

· 信息技术 ·



北部湾港大型深水航道远期适应性及通航标准仿真分析*

房卓¹, 赵鑫哲¹, 唐国磊², 沈忱¹, 李宜军¹, 甄中函¹

(1. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以北部湾港北海港域30万吨级深水航道工程为背景, 采用智能体仿真建模方法, 建立北海港域铁山进港航道船舶进出港、锚泊、航行和码头停泊作业全过程仿真模型。通过仿真定量分析港口通过能力和航道服务水平等指标, 结合航道平面尺度分析, 提出湾外主航道远期推荐尺度和通航标准。基于港口通过能力瓶颈分析和支航道通航标准优化仿真分析, 提出主要支航道北暮航道部分航段通航标准优化建议。结果表明, 湾外主航道2035年达到(10+5)万t船双向通航, 2050年进一步达到(10+10)万t船双向通航的推荐通航标准; 北暮航道1段通航标准由15万t船舶单向通航优化为兼顾2万t船舶双向通航, 对提升港口通过能力具有较好效果。

关键词: 多智能体仿真; 北部湾港; 港口通过能力; 航道服务水平; 通航标准

中图分类号: U651.3; U653.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0144-08

Simulation of long-term adaptability and navigation standard of large deepwater channel in Beibu Gulf Port

FANG Zhuo¹, ZHAO Xinzhe¹, TANG Guolei², SHEN Chen¹, LI Yijun¹, ZHEN Zhonghan¹

(1. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China;

2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: We present the establishment of a simulation model utilizing multi-agent simulation modeling technology to encompass the ship entry and exit process, mooring, navigation, and wharf berthing operation in the Beihai district of Beibu Gulf Port. By quantitatively analyzing indicators of port throughput capacity and channel service level, we propose the long-term recommended scale and navigation standard of the main channel outside the gulf combining with the analysis of channel plane scale. Based on the analysis of the bottleneck of port throughput capacity and optimization of navigation standards for branch channels, we propose suggestions for optimizing the navigation standards of partial channel of Beimu Channel. The results show that the recommended navigation standards for the main channel should reach (100,000+50,000)t two-way navigation for ships by 2035, and further achieve (100,000+100,000)t two-way navigation by 2050. The navigation standard of the first section of Beimu Channel is optimized from one-way navigation of 150,000 t ships to two-way navigation to balance 20,000 t ships, which has a good effect on improving the port throughput capacity.

Keywords: multi-agent simulation; Beibu Gulf Port; throughput capacity of port; channel service level; navigation standard

收稿日期: 2024-01-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600700)

作者简介: 房卓 (1982—), 女, 博士, 高级工程师, 从事港口规划、仿真及大数据研究。

通讯作者: 赵鑫哲 (1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口规划及仿真研究。E-mail: zhaoxz@tpri.org.cn

北部湾港是《国家综合立体交通网规划纲要》明确的国际枢纽海港,是西部陆海新通道的国际门户港^[1]。北部湾港含防城、钦州、北海三大港域,北海港域是北部湾国际枢纽海港的重要组成,是广西构建面向东盟的国际大通道、打造西部地区开放发展的主要战略支点^[2-3]。

铁山进港航道是支撑北海港域港口发展的重要公共基础设施,在近年北部湾“三港合一”的港口总体规划编制背景下,根据临港产业发展需求,拟将北海铁山进港航道湾外主航道等级提升至 30 万吨级。按 30 万吨级设计的湾外主航道里程长达 93 km,随着未来港口发展建设和船舶流量密度增大,各类船舶之间的通航干扰问题将逐步凸显,船舶通航效率和港口通过能力不足等问题将可能显现。为保障航道规划方案与远期港口通过能力、通航效率相协调,有必要对进港航道适宜建设规模和通航标准进行论证研究,科学支撑港口规划方案制定。

本文采用智能体仿真建模方法,建立远期北海铁山水域船舶进出港和靠离泊全过程仿真模型^[4-5]。通过仿真定量评估远期港口通过能力适应性、航道服务水平等指标,结合航道平面尺度分

