

# 多维流视角下湖北省网络结构特征及其影响机制

幸丽君<sup>1, 2</sup>, 杜赛南<sup>1, 2\*</sup>, 孙桂英<sup>3</sup>, 陈全<sup>2</sup>

- (1. 湖北大学区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北武汉 430062;
2. 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062;
3. 湖北省城市规划设计研究院有限责任公司, 湖北武汉 430062)

**【摘要】**:基于百度迁徙、百度指数、银行及物流企业等多元流数据,构建多维城市联系强度矩阵,从网络节点、层级及核心—边缘结构三方面综合测度多维流视角下的湖北省城市网络结构特征及其关联性,并选取企业发展、交通可达、产业结构、经济发展和社会服务五类影响因素构建回归分析模型,进一步探析多维网络结构的影响因素。结果表明:(1)不同要素作用下的城市网络中各节点层级分化明显,武汉均处于独立核心地位,天门、潜江、仙桃及神农架林区等均处于较低层级,且不同联系网络的整体联系密度为信息流>物流>资金流>综合流>人流;(2)资金网络和其他网络之间关联性均较强,其中与物流网络在核心边缘城市的数量和空间分布上具有较大共性,而信息网络和人流网络的关联度较小;(3)企业发展和产业结构是多维网络产生共性的主要原因;交通可达、经济发展和社会服务因素是多维网络产生差异性的主要原因,其中,经济发展因素的影响最显著,社会服务因素影响相对最弱。最后基于本研究结论,为湖北省域空间规划的重点方向提出了若干探讨。

**【关键词】**:多维要素流 城市网络 网络结构特征 影响机制 湖北省

**【中图分类号】**:F291.1 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)010-2134-12

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210003

随着现代交通和信息通讯等技术的变革,传统空间距离的阻碍被打破,城际人员流动、物资扩散、信息传递及经济合作的联系密切度加强,在地域空间上构成各种流——人流、物流、信息流、资金流及技术流等。这些多要素流能够冲破地理空间壁垒的阻碍,实现不同区域的综合和协同发展,促使城市体系向网络化方向演变<sup>[1, 2]</sup>,研究也由“场所空间”(Space of Places)向“流空间”(Space of Flows)转变。“流

<sup>1</sup>收稿日期:2021-10-08;修回日期:2022-01-06

基金项目:湖北省自然科学基金(2020CFB483)

作者简介:幸丽君(1986~),女,讲师,主要研究方向为城市地理、国土空间规划。E-mail:ljxing19@hubei.edu.cn

\*通讯作者 E-mail:dsnhubei@163.com

空间”由 Castells 在 1989 年首次提出,是指包括人流、信息流、资金流、物流、技术流等的空间载体或场域,一种可以实现挣脱现空间距离束缚的联系<sup>[3, 4]</sup>。“流空间”概念的提出是城市研究领域一个重要的理论发现,为城市网络空间的实证研究提供了新视角和新方法<sup>[5]</sup>。国外基于“流空间”视角的城市网络研究较早, Castells 经研究后认为城市社会活动是由多维要素流共同作用所形成的一个具有动态变化的网络化空间<sup>[6]</sup>,全球化与世界城市研究团队基于高端服务业在城市间流动特征测度了世界城市的网络性<sup>[7]</sup>;也有学者利用航空流数据<sup>[8]</sup>和谷歌搜索数据<sup>[9]</sup>分别探析了国际航空港城市群和全球 100 个大城市交通和信息联系空间结构特征; Taylor<sup>[10]</sup>和 Alderson<sup>[11]</sup>基于“连锁网络模型”分别根据世界前 100 强和 500 强的生产性服务业企业在全世界城市的空间分布状况来探析城市网络特征; Trasarti 等<sup>[12]</sup>基于手机信令数据分析了城市内部不同区域之间的相互联系; olak 等<sup>[13]</sup>将手机信令数据和城市公路网数据相结合,综合分析了城市早高峰交通流特征。

近年来,随着“流空间”以及城市网络研究的兴起和成熟,国内大多学者开始以单一城市关联数据进行城市网络研究,如百度指数代表信息流<sup>[14~16]</sup>、母子企业联系代表企业流<sup>[17, 18]</sup>、铁路客运数据代表交通流<sup>[19]</sup>。随着研究的深入,有学者认为基于单一要素流视角的城市网络研究很难全面地反映出城市网络结构的复杂性,马丽亚等<sup>[20]</sup>和朱查松等<sup>[21]</sup>则分别研究了不同要素作用下东北和江苏的城市联系特征;李卓伟等<sup>[22]</sup>、孙阳等<sup>[23]</sup>和叶磊等<sup>[24]</sup>以交通信息流综合测度了城市网络结构形态;郑龙飞等<sup>[25]</sup>、王均瑶等<sup>[26]</sup>基于手机通话、高速公路收费、夜间灯光数据及城市货运数据等实测大数据,从不同流视角综合分析了贵州省和吉林省城市空间网络结构及形成机制。

综合目前研究来看,国内关于城市网络空间的研究已经取得了一定的进展,但研究区域主要集中在珠三角、长三角、京津冀等经济发达的城市群,而对中西部地区特别是省域尺度的研究相对不足;大多数研究聚焦于流空间作用下的城市网络结构特征,而对网络结构影响因素的探析相对较少。湖北省是国家中部崛起战略有效实施的重要支点,也是拉动长江经济带发展、加快长江中游城市群建设的重要承载地,省内城镇体系结构等级完整有序,通过研究城市网络空间结构特征对湖北省空间规划具有较强的现实意义。因此,本文基于多维流视角从省域层面出发分析不同流作用下湖北省城市网络结构特征差异,并利用 QAP 回归分析方法来定量识别和测度多维网络的影响因素,拓展了“流空间”背景下的城市网络结构实证分析与研究,为面向中国省域尺度的区域协同发展提供科学的参考依据。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

