



汉江兴隆—蔡甸段2 000吨级航道整治工程 设计最低通航水位分析

张 芹, 张 雯, 郭 敏

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 随着兴隆枢纽蓄水运用后, 枢纽下游河段的河床发生沿程冲刷, 同流量下水位产生不同程度的下降。为确定汉江兴隆—蔡甸段2 000吨级航道整治工程设计最低通航水位, 采用综合历时曲线法计算航道设计通航流量, 通过近期水位-流量关系、枯水期水面比降等确定航道设计最低通航水位。结合通航水位的变化趋势, 提出后期根据冲淤变化调整后的地形、设计流量、水位-流量关系等对设计最低通航水位进行实时复核调整, 以确保水位下降后设计水位的合理性。

关键词: 最低通航水位; 水位-流量关系; 综合历时曲线法; 水位下降

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0125-06

Lowest navigable water level in design of 2,000-ton level waterway regulation project for Xinglong to Caidian section of Han River

ZHANG Qin, ZHANG Wen, GUO Min

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

Abstract: With the use of Xinglong Hub's water storage, the riverbed of the downstream section of the hub undergoes scouring along the waterway, and the water level decreases to varying degrees under the same discharge. To determine the lowest navigable water level designed for the 2,000-ton level waterway regulation project of the Xinglong to Caidian section of the Han River, the paper uses the comprehensive duration curve method to calculate the navigable discharge of the waterway design, determine the lowest navigable water level of the waterway design through the recent water level-discharge relationship and the water surface gradient during the dry season. Based on the trend of changes in the navigation water level, the paper proposes the terrain, design discharge, water level-discharge relationship adjusted according to erosion and sedimentation changes in the later stage to conduct real-time review and adjustment of the designed lowest navigation water level, ensuring the rationality of the design water level after the water level drops.

Keywords: lowest navigable water level; water level-discharge relationship; comprehensive duration curve method; water level drop

河流上建设枢纽后, 由于水库蓄水拦沙, 改变了下游河道原有的来水来沙条件, 枢纽下游水沙的输移特性会随之改变, 坝下河道一般会出现河床冲刷下切, 进而引起同流量下的水位下降问题。不少河流出现了以来沙急剧减少、河床大幅

下切、枯水位明显下降为主要特征的水沙变异现象^[1-2]。枯水位的变化将对航道的设计最低通航水位产生影响, 而设计最低通航水位是内河航道整治工程的主要技术参数之一。航道设计最低通航水位研究是当前航道工程的热点问题, 主要涉及

收稿日期: 2023-12-19

作者简介: 张芹(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程设计。

设计水位计算方法研究^[3-4]以及河床变形^[5]下的设计水位计算问题。

汉江兴隆—蔡甸段位于汉江下游河段，河段上游建有丹江口、王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山及兴隆等枢纽工程，丹江口水库建成运行后，汉江中下游水文条件发生一定变化；尤其是兴隆枢纽建成后，受“清水下泄”的持续影响，兴隆枢纽坝下河段河床进一步冲刷降低，同流量下水位发生下降。工程河段下段除了受上游来水来沙、枢纽运行影响外，还受长江水位顶托影响。本文以汉江兴隆—蔡甸段 2 000 吨级航道整治工程设计为背景，通过实测资料分析枯水期水位—流量关系以及瞬时水面线等进行设计水位的分析计算，为 2 000 吨级航道整治工程设计提供依据。

1 河段概况

汉江兴隆—蔡甸段 2 000 吨级航道整治工程范围上起兴隆枢纽船闸下游引航道、下至蔡甸汉阳闸，全长 233 km，航道建设等级为Ⅱ₍₃₎，通航保

证率 98%，设计航道尺寸 3.0 m×75 m×550 m(水深×双线航宽×弯曲半径)。

河段进口的兴隆水利枢纽为汉江上最后一级枢纽，该枢纽工程于 2009 年 2 月开工，2013 年建成蓄水运行，主要作用是枯水期抬高兴隆库区水位，改善两岸灌区的引水条件和汉江通航条件，兼顾旅游和发电。水库正常蓄水位 36.20 m、死水位 35.90 m，总库容 4.85 亿 m³；枢纽下游最高通航水位 37.70 m、最低通航水位 29.70 m，枢纽的设计最小通航流量为 420 m³/s。

