

# 渤海海峡跨海通道建设前后区际城市群物流网络结构的时空演变

王泽东<sup>1</sup>, 张小林<sup>1</sup>, 孙东琪<sup>2</sup>, 孙海燕<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;  
3. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025)

**摘要:** 随着网络社会不断崛起, 城市空间内涵发生了明显改变, 已经成为人文地理学研究的新的内容。通过改进重力模型, 基于有向加权网络分析方法以及BRIM算法, 探讨了渤海海峡跨海通道建设前后山东半岛城市群与辽中南城市群物流网络结构的演变过程, 研究发现: ① 渤海通道建设主要影响城市低等级物流联系, 对高等级网络的影响局部集中在辽中南南部和山东半岛东部且自身物流规模较大的城市之间, 其中大连、沈阳以及青岛、烟台、潍坊、济南等少数重点城市之间垄断了大量的物流资源; ② 通道建设促进了“双通道双向合流”格局形成, 在各自城市群内部, 物流结构将出现陆、海方向上的分离性变化, 大连、烟台作为通道门户城市的地位逐渐确立; ③ 首位离心流、向心流格局在演变过程中均表现出渤海通道指向性, 仅有沈阳⇌济南、沈阳⇌淄博、大连⇌青岛、鞍山⇌潍坊等少数城市之间保持了常态化互惠关系, 但互惠程度并不对称, 辽中南地区城市的物流输出规模普遍高于具有互惠关系的山东半岛城市, 前者表现为典型的“双核-边缘”结构, 后者具有多极网络化特征; ④ 通道建设前后山东半岛城市群的物流城市类型保持稳定, 辽中南地区的向心流主导型城市则不断向铁岭、抚顺、本溪等东北部城市蔓延; ⑤ 大连在渤海通道建设后首次与烟台、青岛等山东半岛城市群东部城市实现了同一子群结构衔接, 总体上优化了山东半岛与辽中南城市群的物流空间格局。

**关键词:** 区际城市群; 有向加权; 物流网络; 时空演变; 渤海海峡跨海通道

DOI: 10.11821/dlyj020190061

## 1 引言

伴随着网络社会的崛起, 城市空间内涵正在由属性、等级、封闭逐渐转向关系、网络、开放的体系<sup>[1,2]</sup>。20世纪80、90年代, Castells基于社会学视角提出的“流空间”理论引发了地理学对空间、距离概念的辩论与反思<sup>[3]</sup>, 推动了城市体系研究从“等级规模”向“城市网络”的动态转向<sup>[4]</sup>。Camagni等通过研究意大利北部地区提出了等级网络、互补网络、协作网络等3种城市网络类型<sup>[5]</sup>; Batten强调城市网络的连接性, 认为网络体系主要受集聚能力而非规模的限制<sup>[6]</sup>; Meijers则把研究重点集中在多中心地区, 通过解释城市之间的功能分工与区域合作区分等级与网络的差异性<sup>[7,8]</sup>; GaWC小组借助“连锁网络模型”, 从生产性服务跨国公司入手, 将研究视角导向了世界城市网络<sup>[9]</sup>。此后, Taylor等主张要用“中心流”理论来补充原有的“中心地”理论<sup>[10]</sup>, 指出“中心流”理论更

收稿日期: 2019-01-18; 修订日期: 2019-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571164, 41501187)

作者简介: 王泽东(1992-), 男, 山东胶州人, 博士研究生, 主要研究方向为城乡发展与区域规划。

E-mail:wzdong1019@163.com

通讯作者: 张小林(1966-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事城乡发展与区域规划研究。

E-mail:xiaolin-zh@163.com

加适合解释城市间的流要素互动关系<sup>[11]</sup>。

在这其中,交通流特别是航空流成为国内外学者较早关注的对象,通过收集城市航空客流数据探讨城市体系的空间组织问题<sup>[12,13]</sup>;此后基于人口流动、物流、信息流、资金流、旅游流的城市网络研究不断丰富<sup>[14-16]</sup>,极大地促进了“流空间”理论与城市网络研究的交融。由于“流空间”对场所空间具有一定的依赖性,这在不同流要素的表现并不一致。相对信息、资金等即时传输型要素,以物流为代表的具有明显实体特征的空间网络,既要受到中心地规模的决定作用,又必须借助交通路网实现流转,因而其网络特征受距离衰减规律的影响也比较显著,本质上形成了一种等级性与网络性兼具的综合结构形态。此外,有关城市网络的研究方法也从最初的无向无权网络逐渐有向加权化<sup>[17,18]</sup>,在城市生产性服务业、母子企业、人口流动等研究中取得了较好效果<sup>[19,20]</sup>。首位联系可以在复杂网络分析中提取主干网络而成为重要方法之一<sup>[21]</sup>,但目前相关研究对其方向性关注较少,网络非对称特征有待进一步揭示。而随着地理学文化社会转向的持续深入,更多社会学的理论方法也被迁移到地理学领域。其中,社会网络分析方法因在复杂社会环境中建立起新的关系论思维,并在节点、关系、结构等方面与城市网络研究具有良好的契合性而成为重要的研究手段<sup>[16,21]</sup>。尽管如此,囿于关系数据获取以及复杂网络分析等难度<sup>[18]</sup>,目前研究更多地关注单一城市群,而对区际城市群之间的复杂2-模网络(由两类数据节点构成,同类节点之间不发生联系)研究较少<sup>[15,22]</sup>。特别是对2-模网络进行凝聚子群划分时,传统方法往往将其转化为两个单模网络,结果丢失了大量价值信息。近年来,研究人员不断尝试采用BRIM算法、聚类分配算法、矩阵分解及蚁群算法等<sup>[23-25]</sup>直接对2-模网络开展子群分类,取得了一定成果。可以预见,随着计算机技术的不断进步,复杂网络仍是未来信息技术科学关注的重点之一。

由此可见,尽管沿着多条脉络发展演化的网络研究各行其道,同时成为各专业领域的重要研究内容,但又相互交融、互为借鉴。若将不同学科的观点和方法加以综合,针对目前网络研究中的薄弱之处不断完善,将是一次有益的集成式方法探索,又有助于实现本研究的既定目标:系统阐明渤海海峡跨海通道(以下简称“渤海通道”)建设前后区际城市群物流网络结构的时空演变。

当前,中国经济社会步入新常态,区域发展不平衡不充分成为主要矛盾之一,物流业作为地区重要的基础性产业,合理开展物流活动特别是理清物流网络结构的演化规律对于引导区域物流良性互动、促进地区协同发展具有重要意义。与此同时,物流活动离不开区域交通网络的先导作用,渤海通道项目即是意在通过“桥”“隧”等工程手段跨越渤海海峡,打通山东半岛与辽中南地区的海上联系,加快促进城市群之间的人口、商品、技术流动。2018年渤海通道再次成为全国两会的重要议题,日前发布的《山东省综合交通网中长期发展规划(2018—2035)》着重强调加快推进渤海通道建设的前期研究论证;2018年10月,历时多年建设的港珠澳大桥正式通车,粤港澳大湾区融合发展迈出重要一步,这为环渤海大湾区建设以及渤海通道研究提供了借鉴。近年来相关学者已从交通可达性<sup>[26]</sup>、地缘战略<sup>[27]</sup>、区域经济演化<sup>[28,29]</sup>、客货流量<sup>[30-32]</sup>以及工程地质<sup>[33]</sup>等领域对其进行了系统论述,取得了许多建设性成果。但对于投资远超港珠澳大桥的重大交通项目,目前研究的广度和深度仍旧不够,特别是测度城市群经济、社会、物流联系时更多地强调距离因素对空间相互作用的影响,由此推断出的网络结构不能完全代表城市间的实际联系<sup>[17]</sup>,也难以对城市联系的方向性进行判别。因此,如何改进相关模型以体现城市联系的方向性规律<sup>[32,34]</sup>?基于关系数据的非对称非均衡物流等级网络究竟怎样?渤海通道建设前后区际城市群的物流子群结构如何演变?这些问题仍有待深入思考。

