

潘家口水库流域土地利用变化的水文响应分析

依热下提·卡米力, 李建柱, 冯平

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:以潘家口水库流域为研究区域,采用 SWAT 分布式水文模型定量评估土地利用变化对流域径流过程的影响。相对于 1980 年土地利用情景,2006 年土地利用变化主要表现为耕地减少,林地和草地面积增大,而水域和城镇用地变化相对较小。利用 3 个水文站 1986 年 1 月至 1999 年 12 月的月径流实测数据进行模型的校准和验证。在不同土地利用情景下,对流域的天然径流过程进行模拟分析,模拟结果显示,与 1980 年土地利用情景相比,2006 年土地利用情景下的多年平均径流减少 11%;对于不同典型水文年份而言,土地利用变化对枯水年的影响最大,对丰水年和平水年的影响相当;土地利用变化对年径流的影响主要表现为汛期径流减少。潘家口水库流域水资源涵养能力有所增加。模拟研究土地利用变化对潘家口水库流域径流的影响对合理规划土地利用和流域水资源的综合管理具有现实意义。

关键词:土地利用变化;水文响应;SWAT 模型;潘家口水库流域

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)01-0047-05

Analysis of hydrological response to change of land use in Panjiakou reservoir watershed

Yirexiati · Kamili, LI Jianzhu, FENG Ping,

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Taking Panjiakou Reservoir watershed as study area, the paper applied distributed mechanism hydrological model SWAT (soil and water assessment tool) to quantitatively evaluate the effects of land use change on runoff process in the watershed. The changes land use in 2006 mainly showed the reduction of agricultural land the increase of forest and pasture area compared with that in 1980, and there were little changes in water area and urban land. It used observed monthly flow data from Jan. 1986 to Dec 1999 at three hydrologic stations to calibrate and validate the model. It simulated the natural runoff processes in different land use scenarios. The results showed that compared with land use scenarios of 1980, the average runoff of many years in 1986 decreased by eleven percent. For different typical hydrological years, the influence of land use change on runoff is the greatest in dry years and is general in wet years and mean years; the influence of land use change on runoff mainly indicated the decrease of runoff in flood season. The result shows that water conservation capacity of Panjiakou Reservoir watershed is increasing in resent years. The study on impacts of land use change on runoff in Panjiakou reservoir watershed has practical significance for the plan of reasonable land use and comprehensive management of local water resources.

Key words: land use change; hydrological response; SWAT model; Panjiakou reservoir watershed

流域尺度上土地利用变化的水文响应研究方法归结为流域对比试验法、水文特征参数法和流域水文模型模拟法 3 类。早期的土地利用变化的水文响应研究大都采用试验流域的方法,但是此方法有研

究周期长、无法把握主要因子、可对比性差等缺点。在较长时间尺度上,土地利用变化的水文响应最终表现在流域水量平衡的蒸发分量上,所以许多学者用径流系数这一特征参数评估年际土地利用变化的

收稿日期:2014-09-14; 修回日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51209157、51179117)

作者简介:依热下提·卡米力(1988-),男,新疆阿克苏人,硕士研究生,研究方向为水文过程。

通讯作者:李建柱(1981-),男,河北沧州人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水文过程。

水文响应,但是特征参数法仅是简单的数理统计模型,无法揭示水文响应的物理机制。20世纪70年代以来,土地利用变化的水文响应研究由传统的统计分析方法转向具有一定物理基础的水文模型方法^[1]。土地利用导致土地覆被发生变化,从而影响降水的截留、下渗、蒸发等水文过程及产汇流过程,进而影响流域出口断面的流量过程,引起径流量增加或减少。土地利用变化中,对水文过程影响最为明显的是植被变化。利用具有物理意义的分布式水文模型研究土地利用变化对径流的影响成为当今水文学研究热点^[2]。

本文以潘家口水库流域为研究对象,分别选取两个典型时期的土地利用情景,基于 SWAT 构建该流域的分布式水文模型,研究土地利用变化对入库年径流的影响,以期对流域土地利用规划和水资源综合管理提供科学依据。

1 研究区概况

潘家口水库坝址以上流域面积 3.37 万 km²,其控制面积占滦河流域面积的 75.3%,滦河在河北省承德市境内流域面积 2.65 万 km²,占潘家口水库以上流域面积的 78.6%。潘家口水库坝址以上流域水系发育,流域面积较大的支流主要有闪电河、小滦河、兴洲河、伊逊河、武烈河、老牛河、柳河、瀑河等。流域地形差异比较大,总体变化趋势是西北高东南低,海拔高度为 1 300 ~ 1 800 m。研究区多年平均降水量 548 mm,总趋势由北向南递增。区域多年平均气温为 7.5 ℃。潘家口水库于 1979 年汛末建成,是开发滦河水利资源、调节滦河径流的骨干工程,是引滦入津供水的主体工程,以供水为主,兼顾防洪、发电。潘家口水库流域水系和校准水文站见图 1。

