

引用格式: 肖森元, 杨广, 何新林, 谷新晨, 李小龙. 玛纳斯河流域 MIKE SHE 水文模型率定[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 1-9
XIAO Senyuan, YANG Guang, HE Xinlin, GU Xincheng, LI Xiaolong. Calibration of hydrological modelling by MIKE SHE for the Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 1-9

玛纳斯河流域 MIKE SHE 水文模型率定

肖森元, 杨广*, 何新林, 谷新晨, 李小龙

(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)

摘要: 采用传统的 SWAT 模型模拟干旱区山区流域径流过程, 无法准确反映流域水资源的分布特征。本文基于中国地面日值格点数据集, 运用分布式水文模型 MIKE SHE 模拟了 1991—2015 年间玛纳斯河流域水文过程。选取模型效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、确定系数 (R^2) 以及相对均方根误差 (RMSE-observations standard deviation ratio, RSR) 对模型适用性进行评价。流域出口肯斯瓦特水文站实测径流数据用于模型校准及验证。最终, 肯斯瓦特水文站日尺度径流仿真效率为: $NSE = 0.78$, $R^2 = 0.85$, $RSR = 0.47$; 月尺度径流仿真效率为: $NSE = 0.82$, $R^2 = 0.91$, $RSR = 0.43$ 。结果表明, MIKE SHE 模型在玛纳斯河流域具有良好的适用性。本研究为干旱区山区流域水文模拟提供了参考, 研究结果可为流域水资源合理配置提供科学依据。

关键词: MIKE SHE; 径流模拟; 格点数据集; 玛纳斯河流域

中图分类号: P339

文献标志码: A

中国北疆为内陆河流域干旱区, 山盆相间的地貌格局形成了以山地—绿洲—荒漠三大生态系统为基本特征的特殊地貌。河川径流起源于山区, 在绿洲区传输与消耗, 耗散于荒漠^[1], 阐明山区径流形成过程对流域中下游绿洲区经济带健康发展具有重要意义^[2]。水文模型可以量化自然物理因素之间的相互作用和评估管理决策, 是分析流域水文过程必不可少的工具^[3-4]。水文模型最早可追溯于 20 世纪 30 年代, 而后经历了经验模型、集总式模型及分布式模型三个发展阶段, 其中分布式水文模型因其在描述流域水文地理要素空间异质性方面具有独特优势近年得到广泛应用^[5]。目前常用的分布式

水文模型有 SWAT 模型和 MIKE SHE 模型, SWAT 模型主要通过经验方程式描述土壤水分运移及地表水和地下水的耦合过程, 在反映流域水资源空间分布的准确性方面有待进一步提升^[6]。MIKE SHE 模型完全基于物理意义描述流域水循环过程, 在空间信息的分布式表达、土地利用类型对蒸散发的影响及地表水和地下水耦合表达方面具有显著的优势, 可以更好表达山区径流形成过程^[7-8]。

降水和温度是 MIKE SHE 模型的两个主要气象变量输入^[9]。降水和温度时空变化的精确估计和表达, 对于 MIKE SHE 模拟的精确非常重要^[10]。在高寒山区, 由于复杂的地形条件和地理结构影响, 流

收稿日期 (Received date): 2020-09-30, **改回日期** (Accepted date): 2021-02-02

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划水资源高效利用专项 (2017YFC0404303); 新疆生产建设兵团科技项目 (2021AB021); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目 (XJ2020G119)。[National Key Research and Development Program Water Resources Efficient Utilization Special Project (2017YFC0404303); Xinjiang Production and Construction Corps Scientific and Technological Projects (2021AB021); Xinjiang Uygur Autonomous Region Postgraduate Research and Innovation Project (XJ2020G119)]

作者简介 (Biography): 肖森元 (1995-), 男, 硕士研究生, 山东济宁人, 主要研究方向: 干旱区水文水资源。[XIAO Senyuan (1995-), male, born in Jining, Shandong province, M. Sc. candidate, research on hydrology and water resources in arid area] E-mail: senyuanxiao@foxmail.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 杨广 (1983-), 男, 教授, 河北新乐人, 主要研究方向: 干旱区水文水资源。[YANG Guang (1983-), male, born in Xinle, Hebei province, Ph. D., professor, specialized in hydrology and water resources in arid area] E-mail: mikeyork@163.com

域内水文气象监测站点稀少,无法捕获气象变量的时空变化,MIKE SHE 应用于山区流域水文过程模拟,存在一定难度^[11]。在过去的几十年中,国内外学者尝试改进 MIKE SHE 模型的建模方案,探讨 MIKE SHE 模型在山区流域的适用性。目前部分学者^[12-13]倾向于基于遥感卫星技术获取高空间分辨率气象数据驱动 MIKE SHE 模型,但这需要进一步解译和降尺度研究。本文采用国家气象信息中心建立校准的中国地面日值格点数据集,在实现分布式气象数据输入的同时简化了数据处理的难度,可以有效实现干旱区流域山区水文过程模拟。

