

基于水量平衡模型的府澧河流域安隔区间径流还原研究

汪 庆

湖北省孝感市水文水资源勘测局, 湖北 孝感

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年6月29日

摘 要

针对府澧河流域安陆水文站至隔蒲潭水文站区间长期存在的水量不平衡问题, 本研究综合运用水文测验分析、用水调查、地下水动态及水量平衡模型等方法, 系统诊断了水量不平衡的成因, 并提出了一套有效的径流还原方案。研究首先通过水文测验精度分析和现场同步比测, 验证了实测流量资料的可靠性, 排除“地下漏斗”因素影响。其次, 实地补充调查区间内取用水、引调水等数据, 提升还原分项的完整性。利用Mann-Kendall检验和小波分析方法, 构建了月尺度的区间水量平衡模型, 采用遗传算法率定参数, 对1980~2020年期间的径流进行还原, 还原后的径流序列有效缓解了上下游“水量倒挂”现象, 修正后的降雨径流关系线拟合效果良好。为府澧河流域以及类似地区解决水量不平衡问题提供了科学依据和技术参考。

关键词

水量平衡, 径流还原, 府澧河流域, Mann-Kendall检验, 小波分析

Research on Runoff Restoration in the Ange Interval of the Fu Huan River Basin Based on the Water Balance Model

Qing Wang

Xiaogan Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hubei Province, Xiaogan Hubei

Received: March 31, 2026; accepted: May 14, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

To address the long-standing issue of water quantity imbalance in the section between Anlu Hydrological Station and Geputan Hydrological Station in the Fu Huan River Basin, this study comprehensively employed hydrological measurement analysis, water use investigation, groundwater dynamics, and water balance

作者简介: 汪庆(1976-), 男, 湖北竹溪人, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面研究, Email: hbsywangqing@qq.com

models to systematically diagnose the causes of the imbalance and proposed an effective runoff restoration scheme. Firstly, the reliability of the measured flow data was verified through hydrological measurement accuracy analysis and on-site synchronous comparison tests, eliminating the influence of the “underground funnel” factor. Secondly, on-site supplementary investigations were conducted to collect data on water withdrawals, water diversion, and water transfer within the section, enhancing the completeness of the restoration items. The Mann-Kendall test and wavelet analysis methods were utilized to construct a monthly-scale water balance model for the section, and the parameters were calibrated using the genetic algorithm. The runoff from 1980 to 2020 was restored, and the restored runoff sequence effectively alleviated the “upstream-downstream water quantity inversion” phenomenon. The revised rainfall-runoff relationship line had a good fitting effect. This study provides a scientific basis and technical reference for solving water quantity imbalance issues in the Fu Huan River Basin and similar regions.

Keywords

Water Balance, Runoff Restoration, Fu Huan River Basin, Mann-Kendall Test, Wavelet Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

水量平衡是水文学基本原理,是水资源评价与管理的重要依据。水量平衡方程通过定量描述区域内收入水量、支出水量与蓄水变化量的关系,在水文水资源研究中得到广泛应用。然而在实际中由于水文测验误差、取用水、地下水交换、河道渗漏等多种因素的影响,水量不平衡现象普遍存在[1][2]。这种不平衡不仅直接影响水资源公报的编制质量,也关系到水资源管理保护和生态流量监管的工作质量。

府澧河是湖北省水利化程度较高的河流之一,其干流上的安陆水文站(上游)至隔蒲潭水文站(下游)区间(以下简称“安隔区间”)多年来持续出现水量不平衡,表现为下游实测径流量有时小于上游,即“水量倒挂”现象。这一现象直接影响府澧河流域水资源测算精度,并对府澧河生态流量保障目标的考核(省水利厅〔2020〕596号文件指定隔蒲潭站为控制断面)构成了挑战。因此,深入剖析安隔区间水量不平衡的成因,并建立可靠的径流还原方法,对于提高流域水资源测算精度、支撑“四水四定”决策、保障区域水安全具有重要的理论意义和实际应用价值。

国内外学者对水文测量误差、水量计算误差及天然径流还原进行了大量研究。在水文测验方面,国际标准化组织(ISO)及各国学者对流速面积法的各项不确定度(如面积、测速历时、有限测点/垂线数、流速仪等)进行了系统分析,赫尔西(Herschy)的研究成果被 ISO 广泛采纳[3]-[5]。在径流还原方面,水量平衡法(即分项调查法)、降雨径流模型法、综合修正法等是常用方法[6]-[8]。例如,水量平衡法概念清晰,但调查工作量大;降雨径流模型法简便明了,但外延精度不易控制。然而,这些方法多侧重于单站或单一因素分析,针对复杂人类活动和气候变化双重影响下的区间水量平衡系统研究相对较少。

