

金沙江下游梯级水库泥沙淤积和坝下河道冲刷规律*

朱玲玲^{1**}, 陈迪², 杨成刚¹, 陈柯兵¹, 李思璇¹

(1: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(2: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

摘要:金沙江下游4个梯级水电站总装机容量相当于两座三峡水库,是“西电东送”中部地区的源头工程,工程效益发挥对经济社会发展意义重大。2012年以来,向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩电站等陆续蓄水运行,层层拦截金沙江的泥沙,2013—2020年向家坝出库年输沙量均值下降至152万t,减幅超过99%。大量泥沙淤积在梯级水库内,同时向家坝以下河道发生长距离冲刷。本文以自金沙江下游工程筹建以来的观测资料为基础,针对梯级水库的泥沙淤积和坝下游河道冲刷规律开展研究,结果表明:金沙江下游四个梯级电站自建成运行至2020年底,累计淤积泥沙约5.98亿m³,其中溪洛渡库区淤积量占比达92.5%,2013—2020年溪洛渡和向家坝水库排沙比分别为2.64%和22.2%,其水库泥沙主要淤积在常年回水区的干流河道内,以死库容内淤积为主,侵占有效库容的比例小于1.3%。金沙江下游库区干流河道的峡谷特征明显,淤积多表现为主河槽的平铺式淤高。溪洛渡和向家坝库区淤积的泥沙沿程分选特征明显,越靠近坝前,中数粒径减小、细颗粒泥沙沙量百分数增加,极细颗粒泥沙会在库区一定范围内大量沉积。向家坝下游河床普遍冲刷,但冲刷强度减弱明显,重要涉水工程局部冲刷并未超出预期范围。向家坝下游河道深泓高凸段相对稳定,使得坝下游枯水位未大幅下降,2000m³/s下枯水位累计降幅约0.43m;坝下游河床粗化明显。

关键词:金沙江下游;梯级水库;泥沙淤积;河道冲刷

Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and scouring of river channel under dam*

Zhu Lingling^{1**}, Chen Di², Yang Chenggang¹, Chen Kebing¹ & Li Sixuan¹

(1: Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R. China)

(2: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract: The total installed capacity of the four cascade hydropower stations in the lower reaches of the Jinsha River is equivalent to two Three Gorges reservoirs. They are the source project of the central region of the “west to East power transmission”. The benefits of the project are of great significance to economic and social development. Since 2012, Xiangjiaba, Xiluodu, Wudongde and Baihetan power stations had successively stored water and operated to intercept the sediment of Jinsha River layer by layer. From 2013 to 2020, the average annual sediment discharge from Xiangjiaba decreased to 1.52 million tons, a decrease of more than 99%. A large amount of sediment was deposited in the cascade reservoirs and scoured to the river channel below Xiangjiaba. Based on the observation data since the preparation of the lower Jinsha River project, this paper studied the sediment deposition of cascade reservoirs and the scouring law of the river channel downstream of the dam. The results showed that from the completion and operation of the four cascade hydropower stations in the lower reaches of Jinsha River to the end of 2020, the accumulated sediment deposition was about 598 million m³, of which the sediment deposition in Xiluodu Reservoir accounted for 92.5%. The sediment discharge ratios of Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs from 2013 to 2020 were 2.64% and 22.2%, respectively. The reservoir sediment was mainly deposited in the main stream channel of the perennial backwater area, mainly in the dead storage capacity, and the proportion of occupying the effective storage capacity was less than 1.3%. The canyon characteristics of the main stream channel in the reservoir area of the lower reaches of Jinsha River were obvious, and the siltation was mostly the flat siltation of the main channel.

* 2022-03-28 收稿;2022-05-31 收修改稿。

长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040218)资助。

** 通信作者;E-mail: zhull1012@foxmail.com。

The sediment deposited in Xiluodu and Xiangjiaba reservoir areas had obvious sorting characteristics along the way. The closer to the front of the dam, the medium particle size decreased, the percentage of fine sediment increased, and the very fine sediment would be deposited in a large amount in a certain range of the reservoir area. The downstream riverbed of Xiangjiaba was generally scoured, but the scouring intensity was weakened obviously. The thalweg high convex section of the downstream channel of Xiangjiaba was relatively stable, so that the low water level at the downstream of the dam had not decreased significantly, and the cumulative decline of the low water level at $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ was about 0.43 m. The riverbed at the downstream of the Xiangjiaba dam was obviously coarsened.

Keywords: The lower reaches of Jinsha River; cascade reservoirs; sediment deposition; channel scouring

金沙江下游河段水量大、落差集中,是长江流域水能资源最丰富的河段。金沙江下游河段建有乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝 4 座世界级巨型梯级水电站,装机容量相当于两个“三峡工程”,是“西电东送”中部地区的主力,具有防洪、发电、航运、水资源利用和生态环境保护等巨大的综合效益,自 2012 年开始,向家坝、溪洛渡、乌东德、白鹤滩电站陆续建成蓄水。金沙江下游是长江流域的重点产沙区^[1-2],也是长江上游水土流失最严重的区域之一^[3],泥沙问题突出。泥沙问题关系梯级水库使用寿命、下游冲淤变化及防洪和涉水工程安全等多个方面,是水电站的关键技术难题之一,贯穿工程规划、设计、施工到建成运行的全过程。

金沙江下游水沙异源现象突出^[4],径流主要来自于上游干流及雅砻江,而泥沙主要来自于区间。攀枝花至屏山区间输沙模数一度高达 $2200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是三峡入库泥沙的主要来源。梯级水库运行前,金沙江出口多年平均年输沙量为 2.34 亿 t,占同期三峡水库干流年均入库输沙量的 84.2%,因而,梯级电站在设计阶段就明确了为三峡水库拦沙的任务^[5-6]。2012 年以来,电站陆续蓄水运行,拦截金沙江的泥沙,2013—2020 年向家坝出库年输沙量均值下降至 152 万 t,相较于蓄水前均值减幅超 99%,金沙江的泥沙基本淤积在梯级水库内。加之降雨变化、水土保持工程等因素的综合影响,金沙江下游水沙条件发生显著改变^[7-9],下游梯级水库泥沙淤积、排沙及坝下游河道冲刷特征与以往研究成果均有一定差异^[10-11]。此外,金沙江还是流域营养盐的重要来源,梯级水库泥沙沉积也会导致氮、磷局部滞留效应^[12]。同时,坝下游河道已有构筑物局部冲刷和枯水位变化事关涉水工程的安全和通航条件的稳定,同样值得关注^[13]。因此,系统开展金沙江下游梯级水库泥沙淤积及坝下游河道冲刷规律研究具有较强的实际意义。

金沙江下游梯级水电站自建设至今,历时 15 年,积累了大量的观测资料。为充分了解掌握水库泥沙淤积和坝下游河道冲刷的基本规律,本文集结了系列完整的水文、泥沙与河道观测资料,基于数理统计和类比分析相结合的研究方法,着重对金沙江下游梯级水库入库水沙特征、库区泥沙淤积规律和排沙比变化、坝下游河道冲刷规律与分布及其带来的河道形态、枯水情势等响应开展综合研究,以期为水库群联合调度和流域综合治理提供技术支撑。

1 研究对象及数据源

金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝 4 座水电站自 2005 年开始陆续开工建设,目前均投入蓄水运行。其中,乌东德和白鹤滩水电站分别于 2020 年 5 月和 2021 年 5 月启动初期蓄水,运行时间尚短,淤积量不大,文中仅简要分析其建设阶段的冲淤量,水库淤积分析侧重于向家坝和溪洛渡水库。

1) 溪洛渡水电站:位于四川省雷波县和云南省永善县交界的金沙江峡谷内,控制流域面积 45.4 万 km^2 ,占金沙江流域面积的 96%。水库设计开发任务以发电为主,兼顾防洪,此外还有拦沙、改善库区及下游河段通航条件等综合利用效益。水库死水位 540 m,正常蓄水位 600 m,调节库容 64.6 亿 m^3 ,死库容 51.1 亿 m^3 ,具有不完全年调节能力。工程于 2013 年 5 月开始初期蓄水,2014—2020 年连续达到 600 m 目标蓄水位。