析,提出远期湾外 30 万吨级主航道分阶段通航标准推荐方案;基于湾外主航道推荐方案,仿真定量分析港口通过能力瓶颈环节,对湾内主要支航道通航标准进行优化研究,以此提出远期北海铁山水域港口最大通过能力及湾内主要支航道通航标准优化方案。

1 研究基础

北部湾港北海港域包含铁山西港区、铁山东港区、石步岭港区以及若干港点,研究范围及港区分布见图 1。本文涉及的铁山进港航道主要服务于铁山港西港区、东港区两个港区,两个港区规划资源容量大且发展潜力大。其中,铁山港西港区以服务西岸临港产业发展所需的能源、原材料物资运输为主,现有生产性泊位 19 个、年货物通过能力 3 433 万 t,规划泊位数量 118 个、年通过能力约 4.76 亿 t;铁山港东港区以服务东岸直接腹地的临港产业发展所需的干散货、杂货运输为主,现有 1 000 吨级以下泊位 13 个、年货物通过能力为 105 万 t,规划泊位数量 22 个、年通过能力约 0.68 亿 t。



图 1 研究范围和港区分布

船舶流量方面,铁山水域现状每日进港船舶数量为 10~15 艘。根据港口运输需求和船舶流量预测(表 1),预计 2035 年铁山港东港区、铁山港

西港区到港船舶总数量约 8 100 艘,展望 2050 年在资源大部分开发情况下进港船舶总数量将达约 12 800 艘。

表 1 北海海域铁山水域到港船舶数量及船型预测 艘/a

年份	船型	铁山西港区			铁山东港区	合计
		啄罗	北暮	石头埠		
2035	集装箱船	-	1800	-	-	1 800
	油船	770	-	-	-	770
	其中 30 万 t 油船	0	-	-	-	0
	LNG 船	120	-	-	-	120
	化工品船	830	-	-	-	830
	散货船	82	1 155	1 140	440	2 817
	杂货船	-	863	610	310	1 783
	总计	1 802	3 818	1 750	750	8 120
2050	集装箱船	-	3 300	-	-	3 300
	油船	932	-	-	-	932
	其中 30 万 t 油船	140	-	-	-	140
	LNG 船	180	-	-	-	180
	化工品船	1 088	-	-	-	1 088
	散货船	580	1 520	1 550	530	4 180
	杂货船	-	1 470	960	570	3 000
	总计	2 920	6 290	2 510	1 100	12 820

2 仿真模型及主要边界参数

2.1 基于多智能体仿真技术建模

本文基于 AnyLogic 仿真建模平台, 采用智能体仿真建模方法, 利用智能体自主判断的优势, 将港口系统概化为船舶-航道-泊位三者交互的仿真模型, 建立铁山水域船舶进出港、靠离泊全过程仿真模型^[6-7]。该仿真模型由主系统和船舶航行系统组成, 船舶进出港逻辑流程设置见图 2^[8]。根据式(1)~(8), 判断船舶到港、到达泊位和完成作业等船舶进出港状态, 当满足特定条件时, 船舶会从一个状态转到另一个状态。

$$x_{v,en} \geq \bar{d}_i - M(1 - \alpha_{v,i}) \quad (\forall v \in V, i \in I) \quad (1)$$

$$x_{v,en} \leq \bar{d}_i + M(1 - \alpha_{v,i}) \quad (\forall v \in V, i \in I) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_{v,i} = 0 \quad (\forall v \in V^H \cup V^D) \quad (3)$$

$$z_v \geq \sum_{i \in I} \alpha_{v,i} \quad (\forall v \in V) \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V^C} z_v \leq 0.7 |V^C| \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V^O} z_v \leq 0.6 |V^O| \quad (6)$$

$$|x_{v,en} - x_{v',en}| \geq \frac{L}{u} \quad (\forall v, v' \in V) \quad (7)$$

$$|x_{v,ex} - x_{v',ex}| \geq \frac{L}{u} \quad (\forall v, v' \in V) \quad (8)$$

