

基于LWHM-LUCC模型的澜沧江流域径流模拟

余涛¹, 谢平^{1*}, 桑燕芳², 吴子怡¹, 吴林倩¹, 王路¹

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京

Email: 2649104339@qq.com, *pxie@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年4月26日; 录用日期: 2021年5月28日; 发布日期: 2021年6月18日

摘要

近几十年来, 受变化环境的影响, 澜沧江流域的径流发生了显著的变化。为了更好地对澜沧江流域的径流变化进行模拟和预测, 构建了二水源和三水源LWHM-LUCC模型, 采用1986~2004年资料进行径流模拟, 通过比较两个模型的年径流和月径流模拟结果, 评价两者在澜沧江流域的适用性。结果表明: 二水源和三水源LWHM-LUCC模型年径流的模拟效果基本相同, 三水源LWHM-LUCC模型月径流的模拟效果优于二水源LWHM-LUCC模型; 二水源和三水源LWHM-LUCC模型在汛期的径流模拟效果均优于非汛期, 尤其是7月的径流模拟效果最好。

关键词

LWHM-LUCC模型, 澜沧江流域, 径流模拟, 水源划分

Runoff Simulation in the Lancang River Basin Based on LWHM-LUCC Model

Tao Yu¹, Ping Xie^{1*}, Yanfang San², Ziyi Wu¹, Linqian Wu¹, Lu Wang¹

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: 2649104339@qq.com, *pxie@whu.edu.cn

Received: Apr. 26th, 2021; accepted: May 28th, 2021; published: Jun. 18th, 2021

Abstract

The runoff in the Lancang River basin has undergone significant changes due to the changing environ-

作者简介: 余涛(1996-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向是变化环境下的水文水资源研究。

*通讯作者。

文章引用: 余涛, 谢平, 桑燕芳, 吴子怡, 吴林倩, 王路. 基于 LWHM-LUCC 模型的澜沧江流域径流模拟[J]. 水资源研究, 2021, 10(3): 250-260. DOI: 10.12677/jwrr.2021.103027

ment in recent decades. Two-water Sources and Three-water Sources Lumped Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change (LWHM-LUCC) were constructed, and the data from 1986 to 2004 were used to calibrated and verify the models. The results show that: annual runoff simulation effect of the two-water sources and three-water sources LWHM-LUCC model is basically the same, and the monthly runoff simulated by the three-water sources LWHM-LUCC model is better than that of the two-water sources LWHM-LUCC model, which indicates that three-water sources LWHM-LUCC model has better applicability; the two-water sources and three-water sources LWHM-LUCC model have better runoff simulation effects in the flood season than in the non-flood season, especially the runoff simulation effect in July is the best.

Keywords

LWHM-LUCC Model, Lancang River Basin, Runoff Simulation, Water Source Division

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

近年来,在气候变化和人类活动的双重作用下,流域径流发生了不可忽视的变化[1]。研究表明,中国六大流域的径流量均呈现下降的趋势,这进一步加剧了中国水资源不足的严峻形势,严重影响了我国社会经济的发展[2]。因此,开展流域径流变化的模拟与预测对于流域水资源的合理开发与利用具有重要的现实意义。

水文模型是流域径流模拟的重要工具,一般可分为集总式水文模型和分布式水文模型两大类,其中,集总式水文模型将流域视为一个整体,对模型的参数和资料输入采用平均化处理;分布式水文模型则将流域划分为若干个互不嵌套的单元,对每个单元采用不同的模型参数和输入资料进行水文模拟[3]。分布式水文模型具有较强的物理机制,能够较为准确地描述流域的水文过程,但由于模型复杂度和输入资料限制使其在实际应用中存在很大的困难;而集总式水文模型结构简单,对输入资料的要求较低,具有相对较高的模拟精度,因此在流域径流模拟中具有不可忽视的优势[4][5]。近年来,人类活动引起的土地利用/覆被变化日益剧烈,其对流域水文过程的影响受到越来越多的关注,因此谢平等人提出了考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型(Lumped Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change,简称 LWHM-LUCC);相较于其他集总式水文模型,LWHM-LUCC 模型考虑了流域下垫面的空间差异,将流域下垫面划分为不同土地利用类型分别进行水文模拟,从而便于定量评估土地利用/覆被变化的水文水资源效应[6]。谢平等人应用二水源 LWHM-LUCC 模型对于干旱半干旱地区的无定河流域进行径流模拟,结果证明 LWHM-LUCC 模型具有较好的适用性;然而二水源划分无法准确地反映所有湿润地区的流域径流过程,因此本文将二水源 LWHM-LUCC 模型改进为三水源 LWHM-LUCC 模型对湿润地区的流域进行径流模拟,使 LWHM-LUCC 模型具有更广泛的适用性。

