

厄尔尼诺-南方涛动影响下月尺度水文模型参数可移植性

陈浩^{1,2}, 许月萍¹, 郑超昊¹, 郭玉雪¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江水利水电学院 水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 以浙江省 3 个流域作为研究对象, 采用两参数月水量平衡模型(XM 模型)和四参数月水量平衡模型(ABCD 模型), 结合极大似然不确定性估计方法(GLUE)对水文模拟的不确定性区间进行估计, 在此基础上, 研究不同模型在 ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)和不同流域地理情况下的参数移植能力。结果表明, 厄尔尼诺时期的参数移植至拉尼娜时期, 模型模拟效果要略好于拉尼娜时期的参数移植至厄尔尼诺时期; 参数少的模型(XM 模型)参数移植合格率要优于参数多的模型(ABCD 模型); 相邻流域间的参数移植效果要明显优于距离较远的流域; ABCD 模型具有更好的空间可参数移植能力。

关键词: 水文模型; 参数移植性; 月尺度; ABCD 模型; 厄尔尼诺-南方涛动

中图分类号: TV121.1

文献标志码: A

Parameter Transferability of Monthly Scale Hydrological Model Influenced by El Niño-Southern Oscillation

CHEN Hao^{1,2}, XU Yueping¹, ZHENG Chaohao¹, GUO Yuxue¹

(1. Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper, taking three watersheds in Zhejiang Province as the study objects, uses two models, i. e., the monthly water balance model with two parameters (XM model) and four parameters (ABCD model) to analyze the interval characteristics of hydrological simulation uncertainty in combination with the multiple objective functions of the GLUE method. It studies and analyzes the parameter transferability of different

hydrological models under ENSO (El Niño Southern Oscillation) and different basin geographical conditions. The results show that the simulation effect of parameter transferability from El Niño period to La Niña period is better than that from La Niña period to El Niño period, the pass rate of the model with fewer parameters (XM model) is better than that of the model with more parameter (ABCD model). In addition, the effect of parameter transferability between adjacent watersheds is significantly better than that of remote watersheds, and the ABCD model has a better ability for spatial scale parameter transferability.

Key words: hydrological model; parameter transferability; monthly scale; ABCD model; El Niño-Southern Oscillation

气候变异/变化可影响全球水循环, 包括降水、蒸发和径流^[1]。受全球大气遥相关现象、气候变化和人类活动的影响, 洪水、干旱污染等与水有关的问题日益突出, 科学和准确地评估变化环境下的流域水循环越来越受到人们的关注^[2]。厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)与赤道中、东太平洋海面水温变化和热带大气环流紧密相关。ENSO 事件能够引起世界大范围的气候变异, 导致地区极端事件发生的频率增加、强度增强, 例如干旱、洪水、海平面上升和飓风(台风)登陆等^[3]。

水文模型是研究环境变化对水资源影响的重要工具, 如何更好地理解 ENSO 对水循环的影响, 评估水文模型对 ENSO 的响应, 亦成为水文研究领域的热点话题。众所周知, 所有水文模型的参数必须通

收稿日期: 2021-08-31

基金项目: 浙江省重点研发计划(2021C03017); 浙江省自然科学基金(LZ20E090001); 国家自然科学基金(91547106)

第一作者: 陈浩(1990—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为水文模型机理。E-mail: haochen1990@zju.edu.cn

通信作者: 许月萍(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水文过程和洪水研究。

E-mail: yuepingxu@zju.edu.cn



论文
拓展
介绍

过比较观测和模拟的流量值来满足模型自身的适应性,并且假设模型应用期的条件与率定期的条件相似^[4]。然而,ENSO现象和土地利用的变化会改变降雨径流关系,也给水文模型的应用带来了极大的限制和调整,可能导致相应的水文模型在新的环境下失去预测能力^[5]。

目前,国内外学者们针对水文模型在气候变化和人类活动影响下参数可移植性进行了大量研究,结果表明,许多水文模型都不具备良好的时间传递能力,特别是在非平稳气候条件下^[6]。Chouaib等^[7]在73个美国东部流域,对SAC-SMA水文模型的参数进行了相似气候和水流特征流域之间的移植,发现相似区域内的参数转移减少了偏差,提高了预测效率。Thian等^[8]使用了SAC-SMA水文模型对美国东南部12个流域的径流过程进行了模拟,发现校准期和验证期之间的流域特征差异越大,模型的可移植性就越差。多年来,国内学者们在水文模型参数从有资料到无资料地区的适用性进行了大量研究。彭安帮等^[9]以辽宁省中东部流域为对象,通过水文模型构建参数移植研究,使无资料地区的水文模拟成为可能。祝冰洁等^[10]发现基于相似性的水文模型参数移植效果要优于基于嵌套流域的参数移植。尽管对时间和空间参数转换后水文模型模拟效

