



# 汉江兴隆枢纽坝下河床冲刷引起的水位变化

杨洪祥<sup>1</sup>, 孙保虎<sup>1</sup>, 白国文<sup>1</sup>, 李君涛<sup>2</sup>, 张明<sup>2</sup>

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 汉江兴隆枢纽运行以来坝下河床冲刷较为严重, 枯水期下游最低通航水位下降幅度较大。为保证兴隆枢纽安全运行, 枢纽正常蓄水位需同步降低, 以适应坝下水位下降, 导致兴隆船闸上下闸首枯水期门槛水深不足, 千吨级船舶通航保证率不高。针对兴隆枢纽坝下河床冲刷引起的水位变化问题, 通过分析汉江现状水水泥沙特性和枯水水文情势, 运用一维与二维长系列年水沙数学模型, 滚动计算 60 a 和 50 a 兴隆坝下河床冲刷及水位变化情况, 得出 40 a 后坝下同流量对应的水位逐渐趋于稳定, 并考虑 2 000 吨级航道整治工程实施后, 且汉口站水位每年下降 0.1 m 情况下, 50 a 末兴隆坝下水位将可能下降 3.77 m, 旨在为汉江兴隆枢纽坝下河段相关工程设计水位的确定提供参考。

**关键词:** 兴隆枢纽; 河床冲刷; 水位变化; 水水泥沙特性; 水沙数学模型

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0166-07

## Water level changes caused by riverbed erosion under Xinglong Hub of Han River

YANG Hongxiang<sup>1</sup>, SUN Baohu<sup>1</sup>, BAI Guowen<sup>1</sup>, LI Juntao<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>

(1. Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Since the operation of Xinglong Hub on the Han River, the riverbed under the dam has been severely eroded, and the lowest navigable water level downstream has decreased significantly during the dry season. To ensure the safe operation of Xinglong Hub, the normal water storage level of the Hub needs to be lowered synchronously to adapt to the decrease in water level below the dam, resulting in insufficient threshold water depth for the upper and lower locks of Xinglong Shiplock during the dry season, and low navigation guarantee rate for ships of 1 000-ton. In response to the problem of water level changes caused by riverbed erosion under Xinglong Hub Dam, this paper analyzes the current hydrological and sediment characteristics and dry water hydrological situation of the Han River, and uses one-dimensional and two-dimensional long series annual water and sediment mathematical models to rolling calculate the riverbed erosion and sedimentation and water level changes under Xinglong Dam for 60 and 50 years. It is found that the water level corresponding to the same flow rate under the dam gradually stabilized after 40 years, considering the implementation of the 2 000-ton waterway regulation project and the annual decrease of 0.1 m in water level at Hankou Station, the water level under Xinglong Hub Dam may decrease by 3.77 m by the end of 50 years. The aim is to provide reference for the determination of the design water level of the relevant engineering projects in the section under Xinglong Dam of the Han River.

**Keywords:** Xinglong Hub; riverbed erosion; water level change; hydrological and sediment characteristics; mathematical model of water and sediment

收稿日期: 2023-12-20

作者简介: 杨洪祥 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事枢纽与船闸工程设计研究工作。

自1968年丹江口水库一期工程蓄水运行以来, 由于蓄水拦沙, 汉江下游河道出现长距离冲刷下切现象。尤其随着近年来汉江干流湖北境内梯级开发的陆续建成和2014年南水北调中线工程运行以来, 汉江水文泥沙情势正在持续发生变化。兴隆枢纽做为汉江梯级开发的最下一级, 自2013年运行以来, 坝下河床冲刷较为严重<sup>[1]</sup>。2007年7月和2022年2月, 长江水利委员会水文局、武汉大学<sup>[2]</sup>和重庆西南水运工程科学研究所等<sup>[3]</sup>分别通过一维水沙数学模型对兴隆坝下水位下降进行计算分析。本文在前期研究成果基础上, 结合汉江现状水文泥沙特性, 进一步分析枯水水文情势, 通过建立汉江兴隆枢纽—汉口一维水沙数学模型, 重点研究坝下河床冲淤及水位变化规律, 并为二维水沙模型提供边界条件; 通过建立汉江兴隆枢纽—岳口二维水沙数学模型, 在重点河段开展一维、二维水沙模型计算结果的对比, 预报不同系列年兴隆坝下的水位变化, 旨在为汉江兴