2 模型与方法

2.1 SWAT 模型简介

SWAT 是美国农业部农业研究中心 (USDA - ARS) 开发的分布式大中尺度流域水文模型,该模型能够体现流域模型中各物理参数的空间差异,揭示下垫面状况的时空差异对流域径流形成的影响^[3]。在北美、西欧以及中国的流域水文模拟中得到了广泛的应用,并取得了很好的应用效果^[4]。

SWAT 模型能利用 GIS 和 RS 提供的空间信息模拟多种不同水文过程,包括产流、汇流、产沙以及化学物质的输移与转化等。本研究主要利用其水文循环模块来模拟潘家口水库流域的降水 - 径流关

系。SWAT 模拟的流域水文过程分为水循环的陆面部分(即产流和坡面汇流部分)和水循环的水面部分(即河道汇流部分)等 2 个部分。将整个流域按出水口位置划分成若干个自然子流域,然后再根据土地利用和土壤类型划分成多个水文响应单元 (Hydrologic Response Units, 简称 HRU),以水文响应单元作为最小模拟单元,利用水量平衡理论描述陆相水文循环过程,河道内采用变动储水系数模型或马斯京根法计算河道汇流^[5]。

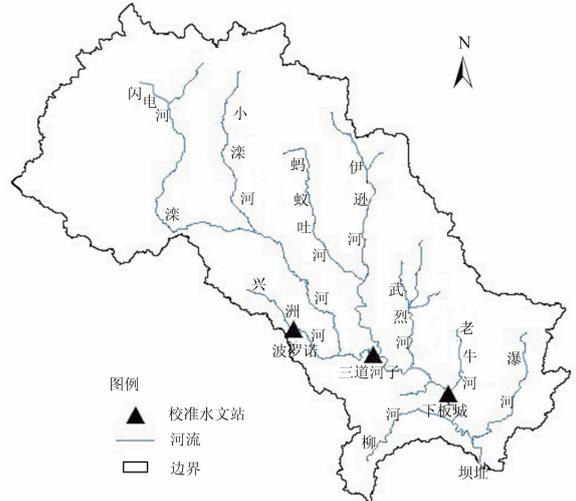


图 1 潘家口水库流域水系及水文站

2.2 数据收集与处理

采用嵌套入 ArcGIS 9.0 软件的 ArcSWAT 2009 对不同土地利用情景进行分布式水文模拟。空间数据中栅格数字高程图 (DEM) 来自于国际科学数据服务平台 ASTER GDEM 数据集,测量时期为 2009 年,精度为 90m;土地利用/覆盖图来自于中国科学院遥感应用研究所,分别选择 1980 和 2006 年两期的土地利用图,精度为 250 m;土壤类型图及土壤数据来自于中国科学院南京土壤研究所,比例为 1: 100 万。在 ArcSWAT 中可直接叠加不同精度的地形、土地利用和土壤类型图,从而实现流域的划分。降水和径流数据来自于《中华人民共和国水文年鉴海河流域水文资料》,气温、风速、相对湿度、日照时数等气象资料来自于中国气象科学数据共享服务网中国地面国际交换站气象资料日值数据集,数据范围为 1983-01-01 - 1999-12-31。

为了使原始数据与 SWAT 模型数据结构一致,土地利用图重分类成耕地、林地、草地、水域和城镇用地等 5 种类型。将土壤粒径由国际制转换成模型适用的美制标准,利用 SPAW 软件计算土壤层有效持水量、饱和导水率、土壤湿密度等参数。通过

SWAT 的流域自动划分功能,将研究区域划分为 32 个子流域,436 个 HRU。子流域划分结果见图 2。



图 2 子流域划分示意图

2.3 模型率定与验证

利用与 SWAT 模型相配套的自动率定软件 SWAT-CUP 进行模型的率定与验证。SWAT-CUP 提供了 4 种优化算法,本文选择其中的 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 算法。通过敏感性分析,得到对模型结果影响较大的 14 个参数。对最为敏感的参数 CN2,采取不同土地利用类型分别率定的方法。最终所选敏感参数及其率定方法见表 1。

