基于云模型的近零碳港口综合评价方法

夏高响[1]，沈保根[1]，华连阳[2]，蒋柳鹏[2]
（1. 安徽省交通勘察设计院有限公司，安徽 合肥 230011；
2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098）

摘要：针对近零碳港口评价过程中碳排放数据存在模糊性与随机性导致量化困难的问题，采用文献频度统计筛选高频指标，结合港口能源活动特征与专家咨询法，构建涵盖保障机制、运营管理、业务活动及碳减排成效 4 个维度、10 项二级指标及 22 项三级指标的评价体系。引入云模型理论，利用期望、熵和超熵 3 个数字特征确定权重并将定性评价转化为定量描述，对安徽省 3 个典型内河码头进行实证分析。结果表明：马鞍山港专业化干散货码头得 89.6 分为最高，但其熵与超熵值偏高，呈现“高分不稳”特征；合肥港国际集装箱码头和芜湖港国际集装箱码头分别得 84.9 和 85.8 分，主要受限于能源结构等硬件减排效率。研究成果验证了云模型在处理非确定性评价中的有效性，揭示内河港口差异化发展瓶颈，为制定精准减排策略提供定量依据。

关键词：近零碳港口；评价指标体系；云模型
中图分类号：U658　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0113-09

Cloud model-based comprehensive evaluation method for near-zero carbon ports

XIA Gaoxiang[1], SHEN Baogen[1], HUA Lianyang[2], JIANG Liupeng[2]
(1. Anhui Provincial Communications Construction Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the challenges in quantifying carbon emission data due to fuzziness and randomness in the evaluation process of near-zero carbon ports, high-frequency indicators are screened using literature frequency statistics. Combined with the characteristics of port energy activities and the expert consultation method, an evaluation system is built, covering four aspects: safeguard mechanisms, operational management, business activities, and carbon reduction effectiveness, with ten secondary indicators and twenty-two tertiary indicators. The cloud model theory is introduced, utilizing three numerical characteristics of expectation, entropy, and hyper-entropy to determine weights and convert qualitative evaluations into quantitative descriptions. An empirical analysis is conducted on three typical inland ports in Anhui Province. The results show that the Ma'anshan Port specialized dry bulk terminal scores the highest at 89.6 points. However, its entropy and hyper-entropy values are relatively high, indicating a "high score with instability". The Hefei Port International Container Terminal and the Wuhu Port International Container Terminal score 84.9 and 85.8 points, respectively, and are primarily constrained by hardware-related emission reduction efficiencies such as energy structure. The results of this study verify the effectiveness of the cloud model in handling non-deterministic evaluations, reveal the bottlenecks in the differentiated development of inland ports, and provide a quantitative basis for formulating precise emission reduction strategies.

Keywords: near-zero carbon port; evaluation indicator system; cloud model

随着全球气候变暖加剧，交通运输业作为碳排放的重点领域，其低碳转型迫在眉睫。在国家“双碳”战略背景下，交通运输部发布《关于推动内河航运高质量发展的意见》(交水发〔2025〕60 号)[1]，明确提出要加快建设内河近零碳港口。

目前，国内外学者针对港口低碳转型的研究

收稿日期：2025-12-24　　**录用日期：**2026-02-13

作者简介：夏高响(1988—)，男，硕士，高级工程师，从事港口水运工程设计、咨询及科研工作。

水运工程

已取得较好进展。在国际方面，Alamoush 等[2]系统梳理港口的七大类技术及运营减排措施，为港口能效提升与温室气体减排提供全面的分类框架；Iris 等[3]系统总结港口能源管理与运营优化的具体技术路径；Bjerkan 等[4]梳理包含 26 项港口减排技术的工具库，为港口减排技术选型提供了依据。在国内实施路径方面，张意等[5]、李庆祥等[6]及贺林林等[7]从“双碳”战略高度分析近零碳港口的建设挑战与发展思路；针对区域与特定类型港口，姜丰怡等[8]提出长江航运的绿色转型路径；程大千等[9]探讨江苏省“零碳港口”的发展模式；赵颖慧等[10]则聚焦北方散货港口的绿色改造难点；此外，封学军等[11]通过实证验证了风光混合能源系统的减排效益。

然而，现有的评价体系尚不足以支撑近零碳港口评价的精准量化。一方面，现行绿色港口评价无法直接应用于近零碳港口评价。现行绿色港口评价指标体系对“碳排放”这一核心维度的颗粒度不够，难以精准刻画能源替代率、设备电气化程度等关键脱碳指标的贡献[12-13]。另一方面，现有研究[14-15]仍多采用层次分析法等确定性数值方法，忽略了港口碳排放具有模糊性与随机性的特点，导致评价结果难以客观。蒋柳鹏等[16]的研究表明，引入云模型是解决此类评价模糊性与随机性问题的有效途径之一。

针对上述问题，本文界定了近零碳港口的概念与评价范围：“近零碳”并非绝对的“零排放”，而是指在现有技术条件下，通过能源结构优化、设备电气化及管理升级最大程度降低直接碳排放；考虑港口施工期排放属于一次性的隐含碳，而运营期长达数十年甚至更久，是港口碳排放的主要来源，也是实施减排管理和技术改造的核心阶段，故本文的评价范围主要聚焦于港口运营期。

