文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0098 - 08

耦合相似性指标下全球集装箱海运网络链路预测

杨俨斌[1], 孙 领[2*], 宁 钟[1]
(1. 复旦大学 管理学院, 上海 200433;
2. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

摘 要:针对现有海运网络链路预测方法多依赖于单一网络结构信息、考虑因素不全面的问题,提出一种融合多层面信息的耦合相似性指标。为充分考虑港口运营、腹地经济及海运距离等现实属性对链路预测的影响,构建节点现实属性层面的相似性指标。利用曲线下面积(AUC)评估 4 个层面(网络局部结构、全局结构、半局部结构及节点现实属性)共 22 种单一相似性指标的预测精度,筛选各层面中 AUC 值最高的指标。采用加权平均与网格搜索法确定其最优的权重组合,进而构建 AUC 值最高的耦合相似性指标。在全球集装箱海运网络上的试验结果表明,基于资源分配(RA)、重启随机游走(RWR)、叠加局部随机游走(SRW)和港口运营相似性(SPO)指标分别在 4 个层面中的链路预测精度最优。耦合相似性指标的预测精度显著优于单个指标,其中,SPO 的高权重表明节点现实属性在预测中起主导作用。把预测结果与 2024 年新增航线进行对比发现,该方法预测的准确率达到 45.48%,且其空间分布与全球航运格局基本一致,有效验证了所提出耦合相似性指标的有效性。

关键词:水路运输;耦合相似性指标;链路预测;集装箱海运网络;航线
中图分类号:U695 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.011

Link prediction in global container shipping networks based on a coupled similarity index

Yang Yanbin[1], *Sun Ling*[2*], *Ning Zhong*[1]
(1. School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. College of Transport & Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Existing link prediction methods for maritime shipping networks primarily rely on single-dimensional network structural information and fail to comprehensively account for multiple influencing factors. To address this limitation, a coupled similarity index integrating multi-level information is proposed. Specifically, to incorporate the effects of practical node attributes such as port operations, hinterland economic conditions, and maritime distances on link prediction, similarity indices based on node realistic attributes are constructed. The predictive performance of 22 individual similarity indices from four perspectives—local network structure, global network structure, quasi-local network structure, and node realistic attributes—is evaluated using the Area Under the Curve (AUC) metric. The index with the highest AUC value from each perspective is then selected. Subsequently, weighted averaging and grid search are employed to determine the optimal weight combination, thereby constructing the coupled similarity index with the highest predictive accuracy. Experimental results on the global container shipping network demonstrate that the Resource Allocation (RA), Random Walk with Restart (RWR), Superposed Random Walk (SRW), and Similarity based on Port Operations (SPO) indices achieve the best prediction performance within their respective perspectives. The proposed coupled similarity index

收稿日期:2025-11-04
基金项目:上海市哲学社会科学青年课题(2025EJC005)资助
第一作者:杨俨斌(1994—),男,助理研究员,博士,研究方向为复杂网络、港航物流、一带一路,(E-mail)yanbinyang321@163.com
*通信作者:孙 领(1990—),男,副教授,研究方向为交通运输规划与管理、航运管理,(E-mail)sunl@shmtu.edu.cn
引用格式:杨俨斌,孙领,宁钟. 耦合相似性指标下全球集装箱海运网络链路预测[J]. 中国航海,2026,49(4):98 - 105.
Yang Y B, Sun L, Ning Z. Link prediction in global container shipping networks based on a coupled similarity index[J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 98 - 105. (in Chinese)

significantly outperforms all individual indices. In particular, the relatively high weight assigned to the SPO index indicates that node realistic attributes play a dominant role in link prediction. Furthermore, comparison with newly added shipping routes in 2024 shows that the proposed method achieves a prediction accuracy of 45.48%, and the spatial distribution of the predicted routes is highly consistent with the global shipping network pattern, thereby validating the effectiveness of the proposed coupled similarity index.

