

王洁, 陈裕迪, 梁峰铭, 等. 基于 CMADS 和流域相似理论的无资料地区水文模拟: 以元江-红河流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 534-544. WANG J, CHEN Y D, LIANG F M, et al. Hydrological simulation based on CMADS dataset and basin similarity in ungauged areas: A case study of Yuanjiang-Red River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 534-544. (in Chinese)

基于 CMADS 和流域相似理论的无资料地区水文模拟

——以元江-红河流域为例

王洁¹, 陈裕迪², 梁峰铭¹, 葛慧¹, 刘森³, 陈家栋⁴, 王丽荣⁵

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 南京 210044; 2. 广德市农业农村局, 安徽 广德 242200;
3. 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029; 4. 江苏省水文水资源勘测局南京分局, 南京 210007;
5. 河北省气象灾害防御和环境气象中心, 石家庄 050021)

摘要: 无水文资料地区, 水文模型的参数难以确定。基于此, 提出一套无资料地区水文模拟的方法体系, 首先利用开源再分析数据驱动水文模型, 然后基于流域相似性理论进行模型参数移植, 完成无资料地区水文模拟。以元江-红河多国跨界流域为例, 将流域划分成 123 个子流域, 基于根据高程、坡度、形状系数、森林覆盖率、降水与蒸散发等指标, 利用主成分分析和流域相似度计算对 123 个子流域进行相似性分析; 再基于水文资料和相似性结果, 将 7 个有流量资料的子流域划分出 4 组相似流域; 对有资料流域进行参数率定和验证, 模拟结果良好, 经过参数移植后, 无资料流域的模拟结果均得到了提高。基于流域相似性的参数区域化和开源再分析数据的无资料地区水文模拟方法, 可以为无资料地区的水文模拟与水资源管理带来更多可能。

关键词: 无资料; CMADS; SWAT 模型; 流域相似性; 参数移植

中图分类号: P343 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0055

水文模拟是干旱、洪涝等极端灾害预警预报和水资源综合利用的有力工具^[1]。全球有 200 多个跨界流域, 水文气象测站稀疏、跨界流域数据共享难^[2-4]等问题导致跨界流域水文气象资料匮乏, 给流域水文模拟造成极大障碍。无资料地区水文模拟是目前水文学家亟待解决的难题^[5-6]。

自国际水文科学协会正式提出 PUB 计划 (prediction in ungauged basins) 以来, 无资料地区水文模拟研究取得了一定的发展, 集总式水文模型常被应用于无资料地区水文模拟研究, 而分布式水文模型在无资料地区的应用是目前研究的难点^[7-10]。其中, 水文模型的参数区域化是无资料地区水文模拟的主要方法^[7-9], 但多数研究集中于研究相邻两个流域间的相似性^[7,10], 而基于流域地理特征的多个流域与其子流域之间的水文相似度研究较少^[9,11]。近年来, 卫星遥测、数据同化融合等技术衍生的系列

水文气象再分析资料^[12-14]也推动了无资料地区水文模拟的研究, 其中中国自主研发的 CMADS (the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model) 产品拥有极高的时空分辨率, 在亚洲地区应用效果良好^[15-18], 但在跨界流域的水文研究较少。

本研究以元江-红河多国跨界流域为研究对象, 基于多流域相似性的参数移植算法, 利用 CMADS 再分析资料驱动的 SWAT (soil and water assessment tool) 分布式水文模型, 构建流域无资料水文模拟体系, 为其他跨界无资料流域的水文模拟提供一定的参考, 为水旱灾害防治、水资源管理提供技术支撑。

1 无资料地区水文模拟研究方法

针对无资料地区水文模拟困难的现状, 提出一种无资料地区水文模拟的方法体系, 首先选取合适的水文模型和开源再分析数据, 利用开源再分析数

收稿日期: 2023-09-08 修回日期: 2024-03-28 网络出版时间: 2024-05-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240527.0900.004>

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目 (19275408D); 江苏省水利科技项目 (2020040); 国家自然科学基金项目 (41877158); 江苏省大学生创新创业训练项目 (202210300131Y)

作者简介: 王洁 (1984—), 男, 山东诸城人, 副教授, 博士, 主要从事分布式水文模拟研究。E-mail: wangjie0775@163.com

据驱动水文模型,然后基于流域相似性分析技术将有资料地区的模型参数移植到无资料地区,最后实现无资料地区的水文模拟。选用的水文模型为 SWAT 分布式水文模型,选用的再分析数据为 CMADS 产品。

1.1 SWAT 水文模型

分布式 SWAT 水文模型是由美国农业部开发研制的水文模拟工具,主要用于流域综合管理,其中在径流模拟、泥沙演进及非点源污染等都有较为广泛的应用^[19-20]。为了提高运算效率与模拟精度,SWAT 模型在空间上划分为三级单元,分别为总流域、子流域以及水文响应单元,其中同一个水文响应单元的水文特征一致,每个水文响应单元独立计算,最后演算汇总至研究流域的出口^[21]。

本研究中主要引入 3 个指标 E_{RSR} (RMSE-observations standard deviation ratio)、 E_{NS} (nash-sutcliffe efficiency coefficient)和 P_{BIAS} (percent bias)用于评估水文模型模拟结果的优劣。 E_{RSR} 综合了误差指数统计的优点,当 E_{RSR} 接近 0 时,模拟结果更加准确。 E_{NS} 综合反映了两者之间的吻合程度, E_{NS} 值越接近于 1,模型模拟结果越好。模型模拟效果的评价标准采用 Moriasi 等^[22]的评价标准,具体见表 1。

