
站-城视角下

长三角高铁网络“流”空间结构特征研究

韦胜 王磊 袁锦富

江苏省规划设计集团有限公司 江苏省规划建设数字化工程研究中心

中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室

摘要：站-城关系是我国高铁网络快速发展中的一个关键空间治理问题，而当前高铁网络“流”空间研究中针对站-城关系特征的研究相对较少。为此，基于城市和高铁站点两个尺度空间分析单元，利用复杂网络理论与方法，分析了长三角高铁网络发展的“流”空间特征。研究结果表明：(1)从城市尺度来看，上海市、南京市、杭州市以及合肥市在高铁网络中处于核心地位。长三角地区被划为4个子网络，反映了高铁网络联系的不同地区紧密性特征。(2)从站-城关系的分析视角来看，一个城市中多站点特征总体可归纳总结为4种类型，并且多数城市一般只有一个高铁站点处于核心地位，且核心站点的类型存在较大差异。因此，本研究建议高铁站点地区发展应从统筹城市网络和站-城关系两个视角进行综合考虑。结论对于高铁网络“流”空间的多尺度和跨尺度空间特征分析具有一定的参考价值。

关键词：高速铁路；“流”空间；站点布局；长三角；复杂网络

作者简介：韦胜（1986~），男，正高级城乡规划师，主要研究方向为城市定量模型。E-mail:gis_wsh@126.com；*袁锦富，E-mail:yuanjif@jspdgc.com

收稿日期：2022-12-09

基金：江苏省自然科学基金(BK20191486, BK20211371)；中国博士后科学基金(2022M710669)

作为一种快速交通出行方式，高铁网络对于区域一体化发展具有重要的支撑作用。高铁网络发展导致了时空压缩效应，促进了城市之间快速交通连接水平的提升，同时也对区域的空间结构、经济发展、旅游联系、通勤关系等方面产生了积极影响[1, 2, 3]。在长三角地区，罗震东等[4]通过高铁客流动态关系数据再现了高铁网络的时空压缩效应；Xiao等[5]证明了中国高铁网络对于城际技术转移产生了积极影响。此外，高铁网络还推动了中国旅游的大众化、生活化和全域化发展[6]。另一方面，高铁网络的不断延伸和密集，也为城市内部带来了新的发展机遇。多个高铁站点的分布增强了城市内部的交通便利性和可达性，促进了城市内部的空间重组和功能优化，提升了城市的综合竞争力和吸引力[7]。例如，李传成等[8]通过国内外案例分析，指出应充分发挥铁路站点的优势，依托城市中多站点的布局推动城市空间结构优化。从研究方法上看，目前已有研究成果主要以城市或高铁站点为基本空间分析单元，采用高铁班次数据、实际客流以及调查问卷等数据[9, 10, 11]，通过复杂网络等分析方法刻画高铁“流”空间的特征[12]。然而，鲜有成果集成站-城两个分析视角来综合解析高铁“流”空间特征的差异，这也是本研究试图从单个城市的多站点布局问题入手进行分析的原因之一。因此，本研究旨在通过城市的多站点布局问题分析，归纳总

结出高铁网络在某一区域内的总体发展特征，并为区域和城市的高铁网络研究提供支撑依据。同时，结合城市和高铁站点的不同尺度分析视角，进一步分析不同高铁站点在“流”空间中地位、职能分工等特征[13]。

在理论上，“流”空间理论将研究对象抽象为网络节点及其之间的关系。通过使用图论等方法，描绘出这些网络节点的空间结构特征[14]。在高铁网络地理空间中，这些网络节点通常被定义为城市或者高铁站点。当城市被定义为网络节点时，“流”空间可以用于挖掘和描绘城市之间的高铁客流关系；当高铁站点被定义为网络节点时，可以观察站点之间的“流”关系。因此，不同的网络节点定义决定了“流”空间特征表现状态，并在不同空间尺度上产生不同的表象特征[15, 16]。然而，在理论上仍较少关注不同网络节点之间的空间单元关系，以及其对于“流”空间特征的影响。从一定程度上来看，不同空间分析单元考虑到了不同的空间研究尺度问题，综合多个空间分析单元的视角进一步探索高铁在不同空间尺度上影响的差异[2, 17]。例如，一个城市可能包含多个高铁站点，因此高铁网络对于一个城市所产生的区域内高铁“流”空间影响通常并不等同于每个高铁站点所受到的影响效应。其原因是城市中不同高铁点的发展定位受到其所在地域环境、城市中区位、交通接驳等诸多条件的综合影响[18]。

因此，本研究以长三角地区为例，旨在通过分析高铁网络的“流”空间特征，揭示城市中高铁多站点布局的特点和问题，为区域和城市的规划决策提供参考依据。特别是，在内部经济发展不均衡和高铁网络扩展的背景下，本研究试图聚焦于分析城市中高铁多站点的布局与整体发展的关系，并探究规划、当地政策等因素对于高铁网络与城市空间发展的影响。本研究的成果不仅有助于深入理解长三角地区高铁网络的时空特征和站城发展规律，也可以为其他地区高铁网络建设提供参考借鉴。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象与数据集

经过十多年的快速建设，长三角地区已形成多条各具特色功能、分布广泛的高铁线路。然而，由于内部经济发展的不均衡性和分工差异[19]，长三角地区不仅包含了我国经济发达地区的高铁网络发展样板，还包括了一些经济欠发达区域的高铁站点布局模式。同时，在这一区域内的诸多城市也已经形成了高铁多站点的布局模式。在本研究中，长三角地区具体包含了上海、江苏、浙江以及安徽的全部行政区域。使用 12306 数据统计分析，本研究将班次名称开头为 G、D、C 的列车作为高铁班次，并采集了 2021 年 7 月 6 日的数据。本研究将分析单元分为两类：以市县为基本分析单元和以高铁站点为基本分析单元。其中，以市县为基本单元时，是以县级行政区或市辖区为基本单元。这是因为当前的县级行政单元相对较为独立，而市辖区之间一般具有较高的一体化发展特性。因此，这里的行政单元是指地级市的全部市辖区范围或县(市)级行政管辖范围。为方便说明，本文中某地级市市辖区也简称为该城市的名称。

基于城市和高铁站点两种基本分析单元，本研究进一步确定了高铁复杂网络的建立规则：以空间分析单元为复杂网络的节点，以网络节点之间的直达高铁班次次数作为网络连接边的权重。最终得到两种类型的高铁网络分析模型，据此可以进一步计算复杂网络指标值。其中，空间分析单元是市县行政区划时，共有 134 个网络节点，7 102 条网络连接边，所得网络模型记为“城市高铁网络模型”。空间分析单元是高铁站点时，共有 211 个网络节点，11 675 条网络连接边，所得网络模型记为“站点高铁网络模型”。

