

城市群内部出行强度的距离衰减效应

魏丽英¹, 彭欢欢^{1,2}

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 浙江省交通运输科学研究院 运输安全研究所, 杭州 310023)

摘要: 考虑城市群尺度出行特征研究存在基础数据不足、横向比较难度大等问题, 本文基于网络爬虫获取全国城市之间迁徙OD流矩阵等基础数据, 据此剖析迁徙强度累计比例曲线特征; 提出以百度迁徙数据表征城市间出行强度, 以最短路网距离作为距离参数, 结合城市常住人口, 构建重力模型拟合分析不同城市群内部的城市间迁徙强度随距离的变化特征。在此基础上, 将基于中心城市“质量”加权的平均旅行时间定义为可达性, 分别计算各城市群公路、铁路、综合交通的可达性, 分析可达性与距离衰减系数的关系, 发现绝大多数城市群基于路网距离的迁徙交互衰减作用较为明显, 且达到城市尺度交互水平。

关键词: 交通运输规划与管理; 城市群; 迁徙数据; 距离衰减效应; 重力模型

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3199-10

DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20230017

Distance-decay effects of travel intensity within city clusters

WEI Li-ying¹, PENG Huan-huan^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Transportation and Safety Research Institute, Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 310023, China)

Abstract: There are some problems in travel feature research on the scale of urban agglomeration, such as insufficient basic data and difficult horizontal comparison, thus web crawler is used to obtain some fundamental data such as migration OD flow matrix among the cities in China, and then the cumulative proportion curve features of migration intensity are analyzed. Further, a gravity model is built to fit and analyze the change characteristics of inter-city migration intensity along with distance within different urban agglomerations. This model uses Baidu migration data to represent the inter-city travel intensity, take the shortest road network distance as the distance parameter, and combine with urban permanent population. What's more, the concept of “accessibility” is defined as the average travel time weighted by central city “quality”, then the accessibility under road transport, railway transport and comprehensive transport is calculated respectively and the relationship between accessibility and distance-decay coefficient is analyzed. It is found that the travel distance-decay effects are obvious for most of the city clusters and the migration interactions have reached the city-scale level.

Key words: transportation planning and management; city clusters; migration data; distance-decay effect; gravity model

收稿日期: 2023-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52472311).

作者简介: 魏丽英(1974-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 交通组织优化, 交通行为分析, 交通仿真建模等.

E-mail: lywei@bjtu.edu.cn

0 引言

推动城市群一体化发展已成为我国新型城镇化建设的重要内容,针对城市群的交通出行研究已成为交通领域研究热点之一,但关于“城市群尺度”,目前尚未形成统一定义。通过类比“国家尺度”、“城市尺度”等提法,本文建议将“城市群尺度”定义为在官方发布或普遍认知的城市群空间范围内,基于国土空间规划和区域一体化发展等视角,对城市群内部的相关问题进行分析 and 探讨的空间范畴。

城市群尺度下各城市间的出行距离相对较长,与传统的城市内部出行相比,具有一些显著的不同特征。例如,城市群内部各城市之间交互往来的强度,具有明显的随距离衰减的特性。面对经济规模、空间结构各有特色的不同城市群,探索其内部各城市间交通出行强度与距离之间的衰减效应,对城市群一体化交通网的合理规划和布局等具有重要意义。城市群尺度的研究由于突破了以市、县为主的行政管辖范围,相较于传统交通调查,面临数据统计口径不统一、数据覆盖度低和获取难度大等问题。

随着互联网、5G、大数据等新技术不断发展,居民出行大数据采集技术得以实现,在交通领域应用十分广泛,包括车辆GPS数据^[1,2]、手机信令数据^[3,4]、高速公路收费数据^[5,6]等。但相关应用大多为微观层面的交通运行状态研究,对城市群尺度出行特征进行深入描述的还不多见。与此同时,基于LBS(Location based services)的迁徙数据具有统计范围广、数据更新快、横向可比等特点,被广泛使用在人口流动^[7]、城市网络结构^[8]、经济地理^[9]、交通出行^[10]等方面。通过挖掘分析海量的迁徙大数据,基于人口流动开展交通出行特征研究成为可能。

基于百度地图慧眼的迁徙大数据时效性好、覆盖广泛。本研究通过爬虫技术获取百度迁徙数据,然后以全国各大城市群为对象,横向对比不同城市群出行规律,回归拟合不同城市群内部的城市间交通出行强度随距离的变化特征,探究距离衰减系数与城市群可达性之间的关系。相关研究可为建设城市群2 h交通圈等提供一些启示和参考。

1 数据来源与处理

迁徙分为迁入和迁出,迁入是指人群从某地迁徙到当前区域,相对应地,迁出是指人群从当前区域迁徙到某地。人群迁徙反映的是人群短期出差、旅游、探亲、看病等行为特征,不同城市之间人群迁徙情况,可以反映城市之间联系紧密度。

