

宋旭妍, 彭甜甜, 张高军. 2022. 粤港澳大湾区水路客运网络特征. 热带地理, 42 (2): 247-255.

Song Xuyan, Peng Tiantian and Zhang Gaojun. 2022. The Waterage Passenger Transportation Network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Tropical Geography*, 42 (2): 247-255.

## 粤港澳大湾区水路客运网络特征

宋旭妍, 彭甜甜, 张高军

(暨南大学 深圳旅游学院, 广东 深圳 518053)

**摘要:**以粤港澳大湾区水路客运班线为数据来源,运用复杂网络分析方法,分析水路客运网络的基本特征,评估其小世界特性与无标度特征,分析各节点的重要性,测试其鲁棒性与脆弱性,结果发现:1)大湾区水路客运网络基本健全,节点之间能够自由流动,但网络的层级单一,可达性较低的节点占据多数;2)大湾区水路客运网络具有部分小世界网络特性和无标度特性,节点分布呈现马太效应;3)深圳蛇口港在复杂网络中的综合重要性最为突出,比较重要的节点还有香港中港码头、香港国际机场、珠海九州港、澳门外港;4)大湾区南部的水路客运网络相比北部发达,东部比西部发达,空间发展不均衡;5)大湾区水路客运网络具有鲁棒性,生存能力较强,但网络发育不够完善,稳定性较差,难以经受蓄意攻击。整体上,大湾区水路客运网络还有较大的优化提升空间,应加大核心节点保障能力,增强边缘节点的连通性,提升大湾区北部的水路客运能力。

**关键词:**水路客运网络;复杂网络分析;可达性;交通网络;粤港澳大湾区

**中图分类号:** F552.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5221(2022)02-0247-09

**DOI:** 10.13284/j.cnki.rddl.003447

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



随着粤港澳大湾区(下文简称“大湾区”)建设持续推进,其内部各城市的交通系统趋于互联互通。对大湾区而言,交通网络建设能够通过增强珠江口东西两岸的联系,形成相对均衡的多极网络联系格局(覃成林等,2018)。水路运输是大湾区发展的突出特征,也是一种重要的运输方式。相比货运交通,客运交通反映人员流动情况,是建设宜居宜业宜游湾区的重要保障。因此,研究水路客运网络对大湾区建设具有理论和现实意义。

在交通系统相关研究中,复杂网络分析是一种较为成熟、常用的方法,能将交通数据抽象为特定关系下的网络,度量网络的节点复杂性、结构复杂性、复杂性因素相互影响程度等,并纳入多因素框架进行研究(高自友等,2006;汪小帆等,2006)。因此,该方法能适应复杂交通网络的数据分析需要,成为交通网络研究的重要工具。

不同城市间交通系统相互连接形成交通网络,其中,陆运、水运和空运网络又在空间约束、可达性等方面呈现各自的特性(王姣娥等,2019)。在航空客运复杂网络研究中,较为成熟的路径是以旅客运输流量和流向为数据,建立航空客运复杂网络,研究其平均路径长度、聚类系数、度分布、中心性、幂律分布系数等整体结构,及小世界特性和无标度特性(党亚茹等,2009;高峰等,2009)。陆路客运网络则多以铁路和公路为数据,从可达性、客运网络优化、网络格局、空间服务范围、经济活动空间区位、节点重要度影响因素等角度进行分析(王姣娥等,2005;焦敬娟等,2016;孟德友等,2018)。相比而言,水路客运网络的研究较为有限,但不可否认,水路运输在人类历史中具有重要地位,尤其是在大航海时代。只是进入20世纪以后,其他现代交通方式的兴起导致水运地位下降

**收稿日期:** 2021-01-26; **修回日期:** 2021-08-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(41801124);广州市哲学社会科学发展“十三五”规划2020年度一般课题(2020GZYZB25)

**作者简介:** 宋旭妍(2000—),女,广东韶关人,研究方向为旅游地理,(E-mail) sxy\_1205@163.com;

**通信作者:** 张高军(1988—),男,河南开封人,副教授,硕士生导师,研究方向为旅游地理,(E-mail) ygzou2009@126.com。

(张京祥等, 2008)。

早期的水路客运网络从实践出发, 以线路规划为主 (Baird, 1999; Lai et al., 2004; Lo et al., 2013)。随着信息技术的发展, 智慧客运网络的研究与日俱增, 如Maiorov等 (2019) 基于模拟和智能运输系统, 对渡轮和游轮路线进行了全面研究与网络预测。国内水路运输网络的研究起于本世纪初, 如宋炳良 (2000) 发现上海港口与其他港口间的网络已有雏形, 而周平德 (2002) 则指出了珠三角未能发挥水运优势的现实问题。此后, 港口网络的竞争策略设计 (吉阿兵, 2006)、布局优化 (赵旭等, 2007)、网络演化及预测 (蹇令香等, 2016) 等受到关注。经过多年发展, 中国沿海港口网络已呈现出“小世界”特征 (宗刚等, 2012; 杜超等, 2016; 郭建科等, 2018), 但这一发现主要基于货运港口, 尤其是在集装箱数据的基础上得到的, 对水路客运网络的关注较少。

