

张成潇,赵汗青,任 实,等.长江干流大型河道型水库冲淤特性与泥沙预报[J].地球科学与环境学报,2026,48(1):133-145.
ZHANG Cheng-xiao,ZHAO Han-qing,REN Shi,et al.Erosion-deposition Characteristics and Sediment Forecasting for the Large Channel-type Reservoir on the Mainstream of the Yangtze River,China[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2026,48(1):133-145.

DOI:10.19814/j.jese.2025.07014

长江干流大型河道型水库冲淤特性与泥沙预报

张成潇^{1,2},赵汗青^{1*},任 实³,董炳江⁴,吕超楠³,翟伊伟¹,高 宇³

1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院,北京 101199; 2. 长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,湖北 武汉 430019;
3. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心,湖北 宜昌 443100;
4. 长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010)

摘 要:高坝大库涉及的工程泥沙问题关乎库容保持与枢纽功能发挥。针对长江干流大型河道型水库,在入库水沙情势持续剧烈调整的背景下,探究了库区冲淤分布的响应特征,进一步构建并优化了汛期泥沙预报技术,为水库泥沙管理与实时调度决策提供技术支撑。结果表明:①长江上游梯级水库蓄水运行显著降低了入库沙量,但并未根本改变大水大沙的入库特征;②泥沙在库区发生沿程淤积,其中清溪场站至坝址河段的常年回水区淤积占比超过 80%,尤其万县站下游河段的泥沙淤积占比随着年入库水量的增加而显著升高;③库区水沙输移与水库排沙主要集中于汛期,对应汛期(6月至9月)入库水量、入库沙量的年内占比分别为 50%~60%和 88%~98%,出库沙量的年内占比超过 90%;④结合水库调度的业务需求,构建了汛期泥沙预报系统并融合了入库泥沙修正技术与水沙运动数学模型优化算法,将沙峰含沙量预报相对误差和峰现时间预报绝对误差分别提升至 30%、10 h 以内,且在大水大沙条件下取得了较好的应用效果,对于资料缺乏地区具有一定的适用性与推广价值。

关键词:河道型水库;入库水沙;冲淤分布;水沙运动数学模型;泥沙预报;动态修正;长江
中图分类号:TV145 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2026)01-0133-13

Erosion-deposition Characteristics and Sediment Forecasting for the Large Channel-type Reservoir on the Mainstream of the Yangtze River, China

ZHANG Cheng-xiao^{1,2}, ZHAO Han-qing^{1*}, REN Shi³, DONG Bing-jiang⁴,
LYU Chao-nan³, ZHAI Yan-wei¹, GAO Yu³

1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of River Basin Water Resources and Ecological Environment Science, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430019, Hubei, China; 3. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, Hubei, China; 4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, Hubei, China)

收稿日期:2025-07-15;修回日期:2025-12-20 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>
基金项目:长江科学院开放研究基金项目(CKWV20231192/KY);国家重点研发计划项目(2022YFC3203900);
国家自然科学基金项目(52209083)
* 通信作者:赵汗青(1991-),男,安徽滁州人,高级工程师,工学博士,E-mail:zhao_hanqing@ctg.com.cn.

Abstract: Sediment management in high-dam and large-reservoir systems is crucial for preserving storage capacity and hydraulic functionality. Erosion-deposition dynamics in a large channel-type reservoir on the mainstream of the Yangtze River under continuous hydrological and sediment regime adjustments were investigated; a sediment forecasting technique for the flood season was developed and refined, providing technical support for reservoir sediment management and real-time operational decision-making. The results show that: ① upstream cascade reservoirs have significantly reduced sediment inflow; however, the “high flow-high sediment” pattern still prevails during major flood events; ② sediment deposition exhibits a progressive longitudinal distribution, with over 80% of total deposition concentrated in the perennial backwater area between Qingxichang station and the dam site, while the proportion of deposition downstream of Wanxian station increases significantly with annual inflow; ③ sediment transport and release are dominated by the flood season, accounting for 50%–60% of annual inflow, 88%–98% of annual sediment load, and over 90% of total sediment discharge in representative years; ④ an enhanced real-time sediment forecasting framework is established, incorporating incoming sediment corrections and optimization of a coupled water-sediment transport numerical model. The framework successfully captures sediment transport processes during flood seasons from 2022 to 2024, achieving forecast relative error within 30% for sediment peak concentration and absolute error within 10 h for peak timing. These results indicate robust performance under high water-sediment conditions and suggest strong applicability and generalization potential, particularly for data-sparse regions.

Key words: channel-type reservoir; water-sediment inflow; erosion-deposition distribution; water-sediment transport numerical model; sediment forecasting; dynamic correction; Yangtze River

0 引言

泥沙问题以其重要性、复杂性和持续性,贯穿重大水利工程论证、设计、建造、运行等全生命周期,直接关系到工程寿命和能效发挥^[1]。长江干流大型河道型水库初步设计阶段确定的运行方式为“蓄清排浑”,即汛期低水位运行以提高出库沙量,非汛期拦蓄清水以充分发挥水资源综合效益^[2]。在气候变化和上游梯级水库群陆续运行等的影响下,长江干流大型河道型水库入库水沙情势发生了显著改变,如年来沙量锐减且集中于汛期场次洪水、水沙异源现象更为突出等^[3-4],极大影响了库区的河道演变进程和冲淤分布趋势^[5-6]。与此同时,为了进一步适应入库水沙新形势、保障水库综合效益发挥,前人在“蓄清排浑”的基础上开展了包括汛期沙峰调度在内的一系列优化实践,有效实现了重点河段泥沙减淤、场次洪水泥沙增泄等目标^[7]。在此过程中,泥沙预报通过预测入库泥沙组成及量级,预演不同调度方案下的库区沙峰演化、重点河段峰现时刻与冲淤分布

等,为优化调度的实时开展提供重要支撑^[8]。

目前,学者们围绕入库水沙情势、库区淤积分布等开展了大量研究。例如,Guo等发现梯级水库建设运行是长江上游输沙量剧减的关键转折点^[9];周银军等认为水库入库沙量减少的同时伴随着来沙地区组成的变化,且区间支流的来沙量也有所增加^[10];任实等发现水库汛期入库泥沙占全年的九成以上,且主要集中于场次洪水过程^[11];袁晶等通过水文资料分析发现,水库近坝段河床淤积最为明显,且变动回水区冲淤变化不大^[12]。还有部分学者致力于泥沙预报技术的研发与应用。例如,针对高含沙河流,万新宇等构建了水沙相似推理方法并应用于黄河三门峡水库的坝址含沙量预报^[13];李楠等构建了基于水文学和输沙理论的响应函数模型,并在黄河潼关段开展泥沙预报^[14];王世平等基于水文统计分析构建了长江上下游水沙关系模型,并在典型洪水过程中证明了泥沙预报的有效性^[15];闫金波等构建了水沙运动数学模型,结合来沙级配修正开展了长江寸滩站至坝址河段的汛期库区泥沙预报作

业^[16];袁晶等结合多源监测数据构建了三峡库区泥沙预报体系,并将其应用于 2018 年、2020 年汛期沙峰过程的预报中^[17]。近年来,也有学者将机器学习技术应用于长江干流和黄河中游含沙量预测,并评估了算法选取、输入因子等因素对预报精度的影响^[18-20]。

整体而言,关于水库泥沙的研究倾向于趋势性变化的研判,且现有的泥沙预报技术一定程度上依赖于流域水文监测资料的丰富程度。在此背景下,本文重点关注长江上游水利工程建设对水库泥沙淤积的影响,对比研究典型大水年份、中水年份、小水年份对应不同时间尺度的入库水沙通量与库区冲淤分布,并探索对数据依赖程度相对较低的水库泥沙实时预报技术,以期进一步丰富水库泥沙领域的科学认识,提升泥沙预报技术的适用性与可靠性,推动相关方法在更广泛水库工程中的推广应用。

1 研究区概况与分析方法

1.1 研究区概况

研究区覆盖了长江上游朱沱站至坝址河段,全长约 760 km。其中,库区长约 660 km,主要承接金沙江、岷沱江、嘉陵江、乌江等来水来沙。本研究涉及 8 个主要水文站点,其中朱沱站、北碚站、武隆站为入库控制站,分别代表长江干流、嘉陵江、乌江的来水来沙,寸滩站、清溪场站、万县站、庙河站为库区沿程控制站,黄陵庙站为出库控制站,水系与水文站