Key words: waterway transportation; coupled similarity index; link prediction; container shipping network; shipping route

全球集装箱物流需求的动态变化导致集装箱班轮海运网络持续演化,呈现出航线更替、流量波动等现象。在全球集装箱海运网络中预测港口间的连接趋势,不仅有助于揭示班轮海运网络的演化规律,也对港航企业合理规划班轮航线布局、提升班轮航线网络连通性和运营效率具有重要的指导意义。

链路预测作为一种基于已有网络结构信息,推测节点间连接变化计算方法,为复杂网络演化研究提供了统一且可量化的分析框架[1]。该方法已广泛应用于社交网络、生物分子网络、电力与交通系统和贸易网络等领域[2-5]。研究者们针对海运网络尝试将链路预测方法引入到网络演化分析中。例如:Ge 等[6]结合 K-shell 分解方法,提出一系列改进的节点相似性指标(如 KS-Salton、KS-AA、KS-RA 和 KS-LRW),从网络整体角度分析全球集装箱海运网络未来可能出现的连接;Yuan 等[7]将节点中心性和传统相似性指标结合,对东亚—东南亚集装箱海运网络进行链路预测。这些研究主要依赖网络结构层面的相似性指标来实施港口间连接的预测。

随着研究的深入,网络节点的现实属性对链路预测的重要性日益凸显。因此,越来越多的研究尝试将这些现实属性纳入相似性指标体系,进而量化评估其对节点间连接预测精度(简称预测精度)的影响。例如:冯霞等[8]提出节点的社会、经济等属性对航空运输网络的演变有重要影响,在预测未来新增航线时,相较于基准方法,增加这些现实属性,有助于提升预测精度;张培文等[9]从网络结构与节点属性出发构建多类相似性指标,并对这些指标进行加权平均,有效提升了预测精度;余红楚等[10]在液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)贸易网络预测中引入地理、贸易量和政治稳定性等多维因素,并采用随机森林算法验证预测的有效性;在海运领域,Zhu 等[11]考虑港口的运营、政治和经济环境等现实因素,结合网络结构层面的相似性指标,预测海上丝绸之路集装箱海运网络链路,发现把这些现实因素纳入到模型,可优化预测精度。

已有研究表明,引入节点的现实属性有助于提高预测节点间连接的精度,但在班轮运输领域,相关研究仍较为匮乏,且缺乏对基于不同相似性指标预测时各自预测精度的系统比较。

1)本文以全球集装箱海运网络为研究对象,构建 2 个节点现实属性层面的相似性指标,并把 20 个网络结构层面的相似性指标按局部、全局和半局部结构等 3 个层面进行分类。

2)通过 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积(Area Under Curve,AUC)值系统评估基于这 4 个层面中各类相似性指标预测时的预测精度。

3)从各层面中选取 AUC 值最大的相似性指标,结合加权耦合和网格搜索方法,构建预测精度最优(即 AUC 值最大)的耦合相似性指标。

4)基于该耦合相似性指标实施预测,并分析未来可能新增的港口间的连接。

本文立足于全球集装箱海运网络的整体结构,探究港口间的潜在链路,旨在为拓扑布局航运企业优化网络和提升网络连通效能提供理论依据与实践参考。

1 研究方法

1.1 链路预测模型

$G(V,E)$ 为一个无向网络,其中 V 为包括 N 个节点的节点集合,E 为连边集合,所有节点对的全集为 $U=N(N-1)/2$。给定一种相似性指标,为所有未产生连接的节点对 (x,y) 赋分数值 v_{xy},根据该分数值对所有未连接的节点对进行排序,分数较高的节点对即为基于该相似性指标最有可能形成连接的节点对。

为评估基于不同相似性指标实施预测的预测精度,需将连边集合 E 随机划分为训练集 E_T 和测试集 E_P,并满足 $E_T \cap E_P = \varnothing$,$E_T \cup E_P = E$。其中,$E_T$ 为已知信息计算相似性分值,E_P 为评估预测精度。选取 AUC 作为评估指标,其原理为从 E_P 中随机抽取一个实际存在的边,从非边集合 $U \backslash E$ 中随机抽取一个未连接的节点对,比较二者的相似性分值,当 E_P 中随机选择的连边的分值更高时,记 1.0 分,反之不计分,相等则计 0.5 分。重复上述过程 m 次,记 1.0 分的次数为 m_1,记 0.5 分的次数为 m_2,则 AUC 值 P_{AUC} 的计算为

$$P_{AUC} = \frac{m_1 + 0.5m_2}{m} \tag{1}$$

AUC 数值越接近于1,说明该相似性指标稳定具有更优异的预测效能。为减少随机误差,应开展多组重复独立试验,并取 AUC 的平均值作为该相似性指标的最终预测精度量化结果。

1.2 网络结构层面的相似性指标

在当前的链路预测研究中,网络结构纬度的相似性指标应用最为广泛且方法体系最为成熟[12]。基于结构信息范围的不同,网络结构层面的相似性指标可细分为网络局部结构层面相似性指标、全局结构层面相似性指标和半局结构层面相似性指标[13]。