总体上, 关于港口交通网络特征的认识已逐渐清晰, 但依然存在较多有待研究的内容, 尤其是关乎人员流动的客运网络。大湾区建设作为国家重大发展战略, 以其为案例研究水路客运网络具有较好的理论和现实价值。为此, 本文将从以下3个步骤展开研究: 1) 利用大湾区水路客运数据, 构建水路运输客运网络; 2) 对网络进行定量描述, 分析水路客运航行线路特点和网络特征; 3) 结合复杂网络分析结果与大湾区现实情况, 提出优化和提升大湾区水运网络的建议。以期优化大湾区水路客运网络提供借鉴, 促进大湾区交通一体化发展, 更好地服务于大湾区深度融合与协调发展。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 复杂网络分析法

采用4组指标开展大湾区水路客运网络的复杂网络分析, 分别是复杂网络的基本特征, 小世界特性和无标度特性分析, 节点重要性评估, 鲁棒性和脆弱性检验。

网络基本特征包括若干具体指标, 其中较为重要的有3个 (刘涛等, 2005), 即平均路径长度 (平均路径长度值越小, 网络整体的连通性越强)、聚类系数 (聚类系数越大, 集聚效应越强) 和度分布 (节点的度值越大, 该节点在整体网络中与其他节点的关联度越高)。

小世界特性分析采用Watts等 (1998) 的标准, 检查网络是否既具有较小的平均距离又具有较大的聚集系数的小世界效应 (与相同规模的完全随机网络比较), 无标度特性采用Barabási等 (1999) 的BA模型进行分析。

节点重要性评估采用中介中心性 (某节点的中介中心性越高, 该节点处于其他节点之间最短路径上的概率越高, 意味着对网络流的控制能力越强)、接近中心性 (某节点到其他所有节点的平均距离, 接近中心性越大, 该节点与其他节点联系的便捷度越高) 以及PageRank算法 (同时考虑一个节点的邻居节点的数量与质量对节点中心性的影响, PageRank值越大, 该节点与其他核心节点之间的联系越紧密)。

鲁棒性和脆弱性分析, 采用蓄意攻击方式模拟网络受到外部攻击后所受的影响, 检验其网络直径, 网络连通性指标是否显著变化, 以评估网络的稳定性, 发现网络存在的问题。

### 1.2 数据来源与处理

从香港特别行政区政府海事处、澳门特别行政区政府统计普查局, 内地9个城市年报、年鉴与港口的专业客轮预订网站等处整理了2018年大湾区的港口、水路客运班线与班次。考虑到本文分析的是大湾区内部城市之间的水路客运网络, 采样时不包括单一城市内部的班线。经过整理, 确定了大湾区内部的21个客运网络节点 (表1)。以港口间的水路客运班线为边, 以港口间的年度水路客运班次为边权。表1中, 港口节点 $v_i$ 和 $v_j$ 之间的边权记为 $w_{ij}$ , 即港口 $i$ 和港口 $j$ 之间的水路客运班次。

## 2 粤港澳大湾区水路客运网络特征

### 2.1 复杂网络的基本特征

以大湾区水路运输客运网络的港口码头为节点, 统计发现网络边有67条, 即21个节点之间存在67条连接; 节点的度平均值为3.19, 表示每个节点平均与另外3.19个节点直接相连; 网络直径为5, 即从某一节点到其他任一节点最多需要经过4次中转; 平均路径长度为2.48, 意味着任一节点到达其他节点平均需要1.48次中转, 客运网络中港口节点间分离程度较小, 整体水路客运的便捷水平尚可; 42.86%的节点的离心率为3, 意味着逾半数的节点与最远节点的距离都是3。因此, 单纯从连接性看,

表 1 2018 年港口间的客运班次

Table 1 Passenger service between ports in 2018

| 港口 | 客运班次  |        |       |       |       |        |       |     |       |       |       |       |     |     |     |    |       |     |       |       |     |
|----|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|----|-------|-----|-------|-------|-----|
|    | A1    | A2     | A3    | A4    | A5    | B1     | B2    | C1  | C2    | D1    | D2    | E1    | E2  | E3  | E4  | E5 | F1    | F2  | G1    | H1    | I1  |
| A1 | —     | —      | —     | —     | —     | —      | —     | 240 | 1 243 | —     | —     | 2 706 | —   | —   | —   | 20 | 1 730 | 235 | —     | 2 747 | 129 |
| A2 | —     | —      | —     | —     | —     | 41 181 | —     | —   | —     | 2 713 | —     | 2 705 | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| A3 | —     | —      | —     | —     | —     | 3 532  | —     | 120 | 1 242 | 5 239 | 1 445 | 1 546 | —   | —   | —   | —  | —     | —   | 1 805 | 1 569 | —   |
| A4 | —     | —      | —     | —     | —     | 3 030  | 87    | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| A5 | —     | —      | —     | —     | —     | 6 348  | 1 411 | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| B1 | —     | 40 340 | 3 995 | 2 947 | 7 316 | —      | —     | —   | —     | 3 353 | 1 367 | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| B2 | —     | —      | —     | 84    | 915   | —      | —     | —   | —     | 4 191 | 1 366 | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | 730   | —     | —   |
| C1 | 239   | —      | 119   | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| C2 | 1 201 | —      | 1 201 | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| D1 | —     | 3 085  | 4 937 | —     | —     | 3 353  | 4 192 | —   | —     | —     | —     | 9 855 | 730 | 365 | 730 | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| D2 | —     | —      | 1 470 | —     | —     | 1 366  | 1 366 | —   | —     | —     | —     | 2 920 | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | 2 555 | —   |
| E1 | 2 568 | 2 567  | 1 467 | —     | —     | —      | —     | —   | —     | 9 855 | 2 920 | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| E2 | —     | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | 730   | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| E3 | —     | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | 365   | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| E4 | —     | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | 730   | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| E5 | 20    | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| F1 | 1 712 | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| F2 | 236   | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| G1 | —     | —      | 1 811 | —     | —     | —      | 730   | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| H1 | 2 263 | —      | 1 939 | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |
| I1 | 131   | —      | —     | —     | —     | —      | —     | —   | —     | —     | —     | —     | —   | —   | —   | —  | —     | —   | —     | —     | —   |