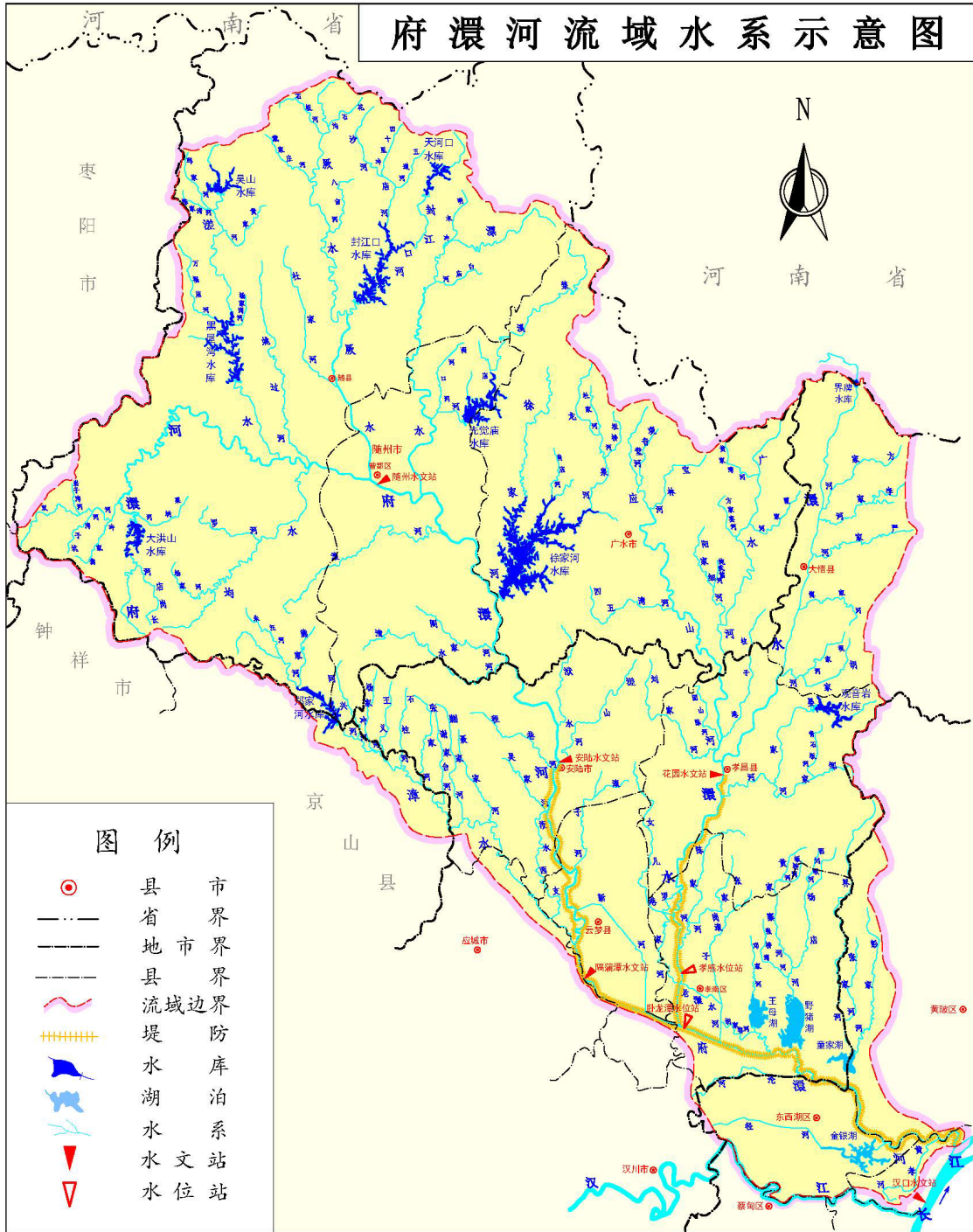
本研究以安隔区间为研究对象,从水文测验精度、区间取用水、地下水交换等多维度入手,系统诊断水量不平衡的成因,并在此基础上构建区间水量平衡模型进行径流还原,旨在破解长期困扰水文工作的水量不平衡难题,为流域综合治理提供更精准的水文技术支撑,并为其他类似区域提供可借鉴的经验。

2. 研究区域与数据

2.1. 研究区域概况

府河亦称澧水,发源于湖北大洪山北麓海拔 1042 m 的斋公岩,因其流域大部在湖北省安陆市境内而得名。

府河自源头向东北方向流至澧潭后，折而流向东南，出随州市区接纳漂水后，流经湖北广水市马坪、长岭岗、平林进入安陆市境，自北而南经青龙潭、三陂港、洑水、府城至巡店。后几经辗转进入云梦县，在清明河乡接纳起源于随州市三里岗付家垭子的漳水，至孝感市孝南区卧龙岗与澧水汇合后，称府澧河，府河干流全长 348 km，集水面积 14,287 km² (见图 1)。

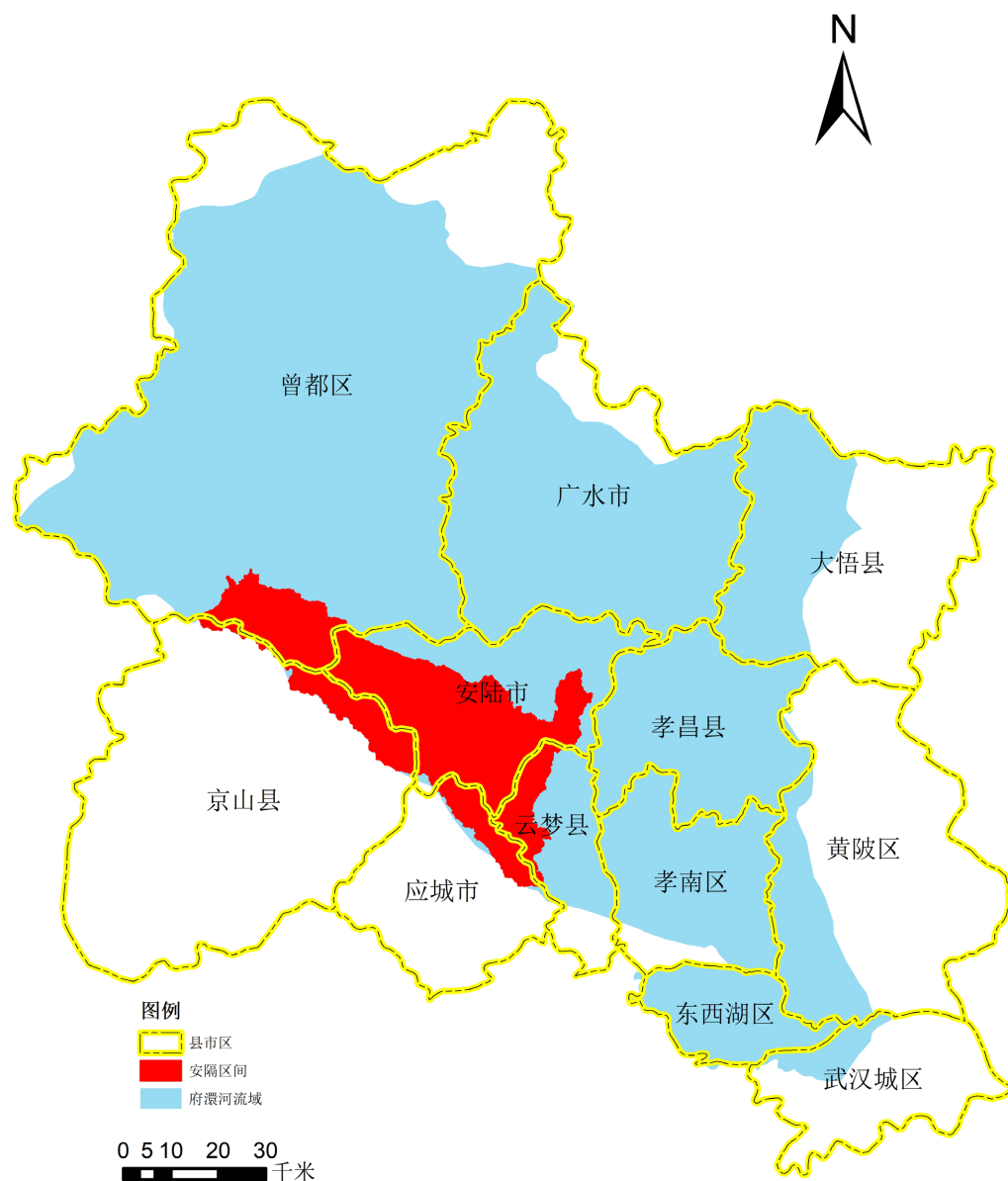


注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2025)1508 号的标准地图制作，底图无修改。

图 1. 府澧河流域概况

安陆水文站(以下简称“安陆站”)位于湖北省安陆市解放山,集水面积 7152 km^2 ,是国家重要水文站,属一类精度水库堰闸站。该站受解放山水库枢纽(含泄洪闸和电站)影响,流量采用水力学公式或率定线推求。隔蒲潭水文站(以下简称“隔蒲潭站”)位于云梦县隔蒲潭镇,集水面积 8812 km^2 ,是国家重要水文站,属一类精度站,为府河中游干流控制站。该站测验河段受安陆解放山电站、泄洪闸及下游云梦橡胶坝等水利工程影响,水位流量关系复杂。

