五道沟)控制流域内全部水库(塘坝)总库容在不同年代的分布情况如图 4、图 5 所示。

从图 4 和图 5 可看出,丰满Ⅱ区子流域内大量水库(塘坝)兴建于 20 世纪 60-90 年代,在 1956 年之前以及 20 世纪 90 年代之后水库(塘坝)兴建较少。因此,可将 1956 年之前和 20 世纪 90 年代以后分别作为人类活动不明显期和人类活动相对稳定期。

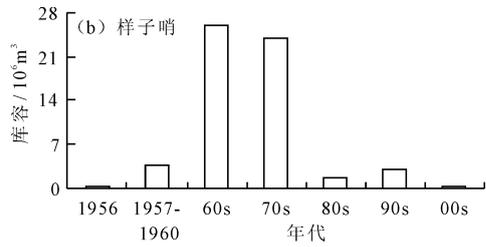
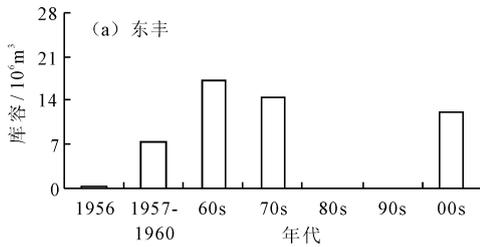


图4 不同年代东丰和样子哨水文站控制流域内水库(塘坝)总库容

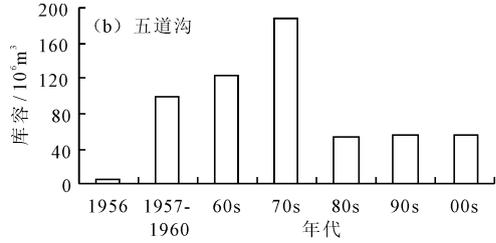
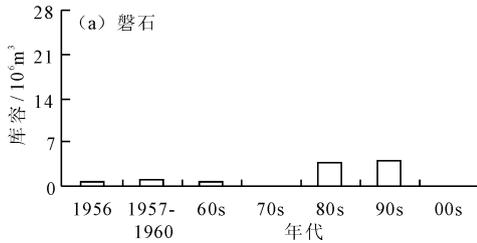


图5 不同年代磐石和五道沟水文站控制流域内水库(塘坝)总库容

3 考虑水利工程建设和下垫面变化的 SWAT 模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)^[11]是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度的水文模型。SWAT模型对空间的描述方法是首先根据流域DEM属性及最小河道汇水面积阈值将流域划分为多个子流域,保持流域地理位置及子流域之间的空间关系;然后根据特定的土地利用类型与土壤类型组合将子流域划分为多个水文响应单元(hydrologic response units, HRUs),反映不同土地利用/植被覆盖和土壤类型引起的流域水文过程变化^[12-15]。模型以HRUs为最小水文模拟单元进行流域水文模拟,汇总子流域内所有HRUs的产流、沉积和非点源负荷量,通过河网汇流演算获得子流域出口流量和污染物量。

本文主要针对流域水文循环模拟中的径流模拟部分进行研究,仅使用模型中的水文过程子模型。SWAT模型模拟的流域水文循环分两阶段,即水文循环的陆面阶段和水文循环的水面阶段。

3.1 考虑水利工程建设的的水文建模方法

本文提出的考虑中小型水利工程信息的分布式流域水文模拟(SWAT模型)方法,首先根据丰水年汛期Landsat TM遥感资料^[16]提取的水面信息与中小型水利工程设计库容资料建立不同坡度、流域面积及设计库容的各类水利工程水面和库容之间关系;然后通过分析子流域内不同类型水利工程间的空间拓扑关系建立中小型水利工程串并联计算关