1)网络局部结构层面相似性指标:该类指标聚焦于节点及其直接邻居间的结构关系,通常通过共同邻居数量、节点度数或其他局部特征来衡量节点间的相似性。常见的局部结构层面的相似性指标包括共同邻居(Common Neighbours,CN)、Salton 指标(Salton Index, SAI)、Jaccard 指标(Jaccard Index, JI)、Sorensen 指标(Sorensen Index,SOI)、大度节点有利指标(Hub Promoted Index, HPI)、大度节点不利指标(Hub Depressed Index,HDI)、莱霍纽指标(Leicht-Holme-Newman Index,LHN1)、优先连接指标(Preferential Attachment Index,PA)、亚当阿达指标(Adamic Adar Index, AA)和资源分配指标(Resource Allocation Index,RA)。

2)网络全局结构层面相似性指标:该类指标则从网络整体结构出发,综合考虑节点间的路径信息、距离等因素以评估其相似性。常见的全局结构层面的相似性指标包括 Katz 指标(Katz Index,KI)、莱霍纽第二指标(Leicht-Holme-Newman Index,LHN2)、平均通勤时间(Average Commute Time,ACT)、基于随机游走的余弦相似性(Cosine Based on L +, Cos +)、重启随机游走(Random Walk with Restart, RWR)、SimRank 指标(SimRank Index,SRI)和矩阵森林指标(Matrix Forest Index,MFI)。

3)网络半局部结构层面相似性指标:该类指标介于局部结构和全局结构之间,通常通过限定范围内的路径信息或随机游走过程来刻画节点间的关系。本指标包括局部路径指标(Local Path,LP)、局部随机游走指标(Local Random Walk,LRW)和叠加的局部随机游走指标(Superposed Random Walk, SRW)。

1.3 节点现实属性层面的相似性指标

实施网络链路预测时,仅依赖已知的拓扑结构信息往往难以克服网络数据稀疏性所带来的预测偏差。在复杂网络中,节点间连接的形成不仅受到网络结构的影响,还受节点现实属性的共同作用。文献[14]和文献[15]提出港口的集装箱吞吐量、所在城市的经济总量和港口之间的航距等,均为影响港口节点连接关系的重要因素。文献[16]得出航行距离是影响港口连接的重要因素之一的结论。具体而言,港口之间的连接概率通常与他们之间的共同邻居数量成正比,但随着港口间距离的增加,连接概率呈现出持续下降的演化特征。

借鉴文献[10]、文献[11]和文献[14]在研究中所构建的吸引力模型,本文考虑港口运营和海运距离构建港口运营相似性指标,考虑港口腹地经济和海运距离构建港口腹地经济相似性指标。

1)港口运营相似性(Similarity based on Port Operation,SPO)指标。集装箱船舶交通量能更为准确地体现港口的实际运营强度。一般而言,参与作业的集装箱船舶数越多,说明该港口处理的货运量越大,连接需求越高,从而更可能吸引其他港口建立航线联系。数据来源于新加坡物流科技公司 Portcast 的 Port Congestion Tracker 数据,汇总了2022年7月—12月期间各港口每周的集装箱船舶交通量,并以他们的和作为表征。任意2个港口节点的 S_{PO} 的计为

$$S_{PO,xy} = \frac{A_x \cdot A_y}{D_{xy}} \tag{2}$$

式(2)中:$S_{PO,xy}$ 为节点 x 和 y 之间的 S_{PO};A_x 和 A_y 分别为节点 x 和 y 的集装箱船舶交通量;D_{xy} 为节点 x 和 y 之间的海运距离,该数据基于 Netpas distance 软件获得。

2)港口腹地经济相似性(Similarity based on Port Hinterland Economy,SPHE)指标。港口腹地的经济发展水平直接影响其航运需求和联通能力。经济基础较为雄厚的区域,其港口不仅具有货物吞吐能力和物流集散潜力,而且可能成为网络中枢节点。考虑到难以获取全球港口所在城市或行政区的完整国内生产总值(Gross Domestic Product,GDP)数据,本文引入夜间灯光数据来替代 GDP 的空间尺度表征[17-18]。数据来源于 Harvard Dataverse (https://dataverse. harvard. edu/dataset. xhtml? persistentId = doi:10. 7910/DVN/YGIVCD)。为消除港口所在区域规模差异对测度值的影响,本文统计各港口周边100 km 范围内的单位面积平均夜间灯光强度,作为港口腹地的经济状况。任意2个港口节点的 PAHE 的计算方法为