两站之间的区间集水面积约 1660 km^2 (见图 2),水系复杂,包括漳水、滚子河等主要支流,是重要的农业生产区,人类活动频繁。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2025)1508 号的标准地图制作,底图无修改。

图 2. 安隔区间示意图

2.2. 数据来源与处理

本研究收集了 1980~2020 年期间的相关数据。

水文气象数据：收集了安陆站、隔蒲潭站的逐月径流、降水数据，以及安陆、云梦、唐陈等雨量站的降水资料。采用算术平均法计算安隔区间面平均降水量。收集了安陆、云梦(1980~2016 年)和花园、汉川(2017~2020 年)等蒸发站的逐月水面蒸发数据，用于估算面平均潜在蒸散发。

还原水量要素：收集了 1980~2020 年两站的农业耗水、工业耗水、生活耗水、蓄水变量、水库蒸发、跨流域引调水等分项还原数据。为弥补统计数据的不足，项目组于 2019~2021 年开展了两次大规模的取用水补充调查，采用无人机巡查和现场踏勘相结合的方式，更新了口门资料。补充调查后，安陆站新增 3 处取水口，隔蒲潭站新增 36 处取排水口，并补充完善了 2018~2020 年的引调水工程数据。

现场测验数据：为验证水文测验精度并排查地下径流交换，2021 年在安隔区间布设了安陆解放山、安陆三桥、巡店大桥、义堂大桥、清明河乡大桥、隔蒲大桥等 6 个临时断面，开展了 130 余次同步流量测验(包括 ADCP 与流速仪比测)，并进行了上下游断面间的两两比测。

3. 研究方法

3.1. 水量不平衡成因分析框架

本研究构建了一个多层次、逐级递进的分析框架，以全面诊断水量不平衡的成因(见图 3)：

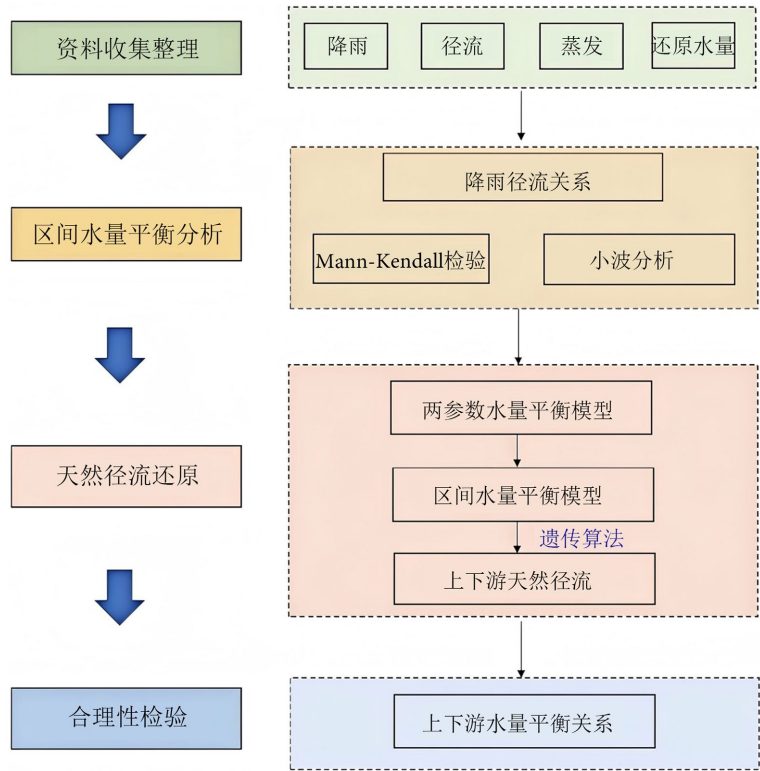


图 3. 区间水量平衡模型建立技术路线图

1、水文测验精度评估：分析安陆站和隔蒲潭站历年流量整编成果与实测资料，评估单次流量测验的随机不确定度和系统误差是否符合《河流流量测验规范》(GB 50179-2015)¹要求，并通过安隔区间河道同步比测验验证测验方法的一致性。

2、取用水调查与合理性复核：通过补充调查，完善取用水口门信息，更新引调水资料，并选取典型年份

¹<http://zy.cjh.com.cn/upload/5/file/2018/0102/1514882296421074513.pdf>

(2018~2020 年)分析区间主要支流(漳水等 6 条河流)的天然径流量,以复核还原分项的完整性和合理性。

3、地下水交换影响分析:整理分析区间内降水、地表水位与地下水位的逐日过程线,结合河道上下游实测流量变化,判断是否存在因“水量漏斗”或地下暗河导致的水量异常损失。

4、降雨径流关系变化识别:在排除上述因素后,聚焦于气候变化和下垫面改变对径流的影响。运用 Mann-Kendall 检验和小波分析方法,定量识别降雨径流关系的变化趋势与突变点。

3.2. 降雨径流关系变化识别

1、Mann-Kendall 检验:

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,许多学者不断应用 Mann-Kendall 方法来分析降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据,计算简便。

采用 Mann-Kendall 非参数检验法对上下游水文站的年径流和年降雨序列进行趋势分析和突变点检验[9]。该方法不要求数据服从特定分布,且不受少数异常值干扰,适用于水文气象序列。

2、小波分析:

小波分析是一种数学工具,用于分析信号或数据的时频局部化特征。针对降雨与径流序列的非平稳特性,交叉小波变换能够同时揭示两者在时频域中的共同显著周期及其局部相位差(即径流对降雨的滞后时间),而小波相干谱则进一步量化不同时间-频率尺度上两者的相关强度随时间的动态演变。二者结合,可系统解析流域降雨-径流关系的多尺度响应特征,以及气候变化或人类活动干扰下该关系的时变规律。

