建成环境对出租车出行需求的时空异质性影响

戢晓峰[1,2]，黄志文[1]，关昊天[1,2]，陈 方[2,3]，覃文文[1,2]

（1.昆明理工大学 交通工程学院，昆明 650504；2.西南综合交通运输发展研究院，云南 昆明 650504；3.昆明理工大学 马克思主义学院，昆明 650504）

摘 要：为探究建成环境与出租车出行需求之间的时空交互影响，利用昆明市出租车订单数据，从土地利用和交通基础设施两个维度构建了相关的建成环境指标。同时，在出租车上车点、到达点应用多尺度地理加权回归模型（MGWR）和时空地理加权回归模型（GTWR），探究了OD点建成环境变量的时空异质性对出租车出行需求的影响差异。研究结果表明：大型交通枢纽、地铁站、餐饮设施和停车场是影响出租车出行需求的关键因素，这些因素在出租车OD空间上均表现出显著的空间异质性；特别是公司企业、体育休闲和公园景点在OD的空间异质性具有截然不同的呈现，而科教文化和医疗机构在出租车OD点上均未表现出明显空间异质性。此外，研究发现建成环境变量在不同时间段内也展现出显著的异质性，整体趋势呈现先下降后上升和先上升后下降两种模式。对早晚高峰时段分析发现：大型交通枢纽在早高峰时对到达点需求影响显著，而在晚高峰时对出发点需求的影响更为突出。停车场对出发点和到达点需求均有正向作用，尤其在晚高峰时作用达到峰值，且对到达点影响更为显著。最后，研究揭示公交站点在早高峰期间与出租车需求呈现合作关系，但在晚高峰时，公交站与出租车需求则表现出竞争关系。

关键词：交通运输系统工程；时空异质性；多尺度地理加权回归；时空地理加权回归；出租车；建成环境

中图分类号：U491.255 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)06-1580-14

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241155

Spatiotemporal heterogeneous effects of built environment on taxi travel demand

JI Xiao-feng[1,2], HUANG Zhi-wen[1], GUAN Hao-tian[1,2], CHEN Fang[2,3], QIN Wen-wen[1,2]

(1. *Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650504, *China*; 2. *Southwest Institute of Integrated Transportation Development, Kunming* 650504, *China*; 3. *School of Marxism, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650504, *China*)

Abstract: To explore the spatiotemporal interaction between the built environment and taxi travel demand, this study utilizes taxi order data from Kunming City, constructing built environment indicators from two

收稿日期：2024-10-28.

基金项目：国家自然科学基金项目（42571258）；云南省研究生导师团队（云学位[2024]19号）；云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项项目（KKXX202402046）.

作者简介：戢晓峰（1982-），男，教授，博士.研究方向：交通地理及交通规划.E-mail：yiluxinshi@sina.com

通信作者：覃文文（1986-），男，讲师，博士.研究方向：交通安全.E-mail：qinww@kust.edu.cn

dimensions: land use and transportation infrastructure. By applying Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) and Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) models to the origin-destination (OD) points, the spatial heterogeneity and temporal non-stationarity of built environment variables and their impacts on taxi demand were examined. The results indicate that major transportation hubs, metro stations, dining facilities, and parking lots are key factors influencing taxi demand, exhibiting significant spatial heterogeneity across OD points. In contrast, cultural-educational and medical institutions show no spatial heterogeneity in taxi demand. Notably, commercial enterprises, recreational facilities, and parks display markedly different spatial heterogeneity between OD points. Further analysis reveals that built environment variables also exhibit significant temporal heterogeneity, generally following two trends: an initial decline followed by a rise, and an initial rise followed by a decline. Detailed spatiotemporal analyses of peak hours reveal that major transportation hubs significantly impact demand at destination points during morning peaks, while their effect on origin points is more pronounced during evening peaks. Parking lots promote demand at both origin and destination points, peaking during evening rush hours, with a stronger influence on destination points. Lastly, the study uncovers that bus stops cooperate with taxi demand during morning peaks but exhibit a competitive relationship during evening peaks.

Key words: engineering of communication and transportation system; spatio-temporal heterogeneity; multiscale geographically weighted regression; spatio-temporal geographically weighted regression; taxi; built environment

0　引　言

出租车作为一种传统交通出行方式,在填补城市公共交通出行空白和满足居民多样化出行需求方面具有重要作用[1,2]。与传统公共交通相比,出租车因其能够提供点到点出行的便捷服务而备受居民出行青睐,同时是城市空间交互[3]和居民出行意愿[4]的重要展示路径。尤其是近年来,部分城市推出的无人驾驶出租车开启了全新的运营模式,这使得出租车出行需求的时空异质性研究成为热点话题。与此同时,基于大数据分析方法研究出行需求与建成环境之间的依存关系,已成为验证其背后影响机制的重要手段[5]。现有研究表明[6],建成环境与出租车出行需求之间存在显著的相关性,因此,深入探究建成环境与出租车出行需求之间的相互作用机理,对于提高出租车的运营效率和优化出行模式具有重要意义。

已有研究表明[7],建成环境是影响居民出行的关键因素,目前建成环境模型已从3D模型发展为5D模型[8]。另外,研究发现建成环境(如土地利用[9]、道路密度[10]、交通设施[9,10])对交通需求,特别是出租车需求,具有显著影响,并揭示了建成环境与出行行为存在密切的关联。任鹏等[11]利用轨道客流数据探究了职住平衡与建成环境的关系,发现土地利用混合度与职住关系高度相关。李欣然等[12]基于出租车轨迹数据,利用深度重力模型,从尺度视角下揭示了影响出租车车流预测的关键POI特征,结果表明,餐饮服务数量和购物服务数量对出租车OD预测精度具有较大影响。李琪琳等[13]通过出租车GPS数据,研究了交通分区的出行需求及空间溢出效应,发现交通小区内停车场数量增多,会显著提升本交通分区及周围分区的出租车出行需求。

然而,这些研究通常未能充分考虑起讫点空间流数据的时空尺度敏感性和异质性问题。为此,部分学者尝试通过引入时空回归模型解决这一问题。Wang等[14]引入地理加权回归(Geographically weighted regression,GWR)模型,研究了一天中不同高峰时段对网约车出行需求的重要影响因素,发现建成环境变量在地理空间上存在异质特性,与普通最小二乘法(Ordinary least squares,OLS)模型相比,GWR模型能提供关于建成环境变量影响的空间变化详细信息。但是,GWR模型忽略了异质建成环境变量之间存在空间尺度差异的问题,导致模型结果不够完善,且忽视了起讫点空间流数据的时空尺度敏感性和异质性。为此,部分学者使用多尺度地理加权回归

(Multiscale geographically weighted regression, MGWR)模型和半参数地理加权回归模型[1]进行更为完善的空间异质性分析,如李想等[15]使用MGWR模型探究了建成环境对地铁-公交客流的影响及尺度效应,该模型能够进行不同尺度下的空间异质分析,但仍未将时间因素真正纳入,以揭示时间异质性。

综上,考虑起讫点建成环境异质性有助于区分起始点与到达点建成环境对出租车出行需求影响程度的差异,这对于进一步提升出租车服务质量至关重要。同时,在明确起讫点范围内建成环境和出租车出行需求影响存在差异性的基础上,需充分考虑建成环境变量异质性的差异,同时将时间因素纳入GWR模型,因此本文充分利用MGWR模型挖掘空间异质性,利用GTWR模型呈现时间异质性,最后,基于出租车订单数据、兴趣点(Point of interest, POI)数据及路网数据,利用GWR改进的MGWR模型和GTWR模型,从土地利用和交通基础设施两个维度,探究出租车出发点和到达点周围建成环境对出租车出行需求的影响及时空异质效应。

