

中国大陆集装箱港口吞吐量特性分析*

郑建平¹ 邵 博²

(1. 宁德职业技术学院财经管理系 福建 宁德 355000 2. 福州大学经济与管理学院 福建 福州 350118)

[摘要] 明晰港口的发展定位和层级是推动港口群协同发展的关键。为精准定位中国大陆沿海港口,区分各港口的发展层级,选取集装箱吞吐量衡量港口规模和吞吐能力,并构建复杂网络可视图模型,对 2000—2020 年港口集装箱吞吐量的时间序列进行分析,计算出集装箱吞吐量网络平均度、网络直径和聚类系数等拓扑结构特征,进而基于网络特征将港口分成四大类。结果表明,中国大陆沿海港口集装箱吞吐量网络呈现出明显的社团结构,港口间联系紧密,但处于无序竞争状态,同质化联系严重。根据港口集装箱吞吐量的时间序列的复杂网络结构,可以准确定位港口的发展定位,明确港口在港口群的层级。

[关键词] 集装箱吞吐量 可视图 复杂网络 聚类分析

[中图分类号] F55

[文献标识码] A

[文章编号] 1673-8683(2021)09-0103-05

1 概述

在经济全球化的推动下,持续增长的国际贸易不仅促进了经济发展,也加强了国际货运对海运的依赖性。而港口作为海运的基本要素,是水陆交通的集结点和枢纽,已成为融合金融、商贸、服务和物流等的综合性资源配置中心,在促进国际贸易和地区经济发展中的地位和作用越加明显。港口建设也逐渐向区域多港口协同建设过渡,以港新城,促进区域协调可持续发展。

近年来,随着对外贸易增长及港口基础设施快速建设,中国在全球供应链和国际贸易领域中的地位也逐渐提升。据统计,中国约 95% 的国际贸易货物量是通过海运完成的,然而,在 COVID-19 疫情影响下,全球经贸形势不断恶化,产业链出现逆全球化趋势,国际和国内贸易量大幅减少。对沿海港口而言,货源减少将导致港口吞吐量增长速度放缓,给港口的生产经营带来诸多挑战,港口的发展空间也将受到限制^[1-3]。因此,中国港口必须加快从单港口建设向多层次港口群协调发展的方向转型,重新对港口进行定位,规划多层次港口群协调建设,保持中国港口在全球贸易中的

竞争力,以适应新的发展形势^[4-5]。本文针对当前中国大陆沿海港口所面临的问题,基于时间序列可视图和复杂网络理论构建港口集装箱吞吐量网络,分析了吞吐量网络的拓扑结构,计算了网络节点的平均度、网络直径和聚类系数等拓扑指标,并通过聚类算法对具有相同吞吐量特征的港口进行有效分类,以推动各港口在港口群发展实践中的合理定位。

2 文献综述

复杂网络是描述和研究复杂系统拓扑结构和行为的关键,近年来逐渐成为学者们的研究热点之一。随着学科间的交叉和不断融合,学者们开始运用图论、统计学等方法研究各种复杂网络的特征。20 世纪 60 年代,Erds 和 Renyi 提出的 ER 随机图模型标志着复杂网络理论的诞生。为了更好地描述真实网络的拓扑结构特征,Watts 和 Strogatz 于 1998 年提出了小世界网络模型,1999 年,Barabasi 通过构造无标度网络模型完善了复杂网络理论。在小世界网络和无标度网络的理论背景下,对复杂网络的研究取得了快速进展。20 世纪 70 年代以来,远洋航运的发展逐渐引起地理学家的广泛关注,并积极探索港口航运复杂网络的形成机制及

