

交通优势度与人口流动的空间格局及互动关系研究

——以山东省为例

张克伟

山东交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月18日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

交通建设和人口流动相互促进和制约, 两者的协调均衡发展是实现以人为本的交通强国战略的切实保证。引用交通优势度模型、社会网络分析法和耦合协调度模型, 对交通和人口流动两个系统的空间分布特征及相互作用关系进行量化分析。结果表明: 山东省公路和铁路的交通优势度分别呈现中间高四周低的“核心-边缘”结构和单核心的“放射状”结构; 山东省的人流网络密度整体较低, 高密度区呈现核心阴影效应, 联系强度的空间邻近性显著, 城市个体的人口流动势能差异较大; 交通系统对人口流动系统的带动和约束作用相对更强, 根据发展水平组合关系可分为16类, 以超前型和同步型为主, 根据耦合系协调关系可分为3类, 以公路、铁路均为良性协调的类型为主。

关键词

交通优势度, 人口流动, 社会网络, 空间格局, 耦合协调度

A Study on the Spatial Pattern and Interactive Relationship between Traffic Advantage and Population Mobility

—A Case Study of Shandong Province

Kewei Zhang

Shandong Jiaotong University, Ji'nan Shandong

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 18th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

The traffic construction and population mobility promote and restrict each other. The coordinated and balanced development of the two is the practical guarantee for the realization of the people-oriented transportation power strategy. The traffic dominance model, social network analysis method and coupling coordination model are used to quantitatively analyze the spatial distribution characteristics and interaction between the traffic and population mobility systems. The results show that the transportation advantages of highways and railways in Shandong Province are “core edge” structure, which is high in the middle and low around, and “radial” structure, which is a single core. The density of people flow network in Shandong Province is low as a whole, the high-density area presents the core shadow effect, the spatial proximity of the connection intensity is significant, and the potential energy of population flow of urban individuals is different. The transportation system plays a relatively stronger role in driving and constraining the population mobility system. According to the level of development, the combination relationship can be divided into 16 categories, mainly advanced and synchronous. According to the coordination relationship of the coupling system, it can be divided into 3 categories, mainly highway and railway are benign coordination.

Keywords

Traffic Advantage, Population Mobility, Social Network, Spatial Pattern, Coupling Coordination Degree

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在交通强国战略和交通“新基建”背景下，国内大规模开展公路、铁路等交通基础设施建设，给人口的空间流动、聚集和生活状态的改变注入了新动力。交通基础设施的供给能力与人们的日常出行需求存在着跨区域不匹配、不协调的问题，主要表现为区域交通设施的建设侧重于提高路网覆盖率，而缺乏对地区间人口数量变化规律、空间分布和出行习惯等方面的统筹考虑，致使部分地区出现交通设施供给盈余或超负荷的现象。《交通强国建设纲要》明确强调了供给侧结构性改革的重要性，提出了坚持以人为本的交通运输发展思想。因此，探讨区域的交通发展格局、人口流动规律以及两者的耦合协同发展关系，可为建设适应人口发展的现代化交通运输体系提供科学决策依据，对于促进交通设施合理布局、实现因地制宜具有切实的实践意义。

2. 文献评述

对于人口流动规律，早期研究多基于静态的人口普查数据[1]和人口抽样调查数据[2]，分析不同时间截面上、长时间周期的人口数量变化规律，无法体现日常区域间、连续时间的人口流动特征[3]。随着互联网、大数据等信息技术的深度应用，城市间 OD 出行数据获取源增多，学术界的研究范式从传统的“静态点”转向“流空间”[4]。已有研究涉及的人口“流数据”可分为三类：一是包含位置信息的网络挖掘数据，包括微博签到数据[5]、百度贴吧数据[6]和互联网数据[7]等，由于用户群体的局限性，此类数据所

展现的人口特征具有特殊性；二是交通设施采集数据，包括公共交通刷卡数据[8]、高速收费站数据[9]、铁路班次数据[10]、海运数据[11]和航空客运数据[12]等，由于区域间的人口流动往往涉及多种交通方式，而此类研究多侧重于单一交通方式的数据分析，因此在分析人口流动的系统性、综合性方面存在不足。三是基于 GPS、LBS 等移动设备定位技术的迁徙数据，以百度迁徙大数据[13]、腾讯位置大数据[14]高德迁徙大数据[15]居多，此类数据融合了海、陆、空多种交通方式的 OD 出行信息，并且具有较高的用户广度，与前两类数据相比，更能综合性地表征人口流动时空特性。目前，学者们基于全球[16]、国家[17]、城市群[18]和省域[19]等不同研究尺度，大多从人口流动的空间结构特征[13] [18] [20]、影响因素[14] [21]和优化策略[22]视角开展研究，侧重于以交通流表征人口流动特征或者把交通水平差异作为人口流动的驱动因素来探讨交通与人口流动的关系，而少有针对于交通和人口流动两者的空间匹配关系、交互协调性的相关研究。

人地关系一直是地理学、管理学的核心研究点，区域交通和人口具有一定相关性[23]，交通运输作为区域间人口联系的纽带，与人口的协调发展模式是人地关系研究的重要内容之一。交通与人口的相互作用关系包括两方面：一是区域间的人口流动产生交通运输需求，表现在人口规模的增长会拉动出行需求量[24]；家庭结构、老龄化等人口结构的不同对交通的便捷性、舒适性等需求存在差异化[25]；人口的空间分布影响交通基础设施的空间布局[26]。二是交通运输供给能力的改变影响着人口流动格局，主要表现在交通可达性的提升拓展了人口流动的范围、速度、流量，增强了人口集聚效应，进而改变人口要素在区域间的流动和配置状态[27] [28]。另外，交通系统包含多种运输方式，不同交通方式之间存在竞争关系[29]，公路、铁路和航空具有不同的优势出行距离[30]，在不同区域所带来的溢出效应也不同[31]。因此，在研究交通与人口之间的互动关系时，要考虑到多种交通运输方式与人口流动的互动作用差异性。

