



长洲枢纽一、二线船闸通过能力变化及航运潜能释放^{*}

潘荣友¹, 胡颖^{2,3}, 王勇¹, 马爱兴^{2,3}, 邓涯^{2,3}

(1. 广西壮族自治区港航发展中心, 广西 南宁 530029;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 长洲水利枢纽过闸货运量已跃居世界天然航道首位。然而坝下枯水位持续降落引起一、二线船闸通航保证率大幅下降, 制约枢纽的整体通过能力。基于实测水文资料和模型试验成果, 分析一、二线船闸通过能力变化。结果表明: 枢纽运行以来, 水位降落引起一、二线船闸可通航船舶吨级总体呈下降趋势, 原设计船型分别为2 000、1 000吨级, 至2019年一、二线船闸在设计流量(外江1 090 m³/s)下仅能通过500、100吨级; 贵梧3 000吨级航道整治工程实施后, 西江运行中的国标船型和西江船型得以顺利过闸(一、二线船闸)所需的外江最小下泄流量分别为1 875、2 470 m³/s。优化上游库群联合调度提升枯季下泄流量, 优化不同泄流条件下一、二线船闸的组合调度, 深度释放船闸的利用率, 是现状全面提升长洲枢纽整体通过能力的重要途径。

关键词: 长洲水利枢纽; 船闸通过能力; 最小下泄流量; 非工程措施; 航运潜能

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0140-06

Trend of traffic capability of first and second ship locks of Changzhou hydro-project and release of shipping potential

PAN Rong-you¹, HU Ying^{2,3}, WANG Yong¹, MA Ai-xing^{2,3}, DENG Ya^{2,3}

(1. Shipping Development Center of the Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The cargo volume of Changzhou hydro project has leapt to the first place in the world's natural waterway. However, the descending trend of the low water level downstream the hydro-project causes a sharp decline in the navigation assurance rate of the first and second ship locks, which restricts the overall carrying capacity of the hydro-project. Based on the hydrological data and the results of river physical model test, this paper studies the change of the carrying capacity of the first and second ship locks. The results show that since the operation of the hydro-project, the tonnage of navigable ships of the first and second ship locks generally declines, which the first and second ship locks can only pass through 500 t and 100 t levels respectively by 2019 under the design flow (1 090 m³/s in the Waijiang river). After the implementation of the 3 000 t level navigation channel regulation project from Guigang to Wuzhou in future, only when the discharge of Waijiang river reaches 1 875 m³/s and 2 470 m³/s

收稿日期: 2022-04-18

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y221013、Y222011); 交通运输部建设科技项目(2014328345180)

作者简介: 潘荣友(1965—), 男, 高级工程师, 从事内河水运建设与科技管理。

respectively, the national standard ship type and Xijiang ship type can pass the ship locks smoothly (the first and second ship locks). It is an important way to comprehensively improve the overall carrying capacity of Changzhou hydro-project for deeply releasing the utilization rate of the first and second ship locks, by optimizing the joint scheduling of upstream reservoirs to increase the dry season flow and the combined scheduling of the first and second locks under different discharge conditions.

Keywords: Changzhou hydro-project; traffic capability for ships; minimum discharge; non-structural measures; shipping potential

作为“四纵四横两网”国家高等级航道网的“一横”，西江航运干线沟通珠江流域上中下游，连通西江经济带与粤港澳地区，是西南水运出海

通道的重要组成部分，而长洲水利枢纽是西江航运干线通江达海的最后一座枢纽，浔江在此被分为外江、中江和内江，见图 1。



图 1 长洲枢纽坝下近坝段河势

船闸是渠化河道通航过程的关键节点。长洲水利枢纽现投入运营四线船闸，一、二线船闸均布置于外江一侧。自 2007 年长洲枢纽建成运行以来显著提高了西江的通航能力，三、四线船闸自 2015 年投入运行后过闸货运量进一步增加，2019 年首次超过三峡船闸，跃居世界天然航道首位，且仍呈快速增长趋势，见图 2。