隆枢纽坝下河段相关工程设计水位的确定提供参考。

### 1 工程概述

兴隆枢纽位于汉江下游湖北省潜江、天门市境内, 上距丹江口枢纽351 km, 下距河口266 km, 是汉江流域梯级开发湖北省境内最下一级<sup>[4]</sup>。工程于2009年2月开工建设, 2013年建成运行。兴隆枢纽建成蓄水后, 改善汉江马良—兴隆河段的通航条件, 发挥了较好的航运效益, 但是受枢纽清水下泄影响, 近年来坝下河床下切较为严重, 导致枯水期下游最低通航水位下降幅度较大。2022年在设计最小通航流量 $Q=420\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船闸下水水位为26.32 m, 比兴隆船闸最初设计值29.78 m下降3.46 m, 比设计最低通航水位28.18 m低1.86 m, 影响船闸的正常运行和汉江航运的畅通, 急需新建兴隆二线船闸工程<sup>[5]</sup>。汉江兴隆枢纽—汉口河道总体形势见图1。

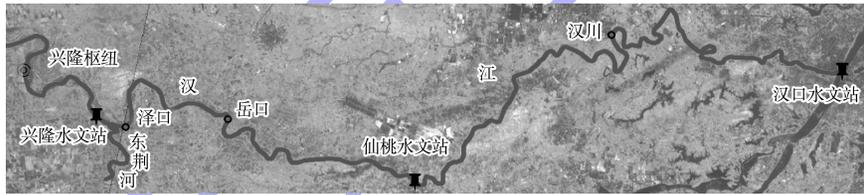


图1 汉江兴隆枢纽至汉口河道总体形势

## 2 河床演变

### 2.1 水文泥沙特性

经统计分析, 2015—2022年, 南水北调工程运行后, 皇庄水文站年均径流量、年均输沙量、年均含沙量分别为390亿 $\text{m}^3$ , 421万t、0.108 $\text{kg}/\text{m}^3$ , 比1969—2014年减少12.3%、72.6%、68.8%, 沙量减小的幅度明显大于水量, 见表1。2000—2022年皇庄站逐年径流量、输沙量及含沙量见图2、3。

表1 汉江皇庄站水沙特征值

时段	年均径流量/ 亿 $\text{m}^3$	年均输沙量/ 万t	含沙量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1951—1968年	535	12 154	2.272
1969—2014年	445	1 539	0.346
2015—2022年	390	421	0.108

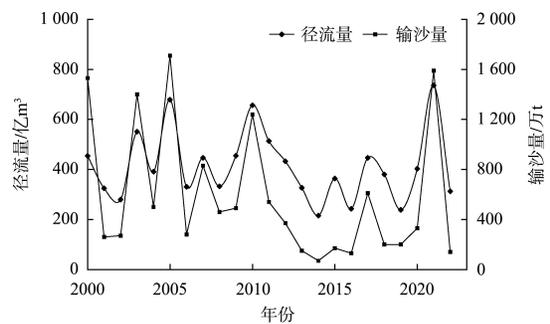


图2 2000—2022年皇庄站逐年径流量和输沙量

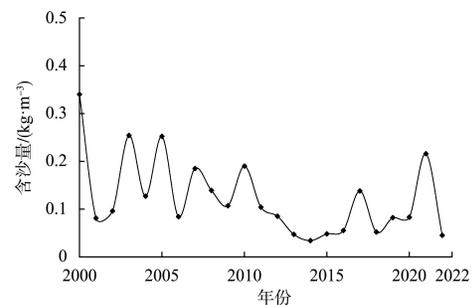


图3 2000—2022年皇庄站逐年含沙量

## 2.2 丹江口下游汉江河床冲淤变化

根据已有研究<sup>[6-7]</sup>，自1968年丹江口水库蓄水运行后，坝下河段发生了长时间、长距离的河床冲刷，1978—2016年，整个汉江中下游冲刷了9.05亿m<sup>3</sup>，主要集中在丹江口—仙桃河段(占比94.4%)，仙桃以下冲淤量较小。1987年前，丹江口—襄阳河

