

黑河山区流域平均坡长的计算与径流模拟

余文君¹, 南卓铜^{2*}, 李 硕¹, 李呈罡¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 流域平均坡长是侧向流和汇流时间计算的重要参数, 其会影响地表径流的计算。应用 SWAT 2005 和 ArcView GIS 3.2 集成的 AVSWAT 模型, 对黑河干流上游山区流域莺落峡出口径流进行模拟, 发现其计算的流域平均坡长存在较大误差, 进而影响到模拟结果。利用子流域内已知的平均坡度和平均坡长建立回归方程, 计算各子流域的平均坡长, 替换 AVSWAT 计算的不合理值, 在保持其他参数不变的情况下, 模拟的月径流纳什系数从 0.60 提高到 0.75, 模拟结果得到显著提高。敏感性分析结果和径流曲线数(CN2)的分析也间接验证了流域平均坡长修正方法的可行性。在修正流域平均坡长后, 对 AVSWAT 模型的其他参数 CN2 等进行优化, 模拟的月径流的纳什系数达到 0.81, 表明本文建议的流域平均坡长计算方法是可以应用到实际的干旱区黑河流域并取得较好模拟效果。

关键词: 黑河流域; 平均坡长; SWAT; 敏感性分析

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00041

1 前言

SWAT^[1] (Soil and Water Assessment Tool), 水土评价工具模型是美国农业部开发的具有物理基础的流域尺度分布式流域水文模型, 可以模拟地表径流、融雪径流等多种物理过程。AVSWAT 和 ArcSWAT 是 SWAT 模型以 ArcView GIS 和 ArcGIS 为平台的图形化界面, 为 SWAT 模型提供了数据可视化和空间分析等功能。本文采用了 SWAT2005 和 ArcView 3.2 集成的 AVSWAT 对黑河干流上游山区流域进行模拟分析。

目前, SWAT 模型在国内外流域的水文过程模拟方面有广泛的应用, 取得不少成功的案例^[2-5], 然而 SWAT 模型在移植到干旱等类型的地区时发现了一些不足之处。例如, 考虑到 SWAT 对地下水动态模拟的不足, Luo *et al.* 将 SWAT 模型和 MODFLOW 模型耦合, 改善了 SWAT 模型地下水和地表交互过程的模拟^[6]; Eckhardt *et al.* 发现了在低山区流域应用 SWAT99.2 壤中流估算偏低的

问题, 发展了适合于低山区的 SWAT-G 模型^[7]; Ahl *et al.* 在 Rocky 山区流域应用中发现融雪径流的模拟问题, 指出通过参数率定可以使 SWAT 模型模拟的融雪径流效果得到一定提高^[8]。SWAT 模型在西北干旱区典型流域黑河流域也有相关的应用, 王中根等在介绍 SWAT 模型基础上进行了黑河流域上游的径流模拟^[9]; 秦耀民等用 SWAT 模型在黑河流域不同土地利用情景进行非点源污染研究, 探讨了黑河流域土地利用与非点源污染关系等^[10]; 黄清华和张万昌在黑河山区流域应用 SWAT 模型进行了 11 年的月径流模拟, 月平均径流模拟效率系数为 0.88, 认为 SWAT 模型可以较可靠地模拟黑河山区流域月径流, 同时认为在该区融雪径流和地下径流参数是精确 SWAT 模拟的关键^[11]; 然而在山区流域, 魏国等报告了 AVSWAT 不能准确计算流域平均坡长, 从而影响了径流的模拟, 探讨了两种从 DEM 模型中提取流域平均坡长的方法, 以替代 AVSWAT 计算的原平均坡长, 第

收稿日期: 2011-04-20; 修回日期: 2011-11-04.

基金项目: 国家科技部“863”课题(2008AA12Z205); 国家自然科学基金重点项目(40730527); 中科院重要方向项目(KZCX2-YW-Q10-1)。

作者简介: 余文君(1987-), 女, 湖北鄂州人, 硕士研究生。主要从事 SWAT 模型的应用研究。E-mail: yuwenjun8899@163.com

* 通讯作者: 南卓铜(1977-), 男, 浙江乐清人, 博士, 研究员。当前主要研究兴趣: 寒区旱区水文建模、决策支持系统和地理信息系统。E-mail: nztong@lzb.ac.cn

一种以流域河网密度的分析方法,从DEM中提取满足地貌定律的河网,计算河网密度从而得到流域平均坡长;第二种是基于经验分析的提取方法^[12]。AVSWAT在黑河上游山区流域的应用也存在同样的坡长计算问题,但采用魏国等的方法,计算得出的流域平均坡长在1000m左右,根据专家经验,不符合黑河山区的实际情况。

