

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*

高宇, 任实**, 王海, 吕超楠, 赵汗青

(中国长江三峡集团有限公司, 宜昌 443100)

摘要: 泥沙淤积问题直接影响着三峡水库的使用寿命及综合效益的发挥, 研究其入库水沙特性对于解决水库泥沙淤积问题具有重要意义。根据水文站实测数据, 分析了三峡水库入库水沙输移特性及来源组成变化, 重点研究了金沙江下游梯级水库运行后的三峡水库高洪水期入库水沙特性。结果表明: 2003—2021年, 三峡水库入库泥沙集中于汛期的高洪水期, 2013年以后该现象更为显著, 泥沙来源也由金沙江为主转变为嘉陵江为主。寸滩站洪峰流量高于 $50000\text{ m}^3/\text{s}$ 的高洪水期三峡入库沙量显著大于 $30000\sim 50000\text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期, 三峡水库泥沙调度关键在于上游发生编号洪水期间。三峡水库上游沱江或嘉陵江等支流发生流域性大洪水时, 易引起高洪水期入库水沙出现“小水大沙”的特点。金沙江下游梯级水库运行后, 三峡水库高洪水期入库泥沙大幅减少, 中小洪水调度期间泥沙淤积量也大幅减小。研究结果可为三峡水库的泥沙精细化调度和长期高效使用提供基础数据支撑。

关键词: 梯级水库; 高洪水期; 三峡水库; 入库水沙; 来源组成

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*

Gao Yu, Ren Shi**, Wang Hai, Lv Chaonan & Zhao Hanqing

(China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, P.R.China)

Abstract: The problem of sediment deposition directly affects the lifespan and comprehensive benefits of the Three Gorges Reservoir (TGR). It is of great importance to explore the characteristics of incoming runoff and sediment load in the TGR, which is conducive to solving the problem of sediment deposition in the reservoir. Based on the measured hydrological data, this paper analyzes the flow and sediment transport characteristics and source composition in the TGR, with special emphasis on such characteristics during the high flood period after the operation of the cascade reservoirs in the Lower Jinsha River. The results show that: The incoming sediment load in the TGR was mainly concentrated in the high flood period from 2003 to 2021, and this phenomenon was more significant after 2013. The main source of the sediment load has also changed from the Jinsha River to the Jialing River after 2013. Besides, for the high flood period in which the peak discharge at Cuntan Station was higher than $50000\text{ m}^3/\text{s}$, the sediment load in the TGR was significantly greater than those in the peak discharge intervals of $30000\sim 50000\text{ m}^3/\text{s}$. The key periods for the sediment regulation of the TGR was during the numbered flood periods in the Upper Yangtze River. Additionally, the basin floods occurred in the tributaries upstream of the TGR, such as the Tuo River or the Jialing River, may cause the phenomenon of “little water carries massive sediment” happened in the TGR during the high flood period. After the operation of the cascade reservoirs in the Lower Jinsha River, the sediment load in the TGR during the high flood period has been significantly decreased, which has greatly reduced the amount of sediment deposition during the middle and small flood operation. This study can provide technical support for the refined sediment regulation of the TGR, and provide a solid guarantee for the long-term use of the TGR.

Keywords: Cascade reservoirs; high flood period; Three Gorges Reservoir; incoming runoff and sediment load; source composition

* 2022-10-27 收稿; 2022-12-08 收修改稿。

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目 (U2040218) 和中国长江三峡集团员工科研項目 (NBYG20220167) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: ren_shi16@126.com。

随着人类社会的发展以及对河流水资源的利用程度不断加深,一系列水利工程在全球范围内相继建成运用。据统计,世界范围内已有超过 58000 座坝高 15 m 以上的水库建成运行^[1],发挥着防洪、航运、发电、水资源利用等综合效益,但也伴随着库容损失、航道淤塞、生态环保等方面问题^[2]。三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程,泥沙淤积问题始终是三峡水库建设和运行阶段的关键技术问题之一^[3-5],直接影响着水库的使用寿命及其综合效益的发挥。入库水沙特性则是研究水库泥沙淤积问题的重要基础,一直以来,三峡水库的入库水沙特性都受到学者们的广泛关注^[6-9]。

1990s 以来,受到长江上游水库拦沙、水土保持、降雨变化及河道采砂等影响,三峡水库在入库水量变化不大的情况下,入库沙量呈明显减少趋势^[10-13]。而随着金沙江下游向家坝水电站、溪洛渡水电站分别于 2012、2013 年相继蓄水运行,拦截了绝大部分的金沙江来沙,导致三峡水库入库泥沙在 2013 年以后出现大幅度减少^[14-16]。综合考虑不同影响因素,虽然降雨等气候因素对三峡水库入库泥沙的减少具有一定影响,但其影响程度始终小于人类活动的影响,如气候变化对寸滩站 2003—2012 年及 2013—2017 年输沙量变化的贡献比例分别仅占 5.7%、5.3%,而人类活动的贡献比例均达到了 94% 以上^[17]。在人类活动的影响中,大型水库建设对三峡水库入库泥沙的减少起到了主要作用,水土保持工程则起到了次要作用^[18]。与此同时,金沙江下游梯级水库运行以来,三峡水库入库泥沙的主要来源组成地区也发生了较大调整。2013 年以前,金沙江是长江上游来沙量最大的河流^[19],而 2013 年以后,受到金沙江下游梯级水库拦沙的影响,金沙江不再是三峡水库入库泥沙的主要来源区^[20]。

目前对于三峡水库蓄水以来的入库水沙特性已有较多的研究成果。然而,以往研究多关注于三峡水库入库水沙在年际或汛期时间尺度的变化,对于汛期的高洪水期入库水沙特性研究则较少。李思璇等^[21]揭示了三峡水库入库泥沙输移在汛期高洪水过程中经历了“涨水输沙占优—涨、落水基本持平—落水输沙占优”的变化。由于金沙江下游梯级水库蓄水运行拦截了大量泥沙,三峡水库高洪水期的入库水沙特性也随之发生了较大改变。当前针对于金沙江下游梯级水库运行后三峡水库高洪水期的入库水沙特性有待深入探究,如不同洪峰量级的高洪水期入库水沙如何变化尚未明晰。此外,三峡水库蓄水后直到 2018 年和 2020 年长江上游才出现特大洪水,三峡水库汛期入库泥沙集中的现象表现更为突出,如 2020 年 8 月三峡水库入库沙量达到 1.41 亿 t,占全年入库沙量的 72%^[22]。因此,已有研究中尚且缺乏对于特大水年三峡水库高洪水期入库水沙特性的研究。

