

基于 CMADS 和 SWAT 模型的玛纳斯河流域水文过程模拟

谷新晨¹, 肖森元¹, 杨广¹, 何新林¹, 赵琪², 张亮², 李冬波¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000;

2. 新疆维吾尔自治区水文局, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 缺乏历史气象资料地区的水文模拟是制约流域模型发展和人们对流域水资源认识的重要因素之一。选取玛纳斯河流域作为研究区, 运用 CMADS 和 SWAT 模型对该流域的水文过程进行了模拟, 最后使用 SWAT - CUP 对模拟径流量进行了校正。通过参数灵敏度分析、参数标定与验证, 选取 NSE 、 R^2 和 $PBIAS$ 统计指标进行评价。选取的 9 个敏感性水文参数的最终取值均在合理范围内, 且在月尺度与日尺度的径流量过程模拟中, 3 个统计指标在校准与验证期间均处于最优区间, 该模型的模拟值与实测值拟合良好, 可用作后续的研究与应用。结果表明: 利用 CMADS 和 SWAT 模型能够较好地模拟玛纳斯河流域的水文过程。在缺乏历史气象资料的地区, CMADS 可提供时间连续、类型详细和空间分辨率高的气象数据, 构建更高精度的水文模型。

关键词: 径流; 水文过程; 水文模型; SWAT; CMADS; 干旱区; 玛纳斯河流域

中图分类号: P334+.92; TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0116-08

Hydrological process simulation of Manas River Basin based on CMADS and SWAT model

GU Xincheng¹, XIAO Senyuan¹, YANG Guang¹, HE Xinlin¹, ZHAO Qi², ZHANG Liang², LI Dongbo¹

(1. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation, College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Hydrology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China)

Abstract: Hydrological simulation in areas lacking historical meteorological data is one of the limiting factors that hinders the development of watershed models and people's understanding of water resources. We selected Manas River Basin as the research area, and simulated its hydrological process using CMADS and SWAT model. Then the simulated runoff was calibrated using SWAT - CUP. According to the parameter sensitivity analysis, parameter calibration and validation, NSE , R^2 and $PBIAS$ were selected for the evaluation. It is found that the final values of the 9 hydrological parameters are all in a reasonable range, and the three statistical indices are in the optimal range during calibration and verification period in the monthly and daily runoff simulation. The simulation value of the model is well fitted with the measured value, indicating that this model can be used for subsequent research and application. The results show that the CMADS and SWAT model is applicable to the reproduction of the hydrological process of Manas River Basin. The meteorological data provided by CMADS is of continuous time, with detailed type classification and high spatial resolution, which is beneficial to the construction of hydrological models with higher accuracy in areas lacking historical meteorological data.

Key words: runoff; hydrological process; hydrological model; SWAT; CMADS; arid area; Manas River Basin

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 - 新疆联合基金重点项目 (U1803244); 新疆维吾尔自治区 2020 年自治区研究生科研创新项目 (XJ2020G119); 兵团重大科技项目 (2017AA002); 兵团中青年科技创新领军人才项目 (2018CB023)

作者简介: 谷新晨 (1996-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事干旱区水文水资源研究。

通讯作者: 何新林 (1966-), 男, 新疆石河子人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。

1 研究背景

寒旱区水资源模拟是世界水资源模拟中的一个难题。这是由于高寒地区地形复杂、波动大、气象台站分布少,利用该地区稀少的气象资料模拟水文过程的误差太大,很难得到准确合理的结果^[1]。而气象数据与水文模型的不同将很大程度上影响水文过程的模拟效果^[2-3]。SWAT(soil and water assessment tool)模型是一种基于物理机制的半分布式水文模型。该模型已经被广泛地应用于世界范围内不同流域的水资源评价中,是目前应用最为广泛的水文模型之一^[4-9]。

SWAT 模型成功应用于国内外诸多寒旱区小流域的研究中。国外方面,Pulighe 等^[10]基于 SWAT 模型预测地中海半干旱小流域的径流和养分负荷,模型评估结果与观测值相一致,经校准的 SWAT 模型可用于后续研究。Pradhan 等^[11]将 SWAT 模型与人工神经网络结合应用于亚洲的热带、亚热带、干旱半干旱地区流域,认为 SWAT 模型对低流量模拟效果较好。Mosbahi 等^[12]基于 SWAT 模型对突尼斯半干旱流域土壤侵蚀土地管理进行评价,结果显示 SWAT 模型成功地再现了水流状况,模拟的径流量与产沙量具有良好的相关性。Mengistu 等^[13]利用物理相似性区域化方法,在资料稀少的集水区配置、校正和验证 SWAT 模型,为估算南非缺资料地区的水平衡组成提供了新的思路。而从国内方面来说,Luo 等^[14]将 SWAT 模型中的单库基流方法推广到中国天山玛纳斯河流域,认为基流延迟响应更为合理。但由于无法获得基流测量数据,作者无法确定基于滤波器与基于模型的方法哪一个评估结果更有代表性。Yang 等^[15]将 SWAT 模型应用于中国西北地区干旱高寒流域评估水文非均质性,结果表明 SWAT 是表征高寒地区水流过程的稳健工具,具有较高的精度。高海拔地区的水文非均质性对能量敏感,低海拔地区的水文非均质性对干旱胁迫敏感。Meng 等^[16]利用 CMADS(the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model)驱动 SWAT 模型,提出在冰川补给率较高的地区,SWAT 模型通过参数标定可以获得满意的结果。张正勇^[17]基于 MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)和 TRMM(tropical rainfall measuring mission)遥感气象数据驱动的 SWAT 模型,提出未来气候情景下玛纳斯河径流量会持续增加。

