

金沙江下游梯级水库蓄水后三峡水库汛期沙峰调度控制指标探讨*

高 宇^{1,2}, 任 实^{1,2**}, 周 曼^{1,2}, 吕超楠^{1,2}, 齐家露^{1,2}, 赵汗青¹, 张成潇¹

(1: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

(2: 高坝大库运行安全湖北省重点实验室, 宜昌 443134)

摘 要: 三峡水库汛期沙峰调度能够显著提高水库排沙效果, 研究其调度控制指标对于保障水库库容安全、提高水库汛期综合效益具有重要意义。根据 2003~2023 年三峡库区水文站实测数据, 分析库区汛期泥沙输移规律, 重点探讨 2013 年金沙江下游梯级水库蓄水后三峡水库汛期沙峰调度的启动控制与过程调控指标。结果表明: 金沙江下游梯级水库蓄水后, 三峡水库入库沙量大幅减少, 汛期输沙更加集中在场次洪水期间, 应主要考虑对预报入库寸滩站洪峰流量不低于 50000m³/s 或沙峰含沙量不低于 1.5kg/m³, 且预报寸滩站 7 日平均含沙量不低于 0.5kg/m³ 的场次洪水启动汛期沙峰调度。沙峰调度期间, 应以防洪安全为前提, 综合考虑水库汛期多目标效益与实际来水来沙情势, 遵循拦洪削峰、库区拉沙、坝前排沙三个时期的基本调度策略实施动态调控。三峡水库汛期泥沙实时监测与预报是开展沙峰调度的基础, 需要不断改进优化泥沙监测与预报技术, 精准掌控调度启动时机与调度过程, 提高水库综合效益。研究成果可为三峡水库汛期优化调度提供重要技术支撑。

关键词: 三峡水库; 沙峰调度; 启动控制; 过程调控; 泥沙实时监测与预报

Discussion on the control indicators of sediment peak regulation in the Three Gorges Reservoir during flood season after the impoundment of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River

Gao Yu^{1,2}, Ren Shi^{1,2**}, Zhou Man^{1,2}, Lv Chaonan^{1,2}, Qi Jialu^{1,2}, Zhao Hanqing¹ & Zhang Chengxiao¹

(1: China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R. China)

(2: Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir, Yichang 443134, P.R. China)

Abstract: Sediment peak regulation (SPR) in the Three Gorges Reservoir (TGR) during the flood season can significantly enhance the discharge of sediment. Studying the control indicators of SPR is important for ensuring the safety of the reservoir's storage capacity and improving its overall benefits. Based on data recorded at hydrological stations in the TGR between 2003 and 2023, the characteristics of sediment transport in the reservoir during the flood season were identified. Following the impoundment of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River, the start-up control and process regulation indicators of the SPR in the TGR were examined. The results indicate that the amount of sediment entering the TGR has decreased considerably since the cascade reservoirs were impounded. Sediment transport in the TGR mainly occurs during flood events. The main consideration is to activate the SPR when the forecasted peak discharge at the Cuntan station is not less than 50,000 m³/s, the forecasted peak sediment concentration at the Cuntan station is not less than 1.5 kg/m³, and the forecasted 7-day average sediment concentration at the Cuntan station is not less than 0.5 kg/m³. Considering flood control safety and the multi-objective benefits of the reservoir, as well as the measured flow and sediment conditions during the SPR, dynamic scheduling can be implemented according to dispatching strategies for three periods: water discharge peak blocking, sediment transport in the reservoir and sediment discharge in front of the dam. In addition, real-time monitoring and forecasting of sediment during the flood season form the basis of the SPR. It is necessary to continuously optimize sediment monitoring and forecasting technologies to accurately control the start time and regulation process of the SPR and improve its overall benefits. This study could provide technical support for optimising and refining the TGR's SPR during the flood season.

Keywords: Three Gorges Reservoir; sediment peak regulation; start-up control; process regulation; real-time monitoring and forecasting of sediment

水利工程在防洪、发电、航运、水资源利用、生态保护等方面具有巨大的综合效益^[1-4]。然而, 水库蓄水改变了天然河道的水流条件, 如库区水位抬升、水流流速减缓等, 导致库区内泥沙易于淤积, 影响水库综合效益发挥, 且我国大多数河流输沙集中在汛期, 水库汛期泥沙淤积的形势更加严峻^[5, 6]。因此, 研究提高水库汛期的排沙能力对于保障水库使用寿命、发挥水库综合效益等意义重大。

水库泥沙淤积的防治措施主要包括拦减流域来沙、水库调度排沙、机械设备人工清淤等^[7-10]。其中,

* 2025-02-14 收稿; 2025-06-07 收修稿。

国家自然科学基金项目 (U2040218) 和水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放研究基金项目 (IWHR-SEDI-2024-10) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: ren_shi16@126.com。

