

王建华, 王乐, 曲田, 等. 基于最小下泄流量的水位衔接模拟研究: 以大渡河铜街子-沙湾电站为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 547-552.

WANG Jianhua, WANG Le, QU Tian, et al. Simulation on connected water level under minimum discharge flow of Tongjiezi-Shawan Power Station in Dadu River basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 547-552.

基于最小下泄流量的水位衔接模拟研究: 以大渡河铜街子-沙湾电站为例

王建华¹, 王乐^{2,3}, 曲田¹, 邱辉^{2,4}, 李书飞⁵, 曾明^{2,6},
董轩^{2,4}, 黄克威⁵

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 4. 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 湖北 武汉 430010; 5. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 6. 长江水利委员会流域水模拟与预报调度智能技术创新中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 水位衔接对大渡河流域水资源高效利用具有重要影响。基于2017—2022年的实况和测量数据, 利用水文学和水动力模拟方法, 分析了大渡河流域铜街子-沙湾电站在最小下泄流量条件下的衔接关系, 并提出了相应的最小下泄流量保障方式。结果表明: 受水库运行后长期冲刷影响, 铜街子坝下水位流量关系曲线较设计阶段出现一定程度的右偏, 同流量下对应的水位偏低。沙湾水库库尾回水对铜街子坝下水位存在顶托影响, 当沙湾库水位在431 m以上时顶托作用较为明显。铜街子-沙湾为不完全衔接关系, 其衔接水位为430.47 m, 较设计衔接水位降低1.53 m, 采用新的衔接水位能够在满足最小下泄需求的同时, 更好的提升上下游梯级之间的水能资源利用效率。

关键词: 水位顶托; 最小下泄流量; 水位衔接; 大渡河

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.084

中图分类号: P333.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0547-06

Simulation on connected water level under minimum discharge flow of Tongjiezi-Shawan Power Station in Dadu River Basin

WANG Jianhua¹, WANG Le^{2,3}, QU Tian¹, QIU Hui^{2,4}, LI Shufei⁵, ZENG Ming^{2,6}, DONG Xuan^{2,4},
HUANG Kewei⁵

(1. CHN Energy Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Bureau of Hydrology, ChangJiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, Sichuan, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, Sichuan, China; 4. Center of Technology Innovation for Intelligent Water Simulation, Forecasting and Operation of the River Basin, ChangJiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, Sichuan, China; 5. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, Sichuan, China; 6. Innovation Team for Flood and Drought Disaster

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2340205); 武汉市曙光知识创新专项(2023020201020356); 水利部重大科技项目(SKS-2022034)

作者简介: 王建华(1973—), 男, 高级工程师, 学士, 主要研究方向为电力生产及运行管理。E-mail: jianhua.wang.c@ceic.com

通信作者: 王乐(1992—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为气候和水资源分析、水文气象预测。E-mail: cwrwangl@163.com

Abstract: Connected water level is an important factor affecting the efficient utilization of water resources in Dadu River Basin. Based on the latest real and measured data, the connected relationship of Tongjiezi-Shawan Power Station in Dadu River Basin under the minimum discharge flow was analyzed by using hydrological and hydrodynamic simulation method, and the corresponding minimum discharge flow guarantee method was proposed. The result show that, under the influence of long-term scouring after reservoir operation, the stage-discharge relation below the Tongjiezi dam shows a right deviation compared with the design stage, and the corresponding water level is relatively low under the same flow. The backwater at the end of Shawan Reservoir has a jacking effect on the water level below Tongjiezi Dam, and the jacking effect is more obvious when the water level of Shawan Reservoir is above 431 m. The latest data shows that Tongjiezi-Shawan has an incomplete connected relationship, with a connected water level of 430.47 m, which is 1.53 m lower than the designed connected water level of 432 m. Adopting the new connected water level can improve the efficiency of water resource utilization between upstream and downstream cascades while meeting the minimum discharge demand.

