

苏柳, 韦诗涛, 尚文绣. 小浪底水库对黄河下游水沙过程的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1129-1136. SU L, WEI S T, SHANG W X. Impact of Xiaolangdi Reservoir on the water and sediment processes in the lower reaches of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1129-1136. (in Chinese)

小浪底水库对黄河下游水沙过程的影响

苏柳^{1,2}, 韦诗涛^{1,2}, 尚文绣^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 郑州 450003)

摘要:小浪底水库运行后黄河下游水沙过程发生明显变化,为量化小浪底水库在其中发挥的作用,将研究时段划分为三门峡水库单独运行时段(简称“单库时段”)和三门峡水库、小浪底水库联合调度时段(简称“双库时段”),对比2个时段黄河下游水沙过程变化,采用趋势检验、突变点分析、数值模拟等方法,定量评估小浪底水库在水沙过程变化中发挥的作用。结果显示:与单库时段相比,双库时段黄河下游花园口、高村和利津3个断面小于预警流量的天数减少90%以上,超过2000 m³/s的大流量及关键期高流量脉冲持续时间延长;含沙量降幅超过72%,河道被持续冲刷。其中,小浪底水库通过泄放生态流量、调水调沙等措施,发挥了减少预警天数、增加大流量及高流量脉冲持续时间、年均减少黄河下游河道泥沙淤积量1.58亿t的作用。水沙过程变化提高了生态基流保证率与栖息地稳定性,有利于淡水鱼类多样性恢复。

关键词:小浪底水库;水文情势;泥沙;河道淤积;黄河;梯级水库群

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0112

建设梯级水库群是流域水资源高效开发利用的主要趋势和重要途径,对保障区域水安全和粮食安全、优化能源结构等具有重要意义^[1-4]。同时,水库建设运行导致河流径流、泥沙等非生物要素重新分配,使河流结构功能发生变化^[5-8],尤其是梯级开发中,随着水库数量的增加,水库之间往往会产生加和、协同等多种效果,对河流的影响机制复杂^[9-10]。因此,梯级水库群中新增水库对河流的影响已经成为布置河流梯级开发的关键因素,也是国内外水科学关注的热点^[11]。

河流梯级开发导致河流从自然生态系统向“自然-人工”复合生态系统转变,改变了河流物质传输、水文循环、生物生命活动等过程^[8,12]。很多研究^[13-15]评估了梯级水库群不同运用阶段河流水文情势、水温、泥沙、营养物质等要素的变化过程;在此基础上,一些研究^[16-17]分析了地貌形态、栖息环境和生物演变趋势。对于水库数量增加对河流的影响,已有研究^[18-19]主要对比新增水库建设前后2个时段河流状态主要表征指标的变化情况。但是,河流受到水利

工程条件、气候变化、土地利用、取用水等多种因素的综合影响,如何科学化新增水库发挥的作用

是研究难点^[20-22]。黄河复杂难治,水少沙多、水沙关系不协调,下游“地上悬河”问题长期存在,在黄河流域生态保护和高质量发展中面临诸多挑战^[23-24]。水库调度是调控黄河水沙过程的重要措施,因此,需要明确梯级水库群中骨干水库对河流的影响程度,为科学布局梯级水库、提升水库群水沙调控作用提供理论支撑。小浪底水库是调控黄河下游水沙过程的重要工程,运行以来与三门峡水库发挥了联合调度作用。以小浪底水库为研究对象,量化小浪底水库运行前后黄河下游水沙过程变化情况,提出小浪底水库对水沙过程影响的定量分析方法,解析小浪底水库在水沙过程变化中发挥的作用。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

研究区域位于黄河干流中游三门峡水库至下游

收稿日期:2024-08-01 修回日期:2024-11-14 网络出版时间:2024-11-18

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241115.1732.006

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243233)

作者简介:苏柳(1983—),女,河南郑州人,高级工程师,主要从事水文水资源研究。E-mail:75009488@qq.com

通信作者:尚文绣(1990—),女,山东曹县人,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wenzil1191@163.com

利津河段(图 1)。三门峡水库是黄河上建成的第一座大型水库,总库容 354 亿 m^3 ,1960 年投入运用;小浪底水库是黄河干流三门峡以下唯一能够取得较大库容的控制性工程,总库容 126.5 亿 m^3 ,2000 年投入运用。