在此基础上，本文构建一套科学量化的近零碳港口综合评价体系。本文的创新点在于：构建涵盖保障机制、运营管理、业务活动及碳减排成效共 4 个维度、10 项二级指标及 22 项三级指标的评价体系，引入在处理不确定性问题上具有显著优势的云模型，利用“期望、熵、超熵”3 个数字特征将定性评价转化为定量描述，解决评价过程中的信息丢失与主观偏差问题。研究成果可为我国内河港口的近零碳建设提供理论依据与差异化改进策略。

1 研究方法

1.1 近零碳港口评价指标体系构建方法

为确保评价体系的科学性与适用性，本文采用“文献频度统计→能源活动分析→专家咨询”的组合路径进行指标筛选。首先，基于中国知网与 Web of Science 数据库[17]，以“低碳港口”“港口能效评价”为关键词检索近 5 年相关文献超 50 篇，通过频度统计提取出“岸电使用率”“清洁能源占比”等 35 项高频初选指标。其次，结合港口生产作业的实际能源消耗环节，将初选指标划分为“顶层设计”与“底层技术”两大类；参考 JTS/T 105-4—2013《绿色港口等级评价标准》[18]，剔除了数据难以获取或与运营期弱相关的指标。最后，通过专家咨询形式，对指标的独立性与可操作性进行校验。

1.2 基于云模型的指标权重确定方法

近零碳港口评价涉及大量定性描述与波动性定量数据，具有显著的模糊性与随机性。传统的层次分析法通常使用确定的数值(如 1~9 标度)描述判断矩阵，往往忽略了决策过程中人的主观犹豫度及客观数据的离散特征。基于云模型的层级分析法可以克服以上问题，该模型利用期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(E_H)3 个数字特征将定性概念转化为定量描述，其中期望(E_x)反映定性概念在论域中的中心值，代表评价的主流意见；熵(E_n)度量定性概念的模糊度，反映专家意见的离散范围；超熵(E_H)反映熵的不确定性，即评价结果的随机波动程度。相较于传统层次分析法，云模型方法能有效捕捉专家打分中的模糊信息。其计算公式为：

$$E_x = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k \tag{1}$$

$$E_n = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(x_k - E_x)^2} \tag{2}$$

$$E_H = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(|x_k - E_x| - \mu_d)^2} \tag{3}$$

式中：E_x 为期望值；E_n 为熵值；E_H 为超熵值；μ_d 为绝对偏差均值；N 为专家打分总样本数；x_k 为第 k 个专家打分样本值。

采用云模型标度 $D(E_x,E_n,E_H)$ 替代层次分析法中的传统标度。基于层次分析法的云模型标度见表 1。

表 1　基于层次分析法的云模型标度

Tab. 1　Cloud model scales based on analytic hierarchy process

整数标度	云模型标度	含义
1	$D(1,E_n,E_H)$	两个因素相比,具有同等重要性
3	$D(3,E_n,E_H)$	前者比后者稍微重要
5	$D(5,E_n,E_H)$	前者比后者明显重要
7	$D(7,E_n,E_H)$	前者比后者强烈重要
9	$D(9,E_n,E_H)$	前者比后者极端重要
2	$D(2,E_n,E_H)$	重要性介于 1~3,前者比后者强于同等重要,弱于稍微重要
4	$D(4,E_n,E_H)$	重要性介于 3~5,前者比后者强于稍微重要,弱于明显重要
6	$D(6,E_n,E_H)$	重要性介于 5~7,前者比后者强于明显重要,弱于强烈重要
8	$D(8,E_n,E_H)$	重要性介于 7~9,前者比后者强于强烈重要,弱于极端重要

利用云模型标度构建综合判断矩阵，采用方根法计算获得各指标要素的期望、熵、超熵的权重向量 $\boldsymbol{W}_i=(E_{x_{i,\mathrm{norm}}},E_{n_{i,\mathrm{norm}}},E_{H_{i,\mathrm{norm}}})^{\mathrm{T}}$，相关参数计算公式为：

$$E_{x_{i,\mathrm{norm}}}=\frac{E_{x_i}}{\sum E_{x_i}}=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{4}$$

$$E_{n_{i,\mathrm{norm}}}=\frac{E_{n_i}}{\sum E_{n_i}}=\frac{\left[\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left[\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \tag{5}$$

$$E_{H_{i,\mathrm{norm}}}=\frac{E_{H_i}}{\sum E_{H_i}}=\frac{\left[\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{H_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left[\prod_{j=1}^{n}E_{x_{ij}}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{H_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \tag{6}$$

$$W_i=\alpha E_{x_{i,\mathrm{norm}}}+\beta E_{n_{i,\mathrm{norm}}}+\gamma E_{H_{i,\mathrm{norm}}} \tag{7}$$

$$\alpha+\beta+\gamma=1 \tag{8}$$

式中：$E_{x_{ij}}$、$E_{n_{ij}}$ 和 $E_{H_{ij}}$ 分别为第 i 个指标相对于第 j 个指标的期望、熵和超熵值；n 为指标数量；E_{x_i}、E_{n_i} 和 E_{H_i} 分别为第 i 个指标的最终期望、熵和超熵值；$E_{x_{i,\mathrm{norm}}}$、$E_{n_{i,\mathrm{norm}}}$ 和 $E_{H_{i,\mathrm{norm}}}$ 分别为归一化的期望、熵和超熵数值；W_i 为综合权重；α、β、γ 分别为归一化的期望、熵和超熵的权重参数。

