

· 航道及通航建筑物 ·



长洲枢纽既有船闸和扩建船闸的 通过能力分析

吴 澎¹, 刘春泽¹, 李明泽², 高成岩¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 目前长洲水利枢纽共有 4 线船闸, 2021 年下行量达 1.19 亿 t, 船闸运行接近饱和。为研究新建船闸建设方案, 需结合过闸运量预测, 分析既有船闸和新建船闸的通过能力。根据过闸船舶统计数据和发展变化的规律, 预测 2030 年过闸船舶的组成、各吨级船舶的平均载重吨和装载系数。采用离散事件系统仿真方法, 模拟船舶随机到闸和排档过程, 考虑多线船闸不同的调度规则, 构建了船闸群的系统仿真模型。结果表明: 按船舶随机到达顺序依次过闸的规则, 船闸总体通过能力相对较优; 五线船闸选新闸址建设, 且闸室平面尺度宜为 340 m×34 m。

关键词: 船闸通过能力; 船舶平均载重吨; 船舶装载系数; 离散事件系统仿真方法

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0056-07

Capacity of existing locks and planning lock in Changzhou Multi-purpose Dam

WU Peng¹, LIU Chunze¹, LI Mingze², GAO Chengyan¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Maritime Economics and Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: At present, there are four lanes of locks in Changzhou multi-purpose dam. The down bound cargo volume in 2021 reached 119 million tons and was close to the capacity of locks. In the study of scheme for a new lock, the capacity of existing locks and the new lock should be analyzed in accordance with the cargo volume forecast. The formation of vessels through the lock and the average dead weight tonnage and loading rate of each class of vessels are predicted. Based on discrete event system simulation, a model of lock group is built, simulating the random arrival of vessels and ship arrangement algorithm in lock chamber, and considering different ship distribution rules among multi-lane locks. The results show that the total capacity of lock group is relatively optimal if ship enters lock by its arriving order. Besides, the fifth lock should be built at a new location and plane dimension of 340 m × 34 m is suitable for it.

Keywords: capacity of locks; average dead weight tonnage of vessels; loading rate of vessels; discrete event system simulation

1 工程概况

长洲枢纽是西江航运干线梯级开发段最下游的一个梯级, 见图 1, 位于珠江干流浔江下游河段的长洲岛, 长洲枢纽船闸是控制西江黄金水道广西段通过能力的咽喉。

枢纽坝址处的长洲岛和泗化洲岛将江面分为内江、中江和外江。长洲枢纽于 2003 年底开工建设, 2007 年一线和二线船闸投入运行, 2011 年 5 月三线和四线船闸开工建设, 2015 年 1 月建成^[1]。一至四线船闸均位于外江右岸台地, 船闸平面布置见图 2。

收稿日期: 2022-11-08

作者简介: 吴澎 (1956—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港航咨询研究和设计工作。



图1 长洲枢纽位置



图2 长洲枢纽一至四线船闸布置

长洲枢纽三线和四线船闸建成后,自2016年起过闸货运量快速发展,2021年船闸货物通过量达到1.52亿t,5年年均增速高达17.0%。过闸货运量以下行为主,2021年下行量达1.19亿t,占上下行总量的78.0%。船闸运行接近饱和,为满足过闸货运量进一步发展的需求,应对扩建船闸方案进行研究。

新建和扩建船闸的建设规模应满足过闸运输需求的增长。在长洲五线船闸前期工作阶段开展了过闸货运量预测工作。其中考虑了大藤峡枢纽建成后对黔柳江水运量的拉动作用,以及平陆运河投入运行后对船闸断面货运量的分流作用,经综合归纳后预测结果见表1。考虑平陆运河的分流

作用,长洲枢纽在2027年达到峰值2.14亿t,其中下行1.62亿t。展望2050年以后,预计下行运量较为平稳,上行运量略有增加。

表1 长洲枢纽过闸货运量预测

年份	货运量/万t			合计	
	大宗散货	件杂货	集装箱		
2030	上行	3 330	920	750	5 000
	下行	13 200	2 300	600	16 100
	小计	16 530	3 220	1 350	21 100
2040	上行	4 110	1 370	1 220	6 700
	下行	14 950	2 720	1 030	18 700
	小计	19 060	4 090	2 250	25 400
2050	上行	4 020	1 800	1 880	7 700
	下行	14 150	3 230	1 720	19 100
	小计	18 170	5 030	3 600	26 800

