岳佳霏，潘柳榕，宗会明．2022．南海周边国家和地区集装箱港口网络体系与结构．热带地理，42（7）：1096-1106.
Yue Jiafei, Pan Liurong and Zong Huiming. 2022. Centrality and Network Structure of the Container Port System around the South China Sea. *Tropical Geography*, 42 (7): 1096-1106.

南海周边国家和地区集装箱港口网络体系与结构

岳佳霏[1,2]，潘柳榕[1,2]，宗会明[1,2,3]
（1. 北部湾海洋发展研究中心，广西 钦州 535000；2. 北部湾大学 经济管理学院，广西 钦州 535000；
3. 西南大学 陆海新通道与区域发展研究中心，重庆 400715）

摘　要：选取南海周边国家和地区37个集装箱港口为研究对象，选用全球前八名船公司航线数据，就其现有航线分布构建二向网络，采用度数中心度、接近中心度、介数中心度及权利指数等复杂网络中心性指标和网络结构模型对其港口体系特征和网络结构进行研究，得出的结论主要有：1）近年来，南海沿线国家和地区间贸易愈加频繁，相关港口吞吐量不断增加，在世界集装箱港口体系内地位总体呈上升态势；各港吞吐量排名总体相对稳定，南海周边7国集装箱港口运力分布不均衡，主要集中在中国与新加坡沿线。2）深圳港、新加坡港、香港港、高雄港、青岛港与上海港等港航线较多，可与较多区域直接进行贸易往来，受其他港口联系影响较小；上海港、深圳港、宁波舟山港、广州港等在国际集装箱航线中起重要的串联中介作用，对航运网络控制能力较强。3）基于港口吞吐规模与中心程度分异情况将港口网络地位分为4层。第一层为国际航线母港，包括上海港、新加坡港、深圳港、宁波舟山港、广州港、青岛港与香港港；第二层为国际航线枢纽港，包括高雄港、丹戎帕拉帕斯港、厦门港、天津港、林查班港、巴生港与胡志明港，中心性发育程度较好；第三层为国际航线挂靠港，包括海防港、钦州港、大连港、丹绒布鲁港、马尼拉港、丹戎佩拉港、连云港、盖梅港、烟台港、营口港、日照港与福州港，港口相对中心度偏低，吞吐量相对受限；第四层为区域性喂给港，包括锦州港、太仓港、台中港、东莞港、唐山港、南京港、泉州港、南通港、珠海港、嘉兴港与海口港，因其地理区位特点成为较热门转运港口。4）整体港口网络可划分为4个港口社群。其中，社群一中心属性明显，社群二与其联通关系紧密，社群三是其喂给港群，社群四小世界属性明显，群内港口航线相对独立。

关键词：南海；集装箱港口；港口体系；网络结构；中心性
中图分类号：F552　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-5221(2022)07-1096-11
DOI：10.13284/j.cnki.rddl.003519　　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

随着经济全球一体化的快速发展以及国际海运贸易规模的不断扩大，全球海运网络已成为交通运输地理学的研究热点领域（李振福 等，2018a；邓昭 等，2021）。随着中国与东盟成员国家制造业以及贸易的发展，全球航运网络中心也逐渐向东亚转移，再加上南海沿线地区独特的地理航运区位优势，南海沿线集装箱港口运输市场愈加活跃。在南海沿线地区集装箱航运网络体系中，中国港口占据了相当一部分吞吐量份额，主导优势明显（王爱虎等，2014）。交通运输部数据①显示，中国港口投资强度自2013年起呈缩减趋势，囿于有限市场容量，几近饱和的港口市场逐步向万吨级以上港口泊位整合缩进，各港口中心性与运力特征对促进港口转型具有指导性作用，故梳理南海沿线地区集装箱港口体系和网络结构对如何合理规划和利用这一地区的港口资源具有重要意义。

收稿日期：2022-04-01；**修回日期：**2022-06-23
基金项目：重庆市教委哲学社会科学重大理论研究阐释专项课题重大项目（19SKZDZX08）；广西高校人文社会科学重点研究基地北部湾海洋发展研究中心创新课题（BHZXSKY2103）
作者简介：岳佳霏（1998—），女，辽宁吉林人，硕士研究生，主要研究方向为国际商务，（E-mail）598333915@qq.com；
通信作者：宗会明（1981—），男，山东淄博人，教授，博士生导师，主要研究方向为经济地理与区域发展等，（E-mail）zonghuim@swu.edu.cn。

① https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/gudingzichantouziwcqk/

在研究主题上，已有港口体系研究主要集中于运输网络特征分析主题。相关研究多采用位序−规模法（郭建科 等，2019）、复杂网络模型（Calatayu et al., 2017）等方法分析全球班轮运输网络中的多尺度核心−边缘结构（Fleming et al., 1994；方志祥 等，2018）；如选取度数中心度、特征向量中心度、接近中心度、中介中心度和流介中心度等指标（刘婵娟 等，2018；勾艺超 等，2021），分析集装箱港口体系空间联系格局、中心性空间分异和区域集散效应等（Notteboom, 2010；王列辉 等，2016）；采取港口间航线的O-D数据，从全球层面和国家层面研究海峡两岸港口运输联系的变化（王列辉 等，2018），利用复杂网络模型对航运网络联系进行定量刻画和空间分析（郭建科 等，2018）。

在研究数据层面，在全球和各地区贸易集团港口体系内部复杂网络结构的研究中，基本默认两港间联系为双向互联互通（赵昌平 等，2019）。但在实际运输过程中，航线并非完全原路往返，部分原路往返的集装箱船在往返过程挂靠的港口也有所不同；港口在体系内的位次不仅与港口运力有关，也与其网络中心程度有关。在港口市场逐步向万吨级以上港口泊位整合缩进的大环境下，探讨各港口中心性与运力特征对促进港口转型具有指导性作用。因此，本文选取37个南海沿线国家集装箱港口，以各船公司公布的船期表与航线分布为依据，创新性地构建有向集装箱港口网络，采用网络分析模型探讨南海周边国家和地区集装箱港口的复杂网络结构。以期对理解南海沿线集装箱港口发展现状和趋势，为港口发展战略制订提供决策支撑。

1　研究案例地与方法

1.1　研究案例地与数据

基于传统研究惯例和已有文献（赵昌平 等，2019），选择南海周边包括中国、新加坡、泰国、越南、马来西亚、印度尼西亚、菲律宾等国家和地区作为案例地。以劳式日报发布的2020年世界百强集装箱港口排名榜单②为依据，选取南海周边国家和地区上榜的37个港口为节点建立港口网络。以Alphaliner Top100全球集装箱班轮公司集装箱吞吐量排名榜单③为基础，参考全球运力排名前8位的航司航线数据提取港口间联通关系。这些航司的总运力占比超全球总运力份额的80%，其航司航线数据具有较好的代表性和典型性，可有效反映南海周边集装箱港口体系的网络结构特征。