总体看来，单独分析交通与人口流动两系统关系的文献相对匮乏，且集中在单一交通方式研究。山东省的交通基础设施相对健全，人口资源较为充足，其交通与人口流动的相互作用状态更具典型性。从历年统计数据来看，公路和铁路的客运总量占据山东省客运总量的 95%以上，且省内城市间直飞航班较少、水路运输以货运为主。基于此，本研究选取山东省连续时间的人口流动数据和公路、铁路两种交通方式的相关数据，对交通和人口流动两个系统分别构建评价指标体系，并运用空间统计、网络分析的方法进行量化，在此基础上，对两个系统的互动关系进行聚类分析、耦合协调分析，目的是科学测度交通与人口流动的空间差异和协调发展水平，以期为交通和人口的协调可持续发展提供科学依据。

3. 评价模型与数据来源

本文以 2021 年为研究时间截面、以山东省 16 个地市为评价单元进行数据收集。对交通系统、人口流动系统分别采用交通优势度模型、人口流动模型进行分析，对两系统的互动关系采用耦合协调度模型进行分析。依据《公路路线设计规范 JTG D20-2017》，参考朱光兴[32]的加权路网密度计算方法，对不同等级道公路的通行能力进行加权赋值：高速公路 0.4、国道 0.2、省道 0.18、县道 0.12、乡道 0.07、其他道路 0.03。最短旅行时间 T_{ij} 的计算采用 ArcGIS 中网络分析模块的 OD 成本矩阵分析法，依据《中华人民共和国公路工程技术标准》(JTGB01-2003)设定各级道路时速：高速公路 100 km/h、国道 80 km/h、省道 60 km/h、高速公路匝道 40 km/h、国道匝道 40 km/h、省道匝道 40 km/h。

3.1. 交通优势度模型

交通优势度是定量评价区域系统中交通优劣程度的综合性指标。依据金凤君[33]提出的相关理论，为避免交通干线影响标准分类及权重赋值的主观性，选取交通网络密度、交通可达性和区位优势度来表达

“量”、“质”、“势”三个层面。其计算公式为：

$$F_i = \alpha_1 D_i + \alpha_2 A'_i + \alpha_3 Q'_i \quad (1)$$

$$D_i = \sum_j^6 K_j L_{ij} / S_i \quad (2)$$

$$A_i = \sum_j^n (T_{ij} \sqrt{G_j P_j}) / \sum_{j=1}^n \sqrt{G_j P_j} \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_i^n T_{ij} / n \quad (4)$$

其中, F_i 、 D_i 、 A_i 、 Q_i 、 S_j 、 G_j 、 P_j 分别为交通优势度、路网密度、交通可达性、区位优势度、土地面积、GDP、区域人口数; A'_i 、 Q'_i 为交通可达性、区位优势度的逆向化值; α_1 、 α_2 、 α_3 为权重值, 本文参考孙宏日等[34]的等比加权法, 令 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$; K_j 为不同等级公路的权重值; L_{ij} 为区域 i 内 j 等级公路的里程; T_{ij} 为最短旅行时间。计算采用的公路网(包括高速公路、国道、省道、县道和其他道路)、铁路网(包括高速铁路和普通铁路)矢量数据来源于 OSM (openstreetmap) 网站, 经 ArcGIS 软件裁剪、投影变换获得。铁路班次数据来源于 12306 网站(<https://www.12306.cn>)。GDP、人口数据分别来源于山东省各地市统计年鉴和《山东省第七次全国人口普查公报》。

3.2. 人口流动模型

社会网络分析法是一种将复杂系统中的个体属性、个体之间的关系属性抽象为具有网络拓扑关系的节点和连线的定量分析方法。以 16 个城市单元为节点, 以两两城市之间的人口流动联系为连线构建复杂网络, 从网络密度、联系强度和人口流动势能三方面分析网络。其计算公式为:

$$M_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L(a_i b_j) / n(n-1) \quad (5)$$

$$B_{ij} = (R_{ij} + R_{ji}) / 2 \quad (6)$$

$$S_i = (\sum_{j=1}^n d(i)_{in} + \sum_{j=1}^n d(i)_{out}) / 2 \quad (7)$$

其中, M_i 、 B_{ij} 、 S_i 分别为网络密度、联系强度、人口流动势能; L 为网络图中实际存在的连线数量; a 为迁入来源地; b 为迁出目的地; n 为网络中节点的数量; R_{ij} 和 R_{ji} 为两城市间的迁入、迁出强度; $d(i)_{in}$ 和 $d(i)_{out}$ 为城市 i 的点入度和点出度。计算所用的人口流动数据来源于百度迁徙平台, 包括 2021 年 5 月 15~21 日一周的连续有向 OD 数据。

3.3. 耦合协调度模型

耦合协调度模型用来衡量多个系统之间的相互作用关系的强弱和良性程度。计算公式如下:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (8)$$

$$C = 2 \times \sqrt{(U_1 \times U_2) / (U_1 + U_2)^2} \quad (9)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (10)$$

其中, D 为耦合协调度; C 为耦合度; T 为协调度指数; U_1 和 U_2 为两个系统的评价值; α 和 β 为协调系数, 均赋值 0.5。

4. 山东省交通优势度空间格局

借助 ArcGIS10.2 软件的投影变换、矢量计算和网络分析模块, 根据公式(1)~(4)计算出 16 个评价单元公路和铁路交通优势度的一、二级指标评价值。为规避各二级指标的量化对分析的影响, 对其评价

