

# 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

黄洁<sup>1</sup>, 王姣娥<sup>1,2</sup>, 靳海涛<sup>1,2,3</sup>, 金凤君<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京市交通信息中心, 北京 100161)

**摘要:**城市轨道交通是居民绿色出行、缓解大城市交通拥堵的重要交通方式。研究大城市地铁客流时间和空间的分布特征,有利于深入了解大城市公共交通的需求,进而制定合理的交通需求管理政策。本文以北京市地铁为例,计算了431万条智能交通卡数据的出行时间和OD矩阵(Origin-Destination Matrix),研究其客流的时间和空间分布特征。研究发现:①全天、早高峰和晚高峰的出行时间分布符合Gamma分布,总体上离城市中心越远,平均出行时间越长;②从市辖区尺度和环路尺度分析,乘客流向和流量均呈现对称性;③从街道尺度来看,居民地铁出行强度的空间不均等性很强。

**关键词:**城市轨道交通;大数据;客流分布;时空格局;北京市

## 1 引言

大城市人口规模庞大、交通需求巨大,需要高效、便捷的公共交通系统。目前,中国一线城市居民对交通便捷性和通畅性的评价普遍较差,交通需求分布的不合理引发长距离绕行、客流拥堵等问题。因此,宜居城市的建设应包括完善城市公共交通体系的建设,倡导居民绿色出行(张文忠等, 2016)。城市轨道交通是合理利用有限的城市土地资源、解决大城市交通拥堵的重要措施之一。研究大城市地铁客流的时空分布特征,有利于甄别大城市公共交通需求,进而制定合理的交通需求管理政策,实现公交优先发展。

从小世界网络模型提出以来(Watts et al, 1998),轨道交通网络的复杂性成为国内外学者的研究热点。国外学者运用无标度和小世界网络模型分析了30个大城市轨道交通网络的鲁棒性;梳理

了波士顿、首尔、北京、南京、上海等城市的网络结构特征参数(Barthélemy, 2010; Derrible et al, 2010)。借鉴国际大城市轨道交通发展的经验和教训,基于可持续发展的框架和公交导向模式,国内学者研究了轨道交通对人口的聚集效应和运输效率,并且初步肯定了轨道交通对城市空间布局的引导和支撑作用(陆化普, 2006; 曹小曙等, 2008; 赵鹏军等, 2016)。

大城市轨道交通普遍采用自动收费系统,智能交通卡已被广泛使用。智能卡数据(Smart Card Data)作为具有地理标识和时刻信息的大数据(龙瀛等, 2012),在数据量、种类和准确性3个方面具备以下特点(Laney, 2001):①通常由大量的便携移动信息感应装置收集(例如,手机、交通卡、出租车GPS装置、SCD数据),数据的收集速度十分迅速,因此其第一个重要特征是数据量大;②大数据的兼容性逐渐提高,多种数据运用在同一研究问题中的方法

收稿日期:2017-07-05;修订日期:2018-01-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41701132);中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助课题(XDA19040402)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41701132; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19040402]。

作者简介:黄洁(1988-),女,广西桂林人,助理研究员,主要从事交通地理研究,E-mail: huangjie@igsnr.ac.cn。

引用格式:黄洁,王姣娥,靳海涛,等. 2018. 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, 37(3): 397-406.  
[Huang J, Wang J E, Jin H T, et al. 2018. Investigating spatiotemporal patterns of passenger flows in the Beijing metro system from smart card data[J]. Progress in Geography, 37(3): 397-406.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.03.010

层出不穷;③由于数据量大和覆盖范围广的特性,大数据具备了准确度高的特征。大数据在地理学研究,尤其在城市交通研究中的应用范围越来越广。例如,利用手机基站数据,研究者对城市道路交通流的分布进行了估计并探究了交通网络结构特征(吴健生等, 2012);利用GPS数据,有学者分析了居民日常活动空间和通勤弹性特征(申悦等, 2013),探究了城市空间形态与居民出行行为的关系(Zheng et al, 2014)。但是,运用手机、出租车等GPS装置的大数据挖掘,很难精确到公共交通出行的模式。

针对城市公共交通系统,国内外学者运用智能交通卡数据(SCD)研究美国、英国、韩国和新加坡的多个城市轨道交通的热点问题,包括城市交通规划、城市空间结构、居民出行与轨道交通的相互作用关系。首先,Utsunomiya等(2006)归纳了SCD挖掘个体出行行为的基本步骤、研究难点及其在交通宏观规划的研究内涵。随后,个体出行行为特征和交通仿真模型的验证一直是SCD数据发掘的热点问题。研究者们通过交通仿真模型发现乘客访问频次最好的站点符合固定的统计分布概率,能够推导少量乘客的社会经济属性和不同群体的出行规律(Hasan et al, 2013; Lee et al, 2014; Manley et al, 2016)。其次,由于城市轨道交通规划与城市空间结构息息相关,因此学者们运用SCD分析客流分布的空间规律,揭示城市空间结构特征,进而解释地铁客流量分布规律与周边建成环境的相互关系(Jang, 2010; Roth et al, 2011; Zhong et al, 2014)。再次,站点尺度的客流量分布成为站点类型划分的重要依据,学者们基于此分析了地铁站的周边建成环境(Choi et al, 2012; Reades et al, 2016; 尹芹等, 2016)。另外,SCD数据也是学者们研究职住平衡的重要支撑,包括职住分布特征、通勤效率优化问题等(龙瀛等, 2012; Zhou et al, 2014; Long et al, 2015; Ma et al, 2017)。

纵观相关研究,很少有从多空间尺度研究客流的OD矩阵、时空分布特性和居民出行频率。本文将采用大数据分析,以北京为例,通过计算431万条智能交通卡数据的出行时间和OD矩阵,研究地铁客流时间和空间的分布特征,为城市公共交通需求管理提供科学依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究数据

