

DOI: 10.13203/j.whugis20190158



文章编号: 1671-8860(2020)07-1089-10

# 基于SCD的公共交通换乘时空模式——以武汉市为例

付诗航<sup>1</sup> 刘耀林<sup>1,2,3</sup> 方莹<sup>1</sup> 杨孝军<sup>1</sup> 刘艳芳<sup>1</sup> 彭明军<sup>4</sup>

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 教育部地理信息系统重点实验室,湖北 武汉,430079

3 地理空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

4 武汉市国土资源和规划信息中心,湖北 武汉,430014

**摘要:** 换乘问题直接影响数十万乘客出行方便,已成为影响城市公共交通系统运营的一个重要因素。基于武汉市2015年3月份完整一周的公共交通智能卡数据(smart card data, SCD),识别公共交通换乘行为,研究乘客换乘时空特征,分析轨道交通发展现状,总结换乘出行模式。研究结果如下:①换乘行为在工作日和休息日均呈现早高峰单高峰分布,大概率存在加班行为;②换乘行为地理特征的3个影响因素为城市地理格局、轨道交通建设、站点辐射范围;③根据武汉市的圈层结构和换乘出行方向,将换乘行为总结为4种模式。基于交通大数据识别乘客换乘行为及其时空分布特征并归纳换乘模式,可为城市规划、城市空间合理利用提供科学依据和决策支持。

**关键词:** 智能卡数据;大数据;换乘行为;时空模式

**中图分类号:** P208

**文献标志码:** A

随着轨道交通的迅速发展,轨道交通与原有公共交通的衔接出现换乘距离过长、换乘时间增加等一系列换乘问题<sup>[1]</sup>,极大影响了城市居民的交通出行便利,如何建立高效、便捷的复合公共交通系统、实现多种交通方式间的合理衔接成为当前研究热点<sup>[2]</sup>。现有换乘研究从轨道交通内部的换车站设计、模拟公共交通流、对站点进行分类和评价等方面展开<sup>[3-6]</sup>,对于换乘行为时空特征的研究较少。交通出行的时空特征可反映居民交通需求、区域间的联系强度及城市空间结构<sup>[7-10]</sup>,为城市公共交通的规划设计决策提供依据。

传统时空研究采取调查问卷的方式,受到人工调查成本、调查规模和样本量的限制<sup>[7]</sup>。公共交通智能卡数据(smart card data, SCD)作为地理时空大数据,能揭示持卡人的出行时空路径、描述和理解城市空间结构现状<sup>[11-12]</sup>,为居民出行时空模式的研究提供了基础<sup>[13-15]</sup>。随着大数据时代的到来,基于SCD的研究逐渐成为新兴研究热点<sup>[16]</sup>,国内外学者主要从数据处理及交通出行起始点(origin-destination, OD)估算<sup>[17-19]</sup>、公共交通运行与管理<sup>[20]</sup>、城市空间结构分析<sup>[21]</sup>、出行行

为<sup>[22-24]</sup>、社会网络<sup>[25]</sup>等方面进行研究<sup>[26]</sup>,并提出了相应的模型和算法。如Bagchi等<sup>[27]</sup>、李佳怡等<sup>[28]</sup>建立了出行假说模型进行OD估算;龙瀛等<sup>[29]</sup>建立出行模型聚合SCD数据识别职住通勤;Chu等<sup>[24]</sup>对个人行为活动空间和行为规则进行探索。也有学者研究了北京<sup>[30-31]</sup>、广州<sup>[32]</sup>、武汉<sup>[33]</sup>等城市的轨道交通客流时空分布特征。换乘行为作为不同交通方式间的纽带,对轨道交通系统的聚集与疏散具有重要意义,理应得到更多的关注。在利用SCD研究换乘行为上,Hofmann等厘定了公共交通换乘的概念<sup>[34]</sup>,Seaborn等<sup>[35-36]</sup>确定了公共交通换乘时间阈值范围。总体而言,鲜有利用刷卡数据研究以换乘人群为典型的特殊人群的出行行为特征。

武汉市是长江经济带中的核心城市,轨道交通发展较早,是中西部地区首个开通地铁的城市,是中部地区重要的综合交通枢纽。面对武汉市高达千万的人口压力与交通压力,武汉市公共交通系统面临严峻考验,本文从交通需求的角度出发,以武汉市为例,基于SCD,结合城市空间结构、地理格局,创新性地提出了数据聚合模型,识

收稿日期: 2019-05-28

项目资助: 国家重点研发计划(2017YFB0503601)。

第一作者: 付诗航,博士,主要研究方向为大数据挖掘和城市规划。wdzhfsh@163.com

通讯作者: 刘耀林,博士,教授,博士生导师,国际欧亚科学院院士。wdzhlyls@163.com

别换乘时空特征和轨道交通服务高需求盲点,总结行为模式类别,以服务于公共交通资源和规划公共交通系统的合理分配,并为城市规划、城市空间合理利用提供科学依据和决策支持。

## 1 实验数据

### 1.1 研究区概况

武汉市都市发展区由3个中心城区、6个中等规模的新城组群共同组成,按环线也可分为一环、二环、三环和三环外。2015年,武汉市都市发展区共有公交线路300余条(按上下行计算共计683条),公交站点2000余个(按上下行计算共计5502个),轨道交通线路3条,轨道交通站点75个,其中换乘站点3个。

### 1.2 数据来源及处理

本文所使用的SCD为武汉市2015年3月份完整一周的(包括周一到周日)常规公交和轨道交通的刷卡记录。该数据共有3696.99万次刷卡记录,包括了轨道交通1461.29万人次的记录,常规公交2235.70万条记录。公交刷卡记录信息包括持卡人刷卡的时间、地点和持卡人刷卡的卡号;轨道交通刷卡记录包括持卡人刷卡的时间和地点、持卡人刷卡的卡号,卡类型(交通卡或临时卡)、出行状态(进入或离开站点)等。所有SCD均不包括持卡者的个人身份信息和乘坐的具体公交线路数据。

由于刷卡数据存在数据量大、信息冗余度高等问题,需要对原始刷卡数据进行预处理,从中提取出有效的OD出行链,本研究对地铁刷卡数据进行了数据清洗及空间化、中文名站点匹配、进出站匹配。