1.2　研究方法

1.2.1　中心性分析

1）度数中心度（Degree）指一个节点在网络中具有的直接联系边数（李振福 等，2018b）。如果节点i和节点j之间有一条边，则定义这两个节点间的联系a_{ij}=1，否则a_{ij}=0。度数中心度C_i^D公式为：

$$C_i^D = \sum_{j \in G} a_{ij} \tag{1}$$

标准化后，节点i的相对度数中心度为$C_I^{D'}$，公式为：

$$C_I^{D'} = \frac{\sum_{j \in G} a_{ij}}{N-1} \tag{2}$$

采用港口的度数中心度表示某一港口有直达航线连接的港口数，数值越高则该港能直接与越多区域进行贸易往来。

2）接近中心度（Closeness）指某个节点与其他节点的最短路径之和的倒数（李振福 等，2018b）。数值越大表示该节点对其他节点的扰动越强烈，传递信息越容易。接近中心度可分为出度与入度。节点i的绝对接近中心度为C_i^C，公式为：

$$C_i^C = \frac{1}{\sum_{j \in G} d_{ij}} \tag{3}$$

式中：d_{ij}是i到j的最短路径长度。标准化后，C_i^C的相对接近中心度为$C_i^{C'}$，公式为：

$$C_i^{C'} = \frac{N-1}{\sum_{j \in G} d_{ij}} \tag{4}$$

采用港口的接近中心度表示某一港口与其他港口产生联系时最短路径总和的长短程度，数值越高则该港独立性越高，越不易受其他港口的影响和控制。

3）介数中心度（Betweenness）指一个节点在多大程度上位于其他节点的最短路径上（李振福等，2018b）。本文认为某一港口是否位于其他节点的最短路径上与航向无关。故如果某节点位于许多节点的最短路径上，则认为它具有较高介数中心度。节点i的绝对介数中心度为C_i^B，公式为：

$$C_i^B = \sum_{j<k \in G} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \tag{5}$$

式中：n_{jk}表示节点j与节点k之间的最短路径条数；

② https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/one-hundred-container-ports-2020

③ https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/

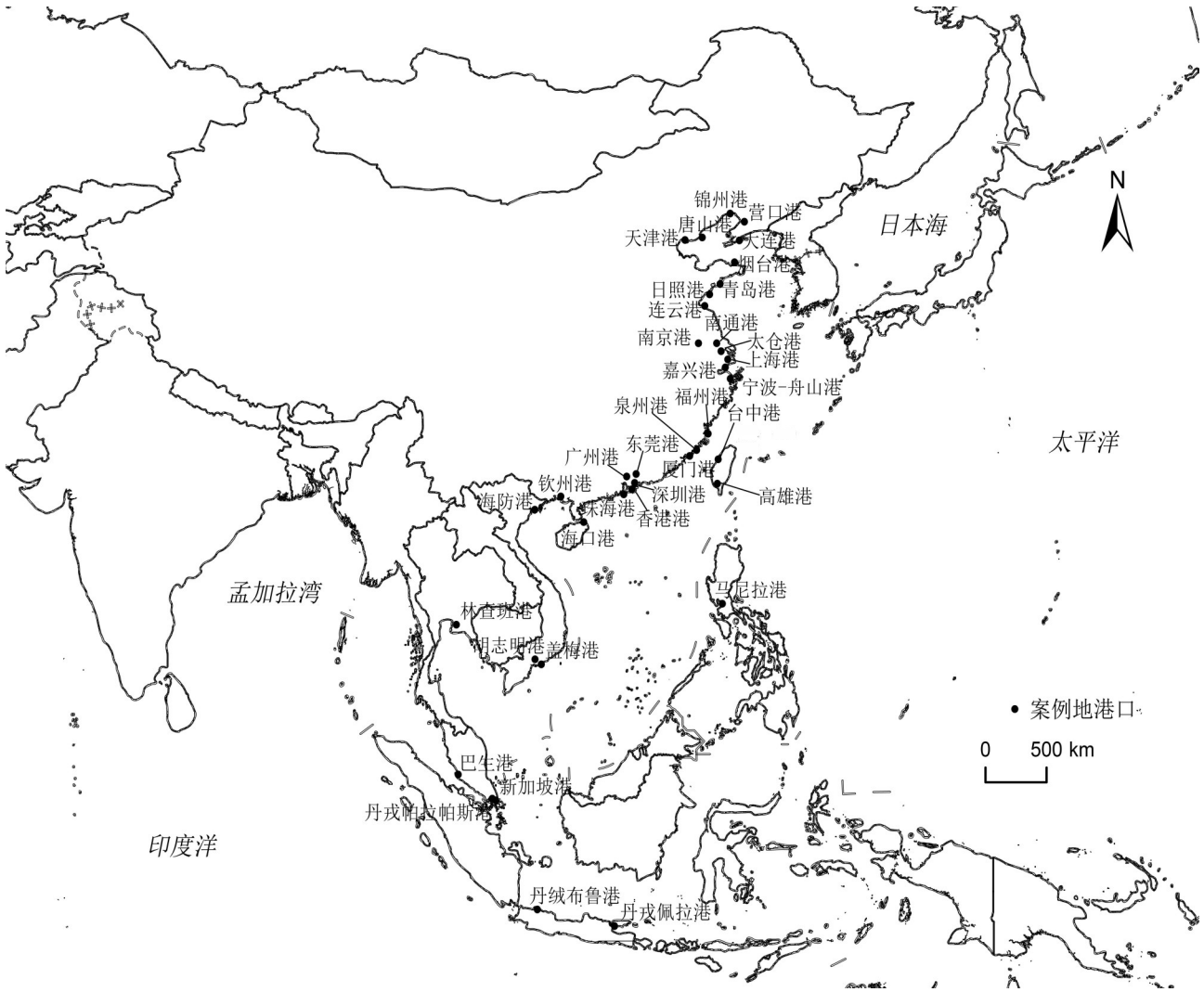

图1 案例地港口分布

Fig.1 Distribution of container ports in the case area

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS（2019）1666号的标准地图制作，底图无修改

$n_{jk}(i)$表示通过节点i连接节点j、k的最短路径条数。公式为：

$$C_i^{B'} = \frac{2C_i^B}{(n^2 - 3n + 2)} \quad (6)$$

式中：有向网络中，i的相对介数中心度为$C_i^{B'}$；节点i的绝对介数中心度为C_i^B；n表示网络中节点间最短路径条数。

采用介数中心度衡量某一港口位于两个港口最短联系路径上的概率，若该港在其他港口联通过程中起中介作用，则其他港口建立联系过程中对该港口的依赖程度可反映该港对港口网络联通的控制能力。

