

基于测验误差的水文站水量平衡修正方法研究

卜慧¹, 蒋正清¹, 郭卫¹, 朱迪¹, 李舒²

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²贵州一方工程设计咨询有限责任公司, 贵州 六盘水

收稿日期: 2025年11月6日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

水文测验误差可能引起上下游水文站水量不平衡问题, 本文以金沙江奔子栏-石鼓河段干支流水文站实测径流为研究对象, 针对水量不平衡月份, 提出采用水文比拟法、相似月法、相关关系法、条件平差法等开展水量平衡修正, 并经综合对比分析选用条件平差法修正成果。将修正后径流与上下游水文站进行径流协调性分析, 也是合理协调的。本文提供了一种水量平衡修正及径流协调性分析方法, 可大批量处理水量不平衡问题。水文站径流在经科学合理的水量平衡修正后, 可为工程水文设计、水库群运行调度、水资源精细化管理等提供更为可靠的数据。

关键词

水量平衡修正, 测验误差, 条件平差法, 径流协调性分析

Research on Correction Method of Water Balance of Hydrographic Station Based on Measuring Error

Hui Bu¹, Zhengqing Jiang¹, Wei Guo¹, Di Zhu¹, Shu Li²

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Guizhou Yifang Engineering Design Consulting Co., Ltd., Liupanshui Guizhou

Received: November 6, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 26, 2025

Abstract

The hydrological measuring error may cause water imbalance in upstream and downstream hydrology stations. Taking the measured runoff data of the mainstream and tributary hydrological stations in the Benzilan-

作者简介: 卜慧(1990-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水文水资源方面工作, Email: buhui992116@163.com

文章引用: 卜慧, 蒋正清, 郭卫, 朱迪, 李舒. 基于测验误差的水文站水量平衡修正方法研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(6): 608-617. DOI: 10.12677/jwrr.2025.146065

Shigu reach of the Jinsha River as the research object, this paper proposes to adopt the hydrological analogy method, similar month method, correlation analysis method, and conditional adjustment method to carry out water balance correction for the months with water imbalance issues. After comprehensive comparative analysis, the results of conditional adjustment method is selected. Then, the runoff coordination analysis is carried out with the upstream and downstream hydrographic stations, and the results show that they are coordinated. This paper provides a method of water balance correction and runoff coordination analysis, which can deal with water imbalance in large quantities. After scientific and reasonable water balance correction for hydrographic station runoff, more reliable data can be provided for engineering hydrological design, reservoir group operation and dispatching and water resources fine management.

Keywords

Water Balance Correction, Measuring Error, Conditional Adjustment Method, Analysis of Runoff Coordination

Copyright © 2025 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

在水文测验中,所有观测结果均存在一定误差[1],可能引起水文站水量不平衡,从而困扰水文资料使用[2]。随着最严格水资源管理[3]、水资源刚性约束[4]等制度的实施,水资源在经济社会发展中的地位日益重要,大中型水库的建设和运行调度也离不开水文资料的支撑[5],水文站实测径流资料的可靠性影响到水资源管理的方方面面,如何科学合理地处理水量不平衡问题显得尤为重要。

目前针对水量平衡修正开展的研究较少,国外研究多集中在流域、区域等大尺度水量平衡模型等[6][7]。国内个别学者做了一些尝试,张留柱[8]等研究了实测径流量资料平差处理问题,并推导了参数平差法的具体计算模型,对黄河流域花园口至利津6个水文站1966~1969年年径流量进行了平差计算,张彦丽[9]等通过最小二乘法条件平差,对花园口至利津6个水文站2002~2009年年径流量进行了平差计算。实际操作中,水量平衡修正处理结果常因人而异,且因水资源精细化管理[10]对月尺度甚至日尺度径流资料水量平衡也提出了更高的要求,修正后的水文站径流与其上下游水文站径流协调性分析也应充分考虑,因此本文尝试对月径流开展水量平衡修正方法及合理性研究。