本文设定权重参数 $\alpha=0.7$、$\beta=0.2$、$\gamma=0.1$。该参数设置遵循云模型理论中信息承载层级原则，期望($E_{x_{i,\mathrm{norm}}}$)作为云滴分布的数学期望，代表了评价指标的核心量值和主流共识，承载了决策所需的最主要信息量，因此赋予主导权重，$\alpha=0.7$；熵($E_{n_{i,\mathrm{norm}}}$)反映了评价的模糊度与离散范围，其重要性次之，$\beta=0.2$；超熵($E_{H_{i,\mathrm{norm}}}$)表征熵的不确定性，即“随机性的随机性”，对评价结果起微调作用，若权重过大会导致系统稳定性急剧下降，故赋予最小权重，$\gamma=0.1$。这种递减赋权结构在港航评价领域具有普遍适用性，文献[19]在邮轮港口竞争力评价中，同样以期望权重为主导 $\alpha=0.7$ 确定核心指标排序；文献[16]在区域交通发展水平评价中，也采用了类似的权重梯次分布。

1.3　近零碳港口评价方法

本文采用云模型对港口的近零碳水平进行评价。首先确定评价标准云，在确定评价标准云之前，建立评语集，并根据评语集的等级划分确定对应的评语取值范围。此后，发放调查问卷，邀请专家对各个三级指标按照评分细则进行打分，获得原始数据。通过公式计算得到评价指标云参数后，利用 MATLAB 软件将云参数输入到正向云发生器，得到评价指标云。将所得到的评价指标云结合指标权重，利用云模型融合算法计算综合指标云特征参数，综合指标云参数输入到正向云发生器便可得到综合评价云图，通过综合评价云图可以直观地看出港口的近零碳水平。

本文将指标结论的评语集设为 $V=\{$一级，二级，三级，四级$\}$，其对应的评语取值范围分别为[60, 70)，[70, 80)，[80, 90)，[90, 100]。近零碳港口评价标准云参数见表 2。

水运工程

表 2 近零碳港口评价标准云参数

Tab. 2 Standard cloud parameters for near-zero carbon port evaluation

近零碳水平等级	打分区间	标准云参数
四级	[90, 100]	(95,1.667,0.1)
三级	[80,90)	(85,1.667,0.1)
二级	[70,80)	(75,1.667,0.1)
一级	[60,70)	(65,1.667,0.1)

通过发放调查问卷，邀请专家根据评分细则对三级指标进行打分，将原始数据输入逆向云发生器，根据求得各三级指标的云模型特征参数，公式为：

$$E_{x_i}=\frac{\sum_{k=1}^{m}x_k}{n} \tag{9}$$

$$S_i^2=\frac{\sum_{k=1}^{m}(x_k-E_{x_i})^2}{n-1} \tag{10}$$

$$E_{n_i}=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\cdot\frac{\sum_{i=1}^{m}|x_k-E_{x_i}|}{n} \tag{11}$$

$$E_{H_i}=\sqrt{|S_i^2-E_{n_i}^2|} \tag{12}$$

式中：m 为专家数量；x_k 为第 k 个专家的打分；E_{x_i}、E_{n_i}、E_{H_i} 分别为港口的第 i 个指标的期望、熵和超熵值；S_i^2 为第 i 个指标的样本方差。

根据式(9)~(12)，求得三级评价指标的云模型特征参数 $\boldsymbol{C}=(\boldsymbol{E}_x,\boldsymbol{E}_n,\boldsymbol{E}_H)^T$，在得到评价指标云参数后，利用 MATLAB 软件将云参数输入到正向云发生器，得到评价指标云图。

结合上述所得到的评价指标云参数 $\boldsymbol{C}=(\boldsymbol{E}_x,\boldsymbol{E}_n,\boldsymbol{E}_H)^T$ 和指标权重 W_i，利用云模型融合算法计算综合指标云特征参数 $\boldsymbol{C}_t=(E_{x_t},E_{n_t},E_{H_t})^T$，各元素公式为：

$$E_{x_t}=\sum_{i=1}^{n}W_i\cdot E_{x_i} \tag{13}$$

$$E_{n_t}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}W_i\cdot E_{n_i}^{\ 2}} \tag{14}$$

$$E_{H_t}=\sum_{i=1}^{n}W_i\cdot E_{H_i} \tag{15}$$

式中：W_i 为第 i 个指标的权重；E_{x_t}、E_{n_t}、E_{H_t} 分别为期望综合指标云参数、熵综合指标云参数和超熵综合指标云参数。

2 研究结果

2.1 近零碳港口评价指标体系

为保证评价数据的权威性与代表性，通过发放调查问卷的形式，在指标体系构建和指标权重打分等方面充分咨询了专家意见。共发放 50 份调研问卷，回收 33 份有效问卷，其中 9 份来自水运相关高校，11 份来自水运相关的设计单位，10 份来自港口企业管理人员，3 份来自行业管理部门。

