

SWAT 模型在天山西部山区的应用

宋倩, 穆振侠, 姜卉芳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 以伊犁喀什河流域为研究对象, 采用分布式流域水文物理模型 SWAT 对喀什河流域进行径流模拟, 并建立模型所需的土壤、土地利用、气象数据库。应用 1990 - 1996 年的月径流资料进行模型参数的率定; 1997 - 2000 年月径流资料进行模型的验证, 评估了模型在天山西部山区的适用性。模型经过多次的参数率定后, 能较好地模拟新疆山区水文过程。结果表明: 率定期的径流相对误差 R_E 为 8.6%, Nash - Sutcliffe 效率系数为 0.8, 模拟值与实测值之间的拟合程度较好。融雪是新疆径流形成的重要环节, 模型中的融雪参数对模拟径流结果的影响较大, 适当的调整融雪参数值, 可提高模拟精度。

关键词: 山区; SWAT 模型; 径流模拟; 伊犁喀什河流域

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0046-04

Application of SWAT model in western area of Tianshan Mountain

SONG Qian, MU Zhenxia, JIANG Huifang

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Taking the Ili Kashi River for a study area, the paper used a distributed SWAT model to simulate runoff process of the basin, and also established the soil, land use, meteorological database with the model need. It applied the data of monthly runoff from 1990 to 1996 for the calibration of SWAT model, used the data during the period of 1997 to 2000 to validate the model, and evaluated the applicability of the model in the west area of Tianshan mountain. After many times of model parameter calibration, the model is capable of simulating hydrological processes in Xinjiang Mountainous. The results show that the relative error of simulation (R_E) is 8.6%, and the Nash efficiency coefficient (NSE) is 0.80. Snowmelt plays an important role in the formation of runoff in Xinjiang, The melting snow parameters of the model have greater impact on the simulated runoff results. Therefore, to appropriately adjust the snowmelt parameter values can improve simulation accuracy.

Key words: mountainous; SWAT model; runoff simulation; the Ilikashi River basin

水文模型成为国内外水文建模研究的热点问题^[1], 水文模拟中应用的 3S 技术, 借助 GIS 和 RS 获取的精确的空间地理信息, 为水文模型的研究提供了新的技术支撑, 同时考虑到降水空间分布和流域下垫面条件的不均匀性, 使得分布式流域水文模型有了突出的优势。

新疆降水稀少蒸发强烈, 河流主要以积雪消融补给, 山区具有湿润与半湿润地区的产流特征^[2-3], 影响产汇流的因素也比较复杂, 增加了模拟的难度。Arnold(1994)^[4]开发了先进的分布式流域水文物理 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型, SWAT

模型是在具有不同土壤类型、土地利用和管理条件特征的大尺度复杂流域内, 可预测土地管理措施长期对水、沙及化学物质的影响, 并可以模拟流域内发生的各种物理过程^[5]。SWAT 模型可将研究区离散形成若干个单元, 降低了模型对下垫面的影响, 提高了模拟精度。本文采用 SWAT2009 模型, 基于其产汇流过程, 尝试对伊犁喀什河流域进行径流模拟。

1 资料及研究方法

1.1 研究区概况

喀什河流域是伊犁河上的第二大支流, 位于天山

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-02-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区高等学校科研计划项目资助(XJEDU2011S17); 国家自然科学基金资助(51209181); 水利部公益项目资助(201001065); 新疆农业大学前期课题资助(XJAU201005); 新疆农业大学水利博士后经费资助; 新疆水文学及水资源重点学科基金资助(xjswszyzdxk20101202)

作者简介: 宋倩(1986-), 女, 新疆伊宁县人, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源。

通讯作者: 穆振侠(1980-), 男, 山东营县人, 副教授, 主要从事水文水资源研究。

西部,介于东经 81°40′~85°10′北纬 43°25′~44°15′之间。发源于天山西部伊连哈比尔尕山冰川地带。河流全长 304 km,集水面积 9 541 km²,乌拉斯台站以上的集水面积为 4 900 km²,流域高程在 693 ~4 604 m 之间,由于特殊的地理位置和下垫面因素,水量主要以冰川、积雪融雪,雨水以及地下水混合补给。流域地势西南高,北部低,气候特征表现为温和湿润、雨量充沛、昼夜温差大等特征。流域上各种冰川共 551 条,冰川面积为 421. 60 km²,冰储存量为 28. 18 m³[6],流域通常在 12 月封冻,次年 3 月解冻。

1.2 资料

(1)水文气象数据:本文采用乌拉斯台水文站、吉林台遥测站、尼勒克和伊宁气象站 4 站点 1990 – 2000 年实测水文气象要素进行研究(表 1),数据来源于新疆水文统计年鉴、国家气象局和新疆地面气候资料集。