2. 研究区域及水文站概况

金沙江干流直门达到宜宾全长2326 km,落差3279 m,平均比降1.4‰。水系较发达,支流众多,集水面积在5000 km²以上的一级支流有15条。金沙江水力资源丰富,上游干流已建有苏洼龙水电站,叶巴滩、拉哇、巴塘、旭龙水电站在建,中游干流已建有梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩、金沙、水电站,下游干流已建有金沙、银江、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水电站,可靠的水文资料是各水电站工程设计及运行管理的基础。

金沙江上中游河段(巴塘-攀枝花区间)干流设有巴塘、奔子栏、石鼓、中江(2012年金江街站上迁建立)、攀枝花等多个国家基本水文站。巴塘-攀枝花区间较大支流岗曲、腊普河、冲江河、硕多岗河、五郎河、漾弓江、落漏河、桑园河、渔泡江、马过河、新庄河等设有省级基本水文站。

奔子栏-石鼓河段有岗曲河、腊普河等支流汇入,岗曲河控制站为上桥头水文站,腊普河控制站为塔城水文站,基本情况见表1,示意图见图1。

表1. 水文站基本信息

| 水文站名称 | 河流 | 集水面积(km ²) | 测站高程(m) | 设立日期 | 管理机构 |
|-------|-------|------------------------|---------|----------|--------|
| 石鼓 | 金沙江 | 214,184 | 1829 | 1939年2月 | 长江委水文局 |
| 奔子栏 | | 203,320 | 2023 | 1959年11月 | |
| 塔城(二) | 金沙江支流 | 724 | 2000.51 | 1960年5月 | 云南省水文局 |
| 上桥头 | | 2432 | 1998.38 | 1960年4月 | |

**图1. 水文站位置示意图**

奔子栏 - 石鼓河段各站径流应满足：

$$Q_{\text{奔子栏}} + Q_{\text{上桥头}} + Q_{\text{塔城}} < Q_{\text{石鼓}}$$

根据各站径流还原成果，各年年径流量上下游基本满足水量平衡，个别月份存在水量不平衡现象，如2012年7月，2014年8月，2019年2月、7月及2020年7月、8月，见表2。

表2. 水量不平衡月份来水情况

| 年份 | 月份 | 天然月均流量(m ³ /s) | | | | 未控区间水量(m ³ /s) |
|------|----|---------------------------|------|------|------|---------------------------|
| | | 奔子栏 | 上桥头 | 塔城 | 石鼓 | |
| 2012 | 7 | 4160 | 68.5 | 22 | 4200 | -50.5 |
| 2014 | 8 | 3600 | 94.9 | 34 | 3710 | -18.5 |
| 2019 | 2 | 442 | 14.4 | 9 | 464 | -1.4 |
| 2019 | 7 | 2740 | 52.7 | 14 | 2800 | -6.7 |
| 2020 | 7 | 4000 | 49.5 | 15.7 | 3980 | -85.2 |
| 2020 | 8 | 3840 | 83.5 | 21.1 | 3870 | -74.6 |

3. 水量平衡修正方法

本文采用水文比拟法、相似月法、相关关系法、条件平差法等多种方法开展月径流水量平衡修正，综合对比分析选用。

3.1. 水文比拟法

针对水量不平衡月份，选取水位流量关系较为稳定的奔子栏站作为依据站，按照水文比拟法和区间流量叠加原理，对石鼓站进行水量平衡修正。

1) 奔子栏放大

奔子栏水文站控制断面集水面积 $203,320 \text{ km}^2$ ，石鼓水文站控制断面集水面积 $214,184 \text{ km}^2$ ，奔子栏 - 石鼓区间面积 $10,864 \text{ km}^2$ ，仅占奔子栏水文站控制断面集水面积的 5%，可采用奔子栏站流量按面积比放大至石鼓断面，见下式：

$$Q_{\text{石鼓}} = Q_{\text{奔子栏}} \times F_{\text{石鼓}} / F_{\text{奔子栏}} \quad (1)$$