点分布如图 1 所示。本文采用 2003~2024 年实测资料开展入库水沙及库区冲淤特征分析,利用水库管理单位和业务部门提供的入库流量预报数据以及控制站流量、含沙量报讯数据开展泥沙预报实时作业。

1.2 泥沙预报原理

本文构建了以水沙运动数学模型为核心、结合入库水沙修正算法的河道型水库泥沙实时预报技术体系。该体系针对不同来水来沙条件实现入库流量(Q)-含沙量(S)关系和水沙运动数字模型参数的滚动自适应修正,在保证预报精度的同时,较现有技术具有更低的数据依赖性与更高的可操作性,具体技术路线见图 2。根据入库控制站的流量预报规则,本文确定泥沙预报的预见期为 3 d。其中,入库泥沙预报的时间步长为 4~6 h,具体同步于入库流量预报;库区泥沙预报的时间步长为 2 h。

1.2.1 入库泥沙预报

本文以水文预报关于各入库控制站在未来一段时间的流量过程为依据,结合水沙关系预报相应的含沙量过程。考虑近年来上游梯级水库蓄水运行造成入库控制站的输沙量锐减以及水沙关系出现趋势性变化^[21],本文采用水沙情势突变后的入库水沙关系进行泥沙预报^[22]。同时,为了降低暴雨落区等因素对水沙关系的不确定性影响,本文提出泥沙预报的滚动修正方法,即通过对比前几日的预报值与实测值,动态修正后几日的预报数据,一定程度上保证



图件引自文献[23]

图 1 研究区域水系及主要水文站点示意图

Fig. 1 Location Map of River System and Major Hydrological Stations in the Study Area

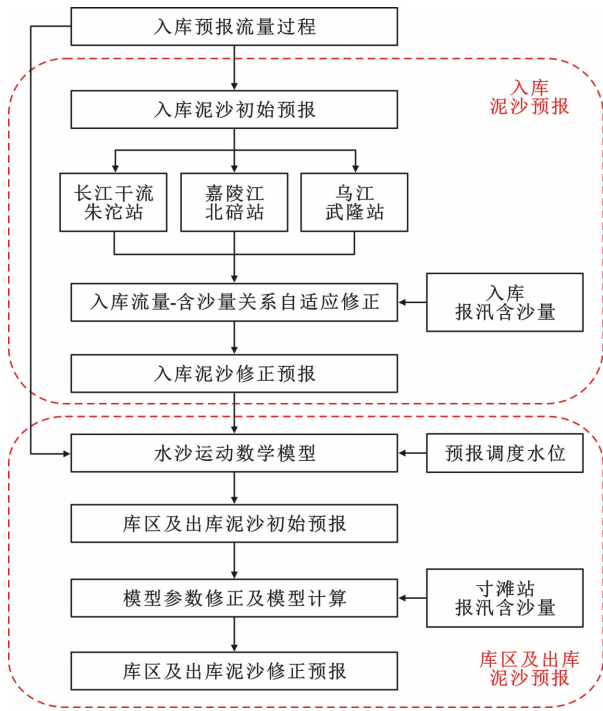


图2 泥沙预报技术流程

Fig. 2 Flowchart of the Sediment Forecasting Technology

了入库泥沙的预报精度。修正公式为

$$S_y^{n+1} = S_i^{n+1} \sum_{i=1}^n \frac{S_r^i/S_i^i}{n} + \beta \quad (1)$$

式中: S_y^{n+1} 表示第 $n+1$ 次预报含沙量修正值; S_i^{n+1} 表示第 $n+1$ 次预报含沙量初始值; S_r^i/S_i^i 分别表示第 i 次预报流量与历史实测流量相当的含沙量实测值和预报值; n 表示预报流量与历史实测流量相当的预报次数; β 为修正系数。

1.2.2 库区泥沙预报

在入库泥沙预报的基础上,本文采用水沙运动数学模型开展库区及出库泥沙实时预报作业。模型范围为长江上游朱沱站至坝址河段,全长约 760 km,沿程包括嘉陵江、乌江等 14 条支流。模型的水动力模块运用 Preissmann 四点隐格式离散、追赶法迭代求解河道断面水位、流量,同时分河段、分水位级给定糙率;相应的泥沙模块运用显格式离散并按照自上游向下游的顺序求解断面含沙量,并根据率定结果确定挟沙力、恢复饱和系数,相关原理和率定验证结果详见文献[23]~[25]。模型的进口边界给定各入库控制站的泥沙预报流量、含沙量过程,出口边界给定预报期的坝前水位过程[16],具体结合入库预报流量、水库调度规程与水位-库容曲线予以实现。

受到入库水沙组成、来沙级配未知等影响,水沙运动数学模型的参数并未精准匹配沙峰在库区的传

播和衰减过程。为此,本文提出了模型参数自适应修正算法,以代表站点含沙量预报值与报汛值之差最小为目标,对模型参数实施动态调整。寸滩站是长江干流在库区的首个水文站点,位于长江、嘉陵江交汇口下游 7.5 km,其报汛数据有助于减少入库条件不确定性引发的模型预报误差,并为水库实时调度决策提供充分的窗口期。基于此,本文选取寸滩站报汛数据作为参数修正基准。

2 入库水沙及库区冲淤特征

2.1 年际变化

图 3 展示了 2003~2024 年出库、入库水沙的逐年变化过程。自 2003 年蓄水运行以来,水库年入库水量基本平稳。结合 2012 年上游梯级水库陆续蓄水运行的历史情况,2013~2024 年较 2003~2012 年的年入库水量平均值、最大值、最小值分别增加 3.3%、13.3%、12.3%,反映出气候环境变化等加剧了极端来水情况,与单敏尔等的研究结果[26-27]一致。同时,上游梯级水库的拦沙作用极大降低了入库泥沙通量,同样以 2012 年为节点,相应的入库泥沙通量平均值由 2003~2012 年的 2.03×10^8 t 降至 2013~2024 年的 0.73×10^8 t,降幅达 64.2%。洪水年份 2018 年、2020 年的入库沙量虽然未达到上游梯级水库蓄水运行前的水平,但是较蓄水运行后的平均水平有显著提升,说明仍需持续关注极端洪水事件对水库管理的不利影响。2003~2024 年出库沙量整体呈现下降趋势,且与入库水量、入库沙量均成正相关关系,符合水库排沙的一般规律。

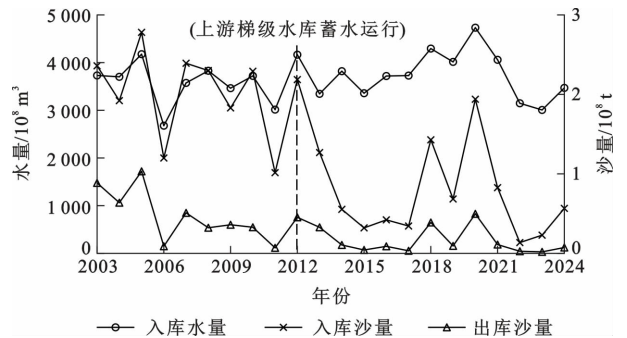


图3 出库、入库水沙年际变化

Fig. 3 Interannual Variations of Inflow/Outflow Water-sediment

本文进一步按照年入库沙量的量级归类统计泥沙要素,统计结果如表 1 所示。由表 1 可知:年入库沙量不低于 2×10^8 t 的年数为 6 年;年入库沙量为 $(1 \sim 2) \times 10^8$ t 的年数为 7 年;年入库沙量小于 1×10^8 t 的年数为 9 年;年入库沙量、年出库沙量、年淤

表 1 不同来沙量下泥沙要素年平均值

Table 1 Annual Average Values of Sediment-related Parameters Under Different Sediment Inflow Scenarios

年来沙量/ 10 ⁸ t	对应年份	各泥沙要素年平均值/10 ⁸ t			年排沙比 平均值/%
		入库沙量	出库沙量	淤积量	
≥2	2003、2005、2007、2008、2010、2012	2.4	0.6	1.8	24.2
1~2	2004、2006、2009、2011、2013、2018、2020	1.5	0.3	1.2	20.8
<1	2014、2015、2016、2017、2019、2021、2022、2023、2024	0.5	0.1	0.4	14.5