果的研究很多,但缺乏针对气候变异条件下的水文模型模拟性能的研究。因为水文模型参数存在“异参同效”的现象,很难在率定期内得到一组最优参数组合^[11]。因此需要在水文模型参数可移植性研究中,结合GLUE法^[12]分析模型参数的不确定性。

鉴于国内外研究针对ENSO不同相位对水文模型参数可移植性的研究较为缺乏,进一步联合研究不同水文模型在不同ENSO时期、不同流域的时空转换能力具有重要意义。本文采用XM和ABCD两个月水量平衡模型在时间和空间尺度上对浙江省3个流域进行参数移植研究。时间参数移植方案是使用一个样本来测试实现,其中数据被分为厄尔尼诺和拉尼娜两个类型,由于样本序列长度较短,本研究将一个用于校准,另一个用于验证。对于空间参数移植方案,本文将其他流域校准和验证后的参数作为该流域校准期参数的提供者,再将其参数用于该流域进行验证,且在两个参数移植方案中,均采用两个目标函数GLUE法对水文模拟不确定性区间特性进行分析。

1 研究方法

本研究基本框架如图1所示。

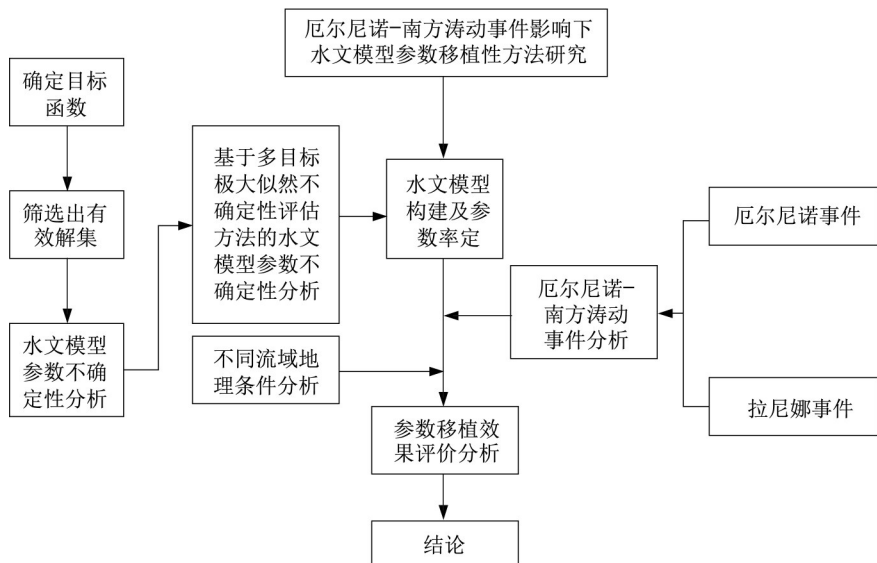


图1 研究框架

Fig.1 Framework of study

1.1 水文模型

1.1.1 两参数XM模型

两参数XM(Xiong Model)水文模型是由熊立华等^[13]提出和建立的一种月水量平衡模型,该模型在

我国南方湿润或半湿润地区应用效果较好,模型的输入数据为月降雨量和月潜在蒸散发量,输出数据为月径流量。

月实际蒸散发量计算公式如下:

$$E_t = C E_{pt} \tanh(P_t / E_{pt}) \quad (1)$$

式中: E_t 为流域月实际蒸散发值; E_{pt} 为月潜在蒸散发量; P_t 为月降雨量; C 为模型中的第一个参数, 综合反映蒸散发和降水的变化情况。

月径流量计算公式如下:

$$Q_t = S_t \tanh(S_t / S_c) \quad (2)$$

式中: Q_t 为月径流量; S_t 为当月土壤净含水量; S_c 为流域最大蓄水能力, 是当土壤几乎没有水分时整个流域的平均持水能力。

月流域水量平衡公式如下:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t \quad (3)$$

本研究中, 参数 C 的取值范围为 $[0.5, 1.5]$, 参数 S_c 的取值范围为 $[200, 1500]$ 。

1.1.2 四参数ABCD模型

ABCD模型(ABCD Water Balance Model)是由Thomas^[14]在1981年提出的概念性月水量平衡模型, 该模型已在中国多个湿润或半湿润流域体现良好地应用性, 模型的输入数据和XM模型一样, 输出数据则多一个地下水含水量^[15]。