表 1 水文气象要素站点分布					m
编号	站点	高程	时间序列	气象要素	
1	伊宁	664	1990 – 2000	降水、气温、风速、相对湿度、太阳辐射	
2	尼勒克	1106	1990 – 2000	降水、气温、风速、相对湿度	
3	乌拉斯台	1440	1990 – 2000	降水、气温	
4	吉林台	1597	1990 – 2000	降水、气温	

(2)土地利用数据:研究中所用到的土地利用数据来源于新疆 1: 100 万的土地利用数据,乌拉斯台水文检测断面以上土地利用类型以耕地,林地,草地,水域,城乡、工矿、居民地和未利用土地 6 种为主,其中,草地所占比例最大,达到研究区总面积的 57. 78%,其次依次为未利用土地,水域,林地,耕地和城乡、工矿、居民地,所占比例为 19. 84%、13. 72%、7. 23%、1. 37% 和 0. 06%。

(3)土壤数据:研究中所用到的土壤数据来源于新疆 1: 100 万的土地利用数据,乌拉斯台水文检测断面以上土壤以潮土、高山草甸土、高山寒漠土、黑钙土、灰褐土、栗钙土和栗高草甸土 7 种为主,其中,栗高草甸土所占比较最大,达到研究区总面积的 41. 89%,栗钙土所占的比例较小,仅占 0. 04%。

(4)DEM 数据:研究中所用到的地形起伏变化分析的 DEM 数据来源于美国 EOS/MODIS 数据中心提供的 SRTM DEM 数据,水平分辨率为 90 m×90 m。

1.3 模型研究方法

1.3.1 模型选择 本研究区虽具有湿润半湿润地

区的产流特征,但地处西北干旱半干旱地区,气象与水文站点比较稀少且分布不均,资料缺乏。由于以往数据的局限性和制约性,概念模型与集总模型成为该地区研究的主要手段,但近年来具有优势的分布式水文模型逐渐成为研究的热点,因此通过对不同模型对比优选,如 TOPMODEL、SHE、HBV 和 SWAT 等,并结合研究区目前现有的基础资料,考虑到分布式水文模型 SWAT 具有很强的物理基础,适用于具有不同土壤、土地利用方式和管理条件下的复杂流域,并能在资料缺乏地区建模。且由于 SWAT 模型以大量的空间分布参数作为支撑,对流域水文过程的描述和模拟更加真实,进而可用于模拟预测不同土地利用及多种土地管理措施对复杂多变的大流域的水文、泥沙和化学物质的长期影响以及人类活动对水、沙、农业、化学物质的长期影响,因而选定此模型进行与气候变化、人类活动对产汇流影响相关方面的研究,初步探讨了此模型在天山西部山区的适应性。

1.3.2 模型精度评定标准 模拟结果的评价,选用 Nash – sutcliffe 效率系数 NSE [7–8] 和径流相对误差 R_E [9] 来评价模型在参数率定期和验证期的模拟结果。

(1)Nash – sutcliffe 效率系数 NSE 。它是衡量模型实测值和模拟值之间的拟合程度,其表达式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{avg})^2}$$

(1)

式中: Q_o 为实测值; Q_s 为模拟值; Q_{avg} 为实测平均值; n 为实测值的个数。当 $Q_o = Q_s$ 时, $NSE = 1$; 如果 NSE 为负值,说明模型模拟值比直接使用观测值的可信度更低;当 NSE 为正值时且越接近 1,表明模型的模拟值越接近实测值。

(2)径流相对误差 R_E 。它是评价总实测值和总模拟值之间的偏离程度,其表达式为:

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_o)}{\sum_{i=1}^n (Q_o)} \times 100\%$$

(2)

式中: R_E 为模型模拟的相对误差; Q_s 为模型的模拟值; Q_o 为模型的实测值。一般认为,误差在 ± 20% 以内,模拟结果较好。

2 模型构建及应用

2.1 模型构建

(1)土壤数据库的构建。由于土层厚度、密度、

有机碳、可利用有效水量和土壤饱和水力传导率等土壤的物理属性决定着土壤剖面中水和气的运动状况,并对水文响应单元(HRUS)中的水循环起着重要作用。因此,需要确定相关参数。由于历史原因,我国的土壤普查资料中的土壤质地存在苏联制和国际制两种体系,而 SWAT 模型所需要的是国际制土壤体系,因此,根据研究区的土壤数据、《新疆土壤》、《新疆土壤志》得出的土壤类型、结构、特性等参数,计算出不同的水文分组,并借助 Matlab 软件采用三次样条插值法将研究区的土壤质地标准转换为 SWAT 模型所需的国际标准。利用 USDA 开发的土壤水文特性 SPAW^[10] 软件和实际观测的资料计算需要的土壤参数,如不同类型(粘粒、粉沙、沙粒、砾石)土壤湿密度、土壤层有效持水量、饱和导水率、有效田间持水量等,并建立土壤属性数据库。