利用交叉小波变换(Cross Wavelet Transform, XWT)和小波相干谱(Wavelet Coherence, WTC)分析降雨-径流序列在时频域内的共振周期、相位关系及其随时间的变化[10][11]。XWT 可以揭示两者在时频空间上的高能量区和相位关系,而 WTC 则能更好地分析低能量值区域的相似性,从而全面理解降雨对径流的影响及其演变规律。

3.3. 区间水量平衡模型构建

根据上下游水量平衡关系,建立月尺度区间水量平衡模型如下:

$$Q_{g,c} + Q_{g,h} + \Delta Q_g = Q_{a,c} + Q_{a,h} + Q_q + \Delta Q_a \quad (1)$$

式中, $Q_{g,c}$ 、 $Q_{a,c}$ 分别为实测下游隔蒲潭和上游安陆(二)水文站径流, mm;

$Q_{g,h}$ 、 $Q_{a,h}$ 分别为统计的下游隔蒲潭站和上游安陆站控制流域的还原水量,其中包括工业、农业等人类活动取用水量、蓄水体变量和跨流域引入及引出水量等, mm;

Q_q 为区间产流,考虑到地下水的交换这些无法被观测到的量 mm;

ΔQ_g 、 ΔQ_a 作为误差量,其中包括人类取水量的退水,径流观测的误差及地下水交换等水量要素, mm。

基于线性假设,设置误差水量为各种水量要素的线性组合,根据特性,误差量与其余观测水量要素关系设置如下:

$$\Delta Q_a = aQ_{a,c} + bQ_{a,h} + cQ_q \quad (2)$$

$$\Delta Q_g = dQ_{g,c} + eQ_{g,h} \quad (3)$$

式中, a , b , c , d , e 为待确定的参数。

基于上述式子,可将式(1)转化为下式:

$$Q_{g,c} + Q_{g,h} + dQ_{g,c} + eQ_{g,h} = Q_{a,c} + Q_{a,h} + Q_q + aQ_{a,c} + bQ_{a,h} + cQ_q \quad (4)$$

等式左边即为还原后的隔蒲潭水文站天然径流,等式右边为还原后的安陆(二)水文站天然径流与区间产流,

根据水量平衡，可得到下列关系：

$$Q_{g,t} = (1+d)Q_{g,c} + (1+e)Q_{g,h} \quad (5)$$

$$Q_{a,t} = (1+a)Q_{a,c} + (1+b)Q_{a,h} \quad (6)$$

$$Q_{q,t} = (1+e)Q_q \quad (7)$$

式中， $Q_{g,t}$ 、 $Q_{a,t}$ 、 $Q_{q,t}$ 分别表示还原后的隔蒲潭站、安陆站径流及天然区间产流，mm。

基于上述式子，还原径流问题可转化为求解上述区间水量平衡模型的各个参数。

对于区间产流 Q_q 采用熊立华等于 1996 年提出的两参数月水量平衡模型，该模型已被广泛应用于流域中长期水文模拟[7]，其具有模型结构简单、物理概念明确、对输入资料要求不高、模型参数较少等优点。其中，月实际蒸发值的计算公式为：

$$ET_t = C \times PET_t \times \tanh(P_t/PET_t) \quad (8)$$

式中， t 表示月份； ET_t 为月实际蒸发值； PET_t 为月潜在蒸发值； $\tanh$ 为双曲正切函数； P_t 为月降水量； C 为模型的第一个参数，综合反映了降水及蒸散发间的关系。天然区间产流与土壤含水量有密切关系，其计算公式为：

$$Q_{qt} = S_t \times \tanh(S_t/SC) \quad (9)$$

式中， S_t 为土壤含水量； SC 定义为流域最大蓄水能力(mm)，代表当土壤几乎没有水分时整个流域的平均持水能力，为模型的第二个参数。

扣除蒸散发后，首先确定初始土壤含水量，过程土壤含水量的计算公式为 $S_{t-1} + P_t - ET_t$ ，代入公式(9)得：

$$Q_{qt} = (S_{t-1} + P_t - ET_t) \times \tanh[(S_{t-1} + P_t - ET_t)/SC] \quad (10)$$

式中， S_{t-1} 为第 $t-1$ 个月底，第 t 个月初的土壤含水量。由水量平衡原理，第 $t+1$ 个月初的土壤含水量计算公式为：

$$S_t = S_{t-1} + P_t - ET_t - Q_{qt} \quad (11)$$

4. 结果与讨论

4.1. 模型率定与评价

以隔蒲潭站实测径流为模拟目标，采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)率定模型中的未知参数(C ， SC ，初始土壤含水量 S_0 ，以及误差项系数)。设置两种率定方案以考察模型的稳定性：

方案一(整段率定)：利用 1980~2020 年全部数据进行率定，并随机划分 2/3 为率定期，1/3 为检验期。

对于整段率定的研究方案在整个研究期的模拟效果如图 4、图 5 所示。参数率定结果如表 1。

方案二(分段率定)：考虑到 2000 年前后人类活动影响程度可能不同，以 2000 年为界，分为 1980~1999 年和 2000~2020 年两个时段分别率定，并各自划分率定期和检验期。

