



# 客货滚装码头减排设计方案评价方法<sup>\*</sup>

唐国磊<sup>1</sup>, 郭 雷<sup>1</sup>, 李善新<sup>2</sup>, 赵卓瑶<sup>1</sup>, 李 熠<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 中国石油大港油田公司, 天津 300280;

3. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司普兰店分公司, 辽宁 大连 116200)

**摘要:** 提出一种客货滚装码头减排设计方案评价方法。在综合考虑成本属性、环境属性、社会属性构建方案评价指标体系的基础上, 引入层次分析法和加权 TOPSIS 法对客货滚装码头减排设计方案进行综合评价, 并以某拟建客货滚装码头为例验证方法的有效性。结果表明, 算例中各方案在评价模型下具有良好的区分度, 方案从优到劣为岸电、低硫柴油和陆基洗涤器。该减排设计方案评价方法可为客货滚装码头减排设计方案优选提供决策支持。

**关键词:** 客货滚装码头; 减排设计; 综合评价; 层次分析法; TOPSIS 法

中图分类号: F 552; U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0051-07

## Evaluation method of emission reduction design scheme for ro-ro terminal

TANG Guo-lei<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>1</sup>, LI Shan-xin<sup>2</sup>, ZHAO Zhuo-yao<sup>1</sup>, LI Yi<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.CNPC Dagang Oil Company, Tianjin 300280, China;

3.Pulandian Branch of Dalian Electric Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Dalian 116024, China)

**Abstract:** We propose an evaluation method of the emission reduction design scheme for the ro-ro terminal. Based on an evaluation index system considering the economic, environmental and social attributes, we introduce the analytic hierarchy process and weighting TOPSIS method to evaluate the ro-ro terminal design scheme, and take a ro-ro terminal as an example to verify the effectiveness of the method. The results show that each scheme in the example has good discrimination under the evaluation model, and shore power is the optimal technology, and then low sulfur diesel and land-based scrubber thirdly. Therefore, the evaluation method can provide decision support for the ro-ro terminal when selecting emission reduction design scheme.

**Keywords:** ro-ro terminal; emissions reduction; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process (AHP); TOPSIS

我国客货滚装运输迅速发展, 形成琼州海峡、舟山群岛、渤海湾三大运输中心<sup>[1]</sup>, 客货滚装码头的规划和运营正朝着安全、绿色、高效、舒适的方向发展。旅客作为客货滚装运输的服务主体, 其身体健康面临着船舶废气的危害。因此, 在规

划运营客货滚装码头时, 应综合考虑成本、减排效果、环境效益等因素选择适合客货滚装码头的减排设计方案。

目前国内外学者对各种减排方案进行了相关研究, 如 Kom 等<sup>[2]</sup> 阐述岸电的起源及发展; 彭传

收稿日期: 2021-04-06

<sup>\*</sup>基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(DUT18JC29)

作者简介: 唐国磊(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港口大数据和智能港口决策支持。

圣等<sup>[3-4]</sup>的研究表明,岸电投资大和换用低硫油保障基础不足是我国能源替代政策实施的主要瓶颈;贾石岩<sup>[5]</sup>对船舶岸电改造或新船安装的成本进行研究;Boer 等<sup>[6]</sup>的研究表明,船基洗涤器竞争优势随着低硫柴油和重质燃料油之间价格差异的降低而降低;王成鸿等<sup>[7]</sup>计算船基洗涤器的减排效果,并指出影响其推广应用的要素;Worley Advisian 公司<sup>[8]</sup>调研表明,CAE-M 公司研发的陆基洗涤器可捕获船舶废气并净化处理;Lasselle 等<sup>[9]</sup>和 Ammar<sup>[10]</sup>研究了甲醇作为燃料的船舶改建成本。由此可见,岸电、洗涤器、清洁燃料等方案均可减少污染物排放,但所需投资、运营维护成本、环境效益等存在差异,需要合适的评价方法对客货滚装码头减排设计进行评价择优。