系;考虑中小型水利工程信息的分布式流域水文模拟方法(改进SWAT模型)框架如图6所示,其中灰色区域为改进部分。

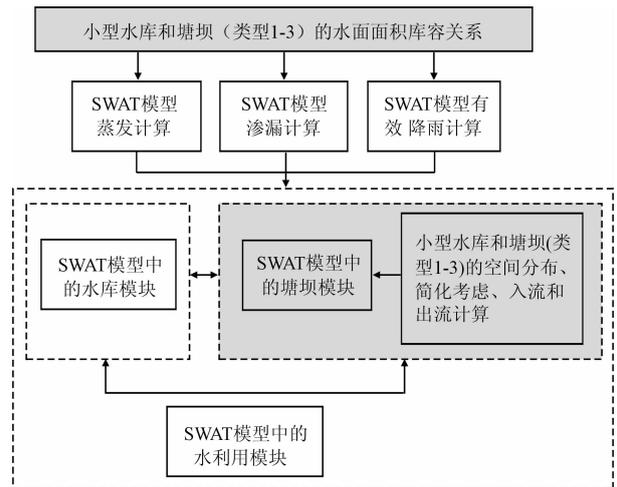


图6 考虑中小型水库(塘坝)信息的改进SWAT模型框架

3.2 中小型水利工程串并联计算关系

(1)大中型水库。丰满Ⅲ区子流域内13座大中型水库具有详细的设计与运行资料,可按其空间分布情况加入到SWAT模型中,模型将其坝址作为划分子流域的依据,各个子流域通过河网连接,大中型水库由模型的水库模块直接进行分布式模拟计算。

(2)小型水库和塘坝。通过对SWAT模型中考虑小型水库(塘坝)的水文模拟方法(塘坝模块)进行改进,丰满Ⅲ区子流域内大量无设计和运行资料的小型水库(塘坝)由改进后的塘坝模块进行模拟,其在中小型水库串并联计算关系如图7所示。

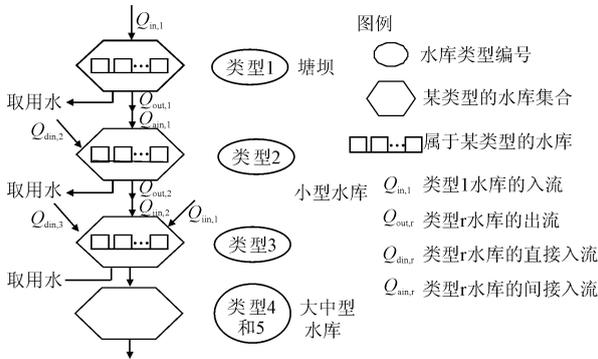


图 7 中小型水库(塘坝)串并联计算关系示意图

3.3 考虑下垫面变化的水文建模方法

SWAT 模型需要输入研究流域的土地利用数据,以反映研究期内不同地表覆被类型对产流的影响。本文首先对土地利用数据的投影类型和数据精度进行转换,使之与 DEM 数据具有相同的投影类型和数据精度;然后在充分了解流域概况的情况下,对土地利用数据进行重分类,将栅格文件中的代码转化为 SWAT 模型能识别的代码,完成土地利用数据库的构建。通过使用不同时期的土地利用数据反映下垫面变化对径流的影响。

4 结果和讨论

4.1 小型水库和塘坝的水面面积 - 库容关系

小型水库和塘坝水面面积被用来计算水面接受雨量及发生在其上的蒸发和渗漏。水库/塘坝水面面积随着其蓄水量的变化而变化,小型水库和塘坝水面面积随着其蓄水量的变化而变化。

本文使用 2005 年 9 月 9 日发布的 Landsat TM 数据提取丰满Ⅱ区子流域内水库的水面面积^[17]。不同特征水库划分及各组水库水面面积 - 库容关系确定方法如下:

(1) 根据水库每个划分指标值(坡度、流域面积与正常库容比值和正常库容)的分布情况设定水库初始分组,即各个划分指标的初始分组点。

(2) 计算每组水库平均特征,即平均库容、平均流域面积和平均坡度,确定丰满Ⅱ区子流域内与平均特征相似的中型水库。由于已知中型水库的详细信息,使用中型水库 2005 年 9 月 9 日库容与其正常库容的比率来调整该组内水库正常库容。

