



# 兴隆水利枢纽运行后汉江下游 枯水位变化及长江顶托关系调整

温国楠

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 兴隆水利枢纽蓄水运行后, 对坝下游枯水位、水位顶托关系等影响已初步显现。系统分析 1970—2022 年汉江下游水文站、水位站的流量与水位特征等变化。结果表明, 汉江兴隆水利枢纽运行后, 坝下游各站同流量的枯水位均表现为累积性下降态势, 越向下游减幅越小。当汉川—汉口段和仙桃—汉口段水面比降分别低于 0.020‰和 0.025‰时, 长江水位顶托作用显著影响汉川站及仙桃水文站的水位; 当水面比降高于 0.060‰和 0.065‰时, 长江水位顶托作用未影响汉川站水位和仙桃水文站。2013—2022 年与 2003—2012 年相比, 汉川—汉口段和仙桃—汉口段比降高于 0.060‰和 0.065‰的时间为增大态势, 即 2013—2022 期间汉江和长江水情组合有利于汉江下游航道水深条件的稳定与发展。

**关键词:** 兴隆水利枢纽; 汉江下游; 同流量的枯水位; 水位顶托关系

中图分类号: U612.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0117-07

## Changes in low water level of lower reaches of Han River and adjustments of the Yangtze River water level uplift relationship after operation of Xinglong hydraulic complex

WEN Guonan

(Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

**Abstract:** After the impoundment and operation of Xinglong hydraulic complex, the impact on the low water level and water level uplift relationship downstream of the dam is preliminarily manifested. We systematically analyze the changes of discharge and water level characteristics of hydrological stations and water level stations in the lower reaches of the Han River from 1970 to 2022. The results show that after the operation of the Xinglong hydraulic complex in the Han River, the downstream of the dam shows a cumulative decline trend of the low water level for the same discharge with a smaller decrease towards the downstream. When the water surface gradient of the Hanchuan to Hankou section and Xiantao to Hankou section is lower than 0.020‰ and 0.025‰ respectively, the water level uplift effect of the Yangtze River significantly affects the water levels of the Hanchuan and Xiantao hydrological station; when the water surface gradient is higher than 0.060‰ and 0.065‰ respectively, the water level uplift effect of the Yangtze River water level does not affect the water level at Hanchuan and Xiantao hydrological stations. Comparing with the period from 2003 to 2012, the number of days with a gradient higher than 0.060‰ and 0.065‰ in the Hanchuan to Hankou section and Xiantao to Hankou section during the period from 2013 to 2022 shows an increasing trend. The combination of the water regime of the Han River and the Yangtze River during the period from 2013 to 2022 is conducive to the stability and development of the water depth conditions in downstream channels of the Han River.

**Keywords:** Xinglong hydraulic complex; lower reaches of the Han River; low water level for same discharge; water level uplift relationship

收稿日期: 2023-11-13

作者简介: 温国楠 (1980—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计。

枢纽建成后，改变了坝下游水沙条件关系，引起河床冲刷下切、水位下降等问题，给枢纽工程安全、水资源利用、生态安全、航运安全带来深刻影响，因此受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。我国长江三峡大坝、西江长洲枢纽<sup>[4]</sup>、湘江长沙枢纽<sup>[5]</sup>等建成后，下游均出现水位下降现象，研究认为这与上游来沙量减少、河床冲刷下切导致的过水断面增大有关，还受到枢纽建设运行、砂石开采、航道整治等人类活动综合影响<sup>[6-7]</sup>。

汉江兴隆水利枢纽自2013年运行以来，坝下游近坝段中、枯水期水位较建坝前发生了不同程度的下降，到2018年枯水位最大下降1.67 m，造成船闸门槛水深不足，影响船舶顺利过闸<sup>[8-9]</sup>。这与全球大型水库下游枯水位下降规律基本一致，但洪水位一般表现出略有上升或变化不大的规律<sup>[10-12]</sup>。在汉江兴隆枢纽下游水位调整特征方面的研究中，关注的影响因素有水沙条件、地质条件、河道冲刷，同时分析航道整治建筑物、引江济汉工程、兴隆枢纽生态调度<sup>[13]</sup>等影响，也关注到兴隆枢纽下游水位变化与长江汉口段水位急剧下跌有一定关系<sup>[14]</sup>。长江干流水位对汉江下游的水位存在一定的顶托关系，不同河段由于距离河口位置远近不一，所受水位顶托的影响差异较大。

