文章编号:1674-2974(2026)03-0119-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026030

基于地铁AFC数据的城际旅游客流出行特征研究——以长沙为例

刘晨辉[1,2,3†],谢瑶[1]

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学综合交通研究中心,湖南 长沙 410082;
3. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘 要:基于长沙地铁自动售检票数据,识别出通过地铁对外交通换乘站到达长沙的城际旅游客流.基于游客在长沙的停留时长,利用高斯混合模型对城际客流进行聚类分析,识别出3类客流群体,在停留模式上主要对应着当天往返、停留一晚与停留两晚等3种类型.研究结果表明,在出行目的上,3类客流的主要出行目的均为以五一广场为主导的核心商圈.一般在远离市中心时过夜客流占比更高,靠近市中心时当天往返客流占比增大.当天往返客流多为满足短期出行需求,如观光和办事.停留两晚的客流出行需求更复杂,如就医和换乘.而停留一晚的客流为过渡性群体,兼具两者特点.在出行时长上,在长沙停留时间较长的群体,其地铁出行时长通常也较长.通过对城际旅游客流出行特征的研究,能为相关交通规划和管理部门提供决策参考,有助于优化轨道交通网络,提升旅客出行体验.

关键词:城市交通;城际旅游客流;地铁;自动售检票数据;出行特征;高斯混合模型

中图分类号:U239.5 **文献标志码**:A

Research on travel characteristics of intercity tourists with metro AFC data—a case study of Changsha

LIU Chenhui[1,2,3†], XIE Yao[1]

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Transportation Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the automatic fare collectionc (AFC), data of Changsha Metro, intercity tourists who arrived at Changsha via the metro external transportation transfer stations are identified. Based on their stay time in Changsha, these tourists are clustered into three groups using Gaussian mixture model, and they are mainly identified to three stay pattern types: the day-return type, the one-night type and the two-night type. The research results show that in terms of travel purpose, all three groups mainly travel to the Wuyi Square-centered core business district of Changsha. Generally, the proportion of overnight passenger flow is higher when it is far away from

* **收稿日期**:2025-02-13
基金项目:湖南省自然资源厅科技计划项目(HBZ20240122),Research Foundation of the Department of Natural Resources of Hunan Province (HBZ20240122)
作者简介:刘晨辉(1987—),男,山东济宁人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: chenhuiliu@hnu.edu.cn

the city center, and the proportion of the day-return passenger flow increases when it is close to the city center. The day-return passenger flow mostly meets short-term travel needs, such as sightseeing and business. The two-night group has the more complex travel needs, such as medical treatment and transfer. The one-night group is a transitional group that has both characteristics. In terms of travel time, the group that stays in Changsha for a longer time usually has a longer metro travel time. The study of travel characteristics of intercity tourist passenger flow can provide decision-making references for relevant transportation planning and management departments, help optimize the rail transit network, and improve the travel experience of passengers.

Key words: urban transportation; intercity tourist; metro; AFC data; travel characteristics; Gaussian mixture model

随着我国经济社会的快速发展,城市之间的联系日益密切,区域一体化发展成为新趋势,多个国家级都市圈相继获批,城际出行需求急剧增加.在此背景下,明确城际客流出行特征是推动都市圈交通一体化规划和建设的前提.轨道交通有着运量大、速度快、环保节能等优点[1],能显著提高区域交通供给水平,促进都市圈内部的融合与发展[2],已逐渐成为城际出行的重要选择.近年来,构建以城市轨道、市域铁路、城际铁路、铁路干线为主的多层次轨道交通体系成为交通发展的新方向.在城际轨道交通领域,侯雪等[3]基于问卷调查研究了京津城际轨道建成后对居民城际出行的影响,发现其显著提高了职住分离的接受度.胡明伟等[4]以粤港澳大湾区11个城市为例,研究了城际轨道交通可达性对区域经济的影响,结果表明城际铁路的效益与城市本身交通与经济发展的协调程度密切相关.基于问卷调查数据,Cheng等[5]通过多项式logit模型预测了宁淮城际高铁开通后的诱导客流量.谢覃禹[6]探究了长株潭城际铁路客流的出行特征,发现节假日客流高于工作日客流,且与节假日相邻工作日受节假日影响较大.王晟由等[7]基于问卷调查数据,探究了北京都市圈内通勤出行方式选择的影响因素.战武麟等[8]基于百度迁徙数据,分析了长三角地区工作日、周末以及节假日城际出行网络特征和出行时间异质性影响因素.陈立峰等[9]利用手机信令数据分析了京津冀城市群工作日与非工作日的城际出行时空特征,结果显示城际出行呈现周变化规律,周五至周日的出行量显著高于周一到周四,且出行结构以省会城市或经济发达城市为中心.Li等[10]从建成环境的角度分析天津与北京之间的城际通勤影响因素,发现就业密度是最重要的影响因素.