## 2 实验方法

### 2.1 数据聚合模型

本研究对公交和地铁两类刷卡数据进行聚合,并构建模型对预处理后的刷卡数据进行处理,识别换乘行为。将每个持卡人连续一天的刷卡记录进行合并,得到持卡人一天的公共交通的出行日志;在此基础上综合清洗得到每个持卡人一周的公共交通的总出行日志。对于卡号为 $N$ 的持卡人,其一日的出行日志可以概括为:

$$\begin{cases} B: \{t_1: s_1, t_2: s_2 \cdots t_i: s_i\} \\ M: \{T_1: S_1, T_2: S_2 \cdots T_i: S_i\} \\ \Delta t_{ij} = T_j - t_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, $B$ 序列表示公交序列; $t_i$ 表示第 $i$ 次公交出行的上车时间; $s_i$ 表示第 $i$ 次公交出行的上车地点; $M$ 序列表示地铁序列, $T_j$ 表示第 $j$ 次地铁出行的上车时间; $S_j$ 表示第 $j$ 次地铁出行的上车地点; $\Delta t_{ij}$ 表示第 $j$ 次地铁出行与第 $i$ 次公交出行的时间间隔。

### 2.2 换乘行为识别

本文为精准识别换乘行为,通过设定换乘阈值,排除偶然换乘行为和非换乘误差。利用持卡人的出行日志对换乘行为的识别判定条件如下:

$$\begin{cases} T_{j-1} < t_i < T_j < T_{i+1} \\ \Delta t_{ij} < h \\ \beta_{ij} = f(s_i, S_j) \\ \gamma = \Delta t_{ij} - \beta_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $h$ 为换乘时间阈值; $\beta_{ij}$ 为调用百度应用程序编程接口(application programming interface, API)的路径时间估算的理论路径时间; $f$ 为百度API路径估算函数; $\gamma$ 为实际路径时间与理论路径时间之差。在此基础上,通过对 $\gamma$ 序列进行数据清洗,合理换乘行为应处于 $\gamma$ 序列95%分位数内。

### 2.3 时空特征分析方法

本文以对照统计分析法对换乘行为发生时间进行统计分析,采取半小时为单位统计一天内换乘行为的出行量,分析一周7天、工作日、休息日换乘行为频率的变化规律,对比时间变化规律曲线,总结出出行高峰;同时对比换乘人群和全体乘客的出行频率,分析换乘人群出行特征差异。

空间分析采取核密度分析法和热点分析法,在多尺度上对换乘行为的时空特征进行分析,识别换乘行为的出行轨迹等地理特征,具体包括:①基于社区尺度的出行量、出行密度、出行时间、出行距离等地理特征;②基于栅格尺度的换乘行为热点分布区域;③基于OD出行链的出行轨迹可视化;④基于城市格局的地理分异特征。

换乘时空模式归纳基于社区和组团尺度,研究分析换乘人群时空热点区域和组团区域流动时空特征。在此基础上,基于武汉市独特的圈层结构,结合OD链的出行方向,划分换乘行为模式,分析不同模式行为特征,模拟换乘行为圈层流动特征。

## 3 结果分析

### 3.1 换乘识别结果

参考既有研究结果,相邻阶段间的换乘间隔

时间不超过 60 min,换乘阈值的取值一般为 20~35 min<sup>[28-30]</sup>。将满足相邻阶段间的换乘间隔的刷卡间隔时间按每 1 min 逐条汇总,得到换乘行为间隔时间分布,如图 1 所示。

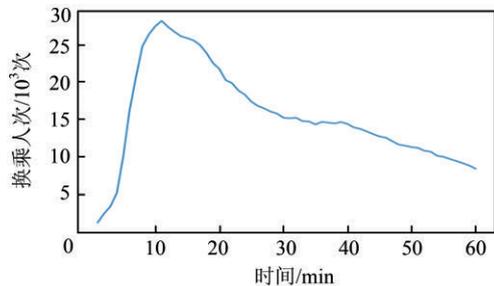


图 1 武汉市换乘行为时间分布

Fig. 1 Time Distribution of Transfer Behavior in Wuhan

在 0~11 min 时,识别出来的换乘者人数增加幅度较快,可认为此段时间内识别出来的为纯换乘行为;在 11~25 min 时,曲线下降速度接近一致,可认为此段时间包含大量纯换乘行为但参杂部分偶然换乘行为;在 25~40 min 时,识别出来的人数变化不大,可认为此时纯换乘行为的数量大幅下降,但偶然换乘的比例和人数提高,总体

保持不变的趋势;在 40~60 min 时,曲线继续下降,认为偶然换乘的人数也开始减少,非换乘误差开始充斥此区间。

基于换乘行为识别方法,通过编写 python 程序对数据进行处理,从 2015 年 3 月 23 日—29 日完整一周的 1 461.28 万次轨道交通刷卡记录中共计 48.11 万次换乘行为为 B-M 换乘模式。该部分换乘平均总出行时间为 44.55 min,其中换乘时间为 14.08 min,而乘坐轨道交通时间为 30.47 min,平均总出行距离(欧氏距离)为 10.26 km,其中换乘过程的出行距离为 2.71 km,继续乘坐轨道交通的距离为 9.25 km。从交通发生学的角度,将识别的换乘行为在社区尺度上汇总,得到存在换乘行为社区的换乘人数、换乘密度、平均出行时间和距离如图 2 所示。

从图 2 可以看出,武汉市换乘行为社区分异显著,中心城区社区的换乘人数呈现两极分化,换乘人数和换乘密度均同时出现了高值和低值;外围城区在轨道交通没有覆盖的情况下,仍然有大量的换乘需求,主要出现在地铁线路终点站(如光谷广场站、金银潭站)外围。

