

岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究*

梁小军¹, 江洪^{1,2}, 朱求安¹, 黄梅玲¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 浙江林学院国际生态中心, 杭州 311300)

摘要:土地利用和气候变化对流域水循环和水资源的影响已经引起社会的广泛关注。以岷江上游流域为研究对象,以分布式水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)为研究工具,建立不同土地利用和气候变化情景,通过模型的校准与验证,模拟不同土地利用和气候变化的径流响应。模拟结果表明随着森林植被面积的减小径流量增大,且裸地增加对径流影响最显著。模拟径流量随着降水的增加而增大,且增加量主要产生于雨季。

关键词:岷江上游流域;径流;SWAT;土地利用;气候变化

中图分类号:F301.24;X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)05-0030-04

Modelling Hydrological Response to Different Land-use and Climate Change Scenarios in the Upper Reach of Minjiang River

LIANG Xiao-jun¹, JIANG Hong^{1,2}, ZHU Qiu-an¹, HUANG Mei-ling¹

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. International Research Center of Spatial-Ecology & Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: Land-use and climate change can influence on basin hydrology cycle and affect water resources what has caused widespread concern in society. We studied on Minjiang upstream watershed, used distributed watershed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool), established different land-use and climate change scenarios. Based on model calibration and verification, the hydrology response to different land-use and climate change scenarios was simulated. The results indicate the runoff varied with different land-use type, the simulated runoff increased when forestland decreased, and the bareland is the most effective on runoff response. The simulated runoff increased with increased precipitation, and the increased runoff concentrated in summer.

Key words: upper reaches of the Minjiang River; runoff; SWAT; land-use; climate change

岷江是长江上游的重要支流,水量充沛,是长江上游的重要水分补给来源。岷江上游位于都江堰工程以上河段,是成都平原农业、工业、城镇生活、环境功能用水的主要来源。由于人口增长和工业的发展,岷江上游流域土地利用发生了明显的变化,同时岷江上游流域河流比降大,土壤结构松散,对自然环境变化反应敏感^[1]。目前研究水文过程的变化主要是运用模型模拟的方法,模型在研究水文过程模拟中具有受数据影响小、参数可控性强等特点,特别是随着 GIS 和 RS 技术的发展,为研究长时间、大区域流域水文过程模拟提供了可能^[2]。SWAT 模型是美国农业部农业研究服务中心研制开发的分布式流域水文模型,其主要目的是模拟预测不同土地利用、土地管理方式对流域水量、水质的影响。SWAT 模型近年来得到了广泛的运用,在世界上很多地区得到了验

证。SWAT 模型具有很多优点:运用水分运动的物理原理,使模拟的过程更加准确;模块化的设计为模拟控制和数据修改提供了方便;与 GIS 软件进行了集成,具有很好的用户界面,便于操作和分析等^[3]。本文应用 SWAT 模型来研究岷江上游地区土地利用变化和气候变化对径流过程的影响,目的是希望通过引入 SWAT 模型,研究模型在岷江上游地区的适用性,并通过建立不同的土地利用和气候变化情景,模拟径流的响应。

1 基于 SWAT 模型的岷江上游流域径流模拟

1.1 流域概况

岷江上游流域位于 30°45' - 33°9' N, 102°34' - 103°56' E, 流域面积约 2.3 万 km²。流域内地形复杂,海拔高度在 733 ~

* 收稿日期:2008-03-05

基金项目:本研究得到科技部 973 项目(No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208)和国家自然科学基金项目(40671132), 科技部数据共享平台建设(No. 2006DKA32300 - 08)的部分支持。

作者简介:梁小军(1984 -),男,浙江金华人,硕士研究生,主要从事景观生态研究。E-mail:clerom@gmail.com

通信作者:江洪(1955 -),男,重庆人,教授,博士生导师,从事生态空间分析与模拟、遥感应用等研究。E-mail:jinghong@nju.edu.cn

5 578 m(见图 1),河源至都江堰市的上游河段主河道长 340 km,落差达 3 009 m,河谷深切,河道平均比降达 8‰。岷江水系有大小支流 90 余条,西侧多、东侧少。流域的控制水文站点是紫坪铺站,其多年平均径流量为 469 m³/s。

岷江上游干湿季分明,5 - 10 月为雨季,11 月 - 翌年 4 月为干季,气温和降水受高程影响显著。受全球气候变暖的影响,雪线呈上升的趋势。植被的主要类型为林地和草地(土地利用类型分布,见附图 9),两者之和占流域面积的 90%以上;受人类活动的影响,森林植被破坏严重。土壤主要是以温带森林土壤为主,其次是寒带草地土壤,土壤受地形作用垂直分带明显。