积量均按照5:1:4的比例分配。此外,随着年入库沙量量级的减少,年排沙比整体呈现3%~6%的减幅,年排沙比平均值由24.2%减至14.5%。其中,年入库沙量不低于 2×10^8 t的年份均在上游梯级水库蓄水运行年份(2012年)之前,虽然这些年份总淤积量约占2003~2024年总淤积量的50%,但相应时期的水库运行水位整体较低并促成年排沙比平均值达到较高水平。此外,除2013年、2018年、2020年之外,上游梯级水库蓄水运行之后的年入库沙量均小于 1×10^8 t,虽然年排沙比平均值最低,但是这些年份总淤积量占2003~2024年总淤积量的比例不到20%。整体来看,上游梯级水库蓄水运行以来的库区淤积由上游梯级水库拦沙前的年份及洪水年份主导,虽然大水大沙条件不利于库容保持,但相应排沙比可维持较高水平。在年来沙量进一步趋减的形势下,为了持续保障水库库容,针对洪水年份的减淤调控尤为重要^[28]。

2.2 年内分布

根据2003~2024年入库水量及多年平均值($3\ 670 \times 10^8$ m³),本文筛选出6个典型年份以进一步分析年内来水来沙及库区冲淤分布情况。其中,2020年、2005年为大水年份,2016年、2010年为中水年份,2022年、2011年为小水年份,涵盖上游梯级水库蓄水运行前后年份,且中水年份、小水年份所选样本的入库水量相近。

2.2.1 汛期、非汛期入库水沙情势

本文按照汛期(6月至9月)及非汛期(1月至5月、10月至12月)进行年内划分,各典型年份的出库、入库水沙指标见图4。虽然上游梯级水库蓄水运行以及大水年份、中水年份、小水年份的差异造成总入库水量、总入库沙量发生变化,但是汛期入库水量、入库沙量在全年的占比较为稳定,分别为50%~60%、88%~98%,表现出来水来沙均由汛期主导的特征。水库排沙同样集中在汛期,相应出库沙量年内占比超过90%,甚至可达99%。其中,由于2022年的汛期为来水偏枯,且10月份嘉陵江发生的场次洪水造成非汛期入库水量、入库沙量的年内占比分别

达到55%和51%,相应的出库沙量占比也达到28%。而且,受到上游梯级水库水资源调配的影响,中水年份、小水年份对应的汛期入库水量分别减少 273×10^8 和 466×10^8 m³,非汛期入库水量增加 $(163 \sim 464) \times 10^8$ m³。

2.2.2 汛期、非汛期库区冲淤分布

本文进一步分析了各典型年份汛期、非汛期对应各河段的冲淤情况(图5)。整体而言,库区淤积集中于汛期且沿程逐渐加剧,不同水沙条件下的冲淤分布有所差别。上游朱沱站一寸滩站河段,大水年份平均淤积量为 209×10^5 t,少于中水年份、小水年份的 436×10^5 、 340×10^5 t,汛期仅在年入库沙量最少的2016年和2022年出现冲刷(汛期冲刷量分别为 262×10^5 、 107×10^5 t),非汛期则为大水年份冲刷,中水年份、小水年份近似不冲不淤,年内呈现“洪淤枯冲”的特征^[29]。寸滩站—清溪场站河段在中水年份、大水年份的平均淤积量分别为 $1\ 349 \times 10^5$ 、 $2\ 391 \times 10^5$ t,占库区总淤积量的11%~19%,而小水年份2011年、2022年分别仅占库区总淤积量的1.4%、5.1%,表明大水大沙条件下该河段淤积更多;清溪场站下游的常年回水区为主要淤积部位,随着入库水量增大,平均淤积量由 $4\ 688 \times 10^5$ t增至 $13\ 354 \times 10^5$ t,占库区总淤积量的比例均超过80%,并且超八成泥沙于汛期淤积。进一步来看,以万县站为分界,清溪场站—万县站河段和万县站—黄陵庙站河段的淤积占比互有高低。随着入库水量的增多,万县站—黄陵庙站河段的近坝区域淤积量占总淤积量的比例由25%逐渐增大至51%,表明水动力条件的增强推动了泥沙淤积重心向坝址方向移动^[30]。

从图5还可以看出,对于入库水量相近的年份,其库区冲淤分布也有所差别。①小水年份库区冲淤分布主要由入库沙量主导。2011年汛期入库沙量为 0.92×10^8 t,朱沱站一寸滩站河段即发生淤积;相比之下,2022年汛期入库沙量仅为 0.07×10^8 t,因此朱沱站—清溪场站河段整体呈现冲刷状态,其下游河段轻微淤积。这两个年份在非汛期的淤积均

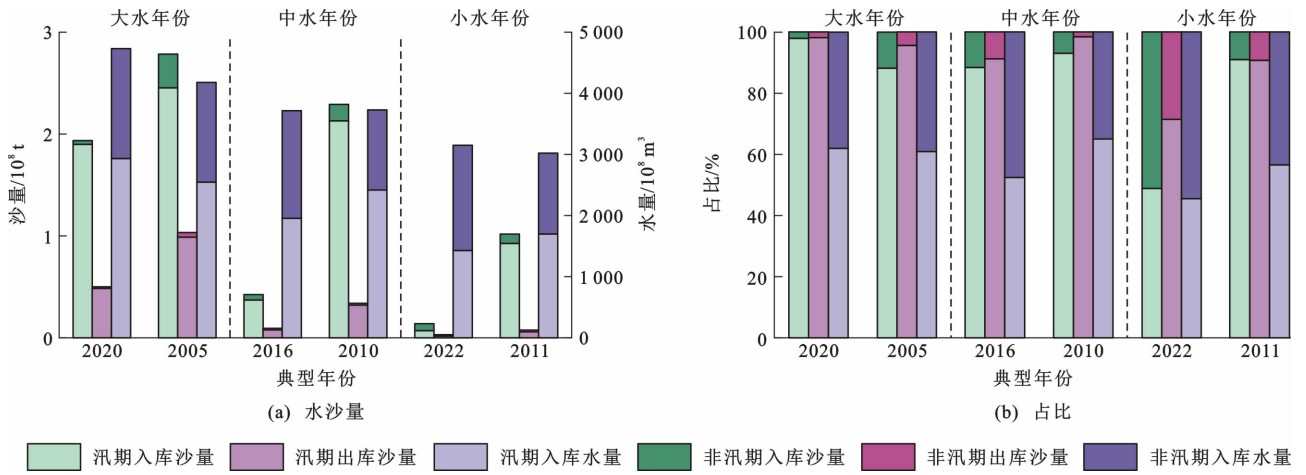
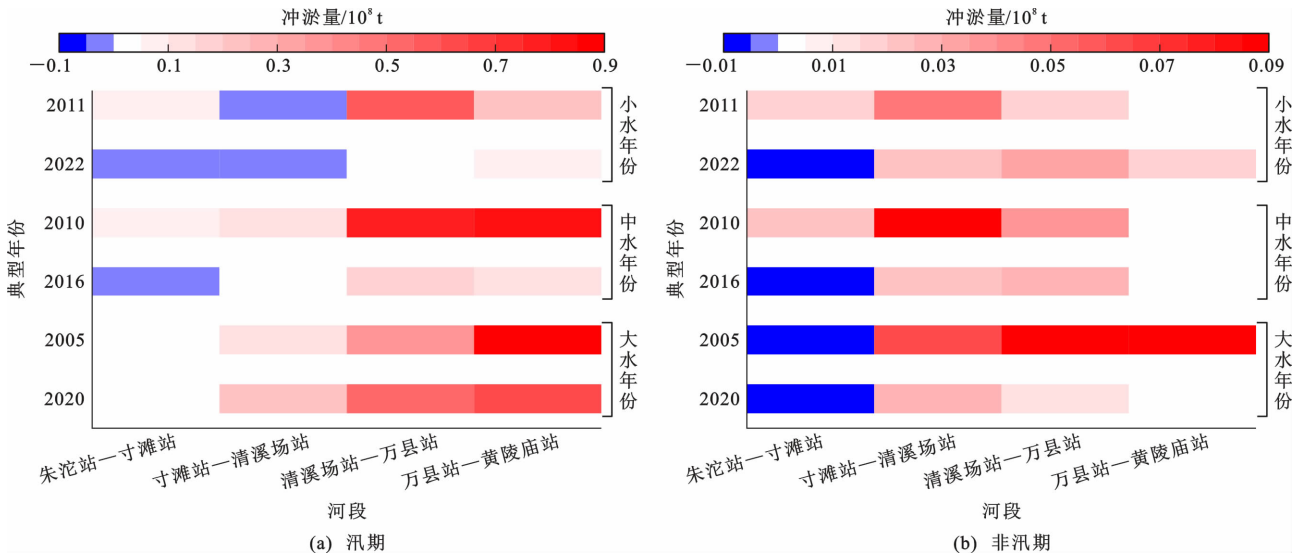


