

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.030

基于全球陆面数据同化系统蒸散量的 GSAC 模型率定

王 斌^{1,2} 朱士江³ 黄金柏⁴ 丁星臣¹ 宫兴龙¹ 王贵作⁵

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 4. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009;
5. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 在识别缺资料流域水文模型参数时,目前常采用的区域化方法存在相似流域间降雨径流关系差别较大、模型参数与流域属性间的相关性不明显、在大范围缺资料地区难于选取参考流域等问题。本文从全球陆面数据同化系统(GLDAS)获取流域蒸散量数据,提出利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型的方法。首先,通过合并网格建立 GSAC 模型模拟的蒸散量与 GLDAS 蒸散量在时间和空间方面的对应关系;其次,基于纳什效率系数的定义构建了一个模型率定指标,以评价 GSAC 模型模拟的蒸散量对 GLDAS 蒸散量的拟合效果;最后,依据 GLDAS 蒸散量与 GSAC 模型模拟蒸散量之间的拟合关系率定 GSAC 模型。呼兰河流域应用结果表明,GLDAS 提供的蒸散量能够较好反映流域实际蒸散量的变化情况,为率定 GSAC 模型提供了一种有效的输入数据;在率定期与验证期,利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型对流量模拟的纳什效率系数分别为 0.81 和 0.77,与利用流量数据率定的 GSAC 模型模拟结果相近。

关键词: 水文模型率定; GSAC 模型; GLDAS; 蒸散量; 呼兰河流域

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0232-09

GSAC Model Calibration Based on Evapotranspiration Data from Global Land Data Assimilation System

WANG Bin^{1,2} ZHU Shijiang³ HUANG Jinbai⁴ DING Xingchen¹ GONG Xinglong¹ WANG Guizuo⁵

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China
3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China
4. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
5. Development Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Since International Association of Hydrological Science (IAHS) initiated the prediction in ungauged basin (PUB) programe, the regionalization has become a common method for identifying hydrological model parameters in ungauged basins. However, some problems exist in the regionalization method, which was commonly used for parameter identification of hydrological model in ungauged basins, such as different relationships between rainfall and runoff in similar basin, unobvious correlation between hydrological model parameters and basin characteristics, and difficult to select a reference basin in wide range of data-deficient areas, etc. It is significant to study the method of calibrating hydrological model by using the data outside the stream flow. A method was presented to calibrate the parameters of grid-based Sacramento (GSAC) model by using evapotranspiration (ET) data from global land data assimilation system (GLDAS). Firstly, a spatiotemporal-grid corresponding relationship between GLDAS ET and ET simulated by GSAC model was established. Secondly, a evaluation index based on Nash – Sutcliffe efficiency coefficient was constructed to measure the fitting effect between GLDAS ET and ET simulated by GSAC model on 0.25° grid. Finally, validation of GSAC model was carried out based on the GLDAS ET. The results of application in the Hulan River Basin indicated that GLDAS ET can better

收稿日期: 2017-07-08 修回日期: 2017-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、国家自然科学基金项目(51009026、41271046)和农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015002)

作者简介: 王斌(1976—),男,副教授,主要从事农业节水和水文过程模拟研究,E-mail: wangbin@neau.edu.cn

simulate the actual ET of the Hulan River Basin so that provided a useful input data for calibrating parameters of GSAC; the runoff Nash – Sutcliffe efficiency coefficient of GSAC model calibrated by GLDAS ET were 0.81 and 0.77 in the calibration and validation periods, respectively, and the results were similar to the corresponding values of GSAC model calibrated by runoff data.

Key words: hydrological model calibration; grid-based Sacramento model; global land data assimilation system; evapotranspiration; Hulan River Basin

0 引言

水文模型是研究水循环和水文过程的重要手段,也是解决水文预报、水文分析与计算、水资源规划与管理等问题的有效工具。在应用水文模型时,一般需要事先获取一定数量的水文资料来率定模型,其中最常被采用的水文资料是流量数据。然而,在很多国家和地区,由于水文站网的分布密度较低,或受各种自然条件与人为因素限制,水文数据缺失严重,甚至无法取得一些基础性的水文资料,给水文模型的率定造成了很大困难^[1]。自国际水文科学协会启动无资料流域预报(PUB)计划以来,“区域化”已成为识别缺资料流域水文模型参数的常用方法,主要包括空间相近法、属性相似法和回归法等,其中:空间相近法和属性相似法统称为参数移植法,是指寻找与缺资料流域(目标流域)距离相近或属性相似的一个或多个有资料流域(参考流域),并将在参考流域率定的模型参数移植到目标流域;回归法先在参考流域建立模型参数与流域属性间的回归关系,从而利用目标流域的属性推求其模型参数^[2-4]。尽管区域化方法取得了一系列重要成果,但在实际应用中也存在一些问题,如:在应用参数移植法时,即使流域间的气候、下垫面、土壤等特征相似,但其降雨径流关系往往差别较大;回归法常见的问题是模型参数之间往往具有很强的相关性,但模型参数与流域属性之间却不存在很强的相关关系^[5]。不仅如此,应用区域化方法的逻辑前提是参考流域具备流量数据,但对于一个大范围内缺资料的地区而言,所关注的目标流域(如某水利水电枢纽工程坝址断面以上集水区)内部及周边均可能处于缺资料区域,存在难于选出参考流域的问题。可见,研究利用流量之外的数据率定水文模型是 PUB 计划的有益补充。