本文主要根据长江上游干支流各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年际间及高洪水期的水沙输移及来源组成,重点探究金沙江下游梯级水库运行后三峡水库高洪水期的入库水沙特性,探索不同洪峰流量级下入库泥沙量及来源组成的变化规律,并探讨高洪水期来沙特性变化对汛期水资源利用的影响。三峡水库高洪水期的入库水沙量对库区洪峰沙峰异步传播、水库排沙比及水库淤积部位等均会产生一定影响^[23-26],研究成果对于提高三峡水库泥沙精细化调度水平、提升汛期排沙调度效果、延长水库使用寿命等均具有重要意义。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域

长江全长 6300 km,以宜昌、湖口为界,分为上游、中游、下游,三峡工程位于长江上游与中游分界处的宜昌市,控制流域面积约 100 万 km²。长江上游水文气象和地质地貌条件时空差异明显,水沙异源现象突出,上游金沙江、横江、岷江、沱江、嘉陵江、乌江等干支流是三峡水库入库径流与泥沙的主要来源地。其中,如图 1 所示,向家坝站、横江站、高场站、富顺站、北碚站、武隆站分别是上游不同干支流的主要水文控制站。

1.2 数据来源及处理

本文收集了三峡水库蓄水运行以来 2003—2021 年朱沱站、北碚站、武隆站、寸滩站、向家坝站(屏山站)、横江站、高场站、富顺站的实测水文泥沙数据以反映三峡水库的入库水沙过程及上游干支流的来水来沙情况。由于金沙江下游向家坝水电站于 2012 年蓄水运行,拦截了绝大部分的金沙江来沙,随后金沙江下游溪洛渡水电站、乌东德水电站及白鹤滩水电站相继建成运行,梯级水库联合调度运用大大改变了金沙江的来水来沙条件,进而影响到三峡水库的入库水沙情况,故本文主要以向家坝水电站蓄水库运行时间为时间节点,

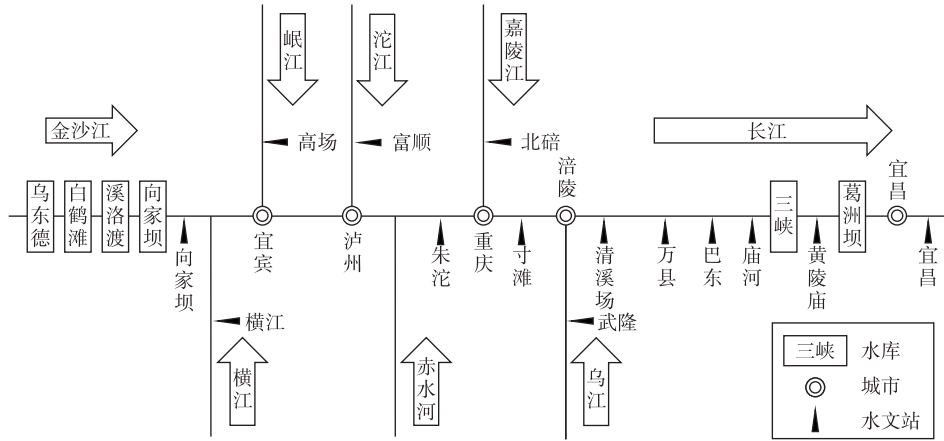


图1 三峡水库水文站点分布

Fig.1 Distribution of hydrological stations in Three Gorges Reservoir

分析对比三峡水库蓄水后 2003—2012、2013—2021 年两个时间段三峡水库高洪水期的入库水沙特性,并重点分析 2013 年以来三峡水库高洪水期的入库水沙转移与来源组成情况。

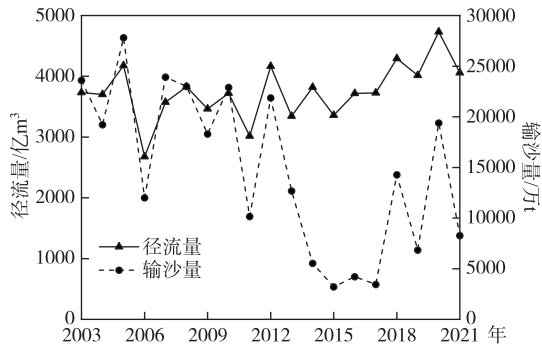


图2 三峡水库蓄水运行以来年入库水沙量

Fig.2 Annual runoff and sediment load in the TGR since its operation

2 三峡水库蓄水运行以来的入库水沙特性

三峡水库蓄水运行以来,入库水沙量(朱沱、北碚、武隆三站之和,下同)变化情况如图2所示。2003—2012年,三峡水库入库沙量与入库水量的变化趋势基本一致,总体呈现出“大水大沙,小水小沙”的特点,三峡水库多年平均入库水量、沙量分别为3605.5亿 m^3 、20276.2万t。2013年后,随着金沙江下游梯级水库相继蓄水运行,三峡水库入库水沙情势发生了较大改变,虽然仍基本符合“大水大沙,小水小沙”的特点,但入库沙量却大幅减少,2013—2021年均入库水量为3896.8亿 m^3 ,较2003—2012年均值增加8.1%,而年均入库沙量仅为8651.9万t,较2003—2012年均值减少57.3%。

随着入库沙量的大幅减少,三峡水库入库泥沙的主要来源组成也发生了较大变化。2013年以前,金沙江是三峡水库年入库水沙的主要来源区,2003—2012年金沙江向家坝站(屏山站)多年平均径流量及输沙量分别为1396.0亿 m^3 、14310.6万t,分别占年入库水量和沙量的38.7%、70.6%。2013年以后,金沙江仍是三峡水库入库水量的主要来源区,2013—2021年金沙江向家坝站多年平均径流量1376.4亿 m^3 ,占年入库水量的35.3%,但输沙量占比却大幅减小,2013—2021年金沙江向家坝站多年平均输沙量仅为146.8万t,较2003—2012年多年均值减少约99.0%,仅占三峡水库年入库沙量的1.7%。横江、岷江、嘉陵江的来沙在2013—2021年先后占据三峡水库入库沙量的主要来源地位,其中以嘉陵江为主,如2016年横江站输沙量占入库沙量的31.2%,2017年高场站输沙量占入库沙量的40.7%,2021年北碚站输沙量占入库沙量的69.2%。而沱江富顺站、乌江武隆站各年的输沙量相对较少,2013—2021年分别仅占当年入库沙量的1.0%~28.4%、0.7%~11.4%。