玛纳斯河流域是我国四大灌溉农业区之一,随着流域绿洲区经济带的蓬勃发展和“三条红线”用水指标的提出,流域水资源供需矛盾日益突出。开展玛纳斯河流域径流模拟研究对流域水资源总量控制和区域用水可持续发展具有重要意义。目前玛纳斯河流域径流模拟研究主要采用 SWAT 模型^[14-15],而 MIKE SHE 模型由于数据需求量大及闭源等特点,其在玛纳斯河流域的适用性仍有待进一步评估。因此,本文采用基于空间插值的中国地面日值格点数据集,建立分布式水文模型 MIKE SHE,对玛纳斯河流域 1991—2015 年的日径流和月径流进行连续模拟计算,探讨 MIKE SHE 模型在我国西北干旱区山区径流模拟的适用性。

1 研究区概况

玛纳斯河流域位于中国天山北麓中段,起源于依连哈比尔尕山山脉,与新疆和静县相邻,地理位置为 85°01'E ~ 86°35'E, 43°27'N ~ 45°21'N (图 1),流域总面积 $5.05 \times 10^3 \text{ km}^2$,其中冰川覆盖面积 608.25 km^2 。玛纳斯河全长 324 km,年平均径流量 $12.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,年内径流量分配极不均匀,夏季径流量约占全年总和的 68%,冬季径流量仅占 6%,属冰川融雪及降水混合补给型河流。玛纳斯河流域深处新疆腹地,远离海岸线,日照时间长,形成了年、日气温变化大,干旱少雨的大陆性干旱气候。降水多集中在山前平原地区,时空分布十分不均,降水量在 110 ~ 300 mm 之间,蒸发量在 1500 ~ 2000 mm 之间。玛纳斯河流域最高海拔 5138 m,最低海拔 846 m,其中 3600 m 以上为终年冰雪覆盖区,为流域提供了丰富而稳定的水资源。

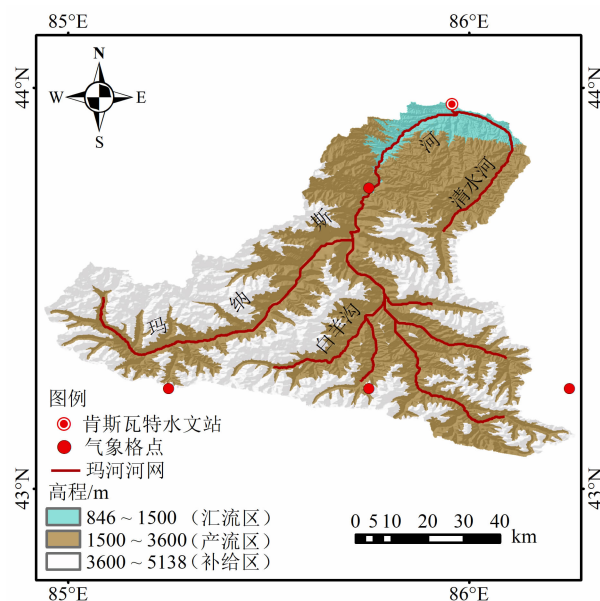


图 1 玛纳斯河流域的位置

Fig. 1 Location of the Manas River Basin, China

2 数据与方法

2.1 MIKE SHE 模型

模块化建模是 MIKE SHE 的独特优势^[16],其水流运动模块 (MIKE SHE WM) 包含六个相互独立又互相耦合的子模块^[17-18]:蒸散发、坡面流、河流与湖泊、饱和带、非饱和带及融雪。研究者可以根据研究区内不同的气候、地质条件结合自身的研究目的选择不同的模块进行建模。本研究选择 MIKE SHE 的所有模块进行建模。

(1) 蒸散发 (ET): 包括截留、土壤和水面蒸发、植被蒸腾,采用 Kristensen-Jensen 模型进行计算,其计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} s &= s_{\text{int}} LAI \\ E_{at} &= f_1(LAI) \cdot f_2(\theta) \cdot RDF \cdot E_p \\ E_s &= E_p \cdot f_3(\theta) + (E_p - E_{at} - E_p \cdot f_3(\theta)) \cdot f_4(\theta) (1 - f_1(LAI)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, s 为冠层截留蓄水量 (mm); s_{int} 为截留系数 (mm); LAI 为叶面积指数; E_{at} 为植被蒸腾量 (mm); $f_1(LAI)$ 为叶面积指数函数; $f_2(\theta)$ 为根区土壤水分函数; RDF 是根系分布函数; E_p 为潜在蒸散发量 (mm); E_s 为土壤蒸散发量 (mm)。

$f_3(\theta)$ 和 $f_4(\theta)$ 的函数表达式如下:

$$f_3(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \leq \theta_M \\ C\left(\frac{\theta}{\theta_W}\right) & \theta_M \leq \theta \leq \theta_W \\ C & \theta > \theta_W \end{cases} \quad (2)$$

$$f_4(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{\theta - 0.5(\theta_W + \theta_F)}{\theta_F - 0.5(\theta_W + \theta_F)} & \theta \geq 0.5(\theta_W + \theta_F) \end{cases} \quad (3)$$

式中, C 为经验常数; θ_F 为田间持水量(%); θ_W 为植物凋萎含水量(%); θ_F 为剩余土壤含水量(%).