1 研究区域和数据说明

1.1 研究区域概况

本研究选取云南省昆明市主城区作为研究区域,该区域包括了商业区、住宅区、工业区等,涵盖机场、高铁站、汽车站等综合交通枢纽,以及地铁站、公交站等公共交通设施。该区域具有较高的人口密度和经济活动水平,有助于准确反映影响出租车需求的实际因素。因此,划分研究区域为1 km×1 km的网格[16]作为出租车出行分析单元,同时剔除水域、山地等不相关区域,筛选后共得到3 304个网格,划分后的研究区域位置及分布如图1所示。

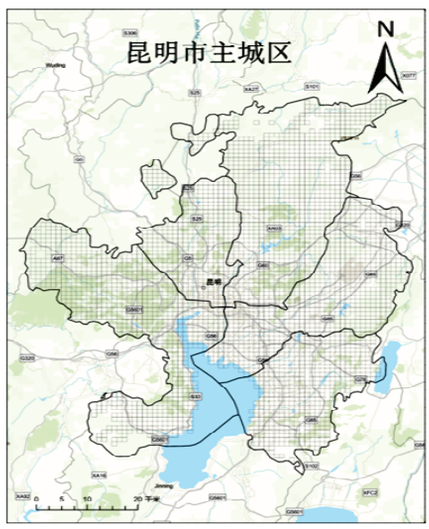


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源及特征

1.2.1 出租车出行数据

初始出租车出行数据来自昆明市2021年10月每日的出行订单数据,包含订单ID、起始坐标、到达坐标、时间、里程等。通过使用ArcGIS和Python对数据进行筛选和清洗,由于其中一周存在数据不全和时间格式错误的情况,因此仅保留21天的数据,涵盖3个完整星期的出行记录,并在研究区域内按网格进行累加,最终得到出租车订单数据共计249万条,如图2和图3所示。

从图2可以看出,出租车订单数量整体表现为多峰分布,凌晨5:00至6:00时段,订单量达到全日最低点,而在早高峰7:00至9:00,订单数量迅速增加。在晚间21:00至22:00之间,订单量再次出现明显的高峰,体现了订单量时间异质性的特征,其显示出的时变特征与学者研究结论一致[17]。图3显示了出租车出发点和到达点在空间分布上的集聚差异,出发点相较于到达点更密集,且分布范围更加集中。尤其在重要交通枢纽区域出现了明显的高峰流量,其中上客流量峰值超过下客点的最大流量。

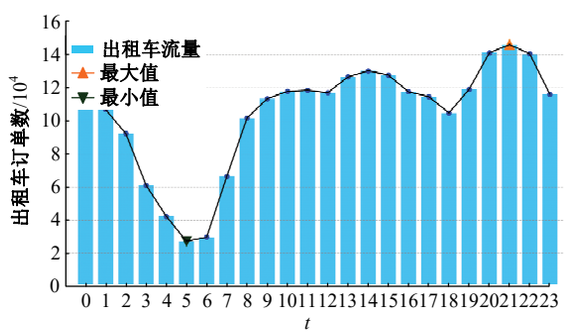
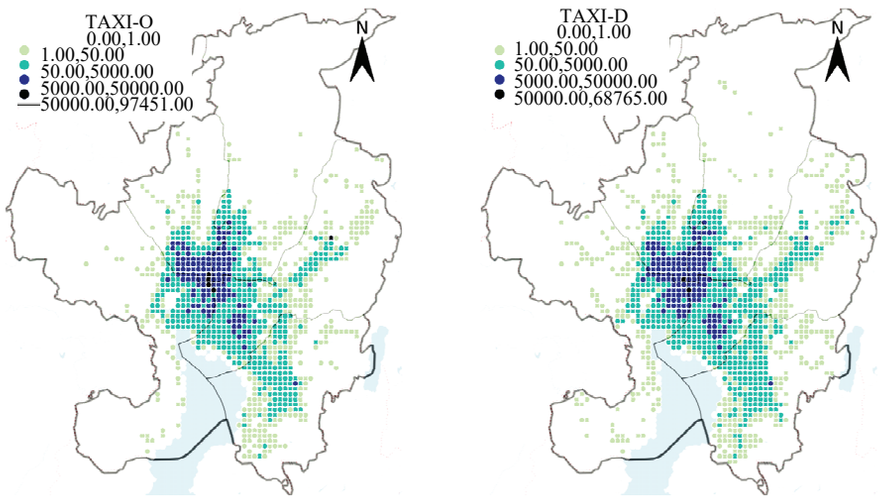


图2 21天出租车24小时出行量时变

Fig. 2 21-day taxi travel time-varying

1.2.2 建成环境数据

建成环境数据从土地利用和交通基础设施两个维度进行构建,基于高德开发平台,获取2021年期间POI数据,土地利用数据中包括餐饮、购物场所、公园景点、公司企业、科教文化、体育休闲、医疗机构、政府机构等类型,交通基础设施数据中包括地铁站点、公交站点、停车场、机场、高铁站、



(a)出发点　　(b)到达点

图 3　出租车起讫点(OD)空间集聚分布

Fig. 3　Spatial agglomeration distribution of taxi origin-destination

汽车站、渡口等设施数据，以此将地理位置数据累积到研究单元，计算出相应的建成环境指标。路网数据(2021)来自 Open Street Map，用于计算路网密度。

2　本文方法

2.1　空间自相关检验

本文旨在探究建成环境的时空异质性，需先通过空间自相关检验确定是否适合采用GWR等模型。空间自相关性指的是变量在实际地理空间的位置存在集聚或分散模式，衡量某一区域的数据与其相邻区域数据之间存在某种空间依赖性，本文采用全局莫兰指数进行空间自相关检验，其计算公式为：

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \quad (1)$$

式中：I为全局莫兰指数；i为第i个研究单元；n为研究单元总数；w_{ij}为i研究单元和j研究单元之间的空间权重；x_i、x_j分别为i、j研究单元的建成环境属性值；$\bar{x}$为该属性值的平均值。

Moran′s I取值为[−1，1]，当其绝对值大于0，且显著性检验结果$p<0.05$时，表示所研究区域存在空间相关性，且取值越接近1表明空间自相关性越强，建成环境变量越呈聚集分布。当其取值接近于0，建成环境变量呈随机分布，不存在自相关性。

2.2　MGWR模型

GWR模型将空间地理数据之间的空间分量嵌入其中，进而探究自变量的空间异质性。然而，该模型仍未考虑异质自变量作用空间尺度不一致的问题，从而导致模型效果产生偏差。针对这一不足，相关学者提出了MGWR模型，该方法在保留GWR对自变量在空间上非平稳的基础上，进一步考虑了尺度效应，允许不同自变量在作用空间尺度上具有差异，从而更深入探究自变量的空间异质性和空间作用尺度。MGWR计算公式为：

$$Y_i=\beta_{bw0}(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{n}\beta_{bwk}(u_i,v_i)X_{ik}+\varepsilon_i \quad (2)$$

式中：Y_i为第i个研究单元的因变量(即研究单元尺度下出租车订单数)；u_i和v_i分别为第i个研究单元质心的经、纬度坐标；$\beta_{bw0}(u_i,v_i)$为第i个研究单元的常数项回归系数，$\beta_{bwk}(u_i,v_i)$为第i个研究单元第k个建成环境变量最优带宽下的回归系数；X_{ik}为第i个研究单元第k个建成环境的变量值；ε_i为残差值。

