

# 基于流动要素的沿海港-城网络体系空间重构

郭建科<sup>1, 2</sup> 秦娅风<sup>3</sup> 董梦如<sup>31</sup>

(1. 辽宁师范大学 海洋可持续发展研究院, 中国辽宁 大连 116029;

2. 海洋经济与可持续发展研究中心, 中国辽宁 大连 116029;

3. 辽宁师范大学 地理科学学院, 中国辽宁 大连 116029)

**【摘要】:** 基于流动空间, 借助 GIS、Matlab 和 Gephi 等技术手段, 构建多元流动要素网络, 分析港—城网络体系空间重构的特征与过程, 并探讨其作用机制。结果表明: (1) 流动空间重塑了港—城体系的结构和方向, 核心港口城市能级提高, 港口城市间由单纯的竞争关系变为新型的竞合关系; 社团结构组合变化促进多元流网络联系广度和深度不断拓展, 枢纽港及其城市溢出效应进一步扩大。(2) 多核心的扁平化结构取代原来的金字塔结构成为流动空间视角下港—城网络体系的典型特征, 其中上海、深圳、广州和天津等综合性港口城市的辐射作用凸显。(3) 港—城网络体系空间重构的作用机制突出表现为“内外统筹”影响下的枢纽港及其城市主导作用明显、“相辅相成”推动下的新兴港口城市快速成长及港口城市间实现自组织协调。物质流和虚拟流越来越成为港—城网络体系演化的决定性因素, 且虚拟流的冲击程度更为显著。

**【关键词】:** 流动空间 港-城网络体系 多元流要素 网络联系 城市能级 智慧港口

**【中图分类号】:** F291.1 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 09-0059-10

港口城市作为一种特殊的城市类型, 具有港口和城市的双重属性<sup>[1]</sup>, 不仅是交通系统内的节点, 更是社会经济系统的中心<sup>[2]</sup>。近年来, 沿海港口数量不断增加, 港口体系不断深化, 港口城市功能规模不断壮大, 逐渐形成具有类似城市体系的港口城市体系, 即港口城市带<sup>[3]</sup>。

以现代航运技术及组织模式变革为基础, 在全球化、流动空间和世界产业转移浪潮推动下, 海港功能升级为全球物流供应链再造的中心节点。引发港口城市对流动空间的交通流线和网络构建发挥独特的空间作用, 加速了各种流要素在方向和距离上产生不同的地理过程和空间运动<sup>[4]</sup>。在此背景下, 港口能否依托其直接腹地——港口城市, 在国家和区域空间重塑中发挥建设性的作用, 港口及其城市在流动空间的经济地理格局演进中扮演何种角色, 港—城网络体系的作用机制如何演化, 这些问题为港口地理研究提出了新的科学命题。因此, 围绕港口交通流场和流线, 探讨港口—腹地经济地域系统的流动空间网络格局, 揭示港—城网络体系空间格局演化的作用机制具有重要理论意义与现实意义。

从地理学关于港口城市的研究来看, 早期相关学者多将港口视为静态的、相对孤立的系统, 从其内部特征出发, 围绕集装箱

**作者简介:** 郭建科 (1980-), 男, 山西长治人, 博士, 教授, 研究方向为交通地理与港航网络、海洋经济地理、城市地理。E-mail: gjianke98@126.com; 秦娅风 (1993-), 女, 山西长治人, 博士研究生, 研究方向为港口交通与城市地理。E-mail: qinyafeng8295@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41571126、41871112)

运输等静态指标,提出了港口体系、港口城市空间发展模型,如 Anyport 模型、Taaffe 的六阶段模型和四阶段模式等<sup>[5,6,7,8,9,10]</sup>,相关研究侧重于港口间的竞争关系。但在全球化和信息化的背景下,港口基础设施不断完善、信息交流日益紧密,港口不再是孤立的系统,港口间通过要素流动进行物质交换,形成动态合作的港口体系,以规模层级分布探究港口发展无法揭示全球化、供应链等新时代背景下港口体系的新因素、新特征。相关研究开始以港口航运网络为切入点,从集装箱及港口相关产业等方面对其进行了深入分析,但研究内容仍以单纯的运输功能为主,枢纽港界定具有一定片面性,航运网络分析忽视模型剖析和空间效应<sup>[11,12,13]</sup>。研究表明,珠三角、长三角等沿海地区海港空间效应与区域经济地域系统高度重合,港口经济是区域经济的核心,整个产业结构和空间布局临港化明显,港口城市处于城市体系的核心<sup>[5,14]</sup>。其中,港口功能是基础性功能,随着港口产业体系的发育逐渐牵引更多其他港口产业甚至非港口产业集聚<sup>[15,16]</sup>,促进城市间多功能网络的形成。但将港口地理的内涵和研究视角扩展至经济地理学层次的系统分析并不多;受港口中心论的影响,港口体系研究尚未与沿海城市网络体系相结合,对于两者的空间耦合及其交互作用、在流动空间和全球生产网络中的区域效应等研究尚属空白。

从地理学关于流动空间的研究来看,城市网络联系是由物流、客流、资金流、技术流和信息流等要素组成的综合性、交互性和复杂性的地域系统<sup>[17,18]</sup>。其中,基于城市基础设施连接形成的网络研究较为广泛,在客流和物流的研究中,主要是基于航空、公路和铁路等构建城市间的网络联系<sup>[19,20,21]</sup>。这类网络受距离和运输方式的影响较大,空间分布具有显著的异质性,城市节点具有明显的等级性,联系轴线呈现“轴—辐”特征;在技术流的研究中,随着知识流动日益频繁,带动了以专利和论文为研究范畴的技术体系、技术联系和技术网络的兴起<sup>[22,23,24,25]</sup>,使网络呈现集聚与分散的双重特征;在资金流的研究中,主要是基于企业关联数据、分行业数据等来探讨网络的空间组织及其功能<sup>[26,27]</sup>,但不同行业视角下的网络格局存在显著差异,相关研究有待进一步补充;在信息流的研究中,形成了以大数据为基础的研究潮流,开始利用百度指数、媒体指数值和新浪微博<sup>[28,29,30]</sup>等数据来研究城市间信息的流通。这类网络的跨地理特征最为显著,城市间信息联系紧密。然而,流动空间并非单一生产要素的流动,而是由多种流动要素构成,进而影响城市的空间发展模式<sup>[31,32]</sup>。