图4 典型年份出库、入库水量和沙量变化

Fig. 4 Variations of Inflow/Outflow Water-sediment in Representative Years



正值代表淤积量,负值代表冲刷量

图5 典型年份库区冲淤分布

Fig. 5 Distributions of Erosion-deposition of Reservoir in Representative Years

集中在寸滩站—万县站河段。②中水年份同时受入库水沙的影响。其中,2010年汛期入库沙量达到 2.13×10^8 t,入库径流推动泥沙淤积沿程增加;而入库水量相近的2016年汛期入库沙量仅为 0.37×10^8 t,因此寸滩站上游发生冲刷,淤积集中在清溪场站下游河段。③大水年份在汛期均表现为自库尾向坝前淤积加剧的趋势。其中,2005年因处于工程的围堰发电期,非汛期水资源调蓄能力及水动力作用相对较弱,造成泥沙在库区沿程淤积[图5(b)]。进一步对比发现,2012年以来金沙江下游梯级水库群蓄水运行,各典型年份的库尾冲刷趋势有所加剧,常年回水区的淤积出现不同程度的减轻,但大水大沙条件对应汛期淤积沿程加剧的趋势未发生根本性转变。

3 水库泥沙实时预报

鉴于泥沙入库和水库排沙均集中于汛期,加之不同入库水沙条件对应的库区淤积分布也存在差别,控制库区淤积与库容保持的核心在于对汛期泥沙的有效调控,而这一调控的关键在于实现对入库和库区泥沙的有效预报。为此,本文进一步构建并优化了水库泥沙预报体系,对2022~2024年汛期各河段的含沙量过程进行了实时预报,结合报汛数据对比了预报结果、预报误差,并对误差趋势进行了初步讨论。

3.1 来水来沙情势

2022~2024年汛历来水来沙情势较为复杂。2022年发生流域性严重干旱,进一步延伸导致2023

年来水来沙整体偏枯,而 2024 年汛期受强降雨影响出现编号洪水,预报期间控制站主要洪峰、沙峰特征如表 2 所示。整体而言,干支流来水来沙逐年增多,来水来沙分别由长江干流、嘉陵江控制,部分场次洪水二者占比相当,乌江武隆站仅 2024 年预报期间出现显著场次洪水过程。

表 2 预报期内来水来沙特征

Table 2 Characteristics of Water and Sediment Inflow During the Forecast Period

站点名称	年份	洪峰特征		沙峰特征			
		洪峰场次	最大洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	平均洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	沙峰场次	最大沙峰含沙量/ ($kg \cdot m^{-3}$)	平均沙峰含沙量/ ($kg \cdot m^{-3}$)
朱沱站	2022	5	23 500	13 400	2	0.24	0.19
	2023	3	22 000	17 900	3	1.77	1.00
	2024	4	30 000	26 000	4	2.41	1.32
寸滩站	2022	4	29 000	19 700	3	0.34	0.23
	2023	3	30 500	26 200	3	1.68	0.95
	2024	3	44 000	41 600	3	0.98	0.80
北碚站	2022	3	9 700	8 000	3	0.38	0.27
	2023	2	15 800	14 900	3	2.03	1.45
	2024	3	20 900	18 500	3	3.24	2.47
武隆站	2024	4	11 100	8 700	2	1.82	1.08

3.2 泥沙预报结果

受上游来沙情势影响,入库控制站的泥沙预报结果将直接影响库区水沙运动数学模型的精度。以预报期间来沙量级较大的朱沱站、北碚站 2 个人库控制站为例,其含沙量预报结果分别如图 6、7 所示。朱沱站在预报期内最大沙峰含沙量逐年增大,预报沙峰的涨落趋势与实测基本一致。由于无法获取朱沱站上游的报汛信息,本文仅参照预报流量过程开展泥沙预报,导致朱沱站的预报沙峰含沙量较实际偏小。嘉陵江多为雨洪河道,暴雨洪水引发的泥石流容易导致水体含沙量剧增^[31],使得北碚站的沙峰过程较朱沱站表现出更为明显的急涨急落特征,给预报带来更大不确定性。基于嘉陵江上游武胜站、小河坝站、罗渡溪站等的报汛流量、含沙量受水沙传播时差和草街枢纽调度影响,北碚站的预报沙峰含沙量也存在一定误差,但通过式(1)的滚动修正,预报来沙趋势与实测基本一致。

2022~2024 年库区代表站点(寸滩站、清溪场站、庙河站)的泥沙预报结果如图 8~10 所示。整体而言,各预报年份的库区沙峰衰减特征有所差别,但预报沙峰含沙量过程与报汛趋势基本一致。各年份

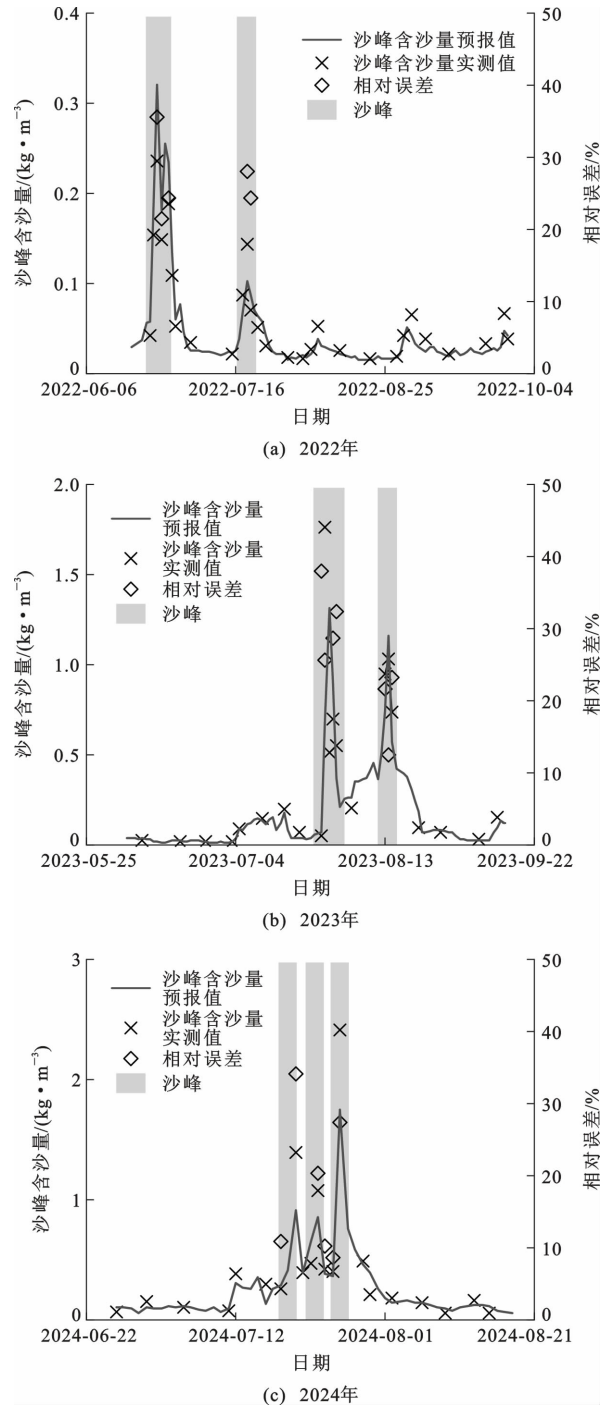
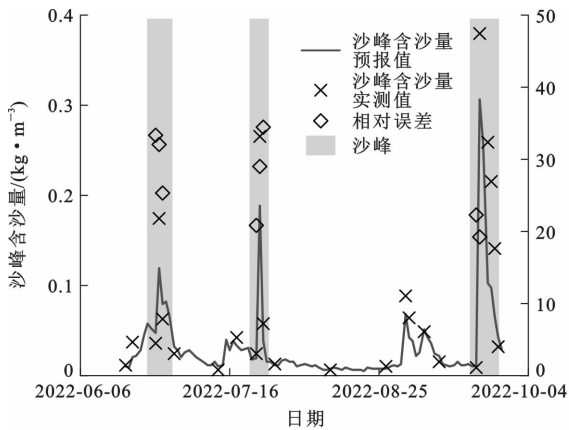