$$S_{PHE,xy} = \frac{B_x \cdot B_y}{D_{xy}} \tag{3}$$

式(3)中:$S_{PHE,xy}$ 为节点 x 和 y 之间的 SPHE;B_x 和 B_y 分别为节点 x 和 y 的周边 100 km 范围内的单位面

积平均夜间灯光强度。

1.4 耦合相似性指标

网络中节点连接的形成不是单一因素决定的,必须综合考虑不同层面的相似性指标。本文提出将网络局部结构层面、网络全局结构层面、网络半局部结构层面以及节点现实属性结构层面的相似性指标结合构建耦合相似性指标,计算为

$$S_{xy} = \lambda_1 S_{xy,1} + \lambda_2 S_{xy,2} + \lambda_3 S_{xy,3} + (1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3) S_{xy,4} \quad (4)$$

式(4)中:$S_{xy,1}$为网络局部结构层面的相似性指标中AUC最大的归一化指标值,$\lambda_1 \in [0,1]$为其权重;$S_{xy,2}$为网络全局结构层面的相似性指标中AUC最大的归一化指标值,$\lambda_2 \in [0,1-\lambda_1]$为其权重;$S_{xy,3}$为网络半局部结构层面的相似性指标中AUC最大的归一化指标值,$\lambda_3 \in [0,1-\lambda_1-\lambda_2]$为其权重;$S_{xy,4}$为节点现实属性层面的相似性指标中AUC最大的归一化指标值,$1-\lambda_1-\lambda_2-\lambda_3 \in [0,1]$为其权重,归一化方法采取最小-最大归一化法。

为确定最优的耦合相似性指标,本文基于各权重的取值范围,设定步长为0.1,采用网格搜索法优化权重组合,选取依据为不同权重组合下多次链路预测中AUC的平均值。该过程既确保各指标权重的合理分配,又避免单一指标贡献过小或过大的问题。

2 全球集装箱海运网络链路预测

2.1 网络构建

基于2022年全球船舶自动识别系统(Automatic Identification System,AIS)轨迹数据和港口索引文件,提取集装箱船舶的到港与离港信息,并将每艘船舶一次靠泊过程中的经纬度、港口编号和时间戳等信息作为一条起讫点数据记录。海运网络中港口之间的连接关系定义为:若一艘集装箱船舶从港口A航行至港口B,则视为港口A与港口B之间存在一条航运连接,记为1。

考虑部分城市包含多个港区,若将其直接作为独立节点纳入网络,将导致节点重复,从而影响网络结构分析的准确性。为此,本文对港区归属进行统一处理,将同一城市下属的多个港区合并为一个港口节点。例如:将盐田港、赤湾港和蛇口港统一为深圳港;达克黑拉港和亚历山大港合并为亚历山大港;艾维亚普港和伊兹米特港合并为伊兹米特港。经数据清洗与合并处理后,最终构建一个包含581个港口节点和7 389条连边的无向海运网络。

2.2 单一相似性指标链路预测分析

采用各单一相似性指标对全球集装箱海运网络开展链路预测研究,将连边集合中90%的连边划入训练集,10%划入测试集。依托1 000组仿真试验所得数据绘制单一相似性指标的链路预测AUC箱型图见图1。

图1中:

1)在网络局部结构层面的相似性指标中,JI指标和SOI指标的平均AUC值均低于0.700 0,预测精度较差;RA指标表现最为优异,其平均AUC值高达0.962 4,展现出较强的适用性和鲁棒性。

2)在网络全局结构层面的相似性指标中,不同指标的预测精度存在明显差异。SRI指标的AUC值最低,仅为0.491 8,预测精度较差;RWR指标的AUC值达到0.959 2,为该类指标中表现最优的方法,说明其在捕捉网络结构特征方面具有更高的准确性。