2) 区间放大

奔子栏 - 石鼓河段有岗曲河、腊普河等支流汇入，岗曲河控制站为上桥头水文站，腊普河控制站为塔城水文站，两站控制断面集水面积分别为 2432 km^2 、 724 km^2 ，奔子栏 - 石鼓区间面积 $10,864 \text{ km}^2$ ，区间来水可采用两站流量按面积比放大，再加上奔子栏站流量，即为石鼓站来水，见下式：

$$Q_{\text{石鼓}} = Q_{\text{奔子栏}} + (Q_{\text{塔城}} + Q_{\text{上桥头}}) / (F_{\text{塔城}} + F_{\text{上桥头}}) \times F_{\text{奔-石区间}} \quad (2)$$

3.2. 相似月法

针对水量不平衡月份，选取与奔子栏站来水量相似月份，根据其对应月份石鼓站来水量，对不平衡月份石鼓站来水量进行水量平衡修正。

3.3. 相关关系法

根据奔子栏和石鼓水文站实测月均流量资料，剔除水量不平衡月份，建立石鼓 - 奔子栏月均流量相关关系（见图 2 及式(3)），石鼓 - 奔子栏月均流量相关系数达 0.9949。按此相关关系对石鼓水文站月径流量进行水量平衡修正。

$$Q_{\text{石鼓}} = 1.089Q_{\text{奔子栏}} + 91.892 \quad (3)$$

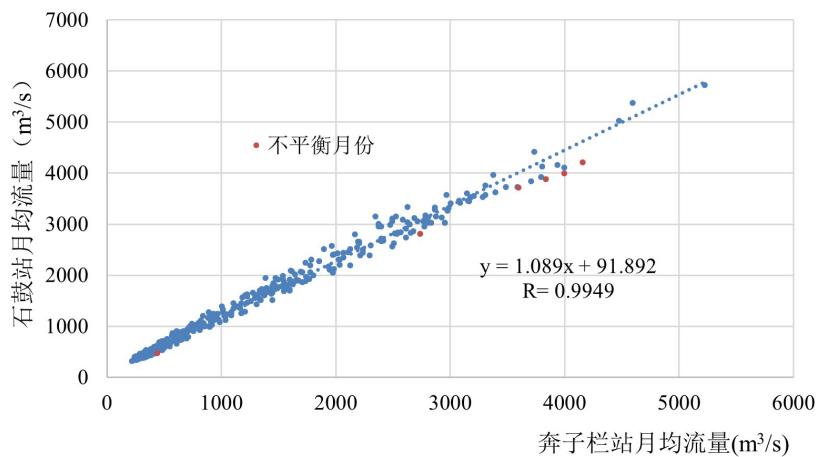


图 2. 石鼓 - 奔子栏月均流量相关关系

3.4. 条件平差法

最小二乘法是测量数据平差处理的基础理论，条件平差的原理就是基于最小二乘法，利用多余观测对结果进行修正。根据相关文献研究，认为采用最小二乘法进行条件平差可解决上、下游水文站水量观测不平衡问题[9]。

设 A_1, A_2, \dots, A_n 表示 n 个独立的观测量，按各观测量可信赖程度分别对其赋一个权重 p_1, p_2, \dots, p_n ，对每个观测量赋予对应改正数 c_1, c_2, \dots, c_n ，最小二乘法表达式为 $C^T P C = \text{最小}$ 。依照最小二乘原理进行条件平差后计算的改正数，称为最或然改正数，平差后各观测量的值，叫做平差值。条件平差的前提是有多余观测量，这些观测量之间存在一定的关系，每一个多余观测量对应一个条件方程式。

1) 条件平差法数学模型建立

本文结合水量平衡原理，采用条件平差法对奔子栏、石鼓进行水量平衡修正，方法如下：

奔子栏 - 石鼓河段，奔子栏、石鼓断面每月的径流量和区间来水量对应的观测值为 m_i ，各观测值对应的最或然改正数为 c_i ，各观测值对应的平差值为未知数 x_i ，如图 3 所示。