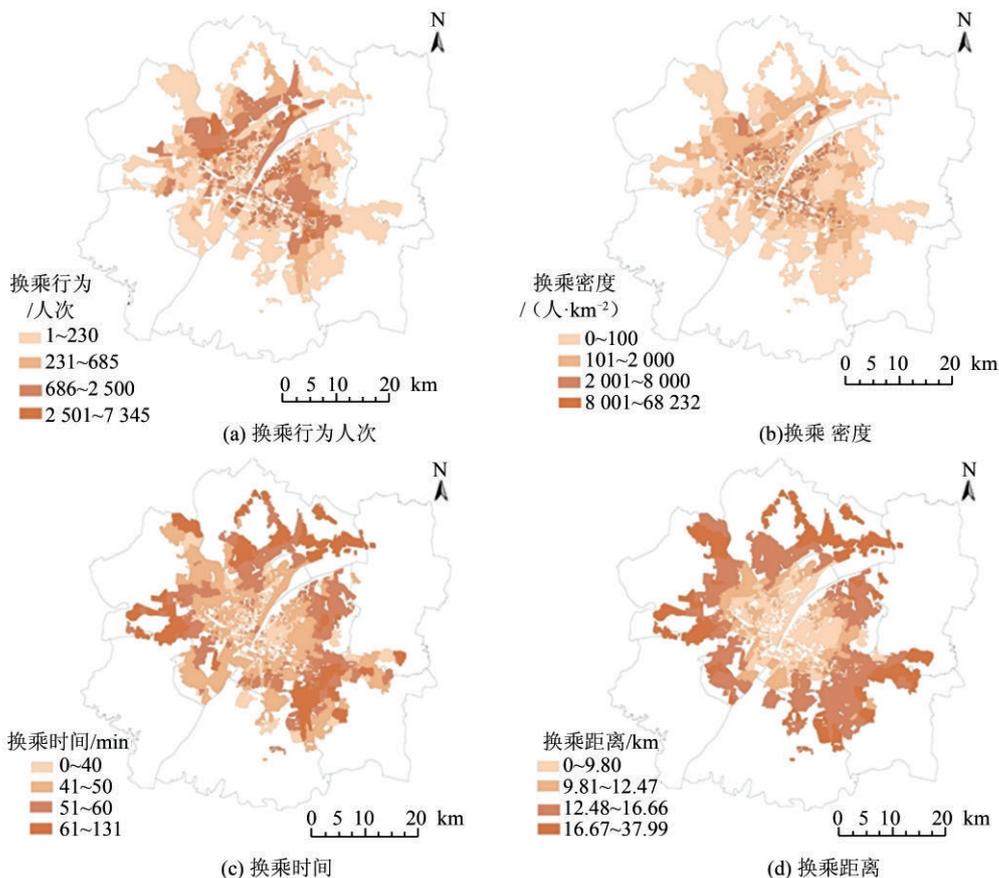


图 2 武汉市都市发展区换乘行为人次、密度、时间和距离

Fig. 2 Cardholder Count, Density, Time and Distance of Transfer Behavior in Wuhan

从换乘出行时间和距离来看,2015年武汉市的轨道交通系统呈现明显的单中心城市结构,外围城区的出行时间和距离明显高于中心城区;中心城区尤其是二环线内,在换乘需求较高的社区出行时间、出行距离均较短,体现出中心城区公共交通系统换乘衔接良好的特征。

### 3.2 换乘行为的时间特征

将识别得到的48.11万次换乘记录以30 min为间隔,识别换乘人群出行的时间特征:换乘行为的出行集中在06:00—09:00,换乘行为频率的工作日均值、休息日均值、周均值如图3所示。

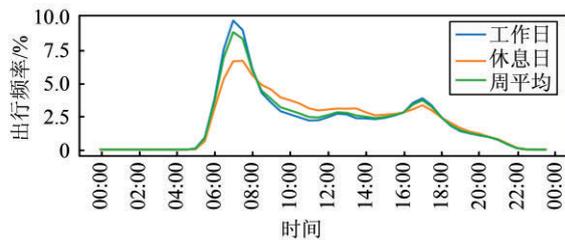


图3 一周内换乘行为发生频率图

Fig. 3 Frequency Chart of Transfer Behavior in a Week

从图3可以发现:①换乘行为频率呈现早高峰单高峰分布,换乘人群的出行时间在时间集聚效应上更为明显,而晚高峰阶段集聚效应较差;②休息日时间分布较工作日的有较大的差距,可以认为存在不同的出行目的;③休息日的早高峰现象依旧存在,休息日的非高峰时间段出行占比高于工作日,但时间略有延后,为06:30—09:30。

换乘人群与常规出行人群的出行时间分布对比结果如图4所示。轨道交通乘客出行时间在工作日呈现明显的双高峰分布,早高峰时间为07:00—09:00,晚高峰时间为16:30—19:00,且两个高峰频率接近;在工作日呈现无高峰分布,从07:30—19:00的出行频率均较高。对比换乘行为与平均出行行为后发现:①从时间分布上来看,轨道交通常规出行行为在工作日呈现双高峰分布,而在休息日呈现无高峰分布,主要是体现为出行目的差异:工作日以上班为主,休息日以休闲娱乐为主。②换乘行为在工作日呈现早高峰单高峰分布。根据常规出行时间分布和出行目的推断,换乘人群早高峰的出行目的为上班;在休息日也呈现出明显的早高峰单高峰分布,故推测换乘人群大概率同时存在娱乐行为和加班行为。③换乘行为在早高峰阶段的时间集聚更为明显,且高峰时间较常规出行早30~60 min;晚高峰阶段集聚效果较差,无法体现晚高峰的特