值进行相应的逆向化、归一化处理(表 1)。对一级指标采用自然间断点法进行分级和可视化(图 1、图 2)。

4.1. 公路优势度格局分析

山东省公路优势度从中部向周边逐渐降低,在空间分布上呈现出明显的“核心-边缘”结构。具有较高公路优势度的城市有 4 个,分别为济南市、淄博市、潍坊市、青岛市,呈现出东西走向的条型聚集结构。从表 1 可看出,这 4 个城市的二级指标存在共同点:首先是受公路区位优势度主导,济南市、淄博市和潍坊市均位于鲁中地区,地理位置优越,与济南市、青岛市两个中心城市之间的联系便捷性高;其次是路网密度较高,均为前 6 位次,公路基础设施比较充足、覆盖率高,青岛市虽位于胶东半岛地区,但凭借较高的路网覆盖率,其公路优势度也较高。公路优势度最低的 3 个城市为烟台市、菏泽市和威海市,分布在鲁南和胶东半岛的边缘区域,其公路区位优势度位分别为 14、15 和 16 位次,均较差,这导致了城市在省内的可达性水平较低。威海市的公路网密度排在即使第 3 位次,但其公路优势度依然很低。综上所述,区位优势度和交通可达性两个指标对公路交通优势度的影响程度更大。

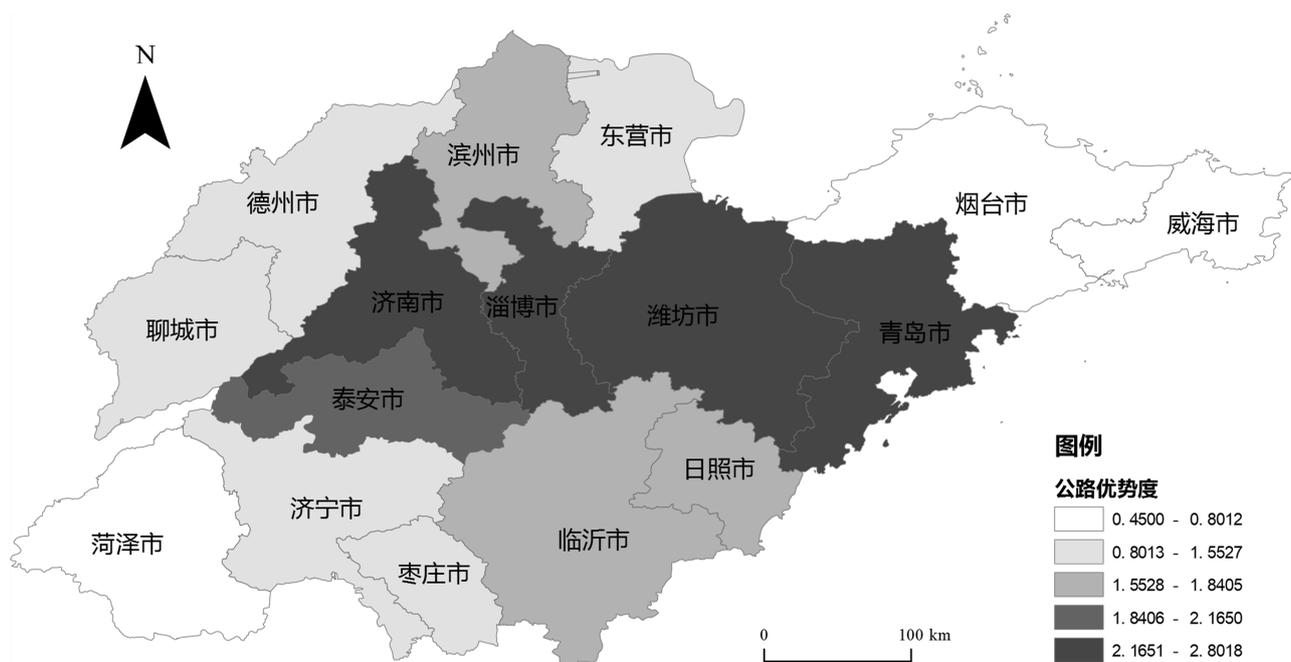


Figure 1. Spatial pattern of highway dominance
图 1. 公路优势度空间格局

4.2. 铁路优势度格局分析

与公路优势度不同,铁路优势度在空间上呈现以济南市和淄博市为核心,向南、北和东三个方向的放射型空间格局,并没有出现高优势度区域聚集特征。较高铁路优势度区域主要分布在国家高速铁路《中长期铁路网规划》“八纵八横”主干线周边,铁路的廊道效应显著。其中,京沪通道贯穿于德州市、泰安市和济宁市,青银通道贯穿于潍坊市、青岛市和日照市,铁路沿线城市均具有较高的铁路优势度。济南市和淄博市因地处纵横铁路通道的交汇处,成为重要的铁路枢纽,进而聚集成铁路优势度高值极化区。根据表 1,铁路优势度主要受到铁路基础设施建设水平的限制,滨州市、东营市和聊城市最为明显,其次为菏泽市、威海市和烟台市,这些城市的铁路网密度值均处于较低位次,导致其可达性也普遍较低,在铁路建设方面还有很大发展空间。

5. 山东省人口流动格局

借助 Ucinet6.0 软件, 依据公式(5), 以单向流动强度的平均值为阈值, 对矩阵进行二值化处理并计算出网络密度; 依据公式(6)和(7), 利用矩阵分析和中心度分析模块计算出联系强度和人口流动势能。采用 ArcGIS10.2 的自然间断点法将三项指标分为 5 个等级并可视化(图 3、图 4)。

5.1. 网络密度分析

网络密度反映了城市间关系的疏密程度, 其值越大, 表征城市间的联系数量越多、关系越紧密。从整体上看, 人口流动网络中共有 16 个城市节点, 理想状态下两两城市之间都存在较强的人口流动联系, 可形成 240 条单向连线, 而经过二值化筛选后的矩阵中仅存在 71 条具有较高强度的连线, 整体网络密度仅为 0.2958, 远小于连续区域的渗透阈值 0.5 [14], 说明山东省各城市间整体的人口流动处于联结状态较弱。网络密度较高(0.3334~0.8333)的城市占 25%, 较低(0.1333~0.2000)的城市占 50%, 有一半的城市处于弱势地位, 各个城市的联系网络密集程度差异较大。在空间分布上表现为城市经济发展水平强相关性, 以省会经济圈的济南市、胶东经济圈的潍坊市及青岛市和鲁南经济圈的临沂市为三个顶点, 呈现出“三角形”的空间结构。

