

基于出租车GPS数据的居民出行行为和城市空间结构分析*——以北京市为例

Analysis of Residents Travel Behavior and Urban Spatial Structure Based on Beijing Taxi GPS Data

魏海涛 肖天聪 胡宝生 王 薇 王晨曦 WEI Haitao, XIAO Tiancong, HU Baosheng, WANG Wei, WANG Chenxi

摘 要 居民出行模式是城市空间结构与功能的映射。运用北京市出租车GPS定位的轨迹大数据,揭示城市居民出行行为和城市空间结构特征。通过社区发现的方法,对短距离和中距离的出行网络进行分区研究,发现北京市“北强南弱不均衡”和“内强外弱圈层式”的出行特征。在每个出行社区内,大多数节点的出租车流量较低,出租车流量最大的节点在区域内部发挥了中枢的作用。此外,位于城市核心区的“居民出行区中心”土地利用类型更综合,出租车流量处于较高水平,而一些位于城市拓展区的“居民出行区中心”土地利用类型相对单一,引发了职住分离、潮汐车流等问题。建议从城市规划导向和实施上进一步完善城市次中心功能,构建功能协调、优势互补的多中心城市网络结构。

Abstract The human travel pattern is a reflection of urban spatial structure and function. This research uses large scale Beijing taxi trip data extracted from GPS-enabled taxi trajectories to reveal the residential travel pattern and urban spatial structure. Using community detection method, we study the sub networks of the short distance and the medium distance travel network and discover the travel characteristics of Beijing, which is unbalanced distribution and concentric zone. In each travel community, more nodes have low taxi traffic flow and the nodes with the highest taxi traffic flow play a role as a hub in the network. In addition, the land use types in the central area of the city are more comprehensive, which attract a large amount of taxi flows. The land use types of the hubs in the urban expansion area are relatively homogeneous, which leads to the problem of home-work separation and tidal traffic flow. The results show that the function of urban sub-centers should be further improved in urban planning orientation, forming a multi-center urban network structure with sub-centers that are complementary and competitive with the central area.

关键词 出租车GPS数据;出行模式;城市结构;土地利用

Key words GPS-enabled taxi data; travel pattern; urban structure; land use

文章编号 1673-8985 (2020) 01-0069-08 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20200112

作者简介

魏海涛

中央财经大学政府管理学院

副教授,博士

肖天聪

中央财经大学政府管理学院

胡宝生

中央财经大学政府管理学院

王 薇

华盛顿大学建成环境学院

硕士研究生

王晨曦

伯明翰大学伯明翰商学院

硕士研究生

1 文献研究概况

出行行为是个人行为建模、交通管控等方面的重要研究议题。出行行为模式是空间相互作用、城市空间结构与功能的映射。Bourne^[1]基于城市形态与城市相互作用的概念,提出城市空间结构以一套组织规则,影响城市形态和

城市子系统内部的行为,并将这些子系统连接成一个城市系统。改革开放以来,我国城市发展动力经历了巨大的变化,许多大城市由过去的以向心集聚为主导动力的阶段转而进入以离心扩散为主导动力的发展阶段(即郊区化阶段)^[2],20世纪90年代后这些大城市分

*基金项目:教育部人文社会科学研究项目“农村土地流转背景下劳动力迁移的空间选择:集聚还是分散?”(编号15YJC790113)。



图1 研究区域(北京六环以内)
资料来源:笔者自绘。

纷提出多中心的城市发展战略。近年来,许多学者对这一现象进行了实证研究,发现北京、上海、广州等大城市在发展中具有明显的郊区化特征,人口和就业分布呈现多中心的空间结构,并在不同程度上出现了居住—就业的空间错位^[3-6]。随着行为地理学相关研究的兴起,越来越多的学者从个人行为角度研究城市空间相互作用与空间结构。孟庆艳^[7]研究了上海市居民通勤行为的基本特征,总结了上海市通勤的空间结构模式,探讨了通勤现象的距离变化特性。周素红^[8]研究了广州市居民就业—居住空间的特征,通过通勤格局及其演变透视了城市实体空间的变化。

随着信息和通信技术 (ICT) 的发展,大数据在研究中得以应用,如交通预测^[9-10]、出行行为研究^[11-12]、土地利用分析^[13]和空间模型校准^[14]等。由于出租车GPS轨迹具有准确的位置和时间标记,能相对准确地揭示人员群体流动的模式,国内学者以出租车GPS轨迹作为数据源,进行了相关研究,如LIANG等^{[15]2137}采用北京市的出租车GPS轨迹,应用模型研究了出租车流动的位移分布,LIU等^[16]利用上海市出租车GPS轨迹的大数据,采用社区发现的方法,发现了15个时间稳定区域,刻画了上海的城市空间结构。SI等^[17]采用北京出租车GPS数据,基于多源数据分析模型,运用语意推理方法将出行分成3种类型,并分析其相应特征。LIU等^[18]基于深圳2014年出租车GPS轨迹的大数

据,提取城市活跃区,用以研究城市结构和居民生活方式。

随着城市化的推进,北京市的空间格局变化特征明显。2000年以前,城市扩展围绕中心城区近地域圈层式蔓延态势明显。自2000年开始,北京的建设呈现多中心集聚趋势^{[19]383}。但是,由于城市规划建设区均镶嵌在城市环路之间,规划建设的多个职能中心并没有形成真正意义的疏散中心城区人口与功能的城市次中心。“圈层式”空间规划固化了城市单中心的蔓延发展模式^[20]。