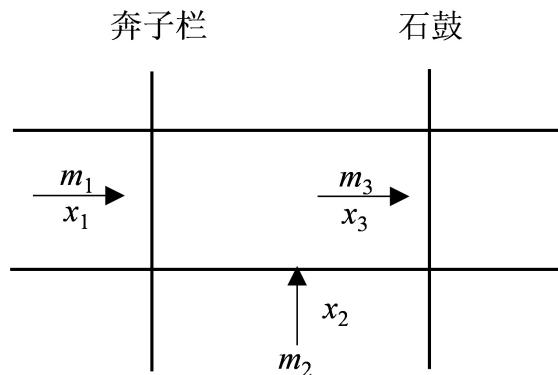


图 3. 各站径流量实测值、平差值与断面位置对应关系

m_1, m_3 分别为奔子栏、石鼓的月径流量实测值， m_2 为区间水量实测值，采用上桥头水文站和腊普河水文站实测径流量估算。 m_1, m_3 为必须观测量， m_2 为多余观测量，由水量平衡原理，可列出 1 个条件方程：

$$-x_1 - x_2 + x_3 = 0 \quad (4)$$

把 $x_1 = m_1 + c_1, x_2 = m_2 + c_2, x_3 = m_3 + c_3$ 带入式(4)得

$$-c_1 - c_2 + c_3 + (-m_1 - m_2 + m_3) = 0$$

用矩阵方程表示为：

$$AC + M = 0 \quad (5)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$ $C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$ $M = \begin{bmatrix} -m_1 - m_2 + m_3 \end{bmatrix}$ 。

2) 观测值最或然改正数 C 的解算

在满足式(5)的前提下，求出使函数 $C^T P C = \text{最小}$ ，通过推导得

$$C = P^{-1} A^T L \quad (6)$$

式中： $L = (l_1, l_2, \dots, l_r)^T$ ，为联系数向量， r 为多余观测个数。

P 为各观测量的权所构成的权矩阵，根据分析认为各干流水文站实测径流量的相对允许误差约为 5%，区间

水量既有实测也有估算，误差较大，相对允许误差约为 10%，则各观测值的先验中误差为 e_{mi} ，可计算出先验权 $p_{wi} = \mu^2 / e_{mi}^2$ ，其中 μ 为单位权中误差。

因各观测量之间相互独立，则权矩阵主对角线上元素均为 μ^2 / e_{mi}^2 ，非主对角线上元素均为 0。

将式(6)代入式(5)得：

$$AP^{-1}A^T K + M = 0$$

取 $N = AP^{-1}A^T$ ，得 $NL + M = 0$ ，即 $L = -N^{-1}M$ 。

再将计算出的 L 向量代入式(6)，即可计算出各观测值最或然改正数 C ，从而可求得各观测值的平差值 x_i 。

4. 结果与分析

4.1. 水量平衡修正结果分析

1) 不平衡月份修正

根据水文比拟法、相似月法、相关系数法和条件平差法对不平衡月份开展水量平衡修正，结果见表 3。可以看出，水文比拟法、相似月法、相关系数法均只对石鼓水文站进行水量平衡修正，条件平差法对奔子栏和石鼓水文站均进行了水量平衡修正，且条件平差法可延伸至上下游，同时开展全河段各水文站的水量平衡修正，可大批量处理水量不平衡问题，因此推荐条件平差法修正成果。

表 3. 不同方法水量平衡修正成果

| 年份 | 月份 | 石鼓水量平衡修正 | | | | 条件平差法水量平衡修正 | |
|------|----|----------|------|------|-------|-------------|------|
| | | 水文比拟法 | | 相似月法 | 相关系数法 | 奔子栏 | 石鼓 |
| | | 奔子栏放大 | 区间放大 | | | | |
| 2012 | 7 | 4380 | 4470 | 4260 | 4620 | 4060 | 4300 |
| 2014 | 8 | 3790 | 4040 | 3730 | 4010 | 3500 | 3820 |
| 2019 | 2 | 466 | 523 | 516 | 573 | 427 | 480 |
| 2019 | 7 | 2890 | 2970 | 3050 | 3080 | 2680 | 2860 |
| 2020 | 7 | 4210 | 4220 | 4100 | 4450 | 3900 | 4070 |
| 2020 | 8 | 4050 | 4200 | 4150 | 4270 | 3730 | 3980 |