码头减排设计需要考虑成本、减排效果、环境效益等诸多因素,是一个多目标决策问题。目前常用的评价方法包括模糊评价法、优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)和物元分析法等。如 Ölgör 等<sup>[11]</sup>建立模糊群体决策模型,评价海运中的清洁能源;Besikci 等<sup>[12]</sup>应用模糊层次分析法(fuzzy-AHP)评价船舶节能措施;李晓满等<sup>[13]</sup>应用加权 TOPSIS 法评价港口绿色发展水平;王征等<sup>[14]</sup>将物元分析法和熵权法相结合,对港区内不同碳排放源进行综合评价。虽然已有研究较少涉及客货滚装码头减排设计方案评价,但可为本文提供一定的思路。

本文通过考虑旅客健康、经济可行性、环境效益等因素,构建适用于客货滚装码头的评价指标体系,引入 AHP 法和加权 TOPSIS 法,评价客货滚装减排设计方案,以期对客货滚装码头减排设计提供决策支持。

## 1 客货滚装码头减排方案

客货滚装码头为旅客、车辆提供服务,旅客数量多、人流密度大,船舶污染排放危害旅客健康<sup>[15]</sup>。为减少污染物排放、保护旅客健康,本文

提出采用岸电、陆基洗涤器和清洁燃料等方案,其特点如下:

1)岸电是供、受电设备及相应的监控辅助系统的统称<sup>[16]</sup>。当使用岸电后,客货滚装船用电由陆侧电网提供,船载发电机组不再工作。因此,该方案会明显减少  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物 PM(包括 PM2.5 和 PM10)等大气污染物排放,而且降低噪声污染。但岸电的建设、运营及维护等成本较高,而且电价昂贵和复杂的连接流程也会制约其发展。

2)陆基洗涤器可捕获大气污染物并进行净化处理,船舶使用重油作为燃料也可以达到排放标准。陆基洗涤器需要大型起重机和支撑系统,不需要对船舶做太多改造,只在船舶靠泊时进行作业。根据洛杉矶港在集装箱船、货船上的试验,陆基洗涤器脱硫效率可达 95%,同时能去除大约 80%的 PM 和  $\text{NO}_x$ ,但对  $\text{CO}_2$ 减排效果不明显,且噪声污染会增加。

3)清洁燃料包括低硫柴油、天然气等,可以有效减少污染物的产生,但不能减少噪声污染,而且需要对船舶进行改造。

综上所述,各方案在成本、环境、社会效益等方面表现出不同的优劣性。因此,为选择合适的减排设计方案,应确定合适的方案评价指标体系及评价方法,解决客货滚装码头减排设计方案多目标决策问题。

## 2 客货滚装码头减排设计方案评价方法

为有效评估客货滚装码头减排设计方案,本文综合考虑成本、污染排放、环境效益等属性,提出适用于客货滚装码头的减排设计方案评价指标体系,并引入 AHP 指标赋权法和 TOPSIS 评价方法,形成客货滚装码头减排设计方案评价框架。

### 2.1 评价指标体系

依据《绿色港口等级评价指南》<sup>[17]</sup>,综合考虑经济可行性、旅客健康、社会影响等因素,构建客货滚装码头减排设计方案评价指标体系,见图 1。

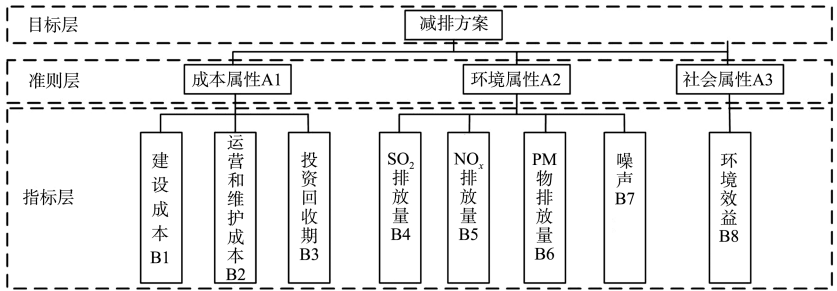


图 1 客货滚装码头减排设计方案评价指标体系

2.1.1 成本属性

成本属性包含建设成本、运营和维护成本、投资回收期 3 个指标。其中, 建设成本是指所耗费的货币支出总和, 反映方案的经济效果; 运营和维护成本是指维持其正常运转所需的支出, 它反映方案持续的可行性; 投资回收期是指收回投资费用或达到收支平衡所需要的时间, 采用净现值, 按下式计算:

NPV = \sum\_{t=1}^{t=w} \frac{(EB\_t - OMC\_t)}{(1 + p\_t)^t} \tag{1}

式中: NPV 为年收益净现值; EB<sub>t</sub>为第 t 年的环境效益, 取值见 2.1.3 节; OMC<sub>t</sub>为第 t 年的运营和维护成本; w 为计息期数; p<sub>t</sub>为第 t 年的折现率。

2.1.2 环境属性

环境属性包含 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和 PM 这 3 种大气污染物排放量和噪声共 4 个指标。其中, SO<sub>2</sub>使人呼吸困难, 对肺部造成直接损伤; NO<sub>x</sub>易引起支气管炎和肺炎, 诱发肺细胞癌变; PM 易附着有害物质沉积于肺, 引起呼吸系统疾病。SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和 PM 排放量公式见式(2)。噪声会影响听力和视力, 且高强度的噪声会使人出现焦躁不安等症状。但噪声污染不易量化, 本文以噪声的相对排序作为指标值。

EM\_m = \frac{\beta \cdot \int P(t) dt}{FCV \cdot \eta\_a} \cdot BEF\_{am} + \frac{(1 - \beta) \cdot \int P(t) dt}{\eta\_b} \cdot BEF\_{bm} \tag{2}

式中: EM<sub>m</sub>为大气污染物 m 的排放量(t), m 取 1、2、3 时分别代表 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM; BEF<sub>am</sub>和 BEF<sub>bm</sub>为大气污染物 m 的燃料的排放系数和电网的排放系数(t/kW); P(t)为船舶辅机功率(kW); β 为 0 或 1 的变量, 1 表示辅机发电, 0 表示岸电供电; FCV 为燃料热值(kW/t); η<sub>a</sub>为燃烧系数; η<sub>b</sub>为岸电效率。

2.1.3 社会属性

污染排放减少可带来社会效益, 该效益与污染物减排量及环境成本有关, 按下式计算:

EB = \sum\_{i=1}^4 ER\_i \cdot EC\_i \tag{3}

式中: EB 为环境效益; i 为污染物序号, 1、2、3、4 分别代表 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM、CO<sub>2</sub>; ER<sub>i</sub>为污染物 i 的减排量; EC<sub>i</sub>为污染物 i 的环境成本。

2.2 AHP 指标赋权法

为尊重旅客、船方、码头运营方的意愿, 本文引入 AHP 法确定各指标的影响程度, 具体步骤为:

1) 建立判断矩阵。按萨蒂 1~9 比例标度法(表 1)确定判断矩阵 B, B 为 n×n 型矩阵(=[b<sub>ij</sub>])。

表 1 萨蒂 1~9 比例标度法相对重要性取值	
b <sub>ij</sub> 取值	含义
1	u <sub>i</sub> 与 u <sub>j</sub> 相比同等重要
3	u <sub>i</sub> 与 u <sub>j</sub> 相比稍微重要
5	u <sub>i</sub> 与 u <sub>j</sub> 相比明显重要
7	u <sub>i</sub> 与 u <sub>j</sub> 相比强烈重要
9	u <sub>i</sub> 与 u <sub>j</sub> 相比极端重要
2, 4, 6, 8	两判断之间的中间状态对应的标度值

注: u<sub>i</sub>、u<sub>j</sub>为代表元素。

2) 层次单排序。用正规化求和法确定本层次各相关元素相对重要性的权重向量 w = (w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, ..., w<sub>n</sub>)。

3) 一致性检验。调整判断矩阵至随机一致性指标 CR < 0.1。CR 为一致性指标 CI 与平均随机一致性指标 RI 的比值, RI 由表 2 确定, CI 按式(4)计算。

表 2 平均随机一致性指标 RI	
矩阵维数 n	3 4 5 6 7 8 9
RI	0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45

CI = \frac{\lambda\_{max} - n}{n - 1} \tag{4}

式中： $\lambda_{\max}$  为权重向量对应的最大特征根； $n$  为判断矩阵维数。

2.3 TOPSIS 评价方法

考虑到减排设计方案评价的多目标决策特征，引入 TOPSIS 法<sup>[18]</sup> 对其进行评价。TOPSIS 法在交通运输、绿色发展评价、企业管理等方面<sup>[19-22]</sup> 具有广泛的应用，其具体步骤为：