港口之间的联系^[6-8]。Hayuth 提出了美国集装箱港口网络的五阶段模型,利用洛伦兹曲线和基尼系数分析发现,在港口竞争和航运系统的影响下,港口网络的结构逐渐分散^[9]。国际海运网络作为世界上复杂程度最高的网络之一,很多学者运用经济地理学、统计物理学等方法分析其网络结构及动态特性。此外,Tran 等基于图论的演算方法对集装箱运输网络进行分析,利用度、中心性和脆弱性等复杂网络指标,探索了 2008 年全球金融危机前后全球集装箱运输网络的结构变化模式^[10]。郭建科等利用复杂网络对 2005 - 2015 年航运网络联系进行了空间分析,研究了中国集装箱港口航运网络的空间联系和区域差异^[11]。关晓光等为研究中国集装箱港口重要性与地位,以全球 992 个港口为节点构建加权网络,研究表明中国集装箱港口体系具有区位优势^[12]。杜超以港口为节点构建复杂网络,分析了中国集装箱网络的拓扑结构和空间结构,研究发现网络结构呈现出“小世界网络”的特征^[13]。汤霞等通过建立航线出口集装箱价格网络,研究了 SCFI 二级市场的地位及波动性的传递特征^[14]。基于可视性算法的原理,从网络参数上分析复杂网络的特性,可以在时间序列数据中挖掘出更多的隐藏信息,更全面地了解网络属性。苏凌通过构建时间序列神经网络对大连港吞吐量进行预测,并对神经网络进行改进,使网络模型更具通用性^[15]。宗刚等基于复杂网络理论,构建加权网络演化模型对港口吸引度和港口间海运距离进行研究^[16]。蹇令香等分析了中国沿海港口网络的度分布、网络集聚系数、平均路径长度等网络拓扑性质。结果表明中国沿海港口网络表现出较强的集聚性,整体结构呈现“小世界网络”特点^[17]。Carlos 等用复杂网络和可视化方法分析了 2008 - 2010 年间集装箱和普通货物海运航线的演变,以准确衡量港口或航线的区域和全球重要性^[18]。Wang 等利用国际航线月度数据来研究全球航运网络的空间格局及其轮辐系统,表明全球航运网络存在多层次结构^[19]。Kosowska 等使用图论和计算机科学工具研究了海运贸易网络的拓扑变化和网络通航特性,表明海运网络不会随着时间的推移而致密化,其有效直径保持不变^[20]。

综上所述,相关文献主要是针对海运航线或者区域航运网络开展了深入研究,但较少在时间序列上对

港口吞吐量网络进行定量分析,也并未针对港口吞吐量对港口群进行有效分类。为此,本文在借鉴已有研究的基础上,将时间序列可视图和复杂网络理论相结合,基于 2000 - 2020 年中国大陆沿海港口吞吐量的面板数据,利用可视图方法对港口集装箱吞吐量进行定量研究,以发现具有相同吞吐量特征的港口,明确港口在港口群发展中的定位,加强港口群间的分工协作。

3 研究方法

3.1 时间序列可视图

本文利用 Lacasa 提出的可见图算法来构造复杂网络。将中国大陆沿海港口吞吐量的相关时间序列数据转化为复杂网络,子系统 $x(t)$ 的离散时间序列数据与网络的节点相对应,并根据可视化准则构造网络连接,通过以下公式来建立连边:

$$x^b < x^a + (x^c - x^a) \frac{t^b - t^a}{t^c - t^a}$$

也就是说,这两点可以通过所得网络中的链路连接起来。如图 1 所示,图(a)直方图中的每个垂直条的高度表示每个时间序列的数据,并且每个条还表示图(b)中相应图中的一个节点。因此,图(b)中的两个节点将被连接,并且如果在图(a)中可以看到这两个条所指示的顶部,则应在它们之间添加联系。