湖北省地处长江流域中心位置,是长江干线最长的省份,交通枢纽地位突出,自然资源丰富,产业基础较好,城镇体系完备,是国家长江经济带的重要组成部分,沿线主要城市包括黄石、鄂州、武汉、荆州等 8 个市州的 48 个县市区,是湖北省东、西两大区域联系的天然纽带。截至 2019 年底,湖北省下辖 12 个地级市、3 个县级市、1 个自治州、1 个林区共 17 个地市州,地区生产总值 45828.31 亿,常住人口 5927 万人。

### 1.2 数据来源与矩阵构建

当前的城市网络研究以“流”来表征城际间联系的形式趋向多元化,例如高铁、航空等不同交通数据,高新人才的跨城移动、科研成果异域合作和转让等知识创新型数据,高新产业、制造业等不同类型的企业类型数据等,而这种存在于城市间不同形式的流态大多是以具有较强实际意义的软网络,即主要表现为城际间人、信息、资金和物质联系等多元表现形式<sup>[27]</sup>,因此本文选取较为普遍的人口迁徙流、信息流、资金

流和物流大数据来代表城市交通、社会、经济、服务发展四个方面，以综合表征城市间空间联系强度。

### (1) 人流数据获取与矩阵构建

从百度迁徙指数官网上获取 2020 年 11 月、2021 年 1 月 28 日~3 月 8 日和 2021 年 4 月共计 100 天的湖北省 17 个城市间的逐日人口流动数据，以反映湖北省内城际交通联系情况。本文以城市  $i$  和其他城市  $j$  之间的双向人口迁徙数据为基础，计算出城市  $i$  和其他城市  $j$  之间的人口流动联系强度，具体公式如下：

$$L_{ij} = \frac{T_{ij} + T_{ji}}{t} \quad (1)$$

式中： $L_{ij}$  为城市对联系强度； $T_{ij}$  为城市  $i$  到城市  $j$  的日均迁徙规模指数； $T_{ji}$  为城市  $j$  到城市  $i$  的日均迁徙规模指数； $t$  为天数，由此根据城市  $i$ 、 $j$  之间的人流联系强度构建  $17 \times 17$  的有向城市关系矩阵。

### (2) 信息流数据获取与矩阵构建

从百度指数官网上获取 2020 年湖北省 17 个地市州双向搜索规则的百度指数，并以城市  $i$  和其他城市  $j$  之间的双向百度搜索指数数据为基础，计算出城市  $i$  和城市  $j$  之间的信息联系强度：

$$V_{ab} = C_{ab} \times C_{ba} \quad (2)$$

$$P_{ab} = V_{ab} / V_{\max} \quad (3)$$

式中： $V_{ab}$  表示城市对  $ab$  的信息流强度； $C_{ab}$  表示城市  $a$  对城市  $b$  的搜索指数； $C_{ba}$  表示城市  $b$  对城市  $a$  的搜索指数； $P_{ab}$  表示城市对  $ab$  的相对强度； $V_{\max}$  表示所有城市对中信息流强度的最大值。由此根据城市  $i$ 、 $j$  的信息联系强度构建  $17 \times 17$  的有向城市信息关系矩阵。

### (3) 资金流数据获取与矩阵构建

采用银行企业进行资金流矩阵构建，百度 POI 数据可获取各类银行企业的名称、类型以及所在地区等信息。本文共选取十家银行，包括中国交通银行、中国工商银行、中国建设银行、中国农业银行和中国银行五大行；广发银行、招商银行、华夏银行、光大银行四家股份制银行以及湖北本地开办已成连锁规模的农村商业银行，并通过天眼查进行核对及异常值剔除等数据预处理。本文采用链锁模型构建资金流网络，借鉴 P. J. Talyor 的世界城市研究的链锁结构原理，对银行的各级网点对应企业的各级分支机构在城市中的服务值进行量化，其服务值大小取决于银行网点的数量和级别。本文将银行网点分为总行、分行、支行、24 小时自助银行和 ATM 机 5 个等级，依次赋予 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 的权重。其公式为：

$$V_{aj} = \sum_x w_x * n_{ijx} \quad (x = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

式中： $V_{aj}$ 、 $V_{bj}$  分别表示  $J$  银行在  $a$  城市和  $b$  城市的服务值，那么城市  $a$  和  $b$  之间的总连接度  $R_{ab}$  为：

$$R_{ab} = \sum_j R_{abj} \quad (j = 1, 2, \dots, 10) \quad (6)$$

由此根据城市 a、b 之间的资金总连接度构建 17×17 的无向城市资金联系矩阵。

#### (4) 物流数据获取与矩阵构建

物流企业也来自于 2020 年百度 POI 数据，共选取安能、百世、德邦、申通、顺丰、天天、圆通、韵达、中通 9 家物流企业。按照总部—分公司—分部—办事处的等级划分，以市为单位，下辖的县和中心市区的物流企业机构都统计到地级市层面，依次统计得到湖北省 17 个地级城市的物流数据。物流网络同资金流网络均采用链锁模型构建物流连接度矩阵，按照物流企业等级依次赋予 0.8、0.4、0.2、0.1 的数值。各个物流企业在各个城市中的服务值、连接度及总连接度计算公式同公式(4、5、6)，由此根据城市 a、b 之间的物流总连接度构建 17×17 的无向城市物流联系矩阵。

#### (5) 综合流矩阵构建

基于构建的 4 种流要素的城市网络联系矩阵，采用极值法归一化处理，参考已有研究将四种流视为同等重要的要素流，其权重均设置为 0.25<sup>[28]</sup>，并以 4 种要素流的加权值作为城市综合联系度以此构建综合城市联系矩阵。此外，影响因素分析指标数据则来源于《2020 年湖北省统计年鉴》及 2020 年湖北省各城市统计年鉴；湖北省各市区行政区划矢量数据均来源于地理国情普查数据。

### 1.3 社会网络分析

#### 1.3.1 网络结构指标

##### (1) 网络密度

网络密度能够衡量城市网络中城市间关联强度，城市间联系数量的多少表征整体网络密度的大小，区域内城市间联系数量越多，城际联系越紧密，城市网络发育越成熟，越能发挥城市之间的整体优势<sup>[29, 30]</sup>。具体公式如下：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(i, j)}{n(n-1)}, i \neq j \quad (7)$$