点;日间非高峰时段,换乘行为和常规行为均体现出休息日的出行频率高于工作日出行频率的特点;夜间非高峰时段,换乘行为的频率远小于常规行为。

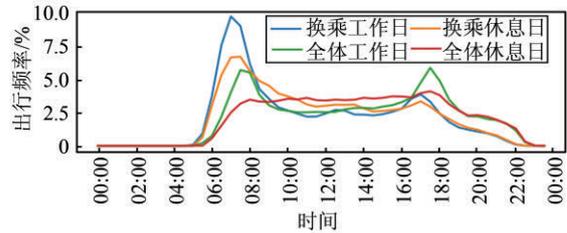


图4 全体乘客和换乘乘客的出行时间分布

Fig. 4 Distribution of Travel Times of Transfer People and All People

### 3.3 换乘行为的时空特征

换乘识别结果中,对换乘行为的空间分布在社区尺度进行了总体特征上的初步刻画,在此基础上,本文采用核密度分析法总结换乘行为人的出行空间特征,结果见图5。

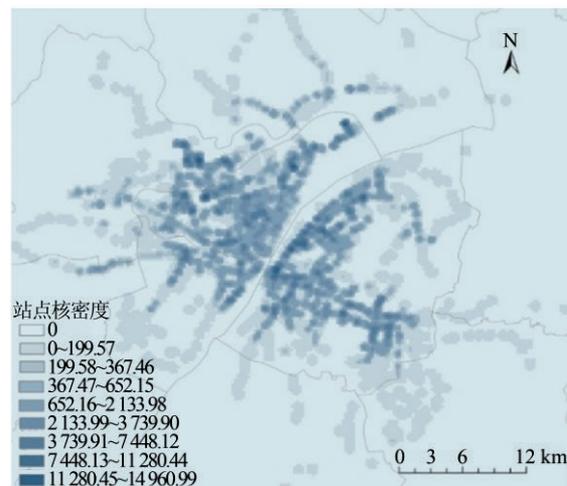


图5 换乘行为热点分布

Fig. 5 Spots Distribution of Transfer Behavior

对于轨道交通的换乘需求强烈的区域主要出现在:①长江、汉江沿岸,与武汉市的“两江分割三镇”的独特地理特征相符;②靠近外围城区的位置,与武汉市2015年轨道交通建设情况相符;③距轨道交通超过一定范围的区域和轨道交通线路终点站周边区域,这与武汉市轨道交通站点的辐射范围及轨道交通线路的带状辐射相符。总而言之,研究发现换乘行为的发生在武汉市呈现出中心高、外围低的总体趋势,并沿轨道交通线路呈现带状辐射,分析得到,影响公共交通换乘行为地理特征的3个影响因素为城市地理格局、轨道交通建设、站点辐射范围。

本文通过地理探测器对换乘行为的空间分异性进行验证。地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法<sup>[37]</sup>。本文选取了X1(城市地理格局)、X2(地铁辐射范围)、X3(轨道交通建设)3个影响因子,探究社区的换乘行为人次是否有统计学差异,结果表明,3个因子均通过0.05的*t*检验,即武汉市换乘行为在社区尺度上存在显著的空间分异特征。在此基础上,进一步通过地理探测器对比各因子间的交互作用关系<sup>[38]</sup>,结果表明,换乘人次分布的3个影响因子存在非线性增强的效果。

换乘OD出行链指的是乘客从出发点出发经过两次出行抵达目的地的出行过程,能够刻画换乘人群出行的区域流动的过程,选择OD出行链对武汉市换乘行为进行空间化展现。由于换乘行为具有两段公共交通行为,故本文通过对两段出行链和总出行链分别绘制出行链,如图6所示。公共交通换乘行为将常规公交系统和轨道交通进行了有机的结合,为实现客运交通一体化提供了现实意义。从中转车站的选择来看,换乘乘客选择相对近的中转站点,83.15%的换乘者选择4 km内的地铁站点换乘,46.50%的乘客选择2 km内的地铁站点。从换乘出行OD链来看,地铁2号线的集聚明显且区域之间的流动频繁。总体而言,换乘行为从新城区往中心城区集聚,并且主要从北、东、西3个方向流入,与南部新城联系较弱。南部新城没有轨道交通经过,可认为轨道交通建设限制了南部新城与中心城区的联系;中心城区内部也存在换乘行为,且大多为跨江出行,体现出武汉市中心城区的公共服务和资源分配的不均衡性;而新城区经过公交出行后还要经过地铁出行,更进一步体现了公共服务不均等现象。

换乘行为的出行链有多条穿越长江和汉江以及武汉市独特的地理分布格局,故以广义上的大武昌区(长江以东)、大汉口区(长江以西且汉江以北)、大汉阳区(长江以西且汉江以南)为单位,对换乘行为的方向进行判定,并分为区域内部交通换乘和跨江交通换乘,得到结果如表1所示。

表 1 换乘行为区域流动/次  
Tab. 1 Flow of Transfer Behavior/次

出发	到达			跨江出行数量
	大武昌区	大汉口区	大汉阳区	
大武昌区	100 234	82 515	17 493	100 008
大汉口区	74 766	167 840	814	75 580
大汉阳区	16 365	549	8 290	16 914

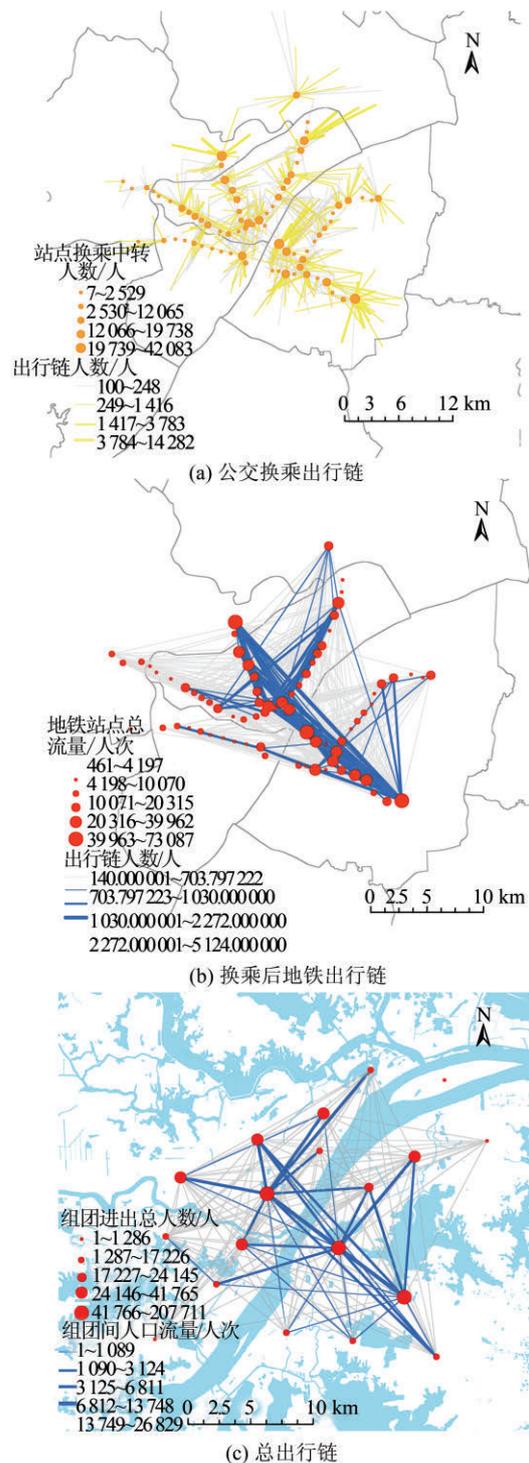


图 6 武汉市换乘行为出行链

Fig. 6 Travel Chain of Transfer Behavior in Wuhan

从表1可以看出,跨江交通换乘行为数为20.3万次,占总换乘行为的42.3%;其中大武昌区与大汉口区的联系最为紧密,换乘行为数为15.7万次,占跨江换乘行为的77.4%;大汉口区与大汉阳区联系最为松散,换乘行为数为0.14万次,占跨江换乘行为的0.67%。研究结果与轨道交通建设情况相符,连接了大武昌区与大汉口区的轨道

