

# 长江经济带多元客流城市网络的空间格局及影响因素<sup>1</sup>

牛彩澄<sup>1</sup> 刘承良<sup>※2, 3, 4</sup> 殷美元<sup>5</sup>

(1. 北京大学 城市规划与设计学院, 中国广东 深圳 518055;

2. 华东师范大学 全球创新与发展研究院, 中国 上海 200062;

3. 华东师范大学 世界地理与地缘战略研究中心, 中国 上海 200062;

4. 华东师范大学 城市与区域科学学院, 中国 上海 200241;

5. 江苏省测绘工程院, 中国江苏 南京 210013)

**【摘要】**：基于长江经济带126个城市之间的公路、铁路和航空班次数据，刻画了长江经济带多元客流城市网络的空间分布与关联格局，并采用负二项回归模型讨论其影响因素，揭示不同交通网络空间分布差异的背后机制。研究发现：①长江经济带的多元客流网络具有显著的空间分异，航空和铁路的空间分异主要来源于上中下游之间以及省内；公路的空间分异主要来自区域内部与省际差异。②三种交通网络具有显著的空间异质性和层级性。城际公路联系主要集中在省内和邻省，形成了围绕省会城市的多“核心—边缘”结构；铁路联系主要分布于长三角以及两大沿江通道；航空联系横跨上下游地区，对地面运输具有显著的补充效应。③地理距离、文化距离、经济距离、产业结构及自然地形地貌对综合交通网络的形成与城际关联强度具有重要影响。

**【关键词】**：多元客流；城市网络；核心—边缘结构；长江经济带；城际关联强度；交通网络；长江沿江通道

**【中图分类号】**：F570.3 **【文献标志码】**：A **【文章编号】**：1000 - 8462 (2022) 11 - 0045 - 09

**【DOI】**：10.15957/j.cnki.jjdl.2022.11.006

伴随着经济全球化和科学技术的发展，城市之间的人员、资金、信息等互动愈加频繁。基于传统中心地理论的“场所空间”

<sup>1</sup> **【收稿时间】**：2022 - 08 - 01；**【修回时间】**：2022 - 10 - 22

**【基金项目】**：国家社会科学基金重大项目（21ZDA011）；上海市“曙光学者”人才计划项目（19SG22）

**【作者简介】**：牛彩澄（1995—），女，山东淄博人，博士研究生，研究方向为城市网络与空间规划。E-mail:niucc@stu.pku.edu.cn

**【※通讯作者】**：刘承良（1979—），男，湖北武汉人，博士，教授，博士生导师，研究方向为科技地理与区域创新。

E-mail:clliu@re.ecnu.edu.cn

逐渐被打破,“流空间”更能够真实地反映现代城市的发展与对外互动联系,并促使城市体系研究逐渐向“网络范式”的转变<sup>[1,2]</sup>。大数据时代下,交通流(包括城际航空流、铁路流、公路流等关系型交通数据)的可获取性增加,使得近年来交通网络以及基于交通流的城市网络研究蓬勃发展<sup>[3,4,5]</sup>。交通运输联系是刻画城市流空间最显性的方式之一,其作为流要素的实体载体能够直接体现城市空间联系和网络结构,对引导区域空间发展具有重要意义,因而被广泛应用于城市网络研究当中<sup>[6]</sup>。

航空流是最早应用于网络研究的交通流数据。金凤君突破传统引力模型,首次将关系型航空客流数据应用于我国的城市网络地域系统研究中<sup>[7]</sup>。之后,航空流成为城市网络研究的重要途径,主要关注航空视角下城市网络的层级结构、空间演化、拓扑特征、组织模式等<sup>[8,9,10,11,12]</sup>。随着高速铁路的发展及公路流数据的可获取性增强,城际交通联系的研究视角延伸到铁路流和公路流,聚焦于城市的空间结构、演化与组织等,揭示不同交通流所反映的区域空间结构<sup>[13,14,15,16]</sup>。基于交通流刻画城市网络结构能够挖掘城市空间联系格局和组织模式,有助于深化对区域城际关联的空间认知。

长江经济带是我国宏观经济发展的重要轴带,覆盖东部、中部、西部三大区域,了解城际交通网络结构对完善长江经济带综合交通网络建设具有重要意义。已有研究多聚焦长江经济带的铁路客运、航空运输、物流货运网络联系格局<sup>[17,18,19]</sup>,以及长江经济带内长三角、长江中游、成渝三大城市群客运联系网络结构<sup>[20]</sup>,在一定程度上丰富了长江经济带城际交通网络研究,但鲜有关于长江经济带多元客流的比较研究。目前,长江经济带内城际客运主要依赖于铁路、公路、航空运输,考虑到不同交通运输方式在服务功能、空间特征上的差异,通过单一客流数据理解城市网络结构会存在片面性<sup>[21,22,23,24]</sup>,因此通过多元客流比较研究理解长江经济带城际关联格局是有必要的。此外,已有城际客运联系研究主要聚焦城市网络的宏观格局、等级划分和层级结构等,缺乏对多元客流空间关联差异化的机理讨论。

基于此,本文基于长江经济带126个地级及以上城市之间的公路、铁路和航空班次数据构建城市网络,通过多元客流比较分析以刻画长江经济带城市网络的空间格局,并采用负二项回归模型揭示不同交通运输方式下城市网络空间组织机理,有助于全面理解长江经济带城市网络的空间格局及组织机制,以期对长江经济带综合交通运输体系的建设及区域协调发展提供理论参考依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域数据来源

长江经济带横跨我国东部、中部、西部区域,具有独特地域优势和巨大发展潜力。长江经济带东起上海、西至云南,包含上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、贵州、四川、云南等11个省市,共计126个地级及以上行政单元,占全国国土面积的1/5以上。

本文数据主要来自携程旅行网(<http://www.ctrip.com/>),基于数据抓取和清洗,获取2017年11月某周的长江经济带城际铁路、公路的平均日班次数。城际客运联系通常易受到时变因素的干扰。考虑到寒暑假以及春节等国家法定节假日会对城际出行带来特殊影响,且11月没有节假日跨城流动的干扰,因此选择11月作为代表性月份获取数据。航空班次数据来源于飞常准(<http://www.vari-flight.com/>),考虑航空出行的规律性,以周为单位获取2017年11月27日—12月3日期间长江经济带内城际航班频次。其他社会经济数据来自《中国城市统计年鉴(2018)》,用于测算文化邻近性的基因数据来源于《Chinese surnames and the genetic differences between North and South China》[25],城市地形起伏度指标根据长江经济带的DEM高程数据计算获得。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 网络构建