为此,选取渤海通道连接的山东半岛城市群与辽中南城市群为研究区<sup>①</sup>,重点关注区际城市群的2-模物流网络结构,通过改进重力模型,获取城市群之间的物流数据并进行有向加权处理,阐释网络非对称及方向性特征,旨在明晰未来山东半岛与辽中南城市群物流网络的演化趋势及其对渤海通道建设的响应,可望为该工程的前期论证提供决策参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

目前研究只考虑城市群的公路和铁路物流,未对水运、航空等交通方式进行研究。主要原因在于:研究区城市不完全具有水运功能,无法系统获取各城市的水运OD数据;另有水运量来自内河航运,这部分物流并不通过渤海通道来测算。航空物流总量较少,且在类型上与渤海通道的相互替代性不强,故不再考虑。

物流预测涉及国家和区域经济、社会、贸易、交通等多项指标,其中GDP、人口、一二三产业、商品销售(购进)总额、公(铁)路货运量、铁路行政区域间货运流量等数据主要来源于1991—2016年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国交通统计年鉴》《山东统计年鉴》《辽宁统计年鉴》以及相关城市的统计资料;公(铁)路里程参考全国公路(铁路)里程数据库、《国家公路网规划(2013年—2030年)》、2016年修编《中长期铁路网规划》等。此外,2017年9月课题组对烟台(大连)市发展改革委员会、交通局、港口与口岸局、统计局以及大连港、烟台港、中铁渤海轮渡等部门的实地调研数据及人员访谈资料也是本研究参考的重要内容。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 物流数据预测方法** 由于现有数据不能满足未来物流网络格局演化的需要,本研究将通过参量替代和模型测算的方式进行,前者包含经济、社会、贸易等多项替代指标,后者主要借鉴孙峰华等、孙东琪等的研究成果<sup>[30,31]</sup>,通过改进重力模型、多指标指数测算及加权处理、引入输出物流量指数等方法,在现有基础上最大限度的保证了数据的准确性(表1)。

此外,预测时间节点的选择借鉴中国工程院2014年9月完成的《渤海海峡跨海通道战略规划研究总报告》以及2017年由中国科学院呈送至国务院的《渤海海峡隧道工程建设必要性分析与建议》咨询报告<sup>[27,31]</sup>,前者是中国工程院、国家自然科学基金委员会设立的“渤海海峡跨海通道战略规划研究”重点咨询项目的成果之一,后者由陆大道院士牵头的课题组研究撰写,其中部分内容对渤海海峡南北间的运量及增长趋势进行了综合研判,对未来的时间预测节点均有说明。至此,本研究以2020年、2035年及2050年三个时间节点的预测数据为代表,上述节点基本对应了中国人口社会及物流发展的现状、重要拐点及渤海通道建设后物流稳定点,总体上满足研究需要。

#### 2.2.2 网络分析方法

(1) 有向加权网络。有向加权网络特别强调城市之间的联系方向和强度,所使用的数据类型为非对称矩阵<sup>[18]</sup>,既能实现城市“点对点”的精准关联,又容易区分整体网络中的主干网络,在网络研究中具有良好的解释性。本文采取有向加权网络分析方法,可以对渤海通道建设前后区际城市群物流网络的等级结构及其非对称特征进行合理评估。

(2) 首位联系流。首位联系流是指某城市与其他城市(物流)联系中的最大一条,

<sup>①</sup> 山东半岛城市群包括济南(暂不含莱芜区、钢城区)、青岛、淄博、东营、潍坊、烟台、威海、日照;辽中南城市群包括沈阳、大连、鞍山、抚顺、本溪、丹东、营口、辽阳、盘锦、铁岭。



表1 区际城市群物流预测方法集成

Tab. 1 Integrated approach to logistics forecasting for inter-regional urban agglomerations

方法集成	模型公式	具体内涵	补充解释
指标中长期预测	—	选取1990—2015年相关省市GDP、人口、产业、交通运输量等13项指标,通过Linear、Quadratic、Logarithmic、Logistic模型对数据进行分时段多次拟合预测,选取最优方案	参照世界银行、国家卫计委、中国科学院等权威部门的预测数据以及城市群实地访谈数据调整优化 <sup>[31]</sup> 。特别指出,研究按照中方案进行
公路、铁路输出物流指数模型构建	$r_{p-i}^E = \frac{d_{pi}d_{pj}}{s_{ij}^b} \sum_{j=1}^n \frac{d_{pi}d_{pj}}{s_{ij}^b}$	$r_{p-i}^E$ 表示 $p$ 指标输出物流流量指数; $d_{pi}$ 、 $d_{pj}$ 为 $i$ 、 $j$ 城市 $p$ 指标的输出物流密度; $s_{ij}$ 表示城市 $i$ 与城市 $j$ 之间的距离; $b$ 为距离摩擦系数; $n$ 为城市数量。因距离参数设置对结果具有较高敏感度,将 $S_{ij}$ (0~2000 km)与指数 $b$ (0.5~3.0)建立多组对应关系以提升模型精度	区际之间物流流量的多寡受到两地经济、人口、产业、距离等诸多因素的综合影响,本文基于渤海通道建设的未来设想,借助改进重力模型以参量替代的方式进行预测。物流出入具有相对性,在此仅考虑输出物流
计算城市物流输出总量	$L_g^E = wy/x$	$L_g^E$ 为不同城市的公路输出物流总量; $w$ 为公路货运总量; $y$ 为限额以上商品销售总额创造的GDP; $x$ 为某城市的GDP	GDP、公路货运量与限额以上商品销售总额存在显著正相关关系,计算限额以上商品销售总额创造的GDP占GDP的比重,一定程度上可以替代某城市公路输出物流总量占公路物流总量的比重(铁路数据国家已作统计)
计算城市物流OD数据	$S_{g(ij)}^E = L_{g(ij)}^E r_{g(ij)}^E$	$S_{g(ij)}^E$ 为城市 $i$ 输出到城市 $j$ 的公(铁)路物流流量; $L_{g(ij)}^E$ 代表城市 $i$ 的公(铁)路输出物流总量; $r_{g(ij)}^E$ 代表城市 $i$ 到其他城市的公(铁)路输出物流流量指数	城市之间的公(铁)路物流交流具有方向性,分别为城市 $i \rightarrow$ 城市 $j$ 以及城市 $j \rightarrow$ 城市 $i$ 的物流量,其中方向判别来自 $r_{g(ij)}^E$ ( $r_{p-i}^E$ 的平均值)
交通可达性测度	—	运用ArcGIS成本距离加权算法计算可达性水平 <sup>[26,31]</sup>	城市 $i$ 与城市 $j$ 在渤海通道建设前后的时间成本及变化率
计算2050年经行渤海通道的物流量	$K_{g(ij)}^E = S_{g(ij)}^E \delta$	$K_{g(ij)}^E$ 为城市 $i$ 经过渤海通道到达城市 $j$ 的物流量; $\delta$ 是参照山东省客货流量抽样调查并根据不同时间节省成本设置的物流比率 <sup>[30]</sup>	渤海通道主要影响区际物流的流量流向,并不影响区际潜在的物流总量 <sup>[31]</sup> 。各城市经行渤海通道的物流量重点考虑城市 $i$ 、 $j$ 之间的时间成本以及物流比率的空间分异

根据联系方向可以将其进一步划分为首位向心流和首位离心流<sup>[32]</sup>。一般而言,向心流用来表征某城市受周边其他城市的补给能力,反映流要素的集聚性;离心流与之相反,是某城市对其他城市所产生的辐射扩散作用。若立足于不同的城市主体,向(离)心的集聚与辐射特征具有相对性。

此外,为更好地表现物流城市属性,同时兼顾“点出(入)度中心性”的概念内涵,在首位联系流之外,计算城市物流的 $DW_{m(n)}$ 值,目的在于清晰刻画城市物流的集聚特征,量化地描绘物流城市类型。

$$DW_{m(n)} = \sum_{n(m)=1}^{z(Z)} WL_{m(n) \rightarrow n(m)} - \sum_{n(m)=1}^{z(Z)} WX_{n(m) \rightarrow m(n)} \quad (1)$$