具体来看, 仅有济南市为最高级别的人口流动网络密度区域, 与其他城市之间的人口联系紧密程度最高, 占据绝对核心地位。同时, 济南市的强核心阴影效应比较显著, 其周边的德州市、聊城市和泰安市为较低网络密度区, 滨州市和淄博市也仅为中等密度区, 均为人口流动网络的“阴影区”。菏泽市、聊城市、德州市、东营市和威海市的网络密度值为最低层级, 人口集聚力较差, 有待进一步提高城市经济吸引力、交通运输设施的互联互通能力。在空间分布上, 低网络密度城市均处于山东省边缘地区, 尤其在山东省西部形成了“低谷”聚集区, 可见地理位置的优劣程度对人口联系密集程度具有一定影响。

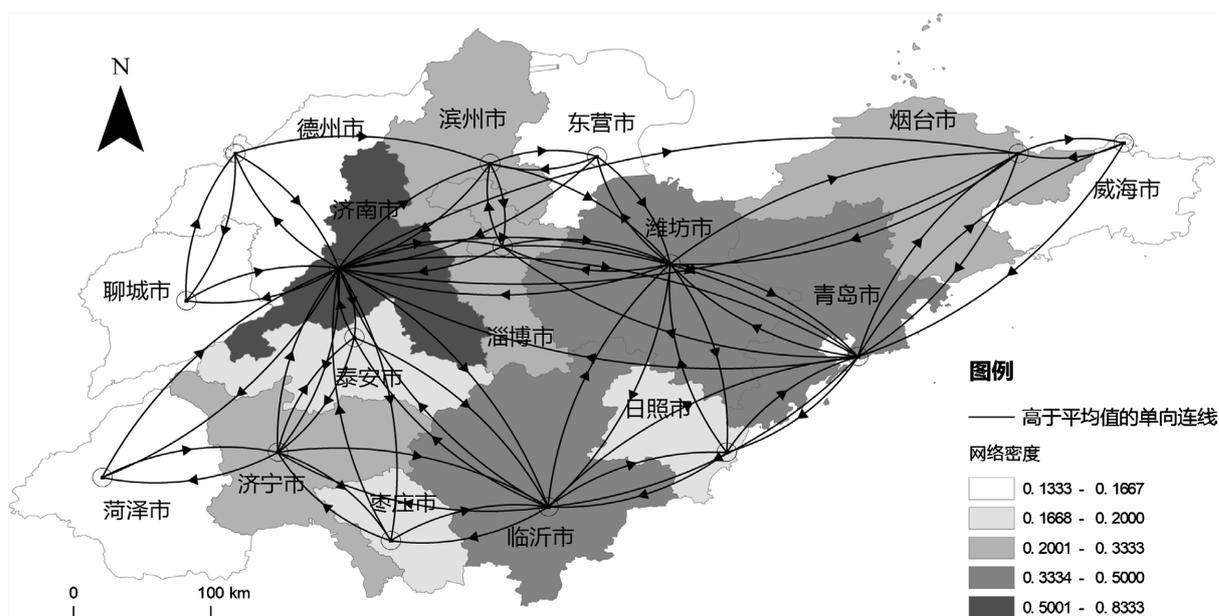


Figure 3. Spatial pattern of population mobility network density

图 3. 人口流动网络密度空间格局

5.2. 联系强度分析

两两城市之间存在相互的人口迁入和迁出联系, 联系强度用来量化城市间这种人口流动联系的强弱,

其值越高,说明两个城市间的人口交流越密切、强度越高。从整体上看,16个评价城市间的人口联系强度在空间上分布不均,以东营市-临沂市的连线为分界线,呈现出“西密东疏”的空间格局。分界线以西的城市表现为以济南市为聚集中心的“放射状”分布特征,而分界线以东城市的连线分布相对分散,为“折线状”分布特征。“放射状”结构相较于“折线状”网络连通性更高,但其中心点以外城市之间的联系强度存在不足,例如济南市周边的德州市-滨州市、聊城市-菏泽市为低联系强度,有待进一步提升互通性。

具体来看,每个城市节点都位于至少一条较高强度(13.0214~39.9392)的连线上,且联系强度最高的那条连线都是与毗邻城市节点所构成的,表现出明显的空间邻近性特征。也有少数城市实现了跨区域的较高强度人口联系,以济南市-菏泽市、济南市-临沂和济南市-青岛市等为代表的较高联系强度连线最明显,共同特点是均与济南市相关。原因是济南市作为省会城市,具有较好的经济吸引力和交通优势,成为重要的人流集散枢纽,往往城市的行政等级高,其在人口流动网络中的地位越高,这一特征与潘竟虎[3]的研究结果具有一致性。