水库调度排沙是改善库区泥沙淤积分布、保持水库防洪库容的有效手段，能够节省大量人工成本。针对水库类型与河道泥沙输移特性，不同水库采取的排沙减淤调度方式有所差异，同时随着水库设计技术的发展，水库运用方式也在不断优化。早期由于对水库泥沙问题的认识有限，水库设计主要以“拦”沙为主，最终可能导致水库泥沙大量淤积，严重影响水库使用寿命；为了解决水库严重淤积的问题，泥沙调度策略逐渐由以“拦”为主转为以“排”为主，如三门峡水库的运用方式由早期的“蓄水拦沙”发展为近期的“蓄清排浑”^[11]；此后，随着“蓄清排浑”运用方式成功应用经验的积累，对水库泥沙调度提出了更高的要求，在“拦”、“排”的基础上，进一步提出了“调”的目标，如小浪底水库采用调水调沙^[12]与异重流排沙^[13]的运用方式，有效减少了水库泥沙淤积，同时也为“蓄清调浑”技术的发展提供了重要支撑。

三峡工程作为治理和开发长江的关键性骨干工程，从初步设计与论证阶段就将库区泥沙淤积问题作为关键技术问题重点研究^[14-16]，设计阶段提出三峡水库采用“蓄清排浑”的调度方式^[17]，即汛期维持防洪限制水位145m运行，以利于水库排沙，期间遇大洪水则进行拦蓄，当洪峰过后仍降至145m运行，在发挥水库防洪效益的同时尽量减少泥沙淤积；汛后10月份开始蓄水至正常蓄水位175m，以满足水库航运、补水、生态等综合效益的发挥。三峡水库蓄水运行以来，入库沙量大幅减少，且入库泥沙主要集中在汛期，尤其是金沙江下游梯级水库蓄水后，入库泥沙更加集中在汛期场次洪水期间^[18]，同时三峡水库的泥沙实时监测与预报技术^[19, 20]也得到了很大提升，为汛期及时、精准掌握水沙输移过程提供了重要支撑。在此基础上，三峡水库根据库区汛期沙峰滞后于洪峰的水沙异步特性^[21]，针对性提出并实践了汛期沙峰排沙调度，分别在2012年、2013年、2018年、2020年汛期开展了“涨水面水库削峰，落水面则加大泄量排沙”的沙峰排沙调度试验^[22, 23]，取得了较好的排沙效果，在保证防洪安全的同时，兼顾了水库排沙，实现了三峡水库从传统“蓄清排浑”逐步转向“调沙提效”^[24, 25]的泥沙动态调控方式。

沙峰调度的控制指标可以分为启动控制指标与过程调控指标，当前对于三峡水库汛期沙峰调度的控制指标尚缺乏系统研究，金沙江下游梯级水库蓄水后，以往调度指标对三峡水库现状水沙情势的适用性有待探讨。本文主要根据三峡库区干支流主要控制水文站的实测水文泥沙数据，分析三峡水库蓄水以来的汛期泥沙输移特性，在此基础上重点探讨2013年金沙江下游梯级水库蓄水后三峡水库汛期沙峰调度的控制指标。研究成果可为后续开展汛期沙峰调度提供重要参考和技术支撑，对于减少库区泥沙淤积、保障库容安全等具有重要意义。

1 研究区域及数据来源

三峡大坝地处长江上游与中游分界处的湖北省宜昌市，控制流域面积约100万km²，如图1所示。其中，江津至涪陵河段为水库变动回水区，长约173km；涪陵至大坝河段为水库常年回水区，长约487km。三峡库区沿程支流众多，主要支流嘉陵江、乌江分别于重庆、涪陵汇入长江干流。

本文收集了三峡水库蓄水以来2003~2023年朱沱、北碚、武隆、寸滩水文站数据来反映三峡水库的入库水沙过程，其中北碚、武隆水文站分别是支流嘉陵江、乌江的控制水文站，长江干流清溪场、万县、庙河水文站数据来反映三峡水库的水沙输移过程，黄陵庙水文站数据来反映出库水沙过程，茅坪水位站数据来反映坝前水位变化过程，上述数据均为日均数据，来源于中国长江三峡集团有限公司，各水文站分布见图1。考虑到金沙江下游梯级水库相继蓄水后，拦截了绝大部分的金沙江来沙，三峡水库入库沙量大幅减少，本文将以向家坝水电站蓄水运行时间为时间节点，重点分析探讨2013年以后三峡水库的汛期泥沙输移特性与沙峰调度控制指标。

2 三峡水库汛期泥沙输移特性

三峡水库蓄水运行以来，年内入库沙量（朱沱、北碚、武隆三站之和，下同）主要集中在汛期，2003~2012年、2013~2023年汛期6~9月的多年平均入库沙量分别为1.824亿t、0.683亿t，占全年入库沙量的90.0%、92.1%。金沙江下游梯级水库蓄水运行后，三峡水库入库沙量在汛期更加集中，但汛期年均入库沙量却大幅减少了约1.141亿t。同时，三峡水库汛期来沙进一步集中在场次洪水期间，根据高宇等^[26]

对三峡水库汛期场次洪水的划分方法，2003~2023年汛期共发生55场次洪水，其中，2003~2012年、2013~2023年汛期场次洪水期间入库沙量占汛期入库沙量的多年平均比值分别为66.7%、67.5%。不同场次洪水期间的寸滩站洪峰流量与三峡水库入库沙量之间的关系如图2所示，2003~2012年，入库沙量未随着寸滩站洪峰流量的增大呈现出明显的趋势性变化，当洪峰流量在30000~65000m³/s区间变化时，入库沙量均小于7000万t，平均入库沙量3586万t；2013~2023年，三峡水库入库沙量整体减少，除2013年、2018年、2020年汛期发生的3场次洪水入库沙量超过8000万t外，其余场次洪水寸滩站洪峰流量均介于30000~50000m³/s之间，入库沙量均小于3000万t，平均入库沙量仅有1206万t，较2003~2012年均值减少了66.4%。