综上,从场空间到流动空间,传统中心地体系向网络体系转变,港口城市体系以网络形式组织起来,全球城市网络体系逐渐显现,基于动态关联的“流动空间”视角逐渐成为研究港口城市发展的热点方向。人流、物流、资金流、技术流和信息流构成了流动空间和网络时代经济发展的核心要素,这些流动要素的作用、功能各不相同,与港口城市的发展阶段、区域功能密切相关。基于此,本文在“流动空间”的相关理论下,分析流动空间的港口功能转型及其网络体系时空演化特征,探讨新的空间属性下港—城网络体系的产生机制,揭示港城关系的新特征、不同港口及其城市在整个网络体系中的等级和功能,并在此基础上对港口及港口城市进行新的层级分类,探讨港口城市对沿海港口—腹地经济地域系统的区域影响,尝试为“流动空间”视角的港口城市体系研究提供新的认知,拓宽港口城市体系的研究领域,推动港口地理学研究转型和沿海地区港口经济可持续发展。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

沿海港口城市带作为链接海向和陆向的核心区域,随着城市间联系深度和广度的不断扩大,逐渐形成跨越省区、联系密切的地理单元,并通过交通网和信息网,形成与世界其他城市相连的新型港口城市体系。一方面,21世纪以来,中国城市中东部港口城市发展最为迅速。在区位、资源和政策的支持下,各港口城市间人员、物质、信息等要素加速流动,逐步演化成城市化水平高、经济发展速度强劲且国际贸易交流密切的港口城市体系。另一方面,中国沿海地带的港口发展日新月异,新兴港口不断涌现,港口区域化特征明显,沿海城市带已发展为港口城市带,港口城市在数量上大为增加,在空间上也连续分布。

本文研究区域基于《全国沿海港口布局规划》(2006)的相关规定,根据港口城市规模及发展现状,选取47个港口城市作为研究区域。文中沿海三大港口城市群指环渤海港口城市群、长三角港口城市群和珠三角港口城市群。

### 1.2 数据来源

港口城市作为我国国内外网络连接的核心区域，利用其特殊的区位条件和交通条件，通过一定的资源优化配置，成为资源、资金、信息和人才流通的中心，促进了港口城市间功能网络的形成。据此，从物流、客流、资金流、技术流和信息流五个维度建立多元联系网络，以探究沿海港—城网络体系的联系特征及空间重构机理。其中，物流数据来源于由国家发改委主管、中国交通运输协会主办的货物航运信息周刊《中国航务周刊》。选取中国港口间、中国出发至世界各地船期表，构建全球港口城市间船期信息平台，从中筛选整理出中国沿海港口城市间的船期信息（包含中转港），以此构建物流网络；客流数据来源于《全国铁路列车时刻表》（以 K、T、Z、D、C、G 开头的列车）和《中国交通统计年鉴》（2007、2017 年），筛选出中国沿海各港口城市之间的铁路运输数据（均未考虑直达和中转对客流权重的影响），以此构建客流网络；资金流数据来源于启信宝<sup>1</sup>提供的 2006 和 2016 年中国各城市间企业跨区域投资数据，将“企业—企业”网络转换为“城市—城市”网络，从中筛选出沿海各港口城市企业间的投资联系数据信息，以此构建资金流网络；技术流来源于万方数据知识平台中两个港口城市之间关于专利、科技成果及科技报告的单位合作联系数据，采取一定规则（选取有合作关系的数据，汇总并进行加权，即参与每篇专利等的作者群，如为两两联系，则分别计为 1/2；三者联系的数据，分别计为 1/3，以此类推）对相关专利、成果和报告进行量化，以此构建技术流网络；信息流来源于百度搜索<sup>2</sup>界面中“两两港口城市之间”的信息流通数据（剔除了无效和干扰信息），以此构建信息网络。

港口从第一代发展到第四代，其港口功能的发展演化（分别为运输中转、工业与商贸及其增值服务、物流与货物信息流动、资源配置与全球枢纽）是港口城市升级换代的宏观表现形式。从这个意义上说，港口货物吞吐量、集装箱吞吐量、地理距离等因素从根本上决定着港—城网络体系的演化特征。随着全球化的进一步加深，港口作为国际物流供应链中的枢纽节点对城市和区域经济发展起着越来越重要的支撑作用。港口的集散功能凸显，带动了港口及所在城市功能的多样化。因此，不同流要素及其网络特征等深刻影响着港—城网络体系的演化规律。此外，为体现现代港口与城市之间的关系及港口城市经济活力和吸引力，特别增加人口和 GDP 作为衡量指标。综上，选取静态指标港口运输量（港口货物吞吐量、集装箱吞吐量、客运量和货运量）、港口城市活力（人口和 GDP）、地理邻近（港口城市间的距离），动态指标物质流（物流和客流）、虚拟流（资金流、技术流和信息流）、网络邻近（民用航空用量、固定资产投资、电信业务收入），共六方面来探讨港—城体系网络空间重构的作用机制。其中，港口货物吞吐量、集装箱吞吐量、客运量、货运量、人口、GDP、民用航空用量、固定资产投资和电信业务收入来源于《中国港口年鉴》和《中国城市统计年鉴》（2007、2017 年）。港口城市间的距离来源于 Google Earth。需要说明的是，文中除揭示港口体系位序—规模分布特征时采用的是 2006—2016 年港口吞吐量的连续数据，其余部分分析均采用 2006 和 2016 年的断面数据。