段冲刷较大；1987年后已经明显减弱，但2005年后该河段恢复了较大的冲刷强度。2005—2012年整个汉江中下游河段均呈冲刷态势。1978—2016年汉江中下游冲淤变化见图4，汉江下游不同河段分时段冲淤统计见表2。

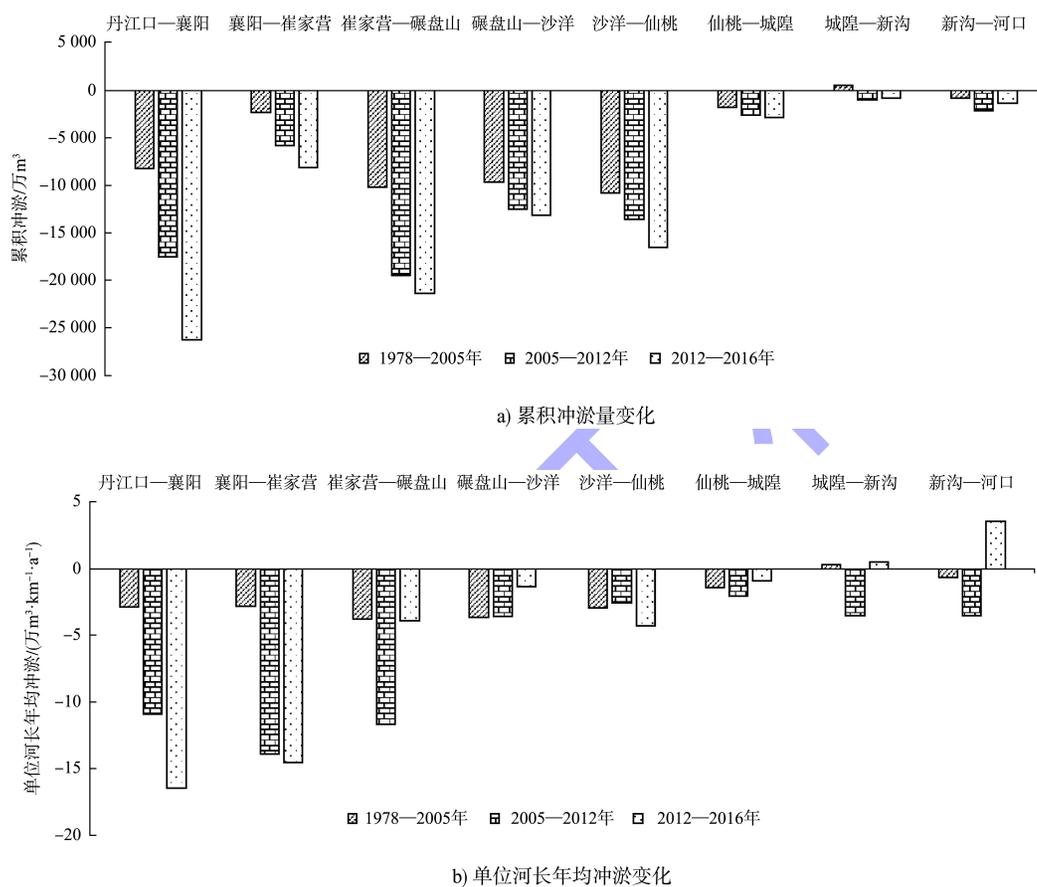


图4 1978—2016年汉江中下游冲淤变化

表2 汉江下游不同河段分时段冲淤

河段	间距/ km	冲淤量/万 m <sup>3</sup>				1978—2016年
		1978—1987年	1987—2005年	2005—2012年	2012—2016年	
丹江口—襄阳	106.00	-6 055	-2 159	-9 266	-8 727	-26 207
襄阳—崔家营	31.23	-2 389	-2 389	-3 472	-2 271	-8 132
崔家营—碾盘山	99.36	-3 100	-7 085	-9 249	-1 942	-21 376
碾盘山—沙洋*	98.90	-1 945	-7 756	-2 808	-659	-13 168
沙洋—仙桃*	135.40	-2 375	-8 477	-2 753	-2 893	-16 498
仙桃—城隍#	49.00	-1 019	-841	-799	-214	-2 873
城隍—新沟#	53.20	-792	1 269	-1 493	133	-883
新沟—河口#	47.00	-288	-564	-1 325	831	-1 346
丹江口—河口	620.00	-43 576	-43 576	-31 165	-15 742	-90 483