工程河段沿线分布有兴隆水文站、岳口水位站、仙桃水文站、汉川水位站，为进行沿线设计最低通航水位分析，沿线布设张港、麻洋、桃花洲、马口以及蔡甸临时水尺，并进行了 2022-09-27—2022-09-29 为期 3 d 的沿程瞬时水面线观测，同时收集了兴隆枢纽坝下水尺实测水位、流量观测资料。工程河段主要水文(位)站及临时水尺位置见图 1。



图 1 工程河段主要水文(位)站及临时水尺位置

2 航道现状及规划

汉江汉川—蔡甸、兴隆—汉川段分别于 2008、2010 年实施航道整治工程，航道建设规模等级为Ⅲ₍₂₎，通航保证率为 98%，设计航道尺寸为 2.4 m×90 m×500 m，可通航 1 000 吨级货船及一顶四驳双排双列 1 000 吨级驳船组成的船队。

2020 年，湖北省港航管理局组织编制完成了《湖北省航道规划报告(2035 年)》(报批稿)^[6]，其中明确提出：汉江河口—襄阳铁路桥 508.2 km 航道规划等级为Ⅱ级。

3 水文及泥沙变化

3.1 枯水流量变化

根据工程河段仙桃水文站的实测流量资料分析，1990—2022 年，仙桃站来流总体平稳，无明显的趋势性变化。南水北调中线工程调水前的 1990—2014 年，仙桃站多年平均流量为 1 090 m³/s；南水北调中线工程调水后的 2015—2022 年，仙桃站多年平均流量为 1 086 m³/s。历年的 98% 保证率流量总体平稳，南水北调中线工程调水前的 1990—2014 系列年的 98% 保证率流量为 350 m³/s，

南水北调中线工程调水后的 2015—2022 系列年的 98% 保证率流量为 465 m³/s。1990—2022 年历年平均流量及 98% 保证率流量见图 2。

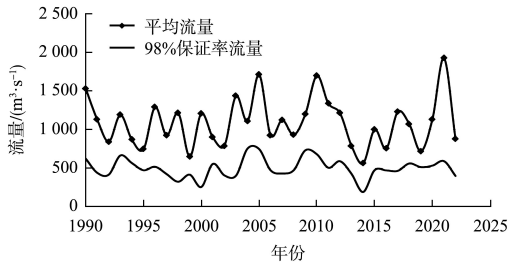
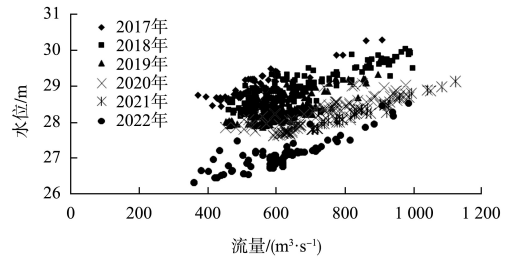


图 2 仙桃站 1990—2022 年历年平均流量、98% 保证率流量的变化

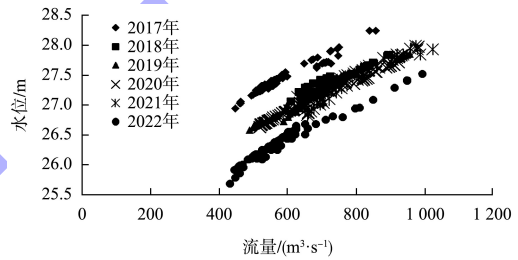
3.2 枯水期水位-流量关系变化

兴隆枢纽建成后, 枢纽下游河段枯水期水位-流量关系发生了明显变化, 从兴隆枢纽坝下水尺(上距兴隆枢纽坝址约 1 165 m)、兴隆站(上距兴隆枢纽坝址约 24 km)、仙桃站(上距兴隆枢纽坝址约 109 km) 2017—2022 年的枯水期水位-流量关系曲线见图 3。可以看出, 同流量对应的水位出现了不同程度的下降, 且自上游向下游下降幅度逐渐减小。以流量 500 m³/s 对应的水位来看, 兴隆枢纽坝下水位从 2017 年的 28.79 m 下降为 2022 年的 26.77 m, 下降了 2.02 m; 兴隆站水位从 2017 年的 27.19 m 下降为 2022 年的 26.13 m, 下降了 1.06 m; 仙桃站水位从 2017 年的 21.17 m 下降为 2022 年的 20.85 m, 水位下降 0.32 m。与兴