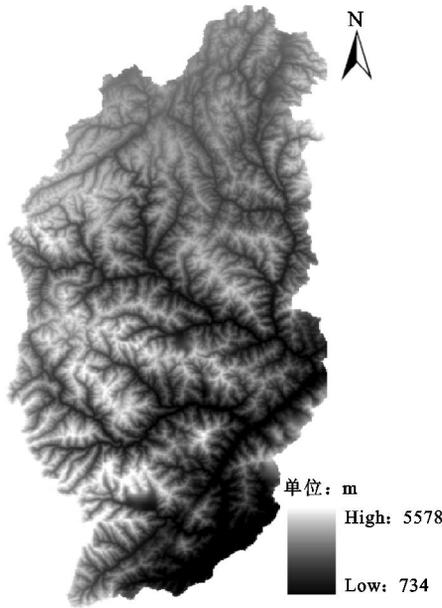


图 1 岷江上游流域 DEM

1.2 模型原理及计算方法

SWAT 是基于物理基础的分布式水文模型,可以模拟流域水运动、泥沙沉积、植被生长、营养物质循环等^[4-7]。水文过程包括坡面产流、坡面汇流和河道汇流、湖泊水库的汇流等。通过对 DEM 计算划分出不同的子流域单元,再根据土地利用类型和土壤类型的分布确定流域的水文响应单元(Hydrology Response Unit, HRU)。SWAT 的水文模拟是建立在水量平衡基础之上的,水量平衡公式表示为

$$sw_t = sw_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中: sw_t ——土壤最终含水量(mm); sw_0 ——土壤初始含水量(mm); t ——时间(d); R_{day} ——第 i 天总降水量(mm); Q_{surf} ——第 i 天地表径流总量(mm); E_a ——第 i 天蒸散总量(mm); w_{seep} ——第 i 天土壤侧流总量(mm); Q_{gw} ——第 i 天地下径流总量(mm)。

SWAT 模型将地下水分成两部分:浅水层用于计算地

下水回流,深水层主要受人类用水的影响。表面径流有两种计算方法:SCS 模型和 Green-Ampt 公式,本文采用美国水土保持局开发的 SCS 模型来计算地表径流量,模拟结果受地形、土地覆盖类型、土壤含水量等因子影响。模型提供了三种潜在蒸散发的计算方法:Hargreaves 公式、Penman-Monteith 公式、Priestly-Taylor 公式,根据研究区的资料,本文选用 Penman-monteith 公式计算潜在蒸散发。河道水运动的计算采用 Muskingum 方法。

1.3 数据的输入与处理

模型需要的数据包括空间数据和属性数据两种,空间数据包括土地利用类型、土壤类型和地形数据。属性数据包括土地利用类型属性库、土壤类型属性库、气象数据和水文数据。模型将用户输入的数据进行读入,转化为模型的模拟数据库,然后运行模型输出模拟结果。

模拟前首先输入岷江上游流域 DEM 数据,其分辨率为 100 m × 100 m。模型集成了 TOPOAZ(Topographic Parameterization) 数字地形分析软件包,运用 D8 算法进行河网的提取,然后确定集水阈值,通过流域参数的计算,获得河流的坡度、坡长、流域面积等参数值。Manillapalli 等^[8]在研究亚流域划分对水文模拟的影响时发现,子流域和 HRU 的数量对径流模拟有一定的影响,主要是由于流域参数的集总情况发生了变化。使用岷江上游流域的 DEM 数据,将岷江上游流域分成 15、27、31、41 个不同数量的子流域,分别模拟不同子流域划分水平下的径流量,得到径流的月模拟系数 R^2 分别为 0.61、0.61、0.63、0.62。不同子流域划分水平的流域特征参数如表 1。不同数量子流域划分下河道总长变化较大,子流域数目越多,河道总长越长,但流域的 CN(Curve Number) 统计值变化不大,本文选用 CN 统计值相对较高的 31 个子流域划分水平进一步进行径流响应分析。

表 1 岷江上游流域不同子流域划分下的参数特征

亚流域数量	HRU 数量	亚流域平均面积/km ²	河道总长/m	流域 CN 集总值
15	87	1529.92	1309.5	65.1
27	165	849.96	1710.9	65.3
31	198	740.28	1825.7	65.0
41	250	559.73	2099.4	65.0