注：1) A1 香港中港码头；A2 香港港澳码头；A3 香港国际机场；A4 香港屯门码头；A5 香港九龙码头；B1 澳门外港；B2 澳门氹仔；C1 广州南沙港；C2 广州莲花山港；D1 深圳蛇口港；D2 深圳宝安国际机场；E1 珠海九洲港；E2 珠海东澳岛；E3 珠海桂山岛；E4 珠海外伶仃岛；E5 珠海斗门港；F1 佛山顺德港；F2 佛山高明港；G1 东莞虎门码头；H1 东莞中山港；I1 江门港。2) 肇庆、惠州两地与其他城市无水路客运班线连接。3) 香港国际机场、深圳宝安机场均有水路客运航线，本研究仅统计其水路客运业务。4) “—”表示对应两个港口之间没有客运班线直接相连。

大湾区的水路客运网络基本健全，可达性较好，任一节点都可以经过或多或少的中转到达其他任一节点。

进一步对复杂网络进行模块化分析，以分析节点间的聚类情况。使用社区探测算法，取值标准为 1.0 (Blondel et al., 2008)，计算得出最终的模块化值为 0.36。图 1 显示，各节点被分为两类社区，其中澳门外港与香港港澳码头、屯门码头和九龙码头组成社区 1，其他港口组成社区 2。值得注意的是，尽管网络中有 21 个节点，但可达性低的边缘节点数量较多，大部分节点的独立性水平较低，整体较为分散，尚未形成独立社区，意味着复杂网络的层级单一，模块化水平较低。度分析结果显示，香港中港码头、香港国际机场码头，深圳蛇口港的度数明显高于其他节点，意味着三者与最多的节点连接；而连接最为紧密的是香港港澳码头与澳门外港，二者的往返频次最高。

局部聚类系数计算结果显示，仅香港港澳码头的聚类系数高于 0.5，多达 14 个节点的聚类系数为 0。即各节点的聚类系数普遍较低，网络的稳定性较差。即便部分节点邻居节点较多，但其邻居节点是相互孤立的，无法构成小网络，如中港码头虽有 8 个邻居节点，但其聚类系数为 0。网络的整体聚类系数值为 0.10，说明网络在空间分布上的连续性较低。结合局部聚类系数差异较大的分析结果，表明个别节点对在网络稳定性方面作用显著，典型如香港中港码头，这也说明网络内部差异较大。

## 2.2 小世界特性与无标度特性分析

小世界特征分析结果显示，相比同等规模下的完全随机网络的平均路径长度 ( $L_{ER}=2.63$ )，大湾区水路客运网络的平均路径更小 ( $L=2.48$ )，符合小世界网络特征；而完全随机网络的聚类系数  $C_{ER}=0.15$ ，大于实际网络的  $C$  值 (0.10)，不符合小世界网络特征。综合来看，水路客运网络的平均路径较



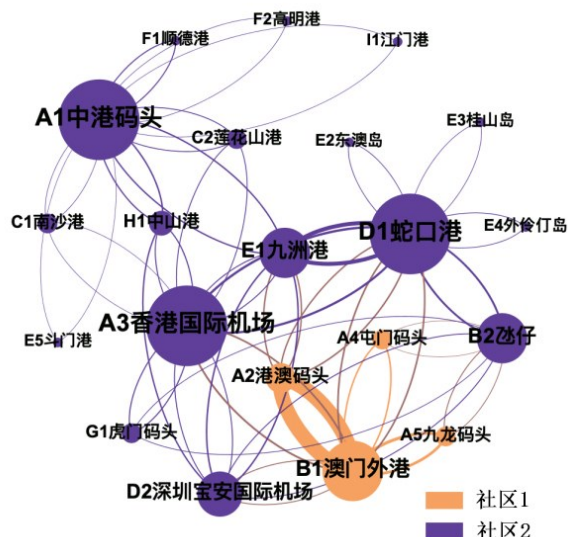


图1 基于模块的粤港澳大湾区水路运输客运网络

Fig.1 Module-based waterway passenger transport network for the GBA

注：1) 节点的度值越大，相应的节点半径越大；2) 节点边权越大，节点连线越粗；3) 澳门外港与香港的港澳码头、屯门码头和九龙码头组成社区1，其他港口共同组成社区2。

小，聚类系数也较小，并不完全符合小世界网络特征。即尽管大湾区水路客运网络在理论上能够实现贯通，但各节点的连接并不便捷，甚至都不存在小世界网络，节点之间的流转只能依赖少数核心节点，网络的内部差异较大，整体连通水平有待提高。

