J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0242

金沙江下游白鹤滩水库运行初期泥沙淤积特征*

路子岩[1,2]，陆　琴[1,2]，邓安军[1,2]，陈翠华[3]，冯志毅[1,2]
（1：中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048）
（2：中国水利水电科学研究院水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室，北京 100048）
（3：中国长江电力股份有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室，湖北宜昌 443000）

摘要：白鹤滩水电站是金沙江下游干流梯级水电站的第二级，库区滑坡、泥石流频发，产沙量较大，水库蓄水后，大量泥沙于库区淤积，淤损水库库容，影响水库综合效益的发挥。基于白鹤滩水库实测断面资料，分析了水库蓄水前后泥沙冲淤时空演变特征。结果表明：蓄水前（2013-2021 年），干流河道泥沙淤积过程为“先淤后冲”，支流河道除黑水河发生累积性淤积外，其他四条支流基本维持冲淤平衡状态；蓄水后（2021-2023 年），库区共淤积泥沙 8279.6 万 m^3，干支流淤积占比分别为 75.2%和 24.8%，支流以黑水河和小江淤积最多。从年际分布看，受高坝大库对泥沙密实沉降作用的影响，干支流泥沙淤积主要集中在成库后的第一年，占淤积总量的 71.8%，随后淤积量逐年减少，并在 2023 年出现“伪冲刷”现象。从年内分布看，干支流河道在各年汛期均呈淤积状态，非汛期以冲刷为主。从淤积纵向分布看，变动回水区持续微冲，泥沙主要淤积在小江河口至以礼河口河段；泥沙颗粒沿程细化现象显著，越靠近坝前，中值粒径越小。从不同特征库容淤积分布看，泥沙主要淤积在死水位以下，死库容淤损 1.14%；库区死水位~正常蓄水位范围以冲刷为主，调节库容增加 0.14%。从纵剖面形态看，受区间来沙影响，普渡河口以下的常年回水区深泓抬升较为均匀，不同河段平均抬升高度在 1.8~2.3m 之间。从支流淤积看，普渡河为带状淤积，以礼河、小江和大桥河河口段表现为三角洲淤积，黑水河受干流泥沙倒灌影响大，存在形成拦门沙的风险。
关键词：淤积量；淤积时空分布；河道形态调整；白鹤滩水电站

Characteristics of sediment deposition in Baihetan Reservoir at the early stage of operation, lower reaches of the Jinshan River

Lu ziyan[1,2],Lu qin[1,2],Deng anjun[1,2],Chen cuihua[3]&Feng zhiyi[1,2]
(1: State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R.China)
(2: Key Laboratory of Sediment Science and Northern River Training, Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R.China)
(3: Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze River and Hydropower Science, China Yangtze Power Co.)

Abstract： The Baihetan Hydropower Station, as the second cascade in the lower reaches of the Jinsha River, is situated in a reservoir area prone to frequent landslides and debris flows, resulting in substantial sediment yield. Following reservoir impoundment, significant sedimentation is expected to accumulate within the reservoir, potentially compromising its storage capacity and impairing the comprehensive benefits of the hydropower project. Based on measured cross-sectional data from Baihetan Reservoir, this study analyzes the spatiotemporal evolution of sedimentation before and after impoundment. The results indicate that: prior to impoundment (2013–2021), the main river channel exhibited a sedimentation pattern characterized by

* 2025-03-15 收稿；2025-07-02 收修改稿。
国家自然科学基金项目（U2040217,U2340223）联合资助。
**通讯作者; E-mail：luqin@iwhr.com

"initial deposition followed by erosion," while four major tributaries largely maintained a balance between sedimentation and erosion, with the exception of Heishui River, which experienced cumulative deposition. After impoundment (2021–2023), a total of 82.796 million m³ of sediment was deposited in the reservoir. The mainstem and tributaries accounted for 75.2% and 24.8% of the total deposition, respectively, with the most pronounced sedimentation occurring in Heishui River and Xiaojiang River. Inter-annually, influenced by the high-dam effect on sediment density and deposition, sedimentation in the mainstem and tributaries was predominantly concentrated in the first year after impoundment, contributing 71.8% of the total deposition. Sedimentation decreased annually thereafter, with a "pseudo-erosion" phenomenon observed in 2023. Intra-annually, both the main river and tributaries experienced deposition during flood seasons and erosion during non-flood seasons. Longitudinally, the backwater area continued to undergo slight erosion, while major deposition occurred between the confluences of Xiaojiang River and Yili River. A significant fining trend in sediment particle size was observed along the flow path, with median grain size decreasing progressively closer to the dam. In terms of reservoir capacity distribution, sedimentation occurred primarily below the dead water level, resulting in a 1.14% reduction in dead storage. In contrast, the zone between dead water level and normal storage level experienced net erosion, leading to a 0.14% increase in regulating storage. From a longitudinal profile perspective, influenced by upstream sediment sources, the perennial backwater area below the Pudu River confluence exhibited relatively uniform uplift, with average bed elevation increases ranging from 1.8 m to 2.3 m across different river segments. Regarding tributary sedimentation patterns: Pudu River displayed banded deposition; the estuaries of Yili River, Xiaojiang River, and Daqiao River exhibited delta-type sedimentation; while Heishui River, significantly affected by backwater sedimentation from the mainstem, faces a potential risk of sediment bar formation.

Keywords: The amount of siltation; Spatial and temporal distribution of sedimentation; River morphology adjustment; Baihetan hydropower Station

白鹤滩水电站是金沙江下游干流梯级水电站的第二级，其装机容量位居世界第二，是我国"西电东送"中部通道的源头工程之一，主要用于发电，兼具防洪、拦沙、航运以及改善下游航运条件等多种功能[1]。工程于 2015 年 11 月实现大江截流，2016 年 6 月围堰投入运行，2021 年 4 月开始蓄水，同年 6 月投产发电，2022 年 12 月全部机组完成发电。水库蓄水后，水位壅高，大量泥沙在库区落淤，淤损水库库容，影响水库综合效益的发挥[2][3]。