(2) 坡面流(OL): 二维地表径流主要通过 St. Venant 方程组描述。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= q \\ \frac{\partial(h)}{\partial x} &= S_{ox} - S_{fx} \\ \frac{\partial(h)}{\partial y} &= S_{oy} - S_{fy} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, h 为河道过水断面水位(m); (x, y) 为空间坐标; t 为时间(s); u, v 为地表径流流速($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); q 为水平方向单位面积入流的源汇项($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); S_{ox}, S_{oy} 表示 x 和 y 方向上的地面坡降; S_{fx}, S_{fy} 表示 x 和 y 方向上的摩阻坡降。

(3) 河流与湖泊(OC): 基于一维明渠非恒定流方程, 耦合 MIKE HYDRO river 对河道汇流进行完整模拟, 并且可对水库、堤坝以及闸门等方面设置计算。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Au)}{\partial x} &= Q \\ \frac{\partial h}{\partial x} &= S_{ox} - S_{fx} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, A 为过水断面面积(m^2); Q 为径流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

(4) 饱和带(SZ): MIKE SHE 提供了两种模拟饱和带水流的方法: 有限差分法和线性水库。尽管有限差分法对饱和带水流运动的模拟更加精确, 但该方法涉及流域水文地质参数较多且估算方法较为复杂, 在玛纳斯河流域这样的高寒山区应用受到了极大限制, 因此本研究将地下储水空间概化成水库, 采用线性水库法对玛纳斯河流域的饱和带水运动进行模拟。

(5) 非饱和带(UZ): 由于非饱和带 Richards 方程法只能与饱和带的有限差分法耦合, 故采用双层

水量平衡法描述水分从地表到地下的渗透过程。双层水量平衡法包括截流、积水和蒸散过程, 该方法将非饱和带划分为两层, 上层表示土壤层中的水分可以被蒸散发耗散, 下层表示的土壤中的水分可以补给地下水。

(6) 融雪(SM): 在 MIKE SHE 中融雪模块作为降雨的一个选择项目出现, 采用度-日因子法模拟高山冰雪融水对径流的补给。

$$M_T = C_T(T_{\text{air}} - T_0) \quad (6)$$

式中, M_T 为融雪速率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); C_T 为度日系数($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{air} 为空气温度($^\circ\text{C}$); T_0 为融点($^\circ\text{C}$)。

2.2 数据输入

2.2.1 时间序列数据

由于研究区内没有传统气象站点, 缺乏必要的历史气象资料, 本文使用中国地面日值格点数据集为模型提供连续的、分布式的空间气象数据。中国地面日值格点数据集是以 2472 个气象台站的气象数据为基础, 融合薄盘样条插值法和三维地理空间技术, 建立的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的降水和气温数据集。使用时结合各观测点的经纬度, 利用泰森多边形法对各观测点进行空间划分, 确定各观测点的控制范围。潜在的蒸散量采用世界粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的彭曼(Penman-Monteith)公式计算, 位于流域西北侧的乌兰乌苏气象站提供该公式需要的风速、净辐射和相对湿度等数据。

肯斯瓦特水文站是玛纳斯河流域径流观测的代表性站点, 海拔高度约 900 m, 集水面积为 4637 km^2 。本文所用到的肯斯瓦特水文站径流量数据来自石河子水文局, 选取 1991—2015 年径流观测日值数据用于模型的率定和验证。

2.2.2 空间数据

MIKE SHE 模型要求输入的空间数据和模型参数主要依靠遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术获取, 其中空间数据必须使用相同的投影坐标系。建立 MIKE SHE 模型所用到的数据及其来源在表 1 中给出。DEM 采用 30 m 分辨率的 ASTER 数据, 利用 Arcgis 软件生成流域边界与水系。中国多时期土地利用/土地覆盖遥感监测数据库(CNLUCC)提供流域土地利用信息, 研究区内主要的土地利用类型见图 2a 所示。叶面积指数(LAI)由 AVHRR 地表反

射率数据经遥感解译得到,植被根深和 LAI 的时空分布密切相关。MIKE SHE 所需的土壤数据包括土壤类型和土壤物理属性,土壤类型数据可由世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD) 获得,研究区内主要的土壤类型如图 2b 所示;土壤物理属性则借助土壤水文特性软件 SPAW (Soil-Plant-Atmosphere-Water) 计算得到。

表 1 MIKE SHE 模型数据

Tab. 1 Data list of the MIKE SHE model

数据类型	数据来源	属性
地形	ASTER DEM 数据	30 m 分辨率
流域边界	DEM 生成	shape 文件
河网水系	DEM 提取	shape 文件
土地利用	CNLUCC	shape 文件
土壤数据	HWSD 土壤数据库	shape 文件
降雨数据	中国地面降水日值格点数据集	0.5°×0.5°格网
气温数据	中国地面气温日值格点数据集	0.5°×0.5°格网
潜在蒸散发	观测站	1 站
径流数据	水文站	1 站
叶面积指数	AVHRR LAI 数据	5 km 分辨率