本文以北京市出租车GPS数据为基础,采用社区发现来探索居民出行模式,并结合相关的土地利用状况,揭示北京市城市空间结构特征。

2 研究区域与数据

北京是典型的世界级城市,2015年末常住人口为2 170.5万人,行政辖区面积为16 411 km²。北京的城市空间体现为“一主、一副、两轴、多点”的结构^①,其中,“一主”为中心城区(包括作为核心区的东、西城区),“一副”即通州,“两轴”是长安街与中轴线,“多点”则是顺义、亦庄、大兴、昌平、房山、怀柔、密云、平谷、延庆、门头沟10个新城,还有海淀山后、丰台河西、北京新机场地区3个重要的城镇组团。城市内部呈现多中心结构,包括中关村科技园区核心区、奥林匹克中心区、中心商务区(CBD)、海淀山后地区科技创新中心、顺义现代制造业基地、通州综合服务中心、亦庄高新技术产业发展中心和石景山综合服务中心。综合考虑研究目的和数据的可行性,本文的研究区域界定为北京六环以内,面积为2 267 km²,占全市总面积的13.81%,是人口出行的主要区域(见图1)。

北京城市道路网为典型的“方格网+环形放射”混合状,两大主要机场(首都国际机场和南苑机场)和四大火车站(北京南站、北京北站、北京西站和北京站)是重要的对外交通枢纽。

根据《第五次北京城市交通综合调查总

报告(2016)》,2014年出租车出行约占总体出行结构的6%,在公共交通服务中占据了重要地位。出租车服务具有独立性、随机性、便利性、区域性和舒适性等特点,是公共汽车和地铁的重要补充。相较而言,出租车能更精准地定位出行的轨迹。本文采用北京市运营的出租车24 h的GPS数据,每辆车的GPS数据作为一条记录,包括上车时间、上车地点、下车时间、下车地点、行程持续时间和行程长度等信息。选取从周一(2015年9月14日)到周日(2015年9月20日)的记录组成数据集。删除其中行程不完整、乘车距离大于100 km和小于100 m、乘车时间大于6 h和小于1 min、速度大于33 m/s的数据,进而得到2 896 609次出行记录。同时,将出租车轨迹简化为由起点和目的地构成的向量,以两地之间的欧氏距离作为行程长度,忽视路线细节,并将GPS数据同北京空间坐标底图相匹配,以便进行空间分析。

3 构建网络—不同距离的出行模式

3.1 基于距离的出行特征分析

出行距离分布是研究人口迁移时的一个重要统计特性。本文研究区域内出租车出行欧氏距离的平均值是3.44 km,出租车出行数据的分布形态(见图2a)显示,出租车出行的距离—频数遵循指数分布:

$$\text{频数} = 254\,223.921e^{-0.177 \times \text{距离}} \quad (1)$$

3 km以内出租车出行频数处于高水平,3—9 km范围内频数快速下降,9 km以上距离频数逐渐趋近于0。基于此,本文以3 km与9 km为阈值对数据进行分组,并将这3组分别命名为短距离出行组(1 779 664次)、中距离出行组(887 738次)和长距离出行组(229 207次)。

图2b显示,把距离频数进行对数变换后的分布符合线性分布:

$$\ln(\text{频数}) = -0.177 \times \text{距离} + 12.446 \quad (2)$$

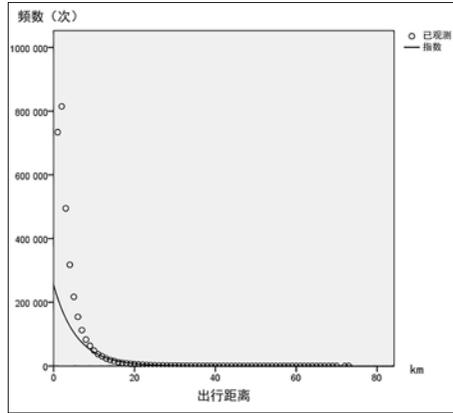
注释 ① 本文的研究时点为2015年,同分析相关的城市空间、路网结构以及交通设施等情况与彼时相应。

随着距离增加,出租车出行频数降低。长距离分布仍然是长尾分布,这表明在长途出行时选择出租车的人对费用的敏感度较低,原因可能在于商务出行、公务出行或非工作性出行中的特定需求,如旅游、就医、娱乐、处理突发事件等。

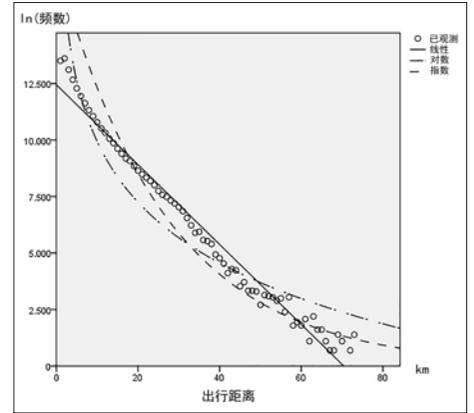
不同组的变化差异证明将出租车出行按照出行距离分组是合理的(见图3)。图3a和图3b显示的3组出行频数的波动区间不同,由短至长分别是(10 000, 30 000)、(0, 10 000)和(0, 5 000)。1天内,短距离出行频数波动幅度最大,长距离出行频数波动幅度最小,长距离出行变化较小,更为稳定。此外,3组出行变化的时间段也是不同的。1天内,短距离出行组出现早、午2个波峰,中距离出行组在早、中、晚均出现波峰,而长距离出行组在白天略有波动,只有晚上1个波峰。

工作日期间出行变化的情况与休息日有明显差别,如图3c和图3d所示,工作日期间0:00—6:00的3组出行情况基本一致,6:00以后3组出行情况存在明显差异。短距离出行组上下车次数在8:00—19:00一直处于高频区间,其中15:00出现波峰;中距离出行组上下车次数在8:00—23:00处于较高水平,无明显波峰;长距离出行组1天之内变化较小。如图3e和图3f所示,休息日期间在0:00—5:00的3组出行的频数均下降但幅度不同,5:00以后3组出行情况存在明显差异。短距离出行组存在3个波峰(10:00—12:00、14:00—16:00和21:00—22:00)和2个波谷(12:00—13:00和20:00—21:00);中距离出行组在8:00—24:00处于较高出行水平,但在19:00—20:00出现1个小的波谷;长距离出行组无明显变化。与工作日相比,双休日期间短距离和中距离整体频数下降且比工作日多1个波谷(20:00左右)。长距离出行在工作日和双休日无明显变化,这可能是由于长距离出行是由特定的出行目的所决定的,不会受工作和休息的影响。