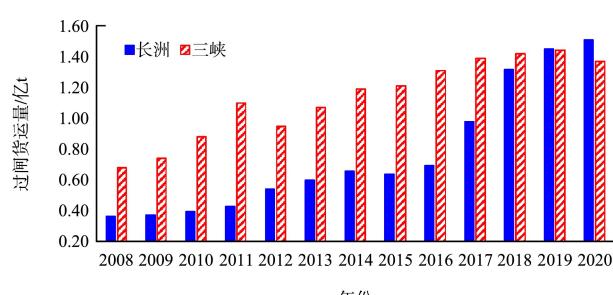


图 2 长洲枢纽投入运行以来与三峡年过闸货运量对比

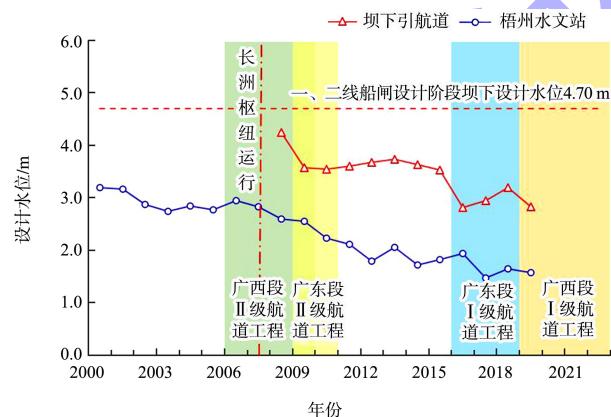
天然河流上修建水利枢纽改变下游河道的来流来沙过程，将引起下游河道的复杂响应，主要表现为纵向冲刷和横向冲淤变化的再造床过程。

前人利用河床演变分析、试验模拟等手段对水库下游河道的冲淤变化、断面形态调整、河床微地貌演变等方面的变化规律进行研究^[1-6]，认为枢纽截流后初期河床下切冲刷幅度最大，之后随着河床粗化和比降调平，冲刷幅度逐渐减缓。

与其他渠化河道类似，长洲枢纽坝下河床受清水下泄、航道整治和人工采砂等影响，坝下枯水位持续降落^[7]的影响，一、二线船闸门槛水深不足、通航保证率大幅降低，同时由于过闸船型多、船舶大等问题^[8]，一、二线船闸通过能力未能得到充分发挥，制约了枢纽的整体通过能力。本文结合实测水文资料与模型试验相结合，分析长洲枢纽建成以来一、二线船闸通过能力的变化趋势，核算满足一、二线船闸设计最低通航水位所需的最小下泄流量，探讨提升一、二线船闸通过能力的非工程措施，为枢纽联合调度、船闸优化调度，充分释放一、二线船闸航运潜能提供技术支撑。

1 长洲枢纽坝下设计水位降落分析

长洲枢纽坝下观测水尺位于一、二线船闸引航道内,梧州水文站位于长洲坝下约 13 km、桂江汇流口下游约 2.5 km 处(图 1)。长洲枢纽设计航运基流 1 090 m³/s,其中外江 845 m³/s,内江 245 m³/s,相应梧州水文站设计流量 1 140 m³/s。根据历年枢纽坝下引航道观测水尺(2008—2019 年)和坝下梧州水文站(2000—2019 年)的水位-流量关系,得到设计流量条件下历年相应的水位,见图 3。可以看出,枢纽自 2007 年运行以来坝下设计水位经历了快速降落→波动缓降的非线性降落过程。以梧州水文站长期观测结果为例,枢纽运行前(2000—2006 年)、运行初期(2007—2012 年)以及近期(2012—2019 年)设计流量对应的水位年均降幅分别为 0.06、0.20 和 0.03 m,其中 2019 年梧州水文站设计流量对应的水位为 1.58 m,已较 2007 年枢纽建成运行时 2.83 m 下降了 1.25 m。长洲枢纽坝下引航道受枢纽非恒定泄流影响,水位-流量关系相对散乱,但 2019 年设计流量下对应的水位 2.83 m,较设计阶段的设计水位 4.70 m 降低了 1.87 m。



注:采用 1985 国家高程基准。

图 3 长洲枢纽坝下(引航道、梧州水文站)设计水位逐年变化

2 长洲枢纽运行以来一、二线船闸通过能力变化

2.1 可通航最大船舶吨级变化

长洲水利枢纽船闸设计参数见表 1。一线船闸为 II 级船闸,通航 2 000 吨级船队;二线船闸为 III 级船闸,通航 1 000 吨级船队。一、二线船闸下闸首门槛设计底高程分别为 0.2 和 1.2 m,设计门槛水深分别为 4.5 和 3.5 m,相应的设计水位均为 4.7 m。然而,设计流量(外江 845 m³/s,内江