澜沧江是连接中国和东南亚五国的重要纽带,其径流变化对六国的农业、渔业、航运、水电和生态等方面都有显著影响,因此流域的径流变化等问题逐渐成为国内外学者的研究热点[7][8]。尤卫红等[9]应用相关分析和时间小波变换的分析方法,研究了云南境内澜沧江月径流量变化的相关性特征和多时间尺度特征,结果表明澜沧江月径流量变化表现出了十分明显的多时间尺度变化特征。李扬等[10]基于澜沧江-湄公河干流 8 个水文站 1960~2012 年的实测径流资料,采用 Mann-Kendall 趋势检验及有序聚类突变诊断方法分析了径流时空演变特征,结果表明澜沧江流域径流呈现显著的变化。在此背景下,本文在参考文献[8]的基础上,通过构

建二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型对澜沧江流域进行年尺度和月尺度径流模拟,对比分析二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型的径流模拟效果,评价两者在澜沧江流域的适用性,为流域水资源规划和管理提供科学依据。

2. 研究区与数据

澜沧江流域位于我国西南地区,地理位置为东经 94°~102°,北纬 21°~33°,发源于青藏高原唐古拉山脉,依次流经青海、西藏和云南三省(区)。流域由北向南呈条带状分布,上下游较宽,中游狭窄。流域整体属于西部型季风气候,受季风影响显著,雨季、旱季分明,一般 5 月~10 月为雨季,11 月~次年 4 月为旱季,全年约 85% 的降水量集中在雨季,其中,6~8 月最为集中[11][12]。流域径流以降水补给为主,地下水和融雪补给为辅,径流的年内分配规律与降水分配规律较为相似,一般汛期为 6 月~10 月,非汛期为 11 月~次年 5 月[13][14]。本文选用流域出口控制站——允景洪站以上子流域为研究对象,子流域面积约为 16.69 万 km²,干流长度约为 2162 km,可以较好地代表澜沧江流域的整体情况,如图 1 所示。

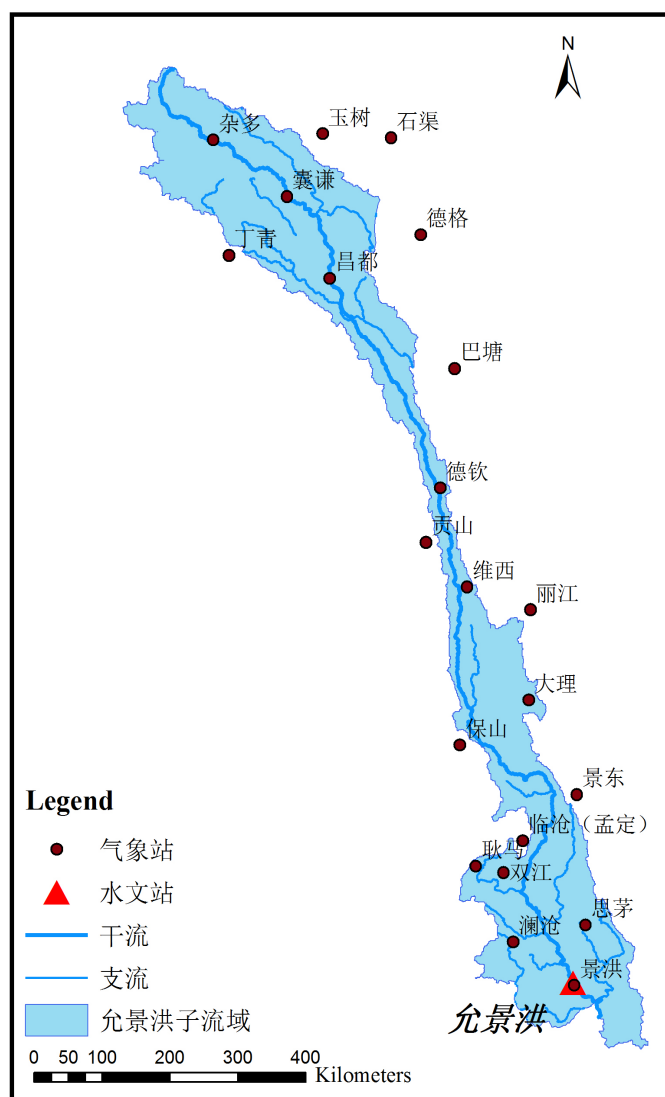


Figure 1. Sketch of the Lancang River basin
图 1. 澜沧江流域示意图

LWHM-LUCC 模型的构建需要输入的数据包括气象数据、水文数据和土地利用数据, 如表 1 所示。其中, 气象数据包括降水和蒸发数据, 根据流域内及周边的 21 个气象站(如图 1 所示)的点数据采用泰森多边形法计算得到面平均数据; 土地利用数据包括 1980 年代末期、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年五期, 根据中国科学院土地利用分类系统[15]将流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地六类。