利用度分布（图2）与双对数坐标系下的度分布（图3）进行无标度网络分析。发现图2中的趋势

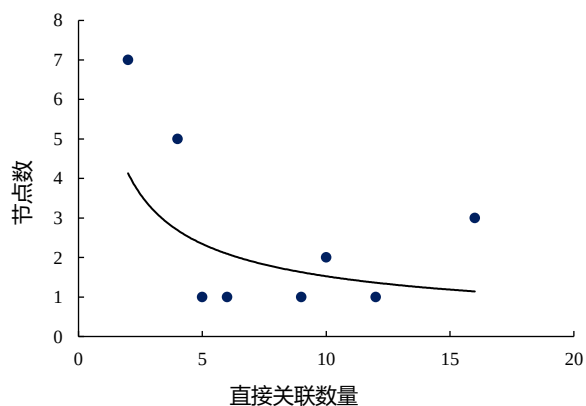


图2 节点的度分布

Fig.2 Degree distribution of nodes

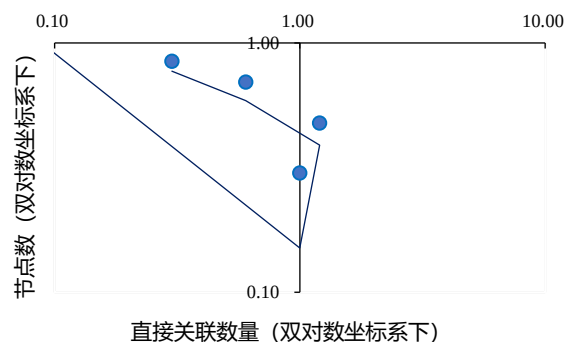


图3 双对数坐标系下的度分布

Fig.3 Degree distribution diagram in the logarithmic coordinate system

线为连续减少的函数，整体符合无标度网络的幂律分布特性。将图3中的趋势线分段看，前半段为直线，符合幂律分布，后半段不符合无标度特性。综合来看，大湾区的水路客运网络结构基本符合无标度网络的特性，但局部有特殊性。从网络特性角度看，某节点的度值越大，越可能与更多节点联系，其客运能力越强，即存在复杂网络的马太效应，它们也具有无标度网络的增长特性和优先连接特性。

### 2.3 网络节点的重要性评估

采用中介中心性（betweenness centrality）、接近中心性（closeness centrality）和 PageRank 三个指标评估各节点的重要性（表2）。结果显示：

中介中心性最高的是香港中港码头、深圳蛇口港和香港国际机场，再次说明它们是复杂网络中的重要节点，最多的处于其他节点之间的最短路径上，具有较强的凝聚力，在复杂网络中能够发挥重要的中介作用。

接近中心性指标最高的前3个节点是深圳蛇口港、香港国际机场和珠海九洲港，接近中心度超过0.50，说明它们到达其他任一节点都非常便捷，值得注意的是，3个节点分别位于大湾区东西两侧及南部顶点，相对而言，大湾区北部的水路客运便捷性不足，整体的空间分布不均衡。

基于 PageRank 算法有效性与参数  $c$  值的内在关系，在统计过程中将概率的参数设定为0.15（任晓龙等，2014），误差值调为0.001，纳入有向边和边的权重。结果显示，香港中港码头、深圳蛇口港和澳门外港位列前三，在确保整个网络连通的作用更加重要。

综上可知，深圳蛇口港在复杂网络中的综合重

表2 粤港澳大湾区水路客运网络特征

Table 2 Characteristics of waterway passenger transport network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

| 港口          | 中介中心度 | 接近中心度 | PageRanks |
|-------------|-------|-------|-----------|
| A1 香港中港码头   | 0.39  | 0.48  | 0.08      |
| A2 香港港澳码头   | 0.01  | 0.44  | 0.05      |
| A3 香港国际机场   | 0.27  | 0.56  | 0.06      |
| A4 香港屯门码头   | 0     | 0.34  | 0.04      |
| A5 香港九龙码头   | 0     | 0.34  | 0.04      |
| B1 澳门外港     | 0.14  | 0.47  | 0.06      |
| B2 澳门氹仔     | 0.08  | 0.44  | 0.05      |
| C1 广州南沙港    | 0.02  | 0.44  | 0.04      |
| C2 广州莲花山港   | 0.02  | 0.44  | 0.04      |
| D1 深圳蛇口港    | 0.34  | 0.56  | 0.07      |
| D2 深圳宝安国际机场 | 0.06  | 0.48  | 0.04      |
| E1 珠海九洲港    | 0.25  | 0.54  | 0.05      |
| E2 珠海东澳岛    | 0     | 0.36  | 0.04      |
| E3 珠海桂山岛    | 0     | 0.36  | 0.04      |
| E4 珠海外伶仃岛   | 0     | 0.36  | 0.04      |
| E5 珠海斗门港    | 0     | 0.328 | 0.04      |
| F1 佛山顺德港    | 0     | 0.33  | 0.04      |
| F2 佛山高明港    | 0     | 0.33  | 0.04      |
| G1 东莞虎门码头   | 0.01  | 0.39  | 0.04      |
| H1 东莞中山港    | 0.04  | 0.44  | 0.05      |
| I1 江门港      | 0     | 0.33  | 0.04      |

要性最为突出，其各项指标都处于前列，到各个节点最为便捷，处于其他节点最短路径之上的频次最高，也是确保不同社区相互联通的重要节点。而香港的中港码头、香港国际机场、珠海九州港、澳门外港在复杂网络中的位置也非常重要，分别在单一指标方面具有突出优势。从空间结构上看，大湾区南部的水路客运网络比北部发达，东部比西部发达。