245 m³/s,相应梧州水文站设计流量 1 140 m³/s)条件下,随着坝下游枯水位的不断下降,使得一、二线船闸门槛水深不能满足原设计要求,直接影响了一、二线船闸的可通航船舶吨级。

表 1 长洲水利枢纽船闸设计参数

船闸	船闸等级	通航船舶吨级	下闸首底槛高程/m	船闸尺度(长×宽×门槛水深)/(m×m×m)
一线船闸	II 级	2 000	0.20	200 × 34 × 4.5
二线船闸	III 级	1 000	1.20	185 × 23 × 3.5
三、四线船闸	I 级	3 000	-4.25	340 × 34 × 5.8

基于长洲坝下引航道水尺 2008—2019 年的水位-流量关系,得到历年设计流量对应的水位,求得设计流量下一、二线船闸历年相应的门槛水深。根据不同等级国标船型^[9]规定,门槛水深与吃水比取不小于 1.6,因此获得船闸最大的理论船舶吃水深度,结果如图 4 所示。枢纽运行初期,一、二线船闸可通航船舶尺寸基本达到 2 000、1 000 吨级的设计要求。随着枢纽运行时间增加,一、二线船闸理论可通航最大船舶吨级总体呈下降趋势,至 2019 年一、二线船闸在设计流量下仅能分别通过 500、100 吨级,枯季船舶过闸须减载以减小吃水。

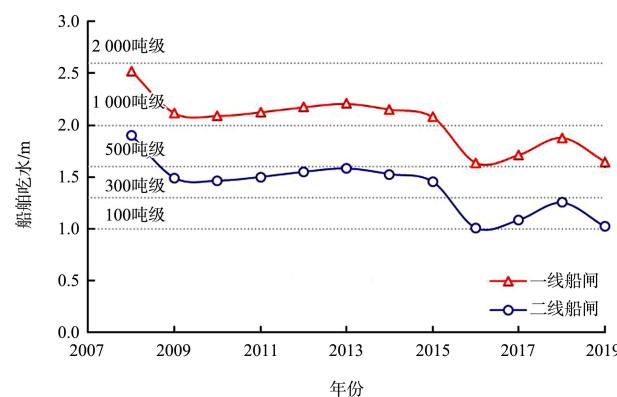


图 4 长洲枢纽设计流量下一、二线船闸可通航的船舶吃水尺度

长洲枢纽外江不同下泄流量条件下一、二线船闸可通航船舶吨级见图 5。随着时间的推移,相同流量下,一、二线船闸船舶吃水深度逐步降低,满足一、二线船闸门槛水深所需的外江最小下泄流量也逐步增加。截至 2019 年,当外江流量 1 700 m³/s(梧州站约 2 990 m³/s)下,一、二线船闸可分别通行 2 000、1 000 吨级船舶,基本恢复设计初衷。

然而, 现状条件下, 三、四线船闸过闸条件优势明显, 进一步引起一、二线船闸利用率降低, 进而制约了枢纽整体通过能力。

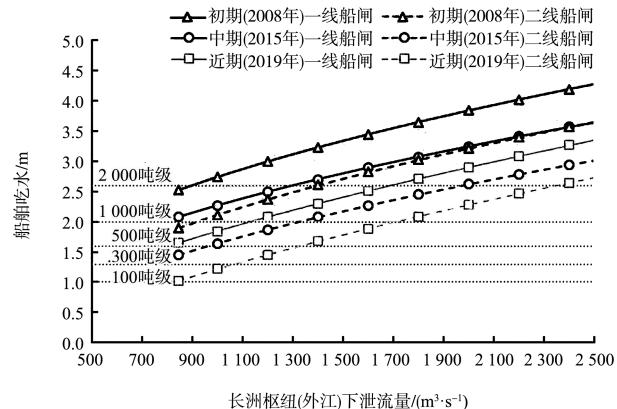


图 5 长洲枢纽外江不同下泄流量条件下
一、二线船闸可通航船舶吨级

2.2 一、二线船闸通航保证率变化

鉴于梧州水文站拥有较长时序的流量资料, 利用梧州水文站 2000—2019 年共 20 a 的日均流量资料, 得到梧州站流量-累积频率曲线, 即日均流量-保证率曲线, 见图 6。根据该保证率曲线, 梧州站设计最小通航流量 1 140 m³/s 时(相应长洲枢纽外江下泄流量为 845 m³/s)的保证率为 98%, 与一、二线船闸原设计通航保证率 98%一致, 表明利用梧州水文站流量样本计算分析长洲枢纽运行前后工程河段设计流量是合适的。