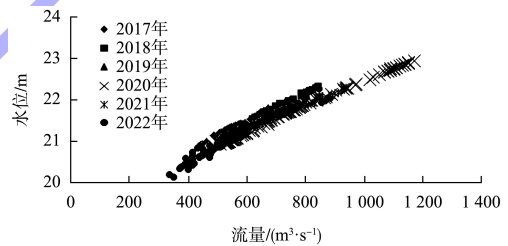
隆枢纽坝下、兴隆水文站相比, 仙桃水文站同流量水位下降幅度较小, 受兴隆枢纽影响已不明显。各站不同流量条件下的水位下降情况见表 1。



a) 兴隆枢纽坝下



b) 兴隆站



c) 仙桃站

图 3 2017—2022 年枯水期水位-流量关系曲线

表 1 不同年份间的同流量水位下降情况

水文站 (水尺)	年份	420 m ³ /s		500 m ³ /s		600 m ³ /s	
		水位/m	下降值/m	水位/m	下降值/m	水位/m	下降值/m
兴隆枢纽坝下	2017 年	28.53	-	28.79	-	29.11	-
	2018 年	28.06	-0.47	28.31	-0.48	28.62	-0.49
	2019 年	27.90	-0.16	28.10	-0.21	28.35	-0.27
	2020 年	27.69	-0.21	27.87	-0.23	28.10	-0.25
	2021 年	26.93	-0.76	27.17	-0.70	27.47	-0.63
	2022 年	26.51	-0.42	26.77	-0.40	27.09	-0.38
	合计	-	-2.03	-	-2.02	-	-2.02
兴隆站	2017 年	26.98	-	27.19	-	27.46	-
	2018 年	26.60	-0.38	26.80	-0.39	27.05	-0.41
	2019 年	26.38	-0.22	26.61	-0.18	26.90	-0.15
	2020 年	26.38	0.00	26.59	-0.03	26.85	-0.05
	2021 年	26.29	-0.09	26.53	-0.05	26.83	-0.02
	2022 年	25.90	-0.39	26.13	-0.41	26.40	-0.43
	合计	-	-1.08	-	-1.06	-	-1.06

续表1

水文站 (水尺)	年份	420 m ³ /s		500 m ³ /s		600 m ³ /s	
		水位/m	下降值/m	水位/m	下降值/m	水位/m	下降值/m
仙桃站	2017年	20.97	-	21.17	-	21.54	-
	2018年	20.94	-0.03	21.12	-0.05	21.46	-0.08
	2019年	20.87	-0.07	21.02	-0.10	21.30	-0.16
	2020年	20.76	-0.11	20.93	-0.09	21.24	-0.06
	2021年	20.82	0.06	20.98	0.05	21.28	0.04
	2022年	20.66	-0.16	20.85	-0.13	21.22	-0.06
	合计	-	-0.31	-	-0.32	-	-0.32

注：仙桃站 420 m³/s 流量实际为 447 m³/s。

3.3 泥沙变化

丹江口水库建成后，来沙过程得到全面调蓄控制，大量泥沙被拦在库内，坝下基本是清水下泄，尤其是丹江口下游相继建成各级枢纽后，兴隆以下河道水流含沙量及年平均输沙量等较建库

前均明显减少，如兴枢纽建库前多年平均含沙量、输沙量分别为 0.55 kg/m³、2 130 万 t，建库后仅为 0.09 kg/m³、409 万 t，建库后仅为建库前的 16.3%、19.2%，仙桃站不同时期的泥沙特征值见表 2。

表 2 仙桃站不同时期泥沙特征值

时期	统计 年份	含沙量/(kg·m ⁻³)			年输沙量/万 t		
		历年最大	历年最小	多年平均	历年最大	历年最小	多年平均
丹江口建库前	1955—1959	11.70	0.015	1.90	14 300	3 260	8 310
丹江口滞洪期	1960—1967	9.95	-	1.66	15 900	1 540	7 500
兴隆建库前	1968—2013	4.82	0.035	0.55	6 390	398	2 130
兴隆建库后	2014—2021	0.95	0.017	0.09	2 040	173	409