本文以黑河上游山区流域为例,应用AVSWAT模型模拟莺落峡出口1990-2009年月径流量,探讨了AVSWAT模型计算中的流域平均坡长不符合实际的问题,进行了修正,并通过试验分析,验证了该修正方法在黑河山区流域应用中的可用性。

2 研究区概况和数据准备

2.1 研究区概况

黑河流域位于河西走廊中段,是我国西北地区第二大内陆河,流域范围介于东经 $96^{\circ}42' \sim 102^{\circ}00'E$ 、北纬 $37^{\circ}41' \sim 42^{\circ}42'N$ 之间,东面以山丹大黄山为界,西面以嘉峪关的黑山为界,南以祁连县境内的托赖南山为分水岭,北抵额济纳旗境内的居延海(中蒙边境)。黑河流域垂直地带性地貌景观十分鲜明,流域水文地理及水文地质条件十分复杂。

本文研究范围为黑河上游山区流域,流域位置如图1所示,流域出口是莺落峡水文站,流域面积约为 $10\,000\text{km}^2$,河道长303km,源头为冰川。上游海拔 $2\,600 \sim 3\,200\text{m}$ 的地区年平均气温 $2.0 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$,年降水量在200mm以上,最高达700mm,相对湿度约60%,蒸发量约700mm;海拔 $1\,600 \sim 2\,300\text{m}$ 的地区气候冷凉,是农业向牧业过渡地带。该地区降水量由东向西递减,雪线高度由东向西逐渐升高,水资源主要来源于祁连山区的降水和冰雪融化。上游山区植被属温带山地森林草原。主要土类有寒漠土、高山草甸土、高山灌丛草甸土、高山草原土、亚高山草甸土、亚高山草原土等。

2.2 数据分析处理

本文的DEM来源于90m空间分辨率的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据。水文、气象站数据,土地利用数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。水文站有扎马什克、祁连、莺落峡3个站点(图1),采用1990年1月-2009年12月的日观测径

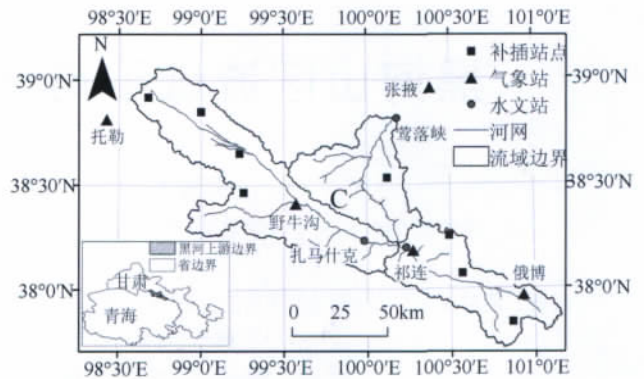


图1 黑河上游山区流域地理位置及气象水文站点分布图
Fig. 1 Location map and distribution of meteorological and hydrological stations in the mountainous upper-stream area of the Heihe River basin (HRB)

流和降雨量数据;气象站有张掖、野牛沟、祁连、俄博和托勒5个站点(图1),采用1990年1月-2009年12月的日观测数据,包括温度(日均最高/最低气温)、太阳辐射、风速和相对湿度。为了提高SWAT模型气象发生器模拟精度,在流域内部选择了不同高度的点,作为补插的雨量站点(图1),根据校正系数和高程值计算这些站点的雨量数据^[13],具体方法是根据已有站点多年平均雨量值和站点海拔高度进行回归分析,建立雨量和海拔的线性回归模型,求得不同高度的雨量校正系数。土地利用为2000年全国土地利用图剪裁得到;土壤图为第二次全国土壤调查制作的1:100万土壤图。土壤颗粒分、含水量、容重、有机质、导水系数等基本属性数据是2010年8月-9月通过野外采样试验和室内分析获得。考虑到模型计算中的面积计算,全部空间数据投影转换为北京54平面坐标系,横轴墨卡托投影。