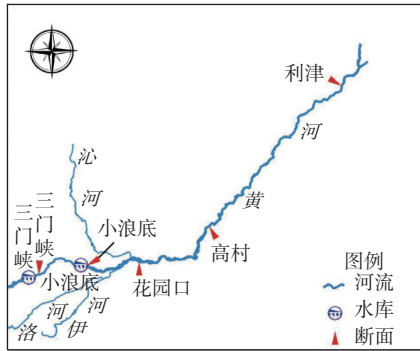


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

1.2 研究对象与思路

研究对象为小浪底水库。基于黄河水少沙多的特征,主要关注小浪底水库调度对水文情势和泥沙的影响,总体思路为首先量化小浪底水库运行前后黄河下游水沙过程变化,然后揭示小浪底水库在其中发挥的作用。通过不同流量的发生频率、小流量事件(流量小于预警流量)及大流量事件(流量大于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和流量大于 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$)的持续时间、鱼类繁殖的关键期(4—6 月)高流量脉冲持续时间等表征水文情势变化,通过来沙量、含沙量、河道冲淤和断面形态等表征泥沙条件变化。预警流量是黄河流域委员会制定的黄河即将断流的流量阈值。将流量高于 4—6 月天然日径流 75% 分位数的时段视为高流量脉冲。

选择黄河下游花园口、高村和利津 3 个断面反映水文和泥沙变化,3 个断面分别位于小浪底水库坝址下游 128、317、792 km 处,均建站较早,有长系列连续实测日流量数据。花园口、高村、利津的预警流量分别为 150、120、30 m^3/s 。

设置三门峡水库单独运行时段(简称“单库时段”,代表小浪底水库运行前的时段)和三门峡水库、小浪底水库联合调度时段(简称“双库时段”,代表小浪底水库运行后的时段)作为 2 个对比时段。双库时段为 2000—2022 年。为减少天然径流量变化和水库上游用水对水文情势的影响,从三门峡水库投入运用后的 1960—1999 年中选择三门峡水库入库断面(潼关断面)实测径流量与双库时段实测径流

量(年均 262.26 亿 m^3)最接近的 23 年作为单库时段。由于 1960—1999 年中连续 23 年系列的实测径流量均比 2000—2022 年偏高 20% 以上,因此选择 1960—1999 年中来水最少的 23 年作为单库时段,分别为 1960 年、1965 年、1969—1974 年、1977 年、1980 年、1986—1988 年、1990—1999 年,单库时段年均实测径流量 275.04 亿 m^3 ,与双库时段偏差在 5% 以内。

1.3 小浪底水库对水沙过程影响的定量分析方法

黄河下游水沙过程变化受到天然来水、梯级水库群调度、取用水、土地利用等多种因素的综合影响,如何量化单个水库在其中发挥的作用是研究难点。一方面通过变化趋势和突变点分析小浪底水库的作用;另一方面设置无小浪底水库的情景,与实际情况对比反映水库的作用。

通过 Mann-Kendall(MK)检验法分析长系列数据的变化趋势和突变点。MK 检验法是广泛应用于水文领域的非参数检验法^[25],此处不再赘述原理,通过该方法判断长系列数据是否具有突变点和在某一时段内是否有显著的变化趋势。

对于水文情势,水库的入库径流可以视为没有水库情况下进入下游的径流。通过对比小浪底水库的入库断面(三门峡断面)和出库断面(小浪底断面)实测径流过程变化,量化水库调度对水文情势的影响。由于缺少小浪底断面 2021 年和 2022 年实测日径流数据,分析时段为 2000—2020 年。

对于泥沙,建立一维水动力学模型模拟没有小浪底水库时黄河下游河道的泥沙冲淤情况。模型包括 4 个核心方程为

水流连续方程:

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{BQ^2}{A^2} \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_c = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{gn^2 |Q| Q}{A} (A/B)^{4/3} \quad (2)$$

悬移质泥沙不平衡输沙方程:

$$\frac{\partial (AS_k)}{\partial t} + \frac{\partial (QS_k)}{\partial x} = -\alpha \omega_k B (S_k - S_{*k}) + q_{is} \quad (3)$$

河床变形方程:

$$\gamma' \frac{\partial A}{\partial t} = \sum_{k=1}^M \alpha \omega_k B (S_k - S_{*k}) \quad (4)$$