土地利用数据通过 1983 年 TM 遥感影像分类得到,分类的结果如表 2 所示。SWAT2000 模型中自带了一部分土地利用类型属性数据库。根据岷江上游流域土地利用分类结果,将相应的土地利用类型选用 SWAT 模型自带的植被属性数据,对于模型没有的属性类型建立用户自定义属性库。土壤类型分类是根据四川土壤图集数字化得到的,模型的土壤属性库采用美国的分类标准,在应用时,将研究区的土壤属性值通过光滑不等距插值算法转化为美国制的标准。土壤分类情况如表 3 所示。

表 2 土地利用类型分类结果

名称及类型代码	针叶林 FRSE	混交林 FRST	灌丛林 RNGB	阔叶林 FRSD	高山草甸 RNGE	农用地 AGRC	裸地 BARE
面积/km ²	7408.75	408.12	5677.40	128.40	9162.66	83.47	89.96
占流域/%	32.27	1.78	24.73	0.56	39.91	0.36	0.39

1.4 模型参数校准与验证

参数校准与验证是模型的重要组成部分。将研究区的气象数据分为两部分:一部分用于校准(1980 - 1984 年),一部分用于验证(1985 - 1987 年),在校准前,月径流模拟结果如图 2 所示。径流模拟的确定系数 R^2 为 0.84, Nash-sutcliffe 效率系数 (Ens) 为 0.65。从图 2 可以看出,在冬季与洪水季节模拟值普遍偏低,这表明岷江上游流域基流值基本保持不变,模型没有正确模拟基流的变化。模型通过土壤水分含量和土壤水分蒸发来模拟基流的变化,参数调整情况如表 4。岷江上游流域存在高山积雪,为了模拟融雪对径流的作用,调节温度垂直递减率、雪被的最小水分含量和融雪因子等参数,可以优化模拟的结果。径流曲线因子 $CN2$ 、土壤有效含水量因子 SOL_AWC 是径流的敏感性参数, $CN2$ 与径流量呈正相关关系, SOL_AWC 与径流量呈负相关关系,通过增大 $CN2$ 值、减小 SOL_AWC 值可以增大模拟的径流量。

表 3 土壤类型分类结果

类型代码	名称	面积/ km ²	占流域的比例/ %
HuangSSHT	黄色石灰土	75.96	0.13
SuanXZR	酸性棕壤	4932.14	21.48
ZongSZYL T	棕色针叶林土	38.03	0.17
YaGSCDT	亚高山草甸土	4803.41	20.92
ZongSSHT	棕色石灰土	461.89	2.01
GaoSCDT	高山草甸土	5906.65	25.73
ChiHRang	赤红壤	128.87	0.56
AnHZR	暗黄棕壤	31.41	0.14
GaoSHMT	高山寒漠土	259.44	1.13
ZhongXCGT	中性粗骨土	116.12	0.51
LengSHNT	冷砂黄泥土	28.32	0.12
HuangZR	黄棕壤	254.15	1.11
AnZRRang	暗棕壤	2844.11	12.39
GaoSGCCDT	高山灌丛草甸土	580.2	2.53
ShiHXHT	石灰性黄土	246.33	10.73
ZaoHT	燥褐土	14.02	0.06
ZongRXT	棕壤性土	162.76	0.29

表 4 岷江上游流域参数率定值

参数名	描述	参数值
$CN2$	SCS 径流曲线数	2.7
SOL_AWC	土壤有效含水量/ (mm · mm ⁻¹)	- 0.03
$ESCO$	土壤蒸发补偿因子	- 66 %
CH_K2	主河道有效水力传导率/ (mm · h ⁻¹)	30
$REVAPMN$	土壤浅水层蒸发的最小深度/ mm	320
$SMFMX$	夏至日融雪因子 (mm/)	6.5
$SNOCVMX$	100 % 雪被下相应的最小水分含量/ mm	350
$SURLAG$	地表径流滞后系数	2
CH_N2	主河道曼宁系数	0.05
$TLAPS$	温度垂直递减率/ (· km ⁻¹)	3

参数调整后,月径流模拟结果显著偏好(如图 3),模拟的确定性系数 R^2 到达了 0.94, Ens 系数达到了 0.90。在验证期,模拟的评价参数 R^2 为 0.92, Ens 为 0.88。通过参数的校准与验证,模拟值与实测值之间的拟合较好,说明 SWAT 模型在岷江上游流域是完全适用性。

