DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.02.028

黄河古贤水利枢纽工程泥沙设计理念与关键技术

张金良[1, 2*]，**李达**[1]

（1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，郑州 450003；2. 黄河实验室（河南），郑州 450003）

摘要：工程泥沙设计是国际多沙河流水利枢纽面临的共性技术难题。作为典型的多沙河流水库，古贤水利枢纽是完善黄河水沙调控体系、推动黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的里程碑工程，妥善处理泥沙问题对工程开发至关重要。本文在深入分析三门峡、小浪底等已建多沙河流水库工程设计运行经验和教训的基础上，立足古贤水利枢纽面临的水沙特点及形势，针对工程泥沙设计需满足的长时序水沙耦合设计、淤积形态主动控制、库容动态韧性保持等设计需求，以“动态调控”设计理念为引领，研发超深超大泄流能力排沙底孔设计、动态泥沙侵蚀基准面及动库容设计、“三槽”淤积形态与库容分布协同设计及“蓄清调浑”运用方式等关键技术，形成了“形态控制–过程调控–动态响应”的多沙河流“水沙共治”技术体系，显著提升了古贤水利枢纽对极端水沙丰枯组合的适应性，对增强黄河水沙调控和水资源调蓄能力、实现黄河下游长治久安意义重大，同时，为国内外多沙河流水库工程泥沙问题处理提供技术新范式。

关键词：古贤水利枢纽；工程泥沙；设计理念；动态调控；蓄清调浑

中图分类号：TV61　　**文献标识码：**A

Design Philosophy and Key Technologies for Sediment Control in Guxian Water Conservancy Project

Zhang Jinliang[1, 2*], **Li Da**[1]

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Yellow River Laboratory (Henan), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Engineering sediment design is a common technical challenge faced by the water conservancy hubs in sediment-laden rivers worldwide. As a typical reservoir in the sediment-laden river, the Guxian Water Conservancy Project is a milestone project in improving the Yellow River water and sediment regulation system and implementing the national strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Proper handling of engineering sediment issues is crucial for the project development. On the basis of in-depth analysis of the design and regulation experiences from existing water conservancy projects in sediment-laden rivers such as Sanmenxia and Xiaolangdi Reservoir, this study focuses on the characteristics and changing trend of the incoming water and sediment of the Guxian Water Conservancy. In response to the design requirements in engineering sediment design, including the coupling design of long-term water and sediment series, active control of sedimentation morphology, and dynamic resilience maintenance of effective reservoir capacities, dynamic regulation is used as the guide of engineering sediment design. And several key technologies are developed, including the design of sediment-discharge bottom holes with ultra-deep and

收稿日期：2025-02-22；**修回日期：**2025-03-17

通讯作者：*张金良，黄河勘测规划设计研究院有限公司正高级工程师，研究方向为多沙河流水利工程设计与调控；E-mail: jlzhangyrec@126.com

资助项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3208605)；国家自然科学基金(52379068)；中国博士后科学基金(2022M721300)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

ultra-large discharge capacities, design of dynamic sediment erosion base level and capacity, coupling design between three sediment deposition patterns and dynamic storage capacity, and operation mode of storing clean water and regulating muddy flow. A water-sediment co-treatment technology system for sediment-laden rivers that features morphology control, process regulation, and dynamic response is formed. Moreover, the adaptability of Guxian Water Conservancy is improved to the extreme incoming water and sediment combinations, which is of great significance for enhancing the water-sediment regulation and water resource storage capacities of the Yellow River, and achieving the long-term stability in the lower reach of the Yellow River. Meanwhile, it provides a new technological paradigm for the treatment of engineering sediment problems in reservoirs of sediment-laden river.

Keywords: Guxian Water Conservancy Project; engineering sediment; design philosophy; dynamic regulation; storing clean water and regulating muddy flow

一、前言

多沙河流水利枢纽的工程泥沙设计是全球水利工程领域长期面临的重大挑战[1~3]。在黄河等含沙量极高的河流上，泥沙淤积不仅迅速缩减库容、威胁工程寿命，更可能引发河道形态剧变与生态连锁反应。据统计，截至2018年，黄河流域水库的淤损率高达36.76%[4]；印度河的塔贝拉水库建成运行30年内（至2006年），库容淤损约为29.48%，库区内淤积三角洲持续发育向坝前推进，截至2006年，三角洲前缘距离坝前仅10.6 km，给大坝5条低水位隧道带来严重堵塞风险[5]；尼罗河的阿斯旺水库建成运行的50年间，总蓄水能力减少12%，库区形态在南部和湖泊入口处发生变化，淤积造成的低水位（140~160 m）水面面积平均减少约15%，相当于库容减少1×10^{10} m^3，同时，尼罗河谷和三角洲地区的农田普遍出现水渍现象，由于每年不再进行定期冲刷，土壤盐分增加，导致肥力下降[6,7]。

多沙河流水利枢纽工程的泥沙设计难点集中体现在：天然水沙过程的高度非线性耦合，需精准协调防洪、蓄水与排沙等目标的时序冲突；淤积形态预测及控制的复杂性，涉及多尺度动力机制与极端气候的叠加影响；在生态保护刚性约束下，传统“以排为主”策略向“水沙联调”综合治理的范式转型。突破这些技术瓶颈，不仅关系水库防洪、供水和发电等功能的长期稳定，更对延长工程寿命、维系河流健康生命及推动区域生态保护和高质量发展具有战略意义，是践行“山水林田湖草沙”系统治理理念的重要实践。

黄河古贤水利枢纽（以下简称“古贤水库”）作为黄河干流梯级开发规划总体布局中的重要骨干工程和水沙调控体系的核心工程，属于多沙河流水库。古贤水库开发以防洪减淤、水资源调蓄为主，兼顾供水、灌溉和发电等综合利用，并为下游补水和增加河道外用水创造条件。古贤水库建成运行后，与小浪底等水库联合运用，可显著增强黄河水沙调控和水资源调蓄能力，控制下游泥沙淤积和悬河发展，提高中下游水资源保障水平，对完善黄河水沙调控体系，实现黄河下游长治久安、推进黄河流域水资源节约集约高效利用、推动黄河中下游（河口）生态环境保护治理和地区经济社会高质量发展等具有重要意义[8]。

