



# 基于多要素比选的连云港港 LNG 接收站码头选址\*

房卓<sup>1,2</sup>, 姚海元<sup>1,2</sup>, 王达川<sup>1</sup>, 李宜军<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>

(1. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 2. 综合交通规划数字化实验室, 北京 100028)

**摘要:** 基于多智能体仿真建模方法建立连云港港 LNG 码头选址涉及相关港区船舶进出港全过程仿真模型, 对拟选址的 LNG 码头船舶进出可能产生的远期通航影响进行定量评估, 并与已有选址相关研究结论进行对比; 综合分析航道条件、选址与后方城市距离、通航影响等多要素, 提出在现行通航规则和港口规划条件下的连云港港 LNG 码头推荐港址。本研究所采用的方法和结论可为区域 LNG 码头布局规划提供技术支撑。

**关键词:** 连云港港; LNG 码头; 选址; 系统仿真; 要素

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0066-07

## Selection of Lianyungang Port LNG terminal's location based on comprehensive analyses of multiple essential factors

FANG Zhuo<sup>1,2</sup>, YAO Hai-yuan<sup>1,2</sup>, WANG Da-chuan<sup>1</sup>, LI Yi-jun<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>

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

2. Laboratory for Traffic & Transport Planning Digitalization, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Based on the multi-intelligence simulation modeling method, we establish the whole process simulation model on ship's in/out of relative areas of Lianyungang Port, by which we quantitatively evaluate the possible long-term impact on navigational induced by the LNG terminal, and compare the result with existed research conclusions. By comprehensive comparison of essential factors including waterway conditions, location and rear city distance, navigation impact, etc., we propose the recommended site of the LNG terminal of Lianyungang Port. The analysis method and conclusion proposed provide technical support for the layout planning of regional LNG terminals.

**Keywords:** Lianyungang Port; LNG terminal; site selection; system simulation; essential factor

为保障苏北地区供气安全、完善储气调峰设施建设, 初步考虑在连云港港选择一处 LNG 接收站港址。目前, 国内针对 LNG 船舶进出港航行采取提前封航、航道单向管制等措施, 以满足 LNG 船舶进出港的移动安全区要求, 因此 LNG 船舶进出对港口其他生产性船舶的运营会产生影响。为保障港口资源的充分和有效利用, LNG 站选址须科学、定量论证, 最大程度地降低选址对港区远期发展的影响<sup>[1-3]</sup>。

已有文献主要针对连云港港相关港区航道条件开展研究: 顾勇、马兴华等<sup>[4-5]</sup>对连云港港

30 万吨级航道工程可行性及建设主要技术问题进行研究; 应铭等<sup>[6]</sup>对连云港和徐圩港区航道回淤情况进行数模研究, 并提出回淤规律和回淤机理; 纪为刚等<sup>[7]</sup>对连云港港徐圩港区自然条件、港口环境等通航环境进行分析; 房卓等<sup>[8-9]</sup>采用仿真方法对连云港和徐圩港区的主航道适应性和通航标准进行研究, 并对赣榆港区 LNG 码头通航影响进行定量研究。

本文采用多智能体仿真建模方法建立 LNG 码头选址涉及相关港区船舶进出港作业全过程的仿真模型, 定量评估不同选址 LNG 船舶进出港对远

收稿日期: 2021-03-08

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0201200、2021YFB2600700)

作者简介: 房卓(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 从事港口规划、大数据及新型港口水工结构物研究。

期港口通航效率的影响; 并通过对港址条件、通航影响、港口功能定位等进行多要素对比, 提出推荐港址。

1 港口概况

连云港港目前已初步形成以连云港区为主体, 以徐圩、赣榆、灌河港区为两翼的“一体两翼”总体发展格局。截至 2019 年底, 共有万吨级及以上经营性生产性泊位 78 个, 综合通过能力 1.7 亿 t, 最大靠泊等级 25 万吨级。