式中: $WL$ 为物流离心联系; $WX$ 为物流向心联系; $m$ 表示山东半岛城市群8个城市; $n$ 特指辽中南城市群10个城市。相应地, $Z=8$ , $z=10$ 。当 $DW_{m(n)} > 0$ 时,表示城市的对外输出量高于外界对该城市的输入量,即为离心流主导型城市;反之为向心流主导型城市。

(3) 凝聚子群。网络因节点之间连接关系的强弱可以划分为不同子群(或称社区、模块),用来分析网络体系的联系层次性以及小团体集聚特征。一般而言,同一子群的节点联系比较紧密,互惠性较强,反之较弱。本研究中,山东半岛与辽中南城市群的区际物流联系分别作为物流的源地与目的地,具备2-模网络的基本属性。将物流流量大小作为权重对联系边进行加权处理,并对数据格式做了有序调整,选择BRIM方法,通过



MATLAB编程对区际城市群2-模物流网络开展子群划分。其中, BRIM算法在一般规模的网络应用中效果较好, 满足研究需要。

## 3 结果分析

### 3.1 网络等级及节点功能演变

从网络整体格局看, 等级结构是物流网络演化的重要内容。根据OD数据及组间分类原则, 将城市之间的物流联系划分为4个等级(图1), 不同色彩分别代表不同城市群的物流方向, “鲁→辽”表示山东半岛城市群对辽中南城市群的单向物流, “辽→鲁”与之相反, “辽⇌鲁”则说明该物流联系具有双向特征。

第Ⅰ等级(100万~200万t)。渤海通道建设前, 2020年尚未有城市物流流量突破100万t。随着经济社会发展, 2035年Ⅰ级物流网络增至14对, 占总量的8.75%, 其中, 辽中南城市的物流输出明显强于山东半岛, 网络开始呈现出非对称性特征, 前者包括大连→青岛、潍坊、烟台、济南, 沈阳→济南、淄博、东营, 鞍山→潍坊、济南、淄博等10对物流联系, 后者仅有青岛→大连、沈阳, 济南、淄博→沈阳等4对联系。渤海通道建设后, 2050年物流网络分化成陆上与通道“双网络”形态, 受多路径交通可达性的叠加影响, 不同城市的物流运输出现分流, 原本“单通道双向流”开始向“双通道双向合成流”演变(图2, 见第591页)。其中, 2050年(陆上)的整体网络有所削弱, 仅剩沈阳→济南、淄博、东营, 鞍山→济南、淄博以及济南、淄博→沈阳等7对联系, 从空间上看, 这些联系全部集中于山东半岛西部城市和沈阳、鞍山之间, 具有明显的陆上交通指向。2050年(通道)物流网络中, 物流分流现象在空间上得到进一步验证, Ⅰ级物流联系缺失即是分流作用导致半岛东部城市与辽中南城市群物流流量相对减少进而等级降低。

第Ⅱ等级(50万~100万t)。2020年Ⅱ级物流网络包括7对城市联系, 集中分布在沈阳、鞍山、大连以及济南、淄博、潍坊、青岛等物流规模较大的城市之间。不难看出, 前一时期的低等级城市联系往往成为后期更高等级联系的基础, 二者具有较高的匹配度, 因此城市物流规模的原发优势将在物流网络格局演变中发挥重要作用。2035年Ⅱ级城市联系增至26对, 占总量的16.25%, 物流联系重心开始向辽中南城市群转移, 接受山东半岛城市群物流输入的规模和范围明显扩大, 除铁岭、抚顺、丹东以及威海等陆上交通边缘外, 其他城市的物流联系均突破50万t。渤海通道建设后, 2050年(陆上)Ⅱ级物流网络基本延续了2035年的总体格局, 但只包含19对联系, 大连→青岛、潍坊、烟台、济南, 鞍山→潍坊以及青岛、烟台→大连等7对减少的城市联系相应地出现在2050年(通道)网络中, 成为渤海通道建设的物流重点响应区, 并且这一热点范围在山东半岛的辐射面积超过辽中南地区, 前者基本囊括了胶济-蓝烟轴线的城市, 而后者则高度集聚在大连。

第Ⅲ等级(20万~50万t)。如前所述, 后期高等级物流网络较大程度上由前一时期的低等级网络演化而来, 因此2020年的Ⅲ级物流网络与2035年Ⅱ级网络高度拟合, 物流交流的重心集中在山东半岛西部城市与辽中南中部城市之间, 共形成25对城市联系, 占总量的15.62%。2035年物流网络快速织密, Ⅲ级物流联系接近50对, 占总量30%, 重点分布在山东半岛东部与辽中南城市之间, 并以前者的物流输出为主。此后, 受到渤海通道建设的影响, 2050年(陆上)Ⅲ级网络不断分化, 陆上可达性更好的半岛西部与辽中南中部城市之间的物流联系得以保留。相对而言, 2050年(通道)物流网络总体规模仍旧不高, 仅有18对联系, 其中流量top5分别为青岛、烟台→沈阳, 大连→淄博, 潍坊

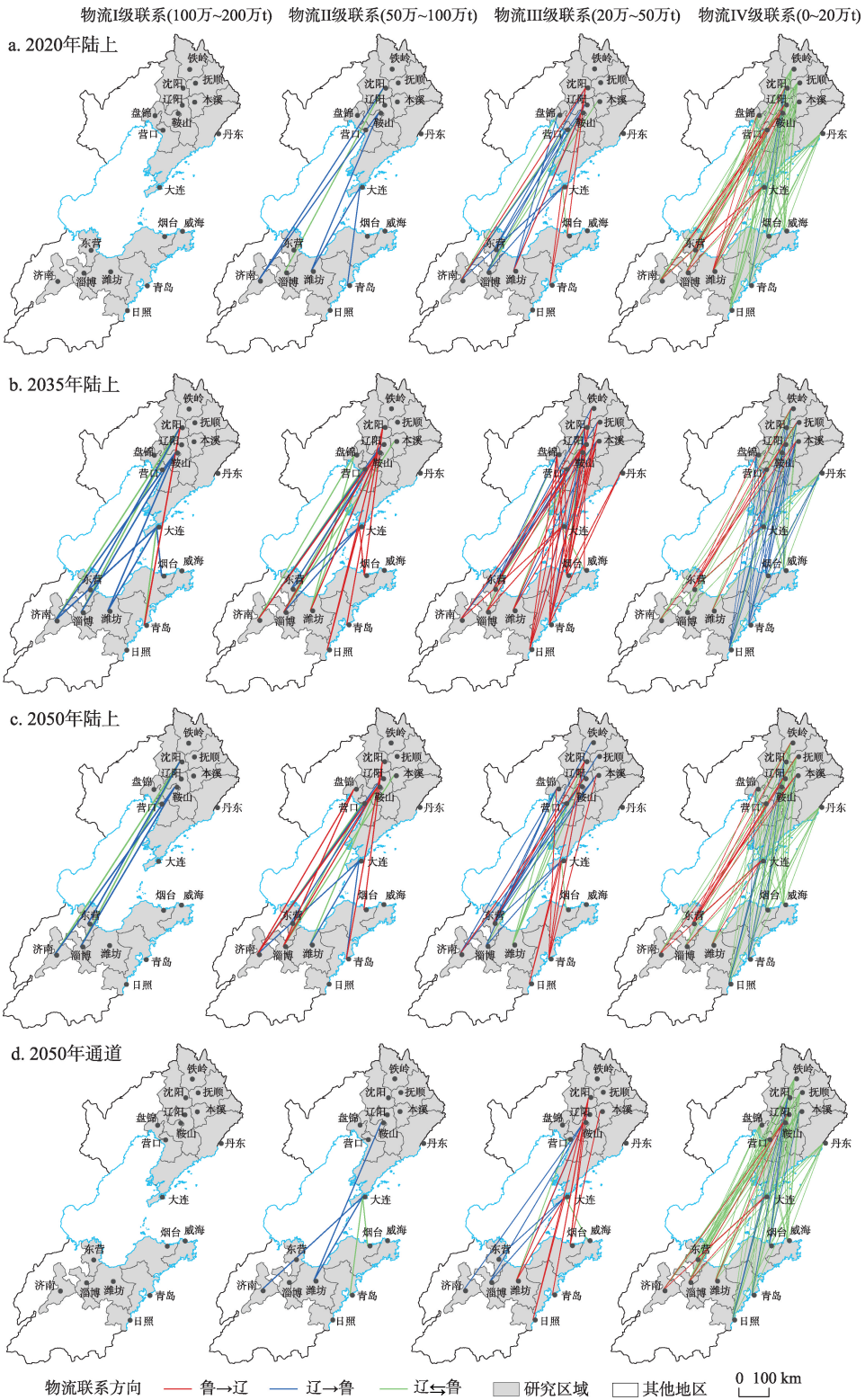


图1 2020—2050年区际城市群物流网络的等级结构演变

Fig. 1 Evolution of the hierarchical structure of logistics networks in inter-regional urban agglomerations from 2020 to 2050

