DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2025.05.18

黄河源水电站建坝-拆坝对河道形态与水动力调整的影响研究

王 博[1], 李志威[1], 岳 遥[1], 曾 鼎[2], 田世民[3]
(1.武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.武汉大学 地球与空间科学技术学院, 湖北 武汉 430072; 3.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要:为了探明黄河源水电站大坝的修建与拆除对下游河道形态与水动力调整的影响,基于1986—2022年Landsat系列遥感影像,提取坝址下游河道的水域面积计算河道平面形态参数。采用TELEMAC-2D模型对黄河源水电站建坝前、电站运行期间、拆坝后3个阶段进行水动力模拟与分析。结果表明:相比建坝前,电站运行期间下游河道水域面积减少2.05 km^2(29.62%),辫状强度降低0.72(20.40%),河道断面平均水深和流速分别减小0.22 m(12.51%)和0.11 m/s(11.73%);相比电站运行期间,拆坝后下游河道水域面积增加1.55 km^2(31.83%),辫状强度增大0.37(13.17%),断面平均水深和流速分别增大0.13 m(8.20%)和0.06 m/s(7.08%);黄河源水电站拆除后,下游河道辫状和水动力特征均有所恢复,但工程活动对下游河道的长期影响依然存在,恢复过程较为缓慢。

关键词:大坝拆除;辫状河道;水动力调整;水域面积;辫状强度;黄河源水电站
中图分类号:TV147 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-643X(2025)05-0152-09

River morphological and hydrodynamic adjustments induced by dam construction and removal of the Yellow River Source Hydropower Station

WANG Bo[1], LI Zhiwei[1], YUE Yao[1], ZENG Ding[2], TIAN Shimin[3]
(1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*;
2. *School of Earth and Space Science Technology*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*;
3. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*, *Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: The construction and removal of the Yellow River Source Hydropower Station has affected the morphological and hydrodynamic adjustments of the downstream channel. To investigate the impact, we extracted the water surface area data of the downstream channel from Landsat images (1986 to 2022), and calculated the planar morphological parameters of the channel. The TELEMAC-2D model was applied to simulate and analyze hydrodynamic conditions in three stages (pre-dam construction, dam operation, and post-dam removal). The results show that compared with the pre-dam construction stage, water surface area in the downstream decreased by 2.05 km^2 (29.62%) during dam operation stage, with a decrease of 0.72 (20.40%) in braiding index, 0.22 m (12.51%) in average cross-sectional water depth, and 0.11 m/s (11.73%) in velocity. Following dam removal, the water surface area increased by 1.55 km^2 (31.83%), with an increase of 0.37 (13.17%) in braiding index, 0.13 m (8.20%) in average water depth, and 0.06 m/s (7.08%) in velocity, compared with the dam operation stage. These findings indicate that the removal of the Yellow River Source Hydropower Station contributed to partial recovery of downstream channel braiding and hydrodynamic conditions; however, the long-term effects of the engineering activities on downstream channel persist, and the recovery process remains slow.

Key words: dam removal; braided channel; hydrodynamic adjustment; water surface area; braiding in-

收稿日期:2025-06-17; **修回日期**:2025-08-27
基金项目:国家自然科学基金项目(U2243214)
作者简介:王 博(2000—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事河流动力学研究。
通讯作者:李志威(1984—),男,湖北云梦人,博士,教授,主要从事青藏高原河流动力学研究。

tensity; the Yellow River Source Hydropower Station

1 研究背景

黄河源头地区是黄河上游重要水源地和三江源国家公园的重要组成部分[1]。然而,过去数十年来随着人类活动增强,如水电工程建设、过度放牧、矿产开发等无序开发行为增多,对该区域的河流生态系统造成了显著扰动[2]。尽管水电工程可以减轻洪涝灾害对下游保护对象的不利影响,并提供可再生清洁能源,但也会影响河道水文过程[3],造成上、下游河道水动力特征发生明显变化,如水流流速减缓、流量变异性增加[4]等。此外,水坝不仅阻碍了鱼类的迁徙路径[5],而且导致下游河道侵蚀下切,改变了冲积河流的天然状态[6-7]。

近 30 年来,气候变暖加剧了黄河源区冰川退缩、冻土融化、降水量不均、径流量增加和季节性分配变化,导致生态环境恶化及水源涵养能力下降的风险增加[8-11]。黄河源区的植被覆盖度在空间上由东南向西北呈递减趋势[12],气候变暖和降水变化显著影响了植被的空间分布和覆盖度[13-14]。出于电力需求和防洪安全的考虑,20 世纪 90 年代末在黄河源玛多县鄂陵湖下游约 17 km 处修建了黄河源水电站。该河段为典型的辫状河流,水文特性复杂且具有较强的季节性流量波动。已有研究表明,该水电站的建设不仅改变了河道的平面形态,影响了河床的冲淤积过程,还对鱼类种群的分布和数量产生了显著影响[15-16],并且黄河源水电站的运行改变了流域的水文过程,导致年内流量分布发生了明显变化[4]。然而,目前关于黄河源水电站建设及其拆除对下游河道水动力过程影响的系统研究仍较为有限。采用数值模拟方法能够重现河道在建坝和气候变化影响下水动力参数的时空变化[17],将该方法用以研究黄河源水电站建坝-拆坝全过程对河道水动力调整的影响具有重要意义。

本研究利用 1986—2022 年的 Landsat 系列遥感影像数据,通过归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*)和最大值合成法(maximum value composite, MVC),并结合大津法(Otsu's method)和目视解译的阈值划分方法,对植被带和水体进行二值化分割,通过栅格计算分析不同时期水域面积的变化。并进一步利用 PyRIS(Python – rivers from satellite)软件[18]计算汊道数指数、水面展宽、水陆面积比等河道平面形态参数。基于 1955—2022 年黄河沿水文站的实测径流数据,结合 TELEMAC-2D 模型,分别模拟水电站建设与拆除状态时下游河道水深和流速等关键水文参数的时空变化特征,全面探讨黄河源头地区在水电站建坝与拆坝前后的河道形态与水动力学变化。本研究旨在探索黄河源地区水电站建坝与拆除前后的河道形态及水动力学状态变化情况,进而为制定合理的生态恢复与保护措施提供参考,并为类似水电站建坝-拆坝前后河道水动力变化的研究提供思路。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