船闸通过能力是否满足预测运量的要求一般是分析运量较大方向的单向通过能力。2021年长洲船闸过闸下行货运量中,大宗散货的占比约为84.8%,件杂货约占13.2%,集装箱占2.0%。预测的各水平年货运量组成基本不变,大宗散货的占比逐步下降,件杂货和集装箱的占比逐步上升。

长洲枢纽建成后,下游河道内的航道疏浚和采砂等活动造成河床明显下切,引起同流量时的水位下降,小流量时的下降更为明显。在枢纽的

设计阶段针对最小通航流量($1\ 090\ m^3/s$)时的水位,这种变化只预留了0.5 m的下降值。但枢纽运行后的第1年最小通航流量对应的水位下降了1.0 m以上,以后逐年有所下降,截至2021年底,该流量对应的水位已降低了2.4 m左右。下游正在实施的3 000吨级航道建成后,最低通航水位还会有所降低。这造成一、二线船闸在枯水期的运行受到一定限制。长洲一至四线船闸主要参数见表2。

表2 长洲一至四线船闸主要参数

船闸	船闸等级	船闸尺度/(长×宽×门槛水深)/(m×m×m)	设计水头/m	正常蓄水位/m	上游最低通航水位/m	下游最低通航水位/m($Q=1\ 090\ m^3/s$)	上闸首门槛底高程/m	下闸首门槛底高程/m	上游引航道底高程/m	下游引航道底高程/m
一线	Ⅱ级	200×34×4.5	15.55			4.55	8.00	0.05	8.00	0.05
二线	Ⅲ级	185×23×3.5	15.55	20.6	18.60 (死水位)		8.00	1.05	8.00	1.05
三、四线	Ⅰ级	340×34×5.8	19.20			1.40	12.80	-4.40	12.80	-4.40

注:1956黄海高程。

长洲枢纽投入运行以来,随着西江干线航道等级的提升,过闸船舶大型化发展迅速,对船闸的通过能力影响显著。随着下游同流量时的水位不断下降,非汛期不满足一、二线船闸运行条件(上下游水位差 $\leq 16.05\ m$)的年出现天数逐渐增多。因此,规划五线船闸另选址新建,还是在一、二线船闸的位置改建,需要进行论证研究,通过分析各种可能情况下的船闸通过能力是否满足过闸运量的发展需求,从能力匹配的角度,提出可行的新建船闸方案。

2 过闸船型分析

西江航运干线的水运量和运输船舶的平均吨位,随着西江航运干线中上游航道等级的提升,而逐步增大。2009年底贵港—梧州Ⅱ级航道工程

完工后,2010年通过长洲船闸的船舶艘次快速增长,平均船舶吨位达到855 t;2013年西江干线邕宁五合大桥以下全线达到Ⅱ级航道标准后,过闸船舶平均吨位增长进一步加速;2015年通过长洲船闸的船舶平均吨位达到1 267 t;至2021年平均吨位进一步提高至2 580 t;2021年底贵港—梧州3 000吨级航道开通,预计未来过闸船舶的大型化还将持续发展。

2019—2021年船闸枢纽下行过闸船舶的分吨级统计数据见表3。其中500吨级的船舶数量逐年减少,艘次占比趋近于1%;1 000吨级和2 000吨级船舶的数量也有所减少,但从船舶艘次占比看,仍是主力船型;3 000吨级船舶的艘次占比缓慢增长;5 000吨级船舶的艘次占比快速增长,从总核载吨和总载货吨两项指标看,已成为主力船型。

表3 2019—2021年长洲枢纽下行过闸船舶统计数据

年份	船舶吨级	船舶艘次/艘	占比/%	总载货量/万t	总核载量/万t	平均核载量/t	装载系数
2019	500吨级($DWT \leq 750\ t$)	1 481	1.9	71.26	82.34	556	0.86
	1 000吨级($750\ t < DWT \leq 1\ 500\ t$)	30 436	39.7	3 181.99	3 501.55	1 150	0.91
	2 000吨级($1\ 500\ t < DWT \leq 2\ 500\ t$)	33 620	43.8	5 320.75	6 488.97	1 930	0.82
	3 000吨级($2\ 500\ t < DWT \leq 4\ 000\ t$)	7 391	9.6	1 702.52	2 418.99	3 273	0.70
	5 000吨级($4\ 000\ t < DWT \leq 6\ 500\ t$)	3 801	5.0	1 057.86	1 630.83	4 292	0.65

