doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.04.001

基于交通流和信息流的长江三角洲地区空间网络演化格局及影响因素研究

缪涟婕[1],张　莉[1,2],陆玉麒[1,2]

(1.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)
(2.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

[**摘要**]　以流空间理论为指导,利用 GIS 空间分析方法和社会网络分析方法解析 2019—2025 年长三角地区在交通流、信息流双重视角下的空间联系网络格局及演化特征,并运用地理探测器探索该地区要素流空间分异的影响因素. 结果表明:①要素流网络呈显著空间分异,上海主导流动格局,交通流网络呈现枢纽地位调整特征,信息流网络层级稳定且核心城市持续引领;②网络呈现“核心-边缘”结构,紧密度提升但整体凝聚力较低;③交通流网络从局部连通转向全域互动,信息流网络由等级辐射演变为扁平化、多中心协同,二者通过“硬联通”与“软协同”互补,推动长三角地区从地理连通迈向功能深度融合;④经济总量扩张、消费需求增长、创新活跃是要素流动的核心动力,各城市要素流空间分异由驱动因子协同耦合共同塑造. 在未来发展中,应当优化长三角地区跨区域通道、培育次级功能节点,推动区域空间结构从地理空间集聚向功能联系网络转型,从而促进长三角地区一体化发展.

[**关键词**]　交通流,信息流,空间网络演化,影响因素,长江三角洲地区
[**中图分类号**]K902　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2026)04-0001-13

Research on the Spatial Network Evolution Pattern and Influencing Factors in the Yangtze River Delta Based on Traffic Flow and Information Flow

Miao Lianjie[1],Zhang Li[1,2],Lu Yuqi[1,2]

(1.School of Geography,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(2.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application,Nanjing 210023,China)

Abstract:Guided by the theory of flow space,this paper analyzes the patterns and evolutionary characteristics of spatial connection networks in the Yangtze River Delta from 2019 to 2025 from traffic and information flow perspectives using GIS and social network analysis. Geographical detectors are applied to identify factors influencing spatial differentiation of element flows. The results show that:①The element flow network exhibits significant spatial differentiation,with Shanghai dominating flow pattern. The traffic flow network shows adjustments in hub status,while the information flow network remains stable with core cities leading. ②The network shows a core-periphery structure,density has increased but cohesion remains low. ③The traffic flow network has shifted from partial connectivity to comprehensive interaction,while the information flow network has evolved from a hierarchical radiation pattern to a flattened,polycentric,and collaborative structure. Their "hard connectivity" and "soft coordination" complementarity drives the Yangtze River Delta from geographical connectivity to functional integration. ④Economic expansion,consumer demand growth,and active in innovation are core drivers. Spatial differentiation of element flows in each city is shaped by their synergistic coupling. Future development should optimize cross-regional corridors,cultivate secondary functional nodes,and transform the regional spatial structure from geographical agglomeration to a functional connectivity network,thus promoting integrated development of the Yangtze River Delta.

Key words:traffic flow,information flow,spatial network evolution,influencing factors,Yangtze River Delta

收稿日期:2025-11-12.
基金项目:国家自然科学基金项目(42571202).
通讯作者:张莉,博士,教授,研究方向:经济地理与区域规划、可达性与区域空间结构. E-mail:zhangli@njnu.edu.cn

随着交通和通讯技术的不断进步,城市之间要素的流动愈加频繁,区域间的相互作用和空间联系超越了传统的地理界限,传统地理学的场所空间逐渐向流空间转变. Castells[1]最早提出并系统阐释了流空间理论. 该视角下,城市联系不再局限于物理邻近,而是高度依赖交通、物流、信息及资金等要素流,旨在打破地理边界,重塑多中心、网络化空间格局.

对流空间视角下的区域空间结构研究,已取得丰富的成果[2-6]. 既有研究多基于单一要素流刻画城市间空间联系,其中,交通流研究主要基于航空[7]、高铁[8]或综合客运[9]数据,揭示城市网络的层级结构与枢纽格局;信息流研究则依托搜索引擎[10]或社交媒体[11]数据,刻画城市在虚拟空间中的关注度与互动强度. 然而,此类研究往往聚焦某一维度要素,难以全面反映区域一体化过程中实体空间与虚拟空间协同演化的整体特征. 为克服单一视角局限,部分学者通过加权叠加多要素流构建综合网络[12-14]. 近年来,针对中国主要城市群的实证研究不断涌现,揭示了京津冀的嵌套式发展[15]、大湾区的广深双核特征[14]、成渝地区受行政边界制约的双核放射结构[16],以及长江中游的核心-边缘格局[17]. 然而,现有研究多停留在静态或并列描述层面,缺乏对不同要素流结构异同的系统比较;同时,针对国家重大战略实施前后空间网络动态演化的比较及政策导向下“硬联通”与“软联通”协同效应的检验相对不足.

交通流、信息流分别代表城市间物理可达性、跨空间交互的两类关键机制,二者在区域一体化中相互促进却非完全同构. 对比两类网络的结构演化,不仅弥补了单一视角的不足,更能系统检验实体与虚拟要素的协同关系. 这有助于识别交通建设是否同步转化为信息协同、核心-边缘结构是否受数字联系影响,以及城市虚实功能是否存在错位,从而为长三角地区由“通达一体化”走向“协同一体化”提供政策依据.

《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》明确提出,到 2025 年长三角一体化发展要取得实质性进展. 为探究长三角一体化这一国家战略对区域空间网络的塑造效应、评估其向“实质性进展”目标的演进轨迹,本研究聚焦 2019 年(政策基准年)、2022 年(实施中期)、2025 年(目标达成期)3 个标志性节点,通过动态对比这 3 年的空间网络格局,深入揭示政策引导下的结构优化过程与内在机制.

本研究基于实体流与虚拟流双重视角,综合运用 GIS 空间分析与社会网络分析,探究长三角地区交通流与信息流网络格局的演化特征,并借助地理探测器剖析其空间分异影响因素. 研究结果可为长三角地区空间结构优化与资源配置效率提升提供决策参考.

1　研究区域、数据来源及研究方法

1.1　研究区域

依据 2019 年中共中央、国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,长江三角洲地区规划范围包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省全域,面积达 35.8 万 km^2. 本文以上海市和江苏省、浙江省、安徽省的 40 个地级市,共计 41 市,作为长江三角洲地区研究单元.

1.2　数据来源与预处理

本文采用两两城市之间铁路客运班次数据来反映交通流强度. 数据来源于盛名列车时刻表(2019 年、2022 年版本)、中国铁路 12306,分别选取 2019 年 9 月 10 日、2022 年 7 月 29 日、2025 年 3 月 20 日 3 个时间截面,统计长三角地区各城市间高铁、动车、普通列车班次数,形成包含 1 640(41×40)组城市对的列车班次数量矩阵,构建长三角地区各城市之间交通联系矩阵. 3 个年份的时间截面均为非节假日、无大型活动的常态化截面,能够反映区域相对稳定的空间交互格局.