选取高斯函数作为MGWR模型的核函数以确定空间权重系数，选取黄金搜索算法搜索最佳带宽，以最小赤池信息准则(Akaike information criterion，AIC)为评估指标。MGWR对不同自变量使用不同优化带宽，减少由于自变量作用空间尺度不同所产生的误差。

在此基础上，本文方法充分考虑了前人研究的不足[18]，在MGWR模型中引入了出租车上下车点的建成环境因素，进一步揭示了出发点和到达点的空间异质性。特别地，本研究深入探讨了

上下车点建成环境对出租车出行需求的异质性影响,有助于提高现有研究对出租车起讫点差异化建成环境作用的认识,形成更为系统、完整的理论解释。

2.3 GTWR模型

GWR虽然考虑了空间上自变量存在空间非平稳的特性,但实际上,对于带有时间序列的出租车数据而言,自变量不仅存在空间异质性,同时存在时间异质性,GTWR模型针对这一问题实现优化改进,可同时测量自变量在空间和时间上的变化,有利于探究自变量所存在的时间异质性,即回归系数随时间变化的模式。GTWR的公式为:

$$Y_i=\beta_0(u_i,v_i,t_i)+\sum_{k=1}^{n}\beta_k(u_i,v_i,t_i)X_{ik}+\varepsilon_i \quad (3)$$

式中:t_i为第i个研究单元的时间段;$\beta_0(u_i,v_i,t_i)$为第i个研究单元的常数项系数;$\beta_k(u_i,v_i,t_i)$为第i个研究单元第k个建成环境变量的回归系数。最优时间带宽由AIC最小化准则确定。

GTWR模型核函数同样选取高斯函数,搜索最佳带宽采用两步黄金搜索算法,以同时兼顾时间和空间带宽的最优解。GTWR同时将空间和时间非平稳性纳入模型,由于具有双维度的回归,其运算效率和挖掘空间异质性上效果不如MGWR模型,但其主要是呈现时间异质性。

目前,时空异质性分析大多依赖MGWR模型,在不同时间维度进行分析对比[10,18],或使用GTWR模型分析工作日与非工作日的时空异质性[19]。与此不同,本研究特别使用GTWR模型,深入探讨建成环境变量在时间维度上的变化特性,GTWR模型能够在一个统一框架内直接捕捉一天中回归系数随时间变化的趋势,从而为建成环境与出租车出行需求之间的关系提供更加全面的理解。

3 结果及分析

3.1 建成环境变量选择

为探讨城市建成环境对出租车出行需求的影响,本文以每个研究单元出租车订单数量作为因变量,以研究单元范围内的建成环境要素特征及交通设施特征作为自变量。

首先,对建成环境自变量进行多重共线性分析,对于方差膨胀系数(Variance inflation factor, VIF)大于10的变量使用逐步剔除法,避免自变量因多重共线性问题对回归模型估计结果造成干扰[20]。其次,进行相关系数分析(Pearson correlation coefficient),验证自变量与因变量之间存在的相关性,并进行显著性检验[21],其中星号代表其结果具有显著性。确保建成环境变量与出租车OD点订单量之间具有显著相关性,结果如图4所示。最后,进行空间自相关检验,使用全局莫兰指数Moran's I判断建成环境数据在空间上是否相关[22],通过P检验确保其解释变量在空间自相关上具有显著的统计学意义,并通过Z值判断其空间集聚特征,从而确认变量适用于GWR、MGWR和GTWR等空间回归模型。最终得到2类建成环境变量,13个建成环境指标,其中餐馆、科教文化、政府机构、停车场在空间上呈现显著的空间集聚特征,结果如表1所示。

3.2 建成环境对出租车出行订单的空间异质性分析

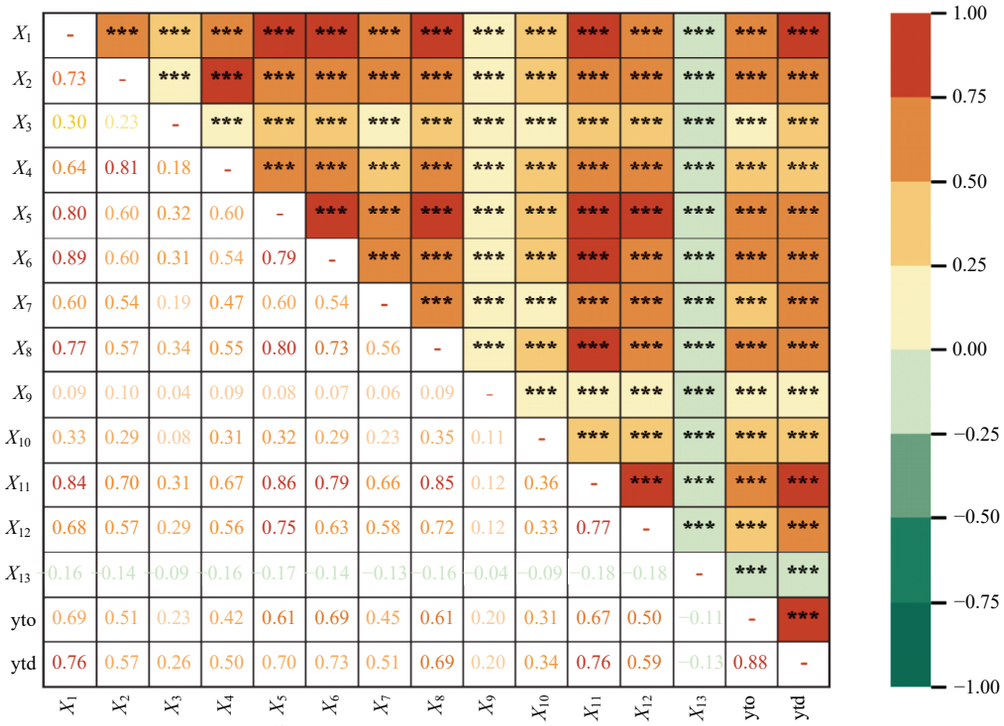
3.2.1 模型效果对比

为探究出租车出行起讫点建成环境对订单量的影响及作用机制,将起讫点数据分别代入回归模型分析。以OLS模型为基准、GWR为参考模型对比各模型的解释力,结果如表2所示。建成环境变量对出租车下客点需求的回归效果略优于上客点。其中,MGWR可针对不同变量调节空间带宽,拟合度R^2最高、AIC值最小,模型效果最优。相较于OLS和GWR模型,R^2分别提升约30%和15%。

3.2.2 MGWR模型带宽及显著性分析

由于MGWR模型确定的各建成环境带宽不一致,使其能够反映不同建成环境变量的差异化作用,结果如表3所示。对于MGWR_O模型,餐馆、购物场所、公司企业、体育休闲、政府机构、大型交通枢纽、地铁站点、停车场数量的带宽占总体样本的1.12%~26.42%,这8个变量为局部空间作用尺度关系,其变量对出租车上客点订单数量在不同位置具有显著的异质性,超出该作用尺度后,系数会发生明显变化。医疗机构和科教文化变量作用尺度为全局尺度,不具有空间异质性,回归系数在空间表现平稳,其作用效果对全局具有相同效果。同时,公交站点和道路长度对出租车上客点需求不具有明显显著性。