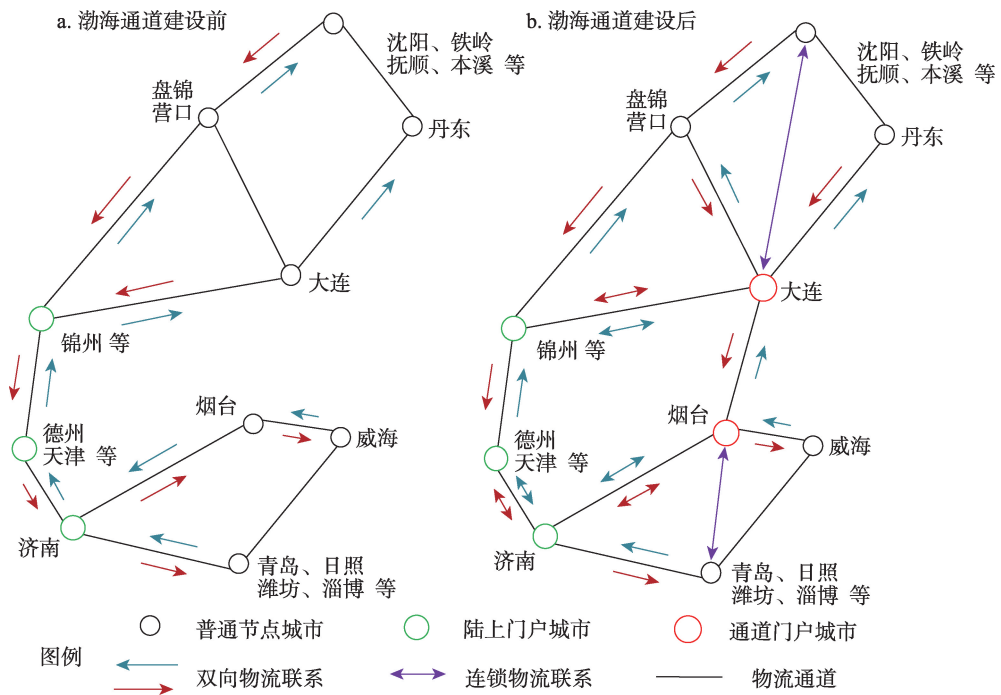


图2 物流联系通道示意

Fig. 2 Schematic diagram of logistics contact channel

注：依据参考文献[35]改绘。

→鞍山以及日照→大连；空间来看在Ⅱ级网络的基础上向辽中南中部及山东半岛西部城市蔓延，特别是烟台、潍坊、日照以及大连的辐射范围明显增大，扩张路径与渤海通道的距离衰减路径基本一致。

第Ⅳ等级（0~20万t）。无论渤海通道建设前后，Ⅳ级物流网络密度均达到峰值，数量也最为庞大，整个区际城市群之间普遍形成了复杂网络化结构，特别是物流边缘城市完全融入进来。其中，受经济社会发展及陆上交通可达性的双重影响，2020年、2035年及2050年（陆上）山东半岛东部城市与辽中南东北部城市的网络更为密集，事实上反映出该地区物流联系的弱势地位（优势联系已入更高等级）。准确地讲，尽管未来经济社会发展是物流规模的决定因素，但在渤海通道建设前，陆上交通可达性对城市群边缘城市的物流联系具有一定的控制力。渤海通道建设后，2050年（通道）物流网络中共有135对城市联系，占总量的84.37%，其复杂程度均高于陆上物流网络。这一现象表明，渤海通道对物流的影响大量集中于城市低等级网络，对高等级网络的影响收缩在局部，但从空间上看，仍是距离渤海通道较近的城市交流规模高于远离通道的城市，渤海通道指向性并未改变。

在此基础上，从图2所表征的城市节点功能视角着手，不难发现，其在网络演化过程中也存在明显变化。渤海通道建设前，区际城市群的物流联系主要通过陆上交通运输方式，因此衔接山东半岛与辽中南地区物流联系的陆上门户城市发挥着重要作用，特别是随着经济社会发展和物流联系加强，该类节点实际上承担了较重的物流运输压力；但这并不意味着该类节点一定具有较高等级的物流联系，原因在于物流网络的等级高低从根本上讲是由各个城市物流总体规模（综合实力）决定的。当然，门户功能与较高等级



物流联系是可以兼具的。渤海通道建设后,烟台、大连等普通节点城市迅速转变为通道门户城市,区际城市群间的物流交流获得新的运输通道,这在一定程度上改善了单通道拥挤的物流局面,进而弱化了陆上门户城市的流通作用。与此同时,受双向距离衰减规律的叠加影响,附着在陆上和通道门户城市周围的双向物流联系更为复杂,与之连接的普通节点城市将随着时间、效益成本变化而出现物流“分流”与“转移”,甚至衍生出新的连锁物流网络,从而不断重塑地区物流总体格局。

在这一过程中,城市群自身的物流结构也会发生微妙变化。原本主要通过陆上交通驱动,城市物流多源汇聚后同时涌向陆上门户城市,此时在城市群内部产生一种挤压力,物流结构较为紧密;但随着渤海通道建设,城市群之间的物流可以选择途经通道门户城市,因而在城市群内部,物流结构容易出现陆、海方向上的分离性张力。不过,由于区际城市群之间的物流流量远远少于城市群内部,即便仅从区际物流入手,经行渤海通道的物流规模总体上也小于陆上交流规模。因此,城市群自身的张力作用会在渤海通道建设后显现,但实际影响效果可能并不特别显著。

