

# 长三角城市群交通可达性与功能性联系比较研究

岳雨峰, 钮心毅

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 区域一体化时代, 城市群内中短距离、高频次、周期性往返出行成为城际出行主导形式, 体现为城际功能性联系。以长三角 16 个核心城市为研究对象, 利用手机信令数据测算城际通勤出行、城际商务出行两类功能性联系, 分别比较城际交通可达性与城际通勤出行、城际商务出行的空间特征。研究发现: 交通可达性与功能性联系不存在严格的对应关系, 交通可达性的支撑优势并不一定会促进城际通勤出行与城际商务出行; 交通可达性支撑与城际通勤出行联系的供需关系差异较小、与城际商务出行联系的供需关系差异较大; 区域一体化发展中 16 个城市对交通可达性的实际需求不同, 供需关系差异揭示了各城市的交通可达性提升需求。指出应针对功能性联系需求与交通可达性供给的相对关系, 因“城”而异地实践长三角多层次轨道交通规划, 促进区域一体化协调发展。

**关键词:** 城际交通; 交通可达性; 城际通勤出行; 城际商务出行; 手机信令数据; 长三角城市群  
Comparative Study on Transportation Accessibility and Functional Connectivity of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

YUE Yufeng<sup>1</sup>, NIU Xinyi<sup>1,2</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Spatial Intelligent Planning Technology, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In the era of regional integration, intercity travels within a city cluster featuring short- and medium distances, high frequency, and periodic round-trips have emerged as the dominant mode. This trend is also reflected in the functional connection among cities. Using cellular signaling data from 16 core cities in the Yangtze River Delta, this paper focuses on the analysis of two types of functional connectivity—intercity commuting travel and intercity business travel. The intercity transportation accessibility with spatial characteristics of intercity commuting travel and intercity business travel are compared in the study. The results suggest no strict spatial correspondence between transportation accessibility and functional connectivity; in addition, the supporting advantage of transportation accessibility does not necessarily promote intercity commuting travel or intercity business travel. The difference in the supply and demand relationship between transportation accessibility and intercity commuting travel connection is minimal; however, the difference is significant between transportation accessibility and intercity business travel connection. The 16 cities in the regional integrated development have diverse real demand for transportation accessibility. The disparity in the supply and demand relationship reveals the need to improve transportation accessibility in these cities. In light of the relative relation between functional connectivity demand and transportation accessibility supply, the paper proposes multi-level rail transit plans customized for cities in the Yangtze River Delta to facilitate the integrated and coordinated development of the region.

**Keywords:** intercity transportation; transportation accessibility; intercity commuting travel; intercity business travel; cellular signaling data; Yangtze River Delta Urban Agglomeration

收稿日期: 2022-06-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“多源数据支持下的都市圈空间结构及规划策略研究”(51878457)

作者简介: 岳雨峰(1990—), 男, 陕西西安人, 在读博士研究生, 主要研究方向: 城市规划技术和方法。E-mail: yufeng\_yue@tongji.edu.cn

通信作者: 钮心毅(1971—), 男, 浙江湖州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 城市规划技术和方法。E-mail: niuxinyi@tongji.edu.cn

## 0 引言

长三角三省一市(江苏省、安徽省、浙江省、上海市)以3.74%的国土面积承载了全国16.66%的人口,创造了全国24.09%的GDP<sup>①</sup>,是中国人口、资本、知识等社会发展资源要素最集聚的城市群。伴随人口要素空间集聚,区域轨道交通系统对城市群客流的支撑效用日益突显。截至2022年初,三省一市区域内铁路运营总里程达13 644 km,高速铁路(以下简称“高铁”)运营总里程超过6 600 km<sup>②</sup>,约占全国高铁运营总里程的16.45%。以上海市为例,2021年旅客发送总量达1.40亿人次,其中铁路运输达0.93亿人次,公路运输达0.15亿人次。相比公路系统,区域轨道交通系统主导了超(特)大城市、大城市的跨城流动。为建设具有全球影响力的世界级城市群<sup>③</sup>,长三角的区域联动发展与都市圈一体化发展大势所趋,需要协同建设区域一体化综合交通系统<sup>④</sup>。《长江三角洲地区多层次轨道交通规划》确定了依托轨道交通系统推进长三角高质量发展的交通战略<sup>⑤</sup>。以高铁为骨干的区域轨道交通系统改变了区域的时空关系,促进了人员跨城流动,为区域经济协同发展创造了机遇<sup>⑥-⑧</sup>。

人员跨城流动反映了区域一体化、都市圈化的社会经济发展趋势,也映衬出交通联系需求。人员跨城流动日渐类型化,城市群内中短距离、高频次、周期性的往返出行成为主要客流形式<sup>⑨-⑩</sup>。城际通勤出行、城际商务出行是城市群内主要城际功能性联系,是决定城市区域化进程发展水平的关键联系<sup>⑪-⑭</sup>。

交通可达性是人员跨城流动存在的基石。通过计算人员跨城出行时耗,可获得城市间的交通可达性。相比于公路交通系统,区域轨道交通系统的发展极大提升了交通可达性,也带来各城市交通可达性的显著差异<sup>⑮-⑰</sup>。城市群交通组织由市域交通、都市圈交通、“城际+”交通、区域交通多个层级构成<sup>⑱</sup>。干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通分别对应区域交通建设的多个层级。发展区域交通需关注高铁与其他交通方式的融合发展<sup>⑲</sup>,以人为本,关注人员全过程出行链的交通可达性<sup>⑲</sup>。同时还需关注交通可达性供给与功能性联系需求间的关系,关注城市通勤圈、都市圈的空间需求,保障交通供给能力在空间上的协调<sup>⑳-㉑</sup>。

分析交通可达性与功能性联系的供需差异,能确定各城市的交通可达性需求,支撑

长三角高质量发展。当前对长三角交通可达性与功能性联系的供需关系研究尚有不足。虽然交通支撑与人员流动相互作用,但区域交通基础设施建设是否催生了广泛的城际功能性联系、是否对各城市融入区域一体化发展产生等价的促进效用?本文选取长三角16个核心城市<sup>⑳</sup>,从空间供给侧视角探索各城市交通可达性与功能性联系的空间关联及其供需差异。基于当前各城市城际通勤出行、商务出行联系需求,提出相对应的交通可达性支撑范围与因“城”而异的区域轨道交通发展策略,为推进区域交通与区域经济的协同发展提供决策支撑。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究范围与对象

以长三角三省一市为研究范围,以长三角核心区16个城市为研究对象,以三省一市区域内4 180个街道、镇级行政单元为空间统计单元。在16个城市的城际人员跨城流动计算中,仅将各城市主城区范围内的人员跨城流动作为人员跨城出行承载的城际功能性联系纳入空间统计,避免以市域行政范围为统计边界对计算结果产生干扰。

### 1.2 城际通勤出行与商务出行识别

本文依托手机信令数据萃取城际通勤出行和城际商务出行。通过解析移动设备用户的行为规律,将个体意义上的出行归纳为群体意义上有明确出行目的的功能性联系。采用2019年12月1—31日连续31天手机信令数据识别移动设备用户的城际通勤出行与当日往返出行<sup>⑲-⑳,㉑</sup>,具体方法如下:

#### 1) 计算城际通勤出行。

通过计算移动设备用户每一天的夜间最长停留地、工作日工作时段最长停留地,识别计算周期内每一名用户的居住地与就业地。基于居住地、就业地的空间隶属关系,将两地跨城分布的人员出行确定为城际通勤出行。

#### 2) 计算城际工作日当日往返出行。

通过计算移动设备用户每一个工作日的出行目的地、当日晚间最长停留地、前一日夜间最长停留地,识别计算周期内用户的当日居住地、当日往返出行目的地与前往同一目的地的出行频次。基于工作日期间的居住地、当日往返目的地的空间隶属关系,将两地跨城分布的人员出行确定为城际工作日当