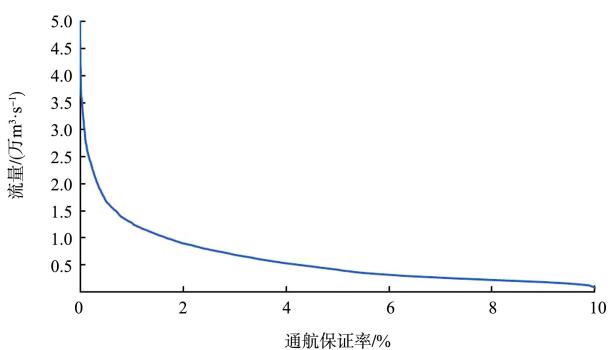


图 6 梧州水文站 2000—2019 年流量-保证率曲线

根据上文, 满足一、二线船闸门槛水深的最低水位须达到 4.7 m。长洲枢纽坝下枯水位总体呈降落趋势, 相应满足 4.7 m 水位所需的下泄流量则逐步上升。根据长洲枢纽坝下引航道水位-梧州水文站流量关系, 得到历年满足 4.7 m 通航水位所需的最小流量, 进而得到历年一、二线船闸的通航保证率

见图 7, 枢纽建成以来不同阶段一、二线船闸通航保证率和恢复船闸原有 98% 通航保证率对应的梧州站流量见表 2。结合通航保证率和历年设计流量对应通航保证率可以看出, 随着坝下枯水位的降落, 通航保证率同样呈逐年下降的趋势, 已由 2007 年枢纽建设初期的 98% 降至 2019 年的 64%, 此时梧州水文站最小流量需要 2 900 m³/s, 相应外江流量须达到 1 750 m³/s 以上, 才能恢复船闸原有 98% 的通航保证率。

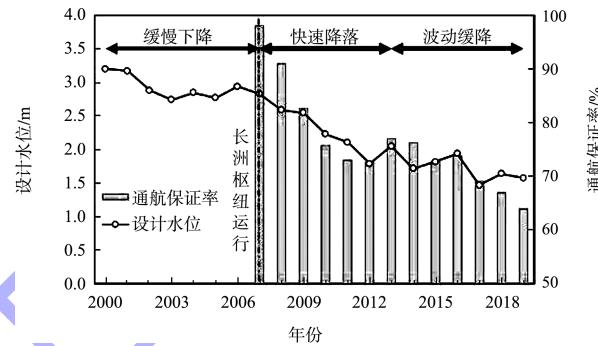


图 7 梧州水文站设计流量下水位降落和
一、二线船闸通航保证率逐年变化

表 2 长洲枢纽运行以来不同阶段一、二线船闸通航保证率

阶段	通航保证率/%	恢复 98% 通航保证率对应梧州站流量/(m ³ ·s⁻¹)
枢纽运行初期(2007 年)	98.0	1 140
三四线船闸建成(2015 年)	72.8	2 465
近期(2019 年)	64.0	2 900

3 满足一、二线船闸门槛水深的最小下泄流量

随着珠江流域船舶大型化的发展趋势, 长洲枢纽坝下航道扩能, 进一步引起坝下水位下降, 进而降低一、二线船闸的通过能力。贵梧 3 000 吨级航道整治工程于 2019 年开工, 尚未全面交工验收。因此, 基于已验证的贵港—梧州 3 000 吨级航道工程长洲坝下航道整治物理模型, 探求贵梧 3 000 吨级航道整治工程实施完成后, 满足一、二线船闸设计门槛水深所需最小下泄流量。

长洲坝下物理模型试验服务于贵梧 3 000 吨级航道整治工程^[10], 模型范围为长洲坝址—界首段长约 24 km 河段, 见图 8。其中包含龙圩水道、洗马滩、鸡笼洲、界首滩, 同时模拟长洲枢纽(中江、外江)调度运行, 以及内江、桂江的入汇。