### 1.3 研究方法

本文运用复杂网络分析方法，建立港口城市间要素流动的加权无向连接矩阵，通过 Matlab 和 Gephi 软件平台对网络各特征值进行计算，并通过熵权 TOPSIS 法对各流要素进行综合，得到多元流，运用社区发现算法（Louvain）揭示其地理空间重构特征。最后，以脉冲响应分析方法探究“流动空间”视角下港—城网络体系重构的作用机制。

#### 1.3.1 复杂网络基本指标

(1) 网络的度。借助复杂网络构建流要素网络结构模型<sup>[20,26]</sup>，公式如下：

$$S_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \quad (1)$$

式中： $S_i$  为节点强度； $N_i$  指网络中所有港口城市； $w_{ij}$  指港口城市  $i$  和港口城市  $j$  之间的联系。

(2) 中心性。中心性是城市网络分析中常用的指标，包括加权度中心性、加权中介中心性和加权邻近中心等。公式如下：

$$WDC_i = k_i^\alpha \times \left( \frac{S_i}{k_i} \right)^{(1-\alpha)} \quad (2)$$

式中：WDC<sub>i</sub>为加权度中心性；k<sub>i</sub>是指港口城市 i 衔接边的数目；α 为赋值参数，本文采用 0.5。

$$WBC_i = \frac{\sum_{k \neq i, j} \frac{n_{kj}(i)}{n_{kj}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i, j} \frac{n_{kj}(i)}{n_{kj}}} \quad (3)$$

式中：WBC<sub>i</sub>为加权中介中心性；n<sub>kj</sub>指港口城市 k 与港口城市 j 之间所有加权最短路径的条数；n<sub>kj</sub>(i)为两城市最短路径经过港口城市 i 的条数；n 为港口城市总数。

$$WCC_i = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij}^w \right]^{-1} \quad (4)$$

$$d_{ij}^w = \min \left\{ \frac{1}{w_{ik}} + \dots + \frac{1}{w_{kj}} \right\} \quad (5)$$

式中：WCC<sub>i</sub>为加权邻近中心性；d<sub>ij</sub><sup>w</sup>是港口城市 i 和港口城市 j 之间的加权最短路径长度。

(3) 在整个网络中有一群城市关系特别紧密，以至于形成一个个社团，称其为“城市社团”，具有内部集聚强、外部网络联系弱的特征。本文通过 Louvain 算法构建“城市社团”结构<sup>[33]</sup>，公式如下。

模块度：

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[ W_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(C_i, C_j) \quad (6)$$

式中：k<sub>i</sub>和 k<sub>j</sub>是节点的度值；C<sub>i</sub>是城市 i 所属社团；m 是网络的总边数。

模块度增量：

$$\Delta Q = \left[ \frac{\sum in + K_{i,in}}{2m} - \left( \frac{\sum out + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[ \frac{\sum in}{2m} - \left( \frac{\sum out}{2m} \right)^2 - \left( \frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中： $\Sigma_{in}$  是社团内部边的权值之和； $\Sigma_{out}$  是所有与社团内部节点相连的边的权值之和； $k_i$  是所有与点  $i$  相连的边的权值之和； $K_{i,in}$  是节点  $i$  与社团  $C$  相连的边的权值之和。

### 1.3.2 基于 VAR 的脉冲响应分析

为确保联立方程模型结构的正确性，并精准解释内生变量之间错综复杂的关系，向量自回归模型（Vector Auto-regression Model, VAR）应运而生。该模型由 Sims 于 1980 年提出，广泛应用于分析长时间序列系统的关联和扰动对变量系统的动态影响<sup>[34, 35]</sup>。脉冲响应函数用于衡量来自某个内生变量的随机扰动项的一个标准差冲击对 VAR 模型中所有内生变量当前值和未取值的影响。联立方程模型可以解决某个年份多个区域内生变量和外生变量间的关系问题。此外，由于不同港口的发展历史、阶段、功能各不相同，为探究整个港—城网络体系空间演化规律的作用机制，借鉴联立方程模型，将网络中的“时间序列”定义为各流要素在不同城市的中心性值，按城市加权度值的大小排列而形成序列。运用 Eviews8.0 软件对港—城网络体系重构的作用机制进行脉冲响应分析。VAR<sub>p</sub> 模型的数学表述为：

$$y_t = Bx_t + A_1y_{t-1} + A_2y_{t-2} + \dots + A_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (8)$$

式中： $y_t$  为  $k$  维内生变量； $x_t$  为  $d$  维外生变量； $t=1, 2, \dots, T$  ( $T$  为样本个数)； $P$  为滞后阶数； $A_1, A_2, \dots, A_p$  和  $B$  分别为系数矩阵； $\varepsilon_t$  为  $k$  维扰动向量。

### 1.3.3 熵权 TOPSIS 法

传统的 TOPSIS 模型具有较强的主观性，其权重是事先确定的。熵权 TOPSIS 法把熵权法和 TOP-SIS 法进行组合，避免了主观赋权对分析结果的影响<sup>[36]</sup>。

## 2 港—城网络体系所处的流动空间整体特征分析

### 2.1 港口体系的位序—规模分布

衡量港口竞争力的两个主要方面是外部集聚经济效应的增强和内部网络联系的提升，且二者之间存在相互影响。首先运用位序—规模法则分析港口体系的演化过程，以揭示其外在区域特征。

由 2006—2016 年港口吞吐量位序—规模图（图 1）可知， $Q$  值<sup>3</sup>从 1.9641 降至 1.6135，降幅为 0.3506，呈现波动下降趋势。港口体系的位序—规模分布由明显分散化向融合发展阶段转变。一方面，发展初期，港口体制改革、航运技术变革等促使港口体系深入调整，港口竞争激烈，枢纽港在竞争中占据优势。港口差异化明显，规模分布呈现明显分散化态势。另一方面，随着全球化推进和腹地经济崛起，靠近枢纽港的中小港口城市在共生关系的影响下逐渐崛起，港口朝着大型化和集装箱化发展，以航运网络联系区别的枢纽港与支线港的分化代替以规模区别的大中小港口分化，港口城市间呈融合发展的态势。

