多重冲击背景下中国沿海港口供应链韧性评价研究

袁克镖，陈雨绮，冷兆华

（宁波工程学院经济与管理学院　宁波　315211）

摘要：在全球地缘政治紧张、贸易摩擦加剧及突发事件频发的多重冲击背景下，提高沿海港口供应链韧性对中国保障港口运营稳定、降低因中断导致的物流成本及增强港口竞争优势至关重要。文章采用博弈论赋权法确定组合权重，并结合云模型理论建立沿海港口供应链韧性评价模型，选取我国 10 个沿海港口为研究对象，对其供应链韧性进行综合测度。结果表明，沿海港口的韧性水平存在两极分化现象：上海港、宁波舟山港和青岛港的供应链韧性水平较为领先，而唐山港、福州港和海口港等港口相对不足。基于分析结果，文章从强化示范效应、补齐能力短板、提升精细化运营与资源配置效率等方面，为推进港口供应链韧性建设提出了相关建议。

关键词：港口供应链；多重冲击；韧性评价；组合赋权；博弈论

中图分类号：F274；P7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2026）05-0129-15

Research on the Evaluation of Supply Chain Resilience in China's Coastal Ports Under Multiple Shocks

YUAN Kebiao，CHEN Yuqi，LENG Zhaohua

（School of Economics and Management，Ningbo University of Technology，Ningbo 315211，China）

Abstract：Against the backdrop of intensifying global geopolitical tensions，escalating trade frictions，and the frequent occurrence of unexpected events，enhancing the resilience of coastal port supply chains is crucial for China to maintain stable port operations，reduce disruption-induced increases in logistics costs，and strengthen its competitive advantages．To evaluate the resilience of coastal port supply chains，this paper employs a game-theoretic weighting method to determine combined indicator weights and integrates the cloud model theory to construct a comprehensive resilience evaluation framework．Ten major coastal ports in China are selected as research subjects for empirical assessment．The results reveal a significant polarization in resilience levels：ports such as Shanghai，Ningbo-Zhoushan，and Qingdao exhibit higher supply chain resilience，whereas ports including Tangshan，Fuzhou, and Haikou demonstrate relatively lower resilience．Based on these findings，the paper proposes targeted recommendations for enhancing port supply chain resilience from the perspectives of

收稿日期：2025-11-25；**修订日期：**2026-04-28

基金项目：浙江省哲社规划课题“数字经济下长三角地区港口碳排放效率的格局、过程与空间效应研究”（25SSHZ027YB）；浙江省社科联研究课题“数字赋能港口物流业新质生产力发展的路径与对策研究”（2025N161）；“甬江社会科学青年人才”资助成果．

作者简介：袁克镖，副教授，博士，研究方向为港口供应链管理

通信作者：冷兆华，高级工程师，博士研究生，研究方向为交通系统优化

strengthening demonstration effects，addressing capacity weaknesses，and improving refined operations and resource allocation efficiency.

Keywords：Port supply chains；Multiple shocks；Resilience evaluation；Combined weighting；Game theory

0 引言

全球产业链与供应链重塑加速，港口航运在全球供应链和地缘格局中的作用日益突出。贸易保护主义、地缘冲突及新冠疫情等多重冲击，凸显了港口供应链在应对运营中断时的脆弱性[1-2]。为有效化解供应链风险带来的不确定性，沿海港口需要加强供应链风险管理，增强韧性，以妥善处置突发事件。因此，建立沿海港口供应链韧性评估框架，有助于识别韧性短板和优化资源配置，并为维护供应链稳定及提升韧性绩效提供支撑。

“韧性”这一术语起源于物理学概念，后被引入供应链研究，主要体现为供应链系统在面对突发事件、中断风险和环境变化时维持关键功能、恢复运行状态并实现动态调整的综合能力[3-4]。相较于一般供应链，港口供应链兼具基础设施属性、网络组织属性和区域联动属性，其韧性不仅体现为港口节点自身抵御冲击和恢复运营的能力，还体现为维持上下游物流衔接、保障供应链连续性和稳定性的综合能力[5]。

随着外部风险日趋复杂，供应链韧性评价逐渐受到学界关注，相关研究已广泛应用于农业、制造业和建筑业等领域。现有研究多从抵抗、恢复、适应与创新等维度构建评价体系，并采用主观赋权、客观赋权及组合赋权等方法开展研究[6-8]。在港口供应链韧性评价方面，已有研究主要集中于港口重要性、海运网络稳定性及特定风险场景下的韧性测度。Wan 等[9]将网络中心性引入逼近理想解排序法（TOPSIS）框架以评估港口重要性；Gu 等[10]基于有效性、适应性、多样性、可控性、成本效益、响应速度、可持续性和灵活性 8 个指标建立海运供应链韧性评价指标体系，并采用最佳—最差法和模糊交互式多准则决策法（Fuzzy TODIM）进行评价。Fan 等[11]与 Panahi 等[12]分别基于模糊逻辑和贝叶斯信念网络等方法，对特殊风险情境下的海运系统韧性进行了研究。

综合已有文献，当前研究仍存在以下不足：一是研究对象多聚焦一般港口或局部风险场景，对中国沿海港口供应链韧性的系统评价仍较缺乏；二是现有指标体系尚难全面反映港口供应链韧性的多维特征；三是传统评价方法在处理韧性评价中的模糊性与随机性方面存在一定的局限。基于此，本文从预测能力、反应能力、适应能力、恢复能力和更新能力 5 个维度构建港口供应链韧性评价指标体系。采用序关系分析法（G1）与基于指标间相关性的客观赋权法（CRITIC）计算主客观权重，并结合博弈论组合赋权，提高评价结果的科学性与合理性。进一步引入云模型方法，对评价过程中的不确定性和模糊性进行刻画，并选取 10 个典型沿海港口供应链作为案例进行评估分析，旨在为港口识别韧性短板、优化风险管理策略提供理论参考与实践指导，提升风险抵御能力。

1 港口供应链韧性评价指标体系

1.1 港口供应链韧性评价体系二级指标构建

港口供应链韧性作为一种重要的供应链风险应对能力，能使港口及其关联供应链系统中的要素企业在面对自然灾害、政治动荡和技术故障等多重冲击时，通过灵活敏捷的策略恢复正常运行状态，甚至开拓新的发展路径，实现创新性突破。

本文以 Martin[13]提出的“4R”经济韧性理论分析框架（抵御、恢复、适应、再组织）为基础，结合港口供应链在外部冲击下的“感知—响应—恢复—优化”动态过程，融合港口供应链的核心内涵，并参考樊雪梅等[14]的研究，将韧性细化为 5 个维度：预测能力、反应能力、适应能力、恢复能力和更新能力，分别对应韧性构建过程中的不同阶段与能力类型，如图 1 所示。

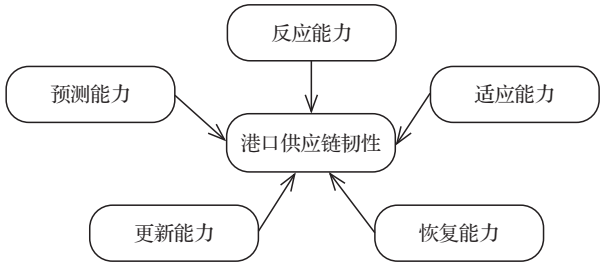

图 1　港口供应链韧性构成系统

Fig.1　Port supply chain resilience system

1.2　港口供应链韧性评价指标的筛选

基于前文维度划分，结合港口供应链运行特征与专家建议，本文遵循系统性、代表性与可操作性原则筛选指标。对可量化指标，采用公开数据进行表征；对难以量化的指标，采用专家评分法赋值，对部分缺乏连续数据的指标，则选取替代指标进行表征。最终构建包含 5 个一级指标和 25 个二级指标的沿海港口供应链韧性评价体系，如表 1 所示。