黑河上游山区自2000年以后兴建水库,流域主出口莺落峡的观测数据受水库蓄水等因素影响,不代表自然径流。本文采用系统水文模型^[14]的方法,利用上游的祁连和扎马什克两站的自然流量和附近的雨量站还原莺落峡站的2000-2009年的逐日自然径流量。回归公式见式(1)

$$Q_{Y,t} = a_0 Q_{Z,t} + a_1 Q_{Z,t-1} + a_2 Q_{Z,t-2} + \dots + a_m Q_{Z,t-m} + b_0 Q_{Q,t} + b_1 Q_{Q,t-1} + b_2 Q_{Q,t-2} + \dots + b_n Q_{Q,t-n} + c_0 \bar{P}_t + c_1 \bar{P}_{t-1} + c_2 \bar{P}_{t-2} + \dots + c_l \bar{P}_0 \quad (1)$$

其中, Q 是自然流量(m^3/s),下标 Y 、 Z 、 Q 分别表示

莺落峡、扎马什克、祁连三个站, t 为时间(天), \bar{P} 莺落峡站所控区域(图 1、图 2 中的 C 区域)的平均降水(mm)。 a, b, c 为系数。 m, n, l 为最大回溯时间步长, 根据回归精度要求确定。 平均降水利用附近 5 个雨量站(大野口、康乐、扎马什克、祁连山、莺落峡)降水乘以权重计算。 权重由泰森多边形给出(如图 2)。

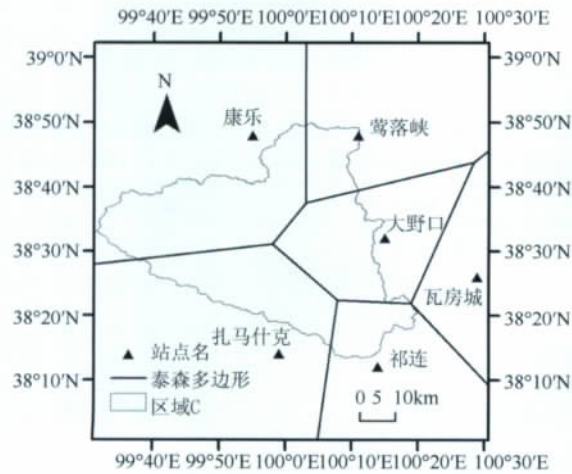


图 2 莺落峡出口自然流量还原的泰森加权方案

Fig. 2 Thiessen weighing scheme for the flow restoration at the Yingluoxia outlet

3 流域平均坡长的修正

按照定义,流域平均坡长是流域内分水岭到最近汇水点的平均坡面距离,是描述流域地形地貌特征的基本地理参数。在黑河上游山区流域 AVSWAT 模拟过程中,发现计算的流域平均坡长比实际情况明显偏小,而流域平均坡长会影响汇流时间、侧向流和水土流失等,从而影响了径流模拟的效果。

3.1 AVSWAT 模型参数设定

根据子流域间的空间组合关系,以及对模拟精度的影响^[15],将上游集水区面积阈值设置为 1000ha,划分了 43 个子流域(图 3);土壤类型(图 4(a))面积阈值设置为 10%,土地利用(图 4(b))面积阈值设置为 5%,共划分了 256 个水文响应单元。图 4a 土壤类型对应的属性是野外调查所测。莺落峡站为流域的总出口,模拟的时间段为 1990-2009 年。

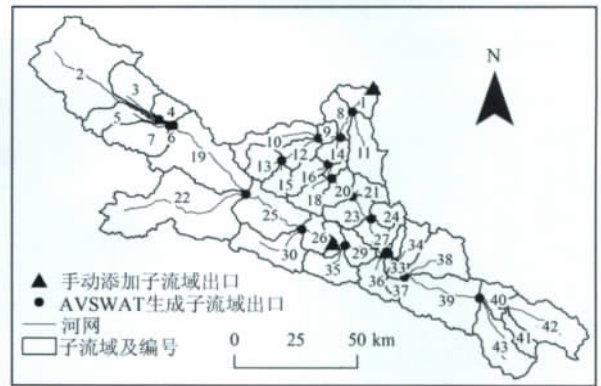
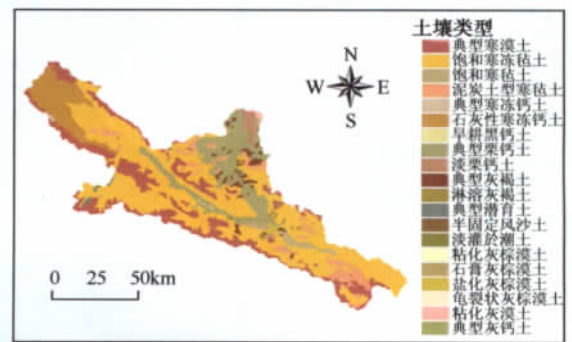
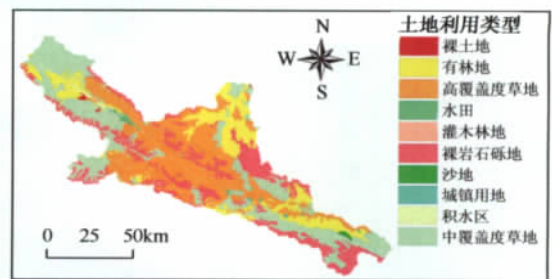