2) 其他月份修正

以条件平差法修正成果为例，对其他月份来水量和年径流量进行修正。本次考虑两种情况：1、其他月份保持实测值不变，根据不平衡月份修正后的成果对年径流量进行修正；2、各站年径流量保持不变，根据不平衡月份修正后的成果对其他个别月份来水量进行修正。

对比各种情况修正成果，尽量选择各站年径流保持不变，根据不平衡月份修正后的成果对其他个别月份来水量进行修正的成果，如 2012 年、2014 年、2019 年均可采用此成果。

特别地，对于 2020 年，奔子栏、石鼓、上桥头、塔城水文站实测年均流量分别为 $1560 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1630 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $14.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ，未控区间流量仅 $21 \text{ m}^3/\text{s}$ ，小于上桥头水文站实测年均流量，上桥头站面积 2432 km^2 ，未控区间面积达 7708 km^2 ，通过查算《长江流域及西南诸河水资源公报(2020 年)》长江流域降水等值线图可知，上桥头水文站以上岗曲河流域年降水量为 796.4 mm ，未控区间年降水量为 747.6 mm ，差别不大，因此奔子栏、石鼓水文站实测年径流量存在一定程度的不平衡现象，建议选择其他月份保持实测值不变，根据不平衡月份修正后的成果对年径流量进行修正。

各年修正成果见表 4。

表 4. 各年水量平衡修正成果

| 时期 | 2012 年 | | | 2014 年 | | | 2019 年 | | | 2020 年 | | |
|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | 奔子栏 | 石鼓 | 未控区间 |
| 1 月 | 287 | 360 | 51.5 | 341 | 415 | 52.9 | 472 | 519 | 20.9 | 415 | 463 | 18.0 |
| 2 月 | 263 | 332 | 48.5 | 311 | 394 | 64.2 | 427 | 480 | 29.6 | 366 | 405 | 11.1 |
| 3 月 | 273 | 348 | 50.5 | 304 | 391 | 67.9 | 418 | 450 | 2.56 | 390 | 425 | 5.80 |
| 4 月 | 456 | 530 | 48.0 | 406 | 464 | 34.8 | 699 | 796 | 63.3 | 549 | 620 | 41.1 |
| 5 月 | 1040 | 1110 | 44.8 | 644 | 717 | 49.3 | 1040 | 1180 | 111 | 914 | 1080 | 122 |
| 6 月 | 1980 | 2040 | 9.70 | 1180 | 1240 | 35.1 | 1450 | 1500 | 27.4 | 2300 | 2380 | 34.2 |
| 7 月 | 4060 | 4300 | 150 | 2490 | 2630 | 34.7 | 2680 | 2860 | 113 | 3900 | 4070 | 105 |
| 8 月 | 3310 | 3510 | 92.9 | 3500 | 3820 | 192 | 1950 | 2150 | 118 | 3730 | 3980 | 145 |
| 9 月 | 2420 | 2670 | 158 | 3710 | 3830 | 44.7 | 2810 | 3010 | 81.4 | 2620 | 2730 | 13.1 |
| 10 月 | 1590 | 1740 | 93.4 | 1750 | 1960 | 164 | 1700 | 1870 | 97.5 | 1740 | 1870 | 73.7 |
| 11 月 | 815 | 913 | 62.4 | 822 | 952 | 95.4 | 981 | 1110 | 81.7 | 923 | 1020 | 60.7 |
| 12 月 | 504 | 566 | 34.7 | 494 | 556 | 36.9 | 552 | 634 | 47.6 | 612 | 647 | 7.86 |
| 年 | 1430 | 1540 | 61.8 | 1340 | 1450 | 64.2 | 1270 | 1380 | 60.2 | 1540 | 1650 | 60.5 |

4.2. 成果合理性分析

4.2.1. 与上下游水文站径流协调性分析

1) 巴塘 - 奔子栏区间流量分析

奔子栏上游金沙江干流有巴塘水文站，巴塘 - 奔子栏区间支流松麦河上有古学水文站。根据奔子栏水文站修正后的径流成果，以及巴塘、古学天然径流成果，分别按以下两种方法，分析 2012 年、2014 年、2019 年、2020 年水量平衡修正月份巴塘 - 奔子栏区间径流量(见表 5):