2) 向家坝水电站:位于四川省宜宾县和云南省水富县交界的金沙江峡谷出口,是金沙江干流最后一个梯级。坝址控制流域面积 45.9 万 km^2 ,占金沙江流域面积的 97%。以发电为主,兼有航运、灌溉、拦沙、防洪等综合效益。水库正常蓄水位 380 m,相应库容 49.77 亿 m^3 ,调节库容 9.03 亿 m^3 ,具有季调节性能。工程于 2012 年 10 月初期蓄水,2013—2020 年均顺利蓄至目标水位。

金沙江干流攀枝花至宜宾区间现有水文(位)站 30 个,其中,水文站 9 个,水位站 21 个,分别隶属于长江水利委员会水文局、四川省水文水资源勘测局、云南省水文水资源勘测局、中国长江三峡集团公司、中国

水电顾问集团成都勘测设计研究院、中南勘测设计研究院等单位。为充分反映金沙江下游梯级水库入、出水沙情况,研究采用金沙江下游干流的攀枝花、白鹤滩、向家坝站和支流雅砻江桐子林、龙川江小黄瓜园、鲮鱼河可河、美姑河美姑、西宁河欧家村、中都河龙山村站等水文站的观测资料开展分析,测站及其与水电站的位置关系如图1,资料采用序列如表1。

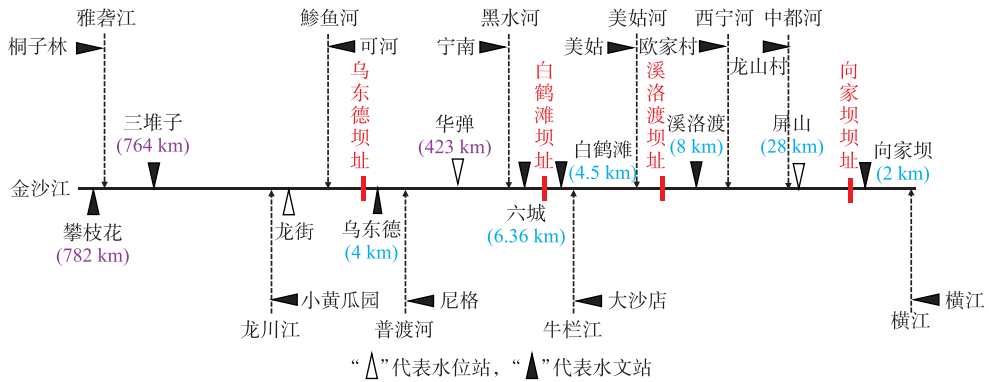


图1 金沙江下游水文、水位控制站及梯级水库分布概化图(攀枝花、三堆子、华弹括号中数据为距宜宾距离;乌东德、六城、白鹤滩、屏山、向家坝括号中数据为距最近梯级电站的距离)

Fig.1 Distribution of hydrology, water level control stations and cascade reservoirs in the lower Jinsha River

表1 金沙江下游梯级水库水文与河道观测资料统计

Tab.1 Statistics of hydrological and river channel observation data of cascade reservoirs in the lower Jinsha River

河流	水文控制站	所属库区	水文泥沙资料	库区固定断面资料
			采用序列	采用测次
金沙江	攀枝花	乌东德	2010—2020年	
金沙江	三堆子	乌东德	2010—2020年	
雅砻江	桐子林	乌东德	2010—2020年	2013年、2016年;2020年5月、11月
龙川江	小黄瓜园	乌东德	2010—2020年	
鲮鱼河	可河	乌东德	2020年	
金沙江	乌东德	白鹤滩	2015—2020年	2013年、2016年
金沙江	白鹤滩	溪洛渡	2013—2020年	
牛栏江	大沙店	溪洛渡	2010—2020年	2008年、2013年、2020年
美姑河	美姑	溪洛渡	2013—2017年	
金沙江	溪洛渡	向家坝	2013—2020年	
西宁河	欧家村	向家坝	2012—2020年	
中都河	龙山村	向家坝	2012—2020年	2008年、2012年、2019年和2020年
金沙江	向家坝	向家坝下游	2012—2020年	

2 梯级水库泥沙淤积特征分析

2.1 乌东德、白鹤滩库区河道冲淤分析

2015—2020年,乌东德站径流量和输沙量分别为1193亿 m^3 和2717万t,与可研阶段相比^[14],径流量略偏少1.4%,输沙量则偏少77.9%,乌东德水文站位于电站下游,2020年电站运行后,出库年输沙量直接下降至411万t。白鹤滩站径流量和输沙量分别为1292亿 m^3 和7485万t,与可研阶段相比^[15],径流量略偏少2.2%,输沙量则偏少55.4%。乌东德和白鹤滩坝址附近输沙量减少均与上游干支流梯级水电站拦沙有

关^[9]。同时还应注意到,两库库区处于干热河谷的核心地带,侵蚀强度大,未控区间来沙量较大,若采用三堆子至华弹区间的多年平均输沙模数估算,2015—2020年乌东德和白鹤滩库区未控区间的年均输沙量分别为780万和1310万t,未控区间或将成为入库泥沙的重要来源。

根据库区2013、2016年的固定断面观测资料计算,乌东德和白鹤滩电站工程建设阶段,恰逢金沙江中游梯级水电站陆续运行^[8],进入金沙江下游的输沙量持续减少,2013—2016年乌东德库区干流河道与支流河口段以冲刷为主,其中,干流冲刷量为343万 m^3 ,冲刷强度为 $0.455\text{万}\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$,坝前段冲刷量最大。支流河口段除勐果河淤积 $6.3\text{万}\text{m}^3$ 外,雅砻江、龙川江、普隆河和鲹鱼河分别累计冲刷5.4万、92.9万、365万和 $2.6\text{万}\text{m}^3$ 。在乌东德库区冲刷泥沙补给的影响下,加之未控区间来沙量较大,白鹤滩库区河道累积呈淤积状态,其中,干流河道淤积量为 $789\text{万}\text{m}^3$,淤积强度为 $1.55\text{万}\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$,库尾段淤积量最大;支流河口段有冲有淤,普渡河和黑水河分别淤积17万和 $56.6\text{万}\text{m}^3$,小江和以礼河分别冲刷5.3万和 $3.4\text{万}\text{m}^3$ 。乌东德坝前和白鹤滩库尾都属于电站工程影响区,河床冲淤变幅主要受施工的影响。

乌东德水库蓄水后,若采用输沙法计算,入库的泥沙主要来自于金沙江中游和雅砻江、龙川江、鲹鱼河等支流及未控区间,2020年总入库沙量约2290万t,水库拦沙量为1880万t。2020年5和11月,乌东德水库开展了两次全库断面观测。若采用断面法计算,成库第一个汛期过后,水库由自然状态下的冲刷转为淤积,库区共淤积泥沙约816万 m^3 。由于水库尚未蓄至975m目标水位,库尾段干流及雅砻江河口尚未受回水的影响,基本冲淤平衡。水库淤积主要发生在常年回水区,其中,干流河道累计淤积泥沙688万 m^3 ,平均淤积强度为 $3.45\text{万}\text{m}^3/\text{km}$,主要支流龙川江、勐果河、普隆河和鲹鱼河河口段冲淤量分别为128万、34万、-44万和 $13\text{万}\text{m}^3$ 。库区淤积基本发生在主河槽,干流深泓平均淤积0.3m,尤其是坝前约20km河道深泓全程淤积明显,最大淤积幅度为8.4m(图2)。