土壤含水层中的水量平衡公式如下:

$$P_t - E_t - Q_{Rt} - Q_{Gt} = S_t - S_{t-1} \quad (4)$$

式中: Q_{Rt} 为地表直接径流量; Q_{Gt} 为地下水补给流量。

ABCD模型中的2个状态变量(有效水量 W_t 和可能蒸散发量 Y_t) 计算公式如下:

$$W_t = S_{t-1} + P_t - S_t - E_t - Q_{Rt} - Q_{Gt} \quad (5)$$

$$Y_t = S_t + E_t \quad (6)$$

其中, W_t 与 Y_t 的非线性函数关系如下:

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{bW_t}{a}} \quad (7)$$

式中: a 为土壤完全饱和和前形成径流的概率, 取值范围为 $(0, 1]$; b 为不饱和含水层储水量的上限, 取值范围为 $(0, 1000]$ 。

土壤含水量与潜在蒸散发量之间的关系式如下:

$$S_t = Y_t \exp\left(\frac{-E_{pt}}{b}\right) \quad (8)$$

模型对于地下水层的水量平衡方程式如下:

$$G_t + G_{Dt} = G_{t-1} + Q_{Gt} \quad (9)$$

$$Q_{Gt} = c(W_t - Y_t) \quad (10)$$

$$G_{Dt} = dG_t \quad (11)$$

式中: G_t 为当月地下储水量; G_{Dt} 为地下径流; G_{t-1} 为上月地下储水量; c 为土壤含水层补给地下水量的比例, 取值范围为 $(0, 1]$; d 为地下水形成出流的速度,

取值范围为 $(0, 1]$ 。

1.2 多目标GLUE方法

当率定数据有限且输入参数存在高度不确定性时, 水文模型输出结果包含很大程度的不确定性。在这种情况下, 适当量化预测不确定性变得至关重要。多目标GLUE法是基于单目标GLUE延伸出来的一种评价模型不确定性的方法, 其实质就是增加似然函数, 形成多目标似然函数^[16-17]。多目标GLUE方法采用如下步骤: ①选择两个似然目标函数判断模型模拟结果; ②确定参数取值范围之后对模型参数进行随机抽样; ③对模型的参数进行不确定性分析; ④根据目标函数计算出的数值进行排序, 估算出模型不确定性95%置信区间。

1.3 评价指标

一般情况下, 水文模型参数的校准应以尽量减小历史记录中模拟值和观测流量之间的差异为标准。本文研究中, 目标函数是纳什效率系数(E_{NS})和水量平衡误差(E_{WB}), 计算公式如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum(Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs,t})^2} \quad (12)$$

$$E_{WB} = \frac{\sum(Q_{sim,t} - Q_{obs,t})}{\sum Q_{obs,t}} \quad (13)$$

$$\Delta E_{NS} = E_{NS2} - E_{NS1} \quad (14)$$

$$\Delta E_{WB} = E_{WB2} - E_{WB1} \quad (15)$$

式中: $Q_{obs,t}$ 为月观测流量; $Q_{sim,t}$ 为水文模型模拟流量; $\bar{Q}_{obs,t}$ 为月观测流量均值。

为了更加客观评价水文模型参数可移植性的标准^[18], 根据 E_{NS} 和 E_{WB} 的变化综合一种评价方法。当参数移植后, 模型可移植性评价方法如下(表1): ① $E_{NS} \geq 0.7$ 且 $|E_{WB}| \leq 0.1$ 时, 模型移植效果为良好; ② $E_{NS} < 0.7$ 且 $|E_{WB}| \leq 0.1$ 时, 当 E_{NS} 差值小于等于0.2, 模型移植效果为合格, 反之则为不合格; ③ $E_{NS} \geq 0.7$ 且 $|E_{WB}| > 0.1$ 时, 当 E_{WB} 差值的绝对值小于等于0.2, 模型移植效果为合格, 反之则为不合格; ④ $E_{NS} < 0.7$ 且 $|E_{WB}| > 0.1$ 时, 当 E_{NS} 差值小于等于0.2且 E_{WB} 差值的绝对值小于等于0.2, 模型移植效果为合格, 反之则为不合格。

2 研究实例概况及数据

2.1 研究实例概况

浙江省位于中国东南沿海, 在长江三角洲南侧, 与东海相邻, 总占地面积 $10.38 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。该省地形

表 1 水文模型可移植性评价指标

Tab.1 Evaluation criteria for hydrological model transferability

指标	附加指标	移植性
$E_{NS} \geq 0.7, E_{WB} \leq 0.1$		良好
$E_{NS} < 0.7, E_{WB} \leq 0.1$	$\Delta E_{NS} \leq 0.2$	合格
	$\Delta E_{NS} > 0.2$	不合格
$E_{NS} \geq 0.7, E_{WB} > 0.1$	$ \Delta E_{WB} \leq 0.2$	合格
	$ \Delta E_{WB} > 0.2$	不合格
$E_{NS} < 0.7, E_{WB} > 0.1$	$\Delta E_{NS} \leq 0.2$ 且 $ \Delta E_{WB} \leq 0.2$	合格
	$\Delta E_{NS} > 0.2$ 或 $ \Delta E_{WB} > 0.2$	不合格