式中: B 为河宽, m ; z 为水位, m ; t 为时间, s ; Q 为流量, m^3/s ; x 为沿水流方向的坐标, m ; q_1 为单位时间单位河长汇入的水量, m^2/s ; A 为断面过水面积, m^2 ; n 为糙率; g 为重力加速度, m/s^2 ; S_k 表示第 k 组泥沙的含沙量, kg/m^3 ; α 为恢复饱和系数; ω_k 为第 k 组泥沙颗粒的沉速, m/s ; S_{*k} 为第 k 组泥沙挟沙力, kg/m^3 ; q_{is} 表示单位时间单位河长汇入的沙量, $kg/(s \cdot m)$; γ' 为泥沙干容重, N/m^3 。

采用有限体积法对方程进行离散后采用迭代法求解离散方程, 用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法处理一维模型中水位与流量的耦合关系。

2 小浪底水库运行前后黄河下游水沙变化

2.1 水文情势变化

黄河下游断面日流量累积频率曲线见图 2。流量累积频率较小对应的是较大的流量事件, 例如洪水; 流量累积频率较大对应的是较小的流量事件, 例如枯水。当累积频率小于 19% 或大于 89% 时, 双库时段花园口断面实测日流量累积频率曲线均

位于单库时段日流量累积频率曲线的右侧, 反映了双库时段同频率实测日流量大于单库时段。当累积频率小于 27% 或大于 90% 时, 双库时段高村断面同频率实测日流量大于单库时段。当累积频率小于 38% 和大于 90% 时, 双库时段利津断面同频率实测日流量大于单库时段。

各断面 2 个时段不同流量区间的年均天数统计结果见表 1。随着小浪底水库投入运行, 黄河下游小流量事件持续时间缩短、大流量事件持续时间延长。与单库时段相比, 双库时段花园口、高村和利津 3 个断面实测日径流: 低于预警流量的年均天数分别减少了 13.22、23.09、58.91 d, 降幅均超过 90%; 大于 2 000 m^3/s 的年均天数分别增长了 4.39、6.26 和 6.74 d, 增幅分别为 18%、30% 和 35%; 大于 3 000 m^3/s 的年均天数分别增长了 6.04、5.83 和 4.70 d, 增幅分别为 85%、109% 和 108%; 在鱼类繁殖的关键期(4—6 月)高流量脉冲年均持续天数分别增长了 12.30、9.04 和 3.57 d, 增幅分别为 65%、66% 和 52%。

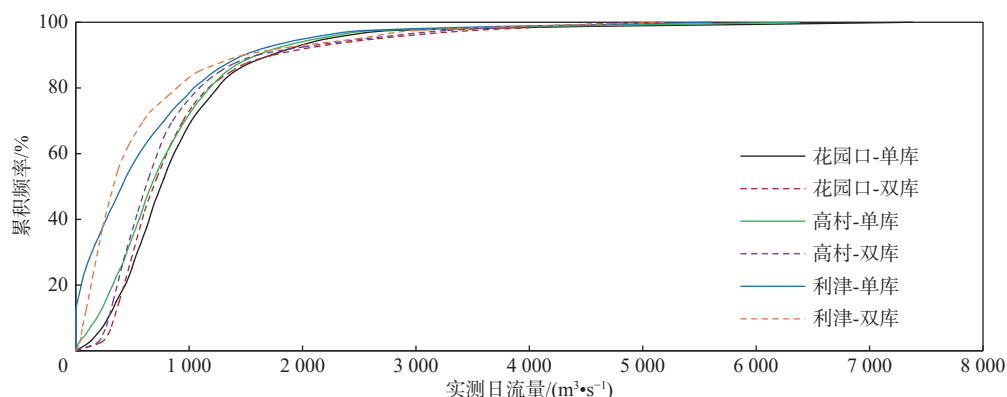


图 2 黄河下游断面日流量累积频率曲线

Fig. 2 Cumulative frequency curve of daily flow of cross-sections in the lower reaches of the Yellow River

表 1 不同时段黄河下游小流量事件和大流量事件年均持续时间变化

时段	小于预警流量			大于 2 000 m^3/s			大于 3 000 m^3/s			4—6 月高流量脉冲		
	花园口	高村	利津	花园口	高村	利津	花园口	高村	利津	花园口	高村	利津
单库时段	14.30	24.43	63.35	24.96	21.22	19.04	7.09	5.35	4.35	18.91	13.74	6.87
双库时段	1.09	1.35	4.43	29.35	27.48	25.78	13.13	11.17	9.04	31.22	22.78	10.43

2.2 泥沙条件变化

与单库时段相比, 2000—2022 年花园口、高村和利津 3 个断面的年来沙量和平均含沙量均显著减小(表 2), 各断面年来均来沙量降幅均超过 75%, 平均含沙量降幅均超过 72%。黄河下游河道从单库