3)在网络半局部结构层面的相似性指标中,3种指标的AUC值均高于0.940 0,表现优异。其中,

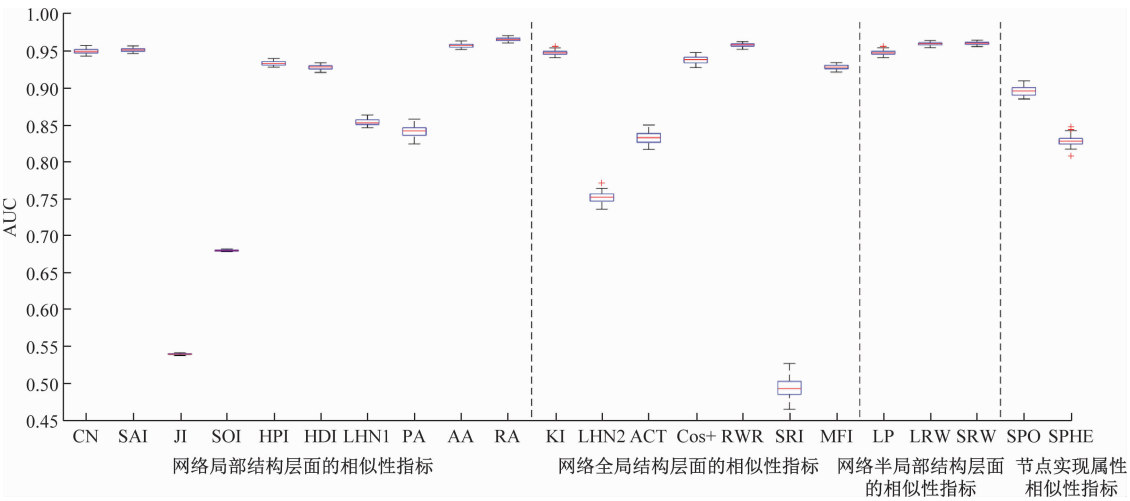


图1 单一相似性指标的链路预测AUC箱型图

Fig. 1 Box plot of AUC values for link prediction using each single similarity index

SRW 指标的 AUC 值最高,为 0.960 2,表明其对结构信息的叠加利用有助于提高预测精度。

4) 对于节点现实属性层面的相似性指标,其 AUC 值分布在(0.83,0.90),略低于其他层面中最优相似性指标的预测精度。SPO 指标考虑集装箱船舶交通量和海运距离,其 AUC 值最高,为 0.890 9,展现出良好的预测性能和实际可解释性。

2.3 耦合相似性指标链路预测分析

根据第 2.2 节中单一相似性指标链路预测的 AUC 值,分别将 RA、RWR、SRW、SPO 指标代入式(4)中的 $S_{xy,1}$、$S_{xy,3}$、$S_{xy,4}$。以步长 0.1 对 λ_1、λ_2、λ_3 进行网格搜索,遍历所有可能的权重组合,并计算不同组合下的 AUC 平均值,λ_1、λ_2 和 λ_3 在不同取值情况下耦合相似性指标的 AUC 平均值的变化见图 2。