国内外的一些学者在利用蒸散量率定水文模型方面进行了有益探索,其中较典型的研究是利用遥感蒸散量率定分布式水文模型 SWAT(Soil and water assessment tool)^[6-9]。这些研究均以 SWAT 模型为对象,采用的短系列蒸散量为遥感影像解译数据,考察的是 SWAT 模型在子流域尺度的模拟值对遥感蒸散量的拟合情况,同时还需借助其他资料(如:参

考蒸散量^[6]、冬小麦和夏玉米的多种作物参数等^[7-9]),研究目的并非为了解决缺资料地区的水文模型率定问题。对于一个固定的研究流域,获取遥感蒸散量一般要单独开展遥感影像解译工作,不仅工作量较大,还需要一定数量的地形、气象、植被等数据支撑;虽然 SWAT 模型机理性较好,但其结构复杂、参数众多,当采用遥感蒸散量率定 SWAT 模型时,为了解决输入的遥感蒸散量与 SWAT 模型模拟的蒸散量在时间步长、子流域等方面的时空匹配关系,需要编译、调试模型程序源代码,或开展模型二次开发工作,不易被一般的工程技术人员掌握。刘昌明等^[5]的研究已表明,选择合适的水文模型对缺资料流域的水文过程模拟有着重要影响,模型的复杂性和表现性似乎没有很强的联系,参数的增多不仅会加大模型的率定难度,还会降低模型的稳定性。

综上,本文以基于网格的萨克拉门托模型(Grid-based Sacramento model, GSAC)为研究对象,研究利用全球陆面数据同化系统(Global land data assimilation system, GLDAS)提供的蒸散量率定 GSAC 模型的方法,以期丰富 PUB 计划研究内容。

1 GSAC 模型模拟蒸散量原理

王斌等^[10]将萨克拉门托(Sacramento, SAC)模型在透水面积上的产流概念引入到网格,简化了该模型的 5 种蒸散量计算方法,同时增加了植被截留蒸发和积雪蒸发等计算模式,构建了 GSAC 模型,该模型能够很好地与各种网格数据融合,可以较好描述径流、蒸散发、土壤水分等逐日变化过程,模型具体计算和应用详见文献[10-12],这里重点介绍该模型中与本研究相关的蒸散量模拟原理。GSAC 模型的实际蒸散量包括冠层截留蒸发量、积雪蒸发量、植被散发量、土壤蒸发量等,植被散发和土壤蒸发消耗的水量由土壤张力水提供。如果植被冠层截留了降水,则首先蒸发冠层截留的降水量;如果存在积雪,则发生积雪蒸发现象;在蒸发了冠层截留和积雪后,蒸发上、下两土层的张力水;如果没有冠层截留或积雪,则只蒸发土壤水。

1.1 冠层截留蒸发

假设降水量先降落至植被冠层,如果降水量被

冠层截留后仍有剩余,则剩余的降水量会穿过冠层降落至地表成为净降水量,继而再被划分为降雨量和降雪量。冠层截留蒸发量为

$$ET_{int} = \begin{cases} \min(I_{max}, PET) & (I + P \geq I_{max}) \\ \min(I + P, PET) & (I + P < I_{max}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $I_{max} = C_{int} LAI$ (2)

式中 ET_{int} ——冠层截留蒸发量,mm/d

I_{max} ——冠层截留容量,mm

PET ——潜在蒸散量,mm/d

I ——冠层截留量,mm

P ——降水量,mm/d

C_{int} ——截留系数,mm

LAI ——叶面积指数

1.2 积雪蒸发

如果地面存在积雪,则会发生积雪蒸发现象,其蒸发量为

$$ET_{sno} = \begin{cases} PET - ET_{int} & (SPWC \geq PET - ET_{int}) \\ SPWC & (SPWC < PET - ET_{int}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $SPWC = SPWC_0 + P_s - ET_{sno} - SMLT$ (4)

$$ET_{low} = \begin{cases} (PET - ET_{int} - ET_{sno} - ET_{up}) \frac{LZTWC}{LZTWM} & (LZTWC \geq (PET - ET_{int} - ET_{sno} - ET_{up}) \frac{LZTWC}{LZTWM}) \\ LZTWC & (LZTWC < (PET - ET_{int} - ET_{sno} - ET_{up}) \frac{LZTWC}{LZTWM}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 ET_{low} ——下层张力水蒸发量,mm/d

$LZTWC$ ——下层张力水蓄量,mm

$LZTWM$ ——下层张力水容量,mm

在网格尺度,上、下层张力水蒸发消耗各自的张力水蓄量,当满足水分交换条件时,张力水和自由水进行交换与调整。各网格的蒸散量为冠层截留蒸发量、积雪蒸发量、土壤水蒸发量之和,潜在蒸散量可视气象数据条件,采用 Hargreaves 公式^[13]、Shuttleworth - Wallace 公式^[14]等计算。

2 GLDAS 蒸散量在 GSAC 模型率定中的应用

2.1 GLDAS 蒸散量数据简介

GLDAS 是美国国家航空航天局戈达德航天飞行中心和美国国家海洋与大气管理局国家环境预测中心联合发展的、融合了地面和卫星观测数据的全球陆面数据模拟系统,提供了多种优化的、近实时的地表状态变量数据^[15]。目前,GLDAS 驱动 Noah 等 4 种陆面模式,包括 GLDAS - 1 和 GLDAS - 2 2 个版本,空间分辨率为 0.25° × 0.25°、1.0° × 1.0°,时间分辨率为 3 h 和月份。GLDAS - 2 又可细分为 GLDAS - 2.0 和 GLDAS - 2.1,前者采用普林斯顿大

$$SMLT = M_f (T - T_b)$$

式中 ET_{sno} ——积雪蒸发量,mm/d

$SPWC$ ——计算时段末积雪水当量,mm/d

$SPWC_0$ ——计算时段初积雪水当量,mm/d

P_s ——降雪量,mm/d

$SMLT$ ——融雪水当量,mm/d

M_f ——度日因子,mm/(K·d)