表 1　港口供应链韧性指标

Table 1　Indicators of port supply chain resilience

总目标	一级指标	二级指标	指标说明	指标性质	参考文献
港口供应链韧性 C	预测能力 C_1	实时预警能力 C_{11}	在危机发生前预先甄别设备异常，以设备智能化水平衡量	定性	［15］
		港口国际化贸易程度 C_{12}	外贸吞吐量 / 总吞吐量	定量	［16，17］
		智能信息化水平 C_{13}	信息的采集、识别、传输、转换、存储、分析、处理、检测和应用的过程	定性	［18］
		供应链可见性 C_{14}	通过可视化信息系统就端对端的整个供应链运营流程进行把控	定性	［14，15］
	反应能力 C_2	港口作业效率 C_{21}	全球集装箱港口绩效指数（CCPI）	定量	［19］
		港口航线辐射 C_{22}	全球港口班轮联通指数（LSCI）	定量	［20］
		信息共享程度 C_{23}	供应链成员之间信息共享广度、信息传递时间、效率	定性	［21，22］
		协调机制健全程度 C_{24}	风险发生时港口工作人员、码头运营商、船舶运营商、监管机构、应急机构各方之间的沟通与协作水平	定性	［23］
	适应能力 C_3	资源规划能力 C_{31}	扰动或环境变化条件下，系统能重新规划、重配置和优化关键资源	定性	［24］
		资源冗余性 C_{32}	包括备用货物装卸设施（如起重机和堆垛机）、泊位设施、替代人员和电力设备等资源冗余	定性	［14，25］
		调度灵活性 C_{33}	风险威胁下快速协调船舶挂靠、出发或到达	定性	［12］
		港口群协作能力 C_{34}	整合港口群的信息和资源，高效响应整个港口网络的市场需求	定性	［26，27］
	恢复能力 C_4	港口规模 C_{41}	港口年吞吐量	定量	［5］
		运输多样性 C_{42}	港口中断期间运输模式的多样性	定性	［28，29］
		资金保障 C_{43}	利润总额 – 所得税费用	定量	［30］
		净资产收益率 C_{44}	净利润 / 平均净资产 ×100%	定量	［30，31］
		资产周转率 C_{45}	营业收入净额 / 平均资产总额	定量	［30］
		区域交通支撑能力 C_{46}	省域单位面积高速公路里程数	定量	［32］
		技术修复能力 C_{47}	港口企业技术人员占比	定量	［33］
		安全管理能力 C_{48}	基于安全风险识别与控制机制，保障人员、设备和货物安全的综合管理水平	定性	［27］
		应急救援能力 C_{49}	所在城市每个人拥有医生数量衡量	定量	［29］
	更新能力 C_5	创新投入 C_{51}	研发费用 / 主营业务收入 ×100%	定量	［34-36］
		创新产出 C_{52}	申请专利数	定量	［34-36］
		数字化转型能力 C_{53}	港口及供应链节点依托数字技术实现流程再造、协同优化与管理升级的能力	定性	［37，38］
		人员培训及演练 C_{54}	港口企业安全培训总人次	定量	［25］

预测能力是指港口企业面对潜在复合风险时，能够结合现有信息快速研判并及时预警，提前采取措施以降低损失。该能力主要包含实时预警能力、港口国际化贸易程度、智能信息化水平和供应链可见性 4 个方面。其中，实时预警能力指在危机发生前预先甄别设备异常，以设备的智能化水平衡量；港口国际化贸易程度越高，越有利于提前判断国际贸易形势，以外贸吞吐量占比衡量；智能信息化水平体现信息采集、传输与处理能力；供应链可见性指通过可视化信息系统实现运输过程跟踪，以运输信息的及时跟踪率衡量。

反应能力是指港口供应链在采购、运输和仓储等过程中，能够及时感知外部环境变化并快速调整，以降低风险损失[14]。因此，本文选取港口作业效率、港口航线辐射、信息共享程度和协调机制健全程度来衡量港口供应链的反应水平。其中，港口作业效率越高，越有利于灵活调度与资源协同，提升突发事件响应能力；港口航线辐射范围越广、替代航线越多，越能加快航运调整与资源配置；信息共享程度能够降低不确定性与延误风险，促进恢复决策；协调机制健全程度则体现港口各参与方在突发事件中的沟通协作能力，有助于减少运营中断的影响并提升应急反应能力。

适应能力是指供应链在外部扰动下维持正常运行，并调整资源布局以适应变化的能力。该能力包含资源规划能力、资源冗余性、调度灵活性和港口群协作能力 4 个指标。资源规划能力是指在突发事件下快速调整资源布局的能力；资源冗余性是指通过储备设施设备提升风险应对能力；调度灵活性反映船舶挂靠、出发或到达的灵活程度，以减轻不确定性带来的影响；港口群协作能力是指通过港口间的信息与资源协同，保障突发事件下货物的正常转运。

恢复能力是指港口供应链在遭受外部冲击后，能够快速应对设备故障或业务中断，并在较短时间内恢复正常运行的能力。该能力主要由港口规模、运输多样性、资金保障、净资产收益率、资金周转率、区域交通支撑能力、技术修复能力、安全管理能力和应急救援能力来体现。其中，港口规模体现资源承载与调度能力，较大规模有助于维持运营连续性；运输多样性是指当港口运营受阻时，可供选择的多元化运输方案；资金保障和净资产收益率反映港口在扰动后的维修、再投资与恢复能力；资金周转率体现资源配置的灵活性；区域交通支撑能力是指港口所在省域的交通网络完善程度，完善程度越高，港口在中断后货物流动与供应链恢复的速度越快（考虑到港口供应链韧性不仅取决于港口节点自身的装卸与作业能力，还与腹地集疏运网络的通达性和应急保障能力密切相关，本文选取“省域单位面积高速公路里程数”作为该指标的替代变量）；技术修复能力体现为基础设施和系统功能的恢复水平；安全管理能力有助于降低突发事件带来的设施受损和运营中断风险；应急救援能力是指港口及其所在城市在突发事件后，能够迅速组织救援与医疗资源、实施现场应急处置并恢复关键功能的能力。

更新能力是指供应链在受到冲击并恢复新平衡后，港口供应链相关企业能够通过调整获得链条升级的机会，从而进一步提升供应链韧性。科技创新是推动供应链持续发展的核心动力，企业的创新投入和产出、数字化转型能力、人员培训及演练，均是提升更新能力不可或缺的指标[36]。

2 研究方法及模型构建

2.1 组合赋权值确定

2.1.1 G1 法与 CRITIC 法

G1 法由专家结合自身经验，判断各评价指标间的优先顺序及相对重要程度，并通过简单运算获得较为可靠、合理的指标权重。具体计算过程见参考文献［39］。CRITIC 法是一种客观赋权法，其核心是综合考虑指标的对比强度与冲突性：利用标准差衡量指标的区分能力，以相关系数反映指标间的关联程度，从而计算信息量并确定客观权重，为后续博弈论组合赋权提供量化依据。具体计算过程见参考文献［40］。

2.1.2 博弈论组合赋权法

在分别计算主客观权重的基础上，构建评价指标权重向量集。引入博弈论思想，使 G1 法与 CRITIC

法所得权重相互博弈，寻求一致性与折中解。以最小化各单一权重与最终组合权重间的偏差为目标，求解最优线性组合系数β_1、β_2，经归一化处理得到β_1^*、β_2^*，代入式（1）计算综合权重：

$$\boldsymbol{w}=\beta_1^*\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}+\beta_2^*\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{w}$ 为组合权重向量；$\boldsymbol{w}_1$、$\boldsymbol{w}_2$ 分别为 G1 法和 CRITIC 法计算的权重向量。

2.2　云模型

云模型是一种融合概率论与模糊数学思想的不确定性转换模型，能够同时刻画系统的随机性与模糊性。其核心是通过期望（Ex）、熵（En）和超熵（He）3 个数字特征，实现定性概念与定量数据之间的双向不确定性映射。该方法能有效处理多因素系统中指标间的模糊关联与随机波动。具体步骤如下。

2.2.1　确定评价标准云

每个准则的值可用云模型表示，利用正向云生成器可得各评价等级对应云模型的数字特征，从而构建准则体系的评价标准云模型。依据评价集，将准则评价值的有效域划分为若干子区间，其中第 k 个区间为 $[x_k^{\min}, x_k^{\max}]$，其对应的标准云数字特征为 (Ex_k, En_k, He_k)。按下面公式计算各子区间标准云的数字特征：

$$\begin{cases} Ex_k=(x_k^{\max}+x_k^{\min})/2 \\ En_k=(x_k^{\max}-x_k^{\min})/6 \\ He_k=s \end{cases} \tag{2}$$