图 1 研究区域河势图

Fig. 1 Sketch of the study area

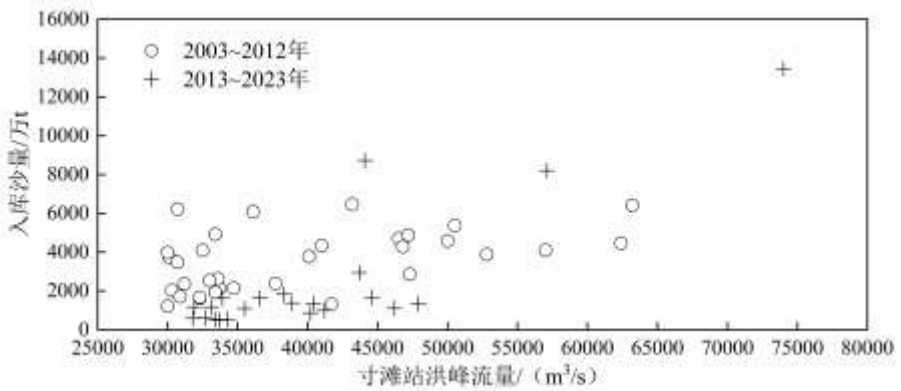


图 2 三峡水库汛期场次洪水期间寸滩站洪峰流量与入库沙量的关系

Fig. 2 The relationship between peak discharge at Cuntan station and incoming sediment amount during the flood season in the Three Gorges Reservoir

进一步统计不同场次洪水期间的三峡水库库区泥沙淤积与水库排沙比之间的关系，如图3所示，两者之间并无明显的相关性。金沙江下游梯级水库蓄水后，三峡水库汛期场次洪水期间的水库排沙比整体有所减小，排沙比平均值由2003~2012年的24.6%减小到2013~2023年的18.7%，但由于入库沙量的大幅减少，2013~2023年汛期场次洪水期间的库区淤积量并未随着排沙比的减小而增大，约86%的场次洪水库区淤积量小于2000万t，仅有2013年、2018年、2020年汛期发生的3场次入库沙量较大的洪水，库区淤积量显著偏大，若不考虑该3场次洪水，库区淤积量平均值由2003~2012年的2531万t减小至2013~2023年的972万t。

由此可见，金沙江下游梯级水库蓄水后，当寸滩站洪峰流量小于50000m³/s时，场次洪水入库沙量普

遍较小，库区淤积量也明显减少；而当洪峰流量大于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 时，入库沙量显著增大，存在场次洪水期间库区泥沙大量淤积的风险，需通过水库汛期优化调度以增大水库排沙、减少库区泥沙淤积。

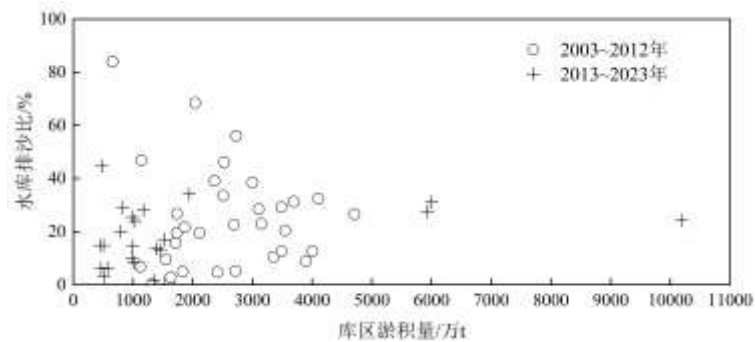


图3 三峡水库汛期场次洪水期间库区淤积量与排沙比的关系

Fig. 3 The relationship between sediment deposition amount and sediment discharge ratio during the flood season in the Three Gorges Reservoir

3 三峡水库汛期沙峰调度原则

三峡水库汛期沙峰调度的总体目标是在保证防洪安全的前提下尽可能多地排沙出库，减少水库总淤积量，实现水库防洪与排沙效益相协同。根据三峡库区沙峰滞后洪峰的水沙输移特点与水库调度情况，将沙峰调度分为拦洪削峰、库区拉沙和坝前排沙三个时期(图4)。拦洪削峰期主要根据防洪要求在洪峰入库时对洪水进行削峰拦蓄，库水位有所上升，此时沙峰入库；库区拉沙期主要通过控制下泄流量维持沙峰输移至坝前；坝前排沙期主要在沙峰到达坝前时增大下泄流量集中排沙，之后再视出库含沙量及库水位情况择机结束沙峰调度。与设计阶段提出的“蓄清排浑”调度方式相比，沙峰调度对洪水过程的调控更为精细化，针对不同阶段的调度目标，提出不同的调控策略和控制指标，提高了水库调度的灵活性。