在汉江枯水期流量稳定，比降变化主要受汉口水位顶托影响；中洪水期比降基本与流量变化同步，比降大小取决于汉江流量与汉口水位的对比关系<sup>[15]</sup>。三峡水库调度运行后，汛后水库蓄水长江中水退落加快、历时缩短、枯水流量增加，其回水对汉江下游河段特别是对河口段水沙特性也有一定影响<sup>[16]</sup>。

本文结合实测资料进行分析，明确汉江兴隆水利枢纽以下河段的水位变化特征和同流量调整关系，综合考虑水面比降、汉江与长江流量组合等条件，识别长江对汉江下游水位顶托的关系及发展趋势。通过水位变化特征的研究，为汉江下游兴隆—蔡甸河段2 000吨级航道整治工程整治水位与参数的确定提供参考。

## 1 研究河段概况与方法

### 1.1 研究河段概况

本文研究的河段为汉江下游兴隆水利枢纽—河口段，河段内分布有兴隆、仙桃水文站，以及兴隆、汉川等水位站，见图1。其中兴隆水利枢纽位于沙洋水文站下游31 km处，位于仙桃水文站上游109 km处，综合分析汉江兴隆枢纽下游的水文泥沙要素以及水位的变化特征。

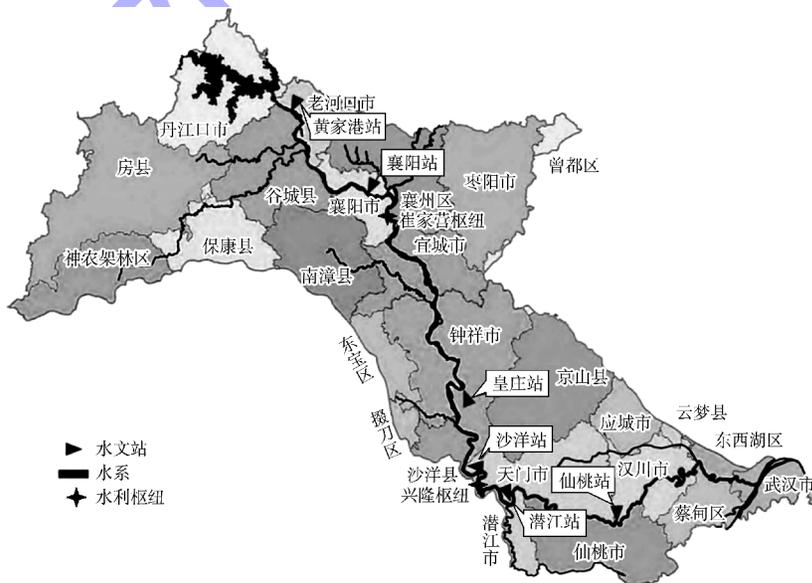


图1 汉江中下游水文站和水位站分布

## 1.2 研究与分析方法

本文收集 2014—2022 年间兴隆水文站的流量与水位、兴隆水位站的水位数据, 1976—2022 年仙桃、汉口水文站的流量和水位数据, 以及 1976—2022 年汉川水位站的水位数据。在此基础上, 绘制不同年份各站的同流量-水位关系以及汉江下游比降变化-时间关系, 深入分析汉江兴隆枢纽坝下一河口段的枯水位变化特征、水位顶托关系等, 识别水位顶托的比降特征及影响时段。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 汉江下游枯水位变化特征

