

# 三峡工程蓄水以来宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽阻力变化规律研究

江磊<sup>1</sup>, 曾子悦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江科学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年7月21日; 录用日期: 2024年10月12日; 发布日期: 2024年12月31日

## 摘要

三峡工程蓄水以来, 长江干流宜昌 - 城陵矶河段发生了明显冲刷, 河道下切、断面扩大, 但洪水位却没有发生趋势性的变化, 导致这种现象的原因可能是冲刷过程中河道综合阻力有所增加, 目前综合阻力随时间的变化规律尚不清楚。本文基于宜昌 - 城陵矶河段的实测地形资料研究了河道坡降 $J$ 、过水面积 $A$ 、河道湿周 $\chi$ 等的变化规律, 并以此为基础反向研究了河道综合糙率系数 $n$ 随冲刷时间的变化规律。结果表明三峡工程蓄水运用以来, 随着宜昌 - 城陵矶河段的冲刷发展, 河道纵坡降 $J$ 调平, 洪水河槽过水面积 $A$ 明显增大, 湿周 $\chi$ 在蓄水初期略有增大、而后基本保持不变; 在此过程中, 宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽综合糙率 $n$ 是增大的, 而且随着冲刷的发展、 $n$ 呈逐渐增大的趋势, 2016年相比于2002年综合糙率 $n$ 平均增大了约16.7%。

## 关键词

糙率系数, 河道纵坡降, 过水面积, 河道湿周

# Study on Flood Bed Resistance Variation Law of the Yichang to Chenlingji Reach after Impoundment of the Three Gorges Project

Lei Jiang<sup>1</sup>, Ziyue Zeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan Hubei

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: Oct. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2024

作者简介: 江磊, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河道整治相关的规划、设计和科研工作, Email: beiai-qq25@163.com

文章引用: 江磊, 曾子悦. 三峡工程蓄水以来宜昌-城陵矶河段洪水河槽阻力变化规律研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(6): 607-613. DOI: 10.12677/jwrr.2024.136068

## Abstract

After the impoundment of the Three Gorges Project, the riverbed from Yichang to Chenglingji was eroded severely and the corresponded area of cross-section was enlarged substantially. Nevertheless, the flood water level remained unchanged all the time. This phenomenon could be due to the increase of bed resistance during erosion. Based on the measured topographic data from Yichang to Chenglingji, the variation of longitudinal slope  $J$ , cross-section area  $A$  and wetted perimeter  $\chi$  were studied in this research, and then the roughness coefficient  $n$  of flood channel was inferred. After impoundment of the Three Gorges Project, the reach longitudinal slope  $J$  from Yichang to Chenglingji decreased and the cross-section area  $A$  increased continuously. However, the wetted perimeter  $\chi$  increased slightly at the seedling stage, and then kept unchanged. During this process, the roughness coefficient  $n$  increased gradually with erosion of riverbed from Yichang to Chenglingji, the roughness  $n$  in the year of 2016 increased by 16.7% compared with that in 2002.

## Keywords

Roughness Coefficient, Longitudinal Slope, Cross-Section Area, Wetted Perimeter

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

三峡工程蓄水运用以来,由于枢纽改变了下游河道的水沙条件,清水下泄导致宜昌 - 城陵矶河段发生了明显冲刷[1][2]。河道冲刷一方面导致河道高程降低,另一方面导致过水面积增大[3]。根据实测资料拟合得出的各年水位流量关系综合线的变化趋势来看,河道发生冲刷以后,宜昌 - 城陵矶河段枯水位明显下降,但洪水位并没有发生趋势性的改变,国内外其它河流枢纽下游也出现了类似的洪枯水位变化规律[4][5]。

河道洪水位不降可能是由于洪水河槽综合阻力增加导致的,但阻力增加幅度及随时间的变化规律并不明确[6]。冲击河流综合阻力组成单元相当复杂,包括沙粒阻力、沙波阻力、大尺度形态阻力、河型阻力、植被阻力、局部来流顶托作用等,河道综合阻力与各形态参数之间的理论关系目前还有待进一步研究[7][8]。而且,各形态参数的量化也一直是河流动力学领域的难点之一[9][10]。因此,要直接通过形态参数的变化来研究河道综合阻力的变化现阶段是难以实现的[11]。