Table 1. The introduction of the LWHM-LUCC model input data

表 1. LWHM-LUCC 模型输入数据介绍

| 数据名称 | 数据说明 | 数据来源 |
|--------|---------------------------|-----------------|
| 气象数据 | 21 个气象站日尺度数据(1961~2014 年) | 中国气象网 |
| 水文数据 | 允景洪站日尺度径流数据(1961~2014 年) | 云南省水文局 |
| 土地利用数据 | 1:100 万遥感影像数据 | 中国科学院资源环境科学数据中心 |

3. LWHM-LUCC 模型的构建

3.1. 模型结构

LWHM-LUCC 模型主要包括土地利用分类、产流计算、蒸散发计算和汇流计算四个部分, 二水源和三水源模型结构如图 2 所示。为了反映流域不同下垫面的产流过程差异, 同时避免模型参数过多而造成参数率定困难, 模型将流域土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地六类, 使用不同的模型参数分别进行产流计算; 在不同的土地利用类型上, 采用蓄满-超渗兼容产流模型[4] [16]进行产流计算, 并采用三层模型计算其蒸散发; 假设不同土地利用类型上各径流成分的汇流作用相同, 对其产流量统一进行汇流计算, 分别采用逆高斯分布地貌模型[17]和线性水库模型对地表径流和地面以下径流(壤中流和地下径流)进行汇流计算。在水源划分上, 二水源模型将径流划分为地表和地面以下径流两种成分, 三水源模型将二水源模型中的地面以下径流进一步分为壤中流和地下径流, 从而划分出地表径流、壤中流和地下径流三种成分, 二水源模型和三水源模型的区别主要在产流部分。

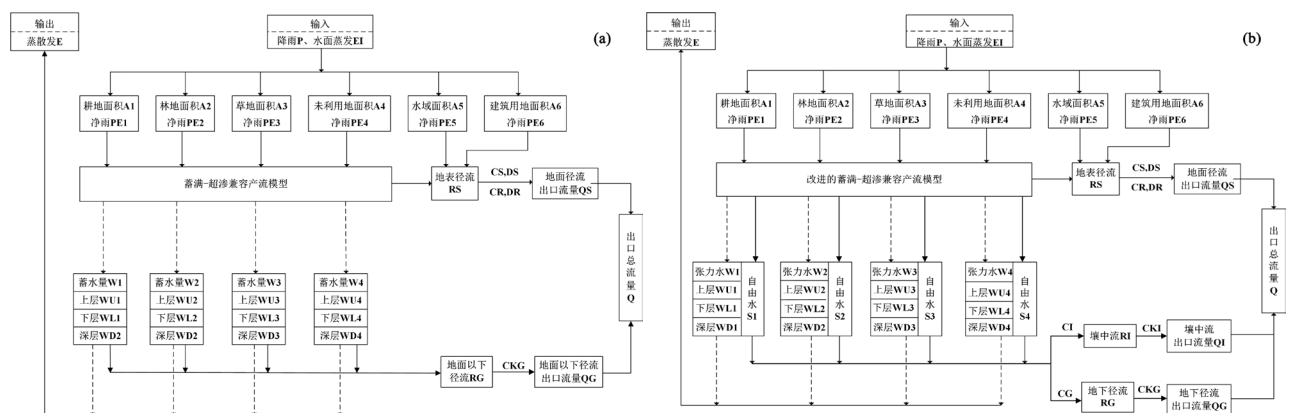


Figure 2. Structure of the LWHM-LUCC model (a) two-water sources model; (b) three-water sources model

图 2. LWHM-LUCC 模型结构图(a) 二水源模型; (b) 三水源模型

雒文生等[16]针对半干旱半湿润地区提出的二水源产流模型, 即蓄满-超渗兼容产流模型(简称兼容模型), 结构如图 3 所示。兼容模型将蓄满产流和超渗产流两种模式有机结合, 根据超渗产流和流域下渗能力曲线计算

地表径流的产流量，根据蓄满产流模式和流域蓄水容量曲线计算地面以下径流的产流量。胡彩虹等[4]结合新安江三水源模型和水箱模型的特点，将二水源兼容模型改进为三水源兼容模型。在三水源兼容模型中，地表径流的产流计算保持不变，然后将原地面以下径流的产流量进入自由水蓄水库，根据自由水蓄水容量曲线计算壤中流和地下径流的产流量。

逆高斯分布地貌模型是基于流域地貌特征的概念性汇流模型，采用统计学方法——逆高斯分布来研究流域水流质点在坡面和河道的运动过程，具有较为明确的物理依据。逆高斯分布导出于在给定瞬时点输入后独立单一方向颗粒(或质点)移动的到达时间，这种颗粒的运动起因于微小独立随机增量，而且增量的分布与颗粒位置无关[6]。逆高斯分布地貌模型的瞬时单位线为

$$h(t) = \left[\frac{\mu\pi}{2\pi t^3} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{\mu\varphi}{2t} + \varphi - \frac{\varphi t}{2\mu} \right] \quad (1)$$

