



小浪底水库调水调沙生态效应研究

韩冰^{1,2,3}, 张唱⁴, 高云霓⁵, 应一梅⁶, 田世民^{1,2,3*}, 邹清洋^{1,2,3}, 赵凌栋^{1,2,3}, 景永才^{1,2,3}

1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003

2. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003

3. 河南省黄河水生态环境工程技术研究中心, 郑州 450003

4. 生态环境部黄河流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 郑州 450004

5. 河南师范大学水产学院, 新乡 453007

6. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 郑州 450046

* E-mail: tsm1981@163.com

收稿日期: 2024-09-30; 接受日期: 2024-12-11; 网络版发表日期: 2025-04-23

国家重点研发计划(编号: 2021YFC3200402)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号: HKY-JBYW-2021-05)资助项目

摘要 本文基于2023年小浪底水库汛前调水调沙生态要素监测数据, 结合历史研究成果, 对小浪底水库调水调沙生态效应进行评估, 主要结论如下. (1) 清水下泄阶段, 受河道冲刷引起底泥再悬浮影响, 西霞院至艾山区间水体氨氮浓度沿程增加; 集中排沙阶段, 受水库泥沙下泄引起的污染物释放影响, 西霞院至花园口区间水体氨氮、总磷和总氮浓度受到一定程度的冲击; (2) 集中排沙阶段, 沿程水体溶解氧浓度降至0.2~4.6 mg/L, 其中伊洛河口至花园口区间水体溶解氧浓度在0.2~0.9 mg/L之间, 显著低于其他时段, 主要与库区泥沙再悬浮释放还原性物质消耗水中氧气有关; (3) 2023年, 黄河下游共调查到鱼类58种, 与2009~2010年和2013~2017年相比有明显增加; 下游鱼类种类数的增加与小浪底水库调水调沙冲刷河道稳定河势和加强鱼类繁殖期生态流量保障有关; (4) “流鱼”是黄河特有的自然现象, 通常由高含沙、低溶解氧的洪水引起. 2023年调水调沙期间“流鱼”现象发生河段主要集中在小浪底坝下至西霞院水文站河段, 与历史时期相比, “流鱼”发生河段明显缩短; (5) 伊洛河口和沁河口分别维持了适宜鱼类生存的低含沙带. 集中排沙阶段, 伊洛河口调查到鱼类26种, 较调水调沙前多11种, 表明伊洛河口和沁河口低含沙带对鱼类的庇护作用明显.

关键词 小浪底水库, 调水调沙, 生态效应, 鱼类

1 引言

黄河水资源短缺, 供需矛盾突出. 20世纪90年代河道外年均耗水量接近300亿m³, 几乎年年断流, 最严重的1997年下游利津站断流时间长达226 d, 断流河段长

度约占黄河下游河道长度的90%. 断流导致黄河下游淤积严重, 干流鱼类资源锐减, 河口湿地萎缩, 近海生态恶化, 流域生态失衡加剧. 2002年, 小浪底水库开始首次调水调沙试验, 自此, 小浪底水库成为黄河水量精准调度的关键节点, 支撑黄河下游从不断流、功能

引用格式: 韩冰, 张唱, 高云霓, 等. 小浪底水库调水调沙生态效应研究. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 968–979

Han B, Zhang C, Gao Y N, et al. A study on the ecological effects of water and sediment regulation by Xiaolangdi Reservoir (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 968–979, doi: 10.1360/SST-2024-0260

性不断流、生态调度等调度目标的实现。2002~2023年,小浪底水库共实施27次调水调沙,下游河势趋于稳定,主槽过流能力显著提升,生态环境明显改善,生物多样性恢复性提升。

为评估调水调沙实施效果,许多学者从不同角度开展了分析研究。其中,小浪底水库库区及下游河道冲淤变化一直是备受关注的重点,多以冲淤演变^[1,2]、入海水沙和主槽过流能力^[3,4]等分析评估为主,黄河水利科学研究院每年开展有关分析工作,成果具有较好的延续性^[5]。2010年起,调水调沙对下游鱼类资源的影响受到关注,介子林等开展了调水调沙期间鱼类资源调查,发现了支流河口对鱼类的庇护作用,并提出了有关建议^[6];自此,较为系统的下游鱼类资源调查研究^[7~10]为小浪底生态效应评估提供了数据支撑,然而,关于调水调沙对鱼类的短期影响研究未见后续报道。而调水调沙对水质^[11,12]、浮游生物^[13,14]的影响方面的研究也缺乏延续性。随着黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略深入实施,公众对小浪底水库调水调沙的生态影响越来越关注,科学开展调水调沙生态效应研究是回应社会关切,支撑小浪底水库调水调沙优化调度的重要抓手。

2023年汛前调水调沙期间,采用万家寨、三门峡和小浪底水库调控为主,支流陆浑、故县、河口村水库相机配合的联合调度模式,减少调水调沙期间对鱼类的短期不利影响。本文基于2023年小浪底水库汛前调水调沙生态要素监测数据,结合历史研究成果,对小浪底水库调水调沙长期和短期生态效应进行系统评

估,以期小浪底水库调水调沙实践提供支撑。

2 研究方法

2.1 监测时间

2023年小浪底水库汛前调水调沙生态监测分为4个时段:调水调沙前(6月17~20日)、清水下泄阶段(6月28日~7月1日)、集中排沙阶段(7月7~14日)和调水调沙后(8月22~24日)。

2.2 监测范围

监测点位包括小浪底、西霞院、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津等9个水文断面,入海口以及伊洛河口和沁河口等2个重点区域(图1)。

2.3 监测内容与方法

监测内容主要包括流量、含沙量、悬沙粒径、溶解氧、浮游生物和鱼类,以及伊洛河口和沁河口低含沙带范围等。

2.3.1 水文泥沙

小浪底、西霞院、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津等水文断面流量和泥沙数据采用黄河网“黄河水情信息查询及会商系统”中的日均值。

2.3.2 含沙量和粒径级配

采用比重法测定含沙量,采用激光粒度仪(Master-

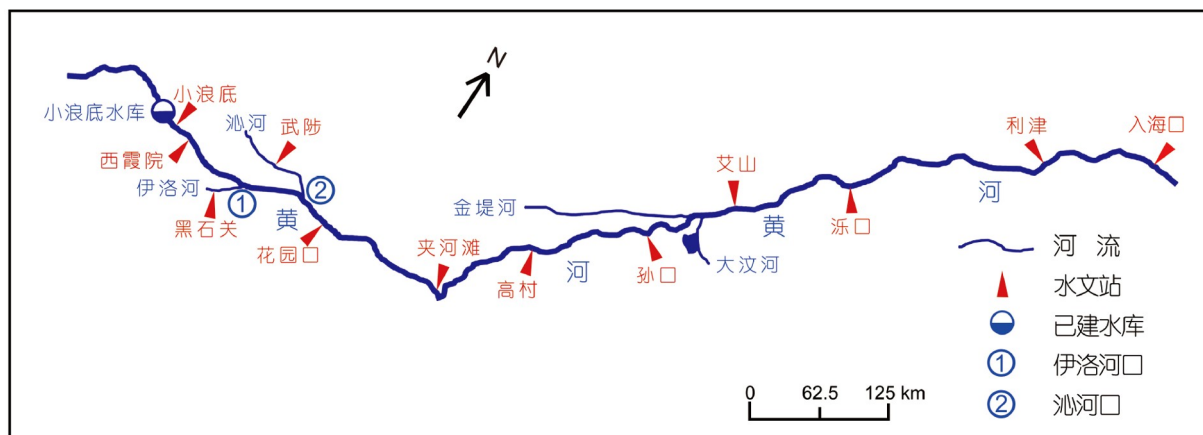


图1 (网络版彩图)监测点位分布示意图

Figure 1 (Color online) Distribution of ecological monitoring sites.