本文基于宜昌 - 城陵矶河段的实测地形资料,研究了河道纵坡降  $J$ 、洪水河槽过水面积  $A$ 、河道湿周  $\chi$  等的变化规律,基于同水位下过流能力不变(同流量下水位不变)的计算条件,反向研究了河道综合糙率系数  $n$  随时间的变化规律。

## 2. 河道概况

宜昌 - 城陵矶河段全长 408 km,自上而下包括宜枝河段(宜昌 - 枝城,长约 60.8 km)、上荆江河段(枝城 - 藕池口,长约 171.7 km)、下荆江河段(藕池口 - 城陵矶,长约 175.5 km)。宜枝河段是山区性河流转化为冲积平原河流的过渡段,河床组成以砾质为主,沿程相间砾卵石,抗冲性较强。上荆江河段河道内弯道较多,部分弯道内有江心洲,江口以上为砂卵石河床、江口以下为砂质河床,该河段因河岸上层粘土层较厚,底层卵石层分布较高,抗冲性较好,加上历年的守护、加固,目前总体河势基本稳定。下荆江为典型的蜿蜒型河道,河床组

成多为中细砂，中值粒径约为 0.18 mm，可冲易动性较强，覆盖层厚度较大，河床演变剧烈。

### 3. 河道综合糙率变化研究

#### 3.1. 综合糙率系数计算公式

恒定均匀流条件下，根据曼宁公式得到的流量计算公式如下：

$$Q = \frac{1}{n} A^{5/3} \chi^{-2/3} J_f^{1/2} \quad (1)$$

进一步变形可得：

$$n = \frac{A^{5/3} J_f^{1/2}}{Q \chi^{2/3}} \quad (2)$$

由式(2)可知，要计算出河道糙率系数值  $n$ ，需要确定河道流量  $Q$ 、过水面积  $A$ 、水面比降  $J_f$ 。恒定均匀流条件下  $J_f$  等于河道纵坡降  $J$  及湿周  $\chi$ 。根据相关研究成果，三峡工程蓄水以来，长江中游干流主要控制站枯水位明显下降、洪水位无明显的趋势性变化[7]-[9]。说明三峡工程蓄水以来，尽管宜昌 - 城陵矶河道发生了明显的冲刷，但对于同一洪水水位而言，河道过流的流量  $Q$  是不变的。因此，要研究糙率系数值  $n$  的变化规律，只需研究河道过水面积  $A$ 、河道纵坡降  $J$  及河道湿周  $\chi$  的变化规律。

#### 3.2. 河道纵坡变化规律

根据实测地形资料，统计了三峡蓄水运用以来 2002 年、2006 年、2011 年、2016 年宜昌 - 城陵矶河段深泓纵剖面的变化情况，见图 1(a)所示。从图可以看出，三峡工程蓄水以来，河道纵剖面整体呈下切的变化趋势，平均高程明显降低，这主要是由于三峡工程蓄水后清水下泄，宜昌 - 城陵矶河段发生大幅冲刷导致深泓纵剖面下切，下切幅度在 2006~2011 年最大。

对数据进行直线拟合可得河道纵坡降  $J$ ，见图 1(b)所示。从图可以来看，纵坡降  $J$  呈逐渐调平的趋势，2002 年、2006 年、2011 年、2016 年宜昌 - 城陵矶河段纵坡降  $J$  分别为 0.591‰、0.546‰、0.533‰、0.532‰，纵坡降数值逐渐减小。随着河道的冲刷发展，2002 年、2006 年、2011 年、2016 年河道纵坡降  $J$  累计减小幅度分别为 0.00%、-7.61%、-9.81%、-9.98%。