(2) 土地利用数据库的构建。根据研究区不同的土地利用类型,选取 SWAT 模型中相应的土地利用类型,并使之相关联,建立相应的土地利用数据库。

(3) 气象数据库的构建。基于收集到的研究区水文气象资料,按 SWAT 模型输入数据要求制成相应格式的数据库。考虑到实际水文气象要素监测过程中由于监测站点数量少和监测数据缺失等原因,将影响模型的模拟效果及气候变化对水文过程影响等方面,因此,有必要寻找一种能够用于生成气候数据和填补缺失的数据的方法,可以用来模拟给定气候条件下的随机天气模型,即天气发生器。鉴于伊宁市气象站气象要素较全,因此,以伊宁市气象站气象要素作为确定天气发生器各参数的主要依据,最终将确定的日降水量、日最高和最低气温、日太阳辐射量、日露点温度和日平均风速等参数输入气象数据库。

2.2 模型应用

2.2.1 模型的运行 基于研究区 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、实测水文气象数据及所建立的不同类型数据库,依据研究区自然地理特征对流域内的水文响应单元(HRUS)设定相应的土地利用阈值、土壤阈值、坡度阈值。径流模拟采用 SCS 径流曲线法、潜在蒸散发(PET)选用 Penman - monteith 方法,河道演算方法选用马斯京根法进行模型的运行。

鉴于 SWAT 模型在径流模拟中相关参数较多,但个别参数对精度影响很小,为减轻模型调参的工作量,提高校准模型的效率,在不影响径流模拟精度的情况下,进行参数敏感性分析,选择较敏感的参数进行调参。通过敏感性分析,影响研究区径流模拟精度的主要参数有 7 个,如表 2 所示。

表 2 重要参数的敏感性值

参数代码	参数含义	敏感性	参数取值	所属文件
Alpha_Bf	基流回退 α 系数	3.07	0.02	.gw
Cn2	SCS 径流曲线数	0.42	80 ~ 90	.mgt
Revapmn	浅层地下水再蒸发或阈值深度	0.29	1	.gw
Gwqmn	浅层蓄水体补偿深度	0.26	400	.gw
Esco	土壤蒸发补偿系数	0.20	0.95	.bsn
Sol_z	土壤表层到底层深度	0.18	1100	.sol
timp	积雪温度滞后因子	0.16	1	.bsn

2.2.2 模型的率定和验证 本研究以喀什河乌拉斯斯水文断面为径流模拟结果检验断面,选取 1990 - 2000 年月水文要素数据,以 1990 - 1996 年为模型的率定期,以 1997 - 2000 年为模型验证期进行径流模拟。考虑到研究区河流补给以降水、积雪消融水为主,因此,在模型参数的率定过程中,除对与降水相关参数进行调试外,还对与融雪相关参数进行调试。

模型率定期径流模拟结果如图 1 所示。

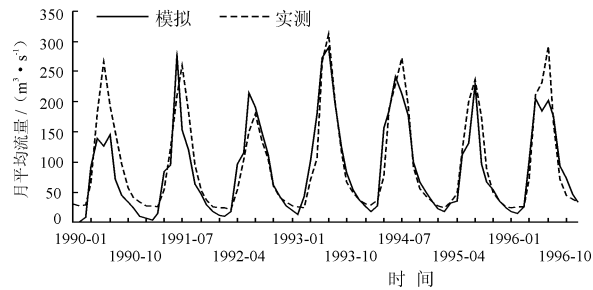


图 1 1990 - 1996 年月径流率定结果

从图 1 可以看出,模型率定期模拟值和实测值吻合较好,Nash - sutcliffe 效率系数为 0.80,径流相对误差为 8.6%。1990 - 1991 年作为模型的预热阶段,实测与模拟结果有所偏差;其他时间产生偏差的主要原因流域降水主要集中在 5 - 9 月,冬季径流很小,春季气温回升径流明显增大,冰雪融水对径流产生了比较大的影响。模型验证期径流模拟结果如图 2。

