

基于教育网络的上海城市网络空间结构研究

任会明 叶明确 祝影¹

(上海大学 经济学院, 中国 上海 200444)

【摘要】: 利用 2016 年上海市教育机构的相关数据, 运用连锁网络模型、社会网络分析方法以及 ArcGIS 空间分析方法测度了上海城市网络的空间结构特征。研究发现: ①整个网络具有较强的集聚性, 节点中心性空间分异显著, 呈现出小世界效应的特征。②网络层级鲜明, 五角场街道、徐家汇街道为上海教育网络的集聚中心, 处于城市网络的最高层级。整个城市网络呈现四边形架构的空间格局, 五角场街道—徐家汇街道—张江镇—江川路街道为网络的核心架构顶点。③通过 QAP 回归分析发现, 人口因素、地理距离、交通通达性、产业集聚、名牌效应以及商务经济发展水平是上海城市网络形成的重要影响因素, 对城市教育网络的扩展具有促进作用。

【关键词】: 教育网络 城市网络 空间结构 上海 QAP 回归

【中图分类号】: F061.5 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2019) 08-0077-10

自 1980 年代以来, 全球产业结构和劳动力市场重塑加速了全球资本在世界城市的集聚, Friedmann 提出世界城市假设, 世界城市是全球经济的控制中心, 没有世界城市的存在, 全球经济体系的建立和联系是无法实现的^[1]。1991 年 Sassen 提出全球城市理论, 其意义为 APS (高端生产性服务业) 主要集聚在全球少数城市的门户城市, 各种高端生产性服务业的集聚产生集群, 各行业各公司间不断发生网络联系^[2]。紧接着 Castells 提出全球化、信息化的交互作用, 使节点城市走入网络和流动的空间^[3]。进入新世纪以后, 以 Taylor 为代表的 GaWC (全球化与世界级城市研究小组与网络) 在以上理论的基础上基于 APS 数据库利用连锁网络模型 (inter locking network model) 进行了世界城市网络的研究^[4]。城市作为网络存在于城市之中, 标志着城市地理学开始向城市网络研究中的转向。

城市网络联系在经济、文化、社会、产业等多个层面中具有多个层面的含义, 国内外学者对于城市网络的研究主要聚焦于两种取向: 一是通过交通流构建城市网络, 包括高速公路网络^[5]、铁路网络^[6]、航运网络^[7]、物流网络等^[8]来测算城市间的联系强度。二是基于企业的微观布局维度, 测度区域中城市与经济的联系^[9], 包括金融网络^[10-11]、法律网络^[12]、上市公司网络^[13-14]等, 基于企业布局的总一分网络是进行构建城市网络的主流^[15]。随着世界经济多元化, 信息技术的发展, 大数据信息流和知识经济席卷全球, 从而构建出多元的城市网络。如基于网络信息流构建城市网络, 如互联网信息^[16-17]、百度指数^[18]; 通过大数据技术挖掘社交软件从而构建城市网络, 典型的有新浪微博^[19]、QQ 群^[20]、豆瓣网^[21]等; 还有基于创新合作产出构建出的城市网络联系^[22-23], 很大程度上丰富了城市网络研究的内涵。

城市网络的研究层面也囊括了不同的尺度, 最具代表性的为 Taylor 世界城市网络的研究, 研究结果更加注重的是世界城市之间的内在联系^[24-25]; Alderson 等^[26]基于全行业视角通过社会网络分析方法对世界城市网络进行了研究, 从而将产业网络和城市网络进行了有效的结合^[27]。国家层面的城市网络研究也越来越成熟, 越来越多的学者透过产业联系^[28]以及企业布局^[29]构建国家城市网络体系^[30]。区域层面的则主要聚焦于城市群间的联系, 包括英格兰地区^[31]、釜山都市圈^[32]、京津冀^[33]、长三角^[34]等。

作者简介: 任会明 (1991-), 女, 河北邢台人, 博士研究生。主要研究方向为区域经济、城市与区域发展、城市网络。

E-mail: renhml1991@126.com。叶明确 (1974-), 女, 安徽滁州人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为区域经济、全球城市网络。E-mail: ymq@i.shu.edu.cn。

基金项目: 上海市软科学研究领域重点项目 (19692105200); 国家自然科学基金项目 (71673178)。

而最小尺度则涉及到城市内部网络结构的研究，如基于出租车数据^[35]、服装产业^[36]透视纽约城市网络研究；基于公交系统测度珀斯城市网络体系^[37]，以及通过银行产业进行上海、北京等城市网络的研究^[38-39]。

教育企业作为城市中独立的个体，属于城市服务性产业中的重点产业，但长期以来没有纳入系统性产业的研究范畴，原因是各个地区尤其是国家间乃至省际间的教育体系存在较大差异，导致地区间的教育联系存在很强的地域性，但在城市内部，教育机构的扩张已经突破了地域范围，表现为在不同的地区设立分支机构或者分校区，从而满足当地对教育服务的需求。而城市快捷交通的发展和互联网通讯方式的进步为各机构和校区之间进行业务交流提供了保障。正是这种教育机构内部各分支机构之间的联系产生了教育连接度，即“教育流”，为研究区域间的联系提供了有利途径。比较典型的是Chow等人^[40]基于全球化的教育评价指标体系对全球城市的教育网络进行研究，发现全球化下的知识流动，使全球更多的城市参与到了全球网络中，但该研究仍是探讨城市间相互联系的。基于教育服务机构为专门指标来测度城市内部联系的研究仍然较少。