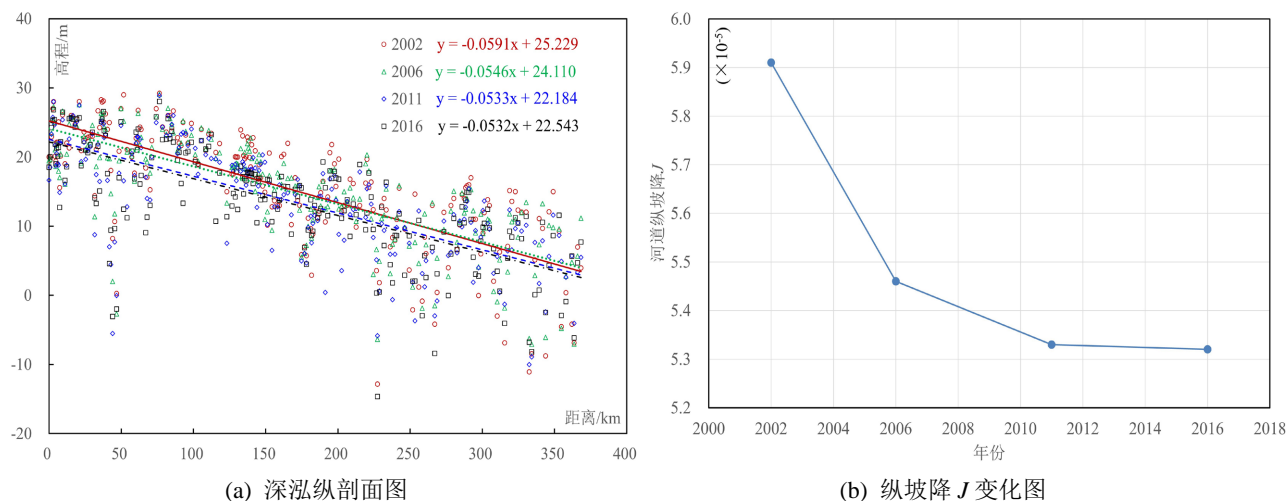


图 1. 宜昌 - 城陵矶河段深泓纵剖面变化图

### 3.3. 过水面积变化规律

根据实测地形资料，计算了宜昌 - 城陵矶河段 220 个断面的洪水河槽过水面积  $A$ ，各断面洪水位按照宜昌站  $56,700 \text{ m}^3/\text{s}$  流量通过一维水流数学模型进行推求，同时考虑沿程的分汇流情况。计算各断面对应洪水位下的过水面积，过水面积增加百分比  $PECA_i$  均为相对于三峡蓄水前 2002 年的计算结果：

$$PECA_i = \frac{A_i - A_{2002}}{A_{2002}} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4 \text{ (分别代表 2002, 2006, 2011, 2016)} \quad (3)$$

过水面积增加百分比  $PECA$  统计分布结果见图 2 所示。从图可以看出，随着河道的逐渐冲刷发展，绝大部分断面洪水河槽过水面积都是增大的，仅个别断面过水面积略有减小。2002 年、2006 年、2011 年、2016 年过水面积增大的断面所占的比例分别为 0.00%、73.64%、90.91%、94.09%，过水面积增加百分比  $PECA$  的平均值分别为 0.00%、4.00%、10.00%、14.80%。总体来看，随着冲刷发展，洪水河槽过水面积是逐渐增加的。