复杂,海拔从西南部山区向东北部中低洼冲积平原丘陵递减,雨量充沛,夏季气温高,冬季干冷,主要受亚热带季风气候控制。年平均降雨量为 980~2 000 mm,年平均气温为 15~18℃。本文采用浙江省 5 个水文站点(长春岭、金华、兰溪、衢州和圩仁)作为研究实例(图 2)。其中,长春岭水文站位于舟山市,属于海岛流域;金华站、兰溪站和衢州站都位于钱塘江水系;圩仁站位于瓯江水系。伍远康等^[19]根据径流量、降雨强度、流域下垫面、流域面积和河道长度等指标将浙江省分为两个洪水计算区,金华站、衢州站和兰溪站同属于水文 A 区,而圩仁站和长春岭站属于水文 B 区。浙江省水文 A 区以梅雨型为主,水文 B 区则以台风暴雨型为主。XM 模型和 ABCD 模型均适用于湿润地区特征的海岛、钱塘江和瓯江流域,研究区域均处于流域中上游,受人类活动影响较小。

2.2 实例数据

本文采用浙江省 5 个水文站点(长春岭、金华、

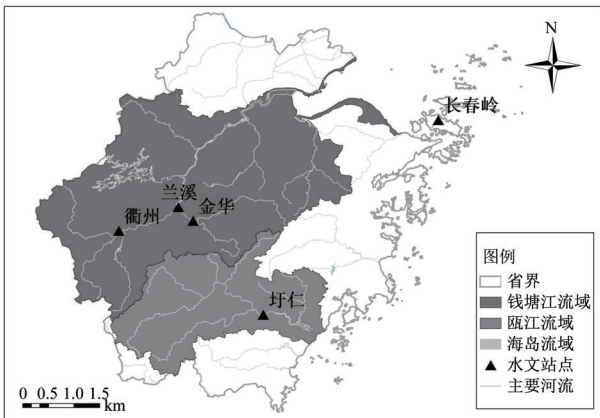


图 2 研究区域和水文站位置

Fig.2 Study area and location of hydrological stations

兰溪、衢州和圩仁)的径流量作为实测径流数据,各个水文站点基本信息如表 2 所示。5 个水文站点逐日降水量、蒸发皿观测值和平均气温等数据来源于中国气象科学数据共享服务网站(<http://data.cma.cn>)。采用泰森多边形方法得到流域的月潜在蒸散发量、月降雨量和平均气温。月潜在蒸散发量可以根据彭曼公式计算得到,计算方程如下:

$$E_{pt} = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (16)$$

式中: e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压与实际水汽压,kPa;饱和水汽压与温度曲线的斜率用 Δ 表示,kPa·℃⁻¹; R_n 为净辐射,MJ·m⁻¹·d⁻¹; G 为地表热通量,MJ·m⁻¹·d⁻¹; γ 为湿度计常数 kPa·℃⁻¹; T 为距地面 2 m 处的平均温度,℃; u_2 为距地面 2 m 处的风速,m·s⁻¹。

表 2 水文站点信息

Tab.2 Information of hydrological stations

水文 站点	一级 流域	径流 系数	流域面积/ km ²	历史时期/年	ENSO 事件年份/年		时间尺度	
					厄尔尼诺	拉尼娜	校准期/年	验证期/年
长春岭站	海岛流域	0.48	3.9	2002—2011	2002, 2004, 2006, 2009	2005, 2007, 2008, 2011	2002—2008	2009—2011
金华站	钱塘江	0.51	5 920.0	1981—1995	1982, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994	1984, 1988, 1995	1981—1990	1991—1995
兰溪站	钱塘江	0.58	18 204.0	1981—1995	1982, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994	1984, 1988, 1995	1981—1990	1991—1995
衢州站	钱塘江	0.64	5 545.0	1981—1995	1982, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994	1984, 1988, 1995	1981—1990	1991—1995
圩仁站	瓯江	0.63	13 500.0	1971—1998	1972, 1976, 1977, 1982, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997	1973, 1975, 1984, 1988, 1995, 1998	1971—1990	1991—1998

2.3 ENSO 事件

ENSO 是发生于赤道东太平洋地区的风场和海面温度振荡,是低纬度的海-气相互作用的现象,其

表现为厄尔尼诺(正相位)和拉尼娜(负相位)事件^[20]。近几十年来,ENSO 事件已经成为全球气候学研究人员和水资源管理者关注的主要问题之一。

根据中国气象局国家气候中心定义,当Niño Z指数连续6个月大于0.5(<-0.5)时,为厄尔尼诺(拉尼娜)事件。根据Niño Z指数统计发现,1970—2011