玛多县以上的黄河干流河段称为河源段,该段河长 296 km,约古宗列曲自西向东穿过星宿海,进入扎陵湖与鄂陵湖。该地区平均海拔高度超过 4 200 m,属于高原大陆性半干旱高寒型气候,80%以上的区域覆盖多年冻土,且无冰川分布,年均降水量为 326.4 mm,年均蒸发量达到 797.7 mm[19]。

黄河源水电站位于青海省果洛藏族自治州玛多县的鄂陵湖口下游约 17 km,距玛多县城约 40 km。大坝于 1998 年 4 月动工,至 2001 年 11 月建成并下闸蓄水正式投入运行。由于诸多原因,2017 年 7 月,当地政府下发了相关通知,决定拆除黄河源水电站。最终于 2022 年 6 月坝体被完全拆除,天然河道纵向连通性得以恢复。黄河源区概况及水电站建设与拆除前后库区遥感图像如图 1 所示。

综合考虑河段的河势情况、地形以及研究需求等因素,遥感研究范围从黄河源水电站坝址(35°05′ N, 97°55′ E)到玛多县城区西南侧(34°29′ N,98°09′ E),该河段河长约 40 km,平均河宽为 300 m。而模型计算范围全长 54.97 km,上游进口边界位于鄂陵湖湖口(35°05′ N,97°46′ E),下游出口边界位于玛多县城区西南侧(34°29′ N,98°09′ E)。

2.2 遥感数据来源与解译

高程以及遥感数据通过地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)下载,精度为 30 m × 30 m。下载研究区域 Landsat 系列卫星影像共计 94 期。其中,建坝前(1986—1997 年)影像为 34 期,电站运行期间(2002—2017 年)影像为 45 期,拆坝后(2018—2022 年)影像为 15 期。

基于遥感影像计算辫状河道平面形态参数,即汊道数指数 B_{T3}、河段水面展宽 L_w 和活动水域面积比 R_w[20-21]。汊道数指数 B_{T3} 用于表征辫状河流的辫

状强度，水域面积比 R_w 可反映不同水位条件下辫状河道水域在河道中的占比，各形态参数计算方法如公式(1)～(3)所示。

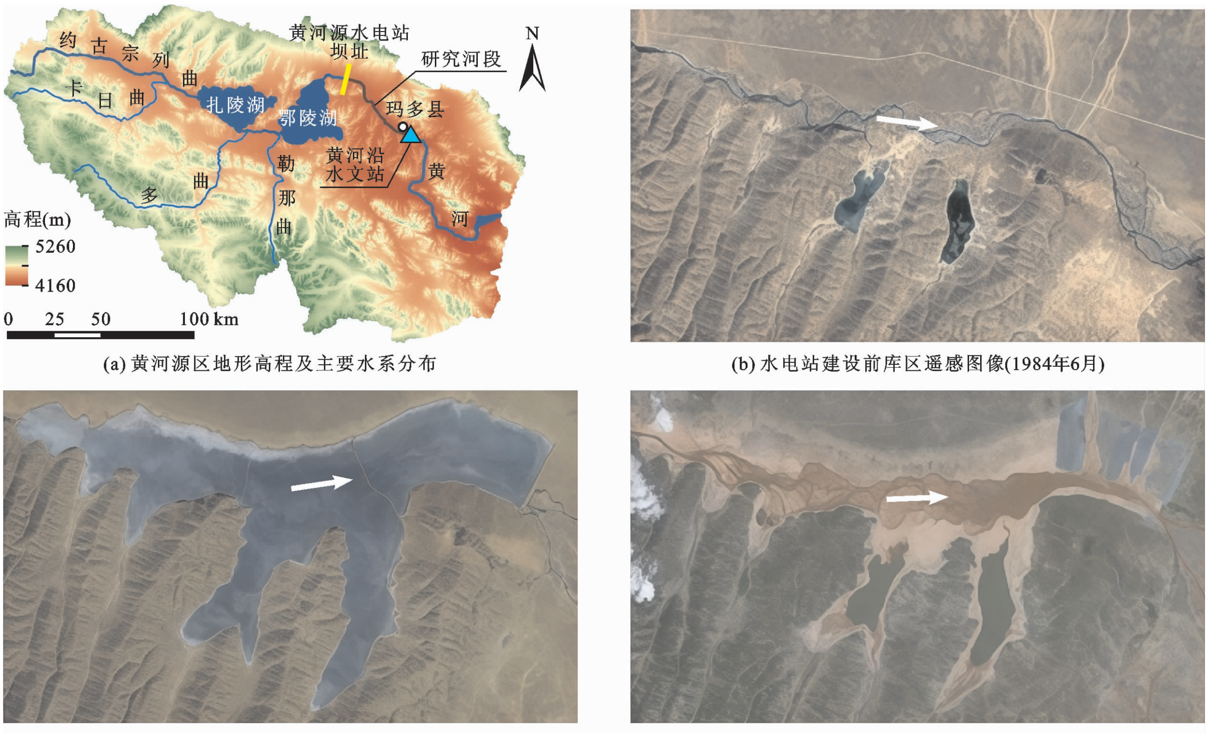
$$B_{T3}=\frac{\sum_{i=1}^{n}N_i}{n} \tag{1}$$

$$L_w=\frac{\sum_{i=1}^{n}L_i}{n} \tag{2}$$

$$R_w=\frac{A_w}{A} \tag{3}$$

式中：N_i 为河道第 i 个横断面上的汊道数；L_i 为河道第 i 个横断面的水面展宽，m；n 为河段内的断面数；A_w 为河段水域面积，km^2；A 为河段陆地总面积，km^2。