式中：概念性参数 $\mu = L/C$ ， $\varphi = CL/2D$ ，其中， L 为洪水波在坡面或河道的传播距离， C 为洪水波的波速， D 为洪水波的扩散系数，在坡面汇流时， L 可以近似取为 $F/2l$ ，其中 F 和 l 分别为流域面积与干流长度。

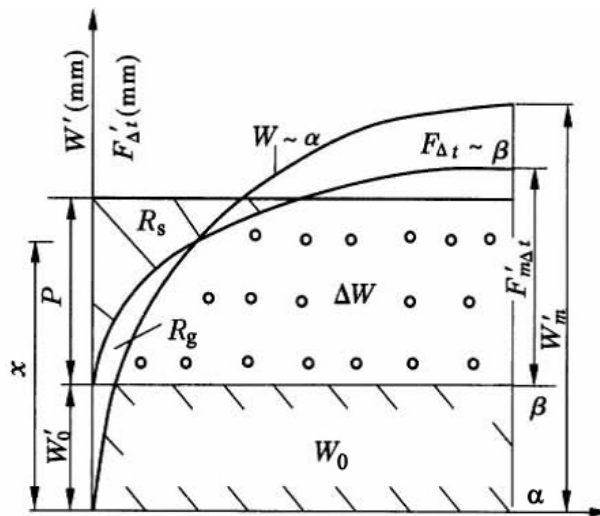


Figure 3. Structure of the runoff yield model coupling of saturated storage and excess infiltration

图3. 蓄满-超渗兼容产流模型结构示意图

线性水库模型的瞬时单位线为

$$h(t) = \frac{1}{K} \exp \left(-\frac{t}{K} \right) \quad (2)$$

式中： K 为蓄泻系数(滞时)，在三水源模型汇流计算中，当计算壤中流时， K 取为 KI ，当计算地下径流时， K 取为 KG 。

3.2. 模型参数

LWHM-LUCC 模型参数可以分为产流参数、蒸散发参数和汇流参数三类，其中二水源模型参数共 22 个，包括产流参数 BN 、 BM 、 FC_i 和 CK_i ($i = 1 \sim 4$)，蒸散发参数 WM 、 CC 和 CE_i ($i = 1 \sim 5$)，汇流参数 CS 、 DS 、 CR 、 DR 和 CKG ；三水源模型参数共 27 个，在二水源模型参数基础上增加了产流参数 SM 、 EX 、 CI 、 CG 和汇流参数 CKI ，各参数具体物理意义如表 2 所示。

Table 2. LWHM-LUCC model parameters
表 2. LWHM-LUCC 模型参数

| 二水源模型参数 | 三水源模型参数 | 参数下限 | 参数上限 | 参数物理意义 |
|-----------------|-----------------|------|-------|-------------------------------|
| WM | WM | 40 | 150 | 流域平均蓄水容量(mm) |
| BN | BN | 0.01 | 2 | 流域蓄水容量曲线指数 |
| BM | BM | 0.01 | 2 | 流域下渗容量曲线指数 |
| CC | CC | 0.01 | 0.3 | 深层蒸散发系数 |
| CE ₁ | CE ₁ | 0.01 | 2 | 林地蒸发皿折算系数 |
| FC ₁ | FC ₁ | 1 | 6 | 林地稳定下渗率(mm) |
| CK ₁ | CK ₁ | 0.01 | 1 | 林地下渗能力曲线指数 |
| CE ₂ | CE ₂ | 0.01 | 2 | 草地蒸发皿折算系数 |
| FC ₂ | FC ₂ | 1 | 6 | 草地稳定下渗率(mm) |
| CK ₂ | CK ₂ | 0.01 | 1 | 草地下渗能力曲线指数 |
| CE ₃ | CE ₃ | 0.01 | 2 | 耕地蒸发皿折算系数 |
| FC ₃ | FC ₃ | 1 | 6 | 耕地稳定下渗率(mm) |
| CK ₃ | CK ₃ | 0.01 | 1 | 耕地下渗能力曲线指数 |
| CE ₄ | CE ₄ | 0.01 | 2 | 未利用地蒸发皿折算系数 |
| FC ₄ | FC ₄ | 1 | 6 | 未利用地稳定下渗率(mm) |
| CK ₄ | CK ₄ | 0.01 | 1 | 未利用地下渗能力曲线指数 |
| CE ₅ | CE ₅ | 0.01 | 2 | 水域蒸发皿折算系数 |
| - | SM | 10 | 50 | 自由水蓄水容量(mm) |
| - | EX | 1 | 1.5 | 自由水蓄水容量曲线指数 |
| - | CI | 0.01 | 0.7 | 壤中流出流系数 |
| - | CG | 0.01 | 0.7 | 地下水出流系数 |
| CS | CS | 0.01 | 5 | 坡面洪水波波速(m/s) |
| DS | DS | 1 | 10 | 坡面洪水波扩散系数(km ² /h) |
| CR | CR | 0.01 | 10 | 河道洪水波波速(m/s) |
| DR | DR | 1 | 20 | 河道洪水波扩散系数(km ² /h) |
| - | CKI | 0.01 | 0.9 | 壤中流日消退系数 |
| CKG | CKG | 0.95 | 0.999 | 地下(地面以下)径流日消退系数 |