(3) 计算每组水库水面面积与正常库容的对数相关系数及其相关系数。

(4) 调整划分指标的分组值,重复步骤(2),直到相关系数不再有显著提高。

根据该步骤最后得到的丰满Ⅱ区子流域内水库划分结果及各类型水库水面面积 - 库容关系如表 3 所示。

4.2 天然期模拟结果

选择具有 20 世纪 50 年代流量资料的“样子哨”和“五道沟”两个水文站作为人类活动不明显期的物理参数率定站。本文只对影响径流预测的与融雪、地表径流、地下径流、壤中流和蒸发相关的 11 个模型参数进行率定。物理参数率定时期两个水文站处的月径流模拟结果如图 8 和表 4 所示。由图表可以看出率定误差和相关系数均满足精度要求,因此可认为模型参数满足天然期自然径流模拟要求。

表 3 丰满Ⅱ区子流域内水库划分及每个水库划分的水面面积 - 库容关系

坡度/%	流域面积/正常库容	正常库容/ 10^4 m^3	水面面积 A - 库容 V 的对数关系	相关系数
0 ~ 15	≥ 0.14		$\log V = 0.4142 \log A - 0.7479$	0.8029
	< 0.14		$\log V = 0.7432 \log A - 2.0623$	0.7435
> 15	≥ 0.1	≤ 17	$\log V = 0.1037 \log A + 0.8082$	0.8979
		17 ~ 77	$\log V = 0.7056 \log A - 1.7734$	0.6325
	< 0.1	≥ 77	$\log V = 0.46 \log A - 0.0804$	0.7323
		< 77	$\log V = 0.7056 \log A - 1.7734$	0.6325
		≥ 77	$\log V = 0.46 \log A - 0.0804$	0.7323

注:流域面积, km^2 ; 正常库容 10^4 m^3 ; 水面面积, m^2 ; 库容, 10^4 m^3 。

4.3 考虑下垫面变化和水利工程影响模拟结果

为了模拟下垫面变化和水利工程运行对径流的影响,建立丰满Ⅱ区子流域改进前后 SWAT 模型,设置不同情景如下:

情景 S_0 :应用原 SWAT 模型进行人类活动相对

稳定时期流域水文模拟。

情景 S_1 :应用变化土地利用图和考虑水利工程运行的 SWAT 模型进行人类活动相对稳定时期流域水文模拟。

情景 S_2 :应用仅变化土地利用图的 SWAT 模型

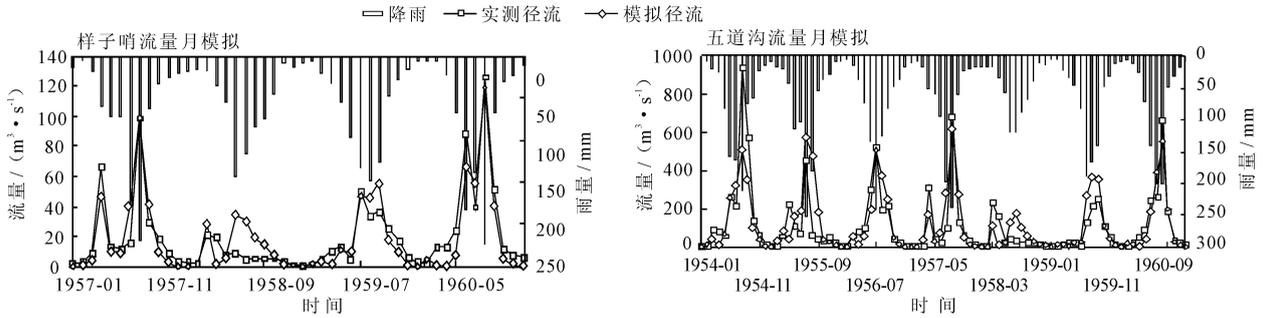


图8 物理参数率定时期(1960年前)水文站实测与模拟月流量

表4 物理参数率定时期模型在样子哨和五道沟两个水文站处的月径流模拟结果

水文站	MRE/%	R ²	NSE
样子哨(1957-1960)	-5.47	0.91	0.83
五道沟(1954-1960)	2.65	0.83	0.67

进行人类活动相对稳定时期流域水文模拟。

不同情景模拟结果如表5所示,以五道沟水文站为例,情景S₁和S₀模拟结果对比如图9所示,选择1998和2004年为典型详细分析情景S₂,S₁和S₀模拟结果,如图10所示。