交通2号线客运量最大,而研究时点大汉口区与大汉阳区暂无轨道交通直接连接。综上所述,武汉市换乘行为频繁发生于两江沿岸,且近半数换乘行为跨越了长江、汉江的地理阻隔,与武汉市的特殊地理格局密切相关。

### 3.4 换乘行为的时空模式

基于上文换乘行为的时间特征,早高峰时间

段和非高峰时间段在时空模式应具有差异性。对比二者出行人数的分布差异可反映换乘行为的时空模式特征,并进一步从出行频率的角度,评价早高峰时间段与非高峰时间段的时空差异,结果如图7所示。通过换乘出行OD链的方式,对比早高峰和非高峰时间段研究换乘人群区域流动的差异,结果如图8所示。

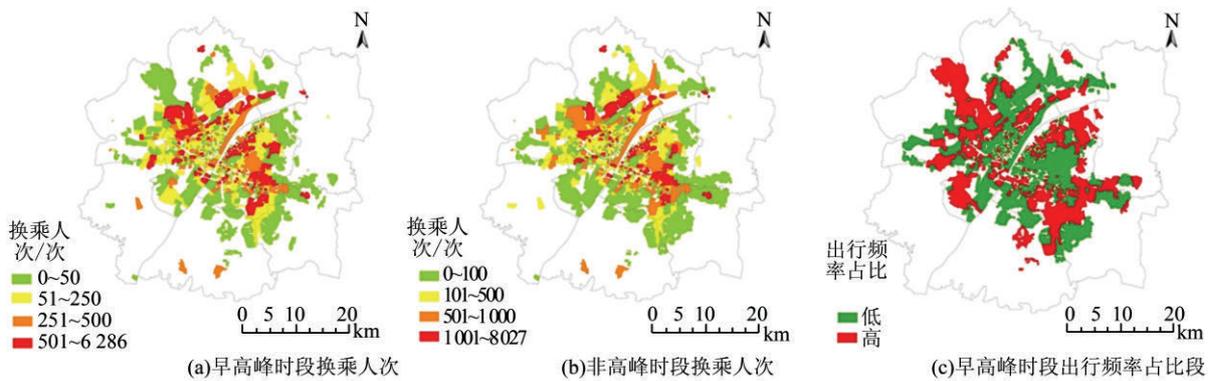


图7 武汉市换乘行为时空特征

Fig. 7 Spatiotemporal Characteristics of Transfer Behavior in Wuhan

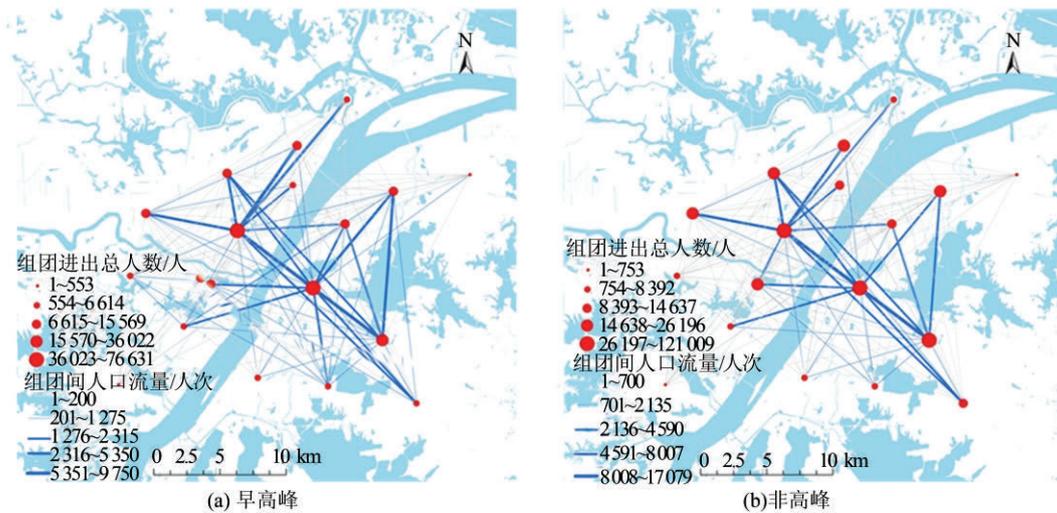


图8 换乘人群区域流动时空特征

Fig. 8 Spatiotemporal Characteristics of Regional Flow

研究发现:①早高峰时段,中心城区的换乘行为数量较少,城市外围和新城区的换乘数量和频率更高。②非高峰时段,中心城区的换乘行为较早高峰更多,主要为城市中心区域内部的流动与联系。③从区域流动来看,早高峰期间,换乘行为为向心特征明显,城市外围的换乘活动向城市中心流动。非高峰期间,城市内部区域之间的流动明显,且内部流动增加。

武汉市作为国家中心城市,经历了人口扩张、产业发展和经济增长后形成了明显的圈层结构,即一环、二环、三环和三环外。根据换乘出行

方向和武汉市独特的圈层结构,换乘出行可划分为以下4种方式:①内部换乘,圈层间内部流动,即出行的起始地和目的地都在同一圈层;②内向换乘,朝中心城区流动,即目的地在较出发点更为中心的圈层;③逆向换乘,朝城市外围流动,即目的地在远离中心城区和出发地的圈层;④侧向换乘,城市外围的圈层内部流动,本文中为出行的起始地和目的地都在三环外的出行模式。将本研究的换乘行为总结后得到10.63万人次内部换乘出行、22.96万人次内向换乘出行、13.68万人次逆向换乘出行和3604人次侧向换乘出行,