sizer 3000, 英国)分析悬沙粒径级配。

2.3.3 低含沙带监测

利用无人机(DJI PHANTOM 4)垂向拍摄伊洛河口、沁河口低含沙带视频影像, 将视频截图拼接为完整区域图像, 利用卫星图像(天地图)嵌套后统计伊洛河口和沁河口低含沙带面积。

2.3.4 水质监测

水体总氮的测定参照《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ636-2012), 总磷的测定参照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB11893-89), 氨氮的测定参照《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(GB7479-87)。水体溶解氧浓度采用便携式水质分析仪(YSI, 美国)进行现场测定。

2.3.5 水生生物监测

鱼类调查采用传统调查法和环境DNA技术相结合的技术方法, 开展鱼类种类组成、资源现状调查和“流鱼”观测。

(1) 传统调查法。按照预设断面进行定点调查, 根据生境状况选择地笼、粘网等捕获鱼类, 采集的鱼类标本用95%酒精固定保存带回实验室备检。依据《河南鱼类志》(新乡师范学院编写组, 1994)、《中国动物志》(硬骨鱼纲鲤形目(中卷))(陈宜瑜等, 1998)、《中国动物志》(硬骨鱼纲鲤形目(下卷))(乐佩琦等, 2000)、《中国动物志》(硬骨鱼纲鲇形目)(褚新洛等, 1999)、《中国淡水鱼类原色图集》(朱可才等, 1982)等进行鱼类种类的鉴定, 整理出调查河段鱼类种类组成名录。

(2) 环境DNA技术。采集水样3 L, 使用真空泵抽滤富集到孔径0.45 μm 的玻璃纤维素滤膜上。若水样浑浊, 则使用无菌医用纱布将水样粗滤后进行抽滤, 将滤膜置于冻存管中于液氮中保存。提取DNA后采用PCR扩增技术对鱼类12S rRNA进行扩增, 采用引物为通用引物MiFish-F(5'-GTCGGTAAACTCGTGCCAGC-3'), MiFish-R(5'-CATAGTGGGGTATCTAATCCCAGTTTG-3'), 每个样品进行3次重复。使用Axy-Prep DNA凝胶回收盒回收PCR产物, 并使用Quanti-Fluor-ST蓝色荧光定量系统检测, 之后构建MiSeq文库, 采用Illumina MiSeq Platform进行高通量测序。

3 结果与讨论

3.1 水沙过程

2023年汛前调水调沙期间, 小浪底水库最大下泄流量按控制花园口水文站4500 m^3/s 左右、含沙量峰值不超过359 kg/m^3 运用。沿程主要断面水文数据显示, 清水下泄阶段, 小浪底水库下泄洪峰日均流量维持在4160~4410 m^3/s , 持续时间为6月25日至31日(图2); 花园口断面洪峰日均流量维持在4330~4550 m^3/s , 持续时间为6月26日至7月1日; 利津断面洪峰流量维持在3300~3690 m^3/s , 持续时间为6月30日至7月5日。集中排沙阶段, 小浪底水库下泄洪水的含沙量峰值沿程降低, 从小浪底断面的日均含沙量峰值329 kg/m^3 , 降至花园口断面的53.3 kg/m^3 , 再逐步降至利津断面的31.6 kg/m^3 , 小浪底水库下泄洪峰在利津断面与高含沙水流叠加, 有利于排沙入海。

调水调沙期间, 伊洛河下泄清水流量(黑石关站)由6月25日的77.9 m^3/s 逐步增加到7月11日的320 m^3/s ; 沁河下泄清水流量(武陟站)的2个洪峰均约140 m^3/s , 分别出现在7月1日和9~10日(图3)。集中排沙阶段, 黄河干流伊洛河口至沁河口区间最大含沙量累计下降35%, 主要与集中排沙初期高含沙水流所携悬移质中泥沙沿程淤积有关^[15]。其中, 伊洛河、沁河下泄清水通过水量稀释使干流最大含沙量降低了12%左右, 表明两大支流大流量清水下泄对于降低干流水体含沙量有明显作用。

3.2 调水调沙对下游水质的影响

黄河下游水体氨氮、硝酸盐氮、磷酸盐等营养盐浓度在调水调沙期间往往受到不同程度的影响。监测结果显示, 调水调沙前, 各水文断面水体氨氮、总磷和总氮浓度范围分别为0.02~0.42 mg/L , 0.02~0.11 mg/L 和3.75~5.09 mg/L (图4(a)~(c)); 清水下泄阶段, 水体氨氮浓度由西霞院断面的0.22 mg/L 沿程增加至艾山断面的2.07 mg/L , 水体总磷浓度则在西霞院、孙口和艾山断面出现大幅度增加, 分别为0.49, 0.75和0.65 mg/L ; 集中排沙阶段, 水体氨氮、总磷和总氮浓度在西霞院至花园口区间呈增加趋势, 最大值分别为2.83, 0.36和6.18 mg/L ; 调水调沙后, 各水文断面水体氨氮、总磷和总氮浓度范围分别恢复至0~0.93 mg/L , 0~0.20 mg/L 和2.15~3.37 mg/L 。以上结果表明, 清水下泄阶段和集

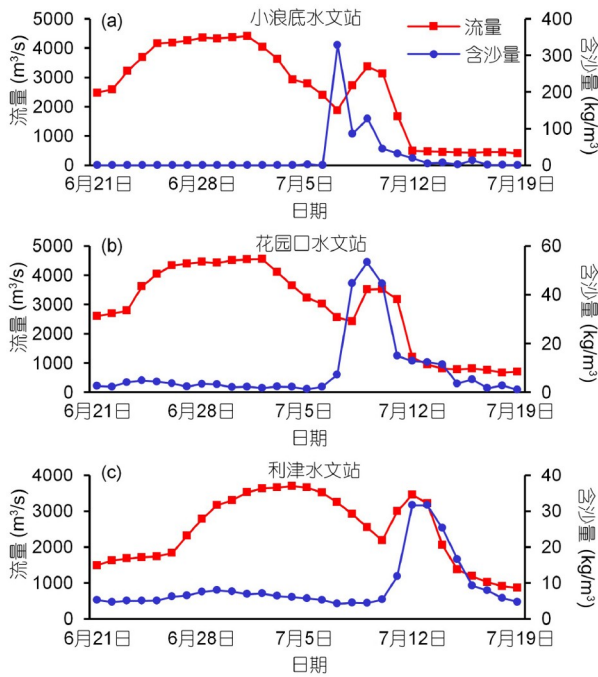


图 2 (网络版彩图)干流主要断面水沙过程

Figure 2 (Color online) Water and sediment processes in the main cross-section of the main stream.