### 3.2 物流首位联系流变化

**3.2.1 渤海通道建设前(2020年、2035年)物流首位联系流** 渤海通道建设前,城市群物流网络结构演化主要受地区经济社会发展的内在影响。据图3发现,除丹东等个别城市

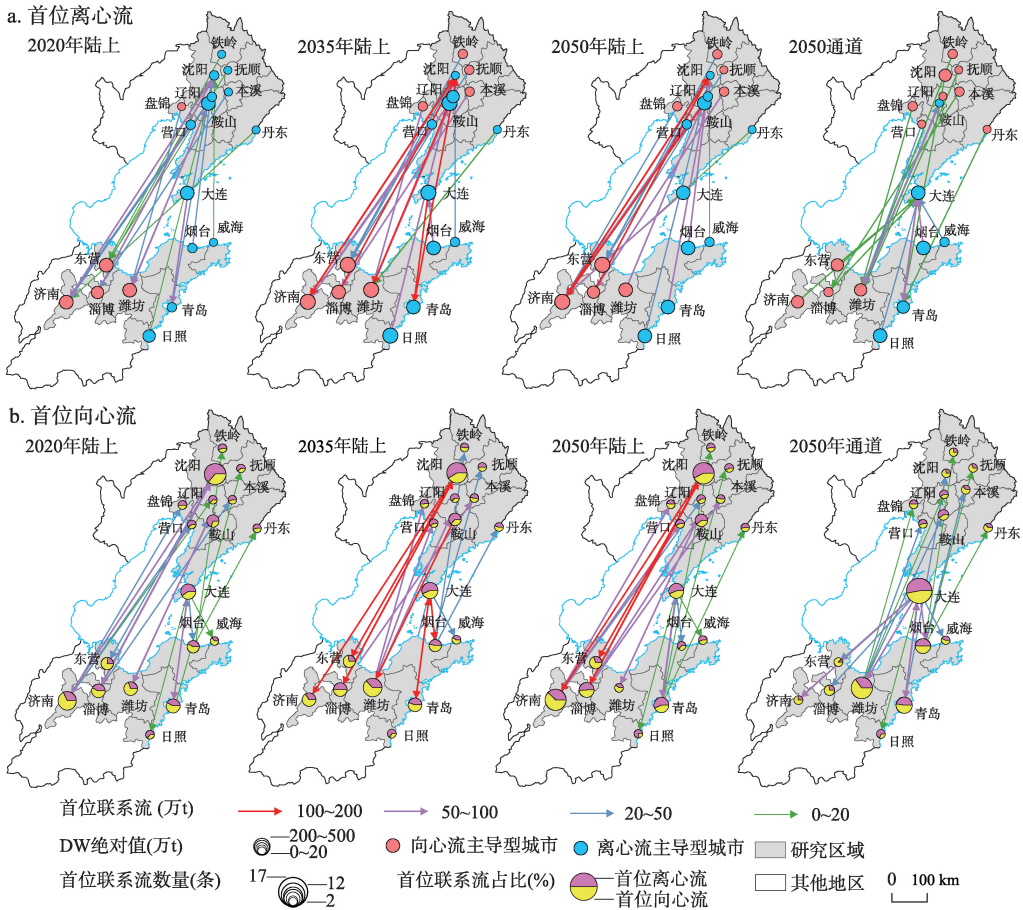


图3 区际城市群首位物流联系及其节点特征

Fig. 3 The prime logistics flow and node characteristics of inter-regional urban agglomeration

物流方向发生转移之外,区际城市群之间的首位离心网络结构总体稳定,交流规模不断等级递增。除潍坊(2035年增加烟台)外,山东半岛各城市的首位离心流均指向沈阳,表明沈阳是承接半岛地区陆路物流的主要城市,集聚了区外城市群的大部分资源,在辽中南地区具有垄断地位。相比之下,辽中南城市的首位离心流指向则比较分散,在山东半岛城市群内部形成济南、淄博、东营、潍坊、青岛等多个承接点,空间上表现为“西强东弱”的格局。

与离心流不同,首位向心流的联系格局随时间变化有所调整,主要发生在山东半岛城市群的济南与潍坊,前者在2020年成为营口、辽阳、盘锦等城市首位向心流的源地,后者则在2035年取代前者成为对辽中南地区物流辐射最显著的城市。对辽中南地区而言,沈阳、大连几乎总揽了对山东半岛城市群的首位物流辐射,济南、淄博、东营等城市的首位向心流均来自沈阳,青岛、烟台、威海、日照等4个城市则源于大连。对应对交流规模上,首位向心流总体保持了较快增长,青岛、烟台与大连,潍坊与鞍山以及济南、淄博与沈阳的流量均在100万t以上。

**3.2.2 渤海通道建设后(2050年)物流首位联系流** 物流“双网络”运输格局形成后(图2),城市物流规模与交通网络变化开始共同作用于物流网络,首位离心流结构因此发生显著变化,2050年(陆上)网络重心明显西移,尽管山东半岛城市在对辽中南城市的首位离心物流输出上仍旧保持了前期的总体态势,但承接辽中南地区首位离心物流的城市数量明显减少,且全部集中于济南、淄博、东营等半岛西部地区。此时,东部城市的首位离心流输出规模出现明显下滑,减少部分构成了2050年(通道)物流网络的主要联系,青岛、烟台等城市的首位离心流规模均高于50万t,除潍坊外其他7个城市的首位离心流全部在大连交汇。

在首位向心流方面,2050年(陆上)物流结构基本维持了2020年的状态,济南的陆上物流优势地位重新确立。在济南之外,青岛对辽中南东部地区城市的向心辐射成为主流,潍坊的辐射作用不断削弱。山东半岛中东部城市的联系重点转移到2050年(通道)物流网络中,烟台、青岛、潍坊的节点等级明显高于半岛西部城市。2020—2050年(陆上)辽中南城市群沈阳、大连的物流地位一直稳固,沈阳因具有陆上交通优势而更胜一筹;但在2050年(通道)物流网络中,大连一跃成为山东半岛所有城市首位向心流的源地,在发挥门户城市作用的同时,也取代沈阳成为物流联系的中心。

**3.2.3 渤海通道建设前后物流首位联系流对比** 对比首位离心、向心网络发现,一方面,二者在渤海通道建设后都表现出明显的通道指向性,其在辽中南城市群的格局也极其稳定,沈阳、大连的物流控制能力较强,普通地级市的物流联系明显被边缘化,是一种典型的“双核-边缘”结构;在山东半岛城市群则表现出一定的多极网络化特征,除威海、日照总体较弱外,其他6个城市均在首位离(向)心格局中发挥着重要作用。这一特征在节点首位联系数量上也能得到体现。另一方面,首位向心流并不是首位离心流的简单“回溯”和“折返”,总体上看前者在空间上形成了东西两个相对独立的次级网络,而后者具有更强的整体性。

考虑节点的物流互惠性,两个城市互为对方的首位离(向)心流被定义为城市互惠关系。总体而言,具有互惠关系的城市数量不多,集中在副省级城市及少数地级市之间;互惠程度并不对称,辽中南地区城市的物流输出普遍高于具有互惠关系的山东半岛城市的输出,这与二者“双核-边缘”及多极网络化的物流结构特征密切相关。在首位离心流方面,鞍山 $\rightleftharpoons$ 潍坊的互惠关系在渤海通道建设前后并无变化;2020年、2035年沈阳 $\rightleftharpoons$ 济南的首位离心互惠流基本稳定,但在通道建设后逐渐脱离,取而代之的是大连 $\rightleftharpoons$ 青

岛。在2020—2050年（陆上）首位向心流格局中，沈阳⇌淄博、大连⇌青岛、鞍山⇌潍坊3对互惠关系持续存在，表现出极强的稳定性；2050年（通道）网络中仅剩大连⇌青岛一对互惠城市。由此可见，物流互惠关系既与渤海通道建设所产生的时空压缩作用有关，也要受到城市物流规模的影响。

### 3.3 物流城市类型变化

$DW_{m(n)}$ 值可以定量反映城市物流出入状况，是区分物流网络对称性的重要依据。分析图3，2020年向心流主导型城市主要分布在济南、淄博、东营等山东半岛中西部城市以及辽中南城市群的盘锦，陆上距离邻近，其他城市均为离心型城市。随着物流总量的增加，2035年 $DW_{m(n)}$ 值发生非均衡变化，向心型城市继续蔓延，辽中南城市群东北部的铁岭、抚顺和本溪加入进来，并在2050年（陆上）的物流网络中得以维持。到2050年（通道）物流网络时，除大连、鞍山外，辽中南地区其他8个城市均成为向心型城市，这也意味着渤海通道建设强化了该地区接受半岛城市群物流辐射的能力，改变了原本山东半岛西部城市单方向吸取辽中南物流的局面，所形成的陆海通道上南北“对流型”物流格局，为振兴东北老工业基地提供了基础性保障。

进一步对比城市首位离（向）心流的比例关系及物流城市类型发现，二者没有必然联系。意味着首位离（向）心流尽管提供了物流主干网络的重要信息，但仍旧存在内容丢失。以烟台为例，其通过渤海通道与辽中南城市群产生的物流交流量高达377.61万t（表2），虽落后于青岛（380.88万t）和潍坊（380.46万t），但差距极小，明显高于其他5个城市，然而这一特征却并未在首位联系中体现出来。从影响机制上讲，城市自身的物流规模将对可达性空间分异结果产生干扰，特别是在物流规模悬殊的地区，物流网络将会因此而发生偏移。这再次说明，物流格局演化受到物流规模与交通网络的共同作用，且在大部分地区，物流规模的影响是基础性、决定性的。这一现象在辽中南城市群并不明显，渤海通道建设后，大连经行通道的物流量超过600万t，首位度是青岛的2倍，围绕大连的首位联系数量也远高于其他城市。可见，首位联系流研究更加适合“核心-边缘”结构显著的地区，而对多极网络化地区则要注重第二、第三联系流乃至全样本数据的综合分析。本文已对物流等级网络进行了系统研究，在此不再赘述。