根据发展需要, 初步考虑在港区 A 或港区 B 选择 1 处 LNG 接收站码头港址(图 1)。其中, 港区 A 选址 LNG 船舶进出与周边港区 C 共用主航道, 因此港区 A 选址将涉及 2 个港区及周边水域的船舶进出港(图 2); 港区 B 选址及其对港口可能产生的远期通航效率影响已有研究。

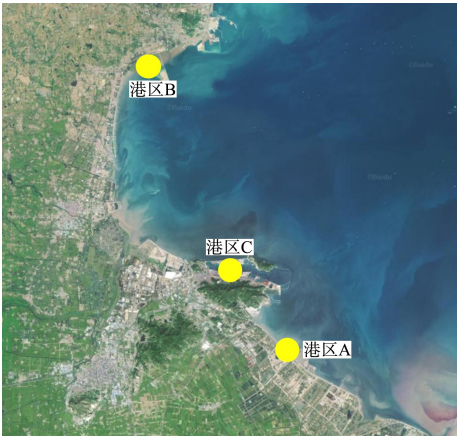


图 1 连云港港沿海港区分布

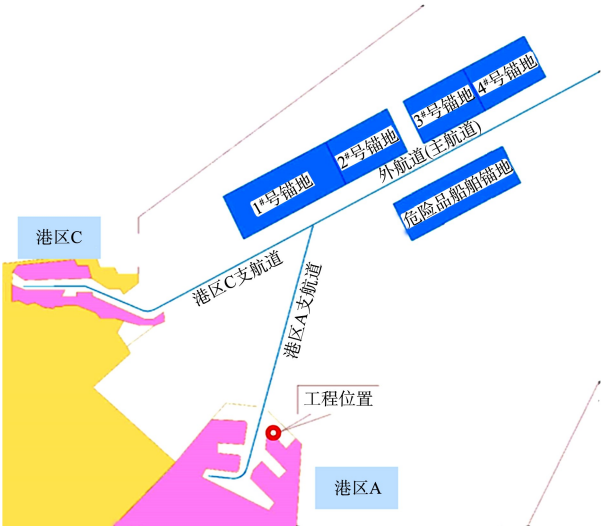


图 2 港区 A LNG 码头初步选址

在码头设施建设方面, 港区 A 生产性泊位 11 个, 综合通过能力 3 794 万 t; 港区 B 生产性泊位 4 个, 综合通过能力 880 万 t; 港区 C 生产性泊位 51 个, 综合通过能力 1.1 亿 t。

2 仿真研究

2.1 模型

采用多智能体仿真模拟方法<sup>[10]</sup>建立港区 A、C 船舶进出港作业全过程的仿真模型, 模拟涵盖 2 个港区生产性船舶进出港、通航规则(船舶乘潮规则、进出港优先级、夜航限制等)、锚地和装卸等诸多要素。船舶进出港逻辑流程设计见图 3。