T ——平均气温,℃

T_b ——基础温度,℃

1.3 土壤水蒸发

采用上、下 2 层蒸发模型描述张力水蒸发量。上层张力水蒸发量为

$$ET_{up} = \begin{cases} PET - ET_{int} - ET_{sno} & (UZTWC \geq PET - ET_{int} - ET_{sno}) \\ UZTWC & (UZTWC < PET - ET_{int} - ET_{sno}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 ET_{up} ——上层张力水蒸发量,mm/d

$UZTWC$ ——上层张力水蓄量,mm

下层张力水蒸发量为

学的全球气象数据作为强迫场,利用 Noah 陆面模式模拟了一套从 1948 年到 2010 年的长序列陆面资料;后者基于强迫的数据集,联合应用模型和观测值,模拟了从 2000 年至当前的陆面数据。与文献[6 - 9]通过遥感方法获取的蒸散量不同,GLDAS - 2 提供的蒸散量为 Noah 陆面模式的模拟结果,不仅系列长,产品也很丰富,包括了蒸散量、潜在蒸散量、冠层水蒸发量、散发量、裸土直接蒸发量等。考虑到 GLDAS - 2 的时空分辨率和数据量以及单机计算水平,文中采用 GLDAS - 2.0 版本 0.25° × 0.25° 分辨率的月份蒸散量数据。

2.2 基于蒸散量的 GSAC 模型率定指标

以网格为计算单元的 GSAC 模型能够模拟较高时空分辨率的蒸散量,且可以通过程序将其模拟的蒸散量转换为其他时空分辨率数据,便于与 GLDAS 蒸散量的时空分辨率相对应,为利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型提供了很多便利。由于采用的 GLDAS 蒸散量在时间方面较离散(仅为月值),但在空间分布方面数据量较大,因此,本文采取“空间换时间”的方法,即根据各网格的地理坐标,将 GSAC 模型模拟的小网格逐日蒸散量转换为 0.25° 网格的月份值,并参照纳什效率系数(NS)的定义,构建了

一个关于蒸散量的模型率定指标 NS_{ET} ，以评价 GSAC 模型模拟的蒸散量对 GLDAS 蒸散量的拟合效果，为

$$NS_{ET} = \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n (ET_{GLDAS}(i,j) - ET_{GSAC}(i,j))^2}{\sum_{j=1}^n (ET_{GLDAS}(i,j) - \overline{ET_{GLDAS}}(i,j))^2} \right) \quad (8)$$

式中 NS_{ET} ——评价蒸散量模拟效果的纳什效率系数

- m ——流域对应的 0.25° 网格数目
- n —— 0.25° 网格蒸散量系列长度(月份数)
- ET_{GLDAS} ——GLDAS 的 0.25° 网格月份蒸散量系列, mm
- ET_{GSAC} ——GSAC 模型模拟的 0.25° 网格月份蒸散量系列, mm
- $\overline{ET_{GLDAS}}$ ——GLDAS 的 0.25° 网格月份蒸散量系列均值, mm

GSAC 模型参数主要包括:12 个产流参数校正系数^[16]、截留系数 C_{int} 、划分雨雪的温度阈值 T_{sr} 、度日因子 M_f 、基础温度 T_b 、马斯京根法蓄量常数 K_{mus} 、马斯京根法流量比重因子 X_{mus} 等,这些参数均可以通过率定模型的方法识别,同时部分参数也可以依据文献取值(如: $C_{int} = 0.2 \text{ mm}^{[17]}$ 、 $T_b = 0^\circ\text{C}^{[18]}$),或通过试验测定(如: T_{sr} 、 M_f),或依据河道水力学特性推求(如: K_{mus} 、 X_{mus})。本文中 C_{int} 和 T_b 取文献值,其他参数利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型识别。自由搜索是一种源于动物群体迁移行为的智能优化算法^[19],在率定 SAC 模型时取得了良好效果^[20],因此,以式(8)为优化目标函数,引入自由搜索算法率定 GSAC 模型,模拟精度为

$$NS_Q = 1 - \frac{\sum_{k=1}^L (Q_{obs,k} - Q_{sim,k})^2}{\sum_{k=1}^L (Q_{obs,k} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (9)$$

- 式中 NS_Q ——评价流量模拟效果的纳什效率系数
- L ——日流量系列长度(日数)
 - Q_{obs} ——实测日流量系列, m^3/s
 - Q_{sim} ——模拟日流量系列, m^3/s
 - $\overline{Q_{obs}}$ ——实测日流量系列均值, m^3/s

3 实例应用

对于地处缺资料地区的流域而言,除缺失流量数据外,当前覆盖全球或地区的各种数据集能为这些流域提供较充足的气象、地形、土壤、土地覆被等

基础资料。当具备降水、气温、地形、土壤、土地覆被、归一化植被指数(NDVI)、GLDAS 等数据时,无论流域是否具备流量数据,采用前文所述方法即可利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型,进而模拟流域出口断面的流量过程。然而,为验证本文方法的可行性以及利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型对流量的模拟效果,则需选择一个具备流量资料的实证流域。因此,选取呼兰河兰西站以上的集水区作为研究流域(以下简称为呼兰河流域),该流域概况见文献[16]。