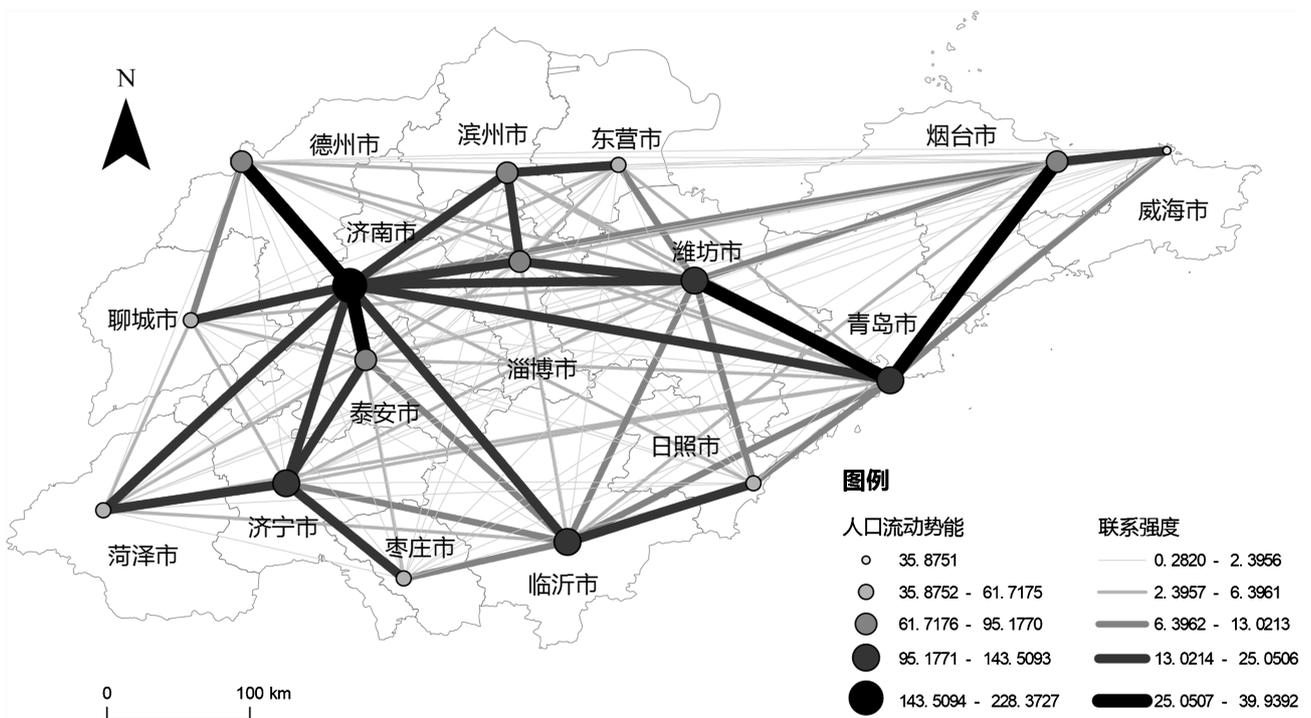


Figure 4. Spatial pattern of population mobility potential energy and contact intensity

图 4. 人口流动势能和联系强度空间格局

5.3. 人口流动势能分析

点出度和点入度反映的是节点城市对人口流动的辐射力和凝聚力,净点入度是点入度与点出度的差值,反映节点城市人口的盈余和流失状态。人口流动势能集成了点入度和点出度,是反映节点城市人口集散能力的综合性指标。根据表 2,总体上看,通过计算 16 个节点城市点出度、点入度的极差(155.04、178.26)和标准差(44.51、48.74)发现,指标的整体离散性较强,各个城市的人流强度差异较大。点出度和点入度的相关系数为 0.9959,说明城市人口的流入和流出之间较为平衡,出现大量人口盈余和流失的情况概率较小。

具体来看,济南市、泰安市、潍坊市和日照市的净点入度较高,城市的日常人口流动处于盈余状态,

人口凝聚力相对较强, 占据较高的人流资源优势。而滨州市、菏泽市、聊城市、德州市和东营市净点入度为负值且较小, 对外输出口大于内流人口, 具有较强人口流失的趋势, 在人口流动网络中处于弱势地位。从图 4 中看出, 济南市的人口流动势能最强, 较高强度边数也最多, 有 2 条一级边(25.0507~39.9392)和 8 条二级边(13.0214~25.0506)与之相连, 成为山东省最强的人流集散中心。其次为青岛市、潍坊市、临沂市和济宁市, 也具有较好的人口集散能力, 在空间分布上相对分散, 有利于发挥对周边城市人口流动的辐射带动作用。人口流动势能较弱(35.8751~61.7175)的城市为威海市、东营市、聊城市、枣庄市、日照市和菏泽市, 其空间分布与城市的人流网络密度分布具有相似性。

Table 2. Potential energy index of population mobility

表 2. 人口流动势能指标

城市	点出度	点入度	净点入度	人口流动势能
济南市	219.16	237.58	18.42	228.37
青岛市	144.67	142.34	-2.33	143.51
淄博市	95.26	95.08	-0.18	95.17
枣庄市	51.67	50.01	-1.66	50.84
东营市	50.62	46.54	-4.08	48.58
烟台市	79.78	78.67	-1.11	79.23
潍坊市	125.65	129.89	4.24	127.77
济宁市	109.79	107.52	-2.27	108.66
泰安市	76.39	83.81	7.42	80.1
威海市	36.89	34.85	-2.04	35.87
日照市	49.62	53.07	3.45	51.35
临沂市	105.07	105.34	0.27	105.21
德州市	76.42	72.1	-4.32	74.26
聊城市	51.93	47.49	-4.44	49.71
滨州市	80.92	74.32	-6.6	77.62
菏泽市	64.11	59.32	-4.79	61.72

6. 山东省交通优势度与人口流动的互动关系

6.1. 交通优势度与人口流动相对发展类型

对 16 个城市公路、铁路的交通优势度和人口流动势能分别进行聚类分析, 绘制散点图并进行分类统计(图 5、图 6 和表 3)。根据 Jenks 分类方法可将城市类型划分为 16 种, 而实际上, 研究城市的公路交通优势度、铁路交通优势度与人口流动势能的组合关系分别占有 11 种、10 种。从两种交通方式的共同点来看, 均不存在 IX、XIII、XIV、XV 这几种交通优势度远滞后于人口流动势能和 IV 这种人口流动势能远低于交通优势度的极端组合情况。一方面, 说明城市的交通运输能力对人口流动的制约起到主导作用, 高强度的人口流动依赖于高水平的交通基础设施, 城市的交通运输能力上限在一定程度上决定了人流量大小、人流网络密集性, 因此很难形成 IX、XIII、XIV、XV 类型的城市。另一方面, 说明交通运输对人口流动也存在带动作用, 更好的交通可达性提高了城市间人口交流的便捷性, 更易促进高强度人口联系