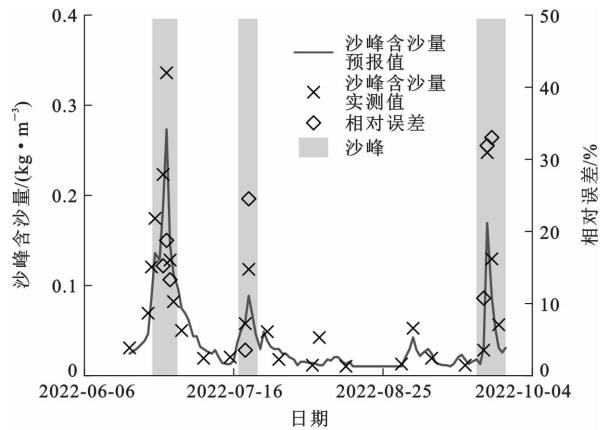
图 6 朱沱站泥沙预报过程

Fig. 6 Sediment Forecasting Processes at Zhutuo Station

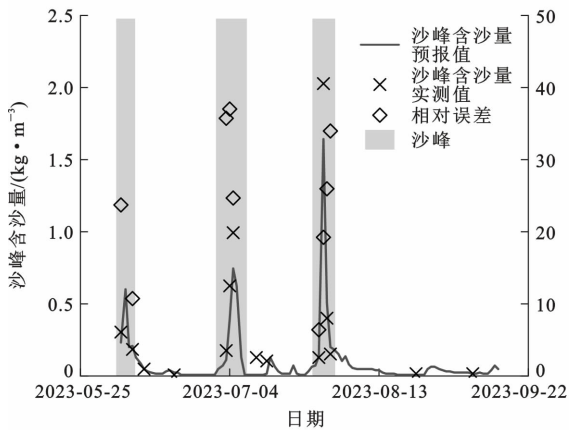
预报期间,寸滩站的主要沙峰含沙量由 $0.2 kg \cdot m^{-3}$ 变化至 $1.7 kg \cdot m^{-3}$,模型能够较好地捕捉不同量级下的沙峰运动过程。对清溪场站而言,在乌江来水不大的 2022 年和 2023 年,清溪场站与寸滩站的沙峰趋势基本一致,沙峰含沙量预报误差是上游寸滩站沙峰含沙量预报偏小所致;2024 年预报期间,乌江出现 4 场流量为 $7 000 \sim 11 000 m^3 \cdot s^{-1}$ 级别的洪峰,因此从报汛含沙量来看,清溪场站的沙峰



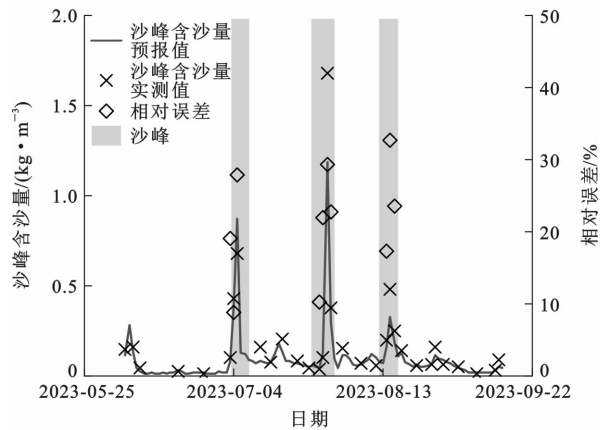
(a) 2022年



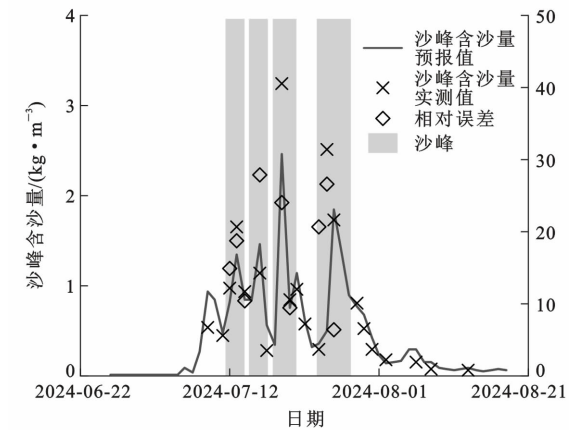
(a) 2022年



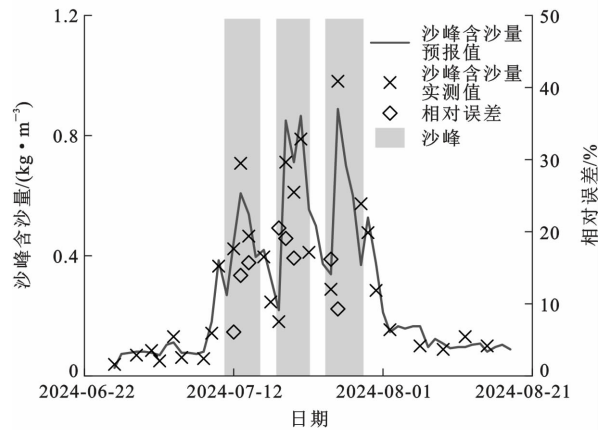
(b) 2023年



(b) 2023年



(c) 2024年



(c) 2024年

图7 北碚站泥沙预报过程

Fig. 7 Sediment Forecasting Processes at Beibei Station

峰型与寸滩站出现较大差别,但模型仍可较准确地对沙峰涨落趋势进行预判。虽然各预报年份的入库沙峰和洪峰量级差别较大,但庙河站的沙峰含沙量整体较为相近,且均未超过 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,可能原因是洪峰峰型尖瘦,无法提供持续的库区水动力条件。

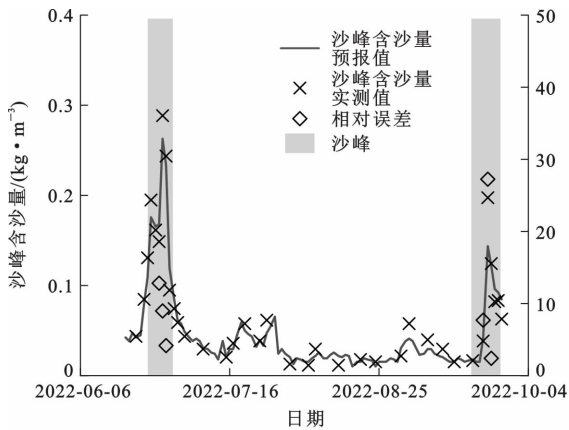
3.3 预报误差对比

含沙量预报值与实测值之间的误差按年份取平均后的结果如表3所示。2022年来水严重偏枯,水

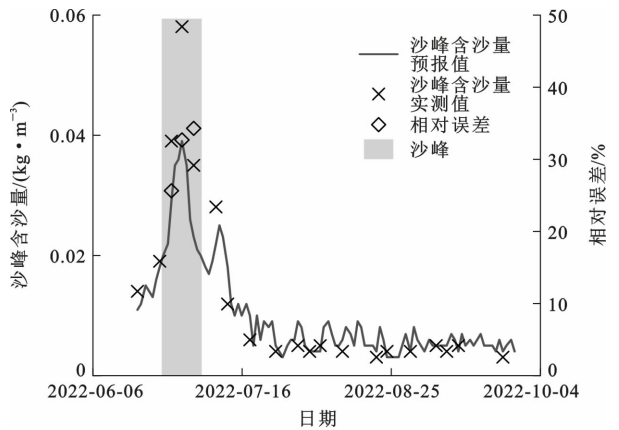
图8 寸滩站泥沙预报过程

Fig. 8 Sediment Forecasting Processes at Cuntan Station

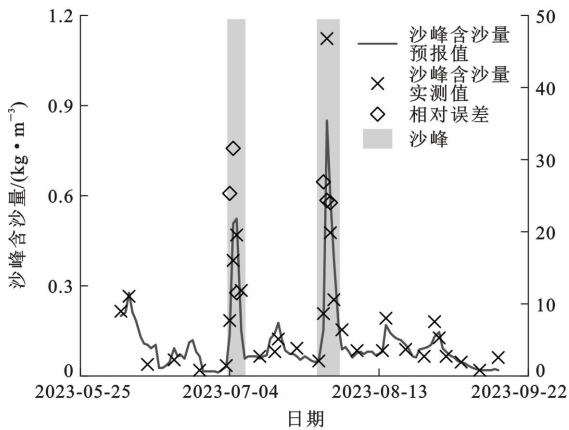
体含沙量显著低于其他年份,因此武隆站、庙河站的含沙量预报绝对误差较小,但相对误差偏大;朱沱站、寸滩站、清溪场站含沙量预报值与实测值较为符合,整体预报相对误差低于30%,满足相关要求^[15]。2023年、2024年汛期来沙逐渐增大,朱沱站由于无法获取上游来沙情势,带来一定预报误差;北碚站、武隆站受到上游水沙异源影响,易出现小水大沙的现象,其中北碚站于2023年7月21日在流量为