基于图论原理，本文以长江经济带 126 个地级及以上城市为节点，城际交通联系为边，班次强度为权重，构建长江经济带城市网络的加权非对称矩阵[式（1）]。本文分别从航空、铁路和公路视角构建三类长江经济带城市网络，以期全面认识长江经济带城际交通联系现状格局。

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \cdots & w_{1(n-1)} & w_{1n} \\ n_{21} & 0 & \cdots & w_{2(n-1)} & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{(n-1)1} & w_{(n-1)2} & \cdots & 0 & w_{(n-1)n} \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

三种交通网络的基本统计特征见表 1。长江经济带内有 69 个城市开通机场航线，共有 781 条城际航空联系，其中大部分联系位于区域、省市之间。据统计，区域内的航空关联有 256 个城市对，其中 73% 的区域内关联集中在西部地区；省内航空联系有 73 对，也主要集中在西部地区。铁路和公路网络的关联统计情况见表 1。

表 1 三种交通网络的基本统计特征

|    | 节点（个） | 总关联（对） | 省内关联（对） | 省际关联（对） | 区域内关联（对） | 区域间关联（对） |
|----|-------|--------|---------|---------|----------|----------|
| 航空 | 69    | 781    | 73      | 708     | 256      | 525      |
| 铁路 | 110   | 4 965  | 917     | 4 048   | 2 297    | 2 668    |
| 公路 | 117   | 2 928  | 1 165   | 1 763   | 2 129    | 799      |

1.2.2 泰尔指数

本文采用泰尔指数对不同交通方式下的城际客运联系强度差异进行测度。泰尔指数是衡量区域差异的一个重要指标，可以分解为组内差距与组间差距。本文从区域尺度与省级尺度分析不同交通网络的空间分布差异，以地级及以上城市为基本区域单元，将长江经济带总体差异分解为省际（区域间）差异和省内（区域内）差异。

$$T_p = \sum_i^n \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \ln \frac{Y_{ij}/Y}{N_{ij}/N} \quad (2)$$

$$T_p = T_w + T_b \quad (3)$$

$$T_w = \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) T_{pi} = \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \sum_j \frac{Y_{ij}}{Y_i} \ln \left( \frac{Y_{ij}/Y_i}{1/N_i} \right) \quad (4)$$

$$T_b = \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_i/Y}{N_i/N} \right) \quad (5)$$

式中： $Y_{ij}$  代表第  $i$  省（区域）第  $j$  城市的客运联系强度； $Y$  代表所有城市的客运联系强度； $Y_i$  代表第  $i$  省（区域）所有城市的客运联系强度； $N$  是研究区域城市总个数； $T_p$  代表总差异； $T_w$ 、 $T_b$  分别表示省（区域）内差异与省（区域）际差异； $T_{pi}$  表示第  $i$  省（区域）的省（区域）内差异。

## 2 长江经济带多元客流网络的空间格局

### 2.1 总体空间分异特征

总体看，长江经济带的多元客流网络存在显著的空间分异特征，省域尺度的空间分异特征大于区域尺度。

①从区域尺度看，航空和铁路网络的空间不均衡主要集中在区域之间，而公路网络的空间分异主要来源于区域内部。总体上，区域尺度下公路客运网络的空间差异最大，航空次之，铁路最小（图 1a）。将总差异拆解为区域内差异（ $T_{rw}$ ）与区域间差异（ $T_{rb}$ ），发现航空和铁路的  $T_{rb}$  大于  $T_{rw}$ ，公路则相反。进一步对区域内差异进行区域分解（图 1b），发现西部地区对公路和铁路的区域内差异贡献率最高，说明西部区域内部在公路和铁路运输上差距较大，可能是西部地区地面交通运输的巨大空间差距造成的。中部地区对公路、铁路和航空交通网络的区域内差异贡献率均较低，反映出鄂湘赣三省的城际交通联系水平比较接近。东部地区对航空网络的组内差距贡献率最高，说明东部地区城市间的航空客运能力差异较大，仅少数核心城市提供大量的航空运输服务，如上海、杭州、南京等。

②省域尺度下，航空和铁路关联不均衡主要来源于省内，而公路差异主要是省际不平衡造成的。总体来看，航空流的省级差异最显著，其次是铁路，最后是公路（图 1c）。航空和铁路的省内差距大于省际差距，公路则相反。将省内差异进行分解（不考虑上海和重庆），发现省内客运联系的不均衡表现为航空 > 铁路 > 公路（图 1c）。其中，贵州的航空省内差异最小，表明贵州省内的地级行政单元之间的航空发展比较平衡。受地形地貌等自然因素影响，贵州是全国唯一每个市（州）都拥有机场的省份，形成了省内机场群，因此省内城际间航空差异较小。铁路省内差异最显著的是云南，可能是由于云南地形地势复杂，山地高原为主，铁路建设难度大，维护成本高，且多个地级行政单元（包括迪庆、怒江、德宏、红河和文山）未开通铁路造成的。公路网络易受地形起伏和地域单元大小影响，因此公路客运省内差异较大的也主要是西部省份。

## 2.2 节点强度的空间异质性

从节点关联强度看，长江经济带多元客流网络具有明显的空间异质性，且不同类型网络的空间格局具有显著差异。采用反距离权重空间插值法对三种交通网络的城市节点关联强度进行地理可视化，以避免个别节点存在空值的情况（图2）。东部地区在公路与铁路联系中占主导地位；西部地区在航空联系中具有地域优势，航空对地面交通具有一定的补充效应（表2，图2）。

①公路网络的核心节点主要聚集于长江经济带的三大城市群：长三角城市群、长江中游城市群与川渝城市群。这反映了长江经济带公路网络与城市群空间分布具有一定的耦合关系。长三角城市群的节点强度远高于其他地区，联系强度前二十的城市有一半以上集中在长三角。从空间格局看，长三角城市群节点强度整体呈现从沿海向内陆逐级递减的趋势，以上海（2114）为中心沿长江向内陆呈扇形递减，沿江、沿海以及省会城市的联系强度较大。其次是成渝城市群和长江中下游城市群，其空间呈现以省会城市为核心向周边扩散递减态势。整体看，公路节点强度与长江经济带当前三大城市群高度一致，说明公路联系与区域一体化发展密切相关，频繁的公路联系能够促进城市群一体化发展<sup>[23]</sup>。