4 设计最小通航流量

工程河段航道规划等级为 II 级，根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[7]，II 级航道的设计最小通航流量保证率为 98%。

兴隆坝下水尺、兴隆站均为兴隆枢纽建立后设立，观测资料系列较短；仙桃站于 1921 年设立，有长系列的观测资料。但因工程河段位于丹江口水库下游，丹江口水库建库以及南水北调中线工程实施调水后，汉江下游的来水条件发生一定变化，所以在进行设计最小通航流量分析计算时，主要根据南水北调中线工程调水 95 亿 m³ 后的 1956—1998 年演算流量资料系列、2015—2022 年实测流量资料系列进行计算，同时结合兴隆枢纽船闸的设计最小通航流量进行综合确定。

兴隆枢纽坝下 2015—2022 年实测流量资料系列的 98% 保证率流量为 435 m³/s，兴隆枢纽船闸的设计最小通航流量(即最小下泄流量)为 420 m³/s；兴隆站 2015—2022 年实测流量资料系列的 98% 保证率流量为 518 m³/s，调水后的流量演算资料系

列 98% 保证率的流量为 518 m³/s；仙桃站 2015—2022 年实测流量资料系列的 98% 保证率流量为 465 m³/s，调水后的流量演算资料系列 98% 保证率的流量为 447 m³/s。

各站的南水北调后演算流量资料系列计算结果与实测资料系列计算结果比较接近，但考虑到南水北调中线工程调水后的实测资料系列较短，其代表性不足，故从资料系列的代表性、一致性以及可靠性方面考虑，兴隆坝下、兴隆站、仙桃站的设计最小通航流量计算分别取 420、518、447 m³/s。

5 设计最低通航水位

5.1 基本站的设计水位

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[8] 的规定，基本站设计水位应采用水位系列进行推算。基本站所处河段河床和水文条件出现明显变化时，还应采用流量系列统计分析确定设计流量，通过近期水位流量关系推求设计水位，并与以水位系列推求的结果进行比较，综合分析确定设计水位。

工程河段兴隆—仙桃段河床受兴隆枢纽下泄水流冲刷影响较大, 仙桃—蔡甸段受兴隆枢纽下泄水流影响较小。因此, 兴隆枢纽坝下、兴隆站以及仙桃水文站的设计水位根据确定的设计流量, 由 2022 年枯水期水位-流量关系(图 4)推求设计水位与根据南水北调实施后的实测水位系列推求设计水位后综合确定。