年间共出现ENSO事件28次,其中厄尔尼诺事件15次,拉尼娜事件13次(表3)。

表3 受ENSO事件影响年份
Tab.3 Years affected by ENSO

ENSO事件	影响年份/年
厄尔尼诺	1972, 1976, 1977, 1982, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009
拉尼娜	1970, 1973, 1975, 1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2001, 2005, 2007, 2008, 2011

ENSO事件的多尺度影响可以在全球和区域尺度上显现,并反映在诸如降水和流量等许多水文气象要素的可变性上。ENSO对区域季风、地下水位、河道径流、干旱、降雨和洪水频率的影响已经被世界各地的许多研究者所证实,其中包括中国^[21]。更具体地说,正确评估和理解ENSO不同事件对流域降雨-径流模型的综合影响,可以为水资源预测和管理提供重要的科学依据。

3 结果及分析

3.1 ENSO事件影响下的水文模型参数移植性

根据ENSO事件中厄尔尼诺和拉尼娜现象的影响年份,将径流序列分割成两部分(具体年份如表3

所示)。将长春岭、金华、兰溪、衢州和圩仁5个站点厄尔尼诺和拉尼娜时期的实测流量、降雨量和潜在蒸散发数据作为XM模型和ABCD模型的输入值,结合GLUE参数不确定性分析,得到不同水文模型参数移植效果,如图3所示。由图3可知,在ENSO事件影响下5个站点的参数移植效果都不错,大部分月径流值都处于95%置信区间之内(见图3阴影),表明模拟水文过程线与实测流量水文过程线拟合程度较好。结合GLUE方法可以有效地规避水文模型参数的“异参同效”现象,使ENSO事件影响下的水文模型参数移植性更加稳定。对比两个模型的参数移植效果,XM模型的移植效果要略好于ABCD模型。特别是在金华、兰溪、衢州和圩仁站的径流模拟中,XM模型对于高流和低流的拟合效果相对较好。

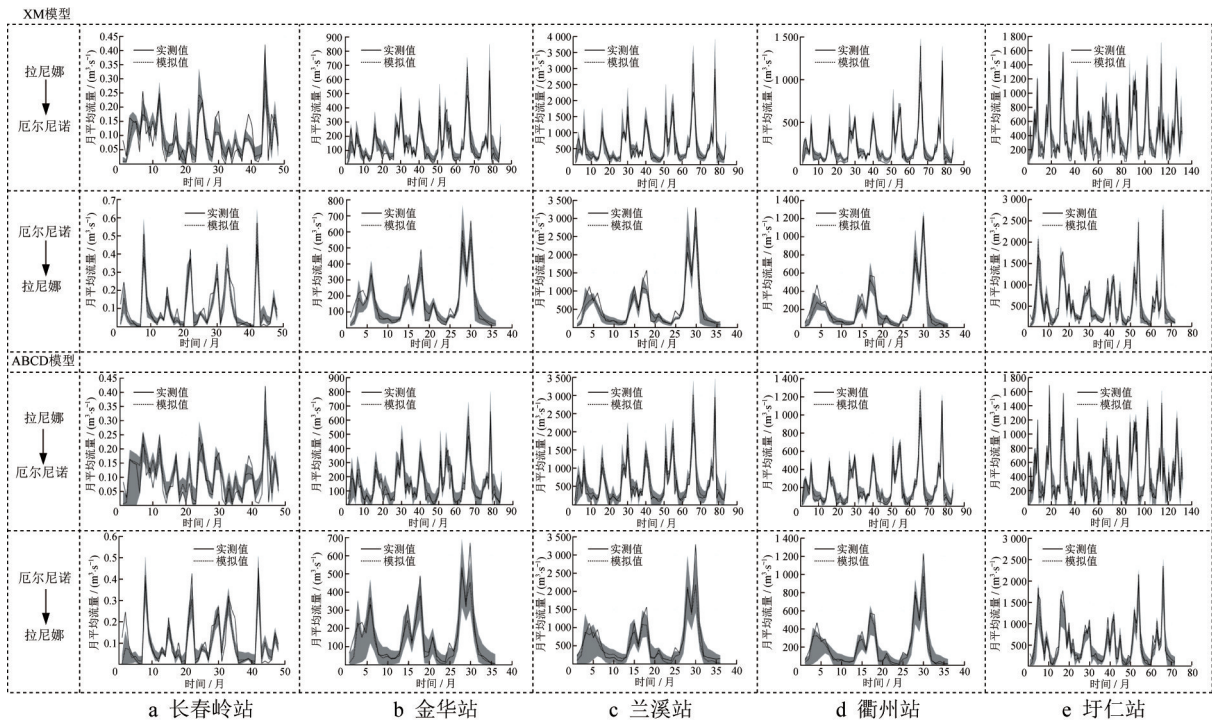


图3 ENSO事件影响下水文模型参数移植效果

Fig.3 Parameter transferability effects of hydrological models affected by ENSO

为了定量地说明气候变异下不同水文模型参数的可移植性,本文根据模拟效果评级指标公式计算

出5个水文站点的 E_{NS} 和 E_{WB} 值,并对模型参数移植效果进行统计分析,如表4所示。

表 4 ENSO 事件影响下水文模型参数移植效果评价

Tab.4 Evaluation of effects of hydrological model parameters transferability affected by ENSO