传统的问卷调查能够挖掘OD对的详细信息,常用于城市居民的出行行为和通勤特征的研究,例如:分析个人出行的活动范围,探究出行者的社会经济属性和通勤时间的关系,居民出行行为选择的分布(周素红等, 2010; Zhao et al, 2011; Zhou et al, 2013)。赵晖等(2011)从租住房和自购房居民的角度分析了地铁沿线和非地铁沿线的通勤特征。将通勤行为调查和街区土地利用特征相结合,周素红等(2006)从微观视角对宏观的城市空间进行解读。同样基于问卷调查的数据,学者们研究了公共交通可达性与居民出行行为的关系以及“交通网络—出行行为—出行碳排放”的影响机制(曹小曙等, 2013; 罗依等, 2016)。综上所述,深入研究OD信息不仅可以研究城市居民的出行行为特征,还可以研究不同出行方式和城市空间、交通网络和城市发展之间的关系。但是,依赖于问卷调查的OD信息,包含严格的样本选取和具有先验性的发放过程,在时空流特征的研究中具有2个不足之处:第一,发放问卷的人力物力消耗较大,问卷调查的样本大小受到限制;第二,对于地铁客流时空分布,很难获取所有出发点(Origin)和目的地(Destination)的信息,无法了解完整的OD分布。

手机GPS数据通常记录了居民出行的全部轨迹,通常包括了步行、乘坐公共交通或者出租车等过程,但是具体换乘地点不确定。因此GPS数据在居民出行模式的细分上会有一定限制。运用城市公共交通智能交通卡数据进行地铁客流时空分布的研究具有以下3个优势:①数据详实,包括检入和检出地点,为OD矩阵计算提供了精确性的保障;②数据结构简明扼要,数据维度有限,只包含地铁出行的客流;③数据兼容性高,以地铁站点信息为基础,可以兼容其他统计数据进行分析。

因此,本文整理了2014年4月14日北京市政智能交通卡<sup>①</sup>,当年的轨道交通线路、站点分布和北京市第六次人口分街道普查数据<sup>②</sup>。地铁智能交通卡数据结构如表1所示,每条数据记录了智能交通卡卡号、检入线路、检入站点、刷卡时间、刷卡次序、检出线路、检出站点和检入时间,并且保存了是否包

①数据来源:北京市交通信息中心

②数据来源:全国第六次人口普查

表1 北京市智能交通卡刷卡数据示例

Tab. 1 Examples of data records of smart cards in Beijing metro system

卡号	检入线路	检入站点	刷卡时间	刷卡次序	检出线路	检出站点	检入时间	是否包含终点
00000002	13	33	2014/04/14 10:44:00	7387916344	0	0	2014/04/14 10:44:00	0
00000002	13	33	2014/04/14 11:22:27	7388858193	3	31	2014/04/14 10:44:00	1

注:\*13号线31站点表示西二旗站,33站点表示龙泽站;检出线路0和检出站点0表示数据无记录。

含终点信息的逻辑判断。值得说明的是,该检票系统以刷卡时间和次序为基准生成数据,即乘客每趟出行记录将生成2条数据记录。这2条数据记录具有相同的卡号、检入线路、检入站点、检入时间,如表1所示。考虑到少量无效数据,北京市地铁SCD包括的OD记录数量等于数据记录总量的40%~50%,与近期研究的数据规律一致(Ma et al, 2017)。以2014年4月14日为例,当天检票系统有超过900万人次,包括使用单次地铁卡的乘客;相当于400多万OD出行记录。该数据量远大于传统抽样调查的样本数量,可以充分反映客流的时空分布特征。因此,431万条OD出行记录将作为本文分析客流时间和空间分布特征的全样本。

2.2 研究区域

2014年,北京市地铁东延6号线、7号线、14号线,西延15号线,空间范围和网络密度不断增加,总计17条线路,运营总里程达到527 km,包括256个站点,日均客运量达到900万人次。根据北京市统计局数据,北京市分为首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区和生态涵养发展区。本文的研究区域定为2014年北京市17条地铁线路和256个站点分布的首都功能核心区、城市功能拓展区和城市发展新区,包括西城、东城、朝阳、海淀、石景山、丰台、昌平、顺义、通州、大兴和房山共11个区(图1)。

2.3 研究方法

本文针对431万条记录完整的数据,对北京市地铁客流的时空格局进行系统性分析。从智能交通卡数据中,运用SQL Server逐个统计客流,得到256维双向客流的OD矩阵。时空特征分析的具体方法如下:①时间维度,从全天、早高峰、晚高峰3个时段研究乘客出行时间的分布,并且从站点尺度分析时间分布的空间规律;②空间上,从市辖区尺度、环路尺度、街道尺度和站点尺度,层层深入地分析了其空间特征。

地铁出行作为绿色出行和城市通勤的主要方

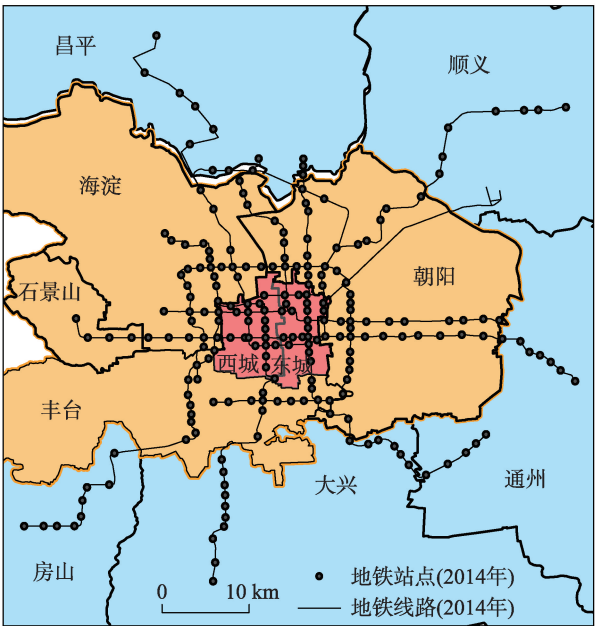


图1 研究区域与北京市地铁线路和站点分布图

Fig.1 Map of municipal districts studied and the metro system in Beijing

式之一,探究不同区域居民乘坐地铁的可达性具有重要意义。研究地铁网络可达性是从供给的角度研究城市公共交通出行的空间分布特征(黄晓燕等, 2104)。同时,研究地铁出行的便捷性和可达性也要从需求的角度出发(Huang et al, 2015),了解不同区域居民乘坐地铁出行的频率。对于街道*i*,人均每天乘坐地铁出行次数为*S<sub>i</sub>*的计算方式为:

$$S_i = \frac{\sum_k^k (d_k + a_k)}{p_i}$$

(1)