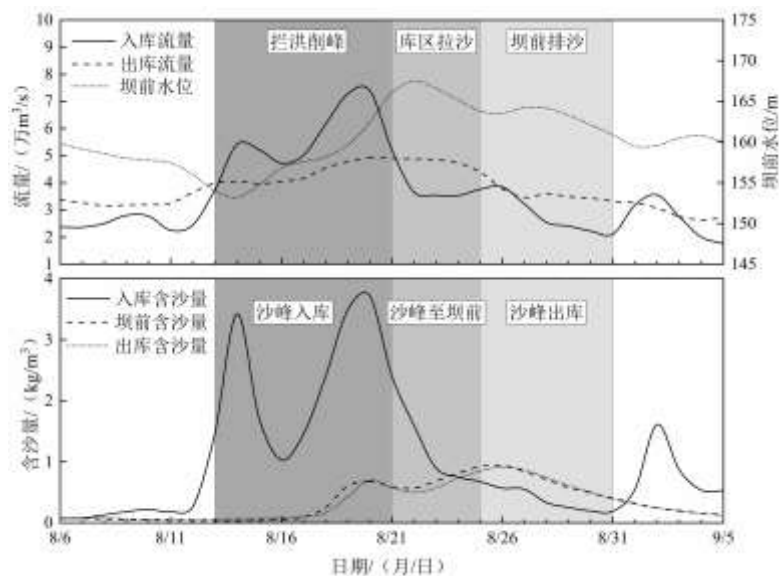


图4 三峡水库2020年沙峰调度过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sediment peak regulation of the Three Gorges Reservoir in 2020

从调度过程来看，沙峰调度的原则即是通过调控洪水过程，在“防洪安全许可”的前提下增大水库下泄流量来尽可能多地排出水库中的泥沙，且只有排出水库的泥沙越多，才能使增加下泄的水量充分发挥其效益，避免出现“高耗水、低排沙”的洪水资源浪费现象。从排沙效果来看，水库排沙的多少是沙峰调度的重要效果指标，其主要取决于出库流量与含沙量的乘积大小，而两者又与入库流量和含沙量的大小密切相关，且两者在调度过程中相互制约。在拦洪削峰期，入库水量较大，三峡水库根据防洪调度

拦蓄较多的入库水量,库水位升高导致泥沙在库区内的输移速度减缓,坝前含沙量降低;在随后的库区拉沙期和坝前排沙期,入库水量减少,水流动力减弱,只有增加下泄流量使更多的泥沙输移至坝前并排出水库,且增加的出库沙量需要能够抵消前期拦洪减少的出库沙量,才能取得较好的沙峰调度排沙效果,实现防洪与排沙效益相协同。

场次洪水期间的入、出库沙量大小直接影响沙峰调度排沙效果,如果沙峰调度的入库启动指标定得太低,入库沙量就太小,会导致出库沙量不够,开展沙峰调度将失去现实意义,同时也造成洪水资源浪费,如果入库启动指标定得太高,则在当前入库沙量大幅减少的背景下,沙峰调度将难以启动实施。即使当入库沙量满足启动指标时,出库沙量的大小除了与入库沙量密切相关,还主要取决于沙峰调度的过程调控,需要调控洪水过程来增加出库沙量。因此,沙峰调度的入库启动条件与调度过程调控至关重要,有必要对其控制指标进行探讨。

4 金沙江下游梯级水库蓄水后三峡水库沙峰调度探讨

由于不同场次洪水的入库水沙输移过程存在较大差异,且不同情况下的防洪、航运等实际需求也会有所区别,当前尚无法对沙峰调度的过程调控指标提出定量要求,本文仅对沙峰调度的启动控制指标进行定量探讨,并提出调度过程调控的基本策略。针对具体的场次洪水过程,可结合防洪、航运等实际需求,根据调控基本策略对场次洪水过程进行调控,以实现水库防洪与排沙效益相协同的目标。

4.1 启动控制指标探讨

由于长江上游干支流水文站洪水叠加时间不同步,且乌江汇入长江干流的泥沙较少,2003~2023年武隆站的多年平均输沙量仅占入库沙量的2.5%,故本文主要选取长江干流寸滩站作为入库水沙的控制水文站,探讨三峡水库汛期沙峰调度的控制指标。入库沙量是直接影响三峡水库沙峰调度排沙效果的重要因素,启动控制指标应重点对入库流量与含沙量提出要求,从而保证有足够大的入库流量能使更多的泥沙输移至坝前,为水库排沙创造有利条件。

金沙江下游梯级水库蓄水后,三峡水库入库沙量进一步减少,水流含沙量降低,往往需要更高的入库流量来满足沙峰调度启动所需入库沙量。根据2013~2023年三峡水库汛期场次洪水期间的水沙统计来看,金沙江下游梯级水库蓄水后,当寸滩站洪峰流量介于 $30000\sim 50000\text{m}^3/\text{s}$ 之间时,三峡水库场次洪水入库沙量普遍小于3000万t,此时开展沙峰调度可能会出现“高耗水、低排沙”的水资源浪费现象;而当寸滩站洪峰流量大于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 时,入库沙量显著增大至8000万t以上,能够满足沙峰调度需要较大入库沙量的前提条件,开展沙峰调度将具有显著效益。但需要注意的是,三峡水库场次洪水也可能存在“小水大沙”或“大水小沙”的特殊情况,如2013年汛期发生场次洪水期间,寸滩站洪峰流量为 $44100\text{m}^3/\text{s}$,但入库沙量却达到了8700万t。因此,可以将入库寸滩站洪峰流量大于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 作为沙峰调度的启动控制指标之一,但入库含沙量也是沙峰调度启动的重要指标之一,需要对其进行探讨。