作为典型的多沙河流水库，古贤水库平均入库含沙量高达28 kg/m^3，工程泥沙设计是长期关注和争议的焦点之一，影响工程规模、运行方式等关键问题的确定。古贤水库工程从1954年《黄河综合利用规划技术经济报告》提出坝址比选方案，1997年《黄河治理开发规划纲要》明确提出工程开发任务，工程规划、设计、论证历经70余年，破解制约工程的泥沙等难题，于2024年7月开工建设。

本文基于三门峡、小浪底、刘家峡等多沙河流水库设计运行经验，立足古贤水库面临的工程泥沙特点及形势，梳理总结古贤水库工程泥沙设计技术特征，提出多沙河流水库工程泥沙设计理念及关键技术，为国内外多沙河流水库工程泥沙设计提供“水沙共治”新范式。

二、古贤水库工程泥沙设计要求

黄河古贤水库的开发面临流域性水沙失衡难题，即水少沙多、水沙异源、时空分配不均，三重矛盾交织。工程坝址位于黄河中游碛口至禹门口河段（晋陕峡谷核心区），控制黄河流域65%的集水面积及关键水沙通量——占全河73%的水量、60%的沙量和80%的粗泥沙（粒径>0.05 mm），其战略地位如图1所示。古贤水库入库泥沙来源区域强侵蚀沟壑地貌发育充分、水沙变化剧烈，具有“暴雨–产沙

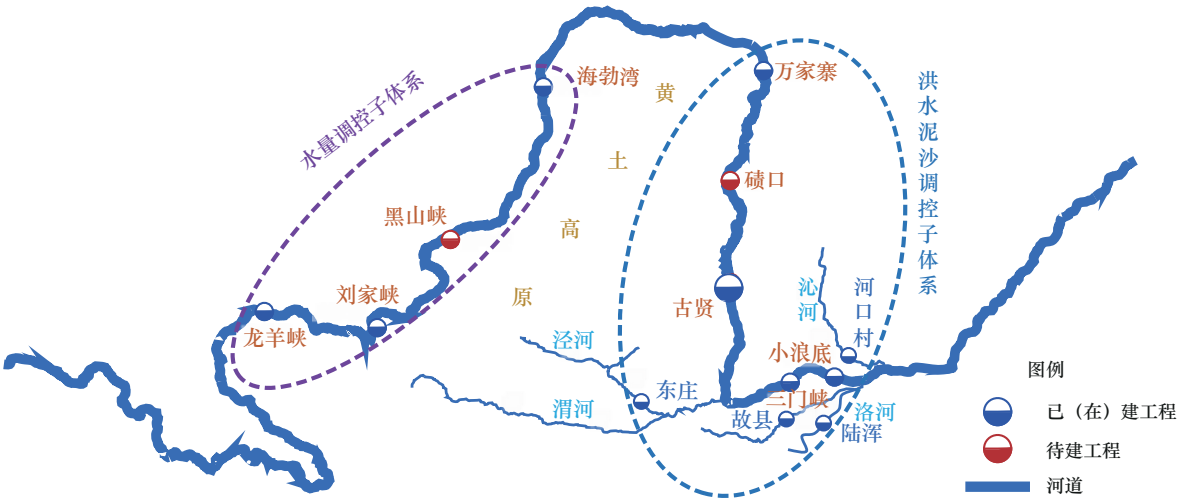


图1　黄河古贤水库地理位置示意图

脉冲响应”特征；在库区范围内，有6条流域面积超过1000 km^{2}的高含沙支流集中汇入，多年平均来沙量约为1.94×10^8 t，占干流总来沙量的35.6%。在气候变化加剧极端水沙事件的背景下，古贤水库工程泥沙设计需在历史经验基础上满足五大要求，即长时序水沙耦合设计、淤积形态主动控制、库容动态韧性保持、高效灵活调水调沙及相机跨年调节水资源。

（一）长时序水沙耦合设计

长时序水沙耦合设计是确保多沙河流水利枢纽功能可持续的核心前提。近年来，受气候变化与人类活动双重驱动，黄河水沙情势呈现锐减特征：潼关站2000—2022年实测年均水沙量（2.6782×10^{10} m^3、2.33×10^8 t）较1919—1960年基准期分别减少37.8%和85%，进入枯沙期。然而，未来百年尺度下，极端水沙事件重现风险显著。当前，学界对黄河未来年均来沙量预测分歧较大（3×10^8~8×10^8 t[9~13]），其不确定性源于侵蚀驱动因子权重争议和极端情境缺位等因素。这导致古贤水库水沙设计需兼容“历史极值”与“未来情景”，构建适应来沙量波动的弹性水沙耦合方案，给古贤水库长时间尺度水沙耦合设计带来很大困难。

此外，黄河“水沙两相流”的非线性特性要求水沙系列设计应突破传统单变量阈值思维。在水库实际调度运行过程中按照来水来沙的不同频率进行来水量、来沙量的丰（>70%）、平（30%~70%）、枯（<30%）划分，可形成丰水丰沙、平水平沙、枯水枯沙等9种水沙组合[14,15]，以1960—2020年潼关站来水来沙组合为例（见图2）。来水来沙丰枯组合的不确定性对工程的水沙适应性提出了巨大挑战。同时，由于近期实测水沙情势变化巨大，现有研究成果对于近期来沙量锐减归因、影响因素及未来水沙变化趋势未形成共识，在气候变化与极端暴雨事件频发的背景下[16,17]，未来黄河来沙量仍具有不确定性，工程水沙系列设计需充分考虑在连续丰沙、连续枯水等极端水沙耦合情况下保障古贤水库运行安全稳定。