式中：Ex_k、En_k、He_k 分别为第 k 个评价区间标准云的期望、熵和超熵；$x_k^{\max}$ 和 $x_k^{\min}$ 分别为该区间的上限值和下限值；s 为常数，根据韧性指标的不确定性选取，一般取值范围为 0.001 ～ 0.100，本文取 s=0.06。

2.2.2　确定二级指标评价云

组织专家对各项二级指标进行评分，构建评价矩阵 $\boldsymbol{C}$。共有 m 位专家和 n 个评价指标，其中 c_{ki} 表示第 k 位专家对第 i 个指标的评分，如下式所示：

$$\boldsymbol{C}=\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}, k=1,2,\cdots,m;\ i=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

通过逆向云发生器计算各指标下专家评分的数字特征。第 i 个指标的评价云模型为 $R_i(Ex_i,En_i,He_i)$，其中 i=1,2,…,n。计算公式如下：

$$\begin{cases} Ex_i=\dfrac{1}{m}\displaystyle\sum_{k=1}^{m}c_{ki} \\ En_i=\sqrt{\dfrac{\pi}{2}}\times\dfrac{1}{m}\displaystyle\sum_{k=1}^{m}|c_{ki}-Ex_i| \\ S_i^2=\dfrac{1}{m-1}\displaystyle\sum_{k=1}^{m}(c_{ki}-Ex_i)^2 \\ He_i=\sqrt{\left|S_i^2-En_i^2\right|} \end{cases} \tag{4}$$

式中：m 为参与评分的专家人数；c_{ki} 为第 k 位专家对第 i 项指标的评分；S_i^2 为第 i 个指标评分的方差。

2.2.3　确定综合评价云

综合评价云的数字特征 $R(Ex,En,He)$ 可通过下列公式计算：

$$\begin{cases} Ex=\dfrac{1}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}En_i\cdot w_i}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(Ex_i\cdot En_i\cdot w_i) \\ En=\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(En_i\cdot w_i) \\ He=\dfrac{1}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}En_i\cdot w_i}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(He_i\cdot En_i\cdot w_i) \end{cases} \tag{5}$$

式中：w_i 为基于博弈论赋权法获得的组合权重。本文通过比较综合评价云与标准评价云的分布特征差异，完成各项指标对比分析并得出评价结果。

2.2.4　确定标准评价云

韧性标准评价云图作为供应链韧性评估的参考基准，依据相关研究成果[8]及专家研讨意见构建。为反映不同水平的韧性状态，设定评语等级区间为 [0,10]，并按韧性程度划分对应的数值区间范围。在此基础上，根据式（2）计算标准云的数字特征（表 2）。同时，利用矩阵实验室（MATLAB）数学计算软件绘制韧性评价标准云图（云滴数 N=2 000）（图 2）。

2.2.5　云相似度计算

为判定各港口的供应链韧性等级，本文采用云相似度方法对综合云与标准云之间的接近程度进行测度。云相似度反映两个云模型在期望、熵及超熵维度上的相似程度，其值越接近 1，表明被评价对象与对应等级的契合度就越高。为计算综合评价云与标

表 2 评价等级划分以及特征参数

Table 2 Evaluation grade classification and characteristic parameters

韧性等级	韧性等级区间划分	标准云参数
低韧性	[0,3]	(1.5，0.500 0，0.06)
较低韧性	(3,6]	(4.5，0.500 0，0.06)
中韧性	(6,8]	(7.0，0.333 3，0.06)
较高韧性	(8,9]	(8.5，0.166 7，0.06)
高韧性	(9,10]	(9.5，0.166 7，0.06)

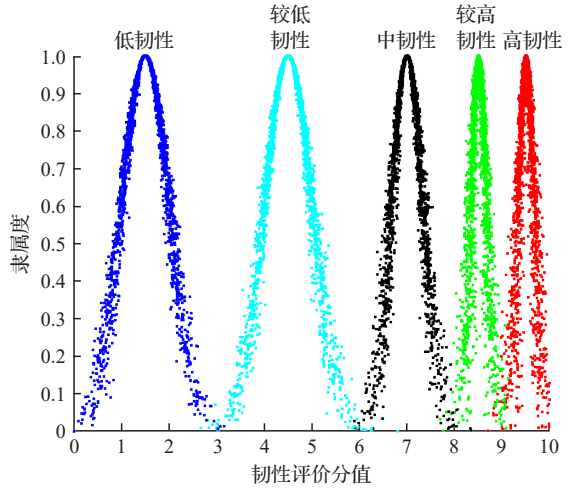

图 2 港口供应链韧性评价等级标准云

Fig.2 Standard clouds for port supply chain resilience evaluation levels

准云之间的相似度，首先计算第 k 个云滴对第 q 个云滴的隶属度 μ_{kq}，其计算公式如下：

$$\mu_{kq}=\exp\left[\frac{-\left(x_k-Ex_q\right)^2}{2En_k'^2}\right] \tag{6}$$

式中：x_k 为第 k 个云滴的特征值；Ex_q 为第 q 个标准云的期望值；En_k' 为第 q 个标准云对应第 k 个云滴的熵。

重复上述过程得到 n 个云滴的隶属度，并据此计算综合评价云与第 q 个标准云的云相似度 δ_q：

$$\delta_q=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mu_{kq} \tag{7}$$

式中：q 为标准云评价等级的序数。

3 实证分析

3.1 数据来源

由于港口数目太多，数据复杂，本文综合考虑地理分布覆盖性、港口规模与影响力、业务类型多样性和风险经验，并参考相关文献，选取 10 个沿海港口作为供应链韧性研究对象（表 3）。

表 3 研究样本港口分布

Table 3 Distribution of sample ports

地区	港口
环渤海湾港口群	唐山港、青岛港
长三角港口群	上海港、宁波舟山港
珠三角港口群	广州港、深圳港
东南沿海港口群	厦门港、福州港
西南沿海港口群	北部湾港、海口港

定量指标数据主要来源于 2023 年各港口统计年鉴、港口企业社会责任报告、全球集装箱港口绩效指数报告、港口班轮连通性指数报告、国家统计局官网及港口公开信息等。定性指标采用专家打分法，由 10 位专家采用 10 分制进行评价，其中 1 ～ 2 分表示该项能力建设较弱或机制缺失；3 ～ 4 分表示初步具备相关能力但不够完善；5 ～ 6 分表示具备基本能力且能够满足常规运行需要；7 ～ 8 分表示该项能力较强、机制较为完善；9 ～ 10 分表示该项能力建设成熟、运行效果良好。

3.2 评价指标权重的确定

本文邀请 10 位港口运营与管理、交通运输与航运规划、港口供应链及供应链韧性领域专家组成专家组（表 4），对同层级指标重要性进行排序，并依据相邻指标重要性差异赋予比值 r_k（取值范围 1.0 ～ 1.8，依次代表“相同”至“极端重要”），采用 G1 法计算主观权重。随后利用 CRITIC 法计算客观权重，并结合博弈组合赋权法得到各指标组合权重，结果如表 5 所示。

表 4　受邀专家学者相关信息

Table 4　Information on invited experts and scholars

领域	受邀对象	受邀人数 / 人
港口运营与管理	港口集团高层管理人员	2
交通运输与航运规划	发展研究规划院物流供应链研究员	2
港口供应链	大学教授	3
供应链韧性	大学副教授	3