日往返出行。根据居住地与当日往返出行目的地之间的出行重复天数, 归纳每位用户的当日往返出行频次。此时的城际工作日当日往返出行中仍包含大量城际通勤出行。

### 3) 确定城际商务出行。

采用枚举法逐一筛选计算周期内工作日当日往返出行频次, 发现将这一出行频次限定为 $\leq 15$ 次·月<sup>-1</sup>时, 能有效剔除当日往返出行中的城际通勤出行。将工作日期间产生的非通勤出行目的的当日往返出行定义为广义上的城际商务出行。这种工作日期间多次前往同一目的地的跨城当日往返出行行为, 具有工作日、跨城出行、当日返回、非偶发的出行特征, 能基本排除短距离旅游、探亲访友等偶发性出行, 反映了区域企业内部、企业部门之间必须依靠面对面人员会晤所进行的公务、商业、咨询、经贸等活动<sup>[23]</sup>。本文将此类城际出行视为城际商务出行。

## 2 交通可达性的空间特征

### 2.1 交通等时圈的获取及空间特征

本文依托百度地图路线规划 API<sup>®</sup>, 计算自定义空间位置间基于多种交通方式的实际最短出行时耗。通过构建全过程出行链的交通可达性, 探索城市交通供给能力并以交通等时圈方式呈现。

针对交通等时圈计算, 选取34个工作日计算时段<sup>④</sup>, 计算日间非高峰时段(12:00—16:00)的出行时耗。选取就业中心、高铁车站、城市公共交通枢纽等位置作为16个城市的出行节点。选取行政、教育、医疗等公共服务设施作为街镇的出行节点。经1 354 320次出行模拟计算, 获取16个城市与4 180个街镇间的双向出行时耗。通过比较公共交通与私人小汽车两种交通方式下的出行时耗, 将更短的出行时耗指定为某中心城市出行节点*i*与街镇单元出行节点*j*之间的出行时耗 $T_{ij}$ 。 $T_{ij} = \min[(T'_{ij} + T''_{ij})/2, (T'''_{ij} + T''''_{ij})/2]$ , 式中: $T'_{ij}$ 为使用公共交通从城市出行节点*i*前往街镇出行节点*j*的最短出行时耗, 反向则为 $T''_{ij}$ , 讨论范畴包含以高铁、地铁、公共汽车等多种非私人交通方式组合实现的最短出行时耗; $T'''_{ij}$ 为使用私人小汽车从城市出行节点*i*前往街镇出行节点*j*的最短出行时耗, 反向则为 $T''''_{ij}$ 。选取城市全部出行节点*i*与街镇出行节点*j*间出行时耗 $T_{ij}$ 的最小值, 作为该城市与街镇单元*j*之间的实际

最短出行时耗 $T_j$ , 由此得到该城市在长三角的交通等时圈。

针对交通可达性特征, 从形态、面积两个视角比较16个城市的交通可达性支撑效用。形态层面, 判断各城市交通可达性的覆盖范围特征。伴随区域轨道交通系统对交通可达性的提升, 交通等时圈逐步突破了圈层形态而出现飞地形态, 等时圈飞地是以高铁为核心的区域轨道交通系统的影响结果。面积层面, 揭示各城市整体交通可达性、等时圈飞地的支撑效用。

引入图像识别中的矩形度指标, 分析交通可达性对时空关系的改变幅度。矩形度指空间对象对其最小外接矩形的充满程度, 取值为0~1。等时圈矩形度反映等时圈飞地与主体的空间距离。等时圈飞地距离等时圈主体越远, 则等时圈面积相对其最小外接矩形的充满程度越低, 即矩形度越低。矩形度 $R_{rec} = S_i/S_{mer}$ , 式中 $S_i$ 为等时圈面积,  $S_{mer}$ 为等时圈最小外接矩形面积。 $S_i$ 越大, 交通可达性的支撑能力越强; 等时圈飞地面积在 $S_i$ 中的占比 $R_0$ 越大, 且 $R_{rec}$ 越小, 则等时圈飞地的支撑能力越强, 即区域轨道交通系统的支撑越强。

### 2.2 交通等时圈的形态特征

以30 min为间隔, 比较16个城市0~360 min交通等时圈的形态特征。各城市在空间形态上呈现显著的等时圈变形与等时圈飞地, 以上海、杭州、南京的等时圈变形最为显著(见图1)。从等时圈变形看, 上海等时圈沿铁路京沪线、沪昆线两个方向显著形变; 常州、苏州、无锡、镇江等时圈变形较相似, 沿铁路京沪线显著形变; 湖州、嘉兴、绍兴等时圈变形较相似, 沿铁路沪昆线、宁杭线、杭甬线方向显著形变; 宁波、台州等时圈变形较相似, 沿铁路杭甬线、宁杭线、甬台温线方向显著形变; 南通、泰州、扬州、舟山等时圈变形相对较弱, 几乎不存在等时圈飞地。

### 2.3 交通等时圈的面积特征

交通等时圈在时间阈值 $T_0$ 下的覆盖面积 $S_i$ 反映了城市在区域轨道交通与公路交通综合支撑下的交通可达性。以30 min为间隔, 比较各城市 $S_i$ 随时间增长的变化趋势(见图2)。16个城市可分为两类: 一类为交通可达性高于均值, 自高到低依次为南京、镇江、杭州、湖州、常州、无锡、苏州、上