1) 给定方案集  $P = \{P_h | h = 1, 2, \dots, p\}$  和指标集  $Q = \{Q_l | l = 1, 2, \dots, q\}$ ，计算指标值  $R_{hl}$ ，构建决策评估矩阵  $R = [R_{hl}]$ 。

2) 按式(5)计算规范化决策评估矩阵  $X = [X_{hl}]$ ：

$$X_{hl} = \frac{R_{hl}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p R_{kl}^2}} \tag{5}$$

3) 确定权重向量，并按式(6)计算加权规范化值矩阵  $Y = [Y_{hl}]$ ：

$$Y_{hl} = w_l \cdot X_{hl} \tag{6}$$

式中： $w_l$  为指标  $l$  对应权重。

4) 确定正负理想向量  $Y^+$  和  $Y^-$ 。成本类指标按式(7)计算，效益类指标按式(8)计算：

$$Y^+ = (Y_l^+) = \left( \begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix} \{ Y_{kl} | k = 1, 2, \dots, m \} \right)_n \tag{7}$$

$$Y^+ = (Y_l^+) = \left( \begin{matrix} \max \\ \min \end{matrix} \{ Y_{kl} | k = 1, 2, \dots, m \} \right)_n \tag{8}$$

5) 计算加权欧氏距离及各方案与理想解的贴近度  $D_k$ ：

$$D_k^{\pm} = \sqrt{\sum_{l=1}^n (Y_{kl} - Y_l^{\pm})^2} \tag{9}$$

$$D_k = \frac{D_k^-}{D_k^- + D_k^+} \tag{10}$$

式中： $D_k^{\pm}$  为加权规范化值  $Y_{kl}$  到正（负）理想解  $Y_l^{\pm}$  的距离。根据  $D_k$  的大小可对各减排方案进行排序， $D_k$  值越大表明方案越优。

3 算例

某客货滚装作业区由 4 个 3 万 GT 泊位和 2 个 1 万 GT 泊位组成，10 艘客货滚装船将服务 6 条航线。客滚船的发动机组主要参数见表 3，船舶靠泊时的辅机负荷率为 25%。根据船舶用电功率及船期表，该港区船舶用电功率的峰值为 6 MW，船舶年用电量为 15.4 GW·h。本着安全、绿色、高效、舒适的发展理念，该工程提出岸电、陆基洗涤器、低硫柴油等 3 种减排设计方案。

表 3 客滚船舶发动机组主要参数值

船舶吨级/万 GT	发电机组额定功率/MW	发电机组额定电压/V	主机额定功率/MW	船舶用电功率/kW
1	2	400	6	500
3	5	400	8	1 250

3.1 减排设计方案

1) 岸电。依据《码头岸电设施建设技术规范》<sup>[23]</sup>，岸电布置及主要参数见图 2，其用电容量约为 6.2 MW。参考文献[24]，本客货滚装作业区岸电的建设成本约为 1 亿元，此地区基础电费为 0.8 元/(kW·h)，年运营和维护成本共计约 1 300 万元。