对于分段率定的研究方案，隔蒲潭站在整个研究期的模拟效果如图 6、图 7 所示。参数率定结果如表 2。

表 1. 整段率定方案下模型优选参数

参数名	C	SC	S	a	b	c	d	e
参数值	0.936	952.513	40.462	0.286	-0.995	-0.820	-0.649	0.598

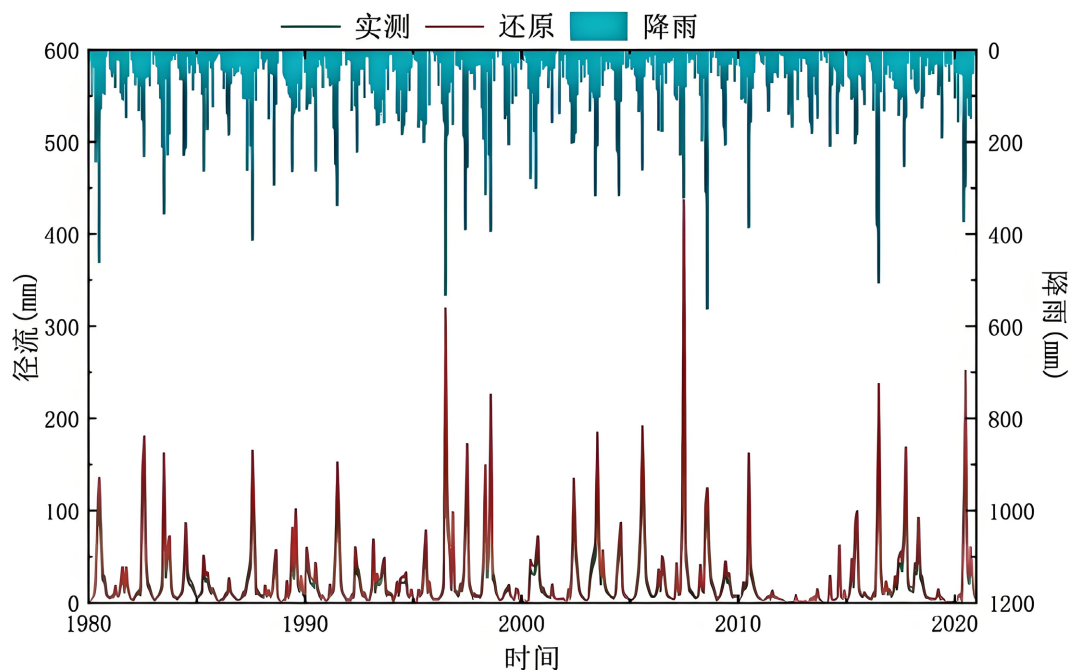


图 4. 1980~2020 年整段率定方案下安陆(二)水文站的还原径流序列

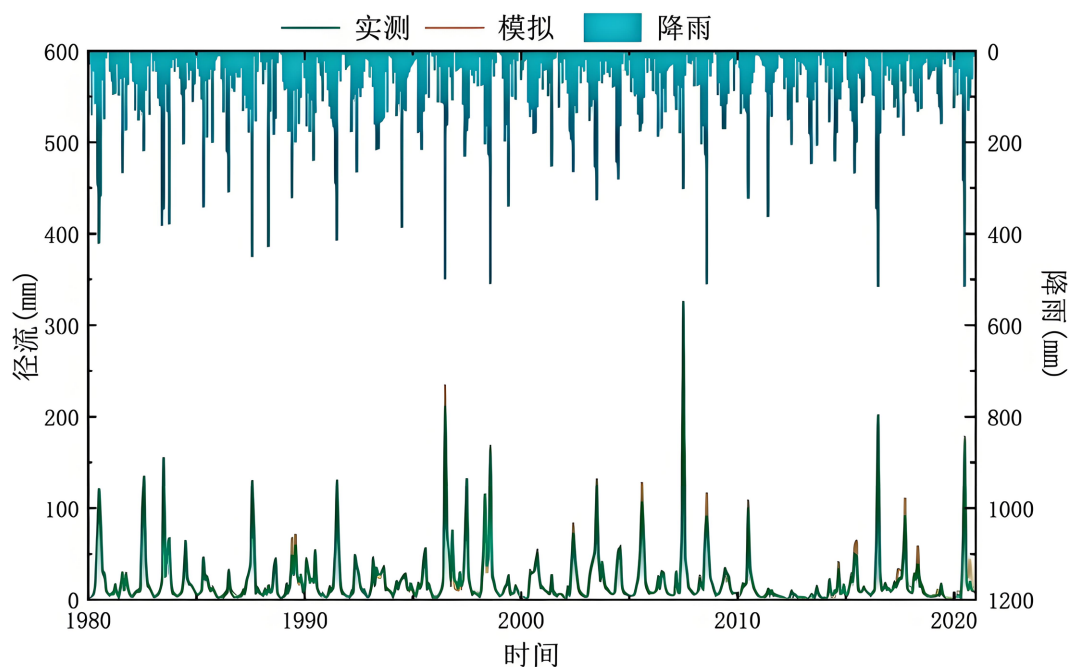


图 5. 1980~2020 年整段率定方案下隔蒲潭水文站的还原径流序列

表 2. 分段率定方案下模型优选参数

参数名	C	SC	S	a	b	c	d	e
1980~1999	1.324	708.958	5.216	-0.011	-0.856	-0.872	-0.523	0.102
2000~2020	0.668	1998.887	5.581	0.471	-0.999	-0.935	-0.846	0.685