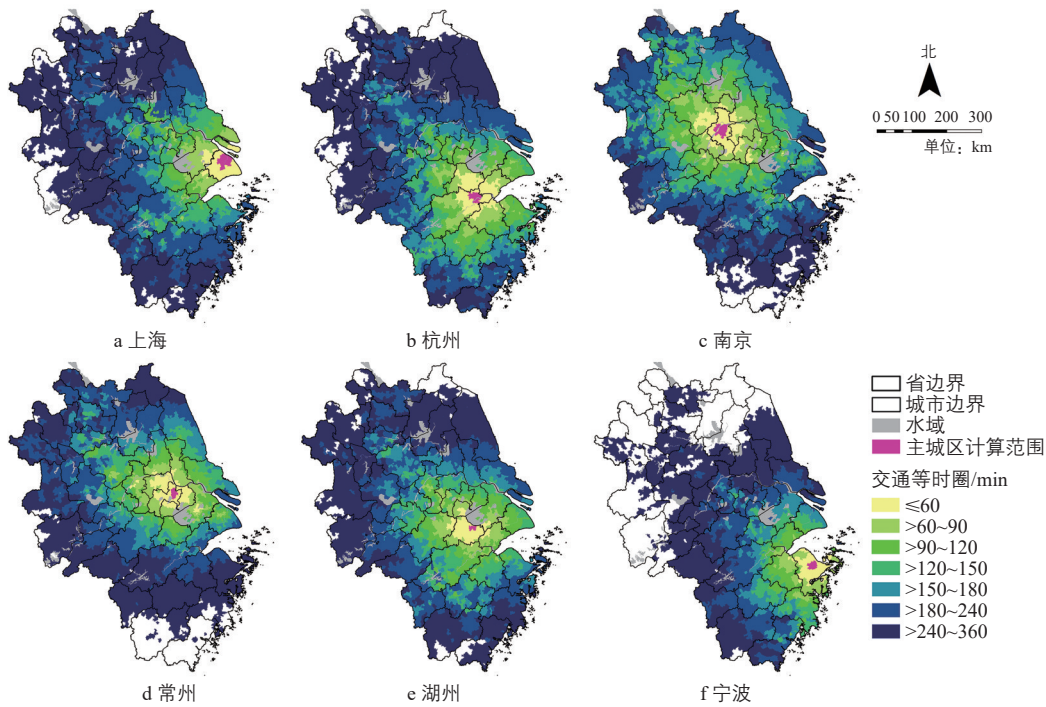


图1 城际交通等时圈

Fig.1 Intercity transportation isochrone

海、扬州；一类为交通可达性低于均值，由低到高依次为舟山、台州、宁波、南通、嘉兴、绍兴、泰州。

比较各城市  $R_0$  和  $R_{rec}$  随交通等时圈时间阈值的变化趋势<sup>⑤</sup>，见图3。在交通等时圈时间阈值  $T_0$  下，各城市的  $R_0$  和  $R_{rec}$  反映了自身等时圈飞地形态特征相比于其他城市的显著程度。同时14个城市  $R_0$  和  $R_{rec}$  的均值线(图3中黑色折线)综合反映了所有城市在各  $T_0$  区段下的等时圈飞地形态特征显著性变化程度。从  $R_0$  看，14个城市在  $T_0$  为60~90 min和150~180 min区间内等时圈飞地最为显著；上海、杭州、南京、苏州、常州、宁波的等时圈飞地最显著(见图3a)。从  $R_{rec}$  看，14个城市在  $T_0$  为60~90 min区间内等时圈飞地最为显著；上海、南京、杭州、常州、绍兴、宁波的等时圈飞地最显著(见图3b)。

综上，上海、杭州、南京及其邻近的苏州、无锡、常州、湖州，体现出较高的交通可达性与较强的等时圈飞地支撑能力。绍兴、宁波的交通可达性相对较弱，但等时圈飞地支撑较强；相反，镇江、扬州的交通可达性相对较强，但等时圈飞地支撑较弱。

### 3 功能性联系的空间特征

#### 3.1 紧密功能性联系范围及空间特征

各城市功能性联系均存在显著规模差

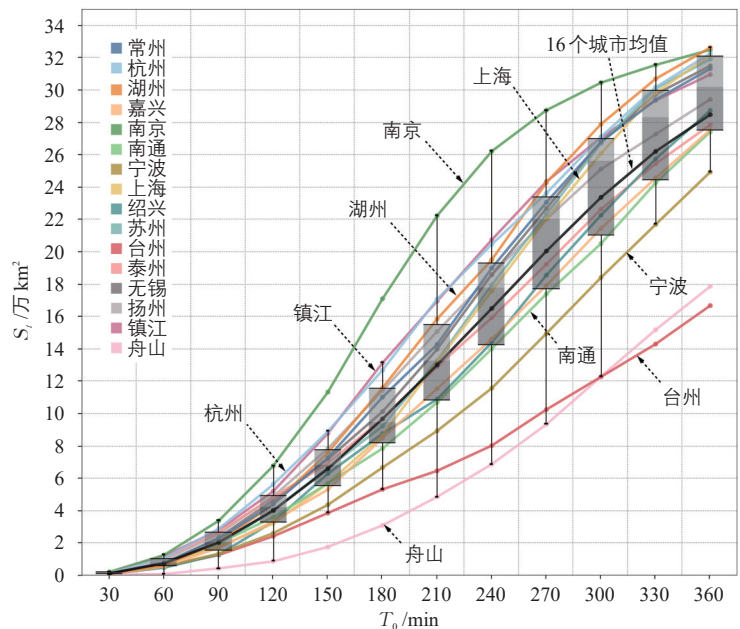


图2 城际交通等时圈面积的变化

Fig.2 Changes in the area of intercity transportation isochrones

异，需通过划分联系规模层级剥离出各城市紧密功能性联系范围，从而评估各城市对交通可达性的空间需求。鉴于功能性联系在“规模一位序”数据分布中遵循奇普夫定律 (Zipf's Law)，数据呈现长尾分布，故引入头尾断裂法(Head/tail Breaks)对城际通勤出行、城际商务出行两类功能性联系进行层级划分<sup>[24]</sup>。基于该数据分析法则下的头尾断裂系数 ( $Ht-index$ ) 能够直观地评估数据的层

次结构特征<sup>[25-26]</sup>。数据的头尾断裂系数越大则其层级越多,说明数据的规模特征差异更大,在本文中实际反映为城际功能性联系的联系规模差异更大。16个城市的城际通勤出行联系划分为3~5个层级,城际商务出行联系划分为5~7个层级。这意味着城际通勤出行联系的联系规模差异较小,而城际商务出行联系的差异较大。通常将  $Ht-index \geq 2$  的层级定义为紧密联系范围,本文以此界定16个城市各自的紧密功能性联系范围。文中将城市与街镇单元间人员流动密度作为联系规模划分依据<sup>⑥</sup>,以消弭街镇空间单元面积差异的影响。

针对紧密功能性联系特征,本文从形态、面积两个视角探索各城市的实际交通需求。形态层面,揭示功能性联系的“圈层+飞地”特征,确定紧密联系的飞地数量  $N_{enc}$ ; 面积层面,揭示各城市对交通可达性的空间需求。 $N_{enc}$  越多,城市对等时圈飞地的需求越大;紧密功能性联系范围覆盖面积  $S_0$  越大,城市对整体交通可达性的需求越大。此外,鉴于长三角16个城市的行政边界差异,紧密功能性联系范围不可避免地受各城市行政辖区面积的影响。同时,各城市与周边地区功能性联系的层级差异也对紧密功能性联系范围产生影响。其中,市域行政辖区较大的城市,会导致大量联系单元因并非跨城而被剔除出统计范围,使得紧密功能性联系范围被相对低估;而联系层级较多的

城市,也使得数量相对更多的联系单元被纳入紧密功能性联系范围。

### 3.2 城际通勤出行联系的形态与面积特征

紧密通勤出行联系在空间上呈“圈层+飞地”形态特征,圈层形态显著,飞地形态较弱(见图4)。16个城市每个城市平均存在1.25个联系飞地,上海、杭州、南京均仅有1个联系飞地,联系飞地多毗邻城市市区,圈层形态主导了城际通勤出行联系(见表1)。杭州、上海、南京存在显著的紧密通勤出行联系覆盖面积差异。苏州、无锡、杭州、绍兴、镇江的紧密通勤出行联系覆盖面积较大;常州、南京、湖州、泰州、舟山的覆盖面积较小;上海的覆盖面积处于16个城市的平均水平,其与苏州城区间存在唯一飞地联系。

城际通勤出行联系的空间分布较集中,易受行政辖区范围与联系规模层级差异影响。城市的行政辖区越大,城际通勤出行联系越难突破行政边界,其作用范围受到更强制约。其中,上海的中心城区偏于市域一隅,进一步推高了城际通勤出行联系的门槛,使联系范围相对被低估。同时,苏州、无锡、绍兴、镇江四城与周边地区的城际通勤出行联系存在5个层级,与其余12个城市3~4个层级相比,这四城紧密功能性联系范围的联系规模差异更大且囊括了相对更多的联系单元。这对16个城市城际通勤出行联