水库泥沙淤积特征与入库水沙条件和水库运行方式等密切相关，然而由于水库地处不同流域，来水来沙条件差异显著，加之水库运行方式各异，不同区域水库的泥沙淤积呈现不同特征[4][5]。三峡水库自 2003 年蓄水以来，上游水库陆续建成，入库沙量大幅减少，使得库区泥沙淤积情势较初步设计阶段显著减轻，泥沙淤积进程不断减缓[6]-[7]，甚至在个别枯水年份（如 2022 年），出现常年回水区"伪冲刷"现象[8]，但在输沙量减少的情势下，仍有洪水年（如 2020 年）造成汛期水库坝前平均水位抬升，滞洪时间延长，导致库区淤积量的增加[7],[9]。小浪底水库地处黄河中游下端，由于上游来沙量大，运用初期又以拦沙为主，库区泥沙淤积量较大，形成了典型的三角洲淤积，并且黄河水沙关系复杂，水多沙少、水少沙多的来水来沙情况交替出现，造成库区淤积量年际变化较大[10][11]。溪洛渡水库建成以来，金沙江中游干流、雅砻江支流水库群相继投产运行，拦沙效应显著[12][13]，库区淤积量年际变化呈减少趋势[14]。然而，受金沙江中游梯级水电站拦沙作用的影响，白鹤滩水库建成时上游来沙量已经很少，但库区岸壁条件差，侵蚀强度大[15]，未控支流多，未控区间产沙量大[16]，是金沙江下游产沙强度最大的区段[17]，加之地震、滑坡等地质灾害频繁发生，会导致突发性的产沙输沙现象，使得库区泥沙淤积规律较为特殊，因此有必要对白鹤滩水库近年的泥沙淤积特征展开进一步研究，以期为金沙江下游梯级水库群的优化调度提供科学依据。

1 研究区域和工程概况

白鹤滩水电站坝址距上游乌东德水电站约 182 km，距下游溪洛渡水电站约 195 km，控制流域面积 43.03 万 km^2，区间流域面积 2.42 万 km^2。坝址年均径流量 1312 亿 m^3，年均悬移质输沙量为 1.85 亿 t[1]。

白鹤滩水电站设计死水位 765 m，汛期限制水位 785 m，正常蓄水位 825 m，水电站坝前水位按照“765-785-825 m”的方式调度运行。水库总库容为 206.27 亿 m^3，正常蓄水位以下的库容为 190.06 亿 m^3，调节库容为 104.36 亿 m^3，防洪库容 75.0 亿 m^3，死库容 85.7 亿 m^3，防洪库容具有年调节能力。水库回水长度为 182 km，常年回水区从白鹤滩坝址到老君滩，全长 145 km；变动回水区从老君滩至乌东德坝址，全长约 37 km。库区水系发达，支流较多，平面形态呈分支状河道型，右岸有以礼河、小江、普渡河等支流汇入，左岸有黑水河、大桥河等支流汇入。研究区域如图 1 所示。

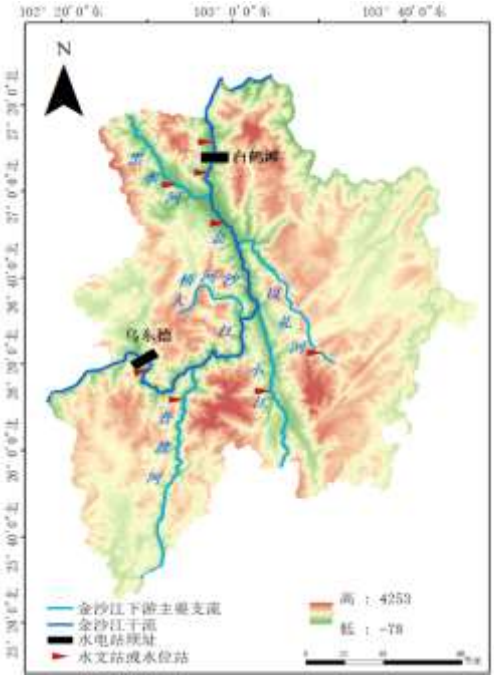

图 1 研究区域示意

Fig. 1 Sketch diagram of the study area

为监测白鹤滩水库干流库区的地形变化，自坝址至乌东德水电站共布设 207 个固定断面（JC002~JC208），支流因受回水影响的差异，布设断面在 5~30 个断面不等，5 条支流共计布设 77 个断面。根据断面原型观测资料，采用断面法[18]计算 2013.11—2023.10 水库干支流河道冲淤量。由于水库蓄水显著影响泥沙输移过程，故本文以 2021 年 3 月为节点，将研究时段划分为 2013.11—2021.3 和 2021.3—2023.10 两个时段，定量分析白鹤滩水库蓄水前后泥沙冲淤特征。

2 淤积量及发展进程

2.1 年际淤积发展过程

白鹤滩水库蓄水前后干、支流河道淤积量如图 2 所示。白鹤滩水库蓄水前，2013.11-2021.03 干流河道泥沙淤积过程为“先淤后冲”，支流除黑水河发生累积性淤积外，其余四条支流基本维持冲淤平衡。其中 2013.11-2016.11 受上游乌东德区间冲刷泥沙补给及白鹤滩区间来沙影响，干流河道累积淤积泥沙 825.7 万 m^3 [15]；2016.11-2021.03 由于上游乌东德水库在此期间建设运行，造成下游白鹤滩区间干流河道发生大幅冲刷，冲刷量达 3398.1 万 m^3；支流以礼河、小江、普渡河和大桥河基本维持冲淤平衡态势，累积淤积量分别为 10.2 万 m^3、-22.2 万 m^3、9.4 万 m^3 和-15.5 万 m^3；黑水河淤积泥沙 237.4 万 m^3。

白鹤滩水库蓄水后，2021.03-2023.10 正常蓄水位下干支流共淤积泥沙 8279.6 万 m^3，干支流分别淤积泥沙 6245.6 万 m^3 和 2034.0 万 m^3，分别占库区泥沙淤积总量的 75.4%和 24.6%，支流淤积量占比较大。支流以小江和黑水河淤积最多，分别淤积 769.9 万 m^3 和 1112.6 万 m^3，分别占支流泥沙淤积总量的 37.9%和 54.7%；大桥河淤积最少，仅淤积泥沙 11.6 万 m^3，占支流泥沙淤积总量的 0.57%。库区干支流泥沙淤积主要集中在成库后的第一年，占总淤积量的 71.8%，随后淤积量有减少趋势，并在 2023 年发生微冲。这主要由于白鹤滩水库蓄水初期，水位抬高，汛期淤积的泥沙来不及密实沉降，导致断面法计算的淤积量出现“虚高”，再经过较长时期的低流速、大水深的静态高压环境后，泥沙颗粒不断密实，在蓄水后的第二年淤积量大幅下降，甚至于 2023 年出现“伪冲刷”现象。

受水库蓄水作用影响，支流淤积过程表现各异。黑水河距离坝址较近，蓄水前两年河口段年均淤积泥沙 603.1 万 m^3，年均淤积量最大，随后转为冲刷；以礼河存在明显的集中淤积过程，2021.3-2021.11 的淤积量超过整个统计时段的淤积量；小江系多沙河流，产沙量大，淤积情况与干流较为相似，蓄水后河道发生累积淤积，年均淤积泥沙 256.6 万 m^3；大桥河冲淤量相对较少，总体呈微淤状态；普渡河蓄水前两年发