3 高洪水期三峡水库入库水沙特性

3.1 三峡水库蓄水运行以来高洪水期入库水沙变化

三峡水库蓄水运行以来,汛期(6—9月)平均入库沙量占全年输沙量的90%以上。同时,由于上游水库拦沙、水土保持工程减沙、降雨分布变化等,三峡水库汛期来沙进一步集中于场次洪水过程,如2013年7月三峡水库入库沙量为10328.0万t,且主要集中在7月11—16日洪水过程期间,达6051.6亿t,占全年入库沙量的47.7%。本节主要分析三峡水库蓄水运行以来汛期高洪水期的入库水沙变化情况。

对于高洪水期的选择,一般取1、3、5、7、15、30日作为统计时段。考虑到长江上游干支流水文站洪水叠加存在时间不同步的问题,仅选取长江干流代表水文站更能反映三峡水库的入库洪水过程,故本文选取寸滩站的水沙条件来分析三峡水库高洪水期的入库水沙特性,且由于乌江武隆站输沙量较小,本文主要以寸滩站上游各干支流水文站的水沙条件为基础来探讨三峡水库高洪水期入库水沙的来源组成变化。综合考虑寸滩站多场次洪水过程、洪峰流量出现频率以及以往研究成果^[21],选取寸滩站30000 m³/s以上洪峰流量对应的7日为一次高洪水期产流产沙的过程(图3)。其中,考虑到三峡库区洪水平均传播时间,金沙江向家坝站(屏山站)、横江横江站、岷江高场站、沱江富顺站高洪水期均按寸滩站高洪水期的时间段提前一天进行统计处理。根据统计结果,2003—2012年共计34场次,2013—2021年共计25场次,如表1所示。

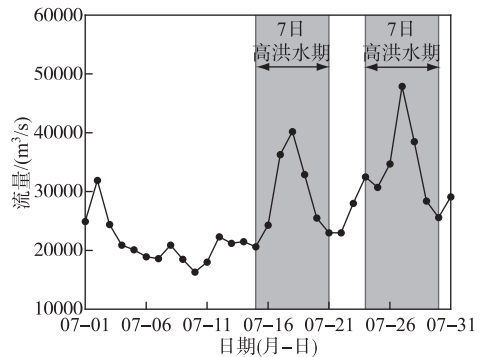


图3 寸滩站2020年7月日均流量过程

Fig.3 Daily discharge process at Cuntan Station in July 2020

表1 三峡水库蓄水后各年高洪水期寸滩站水沙输移变化

Tab.1 Changes in the runoff and sediment load at Cuntan Station during high flood periods in each year after the operation of the TGR

时间	高洪水 期场次	径流量 之和/亿 m ³	年内 占比/%	输沙量 之和/万 t	年内 占比/%	时间	高洪水 期场次	径流量 之和/亿 m ³	年内 占比/%	输沙量 之和/万 t	年内 占比/%
2003年	3	538.4	16.0	5735.9	27.9	2012年	5	1039.6	27.6	10617.1	50.4
2004年	1	245.7	7.4	3355.6	19.3	2013年	3	528.4	16.8	8383.7	69.5
2005年	6	1132.0	29.1	13542.9	50.2	2014年	1	198.5	5.8	609.3	11.7
2007年	5	829.4	26.5	10310.3	49.1	2015年	1	156.0	5.1	299.8	9.1
2008年	3	472.0	13.8	5693.2	26.8	2018年	4	827.5	21.4	10025.2	75.5
2009年	3	578.6	17.9	6156.4	35.5	2019年	3	529.6	14.8	2745.7	43.0
2010年	4	863.0	25.4	12166.4	57.6	2020年	7	1405.6	33.3	15361.1	82.2
2011年	4	545.0	19.4	4729.1	51.6	2021年	6	1003.2	27.8	4538.7	61.7

2003—2012年寸滩站高洪水期径流量、输沙量年内占比多年均值分别为20.4%、40.9%,2013—2021年寸滩站高洪水期径流量、输沙量年内占比多年均值分别为17.9%、50.4%。此外,当长江上游出现特大洪水时,如2018年、2020年均出现了寸滩站洪峰流量大于50000 m³/s的编号洪水,导致2018、2020年寸滩站高洪水期输沙量年内占比明显偏大,分别达到了75.5%、82.2%,为三峡水库蓄水以来的最高年内占比。由此可见,三峡水库入库泥沙主要集中在汛期高洪水期,且这一现象在金沙江下游梯级水库运行后更为显著,尤其是遇到特大洪水年。

图4给出了2013年前后寸滩站高洪水期水沙主要来源区的场次对比,2003—2012年,寸滩站34场次高洪水期的径流和泥沙均主要来源于金沙江和嘉陵江,其中泥沙主要来源于金沙江的概率最大;而2013—

2021年,寸滩站25场次高洪水期的径流主要来源于金沙江、岷江和嘉陵江,泥沙主要来源于横江、岷江、沱江和嘉陵江,其中径流、泥沙主要来源于嘉陵江的概率最大。由此可见,三峡水库蓄水运行以来,高洪水期入库水量主要来源区多年间变化不大,以金沙江、嘉陵江来水为主,而受到金沙江下游梯级水库蓄水运行的影响,三峡水库高洪水期入库沙量主要来源区发生了显著变化,由2013年以前的金沙江转为2013年以后的嘉陵江。

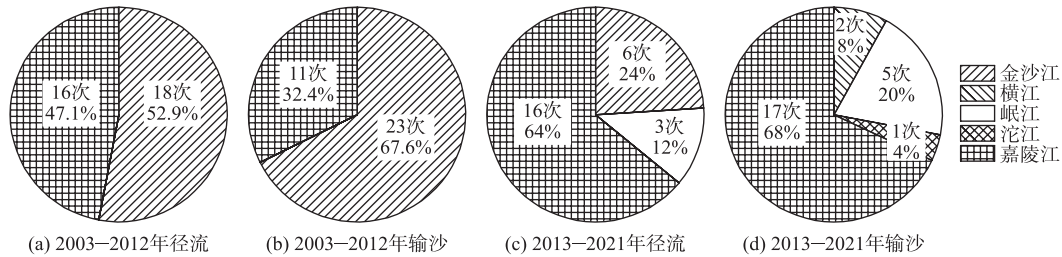


图4 2013年前后寸滩站高洪水期水沙主要来源区场次变化

Fig.4 Changes in the main source areas of the runoff and sediment load at Cuntan Station during high flood periods before and after 2013