时段年均淤积 2.63 亿 t 转变为双库时段年均冲刷 1.30 亿 t。

1991 年、1995 年和 2018 年花园口、高村和利津 3 个断面形态实测结果(图 3)显示: 随着下游河道泥沙淤积, 与 1991 年断面形态相比, 1995 年各断

面河底高程整体呈抬升趋势,断面形态进一步向宽浅发展;与 20 世纪 90 年代典型年断面形态相比,2018 年 3 个断面冲刷效果显著,主槽加深,2018 年

花园口、高村和利津主槽最低高程分别比 1995 年降低 3.98、3.18 和 2.16 m。

表 2 不同时段黄河下游断面来沙量和含沙量变化

Tab. 2 Load and concentration of sediment at different periods in cross-sections in the lower reaches of the Yellow River

时段	年均来沙量/亿t			平均含沙量/(kg·m ⁻³)		
	花园口	高村	利津	花园口	高村	利津
单库时段	8.23	6.40	4.96	29.26	25.45	26.95
2000—2022	1.21	1.30	1.25	4.39	5.40	7.52

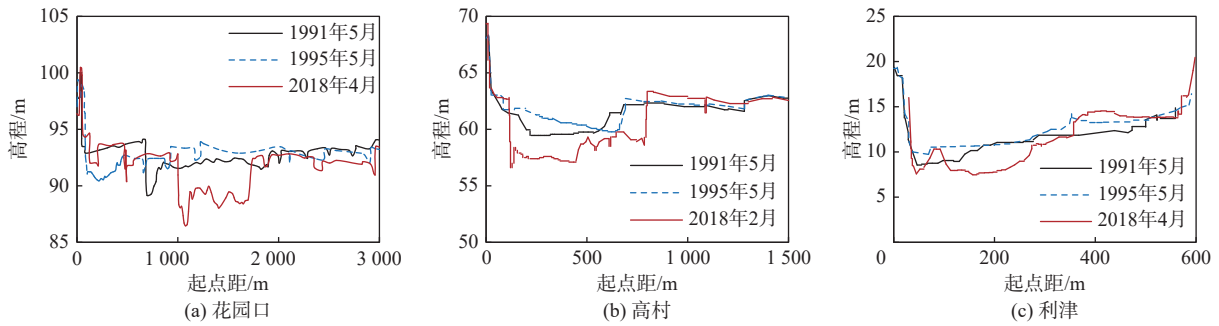


图 3 不同年份各断面形态

Fig. 3 Shapes of cross-sections in the lower reaches of the Yellow River at different years

3 小浪底水库在黄河下游水沙过程变化中发挥的作用

3.1 小浪底水库运行对水文情势的影响

通过对比 2000—2020 年小浪底水库入库断面(三门峡)和出库断面(小浪底)实测日径流过程,揭示小浪底水库调度对水文情势的影响,结果见图 4 和表 3。经过小浪底水库调度后,小于 150 m³/s 的小流量事件年均发生天数减少了 6.86 d,大于 2000 m³/s 和大于 3000 m³/s 的大流量事件年均发生天数

分别增加了 1.38 d 和 4.76 d,4—6 月高流量脉冲年均持续天数增加了 22.10 d。小浪底水库对水文情势的改变与下游各断面大流量事件增加、小流量事件减少的变化趋势具有一致性。小浪底水库发挥的作用与其主要调度任务相符:一方面承担防止黄河下游河道断流和泄放生态流量的任务,在下游流量偏小时加大下泄流量;另一方面承担调水调沙任务,在 6 月至 7 月上旬人工塑造适宜输沙的大流量事件。