自1990年代以来，上海的经济飞速发展，跨国公司总部等高端生产性服务业纷纷落户上海。产业重塑与转型导致上海城市空间结构不断在发生变化，城市网络也从单一性向复杂性转变，进而也影响到城市内部不同企业之间所形成的城市网络形态。本文选取教育机构的相关数据，在社会网络模型的基础上，基于教育连接度刻画上海城市内部网络的结构特征，对清晰地理解上海城市网络的空间结构，促进城市内部的产业互动，揭示城市产业空间的不均衡性具有重要作用。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文研究的对象是上海市的内部网络，故选择上海的214个街镇（街道、镇、乡）以及东平林场、农业现代园区、化工区、东滩等218个空间单元作为上海城市网络的研究节点，选取2016年上海教育机构（包括科研院所、高等院校、中小学校、教育培训机构、教育辅导机构，以下均称为教育机构）的相关数据，数据来源于2016年MCD1公司发布的关于上海市教育机构系列数据，除此之外从上海市统计年鉴中选择系列相关数据，主要来自三个方面：一是取自《上海市统计年鉴》教育板块的相关统计数据；二是取自《2016上海教育年鉴》中的有关各类教育机构的统计数据；三是上海市各区县《统计年鉴》中有关教育方面的相关数据。

教育网络可以通过教育之间的连接流的叠加及宏观化来反映。每家教育机构在每个街镇单元中会有不同的分支、分校区，根据城市网络的构建方法，对各教育机构进行等级赋值处理。但在各教育机构中除高等院校有清晰的总校区—分校区的设置外，大部分教育培训机构、教育辅导机构等没有明显的总—分设置，在城市中大部分处于平行布局，根据姚永玲等人^[41]在2012年的研究中将建立数据矩阵的方法进行简化，在确定服务价值时，将分支机构数量作为某公司在该城市的服务价值的判断标准，故本文将所有的教育机构赋值为1，然后以街镇为空间单位，进行空间分组统计，各街镇教育的总赋值为所有教育机构的赋值与其数量的乘积，得到一个 218×218 的教育空间连接度矩阵，形成218个空间单元之间无向的加权城市网络，借助统计软件MATLAB和空间分析软件ArcGIS、UCI-NET对网络数据进行统计分析和空间可视化。

1.2 数据概况

2016年上海市的各类教育机构21478家，布局总量达到31415家，其中拥有分支机构的总共3125家，布局总量达到12501家。在教育机构总量的基础上，根据地址与街镇的匹配，获得各街镇的教育机构分类别的布局数量（表1）。

其中，花木街道的教育机构总量突破了1000家，遥遥领先于其他街镇，其布局总量是第2位徐家汇街道的1.51倍，是第10位惠南镇的2.69倍，另外，徐家汇街道、五角场街道等中心城区街镇机构布局数量也明显高于其他街镇，具有较高的首位度。在科研院校类别中，惠南镇集聚了较多的科研院校，数量达到44家，斜土路街道、张江镇紧跟其后，但与惠南镇形成了一

定的差距。中小学的分布较为均匀，三林镇虽以 35 家的数量位居榜首，但纵观排名其后的街镇数量，也并没有与之形成悬殊的差距。培训辅导机构的空间分布差异较大，花木街道以 1006 家“一镇独大”，也是在上海市中唯一突破 1000 家的街镇，领先优势非常显著，排名第二、三的分别是徐家汇街道和五角场街道，但是与花木街道的差距显著，这一分布特征对应了教育机构总量的分布特征。且纵观表 1 可得，教育机构总量的街镇分布和培训辅导机构的街镇分布总体较为相似，而与科研院校、中小学的空间分布则完全不同。

1.3 研究方法

本文借助泰勒提出的世界城市网络连锁网络模型（Inter locking Network Model）建立街镇间的网络联系，主要经过以下四部分：

(1) 构建街镇间两两的连接度：

$$r_{ab} = \sum_j r_{abj} \quad (1)$$

(2) 一个街镇与网络中其他所有街镇之间的连接度：

$$N_a = \sum_i r_{ai} \quad (a \neq i) \quad (2)$$

(3) 不同教育机构所形成的街镇连接度：

$$N_i = \sum_a r_{abi} \quad (3)$$

(4) 网络中所有街镇、所有教育机构连接度之和或每个街镇连接度在连接总和中所占的比例：

$$T = \sum_i N_i, L_a = (N_a/T) \quad (4)$$

式中： r_{ab} 表示街镇 a 和街镇 b 之间通过所有公司而形成的连接度；j 代表某个教育机构； r_{abj} 表示街镇 a 和街镇 b 通过 j 教育机构分支机构而形成连接度； N_a 表示一个街镇 a 与网络内所有街镇之间的连接度之和； N_i 代表教育机构 i 连接所有街镇而形成的连接度；T 表示网络中所有街镇连接度的总和； L_a 表示街镇 a 在网络中的连接度占所有街镇连接度的比例，是通过比例方式表现的综合能级。

1.4 测度指标

1.4.1 中心性指标

度数中心性指与该节点直接相连的其他节点的个数，表征节点连接程度，主要衡量一个节点在网络中的地位。

$$c_D(n_i) = d(n_i) = \sum_j X_{ij} = \sum_{\bar{j}} X_{\bar{j}i} \quad (5)$$

式中： C_D 为度中心性值； X_{ij} 为节点间的联系度。平均度为节点度值的平均值。

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_D \quad (6)$$

中介中心性是测量网络中所有最短路径中经过该点的数量比例。节点的介数值越大，表明节点控制网络的能力越强，在网络中承担“中介”或“中转站”的能力：

表 1 教育机构分类别的布局数量排名前十的街镇

| 排名 | 教育机构总量 | | 科研院所 | | 中小学 | | 培训辅导机构 | |
|----|--------|------|-------|------|--------|------|--------|------|
| | 街镇 | 数量/家 | 街镇 | 数量/家 | 街镇 | 数量/家 | 街镇 | 数量/家 |
| 1 | 花木街道 | 1050 | 惠南镇 | 44 | 三林镇 | 35 | 花木街道 | 1006 |
| 2 | 徐家汇街道 | 695 | 斜土路街道 | 31 | 南桥镇 | 33 | 徐家汇街道 | 589 |
| 3 | 五角场街道 | 652 | 张江镇 | 26 | 梅陇镇 | 30 | 五角场街道 | 467 |
| 4 | 南桥镇 | 519 | 定海路街道 | 25 | 花木街道 | 29 | 莘庄镇 | 465 |
| 5 | 方松街道 | 509 | 江川路街道 | 16 | 金杨新村街道 | 27 | 南桥镇 | 458 |
| 6 | 莘庄镇 | 494 | 方松街道 | 16 | 川沙新镇 | 27 | 方松街道 | 394 |
| 7 | 张江镇 | 405 | 徐家汇街道 | 15 | 洋泾街道 | 23 | 梅陇镇 | 357 |
| 8 | 梅陇镇 | 403 | 曲阳路街道 | 15 | 周家渡街道 | 23 | 潍坊新村街道 | 355 |
| 9 | 大场镇 | 398 | 枫林路街道 | 14 | 徐家汇街道 | 23 | 七宝镇 | 336 |
| 10 | 惠南镇 | 390 | 打浦桥街道 | 13 | 北蔡镇 | 23 | 外滩街道 | 332 |

$$C_B(i) = \sum_{j=1; k=1; j \neq k \neq i}^N \frac{N_{jk}(i)}{N_{jk}} \quad (7)$$