表 1 敏感参数及其率定方法

参数名	定义	所属模块	率定方式	率定范围	
				下限	上限
CN2_AGRL	耕地 SCS 径流曲线系数	.mgt	浮动	-0.25	0.25
CN2_FRST	森林 SCS 径流曲线系数	.mgt	浮动	-0.25	0.25
CN2_PAST	草地 SCS 径流曲线系数	.mgt	浮动	-0.25	0.25
SURLAG	地表径流滞后系数	.bsn	赋值	1	24
EVRCH	河道的蒸发系数	.bsn	赋值	0.5	1
GW_DELAY	地下水滞后系数	.gw	赋值	0	500
ALPHA_BF	基流 α 退水常数	.gw	赋值	0	1
GWQMN	浅层地下水径流系数	.gw	赋值	0	5000
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	.gw	赋值	0.02	0.2
REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	.gw	赋值	0	500
ESCO	土壤蒸发补偿系数	.hru	赋值	0.01	1
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	.hru	浮动	-0.25	0.25
CH_N2	主河道的曼宁系数	.rte	赋值	0	0.3
CH_K2	河道的有效渗透系数	.rte	赋值	0	150
ALPHA_BNK	河岸水流的退水常数	.rte	赋值	0	1
SOL_AWC(1)	所有 HRUs 第 1 层的 AWC 值	.sol	浮动	-0.2	0.4

将模型模拟期开始的 1983 - 1985 年作为模型预热期,利用资料条件较好的波罗诺、三道河子和下板城 3 个水文站的实测径流资料校准模型,1986-01

- 1996-12 为校准期,1997-01 - 1999-12 为验证期。本文用确定性系数 R^2 、Nash - Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 和相对误差 Re 评价模型模拟精度,其中确定性系数 R^2 、Nash - Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 和相对误差 Re 的计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)(Q_{pi} - \bar{Q}_p)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^2} \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Q_{oi} 为实测径流; Q_{pi} 为模拟径流; \bar{Q}_o 为实测径流均值; \bar{Q}_p 为模拟径流均值; n 为实测数据个数; Re 为模型相对误差; P_i 为模拟值; O_i 为实测值。

各个水文站月径流模拟值与实测值的 R^2 、 E_{ns} 和相对误差 Re 见表 2。3 个站模拟的径流结果与实测值对比见图 3。从表 2 可以看出,在模型率定和验证期,模拟结果与实测值拟合较好,效率系数一般在 0.6 以上,且相对误差在 10% 以内,而从图 3 也可以看出,月径流的模拟过程与实测值具有统一的变化趋势,因此,可以采用验证的模型进行研究土地利用变化对流域水文过程影响分析。

表 2 SWAT 模型月径流模拟结果评价

站名	校准期(1986 - 1996)			验证期(1997 - 1999)		
	R^2	E_{ns}	$Re / \%$	R^2	E_{ns}	$Re / \%$
波罗诺	0.68	0.67	-6.1	0.79	0.69	-5.2
三道河子	0.64	0.61	3.8	0.78	0.64	9.2
下板城	0.69	0.66	4.5	0.59	0.55	6.7

3 模拟分析结果

3.1 土地利用变化对流域径流的影响

在已校准好的模型中输入 2006 年的土地利用数据,模拟 1986 - 1999 年的流域径流过程。与 1980 年土地利用情景相比,2006 年土地利用情景下的流域多年平均径流量减少了 2.16 亿 m^3 ,减少 11%。从表 3 可以看出,相对于 1980 年的土地利用状况,2006 年耕地面积减少 12.11%,林地面积增加 7.13%,草地面积增加 7.3%,水域减少 0.82%,城镇建设用地及其它用地减少 1.51%。这与研究区内 2000 年以后实施的退耕还林、退耕还草措施有

关,由此推断,林地面积增大,植被覆盖度增大会引起流域径流减少。已有研究也表明:森林面积增大,会提高流域的涵养能力,减少流域径流量^[6];灌木林地和草地的水土土壤条件比较差,其径流系数 CN 较小,所以草地面积的增加引起径流量的减少^[7];林地面积的增加是潘家口水库流域径流减小的重要原因^[8]。