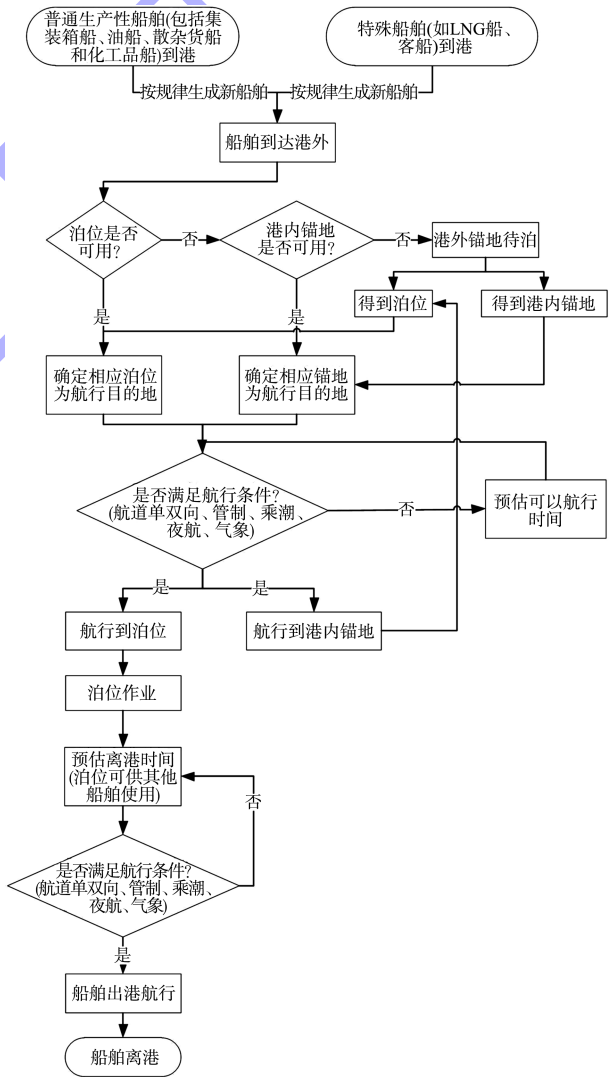






图 3 船舶进出港逻辑流程

模型包含 100 余个参数、变量及行为逻辑函数控件, 包括 2 个子系统: 1) 主系统, 用于设定整个港口作业流程各环节参数, 包括初始化模型、

定义参数、定义控件功能等；2) 船舶航行系统，船舶智能体状态流程、船舶上下线点选择等。主要用于判断船舶进出港行为的逻辑流程部分，包括主要控件及功能见表 1。

表 1 模型主要控件及功能

类别	控件功能	主要内容
 参数	用于定义船舶智能体生命周期内涉及的所有基本信息	①船舶序号;每艘船舶的独有标识; ②船舶到港;各类船舶的生成规律; ③船型数据;船舶吨级和作业时间等; ④航行目的地;船舶的目标装卸港区; ⑤船舶走向;决定船舶进出港航道
 变量	用于记录在仿真过程中船舶的动态变化信息	①泊位变量; ②港内锚地变量; ③港外锚地变量; ④航行时间预测值变量
 行为逻辑函数	用于船舶在每一个航行节点的逻辑判断	①船舶乘潮计算函数;推算需要乘潮进出港的船舶的进出港时间; ②进港准备;判断满足进港条件则进港,否则在港外待泊; ③航行判断;根据日夜、潮汐、天气等条件,判断船舶是否可以航行; ④预定船舶进出港时间;根据各项条件预定船舶进出港时间
 事件	触发某一事件的开始/结束	①模型初始化; ②白天开始/白天结束; ③大风开始/大风结束; ④潮汐开始; ⑤集装箱船到达

2.2 主要参数

2.2.1 船舶流量预测

根据港口规划，结合国际船型发展趋势，设定不同货类、不同吨级船型的装载率，预测港区 A、C 港口规划实施后远期进出 2 个港区船舶约

4 万艘次/a；远期进出港区 B 船舶约 2.85 万艘次，预测结果见表 2。参考国内已投产 LNG 接收站运营实际，结合港区 A 的 LNG 接收站远期发展模式，预测远期到港 LNG 船舶数量，预测结果见表 3。

表 2 生产性船舶进出港数量预测(规划全部实施后)

船舶吨级	港区 A、C				港区 B				艘次
	集装箱	油船	化工品船	散杂货船	集装箱	油船	化工品船	散杂货船	
(0,1 万]	3 460	2 400	4 094	4 760	1 100	4 000	4 600	7 600	
(1 万,5 万]	7 700	1 460	2 766	7 720	2 000	900	1 200	5 100	
(5 万,10 万]	1 280	260	40	2 540	350	260	0	1 100	
(10 万,20 万]	60	30	0	760	50	40	0	200	
(20 万,30 万]	0	350	0	120	0	0	0	0	
合计	12 500	4 500	6 900	15 900	3 500	5 200	5 800	14 000	

表 3 LNG 船到港船舶数量预测

船型/万 m <sup>3</sup>	到港船舶数量/艘次	
	年接卸 300 万 t	年接卸 600 万 t
26.6	2	6
21.0	8	18
17.5	16	30
14.7	11	18
合计	37	72