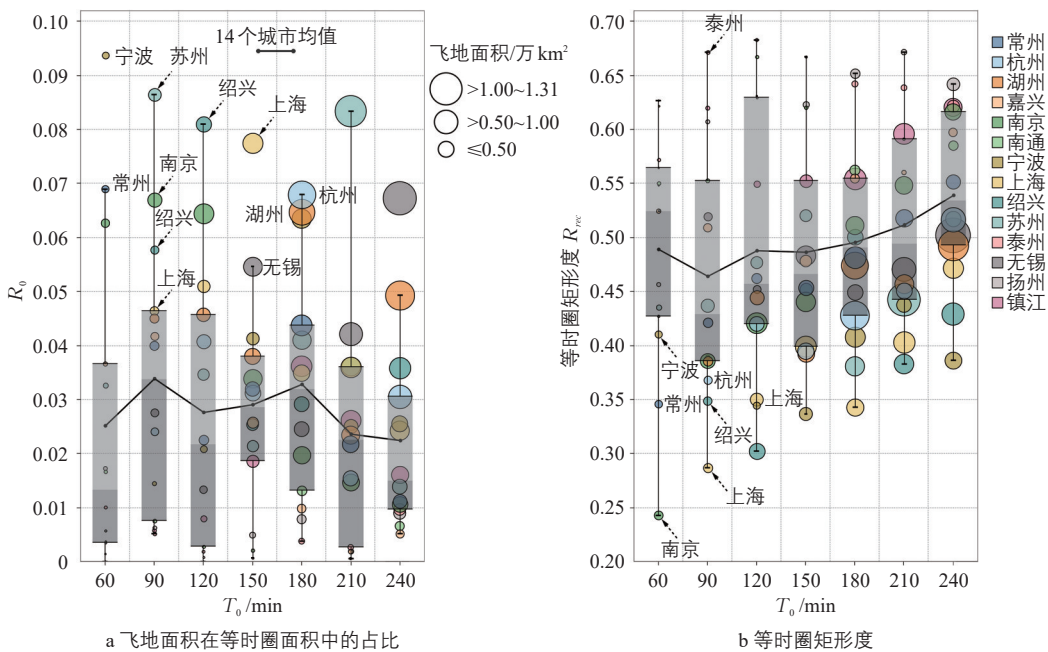


图3 城际交通等时圈飞地的变化

Fig.3 Changes of non-continuous parcels in intercity transportation isochrones

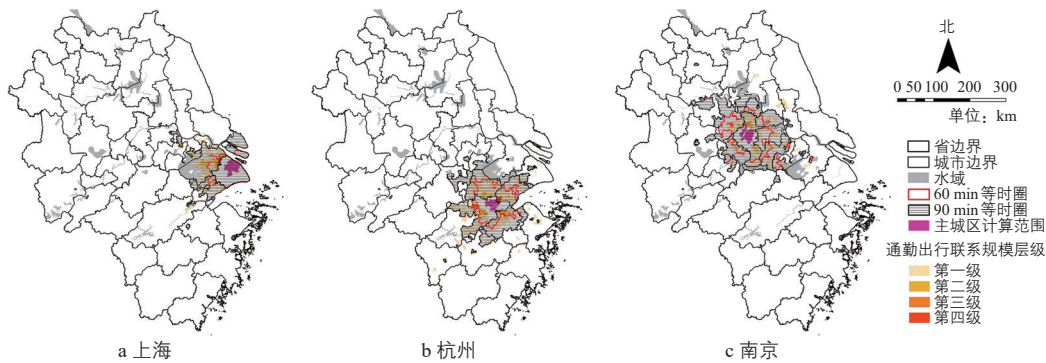


图4 城际通勤出行联系范围

Fig.4 Connection range of intercity commuting travel

系范围的横向比较造成一定影响。

### 3.3 城际商务出行联系的形态与面积特征

紧密商务出行联系在空间上呈“圈层+飞地”形态特征，圈层与飞地形态均较显著(见图5)。16个城市每个城市平均存在13.56个联系飞地，上海、杭州、南京的联系飞地均超过20个，联系飞地基本处于各主要城市市区，圈层与飞地形态共同塑造了城际商务出行联系(见表2)。杭州、上海、南通、常州、无锡、南京的紧密商务出行联系覆盖面积较大；绍兴、湖州、嘉兴、台州、舟山的覆盖面积较小。

城际商务出行联系的空间分布更为广泛，基本触及三省一市范围内广大地区，因此城际商务出行联系受行政辖区面积的影响相对较小，且联系规模差异较大(5~7个层级)，保障了16个城市在界定紧密商务出行联系范围时更为稳定。因此，16个城市城际商务出行联系范围的可比性较城际通勤出行联系更为可靠。

综上，城际通勤出行联系的形态特征差异较小、面积特征差异较大，体现出各城市对交通可达性的空间需求差异相对较大；相反，城际商务出行联系的形态特征差异较大、面积特征差异较小，体现出各城市对交通可达性的空间需求相对接近。

## 4 功能性联系与交通可达性的关联与比较

### 4.1 功能性联系与交通可达性的空间供需关系

城市的交通可达性支撑与功能性联系需求间存在时空供需关系<sup>[11, 23]</sup>。本文采用可达性最大效用时段测度法，从空间维度分类比

表1 紧密通勤出行联系的飞地数量与覆盖面积

Tab.1 Number of non-continuous parcels and coverage area of close commuting travel connection

城市	紧密通勤出行联系飞地数量 $N_{m,c}$ /个	紧密通勤出行联系飞地所属县市	紧密通勤出行联系覆盖面积 $S_{0,c}$ /km <sup>2</sup>
苏州	3	上海、太仓、吴江	2 161.21
无锡	4	上海、常州、宜兴、常熟	2 021.68
杭州	1	海宁	1 556.96
绍兴	0		1 267.61
镇江	1	南京	1 239.60
南通	1	如皋	1 128.10
嘉兴	2	上海、杭州	1 115.14
扬州	0		1 114.18
上海	1	苏州	1 067.09
台州	1	临海	1 018.60
宁波	2	慈溪、余姚	993.54
常州	1	无锡	927.01
南京	1	镇江	854.50
湖州	1	杭州	637.50
泰州	0		508.86
舟山	1	宁波	357.44
16个城市均值	1.25		1 123.06

注：城市以紧密通勤出行联系覆盖面积由大到小顺序排列；紧密通勤出行联系飞地所属县市涉及地市名称时，飞地均位于各地市主城区。

较各城市交通可达性与功能性联系间的供需关系，即交通可达性支撑范围与紧密通勤出行联系、紧密商务出行联系范围的空间匹配程度。以16个城市供需关系的均值为基准将空间匹配程度分为3类：1)联系的空间需求弱于交通可达性的空间支撑，即城际交通超前支撑或联系需求不足；2)联系的空间需求与交通可达性的空间支撑接近16个城市均值，即城际交通供需平衡；3)联系的空间

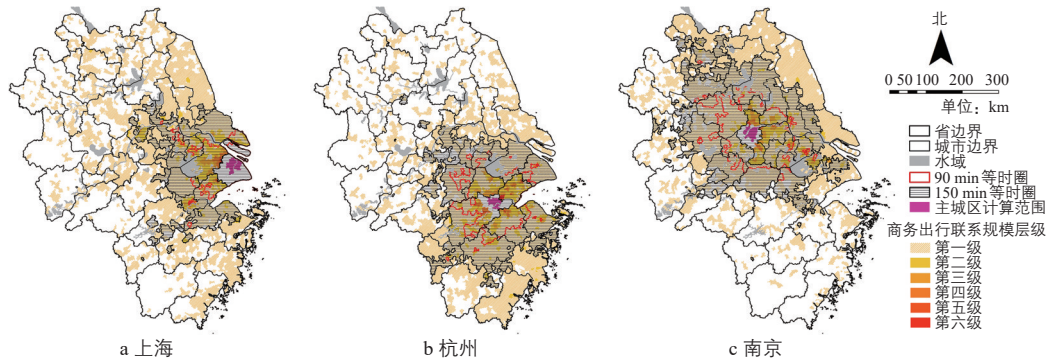


图5 城际商务出行联系范围

Fig.5 Connection range of intercity business travel

表2 紧密商务出行联系的飞地数量与覆盖面积

Tab.2 Number of non-continuous parcels and coverage area of close business travel connection