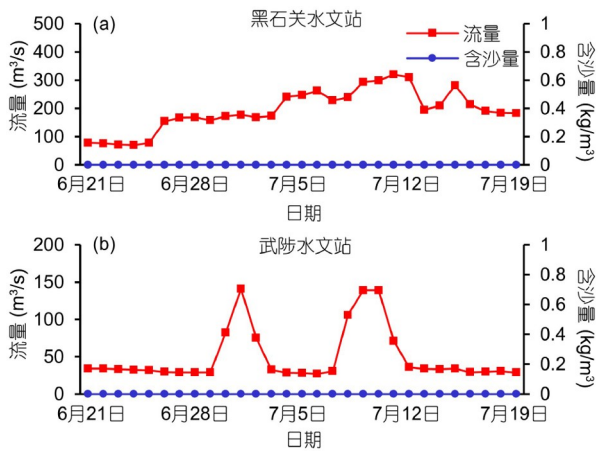


图 3 (网络版彩图)伊洛河(a)和沁河(b)主要断面水沙过程

Figure 3 (Color online) Water and sediment processes in the main cross-section of the Yiluo River (a) and the Qin River (b).

中排沙阶段水体氨氮、总磷和总氮浓度受到一定程度的冲击, 调水调沙结束后即恢复正常, 与以往研究一致^[12]. 在蓄水期, 水库拦蓄上游来水的同时, 引起泥沙以及氮、磷、溶解性有机质等营养物质在库区的沉积^[16,17]. 这些物质在水库排沙调度过程中随着库区泥

沙的再悬浮进入水体并集中下泄至下游河道, 导致下游水体营养盐上升和氧化还原电位的下降^[18]. 库区水体也是下泄水体营养物质的重要来源, 例如, 澳大利亚东南部休姆湖大型水库水量下泄使下游碳、氮、磷等物质浓度上升, 研究表明它们主要来源于库区的藻类物质^[19]. 在本研究中, 下游河道全年水量以小浪底水库下泄水量为主, 下游水质因而受小浪底水库水沙调度主导. 集中排沙阶段下游水质变化较清水下泄阶段更为显著, 表明泥沙是集中排沙阶段影响下游水质的主要因素. 以往研究表明, 清水下泄阶段水体营养盐浓度增加主要与下游河道沉积物的再悬浮有关, 集中排沙阶段水体营养盐浓度增加则主要与小浪底水库泥沙下泄引起的污染物释放有关^[20].

集中排沙阶段, 沿程水体溶解氧浓度降至 0.2~4.6 mg/L, 其中伊洛河口至花园口区间水体溶解氧浓度在 0.2~0.9 mg/L (图 4(d)), 显著低于调水调沙前 (8.0~10.0 mg/L)、清水下泄阶段 (3.8~8.6 mg/L) 和调水调沙后 (2.4~8.4 mg/L). 在连续 6 年开展的美国瀑布溪水库排沙调度过程中, 下游水体平均含沙量 0.65~3.95 kg/m³、最大含沙量 17.5 kg/m³ 条件下, 监测到的水体溶解氧最低值达到 0.71 mg/L^[21]. 虽然瀑布溪水库下泄水流含沙量低于小浪底水库集中排沙阶段下泄水流含沙量, 其下泄过程对下游水体溶解氧同样有显著影响. 小浪底水库集中排沙阶段, 库区下层水体携带大量泥沙通过排沙洞下泄, 相关分析显示, 小浪底水库下游沿程水体氨氮浓度与含沙量呈正相关关系, 水体溶解氧浓度与含沙量呈负相关关系 (图 5), 表明库区泥沙再悬浮与水体氨氮浓度的增加有关, 低溶解氧往往伴随高含沙水流出现. 受气温变化影响, 水深超过 7 m 的水库、湖泊等天然水体由于垂向上受热不均会产生热分层, 热分层使溶解氧向下层水体传递受到限制, 导致下层水体溶解氧含量明显低于表层水体^[22,23]. 而库区下层微生物、浮游动物以及沉积有机质等还原性物质受到扰动后, 大量消耗水体溶解氧^[24~26]. 较高的溶解氧消耗速率是导致下泄水体溶解氧在小浪底大坝至花园口 128 km 的河长仍未得到有效补充的重要原因.