2.2.2 远期航道尺度及通航标准

根据港口规划，港区 A、C 航道由 30 万 t 推荐航线、外航道(主航道)、港区 C 支航道和港区 A 支航道组成，规划航道尺度见表 4。根据研究，连云港港主航道(30 万吨推荐航线-外航道段)通航标准为 30 万吨级船舶单向通航、10 万吨级和

5 万吨级船舶双向通航比较合理。上述标准作为研究的规则参数标准。

表 4 港区 A、C 水域航道规划尺度			
航段	有效宽度/m	通航水深/m	长度/km
30 万 t 推荐航线	700~1 000	25. 9	64. 5
外航道	345	25. 3	35. 6
港区 C 支航道	285/305	25. 2	17. 3
港区 A 支航道	350	24. 6	17. 6

2.2.3 船舶到港规律

对港区现状到港船舶数量分布进行统计, 结果见图 4。从图 4 可知, 船舶到港规律服从正态分布:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \tag{1}$$

式中:  $\mu$  为日到港船舶流量均值, 标准差  $\sigma=5.2$ 。因此本研究假设远期港区 A、C 的日到港船舶数量服从正态分布规律。

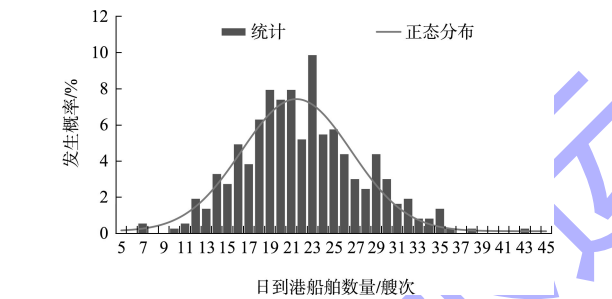


图 4 船舶到港数量分布

2.2.4 LNG 船舶进出港时间

根据港区实测流速及液化天然气码头设计规范要求, 在正常天气条件下, 水流不影响 LNG 进出港航行和靠离泊作业, 可在日间全潮通航。

2.2.5 LNG 船舶移动安全区及通航影响机制

根据沿海港口 LNG 船舶通航的一般规则, LNG 船进出港均需设移动安全区, 前后取 1 n mile、左右各 300~500 m。

LNG 船进港: 主要是对拟出港船舶造成延误影响, 港区 C 平均需提前 1.5 h 禁止船舶出港, 待 LNG 船进入航道约 1 h 后解除管制, 全程管制时间 2~3 h; 港区 A 管制时间 4~5 h。

LNG 船出港: 主要是对在锚地等待拟进港船舶造成延误影响, 位于不同锚地区域船舶的提前管制和结束管制时间不同。

2.2.6 船舶进出港航路

根据港区 A、C 船舶进出港航行轨迹, 结合航道规划, 进出港航路按如下设定: 5 万吨级以下船舶从 3<sup>#</sup> 锚地附近上下线, 5 万~15 万吨级船舶从 4<sup>#</sup> 锚地附近上下线, 15 万~25 万吨级船舶从 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 锚地附近上下线, 25 万吨级以上的大型船舶从远期规划的 30 万吨级航道起点上下线。LNG 船属于浅吃水船舶, 对航道水深要求相对较低, 可考虑经 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 锚地附近上下线(图 5)。