式中：D 为网络密度；n 为城市节点数据；d(i, j) 为城市 i 和城市 j 之间的联系强度即城市间联系数量。为使得不同要素网络具有可对比性，本研究将不同城市联系矩阵进行标准化后计算出整体联系密度。

##### (2) 网络中心性

网络中节点中心性度量指标主要有度数中心性、接近中心性和中介中心性指标<sup>[31]</sup>。由于人流、信息、资金和物流四种要素流构建的网络其接近中心性与中介中心性并不明显，因此本研究采用点度中心性来探析各节点在区域网络中的地位以反映个体在网络中的重要性，其包括点出度和点入度。网络点入度越大，表示这一节点由于某种原因在城市网络中拥有较强的吸引力，对外开放性强；点入度越小，表示这一节点在城市网络中处于较低层级，城市节点较为闭塞不易受到其他节点影响<sup>[32, 33]</sup>。由于研究中人流和信息流矩阵构建是以城市间双向人口迁徙和百度搜索指数数据为基础的，是一种有向矩阵，因此采用点出入度分别表示节点城市的级别，具体公式如下：

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (8)$$

式中:CD(i)表示点出入度;X<sub>ij</sub>为城市 i 和城市 j 的联系强度。

由于研究中资金流和物流矩阵构建的基础是银行和物流企业在各城市中分布的数量和级别等为基础的,是一种无向矩阵,因此仅使用点度中心度值来突出节点城市的级别。具体公式如下:

$$C_D(i) = \frac{D(d_i)}{n-1} \quad (9)$$

式中:CD(i)表示城市 i 的点度中心度;D(d<sub>i</sub>)表示城市 i 的节点度;n-1 表示某城市在网络中的线条数量。

### (3) 核心—边缘结构

网络研究中的核心—边缘结构是由城市间相互联系所构成的一种中心紧密相连、外围稀疏分散的特殊结构<sup>[34]</sup>,用来反映不同节点城市在多维要素流作用下构建的不同城市网络中的地位优劣。核心—边缘区域密度矩阵则能够反映出两区域内外部不同节点之间的联系密切度。

### 1.3.2 网络关联分析

本研究采用社会网络分析中 QAP 相关分析来测度多维网络间的关联性。QAP (Quadratic Assignment Procedure, 二次指派程序)是一种根据两个目标矩阵,以重抽样为基础,对两个 N\*N 的一模矩阵的各个格值的相似性进行比较,得出两个矩阵之间的相关系数,并对系数进行非参数检验的方法<sup>[35]</sup>。

### 1.3.3 影响因素分析

本研究采用社会网络分析中的 QAP 回归分析来构建多维网络结构影响因素回归分析模型,该方法通过研究多个矩阵的相关关系得出回归系数,并给出判定系数 R<sup>2</sup> 值,能够较好地避免多重共线性<sup>[36]</sup>。本文根据已有研究<sup>[37~39]</sup>,结合湖北省城市发展特征以及数据可获得性,选取企业发展、交通可达、产业结构、经济发展和社会服务五类影响因素进行回归分析,因变量为五个网络矩阵。回归模型如下:

$$Z_i = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_4 * x_4 + b_5 * x_5 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

式中:Z<sub>i</sub> 代表人流、信息流、资金流、物流和综合流的网络矩阵;b<sub>1</sub>—b<sub>5</sub> 代表各个影响因素的回归系数;b<sub>0</sub> 为常数;x<sub>1</sub>—x<sub>5</sub> 为影响因素的矩阵。

表 1 影响因素指标解释与计算方法

影响因素类型	影响因子	因子选取的典型性描述
企业发展因素	企业指数差异 S1	不同城市的企业发展数量和规模存在差距时，企业发展水平越高越能够促使各种要素在城市间的流动
交通可达因素	平均时间成本差异 S2	城市要素流动所需的平均时间成本越大，对城市网络的影响越显著
产业结构因素	行业结构差异 S3	城际行业结构差异越大，劳动力的城际流动就越频繁
	人均 GDP 差异 S4	人均 GDP 水平差异是城市经济有效运行的反映
经济发展因素	公共财政预算收入水平差异 S5	公共财政预算收入越大的城市，对其城市内部的资源投入和基础建设越好，进而促进要素的城际流动
	社会消费品零售额差异 S6	社会消费品零售额差异越大，经济增长量差异越明显
	社会固定资产投资额差异 S7	社会固定资产投资额对经济具有巨大的拉伸作用，其差异是引起经济发展水平产生差距的重要因素
	年末常住户籍人口差异 S8	各类因素城际流动以人为主体，年末户籍人口差异越大，对各种要素产生城际联系的影响就越显著
社会服务因素	互联网接入户数差异 S9	城市间互联网接入户数的差异越大，表明城市间经济发展和信息技术等差距较明显，进而对不同要素流动的影响作用就较显著

具体选取的影响因子计算方法如下：(1)企业指数差异因子：反映城市网络中各个要素重新调配的过程；通过查询各个市州 2020 年的统计年鉴，根据记录的工企业数量进行分级，对 0~200、100~200、200~500、500~1000、1000 以上依次赋予 1~5 的权重，将权重与企业数量相乘得到企业发展指数，再进一步构建企业指数差值矩阵。(2)平均时间成本差异因子：城市之间的交通可达水平高低，影响其总体发展效率。本文采用平均时间成本差异表征交通可达水平，利用各个城市中心点之间的直线距离，用高铁、动车、普快和城际公路 4 种交通方式所需要的平均时间构建城市平均时间成本差值矩阵。(3)行业结构差异因子：产业结构在一定程度上是城市社会发展状况的反映。采用 2020 年湖北省 17 个城市的第二、三产业数据，从中选取制造业、建筑业电力煤气及水生产供应业、金融业、房地产业等 17 个行业的从业人员数据，使用克鲁格曼专业化指数来表征各个城市之间的行业结构差异，计算公式如下：

$$K_{ij} = \sum_k |S_i^k - S_j^k| \quad (11)$$

式中： $K_{ij}$  代表城市  $i$ 、 $j$  的克鲁格曼专业指数； $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别代表城市  $i$ 、城市  $j$ 、行业  $k$ ， $E_{ki}$  表示城