以上学者在不同的寒旱区流域成功地应用

SWAT 模型,并取得了良好的结果。玛纳斯河的主要水源是冰川融化的雪水,流域内无传统气象站点。随着流域的开发^[18-19],采用物理相似性区域化方法建立水文模型^[13,20]已经不能满足更加精细化的需求。

本文以中国天山典型流域——玛纳斯河流域为例,采用 CMADS 数据集和 SWAT 模型对玛纳斯河流域进行了建模,并利用 SWAT - CUP(calibration/uncertainty or sensitivity program for SWAT)程序对该流域肯斯瓦特水文站的日尺度与月尺度径流量进行了校准与验证。CMADS 数据与 SWAT 模型能够在月尺度与日尺度上很好地再现玛纳斯河流域的水文过程,CMADS 在无历史气象资料地区——玛纳斯河流域的水文模拟中提供的气象数据效果良好,构建的 SWAT 水文模型能够反映出该流域的水文过程。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

玛纳斯河流域位于中国天山北麓丘陵地带,占地面积 $5.05 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。流域最高海拔 5 138 m,最低海拔 840 m。其中,海拔 3 600 m 以上为常年冰川覆盖区,是玛纳斯河与玛纳斯河流域的主要水源。玛纳斯河流域地表水资源的主要来源是冰川融雪水和降水。由于季节原因,夏季产生大量冰川融雪水,为流域提供了相对稳定的水资源。夏季降水多集中在山前地区,持续时间短,降水量很少。玛纳斯河发源于天山山脉,年平均径流量 $12.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源总量 $25.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。玛纳斯河流域气候类型为大陆性干旱气候,年、日气温变化较大,干旱少雨,降水量在 110 ~ 300 mm 之间,蒸发量在 1 500 ~ 2 000 mm 之间,蒸发量远大于降水量,与降水相比,冰川融雪水是流域水资源的主要来源。玛纳斯河流域概况如图 1 所示。

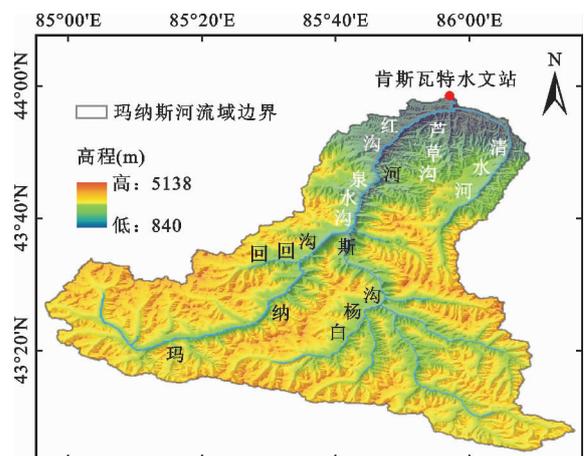


图 1 玛纳斯河流域概况

由于流域高程差异较大,土壤类型和植被覆盖度也体现出显著的垂直地带分异规律。流域由高到低垂直分布不同的土壤和植被类型,土壤性质不同对水的吸附能力也不同,进而影响其地下径流。不同的植被类型通过其本身及其枯枝落叶层对降水进行截留,限制了地表径流的汇集,入渗时间会被延长,水量被重新进行分配。覆盖度较高的植被会降低地表径流深度,使得壤中流和地下径流量增大。这些因素的相互作用,导致了流域下垫面对降水和冰雪融水的汇流作用变得复杂,对水文过程产生重要影响。