表 1 SWAT 模型性能评价标准
Tab. 1 SWAT model performance evaluation standard

性能等级	E_{RSR}	E_{NS}	P_{BIAS}
非常好	$E_{\text{RSR}} \leq 0.50$	$0.75 < E_{\text{NS}} \leq 1.00$	$P_{\text{BIAS}} < \pm 10\%$
好	$0.50 < E_{\text{RSR}} \leq 0.60$	$0.65 < E_{\text{NS}} \leq 0.75$	$\pm 10\% \leq P_{\text{BIAS}} < \pm 15\%$
满意	$0.60 < E_{\text{RSR}} \leq 0.70$	$0.50 < E_{\text{NS}} \leq 0.65$	$\pm 15\% \leq P_{\text{BIAS}} < \pm 25\%$
不满意	$E_{\text{RSR}} > 0.70$	$E_{\text{NS}} < 0.50$	$P_{\text{BIAS}} > \pm 25\%$

均方根误差与实测标准差比值:

$$E_{\text{RSR}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{s_i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2}} \quad (1)$$

纳什效率系数:

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

百分比偏差:

$$P_{\text{BIAS}} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{s_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{o_i}} \times 100 \quad (3)$$

式中: Q_{o_i} 为实测流量, m^3/s ; Q_{s_i} 为模拟流量, m^3/s ; \bar{Q}_o 为实测流量均值, m^3/s ; n 为实测数据的个数,无量纲。

1.2 流域相似性的计算方法

1.2.1 流域相似特征指标选取与处理

从流域地形地貌特征和水文气象特征选取 6 个流域特征指标,分别是流域平均高程、流域平均坡度、流域形状系数、流域森林覆盖率、流域多年平均降水及流域多年平均潜在蒸散发^[23-24]。

流域形状系数 K 会影响流域的汇流情况,流域越狭长,出口断面洪峰流量越小,汇流历时越长。流域形状系数的计算方法见公式(4)。

$$K = \frac{F}{L_A} \quad (4)$$

式中: L_A 为流域的几何中心轴长, m ; F 为流域面积, m^2 。考虑最长汇流路径的长度是影响汇流过程的重要因素。本文选择将 L_A 改为 L , L 即流域最长汇流路径长度^[25]。

1.2.2 流域相似度计算

对于流域在单个特征上的相似性程度,常用流域特征相似度描述^[26]。设 V 为某一流域特征,则流域 i 和流域 j 在流域特征 V 上的相似度^[27] 为

$$\text{sim}(V_i, V_j) = \frac{1}{1 + d(V_i, V_j)} \quad (5)$$

式中: V_i 、 V_j 为流域特征 V 的 2 个值,无量纲; $d(V_i, V_j) = |V_i - V_j|$ 为流域 i 和流域 j 在流域特征 V 上的绝对距离,无量纲。

在流域特征相似度的基础上计算流域相似度时,还需考虑个流域特征对有研究问题的重要性,因此需要引入权重系数。流域 i 和流域 j 之间的相似度计算公式为

$$\text{sim}_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k \text{sim}(V_{ik}, V_{jk}) \quad (6)$$

式中: w_k 为第 k 个流域特征的权重大小,无量纲; n 为流域个数。 sim_{ij} 越接近于 1,反映流域间越相似,反之亦然。

1.2.3 主成分分析

流域特征指标之间往往存在一些相关性,导致流域特征指标之间存在信息重复^[28],需要将高维变量进行降维处理^[29]。采用主成分分析对流域特征指标进行降维处理,基于主成分分析的方差贡献率计算综合相似指标的权重系数。主成分分析的步骤如下:

(1) 首先假设有 m 个流域特征变量 $X_j (j = 1, 2, \dots, m)$, n 个流域特征变量 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 计算流域特征变量均值 \bar{X}_j 以及标准差 S_j , 计算标准化矩阵 $(R_{ij})_{nm}$ 以消除流域特征变量间的量纲影响和变异因子大小。

(3) 建立相关系数矩阵 R , 并通过正交变换计算相关系数矩阵 R 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 和特征值对应的特征向量 $l_{1j}, l_{2j}, \dots, l_{mj}$ 。

(4) 根据方差贡献率计算前 m 个主成分样本值, $Z_j = l_{1j}R_1 + l_{2j}R_2, \dots, l_{mj}R_m$, 即可得到代替原流域特征的流域综合特征值, R_1, R_2, \dots, R_m 为标准化的流域特征值。

2 案例研究区概况与数据介绍

2.1 研究区域

红河发源于中国云南, 是一条流经中国、越南和老挝的国际河流, 流向为自西北向东南, 最终流入北部湾。它在中国被称为元河, 流入越南, 其巨大的泥沙输送和丰富的沉积物中的 FeO_2 使其河水颜色为红棕色, 故又被命名为红河。红河流域多年平均径流量约 1 340 亿 m^3 ^[30]。本文研究区域主要为红河的上游及中游地区, 即元江-红河流域 (Son Tay 站以上流域), $100^{\circ}06' E \sim 105^{\circ}59' E$, $20^{\circ}37' N \sim 25^{\circ}34' N$, 研究流域的面积 12.8 万 km^2 。

2.2 研究数据

所采用数据包括地形、土壤和土地利用等空间数据, 流量数据及实测站点气象数据和 CMADS 再分析数据, 其中 CMADS 数据集由中国学者自主研发, 空间分辨率为 $1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ}$, 数据包括了 2008—2018 年降水 P 、湿度 H 和气温 T 等气象数据, 是 SWAT 模型和 VIC (variable infiltration capacity) 模型等众多水文模型的重要输入与驱动, 在东亚地区应用广泛且效果较好^[31-32]。研究所需的数据来源见表 2。

3 结果与讨论

3.1 CMADS 驱动下的 SWAT 模型适应性评价

根据流域下垫面特征, 将研究区域一共划分为 123 个子流域。SWAT 模型参数较多, 为提高模型校准效率, 需进行参数敏感性分析以减少需要率定的参数个数。通过 SWAT-CUP 进行参数敏感性分析与参数率定, 本文一共选择了 12 个参数, 见表 3。