1.2 研究方法

1.2.1 加权重中心性

网络节点在整个网络中的度中心性(Degree)是指与某一网络节点直接联系的节点数量[20]。具体计算公式如式 1 所示：

$$D_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n L_{ij} \quad (1)$$

式中： L_{ij} 是节点 i 和 j 之间边数； n 为节点总数。

加权度中心性(简称“WDC”)则是指考虑了网络节点之间连接权重后的度中心性。因为加权度中心性考虑网络中节点与节点之间的连接权重，故该指标能反映出每个网络节点在网络中的等级地位。计算公式如式 2 所示。

$$WDC_i = \sum_{j \in N_i} W_{ij} \quad (2)$$

式中： N_i 是节点 i 相关联节点的集合； W_{ij} 是节点 i 和 j 之间的连接边权重值。

1.2.2 中介中心性

中介中心性(简称“BC”)是以经过某个网络节点的最短路径数目来反映网络节点的重要性，可表达节点在网络中作为枢纽地位[21]，其计算公式如式 3 所示。

$$Be_i = \sum_{s, t \in V; s, t \neq i} \frac{\sigma(s, t|i)}{\sigma(s, t)} \quad (3)$$

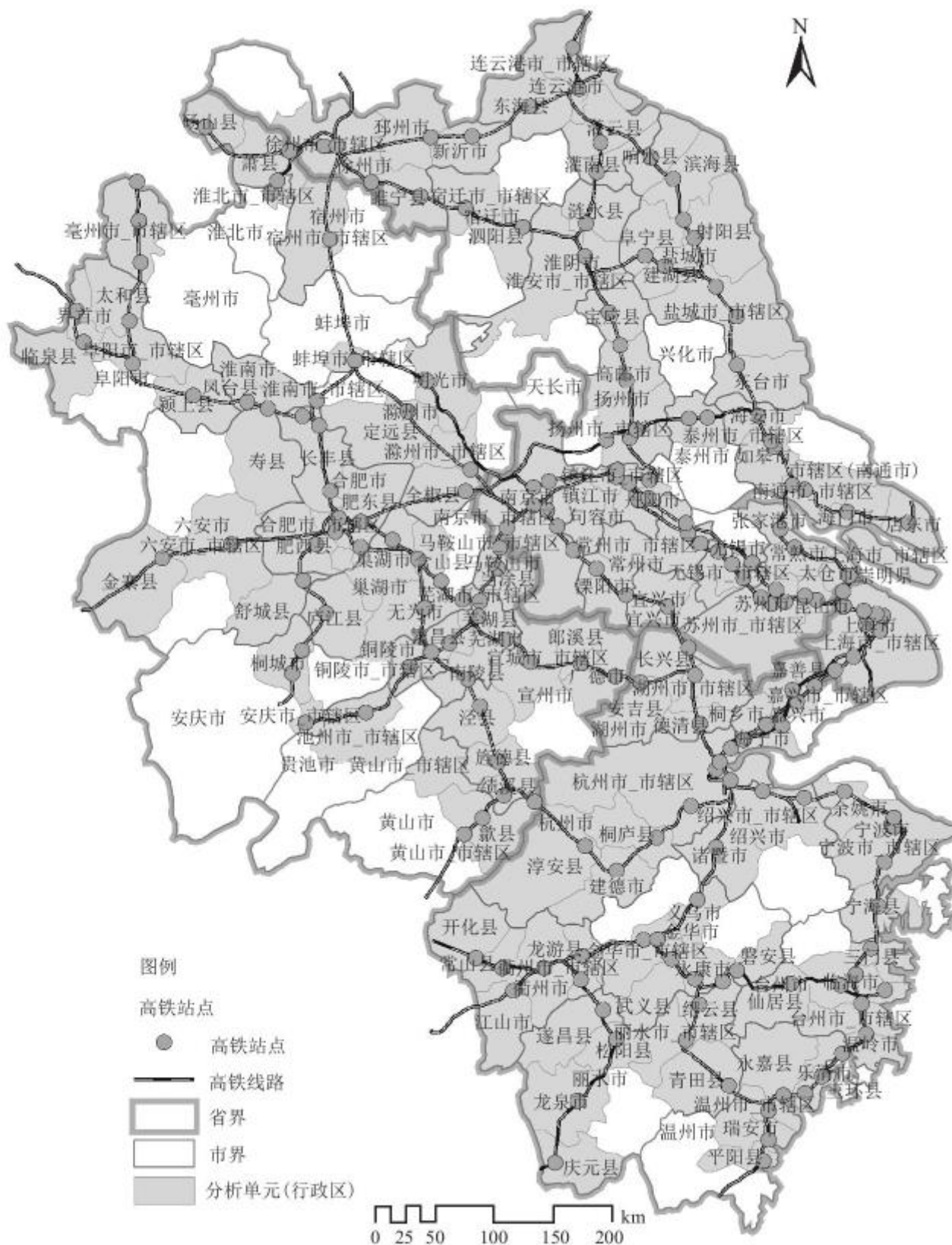


图1 研究区示意图

式中：s 和 t 构成一条边 V 中的节点对； $\sigma(s, t)$ 表示节点 s 和节点 t 之间最短路径数目； $\sigma(s, t|i)$ 表示节点 s 到节点 t 的最短路径中经过节点 i 的数量。

1.2.3 社区检测

社区检测是用来进行复杂网络聚集特征，实际上也是一种数据聚类方法。计算结果中的“社区”可理解为一类具有某种相同特性的节点集合，且通常是基于网络节点之间联系特征[22]。通常，社区检测结果的合理性是基于模块度指标来判断。当模块度的值为 0.3~0.7 时，则一般认为结果相对较好[23]。模块度计算公式如式 4 所示。

$$Q = \sum_k \sum_{ij \in c} (\text{real flow}_{ijk} - \text{est flow}_{ijk}) \quad (4)$$

式中：k 是所划分的社区数； real flow_{ijk} 给出同一社区 C 内节点 i 和 j 之间交互作用的联系值； est flow_{ijk} 表示随机网络状态下的期望值。模块值 $Q = 0$ 表示划分结果最差， $Q = 1$ 则表示划分结果最优。