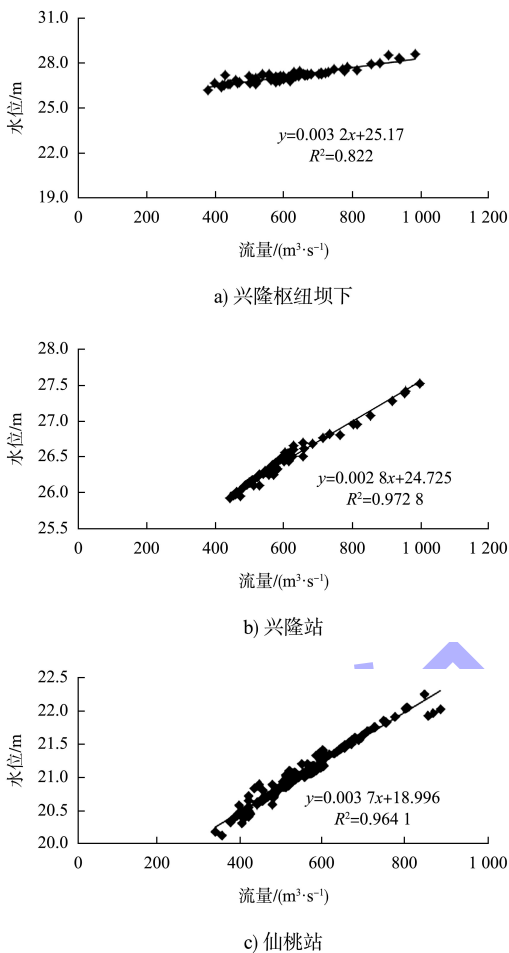


图 4 2022 年枯水期水位-流量关系曲线

1) 根据 2022 年兴隆枢纽坝下枯水期水位-流量关系, 查得流量 $420 \text{ m}^3/\text{s}$ 的相应水位为 26.51 m ; 2015—2022 年实测逐日平均水位资料系列的 98% 历时保证率水位为 26.94 m 。2) 根据 2022 年兴隆站枯水期水位-流量关系, 查得流量 $518 \text{ m}^3/\text{s}$ 的相应水位为 26.17 m ; 2015—2022 年实测逐日平均水位资料系列的 98% 历时保证率水位为 26.23 m 。3) 根据 2022 年仙桃站枯水期水位-流量关系, 查得流量 $447 \text{ m}^3/\text{s}$ 的相应水位为 20.66 m ; 2015—2022 年实测逐日平均水位资料系列的 98% 历时保

证率水位为 20.82 m 。

除兴隆枢纽坝下外, 兴隆及仙桃站两种方法的计算结果比较接近, 考虑到兴隆枢纽蓄水运行以来, 枢纽坝下实测最低水位达 26.32 m , 因此, 从利于通航条件考虑, 确定兴隆枢纽坝下、兴隆站及仙桃站的设计最低通航水位均采用通航流量的相应水位, 即 26.51 、 26.17 、 20.66 m 。

岳口站的设计水位根据建立的仙桃与岳口站 2022 年的枯水期水位相关线(图 5)确定, 即 24.0 m 。汉川站的设计水位根据实测水位资料系列进行综合历时保证率曲线推算, 即 15.5 m 。

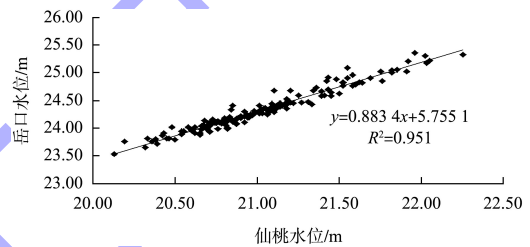


图 5 岳口-仙桃站 2022 年枯水期水位相关线

5.2 沿程设计最低通航水位

根据工程河段设立的张港、麻洋、桃花洲、马口以及蔡甸临时水尺 2022-04-18—2022-06-18 水位观测资料(观测期间仙桃站的流量为 $789 \sim 2\ 080 \text{ m}^3/\text{s}$)与附近基本站建立水位相关线, 确定各临时水尺的设计水位。张港、麻洋、桃花洲、马口、蔡甸临时水尺的设计水位分别为 25.36 、 21.68 、 18.22 、 16.30 、 13.07 m 。再根据 2022-09-27—2022-09-29 工程河段沿线的瞬时水面线观测资料(观测期间仙桃站的流量为 $414 \sim 417 \text{ m}^3/\text{s}$)进行河段各断面设计水位的推求, 根据上下游基本站或临时水尺的水位进行修正内插。汉江兴隆—蔡甸段沿程航道设计最低通航水位见图 6。

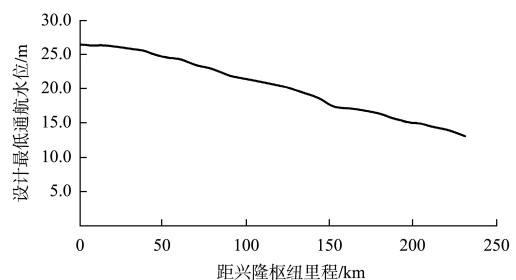


图 6 汉江兴隆—蔡甸段沿程设计最低通航水位

5.3 计算结果合理性分析

2022年长江、汉江均为罕见的枯水年,2022年仙桃站流量过程线及汉口站水位过程线见图7。可以看出,1—3月工程河段受长江顶托影响较小,特别是在3月桃花汛涨水过程中,工程河段基本不受顶托影响;4—7月汉江汛期来水逐步减小,长江水位维持在15 m以上,汉江受顶托作用较强;9月以后汉江流量过程进一步减小并维持在 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,长江水位也降低至13 m以下,此时汉江基本不受长江顶托影响。因此,在进行工程河段的设计最低通航水位推求时,利用近期2022年的枯水水位-流量关系、接近设计通航流量时的实测枯水比降等推算的设计水位能够反映河道水位的实际情况。同时,在兴隆—蔡甸段2 000吨级航道整治工程中,也利用此方法进行了沿程河段设计水位的推求,从其整治效果来看,整治后的航道尺度能够达到设计尺度要求;故本次设计水位按此方法计算的结果基本合理。