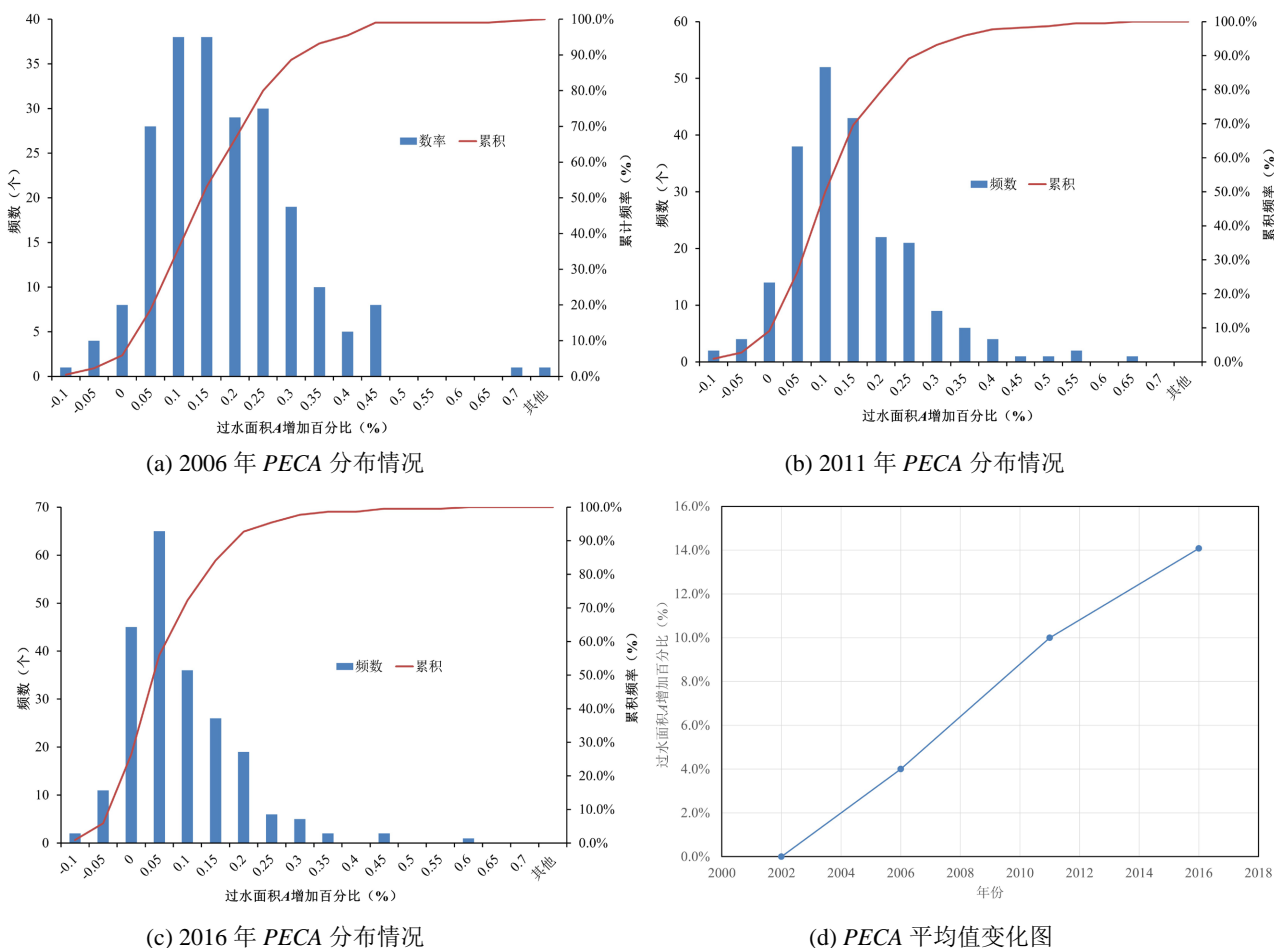


图 2. 宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽过水面积变化图

### 3.4. 河道湿周变化规律

采用与过水面积相同的条件计算各断面洪水河槽的湿周参数，湿周增加百分比  $PEC\chi_i$  均为相对于三峡蓄水前 2002 年的计算结果：

$$PEC\chi_i = \frac{\chi_i - \chi_{2002}}{\chi_{2002}} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4 \text{ (分别代表2002, 2006, 2011, 2016)} \quad (4)$$

湿周增加百分比  $PEC\chi$  统计分布结果见图 3 所示。从图可以看出，湿周的增加主要集中在三峡蓄水初期的 2002~2006 年，2006 年以后湿周增加的百分比在某个值附近呈波动状态。2002 年、2006 年、2011 年、2016 年湿周增大的断面占的比例分别为 75.00%、78.18%、75.91%， $PEC\chi$  的平均值分别为 0.00%、4.66%、5.71%、4.60%。总体来看，随着冲刷发展，湿周在蓄水初期略有增大，而后基本保持不变。