寸滩站汛期6~9月的含沙量累计频率曲线如图5所示,金沙江下游梯级水库蓄水后,寸滩站汛期含沙量大幅减少,2013~2023年汛期含沙量大于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的几率仅为2%,年均出现天数由2003~2012年的8天降到了2天,可以认为当寸滩站含沙量大于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,三峡水库汛期出现了沙峰显著偏大的场次洪水过程,为开展沙峰调度提供了有利的入库泥沙条件。此外,2013~2023年的累计频率曲线在含沙量约为 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 时出现了拐点,即当含沙量大于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,相同频率间隔内的含沙量变化幅度越来越大,表明金沙江下游梯级水库蓄水后,当寸滩站含沙量大于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ (出现几率约为10%)时,可以认为汛期出现了较大的含沙量过程,年均出现天数约有12天。因此,当预报寸滩站出现含沙量大于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的显著偏大沙峰过程时,可以考虑开展沙峰调度,但为了避免出现由于含沙量过程陡涨陡落而导致场次洪水期间入库沙量不大的情况,还需满足寸滩站7日平均含沙量不低于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的基本条件,以保证场次洪水期间有足够多的泥沙入库,此时开展沙峰调度才能取得较好的排沙效果。

综上所述,在金沙江下游梯级水库蓄水后三峡水库入库沙量大幅减少的背景下,为了防止由于沙峰调度启动控制指标定得太低或太高导致沙峰调度排沙效果不佳或难以启动实施,同时避免出现“大水小沙”或“小水大沙”的特殊入库水沙条件影响沙峰调度排沙效果,应综合考虑入库流量与含沙量的控制

作用，将预报场次洪水寸滩站的洪峰流量不低于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 或沙峰含沙量不低于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 作为沙峰调度的启动控制指标，同时还需满足预报寸滩站 7 日平均含沙量不低于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的基本条件，以确保开展沙峰调度具有实际意义，实现防洪与排沙效益相协同。表 1 给出的三峡水库历次沙峰调度过程均满足这一启动控制指标，也进一步印证了指标提出的合理性。

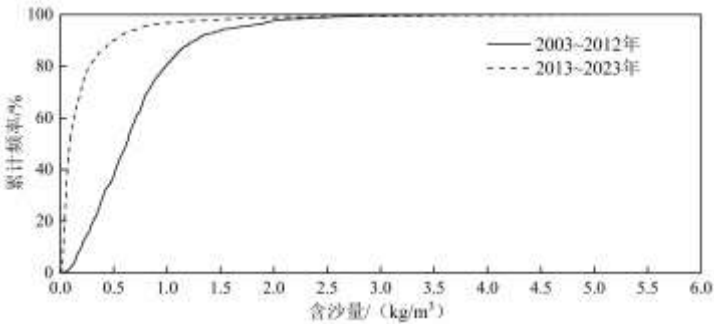


图 5 寸滩站 6~9 月含沙量逐日累计频率曲线

Fig. 5 The daily cumulative frequency curve of sediment concentration at Cuntan Station from June to September

表 1 三峡水库历次汛期沙峰调度过程

Table 1 Sediment peak regulation process in the Three Gorges Reservoir during flood season

年份/ 年	调度时 间 / (月/ 日)	平均流量/ (m^3/s)		平均含沙量 / (kg/m^3)		峰值流量/ (m^3/s)		峰值含沙量 / (kg/m^3)		沙量/万 t		坝前 平均 水位 /m	排 沙 比 /%
		入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库		
201	7/1~	3822	3754	1.01	0.30	5050	4260	1.98	0.55	4679	139	150.8	29.
	7/14	9	3	2	7	0	0	0	3		6	9	8
2	7/23~	4266	4424	1.17	0.33	6320	4550	2.33	0.41	3899	115	160.2	29.
	7/31	7	4	5	5	0	0	0	4		2	7	5
201	7/11~	3170	3145	1.50	0.50	4410	3570	5.45	1.19	7812	262	151.0	33.
	7/29	5	3	1	9	0	0	0	0		7	2	6
201	7/4~	3478	3681	1.28	0.40	5710	4390	4.66	1.21	9653	319	151.3	33.
	7/28	4	2	5	2	0	0	0	0		5	3	1
202	8/13~	4261	4171	1.79	0.46	7400	4920	3.72	0.91	1257	320	161.2	25.
	8/31	6	1	8	8	0	0	0	3		7	2	5

注：入库水沙为寸滩站，出库水沙为黄陵庙站，坝前水位为茅坪站。

4.2 过程调控指标探讨

金沙江下游梯级水库蓄水后，若三峡水库入库水沙条件满足沙峰调度启动控制指标，综合考虑防洪、航运等其它因素后，决定启动沙峰调度时，还需对调度过程进行合理调控，使更多的泥沙能够输移至坝前并排出水库，增加出库沙量。由于水库排沙比随着坝前水位降低呈现出增大的趋势^[26]，沙峰调度过程中，在保障防洪安全的前提下，三峡水库运行水位越低，水库下泄流量越大，沙峰在库区传播的衰减速率就会越小，坝前输沙量越大，从而实现增大水库排沙的目标。