由图 2 可知， $R^2$  分别为 0.8513 和 0.9165，表明基于多元流的港—城网络联系量与港口规模指标高度相关，这进一步证明了要素流动与港口体系密切相关、相互作用。港口体系的形成受到要素集聚和流动的深刻影响；同时，要素的集聚和流动必然要考虑港口城市规模、功能、层级等因素。

### 2.2 港—城网络体系的流动空间格局

### 2.2.1 港—城网络体系的空间分布演化特征

港口不仅是航运集散的起点和终点，也是航运业的枢纽，引发不同流要素集聚，促进港口城市的发展，即港口与港口之间的发展、港口建设与腹地产业的发展、港口建设与城市建设的发展，且港口的多功能发展也带动了港口所在城市功能的多样化。又由于港口网络是分析港口城市内在联系的重要视角，在刻画城市空间组织结构上具有独特的优势，因此，通过对物流、客流、资金流、技术流和信息流综合得到多元流，并绘制其网络空间分布图（图3），以探究港—城网络体系的空间格局及网络联系。

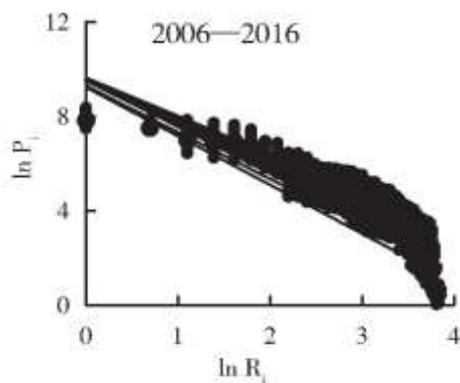


图1 港口体系位序规模图

网络中排在前五位的城市联系对分别由“上海—深圳、上海—宁波、广州—深圳、上海—天津和上海—苏州”变为“上海—宁波、广州—深圳、深圳—上海、宁波—深圳和大连—天津”，网络核心由上海、深圳和广州变为上海、深圳、广州、宁波和天津，整个网络呈现“多核化”发展格局，且扁平化特征更加凸显。表明随着不同流要素在港口城市的不断汇聚，各港口城市在网络中的地位差异缩小，核心港口的垄断地位减弱，并促进了港口体系的纵深演变。打破了由增长极带动港口城市发展的经济规律，促使不同流要素功能自由流动并向优势地区集中，提高了要素流动的频率。不同港口的功能属性优势得以发挥，越来越多的港口融入到网络中来，并迅速成长为重要节点。

### 2.2.2 港—城网络体系的要素流动演化特征

港口体系的变动必然和相邻港口之间的竞争有关。“社团”在一定程度上反映港口间要素的集聚性和差异性，同时进一步明确港—城网络联系及空间关系。在认识港—城网络体系组织规律的基础上，更有助于明确港口群竞争力的来源。利用 Louvain 算法，将 2006 年中国港口城市划分为“两小一大”3 个“社团”，2016 年划分为“一大一小”2 个“社团”（图4）。

2006 年，社团分布与港口群分布基本吻合，但以上海为核心的社团已经开始小范围地吸引其他港口群的城市，区域间跨地理特征明显，基本形成多中心、多层级的港口城市网络格局；2016 年，社团分布开始突破港口城市群的限制，港口城市的广度和深度进一步拓展，不仅覆盖了其所在港口群的绝大部分城市，还囊括了其他港口群的城市，促进了港口城市群溢出效应的扩散，以上海、深圳和广州为核心的社团成为该网络中联系最大的“社团”。一方面，上海、深圳、广州等核心港口具有资金流动规模大、密度高、功能强等特征，对其他港口的经济资源要素产生虹吸效应，使得这些资源要素与其发生联系。另一方面，各港口间实现了要素优化的强聚合效应，社团内各港口可以彼此进行资源互补，由单纯的竞争关系变为新型的竞合关系，并形成了更具效率和价值的链接关系。