2 土地利用类型与气候变化情景模拟

2.1 不同土地利用变化情景的径流响应分析

岷江上游的主要植被类型为森林和草地,占流域面积的 90 % 以上。为了研究岷江上游不同土地利用类型的径流响应特点,根据森林植被的退化特点,设计了三种极端的情景模式:情景 1,假设所有的针叶林都转化为灌丛林,其它的土地利用类型保持不变;情景 2,假设所有的针叶林都转化为农业用地;情景 3,假设所有的针叶林都变成裸地。情景设计目的是考虑未来土地利用在极端变化情况下对径流量的影响。土地利用变化情景如图 4 所示。

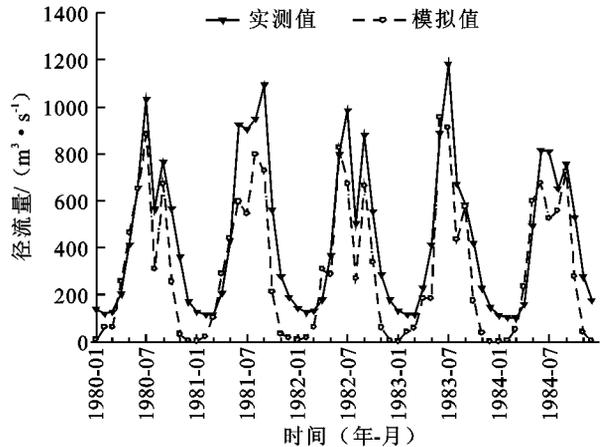


图 2 校准前岷江上游流域的月实测值与模拟值比较

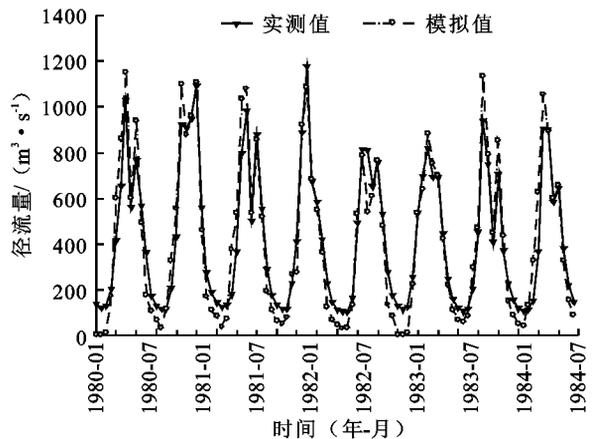


图 3 校准后岷江上游流域的月实测值与模拟值比较

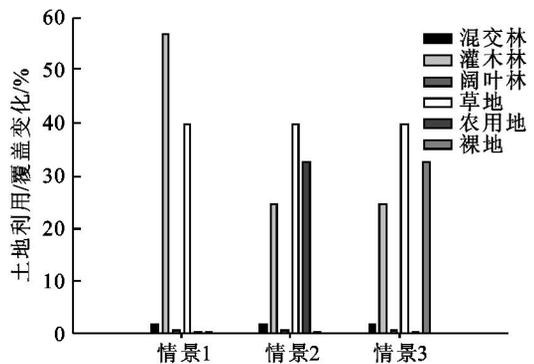


图 4 不同土地利用变化情景

以 1978 - 1987 年的气候资料为基础,采用率定好的 SWAT 模型,得到不同土地利用情景下的径流模拟值,并与

1983 年实际土地利用模拟结果进行比较。表 5 列出了各种虚拟情景下模拟径流深及其变化情况。模拟得到的 10 a 平均径流深为 475.79 mm,当针叶林全部转化为灌丛林时,年平均径流深增加 10.7 mm,增长率为 2.24%;当针叶林都转化为农用地时,年平均径流深增加 16.03 mm,增长率为 3.36%;当针叶林都转化为裸地时,年平均径流深最大,增长率为 4.82%。从三种情景的模拟结果来看,森林植被面积减少增大流域的径流量,当针叶林转化为其他的土地利用类型时,水土保持能力减弱,径流量增大。裸地在 4 种土地利用类型中水土保持能力最弱。模拟的结果对流域的科学管理具有一定的指导意义。

表 5 岷江上游流域不同土地利用情景下的年平均径流量变化

指标	情景 1	情景 2	情景 3	1983 年土地利用类型
模拟值/mm	486.26	491.82	498.18	475.79
变化量/mm	10.70	16.03	22.93	0.00
变化百分比/%	2.24	3.36	4.82	0.00