式中： N_{jk} 表示节点 v_j 和 v_k 之间的最短路径条数； $N_{jk}(i)$ 表示节点 v_j 和 v_k 之间的最短路径经过节点 v_i 的条数。

接近中心性表示节点到其他所有节点最短路径之和的倒数乘以其他节点个数。节点的接近度越大，表明该节点越不受其他节点控制的程度：

$$C_c(i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1; j \neq i}^N d_{ij}} \quad (8)$$

式中： d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的最短路径数； N 表示节点个数。

1.4.2 空间自相关

通过计算 Moran' sI 指数值和 p 值对上海城市网络空间布局的集聚性进行评估, 其计算模型为:

$$I = \frac{n}{s_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (9)$$

式中: z_i 是要素 i 的属性与平均值 $(x_i - \bar{X})$ 的偏差; $w_{i,j}$ 是要素 i 和要素 j 之间的空间权重; n 表示要素总数, S_0 表示整个空间权重的集聚。

I 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 I 越趋向于 1, 表明绝对的空间正相关; 当 I 趋向于 0, 表明空间随机分布; 当 I 趋向于 -1, 表明空间负相关。

1.4.3 QAP 回归分析法

QAP (Quadratic Assignment Procedure, 二次迭代分配程序) 回归分析方法是以前若干个 $1\text{-mode } 2N \times N$ 的网络矩阵为自变量, 回归同类网络矩阵, 判断回归系数并进行显著性检验。之所以采用 QAP 回归方法而不用多元线性回归方法, 是因为关系矩阵中存在结构性的自相关会使基于 OLS 的多元回归方法的变量显著性检验失效。而 QAP 回归是一种非参数检验, 可以避免因观测值相关引起的统计偏误。有鉴于此, 本文使用 QAP 回归分析对网络矩阵之间的“关系”进行假设检验, 运用网络矩阵作为因变量和自变量, 具体计算步骤如下: 一是对自变量矩阵和因变量矩阵对应的长向量元素进行常规的多元回归分析, 二是同时对因变量的各行各列进行随机置换, 重新计算回归, 保存系数估计值和判定系数 R^2 , 重复之前的步骤多次, 得到各统计量的标准误。

2 上海城市网络的空间结构特征研究

2.1 集聚性明显

从统计特征来看 (表 2), 上海城市网络的密度为 0.480, 节点平均度为 104.257, 表明在上海城市网络中街镇间的教育联系较密切, 教育合作较紧密, 具有较高的凝聚性。通过城市网络的度数加权值计算 Moran' sI 指数 (表 3), 判断其空间自相关, 上海城市网络的 Moran' sI 指数为 0.197, p 值为 0.001, 说明整个网络在空间上呈现较强的显著性, 具有空间正相关性。通过计算局部 Moran' sI 指数 (图 1), 得出基于教育网络的上海城市网络具有显著的集聚效应, 徐家汇街道、枫林路街道、五角场街道空间相关性显著, 处于绝对的集聚核心, 是上海教育网络的中枢, 四平路街道、吴泾镇、斜土路街道、五角场镇次之, 而以上结论与《上海高等教育布局结构与发展规划 (2015—2030 年)》的发展目标与布局愿景是基本一致与相切合的。

2.2 节点中心性空间分异显著

根据教育网络的相关指标测算 (表 2), 2016 年上海城市网络的节点数 218 个, 实现上海街镇全覆盖, 网络边数达到 11346 条, 上海内部空间联系呈现强劲态势。但在网络结构发育成熟的过程中, 上海城市网络的节点中心性空间分异显著, 三大中心性指标形态各异。

度数中心性: 抱团式发展。根据上海城市网络度数中心性排名前 15 位 (表 4) 的街镇来看, 整体上各节点的度数中心性差

距不大，且远大于平均度。南桥镇（184）、大场镇（181）、张江镇（178）占据了上海城市网络的前三，表明其在区域教育活动中比较活跃，对外关联紧密，集聚扩散效应凸显。方松街道（175）、周浦镇（174）、北蔡镇（173）、川沙新镇（173）、惠南镇（172）、长寿路街道（172）紧随其后，且以上街镇除去方松街道、长寿路街道外加上排名第十五的洋泾街道（168）实现围其张江镇的“抱团式”发展。徐家汇街道（170）、江川路街道（170）、五角场街道（169）、顾村镇（169）位于城市中心城区或其中心城区的边缘地带，教育的核心地位明显。

表 2 基于教育网络的上海城市网络的统计特征

| 指标 | 规模 | | | 小世界性 | | 度数中心度 | 中介中心度 | 接近中心度 | |
|------|-----|-------|-------|------|--------|--------|---------|-------|-------|
| | 节点数 | 边数 | 密度 | 直径 | 平均路径长度 | 平均聚类系数 | 平均度 | 中心性 | |
| 2016 | 218 | 11364 | 0.480 | 4 | 1.490 | 0.792 | 104.257 | 0.002 | 0.074 |

表 3 基于教育网络的上海城市网络全局空间自相关指标统计

| Moran' sI | 预期指数 | mean | z 得分 | p 值 |
|-----------|--------|--------|-------|-------|
| 0.197 | -0.005 | -0.003 | 5.242 | 0.001 |