图 3 子流域划分图

Fig. 3 Subbasin delineation of the study basin



(a)



(b)

图 4 土壤类型图(a)和土地利用图(b)

Fig. 4 Soil type map (a) and landuse map (b) of the study basin

3.2 AVSWAT 模型流域平均坡长计算与修正

本文为排除人为参数设置对模拟结果的影响,使用 AVSWAT 模型默认参数组作为控制组,对黑河上游山区流域的月径流量进行模拟,模拟期 1990-2009 年计算的 NSE(纳什系数)为 0.60,模拟值与观测值对比如图 5 所示,峰值明显偏大,说明模拟的地表径流量偏大;3-5 月的模拟值偏小,即枯水期径流量偏小。其中,3-5 月份的模拟偏差可能是由

于 SWAT 不能充分考虑融雪径流导致。总体表明模拟结果较差。

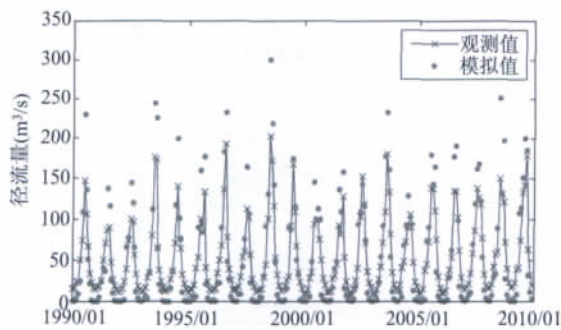


图 5 1990-2009 年莺落峡月径流量模拟值与观测值对比
Fig. 5 Measured and simulated monthly streamflow of the Yingluoxia station in 1990-2009, the outlet of the study basin using default parameters coming with the SWAT model

表 1 流域平均坡长修正前后对比(m)

Tab. 1 Originally calculated average slope lengths and corrected ones for comparison (m)

| 子流域编号 | AVSWAT 计算流域平均坡长 | 修正后流域平均坡长 | 子流域编号 | AVSWAT 计算流域平均坡长 | 修正后流域平均坡长 |
|-------|-----------------|-----------|-------|-----------------|-----------|
| 1 | 0.0500 | 10.0000 | 23 | 0.0500 | 10.0000 |
| 2 | 24.3902 | 35.6330 | 24 | 0.0500 | 11.0433 |
| 3 | 36.5854 | 37.5676 | 25 | 0.0500 | 10.0000 |
| 4 | 15.2439 | 17.0267 | 26 | 0.0500 | 10.0000 |
| 5 | 24.3902 | 37.1311 | 27 | 0.0500 | 10.0000 |
| 6 | 0.0500 | 10.0000 | 28 | 18.2927 | 20.2120 |
| 7 | 0.0500 | 10.0000 | 29 | 0.0500 | 10.0000 |
| 8 | 91.4634 | 80.6562 | 30 | 0.0500 | 10.0000 |
| 9 | 18.2927 | 18.0589 | 31 | 0.0500 | 10.0000 |
| 10 | 0.0500 | 10.0000 | 32 | 0.0500 | 15.0030 |
| 11 | 0.0500 | 10.0000 | 33 | 0.0500 | 10.0000 |
| 12 | 0.0500 | 10.0000 | 34 | 0.0500 | 10.0000 |
| 13 | 0.0500 | 10.2305 | 35 | 0.0500 | 10.0000 |
| 14 | 0.0500 | 10.0000 | 36 | 0.0500 | 10.0000 |
| 15 | 0.0500 | 10.0000 | 37 | 0.0500 | 10.0000 |
| 16 | 15.2439 | 10.8358 | 38 | 0.0500 | 11.1128 |
| 17 | 0.0500 | 10.6256 | 39 | 15.2439 | 12.8489 |
| 18 | 0.0500 | 10.0000 | 40 | 0.0500 | 10.0000 |
| 19 | 0.0500 | 10.0000 | 41 | 0.0500 | 10.0000 |
| 20 | 0.0500 | 10.0000 | 42 | 18.2927 | 23.4560 |
| 21 | 0.0500 | 10.0000 | 43 | 0.0500 | 10.0000 |
| 22 | 0.0500 | 10.0000 | | | |