注：冲淤计算采用地形法，计算水位为平滩水位；\*为统计第1、2个时段，年份分别为1977、1988年；#为统计第2时段，年份为1986年。

### 2.3 兴隆坝下河段冲淤变化

2005年4月—2023年3月, 兴隆枢纽下游河段出现明显冲刷下切态势, 尤其近坝段0~20 km、20~40 km河段下切幅度最大, 深泓平均高程累积

下降6.14、3.93 m。兴隆枢纽下游近坝段深泓下切主要与各时段出现的较大洪峰有关。兴隆枢纽下游各河段深泓平均高程统计见表3。

表3 兴隆枢纽下游各河段深泓平均高程

河段 (距坝址)/ km	平均高程/m								
	2005年 4月	2005年 12月	2010年 6月	2016年 11月	2018年 1月	2021年 1月	2022年 4月	2023年 3月	2005年4月—2022年4月 变化值
0~20	25.05	25.03	25.12	22.52	20.44	20.38	18.91	19.38	6.14
20~40	23.58	23.33	24.00	22.51	20.69	20.73	19.65	20.18	3.93
40~60	22.14	22.47	22.63	20.76	19.93	20.45	19.59	20.03	2.55
60~80	20.09	19.79	20.63	19.09	18.76	18.73	18.10	18.58	1.99
80~100	19.21	19.41	19.51	18.00	17.47	17.55	17.38	17.49	1.83
100~120	17.29	16.86	17.00	16.00	15.59	15.89	15.83	17.11	1.46
120~140	16.42	17.58	16.51	15.84	15.48	15.47	15.55	-	0.87
140~160	14.02	-	13.40	12.64	11.91	11.04	10.66	-	3.36
160~180	13.00	-	12.90	11.80	11.33	10.42	10.72	-	2.28

### 3 汉江枯水情势特征

#### 3.1 汉江枯水情势总体特点

2019—2022年, 皇庄、兴隆、仙桃3站综合历时保证率98%的流量分别为547、500、453 m<sup>3</sup>/s, 总体来看, 汉江一般以小于1 000 m<sup>3</sup>/s的流量为

主。由表4可见, 皇庄、兴隆、仙桃3站各年平均水位(Z<sub>1</sub>)与年保证率98%的水位(Z<sub>2</sub>)差值总体呈现随流量增加而增大; 自上游向下游, 水位差值有所增大; 各站水位差值约1~2 m, 低水呈现长历时特征。

表4 汉江各水文站水位特征

年份	皇庄			兴隆			仙桃		
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub> -Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub> -Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub> -Z <sub>2</sub>
2015	39.67	38.36	1.31	28.86	27.39	1.47	22.91	21.26	1.65
2016	38.86	38.28	0.58	28.04	27.31	0.73	22.54	21.16	1.38
2017	39.59	38.32	1.28	28.78	27.20	1.58	23.12	21.14	1.98
2018	39.49	37.97	1.52	28.55	27.02	1.53	22.82	21.25	1.57
2019	38.26	37.79	0.47	27.40	26.72	0.68	22.02	20.85	1.17
2020	39.24	37.85	1.39	28.48	26.68	1.80	23.33	20.97	2.36
2021	40.36	38.07	2.29	29.76	26.92	2.84	24.32	21.22	3.10
2022	38.49	37.09	1.40	27.49	25.76	1.73	22.27	20.39	1.88

#### 3.2 兴隆枢纽下游枯水位下降与流量

由图5可见, 从兴隆枢纽坝下枯水水位流量(Q<1 000 m<sup>3</sup>/s)关系来看, 2016—2022年, 同流量对应的水位明显下降。由表5可见, 从同流量水位变化来看, 兴隆坝下的水位总体上处于持续下降态势, 尤其是在兴隆站年最大流量大于1万 m<sup>3</sup>/s时, 坝下水位下降尤其明显。

