

# 土地利用变化对阜平流域的径流影响研究\*

郝振纯, 苏振宽, 鞠 琴

(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:** 选取不同年份 Landsat 遥感卫星图像, 分析了阜平流域土地利用变化; 以 SWAT 模型为工具, 利用 1968 - 2010 年的水文气象资料, 针对土地利用情况研究土地利用变化对流域径流的影响。结果表明, 近几十年来, 多年降水量变化不显著, 而径流量呈显著下降趋势; 流域林地增加(草地转林地)是径流减少的主要原因, 从 1993 年的 926 km<sup>2</sup> 增加到 2004 年的 1 119 km<sup>2</sup>, 径流量减少 6.46%; 不同情景下模拟的多年平均流量总体呈现减少的趋势; 林地的增加和草地的减少能够导致径流的减少; 林地和草地的变化通过影响蒸散发量影响水文循环; 径流量的变化趋势与蒸散发量相反。

**关键词:** 阜平流域; SWAT 模型; 土地利用变化; 径流量; 蒸散发量

**中图分类号:** P341 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529 - 6579 (2014) 02 - 0128 - 06

## Impact of Land Use Change on Runoff in the Fuping Basin

HAO Zhenchun, SU Zhenkuan, JU Qin

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

**Abstract:** Landsat remote sensing satellite images in different years were used to analyze land use change in the Fuping Basin, then the hydrological and meteorological data during 1968 - 2010 was used into SWAT model for analyzing the impact of land use change on runoff. In recent decades, the change of precipitation is not obvious, while the change of runoff shows a significant trend of decreasing. Increased watershed woodland (grassland turns to woodland) is the main reason for reducing runoff. Runoff decreased by 6.46% with the change of woodland area from 926 km<sup>2</sup> in 1993 to 1119 km<sup>2</sup> in 2004. Simulated average annual runoff under different scenarios overall decreased. Increasing of woodland and decreasing of grassland can lead to a reduction of runoff. Changes of woodland and grassland affect the hydrological cycle through affecting the evapotranspiration. The change trend of runoff shows a negative correlation with the evapotranspiration.

**Key words:** the Fuping Basin; SWAT model; Land use change; runoff; evapotranspiration

阜平流域是海河流域上游的一个重要支流, 近几十年来, 阜平流域流量呈现明显的减小趋势。该流域除受降雨等气象因素影响外, 人类对于自然的改造和土地利用类型的变化也对径流产生了重要影响。在水文循环过程中, 土地利用变化对水文过程的影响主要表现在对水分循环和水质水量的改变上<sup>[1]</sup>。流域土地利用变化通过影响地表蒸散发、

土壤水分状况及地表植被的截留量等, 对流域水量平衡产生影响。

国内外学者对土地利用变化的水文效应研究主要是借助于 SWAT 模型。郝芳华等<sup>[2]</sup>讨论了土地利用变化对产流产沙的影响。陈军锋<sup>[3]</sup>等研究了有植被全覆盖与无植被覆盖情景下径流深与蒸发量

\* 收稿日期: 2013 - 10 - 11

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 (2010CB951103); 国家自然科学基金资助项目 (41101015, 41371047); 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 - 50985512)

作者简介: 郝振纯 (1958 年生), 男, 研究方向: 水文物理规律模拟及全球变化影响; E-mail: hzchun@hhu.edu.cn

的变化。张蕾娜<sup>[4]</sup>通过情景模拟,发现还草比还林更能增加径流。索安宁等<sup>[5]</sup>对黄土高原流域的水土流失效应做了研究。Hernandez 等<sup>[6]</sup>认为 SWAT 模型可以很好地反映土地覆被变化条件下的多年降水-径流关系。Costa 等<sup>[7]</sup>、Fohrer 等<sup>[8]</sup>和 Schuol 等<sup>[9]</sup>分别对托坎廷斯河流域、德国阿勒河流域和瑞典 Ronnea 流域土地利用变化的水文效应做了分析。因此,本研究针对阜平流域使用 SWAT 模型研究土地利用变化的水文效应,为该地区的土地规划和水资源管理提供依据。