城市	紧密商务出行联系飞地数量 $N_{en,D}$ /个	前三大紧密商务出行联系飞地所属县市	紧密商务出行联系覆盖面积 $S_{0.95}$ /km <sup>2</sup>
杭州	24	宁波、上海、义乌	17 400.45
上海	22	杭州、南京、宁波	14 877.11
南通	10	南京、常州、上海	14 083.84
常州	10	南京、南通、上海	13 917.50
无锡	13	南京、镇江、泰州	13 779.00
南京	27	苏州、无锡、常州	13 561.53
扬州	15	常州、苏州、无锡	10 808.03
镇江	12	无锡、苏州、昆山	10 654.68
苏州	8	南京、镇江、扬州	10 350.41
泰州	14	南京、苏州、无锡	10 159.98
宁波	18	杭州、绍兴、嘉兴	9 462.50
绍兴	14	宁波、嘉兴、义乌	8 477.36
湖州	8	嘉兴、宁波、绍兴	7 558.35
嘉兴	5	上海、宁波、长兴	6 411.48
台州	6	杭州、宁波、温州	6 144.29
舟山	11	杭州、余姚、嘉善	3 598.26
16个城市均值	13.56		10 702.80

注：城市以紧密商务出行联系的覆盖面积由大到小顺序排列；紧密商务出行联系飞地所属县市涉及地市名称时，飞地均位于各地市主城区。

联系的支撑效率； $R_2$  反映功能性联系对交通可达性的需求边界。考虑到各城市均存在个别面积极小的紧密联系单元，本文以  $R_2=0.95$  时的等时圈作为交通可达性需求边界。

各城市功能性联系与交通可达性供需关系的差异不仅受研究样本数量的影响，更受到当前长三角交通网络的限制。城市的交通可达性水平与功能性联系均为现有区域交通网络条件下的派生结果。例如，当前京沪、沪宁双通道走廊区域内城市呈现出的超高交通可达性支撑反向映衬出其功能性联系需求的不足。同样，走廊区域外城市的交通可达性支撑劣势则突显了其功能性联系需求的显著。因此，交通超前支撑与功能性联系需求极小的两类城市均在空间供需关系上体现为功能性联系需求弱于交通可达性支撑；交通可达性支撑亟待加强与功能性联系需求极大的两类城市均在空间供需关系上体现为功能性联系需求强于交通可达性支撑。由此，部分城市功能性联系需求与交通可达性支撑的相对供需失衡，既可能是功能性联系需求端造成的，也可能是交通可达性支撑供给端导致的。

#### 4.2 城际通勤出行联系与交通可达性的关系比较

从16个城市均值来看，城际通勤出行联系对交通可达性需求处于0~75 min，超过95%的联系范围在75 min内可达。交通可达性对城际通勤出行的支撑效率峰值出现在45 min，约60%的联系范围在45 min内可达。

1) 功能性联系需求弱于交通可达性支撑的城市为泰州、南京、常州、扬州、南通、镇江、湖州(见图7a)。交通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=30$  min 前后。当

需求强于交通可达性的空间支撑，即城际交通亟待加强或联系需求旺盛。

以交通等时圈时间阈值  $T_0$  条件下功能性联系与交通可达性的两项空间匹配系数探索可达性最大效用时点(见图6)。两项空间匹配系数为：1)交通等时圈内功能性联系范围在交通等时圈面积中占比  $R_1$ ；2)交通等时圈内功能性联系范围在全局功能性联系范围中占比  $R_2$ 。 $R_1$  反映交通可达性对功能性

$T_0=45$  min 时, 上述 7 城的  $R_2$  均值达 0.821, 远高于 16 个城市均值 0.643; 当  $T_0=60$  min 时, 上述 7 个城市的  $R_2$  均值超过 0.95, 即城际通勤出行联系多在 60 min 内可达。

2) 功能性联系需求与交通可达性支撑相对平衡的城市为台州、嘉兴、宁波、苏州、杭州、无锡、绍兴(见图 7b)。交通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=45$  min, 与 16 个城市均值一致。当  $T_0=45$  min 时, 上述 7 城的  $R_2$  均值达 0.602, 趋近于 16 个城市均值; 当  $T_0=75$  min 时, 上述城市的  $R_2$  均值超过 0.95, 即城际通勤出行联系多在 75 min 内可达。

3) 功能性联系需求强于交通可达性的城市为舟山和上海(见图 7c)。交通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=60$  min。当  $T_0=45$  min 时, 舟山和上海的  $R_2$  均值仅为 0.166, 远低于 16 个城市均值 0.643; 当  $T_0=75$  min 时, 上海的  $R_2$  依然不及 0.95, 即上海的城际通勤出行联系突破 75 min 等时圈。

### 4.3 城际商务出行联系与交通可达性的关系比较

从 16 个城市均值来看, 城际商务出行联系对交通可达性需求处于 0~150 min, 超过 95% 的联系范围在 150 min 内可达。交通可达性对城际商务出行的支撑效率峰值出现在 60 min, 约 40% 的联系范围在 60 min 内可达。

1) 功能性联系需求弱于交通可达性支撑的城市为镇江、无锡、常州、苏州、湖州、嘉兴、泰州(见图 8a)。交通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=45$  min 前后。当  $T_0=60$  min 时, 上述 7 城的  $R_2$  均值达 0.504, 高于 16 个城市均值 0.392; 当  $T_0=120$  min 时, 上述 7 城的  $R_2$  均值超过 0.95, 城际商务出行联系多在 120 min 内可达。

2) 功能性联系需求与交通可达性支撑相对平衡的城市为南通、绍兴、南京、扬州、宁波、台州(见图 8b)。交通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=60$  min, 与 16 个城市均值一致。当  $T_0=60$  min 时, 上述 6 城的  $R_2$  均值达 0.376, 趋近于 16 个城市均值; 当  $T_0=150$  min 时, 上述 6 城的  $R_2$  均值超过 0.95, 城际商务出行联系多在 150 min 内可达。

3) 功能性联系需求强于交通可达性支撑的城市为杭州、上海、舟山(见图 8c)。交

通可达性支撑效率峰值集中在  $T_0=75$  min。当  $T_0=60$  min 时, 上述 3 城的  $R_2$  均值同样仅 0.166, 低于 16 个城市均值; 当  $T_0=180$  min 时, 上述 3 城的  $R_2$  均值超过 0.95, 城际商务出行联系多在 180 min 内可达。

## 5 基于交通可达性供需关系的区域轨道交通发展策略

多层次交通系统建设是推进长三角区域高质量一体化发展的重要措施。针对 16 个城市交通可达性的供给侧差异, 应有侧重地发展干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通, 构建交通与空间协调发展的多层次轨道交通系统。

长三角 16 个城市应各有侧重地实施“四网融合”交通发展策略。各城市的策略差异应以实现交通可达性提升的时间需求与功能性联系提升的空间需求为依据。1)对交通可达性相对超前支撑的城市, 高铁网已表现出较为理想的功能性联系支撑。建议以市域(郊)铁路、城市轨道交通为建设重点, 优先提升市域层面的可达性。2)对功能性联系需求不足的城市, 应在完善城市轨道交通的同时, 加紧发展高铁, 秉持交通先行策略拉近与周边城市的时空距离, 以提升功能性联系的增长潜力。3)对交通可达性支撑与功能性联系需求相对平衡的城市, 建议同步发展城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通,