（二）淤积形态主动控制

黄河高含沙特性导致水库持续淤积，库区淤积形态合理调控成为水利枢纽工程面临的严峻挑战，黄河三门峡水利枢纽的实践为此提供了深刻教训。

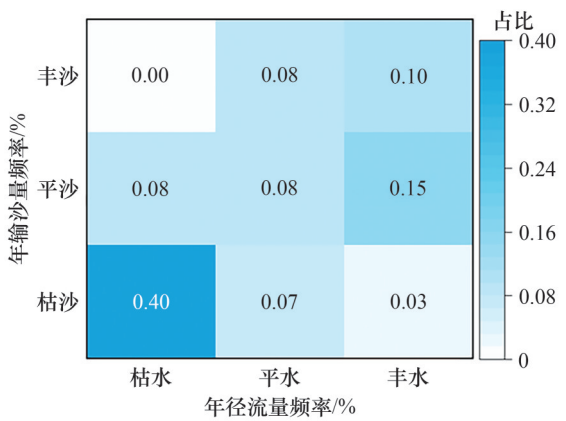
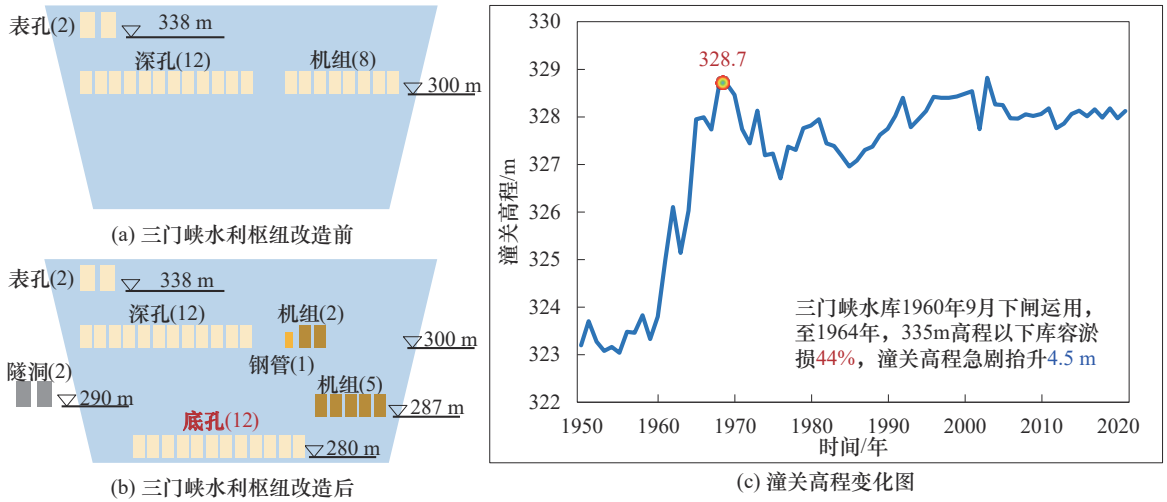


图2　1960—2020年潼关站来水来沙丰、平、枯组合及其占比

三门峡工程入库含沙量为35 kg/m³，设计过程中由于对黄河水沙输移规律认知不足，1960—1964年蓄水初期遭遇灾难性淤积，仅4年间335 m高程以下库容淤损率高达44%，库区泥沙淤积上延导致潼关高程急剧抬升4.5 m。库区泥沙淤积不仅使三门峡水利枢纽工程综合效益显著受损，而且严重威胁渭河下游防洪安全。为遏制泥沙淤积危机，三门峡水利枢纽一方面通过三次改建，将最低泥沙侵蚀面高程（底孔高程）由300 m下移至280 m，库水位315 m下泄流规模由3804 m³/s提升至9701 m³/s；另一方面，将三门峡水利枢纽工程的运用方式由“蓄水拦沙”改为“蓄清排浑”。通过坝身泄流排洪孔洞改造和水库调度运用方式革新，主动控制库区泥沙的淤积形态，塑造出“高滩深槽”的库区泥沙淤积形态，抑制了水库泥沙淤积上延，潼关高程稳定在328 m左右，如图3所示[18]。结构改造、调度革新和形态重塑一系列措施使三门峡水库功能实现了从“以库容换拦沙”向“以调度控淤积”的转变。

黄河干支流水沙交汇引发的干流阻断、支流“翘尾巴”双重挑战，在不同河段呈现差异化淤积风险。以黄河内蒙古河段毛不拉孔兑为例，其年平均含沙量为328.3 kg/m³（汛期为410.6 kg/m³）的极端输沙特性，叠加“流量–含沙量非线性响应”特征，既可形成“大水大沙”型洪水（1989年洪峰为5600 m³/s、最大含沙量为1500 kg/m³），也可出现“小水大沙”型洪水（1988年洪峰为309 m³/s、最大含沙量为1600 kg/m³）[19]，两类情景均可导致沟口区快速形成沙坝淤堵干流主槽。刘家峡水库则呈现另一种典型模式：支流洮河年均来沙量为2.077×10^7 t（占入库总来沙量的73%）。刘家峡水库坝前段由于洮河汇入，自交汇口向干流上游方向倒灌，形成明显的“拦门沙坎”，沙坎顶部高程为1701 m，上游倒坡比下降2.7‰，下游顺坡比下降9.6‰，如图4所示[20,21]。支流拦门沙坎不仅侵占了水库的有效库容，而且当支流遭遇高含沙洪水时会引发支流泥沙淤积“翘尾巴”现象，造成支流库容淤损且难以恢复。

因此，在古贤水库工程泥沙设计中必须采取相关科学措施主动控制库区泥沙淤积形态，应对不同的来水来沙形势，保障工程综合效益充分发挥。古贤水库入库含沙量为28 kg/m³，其中，支流侧向来沙源自黄土高原多沙粗沙区，占入库总来沙量的48%（见表1）。支流入库洪水多为高含沙洪水，如支流清涧河2002年7月的洪水洪峰流量为5500 m³/s、最大含沙量为743 kg/m³[22]；支流无定河2017年7月的洪水洪峰流量为4480 m³/s、最大含沙量为873 kg/m³[23]。当古贤水库入库泥沙以干流来沙为主，易倒灌支流形成拦门沙坎，拦门沙叠加支流高含沙洪水造成支流“翘尾巴”，导致支流有效库容淤损等问题；同时，支流高含沙洪水侵占干流槽库容后，造成库区淤积形态连续分布被阻断等问题。干支流交汇处的水流和泥沙运动复杂，入汇模式、入汇角度、干支流汇流比、含沙量、底坡坡降等均会影响干支流交汇处水沙运动和库区淤积形态[24]，给库区泥沙淤积