#### 2.4 鲁棒性与脆弱性分析

复杂网络对随机故障具有鲁棒性，对于蓄意攻击具有脆弱性，即随机过滤网络中的大量节点时，网络可分成多个孤立的子网，能够保持基本连通，但蓄意过滤网络中少量度最高的节点时，网络的连通性被破坏 (Albert et al., 2000)。为检测水路客运网络的稳定程度，基于无标度网络特性和节点中心性分析的结果，采用蓄意攻击 (刘勇, 2017) 进行模拟。根据节点重要性的排名，依次过滤深圳蛇口港 (图 4-a 事件 1)，深圳蛇口港和香港中港码头 (图 4-b 事件 2)，深圳的蛇口港、香港的中港码头和香港国际机场 3 个中心节点 (图 4-c 事件 3)，得到新的网络 (图 4)，以此分析该网络遇到意外事件时

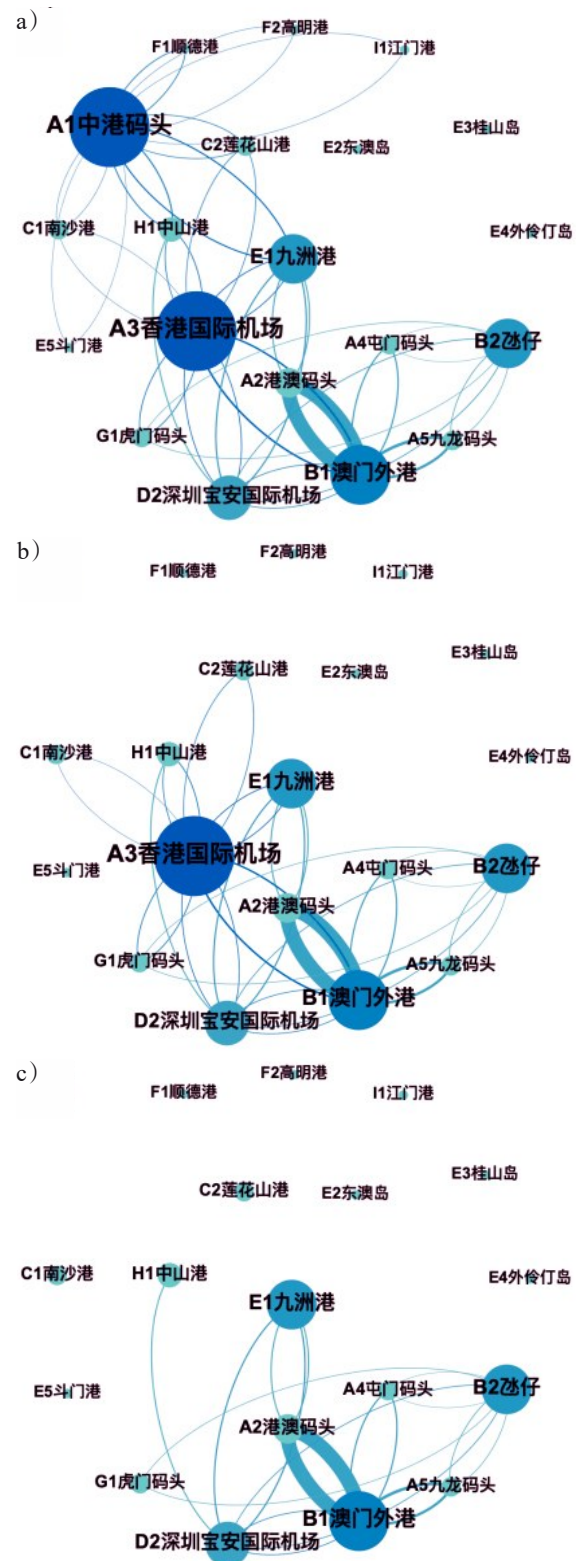


图4 依次进行事件1 (a)、事件2 (b) 和事件3 (c) 之后的网络

Fig.4 Network diagram after event 1 (a), event 2 (b) and event 3 (c)

注：1) 节点度值越大，相应图标的半径越大、颜色越深；2) 节点边权越大，节点连线越粗。

的生存能力和脆弱程度。

由图4可知,每次过滤核心节点后,都会有部分边缘节点脱离网络变成孤立节点,说明它们的抗风险能力较差,对其他节点(尤其是核心节点)的依赖程度较高,即当核心节点受到攻击时,边缘节点近乎瘫痪。另外,中心性较高的节点依旧相互联系,只是网络规模大幅降低,连通性变差。在过滤排名前三的节点后,9个节点成为孤立节点,其他节点也受到很大影响,而原先中心性次高的节点,如珠海九洲港、澳门外港、深圳宝安国际机场,将发展成为新的中心节点。

脆弱性是无标度网络的共同特性,由于现实中不可能实现大湾区各地的完全平均化,因此水路客运网络都会存在一定程度的脆弱性。为检测大湾区水路客运网络生存能力和脆弱程度,在图4的基础上,统计节点与边的可视率、网络的直径(表3),并进行相关分析。在一般的复杂网络中,当中心度最高的节点被排除后,无标度网络的直径会快速增加,节点减少5%时,直径一般增加到原来的两倍(刘勇,2017)。当大湾区水路客运网络节点减少约5%时,其直径保持不变,说明该网络的生存能力高于一般的无标度网络。但前2个中心节点的总辐射范围占据总网络的近50%,前3个中心节点的总辐射范围占据总网络的近70%,经过事件3后,复杂网络边数可视率仅剩31.34%,表明粤港澳大湾区水路运输客运网络非常脆弱。