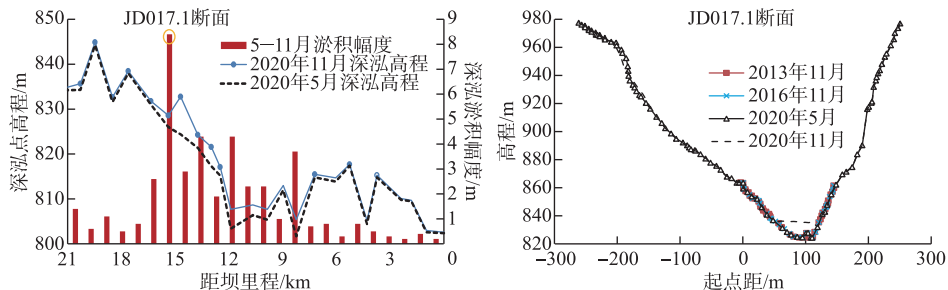


图2 2020年乌东德坝前20 km深泓纵剖面及典型横断面变化

Fig.2 Changes of 20 km thalweg longitudinal section and typical cross section in front of Wudongde Dam in 2020

2.2 溪洛渡、向家坝水库淤积分析

2.2.1 水库淤积量与排沙比 按照输沙法统计,其中,溪洛渡入库泥沙量为白鹤滩水文站与库区入汇支流美姑河、牛栏江来沙的总和,向家坝入库泥沙量为溪洛渡水文站与库区入汇支流西宁河、中都河来沙的总和,两个水库的出库水沙分别由溪洛渡和向家坝水文站控制。同时,考虑到金沙江下游未控区间来沙量较大,本次分析按照观测资料反推区间输沙模数,估算出各水库未控区间的均年来沙量,综合得到溪洛渡和向家坝水库2013—2020年入、出库沙量及水库的淤积量、排沙比变化,见图3。

2013—2020年间溪洛渡总入库沙量为7.36亿t,出库沙量为0.194亿t,水库累积淤积泥沙7.17亿t,排沙比为2.64%,较预期明显偏小^[5]。关于溪洛渡水库排沙比较预期以及向家坝和三峡水库显著偏小的原因,已有较为清晰的阐述^[10]。2020年,溪洛渡水库排沙比略有回升,仅次于2014年,其原因主要有两个方面:一是汛期入库水沙峰值协调性较高,有利于促进水库排沙,9月中旬、8月中下旬和7月下旬累计30天的3场洪水过程中,入库干流控制站白鹤滩站水沙峰值大多同步,水库共计排沙61万t,占年排沙量的1/3;二是溪洛渡库区干流底部两级潜坎的阻隔作用在下降,底部泥沙逐步向坝前推移。

2013—2020年间向家坝总入库沙量为0.547亿t,出库沙量为0.121亿t,水库累积淤积泥沙0.426亿t,

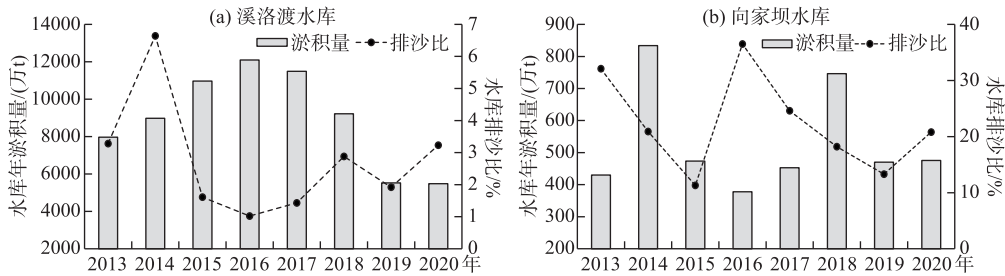


图3 溪洛渡(a)、向家坝(b)水库淤积量和排沙比变化

Fig.3 Changes of sedimentation and sediment discharge ratio in Xiluodu (a) and Xiangjiaba (b) reservoirs

水库排沙比为 22.2%。向家坝水库与溪洛渡运行时间基本相当,溪洛渡水库的拦沙效应使得向家坝入库沙量明显减少。加之,金沙江自上而下侵蚀强度逐渐减弱。因此,向家坝水库排沙比虽然也不及预期^[6],但其泥沙淤积幅度较之溪洛渡水库明显偏小。可见,截至 2020 年,金沙江下游梯级水库泥沙淤积主要集中在溪洛渡水库内。

2.2.2 泥沙淤积分布特征 基于溪洛渡水库 2008—2020 年陆续观测到的固定断面数据,采用断面法计算,2008 年 2 月—2020 年 11 月,库区干流和主要支流河口段共计淤积泥沙约 6.07 亿 m³。其中,蓄水前 2008 年 2 月—2013 年 6 月,库区河道淤积总量为 0.542 亿 m³;蓄水后 2013 年 6 月—2020 年 11 月,水库淤积总量为 5.52 亿 m³,水库拦沙效应显著,年均淤积量达蓄水前的 7 倍之多。泥沙淤积在库区沿程、平面和不同高程上的分布有几个较为典型的特征(表 2):一方面泥沙淤积主要集中在库区干流,其淤积量占比为 95.8%,支流河口段泥沙淤积量占比较小;另一方面泥沙主要淤积的常年回水区,变动回水区淤积量占比不足 4%;再者,泥沙主要淤积在 540 m 以下的死库容内,其淤积量占比为 85.7%,占死库容的 10.2%;540~600 m 调节库容内淤积量占比为 14.3%,侵占调节库容的比例仅为 1.3%。

表 2 2008—2020 年溪洛渡水库淤积量统计

Tab.2 Sedimentation volume of Xiluodu Reservoir in different stages from 2008 to 2020

时段	变动回水区淤积量/(亿 m ³)	常年回水区淤积量/(亿 m ³)			死库容内淤积量/(亿 m ³)	调节库容内淤积量/(亿 m ³)	库区淤积量合计/(亿 m ³)
		干流	主要支流河口段	合计			
水库蓄水前	0.035	0.440	0.068	0.508	0.412	0.131	0.542
水库蓄水后	0.234	5.09	0.198	5.29	4.79	0.737	5.53
2008—2020 年	0.268	5.53	0.267	5.80	5.20	0.868	6.07

2008—2020 年,向家坝库区也开展了多个期次的覆盖全库干流和部分支流河口段的固定断面观测,基于这些资料,采用断面法计算,2008 年 3 月—2020 年 5 月,库区干流和主要支流河口段共淤积泥沙 0.435 亿 m³,其中,蓄水前 2008 年 3 月—2012 年 11 月,库区河道淤积总量为 0.069 亿 m³,蓄水后 2012 年 11 月—2020 年 5 月,水库淤积总量为 0.366 亿 m³,年均淤积量也较之蓄水前偏大 2 倍多。向家坝的变动回水区恰好是溪洛渡坝下游近坝段,向家坝和溪洛渡水库运行前为微淤状态,极可能是溪洛渡工程的弃渣;两库蓄水后,向家坝的变动回水区呈微冲状态,与溪洛渡水库拦沙有关。因此,向家坝水库的淤积仍然主要发生在常年回水区内,支流河口段淤积量占比较之溪洛渡水库偏大,约为 19.8%,泥沙基本淤积在 370 m 以下的死库容内(表 3)。

综上所述,依据断面法统计,自金沙江下游乌东德、溪洛渡和向家坝电站成库至 2020 年底,共计拦截泥沙约 5.98 亿 m³,其中,泥沙主要淤积在溪洛渡库区,其淤积量占比达 92.5%。今后,随着乌东德、白鹤滩逐步正常运行,可发挥逐级拦沙作用,溪洛渡库区的泥沙淤积强度有望减小。

2.2.3 淤积物组成特征 金沙江是长江流域营养盐的重要来源区^[12],尤其是颗粒态磷,主要附着在粒径小于 0.008 mm 的泥沙颗粒上^[16]。金沙江下游 4 个梯级水库运行后,基本截断了金沙江的泥沙,且目前泥沙主要

表 3 2008—2020 年向家坝水库淤积量统计

Tab.3 Sedimentation volume of Xiangjiaba Reservoir in different stages from 2008 to 2020