具体流动方向与数量如表 2 和图 9 所示。分析可知,武汉市换乘行为的圈层流动具有以下特征:①圈层间流动占比较大,内向出行和逆向出行都属于跨圈层出行,跨圈层出行的比例为 76.91%,换乘行为使得各圈层之间的联系更为紧密。②向心出行特征明显,内向出行占比为 48.19%,且超过 60%的换乘出行的目的地为一环和二环的中心城区。③三环的换乘行为最多,以三环为出发地或目的地的换乘行为占比达 61.32%。轨道交通与公共交通的换乘行为增加了三环的可达性,但三环外与其他圈层的联系仍不够紧密。④

从时间段看,早高峰时间段(6:00—9:00)的换乘行为远多于其他时间段,而晚高峰时间段(17:00—20:00)的换乘行为与其他时间段相仿,印证了换乘行为只有早高峰单高峰的时间特征。

表 2 换乘行为圈层流动/次  
Tab. 2 Transfer Behavior of Area Flow/次

O/D	一环	二环	三环	三环外
一环	13 111	25 743	28 348	7 244
二环	23 480	38 448	42 129	15 814
三环	42 445	86 100	54 813	17 530
三环外	15 306	41 495	20 731	3 604

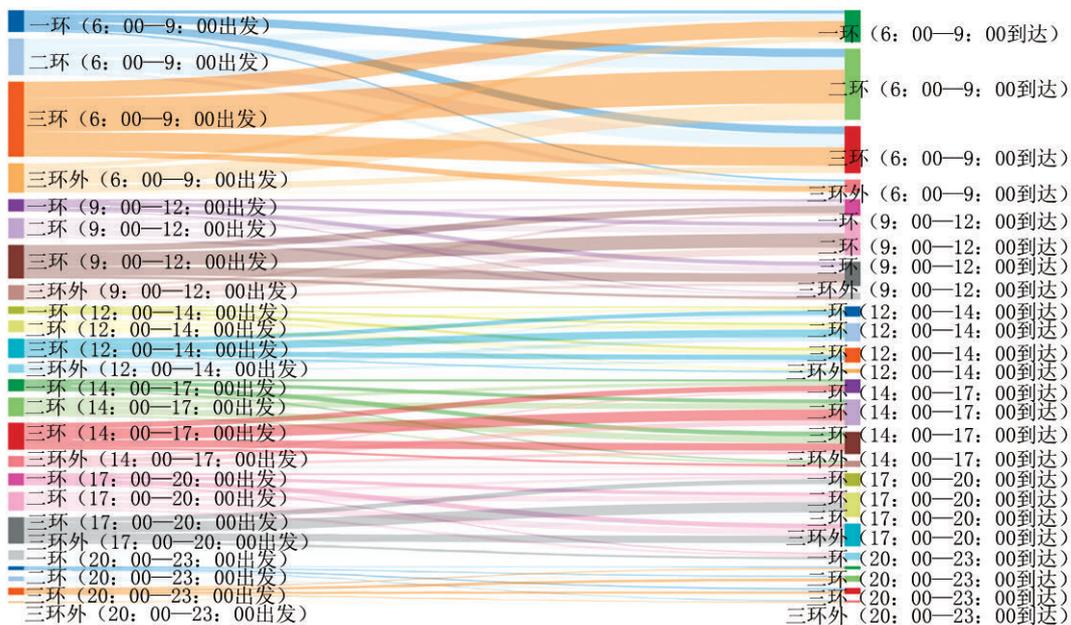


图 9 换乘行为流动分布

Fig. 9 Flow Distribution of Transfer Behavior

### 4 结 语

本文从时间和空间两个维度,基于SCD数据和百度API开放平台,以数据挖掘和数据可视化等技术研究换乘行为的时空特征和区域流动特征,主要结论如下:

1) 基于换乘时间阈值和百度API路径时间估算,从3696万条刷卡记录中识别出48.11万次换乘记录和相应的换乘出行时空链,其中早高峰中16.84%的极端出行,换乘行为中42.3%的跨江出行;武汉市轨道交通建设和发展过程中呈现单中心的公共交通系统结构特征,且存在轨道交通服务的不均衡性。

2) 在时间分布上,换乘人群的出行具有早高峰单高峰的集聚特征,且早高峰开始时间略早于常规出行,出行时间也 longer。早高峰集聚现象明

显,且休息日也存在早高峰,存在一定的加班行为,而几乎没有晚高峰的集聚效应。

3) 在空间分布上,换乘人群的出行高发于长江和汉江沿岸区域、城市外围等轨道交通不可达区域、轨道交通站点800m外区域等,提出城市地理格局、轨道交通建设、站点辐射范围3个换乘行为影响因素。值得注意的是,42.3%的跨江出行体现了轨道交通系统承担跨江越湖的重要职能,也体现了武汉市独特的“两江分割三地”地理特征。

4) 换乘行为加强了区域间的联系,向心特征明显,且在早高峰更为显著,非高峰期间,区域内部流动紧密。

5) 根据武汉市的圈层结构和换乘出行方向,将换乘行为总结为内部换乘、内向换乘、逆向换乘、侧向换乘4种模式。

本文以武汉市换乘行为为例提出特殊人群

出行行为时空模式研究方法,能够广泛用于人类行为研究、交通发展规划、城市空间优化等方面;基于数据挖掘,通过地理学可视化的方法,研究人群出行特征及在城市空间流动的特征,创新性地以城市圈层结构和换乘出行方向为基础,将换乘行为模式进行归纳总结,并对特殊人群(换乘人群)在城市空间中的流动进行可视化,为城市交通政策的制定和公共交通系统的发展规划提供理论依据和政策支持。后续研究将完善SCD聚合模式,分析地铁换乘公交(M-B模式)和轨道交通内部(M-M模式)换乘行为的时空特征;大数据虽然具有样本量全面和空间分布均匀合理等优点,但不具有乘客社会经济标签,对于特殊人群划分存在障碍,后续研究需与经济普查数据相结合来完善特殊人群研究。