1.2.4 多站点构成特征的分析思路

本部分的重点在于分析一个城市中多个高铁站点之间指标差异的特征类型，并且使用加权重中心性和中介中心性这两个指标来揭示不同规模或类型城市中多站点构成特征差异。研究步骤如下：首先将研究区域内所有高铁站点的加权重中心性和中介中心性指标值归一化到 [0, 1] 区间，再将每个城市内归一化后的指标值进行散点图对比，以总结出城市中多站点构成的特征类型。通过此分析，研究人员可以得出不同城市多个高铁站点的构成特征，从而为城市规划和管理提供有价值的参考。

2 结果

2.1 长三角高铁城市网络结构分析

利用研究中所构建的城市高铁网络模型揭示出了长三角地区高铁网络结构特征。如图 2 所示，从加权重中心性指标计算结果来看，上海市、南京市、杭州市的值最高。其次是苏州市、合肥市、无锡市、常州市、宁波市以及温州市等地级市。再其次是镇江市、徐州市这两个地级市以及昆山县级市等。进一步从空间分布上看，除了直辖市和省会城市外，长三角地区沪宁沿线的加权重中心性值也较高，形成了连绵的高铁网络发达区域。该空间分布结果说明城市的加权重中心性指标值与城市的行政地位、经济发展水平等密切相关。因此，城市高铁效应的研究也应基于不同城市的特点进行差异化对待。

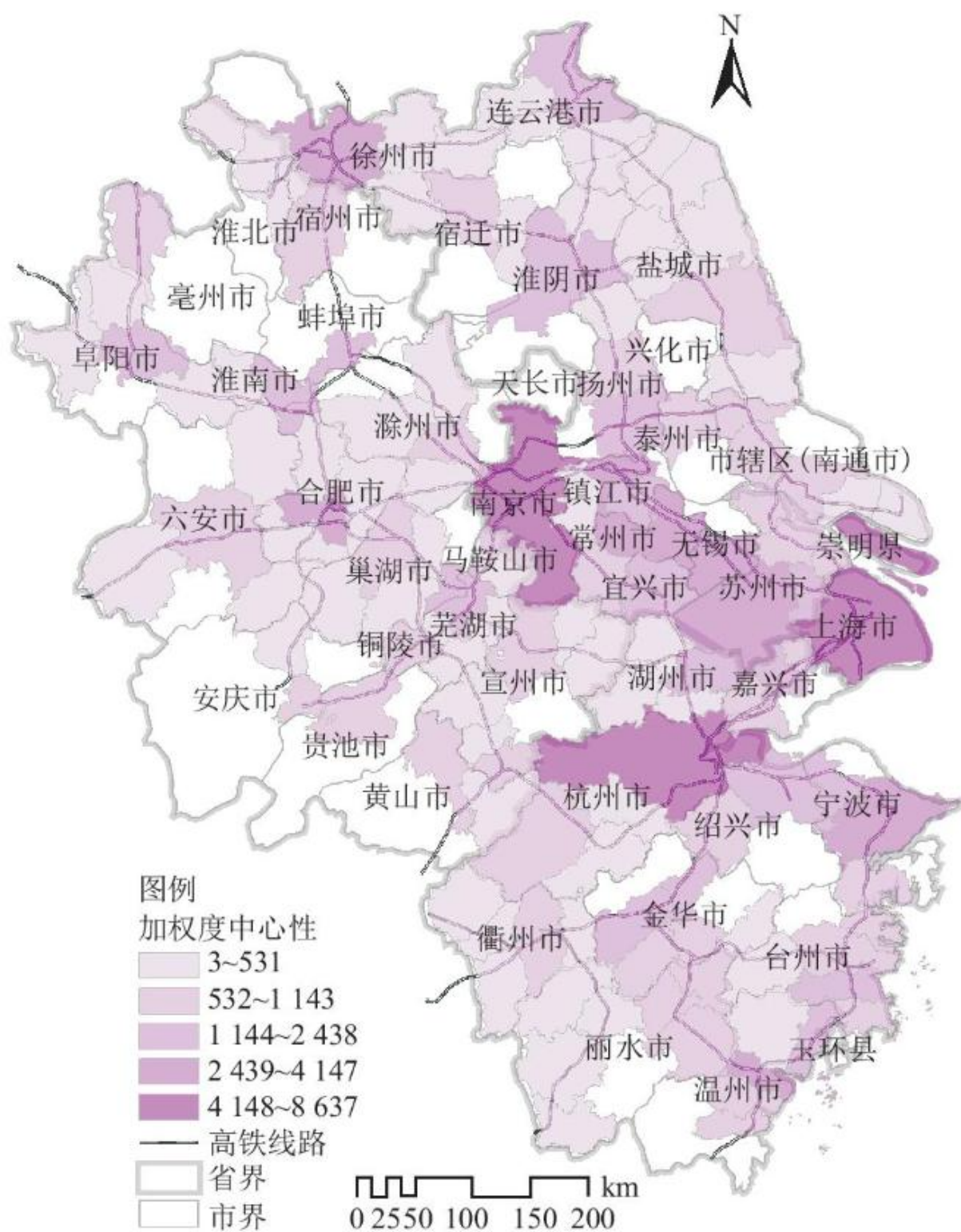


图2 长三角城市高铁网络加权重中心性的分布

如图3所示,中介中心性值计算结果表现为上海市和杭州市的排名最高,其次是南京市和合肥市,再次是嘉兴市、徐州、常州市、苏州市、台州市、无锡市、金华市等地级市以及昆山县县级市等城市。以上分析结果表明,国家中心城市或者省会等城

市在长三角和区域高铁网络中具有主导控制地位。一方面，上海、杭州、南京是长三角一体化的核心城市，其高铁交通枢纽地位十分重要。特别是杭州市在当前长三角高铁网络中扮演着越来越重要的角色，其原因主要有：杭州市在本省的高铁枢纽地位显得十分突出，本省其他城市基本都需要通过杭州市实现与上海、江苏、安徽等重要城市的高铁联系。另一方面，其他省会城市、一些经济发展较好以及地区性核心城市也会在长三角高铁网络中形成较高的枢纽地位，增强了这些城市的辐射带动作用。