2.3 模型率定与评价

Nash 和 Sutcliffe^[19] 提出的模型效率系数 (NSE) 和确定系数 (R^2) 能够对模型在研究区的适用性进行量化。 NSE 是归一化统计量,用于确定残差的相

对大小;确定系数 R^2 用于描述观测值和模拟值之间的相关程度, R^2 的范围是 0 到 1,通常认为大于 0.5 的值可以接受。在此基础上,为了进一步揭示观测值和模拟值之间的离散程度,本文引进 Singh^[20] 等人提出的相对均方根误差 (RSR), RSR 通过使用观测值标准偏差将均方根误差 ($RMSE$) 标准化得到, RSR 越小,则模型模拟效果越好。三个评价指标的表达式分别为:

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_i - \bar{Q}_s)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2 \quad (8)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} \quad (9)$$

式中, Q_i 为 i 时刻观测流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Q_s 为 i 时刻模拟流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); \bar{Q} 为模拟时段内观测流量的平均值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); \bar{Q}_s 为模拟时段内模拟流量的平均值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); n 为时间步长数。

对于指标评价标准的选取,本文采用 Moriasi^[21] 在 2007 年提出的统计指标绩效等级分类标准进行评估 (表 2)。

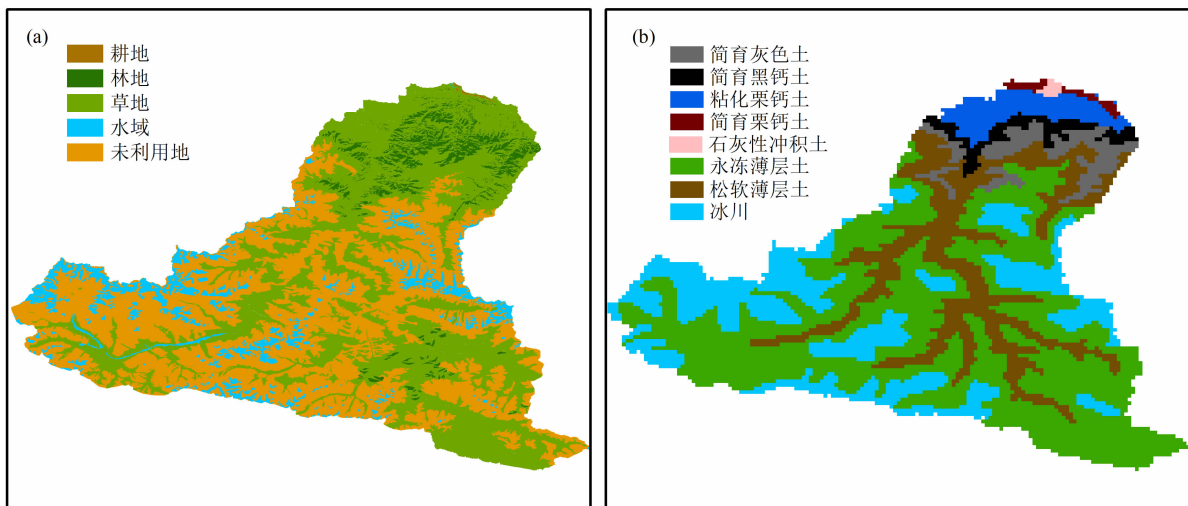


图 2 玛纳斯河流域下垫面特征:(a) 土地利用;(b) 土壤类型

Fig. 2 Characteristics of underlying surface in the Manas River Basin: (a) land use; (b) soil types

表 2 统计指标绩效等级分类

Tab. 2 Classification of performance grades for statistical indicators

性能等级	NSE	RSR
很好	$0.75 < NES \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
好	$0.65 < NES \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
满意	$0.50 < NES \leq 0.65$	$0.60 < RSR \leq 0.7$
不满意	$NES \leq 0.50$	$0.70 < RSR$

3 结果与分析

3.1 参数率定

MIKE SHE 模型的参数具有明确的物理意义,理论上可以从现场测量中定义而无需率定;但山区流域人迹罕至、地理结构复杂,获取参数测量值存在极大难度,故需要通过参数率定以更好地重现流域物理特征并改善模拟结果。本次模拟主要采用人工试错法对 MIKE SHE 进行参数率定。为了避免过参数化,首先依据 Refsgaard 和 Storm^[22]提出的模型参数化原则识别出关键参数,这些参数并非通过测量和计算得到,需要根据实测径流数据对其进行适当调整,寻找符合其理论参考范围的最优值,如融雪的度日因子、初始积雪分数、给水度和河床透水系数等。其他的诸如降水、蒸散发、温度和叶面积指数等参数,是对于现实情况的真实描述,不需要进行率定。率定参数值见表 3。

3.2 径流模拟结果

本文采用 MIKE SHE 模型对玛纳斯河流域 1991—2015 年的日径流和月径流进行模拟研究,其中 1991—2010 年为模型率定期,2011—2015 年为模型验证期。依据肯斯瓦特水文站 1991—2015 年的实测径流数据对 MIKE SHE 进行校准(图 3 和图 4)。总体而言,通过参数率定,MIKE SHE 模型能够比较准确地模拟出玛纳斯河的径流量,模拟径流和实测径流具有相似的变化趋势;根据表 2 给出的评价标准,率定和验证的结果均在可接受的范围内,基于空间插值数据的 MIKE SHE 模型在玛纳斯河流域具有一定的适用性。