1.2.2 熵权topsis分析法 熵权topsis分析法用于评价港口综合运输能效与中心性发育均衡程度，首先将中心性与吞吐量作为指标，量化评估港口综合运输效能，评估结果为港口综合得分与最优方案相关接近程度得分（简称“接近程度得分”）。再通过对比中心性发育程度与港口实际吞吐量间的分异情况，评价港口中心性优势转化为实际吞吐量效率的能力，评价结果为中心性最优方案接近程度得分（简称“中心性接近程度得分”），可为优化港口产出提供参考。

1.2.3 块模型（Block Models） 主要基于迭代相关收敛法（Convergent Correlations）进行块模型分析，该程序始于矩阵或矩阵组，通过计算矩阵的各个行（或者各个列）之间的相关系数，得到相关系

数矩阵（$\boldsymbol{C}1$)并用以表征结构对等性的一种可能的测度。在此基础上，将系数矩阵$\boldsymbol{C}1$作为输入矩阵，循环往复计算此矩阵的各个行或者各个之间的相关系数，迭代至矩阵中的相关系数绝对值为1，最后得出具有联通关系的块。

此方法用于划分港口社群，步长采取2~3步，以港口间是否有直达航线确定有效直接联系，并通过分析港口间联通程度划分港口社群，可为优化港口航线提供参考源。

2　南海周边国家与地区集装箱港口体系特征与演变

根据2016—2020年南海周边国家与地区集装箱港口的吞吐量变化分析可发现：

1）南海周边7国集装箱港口运力分布不均衡，中国集装箱港口吞吐量排名优势远超其他国家和地区。在劳式日报公布的2020年世界百大集装箱港口吞吐量排名中，包括香港及台湾地区在内的中国集装箱港口独占27席，越南集装箱港口占3席，马来西亚与印度尼西亚集装箱港口各占2席，菲律宾、泰国、新加坡分占1席，南海周边国家共占37席，总吞吐量达到3.61亿标箱，占全球前100名港口集装箱总吞吐量的46%。在世界集装箱港口吞吐量排名前十位中，南海周边地区集装箱港口独占8席。其中，除位居第二的新加坡港以外，其他7个港口均为中国集装箱港口，总吞吐量优势远超其他国家和地区。总体上，全球排名靠前的集装箱港口集中在东亚、欧洲和北美洲地区，而东亚地区运力强劲的集装箱港口主要集中在中国长三角、珠三角、环渤海等区域以及毗邻区域。中国港口基础设施水平相对较高且优势明显。

2）港口群内各港集装箱吞吐量排名总体相对稳定，在世界集装箱港口体系内地位总体呈上升态势。榜单上排名靠前的枢纽港排名相对稳定，上海港、新加坡港、宁波舟山港与深圳港4港年吞吐量连年占据前四席。上海港、新加坡港、宁波舟山港、深圳港、广州港、青岛港、天津港、厦门港等港集装箱吞吐量均增长10%以上。唐山港、日照港、福州港与烟台港排位上升明显，分别上升24、16、12、10名（表1）。虽然香港港、高雄港、大连港、营口港、马尼拉港、东莞港、南京港等部分港口的集装箱吞吐量有一定的缩减。但总体上南海周边集装箱港口在世界集装箱港口体系内地位总体呈上升态势，优势地位得到巩固。

3）部分港口新晋世界集装箱吞吐量百强且增势明显。据劳式日报所公布的2020年全球百大集装

表 1　2016—2020 年南海周边国家与地区集装箱港口的吞吐量变化

Table 1　Throughput changes of container ports in countries and regions around the South Sea of China from 2016 to 2020　　百万 TEU

港口	国别/地区	2016年	排名	2020年	排名	排名变动	同比增长/%	港口	国别/地区	2016年	排名	2020年	排名	排名变动	同比增长/%
上海港	中国	37.13	1	43.50	1	0	17.16	日照港	中国	3.01	50	4.86	34	16	61.46
新加坡港	新加坡	30.90	2	36.87	2	0	19.32	连云港	中国	4.70	30	4.80	35	−5	2.13
宁波舟山港	中国	21.57	4	28.72	3	1	33.15	马尼拉港	菲律宾	4.52	32	4.44	41	−9	−1.77
深圳港	中国	23.98	3	26.55	4	−1	10.72	盖梅港	越南	—	—	4.41	42	—	—
广州港	中国	18.86	7	23.51	5	2	24.66	钦州港	中国	—	—	3.95	47	—	—
青岛港	中国	18.01	8	22.10	6	2	22.71	丹戎佩拉港	印度尼西亚	3.35	43	3.60	48	−5	7.46
天津港	中国	14.49	10	18.35	8	2	26.64	福州港	中国	2.65	61	3.52	49	12	32.83
香港港	中国香港	19.81	6	17.95	9	−3	−9.39	东莞港	中国	3.64	40	3.42	52	−12	−6.04
巴生港	马来西亚	13.17	11	13.24	12	−1	0.53	烟台港	中国	2.60	64	3.30	54	10	26.92
厦门港	中国	9.61	16	11.41	14	2	18.73	唐山港	中国	1.93	84	3.12	60	24	61.66
丹戎帕拉帕斯港	马来西亚	8.28	19	9.80	15	4	18.36	南京港	中国	3.08	48	3.02	61	−13	−1.95
高雄港	中国台湾	10.46	13	9.62	16	−3	−8.03	泉州港	中国	2.09	78	2.26	81	−3	8.13
胡志明港	越南	5.99	24	7.85	20	4	31.05	海口港	中国	—	—	1.97	88	—	—
林查班港	泰国	7.23	20	7.55	22	−2	4.43	嘉兴港	中国	—	—	1.96	89	—	—
丹绒布鲁港	印度尼西亚	5.51	27	6.87	23	4	24.68	南通港	中国	—	—	1.91	92	—	—
营口港	中国	6.09	23	5.65	27	−4	−7.22	珠海港	中国	—	—	1.84	94	—	—
太仓港	中国	4.08	35	5.21	30	5	27.70	台中港	中国台湾	1.54	90	1.82	95	−5	18.18
海防港	越南	4.10	35	5.14	31	4	25.37	锦州港	中国	—	—	1.64	100	—	—
大连港	中国	9.61	15	5.11	32	−17	−46.83								