2) 陆基洗涤器建设成本约为 2.5 亿元，船舶每年靠泊时消耗的重油约 3 400 t，其单价为 3 700 元/t。

3) 船用燃料升级。该港区所在地可提供充足的低硫柴油，升级仓储设施等所需的仓储设施约为 2 800 万元，依据船舶能耗和低硫柴油的平均低

位发热量可计算年消耗量约为 3 300 t，其单价为 3 700 元/t。

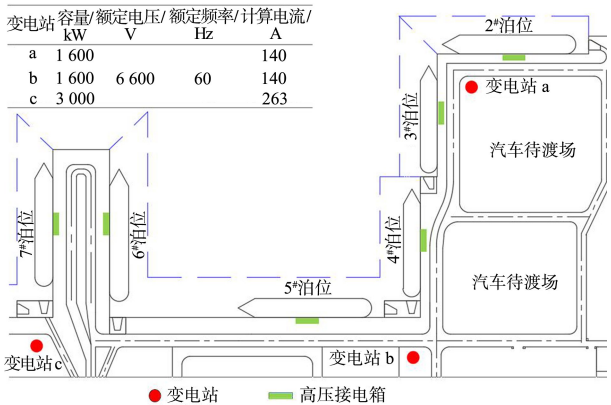


图 2 客货滚装码头平面布置及岸电主要参数



3.2 排放系数与环境成本

该地区以火力发电为主，首先根据现阶段能源发电比例及各能源排放系数计算电网排放系数，见表 4；然后，参考《2006 年 IPCC 国家温室气体

清单指南》《城市大气污染物排放清单编制技术手册》《中国船舶大气污染物排放清单报告(2016)》，确定各燃料的排放系数，见表 4；最后，参考文献 [24]~[26] 确定各污染物的环境成本，见表 5。

表 4 各能源发电比例及排放系数

能源类型	比例/%	SO <sub>2</sub> /(g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> /(g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	PM/(g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> /(kg·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
火力发电	62	9.200	4.650	3.190	1.117 1
风力发电	18	0	0	0	0.016 5
水力发电	5	0.086	0.062	0.001	0.041 0
太阳能发电	6	0	0	0	0.090 0
核能发电	9	0.078	0.054	0.110	0.011 9
合计	100	5.72	2.89	1.99	0.70
重质燃料油	—	11.98	14.70	2.76	1.32
低硫柴油	—	2.12	13.90	0.61	0.29

表 5 各污染物环境成本

污染物	环境成本/(万元·t <sup>-1</sup> )
SO <sub>2</sub>	8.3
NO <sub>x</sub>	7.2
PM	54.4
CO <sub>2</sub>	0.019

3.3 方案评价

应用本文提出的客货滚装码头减排设计方案

评价框架，确定指标权重 1(表 6)及其规范化决策评估矩阵柱状图(图 3)，求得岸电、陆基洗涤器和低硫柴油对应的  $D_k$  分别为 0.116 9、0.056 7 和 0.068 7。可见，各方案在评价模型下具有良好的区分度。对于此工程，方案从优到劣为：岸电、低硫柴油和陆基洗涤器。

表 6 指标权重情形集合

指标	成本属性			环境属性				社会属性	考虑的方面
	建设成本	运营维护成本	回收期	SO <sub>2</sub> 排放量	NO <sub>x</sub> 排放量	PM 排放量	噪声	环境效益	
权重 1	15	15	10	10	10	10	10	20	综合考虑
权重 2	22	22	16	5	5	5	5	20	倾向成本属性
权重 3	8	8	4	15	15	15	15	20	倾向环境属性

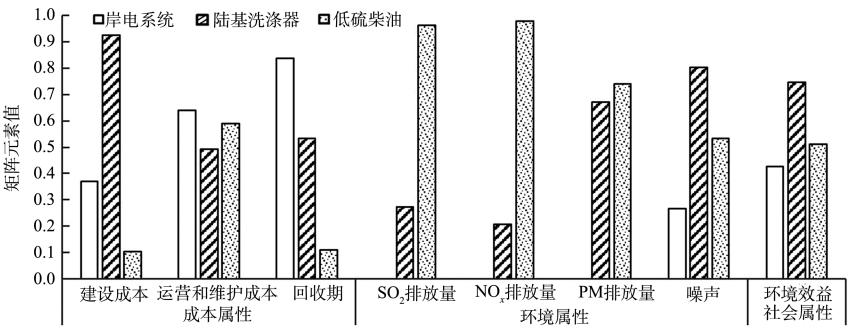


图 3 规范化决策评估矩阵柱状图

3.4 敏感性分析

在确定指标影响程度时，不同的偏好会得到不同的权重向量。由表 6 可看出，偏向码头运营方时，方案的成本属性比重大(权重 2)；偏向旅客时，方案的减排效果比重大(权重 3)。经计算，

在不同偏好下各方案的评价结果见图 4。可以看出，由于各方案在各指标下优劣性的不同，各方案受指标权重变化的影响较大。当倾向成本属性时，低硫柴油凭借其建设成本低这一优势成为最优方案，而岸电和陆基洗涤器的竞争力明显下降；