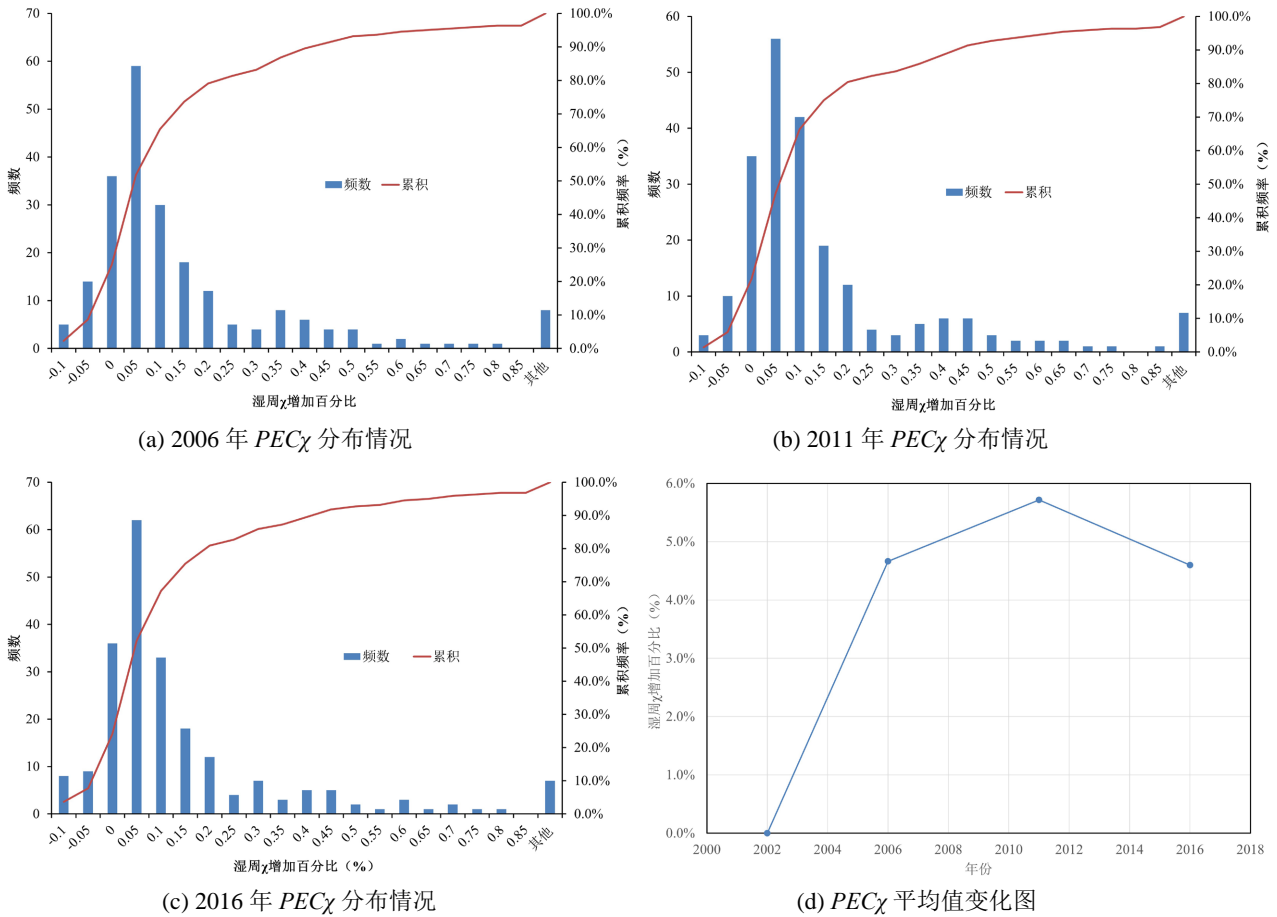


图 3. 宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽湿周变化图

### 3.5. 糙率系数变化规律

根据式(2)可知，在宜昌 - 城陵矶河段洪水位无明显趋势性变化的前提下，洪水流量是基本不变的。糙率系数  $n$  与过水面积  $A$  和河道纵坡降  $J$  呈正比、与河道湿周  $\chi$  呈反比，具体变化规律取决于  $A$ 、 $J$ 、 $\chi$  的变化规律。将式(3)和式(4)变形可得：

$$A_i = (1 + PEC A_i) A_{2002} \quad (5)$$

$$\chi_i = (1 + PEC \chi_i) \chi_{2002} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(2)可得：

$$n_i = \frac{(1 + PEC A_i)^{5/3} (1 + PEC J_i)^{1/2}}{(1 + PEC \chi_i)^{2/3}} \frac{A_{2002}^{5/3} J_{2002}^{1/2}}{Q \chi_{2002}^{2/3}} \quad (7)$$

$$\frac{n_i}{n_{2002}} = \frac{(1 + PECA_i)^{5/3} (1 + PECJ_i)^{1/2}}{(1 + PEC\chi_i)^{2/3}} \quad (8)$$