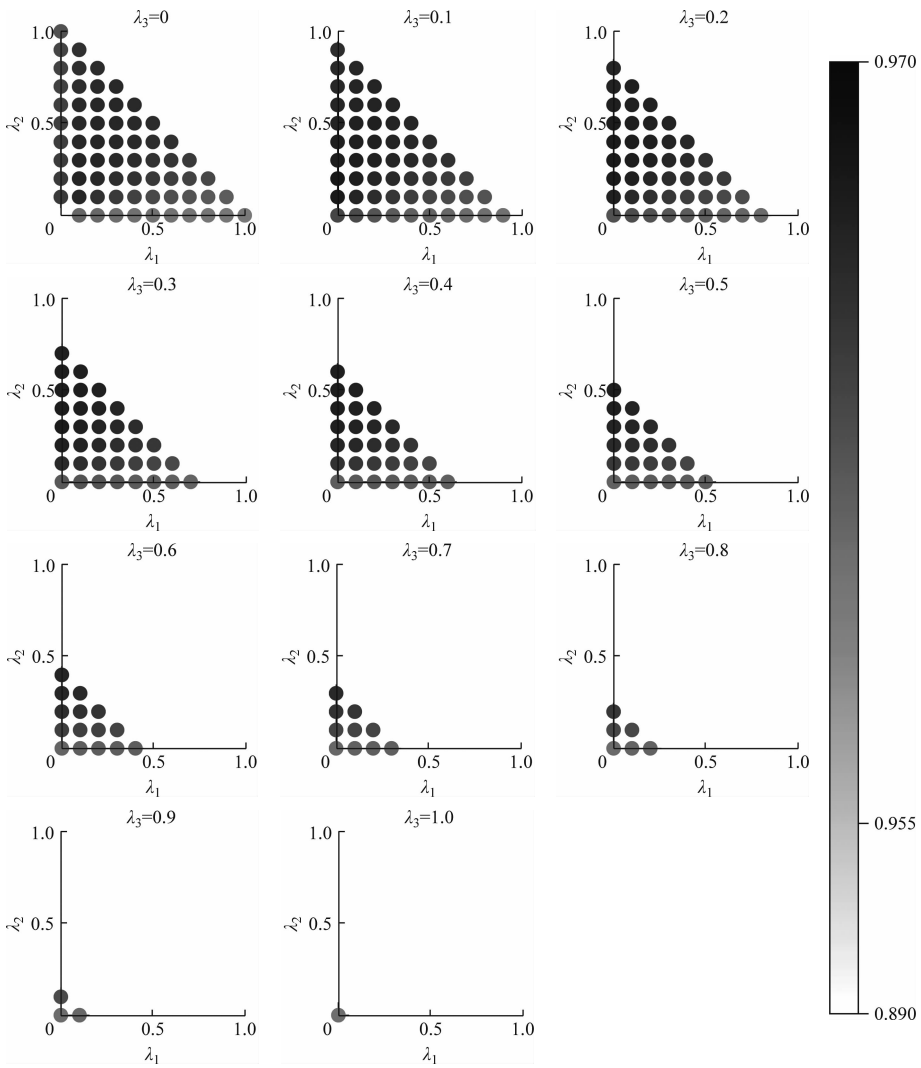


图 2 不同权重下耦合相似性指标的 AUC 平均值变化

Fig. 2 Variation in average AUC values under different coupled weights

随着系数的变化,利用耦合相似性指标进行链路预测的预测精度也相应产生波动。当 λ_1、λ_2 和 λ_3 分别为 0.2、0 和 0.1 时,其模型预测精度达到最优,AUC 值为 0.967 7。此时,节点现实属性层面的相似性指标 SPO 的权重取值为 0.7,在各项指标中占比最高,表明其对整体预测性能的贡献最为显著。尤其在最优耦合相似性指标下,RWR 指标的权重为 0,表明在当前网络结构和预测场景中,RWR 所能表征的拓扑信息已被其他指标充分涵盖或替代,其引入并未对预测精度产生增益。该权重组合的结果是数据驱动的优化结果,反映了不同指标在本研究体系中的相对重要程度。

此外,本文还比较 3 个网络结构层面的相似性指标(RA、RWR 和 SRW)与引入 SPO 后的耦合形式在链路预测中的预测精度见表 1。表 1 中:引入 SPO 后,利用各种形式相似性指标进行链路预测的 AUC 值均出现显著提升,证实节点的现实属性特征在提升链路预测精度方面具有积极作用。

2.4 预测结果分析

在链路预测问题中,节点间的相似性被视为其

表 1 基于网络结构层面的相似性指标相互耦合形式与引入 SPO 指标下的最优 AUC

Tab. 1 Optimal AUC values for combinations of similarity indices with and without the inclusion of the SPO index

相似性指标/耦合相似性指标	最优 AUC	耦合 SPO 指标后的最优 AUC
RA	0.962 4	0.964 3
RWR	0.959 2	0.960 7
SRW	0.960 2	0.963 2
RA + RWR	0.966 0	0.966 5
RA + SRW	0.967 1	0.967 7
RWR + SRW	0.961 4	0.962 9
RA + RWR + SRW	0.967 0	0.967 2

建立连接可能性的度量,即节点相似性越高,两节点之间形成连接的概率越大。基于前述最优 AUC 值下的耦合相似性指标对节点间的连接进行预测。根据 2022 年集装箱航运网络的实际数据,共有 7 389 对港口节点之间存在航线连接。在全部可能的节点对中,选择相似性得分最高的 7 389 对进行比对,其中仅 13.89% 的节点对在现实中尚未形成实际航线连接。该结果表明,基于耦合相似性排序得到的高分节点对,大部分已在现实中形成航线连接,而未连接的部分可能存在假阳性,即这些节点对在预测中被认为可能建立航线连接,但实际上尚未形成航线连接。

进一步研究发现,为分析未来可能新增的连接分布特征,本文依据港口所属区域(划分为东亚、东南亚、南亚、西亚、欧洲、非洲、北美洲、中美洲与加勒比地区、南美洲和大洋洲等 10 个区域)进行分类统计,选取 2022 年未连通节点对中耦合相似性排名前 2 000 的区域连接见表 2。由表 2 可知:所预测的潜在连接在区域内部和跨区域纬度均呈现出明显的异质性特征。

表 2 2022 年未连通节点对中耦合相似性排名前 2 000 的区域连接

Tab. 2 Regional connections among the top 2 000 unconnected node pairs ranked by coupled similarity in 2022