对于MGWR_D模型,到达点周围建成环境对出租车上客点需求的空间异质性就略有不同,



注：'*'：p<0.05，'**'：p<0.01，'***'：p<0.001

图 4　变量相关系数热力图

Fig. 4　Variable correlation coefficient heat map

表 1　建成环境变量 VIF 值及 Moran's I 检验

Table 1　VIF values of built environment variables and Moran´s I test

变量	维度	变量名称	变量描述（个/km^2）	VIF	Moran's I	Z	P
自变量	土地利用	餐饮 X_1	研究单元内餐馆数量	7.548	0.673	72.577	0.00***
		购物场所 X_2	研究单元内购物场所数量	4.027	0.564	60.785	0.00***
		公园景点 X_3	研究单元内公园景点数量	1.158	0.219	23.681	0.00***
		公司企业 X_4	研究单元内公司企业数量	3.288	0.624	67.336	0.00***
		科教文化 X_5	研究单元内科教文化场所数量	5.033	0.730	78.682	0.00***
		体育休闲 X_6	研究单元内体育休闲数量	5.343	0.565	60.954	0.00***
		医疗机构 X_7	研究单元内医疗机构数量	1.866	0.403	43.453	0.00***
		政府机构 X_8	研究单元内政府机构数量	4.174	0.753	81.154	0.00***
	公共交通设施	大型交通枢纽 X_9	研究单元内机场、高铁站、汽车站、渡口总数量	1.030	0.213	23.062	0.00***
		地铁站点 X_{10}	研究单元内地铁站点数量	1.188	0.187	20.214	0.00***
		停车场 X_{11}	研究单元内停车场数量	7.450	0.806	86.940	0.00***
		公交站 X_{12}	研究单元内公交站点数量	2.853	0.656	70.781	0.00***
		道路长度 X_{13}	研究单元内道路长度/(m•km^{-2})	1.044	0.442	47.641	0.00***
因变量		O 点订单 yto	21 天出租车起始点订单总数量				
		D 点订单 ytd	21 天出租车到达点订单总数量				

注：***表示变量显著性<0.001。

表 2　模型计算结果

Table 2　Model calculation results

模型	R^2	AIC
OLS_O	0.565	1 002 000
OLS_D	0.669	941 100
GWR_O	0.739	60 037
GWR_D	0.822	57 308
MGWR_O	0.910	2 205
MGWR_D	0.928	1 359

到达点公司企业和体育休闲空间异质性显著减弱，带宽占比分别为 76.6% 和 100%，即在全局范围内，到达点周围公司企业数量和体育休闲服务数量对出租车需求影响不敏感。到达点公园景点的空间异质性增强，到达点公交站点的空间异质性明显，表明到达点周围公交站数量会显著影响乘客是否到达该区域。其中，起讫点道路长度带宽占比为 100%，但未通过显著性检验，其结果不做参考。

表3 MGWR模型OD带宽及显著性结果

Table 3 OD bandwidth and significance results of MGWR model

变量	MGWR_O		MGWR_D	
	带宽(占比/%)	显著数(占比)/%	带宽(占比)/%	显著数(占比)/%
餐饮X_1	57(1.73)	388(11.74)	89(2.69)	954(28.87)
购物场所X_2	631(19.10)	2 550(77.18)	631(19.10)	1 834(55.51)
公园景点X_3	2 826(85.53)	3 304(100.00)	1 281(38.77)	1 380(41.77)
公司企业X_4	213(6.45)	1 725(52.21)	2 531(76.60)	3 304(100.00)
科教文化X_5	3 304(100.00)	3 304(100.00)	3 304(100.00)	3 304(100.00)
体育休闲X_6	256(7.75)	2 108(63.80)	3 304(100.00)	3 304(100.00)
医疗机构X_7	3 304(100.00)	3 304(100.00)	3 304(100.00)	3 304(100.00)
政府机构X_8	690(20.88)	1 459(44.16)	1 871(56.63)	2 822(85.41)
大型交通枢纽X_9	189(5.72)	1 459(44.16)	189(5.72)	1 726(52.24)
地铁站点X_{10}	37(1.12)	171(5.18)	37(1.12)	156(4.72)
停车场X_{11}	873(26.42)	3 304(100.00)	803(24.30)	3 304(100.00)
公交站X_{12}	3 009(91.07)	0(0.00)	1 168(35.35)	2 436(73.73)
道路长度X_{13}	3 304(100.00)	0(0.00)	3 304(100.00)	0(0.00)

3.2.3 建成环境变量回归系数空间格局及OD差异

为直观展示建成环境变量回归系数的空间分异特征,本文使用Python对标准化后的回归系数进行空间可视化,结果如图5所示(彩图参见电子版,以下同)。其中,颜色越接近红色,表示其正向影响越大,越接近蓝色,表示其负向影响越大,未上色区域代表其回归系数未通过统计学显著性检验,故不做显示,O点公交站和OD点道路长度的回归系数均未通过显著检验,其结果不做展示。

在土地利用相关变量中,起讫点周围餐饮、购物场所、体育休闲数量对出租车出行需求影响均为正相关,该结论与先前研究一致[23]。如图5(a)所示,餐饮数量越靠近市中心与机场附近,其回归系数越高,且到达点周围餐饮数量对出租车出行需求影响范围越广,这可能与大部分居民在就餐后倾向于选择出租车出行有关。如图5(b)所示,购物场所整体以市中心为核心,向五华区辐射,其附近有大型商圈如同德广场、顺城商业中心等,居民购物活跃程度较高,影响因素随距离市中心的距离递减。如图5(f)所示,出发点体育休闲具有空间异质性,整体由市中心向边缘衰减,但到达点周围体育休闲服务数量不具有空间异质性,空间尺度为全局尺度,表明在昆明市主城区全区域上体育休闲数量增多,出租车订单行驶至该区域的可能性增大。

如图5(c)(d)(e)(g)所示,起讫点周围公园景点、公司企业、科教文化、医疗机构数量对出租车出行需求影响均为负影响。其中,科教文化和医疗机构为全局尺度,对出租车出行需求具有负面影响,居民不愿意从学校、教育机构、药店、医院等机构附近选择出租车出行。公司企业越靠近市中心密集区域,附近居民使用出租车出行意愿越弱,公司企业在到达点附近存在会产生负向影响,且不具有空间异质性,这意味着在昆明市范围内,当到达点附近有公司或企业时,出租车的订单量会减少。若将公司企业密集区作为目的地时,居民出行至该区域意愿减弱,这是由于该地区人员密集,交通状况差。如图5(h)所示,在靠近官渡区长水机场附近的政府机构相比市中心政府机构居民更倾向于出租车出行,整体回归系数为-0.198至0.254。同时,在交通基础设施变量的空间异质性作用中,道路长度对出租车出行需求影响不具有显著性,其余交通基础设施变量均对出租车出行具有正向影响,表明交通基础设施完善程度的提高总体上有助于促进出租车出行需求。

如图5(k)所示,在交通基础设施中,停车场数量对出租车出行需求影响最大,其回归系数介于0.374与0.429之间,这是因为出租车司机更倾向于在有停车场的区域运营,因为他们需遵守交通规则,禁止在禁停路段或未经允许的地点停车揽客,违规停车揽客会受到罚款等处罚。如图5(i)所示,大型交通枢纽在市中心密集区域影响程度弱于边缘区域,如高铁站、机场等,这是因为在市中心附近有更多的交通出行方式可以选择,但在距离市中心较远区域,交通方式单一,公交地铁等公共交通方式无法达到或所花费时间较长,此时居民更会偏向选择出租车出行。如图5(j)所示,在市中心地铁站密集区域,出租车出行呈现正相关,说明此地区地铁出行与出租车出