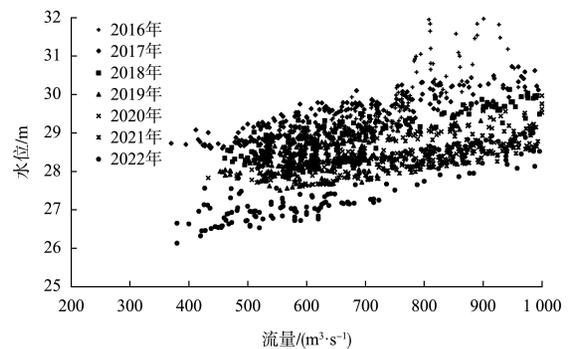


图5 2016—2022年兴隆枢纽坝下水位-流量关系

表5 汉江各水文站水文特征值

年份	年最大流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			皇庄站 输沙量/万 t	皇庄站 含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	兴隆站出现天数/d		水位下降/m		
	皇庄站	兴隆站	仙桃站			Q>1 000 m <sup>3</sup> /s	Q>2 000 m <sup>3</sup> /s	兴隆坝下	兴隆站	仙桃站
2015	2 900	3 220	2 400	170	0.048	138	21	-	-	-0.07
2016	2 350	3 210	2 900	130	0.055	41	9	-	-0.12	-0.16
2017	13 700	12 900	9 070	610	0.138	103	50	0.04	0.00	-0.10
2018	4 590	3 870	3 190	200	0.052	185	52	-0.94	-0.47	-0.11
2019	6 650	6 080	4 350	200	0.082	22	6	-0.34	-0.08	-0.23
2020	5 150	4 980	4 150	330	0.083	174	55	-0.04	-0.04	0.11
2021	11 600	11 100	8 560	1 590	0.216	227	106	0.04	-0.06	-0.02
2022	3 480	3 330	2 850	140	0.045	159	12	-0.84	-0.43	-0.02

#### 4 模型建立及验证

##### 4.1 一维水沙数学模型的建立与验证

建立兴隆坝下一河口长河段一维非恒定流非均匀沙数学模型，计算范围上起兴隆坝址，下至汉江河口。上游边界条件包括兴隆枢纽下泄的水沙过程、东荆河分流的水沙过程以及引江济汉的水沙过程，下边界条件分别采用 2016—2018、2019—2021 年汉口站实测水位过程。结合 2016—2021 年实测资料对模型进行率定和验证，该模型较好地反映研究河段的水沙运动特点及河床冲淤变化规律。

##### 4.2 二维水沙数学模型的建立与验证

建立兴隆枢纽—岳口河段二维水沙数学模型，

上边界为兴隆枢纽坝址，下边界为岳口，模拟河段全长约 65 km，见图 6。模型计算时上游边界与一维模型相同，下游边界由兴隆—汉口长河段一维数学模型给定。采用 2021 年 1 月实测地形、水文资料对水流模型进行验证，模型与原型最大水位偏差±0.03 m，断面流速分布计算值与实测值吻合较好，各测点流速最大偏差在±0.1 m/s 以内，水流模型验证满足规范要求；采用 2021 年 1 月、2023 年 4 月实测河道地形对泥沙模型进行验证，模型与原型平面冲淤部位比较吻合，模型与原型各区段冲淤性质相同，模型计算冲淤量与原型偏差 9.4%，模型与原型基本一致，泥沙模型验证结果也满足规范要求。