遥感数据处理的具体步骤为：①在 Google Earth Engine(GEE)平台上筛选并下载 1986—2022 年的 Landsat 系列夏季少云影像，从不同年份的 Landsat 数据集中筛选出符合条件的影像，并计算每年的归一化差异水体指数(normalized difference water index，*NDWI*)的中位数；②通过调整阈值选择效果最好的阈值进行水体提取，并生成水体掩膜，统计水体面积；③使用 PyRIS 软件进行遥感影像处理和河道中心线计算，并根据该中心线进行 200 m 间隔的断面采样，以统计各个断面上的汊道数 N_i 和水面展宽 L_i，再计算全河段的汊道数指数 B_{T3}。辫状河道形态表征及本研究对河段水体及河道边界的提取结果分别见图 2、3。



(a) 黄河源区地形高程及主要水系分布

(b) 水电站建设前库区遥感图像(1984年6月)

(c) 水电站运行期间库区遥感图像(2010年6月)

(d) 水电站拆除后库区遥感图像(2022年6月)

图 1 黄河源区概况及水电站建设与拆除前后库区遥感图像

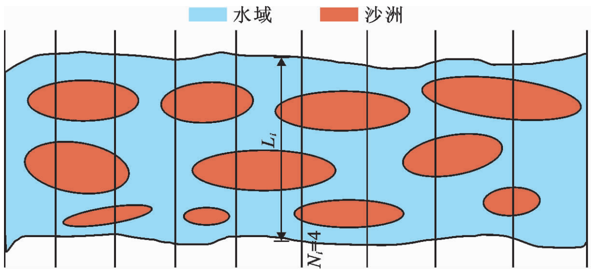


图 2 辫状河道形态表征示意图

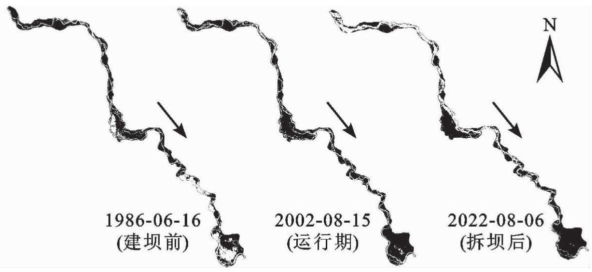


图 3 研究河段水体及河道边界提取示意图

2.3 TELMAC-2D 模型构建

2.3.1 模型计算原理 TELEMAC－MASCARET 模型是由法国国家水力与环境实验室(National Hydraulic and Environment Laboratory)开发的一套开源水动力学模型，其核心模块包括二维水流、三维复杂流动、泥沙传输、波浪模拟等[22-24]。TELEMAC-2D

作为 TELEMAC - MASCARET 的二维模块,能够求解二维圣维南方程,广泛应用于二维自由表面流的水动力学模拟。本次研究采用 TELEMAC-2D 模块 V8P4 版本对河道进行二维水动力模拟,其基本控制方程如下。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial z}{\partial x}+F_x+\frac{1}{h}\mathrm{div}(hv_e\nabla u) \tag{5}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial z}{\partial y}+F_y+\frac{1}{h}\mathrm{div}(hv_e\nabla v) \tag{6}$$

式中:h 为水深,m; t 为时间,s; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速,m/s; g 为重力加速度,m/s^2; z 为水位,m; F_x 和 F_y 分别为 x 和 y 方向的阻力项,采用曼宁公式进行计算; v_e 为有效黏性系数,m^2/s; div 为散度计算符号; ∇ 为梯度运算符号。

2.3.2　地形概化及网格划分　由于缺少实测地形,因此需要对研究河段地形进行概化。首先从地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)下载 3 个阶段的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据。然后通过 Google Earth、Landsat、Omap 等遥感资料分别对研究区域 3 个阶段的地形进行连续插值生成连续地形面,再与下载的 DEM 数据进行验证并去除异常值。采用 Blue Kenue 软件进行网格划分,先将概化的地形数据导入 Blue Kenue 绘制出模型边界线,然后划分网格,网格设置为适用于复杂几何和不规则边界的三角形网格。根据本研究河段实际范围,建坝前模型三角形网格节点数为 53 013 个;电站运行期间模型三角形网格节点数为 59 376 个;拆坝后模型三角形网格节点数为 54 796 个。研究河段最终地形重建结果及河道纵比降见图 4。

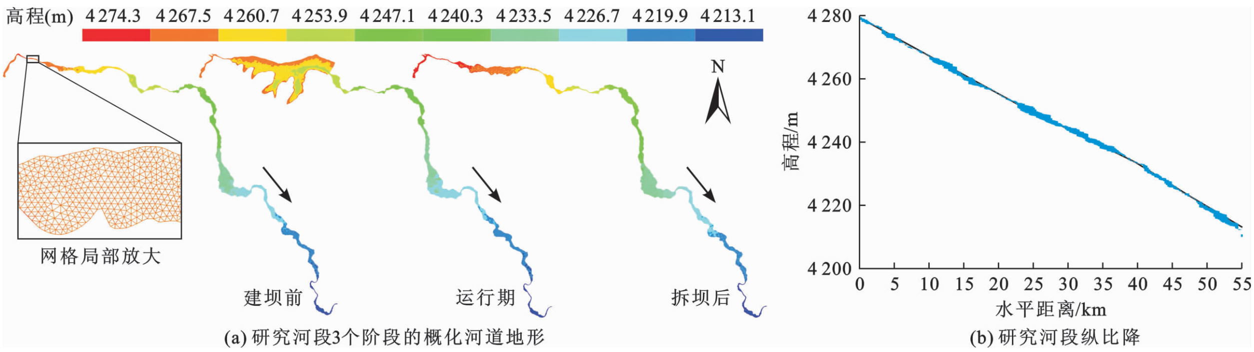


图 4　研究河段地形概化重建结果及纵比降

2.3.3　分析断面布置　为研究黄河源水电站建坝和拆坝对河道不同位置断面水动力的影响,同时考虑河道长度和走向,针对水深和流速共设置 9 个分析断面(图 5)。其中,断面 S1 位于黄河源水电站原坝址下边界,断面 S9 位于出口边界处,各个断面之间间隔 5 km。