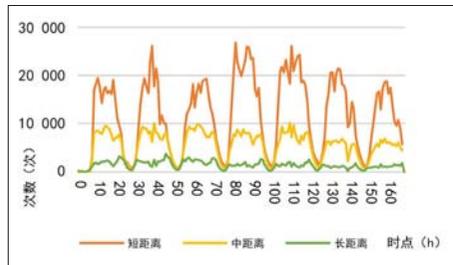
从方位上看(见图4),短距离出行和中距离出行的方向分布基本一致,具有明显的波



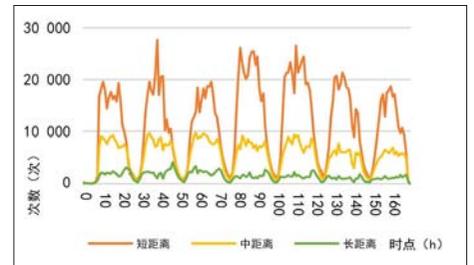
a 出租车出行距离—频数分布



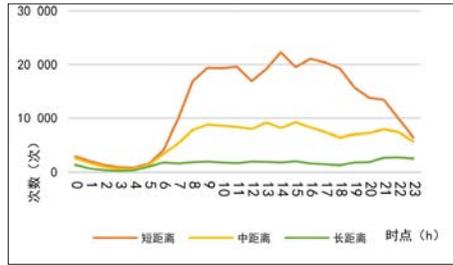
b 出租车出行距离—对数变换后的频数分布
图2 出租车出行距离—频数分布的曲线估计
资料来源:笔者自绘。



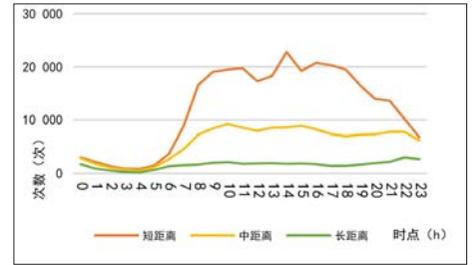
a 出租车上车时间次数变化



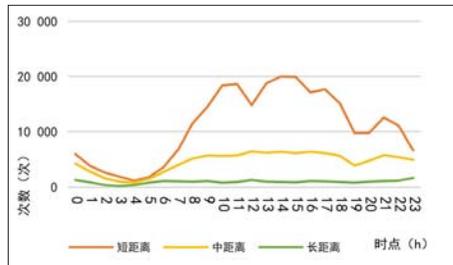
b 出租车下车时间次数变化



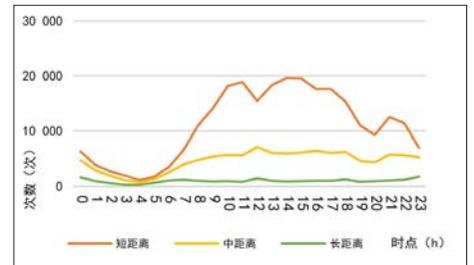
c 工作日出租车上车时间次数变化



d 工作日出租车下车时间次数变化



e 双休日出租车上车时间次数变化



f 双休日出租车下车时间次数变化

图3 不同长度出行组的时间变化图
资料来源:笔者自绘。

峰,而长距离出行的方向分布更均匀。短距离出行的方向分布具有3个较高的波峰(正东、正北和正南)和1个较低的波峰(正西),中距离出行方向分布具有2个较高的波峰(正东和

正南)和2个较低的波峰(正西和正北)。这与通过遥感数据观测到的1986年以来的北京市城市空间拓展方向(北面、东面和南面)是一致的^{[19]377}。这可能是由于城市空间的拓展方向

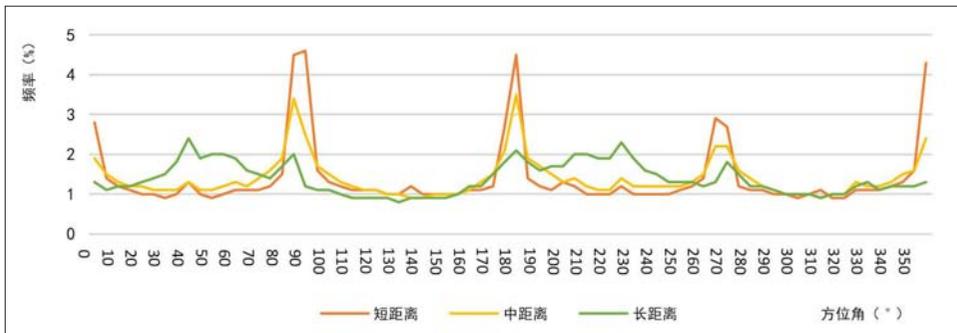


图4 不同长度出行组的出行方向分布
资料来源:笔者自绘。

表1 由不同长度的出行构建的网络的基本统计

出行距离	出行次数/次	节点数/个	边缘数/条	平均边缘权重/次
长距离	229 207	3 284	142 305	1.6107
中距离	887 738	3 506	215 566	4.1186
短距离	1 779 664	3 574	83 882	21.2163

资料来源:笔者自制。

影响了城市的功能结构,进而对人员流动和出行行为产生影响,因此人员流动可以反映城市空间结构特征。长距离出行的方向分布波动较小,在东北和西南方向存在2个较小的波峰,这与市中心到首都国际机场、北京南站、北京西站的方向相同,表明长途出行更多地受到城市交通节点的影响。