表3 过滤中心节点后网络的节点数与边数及其可视率和直径

| 蓄意攻击事件 | 节点数/个 | 边数/条 | 节点可视率/% | 边数可视率/% | 直径/次 |
|--------|-------|------|---------|---------|------|
| 事件1    | 20    | 51   | 95.24   | 76.12   | 5    |
| 事件2    | 19    | 35   | 90.48   | 52.24   | 3    |
| 事件3    | 18    | 21   | 85.71   | 31.34   | 4    |

### 3 结论与讨论

基于复杂网络分析法对粤港澳大湾区水路客运网络进行研究,得到的主要结论有:

1) 大湾区水路客运网络基本健全,节点之间能够自由流动,但网络的层级单一,可达性较低的节点占据多数,整体分散,模块化水平较低。而复杂网络可分为2个社区,度数最高的是香港中港码

头、香港国际机场和深圳蛇口港,联系最为紧密的是香港港澳码头和澳门外港。

2) 大湾区水路客运网络具有部分小世界网络特性和无标度特性,节点分布呈现马太效应。网络的平均路径较小,聚类系数也较小,香港中港码头、香港国际机场与深圳蛇口港是头部节点,它们在网络中最具增长特性和优先连接特性。而从另一角度也表明复杂网络的内部差异较大,整体连通质量有待提高。

3) 深圳蛇口港在复杂网络中的综合重要性最为突出,其各项指标都位于前列,香港中港码头、香港国际机场、珠海九州港、澳门外港在复杂网络中的位置也非常重要,分别在单一指标方面具有突出优势。

4) 从空间结构看,大湾区南部的水路客运能力比北部发达,东部比西部发达。

5) 大湾区水路客运网络具有鲁棒性,生存能力较强,但网络发育不够完善,脆弱性较大,网络连通过度依赖核心节点,稳定性较差。当对网络的核心节点发起攻击后,剩余节点中有一半会受到较大影响,甚至一些节点成为孤立节点,经过测算,过滤深圳的蛇口港、香港的中港码头和香港国际机场3个中心节点后,复杂网络边数仅余31.34%。

总的来说,大湾区水路客运网络各节点之间差异较大,耐受外部攻击的能力较差,需要提高网络的连接密度和连接质量,提升网络的稳定性和便捷性。结合本文结论,大湾区水路客运网络可从以下几个方面进行优化,以便更好地服务于大湾区深度融合与协调发展。1) 对各类核心节点,如香港中港码头、香港国际机场、深圳蛇口港,以及澳门外港,因为它们在网络中的地位十分重要,直接关系到网络畅通,需要加大保障力度,确保其服务能力;2) 对边缘节点,如广州莲花山港与南沙港、佛山顺德港与高明港等,可利用城市本身的吸引力与辐射力,充分调研市场需求,开发新的客运班线,尤其是增加与非核心节点的连接,提升各自在网络中的地位,增强整个网络的稳定性和外部攻击耐受力;3) 从空间格局看,需要重点提升大湾区北部的水路客运能力,形成北部枢纽,使整个网络更加均衡。

值得注意的是,广州作为大湾区中心城市之一,其水路客运码头在整个网络中的位置并不占



优,甚至处于落后位置,这与广州的城市发展水平极不相称,直接导致大湾区北部的水路客运能力塌陷。究其原因,或许是受地理区位的影响,广州处于北部顶点,由广州至大湾区东西方向的陆路交通已经非常便捷,且广州的两个港口相对偏远,这些因素共同作用,客观上限制了广州作为水路客运枢纽的可能。比较而言,大湾区的陆路客运能力当下面临着发展瓶颈,而水路客运具有成本低,运输能力强,开发潜力大等比较优势,与陆路客运具有天然的互补特性。此外,对“宜游湾区”的战略定位而言,水路客运是“旅”与“游”的天然结合,开发旅游客运班线,以旅游服务水平提升常规水运客运服务水平。对广州而言,它是大湾区的重要旅游客源地与目的地,也可以此为抓手,提升其在大湾区水路客运网络的地位,提高网络整体的稳定性和层次性。

虽然本文探讨了大湾区水路客运网络特征,为优化网络结构,提高网络稳定性和便捷性提供了一些建议,但受限于数据获取的完整性,未能掌握各港口的历时性数据,2020—2021年又受疫情影响,非常态化的数据也不适合本研究,以至于未能分析大湾区水路客运网络的动态演化过程。同时,本文作为一项尝试性研究,只是单纯分析了水路客运网络,没有将之与陆路网络相结合,水陆互补将能更好地描述大湾区内部客运网络。综上,未来一方面可以关注于水路客运网络的演化过程及其影响,另一方面可以关注于水路陆路客运网络的综合研究。