式中:属于街道*i*的地铁站点数量总计为*k*; *d<sub>k</sub>*表示从站点*k*出发的乘客数量; *a<sub>k</sub>*表示到达站点*k*的乘客数量; *p<sub>i</sub>*表示街道*i*的总人口数。公式(1)设计的指标可以反映以街道为单元的居民对于地铁出行的依赖程度。在计算中,运用ArcGIS合并分布在同一街道的所有地铁站,将属于该街道的地铁站客流信息总计为该街道的客流信息,即(*d<sub>k</sub>* + *a<sub>k</sub>*)。



3 研究结果

3.1 客流的时间分布规律

3.1.1 全样本统计规律

本文以半小时为时间间隔统计进入和离开地铁的乘客数量,进而识别地铁客流量的早晚高峰时段(图2)。据分析,早高峰出现在7点到9点之间,晚高峰出现在17点到20点之间。检入客流的早高峰早于检出客流的早高峰,晚高峰的客流也呈现相同规律,体现了全样本统计的精确性。根据客流量最高峰值的对比,可以发现早高峰的拥挤程度要明显高于晚高峰,这源于晚高峰时段要长于早高峰,同时也说明居民下班出行的时间弹性要略大于上班。此外,10点到17点之间的地铁客流量非常平稳,每半小时约为10万人次左右。

3.1.2 分时段出行时间分布特征

本文首先统计了400万条数据记录出行时间的基本属性(表2)。根据上文识别的早晚高峰时段,将数据按照以下规则分类:检入时间晚于7点并且检出时间早于9点的记录均被计入早高峰;检入时间晚于17点并且检出时间早于20点的记录均被计入晚高峰。据统计,北京市居民地铁出行的平均时间在40min以内(只考虑在城市轨道交通系统之内的

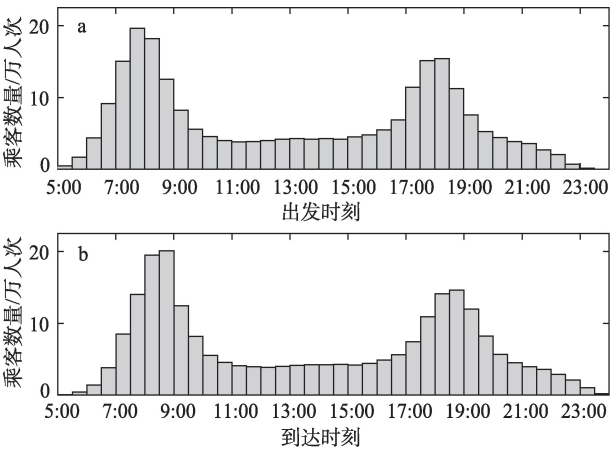


图2 北京市地铁分时段进出乘客数量  
Fig.2 Total passengers in every 30 minutes in the Beijing metro system

表2 乘客出行时间的基本属性

Tab.2 Statistic attributes of travel time		
时段	平均值(min)	标准偏差(min)
全天	38.9817	21.8475
早高峰	35.5971	17.3755
晚高峰	33.7665	18.6590

时间),早晚高峰的平均值与全样本的平均值差距在5min以内。从出行时间来看,地铁出行在早晚高峰时段的可靠性很高,主要压力来自于早晚高峰的客流量(图2)。

出行时间的统计分布特征具有很高研究价值,能够显示出不同出行时间的具体数量。全天、早高峰和晚高峰乘客出行时间分布均符合Gamma分布(图3),概率密度分布函数(PDF)如下:

$$PDF=\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k}x^{k-1}e^{-\frac{x}{\theta}},x\in(0,\infty),k>0,\theta>0\quad(2)$$

式中, $k$ 表示分布的形状参数; $\theta$ 表示分布的比例参数; $x$ 表示自变量乘客出行时间。运用Matlab中gamfit工具,Gamma分布的形状参数、比例参数和95%置信区间如表3所示。

根据乘客的出行时间分布,可以发现北京市地铁内部乘客出行时间主要分布在20~40 min之内,占样本总数的40.81%;只有少部分乘客的出行超过

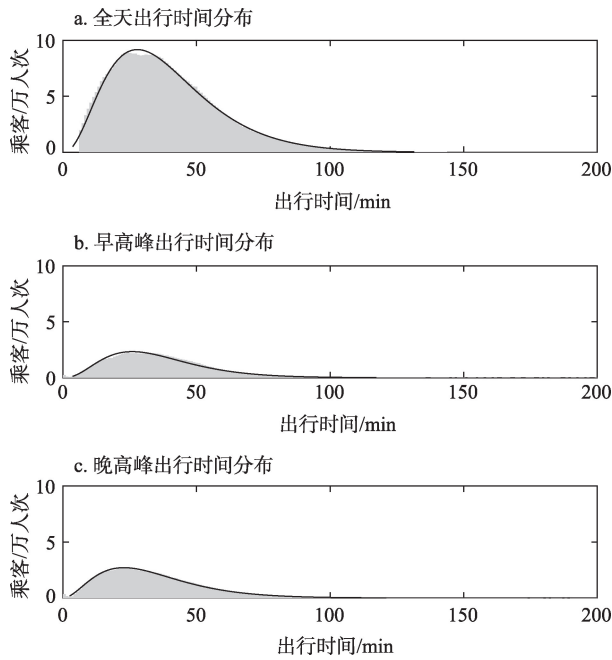


图3 乘客出行时间分布及Gamma分布拟合结果  
Fig.3 Distribution of travel time and fitting results from Gamma distribution