注：建筑用地视为不透水面积，不考虑蒸发和下渗过程，产生的降雨直接转化为地表径流，而水域不考虑下渗过程。

4. 模型模拟及结果分析

4.1. 参数率定与模型评价

在模型参数率定过程中，常用的方法有 SCE-UA 法、基因法、罗森布瑞克法和单纯形法，其中，罗森布瑞克法的收敛速度最快，单纯形法和 SCE-UA 法次之，基因法最慢；SCE-UA 法和基因法对参数初值的要求较低，而罗森布瑞克法和单纯形法对参数的要求较高；单纯形法和 SCE-UA 法的精度较高，罗森布瑞克法次之，基因法略差[18][19]。综合上述几种方法的优点，本文先采用 SCE-UA 法的率定结果作为参数初值，然后使用单纯形法进一步率定，从而得到最优的参数结果，其目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - R_{sim,i})^2 \tag{3}$$

式中： $R_{obs,i}$ 、 $R_{sim,i}$ 分别为第 i 年(月)的实测径流深和模拟径流深， n 为总年(月)数。

本文采用水量平衡系数 R 、径流深合格率 $DR(\%)$ 和纳什效率系数 NSE 作为模型精度的评价指标， R 定义为模型模拟期内模拟总径流深与实测总径流深的比值， $DR(\%)$ 定义为合格的年(月)份在整个模型模拟期的占比，一般认为计算径流深与实测径流深的相对误差小于 20%就是合格的[8]，可以表示为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_{sim,i}}{\sum_{i=1}^n R_{obs,i}} \tag{4}$$

$$DR(\%) = n_q / n \times 100\% \left(n_q = |R_{obs,i} - R_{sim,i}| / R_{obs,s} \leq 20\% \right) \tag{5}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - R_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - R_{obs,avg})^2} \tag{6}$$

式中： $R_{obs,i}$ 、 $R_{sim,i}$ 和 n 的意义与公式(3)相同， n_q 为实测径流深与模拟径流深的相对误差小于 20%的年(月)数， $R_{obs,avg}$ 为实测年(月)径流深的平均值。

一般来说，水量平衡系数 R 越接近于 1，表示模拟的总径流深与实测的总径流深越接近；而径流深合格率 $DR(\%)$ 越接近 100%，纳什效率系数 NSE 越接近于 1，表示表明模拟的径流过程越接近于实测径流过程。

4.2. 年径流模拟

选用澜沧江流域 1961~2004 年的水文资料进行模型的参数率定和检验，其中，1991~2004 年的土地利用数据精度相对较高，1985~1990 年的土地利用数据精度相对较差。本文以 1991~2004 年作为率定期，以 1985~1990 年作为检验期，分别应用二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型对澜沧江流域的年径流进行模拟，率定期和检验期的年径流模拟结果如图 4 所示，年径流模拟结果评价如表 3 所示。根据图 4 和表 3 分析可知：率定期和检验期的水量平衡系数均近似于 1，径流深合格率均为 100%，纳什效率系数均大于 0.88，二水源和三水源的模拟精度相差较小，且两者的模拟年径流过程与实测年径流过程均较为接近，结果说明二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型的年径流模拟效果基本相同，均具有较高的模拟精度。

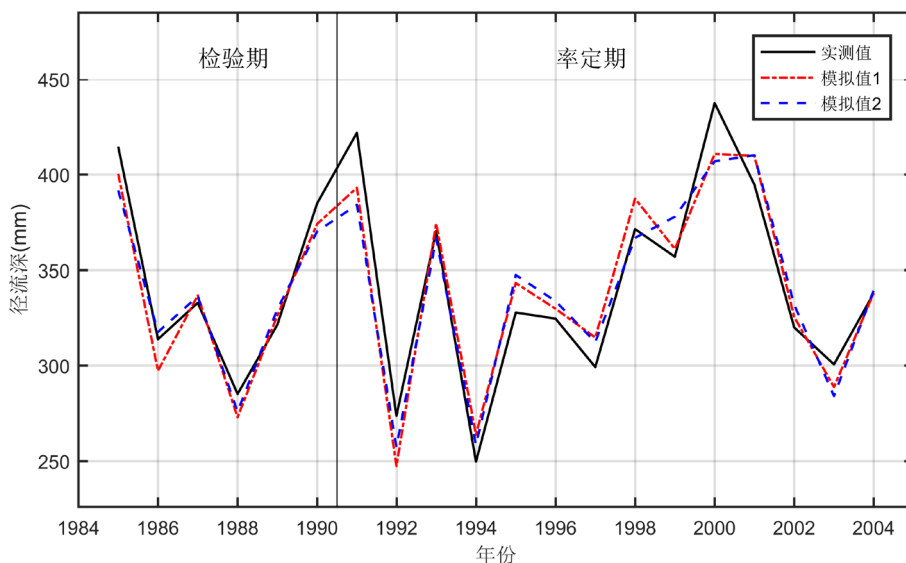


Figure 4. Annual runoff simulation results of the Lancang River basin (Simulation value 1 and 2 correspond to the annual runoff simulation values of two-water sources and three-water sources model respectively)