时段	变动回水区 淤积量/ (亿 m ³)	常年回水区淤积量/(亿 m ³)			死库容内 淤积量/ (亿 m ³)	调节库容内 淤积量/ (亿 m ³)	库区淤积量 合计/(亿 m ³)
		干流	主要支流 河口段	合计			
水库蓄水前	0.014	0.049	0.006	0.055	0.069	0	0.069
水库蓄水后	-0.052	0.33	0.083	0.418	0.361	0.005	0.366
2008—2020 年	-0.038	0.38	0.089	0.473	0.430	0.005	0.435

淤积在溪洛渡水库中,向家坝和运行时间较短的乌东德、白鹤滩水库淤积量较小。本次研究基于2016—2020年溪洛渡库区床沙取样资料,着重分析其淤积物的组成特征如表4。受水动力条件改变的影响,泥沙在水库内沿程沉积具有分选规律,粗颗粒泥沙会先沉积下来,细颗粒泥沙输移的距离相对较远。溪洛渡库区干流河道自上而下,淤积的泥沙中数粒径越来越小,符合淤积物沿程分选的规律。同时,在坝前约80 km以内的库区,沉积泥沙的中数粒径大多小于0.008 mm,最小中数粒径基本出现在坝前段,为0.005 mm。 $d < 0.008$ mm 颗粒沙量百分数沿程递增,距坝超过150 km范围的库区河道内,其沙量百分数基本在10%以内,距坝在80 km以内的库区河道,其沙量百分数基本在50%以上。且从年际对比来看,大多数断面随着淤积的进行, $d < 0.008$ mm 细颗粒沙量百分数有逐渐增加的趋势,2016—2020年,距坝100 km以内断面其沙量百分数普遍增加,增幅在3.8%~28%之间。

表 4 2016—2020 年溪洛渡库区干流沿程床沙中数粒径和 $d < 0.008$ mm 颗粒沙量占比变化

Tab.4 Change of median particle size of bed sediment along the main stream of Xiluodu Reservoir from 2016 to 2020

断面编号	距坝里程/ km	中数粒径/mm			$d < 0.008$ mm 沙量占比/%		
		2016年11月	2018年11月	2020年11月	2016年11月	2018年11月	2020年11月
JB198	173.3	0.166	0.197	0.212	0.2	0	2.2
JB184	163.1	0.09	0.071	0.074	5.5	12.2	10.6
JB172	153.2	0.222	0.306	0.353	0	7.4	0
JB161	143.7	0.109	0.17	0.08	4.7	3.9	16.5
JB149	127.7	0.111	0.048	0.05	4.6	14.4	19.9
JB134	119.1	0.008	0.018	0.021	49.8	30.8	33
JB106	94.8	0.049	0.013	0.008	21.9	37.6	49.9
JB089	79.1	0.017	0.01	0.007	34.3	43.7	53.9
JB070	64.4	0.008	0.008	0.007	49.4	52.4	53.2
JB043	39.9	0.006	0.008	0.006	54	48.7	60.5
JB006	4.8	0.005	0.005	0.005	42.1	65.7	65.5

向家坝库区泥沙淤积幅度较小,其淤积物组成的观测频次较低,目前仅有2019年汛后的床沙取样资料,其沿程分选特征也十分明显,越靠近坝前,淤积物中数粒径越小、 $d < 0.008$ mm 的细颗粒泥沙沙量百分数越大(表5)。溪洛渡和向家坝库区淤积物组成沿程分布特征相似,进一步证明:极细颗粒的泥沙并不会都跟随水流排出水库,而是会在距离大坝一定范围的库区大量沉积,这可能是氮、磷等营养盐在库区富集和坝下游通量下降的本质原因。因此,库区和坝下游细颗粒泥沙通量的剧增和剧减都可能带来一定的生态环境效应。

2.2.4 纵、横剖面形态变化 溪洛渡库区干流河道深泓纵剖面 and 典型横断面变化如图5,库区以峡谷地形为主,深泓纵剖面形态呈锯齿形。水库蓄水前和蓄水初期(2008年2月—2014年5月)深泓平均淤积抬高4.2 m。其中,变动回水区白鹤滩坝址至对坪镇段平均抬高约1.4 m,常年回水区对坪镇至溪洛渡坝址段平均抬高约4.9 m,淤积主要发生在水库初期蓄水期。水库蓄水后(2014年5月—2020年11月),库区深泓点平均

淤积抬高 15.1 m,最大淤高 35.3 m,最大降幅 2.2 m,出现在库尾段,主要与白鹤滩工程施工和运行有关。变动回水区白鹤滩坝址至对坪镇深泓点平均抬高 7.9 m,常年回水区对坪镇至溪洛渡坝址深泓点沿平均抬高 16.8 m,且自牛栏江河口至坝前,深泓淤积幅度呈阶梯性递减的变化特点,与底部天然拦沙坎有密切关系^[10]。在水库蓄水初期,两级潜坎高度均接近 21 m(位置如图 4),水库泥沙集中在底部输移,潜坎逐级拦截水库底部泥沙,使得溪洛渡水库深泓纵剖面淤积幅度自牛栏江河口至坝前逐级递减,并没有出现类似其他河道型水库的三角洲淤积。

溪洛渡库区河道以深切高山峡谷地形为主,库区干流河道断面多为偏“V”“U”形态,两岸岸坡稳定,2014—2020 年断面主河槽大多淤积抬高,局部断面两侧向江心淤进。其中,变动回水区断面以淤积为主,兼有基本无变化和近期冲刷下切等,如①断面左侧向江心淤进最大淤进幅度为 7 m,主河槽最大淤积幅度为 11 m;②断面形态基本稳定,主河槽最大淤积幅度为 12 m。常年回水区是金沙江下游梯级水库淤积最明显的区域,断面主槽普遍平淤,如③断面河槽最大淤积幅度为 27 m,同时两岸因公路修建而束窄,④断面河槽最大淤积幅度为 24 m,⑤断面河槽最大淤积幅度为 17 m,⑥断面河槽最大淤积幅度为 12 m;⑦断面主河槽平铺式淤积,最大淤积幅度为 10 m。

向家坝库区干流河道深泓纵剖面和典型横断面变化如图 5,库区深泓纵剖面形态呈锯齿形,水库蓄水前 2008 年 3 月—2012 年 11 月库区河道冲淤基本平衡,深泓平均高程变化不大^[11];水库蓄水后 2013 年 4 月—2020 年 5 月库区干流河道深泓以淤积抬高为主,平均抬高 1.2 m,最大淤积幅度 9.6 m,最大下切幅度为 17 m。其中,变动回水区永善县至桧溪镇深泓点平均高程基本稳定,常年回水区桧溪镇至新滩坝深泓点平均淤积抬高 1.47 m,尤其是在距坝 40~75 km 范围内,深泓平均淤积幅度最大,约 3.1 m,最大淤积幅度也出现在该区域内。

向家坝库区干流断面形态仍以偏“V”“U”型居多,断面形态大多保持稳定,冲淤主要发生在主河槽内,然而,相较于溪洛渡库区,向家坝库区断面受人工采砂、修路等活动的影响较大。其中,变动回水区大多断面形态保持稳定,局部因采砂表现为冲刷,如①断面,河槽最大冲刷幅度约 25 m,深泓点最大下切 17 m,整个库区唯有该断面大幅冲刷下切,2019 年实地观测期间发现附近有大规模挖沙船只作业,下切极有可能由采砂活动造成。常年回水区大多断面冲淤变幅也较小,局部较大冲淤变幅与采砂和公路修建等有关,如②断面河槽冲刷,最大冲刷幅度约 14 m,由采砂活动造成;③断面位于库区典型淤积区,为典型的主槽平铺式淤积,最大淤积厚度约 9.7 m;④断面受挖砂影响左岸边坡高程最大降低 7.5 m,深槽在蓄水初期发生淤积,淤积厚度在 5.5 m 以内。

