

# 土地利用变化对盘古河流域径流的影响

赵霞, 郝振纯

(河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** [目的] 分析大兴安岭地区盘古河流域土地利用变化情况, 研究流域径流对不同土地利用情景的响应, 为合理规划土地利用提供依据。[方法] 利用盘古河流域 1987, 2000 和 2011 年 3 期土地利用数据和 1988—2012 年的水文气象资料, 结合 SWAT(soil and water assessment tool)模型, 分析盘古河流域土地利用变化的径流响应。[结果] 1987—2011 年盘古河流域主要土地利用变化为裸地向林地、草地转化, 林地面积增加, 裸地面积减少; 汛期径流量占年总径流量的比例随着林地的增加而减少; 林地的增加使得多年平均年径流量、汛期径流量和最大月径流量均呈减少趋势。[结论] SWAT 模型能够较好地模拟盘古河流域的月流量过程; 流域径流随着林地面积的增加而减少。

**关键词:** 土地利用变化; SWAT 模型; 径流变化; 盘古河流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)01-0083-05

**中图分类号:** TV121<sup>+</sup>.2

**文献参数:** 赵霞, 郝振纯. 土地利用变化对盘古河流域径流的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 083-087. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.015; Zhao Xia, Hao Zhenchun. Land use change effects on runoff in Pangu River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 083-087. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.015

## Land Use Change Effects on Runoff in Pangu River Basin

ZHAO Xia, HAO Zhenchun

(State Key Laboratory of Hydrology & Water Resources and  
Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the study is to analyze the land use change in Pangu River basin in Daxinganling region and explore the responses of runoff to different land use scenarios and provide the basis for the rational land use planning. [Methods] Using the land use data of 1987, 2000, 2011 and the hydro meteorology data from 1988 to 2012, combining the soil and water assessment tool model, we analyzed response of runoff to land use changes. [Results] The land use changes during period from 1987 to 2011 included a transformation from barren land to forest and grassland, an increase in forest land and a decrease in barren land. The percentage of runoff in flooding season decreases with increasing forest area. The increase in forest area reduced the long-time average annual runoff, the runoff in flooding season and the maximum monthly peak discharge. [Conclusion] The SWAT model could well simulate monthly flow process of the Pangu River basin and the runoff decreased with increasing forest area.

**Keywords:** land use change; SWAT model; runoff changes; Pangu River basin

近年来变化环境下的水文水资源问题日益成为研究重点<sup>[1]</sup>, 其中土地利用/覆盖变化作为环境变化的重要部分, 对流域水文循环有着重大影响。土地利用变化的水文响应研究也日益成为热点问题<sup>[2]</sup>。

流域水文模型是模拟流域水文过程、研究流域水文规律的重要理论基础<sup>[3]</sup>。SWAT 模型作为一种具

有很强物理机制的流域尺度、连续时段、针对过程的综合水文模型<sup>[4-5]</sup>, 目前已被广泛应用于流域土地利用/覆被变化的水文响应研究。然而近年来, 特定流域上土地利用变化的水文响应结论却很难取得一致。张圣微等<sup>[6]</sup>通过对拉萨河的研究表明随着流域林草地面积的增加, 年径流量呈减少趋势。郝振纯等<sup>[7]</sup>设

收稿日期: 2016-06-21

修回日期: 2016-07-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“多尺度水文水资源预报预测预警关键技术及应用研究”(2016YFC0402704); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费资助项目(1069-514031112)

第一作者: 赵霞(1992—), 女(汉族), 江苏省洪泽县人, 硕士研究生, 研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 541978989@qq.com。

置了 4 种土地利用情景,发现海河流域典型区域的径流量随着草地面积的减少和林地面积的增加而减少。史晓亮等<sup>[8]</sup>分析诺敏河流域土地利用变化对径流的影响后发现,林草地面积的减少和耕地面积的增加使得多年平均径流量增加了 17.78%。但是部分学者的研究却得出完全相反的结论。郝芳华等<sup>[9]</sup>通过对洛河上游流域的研究表明,森林的存在使得流域径流量增加。王根绪等<sup>[10]</sup>在马营河流域的研究发现随着林草地向耕地的大规模转化,流域年均径流量减少了 28.12%。因此,针对流域土地利用变化的水文响应,有必要进行大量实例研究。