查看输入参数发现,利用 AVSWAT 模块计算的子流域平均坡长大部分等于 0.05 m(表 1)。结

合野外实际调查知识,显然计算得到的平均坡长不能代表山区流域的实际情况。

从 AVSWAT 代码可知,AVSWAT 模块流域平均坡长是根据坡度进行计算。当坡度在(0,2)范围内,最大流域平均坡长就等于 400 ft;当坡度大于 25,流域平均坡长被强制为 0.05 m(表 2)。这种计算在 SWAT 模型多数应用的平缓地形是合适的,但在山区流域可能产生较大问题。

表 2 AVSWAT 模型流域平均坡长计算方法*
(来自 AVSWAT 源码)

Tab. 2 Algorithm used to calculate average slope length in the AVSWAT model, sourced from the AVSWAT source codes

| 平均坡长 | 计算方法 |
|---------------------|-----------------|
| 0 < slope < 2.0 | SL = 400/3.28 m |
| 2.0 ≤ slope < 5.0 | SL = 300/3.28 m |
| 5.0 ≤ slope < 8.0 | SL = 200/3.28 m |
| 8.0 ≤ slope < 10.0 | SL = 200/3.28 m |
| 10.0 ≤ slope < 12.0 | SL = 120/3.28 m |
| 12.0 ≤ slope < 16.0 | SL = 100/3.28 m |
| 12.0 ≤ slope < 16.0 | SL = 80/3.28 m |
| 16.0 ≤ slope < 20.0 | SL = 60/3.28 m |
| 20.0 ≤ slope < 25.0 | SL = 50/3.28 m |
| slope ≥ 25 | SL = 0.05 m |

* slope:平均坡度(%); SL:平均坡长(m); 3.28:单位转换系数。

3.3 流域平均坡长对径流的影响

AVSWAT 模型中流域平均坡长参与流域汇流时间、地下水侧向流和水土流失的计算,而汇流时间和地下水侧向流直接影响地表径流的计算,进而影响到径流量的模拟。

汇流时间的计算如式(2):

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} * n^{0.6}}{18 * slp^{0.3}} \quad (2)$$

式中, t_{ov} 为汇流时间; L_{slp} 为子流域平均坡长; n 为曼宁系数; slp 为流域平均坡度。

从计算公式可以看出流域平均坡长和坡度共同决定汇流时间,而汇流时间直接影响地表径流量,因此流域平均坡长与地表径流呈负相关。

汇入主河道的侧向流计算公式如下:

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}) * (1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{lag}}\right]) \quad (3)$$

$$TT_{lag} = 10.4 * \frac{L_{hill}}{K_{sat, mx}} \quad (4)$$

式中, Q_{lat} 为贡献主河道的侧向流量; Q'_{lat} 为子流域产生的侧向流量; $Q_{latstor, i-1}$ 为存贮的侧向流量; TT_{lag} 为侧向流时间; L_{hill} 为水文响应单元的平均坡长, 默认值为子流域平均坡长; $K_{sat, mx}$ 为土壤饱和导水系数。

从计算公式(3)-(4)可以看出流域平均坡长和土壤饱和导水系数共同决定侧向流量, 流域平均坡长过小, 计算的侧向流过大, 则会导致基流计算误差, 因此流域平均坡长影响地表径流, 呈负相关。

3.4 流域坡长修正方法及模拟结果

根据 Lim 和 Kim 的工作^[16], 使用在山区流域测量的水文响应单元坡长, 计算水文响应单元对应的平均坡度, 根据指数关系建立坡度与平均坡长的关系, 得到关系式(5):

$$y = 120.51e^{-0.0978x} \quad (5)$$

式中, y 为子流域平均坡长; x 为子流域平均坡度。式(5)相关系数为 0.977, 是显著相关的。

在 AVSWAT 模型划分子流域后, 根据子流域平均坡度代入式(5)计算修正的流域平均坡长, 以替换 AVSWAT 模型生成的子流域属性表里的字段 SLL(流域平均坡长)值。由于缺少黑河山区子流域平均坡度的实际测量数据, 本文采用使用 TauDEM (<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/index.html>)对子流域平均坡度进行计算, 修正后的流域平均坡长见表 1。部分原坡长等于 0.05 m(如子流域 13、17 等)被修正为合适的平均坡长, 部分由于子流域平均坡度过小(如子流域 1、6 等), 用最小值 10 m 坡长修正。根据 AVSWAT 模型流域平均坡长对计算过程和结果的影响, 坡长值偏小时, 计算的汇流时间和侧向流偏大, 模拟的径流结果对比实际测量结果明显偏大, 结合黑河上游山区流域出口流量, 当计算的坡长小于 10 m 时, 设定坡长为 10 m, 经过模拟结果对比分析是可行的。