#### 2.1.1 兴隆枢纽坝下游附近的水位变化特征

兴隆水利枢纽自 2013 年 10 月蓄水运行以来, 坝下游中、枯水位有不同程度的下降, 高水位则变化不大。将 2014—2022 年坝址下游 1.5 km 处实测水位与建枢纽前设计水位进行比较分析, 见图 2。可以看出, 2014 年枢纽刚开始运行时坝下游河床冲刷较小, 流量低于  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  时河道水位略有下降, 流量高于  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  时水位基本不变, 从 2015 年开始坝下游中、枯水位呈逐年下降的趋势。从年际水位的下降情况看, 到 2018 年流量  $500 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  的水位累计下降  $1.47 \sim 1.67 \text{ m}$ , 流量在  $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{s}$  的水位累计下降值为  $0.82 \sim 1.26 \text{ m}$ 。在兴隆枢纽下泄  $500 \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$  流量的条件下, 2019 年实测水位与建坝前相比累计下降  $2.00 \sim 2.18 \text{ m}$ , 2021 年实测水位较建坝前累计下降  $2.47 \sim 2.55 \text{ m}$ , 2022 年实测水位较建坝前累计下降  $3.31 \sim 3.39 \text{ m}$ 。

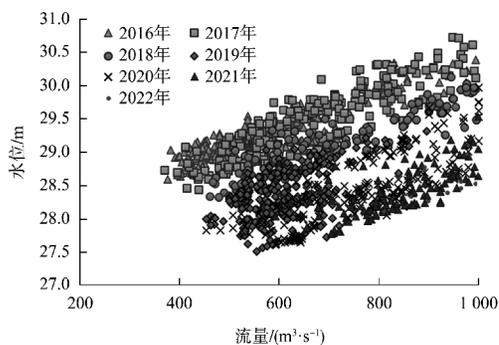


图2 兴隆水利枢纽坝下水位变化

#### 2.1.2 仙桃站水位变化

1972—2022 年间, 仙桃站流量为  $400$ 、 $500$ 、 $600$ 、 $800$  和  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  的水位下降值为  $1.13$ 、 $1.18$ 、 $1.24$ 、 $1.35$  和  $1.46 \text{ m}$ , 中、枯水位整体表现为下降态势, 见图 3。以汉江兴隆枢纽运行的 2014 年为分界年份, 2014—2022 年间仙桃站  $400 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  对应水位呈波动状下降态势。2022 与 2014 年进行比较, 仙桃站流量为  $400 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  对应水位下降值为  $0.56 \sim 0.60 \text{ m}$ 。

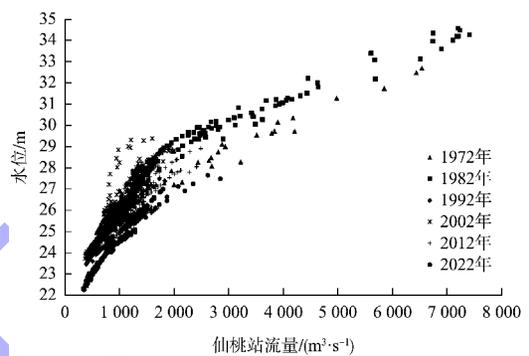


图3 仙桃水文站的水位变化

#### 2.1.3 汉口站水位变化

2003 年以来, 汉口水文站枯水位有所下降, 见图 4。2003—2022 年间当汉口水文站流量为  $1 \text{ 万 m}^3/\text{s}$  时, 水位累计降低了  $1.64 \text{ m}$ ; 当汉口水文站流量为  $2 \text{ 万 m}^3/\text{s}$  时, 水位累计降低了  $1.27 \text{ m}$ 。随着流量增大水位降低的幅度减小。

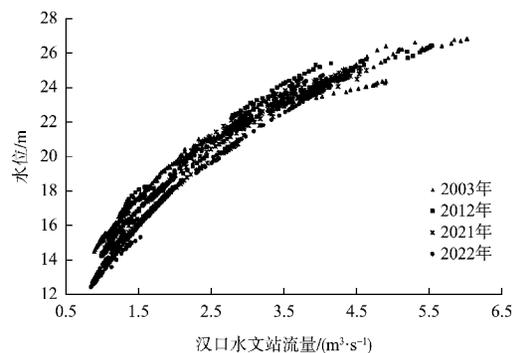


图4 汉口水文站的水位变化

通过分析仙桃、汉口等测站水位变化发现, 兴隆枢纽下游水位发生累积性下降, 而通常流域水沙条件是塑造河床形态的动力源泉, 流量、含沙量变化导致天然河道冲刷演变是坝下游水位下降的根本动因。汉江上中游梯级枢纽拦沙, “清