3 向家坝下游河道冲刷分析

3.1 冲刷规律分析

3.1.1 冲刷量及发展过程 2008 年以来,向家坝坝下至宜宾河段(长约 29.8 km)存在大量护堤护岸等工程陆续施工,河道采砂活动频繁,对河道冲淤计算成果有较大影响。为保持坝上坝下冲淤计算成果的连续性,坝下游的冲淤量计算仍采用断面法。结果表明,2008 年 3 月—2020 年 11 月,向家坝坝下至宜宾河段总体冲刷,冲刷量为 2590 万 m³(含河道采砂的影响),各断面冲淤见图 6。其中,2008 年 3 月—2012 年 10 月河道共冲刷 1388 万 m³,冲刷强度为 10.3 万 m³/(km·a),各断面均出现不同程度的冲刷;2012 年 10 月—2020 年 11 月,受向家坝电站蓄水拦沙影响,干流河段累计冲刷 1202 万 m³,冲刷强度为 5.0 万 m³/(km·a),较水库蓄水前略有减小,其主要原因在于该段河道采砂活动频繁,采砂量较大,2016 年开始河道全面禁止采砂,河段年均冲刷量从 2012—2016 年的 262 万 m³减少至 2017—2019 年的年均 103 万 m³,2020 年河道出现回淤,淤积量约 157 万 m³。

表 5 2019 年向家坝库区干流沿程床沙中数粒径和 $d < 0.008$ mm 颗粒沙量百分数变化

Tab.5 Change of median particle size of bed sediment along the main stream of Xiangjiaba Reservoir in 2019

断面编号/距坝 里程/km	中数粒径/ mm	$d < 0.008$ mm 沙量 占比/%
JA083/71.2	0.016	31.7
JA063/55.0	0.012	40.5
JA036/32.6	0.01	45.8
JA005/5.63	0.007	56.3

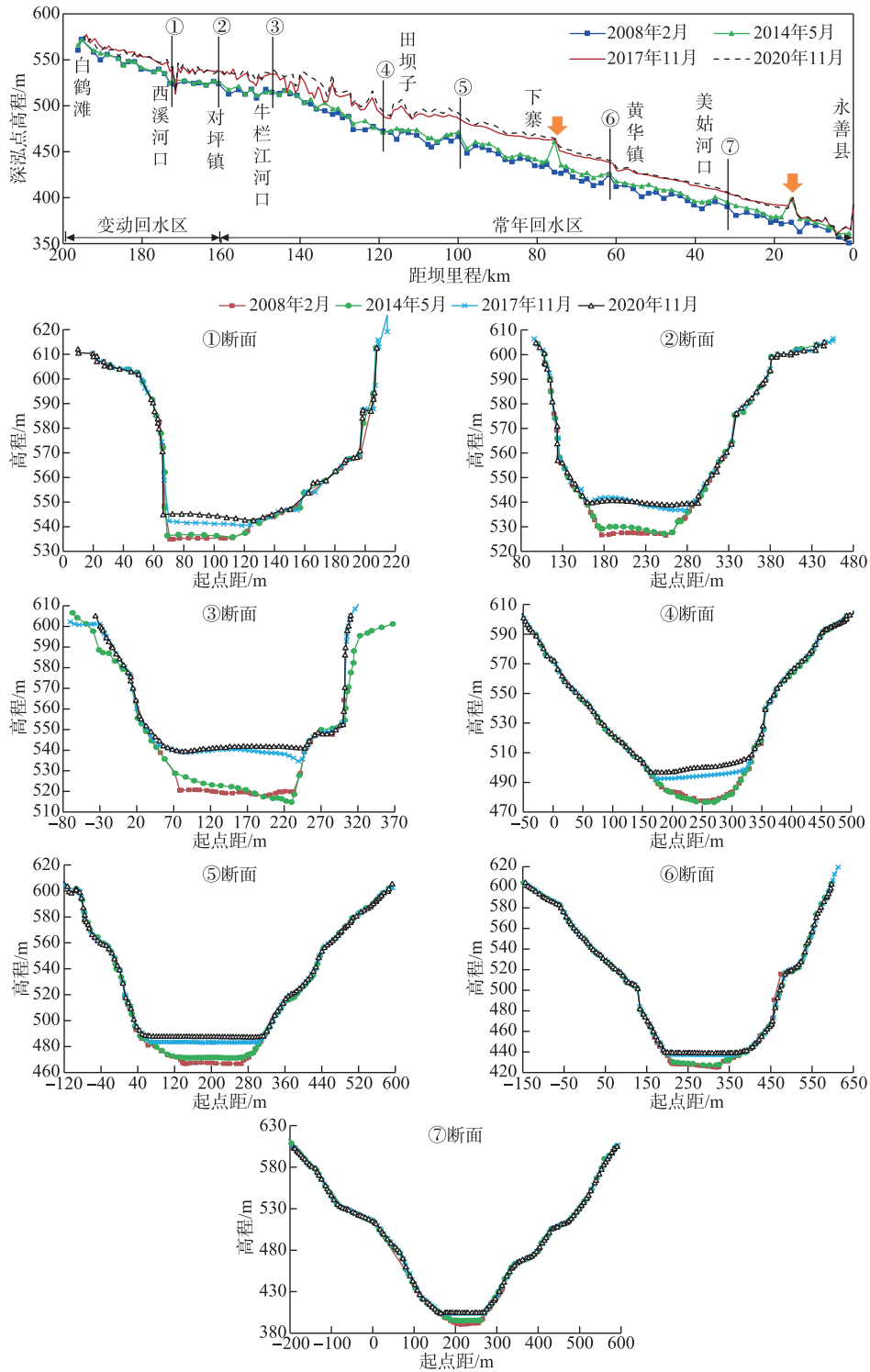


图4 2008—2020年溪洛渡库区干流河道深泓纵剖面和典型横断面变化

Fig.4 Changes of thalweg longitudinal profile and typical cross sections of main stream in Xiluodu Reservoir from 2008 to 2020

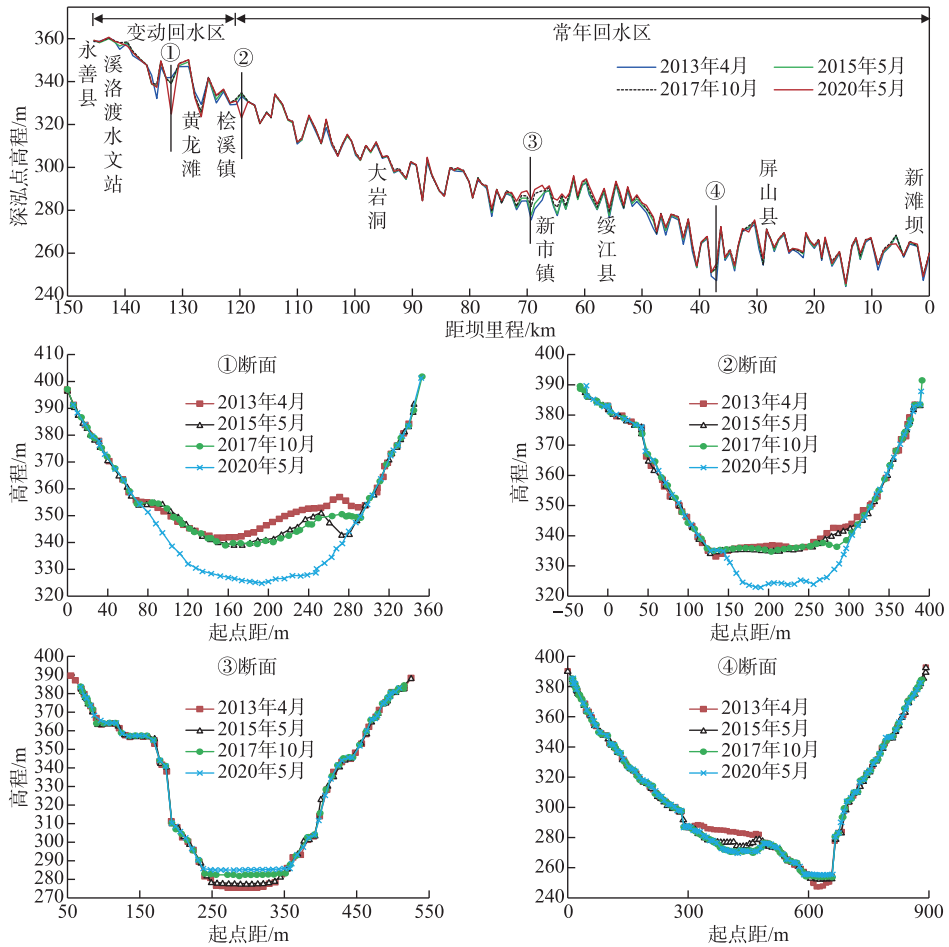


图 5 2013—2020 年向家坝库区干流河道深泓纵剖面 and 典型横断面变化

Fig.5 Changes of thalweg longitudinal profile and typical cross sections of main stream in Xiangjiaba Reservoir from 2013 to 2020