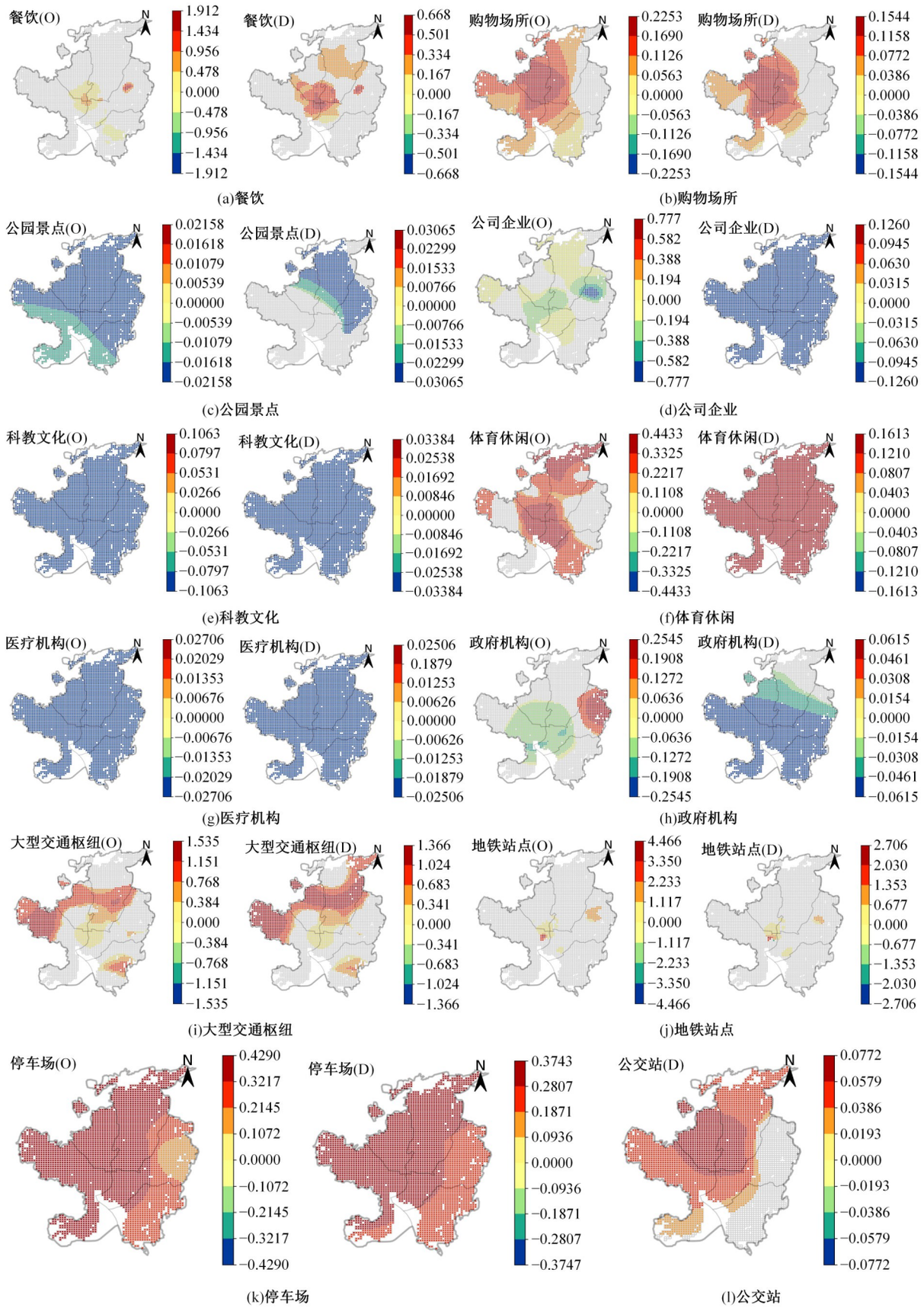


图 5　起讫点建成环境变量回归系数空间格局

Fig. 5　Spatial regression coefficient of origin-destination built environment

行在一定程度上存在合作关系。如图5(1)所示,在起始点区域公交站点数量对出租车出行需求空间上不具有显著特征,这是因为其不存在竞争或者合作关系,出行群体不存在重叠,但在到达点区域,若存在公交站点,对出租车订单具有促进作用。

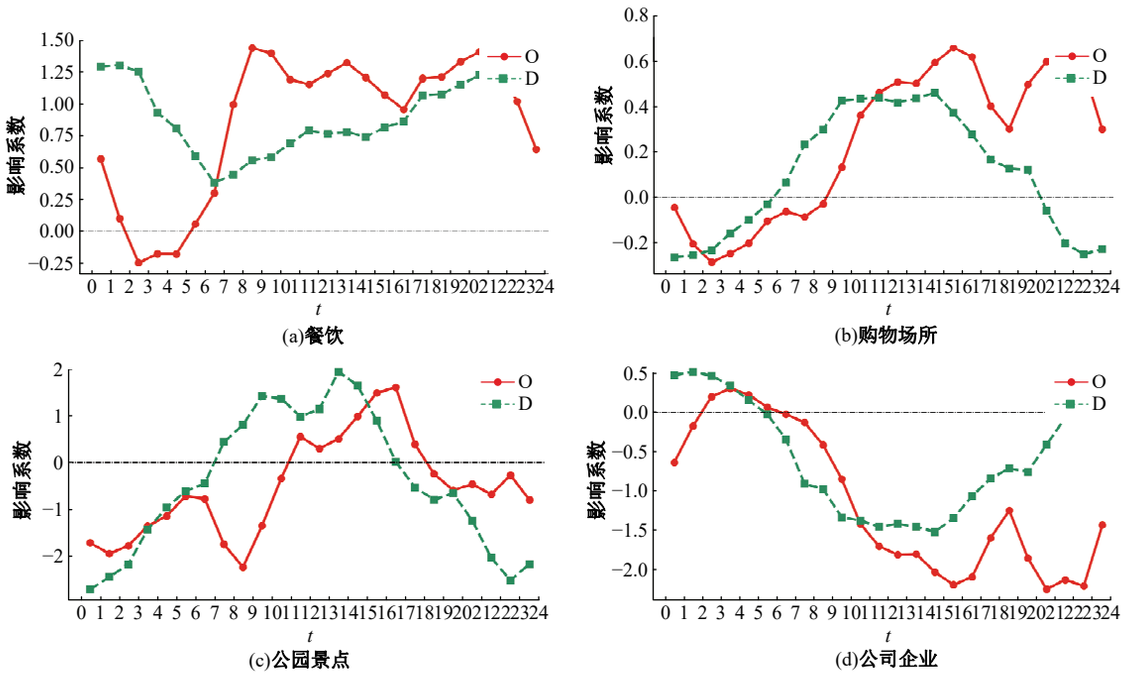
3.3 建成环境对出租车出行订单的时间异质性分析

GTWR模型在考虑空间异质性的基础上同时考虑时间异质性及其动态变化特征,相比GWR模型具有探究不同建成环境变量在异质时间上影响程度的优点,时间异质性是指各建成环境变量的回归系数随时间变化而不同,该模型可以捕捉到因变量与自变量之间关系随时间的变化。因此,将出租车出行订单按起始点和到达点的出行订单数量均划分为24个时间段,划分标准以出发时间为准则,即乘客乘车时其起讫点已经确定,加入时间维度后共计79 296行,GTWR_O模型和GTWR_D模型结果拟合优度分别为70.8%和79.5%,出发点AIC值和BIC值分别为969 945.60和968 251.58,到达点AIC值和BIC值分别为901 546.80和899 852.78,到达点的AIC和BIC值均比出发点低,这表明GTWR_D模型在考虑复杂度的情况下,具有更好的拟合效果。AIC和BIC的差异说明到达点的时空模式能够更有效地被模型捕捉。以单位小时为间隔计算回归系数平均值,得到建成环境变量回归系数的小时分布曲线图,如图6所示。