式中: V 为进出港船舶集合; V^H 为进出港超大型船舶集合; V^D 为进出港 5 万 t 以上危险品船集合; V^C 为进出港 5 万 t 以下化学品船集合; V^O 为进出港油船集合; I 为夜间时段集合; $[d_i, \bar{d}_i]$ 为第 i 个夜间时段; M 为一个足够大的常数; $x_{v,en}$ 和 $x_{v',en}$ 分别为船舶 v 和 v' 进港进入航道时间(船舶 v 和 v' 为相邻两艘船舶), 连续变量; $x_{v,ex}$ 和 $x_{v',ex}$ 表示船舶 v 和 v' 出港进入航道时间, 连续变量; z_v 为船舶 v 是否夜航的 0-1 变量; $\alpha_{v,i}$ 为辅助变量, 判断船舶 v 是否夜航, 为 0-1 变量; L 为船长; u 为船舶航速。

式(1)~(3)为约束 1, 即超大型船(船舶载质量 ≥ 25 万 t)、5 万 t 以上危险品船不允许夜航; 式(4)~(6)为约束 2, 即 5 万 t 以下的 70% 的化学品船、60% 的油船不允许夜航; 式(7)、(8)为约束 3, 即船舶的安全间距。

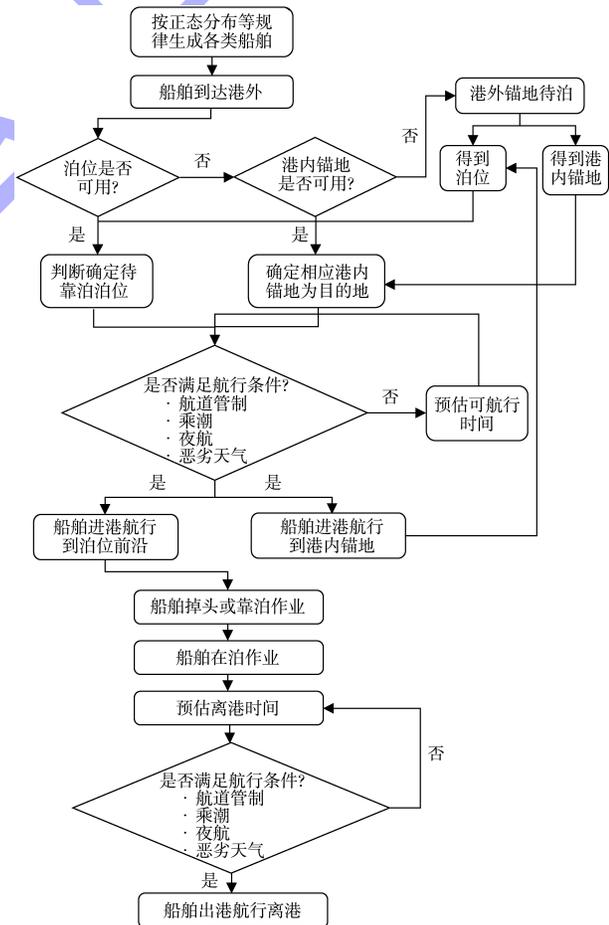


图 2 船舶进出港逻辑流程

2.2 模型主要边界条件

2.2.1 航道边界

铁山进港航道包括铁山港湾外航道、湾内支航道(含北暮航道、北暮外航道、石头埠航道), 现状进港航道为 10 万吨级、湾内航道为 3.5 万吨级。根据现状航道船舶通航航路和 30 万吨级航道设计资料, 远期船舶进出港航路设置按如下考虑:

10 万 t 及以下船舶在现状 10 万吨级航道附近上、下线, 10 万(不含)~20 万 t 船舶从 20 万吨级航道起点上、下线; 25 万 t 以上的大型船舶从 30 万吨级航道起点上、下线。航道走向及分段设置、万吨级船舶上下线点设置见图 3, 航道分段通航等级及通航标准设置见表 2。