水”下泄导致兴隆坝下河床发生自上而下的普遍冲刷，而由于汉江下游河床覆盖层以细沙为主，河床粗化过程慢，沿程冲刷将在长河段、长时段发生；加之南水北调中线一期调水后，中枯水刷槽时间延长，这是兴隆坝下枯水位下降的主要因素。汉江中下游4项补偿治理工程中，兴隆枢纽的建设带来坝址处河床形态的调整，坝址处主槽易位、断面下切引发的河势调整；航道整治丁坝挑流、引江济汉补水等因素虽带来局部河段的河床大幅度下切，但影响范围仍然相对有限，是造成兴隆坝下枯水位下降的次要因素。

## 2.2 汉江下游水位顶托关系分析

### 2.2.1 汉川及以下河段的顶托作用

2014—2022年汉川水位站的变化特征见图5（汉川水位站无流量资料，采用仙桃水文站流量代替）。可以看出，汉川以下河段全年均受到回水顶托影响，其顶托程度随长江水位的升高而升高。从顶托过程来看，舵落口以下河段全年受到长江回水顶托影响；舵落口—蔡甸河段，为长江枯水回水顶托的变动区，除长江特枯水季节外，舵落口—蔡甸河段均受到长江回水影响。当长江汉口站水位超过13.0 m时，蔡甸河段开始受到顶托影响，随着长江水位升高，影响范围随之向上游扩展。当汉口水位在13.0~16.0 m时，长江回水顶托末端位于蔡甸—汉川之间，一旦汉口水位超过16.0 m时，则回水影响末端继续上移。

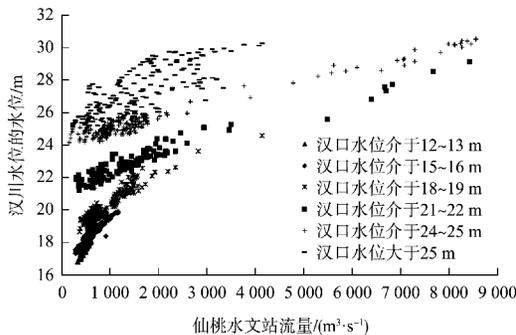


图5 2014—2022年汉川水位站的变化特征

### 2.2.2 仙桃—汉川段的顶托作用

长江汉口站水位处于16.0~21.0 m时，长江回水末端区域为汉川—仙桃河段，见图6。从仙桃

汉口水位差值看，汉川—仙桃段自5月开始受到长江回水顶托影响，而后随着长江水位上涨；到6月顶托影响达到小水期最大；7月随着汉江来水将增大，顶托影响程度有所减小；8—9月为长江水位洪峰季节，回水末端延伸至仙桃上游，汉川—仙桃段全段受回水影响；10月开始，随着长江水位的回落，长江回水影响范围逐渐下移；11月下旬—12月，回水末端移至汉川以下；12月—翌年3月，汉川—仙桃段不受长江回水顶托影响；4月一般来说长江回水少数时间可达汉川以上，基本不对仙桃—汉川河段造成大的顶托影响。