根据本文提出的近零碳评价指标体系构建方法，最终确立包含保障机制、运营管理、业务活动及碳减排成效 4 个一级维度、10 项二级指标及 22 项三级指标的评价体系。三级指标采用定性和定量相结合的计算方法，其中 C10~C14、C18~C21 为定量计算，并通过极大极小值法归一化并映射到 60~100 分；其中 C1~C9、C15~C17、C22 等指标为定性计算指标，按照打分规则在 60~100 分范围内进行赋分。近零碳口评价指标体系见表 3。

表 3 近零碳港口评价指标体系

Tab. 3 Evaluation index system for near-zero carbon port

一级指标	二级指标	三级指标	打分细则
A1 保障机制	B1 政策保障	C1 碳减排政策保障	有省级及以上专项政策得 90~100 分;有市级专项政策得 80~89 分;有泛用性政策得 70~79 分;无时效性政策得 60~69 分
	B2 资金支持	C2 碳减排战略规划	规划全面科学得 90~100 分;规划较完善得 80~89 分;有基本规划得 70~79 分;无长期目标或目标模糊得 60~69 分
		C3 政府资金支持	资金支持补贴力度大且应用广泛得 90~100 分;资金补贴政策支持力度较好得 80~89 分;资金补贴政策支持有限得 70~79 分;资金补贴政策的支持薄弱得 60~69 分
		C4 碳减排专项经费	专项基金充足得 90~100 分;专项基金较充足得 80~89 分;专项基金适中得 70~79 分;无专项基金得 60~69 分

续表3

一级指标	二级指标	三级指标	打分细则
A2 运营管理	B3 发展战略	C5 制定减碳考核目标	减碳考核目标科学得 90~100 分;目标明确得 80~89 分;有基本考核目标得 70~79 分;没有目标得 60~69 分
	B4 管理制度	C6 碳减排相关规划	碳减排年度规划详尽得 90~100 分;规划较完善得 80~89 分;有基本规划得 70~79 分;无相关规划得 60~69 分
		C7 碳排放管理机构	部门组织完备得 90~100 分;组织较好得 80~89 分;部门或人员不足得 70~79 分;缺乏组织得 60~69 分
		C8 组织减碳相关培训、科普、宣传	培训和科普宣传机制完善得 90~100 分;定期组织培训和宣传活动得 80~89 分;偶尔组织减碳相关培训和宣传活动得 70~79 分;无减碳培训或科普宣传,仅有零散的活动,影响范围有限得 60~69 分
		C9 编制碳排放清单	排放清单科学详细得 90~100 分;有规范化的清单得 80~89 分;有排放清单 70~79 分;无清单得 60~69 分
A3 业务活动	B5 生产设备	C10 纯电设备占有率	集装箱码头:≥75%得 90~100 分;60%~<75%得 80~89 分; 45%~<60%得 70~79 分;<45%得 60~69 分 干散货码头:≥55%得 90~100 分;40%~<55%得 80~89 分; 25%~<40%得 70~79 分;<25%得 60~69 分
		C11 能量回馈技术	港口设备全面覆盖得 90~100 分;覆盖率较高得 80~89 分;覆盖率较低得 70~79 分;无能量回馈技术得 60~69 分
	B6 生产工艺	C12 岸边装卸电气化率	集装箱码头:≥65%得 90~100 分;50%~<65%得 80~89 分; 35%~<50%得 70~79 分;<35%得 60~69 分。 干散货码头:≥45%得 90~100 分;35%~<45%得 80~89 分; 20%~<35%得 70~79 分;<20%得 60~69 分
		C13 水平运输电气化率	集装箱码头:≥70%得 90~100 分;55%~<70%得 80~89 分; 40%~<55%得 70~79 分;<40%得 60~69 分。 干散货码头:≥50%得 90~100 分; 40%~<50%得 80~89 分;25%~<40%得 70~79 分;<25%得 60~69 分
		C14 堆场作业电气化率	集装箱码头:≥75%得 90~100 分;60%~<75%得 80~89 分; 45%~<60%得 70~79 分;<45%得 60~69 分 干散货码头:≥55%得 90~100 分;45%~<55%得 80~89 分; 30%~<45%得 70~79 分;<30%得 60~69 分
	B7 辅助生产	C15 进行能耗和碳排放监测	能耗和碳排放监测体系全面得 90~100 分;体系较完善得 80~89 分; 体系一般得 70~79 分;无监测体系得 60~69 分
		C16 空调和照明灯具能耗等级	一级能耗设备占比≥70%得 90~100 分;50%~<70%得 80~89 分; 30%~<50%得 70~79 分;<30%得 60~69 分
		C17 岸电使用	岸电使用率达到 90%得 90~100 分;70%~<90%得 80~89 分; 50%~<70%得 70~79 分;<50%得 60~69 分
		C18 辅助生产设施电气化率	辅助生产设施电气化率≥70%得 90~100 分;50%~<70%得 80~89 分; 30%~<50%得 70~79 分;<30%得 60~69 分
	B8 能源体系	C19 清洁能源使用率	清洁能源使用率≥80%得 90~100 分;50%~<80%得 80~89 分; 30%~<50%得 70~79 分;<30%得 60~69 分
		C20 可再生能源渗透率	可再生能源渗透率≥20%得 90~100 分;10%~<20%得 80~89 分; 5%~<10%得 70~79 分;<5%得 60~69 分
A4 碳减排成效	B9 碳减排改进成效	C21 单位吞吐量 CO_2 排放下降率	下降率≥10%得 90~100 分;6%~<10%得 80~89 分;3%~<6%得 70~79 分;<3%得 60~69 分
	B10 碳排放效率	C22 生产单位吞吐量 CO_2 排放量	≤5.0 tCO_2/万 t 得 90~100 分;>5.0~7.0 tCO_2/万 t 得 80~89 分; >7.0~9.0 tCO_2/万 t 得 70~79 分;>9.0 tCO_2/万 t 得 60~69 分