区域	东亚	东南亚	南亚	西亚	欧洲	非洲	北美洲	中美洲与加勒比地区	南美洲	大洋洲
东亚	180									
东南亚	128	62								
南亚	26	18	10							
西亚	19	13	15	62						
欧洲	29	17	10	111	336					
非洲	27	18	18	59	117	69				
北美洲	49	21	2	8	49	11	28			
中美洲与加勒比地区	12	3	0	0	30	12	56	39		
南美洲	19	7	0	1	12	4	34	47	75	
大洋洲	43	20	1	0	0	0	4	0	0	69

1)在区域内部连接方面,欧洲区域内部潜在连接数量达 336 条,占所有涉及欧洲的节点对的 47.25%。这一结果反映出欧洲港口之间在功能定位、市场互补和航线协同上具有高度协调性,将在短期内形成更多区域内的短程运输链路。东亚区域内部也呈现出显著的连接潜力(180 条,占比 33.80%),反映出该区域在以中国、日本和韩国为核心的港口网络主导下,形成较强的区域内经济整合趋势。相较之下,西亚和北美洲的区域内部潜在的连接数量较少,表明其网络结构可能更依赖于跨区域纬度的连接来实现枢纽功能和货物流通。

2)在跨区域间纬度连接方面,东亚—东南亚之间的预测连接数量高达 128 条,位列所有区域对之首,表明两区域之间存在显著的物资运输需求和高度的经济互嵌关系,这一趋势与全球产业链重心逐步向东南亚转移的宏观背景相一致。此外,欧洲—西亚和欧洲—非洲的潜在连接数量同样突出,体现出红海—地中海通道在全球航运体系中的持久战略价值。北美洲—中美洲及加勒比海地区的联系亦较为密切,将继续支撑美洲区域内运输网络的发展。

与此同时,东亚—北美洲和东亚—大洋洲等远距离的潜在连接也反映了跨洋主干线在全球网络中的支柱作用。

为验证所提出的耦合相似性指标在链路预测中的有效性,本文基于2022年未连接的港口节点对,选取相似性排名前2 414的港口节点对,并与2024年实际新增的2 414条港口连接进行对比,统计其中成功预测的数量。预测准确率为计算成功预测的连接数量与总预测连接数量(2 414对)之比。结果显示,共有1 098对港口在2024年实现连接,预测准确率为45.48%,而RA、RWR、SRW和SPO等4种单一相似性指标的预测准确率分别为43.29%、34.89%、31.36%和31.11%。这一结果表明,相较于单一相似性指标,所提出的耦合相似性指标具备显著优越性,在提升预测精度方面具有一定的有效性。

尽管耦合相似性指标相比单一相似性指标表现更优,预测命中率仍不高。其主要原因在于实际航线的形成受到多重复杂因素的影响,这些因素无法仅借助相似性指标完全体现。例如,贸易需求、政策变动、地缘政治和经济联系等都在影响港口连接的形成。自由贸易协定的签订可能促进区域内的港口连接,而贸易摩擦或制裁则可能导致航运关系的削弱甚至中断。此外,环境法规(如IMO 2020限硫政策及欧盟排放交易体系)也在推动船舶技术更新和路径优化,进而间接影响全球港口的连接格局。

3 结 语

本研究基于链路预测理论,提出一种融合网络结构与现实属性的耦合相似性指标,有效识别了潜在的港口连接。该方法不仅为理解全球班轮海运网络的演化机制提供理论支撑,也为航运企业与政策制定者优化航线布局、提升网络连通性提供实用工具。主要研究成果如下:

1)本研究通过引入港口运营、腹地经济和海运距离等因素,构建节点现实属性层面的相似性指标。实证结果表明,该指标在链路预测中具有较高的预测精度,展现良好的现实解释力。

2)所构建的耦合相似性指标有效克服了单一相似性指标在链路预测中的局限性。通过网格搜索法优化权重组合,确定的最优耦合相似性指标显著提升了预测精度。SPO指标被赋予较高权重,充分印证其在潜在连接预测中居于主导作用。

3)基于耦合相似性指标成功识别多个具有高潜力的航线连接,预测结果表明,未来航线连接将呈现区域强化和跨洲拓展双重趋势。此外,预测结果与实际航运格局高度吻合,验证其在理解全球海运网络演化中的有效性,具有重要的应用价值。