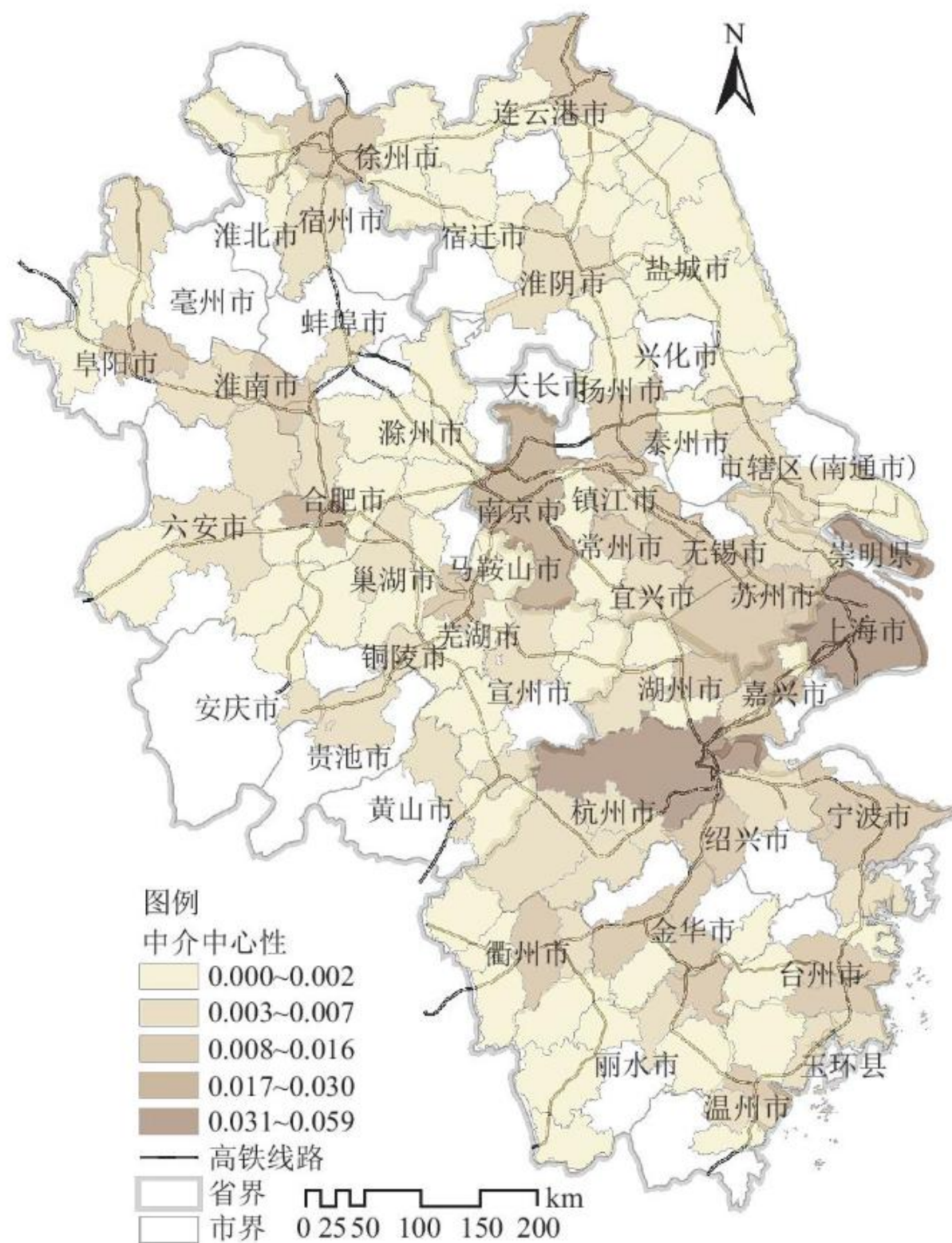


图 3 长三角城市高铁网络中介中心性的分布

城市高铁网络模型的社区检测结果为 0.313, 表明了社区划分结果较好。如图 4 所示, 计算结果共包括了 4 个社区, 并具有以下空间分布特征: (1) 根据社区 1 的空间覆盖范围, 可发现安徽省自身形成了“西北-东南”方向的高铁联系网络。(2) 社区 2 的空间覆盖结果表明了浙江省内基本上形成了内部联系紧密的高铁网络, 并对江苏省内宁杭线上城市产生一定的辐射力; (3) 社区 3 的结果表明江苏沿海地区已初步形成了相对独立的高铁子网络, 其仍然需要与长三角高铁整体网络之间形成更加紧密的班次连接关系。例如, 当前南京至盐城的直达高铁班次需要在线路的中间城市淮安调转列车运行方向才能到达; (4) 社区 4 则是以京沪、连淮扬镇为依托, 在上海、江苏之间形成了较为紧密的子网络, 并对安徽滁州、蚌埠、淮北、宿州、六安等城市产生较强的跨省辐射作用。(5) 社区 1 的核心城市为合肥, 社区 2 的核心城市为杭州, 社区 4 的核心城市为上海和南京, 而社区 3 则是江苏沿海地区的局部高铁子网络, 无明显的核心城市。