(a) 三门峡水利枢纽改造前

(b) 三门峡水利枢纽改造后

(c) 潼关高程变化图

图3 三门峡水利枢纽改造前后对比及潼关高程变化图

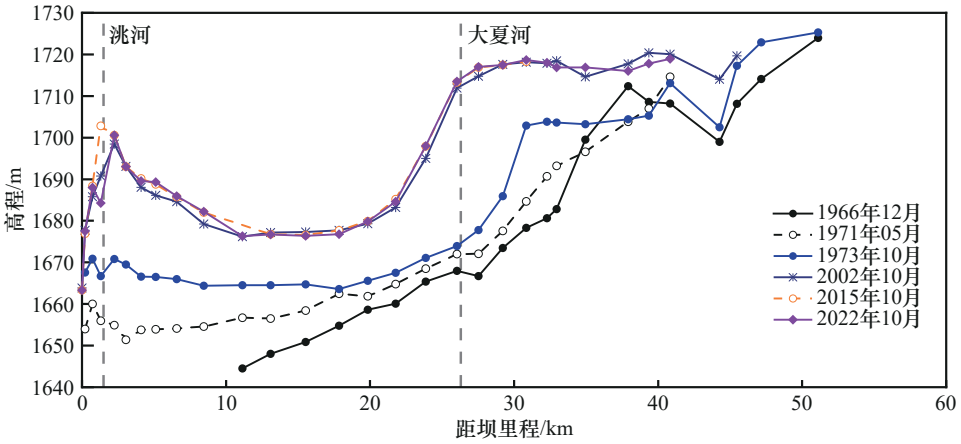


图4　刘家峡库区实测泥沙淤积形态图

表1　古贤水库库区主要支流水文站多年平均来水来沙量统计表

河名	来水量/(×10⁸ m³)			来沙量/(×10⁴ t)			含沙量/(kg·m⁻³)		
	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
三川河	1.20	0.95	2.15	1306	80	1386	109.0	8.4	64.5
屈产河	0.21	0.08	0.30	584	53	637	275.4	62.0	214.5
无定河	4.80	6.05	10.84	8423	1024	9447	175.6	16.9	87.1
清涧河	0.85	0.45	1.30	2608	253	2861	305.1	56.6	219.6
昕水河	0.80	0.39	1.19	1113	91	1204	139.7	23.4	101.5
延水河	1.25	0.72	1.97	3300	308	3608	264.7	42.4	182.8

形态主动控制带来了挑战。

（三）库容动态韧性保持

多沙河流水库的库容动态韧性保持能力是维系工程全生命周期效益的核心，小浪底水库的实践验证了这一理念。小浪底水库总库容为1.265×10¹⁰ m³，其中，拦沙库容为7.55×10⁹ m³（设计拦沙期为15年）。与三门峡水利枢纽工程初期“蓄水拦沙”不同，小浪底水库在调度运行过程中充分考虑了泥沙淤积影响，采取了相应措施，如实施黄河调水调沙等。小浪底水利枢纽工程于1999年下闸蓄水运行，至2024年汛前水库累计淤积泥沙3.421×10⁹ m³，如图5所示，仅占拦沙库容的45%左右[25]，使实际拦沙年限远超设计预期，工程防洪、供水、生态等综合效益持续释放。三门峡水利枢纽工程运行初期的经验教训与小浪底水利枢纽工程的成功实践表明，多泥沙河流水库各项兴利指标和综合利用效益很大程度上受有效库容的限制。因此，在多泥沙河流上兴建水利枢纽，必须把妥善排放泥沙、动态韧性保持水库有效库容放在重要地位。古贤水库规划设计

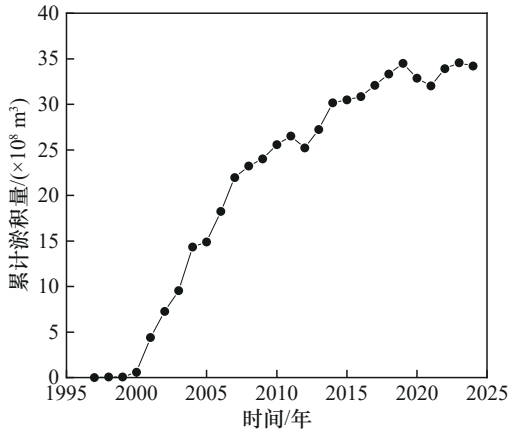


图5　小浪底水库库区淤积图

及运行应以此为基础，考虑极端天气加剧与来水来沙形势变化剧烈等不利条件下合理的工程与非工程应对措施，实现在极端水沙条件下有效库容的长期韧性保持。

（四）高效灵活调水调沙

调水调沙是指在充分利用河道输沙能力的前提

下，利用干、支流水库群的可调节库容，对进入下游的水沙过程进行合理的调节控制，适时蓄存或泄放水沙，使不协调的水沙过程变为协调的一种技术手段[26]。小浪底水库自2002年开始，经过3年的调水调沙试验后转入生产运行，至今已有23年。截至2024年汛前，小浪底水库通过调水调沙累计排沙出库1.689×10^9 m³。此外，自小浪底水库蓄水运行后，黄河下游河道累计冲刷泥沙2.297×10^9 m³，如图6所示，河床平均下切3.1 m。黄河调水调沙的实施不仅保持了小浪底水库的有效库容，同时，充分发挥了小浪底水库拦沙减淤作用，显著缓解了黄河下游的防洪风险[27]。但是，小浪底水库调水调沙后续动力不足的问题逐渐凸显，导致排沙关键时期后续水量不足，部分出库泥沙淤积在下游河槽，尤其是异重流排沙时，出库细泥沙80%以上淤积在下游河道，没有后续水量输沙入海，形成无效排沙和有害淤积。

古贤水库作为黄河水沙调控体系的核心工程，需要考虑与三门峡、小浪底等水库联合运用，在为调水调沙补充足够后续动力（水量为3.5×10^9 m³）的同时，需实现调水调沙的高效性与灵活性。具体而言，一方面，古贤水库应设置尽可能大的调水调沙库容，以适应不同来水来沙情景，在汛期防洪和调水调沙运用，利用汛限水位以下库容，与小浪底等水库联合开展调水调沙，为小浪底水库调水调沙提供充足后续动力，实现下游河道中水河槽过流能力长期维持稳定。据测算，古贤水库运用可使小浪底水库拦沙库容使用年限延长45年。另一方面，在遭遇连续枯水丰沙等情况时，