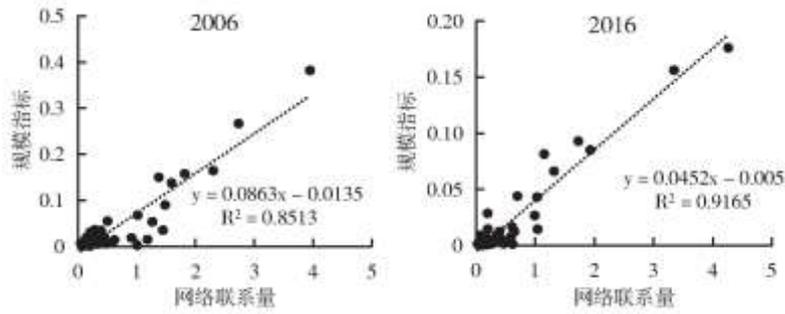


图2 网络与规模指标相关性

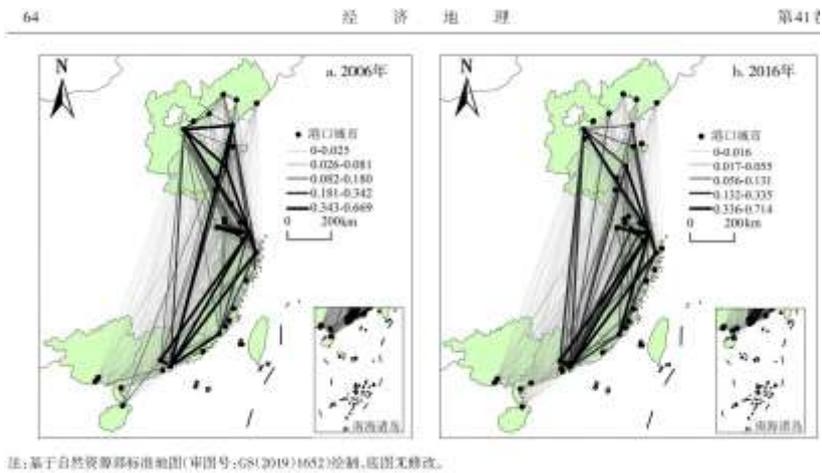


图3 港—城网络体系空间分布图

### 2.3 港—城网络体系的层级划分与重构特征

作为当前全球航运市场发展及港口成长的中心，东亚沿海港口体系和运输网络正经历着前所未有的空间转型，多港口门户区域不断涌现、港航企业物流网络加速整合、港口与腹地连接深度重构。沿海港口城市从属于不同层级的全球航运中心系统，并最先融入全球性城市网络的流动空间体系。因此，必须对沿海地区及港口城市所处的流动空间网络性质、层级、功能等形成整体认识，才能进一步探究港—城网络体系的作用机制。依据静态视角下的港口货物吞吐量和集装箱吞吐量、流动空间视角下的多元流网络的中心性的值进行 K-means 聚类，得到不同类型港口城市层级特征的分类结果。将各类型均划分 4 个层级，依次为全国性枢纽、区域性枢纽、骨干城市和一般节点。

#### 2.3.1 基于静态视角的城市层级划分

港口城市层级由“2+4+9+32”变为“2+7+14+24”格局，均呈现“金字塔”结构。具体看：(1)全国性枢纽由上海和深圳变为上海和广州，其中上海一直处于最顶端。这类港口具有优越的区位和广阔的腹地，基础设施完善、运输需求旺盛，处于整个港口运输体系的枢纽位置。(2)区域性枢纽的数量明显增多。该类港口城市通常是不同运输方式的交汇点及集散中枢，中转功能突出，承担了较多的货物运输及转运。(3)骨干城市的数量也明显增加，多是一些区域性骨干港口，运输需求、基础设施及地理位置一般，但主要在某个区域中发挥作用，并有效连接了枢纽港口、骨干城市及一般港口间的货物运输，是地区客货综合运输和集散中

心。(4)一般节点港口城市的数量减少,该类港口城市的运输需求、基础设施及地理位置等各方面优势较差,但有效补充了整个沿海交通系统,同时促进了所在区域的经济的发展。

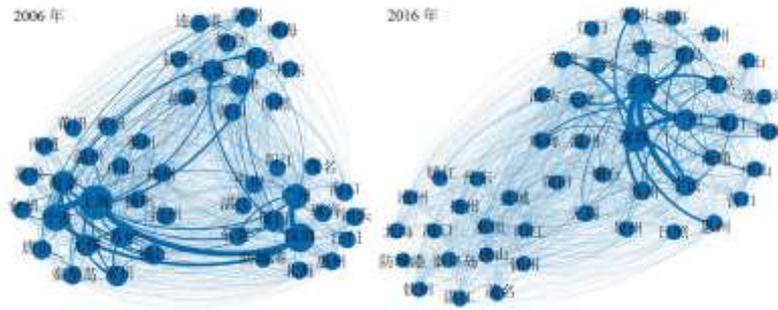


图 4 基于多元流要素的港口城市社团划分

### 2.3.2 基于动态视角的城市层级划分

港口城市层级由“4+8+17+18”变为“6+8+17+16”格局,均符合“梯型”结构。具体来看:(1)全国性枢纽主要由经济关联能力和影响能力极强的港口城市组成,作为流要素的交汇点,时空收敛效应带来了要素高度集中,在整个网络中的地位非常高。是整个网络中的经济中心、信息中心、技术中心及交通枢纽,能克服地理距离限制而发生频繁的要素流动。(2)区域性枢纽各流要素的集聚虽不及枢纽港口城市,但明显高于骨干和一般港口城市,不仅是各流要素交汇的重要核心,从整个网络格局来看,处于重要的位置。(3)骨干城市主要是一些基础设施一般、服务能力较差、吸引力不足的港口城市,同时由于核心港口城市辐射带动,与边缘城市形成较明显的要素流动关系。(4)一般节点港口城市由于受到交通、人口、自层级划分相比,多元流层级的枢纽港口数量明显增多,一般节点城市数量减少。相比传统意义上的港口体系,多核心的扁平化结构取代原来的金字塔结构成为流动视角下港—城网络体系的典型特征。(1)从能级变化看,三种类型的港口数量分别占整个港口城市带的51.0%、40.4%和8.6%。其中,宁波、深圳、天津、南京和烟台等港口城市能级提升,这类港口城市或由于货源充足、集散功能较强,或是一些近代以来快速崛起的枢纽港口,具有较强的要素集聚和扩散能力、完善的基础设施。营口、泰州、台州和湛江的能级下降,这类港口城市或由于港口职能单一,或由于流要素类型单一,或由于服务设施较差,要素的汇集能力减弱,能级提升受阻。总的来看,流动空间重塑了港—城网络体系的结构和方向,其层级数量和能级均发生了显著变化,且核心港口能级提高。(2)从集聚程度看,2006和2016年静态港口城市的集聚指数( $H^*$ )分别为0.1534和0.1878,多元流分别为0.0723和0.0603,均小于同时期静态港口城市的集聚程度,同时多元流也均小于王列辉等<sup>[12]</sup>研究中2005和2015年“海丝之路”沿线国内集装箱网络的0.0922和0.0900。表明,流动空然条件等众多客观因素的限制,流要素集聚和吸引能力明显低于其他层级的港口城市,竞争优势不够突出,对外联系的人才、资金、信息和技术等受阻,明显从属于高一层级的港口城市。