由图 3 可知,在日尺度的模拟中,MIKE SHE 模型模拟的玛纳斯河流域径流量的模拟值与实测值相比,整体偏小,但基本能反映出研究区内径流变化的实际情况。5—9 月的汛期,模拟值也基本反映了

表 3 参数率定结果

Tab. 3 Results of the calibrated parameters

模块	参数	率定结果	单位
融雪	临界融雪温度	0	℃
	度日因子	1.50	$\text{mm} \cdot \text{℃}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
	初始总积雪	1.50	m
坡面流	曼宁系数	30	$\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
	地面持水量	0	mm
	初始水深	0	m
河道流	河床糙率	30	$\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
	河床渗透系数	1×10^{-7}	—
	给水度	0.44	—
	初始水深	5	m
饱和带 (壤中流水库)	水库深	5	m
	壤中流阈值深度	5	m
	壤中流时间常数	9	d
	渗透时间常数	365	d
饱和带 (基流水库 1)	给水度	0.10	—
	初始水深	20	m
	水库深	20	m
	基流阈值深度	20	m
	基流时间常数	600	d
	UZ 反馈系数	0.10	—
饱和带 (基流水库 2)	给水度	0.10	—
	初始水深	50	m
	水库深	50	m
	基流阈值深度	50	m
	基流时间常数	1825	d
	UZ 反馈系数	0.10	—

洪峰的涨落过程,峰值流量多出现在 6—8 月。同时从整体来看,率定期内径流拟合程度要优于验证期,这是由于玛纳斯河流域 MIKE SHE 模型的建立主要是基于率定期内的实测流量对参数集进行的优化校准,因此率定期内的拟合程度要优于验证期。进一步分析发现,MIKE SHE 模型较好地模拟出了春季和冬季枯水期的径流量,但对夏季径流峰值的模拟效果仍需进一步提高,其中 2002 年和 2008 年模拟日径流的峰值出现时间与实测值发生了较大偏差,而 1999 年和 2010 年夏季峰值则整体低于实测值;这表明在某些降雨事件中,绝对峰值流量经常被低估,这主要是由于玛纳斯河流域观测站点稀少,输入数据质量较差,同时夏季径流变化剧烈,影响因素较