生淤积，年均淤积泥沙 60.5 万 m³，第三年调整为冲刷。

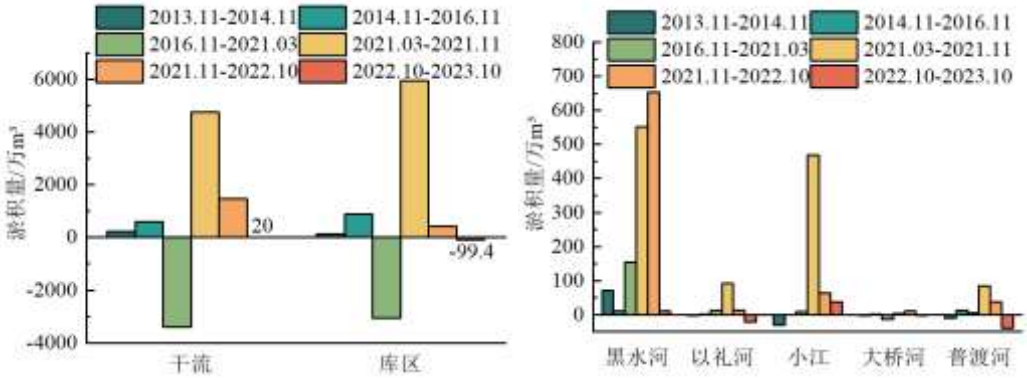

图 2 白鹤滩水库干支流河道淤积量

Fig 2 sediment content of main and branch streams in Baihetan reservoir

2.2 年内冲淤分布

正常蓄水位下白鹤滩库区干支流河道年内冲淤情况如图 3、4 所示。水库蓄水以来，2021-2023 年各年汛期库区干流河道均处于淤积状态，非汛期以冲刷为主，且冲淤主要发生在常年回水区。干流河道汛期淤积量逐年下降，由 2021 年的 4745.1 万 m³ 减小至 2023 年 2067.9 万 m³，减幅为 56.4%；非汛期冲刷量有上升的趋势，由 2022 年的 1249.0 万 m³ 增大至 2023 年的 2047.4 万 m³，增幅为 63.9%。支流以礼河、小江和普渡河年内冲淤发展过程与干流基本一致，表现为“汛期淤积，非汛期冲刷”；黑水河在汛期持续淤积，成库后的第二个非汛期才由淤积调整为冲刷。

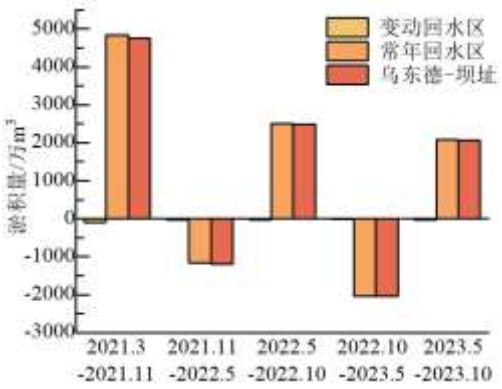

图 3 正常蓄水位下白鹤滩库区干流河道年内冲淤量统计

Fig. 3 Statistics on scour and siltation volume of the main stream channel of Baihetan reservoir under normal storage level

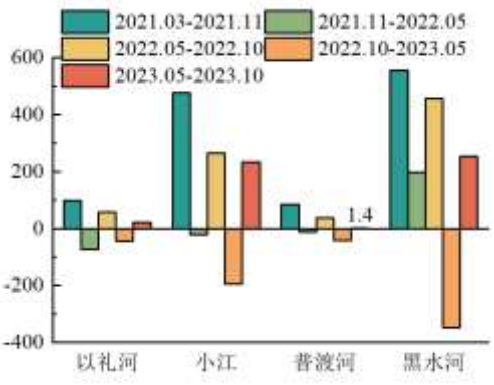

图 4 正常蓄水位下白鹤滩水库支流河道年内泥沙冲淤量统计

Fig. 4 Statistics on scour and siltation volume in tributary channels of Baihetan reservoir under normal storage level

3 淤积空间分布

3.1 干流淤积沿程分布

基于断面法计算的 2013 年至 2023 年白鹤滩水库干流河道沿程淤积量分布情况如图 5、6 所示。白鹤滩水库蓄水前，2013.11-2021.3 变动回水区和常年回水区所在河道总体上均发生冲刷，冲刷量分别为 155.2

万 m³ 和 2417.2 万 m³，占比分别为 6.0%和 94.0%。其中 2013.11-2014.11 干流处于天然河道状态，基本维持冲淤平衡；2014.11-2016.11 上游乌东德水电站在此期间开始施工，造成白鹤滩干流变动回水区河段集中淤积，淤积量占相应年份总淤积量的 69.2%；2016.11-2021.3 乌东德水库建设运行期间，考虑其围堰和水库运用拦沙影响，从乌东德坝址处到白鹤滩坝址上游约 30 km 的河段发生长距离冲刷，冲刷量达 3398.1 万 m³ 。

蓄水后，2021.3-2023.10 变动回水区共冲刷泥沙 133.0 万 m³，常年回水区共淤积泥沙 6378.5 万 m³ 。其中 2021.03-2021.11 变动回水区冲刷泥沙 100.5 万 m³，占变动回水区总冲刷量的 75.6%，常年回水区淤积泥沙 4845.6 万 m³，占常年回水区总淤积量的 76.0%，冲刷量和淤积量占比均为各时段最多；2021.11-2022.10 受泥沙密实沉降作用影响，常年回水区淤积量减少至 1487.1 万 m³，占常年回水区总淤积量的 23.3%，变动回水区冲刷 6.7 万 m³，占变动回水区总冲刷量的 5.0%；2022.10-2023.10 常年回水区仅淤积泥沙 45.8 万 m³，仅占常年回水区总淤积量的 0.7%，变动回水区冲刷 25.8 万 m³，占变动回水区总冲刷量的 19.4%。

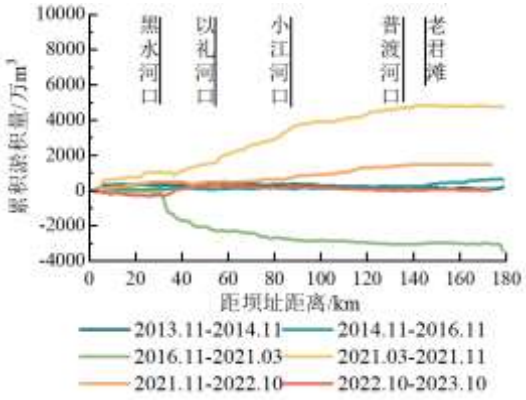

图 5 白鹤滩库区干流河段沿程淤积量变化

Fig. 5 Changes in siltation along the mainstem section of Baihetan reservoir area