## 参考文献 (References):

- Albert Réka, Jeong Hawoong and Barabasi Albert-László. 2000. Error and Attack Tolerance of Complex Networks. *Nature*, 406(6794): 378-382.
- Baird Alfred J. 1999. A Comparative Study of the Ferry Industry in Japan and the UK. *Transport Reviews*, 19(1): 33-55.
- Barabási A L and Albert R. 1999. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439): 509-512.
- Blondel Vincent D, Guillaume Jean-Loup, Lambiotte Renaud and Lefebvre Etienne. 2008. Fast Unfolding of Communities in Large Networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, (10): 100.
- 党亚茹, 周莹莹, 王莉亚, 李雯静. 2009. 基于复杂网络的国际航空客运网络结构分析. 中国民航大学学报, 27 (6): 41-44. [Dang Yaru, Zhou Yingying, Wang Liya and Li Wenjing. 2009. International Air Transport Network Structure Analysis Based on Complex Networks. *Journal of Civil Aviation University of China*, 27(6): 41-44.]
- 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.]
- 高峰, 党亚茹. 2009. 世界航空客运网络的节点度分布特征. 科学学与科学技术管理, 30 (7): 75-79, 185. [Gao Feng and Dang Yaru. 2009. Analysis on Distribution Property of an International Air Transport Network. *Science of Science and Management of S. & T.*, 30(7): 75-79, 185.]
- 高自友, 赵小梅, 黄海军, 毛保华. 2006. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究. 交通运输系统工程与信息, (3): 41-47. [Gao Ziyu, Zhao Xiaomei, Huang Haijun and Mao Baohua. 2006. Research on Problems Related to Complex Networks and Urban Traffic Systems. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, (3): 41-47.]
- 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.]
- 吉阿兵, 朱道立. 2006. 网络外部性下的港口竞争策略设计. 系统工程理论与实践, (7): 105-111. [Ji A'bing and Zhu Daoli. 2006. The Port Competitive Strategies with Network Externality. *System Engineering Theory and Practice*, (7): 105-111.]
- 蹇令香, 李东兵, 赵诗晨. 2016. 我国沿海港口复杂网络演化特征. 经济地理, 36 (12): 96-103. [Jian Lingxiang, Li Dongbing and Zhao Shichen. 2016. China's Coastal Ports Complex Network Evolution. *Economic Geography*, 36(12): 96-103.]
- 焦敬娟, 王姣娥, 金凤君, 王涵. 2016. 高速铁路对城市网络结构的影响研究——基于铁路客运班列分析. 地理学报, 71 (2): 265-280. [Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e, Jin Fengjun and Wang Han. 2016. Impact of High-Speed Rail on Inter-City Network Based on the Passenger Train Network in China, 2003-2013. *Acta Geographica Sinica*, 71(2): 265-280.]
- Lai M F and Lo Hong K L. 2004. Ferry Service Network Design: Optimal Fleet Size, Routing, and Scheduling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(4): 305-328. DOI: 10.1016/j.tra.2003.08.003.
- Lo Hong K, An Kun and Lin Weihua. 2013. Ferry Service Network Design Under Demand Uncertainty. *Transportation Research Part E*, 59: 48-70.
- 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 2005. 复杂网络理论及其应用研究概述. 系统工程, (6): 1-7. [Liu Tao, Chen Zhong and Chen

- Xiaorong. 2005. A Brief Review of Complex Networks and Its Application. *Systems Engineering*, (6): 1-7.]
- 刘勇. 2017. 网络数据可视化与分析利器: Gephi中文教程. 北京: 电子工业出版社. [Liu Yong. 2017. *Web Data Visualization and Analysis Tools: Gephi Chinese Course*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry.]
- Maierov N and Fetisov V. 2019. Forecasting of the Route Network of Ferry and Cruise Lines Based on Simulation and Intelligent Transport Systems. *Transport Problems*, 14(2): 111-121.
- 覃成林, 柴庆元. 2018. 交通网络建设与粤港澳大湾区一体化发展. 中国软科学, (7): 71-79. [Qin Chenglin and Chai Qingyuan. 2018. Transport Network Construction and Integrated Development of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *China Soft Science*, (7): 71-79.]
- 任晓龙, 吕琳媛. 2014. 网络重要节点排序方法综述. 科学通报, 59 (13): 1175-1197. [Ren Xiaolong and Lv Linyuan. 2014. Review of Ranking Nodes in Complex Networks. *Chinese Science Bulletin*, 59(13): 1175-1197.]
- 宋炳良. 2000. 上海港口功能的空间定位与国际航运中心建设. 上海经济研究, (4): 57-61. [Song Bingliang. 2000. Spatial Positioning of Shanghai Port Functions and Construction of International Shipping Center. *Shanghai Journal of Economics*, (4): 57-61.]
- Watts D J and Strogatz S H. 1998. Collective Dynamics of 'Small-World' Networks. *Nature*, 393(6684): 440-442.
- 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 2006. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2-3. [Wang Xiaofan, Li Xiang and Chen Guanrong. 2006. *Complex Network Theory and Its Application*. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2-3.]
- 王姣娥, 金凤君. 2005. 中国铁路客运网络组织与空间服务系统优化. 地理学报, (3): 371-380. [Wang Jiao'e and Jin Fengjun. 2005. Railway Network Organization and Spatial Service System Optimization in China. *Acta Geographica Sinica*, (3): 371-380.]
- 王姣娥, 杜德林, 金凤君. 2019. 多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束. 地理学报, 74 (12): 2482-2494. [Wang Jiao'e, Du Delin and Jin Fengjun. 2019. Comparison of Spatial Structure and Linkage Systems and Geographic Constraints: A Perspective of Multiple Traffic Flows. *Acta Geographica Sinica*, 74(12): 2482-2494.]
- 张京祥, 刘雨平. 2008. 沿京杭大运河地区的空间发展——以京杭大运河扬州段为例. 经济地理, 28 (1): 1-5. [Zhang Jingxiang and Liu Yuping. 2008. Research on the Spatial Development of Areas Along the Beijing-Hangzhou Canal—With the Case Study of Yangzhou Part of Beijing-Hangzhou Canal. *Economic Geography*, 28(1): 1-5.]
- 孟德友, 陆玉麒, 李小建, 高超. 2014. 长江三角洲高速公路网络构建对区域可达性的影响. 热带地理, 34 (5): 643-654. [Meng Deyou, Lu Yuqi, Li Xiaojian and Gao Chao. 2014. Impact of Expressway Network Construction on the Regional Accessibility in the Yangtze River Delta. *Tropical Geography*, 34 (5): 643-654.]
- 赵旭, 杨赞, 靳志宏, 计明军. 2007. 区域集装箱港口网络布局规划优化模型. 交通运输工程学报, (3): 44-49. [Zhao Xu, Yang Zan, Jin Zhihong and Ji Mingjun. 2007. Optimization Model of Network Distribution Planning on Regional Container Ports. *Journal of Traffic and Transport Engineering*, (3): 44-49.]
- 周平德. 2002. 珠江三角洲地区一体化交通运输网络发展构想. 热带地理, 22 (4): 299-303. [Zhou Pingde. 2002. A Study on the Development of the Integrated Transportation Network in the Pearl River Delta Economic Region. *Tropical Geography*, 22 (4): 299-303.]
- 宗刚, 胡蓓蓓, 韩建飞. 2012. 中国沿海港口网络空间结构的复杂性研究. 中国软科学, (12): 171-178. [Zong Gang, Hu Beibei and Han Jianfei. 2012. Complexity Research on Spatial Structural Characteristics of China's Coastal Port Network. *China Soft Science*, (12): 171-178.]