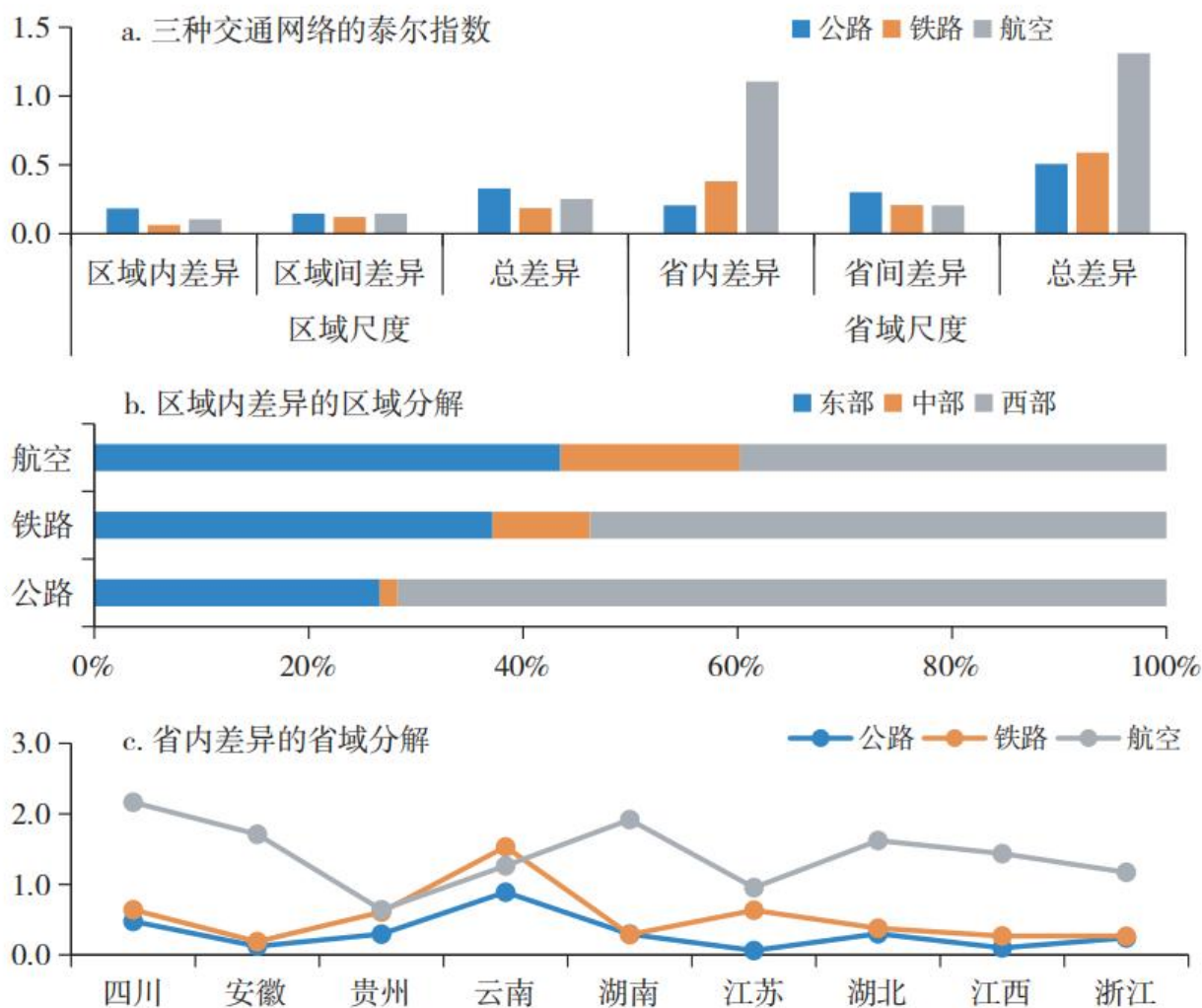


图1 不同尺度下三种交通方式的泰尔指数

Fig.1 Theil index of three transportation networks at regional and provincial scale

(2)铁路节点强度形成了“东强西弱，南高北低”的带状空间格局，与铁路线分布高度重合。其中，长三角地区的铁路节点强度最为突出，上海（4 919）、南京（4 721）和杭州（4 131）位居长江经济带铁路关联班次的前三位，沪宁线与沪杭线构成了长江经济带铁路网络的龙头区域。其次，沪昆线与沪汉蓉线两大东西走向的主干铁路横穿长江经济带，分别以上海为起点向西延伸至四川和云南，两大通道沿江共同形成了长江经济带的铁路大动脉。此外，京九、京广和成昆等纵向铁路线进一步将长江经济带主要省份进行南北向串联。总体来看，高强度节点城市主要集中分布在东部与中部地区，除省会城市外的西部地区普遍处于低值区。

(3)与铁路相反，长江经济带的航空节点强度呈现“西强东弱”的空间格局。地面交通网络不太发达的西部地区在航空运输上具有明显优势。昆明的航空节点强度（630）大于上海（429），位居长江经济带航空网络节点强度第一位，可能与云南省内城际联系比较依赖航空运输有关。整体来看，西部地区的省会城市的航空节点强度均高于东部和中部地区的省会城市。航空网络节点强度呈现出以昆明、贵阳、重庆和成都四个西部中心城市为核心向周边区域逐步扩散的态势，而中下游地区则呈现出以省会等核心城市为中心的散点分布。

总之，三种交通方式从不同客流视角揭示出长江经济带城市网络的空间格局差异，也反映出基于多元客流探究城市网络的必要性。

表 2 三种交通网络中城市节点关联强度排名前十城市

| 排名 | 公路 |       | 铁路 |       | 航空 |      |
|----|----|-------|----|-------|----|------|
|    | 城市 | 关联强度  | 城市 | 关联强度  | 城市 | 关联强度 |
| 1  | 上海 | 2 114 | 上海 | 4 919 | 昆明 | 630  |
| 2  | 南京 | 1 771 | 南京 | 4 721 | 上海 | 429  |
| 3  | 成都 | 1 475 | 杭州 | 4 131 | 成都 | 376  |
| 4  | 杭州 | 1 462 | 长沙 | 3 150 | 重庆 | 321  |
| 5  | 苏州 | 1 286 | 武汉 | 3 108 | 贵阳 | 251  |
| 6  | 扬州 | 1 149 | 苏州 | 2 981 | 杭州 | 206  |
| 7  | 舟山 | 1 093 | 南昌 | 2 730 | 武汉 | 189  |
| 8  | 泰州 | 1 082 | 无锡 | 2 374 | 长沙 | 182  |
| 9  | 南通 | 1 059 | 徐州 | 2 301 | 南京 | 152  |
| 10 | 常州 | 1 055 | 上饶 | 2 247 | 丽江 | 130  |