表 5　港口供应链韧性评价指标权重

Table 5　Indicator weights for port supply chain resilience evaluation

总目标	一级指标	主观权重	客观权重	博弈论组合权重	二级指标	主观权重	客观权重	博弈论组合赋权
港口供应链韧性	预测能力C_1	0.257 2	0.238 0	0.269 1	实时预警能力C_{11}	0.044 3	0.074 9	0.064 7
					港口国际化贸易程度C_{12}	0.063 9	0.054 4	0.067 0
					智能信息化水平C_{13}	0.095 8	0.041 1	0.080 8
					供应链可见性C_{14}	0.053 2	0.029 7	0.048 2
	反应能力C_2	0.282 9	0.186 6	0.264 1	港口作业效率C_{21}	0.103 9	0.033 7	0.082 3
					港口航线辐射C_{22}	0.074 2	0.028 0	0.060 7
					信息共享程度C_{23}	0.057 1	0.044 8	0.058 1
					协调机制健全程度C_{24}	0.047 6	0.050 4	0.054 8
	适应能力C_3	0.134 0	0.271 6	0.202 8	资源规划能力C_{31}	0.026 6	0.069 3	0.050 8
					资源冗余性C_{32}	0.034 6	0.093 2	0.067 5
					调度灵活性C_{33}	0.048 5	0.025 3	0.043 1
					港口群协作能力C_{34}	0.024 2	0.040 5	0.035 1
	恢复能力C_4	0.214 3	0.151 9	0.126 7	港口规模C_{41}	0.017 6	0.083 3	0.051 8
					运输多样性C_{42}	0.014 6	0.024 5	0.021 2
					资金保障C_{43}	0.023 2	0.025 8	0.027 3
					净资产收益率C_{44}	0.021 1	0.026 9	0.026 5
					资产周转率C_{45}	0.021 1	0.024 3	0.025 2
					区域交通支撑能力C_{46}	0.014 6	0.025 7	0.021 8
					技术修复能力C_{47}	0.030 6	0.024 3	0.031 3
					安全管理能力C_{48}	0.025 5	0.026 8	0.029 3
					应急救援能力C_{49}	0.045 9	0.025 6	0.041 6
	更新能力C_5	0.111 6	0.151 9	0.137 4	创新投入C_{51}	0.037 3	0.050 5	0.048 3
					创新产出C_{52}	0.028 7	0.026 1	0.030 9
					数字化转型能力C_{53}	0.023 9	0.025 5	0.027 6
					人员培训及演练C_{54}	0.021 7	0.025 6	0.026 3

注：数据来源于 Wind 数据库、国家统计局、《中国港口年鉴（2023）》及样本港口相关运营企业发布的 2023 年度社会责任报告和环境、社会及治理（ESG）报告。

3.3 指标评价云

综合定量与定性资料，依据表 2 港口供应链韧性评价标准，对港口供应链韧性二级指标进行测度，取其平均值作为各二级指标的评判值，从而构建指标韧性评价等级矩阵。根据式（4）计算其云数字特征，结果如表 6 至表 10 所示。

表 6 港口企业二级指标评价云参数（预测能力）

Table 6 Cloud parameters of secondary indicators for port enterprise evaluation（predictive capability）

港口	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
唐山港	（7.016 7，0.403 8，0.196 4）	（7.400 0，0.593 2，0.143 4）	（7.000 0，0.292 4，0.149 9）	（6.633 3，0.222 8，0.095 0）
青岛港	（8.816 7，0.313 3，0.059 1）	（9.283 3，0.438 7，0.163 6）	（9.000 0，0.208 9，0.019 2）	（8.833 3，0.250 7，0.090 4）
宁波舟山港	（9.150 0，0.396 9，0.162 8）	（8.416 7，0.640 6，0.112 6）	（9.266 7，0.334 2，0.130 5）	（9.283 3，0.355 1，0.156 3）
上海港	（9.416 7，0.264 6，0.018 5）	（8.913 3，0.476 3，0.272 5）	（9.483 3，0.403 8，0.132 0）	（9.333 3，0.334 2，0.130 5）
厦门港	（7.750 0，0.731 1，0.153 3）	（8.736 7，0.497 1，0.199 7）	（8.133 3，0.877 3，0.055 0）	（7.750 0，0.543 1，0.219 2）
福州港	（6.500 0，0.668 4，0.212 6）	（6.566 7，0.668 4，0.167 7）	（6.300 0，0.668 4，0.359 4）	（6.250 0，0.898 2，0.352 5）
广州港	（8.766 7，0.139 3，0.085 3）	（6.333 3，0.584 9，0.364 1）	（8.583 3，0.104 4，0.035 2）	（8.566 7，0.125 3，0.054 4）
深圳港	（9.066 7，0.125 3，0.032 3）	（9.550 0，0.229 8，0.042 4）	（9.283 3，0.229 8，0.055 9）	（8.983 3，0.153 2，0.119 2）
北部湾港	（7.283 3，0.403 8，0.081 1）	（7.938 3，0.996 4，0.422 3）	（6.933 3，0.598 8，0.189 5）	（6.883 3，0.438 7，0.137 0）
海口港	（5.850 0，0.731 1，0.067 0）	（4.650 0，0.543 1，0.379 5）	（6.083 3，0.821 6，0.388 1）	（5.716 7，0.508 3，0.321 4）

表 7 港口企业二级指标评价云参数（反应能力）

Table 7 Cloud parameters of secondary indicators for port enterprise evaluation（response capability）

港口	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}
唐山港	（6.283 3，0.480 4，0.082 7）	（5.800 0，0.584 9，0.392 3）	（6.933 3，0.445 6，0.155 2）	（7.316 7，0.640 6，0.143 8）
青岛港	（6.883 3，0.564 0，0.244 1）	（8.850 0，0.229 8，0.042 4）	（8.950 0，0.146 2，0.075 0）	（8.800 0，0.334 2，0.110 9）
宁波舟山港	（9.633 3，0.083 6，0.017 7）	（9.616 7，0.153 2，0.042 4）	（9.266 7，0.250 7，0.090 4）	（9.266 7，0.334 2，0.158 2）
上海港	（8.438 3，0.520 8，0.235 7）	（9.800 0，0.041 8，0.047 5）	（9.416 7，0.264 6，0.018 5）	（9.450 0，0.208 9，0.106 6）
厦门港	（8.500 0，0.417 8，0.324 8）	（8.383 3，0.612 7，0.133 3）	（7.733 3，0.334 2，0.158 2）	（7.733 3，0.362 1，0.091 8）
福州港	（8.316 7，0.396 9，0.062 0）	（6.800 0，0.668 4，0.291 9）	（6.683 3，0.779 8，0.416 6）	（6.483 3，0.988 7，0.063 9）
广州港	（9.650 0，0.208 9，0.025 2）	（8.133 3，0.571 0，0.068 4）	（8.633 3，0.083 6，0.017 7）	（8.733 3，0.139 3，0.085 3）
深圳港	（8.766 7，0.334 2，0.032 2）	（8.633 3，0.334 2，0.250 9）	（8.966 7，0.125 3，0.054 4）	（8.916 7，0.181 0，0.113 5）
北部湾港	（7.750 0，0.731 1，0.208 6）	（7.183 3，0.564 0，0.201 0）	（7.066 7，0.584 9，0.226 8）	（7.100 0，0.668 4，0.151 0）
海口港	（7.300 0，0.793 8，0.355 1）	（5.633 3，0.584 9，0.067 7）	（5.750 0，0.626 7，0.286 9）	（6.216 7，0.772 9，0.235 9）

表 8 港口企业二级指标评价云参数（适应能力）

Table 8 Cloud parameters of secondary indicators for port enterprise evaluation（adaptive capability）

港口	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
唐山港	（6.983 3，0.933 0，0.262 4）	（7.300 0，0.626 7，0.191 6）	（7.216 7，0.480 4，0.182 1）	（7.166 7，0.334 2，0.095 0）
青岛港	（8.766 7，0.320 3，0.008 9）	（8.216 7，0.327 3，0.250 1）	（8.933 3，0.292 4，0.033 8）	（9.000 0，0.208 9，0.200 9）
宁波舟山港	（9.116 7，0.320 3，0.030 3）	（9.266 7，0.250 7，0.110 3）	（9.250 0，0.355 1，0.055 7）	（9.433 3，0.153 2，0.028 3）
上海港	（9.433 3，0.278 5，0.071 4）	（9.433 3，0.292 4，0.033 8）	（9.533 3，0.167 1，0.082 1）	（9.366 7，0.208 9，0.055 1）
厦门港	（7.900 0，0.835 5，0.319 6）	（7.383 3，0.355 1，0.177 7）	（7.766 7，0.320 3，0.219 3）	（7.466 7，0.473 5，0.350 0）