Keywords: backwater effect; minimum discharge flow; connected water level; Dadu River

0 引言

大渡河发源于青海省久治县哇尔依乡, 于四川省壤塘县与阿坝县入境。主要流经果洛、阿坝、甘孜、雅安、凉山及乐山等 6 市州, 其中四川省占总面积 91.5%。流域内水资源丰富, 水资源总量 479 亿 m^3 , 是我国重要的水电能源基地之一, 其开发治理与保护的主要任务是防洪、供水与灌溉、水资源与生态保护、水力发电、跨流域调水、航运和水土保持等^[1]。

随着梯级水库群的开发建设, 天然水文情势被改变, 对河流生态系统造成不可忽视的威胁, 生态流量相关研究也更加复杂, 从而引出水位衔接的概念^[2]。水位衔接常用于水电开发工程规划设计中水能计算及正常蓄水位的比选, 不仅与梯级开发河段水能资源的利用与共享有关, 还关系到河流生态环境安全及河流航运等方面^[3-4]。对于水位衔接情形共划分为不衔接、不完全衔接、完全衔接三种情形。从生态角度而言, 在不衔接情形时, 水电站为保证下游河段的生态问题, 需要通过加大下泄流量来确保下游河段不出现脱水、减水等生态问题^[5], 即上游梯级需要满足瞬时最小下泄流量的条件, 但为实现电网调峰, 水电站在夜间负荷很小, 为保证瞬时最小下泄流量条件, 只能采取机组空转的形式运行, 从而导致机组过热、降低使用寿命, 甚至损坏设备; 对于不完全衔接情形, 当下游梯级水位在衔接水位以上时, 采用日均最小下泄流量可基本保证河道生态水量需求, 此时白天可根据电网负荷采用较大流量进行发电下泄, 夜间则可以根据负荷调整机组运行状况, 甚至适当关停机组, 从而协调水调和电调的问题^[6]。当下游梯级库水位在衔接水位以下时, 为满足河道生态需求, 上游梯级必

须保障瞬时最小下泄流量条件; 对于完全衔接情形, 下游梯级水位在死水位以上时, 即便上游梯级不下泄流量, 区间也可保证一定的水深, 但考虑到生物对流速需求, 上游梯级需保障日均最小下泄流量以满足水调需求。

因此, 针对上述大渡河流域水量调度工作中存在的流域、控制断面及梯级电站层面上的关于最小下泄流量下水位衔接的问题, 本文以铜街子-沙湾为例, 通过最新水文资料分析其水位衔接关系, 并利用水动力学模型开展模拟分析, 从而验证他们之间的衔接关系, 为提高水资源综合利用效益提供理论支撑。

1 数据与方法

1.1 研究数据

水文资料: 分析采用的大渡河梯级尾水水位和流量数据由大渡河公司、沙湾电站提供, 具体数据情况如表 1 所列。

表 1 水文资料

水 库	数据种类	时间长度	时间步长
铜街子	尾水水位、出库流量	2017 年 1 月 1 日— 2022 年 9 月 22 日	逐小时
沙 湾	库水位、出库流量、 入库流量	2021 年 1 月 1 日— 2022 年 9 月 25 日	逐小时

地形资料: 采用长江委水文局 2023 年测量的铜街子坝下-沙湾坝址河段断面地形数据, 测量要素包括起点距、断面高程、断面布置图、距坝里程等, 每隔 1 km 左右设置一个测量断面, 具体断面分布如图 1 所示。