图 4. 澜沧江流域年径流模拟结果(模拟值 1 和模拟值 2 分别对应二水源和三水源模型的年径流模拟值)

Table 3. Evaluation of annual runoff simulation results of the Lancang River basin
表 3. 澜沧江流域年径流模拟结果评价

| 模型类别 | 时期 | 水量平衡系数 | 径流深合格率/% | 纳什效率系数 |
|-------|----------------|--------|----------|--------|
| 二水源模型 | 率定期(1991~2004) | 1.000 | 100.00 | 0.905 |
| | 检验期(1985~1990) | 0.978 | 100.00 | 0.935 |
| 三水源模型 | 率定期(1991~2004) | 0.998 | 100.00 | 0.882 |
| | 检验期(1985~1990) | 0.985 | 100.00 | 0.921 |

4.3. 月径流模拟

本文继续以 1991~2004 年作为率定期,以 1985~1990 年作为检验期,分别应用二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型对澜沧江流域的月径流进行模拟,率定期和检验期的月径流模拟结果如图 5 所示,月径流模拟结果评价如表 4 所示。根据图 5 和表 4 分析可知:率定期和检验期的水量平衡系数均近似于 1,纳什效率系数均大于 0.90,二水源和三水源模型相差较小,但三水源模型的径流深合格率大于 70%,二水源模型的径流深合格率则约为 50%,且相较于二水源模型,三水源模型的模拟月径流过程与实测月径流过程更为接近,结果说明三水源 LWHM-LUCC 模型的月径流模拟精度较高,而二水源 LWHM-LUCC 模型的月径流模拟精度略差,三水源 LWHM-LUCC 模型的月径流模拟效果优于二水源 LWHM-LUCC 模型。

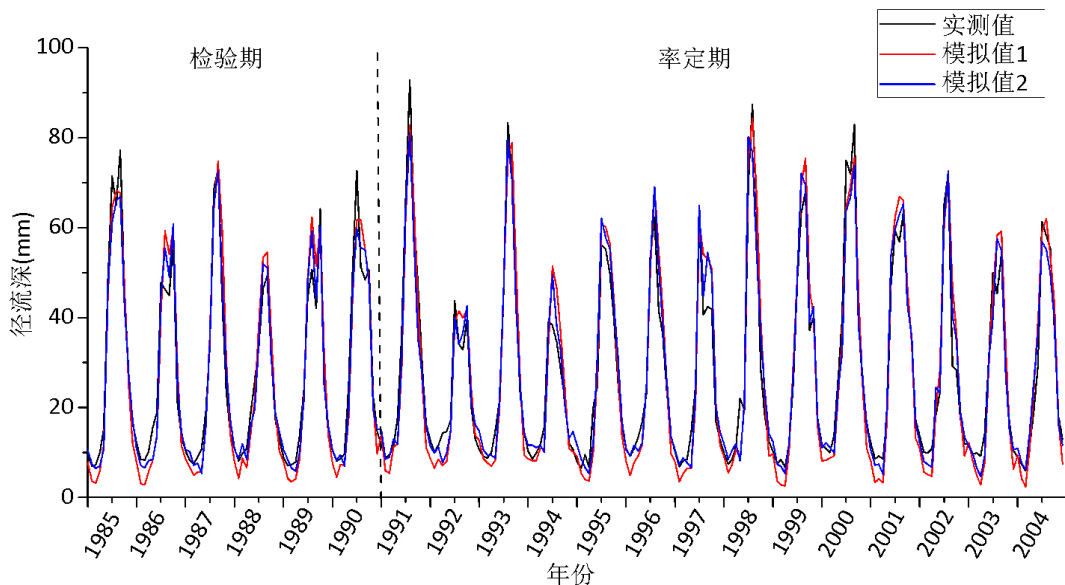


Figure 5. Monthly runoff simulation results of the Lancang River basin (Simulation value 1 and 2 correspond to the monthly runoff simulation values of two-water sources and three-water sources model respectively)

图 5. 澜沧江流域月径流模拟结果(模拟值 1 和模拟值 2 分别对应二水源和三水源模型的月径流模拟值)

