

北庙水源地土地利用变化对水文要素影响的研究

白致威¹, 胡晓英², 王杰¹

(1. 云南省水利水电科学研究院, 云南 昆明 650228; 2. 云南省水利水电学校, 云南 昆明 650202)

摘要: 选用保山市日气象观测数据和北庙水源地水库坝上径流资料, 结合北庙水源地内的土地利用数据、土壤数据和 DEM 数据, 构建其 SWAT 分布式水文模型, 研究水源地三期不同土地利用方式变化对水文要素的影响。结果表明: 在模型率定期和验证期, R^2 数分别为 0.70 和 0.72, 模型效率系数均大于 0.55, 径流模拟值与实测值相对误差在 15% 以内, SWAT 水文模型在北庙水源地有较好的适用性。1986–2009 年, 北庙水源地土地利用类型以林地、耕地、草地为主; 草地面积减少, 耕地、未利用土地和居民用地增加是这一时期土地利用方式变化的主要特征。水源地水文要素发生相应的变化主要表现为坡面径流深、径流深和土壤侵蚀模数增加, 而实际蒸散减少。

关键词: 水文要素; SWAT 模型; 径流模拟; 土地利用变化; 北庙水源地

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0046-04

Research on impact of land-use change on hydrology in Beimiao water source

BAI Zhiwei¹, HU Xiaoying², WANG Jie¹

(1. Yunnan Hydraulic Research Institute, Kunming 650228, China;

2. Yunnan Water Conservancy and Hydropower College, Kunming 650202, China)

Abstract: The paper selected the daily meteorology data of Baoshan station and the runoff data above dam of reservoir in Beimiao water source, and combined with land use, soil data, and DEM data to construct SWAT model so as to simulate and study the impact of land use change on hydrologic factors. The result showed that in period of calibration and validation, the value of R^2 is 0.70 and 0.72 respectively. All of the simulation efficiency (Ens) value are greater than 0.55. the relative error (Re) between simulation value and observation value is less than 15%. SWAT hydrological model has better applicability in Beimiao water source. The main types of land-use are forest land, cultivated land and grass land during the period of 1986 to 2009. The main characteristics of land use variation in Beimiao water source were the decrease of grass land area and the increase of cultivated land, non-use of land and residential land. The major change of hydrologic factors mainly presented the increase of runoff depth of slope surface, runoff depth and soil erosion modulus and the decrease of actual evapotranspiration.

Key words: hydrology factors; SWAT model; runoff simulation; land use change; Beimiao water source

土地利用变化是引起水循环过程变化的主要原因之一, 土地利用变化通过改变地表植被截留量、土壤水分入渗能力和地表蒸发等因素, 影响流域产汇流机制^[1-2], 进而影响到坡面径流、实际蒸散和土壤侵蚀模数等水文要素的变化。近年来随着水源地内经济社会发展和群众生活需求, 其土地利用方式相应地发生了一定的变化, 出现了开荒种地等农事活

动, 改变了原有水源地水源涵养、土壤流失水文过程, 从而对水源地的水质和水量等水文要素产生了影响^[2-5]。因此, 定量研究水源地土地利用变化对径流、蒸散和土壤侵蚀等水文要素的影响, 将对其水资源合理开发利用与保护, 水源涵养林建设等方面提供科学的决策支持。本文基于 SWAT 分布式水文模型, 研究保山市集中式饮用水水源地北庙水源

地不同土地利用方式对其水文要素的影响,以期为研究区水资源规划管理和生态保护提供技术支持。

1 流域概况

北庙水源区位于保山市北部(24°09′~25°50′N,98°06′~100°01′E),怒江左岸二级支流上,控制流域面积 164.4 km²,流域内多年平均降雨量 1 077.6 mm,多年平均径流量为 0.98 亿 m³,多年平均蒸发量为 992.6 mm,多年平均气温约为 15.9℃,极端最高气温约为 32.3℃,最低气温约为 -3.5℃,无霜期约为 236 d。研究区土壤类型以红壤和水稻土为主,具有明显的地带性和区域性特点;植被类型以森林为主,森林覆盖率达到 60% 以上,多为半湿性常绿阔叶林、针叶林和针阔混交林。另外,水源地内有 12 个村委会,共有 17 079 人,耕作以传统的农业生产为主,有水稻、包谷、小麦等作物,以包谷、小麦、薯类为主。