从表 1 中 2013 年以来的历次沙峰调度过程来看，三峡水库的平均出库流量与入库流量相差不大，加之区间支流入汇的影响，有的出库流量甚至大于入库流量，为库区内泥沙输移提供了有利的水流动力条件。其中，2013 年沙峰调度过程平均出库流量最小仅有 $31453\text{m}^3/\text{s}$ ，但由于坝前水位较低，平均为 151.02m ，沙峰调度仍然取得了较好的排沙效果，水库排沙比最大为 33.6% ，表明水库维持低水位有利于泥沙大量输移至坝前并随下泄水流排出。同时，历次沙峰调度实践也反映了实际场次洪水过程中并未严格按照定量的控制指标进行调度，如历次沙峰调度的出库流量并不相同，而是与入库流量相近，若将出

库流量按照某一指标进行控制下泄, 极有可能出现出库流量明显大于入库流量导致水资源浪费或出库流量明显小于入库流量导致排沙效益较低等问题; 且坝前水位也并非越低越好, 虽然水库维持低水位有利于排沙, 但也需要考虑三峡水库汛期防洪、航运、水资源利用等综合效益。2020 年汛期, 三峡水库上游发生流域性大洪水, 由于水库的防洪运用, 沙峰调度期间坝前平均水位甚至达到了 161m, 但通过水库动态调控仍然取得了较优的排沙效益, 期间水库排沙比达到 25.5%, 高于 2009~2023 年汛期水库平均排沙比 18.6%。由此可见, 三峡水库汛期沙峰调度的过程调控需要根据实际水沙情势及坝前水位进行动态调控, 确保水库综合效益发挥。

由前文可知, 金沙江下游梯级水库蓄水后, 新水沙条件下主要考虑对预报入库寸滩站洪峰流量不低于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 或沙峰含沙量不低于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$, 且预报寸滩站 7 日平均含沙量不低于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的场次洪水启动汛期沙峰调度。但是, 此时首先考虑的是防洪安全, 在此前提下再综合考虑三峡水库的航运、水资源利用等效益, 进一步研判是否开展汛期沙峰调度。

若决定启动沙峰调度, 根据拦洪削峰、库区拉沙和坝前排沙三个时期的库区水沙输移特点与调度目标, 分别提出调度基本策略。拦洪削峰期主要确保发生场次洪水期间的防洪安全, 虽然洪峰流量较大, 但由于拦蓄洪水导致库水位抬升、水流动力减弱, 将不利于沙峰在库区内的输移。当安全度过洪峰后, 沙峰调度进入库区拉沙期, 入库流量开始减小, 为了维持沙峰能够顺利输移至坝前, 需要加大水库下泄流量、降低库水位来增大库区水流动力, 但由于该时期承接前期洪峰影响阶段, 还需综合考虑到防洪、航运等需求, 如增大水库下泄流量可能会导致此前因洪峰影响滞留的船舶仍无法通航、中下游地区持续面临较大防洪压力等, 故该时期作为沙峰调度过程中承上启下的阶段, 需要结合实际情况动态调控水库下泄流量。金沙江下游梯级水库蓄水后, 三峡水库入库沙峰从寸滩传播至坝前平均滞后于洪峰约 7 天时间^[21, 27], 在无下一场次洪水叠加影响的情况下, 当沙峰传播至坝前时, 此前洪峰产生的影响已明显减弱, 此时洪水流量较小, 三峡水库及长江中下游的防洪压力有所缓解, 沙峰调度进入坝前排沙期, 可根据库区泥沙实时监测与预报成果, 研判沙峰输移至坝前的衰减程度, 若有足够多的泥沙能够输移至坝前, 则在预报沙峰到达坝前的前 2 天开始增大水库泄量, 并持续至沙峰出库后 3 天进行集中排沙, 以实现在“防洪安全可控”的前提下增大水库排沙的目标。

综上所述, 在金沙江下游梯级水库蓄水后的水沙条件下, 三峡水库主要考虑对预报入库寸滩站洪峰流量不低于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 或沙峰含沙量不低于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$, 且预报寸滩站 7 日平均含沙量不低于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的场次洪水进行沙峰调度, 但由于场次洪水来水来沙过程与坝前水位各不相同, 沙峰调度应在保证防洪安全的前提下, 综合考虑航运、水资源利用等实际需求, 遵循拦洪削峰期、库区拉沙期、坝前排沙期的基本调度策略, 动态调控沙峰调度过程, 以实现三峡水库综合效益的充分发挥。

4.3 泥沙实时监测与预报对沙峰调度的影响

三峡水库汛期泥沙实时监测与预报是沙峰调度启动控制与过程调控的重要基础, 有助于及时掌握库区沙峰输移过程, 动态调整水库下泄流量, 从而提高水库排沙效益。然而, 随着精准动态开展沙峰调度的要求不断提高, 当前的泥沙实时监测与预报技术仍有待于进一步提升。其中, 三峡水库泥沙监测技术虽然实现了实时监测, 但仍需通过人工手段进行河道泥沙取样, 导致监测频次受到限制, 无法连续获取各水文站的含沙量变化过程, 测量结果有一定的随机性, 甚至存在未能测到沙峰的可能性。