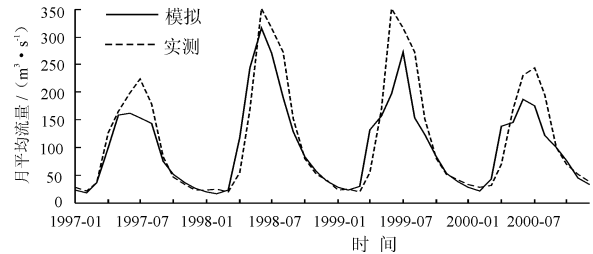


图 2 1997 - 2000 年月径流验证结果

从图2中可以看,模型验证期径流模拟值与实测值总体变化趋势相近,在量上存在一定的偏差。验证期的 Nash - sutcliffe 效率系数为 0.80,径流相对误差为 11.6%。由率定期和验证期可以看出,模拟效率系数较高,误差较小,表明 SWAT 模型在天山西部山区是可以适用的,能够较好的反映其产流特性。

3 结 语

为能够更好研究气候及下垫面的变化对流域产流规律的影响,为其他相关方面的研究提供一定的指导依据,借助研究区 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、水文气象要素等基础数据,以 SWAT2009 模型为平台研究了 SWAT 模型在天山西部山区径流模拟过程中的适用性。

通过对比看出 SWAT 模型在天山西部山区是可以适用的,能够较好的反映其产流特性,率定期和验证期效率系数均为 0.80,径流相对误差分别为 8.6% 和 11.6%,径流模拟值与实测值变化趋势相近。产生误差的主要原因是山区降水与气温在垂直方向上分布的差异性及研究区实测水文气象站点较少,不能较好的反映降水与气温的时空分布规律,并且由于积雪、冰川融水的存在加大的径流模拟的难度,有待于借助精度更高、更好的数据源进行进一步研究。

(上接第 45 页)

由熵值的大小可以判定,非冰期水面蒸发影响因子的敏感性排序为: $x_1 > x_7 > x_3 > x_2 > x_4 > x_6 > x_5$ 。

3 结 语

(1) 基于神经网络 - 缺省因子法与熵权法的水面蒸发敏感因素研究结果表明:非冰期情况下,水面蒸发对温度与风速这二因素最为敏感。在今后该区域的水资源优化调度中,应当充分考虑这二种气象因素对水资源配置的影响,合理优化水资源调度方案。

(2) 神经网络 - 缺省因子法与熵权法分析的结果基本一致,尤其在主要敏感因素的判别上是完全一致的,这充分说明上述两种方法在水面蒸发敏感性分析中的可行性。同时,该方法也为类似问题的解决提供了参考。

参考文献:

- [1] 张明旭,赵海英. 晋江西流域降雨径流的 SWAT 模型模拟[J]. 通化师范学院学报,2008,29(4):74-76.
- [2] 冯国章. 新疆内陆河流水文干旱特征浅析[J]. 干旱地区农业研究,1994,12(2):70-78.
- [3] 姜卉芳,姜毅,陈亮. 新疆河流径流模拟[J]. 新疆农业大学学报,1998,21(3):176-183.
- [4] Philip W G, Manuel R R, Colleen H G, et al. The soil and water assessment tool: Historical, development, applications, and future research directions [J]. Trans ASAE, 2007,50(4):1211-1250.
- [5] 李峰,胡铁松,黄金金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电,2008(3):24-28.
- [6] 施雅风,刘潮海,王宗太,等. 简明中国冰川目录[M]. 上海:上海科学普及出版社,2005:41-48.
- [7] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理,2010,33(1):8-15.
- [8] Nash J E, Sutcliffe J V. Rive flow forecasting through conceptual models, Part1 - a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [9] 姚苏红,朱仲元,张圣微. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(1):175-180.
- [10] 齐贞,杜丽平,刘晓冰,等. SWAT 模型中气象数据库和土壤数据库的构建方法[J]. 河南科学,2011,29(12):1458-1463.
- [11] 张小咏,李佳,杨艳昭,等. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. 西北林学院学报,2010,27(5):38-44.

参考文献:

- [1] 陈玉芳. BP 神经网络的算法改进及应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2004.
- [2] 杨旭,冯国章. 基于 BP 网络的中长期水文预报精度影响分析[J]. 东北水利水电,2003,21(2):1-3.
- [3] 魏铁军,王永成,刘东. BP 网络在三江平原井灌区地下水埋深预测中的应用[J]. 黑龙江水专学报,2009,36(1):26-30.
- [4] 韩丽伟,付强,刘东,等. 三江平原地下水承载能力综合评价模型的构建及其应用[J]. 水土保持研究,2010,17(2):182-185.
- [5] 张德二. 台安实验区“三水”转化分析及水资源计算研究[J]. 水文,1992,12(5):26-31.
- [6] 于国强,李占斌,张霞,等. 土壤水盐动态的 BP 神经网络模型及灰色关联分析[J]. 农业工程学报,2009,25(11):141-147.