3.2 不同洪峰流量区间高洪水期入库水沙特性

金沙江下游梯级水库运行后,尤其是向家坝水电站运行以来,三峡水库的入库沙量及主要来源区均发生了显著变化,本节聚焦于2013年以来三峡水库高洪水期入库水沙特性的研究,通过划分不同洪峰流量区间来探索三峡水库高洪水期的入库水沙输移及来源组成特点,为今后三峡水库泥沙问题的研究提供基础数据,为高洪水时期三峡水库的泥沙精细化调度提供支撑。

寸滩站2013—2021年汛期洪峰流量在30000~40000、40000~50000以及大于50000 m³/s的高洪水期过程分别有14、8、3场,其中最大洪峰流量出现在2020年8月20日,日均流量达到74000 m³/s。图5给出了2013年以来寸滩站不同洪峰流量区间高洪水期径流量与输沙量的关系,可以看到,寸滩站高洪水期7日径流量与输沙量、7日径流量年内占比与输沙量年内占比之间均呈现出一定的正相关关系,基本符合“大水大沙、小水小沙”的特点,且当高洪水期洪峰流量大于50000 m³/s时,7日径流量与输沙量、7日径流量年内占比与输沙量年内占比均显著提升。据统计,寸滩站有超过半数(14场)的高洪水期7日输沙量年内占比是7日径流量年内占比的2倍以上,在特大水年2018年和2020年,汛期更是出现了单次高洪水过程7日输沙量占全年输沙量比例分别达到49.6%、44.6%的情况。

同时,随着洪峰流量的增加,寸滩站在不同洪峰流量区间的高洪水期7日径流量均值呈逐渐增加的趋势,分别为160.5亿、195.7亿、278.9亿 m³。高洪水期7日输沙量在30000~40000与40000~50000 m³/s洪峰流量区间的均值却基本相等,分别为1077.3万、1070.3万 t,主要是由于2013年7月13日寸滩站洪峰流量37400 m³/s对应的高洪水期7日输沙量显著偏大,达到5489.5万 t,使得30000~40000 m³/s洪峰流量区间的7日输沙量均值与40000~50000 m³/s洪峰流量区间接近。而后随着洪峰流量增大至50000 m³/s以上,寸滩站高洪水期7日输沙量均值出现了大幅提升,由1070.3万 t增大至6106.3万 t,增幅达到470.5%,高洪水期7日输沙量年内占比平均为37.5%。

除此之外,进一步统计了2013年以来寸滩站不同洪峰流量区间高洪水期的水沙主要来源区变化情况(图6),金沙江下游梯级水库运行后,寸滩站不同洪峰流量区间高洪水期的径流、输沙主要来源区均是嘉陵江占比较大,且随着洪峰流量的增加,主要水沙来源区均越来越集中于嘉陵江,表明嘉陵江在2013年以后成为三峡水库各流量级高洪水期入库水沙的主要来源区。

综上所述,由于三峡水库年来内来沙主要集中于汛期高洪水期,三峡水库泥沙调度关键在于汛期高洪水期,尤其是对于寸滩站洪峰流量达到50000 m³/s以上的高洪水过程。

3.3 典型高洪水期入库水沙特性

由上述研究可知,寸滩站不同洪峰流量区间的高洪水期7日径流量及输沙量均存在着较大的差别,但

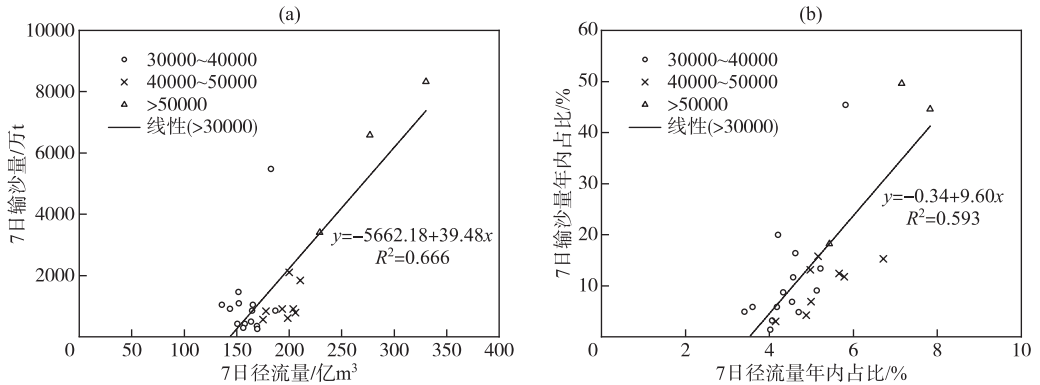


图 5 2013 年以来寸滩站不同洪峰流量区间的高洪水期径流量与输沙量的关系
Fig.5 Relationship between runoff and sediment load during high flood periods at Cuntan Station in different flood peak discharge intervals after 2013

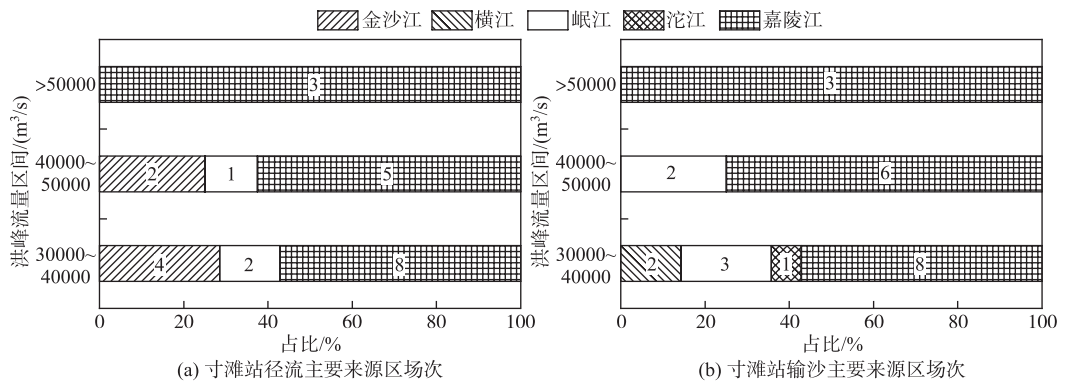


图 6 2013 年以来寸滩站不同洪峰流量区间高洪水期水沙主要来源区变化

Fig.6 Changes in the main source areas of runoff and sediment load during high flood periods at Cuntan Station in different flood peak discharge intervals after 2013