表 2 模型输入数据及主要来源

Tab. 2 Study data and main sources

数据类型	数据名称	数据来源
地形	数字高程模型 (DEM)	http://srtm.csi.cgiar.org/
土壤	FAO 全球土壤分布图	FAO global soil map
土地利用	USGS 全球土地利用分布图	USGS National Center for Earth Resources Observation Science
水文数据	流量	越南气象水文局
实测气象数据	日降水量、日最高最低气温、太阳辐射量、风速、相对湿度	中国气象数据网
CMADS 数据集	日降水量、日最高最低气温、太阳辐射量、风速、相对湿度	http://www.cmads.org/

表 3 参数选取及初始值

Tab. 3 Parameter selection and initial value

参数名称	参数意义	初始赋值范围
CN	径流曲线数	-1~1
GW_DELAY.gw	地下水延迟时间/d	0~500
ALPHA_BF.gw	基流 alpha 因子/a	0~2
GWQMN.gw	浅层含水层产生“基流”的阈值深度/mm	50~500
GW_REVAP.gw	浅层地下水再蒸发系数	-1~1
ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0~1
CH_N2.rte	主河道河床曼宁系数	0~10
CH_K2.rte	主河道河床有效水力传导度	0~10
SOL_AWC().sol	土壤层有效水容重	0~1
SOL_K().sol	土壤饱和水力传导度	-50~50
RCHRG_DP.gw	深含水层渗透比	-1~1
SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0~2

进一步利用传统气象站数据和校正后 CMADS 驱动 SWAT 水文模型。基于实测月流量, 两种数据在 Son Tay 站的率定与验证结果见表 4 和图 1。2009—2011 年为率定期, 2012—2013 年为验证期。

如图 1 所示, CMADS 和传统气象站数据驱动模型得到的流量过程与实测流量过程均基本吻合。从 E_{NS} 、 E_{RSR} 以及 P_{BIAS} 的评价结果 (表 4) 来看, CMADS 驱动模型时, Son Tay 站在率定期和验证期都满足 $E_{RSR} \leq 0.50$, $E_{NS} > 0.75$ 且 P_{BIAS} 介于 $\pm 10\%$, 即 SWAT 模型性能达到了非常好的标准, 而采用传统气象站数据驱动模型得到的流量曲线虽基本与实测流量基本吻合, 但综合来看率定期和验证期均仅

达到满意的标准,率定期和验证期的 E_{NS} 均小于 0.65, E_{RSR} 均大于 0.6, P_{BIAS} 在率定期为 12.1%, 在验证期则高达 21%, 与 CMADS 驱动模型的结果相比较存在较大的误差。CMADS 在研究区域一共有 728 个格点,保证了平均每个子流域有 6~7 个站点数据。传统气象站数据在研究区域可用的气象站点仅 10 个左右,大部分子流域没有气象站点,气象站点的匮乏导致模型在进行降水空间插值时出现偏差,会在一定程度上削弱模型的模拟能力,使得流量模拟结果欠佳,而 CMADS 则弥补了这一不足,CMADS 数据覆盖范围广且均匀密集,极大地提高了元江-红河流域的气象数据精度。经上述结果分析,在实测站点数据匮乏的情况下,CMADS 可以为元江-红河流域的流量模拟提供高质量的气象数据。

3.2 流域相似性分析

3.2.1 流域特征指标选取

本研究中 7 个子流域有流量资料,分别对应 NGOI HUT、Yen Bai、NAM MUC、Vu Quang、Lai Chau、Son Tay 及 Hoa Binh 水文监测站,对应的子

流域编号分别为 77 号、95 号、96 号、102 号、108 号、115 号和 123 号,子流域的空间分布见图 2。

表 4 Son Tay 站月流量模拟评价结果

Tab. 4 The monthly flow simulation evaluation results of SonTay station

数据源	时期	评价指标	评价值
传统气象站	率定期 (2009—2011年)	E_{NS}	0.63
		E_{RSR}	0.61
		P_{BIAS}	12.10%
	验证期 (2012—2013年)	E_{NS}	0.61
		E_{RSR}	0.63
		P_{BIAS}	21.00%
CMADS	率定期 (2009—2011年)	E_{NS}	0.79
		E_{RSR}	0.46
		P_{BIAS}	0.20%
	验证期 (2012—2013年)	E_{NS}	0.82
		E_{RSR}	0.42
		P_{BIAS}	-2.11%

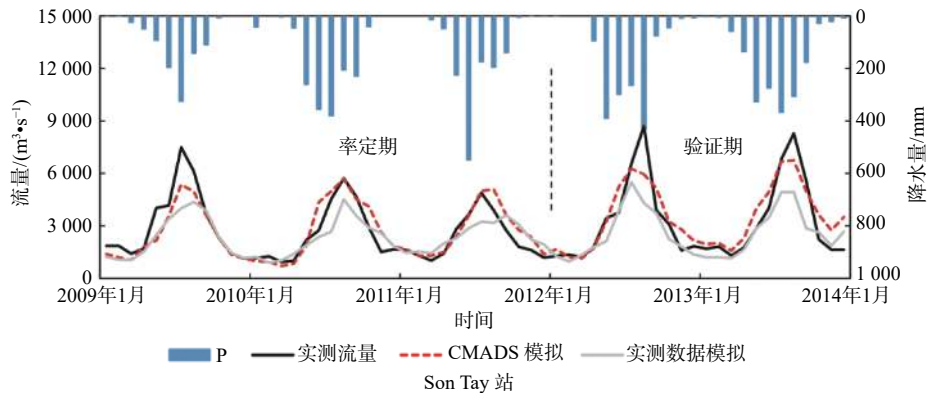


图 1 传统气象站数据和 CMADS 分别驱动 SWAT 模型在 Son Tay 站模拟结果

Fig. 1 Measured meteorological data and CMADS respectively drive the SWAT model to simulate the results at Son Tay station