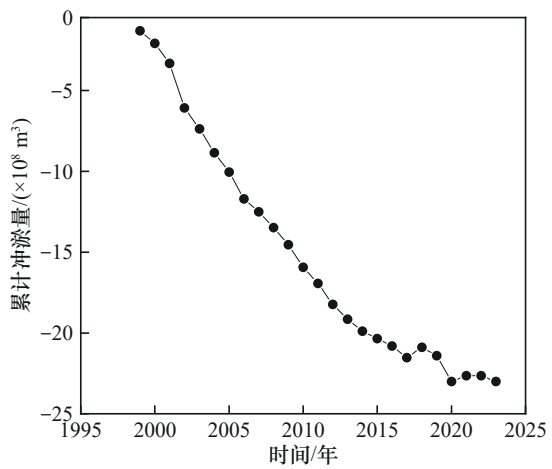


图6　小浪底水库蓄水运行以来黄河下游累计冲淤量

应充分考虑自身的排沙需求，通过降低水位至死水位以下，形成较低的泥沙侵蚀基准面，并利用较大的泄流能力敞泄排沙，恢复被泥沙淤积的库容。

（五）相机跨年调节水资源

黄河流域水资源管理面临“三重割裂”矛盾，一是时间维度上径流年际丰枯振荡剧烈、年内汛期水沙高度集中，二是空间维度上产水区与用水带错位分布，三是功能维度上防洪、兴利、生态、排沙等目标相互掣肘。既有工程受限于建设时对泥沙问题的认识和处理技术水平，多采用“蓄清排浑”运用方式设计，即非汛期蓄水兴利、汛期降低水位排沙，虽然在一定程度上可保持水库有效库容，但是汛期泥沙调控库容过小等问题在水库正常运用期依然存在，导致头道拐至入海口近2000 km的黄河干流缺乏跨年度水资源调节能力。这一缺陷在气候变化背景下凸显放大效应，即丰水年被迫弃水排沙、枯水年下游生态基流难以保障。在黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略背景下，黄河干流建设能够相机跨年调节水资源的水利枢纽十分重要。古贤水库具有优越的地理条件，具有较强的水沙调节能力，应利用较大的调节库容（3.46×10^9 m³）相机跨年度调节径流，实现丰蓄枯补、洪旱联调、时空置换，推动黄河水资源调节向“多周期适配”跃升，提高供水保证程度。

三、古贤水库工程泥沙设计理念

黄河古贤水库作为干流梯级开发规划总体布局中的重要骨干工程，工程泥沙设计充分吸收了三门峡、小浪底、刘家峡、东庄等多沙水库工程泥沙设计运用经验，从安全底线出发，考虑工程造价及技术可达性，结合库区来水来沙特点，考虑来沙量3×10^8 t（实测）、4×10^8 t、5×10^8 t、6×10^8 t（系列长度66年）和8×10^8 t（系列长度60年）不同来沙量（见表2），分析百年尺度内的冲淤形势，提出“动态调控”设计理念，构建“形态控制–过程调控–动态响应”三维技术体系，推动多沙河流水库工程泥沙设计技术跃升，具体体现在以下三个方面。

（1）枢纽排沙效能增强：基于“低位排沙”调

表2　不同水沙系列四站及龙门站水沙量特征值

设计系列	站名	来水量/(×10⁸ m³)			来沙量/(×10⁸ t)			来沙量/(×10⁸ t)	
		汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年	最大值	最小值
3×10⁸ t系列	四站	135.13	141.6	276.7	2.28	0.32	2.60	5.95	0.61
（2000—2021年实测）	龙门	94.3	114.6	208.9	1.25	0.24	1.49	3.21	0.37
1962-4系列	四站	144.7	135.7	280.4	3.52	0.48	4.00	9.43	1.51
	龙门	106.8	111.5	218.3	2.04	0.36	2.40	7.38	0.57
1962-5系列	四站	144.7	135.7	280.4	4.40	0.60	5.00	11.79	1.89
	龙门	106.8	111.5	218.3	2.55	0.45	3.00	9.22	0.72
1962-6系列	四站	144.7	135.7	280.4	5.28	0.72	6.00	14.38	2.31
	龙门	106.8	111.5	218.3	3.06	0.54	3.60	11.25	0.88
1962-8系列	四站	137.8	130.8	268.6	7.10	0.92	8.02	21.04	2.13
	龙门	102.8	108.9	211.7	4.14	0.72	4.86	15.78	0.80

注：设计系列名称“1962-4”，“1962”指的是设计系列起始年，“4”指的是来沙量为4×10⁸ t，其余系列一致；四站指龙门站、华县站、河津站、状头站。

度运用经验，在泄洪建筑物设置超深超大排沙底孔群，提高排沙灵活性和有效性，利用低水位、大泄量工况强化溯源冲刷强度，破解支流高含沙过程侧向入汇的动态顶托效应。

（2）库容形态协同设计：提出库容分布与淤积形态协同设计，实现“高槽”调洪、“中槽”兴利、“深槽”调沙分区动态运用。

（3）工程水沙动态调控：采用“蓄清调浑”弹性运用模式，丰沙年份优先大流量排沙，通过“水沙置换”动态保持有效库容，平枯沙年份结合来水预报动态调蓄水位，协同优化兴利与排沙等目标实现“沙多调沙、沙少调水”的灵活运用。

该体系通过泥沙侵蚀基准面与库容的动态响应，使“水”库容与“沙”库容实现时空置换，直接响应场次洪水的水沙丰枯组合不确定性，提升工程应对极端水沙组合的韧性。

四、古贤水库工程泥沙设计关键技术

（一）超深超大泄流能力排沙底孔设计

针对古贤水库入库泥沙具有来沙量大、年内分布集中、汛期平均含沙量高等特点及库区泥沙淤积形态控制需求，需要设置较大的泄流规模，有利于在遭遇大洪水时能够提前泄空水库蓄水敞泄排沙，长期保持水库有效库容。恢复并重复利用拦沙库容是持续发挥古贤水库拦沙减淤效益的前提，因此，古贤水库设置了具有超深超大泄流能力的排沙底孔群，其中排沙底孔进口底板高程为490 m，调水调沙最低水位为578 m，必要时可进一步降低，对应泄流能力为11 011 m³/s（其中底孔泄流能力为6981 m³/s），汛限水位619 m对应的泄流能力为18 471 m³/s（其中底孔泄流能力为8467 m³/s），如图7所示。古贤水库通过设置超深超大泄流能力的排沙底孔，可大幅提高排沙的灵活性和有效性，在遭遇高含沙中小洪水过程时，通过“低水位–大比降–强冲刷”协同作用，形成快速响应的排沙廊道，破除支流泥沙入汇干流形成阻断干流的淤积沙坎，快速恢复水库有效库容，实现库容动态韧性保持，保证水库拦沙库容的长期重复利用。