续表3

年份	船舶吨级	船舶艘次/艘	占比/%	总载货量/万t	总核载量/万t	平均核载量/t	装载系数
2020	500 吨级($DWT \leq 750 t$)	1 260	1.8	55.57	70.06	556	0.79
	1 000 吨级($750 t < DWT \leq 1 500 t$)	24 974	35.1	2 565.78	2 857.00	1 143	0.90
	2 000 吨级($1 500 t < DWT \leq 2 500 t$)	29 688	41.8	4 803.33	5 794.67	1 951	0.83
	3 000 吨级($2 500 t < DWT \leq 4 000 t$)	7 469	10.5	1 786.99	2 478.56	3 318	0.72
	5 000 吨级($4 000 t < DWT \leq 6 500 t$)	7 691	10.8	2 366.33	3 386.65	4 403	0.70
2021	500 吨级($DWT \leq 750 t$)	881	1.2	31.15	44.68	507	0.70
	1 000 吨级($750 t < DWT \leq 1 500 t$)	23 491	32.8	2 325.04	2 678.58	1 140	0.87
	2 000 吨级($1 500 t < DWT \leq 2 500 t$)	24 872	34.7	3 678.14	4 872.96	1 959	0.75
	3 000 吨级($2 500 t < DWT \leq 4 000 t$)	8 184	11.4	1 830.43	2 746.53	3 356	0.67
	5 000 吨级($4 000 t < DWT \leq 6 500 t$)	14 259	19.9	3 991.74	6 365.16	4 464	0.63

5 000 吨级船舶数量的快速增长, 与西江航运干线贵港—梧州段 3 000 吨级航道的开通密切相关。西江航运干线航道的年平均水深或保证率 50% 的水深, 要比 3 000 吨级航道最小水深高 2 m 以上, 因此新建船型的平面尺度基本与 3 000 吨级标准船型尺度相同, 吃水在 5~6 m, 载重吨可达 5 000~6 000 t, 甚至更大, 全年内随着航道水深的变化采用变吃水营运方式, 经济效益十分显著。表 3 中 5 000 吨级船舶的平均核载量不到 4 500 t, 随着 3 000 吨级航道的开通和向上延伸, 预计 5 000 吨级以上的船舶数量会在未来一段时间内显著增长。

根据表 3 统计的各吨级船舶组成的变化过程, 预测 2030 年过闸船舶的组成(表 4), 其中船型尺度按照 GB 38030.1—2019《内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列 第 3 部分: 西江航运干线》^[2]中散货船的尺度, 对比过闸船型实际尺度分布得到。1 000 吨级的船型标准中还有船长为 68 m 的 1 500 t 一档, 但考虑实际统计中 1 000 吨级船型的船长在 50 m 以下的占比超过 90%, 所以此档船长取 50 m; 3 000 吨级船型船长取上限。各吨级的平均核载量和装载率的预测值主要根据表 3 的统计值。

由表 4 可知, 预测 2030 年长洲枢纽过闸船舶的平均核载量将达 3 060 t, 与 2021 年的 2 580 t 相比是合理的。其中预测船舶平均装载系数为 0.71, 因此计算船闸通过能力时, 各吨级船舶的装载系数可统一取值 0.71。此外, 当航道通过货类中散

货占比较高时, 船舶平均装载系数往往较高。但在本案例中由于承运比较高(约 53%)的 5 000 吨级船舶在全年内有减载航行的情况, 因此尽管货类中散货占比较高, 但装载系数仍受一定限制。

表 4 预测 2030 年过闸船型组成及下行船舶装载率

船舶吨级	核载量/t	船型长/m	船型宽/m	装载率	艘次比/%
500	500	46	10.0	0.80	1
1 000	1 100	50	11.0	0.85	25
2 000	2 000	74	14.0	0.80	25
3 000	3 300	90	15.8	0.75	15
5 000	5 250	90	15.8	0.65	34