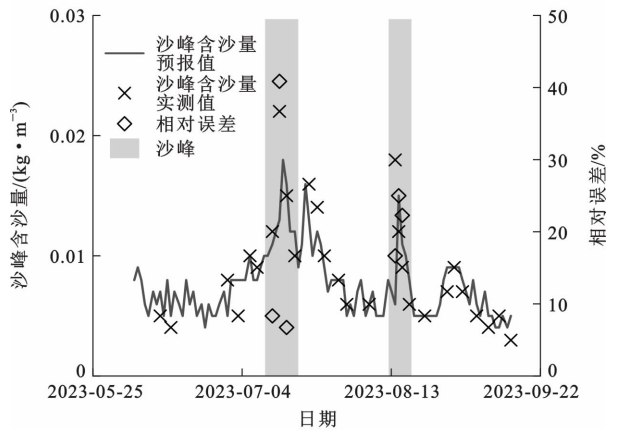
(a) 2022年



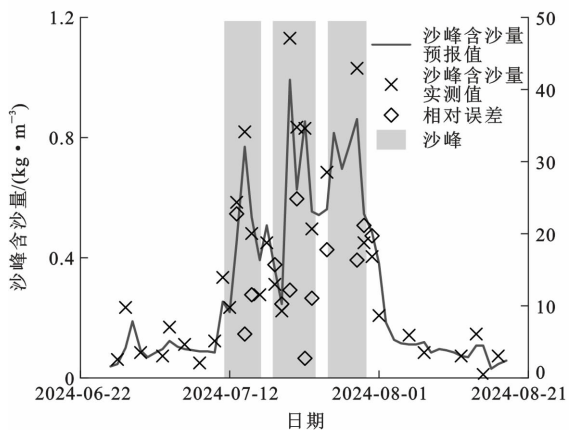
(a) 2022年



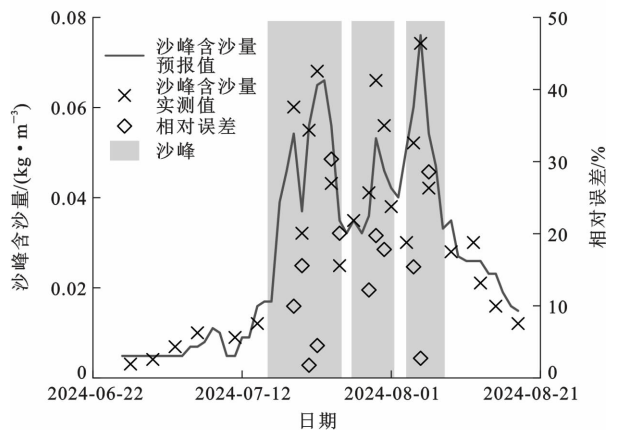
(b) 2023年



(b) 2023年



(c) 2024年



(c) 2024年

图 9 清溪场站泥沙预报过程

Fig. 9 Sediment Forecasting Processes at Qingxiang Station

图 10 庙河站泥沙预报过程

Fig. 10 Sediment Forecasting Processes at Miaohe Station

1 000 m³ · s⁻¹级别的情况下出现 1.33 kg · m⁻³的沙峰含沙量,对预报精度产生了较大影响。寸滩站、清溪场站、庙河站整体预报精度较为稳定,误差基本在合理范围内。

部分代表站点(朱沱站、北碚站、寸滩站、清溪场站)主要沙峰含沙量预报结果如表 4 所示,沙峰含沙量预报相对误差整体小于 30%。对朱沱站而言,在

上游实时来沙情势未知的情况下,沙峰含沙量预报值大多低于实测值,沙峰含沙量预报相对误差平均值为 24.0%,峰现时间预报绝对误差平均值为 7.2 h。类似地,北碚站整体沙峰含沙量预报相对误差平均值为 23.4%,峰现时间预报绝对误差平均值为 8.8 h。朱沱站、北碚站预报结果表明基于水沙关系的滚动修正公式[式(1)]对入库沙量预报具有较好适用性。寸滩站在预报期间的实测沙峰量级不大,

表3 代表站点沙峰含沙量预报误差

Table 3 Forecast Errors of Sediment Peak Concentration at Representative Stations

站点名称	2022年沙峰含沙量预报误差		2023年沙峰含沙量预报误差		2024年沙峰含沙量预报误差		2022~2024年沙峰含沙量预报误差	
	相对误差/ %	绝对误差/ (kg·m ⁻³)	相对误差/ %	绝对误差/ (kg·m ⁻³)	相对误差/ %	绝对误差/ (kg·m ⁻³)	相对误差/ %	绝对误差/ (kg·m ⁻³)
朱沱站	26.7	0.013	34.6	0.100	36.2	0.128	28.9	0.066
北碚站	38.9	0.021	50.5	0.134	33.5	0.245	38.9	0.095
武隆站	45.4	0.003	31.2	0.006	34.4	0.093	39.1	0.031
寸滩站	30.5	0.012	30.3	0.042	28.9	0.071	29.6	0.034
清溪场站	21.7	0.009	33.6	0.043	29.7	0.077	28.4	0.040
庙河站	45.1	0.004	28.8	0.002	29.2	0.009	33.2	0.004
黄陵庙站	41.0	0.004	27.2	0.002	28.9	0.009	31.9	0.004

表4 代表站点主要沙峰预报结果对比

Table 4 Comparison of Major Sediment Peak Forecasting Results at Representative Stations

站点名称	沙峰含沙量			峰现时间	
	预报值/ (kg·m ⁻³)	相对误差/ %	绝对误差/ (kg·m ⁻³)	预报值	绝对误差/ h
朱沱站	1.31	26.0	0.46	2023-07-28 02:00	6
	1.16	12.6	0.13	2023-08-14 14:00	6
	0.92	33.8	0.47	2024-07-19 20:00	12
	0.86	20.4	0.22	2024-07-22 20:00	12
	1.75	27.4	0.66	2024-07-26 08:00	0
北碚站	1.64	19.2	0.39	2023-07-29 02:00	6
	1.34	18.8	0.31	2024-07-13 20:00	12
	1.46	27.8	0.32	2024-07-16 22:00	14
	2.46	24.1	0.78	2024-07-19 08:00	0
	1.84	26.7	0.67	2024-07-24 20:00	12
寸滩站	1.19	29.2	0.49	2023-07-29 02:00	6
	0.61	12.9	0.09	2024-07-13 08:00	0
	0.85	19.7	0.14	2024-07-19 20:00	12
清溪场站	0.89	9.2	0.09	2024-07-26 02:00	6
	0.85	24.1	0.27	2023-07-30 02:00	6
	0.99	12.4	0.14	2024-07-20 14:00	6
	0.86	16.5	0.17	2024-07-28 14:00	18

预报模型能够准确把握沙峰含沙量和峰现时间,沙峰含沙量预报相对误差平均值为17.7%,峰现时间预报绝对误差平均值为6h;清溪场站的沙峰含沙量预报值整体略低于实测值,但沙峰含沙量预报相对误差平均值仍低于20.0%,且峰现时间预报绝对误差平均值在10h以内,沙峰运动过程与实测趋势基本一致。坝前庙河站和出库黄陵庙站于报汛期间均未监测到显著沙峰,与预报结果一致。