### 参 考 文 献

- [1] Luo Yanyun, Dong Guopeng, Chen Weiping. Points on Transfer at Urban Rail Transit Stations [J]. *Urban Mass Transit*, 2004(6):14-16(罗雁云,董国鹏,陈薇萍.关于城市轨道交通换乘的几点思考[J].城市轨道交通研究,2004(6):14-16)
- [2] Zhou Wei, Jiang Cailiang. Theoretical Analysis of Interchange Passengers in Urban Transport Terminals [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2005, 5(5): 23-30(周伟,姜彩良.城市交通枢纽旅客换乘问题研究[J].交通运输系统工程与信息,2005,5(5):23-30)
- [3] Jiang Yongkang. A Discussion on the Transfer Riding Strategy for Urban Rail-bound Transit System [J]. *Urban Mass Transit*, 2000(3):45-48(蒋勇康.城市轨道交通换乘方式探讨[J].城市轨道交通研究,2000(3):45-48)
- [4] Sha Bin, Yuan Zhenzhou, Miao Jianghua, et al. Comparison and Analysis of Transfer Manners Among Urban Rail Transit Systems [J]. *Urban Transport of China*, 2006, 4(2): 11-15(沙滨,袁振洲,缪江华,等.城市轨道交通换乘方式对比分析[J].城市交通,2006,4(2):11-15)
- [5] Yue Zhenhong, Chen Feng, Wang Zijia, et al. Classifications of Metro Stations by Clustering Smart Card Data Using the Gaussian Mixture Model [J]. *Urban Transport of China*, 2017, 30(2): 48-51(岳真宏,陈锋,王子甲,等.基于刷卡数据和高斯混合聚类的地铁站分类[J].城市交通,2017,30(2):48-51)
- [6] Lin Hui, You Lan, Hu Chuanbo, et al. Prospect of Geo-Knowledge Engineering in the Era of Spatio-temporal Big Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 452-458(林珪,游兰,胡传博,等.时空大数据时代的地理知识工程展望[J].武汉大学学报·信息科学版,2018,43(12):452-458)
- [7] Gu Jie, Zhou Suhong, Yan Xiaopei, et al. Formation Mechanism of Traffic Congestion in View of Spatio-temporal Agglomeration of Residents' Daily Activities: A Case Study of Guangzhou [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 921-927(谷杰,周素红,闫小培,等.居民日常出行时空集聚视角下的城市交通拥堵形成机制研究——以广州为例[J].地理科学,2012,32(8):921-927)
- [8] Xu Chong, Liu Lin, Zhou Suhong, et al. The Spatio-temporal Patterns of Street Robbery in DP Peninsula [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(12): 1 714-1 723(徐冲,柳林,周素红,等. DP半岛街头抢劫犯罪案件热点时空模式[J].地理学报,2013,68(12):1 714-1 723)
- [9] Zhou Suhong, Deng Lifang. Spatio-temporal Pattern of Residents' Daily Activities Based on T-GIS: A Case Study in Guangzhou, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1 454-1 463(周素红,邓丽芳.基于T-GIS的广州市居民日常活动时空关系[J].地理学报,2010,65(12):1 454-1 463)
- [10] Zhang Wenchang, Wang Chengjin, Ma Qingyu. Spatial-Temporal Characteristics of Urban Resident Trips and Influence Factors in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6):737-742(张文尝,王成金,马清裕.中国城市居民出行的时空特征及影响因素研究[J].地理科学,2007,27(6):737-742)
- [11] Batty M. Invisible Cities [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1990, 17:127-130
- [12] Liu X, Wang M. How Polycentric is Urban China and Why? A Case Study of 318 Cities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 151:10-20
- [13] Bagchi M, White P. The Potential of Public Transport Smart Card Data [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(5): 464-474
- [14] Li Deren, Yao Yuan, Shao Zhenfeng. Big Data in Smart City [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 631-640(李德仁,姚远,邵振峰.智慧城市中的大数据[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(6):631-640)
- [15] Li Qingquan, Li Deren. Big Data GIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 641-644(李清泉,李德仁.大数据GIS[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(6):641-644)
- [16] Li Zufen, Yu Lei, Gao Yong, et al. Extraction Method of Temporal and Spatial Characteristics of Residents' Trips Based on Cellular Signaling Data