百度迁徙大数据是基于百度地图开放平台LBS计算得来,通过定位设备在不同时间点定位城市的变化,挖掘迁徙人群。根据百度地图官方数据,截至2021年7月,百度地图日均位置服务请求响应1 200亿次、道路里程覆盖1 000万km,累计注册开发者超过220万,服务超50万的移动应用。广泛的用户基础,可以较真实地反映人口迁徙的特征。

1.1 百度迁徙规模指数

百度迁徙规模指数为无量纲数据结构。目前有不少研究以百度迁徙规模指数为基础,对每日铁路、公路和航空的运输流量等进行近似拟合并取得较好效果,说明百度迁徙规模指数和交通流量之间关系密切。王聪等^[11]反演得到该指数与实际迁徙人口之间具有简单正比关系,如下所示:

$$C_{it}^* = bH_{it}^* \quad (1)$$

式中: C_{it}^* 为第 t 天行政区划 i 迁徙规模指数; H_{it}^* 为第 t 天行政区划 i 实际迁徙人口数; b 为比例系数, $b = 3.24 \times 10^{-5}$ 。

1.2 数据爬取

百度迁徙数据可以分为两部分:迁徙规模指数和迁徙区划的迁徙人口百分比。其中迁徙规模指数直接反映迁入/迁出人口规模,城市间可横向对比;迁徙人口百分比是迁入/迁出到某城市的人口与全国迁入/迁出到某城市总人口的比值。

迁徙数据获取中,本研究基于Python工具自动捕获百度地图慧眼平台2020年9月23日~2021年3月27日全平台共计约368个城市的迁徙规模指数、迁徙人口百分比。

距离计算形式多样,就交通运输而言,影响居民出行的距离形式主要是路网距离、时间距离及成本距离。其中,成本距离受出行距离、前期投入成本、个人感知等因素影响,难以准确估计,时间距离受交通方式、候车时间等因素影响,不确定性较大,本研究选取以路网距离作为切入点,分析迁徙强度随距离的变化关系。

本文的路网距离是基于 Python 工具获取自百度地图。根据《中国统计年鉴》(2021),2015 至 2020 年公路客货运量占公路、铁路、水运、民航 4 种方式客货运量的比例均稳定在 70% 以上,具有绝对优势。故本研究重点分析公路网最短路网距离。

1.3 迁徙 OD 矩阵的获取

为减少节假日、统计误差等对城市迁徙数据的影响,本研究以半年左右的跨度作为时间范围。城市之间的迁徙 OD 流获取方式如下所示:

$$W_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_{it} \times \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n q_{ijt} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中: W_{ij} 为城市 i 迁出/迁入城市 j 的迁徙规模指数,即为迁徙强度; W_{it} 为第 t 天城市 i 迁出/迁入的总规模指数; q_{ijt} 为第 t 天从城市 i 迁出/迁入 j 的迁徙规模占城市 i 总迁徙规模的百分比; t 为研究时间范围(2020 年 9 月 23 日~2021 年 3 月 27 日)。

式(2)表示的含义为:城市 i 每天的迁徙规模指数,乘以城市 i 至 j 每天的迁徙人口占城市 i 总迁徙人口的百分比,使用时都是对统计期内各天的迁徙数据指标取均值。考虑到计算结果数量级较小,大量数据取值小于 1.0,为增强可读性和可用性,本研究对其扩大 1 000 倍,然后将该结果定义为城市 i 迁徙至城市 j 的规模指数,即为迁徙强度。最终可得到各城市间的迁徙 OD 矩阵。

通过对式(2)的结果整理,可得到全国 368 个地级市、直辖市之间的迁徙 OD 流矩阵。该矩阵在一定程度上反映了城市之间的交通联系强度,可作为后续交通分析的基础数据。

从理论上而言,当统计时间周期较长时,城市流入、流出人口规模相当,迁入、迁出规模指数差异较小。本研究统计的迁出、迁入规模指数差值,也验证了这一结论,结果如表 1 所示。其中,差值统计在 5%、10%、20% 以内的城市占比分别达到 55.43%、83.42%、98.10%。本研究主要以迁出规模指数为标准进行迁徙 OD 流矩阵计算。

1.4 迁徙强度累计比例曲线

累计比例曲线是迁徙交互强度随路网距离分布的重要表现形式,能直观地表达流量主要集中的距离区段。从图 1 的全国城市迁徙强度累计曲线来看,以累计比例 80%、90% 为界,城市迁徙分别主要集中在路网距离 0~579 km、0~1 116 km 两

表 1 迁出、迁入规模指数误差统计
Table 1 Error of emigration and immigration scale index

误差 (迁出规模指数-迁入规模 指数)/迁出规模指数*100%	城市 个数	城市 占比/%	累计百分 比/%
[0,5%)	204	55.43	55.43
[5%,10%)	103	27.99	83.42
[10%,15%)	42	11.41	94.84
[15%,20%)	12	3.26	98.10
[20%,40%)	7	1.90	100.00
[40%,+∞)	0	0.00	100.00

个区段。
根据相关研究^[12],城市对外交通客运方式中,公路、铁路、航空的绝对优势出行距离区间分别为 [8, 119]、[119, 1 594]、[1 594, 3 000] km。从全国城市迁徙强度累计曲线来看,8~119 km、8~1 594 km 路网距离的交通出行占比分别为 30%、95%,进一步印证我国城市对外交通中公路和铁路运输的重要性。