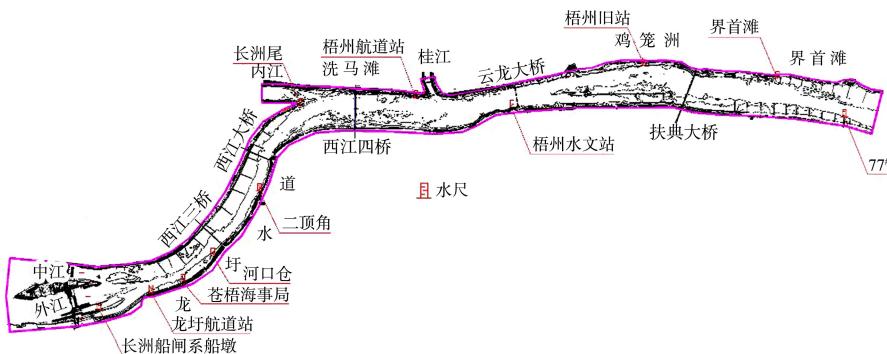


图 8 物理模型范围

长洲枢纽一、二线船闸设计阶段选用的代表船型为国标船型。前文已根据长洲水利枢纽船闸设计参数,指明满足一、二线船闸最小门槛水深所需的最低水位为 4.7 m。而实际运行中部分西江船型吃水深度较国标船型大。根据交通运输部发布的《关于公布西江航运干线过闸船舶标准船型主尺度系列及有关规定的公告》(2011 年第 94 号),

1 000 和 2 000 吨级代表西江船型吃水分别为 2.6 和 3.5 m, 相应国标船型仅为 1.6 和 2.0 m。不同船型所需门槛水深对应的设计水位值见表 3。结合长洲一、二线船闸设计参数, 下闸首底槛高程分别为 0.2、1.2 m, 国标船型和西江船型得以顺利过闸的最低水位分别为 4.7 和 5.8 m。不同船型对应的一、二线船闸相关参数见表 3。

表 3 国标船型和西江船型满足门槛水深对应的设计水位

船型	船闸	下闸首低槛高程/m	船舶吃水/m	所需船闸门槛水深/m	设计阶段须达到的目标水位/m
国标船型	一线船闸	0.2	2.0	4.5	4.7
	二线船闸	1.2	1.6	3.5	4.7
西江船型	一线船闸	0.2	3.5	5.6	5.8
	二线船闸	1.2	2.6	4.2	5.4

根据长洲枢纽坝下设计水位降落分析结果,长洲枢纽三、四线船闸运行初期(2015 年),设计流量条件下一、二线船闸最小门槛水深已不能满足要求,当外江下泄流量达到约 1 400 m³/s 时(图 5),一、二线船闸方能分别恢复 2 000、1 000 吨级船舶通行。

根据物理模型试验结果,待贵梧 3 000 吨级

航道整治完工后,河床演变、疏浚工程引起的水位进一步降落,外江下泄流量须达到 1 875 m³/s(相应梧州水文站流量约 3 308 m³/s)时,方能达到一、二线船闸的设计门槛水深。而满足西江大吃水船型所需的外江下泄流量则须达到 2 470 m³/s(相应梧州水文站流量约 4 350 m³/s),具体参数见表 4。

表 4 贵梧 3 000 吨级航道整治后满足设计水位所需下泄流量

工况	流量/(m ³ ·s ⁻¹)					船闸下闸首水位/m
	外江	内江	浔江总流量	桂江	梧州水文站	
原设计流量条件	845	245	1 090	50	1 140	2.65
满足国标船型所需流量	1 875	1 140	3 015	293	3 308	4.70
满足西江船型所需流量	2 470	1 540	4 010	340	4 350	5.80

4 一、二线船闸通过能力潜能释放的非工程措施

长洲枢纽一至四线船闸中,三、四线船闸下闸首底高程已充分考虑河床下切、枯水位下降的

问题。而现有一、二线船闸下闸首底高程因预留不足,在下游河段航道扩能升级及河道继续挖沙的条件下,枯水航深进一步减小。长洲船闸规模

和通过量为世界天然航道之最, 船闸改造受既有庞大建筑群、输水系统和大密度通航船舶等多因素制约, 船闸改造操作空间有限。因此, 现阶段全面释放一、二线船闸通过潜能, 提高一、二线船闸利用率, 有利于枢纽整体通过能力的提升。