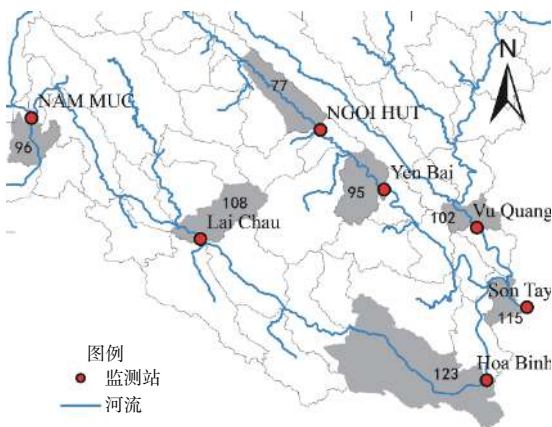


图 2 子流域空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of sub-basins

基于 123 个子流域的流域属性,进行流域相似相似性分析。经过标准化处理后的流域特征指标见表 5。

3.2.2 基于主成分分析的指标权重确定

根据流域特征指标的相关系数矩阵可以计算得到相应的特征值和方差贡献率。根据主成分分析要求,根据主成分方差累计贡献率大于 80%~90% 的原则确定了 4 个主成分,各主成分的特征值、方差贡献率和累计方差贡献率及主成分系数矩阵见表 6 和表 7。

对 4 个主成分进行分析,其中主成分 1 和主成分 2 特征值大于 1。主成分 1 的特征值为 1.990,方

差贡献率为 33.171%, 其中流域平均高程、流域平均坡度是影响较大的载荷, 是影响主成分 1 的主要特征指标, 可能是受元江-红河流域内山脉众多, 地形复杂影响。主成分 1 可以理解为地形地貌综合相似指标。主成分 2 特征值为 1.698, 方差贡献率为 28.293%, 其中降水量和潜在蒸散发是影响较大的

载荷, 这可能与元江-红河流域处于印度季风和东亚季风的交汇区, 气候时空变异复杂, 进而导致子流域间年均降水和年均蒸散发空间分布变化大^[33], 主成分 2 可以理解为气象综合相似指标。特征值较小的主成分 3 和主成分 4 则分别主要受流域形状系数和森林覆盖率控制。

表 5 基于 123 个子流域的流域特征进行流域特征指标标准化

Tab. 5 Standardization of basin characteristic indexes based on basin characteristics of 123 subbasins

子流域编号	流域平均高程指标	流域平均坡度指标	流域形状系数指标	植被覆盖率指标	多年平均降水指标	多年平均潜在蒸散发指标
77	-1.21	-0.38	-0.44	0.58	0.31	-0.39
95	-1.35	-0.84	-0.31	-1.09	0.50	-0.24
96	-0.09	0.72	-0.34	0.67	0.13	-0.51
102	-1.62	-1.79	-0.36	-1.60	0.53	0.13
108	0.36	1.01	0.02	0.76	-0.48	-2.07
115	-1.69	-2.54	-0.37	-1.88	0.86	1.20
123	-0.82	-0.04	-0.21	-1.28	1.15	-0.65

表 6 相关矩阵的特征值、方差和累计方差贡献率

Tab. 6 Eigenvalue, variance and cumulative variance contribution rate of correlation matrix

成分	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	1.990	33.171	33.171
2	1.698	28.293	61.464
3	0.973	16.220	77.684
4	0.797	13.288	90.972
5	0.342	5.694	96.666
6	0.200	3.334	100.000

表 7 主成分系数矩阵

Tab. 7 Principal component coefficient matrix

流域相似指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
流域平均高程	0.617	-0.208	0.008	-0.278
流域平均坡度	0.468	0.473	-0.185	-0.130
流域形状系数	0.187	0.100	0.946	0.224
森林覆盖率	0.444	0.286	-0.231	0.645
年均降水量	-0.408	0.531	-0.030	0.289
年均潜在蒸散发	0.037	-0.599	-0.128	0.596

3.2.3 流域相似度计算

基于 123 个子流域相似度计算结果, 主要以有水文资料可以作为验证的 7 个子流域作为研究对象, 流域相似度计算结果见表 8。根据流域相似度对应的评价级别标准(表 9), 本文研究的相似流域的相似程度都为一般相似。

表 8 流域相似度计算结果

Tab. 8 Calculation results of basin similarity

子流域编号	77	95	96	102	108	115	123
77	1.00	0.60	0.57	0.51	0.49	0.43	0.60
95	0.60	1.00	0.45	0.67	0.42	0.55	0.69
96	0.57	0.45	1.00	0.40	0.63	0.39	0.45
102	0.51	0.67	0.40	1.00	0.39	0.67	0.50
108	0.49	0.42	0.63	0.39	1.00	0.37	0.35
115	0.43	0.55	0.39	0.67	0.37	1.00	0.43
123	0.60	0.69	0.45	0.50	0.35	0.43	1.00

表 9 流域相似度对应的评价级别

Tab. 9 Evaluation level corresponding to basin similarity

相似度范围	流域相似度等级
$sim_{ij} < 0.60$	不相似
$0.60 \leq sim_{ij} < 0.75$	一般相似
$0.75 \leq sim_{ij} < 0.8$	较相似
$0.8 \leq sim_{ij} < 0.95$	基本相似
$0.8 \leq sim_{ij} < 0.95$	完全相似

3.3 相似流域间的参数区域化

3.3.1 有资料流域参数敏感性分析

本研究根据相似度之间的分析, 如果一个流域和多个流域存在相似关系, 优先选择相似度更高关系的相似流域, 通过分析, 本文一共设置了 4 组相似流域。本研究将 108 号、115 号以及 123 号子流域