应用修正后的流域平均坡长, 其他参数继续使用 AVSWAT 模型默认参数, 对黑河上游山区流域的月径流再次进行模拟。模拟期 1990-2009 年效率系数提升为 0.75。观测值和模拟值对比如图 6 所示, 峰值明显较图 5 合理。这可以解释为, 因流域平均坡长的修正, 侧向流量减小, 汇流时间增大, 进

而地表径流量减少, 径流的模拟值更接近观测值。这从一个方面说明平均坡长的修正是合适的。注意到效率系数仍然不高, 尤其是枯水期模拟较差。这是因为此次模拟只修正了流域平均坡长, 其他参数未进行优化。枯水期的模拟取决于融雪径流和基流的模拟, 需要对融雪径流和地下水参数再进行调整。

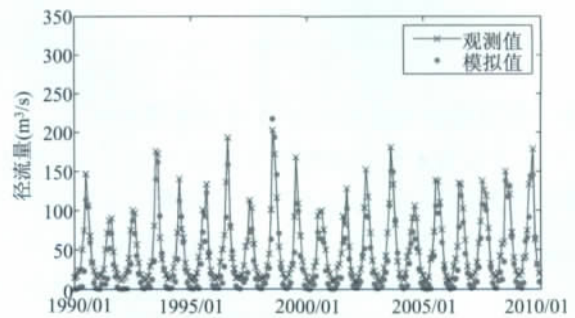


图 6 流域平均坡长修正后(其他参数为 SWAT 模型默认设置)1990-2009 年莺落峡月径流观测值与模拟值对比

Fig. 6 Measured and simulated monthly streamflow of the Yingluoxia station in 1990-2009 with corrected average slope lengths and with other parameters default by the SWAT model

3.5 敏感性分析

对流域平均坡长修正前后的两次模拟进行敏感性分析, 部分结果如表 3 所示。尽管以上讨论表明流域平均坡长对径流模拟有显著影响, 但从表中看到, 两次敏感性分析得到的流域平均坡长(SL-SUBBSN)的敏感排序都很低。这是由 AVSWAT 模型的敏感性分析模块的计算方式决定, 即每次参数的调整范围很都小, 而流域平均坡长的变化范围却很大。如表 1 所示, 修正后的流域平均坡长最大增大了 200 倍。然而, 如公式(2)-(4)显示, 流域平均坡长和土壤导水系数(SOL_K)、流域平均坡度(SLOPE)共同影响着汇流时间和侧向流量。对比的修正前后模拟, SOL_K 和 SLOPE 的敏感度从 3 和 4 分别下降到了 13 和 11, 流域平均坡长修正后 SOL_K 和 SLOPE 不再是主要的敏感性因子, 说明流域平均坡长对汇流时间和侧向流量的影响反馈给了土壤导水系数和流域平均坡度。SOL_K 和 SLOPE 变得不敏感, 也间接说明了修正后的流域平均坡长能够较好反映实际情况。

表3 敏感性分析部分结果

Tab.3 Partial parameters ranking before and after slope length correction by the sensitivity analysis

| 参数 | 修正前排序 | 修正后排序 |
|---------|-------|-------|
| CN2 | 1 | 1 |
| ESCO | 2 | 3 |
| SOL_K | 3 | 13 |
| SLOPE | 4 | 11 |
| SOL_AWC | 7 | 5 |
| SLSUBSN | 24 | 23 |