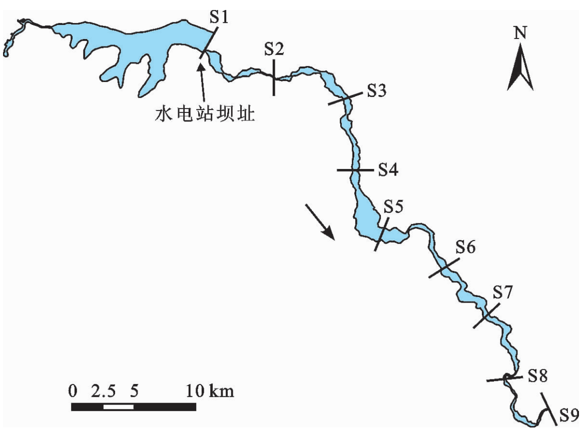


图 5　研究河段模型分析断面布置

2.3.4　模拟工况设置　为保证分析的全面性,分别对黄河源水电站在建坝前(阶段Ⅰ)、电站运行期间(阶段Ⅱ)及拆坝后(阶段Ⅲ)3 个阶段的枯水期、中水期和洪水期的水深与流速进行了模拟计算。枯水期(Run 1)采用 90% 频率流量,中水期(Run 2)采用多年平均流量,洪水期(Run 3 ~ Run 6)则分别选取 2、5、20 和 50 a 一遇的洪水流量,共设置 6 种工况进行计算(表 1)。其中,洪水期不同频率对应的流量是根据黄河沿水文站的实测径流数据,通过皮尔逊Ⅲ型分布曲线推导得出。

水动力模拟的物理参数主要是河床糙率,其反映河床对水流的摩阻,因实测数据资料比较匮乏,故取天然河道常见糙率值 0.035。研究河段水流从上游至下游的历时较长,为确保数值模拟结果达到稳定,模型模拟的物理时间跨度设置为 432 000 s(即 5 d),以使水流系统充分发展至稳定状态。以洪水期(Run 6)为例,计算机在 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700 (2.10 GHz) 处理器、32 GB 内存的

硬件条件下,该工况的计算时长约为 400 min,且所有模拟均能收敛至稳定解。

表 1　6 种数值模拟工况对应流量

工况编号	洪水频率/%	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
Run 1	90%	1.3
Run 2	多年平均	20.3
Run 3	50%	36.4
Run 4	20%	77.7
Run 5	5%	160.6
Run 6	2%	232.2

3　结果与分析

3.1　建坝-拆坝前后阶段河道平面形态演变

3.1.1　河道水域面积和辫状强度变化　基于 1986—2022 年遥感影像解译得出了研究河段在 3 个不同阶段的水域面积 A_w 和辫状强度 B_{T3} 的变化特征,如图 6 所示。

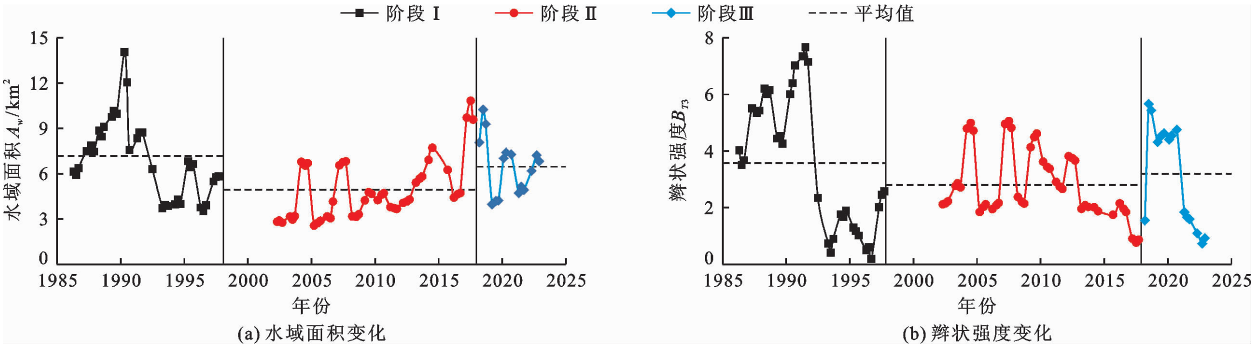


图 6　研究河段在 3 个不同阶段的水域面积和辫状强度变化

分析图 6(a)可知,不同阶段河道水域面积总变化范围为 2.59 ~ 14.06 km²,3 个阶段的平均水域面积 $\bar{A}_w$ 分别为 6.92 km²(阶段Ⅰ)、4.87 km²(阶段Ⅱ)和 6.42 km²(阶段Ⅲ)。阶段Ⅰ为河道自然状态,$\bar{A}_w$ 较大;阶段Ⅱ受上游水库蓄水与发电调度影响,$\bar{A}_w$ 较阶段Ⅰ减少 29.62%;阶段Ⅲ为拆坝后期,$\bar{A}_w$ 较阶段Ⅱ回升 31.83%。总体而言,水电站的建设导致下游河道水域显著收缩,而拆坝措施促进了河道水动力恢复及水域扩展,但尚未完全恢复至建坝前的自然水平。

分析图 6(b)可知,3 个阶段河道平均辫状强度 $\bar{B}_{T3}$ 分别为 3.53(阶段Ⅰ)、2.81(阶段Ⅱ)和 3.18(阶段Ⅲ)。阶段Ⅰ处于自然状态,河道受径流驱动形成典型的多汊辫状结构,因此 $\bar{B}_{T3}$ 较高;在阶段Ⅱ,水电站建成运行使河道主槽流量显著减小,导致 A_w 收缩,辫状结构趋于简化,$\bar{B}_{T3}$ 下降至 2.81。在阶段Ⅲ,水电站拆除后河道水动力条件有所改善,A_w 出现回升,部分干涸汊道的连通性和辫状特征得以恢复,$\bar{B}_{T3}$ 回升至 3.18。上述结果表明,河道辫状强度的变化趋势与水域面积的调整密切相关,河道形态对水文情势变化的响应敏感,河道多汊结构具有可恢复性。