2 数据及方法

2.1 模型输入数据

2.1.1 水文气象数据 北庙水源地内没有气象观测站,但保山气象站距离水源地较近,因此选用保山

站日气象观测资料,选用的气象要素有逐日气温(最高、最低)、降水量、风速、相对湿度和日照时数,时间序列长度为 1953 - 2009 年,另选用北庙水源区内北庙站 1953 - 2009 年,大西河站 1978 - 2009 年日降水资料。径流数据选用北庙水源地坝上站 2006 - 2009 年月流量资料。

2.1.2 空间数据 研究区 DEM 数据选用 90 m 分辨率的 STRM 数据,土地利用数据选用地球系统科学数据共享的 1:10 万的 1986 和 2000 年云南省土地利用数据,数据格式为 shape 格式,2009 年土地利用数据为利用 Landsat TM 影像目视解译数据。土壤数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心 1:100 万土壤数据集,数据格式为 shape 格式。

2.1.3 属性数据 土地利用类型和土壤属性数据对水循环具有重要的作用,因此构建合适的土地利用和土壤属性数据对模型的正确模拟起着非常重要的意义。土地利用类型属性数据库参照文献[6]和 SWAT 模型原始土地利用类型代码表构建。土壤属性数据库构建前,需要将国际制土壤粒径转化为美制粒径级配,然后用 SPAW 模型计算土壤层结构、土壤湿密度、饱和水力传导系数等参数^[6],北庙水源地土壤数据见表 1。

表 1 北庙水源地土壤物理属性表

土壤编码	土壤类型	SWAT 土壤编码	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤有效水量/(cm·cm ⁻¹)	土壤饱和导水率/(mm·h ⁻¹)	土壤最小下渗速率/(mm·h ⁻¹)	土壤分类
23110121	红壤	HR	1.35	0.15	26.48	7.4	B
23119101	水稻土	SDT	1.55	0.11	11.75	10.1	A
23121124	山原红壤	SYHR	1.39	0.13	0.68	4.1	B

2.2 SWAT 模型构建及模型评价方法

2.2.1 SWAT 模型构建 SWAT 模型是由美国农业部研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度模型,是一种具有很强的物理基础的分布式水文模型^[7]。可以对不同土壤属性、土地利用类型、气候状况和人类活动干扰下做出有效的产流模拟分析,已经在不同地区进行广泛的应用^[1-9]。本研究应用 ArcSWAT2009 工具,进行不同土地利用下的径流、坡面流及土壤侵蚀变化的定量模拟研究。首先,以集水面积 1000 hm² 为阈值,基于 DEM 将研究区划分为 51 个子流域。结合土地利用数据和土壤空间分布图,将研究区划分为 310 个水文响应单元。地表径流产汇流模拟采用 Daily rain/CN/Daily 算法,潜在

蒸散量的模拟采用 P-M 公式,河道演算采用 Variable Storage 法。模型构建后,以北庙水源地坝上站的月径流观测资料为依据对 SWAT 模型参数进行校核。将北庙水源地坝上站月流量资料分为两段,其中 2006 - 2007 年作为模型参数率定期,2008 - 2009 年为模型参数验证期。

2.2.2 模型评价方法 选择水文模型进行流域应用研究时,要评价模型的适用性,为此通常需要选取一些指标对模型参数校准和验证的结果进行评价,从而确定相应水文模式在研究区的合理性。本文参照已有研究^[10-11]选择相对误差(Re)、相关系数(R²)和模型效率系数(Ens)作为标准来评价模型参数率定和模型验证的效果。计算公式如下:

$$Re = \frac{Q_s - Q_o}{Q_o} \times 100\%$$
 (1)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - 1)(Q_{oi} - 1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - 1)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - 1)^2}}$$
 (2)

$$Ens = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q})}$$
 (3)

式中： Q_s 为模拟值， m^3/s ； Q_o 为实测值， m^3/s ； $\bar{Q}$ 为实测平均值， m^3/s 。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定与验证

以北庙水源地坝上 2006 – 2007 年径流资料为率定期，2008 – 2009 年为验证期，应用手动调参和 SUFI2 参数优化算法^[11]进行调参模拟，结果见图 1、表 2。