2.2 气候变化情景设计对径流的影响分析

为了模拟气候变化对径流的影响,假定土地利用类型不变(1983 年土地利用类型),模拟 1971 - 2000 年气候变化对流域径流量的影响。以 30 a 平均降水量值为参照,把 30 a 分为三个不同的气候时段,70 年代降水量大于 30 a 平均降水量,属于湿润期,设为情景 1;90 年代降水量偏少,属于干旱期,设为情景 2;80 年代降水与 30 a 平均降水量相近,设为情景 3。三种情景的模拟结果如表 6 所示。

表 6 岷江上游不同气候条件下的年平均径流量变化

指标	情景 1	情景 2	情景 3	30 年均值
模拟值/mm	559.73	457.36	401.43	472.86
变化量/mm	86.87	- 15.50	- 71.43	0.00
变化百分比/%	18.37	- 3.27	- 15.10	0.00

从表 6 可以看出,70 年代径流模拟值偏大,而 90 年代径流模拟值偏小。不同气候情景下,径流量变化非常明显,说明径流量受气候影响显著。岷江上游流域干湿季节分明,5 - 10 月为雨季,11 月 - 翌年 4 月为干季。将径流量分为雨季和干季两部分,并分别求它们的年平均值,得到 1971 - 2000 年每年的雨季径流深与干季径流深(图 5)。受气候变化影响,雨季径流变化明显,呈显著的下降趋势,而干季径流在 70 年代有所波动外,80 年代以后基本没有变化。说明气候变化对径流量的影响主要发生在雨季(夏半年),而干季(冬半年)径流量受气候变化影响较小。

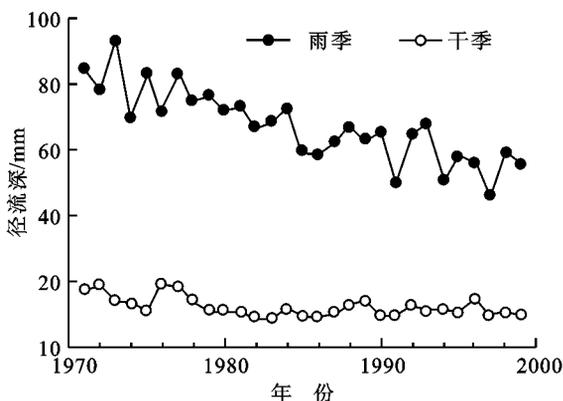


图 5 雨季/干季的年平均径流变化

3 结论

将分布式水文模型 SWAT 应用于岷江上游地区,通过不同子流域数量的划分,选取最佳的子流域划分数量进行径流模拟分析。使用 1980 - 1984 年实测径流数据对模型进行校准,在校准期确定系数 R^2 达到 0.94, E_{ns} 系数达到了 0.90。在验证期(1985 - 1987 年)模型的评价参数也都达到了 0.90 以上。

运用率定好的模型,通过建立三种不同的土地利用情景,模拟不同土地利用情景下径流量的变化,森林植被退化增大径流量。针叶林地的减少导致流域径流量增加,当针叶林转化为裸地时,年平均径流量增长最大,增长率为 4.82%。气候变化对径流作用明显,保持土地利用类型不变,设定三种不同的气候情景,模拟得到 70 年代、80 年代、90 年代年平均径流值分别为 559.73,457.36,401.43 mm,且径流变化主要发生在雨季。

参考文献:

- [1] 彭立,苏春江,徐云,等.岷江上游生态环境现状、存在问题及治理对策[J].江西农业大学学报:社会科学版,2007,6(1):80-84.
- [2] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆盖变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-225.
- [3] Wang Sufen, Kang Shaozhong, Zhang Lu, et al. Modeling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China[J]. Hydrology Processes, 2007, 22: 2502-2510.
- [4] Manguerra H B, Engel B A. Hydrologic Parametrization of Watersheds for Runoff Prediction Using SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(5): 1149-1162.
- [5] Rosenberg N J, Epstein D J, Wang D, et al. Possible Impacts of Global Warming on the Hydrology of the Ogallala Aquifer Region[J]. Journal of Climate, 1999, 42: 677-692.
- [6] Saleh A, Arnold J G, Gassman P W, et al. Application of SWAT for the Upper North Bosque Watershed[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1077-1087.
- [7] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale[J]. Phys. Chem. Earth. (B), 2001, 26(7/8): 577-582.
- [8] Manillapalli S, Srinivasan R, Arnold J G, et al. Effect of spatial variability on basin scale modeling [C]// Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Proceedings, Santa Fe, New Mexico, 1996.