将前述  $A$ 、 $J$ 、 $\chi$  的研究成果代入式(8)可得相对糙率  $n_i/n_{2002}$  的变化规律, 见图 4 所示。从图可以看出相对糙率  $n_i/n_{2002}$  的数值均是大于 1.0 的, 表明三峡蓄水以来宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽的糙率值是增大的。从相对糙率  $n_i/n_{2002}$  随时间的变化情况来看, 随着冲刷发展, 相对糙率系数逐年增大, 2002 年、2006 年、2011 年、2016 年相对糙率系数  $n_i/n_{2002}$  分别为 1.00、1.009、1.081、1.167。说明 2006 年、2011 年、2016 年宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽综合糙率相比于蓄水前的增加比例分别为 0.90%、8.10%、16.7%。

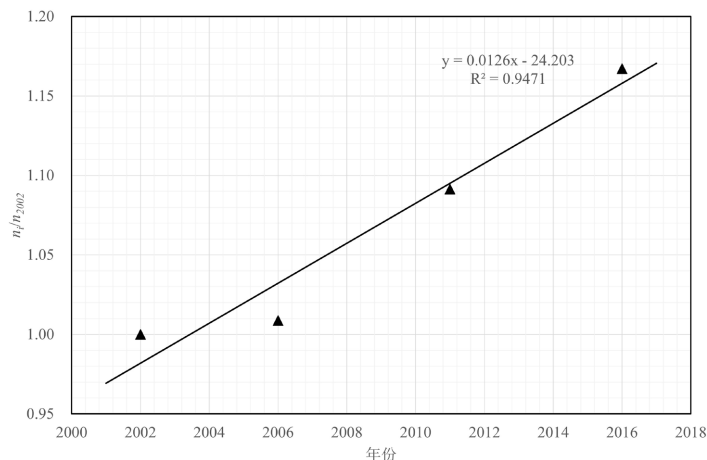


图 4. 宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽相对糙率变化图

## 4. 结论

1) 三峡工程蓄水运用以来, 随着中下游河道的冲刷发展, 宜昌 - 城陵矶河段河道纵坡降调平, 洪水河槽过水面积明显增大, 湿周在蓄水初期略有增大, 而后基本保持不变。

2) 三峡工程蓄水运用以来, 包含下游顶托作用的宜昌 - 城陵矶河段洪水河槽综合糙率是增大的, 而且随着冲刷的发展、综合糙率呈逐渐增大的趋势, 2016 年相比于 2002 年综合糙率平均增大了约 16.7%。

## 基金项目

国家重点研发计划项目(2023YFC3209503)。

## 参考文献

- [1] 王华琳, 郑珊, 谈广鸣, 等. 三峡水库运行后宜昌-城陵矶河段冲刷重心下移与时空演变[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1470-1481.
- [2] 董炳江, 许全喜, 袁晶, 等. 近年来三峡水库坝下游河道强烈冲刷机理分析[J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 41-46.
- [3] 罗方冰, 陈迪, 郭怡, 等. 三峡水库蓄水以来下游近坝河段冲淤分布特征及成因[J]. 泥沙研究, 2019, 44(3): 31-38.
- [4] 杨云平, 张明进, 孙昭华, 等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 776-789.
- [5] 李义天, 薛居理, 孙昭华, 等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化[J]. 水力发电学报, 2021, 40(4): 1-13.
- [6] 韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1217-1226.
- [7] 刘鑫, 夏军强, 周美蓉, 等. 长江中游动床阻力计算[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 535-546.
- [8] 刘鑫, 夏军强, 周美蓉, 等. 长江中游动床阻力计算及其近期变化特点研究[J]. 人民长江, 2020, 51(11): 34-40, 152.
- [9] 黄才安, 严恺. 动床阻力的研究进展及发展趋势[J]. 泥沙研究, 2002(4): 75-81.

- [10] 白玉川, 王令仪, 杨树青. 基于阻力规律的床面形态判别方法[J]. 水利学报, 2015(6): 707-713.
- [11] FERRO, V. Flow resistance law under equilibrium bed-load transport conditions. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 64: 641-648. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.008>