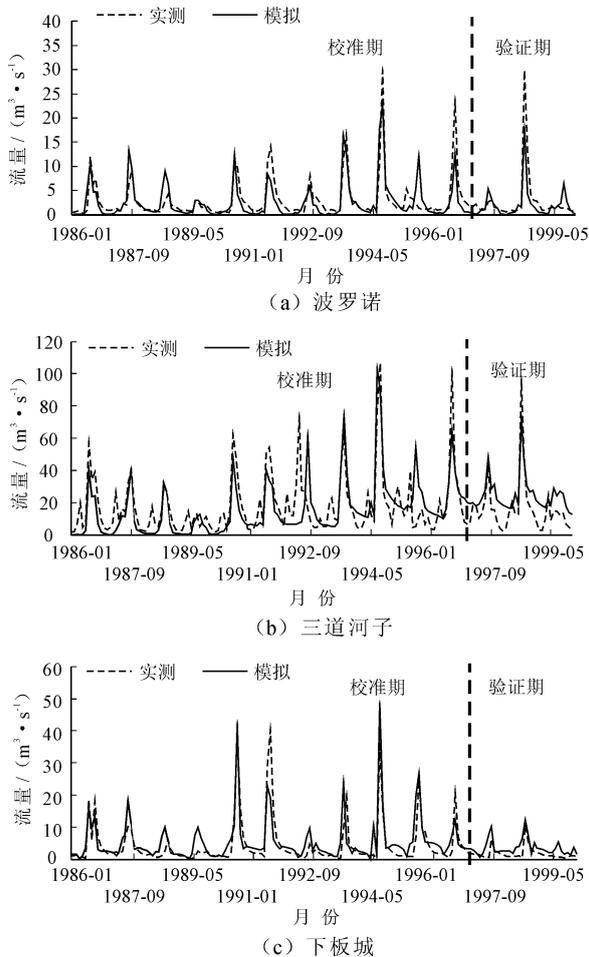


图3 月径流过程实测值与模拟值

表3 1980-2006年土地利用组成与变化

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城镇用地和其它
1980年面积/km ²	6684.06	13589.76	10370.53	674.51	617.98
占流域面积比/%	20.93	42.55	32.47	2.11	1.94
2006年面积/km ²	2818.11	15867.18	12701.28	414.22	136.05
占流域面积比/%	8.82	49.68	39.77	1.30	0.43
相对变化/%	-12.11	7.13	7.30	-0.82	-1.51

3.2 土地利用变化对典型水文年份年径流的影响

为研究该流域土地利用变化对不同水文年份年径流的影响,选取1983至1999年期间丰、平和枯水年进行分析。对潘家口水库流域降水资料进行频率

分析,得到频率为5%,50%,95%的年降水量分别为631,472和360 mm,分别选取与不同频率下降水量相接近的1990、1993和1989年作为典型的丰水、平水和枯水年份。从图4可见,2006年土地利用情景下典型年份的模拟径流量均小于1980年土地利用情景下的相应模拟值。其中1989年的变化幅度最大,为12%,1990和1993年减幅分别为5%和4.9%。由此判断,1980-2006年的土地利用变化对枯水年的影响最大,对丰水年和平水年的影响相当。

3.3 土地利用变化对汛期和非汛期径流的影响

研究区降水年内分配不均匀,差异明显,6-9月份降水占全年总量的75%~85%^[9]。根据1980和2006年土地利用情景下1986-1999年的各月平均产流量,分析土地利用变化对汛期和非汛期径流的影响。

由图5可见,与1980年土地利用情景相比,2006年土地利用情景下的流域汛期平均产流量减少明显,平均幅度为9.3%。非汛期平均产流量变化甚微。由此可知,土地利用变化引起的流域年径流变化主要表现为汛期产流有所减少,而非汛期变化不明显。相较于1980年土地利用情景,2006年土地利用情景下的汛期产流量减少,说明植被覆盖的增加会降低汛期洪水灾害发生的频率和强度。