Table 4. Evaluation of monthly runoff simulation results of the Lancang River basin
表 4. 澜沧江流域月径流模拟结果评价

| 模型类别 | 时期 | 水量平衡系数 | 径流深合格率/% | 纳什效率系数 |
|-------|----------------|--------|----------|--------|
| 二水源模型 | 率定期(1991~2004) | 0.992 | 53.57 | 0.934 |
| | 检验期(1985~1990) | 0.970 | 50.00 | 0.930 |
| 三水源模型 | 率定期(1991~2004) | 1.004 | 73.21 | 0.953 |
| | 检验期(1985~1990) | 0.979 | 79.17 | 0.963 |

为了进一步分析二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型对澜沧江流域不同月份的径流模拟效果, 分别计算率定期(1991~2004 年)、检验期(1985~1991 年)和模拟期(1985~2004 年)内各月份实测径流深与模拟径流深相对误差的平均值, 如表 5 所示。根据表 5 分析可知: 在二水源模型模拟结果中, 6~11 月三个时期的径流深相对误差均小于 20%, 其中 7 月的径流深相对误差最小, 2~5 月三个时期的径流深相对误差均大于 20%; 在三水源模型模拟结果中, 1~3 月和 6~12 月三个时期的径流深相对误差均小于 20%, 其中 7 月的径流深相对误差最小, 而 5 月三个时期的径流深相对误差均大于 20%; 结果说明二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型在汛期(6~10 月)的径流模拟效果均优于非汛期(11 月~次年 5 月), 尤其是 7 月的径流模拟效果最好, 推测是由于非汛期径流以地下水补给为主, 尽管三水源模型较二水源模型在径流模拟时有一定的提升, 但 LWHM-LUCC 模型不能完全模拟流域的基流过程变化。

Table 5. Relative error of monthly runoff depth in the Lancang River basin (unit: percentage)

表 5. 澜沧江流域月径流深相对误差(单位: %)

| 月份 | 二水源模型 | | | 三水源模型 | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 率定期 | 检验期 | 模拟期 | 率定期 | 检验期 | 模拟期 |
| 1 | 9.38 | 22.38 | 13.28 | -3.73 | -10.66 | -8.58 |
| 2 | 32.86 | 43.40 | 36.02 | -7.07 | -4.93 | -5.57 |
| 3 | 37.65 | 38.93 | 38.04 | 2.73 | 3.81 | 3.49 |
| 4 | 34.55 | 39.50 | 36.04 | 23.27 | 17.01 | 18.89 |
| 5 | 28.05 | 34.42 | 29.96 | 31.90 | 20.19 | 23.70 |
| 6 | -1.61 | 13.87 | 3.04 | 14.77 | -1.99 | 3.04 |
| 7 | -0.24 | 1.55 | 0.30 | 4.38 | -0.27 | 1.13 |
| 8 | -10.31 | -14.22 | -11.49 | -8.88 | -3.29 | -4.97 |
| 9 | -15.24 | -9.37 | -13.48 | -2.85 | -6.36 | -5.31 |
| 10 | -15.74 | -7.82 | -13.37 | 1.00 | -3.91 | -2.44 |
| 11 | -4.13 | -13.13 | -6.83 | -5.23 | -7.08 | -6.53 |
| 12 | 22.67 | 16.68 | 20.88 | -10.23 | -6.04 | -7.30 |

5. 结论与展望

本文构建了澜沧江流域的二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型, 采用 1986~2004 年的资料进行年径流和月径流模拟。主要结论如下:

1) 二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型的年径流模拟效果基本相同, 均具有较高的模拟精度; 三水源 LWHM-LUCC 模型的月径流模拟效果优于二水源 LWHM-LUCC 模型, 三水源模型的模拟精度较高, 二水源模型的模拟精度略差; 说明三水源 LWHM-LUCC 模型在澜沧江流域具有更好的适用性。

2) 二水源和三水源 LWHM-LUCC 模型在汛期的径流模拟效果均优于非汛期, 尤其是 7 月的模拟效果最好。

受某些条件所限, 本文构建 LWHM-LUCC 模型仅对澜沧江流域进行了径流模拟的初步研究, 还存在着一些不足之处, 未来可以考虑在以下方面展开进一步的研究: 基于 LWHM-LUCC 模型对不同的气候和土地利用变化情景进行情景模拟, 研究变化环境下澜沧江流域的径流演变规律, 并分析流域气候和土地利用变化引起的水文水资源效应; LWHM-LUCC 模型在汛期的径流模拟效果较好, 可以应用 LWHM-LUCC 模型对汛期径流进行模拟和预测, 从而为澜沧江流域洪水预报等相关研究提供一定的指导。