本文将研究区域划分为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的单元,计算每个单元中3组距离的上下车点数,发现上下车点主要分布于六环以内,在远郊区县的经济活动中心也有零散分布,其中通州分布规模较大。短距离出行的上下车热点主要集中在CBD和金融街一带。中距离出行的上下车热点主要集中在北京南站、北京西站、国贸、首都国际机场以及北二环、三元桥—首都国际机场一带。长距离出行的上下车热点主要集中在北京西站、北京南站和首都国际机场,可以推断长距离出行是由居民特殊类型的交通产生的,例如目的地为火车站、机场,或外地游客前往陌生地点等。由此可见,不同距离的出租车出行因不同目的而具有不同的模式^{[15][2142]}。

3.2 构建出租车出行网络

本文将 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 网格单元作为网络的节

点。如果出租车出行从一个单元开始并在另一个单元结束,则存在两个单元的边界且边界方向为从起始单元指向目的地单元,两个单元之间的出租车出行次数是边缘的权重,从而形成定向和加权的网络。在构建网络时,删除在同一单元中开始和结束的出行。

基于3组出行数据分别建立3个网络。表1显示了网络的基本统计结果。短距离出行组的出行次数和节点数最多,但边缘数最少,说明短距离出行路线较中远距离出行更稳定,具有更规律的空间模式,短距离出行的空间相互作用更强;长距离出行包含最少的出行次数和节点数,平均边缘权重远低于其他两组,说明长距离出行往往具有特定的出行目的和地点,发生频率较低;中距离出行作为短距离出行和长距离出行的过渡类型,结合了二者的特性。

总体来看,不同组的出租车出行在时间、空间方面具有不同的特征。从出行流量来看,短距离和中距离出行都远高于长距离出行。从时间变化来看,短距离和中距离出行具有明显变化,而长距离出行则基本无变化。从出行方位来看,短距离和中距离出行具有明显的方向性,而长距离出行的方向分布更均匀。结合短、中、长距离网络基本统计结果,可以发现长距离出行是由特殊的出行目的引发的,不体现居民出行的日常行为特

征。相反,短距离和中距离出行具有更规律的时空特征,更适宜用来揭示城市的空间结构。

4 城市交通和城市结构

4.1 网络的社区发现

社区结构是网络中的一个普遍特征。给定一个网络图,并找出其社区结构的过程叫做社区发现(Community detection)。同一社区中的节点之间的连接多于与其他社区中的节点之间的连接^[21],^{[22][167-171]}。因本文将研究重点放在短距离和中距离的分析上,考虑到加权和定向的网络,采用凝聚子群分析,用以发现短距离和中距离网络中的社区。凝聚子群分析(Cohesive subgroup analysis)是社会网络分析中的重要方法,强调凝聚性在社会网络中的重要性。当网络中某些行动者之间的关系紧密,以至于结合成一个次级群体时,即成为凝聚子群。分析的目的是为了揭示社会行动者之间实际存在的或者潜在的关系^{[22][148]}。本文主要通过分析节点间的联系来研究网络结构特征。

本文从短距离网络中发现了16个区域,在中距离网络中发现了24个区域(见图5)。这些区域同北京圈层结构基本吻合,具有一定的等级性,呈现从中心向外围辐射的“圈层+片状”的分布形态。中心城区的社区通常是空间连续的大面积区域,直径从5 km到10 km不等。郊区的大多数社区由很少的网格构成,这些小社区是由于出租车流量较低而形成的。所有的社区围绕城市中心呈圈层结构分布,空间连续性体现了距离衰减效应,这与现有的一些结论^[23]一致。大多数社区形态与行政区不同,行政边界对城市内部出行的影响较小。社区发现反映了人们的出行特征,是研究城市结构与功能的基础单元,本文将发现的社区命名为居民出行区(Residential travel zone, RTZ)。通过聚焦分析RTZ,探究城市结构与功能。

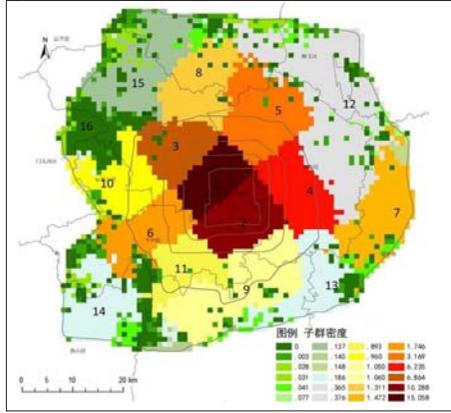
4.2 RTZ的网络统计

RTZ的内部特征对于研究城市结构具有重要的意义。为使RTZ格局更加清晰简洁,且便于统计,本文去除了RTZ内部的零星异块。

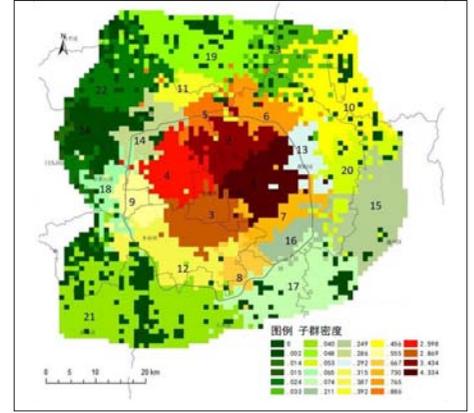
如图6所示,短距离的RTZ共有16个,根据凝聚子群密度的大小,将其划分为5个层级。RTZ1和RTZ2属于第1级,位于北京市中心,涵盖了三环以内绝大多数地区,包含最多的出租车出行次数。第2级包括从3到5的RTZ,集中了北京市主要的就业中心。RTZ6到RTZ8相对分散,属于第3级,主要是近郊的一些核心地区;其中RTZ7位于通州地区,是城市副中心的核地区,近年来发展较为迅猛。RTZ9至RTZ11属于第4层级,位于石景山区、丰台区和大兴区,属于城市功能拓展区。RTZ12至RTZ16属于第5层级,出租车流量较低,均位于六环以内的边缘区域。其中,RTZ16的子群密度近乎为0,主要是香山地区。除了RTZ12和RTZ13外,同一级的RTZ基本位于相同的圈层。整体上反映了“北强南弱不均衡”的城市出行特征,与北京市“一主、一副、两轴、多点”的空间布局特征具有一致性。