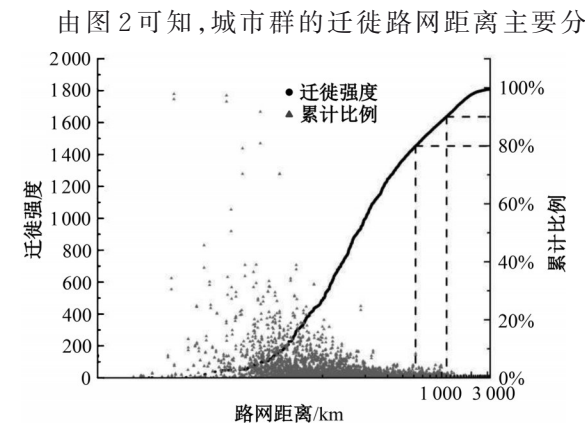


图 1 距离路网下全国城市迁徙强度累计曲线
Fig. 1 Migration intensity cumulative curve of national city under the distance of road network

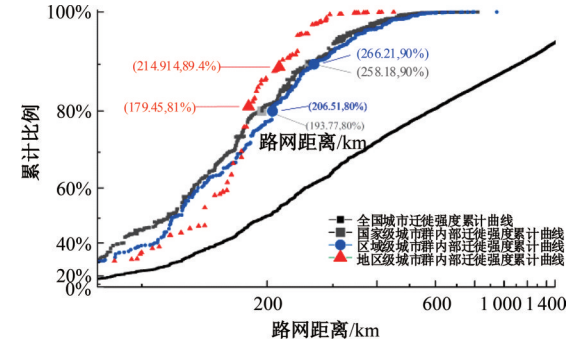


图 2 距离路网下不同城市群迁徙强度累计曲线对比
Fig. 2 Comparison of cumulative curves of migration intensity of different levels city clusters under the distance road network

布在0~600 km。为进一步细化分析0~600 km内累计曲线变化,对 x 轴进行对数坐标变换发现,全国城市迁徙强度累计曲线明显低于城市群累计曲线,说明城市群以短距离出行为主。以交通迁徙累计90%为界,国家级、区域级、地区级城市群迁徙路网距离分别为258.18、266.21、214.914 km。其中,城市群等级划分标准来自《中国城市群地图集》^[13],主要包括五大国家级城市群、八大区域级城市群和六大地区级城市群,详见表2。

统计发现,同一累计百分比下,区域级城市群路网距离略高于国家级、明显高于地区级城市群,

反映了不同等级城市群发展现状。国家级、区域级城市群出行距离偏大,但是国家级城市群中心城市集聚效果更加明显,而区域级城市群中处于较近距离的城市间相互联系更为密切,地区级城市群包含城市数量、城市规模更小,出行距离明显下降。

城市群迁徙强度累计曲线对城市群建设边界问题有所启发,不同等级城市群路网距离控制上限不同,参考图2中90%累计比例对应的距离,国家级、区域级城市群建议控制在260 km左右,地区级城市群建议控制在210 km左右。

表2 7种常见距离衰减函数拟合效果 R^2 分析

Table 2 R^2 Analysis of fitting effects of seven common distance decay functions

等级	城市群名称	指数型	幂律型	高斯型	指数截断幂律型	对数正态型	平方指数型	平方根指数型
国家级城市群	京津冀城市群	0.62	0.65	0.57	0.65	0.64	0.58	0.64
	长三角城市群	0.29	0.26	0.28	0.29	0.27	0.29	0.28
	珠三角城市群	0.43	0.45	0.38	0.45	0.45	0.39	0.45
	成渝城市群	0.17	0.17	0.15	0.17	0.17	0.15	0.18
	长江中游城市群	0.28	0.18	0.28	0.30	0.22	0.29	0.25
区域级城市群	哈长城市群	0.47	0.40	0.49	0.58	0.42	0.49	0.44
	辽中南城市群	0.26	0.20	0.22	0.26	0.23	0.23	0.25
	山东半岛城市群	0.46	0.44	0.45	0.46	0.45	0.45	0.46
	海峡西岸城市群	0.54	0.39	0.60	0.80	0.44	0.60	0.48
	中原城市群	0.20	0.17	0.21	0.22	0.18	0.20	0.19
	关中平原城市群	0.86	0.86	0.87	0.88	0.86	0.86	0.86
	北部湾城市群	0.33	0.25	0.38	0.42	0.27	0.37	0.29
	天山北坡城市群	0.31	0.31	0.31	0.36	0.32	0.31	0.32
地区级城市群	呼包鄂榆城市群	0.40	0.43	0.46	0.52	0.52	0.48	0.50
	兰西城市群	0.52	0.58	0.56	0.58	0.50	0.65	0.63
	滇中城市群	0.39	0.45	0.36	0.40	0.32	0.36	0.25
	黔中城市群	0.25	0.30	0.29	0.29	0.32	0.30	0.27
	晋中城市群	0.25	0.29	0.32	0.28	0.30	0.36	0.32
	宁夏炎黄城市群	0.21	0.26	0.29	0.26	0.29	0.32	0.34