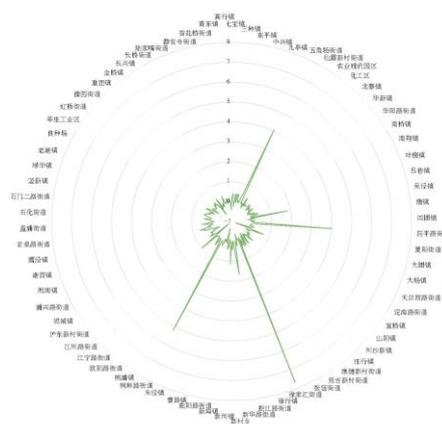


图 1 基于教育网络的上海城市网络局部 Moran' sI 指数示意图

中介中心性：边缘区中转能力增强。中介中心性整体偏低，平均水平只有 0.002（表 2），节点在网络中的控制能力整体较弱，在教育发展中并没有过于注重“桥”的建设。在中介中心性排名前 15 的街镇中（表 4），中介中心性整体介于 0.005~0.023，除去排位最低的五角场街道（0.005）、徐家汇街道（0.005）外，名列前茅的地区为城桥镇（0.023）、南桥镇（0.014）、长征镇（0.013）、祝桥镇（0.011）、周浦镇（0.011）、吴泾镇（0.010），金山卫镇（0.009）、花木街道（0.008）、大场镇（0.008）、夏阳街道（0.007）、北蔡镇（0.007）、方松街道（0.006）乃至张江镇（0.006），说明其在网络中具有相对较强的控制能力，但值得注意的是，以上街镇除去花木街道外全部处于城市的边缘区，究其原因，以上地区虽位于城市远郊区，教育资源匮乏，人才稀疏，也没有云集的科研院所，但属区域经济中心，交通便利，且随着政府对城市边缘区的政策扶持以及产业转移，致使其在基于教育网络的城市网络中起到了较强的中转作用。

接近中心性：独立性显著。相比于前两大中心性指标，在排名前 15 位的街镇中（表 4），整体水平都远远大于上海城市网络

的平均标准 0.074 (表 2), 走势良好, 说明街镇在教育方面具有较强的不受其他街镇控制和影响的能力。单就节点来看, 南桥镇的接近中心性为 0.907, 在本网络中已最大程度接近水平 1, 说明其在网络中与其他街镇的教育距离较短, 不受其他街镇的教育控制也最强。而大场镇 (0.895)、张江镇 (0.884)、周浦镇 (0.869)、方松街道 (0.869)、北蔡镇 (0.865) 其在网络中的独立性仅次于南桥镇, 徐家汇街道 (0.854)、江川路街道 (0.854)、五角场街道 (0.851)、顾村镇 (0.851)、七宝镇 (0.851)、洋泾街道 (0.847) 虽与南桥镇有着 0.050 左右的差距, 但总体都在 80% 以上, 教育效率较高, 在教育网络信息传递过程中具有一定的有效性。

表 4 上海城市网络的中心性前十五位统计情况

| 排名 | 度数中心性 | | 中介中心性 | | 接近中心性 | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 街镇 | 度数中心性 | 街镇 | 中介中心性 | 街镇 | 接近中心性 |
| 1 | 南桥镇 | 184 | 城桥镇 | 0.023 | 南桥镇 | 0.907 |
| 2 | 大场镇 | 181 | 南桥镇 | 0.014 | 大场镇 | 0.895 |
| 3 | 张江镇 | 178 | 长征镇 | 0.013 | 张江镇 | 0.884 |
| 4 | 方松街道 | 175 | 祝桥镇 | 0.011 | 周浦镇 | 0.869 |
| 5 | 周浦镇 | 174 | 周浦镇 | 0.011 | 方松街道 | 0.869 |
| 6 | 北蔡镇 | 173 | 吴泾镇 | 0.010 | 北蔡镇 | 0.865 |
| 7 | 川沙新镇 | 173 | 金山卫镇 | 0.009 | 川沙新镇 | 0.861 |
| 8 | 惠南镇 | 172 | 花木街道 | 0.008 | 长寿路街道 | 0.861 |
| 9 | 长寿路街道 | 172 | 大场镇 | 0.008 | 惠南镇 | 0.858 |
| 10 | 七宝镇 | 170 | 夏阳街道 | 0.007 | 徐家汇街道 | 0.854 |
| 11 | 徐家汇街道 | 170 | 北蔡镇 | 0.007 | 江川路街道 | 0.854 |
| 12 | 江川路街道 | 170 | 方松街道 | 0.006 | 五角场街道 | 0.851 |
| 13 | 五角场街道 | 169 | 张江镇 | 0.006 | 顾村镇 | 0.851 |
| 14 | 顾村镇 | 169 | 五角场街道 | 0.005 | 七宝镇 | 0.851 |
| 15 | 洋泾街道 | 168 | 徐家汇街道 | 0.005 | 洋泾街道 | 0.847 |

注: 根据 Gephi 中心度统计算法。

值得注意的是: 上海城市网络的三大中心性指标中度数中心性的排名与接近中心性的测度结果排名基本一致, 而中介中心性的结果则与其他两项中心性指标有所出入, 说明教育核心地位高的地区并不意味着其教育的中介能力强。

2.3 小世界效应典型

上海城市网络具有较大的聚类系数, 较小的平均路径长度, 呈现典型的小世界效应。该网络的平均聚类系数达到 0.792, 说明上海城市网络的凝聚性较强, 具有较好的空间连通性, 城市内部的教育联系以短距离的街镇联系为主, 具有显著的“抱团式”网络组织特征。该网络的平均路径长度为 1.490, 说明上海每两个街镇间只需通过 1.490 个街镇就可以连接起来, 意味着上海市内部教育联系紧密, 街镇间具有较好的网络通畅性。党亚茹等人^[42]基于中国优秀旅游城市的航空客运网络和吴文清等人^[43]基于科技企业的孵化器合作网络, 均验证了上海城市网络具有显著的小世界效应。