表2 2050年（通道）区际城市群物流交流总量（⇌）

Tab. 2 Total logistics exchanges of inter-regional urban agglomerations in 2050 (channel) (⇌) (万t)

城市	济南	青岛	淄博	东营	烟台	潍坊	威海	日照	总计
沈阳	0.00	66.45	25.97	11.34	63.40	23.93	25.10	28.24	244.43
大连	70.84	141.86	59.23	31.62	126.24	93.15	53.99	51.29	628.22
鞍山	36.37	44.49	34.33	16.52	38.97	95.75	15.89	17.12	299.45
抚顺	0.00	15.85	2.29	3.93	18.53	9.59	7.82	8.18	66.19
本溪	1.74	23.91	28.89	13.06	33.65	18.28	13.76	12.37	145.68
丹东	7.28	19.16	8.16	4.04	21.24	10.68	8.68	9.07	88.30
营口	19.48	21.67	19.50	7.96	19.25	47.55	8.20	11.29	154.90
辽阳	12.10	14.69	6.56	6.94	17.27	40.77	7.05	8.67	114.05
盘锦	0.00	16.91	6.88	2.95	19.75	31.76	6.78	11.65	96.67
铁岭	0.00	15.89	1.98	3.72	19.32	8.98	7.69	8.59	66.18
总计	147.80	380.88	193.79	102.08	377.61	380.46	154.97	166.46	1904.07



### 3.4 网络子群结构演化

2-模网络划分的子群不代表城市联盟,通过子群成员关系互惠性、可达性、关系频次及联系强度等进行衡量,也以上述内容为表征。考虑到城市数量及划分精度,将物流网络的子群个数设定为3个,通过BRIM算法进行程序运算,最终的可视化结果如图4所示。

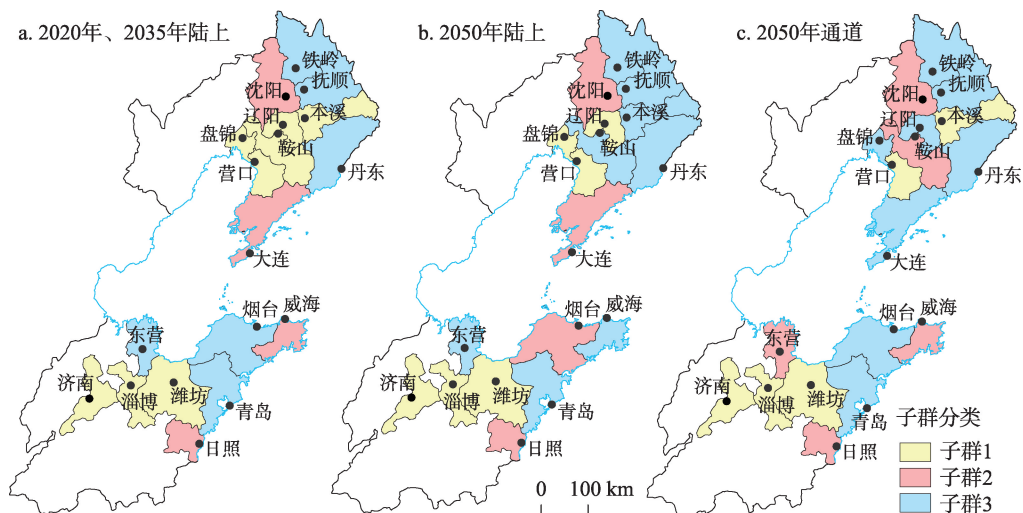


图4 2020—2050年物流网络子群结构演化

Fig. 4 Evolution of the subgroup structure of the logistics network from 2020 to 2050

渤海通道建设前,2020—2035年区际城市群的物流子群结构保持稳定,未来城市之间的物流联系并无较大波动,规模上的原发优势以及陆上可达性分异格局不断巩固。具体到各个子群,子群1包括山东半岛城市群的济南、淄博、潍坊以及辽中南地区的盘锦、营口、鞍山、辽阳和本溪,在各自城市群内部高度集中,区际空间上则表现出显著的陆上地理邻近性。其他两个子群的成员在各自城市群内部并未相接,空间分布离散,受子群1的分割明显。其中,子群2包含威海、日照和沈阳、大连4个城市,青岛、烟台、东营以及丹东、抚顺、铁岭等6个城市组成子群3。

渤海通道建设后,地区交通网络格局发生变化,物流网络随之响应。2050年(陆上)物流网络中,子群1在辽中南城市群的范围大幅缩减,空间集聚形态也被子群3打破,但在山东半岛地区仍然保持独立。子群2成员变化不大,仅在山东半岛地区发生小幅置换,烟台取代威海进入子群2。相应地,威海进入子群3,空间上仍然与其他半岛城市分离;从子群1中脱离出的本溪、鞍山也被划分到子群3,并在辽中南城市群内部与铁岭、抚顺、丹东形成空间集聚,与山东半岛地区的青岛、东营、威海保持着相对密切联系。可见,渤海通道建设对2050年(陆上)物流网络的子群结构起到一定调整作用,主要分布于远离陆上连接的山东半岛东部与辽中南东部城市之间,是子群整合过程中陆上交通可达性影响的结果。

2050年(通道)物流网络的子群结构更为分散,辽中南城市群的3个子群均未形成区内集聚现象,而是相互分割,独立分布。同时,地区重要物流枢纽——大连随渤海通道建设进入子群3,成为区际物流联系的通道控制性节点,与山东半岛东部地区的烟台、青岛实现对接,构建起贯通山东半岛与辽中南城市群的完整子群结构。其他子群

中,子群1的成员进一步缩减,山东半岛中西部的济南、淄博、潍坊仅与辽中南地区的营口、本溪2个城市的联系相对紧密。子群2的成员个数虽有拓展,由2035年的4个增至5个,但仍然依附在子群3的外围,表现出一定的边缘化趋势。

此外也注意到,2035年(陆上)与2050年(通道)的子群结构在空间表达上具有一定相似性,特别是山东半岛城市群的前后变化并不明显。事实上,同一表现形式的内在机理仍然存在显著差异。以子群3为例,图4a完全受陆上交通影响,青岛、烟台与铁岭、抚顺、丹东等城市被划分在一个子群,除受物流互惠影响之外,很大程度上是迫于子群1产生的空间分割。但在图4c中,这种距离(可达性)优势发生变化,青岛、烟台与辽中南地区的大连、丹东等城市联系密切首先是由经行渤海通道的地理邻近性产生的,此外还受到物流规模、物流互惠性等因素影响。此时,原本(2035年陆上网络)隶属于子群1的城市成为被分割的对象,一个显著特征是辽阳、盘锦脱离子群1开始与子群3中的青岛、烟台变得更加紧密。由此可见,图4a、图4c分别刻画了陆海物流运输方式主导的子群结构,其演化过程和动力机制源于区域交通网络变化的先导作用,渤海通道建设打破了传统陆上单线联系的既有局面,通过陆海双向分流机制重构了区际城市群的网络结构,不断推动山东半岛与辽中南城市群物流一体化发展。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于有向加权的城市网络分析方法,从物流网络的等级结构、首位联系流、子群结构等多个方面,对渤海通道建设前后山东半岛与辽中南城市群的物流格局演变进行了系统分析,主要结论如下:

(1)按照客流量可将城市物流网络划分为4个等级,①渤海通道建设主要影响城市低等级物流联系,对高等级网络的影响局部集中在辽中南南部和山东半岛东部且自身物流规模较大的城市之间,在区际城市群联系中具有非对称特征;②大连、沈阳以及青岛、潍坊、烟台、济南等少数几个重点城市之间垄断了大量的物流联系,成为区际物流交流的核心城市;③2020—2035年,物流网络总体上保持等级递增,前一时期低等级城市联系往往成为后期更高等级联系的基础,城市物流规模的原发优势得以显现。2035—2050年,随着渤海通道建设,物流运输格局由原本的“单通道双向流”演变成“双通道双向合成流”,陆上门户城市的流通地位下降,烟台、大连等通道门户城市的门户地位逐渐确立。

