



# 低碳港口评价指标体系的创建和赋值研究

陈 睿<sup>1</sup>, 梁军波<sup>2</sup>

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090; 2. 中交第三航务工程勘测设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对低碳港口评价标准缺失的现状, 以绿色、节能、降碳、减污为基本出发点, 基于 P-S-R 模型, 运用层次分析法和德尔菲法创建低碳港口评价的指标体系, 涵盖了碳排放指标、能源活动指标、水资源指标、绿色建筑指标、绿色用电指标、环境碳汇指标和管理体系指标 7 项一级指标和 21 项二级指标。指标体系采用定量和定性指标结合的方式, 具有较好的系统性、科学性和港口特色, 可操作性强, 对港口降碳减排具有较好的协同性。同时提出低碳港口评价指标权重的赋值方法和判断标准, 并依据规范标准、行业发展规划、管理条例和港口历年统计资料, 提供了指标评价的基准值。研究成果为低碳港口创建提供了完整、科学的评价依据, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 港口; 低碳评价; 指标体系; 权重赋值

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0045-06

## Establishment and value assignment of low-carbon port evaluation index system

CHEN Rui<sup>1</sup>, LIANG Junbo<sup>2</sup>

(1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In response to the lack of evaluation standards for low carbon ports, taking green, energy-saving, carbon reduction and pollution reduction as the basic starting point, based on the P-S-R model, the Analytic Hierarchy Process and Delphi method are used to create an index system for low-carbon port evaluation, which includes 7 primary indexes and 21 secondary indexes, including carbon emission indexes, energy activity indexes, water resources indexes, green building indexes, green electricity indexes, environmental carbon sink indexes, and management system indexes. The index system adopts a combination of quantitative and qualitative indexes, which has good systematicity, scientificity, port characteristics, strong operability, and good synergy in reducing carbon emissions in ports. This paper also puts forward a method and judgment criteria for assigning evaluation indexes for low-carbon ports, and provides benchmark values of evaluation indexes based on normative standards, industry development plans, management regulations, and port statistical data over the years. The research results provide a complete and scientific evaluation basis for the creation of low-carbon ports, and have good application prospects.

**Keywords:** port; low-carbon evaluation; index system; value assignment

港口是社会经济发展的重要基础设施和对外开放的窗口, 也是能源消费和碳排放的重要环节之一, 我国在大幅提升港口服务能力的同时, 如何发展绿色低碳港口至关重要。当前我国港口建设在绿色、节能、降碳、减污方面取得了重大成

就, 涌现出了许多低碳港口标兵企业, 但评价标准却很难得到各方面认可, 为此探索一套完善的具有港口特色、对减污降碳有较大推动作用的评价标准体系至关重要。

收稿日期: 2023-10-20

作者简介: 陈睿 (1982—) 女, 硕士, 高级工程师, 从事环境管理和评价等相关工作及研究。

## 1 低碳港口评价指标体系创建

### 1.1 评价指标选取原则

1) 代表性原则。港区碳排放来自电力、能源、建筑和环境等多方面,涉及的因素较多,选取的指标应具有较高代表性,且与评价目的具有较强相关性,避免出现同质指标。

2) 可获得性原则。所需数据在港口的统计系统内或与统计数据具有较高的关联性,遵从数据的可获得性原则,尽量选用可量化的指标,保证指标系统的可操作性。

3) 一致性原则。一方面指评价指标要和国家政策框架和标准保持一致,以保证最终构建的指标体系与国家节能降碳减排的发展目标协调;另一方面保证各港口实施时对指标的理解和计算保持一致。

4) 系统性原则。应涵盖电力、能源、建筑、设备与环境等诸多因素,系统评估港口的低碳发展水平,既避免单一的指标体系无法满足评价结果的公平性,又避免因指标过多而造成的复杂性。

### 1.2 指标模型的选择

当前针对碳排放影响因素的国内外研究主要通过构建模型进行分析和预测,常用评价模型主要为 LMDI 模型、STIRPAT 模型和 P-S-R(“压力-状态-响应”)模型,其中 P-S-R 模型是 20 世纪 90 年代由联合国经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)和环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)共同提出的用于研究环境问题的概念模型框架,后被广泛用于环境评价领域<sup>[2]</sup>。本文港区低碳评标指标体系依据 P-S-R 模型创建。

### 1.3 指标体系构建和权重赋值

根据上述指标选取原则,结合港口碳排放特点,基于 P-S-R 模型,运用层次分析法和德尔菲法建立低碳港区评价指标体系,包括碳排放、能源活动、水资源、绿色建筑、绿色用电、环境碳汇、管理体系等 7 项一级指标和 21 项二级指标,见表 1。该指标体系中定量和定性指标相结合,其中定量指标 10 项,定性指标 11 项。评价体系的