2.2 CMADS 数据集

由于研究区内没有气象台站,缺乏必要的历史气象资料,本文使用 CMADS 数据集 1.1 版本^[21]提供的详细、连续的高分辨率空间气象数据。CMADS 融合了 LAPS/STMAS 技术,采用多种技术和科学方法构建,包括数据的循环嵌套、重采样模型的投影和双线性插值。CMADS 系列数据集可用于驱动各种水文模型,如 SWAT 模型、可变渗透能力(VIC)模型和雨水管理模型(SWMM),它还允许用户方便地提取各种气象要素,以便进行详细的气候分析。CMADS 系列的数据源包括中国 2 421 个国家自动和商业评估中心的近 40 000 个区域自动站^[22],这确保了 CMADS 数据集在国内具有广泛的适用性,并大大提高了数据的准确性。CMADS 数据网格的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,数据集的时间范围是 2008 - 2016 年。SWAT 自动读取 12 个站点的 5 个气象要素(降水量、气温、相对湿度、太阳辐射和风速数据)数据。

2.3 SWAT 模型

SWAT 流域面积的离散化是根据给定的数字高程模型(DEM)划分出多个子流域,每个子流域的水文响应单元(HRU)具有相似的土地利用和土壤类型,是基本的模型单元。该模型模拟了各 HRU 的蒸散、过滤、地表径流、地下水径流和泥沙侵蚀等水文过程,各 HRU 的径流先汇入各子流域的干渠,然后从一个子流域流向另一个子流域,最后到达集水区的出口。

水平衡方程可表示如下:

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

式中: SW_t 为最终土壤含水量,mm; SW_0 为初始土壤含水量,mm; t 为模拟时间,d; R_{day} 为日降水量,

mm; Q_{surf} 为日地表径流量,mm; E_a 为日蒸散发量,mm; W_{seep} 为在给定日期从土壤剖面进入包气带的水量,mm; Q_{gw} 为给定日期的回流量,mm。

玛纳斯河流域高寒区冰川广布,冰川融水对河川径流具有较高的贡献度,尽管冰川消融主要取决于其表面能量的收支,但对于能量平衡模型来说,该方法涉及的参数较多且计算过程十分复杂,在偏远的高海拔山区,其应用受到很大限制。因此本研究选择基于冰雪消融与气温之间的线性关系的度日模型分析冰川融水对河川径流的影响。度日模型的一般形式为:

$$M = DDF \cdot PDD + \alpha R \quad (2)$$

式中: M 为冰川的消融水当量,mm/d; DDF 为冰川的度日因子,mm/(d·°C); PDD 为正积温,°C,一般由公式(3)获取; α 为系数,(mm·m²)/MJ; R 为太阳短波辐射或净辐射,MJ/(m²·d)。

$$PDD = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot T_i) \quad (3)$$

式中: T_i 为日平均气温,°C; H_i 为逻辑变量。当 $T_i \geq 0^\circ\text{C}$ 时, $H_i = 1.0$; 当 $T_i \leq 0^\circ\text{C}$ 时, $H_i = 0$ 。

利用地形梯度、土壤导水率(SOL_K)和土壤水分时空变化等动态存储模型,计算了 SWAT 地区土壤内部流动特征。在地表高导水率的土壤集水中,侧向流是非常重要的。Sloan 等^[23]将 SWAT 与地下水流运动存储模型相结合,同时计算渗流,然后浅层含水层将地下水汇集到次盆地的主河道中。降水经截流入渗后形成地表径流,地表径流采用 Green - Ampt 入渗法和水土保持服务(SCS)曲线法估算^[24]。洪峰径流率反映了暴雨的冲蚀力,可用于泥沙流失量的预测。蒸散量包括植物冠层蒸发、土壤蒸发升华等。目前有多种模拟潜在蒸散量(PET)的方法,包括 Priestley - Taylor 方法^[25]、Penman - Montes 方法和 Hargreaves 方法^[26],并将其纳入 SWAT。Hargreaves 方法是在对美国加利福尼亚等干旱半干旱地区蒸散量(ET)研究的基础上,由 Hargreaves 等提出的以气温和太阳辐射作为基础蒸散量(ET₀)的计算方法。由于该方法的计算结果较好,联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐在气象资料缺乏时使用。本研究采用 Hargreaves 方法模拟 PET,方程可表示如下:

$$PET = 0.0023 R_a \left(\frac{T_x + T_n}{2} + 17.8 \right) \sqrt{T_x - T_n} \quad (4)$$

式中: T_x 和 T_n 分别为每日最高和最低气温,°C; R_a

为大气顶层太阳辐射, MJ/(m² · d), 可根据纬度计算或由 FAO 提供的大气层顶辐射表查出。

2.4 CMAD + SWAT 模型

流域高程 (DEM) 数据由地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) 提供, 利用 ArcMap 对 DEM 数据进行凹陷填充, 以减小误差, 并基于 ArcMap 计算 DEM, 生成流域和子流域的边界、河网和坡度数据。土壤数据为基于世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO) 的中国土壤数据集, 土壤数据集由寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 提供; 土地利用数据来源于国家地球系统科学数据共享中心 (<http://www.geodata.cn>), 为 2015 年夏季云量小、地物信息丰富的 Landsat-8 遥感影像, 进行遥感解译后获得。以上数据分辨率均为 30 m。