续表 8

港口	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
福州港	（6.600 0，0.584 9，0.319 2）	（6.783 3，0.647 5，0.048 5）	（5.983 3，0.571 0，0.060 6）	（6.450 0，1.086 2，0.335 9）
广州港	（8.633 3，0.125 3，0.032 3）	（8.583 3，0.104 4，0.035 2）	（8.666 7，0.097 5，0.034 1）	（8.583 3，0.153 2，0.078 8）
深圳港	（8.950 0，0.125 3，0.057 4）	（8.783 3，0.153 2，0.046 9）	（9.100 0，0.125 3，0.091 1）	（8.633 3，0.250 7，0.064 5）
北部湾港	（7.033 3，0.320 3，0.228 2）	（6.833 3，0.264 6，0.025 7）	（7.350 0，0.584 9，0.055 5）	（7.416 7，0.557 0，0.177 2）
海口港	（5.950 0，0.626 7，0.427 0）	（5.750 0，0.459 5，0.227 6）	（5.750 0，0.584 9，0.323 9）	（5.850 0，0.459 5，0.328 4）

表 9　港口企业二级指标评价云参数（恢复能力部分）

Table 9　Cloud parameters of secondary indicators for port enterprise evaluation（recovery capability）

港口	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}
唐山港	（9.260 0，0.242 3，0.033 4）	（7.033 3，0.264 6，0.112 5）	（8.130 0，0.743 6，0.203 0）	（9.050 0，0.146 2，0.040 2）
青岛港	（8.758 3，0.261 1，0.075 9）	（8.833 3，0.264 6，0.129 1）	（9.453 3，0.189 4，0.124 9）	（9.550 0，0.188 0，0.087 5）
宁波舟山港	（9.750 0，0.125 3，0.026 6）	（9.250 0，0.376 0，0.079 8）	（9.400 0，0.167 1，0.109 9）	（8.550 0，0.438 7，0.073 6）
上海港	（9.216 7，0.229 8，0.029 5）	（9.583 3，0.139 3，0.041 5）	（9.783 3，0.069 6，0.028 6）	（9.300 0，0.292 4，0.049 8）
厦门港	（6.283 3，1.190 6，0.275 6）	（8.000 0，0.543 1，0.317 9）	（8.700 0，0.250 7，0.053 2）	（6.933 3，0.738 1，0.195 1）
福州港	（7.133 3，0.543 1，0.190 5）	（6.483 3，0.779 8，0.318 6）	（8.416 7，0.431 7，0.057 5）	（6.216 7，0.480 4，0.216 4）
广州港	（8.618 3，0.261 8，0.105 2）	（8.800 0，0.250 7，0.131 0）	（7.953 3，0.378 8，0.109 5）	（7.783 3，0.480 4，0.095 7）
深圳港	（7.066 7，0.459 5，0.067 2）	（8.933 3，0.292 4，0.071 7）	（7.368 3，0.224 2，0.055 2）	（8.750 0，0.250 7，0.013 0）
北部湾港	（7.716 7，0.473 5，0.183 0）	（7.633 3，0.376 0，0.103 5）	（7.545 0，0.779 1，0.129 2）	（8.450 0，0.271 6，0.203 1）
海口港	（5.966 7，0.389 9，0.081 4）	（6.083 3，0.389 9，0.160 1）	（7.416 7，0.348 1，0.191 0）	（8.983 3，0.278 5，0.090 0）

表 10　港口企业二级指标评价云参数（更新能力）

Table 10　Cloud parameters of secondary indicators for port enterprise evaluation（renewal capability）

港口	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}
唐山港	（9.050 0，0.292 4，0.171 7）	（7.583 3，0.438 7，0.212 7）	（7.200 0，0.626 7，0.229 6）	（8.516 7，0.438 7，0.311 8）
青岛港	（8.683 3，0.229 8，0.055 9）	（9.050 0，0.146 2，0.040 2）	（9.100 0，0.292 4，0.074 3）	（8.300 0，0.334 2，0.091 1）
宁波舟山港	（9.016 7，0.201 9，0.170 0）	（8.883 3，0.396 9，0.127 1）	（9.233 3，0.306 4，0.084 8）	（8.966 7，0.264 6，0.191 5）
上海港	（8.766 7，0.543 1，0.275 1）	（9.116 7，0.278 5，0.064 0）	（9.550 0，0.188 0，0.087 5）	（8.738 3，0.218 6，0.051 1）
厦门港	（6.966 7，0.849 5，0.348 0）	（7.350 0，0.355 1，0.221 1）	（8.183 3，0.863 4，0.166 7）	（7.683 3，0.313 3，0.022 5）
福州港	（8.000 0，0.292 4，0.174 6）	（6.250 0，0.584 9，0.202 3）	（6.766 7，0.696 3，0.487 7）	（6.100 0，0.376 0，0.163 2）
广州港	（7.800 0，0.584 9，0.148 6）	（9.233 3，0.334 2，0.032 2）	（8.683 3，0.146 2，0.091 0）	（8.633 3，0.167 1，0.035 5）
深圳港	（7.550 0，0.376 0，0.075 0）	（7.516 7，0.522 2，0.083 9）	（9.183 3，0.153 2，0.101 0）	（9.166 7，0.208 9，0.031 1）
北部湾港	（8.133 3，0.181 0，0.076 8）	（7.700 0，0.250 7，0.053 2）	（7.483 3，0.403 8，0.185 9）	（9.108 3，0.389 9，0.135 6）
海口港	（6.450 0，0.396 9，0.080 7）	（6.116 7，0.403 8，0.136 3）	（5.966 7，0.264 6，0.191 5）	（8.683 3，0.229 8，0.055 9）

3.4　综合评价云

通过计算得到上海港、宁波舟山港、厦门港和福州港等 10 个港口的综合云数字特征。在此基础上，为深入对比不同港口群的韧性特征，运用正向云发生器在 MATLAB 数学计算软件中分港口群绘制各港口综合评价云图，并与标准云图进行可视化叠加，以便对比分析同一港口群内及不同港口群间的韧性水平差异，如图 3 至图 7 所示。