3.1.2　河道辫状强度与水域面积比及水面展宽的关系　图 7 显示了 3 个阶段研究河段的辫状强度 B_{T3} 与水域面积比 R_w 及水面展宽 L_w 的关系。由图 7(a)可知,B_{T3} 与 R_w 呈抛物线函数关系(R^2 = 0.596 ~ 0.979)。总体上,B_{T3} 随 R_w 增大而呈增长趋势。分阶段来看,阶段Ⅰ与Ⅲ的 B_{T3} 增长速率接近,曲线变化相对缓和,而阶段Ⅱ的 B_{T3} 增长速率较快。可见阶段Ⅱ B_{T3} 对 R_w 的响应更加剧烈,增长速率明显高于阶段Ⅰ和Ⅲ,反映出河道水文过程受到调控后对形态变化的敏感性增强。由图 7(b)可知,B_{T3} 与 L_w 呈幂函数关系(R^2 = 0.784 ~ 0.978)。在阶段Ⅰ和Ⅲ,随着 L_w 增大,B_{T3} 的增大速率较一致,说明当河道处于自然或者恢复状态时,其形态演变相对平稳。而在阶段Ⅱ,幂指数显著增大,表明在水流受控条件下,河道形态对展宽变化更为敏感,辫状结构调整程度更加剧烈。

随着水域面积比 R_w 或水面展宽 L_w 的变化,河道辫状强度 B_{T3} 的响应速率存在显著差异。这一差异主要源于不同阶段下游河道平均水域面积 $\bar{A}_w$ 的不同。在阶段Ⅰ和Ⅲ,河道处于天然状态或拆坝后的恢复期,$\bar{A}_w$ 相对较大,河道水文连通性较强,汊道基础较好,河道平面形态的变化主要表现为既有汊道的展宽与扩张,而新增汊道数量有限。相比之下,阶段Ⅱ受水电站调度运行的影响导致河道来流量减少,汊道发育受限,部分汊道处于干涸或断流状态。

随着 R_w 或 L_w 的逐步增大,河道恢复通水条件,新增汊道显著增加,导致 B_{T3} 快速增长。因此,阶段 Ⅱ 中 B_{T3} 对水文参数的变化更加敏感,其变化速率明显高于其他阶段。上述结果表明,辫状强度的变化不仅受水域规模影响,还与汊道数量的恢复和河道形态演化密切相关。

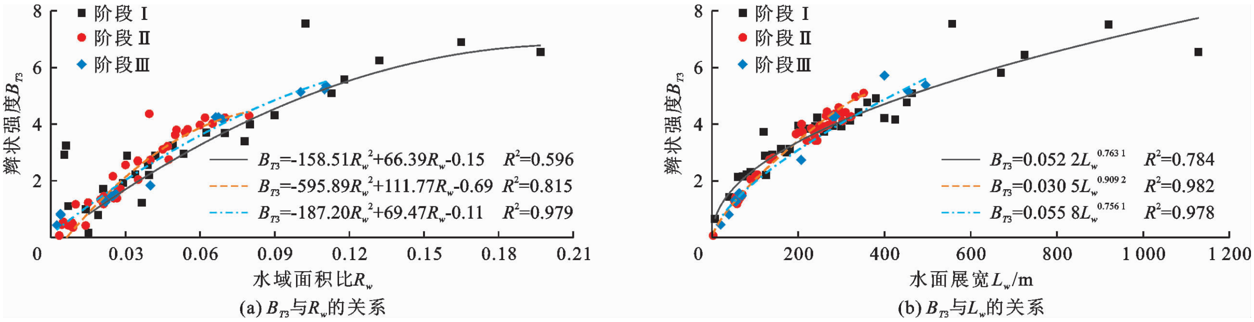


图 7　3 个阶段研究河段的辫状强度 B_{T3} 与水域面积比 R_w 及水面展宽 L_w 的关系

3.2　建坝-拆坝前后阶段河道水深变化

3.2.1　河道水深总体变化　通过对表 1 所列 6 种工况(Run 1 ~ Run 6)的数值模拟,得出了建坝前、电站运行期间、拆坝后 3 个阶段 S1 ~ S9 断面的水深分布,如图 8 所示。由图 8 可知,3 个阶段 S1 ~ S9 断面的水深变化幅度在 -0.81 ~ 0.73 m 之间。与阶段Ⅰ相比,阶段Ⅱ河道平均水深减小了 0.22 m(减小 12.51%),而阶段Ⅲ较阶段Ⅱ平均水深增大了 0.13 m(增大 8.20%)。在模拟流量较大的工况下,建坝-拆坝对水深的影响更显著,尤其在 Run 6 工况下水深变化最大。此时,阶段Ⅰ河道平均水深为 2.45 m,而阶段Ⅱ显著减少至 2.18 m,这主要是因为水库蓄水而减少了下游流量;阶段Ⅲ水深回升至 2.38 m,但仍小于阶段Ⅰ。