铜街子和沙湾电站设计的水位衔接信息的基本参数如表 2 所列。

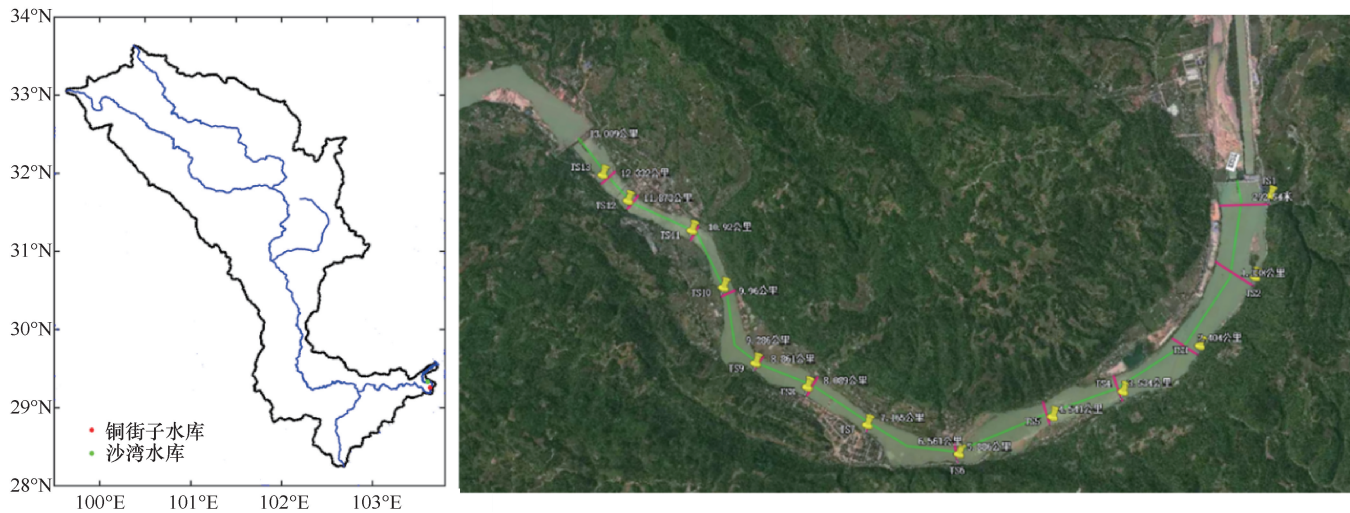


图1 铜街子水库坝下至沙湾水库河道及断面分布

表2 铜街子和沙湾设计阶段水位衔接基本参数

项目	正常蓄水位 /m	死水位 /m	最小下泄流量 /m ³ ·s ⁻¹	坝下游天然枯水位 /m	与下游水位衔接关系
铜街子	474	469	345(日均)/236(瞬时)	432	不完全衔接
沙湾	432	424	合计 390(瞬时)	—	—

1.2 研究方法

1.2.1 数据稳定性分析

由于梯级电站运行时, 流量陡涨陡落、波动幅度大, 会造成水位流量关系失真。为了过滤这种影响, 本文根据电站的运行特性, 选取近年来铜街子电站出库流量值稳定时间段的水位流量散点进行分析, 挑选原则为水库稳定(流量与初始时刻偏差 5%以内)运行 3 h 以上, 取中间时刻尾水位及流量。

1.2.2 水位流量分析

采用上游铜街子梯级出库流量、坝下(尾水)水位与同时刻下游沙湾梯级库水位, 分析下游水库不同运行水位条件下上游水电站的多组尾水水位流量关系, 相应的坝下水位流量关系曲线不是一条稳定的单一线, 而是以下游水库库水位为参数的尾水位-出库流量-下游水库库水位的曲线簇。根据实测水位流量资料情况, 采用最小二乘法和人工订正拟定出下游水库正常高水位至死水位之间的水位流量关系曲线。

1.2.3 水动力模拟

基于 MIKE11 模型构建沙湾库区水力学模型。构建河段为铜街子水库坝下至沙湾水库坝前河段, 共计 12.04 km, 设 13 个横断面, 断面间距约为 1 km, 断面数据采用 2023 年 4 月最新测量成果(见图 1)。铜街子水库坝下至沙湾水库坝前河段无支流汇入, 模型上边界采用铜街子水库出库流量, 下边界采用沙湾水