2 距离衰减效应的拟合研究

2.1 常见距离衰减函数拟合

距离与迁徙强度之间的关系并不唯一,可能表现为幂函数、指数函数或其他形式。由于无有效迁徙强度距离衰减模式先验判断,本文以常见距离衰减函数依次拟合现有数据,常见函数如表3所示^[14]。

以城市间最短路网距离作为自变量,以城市间迁徙强度作为因变量,对19个城市群分别进行函数拟合,拟合效果如表2所示。其中相关系数 R^2 最大值为1,越接近1,说明拟合曲线对观测值

表3 常见距离衰减函数形式

Table 3 Forms of common distance decay functions

模式	函 数
指数型	$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij}) (\beta > 0)$
幂律型	$f(d_{ij}) = \beta_{ij}^{-\beta} (\beta > 0)$
高斯型	$f(d_{ij}) = \beta_{ij}^{-\beta d_{ij}^2} (\beta > 0)$
指数截断幂律型	$f(d_{ij}) = \exp(-\alpha d_{ij}) d_{ij}^{-\beta} (\beta > 0)$
对数正态型	$f(d_{ij}) = \exp\left[-\beta (\ln d_{ij})^2\right] (\beta > 0)$
平方指数型	$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij}^2) (\beta > 0)$
平方根指数型	$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij}^{0.5}) (\beta > 0)$

拟合程度越好;反之,拟合程度越差。根据拟合结果可知,除京津冀城市群、海峡西岸城市群、关中

平原城市群、兰西城市群外,其他城市群拟合后的 R^2 明显小于 0.50,说明基于路网距离的常见距离衰减函数不能较好地刻画城市群距离衰减特征。

2.2 重力模型回归拟合

上述对城市群迁徙强度距离衰减函数的拟合结果表明,只考虑距离因素还不够充分,分析城市群间联系强度不仅与路网距离有关,还受城市自身的经济社会因素影响。

重力模型是依据万有引力定律构建的表征两个小区之间出行吸引力的交通领域经典模型。对城市群而言,这里的小区也可以是以城市为基本单位的划分。该模型的分布阻抗有幂函数、指数函数以及组合函数等形式。如何选用阻抗函数是很值得探讨的一个问题。根据相关研究,地理学中最常用的交互模型为负幂律形式的重力模型和负指数形式的 Wilson 最大熵模型。其中负指数函数在空间上的作用域有限,长程交互作用偏少,而负幂律函数更适用于大尺度的复杂空间交互系统^[15],因此本研究选取负幂律重力模型进行函数构建和拟合研究。

最基本的重力模型常用地理直线距离来表示两点之间的空间阻碍,忽略了地形、河流等影响因素,难以准确刻画人们的出行条件,本文使用基于公路网的最短路网距离。

本研究旨在分析城市间的交互作用强度,因此用式(2)中表征两个城市之间相互吸引强度的迁徙规模指数 W_{ij} 替代传统的分布交通量 T_{ij} 。参考传统的 Casey 无约束重力模型形式,同时考虑城市群内部以城市为基本统计单元时的数据易获取程度,本文引入城市常住人口 P_i 和 P_j 替代交通小区的出行发生量 O_i 和吸引量 D_j 。

综上,构建的面向城市群层面的重力模型如下所示:

$$W_{ij} = kP_iP_jd_{ij}^{-\beta} (i \neq j) \quad (3)$$

式中: W_{ij} 为城市 i 与 j 之间交互吸引的作用强度,用迁徙规模指数表示; P_i 、 P_j 为城市 i 与 j 的规模大小,用城市常住人口表示; d_{ij} 为 i 和 j 之间的距离,取值为最短路网距离; β 为距离衰减系数,待求参数; k 为比例因子,待求常数。