- [J]. *Transport Research*, 2016, 2(1): 51-57 (李祖芬, 于雷, 高永, 等. 基于手机信令定位数据的居民出行时空分布特征提取方法[J]. 交通运输研究, 2016, 2(1):51-57)
- [17] Dai Xiao, Chen Xuewu. The Method of Intelligent Card Data Analysis for One Public Transportation Route Transport of China [J]. *Urban Transport of China*, 2005, 3(4): 73-76 (戴霄, 陈学武. 单条公交线路的 IC 卡数据分析处理方法[J]. 城市交通, 2005, 3(4): 73-76)
- [18] Li Haibo, Chen Xuewu. A Method to Identify Public Transit Transfers Based on IC and AVL Data [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(6): 73-79 (李海波, 陈学武. 基于公交 IC 卡和 AVL 数据的换乘行为识别方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(6): 73-79)
- [19] Weng Jiancheng, Wang Chang, Wang Yueyue, et al. Spatio-temporal Pattern of Residents' Daily Activities Based on T-GIS: A Case Study in Guangzhou, China [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(3): 67-73 (翁剑成, 王昌, 王月玥, 等. 基于个体出行数据的公共交通出行链提取方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 67-73)
- [20] Duan Degang, Zhang Fan. Study on Classification of Urban Rail Transit Stations from the Perspective of Land Use Optimization: A Case Study on Xi'an Subway Line 2 [J]. *City Planning Review*, 2013, 37(9): 39-45 (段德罡, 张凡. 土地利用优化视角下的城市轨道交通站点分类研究——以西安地铁 2 号线为例[J]. 城市规划, 2013, 37(9): 39-45)
- [21] Liu X, Song Y, Wu K. Understanding Urban China with Open Data [J]. *Cities*, 2015, 47: 53-61
- [22] Long Y, Liu X, Zhou J, et al. Early Birds, Night Owls, and Tireless/Recurring Itinerants: An Exploratory Analysis of Extreme Transit Behaviors in Beijing, China [J]. *Habitat International*, 2016, 57: 223-232
- [23] Guo Wenlu, Liu Yanfang, Liu Zijing, et al. Study on Special Travel Behaviors Using Subway Smart Card Data: A Case Study the Lines 1, 2 and 4 of Wuhan Metro [J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 44(2): 29-33 (郭文露, 刘艳芳, 刘子靖, 等. 基于地铁刷卡数据的乘客特别出行行为研究——以武汉市地铁 1、2、4 号线为例[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(2): 29-33)
- [24] Chu K K A, Chapleau R. Augmenting Transit Trip Characterization and Travel Behavior Comprehension Multiday Location-stamped Smart Card Transactions [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2083: 29-40
- [25] Liu Yaolin, Fang Feiguo, Wang Yiheng. Characteristics and Formation Mechanism of Intra-Urban Employment Flows Based on Mobile Phone Data—Taking Wuhan City as an Example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 459-471 (刘耀林, 方飞国, 王一恒. 基于手机数据的城市内部就业人口流动特征及形成机制分析——以武汉市为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 459-471)
- [26] Long Ying, Sun Lijun, Tao Sui. A Review of Urban Studies Based on Transit Smart Card Data [J]. *Urban Planning Forum*, 2015 (3): 70-77 (龙瀛, 孙立君, 陶遂. 基于公共交通智能卡数据的城市研究综述[J]. 城市规划学刊, 2015(3): 70-77)
- [27] Bagchi M, White P R. The Potential of Public Transport Smart Card Data [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(5): 464-474
- [28] Li Jiayi, Zhang Jin, Zhang Jingwen, et al. An Algorithm to Identify Passengers' Alighting Stations and the Effectiveness Evaluation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1172-1177 (李佳怡, 张锦, 张静文, 等. 城市公交乘客下车站点推算方法和有效性评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(8): 1172-1177)
- [29] Long Ying, Zhang Yu, Cui Chengyin. Identifying Commuting Pattern of Beijing Using Bus Smart Card Data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1339-1352 (龙瀛, 张宇, 崔承印. 利用公交刷卡数据分析北京职住关系和通勤出行[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1339-1352)
- [30] Huang Jie, Wang Jiao'e, Jin Haitao, et al. Investigating Spatiotemporal Patterns of Passenger Flows in the Beijing Metro System from Smart Card Data [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(3): 397-406 (黄洁, 王姣娥, 靳海涛, 等. 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)
- [31] Wang Jing, Liu Jianfeng, Ma Yilin, et al. Temporal and Spatial Passenger Flow Distribution Characteristics at Rail Transit Stations in Beijing [J]. *Urban Transport of China*, 2013, 11(6): 18-27 (王静, 刘剑锋, 马毅林, 等. 北京市轨道交通车站客流时空分布特征[J]. 城市交通, 2013, 11(6): 18-27)
- [32] Ma Xiaoyi, Jin An, Liu Mingmin, et al. Rail Transit Passenger Flow Characteristics in Guangzhou [J]. *Urban Transport of China*, 2013, 11(6): 35-42 (马小毅, 金安, 刘明敏, 等. 广州市轨道交通客流特征分析[J]. 城市交通, 2013, 11(6): 35-42)
- [33] Wang Guan, Chen Hua, Li Jianzhong. Spatial-Temporal Characteristics of Urban Rail Transit Passenger Flow in Wuhan Based on IC Card Data [J]. *Urban*

- Transport of China*, 2018, 16(4): 81-88(王冠, 陈华, 李建忠, 等. 基于IC卡数据的武汉市轨道交通客流时空特征[J]. 城市交通, 2018, 16(4): 81-88)
- [34] Hofmann M, Wilson S P, White P. Automated Identification of Linked Trips at Trip Level Using Electronic Fare Collection Data [C]. Transportation Research Board 88th Annual Meeting, Singapore, Washington DC, 2009
- [35] Seaborn C, Wilson N H M, Attanucci J. Using Smart Card Fare Payment Data to Analyze Multimodal Public Transport Journeys [C]. Transportation Research Board 88th Annual Meeting, London, UK, 2009
- [36] Wilson N, Attanucci J, Seaborn C. Analyzing Multimodal Public Transport Journeys in London with Smart Card Fare Payment Data [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2 121: 55-62
- [37] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and Prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134(王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134)
- [38] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127

## Spatiotemporal Pattern of Public Transit Behavior Based on Smart Card Data—A Case Study of Wuhan City

FU Shihang<sup>1</sup> LIU Yaolin<sup>1,2,3</sup> FANG Ying<sup>1</sup> YANG Xiaojun<sup>1</sup>  
LIU Yanfang<sup>1</sup> PENG Mingjun<sup>4</sup>

<sup>1</sup> School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Ministry of Education Key Laboratory of Geographic Information System, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>3</sup> Collaborative Innovation Center of Geospatial Information Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>4</sup> Wuhan Land Resources and Planning Information Center, Wuhan 430014, China

**Abstract:** With the development of China's rail transit system, the transfer problem directly affects the convenience of hundreds of thousands of passengers day after day, and has become an important factor which affects the operation of public transportation systems. The problem of public transportation transfer should be "people-oriented" and analyzed from the time and space mode of passengers' transfer. Based on the smart card data (SCD) of Wuhan City in March 2015, this paper studies the time-space characteristics of passenger transfer, analyzes the current situation of rail transit development, and summarizes the transfer travel mode. The research results are as follows:① In the process of the development of rail transit in Wuhan, the imbalance of rail transit services has arisen and a single-center urban structure has emerged. ② The geographical characteristics of transfer behavior are related to the city's own geographical pattern, and three factors which influence the transfer behavior are proposed. ③ Using intelligent bus card data, it can effectively identify the social behavior of passengers (transfer behavior) and the time and space mode of passengers traveling. This paper analyzes the spatiotemporal patterns of travel behaviors such as transfer behavior and urban planning and urban space utilization from the perspective of "people-oriented" based on the analysis of big data.

**Key words:** smart card data; big data; transfer behavior; spatiotemporal pattern

**First author:** FU Shihang, PhD, specializes in big data mining and urban planning. E-mail: wdzhsfsh@163.com

**Corresponding author:** LIU Yaolin, PhD, professor, Academician of International Eurasian Academy of Science. E-mail: wdzhylls@163.com

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2017YFB0503601).

**引文格式:** FU Shihang, LIU Yaolin, FANG Ying, et al. Spatiotemporal Pattern of Public Transit Behavior Based on Smart Card Data—A Case Study of Wuhan City[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1089-1098. DOI: 10.13203/j.whugis20190158(付诗航, 刘耀林, 方莹, 等. 基于SCD的公共交通换乘时空模式——以武汉市为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(7):1089-1098. DOI:10.13203/j.whugis20190158)