表3 Gamma分布拟合系数和置信区间

Tab.3 Fitting parameters of Gamma distribution and 95% confidence interval						
时段	形状参数	95%置信区间		比例参数	95%置信区间	
		下限	上限		下限	上限
全天	3.4945	3.4900	3.4990	11.1551	11.1397	11.1705
早高峰	3.6509	3.6410	3.6608	9.7629	9.7346	9.7912
晚高峰	3.0142	3.0067	3.0217	11.2505	11.2201	11.2810



1 h,占14.31%;很少有乘客的出行超过2 h。早高峰乘客出行集中在20~40 min的比例比全样本高,占44.26%;晚高峰时段的这一比例是43.09%。短时间出行的乘客(行程时间小于20 min)主要在早晚高峰时段出行,占短时间出行乘客数量的61.23%。这也进一步论证了早晚高峰时段的平均出行时间略低于全样本,主要原因为:第一,早晚高峰的发车频率远高于其余时段,乘客的站台等待时间相应缩短;第二,通勤乘客的出行步伐一般快于休闲出行的乘客(如购物、娱乐)。另外,长时间出行的乘客趋向于避开早晚高峰,行程时间大于40 min的乘客59.71%都不在早晚高峰出行。

### 3.1.3 进站点客流的平均出行时间分布特征

基于地铁站点尺度统计每个站点出发乘客的平均出行时间,可以反映乘客的出行空间范围。本文将全样本按照进站点分类,乘客在各站点的平均出行时间如图4所示。总体来说,呈现离市中心越远,出行时间越长的趋势。二环以内,93.55%地铁站点的乘客平均出行时间低于35 min以内。以地铁出行平均3 min一站路计算,二环以内的乘客平均出行范围在12个地铁站点以内,按北京市地铁平均站间距1.5 km<sup>③</sup>,空间范围在18 km以内。二环到三环之间,虽然乘客平均出行范围也是12个地铁站点以内,但是其中42.86%地铁站点的乘客平均出行时间在35~40 min以内。三环到四环之间,乘客平均出行时间是35.9 min,49.18%地铁站点的乘客平均

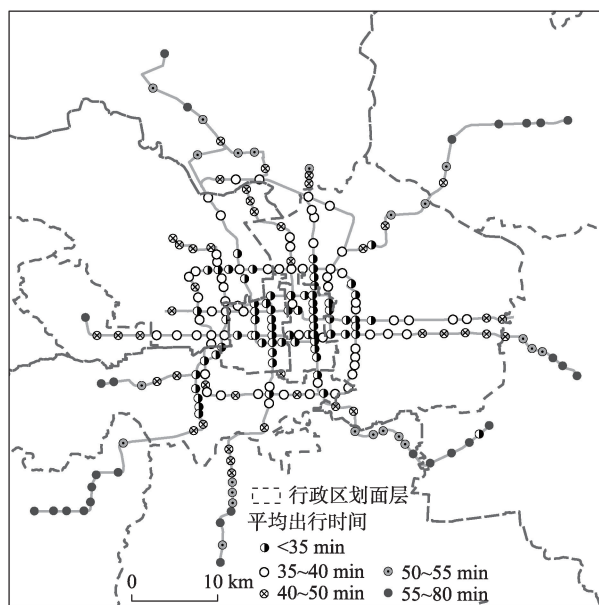


图4 基于进站点的平均出行时间分布

Fig.4 Distribution of average travel time at each metro station

③ 数据来源:www.bjsubway.com

出行范围超过12个站点,最大范围达到15个站点。四环到五环之间乘客平均出行时间为42 min,约为14个站点,最大出行时间达到52 min。五环到六环之间乘客平均出行时间达到51 min,约为17个站点,245 km。总的来说,四环以内的平均出行时间增长较慢;五环和六环的出行时间增加明显,增幅分别为5.8 min和9.5 min。

## 3.2 客流出行的时空分布规律

### 3.2.1 市辖区尺度

人口与各市辖区的地铁客流总量呈现一定的相关性,如图5所示。首先,朝阳区和海淀区的常住人口总数在研究区域内排前2位,均超过350万(2015年北京市统计局数据);这2个区客流总量也排在前2位。其中,朝阳区全天客流超过总客流量的27%,约为230万人次;海淀区的全天地铁客流总量在11个市辖区的第二位,占17.35%,约为140万人次。其次,丰台、昌平和大兴的常住人口数分别为230万、190万和154万,这些辖区的客流分别为85万/d、65万/d、34万/d。再次,顺义、通州、房山和石景山2014年常住人口总数均小于150万人,石景山的常住人口总数只有65万。这些市辖区的客流占比均小于3%。虽然东城区和西城区常住人口数量少于丰台、大兴、昌平等市辖区,但是二者位于首都核心功能区,集中了大量的居民出行目的地,包括居住地、工作地、娱乐休闲场所等。东城和西城区自然集聚了大量的地铁客流。并且,核心区的公路网络常常处于拥堵状态,人们在该区域的出行更需要依赖于地铁。因此,这2个市辖区的日均客流量接近100万人次/d,分别均占北京地铁总客流量的12%。

图6a-6c统计了11个市辖区之间的客流分布,时间尺度为全天、早高峰和晚高峰。图中每个辖区

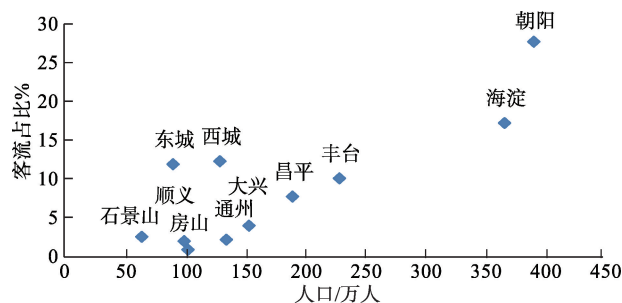


图5 北京市辖区人口与地铁客流相关性

Fig.5 The correlation between population size and the number of passengers in municipal districts in Beijing

外环的颜色表示该辖区流出的客流,圆弧的长度表示该辖区占总乘客数量的百分比,圆弧刻度标注实际客流量。从进出各市辖区客流的进出流量来看,客流分布的对称性很高。例如,全天海淀到朝阳的客流22.9万,朝阳到海淀的客流21.9万;全天东城