用两两城市之间的列车班次数加和表征该城市对的交通流联系强度[6],具体公式如下:

$$T_{ij}=N_{ij}+N_{ji},$$

$$T_i=\sum_{j=1}^{40}T_{ij},$$

式中,N_{ij}表示城市 i 到城市 j 的列车日班次数;N_{ji}表示城市 j 到城市 i 的列车日班次数;T_{ij}为城市 i 和城市 j 之间的交通流联系强度;T_i 为城市 i 的交通流总量.

本文使用百度搜索指数来反映城市间信息流强度. 基于百度搜索指数平台,选取长三角地区 41 个节点城市作为研究对象,设定时间范围分别为 2019 年 1—12 月、2022 年 1—12 月、2025 年 1—5 月. 受数据

采集时点限制,2025 年数据时段并非全年,但分析显示,所选取的 1—5 月数据整体日均值与完整年度基准值相对一致,具有一定的全年代表性. 通过输入城市关键词,采集两两城市间搜索指数均值,构建包含 1 640(41×40)组城市对的百度搜索指数矩阵.

用两两城市之间的搜索指数乘积表征该城市对的信息流联系强度[18],具体公式如下:

$$R_{ij}=V_{ij}\times V_{ji},$$

$$R_i=\sum_{j=1}^{40}R_{ij},$$

式中,V_{ij}表示城市 i 对城市 j 的百度搜索指数;V_{ji}表示城市 j 对城市 i 的百度搜索指数;R_{ij}为城市 i 和城市 j 之间的信息流联系强度;R_i 为城市 i 的信息流总量.

1.3 研究方法

1.3.1 社会网络分析方法

社会网络分析方法以节点之间的关系数据构建网络,重点探究网络节点的属性特征及整体结构规律,已被广泛应用于流空间相关研究[17,19]. 本文选取 Ucinet 软件中的网络密度、网络中心性、核心-边缘结构和块模型,从网络结构、节点层级、聚类特征等角度解构长三角地区空间关联特征.

(1)网络密度. 随着城市间建立的联系数量增加,城市群的网络密度会相应提高,城市间的交流更加紧密,形成的城市网络对各组成城市的影响也更显著. 网络密度的表达式为[20]:

$$D=\frac{L}{N(N-1)},$$

式中,L 为城市网络中实际存在的联系数量;N 为网络中节点的数量.

(2)网络中心性. 中心性测度指标能够体现城市群网络中的关键节点特征. 处于网络中枢位置的城市通常与网络中各节点形成广泛联系,对区域要素流动及整体效能发挥产生重要影响. 中心性测度指标主要包括点度中心度、接近中心度和中间中心度[21]. 其中,点度中心度反映的是某一节点在区域内的重要程度,该节点与其他节点关联越密切,其中心性越显著,地理位置也越重要[22]. 点度中心度的表达式为[20]:

$$C_{Di}=\frac{\sum_j x_{ij}}{N-1},$$

式中,x_{ij}为城市 i 与城市 j 之间要素流的联系强度;N 为网络中节点的数量.

(3)核心-边缘结构. 核心-边缘结构分析可以体现各个节点的网络地位,根据其在网络中的核心程度分为核心区域和边缘区域[23].

(4)块模型. 块模型用于分析网络内部结构,并识别网络中的社会角色[24]. 根据已有研究[25],将板块划分为 4 种类型:第一类为“净受益”板块,其接收外部的关系数量显著超过自身对外部发出的关系数量,是网络中的受益者;第二类为“净溢出”板块,其对外部发出的关系数量明显高于接收的关系数量,且内部关系较少;第三类为“双向溢出”板块,该类板块无论对内部成员还是对外部其他板块,均表现出活跃的关系输出;第四类为“经纪人”板块,此类板块同时接收和发出外部关系,但内部关系较少,承担着中介与桥梁的作用.

1.3.2 地理探测器

地理探测器旨在探测地理现象的空间分异性及其驱动因素. 其核心是通过计算影响因子的解释力(q 值),量化各影响因素对因变量空间分布的贡献程度. q 取值为 0~1,q 值越大,说明该因素对区域空间联系强度分异的影响越大. 本文选取其中的因子探测器和交互探测器来分析不同影响因子对长三角地区各市交通流及信息流总量空间分异的解释力. 其表达式为[26-27]:

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^{h}n_i\sigma_i^2}{n\sigma^2},$$

式中,n、σ^2 分别为研究区域的总要素流量、方差;n_i、σ_i^2 分别为第 i 类影响因子的要素流量、方差;h 为第 i 类影响因子的分层数.

2 长三角地区网络演化特征分析

2.1 网络层级演化特征

通过自然断点分级法,对 2019—2025 年长三角地区城市间的交通流、信息流联系强度和各城市单一要素流总量进行网络层级划分,并在 ArcGIS 软件中进行可视化表达,得到长三角地区要素流网络层级图(见图 1).

2.1.1 城市间网络联系强度层级

长三角地区交通流网络呈现显著的空间分异特征,上海作为区域核心枢纽,逐级构建起以自身为中心的放射状交通流网络. 2019—2025 年,第一层级始终为上海、南京、苏州、无锡、常州间的两两联系及上海与杭州的联系,共 11 组,构成稳定强连接结构. 2025 年第二至第四层级城市对较 2022 年减少,第五层级城市对增加,实为网络质量优化. 第二层级中减少的城市对主要包括“金华—衢州”“徐州—常州”等省内非核心城市间的连接,新增的有“苏州—杭州”“上海—合肥”“苏州—合肥”等强经济关联城市对. 这表明网络演化中,核心城市联系增强,但边缘城市联系减弱. 2025 年合肥与上海、苏州的连接首次进入第二层级,说明其区域地位提升.

信息流网络呈现核心辐射增强与边缘城市地位快速提升的特征. 2019 年第一层级仅为“上海—苏州”“上海—杭州”,2022 年加入“上海—南京”,表明上海辐射力持续增强,但城市间关注度总体不足. 2019—2025 年,信息流网络第一、二、三、四层级的城市对数量均增加,只有第五层级城市对数量减少. 相对而言,信息流网络第二层级的扩张更加显著,这种大幅增长主要源于两股驱动力:一是上海作为信息流网络核心,其辐射能力增强,连接对象从 2019 年的 4 市扩展至 2025 年的 12 市,包括台州、湖州等边缘城市;二是省会城市网络地位提升,如南京的第二层级连接从 3 市增至 6 市. 高层级网络增加的城市对中,有“上海—台州”“上海—温州”等距离较远的城市对,反映了虚拟流在一定程度上突破了地理距离的约束.

总的来说,在长三角地区要素流网络中,随着网络层级的降低,网络的覆盖范围增大,涵盖的城市数量逐渐增多,形成了以省会城市和地区中心城市为核心的要素流网络. 因空间距离增加,城市之间的联系逐渐减弱,远距离的城市空间联系相对较弱,跨省互动主要集中在上海、苏南、浙北等经济较发达区域. 交通流与信息流第一层级网络均以上海为核心向外辐射,在江浙沪形成小型网络;第二层级网络向西覆盖,均呈“核心-边缘”特征. 从二者的差异性来看,交通流网络的第一层级始终保持 11 组强连接城市对,形成稳定网络结构;而信息流网络高层级的城市对数量显著增长,且由核心城市主导,反映虚拟流网络的核心极化特征更为突出.