当汉口水位超过21.0 m时，仙桃站水位流量出现明显多值关系。这一现象说明，长江回水顶托影响的末端即越过仙桃站，延伸至仙桃上游河段。

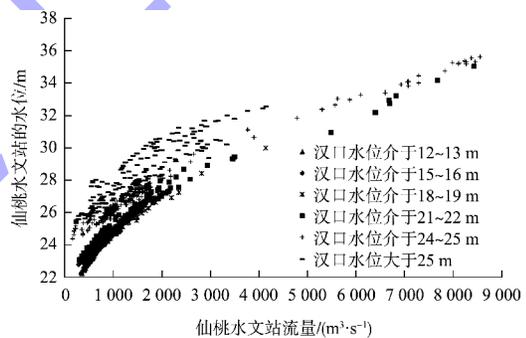


图6 2014—2022年不同汉口水位对应的仙桃水位变化特征

### 2.2.3 兴隆枢纽—仙桃段的顶托作用

当长江水位超过21.0 m时，长江回水顶托影响就超过仙桃，开始影响仙桃以上河段，见图6、7。

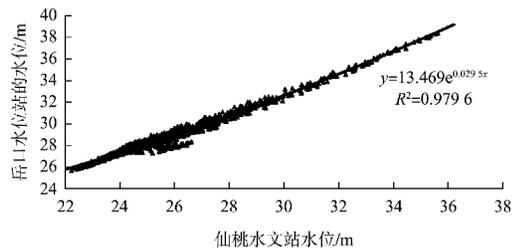


图7 岳口水位站与仙桃水文站的水位关系

长江高水位对汉江的影响范围最远可达岳口河段。长江回水对仙桃—岳口河段的影响时间一般自9月开始，10月长江开始退水时顶托回水的

末端随之下移，进而移出仙桃—岳口河段。

汉江下游岳口以上河段由于距离河口较远、河床底高程较高，汉口水位升高引起的顶托作用无法达到本河段，因此本河段不受长江回水顶托影响，其河床变化主要受上游来水来沙等上边界条件影响。

### 2.3 水位顶托的临界特征分析

以长江干流、汉江的流量变化关系出发，选取包含汉江秋汛、长江干流大水年份、汉江与长江主汛期同步等水文年，分析仙桃—汉口段、汉川—汉口段水面比降的变化特征。汉江兴隆枢纽—入江段存在支流入汇，由于流量相对汉江和长江干流的流量较小，对水文的顶托作用集中在

入汇口区域，本文分析中暂不考虑支流入汇的影响。

#### 2.3.1 汉川—汉口段

汉川—汉口段受长江水位顶托比较显著，水位顶托的直接作用为水面比降偏低。绘制的汉川—汉口段年内水面比降见图 8，按照比降数值由小到大进行排列，比降存在明显的分界特征。当汉川—汉口段水面比降低于 0.02‰ 时，认为长江水位顶托作用显著影响汉川站水位；当水面比降高于 0.06‰ 时，认为长江水位顶托作用未影响汉川站水位；当比降介于 0.02‰~0.06‰ 时，长江水位顶托作用相对较弱。

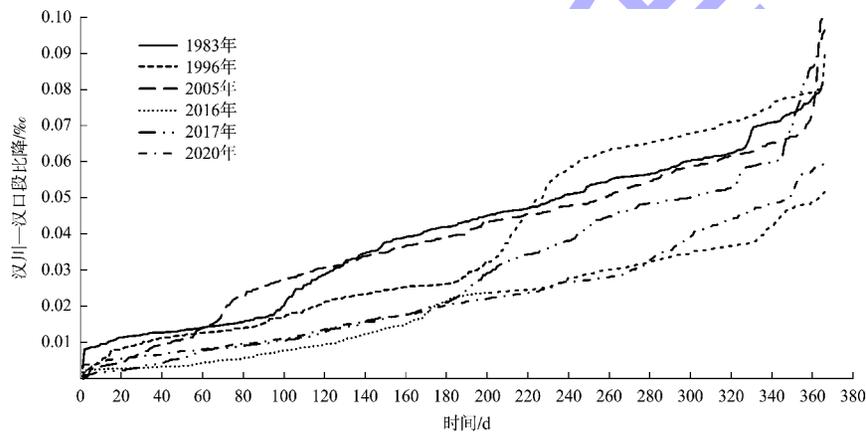


图 8 汉川—汉口段水面比降年内序列变化

统计 1976—2022 年间汉川—汉口段水面比降低于 0.02‰、介于 0.02‰~0.06‰ 和高于 0.06‰ 的时间，见表 1。2013—2022 年间水面比降低于 0.02‰ 的时间为 170 d，显著高于 2003—2012 年间的 96 d，表明 2013—2022 年间的汉江和长江水情组合不利于汉江下游水位受顶托段航道水深