土地利用变量的时间异质性影响作用揭示了更为细致出租车出行需求变化。特别地,土地利用建成环境在时间上呈现显著差异,在不同时段对出租车出行订单影响均有正负异质相关性。整体上分析,土地利用因素对出租车出行需求影响并不是在全天呈现单一的正向影响或负向影响,特别是在晚间至凌晨期间,土地利用对出租车需求呈现不同程度的负向影响,这些地区的出租车出行所呈现的城市互动活力逐渐减弱。

餐饮、购物场所、公园景点、科教文化、政府机构对出租车出行需求的影响在早高峰开始至午间出现显著上升,在下午至晚间凌晨出现不同程度下降。公司企业、医疗机构呈现出相反趋势,其在晚间和凌晨期间对出租车出行呈现促进作用,这种现象表明,对于公司通勤及就医人群在晚间有较为明显的出租车出行需求。值得注意的是,在夜间20:00点过后,与在医疗场所选择出租车出行相比,居民选择出租车至医院等医疗场所的需求显著增加,表明在夜间居民就医需求的紧迫性以及对出行舒适性的重视,而出租车服务此时正好提供了必要的便利。

然而,在交通基础设施变量的时间异质性作用中,其影响机制却有所不同。在研究时段内,大型交通枢纽、地铁站点、停车场对出租车出行产生显著正相关。具体地,在早高峰期间,居民选择出行至大型交通枢纽、地铁站点的意愿会显著大于从这些地方出发,揭示了居民在早高峰期间对于



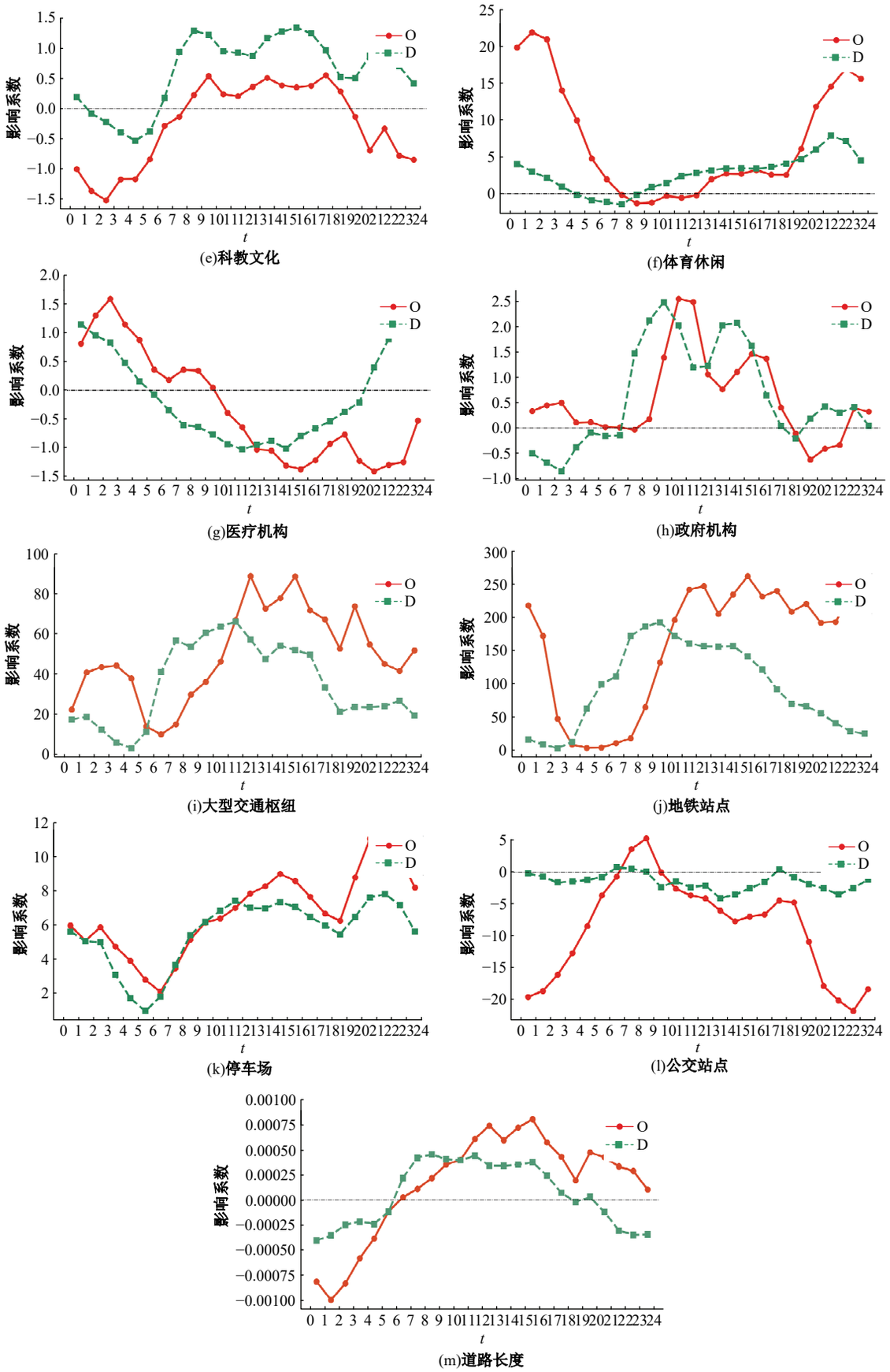


图 6　起讫点建成环境变量回归系数时间分异

Fig. 6　Time regression coefficients of OD built environment variables

高效交通接驳具有明显需求。在早高峰期间,起讫点附近停车场对出租车订单的影响差异不明显。早高峰过后,出发点回归系数大于到达点,这表明在午后,重要交通枢纽区域出租车出行需求呈现上升趋势。

公交站点在全天大部分时间对出租车出行产生负面影响,产生这种现象的原因是公交车与出租车出行关系中呈现复杂的竞争关系,值得注意的是,在早高峰期间,由于出行量激增,仅在此时公共交通与出租车存在部分合作关系,共同承担一部分交通流量。此外,道路长度可能在某种程度上促进日间出租车出行,但这种影响程度较弱。

3.4 建成环境对出租车OD出行需求的时空综合效应分析

为进一步探究建成环境对出租车OD出行需求的时空综合效应,将研究时间聚焦于早高峰(7:00~9:00)和晚高峰(17:00~19:00)两个关键时段,并以30 min划分时间粒度,分析在这两个高峰期内,建成环境的作用机制如何随着时空变化而演化。在此过程中,选取了两个关键的建成环境变量,包括大型交通枢纽、地铁站点和停车场,分析其对OD出行需求的时空综合效应,进一步挖掘公交站与出租车的复杂时空交互模式。并对回归系数进行显著性检验,使用协方差矩阵的对角线元素计算每个系数的标准误差,并通过Z值判断某个回归系数是否显著,如果不显著则对该部分进行灰色显示,颜色代表回归系数时空综合分析结果,如图7、图8和图9所示。