（二）动态泥沙侵蚀基准面及动态库容设计

古贤水库通过动态泥沙侵蚀基准面与动态库容设计，突破传统单一死水位（588 m）下侵蚀基准面的刚性约束，构建两级动态泥沙侵蚀基准面（调水调沙最低水位为578 m，必要时可突破至更低高程），实现侵蚀基准面随水沙条件变化动态调整，如图8所示。该设计在常态水沙情势下，通过泥沙侵蚀基准面动态下调提升溯源冲刷与沿程冲刷效率，周期性恢复拦沙库容；在极端丰沙枯水条件下，依托高达19.91的泥沙调控度[28]（为小浪底6.8倍、三门峡99.6倍、东庄2.6倍），抑制古贤水库库容侵占风险。通过短历时高含沙洪水期的泥沙侵蚀基准面瞬时调整破除沙坎阻水效应，以及长序列枯沙年的渐进式调蓄平衡兴利与库容保护，古贤水库可形成“动态响应–弹性调蓄”双模机制，显著提升了工程水沙调控灵活性与极端水

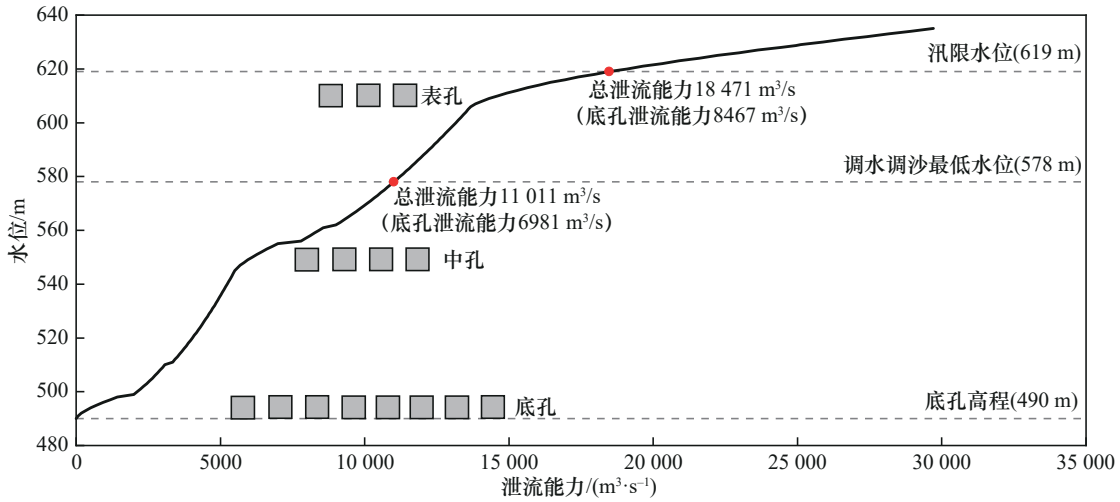


图7　古贤水库水位–泄量关系图

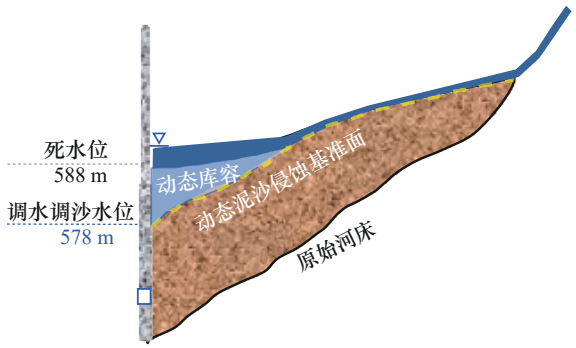


图8　动态泥沙侵蚀基准面与动态库容设计

沙组合应对能力。

下游河道减淤主要依靠水库拦截泥沙实现，然而目前的设计理念是水库拦沙减淤功能在拦沙库容淤满后丧失。古贤水库采用动态库容设计，基于超深超大泄流能力的排沙底孔和动态侵蚀基准面设计，实现部分拦沙库容恢复和重复利用，结合“相机泄空、适时回蓄”非常规运用方式，可应对极端来水来沙情况，实现“沙多调沙，水多调水”，拦沙库容可恢复 20% 以上，实现死库容“周期复活–持续利用”的目标。

（三）“三槽”淤积形态与库容分布协同设计

多沙河流水库规模指标受水库淤积形态和库容分布设计影响显著。库区泥沙淤积形态计算和库容分布设计在“蓄水拦沙”阶段往往是独立开展的，且库区河槽冲淤临界状态在淤沙形态设计中未被考虑，而实际上多沙河流水库库区“死滩活槽”特征明显，库区槽库容内的泥沙冲淤交替。古贤水库在河槽冲淤平衡形态设计时考虑了三种状态[29]，如图 9 所示：第一种为水库降水位至 578 m 排沙冲刷过程中塑造的“深槽”河槽形态；第二种为水库降至死水位 588 m 排沙冲刷过程中塑造的“中槽”河槽形态；第三种是在水库调水调沙和防洪运用过程中河槽严重淤积时（考虑最大淤积为 1.2×10^9 m³）形成的“高槽”形态。古贤水库按照“深槽调沙、中槽兴利、高槽调洪”原则，采用淤积形态和库容分布协同设计技术，实现拦沙、调沙、兴利、防洪等特征库容与库区泥沙淤积形态的精准匹配。

（四）“蓄清调浑”运用方式

针对复杂泥沙问题，古贤水库采用“蓄清调浑”运用方式[30]设计。不同于常规的“蓄清排浑”运用方式的被动排沙，“蓄清调浑”运用方式更注重水库“调”的作用，在水库设计上也有所不同。例如，古贤水库设置了 3.5×10^9 m³ 的调水调沙库容，其中，调水库容通过大流量下泄塑造高效输沙动力，调沙库容精准响应丰、平、枯水沙组合以及年际和年内水沙关系不协调引发的泥沙调节需要。该设计通过“调”的弹性控泄替代“排”的刚性操作，构建水沙双目标协同调控的技术范式，实现复杂水沙条件下库容韧性保持与河道输沙需求的动态适配。“蓄水拦沙”“蓄清排浑”“蓄清调浑”运用方式比较见表 3。