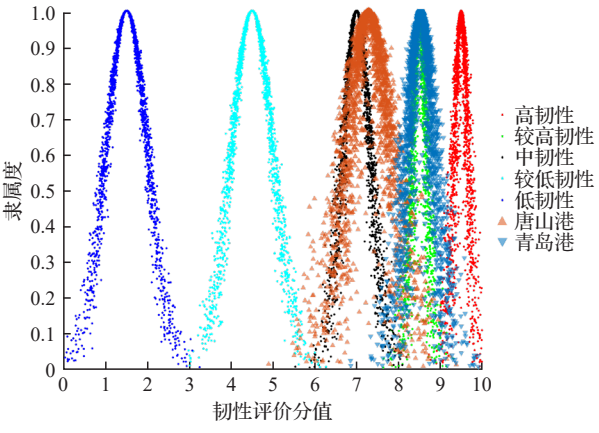

图 3 环渤海湾港口群综合评价云

Fig.3 Evaluation cloud of the Bohai Rim port cluster

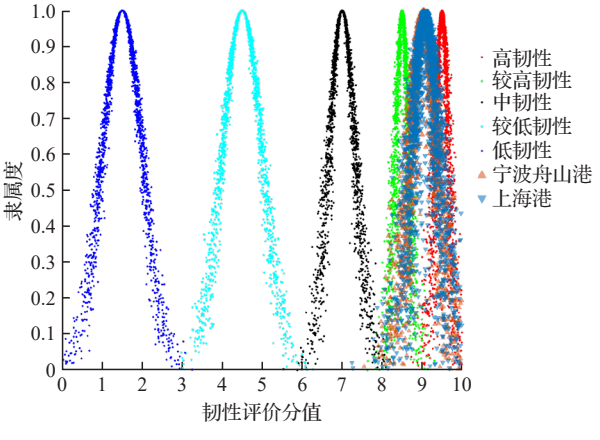

图 4 长三角港口群综合评价云

Fig.4 Evaluation cloud of the Yangtze River Delta port cluster

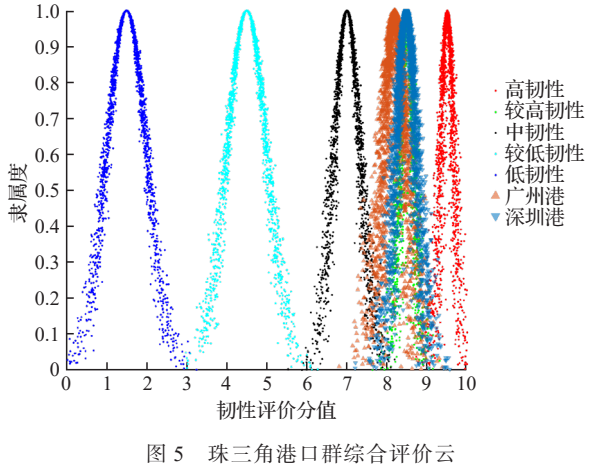

图 5 珠三角港口群综合评价云

Fig.5 Evaluation cloud of the Pearl River Delta port cluster

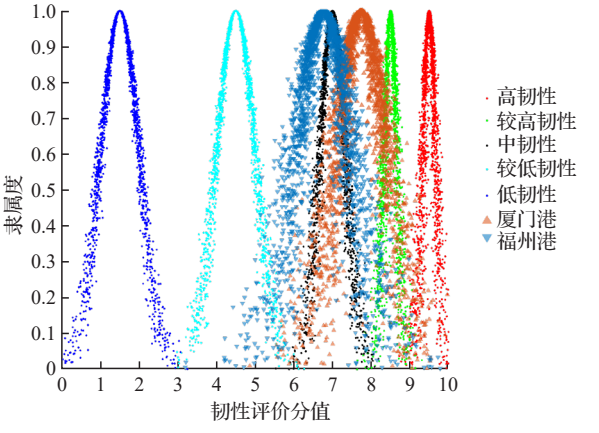

图 6 东南沿海港口群综合评价云

Fig.6 Evaluation cloud of the Southeast coasts port cluster

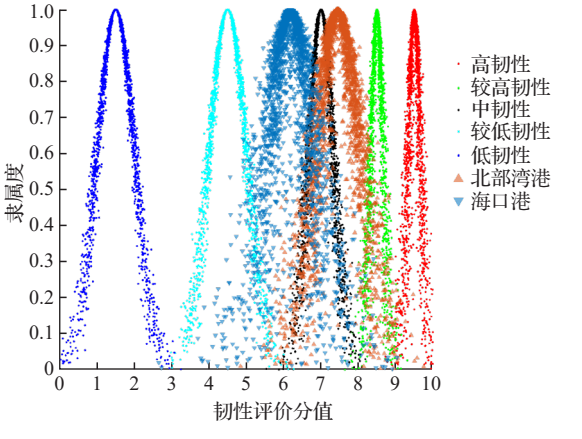

图 7 西南沿海港口群综合评价云

Fig.7 Evaluation cloud of the Southwest coasts port cluster

3.5 云相似度计算

通过式（6）和式（7）计算唐山港、青岛港、宁波舟山港、上海港、厦门港、福州港、广州港、深圳港、北部湾港和海口港供应链韧性综合评价云特征与标准云特征的相似度，结果如表 11 所示。

表 11 综合评价云与标准云的相似度

Table 11 Similarity between comprehensive evaluation clouds and standard clouds

港口	低韧性	较低韧性	中韧性	较高韧性	高韧性
唐山港	0.000 0	0.002 4	0.495 7	0.026 7	0.000 6
青岛港	0.000 0	0.000 0	0.005 4	0.401 8	0.041 9
宁波舟山港	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.082 2	0.303 2

续表 11

港口	低韧性	较低韧性	中韧性	较高韧性	高韧性
上海港	0.000 0	0.000 0	0.000 5	0.067 6	0.345 9
厦门港	0.000 0	0.000 8	0.186 4	0.146 2	0.015 2
福州港	0.000 0	0.022 5	0.463 9	0.018 4	0.002 3
广州港	0.000 0	0.000 0	0.008 9	0.509 5	0.015 7
深圳港	0.000 0	0.000 0	0.001 0	0.319 3	0.046 9
北部湾港	0.000 0	0.002 1	0.396 3	0.050 4	0.003 2
海口港	0.000 0	0.071 1	0.208 0	0.003 2	0.000 0

3.6　评价结果分析

在云图特征与云相似度分析的基础上，本文进一步结合一级指标和二级指标评价云参数，从预测能力、反应能力、适应能力、恢复能力和更新能力 5 个维度识别各港口的主导优势与关键短板，以增强结果分析的差异性和针对性。

（1）由图 4 可知，上海港与宁波舟山港供应链韧性处于“较高韧性”与“高韧性”之间，云滴多集中在［8，10］，实际测度均为“高韧性”，领先其他港口。上海港业务结构更复杂、综合功能更强，超熵更高（He=0.133 0）；宁波舟山港依托港群协同和大宗货物优势，稳定性更好（He=0.107 1）。两港云参数分别为（9.077 9，0.332 5，0.133 0）和（9.035 0，0.329 9，0.107 1），期望值 Ex 均超 9.0，熵值 En ＞ 0.32 表明存在一定的离散度。在智能信息化水平 C_{13}、供应链可见性 C_{14} 和调度灵活性 C_{33} 指标上表现突出，得益于航运中心与一体化政策的支持，形成规模与网络双重优势：充足的泊位岸线、多港区协同、海铁联运、国际干线及高吞吐量。5 个评价维度均衡无短板，综合韧性领先。

（2）根据综合评价，珠三角港口群中的深圳港与广州港的供应链韧性均处于“较高韧性”水平。深圳港云滴集中，与“较高韧性”图像重合；广州港贴近该水平。深圳港和广州港云相似度结果分别为［0.000 0，0.000 0，0.001 0，0.319 3，0.046 9］和［0.000 0，0.000 0，0.008 9，0.509 5，0.015 7］，综合判定两港为“较高韧性”。深圳港更突出预测能力和信息化支撑，数字特征（9.242 7，0.195 4，0.065 7），熵值小、可信度高，但更新能力偏弱（创新投入 C_{51}、创新产出 C_{52} 较低），与投资偏向产能扩张而非长期研发有关。广州港依托江海联运和集疏运体系，反应能力较强，但预测能力弱，其中港口国际化贸易程度 C_{12} 期望值仅为 6.333 3，内贸占比高、外贸航线密度低，导致对全球贸易波动感知弱、预警能力不足。两港差异化分工协同构筑了区域供应链韧性。

（3）环渤海湾港口群内部存在较为明显的韧性差异，从综合评价云图来看，青岛港的韧性水平处于“高韧性”与“较高韧性”之间，而唐山港则更趋近于“中韧性”。从相似度计算结果来看，青岛港整体韧性实际测度与高韧性相似度最高，唐山港则与中韧性相似度最高。青岛港在预测能力方面表现优异，主要得益于两大客观基础：一是高度国际化的贸易网络，为风险识别提供了多元、实时的大数据来源；二是领先的智能化建设，如其投入运营的自动化码头和智能算法排程系统，极大提升了对复杂运营数据的分析能力和事前预判水平。相比之下，唐山港在智能信息化水平 C_{13} 和运输多样性 C_{42} 两项指标上得分较低，直观反映了其在数字化建设和多式联运体系方面仍存在短板，与领先港口存在一定的差距。

（4）根据评价，东南沿海港口群中，厦门港供应链韧性介于“较高韧性”与“中韧性”之间（更接近后者），福州港介于“中韧性”与“较低韧性”之间，两港实际测度均与中韧性相似度最高。厦门港的短板主要在更新能力，表现为净资产收益率 C_{44} 和创新投入 C_{51} 期望值低，这与运营成本控制、资产效率及研发支出占比偏低有关。福州港短板更具综合性，在预测能力、反应能力和更新能力等多个维度均存在不足，尤其是智能信息化水平 C_{13} 和运输多样性 C_{42} 得分低，原因在于数字化基础设施滞后，铁路、公路及内河等集疏运协同不足，多式联运体系尚未高效打通。