库坝前水位, 不考虑无控区间产汇流情况。

1.2.4 水位衔接定义

最小下泄流量条件下的水位衔接共分为不衔接、不完全衔接、完全衔接三种情形。其中, 不衔接情形表示下游梯级水位为正常蓄水位时, 其库尾回水水位仍然低于上游梯级最小下泄流量对应的坝下水位; 不完全衔接情形表示下游梯级在正常蓄水位时其库尾回水在上游梯级坝下河道断面存在一定淹没水深, 但在死水位时其库尾回水水位低于上游梯级最小下泄流量对应的坝下水位, 在下游梯级死水位和正常蓄水位之间存在一个临界水位, 当下游梯级水位等于或高于临界水位时, 上游梯级与下游梯级水位衔接关系为衔接关系, 否则为不衔接关系; 完全衔接情形表示下游梯级在死水位时, 其库尾回水水位在上游梯级坝下河道断面仍然存在一定的淹没水深。

对于不衔接情形, 为满足生态需求, 水库必须保障瞬时最小下泄流量。对于不完全衔接情形, 当下游梯级水位在衔接水位以上时, 水库可采用日均最小下泄流量, 在衔接水位以下时, 必须保障瞬时最小下泄流量。对于完全衔接情形, 上游梯级需保障日均最小下泄流量。通过重新分析梯级水位衔接边界, 可优化水库最小下泄流量保障方式。

2 结果与分析

2.1 枯水条件下水位流量关系及顶托分析

为分析下游梯级沙湾不同水位条件下铜街子水库坝下水位流量关系, 选取下游沙湾电站在正常蓄水位 432 m 到最低点水位 427 m 之间不同坝前水位下(按 0.1 m 间隔取值)铜街子电站对应的稳定出库流量与同时刻的坝下水位, 点绘铜街子坝下稳定时段水位流

量关系散点, 并拟和下游沙湾电站不同水位影响时铜街子的坝下水位流量关系。由于铜街子瞬时最小下泄流量为 $236 \text{ m}^3/\text{s}$, 故铜街子坝下水位流量关系拟合至流量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 处, 如图 2 所示。

收集铜街子电站技施阶段的尾水曲线, 将拟合的铜街子坝下水位流量关系线(拟合线)与设计尾水水位流量关系线(设计线)比较。由图可知, 拟合线与设计线整体形态较为接近, 设计线较拟合线整体偏高, 偏高幅度在 $0.6 \sim 1.6 \text{ m}$ 之间, 说明水库建设运行后, 可能受长期冲刷影响导致水位流量关系线下移。

此外, 由图 2 可知, 沙湾水位 $427 \sim 431 \text{ m}$ 条件下铜街子坝下对应的水位流量散点基本是重合的, 分层情况不明显, 这说明沙湾的回水对铜街子坝下尾水顶托影响较弱, 相应沙湾不同水位下铜街子坝下的水位流量关系拟合线基本可用单一线表示。当沙湾水位为 432 m 时散点分层明显, 这说明沙湾的回水在 431 m 以上时对铜街子坝下水位存在顶托影响。

2.2 水动力学模型模拟

根据水力学模型计算原理, 对于水位流量预报、防洪调度等水力模拟, 对结果影响最大的参数为河道糙率参数。通过灵敏度分析, 对铜街子水库坝下至沙湾水库坝前河段糙率按单层糙率进行率定, 采用铜街子水库 2021 年 11 月 1 日 8 时至 11 月 15 日 8 时实际出库流量及相应时段沙湾水库坝前实况水位分别作为模型上、下边界条件, 取河段曼宁数 $M=18$ (注: $M=1/n$)。经模拟计算, 铜街子水库坝下实测水位与模拟水位对比如图 3 所示。总体来看, 铜街子水库坝下模拟计算水位与实测水位过程基本吻合, 模拟效果良好, 平均误差 0.28 m , 确定性系数 0.82 。