同一洪峰流量区间的高洪水期 7 日径流量及输沙量之间也存在着一定差别,如同一洪峰流量级的 2 场次高洪水期 7 日径流量相近,但 7 日输沙量却相差较大。此外,寸滩站还存在着 7 日径流量不大、输沙量却明显偏大的典型高洪水期情况,如 2013 年 7 月 13 日寸滩站洪峰流量 $37400 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的高洪水期。因此,有必要选取寸滩站的典型高洪水期进行分析比较,以便进一步认识金沙江下游梯级水库运行后三峡水库高洪水期的入库水沙特性。

3.3.1 同一洪峰流量级典型高洪水期对比 为了比较分析三峡水库同一洪峰流量级典型高洪水期入库水沙特性,分别在寸滩站 2013 年以来 30000~40000、40000~50000 以及大于 50000 m^3/s 的洪峰流量区间各选取 2 场次高洪水过程(表 2),并对选取的 6 场次高洪水期水沙主要来源区进行统计(图 7)。

对比寸滩站洪峰流量在 30000~40000 m^3/s 区间的 1#、2#高洪水期(表 2),7 日径流量几乎相等,而 7 日输沙量却相差悬殊,2#高洪水期 7 日输沙量是 1#高洪水期的 4 倍以上。从图 7 来看,1#高洪水期径流、输沙分别主要来源于金沙江、沱江,2#高洪水期径流、输沙均主要来源于嘉陵江,嘉陵江来沙占比达到 99%以上,且对比图 7a、c 及图 7b、d,1#、2#高洪水期径流、输沙来源组成占比均有所区别。

对比寸滩站洪峰流量在 40000~50000 m^3/s 区间的 3#、4#高洪水期(表 2),7 日径流量相差不大,而 7 日输沙量仍相差悬殊,3#高洪水期 7 日输沙量是 4#高洪水期的 2 倍以上。从图 7 来看,3#高洪水期径流、输沙

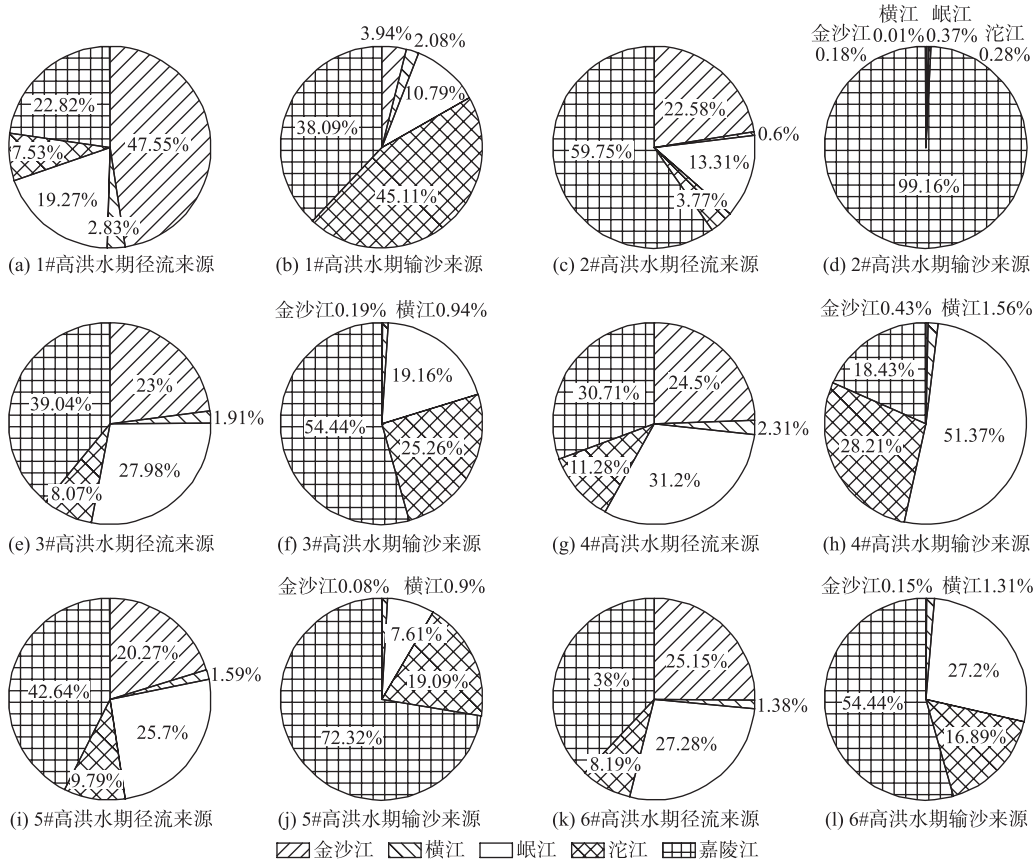


图 7 2013 年以来寸滩站典型高洪水期水沙主要来源区情况 (序号对应表 2 中高洪水期)

Fig.7 Main source areas of runoff and sediment load during typical high flood periods at Cuntan Station after 2013 (The numbers correspond to the high flood periods in Table 2)

表 2 2013 年以来寸滩站典型高洪水期 7 日径流量、输沙量对比
Tab.2 Comparison of the 7-day runoff and sediment load at Cuntan Station during typical high flood periods after 2013

洪峰流量区间/ (m ³ /s)	序号	时间 (年-月-日)			洪峰流量/ (m ³ /s)	径流量/亿 m ³		输沙量/万 t	
		开始时间	结束时间	峰值时间		7 日	年内占比	7 日	年内占比
30000~40000	1#	2015-09-09	2015-09-15	2015-09-12	33700	156.0	5.1%	299.8	9.1%
	2#	2021-10-04	2021-10-10	2021-10-07	33400	151.5	4.2%	1471.9	20.0%
40000~50000	3#	2018-07-02	2018-07-08	2018-07-05	43700	199.9	5.2%	2099.2	15.8%
	4#	2019-08-05	2019-08-11	2019-08-08	41200	178.0	5.0%	838.8	13.1%
>50000	5#	2018-07-11	2018-07-17	2018-07-14	57100	276.9	7.2%	6586.5	49.6%
	6#	2020-08-10	2020-08-16	2020-08-13	54100	229.3	5.4%	3400.9	18.2%