设置为有资料流域,将 95 号、96 号、77 号以及 102 号子流域设置为无资料流域。无资料或缺资料地区水文模拟的关键是将有资料地区的参数信息转换到无资料或缺资料地区,实现从“无资料”到“有资料”^[34]。经过分析最后的移植方案 108 号子流域参数移植到 96 号子流域,这组相似流域的相似度为 0.63; 115 号子流域参数移植到 102 号子流域,这组相似流域的相似度为 0.67; 123 号子流域参数移植到 77 号和 95 号子流域,123 号子流域和 77 号子流域的相似度为 0.6, 123 号子流域与 95 号子流域的相似度为 0.69。

通过 SWAT 模型对 3 个有资料的流域进行参数分析,见表 10。

3.3.2 有资料地区 SAWT 模型率定验证

参数敏感性分析后,对 3 个有资料的子流域进行参数的率定和验证,结果见表 11 和图 3。3 个有资料流域在率定期和验证期均达到非常好的标准。

3.3.3 参数移植及结果分析

根据表 9 得到的相似流域划分结果,进行相似流域间的参数移植。得到的参数移植结果见表 12 和图 4,从表 12 可以看出,大部分无资料流域在没有经过参数移植时(无参数移植即 SWAT 模型直接根据气象数据未率定参数运行模拟),模拟效果均已达到基本满意,这说明降水校正后的 CMADS 再分析数据具有较高的精度,可以极大地丰富研究区域无资料地区的气象数据。无资料地区在通过有资料的相似流域进行参数移植后,水文模拟效果得到进一步提升。其中:77 号子流域通过 123 号子流域的参数移植后, E_{NS} 从 0.69 提高到 0.75; 95 号子流域通过 123 号子流域参数移植后, E_{NS} 从 0.75 提高到 0.85; 96 号子流域通过 108 号子流域参数移植后,

E_{NS} 从 0.64 提高到 0.78; 102 号子流域通过 115 号子流域参数移植后, E_{NS} 从 0.62 提高到 0.67。

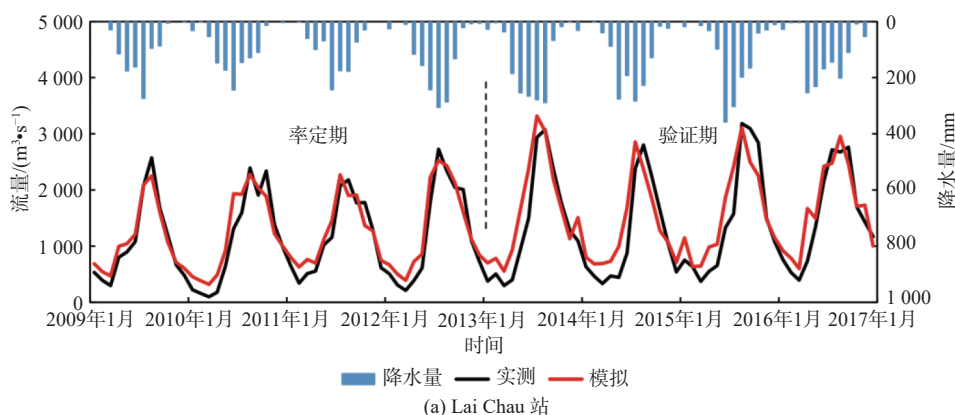
表 10 参数取值及参数敏感性分析
Tab. 10 Parameter value and parameter sensitivity analysis

子流域编号	参数	最优值	t值	P值	敏感性排序
108	SOL_AWC.sol	0.047	39.34	0	1
	SOL_K(.).sol	31.456	-10.77	0	2
	GW_DELAY.gw	126.353	-2.78	0.005 7	3
	GWQMN.gw	0.875	0.82	0.413 8	4
	SURLAG.bsn	0.701	1.57	0.502 7	5
115	SOL_AWC(.).	0.059	41.79	0	1
	SOL_K(.).sol	30.813	26.77	0	2
	ALPHA_BF.gw	0.251	5.95	0	3
	CH_K2.rte	1.245	-2.75	0.006 4	4
123	GW_DELAY.gw	189.871	2.51	0.012 6	5
	SOL_AWC(.).sol	0.045	40.41	0	1
	SOL_K(.).sol	34.361	-5.46	0	2
	GW_DELAY.gw	125.352	-2.53	0.012 1	3
	GWQMN.gw	0.766	1.55	0.122 0	4
	SURLAG.bsn	0.663	0.63	0.530 7	5

表 11 有资料流域流量模拟评价结果

Tab. 11 The results of flow simulation evaluation in the data basin

站点	率定期			验证期		
	E_{NS}	E_{RSR}	P_{BIAS}	E_{NS}	E_{RSR}	P_{BIAS}
Lai Chau	0.90	0.31	-8.3%	0.85	0.39	7.6%
Son Tay	0.79	0.46	0.2%	0.82	0.42	-8.6%
Hoa Binh	0.91	0.30	-9.5%	0.84	0.40	9.8%