3.3 调水调沙对下游鱼类资源的影响

20 世纪 90 年代, 黄河下游河道频繁断流, 鱼类资源遭受严重损失. 小浪底水库调水调沙以来, 黄河河南、山

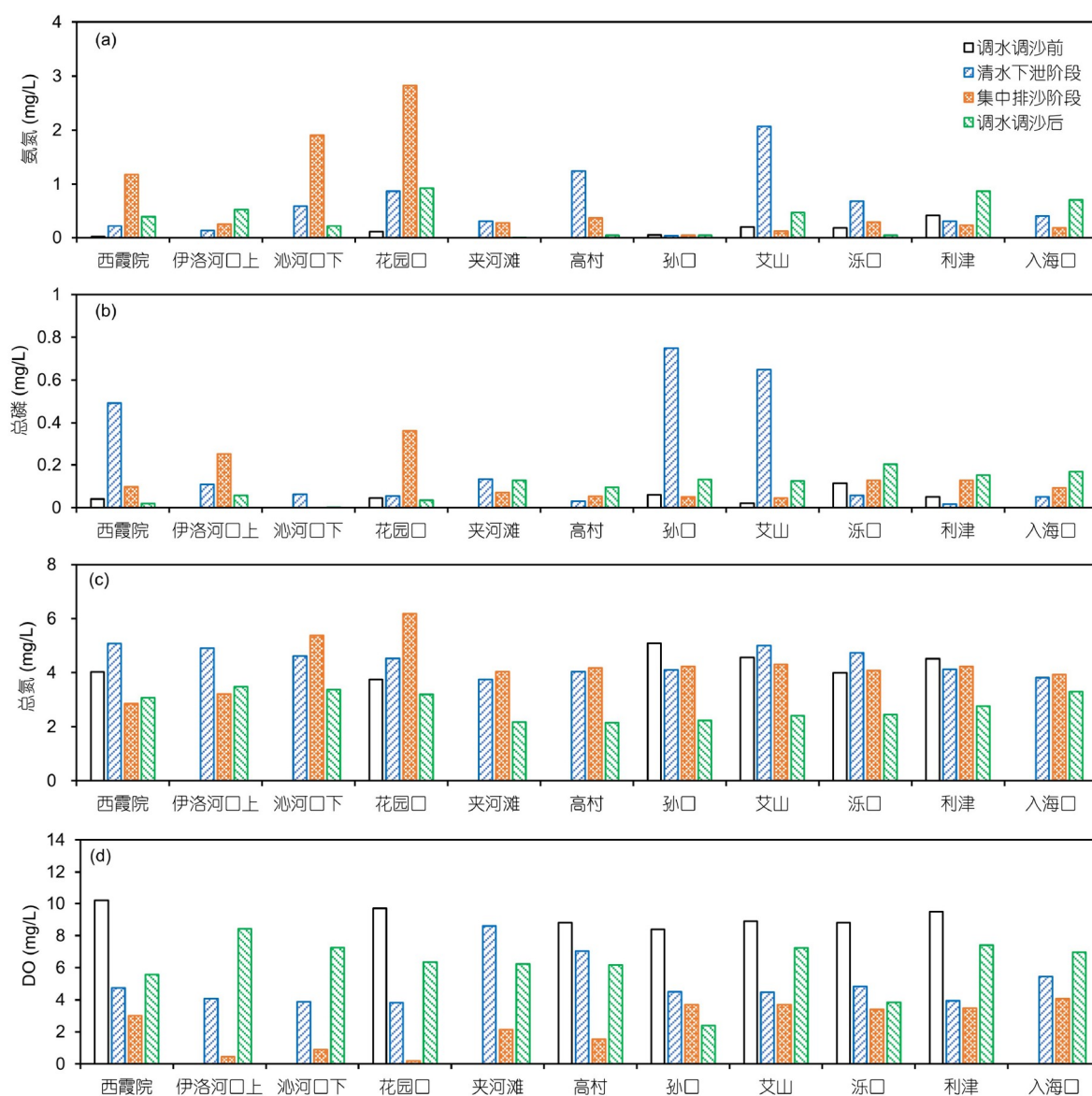


图4 (网络版彩图)不同阶段沿程水质状况。(a) 氨氮; (b) 总磷; (c) 总氮; (d) DO

Figure 4 (Color online) Water quality conditions along the route at different stages. (a) Ammonia nitrogen; (b) total phosphorus; (c) total nitrogen; (d) dissolved oxygen.

东段鱼类生物多样性明显恢复。2023年调水调沙期间, 黄河下游共调查到鱼类58种(表1), 其中传统调查法和环境DNA检测法分别获取到31种和47种, 与丛旭日等^[10]在黄河山东段调查到的鱼类种类数59种接近, 与葛雷等^[9]报道的2018~2020年黄河河南段鱼类种类数62种少3种, 可能与调查次数和时间跨度有关。本文调查得到的鱼类种类数与2009~2010年(36种和41种)和2013~2017年(54种和48种)相比有明显增加。

下游鱼类种类数的增加与小浪底水库调水调沙关系密切。经过连续22年的调水调沙, 下游河道平均下切3.1 m, 主槽过流能力由2002年的1800 m³/s提升到现在的5000 m³/s。花园口至孙口段是黄河下游鱼类“三场”的主要分布河段, 小浪底水库建设对该河段鱼类栖息地无显著影响^[27], 经过多年的冲刷, 河势趋于稳定^[28], 为鱼类生长繁殖提供了稳定的栖息生境。鱼类栖息地稳定是鱼类资源恢复的基础, 而适宜的流量是维持栖

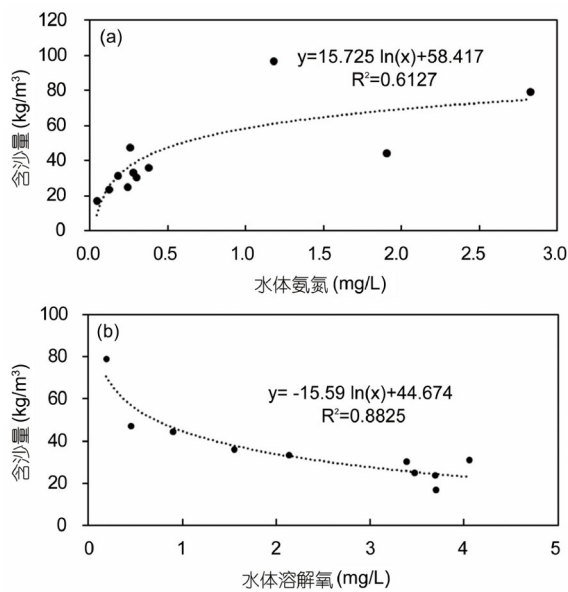


图 5 水体含沙量与氨氮、溶解氧相关关系曲线. (a) 水体含沙量与氨氮相关关系曲线; (b) 水体含沙量与溶解氧相关关系曲线

Figure 5 Correlation curves between sediment concentration and ammonia nitrogen, dissolved oxygen. (a) Correlation curve between sediment concentration and ammonia nitrogen; (b) correlation curve between sediment concentration and dissolved oxygen.

表 1 鱼类资源变化情况

Table 1 Changes in fish resources

年份	鱼类种类数		数据来源
	河南段	山东段	
20世纪50~60年代	103	118	[20]
2009~2010年	36	41	[20]
2013~2017年	54	48	[20]
2018~2020年	62	53	[9]
2019~2021年	—	59	[10]
2023年	58		本研究

息地规模的重要水文因子。以往研究表明,花园口段亲鱼栖息地适宜规模在流量150~850 m³/s范围内随流量增大而增大,而鱼苗栖息地面积随流量增加略有减少,但总体维持在100~130 hm²范围内^[29]。近年来,通过小浪底水库生态调度,下游河段主要断面生态基流保障程度由20世纪90年代的56%左右提高到现在的100%^[30],4~6月鱼类繁殖期花园口、利津断面平均流

量分别超过和接近天然情况(20世纪60年代)流量水平^[9],为鱼类栖息地规模的稳定提供了生态流量保障,促进了黄河下游鱼类种类数的恢复性增加。

3.4 调水调沙期间“流鱼”发生河段变化

由于含沙量过大,致使水体严重缺氧,再加上泥沙封闭了鱼类的鳃丝,鱼类不能正常呼吸,导致大量鱼类漂浮于水面,即人们所说的“流鱼”。“流鱼”是黄河特有的自然现象,通常发生在每年七八月份,来自黄土高原的暴雨洪水携带大量泥沙入河,形成自然的“流鱼”现象。黄土高原土壤粒径0.05 mm以下的平均占比达到80.85%,且沙源供给充足,因此当洪水达到某一量级时仍能够携带大量的泥沙,形成高含沙水流^[31]。例如,1970~2012年皇甫川、佳芦河和延河3个流域发生的5次极端洪水事件中,实测最大含沙量达到774~984 kg/m³^[32]。1992年8月,黄河中游发生中常洪水,但降雨主要来源于多沙区,府谷站最大含沙量达到746 kg/m³,三门峡站最大含沙量达到479 kg/m³^[33]。有研究表明,当溶解氧浓度低于2 mg/L或含沙量大于30 kg/m³时,鱼类生存受到较大影响^[34]。