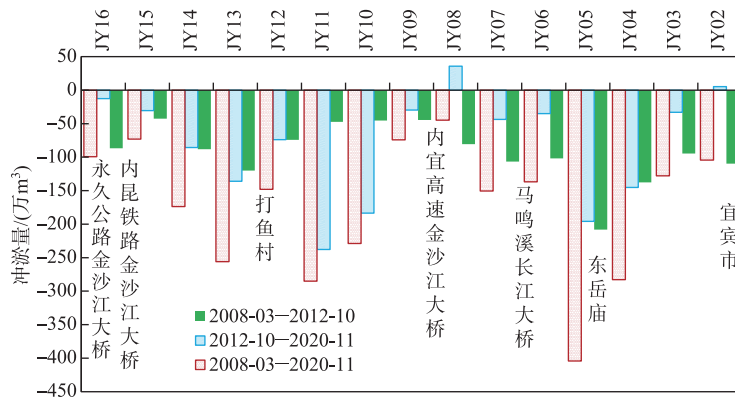


图 6 向家坝坝址至宜宾河段沿程冲淤量分布

Fig.6 Distribution of scouring and silting along the reach from Xiangjiaba Dam to Yibin

3.1.2 纵、横剖面形态变化 向家坝下游至宜宾段的河道冲刷自工程建设阶段就已经显现,然而其本底河床可以冲刷的覆盖沙层十分有限,水库蓄水前冲刷强度较之蓄水后偏大的因素主要与工程建设期的砂石料挖采有关,且挖沙一般集中在断面较低的滩体附近,因此,河床深泓纵剖面因自然冲刷而下切的特征并不明显(图7),主要发生在马鸣溪大桥以下,最大下切幅度约6.3 m,同时还可以看到,坝下游一些高凸的断面深泓点高程基本稳定。坝下游典型断面形态大多稳定,其调整主要受冲刷下切、近岸施工和低滩采砂等影响(图8)。2016年之后,河道禁止采砂,断面的冲淤变幅均较小,尤其是在2020年流域性洪水过后,河床并没有产生冲刷增大的现象,反而略有回淤。可见,向家坝下游河床冲刷也趋于稳定,与三峡水库下游砂卵石河段冲刷接近平衡的历时基本相当^[17]。

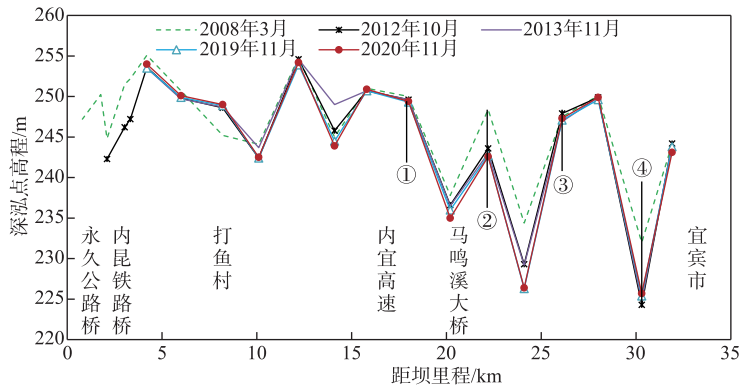


图7 2008—2020年向家坝至宜宾河段深泓纵剖面变化

Fig.7 Changes of longitudinal profile of riverbed thalweg in Xiangjiaba-Yibin river section from 2008 to 2020

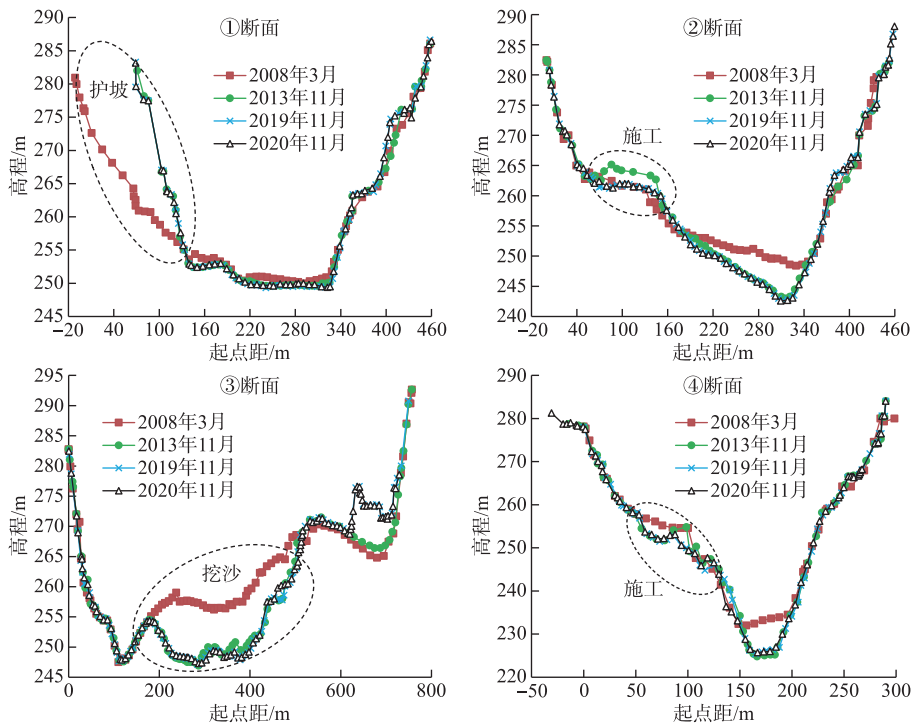


图8 2008—2020年向家坝至宜宾河段典型横断面变化

Fig.8 Changes of typical cross sections in Xiangjiaba-Yibin river section from 2008 to 2020

3.2 重点涉水工程局部冲刷

向家坝工程建设及运行期间,其下游分布有跨江大桥、码头等涉水工程,坝下游河床自 2008 年开始进入持续冲刷状态,有关部门担忧河床冲刷会对既有的涉水建筑物安全造成不利影响,尤其是可能加大跨江大桥桥墩的局部冲刷^[6]。其中,永久公路金沙江大桥、内昆铁路金沙江大桥、内宜高速金沙江大桥和马鸣溪大桥分别位于坝下游约 1.74、3.3、16.7 和 20.4 km 处,深水码头和煤码头分别位于内昆铁路金沙江大桥上下游附近。

本次分析利用水下地形观测资料,在 4 座跨江大桥附近套汇了断面冲淤变化如图 9,2008 年以来,4 座桥梁桥墩所在断面的形态基本稳定,桥位附近的冲刷主要发生在蓄水前,蓄水后工程附近河床冲刷下切幅度较小。具体来看,2012 年 3 月—2020 年 4 月,永久公路桥附近河槽主要表现为左淤右冲,桥墩位置最大冲深为 4 m;内昆铁路桥附近河槽主要表现为中部冲刷,两侧淤积,桥墩位置冲刷不明显,桥墩位置最大冲深为 1 m;内宜高速公路桥附近主河槽冲刷,边滩淤积,向家坝蓄水后桥墩位置冲刷小于蓄水前,桥墩局部最大冲深为 3 m;马鸣溪大桥附近主河槽冲刷,边滩淤积,向家坝蓄水后桥墩位置冲刷大于蓄水前,桥墩局部最大冲深为 1 m。深水码头和煤码头附近岸线基本稳定,深水码头前沿未见明显冲刷坑,煤码头前沿有明显的冲刷坑,但没有进一步发展的趋势。整体上,近坝河段主要分布的重点涉水建筑物附近均有一定幅度的冲刷下切,但并未发展至超过预期,且冲刷主要发生在工程建设期,向家坝正式运行后,建筑物附近的冲刷发展减缓且趋于稳定。