均主要来源于嘉陵江,4#高洪水期径流、输沙均主要来源于岷江,且对比图 7e、g 及图 7f、h,3#、4#高洪水期径流来源组成占比相似,而输沙来源组成占比有所区别。

对比寸滩站洪峰流量在 50000 m³/s 以上的 5#、6#高洪水期(表 2),7 日径流量同样相差不大,而 7 日输沙量仍相差悬殊,5#高洪水期 7 日输沙量是 6#高洪水期的近 2 倍。从图 7 来看,5#高洪水期径流、输沙均主

要来源于嘉陵江,6#高洪水期径流、输沙也均主要来源于嘉陵江,且对比图 7i、k 及图 7j、l,5#、6#高洪水期径流、输沙来源组成占比均相似,但 5#高洪水期输沙来源中嘉陵江占比明显大于 6#高洪水期。

综上所述,对于寸滩站同一洪峰流量级的典型高洪水期,无论其径流来源组成是否相似,泥沙来源组成不同将会导致三峡水库入库沙量存在较大区别,当高洪水期泥沙主要来源于嘉陵江时,往往会导致该场次高洪水期的 7 日输沙量明显偏大。因此,无论今后寸滩站出现何种洪峰流量级的高洪水过程,若遇到嘉陵江来沙明显偏多的情况时,需要重点关注该场次高洪水期的入库沙量,通过三峡水库的泥沙调度来减少库区泥沙淤积,以维持水库的长期使用。

3.3.2 特大入库沙量典型高洪水期分析 根据前文分析,寸滩站高洪水期基本符合“大水大沙、小水小沙”的特点,但也存在少数“小水大沙”的特殊情况,例如,2013 年 7 月 13 日寸滩站洪峰流量 $37400 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的高洪水期,7 日径流量为 182.3 亿 m^3 ,仅占寸滩站全年径流量的 5.8%,却输送了 5489.5 万 t 悬移质泥沙,占寸滩站全年输沙量的 45.5%,远超洪峰流量在 $30000 \sim 40000 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期均值。因此,为了探究这种“小水大沙”现象的形成原因,选取 2013 年 7 月 13 日寸滩站洪峰流量 $37400 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的 7 日高洪水过程作为特大入库沙量典型高洪水期进行分析。

根据表 3 统计的寸滩站 2013 年 7 月 13 日洪峰流量对应的典型高洪水期与 2013 年以来其余 24 场次高洪水期的径流量、输沙量均值对比,该典型高洪水期上游主要干支流的 7 日径流量与其余均值差别较小,而上游部分支流的 7 日输沙量却存在明显差别,其中最为显著的是沱江和嘉陵江来沙,沱江、嘉陵江分别出现日均含沙量达到 $21.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ (沱江富顺站 2013 年 7 月 11 日)、 $9.42 \text{ kg}/\text{m}^3$ (嘉陵江北碛站 2013 年 7 月 12 日)的情况,均为 2003 年三峡水库蓄水运行以来 2 个水文站实测最大日均含沙量,导致该典型高洪水期沱江富顺站、嘉陵江北碛站的 7 日输沙量分别达到 2717.4 万、2835.1 万 t,进而寸滩站高洪水期出现了“小水大沙”的现象。

表 4 进一步统计了嘉陵江北碛站上游主要干支流对应高洪水期的径流量、输沙量情况,该典型高洪水期嘉陵江北碛站的输沙基本全部来源于上游的涪江,涪江小河坝站的 7 日输沙量达到了 2918.7 万 t,远超其余 24 场次高洪水期均值,其中涪江最大日均含沙量达到了 $20.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ (涪江小河坝站 2013 年 7 月 11 日),同样达到 2003 年三峡水库蓄水运行以来该水文站的实测最大日均含沙量值。

表 3 2013 年以来寸滩站典型高洪水期上游主要干支流径流量、输沙量对比

Tab.3 Comparison of runoff and sediment load of the mainstream and tributaries upstream of Cuntan Station during typical high flood periods after 2013

河流	7 日径流量对比/亿 m^3		7 日输沙量对比/万 t	
	2013 年 7 月 13 日 对应高洪水期	其余 24 场次 高洪水期均值	2013 年 7 月 13 日 对应高洪水期	其余 24 场次 高洪水期均值
金沙江	35.8	50.2	7.9	7.1
横江	2.5	3.9	17.0	70.9
岷江	53.6	43.1	965.9	383.1
沱江	24.7	11.1	2717.4	213.6
嘉陵江	62.4	62.8	2835.1	942.1

表 4 2013 年以来嘉陵江北碛站典型高洪水期上游主要干支流径流量、输沙量对比

Tab.4 Comparison of runoff and sediment load of the mainstream and tributaries upstream of Beibei Station in the Jialing River during typical high flood periods after 2013

河流	7 日径流量对比/亿 m^3		7 日输沙量对比/万 t	
	2013 年 7 月 13 日 对应高洪水期	其余 24 场次 高洪水期均值	2013 年 7 月 13 日 对应高洪水期	其余 24 场次 高洪水期均值
涪江	30.3	15.0	2928.7	548.4
渠江	2.4	18.5	0.7	107.1
嘉陵江上游干流	25.6	22.6	83.7	272.9

由此可见,虽然寸滩站 2013 年 7 月 13 日的洪峰流量仅为 $37400 \text{ m}^3/\text{s}$,对应的高洪水期 7 日径流量并未明显偏大,但由于沱江以及嘉陵江上游的支流涪江发生了流域性大洪水,输入长江干流的泥沙显著增加,引起寸滩站出现特大入库沙量的情况,给三峡水库的泥沙调度带来巨大挑战。因此,在今后的三峡水库泥沙调度过程中,即使寸滩站的来水不大,但如果上游沱江、嘉陵江等支流存在特大输沙的情况时,也应加强对入库泥沙的监测,警惕三峡水库入库水沙出现“小水大沙”的现象,避免对水库的正常运用产生影响。