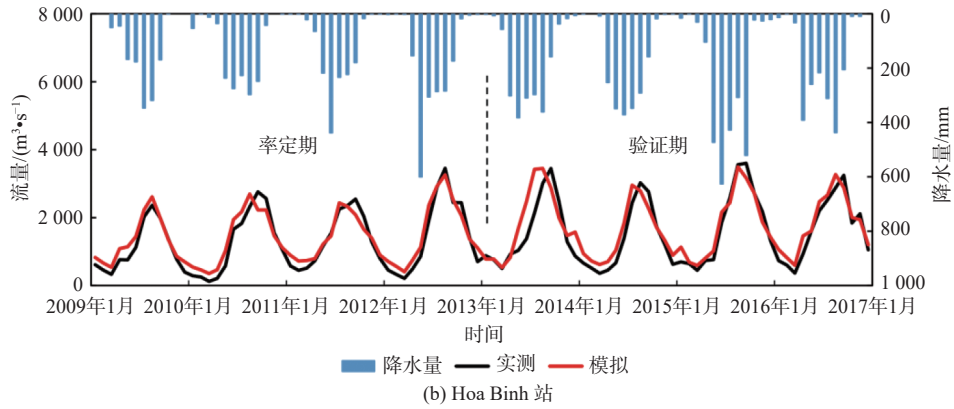


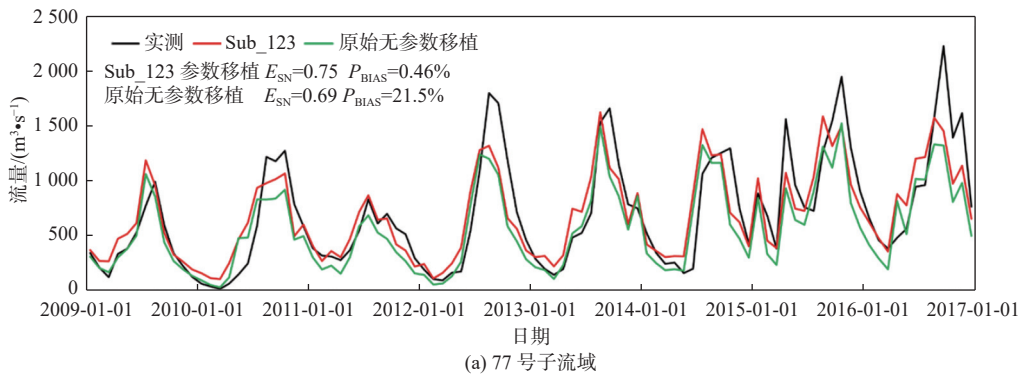
图 3 有资料流域月流量的率定验证结果

Fig. 3 The results of the calibration verification of the monthly flow of the basins with data

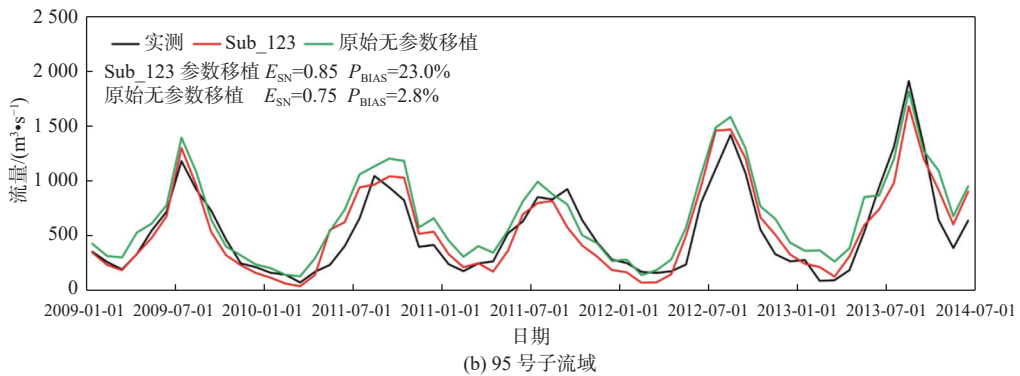
表 12 参数移植结果

Tab. 12 Parameter transplantation results

子流域编号	E_{NS}	$P_{BIAS}/\%$	E_{RSR}	参数来源
77	0.69	21.5	0.56	初始
	0.75	0.46	0.50	Sub_123
95	0.75	-23.0	0.50	初始
	0.85	2.8	0.39	Sub_123
96	0.64	8.7	0.60	初始
	0.78	-3.0	0.47	Sub_108
102	0.62	6.1	0.62	初始
	0.66	-2.4	0.58	Sub_115



(a) 77 号子流域



(b) 95 号子流域

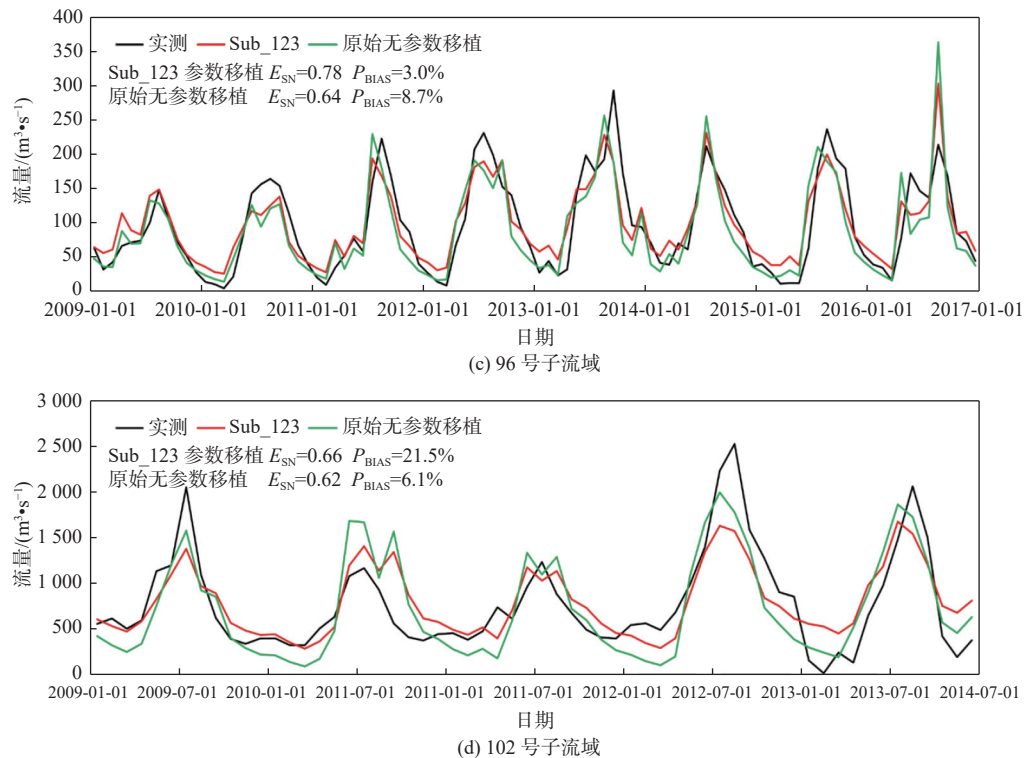


图4 无资料流域参数移植结果

Fig. 4 Results of parameter transplantation for ungauged basins

4 结论

本文提出一套无资料地区水文模拟的方法体系,利用开源再分析数据驱动水文模型,通过流域相似性分析,划分相似流域并进行无资料流域的水文模型参数移植,从而实现无资料地区的水文模拟。