轨道交通的发展改变了城际和城市出行方式[11],也深刻影响了城市间的旅游流动.随着客流增长和旅游模式多样化,不同城市间的旅游客流特征发生了显著变化.就都市圈而言,往往被分为单核或多核都市圈,即都市圈由一个或者多个核心城市组成,整体形态为周边城市围绕核心城市发展.在人口流动上,整体上仍然是人口向核心城市流动,这种特性在节假日旅游客流的表现上更为明显.王娟等[12]基于社交平台旅游数据,对成渝城市群旅游客流网络结构特征进行分析,研究表明旅游客流以成都和重庆为双核心的空间极化现象显著且具有持久性.李涛等[13]基于腾讯迁徙数据,分析全国城市群国庆假期的城际出行特征,研究表明黄金周期间的城际出行呈现出明显的时段变化规律,可划分为出行期、返程期和旅途期,且形成了轴辐式、多中心和单中心3种典型的出行模式.随着大数据时代的到来,手机信令数据[9,14]、互联网位置服务数据[15]、智能刷卡数据[10,16]等新型数据的使用,为城际旅游出行特征的精细化研究提供了条件.

尽管相关学者已经针对城际旅游客流出行特征做了一些探索性研究,但仍存在显著不足.首先,目前针对城际旅游客流的精细化研究较少,现有研究主要以城市为节点进行宏观分析,缺乏对旅客到达目标城市之后的出行特征的深入刻画.其次,现有研究多关注城际轨道交通对区域联系的影响,而对城际旅游客流在核心区域内的出行模式探讨不足.这不仅限制了对核心区域交通需求与服务效率的全面

认知,也影响了交通组织与资源配置优化. 此外,基于轨道交通发展背景的旅游客流出行特征研究较少. 现有旅游数据多围绕单个景区展开,难以刻画景点之外的出行模式,尤其是地铁旅游客流的出行研究仍然不足.

基于此,本文聚焦轨道交通发展背景下的城际旅游客流,利用高精度时空数据与高斯混合建模识别不同城际旅游客流群体,深入挖掘其出行规律,揭示独特的出行模式及潜在问题. 研究成果可为轨道交通规划与建设提供科学参考,并为其他城市的相关研究提供借鉴.

1　数据来源

长株潭都市圈是我国中部第一个获批的国家级都市圈,由湖南省长沙市、株洲市和湘潭市 3 个城市组成,其相距均不到 40 km. 2022 年,长株潭都市圈地区生产总值达 2 028 亿元,占湖南省地区生产总值的 41.7%,成为拉动全省经济发展的火车头. 作为湖南省省会和国家特大城市,长沙是长株潭都市圈核心城市,也是唯一开通城市轨道交通线路的城市. 作为著名“网红城市”,长沙文旅、商业等服务产业发达,拥有五一广场、橘子洲、岳麓山等大批旅游景点,吸引了大量的外来旅游客流. 截至 2023 年 4 月,长沙已开通运营 6 条地铁线路,分别为 1、2、3、4、5 和 6 号线,总长度 190.6 km. 地铁线网覆盖范围广,涵盖了长沙市的主要功能区,包括芙蓉区、天心区、雨花区、岳麓区、开福区以及长沙县部分区域. 此外,还实现了不同交通系统之间的便捷换乘,形成了四通八达的交通网络.