各项权重值依据其权重特性和评价目的分解成不同的组成因素,根据各因素之间的相互影响及隶属关系形成层次结构模型,再通过专家打分方式依次对每个层次内所包含的因素进行相对重要性赋值,最后利用数学矩阵求得各层次全部因素所占的相对重要性权重值。

表 1 港口低碳评价指标体系

一级指标	一级指标权重值	二级指标	二级指标权重值	指标性质
碳排放指标(B <sub>1</sub> )	0.34	碳排放强度(C <sub>1</sub> )	0.25	定量
		港区碳排放强度降低进度(C <sub>2</sub> )	0.08	定量
能源活动指标(B <sub>2</sub> )	0.22	单位吞吐量能耗(C <sub>3</sub> )	0.11	定量
		单位吞吐量能耗降低进度(C <sub>4</sub> )	0.04	定量
水资源指标(B <sub>3</sub> )	0.10	新能源和清洁能源车辆的比例(C <sub>5</sub> )	0.05	定量
		清洁能源的开发(C <sub>6</sub> )	0.02	定性
绿色建筑指标(B <sub>4</sub> )	0.08	节水保障措施(C <sub>7</sub> )	0.06	定性
		中水回用率(C <sub>8</sub> )	0.03	定量
绿色用电指标(B <sub>5</sub> )	0.15	雨水资源利用(C <sub>9</sub> )	0.02	定性
		绿色建筑率(C <sub>10</sub> )	0.05	定量
环境碳汇指标(B <sub>6</sub> )	0.05	建筑节能标准执行情况(C <sub>11</sub> )	0.02	定量
		低碳供热技术应用(C <sub>12</sub> )	0.01	定性
管理体系指标(B <sub>7</sub> )	0.05	装卸设备节能节电技术(C <sub>13</sub> )	0.09	定性
		节电照明系统(C <sub>14</sub> )	0.04	定性
		变电站节能化(C <sub>15</sub> )	0.02	定性
		绿化率(C <sub>16</sub> )	0.01	定量
		岸电设备(C <sub>17</sub> )	0.03	定量
		船舶污染物接收设施(C <sub>18</sub> )	0.02	定性
		碳计量制度(C <sub>19</sub> )	0.01	定性
		低碳政策宣传和落实情况(C <sub>20</sub> )	0.01	定性
		低碳发展专项资金设立情况(C <sub>21</sub> )	0.03	定性
合计	1.00	-	1.00	-

## 2 评价指标取值

### 2.1 评价指标打分办法

#### 2.1.1 定量指标

每个评价指标的标准分数按 100 分计,定量指标评价值为实际值与标准值的比值乘以标准分

数,若实际值达到标准值则按 100 分计,为鼓励港区低碳绿色发展路径,对于港区碳排放较为重要的 3 个指标即碳排放强度( $C_1$ )、单位吞吐量能耗( $C_3$ )和新能源和清洁能源车辆的比例( $C_5$ )采用不封顶策略。

考虑正向指标与负向指标的差别,对各评价指标的实际分值根据其类别和不同情况进行标准化处理<sup>[3]</sup>。

正向指标标准化处理公式:

$$S_i = S_{xi}/S_{oi} \quad (1)$$

负向指标标准化处理公式:

$$S_i = S_{oi}/S_{xi} \quad (2)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  项评价指标的单项评价指数;  $S_{xi}$  为第  $i$  项评价指标的实际值;  $S_{oi}$  为第  $i$  项评价指标的评价基准值,应结合相关规范、政府指导文件和相关港区的统计年鉴确定。

## 2.1.2 定性指标

定性指标采用专家打分法,按 5 级评分原则,评分标准见表 2。

表 2 定性指标评分方法

等级	很差	较差	中等	较好	很好
分数	0	30	60	80	100

## 2.2 评价指标定义和赋值计算

### 2.2.1 碳排放指标

碳排放总量因港口规模不同而差别较大,为此采用单位吞吐量碳排放强度指标进行评价;此外,考虑到指标体系与地方考核体系的一致性,为确保降碳减排目标指标的完成,选择碳排放降低进度指标。

1) 港口碳排放强度。港口碳排放强度为港口碳排放总量与港口吞吐量的比值,为负向指标,基准值依据 JTS/T 105-4—2020《绿色港口等级评价指南》<sup>[4]</sup>确定。专业化集装箱码头基准值为 2.44 t CO<sub>2</sub>/万 t,专业化干散货码头基准值为 1.04 t CO<sub>2</sub>/万 t。