大兴安岭是中国最大的原始林区,林地面积  $7.30 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,被誉为祖国的“绿色宝库”,是东北华北地区环境安全的天然屏障。1987 年“五·六”特大森林火灾烧毁林地  $1.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,使得大兴安岭的森林覆盖率由原来的 76% 下降到 61.5%,下垫面土地利用/覆被发生巨大变化,一定程度上影响了该地区的生态环境安全。因此,大兴安岭地区土地利用变化的水文响应研究十分必要。本研究拟选取大兴安岭地区盘古河流域为研究区,结合 3 期实测遥感土地利用数据分析流域土地利用变化情况,构建 SWAT 模型研究不同情景下的径流响应,从而为该地区合理规划土地利用提供依据。

## 1 研究区概况

盘古河为黑龙江上游右岸支流,发源于大兴安岭白卡鲁山东麓,位于黑龙江省塔河县西部,河流全长 165 km,宽 20~45 m,水深 1.2 m,流域面积  $3\,308 \text{ km}^2$ ,在 23 站东北 10 km 处注入黑龙江。盘古河流域地处中高纬度,大兴安岭东侧,属于寒温带季风气候,雨热同季,冬季干燥寒冷且漫长,夏季多雨高温。流域多年平均气温  $-2.0 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,无霜期在 80 d 左右。流域降雨年内分配较不均匀,降雨多集中于 6—9 月,多年平均降雨量约 420 mm。

## 2 数据准备与模型构建

### 2.1 基础数据

模型所需地形数据来源于国际科学数据服务平台提供的 90 m 分辨率的 SRTM(shuttle radar topography mission)数据,利用 ArcGIS 软件对其进行拼接、投影、剪切等一系列预处理操作,生成模型所需的 DEM。土壤数据来自于中科院地理所数据中心的 1:100 万的土壤矢量数据集。土壤属性数据参数由中国土壤数据库查询得到,以及采用 SPAW 软件<sup>[11]</sup>

计算获得。水文资料和雨量资料来源于水文年鉴,包括流域内盘古水文站 1988—2012 年逐日流量资料以及盘古站、23 站逐日降雨资料。气象资料采用流域临近塔河气象站 1988—2012 年逐日流量资料以及盘古站、23 站逐日降雨资料。气象资料采用流域临近塔河气象站 1988—2012 年的气象数据,数据来源于中国气象科学数据共享网,包括逐日相对湿度、日照时数、平均风速、最低气温和最高气温。日太阳辐射量由模型内置的天气发生器模拟得到。

研究区的土地利用数据选取 1987,2000 和 2011 年 3 期 Landsat TM 影像图,利用 ENVI 软件监督分类功能进行人机交互目视解译,将土地利用类型划分为 6 类:林地(FRST)、草地(PAST)、耕地(AGRL)、居民区(低密度)(URLD)、水体(WATR)、裸地(BARR),流域土地利用分布见附图 1。

### 2.2 模型构建

SWAT 模型在模拟过程中,基于 DEM 栅格将研究流域空间上离散化成多个子流域单元,各子流域能够体现出气温、降水、蒸发等气候因素异性,土壤、土地利用、海拔、坡度等下垫面因子的空间变化以及管理方式的不同。模型基于最小集水面积划分子流域,本研究最小集水面积取  $60 \text{ km}^2$ ,将盘古河流域划分为 31 个子流域。HRU 的生成采用 multiple hydrologic response units 方法,将土地利用类型最小面积比重设为 5%,土壤类型最小面积比重设为 10%,坡度最小面积比重设为 10%。潜在蒸散发选择彭曼—蒙蒂斯潜在蒸散发公式计算,地表径流模拟采用 SCS 径流曲线数法,河道汇流演算采用 Variable Storage 法。

## 3 研究结果

### 3.1 模型验证及评价

以 2000 年土地利用数据为输入,利用 1988—2012 年盘古站月径流数据对模型进行校准及验证,其中 1988—2002 年为校准期,2003—2012 年为验证期。由于 SWAT 模型输入参数较多,与径流有关的 25 个参数对模型结果影响程度不同,本文通过敏感性分析选取对模拟精度影响较为显著的 10 个参数进行参数率定。表 1 即为敏感性前 10 的参数,以及各参数物理意义、调参方式和最优参数值。

本文选用决定系数  $R^2$ , Nash-Sutcliffe 系数 ( $E_{NS}$ )<sup>[12]</sup> 来检验模型的模拟效果,具体计算公式如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2$$

式中:  $Q_{obs,i}$ ,  $Q_{sim,i}$ ,  $\bar{Q}_{obs}$ ,  $\bar{Q}_{sim}$  ——第  $i$  时段的流量实测值、流量模拟值、模拟时段内实测流量的平均值和模拟时段内模拟流量的平均值。