的形成，高交通优势度的区域往往人口流动势能也高，因此难以形成 IV 类型的城市。

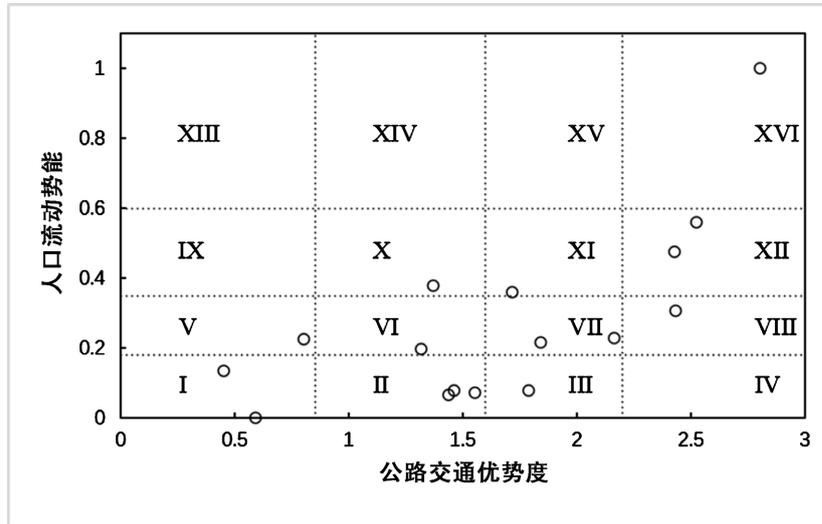


Figure 5. Distribution of the combination type of highway traffic dominance and population mobility potential energy
图 5. 公路交通优势度与人口流动势能组合类型分布

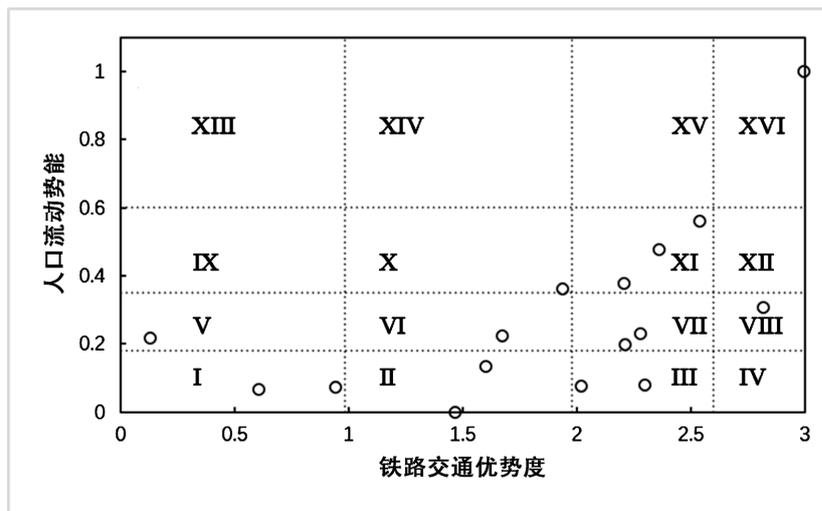


Figure 6. Distribution of the combination type of railway traffic dominance and population mobility potential energy
图 6. 铁路交通优势度与人口流动势能组合类型分布

从实际存在的组合类型统计情况来看，在公路方面，交通优势度与人口流动势能相对同步的城市有 I、VI、XI、XVI 四种类型，共 5 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 35.36%、33.55%、36.97%；交通优势度超前于人口流动势能的城市有 II、III、VII、VIII、XII 五种类型，共 9 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 48.85%、49.6%、47.8%；交通优势度滞后于人口流动势能的城市有 V、X 两种类型，共 2 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 15.79%、16.84%、15.23%。铁路方面，交通优势度与人口流动势能相对同步的城市有 I、VI、XI、XVI 四种类型，共 7 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 50.16%、62.96%、51.48%；交通优势度超前于人口流动势能的城市有 II、III、VII、VIII 四种类型，共 7 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 32.96%、27.03%、33.80%；交通优势度滞后于人口流动势能的城市有 V、X 两种类型，共 2 个城市，国土面积、GDP、人口的占比分别为 16.88%、

10.01%、14.72%。综合来看，公路、铁路交通优势度持平或超越人口流动势能的城市均占据 87%左右，说明大多数城市的交通发展水平与其人口流动需求的匹配度较高，仅有少数城市的交通供给相对滞后。两种交通方式相对比来看，公路交通优势度超前于人口流动势能的城市类型所占比重最高，铁路交通优势度与人口流动势能相对同步的城市类型占比最高，两者均为 50%左右，说明山东省大部分地区的公路基础设施建设水平较高，对城市间人口流动具有充足的支撑能力，且存在一定的运输能力过剩现象；铁路方面，交通供给能力与人口流动需求水平处于相互持平状态的城市居多，基本满足当前的人流需求，与公路相比存在一定差距。

Table 3.Combination type statistics of highway and railway traffic dominance and population mobility potential energy
表 3.公路、铁路交通优势度与人口流动势能的组合类型统计

序号	组合类型		城市个数/个		国土面积占比/%		GDP 占比/%		人口占比/%	
	交通优势度	人口流动势能	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路
I	低	低	2	2	11.42	10.69	8.89	7.25	11.53	8.02
II	较低	低	3	2	13.58	11.42	9.62	8.89	11.82	11.53
III	较高	低	1	2	3.39	6.28	2.74	5.12	2.92	6.72
V	低	较低	1	1	8.71	5.99	10.69	3.43	7.00	3.87
VI	较低	较低	1	1	6.56	8.71	4.21	10.69	5.53	7.00
VII	较高	较低	2	2	10.90	11.48	7.22	8.00	9.26	10.92
VIII	高	较低	1	1	3.78	3.78	5.03	5.03	4.63	4.63
X	较低	较高	1	1	7.09	10.89	6.15	6.57	8.23	10.85
XI	较高	较高	1	3	10.89	24.28	6.57	31.15	10.85	27.40
XII	高	较高	2	0	17.19	0.00	25.00	0.00	19.17	0.00
XVI	高	高	1	1	6.49	6.49	13.87	13.87	9.06	9.06