方法 1:

$$Q_{\text{巴塘-奔子栏区间}} = Q_{\text{奔子栏}} - Q_{\text{巴塘}}$$

方法 2:

$$Q_{\text{巴塘-奔子栏区间}} = Q_{\text{古学}} \times F_{\text{巴塘-奔子栏区间}} / F_{\text{古学}}$$

表 5. 巴塘 - 奔子栏区间流量分析

| 水量平衡修正月份及年份 | 巴塘 | 奔子栏 | 巴塘 - 奔子栏区间流量 | | 区间流量差值/奔子栏流量(%) |
|-------------|------|------|--------------|--------|-----------------|
| | | | (方法 1) | (方法 2) | |
| 2012 年 7 月 | 3480 | 4060 | 580 | 831 | -6% |
| 2012 年 8 月 | 2780 | 3300 | 520 | 706 | -6% |
| 2012 年 10 月 | 1320 | 1590 | 270 | 304 | -2% |
| 2014 年 7 月 | 1940 | 2490 | 550 | 492 | 2% |
| 2014 年 8 月 | 2970 | 3500 | 530 | 730 | -6% |

续表

| | | | | | |
|----------|------|------|-----|-----|-----|
| 2019年2月 | 313 | 427 | 114 | 133 | 4% |
| 2019年7月 | 2370 | 2680 | 310 | 398 | 3% |
| 2019年9月 | 2220 | 2810 | 590 | 739 | 5% |
| 2019年10月 | 1330 | 1700 | 370 | 349 | -1% |
| 2020年7月 | 3470 | 3900 | 430 | 494 | 2% |
| 2020年8月 | 3100 | 3730 | 630 | 552 | -2% |
| 2020年 | 1300 | 1540 | 240 | 267 | 2% |

2) 石鼓 - 攀枝花区间流量分析

石鼓下游金沙江干流有攀枝花水文站，石鼓 - 攀枝花区间支流有冲江河、硕多岗河、水洛河、五郎河、漾弓江、落漏河、桑园河、泡江、马过河、万马河、新庄河等支流，支流控制站分别为来远桥、下桥头、水洛河(新)、总管田、鹤庆、黄坪、大惠庄、地索、仁里、中和街、石龙坝。石鼓 - 攀枝花区间干支流控制站分布如图 4 所示：

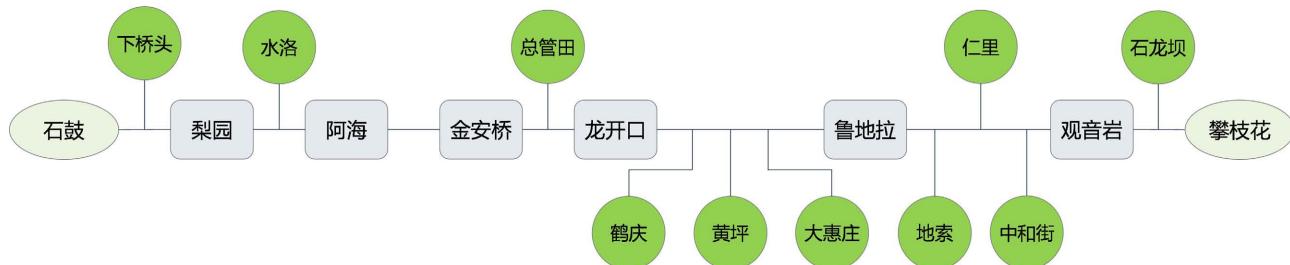


图 4. 石鼓 - 攀枝花区间支流控制站分布

根据石鼓水文站修正后的径流成果，及各支流控制站、攀枝花水文站天然径流成果，分别按以下两种方法，分析 2012 年、2014 年、2019 年、2020 年水量平衡修正月份石鼓 - 攀枝花区间径流量：