2.4 层级性鲜明

一般而言，教育机构的数量越多，则街镇间的联系越大，每个街镇在上海的影响力不同，与其他街镇的联系度会存在差别。根据 ArcGIS 中的自然间断点分级法 (Jenks)，依据各街镇的度数中心性的加权值，将上海城市网络划分为 5 个层级 (图 1, 表 5、表 6)，第一层级为五角场街道、徐家汇街道，处于城市网络的中心，五角场街道、徐家汇街道是上海最大的教育集聚区，复旦大学、上海交通大学等高等院校林立，科研单位密集，依托五角场商业中心、徐家汇商圈，经济发达，人才集聚，衍生出各具特色的教育机构，也有着全市最多的教育合作伙伴，是上海教育网络的领导者，处于上海城市网络金字塔的顶端。枫林路街道、张江镇、江川路街道、大场镇、四平路街道、吴泾镇、七宝镇构成了上海城市网络的第二梯队，它们拥有的教育机构的数量、依托的名校资源等各项指标旗鼓相当，教育合作联系密切，对外连接度高，形成上海城市网络的第二梯队。第三层级由 32 个街镇组成，包括方松街道、天平路街道、南桥镇、莘庄镇、打浦桥街道、康健新村街道、共和新路街道、长寿路街道、嘉定镇街道、半淞园路街道等，教育资源丰富，有的甚至是区域的科教中心 (如天平路街道、康健新村街道)，其中心性各项指标均高于网络的平均值，相互之间有着频繁的教育合作联系。友谊路街道、田林街道、浦兴路街道、三林镇、塘桥街道、曹路镇、新泾镇、陆家嘴街道、广中路街道、定海路街道等 65 个节点构成网络的第四层级，相比而言，它们间的教育联系并不高。最后剩余的 112 个街镇构成上海城市网络的第五层级，主要位于上海的城市边缘区，这些地区经济水平略低，人才集聚效应小，或深陷交通不便的困境，教育事业发展缓慢，处于上海城市网络金字塔的底端。值得注意的是，这与上海城市地理空间上的行政等级体系并不完全一致，且各层级之间存在显著的差距，这在某种程度上反映出教育的空间集聚并不完全遵循城市地理空间的行政等级秩序。

表 5 基于教育网络的上海城市网络的层级结构

| 层级 | 数量 | 街镇 |
|------|-----|--|
| 第一层级 | 2 | 五角场街道、徐家汇街道 |
| 第二层级 | 7 | 枫林路街道、张江镇、江川路街道、大场镇、四平路街道、吴泾镇、七宝镇 |
| 第三层级 | 32 | 方松街道、天平路街道、南桥镇、莘庄镇、打浦桥街道、康健新村街道、共和新路街道、长寿路街道、嘉定镇街道、半淞园路街道等 |
| 第四层级 | 65 | 友谊路街道、田林街道、浦兴路街道、三林镇、塘桥街道、曹路镇、新泾镇、陆家嘴街道、广中路街道、定海路街道等 |
| 第五层级 | 112 | 奉城镇、朱泾镇、杨行镇、彭浦新村街道、曹杨新村街道、豫园街道、徐泾镇、祝桥镇、盈浦街道、高东镇等 |

注：在第三、四、五层级中由于囊括的街镇数量过多，依据度数中心性的高低选取前 10 个街镇列出。

表 6 基于教育网络的上海城市网络的层次结构统计特征

| 层级 | 节点数量 | 平均加权度 | 平均度数中心性 | 平均中介中心性 | 平均接近中心性 | 平均拥有教育机构数量 |
|------|------|-----------|---------|---------|---------|------------|
| 第一层级 | 2 | 25355 | 169.500 | 0.005 | 0.076 | 495.000 |
| 第二层级 | 7 | 11774.571 | 160.857 | 0.005 | 0.076 | 244.571 |
| 第三层级 | 32 | 4695.625 | 152.844 | 0.004 | 0.075 | 247.000 |
| 第四层级 | 65 | 2201.508 | 141.354 | 0.002 | 0.075 | 155.046 |
| 第五层级 | 112 | 408.911 | 64.143 | 0.001 | 0.065 | 55.571 |

2.5 四边形架构的格局显著

根据 218 个节点间的教育连接度，绘制出上海城市网络图（图 2）。研究发现：（1）整个网络呈现以五角场街道—徐家汇街道—张江镇—江川路街道为顶点架构的上海城市网络的四边形格局，但是陆家嘴街道、外滩街道、南京东路街道等城市 CBD 的中枢地位未能在教育网络的核心圈内有效凸显，教育连接度主要发生在一些教育资源集聚的核心节点之间。（2）城市核心区教育联系密切，五角场街道、徐家汇街道是整个网络中教育连接度的核心枢纽，受地理邻近性的影响，四平路街道、五角场镇、枫林路街道、天平路街道、田林街道构成上海城市网络的重要节点。（3）其他节点与教育资源集聚的五角场街道、徐家汇街道的教育连接度明显强于与其他街道的教育连接度，这也验证了产业集聚带来的集聚效应。（4）随着张江高科技产业园的崛起，张江镇成为科教产业的积极参与者，除积极引进科研院所落户张江外（如复旦大学、上海中医药大学等），对外联系高度聚焦于五角场街道、徐家汇街道、枫林路街道、江川路街道等教育资源集聚的地区。