本研究使用正向求解重力模型的方法估算 β 和 k ,首先对式(3)进行等式变形得到式(4),通过对数变换得到式(5),通过变量转换转化为常见的

一元一次方程(6)。

$$W_{ij}/P_iP_j = kd_{ij}^{-\beta} (i \neq j) \quad (4)$$

$$\ln(W_{ij}/P_iP_j) = \ln k - \beta \ln d_{ij} (i \neq j) \quad (5)$$

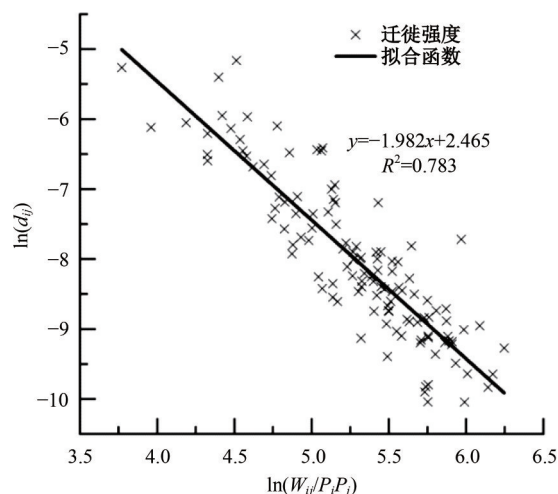
$$y = \alpha - \beta x \quad (6)$$

其中: $y = \ln(W_{ij}/P_iP_j)$, $\alpha = \ln k$, $x = \ln d_{ij}$ 。

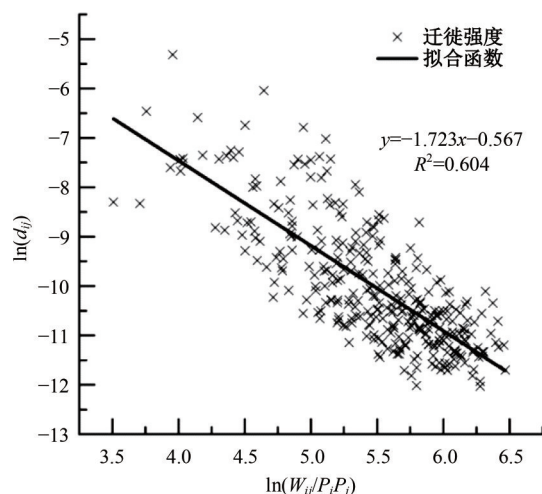
依据 OD 迁徙流矩阵可得迁徙规模指数 W_{ij} ,基于百度地图可得路网距离 d_{ij} ,城市人口 P_i 、 P_j 为统计数据,则式(6)中 y 和 x 均为已知量,通过线性回归可得到系数 α 和 β ,其中直线斜率 β 即为距离衰减系数,由 α 转换得到 k ,从而确定每个城市群对应的重力模型拟合结果。

2.3 拟合结果分析

重力模型求解过程中,将每个城市群的样本集分别带入,绘制散点图,进行直线拟合。图 3 给



(a)成渝国家级城市群



(b)长三角国家级城市群

图 3 部分城市群重力模型拟合

Fig. 3 Fitting diagram of gravity model of some city clusters

出的是成渝城市群和长三角城市群的散点图及直线拟合图,可以看出迁徙强度散点均匀分布在直线两侧,其他城市群也都出现类似效果。

表4为不同城市群重力模型距离衰减函数的拟合结果,包括待求参数截距 α 、距离衰减系数 β 、相关系数 R^2 及得到的函数公式。由表4可知,重力模型整体拟合效果较好,除天山北坡、宁夏炎黄城市群外,其他城市群的 R^2 均大于0.50,占比达到89.5%,表明各变量之间的相关性很强,可以认为在常住人口、公路路网距离和城市间迁徙强度等参数选择下,重力模型更好地刻画了城市群尺度下城市间的交互作用。同时也验证了相较于常见距离衰减函数,重力模型更适于刻画大尺度空间范围内地理实体之间的相互作用。

距离衰减系数 β ,用于反映城市群内部城市间出行强度距离衰减效应的敏感性, β 越大,城市间的迁徙规模指数对距离 d 的敏感性越强,反之

亦然。当 β 小于1.0时,距离衰减效应就变得不再明显。对于个体在城市尺度的移动,距离衰减系数为1.0~2.0^[14]。

由表4可知,除天山北坡城市群距离衰减系数为0.813,其余城市群距离衰减系数均大于1,说明除天山北坡城市群外,其余城市群内部的基于路网距离的迁徙交互衰减作用均较为明显。京津冀、长三角、珠三角、成渝、辽中南、山东半岛、滇中、黔中、晋中等9个城市群的距离衰减系数在1.0~2.0,交互水平达到城市尺度交互水平,侧面反映城市群一体化融合发展程度较高。长江中游城市群、呼包鄂榆城市群、兰西城市群等距离衰减系数均大于2.0,说明相较于其他城市群,其城市间的出行活动对路网距离的增大较为敏感,也说明这些城市群的交通基础设施建设有待完善,建议加强城市群内部互联互通,提高城市群一体化建设。

表4 不同城市群的重力模型距离衰减函数拟合结果

Table 4 Fitting results of gravity model distance decay function for different city clusters

城市群等级	城市群名称	α	β	R^2	距离衰减函数
国家级城市群	京津冀城市群	-1.316	1.237	0.564	$y = -1.237x - 1.316$
	长三角城市群	-0.567	1.723	0.604	$y = -1.723x - 0.567$
	珠三角城市群	-0.411	1.684	0.559	$y = -1.684x - 0.411$
	成渝城市群	+2.465	1.982	0.783	$y = -1.982x + 2.465$
	长江中游城市群	+3.819	2.405	0.757	$y = -2.405x + 3.819$
区域级城市群	哈长城市群	+5.337	2.268	0.589	$y = -2.268x + 5.337$
	辽中南城市群	-1.693	1.045	0.552	$y = -1.045x - 1.693$
	山东半岛城市群	+0.848	1.700	0.832	$y = -1.700x + 0.848$
	海峡西岸城市群	+2.888	2.229	0.889	$y = -2.229x + 2.888$
	中原城市群	+3.321	2.304	0.709	$y = -2.304x + 3.321$
	关中平原城市群	+40.25	2.169	0.662	$y = -2.169x + 4.025$
	北部湾城市群	+8.093	2.921	0.772	$y = -2.921x + 8.093$
	天山北坡城市群	-1.993	0.813	0.275	$y = -0.813x - 1.993$
地区级城市群	呼包鄂榆城市群	+10.045	3.267	0.693	$y = -3.267x + 10.045$
	兰西城市群	+10.960	3.138	0.636	$y = -3.138x + 10.959$
	滇中城市群	+0.948	1.492	0.522	$y = -1.492x + 0.948$
	黔中城市群	+3.163	1.806	0.692	$y = -1.806x + 3.163$
	晋中城市群	-0.079	1.220	0.523	$y = -1.220x - 0.079$
	宁夏炎黄城市群	0.814	1.106	0.361	$y = -1.106x + 0.814$