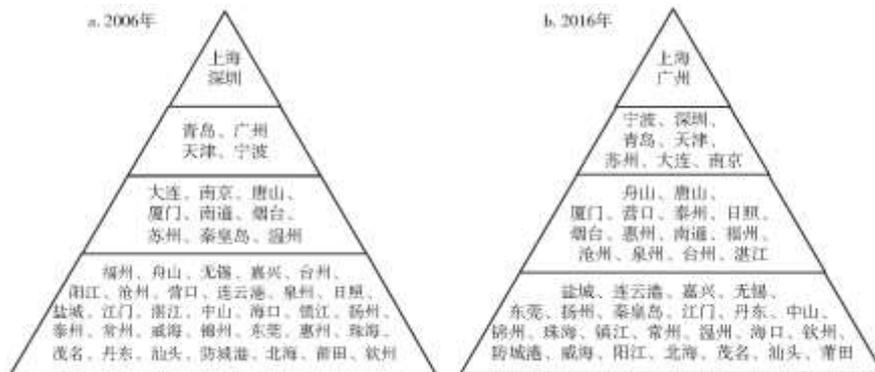


图 5 静态港口城市层级分布

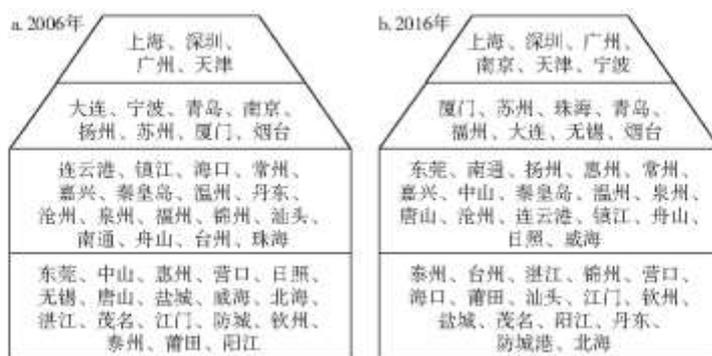


图 6 动态港口城市层级分布

与静态港口城市间视角下的港—城网络的集聚程度降低，各港口间联系增多、效率提高。多元流克服了地理距离约束，提高了港口之间要素流动的频率，促进了骨干城市快速成长为枢纽港口。

### 3 港—城体系网络空间重构的作用机理

目前大量研究主要集中于城市网络的视角化和描述性分析，机制分析薄弱。港—城网络本质上是港口城市体系的拓展和深化，静态空间状态下，港口体系演化受自然条件、技术进步、规模经济、航运市场变化、腹地经济联系和港口管理体制等多方面影响。在流动空间状态下，这种作用机制发生着怎样的变化和演进值得进一步探讨。为此，运用脉冲响应来测定港口运输量、港口城市活力、地理邻近、物质流、虚拟流和网络邻近对港—城网络体系的冲击程度，揭示其驱动模式。

#### 3.1 “内外统筹”影响下的枢纽港口主导作用明显

2006 年，对港—城网络体系的冲击程度从大到小分别是：交通运输量、港口活力、物质流、地理邻近、虚拟流、网络邻近。其中，物质流对其冲击呈现波动上升的态势；虚拟流对其的冲击呈现波动性和持续性；交通运输量对其的冲击虽短期效应显著，但持续性不足；港口活力对其的冲击呈现波动下降的趋势；地理邻近和网络邻近的影响虽小，但持续性强。总的来看，交通运输量是该阶段港城—网络体系演化的首要作用机制，促使枢纽港口对网络体系的主导作用较强，将该特征概括为“内外统筹”影响下的枢纽港口主导作用明显。其中，“外”指 1980 年以来，集装箱成为中国港口体系演化的新动力，影响港口体系演化的因素可归纳为地理区位、航运市场、技术进步、政策和政治四类。因此，在区位优势 and 先发优势的影响下，枢纽港的枢纽地位更加稳固，不同层级港口城市之间的差异较大，促使枢纽港口对整个港口体系和港航运输的主导作用不断增强。“内”指 2006 年，交通运输量是影响多元流网络的决定性因素，即受到港口自然经济条件、发展规模和交通可达性等多重制约，枢纽港口对整个网络的主导作用较强，且不同层级的港口城市差异化明显。

#### 3.2 “相辅相成”推动下的新兴港口快速成长及港口间实现自组织协调

2016 年，对港—城网络体系的冲击程度从大到小分别是：虚拟流、物质流、港口活力、交通运输量、网络邻近、地理邻近。其中，物质流对其的冲击具有明显的冲击性和持续性；虚拟流对其的冲击表现为明显正向溢出效应，并呈逐渐加强态势；交通运输量对其的冲击虽第 1 期表现为负向溢出效应，但后期持续且稳定；港口活力对其的冲击短期效应显著，但是后期呈正负波动；地理邻近对其的冲击较平稳；网络邻近对其的影响具有波动且上升的趋势。总的来看，流要素是该阶段港城—网络体系演化的首

要作用机制，使港口城市间链接的频率增多，促发新兴港口崛起，将该特征概括为“相辅相成”推动下的新兴港口快速成长及港口间实现自组织协调。一方面，在全球化和一体化的影响下，国家对沿海港口的规划日益完善，中小港口规模不断壮大，港口大型化、区域化发展日益明显，集装箱态势显著，以规模划分的大中小港口分化让位于以港口城市网络联系的枢纽港与一般节点的分化。另一方面，流要素涵盖人力、物力、资金、技术和信息等多方面，不同流要素在空间的流动也即是港口城市网络形成和发展的过程。在各港口城市发展相对稳定的情况下，发展较快的港口城市具有较大的溢出性，一般港口城市在资金、技术和信息等要素的推动下获得较快发展，港口间的规模大小、等级差距开始缩小。港口城市间相互作用、共同发展，通过要素的流动引起空间活动的集聚与扩散，这种过程就是港口体系向港—城网络体系的演化过程。