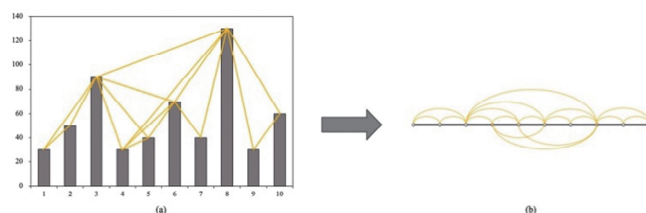


图 1 可见性图及其关联图

基于相应时间序列或可见性图的所得网络创建相邻矩阵,然后将来自网络科学的方法或措施应用于时间序列数据分析。

3.2 复杂网络结构

本文利用 Lacasa 提出的可见图算法构造复杂网络时间序列与复杂网络之间的新联系,为研究复杂网络提供了广泛的可能性。

3.2.1 平均度

对于节点 i ,度被定义为与该节点连接的其他节点

的数目,即该节点的邻点的数目。一般来说,不同的节点对应的程度不同。将所有节点的度的平均值视为复杂网络的平均度,可以表示为:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N}$$

在复杂网络中,度可以用来表征节点的重要程度。

3.2.2 平均路径长度

两个节点之间的距离称为连接两个节点的最短路径上的边数。任何两个节点之间的最大距离被表示为直径 D ,其被定义为:

$$D = \max_{i,j} d_{ij}$$

网络的平均路径长度表示任意两个节点之间的平均距离,其中 N 表示网络中的节点总数。

$$L = \frac{2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^N d_{ij}}{N(N-1)}$$

3.2.3 平均聚集系数

如果节点 i 经由边连接到其他节点,则这些节点被视为节点 i 的邻点。在连接到每个节点的边的数目上存在一个节点。对于每个节点,聚类系数计算如下:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$$

对于整个网络,通过对所有节点的聚类系数进行平均,可以计算出相应的聚类系数 C 。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N}$$

3.3 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法是应用最广泛的聚类算法。通过样本的加权平均(质心)表示该类样本,该类样本仅用于数字属性数据的聚类,具有明确的几何意义和统计意义。通常,将每个样本与其质心之间的欧式距离之和作为目标函数,或者将目标函数修改为每个类中任意两点之间的欧式距离之和,这既考虑了聚类的离散度,又考虑了聚类的紧密性。

样本 x 和 y 之间的相似性通常用它们之间的距离来表示。距离越小,样本的相似度越高。距离越大,样本越不相似,差异越大。在二维空间中使用欧式距离比较方便,欧式距离公式如下:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

首先,确定 n 个数据点 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, 随机选

取 k 个聚类中心 $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 。其次,计算每个样本到聚类中心的距离 $d(x, y)$, 并选择最小距离 $\min = |v_i - c_j|$ 将样本分类到最近的聚类中心。之后,计算每个集群中所有对象从集群中心的平均值,并将该平均值作为新的集群中心: $c_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} v_i, j = \{1, 2, \dots, k\}$ 。最后,若各聚类的聚类中心不再变化,则聚类准则函数 $J_c = \sum_{i=1}^{n_j} |v_i^j - c_j|$ 收敛, K-means 聚类算法结束,否则返回步骤 3 继续迭代,得到新的聚类中心。

4 结果和分析

4.1 数据

本文根据中国交通部《全国沿海港口规划》,选取中国大陆沿海港口集装箱吞吐量排名前 25 的港口作为研究对象,以这些港口 2000—2020 年集装箱吞吐量作为基础数据,进行吞吐量复杂网络的构建和聚类分析。数据来源自历年《中国港口年鉴》,2000—2020 年集装箱吞吐量如图 2 所示。