（5）西南沿海港口群整体供应链韧性偏低。北部湾港接近“中韧性”，应急管理、安全培训较突出，但预测能力与适应能力不足，尤其是智能信息化水平 C_{13}、供应链可见性 C_{14} 和资源冗余性 C_{32} 分值低，根源在于数字化基础设施投入不足、应急资

源配置紧张。海口港介于“中韧性”与“较低韧性”之间，呈现“恢复能力相对突出，适应能力严重不足”的特点，适应能力为一级指标中最低，具体表现为港口国际化贸易程度 C_{12}、资源冗余性 C_{32} 和调度灵活性 C_{33} 分值低，源于国际航线密度低、外贸占比不高、核心资源调度弹性有限。当前，最迫切的任务是提升国际化水平、优化资源配置和增加关键要素冗余度。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文着重从多重冲击背景下对港口供应链韧性进行探索，为帮助港口企业全面掌握韧性水平，及时识别和分析在政治冲突、经济制裁和航运中断等多重压力下的供应链薄弱环节，精准了解供应链的脆弱性与抗风险能力，构建组合赋权 - 云模型的港口企业供应链韧性评价模型对港口企业供应链韧性进行测度分析，结果如下。

（1）高韧性港口（上海港、宁波舟山港、青岛港）韧性能力全面均衡。在预测能力、适应能力和恢复能力上表现突出，智能信息化水平、供应链可见性、调度灵活性及港口群协作能力较高。恢复能力稳定，资金与安全支撑较强。在更新能力方面，创新投入与数字化转型能力应用仍有提升空间。

（2）较高韧性港口（深圳港、广州港）风险抵御能力较好，但韧性结构不均衡。深圳港预测能力强，智能信息化水平与供应链可见性高，能前置调整，但更新能力薄弱，创新投入不足；广州港反应能力强，港口作业效率较高，港口航线辐射能力较强，但预测能力不足，港口国际贸易程度有限。整体呈现“应急处置能力强、长期演化动力相对不足”的特征。

（3）中韧性港口（唐山港、厦门港、福州港、北部湾港、海口港）存在明显的结构性短板。适应能力、恢复能力和更新能力弱，表现为资源冗余性不足、港口群协作能力有限、创新投入低。厦门港主要受限于更新能力，创新投入不足，净资产收益率偏低，对资金运转能力支持力度有限，制约长期韧性发展。总体来看，中韧性港口能保障核心业务不中断，但仍需持续优化韧性建设。

4.2 政策建议

4.2.1 高韧性港口：深化示范效应

上海港、宁波舟山港和青岛港等高韧性港口应发挥引领作用，构建可复制的韧性建设模式。本文建议建立港口群一体化风险监测与协同预警平台，完善多式联运与物流备份体系，增强重点货类和航线的冗余保障能力；依托自动化与信息化基础推进数字孪生系统建设，提升风险感知、应急响应与运营恢复能力；加强智能装卸、预测性维护及能源协同管理等领域的技术创新与成果转化，推动港口韧性能力的制度化、数字化发展。

4.2.2 较高韧性港口：补齐能力短板

广州港和深圳港应着力补齐关键短板，推动向高韧性跃升。广州港需要提升国际化运营水平，新增国际航线，深化与全球主要港口合作，完善国际化配套服务，提高外贸货物占比与影响力。深圳港应将创新作为核心竞争力，大幅增加研发投入，布局智能航运和绿色能源等前沿技术，建立产学研转化机制，提升专利与成果转化效率，以科技创新驱动韧性全面提升。

4.2.3 中韧性港口：提升精细化运营与资源配置效率

福州港、北部湾港、海口港、唐山港和厦门港等中韧性港口需要实施精准提升策略。重点推进智能化与数字化改造，完善智慧管理与供应链可视化平台，提升信息化集成与资源调度能力；拓展铁路和公路等多式联运网络，增强物流衔接与应急保障能力；优化资产结构与业务模式，提高资金周转与创新投入水平；加强国际航线布局与腹地物流联动，提升核心资源调度弹性与供应链协同能力，逐步构建与港口功能定位相匹配的韧性体系。

参考文献（References）：

[1] 王如玉，柴忠东，林家兴. 全球供应链空间重构下的中国外贸“三新”：新格局、新动能与新质生产力[J]. 重庆大学学报（社会科学版），2024，30(3)：18-35.

WANG Ruyu，CHAI Zhongdong，LIN Jiaxing. The three new characteristics of China’s foreign trade under the spatial reconstruction of global supply chain：New pattern，new momentum and new quality productivity[J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition)，2024，30(3)：18-35.

[2] 谢畅，马弘. 风险冲击与产业链供应链重构研究前沿与展望[J]. 当代经济管理，2024，46(8)：53-63.
XIE Chang，MA Hong. Fronts and prospects of research on risk shocks，industrial chain and supply chain restructuring[J]. Contemporary Economic Management，2024，46(8)：53-63.

[3] CHRISTOPHER M，PECK H. Building the resilient supply chain[J]. The International Journal of Logistics Management，2004，15(2)：1-14.

[4] CAI Baoping，XIE Min，LIU Yonghong，et al. Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology[J]. Reliability Engineering & System Safety，2018，172：216-224.

[5] KIM K，BUI L. Learning from Hurricane maria：island ports and supply chain resilience[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction，2019，39：101244.

[6] 戴媛媛. 中国粮食产业链供应链韧性分布动态与区域差距[J]. 统计与决策，2024，40(18)：114-119.
DAI Yuanyuan. Dynamic distribution and regional differences of resilience in China’s grain industry chain and supply chain[J]. Statistics & Decision，2024，40(18)：114-119.

[7] 徐文平，陈文博. 基于组合赋权 -VIKOR 的农产品供应链韧性评价体系研究[J]. 物流工程与管理，2023，45(12)：62-67.
XU Wenping，CHEN Wenbo. Research on resilience evaluation system of agricultural product supply chain based on combinatorial empowerment-VIKOR[J]. Logistics Engineering and Management，2023，45(12)：62-67.

[8] 周晓晔，王萱，黄兰. 电动汽车制造企业供应链韧性评价研究：基于组合赋权 - 云模型[J]. 中国物价，2024(7)：47-51.
ZHOU Xiaoye，WANG Xuan，HUANG Lan. Supply chain resilience evaluation of electric vehicle manufacturing enterprises：Based on combination weighting and cloud model[J]. China Price，2024(7)：47-51.

[9] WAN Chengpeng，ZHAO Yinxiang，ZHANG Di，et al. Identifying important ports in maritime container shipping networks along the Maritime Silk Road[J]. Ocean & Coastal Management，2021，211：105738.

[10] GU Bingmei，LIU Jiaguo，CHEN Jihong. Scenario-based strategies evaluation for the maritime supply chain resilience[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2023，124：103948.

[11] FAN Hanwen，GONG Xiaoxing，LYU Jing. Resilience assessment of strait/canal：a rule-based Bayesian network framework[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2023，124：103960.

[12] PANAHI R，GARGARI N S，LAU Y Y，et al. Developing a resilience assessment model for critical infrastructures：the case of port in tackling the impacts posed by the Covid-19 pandemic[J]. Ocean & Coastal Management，2022，226：106240.

[13] MARTIN R. Regional economic resilience，hysteresis and recessionary shocks[J]. Journal of Economic Geography，2012，12(1)：1-32.

[14] 樊雪梅，卢梦媛. 新冠疫情下汽车企业供应链韧性影响因素及评价[J]. 工业技术经济，2020，39(10)：21-28.
FAN Xuemei，LU Mengyuan. Influencing factors and evaluation of auto companies’ supply chain resilience under the COVID-19[J]. Journal of Industrial Technology and Economy，2020，39(10)：21-28.

[15] 陈为公，张娜，张友森，等. 基于 DEMATEL-ISM 的城市灾害韧性影响因素研究[J]. 灾害学，2021，36(1)：1-6.
CHEN Weigong，ZHANG Na，ZHANG Yousen，et al. Study on influencing factors of urban disaster resilience based on DEMATEL-ISM[J]. Journal of Catastrophology，2021，36(1)：1-6.