如图7所示,中距离的RTZ共有24个,可以分为3个层级。RTZ1至RTZ4属于第1级,位于北京市中心,基本与四环的区域重合,子群密度非常高,社区内部联系非常紧密。第2级包括从5到16的RTZ,基本位于第1级的外围,面积较小,行政区划上位于城市功能拓展区。RTZ17到RTZ24,属于第3级,位于六环以内的边缘区域,出租车流量低。除了RTZ10和RTZ15外,同一级的RTZ基本位于相同的圈层。RTZ10位于空港经济区,RTZ15位于城市副中心通州的核心地区。从整体上看,中距离的RTZ反映了“内强外弱的圈层式”的出行格局,这与北京市早期圈层式蔓延发展的路径具有一致性,同时可以看出,与所属圈层不匹配的子群是由特定的发展基础、功能分工来影响和决定的。

为了进一步探索每个RTZ内的出行结构,本文分析了短距离网络和中距离网络的40个RTZ所对应的子网络属性。每个子网络包含开始和结束于对应RTZ的所有短距离(或中距离)出行。在计算统计时,选择忽略网络边缘的方向,因为非定向指标更容易理解,并且可以足够清楚地描述空间交互关系。



a 短距离



b 中距离

图5 基于短、中距离出行网络的社区发现结果
资料来源:笔者自绘。

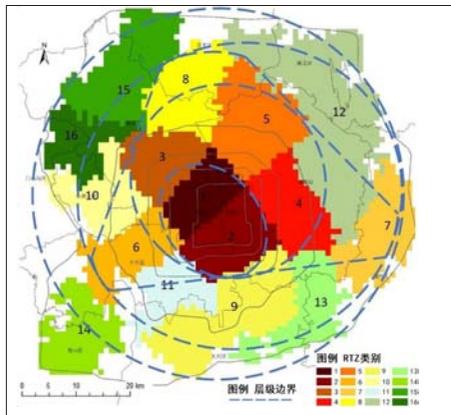


图6 北京市16个短距离RTZ
资料来源:笔者自绘。

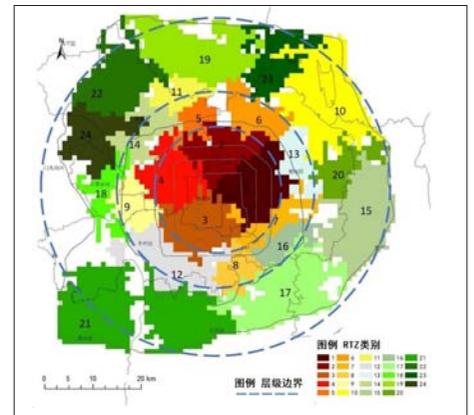


图7 北京市24个中距离的RTZ
资料来源:笔者自绘。

表2 短距离RTZ统计表

社区编号	节点数 /个	边缘数 /条	平均度 /条	平均边缘权重/次	图密度	平均聚类系数
1	134	5 263	78.5522	50.9922	0.5906	0.1933
2	175	7 077	80.8800	44.2668	0.4648	0.1901
3	150	4 297	57.2933	33.3558	0.3845	0.2256
4	177	5 164	58.3503	38.0395	0.3315	0.2201
5	249	6 638	53.3173	27.6180	0.2150	0.2240
6	168	3 382	40.2619	14.4734	0.2411	0.2331
7	204	4 087	40.0686	15.5070	0.1974	0.2317
8	203	4 618	45.4975	10.9138	0.2252	0.2163
9	316	5 798	36.6962	8.3060	0.1165	0.2287
10	170	3 213	37.8000	8.7818	0.2237	0.2590
11	139	2 052	29.5252	8.2320	0.2140	0.2654
12	555	6 670	24.0360	8.3994	0.0434	0.2326
13	184	2 089	22.7065	2.9411	0.1241	0.2085
14	180	2 407	26.7444	7.8521	0.1494	0.2584
15	266	2 076	15.6090	3.7182	0.0589	0.2385
16	136	2	0.0294	1.0000	0.0002	0.0000
平均值	213	4 052	40.4605	17.7748	0.2238	0.2141