4 高洪水期来沙特性变化对汛期水资源利用的影响

根据《长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程)》,三峡水库运用初期一般对 $55000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下的洪水不进行拦蓄,导致三峡水库的防洪效益未能充分发挥,汛期水资源利用效率也较低。为了更好地发挥三峡水库的综合效益,于 2009 年开始实施了中小洪水调度,三峡水库可以相机进行调洪运用。所谓中小洪水,一般指 20 年一遇或 10 年一遇以下的洪水流量^[27]。考虑到三峡水库对荆江河段进行防洪补偿,将中小洪水的范围界定为 $30000 \sim 55000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。三峡水库实施中小洪水调度的实质是汛期酌情启用的适时调度,即在防洪风险可控的前提下,利用防洪库容拦蓄流量 $56700 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下洪水。此后,在《三峡(正常运行期)一葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》中进一步明确了中小洪水调度方式,如“当预报未来 5 天城陵矶(莲花塘)站水位将超过 32.5 m 且预报未来 5 天三峡水库入库流量不超过 $55000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,三峡水库可以相机拦洪削峰”,以此来指导水库的长期优化运行。

三峡水库中小洪水调度的实施提高了汛期水资源利用效益,有效减轻了下流防洪压力,使得三峡工程的综合效益得到更好发挥。但也有众多学者对中小洪水调度期间给库区带来的泥沙淤积问题产生了担忧,如三峡水库汛期拦洪导致库水位抬高,超汛限水位运行时间延长,使得水库排沙比下降,泥沙淤积量相对增多;水库蓄水时间提前,起蓄水位抬升也会影响库尾河段走沙,造成泥沙淤积^[27]。然而,这些担忧多是基于 2013 年以前的实测水沙数据,汛期的输沙量较大。随着金沙江下游梯级水库的相继运行,三峡水库汛期来沙大幅减少,2003—2012 年寸滩站洪峰流量在 $30000 \sim 50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期 7 日输沙量均值为 1865.2 万 t ,2013—2021 年寸滩站洪峰流量在 $30000 \sim 50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期 7 日输沙量均值减小为 1074.8 万 t ,中小洪水调度带来的泥沙淤积风险也会发生变化。本节统计了不同时段寸滩站洪峰流量在 $30000 \sim 50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期入、出库水沙特性,根据寸滩站及黄陵庙站的 7 日输沙量估算库区泥沙淤积量与三峡水库排沙比,来探讨金沙江下游梯级水库运行后三峡水库入库泥沙减少对中小洪水调度泥沙淤积风险的影响。

对于寸滩站洪峰流量在 $30000 \sim 50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间的高洪水期,在实施中小洪水调度之前,2003—2008 年高洪水期寸滩站的 7 日径流量平均为 174.8 亿 m^3 ,坝前平均水位为 140.2 m ,寸滩站、黄陵庙站的 7 日输沙量分别平均为 2075.4 万 、 748.8 万 t ,库区泥沙淤积量约为 1326.7 万 t ,排沙比约为 36.1% ;2009—2012 年实施中小洪水调度期间,高洪水期寸滩站的 7 日径流量平均为 162.5 亿 m^3 ,坝前平均水位为 154.0 m ,寸滩站、黄陵庙站的 7 日输沙量分别平均为 1540.4 万 、 163.0 万 t ,库区泥沙淤积量约为 1377.4 万 t ,排沙比约为 10.6% ;金沙江下游梯级水库运行后,2013—2021 年实施中小洪水调度期间,高洪水期寸滩站的 7 日径流量平均为 173.3 亿 m^3 ,坝前平均水位为 156.2 m ,寸滩站、黄陵庙站的 7 日输沙量分别平均为 1074.8 万 、 191.5 万 t ,库区泥沙淤积量约为 883.3 万 t ,排沙比约为 17.8% 。由此可见,实施中小洪水调度期间,三峡水库高洪水期坝前平均水位抬升至 155 m 附近,不利于水库排沙,导致 2009—2012、2013—2021 年高洪水期水库排沙比相较于 2003—2008 年大幅减小。其中,2009—2012 年库区平均泥沙淤积量比 2003—2008 年增加了 50.7 万 t ,说明中小洪水调度的实施导致水库排沙比减小,增加了库区泥沙淤积的风险;然而,2013—2021 年库区平均泥沙淤积量却比 2009—2012 年大幅减少了 494.2 万 t ,说明三峡水库入库沙量的大幅减少,有效缓解了库水位抬升引起的库区泥沙淤积风险。

综上所述,虽然实施中小洪水调度抬升了三峡水库汛期库水位,水库排沙比大幅减小,存在增加库区泥沙淤积量的风险,但由于金沙江下游梯级水库运行后三峡水库入库沙量大幅减少,导致汛期高洪水期的库区泥沙淤积量显著减少。因此,在三峡水库当前阶段的入库泥沙条件下,中小洪水调度所带来的泥沙淤积风险将大幅减小,有利于在“防洪风险可控,泥沙淤积许可”的要求下进一步提高对汛期水资源的利用效益,

扩大对下游地区的防洪效益。

5 结论

本文选取三峡水库蓄水运行以来的入库水沙为研究对象,重点分析了金沙江下游梯级水库运行后高洪水期的三峡水库入库水沙特性,探讨了高洪水期来沙特性变化对汛期水资源利用的影响。主要结论如下:

1) 2003—2021年,三峡水库入库泥沙主要集中在汛期的高洪水期,且2013年以来高洪水期输沙年内占比进一步增加,尤其是长江上游出现编号洪水的特大水年。三峡水库高洪水期入库泥沙主要来源区也由2013年前的金沙江转为2013年后的嘉陵江。

2) 金沙江下游梯级水库运行后,不同洪峰流量级下高洪水期的三峡水库入库沙量存在较大差异。寸滩站 $30000\sim 40000\text{ m}^3/\text{s}$ 与 $40000\sim 50000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪峰流量区间的高洪水期输沙量均值差别不大,而洪峰流量大于 $50000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,输沙量均值大幅提升,年内占比平均为37.5%,三峡水库泥沙调度的关键在于长江上游发生编号洪水期间。

3) 金沙江下游梯级水库运行后,同一洪峰流量级下的高洪水期,泥沙来源不同将会导致三峡水库入库沙量存在较大差别,当泥沙主要来源于嘉陵江时,易引起入库沙量明显偏大。当高洪水期洪峰流量较小时,若上游沱江、嘉陵江等支流发生流域性大洪水,则可能引起入库水沙出现“小水大沙”的现象。