3.4 误差趋势讨论

本文进一步结合出库、入库水沙特征对沙峰含

沙量预报误差的变化趋势进行讨论。入库控制站以及位于变动回水区的寸滩站主要受上游来水来沙影响,但由于预报手段不同,朱沱站和寸滩站的沙峰含沙量预报误差存在一定差别。朱沱站沙峰含沙量预报误差与实测洪峰流量、沙峰含沙量均成弱正相关关系(图11),表明受限于上游实时来沙数据,仅依据预报流量开展泥沙预报不可避免地引入了系统误差,来水来沙越大,对应的预报误差越大。北碚站和寸滩站近似呈现出实测洪峰流量、沙峰含沙量越大,预报误差越小的趋势(图11)。这是由于上游可获得实测含沙量,有利于对北碚站和寸滩站沙峰含沙量预报值的修正,而当遭遇小水小沙情形时,上游站点泥沙监测频次降低,相应导致北碚站和寸滩站的沙峰含沙量预报误差增大。

库区沿程控制站以清溪场站、庙河站为代表,由于预报期间未掌握报汛流量过程,所以仅分析沙峰含沙量预报相对误差与实测值的相关性(图11)。整体而言,两个站点预报相对误差随实测沙峰含沙量的增大而趋于减小,其中清溪场站的沙峰含沙量预报相对误差趋势与寸滩站基本一致。庙河站的沙峰含沙量预报相对误差与实测值趋势性关联更高,但由于预报期内各种入库条件下通过报汛手段未监测到明显沙峰(图10),所以在同一量级的极小沙峰条件下,泥沙预报不确定性增强,导致预报误差跨度较大,且与上游站点呈现不同的分布特征。

鉴于来水预报的不确定性,叠加降水产沙以及库区输沙的复杂性,后续需通过以下工作来进一步提升泥沙预报的精度:①在上游及库区加密布设监测站点或设备,为提升预报精度、延长预见期等提供更丰富的数据支撑;②加强遥感技术在未控区间水沙监测的应用,谨防中小支流极端降水及地质灾害对泥沙预报的影响;③聚焦嘉陵江

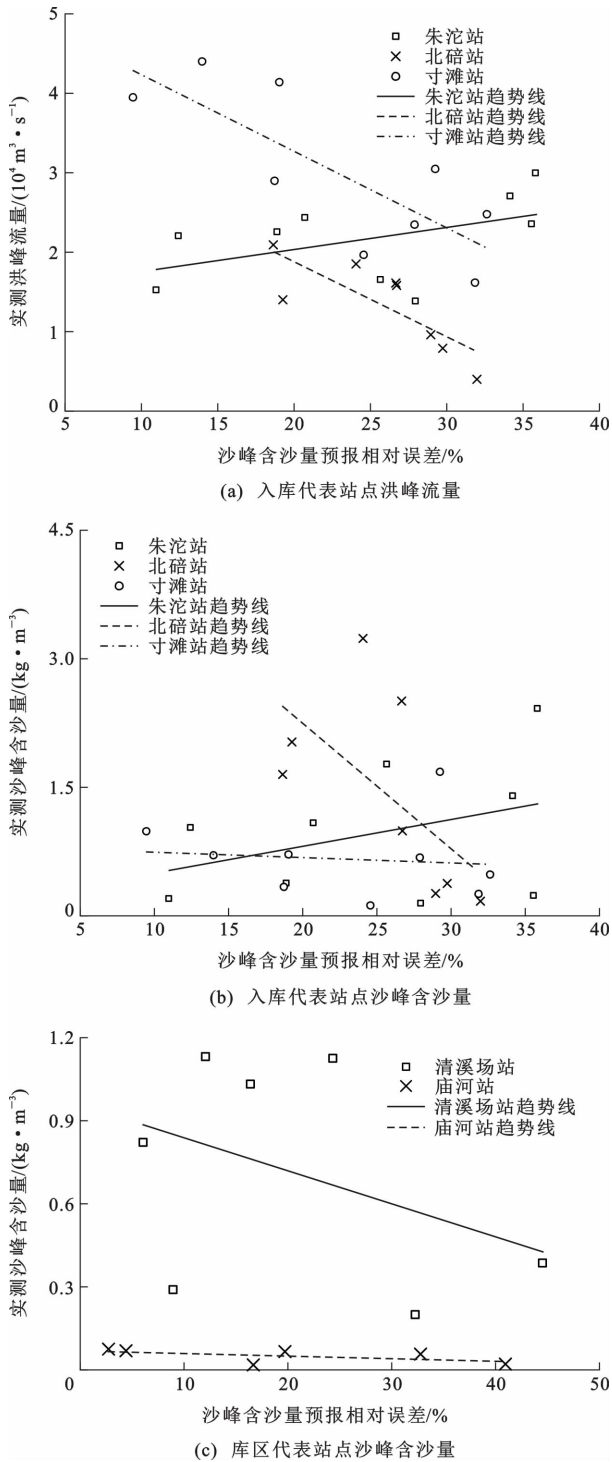


图 11 代表站点沙峰含沙量预报相对误差与实际洪峰流量、沙峰含沙量的相关性

Fig. 11 Correlations of the Forecast Relative Error for Sediment Peak Concentration at Representative Stations with Observed Flood Peak Discharge and Sediment Peak Concentration

4 结 语

本文利用长江干流大型河道型水库成库以来的实测水沙资料,分析了入库水沙特征及库区冲淤响应,构建并优化了水库泥沙预报系统,且在连续多年的实时作业中取得了较好的精度效果。

(1)长江上游梯级水库蓄水运行对年入库水量的影响不大,且通过汛期拦洪、非汛期补水,有效调节了入库水量的年内分配。在上游梯级水库蓄水运行造成入库泥沙大幅减少的背景下,大水年份仍对应大沙入库。典型年份对应汛期入库水量、入库沙量的年内占比分别为 50%~60%和 88%~98%。

(2)泥沙在库区的淤积沿程增加,其中清溪场站下游常年回水区的淤积占比超过八成。对于常年回水区的万县站至坝址河段,年入库水量的增大将进一步提升相应的淤积占比。水库排沙主要集中在汛期,相应出库沙量年内占比超过 90%,且大水大沙条件对应场次洪水的排沙比更高。

(3)构建并优化了水库泥沙预报技术体系,提出了基于水沙关系的滚动修正公式以降低入库控制站预报误差,并通过基于预报误差的水沙运动数学模型参数自适应调整,提升了库区和出库泥沙的预报水平。结果表明,沙峰含沙量预报相对误差和峰现时间预报绝对误差基本在 30%、10 h 以内。其中,入库朱沱站、北碚站的沙峰含沙量预报误差分别与洪峰流量呈现一定的正、负相关趋势,库区清溪场站、庙河站的预报误差则随沙峰含沙量的增大而趋于减小。

参 考 文 献 :

References :

[1] 胡春宏,方春明,史红玲.三峡工程重大泥沙问题研究进展[J].中国水利,2023(19):10-16.
 HU Chun-hong, FANG Chun-ming, SHI Hong-ling. Recent Progress in Sediment Research of the Three Gorges Project [J]. China Water Resources, 2023 (19):10-16.

[2] 郭生练,王 俊,谢雨祚,等.面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J].水利学报,2024,55(4):379-388.
 GUO Sheng-lian, WANG Jun, XIE Yu-zuo, et al. Three Gorges Reservoir Operation Scheme Facing the New Era and New Demands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(4):379-388.

[3] 赵汗青,任 实,袁赛瑜,等.三峡库区洪峰的来水组成及传播特征[J].水科学进展,2022,33(6):924-933.