当倾向环境属性时，低硫柴油成为最差减排方案。

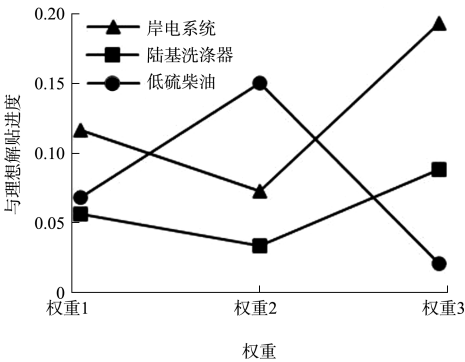


图4 不同权重下的方案评价结果

目前，我国正在大力推动靠港船舶使用岸电，但受成本高、环境效益低等因素的影响，在权重2下，岸电的竞争力有待提高。为此，本文在权重2下，探究各情形(表7)对岸电竞争力的影响，评价结果见图5。可以看出，为促进我国岸电建设，政府可采取以下措施：1)发放建设补贴，提高港方积极性；2)降低电价，提高船方积极性；3)优化岸电技术，提高操作便捷性；4)优化电力结构，降低岸电生命周期内的排放，提高其环境效益。

表7 情形描述

情形	情形描述	情形	情形描述
1	对照情形	8	火力发电比例降低 8%,其他等额增加
2	岸电建设成本取得 10%的补贴	9	火力发电比例降低 16%,其他等额增加
3	岸电建设成本取得 20%的补贴	10	火力发电比例降低 24%,其他等额增加
4	岸电建设成本取得 30%的补贴	11	低硫柴油价格增长 10%
5	电价补贴 10%	12	低硫柴油价格增长 20%
6	电价补贴 20%	13	低硫柴油价格降低 10%
7	电价补贴 30%	14	低硫柴油价格降低 20%

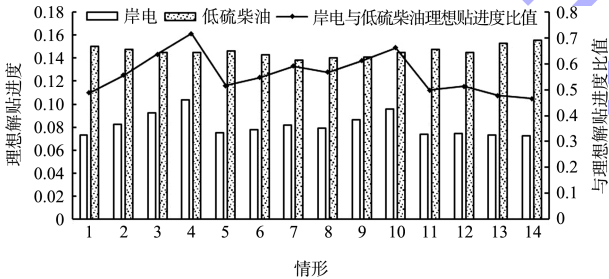


图5 不同情形下的方案评价结果

4 结论

1)综合考虑成本、污染排放、环境效益等属性，提出适用于客货滚装码头的减排设计方案评价指标体系，并引入 AHP 指标赋权法和 TOPSIS 评价方法，形成客货滚装码头减排设计方案评价框架。

2)在客货滚装码头算例中，岸电是最优减排方案，低硫柴油为次优减排方案。因此，考虑到岸电的建设、运营及维护等成本相对较高，建议分阶段建设，以逐步实现整个客货滚装作业区的岸电全覆盖；在岸电建设过程中，无法连接岸电的船舶可暂时通过使用低硫柴油达到排放要求。

参考文献：

[1] 闫哲彬,丁敏,王海霞.环渤海地区客货滚装运输现状分析与展望[J].水运工程,2011(S1):8-11,38.

[2] ZIS T.Prospects of cold ironing as an emissions reduction option[J].Transportation research part A(Policy and practice), 2019, 119: 82-95.

[3] 彭传圣.靠港船舶使用岸电技术的推广应用[J].港口装卸,2012(6):1-5.

[4] 蔡欧晨,彭传圣.能源替代防治我国船舶大气污染对策[J].中国航海,2017,40(1):114-118.

[5] 贾石岩.船舶使用岸电对温室气体排放的控制研究[D].大连:大连海事大学,2009.

[6] BOER E, HOEN M.Scrubbers-an economic and ecological assessment[R].Delft: CE Delft, 2015.

[7] 王成鸿,叶霖.低硫政策下船舶废气清洁系统推广使用前景分析[J].国际石油经济,2018,26(9):87-95.

[8] Worley Advisian.Ports of Auckland Cruise Vessel Emission Reduction Technologies Feasibility Study[R].Auckland: Worley Advisian, 2017.

[9] LASSELLE S, ABUSDAL H.Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility [R].London: International Maritime Organization,2016.

[10] AMMAR N R. An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship [J]. *Transportation research part D( Transport and environment)*, 2019, 69: 66-76.