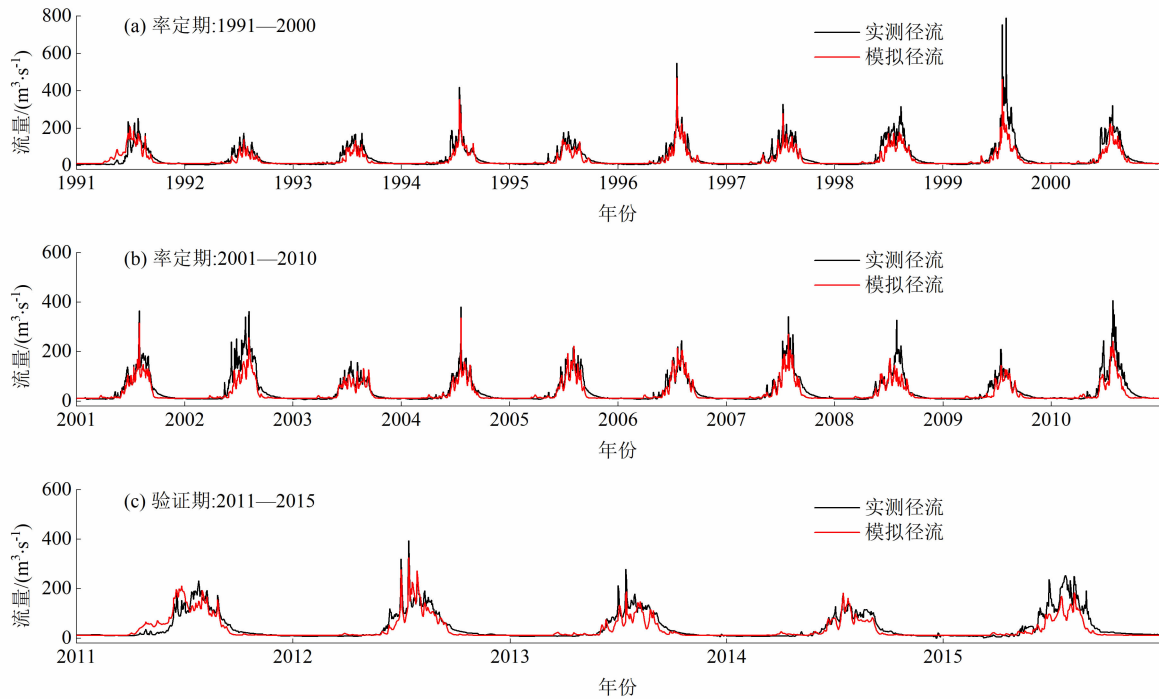


图 3 1991—2015 年日尺度实测与模拟流量值

Fig. 3 Measured and simulated flow values on daily scale from 1991 to 2015

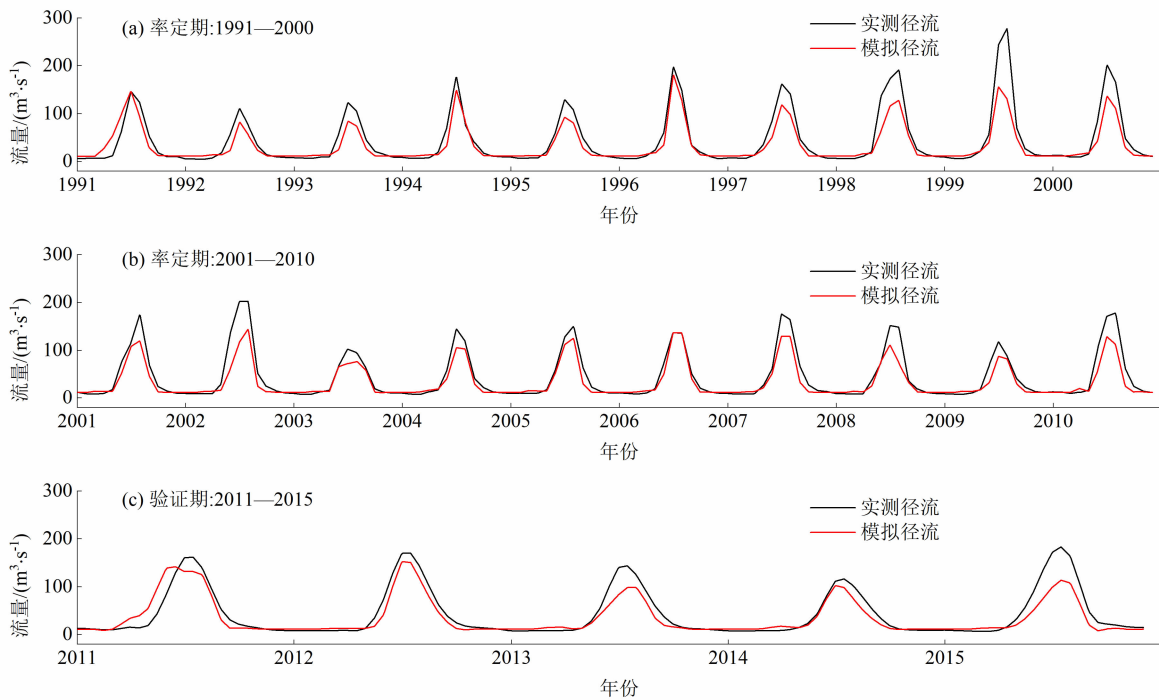


图 4 1991—2015 年月尺度实测与模拟流量值

Fig. 4 Measured and simulated flow values on monthly scale from 1991 to 2015

为复杂。

由图 4 可以看出,在月尺度的模拟中,玛纳斯河径流量年内分配极不均衡,春季五月份过后径流量

开始迅速增长,到夏季七、八月份达到最大,八月份过后径流量开始陡降,入冬以后径流量保持平稳;这主要是因为玛纳斯河水资源主要源于冰川融雪和降

水,冬季流域内冰雪冻结,降水多以霜雪的形式存在,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季节的到来,冰川融雪对河川径流的补给速率加快,径流量急剧增加,表明研究区内径流变化受气温和降水的双重影响。进一步分析模拟结果发现,率定期和验证期均采用同一套模拟参数,但有些年份拟合程度较好,有些年份拟合精度不太理想,如 1998—2002 年。原因是在参数率定时,为了避免“过参数化”,一些参数被假设为均质的,如融雪因子、曼宁系数等,削弱了不同年份之间的差异。

3.3 模型评价

从表 4 玛纳斯河流域 MIKE SHE 模拟结果评价中可以看出,日尺度的率定期和验证期的确定系数(R^2)均达到了 0.75 以上,月尺度达到了 0.85 以上,可见模拟流量和观测流量之间有很好的相关性。日尺度率定期的 NSE 为 0.78,可见在 1991—2010 年内有 78% 的模拟流量与观测流量相似,而验证期内的 NSE 虽然低于率定期,但也达到了 0.75,符合表 1 的模型评价标准;月尺度的模拟结果相比日尺度更佳,率定期和验证期内的 NSE 均达到了 0.82。日尺度的率定期和验证期内的 RSR 分别为 0.47 和 0.48,月尺度的率定期和验证期内的 RSR 则分别为 0.43 和 0.42,均小于 0.5,表明 $RMSE$ 较小,模型模拟结果好。

表 4 MIKE SHE 模拟结果评价

Tab. 4 Evaluation on simulation results by MIKE SHE model

指标	率定期 (1991—2010)		验证期 (2010—2015)	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
NSE	0.78	0.82	0.75	0.82
R^2	0.85	0.91	0.78	0.87
RSR	0.47	0.43	0.48	0.42

综上所述,在日尺度和月尺度的模拟中,依据表 1 给出的评价标准,从时间尺度和空间尺度看,模型模拟结果可靠,达到了模拟精度要求,表明 MIKE SHE 模型在玛纳斯河流域具有良好的适用性,可用作后续的研究与应用。