[16] 谢泗薪，徐梦凡，孙敏. 后疫情时代我国航空物流韧性评价及提升路径研究[J]. 价格理论与实践，2021(10)：152-155.
XIE Sixin，XU Mengfan，SUN Min. Researchon the resilienceevaluationand improvement pathofmy country’s aviation logistics in thepost-epidemic era[J]. Price：Theory & Practice，2021(10)：152-155.

[17] 王豆，温艳萍. 自贸区背景下港口物流竞争力评价模型构建[J]. 海洋经济，2018，8(6)：40-45.
WANG Dou，WEN Yanping. Construction of port logistics competitiveness evaluation model against the background of free trade area[J]. Marine Economy，2018，8(6)：40-45.

[18] 谭园玲，李金梅. 供应链韧性对我国统一大市场建设的影响[J]. 商业经济研究，2024(17)：10-13.
TAN Yuanling，LI Jinmei. The impact of supply chain resilience on the construction of China’s unified national market[J]. Commercial Economics Research，2024(17)：10-13.

[19] 杨晓光，孟文君，王伟，等. 我国港口企业营商环境评价及建议[J]. 中国港口，2019(8)：14-18.

YANG Xiaoguang，MENG Wenjun，WANG Wei，et al. Evaluation and suggestions on the business environment of China's port enterprises[J]. China Ports，2019(8)：14-18.

[20] YUAN Xiang，HE Xinhao. Enhancement strategy for Port resilience：shipping route optimization methods based on network characteristics of ports[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2025，13(2)：325.

[21] 朱蕾，陈静怡，袁竞峰. 基于 ISM 的装配式建筑供应链韧性关键影响因素研究[J]. 土木工程与管理学报，2020，37(5)：108-114.
ZHU Lei，CHEN Jingyi，YUAN Jingfeng. Research on critical factors influencing the resilience of prefabricated building supply chain based on ISM[J]. Journal of Civil Engineering and Management，2020，37(5)：108-114.

[22] RUSSELL D，RUAMSOOK K，ROSO V. Managing supply chain uncertainty by building flexibility in container port capacity：a logistics triad perspective and the COVID-19 case[J]. Maritime Economics & Logistics，2022，24(1)：92-113.

[23] 顾磊，曲林迟，甘爱平，等. 绿色供应链管理视角下港口绿色绩效及竞争力研究：来自沿海港口的问卷数据[J]. 科技管理研究，2014，34(23)：227-232.
GU Lei，QU Linchi，GAN Aiping，et al. Study on the green port performance and competitiveness based on the global green supply chain management[J]. Science and Technology Management Research，2014，34(23)：227-232.

[24] YIN Jingbo，KHAN R U，WANG Xinbo，et al. A data-centered multi-factor seaport disruption risk assessment using Bayesian networks[J]. Ocean Engineering，2024，308：118338.

[25] 马晓雪，周群，刘阳. 弹性理论视角下的北极航线安全评价研究：基于贝叶斯网络方法[J]. 数学的实践与认识，2020，50(11)：299-308.
MA Xiaoxue，ZHOU Qun，LIU Yang. Research on safety evaluation of arctic route from the perspective of resilience theory：based on bayesian network method[J]. Mathematics in Practice and Theory，2020，50(11)：299-308.

[26] 王景敏，崔利刚，隋博文. 港口—腹地供应链合作效率的影响因素：基于中国西部陆海新通道的实证分析[J]. 中国流通经济，2021，35(12)：28-39.
WANG Jingmin，CUI Ligang，SUI Bowen. Research on the influencing factors of cooperation efficiency for port-hinterland supply chain：based on the empirical analysis of the new western land-sea corridor[J]. China Business and Market，2021，35(12)：28-39.

[27] HOSSAIN N U I，NUR F，HOSSEINI S，et al. A Bayesian network based approach for modeling and assessing resilience：a case study of a full service deep water port[J]. Reliability Engineering & System Safety，2019，189：378-396.

[28] 卢昱嘉，陈秧分，吴振磊. 全球供应链风险评估与韧性测度：以大豆为例[J]. 地理学报，2024，79(10)：2651-2669.
LU Yujia，CHEN Yangfeng，WU Zhenglei. Global supply chain risk assessment and resilience measurement：taking soybean as an example[J]. Acta Geographica Sinica，2024，79(10)：2651-2669.

[29] 孙家庆，房朝阳，徐帆. 基于安全和集群视角的邮轮港口竞争力评价[J]. 上海海事大学学报，2024，45(1)：70-76.
SUN Jiaqing，FANG Chaoyang，XU Fan. Evaluation on cruise port competitiveness based on security and cluster perspective[J]. Journal of Shanghai Maritime University，2024，45(1)：70-76.

[30] 韩兵，康娟娟，匡海波. 港口服务供应链绿色运营动力因素及关联效应研究[J]. 工业工程与管理，2020，25(2)：59-66.
HAN Bing，KANG Juanjuan，KUANG Haibo. Dynamic factors and correlation effects of green operation of port service supply chain[J]. Industrial Engineering and Management，2020，25(2)：59-66.

[31] 李晓梅，白雪飞. 基于超效率 CCR-DEA 的国有物流企业绩效实证分析：基于 16 家上市物流企业的样本数据[J]. 中国流通经济，2016，30(4)：26-32.
LI Xiaomei，BAI Xuefei. An Empirical analysis on the state-owned logistic enterprises based on SUP-CCR-DEA[J]. China Business and Market，2016，30(4)：26-32.

[32] WANG Nanxi，WU Min，YUEN K F. Assessment of port resilience using Bayesian network：a study of strategies to enhance readiness and response capacities[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，237：109394.

[33] LIU Jiaguo，WU Juanjuan，GONG Yu. Maritime supply chain resilience：from concept to practice[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，182：109366.

[34] 王景敏，崔利刚，许茂增. 链主企业创新能力对供应链效率的影响：来自港口—腹地供应链的调查证据[J]. 中国流通经济，2022，36(8)：16-28.
WANG Jingmin，CUI Ligang，XU Maozeng. The impact of innovation ability of leading-chain-enterprise on supply chain

efficiency：survey evidence from the port-hinterland supply chain[J]. China Business and Market，2022，36(8)：16-28.

[35] 袁中华，李佩宁，万欢. 新质生产力视域下制造业产业链供应链韧性测度：以广西为例[J]. 新疆师范大学学报（哲学社会科学版），2025，46(5)：84-92.
YUAN Zhonghua，LI Peining，WAN Huan. Measurement of manufacturing industry chain and supply chain resilience from the perspective of new quality productive forces：a case study of Guangxi[J]. Journal of Xinjiang Normal University(Edition of Philosophy and Social Sciences)，2025，46(5)：84-92.

[36] 朱永光，张伍丰，王迪，等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学，2023，45(9)：1761-1777.
ZHU Yongguang，ZHANG Wufeng，WANG Di，et al. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain[J]. Resources Science，2023，45(9)：1761-1777.

[37] ROGERSON S，SVANBERG M，SANTÉN V. Supply chain disruptions：flexibility measures when encountering capacity problems in a port conflict[J]. The International Journal of Logistics Management，2022，33(2)：567-589.

[38] HE Xinhua，HU Wenfa，LI Wenhui，et al. Digital transformation，technological innovation，and operational resilience of port firms in case of supply chain disruption[J]. Marine Pollution Bulletin，2023，190：114811.

[39] 袁婉玲，崔子轩，禹洪波，等. 基于粗糙集 -G1 法组合赋权的变压器健康状态评估[J]. 电力建设，2022，43(3)：50-57.
YUAN Wanling，CUI Zixuan，YU Hongbo，et al. Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting[J]. Electric Power Construction，2022，43(3)：50-57.

[40] 张蓝月，卜伟. 产业链韧性测度、动态演化与地区差异：基于“4R”理论视角[J]. 统计与决策，2026，42(3)：132-137.
ZHANG Lanyue，BU Wei. Measurement，dynamic evolution and regional differences of industrial chain resilience：based on the “4R” theoretical perspective[J]. Statistics & Decision，2026，42(3)：132-137.