2) 港区碳排放强度降低进度。港口碳排放强度降低进度是指与上一年相比港区碳排放强度的下降程度:

$$R_D = \left( 1 - \frac{C_t}{C_e} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $R_D$  为港口碳排放强度降低进度,  $C_t$  为本年度碳排放强度,  $C_e$  为上一年碳排放强度。

生态环境部发布的《中国应对气候变化的政策与行动 2022 年度报告》中指出 2021 年中国单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年累计下降 50.8%, 年均降低进度 1.28%;天津港 2022 年统计数据显示 2012 年以来年均碳排放强度降低进度 1.32%;《镇江市绿色低碳港口建设行动方案(2023—2025 年)》提出到 2025 年底,规模以上港口生产单位吞吐量、二氧化碳排放比 2020 年均下降 5%, 年均碳排放强度降低进度 1.38%;广东省交通运输厅印发《广东省绿色港口行动计划(2023—2025 年)》,提出到 2025 年单位吞吐量碳排放量较 2020 年下降 5%, 年均碳排放强度降低进度 1.38%;

类比上述数据,镇江港、天津港和广东港碳排放强度降低进度基本与国内生产总值碳排放降低速度持平,为此碳排放强度降低进度取四者平均值 1.34% 作为基准值。

### 2.2.2 能源活动指标

1) 单位吞吐量能耗。单位吞吐量能耗指一次能源供应总量与港口吞吐量的比率,是目前港口节能减排的重要指标,若单位吞吐量能耗小则说明港口能源使用效率高,较为清洁和低碳。本指标为负向指标,基准值依据 JTS/T 105-4—2020《绿色港口等级评价指南》确定。专业化集装箱码头基准值为 24 tce/万 TEU,专业化干散货码头基准值为 1.8 tce/万 t。

2) 单位吞吐量能耗降低进度。单位吞吐量能耗降低进度指单位吞吐量能耗与上一年相比的下降程度,计算方法同碳排放降低进度。该指标反映港口能源使用效率的提升,有利于激励港口提升能源使用效率,高效完成减排目标。

宁波港 2021 公布的统计资料表明 2016—2021 年万吨吞吐量能耗下降 15%,年均能耗降低 1.72%;上海港制定的《港口节能减排专项规划(2015—2017)》指出,2017 年底上海港港口生产作业单位吞吐量能耗较 2010 年下降 7%,年均 1.48%;山东省港口集团公布的统计资料表明 2019—

2021 年万吨吞吐量能耗下降 13%，年均下降 2.35%；中国环境网 2023 年发布资料表明 2012 年以来我国单位 GDP 能耗累计降低 26.4%，年均下降 3.3%；随着港口绿色化、智慧化的建设，港区能耗下降速度明显低于国家能耗下降速度，为此取上海港、宁波港和山东港口的均值 1.85% 作为基准值。

3) 新能源和清洁能源港作机械和车辆比例。交通运输部(交规划发[2021]104 号)发布的《绿色交通“十四五”发展规划》提出国际集装箱枢纽上海港的新能源和清洁能源集卡 2025 年预期目标值为 60%；广东省交通运输厅(粤交港函[2023]404 号)发布的《广东省绿色港口行动计划(2023—2025 年)》提出港口使用电能、液化天然气等新能源清洁能源的港作机械和车辆数量 2025 预期目标值 60%。依照上述文件精神，将新能源和清洁能源港作机械和车辆的比例 60% 作为基准值。

4) 清洁能源的开发。为鼓励港口应用光伏发电、风能发电、风光互补供电、氢能等低碳清洁能源技术，提高港口绿电比例，本项基准值按照满足 1 项 60 分、2 项 80 分、3 项及以上 100 分标准执行。

### 2.2.3 水资源指标

1) 节水保障措施。采用节水型用水设备；采用二级计量水表，进行计量监测与统计方案；设置分质供水系统。本项基准值按照满足 1 项 60 分、2 项 80 分、3 项及以上 100 分标准执行。

2) 中水回用率。中水回用率指港口再生水的回用量与污水量的比值。国家发改委等发布《关于推进污水资源化利用的指导意见》(发改环资[2021]13 号)提出到 2025 年全国地级及以上缺水城市再生水利用率达到 25% 以上；交通运输部办公厅《深入推进绿色港口建设行动方案(2018—2022 年)》征求意见稿(交办水函[2018]480 号)提出生产生活污水、雨水循环利用率不低于 30%。依照上述文件精神，选取中水回用率 30% 为基准值，达到该基准值为 100 分，不满足则采用标准化公式进行赋值。