泥沙预报模型计算往往依赖于入库控制站的流量、含沙量以及坝前水位等边界条件, 泥沙监测结果将会直接影响泥沙预报精度, 泥沙监测频次受限、监测结果存在随机性可能导致无法精确掌握沙峰输移至坝前的时间, 影响坝前集中排沙效益。为了提升沙峰调度效果, 今后仍需要不断改进泥沙监测与预报技术, 争取能够实现含沙量的在线精准监测, 为模型预报提供更加详实、可靠的边界条件, 实现库区沙峰输移过程的连续监测与预报, 避免出现提前增泄导致洪水资源浪费、延迟增泄导致排沙效果降低等情况。

5 结论

本文以三峡水库蓄水以来的实测水沙资料为基础, 分析了库区汛期泥沙输移特性, 重点探讨了金沙

江下游梯级水库蓄水后三峡水库汛期沙峰调度的启动控制与过程调控指标等。主要结论如下：

(1) 金沙江下游梯级水库蓄水后，三峡水库入库泥沙更加集中在汛期场次洪水期间，当寸滩站洪峰流量大于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 时，入库沙量显著增大，存在场次洪水期间库区泥沙大量淤积的风险，有必要通过汛期优化调度来增大水库排沙、减少库区泥沙淤积。

(2) 金沙江下游梯级水库蓄水后，在三峡水库入库沙量大幅减少的水沙条件下，应主要考虑对预报入库寸滩站洪峰流量不低于 $50000\text{m}^3/\text{s}$ 或沙峰含沙量不低于 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，且预报寸滩站 7 日平均含沙量不低于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的场次洪水启动汛期沙峰调度，在保证防洪安全的前提下，综合考虑航运、水资源利用等多目标需求，结合实际来水来沙情势及库水位情况，遵循拦洪削峰、库区拉沙、坝前排沙三个时期的基本调度策略，动态调控沙峰调度过程，以实现三峡水库综合效益的充分发挥。

(3) 三峡水库汛期泥沙实时监测与预报是沙峰调度启动控制与过程调控的重要基础，需要不断改进优化泥沙监测与预报技术，精准掌握库区沙峰输移的连续过程，以实现沙峰调度的动态调控，提高水库综合效益。

6 参考文献

- [1] Poff NL, Schmidt JC. How dams can go with the flow. *Science*, 2016, **353**(6304): 1099-1100. DOI: 10.1126/science.aah4926.
- [2] An XD. Effect and benefit tracking analysis of flood control and sediment reduction in Xiaolangdi Reservoir of the Yellow River. *Yellow River*, 2023, **45**(8): 37-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.08.008. [安新代. 黄河小浪底水库防洪减淤作用与效益跟踪分析. 人民黄河, 2023, **45**(8): 37-42.]
- [3] Yu Y, Zhao R, Zhang JH, et al. Multi-objective game theory optimization for balancing economic, social and ecological benefits in the Three Gorges Reservoir operation. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(8): 17. DOI: 10.1088/1748-9326/ac0b69.
- [4] Rashid MU, Abid I, Latif A. Optimization of hydropower and related benefits through Cascade Reservoirs for sustainable economic growth. *Renewable Energy*, 2022, **185**: 241-254. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.073.
- [5] Hu CH. Development and practice of the operation mode of "storing clear water and discharging muddy flow" in sediment-laden rivers in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 283-291. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20151261. [胡春宏. 我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践. 水利学报, 2016, **47**(3): 283-291.]
- [6] Wang ZY, Hu CH. Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research*, 2009, **24**(4): 369-384. DOI: 10.1016/s1001-6279(10)60011-x.
- [7] Ren S, Liu L. Sediment deposition and countermeasures in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 40-45. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.06.007. [任实, 刘亮. 三峡水库泥沙淤积及减淤措施探讨. 泥沙研究, 2019, **44**(6): 40-45.]
- [8] Xie JM, Wu BS, Liu XY. Review of reservoir sedimentation management. *Journal of Sediment Research*, 2013, (3): 71-80. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2013.03.010. [谢金明, 吴保生, 刘孝盈. 水库泥沙淤积管理综述. 泥沙研究, 2013, (3): 71-80.]
- [9] Kondolf GM, Gao YX, Annandale GW, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2014, **2**(5): 256-280. DOI: 10.1002/2013ef000184.
- [10] Ren S, Zhang BW, Wang WJ, et al. Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China. *Catena*, 2021, **199**: 13. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105096.
- [11] Guo Y, Hou SZ, Yang F, et al. Discussion on optimization of control operation mode of Sanmenxia Reservoir. *Water Resources and Power*, 2024, **42**(7): 202-206, 239. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231513. [郭彦, 侯素珍, 杨飞, 等. 三门峡水库控制运用方式的优化探讨. 水电能源科学, 2024, **42**(7): 202-206, 239.]
- [12] Xia JQ, Zhang XZY, Wang ZH, et al. Modelling of the flow and sediment regulation processes before flood seasons in the Xiaolangdi Reservoir and evaluation of comprehensive benefits. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(5): 1550-1561. DOI: 10.18307/2024.0544. [夏军强, 张贤梓依, 王增辉, 等. 小浪底水库汛前调水调沙模拟与综合效益评估. 湖泊科学, 2024, **36**(5): 1550-1561.]