3.1 数据来源

日降水量和日流量数据来自中国水文年鉴,降水量插值采用泰森多边形法,日流量资料仅作为模拟流量的检验数据;日气象数据包括水汽压、日照时数、最高气温、最低气温、平均气温及风速等,主要用于计算潜在蒸散量和划分雨雪过程,来自铁力、绥化、海伦、明水 4 个气象站,数据下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),采用泰森多边形法将气象站数据插值到流域内各网格,应用 Shuttleworth - Wallace 公式计算潜在蒸散量;DEM 采用美国地质调查局的 $30''$ 分辨率数据;土地覆被采用国际地圈生物圈计划的 $30''$ 分辨率数据,主要用于识别各网格的土地覆被类型;NDVI 采用 NOAA - AVHRR 的 8km 分辨率数据,用于计算各种覆被的叶面积指数;土壤属性数据采用世界和谐土壤数据库,来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),空间分辨率为 $30''$,用于估计不同土层的土壤水分常数;GLDAS 蒸散量下载自 <http://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/>。

为提高运算速度,将 GSAC 模型计算网格设为 $60'' \times 60''$,即在空间范围上,1 个 0.25° 网格对应 225 个 ($15 \text{ 行} \times 15 \text{ 列}$) $60''$ 网格。当需要将 GSAC 模型模拟的 $60''$ 网格蒸散量转换为 0.25° 网格数值时:对于流域周边的 0.25° 网格,如果其对应的流域内 $60''$ 网格数目不足 225 个,则转换后的 0.25° 网格蒸散量为其内部实际 $60''$ 网格数据的平均值;对于流域内部的 0.25° 网格,转换后的 0.25° 网格蒸散量为 225 个 $60''$ 网格数据的平均值。经过提取后,呼兰河流域包含 11 968 个 $60''$ 网格,对应 55 个 0.25° 网格,如图 1 所示。

3.2 GLDAS 蒸散量适用性评价

由于很难获取流域尺度的多点长期实测蒸散量资料,为评价 GLDAS 蒸散量在呼兰河流域的适用性,首先采用文献[16]中利用流量率定的参数驱动 GSAC 模型,模拟了该流域 1982—2000 年的 $60''$ 网格逐日蒸散量。经统计,在 1982—2000 年间,呼兰

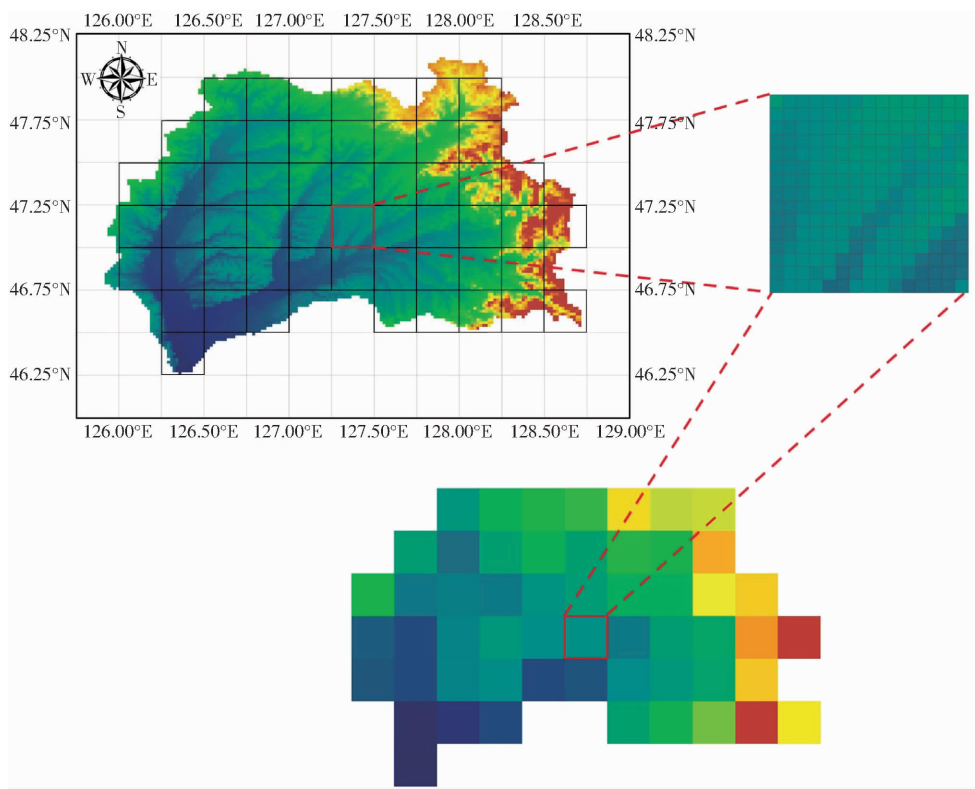


图 1 呼兰河流域地理位置及其与不同分辨率网格的对应情况
Fig. 1 Position of Hulan River Basin and its different resolution grids

河流域实测降水量、流量与 GSAC 模型模拟的蒸散量多年平均值分别为 588.5、124.4、470.7 mm,三者基本遵循流域尺度的多年平均水量平衡方程,其差值为土壤蓄水量的变化量。因此,可以认为 GSAC 模型模拟的蒸散量能够代表呼兰河流域蒸散量的实际变化过程。

将 GSAC 模型模拟的 1982—2000 年蒸散量转化为全流域平均的逐月系列后,与同期的 GLDAS 蒸散量(全流域 0.25°网格的数据平均值)系列对比情况如图 2 所示。