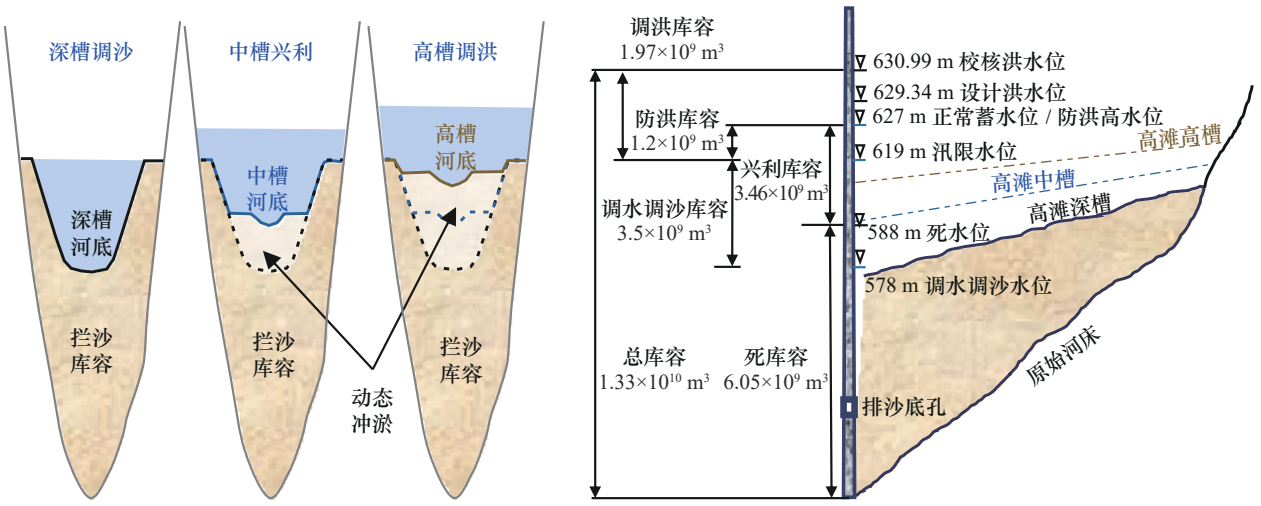


图9　古贤水库库区淤积形态与库容分布耦合设计

表3　“蓄水拦沙”“蓄清排浑”“蓄清调浑”运用方式比较

主要比较项	蓄水拦沙	蓄清排浑	蓄清调浑
处理理念	强制拦沙	被动排沙	主动调沙
淤积形态	不控制	一种淤积形态（高滩深槽）	三种淤积形态（高滩深槽、高滩中槽、高滩高槽）
排沙设计	不设计	单泥沙侵蚀基准面	双（动态）泥沙侵蚀基准面
设计寿命	库容淤满后终止	有效库容长期保持	有效库容长期保持，部分淤死库容再生利用
径流调控	库容淤满后无调节	主汛期基本不蓄水，效益保不全	相机跨年调节效益充分发挥
适应性	少沙河流	高含沙河流	高、超高、特高含沙河流

五、结语

古贤水库是黄河水沙调控体系的核心，对实现黄河下游长治久安、推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义，是一项标杆工程。作为典型的多沙河流水库，古贤水库工程泥沙设计关乎综合效益长期稳定发挥。基于三门峡、小浪底等多沙河流水库设计运行经验，本文详细梳理了古贤水库规划设计阶段过程中面临的长时序水沙耦合设计、淤积形态主动控制、库容动态韧性保持、高效灵活调水调沙及相机跨年调节水资源等设计要求，系统总结了古贤水库工程泥沙设计理念与技术突破，提出了“动态调控”的多沙河流水库工程泥沙设计理念，构建了“形态控制–过程调控–动态响应”三维技术体系，包含超深超大泄流能力排沙底孔设计、动态泥沙侵蚀基准面及动库容设计、“三槽”淤积形态与库容分布协同设计以及“蓄清调浑”运用方式四大关键技术，其核心在于枢纽排沙效能增强、库容形态协同设计以及工程泥沙动态调控，为古贤水库全生命周期防洪、供水、生态、排沙等综合效益发挥提供技术支撑，促进区域经济社会高质量发展。

当前，古贤水库已进入建设阶段，未来工程蓄水运用后，仍需加强在滩槽同步塑造、拦沙库容多元化利用、汛期浑水发电、水库群联合调度运用方式等方面开展进一步探索，在实际调度过程中不断优化，提升黄河水沙调控技术水平。此外，古贤水库工程泥沙设计理念创新与技术突破可为解放国内外多沙河流水库综合效益潜能提供技术借鉴。例如，黄河三门峡水利枢纽工程由于泥沙问题的制约，工程效益远未达到设计预期，未来可基于古贤水库工程泥沙设计技术对三门峡工程进行改建，可通过排沙底孔下卧改造，提高汛期运用水位，增强工程泄流排沙能力，塑造动态泥沙侵蚀基准面，恢复部分淤死库容，从而释放三门峡水库防洪、供水、兴利及生态等综合效益潜力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 22, 2025; **Revised date:** March 17, 2025

Corresponding author: Zhang Jinliang is a professor-level senior engineer from Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd. His major research field is design and regulation of water conservancy engineering in sediment-laden rivers. E-mail: jlzhangyrec@126.com

Funding project: National Key Research and Development Program of China (2023YFC3208605); National Natural Science Fund Project (52379068); China Postdoctoral Science Foundation (2022M721300)

参考文献

[1] Wang G Q, Wu B S, Wang Z Y. Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China [J]. Water Resources Research, 2005, 41(9): W09417.

[2] Kondolf G M, Gao Y X, Annandale G W, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents [J]. Earth's Future, 2014, 2(5): 256–280.

[3] Molina J L, Espejo F, Zazo S, et al. Assessment of sediments' transport triggering processes through the identification of deposition shapes in large reservoirs [J]. Water, 2024, 16(7): 960.

[4] 邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析 [J]. 水利学报, 2022, 53(3): 325–332.
Deng A J, Chen J G, Hu H H, et al. Analysis of reservoir siltation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325–332.

[5] Ahmed K B, Sanchez M. A study of the factors and processes involved in the sedimentation of Tarbela reservoir, Pakistan [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(5): 927–933.

[6] Abd-El Monsef H, Smith S E, Darwish K. Impacts of the Aswan high dam after 50 years [J]. Water Resources Management, 2015, 29(6): 1873–1885.