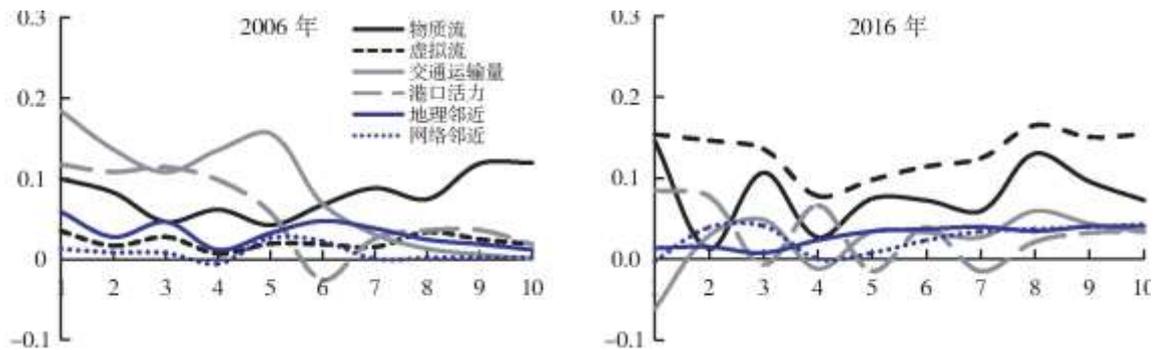


图 7 各因素对港—城网络体系的脉冲响应分析图

注：横轴为冲击作用的滞后期数，纵轴为脉冲响应函数值，代表各因素对港—城网络体系冲击引起的响应程度。

比较来看，2006 年静态指标对港—城网络的冲击程度明显大于动态指标，2016 年静态指标对港—城网络的冲击程度明显小于动态指标。物质流和虚拟流越来越成为港—城网络的决定性因素，且虚拟流的冲击程度增长趋势显著。究其原因：(1) 随着航运技术变革、港口运输结构优化及港口的多功能发展，港口功能由海洋运输演变为国际物流供应链中心和全球资源配置的枢纽，并实现了功能提升、要素集聚和空间成长。尤其是，随着各流要素不断在港口城市汇集，港口城市从优化内部流程转向更多地与外部互动，加强了港口城市间的要素流动，从而形成具有鲜明特征的现代港口城市。(2) 随着港口城市更加多元化，港口城市不断实现物流、客流、资金流、技术流和信息流的融合发展，从而使整个地区的联系更为紧密、整体性更强。港口与港口之间通过流要素网络不断实现一体化发展，彼此分工协作加强，并最终实现联动发展。(3) “智慧港口”将成为未来港口城市的发展方向，这不仅要求港口物流升级换代，也对港口基础建设及服务建设提出了高标准和新要求。同时，以大数据为基础的信息技术呈爆发式增长，已然成为影响港口城市发展的最活跃因素。(4) 随着场所空间向流动空间转型，网络可达性取代了地理邻近性，成为城市经济联系的重要影响因素。在网络环境下，那些拥有关键资源的城市将得到更多的关注，传统城市体系中的资源优势将进一步转化为城市网络竞争力，使得中国城市网络发育呈现出等级扩散、择优链接的特征。

## 4 结论和讨论

从五种基本的生产流要素出发，围绕流动空间经济地理过程的核心要素，并在以往对客货流、物流研究及数据储备基础上，拓展至其他流动要素，研究港口间相互作用及城市网络体系。主要结论如下：

(1) 港口体系演化是港口城市竞争力的外在特征，表现为港口体系的位序—规模分布由明显分散化向融合发展并存的阶段。10 年来，港口体系逐渐完善，且与多元流的港—城网络联系量高度相关。规模层级让位于网络化的空间格局，港口城市间由单纯的竞争关系变为新型的竞合关系。港—城网络体系演化是港口城市竞争力的内在特征，表现为网络联系呈现“多核化”发展的格局，各港口城市在网络中的地位差异缩小，核心港口的垄断地位减弱，并促进了港口体系的纵深演变。社团结构组合变化促

进多元网络联系广度和深度不断拓展，枢纽港城市及其城市溢出效应进一步扩大。

(2)从港口城市层级看，基于静态指标的港口城市层级划分均呈现“金字塔”结构，基于动态视角的城市层级划分均呈现“梯型”结构，多核心的扁平化结构取代原来的金字塔结构成为流动视角下港—城网络体系的典型特征，枢纽港口城市数量明显增多，一般节点城市数量明显减少；综合性港口城市能级提高，单一性港口城市能级下降，其中上海、深圳、广州和天津等综合性港口城市的辐射作用凸显；整个港—城网络体系集聚程度降低，各港口间联系增多、效率提高。

(3)2006年静态指标对港—城网络体系的冲击程度明显大于动态指标，2016年静态指标明显小于动态指标。港—城网络体系空间重构的作用机制突出表现为“内外统筹”影响下的枢纽港及其城市主导作用明显、“相辅相成”推动下的新兴港口城市快速成长及港口城市间实现自组织协调。物质流和虚拟流越来越成为港—城网络体系空间重构的决定性因素，且虚拟流冲击程度的增长趋势显著。

从城市网络理论来看，“流动空间”代替“地方空间”并作为区域空间组织研究的理论基础，将港口体系与网络相结合，从非等级视角对港口城市间组织结构作出解释。结合本文的研究结论，主要具有两方面特征：(1)“流动空间”重塑了港—城网络体系的思考方向，表现为港—城网络体系的集中化程度明显下降，呈现出多核心的扁平化特征。(2)网络化更注重核心港口在区域中发挥的作用和优势，表现为核心港口须同时具备中心和门户的双重属性，不仅要拥有特色的核心功能与引领作用，同时应发挥连接功能与辐射作用。港—城网络体系是港口城市节点间相互关系的一种空间体现，以关系视角代替传统的结构视角并推动理论研究范式的转型，以此避免了孤立的港口研究，也打破了以等级作为港口间组织关系的传统研究思路。

#### 参考文献:

[1]Hoyle B S.Ports, port cities, and coastal zones: development, interdependence and competition in East Africa[M]. Academie Royale des Sciences D'outre-mer, 1997.

[2]杨吾扬, 张国伍, 等. 交通运输地理学[M]. 北京: 商务印书馆, 1986.

[3]郭建科, 吴陆陆, 李博, 等. 多功能视角的沿海港口城市体系位序规模结构及耦合类型[J]. 地理科学, 2020, 40(7):1050-1061.

[4]韩增林, 郭建科. 中国海港空间效应的识别与测度[J]. 地理学报, 2014, 69(2):243-254.

[5]Bird J. The Major Seaports of the United Kingdom[M]. London:Hutchinson, 1963.