3 船闸通过能力计算

根据长洲枢纽一至四线船闸的主要特性指标。在论证扩建船闸方案时, 应分析已有船闸在新船型组成情况下的通过能力。

长洲一至四线船闸均为大型船闸, 1 闸次均有多艘船舶通过, 且 4 座船闸的尺度差异较大。由于过闸船舶的吨级范围较宽, 为准确计算 1 次过闸平均吨位和船舶过闸时间等关键参数^[3], 采用离散事件系统仿真方法, 模拟船舶随机到闸和排档过程。应用 AnyLogic 仿真软件, 构建船闸群的系统仿真模型, 在模型中考虑多线船闸不同的调度规则和一、二线船闸运行限制等因素的影响。根据文献[4]建议的参数取值, 船闸年运行天数取 340 d; 日工作小时取 23 h; 船闸运行不均衡系数取 1.05。

一、二线船闸的运行限制条件之一是上下游水位差不超过 16.05 m, 因此在下游水位下切后,

每年在枯水期均有停航的情况出现。2011—2021 年统计资料表明, 平均每年约有 19.3 d 因水位差超过 16.05 m 而停航。目前长洲枢纽下游 3 000 吨级航道疏浚工程还在施工过程中, 预计完成后下游航道枯水水位还会有一定下切。通过建立下游 3 000 吨级航道建成后船闸下游的水位与流量关系, 采用 2009—2021 年枢纽的运行过程, 可预测未来一定时间内一线和二线船闸因上下游水位差超过 16.05 m 而停航的平均天数为每年 104 d, 最多 1 年达 163 d; 若考虑其他影响因素还会造成枯水位继续下降 0.3 m, 则平均停航天数为每年 117 d, 最多 1 年达 172 d。

根据以上分析的主要参数, 采用仿真模型, 按船舶随机到达、顺序过闸的规则, 得出 2030 年预测船型情况下的一至四线船闸通过能力, 见表 5。

表 5 长洲枢纽一至四线船闸 2030 年预测船型组成下的年单向通过能力

船闸	单向通过能力/万 t		
	一至四线船闸 均运行	一线和二线船闸 停航 104 d	一线和二线船闸 停航 117 d
一线	4 384	3 043	2 875
二线	2 442	1 694	1 600
三线	5 430	5 465	5 470
四线	5 418	5 458	5 460
合计	17 674	15 660	15 405

计算结果表明: 若考虑一、二线船闸受下游水位下切的影响有停航情况时, 长洲一至四线船闸的通过能力略低于预测的 2027 年下行运量 1.62 亿 t。但如果平陆运河在 2026 年底或 2027 年初建成, 考虑其分流作用, 则长洲一至四线船闸的通过能力基本可满足 2026 年的预测量, 新建的五线船闸应在 2030 年以前建成。

如果考虑在二线船闸的位置处建设五线船闸, 以避免新征枢纽区以外的土地, 则其余一、三、四线船闸的通过能力无法满足船闸改建的施工期内过闸运量的需求。即使考虑先改造一线船闸的阀门和启闭设备, 以适应船闸最大水头 19.2 m 的条件, 一、三、四线船闸的单向通过能力也只能

达到 1.53 亿 t, 难以满足预测的 2026 年过闸运量的需求。

采用系统仿真模型模拟船舶过闸过程, 可以比较不同调度规则对通过能力的影响^[4-5]。根据长洲枢纽分船闸的统计数据, 船闸实际运行时基本按照小船过一、二线船闸, 大船过三、四线船闸。采用仿真分析法计算, 假设到闸船舶允许有一定的排队长度, 且 2 000 吨级及以下的船舶(简称“小船”)仅通过一、二线船闸, 3 000 吨级及以上的船舶(简称“大船”)优先通过三、四线船闸, 并在不饱满时允许小船通过。对比船舶按照吨级规定通过的船闸和按到达顺序过闸的仿真模拟结果见表 6。

表 6 不同调度规则下一线至四线船闸仿真模拟结果

船闸	通过能力/ 万 t	闸室 利用率/%	一闸次平均 吨位/t	一闸次平均 船舶数/艘
一线	2 810 (4 384)	61.0 (74.4)	8 008 (14 351)	4.1 (4.1)
二线	2 048 (2 440)	67.9 (57.2)	5 681 (6 206)	5.1 (2.3)
三线	6 450 (5 490)	73.1 (76.3)	26 070 (23 803)	6.1 (8.3)
四线	6 457 (5 480)	73.1 (76.3)	26 095 (23 812)	6.1 (8.3)
合计	17 765 (17 794)			