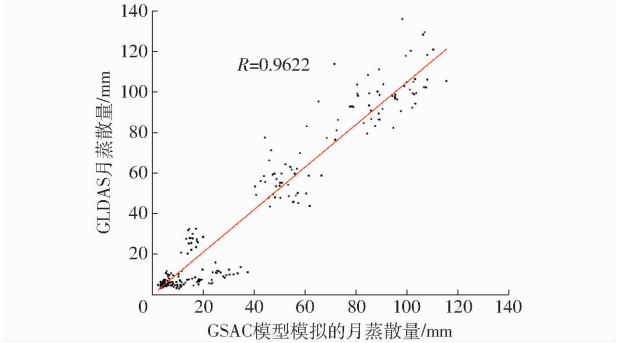


图 2 GSAC 模型模拟的月蒸散量与 GLDAS 月蒸散量对比

Fig. 2 Comparison of month ET of GLDAS and simulation results from GSAC model

由图 2 可见, GLDAS 蒸散量与 GSAC 模型模拟蒸散量的总体符合情况较好,经计算二者相关系数达 0.962 2,可见,在呼兰河流域,采用 GLDAS 蒸散

量代替实际蒸散量是可行的。由于 GLDAS 提供的蒸散量与呼兰河流域的蒸散量变化过程较一致,因此,本文直接将 GLDAS 蒸散量作为模型输入数据,利用其与 GSAC 模型模拟蒸散量的对应关系率定 GSAC 模型。需要说明的是,当需评价 GLDAS 在缺资料地区的适用性时,可在该地区之外的资料相对丰富地区对 GLDAS 进行检验和修正,再将检验和修正后的 GLDAS 制成覆盖缺资料地区的数据集,从而将 GLDAS 应用到缺资料地区。

3.3 参数敏感性分析与率定结果

为便于与文献[16]中利用流量率定模型的研究结果相比较,以 1991—2000 年的 10 a 为研究时段,前 5 年为率定期,后 5 年为检验期,以式(8)为优化目标函数,通过寻求 NS_{ET} 的最大值率定 GSAC 模型。设定自由搜索算法群体数量为 10、探查步数为 4、迭代 100 次,记录算法迭代过程中所有动物每步探查的位置(GSAC 模型参数)及适应值(NS_{ET})作为分析参数敏感性的样本数据,并取算法的最好寻优结果作为参数取值,结果如表 1 所示。

由表 1 可见,在呼兰河流域,当利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型时,各参数的敏感性与文献[16]相似,较敏感参数仍是校正上层厚度的 3 个地区经验系数和上层张力水容量校正系数;不同的是下层自由水容量校正系数也较敏感,不很敏感的是上层自由水出流系数、下层张力水容量校正系数,

表 1 利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型参数及其敏感性

Tab.1 Sensitivity and optimal values of parameters for GSAC model calibrated by ET from GLDAS

参数	数值	T 检验	P
上层厚度校正系数 c_1	68.061 0	10.741 8	<0.000 1
上层厚度校正系数 c_2	0.010 4	1.686 5	0.092 0
上层厚度校正系数 c_3	-1.012 8	1.619 1	0.105 7
下层自由水容量校正系数 p_{LZFWM}	0.949 1	1.169 4	0.242 5
上层张力水容量校正系数 p_{UZTWM}	1.259 9	0.534 7	0.592 9
马斯京根法蓄量常数 K_{mus}/h	27.793 0	0.437 8	0.661 6
划分雨雪的温度阈值 $T_{st}/^{\circ}C$	1.794 9	0.403 2	0.686 9
下层基本自由水出流系数校正系数 p_{LZPK}	1.013 2	0.207 7	0.835 5
马斯京根法流量比重因子 X_{mus}	0.086 8	-0.342 3	0.732 2
下层附加自由水出流系数校正系数 p_{LZSK}	1.113 2	-0.405 9	0.684 9
度日因子 $M_t/(mm \cdot K^{-1} \cdot d^{-1})$	3.990 0	-0.477 1	0.633 4
上层向下层下渗水量中补给下层自由水比例校正系数 p_{PFREE}	0.975 8	-0.797 7	0.425 2
上层自由水容量校正系数 p_{UZFWM}	0.866 9	-0.836 9	0.402 8
上层自由水出流系数校正系数 p_{UZK}	0.737 1	-1.186 6	0.235 6
下层张力水容量校正系数 p_{LZTWM}	1.199 6	-1.874 5	0.061 1
下渗曲线指数校正系数 p_{REXP}	1.028 8	-2.047 7	0.040 8

最不敏感的是下渗曲线指数校正系数。综合分析文献[16]和本文结果可见,上层厚度校正系数的敏感性较大表明不同流域间不宜直接移用这 3 个经验系数,而改变下渗曲线指数值则对下渗曲线形状的影响不大。

3.4 利用蒸散量率定的 GSAC 模型模拟效果分析

采用表 1 参数驱动的 GSAC 模型模拟的呼兰河流域蒸散量与兰西站流量如图 3 ~ 6 所示,其中:图 3 是对冠层截留蒸发量、积雪蒸发量、上层张力水蒸发量、下层张力水蒸发量及总蒸散量的模拟结果,