为进一步分析铜街子坝下水位流量关系与沙湾库水位的相关性, 基于构建的水力学模型, 采用多种组合工况分析库水位对库

尾的顶托情况。模型计算上边界设置为铜街子水库不同恒定出库流量, 流量变化范围为 $100 \sim 2\,460 \text{ m}^3/\text{s}$, 涵盖铜街子水库最小下泄流量、坝址处多年平均流量、单机满载流量和机组满载流量节点, 模型下边界设置为沙湾水库死水位至正常高水位, 水位变化范围 $424 \sim 432 \text{ m}$ 。根据铜街子水库出库流量和沙湾水库坝前水位组合, 共设计 135 种方案。提取各方案结果, 点绘铜街子水库坝下水位流量关系点, 并根据散点分布拟合沙湾水库不同水位时的铜街子坝下水位流量关系, 如图 4 所示。

由铜街子水库不同出库流量和下游沙湾水库不同坝前水位的组合方案计算结果表明, 铜街子坝下水位流量关系一定程度受沙湾库水位顶托影响, 即随着沙湾库水位抬高, 同流量下铜街子坝下水位也有一定抬

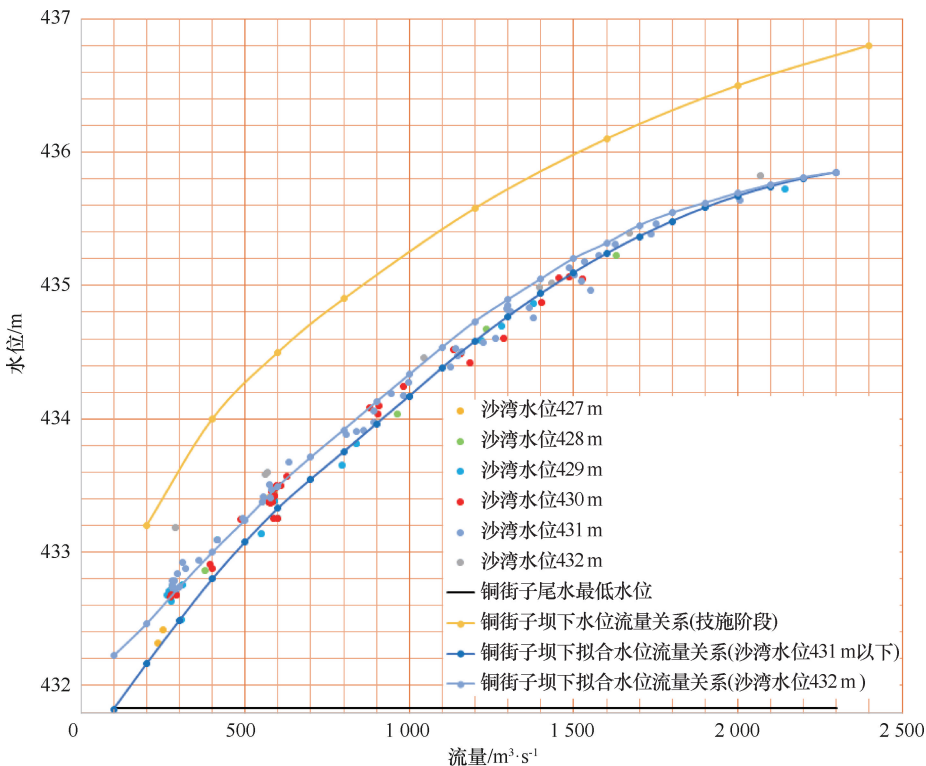


图 2 沙湾水库不同水位条件下铜街子坝下水位流量关系

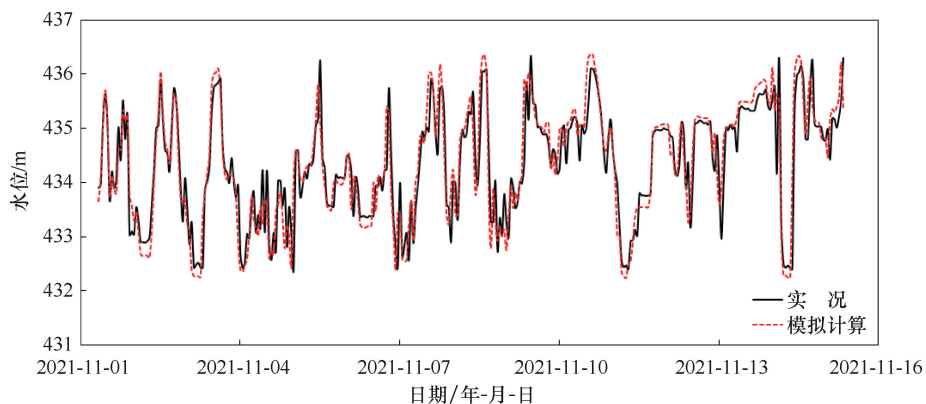


图 3 铜街子坝下模拟和实测水位对比

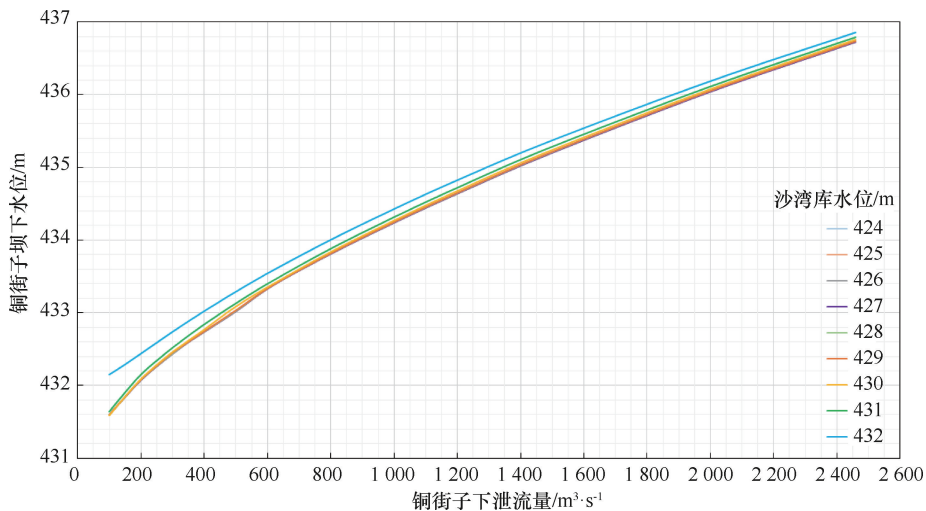


图4 沙湾不同水位时铜街子坝下水位流量关系水力模拟分析

明显顶托。

2.3 上下游水位衔接关系综合分析

综合分析铜街子-沙湾的现状水位衔接关系, 沙湾的特征水位选取正常蓄水位和死水位, 铜街子的尾水位选用最小下泄流量相应的厂房尾水位(见表3)。根据率定的电站尾水水位流量关系, 判别梯级水库正常蓄水位与上游梯级最小下泄流量下的尾水位衔接关系, 如图5所示。由图可知, 当采用实测资料拟合的水位流量关系线时, 铜街子瞬时最