3) 雨水资源利用。采用专家打分法对港口采用海绵城市措施和雨水资源化执行情况进行定性化打分。

### 2.2.4 绿色建筑指标

1) 绿色建筑率。鉴于新建建筑须进行绿建专项审查，最低要求为一星标准，为更好贯彻节能减排，评价体系进行了指标管理，将二星及以上的绿色建筑率作为评价指标。工业建筑按照 GB/T 50878—2013《绿色工业建筑评价标准》<sup>[5]</sup> 评价，获得二星及以上评级的为绿色建筑；公用建筑按照 GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》<sup>[6]</sup> 评价，获得二星及以上评级的为绿色建筑，将绿色建筑率二星及以上等级 100% 作为基准值。绿色建筑率计算公式为：

$$G = \frac{G_a}{T_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中：G 为港口绿色建筑率，G<sub>a</sub> 为二星及以上绿色建筑面积，T<sub>a</sub> 为港区总建筑面积。

2) 建筑节能标准执行情况。我国已发布 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》<sup>[7]</sup>、GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》<sup>[8]</sup> 等相关建筑节能标准。鉴于新建建筑节能设计已进入强制阶段，为此将 100% 满足节能相关标准作为基准值。

3) 低碳供热技术应用。采用太阳能、地源或空气热源泵等低碳供热技术为港口供热，将 100% 采用低碳供热技术作为基准值，采用为 100 分，不采用则为 0 分。

### 2.2.5 绿色用电指标

1) 装卸设备节能节电技术。集装箱泊位包括：① 岸边集装箱起重机采用能量回馈技术，② 集装箱门式起重机采用能量回馈技术，③ 岸边集装箱起重机采用变频或直流驱动技术，④ 集装箱门式起重机采用变频或直流驱动技术；干散货泊位包括① 桥式抓斗卸船机采用能量回馈技术，② 带式输送机采用变频驱动技术，③ 桥式抓斗卸船机采用变频或直流驱动技术；件杂货和通用泊位包括① 起重机采用能量回馈技术，② 起重机采

用变频或直流驱动技术。集装箱泊位和干散货泊位基准值按照满足1项60分、2项80分、3项及以上100分标准执行;件杂货泊位和通用泊位按照满足1项60分、2项100分标准。

2) 节电照明系统。室外照明采用智能化控制技术,采用节能灯照明系统,采用电网谐波污染治理技术和电网无功补偿技术。本项基准值按照满足1项60分、2项80分、3项及以上100分标准执行。

3) 变电站节能化。变电站采用节能型变压器。采用为100分,不采用为0分。

## 2.2.6 环境和碳汇指标

1) 可绿化率。依据JTS 149—2018《水运工程环境保护设计规范》<sup>[9]</sup>,绿化面积不应小于可绿化面积的85%;交通运输部办公厅《深入推进绿色港口建设行动方案(2018—2022年)》征求意见稿(交办水函[2018]480号)提出目标值为港内绿化面积占可绿化面积比例不少于90%。按照绿化率80%取60分、绿化率90%取80分、绿化率95%以上取100分。

2) 岸电设备。《港口和船舶岸电管理办法》(交通运输部令2019年第45号)要求对新建、改建、扩建码头工程(油气化工码头除外)同步设计、建设岸电设施;交通运输部办公厅《深入推进绿色港口建设行动方案(2018—2022年)》征求意见稿(交办水函[2018]480号)提出提升岸基供电设施的安全便捷和经济性,港作船舶靠泊使用岸电比例不低于90%目标要求。依照《港口和船舶岸电管理办法》,岸电设施配置是基本要求,因此设置岸电设施取值60分,港作船舶靠泊使用岸电比例不低于90%取值80分,岸电使用比例100%取值100分。

3) 船舶污染物接收设施。环境保护部发布《船舶水污染防治技术政策》的公告(公告2018年第8号)要求港口应建设船舶含油污水接收设施,交通运输部发布的《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020年)》(交水发[2015]133号)提出沿海和内河港口、码头、装卸站、船舶修造

厂分别于2017年底前和2020年底前具备船舶含油污水、化学品洗舱水、生活污水和垃圾等接收能力,并做好与城市市政公共处理设施的衔接,全面实现船舶污染物按规定处置。依据上述文件知,船舶污水、生活污水和垃圾接收设施的配置为新建港口基本要求,为此港口配置上述设施2项以上取值60分,配置3项取值80分,同时建立并有效实施船舶污染物接收、转运、处置监管联单制度取值100分。