将研究区划分为 21 个子流域, 如图 2(a) 所示,

其中流域 1 为河流出口, 肯斯瓦特水文站也位于子流域 1 内。图 2(b) 为玛纳斯河流域周边的 CMADS 气象站点, 共计 12 个气象站点, 将其导入到 SWAT 模型中进行建模。

图 3 为玛纳斯流域的土地利用、土壤类型与坡度的分布情况。玛纳斯流域土壤类型及其面积占比为: 永冻薄层土 (47.61%)、冰川/积雪 (21.53%)、松软薄层土 (18.17%)、筒育灰色土 (4.83%)、黏化栗钙土 (4.32%)、筒育黑钙土 (2.60%)、筒育栗钙土 (0.64%)、石灰性冲积土 (0.30%); 玛纳斯流域的主要土地利用类型及其面积占比为: 草地 (48.49%), 其次为不透水面 (26.20%)、冰川/积雪 (20.29%)、森林 (4.97%)、农田 (0.04%)、荒地 (0.01%)。玛纳斯流域的坡度分级及其面积占比分布为: 0° ~ 15° (7.65%)、15° ~ 25° (9.12%)、25° ~ 75° (63.19%)、≥75° (20.04%)。

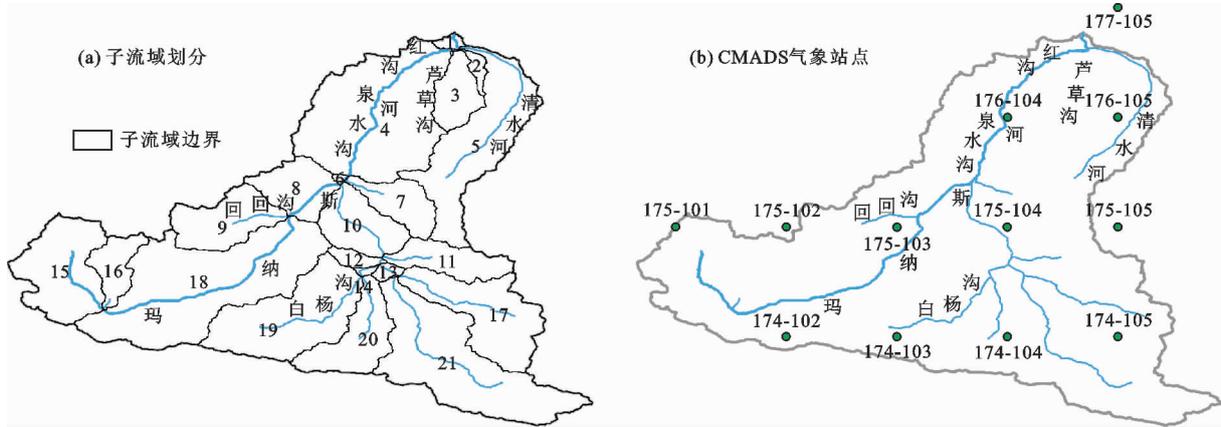


图 2 玛纳斯河流域子流域划分及周边 CMADS 气象站点分布

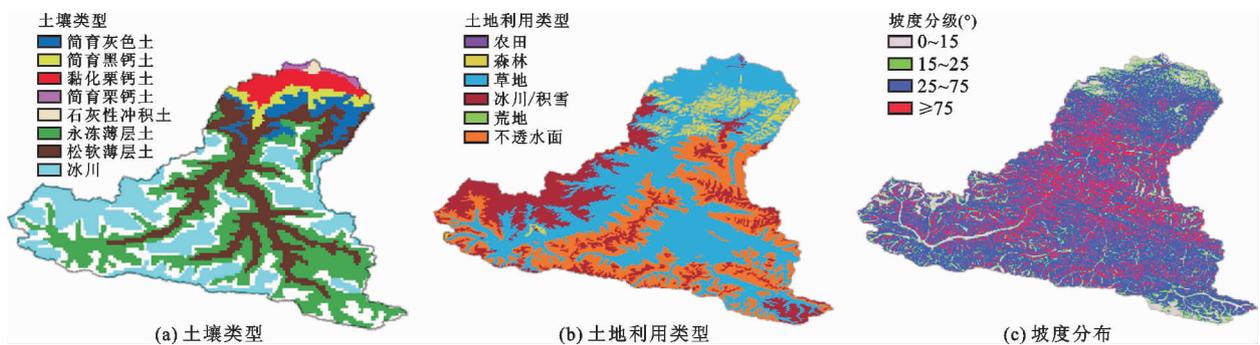


图 3 玛纳斯流域土壤类型、土地利用类型及坡度分级分布

通过子流域划分、CMADS 气象站点的导入、土地利用数据、土壤类型数据、坡度划分等步骤完成玛纳斯河流域 SWAT 模型的构建。

2.5 模型校准与验证

本研究应用 SWAT-CUP 中 SUFI-2 算法, 通过序贯拟合过程对未知参数进行迭代估计完成最终估

计。程序还考虑了模型输入、模型结构、输入参数和观测数据的不确定性。考虑到校准过程中的平衡现象, 采用 *t* 检验 (*t*-Stat) 和 *P* 检验 (*P*-Value) 法进行灵敏度评估。最后, 这些不同的参数设置生成可接受的径流量曲线。在此过程中, 参数的灵敏度越高, *t*-Stat 的绝对值越大, *P*-Value 越接近零值^[27]。