2.1.2 各市要素流总量层级

2019 年,交通流总量第一层级包含南京、上海、杭州、苏州、无锡、常州 6 个城市,2022 年缩减为上海、南京、杭州 3 市,2025 年回升至上海、苏州、南京、杭州 4 市,表明长三角地区交通枢纽功能向上海、苏州、南京、杭州高度集聚,呈现区域交通流网络优化与城市枢纽地位调整的特征. 第二层级由 2019 年的 7 市减至 2025 年的 4 市,第三层级及以下城市数量整体增加,反映网络向边缘城市延伸,中小城市可达性提升.

信息流总量层级分布呈现出更强的稳定性与核心城市的持续引领作用. 第一层级在 2019—2025 年始终为上海、南京、杭州、苏州 4 市,上海作为区域枢纽,与南京、苏州、杭州塑造了核心区域的信息集聚效应. 第二层级在 2019 年为合肥、无锡、宁波 3 市,2022 年保持稳定,2025 年扩展至合肥、宁波、无锡、徐州、常州 5 市. 所有省会、副省级城市均稳居信息流第一、第二层级,体现出城市信息流总量与行政等级的一定相关性. 徐州进入第二层级,显示苏北信息流参与度提升. 常州的加入,则体现了苏南城市间信息流联系的进一步强化. 低层级城市数量先增后减,表明网络加密下部分城市层级提升,少数边缘城市因数字化滞后融入较慢.

总的来看,长三角地区交通流与信息流网络均具有明显的梯度扩散特征,上海、南京、苏州、杭州作为核心枢纽,向外围形成高强度辐射网络,因此在交通流和信息流总量层级中均占据主导地位. 比较而言,交通流网络由基础设施和地理邻近性主导,而信息流网络受行政等级、经济实力等影响更深.

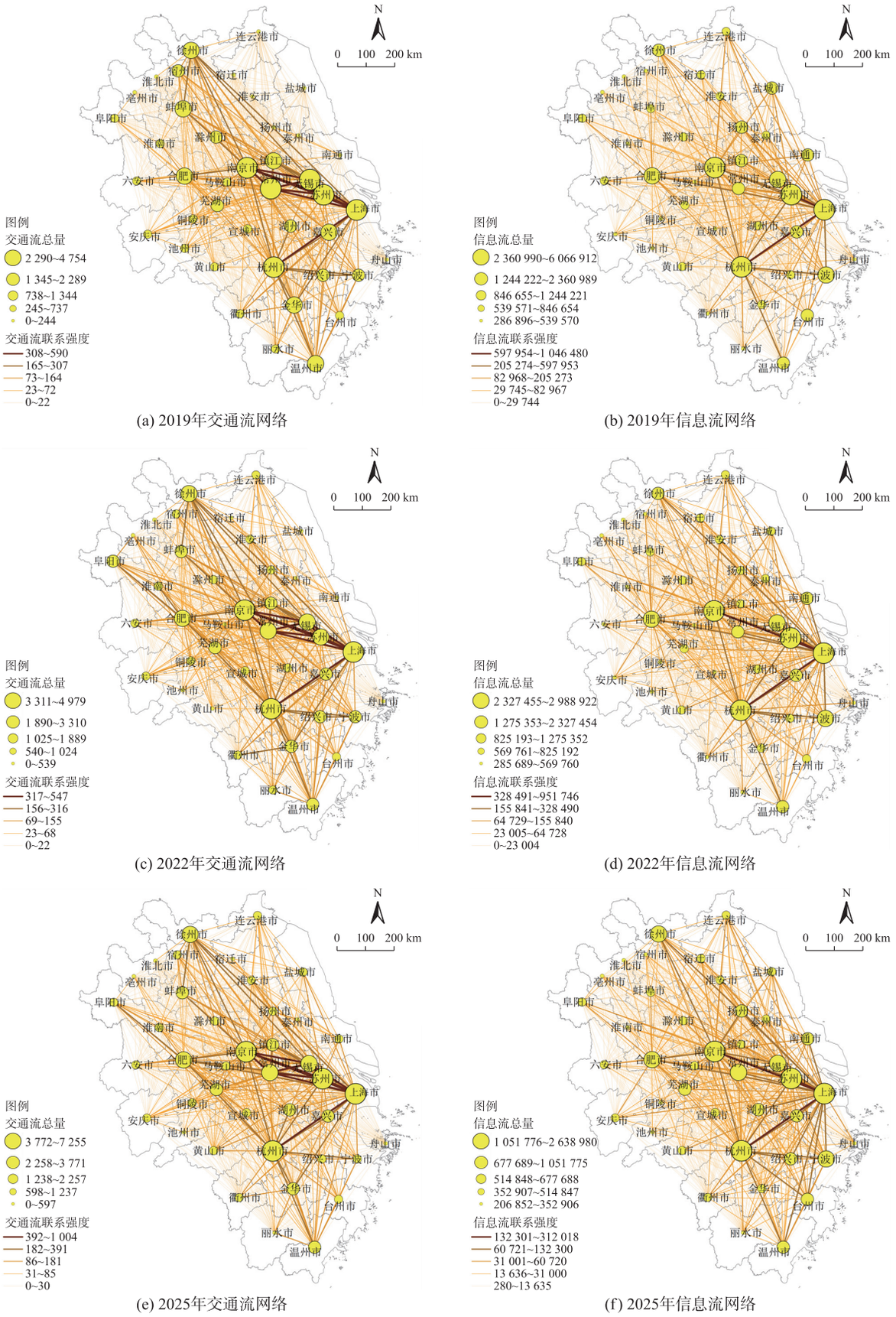


图 1　长三角地区要素流网络层级图

Fig. 1　Hierarchical diagram of the element flow networks in the Yangtze River Delta

注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统,审图号为 GS(2023)2767 号,底图无修改.

2.2　网络结构演化特征

2.2.1　网络密度

以平均数作为断点值,对要素流联系强度无向矩阵进行二值化处理,并根据 Ucinet 软件中的 Network-Cohesion-Density 算法,计算网络密度. 结果显示,2019—2025 年,长三角地区交通流与信息流网络密度均持续上升,交通流网络密度从 2019 年的 0.231 7 逐步增至 2022 年的 0.257 3,2025 年进一步升至 0.269 5,年均增长幅度较为稳定;信息流网络密度则由 2019 年的 0.215 9 增长至 2022 年的 0.234 1,2025 年快速攀升至 0.287 8,2022—2025 年增速显著加快,并在 2025 年超过交通流网络密度. 可以发现,长三角地区要素流网络整体连接紧密度处于中等偏低水平,凝聚力较低,其中交通流网络密度稳定增长,信息流网络密度加速增长并反超交通流网络密度.

2.2.2　网络中心性

运用 Ucinet 软件计算得到 2019—2025 年长三角地区各个城市的点度中心度,并通过自然断点分级法在 ArcGIS 软件中进行可视化表达(见图 2).