市  $i$  的  $k$  行业从业人员数； $S_i^k = E_i^k / \sum_k E_i^k$  其他差异因子如：人均 GDP、公共财政预算收入水平、社会固定资产投资额、社会消费品零售额、年末常住户籍人口和互联网接入户数是经济发展和社会服务状况的反映，具有一定的指标代表性，均通过收集 2020 各州市统计年鉴查询该指标数据，构建出因子差值矩阵。

## 2 湖北省城市网络结构特征

## 2.1 网络节点特征

图1显示了湖北省不同城市网络中各节点城市的点度中心度特征。人流网络中,武汉、孝感和黄冈点出入度最高,表明其在省域交通联系中处于核心地位,对其他节点城市具有较强的辐射力和集聚力;信息流网络中,武汉为信息辐射和集聚中心,襄阳、宜昌和荆州则为次中心,其他各州市的辐射和集聚能力相差不大,而孝感和黄冈两市的信息辐射能力均大于其集聚能力;资金流和物流网络表现出较高的相关性,各节点城市在资金和物流上与其他城市的连接度和凝聚力相差不大,其中特色型城市如仙桃、鄂州等城市占据的度中心性较低,与其他城市的连接度不高,表明其难以受到核心城市的辐射带动作用;综合网络呈现出以武汉为核心点,以襄阳、宜昌、荆州、黄冈和孝感为次核心点的点度中心性特征,而天门、潜江和仙桃的综合集聚能力大于其辐射能力,表明这3个县级直辖市虽然与其他城市的联系较少,不易受到核心城市的辐射作用,但其内部联系相对紧密,神农架林区在综合网络中的集聚和辐射能力最低,表明其由于自身的地理区位和经济发展基础等制约,在城市网络中处于较低层级,自身的要素集聚能力较弱且不易受到其他节点城市的影响。

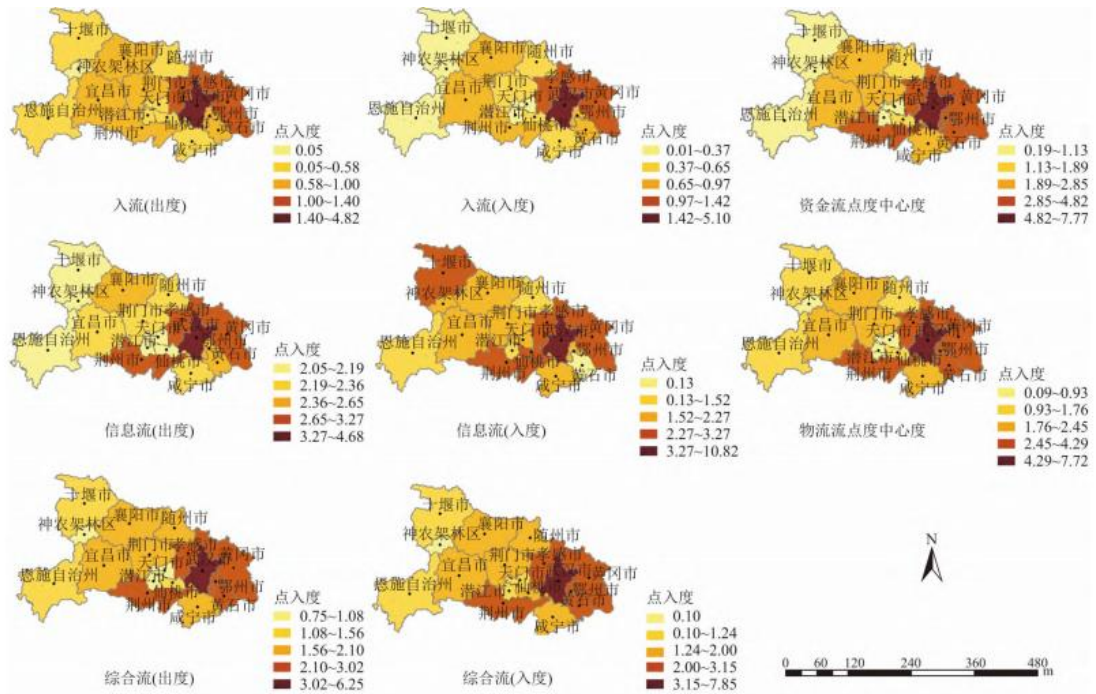


图1 湖北省城市网络点度中心度

## 2.2 网络层级特征

通过将不同城市联系矩阵进行标准化,使得不同要素作用下的城市联系网络的整体网络密度具有可对比性。由图2可看出,人流网络中,除武汉与孝感、黄冈的联系度较高处于第一层级之外,其他各节点间的联系度相差不大且整体较低,表现出明显的地理邻近性特征。信息流、资金流、物流及综合网络中,武汉和襄阳、宜昌、荆州、黄冈及孝感均呈现出较高的联系度处于第一层级,而与其他两大城市群的联系相对较弱多处于二三联系层级,表明武汉一主引领的辐射带动能力有待提高,区域协同联动机制尚未成熟;此外,天门、仙桃、潜江和神农架林区与其他城市的联系度差距较大且在信息、资金和物流上的城际联系强度均较低大多处于四、五层级。整体来看,不同联系网络中城市层级化明显,且各网络的整体联系密度表现为:信息流>物流>资金流>综合流>人流,表明信息流、物流和资金流网络发育较好且各节点城市联系相对紧密,而人流网络的发育水平较低,各节点间的联系较弱,综合流网络中存在城市发展孤点,各节