注：C_{10} 纯电设备占有率为电动设备总量占设备总量的百分比；C_{12} 岸边装卸电气化率为电动生产工艺设备总量占同类型生产工艺设备总量的百分比；C_{13} 水平运输电气化率为电动生产工艺设备总量占同类型生产工艺设备总量的百分比；C_{14} 堆场作业电气化率为电动生产工艺设备总量占同类型生产工艺设备总量的百分比；C_{18} 辅助生产设施电气化率为电能辅助生产设施设备总量占辅助生产设施总量的百分比；C_{19} 清洁能源使用率为清洁能源消耗总量占总能耗的百分比；C_{20} 可再生能源渗透率为光伏、风电和生物质能总发电量占总能耗的百分比；C_{21} 单位吞吐量 CO_2 排放下降率为本年度排放强度比基准年度排放强度的下降值占基准年排放强度的百分比。

2.2 近零碳港口评价指标权重

根据式(1)~(7)计算可得出各项指标的权重，近零碳港口评价指标权重见表 4。

表 4 近零碳港口评价指标权重

Tab. 4 Weights of evaluation indicators for near-zero carbon ports

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重	总权重
保障机制	0.20	政策保障	0.69	碳减排政策保障	0.61	0.09
				碳减排战略规划	0.39	0.06
		资金支持	0.31	政府资金支持	0.71	0.04
				企业碳减排专项经费	0.29	0.02
运营管理	0.18	发展战略	0.35	制定减碳考核目标和相关激励机制	1	0.06
		管理制度	0.65	制定碳减排年度工作计划	0.39	0.05
				组织专门的碳排放管理机构和人员	0.36	0.04
				组织减碳相关培训、科普、宣传等活动	0.18	0.02
				编制碳排放清单报告	0.07	0.01
业务活动	0.45	生产设备	0.28	纯电设备占有率	0.70	0.09
				能量回馈技术使用情况	0.30	0.04
		生产工艺	0.22	岸边装卸	0.41	0.04
				水平运输	0.30	0.03
				堆场作业	0.29	0.03
		辅助生产	0.09	进行能源消耗、活动水平和碳排放的监测和统计	0.26	0.01
				空调和照明灯具能耗等级	0.19	0.01
				岸电使用	0.37	0.01
				辅助生产设施电气化率	0.18	0.01
		能源体系	0.41	清洁能源使用百分比	0.69	0.13
				可再生能源渗透率	0.31	0.06
碳减排成效	0.17	碳减排改进成效	0.54	生产单位吞吐量 CO_2 排放下降量	1	0.09
		碳排放效率	0.46	生产单位吞吐量 CO_2 排放量	1	0.06

2.3 案例评价结果

本文选取安徽省部分港口码头进行近零碳港口评价，考虑数据的可获得性，选取其中具有代表性的 3 个码头：1)合肥港国际集装箱码头位于合肥港南淝河港区，拥有 7 个 2 000 吨级集装箱泊位，年设计吞吐能力为 60 万 TEU，作为长江支流航道上最大的内河智能化集装箱港口，是皖中及皖西北地区最重要的国际集装箱枢纽；2)芜湖港国际集装箱码头位于芜湖港朱家桥港区，拥有 8 个集装箱专用泊位，年设计吞吐能力超过 160 万 TEU，是安徽省最大的外贸集装箱主枢纽港；马鞍山港专业化干散货码头位于马鞍山港中心港区，拥有 3 个专业化散货泊位，包括 1 个 5 000 吨级、1 个 1 万吨级和 1 个 2 万吨级泊位，年设计通过能力为 1 064 万 t，其作为芜马江海联运枢纽的关键工程，实现了大型江海直达船舶的常年安全靠泊，是马鞍山钢铁产业的重要物流支撑。