## 1 研究流域概况

阜平流域是海河上游大清河水系的一个重要支流,包括沙河、冉庄河、青羊河、下关河独峪河、南河沟和北流河。流域地处河北省和山西省交界处,太行山东麓,经度 113.64 - 114.31°E,纬度 38.78 - 39.37°N,总面积 2 210 km<sup>2</sup>。地势西北高东南低,最高海拔 2 286 m,最低 200 m。

流域出口阜平水文站处于大清河水系沙河支流上,阜平站以上以深山区为主,山地坡度一般大于 25 度,沟谷多深长。由于地形坡度较大,表层土壤覆盖较少,植被较差,小片成林。流域属温带半湿润半干旱地区,气候属于亚洲大陆性季风气候,主要特点为冬季干旱少雨,夏季多暴雨,降雨主要集中在 6 - 10 月份。多年平均降雨量约 490 mm,年平均气温 12.7 °C,年平均相对湿度 52%,年平均日照时数约 2 800 h。土地利用类型分为为林地、草地、居住地、水域、耕地和裸地 6 大类,土壤类型以棕壤和褐土为主。

## 2 模型介绍

SWAT 模型是 20 世纪 90 年代由美国农业部 (USDA) 的 Jeff Arnold 博士开发的分布式水文模型。它具有很强的物理机制,能够利用遥感和地理信息等空间信息,模拟不同土地利用、多种土地管理措施对流域水文、泥沙和化学物质的影响<sup>[10]</sup>。模型在模拟过程中,首先将流域划分为若干个子流域,然后根据不同土地利用类型和土壤类型,将子流域划分为若干个水文响应单元 (HRU),单独计算每个 HRU 的径流量,最后经河网汇集得出流域的总径流量。

模型采用的水量平衡公式为<sup>[11]</sup>:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中,  $SW_t$  为土壤最终含水量 (mm);  $SW_0$  为土壤前期含水量 (mm);  $t$  为时间步长 (d);  $R_{\text{day}}$  为第  $i$  天降水量 (mm);  $Q_{\text{surf}}$  为第  $i$  天地表径流 (mm);  $E_a$  为第  $i$  天的蒸发量 (mm);  $W_{\text{seep}}$  为第  $i$  天存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量 (mm);  $Q_{\text{gw}}$  为第  $i$  天地下含水量 (mm)。

模型计算的蒸散发量包括树冠截留的水分蒸发、蒸腾和升华及土壤水的蒸发。在实际计算时,首先从植被冠层截留的水分蒸发开始计算,然后计算最大蒸腾量、最大升华量和最大土壤水分蒸发量,最后计算实际的升华量和土壤水分蒸发量<sup>[12]</sup>。

## 3 模型的构建与评价

### 3.1 研究区域数据收集与处理

3.1.1 DEM 数据 地形数据数字高程模型 (DEM) 来源于 SRTM 数据集 (<http://strm.csi.cgiar.org/>), 空间分辨率为 90 m。

3.1.2 土壤数据 土壤数据来源于中国科学院地理所数据中心提供的 1:100 万的土壤矢量数据,土壤类型为棕壤 (ZONG, 22.19%) 和褐土 (LING, 77.81%), 根据土壤类型从中国土壤数据库查得土壤的颗粒组成以及物质成分,使用 matlab 利用三次样条插值将颗粒级配转化为美国标准<sup>[13]</sup>,并通过 SPAW 软件<sup>[14]</sup>计算得出相关属性数据,建立土壤数据库<sup>[15]</sup>。

3.1.3 土地利用数据 土地利用类型动态变化选取 Landsat 遥感卫星图像为数据源。利用 ENVI 遥感图像处理软件对图像进行地物监督分类,在信息提取过程中参考区域专题研究结果及图件、地形图等相关资料,将监督分类结果进行人工校正,最终将土地利用类型划分为六类:林地、草地、居住地、水域、耕地、裸地,如图 2。

3.1.4 水文与气象资料 水文资料采用流域出口阜平水文站的 1968 - 2010 年的逐月实测流量资料。雨量资料采用冉庄、下关、庄旺、不老台、砂窝、龙泉关和桥南沟 7 个雨量站的逐日降雨资料。