在综合评价方法的基础上, Moriasi 等^[28]提出了 4 种定量统计指标: Nash - Sutcliffe 系数 (*NSE*)、百分比偏差 (*PBIAS*)、相对均方根误差 (*RRMSE*) 和相对误差 (R^2)。本文选取 3 种常用的指标 (*NSE*、*PBIAS* 和 R^2) 对模型的性能进行了量化, 该 3 个性能指标表明了量化数值模型的模拟值与实测值的匹配度。*NSE* 是一种统计方法, 该方法量化了剩余方差的相对大小^[29], *PBIAS* 表示模拟数据的平均趋势大于或小于相应观测数据的平均趋势^[30], 不同于数据的方差。

Nash - Sutcliffe 系数 (*NSE*)、相对误差 (R^2) 和百分比偏差 (*PBIAS*) 的计算公式可分别如下:

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum O_i} \right] \times 100\% \quad (7)$$

在上述的 3 个指标中, 若 *NSE* 和 R^2 值越接近 1, 则 SWAT 的性能越好; 当 *PBIAS* 接近零时, 表示模拟非常精确。Moriasi 等^[28]提出, 当 $NSE \geq 0.5$ 、*PBIAS* 在 $\pm 25\%$ 以内时, 模型可进行令人满意的模拟。本文使用 Moriasi 开发的标准进行评估, 见表 1。

表 1 统计指标绩效等级分类标准^[28]

绩效等级	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> /%
非常好	$1.00 \geq NSE \geq 0.75$	$ PBIAS < 10$
好	$0.75 > NSE \geq 0.65$	$15 \geq PBIAS > 10$
满意	$0.65 > NSE \geq 0.5$	$25 \geq PBIAS > 15$
不满意	$NSE < 0.50$	$ PBIAS > 25$

3 结果与分析

为了获得高分辨率的土地利用和土壤性质, 将研究区的 21 个子流域进一步划分为 136 个 HRU, 使 SWAT 模型能够更合理地模拟径流量, 并依据肯斯瓦特水文站观测的径流量对模型进行校准。通过敏感性分析, 最终确定了 9 个参数。使用这 9 个参数对模型进行了校正, 在验证期、率定期达到了精度的要求。

3.1 敏感性分析

本研究首先进行敏感性分析, 以确定对融雪径流模拟影响较大的参数。如表 1 所示, 敏感性分析是通过将拉丁超立方体采样法 (LH - OAT) 纳入 SWAT 2012 进行的。对常见的参数进行参数敏感性分析, 选取模型敏感性较高的参数进行参数调试, 最终筛选出 9 个参数, 见表 2。

由表 2 可见, 参数融雪基温 (*SMTMP*) 的最优取值为 $6.71\text{ }^\circ\text{C}$, 表明流域在 $6.71\text{ }^\circ\text{C}$ 时开始发生融雪; 降雪基温 (*SFTMP*) 最优取值为 $6.34\text{ }^\circ\text{C}$, 表明流域在 $6.34\text{ }^\circ\text{C}$ 时降雨开始向降雪转变。其他的参数诸如: 水力传导度 (*SOL_K*)、SCS 径流曲线系数 (*CN2*)、平均坡度 (*HRU_SLP*) 等在表 2 中也给出了最优取值。

上述 9 个水文参数均处于合理范围内, 部分参数需要进一步进行讨论以探求其实际意义, 这一部分将在讨论中给出。

3.2 模型校准与验证

对 2008 - 2016 年玛纳斯河流域的月尺度和日尺度地表平均流量进行了模拟, 其中 2010 - 2013 年数据用于校准, 2014 - 2016 年数据用于验证。本研究设定预热时间为两年 (2008 - 2009 年), 以初始化 SWAT。模型模拟结果与观测值的比较见图 4、5。总体而言, 校准后的 SWAT 模型模拟的平均流量与实测平均流量具有相似的趋势, 模拟和实测径流的洪水发生时间吻合较好, 具体分析如下。