到朝阳的客流14万,朝阳到东城的客流14.5万。

客流呈现在朝阳、海淀区集聚的特征。11个市辖区的OD流向图中(图6a),朝阳区内部客流是流量最大的OD,达到51万人次。并且,朝阳区与其他市辖区都保持着紧密的联系,9个辖区的最大流

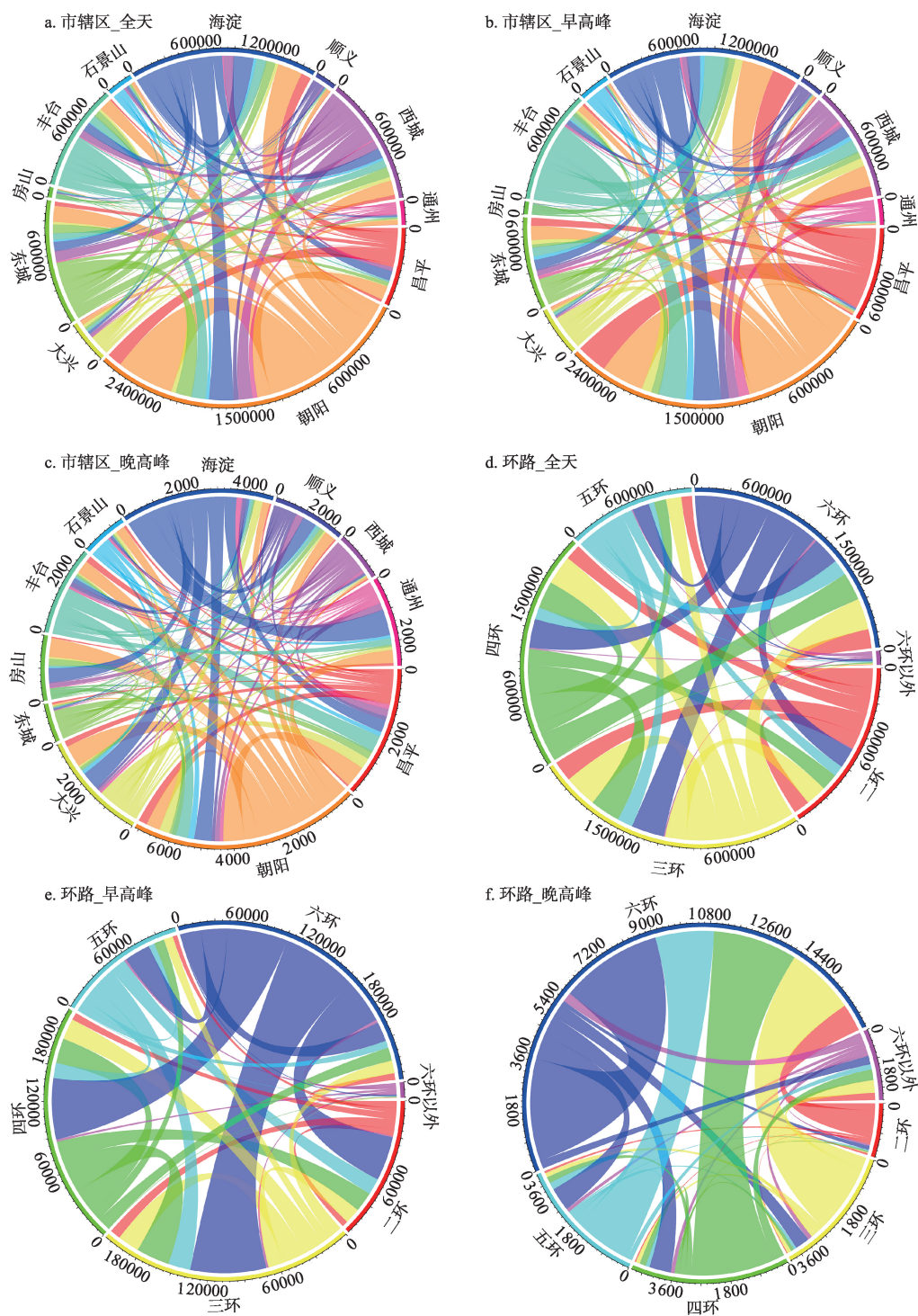


图6 北京地铁客流的时空分布

Fig.6 Origin-destination (OD) flows of the metro system in Beijing



人和流出的流向都是朝阳区,按照联系由强到弱的排序为海淀、东城、昌平、西城、丰台、通州、顺义、大兴、石景山。4个辖区与海淀区的客流联系仅弱于朝阳区,按照与海淀区联系由强到弱的排序为昌平、丰台、石景山、顺义。房山区与海淀区保持着最紧密的客流联系,达到2万人次。对比图6a-6c,集聚效应在早高峰时段更为明显。朝阳区早高峰的客流比例是该时段客流的35.04%,比全天高出8.00%;海淀区早高峰的客流比例是该时段客流的23.20%,比全天高出6.00%。

丰台区位于城市功能拓展区,具有一定的区位优势。截至2014年,有5条地铁线路经过丰台区,形成了轨道交通网络,丰台区全天客流达到80万人次。与海淀、朝阳、东城和西城保持着较强的客流联系。但是,同样位于城市功能拓展区的石景山只有1条地铁线路的4个站点,还没有形成城市轨道交通网络。据统计,石景山区全天客流只有20万。各辖区内客流中,石景山区内联系也是最弱的,每天只有4000多人次。

城市发展新区的市辖区地铁客流量相对较少。5个市辖区中,昌平的全天客流量最大,达65万,占当天客流总量的7.86%。虽然这些辖区的客流量较小,但是它们的主要联系方式对北京市地铁线路优化、规划有着重要的意义。昌平和大兴相似,主要联系方向是朝阳、海淀、顺义和通州的客流主要流向朝阳区,与其他各区的联系很弱,房山的主要联系方向是丰台、海淀。另外,这些市辖区的区内地铁客流都很少,表明该区域的城市功能综合性较差。