模型校准及验证结果见图 1, 评价指标见表 2。

表 1 参数敏感性分析结果及参数最优值

敏感性等级	参数名称	物理意义	调参方式	最优值
1	CANMX	最大冠层蓄水量	赋值 $V$	1.09
2	CN <sub>2</sub>	SCS 径流曲线数	百分比浮动 $R$	0.24
3	SLSUBBSN	平均坡长	赋值 $V$	37.71
4	ESCO	土壤蒸发补偿系数	赋值 $V$	0.92
5	HRU_SLP	平均坡度	赋值 $V$	0.42
6	SMFMX	6 月 21 日融雪系数	赋值 $V$	5.25
7	ALPHA_BF	基流分割系数	赋值 $V$	0.13
8	SOL_AWC	土壤可利用水量	百分比浮动 $R$	0.07
9	TIMP	雪堆温度延迟因子	赋值 $V$	0.44
10	SMTMP	融雪基温	赋值 $V$	3.68

表 2 盘古水文站月径流模拟结果评价

项目	校准期(1988—2002 年)		验证期(2003—2012 年)	
	$E_{NS}$	$R^2$	$E_{NS}$	$R^2$
参数值	0.71	0.71	0.73	0.76

纳什系数  $E_{NS}$  表示模拟值与实测值之间的拟合度, 决定系数  $R^2$  表示实测值与模拟值之间的吻合程

表 3 1987—2011 年盘古河流域土地利用类型面积变化及动态度

土地利用类型	1987 年		2000 年		2011 年		1987—2000 年		2000—2011 年	
	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	年变化量/ km <sup>2</sup>	动态度/ %	年变化量/ km <sup>2</sup>	动态度/ %
耕地	0.00	0.00	2.47	0.08	3.06	0.10	0.19	—	0.05	2.15
林地	1 132.85	35.33	1 745.96	54.45	2 414.52	75.30	47.16	4.16	60.78	3.48
水体	7.01	0.22	8.14	0.25	2.45	0.08	0.09	1.24	-0.52	-6.35
居民区	20.33	0.63	13.88	0.43	6.70	0.21	-0.50	-2.44	-0.65	-4.70
裸地	1 305.48	40.71	160.61	5.01	90.46	2.82	-88.07	-6.75	-6.38	-3.97
草地	740.93	23.11	1 275.54	39.78	689.41	21.50	41.12	5.55	-53.29	-4.18

长期以来, 林地和草地一直是盘古河流域主导景观, 然而由于 1987 年 5 月 6 日至 6 月 2 日大兴安岭地区的特大森林火灾, 1987 年土地利用数据中林地面积仅为 1 132.85 km<sup>2</sup>, 仅占流域面积的 35.33%, 裸地面积达 1 305.48 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的

度, 通常认为  $E_{NS}$  越大,  $R^2$  越高, 模型模拟结果越好, 通常认为  $R^2$  高于 0.65,  $E_{NS}$  高于 0.60 时, 模型模拟精度令人满意<sup>[13-14]</sup>。由表 2 可以看出, 无论是校准期还是验证期,  $E_{NS}$  和  $R^2$  都大于 0.70, 说明 SWAT 模型适用于盘古河流域盘古站的径流模拟。