[6]Notteboom T, Rodrigue J. Port regionalization: Towards a new phase in port development[J]. Maritime Policy and Management, 2005, 32(3):297-313.

[7]Taaffe E, Morrill R, Gould P R. Transport expansion in underdeveloped countries: A comparative analysis[J]. Geographical Review, 1963, 53(4):503-529.

[8]Mina Akhavan. Development dynamics of port-city interface in the Arab Middle Eastern world-The case of Dubai global hub port-city[J]. Cities, 2017, 60(3):343-352.

[9]王缉宪. 中国港口城市互动与发展[M]. 南京: 东南大学出版社. 2010.

- 
- [10]叶士琳, 曹有挥, 王佳韡, 等. 长江沿岸港口物流发展格局演化及其机制[J]. 地理研究, 2018, 37(5):925-936.
- [11]王成金, 韩增林. 试论环渤海物流网络的形成与运作[J]. 人文地理, 2004(2):69-73.
- [12]王列辉, 朱艳. 基于“21世纪海上丝绸之路”的中国国际航运网络演化[J]. 地理学报, 2017, 72(12):2265-2280.
- [13]莫辉辉, 胡华清, 王姣娥. 中国货运航空企业发展过程及航线网络演化格局[J]. 地理研究, 2017, 36(8):1503-1514.
- [14]郭建科, 韩增林. 中国海港城市“港—城空间系统”演化理论与实证[J]. 地理科学, 2013, 33(11):1285-1292.
- [15]张梦天, 王成金, 王成龙. 中国港口铁矿石运输的空间格局及演化[J]. 经济地理, 2016, 36(8):99-105.
- [16]王伟, 王成金. 中国沿海港口煤炭运输的空间分异格局及演化[J]. 地理学报, 2016, 71(10):1752-1766.
- [17]Zhen F, Qin X, Ye X, et al. Analyzing urban development patterns based on the flow analysis method[J]. *Cities*, 2019, 86:178-197.
- [18]胡国建, 陈传明, 金星星, 等. 中国城市体系网络化研究[J]. 地理学报, 2019, 74(4):681-693.
- [19]Matsumoto H. International urban systems and air passenger and cargo flows: Some calculations[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10(4):239-247.
- [20]金凤君, 王成金. 轴—辐侍服务理念下的中国航空网络模式构筑[J]. 地理研究, 2005, 24(5):774-784.
- [21]Chen W, Liu W, Ke Q, et al. Understanding spatial structures and organizational patterns of city networks in China: A highway passenger flow perspective[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(4):477-494.
- [22]刘承良, 桂钦昌, 段德忠, 等. 全球科研论文合作网络的结构异质性及其邻近性机理[J]. 地理学报, 2017, 72(4):737-752.
- [23]徐宜青, 曾刚, 王秋玉. 长三角城市群协同创新网络格局发展演变及优化策略[J]. 经济地理, 2018, 38(11):133-140.
- [24]Ter Wal A L J. Cluster emergence and network evolution: A longitudinal analysis of the inventor network in Sophia Antipolis[J]. *Regional Studies*, 2013, 47(5):651-668.
- [25]Scherngell T, Hu Y. Collaborative knowledge production in China: Regional evidence from a gravity model approach[J]. *Regional Studies*, 2011, 45(6):755-772.
- [26]陈艳华, 韦素琼, 陈松林. 大陆台资跨界生产网络的空间组织模式及其复杂性研究——基于大陆台商千大企业数据[J]. 地理科学, 2017, 37(10):1517-1526.
- [27]赵金丽, 盛彦文, 张璐璐, 等. 基于细分行业的中国城市群金融网络演化[J]. 地理学报, 2019, 74(4):723-736.
- [28]熊丽芳, 甄峰, 王波, 等. 基于百度指数的长三角核心区城市网络特征研究[J]. 经济地理, 2013, 33(7):67-73.

- 
- [29]王波,甄峰.城市实体特征对城市网络空间影响力的作用机制——基于互联网新闻媒体的分析[J].地理科学,2017,37(8):1127-1134.
- [30]王波,甄峰,席广亮,等.基于微博用户关系的网络信息地理研究——以新浪微博为例[J].地理研究,2013,32(2):380-391.
- [31]Derudder B,Cao Z,Liu X,et al.Changing connectivities of Chinese cities in the world city network 2010-2016[J].Chinese Geographical Science,2018,28(2):183-201.
- [32]Liu X,DerudderB,Wu K.Measuring polycentric urban development in China:An intercity transportation network perspective[J].Regional Studies,2016,50(8):1302-1315.
- [33]占文威,席景科,王志晓.基于相似性模块度的层次聚合社区发现算法[J].系统仿真学报,2017,29(5):1028-1032,1040.
- [34]Guo J,Qin Y,Du X,et al.Dynamic measurements and mechanisms of coastal port-city relationships based on the DCI model:Empirical evidence from China[J].Cities,2020,96:102440.
- [35]樊欢欢,刘荣.Eviews 统计分析与应用[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [36]曹贤忠,曾刚.基于熵权 TOPSIS 法的经济技术开发区产业转型升级模式选择研究——以芜湖市为例[J].经济地理,2014,34(4):13-18.

#### 注释:

1 “启信宝”从全国企业信用信息公示系统、中国法院裁判文书网、中国执行信息公开网等 100 家网站提取官方数据,通过企业名称、人名、品牌、联系方式、网址、专利等企业信息关键字或者组合关键字多维度锁定目标企业。

2 百度拥有目前世界上最大的中文信息库,并使用了高性能的“网络蜘蛛”程序自动在互联网中搜索信息,能在极短的时间内收集到最大数量的互联网信息。

3 位序规模的线性表达式为:  $\ln P_i = \ln P_1 - q \ln R_i$ , 其中,  $p_i$  为港口城市吞吐量的规模;  $R_i$  为  $i$  港口吞吐量降序排列的顺序;  $q$  为 Zipf 维数齐夫参数,  $q$  的变化反映吞吐量的空间分布形态变化。