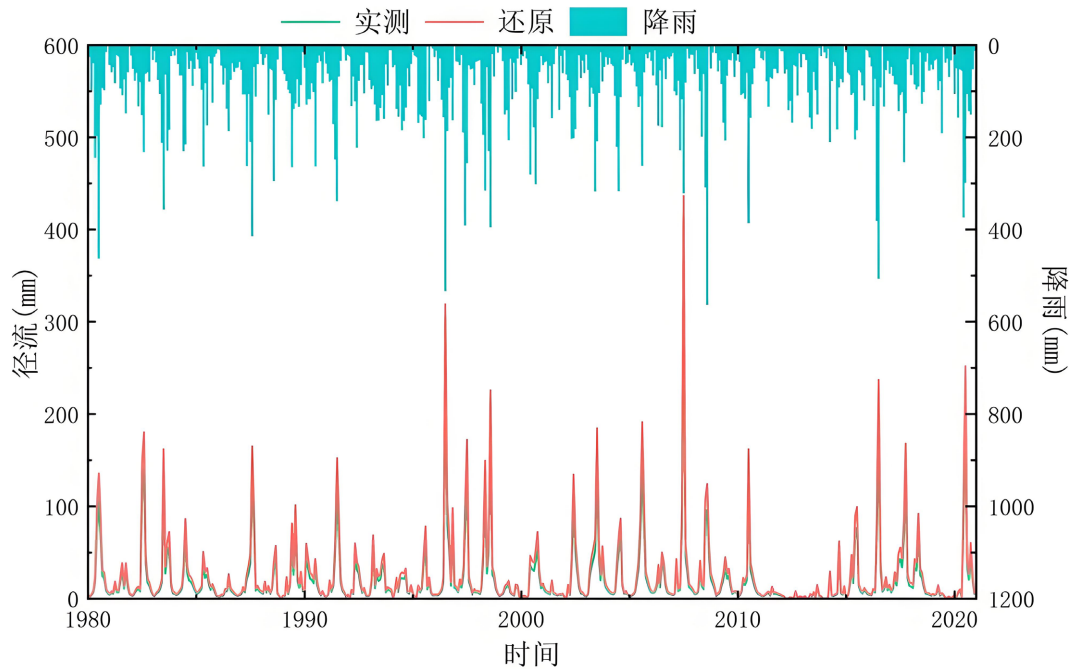


图 6. 1980~2020 年分段就率定方案下安陆(二)水文站的还原径流序列

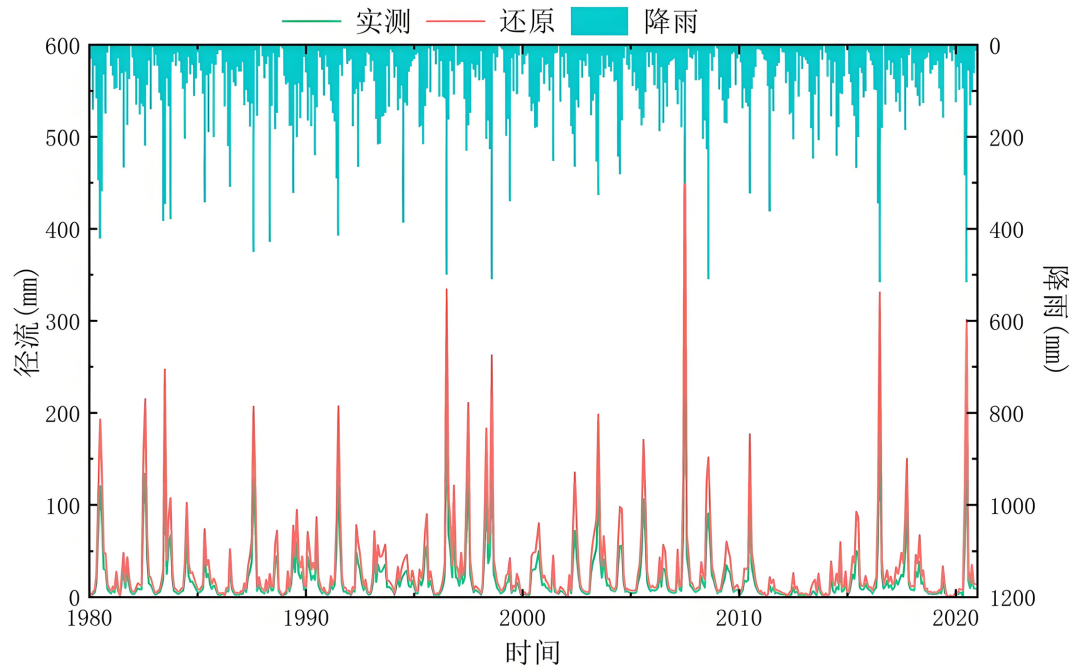


图 7. 1980~2020 年分段就率定方案下隔蒲潭水文站的还原径流序列

构建的区间水量平衡模型在两种率定方案下均表现出良好的性能(表 3)。整段率定方案在检验期的 NSE (Nash-Sutcliffe 效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient),它是水文学、气象学、环境科学等领域中广泛用于评估模型模拟效果好坏的一个统计指标。)高达 0.961, WBI (水量平衡指数(Water Balance Index)或水量相对误差)为 0.091; 分段率定方案在 2000~2020 年检验期的 NSE 为 0.928, WBI 为 0.149。模型模拟的隔蒲潭站径流过程与实测值吻合度较高,证明了模型结构的合理性。

通过模型还原后, 安陆站和隔蒲潭站的天然径流序列发生了合理调整, 尤其是隔蒲潭站还原径流较实测值显著增加。还原后, 上下游水量差由原来的频繁负值(倒挂)基本转变为正值, 更符合流域水量沿程增加的自然规律。

对比两种方案, 整段率定结果对“倒挂”现象的缓解效果更优, 且在整个研究期内保持了一致的参数体系, 因此被选定为最终方案。

表 3. 不同方案下区间水量平衡模型模拟效果

方案	时段	NSE (率定期/检验期)	WBI (率定期/检验期)
整段率定	1980~2020	0.974/0.961	0.014/0.091
分段率定	1980~1999	0.977/0.960	0.021/0.039
分段率定	2000~2020	0.980/0.928	0.003/0.149

4.2. 水量不平衡成因诊断

4.2.1. 水文测验精度分析

分析表明, 安陆站电站和泄洪闸各年关系线与综合线的最大相对偏差, 均符合《水文巡测规范》(SL 195-2015)²的允许误差要求。选取 1998 年典型流量测次计算, 其系统误差和总不确定度均未超过规范允许值。隔蒲潭站选取 2015、2016 年高、中、低水典型测次计算, 同样满足精度要求。

2021 年安隔区间河道同步比测结果显示, 上下游断面流量依次递增, ADCP 与流速仪比测误差多在 5%以内(个别高水期因水流湍急导致误差稍大, 但整体在可接受范围)。因此, 水文测验精度不是导致水量不平衡的主要原因, 见表 4。

表 4. 隔蒲潭站单次流量测验不确定度计算结果

年份	流量测次	已定系统误差(%)	允许系统误差(%)	总不确定度(%)	允许不确定度(%)
2015	Q51 (低水)	-2.0	-2.5~1	5.0	5
2015	Q48 (中水)	-2.0	-2.0~1	3.9	6
2015	Q45 (高水)	-1.4	-1.5~1	4.0	5
2016	Q50 (低水)	-1.3	-2.5~1	3.4	9
2016	Q24 (中水)	-2.0	-2.0~1	4.1	6

4.2.2. 取用水调查与支流来水分析

通过补充调查, 安陆站和隔蒲潭站的取用水数据得到显著完善。以安陆站为例, 补充调查后, 2018 年和 2019 年的径流还原合格率分别由 42.4%和-32.4%修正为 45.3%和-24.9%(表 5), 虽仍未达标, 但向合理方向改善, 有效减少了“水量倒挂”的幅度。

对 2018 年(平水年)、2019 年(枯水年)、2020 年(丰水年)区间 6 条主要支流的天然径流量分析表明, 其年径流深与径流系数随丰、平、枯年份变化规律一致, 且与雨量及承雨面积基本成正比, 说明主要还原分项覆盖到位, 计算合理, 见表 5。

4.2.3. 地表水 - 地下水关系分析

通过对比安隔区间降水、地表水位和地下水位逐日过程线, 发现三者变化趋势基本同频, 未出现地表水与地下水变化反向的异常情况。同时, 2021 年河道实测流量从上游至下游依次递增(例如, 4 月 22 日实测安陆解放山断面流量 87.8 m³/s, 隔蒲大桥断面流量 116 m³/s), 未发现沿程水量异常损失。因此, 可以排除“水量漏斗”

²<http://zy.cjh.com.cn/upload/5/file/2018/0102/1514883651802007233.pdf>

或地下暗河等地质因素导致的水量不平衡。

表 5. 安陆站还原计算补充调查对照表

年份	项目	实测径流(亿 m ³)	还原水量(亿 m ³)	天然径流(亿 m ³)	径流深(mm)	径流系数	合格率(%)	是否合格
2018	原表	16.96	-0.1624	16.80	234.9	0.298	42.4	否
2018	补充后	16.96	0.1946	17.15	239.8	0.304	45.3	否
2019	原表	2.909	0.7154	3.625	50.70	0.092	-32.4	否
2019	补充后	2.909	1.1174	4.027	56.30	0.102	-24.9	否