气象资料采用繁峙气象站的同期逐日气象数据,包括最高、最低气温,太阳辐射量,降水量,相对湿度,平均气压,平均风速,日照时数。太阳辐射量由模型自带的天气发生器模拟得到。

### 3.2 模型率定与验证

由于 SWAT 模型输入参数较多,在校准之前需对参数进行敏感性分析。模型参数敏感性分析采用 LH-OAT 方法,该方法结合 LH 和 OAT,同时又具备这两种方法的优点<sup>[16-17]</sup>。LH 方法由 Mckay

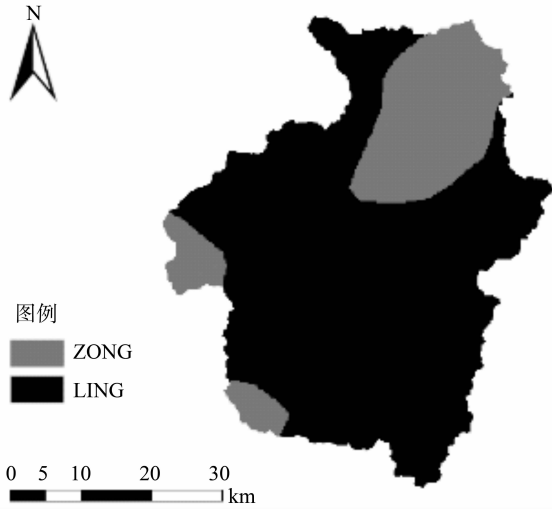


图 1 阜平流域土壤图

Fig. 1 Soil types of the Fuping basin

于 1979 年提出, 将参数分布空间分成  $N$  个, 每一个范围出现的概率均为  $1/N$ , 然后生成参数随机值, 且每一个值域仅抽样一次, 参数随机组合, 最后对结果进行多元线性回归分析。OAT 方法由 Morris 于 1991 年提出, 模型每次运行时只改变一个参数, 考虑到某些参数的灵敏度可能会受到其他参数值的选取的影响, 所以模型输入若干组参数重复运行, 最终灵敏度由其平均值决定。模型首先利用 LH 法进行抽样, 然后采用 OAT 法进行抽样, 确保了所有参数均被采样, 精减了需要率定的参数的个数, 提高了计算效率。

本次研究中灵敏度较高的参数为 CH-K2 (河道有效水力传导系数)、CANMX (最大冠层蓄水量)、ESCO (土壤蒸发补偿系数)、ALPHA-BF (基流  $a$  系数)、SLOPE (平均坡度)、SOL\_K (饱和