基金项目

国家自然科学基金项目(91547205, 41971040, 51579181)。

参考文献

- [1] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672.
ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun, *et al.* Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff change in the Luanhe River catchment. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 664-672. (in Chinese)
- [2] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007(2): 230-234.
ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, *et al.* Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007(2): 230-234. (in Chinese)
- [3] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 1-7, 58.
RUI Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(4): 1-7, 58. (in Chinese)
- [4] 胡彩虹, 王金星, 李析男. 蓄满-超渗兼容水文模型的改进及应用[J]. 水文, 2014, 34(1): 39-45.
HU Caihong, WANG Jinxing and LI Xinan. A modified saturated storage and excess infiltration watershed model and its application. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(1): 39-45. (in Chinese)
- [5] 许波刘, 董增川, 洪娴. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 37-42.
XU Boliu, DONG Zengchuan and HONG Xian. Lumped karst hydrological model and its application. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 37-42. (in Chinese)
- [6] 谢平, 朱勇, 陈广才, 等. 考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用[J]. 山地学报, 2007(3): 257-264.
XIE Ping, ZHU Yong, CHEN Guangcai, *et al.* A lumped watershed hydrological model considering land use and land cover change and its application. *Mountain Research*, 2007(3): 257-264. (in Chinese)
- [7] 孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 澜沧江-湄公河流域水资源利用现状与需求分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 67-73.
SUN Zhouliang, LIU Yanli, LIU Ji, *et al.* Analysis on the present situation and demand of water utilization in the Lancang-Mekong River basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 67-73. (in Chinese)
- [8] 余涛, 谢平, 桑燕芳, 等. 基于 LWHM-LUCC 模型的澜沧江流域径流演变驱动机制分析[J]. 黑龙江大学学报, 2019, 10(4): 1-9.
YU Tao, XIE Ping, SANG Yanfang, *et al.* Driving mechanism analysis of runoff evolution based on LWHM-LUCC model in Lancang River basin. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2019, 10(4): 1-9. (in Chinese)
- [9] 尤卫红, 何大明. 澜沧江月径流量变化的相关性和多时间尺度特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005(4): 314-322.
YOU Weihong, HE Daming. Correlation and multi-timescale characteristics of the monthly variations for Lancang River flow in the region of Yunnan. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2005(4): 314-322. (in Chinese)
- [10] 李杨, 王婕, 唐雄朋, 等. 变化环境下澜沧江-湄公河流域径流演变及年内分配特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 141-148.
LI Yang, WANG Jie, TANG Xiongpeng, *et al.* Characteristics of runoff variation and seasonal pattern of Lancang-Mekong River in the context of the environment change. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 141-148. (in Chinese)
- [11] 陈茜, 孔晓莎. 澜沧江-湄公河流域基础资料汇编[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2000.
CHEN Xi, KONG Xiaosha. *Compilation of basic data on the Lancang-Mekong River basin*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 陈素景, 李丽娟, 李九一, 等. 近 55 年来澜沧江流域降水时空变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 365-373.
CHEN Sujing, LI Lijuan, LI Jiuyi, *et al.* Analysis of the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Lancang River Basin over the past 55 years. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(3): 365-373. (in Chinese)
- [13] 何大明. 澜沧江-湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 1995(1): 58-74.
HE Daming. Analysis of hydrological characteristics in Lancang-Mekong River. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1995(1): 58-74. (in Chinese)
- [14] 柯玮, 谢平, 桑燕芳, 等. 基于 Bai & Perron 结构断点检验的水文分期方法[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 57-67.
KE Wei, XIE Ping, SANG Yanfang, *et al.* Staged hydrological method based on Bai and Perron's multiple structural breaks test. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(2): 57-67. (in Chinese)
- [15] 肖鹏峰, 刘顺喜, 冯学智, 等. 基于遥感的土地利用与覆被分类系统评述及代码转换[J]. 遥感信息, 2003(4): 54-58.
XIAO Pengfeng, LIU Shunxi, FENG Xuezhi, *et al.* Appraisal and code conversion of land use/cover classification systems based on remotely sensed data. *Remote Sensing Information*, 2003(4): 54-58. (in Chinese)
- [16] 雒文生, 胡春歧, 韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 6-13.
LUO Wensheng, HU Chunqi and HAN Jiatian. Research on a model of runoff yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(4): 6-13. (in Chinese)
- [17] 谢平, 梁瑞驹. 逆高斯分布地貌瞬时单位线[J]. 水利学报, 1997(3): 10-16.

- XIE Ping, LIANG Ruiju. An inverse Gaussian distribution geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(3): 10-16. (in Chinese)
- [18] 谭炳卿. 水文模型参数自动优选方法的比较分析[J]. *水文*, 1996(5): 9-12.
TAN Bingqing. A comparative study on optimization methods for calibrating the hydrological models. *Journal of China Hydrology*, 1996(5): 9-12. (in Chinese)
- [19] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. SCE-UA 法在水文模型参数优选中的应用比较[C]//中国水论坛第四届学术研讨会. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 409-413.
GUO Jing, GUO Shenglian, Zhang Jun, *et al.* Comparison of application of SCE-UA method in parameter selection of hydrological models. In the 4th Academic Seminar of China Water Forum. Beijing: China Water & Power Press, 2006: 409-413. (in Chinese)