以元江-红河多国跨界流域为例,在水文气象资料匮乏的情况下,利用 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型,模拟流量过程线与实测流量过程线基本吻合,且达到了非常好的模型评价标准等级,模拟结果优于使用传统的站点气象资料,因此基于 CMADS 的分布式 SWAT 模型适用于元江-红河流域,可以用于该地区的水文模拟。结合 CMADS 驱动的水文模型和流域相似性分析结果,将有资料流域的参数移植到无资料流域,大部分无资料流域的水文模拟精度均得到了提高。综上所述:在流域水文气象资料匮乏的情况下,本文提出的方法可以为无资料地区的水文模型提供合适的参数,并为无资料地区的水文模拟提供更多可能。

参考文献:

- [1] 夏军,马协一,邹磊,等.气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J].*南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 1-6. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.01.001.
- [2] RINGERSMA J, BATJES N H, DENT D L. Green water: Definitions and data for assessment[R]. ISRIC report - World Soil Information, 2003.
- [3] 张红武,王海,马睿.我国湖泊治理的瓶颈问题与对策研究[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 21-32. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.002.
- [4] 张自豪,王国强,薛宝林,等.基于深度学习预测缺资料区域深层土壤水分[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(11): 25-36. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.11.003.
- [5] WAGENER T, SIVAPALAN M, MCDONNELL J, et al. Predictions in ungauged basins as a catalyst for multidisciplinary hydrology[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2004, 85(44): 451-457. DOI: 10.1029/2004eo440003.
- [6] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(6): 857-880. DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421.
- [7] 孙周亮,刘艳丽,陈鑫,等.水文模型参数区域化方法研究进展[J].*水文*, 2023, 43(4): 1-7. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220221.

- [8] 程旭, 马细霞, 王武森, 等. HEC-HMS模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J]. *水文*, 2022, 42(1): 40-46,102. DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20200501](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20200501).
- [9] 程艳, 敖天其, 黎小东, 等. 基于参数移植法的SWAT模型模拟嘉陵江无资料地区径流[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 81-86. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.012](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.012).
- [10] 汪银龙, 冯民权, 张杰. 基于相似流域法的SWAT模型模拟黄河中游无资料地区径流[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(6): 81-87.
- [11] 苟娇娇, 缪驰远, 段青云. 水文模型参数敏感性分析—优化—区域化方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(7): 1338-1348. DOI: [10.18306/dlkxjz.2022.07.016](https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2022.07.016).
- [12] BOSILOVICH M G, CHEN J, ROBERTSON F R, et al. Evaluation of global precipitation in reanalyses[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(9): 2279-2299. DOI: [10.1175/2008JAMC1921.1](https://doi.org/10.1175/2008JAMC1921.1).
- [13] HODGES K I, LEE R W, BENGTSSON L. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(18): 4888-4906. DOI: [10.1175/2011JCLI4097.1](https://doi.org/10.1175/2011JCLI4097.1).
- [14] YU X J, ZHANG L X, ZHOU T J, et al. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: Comparative assessment[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 46-63. DOI: [10.1007/s13351-021-0107-1](https://doi.org/10.1007/s13351-021-0107-1).
- [15] MENG X Y, WANG H, CHEN J. Profound impacts of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS)[J]. *Water*, 2019, 11(4): 832. DOI: [10.3390/W11040832](https://doi.org/10.3390/W11040832).
- [16] 陈世雪, 玉素甫江·如素力. CMADS数据集用于开都河上游水文模拟的适用性评估[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(12): 139-146. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2022125](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2022125).
- [17] CAO Y, ZHANG J, YANG M X, et al. Application of SWAT model with CMADS data to estimate hydrological elements and parameter uncertainty based on SUFI-2 algorithm in the Lijiang River basin, China[J]. *Water*, 2018, 10(6): 742. DOI: [10.3390/w10060742](https://doi.org/10.3390/w10060742).
- [18] VU T T, LI L, JUN K S, et al. Evaluation of multi-satellite precipitation products for streamflow simulations: A case study for the Han River basin in the Korean Peninsula, East Asia[J]. *Water*, 2018, 10(5): 642. DOI: [10.3390/w10050642](https://doi.org/10.3390/w10050642).
- [19] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于SWAT模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 9-18. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0079](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0079).
- [20] GASSMAN P W, SADEGHI A M, SRINIVASAN R. Applications of the SWAT model special section: Overview and insights[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 1-8. DOI: [10.2134/jeq2013.11.0466](https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466).
- [21] DONG N P, YANG M X, MENG X Y, et al. CMADS-driven simulation and analysis of reservoir impacts on the streamflow with a simple statistical approach[J]. *Water*, 2019, 11(1): 178. DOI: [10.3390/w11010178](https://doi.org/10.3390/w11010178).
- [22] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900. DOI: [10.13031/2013.23153](https://doi.org/10.13031/2013.23153).
- [23] 徐长江, 杨无双, 汪青静, 等. 无资料地区水文模型参数估算方法比较研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(5): 109-113,118. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2018.05.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2018.05.022).
- [24] 祝冰洁, 阚光远, 何晓燕. 无资料嵌套流域水文相似性及参数移植研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(3): 223-231. DOI: [10.13244/j.cnki.ji-whr.2020.03.008](https://doi.org/10.13244/j.cnki.ji-whr.2020.03.008).
- [25] 李莉莉, 孔凡哲. 基于GIS对新安江模型的改进初探[J]. *水文*, 2006, 26(5): 33-37. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0852.2006.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0852.2006.05.008).
- [26] 戚晓明, 陆桂华, 吴志勇, 等. 水文相似度及其应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 355-36. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.017).
- [27] 万新宇, 包为民, 荆艳东, 等. 基于主成分分析的洪水相似性研究[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(5): 36-39. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7709.2007.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7709.2007.05.010).
- [28] 李偲松, 包为民, 李倩. 基于主成分分析的流域聚类研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(3): 23-26. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7709.2012.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7709.2012.03.008).
- [29] 王晓玮, 邵景力, 崔亚莉, 等. 基于DPSIR和主成分分