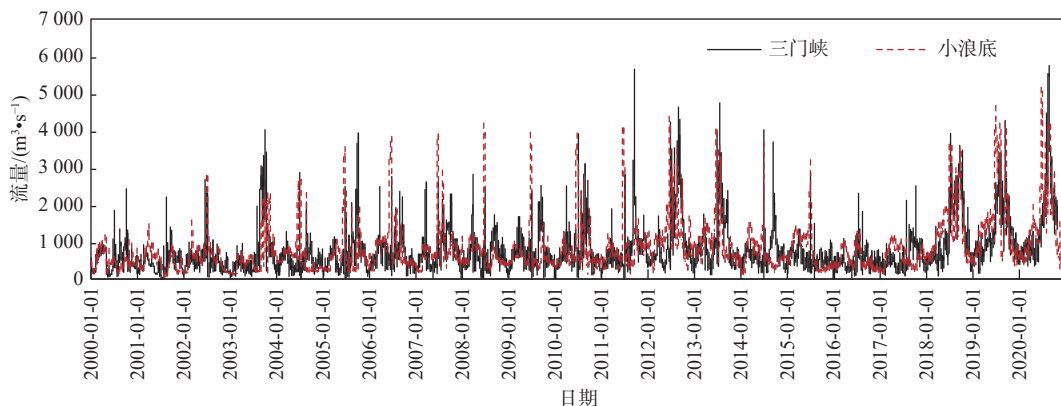


图 4 小浪底水库入库断面(三门峡)和出库断面(小浪底)实测日流量对比

Fig. 4 Comparison of measured daily flow between the inflow section (Sanmenxia) and outflow section (Xiaolangdi) of Xiaolangdi Reservoir

3.2 小浪底水库运行对泥沙条件的影响

小浪底水库调水调沙库容 10.50 亿 m³,拦沙库容 75.50 亿 m³,对进入下游的泥沙具有较强的调节

作用。截至 2022 年汛后,小浪底水库累计淤积 34.6 亿 m³[26],年均拦沙 1.50 亿 m³(约 1.58 亿 t)。与单库时段相比,2000—2022 年花园口断面年均来沙

量减少了 7.02 亿 t,说明小浪底水库拦沙并非最主要原因。有关研究显示,黄土高原地区淤地坝建设、梯田建设、植被修复等水土保持措施是导致黄河来沙量减少的最主要原因^[27]。潼关断面来沙量的变化能反映上中游主要产沙区入黄沙量变化,与单库时段相比,2000—2022 年潼关断面来沙量减少了 6.99

亿 t。2000—2022 年小浪底水库运行后,坝下至花园口河段从单库时段的年均淤积 0.49 亿 t 转变为年均冲刷 0.32 亿 t,增加花园口断面来沙量 0.81 亿 t。此外,近年来三门峡水库淤积量减少,对花园口断面来沙量有增加作用。上述因素共同导致了花园口断面来沙量大幅减少。

表 3 2000—2020 年小浪底水库入库断面和出库断面流量事件年均持续时间变化

Tab. 3 Annual duration of flow events of the inflow section and outflow section of Xiaolangdi Reservoir

单位: d

断面	流量事件			
	小于150 m ³ /s	大于2 000 m ³ /s	大于3 000 m ³ /s	4—6月高流量脉冲
三门峡(入库断面)	11.95	22.33	5.52	7.00
小浪底(出库断面)	5.10	23.71	10.29	29.10

花园口断面年均含沙量(图 5)的 MK 检验结果显示,在 $\alpha=0.01$ 的显著性水平下 2000 年发生突变,突变时间与小浪底水库投入运行的时间一致,1960—1999 年含沙量没有呈现出显著的变化趋势,2000—2022 年呈现显著的下降趋势。花园口断面来沙量在 20 世纪 60 年代至 80 年代没有呈现出显著的变化趋势,1990 年后呈现显著下降趋势,但没有出现突变点。

没有小浪底水库,2000—2022 年黄河下游河道泥沙冲淤情况将从年均冲刷 1.30 亿 t 转变为年均淤积 0.28 亿 t。

黄河下游 1960—2022 年逐年冲淤量与累积冲淤量见图 6。三门峡水库运用初期下游河道发生冲刷,但 1965 年下游进入持续淤积阶段,直至 2000 年小浪底水库运用后开始进入持续冲刷阶段。黄河下游一维水沙数学模型模拟结果显示(图 7),如果