---

### 2.3 城际关联的等级层次性

长江经济带多元客流网络的城际关联具有典型的等级层次性。利用 ArcGIS10.3 依次绘制出公路、铁路和航空城际空间关联,将城市关联节点与关联班次的数量根据自然断裂法分为 6 个层级(图 3)。统计交通网络的前 3 级关联,发现公路、铁路和航空网络的前 2.83%、2.82%和 7.68%的城市对分别占据了整体网络关联的 34.34%、27.73%和 46.42%,表明加权网络具有更为极化的等级层次性。

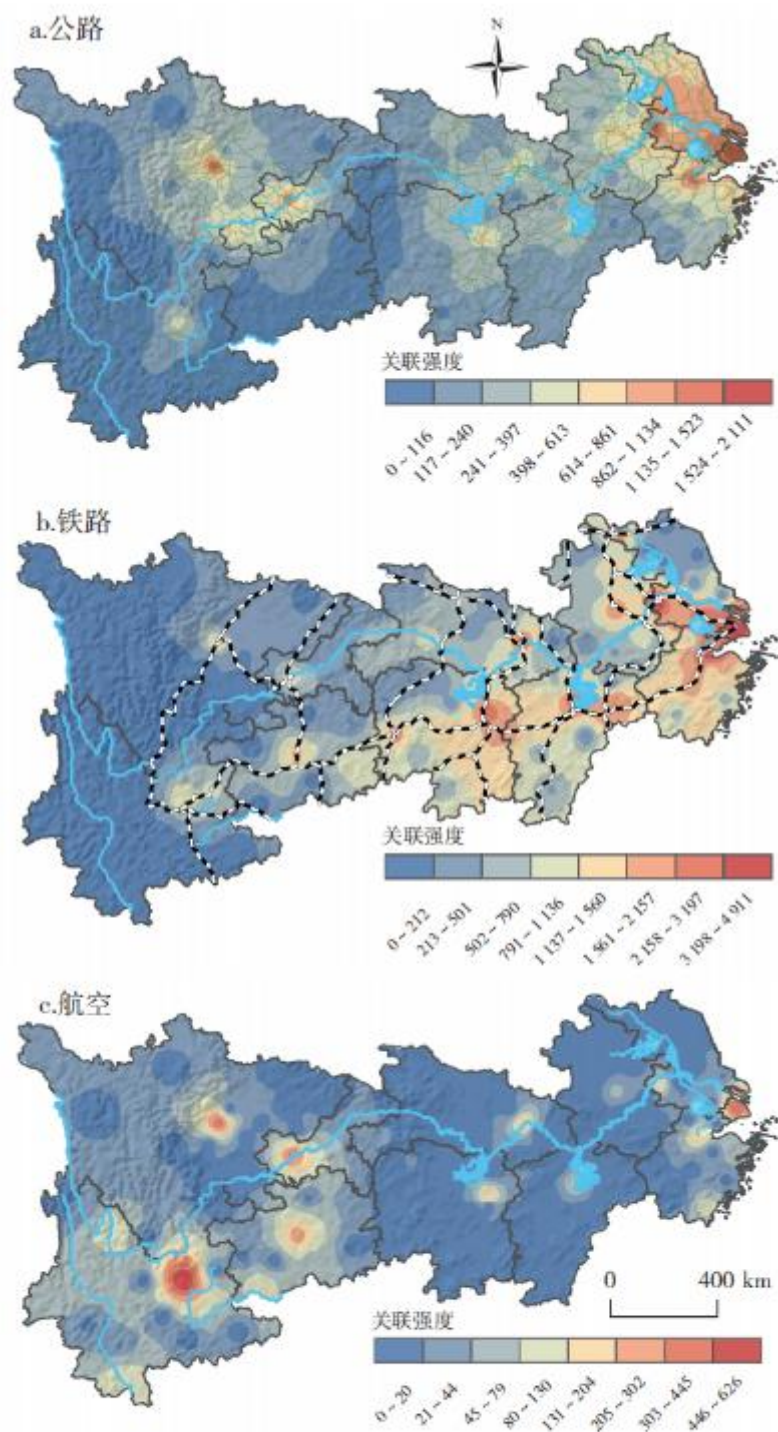


图2 公路、铁路和航空交通网络的城市关联强度空间格局  
Fig.2 Spatial patterns of city connection intensity of three transportation networks (road, railway and aviation)

①公路网络围绕省会城市形成了多“核心—边缘”的区域空间结构（图 3a）。长江经济带城际公路联系多集中在省内或邻近省份的城市之间，尤其是省会与省内其他地级行政单元。前 3 层级公路联系主要是江浙沪、成渝地区的区域内部联系，以及

---

以合肥、武汉、长沙、南昌和昆明等省会城市为核心的省内联系。

②铁路网络呈现出明显的“一区两横一纵”区域空间结构（图 3b）。纵横交错的铁路关联形成了长三角铁路网络密集区（一区）。其次，沪汉蓉铁路通道与沪昆铁路将长三角、长江中游、成渝、滇中和黔中城市群紧密地串联在一起，形成了两条非常明显的铁路沿线城市带（两横），对跨区域城际联系起到重要作用，成为长江经济带东西横向运输的主动脉。“一纵”是穿越长江中游城市群的京广、京九等南北纵向铁路线，其满足了长江中游地区的南北城际联系需求。与公路网络相似，长江经济带西部地区的铁路联系相对薄弱。