4) 金沙江下游梯级水库运行后,汛期高洪水期入库泥沙大幅减少,三峡水库实施中小洪水调度期间库区泥沙淤积量也大幅减小,缓解了中小洪水调度带来的泥沙淤积风险。

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] Milliman JD. Blessed dams or damned dams? *Nature*, 1997, **386**(6623): 325-327. DOI: 10.1038/386325a0.
- [3] 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. [胡春宏. 三峡水库175 m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.]
- [4] Hu CH, Fang CM. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects. *Scientia Sinica: Technologica*, 2017, **47**(8): 832-844. [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.]
- [5] Zheng SR. Analysis of sediment observation data in the trial impounding period of the Three Gorges Project to pool level of El. 175-meter. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, **3**(3): 1-7. [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.]
- [6] Xu QX, Tong H. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years. *Journal of China Hydrology*, 2012, **32**(5): 38-47, 76. [许全喜, 童辉. 近50年来长江水沙变化规律研究. 水文, 2012, **32**(5): 38-47, 76.]
- [7] Zhang W, Li X, Ren JQ. Delayed response law of sedimentation in the Three Gorges Reservoir. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, **53**(5): 81-88. DOI: 10.15961/j.jsuese.202001126. [张为, 李昕, 任金秋. 三峡水库泥沙淤积滞后响应规律. 工程科学与技术, 2021, **53**(5): 81-88.]
- [8] Ren S, Liu L. Sediment deposition and countermeasures in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 40-45. [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.]
- [9] Xiao Y, Yang SF, Shao XJ. Trends of temporal variation of the flow-sediment discharges into the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2017, **42**(6): 22-27. [肖毅, 杨胜发, 邵学军. 三峡水库水沙条件时序变化趋势研究. 泥沙研究, 2017, **42**(6): 22-27.]
- [10] Yang WG, Dai R, Zhang Y et al. Analysis of variations and causes in runoff and sediment of Yangtze River during 2000-2015. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(1): 16-23. DOI: 10.16843/j.sswc.2019.01.003. [杨维鸽, 代茹, 张雁等. 2000—2015年长江干流水沙变化及成因分析. 中国水土保持科学, 2019, **17**(1): 16-23.]
- [11] Xu JX. Recent variations in water and sediment in relation with reservoir construction in the upper Changjiang River Basin. *Journal of Mountain Science*, 2009, **27**(4): 385-393. [许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系. 山地学报, 2009, **27**(4): 385-393.]
- [12] Guo S, Zhou M, Hu T et al. An analysis of the variation process and causes of water and sediment to the Three Gorges Reservoir in recent years. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (8): 35-40, 49. [郭率, 周曼, 胡挺等. 近年来三峡水库水沙通量变化过程及原因

- 分析. 中国农村水利水电, 2022, (8): 35-40, 49.]
- [13] Shan ME, Li ZJ, Zhou YJ *et al.* Variations and driving factors of water flow and sediment transport in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2022, **47**(2): 29-35. [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. 泥沙研究, 2022, **47**(2): 29-35.]
- [14] Zhu LL, Dong XY, Chen ZF. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, **34**(3): 1-7. [朱玲玲, 董先勇, 陈泽方. 金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究. 长江科学院院报, 2017, **34**(3): 1-7.]
- [15] Yang CG, Li SW, Dong BJ. Changes of runoff and sediment in the upper reaches of the Yangtze River since the trial impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(S1): 38-44. [杨成刚, 李圣伟, 董炳江. 三峡水库试验性蓄水以来长江上游来水来沙变化. 水利水电技术: 中英文, 2022, **53**(S1): 38-44.]
- [16] Tang XY, Tong SC, Xu GX *et al.* Delayed response of sedimentation in the flood seasons to the pool level of the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(4): 528-536. [唐小娅, 童思陈, 许光祥等. 三峡水库汛期泥沙淤积对坝前水位的滞后响应. 水科学进展, 2019, **30**(4): 528-536.]
- [17] Wang SH, Su BR, Wang YQ *et al.* Change analysis of runoff and sediment in the Three Gorges Reservoir Region in recent 16 years. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, **19**(1): 69-78. DOI: 10.16843/j.sswc.2021.01.009. [王淑慧, 苏伯儒, 王云琦等. 近16年三峡库区径流输沙变化分析. 中国水土保持科学: 中英文, 2021, **19**(1): 69-78.]
- [18] Peng T, Tian H, Singh VD *et al.* Quantitative assessment of drivers of sediment load reduction in the Yangtze River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2020, **580**: 124242. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124242.
- [19] Chen SS, Zhang OY, Chen ZF *et al.* Variations of runoff and sediment load of the Jinsha River. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(4): 475-482. [陈松生, 张欧阳, 陈泽方等. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析. 水科学进展, 2008, **19**(4): 475-482.]
- [20] Zhou YJ, Wang J, Jin ZW *et al.* Study on processes of sediment sources to the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2020, **45**(4): 21-26. [周银军, 王军, 金中武等. 三峡水库来沙的地区组成变化分析. 泥沙研究, 2020, **45**(4): 21-26.]
- [21] Li SX, Yang CG, Dong BJ *et al.* Sediment transport characteristics during high floods in the upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(12): 6-11. [李思璇, 杨成刚, 董炳江等. 长江上游高洪水期泥沙输移特性. 长江科学院院报, 2021, **38**(12): 6-11.]
- [22] Xu QX, Yuan J. Study on characteristics and causes of sediment deposition in Three Gorges Reservoir in 2020. *Yangtze River*, 2022, **53**(5): 7-13. [许全喜, 袁晶. 2020年三峡水库泥沙淤积特点及原因分析. 人民长江, 2022, **53**(5): 7-13.]
- [23] Dong ZD, Hu HH, Ji ZW *et al.* Response of sediment excluding ratio to incoming flow and sediment in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2017, **42**(6): 16-21. [董占地, 胡海华, 吉祖稳等. 三峡水库排沙比对来水来沙的响应. 泥沙研究, 2017, **42**(6): 16-21.]
- [24] 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. [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.]
- [25] Jin ZW, Ren S, Wu HL *et al.* Sedimentation and sediment delivery and river pattern conversion in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(10): 9-15, 27. [金中武, 任实, 吴华莉等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律. 长江科学院院报, 2020, **37**(10): 9-15, 27.]
- [26] Liu J, Yang SF, Shen Y. Impact of runoff and sediment from the Upper Yangtze River on deposition in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 33-39. [刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响. 泥沙研究, 2019, **44**(6): 33-39.]
- [27] Zheng SR. Risk analysis of implementing middle- small flood dispatch by Three Gorges Project and countermeasures. *Yangtze River*, 2015, **46**(5): 7-12. [郑守仁. 三峡水库实施中小洪水调度风险分析及对策探讨. 人民长江, 2015, **46**(5): 7-12.]