交通流网络中,2019—2022 年,南京、上海、杭州、合肥依托既有线路优势位于第一层级,2025 年苏州取代合肥进入第一层级,这或与沪苏湖高铁开通后苏州铁路客运量及跨城联系强度大幅提升直接相关. 无锡、徐州、常州稳居第二层级,可见这些城市是长三角地区的重要铁路支点. 第三至第五层级变化显著,淮安等城市向高层级迁移,说明区域铁路网的完善让中小城市与核心节点的联系更加紧密.

信息流网络中,上海、杭州、南京、苏州稳定在第一层级,合肥 2022 年进入第一层级,但在 2025 年退至第二层级. 宁波、无锡在 2022—2025 年稳居第二层级. 第三至第五层级城市数量较多,台州、绍兴、嘉兴等城市逐步进入更高层级,表明更多城市的信息流参与度在提升.

整体来看,长三角地区要素流网络结构逐步向多中心、广覆盖方向演进. 2019—2025 年,上海、南京和杭州稳居交通流网络与信息流网络中心度第一层级,说明这几座城市在两类网络中均展现出显著枢纽作用,印证了区域要素流动受城市行政地位与经济水平的双重驱动.

2.2.3　核心-边缘结构

使用 Ucinet 软件完成长三角地区交通流、信息流网络核心-边缘结构的区分,并将不同年份的核心城市在 ArcGIS 中进行可视化表达(见图 3).

2019—2025 年,交通流网络核心城市数量比较稳定,14~15 个,但内部构成发生显著变化. 苏南 5 市在 3 个年份均为核心城市,体现了苏南地区在交通流网络的持续主导作用. 浙江省杭州与嘉兴、安徽省合肥与芜湖也保持了核心地位. 苏北的连云港与淮安、苏中的扬州在 2022 年进入核心区,填补了徐州至苏南沿线网络的关键节点,加强了江苏省内部的连通性. 总的来看,长三角地区交通流网络的核心城市由分散到集中,形成连片的核心区域. 同时核心城市重心北移,反映了苏北地区交通可达性的提高.

信息流网络核心城市数量从 2019 年的 9 个增至 2025 年的 14 个,核心区域的空间扩张速度远超交通流网络. 扩张主要方向有两个,一是向苏中、苏北延伸,南通、扬州的接连加入标志着苏中地区信息流枢纽功能的突破;二是向浙南沿海城市延伸,台州、温州均在 2025 年纳入核心区域. 与交通流网络相比,信息流网络核心城市集聚性较低. 由于虚拟网络对地理区位的依赖性较弱,沿海、沿江城市获得了超越实体区位的发展动能,从而发展为信息流网络核心城市.

比较而言,交通流核心调整受基建驱动,以城市间替代为主;信息流核心依赖数字连接,扩张快且对经济活力敏感,主要在原有范围上扩张. 而信息流网络核心区域的快速扩张,表明虚拟流比实体流更易突破地理约束.

2.3　网络聚类演化特征

以平均数作为断点值,对铁路客运班次有向矩阵及百度搜索指数有向矩阵进行二值化处理. 使用 Ucinet 软件将最大分割深度设置为 2、收敛标准设置为 0.2,对长三角地区的交通流和信息流有向网络进行块模型分析,并通过 ArcGIS 软件将各板块进行可视化呈现(见图 4).

交通流网络的演变呈现出从局部连通到全域一体化的清晰路径(见表 1). 2019 年,交通流网络结构具有鲜明的核心-边缘特征. 由上海、苏州、合肥等 18 市组成的第一板块和由杭州、南京、宁波等 14 市组成的第二板块对内部成员和外部其他板块均有较多溢出关系,因此均为“双向溢出”板块. 这 2 个板块的