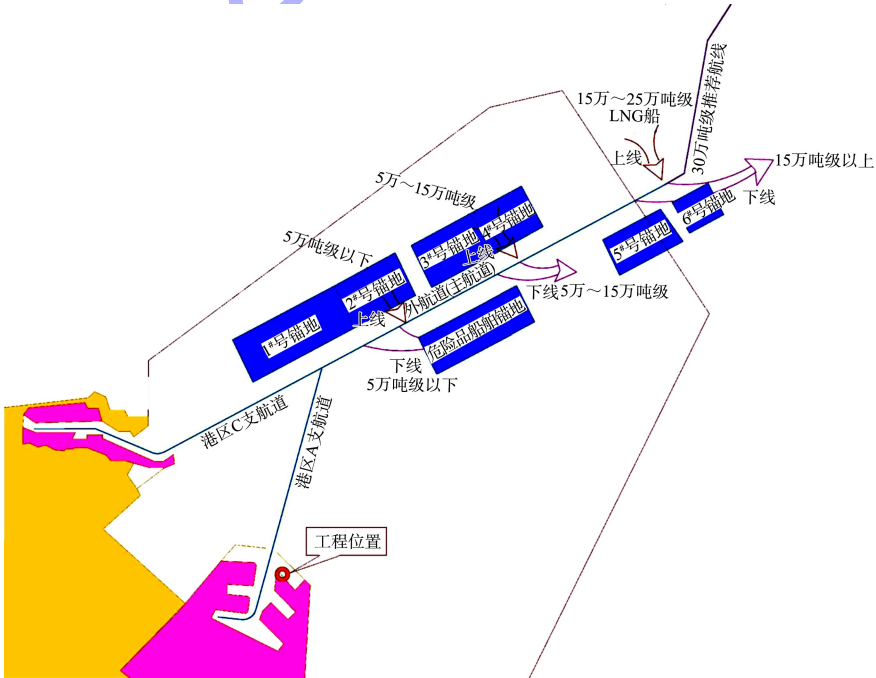


图 5 港区 A 选址周边水域船舶航路及船舶上下线点

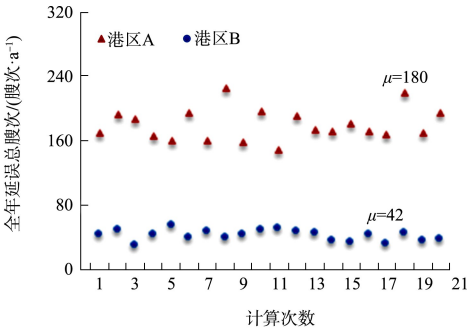
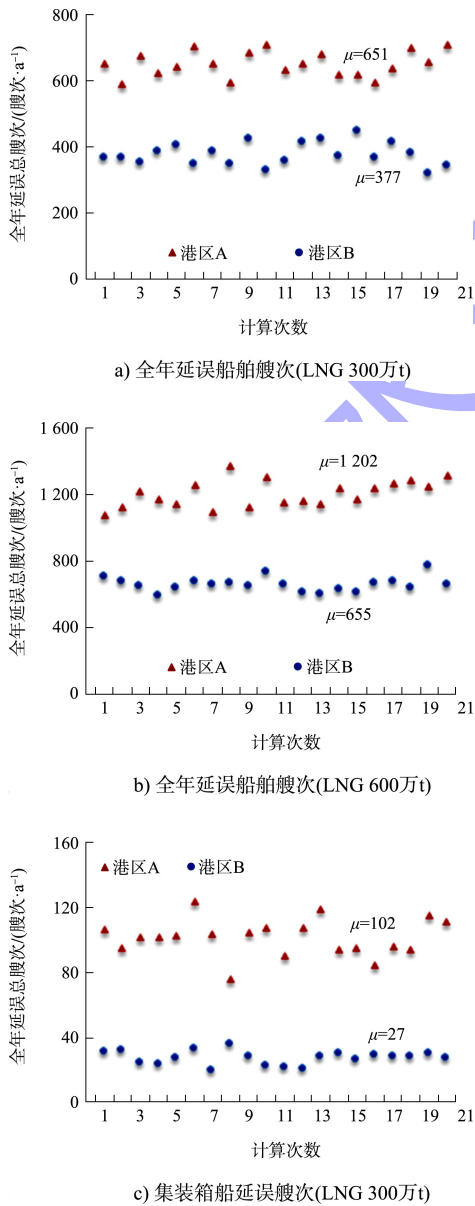