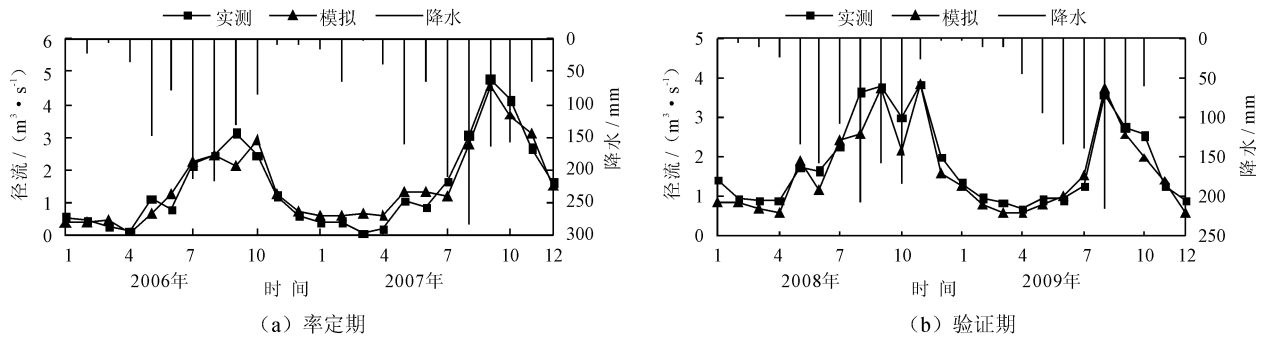


图 1 北庙水源地率定与验证期实测和模拟月径流比较

表 2 北庙水源地月径流模拟结果评价					
	年 份	时间/月	R^2	Ens	$Re / \%$
率定期	2006 – 2007	24	0.70	0.56	-12.1
验证期	2008 – 2009	24	0.72	0.63	-10.8

从图 1、表 2 中可以看出，在率定期月模拟径流、实测径流和降水三者的变化过程具有较好的一致性，模拟值小于实测值，偏小约为 12.1%， Ens 为 0.56， R^2 为 0.70；在验证期，月模拟径流、实测径流和降水三者的变化过程同样具有较好的一致性，模拟值小于实测值，偏小约为 10.8%， Ens 为 0.63， R^2 为 0.72。总体来看，在率定期和验证期 R^2 均达到 0.60 以上， Re 绝对值小于 15%， Ens 大于 0.55，可见 SWAT 水文模型在北庙水源地具有较好的适用性。

3.2 土地利用变化

北庙水源地 1986、2000 和 2009 年的土地利用类型所占流域面积的比例见图 2。从图中可以看出，3 年土地利用类型以林地、耕地、草地为主。1986、2000 和 2009 年耕地面积比分别为 14.46%、15.01% 和 21.85%，2000 年相比 1986 年耕地面积略有增加，随着人类活动的增加，2009 年耕地大幅增加，其耕地面积相比 2000 年增加了 6.84%。1986、2000、2009 年林地面积比分别为 64.31%、64.33% 和 71.73%，2009 年林地面积比 2000 年林

地面积增加了 7.40%。1986 年和 2000 年的草地面积比例分别为 16.74% 和 16.19%，到 2009 年草地面积所占比例较少，其值仅为 0.97%。水体所占面积比例 1986 年和 2000 年相等，2009 年水体面积小于 2000 年水体面积，减少了 2.25%。1986 年和 2000 年居民用地面积相等，所占比例为 0.11%，但到 2009 年居民用地面积比例增加到 2.66%。就未利用土地来看，2009 年所占比例增加到 0.67%（图 2）。总之，在过去 20 年里北庙水源地土地利用方式的变化整体表现为林地、耕地、居民用地面积明显增加而草地和水体面积减少。

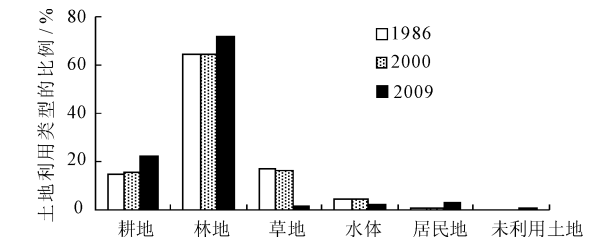


图 2 1986、2000、2009 年北庙水源地土地利用类型

3.3 土地利用变化对水文要素的影响

以 1980 – 2009 年日平均气象数据为基准，用率定好的 SWAT 模型分别模拟研究 1986、2000 和 2009 年 3 种不同土地利用方式下多年平均坡面流、径流深、实际蒸散和土壤侵蚀模数，结果见表 3。从表 3 中可以看出，1986、2000、2009 年土地利用方式