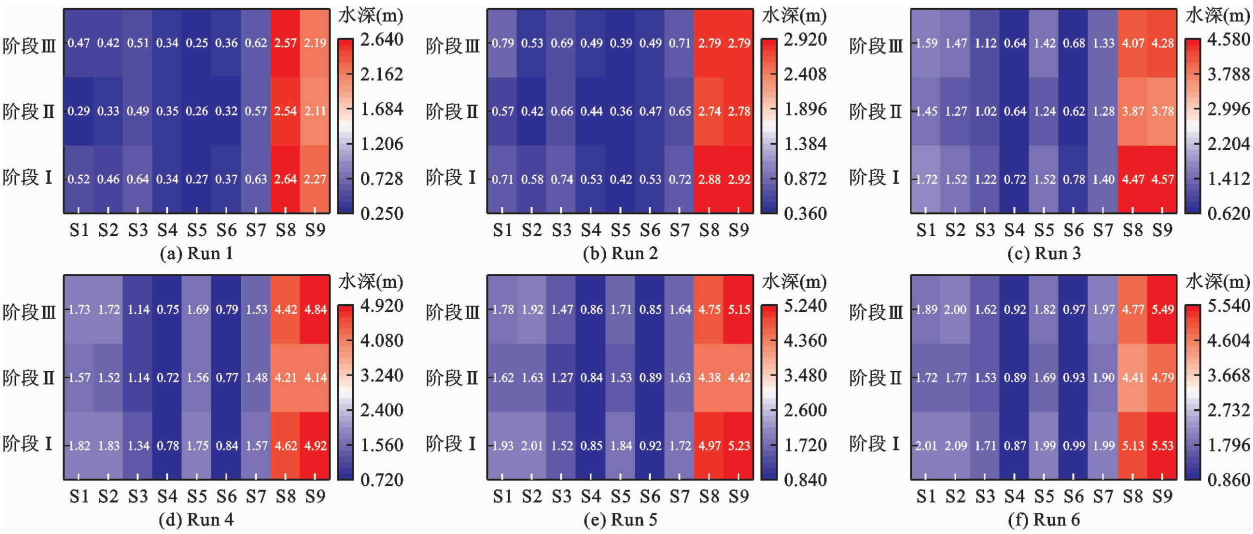


图 8　不同模拟工况下 3 个阶段研究河段 S1 ~ S9 断面水深分布

3.2.2　典型断面水深变化分析　在研究河段的上、中、下游各取 1 个代表性断面即 S2、S5、S8 断面,分析电站修建与拆除对下游不同位置河道水深的影响。以 Run 6 工况为例,3 个阶段的研究河段总体水深及 S2、S5、S8 典型断面水深分布如图 9 所示。图 9 中模拟结果表明,与阶段Ⅰ相比,阶段Ⅱ3 个典型断面的水深普遍降低,具体表现为:S2 断面水深从 2.09 m 降至 1.77 m(降低 15.31%);S5 断面水深从 1.99 m 降至 1.69 m(降低 15.08%);S8 断面水深从 4.97 m 降至 4.41 m(降低 11.27%)。这些变化主要因为这一时段电站的运行导致下游河道流量减少,且影响程度随着距坝距离的增加而逐渐减弱。到阶段Ⅲ,S2 断面水深从 1.77 m 回升至 2.00 m(增大 12.99%);S5 断面水深从 1.69 m 回升至 1.82 m(增大 7.69%);S8 断面水深从 4.41 m 回升至 4.47 m(增大 1.36%)。这表明,阶段Ⅲ拆坝后各断面水深逐渐回升,但其恢复程度因断面位置不同而有所差异。

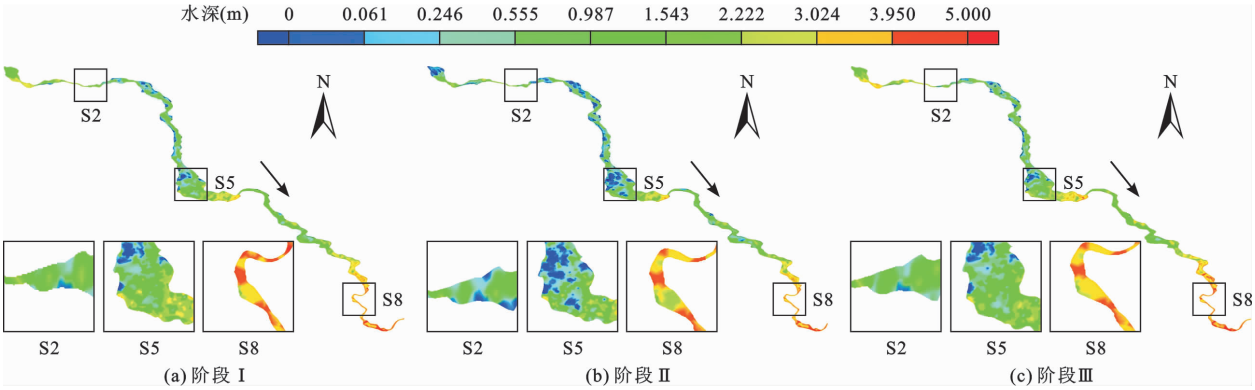


图9 Run 6 工况下研究河段总体水深及 S2、S5、S8 典型断面水深分布云图

3.3 建坝-拆坝前后阶段河道流速变化

3.3.1 河道流速总体变化 图10显示了建坝前、电站运行期和拆坝后3个阶段研究河段S1～S9断面的平均流速分布。由图10可知,3个阶段S1～S9断面的平均流速变化幅度在－0.35～0.20 m/s之间。与阶段Ⅰ相比,阶段Ⅱ河道平均流速降低了0.11 m/s(降低11.73%),而阶段Ⅲ河道平均流速较阶段Ⅱ增大了0.06 m/s(增大7.08%)。通过比较发现,模拟流量较大时,建坝-拆坝对河道流速的影响更为显著,尤其是Run 6工况的流速变化最大。在Run 6工况下,阶段Ⅰ各断面平均流速为1.58 m/s,反映出自然状态下河道具有较强的水动力特性。相比之下,阶段Ⅱ各断面平均流速降至1.43 m/s,表明水电站建成运行后河道流速显著减缓;阶段Ⅲ各断面平均流速回升至1.49 m/s,显示拆坝后河道流速有所恢复。