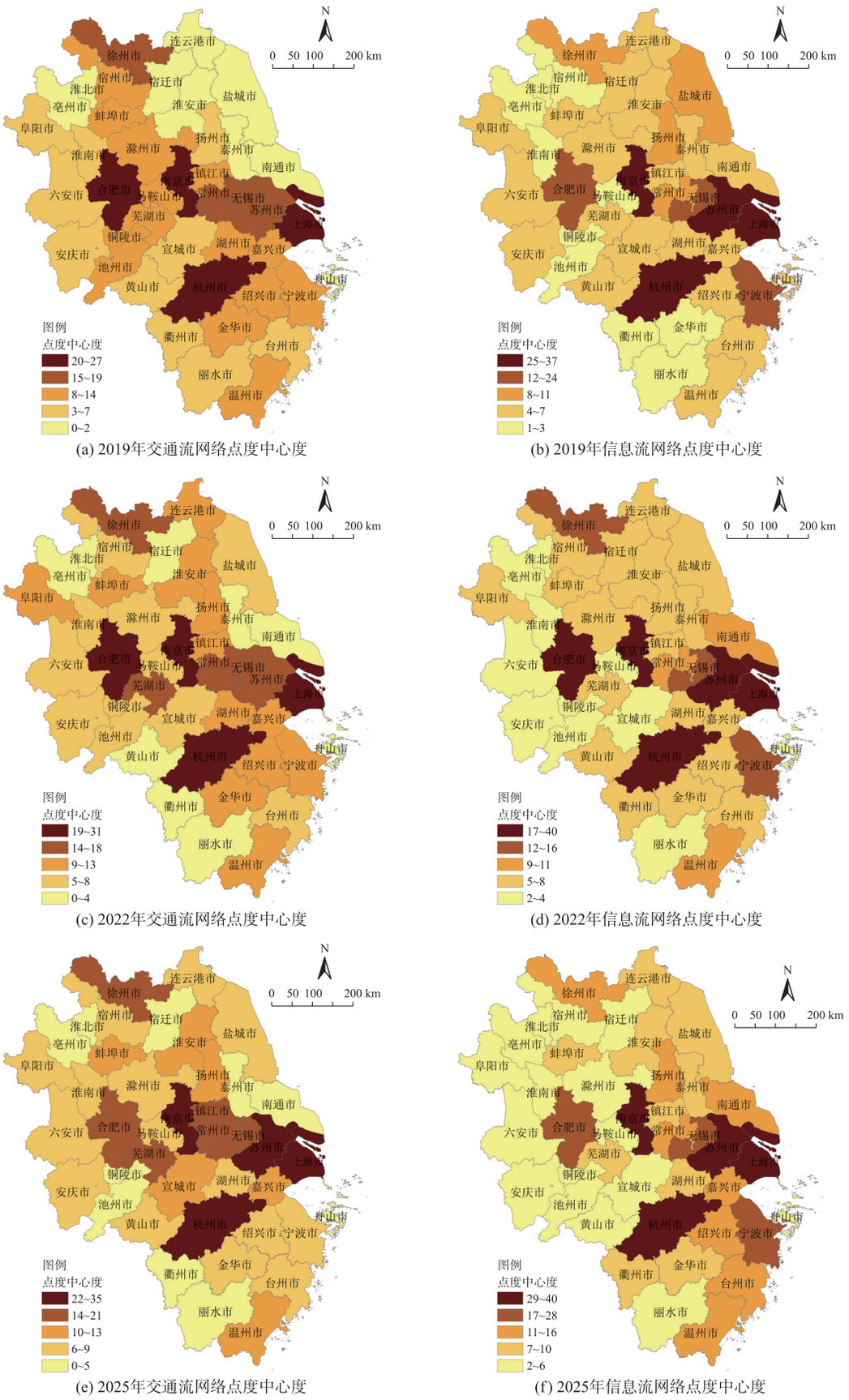
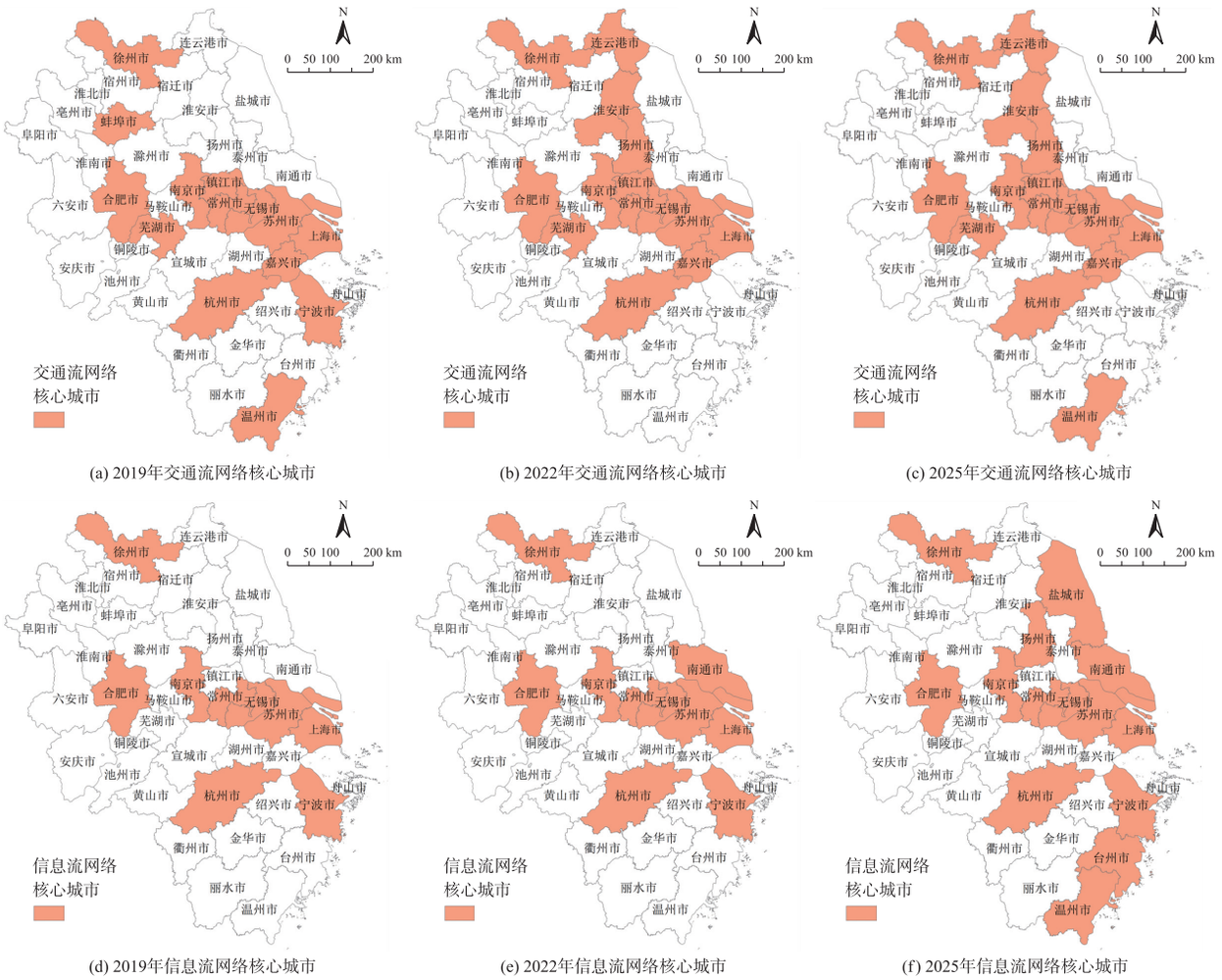


图 2　长三角地区要素流网络点度中心度

Fig. 2　Centrality of point degree of the element flow networks in the Yangtze River Delta

注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统,审图号为 GS(2023)2767 号,底图无修改.



(a) 2019年交通流网络核心城市　(b) 2022年交通流网络核心城市　(c) 2025年交通流网络核心城市

(d) 2019年信息流网络核心城市　(e) 2022年信息流网络核心城市　(f) 2025年信息流网络核心城市

图 3　长三角地区要素流网络核心城市

Fig. 3　Core cities of the element flow networks in the Yangtze River Delta

注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统,审图号为 GS(2023)2767 号,底图无修改.

实际内部关系比例分别高达 69.19%、61.64%,远超出其期望值,表明板块内部城市间通过铁路客运形成了紧密的日常联系,同时对网络其他部分产生了显著的辐射与吸纳作用. 然而,由亳州、泰州、南通、扬州组成的第三板块和由宿迁、阜阳、舟山、盐城、淮安组成的第四板块则处于网络的边缘地带. 前者实际内部关系比例为 75.00%,内部联系高度集中,后者则完全无内部联系,两者共同的特点是接收与溢出关系数量极少,与核心板块的关联微弱,不符合已有研究中划分的任意一个板块类型,可被看作网络中的“孤立者”. 这反映出该时期长三角地区交通一体化尚不完善,片区间的交通连接存在明显短板. 至 2022 年,4 个板块全部转变为“双向溢出”类型,实际内部关系比例均高于 43%,标志着各板块内部联系的巩固与板块间交互的全面激活. 2025 年,长三角地区的交通一体化格局趋于成熟与稳定,各板块在保持高度内聚性的同时,板块间的溢出路径更加多元与均衡. 同时可以发现,2019 年,板块内部关系总数远超板块之间的关系总数,而到 2025 年,板块内部关系总数下降至 225 个,板块之间的关系总数则大幅上升至 226 个,两者比值逆转为近乎 1∶1 的均衡状态. 这表明长三角地区交通流网络结构已从“板块内聚主导”转向了“板块互动主导”.

信息流网络的演进展现了从等级化辐射到扁平化交互的过程(见表 2).

2019 年,第一板块囊括了上海、南京、杭州、合肥、宁波、苏州、无锡七个中心城市,作为“双向溢出”板块,其凭借强大的经济与创新能力,向全网其他板块进行高强度、广覆盖的信息辐射. 而由江苏徐州、南通、扬州、镇江、常州等城市组成的第二板块和由浙江温州、台州、绍兴、嘉兴等城市组成的第四板块,均为“净受益”板块,处于信息接收端. 由安徽大部分城市、苏北部分城市组成的第三板块则承担起“经纪人”功能,在板块之间传递与中转信息流. 2022 年,由徐州、无锡、常州、南通等 6 市组成的第二板块成为“双向溢出”板块,第一板块

的核心辐射地位依然稳固,整体上“核心-中介-边缘”的层级框架仍然存在. 2025 年,纯粹的“净受益”板块消失,以苏浙皖三省非核心城市为主组成的第三板块和由安徽大部分城市组成的第四板块,两者共同成为“经纪人”板块,构筑起一个双重的信息传递中介. 与此同时,第一板块与第二板块均保持“双向溢出”活力. 信息流网络转变为互动关系更为复杂的扁平化多中心网络.