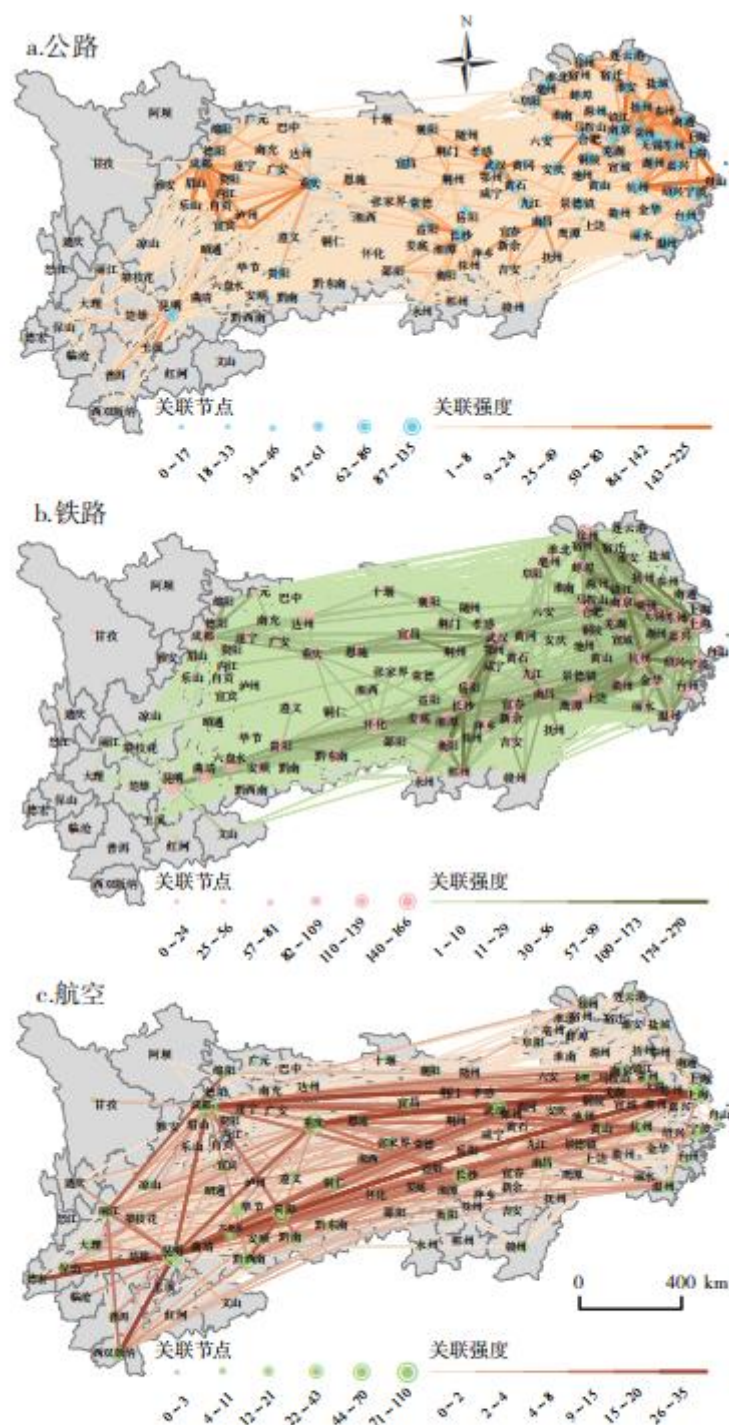


图3 公路、铁路和航空交通网络的城际联系空间格局  
Fig.3 Spatial patterns of intercity linkages of three transportation networks (road, railway and aviation)

③航空网络在空间上主要表现为东西横跨长江经济带的长距离联系（图3c）。核心关联主要集聚在西部城市以及东西部跨区域城市之间，如昆明↔上海，成都↔上海，西双版纳↔昆明，上海↔重庆，昆明↔重庆等重要城市联系。与稀疏的公路与铁路网络相比，西部地区的航空网络较为密集，作为云贵、川西地区城际互联的重要交通方式，航空网络成为地面交通落后地区

与区域核心城市构建城际联系的主要载体，形成对地面交通的有效补充。受区位及地面运输联系影响，长江中游地区的航空关联较弱，成为城际航空关联的洼地。

#### 2.4 三种交通网络的核心距离区间竞争性

从空间关联上可以发现交通网络对地理距离的敏感性具有明显差异：公路>铁路>航空。以 200 km 为单位，统计各单位距离范围内城际班次的比重（图 4）。交通网络的距离—班次频率均呈现正偏态分布，公路、铁路和航空关联对地理空间的突破能力依次增强，服务距离逐步拓展。80%以上的公路、铁路与航空班次分别集中在<600 km、200~1 000 km、400~1 600 km 范围内。航空网络的非平面运输优势使得其对距离约束的突破最强，其距离—班次频率的曲线变化相对更加平缓。具体来看，公路班次主要集中在 100~400 km 范围内，超过 400km 后公路班次频率开始下降，且下滑幅度较大，说明公路受到距离因素的显著约束。但该曲线在 1 600 km 处出现小幅波动，发现这一区间集中了长三角城市群与西部地区之间的城际公路联系。铁路班次主要集中在 200~600 km 范围内，超过 600km 后班次频率逐渐下降。与公路相比，铁路网络受到的地理距离约束较小，而航空网络则进一步表现出对地理空间约束的克服，航空关联在中长距离（800~1 600 km）的班次频率下降并不明显。航空关联在距离分布上出现了两个集聚点（600 km、1 600 km），这可能与长江经济带的空间、地形及经济特征密切相关。一是西部地区由于地形地貌等因素对航空运输较为依赖，造成航空联系在中程距离上产生了 500~700 km 集聚区；二是随着地理距离的增加，航空运输对地理距离的突破能力逐渐显现，东部与西部地区之间长距离城际联系依赖航空客运，如上海—成都、上海—昆明、杭州—昆明等城际关联均处于 1 600 km 距离范围内，使得航空班次占比在地理空间 1 600 km 处出现小幅增长。综上所述，三种交通客运网络存在各自的核心距离区间，彼此具有竞争性与互补性，这与刘承良等<sup>[24]</sup>发现一致。

### 3 长江经济带多元客流网络格局的影响因素回归分析

已有文献表明，地理邻近性对不同交通网络的组织模式具有不同影响<sup>[21]</sup>。不同交通运输方式对距离的敏感性存在差异，空间距离会影响人们城际出行方式的选择。此外，经济发展水平、第三产业发展与区域交通可达性存在一定的互动关系<sup>[17, 26]</sup>。文化影响人际交流与互动<sup>[27]</sup>，相近的历史发展背景与区域文化共性可能会影响城际交通联系。语言、民族和宗教等指标作为地方文化的重要表征已被广泛应用于文献中<sup>[28]</sup>。但上述指标仅能体现文化的一个方面。基因科学研究发现相似的基因会使得人们拥有相近的文化接受程度，因此基因距离也成为刻画文化邻近性的重要指标<sup>[29]</sup>。地形地貌特征对路网建设、区域可达性具有一定影响<sup>[30]</sup>，所以本文采用地形起伏度这一指标表征区域地貌类型的变化<sup>[31]</sup>。综上，考虑城际交通关联的有向加权特征，选择城际客流关联强度为被解释变量，城际间的地理邻近性、经济发展差距、产业结构相似度、文化邻近性和地形起伏度作为潜在的解释变量来探讨长江经济带多元客流网络的影响因素。