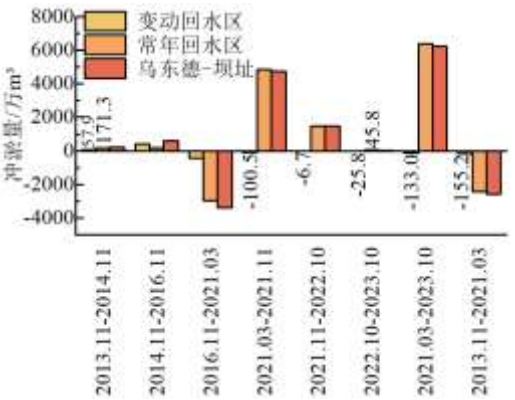

图 6 白鹤滩库区干流河段淤积量分布

Fig. 6 Distribution of siltation volume in the main stream section of Baihetan reservoir area

干流库区冲淤强度沿程变化如图 7 所示。蓄水以来，干流库区沿程冲淤强度呈现出“中间大，两端小”的特点，变动回水区持续微冲，泥沙主要淤积在常年回水区小江河口至以礼河口河段，但统计时段内各年份淤积重心不同。其中 2021.3-2021.11 泥沙主要淤积在小江河口至以礼河口河段，淤积强度达 57.8 万 m³ /km；2021.11-2022.10 泥沙主要淤积在普渡河口至小江河口以及黑水河口至坝址河段，淤积强度分别为 14.8 m³ /km 和 16.3 m³ /km；2022.10-2023.10 泥沙主要淤积在以礼河口至黑水河口河段，其余河段普遍有冲刷情况，其中黑水河口至坝址河段冲刷强度达到 8.9 万 m³ /km。

3.2 不同特征库容淤积分布

特征水位下库区干支流河道淤积量如表 1 所示。白鹤滩库区死水位以下淤积泥沙 9728.0 万 m³，淤损死库容 1.14%，死水位~正常蓄水位范围内冲刷泥沙 1448.4 万 m³，增加调节库容 0.14%。其中干流库区泥沙淤积主要集中在死水位以下；支流黑水河、以礼河和小江距离坝址较近，受干流蓄水顶托作用较大，泥沙在死水位以下的淤积占比超过 50%；大桥河和普渡河距坝较远，在调节库容内淤积较多。

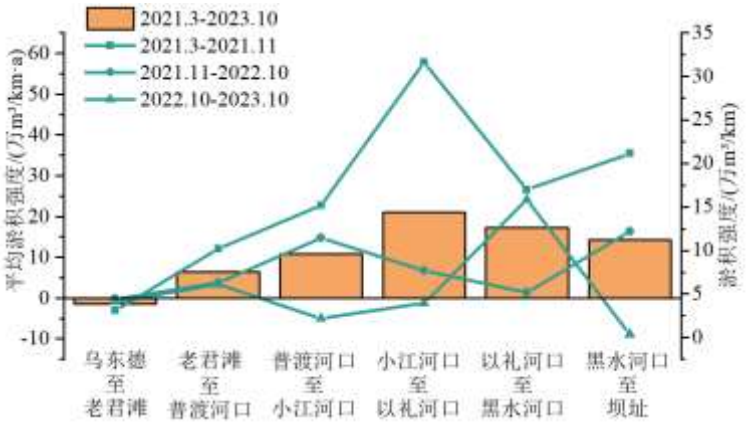

图 7 正常蓄水位下白鹤滩干流库区河道淤积强度

Fig. 7 Intensity of siltation in the main stream of Baihetan reservoir under normal water storage level

表 1 蓄水后特征水位条件下库区干支流泥沙淤积量 单位：万 m^3

Tab.1 Sediment deposition in dry and tributary streams in the reservoir area under the characteristic water level condition after impoundment unit：10^4m^3

	干流	黑水河	以礼河	小江	大桥河	普渡河	库区
死水位 765m	8227.3	957.9	121.3	389.6	4.8	27.1	9728.0
汛限水位 785m	7759.8	1056.1	108	705.1	10.8	97.3	9737.1
正常蓄水位 825m	6245.6	1112.6	59.6	769.9	11.6	80.3	8279.6

3.3 淤积物组成特征

2022-2023 年白鹤滩库区干流河道实测床沙资料如表 2 所示。蓄水后，由于水动力条件发生变化，白鹤滩库区干流床沙中值粒径沿程逐渐变细，水流分选现象显著。由于坝下游清水冲刷造成床沙颗粒不断粗化，距离坝址 140 km 以上的干流河段床沙粒径 D<8 μm 的比例不足 1%，而距坝址 100 km 以内的河道沙量占比接近 50%，距坝 75 km 范围内床沙的中值粒径多数小于 8 μm，且床沙粒径 D<8 μm 的沙量百分数沿程增大。从年际对比来看，大多数断面随着淤积的发生，D<8 μm 粒径组占比呈增长趋势，最大增幅达 25.0%。细颗粒含量大的泥沙级配，比表面积大、吸附点位多，增强了对水中磷等元素的吸附速率和吸附量[19]。因此，白鹤滩水库拦截的细颗粒泥沙可能通过增强污染物吸附-滞留效应，对库区水体营养盐迁移转化、藻类群落结构乃至底栖生态系统产生重要影响[20][21]。

4 河道形态调整

4.1 干流河道纵剖面形态调整

白鹤滩水库干流深泓纵剖面变化情况如图 8 所示。库区深泓纵剖面形态呈锯齿形，水库蓄水前，2013.11-2021.3 河道处于天然状态，干流深泓高程平均抬升仅 0.16 m；蓄水后，2021.3-2023.10 干流库区深泓点平均抬升 1.38 m，其中变动回水区平均下切 0.43 m，常年回水区平均抬升 1.90 m。受库区区间坡面产沙影响，普渡河口以下的干流河段抬升较为均匀，各河段平均抬升厚度在 1.77~2.34 m 之间。其中以礼河口至黑水河口间的干流河段抬升幅度最大，深泓点高程平均抬升 2.34 m，其次是下游的黑水河口至坝前段，深泓平均抬升 2.05 m，小江河口至以礼河口、普渡河口至小江河口之间的干流河段抬升幅度基本相当，分别为 1.79 m 和 1.77 m。