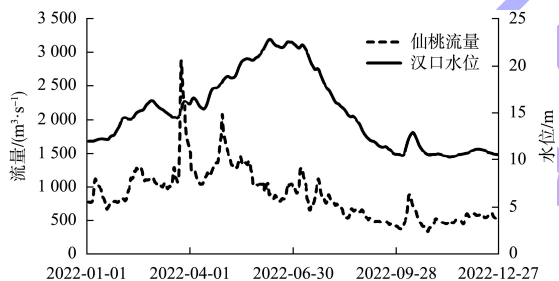


图7 2022年仙桃流量、汉口水位过程线

6 坝下河段河床冲淤、河口水位顶托等对通航水位的影响分析

枢纽下游河段河床冲刷是一个自上而下、逐步发展的过程,随着时间的推移,冲刷强度由强到弱直至达到冲淤平衡。兴隆—蔡甸段2 000吨级航道整治工程实施后,第15年末河床断面冲淤基本达到平衡^[9];第18年末,设计最小通航流量条件下,兴隆坝下、兴隆站、岳口站、仙桃站设计最低通航水位较近期的设计最低通航水位分别下降约1.81、1.77、1.29、0.62 m。工程河段的水位除受河床冲淤变化影响外,还受出口长江水位的顶托影响,通常年份条件下,长江回水顶托可达蔡甸或汉川,最远可达仙桃;随着长江三峡坝

下河段的沿程冲刷发展,待冲刷影响发展到汉口河段时,长江对汉江的顶托影响将会有所减弱,届时工程河段的设计水位将会随着顶托影响的减弱而发生一定的水位下降。鉴于此,在具体工程设计时,为确保设计水位的合理性,须结合冲淤变化调整后的地形,根据设计流量、水位-流量关系等对设计最低通航水位进行实时复核调整。

7 结论

1) 兴隆枢纽蓄水前、后,工程河段枯水期来流无明显的趋势性变化;但随着水库“清水下泄”冲刷河床影响,兴隆枢纽下游河段同流量对应的水位出现了不同程度下降,且自上游向下游下降幅度逐渐减小;最大下降幅度位于兴隆枢纽坝下,该处设计水位较枢纽设计时的水位值已下降了3.19 m。

2) 根据兴隆—蔡甸河段水文变化特点,提出兴隆—仙桃段根据设计流量推求基本站的设计水位、仙桃—蔡甸段根据实测水位资料系列推算基本站的设计水位;再根据接近设计流量时的河道瞬时水面线观测资料推算沿程各断面的设计水位,计算结果基本合理。

3) 枢纽下游河段河床冲刷是一个自上而下、逐步发展的过程,在河床达到冲淤平衡之前,断面的设计水位、水位流量关系将随着河床的冲淤变化而变化,加上出口河段顶托关系随着三峡坝下河段的沿程冲刷发展而变化的影响,在具体设计时须根据设计流量、水位流量-关系等对设计最低通航水位进行实时复核调整。

参考文献:

- [1] 季荣耀,陆永军,左利钦.东江下游博罗河段人类活动影响下的河床演变[J].泥沙研究,2010(5):48-54.
- [2] 张明,冯小香,郝品正.多因素作用下的西江梧州河段枯水水位下落[J].泥沙研究,2013(5):69-74.
- [3] 张明,冯小香,彭伟,等.西江界首至肇庆河段航道设计最低通航水位研究[J].水运工程,2018(4):104-109.
- [4] 闵朝斌.关于最低通航设计水位计算方法的研究[J].水运工程,2002(1):29-33.

(下转第151页)