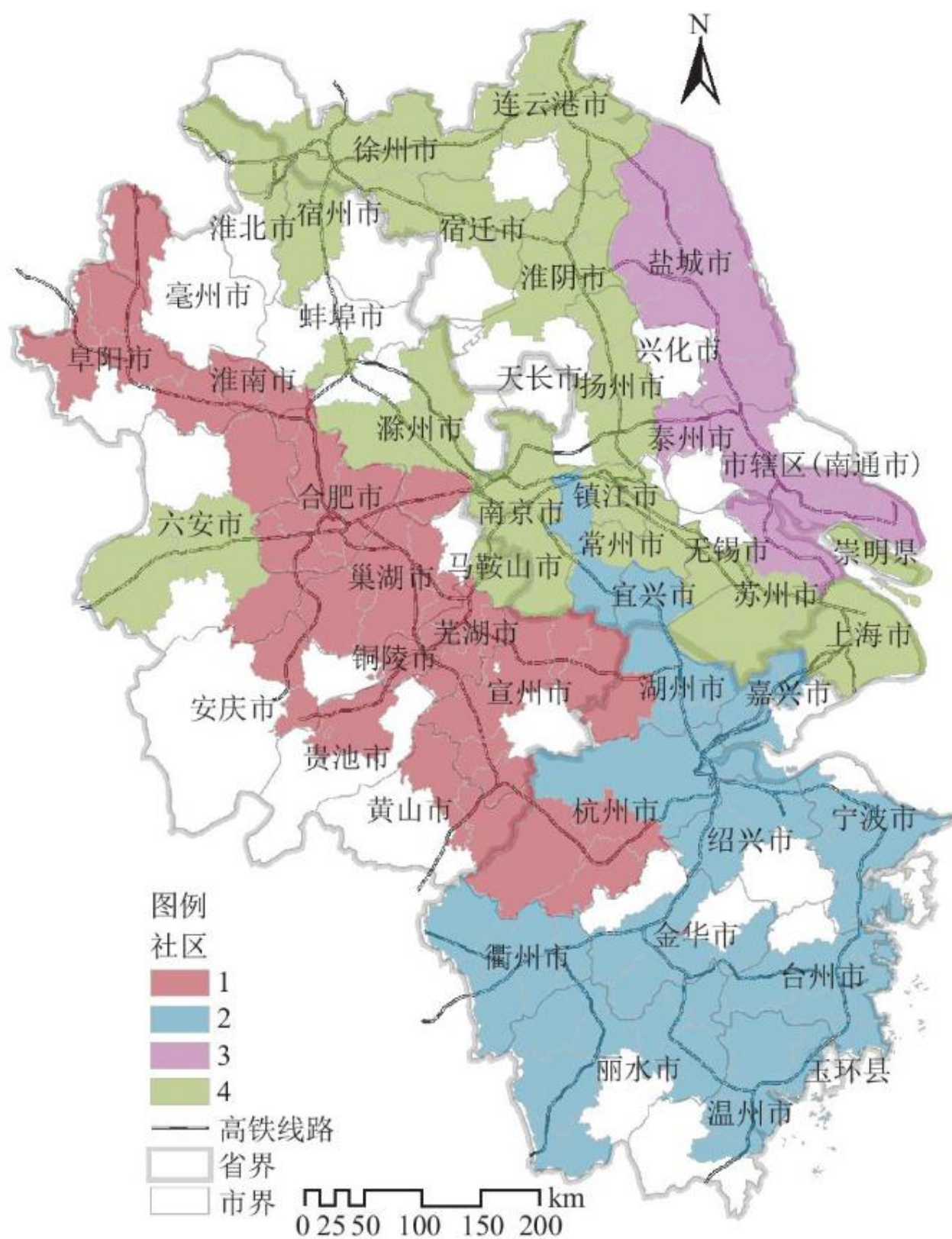


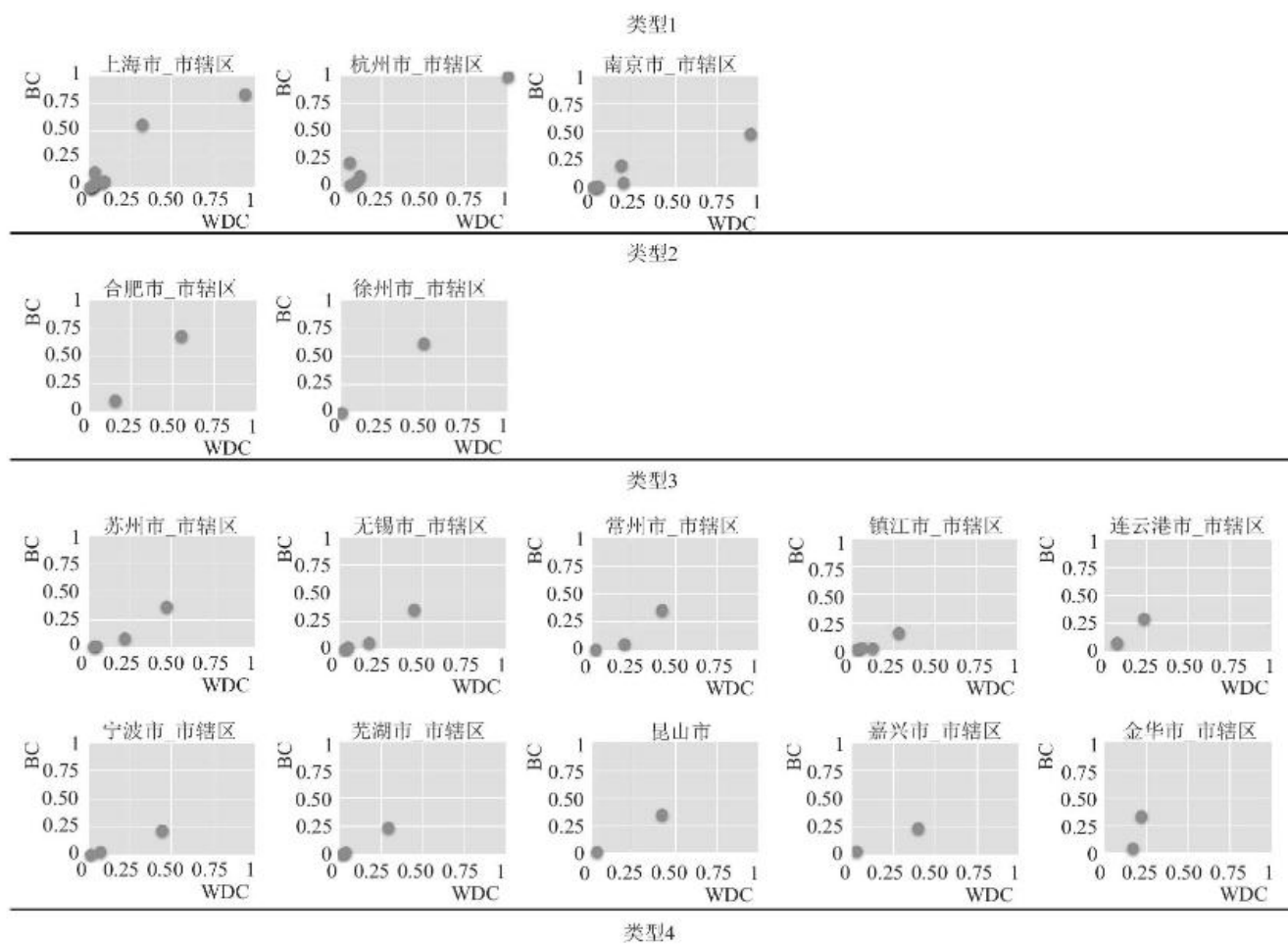
图 4 长三角城市高铁网络社区结构

2.2 长三角高铁站点网络结构分析

利用研究中所建立的站点高铁网络模型,分析不同等级规模和类型城市中多站点的构成特征,具体结果如图5所示。其中,类型1主要涉及研究区域内3个超大城市,即上海、杭州以及南京市。这一类型表现为一个研究区中核心城市中布局有多个高铁站点,但只有一个高铁站点在两个维度的评估指标值上均较高,其中在加权度中心性指标值上接近于1.0。这类别的典型特征还表现为城市中存在一个高铁站点在整个研究区高铁网络中都具有极强地位。类型2的典型特点是高铁站点之间是“一主一副”关系,主要包括合肥市和徐州市2个研究单元。合肥是安徽省省会,而徐州是中国重要的交通枢纽城市,因此这两个城市在高铁网络中地位较高。尽管这两个城市中布局了两个高铁站点,但也主要表现为只有一个高铁站点在两个维度的评估指标值上均较高。与类型1相比,城市中核心站点在指标值上有所下降,处于0.5~0.75范围之内。类型3主要包括长三角地区中9个重要的地级市市辖区和1个全国百强县昆山市,共10个研究单元。总体而言,城市中一个高铁站点在两个维度的评估指标值上明显领先于其他站点,处于0.25~0.5范围之内。类型4主要包括10个地级市市辖区和17个县级单元,共27个研究单元。所有研究单元内的两个评价指标均小于0.25。部分城市中指标值具有一定的差距,即一个高铁站点处于城市中较为主导的地位。另外,一些城市中两个高铁站点在指标值上差距较小,即不同高铁站点在一个城市中处于同等地位,但功能分工上可能存在较大差异。例如,丹阳市中两个高铁站点丹阳站和丹阳北站,分别位于沪宁城际和京沪高铁线路上,在区域中承担着不同的高铁客运功能。