方法 1：

$$Q_{\text{石鼓-攀枝花区间}} = Q_{\text{攀枝花}} - Q_{\text{石鼓}}$$

方法 2：

$$Q_{\text{石鼓-攀枝花区间}} = Q_{\text{支流和}} \times F_{\text{石鼓-攀枝花区间}} / F_{\text{支流和}}$$

$$Q_{\text{支流和}} = Q_{\text{冲江河}} + Q_{\text{硕多岗河}} + Q_{\text{水洛河}} + Q_{\text{五郎河}} + Q_{\text{漾弓江}} + Q_{\text{落漏河}} + Q_{\text{桑园河}} + Q_{\text{泡江}} + Q_{\text{马过河}} + Q_{\text{万马河}} + Q_{\text{新庄河}}$$

$$Q_{\text{支流}} = Q_{\text{支流控制站}} \times F_{\text{支流}} / F_{\text{支流控制站}}$$

$$F_{\text{支流和}} = F_{\text{冲江河}} + F_{\text{硕多岗河}} + F_{\text{水洛河}} + F_{\text{五郎河}} + F_{\text{漾弓江}} + F_{\text{落漏河}} + F_{\text{桑园河}} + F_{\text{泡江}} + F_{\text{马过河}} + F_{\text{万马河}} + F_{\text{新庄河}}$$

其中方法 2 考虑不同支流产水模数差异，首先将控制站天然径流量按面积比放大至各支流所在流域，再将区间支流径流量加和，最后根据石鼓 - 攀枝花区间面积与区间支流面积之和的比值放大，计算得到石鼓 - 攀枝花区间径流量(见表 6)。

3) 与上下游水文站径流协调性分析

从上述巴塘 - 奔子栏区间、石鼓 - 攀枝花区间流量分析可知，对于奔子栏和石鼓进行了水量平衡修正的月份和年份，两种方法分析的区间流量差值除个别月份为 6% 外，其余月份均在 5% 以内，说明水量平衡修正后的奔子栏、石鼓月均流量与上游巴塘水文站和下游攀枝花水文站月均流量是协调的。

表 6. 石鼓 - 攀枝花区间流量分析

| 水量平衡修正月份及年份 | 石鼓 | 攀枝花 | 石鼓 - 攀枝花区间流量 | | 区间流量差值/攀枝花流量(%) |
|-------------|------|------|--------------|--------|-----------------|
| | | | (方法 1) | (方法 2) | |
| 2012 年 7 月 | 4300 | 5080 | 780 | 502 | 5% |
| 2012 年 8 月 | 3510 | 4560 | 1050 | 888 | 4% |
| 2012 年 10 月 | 1740 | 2280 | 540 | 404 | 6% |
| 2014 年 7 月 | 2630 | 3850 | 1220 | 1037 | 5% |
| 2014 年 8 月 | 3820 | 5040 | 1220 | 1062 | 3% |
| 2019 年 2 月 | 480 | 649 | 169 | 164 | 1% |
| 2019 年 7 月 | 2860 | 3420 | 560 | 629 | -2% |
| 2019 年 9 月 | 3010 | 4160 | 1150 | 1239 | -2% |
| 2019 年 10 月 | 1870 | 2350 | 480 | 522 | -2% |
| 2020 年 7 月 | 4070 | 4440 | 370 | 608 | -5% |
| 2020 年 8 月 | 3980 | 5090 | 1110 | 1255 | -3% |
| 2020 年 | 1650 | 2060 | 410 | 451 | -2% |

4.2.2. 水量平衡修正前后成果对比

本次主要对奔子栏水文站、石鼓水文站个别月份及年份开展了水量平衡修正，将修正前后的月均流量及年均流量进行对比(见表 7)，可以看出，修正前后差值均在 5% 以内，可以认为奔子栏水文站、石鼓水文站的水量不平衡程度基本上在测验误差范围内。