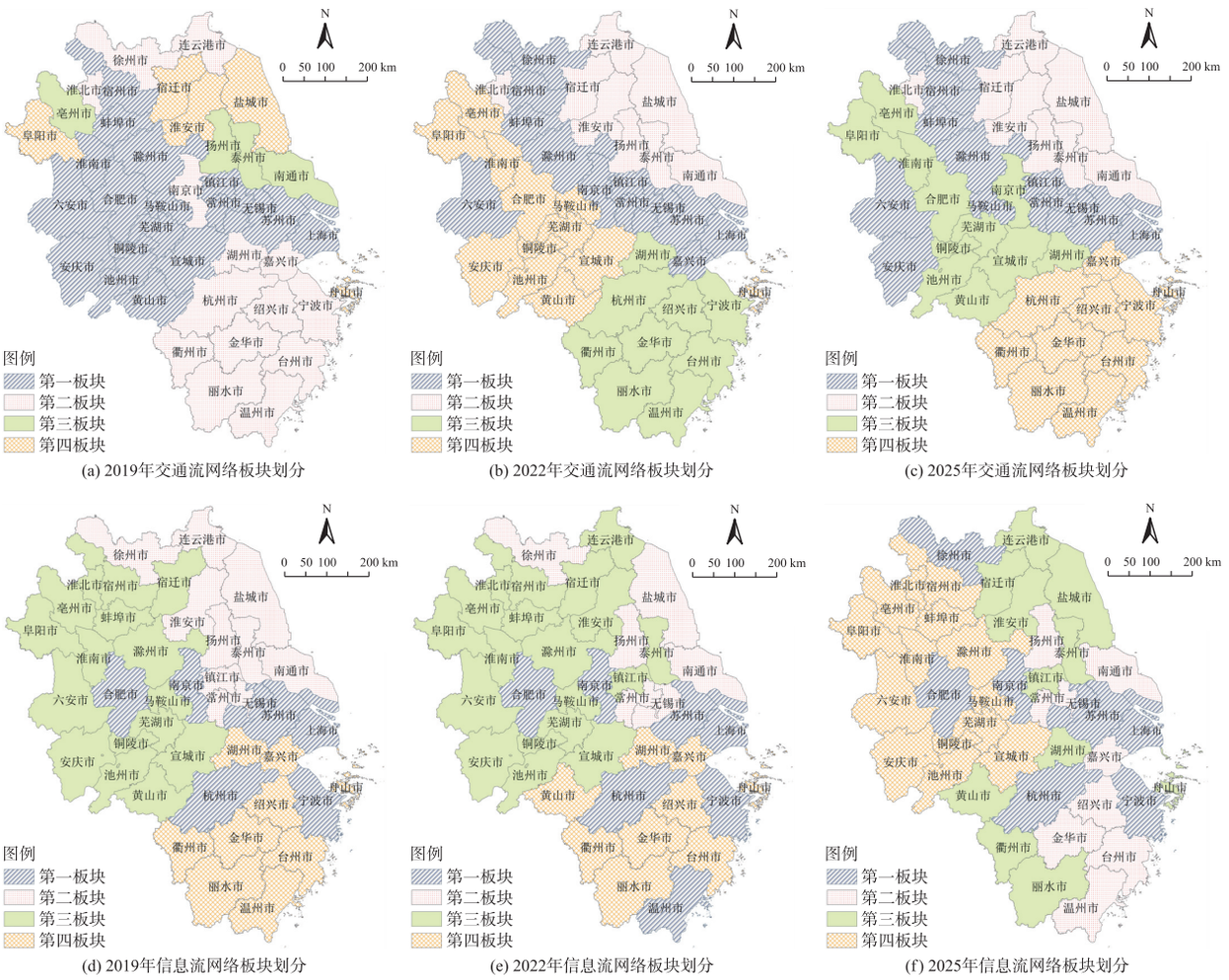


图 4　长三角地区要素流网络板块划分

Fig. 4　Block division of the element flow networks in the Yangtze River Delta

注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统,审图号为 GS(2023)2767 号,底图无修改.

表 1　交通流网络块模型分析结果

Table 1　Block model analysis results of traffic flow network

年份	板块	接收关系数/个		溢出关系数/个		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块类型
		板块内	板块间	板块内	板块间			
2019	第一板块	146	63	146	65	42.50	69.19	双向溢出
	第二板块	98	63	98	61	32.50	61.64	双向溢出
	第三板块	6	2	6	2	7.50	75.00	孤立者
	第四板块	0	4	0	4	10.00	0.00	孤立者
2022	第一板块	107	80	107	87	27.50	55.15	双向溢出
	第二板块	20	27	20	26	17.50	43.48	双向溢出
	第三板块	45	48	45	44	20.00	50.56	双向溢出
	第四板块	50	43	50	41	27.50	54.95	双向溢出
2025	第一板块	96	90	96	90	27.50	51.61	双向溢出
	第二板块	20	30	20	30	17.50	40.00	双向溢出
	第三板块	62	64	62	66	25.00	48.44	双向溢出
	第四板块	47	42	47	40	22.50	54.02	双向溢出

表 2　信息流网络块模型分析结果

Table 2　Block model analysis results of information flow network

年份	板块	接收关系数/个		溢出关系数/个		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块类型
		板块内	板块间	板块内	板块间			
2019	第一板块	42	86	42	222	15.00	15.91	双向溢出
	第二板块	54	69	54	55	20.00	49.54	净受益
	第三板块	9	115	9	19	37.50	32.14	经纪人
	第四板块	24	63	24	37	20.00	39.34	净受益
2022	第一板块	42	110	42	214	15.00	16.41	双向溢出
	第二板块	29	60	29	87	12.50	25.00	双向溢出
	第三板块	12	155	12	65	45.00	15.58	经纪人
	第四板块	24	79	24	38	20.00	38.71	净受益
2025	第一板块	56	140	56	240	17.50	18.92	双向溢出
	第二板块	43	72	43	131	17.50	24.71	双向溢出
	第三板块	16	154	16	55	25.00	22.54	经纪人
	第四板块	14	108	14	48	32.50	22.58	经纪人

3　长三角地区网络结构的影响因素分析

3.1　影响因素指标选取

流空间背景下,区域网络中的每个节点与整体网络密不可分,节点地位与区域空间联系强度存在显著关联[28]. 为探究要素流动对长三角地区空间联系网络的塑造作用,并解析各个城市在网络中地位的成因,本文对 2019—2025 年长三角地区各市交通流及信息流总量的空间异质性进行驱动因素分析. 参考相关文献,对城市间要素流的影响因素主要包含人口与经济规模[29]、产业结构[30]、经济实力与消费水平[31]等. 考虑到长三角地区作为国家科技创新与高端人才集聚中心,科技与教育水平亦是影响要素流动与城市网络地位的关键因素,因此,本文主要从城市的发展规模、发展水平、产业结构、市场活力、创新及教育能力 5 个方面选取相关的 9 个指标作为探测因子(见表 3),利用地理探测器对长三角地区各市交通流与信息流总量进行探测.