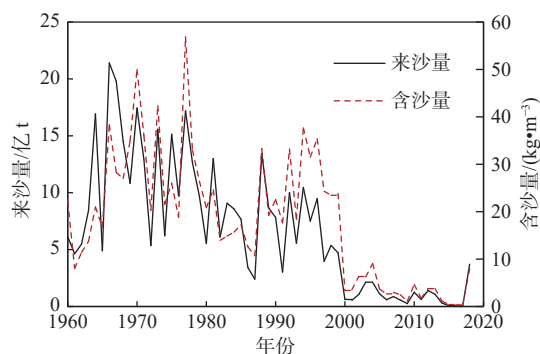


图 5 花园口断面逐年来沙量和平均含沙量变化
Fig. 5 Load and concentration of sediment in Huayuankou

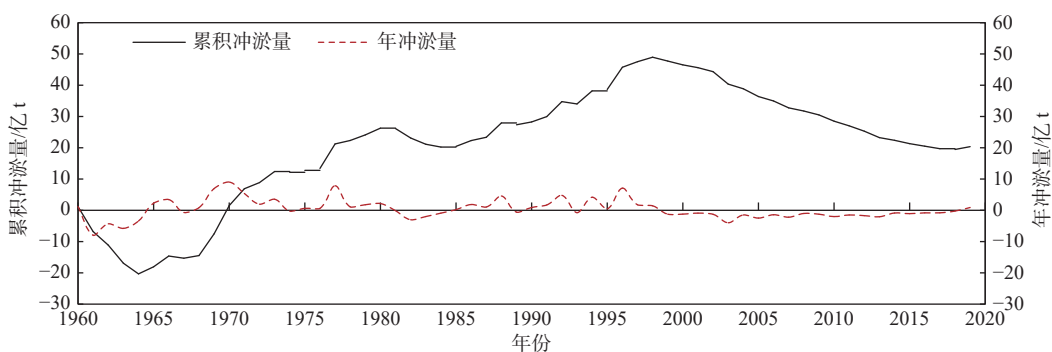


图 6 黄河下游冲淤量变化

Fig. 6 Changes in erosion and deposition in the lower reaches of Yellow River

小浪底对泥沙的调节作用一直是研究热点,近年来多项研究^[26,28-30]提出小浪底水库提高了黄河下游水沙关系协调程度,扭转了黄河下游河道持续淤积的趋势,使黄河下游游荡性河段横断面形态总体上向窄深发展,显著恢复了主槽过流能力。本文研究结果与上述成果间具有较好的一致性。

3.3 生物对水沙过程变化的响应

水沙过程变化在一定程度上改善了水生生物的生存条件。小流量事件的减少提高了生态基流的保证率,更好地保障了水生生物的基本生存条件。根据水利部印发的《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》,花园口断面生态基流 200 m³/s,利津

断面生态基流 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据实测日径流数据发现:花园口断面生态基流年均破坏天数从单库时段的 20.09 d 减少到双库时段的 5.83 d, 降幅 71%; 利津断面生态基流年均破坏天数从单库时段的 74.13 d 减少到双库时段的 18.52 d, 降幅 75%。双库时段花园口断面和利津断面生态基流破坏集中于小浪底水库运行初期来水偏枯的 2000—2003 年(天然径流量偏枯 27%), 2004 年后花园口断面和利津断面生态基流年均破坏天数分别降至 0.89 d 和 0 d。4—6 月是黄河下游鱼类繁殖的关键期, 这一时段内发生的高流量脉冲是引发生物发育、繁殖等行为的重要生命节律信号, 这一时段高流量脉冲持续时间的延长有利于促进鱼类繁衍^[31]。高流量事件的增加和含沙量的减少使下游河道被持续冲刷, 主槽加深, 河道形态趋于稳定, 为水生生物提供了更加稳定的栖息环境。黄河水生生物资源曾遭受过严重破坏, 20 世纪 80 年代初黄河下游调查到淡水鱼类 54 种, 2008 年仅调查到淡水鱼类 38 种^[32]。随着水库生态调度、减少捕捞、控制排污等措施的实施, 水生生物多样性有所修复, 在黄河水资源保护研究院 2018—2019 年生物资源调查中, 下游河南段发现淡水鱼类 54 种, 山东段发现淡水鱼类 48 种。

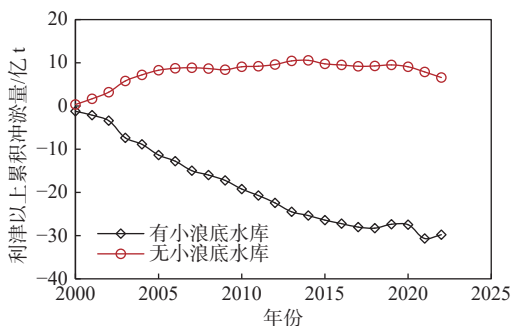


图 7 有无小浪底水库下不同年份黄河下游累积冲淤量变化对比

Fig. 7 Sediment erosion in the Lower Yellow River at different scenarios by year: with and without the Xiaolangdi Reservoir

4 结论

本文对比三门峡水库单独运行时段和三门峡水库、小浪底水库联合调度时段黄河下游水文、泥沙、生物等的时空变化, 分析小浪底水库在水沙过程中发挥的作用, 得到以下结论:

与单库时段相比, 小浪底水库与三门峡水库联合调度后, 黄河下游花园口、高村、利津 3 个断面在实测日流量累积频率较小或较大的情况下, 同频率实测日流量增大; 河道断流的预警天数减少, 大于

$2\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 和大于 $3\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大流量事件持续时间延长, 4—6 月高流量脉冲持续时间增加; 年均来沙量和平均含沙量降幅超过 7 成, 断面主槽加深、高程降低。

小浪底水库发挥的作用与黄河下游水沙过程变化特征一致。小浪底水库调度使坝下流量大于 $3\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的天数增加 86%, 流量小于 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 的天数减小 57%; 小浪底年均拦沙 1.50 亿 m^3 , 是导致下游来沙量减少的重要原因; 花园口断面含沙量突变时间与小浪底水库运行时间一致; 如果没有小浪底水库, 黄河下游河道泥沙冲淤情况将从年均冲刷 1.30 亿 t 转变为年均淤积 0.28 亿 t。

小浪底水库与三门峡水库联合调度后, 黄河下游水沙过程变化提高了生态基流保证率、增加了栖息地稳定性, 淡水鱼类多样性逐渐恢复。

参考文献:

- [1] 杨才杰, 王贺龙, 温进化, 等. 基于 IA-PSO 的库坝梯级系统水资源优化配置与调度 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 60-68. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.005.
- [2] 陈进. 长江梯级水库群联合调度成效、挑战及对策 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(5): 1-7. DOI: 10.11988/ckyyb.20240245.
- [3] MENG X J, CHANG J X, WANG X B, et al. Multi-objective hydropower station operation using an improved cuckoo search algorithm [J]. *Energy*, 2019, 168(1): 425-439. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.096.
- [4] 王何予, 田晶, 郭生练, 等. 考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1041-1051. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0103.
- [5] MAAVARA T, CHEN Q W, VAN METER K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020(1): 103-116. DOI: 10.1038/s43017-019-0019-0.
- [6] 陈秀秀, 叶盛, 潘海龙, 等. 水库运行对河流水文情势影响分析: 以龙羊峡、小浪底水库为例 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(10): 96-104. DOI: 10.12396/znsd.220086.
- [7] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210122.
- [8] CHEN Q W, SHI W Q, HUISMAN J, et al. Hydropower reservoirs on the upper Mekong River mod-

- ify nutrient bioavailability downstream[J]. *National Science Review*, 2020, 7(9): 1449-1457. DOI: 10.1093/nsr/nwaa026.
- [9] 王学雷, 宋辛辛. 梯级水库叠加影响下汉江中下游流域水文情势变化研究 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 53(5): 685-691. DOI: 10.19603/j.cnki.1000-1190.2019.05.007.
- [10] 陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 793-810. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.015.
- [11] 赵新磊, 李姝蕾, 尚文绣. 龙羊峡和刘家峡梯级水库生态流量核定与保障 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(3): 473-481. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0049.
- [12] 张玮, 刘攀, 刘志武, 等. 变化环境下水库适应性调度研究进展与展望 [J]. *水利学报*, 2022, 53(9): 1017-1027. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20211024.
- [13] 丁一桐, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 891-901. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0100.
- [14] 刘明, 杨雅迪, 毕乃双, 等. 2015年调水调沙期间黄河悬浮颗粒 Pb 及其稳定同位素组成变化 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3009-3017. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0355.
- [15] 赵高磊, 林玲, 蒲迅赤, 等. 梯级水库水温影响的极限 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(1): 120-128. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.01.013.
- [16] 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 [J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1175-1187. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200184.
- [17] 程亦菲, 夏军强, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段过流能力调整对水沙条件与断面形态的响应 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 337-347. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.003.
- [18] 张文浩, 瞿思敏, 徐瑶, 等. 泼水水库对黄河径流过程及水文情势的影响 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 61-65. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.010.
- [19] 尚文绣, 许明一, 尚弈, 等. 龙羊峡水库调度对径流的影响及蓄补水规律 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 451-458. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0045.
- [20] 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 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(10): 91-95. DOI: 10.12396/znsd.212218.
- [21] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 160-166. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.021.
- [22] SHANG W X, YAN D M, PENG S M, et al. Analysis on the ecological impact of the Xiaolangdi Reservoir on the Yellow River Delta wetland and coastal areas [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 953318. DOI: 10.3389/feart.2022.953318.
- [23] 杨开忠, 董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策: 基于“要素-空间-时间”三维分析框架 [J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1038-1047. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200607.
- [24] 董战峰, 璩爱玉, 冀云卿. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护 [J]. *科技导报*, 2020, 38(14): 109-115. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.14.011.
- [25] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究 [J]. *泥沙研究*, 2019, 44(2): 33-40. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.02.005.
- [26] 王远见, 王强, 刘彦晖, 等. 小浪底水库运行以来对黄河下游河道河床演变特性的影响 [J]. *水利学报*, 2024, 55(5): 505-515. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230402.
- [27] 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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.014.
- [28] 申冠卿, 张原锋, 王平, 等. 水库拦沙对黄河下游河床演变的影响 [J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 475-484. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.011.
- [29] 沈逸, 吴保生, 王彦君, 等. 小浪底水库运用以来黄河下游河道冲淤的时空规律与模拟 [J]. *地理学报*, 2023, 78(11): 2735-2749. DOI: 10.11821/dlxb202311006.
- [30] 张金良, 练继建, 张远生, 等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用 [J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 897-905. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2020023.
- [31] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究 [J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 367-377. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190784.
- [32] 蒋晓辉, 何宏谋, 曲少军, 等. 黄河干流水库对河道生态系统的影响及生态调度 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.