(2)渤海通道建设前山东半岛各城市的首位离心流均指向沈阳,辽中南地区的指向则分散在济南、淄博、青岛等多个城市。山东半岛的首位向心流在济南与潍坊之间不断调整,而辽中南地区的沈阳、大连始终具有较强的控制力;通道建设后陆上首位联系网络重心明显西移,大连、烟台、潍坊、青岛等城市在2050年(通道)物流网络中占据重要地位;仅有沈阳 $\rightleftharpoons$ 济南、沈阳 $\rightleftharpoons$ 淄博、大连 $\rightleftharpoons$ 青岛、鞍山 $\rightleftharpoons$ 潍坊等少数城市之间保持着常态化互惠关系,互惠程度却并不对称,辽中南地区城市的物流输出量普遍高于具有互惠关系的山东半岛城市的输出量,这与二者“双核-边缘”以及多极网络化的物流结构特征密切相关。

(3)渤海通道建设前后山东半岛城市群的物流城市类型保持稳定,辽中南城市群的向心流主导型城市则不断向铁岭、抚顺、本溪等东北部城市扩展,2050年(通道)物流网络中除大连、鞍山外的其他8个城市均成为向心型城市,物流出入关系及非对称特征

发生显著变化,体现出渤海通道建设的直接影响。此外,城市自身的物流规模将对可达性空间分异结果产生干扰,尤其是在物流规模悬殊的地区,物流网络将会因此发生偏移。

(4) 渤海通道建设前后,区际城市群的物流子群结构由基本稳定逐渐分散化,前期子群1的成员在各自城市群内部出现集聚现象,并对子群2、子群3产生分割;后期子群1的城市成为被分割的对象,特别是在大连与烟台、青岛依托渤海通道实现了同一子群结构衔接后,表明其间的物流经济联系迅速增强,从而在一定程度上推动了山东半岛与辽中南城市群的物流一体化。

#### 4.2 讨论

(1) 经济社会发展与城市群物流网络结构的时空演化存在紧密联系,前者往往是后者发生的基础性条件,本研究中,随着渤海通道建设的交通介入,区际城市群物流网络结构进一步复杂化,从演变的动力机制上讲,这是地区经济社会发展(城市物流规模)与交通网络变化(渤海通道建设)共同作用的结果。这种综合作用,立足于未来经济社会发展演化的基本规律以及交通网络变化与物流结构调整之间的内在逻辑,基本明确了渤海通道的影响范围和强度,特别是子群划分结果聚焦未来地区物流发展的重点城市系统,为该工程的建设论证、未来城市物流发展定位与设施布局提供了决策参考。在积极营建环渤海大湾区的背景下,区域物流发展的基础性和先导性作用需要得到重视,由此形成的跨城市群协同对话机制、边界屏蔽和阻隔效应破除机制以及多城市群组团发展规划机制等,将有利于提升环渤海大湾区的未来可塑性。

(2) 相关研究数据来自课题组对未来经济社会发展的中长期预测,受制于国内外形势的复杂变化,不可避免地将与未来实际存在偏差。为最大限度的保证数据的相对准确性,数据预测过程选择多种方法对比拟合,综合设定高中低三种方案(本研究选择中方案),并严格按照指标总量控制和区域约束的原则,因此地区总体发展格局将不会发生根本变动。渤海通道作为涉及国计民生的重大交通工程,其是否建设、何时建设必须服务于中国未来经济社会发展的战略需求,其建设的可行性、必要性以及风险性评估需要系统、科学、严谨的判断,本文的探讨内容只是一次有益尝试。且因种种原因,研究过程并未考虑海运、航空物流,一定程度上弱化了渤海通道建设的实际意义。如何跳出OD数据的限制,进一步分析区域水运物流(烟大海上航线)与渤海通道的相互替代性,关注不同类型物流的未来走向,以及综合考虑物流之外的城市人口、产业、信息网络等在未来中国经济地理格局中的演变,有望成为今后研究的重要内容。

#### 参考文献(References)

- [1] 杨永春,冷炳荣,谭一铭,等.世界城市网络研究理论与方法及其对城市体系研究的启示.地理研究,2011,30(6): 1009-1020. [Yang Yongchun, Leng Bingrong, Tan Yiming, et al. Review on world city studies and their implications in urban systems. Geographical Research, 2011, 30(6): 1009-1020.]
- [2] 程遥,王理.流动空间语境下的中心地理论再思考:以山东省域城市网络为例.经济地理,2017,37(12): 25-33. [Cheng Yao, Wang Li. Reinterpretation of the theory of central place in a context of space of flow: A study on provincial city network in Shandong province. Economic Geography, 2017, 37(12): 25-33.]
- [3] Castells M. The Rise of the Network Society. Cambridge, MA: Blackwell, 1996.
- [4] 宋琼,赵新正,李同昇,等.多重城市网络空间结构及影响因素:基于有向多值关系视角.地理科学进展,2018,37(9): 1257-1267. [Song Qiong, Zhao Xinzheng, Li Tongsheng, et al. Spatial structures and influencing factors of multiple urban networks based on the perspective of directed-multivalued relation. Progress in Geography, 2018, 37(9): 1257-1267.]
- [5] Camagni R, Salone C. Network urban structures in Northern Italy: Elements for a theoretical framework. Urban Studies, 1993, 30(6): 1053-1064.
- [6] Batten D F. Network cities: Creative urban agglomerations for the 21st century. Urban Studies, 1995, 32(2): 313-327.
- [7] Meijers E. From central place to network model: Theory and evidence of a paradigm change. Tijdschrift Voor Econo-