### 3.2.2 环路尺度

从环路尺度来看,客流的时空分布呈现潮汐式分布特征;早高峰时段的客流从外环流向内环,晚高峰时段的客流从内环流向外环。客流主要集中在三环、四环和六环之间,且均匀分布,9个OD对都保持在25万/d。早高峰和全天客流在环路尺度的空间分布相似,三环、四环和五环的客流均匀分布在23%~28%之间;二环客流近15%;五环客流总量最少,只占12%。但晚高峰的客流集中主要分布在六环,占45%;三环、四环和五环的客流在13%~17%之间;二环的客流总量最少。早高峰时段,从六环出发至二环、三环、四环是最主要的客流方向,分别为3.7、6.4和5.2万/d。晚高峰时段,六环内部的客流量最大,其次是从三环、四环、五环至六环的

客流。

根据环路尺度的分析,可以发现:第一,城市核心区域(二环以内)的地铁客流相对较少,三环和四环是城市地铁客流最为集中、拥堵的区域。第二,相较于市辖区尺度,环路尺度的客流大小对时间维度更敏感。但是,外环客流量高的原因是人口总量大还是人均出行频次高,还需要更精细的计算。

### 3.2.3 街道尺度

以街道为单元统计,138个街道的空间范围内包含地铁站点,或者居民步行范围内有地铁站点。根据式(1),本文分析了街道居民乘坐地铁的平均出行次数。由于本文只采用了2014年4月14日当天的数据进行计算,因此图7采用了相对分析法,将包含地铁的街道分成5个等级,分析不同区域居民出行对地铁的依赖程度。

全天来看,1号线、2号线沿线位于城市中心区域的街道,居民的出行对地铁出行的依赖性较强。1号线从南礼士路至高碑店地铁站沿线街道和2号线沿线大部分街道(除积水潭、鼓楼大街、安定门和雍和宫沿线街道)均排在地铁出行强度的前20%。首先,城市中心区域道路网络易拥堵,乘坐地铁出行的可靠性更高,地铁出行成为居民的首要选择。其次,城市中心区域是办公、居住、学校、休闲娱乐等场所聚集地,吸引了大量城市中心区域以外的客流。再次,城市中心是城市居民和外来游客出行目的地的集中区域,因此该区域的出行强度估算可能包含了外来游客的出行,即略高于实际出行强度。

早高峰和晚高峰时段,街道居民地铁出行强度高的空间分布相似,分散在城市发展新区。早高峰时段,房山区长阳镇、丰台区新村街道、大兴区林校路街道和亦庄地区、昌平线至8号线霍营站沿线的街道、昌平线至13号线北苑站沿线街道的居民地铁出行强度高。晚高峰阶段,城市发展新区南部的地铁出行强度分布与早高峰相似,集中在房山线良乡大学城至4号线丰台南路站沿线街道和大兴线沿线街道;而城市发展新区北部的空间分布与早高峰时段有差异,主要集中在4号线海淀黄庄至安河桥北站沿线街道和15号线国展至顺义站沿线街道。这些街道居民的地铁出行强度在全天的时间维度上看,大部分都不是地铁出行强度最强的街道,说明城市发展新区的居民主要依靠地铁通勤,进而反映出这些地点的居民面临职住分离的问题。相反地,早高峰和晚高峰时段,街道居民地铁出行强度低的