表 3　长三角地区要素流网络影响因素

Table 3　Factors influencing the element flow networks in the Yangtze River Delta

影响因素	指标	单位
发展规模	常住人口规模 X_1	万人
	地区生产总值 X_2	亿元
发展水平	城镇化率 X_3	%
	人均地区生产总值 X_4	元
产业结构	第三产业占 GDP 的比重 X_5	%
市场活力	社会消费品零售总额 X_6	亿元
	全市居民人均可支配收入 X_7	元
创新及教育能力	普通、职业本专科学生数 X_8	人
	专利授权数 X_9	件

3.2　影响因素探测分析

以长三角地区各市的交通流(信息流)总量为因变量,9 个探测因子为自变量,在 ArcGIS 软件中通过自然断点法将自变量分为 10 类. 使用地理探测器的因子探测模块测算各探测因子对要素流总量空间异质性的解释力,即 q 值. 结果见表 4. 鉴于统计年鉴发布的滞后性,本研究能够获取的最新权威数据为各市 2024 年统计年鉴中的 2023 年截面数据,因此以 2023 年的相关指标作为 2025 年网络格局的探测因子.

表 4　长三角地区要素流网络影响因子探测结果

Table 4　Detection results of factors influencing the element flow networks in the Yangtze River Delta

探测因子	q 值(2019 年)		q 值(2022 年)		q 值(2025 年)	
	交通流	信息流	交通流	信息流	交通流	信息流
常住人口规模	0.52	0.71	0.68	0.84	0.68	0.82
地区生产总值	0.72	0.88	0.64	0.93	0.81	0.93
城镇化率	0.81	0.85	0.75	0.68	0.73	0.75
人均地区生产总值	0.75	0.70	0.66	0.51	0.57	0.49
第三产业占 GDP 的比重	0.49	0.69	0.65	0.78	0.62	0.71
社会消费品零售总额	0.77	0.95	0.77	0.95	0.82	0.95
全市居民人均可支配收入	0.65	0.68	0.60	0.72	0.61	0.73
普通、职业本专科学生数	0.76	0.87	0.78	0.88	0.78	0.84
专利授权数	0.63	0.88	0.74	0.85	0.80	0.86

总的来看,地区生产总值、城镇化率和社会消费品零售总额常年保持高 q 值,表明长三角地区城市网络的形成更加依赖宏观的经济总量、人口和经济的集聚程度,经济总量的扩大直接提升要素流动的广度和强度. 普通、职业本专科学生数与专利授权数的 q 值均持续处于高位,长三角地区作为科教创新中心,其丰富的人力资本与活跃的创新能力是支撑与塑造要素流网络的重要力量. 常住人口规模对两类要素流的解释力较高,表明人口集聚通过规模效应和资源再分配显著优化要素流动效率. 人均地区生产总值、全市居民人均可支配收入对两类要素流的解释力较低,显示人均经济水平并非要素流动的核心制约因素.

在要素流异质性方面,社会消费品零售总额、地区生产总值、第三产业比重对信息流的驱动作用更强,表明消费需求、宏观经济总量、知识密集型服务业是激发城市关注度与信息交互的核心引擎. 相比之下,专利授权数对交通流的解释力呈现快速上升趋势,说明创新产出对实体要素流动的驱动力日益增强,科学技术扩散与实体网络呈现交织共进的趋势.

在时间演变方面,人均地区生产总值的解释力持续减弱,而常住人口规模的解释力稳步提升. 这表明在区域一体化持续推进的背景下,要素流动的逻辑正在由“以人均效率为导向”转向“以网络规模和节点体量为导向”,城市在区域网络中的地位更多取决于其综合承载能力和系统功能,而非单纯的个体富裕程度.

为进一步揭示不同影响因素之间的协同作用机制,采用地理探测器的交互探测模块,对 2025 年长三角地区各市交通流与信息流总量的驱动因素进行两两交互分析. 结果见表 5.

表 5　2025 年长三角地区城市要素流总量空间分异驱动因子交互探测结果

Table 5　Interactive detection results of driving factors for spatial differentiation of total urban element flows in the Yangtze River Delta in 2025

探测因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	0.68/0.82								
X_2	0.89/0.95	0.81/0.93							
X_3	0.88/0.95	0.96/1.00	0.73/0.75						
X_4	0.94/0.97	0.98/0.97	0.93/0.88	0.57/0.49					
X_5	0.87/0.95	0.98/1.00	0.84/0.89	0.99/0.99	0.62/0.71				
X_6	0.88/0.96	0.94/0.97	0.99/1.00	0.99/0.99	0.99/1.00	0.82/0.95			
X_7	0.85/0.91	0.93/0.98	0.87/0.91	0.77/0.84	0.89/0.97	0.88/0.97	0.61/0.73		
X_8	0.87/0.93	0.90/0.99	0.89/0.91	0.99/1.00	0.91/0.90	0.99/0.99	0.96/1.00	0.78/0.84	
X_9	0.88/0.96	0.88/0.95	0.89/0.92	0.96/0.90	0.93/0.92	0.94/0.99	0.92/0.99	0.90/0.92	0.80/0.86

注:“/”前后数字分别为交通流、信息流交互探测结果.

探测结果表明,所有因子对之间的交互作用均表现为双因子增强,即任意两个探测因子共同作用下的解释力均高于单一因子作用的解释力,且不存在非线性减弱或独立作用的情况. 这说明长三角地区交通流与信息流空间分异并非由单因素主导,而是多维要素在空间上协同耦合、共同塑造城市网络格局的结果.

从交互强度看,发展规模、市场活力、创新及教育能力之间的交互效应最为显著. 其中,地区生产总值与城镇化率、第三产业占比、社会消费品零售总额等因子的交互 q 值在交通流和信息流中均接近或达到 1.00,显示经济总量在与人口集聚、产业结构、消费市场相结合时,对要素流网络具有极强的放大效应. 这说明,经济规模并非孤立地影响城市联系强度,而是通过与人口承载能力、产业活动密度、市场需求共同作用,显著提升城市对要素流动的吸附与辐射能力.

进一步比较交通流与信息流发现,信息流对交互作用的响应整体强于交通流. 社会消费品零售总额与城镇化率、产业结构、专利授权数等因素的交互 q 值在信息流中多次达到 1.00,明显高于对应的交通流结果. 这表明,信息流网络更依赖于经济活动密度、消费行为与知识创新的叠加效应,具有更强的乘数放大特征.

在人口规模与创新及教育能力的交互中,两类要素流的 q 值均显著提升,说明人口集聚为知识生产与创新扩散提供了基础载体,而创新产出又反过来增强了城市间的交流频率与联系强度. 这种人口与创新之间的耦合关系,是长三角地区高强度要素流动得以持续的重要内在机制.