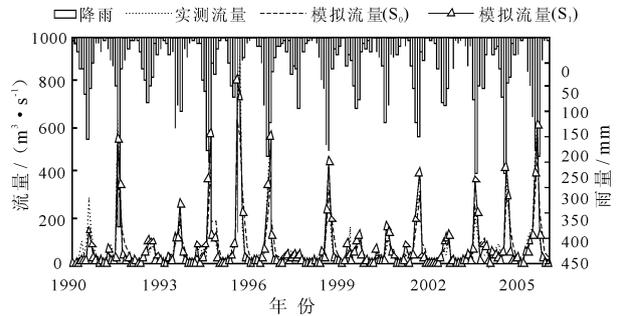


图9 “五道沟”水文站人类活动稳定期(1990-2005年)实测与模拟月流量

表5 1990-2006年改进SWAT模型情景模拟结果

水文站	S ₀			S ₁			S ₂		
	MRE/%	R ²	NSE	MRE/%	R ²	NSE	MRE/%	R ²	NSE
磐石	-24.72	0.89	0.77	-9.23	0.92	0.84	-23.11	0.89	0.78
东丰	9.48	0.82	0.56	9.16	0.91	0.79	9.4	0.83	0.58
样子哨	-5.22	0.93	0.84	0.96	0.95	0.89	-5.3	0.93	0.84
五道沟	-6.18	0.92	0.82	-0.37	0.96	0.92	-6.2	0.92	0.82

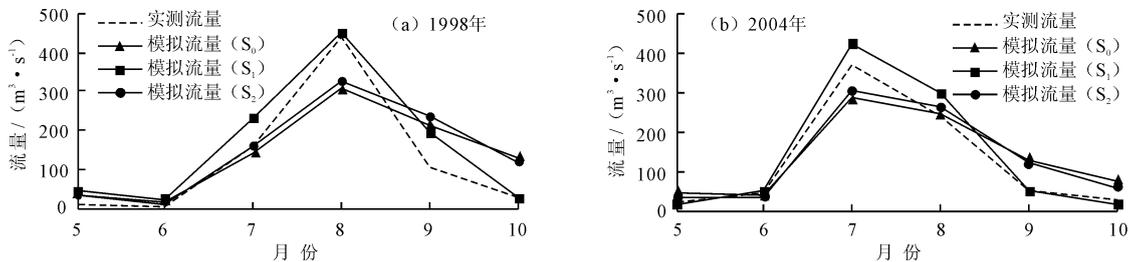


图10 1998和2004年汛期“五道沟”水文站实测与模拟月流量

由图9、10和表5可知,情景S₁与S₀相比,人类活动稳定期4个水文站处模拟精度都有了提高;其中磐石和东丰位于流域的上游,塘坝等中小水利工程的运行是主要的人类活动,样子哨和五道沟位于流域下游,水利工程的影响有互相抵消的情况。因此磐石和东丰2个水文站径流模拟精度提高的更明显。磐石站径流模拟相关系数R²和纳什效率系数NSE分别从0.89、0.77提高到0.92、0.84,分别

提高了3.4%和9.1%;东丰站径流模拟相关系数R²和纳什效率系数NSE分别从0.82、0.56提高到0.91、0.79,分别提高了11.0%和41.1%。样子哨站、五道沟站径流模拟相关系数R²和纳什效率系数NSE分别提高了2.2%、6.0%和4.3%、12.2%。

情景S₂与S₀相比,模拟精度没有明显的提高,只有东丰站稍微有一点提高,径流模拟相关系数R²和纳什效率系数NSE分别从0.82、0.56提高到0.83、

0.58,分别提高了 1.2% 和 3.6%。综合上述结论可知,径流模拟精度提高 91.3% 是由于考虑水利工程所引起的,剩余 8.7% 是由考虑土地利用变化引起的。2009 年丰满发电厂张喜峰等^[18]总结了丰满流域人类活动影响研究与洪水预报实践,主要是水利工程对径流的拦蓄作用。本文的研究成果证实了水利工程在径流变化中占据主导作用,且水利工程特别是中小水库塘坝是造成径流减小的主要因素。