- 析的阜康市水资源承载力评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 37-42,48. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.007.
- [30] 李雪,李运刚,何娇楠,等. 1956—2013年元江-红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(6): 1149-1159. DOI: 10.18402/resci.2016.06.14.
- [31] 骆成彦,陈伏龙,何朝飞,等. CMADS在玉龙喀什河径流模拟中的适用性研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1090-1101. DOI: 10.13866/j.azr.2022.04.10.
- [32] 王丽霞,吕亮,刘招,等. 基于CMADS气象数据集的延河流域径流量变化模拟及分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1): 73-80. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2022.010.
- [33] 赵红玲. 红河流域径流对降水、气温的非线性响应[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [34] 杨学军,杨邦,孟宪萌,等. 洮水流域无资料地区降雨径流模拟应用研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 38-40,99. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.01.009.

Hydrological simulation based on CMADS dataset and basin similarity in ungauged areas: A case study of Yuanjiang-Red River basin

WANG Jie¹, CHEN Yudi², LIANG Fengming¹, GE Hui¹, LIU Miao³, CHEN Jiadong⁴, WANG Lirong⁵

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guangde Agricultural and Rural Bureau, Guangde 242200, China; 3. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210044, China; 4. Nanjing Branch of Jiangsu Province Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Nanjing 210044, China; 5. Hebei Meteorological Disaster Prevention and Environmental Meteorological Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In recent years, extreme weather such as drought and floods have occurred more frequently, and the study of watershed water cycle under changing environments is of great research significance. However, the construction of hydrological and meteorological stations in some regions of the world is not perfect enough, and the consistency of hydrological data in some regions is also disrupted due to changes in underlying surface and climate. These have led to lack of data in many study areas, posing a great obstacle to watershed hydrological simulation. As a multinational basin, the research data in the study area is difficult to fully obtain, which leads to similar difficulties in hydrological simulation of cross-border watersheds as in hydrological simulation of areas lacking data. A set of hydrological research methods suitable for regions lacking data in cross-border watersheds are aimed to be explored.

The research method was mainly based on hydrological model and watershed similarity theory. Meteorological data, as an important input data for hydrological simulation, is often difficult to fully obtain in areas without data. Reanalysis data CMADS as a supplement to meteorological data in the hydrological simulation of the Red River basin was selected and its applicability in the Red River basin was studied. Based on the SWAT model and watershed elevation data, the Red River basin was divided into 123 sub watersheds. Then, a series of indicators such as elevation, slope, shape coefficient, forest coverage, precipitation and evapotranspiration were introduced to analyze the similarity of 123 sub watersheds by using of principal component analysis. According to existing little hydrological data and similarity results, four groups of similar watersheds were divided. Model parameters were well calibrated and validated in the basins with enough data, and then the validated parameters were used to drive the hydrological model in the data-shortage basins.

The research results were as follows: In the Red River basin, the SWAT model was driven by both traditional meteorological station data and CMADS. Results showed that the CMADS-driven model performed well in the Son Tay station in both the calibration and validation periods, with the $E_{RSR} \leq 0.50$ and $E_{NS} > 0.75$. Compared with the results of the CMADS-driven model, the model driven by traditional meteorological station data still satisfied simulation accuracy requirements, but the P_{BIAS} was 12.1% in the calibration period and as high as 21% in the validation period, indicating a large simulation error. This indicated that CMADS could greatly enrich meteorological data in the Red River basin. Based on the results of basin similarity analysis and parameters transplantation, hydrological modeling in data-scarce sub-basins were carried out, which improved the simulation

accuracy in most data-scarce sub-basins. Among them, E_{NS} increased from 0.69 to 0.75 for sub-basin 77 after parameter transplantation from sub-basin 123, E_{NS} increased from 0.75 to 0.85 for sub-basin 95 after parameter transplantation from sub-basin 123, E_{NS} increased from 0.64 to 0.78 for sub-basin 96 after parameter transplantation from sub-basin 108, and E_{NS} increased from 0.62 to 0.67 for sub-basin 102 after parameter transplantation from sub-basin 115. This indicated that parameter transplantation based on basin similarity could provide suitable parameters for hydrological models in data-scarce basins and provide more possibilities for hydrological simulation in data-scarce areas.

The main conclusions were summarized as follows: Firstly, under the condition of lack of meteorological data, CMADS could be the alternative data for the SWAT model simulation. Compared with simulation results obtained by traditional meteorological station data, the results obtained by the CMADS-driven model could reach a very good standard in both the calibration and validation periods. Secondly, parameter transplantation based on basin similarity can provide suitable parameters for hydrological models in data-scarce areas, and basin similarity method improved the simulation results of most data-scarce sub-basins after parameter transplantation between similar basins. Finally, one research method was put forward successfully, which provide more possibilities for hydrological simulation in more data-scarce areas.

Key words: ungauged area; CMADS; SWAT model; watershed similarity; parameter transplantation



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部