长沙地铁对外换乘站点可分为 4 类(图 1):一是城际换乘站点,为地铁与长株潭城际铁路之间的换乘站,共计 5 个换乘站点,分别为 1 号线中信广场站和开福寺站,4 号线树木岭站和观沙岭站,以及 2 号线锦泰广场站,实现了城轨与城际铁路的有机衔接. 二是干线铁路换乘站点,为地铁与干线铁路之间的换乘站,共计 2 个换乘站点,分别为长沙火车站与长沙火车南站. 三是汽车换乘站点,为地铁与公共汽车之间的换乘站,共计 1 个换乘站点,为望城坡站. 四是机场换乘站点,为地铁与机场之间的换乘站,共计 1 个换乘站点,为黄花机场 T1T2 站. 长沙地铁网络数量众多的交通换乘站,加强了长沙与周边城市之间的互联互通,有助于区域协同发展.



图 1　长沙地铁网络分布图(截至 2023 年 4 月)

Fig.1　Changsha metro network map (as to April 2023)

为分析城际旅游客流群体出行特征的异质性,本研究采集了 2023 年 3 月 21 日—4 月 3 日共计两周的长沙轨道交通自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)数据,每条记录包含乘客编号、进站时间、进站线路、进站站点、出站时间、出站线路、出站站点等信息. 精准识别城际旅游客流是分析其出行特征的前提. 针对收集到的 AFC 数据,在正式分析之前先进行了预处理. 考虑到往返客流较单程旅客而言,具有更丰富的出行特征,故本文最终选取城际往返旅游客流作为研究对象,并在数据预处理的基础上,多角度识别城际往返旅游客流(图 2). 首先,去除无效数据. 进出站点相同或出行时长超过 120 min 的数据被认为是异常数据,予以删除. 接着,识别外来游客. 本文将外来游客定义为“仅在周五 18:00 至周日 24:00 期间出现,通过轨道交通系统实现一次城际往返,且首次进站点与末次出站点均为对外轨道交通枢纽站点的乘客”. 即,从时间上来说,外来游客应是在周五下班后来长沙,周日结束前离开长沙;从空间上来说,外来游客应通过长沙对外轨道交通枢纽抵达和离开长沙.

2　研究方法

2.1　GMM 算法

高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)是一种无监督学习算法,是单一高斯概率密度函数(probability density function, PDF)的扩展,理论上其可以平滑地近似任意非线性函数[17-18]. GMM 假设数据点由多个高斯分布组成,能灵活地描述数据的复杂分布特性,则包含 K 个组件的 GMM 公式为[19]:

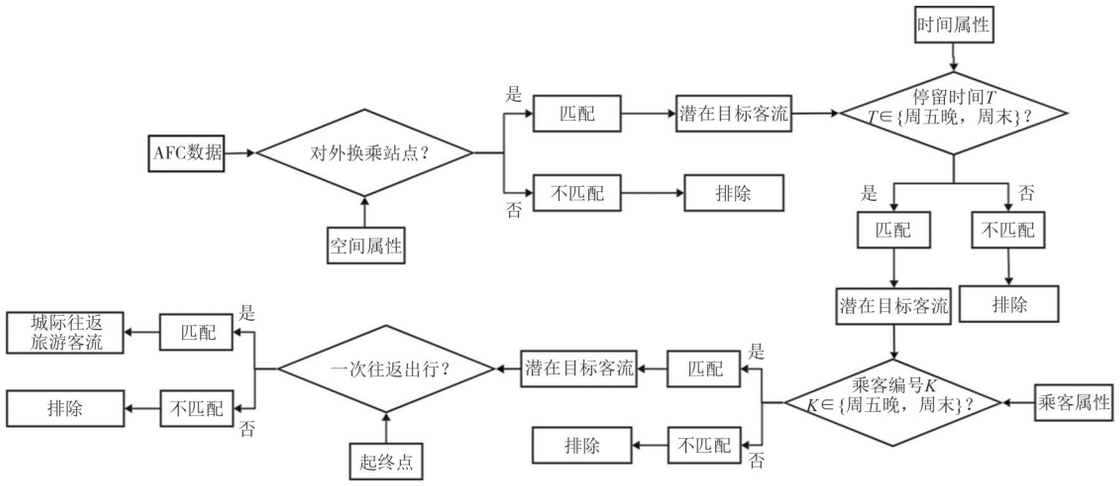

图2 城际往返旅游客流识别流程图

Fig.2 Flow chart of the intercity round-trip tourist identification

$$\begin{cases} p(x)=\sum_{k=1}^{K}\omega_k N(x|\mu_k,\sigma_k^2) \\ N(x|\mu_k,\sigma_k^2)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}}\exp\left[-\dfrac{(x-u_k)^2}{2\sigma_k^2}\right] \\ \sum_{k=1}^{K}\omega_k=1,0\leqslant\omega_k\leqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$p(x)$为高斯混合模型的概率密度函数，$N(x|\mu_k,\sigma_k^2)$为高斯密度函数，ω_k、μ_k、σ_k^2分别为混合模型中第k个组件的权重、均值、方差矩阵.

期望最大化(expectation-maximization，EM)算法是最常见的GMM模型参数估计方法[20]，可分为期望步(E-Step)和最大化步(M-Step)两个步骤. 其中，E-Step是根据初始参数获得每个数据点的生成概率，M-Step则是根据E-Step的结果求解并更新参数值，重复上述两步骤直到模型参数的似然函数收敛[21].

1)E-step，得到每个数据点x_i来自第k个组件的概率：

$$\gamma_k(x_i)=\frac{\omega_k N(x_i|\mu_k,\sigma_k^2)}{\sum_{k=1}^{K}\omega_k N(x_i|\mu_k,\sigma_k^2)} \tag{2}$$

2)M-step，基于E-Step中计算的每个高斯分布的概率，用最大似然函数估计模型参数：

$$u_k=\frac{\sum_{i=1}^{N}\gamma_k(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^{N}\gamma_k(x_i)} \tag{3}$$

$$\sigma_k^2=\frac{\sum_{i=1}^{N}\gamma(x_i)(x_i-u_k)^2}{\sum_{i=1}^{N}\gamma_k(x_i)} \tag{4}$$

$$\omega_k=\frac{\sum_{i=1}^{N}\gamma_k(x_i)}{N} \tag{5}$$

2.2 客流聚类

基于城际一次往返旅游客流数据，计算旅客在长沙的停留时间，并将停留时间的范围设定为地铁出站后在长沙逗留不超过54 h(即从周五18:00至周日24:00的单个周末最长时间)，计算共得到54 176条数据. 图3展示了城际旅游客流在长沙停留时长的密度分布情况，可见城际旅游客流的停留时长分布呈现出高度异质性，并表现出多峰特征，这表明不同旅客群体的停留行为存在显著差异. 为继续探究不同城际旅游客流群体之间出行行为模式差异，基于GMM算法，对城际旅游客流进行聚类分析. 在聚类开始之前，基于密度峰值[22]设置初始参数，确定客流类别，根据先验知识将GMM中的参数K设定为3，即将城际旅游客流按停留时长划分为3个群体.

GMM算法聚类结果参数如表1所示. 研究结果表明，城际旅游客流群体可被分为3类，分别对应不同的停留模式和出行特征. 第1类是短停留时长群

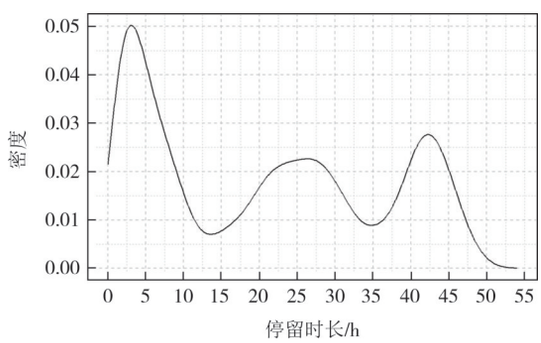

图3 城际旅游客流在长沙的停留时长分布图

Fig.3 Distribution of the intercity tourist stay time in Changsha

体(高斯分布 1),主要表现出当天往返的停留模式,其停留时间平均为 3.87 h,占比 38.82%;第 2 类是中停留时长群体(高斯分布 2),停留模式主要表现为停留一晚,平均停留时间为 24.28 h,占比 39.16%;第 3 类是长停留时长群体(高斯分布 3),主要表现为停留两晚的停留模式,平均停留时间为 42.07 h,占比 22.02%.