高, 尤其当沙湾库水位大于 431 m 时对沙湾库尾存在小下泄流量和日均最小下泄流量时尾水位均低于沙湾

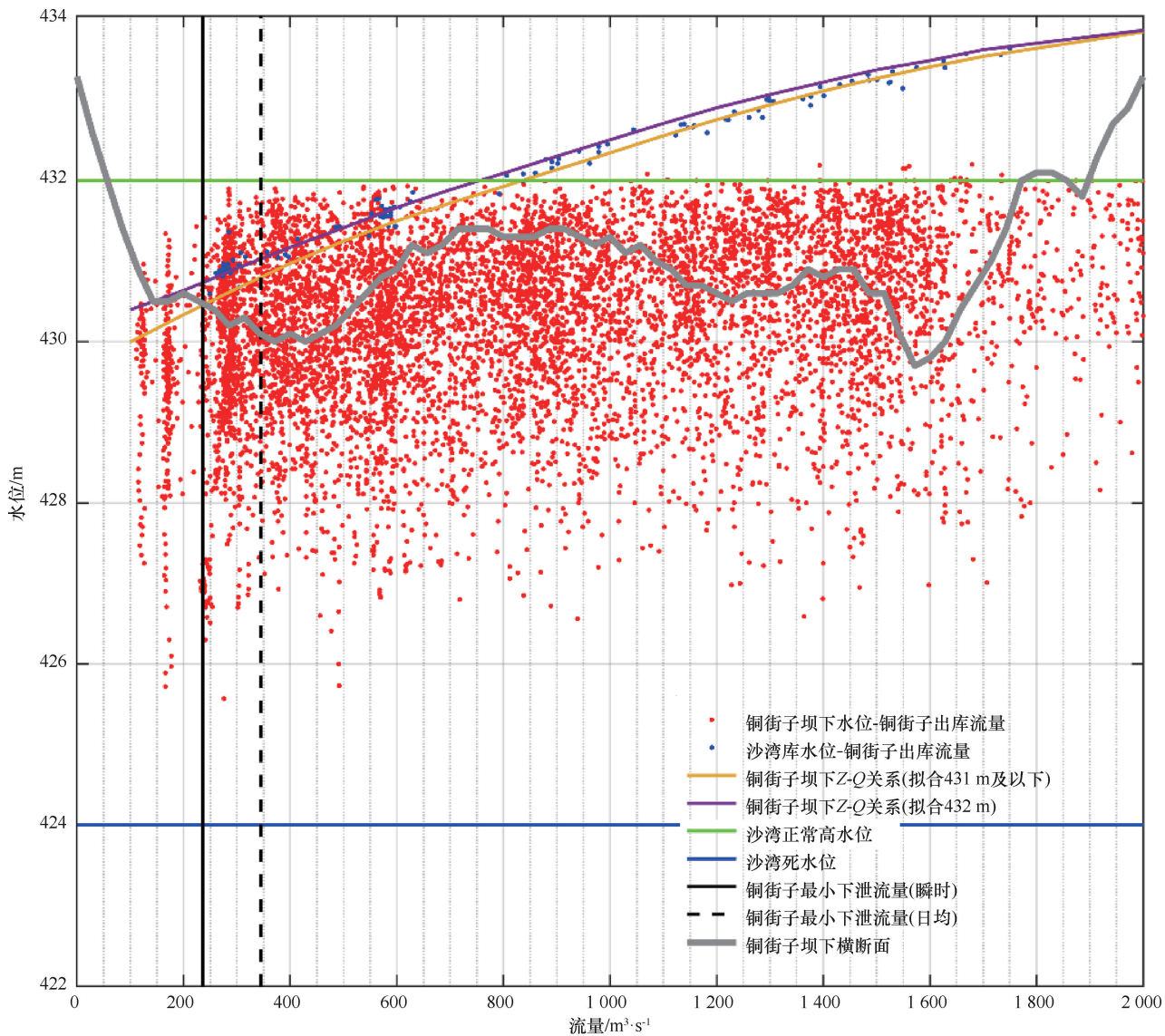


图5 铜街子-沙湾水位衔接关系分析

表 3 铜街子-沙湾水位衔接关系分析

电 站	最小下泄流量				水位衔接关系			
	瞬 时		日 均		低于下游正常蓄水位		低于下游死水位	
	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	水位/m	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	水位/m	瞬时/m	日均/m	瞬时/m	日均/m
铜街子	236	430.47	345	430.82	1.53	1.18	-6.47	-6.82