条件的稳定与发展。2022 年水面比降低于 0.02‰ 的时间为 100 d，显著低于 2013—2022 年期间的 170 d，比降高于 0.06‰ 的时间也为增大态势，即表明 2013—2022 年间汉江和长江水情组合利于汉江下游水位受顶托段航道水深条件的稳定与发展。

表 1 汉川—汉口段不同水面比降持续时间与仙桃站沙量特征

时段	比降低于 0.02‰ 的时间/d	比降介于 0.02‰~0.06‰ 的时间/d	比降高于 0.06‰ 的时间/d	仙桃站径流量/亿 m <sup>3</sup>	仙桃站沙量/万 t
1976—1989 年	100	186	79	432	2 538
1990—2002 年	154	166	45	323	1 344
2003—2012 年	96	201	68	401	1 610
2013—2022 年	170	174	21	334	493
2022 年	100	195	71	312	140

注：每年按 365 d 计算。

### 2.3.2 仙桃—汉口段

参考汉川—汉口段水面比降临界阈值的分析过程，当仙桃—汉口段水面比降低于0.025‰时，认为长江水位顶托作用显著影响仙桃站水位；当

水面比降高于0.065‰时，认为长江水位顶托作用未影响仙桃站水位。当比降介于0.025‰~0.065‰时，长江水位顶托作用相对较弱，见图9。

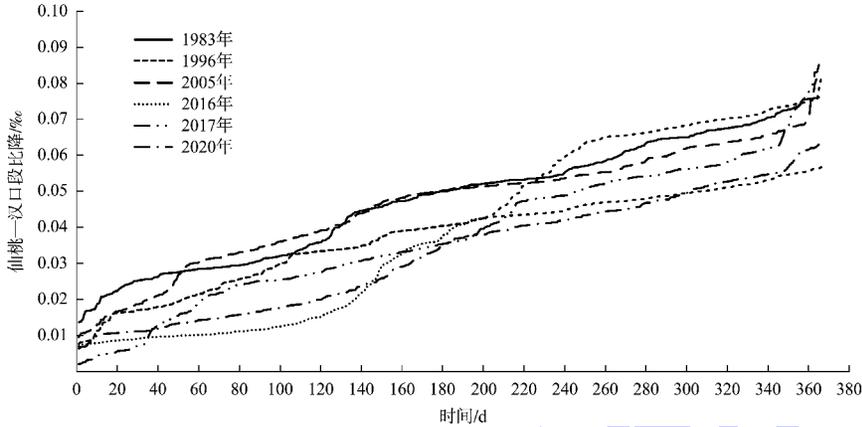


图9 仙桃—汉口段水面比降的持续时间变化

统计1976—2022年期间仙桃—汉口段水面比降低于0.025‰、介于0.025‰~0.065‰和高于0.065‰的时间，见表2。2013—2022年间水面比降低于0.025‰的时间为101d，显著高于2003—2012年间的54d，表明2013—2022年间的汉江和长江水情组合不利于汉江下游仙桃—汉口段的航

道水深条件的稳定与发展。2022年水面比降低于0.025‰的时间为71d，显著低于2013—2022年间的101d，比降高于0.065‰的时间也为增大态势，即表明2013—2022年间汉江和长江水情组合利于汉江下游水位受顶托段航道水深条件的稳定与发展。

表2 仙桃—汉口段不同水面比降持续时间与仙桃站沙量特征

时段	比降低于0.025‰的时间/d	比降介于0.025‰~0.065‰的时间/d	比降高于0.065‰的时间/d	仙桃站径流量/亿 m <sup>3</sup>	仙桃站沙量/万 t
1976—1989年	33	246	86	432	2 538
1990—2002年	85	241	36	323	1 344
2003—2012年	54	264	47	401	1 610
2013—2022年	101	254	13	334	493
2022年	71	248	46	312	140