4 讨论

中国地面日值格点数据集能够为 MIKE SHE 模

型提供分布式气象数据,玛纳斯河流域的水文情况模拟较好,能够总体反映年内和年际间的总体水文情势。对于夏季径流峰值,模型的模拟效果不尽如人意。分析其原因主要有以下几点:第一,玛纳斯河流域内并无传统气象站点,流域内中国地面日值格点数据集的气象格点是根据流域周边气象站的观测资料进行空间插值得到,而研究表明^[23]气象站点分布密集的地方,插值精确度高,但当气象站点间的距离大于 40 km 时基于空间插值的中国地面日值格点数据集弱化了大雨和中雨日的降水强度,导致 MIKE SHE 模型低估了峰值流量;同时流域内仅有 4 处气象格点数据并不足以充分展现流域降水分布的空间异质性。第二,由于缺乏详细的水文地质参数,在构建饱和带模块时将地下储水空间简化为水库,给水度、UZ 反馈系数等参数被假设为一个常数,整个区域表现为相同的持水和传输特性,导致 MIKE SHE 在模拟地下水基流对径流的补给方面存在较大误差。第三,玛纳斯河属于冰川融雪及降水混合补给型河流,径流量的 35.3% 来自高山冰雪融水^[24],而 MIKE SHE 融雪模块中采用的度日因子法没有考虑冰雪表面的积温影响^[7],融雪量由当天的空气温度决定,导致融雪期更长,时间分布更分散,削弱了夏季高温时期冰川积雪对径流的补给作用。基于此,如何进一步提升 MIKE SHE 模型对夏季峰值的模拟效果,使得 MIKE SHE 模型更好的适用于干旱区内陆河流域将是我们下一步的工作。

5 结论

本文采用基于空间插值的中国地面日值格点数据集建立分布式水文模型 MIKE SHE 对玛纳斯河流域进行了径流模拟,选择流域出口口的肯斯瓦特水文站实测径流数据对模型进行校准,得到了以下结论:

(1) 本文建立的玛纳斯河流域分布式水文模型 MIKE SHE 在日尺度和月尺度上较为准确地再现了流域的水文过程,率定期和验证期内的 NSE 系数和 R^2 均在 0.75 以上, RSR 小于 0.5。表明基于空间插值的中国地面日值格点数据集可提供连续的、分布式的气象数据,实现缺资料或无资料山区流域的水文模拟,具有良好的应用前景。

(2) MIKE SHE 模型允许用户根据研究区实际情况简化对单个水文过程的模拟。模型采用线性储

层法模拟地下水过程,在水文信息匮乏的玛纳斯河流域具有一定适用性,能够充分发挥分布式水文模型的优点,最大限度接近流域实况,MIKE SHE 模型在干旱区流域应用是完全可行的。

(3) 基于空间插值的中国地面日值格点数据集能够为无历史气象资料的地区提供分布式的气象数据。但由于西北地区气象站点稀疏,基于空间插值的中国地面日值格点数据集的准确性和空间分辨率仍有待进一步提高。

参考文献 (References)