表 7. 水量平衡修正月份修正前后月均流量对比(单位: m³/s)

| 水量平衡修正月份及年份 | 奔子栏 | | | 石鼓 | | |
|-------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|
| | 修正前 | 修正后 | (修正后 - 修正前)/修正前(%) | 修正前 | 修正后 | (修正后 - 修正前)/修正前(%) |
| 2012 年 7 月 | 4160 | 4060 | -2% | 4200 | 4300 | 2% |
| 2012 年 8 月 | 3290 | 3300 | 0% | 3520 | 3510 | 0% |
| 2012 年 10 月 | 1550 | 1590 | 3% | 1770 | 1740 | -2% |
| 2014 年 7 月 | 2400 | 2490 | 4% | 2710 | 2630 | -3% |
| 2014 年 8 月 | 3600 | 3500 | -3% | 3710 | 3820 | 3% |
| 2019 年 2 月 | 442 | 427 | -3% | 464 | 480 | 3% |
| 2019 年 7 月 | 2740 | 2680 | -2% | 2800 | 2860 | 2% |
| 2019 年 9 月 | 2770 | 2810 | 1% | 3050 | 3010 | -1% |
| 2019 年 10 月 | 1680 | 1700 | 1% | 1880 | 1870 | -1% |
| 2020 年 7 月 | 4000 | 3900 | -3% | 3980 | 4070 | 2% |
| 2020 年 8 月 | 3840 | 3730 | -3% | 3870 | 3980 | 3% |
| 2020 年 | 1560 | 1540 | -1% | 1630 | 1650 | 1% |

5. 结论

本文选取奔子栏、石鼓、上桥头、塔城水文站月径流作为研究对象，采用水文比拟法、相似月法、相关关系法、条件平差法等开展了水量平衡修正，并分析了修正后与上游巴塘、下游攀枝花的径流协调性，结果表明，修正后各站月径流基本满足水量平衡。修正前后差值均在 5% 以内，认为水量不平衡程度基本在测验误差范围内。经水量平衡修正后，可为金沙江中游河段工程水文设计及水库群运行调度提供更为可靠的径流数据[11]。

本文提供了基于测验误差的水量平衡修正及与上下游径流协调性分析思路，解决了水文分析计算中常遇的水量不平衡问题，提高了水文观测资料的可靠性，且具有很强的可操作性，可推广至其他流域。

基金项目

长江水利委员会水文局科技创新基金(SWJ-CJX23Y03)。

参考文献

- [1] 熊莹, 张洪刚, 张明波, 等. 水文资料误差分布特性以及随机模拟[J]. 水文, 2011, 31(1): 137-139.
- [2] 车淑红, 李兰涛. 黄河龙门至潼关河段水量平衡分析研究[J]. 内蒙古水利, 2021(9): 12-14.
- [3] 邓坤, 张璇, 王敬斌, 等. 最严格水资源管理制度考核实施情况与考核成效分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(4): 61-64+70.
- [4] 左其亭, 凌敏华, 张羽. 水资源刚性约束制度研究框架与展望[J]. 水利水电快报, 2024, 45(3): 6-11.
- [5] 赵良坤. 玉溪市东风水库水量平衡分析[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(4): 21-25+31.
- [6] KARAMUZ, E., NAPIORKOWSKI, J. and SENBETA, T. Effects of climate change and human interactions on water balance dynamics in the River Vistula basin. EGU General Assembly 2021, 19-30 April 2021, EGU21-5757. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5757>
- [7] LYSENKO, S. A., LOGINOV, V. F., BUYAKOV, I. V. and BROVKA, Yu. A. Water balance of Belarus and its changes due to global warming. Russian Meteorology and Hydrology, 2024, 49: 52-61. <https://doi.org/10.3103/S1068373924010072>
- [8] 张留柱, 袁东良. 最小二乘原理在径流量资料处理中的应用[J]. 水文, 2001(5): 42-44.
- [9] 张彦丽, 张留柱, 张家军, 等. 条件平差法水量平衡计算研究[J]. 水文, 2016, 36(5): 74-78.
- [10] 许继军. 水资源精细化管理的保障体系与支撑技术初探[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 107-110.
- [11] 汪琳, 周波, 郭卫, 等. 1970-2022 年金沙江上中游河段径流演变规律研究[J]. 人民长江, 2024, 55(10): 119-125.