由图 4 的月尺度模拟结果来看, 玛纳斯河年内径流丰枯变化规律十分显著, 冬季流量较小, 除 2014 年之外, 其余各年份冬季流量模拟值均大于实测值; 春季 4 月份过后流量开始迅速增大, 到夏季 6、7 月份达到最大, 2011、2016 年夏季流量峰值的模拟值小于实测值, 且差值相对较大, 其他年份两者较为接近。上述结果表明, 玛纳斯河流域冬季气温过低, 导致冰雪融化停顿, 冰川融雪对径流的补给量变小, 随着春季气温的回升和夏季高温的到来, 冰雪融化速度加快, 流量迅速增大, 这与参数敏感性分析得出的融雪基温 (*SMTMP*) 最为敏感的结果相吻合。

由图 5 的日尺度模拟结果来看, 率定期和验证期模拟日均流量峰值的出现时间与实测值基本一致, 但率定期内模拟值的峰值整体比实测值略小, 而验证期内模拟值的峰值整体比实测值略大, 但基本能反映出研究区实际流量的变化趋势。进一步分析可知 2010、2012、2013 和 2016 年夏季日均流量峰值模拟结果与实测相近, 2011、2014 和 2015 年夏季日

均流量峰值模拟结果与实测相差较大,其中 2011 年夏季日均流量峰值整体低于实测值,而 2014 年的夏季日均流量峰值则整体高于实测值;2010、2014 和 2015 年冬季日均流量模拟结果偏高,其余年份两者

基本吻合。

整体来看,模型对冬季径流的模拟效果要优于对夏季径流的模拟效果,可能是由于夏季流量变化剧烈,且变化原因相比冬季更为复杂。

表 2 模型的 9 个敏感性参数及其最优值

参数名称	物理意义及取值单位	最优取值	敏感性排序	<i>t</i> - Stat	<i>P</i> - Value
v_SMTMP. bsn	融雪基温/°C	6.71	1	15.13	0.00
v_SMFMX. bsn	最大融雪系数(夏至日)/(mm · °C ⁻¹ · d ⁻¹)	1.09	2	-14.71	0.00
r_SOL_K. sol	土壤饱和水力传导度/(mm · h ⁻¹)	-0.46	3	-12.57	0.00
v_SFTMP. bsn	降雪温度/°C	6.34	4	7.17	0.00
r_SLSUB_BSN. hru	平均坡长/m	0.39	5	4.99	0.00
r_CN2. mgt	半湿润条件下 SCS 径流曲线系数	-0.45	6	-4.62	0.00
r_HRU_SLP. hru	平均坡度/(m · m ⁻¹)	0.29	7	-3.53	0.00
r_SOL_BD. sol	土壤饱和容重/(g · cm ⁻¹)	0.10	8	-3.14	0.00
v_RCHRG_DP. gw	深层土壤水渗透系数	0.29	9	2.13	0.03