5 结 论

本文基于分布式 SWAT 水文模型,结合流域水利工程运行和分布特征,构建了考虑下垫面变化和水利工程影响的径流模拟模型,通过设置分别单独考虑水利工程运行和下垫面变化,以及综合考虑下垫面变化和水利工程运行 3 种情景模式进行径流模拟,对比 3 种情景的模拟结果可以看出:考虑水利工程影响显著提高了径流模拟精度,而考虑下垫面变化的模拟结果并没有明显的提高。其中水利工程对径流的影响比重为 91.3%,下垫面变化的影响只占 8.7%。究其原因该流域水利工程众多,下垫面变化程度相对较小。

与原 SWAT 模型相比,改进 SWAT 模型能够根据不同水库和人类活动类型特点来考虑其对流域水文循环过程的影响,提高流域径流模拟精度。且改进 SWAT 模型中中小型水库(塘坝)串并联计算关系考虑是流域径流模拟精度提高的主要原因,可应用于具有大量资料难以获取水库的流域径流模拟。随着地理信息系统的完善,今后可以根据更为细致的遥感数据解析水利工程拓扑关系、地理位置和水面面积变化等信息进一步完善模型,提高流域水文模拟精度。

参考文献:

- [1] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Zhu Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 641 - 648.
- [2] Batallaa R J, Gómez C M, Kondolf GM. Reservoir - induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 290(1 - 2): 117 - 136.
- [3] 程春田,王本德. 考虑人类活动影响的流域水文模型参数的确定[J]. *大连理工大学学报*, 1995, 35(3): 400 - 404.
- [4] 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.
- [5] 熊金和,郭丽娟,同斌,等. 受水利工程影响的乌江流域洪水预报方法浅析[J]. *人民长江*, 2011, 42(6): 35 - 37.
- [6] Wang Gangsheng, Xia Jun, Chen Ji. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 206 - 216.
- [7] Zhang Aijing, Zhang Chi, Fu Guobin, et al. Assessments of Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China [J]. *Water Resource Management*, 2012, 26 (8): 2199 - 2217.
- [8] Deitch M J, Merenlender D A, Feirer S. Cumulative Effects of Small Reservoirs on Streamflow in Northern Coastal California Catchments [J]. *Water Resource Management*, 2013, 27(15): 5101 - 5118.
- [9] 雒文生,王祥三,宋星源,等. 受水利水电工程影响流域产流预报方法的探讨[J]. *水电能源科学*, 1990, 8(3): 242 - 250.
- [10] 曹明亮,周惠成,张弛,等. 基于遥感数据的小水库塘坝拦洪计算方法研究与应用[J]. *中国科学(技术科学)*, 2011, 41(8): 1063 - 1069.
- [11] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous - time water and sediment - routing model for large basins [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121(2): 171 - 183.
- [12] 桑学锋,周祖昊,秦大庸,等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用[J]. *水利学报*, 2008, 39(12): 1377 - 1383 + 1389.
- [13] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79 - 86.
- [14] 代俊峰,崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型 - I 模型构建的原理与方法[J]. *水利学报*, 2009, 40(2): 145 - 152.
- [15] 代俊峰,崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型 - II 模型应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(3): 311 - 318.
- [16] Cao Mingliang, Zhou Huicheng, Zhang Chi, et al. Research and application of flood detention modeling for ponds and small reservoirs based on remote sensing data [J]. *SCIENCE CHINA Technol Sci* 2011, 54(8): 2138 - 2144.
- [17] 初京刚. 基于多源信息的分布式水文模拟及优化算法应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [18] 张喜峰,王进,李文龙,等. 丰满水库人类活动影响研究与洪水预报实践[J]. *大坝与安全*, 2009(4): 34 - 38.