根据式(9)~(12)，将现场调研数据和专家对 3 个码头的打分输入逆向云发生器，得到各码头的云模型特征参数。合肥港国际集装箱码头的三级指标云模型参数计算结果为：

$$\begin{bmatrix} 84.9 & 95.6 & 75.7 & 94.8 & 94.6 & 85.0 & 94.3 & 85.3 & 66.2 & 85.9 & 85.7 & 94.9 & 84.9 & 84.9 & 83.5 & 83.7 & 84.0 & 94.4 & 75.6 & 95.2 & 64.4 & 94.1 \\ 3.16 & 1.50 & 2.96 & 2.51 & 2.51 & 2.76 & 2.46 & 2.21 & 2.51 & 2.66 & 2.89 & 2.63 & 2.63 & 2.16 & 1.50 & 1.88 & 2.26 & 2.61 & 2.26 & 2.76 & 2.76 & 2.41 \\ 0.74 & 0.07 & 0.72 & 0.33 & 0.65 & 0.85 & 0.65 & 0.64 & 0.88 & 0.39 & 0.86 & 0.40 & 0.78 & 0.57 & 0.13 & 0.80 & 0.45 & 0.29 & 0.40 & 0.73 & 0.47 & 0.30 \end{bmatrix}$$

水运工程

芜湖港国际集装箱码头的三级指标云模型参数计算结果为：

$$\begin{bmatrix} 84.2 & 94.5 & 75.2 & 94.8 & 93.0 & 95.0 & 85.6 & 84.6 & 65.3 & 84.1 & 75.2 & 93.0 & 75.1 & 93.7 & 94.8 & 74.7 & 83.5 & 75.2 & 75.0 & 84.0 & 93.2 & 93.7 \\ 3.06 & 2.88 & 2.76 & 3.06 & 3.01 & 2.51 & 3.26 & 2.76 & 2.96 & 3.18 & 2.76 & 2.51 & 2.88 & 3.06 & 3.06 & 2.88 & 2.51 & 3.01 & 3.26 & 3.01 & 2.51 & 3.13 \\ 0.53 & 0.84 & 0.73 & 0.53 & 0.25 & 0.91 & 1.38 & 0.47 & 0.86 & 0.50 & 0.73 & 0.71 & 0.46 & 0.82 & 0.71 & 0.55 & 0.46 & 1.05 & 0.92 & 0.62 & 0.57 & 0.96 \end{bmatrix}$$

马鞍山港专业化干散货码头三级指标云模型参数计算结果为：

$$\begin{bmatrix} 84.5 & 93.9 & 74.6 & 93.4 & 95.2 & 93.2 & 84.2 & 74.3 & 65.0 & 94.2 & 83.7 & 84.8 & 93.7 & 84.5 & 83.1 & 75.0 & 94.1 & 74.8 & 93.2 & 93.0 & 93.7 & 93.8 \\ 3.13 & 3.13 & 2.66 & 3.11 & 2.71 & 2.56 & 3.51 & 2.71 & 3.51 & 3.51 & 2.88 & 4.01 & 2.88 & 3.64 & 2.18 & 3.01 & 3.38 & 2.76 & 2.56 & 2.26 & 3.64 & 3.51 \\ 0.45 & 0.78 & 0.36 & 0.85 & 0.43 & 0.73 & 1.21 & 0.81 & 1.10 & 0.76 & 0.77 & 1.54 & 0.28 & 1.51 & 0.82 & 0.53 & 0.83 & 0.30 & 0.73 & 1.26 & 1.28 & 1.21 \end{bmatrix}$$