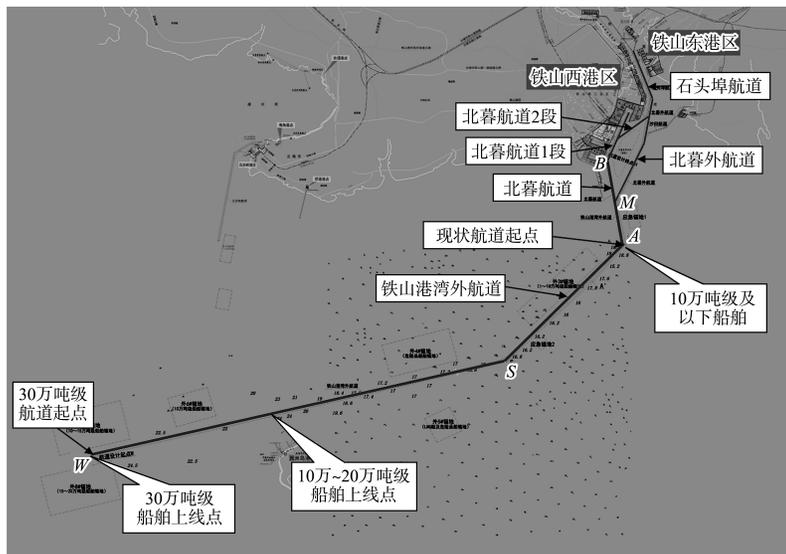


图 3 30 万吨级航道船舶上下线

表 2 进港航道分段通航等级及通航标准设置

分段航道	航道等级/ 万 t	湾外航道 长度/km	分段通航标准
铁山港湾外航道(W—S、S—A、A—M段)	30	93.035	30 万 t 船舶单向, 双向通航标准分析后待定
北暮航道(M—B 段)	30	7.765	30 万 t 船舶单向, 双向通航标准分析后待定
北暮航道 1 段(啄罗 2 号突堤—北暮 3 号港池)	15	-	15 万 t 船舶单向
北暮航道 2 段(啄罗 2 号突堤—北暮外航道)	20	-	20 万 t 船舶单向
北暮外航道	20	-	20 万 t 船舶单向, 10 万 t 船舶双向
石头埠航道	5~20	-	150 m 航宽段: 5 万 t 船舶单向; 270 m 航宽段: 20 万 t 船舶单向
雷田航道	0.5~1	-	0.5 万~1 万 t 船舶单向
沙田航道	5	-	5 万 t 船舶单向

2.2.2 船舶流量分配

基于表 1 的分港区和作业区船舶流量预测结果, 兼顾考虑降低西线北暮航道的船舶通行压力, 对 2035、2050 年分航路船舶流量进行分配。

3 湾外 30 万吨级主航道适宜通航标准分析

根据不同的港口发展阶段和通航标准, 共设计 6 组仿真计算工况, 见表 3。通过仿真计算得出港口通过能力、航道服务水平等指标^[9-11], 结合航道平面尺度和分阶段投资合理性分析, 提出铁山进港航道主航道推荐通航标准。

表3 湾外30万吨级主航道适宜通航标准分析仿真工况设计

工况	港口发展水平年	到港船舶流量/(艘·a ⁻¹)	30万吨级主航道通航标准
1	2035	8 100	30万t船舶单向,(5+5)万t船舶双向
2	2035	8 100	30万t船舶单向,(10+5)万t船舶双向
3	2035	8 100	30万t船舶单向,(10+10)万t船舶双向
4	2050	12 800	30万t船舶单向,(5+5)万t船舶双向
5	2050	12 800	30万t船舶单向,(10+5)万t船舶双向
6	2050	12 800	30万t船舶单向,(10+10)万t船舶双向

注:(10+5)万t船舶双向为10万t船舶和5万t船舶可双向通航的简称,以此类推。

3.1 港口通过能力适应性仿真分析

工况1~6不同通航标准下通过的船舶数量及其占比(仿真通过船舶数量/预测数量)的仿真结果见图4。针对2035年预测港口发展规模,30万吨级主航道段在(10+5)万t船舶双向通航及以上通航标准情况下,通过船舶数量占预测数量的比例接近100%,可以满足2035年港口通过能力需求。针对2050年预测港口发展规模,在不同工况下通过船舶数量占预测数量的比例为76%~80%,难以满足2050年港口通过能力需求。