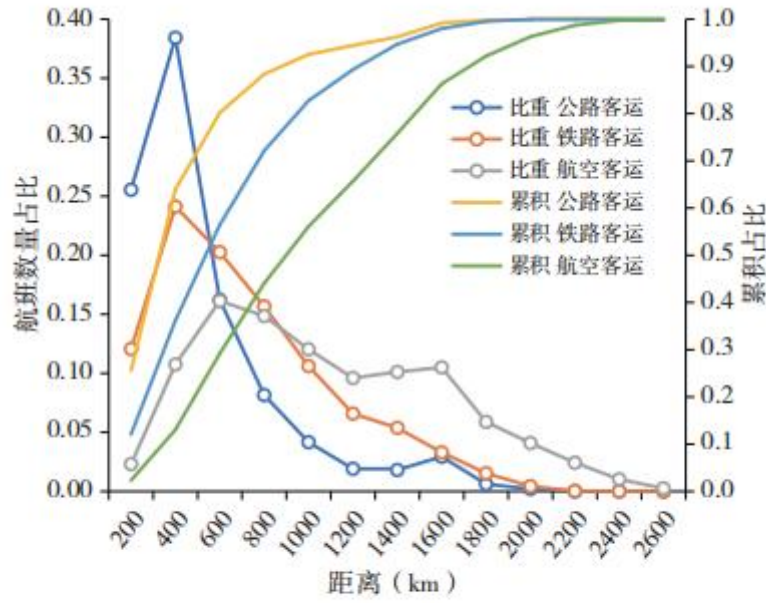


图4 三种交通网络的距离分布规律特征  
Fig.4 Distance distribution characteristics of the three transportation networks

此外，考虑城市等级的影响，以“出发城市和到达城市是否有省会城市”作为模型的控制变量。基于上述结果，西部省份内部城际联系较为依赖航空网络，因此在航空网络模型中补充“航空对为西部省份内部的城际关联”作为控制变量，若航空对为云南、贵州、四川3个省内部的城际联系，赋值为1，否则为0。由于城际交通关联强度属于离散型计数变量，考虑数据结构特征，采用负二项回归模型分析长江经济带多元客流城市网络的影响因素。模型如下：

$$Connections = \alpha_0 + \beta_1 Geo + \beta_2 Rdl_s + \beta_3 Ecgap + \beta_4 Cul + \beta_5 Ins + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中： $\varepsilon_{it}$ 为模型误差项； $\alpha_0$ 和 $\beta$ 是模型待估参数；其他解释变量的计算方式见表3。基因距离借鉴钱超峰等<sup>[29]</sup>采用的Nei氏标准遗传算法计算获得各省市之间的相对遗传距离。地形起伏度是基于精度30m的DEM高程数据，采用封志明等提出的地形起伏度计算方式获得<sup>[31]</sup>。

为保证回归结果的准确性，需要对解释变量进行多重共线性检验。检验结果表明，解释变量的方差膨胀因子（VIF）均小于2，可认为模型不存在多重共线性问题。回归模型结果见表4。其中，模型结果（1）、（2）为城际公路联系影响因素回归结果；（3）、（4）为城际铁路联系的回归结果；（5）、（6）为城际航空联系的回归结果。

地理邻近性（Geo）对城际公路和铁路客运出行联系具有显著的正向作用，表明空间距离较近的城市之间的公路和铁路联系更为紧密，也反映出地面交通易受到空间因素的制约。其中，地理邻近性对公路联系的正向作用比铁路更大。地理邻近性对航空客运的影响显著为负，表明远距离城际联系更倾向选择航空运输。这与长江经济带航空网络主要集中在东西远距离联系密切相关。航空网络因具有不受空间距离制约的优势而备受长距离城际关联的青睐，这与王成金等<sup>[21, 28]</sup>研究发现一致。不同交通方式具有不同的优势地理距离区间，省内或邻省城际联系优选公路和铁路等地面运输方式，而航空网络一般承担远距离的跨区域城

际出行，这可能是导致不同交通方式联系强度空间差异的核心原因。

地形起伏 (Rdls) 对城际公路和铁路网络产生了明显的负向影响，说明地形起伏会显著抑制公路和铁路城际联系，反映出地形起伏会阻碍地面交通的发展。从空间格局看，受地形地貌影响，除成渝城市群外的西部地区的公路与铁路城际联系十分薄弱（图 4），这可能与西部的地形复杂、地势起伏度大，公路和铁路修建难度大、成本高、技术标准严等问题相关。另一方面，地形起伏度能够促进城际间的航空联系。由于地面交通发展薄弱，西部地区的出行需求更依靠空中客运来满足，航空网络成为西部地区重要的城际运输方式，说明航空网络与地面交通网络不仅存在竞争关系，也证实航空网络与地面交通具有较强的互补性<sup>[24]</sup>。

表 3 变量定义与解释

| 变量名称         | 符号                 | 指标解释或公式                                                                                                                                                                |
|--------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>被解释变量</b> |                    |                                                                                                                                                                        |
| 城际客运关联强度     | <i>Connections</i> | 城市 <i>i</i> 到城市 <i>j</i> 的交通出行班次数                                                                                                                                      |
| <b>解释变量</b>  |                    |                                                                                                                                                                        |
| 地理邻近性        | <i>Geo</i>         | $geo = 1 - \ln \frac{d_{ij}}{\max d_{ij}}$ (7), $d_{ij}$ 为城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 间的地理距离, $d_{ij}$ 越大, <i>geo</i> 越小                                                  |
| 地形起伏度        | <i>Rdls</i>        | 选择城际关联中地形起伏度较大的一方                                                                                                                                                      |
| 经济发展水平差距     | <i>Ecgap</i>       | $ecgap = 1 - \ln \frac{gdp_{\min}}{gdp_{\max}}$ (8), $gdp_{\min}$ 和 $gdp_{\max}$ 分别代表城市 <i>i</i> 和 <i>j</i> 的二者中 GDP 较小值和较大值                                           |
| 文化邻近性        | <i>Cul</i>         | 基于省际相对基因距离定义城际间的文化邻近性                                                                                                                                                  |
| 产业结构相似度      | <i>Ins</i>         | $ins = \frac{\sum_{k=1}^3 (p_{ik} p_{jk})}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 (p_{ik})^2 \sum_{k=1}^3 (p_{jk})^2}}$ ( $k=1, 2, 3$ ) (9), $p_{ik}$ 是城市 <i>i</i> 中产业 <i>k</i> 的产值占总产值的比重 |
| <b>控制变量</b>  |                    |                                                                                                                                                                        |
| 关联中有省会城市     | <i>Capital</i>     | 虚拟变量, 关联中存在省会赋值为 1, 地级市赋值为 0                                                                                                                                           |
| 西部省份内部航空对    | <i>West_up</i>     | 虚拟变量, 航空对若为西部地区的省内联系则赋值为 1, 其他为 0                                                                                                                                      |