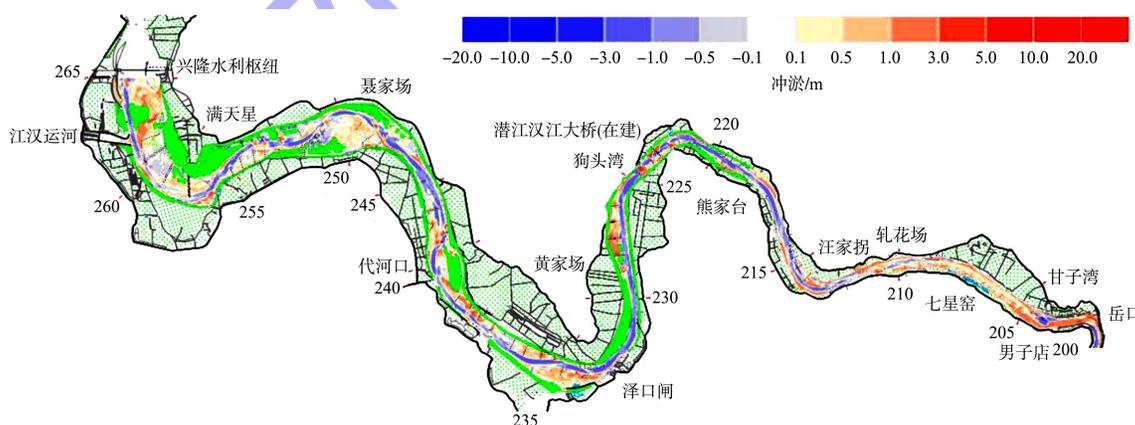


图6 2021年1月—2023年4月模型计算河床地形平面冲淤分布

#### 5 兴隆枢纽坝下水位下降预报

##### 5.1 一维水沙数学模型对兴隆枢纽坝下水位下降预报

通过兴隆枢纽—汉口长河段一维水沙数学模

型，以 2017—2021 年 5 a 水沙过程作为典型水沙系列年，一维模型循环 12 次组成 60 a 水沙系列，滚动计算 60 a 兴隆坝下河床冲淤和水位变化情况，见表 6，主要结论为：在不考虑兴隆—蔡甸 2 000 吨

级航道整治工程, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 计算结果见工况 1; 在考虑 2 000 吨级航道整治工程<sup>[8]</sup>, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 结果见工况 2; 在不考虑 2 000 吨级航道整

治工程, 且汉口站水位每年下降 0.1 m 时, 结果见工况 3。上述结果表明: 30 a 后兴隆下游近坝河段的累积冲刷量变幅较小, 40 a 后坝下同流量对应的水位逐渐趋于稳定。

表 6 兴隆坝下水位下降结果

		m					
工况	时间	420 m <sup>3</sup> /s	820 m <sup>3</sup> /s	1 200 m <sup>3</sup> /s	5 000 m <sup>3</sup> /s	7 080 m <sup>3</sup> /s	1 万 m <sup>3</sup> /s
1	10 a 末	1.72	1.84	1.57	1.37	1.13	0.82
	20 a 末	2.36	2.65	2.08	1.74	1.22	0.90
	30 a 末	2.77	2.99	2.43	1.92	1.34	0.93
	40 a 末	3.09	3.31	2.72	2.04	1.42	0.94
	50 a 末	3.10	3.32	2.73	2.04	1.42	0.94
	60 a 末	3.10	3.32	2.73	2.04	1.43	0.94
2	10 a 末	1.74	1.86	1.59	1.39	1.12	0.82
	20 a 末	2.39	2.68	2.12	1.76	1.21	0.89
	30 a 末	2.82	3.04	2.47	1.96	1.33	0.91
	40 a 末	3.15	3.36	2.77	2.08	1.41	0.92
	50 a 末	3.17	3.38	2.79	2.09	1.41	0.92
	60 a 末	3.17	3.39	2.79	2.10	1.41	0.92
3	10 a 末	1.73	1.84	1.58	1.38	1.13	0.83
	20 a 末	2.40	2.43	2.46	2.48	2.49	0.90
	30 a 末	2.83	3.05	2.47	1.94	1.36	0.93
	40 a 末	3.20	3.40	2.80	2.08	1.44	0.94
	50 a 末	3.21	3.40	2.78	2.08	1.44	0.94
	60 a 末	3.21	3.42	2.81	2.09	1.45	0.95

5.2 二维水沙数学模型对兴隆枢纽坝下水位下降预报

通过兴隆枢纽—岳口二维水沙数学模型, 以 2017—2021 年 5 a 水沙过程作为典型水沙系列年, 二维模型循环 10 次组成 50 a 水沙系列, 滚动计算 50 a 兴隆坝下水位变化情况, 见表 7, 主要结论为: 在不考虑兴隆—蔡甸 2 000 吨级航道整治工程, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 计算结果见工况 1; 在考虑 2 000 吨级航道整治工程<sup>[8]</sup>, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 计算结果见工况 2; 在不考虑 2 000 吨级航道整治工程, 且汉口站水位每年下降 0.1 m 时, 计算结果见工况 3。