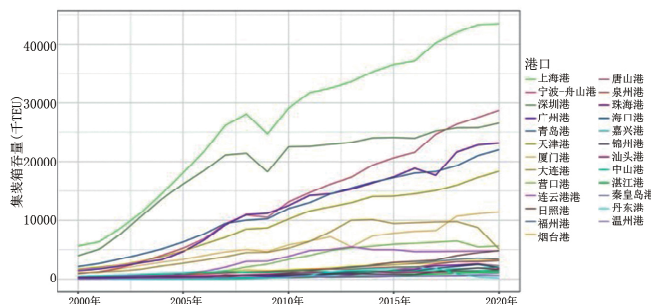


图 2 2000—2020 年各港口集装箱吞吐量

4.2 时间序列网络结构特征

港口吞吐量的复杂网络可以反映港口之间的航运联系和相互依赖关系。吞吐量网络的演化是不同地区、不同港口相互作用的结果,具有动态性和阶段性的特征。研究表明,复杂网络理论能有效解释复杂系统的形成机制,反映复杂网络的特点。平均度揭示了港口在吞吐量网络中的重要性和分布能力,是港口的基本属性。港口聚集系数是港口在局部区域集中性的集中体现,港口节点平均路径长度反映了港口的通过能力。因此,以上三个指标能全面反映复杂网络中港口的属性。运用复杂网络理论有助于揭示吞吐量网络的结构特征及问题,为促进港口群的可持续发展提供

依据。

基于中国大陆沿海航运网络的吞吐量数据,我们利用可见图方法构建了集装箱吞吐量下相应的时间序列网络。然后,从网络科学的角度,分析了这四个区域网络的相关网络属性,如表 1 所示。时间序列网络可能表现出不同的特征,表明中国大陆沿海港口之间存在不同的基础设施、生产能力、经营环境、发展目标、集疏能力和中转能力,这可能与经济、地理或政治因素有关。因此,有必要将时间序列网络与四个不同的指标相结合,深入挖掘港口吞吐量网络的性质和结构。

表 1 中国大陆港口集装箱吞吐量时间序列网络特征

| 港口 | 平均度 | 网络直径 | 路径长度 | 聚类系数 |
|--------|------|------|------|------|
| 上海港 | 2.71 | 5.00 | 2.55 | 0.74 |
| 宁波-舟山港 | 3.43 | 3.00 | 1.88 | 0.79 |
| 深圳港 | 2.00 | 5.00 | 2.62 | 0.72 |
| 广州港 | 3.00 | 5.00 | 2.34 | 0.78 |
| 青岛港 | 2.71 | 6.00 | 2.74 | 0.82 |
| 天津港 | 3.29 | 4.00 | 2.30 | 0.85 |
| 厦门港 | 2.24 | 4.00 | 2.24 | 0.65 |
| 大连港 | 3.76 | 5.00 | 2.23 | 0.72 |
| 营口港 | 4.19 | 5.00 | 2.37 | 0.87 |
| 连云港港 | 3.19 | 5.00 | 2.28 | 0.82 |
| 日照港 | 7.29 | 2.00 | 1.27 | 0.86 |
| 福州港 | 4.95 | 3.00 | 1.58 | 0.76 |
| 烟台港 | 2.67 | 4.00 | 2.12 | 0.78 |
| 唐山港 | 6.52 | 3.00 | 1.39 | 0.84 |
| 泉州港 | 2.62 | 5.00 | 2.21 | 0.75 |
| 珠海港 | 4.33 | 3.00 | 1.62 | 0.74 |
| 海口港 | 6.00 | 3.00 | 1.42 | 0.72 |
| 嘉兴港 | 5.62 | 3.00 | 1.52 | 0.77 |
| 锦州港 | 3.52 | 3.00 | 1.80 | 0.79 |
| 汕头港 | 3.71 | 4.00 | 2.05 | 0.79 |
| 中山港 | 1.95 | 5.00 | 2.57 | 0.78 |
| 湛江港 | 5.62 | 3.00 | 1.45 | 0.77 |
| 秦皇岛港 | 2.95 | 3.00 | 1.89 | 0.79 |
| 丹东港 | 4.71 | 5.00 | 2.28 | 0.81 |
| 温州港 | 3.33 | 3.00 | 1.80 | 0.80 |