的正常高蓄水位, 但高于死水位, 表明二者不完全衔接。第 2.1 节分析表明沙湾坝前水位 431 m 以上时的回水对铜街子坝下尾水存在顶托影响, 同时水动力学模拟也显示沙湾坝前水位对铜街子存在顶托影响, 同样表明铜街子梯级尾水与下游梯级为不完全衔接状态。最后, 图中灰色曲线为测量中距离铜街子坝下最近的一个断面, 可以看到, 铜街子坝下测量河底断面最低点高程低于沙湾正常蓄水位, 但高于死水位, 也表明测量断面尾水附近高程与下游梯级为不完全衔接关系。

因此, 基于水文水动力模拟和实测资料分析, 最终确定铜街子电站与下游沙湾电站在最小下泄流量条件下为不完全衔接关系。在此情况下, 铜街子水库最小下泄流量 $345 \text{ m}^3/\text{s}$ (日均)对应的沙湾水位 427 m 时铜街子坝下水位为 430.82 m, 最小下泄流量 $236 \text{ m}^3/\text{s}$ (瞬时)对应的铜街子坝下水位为 430.47 m(见表 3), 均低于沙湾的正常蓄水位, 且高于沙湾死水位。从生态安全角度考虑, 为保证尾水河段的最小下泄流量需求, 当沙湾水位在 430.47 m 以上时, 可保障铜街子最小下泄流量的日均值, 当沙湾水位在 430.47 m 以下时, 需要保障铜街子最小下泄流量的瞬时值。

3 结论与展望

(1)随着梯级水库建设运行, 长期冲刷导致梯级坝下断面下切, 坝下断面水位流量关系较设计时已发生明显变化, 铜街子坝下水位流量关系曲线形态与设计阶段较为相似, 但出现一定程度的右偏, 同流量下对应的水位偏低。

(2)水文学和水动力模拟分析表明, 沙湾水库库尾回水对铜街子坝下水位存在顶托影响, 沙湾库水位在 431 m 及以下时, 顶托影响较弱, 当沙湾库水位在 431 m 以上时, 则出现明显的顶托现象。

(3)采用最新实测资料综合分析表明铜街子-沙湾为不完全衔接关系, 其衔接水位为 430.47 m, 较原有衔接水位 432 m 降低 1.53 m, 采用最新的衔接水位能够在满足最小下泄需求的同时, 更好的提升上下游梯级之间的水能资源利用效率。

(4)对于在建以及规划阶段的梯级电站, 其建成运行后必然会影响到当前梯级的水位衔接关系, 建议在其坝下建立水位流量测站进行长期观测, 并适时开展坝下断面测量, 为后期衔接复核分析工作奠定基础。

参考文献:

- [1] 张岚婷, 王文圣, 刘浅奎, 等. 大渡河流域年径流变化特征及其归因分析 [J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 96-102.
- [2] 黄木顺. 水位衔接问题与水电开发水位的选定 [J]. 小水电, 2006(4): 40-41.
- [3] 王琨, 周波, 郭卫, 等. 目标生态需求下的梯级水库生态衔接水位指标构建及运用方式初探 [J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 115-119.
- [4] 黄木顺. 水电站梯级开发水位衔接若干问题探讨 [J]. 水利科技, 2004(2): 13-14.
- [5] 张文娟. 金沙江下游鱼类繁殖最优生态流量计算及其水库调度效益评价[D]. 宜昌: 三峡大学, 2022.
- [6] 董延军, 李杰, 石赟赟, 等. 流域管理中电调与水调关系问题探讨 [J]. 广东水利水电, 2009(8): 1-3.

(责任编辑 王海锋)