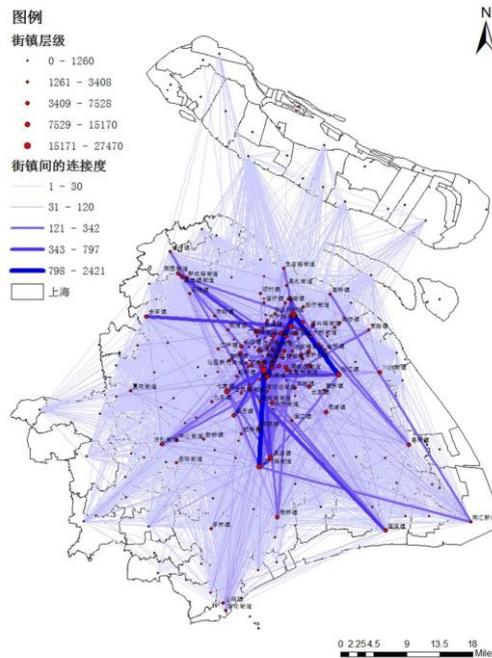


图 2 基于教育网络的上海城市网络示意图

3 上海城市网络的影响因素分析

3.1 变量选取和模型构建

3.1.1 变量选取

城市网络的形成受多种因素的影响，当前，学术界对以多元化生产性服务业为媒介构建城市网络的影响因素的研究中发现：城市网络的形成多受人口因素^[44]、地理邻近性^[45]、交通通达性^[46]、产业集聚状况^[47]以及名牌效应^[48]的影响，而在城市内部网络中，区域的商务经济水平也直接影响着城市网络的形成。基于数据的可得性，本文基于教育网络构建的城市网络的影响因素设定为：人口数量、地理距离、区域拥有的地铁站的数量、教育机构的数量、名校的数量以及商务楼宇的数量，以城市网络中的教育连接度（weight）为因变量，其中区域拥有的地铁站的数量表征区域的交通通达性、教育机构的数量表征教育产业的集聚状况、区域拥有的名校数量表征名牌效应、商务楼宇的数量表征区域的商务经济水平（表 7）。

3.1.2 模型构建

基于以上教育产业选取的自变量指标，设立模型如下：

$$w = f(\text{popu}, \text{dist}, \text{sub}, \text{edu}, \text{uni}, \text{bui}) \quad (10)$$

式中：等式两侧均为关系数据，各变量的说明见表 7。根据引力模型，将各指标变量进行了对数变换，但楼宇数量、名校数量和地铁站数量是离散整数，则在回归模型中采用水平值。

3.2 实证分析

3.2.1 QAP 相关性分析

运用 UCINET 软件，对教育关联网络与影响因子进行 QAP 相关性分析（表 8），人口数量、地理距离、地铁站数量、教育机构数量、名校数量、商务楼宇数量与上海城市网络教育关联矩阵的相关系数为 0.494、0.324、0.611、0.553、0.465、0.565，且均通过了 1% 的显著性水平检验，说明以上自变量均与基于教育网络的上海城市网络有一定的相关性，且与城市网络的相关系数均为正，也表明了人口因素、地理邻近性、交通通达性、产业集聚、名牌效应以及商务经济发展水平对上海城市网络结构的完善与扩展具有重要促进作用。

3.2.2 QAP 回归分析

根据 QAP 回归分析方法，选择 2000 次随机置换，计算出调整后的 $R^2=0.413$ ，且通过了 1% 的显著性水平检验，说明以上自变量矩阵可以解释上海城市网络教育关联关系的 52%。回归结果显示（表 9）：(1) 人口数量通过了 1% 的显著性水平检验，但其回归系数为 0.425，存在显著的正效应，验证了假设检验。意味着人口集聚会增强教育的需求，促进城市网络的形成。(2) 地理距离的标准化回归系数为 -0.252，在 1% 的水平上显著为负，验证了假设检验。地理距离的远近是城市网络形成的重要因素，且意味着在教育网络基础上形成的城市网络存在距离衰减效应。(3) 地铁数量通过了 5% 水平的显著性检验，且其标准化系数为 0.042，存在显著的正效应，验证了假设检验。说明交通通达性是影响城市网络形成的重要因素，一地区的交通通达性会直接影响地区间的教育合作、人才流通等，地铁站是现代城市快捷交通的重要表现形式，其地铁站的多寡直接影响着一地区对外的教育连接强度。(4) 教育机构的数量通过了 5% 的水平检验，有着明显的正效应，验证了假设检验。说明产业集聚效应会在一定程度上带动信息、人才和资本的集聚，促进对教育的需求，是影响城市网络的重要因素。(5) 名校数量的回归系数为 0.207，在 10% 的显著性水平上显著为正，验证了假设检验。名牌效应不仅可以提升社会对某个地区的关注度，还加强了整个教育的需求，提升了教育的品质，使其在整个教育产业的竞争中脱颖而出，占据上风。(6) 商务楼宇数量的回归系数为 0.003，通过了 1% 的显著性水平检验，验证了假设检验。商务楼宇的多寡是一地区高端生产性服务业水平的一种表征，商务办公楼宇不仅为教育服务产业提供了良好的工作环境，还在一定程度上衍生出教育中介、教育培训、高素质人才等多样化的需求。

表 7 自变量的说明

| 变量 | 变量解释与说明 | 假设检验 |
|-------------|--------------|--------------------------------------|
| 人口数量 (popu) | 两街镇间人口数量的和矩阵 | 人口越多，越密集，则对教育的需求越大，预期为正向影响 |
| 地理距离 (dist) | 两街镇间地理距离的矩阵 | 两街镇间距离越近，则教育联系越频繁，网络连接度越高，预期为负 1 向影响 |
| 地铁站数量 (sub) | 两街镇间地铁站数量和矩阵 | 地铁站的数量越多说明街镇的交通通达性好，人流量大，则教育需求越 |

多, 预期 为正向影响

| | | |
|-----------------|-----------------|--|
| 教育机构数量 (edu) | 两街镇间教育机构数量的和矩阵 | 教育机构的数量越多说明街镇的教育产业越集聚, 预期为正 1 向影响 |
| 名校数量(uni) | 两街镇间拥有的名校数量的和矩阵 | 街镇拥有的名校数量越多, 则对外教育联系越多, 预期为正 1 向影响 |
| 商务楼宇数量 (bui) | 两街镇间办公楼宇数量的和矩阵 | 商务楼宇数量越多, 人流量越大, 商业经济越发达, 高端服务业越集聚, 预期为 正向影响 |

注: 数据来源于《上海市 2016 统计年鉴》、上海市各区县《统计年鉴》中有关人口、地铁站、商务楼宇等方面的统计数据; 名校的数量取自于中国高校之窗, 选择教育部或者上海市教委主管部门的公办本科院校, 地理距离由经纬度坐标计算所得。