下的坡面径流深分别为 56.1、56.2 和 60.9 mm; 1986 和 2000 年土地利用方式下坡面流变化不大, 而 2009 年土地利用方式下坡面流比 2000 和 1986 年分别增加了 4.8 和 4.7 mm,这可能由于 2009 年耕地面积增加,而草地面积减少,使得拦蓄截留雨水的 能力下降,从而坡面径流深增加。就不同土地利用 方式下的年径流深变化来看,1986、2000 和 2009 年土地利用方式下年径流深分别为 307.3、306.5 和 342.5 mm;由于 2000 年和 1986 年相比,土地利用方 式变化不大,年径流深也仅相差 0.8 mm;但由于 2009 年与 2000、1986 年相比,耕地和林地增加,草 地明显减少,林地的增加发挥了其蓄水作用,可能是 导致对应的年径流深分别比 1986、2000 年土地利用 方式增加 35.2 和 36.0 mm 的原因,另外草地面积 的大幅减少导致实际蒸散减少,也可能是 2009 年土 地利用方式下年径流深增加的另一原因,从表 3 中 可以明显看出 2009 年土地利用方式下实际蒸散比 2000 年土地利用方式下实际蒸散减少了 42.5 mm。

表 3 表明,1986、2000 年土地利用方式下,北庙 水源地土壤侵蚀模数为 6.40 t/(hm²·a),也就是在 该土地利用方式下,北庙水源地土壤侵蚀以轻度为 主。2009 年土地利用方式下,北庙水源地土壤侵蚀 模数为 8.56 t/(hm²·a),尽管土壤侵蚀仍以轻度侵 蚀为主,但相比 1986、2000 年,土壤侵蚀模数呈增加 态势,这是因为耕地的增加,引起坡面流增加,从而 引起土壤侵蚀相应的增加。

表 3 1986、2000、2009 年土地利用方式下北庙水源地
径流、蒸散、土壤侵蚀模数

年份	坡面径流/ mm	年径流/ mm	蒸散/ mm	土壤侵蚀模数/ t/(hm ² ·a)
1986	56.1	307.3	525.4	6.40
2000	56.2	306.5	525.4	6.40
2009	60.9	342.5	482.9	8.56

4 结 语

本文选用 SWAT 水文模型对北庙水源地不同 土地利用方式下坡面径流深、年径流深、实际蒸散和 土壤侵蚀模数进行模拟,得出以下结论:

(1)月模拟径流和实测径流的变化过程具有较

好的一致性,检验模型模拟效果的 *R*²、*Ens* 和 *Re* 在 率定期和验证期均在模拟要求范围内,SWAT 水文 模型在北庙水源地有较好的适用性。

(2)过去 20 a 北庙水源地土地利用以耕地、林 地为主。土地利用方式的变化整体表现为林地、耕 地、居民用地面积明显增加而草地和水体面积减少。

(3)过去 20 a,耕地面积增加引起坡面流和土 壤侵蚀增加;而耕地面积增加和草地面积减少,导致 水源地实际蒸散减少,加上林地面积增加导致水源 地蓄水作用增强,因而 2009 年土地利用方式下水源 地年径流深最大。

参考文献:

[1] 杨宏伟,许崇育. 东江流域典型子流域土地利用覆被变化对地表径流影响[J]. 湖泊科学,2011,23(6):991-996.

[2] 邓慧平,李秀彬,陈军锋,等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟:以长江上游源头区梭磨河为例[J]. 地理学报,2003,58(1):53-62.

[3] 王 杰,黄 英,段琪彩,等. 土地利用变化情景下牧羊河水文响应研究[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(6):756-762.

[4] 李道峰,田 英,刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报,2004,59(4):565-573.

[5] 王 杰,黄 英,段琪彩,等. 变化情景下昆明市松华坝水源区径流变化研究[J]. 水文,2013,33(5):64-69+80.

[6] 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.

[7] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment (Part I): Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1):73-89.

[8] 李 磊,董晓华,喻 丹,等. 基于 SWAT 模型的清江流域径流模拟研究[J]. 人民长江,2013,44(22):25-29+42.

[9] 方玉杰,万金保,邓长涛,等. 基于 ARCSWAT2009 的锦江流域径流模拟分析[J]. 人民长江,2014,45(4):17-20.

[10] 白 薇,刘国强,董一威,等. SWAT 模型参数自动率定的改进与应用[J]. 中国农业气象,2009,30(Z2):271-275.

[11] 陈 强,苟 思,秦大庸,等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报,2010,41(1):113-119.