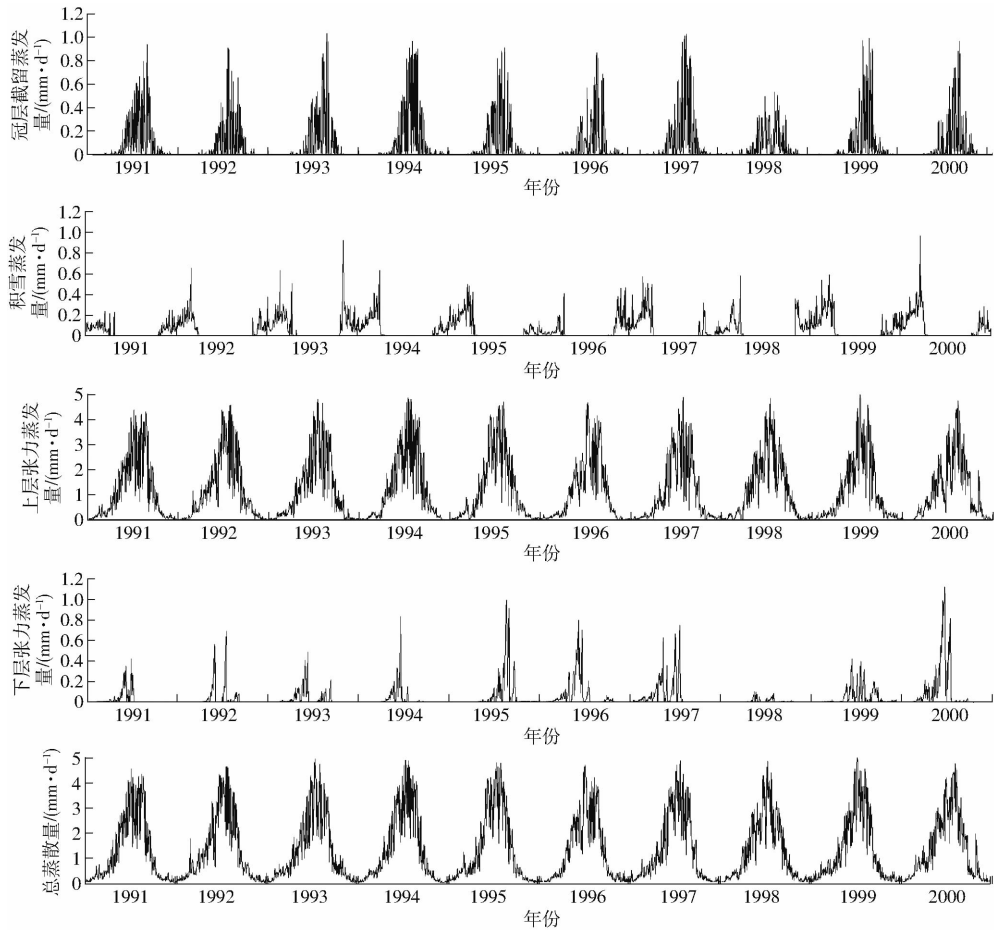


图 3 GSAC 模型模拟的各种蒸散量逐日变化过程

Fig.3 Evapotranspiration simulated by GSAC model calibrated with ET from GLDAS

每种蒸散量的逐日数据为全流域 60"分辨率网格数据的平均值;图 4 为将 GSAC 模型模拟的 1991—2000 年逐日 60"分辨率蒸散量转换为 0.25°分辨率逐月值后,与 GLDAS 蒸散量系列的对比情况;图 5 为以 1996 年 8 月为例,模拟的 60"与 0.25°分辨率蒸散量(后者由前者转换而成)以及提取的 GLDAS 蒸散量;图 6 为模拟与实测的逐日流量对比情况,模拟精度如表 2 所示。

由图 3 可见,利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC

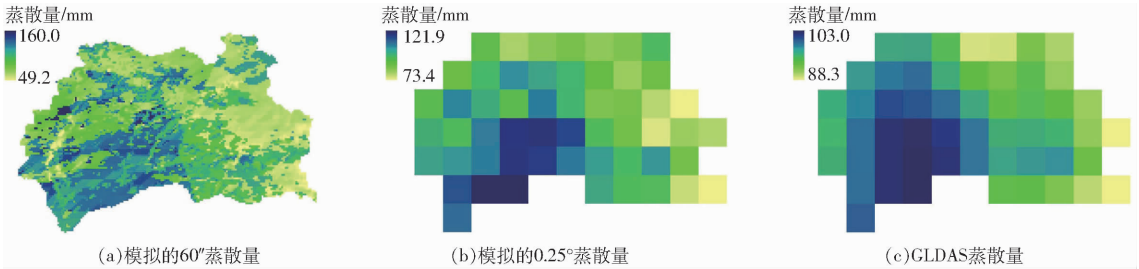


图 5 GSAC 模型模拟的蒸散量与 GLDAS 蒸散量的空间分布对比图

Fig.5 Spatial distribution comparisons of month ET of GLDAS and simulation results from GSAC model calibrated wih ET from GLDAS

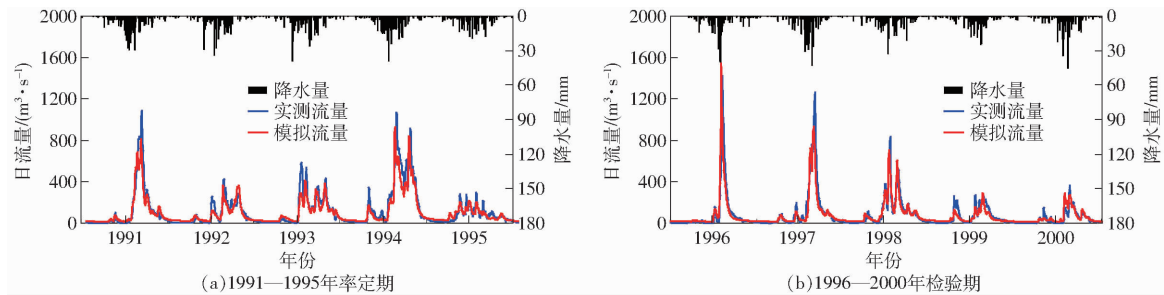


图 6 利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型模拟的兰西站日流量过程

Fig.6 Runoff simulation results of GSAC model at Lanxi station calibrated wih ET from GLDAS