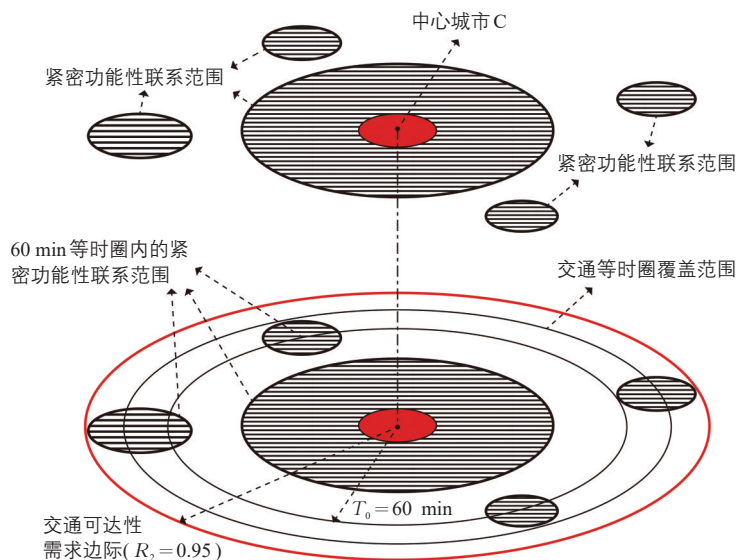


图 6 紧密功能性联系与交通可达性的空间匹配关系

Fig.6 Spatial matching relationship between close functional connectivity and transportation accessibility

重在匹配功能性联系的空间需求与交通可达性的空间支撑。4)对交通可达性支撑亟待加强的城市，以上海为代表，应同步推进四网建设与融合发展。依托干线铁路、城际铁路支撑其在长三角层面广泛的功能性联系。依托城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通构建上海大都市圈、市域层面的功能性联系。

城际通勤出行联系中：1)功能性联系需求弱于交通可达性支撑的南京、常州、镇江，因地处京沪高铁走廊区域，交通可达性超前支撑了自身的功能性联系需求。对于高等级交通走廊沿线城市，以市域(郊)铁路、城市轨道交通为核心，重点提升与联系飞地所属县市的交通可达性，实现城际通勤出行联系与交通可达性支撑相互匹配。2)功能性联系需求弱于交通可达性支撑的扬州、泰州、南通、湖州，因其对外联系需求不足，反映出交通可达性支撑的相对剩余，应发展市域(郊)铁路、城市轨道交通，优先满足城际通勤出行联系在市域层面的增长需求。3)功能性联系需求平衡于交通可达性支撑的杭州、宁波、苏州、无锡等，在同步发展市域(郊)铁路、城市轨道交通的基础上，重点依托城际铁路满足其与联系飞地所属县市间的城际通勤出行需求。4)功能性联系需求强于交通可达性支撑的上海，发展通勤高铁提

升上海与周边区域的紧密联系是必然选择。要同步完善上海市域层面的四网融合，保障以科研创新片区、金融服务片区为代表的具有区域职能协作需求的城市空间区块高效连接区域交通网络系统。

城际商务出行联系中：1)功能性联系需求弱于交通可达性支撑的苏州、无锡、常州、镇江，呈现超前交通支撑，应以城际铁路为核心推进都市圈层面四网融合，从扩展城市的交通可达性支撑范围转为提升既有联系范围内的交通运输效率与运能，实现城际商务出行联系需求与交通可达性支撑方式相互匹配。2)功能性联系需求弱于交通可达性支撑的泰州、嘉兴、湖州，因城际商务出行联系的空间需求不足，应以寻求干线铁路、城际铁路对城市核心商务区的交通支撑为主，加强与省会城市、周边城市核心区的交通联系。3)功能性联系需求平衡于交通可达性支撑的南京、南通、宁波、台州等，在发展城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通的同时，应完善高铁站场周边空间综合开发，通过TOD模式复合开发综合交通枢纽，满足城际商务出行联系的增长需求。4)功能性联系需求强于交通可达性支撑的上海、杭州，与长三角各城市的联系需求是广泛的。需强化上海、杭州在长三角铁路网中

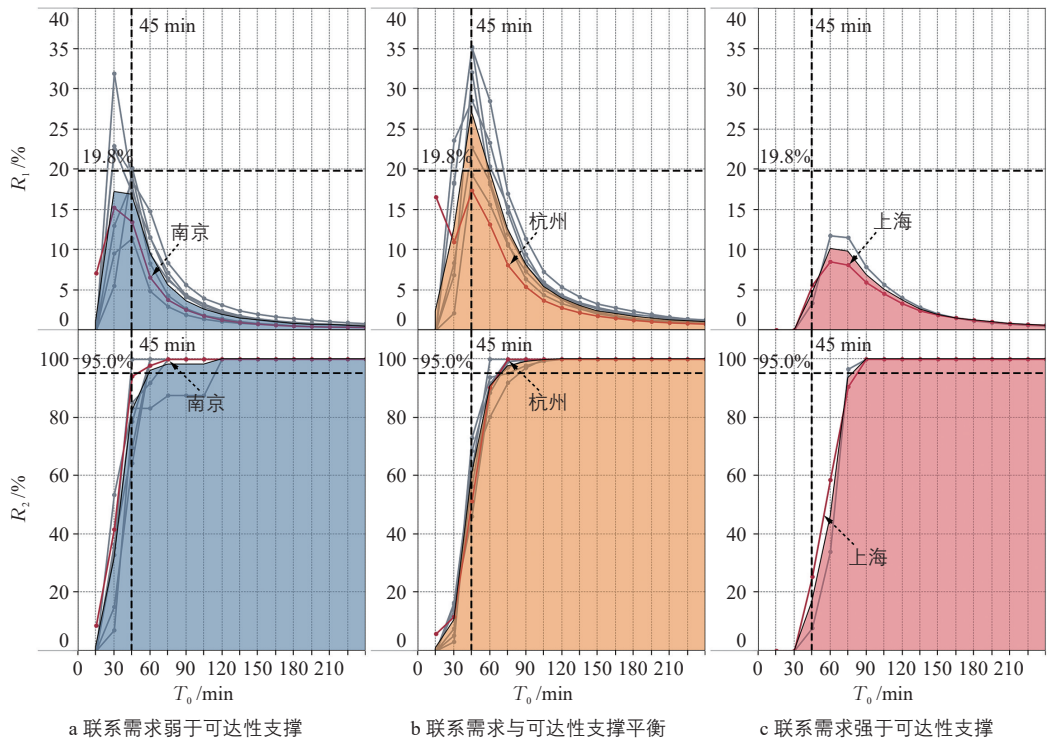


图7 城际通勤出行联系与交通可达性的空间匹配关系

Fig.7 Spatial matching relationship between intercity commuting travel connection and transportation accessibility

的枢纽地位，同步发展多层次轨道交通，实现上海、杭州两大都市圈区域层面四网融合，从提升内、外交通可达性同时发力，全面压缩上海、杭州在长三角区域内时空距离。

从面向城际通勤出行联系的交通可达性提升需求看，若以超前供给的60 min交通可达性需求边际为理想目标，杭州、苏州、无锡、宁波等城市需至少提升15 min交通可达性，对于功能性联系需求极大的上海则应持续提升其交通可达性以满足巨大的城际通勤出行潜力需求；从面向城际商务出行联系的可达性提升需求看，若以超前供给的120 min交通可达性需求边际为理想目标，南京、南通、宁波等城市需至少提升30 min交通可达性，对于联系需求极大的上海、杭州则需至少提升60 min以上交通可达性。

## 6 主要结论

1) 交通可达性的优化方向应与功能性联系的空间需求相互匹配。

本文比较了长三角16个城市交通可达性差异，发现上海、杭州、南京及环太湖的苏州、无锡、常州、湖州交通可达性相比于其余城市呈现显著优势。这既是区域功能性联系需求推动交通网络发展的结果，也是功

能性联系需求在交通网络支撑下的派生结果。理论上，功能性联系的空间需求与交通可达性的空间支撑相互匹配。但基于16个城市的对比发现，各城市交通可达性的供给与功能性联系的需求在空间关系上并不完全对应。这反映了在不同规模、不同尺度的城市功能性联系对交通可达性支撑的需求程度不尽相同。