注: 括号外数字为按吨级规定通过船闸的结果; 括号内的数字为按到达顺序依次过闸的结果。

结果表明: 采用小船优先过小闸的调度规则, 大船闸的通过能力提高了, 但小船闸的通过能力降低了, 同时大船闸的闸室利用率降低, 即大船闸的通过能力未得到充分发挥。与按船舶到达顺序依次过闸的调度规则相比, 4 座船闸总的通过能力基本相当。

4 五线船闸建设方案论证

根据表 5 的计算结果, 五线船闸宜选新闸址建设。新建船闸尺度考虑与三、四线船闸一致, 即 340 m×34 m。五线船闸建成后的总通过能力见表 7。

表7 长洲枢纽五线船闸2030年预测船型组成下的年单向通过能力

船闸	年单向通过能力/万t		
	五线船闸 正常运行	一线和二线船闸 停航117d	一线和二线船 闸停航172d
一线	4 416	2 897	2 181
二线	2 452	1 608	1 212
三线	5 455	5 492	5 508
四线	5 455	5 492	5 508
五线	5 534	5 572	5 592
合计	23 312	21 061	20 001

结果表明: 五线船闸建成后, 长洲枢纽一至五线船闸总的通过能力即使在一、二线船闸年停航172d的情况下, 仍然能够满足远期(2060年)预测的单向过闸1.9亿t的需求。若对一、二线船闸的阀门和启闭设备进行改造, 以适应船闸最大水头19.2m的条件, 枢纽总的单向通过能力可达到2.3亿t。

根据对未来过闸船型组成的预测, 3 000和5 000吨级的船舶将成为主力船型, 艘次比占一半左右。表6表明, 340m长的闸室以过大船为主时, 闸室利用率降低。一线船闸200m×34m, 适合停4艘大船。分析一线船闸在枯水期通过大船的可能性。若对一线船闸的阀门和启闭机械进行改造, 使其不受运行水头需小于16.05m的限制, 根据2021年过闸船型的统计, 3 000和5 000吨级船舶中吃水小于2.0m的船舶艘次约占13%, 预测下游水位低于2.65m(吃水2m的船可通过一线船闸的最小水深)的出现频率不到1%; 吃水小于2.5m的船舶艘次约占30%, 预测下游水位低于3.05m(吃水2.5m的船可通过一线船闸的最小水深)的出现频率不到7%。因此近似认为一线船闸在枯水期可正常通过大船。

通过以上分析, 随着大船比例提高, 当前采用的小船过一、二线船闸, 大船过三、四线船闸的原则并不合适。从船闸平面尺度和船舶平面尺度匹配性的角度, 现有一线船闸适合停4艘大船; 规划新建的五线船闸, 其尺度可选择290或380m,

以适应停6或8艘大船。表8显示了五线船闸尺度为290m×34m和380m×34m, 调度规则为大船优先过一、五线船闸时的船闸通过能力。与之对比, 采用调度规则为按船舶到达顺序依次过闸, 且五线船闸长度为340m时, 一至五线船闸年单向通过能力为2.33亿t。因此, 五线船闸闸室长度采用340m时的枢纽单向通过能力明显大于290m时的结果, 但与380m时的结果相差不大, 因此五线船闸长度宜取340m。

表8 大船优先过一线和五线船闸规则下的船闸仿真模拟结果

船闸	通过能力/ 万t	闸室 利用率/%	一闸次平均	一闸次平均
			吨位/万t	船舶数/艘
一线	5 330 (5 525)	83.6 (83.6)	1.7943 (1.7907)	4.0 (4.0)
二线	1 840 (1 840)	49.4 (49.0)	0.4408 (0.4414)	2.6 (2.6)
三、四线	8 520 (8 685)	66.9 (67.0)	1.7705 (1.8045)	8.5 (8.3)
五线	7 810 (6 940)	88.0 (86.5)	3.5816 (2.6881)	8.0 (6.0)
合计	23 500 (22 900)			