表 2 利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型对兰西站日流量过程的模拟精度

Tab.2 Runoff simulation accuracy of GSAC model calibrated wih ET from GLDAS at Lanxi station

参数	1991 年	1992 年	1993 年	1994 年	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年
NS_{ET}	49.84	49.23	50.10	50.05	48.41	48.69	49.31	48.89	47.35	44.70
NS_Q	0.88	0.78	0.80	0.84	0.75	0.65	0.85	0.88	0.75	0.73
$NS_Q^{[16]}$	0.88	0.78	0.82	0.90	0.67	0.81	0.91	0.90	0.75	0.76

模型能够模拟各网格的多种蒸散量逐日变化过程。经统计,在 1991—2000 年期间,上层张力水蒸发量、截留蒸发量、积雪蒸发量、下层张力水蒸发量分别占总蒸散量的 86.69%、6.11%、4.65%、2.55%;截留蒸发量、积雪蒸发量与下层张力水蒸发量的数量相当且数值较小;上层张力水蒸发量为总蒸散量的主体,二者变化趋势十分接近;积雪蒸发量和下层张力水蒸发量均存在不连续现象,且积雪蒸发量具有季节性变化规律,与呼兰河流域的降雪、融雪期相一致。

图 4 表明,利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型模拟的蒸散量系列总体上与 GLDAS 蒸散量系列符合较好,经计算二者相关系数在率定期为 0.967 7,检

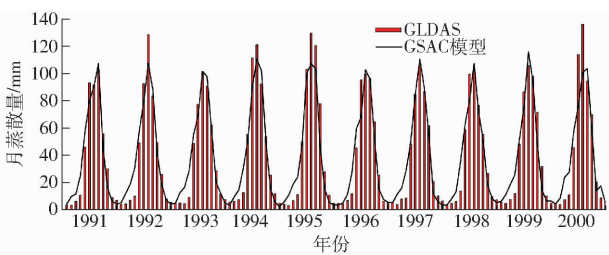


图 4 GSAC 模型模拟的月蒸散量与 GLDAS 月蒸散量对比图

Fig.4 Comparison of month ET of GLDAS and simulation results from GSAC model calibrated wih ET from GLDAS

验期为 0.954 6,平均为 0.961 2,高于文献[6—9]中的各种模拟指标与实测(或遥感)指标间的相关系数。经统计,在 1991—2000 年间,实测的多年平均降水量和径流量分别为 578.2、114.4 mm,GSAC 模型模拟多年平均蒸散量为 472.0 mm,GLDAS 蒸散量多年平均值为 480.2 mm,可见,GSAC 模型模拟蒸散量、GLDAS 蒸散量均与实测降水量与径流量之差 463.8 mm 接近。

由图 5a 可以看出,利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型模拟的蒸散量在空间分布更加细腻,当合并为 0.25°分辨率的较大网格数值后,与 GLDAS 蒸散量空间分布规律相近,上游山区数值偏小,下游平原区数值较大;在数值大小和空间分布两方面,模

拟的各网格蒸散量与提取的各网格 GLDAS 蒸散量较接近,这是本文利用 GLDAS 蒸散量能够较好率定 GSAC 模型的主要原因,即在率定模型过程中,参数的取值力图使得率定期的各月份中,每个 0.25°网格内的两种蒸散量尽量接近。

结合式(8)和表 2 可以看出,利用 GLDAS 蒸散量率定的 GSAC 模型模拟的蒸散量与 GLDAS 蒸散量拟合良好,经统计,在 55 个 0.25°的网格尺度内,单个网格的 NS_{ET} 在率定期平均为 0.88 ~ 0.91,验证期平均为 0.81 ~ 0.90。结合图 6 和表 2 还可以看出,GSAC 模型模拟的流量与实测流量符合情况较好,能再现呼兰河流域的实测日流量过程,在率定期与验证期的 NS_Q 平均值分别为 0.81 和 0.77;除 1996 年模拟精度稍低外,其他年份均达到了乙精度等级,且 1991 年、1997 年、1998 年均达到了甲精度等级。文献[16]利用流量率定模型时,率定期与验证期的 NS_Q 平均值分别为 0.81 和 0.83,验证期的 NS_Q 高于本文,但本文的流量模拟结果是在利用蒸散量率定模型后取得的,对流量的模拟精度稍低也是可以接受的。与文献[6-9]相比,GSAC 模型模拟的蒸散量与 GLDAS 蒸散量之间,以及 GSAC 模型模拟流量与实测流量间的 NS 均更高。综上所述,本文与文献[16]的模拟结果相近,进一步表明了利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型的可行性。

4 结论

(1)以网格为计算单元的 GSAC 模型能够很好地与降水、地形、土地覆被、NDVI、土壤属性等各种网格数据集融合,模型模拟的蒸散量可以通过程序转换为 0.25°分辨率的月份值,从而与 GLDAS 提供的蒸散量在时空分辨率方面相对应,给利用 GLDAS 蒸散量率定水文模型带来了很多便利,为缺流量资料流域的水文过程模拟提供了一个结构简单、参数较少、利用多源数据集即可驱动和率定的模型工具。