表 8 城市网络的教育关联矩阵与影响因素的 QAP 相关性分析

| 变量名称 | 相关系数 | 显著性水平 | 相关系数均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 | $P \geq 0$ | $P \leq 0$ |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|------------|------------|
| lpopu | 0.494 | 0.000 | -0.000 | 0.026 | -0.090 | 0.079 | 0.000 | 1.000 |
| ldist | 0.324 | 0.000 | 0.000 | 0.026 | -0.084 | 0.077 | 0.000 | 1.000 |
| sub | 0.611 | 0.000 | -0.000 | 0.026 | -0.074 | 0.086 | 0.000 | 1.000 |
| ledu | 0.553 | 0.000 | -0.000 | 0.026 | -0.082 | 0.074 | 0.000 | 1.000 |
| uni | 0.465 | 0.000 | 0.001 | 0.025 | -0.067 | 0.086 | 0.000 | 1.000 |
| bui | 0.565 | 0.000 | -0.001 | 0.025 | -0.078 | 0.095 | 0.000 | 1.000 |

表 9 QAP 回归结果分析

| 变量名称 | 回归系数 | 显著性概率 | 概率 1 | 概率 2 |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| lpopu | 0.425 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| ldist | -0.252 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |
| sub | 0.042 | 0.048 | 0.048 | 0.953 |
| ledu | 0.233 | 0.040 | 0.040 | 0.960 |
| uni | 0.207 | 0.078 | 0.078 | 0.922 |
| bui | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 1.000 |

注: 概率 1、概率 2 分别表示随机置换过程中回归系数大于等于、小于等于最终回归系数概率。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文利用社会网络的分析方法, 基于教育机构的相关数据, 对上海城市网络的空间结构特征进行了分析, 研究结果表明:

(1) 在空间结构上, 上海城市网络的密度较大, 节点的平均度较高, Moran' sI 指数呈现显著的空间自相关, 整个网络呈现明

显的集聚性。节点中心性空间分异显著，三大中心性指标呈现出明显的结构异质性：度数中心性整体表现为围绕徐家汇街道、五角场街道、张江镇等区域教育核心形成“抱团式”发展；中介中心性整体偏低，处于边缘区的街镇在城市网络中起到较强的中转能力；接近度中心性则表现出网络节点具有较强的独立性，街镇间具有较高的教育效率以及在教育信息的网络传递中具有较强的有效性。同时，在教育网络关联上，上海城市网络具有较大的聚类系数，较小的平均路径长度，呈现典型的小世界效应。网络层级鲜明，五角场街道、徐家汇街道是上海城市教育网络的集聚中心，处于网络的第一层级，枫林路街道、张江镇、江川路街道、大场镇、四平路街道、吴泾镇、七宝镇的教育资源等各指标旗鼓相当，构成了上海城市网络的第二梯队，整个城市网络以第一层级为核心、第二梯队为主体，其余街镇在城市网络中的等级较低，这也在一定程度上造成了空间的不均衡性。根据教育连接度，整个城市网络呈现以五角场街道—徐家汇街道—张江镇—江川路街道为顶点架构的四边形空间格局。

(2)在影响因素上，通过 QAP 回归分析发现，人口因素、交通通达性、产业集聚、名牌效应以及商务经济发展水平对上海城市网络的教育连接度具有显著的正向影响，对城市网络的空间教育连接具有显著的促进作用；地理距离对上海城市网络的教育连接度具有显著的负向影响，网络的教育合作与连接随着距离的加大而减弱，验证了距离衰减理论。

4.2 讨论

(1)上海城市网络是一个复杂的整体网络，有必要增加多时间段进行网络的动态演化研究。

(2)有必要找出各教育机构的总部，按照教育机构的总—分等级进行赋值，更加严格识别出网络节点的等级以及网络的教育连接度。

(3)在影响因素的选取上，可适当扩展变量的选取，如地区的 GDP 水平、从业人员数量以及教育投资额度等，更加系统地刻画出影响机制的研究。

(4)由于高校、中小学、培训结构三类机构差异比较大，有必要对教育机构进行分类研究，比较其差异。

参考文献：

[1]Friedmann J. The world city hypothesis[J]. *Development and Change*,1986,17(1):69-83.

[2]Sassen S. *The Global City:New York,London,Tokyo*[M].Princeton:Princeton University Press,1991.

[3]Castells,M. *The Rise of Network Society*[M]. Oxford:Blackwell,1996.

[4]Taylor P J. World cities and territorial states under conditions of contemporary globalization II:Looking forward, looking ahead[J]. *Geojournal*,2000,19(1):5-32.

[5]Yang H,Dijst M,Witte P,et al. The Spatial Structure of High Speed Railways and city networks in China:A Flow Approach[J]. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*,2017,109(1):109-128.

[6]赵映慧,初楠臣,郭晶鹏,等.中国三大城市群高速铁路网络结构与特征[J].*经济地理*,2017,37(10):68-73.

[7]Ducruet C,Cuyala S,Hosni A E. Maritime networks as systems of cities:The long-term interdependencies between global shipping flows and urban development(1890-2010)[J]. *Journal of Transport Geography*,2018,66:340-355.