表 1　高斯混合模型识别的停留时长客流聚类

Tab.1　Passenger clusters identified with the Gaussian mixture model by stay time

类别	ω	μ/h	σ
高斯分布 1	0.388 2	3.87	2.69
高斯分布 2	0.391 6	24.28	6.98
高斯分布 3	0.220 2	42.07	2.89

整体来看,中停留时长群体的客流占比最大,说明停留一晚是最主要的旅游停留模式. 而短停留时长客流略低于中停留时长客流,在城际旅游出行中占比相当大,体现了长沙与周边城市交通出行的便捷与快速. 上述结果在反映长沙与周边城市之间频繁的经济与社交互动的同时,也体现出短时停留和当天往返的出行模式更能满足旅客群体的短途出行需求. 相比之下,长停留时长的客流占比相对较少,说明中长期出行需求要低于短期出行需求. 但整体上,城际旅游客流具有极大的过夜需求,这也符合一般的旅游出行特征.

3　聚类结果分析

3.1　出行目的分析

明确旅游客流抵达与离开长沙时的地铁站点有助于识别其来长沙的出行目的. 统计外来旅客抵达长沙时的出站地铁站点,与离开长沙时的的进站地铁站点. 各站点不同客流群体的占比情况如图 4 所示. 在绝大部分站点中,过夜客流群体占比最大,且过夜客流在远离市中心的区域占比明显更高. 而越靠近市中心区域,当天往返客流的占比通常越高. 这体现出不同客流群体在城市不同功能分区上出行的差异性. 市中心区域凭借资源和交通优势吸引了更多的短时旅客,而远离市中心的区域则由于较长的停留需求成为过夜旅客的主要目的地.



图 4　不同客流群体在长沙的分布情况

Fig.4　Distributions of different passenger groups in Changsha

不同城际旅游客流群体的主要出行目的地存在明显差异,选择客流量占比前二十的目的站点,如图 5 所示. 对于短停留时长的客流群体,其主要目的站点为五一广场(23%)、橘子洲(7%)等. 对于过夜一晚的客流群体,其主要出行目的站点为五一广场(22%)、万家丽广场(5%)等. 对于过夜两晚客流群体,其主要出行目的站点为五一广场(20%)、芙蓉广场(6%)等. 不难发现,五一广场在当天往返与过夜

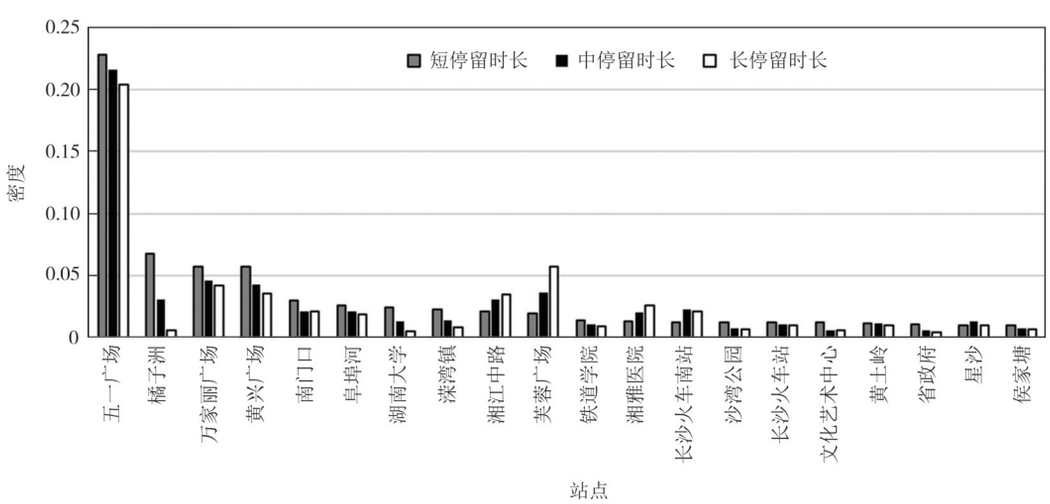

图 5　不同客流群体的主要目的站点

Fig.5　Main destination stations for different passenger groups

类型的旅游客流群体中均具有极大的吸引力,是长沙的旅游热点目的地.而以过夜客流为主导的站点如芙蓉广场与湘江中路,均位于五一广场附近,酒店产业发达,是为五一广场输送游客的过渡性地点.上述研究表明,以五一广场为主导的商圈旅游在长沙旅游中占据主导地位.