注: 括号外为五线船闸闸室长380m的结果; 括号内的数字为五线船闸闸室长度290m的结果。

5 结论

1) 以平陆运河2027年建成为假定条件, 长洲枢纽过闸运量在2027年达到峰值2.14亿t, 其中下行1.62亿t; 2050年将增长到2.68亿t, 其中下行运量1.91亿t。

2) 长洲船闸过闸船舶大型化发展明显, 至2021年船舶平均吨位已达到2 580t, 其中5 000吨级船舶的艘次占比快速增长并成为主力船型。未来随着西江航运干线3 000吨级航道的继续开通和向上延伸, 5 000吨级以上的船舶数量会显著增长。

3) 若在二线船闸的位置处建设五线船闸, 则其余一、三、四线船闸的通过能力无法满足船闸改建施工期内过闸运量的需求。即使考虑先改造

一线船闸的阀门和启闭设备, 以适应船闸最大水头 19.2 m 的条件, 一、三、四线船闸的单向通过能力也难以满足预测的 2026 年过闸运量的需求。

4) 按照五线船闸选新闸址建设方案, 闸室平面尺度适宜选择 340 m×34 m。且在五线船闸建成、考虑一、二线船闸年停航 172 d 的情况下, 长洲枢纽一至五线船闸通过能力仍满足远期(2060 年)预测的单向过闸 1.9 亿 t 的需求。若对一线和二线船闸的阀门和启闭设备进行改造, 以适应船闸最大水头 19.2 m 的条件, 枢纽总的单向通过能力可以达到 2.3 亿 t。

5) 在仿真模型中, 对一至四线船闸的两个调度规则为: ①2 000 吨级及以下的小船优先走一、二线船闸, 3 000 吨级及以上的大船优先走三、四线船闸; ②按到达顺序依次过闸。前者与后者相比, 大船闸的通过能力提高了, 但小船闸的通过能力降低了, 同时大船闸的闸室利用率降低了,

(上接第 50 页)

3 结论

1) 通过对连云港赣榆港区近岸滩涂区水动力数值研究, 海堤工程实施的近岸区域在落潮起始时潮位最高, 此时海堤被海水包围; 随着落潮开始, 水位逐渐降低, 6 h 后潮位达到最低, 近岸区域出现露滩现象。

2) 综合考虑海堤所围水体的交换能力和海堤开口位置处最大流速, 在海堤南侧通过结构优化、设置 1 个尺寸 100 m 以上开口通道, 在满足自身结构安全的条件下, 实现近岸滩涂区域水体在落潮作用下全部、快速地流向大海, 实现 1 个潮周期内水体 100% 交换的可能性, 使整条疏港道路达到透水结构的目标, 对工程平面布置具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 张娜, 郭科, 王旭辉, 等. MIKE21-BW 模型在日照港总

船闸总体通过能力相差不大。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院等, 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计成果 [R]. 北京: 中交水运规划设计院, 2010.
- [2] 武汉长江船舶设计院有限公司, 交通运输部珠江航务管理局. 内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第 3 部分: GB 38030.3—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001 [S]. 中华人民共和国交通部. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] 吴澎, 商剑平, 刘春泽, 等. 船闸通过能力的仿真分析方法 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [5] 商剑平, 吴澎, 唐颖. 基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究 [J]. 水运工程, 2011(9): 199-204.

(本文编辑 赵娟)

平面设计方案可行性研究中的应用 [J]. 中国港湾建设, 2007(1): 32-34.

- [2] 何齐齐, 宋丹, 许雪峰, 等. 三门湾海域污染物扩散数值研究 [J]. 海洋通报, 2018, 37(1): 63-73.
- [3] 许婷. MIKE21HD 计算原理及应用实例 [J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.
- [4] 冯静. MIKE 21 FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] 靳玉丹, 张秋丰, 李希彬, 等. 天津海域围填海工程对渤海湾水交换的影响研究 [J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 578-584.
- [6] 左天立, 查雅平, 聂向军, 等. 生态型港口规划理念研究 [J]. 水运工程, 2017(5): 56-61.
- [7] 李希彬, 孙晓燕, 牛福新, 等. 半封闭海湾的水交换数值模拟研究 [J]. 海洋通报, 2012, 31(3): 248-254.
- [8] 李蕊, 姚姗姗, 丁文涛, 等. 基于改善水体交换能力的环抱式长港池布置优化 [J]. 水运工程, 2021(2): 38-43.

(本文编辑 赵娟)