#### 作者贡献声明:

**宋旭妍:**撰写论文,分析数据,修订完善论文;

**彭甜甜:**收集与分析数据,撰写论文;

**张高军:**提出研究问题,设计研究框架,指导研究过程,修改论文等。



## The Waterage Passenger Transportation Network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

Song Xuyan, Peng Tiantian and Zhang Gaojun

(Shenzhen Tourism College, Jinan University, Shenzhen 518053, China)

**Abstract:** Taking the waterage passenger transportation lines in the Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area (GBA) as the data source to study its complex network characteristics can enrich the traffic geography research based on waterage passenger transportation and serve the construction of the GBA. The findings are as follows. Firstly, the waterage passenger transportation network (WPTN) in the GBA is basically sound with nodes flowing freely, but the network lacks in hierarchy as nodes with low accessibility occupy the majority and is overall dispersed with low-level modularization. The complex network can be divided into two communities, of which the nodes with the highest degree are China Ferry Terminal (CFT) in Hong Kong, Hong Kong International Airport (HKIA) and Shekou Port (SP) in Shenzhen, and the nodes most closely connected are HK Macao Ferry Terminal (HMFT) and Macao Outer Harbour Ferry Terminal (MOHFT). Secondly, the WPTN in the Great Bay Area has characteristics of some small world network and scale-free, of which the node distribution presents the "Matthew Effect". The average path length of the network is small, and the clustering coefficient is also small. CFT, HKIA and SP are the head nodes of the WPTN, which have the most growing feature and priority connection feature in the network. On the other side, it also shows that the internal differences of the complex network are large and the overall connectivity quality needs to be improved. Thirdly, SP is the most important node in the complex network, as its various indicators are all at the forefront. The positions of CFT, HKIA, Jiuzhou Port in Zhuhai and MOHFT in the complex network are also very important, and they have outstanding advantages in a single indicator respectively. Fourthly, from the perspective of spatial structure, the waterage passenger transportation capacity in the south of the GBA is more developed than that in the north, and that in the east is more developed than that in the west. And finally, the WPTN in the GBA has robustness and strong survivability, but the network development is not perfect enough with greater vulnerability, as the network connectivity depends too much on the core nodes and the stability is poor. After attacking the core nodes of the network, half of the remaining nodes will be greatly affected, and even some nodes become isolated ones. After calculation, there are only 31.34% of the complex network variables remained after event 3. In order to optimize the WPTN in the Great Bay Area, the suggestions are list below. First, for various core nodes, such as CFT, HKIA, SP and MOHFT, as they play important roles in the network, it is necessary to strengthen support to ensure their service capacity. Second, for edge nodes, such as Lianhuashan Port and Nansha Port in Guangzhou, Shunde Port and Gaoming Port in Foshan, we can make full use of the attraction and radiation of the city itself, fully investigate the market demand and develop new passenger transportation lines, especially increase the connections with non-core nodes and improve their position in the network, so as to enhance the stability and external attack tolerance of the whole network. And third, from the perspective of spatial pattern, it is necessary to focus on improving the waterage passenger transportation capacity in the north of the GBA and form a northern hub, in order to make the whole network more balanced. For future studies, we can focus on the evolution process and impact of the WPTN and the comprehensive research of waterage and land passenger transportation network as well.

**Keywords:** waterage passenger transportation network; complex network analysis; accessibility; traffic network; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area