2.3 长三角站-城关系类型特征分析

城市和站点视角下的分析,反映了长三角区域不同尺度下的高铁网络结构特征,而将两个视角结合则可以更加综合地分析高铁网络“流空间”结构中站-城之间的匹配性发展状况。具体来说,首先类型1中城市是城市高铁网络模型中最为核心的城市,也是图4中高铁网络社区的核心站点。虽然这类城市中布局了多个高铁站点,但目前也仅有一个高铁站点处于非常核心的地位,其他高铁站点则处于城市副站点或者城市局部服务性站点的地位。进一步分析发现,这类城市核心站点主要是新建高铁站。其次,类型2中城市属于城市网络模型中2个重要的高铁枢纽性城市,并具有较高的班次连接数。与类型1类似,城市中核心高铁站点也是新建类站点。再次,类型3中城市主要涉及沪宁沿线的城市以及地区性核心城市。从站-城关系来看,单核站点主导的特征在当前仍然非常明显,不过较多城市中核心站点是由城市中普速铁路站点升级改造而成。来自不同方向上的高铁线路若再要连接到城市中心,则在拆迁量和切割城市发展格局等方面都会产生较大的成本。这意味着这类核心站点在城市中区位往往是离城市中心较近,未来连接新高铁线路的难度反而较大。最后,类型4中城市是长三角地区中其他具有多个高铁站点布局的城市,在城市高铁网络模型中的地位相对较低,枢纽地位也不显著。对于这类城市中高铁站点而言,由于自身在高铁城市网络中的地位相对较低,对待城市中任何一个高铁站点地区都应当注重开发强度的合理控制。



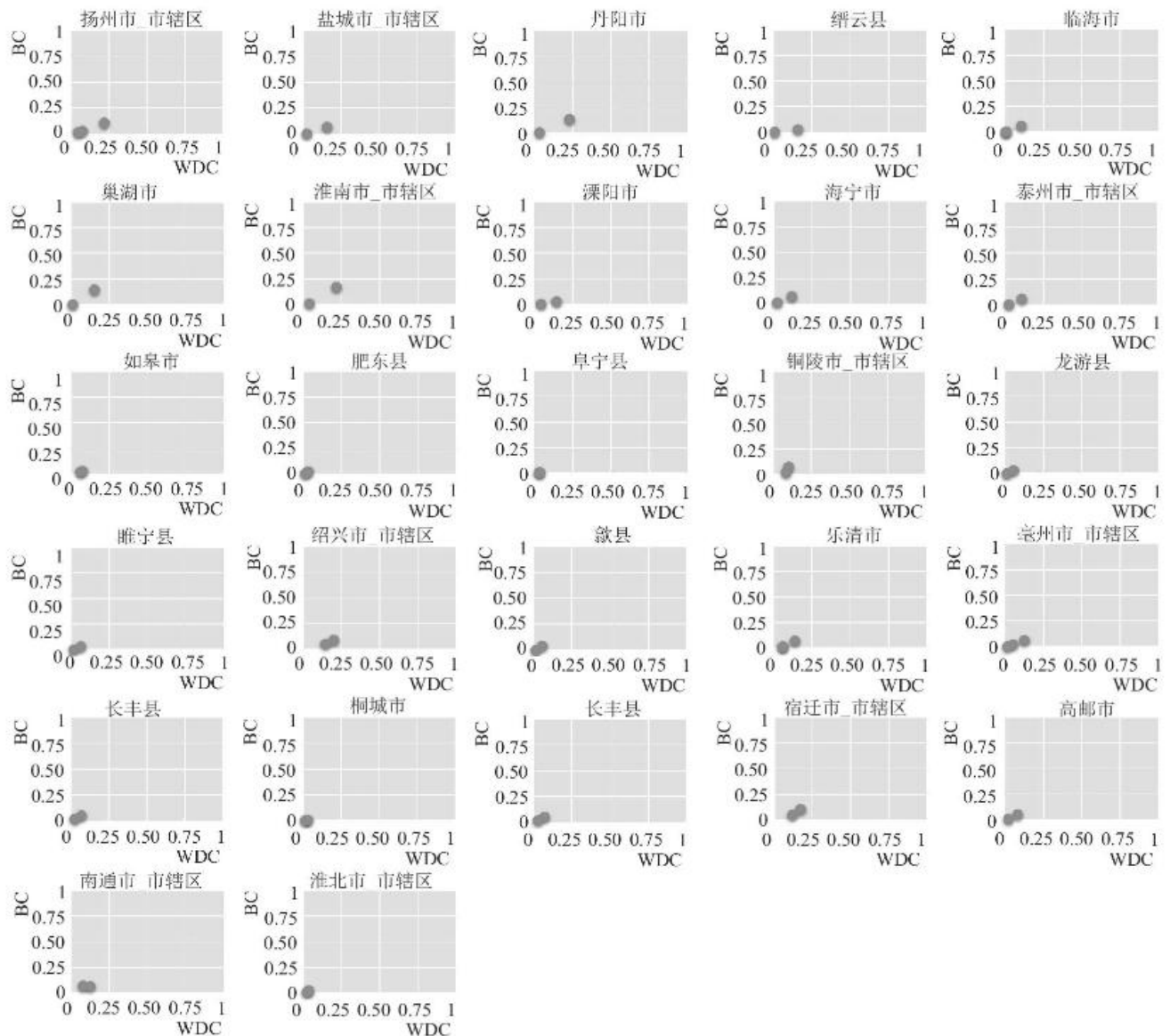


图5 多站点构成特征的分类结果示意图

3 结论与讨论

(1)长三角高铁的城市网络结构特征表现为以围绕主要中心城市紧密联系的分区特征。该地区高铁网络覆盖范围广，其基本空间结构特征与其社会经济发展特征基本保持一致，核心城市在整个高铁网络中扮演着重要角色。通过社区检测方法，将该网络结构划分为4个子社区网络，这些子社区网络的空间分布特征基本与行政区之间的空间邻近性一致。此外，省级行政单元内部的联系相对紧密，但一个社区中也存在跨多个省级行政单元的现象，社区检测结果可为区域交通一体化发展规划提供参考依据。例如，江苏省主要由2社区所构成，而这两个社区之间未来可进一步加强高铁联系水平。除江苏沿海地区的高铁子网络外，每个社区均有1至2个核心城市。其中，上海和南京在一个社区网络中，体现出了二者之间的紧密联系水平。围绕主要中心城市紧密联系的分区特征反映了长三角高铁网络空间总体特征，说明了在长三角区域一体化发展中应特别关注高铁效应中主要城市的作用和地位。因此，对于中小城市而言，不能过分夸大高铁带来的直接效应。然而，城市层级的网络节点异质性并非就完全决定了城市中各个高铁站点的发展态势，还应进一步从站-城关系视角去剖析。