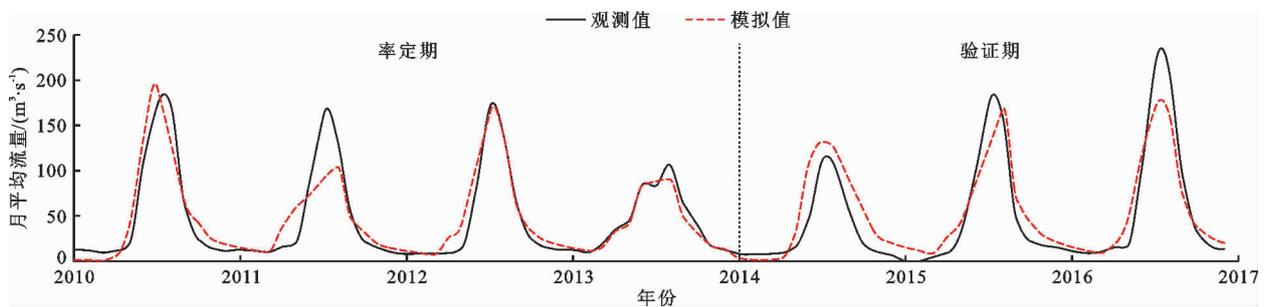


图 4 2010 - 2016 年肯斯瓦特水文站月尺度平均流量模拟值与观测值对比

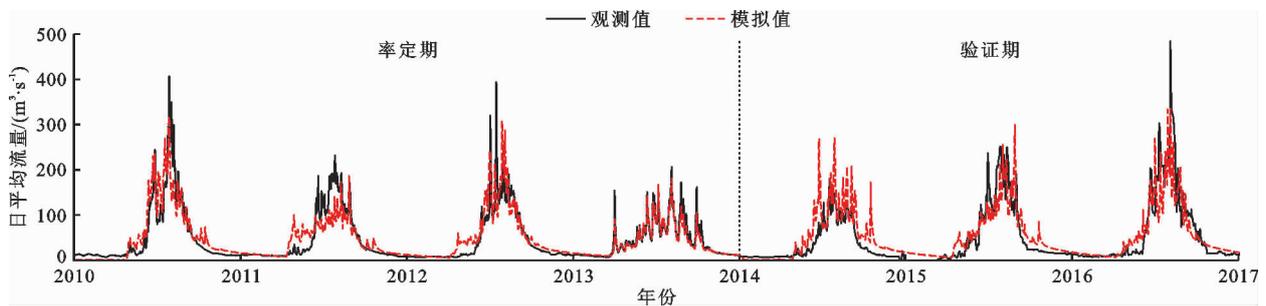


图 5 2010 - 2016 年肯斯瓦特水文站日尺度平均流量模拟值与观测值对比

2010 - 2016 年校准期和验证期的模型各绩效指标值见表 3。

表 3 2010 - 2016 年校准期和验证期的模型各绩效指标值

绩效指标	校准期(2010 - 2013 年)		验证期(2014 - 2016 年)	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
<i>NSE</i>	0.75	0.88	0.66	0.86
<i>R</i> ²	0.75	0.88	0.67	0.87
<i>PBIAS</i>	-1.50	-1.51	-12.60	-12.88

依据表 1 中给出的统计指标绩效等级分类标准,在月尺度与日尺度的模拟中,3 个性能参数 (*NSE*、*R*² 和 *PBIAS*) 在校准与验证期间表示模拟结果为“非常好”或“好”,表明经过参数率定后模型的精度达到了要求,模型可用作后续的研究与应用。

4 讨论

近 40 年来,由于研究区内节水灌溉技术的蓬勃发展,玛纳斯河流域的绿洲区人工绿洲面积扩大了

129.56%^[17],绿洲的社会经济效应促进了该地区的发展^[18]。但与此同时,玛纳斯河流域的水资源需求也在不断增加,流域的水资源分析与模拟是流域水资源总量控制的基础和区域可持续发展的前提^[30]。但由于玛纳斯河流域的特殊性,现有的水文气象资料不能很好地服务于流域水资源分析与相关水政策的实施。本文将CMADS数据集与SWAT模型结合,从补全水文气象的角度对流域水文过程进行了探求。

使用 ArcMap - ArcSWAT 2012 将玛纳斯河流域分为 21 个子流域和 136 个 HRU,并进行了参数调试。在此过程中,大多数参数都在合理范围内。但值得注意的是,融雪基温(*SMTMP*)的最优取值为 6.71 °C,降雪基温(*SFTMP*)最优取值为 6.34 °C,表明玛纳斯河流域雪、雨转换温度为 6 °C 左右,这与前人研究天山山区及周边降雪事件基本发生在 -35 ~ 5 °C 之间的结论基本相符^[31]。水流在土壤中下渗时与土壤颗粒产生的摩擦阻力会改变水流传导的速度,土壤饱和水力传导度(*SOL_K*)是综合反映水在其中流动时所产生的阻碍作用的参数,*SOL_K* 值越大,表明水流在土壤中下渗越容易,下渗到土壤中的水越多,则地表径流量就越小;平均坡度(*HRU_SLP*)主要影响侧向流,坡度的变化与产流量的变化呈正相关,其与平均坡长(*SLSUB_BSN*)共同影响着洪峰流量;*CN2* 表示平均土壤湿度状态下的径流曲线系数,*CN2* 值越大表示流域下垫面不透水性越强,径流量就越大。这些参数表明 CMADS 气象数据能够很好地驱动模型,反映出流域水文过程的特性。而如何进一步准确评估 CMADS 与不同土地利用变化下的流域水文过程模拟还需作后续研究。

总体来看,基于 CMADS 数据集的 SWAT 模型可以为玛纳斯河流域提供详细的、连续的、高空间分辨率的气象数据,玛纳斯河流域的模拟水文情况较好,能够反映年内和年际的总体水文情景。该数据集对玛纳斯河流域具有很好的适用性,可以为我国西北地区气象站点不足的流域进行水文分析时提供参考^[3,16]。

5 结 论

本研究采用 CMADS 数据与 SWAT 模型,对以冰川补给率较高的玛纳斯河流域进行了水文模拟,结果表明 CMADS 数据集可以为无资料的寒旱区水资源评价中的 SWAT 模型的研究提供参考。主要结论如下:

(1)通过对温度指数法的参数敏感性分析和参

数标定验证,证明 SWAT 模型对玛纳斯河流域的适应性较好。考虑到气候变化和人为因素对玛纳斯河流域的影响,以及该模型在部分年份的夏季可能存在的较大误差,仍需进一步探讨和提高 CMADS 数据与 SWAT 模型的精确性。

(2)通过 CMADS 数据与 SWAT 模型对玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站的径流量进行定位和模拟。结果表明,CMADS 驱动的 SWAT 模型能够在月尺度与日尺度上很好地模拟玛纳斯河流域的水文过程。