4.3. 降雨径流关系变化

1962~2020 年实测径流对比显示,1962~2000 年间,下游隔蒲潭站径流普遍大于上游安陆站,符合水文规律。但 2000 年后,下游径流多次小于上游(“倒挂”现象),且发生频率和量级显著增大。

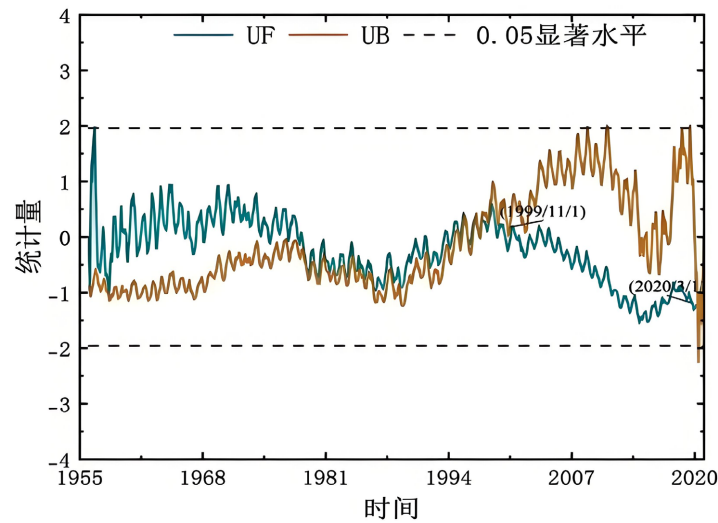


图 8. 1956~2020 年安陆(二)水文站降雨序列的 Mann-Kendall 突变检验

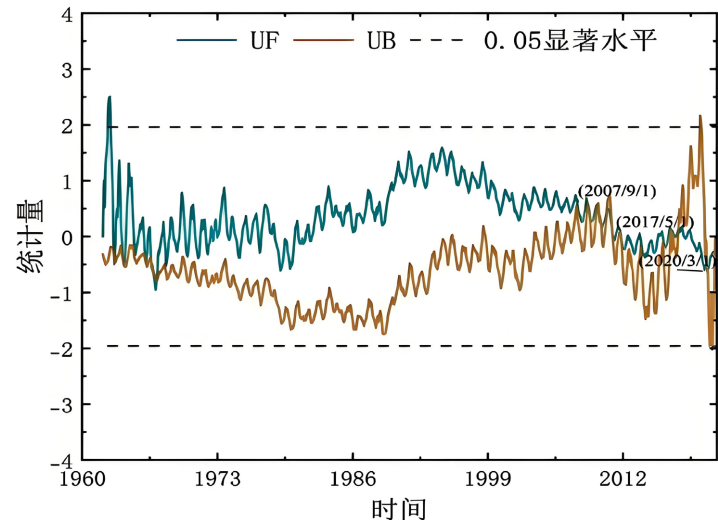


图 9. 1962~2020 年隔蒲潭水文站降雨序列的 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 检验结果表明(见图 8、图 9)，安陆站径流无显著变化趋势($Z = -0.39$)，而隔蒲潭站径流呈显著下降趋势($Z = -2.07$ ，超过 95%置信区间)。降雨序列虽无明显趋势，但均存在突变点(安陆站在 1999、2020 年；隔蒲潭站在 2007、2017、2020 年)。双累积曲线进一步揭示，隔蒲潭站降雨径流关系在 2007 年出现明显拐点，2007 年后产流能力显著下降， R^2 由 0.997 下降至 0.971。

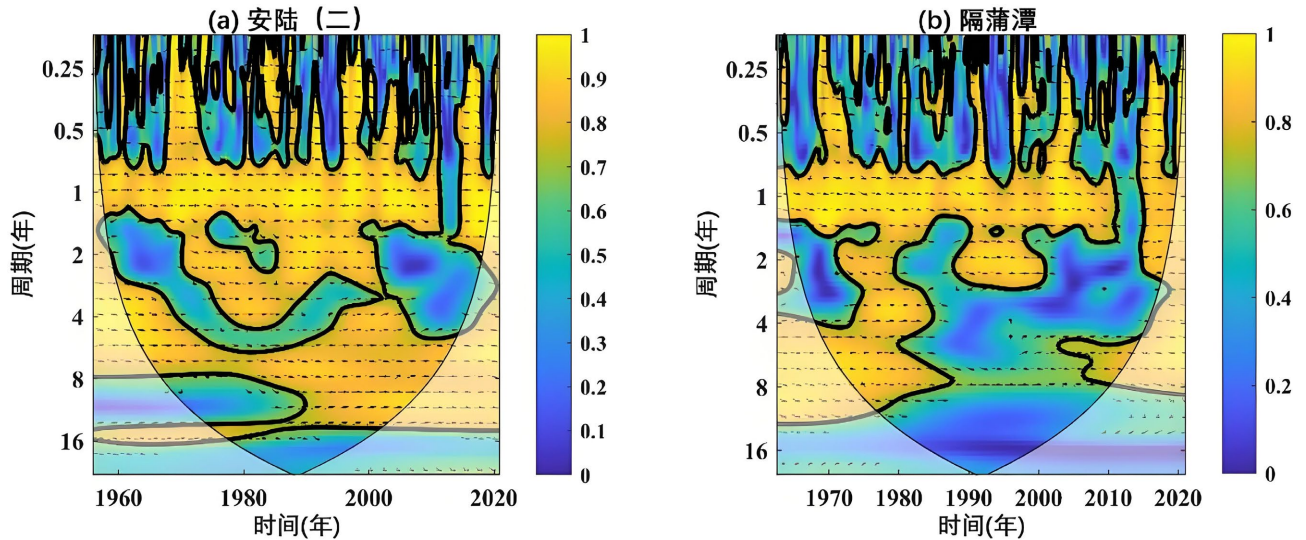


图 10. 安陆(二)和隔蒲潭水文站的降雨与径流序列的小波相干谱

交叉小波分析结果显示(见图 10)，2011~2014 年及 2018~2020 年，两站降雨对径流的影响显著减弱，小波相干谱也发生显著变化。这些结果共同证实，安隔区间水量不平衡是气候变化和人类活动(如水利工程运行、下垫面改变)共同作用的结果，原有的降雨径流关系已不再适用于天然径流的推算。

4.4. 降雨径流关系修正

基于整段率定还原的 1980~2020 年天然径流序列，重新建立了安陆站和隔蒲潭站的降雨径流关系线(见图 11、图 12)。新的关系线拟合效果良好，相关性显著提高，为后续水资源评价、公报编制和生态流量保障提供了更科学、更可靠的基准。