站点	水文模型	参数移植	移植后		指标差值		移植效果
			E_{NS}	E_{WB}	ΔE_{NS}	ΔE_{WB}	
长春岭	XM 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.79	0.04	0.26		良好
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.57	0.06			不合格
	ABCD 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.80	0.10	0.25	0.12	良好
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.56	-0.11			不合格
金华	XM 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.91	0.07			良好
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.85	-0.08			良好
	ABCD 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.88	0.13		0.12	合格
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.86	-0.14		0.15	合格
兰溪	XM 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.89	0.13		0.11	合格
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.87	-0.17		0.18	合格
	ABCD 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.86	0.16		0.15	合格
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.85	-0.22		0.21	不合格
衢州	XM 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.93	0.11		0.12	合格
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.88	-0.14		0.13	合格
	ABCD 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.93	0.14		0.13	合格
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.92	-0.17		0.16	合格
圩仁	XM 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.86	0.06			良好
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.83	-0.09			良好
	ABCD 模型	厄尔尼诺→拉尼娜	0.92	0.09		0.13	良好
		拉尼娜→厄尔尼诺	0.86	-0.12			合格

由表 4 可知, ENSO 事件影响下的水文模型参数移植较好, 其中模拟评价指标 E_{NS} 的差值几乎都小于 0.10。但是, 对于 E_{WB} 的值影响较大, 站点的差值均大于 0.1, 特别在金华站, ABCD 模型的拉尼娜时期最优参数移植到厄尔尼诺时期时, E_{WB} 值从 -0.01 下降到 -0.22, 该现象说明, 在评价模型参数可否移植上, 需要结合 E_{NS} 和 E_{WB} 两组指标进行评定。XM 模型 10 组实验中有 9 组结果为良好或合格, ABCD 模型则为 8 组。所有水文站点的拉尼娜时期参数移植至厄尔尼诺时期均判定为合格及以上, 但是反过来, 厄尔尼诺时期参数移植到拉尼娜时期却有两个水文站判定不合格。上述情况可能是两个时期的月平均降雨量差距较大造成的, 5 个站点厄尔尼诺时期的月平均降雨量都高于拉尼娜时期。总的来说, 气候变异下水文模型具有良好的参数可移植性, 参数少的水文模型参数移植合格率要优于参数较多的水文模型。

3.2 水文模型参数空间可移植性分析

根据各个水文站点之间地理情况, 分析水文模型的空间参数移植性, 将实测径流量、降雨量和潜在蒸散发量作为 XM 模型和 ABCD 模型的输入求得各模型参数(表 5), 对 5 个水文站相互移植参数, 得到参数移植效果如表 6 所示。由表 6 可知, 同流域内的金华站、兰溪站和衢州站间都可进行参数移植, 但是不同流域之间的移植效果不是很理想。特别是处于

表 5 水文模型的移植参数取值

Tab.5 Transplant parameters of hydrological models

研究区域	XM 模型参数		ABCD 模型参数			
	C	S_C	a	b	c	d
长春岭	1.33	449.51	0.99	243.24	0.37	0.92
长春岭(厄尔尼诺)	1.33	333.34	0.97	218.41	0.51	0.95
长春岭(拉尼娜)	1.37	496.98	0.98	126.21	0.42	0.54
金华	0.94	642.70	0.92	219.72	0.22	0.25
金华(厄尔尼诺)	0.97	683.04	0.87	200.99	0.39	0.55
金华(拉尼娜)	0.90	639.15	0.81	274.98	0.21	0.99
兰溪	1.07	1139.58	0.87	274.65	0.30	0.22
兰溪(厄尔尼诺)	1.09	1081.11	0.49	240.96	0.51	0.96
兰溪(拉尼娜)	0.82	1145.95	0.77	410.50	0.05	0.04
衢州	0.87	894.69	0.88	220.03	0.11	0.23
衢州(厄尔尼诺)	0.87	907.69	0.85	145.04	0.20	0.39
衢州(拉尼娜)	0.65	899.82	0.54	250.84	0.01	0.94
圩仁	0.70	552.75	0.86	241.13	0.01	0.65
圩仁(厄尔尼诺)	0.73	459.38	0.88	210.30	0.02	0.75
圩仁(拉尼娜)	0.63	772.47	0.45	185.57	0.07	0.80