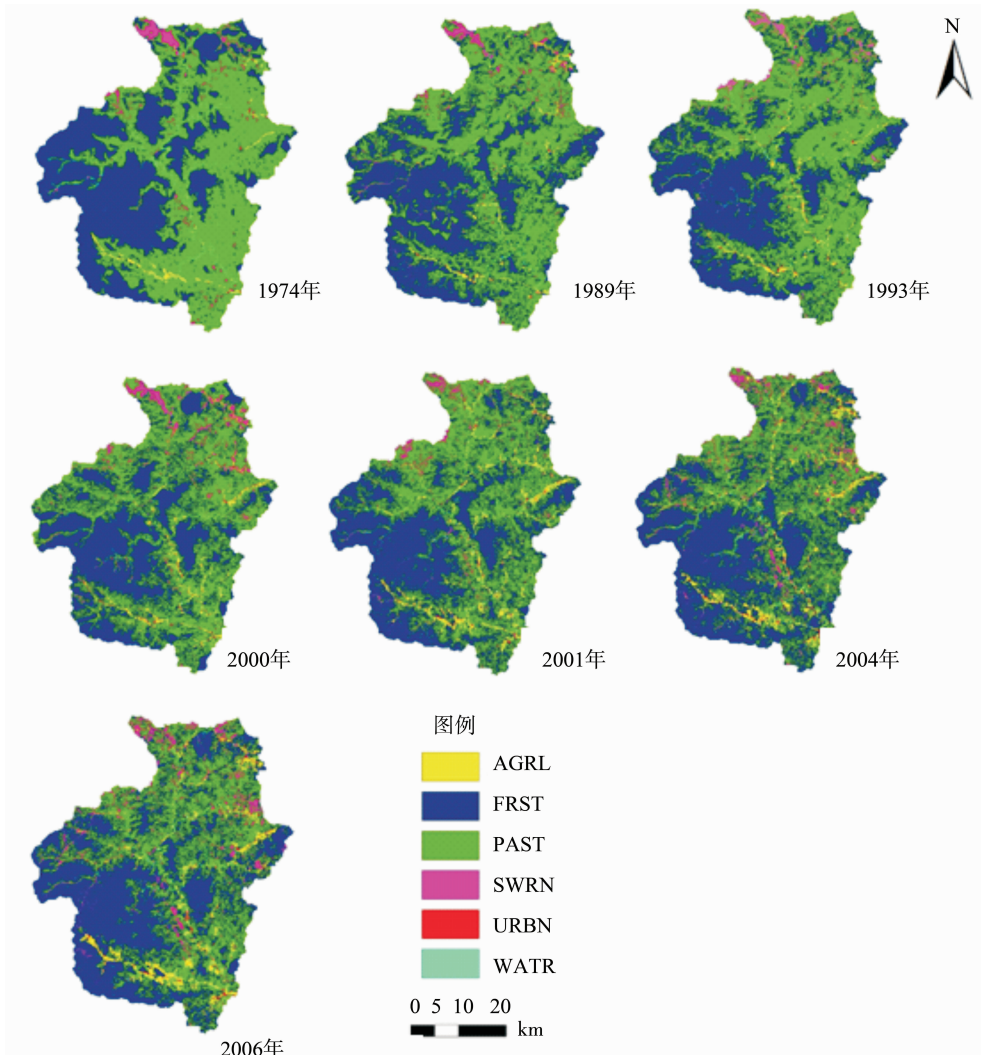


图 2 土地利用变化图

Fig. 2 Change of land use

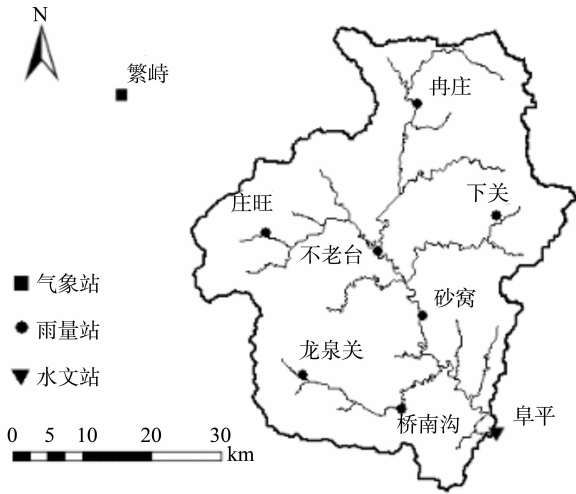


图 3 阜平流域站点分布图

Fig. 3 Distribution of stations in the Fuping Basin

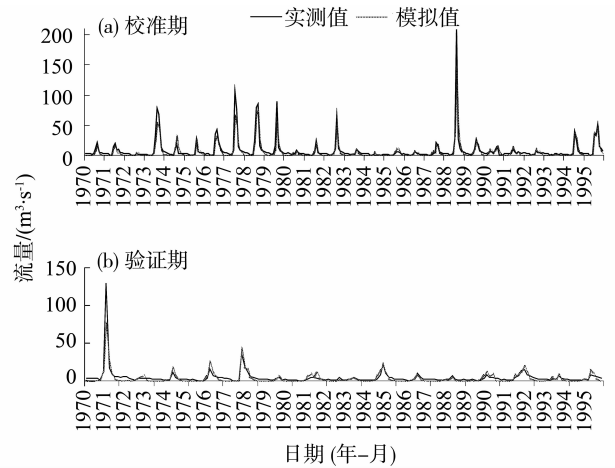


图 4 月流量模拟值与实测值对比图

Fig. 4 Comparison of simulated and measured average monthly flow in January during 1970 – 1995 and 1996 – 2010