4.3 集装箱吞吐量网络特征下的港口群划分

基于可视图网络的参数,利用 K-means 聚类算法对中国大陆 25 个主要沿海港口的区域时间序列网络可视图网络进行聚类分析。本文将分析中国大陆沿海港口在集装箱吞吐量网络特征下的聚类结果。

随着集装箱船舶的发展和集装箱化率的提高,全球集装箱运输业得到了快速发展。港口集装箱吞吐量反映了港口目前的规模,是港口实力的体现。利用 K-means 聚类算法对区域时间序列网络的集装箱吞吐

量可见性图网络进行分析,将港口按网络特征划分为 4 个集群,划分依据如图 3 所示。

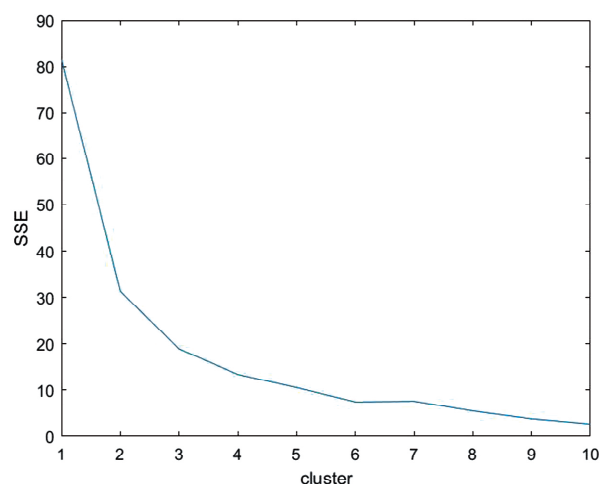


图 3 港口集群划分依据

在港口集群中,嘉兴港、日照港、唐山港、福州港、湛江港和海口港作为第一个集群,在集装箱吞吐量网络中的平均度约为 6,表明这些港口平均与集装箱吞吐量网络中的其他 6 个港口相连,其中日照港平均度最高,与网络中的其他 7 个港口相连,平均路径长度约为 1.44,平均聚集系数为 0.79。这些港口在集装箱运输网络中拥有最好的集装箱货物转运能力和最高的运输效率。大连港和青岛港是第二个集群。这些港口的平均度为 3.71,这意味着这些港口与集装箱吞吐量网络中的其他四个港口相连,聚合系数为 0.81,平均路径长度为 2.38。平均度和平均聚集系数较高,意味着这些节点在集装箱运输网络中紧密相连。该类别港口具有较强的集装箱集散能力,其集散能力、中转能力和中心性良好。天津港、汕头港、珠海港、秦皇岛港、宁波-舟山港、温州港、锦州港等港口均划分为第三集群。这些港口的平均聚集度和平均聚集系数较低,在集装箱运输中的重要性较低,与其他港口的联系较弱。广州港、上海港、深圳港、泉州港、烟台港、厦门港和中山港被划分为一个集群。这些港口的平均程度在集装箱吞吐量网络中最小,平均路径长度约为 2.46,聚集系数仅为 0.74,网络直径最大,平均路径长度和聚集系数最低,表明这些港口是集装箱吞吐量网络中最弱的。

5 结论

经济全球化促使得港口的地位愈加重要,但当前

的港口建设已无法满足国际贸易环境和海运需求。为了促进中国港口集群规划建设和协调管理,本文利用可视图和网络科学的方法对中国大陆沿海港口吞吐量网络进行了深入分析,为分析港口吞吐量的时间序列特征和明确港口的战略定位提供了一个新视角,对于制定科学的港口规划和协调发展政策具有指导意义。通过分析得出以下结论:

①中国大陆沿海港口集装箱吞吐量网络呈现出明显的社团结构,这与不同港口的发展政策、货物类型、腹地经济及地理位置密切相关。

②中国大陆沿海港口集装箱吞吐量网络与许多现实网络一样,具有集聚系数大、平均最短路径小等小世界特征。尽管港口间联系紧密,但处于无序恶性竞争状态,港口间同质化联系严重。