6.2. 交通优势度与人口流动耦合协调度

为分析城市交通与人口流动的协调关系，根据公式(8)~(10)分别计算出公路、铁路交通优势度与人口流动势能的耦合协调度值(表 4)。从整体上看，公路、铁路交通优势度与人口流动的耦合协调度的平均值分别为 0.56、0.58，以及处于协调状态的城市数量为 9 个、11 个，铁路总体耦合协调水平稍高于公路。具体来看，根据城市公路、铁路的协调类型可分为三大类：

一是两种交通方式均与人口流动相协调的城市，包括济南市、青岛市、淄博市、潍坊市、济宁市、泰安市、临沂市和德州市。此类城市的交通和人口流动之间是一种良性的相互作用状态，公路、铁路运输服务水平的提高促进了人口的向内集聚和向外辐射，高强度的人口流动产生了更多交通运输需求，进而刺激交通基础设施的进一步完善，两个系统互惠互利、和谐一致。

二是单一交通方式与人口流动相协调的城市，包括烟台市、日照市、滨州市和菏泽市。其中，烟台市、菏泽市和日照市为公路交通失调状态，公路发展滞后性明显，前两者受区位优势度影响较大，而日照市的公路可达性和公路区位优势度均排在前列，较低的公路网密度是导致公路交通失调的主要原因。滨州市的铁路交通指标均较低，而其人口流动势能为三级强度，两者无法形成良好协调状态。

三是两种交通方式与人口流动相失调的城市，包括枣庄市、东营市、威海市和聊城市。此类城市的

交通与人口流动相互牵制和约束，处于低效、无序的运作状态。这 4 个城市的公路、铁路交通优势度均为三到五级别，且人口流动强度均为四、五级别，交通供给和人口流动需求相互失调，两个系统之间相互摩擦，处于一种恶性耦合状态。

Table 4. Coupled co scheduling of traffic dominance and population mobility potential energy
表 4. 交通优势度与人口流动势能的耦合协调度

城市	公路		铁路	
	耦合协调度 D 值	协调类型	耦合协调度 D 值	协调类型
济南	0.995	优质协调	0.995	优质协调
青岛	0.836	良好协调	0.826	良好协调
淄博	0.715	中级协调	0.734	中级协调
枣庄	0.439	濒临失调	0.488	濒临失调
东营	0.421	濒临失调	0.337	轻度失调
烟台	0.436	濒临失调	0.593	勉强协调
潍坊	0.794	中级协调	0.779	中级协调
济宁	0.622	初级协调	0.723	中级协调
泰安	0.642	初级协调	0.647	初级协调
威海	0.162	严重失调	0.261	中度失调
日照	0.474	濒临失调	0.508	勉强协调
临沂	0.665	初级协调	0.691	初级协调
德州	0.525	勉强协调	0.62	初级协调
聊城	0.441	濒临失调	0.39	轻度失调
滨州	0.602	初级协调	0.217	中度失调
菏泽	0.194	严重失调	0.519	勉强协调

7. 结论

以山东省 16 个地市为研究对象，对公路、铁路交通和人口流动两个子系统分别建立评价指标体系，分析两个系统的发展水平和空间格局，以及探讨两者的互动发展关系。主要结论如下：

1) 公路交通优势度呈现中间高四周低的“核心-边缘”结构，水平较高的城市受益于区位优势度和路网密度，水平较低的城市受区位优势度和可达性的影响较大。铁路交通优势度呈现单核心的“放射状”空间格局，水平较高的城市普遍分布在国家高速铁路网主干道周边，“廊道效应”显著，影响其水平高低的主要因素为路网密度。

2) 人口流动整体上呈弱联结状态，各城市的人流强度差异较大。在网络密度方面，50%的城市为较低密度区，高密度区的核心阴影效应明显，具有明显的空间分异特征。在联系强度方面，城市间的人流“连线”整体呈现“西密东疏”的空间结构，具体表现为空间邻近性，即每个城市都会与其近邻的某一个城市形成至少一条较高强度的人口流动“连线”，且较高强度连线数量与城市行政等级存在相关性。在人口流动势能方面，个体城市的人口流入、流出相对平衡，城市间的人口流动势能差异较大，且与网络密度的空间分布具有相似性。

3) 城市的交通系统和人口流动系统存在相互作用关系, 前者的作用相对更强, 具体为交通运输对人口流动的带动和制约两种作用, 表现在两方面: 充足的交通供给能力能够支撑起高强度的人口流动, 以 XII 和 XVI 类型的城市为典型代表; 较低交通优势区域难以形成高强度人口流动, 以 I、II 和 VI 类型的城市为典型代表。相对于人口流动状态, 大部分城市的公路、铁路发展水平属于超前型和同步型, 且公路总体建设水平要高于铁路, 但在交通与人口流动耦合协调关系方面, 铁路总体水平要稍高于公路。

4) 根据耦合协调类型将城市分为三类: 一是公路、铁路均为协调类型的城市, 此类城市要保持好交通建设与人口流动的良性协调关系, 避免过度建设造成资源浪费, 同时, 要发挥对边缘城市的人流辐射带动作用, 缩小城市间人口资源差异; 二是单一交通协调的城市, 此类城市应着重补强弱势交通的建设, 满足人口流动需求的同时, 实现多种交通方式平衡发展; 三是两种交通均失调的城市, 此类城市的发展关键是提升自身经济实力和交通基础设施建设水平, 增强城市吸引力和与周边城市的互联互通能力。