水力传导系数)、CN2 (SCS 径流曲线系数)、GWQMN (浅层地下水径流系数)、GW\_REVAP (地下水再蒸发系数)、SOL\_AWC (土壤可利用水量)。土壤类型与地形坡度反映的是流域基础地质和地理背景，它们的变化以百万年为周期，在研究过程中假定其不变。为了确定土地利用类型的改变对流域径流的影响，所以在后面的模拟过程中仅改变土地利用资料，其他参数和数据均保持不变。

选取 1968 – 1969 年为模型缓冲期，1970 – 1995 年为校准期，1996 – 2010 年为验证期。模型模拟结果采用 Nash-Sutcliffe 确定性系数  $E_{ns}$ 、决定系数  $R^2$  来评价<sup>[18]</sup>。计算公式如下：

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

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中， $Q_{obs,i}$  为实测数据， $Q_{sim,i}$  为模拟数据， $\bar{Q}_{obs}$  为实测数据平均值， $\bar{Q}_{sim}$  为模拟数据平均值， $n$  为数据个数。

模型校准和验证结果见图 4，评价指标见表 1

表 1 阜平水文站月径流模拟结果评价

Table 1 Evaluation of monthly runoff simulated results of the Fuping station

水文站	校准期 (1970 – 1995 年)		验证期 (1996 – 2010 年)	
	$E_{ns}$	$R^2$	$E_{ns}$	$R^2$
阜平	0.88	0.93	0.80	0.83

综合这两种指标，通常认为  $E_{ns} > 0.50$ ， $R^2 > 0.65$ ，模拟结果令人满意<sup>[18]</sup>。根据模型模拟结果可知 SWAT 模型适用于阜平流域。

## 4 土地利用变化影响

### 4.1 降水量与径流量变化关系

在研究流域土地利用变化引起的水文效应之前，首先要确定气象因素主要是降水量的变化对其的影响，因此需对流域多年的降水量与径流量变化趋势进行分析，结果如图 5 和 6 所示。

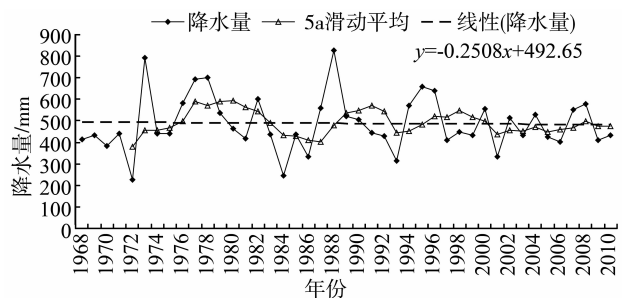


图 5 流域多年降水量变化图

Fig. 5 Change of precipitation for years

根据对流域多年降水量的 5 年滑动平均值变化可知, 其呈现不规则周期性变化, 21 世纪之前降水量变化幅度较大, 在最近的 10 年间, 变化幅度较小, 多年降水量呈微弱下降趋势, 年平均变化率为  $-0.25 \text{ mm/a}$ , 下降趋势不明显。

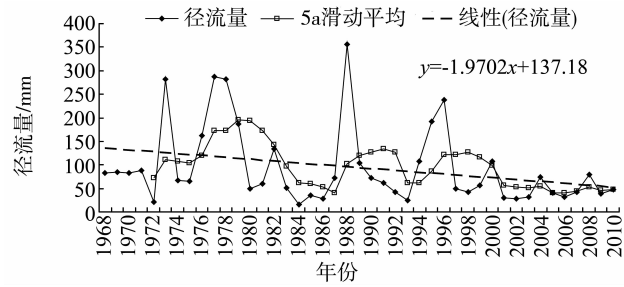


图 6 流域多年径流量变化图

Fig. 6 Change of runoff for years

对流域多年径流量趋势分析可知, 其相应于降水量变化也呈现不规则周期变化, 但不同的是, 多年径流量下降趋势非常明显, 年变化率为  $-1.97 \text{ mm/a}$ 。