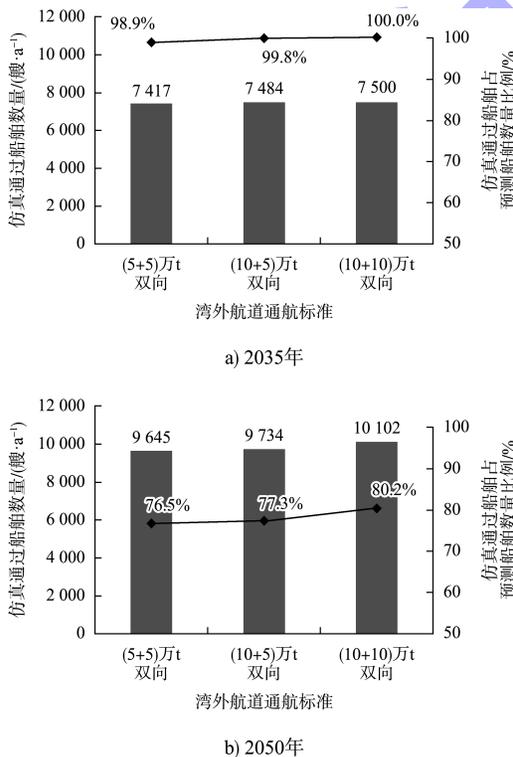
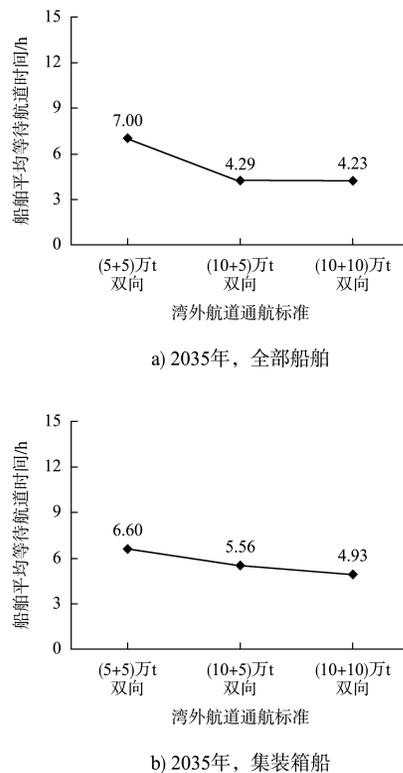


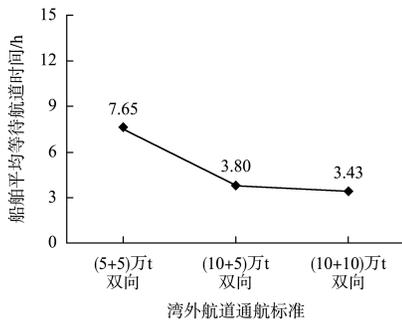
图4 工况1~6仿真通过船舶数量及占比

3.2 航道服务水平仿真分析

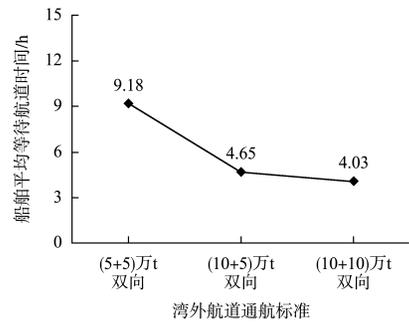
2035年船舶进港平均等待时间仿真结果见图5a)~c)。由计算结果可见,针对2035年港口发展需求,保障(10+5)万t船舶双向通航对于提升航道服务水平效果较优。其中,主航道通航标准由(5+5)万t提升到(10+5)万t船舶双向通航时,各类船舶进港等待航道平均时间由7.00h降为4.29h,降幅达39%,效果较明显;由(10+5)万t提升到(10+10)万t船舶双向通航时,船舶进港等待时间降幅为1.4%、降幅有限。