区域连接能力是城市参与区域经济协作的核心竞争力，但落实城市交通可达性的提升要有的放矢。要根据城市交通可达性支撑与功能性联系需求的空间匹配关系确定交通支撑的优化方向。城际交通可达性提高，势必加强既有功能性联系，对于激发更为广泛的城际功能性联系，则需其他社会经济发展要素共同参与，实现城市在区域经济协作中的广泛深度参与。

2) 交通可达性与城际通勤出行、城际商务出行的供需关系存在显著差异。

长三角16个城市交通可达性与城际通勤出行联系的供需关系差异较小，与城际商务出行联系的供需关系差异较大。交通可达性支撑与城际通勤出行、城际商务出行联系的供需差异分别为60~75 min和120~180 min。对于城际通勤出行联系，交通供给富余与供给不足的城市相比，交通可达性需求边际的

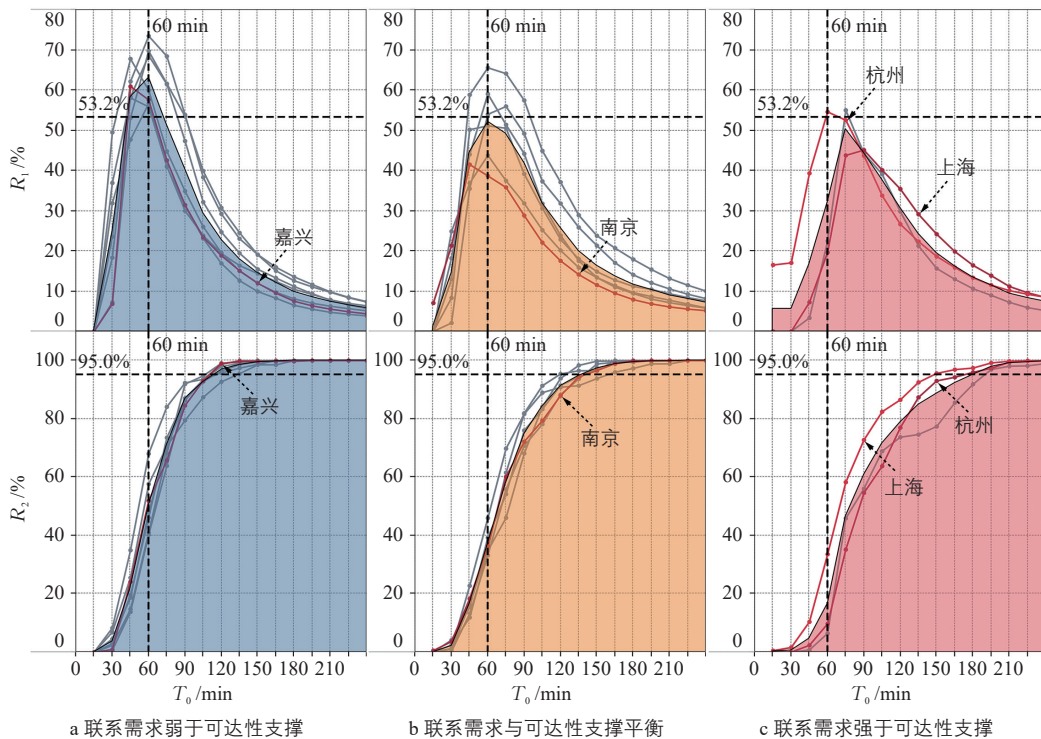


图8 城际商务出行联系与交通可达性的空间匹配关系

Fig.8 Spatial matching relationship between intercity business travel connection and transportation accessibility

差距仅 15 min；对于城际商务出行联系，这一差距达到 60 min。同时，交通可达性对城际通勤出行、城际商务出行联系的支撑效率峰值分别为 45 min 和 60 min 等时圈，即城际通勤出行、城际商务出行联系的圈层形态分别处于 45 min 和 60 min 交通可达性空间内。城际通勤出行联系的交通可达性支撑效率峰值与需求边际相差 30 min，城际商务出行联系则相差 120 min。

3) 基于各城市的供需关系差异实践因“城”而异的区域交通策略。

长三角 16 个城市交通可达性支撑与两种功能性联系的供需关系差异，表明了各城市在区域一体化、都市圈化发展中交通可达性的现实需求是不同的。应从供需关系视角，确定区域交通系统在区域一体化发展中的最优交通可达性支撑范围，继而规划区域交通设施。基于各城市交通可达性支撑与功能性联系的供需差异，揭示为实现功能性联系需求的增长潜力所必须提升的交通可达性，可反向推知各城市所需发展的区域轨道交通系统，实践因“城”而异的区域交通发展策略。

第一，上海、杭州对区域轨道交通系统的需求是全方位的。应同步推进干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通快线的协调发展；以干线铁路、城际铁路支撑两个城市广泛的城际商务出行及部分远距离城际通勤出行需求；以市域(郊)铁路，城市轨道交通快线支撑两个城市广泛的城际通勤出行需求。第二，南京、扬州、南通等城市的交通可达性对当前城际通勤出行需求的支撑尚可，而对城际商务出行需求的支撑相对不足，应优先以干线铁路、城际铁路为发展核心，持续提升城际商务出行联系，促进区域经济一体化。第三，苏州、无锡、嘉兴等城市的交通可达性对当前城际商务出行的支撑尚可，而对城际通勤出行需求的支撑相对不足，应优先以市域(郊)铁路、城市轨道交通快线为发展核心，满足日益增长的城际通勤出行需求，支撑都市圈发展。

## 7 结语

中国城市群、都市圈的空间组织特征不同于西方发达国家，是建立在时速 200~350 km·h<sup>-1</sup> 高铁轨道上的超级城市区域。高铁网极大地改变了交通走廊区域的空间组织特征。各城

市普遍呈现的功能性联系飞地意味着长三角内部的空间组织关联并非以简单圈层形态向外拓展，而呈现更为复杂的“圈层+飞地”形态。城市群的区域交通基础设施建设须能切实支撑城际功能性联系的持续发展。这决定了面向城市群、都市圈的交通设施规划要形成相对应的实践方法，以此确定各城市融入区域经济一体化发展的交通可达性需求。

在城镇化与高铁同步快速发展的过程中，长三角功能性联系网络依然处于持续演化阶段。各城市的城际通勤出行、城际商务出行联系在交通可达性的提升中必将继续产生空间扩展，这又对长三角区域轨道交通系统的发展提出了新需求。交通设施适度超前发展反过来也会作用于功能性联系。交通可达性、功能性联系两者互动演进，也会改变城市群的空间组织形式。在认识交通可达性支撑、功能性联系需求两者关系的前提下，如何制定适宜的城际交通超前发展策略，还需要对导致两者不匹配的原因进行深入研究。认识城市自身属性如何影响交通可达性与功能性联系匹配性是下一步值得研究的议题。

注释：

Notes:

- ① 基于国家统计局公布数据，长三角三省一市占地面积约 35.91 万 km<sup>2</sup>。截至 2021 年初，三省一市地区生产总值 244 713.53 亿元，国内生产总值 1 015 986.20 亿元；根据第七次全国人口普查公报，三省一市常住人口 235 213 670 人，全国人口 1 411 778 724 人。
- ② 16 个核心城市指上海、杭州、南京、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、舟山、台州、苏州、无锡、常州、镇江、南通、泰州、扬州。
- ③ 路线规划 API 为一套 REST 风格的 Web 服务 API，以 HTTP/HTTPS 形式提供出行路线规划服务。
- ④ 以 2020 年 11 月 9 日—12 月 24 日为计算周期，以尽可能与人员跨城出行计算时段的季节对应。
- ⑤ 鉴于台州、舟山的交通可达性相比其他城市过弱，且舟山市并无区域轨道交通支撑，此处仅讨论其余 14 个城市。
- ⑥ 流动密度计算中，同时考虑了城市与周边各街镇单元间流入联系与流出联系。流动密度=(流入人数+流出人数)/街镇单元面积。街镇单元面积计算中剔除了各街镇单元的水域面积，仅为陆域面积。