- mische en Sociale Geografie, 2007, 98(2): 245-259.
- [8] Meijers E, Burger M, Hoogerbrugge M. Borrowing size in networks of cities: City size, network connectivity and metropolitan functions in Europe. *Papers in Regional Science*, 2016, 95(1): 181-198.
- [9] Taylor P J. Specification of the world city network. *Geographical Analysis*, 2001, 33(2): 181-194.
- [10] Taylor P J, Hoyler M, Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement central place theory. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [11] 冷炳荣, 杨永春, 谭一洺. 城市网络研究: 由等级到网络. *国际城市规划*, 2014, 29(1): 1-7. [Leng Bingrong, Yang Yongchun, Tan Yiming. City network studies: The transformation of research perspective from hierarchy to network. *Urban Planning International*, 2014, 29(1): 1-7.]
- [12] Taaffe E J. The urban hierarchy: An air passenger definition. *Economic Geography*, 1962, 38(1): 1-14.
- [13] 金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. *地理研究*, 2001, 20(1): 31-39. [Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 31-39.]
- [14] 王宁宁, 陈锐, 赵宇. 基于信息流的互联网信息空间网络分析. *地理研究*, 2016, 35(1): 137-147. [Wang Ningning, Chen Rui, Zhao Yu. Analysis of the provincial information space network based on the internet information flow. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 137-147.]
- [15] 陈超, 刘家明, 马海涛, 等. 中国农民跨省旅游网络空间结构研究. *地理学报*, 2013, 68(4): 547-558. [Chen Chao, Liu Jiaming, Ma Haitao, et al. The evolution of network gravity center for rural residents tourist flow in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(4): 547-558.]
- [16] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客运流的中国城市网络结构及空间组织模式. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241.]
- [17] 赵渺希, 黎智枫, 钟焯, 等. 中国城市群多中心网络的拓扑结构. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 376-388. [Zhao Miaoxi, Li Zhifeng, Zhong Ye, et al. Polycentric network topology of urban agglomerations in China. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 376-388.]
- [18] 刘铮, 王世福, 赵渺希, 等. 有向加权型城市网络的探索性分析. *地理研究*, 2013, 32(7): 1253-1268. [Liu Zheng, Wang Shifu, Zhao Miaoxi, et al. Exploratory analysis of directed weighted network of city. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1253-1268.]
- [19] 赵梓渝, 魏冶, 王士君, 等. 有向加权城市网络的转变中心性与控制力测度: 以中国春运人口流动网络为例. *地理研究*, 2017, 36(4): 647-660. [Zhao Ziyu, Wei Ye, Wang Shijun, et al. Measurement of directed alternative centrality and power of directed weighted urban network: A case of population flow network of China during "Chunyun" period. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 647-660.]
- [20] Alderson A S, Beckfield J, Jessica S J. Intercity relations and globalization: The evolution of the global urban hierarchy, 1981-2007. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1899-1923.
- [21] 王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519. [Wang Jiao'e, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [22] 段德忠, 刘承良, 杜德斌, 等. 基于二分网络的北京公交线路布局的空间依赖性. *地理学报*, 2016, 71(12): 2185-2198. [Duan Dezhong, Liu Chengliang, Du Debin, et al. Spatial dependency of bus-line distribution based on bipartite network: A case study of Beijing city. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2185-2198.]
- [23] 陈伯伦, 陈岐, 邹盛荣, 等. 基于矩阵分解的二分网络社区挖掘算法. *计算机科学*, 2014, 41(2): 55-58. [Chen Bolun, Chen Ling, Zou Shengrong, et al. Detecting community structure in bipartite network based on matrix factorization. *Computer Science*, 2014, 41(2): 55-58.]
- [24] 郭改改, 钱宇华, 张晓琴, 等. 自主确定社区个数的二模网络社区发现算法. *模式识别与人工智能*, 2015, 28(11): 969-975. [Guo Gaigai, Qian Yuhua, Zhang Xiaoqin, et al. Algorithm of detecting community in bipartite network with autonomous determination of the number of communities. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2015, 28(11): 969-975.]
- [25] 张婧婧, 黄廷磊, 张银明. 基于聚类分析的二分网络社区挖掘. *计算机应用*, 2015, 35(12): 3511-3514. [Zhang Qiangqiang, Huang Tinglei, Zhang Yinming. Detecting community in bipartite network based on cluster analysis. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(12): 3511-3514.]
- [26] Wang Zhenbo, Xu Guang, Bao Chao, et al. Spatial and economic effects of the Bohai Strait Cross-Sea Channel on the transportation accessibility in China. *Applied Geography*, 2017, 83: 86-99.

- [27] 孙峰华, 陆大道, 代合治, 等. 渤海海峡跨海通道建设与中国的地缘政治战略. 地理科学, 2016, 36(11): 1-10. [Sun Fenghua, Lu Dadao, Dai Hezhi, et al. The construction of trans-Bohai Strait passageway and its geopolitical strategies of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(11): 1-10.]
- [28] 孙海燕, 陆大道, 孙峰华, 等. 渤海海峡跨海通道建设对山东半岛、辽东半岛城市经济联系的影响研究. 地理科学, 2014, 34(2): 147-153. [Sun Haiyan, Lu Dadao, Sun Fenghua, et al. Influence of the economic contacts between cities in Shandong Peninsula and east Liaoning Peninsula on the construction of Trans-Bohai Strait passageway. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 147-153.]
- [29] 王泽东, 孙海燕, 孙峰华, 等. 渤海海峡跨海通道建设对环渤海地区经济重心的影响. 地理研究, 2017, 36(8): 1515-1530. [Wang Zedong, Sun Haiyan, Sun Fenghua, et al. The influence of the construction of Trans-Bohai Strait Passageway on the economic gravity center of Bohai Rim region. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1515-1530.]
- [30] 孙峰华, 陆大道, 柳新华, 等. 中国物流发展对渤海海峡跨海通道建设的影响. 地理学报, 2010, 65(12): 1507-1521. [Sun Fenghua, Lu Dadao, Liu Xinhua, et al. Influence of the development of China's logistics on the construction of Trans-Bohai Strait passageway. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1507-1521.]
- [31] 孙东琪, 陆大道, 王振波, 等. 渤海海峡跨海通道客货流量预测分析. 地理学报, 2017, 72(8): 1486-1507. [Sun Dongqi, Lu Dadao, Wang Zhenbo, et al. Predictive analysis of passenger and goods flow of Bohai Strait Cross-sea Channel. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1486-1507.]
- [32] 高鑫, 孙峰华, 李山, 等. 渤海海峡跨海通道建设对环渤海陆路物流网络格局的影响. 经济地理, 2018, 38(11): 141-149. [Gao Xin, Sun Fenghua, Li Shan, et al. Influence of the construction of the Bohai Strait Cross-Sea Channel to the land logistics network pattern in the Bohai Rim Region. *Economic Geography*, 2018, 38(11): 141-149.]
- [33] 侯方辉, 王保军, 孙建伟, 等. 渤海海峡跨海通道新构造运动特征及其工程地质意义. 海洋地质前沿, 2016, 32(5): 25-30. [Hou Fanghui, Wang Baojun, Sun Jianwei, et al. Neotectonic movement across the Bohai Strait and ITS engineering geologic significance. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(5): 25-30.]
- [34] 豆晓, Blanca A, Josep R. 基于相互作用关系的中国省际人口流动研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1848-1861. [Dou Xiao, Blanca A, Josep R. China's inter-provincial population flow based on the interaction value analysis. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1848-1861.]
- [35] 徐建斌. 交通网络变化与区域经济关系演化的规律研究. 烟台: 鲁东大学硕士学位论文, 2016. [Xu Jianbin. Regulation exploring between changes of transport network and regional relationship of economic. Yantai: Master Dissertation of Ludong University, 2016.]

## Spatial-temporal evolution of the logistics network structure of inter-regional urban agglomeration before and after the construction of the Bohai Strait cross-sea channel

WANG Zedong<sup>1</sup>, ZHANG Xiaolin<sup>1</sup>, SUN Dongqi<sup>2</sup>, SUN Haiyan<sup>3</sup>

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

**Abstract:** With the rise of the network society, the connotation of urban space has changed significantly, and it has become a new important content in the study of human geography. In this paper, the gravity model is improved, based on the method of directed weighted network analysis and BRIM, and the evolution of the logistics network of the Shandong Peninsula and the Central and Southern Liaoning urban agglomerations are discussed before and after the construction of the Bohai Strait cross-sea channel. We found that: (1) After the construction of the cross-sea channel, urban low-level logistics links will be mainly affected, and the impact on high-level networks will be concentrated on cities that have large logistics scales and located in the southern part of central and southern Liaoning and the eastern part of Shandong Peninsula. Among them, a large quantity of logistics resources are monopolized by a few key cities such as Dalian, Shenyang, Qingdao, Yantai, Weifang and Jinan. (2) The “two-channel two-way synthetic flow” will be formed with the construction of the channel. Within the respective urban agglomerations, changes in the logistics structure in the land and sea directions have begun to emerge, and further the status of Dalian and Yantai as gateway cities will be established. (3) The pattern of primary centrifugal/centripetal flow has directivity towards Bohai channel in the evolution process. Normalized reciprocal relationships are maintained among a few cities such as Shenyang⇌Jinan, Shenyang⇌Zibo, Dalian⇌Qingdao and Anshan⇌Weifang, but the degree of reciprocity of urban logistics is asymmetric. In terms of cities with reciprocal relationships, the logistics output of cities in central and southern Liaoning is generally higher than that of Shandong Peninsula. The former is characterized by a typical “dual-core-edge” structure, and the latter by multipolarity. (4) Before and after the construction, the types of logistics cities in the Shandong Peninsula urban agglomeration remained stable. The centripetal-flow-oriented cities in the central and southern Liaoning urban agglomeration continued to spread. (5) After the construction, Dalian will be classified into subgroup 3 firstly, while the sub-group structure of the inter-regional urban agglomeration will be improved by the Bohai Strait cross-sea channel together with Yantai and Qingdao, which optimized the logistics spatial pattern of the Shandong Peninsula and the Central and Southern Liaoning urban agglomerations.

**Keywords:** inter-regional urban agglomeration; directed weighted; logistics network; spatial-temporal evolution; Bohai Strait cross-sea channel