(2)城市中多站点构成特征反映了长三角高铁网络站-城关系下“流空间”网络结构的匹配性,其重点表现形式为城市的核心站点与其他站点的关系,并具有四种类型。第1种类型包括上海、杭州和南京三个城市,体现出长三角核心城市的高铁站点布局特征,即城市不仅布局有一个区域内重要的核心站点,还布局了多个高铁站点。第2种类型包含了2个区域性城市,徐州市和合肥市。城市的核心高铁站点不仅具有较高数量的班次连接水平,并且具有较高的地区性高铁枢纽地位。第3种类型则由区域内9个重要城市和全国百强县昆山市组成,同样表现为一个城市中只有一个核心高铁站点。这三种类型主要由规模较大和经济发展水平较高的城市组成,突出地表现为一个城市存在一个核心高铁站点。其中,前两种类型中核心高铁站点主要是新建类高铁站点,而第三种类型中核心站点主要是沪宁沿线通过改造后的普通铁路站点转化而来的。这在一定程度上说明了长三角地区中主要城市依托新建高铁站而在高铁网络中发挥中重要作用,但沪宁线上一些主要城市的核心站点则主要是通过改造后普通铁路站点转化而来。第4种类型中高铁站点的等级相对较低,城市中站点等级既有存在一定差距的案例,也有差距较小的案例,但站点之间功能定位往往存在着显著差异性。同时,不同能级城市都遇到了一个发展问题:除核心高铁站点外,其他高铁站点的地位和发展水平不一定就高,甚至是处于一个较低的水平。综合来看,应谨慎规划各个层面城市中高铁站点地区的开发强度,要从站点在区域和城市两个空间尺度上去科学合理判断站点的发展机遇。

本研究中城市中多个高铁站点的布局特征与中国高铁网络的演化、高铁网络空间结构、城市与高铁网络发展阶段之间错位、站点建设方式、城市规模和空间结构等因素相关。首先,长三角高铁网络正处于快速动态发展阶段,面向着不同方向的连接需求,因此高铁站点需要考虑不同的城市空间区位布局。其次,一些高铁站点是在原有普通铁路线路站点基础上改造而成,而另一些则是新建的。由于很多城市的建设发展阶段与高铁网络建设阶段不同步,即城市在发展到一定规模之后才有了高铁网络建设,使得新建的高铁线路不容易再连接升级改造类的高铁站点,形成了不少城市既有新建类的高铁站点也有升级改造类的站点。最后,城市规模、城市自身空间结构和行政区划等因素决定了城市中多站点布局模式和发展特点,并且城市中每个站点的发展机遇差异较大。例如,上海、南京、合肥等规模较大的城市的核心高铁站点是基于新建的高铁站点,有利于城市空间骨架合理扩展,并支撑了城市的高铁枢纽地位发展。苏州、无锡等城市由于多条高铁线路通过,也有多个高铁站点布局,但由于原有普通铁路升级改造后的站点离主要客流场所较近,且大部分客流仍然是城际出行,因此城市中大部分客流主要是通过升级改造后的站点出行。相对而言,在沪宁沿线的城市中,如苏州、无锡等地,存在着一些新建高铁站点的发展没有达到规划预期效果。这些站点受到了在城市中位置较为偏远或其他因素的影响,客流量相对较少,甚至有些被迫关闭。其中,昆山的花桥站就是一个例子。

(3)从理论上,本研究采用不同空间分析单元视角有助于揭示出“流”空间的多尺度特征。在相对较大的空间尺度上,高铁网络“流”对于区域内部联系产生了重要影响,其所得计算结果往往反映出区域总体结构特征,可能会掩盖较小尺度空间上的“流”空间特征规律。在相对较小的空间尺度上,“流”空间节点之间更细微的差异则表现得更为明显。对于原本在相对更大尺度空间上作为一个网络节点的多个网络节点而言,人们会更容易发现当它们作为一个整体时所不易表现出的特点。这对于高铁网络效应中站-城关系而言,在理论上应进一步重视多尺度与跨尺度视角的分析。

(4)本研究进一步提出以下政策建议:首先,城市应根据在高铁网络中不同的等级和职能分工,进行城市高铁战略规划研究。其次,长三角高铁网络的局部联系紧密性关系可以为区域规划研究提供支撑。再次,对于多数城市而言,目前城市中核心站点一般只有一个,因此需要对城市中不同站点地区进行差异化开发。最后,单个城市中核心站点的类型也存在一定差异性,需要进一步强化其在未来发展中站点周边地区发展潜力和机遇的分析。

本研究还需要在以下4个方面做进一步的改进。首先,高铁班次数据难以非常准确地反映出城市或站点的实际客流量,因此未来可以考虑采用实际客流数据来进行分析。其次,在城市视角下的多站点构成特征的分析中,可以结合站点周边地区的发展评估来开展。再次,需要借助移动位置大数据做深入剖析一个城市中各个站点上的乘客在城市中的流动特征差异。最后,还需要从演化发展的视角发现长三角地区高铁网络的结构特征和发展规律。