Impact of Xiaolangdi Reservoir on the water and sediment processes in the lower reaches of the Yellow River

SU Liu^{1,2}, WEI Shitao^{1,2}, SHANG Wenxiu^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin (under Construction), Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The construction of cascade reservoirs is a trend and inevitable way for efficient utilization of water resources in the basin. At the same time, the construction and operation of reservoirs have led to the redistribution of non-biological elements such as water and sediment, resulting in changes in the structure and function of river ecosystems. Multiple reservoirs often produce various effects such as summation, synergy, and antagonism along with a complex ecological impact especially in cascade development. The impact of adding new reservoirs has become a key factor in the planning of river cascade development.

The river ecosystem is influenced by multiple factors such as water conservancy engineering conditions, climate change, land use, and water intake, which raises difficulty for scientifically quantifying the role of newly added reservoirs. Xiaolangdi Reservoir is a critical project for controlling the water and sediment processes in the lower reaches of the Yellow River, and since its scheduling, it has jointly worked in conjunction with Sanmenxia Reservoir. Since the scheduling of the Xiaolangdi Reservoir, there have been significant changes in the water and sediment processes in the lower reaches of the Yellow River. To quantify the role played by the Xiaolangdi Reservoir in these changes, the changes in water and sediment conditions in the lower reaches of the Yellow River during the single reservoir period of Sanmenxia Reservoir and the dual reservoir period of Sanmenxia Reservoir and Xiaolangdi Reservoir are quantified. The impact of Xiaolangdi Reservoir is quantitatively evaluated through methods such as trend testing, abrupt change point analysis, and numerical simulation.

The results show that the single reservoir period compared with the joint scheduling of Xiaolangdi Reservoir and Sanmenxia Reservoir shortened the duration of low flow events in the lower reaches of the Yellow River, prolonged the duration of high flow events, and caused continuous erosion of the river channel. Compared with the single reservoir period, at the three cross-sections of Huayuankou, Gaocun, and Lijin during the dual reservoir period: the average number of days below the warning flow decreased by more than 90%, and the average number of days above 3000 m³/s increased by more than 85%; the duration of high flow pulses during the critical period of fish reproduction (April to June) increased by more than 50%; the annual average sediment yield and average sediment concentration have decreased by more than 70%; the main groove of the cross-sections was deepened and the elevation was reduced.

The role played by Xiaolangdi Reservoir was consistent with the characteristics of changes in water and sediment processes. The scheduling of Xiaolangdi Reservoir increased the number of days with a flow greater than 3000 m³/s by 86%, and reduced the number of days with a flow less than 150 m³/s by 57%. Xiaolangdi Reservoir annually retained an average of 1.50×10^8 m³ of sediment. The sudden change time of sediment concentration at Huayuankou cross-section is consistent with the operation time of Xiaolangdi Reservoir. Without Xiaolangdi Reservoir, the lower reaches of the Yellow River would have shifted from an average annual erosion of 130 million t to an average annual sedimentation of 28 million t. After the joint scheduling of Xiaolangdi Reservoir and Sanmenxia Reservoir, the ecological base flow guarantee rate and habitat stability in the lower reaches of the Yellow River have been improved, and the diversity of freshwater fish has been effectively restored.

Key words: Xiaolangdi Reservoir; flow regime; sediment; river siltation; Yellow River; cascade reservoirs