(2)呼兰河流域应用结果表明,利用 GLDAS 蒸散量率定 GSAC 模型的方法是可行的,所模拟的蒸散量在数值大小和空间分布方面均与 GLDAS 蒸散量接近;在率定期与验证期的流量系列模拟中,纳什效率系数分别为 0.81 和 0.77,与利用流量数据率定的 GSAC 模型模拟结果接近,为缺流量资料流域的水文模型率定提供了一种可行方法。

(3)在缺流量资料情况下,GLDAS 蒸散量是率定 GSAC 模型的一种有效数据,除蒸散量数据外,GLDAS 还提供了径流、土壤水分等近 30 种网格化的指标数据,在经过检验修正后,部分指标数据均可作为率定水文模型(或其部分模块)参数的基础数据。

参 考 文 献

- 1 谈戈,夏军,李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 192-196.
TAN Ge, XIA Jun, LI Xin. Hydrological prediction in ungauged basins[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 192-196. (in Chinese)
- 2 刘苏峡,夏军,莫兴国. 无资料流域水文预报(PUB 计划)研究进展[J]. 水利水电技术, 2005, 36(2): 9-12.
LIU Suxia, XIA Jun, MO Xingguo. Advances in predictions in ungauged basins [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(2): 9-12. (in Chinese)
- 3 李红霞. 无径流资料流域的水文预报研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 4 伊璇,周丰,周璟,等. 区划方法在无资料地区水文预报中的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(4): 21-27.
YI Xuan, ZHOU Feng, ZHOU Jing, et al. Application of regionalization in hydrological forecasting for ungauged basins [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(4): 21-27. (in Chinese)
- 5 刘昌明,白鹏,王中根,等. 稀缺资料流域水文计算若干研究:以青藏高原为例[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 272-282.
LIU Changming, BAI Peng, WANG Zhonggen, et al. Study on prediction of ungaged basins; a case study on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 272-282. (in Chinese)
- 6 IMMERZEEL W W, DROOGERS P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3): 411-424.
- 7 潘登,任理,王英男. 漳卫河平原农业水资源高效利用的模拟研究 I. 参数率定和模拟验证[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 13-19.
PAN Deng, REN Li, WANG Yingnan. Study on utilization of agricultural water resources with high efficiency in Zhangwei River plain I. parameter calibration and validation[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5): 13-19. (in Chinese)
- 8 潘登,任理. 分布式水文模型在徒骇马颊河流域灌溉管理中的应用 I. 参数率定和模拟验证[J]. 中国农业科学, 2012, 45(3): 471-479.
PAN Deng, REN Li. Application of distributed hydrological model in irrigation management of Tuhai-Majia River basin I. parameter calibration and validation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(3): 471-479. (in Chinese)
- 9 潘登,任理,刘钰. 应用分布式水文模型优化黑龙港及运东平原农田灌溉制度 I: 模型参数的率定验证[J]. 水利学报,

- 2012, 43(6): 717–725.
- PAN Deng, REN Li, LIU Yu. Application of distributed hydrological model for optimizing irrigation regime in Heilong-gang and Yundong plain I. model calibration and validation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 717–725. (in Chinese)
- 10 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36–42. WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 36–42. (in Chinese)
- 11 戚颖. 三江平原典型流域土地覆被变化对水资源的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015. QI Ying. Research on the effects of land cover change of typical basin in Sanjiang plain[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015. (in Chinese)
- 12 白雪峰, 王斌, 戚颖. 土地覆被变化对径流量影响的 GSAC 模型分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 257–264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170732&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.032. BAI Xuefeng, WANG Bin, QI Ying. Impacts of land cover change on runoff based on grid-based Sacramento model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 257–264. (in Chinese)
- 13 HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96–99.
- 14 ZHOU M, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth–Wallace model and NOAA–AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327: 151–173.
- 15 RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U E A, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381–394.
- 16 王斌, 丁星臣, 黄金柏, 等. 基于 HWSO 的 GSAC 模型网格化产流参数估计与校正[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 250–256, 249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170931&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.031. WANG Bin, DING Xingchen, HUANG Jinbai, et al. Grid runoff parameters estimation and adjustment of GSAC model based on HWSO[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 250–256, 249. (in Chinese)
- 17 MO Xingguo, LIU Suxia, LIN Zhonghui, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285: 125–142.
- 18 BORMANN K J, EVANS J P, MCCABE M F. Constraining snowmelt in a temperature-index model using simulated snow densities[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 652–667.
- 19 PENEV K, LITTLEFAIR G. Free search—a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005, 172(1–2): 173–193.
- 20 王斌, 黄金柏, 宫兴龙, 等. Free Search 算法率定的 Sacramento 模型在东北寒旱区的应用[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 171–177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160622&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.022. WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong, et al. Application of Sacramento model calibrated by Free Search algorithm in cold and arid region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 171–177. (in Chinese)

(上接第 404 页)

- 16 WANG Y Y, GU L Y, XU Y H, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6194–6204.
- 17 YU S H, YU X H, SHIRINZADEH B, et al. Continuous infinite time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. Automatica, 2005, 41(11): 1957–1964.
- 18 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- 19 WAN K G, WU A G, LIU H T, et al. Trajectory tracking of 3-DOF spatial robot manipulator[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2016: 3259–3264.
- 20 丁力, 马瑞, 单文桃, 等. 小型无人直升机航向线性自抗扰控制[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 22–27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170502&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.002. DING L, MA R, SHAN W T, et al. Linear active disturbance rejection control for yaw channel of small-scale unmanned helicopter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 22–27. (in Chinese)