针对当前研究的局限性与未来拓展方向,本文提出以下几点建议。

基于更长时间序列的全球航运数据,验证耦合相似性指标在不同时间段海运网络链路预测中的精度,并分析预测结果的滞后情况。

结合图神经网络等机器学习技术,自动挖掘网络结构与多维属性间的复杂非线性关系,提升模型的解释力与预测精度。

除研究航线的形成机制外,亦应探讨航线消失的机制,以全面理解港口网络的演化规律。

参 考 文 献

[1] 吕琳媛. 复杂网络链路预测[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(5): 651-661.
Lyu L Y. Link prediction on complex networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(5): 651-661. (in Chinese)

[2] Cai W, Liu P, Wang Z, et al. Link prediction in protein-protein interaction network: a similarity multiplied similarity algorithm with paths of length three[J]. Journal of Theoretical Biology, 2024, 589: 1-12.

[3] 郭婷婷, 赵承业. 异常链路分析在电力网络恢复中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(5): 854-859.
Guo T T, Zhao C Y. Application of abnormal links analysis in restoring power networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(5): 854-859. (in Chinese)

[4] 周静, 庄艳阳, 周季蕾. 基于文本语义与动态网络结构的科研合作网络链路预测研究[J]. 情报资料工作, 2022, 43(6): 21-29.
Zhou J, Zhuang Y Y, Zhou J L. Research on scientific research cooperation network link prediction based on text semantics and dynamic network structure[J]. Information and Documentation Services, 2022, 43(6): 21-29. (in Chinese)

[5] 杨文东, 蒋云. 链路预测下全服务航空公司航线网络演化研究[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(3): 112-121.
Yang W D, Jiang Y. Research on evolution of airline networks for full-service carriers through link prediction[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(3): 112-121. (in Chinese)

[6] Ge J, Wang X, Shi W. Link prediction of the world

container shipping network: a network structure perspective[J]. Chaos, 2021, 31(11): 1-20.

[7] Yuan X, He X. 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): 1-34.

[8] 冯霞, 王尧. 基于链路预测的未来新增航线发现[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1729-1738.
Feng X, Wang Y. Future air routes discovery based on link prediction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1729-1738. (in Chinese)

[9] 张培文, 杜福民, 汪瑜. 基于链路预测的中小机场连接机制研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 298-304.
Zhang P W, Du F M, Wang Y. Connection mechanism of small and medium-sized airports based on link prediction[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 298-304. (in Chinese)

[10] 余红楚, 陈丰, 张平. 多指标耦合学习的 LNG 贸易网络链路预测方法[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学, 2024-11-08. https://link.cnki.net/urlid/37.1402.N.20241108.1457.008.
Yu H C, Chen F, Zhang P. Link prediction method of LNG shipping network based on multi-index coupling learning[J/OL]. Complex Systems and Complexity Science, 2024-11-08. https://link.cnki.net/urlid/37.1402.N.20241108.1457.008. (in Chinese)

[11] Zhu J, Yang Y, Jin Y, et al. An improved link prediction method for Maritime Silk Road shipping network using composite index[J]. Transportation Research Record, 2023, 2678(7): 674-688.

[12] 刘宏鲲, 吕琳媛, 周涛. 利用链路预测推断网络演化机制[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2011, 41(7): 816-823.
Liu H K, Lyu L Y, Zhou T. Uncovering the network evolution mechanism by link prediction[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2011, 41(7): 816-823. (in Chinese)

[13] Liu W, Lyu L. Link prediction based on local random walk[J]. Europhysics Letters, 2010, 89(5): 1-6.

[14] 王杰, 李雪, 王晓斌. 基于改进 BA 模型的不同规模海运复杂网络演化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 103-110.
Wang J, Li X, Wang X B. Complex network evolution of different scale shipping based on improved BA model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 103-110. (in Chinese)

[15] Xu X, Yang Y, Liu Y, et al. Complex network evolution of the key coastal ports in china under the Belt and Road Initiative[J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2022, 15(3/4): 309-328.

[16] Kosowska-Stamirowska Z. Network effects govern the evolution of maritime trade[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(23): 12719-12728.

[17] 郑渊茂, 何原荣, 王晓荣, 等. 夜光遥感数据应用述评与展望[J]. 遥感信息, 2020, 35(3): 1-14.
Zheng Y M, He Y R, Wang X R, et al. Application review and prospect of nighttime light remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(3): 1-14. (in Chinese)

[18] Gibson J, Olivia S, Boe-Gibson G, et al. Which night lights data should we use in economics, and where?[J]. Journal of Development Economics, 2021, 149: 1-12.