表 2 白鹤滩库区干流河道床沙组成沿程变化情况

Table 2 Along-range changes of bed sand composition in the main channel of Baihetan reservoir area

断面编号	距坝距离/km	中值粒径 / mm		*D*<8 μm 沙量占比 / %	
		2022.11	2023.11	2022.11	2023.11
JC200	168.1	—	0.432	—	0.8
JC179	153.6	0.368	0.292	0.700	0.4
JC164	142.8	0.378	0.499	0.150	—
JC150	133.2	0.234	0.236	1.700	3.6
JC132	121.1	0.010	0.014	—	38.4
JC104	95.9	0.011	0.010	41.564	44.7
JC079	73.2	0.010	0.008	44.735	50.4
JC051.2	49.1	0.008	0.008	49.581	49.9
JC027	26	0.182	0.016	10.516	35.5
JC004	2.7	—	0.008	—	52.5

由于水库运行年限较短，库区深泓纵剖面比降逐年基本保持在 1.34‰左右。其中老君滩至普渡河口河段调整最为剧烈，由 2021 年 3 月的 6.84‰调平至 2023 年 10 月的 6.05‰，以礼河口至黑水河口河段、小江河口至以礼河口河段比降增加幅度相当，分别由 2021 年 3 月的 0.87‰和 1.32‰调整至 2023 年 10 月的 0.95‰和 1.41‰；黑水河口至坝前河段及老君滩上游的变动回水区河段略下切；普渡河口至小江河口河段比降基本不变，约为 0.90‰。

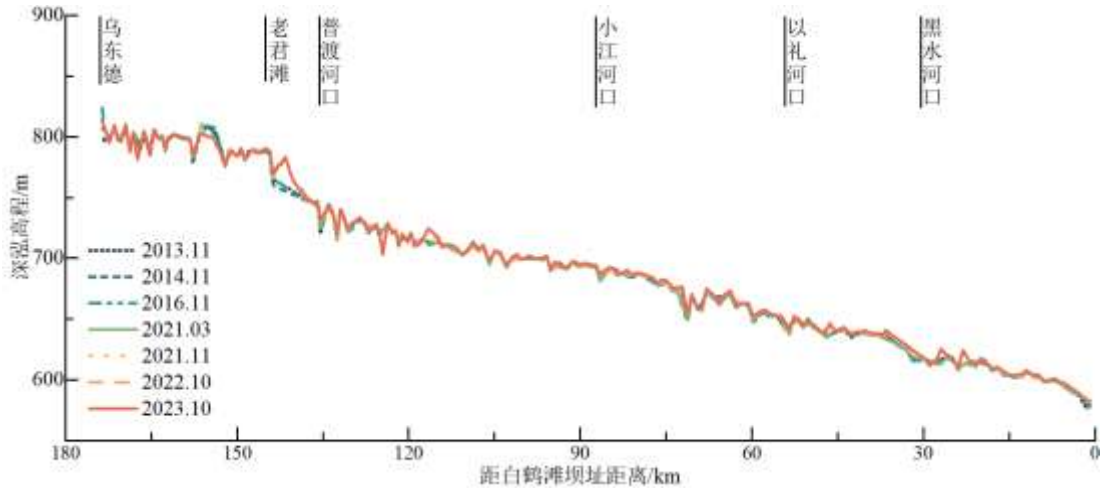

图 8 白鹤滩水库干流深泓演变过程

Fig. 8 Evolution of the longitudinal profiles in the main stream of Baihetan reservoir

基于实测断面资料，分析蓄水以来白鹤滩库区干流深泓点高程的逐年变化过程如图 9 所示。2021.03-2023.10 由于泥沙密实作用，库区沿程深泓点高程变化表现为由剧烈波动向逐渐趋于平稳发展。其中 2021.03-2021.11 水库初期蓄水，库区断面深泓高程整体抬升幅度较大，个别断面在水位涨落过程中出现崩岸、滑坡等现象，深泓抬升异常剧烈，如常年回水区 JC024 和 JC028 断面分别抬升 10.9 m 和 11.5 m；2021.1

1-2022.10 深泓高程变化较去年有所减小，但局部仍有显著的淤积现象，如常年回水区的 JC033、JC057 和 JC165 断面分别抬升 4.2 m、4.0 m 和 5.1 m；2022.10-2023.10 整体波动变化趋于平稳，常年回水区最大淤积幅度仅 2.3 m，变动回水区最大下切幅度仅 2.0 m。

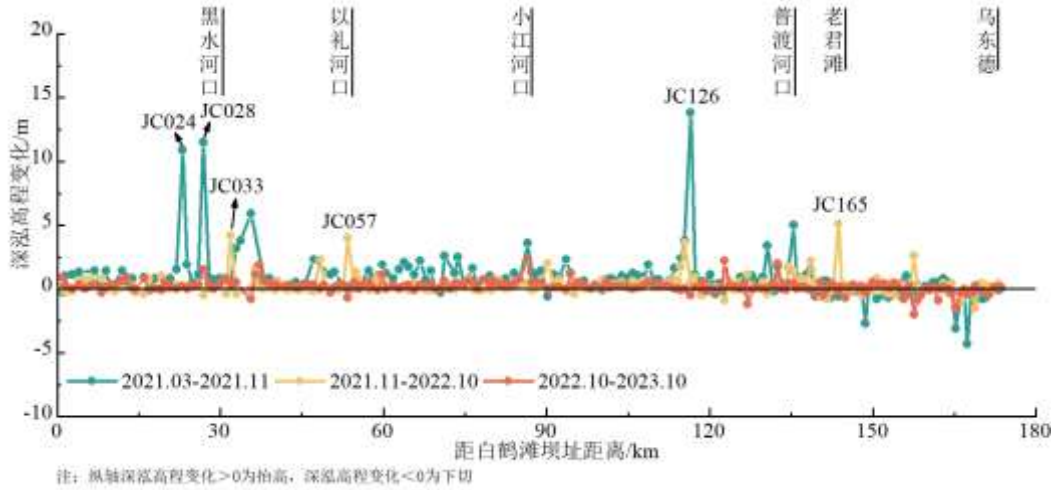

图 9 蓄水后白鹤滩干流库区深泓点高程变化过程

Fig. 9 Change process of thalweg in the main stream of Baihetan reservoir

由图 10 知，蓄水后白鹤滩干流库区断面面积变化在空间上呈现出“中间大，两端小”的特点，与沿程冲淤强度变化规律（图 6）相互印证。变动回水区受水库周期性水位调节影响，非汛期壅水泥沙淤积，汛期水位降低水流恢复冲刷能力，前期淤积泥沙冲刷下移，形成“冲淤交替”的年内平衡，因此库尾断面面积变幅总体较小；常年回水区常年壅水，河床以淤积为主，库区中段断面面积变化幅度剧烈，且年际间受密实作用减少趋势明显，坝前段变幅相对较轻。