点城市联系密切度有待加强，城市综合网络发育水平有待提高。

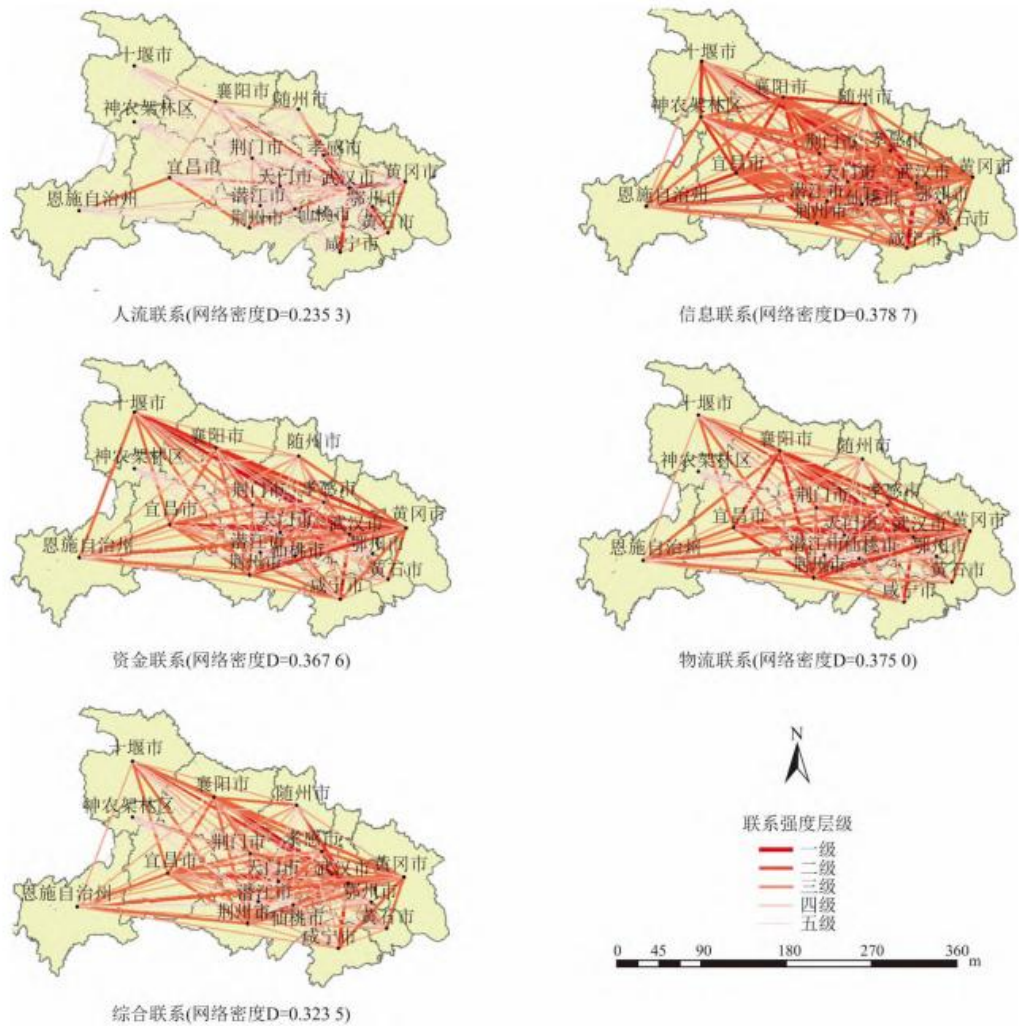


图2 湖北省多维联系网络层级结构图

### 2.3 核心—边缘结构特征

以人口迁徙、信息交流、资金联系和物质聚散4种不同要素的城际联系数据为基础，从单要素和多要素综合两种视角分析湖北省城市网络核心—边缘结构，以此来反映城市网络中城市的地位与重要程度。

#### 2.3.1 单要素流视角的城市网络核心—边缘结构特征

图3显示人流网络中除武汉、黄石和鄂州外其他城市均位于边缘区域，说明这些城市集聚和辐射力不足，整体人流网络呈现出弱联系状态。信息流网络中核心区域多于人流网络，但是边缘城市也较多，主要原因是这些边缘城市自身地理位置和经济发展水平等因素的制约，在信息网络中的关注和被关注度较低。资金流和物流网络的核心城市数量相当且均大于前两种流，表明整体城市资金和物流的联系度均较高，但其边缘城市均主要位于鄂东南和鄂西北，如鄂州和咸宁等，资金和物质要素向核心城市集聚明显，边缘城市受核心城市的辐射较小，对外资金合作和物资聚散力有待提高。通过核心—边缘密度计算发现四种单要素流网络核心密度均在0.320~0.389之间，核心—边缘密度均在0.129~0.227之间，边缘密度均在0.022~0.092之间，说明区域内部联系呈现核心城市>核心—边缘城市>边缘城市的特征。整体来看，核心城市

主要集中在省域三大城市群，且核心城市较少但紧密程度相对较高，边缘城市数量较多但联系较稀疏，城市网络组织结构相对分散，形成以武汉为核心节点的连接鄂东、鄂西的梯形核心区域的结构特征。



图3 湖北省城市网络核心-边缘结构特征

### 2.3.2 多要素流视角的城市网络核心-边缘结构特征

根据图3城市核心边缘结构特征，将四种单要素流视角下的城市网络核心-边缘区域进行综合分析，如果城市*i*同时位于人流和信息流两种网络中的核心区域，则将该城市定义为交通信息型，同理，如果城市*i*同时位于人流、信息流和资金流三种网络中的核心区域，则将该城市定义为交通信息资金型，如果城市*i*同时位于人流、信息流、资金流和物流组成的综合网络的核心区域，则将该城市定义为交通信息资金物流型，由此得到湖北省多维流要素作用下的核心-边缘结构类型(表2)。

表2 多维流视角下湖北省城市网络核心-边缘结构类型

结构类型	核心城市
交通信息/交通资金/交通物流/交通信息资金/交通信息物流型	武汉、黄石
信息资金/信息物流/信息资金物流型	武汉、黄石、襄阳、宜昌、荆州、十堰
资金物流型	武汉、黄石、襄阳、宜昌、荆州、孝感、黄冈、十堰
交通信息资金物流型	武汉、黄石、襄阳、宜昌、荆州、黄冈、十堰