表 4 回归模型结果

|                        | (1) road          | (2) road           | (3) rail          | (4) rail          | (5) air           | (6) air           |
|------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 地理邻近性( <i>Geo</i> )    | 1.078*** (30.17)  | 1.047*** (31.56)   | 0.906*** (31.64)  | 0.860*** (34.91)  | -0.378*** (-4.07) | -0.375*** (-4.10) |
| 地形起伏度( <i>Rdls</i> )   | -0.0618** (-3.27) | -0.0939*** (-6.05) | -0.0495** (-2.80) | -0.109*** (-7.16) | 0.120*** (3.54)   | 0.100** (2.89)    |
| 经济差距( <i>Ecgap</i> )   | 0.418*** (12.71)  | 0.157*** (5.03)    | 0.152*** (6.59)   | -0.125*** (-5.38) | -0.241*** (-5.97) | -0.268*** (-6.87) |
| 文化邻近性( <i>Cul</i> )    | 0.0938*** (8.18)  | 0.102*** (10.56)   | 0.0237* (2.47)    | 0.0365*** (4.54)  | -0.0452* (-2.09)  | -0.0493* (-2.35)  |
| 产业相似度( <i>Ins</i> )    | 0.418 (1.40)      | 1.028*** (4.05)    | 1.216*** (5.98)   | 1.179*** (6.35)   | 1.697*** (3.64)   | 1.603*** (3.61)   |
| 西部省内( <i>West_up</i> ) |                   |                    |                   |                   | 1.661*** (7.16)   | 1.729*** (8.04)   |
| 省会( <i>Capital</i> )   |                   | 0.960*** (17.41)   |                   | 1.093*** (27.44)  |                   | 1.017*** (5.64)   |
| _cons                  | -3.200*** (-9.61) | -3.443*** (-12.14) | -1.698*** (-7.66) | -1.287*** (-6.39) | 0.237 (0.44)      | -0.440 (-0.85)    |
| lnalpha                | -0.250*** (-7.20) | -0.423*** (-12.50) | 0.0268 (1.33)     | -0.174*** (-8.86) | -0.183** (-2.71)  | -0.275*** (-3.68) |
| N                      | 2 928             | 2 928              | 4 965             | 4 965             | 781               | 781               |

注: \*\*\* $p < 0.01$ , \*\* $p < 0.05$ , \* $p < 0.1$ 。

根据模型（1）与（3），经济发展差距（Ecgap）会促进城际公路和铁路联系的产生，公路与铁路网络将不同经济发展水平的城市紧密关联起来。但控制“省会城市”变量后，公路模型（2）中，“经济发展差距”这一变量的系数显著变小；而在铁路模型（4）中，变量系数由正转负，说明对于省会城市，经济发展差距会抑制小城市与省会城市产生铁路联系。实际上，经济较为落后的小城市在对外联系中更为依赖公路运输。从航空网络回归结果看，经济差距对航空联系具有显著的负向影响，说明速度快且成本高的航空出行主要集中在经济发展水平相对发达的城市，因此经济差距会显著抑制航空联系强度，这与货运<sup>[19]</sup>的研究结果发现一致。

文化邻近性（Cul）对公路网络的影响显著为正，说明相同文化背景会促进城际公路出行；对铁路网络有一定的正向影响，说明同一文化区的城际铁路联系会相对密集，尤其是控制省会城市变量后，文化邻近性系数的显著性增强。文化邻近性与航空网络存在负相关关系，说明航空联系能够打破文化区的交流界限，促进不同地域文化的传播与交流，且省会城市的文化包容性更强[29]。产业结构相似度对公路联系没有显著影响，但控制省会城市变量，即考虑城市行政等级后系数显著为正，表明省会城市与产业结构相似的城市之间的公路联系更密切。同时，产业结构相似度对城际铁路和航空联系的影响显著为正，说明产业发展结构相似的城市之间的铁路和航空关联也更为紧密。

综上，城市经济发展水平、行政等级、文化归属等社会经济属性与城市的区位、地形地貌等客观自然环境共同交互对长江经济带多元客流网络产生不同的影响。这些因素综合影响城际客运联系的强弱。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论与讨论

本文从多元客流视角分析了长江经济带城市网络的空间结构与影响因素，揭示了长江经济带的多元客流网络的空间分异、空间结构与影响机制。主要得出以下结论：

①长江经济带的多元客流网络具有显著的空间分异特征。区域尺度的空间分异规律是公路>航空>铁路；省域尺度的空间分异特征为航空>铁路>公路。航空和铁路网络的空间分异主要集中在区域之间以及省内，而公路网络的不均衡主要是区域内部和省际差异造成的。

②从节点强度看，长江经济带三种客流网络具有显著的空间异质性。航空、铁路和公路的城际关联强度在地理空间上分别形成了“点”“线”“面”的特征。航空网络主要以省会城市为中心向周边扩散；铁路网络以长三角为中心围绕沿江铁路线形成重点交通轴带；公路网络与长三角、长江中游和川渝三大城市群具有明显的空间耦合关系。

③从关联格局看，城际公路联系主要集中在省内和邻省，形成围绕省会城市的多“核心—边缘”结构；铁路联系主要分布于长三角以及两大沿江通道；航空联系横跨长江经济带的东西，主要满足长距离出行与地面交通落后地区对外联系的需求。西部地区受区位、地形、距离等因素影响，地面运输网络关联稀疏，航空网络对地面运输网络进行了有效互补。

④地理距离与地形起伏等自然环境因素以及经济发展水平、文化特征、产业结构、行政等级等社会经济因素均对城际交通网络的形成具有重要影响。同时，交通网络的形成又能够促进城市的经济发展、产业结构优化调整以及文化交流传播等。

综上，由于长江经济带自身资源禀赋及经济发展水平的差异较大，多元客流视角下交通网络的区域碎片化、非均衡发展特征十分明显。西部地区的地面交通基础设施覆盖率低，如云南、贵州和川西地区的公路和铁路网络相对稀疏，城市对外交通方式单一，综合客运网络的抗风险能力较弱。其次，城际客运关联的空间异质性和等级层次性反映出长江经济带城市网络具有典型的层级结构。部分经济落后的城市对外联系薄弱，限制了这些城市的劳动力、资本等要素流动，进而阻碍制造业、服务业（尤其是旅游业）发展以及文化传播。同时，区域中的人力、资金和资源等发展要素容易被大城市虹吸，可能会进一步拉大区