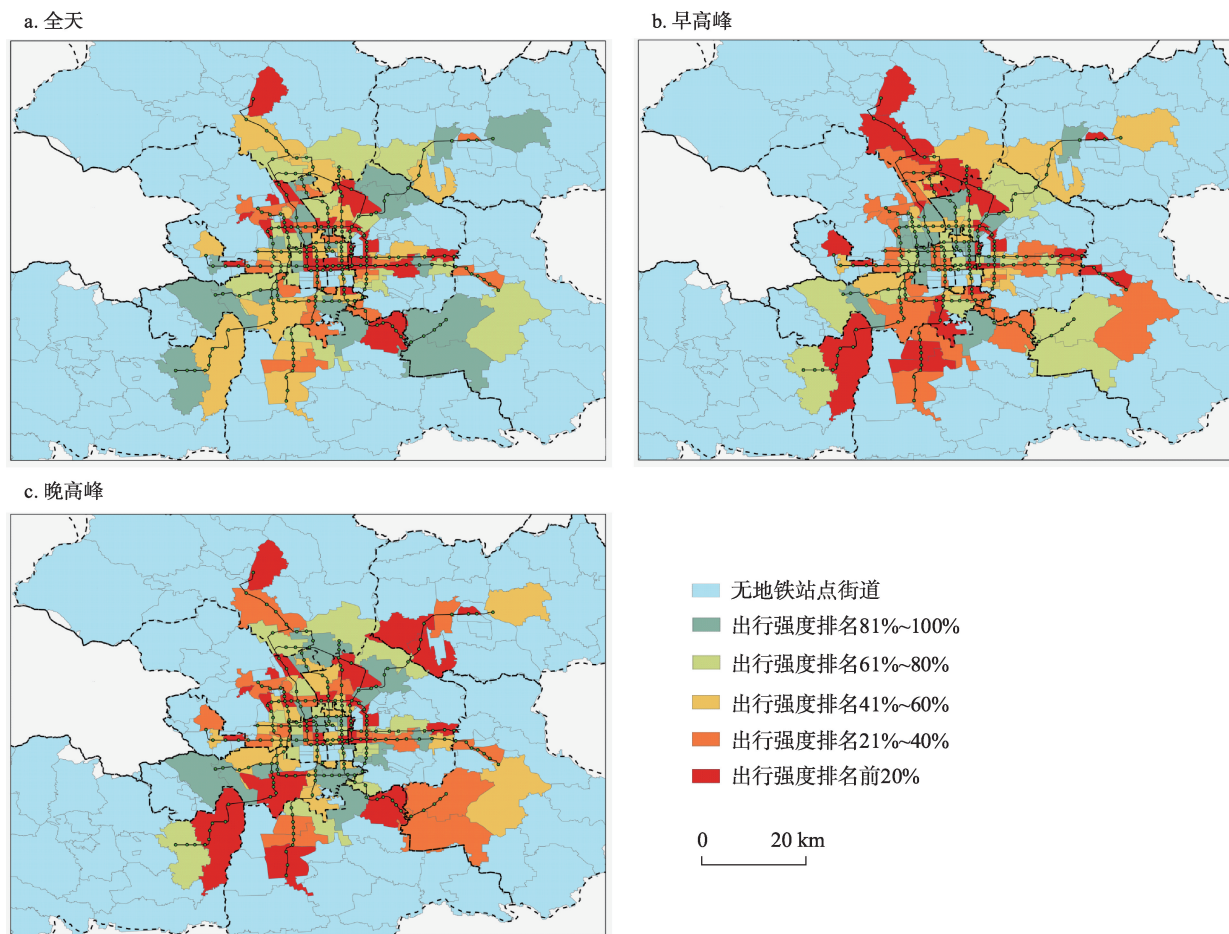


图7 基于街道人口的平均乘坐地铁出行强度分析

Fig.7 Analysis of commuting frequencies by transit in street-based communities

空间分布差异较大。早高峰时段,这些街道主要分布在城市中心;而晚高峰时段,居民地铁出行强度低的街道呈散点状分散分布。晚高峰客流要略少于早高峰客流(图2),部分客流没有在晚高峰出行,因此部分街道居民地铁出行强度明显小于早高峰。

## 4 结论与讨论

本文基于地铁刷卡数据,运用大数据的分析方法,从全天、早高峰和晚高峰时段、市辖区尺度、环路尺度、街道尺度,对北京市地铁客流的时空分布特征进行了系统性分析,研究表明:

第一,北京市地铁客流的流向和流量从市辖区尺度和环路尺度均呈现很强的对称性,同时早晚高峰时间的客流最大值是普通时段的3~4倍。并且,早高峰客流的主要方向是从六环至三环、四环;晚高峰客流的主要方向是三环、四环至六环。

第二,基于街道人口估算人均每天乘坐地铁出行次数,从街道尺度可以发现不同区域居民对地铁的依赖程度差异较大,空间不均等性较强。市郊居民区对于地铁出行的依赖性最高。目前市郊的地铁网络化还远远不够并且城市功能性不强,因此外环到内环的客流量很大。文章解析了城市发展新区地铁客流的主要联系方向,为北京市轨道交通规划和需求管理提供了准确的方向。

第三,经过不同空间尺度的对比分析,环路尺度、街道尺度相较于市辖区尺度更有助于识别地铁客流时空分布的差异;市辖区尺度和街道尺度有助于分析地铁客流与城市人口分布、居民地铁出行强度。可以发现,空间尺度不断缩小,地铁客流的时空差异越明显。根据不同时段和不同空间尺度研究地铁出行的拥堵压力进行研究,对理解城市轨道交通发展的优势和问题有着深远的意义。

本文采用全样本SCD估计OD矩阵和平均出

行强度,结合多尺度分析,为城市地铁客流的时空分布提供了系统的研究。在京津冀交通智能交通卡互联互通后,该方法的应用范围将更为广泛。未来可以基于当前OD矩阵的计算,进一步估计所有乘客的径路网络,研究不同地铁线路的客流量和拥挤程度,更加深入地分析城市轨道交通系统内部客流特征。

## 参考文献(References)

- 曹小曙,黄晓燕,董哲. 2013. 基于GIS的公共交通可达性与居民出行特征[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 45(5): 98-105. [Cao X S, Huang X Y, Dong Z. 2013. Transit accessibility and characteristics of residents' transportation based on GIS[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 45(5): 98-105.]
- 曹小曙,林强. 2008. 世界城市地铁发展历程与规律[J]. 地理学报, 63(12): 1257-1267. [Cao X S, Lin Q. 2008. The evolution of worldwide metro systems: A study on their scales and network indexes[J]. Acta Geographica Sinica, 63(12): 1257-1267.]
- 黄晓燕,张爽,曹小曙. 2014. 广州市地铁可达性时空演化及其对公交可达性的影响[J]. 地理科学进展, 33(8): 1078-1089. [Huang X Y, Zhang S, Cao X S. 2014. Spatial-temporal evolution of Guangzhou subway accessibility and its effects on the accessibility of public transportation services [J]. Progress in Geography, 33(8): 1078-1089.]
- 龙瀛,张宇,崔承印. 2012. 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, 67(10): 1339-1352. [Long Y, Zhang Y, Cui C Y. 2012. Identifying commuting pattern of Beijing using bus smart card data[J]. Acta Geographica Sinica, 67(10): 1339-1352.]
- 陆化普. 2006. 城市土地利用与交通系统的一体化规划[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 46(9): 1499-1504. [Lu H P. 2006. Integrated planning of land-use and transportation systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 46(9): 1499-1504.]
- 罗依,曹小曙. 2016. 广州市交通网络对居民出行碳排放量的影响: 以聚德、社学、祈福与晓西社区为例[J]. 城市观察, (5): 110-121. [Luo Y, Cao X S. 2016. Impact of road networks on household travel carbon emissions in Guangzhou: A case study of Jude, Shexue, Qifu and Xiaoxi Communities[J]. Urban Insight, (5): 110-121.]
- 申悦,柴彦威. 2013. 基于GPS数据的北京市郊区巨型社区居民日常活动空间[J]. 地理学报, 68(4): 506-516. [Shen Y, Chai Y W. 2013. Daily activity space of suburban mega-community residents in Beijing based on GPS data[J]. Acta Geographica Sinica, 68(4): 506-516.]
- 吴健生,黄力,刘瑜,等. 2012. 基于手机基站数据的城市交通流量模拟[J]. 地理学报, 67(12): 1657-1665. [Wu J S, Huang L, Liu Y, et al. 2012. Traffic flow simulation based on call detail records[J]. Acta Geographica Sinica, 67(12): 1657-1665.]
- 尹芹,孟斌,张丽英. 2016. 基于客流特征的北京地铁站点类型识别[J]. 地理科学进展, 35(1): 126-134. [Yin Q, Meng B, Zhang L Y. 2016. Classification of subway stations in Beijing based on passenger flow characteristics[J]. Progress in Geography, 35(1): 126-134.]
- 张文忠,余建辉,湛东升,等. 2016. 中国宜居城市研究报告[M]. 北京: 科学出版社. [Zhang W Z, Yu J H, Zhan D S, et al. 2016. Study of livable cities in China[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 赵晖,杨军,刘常平,等. 2011. 职住分离的度量方法与空间组织特征: 以北京市轨道交通对职住分离的影响为例[J]. 地理科学进展, 30(2): 198-204. [Zhao H, Yang J, Liu C P, et al. 2011. Measurement method and characteristics of spatial organization for jobs-housing misbalance: A case study of the effects of metro systems on jobs-housing misbalance in Beijing[J]. Progress in Geography, 30(2): 198-204.]
- 赵鹏军,万海荣. 2016. 我国大城市交通拥堵特征与国际治理经验借鉴探讨[J]. 世界地理研究, 25(5): 48-57. [Zhao P J, Wan H R. 2016. Big city traffic characteristics and international management experience and enlightenment[J]. World Regional Studies, 25(5): 48-57.]
- 周素红,邓丽芳. 2010. 基于T-GIS的广州市居民日常活动时空关系[J]. 地理学报, 65(12): 1454-1463. [Zhou S H, Deng L F. 2010. Spatio-temporal pattern of residents' daily activities based on T-GIS: A case study in Guangzhou, China[J]. Acta Geographica Sinica, 65(12): 1454-1463.]
- 周素红,闫小培. 2006. 基于居民通勤行为分析的城市空间解读: 以广州市典型街区为案例[J]. 地理学报, 61(2): 179-189. [Zhou S H, Yan X P. 2006. The impact of commuters' travel pattern on urban structure: A case study in some typical communities in Guangzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 61(2): 179-189.]
- Barthélemy M. 2010. Spatial networks[J]. Physics Reports, 499(1-3): 1-101.
- Choi J, Yong Y J, Kim T, et al. 2012. An analysis of metro ridership at the station-to-station level in Seoul[J]. Transportation, 39(3): 705-722.
- Derribe S, Kennedy C. 2010. The complexity and robustness of metro networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 389(17): 3678-3691.
- Hasan S, Schneider C M, Ukkusuri S V, et al. 2013. Spatiotemporal patterns of urban human mobility[J]. Journal of Statistical Physics, 151(1-2): 304-318.