小浪底水库调水调沙以来,由于人造高含沙洪水在极短时间内形成和演进,集中排沙期往往形成剧烈的人为“流鱼”现象。2004~2022年,小浪底水库调水调沙期间小浪底站最大含沙量在96.1~375 kg/m³之间,虽不及前述报道中极端洪水期间最大含沙量峰值,但含沙量平均涨幅高达22.9~78.1 kg/(m³·h)^[35]。库区鱼类受此影响随人造沙峰顺流而下,形成“流鱼”。经走访调查,2008年以前调水调沙期间“流鱼”现象发生河段可延伸至济南平阴段,与之相比,近年来“流鱼”现象发生河段明显缩短。据观测,2023年调水调沙期间,“流鱼”现象主要集中发生在小浪底坝下至西霞院水文站河段,伊洛河口以下河段未观测到“流鱼”现象。有研究表明,0.075 mm以下的泥沙可进入鱼鳃组织间隙堵塞鱼鳃,0.075~0.25 mm的泥沙会对鱼鳃产生机械磨损^[36]。集中排沙阶段,沿程悬沙中值粒径约0.02~0.05 mm,99.6%的悬沙粒径在0.25 mm以下,沿程悬沙粒径无显著差异(图6),且与长江等河流洪水期悬沙中值粒径无显著差异^[37,38]。以上结果表明,悬沙粒径虽不是导致“流鱼”发生的主要因素,但库区沉积的大量细沙为集中排沙阶段高含沙洪水的塑造提供了条件。从2023年实测最大含沙量和水体溶解氧沿程变化

看, 伊洛河口以上的高含沙洪水是“流鱼”发生的主导因素, 伊洛河口至花园口段的低溶解氧浓度对于“流鱼”发生未起到决定性作用。

3.5 伊洛河口低含沙带对鱼类的庇护作用

2023年调水调沙过程中, 通过控制水体含沙量峰值, 利用支流联合调度稀释高含沙水流, 制造低含沙环境为鱼类提供庇护场所等措施减缓对鱼类的不利影响。集中排沙阶段, 伊洛河口和沁河口分别形成了约7万m²和12万m²的低含沙带(图7)。期间, 黄河干流伊洛河口至沁河口区间最大含沙量约44.3~48.7 kg/m³, 水体溶解氧浓度在0.45~1.26 mg/L之间; 伊洛河口、沁

河口低含沙带含沙量分别为0.68和0.32 kg/m³, 水体溶解氧浓度分别为5.90和6.70 mg/L, 维持了适宜鱼类生存的低含沙量和较高的溶解氧水平。

伊洛河口鱼类资源调查采用环境DNA检测法, 调水调沙前, 伊洛河口低含沙带调查到鱼类15种, 主要包括拉氏鲮、鲫、宽鳍鱲、麦穗鱼、高体鳊、彩石鲃、颌须鲃、草鱼、青鱼、大鳞副泥鳅和虾虎鱼等(表2), 多为伊洛河常见鱼类^[39]。集中排沙阶段, 伊洛河口低含沙带调查到鱼类26种, 新增加的鱼种主要有鲤、鳊、银鲃、鲢、雅罗鱼、攀鲈、罗非鱼、泥鳅、黄鳝、细鳞鲃、虹鳟等11种。其中, 鲤、雅罗鱼、泥鳅、罗非鱼、黄鳝、虹鳟等为低氧环境耐受性较强

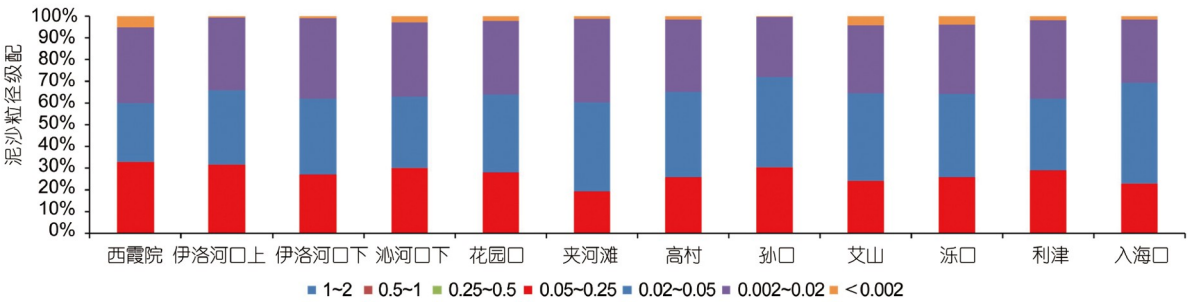


图6 集中排沙阶段沿程悬沙粒径分布
Figure 6 Changes in particle size distribution of suspended particles along the route during the sand discharge stage.

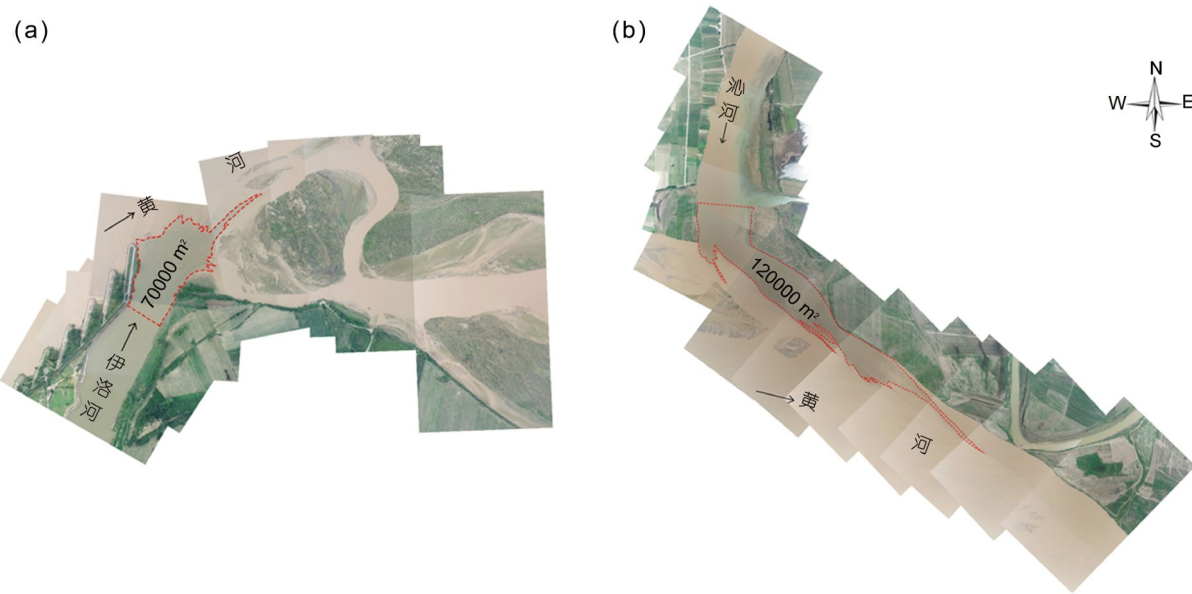


图7 伊洛河口(a)、沁河口(b)低含沙带范围示意图
Figure 7 The low sediment concentration zone at the estuary of the Yiluo River (a) and the Qin River (b).