4　结论与讨论

4.1　结论

本文基于流空间理论,利用 GIS 空间分析法和社会网络分析方法,从市域层面探究 2019—2025 年长

三角地区在交通流与信息流作用下的空间联系网络格局,并运用地理探测器分析该地区要素流空间分异的影响因素. 主要结论如下:

(1)上海始终主导长三角地区要素流动格局. 交通流网络持续优化,但边缘城市存在联系弱化风险;信息流则更易突破地理距离约束,推动边缘城市跃升联系层级.

(2)交通流、信息流网络整体连接紧密度均处于中等偏低水平,凝聚力较低,但呈现持续上升的特征,其中信息流网络密度增速更快. 整体网络结构呈多中心、广覆盖演化特征. 交通流网络核心城市的扩展受地理区位与基础设施主导,而信息流网络依赖行政等级与经济发展.

(3)交通流网络结构由“板块内聚主导”转向“板块互动主导”,体现了“硬联通”的支撑作用;信息流网络则从等级化辐射转向扁平化交互,反映了数字赋能下城市间关注度“软协同”的深化. 二者共同推动长三角地区从地理连通迈向功能深度融合的一体化新阶段.

(4)人均经济水平对区域要素流动的影响有限,经济总量大、消费能力强且创新活跃的城市,更容易成为区域的交通枢纽与信息核心. 影响因素间呈双因子增强效应,空间分异由多维要素协同耦合塑造,其中信息流对这种叠加效应的响应更为敏感,呈现乘数放大特征.

4.2　对策建议

为促进长三角地区一体化发展和区域网络结构优化,应建立多层次的跨区域合作机制,促进核心城市与边缘城市之间要素流互动. 可以构建协同工作平台,强化各城市在交通、信息与经济合作中的联系,鼓励跨区域产业链的联动发展. 同时,制定合理的资金分配政策,支持边缘地区的基础设施发展,加速其融入主流网络,从而提升整体网络的一体化进程. 此外,依托上海和交通轴线采取“点轴开发”的模式,聚焦优势轴线,进行重点发展,通过轴线上的节点城市及其延伸的发展线带动周围城市的进步.

4.3　研究展望

受更精细数据可获性制约,本研究空间分析仅限于长三角地区 41 个地级及以上城市. 同时,本研究采用铁路客运班次、百度搜索指数分别作为交通流、信息流的代理指标,虽是学界广泛采用的共识性做法,但铁路班次主要反映轨道交通联系,未能涵盖公路、航空、水运等多模式交通流网络;百度搜索指数本质为基于搜索行为的关注度流,与涵盖商务、政务、社会交往等活动的广义信息流存在概念差异. 未来将进一步细化研究单元,挖掘更合适而细致的流要素数据,并将宏观动态因素纳入统一的定量模型进行科学检验,以期深化对要素流动机制与空间网络结构的认识.

[参考文献]

[1] Castells M. The informational city: information technology, economic restructuring, and the urban-regional process[M]. Oxford, UK: Blackwell, 1989.

[2] Taylor P J. Specification of the world city network[J]. Geographical Analysis, 2001, 33(2): 181-194.

[3] 彼得·霍尔,凯西·佩恩. 多中心大都市:来自欧洲巨型城市区域的经验[M]. 罗震东,译. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[4] Trasarti R, Olteanu-Raimond A, Nanni M, et al. Discovering urban and country dynamics from mobile phone data with spatial correlation patterns[J]. Telecommunications Policy, 2015, 39(3): 347-362.

[5] 赵梓渝,魏冶,庞瑞秋,等. 基于人口省际流动的中国城市网络转变中心性与控制力研究:兼论递归理论用于城市网络研究的条件性[J]. 地理学报,2017,72(6):1032-1048.

[6] 郭倩倩,张志斌,陈龙,等. “流空间”视角下西北地区城市关联特征与网络格局分析[J]. 经济地理,2023,43(3):88-99.

[7] 金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究[J]. 地理研究,2001,20(1):31-39.

[8] 游悠洋,杨浩然,王姣娥. “高铁流”视角下的中国城市网络层级结构演变研究[J]. 世界地理研究,2020,29(4):773-780.

[9] 赵亚博,黄柳倩,胡蝶,等. “流空间”视角下珠三角城市群综合客运网络特征及影响因素[J]. 世界地理研究,2024,33(9):163-175.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 赵金丽,张学波,任嘉敏,等. 多元流视角下黄河流域城市网络空间结构及其影响因素[J]. 地理科学,2022,42(10):1778-1787.
[13] 杨辉宇,曾达,李苗苗,等. 多元流空间视角下粤港澳大湾区城市生态位研究[J]. 地理学报,2023,78(8):1983-2000.
[14] 卢婉婷,刘艳芳,安睿,等. 多维流视角下粤港澳大湾区城市群网络结构分析[J]. 现代城市研究,2025(7):112-118.
[15] 张贵,李海鹏,张东旭. 基于多源流数据的京津冀城市群网络结构研究[J]. 经济与管理,2019,33(4):1-7.
[16] 孙芳城,张娜,胡钰苓,等. “流空间”视角下成渝地区双城经济圈城市网络结构研究[J]. 世界地理研究,2024,33(9):147-162.
[17] 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.
[18] 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.
[19] 任梦瑶,肖作鹏,王缉宪. 中国城际专线物流网络空间格局[J]. 地理学报,2020,75(4):820-832.
[20] 刘贺,李雪铭,宫一路. 长江中游城市群城市网络演化及影响因素:多元要素流视角[J]. 世界地理研究,2024,33(10):100-115.
[21] 马菁,曾刚,胡森林,等. 长三角生物医药产业创新网络结构及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(5):960-971.
[22] 李梦程,王成新,刘海猛,等. 黄河流域城市发展质量评价与空间联系网络特征[J]. 经济地理,2021,41(12):84-93.
[23] 叶珊珊,曹明明,胡胜. 关中平原城市群经济联系网络结构演变及对经济增长影响研究[J]. 干旱区地理,2022,45(1):277-286.
[24] 王小华,杨玉琪,罗新雨,等. 中国经济高质量发展的空间关联网络及其作用机制[J]. 地理学报,2022,77(8):1920-1936.
[25] 刘耀彬,王梓畅,骆康,等. 生态安全约束下环鄱阳湖城市群产业投资空间关联网络与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2025,34(8):1677-1692.
[26] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
[27] 李江敏,赵青青,陈静. 长江经济带非物质文化遗产空间分布特征与影响因素[J]. 经济地理,2020,40(12):191-198.
[28] 冯兴华,修春亮,白立敏,等. 基于公路交通流视角的吉林省城镇中心性及影响因素[J]. 经济地理,2019,39(1):64-72.
[29] 何胜,唐承丽,周国华. 长江中游城市群空间相互作用研究[J]. 经济地理,2014,34(4):46-53.
[30] 林赛南,邓慧琳,彭馨雨,等. 流空间视角下武汉都市圈城市空间联系格局及影响因素[J]. 经济地理,2024,44(2):81-89.
[31] 赵芮,丁志伟. 基于流空间视角的中原城市群物流网络结构及其影响因素分析[J]. 地域研究与开发,2022,41(4):71-77.

[责任编辑:丁　蓉]