由表2可以看出不同要素作用下的核心-边缘结构共分为十种组合类型。其中交通信息、交通资金、交通物流、交通信息资金、交通信息物流型5种组合类型的核心城市均由武汉和黄石组成。武汉作为国家级和省级中心城市，是交通、信息、资金和物流等各种要素的集聚地和发散地，黄石作为综合型的区域中心城市也依托其优良港口形成的便利交通和贸易发展等优势对外联系密切度较高，在以上5种组合类型的城市网络节点中处于核心地位。其他几种组合类型如信息资金型和信息物流型基本均是以武汉、黄石、襄阳、宜昌、荆州、孝感、黄冈和十堰为核心城市；城市便捷的信息流动在促进频繁的物流联系的同时也带来了更多的资金往来，由此在城市联系网络中占据核心地位。此外，武汉、黄石、孝感和黄冈均属于属于武汉城市圈，其依托有利的政策支持及武汉的发展和带动优势，在不同组合类型的城市网络中成为核心节点，整体来看形成以武汉为中心的武汉城市圈带动其他两大城市群发展的结构特征。

### 2.4 多维联系网络关联特征

利用QAP相关分析测度多维网络的关联性特征，结果显示各个网络相关系数均为正值，且均通过99.999%的显著性检验，说明四种联系网络之间均存在显著的正相关关系，符合理论预期和实际情况(表3)。从单要素流的相关性来看：资金网络—物流网络>信息网络—物流网络>资金网络—信息流>交通网络—物流网络>交通网络—资金网络>信息网络—交通网络。资金和交通、信息、物流联系的产生和发展均具有高度协同性，其中，资金和物流网络之间的相关性最大，表明城市之间产生经济联系的同时也促进了物流联系强度的提高。综合网络与物流和经济网络的相关性最大，而与信息网络的相关性最小，表明资金和

物流网络的发展水平在很大程度上对综合网络的发育具有一定的影响。

表 3 湖北省多维网络 QAP 相关性分析

	人流	信息流	资金流	物流	综合流
人流	—	0.646	0.651	0.695	0.817
信息流	0.646	—	0.719	0.760	0.867
资金流	0.651	0.719	—	0.943	0.937
物流	0.695	0.760	0.943	—	0.958
综合流	0.817	0.867	0.937	0.958	—

结合前文多维网络结构特征分析综合可得多维要素流共性特征为:多维城市网络均以武汉为中心,向省内其他城市辐射;资金流和物流的核心边缘结构具有高度的协同性,核心和边缘城市在数量和空间分布上具有较大共性,且各节点城市在资金和物流上与其他城市的连接度和凝聚力均相差不大;多维要素流差异性特征为:人流网络中武汉、孝感和黄冈的联系度较高处于第一层级且表现出明显的地理邻近性特征;信息流网络中形成以武汉为中心,以襄阳、宜昌和荆州为次中心的结构特征。

### 3 多维流网络结构影响机制探讨

基于不同联系网络矩阵相关性分析,湖北省城市多维网络之间存在着共性和差异,因此,本研究将通过引入新的解释性变量构建 QAP 回归分析模型,定量识别和测度多维网络的影响因素。多维网络结构影响因素回归分析结果表明(表 4),QAP 回归分析模型的拟合度较高,调整后的 R<sup>2</sup> 在 0.572~0.712 之间,可解释因变量 2%~71.2%的信息,回归分析结果相对较好

表 4 多维网络结构影响因素回归分析结果

影响因素	影响因子	回归系数			
		人流	信息流	资金流	物流
企业发展因素	企业指数差异 S1	0.330**	0.240*	0.278***	0.331***
交通可达因素	平均时间成本差异 S2	-0.250**	-0.028	-0.138*	0.057
产业结构因素	行业结构差异 S3	0.086*	-0.094*	-0.223***	-0.185*
	人均 GDP 差异 S4	0.108**	0.066*	0.071	0.143*
经济发展因素	公共财政预算收入 S5	0.823**	0.916*	0.827***	0.841***
	社会消费品零售额差异 S6	1.246**	1.200**	1.201***	1.1420***
社会服务因素	社会固定资产投资额差异 S7	-0.037	-0.169	-0.198*	-0.087
	年末常住户籍人口差异 S8	-0.554**	-0.730**	-0.685***	-0.387***
	互联网接入户数差异 S9	-0.125	0.057	-0.015	-0.051
	调整后的 R <sup>2</sup>	0.572	0.633	0.637	0.628
	观察项个数	272	272	272	272
	随机置换次数	5000	5000	5000	5000

注: \*、\*\*、\*\*\*分别代表 0.1、0.05、0.001 显著水平下通过检验。

1) 各类因子对多维流网络的影响作用表现为:企业发展水平差异与四种网络均呈正相关,且在信息网络中的显著性最大,企业发展水平差异越高,在城市网络中越活跃,越能够促进人口、信息、资金和物质等

要素的流动。平均时间成本差异在资金流和人流网络中显著性较高,且与人流、信息流及物流均呈负相关,表明城市间要素流动的时间成本越大,越不利于城市网络的良好发展。行业结构差异在人流、信息流和物流网络中的显著性最好,且除人流网络外,与其他三种网络均呈负相关,表明城际行业结构差异越大,劳动力的城际流动就越频繁,但是当差异过大时,对信息、资金、物流等网络的发育会产生负作用。经济发展因素中,人均GDP差异对信息和物流网络的作用最显著,公共财政预算收入和社会固定资产投资额差异在4种网络中表现出在0.5%水平下显著,而社会消费品零售额对四种网络的作用并不显著;此外,人均GDP、公共预算收入和社会消费品零售额差异与4种网络均呈正相关,其中公共预算收入越大的城市,对其城市内部的资源投入和基础建设越好,对其它城市具有较强的吸引力;社会固定资产投资额差异越大,对4种要素流动负面影响就越显著。社会服务因素中,年末常住户籍人口差异虽然对四种网络均具有正向作用但均表现出在0.5%水平下显著;除信息网络外,互联网接入户数差异与其他3种网络均呈负相关且显著性较弱,表明当接入户数存在明显差距时,对人口、资金、物质等要素的城际流动会产生一定的负作用。