箱港口排名，部分2016年尚未进入世界百强集装箱港口的南海沿线港口新跻身世界百强集装箱港口，且增速较快，如盖梅港、钦州港、海口港、嘉兴港、南通港、珠海港、锦州港等。其中，珠海港和海口港得益于南亚和东南亚、北美和南美新兴市场的支撑。嘉兴港则在2019年作为支线港口跻身百强，并于2020年上升7名，升至第89名。作为西部陆海新通道国际门户枢纽，钦州港在2020年集装箱吞吐量达到395万标箱，首次入选榜单即跻身世界排名前五十（见表1）。

3 南海周边国家与地区集装箱港口网络结构

3.1 中心度分析

3.1.1 相对度数中心度 表2显示，深圳港、新加坡港、香港港与高雄港等的相对度数中心入度较高，可接引多条由各港口发出的国际航线，并与航线上港口间存在直接联系。其中，深圳港的相对度数中心入度最高，为58.33；本区域中吞吐量排名靠前的热门港口均可直达。新加坡港、香港港、高雄港、上海港、广州港、丹戎帕拉帕斯港、宁波舟山港与林查班港，各港得分均＞40，这些港口与其他港口也多有直接联系，可承运相关海运货物。日照港、营口港、东莞港、海口港、锦州港、太仓港、唐山港、南京港、台中港、嘉兴港与南通港的评分相对较低，各港得分均＜10；其余各港得分大多介于10~40。唐山港、南京港、台中港、嘉兴港与南通港得分较低，可直达的航班有限，货物需先靠挂临近枢纽港中转后才能运抵以上各港。青岛港在相对度数中心度方面出度大于入度，表明从青岛出发到达其他港口的直联程度大于从其他港口到达青岛的直联程度。

新加坡港、青岛港、上海港、香港港、宁波舟山港与深圳港等的相对度数中心出度较高，由这些港口发出的国际航线与多个港口间存在直接联系。其中，新加坡港相对度数中心出度最高，为58.33，可直通上海港、宁波舟山港、深圳港、广州港等国际性大港，与青岛港、天津港、香港港、巴生港、厦门港、丹戎帕拉帕斯港与高雄港等热门港口也均有直达航线。其次是青岛港、上海港、香港港、宁波舟山港、深圳港，此五港可直通半数以上枢纽港口。嘉兴港、太仓港、唐山港、东莞港、南京港、泉州港、海口港与珠海港相对较低，得分均＜10，此类港口货物多需先运输至周边点出度较大的港口后再发往目的地。

3.1.2 相对接近中心度 深圳港、新加坡港、香港

表 2 南海周边国家与地区集装箱港口的中心性分析

Table 2 Analysis on the centrality of container ports in countries and regions around the South China Sea

港口	集装箱吞吐量排名	相对度数中心度		相对接近中心度		相对介数中心度
		入度	出度	入度	出度	
上海港	1	47.22	52.78	68.98	73.61	12.33
新加坡港	2	52.78	58.33	72.22	76.39	6.03
宁波舟山港	3	41.67	44.44	65.74	69.44	7.51
深圳港	4	58.33	44.44	74.54	68.52	7.53
广州港	5	47.22	38.89	69.44	63.89	7.02
青岛港	6	38.89	55.56	65.28	75.00	5.17
天津港	7	33.33	25.00	62.04	57.87	5.95
香港港	8	50.00	50.00	70.37	72.22	4.35
巴生港	9	30.56	41.67	61.11	67.59	1.71
厦门港	10	38.89	36.11	65.28	64.82	4.83
丹戎帕拉帕斯港	11	47.22	41.67	69.44	67.59	3.47
高雄港	12	50.00	41.67	70.37	67.59	5.83
胡志明港	13	33.33	27.78	61.57	60.65	1.04
林查班港	14	41.67	36.11	66.67	64.35	1.82
丹绒布鲁港	15	30.56	13.89	60.65	48.61	0.16
营口港	16	8.33	16.67	44.44	51.85	0.30
太仓港	17	5.56	8.33	40.97	47.69	0.19
海防港	18	22.22	30.56	56.02	61.57	1.19
大连港	19	22.22	19.44	55.56	55.09	1.89
日照港	20	8.33	16.67	46.30	52.78	0.25
连云港	21	16.67	13.89	52.78	50.46	0.59
马尼拉港	22	19.44	25.00	52.32	58.33	0.23
盖梅港	23	13.89	19.44	50.00	53.70	0.08
钦州港	24	30.56	16.67	58.80	50.00	2.05
丹戎佩拉港	25	22.22	19.44	54.63	52.78	0.32
福州港	26	13.89	11.11	49.07	48.15	0.00
东莞港	27	5.56	5.56	44.91	43.06	0.00
烟台港	28	13.89	16.67	50.00	53.24	0.22
唐山港	29	2.78	5.56	37.27	40.05	0.00
南京港	30	2.78	2.78	38.43	40.28	0.00
泉州港	31	11.11	2.78	49.54	2.78	0.44
海口港	32	5.56	0.00	42.59	0.00	0.00
嘉兴港	33	0.00	8.33	0.00	49.54	0.00
南通港	34	0.00	13.89	0.00	50.93	0.00
珠海港	35	13.89	0.00	51.39	0.00	0.00
台中港	36	2.78	13.89	40.05	50.46	0.01
锦州港	37	5.56	13.89	43.06	50.93	0.13

港、高雄港、广州港与丹戎帕拉帕斯港等的相对接近中心度入度独立性较高，受其他港口影响和控制程度低。港口接近中心入度越高，可接引的国际航线上所含港口与之产生联系时，最短路径总和长度越短，港口的独立性与可达性更高。其中，深圳港最高，得分74.54；新加坡港、香港港、高雄港次之；广州港、丹戎帕拉帕斯港、上海港、林查班港与宁波舟山港也具有较高相对接近中心度入度，得分均＞65.73。日照港、东莞港、营口港、锦州港、海口港、太仓港、台中港、南京港、唐山港、嘉兴港与南通港的点入度相对较低，得分均＜47，表明这些港口的独立程度较差，运输过程在一定程度上依赖周边港口，须经多次转运才能运抵其他港口。

新加坡港、青岛港、上海港、香港港、宁波舟山港、深圳港等的港口相对接近中心度出度独立性较高，受其他港口影响和控制程度低。其中，新加坡港是相对接近中心度点出度最高的港口，得分高达76.39；新加坡港能独立运输至上海港、宁波舟山港、深圳港、广州港、青岛港、天津港、香港港、巴生港、厦门港、丹戎帕拉帕斯港与高雄港等吞吐量排名靠前的热门港口。其次是青岛港、上海港。此外，香港港、宁波舟山港、深圳港、高雄港、丹戎帕拉帕斯港、巴生港与厦门港也具有较高的港口出度独立性；以上各港与其他港口直接联系且关系较广，具有较强的运输独立性，可独自向大部分港口运输货物。泉州港、海口港与珠海的港港口出度独立性较低，得分低于3；此类港向其他港口发出货物时往往需要周边邻近港口多次转运才能运抵。