[11] ÖLÇER A, BALLINI F. The development of a decision making framework for evaluating the trade-off solutions of cleaner seaborne transportation [J]. *Transportation research part D( Transport and environment)*, 2015, 37: 150-170.

[12] BESIKCI E B, KECECI T, ARSLAN O, et al. An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures [J]. *Ocean engineering*, 2016, 121: 392-402.

[13] 李晓满, 谢新连. 基于 DRSIR 模型和 TOPSIS 法的港口企业绿色发展水平评价方法的构建[J]. *水运管理*, 2019, 41(2): 28-32.

[14] 王征, 刘瑛, 张卫, 等. 基于熵权模糊物元模型的港区温室气体减排潜力综合评价[J]. *交通节能与环保*, 2019, 15(1): 30-34.

[15] 赵晓艺, 唐国磊, 宋向群, 等. 客货滚装码头作业系统智能体微观仿真建模[J]. *大连理工大学学报*, 2019, 59(1): 71-78.

[16] 王晓华, 朱成云. 岸电系统[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2018.

[17] 交通运输部水运科学研究院. 绿色港口等级评价指南: JTS/T 105-4—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[18] HWANG C L, YOON K P. Methods for multiple attribute decision making[M]. Berlin: Springer, 1981.

[19] 陈婷婷, 施朝健, 雷琴. 基于熵权-TOPSIS-灰色关联的航道宽度设计结果评价[J]. *水运工程*, 2013(12): 136-141.

[20] WU X, ZHANG C, YANG L J. Evaluation and selection of transportation service provider by TOPSIS method with entropy weight [J]. *Thermal science*, 2021, 25(2): 1483-1488.

[21] 陈人杰, 李华取, 彭晓涛, 等. 基于改进 TOPSIS 的新能源大数据服务项目评价研究[J]. *电力建设*, 2021, 42(3): 126-134.

[22] 田霖, 张露露. 基于模糊 ANP 和 TOPSIS 法的科技型中小企业成长性评价体系构建[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(2): 184-190.

[23] 交通运输部水运科学研究院. 码头岸电设施建设技术规范: JTS 155—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

[24] KATHARINE R, LAURENT D, KEN C, et al. Country-level social cost of carbon [J]. *Nature climate change*, 2018(8): 895-900.

[25] BALLINI F. Air pollution from ships in Danish harbours: feasibility study of cold-ironing technology in Copenhagen [D]. Genoa: University of Genoa, 2013.

[26] SONG S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan Port [J]. *Atmospheric environment*, 2014, 82: 288-297. (本文编辑 王璁)

\*\*\*\*\*

(上接第 50 页)

参考文献:

[1] 房卓, 沈忱, 张民辉, 等. 环渤海地区港口 LNG 运输特点及泊位合理通过能力研究[J]. *水运工程*, 2019(11): 36-39, 53.

[2] 王殿华, 周立群. 环渤海的油气资源约束及与俄罗斯的合作前景[J]. *东北亚论坛*, 2007, 72(4): 23-27.

[3] 赵仓龙, 龚少军. LNG 船进出深圳港对航路通过能力的影响[J]. *中国航海*, 2015, 38(0): 90-93, 126.

[4] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 基于多智能体仿真的 LNG 船舶进出港通航影响的评价指标研究[J]. *水运工程*, 2018(3): 52-58.

[5] 张宝刚, 张磊. LNG 船舶进出洋山港主航道的通航安全研究[J]. *航海技术*, 2013(4): 15-17.

[6] 李红亮, 杨传波. LNG 船舶进出港对珠海港主航道通过能力影响[J]. *水运工程*, 2013(6): 85-88, 113.

[7] 沈忱, 孙路, 鲍建宇, 等. 曹妃甸 LNG 码头建设规模与通航效率的适应性[J]. *水运工程*, 2019(12): 70-74.

[8] 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.

[9] 孙家庆, 孙倩雯, 李沛泽. 我国 LNG 码头建设现状与对策建议[J]. *中国港口*, 2016(3): 5-8.

[10] 张刚雄, 李彬, 郑得文, 等. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 153-159.

[11] 丁国生, 李春, 王皆明, 等. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. *天然气工业*, 2015, 35(11): 107-112. (本文编辑 武亚庆)