2.3 港区 A、B 选址通航影响对比分析

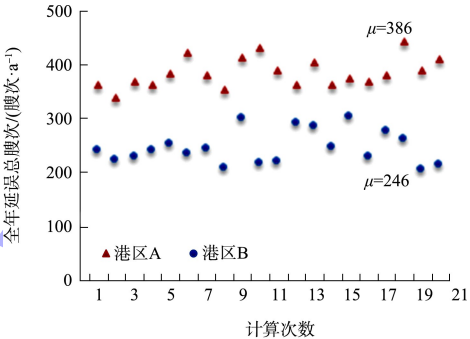
针对港区 A 的 LNG 码头选址船舶进出港仿真计算共设计 2 组工况：在港口规划实施后，LNG 年运营规模 300 万和 600 万 t。每组工况进行 20 次仿真模拟，一次计算周期为 1 a，可得到不同运营规模下的船舶延误艘次、LNG 船单次进出港影响艘次、分船型延误时间等 3 项指标。并将指标计算结果与港区 B 的 LNG 码头选址同工况研究结果进行对比分析。

2.3.1 船舶延误艘次影响

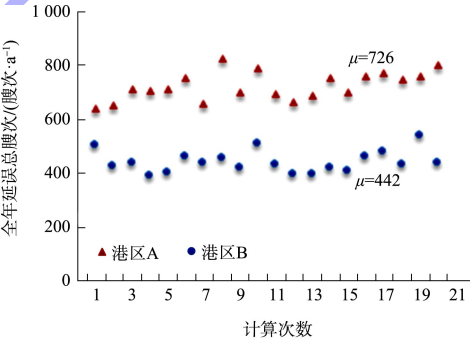
港区 A、B 2 处选址 LNG 船舶通航导致港区各类船舶延误的全年延误总艘次、分船型全年延误艘次的计算结果及对比见图 6。



d) 集装箱船延误艘次(LNG 600 万 t)



e) 油及液化品船延误艘次(LNG 300 万 t)



f) 油及液化品船延误艘次(LNG 600 万 t)

注： $\mu$  为均值。

图 6 2 处选址的 LNG 船通航对所在港区各类船型延误艘次影响统计对比

在全年延误总艘次方面，当港口规划实施后，港区 A 选址 LNG 船舶通航产生的船舶延误艘次是港区 B 址的 1.7~1.8 倍。在分船型延误艘次方面，港区 A 选址 LNG 船舶通航对各类船型的延误影响均大于港区 B 选址。

2.3.2 LNG 船单次进出港影响

港区 A 选址 LNG 船单次进出港延误船舶艘次的仿真记录(LNG 年进口规模 300 万 t 为例,20 次计算结果)见图 7。从图 7 可见，LNG 船每次通航影响程度具有随机性，因此须对 LNG 船单次进出

港影响的船舶数量分布概率进行统计。

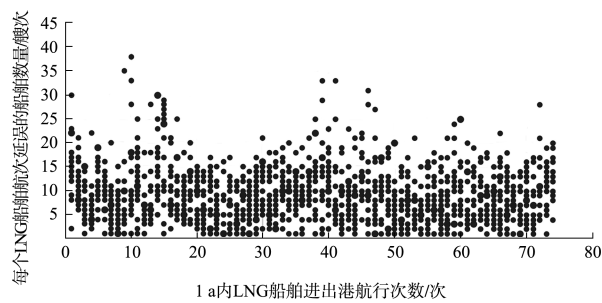


图 7 LNG 船通航延误的船舶数量仿真记录 (LNG 300 万 t)

2 处选址 LNG 船舶进出港单航次影响的船舶艘次分布概率对比见图 8。以 LNG 进口规模 300 万 t 为例, 港区 A 的 LNG 船舶单航次延误的船舶在 10~20 艘次的概率最高 (38%), 其次为 5~10 艘次 (33%); 港区 B 的 LNG 船舶单航次延误的船舶在 0~5 艘次的概率最高 (58%), 其次为 5~10 艘次 (20%)。港区 A 选址 LNG 船舶单航次的通航影响更大。