#### 4.2 土地利用类型变化对流域径流的影响

为了定量分析土地利用变化对流域径流影响过程, 以校准好的参数分别对模型输入 1974、1989、1993、2000、2001、2004、2006 年土地利用资料设定 7 种情景模拟径流。土地利用变化如图 7。

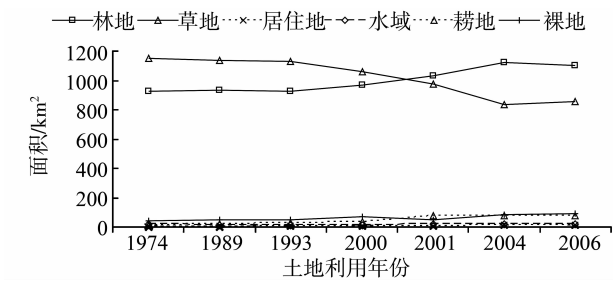


图 7 土地利用面积变化图

Fig. 7 Change of percent of land use area

根据图 7 可知, 该流域土地利用主要变化趋势是草地减少, 林地、裸地、耕地和居住地增加。土地利用类型以林地和草地为主, 总面积占流域 90% 左右。从 20 世纪 90 年代开始, 林地面积逐渐增多, 草地面积在不断减少。土地利用类型的转化主要是草地向林地的大面积转化。

根据以上 7 种情景, 分别模拟了阜平流域 1970-2010 年的年径流量与蒸散发量变化, 见图 8、9。结果表明, 土地利用变化对径流影响比较显著。从不同土地利用时期资料模拟出的多年平均径

流量可知, 7 种情景下的多年平均径流量呈现明显减小的趋势, 相应的多年平均蒸散发量呈现增大的趋势, 也就是说, 随着草地向林地的面积转化, 流域径流减少, 蒸散发量增大。

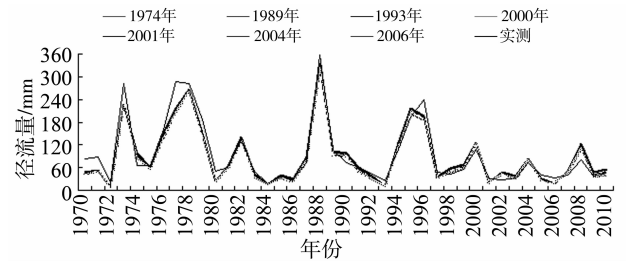


图 8 不同年份土地利用情景下年径流量对比图

Fig. 8 Comparison of values of runoff in various year-dependent scenarios

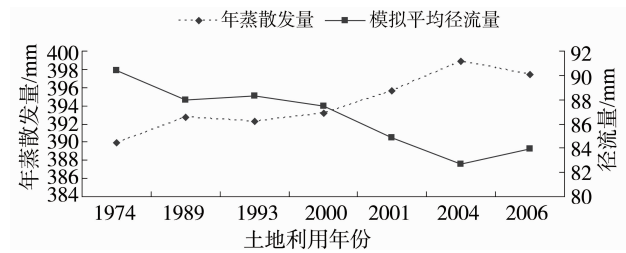


图 9 多年平均蒸散发量与径流量模拟值

Fig. 9 Values of average annual evapotranspiration and simulated runoff

1974 年土地利用资料中, 草地面积  $1154.32 \text{ km}^2$ , 在 7 种情景中最大, 林地面积最小  $922.98 \text{ km}^2$ , 模拟出的多年平均径流量最大, 达到  $90.42 \text{ mm}$ , 实际蒸散发量最小, 为  $389.89 \text{ mm}$ 。主要是由于林地的截留量与蒸散发量要比草地大得多。而居住地、水域、耕地和裸地所占面积较小, 总体上对径流影响不大。从土地利用变化来看, 1989 年和 1993 年之间变化不大, 模拟的多年平均径流量和蒸散发量变化也不大。1993 年和 2000 年相比, 林地面积增加了  $4.7\%$ , 草地面积减少了  $6.4\%$ , 面积变化相对较为明显, 但由于裸地面积增加了  $55.7\%$ , 使得模型输入 2000 年土地利用资料模拟出的多年平均径流量与前两期相比, 变化并不是特别大。2004 年与 2006 年土地利用变化不大, 模拟的径流结果差别也相对不大。从图 7 可知, 1993 年和 2004 年的土地利用资料变化最为明显, 变化量见表 2, 模拟结果见表 3。可见居住地、耕地和裸地变化幅度比较大, 但是所占的总面积依然很小, 对径流影响不如林地和草地影响大。与实测数据对比可知, 草地面积最小, 林地面积最大的