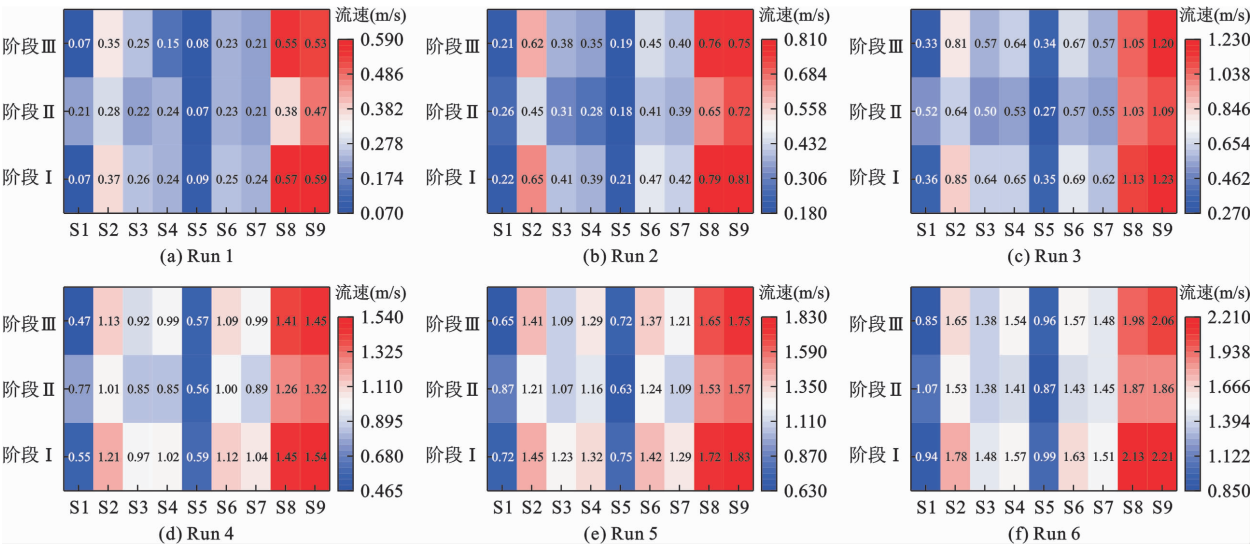


图10 不同模拟工况下3个阶段研究河段S1～S9断面平均流速分布

3.3.2 典型断面流速变化分析 在研究河段的上、中、下游各取1个代表性断面即S4、S6、S9断面,分析电站修建与拆除对下游不同位置河道流速的影响。以Run 6工况为例,3个阶段的研究河段总体流速及S4、S6、S9典型断面流速分布如图11所示。由图11可知,阶段Ⅱ与阶段Ⅰ相比,S4断面的河道中心流速从1.72 m/s降至1.54 m/s(降低10.46%),S6断面中心流速从1.74 m/s降至1.58 m/s(降低9.19%),S9断面中心流速从2.24 m/s降至2.05 m/s(降低8.48%)。阶段Ⅱ流速下降幅度最大的断面为S4, S6和S9断面流速的下降幅度有所减小,表明电站运行对大坝近距离河道水动力的影响较大,而对远距离断面的影响逐渐减弱。到阶段Ⅲ,S4、S6、S9断面的中心流速分别回升至1.70 m/s(增大10.39%)、1.65 m/s(增大4.43%)、2.11 m/s(增大2.93%)。由此可见,电站拆除后下游各断面的流速均有所恢复,但恢复程度随距坝距离的增加而逐渐减小。

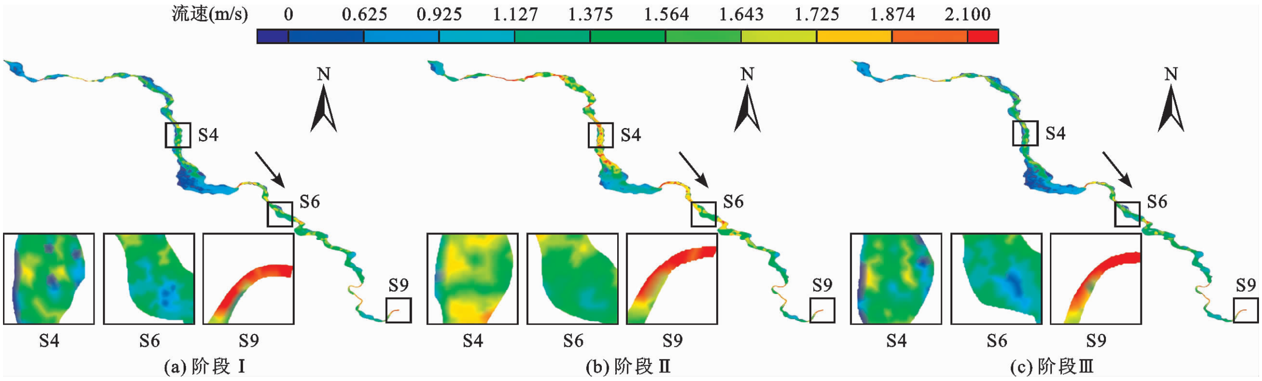


图 11　Run 6 工况下研究河段总体流速及 S4、S6、S9 典型断面流速分布云图

4　讨　论

近年来,黄河源区受降水增加与冰川融水增强的影响,年径流量总体呈增大趋势,尤其在 1990 年后趋势显著[25]。然而,本研究区水电站下游局部河段在建坝至拆坝期间水域面积显著减少,表现为分汊水面缩减、岸线收敛,说明工程调控在局地可显著改变水体空间格局,甚至与区域径流变化方向相反[6,26]。这凸显了水利工程对河道水文过程及形态格局的重要影响。本研究未将气候变化因素纳入水域变化定量分析,未来可通过耦合气候数据与水文模型,进一步区分自然变化与工程干扰的贡献。

在河道形态方面,建坝削弱了下游辫状结构,减少了汊道数量,使河道形态趋于单一,反映出水文调控与洪峰削减效应对辫状河道的活跃性具有抑制作用。拆坝后分汊结构有所恢复,但重构程度有限。本研究发现辫状强度与水域面积比呈抛物线关系,与水面展宽呈幂函数关系,这与既有研究结论一致[21,27],说明高原辫状河道演变具有一定的规律性。河道形态变化还受来沙条件、岸坡稳定性和植被演替等多因子控制,未来需结合高分辨率遥感、无人机及实地调查开展多源协同分析。

水动力方面,已有研究表明水利工程建设通常会减小下游河道的水深与流速[28-29]。拆坝后两者逐步回升,显示出河道具有一定的恢复能力,但不同断面的恢复程度差异显著,表明水动力结构恢复具有阶段性和空间不均性。值得注意的是,建坝前与拆坝后虽均属天然状态,但二者下游水深与流速仍存在差异,可能是由于经过多年受控水流冲刷而导致了河床重构。近年来,在气候变暖与冻土退化等因素的共同作用下,研究区域的降水及径流状况已发生变化,河道水文特性相较建坝前有了较大改变。上述分析表明,河道水动力变化受工程遗留效应与气候变化的双重影响,值得后续深入研究不同因素对水动力调整的作用。