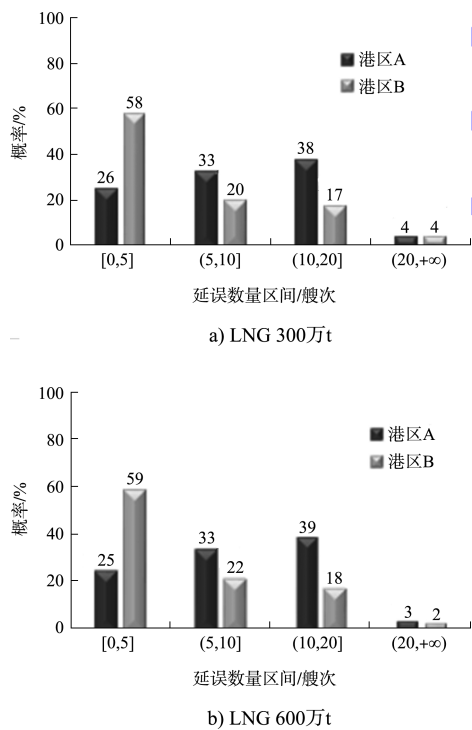
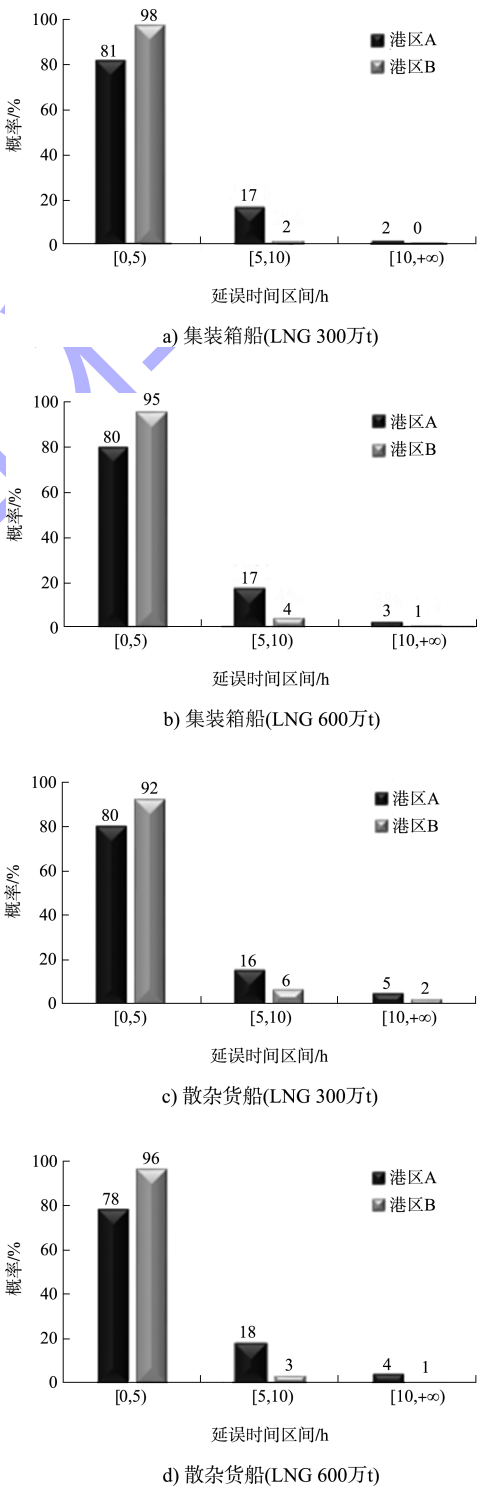


图 8 LNG 船每航次进出港延误的船舶数量对比

2.3.3 船舶延误时间

2 处选址的分船型船舶延误时间的分布统计计算结果见图 9。2 处选址的单船延误时间影响主要分布在 0~5 h 内; 但港区 A 选址单船延误 5~10 h

的发生概率较高, 以集装箱船为例, 港区 A 选址的单船延误 5~10 h 的概率达 17%, 港区 B 选址仅为 2%; 此外, 2 处港址的极端延误情况可超过 10 h, 油船和液体化工品船延误时间超过 5 h 的船舶比例大于集装箱船和散杂货船, 这是由于油船及液体化工品船的夜航限制, 若因 LNG 船的管制无法及时进出港, 须推后 1 d 或以上时间才能进出港。