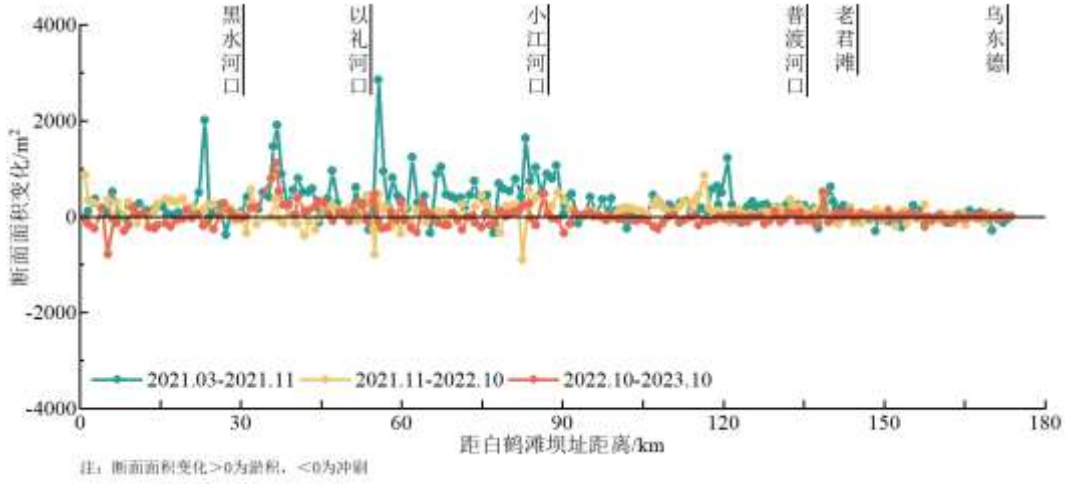

图 10 蓄水后白鹤滩干流库区沿程断面面积变化

Fig.10 Changes in cross-sectional area along the main stream of Baihetan reservoir

4.2 干流河道横断面形态变化

库区干流河道横断面形态主要呈“U”型、偏“V”型和不对称的“W”型，典型横断面变化情况如图

11 所示。断面淤积或冲刷主要发生深槽，受乌东德水库清水下泄影响，变动回水区大部分断面以冲刷为主，但冲刷程度相对较轻，断面过水面积增幅在 8%以内。其中 JC196 断面冲刷最为显著，深泓自 2021.3 至 2023.10 累积下切 5.7 m；JC195 断面地处弯道段，存在环流作用，泥沙在凸岸处淤平，在弯道外侧泥沙被带走，断面过水面积增加 2.6%。常年回水区河道淤积形态以主槽平淤为主（JC025，JC125 断面），受水库初期蓄水影响，2021.3 至 2021.11 部分横断面形态不稳定，如 JC024 左侧滩岸显著调整，深泓抬升 10.9 m，断面过水面积增加 2.2%，JC028 右侧发生滑坡，深泓抬升 11.5 m，断面过水面积减少 0.5%。