5　结　论

本研究基于多期遥感影像、实测水文数据和 TELEMAC-2D 模型,系统分析了黄河源水电站建坝与拆坝过程中河道形态与水动力特征的演变规律,主要结论如下。

(1)黄河源水电站建坝前、电站运行期间与拆坝后 3 个阶段研究河段的平均辫状强度分别为 3.53、2.81、3.18,反映了水利工程调控对下游河道辫状结构具有抑制效应。该 3 个阶段的河道辫状强度与水域面积比呈抛物线函数关系,与水面展宽呈幂函数关系。

(2)黄河源水电站运行期间下游断面平均水深和流速分别较建坝前减小 0.22 m(减小 12.51%)和 0.11 m/s(减小 11.73%),而拆坝后相较运行期间则分别回升了 0.13 m(增大 8.20%)和 0.06 m/s(增大 7.08%)。在模拟 50 a 一遇洪水时,电站下游河段水深与流速的变化趋势更为显著,表明模拟流量越大,建坝与拆坝对水动力的影响越显著。从空间分布来看,工程对下游河段的影响随着距离的增大而逐渐减弱。

(3)黄河源水电站的修建削弱了下游河道的辫状和水动力特征,导致水域缩减和河道形态趋于单一化,拆坝有助于河道辫状结构和水动力恢复,但整体尚未恢复到建坝前状态,表明工程活动对高原辫状河道具有遗留影响效应。

参考文献:

[1] YAO Tandong, BOLCH T, CHEN Deliang, et al. The imbalance of the Asian water tower [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 618-632.

[2] 张 鸣,朱 奎,鲁 帆,等.黄河源区水文要素变化及驱动因素分析[J].人民黄河,2023,45(10):30-37.

[3] ZHANG Ting, LI Dongfeng, LU Xixi. Response of runoff components to climate change in the source-region of the Yellow River on the Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2022, 36(6): 14633.

[4] MA Qiang, JIN Huijun, WU Qingbai, et al. Changes in hydrological processes in the headwater area of Yellow River, China during 1956—2019 under the influences of climate change, permafrost thaw and dam[J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(2): 237-247.

[5] 李敏讷,王 妍,王新源,等.鱼类行为生态水力学模型研究现状与发展趋势[J].湖泊科学,2024,36(5):1323-1335.

[6] 侯轶群,邹 曦,陈小娟,等.金沙江下游大坝建设对纵向连通性的影响研究[J].水生态学杂志,2024,45(1):26-31.

[7] 肖建设,乔 斌,陈国茜,等.黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J].生态学报,2020,40(2):510-521.

[8] 姚檀栋,徐柏青,谭德宝,等.气候变化对江河源区水循环的影响[J].青海科技,2022,29(5):4-11+21.

[9] 梁鹏飞,李宗杰,辛惠娟,等.黄河源区径流变化特征及影响因素研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):64-71.

[10] QIN Yue, YANG Dawen, GAO Bing, et al. Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the Yellow River source region, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605-606: 830-841.

[11] ZHENG Xiankun, LIANG Sihai, YAN Dezhao, et al. Mechanisms of climate-induced lake dynamics in the Source Region of Three Rivers, Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 59: 102323.

[12] 王俊奇,王广军,梁四海,等.1996—2015年黄河源区植被覆盖度提取和时空变化分析[J].冰川冻土,2021,43(2):662-674.

[13] 潘 耀,尹云鹤,侯文娟,等.基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J].生态学报,2022,42(19):7978-7988.

[14] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.黄河源植被覆盖度变化及空间分布自然驱动力分析[J].生态环境学报,2022,31(3):429-439.

[15] 郝好鑫,杨 霞,杨梦斐,等.金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响[J].湖泊科学,2023,35(1):247-257.

[16] 吕 浩,田辉伍,段辛斌,等.岷江下游干流段鱼类资源现状及其多样性分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):88-96.

[17] 郭 佳,李昌文,杨忠勇,等.长江口南北港水下地形演变数值模拟研究[J].人民长江,2023,54(S2):143-147+171.

[18] MONEGAGLIA F, ZOLEZZI G, GÜNERALP I, et al. Automated extraction of meandering river morphodynamics from multitemporal remotely sensed data [J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 105: 171-186.

[19] 龚成麒,董晓华,魏 冲,等.1978—2018年青藏高原降水区划及各区降水量时空演变特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):96-108.

[20] 李志威,吴叶舟,胡旭跃,等.长江源辫状河群相似性分析[J].泥沙研究,2020,45(4):13-20.

[21] 何育聪,李志威,夏军强,等.沱沱河辫状河道多尺度形态特征及非活跃汊道的影响[J].泥沙研究,2024,49(1):38-44.

[22] TADESSE Y B, FRÖHLE P. Modelling of flood inundation due to levee breaches: sensitivity of flood inundation against breach process parameters[J]. Water, 2020, 12(12): 3566.

[23] RIVERA-TREJO F, SOTO-CORTES G, KONSOER K M, et al. Beyond water surface profiles: a new iterative methodology for 2D model calibration in rivers using velocity data from multiple cross-sections[J]. Water, 2025, 17(3): 377.

[24] YAO Weiwei, CHEN Yuansheng. Assessing three fish species ecological status in Colorado River, Grand Canyon based on physical habitat and population models[J]. Mathmatical Biosciences, 2018, 298: 91-104.

[25] ZHANG Guoqing, YAO Tandong, XIE Hongjie, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103269.

[26] 王 波,黄 薇,尹正杰.大型梯级水库对河流生态流量的影响:以金沙江下游梯级为例[J].长江流域资源与环境,2009,18(9):860-864.

[27] LI Zhiwei, LU Hanyou, GAO Peng, et al. Characterizing braided rivers in two nested watersheds in the Source Region of the Yangtze River on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geomorphology, 2020, 351: 106945.

[28] 陈 建,陈 晨.水库建设对下游河流地貌过渡区水文情势影响研究[J].人民珠江,2020,41(3):91-97.

[29] 周炜兴,孙昭华,周 坤,等.三峡水库蓄水前后长江中下游流量频率分布特征及其对洪水造床作用的影响[J].湖泊科学,2022,34(2):616-629.