3 距离衰减系数与可达性的关系

通过观察不同城市群的距离衰减系数,可知得到的重力模型参数具有明显的空间异质性。下面将进一步细化分析重力模型中的距离衰减系数

的影响因素。

3.1 可达指标的计算

可达性这一概念由 Hansen^[16]于1959年首次提出,并将其定义为交通网络中各节点相互作用

机会的大小。随着研究的深入,这一概念也被应用于表达克服阻隔的难易程度。考虑到可达性与距离衰减系数 β 之间可能具有良好的耦合关系,本文采用可达性这一指标对 β 进行分析。

受徐明非等^[17]将“城市群 2 h 通达”解读为“在采用最快的交通方式组合下,从中心城市到城市群内任一其他城市出行时间均在 2 h 以内”启发,本研究用城市群内中心城市的交通可达性评价城市群总体可达性。根据《中国城市群地图集》^[13]确定中心城市,按照质量加权平均可得城市群整体可达性。

根据戢晓峰等^[18]研究成果,城市 i 的综合运输可达性可用式(7)(8)计算:

$$A_i = \omega_1 A_{i1} + \omega_2 A_{i2} + \omega_3 A_{i3} + \omega_4 A_{i4} + \omega_5 A_{i5} \quad (7)$$

$$A_{ix} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{ij} \cdot M_j}{\sum_{j=1}^n M_j}, (x=1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

式中: A_i 为城市 i 综合运输可达性; A_{i1} 、 A_{i2} 、 A_{i3} 、 A_{i4} 、 A_{i5} 分别为城市 i 区内公路、区外公路、铁路、水运及航空运输可达性; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 为上述 5 种运输类别的权重; A_{ix} 为城市 i 第 x 种运输类别的可达性取值; T_{ij} 为城市 i 与城市 j 间最短旅行时间距离; M_j 为城市 j 质量,为 $\sqrt{P \times \text{GDP}}$ (P 、 GDP 为城市人口及地区生产总值)。

城市群内的出行距离较短,一般处于公路和铁路绝对优势区间^[12],因此本文在计算城市群综合运输可达性时,主要考虑公路和铁路两种运输方式。基于私人小汽车出行的区内公路和区外公路运输均无须换乘,因此不再对区域内外进行划分,统一合并为公路运输。城市群综合运输可达性计算公式可简化为式(9)~(13):

$$K_l = \sum_{i=1}^m \alpha_i A_i \quad (9)$$

$$A_i = \omega_1 A_{i1} + \omega_2 A_{i2} \quad (10)$$

$$A_{ix} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{ij} \cdot M_j}{\sum_{j=1}^n M_j}, (x=1, 2) \quad (11)$$

$$T_{ij} = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{v_{ij}}, & x=1 \\ z_{ij} + 10, & x=2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^m M_i} \quad (13)$$

式中: K_l 为第 l 个城市群的综合运输可达性; $x=1, 2$ 为公路和铁路两种运输方式; ω_1 、 ω_2 为公路和铁路运输方式的权重,取中心城市公路、铁路客运周转量占公路和铁路总客运周转量的比例; α_i 为第 i 个中心城市可达性的权重,取城市 i 的质量占城市群 l 中所有中心城市质量的比例; T_{ij} 为最短距离时间,常取小时为单位; z_{ij} 为两城市间铁路时刻表的最短直达时间。

其中最短距离时间 T_{ij} ,公路以最短路网距离 d_{ij} 作为路程,取 100 km/h 设计速度为行驶速度 v_{ij} ,计算旅行时间;铁路最短距离时间取 12306 售票软件中两城市间铁路时刻表最短时间(考虑直达和中转),对于没有列车接续的城市,认为公路为唯一交通方式,取公路最短距离时间代替。

3.2 距离衰减系数与可达性间的关系

本文中,可达性指标 A_i 可理解为城市质量加权的平均旅行时间; A_i 越小,表明城市之间的交通联系越便捷, A_i 越大,表明城市间相互联系的阻碍也越大。距离衰减系数表现的是交互强度对于距离的敏感性,两者都可以体现城市之间的交通联系随着“距离”的变化。