- [13] Gao GM, Tan GM, Li T, et al. Analysis of index on sediment flushing of density current in Xiaolangdi reservoir and application in 2015. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, **27**(2): 275-283. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.02.004. [郇国明, 谈广鸣, 李涛, 等. 小浪底水库排沙指标及 2015 年应用分析. 应用基础与工程科学学报, 2019, **27**(2): 275-283.]
- [14] Hu CH. Analysis on sediment scouring and silting variation of Three Gorges Reservoir since 175 m trial impoundment for past ten years. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, **50**(8): 18-26. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.08.003. [胡春宏. 三峡水库 175m 试验性蓄水十年泥沙冲淤变化分析. 水利水电技术, 2019, **50**(8): 18-26.]
- [15] Hu CH, Fang CM. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and it operational effects. *Scientia Sinica: Technologica*, 2017, **47**(8): 832-844. DOI: 10.1360/N092017-00098. [胡春宏, 方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究. 中国科学:技术科学, 2017, **47**(8): 832-844.]
- [16] 郑守仁. 三峡工程 175 米试验性蓄水运行期的泥沙观测分析. 长江技术经济, 2019, **3**(3): 1-7.
- [17] Hu CH, Fang CM, Xu QX. Application and optimization of "storing clean water and discharging muddy flow" in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(1): 2-11. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180868. [胡春宏, 方春明, 许全喜. 论三峡水库“蓄清排浑”运用方式及其优化. 水利学报, 2019, **50**(1): 2-11.]
- [18] Gao Y, Ren S, Wang H, et al. Characteristics of incoming runoff and sediment load in the Three Gorges Reservoir during high flood period after the operation of the cascade reservoirs in the lower Jinsha River. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 662-672. DOI: 10.18307/2023.0222. [高宇, 任实, 王海, 等. 金沙江下游梯级水库运行后三峡水库高洪水期入库水沙特性. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 662-672.]
- [19] Yang CG, Xu QX, Dong BJ, et al. Research and application of key technology on real-time sediment forecast of Three Gorges Reservoir: case of flood season in 2020. *Yangtze River*, 2020, **51**(12): 82-87. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.12.017. [杨成刚, 许全喜, 董炳江, 等. 三峡水库泥沙实时预报关键技术研究及应用——以 2020 年汛期为例. 人民长江, 2020, **51**(12): 82-87.]
- [20] Zhou B, Xu QX, Li Y. On new technology of sediment real-time monitoring in Three Gorges Reservoir. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(4): 53-57. [周波, 许全喜, 李雨. 三峡水库入库泥沙实时监测试验研究. 水文, 2016, **36**(4): 53-57.]
- [21] Zhang W, Li X, Ren JQ, et al. Influence of the impoundment of cascade reservoirs on the asynchronies of flood peak and sediment peak in the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(4): 481-490. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.002. [张为, 李昕, 任金秋, 等. 梯级水库蓄水对三峡水库洪峰沙峰异步特性的影响. 水科学进展, 2020, **31**(4): 481-490.]
- [22] Chen GY, Dong BJ, Jiang LL, et al. Analysis of sediment peak scheduling of Three Gorges Reservoir in No. 2 flood of Changjiang River in 2018. *Yangtze River*, 2018, **49**(19): 6-10. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.19.002. [陈桂亚, 董炳江, 姜利玲, 等. 2018 长江 2 号洪水期间三峡水库沙峰排沙调度. 人民长江, 2018, **49**(19): 6-10.]
- [23] Dong BJ, Qiao W, Xu QX. Study on sediment peak regulation of Three Gorges Reservoir in flood season and preliminary practice. *Yangtze River*, 2014, **45**(3): 7-11. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.03.009. [董炳江, 乔伟, 许全喜. 三峡水库汛期沙峰排沙调度研究与初步实践. 人民长江, 2014, **45**(3): 7-11.]
- [24] 胡春宏, 张晓明. 近十年我国江河泥沙变化、水沙调控与泥沙资源化利用研究. 中国水利, 2022, (19): 24-28.
- [25] Ren S, Gao Y. Research progress and prospects on sediment issues of the Three Gorges Project. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(6): 1611-1625. DOI: 10.18307/2024.0601. [任实, 高宇. 三峡工程泥沙问题研究进展与展望. 湖泊科学, 2024, **36**(6): 1611-1625.]
- [26] Gao Y, Ren S, Wang H, et al. Sediment delivery regularity and its influencing factors during flood events in the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2024, **35**(1): 112-122. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.01.010. [高宇, 任实, 王海, 等. 三峡水库场次洪水排沙规律及影响因素. 水科学进展, 2024, **35**(1): 112-122.]
- [27] Zhang DJ, Dong BJ, Yang X, et al. Research on sediment peak movement characteristics in Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2018, **49**(2): 23-28, 68. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.02.006. [张地继, 董炳江, 杨霞, 等. 三峡水库库区沙峰输移特性研究. 人民长江, 2018, **49**(2): 23-28, 68.]