根据各指标的云模型参数以及权重，运用式(13)~(15)可得出安徽省 3 个典型码头的近零碳港口评价的综合云模型参数见表 5。

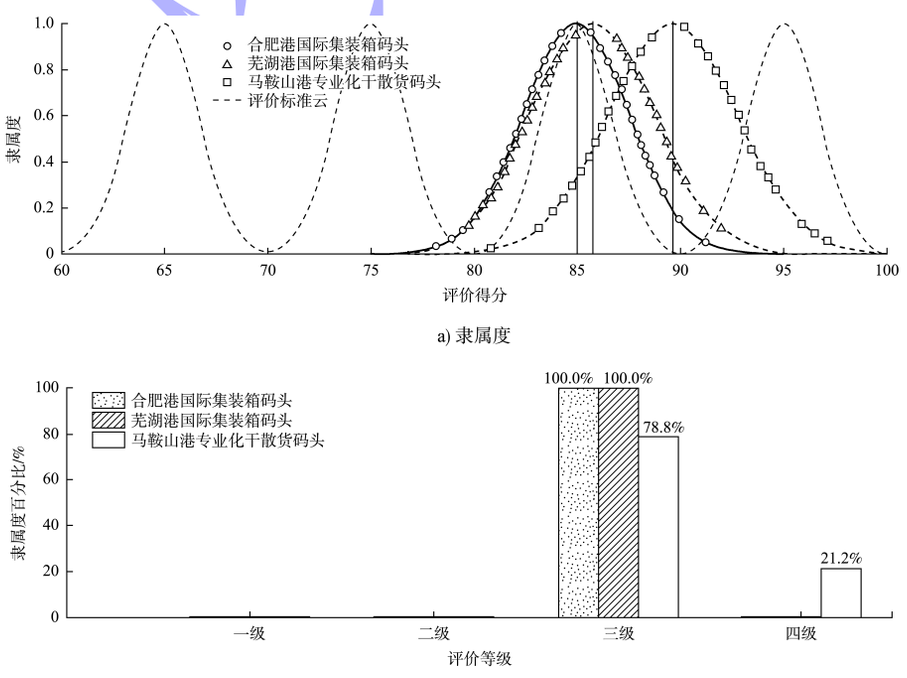
表 5　安徽省 3 个典型码头的近零碳港口评价的综合云模型参数

Tab. 5　Comprehensive cloud model parameters of evaluated near-zero carbon terminal of three typical terminal in Anhui Province

码头名称	E_x	E_n	E_H
合肥港国际集装箱码头	84.94	2.57	0.03
芜湖港国际集装箱码头	85.75	2.96	0.05
马鞍山港专业化干散货码头	89.64	3.11	0.06

利用 MATLAB 软件绘制 3 个典型码头的综合评价云图，并与标准云图进行对比。3 个典型码头近零碳综合评价云图见图 1。

由图 1 可知，从整体近零碳情况来看，3 个典型码头均已达到“近零碳水平三级”，其中，马鞍山港专业化干散货码头得分最高(89.6 分)，且拥有一定的概率隶属于“近零碳水平四级”，表现最为突出；芜湖港国际集装箱码头、合肥港国际集装箱码头分别以 85.8、84.9 分紧随其后，均表现出较高的三级隶属度。从维度表现看，3 个码头在“保障机制”与“运营管理”等顶层设计方面基础坚实，多数指标的期望值均超过 90 分。



a) 隶属度

b) 隶属度百分比

图 1　3 个典型码头近零碳综合评价云图

Fig. 1　Cloud map of near-zero carbon comprehensive evaluation for three typical terminals

从核心优势与评估业务活动与成效稳定性维度，马鞍山港专业化干散货码头凭借纯电设备普及率(94.2 分)、岸电使用(94.1 分)及碳排放效率（93.8 分）等硬件指标确立了领先地位。然而，其熵(E_n)与超熵(E_H)值显著偏高，揭示了其在生产环节存在表现波动大或评价确定性较低的风险。相比之下，合肥港国际集装箱码头和芜湖港国际集装箱码头虽然在核心生产指标上略逊一筹，但相关参数表现更加稳健，评估的确定性更强。

从发展痛点与差异化短板来看，各码头的落后指标反映了其发展的差异化瓶颈。合肥港国际集装箱码头受限于实际减排效率，其生产单位吞吐量 CO_2 排放下降量得分仅为 64.4 分，且存在碳核算监测不足的问题；马鞍山港专业化干散货码头则在管理落地环节欠缺，碳排放清单编制及员工培训得分极低；芜湖港国际集装箱码头的主要矛盾集中在能源结构与硬件基础，其水平运输与辅助生产的电气化及节能技术应用严重滞后。

3 结论

1）本文构建涵盖保障机制、运营管理、业务活动及碳减排成效 4 项一级维度、10 项二级指标及 22 项三级指标的近零碳港口评价指标体系。采用云模型确定各级指标权重，通过期望、熵和超熵 3 个数字特征有效刻画了评价过程中的模糊性与随机性。

2）本文对合肥港国际集装箱码头、芜湖港国际集装箱码头和马鞍山港专业化干散货码头进行近零碳港口评价，结果显示 3 个码头均已达到“近零碳水平三级”。马鞍山港专业化干散货码头综合得分最高(89.6 分)，且具有 21.2%的概率隶属于“近零碳等级四级”。芜湖港国际集装箱码头、合肥港国际集装箱码头分别得 85.8 和 84.9 分，均完全隶属于“近零碳水平三级”。3 个码头在政策保障与管理制度等顶层设计方面均表现出色，奠定了坚实的建设基础。

3）本文揭示了近零碳港口建设中的差异化痛点与稳定性特征。通过云参数的深度对比，研究发现马鞍山港专业化干散货码头虽然得分领先，但其熵与超熵值显著偏高，呈现出“高分但不稳”的特征，且在精细化管理与人员培训方面存在明显短板。合肥港国际集装箱码头核心瓶颈在于实际减排效率改善不足，其碳排放下降量指标处于低位。芜湖港国际集装箱码头则主要受限于能源结构转型滞后，水平运输与辅助生产环节的电气化水平有待提升。研究成果为港口和码头的近零碳建设及提升提出新见解，对推动区域绿色交通体系高质量发展具有重要的指导意义。

参考文献：

[1] 交通运输部. 关于推动内河航运高质量发展的意见: 交水发〔2025〕60 号[EB/OL]. (2025-06-27)[2025-10-12]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202506/t20250627_4171424.html.
Ministry of Transport. Opinions on promoting high-quality development of inland waterway shipping: Jiaoshuifa[2025]No. 60[EB/OL]. (2025-06-27)[2025-10-12]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202506/t20250627_4171424.html.