除此之外,以旅游景点为主要出行目的的出行中,短停留时长客流占据主要比例,如橘子洲、湖南大学(岳麓书院)等.这表明旅游景点主要吸引的是当天往返客流.而对于就医与交通换乘的出行中,如湘雅医院、长沙火车南站等,过夜客流占据主导地位.

上述研究发现当天往返客流在短期出行需求中占据主导位置,如景点观光、办事等需求.中停留时长的客流群体既具有短停留时长客流的特征,也与长停留时长客流有所交集,是一个过渡性群体.停留两晚的出行模式在复杂需求中占据主导位置,如就医、交通换乘等需求.3种类型旅游客流来长沙最主要的出行目的均为以五一广场为主导的商圈旅游,这表明商圈出行对于各类旅游群体的吸引力都很大.

3.2 出行时长分布

出行时长定义为乘客在地铁系统内一次出行的进出站时间之差,反映了城际旅客出行的活动范围.统计不同城际旅游客流群体的出行时长分布如图6所示,可见其存在一定差异.为验证这种差异是否具有统计学上的显著性,进行了统计检验.ANOVA方差分析结果表明,不同群体的出行时长在总体上存在显著差异(F=4.98,P=0.007 4<0.01).Tukey事后检验进一步表明,短停留时长客流群体与中停留时长客流群体之间无显著差异(P=0.898 4),而长停留时长客流群体与短停留时长客流群体、中停留时长客流群体之间的差异显著(P=0.035 7<0.05;P=0.010 2<0.05).这表明长停留时长客流群体的出行时长与其他两组明显不同.具体而言,短停留时长客流群体平均出行时长为28.3 min,中停留时长客流群体的平均出行时长为32.0 min,长停留时长客流群体的平均出行时长为38.6 min.这一结果反映出在长沙停留时长越长的群体,其在地铁系统内花费的交通出行时长越长.在出行时长的分布特征上,短停留时长客流呈现出双峰特征,两个出行峰值分别在17 min和32 min附近,而长停留时长客流呈现出单峰特征,其出行时长峰值在32 min附近.中停留时长客流呈现出双峰特征,体现出另外两种客流的混合特征.上述不同群体出行时长的差异,反映了各客流群体出行需求的差异性.当天往返客流出行时长较短,反映了其近距离出行需求,而停留两晚客流出行时长更长,意味着这部分客流往往有着更远的出行距离.

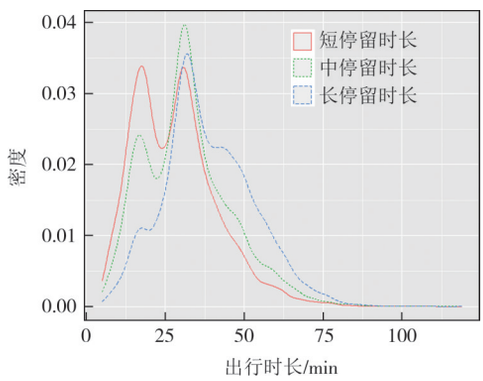

图6 不同城际旅游客流群体的出行时长分布

Fig.6 Distributions of travel time of different intercity tourist groups

4 结论和展望

随着长株潭区域多层次轨道交通网络的不断完善,城市之间的联系日益紧密,城际出行需求也在持续增长.日益发达的地铁网络显著增强了长沙与其周边城市的互联互通,提升了区域整体的出行效率.通过对外换乘站点旅游客流的研究,不仅能够揭示出行群体的差异化需求,还能反映长沙与周边地区经济社会互动的强度与发展趋势,有助于优化交通资源配置,为相关政策制定者提供科学依据.