要进一步完善中国港口的航运航线网络,必须加强港口之间的联系,这就要求政府参与航线开放,并实施激励政策,使港口发展更加多元化。各级港口要根据实际情况进行战略定位,加强港口之间的合作和要素流动,加强自身业务范围的合理规划,并积极与其他区域枢纽港构建紧密的合作关系。然而,港口的规划和管理受到现实中政治、地理、经济等方面因素的影响,这些影响对海运网络的形成及其内部运转机制具有较大的约束作用。同时,港口集装箱吞吐量网络特性也说明,利用复杂网络可视图模型,结合航线的运力以及港口的吞吐量为航线的分布以及港口的规划提供指导,以实现港口协调可持续发展的思路是可行的。

参考文献:

- [1] 鄢思国. 中国港口企业在全局变局中的应变之道[J]. 中国港口, 2019(6): 8-12.
- [2] 解煌鸣. 亚洲航运港口网络连接性分析[J]. 航海, 2017(4): 66-69.
- [3] 杨秋平, 翟慧娟. 新航路对航运业及我国港口竞争格局的影响[J]. 交通与港航, 2017, 4(1): 4-8.
- [4] 蒋宇润. 宁波港口集装箱运输发展历程[J]. 中国港口, 2020(3): 55-59.
- [5] 港口协同发展与绿色增长——大连海事大学交通运输管理学院匡海波教授教育部创新团队[J]. 管理评论, 2018, 27(9): 2.
- [6] 李静宇. 交通强国 港口先行[J]. 中国储运, 2021(9): 50.
- [7] 倪彦博. 宁波舟山港对区域经济的影响[J]. 中国港口, 2021(8): 11-13.
- [8] 戈佳威, 袁克鏖, 殷明, 王学锋. 传播动力学视角下集装箱海运网络关键港口节点识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(4): 256-262.
- [9] Hayuth Y. Containerization and the load center concept. *Economic Geography*, 1981, 57(2): 160-175.
- [10] Tran N K, Haasis H D. Empirical analysis of the container liner shipping network on the East-West corridor (1995-2011) [J]. *Netnomics Economic Research & Electronic Networking*, 2014, 15(3): 121-153.
- [11] 郭建科, 何瑶, 侯雅洁. 中国沿海集装箱港口航运网络空间联系及区域差异[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1499-1509.
- [12] 关晓光, 李振福, 陈雪, 等. 基于航次加权的世界集装箱港口复杂网络结构及港口中心性研究[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 11-21.
- [13] 杜超, 王姣娥, 莫辉辉. 中国集装箱航运网络空间格局及复杂性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 190-198.
- [14] 汤霞, 匡海波, 郭媛媛. 基于复杂网络的上海出口集装箱运价指数波动传导特征研究[J]. 管理评论, 2021, 33(2): 289-297.
- [15] 苏凌. 基于径向基函数神经网络的港口吞吐量预测研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- [16] 蹇令香, 李东兵, 赵诗晨. 我国沿海港口复杂网络演化特征[J]. 经济地理, 2016, 36(12): 96-103.
- [17] 宗刚, 胡蓓蓓, 韩建飞. 中国沿海港口网络空间结构的复杂性研究[J]. 中国软科学, 2012(12): 171-178.
- [18] Montes C P, Seoane M, Laxe F G. General cargo and container-ship emergent routes: A complex networks description [J]. *Transport Policy*, 2016, 24: 126-140.
- [19] Wang C, Wang J. Spatial pattern of the global shipping network and its hub-and-spoke system [J]. *Research in Transportation Economics*, 2017, 32(1): 54-63.
- [20] Kosowska-Stamirowska Z, Ducruet C, Rai N. Evolving structure of the maritime trade network: evidence from the Lloyd's Shipping Index (1890-2000) [J]. *Journal of Shipping & Trade*, 2018, 1(1): 10.