2050年船舶进港平均等待时间仿真结果见图5d)~f)。由计算结果可见,针对2050年港口发展需求,保障(10+10)万t船舶双向通航对于提升航道服务水平效果较优。其中,主航道通航标准由(5+5)万t提升到(10+5)万t船舶双向通航时,各类船舶进港等待航道平均时间由9.86h降为5.96h,降幅为40%,集装箱船进港等待时间由7.78h降为6.90h,等待时间较长且改善效果不显著;由(10+5)万t提升到(10+10)万t船舶双向通航时,各类船舶进港等待平均时间降幅为11%,集装箱船进港等待时间降幅达28%,效果较优。



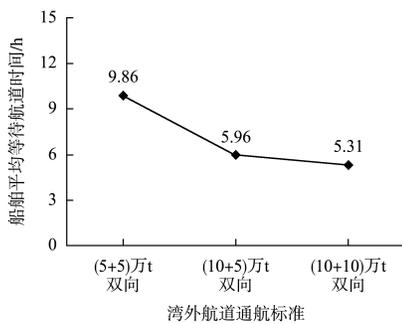


c) 2035年, 散杂货船

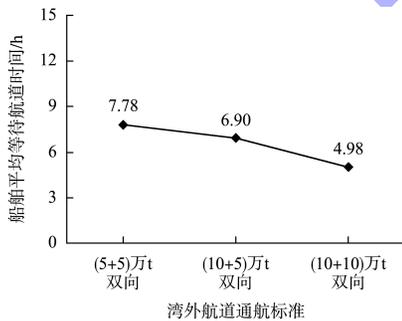


f) 2050年, 散杂货船

图 5 船舶进港平均等待航道时间



d) 2050年, 全部船舶



e) 2050年, 集装箱船

3.3 航道平面尺度分析

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[12] 6.4.2 条, 对 30 万吨级主航道在不同设计代表船型和通航标准下的航道宽度尺度进行测算, 结果见表 4。可以看出, 30 万吨级油船单向航道设计通航宽度为 368 m, 可同时兼顾(5+5)万 t 各类船舶双向通航, 按此宽度设计工程投资相对经济合理; 若航道兼顾(10+5)万 t 船舶双向通航或更高, 需要在 30 万 t 油船单向航道基础上进一步拓宽, 工程投资相应增大。

基于 3.1~3.3 节的研究结果, 在保障一定的港口通过能力和航道服务水平基础上, 立足尽量降低工程投资, 推荐铁山进港航道 30 万吨级主航道采用如下通航标准: 2035 年, 保障(10+5)万 t 船双向通航的尺度比较合理; 2050 年, 视港口船舶流量和船舶大型化发展需要, 进一步拓宽至保障(10+10)万 t 船双向通航尺度比较合理。

表 4 铁山进港航道湾外 30 万吨级主航道尺度测算

设计代表船型和通航标准	设计船长/m	设计船宽/m	船舶漂移倍数	风、流压偏角/(°)	航迹带宽度/m	通航宽度/m
30 万 t 船舶单向	334	60.0	1.59	10	187.62	368
(10+10)万 t 船舶双向	250	43.0	1.59	10	137.40	404
(10+10)万 t 油船双向	246	43.0	1.59	10	136.29	445
(10+10)万 t 集装箱双向	346	45.6	1.59	10	168.03	450
(10+5)万 t 散货船双向	250, 223	43.0, 32.3	1.59	10	137.40, 112.90	379
(10+5)万 t 油船双向	246, 229	43.0, 32.2	1.59	10	136.30, 114.40	423
(10+5)万 t 集装箱船双向	346, 293	45.6, 32.2	1.59	10	168.00, 132.10	414
(5+5)万 t 散货船双向	223	32.3	1.59	10	112.90	323
(5+5)万 t 油船双向	229	32.2	1.59	10	114.40	358
(5+5)万 t 集装箱船双向	293	32.2	1.59	10	132.10	345