参考文献:

References:

- [1] 国家统计局. 2022 中国统计年鉴[DB/CD]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 长江三角洲城市群发展规划[EB/OL]. (2016-06-01)[2022-01-21]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201606/W020190905497826154295.pdf>.
- [3] 中共中央国务院. 长江三角洲区域一体化发展规划纲要[EB/OL]. (2019-12-01)[2022-01-21]. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content\\_5457442.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm).
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 长江三角洲地区多层次轨道交通规划[EB/OL]. (2021-06-07)[2022-01-21]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202107/P020210702641340715011.pdf>.
- [5] 王缉宪. 高速铁路影响城市与区域发展的机理[J]. 国际城市规划, 2011, 26(6): 1-5.  
WANG J X. Urban and regional impacts of high-speed railways: a preamble[J]. Urban planning international, 2011, 26(6): 1-5.
- [6] 王姣娥, 丁金学. 高速铁路对中国城市空间结构的影响研究[J]. 国际城市划, 2011, 26(6): 49-54.  
WANG J E, DING J X. High-speed rail and its impacts on the urban spatial structure of China[J]. Urban planning international, 2011, 26(6): 49-54.
- [7] DIAO M. Does growth follow the rail? the potential impact of high-speed rail on the economic geography of China[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2018, 113: 279-290.
- [8] CASCETTA E, CARTENÌ A, HENKE I, et al. Economic growth, transport accessibility and regional equity impacts of high-speed railways in Italy: ten years ex post evaluation and future perspectives[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 139: 412-428.
- [9] 蔡润林, 张聪. 长三角城市群交通发展新趋势与路径导向[J]. 城市交通, 2017, 15(4): 35-48.  
CAI R L, ZHANG C. New transportation development strategies for the cluster of urban areas in Yangtze River Delta area[J]. Urban transport of China, 2017, 15(4): 35-48.
- [10] 蔡润林. 基于服务导向的长三角城际交通发展模式[J]. 城市交通, 2019, 17(1): 19-28.  
CAI R L. Service-oriented development for intercity passenger transportation within Yangtze River Delta[J]. Urban transport of China, 2019, 17(1): 19-28.
- [11] 王缉宪, 林辰辉. 高速铁路对城市空间演变的影响: 基于中国特征的分析思路[J]. 国际城市规划, 2011, 26(1): 16-23.  
WANG J X, LIN C H. High-speed rail and its impacts on the urban spatial dynamics in China: the background and analytical framework[J]. Urban planning international, 2011, 26(1): 16-23.
- [12] 吴康, 方创琳, 赵渺希, 等. 京津城际高速铁路影响下的跨城流动空间特征[J]. 地理学报, 2013, 68(2): 159-174.  
WU K, FANG C L, ZHAO M X, et al. The intercity space of flow influenced by high-speed rail: a case study for the rail transit passenger behavior between Beijing and Tianjin[J]. Acta geographica sinica, 2013, 68(2): 159-174.
- [13] 钮心毅, 李凯克. 紧密一日交流圈视角下上海都市圈的跨城功能联系[J]. 上海城市规划, 2019(3): 16-22.  
NIU X Y, LI K K. Inter-city functional linkages in Shanghai Metropolitan Region from the perspective of close daily communication area[J]. Shanghai urban planning review, 2019(3): 16-22.
- [14] 钮心毅, 岳雨峰, 李凯克. 长三角城市群中心城市与周边城市的城际出行特征研究[J]. 上海城市规划, 2020(4): 1-8.  
NIU X Y, YUE Y F, LI K K. Inter-city travel characteristics between central and surrounding cities in the Yangtze River Delta urban agglomerations[J]. Shanghai urban planning review, 2020(4): 1-8.
- [15] SÁNCHEZ-MATEOS H S M, GIVONI M. The accessibility impact of a new high-speed rail line in the UK: a preliminary analysis of winners and losers[J]. Journal of transport geography, 2012, 25: 105-114.
- [16] 汪德根, 章莹. 高速铁路对长三角地区都市圈可达性影响[J]. 经济地理, 2015, 35(2): 54-61.  
WANG D G, ZHANG Y. The influence of high-speed railways on accessibility of Yangtze River Delta region's metropolitans[J].

- Economic geography, 2015, 35(2): 54-61.
- [17] 文婧, 韩旭. 高铁对中国城市可达性和区域经济空间格局的影响[J]. 人文地理, 2017, 32(1): 99-108.
- WEN H, HAN X. The impacts of high-speed rails on the accessibility and the spatial pattern of regional economic development in China[J]. Human geography, 2017, 32(1): 99-108.
- [18] 汪光焘, 王继峰, 赵珺玲. 新时期城市交通需求演变与展望[J]. 城市交通, 2020, 18(4): 1-10.
- WANG G G, WANG J F, ZHAO J L. Evolution of urban travel demand in the new era [J]. Urban transport of China, 2020, 18(4): 1-10.
- [19] GIVONI M, BANISTER D. Speed: the less important element of the high-speed train[J]. Journal of transport geography, 2012, 22: 306-307.
- [20] 郝媛, 徐天东, 伍速锋. 高铁网络化背景下普铁与城市的冲突与协调[J]. 城市交通, 2020, 18(2): 67-75.
- HAO Y, XU T D, WU S F. Conflict and coordination between regular railway and cities in the network era of high-speed railway[J]. Urban transport of China, 2020, 18(2): 67-75.
- [21] 李凤军. 促进市域快速轨道交通经济可持续发展[J]. 城市交通, 2021, 19(6): 7-8.
- LI F J. Promoting the economic sustainable development of urban rapid rail transit[J]. Urban transport of China, 2021, 19(6): 7-8.
- [22] 钮心毅, 谢琛. 手机信令数据识别职住地的时空因素及其影响[J]. 城市交通, 2019, 17(3): 19-29.
- NIU X Y, XIE C. Identifying residence and workplace locations with cellular signaling data: spatial-temporal factors and impacts[J]. Urban transport of China, 2019, 17(3): 19-29.
- [23] NEUMAN M, HULL A. The futures of the city region[J]. Regional studies, 2009, 43(6): 777-787.
- [24] JIANG B. Head/tail breaks: a new classification scheme for data with a heavy-tailed distribution[J]. The professional geographer, 2013, 65(3): 482-494.
- [25] JIANG B, MIAO Y. The evolution of natural cities from the perspective of location-based social media[J]. The professional geographer, 2015, 67(2): 295-306.
- [26] JIANG B, MA D. How complex is a fractal? head/tail breaks and fractional hierarchy[J]. Journal of geovisualization and spatial analysis, 2018, 2(1): 1-6.

(上接第105页)

- [7] 新华社. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19)[2022-08-01]. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content\\_5431432.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm).
- [8] 殷韞, 廖璟瑒. 智慧出行服务新模式的解析和场景应用[C]//中国公路学会. 世界交通运输工程技术论坛(WTC2021)论文集(下). 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021: 2142.
- [9] 杨钧剑. 基于城市交通大数据的出行者出行本征分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- YANG J J. Research on traveler's travel characteristics analysis method based on urban traffic big data[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [10] 关积珍. 关积珍: 智能交通在中国的发展与创新[EB/OL]. (2020-10-29)[2022-08-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681878251734020939&wfr=spider&for=pc>.
- [11] 陈艳艳, 李同飞, 何佳, 等. 新技术时代城市交通管理与服务研究发展展望[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(6): 621-629.
- CHEN Y Y, LI T F, HE J, et al. Development and prospects of urban transportation management and services in the new era[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(6): 621-629.