[2] ALAMOUSH A S, BALLINI F, ÖLÇER A I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: a review[J]. Marine pollution bulletin, 2020, 160: 111508.

[3] IRIS Ç, LAM J S L. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 112: 170-182.

[4] BJERKAN K Y, SETER H. Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports? [J]. Transportation research part D: transport and environment, 2019, 72: 243-260.

[5] 张意, 周然, 郑霖. “双碳”战略下“近零碳港口”建设的思考[J]. 交通运输部管理干部学院学报, 2022, 32(1): 19-22.
ZHANG Y, ZHOU R, ZHENG L. Thinking on the construction of “near-zero carbon port” under the “double carbon” strategy [J]. Journal of Transport Management Institute Ministry of Transport, 2022, 32(1): 19-22.

[6] 李庆祥, 王妮妮. 开展“近零碳港口”建设的思考和分析[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(5): 18-21.
LI Q X, WANG N N. Consideration and analysis on the construction of “near zero carbon port” [J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2021, 17(5): 18-21.

[7] 贺林林, 金勇, 彭银霞, 等. “双碳”背景下国内外绿色港口建设发展综述[J]. 水运工程, 2024(7): 42-50, 67.
HE L L, JIN Y, PENG Y X, et al. Review of green port construction and development under carbon peaking and carbon neutrality goals background[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 42-50, 67.

[8] 姜丰怡, 易巧巧, 胡裕, 等. 双碳目标背景下长江航运发展形势与实施路径[J]. 水运工程, 2025(6): 30-34, 94.
JIANG F Y, YI Q Q, HU Y, et al. Development situation and implementation pathway of the Yangtze River shipping under background of carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Port & waterway engineering, 2025(6): 30-34, 94.

[9] 程大千, 马小林, 毛永宁, 等. 江苏省“零碳港口”发展路径研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(5): 108-113.
CHENG D Q, MA X L, MAO Y N, et al. Research on the development path of “zero carbon port” in Jiangsu Province[J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2024, 20(5): 108-113.

[10] 赵颖慧, 褚广强, 陈刚, 等. 我国北方散货港口绿色提升改造难点研究[J]. 水运工程, 2023(2): 69-73.
ZHAO Y H, CHU G Q, CHEN G, et al. Difficulties in green upgrading and transformation of bulk cargo ports in North China [J]. Port & waterway engineering, 2023(2): 69-73.

[11] 封学军, 王海鹏, 王慧茹, 等. 近零碳视角下港口混合可再生能源系统建设效果评估方法[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(5): 99-110.
FENG X J, WANG H P, WANG H R, et al. Evaluation method for construction effect of port hybrid renewable energy system from the perspective of near-zero carbon[J]. Journal of transport information and safety, 2024, 42(5): 99-110.

[12] 林宇, 刘长兵, 张翰林, 等. 国内外绿色港口评价体系比较与借鉴[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 613-618.
LIN Y, LIU C B, ZHANG H L, et al. Comparison and reference of green port evaluation systems at home and abroad [J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(5): 613-618.

[13] 郭韦佟, 张体超. 绿色港口评价体系综述[J]. 水运管理, 2020, 42(7): 28-31.
GUO W T, ZHANG T C. Summary of green port evaluation system [J]. Shipping management, 2020, 42(7): 28-31.

[14] 陈睿, 梁军波. 低碳港口评价指标体系的创建和赋值研究[J]. 水运工程, 2024(6): 45-50.
CHEN R, LIANG J B. Research on the creation and assignment of evaluation index system for low-carbon ports [J]. Port & waterway engineering, 2024 (6): 45-50.

[15] 郝岭. 近零碳港口评价指标体系构建[J]. 水运管理, 2024, 46(10): 11-13.
HAO L. Construction of evaluation index system for near-zero carbon port[J]. Shipping management, 2024, 46(10): 11-13.

[16] 蒋柳鹏, 翁艳君, 雷智鹞. 基于云模型和 TOPSIS 模型的区域综合交通发展水平评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(10): 47-53, 69.
JIANG L P, WENG Y J, LEI Z Y. Evaluation of regional comprehensive transportation development level based on cloud model and TOPSIS model [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2024, 43(10): 47-53, 69.

[17] Clarivate. Web of Science [EB/OL]. [2025-10-28]. http: //www. webofscience. com/.

[18] 绿色港口等级评价标准: JTS/T 105-4—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Standard for green port grade evaluation: JTS/T 105-4-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[19] 刘翠莲, 庄海林, 张群淑. 基于熵权-云模型的环渤海邮轮港口竞争力评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 8-15.
LIU C L, ZHUANG H L, ZHANG Q S. Competitiveness evaluation of cruise ports in Bohai Rim based on entropy weight-cloud model [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2021, 40 (7): 8-15.

(本文编辑　王璁)

水运工程