除建立“船闸运行、航道管理、执法监督”相统一的通航管理模式、推进过闸船型标准化大型化外, 提高一、二线船闸利用率、提升长洲枢纽船闸通过能力可从以下方面考虑:

1) 优化船闸调度管理水平, 优化过闸配置。长洲枢纽自 2007 年运行以来, 一、二线船闸可通航船型吨级总体呈下降趋势。随长洲坝下外江流量增加, 一、二线船闸可通航船舶吨级相应提升。至 2019 年, 当外江流量 $1\ 700\ m^3/s$ 条件下, 一、二线船闸可满足通行 2 000、1 000 吨级船舶; 贵梧 3 000 吨级航道整治实施后, 外江下泄流量须达到 $1\ 875\ m^3/s$ (相应梧州水文站流量约 $3\ 308\ m^3/s$) 时, 方能达到一、二线船闸的设计门槛水深。

在运输船舶过闸调度中, 可遵循大小船舶组合过闸、分行过闸的调度原则, 基于长洲枢纽短期出库流量安排, 结合不同流量条件下可通航船舶吨级成果, 提前规划大小船型选择停泊区位, 引导小吨级船型优先选择二线船闸、其次一线船闸, 300 吨级以下小型船舶过闸充分利用一二线船闸的闸室空当、与大船过闸组合随机排当。

2) 西江上游库群联合调度, 优化水资源配置, 提高长洲枯水期出库流量。西江干支流梯级枢纽众多, 因隶属不同, 缺乏统一管理。枯水期流域降水减少、河流来水不多时, 部分枢纽兼顾发电效益, 关闸蓄水, 给中下游枢纽运行造成一定压力。长洲水利枢纽是西江航运干流的最末一级枢纽, 承担着发电、航运和压咸补淡的任务, 其下泄流量影响着下游航道的通航水深。

通过深入研究流域水资源条件, 合理优化水资源配置, 枢纽水库联合调度要求上游水库考虑中下游水库的实际情况, 在枯水期下游水库运行困难时, 从中上游大中型水库进行补水, 分摊下

游水库的压力, 以促进流域水资源利用的最大化。

5 结论

1) 长洲枢纽自 2007 年运行以来坝下水位经历了“快速降落→波动缓降”的非线性降落过程。截至 2019 年, 长洲枢纽坝下引航道和梧州水文站设计流量下对应的水位为 $2.83\ m$, 较设计阶段的设计水位 $4.70\ m$ 降低了 $1.87\ m$ 。2019 年梧州水文站设计流量对应的水位为 $1.58\ m$, 较 2007 年枢纽建成运行时 $2.83\ m$ 下降了 $1.25\ m$ 。

2) 设计水位的不断下降, 一、二线船闸理论可通航最大船舶吨级总体呈下降趋势, 至 2019 年一、二线船闸在设计流量(梧州 $1\ 140\ m^3/s$)下仅能分别通过 500、100 吨级, 实际情况因船闸管理而异。

3) 长洲枢纽一、二线船闸设计阶段选用的代表船型为国标船型, 西江船型吃水比国标船型大, 两类船型得以顺利过闸的设计水位分别为 4.7 和 $5.8\ m$ 。随长洲坝下外江流量增加, 一、二线船闸可通航船舶吃水尺度相应增加。长洲枢纽坝下 3 000 吨级航道整治后, 外江下泄流量须分别达到 $1\ 875$ 、 $2\ 470\ m^3/s$, 一、二线船闸门槛水深方能分别满足国标船型和吃水更大的西江船型。

4) 随着珠江流域船舶大型化的发展趋势, 长洲枢纽坝下航道扩能引起坝下水位下降, 进一步降低了一、二线船闸的通过能力。应优化船闸调度, 结合枢纽不同出库流量条件, 引导大小船舶组合过闸、分行过闸, 以提高一、二线船闸的利用率, 进而提高长洲枢纽通航能力。通过优化上游库群联合调度, 合理分配水资源, 以提高长洲枢纽枯水期下泄流量。通过全面释放一、二线船闸通过潜能, 提高一、二线船闸利用率, 突破西江末端梯级堵航瓶颈, 以提升枢纽整体通过能力。

参考文献:

- [1] 曹民雄, 庞雪松. 电站泄流对坝下航道影响研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 94-104.