- [1] 邓铭江,龙爱华,李江,等. 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析[J]. 地理学报,2020,75(7):1333–1345. [DENG Mingjiang, LONG Aihua, LI Jiang, et al. Theoretical analysis of “natural-social-trading” ternary water cycle mode in the inland river basin of Northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(7): 1333–1345] DOI: 10.11821/dlxb202007001
- [2] 沈思民,赵军,刘佳茹,等. 祁连山 TRMM 降水数据降尺度不同方法比较研究[J]. 山地学报,2019,37(6):923–931. [SHEN Simin, ZHAO Jun, LIU Jiaru, et al. Comparative study on different downscaling methods of TRMM satellite precipitation data over the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2019,37(6): 923–931] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000482
- [3] TUO Ye, DUAN Zheng, DISSE M, et al. Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: a case study in the Adige river basin (Italy) [J]. Science of the Total Environment, 2016(573):66–82. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.034
- [4] 陆文,唐家良,章熙锋,等. 山地流域水文模拟研究进展与展望[J]. 山地学报,2020,38(1):50–61. [LU Wen, TANG Jialiang, ZHANG Xifeng, et al. Hydrological simulation in mountainous region: present state and perspectives [J]. Mountain Research, 2020,38(1):50–61] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000490
- [5] TODINI E. Hydrological catchment modelling: past, present and future [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2007, 11(1): 468–482. DOI: 10.5194/hess–11–468–2007
- [6] MA Liang, HE Chunguang, BIAN Hongfeng, et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: merits, applications, and challenges [J]. Ecological Engineering, 2016(96):137–149. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.008
- [7] LIU Jiao, LIU Tie, BAO Anming, et al. Assessment of different modelling studies on the spatial hydrological processes in an arid alpine catchment [J]. Water Resources Management, 2016, 30(5): 1757–1770. DOI: 10.1007/s11269–016–1249–2
- [8] RUJNER H, LEONHARDT G, MARSALEK J, et al. High-resolution modelling of the grass swale response to runoff inflows with Mike SHE [J]. Journal of Hydrology, 2018(562): 411–422. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.024
- [9] SAHOO G B, RAY C, CARLO E H D. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2):94–109. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.012
- [10] LAITI L, MALLUCCI S, PICCOLROAZ S, et al. Testing the hydrological coherence of high-resolution gridded precipitation and temperature datasets [J]. Water Resources Research, 2018, 54(3): 1999–2016. DOI: 10.1002/2017WR021633
- [11] ZHOU Shilun, ZHANG Wanchang, GUO Yuedong. Impacts of climate and land-use changes on the hydrological processes in the Amur River Basin [J]. Water, 2019, 12(1):76. DOI:10.3390/w12010076
- [12] ANDERSEN J, SANDHOLT I, JENSEN K H, et al. Perspectives in using a remotely sensed dryness index in distributed hydrological models at the river-basin scale [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(15): 2973–2987. DOI: 10.1002/hyp.1080
- [13] 刘蛟,刘铁,黄粤,等. 基于遥感数据的叶尔羌河流域水文过程模拟与分析[J]. 地理科学进展,2017, 36(6): 753–761. [LIU Jiao, LIU Tie, HUANG Yue, et al. Simulation and analysis of the hydrological processes in the Yarkant River Basin based on remote sensing data [J]. Progress in Geography, 2017, 36(6): 753–761] DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.06.010
- [14] 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. DOI: 10.1515/geo–2020–0127
- [15] 张正勇. 玛纳斯河流域产流区水文过程模拟研究[D]. 新疆: 石河子大学, 2018: 60–70. [ZHANG Zhengyong. Modeling hydrological processes in main runoff generating area of Manasi River Basin, Xinjiang [D]. Xinjiang: Shihezi University, 2018: 60–70]
- [16] 刘斯文,刘海隆,王玲. MIKE SHE 模型的发展与应用研究[J]. 水文,2018, 38(5): 23–28. [LIU Siwen, LIU Hailong, WANG Ling. Development and application of MIKE SHE model [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 23–28] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0852.2018.05.005
- [17] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 45–59. DOI: 10.1016/0022–1694(86)90114–9
- [18] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: structure of a physically-

- based, distributed modelling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, **87**(1/2): 61 – 77. DOI: 10.1016/0022 – 1694 (86) 90115 – 0
- [19] 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. DOI: 10.1016/0022 – 1694(70)90255 – 6
- [20] SINGH J, KNAPP H V, ARNOLD J G, et al. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, **41**(2): 343 – 360. DOI: 10.1111/j.1752 – 1688.2005.tb03740.x
- [21] 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 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, **50**(3): 885 – 900. DOI: 10.13031/2013.23153
- [22] REFSGAARD J C, STORM B, CLAUSEN T. Systeme Hydrologique Europeen (SHE): review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling [J]. *Hydrology Research*, 2010, **41**(5): 355 – 377. DOI: 10.2166/nh.2010.009
- [23] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. *气象科学*, 2014, **34**(4): 414 – 420. [ZHAO Yufei, ZHU Jiang, XU Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for the past 50 years [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, **34**(4): 414 – 420] DOI: 10.3969/2013jms.0008
- [24] 陈伏龙, 王怡璇, 吴泽斌, 等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆径流量的影响——以新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站为例[J]. *干旱区研究*, 2015, **32**(4): 692 – 697. [CHEN Fulong, WANG Yixuan, WU Zebin, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of continental river in arid areas—taking Kensiwater Hydrological Station in Xinjiang Manas River Basin as an example [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(4): 692 – 697] DOI: 10.13866/j.azr.2015.04.09

Calibration of Hydrological Modelling by MIKE SHE for the Manas River Basin, Xinjiang, China

XIAO Senyuan, YANG Guang*, HE Xinlin, GU Xinchun, LI Xiaolong

(College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University / Key Laboratory of Modern

Water-Saving Irrigation, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Watershed models are powerful tools for simulating the effect of watershed processes and management on soil and water resources. However, the use of traditional SWAT model to simulate the runoff of the Manas River Basin cannot accurately reflect the temporal and spatial distribution characteristics of water resources in the basin. Based on the China Surface Daily Meteorology Grid Dataset issued by National Meteorological Information Center, the distributed hydrological model MIKE SHE was instead used to simulate the hydrological process in the Manas River Basin from 1991 to 2015. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), the adjusted R -Square (R^2) and ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data (RSR) were integrally employed to evaluate the applicability of the model. The results were justified by observations obtained from Kensiwater hydrological station. The daily runoff simulation efficiency at Kensiwater hydrological station were $NSE = 0.78$, $R^2 = 0.85$, $RSR = 0.47$ and monthly runoff simulation efficiency $NSE = 0.82$, $R^2 = 0.91$, $RSR = 0.43$. The simulated results revealed that the MIKE SHE model is able to simulate hydrographs satisfactorily for the Manas River Basin at daily and monthly time scales. This study provides a reference for the hydrological simulation of a mountainous basin in arid regions, and the research results can provide a scientific basis for the rational allocation of water resources in the basin.

Key words: MIKE SHE; runoff simulation; grid datasets; Manas River Basin