流域,重点关注小水大沙、大水小沙的发生机制;
④优化泥沙预报的模型方法,融合人工智能等技术以丰富泥沙预报手段。

- ZHAO Han-qing, REN Shi, YUAN Sai-yu, et al. Inflow Composition and Transport of Three Gorges Reservoir Flood Peaks[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(6): 924-933.
- [4] 许全喜,董炳江,张为,等.基于洪峰沙峰异步传播规律的三峡水库排沙调度研究[J]. *人民长江*, 2025, 56(10): 11-20.
- XU Quan-xi, DONG Bing-jiang, ZHANG Wei, et al. Sediment Discharge Operation of Three Gorges Reservoir Based on Asynchronous Propagation of Flood Peak and Sediment Peak[J]. *Yangtze River*, 2025, 56(10): 11-20.
- [5] 黄仁勇,舒彩文,谈广鸣.长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测初步研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(4): 737-745.
- HUANG Ren-yong, SHU Cai-wen, TAN Guang-ming. Long-term Sedimentation Prediction of Cascade Reservoirs in the Upper Reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(4): 737-745.
- [6] WANG K Y, HUANG L, HE G J, et al. Spatial-temporal Evolution of Sediment Transport in the Upper Yangtze River Basin Considering the Cumulative Impacts of Mega Reservoirs [J]. *Catena*, 2023, 232: 107370.
- [7] 任实,高宇.三峡工程泥沙问题研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(6): 1611-1625.
- REN Shi, GAO Yu. Research Progress and Prospects on Sediment Issues of the Three Gorges Project[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(6): 1611-1625.
- [8] REN S, ZHANG B W, WANG W J, et al. Sedimentation and Its Response to Management Strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China [J]. *Catena*, 2021, 199: 105096.
- [9] GUO C, JIN Z W, GUO L C, et al. On the Cumulative Dam Impact in the Upper Changjiang River: Streamflow and Sediment Load Changes [J]. *Catena*, 2020, 184: 104250.
- [10] 周银军,王军,金中武,等.三峡水库来沙的地区组成变化分析[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(4): 21-26.
- ZHOU Yin-jun, WANG Jun, JIN Zhong-wu, et al. Study on Processes of Sediment Sources to the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(4): 21-26.
- [11] 任实,高宇,吕超楠,等.三峡水库汛期排沙规律研究[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(5): 1562-1571.
- REN Shi, GAO Yu, LYU Chao-nan, et al. Sediment Discharge Characteristics of the Three Gorges Reservoir During Flood Seasons [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(5): 1562-1571.
- [12] 袁晶,许全喜,董炳江,等.近20年来三峡水库泥沙淤积及其对库区的影响[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 632-641.
- YUAN Jing, XU Quan-xi, DONG Bing-jiang, et al. Sediment Deposition of Three Gorges Reservoir and Its Impact on the Reservoir Area in Recent 20 Years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 632-641.
- [13] 万新宇,包为民,钟平安.基于相似推理的多沙河流域水库坝址泥沙预测[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(12): 191-194.
- WAN Xin-yu, BAO Wei-min, ZHONG Ping-an. Similarity-based Reasoning for Predicting Sediment of Dam Site in Heavy Sediment-carrying River [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(12): 191-194.
- [14] 李楠,张振华,宋扬,等.黄河含沙量变化过程预报方法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(增1): 89-92.
- LI Nan, ZHANG Zhen-hua, SONG Yang, et al. Study on Prediction Method of Sediment Content Process in Yellow River [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(S1): 89-92.
- [15] 王世平,王渺林,许全喜,等.三峡入库站含沙量预报方法初探与试预报[J]. *水利水电快报*, 2015, 36(5): 11-14.
- WANG Shi-ping, WANG Miao-lin, XU Quan-xi, et al. Preliminary Study and Trial Forecast of Sediment Concentration Prediction Method in Three Gorges Storage Station [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2015, 36(5): 11-14.
- [16] 闫金波,代水平,刘天成,等.三峡水库泥沙作业预报方案研究[J]. *水利水电快报*, 2012, 33(7): 71-74.
- YAN Jin-bo, DAI Shui-ping, LIU Tian-cheng, et al. Study on Forecast Scheme of Sediment Operation in Three Gorges Reservoir [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2012, 33(7): 71-74.
- [17] 袁晶,杨成刚.三峡水库汛期沙峰预报技术及排沙调度实践[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(7): 1-7.
- YUAN Jing, YANG Cheng-gang. Technology of Forecasting Sediment Peak and Practice of Sediment Reduction Dispatch in Three Gorges Reservoir During Flood Season [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(7): 1-7.
- [18] 林天宙,彭杨,罗诗琦,等.基于RF-LSTM模型的长江上游汛期日含沙量预测[J]. *中国农村水利水电*, 2024(10): 32-39.
- LIN Tian-zhou, PENG Yang, LUO Shi-qi, et al. Prediction of Daily Sediment Concentrations in the Upper

- Reaches of Yangtze River During Flood Season Based on RF-LSTM Model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(10):32-39.
- [19] 陈雪,胡宏昌,刘慧,等.基于机器学习算法的清涧河流域径流及含沙量预测研究[J].*中国水利水电科学研究院学报*, 2024, 22(5):520-529, 538.
CHEN Xue, HU Hong-chang, LIU Hui, et al. Prediction of Runoff and Sediment Concentration in Qingjian River Basin Based on Machine Learning Algorithm[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(5):520-529, 538.
- [20] 曹辉,陈柯兵,董炳江.基于 Azure AutoML 的泥沙预报模型构建与应用[J].*人民长江*, 2023, 54(4):94-100.
CAO Hui, CHEN Ke-bing, DONG Bing-jiang. Construction and Application of Sediment Forecast Model Based on Azure AutoML[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(4):94-100.
- [21] 胡春宏,李丹勋,方春明,等.三峡工程泥沙模拟与调控[M].北京:中国水利水电出版社,2017.
HU Chun-hong, LI Dan-xun, FANG Chun-ming, et al. Sediment Simulation and Regulation of Three Gorges Project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.
- [22] 姚金忠,程海云,王海,等.三峡水库 175 m 试验性蓄水以来水文泥沙观测与研究[M].北京:中国水利水电出版社,2021.
YAO Jin-zhong, CHENG Hai-yun, WANG Hai, et al. Observation and Study on Hydrological and Sediment Since the 175 m Experimental Impoundment of Three Gorges Reservoir[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [23] 张成潇,赵汗青,任实,等.三峡水库汛期沙峰调度效益研究[J].*中国科学:技术科学*, 2025, 55(5):914-926.
ZHANG Cheng-xiao, ZHAO Han-qing, REN Shi, et al. Benefits of the Sediment Peak Regulation During the Flood Season in the Three Gorges Reservoir[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2025, 55(5):914-926.
- [24] 赵汗青,任实,闫静,等.汛期洪水资源化利用对三峡水库淤积影响研究[J].*湖泊科学*, 2024, 36(2):634-644.
ZHAO Han-qing, REN Shi, YAN Jing, et al. The Influence of Flood Resource Utilization on Sediment Deposition in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2):634-644.
- [25] 张成潇,米博宇,吕超楠,等.高洪水期运行水位对三峡水库泥沙淤积的影响[J].*长江科学院院报*, 2024, 41(6):10-17, 35.
ZHANG Cheng-xiao, MI Bo-yu, LYU Chao-nan, et al. Influence of Operating Water Level on Sediment Deposition in the Three Gorges Reservoir During High Flood Levels[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(6):10-17, 35.
- [26] 单敏尔,李志晶,周银军,等.三峡水库入库水沙变化规律及驱动因素分析[J].*泥沙研究*, 2022, 47(2):29-35.
SHAN Min-er, LI Zhi-jing, ZHOU Yin-jun, et al. Variations and Driving Factors of Water Flow and Sediment Transport in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2):29-35.
- [27] 张成潇,赵汗青,任实,等.三峡水库典型入库水沙序列对比研究[J].*泥沙研究*, 2024, 49(3):62-68.
ZHANG Cheng-xiao, ZHAO Han-qing, REN Shi, et al. Comparative Study of Typical Input Flow and Sediment Sequences of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(3):62-68.
- [28] 高宇,任实,王海,等.三峡水库场次洪水排沙规律及影响因素[J].*水科学进展*, 2024, 35(1):112-122.
GAO Yu, REN Shi, WANG Hai, et al. Sediment Delivery Regularity and Its Influencing Factors During Flood Events in the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1):112-122.
- [29] 金中武,任实,吴华莉,等.三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J].*长江科学院院报*, 2020, 37(10):9-15, 27.
JIN Zhong-wu, REN Shi, WU Hua-li, et al. Sedimentation and Sediment Delivery and River Pattern Conversion in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10):9-15, 27.
- [30] 杨春瑞,邓金运,陈立.复杂边界作用下三峡水库泥沙淤积特征与趋势[J].*水科学进展*, 2023, 34(3):442-453.
YANG Chun-rui, DENG Jin-yun, CHEN Li. Sediment Deposition Trend in the Three Gorges Reservoir Under the Action of Complex Boundary Conditions[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3):442-453.
- [31] 刘尚武,张鹏,苗蔚,等.嘉陵江不同区域场次洪水输沙规律[J].*水科学进展*, 2022, 33(1):38-47.
LIU Shang-wu, ZHANG Peng, MIAO Wei, et al. Study on Sediment Transport Law of Flood Event in Different Areas of the Jialingjiang River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1):38-47.