## 2.2.7 管理体系指标

1) 碳计量制度。碳计量是对港口碳排放量的计量,建立碳排放计量体系并实施是碳减排的重要基础,也体现了港口的碳管理水平。专家根据经验进行打分赋值,不设置为0分。

2) 低碳政策宣传和落实情况。构建港区低碳发展建设的组织架构体系,编制港口的低碳发展规划,建立企业低碳发展的激励和惩罚机制,定期开展低碳政策宣传。满足1项取值30分,满足2项取值60分,满足3项取值80分,满足4项取值100分。

## 3 低碳港口等级的划分

通过上述评价指标,可分别得出碳排放指标、能源指标、水资源指标、绿色建筑指标、绿色用电指标、环境碳汇指标、管理体系指标的评分。根据综合评价得分将港口碳排放评价系数划分为4个等级,满足一、二等级判定为港口满足低碳发展要求,等级划分见表3。

表3 低碳港口等级划分

等级	分数范围/分	基本特征
一	≥85	满足港口低碳发展要求,并具备良好发展势头
二	70~<85	基本满足低碳发展要求
三	60~<70	未能满足港口低碳发展要求,但可通过一定的措施进行改进
四	<60	未能满足低碳发展要求

#### 4 结论

1) 针对低碳港口评价标准缺失的现状, 以绿色、节能、降碳、减污为基本出发点, 基于 P-S-R 模型, 运用层次分析法和德尔菲法创建了低碳港口评价权重体系, 该指标体系采用定量和定性指标结合的原则, 其中定量指标 10 项, 定性指标 11 项。

2) 评价体系具有较好的系统性和科学性, 为低碳港口创建提供了完整科学的评价依据, 可针对性指导港口开展减排降碳工作, 具有较好的应用前景。

3) 提供了低碳港口评价指标赋值的方法和判断标准, 并依据规范标准、行业发展规划、管理条例和港口历年统计资料, 提供了指标权重的基准值, 可操作性强。

4) 评价体系适用于已建、新建或扩建的集装箱、干散货、件杂货和通用泊位的低碳评价和降碳减污指导。由于评价指标体系未考虑液体化工品泊位的油气回收和逃逸问题, 故不适用于液体化工品泊位的低碳评价。

#### 参考文献:

- [1] 刘茂辉, 刘胜楠, 李婧, 等. 天津市减污降碳协同效应评估[J]. 水运工程, 2023, 42(8): 3940-3949.
- (上接第 23 页)
- [6] 张华昌, 董胜, 柳玉良, 等. 斜向浪沿直立堤传播规律及对接岸斜坡堤影响[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中). 北京: 海洋出版社, 2011: 113-117.
- [7] 郑安兴, 毛前, 臧振涛, 等. 框架式海堤变形模拟与稳定性影响因素分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(5): 57-62.
- [8] WU X W, TANG M L, YAO Y X. Analysis of the influence about back side sand pile on the stability and deformation of the pile foundation frame seawall[J]. IOP conference series ( earth and environmental science ), 2021, 638(1): 1-5.
- [9] 詹敏杰. 高填土对软土下桩基框架结构堤防的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [10] 中交第一航务工程勘测设计院有限公司. 港口与航道

估与预测[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3940-3949.

- [2] 魏竞超, 李自涵, 董媛媛. 基于压力-状态-响应(PSR)模型的黄河流域环境安全评价体系法化研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(1): 19-28.
- [3] 骆其金, 谌建宇, 王振兴, 等. 基于氨氮减排的氮肥行业清洁生产技术评估方法[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(3): 243-247.
- [4] 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.
- [5] 中国建筑科学研究院, 机械工业第六设计研究院有限公司. 绿色工业建筑评价标准: GB/T 50878—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] 中国建筑科学研究院有限公司, 上海建筑科学研究院(集团)有限公司. 绿色建筑评价标准: GB/T 50378—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [8] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [9] 中交第二航务工程勘测设计院有限公司. 水运工程环境保护设计规范: JTS 149—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

(本文编辑 王传瑜)

水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [12] JIANG X M, PAN B Z, SONG Z Y, et al. Do functional traits of chironomid assemblages respond more readily to eutrophication than taxonomic composition in Chinese floodplain lakes? [J]. Ecological indicators, 2019, 103: 355-362.
- [13] BORCARD D, GILLET F, LEGENDRE P. Numerical ecology with R[M]. New York : Springer Nature, 2011.
- [14] 李本霞. 斜向和多向不规则波对直立堤作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

(本文编辑 王璁)