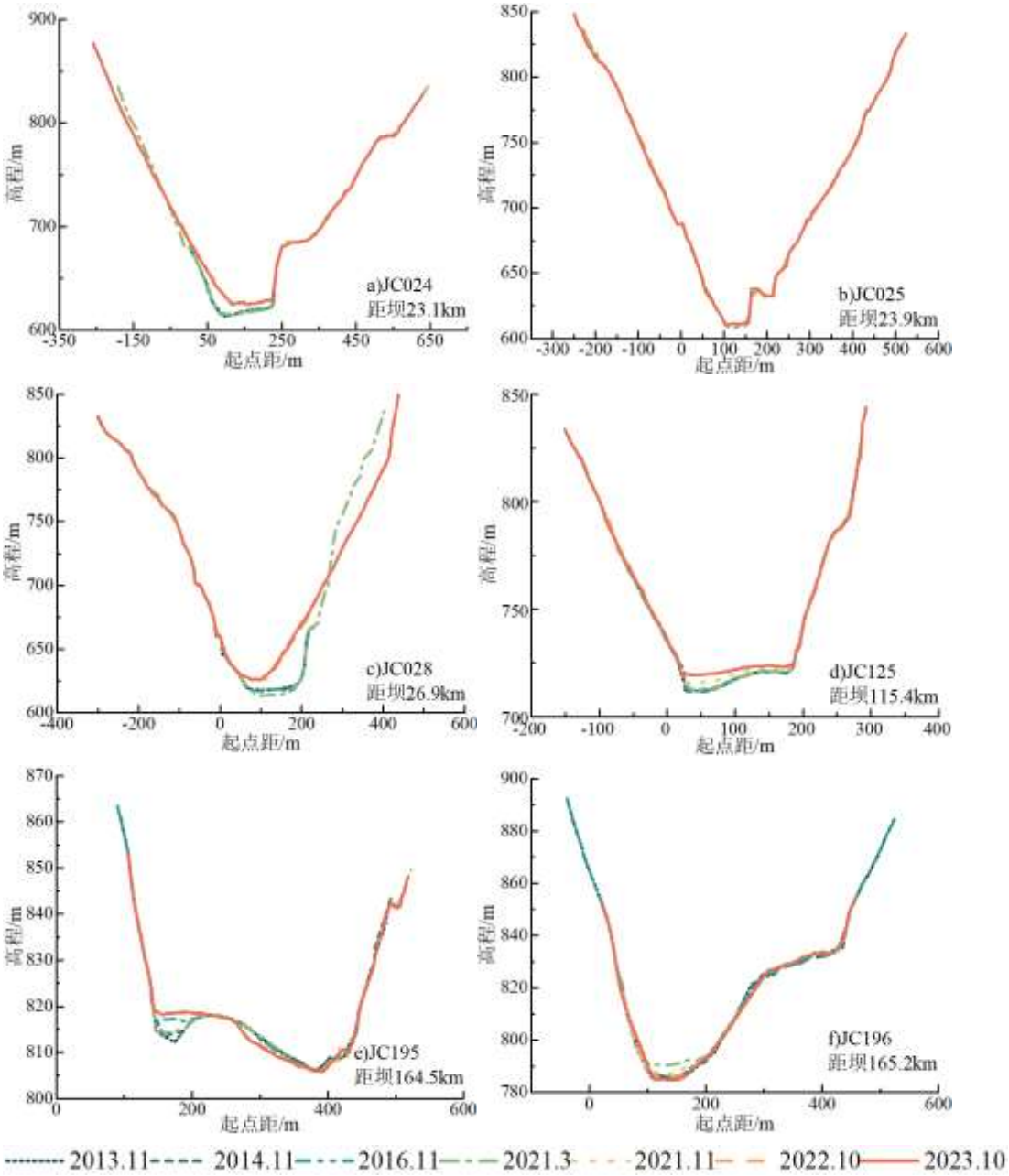

图 11 2013-2023 年白鹤滩水库干流典型横断面变化

Fig.11 Typical cross-sectional changes of the main stream of Baihetan reservoir

4.3 支流河道纵剖面形态调整

库区支流深泓纵剖面变化如图 12 所示。白鹤滩水库蓄水前，2013.11-2021.03 各支流河口段尚未形成库区，深泓基本处于天然的冲淤平衡状态，其中发生累积性淤积的黑水河平均淤积厚度仅为 0.23 m。白鹤滩水库蓄水后，2021.03-2023.10 各支流河口段深泓调整幅度显著增大。支流淤积主要源自上游来沙和干流倒灌，纵剖面淤积形态受到水动力条件、地形坡度等因素的综合影响[22]。普渡河距坝址较远，受水库蓄水影响较小，且纵剖面坡度较平缓，水流动能变化较均匀，淤积分布呈带状，平均淤积厚度为 1.39 m。以礼河、小江和大桥河河口段距离坝址较近，坡度较陡，受干流泥沙倒灌影响较小，水流从上游流入库区后动能迅速削弱，导致纵剖面深泓调整主要集中于中上游段，形成典型的三角洲淤积特征，其平均淤积厚度分别为 3.11 m、2.78 m 和 2.67 m。黑水河距坝址最近，坡度最缓，受干流泥沙倒灌支流的影响大，其口门至上游 2.5km 范围内深泓纵剖面比降由 2021.03 的 1.20%下降至 2023.10 的 0.27%，可能存在形成拦门沙的风险。

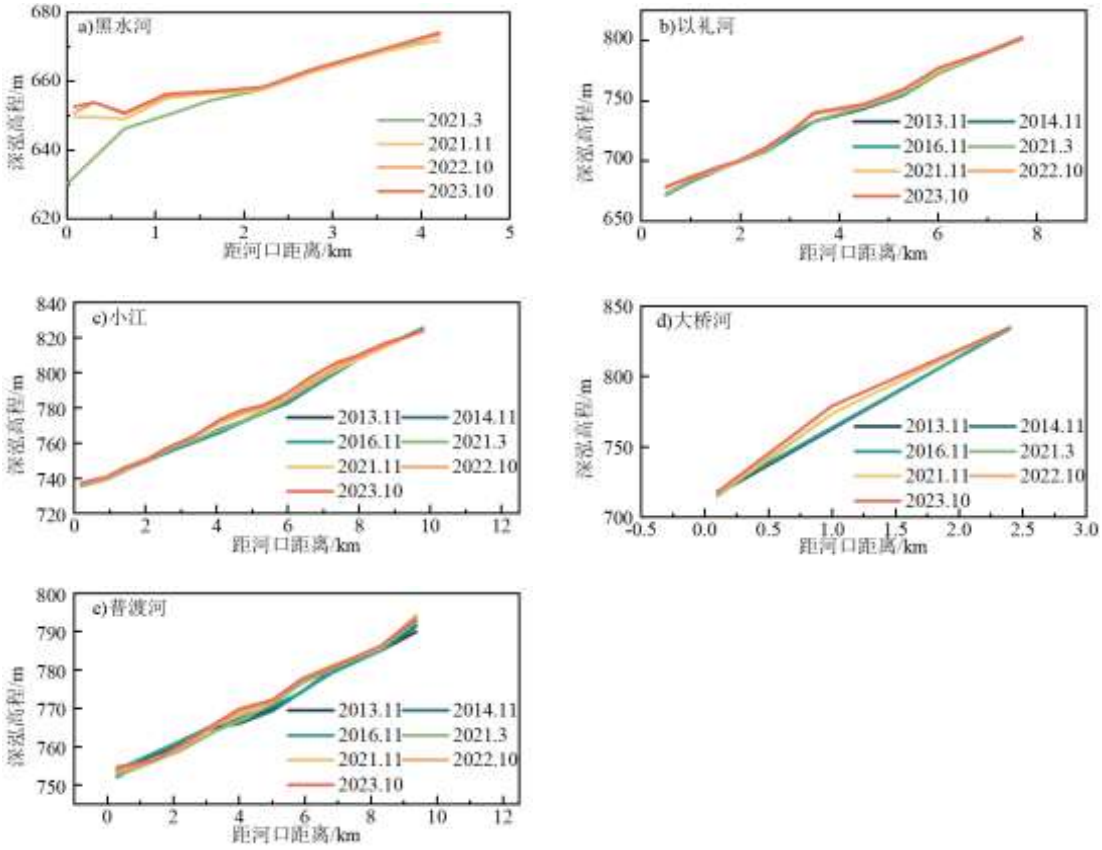

图 12 支流纵剖面演变过程

Fig.12 Evolution of tributary profile

5 结论

基于 2013-2023 年白鹤滩水库断面实测资料，从淤积时空分布和剖面形态调整两方面，对白鹤滩水库运用前后泥沙冲淤时空演变特征进行了系统分析，主要结论如下：

（1）蓄水前，白鹤滩水库干流河道泥沙淤积过程为“先淤后冲”，支流河道除黑水河发生累积性淤积

外，其余四条支流基本维持冲淤平衡态势；蓄水后，白鹤滩库区共淤积泥沙 8279.6 万 m^3，死库容淤损 1.14%，调节库容增加 0.14%，干支流淤积占比为 75.4%和 24.6%，其中小江和黑水河淤积较多，大桥河淤积最少，占比分别为 37.9%、54.7%和 0.57%。库区泥沙集中淤积在成库后的第一年，占总淤积量的 71.8%，随后淤积量逐年减少，并在 2023 年出现“伪冲刷”现象。

（2）白鹤滩水库变动回水区持续微冲，常年回水区表现为“汛期淤积、非汛期冲刷”，各年份淤积重心不同，主要淤积部位在小江河口至以礼河口河段；床沙沿程细化明显，越靠近坝前，中值粒径越小、D<8 μm 粒径组占比增加。

（3）由于蓄水年限较短，干流库区深泓纵剖面比降基本不变，受区间来沙影响，普渡河口以下的常年回水区抬升较为均匀，不同河段的平均抬升高度在 1.8~2.3 m 之间；干流淤积或冲刷主要发生在主河槽，常年回水区断面出现平铺式淤高，最大淤积厚度为 12.5 m，变动回水区大部分断面发生微冲，最大下切 5.7 m；受初期蓄水影响，水位涨落引起部分断面发生崩岸、滑坡是部分断面深泓剧烈抬高的主要原因。

（4）受水库蓄水影响，支流淤积表现各异。普渡河距坝址最远，受水库蓄水影响最小，淤积形态接近平铺淤积；以礼河、小江和大桥河河口段距坝址较近，淤积形态为三角洲淤积；黑水河口门处受干流泥沙倒灌影响较大，可能存在形成拦门沙的风险。

6 参考文献

[1] Wang WG, Cao DW, Feng JZ. Survey on size gradation of bed material in the fluctuating backwater reach of the Baihetan Reservoir on the Jinsha River. *Journal of sediment research*, 2016, (02): 57-60. [王维国, 曹大卫, 冯荆州. 金沙江白鹤滩水库变动回水区河床组成勘测调查. 泥沙研究, 2016, (02): 57-60.]