注：每年按365d计算。

### 3 结论

1) 汉江兴隆枢纽运行以来，坝下游兴隆水位站、兴隆水文站、仙桃水文站同流量的枯水位均表现为累积性下降态势；截至2021年兴隆坝下420 m<sup>3</sup>/s流量下的实测水位较建坝前累计下降2.47~2.55 m，2022年水位约0.84 m，显著高于

2014—2021年均值。2014—2022年间仙桃站流量为400~1 000 m<sup>3</sup>/s对应水位下降值为0.56~0.60 m。2003—2022年间，汉口水文站流量为1万~2万 m<sup>3</sup>/s时，水位累计降低了1.27~1.64m，随着流量增加水位变幅减小。

2) 当汉川—汉口段和仙桃—汉口段水面比降

分别低于 0.020‰和 0.025‰时, 认为长江水位顶托作用显著影响汉川站及仙桃水文站的水位; 当水面比降高于 0.060‰和 0.065‰时, 认为长江水位顶托作用未影响汉川站水位和仙桃水文站。

3) 2013—2022 年间汉川—汉口段、仙桃—汉口段的水面比降低于 0.020‰和 0.025‰的时间高于 2003—2012 年间, 即 2013—2022 年间的汉江和长江水情组合不利于汉江下游水位受顶托段航道水深条件的稳定与发展。2013—2022 年间与 2003—2012 年间相比, 汉川—汉口段、仙桃—汉口段比降高于 0.060‰和 0.065‰的时间为增大态势, 即 2013—2022 年间汉江和长江水情组合有利于汉江下游航道水深条件的稳定与发展。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 唐金武, 由星莹, 李义天, 等. 三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 102-107.
- [4] 庞雪松, 杜敬民, 假冬冬, 等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施[J]. 水利水运工程学报, 2014(3): 42-48.
- [5] 闫世雄, 隆院男, 蒋昌波, 等. 湘江下游水位变化趋势与河床演变关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 150-156.
- [6] YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG M J, et al. Sediment sink-source transitions in the middle and lower reaches of the Yangtze River estuary [J]. *Frontiers in marine science*, 2023, 10: 1201533.
- [7] YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG M J, et al. Sandy riverbed shoal under anthropogenic activities: the sandy reach of the Yangtze River, China [J]. *Journal of hydrology*, 2021, 603: 126861.
- [8] 黄建成, 黄雪颖, 周银军, 等. 汉江兴隆水利枢纽下游近坝段水位下降成因及防治对策[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(7): 13-16, 22.
- [9] 由星莹, 王祖卿, 彭翔鹏, 等. 汉江兴隆枢纽坝下枯水位下降成因浅析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(11): 9-15.
- [10] BORMANN H, PINTER N, ELFERT S. Hydrological signatures of flood trends on German rivers: flood frequencies, flood heights and specific stages[J]. *Journal of hydrology*, 2011, 404(1/2): 50-66.
- [11] YANG Y P, ZHANG M J, SUN Z H, et al. The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam [J]. *Journal of geographical sciences*, 2018, 28(12): 1975-1993.
- [12] YANG Y P, ZHANG M J, ZHU L L, et al. Influence of large reservoir operation on water-levels and flows in reaches below dam: case study of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1/4): 15640.
- [13] 王业祥, 徐静, 欧阳飞. 梯级水利枢纽生态调度对库区航道影响案例分析[J]. 水运工程, 2019(11): 81-85, 113.
- [14] 江盛威, 吴铮, 袁泽雄, 等. 兴隆水利枢纽上下游河道下切侵蚀研究[J]. 现代工程科技, 2023, 2(1): 30-33.
- [15] 瞿月平, 黄勇, 何志高, 等. 长江回水顶托对汉江兴隆至汉川水沙过程的影响[J]. 中国水运, 2014(11): 62-64.
- [16] 张俊宏. 丹江口水库下游河道对汉江调水响应机制及航道整治对策研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

(本文编辑 王璁)