(2)通过回归结果可以分析资金流与物流联系网络存在显著共性、人流与信息流存在显著差异性的原因。企业发展和产业结构因素对4种网络均存在不同程度的影响,其中信息网络受企业发展差异的影响较大,人流、信息流和物流受产业结构差异的影响较大。交通可达因素仅在人流和资金流网络中表现显著;经济发展因素对不同网络的影响具有显著差异性,其中人均GDP和公共财政预算收入差异对信息流的影响较显著,社会固定资产投资额差异对4种网络的影响均显著,而社会消费品零售额对4种网络的作用并不明显。社会服务因素中年末户籍常住人口和互联网接入户数对4种网络的作用也不明显。综合来看,企业发展和产业结构对多维要素存在普遍影响,是多维网络产生共性的主要原因;交通可达、经济发展和社会服务因素仅对个别的要素产生影响,是多维网络产生差异性的主要原因。

(3)在多维流影响因素分析的基础上,从网络节点、层级和核心—边缘结构来进一步探讨湖北省城市网络结构特征的影响机制。五类影响因素对不同网络均具有不同程度的影响,其中社会经济发展因素特别是人均GDP差异和公共财政预算收入是影响城市网络结构特征的主要因素。因此,经济发展水平较高的城市如武汉、襄阳和宜昌等,在城市联系网络中属于核心点和次核心点,对其他城市具有较强的要素集聚力和辐射力,且多处于城市联系的第一层级和核心区域;而天门、仙桃、潜江和神农架林区等由于自身地理位置及其他等因素制约,经济发展总量较小,占据的度中心性较低,与其他城市的连接度和凝聚力相差不大,在城市联系网络中多处于较低层级和边缘区域,自身的要素集聚能力较弱且不易受到其他节点城市的影响。整体来看,在经济发展水平的区域差异作用下,不同联系网络中城市层级分化较明显,区域协同联动机制尚未成熟,城市综合网络发育水平有待提高。

## 4 结论与讨论

本研究基于多维流视角对湖北省城市网络结构特征、不同流作用下的网络结构关联特征及多维网络结构影响因素进行了深入分析,主要得出以下结论:

(1)从不同流作用下的城市网络结构特征来看,人流网络中武汉、孝感和黄冈的集聚和辐射能力均较强,但整体联系程度相对较弱,未来要进一步完善区域整体交通基础设施建设;信息网络中武汉与襄阳、宜昌分别发挥着主次核心的辐射和集聚作用,各节点城市联系相对紧密;资金和物流网络关联性较大,省级中心和副中心城市在资金和物流网络中的集聚和辐射能力均较强;综合网络中各节点城市层级分化明显,武汉处于独立核心地位,天门、潜江、仙桃及神农架林区则被边缘化。此外,核心城市主要集中在省域三大城市群,当前“一主两翼”的区域发展布局特征明显。

(2)通过综合网络结构和关联特征分析得出多维流共性特征为:多维城市网络均以武汉为中心,向省内

其他城市辐射;资金流和物流网络的核心边缘结构具有高度的协同性,在核心边缘城市的数量和空间分布上具有较大共性。多维流差异性特征为:人流网络中武汉、孝感和黄冈的联系度较高处于第一层级且表现出明显的地理邻近性特征;信息流网络中形成以武汉为中心,以襄阳、宜昌和荆州为次中心的结构特征。

(3)从多维网络影响因素回归分析结果来看,企业发展、交通可达、产业结构、经济发展和社会服务五类因素对多维网络结构具有明显的影响,但对不同城市网络结构特征的影响具有差异性。其中,经济发展因素的影响最显著,社会服务因素的影响相对最弱。企业发展和产业结构是多维网络产生共性的主要原因;交通可达、经济发展和社会服务因素是多维网络产生差异性的主要原因。

基于以上结论,本研究建议湖北省空间协同发展的重点方向如下:(1)按照湖北省十四五规划要求,发挥武汉市的引领带动作用,强化“两翼驱动”,关注低层级城市发展短板问题,引导区域布局向“一主引领、两翼驱动、全域协同”的方向发展;(2)发挥襄阳、宜昌、荆州作为联系武汉城市圈和鄂中、鄂西区域的重要枢纽作用,推进“襄十随神”、“宜荆荆恩”城市群与武汉城市圈的优势互补,实现区域协同发展;(3)针对城市间各要素配置不公平问题,在保证核心城市之间现有联系的基础上,加强边缘区域城市间的联系如咸宁、随州、恩施和神农架林区等,保证城市间企业发展水平、行业结构、经济发展水平等差异在合理范围内。本文基于“流空间”视角下的城市网络研究理论与方法,采用大数据和传统数据相结合,分析了省域层面城市多维联系网络结构特征、关联及影响因素,结果具有一定科学合理性。但还存在一些局限性,如人口迁徙流是以所选的100d时间段内城际平均人口迁徙数据为基础的,这可能会导致部分城市的人口迁徙特征并没有很好的体现出来;此外,多源大数据方面还需加强如手机信令实测数据和夜间灯光数据等来体现精细化的城市联系,方法上也要与传统方法相结合,从动态分析的角度对流空间作用下的城市网络结构特征进行进一步探究。

#### 参考文献:

- [1] 姚文萃,周婕,陈虹桔,等.基于互联网公共信息流的区域网络空间结构研究[J].经济地理,2017,37(10):10-16.
- [2] 钟业喜,吴思雨,冯兴华,等.多元流空间视角下长江中游城市群网络结构特征[J].江西师范大学学报(哲学社会科学版),2020,53(2):47-55.
- [3] 王成,王茂军.山东省城市关联网络演化特征——基于“中心地”和“流空间”理论的对比[J].地理研究,2017,36(11):2197-2212.
- [4] CASTELLS M. The informational city: Information technology, economic restructuring and the urban-regional progress [M]. Oxford U K & Cambridge USA: Blackwell, 1989: 146.
- [5] 王少剑,高爽,王宇渠.基于流空间视角的城市群空间结构研究——以珠三角城市群为例[J].地理研究,2019,38(8):1849-1861.
- [6] SASSEN S. The global city: New york, london, tokyo [M]. Princeton: Princeton University Press, 2013.
- [7] TAYLOR P J. Specification of the world city network [J]. Geographical Analysis, 2001, 33(2): 181-194.