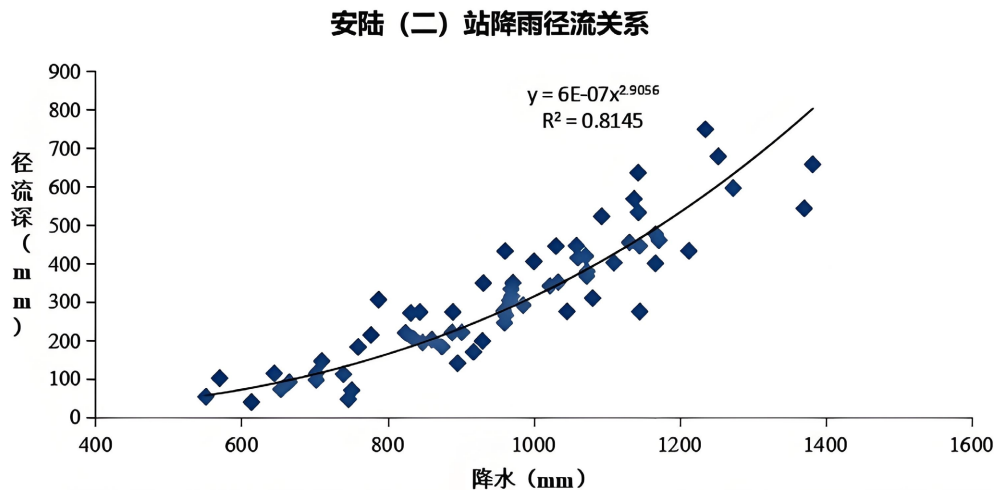


图 11. 安陆站降水径流关系曲线(修正系列)

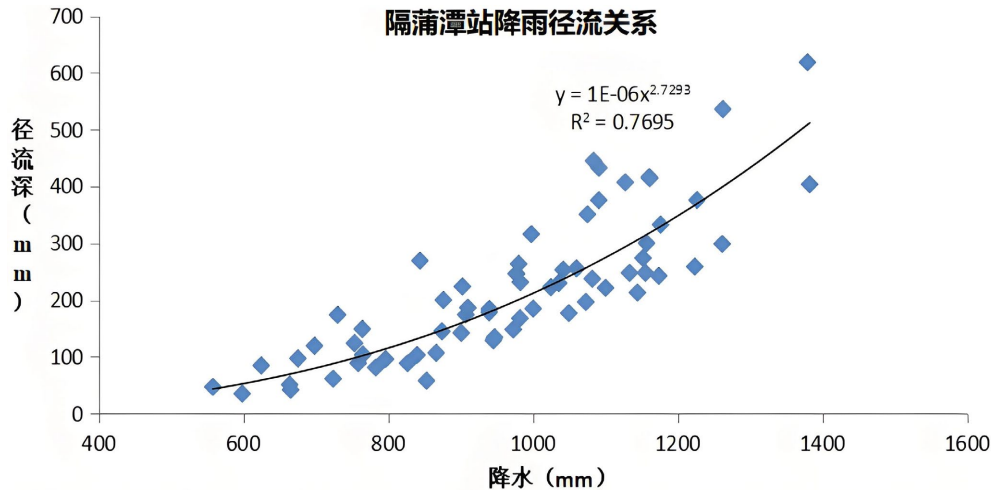


图 12. 隔蒲潭站降水径流关系曲线(修正系列)

5. 结论

本研究系统揭示了府澧河流域安隔区间水量不平衡的成因，并提出了一套有效的径流还原方法，主要结论如下：

1) 成因诊断：安隔区间水量不平衡并非由水文测验精度或“地下漏斗”等地质因素导致，而是气候变化与人类活动(尤其是水利工程运行、取用水增加)共同作用下，流域降雨径流关系发生显著改变的结果。下游隔蒲潭站径流呈现显著下降趋势，且降雨径流关系在 2007 年后发生明显变化。

2) 模型构建与验证：基于区间水量平衡和两参数月水量平衡模型构建的径流还原方法，能够有效模拟和修正受人类活动影响的径流过程。整段率定方案(1980~2020)表现最佳，在检验期取得了 0.961 的 NSE 和 0.091 的 WBI，模型性能优良，参数稳定。

3) 还原效果：应用该模型还原后的径流序列，基本消除了上下游“水量倒挂”现象，使流域水量平衡关系回归合理，并据此修正了 1956~2020 年的降雨径流关系线，为流域水资源量确权、生态流量考核提供了科学依据。

4) 实践价值：本研究为复杂条件下流域水量平衡分析提供了可借鉴的技术路径。研究成果支撑了 2022 年及 2023 年安隔区间水量平衡的改善，两站还原合格，生态流量达标。同时，通过项目实践，锻炼了一支专业的水文水资源勘测评价分析队伍。

尽管本研究取得了显著成果，但仍存在一些局限性，未来研究可从增设水文监测点、加强地下水动态监测、动态监测流域土地利用等方面深化。

基金项目

安隔区间水量不平衡分析研究(HBSLKY202201)。

参考文献

- [1] WANG, H., NIU, C. W. and ZHAO, Y. Natural-social dualistic water cycle and water resources research. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1599-1607.
- [2] 夏军, 李存虎. 全球变化背景下水资源面临的挑战与机遇[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 1-10.
- [3] HERSCHY, R. W. *Streamflow measurement*. 3rd Edition, London: CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781482265880>
- [4] ISO 748:2024. *Hydrometry—Measurement of liquid flow in open channels—Velocity area methods using point velocity*

- measurements. 2024. <https://www.gso.org.sa/en/>
- [5] 中华人民共和国国家标准. GB 50179-2015 河流流量测验规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [6] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8.
- [7] HONG, X., GUO, S., CHEN, G., GUO, N. and JIANG, C. A modified two-parameter monthly water balance model for runoff simulation to assess hydrological drought. *Water*, 2022, 14: 3715. <https://pdfs.semanticscholar.org/87a6/720527f25fc005e28fc8db7e6db951c23912.pdf>
- [8] 包为民. 水文预报[M]. 第 5 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- [9] ALASHAN, S. Non-monotonic trend analysis using Mann-Kendall with self-quantiles. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(2): 901-910. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04666-z>
- [10] GRINSTED, A., MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- [11] ZHANG, H., RUI, X., ZHOU, Y., SUN, W., XIE, W., GAO, C., et al. Analysis of the response of shallow groundwater levels to precipitation based on different wavelet scales—A case study of the Datong Basin, Shanxi. *Water*, 2024, 16(20): 2920. <https://doi.org/10.3390/w16202920>