-
- [8]唐建荣, 张鑫, 杜聪. 基于引力模型的区域物流网络结构研究——以江苏省为例[J]. 华东经济管理, 2016, 30(1):76-82.
- [9]Sigler T J, Martinus K. Extending beyond "world cities" in World City Network (WCN) research: Urban positionality and economic linkages through the Australia-based corporate network[J]. *Environment & Planning A*, 2017, 49(12): 2916-2937.
- [10]温锋华, 张阿曼, 李桂君. 基于金融企业网络的京津冀城市网络结构特征分析[J]. 城市发展研究, 2017, 24(9):64-71.
- [11]Nie C X, Song F T. Constructing financial network based on PMFG and threshold method[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2018, 495:104-113.
- [12]邹小华, 薛德升, 黄颖敏. 等级化、网络化与区域化: 基于律师事务所空间分布的中国城市体系研究[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 47(2):134-142.
- [13]李仙德. 基于上市公司网络的长三角城市网络空间结构研究[J]. 地理科学进展, 2014, 33(12):1587-1600.
- [14]蒋小荣, 杨永春, 汪胜兰, 等. 基于上市公司数据的中国城市网络空间结构[J]. 城市规划, 2017, 41(6):18-26.
- [15]Derudder B. On Conceptual confusion in empirical analyses of a transnational city network[J]. *Urban Studies*, 2006, 43(11):2027-2046.
- [16]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.
- [17]Zhang L, Du H, Zhao Y, et al. city networks among Chinese cities along "the Belt and Road": A case of web search activity in cyberspace[J]. *Plos One*, 2017, 12(12):e0188868.
- [18]程利莎, 王士君, 杨冉. 基于交通与信息流的哈长城市群空间网络结构[J]. 经济地理, 2017, 37(5):74-80.
- [19]甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征——以新浪微博为例[J]. 地理学报, 2012, 67(8):1031-1043.
- [20]赵映慧, 谌慧倩, 远芳, 等. 基于QQ群网络的东北地区城市联系特征与层级结构[J]. 经济地理, 2017, 37(3):49-54.
- [21]黎智枫, 赵渺希. 赛博空间视角下中国三大城市群网络特征——基于豆瓣跨城活动数据[J]. 人文地理, 2016, 31(6):102-108.
- [22]Leydesdorff L, Wagner C, Han W P, et al. International Collaboration in Science: The Global Map and the Network[J]. *Profesional De La Informacion*, 2013, 22(1):87-94.
- [23]龙瀛, 周垠. 中国城市规划领域的知识产出、消费与网络——基于2000—2015年城市规划四大期刊的分析[J]. 规划师, 2017, 33(6):119-125.
- [24]Derudder B, Taylor P, Ni P, et al. Pathways of Change: Shifting Connectivities in the World City

Network, 2000–2008[J]. *Urban Studies*, 2010, 47(9):1 861–1 877.

[25]Silva T C,Souza S R S D,Tabak B M. Structure and dynamics of the global financial network[J]. *Chaos Solitons&Fractals*, 2016, 88:218–234.

[26]Alderson A S,Beckfield J,Sprague–Jones J. Intercity Relations and Globalisation:The Evolution of the Global Urban Hierarchy, 1981–2007[J]. *Urban Studies*, 2010, 47(9):1 899–1 923.

[27]Coe N M,Dicken P,Hess M,et al. Making connections:Global Production Networks and World City Networks[J]. *Global Networks*, 2010, 10(1):138–149.

[28]姜巍, 高卫东, 熊天琦. 中国能源产业网络结构特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8):196–202.

[29]王娟, 李丽, 赵金金, 等. 基于国际酒店集团布局的中国城市网络连接度研究[J]. *人文地理*, 2015, 30(1):148–153.

[30]Grove A,Volgmann K. Exploring Cosmopolitanity and Connectivity in The Polycentric German Urban System[J]. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2016, 107(2):214–231.

[31]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.

[32]Kwon C J,Yoo T G. Interactive–Network–Based Regional Economic Growth Model and Regional Development of the Busan Metropolitan City[J]. *Centry Political Science Review*, 2015, 25(2):101–132.

[33]赵渺希, 魏冀明, 吴康. 京津冀城市群的功能联系及其复杂网络演化[J]. *城市规划学刊*, 2014(1):46–52.

[34]王聪, 曹有挥, 陈国伟. 基于生产性服务业的长江三角洲城市网络[J]. *地理研究*, 2014, 33(2):323–335.

[35]Deri J A,Moura J M F. Taxi data in New York city:A network perspective[C]//*Signals, Systems and Computers*, 2015 49th Asilomar Conference on IEEE, 2015:1 829–1 833.

[36]Williams S,Currid–Halkett E. Industry in motion:using smart phones to explore the spatial network of the garment industry in New York City[J]. *Plos One*, 2014, 9(2):e86165.

[37]Renne J L. Evaluating Transit–Oriented Development Using a Sustainability Framework:Lessons from Perth’ s Network City[J]. *Berichte Zur Wissenschaftsgeschichte*, 2011, 18(4):254–256.

[38]任会明, 叶明确. 上海银行产业的网络结构特征和空间格局演化[J]. *经济地理*, 2018, 38(9):147–157.

[39]叶明确, 任会明. 北京和上海城市网络时空演化研究[J]. *上海经济研究*, 2019(5):48–62.

[40]Chow A S Y,Loo B P Y. Applying a World–City Network Approach to Globalizing Higher Education: Conceptualization, Data Collection and the Lists of World Cities[J]. *Higher Education Policy*, 2015, 28(1):107–126.

-
- [41]姚永玲,董月,王韞涵.北京和首尔全球城市网络联系能级及其动力因素比较[J].经济地理,2012,32(8):36-42.
- [42]党亚茹,陈韦宏.基于中国优秀旅游城市的航空客运网络分析[J].旅游学刊,2011,26(2):13-19.
- [43]吴文清,吕卓燊,赵黎明.科技企业孵化器合作网络结构及测度研究——以北京市、上海市为例[J].科学管理研究,2015,33(2):65-68.
- [44]马远,徐俐俐.“一带一路”沿线国家天然气贸易网络结构及影响因素[J].世界经济研究,2017(3):109-122+136.
- [45]杨晨,王海鹏,韩庆潇.基于 SNA 方法的国际服务贸易网络结构特征及其影响因素识别——来自亚太地区的经验证据[J].国际商务(对外经济贸易大学学报),2017(6):65-75.
- [46]李志,周生路,吴绍华,等.南京地铁对城市公共交通网络通达性的影响及地价增值响应[J].地理学报,2014,69(2):255-267.
- [47]陈明华,刘华军,孙亚男,等.城市房价联动的网络结构特征及其影响因素——基于中国 69 个大中城市月度数据的经验考察[J].南方经济,2016(1):71-88.
- [48]唐松.区域产业品牌效应、外部性与产业集聚的实证研究——基于中国省域空间模型的分析[J].经济管理,2015,37(8):35-44.

注释:

1 由于涉及公司的隐私,故用字母 MCD 代表。

2 相对于 2-mode 城市网络而言,要求网络矩阵的行与列为同质网络成员。