为了确保距离衰减系数分析的准确性,剔除 $R^2 < 0.50$ 的城市群,以剩余 17 个城市群为对象分别计算其公路、铁路以及综合运输可达性,结果如表 5 所示。通如过图 4 所示的散点图,发现距离衰减系数 β 与公路运输可达性之间的散点图分布较为分散,但二次函数可以较好解释 β 与铁路以及综合运输可达性之间的关系。

表 5 中的结果表明:第一,不同城市群对公路的依赖性不同。一方面,公路运输可达性在 2 h 以内的城市群占比仅为 41.2%,表明能实现城市群 2 h 公路交通圈的比例不到 50%。公路可达性 2 h 以内的多为区域级城市群和地区级城市群。国家级城市群往往覆盖范围较广,难以实现城市群边缘地区的公路快速通达。但是当区域级城市群和地区级城市群包含城市较少、城市之间距离较近时,可以通过完善公路设施,实现城市间的快捷连接。另一方面,公路运输可达性和距离衰减系数分布较为分散,说明公路旅行时间并不能完

全解释人们的出行积极性。

第二,铁路基础设施的建设,可以极大地方便人们的出行。对比发现,铁路运输可达性在2 h以内的城市群占比达76.5%。公路可达性大于2 h的城市中,有50%的城市通过引入铁路运输将可达性降到2 h以下。铁路基础设施的完善可以极大地改善城市群的出行便利性。综合运输可达性在2 h以内的城市群占比可达到70.6%,从中可

以看出发展综合交通运输对城市群实现2 h交通圈的重要性。

第三,旅行时间的增长将极大地影响人们出行的积极性。由铁路可达性以及综合运输可达性与距离衰减系数的拟合结果可知,随着可达性时间的提高,距离衰减系数逐渐增大,且增大速度逐渐越来越快,说明随着旅行时间的增加,人们对距离的敏感性越来越高,且边际效应递增。

表5 各城市群可达性计算结果

Table 5 Calculation results of accessibility of city clusters

城市群等级	城市群名称	中心城市	β	公路运输可达性/h	铁路运输可达性/h	综合运输可达性/h
国家级城市群	京津冀城市群	北京市、天津市、石家庄	1.237	2.303	1.390	1.803
	长三角城市群	上海市、杭州市、南京市、合肥市	1.723	2.518	1.452	1.944
	珠三角城市群	广州市	1.684	0.906	0.495	0.786
	成渝城市群	重庆市、成都市	1.982	2.505	1.410	1.715
	长江中游城市群	武汉市、长沙市、南昌市	2.405	3.149	2.078	2.329
区域级城市群	哈长城市群	哈尔滨、长春市	2.268	2.772	2.067	2.410
	辽中南城市群	沈阳市、大连市	1.045	2.780	1.421	1.973
	山东半岛城市群	济南市、青岛市	1.700	2.993	1.762	2.030
	海峡西岸城市群	福州市、厦门市	2.229	2.767	0.588	1.947
	中原城市群	郑州市	2.304	1.348	0.675	1.217
	关中平原城市群	西安市	2.169	1.814	1.233	1.519
	北部湾城市群	南宁市、海口市	2.921	3.066	4.056	3.477
地区级城市群	呼包鄂榆城市群	呼和浩特市	3.267	2.926	3.385	3.270
	兰西城市群	西宁市、兰州市	3.138	1.795	1.850	1.830
	滇中城市群	昆明市	1.492	1.603	1.174	1.426
	黔中城市群	贵阳市	1.806	1.467	0.945	1.453
	晋中城市群	太原市	1.220	1.281	0.790	0.914

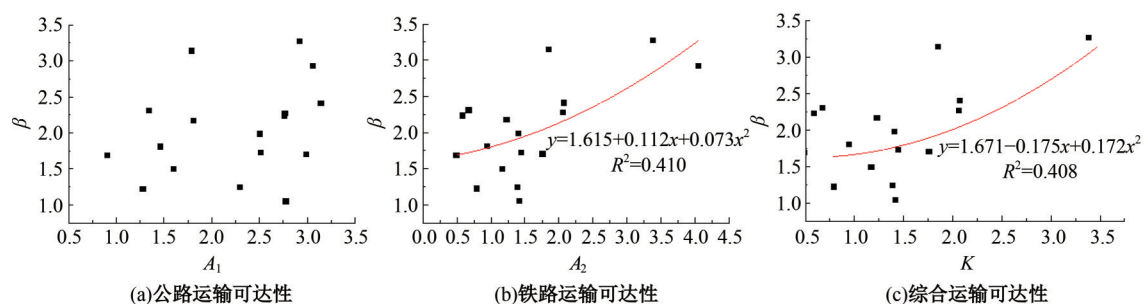


图4 距离衰减系数与交通可达性之间的关系

Fig. 4 Relationship between distance decay coefficient and traffic accessibility

4 结论

(1)区别于传统市域等研究尺度,本文以全国各大城市群为研究范围,利用百度迁徙大数据作为基础数据,克服了对多城市群交通出行进行横向分析缺少数据支撑的问题。

(2)本文构建重力模型拟合分析不同城市群

内部的城市间迁徙强度随距离的变化特征。研究表明幂函数形式的重力模型更适合于刻画城市群尺度空间范围内地理实体之间的相互作用。以迁徙规模指数代替传统交通分布量,表征城市间交互吸引强度,是本文的主要新意之处。