3.1.3　相对介数中心度　经由上海港、深圳港、宁波舟山港、广州港等港中转的国际集装箱航线中，作为货物挂靠港口的上述港口在转运货物过程中起重要的中介作用，许多港口依赖这些港中转货物。其中，上海港的相对介数中心度最高，得分为12.33；深圳港和宁波舟山港次之，得分分别为7.53和7.51；此外，新加坡港、天津港、高雄港、青岛港与香港港得分均在4~7；福州港、东莞港、唐山港、南京港、海口港、嘉兴港、南通港、珠海港等港的相对介数中心度相对较低。可见，各港对港口航运网络控制能力差距明显。上海港连接长江东西运输与海上南北交通要道，特殊的区位特点使其成为重要的挂靠中转枢纽，众多二线港口经该港中转汇入其远洋航线发往世界各港，因而其相对介数中心度最高。深圳港、宁波舟山港、广州港、新加坡港、天津港、高雄港、青岛港等港在远洋货物货物运输过程中参与度较高，在集中腹地货源的同时也发挥了一定程度的中转作用，因而介中心性也较高。

图2显示，各港口网络中心性的各项指标与港口集装箱吞吐量的指标变化趋势相对一致。随港口集装箱的吞吐量阶段性变化，各港中心度变化趋势出现分异。上海港、新加坡港、宁波舟山港、深圳港、广州港、青岛港等的接近中心度紧贴吞吐量排名变化，此类港口吞吐量排名与度数中心度排名靠前，直达航线充足，因而是沟通连接远洋航线的重要节点。天津港、香港港、巴生港、厦门港、丹戎帕拉帕斯港、高雄港、林查班港、丹绒布鲁港等的接近中心度随港口吞吐量变化的剧烈程度相对较低，且相对介数中心度与港口吞吐量关联不明显。因地理区位特点，此类港口向腹地货源集货与向其他港口集散均具有一定优势，因而是较热门的挂靠港。

3.2　网络层次分析

基于熵权topsis法，以各中心度与港口实际吞吐量为指标，计算港口的综合评分并采用自然断裂点法对其进行分层，以评价其综合运输能效并确定其在港口体系中的职能和地位。

第一层次属国际航线母港，综合得分为1.69~1.93，包括上海港、新加坡港、深圳港、宁波舟山港、广州港、青岛港与香港港。第一层次港口的综合得分与中心性相对接近程度得分最高，港口资源得到合理利用，极大效率地将中心性的便利程度转化为航运优势。此层次港口均为国际性大港，在世界航线中具有举足轻重的地位，承担重要的承接发出作用。此类港口的吞吐量与中心性排名均保持靠前，但层内各港得分差异相对较大。其中，上海港中心性与运力发育程度极高，其港口资源发挥极大效能且利用率极高；而新加坡港中心性相对接近度得分较低，相对接近度表现不如吞吐量突出。

第二层次属国际航线枢纽港，综合得分为1.42~1.64，包括高雄港、丹戎帕拉帕斯港、厦门港、天津港、林查班港、巴生港与胡志明港。第二层次港口的综合得分与中心性相对接近程度较高，但层内部分港口中心性相对接近程度与综合得分存在分异，即港口的网络中心性的优势比其吞吐量的

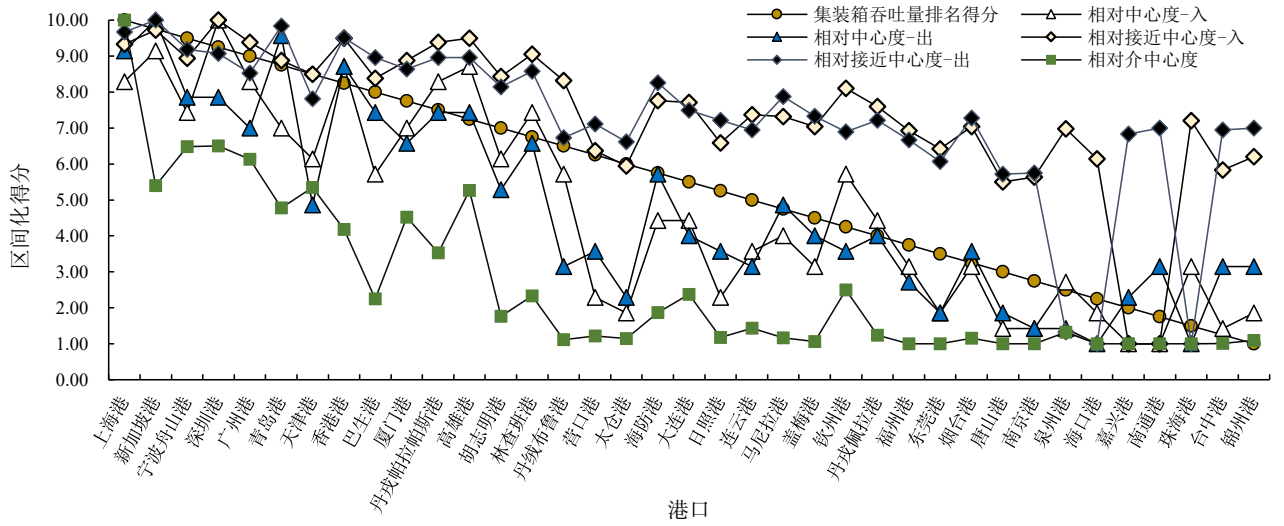

图 2 区间化集装箱吞吐量排名与中心度测量结果排名对比

Fig.2 Interval ranking comparison between throughput and centrality

优势更明显。这是因为此类港口是国际航线上重要的枢纽港口，承担国际航线货物的挂靠中转作用，故而中心性优势更加明显。

第三层次属国际航线挂靠港，综合得分为1.23~1.38，包括海防港、钦州港、大连港、丹绒布鲁港、马尼拉港、丹戎佩拉港、连云港、盖梅港、烟台港、营口港、日照港与福州港。第三层次港口的中心性相对接近程度与实际吞吐量逐渐拟合，相对接近度下降明显，故港口中心性发育平衡程度有待提高。第三层次内也包括海防港、丹绒布鲁港、马尼拉港、丹戎佩拉港、盖梅港等国际性港口，但因其腹地货源受限或港口区位优势不明显，囿于货源体量等因素，其实际吞吐量受限；另外大连港、钦州港也凭借良好的地理区位位列其中。虽然层内各港口多位处国际航线上，但港口的中心性与吞吐量仍有较大发育空间。