(3)CMADS 数据可以为无气象资料的玛纳斯河流域水资源模拟提供时间连续、类型详细和空间分辨率高的气象数据。但与传统气象站相比,CMADS 提供的气象数据在模型建模中仍需要注意是否需要对其进行调整。

参考文献:

- [1] WANG Xiaolei, LUO Yi, SUN Lin, et al. Assessing the effects of precipitation and temperature changes on hydrological processes in a glacier-dominated catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(23):4830 - 4845.
- [2] KAN Guangyuan, HE Xiaoyan, LI Jiren, et al. Computer aided numerical methods for hydrological model calibration: An overview and recent development [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2019,26(1):35 - 59.
- [3] GU Xinchun, YANG Guang, HE Xinlin, et al. Hydrological process simulation in Manas River Basin using CMADS [J]. *Open Geosciences*, 2020,12(1):946 - 957.
- [4] GALVÁN L, OÍÍAS M, CÁNOVAS C R, et al. Hydrological modeling of a watershed affected by acid mine drainage (Odiel River, SW Spain). Assessment of the pollutant contributing areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2016,540:196 - 206.
- [5] VOLK M, BOSCH D, NANGIA V, et al. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale [J]. *Agricultural Water Management*, 2016,175:1 - 3.
- [6] GHAFARI G, KEESSTRA S, GHODOUSI J, et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjnrood Basin, Northwest Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(7):892 - 903.
- [7] ÖZCAN Z, KENTEL E, ALP E. Determination of unit nutrient loads for different land uses in wet periods through modelling and optimization for a semi-arid region [J]. *Journal of Hydrology*, 2016,540:40 - 49.
- [8] CHO K H, PACHEPSKY Y A, KIM M, et al. Modeling seasonal variability of fecal coliform in natural surface waters using the modified SWAT [J]. *Journal of Hydrology*,

- 2016,535:377–385.
- [9] PEREIRA D R, MARTINEZ M A, PRUSKI F F, et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016,7:14–37.
- [10] PULIGHE G, BONATI G, COLANGELI M, et al. Predicting streamflow and nutrient loadings in a semi-arid mediterranean watershed with ephemeral streams using the SWAT model [J]. *Agronomy*, 2020,10(1):21.
- [11] PRADHAN P, TINGSANCHALI T, SHRESTHA S. Evaluation of soil and water assessment tool and artificial neural network models for hydrologic simulation in different climatic regions of Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,701:134308.
- [12] MOSBAHI M, BENABDALLAH S C. Assessment of land management practices on soil erosion using SWAT model in a Tunisian semi-arid catchment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020,20(16):1129–1139.
- [13] MENGISTU A G, VAN RENSBURG L D, WOYESSA Y E. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019,25:100621.
- [14] LUO Y, ARNOLD J, ALLEN P, et al. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012,16(4):1259–1267.
- [15] YANG Linshan, FENG QI, YIN Zhenliang, et al. Regional hydrology heterogeneity and the response to climate and land surface changes in arid alpine basin, northwest China [J]. *Catena*, 2020,187:104345.
- [16] MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Hydrological modeling in the Manas River Basin using soil and water assessment tool driven by CMADS [J]. *Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette*, 2017,24(2):525–534.
- [17] 张正勇. 玛纳斯河流域产流区水文过程模拟研究 [D]. 石河子:石河子大学, 2018.
- [18] YANG Guang, XUE Lianqing, HE Xinlin, et al. Change in land use and evapotranspiration in the Manas River Basin, China with long-term water-saving measures [J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):17874.
- [19] YANG Guang, LI Fadong, CHEN Dong, et al. Assessment of changes in oasis scale and water management in the arid Manas River Basin, north western China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,691:506–515.
- [20] 何新林, 郭生练. 气候变化对新疆玛纳斯河流域水文水资源的影响 [J]. *水科学进展*, 1998,9(1):78–84.
- [21] MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Simulation, validation, and analysis of the hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(21):7114–7127.
- [22] MENG Xianyong, WANG Hao. Significance of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS) of East Asia [J]. *Water*, 2017,9(10):765.
- [23] SLOAN P G, MOORE I D. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds [J]. *Water Resources Research*, 1984,20(12):1815–1822.
- [24] BOUGHTON W C. A review of the USDA SCS curve number method [J]. *Soil Research*, 1989,27(3):511–523.
- [25] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. *Monthly Weather Review*, 1972,100(2):81–82.
- [26] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985,1(2):96–99.
- [27] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. *Journal of Hydrology*, 2007,333(2):413–430.
- [28] 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.
- [29] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970,10(3):282–290.
- [30] GUPTA H V, SOROOSHIAN S, YAPO P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1999,4(2):135–143.
- [31] 秦艳, 丁建丽. 1961–2016年中国天山不同级别降雪事件变化特征分析 [J]. *水科学进展*, 2019,30(4):457–466.