[2] 谢鉴衡. 河床演变及整治. 武汉:武汉大学出版社, 2013: 237-265.

[3] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论. 北京: 清华大学出版社, 2013: 115-125.

[4] Deng AJ, Chen JG, Hu HH *et al.* Analysis of reservoir siltation in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(03): 325-332. [邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析. 水利学报, 2022, 53(03): 325-332.]

[5] Chen JG, Deng AJ, Hu HH. Analysis of factors affecting the annual average deposition rate of reservoirs. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(04): 1-5. [陈建国, 邓安军, 胡海华. 水库年平均淤损率影响因素分析. 泥沙研究, 2019, 44(04): 1-5.]

[6] Ren S, Gao Y, Research progress and prospects on sediment issues of the Three Gorges Project. *Journal of Lake Science*, 2024, 36(6): 1611-1625. [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.]

[7] Yuan J, Xu QX, Dong BJ *et al*. Sediment deposition of Three Gorges Reservoir and its impact on the reservoir area in recent 20 years. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(2): 632-641. [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. 湖泊科学, 2023, 35(2): 632-641.]

[8] Zou HM, Chen F, Yang CG. Impact of Severe Drought during Flood Season in 2022 on Sediment Erosion and Deposition in Three Gorges Reservoir. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(07): 190-195+202. [邹红梅, 陈芳, 杨成刚. 2022 年“汛期反枯”对三峡库区泥沙冲淤的影响. 长江科学院院报, 2024, 41(07): 190-195+202.]

[9] Yang CR, Deng JY, Chen L. Sediment deposition trend in the Three Gorges Reservoir under the action of complex boundary conditions. *Advances in Water Science*, 2023, 34(03): 442-453. [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. 水科学进展, 2023, 34(03): 442-453.]

[10] Sun DP, Wu MX. Analysis of Characteristics of Sediment in Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2018, 39(02): 74-79. [孙东坡, 吴默溪. 黄河小浪底水库

运用以来的泥沙淤积特征分析. 华北水利水电学院学报, 2018, 39(02): 74-79.]

[11] Wang T, Wang YJ, Qu SJ *et al*. Deposition in Xiaolangdi Reservoirs Since Operation. *Yellow River*, 2018, 40(12): 1-3+20. [王婷, 王远见, 曲少军等. 小浪底水库运用以来库区泥沙淤积分析. 人民黄河, 2018, 40(12): 1-3+20.]

[12] Du ZD, Dong XY, Zhang F *et al.* Study on runoff and sediment charcateristics and reservoirs deposition in Xiluodu Reservoir of the Jinsha River, *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2): 22-28. [杜泽东, 董先勇, 张锋等. 金沙江溪洛渡水库水沙特征及泥沙冲淤规律. 泥沙研究, 2022, 47(2): 22-28.]

[13] Zhang GS, Deng AJ, Zhang BW *et al*. The impact of reservoir operation on runoff and sediment load change in the lower Jinsha River, *Journal of Lake Science*, 2024, 36(6): 1911-1921. [张国帅, 邓安军, 张帮稳等. 水库运用对金沙江下游水沙变化的影响. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1911-1921.]

[14] Feng SH, Deng AJ, Wang DW *et al*. Characteristics analysis of sediment deposition in the Xiluodu Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(6): 16-22+29. [冯胜航, 邓安军, 王党伟等. 溪洛渡水库泥沙淤积规律分析. 泥沙研究, 2021, 46(6): 16-22+29.]

[15] Zhu LL, Chen D, Yang CG *et al*. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and scouring of river channel under dam. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(03): 1097-1110. [朱玲玲, 陈迪, 杨成刚等. 金沙江下游梯级水库泥沙淤积和坝下河道冲刷规律. 湖泊科学, 2023, 35(03): 1097-1110.]

[16] Xie YQ, Deng AJ, Dong XY *et al*. Study on the spatial-temporal variations of runoff and sediment in the lower reach of Jinsha River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(11): 1309-1322. [谢益芹, 邓安军, 董先勇等. 金沙江下游流域水沙格局变化研究. 水利学报, 2023, 54(11): 1309-1322]

[17] Tan YN, Liu HX, Lu YJ. Factors controlling sediment yield and prediction of ungauged areas in the Lower Jinsha River basin, *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 277-289. [谭寓宁, 刘怀湘, 陆永军. 金沙江下游区间来沙驱动因子分析及产沙预测模型, 水科学进展, 2023, 34(2): 277-289.]

[18] Shu CW, Tan GM. Advances in calculation methods for river sedimentation. *Journal of Sediment research*, 2009, (04): 68-73. [舒彩文, 谈广鸣. 河道冲淤量计算方法研究进展. 泥沙研究, 2009, (04): 68-73.DOI:10.16239/j.cnki.0468-155x.2009.04.010.]

[19] 李晓翠. 泥沙颗粒吸附解吸特性及受污染底泥修复研究[学位论文]. 清华大学, 2023. DOI:10.27266/d.cnki.gqhau.2023.000063.]

[20] Zhou J, Zhang M, Lu P. The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze river. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3659-3669.

[21] Gao Q, Ni JR,Zhao XF *et al*. Community Structure Characteristics of Phytoplankton and Their Relationship with Environmental Factors in the Typical Section of Chin-sha River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(3): 571-579. [高琦, 倪晋仁, 赵先富等 .金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 571-579.]

[22] Zhang BW, Deng AJ, Wang DW *et al*. Study on formation mechanism of barrier sandbar of tributaries in Xiluodu Reservoir. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 928-937. [张帮稳,邓安军,王党伟等. 溪洛渡库区支流拦门沙形成机理. 水科学进展, 2023, 34(6): 928-937.]