资料来源:笔者自制。

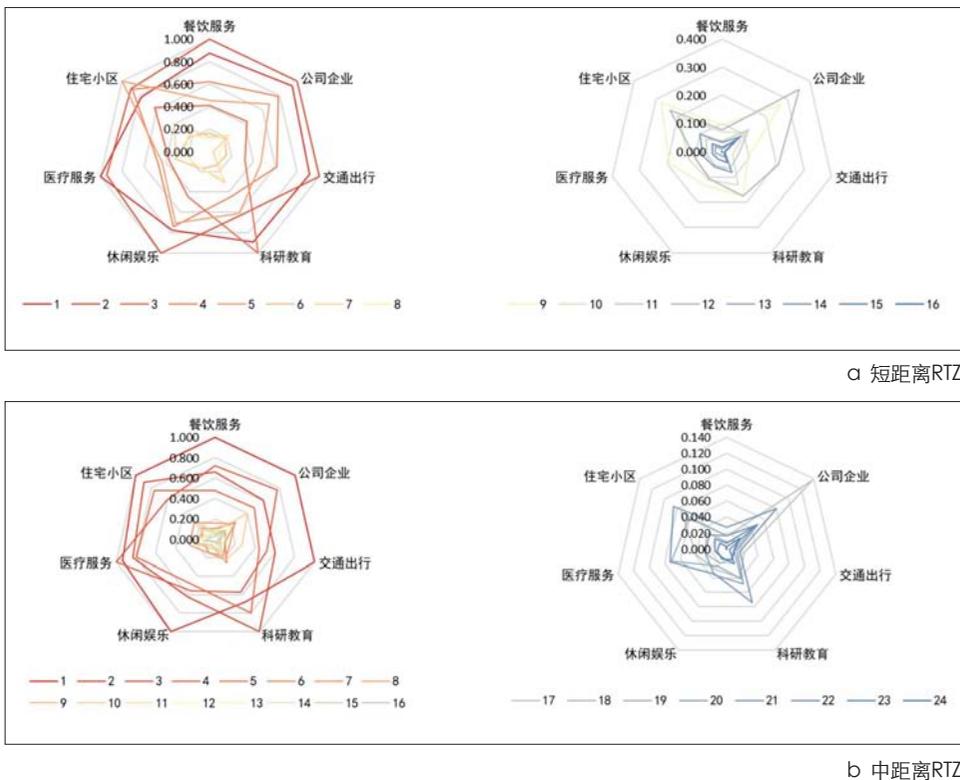


图8 RTZ的土地利用情况分析图
资料来源:笔者自绘。

表2显示了16个短距离子网络的总体特性。节点的度被定义为连接到它的节点的数量,是节点的拓扑中心性的基本衡量指标;网络的平均度表示不同节点之间的交互强度;图密度是指网络边缘数量与其可能的边缘数量最大值的比率,用于衡量完全连接的网络之间的连接程度;聚类系数被定义为连接到同一节点的两个节点连接并且量化为局部聚类的可能性。

如表2所示,16个短距离的RTZ网络的平均度和图密度高,表明RTZ中节点间的联系比较强,进而说明了居民在RTZ内部出行的多样性及RTZ中节点相互作用的广泛性。此外,随着层级的提高,RTZ的平均度、平均边缘权重和图密度减弱,即随着出行次数的减少,RTZ内部节点间的联系也减弱。由于16个RTZ的连接性都较好,与节点数相比,平均聚类系数的值比较均匀。一般来说,16个子网络具有类似的拓扑结构,但是城市区域中的子网络包含更大的交通流量,并且节点之间的连接范围比郊区子网络更广泛。

由于交通流量的差异,在中距离网络中1、2和3级RTZ的平均度(分别为182.4268、135.7500和145.6883),平均边缘权重和图密度的值逐渐降低。由于24个中距离RTZ^②的连接性较好,与节点数相比,平均聚类系数的值比较均匀。24个子网络具有类似的拓扑结构,但是中心城区的子网络包含更大的交通流量,并且节点之间的连接范围比郊区子网络更广泛。中距离RTZ的平均度(42.0578)和图密度的平均值(0.3443)均高于短距离RTZ,说明中距离RTZ内节点之间的联系更加紧密。相反,中距离RTZ的平均聚类系数的平均值(0.1422)低于短距离RTZ(0.2141),说明中距离RTZ内部节点间的联系更加均匀,而短距离RTZ中存在少数联系较强的节点,发挥了中枢的作用。

4.3 RTZ的中心和土地利用

城市出行与特定的土地利用有关。本文利用POI(Point of information)数据进一步研

究不同RTZ的土地利用状况,选取餐饮服务、公司企业、交通出行、科研教育、休闲娱乐、医疗服务和住宅区7类POI数据来反映不同的土地利用类型。由于出租车的上下车位置不一定是出行的目的,本文使用泰森多边形对POI点进行处理,得到每一个POI点的服务范围,规定上下车点位置所对应的POI点功能即为出行目的。同一个上(下)车位置可能对应多个POI点的泰森多边形,此时采取该多边形中功能比重最高者作为出行目的类型。对每一个RTZ中的出行目的进行汇总,并分别把16个短距离RTZ和24个中距离RTZ中每个POI类型的最大值标准化(见图8)。显而易见,短距离的RTZ前3层(RTZ1—RTZ8)包含更多类型及数量的POI,并且住宅区、餐饮服务以及公司企业的POI数据在不同的RTZ中比率相近;后2层(RTZ9—RTZ16)中的POI则主要集中在公司企业及住宅区两类,其他功能较弱。中距离的RTZ情况与短距离的RTZ相似,外层的突出功能为公司企业,其他功能较弱。这些差异反映了不同层级RTZ的不同功能,从土地利用情况可见北京城市功能的分层结构明显。

4.4 RTZ中出租车出行的交通流特征

事实上,城市空间结构可能与所有长度的出行状况密切相关。本文对所有长度的出行流进行分析。出租车流量以及出行距离差异水平的变化可以描述一个地区的交通状况,与土地利用状况密切相关,能够在一定程度上反映该地区的功能。

选取与上文相同的1 km×1 km的单元,然后基于出行流量和差异水平将这些单元聚集成类。在1天中界定5个时间间隔,每个间隔都有足够的出行数据支持分析。这5个间隔分别是:“清晨”(5:00—9:00),“上午和中午”(9:00—13:00),“下午”(13:00—17:00),“傍晚”(17:00—21:00)以及“晚上”(21:00—次日1:00)。根据在相关研究中被成功应用的香农熵^[24],将每个网格D(i)的差异水平定义为:

注释 ② 限于篇幅,中距离24个子网络的统计表格省略。

$$D(i) = -\sum_{d(i)=1}^k P_{d(i)} \log_2(P_{d(i)}) , P_{d(i)} = \frac{V_{d(i)}}{\sum_{d(i)=1}^k V_{d(i)}} \quad (3)$$