基于停留时长聚类分析城际往返旅游客流在长沙的不同出行模式,共聚类出3类客流群体,分别为短停留时长、中停留时长与长停留时长,分别主要对应着当天往返、停留一晚与停留两晚3种停留模式.研究结果表明,在出行目的上,大多数站点中,过夜客流占比最大,且远离市中心的区域过夜客流占比更高,靠近市中心时,当天往返客流占比增大.短停留时长客流满足短期需求,如观光和办事;中停留时长客流则介于两者之间,属于过渡性群体;长停留时长客流主要满足更复杂的出行需求,如就医和交通换乘.3类客流的主要出行目的均为五一广场商圈,显示出商圈对各类群体的强大吸引力.在出行时长上,在长沙停留时间较长的群体,其地铁出行时长通常也较长.具体而言,短停留时长客流的出行时长较短,反映出近距离出行需求;而长停留时长客流则有

更长的出行时长,意味着出行距离更远.

本研究在城际旅游客流出行特征方面取得了初步成果,但由于数据的限制,研究仅基于两周的数据,这限制了对城际客流长期趋势的探讨.未来,城际旅游客流的分析应扩大数据时间范围,分析不同季节、假期以及特定时段(如节假日高峰期、平日等)的城际旅游客流变化,识别出更为精确的季节性和周期性趋势.此外,研究未涵盖乘坐公交、出租车等交通方式的乘客,仅考虑地铁系统内的停留点信息,难以全面反映出行目的的多元性与复杂性.未来研究可结合多源数据(如手机信令或调研数据),对城际旅游客流在市内的活动模式进行更精细的分析,以提升对其出行特征的理解.

参考文献

[1] 晏莉颖, 孟祥佩. 轨道交通对居民交通方式选择的影响研究[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(1):100-105.
YAN L Y, MENG X P. Effect of rail transit on residents' choice of traffic modes[J]. Railway Transport and Economy, 2018, 40(1): 100-105.(in Chinese)

[2] 吕凤琴, 袁奇峰, 吴海蓝. 基于特征价格模型的城际轨道交通站点周边土地价值影响效应研究[J]. 工程经济, 2021, 31(9): 64-67.
LÜ F Q, YUAN Q F, WU H L. Analysis of the influence effects on the land value around the comprehensive development area of intercity rail transit station through HPM [J]. Engineering Economy, 2021, 31(9): 64-67.(in Chinese)

[3] 侯雪, 刘苏, 张文新, 等. 高铁影响下的京津城际出行行为研究[J]. 经济地理, 2011, 31(9): 1573-1579.
HOU X, LIU S, ZHANG W X, et al. Characteristics of commuting behaviors between beijng and Tianjing influenced by high speed train[J]. Economic Geography, 2011, 31(9): 1573-1579.(in Chinese)

[4] 胡明伟, 吴雯琳, 赵千, 等. 城际轨道交通可达性与城市经济发展的关系分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(3): 287-295.
HU M W, WU W L, ZHAO Q, et al. Analysis on the relationship between accessibility of intercity rail transit and urban economic development [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2022, 39(3): 287-295.(in Chinese)

[5] CHENG Q, QU S Y, HU Q Z. Study on induced passenger flow forecast for intercity high-speed rail[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678(7): 759-770.

[6] 谢覃禹. 基于客流特征分析的长株潭城际铁路运营策略优化研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(10): 117-124.
XIE Q Y. Research on optimization of operation strategy for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Intercity railway based on passenger flow characteristics analysis[J]. Modern Urban Transit, 2024(10): 117-124.(in Chinese)

[7] 王晟由, 王倩, 邵春福, 等. 都市圈通勤出行行为特性分析与建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5):35-41.
WANG S Y, WANG Q, SHAO C F, et al. Analyzing and modeling commuting behavior characteristics in metropolitan area [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(5):35-41.(in Chinese)

[8] 战武麟, 席广亮, 居阳, 等. 长三角地区居民城际出行时间异质性及影响机制研究[J]. 热带地理, 2024, 44(5):850-863.
ZHAN W L, XI G L, JU Y, et al. Temporal heterogeneity and impact mechanism of intercity travel time in the Yangtze River Delta Region[J]. Tropical Geography, 2024, 44(5):850-863.(in Chinese)

[9] 陈立峰, 尚晶, 刘婷婷, 等. 基于手机信令数据的京津冀城际出行时空特征分析[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(5): 162-168.
CHEN L F, SHANG J, LIU T T, et al. Spatiotemporal characteristics of intercity travel in Beijing-Tianjin-Hebei based on mobile phone signaling data [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(5): 162-168.(in Chinese)

[10] LI Y G, YAO E J, LIU S S, et al. Spatiotemporal influence of built environment on intercity commuting trips considering nonlinear effects [J]. Journal of Transport Geography, 2024, 114 (C): 103744.