- Huang J, Levinson D M. 2015. Circuity in urban transit networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 48: 145-153.
- Jang W. 2010. Travel time and transfer analysis using transit smart card data[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2144: 142-149.
- Laney D. 2010. 3D data management: Controlling data volume, velocity, and variety[R]. META Group Research Note, 6: 70.
- Lee S G, Hickman M. 2014. Trip purpose inference using automated fare collection data[J]. *Public Transport*, 6(1-2): 1-20.
- Long Y, Shen Z. 2016. Discovering functional zones using bus Smart Card Data and Points of Interest in Beijing[M]. *Geospatial analysis to support urban planning in Beijing*. Cham, Germany: Springer: 193-217.
- Ma X L, Liu C C, Wen H M, et al. 2017. Understanding commuting patterns using transit smart card data[J]. *Journal of Transport Geography*, 58: 135-145.
- Manley E, Chen Z, Batty M. 2016. Spatiotemporal variation in travel regularity through transit user profiling[J]. *Transportation*, doi: 10.1007/s11116-016-9747-x.
- Reades J, Zhong C, Manley E D, et al. 2016. Finding pearls in London's Oysters[J]. *Built Environment*, 42(3): 365-381.
- Roth C, Kang S M, Batty M, et al. 2011. Structure of urban movements: Polycentric activity and entangled hierarchical flows[J]. *PLoS One*, 6(1): e15923.
- Utsunomiya M, Attanucci J, Wilson N H. 2006. Potential uses of transit smart card registration and transaction data to improve transit planning[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1971: 119-126.
- Watts D J, Strogatz S H. 1998. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 393: 440-442.
- Zhao P J, Lü B, de Roo G. 2011. Impact of the jobs-housing balance on urban commuting in Beijing in the transformation era[J]. *Journal of Transport Geography*, 19(1): 59-69.
- Zheng Z, Zhou S H. 2014. Characterizing urban structure using taxi GPS data[M]//Rasouli S, Timmermans H J P. *Mobile technologies for activity-travel data collection and analysis*. New York, IGI: 341-350.
- Zhong C, Arisana S M, Huang X F, et al. 2014. Detecting the dynamics of urban structure through spatial network analysis[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(11): 2178-2199.
- Zhou J P, Murphy E, Long Y. 2014. Commuting efficiency in the Beijing metropolitan area: An exploration combining smartcard and travel survey data[J]. *Journal of Transport Geography*, 41: 175-183.
- Zhou S H, Deng L F, Huang M Y. 2013. Spatial analysis of commuting mode choice in Guangzhou, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 23(3): 353-364.

## Investigating spatiotemporal patterns of passenger flows in the Beijing metro system from smart card data

HUANG Jie<sup>1</sup>, WANG Jiaoe<sup>1,2</sup>, JIN Haitao<sup>1,2,3</sup>, JIN Fengjun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Transportation Information Center, Beijing 100161, China)

**Abstract:** Urban railway systems can reduce environmental footprints by residents' commuting and alleviate traffic congestion in mega-cities. Investigating the characteristics of the spatiotemporal distribution of passenger flows is significant in the examination of traffic demand in public transportation systems. Moreover, the study can help decision makers in traffic demand management. Taking the metro system of Beijing as an example, this study calculated the travel time of over 4 million trips and their origin-destination (OD) matrix. In the investigation of the spatiotemporal patterns, we found that: (1) travel time distribution of all trips and trips during the morning and afternoon peaks well fit with Gamma distribution; (2) patterns of passenger flows between districts or ring roads are symmetric; and (3) spatial inequity has been captured from the evaluation of average transit trips per person per day.

**Key words:** urban railway system; big data; passenger flow distribution; spatiotemporal pattern; Beijing