---

域发展差异。

#### 4.2 建议

针对当前长江经济带客运网络特征，并联系长江经济带“通道支撑，协调发展”的基本原则，本文提出以下政策建议：①加快地面交通基础设施建设，补齐长江经济带陆路交通基础设施短板。加快沪汉蓉沿江铁路线建设，提升沿海城市的铁路客运运输水平。增强长江经济带纵向铁路客运联系，促进成渝地区与云贵地区的铁路衔接，加强长江中游城市群的纵向城际互动。进一步加强西部地区，特别是滇中城市群与黔中城市群的公路基础设施建设，实现公路客运全覆盖，提升西部偏远地区的对外联系能力。②合理规划布局支线机场建设，优化航空网络组织模式。航空客运是支撑长江经济带西部地区对外联系的有效方式。然而，航空运输作为高成本出行方式，机场建设与航线布局可能受限于当地的经济发展水平与居民收入水平。对此，需要合理评估偏远机场运力与居民出行需求，优化“轴—辐”式空间组织，协调支线机场与枢纽机场之间的航线与航班配置以支撑偏远城市对外联系的需要。③打造长江经济带综合交通客运网络，促进区域协调发展。加强区域综合交通网络建设，满足居民个性化出行需求，引导区域人才迁移；发挥核心城市的区域影响力，扶持中小城市的对外交通建设，加强区域产业转移与经济合作，缩小东部、中部和西部地区经济发展差距，推动长江经济带协调发展。

#### 参考文献

- [1] Zhang W, Thill J. Mesoscale structures in world city networks[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2019, 109(3): 887–908.
- [2] Derudder B, Taylor P J. Central flow theory: comparative connectivities in the world-city network[J]. *Regional Studies*, 2018, 52(8): 1029–1040.
- [3] Paleari S, Redondi R, Malighetti P. A comparative study of airport connectivity in China, Europe and US: Which network provides the best service to passengers?[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(2): 198–210.
- [4] 焦敬娟, 王姣娥, 金凤君, 等. 高速铁路对城市网络结构的影响研究——基于铁路客运班列分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(2): 265–280.
- [5] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式[J]. *地理学报*, 2017, 72(2): 224–241.
- [6] 王法辉, 刘瑜, 王姣娥. 交通网络与城市结构研究——理论框架与中美两国实证案例[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1289–1299.
- [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(1): 31–39.
- [8] 周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构[J]. *地理研究*, 2002(3): 276–286.
- [9] 薛俊菲. 基于航空网络的中国城市体系等级结构与分布格局[J]. *地理研究*, 2008(1): 23–32.
- [10] 朱惠斌. 基于航空客流的中国城市功能网络研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(4): 59–63.

- 
- [11] 陆璐, 魏冶, 庞瑞秋, 等. 航空企业视角的中国航空客运网络组织模式[J]. 地理科学, 2019, 39(4):550-559.
- [12] Du W,Zhou X,Lordan O,et al. Analysis of the Chinese Airline Network as multi-layer networks[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2016,89:108-116.
- [13] 王姣娥, 金凤君. 中国铁路客运网络组织与空间服务系统优化[J]. 地理学报, 2005(3):371-380.
- [14] 钟业喜, 陆玉麒. 基于铁路网络的中国城市等级体系与分布格局[J]. 地理研究, 2011, 30(5):785-794.
- [15] 冯兴华, 修春亮, 刘志敏, 等. 东北地区城市网络层级演变特征分析——基于铁路客运流视角[J]. 地理科学, 2018, 38(9):1430-1438.
- [16] 刘承良, 许佳琪, 郭庆宾. 基于铁路网的中国主要城市中心性的空间格局[J]. 经济地理, 2019, 39(3):57-66.
- [17] 刘玮辰, 曹有挥, 吴威, 等. 长江经济带铁路客运通达能力空间格局及第三产业发展效应分析[J]. 地理科学, 2019, 39(4):626-635.
- [18] 吴威, 曹有挥, 梁双波, 等. 长江经济带航空运输发展格局及对策建议[J]. 经济地理, 2018, 38(2):98-103.
- [19] 宓泽锋, 曾刚. 不同尺度下长江经济带物流联系格局、特征及影响因素研究[J]. 地理科学, 2018, 38(7):1079-1088.
- [20] 涂建军, 毛凯, 况人瑞, 等. 长江经济带三大城市群城际客运联系网络结构对比分析[J]. 世界地理研究, 2020, 30(1):1-11.
- [21] 王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束[J]. 地理学报, 2019, 74(12):2482-2494.
- [22] Yang H,Dobruszkes F,Wang J,et al. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airline networks[J]. Journal of Transport Geography,2018,68:233-244.
- [23] 陈伟, 修春亮, 柯文前, 等. 多元交通流视角下的中国城市网络层级特征[J]. 地理研究, 2015, 34(11):2073-2083.
- [24] 刘承良, 殷美元, 黄丽. 基于多中心性分析的中国交通网络互补性的空间格局[J]. 经济地理, 2018, 38(10):21-28.
- [25] Du R,Yuan Y,Hwang J,et al. Chinese surnames and the genetic differences between north and south China[J]. Journal of Chinese Linguistics Monograph Series,1992(5):1-93.
- [26] 程钰, 刘雷, 任建兰, 等. 县域综合交通可达性与经济发展水平测度及空间格局研究——对山东省 91 个县域的定量分析[J]. 地理科学, 2013, 33(9):1058-1065.
- [27] Gudykunst W B,Ting-Toomey S,Chua E. Culture and Interpersonal Communication[M]. Newbury Park, CA:Sage, 1988.

- 
- [28] 贺灿飞, 金璐璐, 刘颖. 多维邻近性对中国出口产品空间演化的影响[J]. 地理研究, 2017, 36(9):1613-1626.
- [29] 钱超峰, 杜德斌, 胡璇, 等. 地区间基因差异会影响技术转移吗? ——基于中国 2001—2005 年省际专利转让数据[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5):745-755.
- [30] 宋洁华, 李敏纳, 蔡舒, 等. 海南交通可达性的测度与空间分异格局分析[J]. 地理科学, 2017, 37(10):1507-1516.
- [31] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报, 2007(10):1073-1082.