[11] 刘晨辉, 苏美玲, 王星宇, 等. 基于Beta随机效应模型的城市轨道交通客运分担率研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(5): 154-161.
LIU C H, SU M L, WANG X Y, et al. Research on ridership share of urban rail transit with the Beta random effects regression model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(5): 154-161.(in Chinese)

[12] 王娟, 孟凤娇, 封洁洁. 基于用户生成内容的成渝城市群旅游客流网络结构演化及机理研究[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(1): 85-90.
WANG J, MENG F J, FENG J J. User generated content based tourist flow network structure evolution and mechanism in Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(1): 85-90.(in Chinese)

[13] 李涛, 王姣娥, 黄洁. 基于腾讯迁徙数据的中国城市群国庆长假城际出行模式与网络特征[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(6): 1240-1253.
LI T, WANG J E, HUANG J. Research on travel pattern and network characteristics of inter-city travel in China's urban agglomeration during the national day week based on tencent

migration data [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(6): 1240-1253. (in Chinese)

[14] 张星阳. 基于多源数据融合的城际出行信息采集: 以上海为例[J]. 建设科技, 2022(1):92-96.
ZHANG X Y. Intercity travel information collection based on multi-source data fusion: taking Shanghai as an example [J]. Construction Science and Technology, 2022 (1): 92-96. (in Chinese)

[15] 潘竟虎, 魏石梅, 张蓉, 等. 中国居民城际出行网络的空间结构特征[J]. 地理学报, 2022, 77(10):2494-2513.
PAN J H, WEI S M, ZHANG R, et al. Spatial structure characteristics of intercity travel network of Chinese residents: Based on Tencent migration data[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(10):2494-2513. (in Chinese)

[16] 林雄斌,卢源. 都市区跨区域通勤特征与影响因素研究:以京津城际高铁为例[J]. 城市规划,2021,45(12):104-113.
LIN X B, LU Y. Intercity commuting in China's metropolitan area: the case of Beijing-Tianjin intercity high-speed railway[J]. City Planning Review,2021,45(12):104-113. (in Chinese)

[17] PISHDAD L, LABEAU F. Approximate MMSE estimator for linear dynamic systems with Gaussian mixture noise [J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2017,62(5):2457-2463.

[18] 徐洋,方洋旺,伍友利,等. 相似分布特性准则下的高斯混合项聚类-合并算法[J]. 国防科技大学学报,2019,41(4): 156-164.
XU Y, FANG Y W, WU Y L, et al. Cluster-merge method for the Gaussian mixture components based on the similarity distribution criterion [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 156-164. (in Chinese)

[19] 张美霞,李丽,杨秀,等. 基于高斯混合模型聚类和多维尺度分析的负荷分类方法[J]. 电网技术,2020,44(11):4283-4296.
ZHANG M X, LI L, YANG X, et al. A load classification method based on Gaussian mixture model clustering and multi-dimensional scaling analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4283-4296. (in Chinese)

[20] YU J, QIN S J. Multimode process monitoring with Bayesian inference-based finite Gaussian mixture models [J]. AIChE Journal,2008,54(7): 1811-1829.

[21] MCLACHLAN G J, LEE S X, RATHNAYAKE S I. Finite mixture models[J]. Annual Review of Statistics and Its Application, 2019, 6: 355-378.

[22] 崔文浩, 郑胜, 杨森权, 等. 基于密度峰值聚类的高斯混合模型核电运行工况划分[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8670-8676.
CUI W H, ZHENG S, YANG S Q, et al. Nuclear power operating condition division based on density peak clustering using Gaussian mixture model [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8670-8676. (in Chinese)