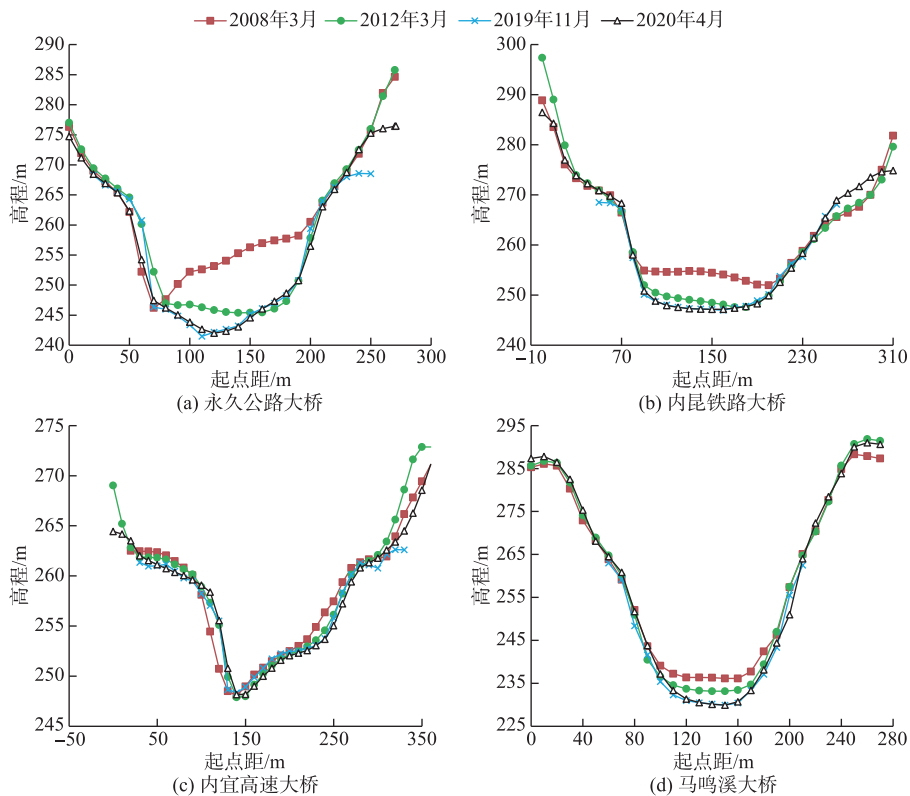


图 9 向家坝坝下游重要涉水建筑物附近断面冲淤变化

Fig.9 Changes of sections near important wading structures at the downstream of Xiangjiaba Dam

3.3 枯水位变化

河床边界是控制枯水位的重要因素,水库下游河床冲刷下切带来枯水位下降是普遍性的问题,但不同的河道形态,枯水位对于河床冲刷下切的响应程度存在差异,尤其是山区河流,其枯水位大多受高凸的卡口

段控制,一些低洼段淤积物的冲刷对枯水位影响并不大^[18]。结合上文分析来看,向家坝下游河床虽然出现了普遍性的冲刷,但一些深泓高凸的区域高程相对稳定,深泓的下切主要发生在距坝 20 km 下游高程相对偏低的区域内,因此,截止 2020 年,向家坝下游同流量枯水位下降幅度并不大。

表 6 2012—2020 年向家坝下游
实测枯水位及最小流量变化统计

Tab.6 Changes in low water level and minimum
flow at the downstream of Xiangjiaba
from 2012 to 2020

时间	对应水位/m			最小流量/ (m ³ /s)	最低 水位/m
	2000 m ³ /s	3000 m ³ /s	4000 m ³ /s		
2012 年	266.71	268.11	269.42	941	265.10
2013 年	266.65	268.22	269.65	1110	265.73
2014 年	266.66	268.03	269.13	1240	265.66
2015 年	266.73	267.93	269.15	1430	266.01
2016 年	266.58	267.8	268.88	1430	265.98
2017 年	266.53	267.72	268.82	1610	266.07
2018 年	266.33	267.68	268.8	1590	266.04
2019 年	266.32	267.74	268.62	1580	266.03
2020 年	266.28	267.39	268.48	1850	266.00
2012—2020 年变幅	-0.43	-0.72	-0.94	909	0.90

以位于坝址下游约 2 km 的向家坝水文站为对象,统计其中低水期不同流量下历年水位以及最小流量和最低水位如表 6,2012—2020 年间,2000 m³/s 下,向家坝站枯水位累计下降约 0.43 m,且 2015 年前相对稳定,2015 年之后开始下降。随着流量的增大,水位降幅也有所增加,3000 m³/s 下,向家坝站枯水位累计下降约 0.72 m,4000 m³/s 下,向家坝站枯水位累计下降约 0.94 m,其主要原因在于,枯水位主要受深槽形态的影响,向家坝下游深泓纵剖面存在高凸的节点,且年际间基本稳定,对枯水位下降幅度有一定的控制作用。相反地,下游河道砂石料开采主要发生在中低滩段,是以中水的水位下降幅度大于低水,这与三峡水库下游近坝砂卵石河段水位下降规律基本一致^[19]。同时还应注意到,为了缓解枯水位下降及电站日调节对于坝下游通航的影响,向家坝电站自 2012 年起不断加大最小下泄流量,自 2017 年,各年最小下泄流量均在 1500 m³/s 以上,至 2020 年,最小下泄流量增加 909 m³/s,与之相关的年最低水位也有所抬升,累计增幅约 0.90 m。可见,随着向

家坝下游河床冲刷强度逐渐减弱,加之电站对枯水期流量有一定的调控作用,向家坝下游枯水位继续大幅下降的可能性较小。

3.4 床沙组化分析

向家坝坝下至宜宾河段以卵石河床为主,间有沙质河床。自坝址至宜宾河段内布置有 15 个床沙取样断面,2020 年汛后的取样结果显示,只有距坝较远的两个断面(JY01 和 JY04 分别距坝 31.9 和 26.1 km)取到了 $d < 2$ mm 的泥沙,其他断面取到的样均为砾卵石,最小粒径在 4 mm 以上。进一步对比向家坝水库蓄水以来的床沙中数粒径和级配变化来看(表 7,图 10),水库蓄水后,向家坝下游河床粗化的现象明显。蓄水初期 2012、2013 年汛后的床沙取样结果显示,有 3 个断面河床含 $d < 2$ mm 的泥沙,床沙中数粒径在 1 mm 以下,至

表 7 2012—2021 年向家坝下游床沙中数粒径变化

Tab.7 Change of median particle size of bed sand in the downstream of Xiangjiaba from 2012 to 2021

断面编号	距坝里程/km	2012 年 10 月	2013 年 10 月	2017 年 10 月	2021 年 11 月
JY01	31.9	0.42	0.447	0.698	111
JY03	28.0	174	146	155	171
JY04	26.1	—	—	0.411	90.6
JY07	20.0	—	0.56	7.06	—
JY09	15.8	146	177	257	263
JY10	14.1	—	—	0.49	176
JY11	12.2	78.6	—	—	167
JY12	10.1	—	—	0.839	199
JY13	8.2	91.3	140	44.2	50.7
JY14	6.0	—	—	101	139
JY15	4.2	—	0.336	18	133