2004 年土地利用资料模拟出的径流量减少 12.38%，与 1993 年相比减少 6.46%。

表 2 1993 和 2004 年土地利用面积变化

Table 2 Change of land use area in 1993 and 2004, respectively

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>		变化量/%
	1993 年	2004 年	
林地	925.36	1 119.61	21.0
草地	1 129.96	838.04	-25.8
居住地	5.39	14.01	159.9
水域	17.03	18.76	10.2
耕地	31.48	79.77	153.4
裸地	46.79	86.02	83.8

表 3 1993 和 2004 年径流模拟结果

Table 3 Results of simulated runoff in 1993 and 2004

土地利用 年份	年平均径 流量/mm	变化率/%	年平均蒸散 发量/mm	变化率/%
	1993	88.35	-6.33	392.32
2004	82.64	-12.38	398.88	0.77
实测	94.32	/	395.84	/

## 5 结 论

利用流域出口阜平水文站 43 a 的水文实测数据和流域 7 个雨量站 43 a 的降水数据, 利用 7 种土地利用情景, 建立 SWAT 模型, 模拟了不同情景下径流的响应。

1) 通过对模型的校准和验证, 校准期  $E_{ns} = 0.88$ ,  $R^2 = 0.93$ , 验证期  $E_{ns} = 0.80$ ,  $R^2 = 0.83$ , 说明 SWAT 模型适合阜平流域的径流模拟。

2) 从 20 世纪 90 年代开始, 该流域土地利用类型发生明显变化, 不同情景下模拟的流域出口径流量明显减少。

3) 阜平流域土地利用类型以林地和草地为主, 流域径流量呈现明显的减少趋势, 降水量下降趋势不明显, 林地和草地的变化是径流量变化的重要因素。

4) 林地和草地的变化主要是通过影响蒸散发量改变水文循环过程, 从而影响径流量的变化。不同情景下模拟多年平均蒸散发量变化趋势与径流量变化相反。

由此可见, 不合理的土地利用会导致一定的生态平衡失调, 在土地利用规划过程中, 要兼顾水文效应与经济效益。另一方面要充分认识到人类活动引起的土地利用变化对径流的影响。

## 参考文献:

- [1] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆被变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 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.
- [3] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833-836.
- [4] 张蕾娜. 白河流域土地覆被变化水文效应的分析与模拟[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.
- [5] 索安宁, 李金朝, 王天明, 等. 黄土高原流域土地利用变化的水土流失效应[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 767-772.
- [6] HERNANDEZ M, MILLER S N, GOODRICH D C, et al. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64: 285-298.
- [7] COSTA M H, BOTTA A, CARDILLE J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of Tocantins River, Southeastern Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1): 206-217.
- [8] FOHRER N, MÖLLER D, STEINER N. An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27(9): 655-662.
- [9] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 30-49.
- [10] 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.
- [11] NEITSCH S L, AONOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2005 [EB/OL]. [2011-04-12]. [http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT2005\\_theory\\_final.pdf](http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT2005_theory_final.pdf), 2005.
- [12] 肖军仓, 周文斌, 罗定贵, 等. 非点源污染模型 - SWAT 用户应用指南[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [13] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.
- [14] 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.
- [15] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18.
- [16] Van GRIENSVEN. Sensitivity auto-calibration uncertainty and model evaluation in SWAT2005[Z]. Grassland, soil and water research service, Temple, TX, 2007.
- [17] McKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239-245.
- [18] MORIASI D N, ARNOLD J G, Van LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.