参考文献

-
- [1] 朱新华, 钟苏娟. “流空间”视角下高铁对城市土地利用的影响——基于 DPSIR-PLS 模型分析[J]. 资源科学, 2019, 41(12):2262-2273. ZHU X H, ZHONG S J. Effects of high-speed rail on urban land use from the perspective of “space of flows”:An analysis based on DPSIR-PLS model[J]. Resources Science, 2019, 41(12):2262-2273.
- [2] XU J, ZHANG M, ZHANG X, et al. How does City-cluster high-speed rail facilitate regional integration? Evidence from the Shanghai-Nanjing corridor[J]. Cities, 2019, 85:83-97.
- [3] WANG S, WANG J, LIU X. How do urban spatial structures evolution in the high-speed rail era? Case study of Yangtze River Delta, China[J]. Habitat International, 2019, 93:102051.
- [4] 罗震东, 朱查松, 薛雯雯. 基于高铁客流的长江三角洲空间结构再审视[J]. 上海城市规划, 2015(4):74-80. LUO Z D, ZHU Z S, XUE W W. The analysis on spatial structure of Yangtze River Delta based on passenger flow of High-Speed Railway[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2015(4):74-80.
- [5] XIAO F, WANG J, DU D. High-speed rail heading for innovation: The impact of HSR on intercity technology transfer[J]. Area Development and Policy, 2022, 7(3):293-311.
- [6] 胡蓓蓓, 徐爱荣, 高姗. 区域旅游承载力与高铁网络的耦合机制与协同策略[J]. 旅游学刊, 2021, 36(12):8-10. HU B B, XU A R, GAO S. Coupling mechanism and collaborative strategy of regional tourism carrying capacity and high-speed railway network[J]. Tourism Tribune, 2021, 36(12):8-10.
- [7] 韦胜, 徐海贤. 高铁“一城多站”的特征、问题与优化——以沪宁沿线城市为例[J]. 现代城市研究, 2019, 34(9):112-117. WEI S, XU H X. The characteristics, problems and optimization of “one city with multi-stations” in Chinese high speed rail network: Taking cities along the Shanghai-nanjing HSR line as examples[J]. Modern Urban Research, 2019, 34(9):112-117.
- [8] 李传成, 孟雷雷, 张婷. 铁路多站点对城市空间结构影响的比较研究[J]. 国际城市规划, 2018, 33(6):36-42, 87. LI C C, MENG L L, ZHANG T. Study on the influence of multi railway stations on urban spatial structure[J]. Urban Planning International, 2018, 33(6):36-42, 87.
- [9] WEI S, WANG L. Examining the population flow network in China and its implications for epidemic control based on Baidu migration data[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2020, 7:145.
- [10] 武前波, 陶娇娇, 吴康, 等. 长江三角洲高铁日常通勤行为特征研究——以沪杭、宁杭、杭甬线为例[J]. 城市规划, 2018, 42(8):90-97, 122. WU Q B, TAO J J, WU K, et al. Daily commuting behavior characteristics of high speed rail passengers in the Yangtze River Delta region: A case study of Shanghai-Hangzhou, nanjing-Hangzhou, and Hangzhou-ningbo lines[J]. City Planning Review, 2018, 42(8):90-97, 122.
- [11] GUO Y, CAO L, SONG Y, et al. Understanding the formation of City-HSR network: A case study of Yangtze River Delta, China[J]. Transport Policy, 2022, 116:315-326.
- [12] 孙娜, 张梅青. 基于高铁流的中国城市网络结构特征演变研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5):727-737. SUN N, ZHANG M Q. Network structure and evolution characteristics of cities in China based on high-speed railway transport

flow[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(5):727-737.

[13] 韦胜, 张小辉. 基于高铁余票的客流行为特征及其效应分析——以沪宁沿线高铁站点为例[J]. *城市规划*, 2015, 39(7):38-42. WEI S, ZHANG X H. Passenger flow characteristics and effects based on the remaining high-speed rail tickets: A case study on high-speed rail stations from Shanghai to Nanjing[J]. *City Planning Review*, 2015, 39(7):38-42.

[14] 陈晨, 修春亮. 流空间视角的东北地区城市网络研究[J]. *地域研究与开发*, 2014, 33(4):82-89. CHEN C, XIU C L. Research on city network of northeast China based on space of flows[J]. *Areal Research and Development*, 2014, 33(4):82-89.

[15] 张晶, 陈海山. 新时期城市化推进过程中集聚阴影研究——基于高铁通车的视角[J]. *经济学(季刊)*, 2022, 22(1):281-302. ZHANG J, CHEN H S. A study of agglomeration shadow during urbanization in the new era: The case for high-speed rail[J]. *China Economic Quarterly*, 2022, 22(1):281-302.

[16] 冯烽, 崔琳昊. 高铁开通与站点城市旅游业发展:“引擎”还是“过道”?[J]. *经济管理*, 2020, 42(2):175-191. FENG F, CUI L H. High-speed rail operation and tourism in the HSR site city: “engine” or “corridor”?[J]. *Business and Management Journal*, 2020, 42(2):175-191.

[17] 黄洁, 杜德林, 王姣娥, 等. 基于城市群尺度的高铁列车与长途汽车网络结构比较[J]. *地理科学*, 2020, 40(12):1958-1966. HUANG J, DU D L, WANG J E, et al. A comparative study on network structures of high-speed train and inter-city coach based on the urban agglomerations[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(12):1958-1966.

[18] 李淑庆, 卢九一, 毛宏黎. 我国高铁车站选址与接驳交通研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2019, 34(6):94-101. LI S Q, LU J Y, MAO H L. Research on site selection and connecting traffic system of high-speed railway station in China[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2019, 34(6):94-101.

[19] 段学军, 陈雯, 朱红云, 等. 长江岸线资源利用功能区划方法研究——以南通市域长江岸线为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5):621-626. DUAN X J, CHEN W, ZHU H Y, et al. Method to make function division of waterfront resources along the Yangtze River—a sample on the waterfront for Nantong city[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5):621-626.

[20] 李磊, 陆林, 孙小龙, 等. 高铁沿线旅游流网络结构及其互动关系研究——以合福高铁沿线地区为例[J]. *人文地理*, 2020, 35(1):132-140. LI L, LU L, SUN X L, et al. Study on the network structure and interactive relationship of tourism flow along high-speed railway: An example of hefei-fuzhou high-speed railway[J]. *Human Geography*, 2020, 35(1):132-140.

[21] 朱海珠, 曹芳东. 基于地理标记照片的游客流动网络结构特征及其流动模式——以扬子江城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11):2374-2383. ZHU H Z, CAO F D. Tourist flow network structure characteristics and its flow pattern based on geo-tagged photos: Taking the Yangtze River city group as an example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(11):2374-2383.

[22] 胡昊宇, 黄莘绒, 李沛霖, 等. 流空间视角下中国城市群网络结构特征比较——基于铁路客运班次的分析[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(8):1525-1540. HU H Y, HUANG X R, LI P L, et al. Comparison of network structure patterns of urban agglomerations in China from the perspective of space of flows: Analysis based on railway schedule[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(8):1525-1540.

[23] GAO S, LIU Y, WANG Y, et al. Discovering spatial interaction communities from mobile phone data[J]. Transactions in GIS, 2013, 17(3):463-481.