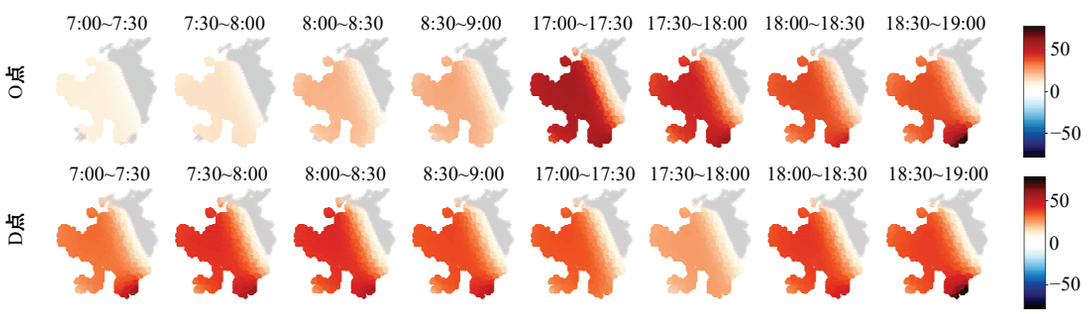


图7 OD点大型交通枢纽对出租车出行需求的时空影响

Fig. 7 Spatiotemporal impact of major transportation hubs on taxi travel demand at OD points

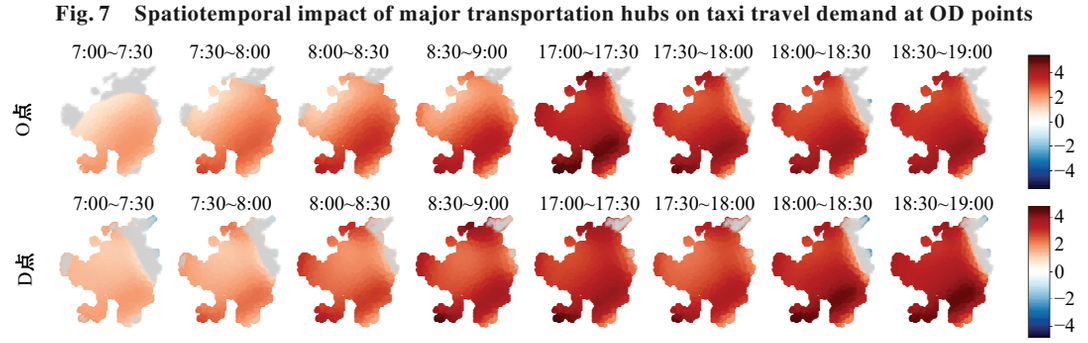


图8 OD点停车场对出租车出行需求的时空影响

Fig. 8 Spatiotemporal impact of parking lots on taxi travel demand at OD points

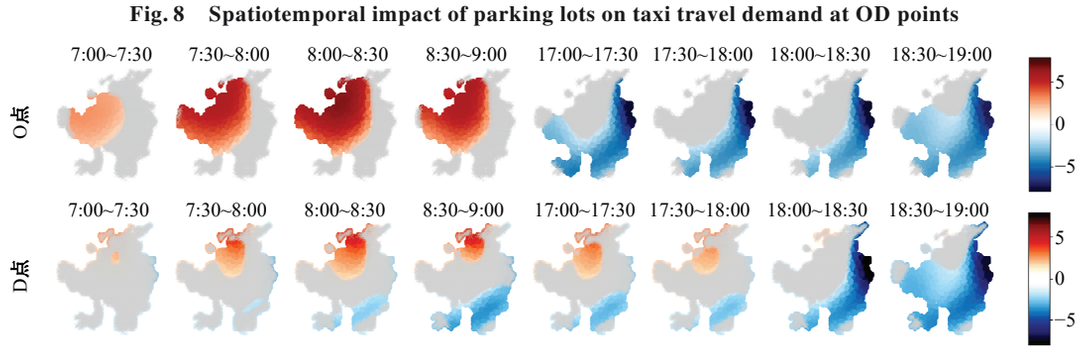


图9 OD点公交站对出租车出行需求的时空影响

Fig. 9 Spatiotemporal impact of bus stops on taxi travel demand at OD points

如图7所示，在早高峰期间，大型交通枢纽对出租车出行需求的影响表现出明显的时空差异。具体而言，到达点附近的大型交通枢纽会显著促进出租车订单需求，表明早高峰时段乘客更倾向于通过出租车前往机场、高铁站等综合交通枢纽。相比之下，出发点附近大型交通枢纽对出租车需求的促进作用相对较弱，这与早高峰期间由交通枢纽出发的乘客数量较少有关；在晚高峰期间，情况与早高峰截然不同，此时出发点附近的大型交通枢纽对出租车出行需求的促进作用显著增强，说明晚高峰期间，许多乘客选择从大型交通枢纽离开，并通过出租车前往其他目的地。而到达点附近的大型交通枢纽在晚高峰时的影响则不太明显，表明较少乘客选择在晚高峰期间抵达大型交通枢纽附近。

如图8所示，早高峰期间停车场对出租车出行需求的促进作用逐渐增强，影响范围随时间推移逐步扩大。尤其当出发点或到达点位于停车场周边时，居民更可能将出租车作为接驳或延伸出行方式，从而带动出租车订单需求增长；晚高峰期间，停车场对出租车需求的促进作用更加明显，影响力在晚高峰时段达到顶峰，相比于O点，D点对乘客吸引力更大，说明出租车更倾向于在具备停车条件和上下客便利性的区域完成落客行为。

如图9所示，公交站点对出租车出行需求的时空影响具有较强的阶段性和方向性差异。从出发点来看，早高峰期间公交站点数量对出租车订单需求具有一定促进作用，尤其在7:00～8:00期间，其影响强度逐步增强、影响范围持续扩大，并在8:00～8:30达到峰值。这表明早高峰时段公交站点周边集聚了较强的出行需求，公交与出租车之间存在一定的接驳互补关系，乘客会根据出行距离、时间成本和换乘便利性选择多种交通方式组合出行。相比之下，晚高峰期间公交站点与出租车需求之间的竞争关系更加突出，尤其在机场周边区域表现明显。随着时间的推移，竞争影响范围不断扩大，公交站点的存在持续抑制出租车到达需求，说明该区域公共交通与出租车之间存在较为明显的替代效应。此外，早高峰期间，靠近市中心区域的公交站点对出租车到达需求具有一定促进作用，但影响程度相对较弱，这种协同作用在出发点区域表现更为明显。

4　结　论

(1)出租车出行反映了居民的出行意愿，不仅表现为起点和终点在城市不同区域的空间集聚特性，同时也体现出居民使用出租车的时间偏好。相比于到达点，出租车出发点的空间集聚程度更高，尤其是在晚间21:00～22:00，出行需求达到峰值，而在凌晨5:00～6:00时降至最低。

(2)MGWR模型结果表明，其整体拟合效果优于OLS模型和GWR模型。在评估建成环境变量空间异质性时，起讫点的科教文化设施和医疗机构在空间上的异质性不显著，其余变量则具有显著的空间异质性。但针对同一变量时，起讫点建成环境变量所呈现的空间异质具有相反的结果。如到达点公园景点的空间异质性相比出发点显著增强，而公司企业和体育休闲在到达点附近的空间异质性减弱。在分析出租车出行需求的重要因素中，大型交通枢纽、地铁站点、餐饮和停车场被证实为核心因素，其中，交通基础设施的丰富程度显著地促进了出租车出行需求。

(3)GTWR模型进一步揭示了建成环境变量对出租车出行需求影响的时间异质性。土地利用因素在日间对出租车出行具有一定程度的促进作用，而晚间这些地区的吸引力逐渐减弱。在交通基础设施方面，大型交通枢纽、地铁站点、停车场对出租车出行需求呈显著正相关，在早高峰期间，居民倾向于前往至机场、高铁站、地铁站等区域。

(4)通过对早晚高峰进行30 min的时空综合分析发现，大型交通枢纽在不同时段对出租车出行需求具有显著的时空差异：早高峰期间，交通枢纽对到达点需求的促进作用明显，乘客大多通过出租车抵达枢纽；而晚高峰期间，出发点附近的交通枢纽对出租车需求有较大促进作用，反映出乘客离开枢纽的需求旺盛。停车场则对出发点和到达点的出租车需求均有显著促进作用，尤其是在晚高峰，停车场的影响达到顶峰，且到达点的影响强于出发点。公交站点在早高峰时与出租车需求存在一定的合作关系，特别是在出发点，公交站促进了出租车订单；而在晚高峰，尤其是机场周边区域，公交站与出租车订单呈现出显著的竞争关系，说明公交与出租车之间存在一定的替代效应。

参考文献：

[1] 马健霄，赵飞燕，尹超英，等. 建成环境和出租车需

求对网约车出行需求影响的时空间分异模式[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 136-145.
Ma Jian-xiao, Zhao Fei-yan, Yin Chao-ying, et al. Spatial-temporal heterogeneity effects of built environment and taxi demand on ride-hailing demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 136-145.