(3)京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群、成渝城市群等城市群距离衰减系数处于

1.0~2.0,说明城市出行强度随着距离的增加变化明显,已经达到城市尺度交互水平,一体化融合发展水平较高,同时长江中游城市群、呼包鄂榆城市群、兰西城市群内部路网距离对其迁徙交互阻碍作用较大,交通基础设施建设有待完善。

(4)城市群可达性和距离衰减系数之间的关系研究表明,铁路基础设施建设可以极大地提高人们出行的便利性,这为完善城市群2 h交通圈建设提供了重要思路。

参考文献:

- [1] 冯慧芳,柏凤山,徐有基. 基于轨迹大数据的城市交通感知和路网关键节点识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 42-47.
Feng Hui-fang, Bai Feng-shan, Xu You-ji. Urban traffic perception and critical node identification of road network based on trajectory big data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 42-47.
- [2] 贾洪飞,郭明雪,罗清玉,等. GPS数据下的城市路网关键路段识别[J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50(4): 1338-1343.
Jia Hong-fei, Guo Ming-xue, Luo Qing-yu, et al. Identifying critical links of urban road networks based on GPS data[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1338-1343.
- [3] Ding F, Zhang Z, Zhou Y, et al. Large-scale full-coverage traffic speed estimation under extreme traffic conditions using a big data and deep learning approach: case study in China[J]. Transportation Engineering Part A Systems, 2019, 145(5): 05019001.
- [4] 李自圆,孙昊,李林波. 基于手机信令数据的长三角全域城际出行网络分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2022, 62(7): 1203-1211.
Li Zi-yuan, Sun Hao, Li Lin-bo. Analysis of inter-city travel in the yangtze river delta based on mobile signaling data[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1203-1211.
- [5] Shang Y, Li X G, Jia B, et al. Freeway traffic state estimation method based on multisource data[J]. Journal of Transportation Engineering Part A Systems, 2022, 148(4): 4022005.
- [6] Soriguera F, Rosas D, Robuste F. Travel time measurement in closed toll highways[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2010, 44(10): 1242-1267.
- [7] Lu X J, Ma C X. The impact of inter-city traffic restriction on COVID-19 transmission from spatial econometric perspective[J]. Promet-traffic & Transportation, 2021, 33(5): 705-716.
- [8] 王录仓,刘海洋,刘清. 基于腾讯迁徙大数据的中国城市网络研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 853-869.
Wang Lu-cang, Liu Hai-yang, Liu Qing. China's city network based on Tencent's migration big data [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 853-869.
- [9] Xu X L, Wang S H, Dong J H, et al. An analysis of the domestic resumption of social production and life under the COVID-19 epidemic[J]. Plos One, 2020, 15(7): 0236387.
- [10] 项昀,徐铖铖,于维杰,等. 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.
Xiang Yun, Xu Cheng-cheng, Yu Wei-jie, et al. Dominant trip distance of urban external passenger transport mode based on big data of migration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(1): 241-246.
- [11] 王聪,严洁. 百度迁徙规模指数构造方法反演[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(4): 616-626.
Wang Cong, Yan Jie. An inversion of the constitution of the Baidu migration scale index[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(4): 616-626.
- [12] 项昀,王炜,郑敦勇,等. 区域综合网络货运交通方式的优势运距研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 33-39.
Xiang Yun, Wang Wei, Zheng Dun-yong, et al. Dominant transportation distance for multi transportation modes in regional integrated freight network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(6): 33-39.
- [13] 方创琳. 中国城市群地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [14] 陈卓,金凤君,杨宇,等. 高速公路流的距离衰减模式与空间分异特征——基于福建省高速公路收费站数据的实证研究[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1086-1095.
Chen Zhuo, Jin Feng-jun, Yang Yu, et al. Distance-decay pattern and spatial differentiation of expressway

- flow: an empirical study using data of expressway toll station in Fujian Province[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1086-1095.
- [15] 刘瑜, 龚俐, 童庆禧. 空间交互作用中的距离影响及定量分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 526-534.
- Liu Yu, Gong Li, Tong Qing-xi. Quantifying the distance effect in spatial interactions[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 526-534.
- [16] Hansen W G. How accessibility shapes land use[J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, 25(2): 73-76.
- [17] 徐明非, 欧晓培, 王元庆. 城市群公路可达性与衔接提升研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 245-254.
- Xu Ming-fei, Ou Xiao-pei, Wang Yuan-qing. Study on highway accessibility of urban agglomerations and its connection improvement[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(11): 245-254.
- [18] 戢晓峰, 郝京京, 陈方. 综合运输可达性与物流经济的空间分异及耦合[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 24-31.
- Ji Xiao-feng, Hao Jing-jing, Chen Fang. Spatial differentiation and coupling between integrated transport accessibility and logistics economy[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 24-31.