第四层次属区域性喂给港，综合得分为1.07~1.19，包括锦州港、太仓港、台中港、东莞港、唐山港、南京港、泉州港、南通港、珠海港、嘉港兴与海口港。层内港口实际吞吐量与中心性拟合程度较高，综合得分均匀递减。第四层次港口则多处经济圈内，为热门枢纽港的喂给港，职能更多分属中转挂靠，而非热门国际航线的始发重点港，故层内各港综合得分不高，实际吞吐规模与中心性均有限。

3.3 网络结构分析

基于迭代相关收敛法构建块模型分析港口间联通关系，将所分析港口划分为4个社群（图3）。社群一内港口包括华东区与华南区等多个国际性枢纽大港，为兼顾型社群。这一社群港口不仅内部联系紧密，且对其他社群也有较高通达性，各港货物可经由社群一内港口集货搭乘远洋航线。包括上海港、广州港、厦门港、南京港与台中港，基于联通关系可进一步划分为上海港—厦门港—广州港子群与南京港—台中港子群，其中上海港—厦门港—广州港子群联系更紧密。港口社群总体通达能力较强，上海港—厦门港—广州港均在热门国际航线的覆盖范围；社群内各港联系紧密，南京港是长江中上游最直接的出海口，上海港地处长江东西运输通道，广州港是珠江水系东西北线航运中心，而厦门港介于上海港与广州港间，经由青屿水道联通台湾海峡。

社群二内港口集中于环渤海湾地区，属内部型社群。各港腹地货源集中在华北、东北与西北地区，热门航线向东北亚集中。包括天津港、营口港、唐山港、南通港、大连港、锦州港与泉州港7港，主要直达航线相对集中于社群内部。基于联通关系，社群二港口可进一步划分为南通港—天津港—锦州港子群与唐山港—营口港—大连港—泉州港子群，子群间相互联通较紧密。社群二港口与社群一港口联系紧密，但两社群航线的目的国有一定

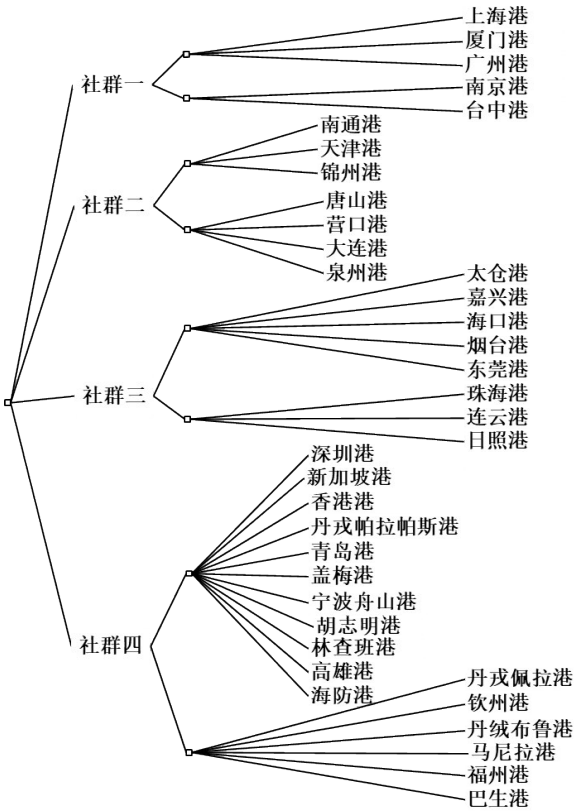

图3　南海周边国家与地区集装箱港口的社群划分

Fig.3　Community division of container ports in countries and regions around the South China Sea

区别，故两社群间互相挂靠转运货源，联通关系较紧密。天津港、唐山港、锦州港分别位处渤海湾西端、北岸、西北部，航线联通渤海湾。大连港与营口港主要接引中转东北部货源，大连港是东北地区面向太平洋的综合性外贸口岸，营口港则是东北地区与内蒙古东部地区最近的出海港。因独特的地理区位特点，南通港是江河海联运的枢纽，接引联通黄海与长江水域。

社群三内港口主要集中在长三角地区，属内部型社群，整体中心度相对较低，以社群一为中心扩散分布，部分港口是社群一的喂给港。包括太仓港、日照港、海口港、嘉兴港、连云港、珠海港、东莞港与烟台港8港，基于联通关系可进一步划分为太仓港—嘉兴港—海口港—烟台港—东莞港子群与珠海港—日照港—连云港子群。社群内部分港口因区位特点补充了长江航道支线，如太仓港位于长江沿海开放交汇处；嘉兴港地处长江三角洲南翼；连云港紧邻日照港，南通长三角，北临渤海湾。部分港口处于国际通道节点，补充支撑了社群一国际性枢纽港运力，如烟台港地处同江至三亚南北大通道，是沟通日韩欧新欧亚大陆桥的重要枢纽节点；珠海港紧邻大西国际水道，通过西江实现江海联运。社群三内港口远洋航线占比相对较少，与社群一内国际港口航线联系较密集，部分港口是社群一内国际枢纽港口的有力喂给港，如太仓港是上海国际航运中心的重要集装箱干线港，重点服务于长江地区；海口港则向部分喂给北部湾港。

社群四内港口地处南海沿线，属于孤立型社群，国际航线充足。因群内港口数相对较多且中心性较高，重点服务于南海周边各国集装箱货物往来，是沟通太平洋和印度洋、联系亚洲和大洋洲的交通要道。社群内包括新加坡港、深圳港、宁波舟山港、青岛港、香港港、高雄港、丹戎帕拉帕斯港、丹戎佩拉港、胡志明港、林查班港、丹绒布鲁港、钦州港、福州港、巴生港、盖梅港、马尼拉港与海防港等17港，其中，新家坡港、深圳港、宁波舟山港等均是吞吐量排名靠前、中心性较高的国际性枢纽港，丹戎帕拉帕斯港、丹戎佩拉港、胡志明港、林查班港、丹绒布鲁港、巴生港、盖梅港、马尼拉港、海防港等因其所在国贸易体量等原因吞吐量相对较低，但也是所在国家和地区的重要枢纽港口。社群四内各港职能互补，地理区位分布较集中，内部航线结构相对完整，各港小世界属性明显，基本可互相满足港群内其他成员的挂靠需要，故而与其他社群间联通关系较少。

4　结论与讨论

在分析南海沿线港口体系格局与演化基础上，通过社会网络中心性模型，对南海沿线37个集装箱港口，创新性引入有向网络数据，分析南海周边地区集装箱港口体系特征和网络结构，得到的主要结论为：