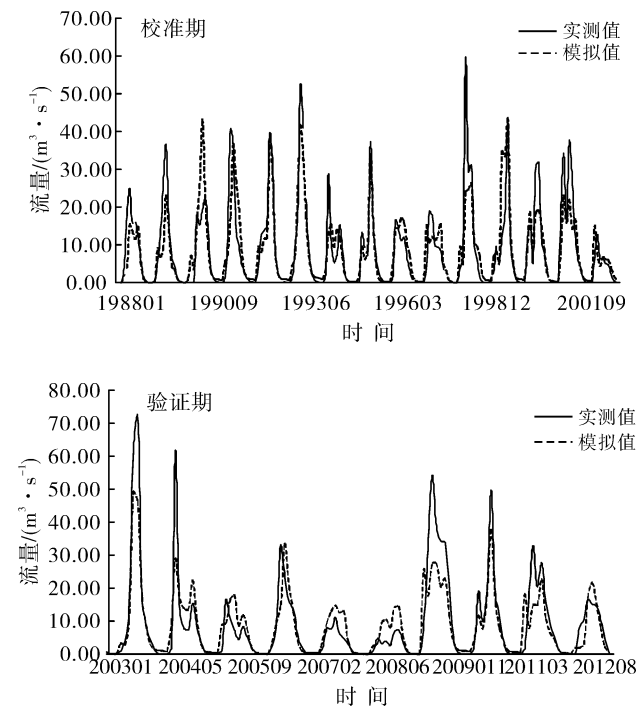


图 1 校准期和验证期月径流模拟值与实测值对比

### 3.2 1987—2011 年间盘古河流域土地利用变化

根据对解译出的盘古河流域 1987, 2000 和 2011 年 3 期土地利用数据的统计对比分析, 得到各土地利用类型的面积、百分比和动态度(表 3)。

40.71%。随着多年的恢复, 2000 年土地利用数据中林地面积为 1 745.96 km<sup>2</sup>, 草地面积为 1 275.54 km<sup>2</sup>, 相较于 1987 年面积分别增加了 613.11 和 534.61 km<sup>2</sup>, 年变化面积分别为 47.16 和 41.12 km<sup>2</sup>/a, 动态度分别为 4.16% 和 5.55%。2011 年土

地利用数据中林地面积为 2 414.52 km<sup>2</sup>,草地面积为 689.41 km<sup>2</sup>,相较于 2000 年林地面积增加了 668.56 km<sup>2</sup>,草地面积减少了 586.09 km<sup>2</sup>,年变化面积分别为 60.78 和 -53.29 km<sup>2</sup>/a,动态度分别为 3.48% 和 -4.18%。1987—2011 年期间,与林地面积增长相对应,裸地面积不断减少,由 1987 年的 1305.48 km<sup>2</sup> 减少到 2011 年的 90.46 km<sup>2</sup>,同时耕地面积不断增长,居民区和水体面积总体呈下降趋势。

由于盘古河流域出口 23 站自 1986 年撤销流量观测,本研究采用径流数据为流域内盘古站观测数据,因而需进一步分析盘古站集水面积上流域土地利用变化情况。盘古站集水面积上各土地利用类型面积及百分比见表 4。

表 4 1987—2011 年盘古站集水面积  
土地利用类型面积及百分比

土地利用类型	1987 年		2000 年		2011 年	
	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %
林地	856.90	67.68	810.43	64.01	1056.83	83.47
水体	0.25	0.02	3.60	0.28	0.17	0.01
居民区	6.66	0.53	9.16	0.72	4.01	0.32
裸地	83.65	6.61	41.78	3.30	28.75	2.27
草地	318.64	25.17	401.13	31.68	176.35	13.93

由表 4 可以看出,1987—2011 年期间,林地面积由 856.90 km<sup>2</sup> 增长到 1 056.83 km<sup>2</sup>,面积增加了近总集水面积的 20%;裸地面积由 83.65 km<sup>2</sup> 下降为 28.75 km<sup>2</sup>,面积由占集水面积的 6.61% 下降为 2.27%;草地面积则经历了先增加后减少的过程,由 1987 年的 318.64 km<sup>2</sup> 增加到 2000 年的 401.13 km<sup>2</sup>,再减少到 2011 年的 176.35 km<sup>2</sup>;水体及居民区面积变化较小。

表 5 3 期土地利用情景下模拟的径流深

项目	1987 年	2000 年	2011 年	变化/%		
				1987—2000 年	2000—2011 年	1987—2011 年
年径流深/mm	217.81	216.87	215.36	-0.43	-0.70	-1.12
汛期径流深/mm	155.84	153.31	151.37	-1.62	-1.27	-2.87
最大月径流深/mm	48.49	47.50	46.07	-2.04	-3.01	-4.99

3 种情景下汛期(6—9 月)流量占全年总径流量的比例都在 70% 左右,分别为 71.55%,70.69% 和 70.29%,表明随着林草地面积的增加,占比呈下降趋势。1987 年到 2000 年,主要土地利用类型变化为由裸地向草地林地转化,多年平均径流量下降了 0.43%,汛期径流深下降了 1.62%,最大月径流量下

### 3.3 盘古河流域土地利用变化的水文响应分析

利用盘古河流域 1987,2000 和 2011 年 3 期土地利用数据,采用相同的气象、土壤数据,仅改变土地利用输入,分别模拟盘古站 1988—2012 年的径流过程,得到 3 期土地利用条件下月径流过程(图 2),通过对比分析得到流域土地利用变化对水文过程的影响。