4 湾内主要支航道通航标准优化分析

4.1 港口通过能力瓶颈仿真分析

根据港口通过能力仿真计算结果，2050年在30万吨级主航道不同通航标准下，全年仿真港口通过船舶数量占预测数量的比例在76%~80%。根据仿真结果，未完成进出港作业的船舶分布在拟

靠泊北暮作业区的集装箱船、啄罗作业区的化工品船及石头埠作业区的散杂货船，其中北暮作业区集装箱船所占比例达35%~47%，占未完成进出港作业船舶的比例最高。在不同的通航标准下，2050年未进港船舶船型作业区分布及比例的仿真结果见图6。

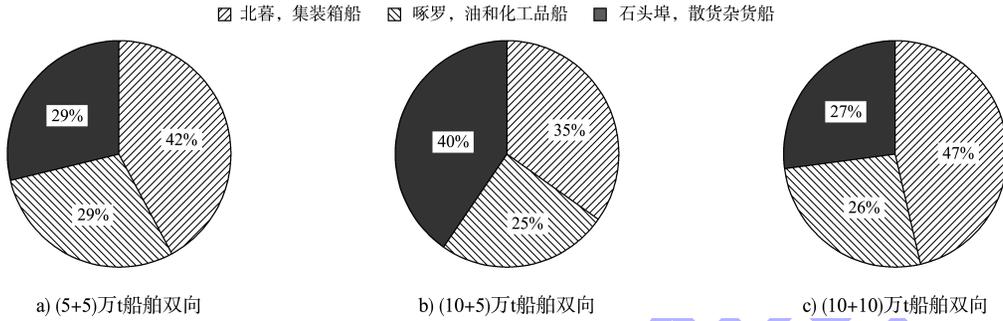


图6 2050年未进港船舶船型及作业区分布比例

4.2 支航道通航标准优化仿真分析

从通往北暮、啄罗及石头埠作业区的主要支航道通航标准来看，石头埠航道、北暮航道1段(啄罗作业区2号突堤—北暮外航道)、北暮航道2段(啄罗2号突堤—北暮3号港池)目前规划为单向通航。兼顾通航宽度合理尺度，这3段支航

道可兼顾部分船型双向通航，石头埠航道可兼顾5万吨散货船双向通航，北暮航道2段可兼顾5万吨散货船双向通航，北暮航道1段可兼顾2万吨集装箱船双向通航。按以上支航道通航标准优化考虑，共设计3组仿真工况，见表5。

表5 主要支航道通航标准优化仿真工况设计

工况	港口发展水平年	预测到港船舶流量/(艘·a ⁻¹)	湾外主航道等级及推荐通航标准	支航道名称	规划通航标准	通航标准优化考虑
7	2050	12 800	30万吨船舶单向、(10+10)万吨船舶双向	石头埠航道	20万吨船舶单向(航道宽度270m)	20万吨船舶单向 兼顾5万吨散货船双向(航道宽度282m)
8	2050	12 800	30万吨船舶单向、(10+10)万吨船舶双向	北暮航道2段	20万吨船舶单向(航道宽度270m)	20万吨船舶单向 兼顾5万吨散货船双向(航道宽度282m)
9	2050	12 800	30万吨船舶单向、(10+10)万吨船舶双向	北暮航道1段	15万吨船舶单向(航道宽度230m)	15万吨船舶单向 兼顾2万吨集装箱船双向(航道宽度238m)

支航道通航标准优化后的港口通过能力仿真计算结果见图7。可以看出，工况9北暮航道1段通航标准优化对于提升港口通过能力的效果最优，由此预计远期铁山水域港口最大通过船舶艘次能力可达10 320艘/a。建议在规划阶段，推荐北暮航道1段(啄罗2号突堤—北暮3号港池)航道设计尺度和通航标准按兼顾2万吨集装箱船舶进行优化。