1）近年来，南海沿线国家和地区间贸易往来逐渐密集，南海周边各港吞吐量继续上升，在世界集装箱港口体系内地位总体呈上升态势。各港吞吐量排名总体相对稳定，南海周边7国集装箱港口集装箱吞吐量分布不均衡，中国集装箱港口吞吐量排名优势远超其他国家和地区。其中，唐山港、日照港、福州港及烟台港等港吞吐量提升明显，盖梅港、钦州港、海口港等进入全球港口集装箱吞吐量

百强榜单。

2）深圳港、新加坡港、香港港、高雄港、青岛港及上海港等港有较多直达航线，可直接与较多区域进行贸易往来，受其他港口联系影响较小；青岛港在经由上海港、深圳港、宁波舟山港、广州港等港中转的国际集装箱航线中，中介作用明显，对上下游港口影响作用明显，对所在航线起重要串联作用；且青岛港、深圳港、丹绒布鲁港在出度、入度的方向性方面存在较为明显的差距。

3）基于港口网络中心度和吞吐量分异情况，将港口网络地位分为4层：第一层次属国际航线母港，包括上海港、新加坡港、深圳港、宁波舟山港、广州港、青岛港与香港港。第二层次属国际航线枢纽港，包括高雄港、丹戎帕拉帕斯港、厦门港、天津港、林查班港、巴生港与胡志明港，中心性发育程度较好，因而应加强与上下游枢纽港联系，进一步提升吞吐量。第三层次属国际航线挂靠港，包括海防港、钦州港、大连港、丹绒布鲁港、马尼拉港、丹戎佩拉港、连云港、盖梅港、烟台港、营口港、日照港与福州港，但因腹地货源体量有限，吞吐量相对受限，且此层次港口的相对中心度偏低，需要加强与其他港口间联系。第四层次属区域性喂给港，包括锦州港、太仓港、台中港、东莞港、唐山港、南京港、泉州港、南通港、珠海港、嘉兴港与海口港，是较热门转运港口，因此，此层次港口应结合所在区域发展形势和格局，明确自身定位，发挥自身优势。

4）整体港口网络可划分为4个港口社群。其中社群一中心属性明显，社群二与其联通关系紧密，社群三是其喂给港群，社群四小世界属性明显，群内港口航线相对独立。可见南海国家和地区虽然港口数目较多，但各港口间联通关系规律性较强，社群划分清晰，港口间联通关系明确，港口社群发育转型过程中，也应充分结合上下游港口发展策略。

在《区域全面经济伙伴关系协定》（Regional Comprehensive Economic Partnership, RCEP）生效和港口转型发展背景下，南海地区是沟通周边国家和地区经贸往来的重要航运要道，其网络特征和影响因素较为复杂。本文选择南海沿线国家37个典型集装箱港口有向联通网络中心性及集装箱吞吐量的研究对理解该地区集装箱港口网络格局现状和趋势，认清各港口的网络地位与职能，指导港口航线拓展和转型发展具有现实性意义。随着RCEP生效，中国港口与南海周边国家和地区港口间航线联系网络有待进一步加强，尤其是更具区位优势的面向东盟的港口枢纽港海口港和钦州港。部分国际枢纽港在中心性出入度存在较大差异，这与港口区位和货源流向密切相关。但本文在数据库构建中仅考虑了港口间航线是否联通的要素，未考虑网络间航线联通的频率和权重，因此本文更多地反映港口间航线的联通网络结构与特征。而港口间航线的班次和密度数据可更好地反映港口间的联系网络结构与特征，且该区域港口网络格局与特征、港口间竞合关系及影响因素分析也是未来研究的方向。

参考文献（References）：

Calatayud A, Mangan J and Palacin R. 2017. Vulnerability of International Freight Flows to Shipping Network Disruptions: A Multiplex Network Perspective. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 108: 195-208.

邓昭，李振福，郭建科，周玉涛. 2021. 中国港口地理学研究进展与展望. 地理科学，41（4）：606-614. [Deng Zhao, Li Zhenfu, Guo Jianke and Zhou Yutao. 2021. Research Prospect and Progress of Port Geography in China. *Scientia Geographica Sinica*, 41(4): 606-614.]

杜超，王姣娥，莫辉辉. 2016. 中国集装箱航运网络空间格局及复杂性研究. 长江流域资源与环境，25（2）：190-198.[Du Chao, Wang Jiao'e and Mo HuiHui. 2016. Spatial Pattern Analysis of China Container Shipping Network on Complex Theory. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 25(2): 190-198.]

Fleming D K and Hayuth Y. 1994. Spatial Characteristics of Transportation Hubs: Centrality and Intermediacy. *Journal of Transport Geography*, 2(1): 3-18.

方志祥，余红楚，黄守倩. 2018. 海洋运输网络研究进展与趋势探讨. 地球信息科学学报，20（5）：554-563. [Fang Zhixiang, Yu Chuhong and Huang Shouqian. 2018. Review of Research Works on Maritime Network. *Journal of Geo-Information Science*, 20 (5): 554-563.]

郭建科，何瑶，侯雅洁. 2018. 中国沿海集装箱港口航运网络空间联系及区域差异. 地理科学进展，37（11）：1499-1509. [Guo Jianke, He Yao and Hou Yajie. 2018. Spatial Connection and Regional Difference of the Coastal Container Port Shipping Network of China. *Progress in Geography*, 37(11): 1499-1509.].

郭建科，何瑶，王绍博，吴陆陆. 2019. 1985年以来中国大陆沿海集装箱港口体系位序–规模分布及其网络联系. 地理研究，38（4）：869-883. [Guo Jianke, He Yao, Wang Shaobo and Wu Lulu. 2019. Rank-Size Distribution Changes and Transportation Network Connections of The Coastal Container Port System in

Chinese Mainland Since 1985. *Geographical research*, 38(4): 869-883.]

勾艺超，王成金 . 2021. 加勒比海邮轮航运网络港口分异与网络结构 . 中国生态旅游，11（4）：602-614. [Gou Yichao and Wang Chengjin. 2021. Differences by Port and Network Structure of Caribbean Cruise Shipping Network. *Journal of Chinese Ecotourism*, 11(4): 602-614.]

Hu Z H, Zheng Y X and Hu J J. 2022. Vietnam's Maritime Shipping Ports: Using Data-Driven Model Analysis to Determine Connectivity and Networking. *Journal of Coastal Research*, 38 (3): 639-653.

李振福，李婉莹，徐梦俏 . 2018a. 新海上丝绸之路集装箱海运网络中心性 . 中国航海，41（3）：123-128，134. [Li Zhenfu, Li Wanying and Xu Mengqiao. 2018a. Centrality of Maritime Silk Road Container Shipping Network. *Navigation of China*, 41(3): 123-128, 134.]