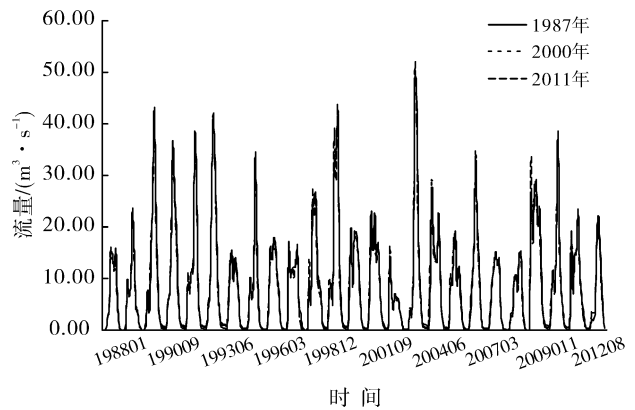


图 2 3 期土地利用情景下月径流模拟值对比

模拟得到的不同土地利用情景下的多年平均径流深、多年平均汛期径流深(6—9 月)和多年平均最大月径流深(7 月)结果及变化情况见表 5。在 1987 年土地利用情景下,盘古站多年平均径流深为 217.81 mm,其中多年平均汛期径流深为 155.84 mm,多年平均最大月径流深为 48.49 mm;在 2000 年土地利用情景下,盘古站多年平均径流深为 216.87 mm,其中多年平均汛期径流深为 153.31 mm,多年平均最大月径流深为 47.50 mm;在 2011 年土地利用情景下,盘古站多年平均径流深为 215.36 mm,其中多年平均汛期径流深为 151.37 mm,多年平均最大月径流深为 46.07 mm。

降了 2.04%;2000—2011 年,主要土地利用类型变化为由草地向林地转化,多年平均径流量下降了 0.70%,汛期径流量下降了 1.27%,最大月径流量下降了 3.01%。1987—2011 年,盘古站集水面积上林地面积增加了 20%,多年平均径流量下降了 1.12%,汛期径流量下降了 2.87%,最大月径流量下降了

4.99%。结果表明,随着流域林地面积的增加,流域径流呈下降趋势;年径流量、汛期径流量和最大月径流量对土地利用变化的响应程度呈增加趋势。

## 4 结论

为研究土地利用变化对流域径流的影响,利用1987,2000和2011年3期土地利用数据和流域1988—2012年水文气象资料,建立SWAT模型对径流进行模拟。模型在校准期纳什系数为0.71,决定系数为0.71;验证期纳什系数为0.73,决定系数为0.76,表明SWAT模型适用于盘古河流域的径流模拟。

1987—2000年期间,盘古河流域主要土地利用变化为裸地面积减少,林地、草地面积增加,年变化量分别为-88.07,47.16和41.12 km<sup>2</sup>/a。2000—2011年期间,盘古河流域主要土地利用变化为草地面积减少,林地面积增加,年变化量分别为-53.29,60.78 km<sup>2</sup>/a。多年主要土地利用变化为裸地向草地、林地转化。

针对1987,2000和2011年3期土地利用数据进行的径流模拟结果说明:当流域林地面积增加时,盘古站年径流量、汛期径流量及最大月径流量均呈下降趋势且响应程度增加,同时汛期流量占全年总径流量的比例呈下降趋势。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王茂运,谢朝勇.变化环境下的水资源安全问题探讨[J].中国水运,2013(4):210-211.
- [2] 李丽娟,姜德娟,杨俊伟,等.陕西大理河流域土地利用/覆被变化的水文效应[J].地理研究,2010,29(7):1233-1243.
- [3] 王中根,郑红星,刘昌明,等.黄河典型流域分布式水文模型及应用研究[J].中国科学(E辑):技术科学,2004,34(S1):49-59.
- [4] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modelling of the United States with the soil and water assessment tool[J]. International Journal of Water Resources Development, 1998,14(3):315-325.
- [5] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1996,176(1):57-77.
- [6] 张圣微,雷玉平,姚琴,等.土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响[J].水资源保护,2010,26(2):39-44.
- [7] 郝振纯,苏振宽.土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J].水科学进展,2015,26(4):491-499.
- [8] 史晓亮,李颖,赵凯,等.诺敏河流域土地利用与覆被变化及其对水文过程的影响[J].水土保持通报,2013,33(1):23-28.
- [9] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等.土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J].水土保持学报,2004,18(3):5-8.
- [10] 王根绪,张钰,刘桂民,等.马营河流域1967—2000年土地利用变化对河流径流的影响[J].中国科学(D辑):地球科学,2005,35(7):671-681.
- [11] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1569-1578.
- [12] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for system atic-quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(3):885-900.
- [13] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学.密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):290-299.
- [14] 张利平,曾思栋,王任超,等.气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J].资源科学,2011,33(5):966-974.