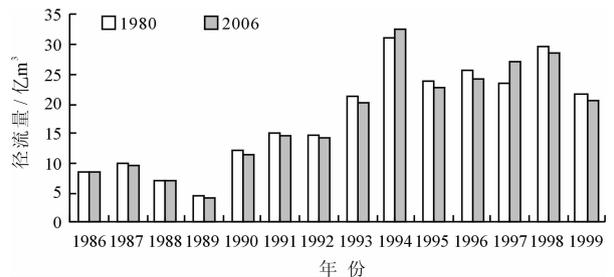


图4 1980和2006年土地利用情景下的1986-1999年流域年径流模拟

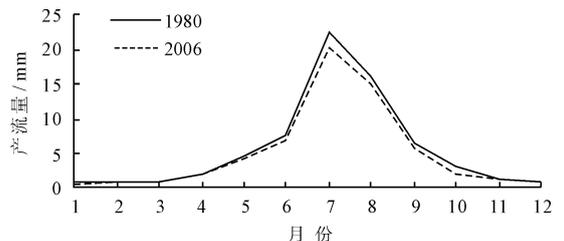


图5 1980和2006年土地利用情景下的各月平均产流量

4 结 语

(1) 本文首先利用1980年的土地利用图,建立

了潘家口水库流域的分布式水文模型,并通过三道河子水文站的实测数据,进行模型的率定与验证,采用确定性系数 R^2 和 Nash - Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 评价模型模拟精度,验证期 $R^2 = 0.78$, $E_{ns} = 0.64$, 说明该模型适用于潘家口水库流域。模型校准成功后,输入 2006 年土地利用数据,重演模拟 1986 - 1999 年的径流过程,在假定气候条件不变的情况下,分析土地利用变化的水文响应。

(2)1980 - 2006 年潘家口水库流域土地利用变化主要表现为耕地向林地、草地转变。模拟结果表明:与 1980 年土地利用情景相比,2006 年土地利用情景下的多年平均径流减少 11%;对于不同典型水文年份,土地利用变化对枯水年径流的影响最大,对丰水年和平水年的影响相当;潘家口水库流域的土地利用变化使得汛期径流减少,而非汛期径流变化不明显。

(3)影响流域径流变化的因素较多,除了土地利用变化以外,径流受到气候变化和人类直接取水等因素的影响,所以研究的局限性较大。本文模拟中未能考虑流域上游的水土保持工程措施,对研究结论产生一定影响。潘家口水库上游流域修建的大量谷坊坝等水土保持工程措施对径流变化的影响

需进一步研究。

参考文献:

- [1] 姚允龙,吕宪国,王蕾. 流域土地利用/覆被变化水文效应研究的方法评述[J]. 湿地科学,2009,7(1):83 - 88.
- [2] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然科学学报,2007,22(2):211 - 224.
- [3] Franchini M, Pacciani M. Comparative analysis of several conceptual rainfall - runoff models[J]. Journal of Hydrology,1991,122(1 - 4): 161 - 219.
- [4] 董国强,杨志勇,于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(3):111 - 115.
- [5] 董国强,杨志勇,史晓亮,等. 基于 SWAT 模型的滦河流域径流模拟[J]. 人民黄河,2013,35(6):46 - 49 + 52.
- [6] 李远平,苏志强,杨太保,等. 基于 SWAT 模型的渭河流域土地利用变化的水文响应模拟[J]. 生态与农村环境学报,2013, 29 (5):662 - 665.
- [7] 郭宗峰,马友鑫,李红梅,等. 流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究,2006,13(5):139 - 142.
- [8] 冯平,李建柱,徐仙. 潘家口水库入库水资源变化趋势及影响因素[J]. 地理研究,2008, 27(1):213 - 220.
- [9] 史晓亮. 基于 SWAT 模型的滦河流域分布式水文模拟与干旱评价方法研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2013.
- [8] 段晓男,王效科,欧阳志云,等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析[J]. 植物生态学报,2004,28(2):246 - 251.
- [9] 于瑞宏,刘廷玺,许有鹏,等. 人类活动对乌梁素海湿地环境演变的影响分析[J]. 湖泊科学,2007,19(4):465 - 472.
- [10] 尚士友,杜健民,李旭英,等. 乌梁素海富营养化适度控制的研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2003,34(5):588 - 592.
- [11] 蒙荣,尚士友,谢玉红,等. 乌梁素海生态恢复规划设计[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2001,22(3):61 - 65.
- [12] 梁文,张生. 乌梁素海表层底泥污染特征分析[J]. 节水灌溉,2011(4):35 - 39 + 43.
- [13] 孙惠民,何江,吕昌伟,等. 乌梁素海沉积物中有机质和全氮含量分布特征[J]. 应用生态学报,2006,17(4):620 - 624.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sediment ecological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975 - 1001.
- [15] 张晓晶,李畅游,张生,等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1770 - 1776.
- [16] 史小红. 乌梁素海营养元素及其存在形态的数值模拟分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [17] 刘海军. 洞庭湖湿地芦苇保护和开发利用的思考[J]. 造纸信息,2009(7):23 - 24.
- [18] 王丽敏. 水草收割工程对乌梁素海氮元素转移过程的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.
- [19] 姜慧琴,李畅游,史小红,等. 乌梁素海沉积物总磷分布及其影响因素研究[J]. 节水灌溉,2010(6):39 - 41.

(上接第 46 页)