- [8] MATSUMOTO H. International urban systems and air passenger and cargo flows: Some calculations [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10(4): 239–247.
- [9] DEVRIENDT L, BOULTON A, BRUNN S, et al. Searching for cyberspace: The position of major cities in the information age [J]. *Journal of Urban Technology*, 2011, 18(1): 73–92.
- [10] TAYLOR P J, DERUDDER B, HOYLER M, et al. New Regional geographies of the world as practised by leading advanced producer service firms in 2010 [J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2013, 38(3): 497–511.
- [11] ALDERSON A S, BECKFIELD J. Power and position in the world city system [J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811–851.
- [12] TRASARTI R, OLTEANU-RAIMOND A M, NANNI M, et al. Discovering urban and country dynamics from mobile phone data with spatial correlation patterns [J]. *Telecommunications Policy*, 2015, 39(3/4): 347–362.
- [13] OLAK S, LIMA A, GONZALEZ M C. Understanding congested travel in urban areas [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10793.
- [14] 康洋鸣, 郭荣朝. 流空间视角下中原城市群城市网络特征研究——基于2011–2017年百度指数数据 [J]. *河南科学*, 2020, 38(3): 509–516.
- [15] 胡国建, 陈传明, 侯雨峰, 等. 基于百度指数的黑龙江省城市网络研究 [J]. *地域研究与开发*, 2018, 37(1): 58–64.
- [16] 赵映慧, 高鑫, 姜博. 东北三省城市百度指数的网络联系层级结构 [J]. *经济地理*, 2015, 35(5): 32–37.
- [17] 马丽亚, 修春亮, 冯兴华. 基于母子企业联系的东北三省城市网络特征 [J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1129–1138.
- [18] 钟业喜, 傅钰, 朱治州, 等. 基于母子企业联系的上市公司网络结构研究——以长江中游城市群为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1725–1734.
- [19] 柯文前, 肖宝玉, 许可, 等. 基于铁路客运班次的福建省城市网络空间组织模式 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(4): 87–98.
- [20] 马丽亚, 修春亮, 冯兴华. 多元流视角下东北城市网络特征分析 [J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 51–58.
- [21] 朱查松, 曹子威, 罗震东. 基于流空间的山东省域城市间关系研究 [J]. *城乡规划*, 2017(4): 85–93.

- [22] 李卓伟, 王彬燕, 王士君, 等. 基于多元流的走廊地带城市网络联系分析——以辽西走廊为例 [J]. 经济地理, 2020, 40(10):74—82.
- [23] 孙阳, 姚士谋, 张落成. 中国沿海三大城市群城市空间网络拓展分析——以综合交通信息网络为例 [J]. 地理科学, 2018, 38(6):827—837.
- [24] 叶磊, 段学军, 欧向军. 基于交通信息流的江苏省流空间网络结构研究 [J]. 地理科学, 2015, 35(10):1230—1237.
- [25] 郑龙飞, 顾伟男, 龙奋杰, 等. 不同流视角下的贵州省空间网络结构及形成机制分析 [J]. 地理科学, 2020, 40(6):939—947.
- [26] 王均瑶, 宋崴, 刘彤起. 基于多元“流”数据的吉林省城市网络结构研究 [J]. 规划师, 2020, 36(S2):64—68.
- [27] 马海涛. 知识流动空间的城市关系建构与创新网络模拟 [J]. 地理学报, 2020, 75(4):708—721.
- [28] 刘传明, 曾菊新. 县域综合交通可达性测度及其与经济发展水平的关系:对湖北省 79 个县域的定量分析 [J]. 地理研究, 2011, 30(12):2209—2221.
- [29] 熊丽芳, 甄峰, 席广亮, 等. 我国三大经济区城市网络变化特征——基于百度信息流的实证研究 [J]. 热带地理, 2014, 34(1):34—43.
- [30] 韩剑磊, 明庆忠, 史鹏飞, 等. 多维“流”视角下区域旅游网络结构特征及其作用机制分析——云南省为例 [J]. 世界地理研究, 2021, 30(3):645—656.
- [31] 赖建波, 潘竟虎. 基于腾讯迁徙数据的中国“春运”城市间人口流动空间格局 [J]. 人文地理, 2019, 34(3):108—117.
- [32] 李响. 基于社会网络分析的长三角城市群网络结构研究 [J]. 城市发展研究, 2011, 18(12):80—85.
- [33] 马学广, 唐承辉. 基于功能性联系的山东半岛城市群空间范围划定实证研究 [J]. 经济地理, 2020, 40(5):106—117.
- [34] 刘军. 社会网络分析导论 [M]. 北京:社会科学文献出版社, 2004.
- [35] 刘权毅, 詹庆明, 刘稳, 等. 基于铁路客流的湖北省城市网络关联与空间组织结构特征 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5):1008—1022.
- [36] 张荣天, 华富. 江苏省城市网络空间结构演化特征与驱动机制 [J]. 世界地研究, 2015, 24(1):68—75.

[37] 王逸舟, 王海军, 张彬, 等. 基于多维要素流视角的城市群网络结构及影响因素分析——以武汉城市圈为例 [J]. 经济地理, 2021, 41(6):68—76.

[38] 钟业喜, 吴思雨, 冯兴华, 等. 多元流空间视角下长江中游城市群网络结构特征 [J]. 江西师范大学学报(哲学社会科学版), 2020, 53(2):47—55.

[39] 董莹, 罗静, 郑文升, 等. 湖北省城市网络结构及其复杂性研究 [J]. 经济地理, 2019, 39(7):76—84.