参考文献

- [1] 刘涛, 彭荣熙, 卓云霞, 曹广忠. 2000-2020 年中国人口分布格局演变及影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(2): 381-394.
- [2] 叶明确, 任会明. 中国省际人口流动网络演化及其影响因素研究[J]. 当代经济管理, 2020, 42(3): 46-54.
- [3] 潘竟虎, 赖建波. 中国城市间人口流动空间格局的网络分析——以国庆 - 中秋长假和腾讯迁徙数据为例[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1678-1693.
- [4] Castells, M. (2010) Globalisation, Networking, Urbanisation: Reflections on the Spatial Dynamics of the Information Age. *Urban Studies*, 47, 2737-2745. <https://doi.org/10.1177/0042098010377365>
- [5] 潘碧麟, 王江浩, 葛咏, 马明国. 基于微博签到数据的成渝城市群空间结构及其城际人口流动研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(1): 68-76.
- [6] 邓楚雄, 宋雄伟, 谢炳庚, 李民, 钟小龙. 基于百度贴吧数据的长江中游城市群城市网络联系分析[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1181-1192.
- [7] 汪明峰, 宁越敏. 互联网与中国信息网络城市的崛起[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 446-454.
- [8] 黄洁, 王姣娥, 靳海涛, 金凤君. 北京市地铁客流的时空分布格局及特征——基于智能交通卡数据[J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 397-406.
- [9] 周健, 靳诚, 李平星. 基于高速公路流的江苏省交通网络地域分异及影响因素[J]. 中国科学院大学学报, 2022, 39(1): 64-73.
- [10] 王姣娥, 景悦, 杨浩然. 中国高铁-民航竞争网络的空间演化模式及影响因素[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 675-684.
- [11] Liu, C.L., Wang, J.Q. and Zhang, H. (2018) Spatial Heterogeneity of Ports in the Global Maritime Network Detected by Weighted Ego Network Analysis. *Maritime Policy & Management*, 45, 89-104. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1345019>
- [12] Matsumoto, H. (2004) International Urban Systems and Air Passenger and Cargo Flows: Some Calculations. *Journal of Air Transport Management*, 10, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.02.003>
- [13] 叶强, 张俪璇, 彭鹏, 黄军林. 基于百度迁徙数据的长江中游城市群网络特征研究[J]. 经济地理, 2017, 37(8): 53-59.
- [14] 张伟丽, 晏晶晶, 聂桂博. 中国城市人口流动格局演变及影响因素分析[J]. 中国人口科学, 2021(2): 76-87+127-128.
- [15] 陆杰华, 刘烁瞳. 基于电子地图大数据的春运期间人口流动时空新格局探析——兼议反向春运[J]. 人口与社会, 2020, 36(5): 1-13.
- [16] Abel, G.J. (2013) Estimating Global Migration Flow Tables Using Place of Birth Data. *Demographic Research*, 28, 505-546. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2013.28.18>
- [17] 张小东, 韩昊英, 唐拥军, 罗国娜. 基于百度迁徙数据的中国城市网络结构特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1798-1808.
- [18] 刘海洋, 王录仓, 李蹇国, 严翠霞. 基于腾讯人口迁徙大数据的黄河流域城市联系网络格局[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 28-37.

- [19] 车冰清, 沈正平, 陆玉麒, 王毅. 江苏省流动人口分布的格局演变及其驱动因素——基于城乡建设用地的探讨[J]. 人文地理, 2017, 32(6): 80-86.
- [20] 向歆, 施开放, 杨庆媛. 基于百度迁徙的中国城市网络结构分析——以2015年和2019年春运数据为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(4): 79-88. <https://doi.org/10.13718/j.cnki.xsxb.2021.04.015>
- [21] 李天籽, 陆铭俊. 中国人口流动网络特征及影响因素研究——基于腾讯位置大数据的分析[J]. 当代经济管理, 2022, 44(2): 1-9.
- [22] 李智轩, 甄峰, 曹钟茗, 孔宇. 人流视角下城市空间结构特征及规划与治理响应——以南京市为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28(6): 58-65.
- [23] 彭伟, 应国伟, 李胜, 李亮. 交通与人口相关性分析——以四川省为例[J]. 价值工程, 2018, 37(25): 198-200.
- [24] 李光军. 北京市社会经济发展对城市交通的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [25] 程苑, 刁晶晶, 李俊鹏, 繇凯, 王倩, 蔡乐乐. 人口结构变化对交通出行需求的影响[J]. 交通与运输, 2020, 36(6): 100-104.
- [26] 赵鹏军, 吕迪, 胡昊宇, 曹毓书, 谢金芯, 庞亮, 曾良恩, 张听雨, 袁丹丹. 适应人口发展的现代化综合交通运输体系研究[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2699-2715.
- [27] 黄春芳, 韩清. 长三角高铁运营与人口流动分布格局演进[J]. 上海经济研究, 2021(7): 39-54.
- [28] 马伟, 王亚华, 刘生龙. 交通基础设施与中国人口迁移: 基于引力模型分析[J]. 中国软科学, 2012(3): 69-77.
- [29] 杨浩然, 王潇萌, 张钦然, 张凡, 王姣娥. 基于航空和高铁流的中国城市网络格局及演化[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 436-445. <https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2022.03.008>
- [30] 项昀, 徐铖铖, 于维杰, 华雪东, 王炜. 基于人口迁徙大数据的城市对外交通客运方式优势出行距离研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(1): 241-246.
- [31] 易其国, 马灿, 丁锐. 我国30个省(市)交通基础设施空间溢出效应研究[J]. 经济论坛, 2021(4): 26-38.
- [32] 朱光兴, 周忠发, 张勇荣, 张浩, 诸艳. 贵州省“组组通”背景下道路网密度空间分异特征[J]. 公路, 2021, 66(8): 252-256.
- [33] 金凤君, 王成金, 李秀伟. 中国区域交通优势的甄别方法及应用分析[J]. 地理学报, 2008, 63(8): 787-798.
- [34] 孙宏日, 刘艳军, 周国磊. 东北地区交通优势度演变格局及影响机制[J]. 地理学报, 2021, 76(2): 444-458.