[2] Ghaffar A, Mitra S, Hyland M. Modeling determinants of ride sourcing usage: a census tract-level analysis of Chicago[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 119: No. 102769.

[3] 庄浩铭, 刘小平. 基于出租车轨迹数据的城市空间结构变化研究——以深圳市为例[J]. 热带地理, 2020, 40(2): 217-228.
Zhuang Hao-ming, Liu Xiao-ping. Identifying changes in urban spatial structure using taxi trajectory data: a case study in Shenzhen[J]. Tropical Geography, 2020, 40(2): 217-228.

[4] 郑晓琳, 刘启亮, 刘文凯, 等. 智能卡和出租车轨迹数据中蕴含城市人群活动模式的差异性分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(6):1268-1281.
Zheng Xiao-lin, Liu Qi-liang, Li Wen-kai, et al. Discovery of urban human mobility patterns from smart card transactions and taxi GPS trajectories: a comparative study[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(6): 1268-1281.

[5] 戢晓峰, 邓若凡, 乔新, 等. 建成环境对共享单车时间集聚模式的非线性影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2025, 55(7): 2233-2242.
Ji Xiao-feng, Deng Ruo-fan, Qiao Xin, et al. Nonlinear influence of built environment on temporal aggregation modes of shared bicycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(7): 2233-2242.

[6] 陈启香, 吕斌, 陈喜群, 等. 空间异质性建成环境对出租车与地铁竞合关系的影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 25-35.
Chen Qi-xiang, Lv Bin, Chen Xi-qun, et al. Impacts of built environment on competition and cooperation relationship between taxi and subway considering spatial hetero geneity[J]. Journal of Transportation Systems Engineer ing and Information Technology, 2022, 22(3): 25-35.

[7] 彭诗尧, 陈绍宽, 许奇, 等. 基于POI的土地利用与轨道交通客流的空间特征[J]. 地理学报, 2021, 76(2): 459-470.
Peng Shi-yao, Chen Shao-kuan, Xu Qi, et al. Spatial characteristics of land use based on POI and urban rail transit passenger flow[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(2): 459-470.

[8] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: a synthesis[J]. Transportation Research Record, 2001, 1780(1): 87-114.

[9] 关昊天, 戢晓峰, 李武, 等. 建成环境对共享单车与地铁组合出行的影响关系[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(4): 200-211.
Guan Hao-tian, Ji Xiao-feng, Li Wu, et al. Influence of built environment on integrated use of bike sharing and metro[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 200-211.

[10] 潘义勇, 徐家聪, 尤逸文, 等. 网约车出行需求影响因素多尺度空间异质性分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2025, 55(5): 1567-1575.
Pan Yi-yong, Xu Jia-cong, You Yi-wen, et al. Multi-scale spatial heterogeneity analysis of influencing factors of ride-hailing travel demand[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(5): 1567-1575.

[11] 任鹏, 彭建东, 杨红, 等. 武汉市轨道交通站点周边地区职住平衡与建成环境的关系研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1231-1245.
Ren Peng, Peng Jian-dong, Yang Hong, et al. Relationship between jobs-housing balance and built environment in areas around urban rail transit stations of Wuhan[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(7): 1231-1245.

[12] 李欣然, 贺日兴, 姜超, 等. 北京市出租车OD流多尺度空间预测深度重力模型及其可解释性研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(6): 1390-1406.
Li Xin-ran, He Ri-xing, Jiang Chao, et al. A multi-scale spatial prediction model for taxi OD flow based on deep gravity and its interpretability research in Beijing[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(6): 1390-1406.

[13] 李琪琳, 鹿应荣, 丁川, 等. 城市建成环境对出租车出行需求影响研究——基于空间溢出效应的分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 39-44.
Li Qi-lin, Lu Ying-rong, Ding Chuan, et al. Analysis of the impact of built environment on taxi travel demand considering spatial spillover effect[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 39-44.

[14] Wang S, Noland R B. Variation in ride-hailing trips in Chengdu, China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 90:

No. 102596.

[15] 李想, 晏启鹏, 骆晨. 空间异质性建成环境对地铁与公交换乘客流的影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 100-110.
Li Xiang, Yan Qi-peng, Luo Chen. Impact of built environment on flow of transfer passengers between subway and bus considering spatial heterogeneity[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(2): 100-110.

[16] 王健宇, 陈献天, 焦朋朋, 等. 考虑建成环境的交通事故严重程度致因交互效应研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(2): 272-280.
Wang Jian-yu, Chen Xian-tian, Jiao Peng-peng, et al. Interactive effect on traffic accident severity considering built environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(2): 272-280.

[17] 冼浩然, 江昊, 廖娟, 等. 基于Transformer的出租车轨迹预测方法研究[J]. 武汉大学学报: 2025, 58(2): 306-315.
Xian Hao-ran, Jiang Hao, Liao Juan, et al. Study on taxi trajectory prediction method based on transformer [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025, 58(2): 306-315.

[18] 马健霄, 印杰祥, 邵春福, 等. 时空异质性建成环境对出租车出行需求影响[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(1): 119-127.
Ma Jian-xiao, Yin Jie-xiang, Shao Chun-fu, et al. The spatiotemporal heterogeneity of the impact of the built environment on taxi travel demand[J], Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(1): 119-127.

[19] 李聪颖, 吴佳西, 张洪涛, 等. 建成环境对城市机动车出行时空异质影响研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(4): 52-66.
Li Cong-ying, Wu Jia-xi, Zhang Hong-tao, et al. Spatio-temporal heterogeneous effects of built environment on urban motorized travel[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2024, 22(4): 52-66.

[20] 马君泽, 郑长江, 吴非, 等. 面向地铁站点的共享单车接驳出行特征及影响因素分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(8): 2639-2650.
Ma Jun-ze, Zheng Chang-jiang, Wu Fei, et al. Analysis of characteristics and influencing factors of dockless bike sharing connected to metro[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(8): 2639-2650.

[21] 龙雪琴, 赵欢, 周萌, 等. 成都市建成环境对网约车载客点影响的时空分异性研究[J]. 地理科学, 2022, 42(12): 2076-2084.
Long Xue-qin, Zhao Huan, Zhou Meng, et al. Spatiotemporal heterogeneity of the impact of built environment in Chengdu on online car-hailing passengers′ pick-up points[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(12): 2076-2084.

[22] Vandenbulcke G, Dujardin C, Thomas I, et al. Cycle commuting in Belgium: spatial determinants and ′re-cycling′ strategies[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(2): 118-137.

[23] 程小云, 张学宇, 施澄, 等. 基于多源数据的夜间出行需求空间效应及其异质性分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 288-301.
Cheng Xiao-yun, Zhang Xue-yu, Shi Cheng, et al. Analysis of spatial effect and its heterogeneity on night-time travel based on multi source data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 288-301.