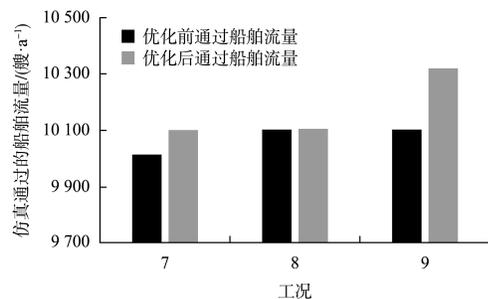


图7 主要支航道通航标准优化前后通过能力仿真结果

5 结论

1) 基于智能体仿真建模平台, 建立 2035、2050 年北部湾港北海港域规划 30 万吨级深水航道船舶进出港、锚地、航道和码头生产组织实施全过程的港口运营系统仿真模型。

2) 综合港口通过能力、航道服务水平仿真分析和合理航道建设尺度分析, 提出铁山进港航道湾外规划 30 万吨级主航道推荐尺度和通航标准: 2035 年航道宽度达 (10+5) 万 t 船舶双向通航的尺度比较合理, 2050 年可视港口船舶流量和船舶大型化发展需要, 进一步拓宽至满足 (10+10) 万 t 船舶双向通航的尺度比较合理。

3) 通过港口通过能力瓶颈仿真分析, 研究提出铁山进港航道湾内主要支航道推荐通航标准和港口最大通过能力: 将北暮航道 1 段 (啄罗 2 号突堤—北暮 3 号港池) 通航标准由 15 万 t 船舶单向通航优化为兼顾 2 万 t 船舶双向通航, 对提升港口通过能力具有较好效果; 预计远期铁山水域港口最大通过船舶艘次能力可达 10 320 艘/a, 未来视船舶大型化发展和管理规则的不断优化, 港口通过能力仍将有进一步提升空间。

参考文献:

- [1] 庞革平, 庞雯文. 服务新通道 打造门户港 广西大力推进北部湾港建设[J]. 人民周刊, 2022(15): 87-88.
- [2] 田佳, 沈益华, 王宗文, 等. 新时期建设北部湾国际门户

港的若干思考[J]. 水运工程, 2022, (4): 54-57, 64.

- [3] 潘竹萍, 杨煜航. 北部湾港: 西部陆海新通道高质量发展助力共建“一带一路”[J]. 中国港口, 2023(11): 20-24.
- [4] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 多智能体航道通航标准仿真技术[J]. 水运工程, 2016(5): 116-120.
- [5] TANG G L, YU J J, LI N N, et al. Multi-agent microscopic simulation based layout design for Lushun ro-pax terminal[J]. Simulation modelling practice and theory, 2019, 96: 101942.
- [6] 沈忱, 赵晓艺, 齐越, 等. 复杂水域船舶进出港全过程仿真建模方法[J]. 港工技术, 2020, 57(1): 12-17.
- [7] 马晓雪, 冯敏, 张哲, 等. 基于 AIS 和 Anylogic 的 LNG 船舶对通航及港口服务水平的影响[J]. 水运工程, 2023(1): 64-69.
- [8] 房卓, 左天立, 王达川, 等. 连云港港主航道远期适应性及通航标准[J]. 水运工程, 2017(10): 160-165, 185.
- [9] 李绍武, 曾冬, 祁泽鹏. 秦皇岛港航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2016(11): 108-113.
- [10] SHANG J P, WANG W Y, PENG Y, et al. Simulation research on the influence of special ships on waterway through capacity for a complex waterway system: a case study for the port of Meizhou Bay [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2019, 96(4): 387-402.
- [11] 唐颖, 薛晓晓, 商剑平. 广州港深水航道通过能力仿真分析[J]. 水运工程, 2016(10): 157-161.
- [12] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

(本文编辑 王璁)

(上接第 130 页)

- [5] 周作付, 何健华, 邓年生, 等. 受人工采砂影响明显的河段基本站设计最低通航水位计算的探讨[J]. 水运工程, 2003(8): 33-36.
- [6] 湖北省港航管理局. 湖北省航道规划报告 (2035 年) (报批稿)[R]. 武汉: 湖北省港航管理局, 2020.
- [7] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [9] 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆西南水运工程科学研究所. 汉江兴隆—蔡甸段 2000 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: 重庆西科水运工程咨询中心, 2022.

(本文编辑 王璁)