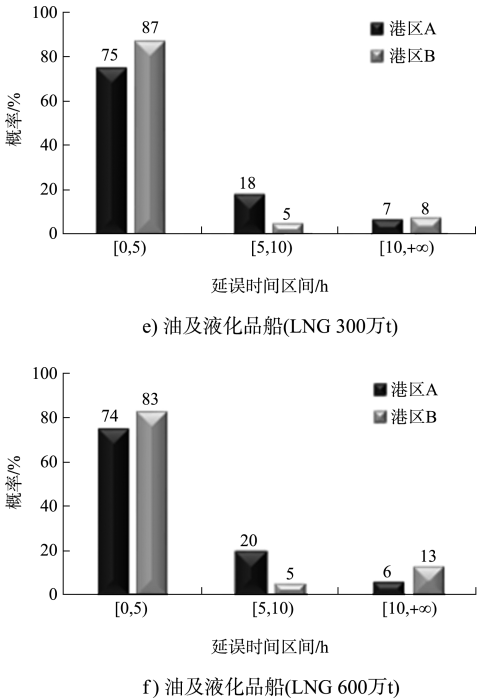


图 9 分船型单船延误时间分布

3 选址综合对比

在通航影响对比分析的基础上，从规划情况、航道条件、选址与后方城市距离、通航影响等多方面要素，对 2 处选址的港址条件进行对比，结果见表 5。

在航道条件方面，现状 2 处选址所在港区均为 10 万吨级航道，通航宽度和底高程尚无法满足 21 万~27 万 m<sup>3</sup> LNG 船舶通航条件，规划航道均可满足。在 LNG 选址与后方城市协调性方面，2 处选址与后方城市距离在 5 km 以上，满足《石油天然气工程设计防火规范》中相关距离要求。在 LNG 船舶对港区船舶通航影响方面，无论是在远期延误船舶数量还是各类船型延误时间方面，港区 A 选址影响均大于港区 B。为此，在现行通航规则和港口规划条件下，总体推荐港区 B 选址作为 LNG 接收站码头的推荐港址。

表 5 2 处选址条件对比

LNG 码头选址	涉及港区	港区功能定位	现状	规划	与后方城市距离/km	全年延误的进出港船舶数量	单船平均延误时间/h
A	A	近期以服务临港产业为主,远期发展成为服务腹地经济和临港产业的大型综合性港区	10 万吨级航道,底高程-13.3 m,通航宽度 210~240 m,长度 24.9 km	外航道外段为 30 万吨级航道,内航道为 15 万吨级,通航宽度 350 m,底高程-21.7 m	>7	589~708	3.7
	C	-	25 万吨级	30 万吨级	-		
B	B	以服务临港工业起步,逐步发展成为后方临港工业和腹地经济服务的综合性港区	10 万吨级航道,底高程-13.5 m,通航宽度 255 m,长度 16.4 km	15 万吨级油船单向通航,底高程-17.5 m,通航宽度按 335 m	>5	321~447	2.7

4 结论

- 1)采用多智能体仿真方法，建立模拟港区 A 的 LNG 码头选址船舶进出涉及相关港区和水域的船舶进出港全过程仿真模型，涵盖 2 个港区生产性船舶进出港、乘潮及夜航限制等多项通航规则、锚地利用和码头装卸等多要素环节。
- 2)当港口规划实施后，港区 A 选址 LNG 船舶通航产生的全年船舶延误艘次是港区 B 选址的 1.7~1.8 倍，港区 A 选址的 LNG 船舶单航次延误影响和分船型延误时间影响也均高于港区 B。
- 3)在现行通航规则和港口规划条件下，综合分析港区规划功能定位符合性、航道现状和远期

实施条件、LNG 选址与城市安全距离及 LNG 船舶通航对各类船型延误影响指标等多要素，总体选择港区 B 选址作为连云港 LNG 接收站码头的推荐港址。

参考文献：

[1] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2016[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.

[2] 沈忱,房卓,张民辉,等.单航道多泊位的液化天然气码头建设规模仿真研究[J].水运工程,2019(11):122-126,132.

(下转第 76 页)