[7] El-Shazli A, Hoermann G. Development of storage capacity and morphology of the Aswan high dam reservoir [J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(14): 2639–2648.

[8] 程增辉, 田慧莹, 陈汉. 黄河古贤水利枢纽工程建设动员大会举行 [J]. 人民黄河, 2024, 46(8): 2.
Cheng Z H, Tian H Y, Chen H. The mobilization meeting of the Yellow River ancient water conservancy project construction was held [J]. Yellow River, 2024, 46(8): 2.

[9] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112–119.
Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 112–119.

[10] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题 [J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1028–1039.
Hu C H, Zhang X M. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1028–1039.

[11] 胡春宏. 黄河流域水沙变化机理与趋势预测 [J]. 中国环境管理, 2018, 10(1): 97–98.
Hu C H. Variation mechanism and trend prediction of water and sediment in the Yellow River Basin [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(1): 97–98.

[12] 刘晓燕, 马思远, 党素珍. 黄河流域近百年产沙情势变化 [J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 1–6.
Liu X Y, Ma S Y, Dang S Z. Processes of sediment yield in the Yellow River Basin in recent hundred years [J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(5): 1–6.

[13] 姚文艺, 焦鹏. 黄河水沙变化及研究展望 [J]. 中国水土保持, 2016 (9): 55–63, 93.
Yao W Y, Jiao P. Prospects in runoff and sediment variation and study of the Yellow River [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016 (9): 55–63, 93.

[14] 金鑫, 郝振纯, 张金良. 黄河中游水沙频率关系研究 [J]. 泥沙研究, 2006, 31(3): 6–13.
Jin X, Hao Z C, Zhang J L. Study on the relation of frequency between flood and sediment in the Middle Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2006, 31(3): 6–13.

[15] 张金良, 郜国明. 关于建立黄河泥沙频率曲线问题的探讨 [J]. 人民黄河, 2003, 25(12): 17–18.
Zhang J L, Gao G M. Approach to establishing sediment frequency curve of the Yellow River [J]. Yellow River, 2003, 25(12): 17–18.

[16] Xu Z, Zhang S H, Yang X Y. Water and sediment yield response to extreme rainfall events in a complex large river basin: A case study of the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126183.

[17] Jian S Q, Pei Y N, Zhu T S, et al. Spatiotemporal change and attribution analysis of future runoff on the Yellow River Basin of China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 49: 101494.

[18] 石长伟, 张智, 王亚梅, 等. 潼关高程变化及其对渭河下游的影响分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 125–129.
Shi C W, Zhang Z, Wang Y M, et al. Change of Tongguan elevation and its influence on the lower reaches of Weihe River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 125–129.

[19] 杨亚娟, 许林军, 刘政鸿, 等. 毛不拉孔兑暴雨径流产输沙特征研究 [J]. 水土保持应用技术, 2013 (1): 12–14.
Yang Y J, Xu L J, Liu Z H, et al. Study on characteristics of runoff and sediment transport in Maobulakon-rainstorm path [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2013 (1): 12–14.

[20] 王婷, 周恒, 苏加林, 等. 黄河刘家峡水库坝前沙坝对水沙和水库调度的响应研究 [J]. 西北水电, 2021 (5): 17–20, 25.
Wang T, Zhou H, Su J L, et al. Study on response of sand bar in front of the Liujiaxia Reservoir to flow, sediment and reservoir regulation [J]. Northwest Hydropower, 2021 (5): 17–20, 25.

[21] 梁艳洁, 罗秋实, 韦诗涛. 洮河异重流倒灌对刘家峡库区河床变化的影响 [J]. 人民黄河, 2015, 37(12): 19–22.
Liang Y J, Luo Q S, Wei S T. Effect of Taohe River density current extended on the Liujiaxia Reservoir bed [J]. Yellow River, 2015, 37(12): 19–22.

[22] 杨德应, 王玲, 高贵成, 等. 陕北清涧河 "2002 • 7" 暴雨洪水分析 [J]. 人民黄河, 2002, 24(12): 10–11, 45.

Yang D Y, Wang L, Gao G C, et al. Analysis of “July 2002” rainstorm and flood in Qingjian River in northern Shaanxi [J]. Yellow River, 2002, 24(12): 10–11, 45.

[23] 余欣, 侯素珍, 李勇, 等. 黄河无定河流域“2017.7.26” 洪水泥沙来源辨析 [J]. 水利水运工程学报, 2019 (6): 31–37.
Yu X, Hou S Z, Li Y, et al. Identifying sediment sources in wudinghe river during “7·26” flood in 2017 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (6): 31–37.

[24] 张原锋, 王平, 侯素珍, 等. 黄河上游干支流交汇区沙坝淤堵形成条件 [J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 333–339.
Zhang Y F, Wang P, Hou S Z, et al. On conditions of sandbar clogging at confluences in the Upper Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 333–339.

[25] 景来红, 万占伟, 陈翠霞. 延长小浪底水库拦沙运用年限对黄河防洪保安的重大意义 [J]. 人民黄河, 2024, 46(1): 1–4, 24.
Jing L H, Wan Z W, Chen C X. Significance of extending the service life of Xiaolangdi Reservoir in sediment retention for Yellow River flood control and security [J]. Yellow River, 2024, 46(1): 1–4, 24.

[26] Li G Y, Sheng L X. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 924–930.

[27] 高兴, 朱呈浩, 刘俊秀, 等. 新时期黄河调水调沙思考与建议 [J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 42–46.
Gao X, Zhu C H, Liu J X, et al. Thoughts and suggestions on water-sediment regulation of the Yellow River in the new period [J]. Yellow River, 2023, 45(2): 42–46.

[28] 张金良, 胡春宏, 刘继祥, 等. 多泥沙河流水库汛期水沙调控度研究 [J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 1–5.
Zhang J L, Hu C H, Liu J X, et al. Study on regulation degree of water and sediment of reservoirs from sediment-laden rivers in flood season [J]. Yellow River, 2021, 43(11): 1–5.

[29] 张金良. 多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 45–50.
Zhang J L. Coupling design for sedimentation pattern and storage capacity distribution of reservoirs in sediment-laden rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 45–50.

[30] 张金良, 胡春宏, 刘继祥. 多沙河流水库“蓄清调浑” 运用方式及其设计技术 [J]. 水利学报, 2022, 53(1): 1–10.
Zhang J L, Hu C H, Liu J X. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(1): 1–10.