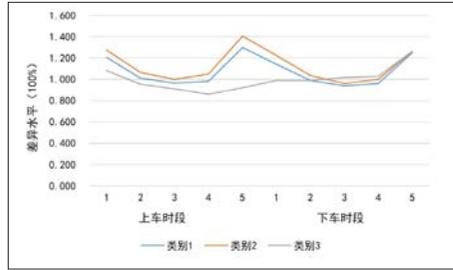
其中 $V_{d(i)}$ 是在一定距离范围类别 d 内同网格单元 i 联系的出租车流量, k 是根据出行长度划分的出行组编号。本文选择3 km作为这里的分组间隔, V_1 代表距离小于3 km的出租车流量, V_2 代表距离位于3 km到6 km之间的出租车流量, 以此类推。由于上车点和下车点有不同的模式, 计算5个时间段中每个网格单元的上车点数量、下车点数量、上车出行的差异水平和下车出行的差异水平, 即每个单元有20个特性。本文忽略那些在这5个时间段中没有出租车流动的单元格并应用 k 均值聚类的方法对所有单元格分类。

这些网格单元被分为3类(见图9)。类别1、2的单元格具有很大的交通流量和相似的时间变化水平, 类别3的单元格交通流量较低且没有明显的时间变化。中心地区的上车出行差异水平大于边缘地区, 而就下车出行的差异水平而言, 除清晨外, 所有类别的差异水平基本一致。

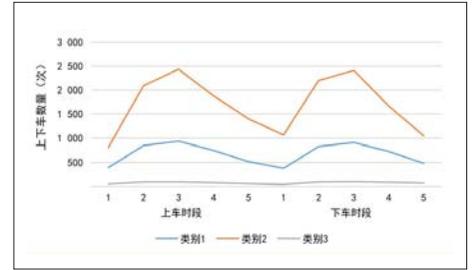
这三类网格的空间分布清晰地描绘了北京的同心层结构。类别1的单元覆盖了城市的多个中心及火车站、机场。类别2基本覆盖了四环以内大部分区域, 并包含了机场线及通州副中心。除特殊地形的地域外, 类别3基本涵盖了六环以内的所有区域。将这3类网格的分布与短距离及中距离的RTZ分布相比较, 可以发现具有相似的规律——较为明显的同心层结构, 与RTZ单元所描绘的城市结构有一致性, 证明前文基于RTZ分析的结论是合理的。

5 结论

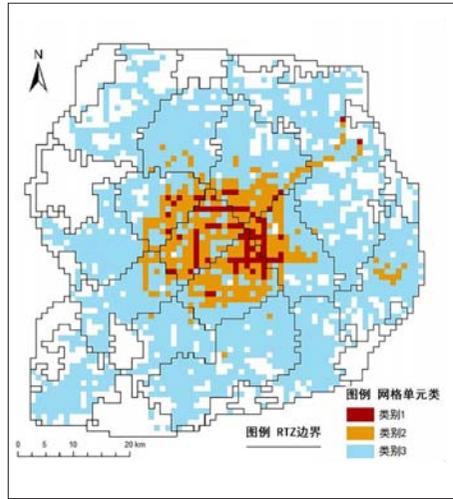
出租车在公共交通服务中占据了重要地位, 研究出租车轨迹及其空间特征对探究居民出行规律、城市结构与功能, 以及城市规划具有一定的启示意义。本文首先对出租车出行按距离进行分组研究, 发现不同组的出租车出行在时间、空间方面具有不同的特征, 与长距离出行相比, 短距离和中距离出行具有



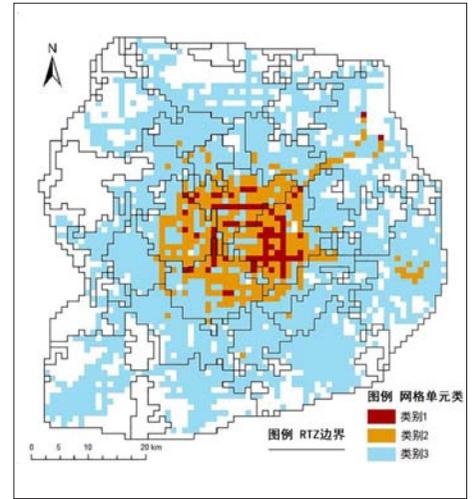
a 上车点和下车点的差异水平



b 上车点和下车点的出租车出行量



c 上车点和下车点的差异水平的空间分布图



d 上车点和下车点的出租车出行量的空间分布图

图9 3类网格单元中5个时间段的交通流特征分析
资料来源:笔者自绘。

更规律的时空特征, 更适宜用来揭示城市的空间结构。

本文运用社区发现的方法研究了由短距离和中距离出行构建的网络, 将其分区并命名为RTZ。根据凝聚子群密度将RTZ进行层级划分, 发现北京市具有“北强南弱不均衡”和“内强外弱圈层式”的出行特征。进一步研究RTZ内部的出行结构, 可以发现在每个RTZ内部大多数节点的出租车流量较低, 出租车流量最大的节点在RTZ内部发挥了中枢的作用, 将其命名为“居民出行区中心”并进行分析。位于城市核心区的“居民出行区中心”, 其土地利用类型更综合, 出租车流量处于较高水平; 而一些位于城市拓展区的“居民出行区中心”, 其土地利用类型过于单一, 引发了城市内部职住分离、潮汐车流等问题。最后, 本文探讨所有长度的出租车出行的交通流量属性, 交通单元的空间分布也揭示

了北京的圈层式分布。

结合其他学者的研究, 本文认为北京市目前圈层式的空间布局的原因, 在于北京市2000年之前围绕中心城近地域圈层式的发展模式固化了城市单中心的蔓延态势^{[19]382}。在这样的空间惯性下, 要使城市向多中心转变任重而道远。因此, 城市规划导向上应进一步完善城市次中心的功能, 提升次中心土地利用类型的综合性, 构建功能协调、优势互补的多中心城市网络结构。

出租车作为公共交通的一种类型, 存在一定的价格门槛, 难以涵盖所有人群及目的的出行, 进一步的研究可以扩大数据来源, 整合私家车、公共汽车和地铁等多种交通方式, 而不同数据的组合可以从更多维度研究居民出行特点和城市空间结构。