3.6 径流曲线系数的优化及模拟结果分析

表3表明无论在流域平均坡长修正前后,参数CN2(径流曲线数)都是很敏感的参数。AVSWAT模型默认的CN2值是根据土地利用类型和土壤水分计算的。当应用在山区流域,CN2值应当进行调整,文献[17]提供了根据流域平均坡度修正CN2值的方法,公式如下:

$$CN3 = CN2' \times \exp(0.00673 \times (100 - CN2')) \quad (6)$$

$$CN2 = \frac{CN3 - CN2'}{3} \times$$

$$(1 - 2 \times \exp(-13.86 \times L_{sp})) + CN2' \quad (7)$$

式中,CN2'为SWAT模型数据库提供的默认径流曲线数;CN2为修正后的径流曲线数; L_{sp} 为流域平均坡长。

从式(6)-(7)可以看出,根据坡度调整后的CN2值比原径流曲线数(CN2')要大。CN2与地表径流呈正相关,这意味着调整后的地表径流也应当变大。然而考察图5(坡长未修正情况),地表径流(表现在峰值)的模拟值比观测值大,CN2的调整将使得模拟值的误差进一步增大,这明显是不合适的。相反的图6(坡长修正情况)的峰值模拟小于观测值,当CN2值调整后,模拟精度可以进一步提高。这也说明了修正后的流域平均坡长是比较合适的。

相对CN2值的其余敏感度较高的参数,如表3所示的ESCO(土壤蒸发补偿系数)、SOL_AWC(土壤可利用水量)等,参照黑河上游山区流域土壤物理性质,使用手动试错法优化除平均坡长以外的其他参数。优化后率定期1990-1999年月径流模拟值与观测值对比如图7所示,NES=0.81;验证期2000-2009年对比如图8所示,NSE=0.85。模拟结果较为真实反映了该流域的水文过程,说明在流

域平均坡长修正的基础上,再进行其他参数的优化可进一步提高模拟精度。

图7和图8发现,每年春季3-5月模拟的径流值均偏小,这是因受春汛期间冰雪融化对径流产生补给,而SWAT模型融雪的计算方法较为简单,不能较好地模拟融雪径流。这也表明,在祁连山区的SWAT应用,需要对融雪模块进行改进。

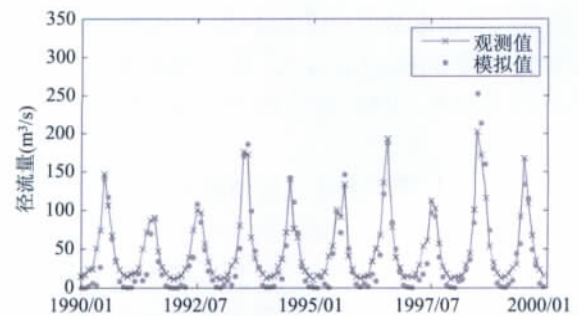


图7 参数优化后1990-2000年莺落峡月径流模拟值与观测值对比

Fig.7 Measured and simulated monthly streamflow of the Yingluoxia station in the calibration period of 1990-1999 using optimized parameters

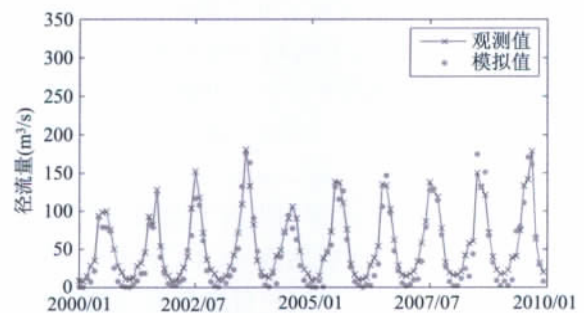


图8 参数优化后2000-2009年莺落峡月径流模拟值与观测值对比

Fig.8 Measured and simulated monthly streamflow of the Yingluoxia station in the validation period of 2000-2009 using optimized parameters

4 结论

本文应用AVSWAT模型模拟黑河上游山区流域1990-2009年的月径流量,其中,AVSWAT模型计算的流域平均坡长存在明显问题。流域平均坡长是分布式水文模型的重要参数,影响侧向流和汇流时间,最终影响了地表径流。在山区应用中,需要对流域平均坡长进行修正。

针对这个问题,本文使用了一种流域平均坡长的修正方法,使模拟结果得到显著提高。同时敏感性分析结果和径流曲线系数的分析也表明修正后的流域平均坡长是比较适合山区流域的。在修正流域平均坡长的基础上,利用手动试错法,对 SWAT 模型的其余敏感参数进行优化,黑河流域上游月径流模拟可以达到较好的结果。

本文的模拟也表明,SWAT 模型对于研究区融雪期 3-5 月份的模拟结果较差,是由于 SWAT 模型对于融雪径流的简单处理不够造成。后期工作有必要结合如 SN THERM、FASST 等物理过程的积雪模块,对 SWAT 模型的融雪模块进行改进,以提高融雪期的径流模拟精度。

参考文献:

- [1] Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, *et al.* Advances in the application of the SWAT model for water resources management[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19:749-762. DOI:10.1002/hyp.5264.
- [2] Van Liew M W, Garbrecht J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(2):413-426.
- [3] 宋艳华, 马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应研究——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):636-644.
- [4] 康杰伟, 李硕. SWAT 模型运行结构与组织研究[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(5):76-82.
- [5] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5):437-445, 541-542.
- [6] Luo Y, Marios S. Two-way coupling of unsaturated-saturated flow by integrating the SWAT and MODFLOW models with application in an irrigation district in arid region of West China[J]. *Journal of Arid Land*, 2011, 137-164.
- [7] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, *et al.* SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 641-644.
- [8] Ahl R S, Woods S W, Zuuring H R. Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, USA [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 1411-1430.
- [9] 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, 29(1):79-86.
- [10] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2):440-448.
- [11] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2):22-26.
- [12] 魏国, 姜海, 何俊仕. 流域平均山坡长度的提取及其在 SWAT 模型中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2007, 6:24-26.
- [13] 李硕. GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D]. 南京师范大学博士论文, 2002.
- [14] 胡兴林, 畅俊杰, 姚志宗, 等. 干旱半干旱地区水文预报模型研究及应用——以洮河流域为例[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(4):409-413.
- [15] 李硕, 孙波, 曾志远, 等. 遥感、GIS 辅助下流域空间离散化方法研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):183-189.
- [16] Lim K J, Kim J G. Development of SWAT ArcView GIS Patch II to reflect steep topography in Korea[D]. Master. Kangwon, Korea: Kangwon National University, 2007, 1-56.
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, *et al.* Soil and water assessment tool user's manual, version 2000 [M]. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 2002, 1-781.

Average Slope Length Calculation and Runoff Simulation

YU Wenjun¹, NAN Zhuotong², LI Shuo¹ and LI Chenggang¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Watershed average slope length (ASL) is defined as the average distance measured along the main channel from the watershed outlet to the basin divide. It is an important parameter in a hydrologic

model. Theoretically ASL is related to the calculation of lateral flow and routing timing, which eventually impacts simulation of the total surface runoff. SWAT (Soil and Water Assessment Tools) is a river basin scale model developed to predict the effects of management decisions on water, sediment, nutrient and pesticide yields with reasonable accuracy on larger, and ungauged river basins. The AVSWAT model, an integration of SWAT2005 and ArcView GIS 3.2, was applied in this paper to simulate monthly stream flow (1990-2009) of the Yingluoxia outlet of the 10 000 km² upstream basin of the Heihe River basin (HRB). The simulation showed that ASLs calculated by the AVSWAT model were not consistent with the actual cases in the upstream basin of HRB. As a result, it led to an inaccurate simulation. To address this problem, a new approach has been adopted to correct ASL of each sub-basin. A regression equation, which reflects the relationship between average slope and average length, was established by measuring average slope of each sub-basin. Using the corrected slope lengths and the default parameter set of SWAT together with meteorological and hydrologic data from 1990 to 2009, Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) of monthly runoff simulation is obviously improved to 0.75 in contrast with 0.60 with uncorrected slope lengths and same parameter set. Sensitivity analysis and an examination of CN2 parameter were also conducted to prove the applicability of this correcting method. The results showed that corrected slope lengths were more suitable for the studied mountainous basin and also verified its applicability of the adopted correction approach. Using the corrected ASLs, an error-trial optimization was used to optimize other parameters. The validation with daily runoff from 2000-2009 showed an NSE of up to 0.81, which suggested an acceptable simulation for the study basin. We concluded on basis of corrected slope lengths quite good simulation can be achieved by parameter optimization. Therefore, the approach to correct ASL is feasible in mountainous basin, and the corrected slope lengths have made the stream flow simulation better.

Key words: Heihe River basin (HRB); average slope length; SWAT; sensitivity analysis

~~~~~  
(上接第 40 页)

soil moisture and demonstrated even quicker response to shallow surface drought severity than that of VCI. Finally, the spatio-temporal distribution of drought in southwest China in 2010 was reoccurred with NDDI index, and also land area with different drought severity was derived. The result showed that the period that suffered from most severe drought conditions lasted from January to April in 2010 in Guizhou Province, the maximum drought-stricken area was 132257 km<sup>2</sup> and it occupied more than 75% of the total area of Guizhou Province. Meanwhile, the maximum area suffered from "heavy drought" was 88246 km<sup>2</sup> and it occupied more than 50% of the total area of Guizhou Province.

**Key words:** soil moisture; normalized difference drought index; spatio-temporal characteristics; drought; MODIS