海岛地区的长春岭站点, 当使用 XM 模型时, 另外 4 个水文站点的最优参数移植到长春岭站的移植效果均不佳, ΔE_{NS} 和 ΔE_{WB} 均大于 0.2。同时, 圩仁站和长春岭站的水文模型最优参数分别移植到金华站、兰溪站和衢州站时, ΔE_{NS} 结果表现较好, 但是 ΔE_{WB} 较大, 其中 ΔE_{WB} 最大达 0.43, 不满足参数可移植的评判标准。

相邻流域的水文站参数移植效果也大不相同, 例如, 金华站的最优参数移植到圩仁站时, XM 模型

表 6 不同流域地理情况下水文模型参数空间移植效果评价

Tab.6 Evaluation of hydrological model parameters transferability effects under different basin geographical conditions

参数移植	XM 模型					ABCD 模型				
	移植后		指标差值		移植效果	移植后		指标差值		移植效果
	E_{NS}	E_{WB}	ΔE_{NS}	ΔE_{WB}		E_{NS}	E_{WB}	ΔE_{NS}	ΔE_{WB}	
金华→长春岭	0.69	−0.27	0.19	0.24	不合格	0.73	−0.20		0.18	合格
兰溪→长春岭	0.66	−0.16	0.24	0.15	不合格	0.70	−0.19		0.18	合格
衢州→长春岭	0.64	−0.32	0.27	0.30	不合格	0.69	−0.31	0.25	0.30	不合格
圩仁→长春岭	0.54	−0.46	0.35	0.44	不合格	0.63	−0.39	0.29	0.41	不合格
长春岭→金华	0.69	0.34	0.09	0.31	不合格	0.81	0.18		0.19	合格
兰溪→金华	0.80	0.10			良好	0.86	−0.01			良好
衢州→金华	0.86	−0.09			良好	0.85	−0.12		0.11	合格
圩仁→金华	0.80	−0.25		0.23	不合格	0.81	−0.19		0.21	不合格
长春岭→兰溪	0.76	0.16		0.13	合格	0.85	0.14		0.15	合格
金华→兰溪	0.83	−0.09			良好	0.90	−0.03			良好
衢州→兰溪	0.87	−0.13		0.11	合格	0.90	0.10			良好
圩仁→兰溪	0.72	−0.24		0.22	不合格	0.79	−0.18		0.20	合格
长春岭→衢州	0.82	0.25		0.22	不合格	0.89	0.22		0.23	不合格
金华→衢州	0.90	0.02			良好	0.93	0.07			良好
兰溪→衢州	0.89	0.10			良好	0.90	0.10			良好
圩仁→衢州	0.88	−0.12		0.10	合格	0.93	−0.07			良好
长春岭→圩仁	0.55	0.46	0.23	0.43	不合格	0.78	0.32		0.33	不合格
金华→圩仁	0.83	0.16		0.19	合格	0.87	0.14		0.16	合格
兰溪→圩仁	0.68	0.26	0.22	0.27	不合格	0.82	0.17		0.18	合格
衢州→圩仁	0.82	0.11		0.13	合格	0.92	0.08			良好

的 E_{NS} 值为0.83,然而兰溪站的移植效果只有0.68。径流系数为0.64的衢州站的参数移植结果始终要优于径流系数为0.48的长春岭站,径流系数可能是影响模型 E_{NS} 和 E_{WB} 值的原因之一。上述结果可以说明,在20组模型参数移植方案中,XM模型只有10组移植效果在合格及以上,其中有5组为良好,反观ABCD模型则有15组移植效果在合格及以上,其中7组为良好。正是因为如此,参数较多的水文模型(ABCD模型)比参数较少的模型(XM模型)具有更好的空间尺度参数移植性。

4 结论

- (1)对于ENSO事件影响下水文模型参数可移植性,XM和ABCD模型均表现出良好的移植性能,但从厄尔尼诺时期的参数移植至拉尼娜时期的模型模拟效果要略好于拉尼娜时期的参数移植至厄尔尼诺时期。
- (2)对于水文模型不同流域地理情况下参数可移植性,同一流域间的参数移植效果要明显优于相邻或稍远的流域,同时,当模型从产流条件良好的流域转移至产流条件较差的流域时,评判指标会大幅下降,模型移植能力很大程度上减弱。
- (3)对于ENSO事件影响下水文模型的参数移

植效果分析可知,参数少的模型(XM模型)参数移植合格率要优于参数多的模型(ABCD模型)。ABCD模型比XM模型具有更好的空间尺度参数移植能力。

作者贡献声明:

- 陈 浩:研究构思,论文撰写和修改。
许月萍:学术指导与论文修改。
郑超昊:数据处理与分析。
郭玉雪:文献研究与论文审阅。

参考文献:

- [1] 刘艳丽,张建云,王国庆,等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析 I:基准期的模型与方法[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 147.
LIU Yanli, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, *et al.* Evaluation on the influence of natural climate variability in assessing climate change impacts on water resources I: model and methodology in baseline period [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 147.
- [2] LI H, BELDRING S, XU C Y. Stability of model performance and parameter values on two catchments facing changes in climatic conditions [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(7/8): 1317.
- [3] 刘冰石,邹贤才. ENSO影响下的西太平洋地区海陆水储量变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9):

- 1296.
- LIU Bingshi, ZOU Xiancai. Analysis of sea and land water storage changes in the western Pacific under the influence of ENSO [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1296.
- [4] 陈华, 霍苒, 曾强, 等. 雨量站网布设对水文模型不确定性影响的比较[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 34.
- CHEN Hua, HUO Ran, ZENG Qiang, *et al.* Comparative study on the influence of rain-gauge network on the uncertainty of hydrological modeling [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 34.
- [5] PATIL S D, STIEGLITZ M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 409.
- [6] CORNELISSEN T, DIEKKRUGER B, GIERTZ S. A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a tropical catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 221.
- [7] CHOUAIB W, ALILA Y, CALDWELL P V. Parameter transferability within homogeneous regions and comparisons with predictions from a priori parameters in the eastern United States [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 24.
- [8] THIAN Y G, STEPHEN J B. Assessment of soil-based and calibrated parameters of the Sacramento model and parameter transferability [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(1/2): 117.
- [9] 彭安帮, 刘九夫, 马涛, 等. 辽宁省资料短缺地区中小河流洪水预报方法[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(8): 79.
- PENG Anbang, LIU Jiufu, MA Tao, *et al.* Flood forecasting method for medium- and small-size rivers short of hydro-logical data in Liaoning Province [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(8): 79.
- [10] 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.
- ZHU Bingjie, KAN Guangyuan, HE Xiaoyan. Study on hydrological similarity and parameter transplantation of dataless nested watershed [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(3): 223.
- [11] 李紫妍, 刘登峰, 黄强, 等. 定量评估参数不确定性传递对径流模拟的影响[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(3): 53.
- LI Ziyen, LIU Dengfeng, HUANG Qiang, *et al.* Quantitative assessment on influence of parameter uncertainties on run-off simulations [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(3): 53.
- [12] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Process*, 1992, 6(3): 279.
- [13] 熊立华, 郭生练, 付小平, 等. 两参数月水量平衡模型的研制和应用[J]. *水科学进展*, 1996(S1): 80.
- XIONG Lihua, GUO Shenglian, FU Xiaoping, *et al.* Two-parameter monthly water balance model and its application [J]. *Advances in Water Science*, 1996(S1): 80.
- [14] THOMAS H A. Improved methods for national water assessment [D]. Washington D C: Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 1981.
- [15] 王喆, 李昱, 丁伟, 等. 基于扩展Budyko假设的季节径流变化归因分析[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(8): 22.
- WANG Zhe, LI Yu, DING Wei, *et al.* Attribution analysis on seasonal river runoff based on extended Budyko hypothesis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(8): 22.
- [16] 姜倩妮. 多目标GLUE框架下水文模型参数不确定性及参数移植适用性分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- JIANG Qianni. Analysis of parameter uncertainty and its transfer applicability in hydrological modeling using multi-criteria GLUE method [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [17] 冯娇娇, 何斌, 王国利, 等. 基于GLUE方法的新安江模型参数不确定性研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(1): 26.
- FENG Jiaojiao, HE Bin, WANG Guoli, *et al.* Research on parameter uncertainty analysis of Xin'anjiang model based on GLUE method [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(1): 26.
- [18] YANG W, CHEN H, XU C, *et al.* Temporal and spatial transferabilities of hydrological models under different climates and underlying surface conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125276.
- [19] 伍远康, 陶永格, 刘福瑶. 基于区域回归分析法的浙江省洪水计算分区[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(4): 39.
- WU Yuankang, TAO Yongge, LIU Fuyao. Flood zoning calculation in Zhejiang Province based on regional regression analytical method [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(4): 39.
- [20] SANTOSO A, ENDLAND M H, CAI W. Impact of Indo-Pacific feedback interactions on ENSO dynamics diagnosed using ensemble climate simulations [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(21): 7743.
- [21] WEI J, WANG W G, SHAO Q X, *et al.* Influence of mature El Nino-Southern oscillation phase on seasonal precipitation and streamflow in the Yangtze River Basin, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40: 3885.