李振福，张小玲，徐梦俏，史砚磊，姜书飞 . 2018b. 东亚集装箱港口体系中心性研究 . 数学的实践与认识，48（9）：1-10. [Li Zhenfu, Zhang Xiaoling, Xu Mengqiao, Shi Yanlei and Jiang Shufei. 2018b. Centrality in East Asion Container Port System . *Mathematics in Practice and Theory*, 48(9): 1-10.]

刘婵娟，胡志华 . 2018. “21 世纪海上丝绸之路”海运网络空间格局及其复杂性研究 . 世界地理研究，27（3）：11-18. [Liu Chanjuan and Hu Zhihua. 2018. Spatial Pattern and Complexity of the 21st Century Maritime Silk Road Shipping Network. *World Regional Studies*, 27(3): 11-18.]

Liu Q, Yang Y, Ke L and Ng A K F. 2022. Structures of Port Connectivity, Competition, and Shipping Networks in Europe. *J. Transp. Geogr.,* 102: 1-11.

Monios J and Wilmsmeier G. 2012. Giving a Direction to Port Regionalization. *Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*, 46(10): 1551-1561.

Notteboom T E. 2010. Concentration and the Formation of Multi-Port Gateway Regions in the European Container Port System: An Update. *Journal of Transport Geography*, 18(4): 567-583.

Sadamori Kojaku, Xu Mengqiao, Xia Haoxiang and Naoki Masuda. 2019. Multiscale Core-Periphery Structure in a Global Liner Shipping Network. *Scientific Reports*, 9(1): 404.

Wang Liehui, Zhang Nanyi, Ye Fei , Lau Yuiyip and Ducruet César. 2020. The Complex Network Analysis of Liner Shipping Networks: Lessons from the Merger between COSCO and CSCL. *Growth and Change*, 51(4): 1877-1893.

王爱虎，匡桂华 . 2014. 中国沿海集装箱港口群体系结构演化与竞争态势 . 经济地理，34（6）：92-99. [Wang Aihu and Kuang Guihua. 2014. The Evolution and Competition Situation of Container Port Cluster System in China. *Economic Geography*, 34 (6): 92-99.]

王列辉，洪彦 . 2016. 直航背景下海峡两岸集装箱港口体系空间结构——基于复杂网络的视角 . 地理学报，71（4）：605-620. [Wang Liehui and Hong Yan. 2016. Spatial Structure of Container Port Systems across the Taiwan Straits Under The Direct Shipping Policy: A Complex Network System Approach. *Acta Geographica Sinica*, 71(4): 605-620.]

王列辉，林羽珊，Cesar Ducruet. 2018. 1895—2016 年全球海运网络中的海峡两岸港口运输联系变化 . 地理学报，73（12）：2282-2296. [Wang Liehui, Lin Yushan and Cesar Ducruet. 2018. Changes of Ports' Connection Across the Taiwan Straits in the Global Maritime Network (1895-2016). *Acta Geographica Sinica*, 73(12): 2282-2296.]

赵昌平，李睿，王业成 . 2019. 南海航线经济圈的贸易网络研究 . 东北亚经济研究，13（3）：5-21. [Zhao Changping, Li Rui and Wang Yecheng. 2019. Study on Trade Network of South China Sea Route Economic Circle. *Northeast Asia Economic Research*, 13(3): 5-21.]

作者贡献声明：

岳佳霏：数据搜集和分析、实施研究过程、论文撰写与修订；

潘柳榕：数据和资料获取支持、设计研究框架；

宗会明：研究选题提出、论文框架和思路、论文修订。

Centrality and Network Structure of the Container Port System around the South China Sea

Yue Jiafei[1,2], Pan Liurong[1,2] and Zong Huiming[1,2,3]

(1. Beibu Gulf Marine Development Research Center, Qinzhou 535000, China; 2. School of Economics and Management, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China; 3. Research Center of New International Land-Sea Trade Corridor and Regional Development, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The shift of the global shipping network center to East Asia is a trend that has been widely recognized. As the main carrier of logistics and trade transportation in the RCEP and the surrounding areas of the South China Sea, research on the container port system and network structure in the surrounding areas is of great significance for understanding the characteristics and optimization of maritime trade channels in the surrounding countries and regions of the South China Sea. Based on route data from the world's top eight shipping companies, we selected 37 container ports around the South China Sea as the research objects of this study. First, we constructed a two-way network on their existing route distribution and studied their port system characteristics and network structure using complex network centrality indicators and network structure models, such as degree centrality, proximity centrality, intermediate centrality, and right index. The conclusions are as follows: (1) In recent years, the status of container ports in countries and regions along the South China Sea within the world container port system has generally been on the rise. The overall ranking of port throughput is relatively stable. The capacity of container ports in seven countries around the South China Sea is unevenly distributed, mainly in China and Singapore. (2) In terms of network centrality analysis, port routes, such as Shenzhen, Singapore, Hong Kong, Kaohsiung, Qingdao, and Shanghai, are abundant, and there are many regions that can conduct trade directly, which are less affected by other port connections. Shanghai, Shenzhen, Ningbo, Zhoushan, Guangzhou, and other ports play an important role as tandem intermediaries in international container routes and have a strong ability to control the shipping network. (3) In terms of network level, the port network status is divided into four levels according to the differentiation of port throughput scale and center degree. The first-tier ports are the home ports of international routes, including Shanghai, Singapore, Shenzhen, Ningbo Zhoushan, Guangzhou, Qingdao, and Hong Kong. Ports on the second layer are the hub ports of international routes, including Kaohsiung, Tanjung Pelepas, Xiamen, Tianjin, Laem Chabang, Klang, and Ho Chi Minh. This layer contains mostly the hub ports of international routes, with a good degree of central development. Ports on the third layer are the international route connecting ports, including Haiphong, Qinzhou, Dalian, Tanjung Priok, Manila, Tanjung Perak, Lianyungang, Cai Mep, Yantai, Yingkou, Rizhao, and Fuzhou. The relative centrality of ports on this layer is low, and the throughput is relatively limited. Layer four ports are regional feeder ports, including Jinzhou, Taicang, Taichung, Dongguan, Tangshan, Nanjing, Quanzhou, Nantong, Zhuhai, Jiaxing, and Haikou, which have become popular transshipment ports owing to their geographical characteristics. (4) In terms of network structure, the overall network can be divided into four port communities. Among them, community one has a clear central attribute, to which community two is closely connected, and community three is fed to the port group. Community four has clear small world attributes, and the port routes within this group are relatively independent.

Keywords: South China Sea; container port; port system; complex network; centrality