表 2 伊洛河口低含沙带鱼类资源变化情况
Table 2 Changes in fish resources in the low sediment concentration zone at the Yiluo River estuary

序号	属	种	习性	调水调沙前	集中排沙期
1	鲤属	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	底层		+
2	鲮属	鲮 <i>Hemiculter leuciscus</i>	中上层		+
3	鲢鱼属	银鲢 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	中上层		+
4	鲢属	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	上层		+
5	鳊属	拉氏鳊 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	中上层	+	+
6	鲫属	鲫 <i>Carassius auratus</i>	底层	+	+
7	鳊属	宽鳍鳊 <i>Zacco platypus</i>	中上层	+	+
8	麦穗鱼属	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	中上层	+	+
9	鳊属	高体鳊 <i>Rhodeus ocellatus</i>	底层	+	+
10	鳊属	彩石鳊 <i>Rhodeus lighti</i>	底层	+	+
11	颌须鲃属	颌须鲃 <i>Gnathopogon taeniellus</i>	底层	+	+
12	草鱼属	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	中下层	+	+
13	青鱼属	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	中下层	+	+
14	雅罗鱼属	雅罗鱼 <i>Leuciscus sp.</i>	底层		+
15	高原鳅属	高原鳅 <i>Triplophysa sp.</i>	底层	+	+
16	泥鳅属	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	底层		+
17	副泥鳅属	大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	底层	+	+
18	吻虾虎鱼属	虾虎鱼 <i>Rhinogobius sp.</i>	中下层	+	+
19	攀鲈属	攀鲈 <i>Anabas testudineus</i>	中上层		+
20	罗非鱼属	罗非鱼 <i>Oreochromis</i>	中下层		+
21	黄颡鱼属	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	底层	+	+
22	拟鲢属	乌苏里拟鲢 <i>Pseudobagrus ussuriensis</i>	底层	+	+
23	鲇属	鲇 <i>Silurus asotus</i>	底层	+	+
24	黄鲢属	黄鲢 <i>Monopterus albus</i>	底层		+
25	细鳞鲢属	细鳞鲢 <i>Brachymystax sp.</i>	中上层		+
26	太平洋鲢属	虹鲢 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	中下层		+

的底层或中下层鱼类. 结果表明, 集中排沙阶段, 高含沙洪水中的低氧环境超出这些鱼类的耐受范围, 伊洛河口低含沙带为其提供了有效庇护. 本研究中, 集中排沙阶段伊洛河口低含沙带增加的11个鱼种中, 鲤、鳊、鲢、雅罗鱼、罗非鱼、泥鳅、黄鲢、细鳞鲢、虹鳟等9种在黄河中游均有分布^[39], 鲤、鳊、鲢、雅罗鱼、泥鳅等5种在伊洛河中也有分布^[40]. 以上结果表明, 即使伊洛河大流量清水下泄可能导致伊洛河口鲤、鳊、鲢、雅罗鱼、泥鳅等鱼种的增加, 罗非鱼、黄鲢、细鳞鲢、虹鳟等鱼种的增加也证实了集中排沙阶段黄河鱼类在伊洛河的规避行为. 介子林等^[6]对小浪底水库调水调沙前、中、后伊洛河鱼类资源的调查

研究也发现了类似证据, 2008年调水调沙期间伊洛河鱼类物种数由4种增加到了8种, 主要的庇护对象有鲤、鲫、黄颡鱼、赤眼鳟、鲃类等物种.

4 结论

小浪底水库调水调沙期间, 水沙过程对水质和鱼类造成短期不利影响, 调水调沙后即可恢复. 从长期来看, 小浪底水库水沙调度对下游鱼类生物多样性的增加具有明显的促进作用. 主要结论如下.

(1) 清水下泄阶段, 受河道冲刷引起底泥再悬浮影响, 西霞院至艾山区间水体氨氮浓度沿程增加, 西霞

院、孙口和艾山断面水体总磷浓度出现大幅度增加;集中排沙阶段,受水库泥沙下泄引起的污染物释放影响,西霞院至花园口区间水体氨氮、总磷和总氮浓度受到一定程度的冲击。

(2) 集中排沙阶段,沿程水体溶解氧浓度降至0.2~4.6 mg/L,其中伊洛河口至花园口区间水体溶解氧浓度在0.2~0.9 mg/L,显著低于其他时段,主要与库区泥沙再悬浮释放还原性物质消耗水中氧气有关。

(3) 2023年,黄河下游共调查到鱼类58种,与2009~2010年和2013~2017年相比有明显增加,与小浪底水库调水调沙冲刷河道稳定河势和加强鱼类繁殖期生态流

量保障有关。

(4) “流鱼”是黄河特有的自然现象,通常由高含沙、低溶解氧的洪水引起。2023年调水调沙期间“流鱼”发生河段主要集中在小浪底坝下至西霞院水文站河段,与历史时期相比,“流鱼”发生河段明显缩短。

(5) 伊洛河口和沁河口分别维持了适宜鱼类生存的低含沙带。集中排沙阶段,伊洛河口调查到鱼类26种,较调水调沙前多11种,表明伊洛河口和沁河口低含沙带对鱼类的庇护作用明显,主要庇护对象由鲤、鲮、银鲈、鲢、雅罗鱼、攀鲈、罗非鱼、泥鳅、黄鳝等。