2017年,仍然是在3断面取到了泥沙,且中数粒径相较于蓄水初期以增大为主,至2021年汛后,在取到样的10个断面中,中数粒径最小的为50.7mm,具有砾石河床的特征,2017—2021年,取样断面的中数粒径普遍增大,宜宾附近的JY01断面逐渐由沙夹卵石河床粗化为卵石夹沙河床, $d < 1$ mm的沙量百分数由2012年的98.7%下降至2021年的0.9%。床沙粗化既是坝下游河床冲刷的产物,同时也是坝下游河床减缓的重要控制因素之一,从目前的河床组成可以判断,向家坝坝下游至宜宾河段冲刷进一步发展的可能性较小。

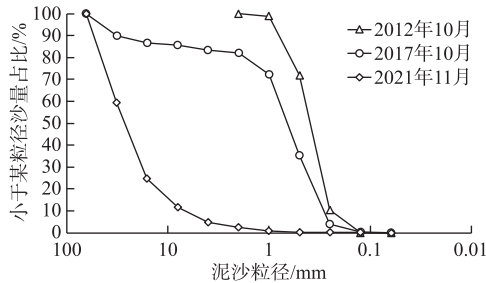


图10 向家坝下游宜宾附近河床床沙级配变化

Fig.10 Variation of bed sand gradation in the riverbed near Yibin at the downstream of Xiangjiaba

4 主要结论

1) 2013—2020年,金沙江下游溪洛渡和向家坝水库的排沙比分别为2.64%和22.2%,均小于预期。依据断面法计算,自乌东德、溪洛渡和向家坝电站成库至2020年底,共拦截泥沙约5.98亿 m^3 ,溪洛渡库区淤积量占比达92.5%。泥沙主要淤积在常年回水区的干流河道内,以死库容淤积为主,溪洛渡有效库容侵占比例仅1.3%,向家坝有效库容内未发生淤积。主河槽平铺式淤高,溪洛渡库区深泓纵剖面平均淤高15m以上。向家坝库区采砂活动频繁,造成库区局部区域断面形态改变。

2) 溪洛渡和向家坝水库库区床沙沿程分选特征明显,越靠近坝前,床沙中数粒径越小、 $d < 0.008$ mm的细颗粒泥沙含量越大。溪洛渡库区坝前约80km库区内,淤积物中数粒径多小于0.008mm, $d < 0.008$ mm的细颗粒泥沙沙量占比多超过50%,且床沙逐步细化。向家坝库区坝前约70km库区内,自上而下 $d < 0.008$ mm的细颗粒泥沙沙量占比由31.7%递增至56.3%。印证了细颗粒泥沙在水库一定范围内大量沉积的事实。

3) 2008年3月—2020年11月向家坝下游至宜宾河段整体冲刷,总冲刷量为2590万 m^3 (含河道采砂的影响),且蓄水前冲刷强度大于蓄水后。2016年后禁止采砂,河槽年均冲刷量从2012—2016年的262万 m^3 下降至2017—2019年的103万 m^3 ,减幅为60.7%。水库蓄水后坝下游永久公路大桥等涉水桥梁附近河道断面形态稳定,桥墩附近最大冲深在4m以内,重点建筑物局部冲刷强度未超过预期且逐步减缓。

4) 向家坝水库蓄水后,下游河道深泓冲刷下切主要集中低洼段,高凸段基本保持稳定,对枯水位发挥较强的卡口作用,枯水位未大幅下降,2000 m^3/s 下枯水位累计降幅约0.43m。砂石料开采主要发生在中低滩段,中水位下降幅度大于低水,4000 m^3/s 对应水位下降约0.94m。2012年起向家坝电站不断加大最小下泄流量,加泄流量对枯水位抬升幅度大于河床冲刷的影响。随着下游河床冲刷强度逐渐减弱,加之电站枯水期的调控作用,枯水位继续大幅下降的可能性较小。至2021年,向家坝下游粗化明显,河床组成具有砾卵石特征,将进一步限制河床的冲刷发展。

5 参考文献

- [1] Xu QX, Shi GY, Chen ZF. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River. *Advance in Water Science*, 2004, **15**(4): 420-426. [许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析. 水科学进展, 2004, **15**(4): 420-426.]
- [2] 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.]
- [3] Liu H, Chen QB, Wang KQ et al. Soil erosion properties in typical section of dry-hot valley of Jinsha Basin. *Journal of Soil and Water Con-*

- ervation, 2012, 26(5): 28-33. [刘海, 陈奇伯, 王克勤等. 金沙江干热河谷典型区段水土流失特征. 水土保持学报, 2012, 26(5): 28-33.]
- [4] Zhu LL, Chen CH, Zhang JS. Study on variations of runoff and sediment and effect to the lower Jinsha River. *Journal of Sediment Research*, 2016, (5): 20-27. [朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究. 泥沙研究, 2016, (5): 20-27.]
- [5] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 金沙江溪洛渡水电站可行性研究报告. 成都, 2005.
- [6] 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院. 金沙江向家坝水电站可行性研究报告. 长沙, 2006.
- [7] Jin XP, Xu QX. Sediment issues in joint dispatch of reservoir group in upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 1-8, 31. [金兴平, 许全喜. 长江上游水库群联合调度中的泥沙问题. 人民长江, 2018, 49(3): 1-8, 31.]
- [8] Zhu LL, Li SW, Dong BJ *et al.* Effect of Baige landslide-dammed lake on runoff and sediment of the Jinsha River and operation of cascade reservoirs. *J Lake Sci*, 2020, 32(4): 1165-1176. DOI: 10.18307/2020.0423. [朱玲玲, 李圣伟, 董炳江等. 白格堰塞湖对金沙江水沙及梯级水库运行的影响. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1165-1176.]
- [9] Wang YG, Shi HL, Liu X. Influence of sediment trapping in reservoirs on runoff and sediment discharge variations in Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 467-476. [王延贵, 史红玲, 刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响. 水科学进展, 2014, 25(4): 467-476.]
- [10] Zhu LL, Xu QX, Dong BJ *et al.* Study on the effect and influencing factors of sand discharge of Xiluodu Reservoir in the Lower Jinsha River. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 544-555. [朱玲玲, 许全喜, 董炳江等. 金沙江下游溪洛渡水库排沙效果及影响因素. 水科学进展, 2021, 32(4): 544-555.]
- [11] 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. DOI: 10.11988/ckyyb.20160007. [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.]
- [12] Liu SW, Zhang XF, Lv PY *et al.* Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention. *J Lake Sci*, 2019, 31(3): 656-666. DOI: 10.18307/2019.0305. [刘尚武, 张小峰, 吕平毓等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应. 湖泊科学, 2019, 31(3): 656-666.]
- [13] Pan Z, Chen ZX, Fan XJ *et al.* Influence of downstream river channel change on operation of Xiangjiaba Hydropower Station. *Yangtze River*, 2020, 51(S2): 320-324. [潘增, 陈忠贤, 范向军等. 向家坝水电站下游河道变化对枢纽运行影响研究. 人民长江, 2020, 51(S2): 320-324.]
- [14] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告. 武汉, 2015.
- [15] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究报告. 杭州, 2010.
- [16] Zhou JJ, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, 30(4): 865-880. DOI: 10.18307/2018.0401. [周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策. 湖泊科学, 2018, 30(4): 865-880.]
- [17] Zhou MR, Xia JQ, Deng SS *et al.* Responses of bankfull channel geometry to variation of flow and sediment in the Yizhi Reach after the TGP operation. *Journal of Sediment Research*, 2016, (2): 14-19. [周美蓉, 夏军强, 邓珊珊等. 三峡工程运用后宜枝河段平滩河槽形态调整对来水来沙的响应. 泥沙研究, 2016, (2): 14-19.]
- [18] Ge H, Li YT, Zhu LL *et al.* Analysis of stability mechanism of Yichang low-water level during TGP's initial impoundment period. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2009, 41(1): 47-53. [葛华, 李义天, 朱玲玲等. 三峡蓄水初期宜昌枯水位稳定机理分析. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(1): 47-53.]
- [19] Zhu LL, Yang X, Xu QX. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1184-1194. DOI: 10.11821/dlxb201707005. [朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, 72(7): 1184-1194.]