参考文献 References

- [1] BOURNE L S. Internal structure of the city: readings on urban form, growth, and policy[J]. *Historian*, 1963, 26(1): 1-18.
- [2] 冯健,周一星. 中国城市内部空间结构研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2003 (3): 204-215.
FENG Jian, ZHOU Yixing. A review and prospect on urban internal spatial structure research in China[J]. *Progress in Geography*, 2003(3): 204-215.
- [3] 曹广忠,史秋洁. 北京都市区扩展特征、机制与区域影响[J]. *北京联合大学学报 (人文社会科学版)*, 2015, 13 (4): 41-46.
CAO Guangzhong, SHI Qiujie. Traits, mechanism and regional impact of Beijing metropolitan area expansion[J]. *Journal of Beijing Union University(Humanities and Social Sciences)*, 2015, 13(4): 41-46.
- [4] 孙斌栋,魏旭红. 上海都市区就业—人口空间结构演化特征[J]. *地理学报*, 2014, 69 (6): 747-758.
SUN Bindong, WEI Xuhong. Spatial distribution and structure evolution of employment and population in Shanghai Metropolitan Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(6): 747-758.
- [5] 蒋丽,吴缚龙. 2000—2010年广州人口空间分布变动与多中心城市空间结构演化测度[J]. *热带地理*, 2013, 33 (2): 147-155.
JIANG Li, WU Fulong. Guangzhou population spatial distribution and polycentricity spatial structure evolution[J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(2): 147-155.
- [6] 孙铁山. 北京市居住与就业空间错位的行业差异和影响因素[J]. *地理研究*, 2015 (2): 351-363.
SUN Tieshan. Spatial mismatch between residences and jobs by sectors in Beijing and its explanations[J]. *Geographical Research*, 2015(2): 351-363.
- [7] 孟庆艳,陈静. 城市居民通勤活动行为的时空特征研究——以上海浦东新区为例[J]. *交通与运输 (学术版)*, 2006 (B07): 6-9.
MENG Qingyan, CHEN Jing. A study on the time-space characteristics of urban commuting[J]. *Traffic & Transportation(Academic Edition)*, 2006(B07): 6-9.
- [8] 周素红,闫小培. 广州城市居住—就业空间及对居民出行的影响[J]. *城市规划*, 2006 (5): 13-18.
ZHOU Suhong, YAN Xiaopei. Relationship between urban residential space and employment space and impact on resident trip in Guangzhou[J]. *City Planning Review*, 2006(5): 13-18.
- [9] GAO S, WANG Y, GAO Y, et al. Understanding urban traffic-flow characteristics: a rethinking of betweenness centrality[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2013, 40(1): 135-153.
- [10] 胡小文,冯均佳. 基于GPS数据采集的出租汽车交通运行特点研究[J]. *城市交通*, 2007, 5 (2): 91-95.
HU Xiaowen, FENG Junjia. Research on characteristics of taxi traffic based on GPS data[J]. *Urban Transport of China*, 2007, 5(2): 91-95.
- [11] 唐炉亮,常晓猛,李清泉,等. 基于蚁群优化算法与出租车GPS数据的公众出行路径优化[J]. *中国公路学报*, 2011, 24 (2): 89-95.
TANG Luliang, CHANG Xiaomeng, LI Qingquan, et al. Public travel route optimization based on ant colony optimization algorithm and taxi GPS data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(2): 89-95.
- [12] 童晓君. 基于出租车GPS数据的居民出行行为分析[D]. 长沙:中南大学, 2012.
TONG Xiaojun. Analysis of residents' behavior based on the Taxi GPS data[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] LIU Y, WANG F, XIAO Y, et al. Urban land uses and traffic 'source-sink areas': evidence from GPS-enabled taxi data in Shanghai[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2012, 106(1): 73-87.
- [14] YUE Y, WANG H D, HU B, et al. Exploratory calibration of a spatial interaction model using taxi GPS trajectories[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2012, 36(2): 140-153.
- [15] LIANG X, ZHENG X, LYU W, et al. The scaling of human mobility by taxis is exponential[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, 391(5): 2135-2144.
- [16] LIU X, GONG L, GONG Y, et al. Revealing travel patterns and city structure with taxi trip data[J]. *Journal of Transport Geography*, 2013(43): 78-90.
- [17] SI Y, WENG J C, CHEN Z H, et al. Taxi travel purpose estimation and characteristic analysis based on multisource data and semantic reasoning: a case study of Beijing[C]//*Web Information Systems Engineering—WISE 2013 Workshops*. 2013.
- [18] LIU L, TANG L. Revealing the characteristics of active area in the city by Taxi GPS data—a study of Shenzhen[C]//*2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis*, 2017.
- [19] 王亮,加雨灵. 北京市城市空间的扩展与空间结构演变分析[C]//*2013中国城市规划年会论文集*, 2013.
WANG Liang, JIA Yulin. Urban space expansion and evolution of spatial structure in Beijing[C]//*The Proceedings of Annual National Planning Conference 2013*, 2013.
- [20] 邓羽,司月芳. 北京市城区扩展的空间格局与影响因素[J]. *地理研究*, 2015, 34 (12): 2247-2256.
DENG Yu, SI Yuefang. The spatial pattern and influence factors of urban expansion: a case study of Beijing[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(12): 2247-2256.
- [21] 斯坦利·沃斯曼,凯瑟琳·福斯特,等. 社会网络分析: 方法与应用[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2012.
WASSERMAN S, FORSTER C, et al. The social network analysis: method and application[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012.
- [22] 刘军. 社会网络分析导论[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2004.
LIU Jun, The introduction of social network analysis[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2004.
- [23] RATTI C S, SOBOLEVSKY S, CALABRESE F, et al. Redrawing the map of Great Britain from a network of human interactions[J]. *PLOS One*, 2010, 5(12): e14248.
- [24] EAGLE N, MACY M, CLAXTON R. Network diversity and economic development[J]. *Science*, 2010, 328 (5981): 1029-1031.