参考文献

- 1 Fu C L, Li Q Y, Wang Q B, et al. Influence of water and sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir on the channel scouring and silting of lower reaches of the Yellow River (in Chinese). *J Water Res Eng*, 2012, 23: 173–175 [付春兰, 李庆银, 王庆斌, 等. 小浪底水库调水调沙对黄河下游河道冲淤的影响分析. *水资源与水工程学报*, 2012, 23: 173–175]
- 2 Han X J, Zhu L L. Analysis on the channel scouring and deposition characteristics in the lower reaches of the Yellow River before and after Xiaolangdi Reservoir used (in Chinese). *Shaanxi Water Res*, 2017, 5: 1–2, 10 [韩小军, 朱莉莉. 小浪底水库运用前后黄河下游河道冲淤特征分析. *陕西水利*, 2017, 5: 1–2, 10]
- 3 Liu X, Liu Y Z. Fluvial processes of channel geometry in wandering reach of the Lower Yellow River since water-sediment regulation of Xiaolangdi reservoir (in Chinese). *J Sediment Res*, 2019, 44: 56–60 [刘欣, 刘远征. 小浪底水库调水调沙以来黄河下游游荡河段河床演变研究. *泥沙研究*, 2019, 44: 56–60]
- 4 Shang W X, Jing J, Shang Y. The influence of Xiaolangdi Reservoir operation on flow regime in the Lower Yellow River (in Chinese). *China Rural Water and Hydropower*, 2022: 91–95, 104 [尚文绣, 靖娟, 尚弈. 小浪底水库调度对黄河下游水文情势的影响. *中国农村水利水电*, 2022, 10: 91–95, 104]
- 5 Zhang C J, Zhang Z Y, Zhang M, et al. Analysis on the discharging capability of the Lower Yellow River channel during 2023 flood season (in Chinese). Zhengzhou: Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, 2023 [张春晋, 孙赞盈, 张敏, 等. 2023年黄河下游河道排洪能力分析. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2023]
- 6 Jie Z L, Zhu W J. Research on the impact and countermeasures of water and sand adjustment in Xiaolangdi Reservoir on fishery resources in the Lower Yellow River (in Chinese). *Henan Fisheries*, 2010, 1: 7–9 [介子林, 朱文锦. 小浪底水库调水调沙对黄河下游渔业资源影响及对策研究. *河南水产*, 2010, 1: 7–9]
- 7 Lv B B, Yang X Z, Wang X C, et al. The current fishery resources status of Xiaolangdi to estuary reach in mainstream of Yellow River and its protection measures (in Chinese). *J Hydroeco*, 2012, 33: 73–79 [吕彬彬, 杨兴中, 王晓臣, 等. 黄河小浪底至入海口渔业资源现状与保护对策研究. *水生态学杂志*, 2012, 33: 73–79]
- 8 Liu H B, Guan H R. Investigation on fish resources in the lower reaches of the Yellow River (in Chinese). *Anhui J Agr Sci*, 2019, 47: 110–112, 131 [刘洪波, 菅浩然. 黄河下游鱼类资源调查研究. *安徽农业科学*, 2019, 47: 110–112, 131]
- 9 Ge L, Zhou Z J, Shen H B, et al. Effect of ecological flow regulation on fish diversity in the lower Yellow River (in Chinese). *Yellow River*, 2022, 44: 115–120 [葛雷, 周子俊, 沈红保, 等. 黄河生态调度对下游鱼类多样性影响研究. *人民黄河*, 2022, 44: 115–120]
- 10 Cong X R, Li X Q, Dong G C, et al. Fish community pattern and diversity affected by water and sediment regulation in Shandong section of the Yellow River (in Chinese). *Acta Hydrobio Sin*, 2024, 48: 889–900 [丛旭日, 李秀启, 董贯仓, 等. 调水调沙影响下黄河山东段鱼类群落格局及多样性. *水生生物学报*, 2024, 48: 889–900]
- 11 Zhang X X, Yao Q Z, Chen H T, et al. Study on the seasonal variation of nutrient salt concentration in the lower reaches of the Yellow River and its flux into the sea (in Chinese). *Period Ocean Univ China*, 2010, 40: 82–88 [张晓晓, 姚庆祯, 陈洪涛, 等. 黄河下游营养盐浓度季节变化及其

入海通量研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40: 82–88]

- 12 Wang Y, Zhang H M, Wu N, et al. Monthly variation of nutrient concentration in the lower reaches of the Yellow River and its response to the flood discharge event of the reservoir (in Chinese). *Period Ocean Univ China*, 2022, 52: 88–98 [王允, 张红梅, 吴念, 等. 黄河下游营养盐浓度月际变化及其对水库泄洪事件的响应. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52: 88–98]
- 13 Wang X C, Yang X Z, Lv B B, et al. Community structure of the phytoplankton and its relationship with environmental factors in lower reaches of the Yellow River (in Chinese). *Anhui J Agr Sci*, 2012, 40: 9819–9821 [王晓臣, 杨兴中, 吕彬彬, 等. 黄河下游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 安徽农业科学, 2012, 40: 9819–9821]
- 14 Song J, Yi Y J, Hou C Y, et al. Effect of water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir to Plankton communities of lower reaches (in Chinese). *Yellow River*, 2019, 41: 38–43, 75 [宋劼, 易雨君, 侯传莹, 等. 小浪底水库调水调沙对下游河道浮游生物的影响. 人民黄河, 2019, 41: 38–43, 75]
- 15 Wei X Y, Yang H Y, Ren W, et al. Exploration and practice of sediment concentration regulation in the Yellow River in 2023 (in Chinese). *China Flood Drought Manage*, 2024, 34: 68–72 [魏向阳, 杨会颖, 任伟, 等. 2023年黄河含沙量调度探索与实践. 中国防汛抗旱, 2024, 34: 68–72]
- 16 Fantin-Cruz I, Pedrollo O, Girard P, et al. Changes in river water quality caused by a diversion hydropower dam bordering the Pantanal floodplain. *Hydrobiologia*, 2016, 768: 223–238
- 17 Wang K, Pang Y, Yi Y, et al. Response of dissolved organic matter chemistry to flood control of a large river reservoir during an extreme storm event. *Water Res*, 2023, 230: 119565
- 18 Frémion F, Courtin-Nomade A, Bordas F, et al. Impact of sediments resuspension on metal solubilization and water quality during recurrent reservoir sluicing management. *Sci Total Environ*, 2016, 562: 201–215
- 19 Baldwin D S, Wilson J, Gigney H, et al. Influence of extreme drawdown on water quality downstream of a large water storage reservoir. *River Res Apps*, 2010, 26: 194–206
- 20 Zhang T T, Yao P, Wang J P, et al. Effect of water and sediment regulation on the transport of particulate organic carbon in the lower Yellow River (in Chinese). *Environ Sci*, 2015, 36: 2817–2826 [张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 等. 调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响. 环境科学, 2015, 36: 2817–2826]
- 21 Schenk L, Bragg H. Sediment transport, turbidity, and dissolved oxygen responses to annual streambed drawdowns for downstream fish passage in a flood control reservoir. *J Environ Manage*, 2021, 295: 113068
- 22 Gao R, Huang S L, Sun Y X. Vertical distribution and influencing factors of dissolved oxygen during thermal stratification in Panjiakou Reservoir (in Chinese). *J Water Res Eng*, 2022, 33: 39–49, 57 [高锐, 黄岁樑, 孙逸璇. 潘家口水库热分层期溶解氧垂向分布及影响因素. 水资源与水工程学报, 2022, 33: 39–49, 57]
- 23 Del’Duca A, Janiques A M S, Azevedo R S, et al. Oxygen concentration and its implications for microbial structure and metabolism: A case study in a deep tropical reservoir. *Diversity*, 2024, 16: 444
- 24 Baiyin B, Xu F R, Chen X R, et al. Impact of sediment flushing of Xiaolangdi Reservoir on downstream fish (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2012, 43: 1146–1153 [白音包力皋, 许凤冉, 陈兴茹, 等. 小浪底水库排沙对下游鱼类的影响研究. 水利学报, 2012, 43: 1146–1153]
- 25 Hanjaniamin A E, Tabrizi M S, Babazadeh H. Dissolved oxygen concentration and eutrophication evaluation in Yamchi dam reservoir, Ardabil, Iran. *Appl Water Sci*, 2023, 13: 9
- 26 Guan Z Y, Wang S, Zhang S S, et al. Effect of water stratification on vertical distribution of dissolved oxygen in different reservoirs in the middle reaches of Lancang River (in Chinese). *J China Three Gorges Univ (Nat Sci)*, 2020, 42: 12–18 [官卓宇, 王慎, 张思思, 等. 澜沧江不同中游水库分层对溶解氧垂向分布的影响研究. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42: 12–18]
- 27 Ruan Q Y. Influence of Xiaolangdi Dam on the reproduction of Yellow River carp and multiobjective optimal operation of reservoir (in Chinese). Dissertation for the Master’s Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2023. 21–31 [阮琼瑶. 小浪底大坝对黄河鲤鱼繁殖的影响及水库多目标优化调度. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2023. 21–31]
- 28 Ma Z P, Wu B S, Shen Y, et al. Distribution pattern and characteristics of sedimentation in the lower Yellow River (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2024, 55: 468–480 [马子普, 吴保生, 沈逸, 等. 黄河下游河道冲淤分布模式及冲淤特征. 水利学报, 2024, 55: 468–480]
- 29 Wang R L, Huang J H, Ge L, et al. Study of ecological flow based on the relationship between cyprinus carpio habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2020, 51: 1175–1187 [王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文–生态响应关系的黄河下游生态流量研究. 水利学报, 2020, 51: 1175–1187]
- 30 Lou G Y, Ge L, Huang Y F, et al. Evaluation on the effect of ecological regulation in the lower Yellow River (in Chinese). *Yellow River*, 2021, 43:

- 100–103 [娄广艳, 葛雷, 黄玉芳, 等. 黄河下游生态调度效果评估研究. 人民黄河, 2021, 43: 100–103]
- 31 Xiao Z W. Multivariate random forest for predicting the spatial distribution of soil particle size fractions and analysis in the Loess Plateau (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Wuhan: Hubei University, 2023. 24–31 [肖志伟. 基于多变量随机森林的黄土高原土壤粒径空间分布预测与分析. 硕士学位论文. 武汉: 湖北大学, 2023. 24–31]
- 32 Zhai T T, Zhao G J, Mu X M, et al. Processes of water and sediment in the representative catchments of the middle Yellow River under extreme rainfalls (in Chinese). *J Sediment Res*, 2021, 46: 57–63, 41 [翟婷婷, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化. 泥沙研究, 2021, 46: 57–63, 41]
- 33 Lei D H. “92.8” rainstorm flood analysis of Yellow River, Jing, Luo and Wei Rivers (in Chinese). *Heilongjiang Hydraul Sci Tech*, 2024, 52: 54–56 [雷东海. “92.8”黄河及泾、洛、渭河暴雨洪水分析. 黑龙江水利科技, 2024, 52: 54–56]
- 34 Baiyin B, Xu F R, Chen X R. Research on the Impact of High Sediment Concentration and Sediment Discharge in Reservoirs on Fish in Downstream Rivers (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2015 [白音包力皋, 许凤冉, 陈兴茹. 水库高含沙排沙对下游河流鱼类的影响研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2015]
- 35 Zhao L J, Han S S, Dong Q H. Study on flood peak discharge increase prediction method of the lower Yellow River channel during the water and sediment regulation period (in Chinese). *Yellow River*, 2024, 46: 37–41 [赵连军, 韩沙沙, 董其华. 调水调沙期黄河下游河道洪峰增值预测方法研究. 人民黄河, 2024, 46: 37–41]
- 36 Garric J, Migeon B, Vindimian E. Lethal effects of draining on brown trout. A predictive model based on field and laboratory studies. *Water Res*, 1990, 24: 59–65
- 37 Fan J, Shao X, Wang Y, et al. Enhancing the freshness of particulate organic carbon through the regulation of dam and river-lake interactions. *J Hydrol*, 2024, 644: 132064
- 38 Dong X, Hu C. Analysis of measurement differences and causes of C, N, and P in river flooding areas—taking the Hailar River in China as an example. *PeerJ*, 2024, 12: e17745
- 39 Li J H, Li R J, Ying S J, et al. Investigation on the current status of fishery resources in Shaanxi section of the Yellow River mainstream and Weihe River (in Chinese). *Fisheries Res*, 2025-01-07 [李菁华, 李瑞娇, 英士娟, 等. 黄河干流陕西段和渭河渔业资源调查. 渔业研究, 2025-01-07]
- 40 Lin P C, Li S Z, Qin X C, et al. Pattern of fish diversity and assemblage structure in the middle and lower reaches of the Yiluo River, Yellow River (in Chinese). *J Lake Sci*, 2019, 31: 482–492 [林鹏程, 李淑贞, 秦祥朝, 等. 黄河伊洛河中下游鱼类多样性及群落结构. 湖泊科学, 2019, 31: 482–492]

A study on the ecological effects of water and sediment regulation by Xiaolangdi Reservoir

HAN Bing^{1,2,3}, ZHANG Chang⁴, GAO YunNi⁵, YING YiMei⁶, TIAN ShiMin^{1,2,3*},
ZOU QingYang^{1,2,3}, ZHAO LingDong^{1,2,3} & JING YongCai^{1,2,3}

¹ Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China

² Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450003, China

³ Henan Yellow River Water Ecological Environment Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450003, China

⁴ Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yellow River Basin Ecological Environment Supervision and Management Bureau, Ministry of Ecology and Environment, Zhengzhou 450004, China

⁵ College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

⁶ College of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

This paper evaluates the ecological effects of water and sediment regulations at the Xiaolangdi Reservoir by combining monitoring data before the 2023 flood season with historical research results. The main conclusions are as follows. (1) During the clear water discharge phase, ammonia nitrogen concentrations increased from Xixiayuan to Aishan owing to the sediment resuspension from river erosion. During the centralized sediment discharge stage, ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen levels between Xixiayuan and Huayuankou were affected by the pollutant release from sediment discharge. (2) During the centralized sand removal stage, dissolved oxygen concentrations in the water dropped to 0.2–4.6 mg/L. Specifically, between the Yiluo River estuary and Huayuankou, levels were 0.2–0.9 mg/L, significantly lower than in other periods, mainly owing to oxygen consumption by reducing substances released from sediment resuspension. (3) In 2023, 58 species were surveyed in the lower reaches of the Yellow River, a significant increase from 2009–2010 and 2013–2017. This rise is linked to Xiaolangdi Reservoir's water and sediment regulation, which stabilizes river flow and enhances ecological flow during fish breeding seasons. (4) “Flowing fish”, a natural phenomenon unique to the Yellow River, is usually caused by high sediment content and low dissolved oxygen. The occurrence of the “flowing fish” phenomenon during the 2023 water and sediment adjustment period was mainly concentrated in the river section from Xiaolangdi Dam to Xixiayuan Hydrological Station. Compared with historical periods, the river section where “fish migration” occurred has significantly shortened. (5) The Yiluo River and Qin River estuaries maintained low sediment zones suitable for fish survival. During the centralized sediment discharge stage, 26 fish species were surveyed at the Yiluo River estuary, more than before adjustments, highlighting the protective effect of low sediment concentration zones at these estuaries.

Xiaolangdi Reservoir, water and sediment regulation, ecological effects, fish species

doi: [10.1360/SST-2024-0260](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0260)