表 7 兴隆出库  $Q=420 \text{ m}^3/\text{s}$  条件下典型位置水位下降结果

		m			
工况	位置	10 a 末	20 a 末	30 a 末	50 a 末
1	坝下	1.75	2.82	3.11	3.49
	泽口	1.57	2.29	2.71	3.01
	汪家拐	1.42	2.02	2.46	2.51
2	坝下	1.86	2.69	3.21	3.57
	泽口	1.67	2.25	2.82	3.10
	汪家拐	1.55	2.08	2.51	2.64
3	坝下	1.74	2.86	3.23	3.69
	泽口	1.58	2.38	2.83	3.26
	汪家拐	1.44	2.12	2.61	2.85

### 6 结语

1) 在不考虑兴隆—蔡甸 2 000 吨级航道整治工程, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 根据一维水沙数学模型计算(2017—2021 年水沙系列), 30 a 后兴隆下游近坝河段的累积冲刷量变幅较小, 40 a 后坝下同流量对应的水位逐渐趋于稳定。

2) 根据计算可知, 在考虑 2 000 吨级航道整治工程, 且维持汉口站现状水位不变的条件下, 兴隆枢纽出库流量  $Q=420 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 50 a 末坝下水位下降 3.57 m。同时, 汉口站水位下降也将一定程度上增加坝下水位下降幅度, 若汉口站水位每年下降 0.1 m, 与现状相比, 50 a 末水位下降幅度将增加 0.2 m。因此, 在考虑 2 000 吨级航道整治工程、且汉口站水位每年下降 0.1 m 情况下, 50 a 末兴隆坝下水位可能下降 3.77 m。

3) 汉江下游流经江汉平原, 河床质主要由粉细砂组成, 覆盖层较厚, 河道采砂可能导致河床出现剧烈下切, 且导致枯水位下降, 建议做好河道采砂的合理规划和管控工作。

4) 近年来东荆河呈趋于萎缩的态势, 可能导致汛期东荆河分流量的减小和汉江干流洪峰流量的加大, 东荆河下游汉江干流洪峰的进一步增加, 将加剧下游河道的冲刷下切和枯水位下降。

### 参考文献:

[1] 湖北省交通规划设计院股份有限公司. 汉江兴隆枢纽 2 000 吨级二线船闸工程工程可行性研究报告[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2023.

[2] 长江水利委员会水文局, 武汉大学. 汉江下游航道整治工程(兴隆至汉川段)一维水沙数学模型计算分析报告[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 武汉大学, 2007.

[3] 重庆西南水运工程科学研究所. 汉江兴隆至蔡甸段 2 000 吨级航道整治工程一维数学模型试验专题研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2022.

[4] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 南水北调中线工程汉江兴隆枢纽初步设计报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2007.

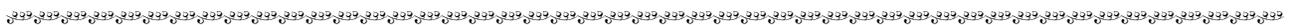
[5] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 汉江兴隆枢纽下游长河段水沙数学模型研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2023.

[6] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 汉江中下游河道冲淤及洪水位变化特性研究[R]. 长江勘测规划设计研究有限责任公司科研报告, 2019.

[7] 林云发. 汉江中游近期冲刷状况浅析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9): 1-5, 20.

[8] 湖北省交通规划设计院股份有限公司. 汉江兴隆至蔡甸段 2 000 吨级航道整治工程初步设计报告[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2023.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 152 页)

[4] 曹祖德, 杨华, 侯志强. 粉沙质海岸的泥沙运动和外航道淤积[J]. 水道港口, 2008, 29(4): 247-252.

[5] 曹祖德, 侯志强, 张书庄. 黄骅港航道整治与发展前景[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 33-38.

[6] 于泳. 唐山港京唐港区 20 万 t 级航道工程建设方案的研究[J]. 港工技术, 2013, 50(3): 9-10, 13.

[7] 胡立双, 苗士勇. 神华黄骅港外航道泥沙淤积问题总结

与探讨[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 331-336.

[8] 许国辉, 刘德辅, 贾同彬. 粉砂淤泥质海岸开敞航道淤积模式探讨[J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 11-16.

[9] 白洪炉. 关于淤泥粉砂质海岸的航道分段备淤深度研究[J]. 珠江水运, 2021(18): 27-28.

[10] 张华, 黄志扬, 肖烈兵, 等. 感潮河段深水航道乘潮保证率及疏浚维护[J]. 水运工程, 2015(4): 8-12.

(本文编辑 王传瑜)