

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.016

# 基于GWR的建成环境对公共自行车出行模式的影响分析

王涛<sup>1,2</sup>, 戢晓峰<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 重庆市交通规划研究院, 重庆 401120)

**摘要:**为分析建成环境对公共自行车出行模式的影响,文章结合公共自行车运营数据和建成环境数据,以公共自行车站点为中心建立缓冲区并提取缓冲区内兴趣点(point of interest, POI),在考虑POI规模的基础上划分站点类型;根据站点类型对出行起讫点(origin-destination, OD)分类,以OD类型确定公共自行车出行模式,使用地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型,分析建成环境对公共自行车出行模式的影响;以昆明市为例进行实证分析。结果表明:昆明市公共自行车出行模式可划分为16种,OD皆为住宅主导型和公司(企业)主导型站点的出行模式约占69.26%;建成环境对不同出行模式的影响效应存在差异;土地利用混合度是公共自行车出行模式的主要影响因素。研究结果可为公共自行车布局优化及运营管理提供参考。

**关键词:**城市交通;公共自行车;出行模式;地理加权回归(GWR);建成环境

**中图分类号:**U484 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)07-0963-09

## Impact of built environment on public bicycle travel patterns based on geographically weighted regression

WANG Tao<sup>1,2</sup>, JI Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China; 2. Chongqing Transport Planning Institute, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** This paper explores the impact of the built environment on the travel patterns of public bicycles. Combined with the public bicycle usage data and built environment data, a buffer zone centered on public bicycle station was established, and the points of interest (POIs) in it were extracted. Based on the scale differences of POIs, the station type was divided. Then the origin-destination (OD) data of public bicycle was classified according to the types of stations. And the public bicycle travel patterns were defined by OD properties. Finally, geographically weighted regression (GWR) model was used to analyze the impact of the built environment on public bicycle travel patterns. An empirical study on Kunming City was conducted, and the results show that there are 16 public bicycle travel patterns in Kunming City, and the proportion of travel patterns that both OD are residential-led and company-led stations is 69.26%; the built environment has different effects for different travel patterns; land use mix is the chief factor influencing public bicycle travel patterns. The research results can provide reference for the optimization of public bicycle layout and operations management.

**Key words:** urban traffic; public bicycle; travel pattern; geographically weighted regression (GWR); built environment

**收稿日期:**2021-10-26; **修回日期:**2022-07-24

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(42061030); 云南省交通运输厅科技创新及示范资助项目(2021-86-4)

**作者简介:**王涛(1997—),男,重庆市人,昆明理工大学硕士生,重庆市交通规划研究院助理工程师;

戢晓峰(1982—),男,湖北随州人,博士,昆明理工大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: yiluxinshi@sina.com.

## 0 引言

城市公共自行车作为一种绿色、低碳的交通工具,可以有效地接驳其他公共交通方式,节省出行时间、减少噪声和空气污染<sup>[1]</sup>,在解决交通拥堵等问题中发挥了重要作用,成为城市交通可持续发展策略的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>。但是,公共自行车出行模式呈多样化发展态势,其运营过程中出现了时空失衡现象<sup>[4-5]</sup>、其服务水平和出行者满意度下降等问题。随着无桩共享单车的发展,其分布广泛、使用方便等特点为公众提供了更好的出行体验,为解决城市交通“最后一公里”问题提供了新的方案<sup>[6]</sup>,相关研究逐渐成为热点。但共享单车随处停放、占用城市其他公共空间等问题日益严重。因此,深入研究有桩公共自行车使用特征及影响机制,优化公共自行车布局,对于城市交通规划与管理具有重要的现实意义。

目前,国内外公共自行车相关研究主要集中在服务能力与满意度<sup>[4]</sup>、站点布局与车辆优化分配调度<sup>[7]</sup>和公共自行车出行行为<sup>[8-10]</sup>等方面。其中,公共自行车出行行为研究主要采用问卷数据,分析公共自行车的出行特征及影响因素,如文献<sup>[11]</sup>对太原市公共自行车用户的个体特征和出行行为特征开展调查,通过因子分析发现,公共自行车使用需求主要受服务质量、推广力度和用户社会经济属性的影响。随着公共自行车刷卡数据的使用,公共自行车出行行为得到多层次解析,如文献<sup>[12]</sup>使用杭州市公共自行车刷卡数据,从使用量、使用时长、周转率等方面分析公共自行车出行行为。上述对公共自行车出行行为的相关研究结果表明,城市空间结构对公共自行车使用特征影响显著,因此建成环境与公共自行车使用特征之间存在一定的关联。近年来,研究者开始将建成环境数据引入相关研究<sup>[13-15]</sup>。文献<sup>[16]</sup>使用南京市公共自行车刷卡数据及建成环境数据,通过零膨胀负二项模型发现,公共自行车使用频次与建成环境呈显著相关关系,位于居住小区、公交车站、地铁站、公司及公共服务设施附近的站点使用频次更高;文献<sup>[17]</sup>使用空间滞后模型,着重考虑土地利用类型及强度对公共自行车使用的影响机制,发现土地利用密度更高的区域会带来更多的公共自行车出行需求;文献<sup>[18]</sup>以南京市桥北片区为例,研究公共自行车使用特征与建成环境的关系,发现公共自行车使用频次主要受站点附近公共交通、骑行环境和服务设施密度的影响。为

了分析公共自行车出行过程,需要引入出行模式<sup>[19-21]</sup>相关概念,文献<sup>[22]</sup>以出行目的为依据,将公共自行车出行模式划分为“全程模式”“换乘模式”和“往返模式”。关于建成环境对公共自行车出行模式的影响,文献<sup>[23]</sup>运用层次聚类方法识别台北市公共自行车出行模式,采用多项 Logit 回归模型进行分析,结果表明,城市公共自行车出行模式主要受到站点位置、土地利用及公共设施情况等因素的影响。

综上所述,公共自行车出行行为的相关研究主要围绕公共自行车出行特征、使用需求等,或从站点尺度探寻公共自行车使用强度和建成环境之间的关系;关于建成环境对公共自行车使用强度的影响,相关研究多以站点周边的公共设施、人口分布、兴趣点(point of interest, POI)数量、骑行环境等作为影响因子,从不同时间尺度分析其对公共自行车使用率的影响。同时,已有研究对 POI 数据的处理主要以各类 POI 的数量为主,未考虑各类 POI 自身规模差异导致的影响程度差异。此外,对公共自行车出行模式的定义采用主观描述或使用运营数据进行分析归类,无法反映公共自行车出行的完整情况。因此,精确识别公共自行车出行模式,准确捕捉公共自行车出行行为,深入解析建成环境对公共自行车出行模式的影响机制,对于公共自行车的差异化投放具有重要意义。

为了系统分析建成环境对公共自行车出行模式的影响机制,本文以云南省昆明市为例,使用公共自行车运营数据和建成环境数据,划分公共自行车站点类型,识别公共自行车出行模式,并分析建成环境对其影响机制,以期为城市公共自行车的投放、运营和管理提供依据。

## 1 公共自行车出行模式指标选取

### 1.1 公共自行车出行模式测度指标

公共自行车出行模式可以通过出行起终点来定义<sup>[23]</sup>,本文以公共自行车站点用地属性划分出行起讫点(origin-destination, OD)类型,根据 OD 类型确定公共自行车出行模式。在确定站点用地属性时,以公共自行车站点为中心建立缓冲区,并提取缓冲区内 POI,然后根据文献<sup>[24]</sup>的居住用地、工业用地等 5 种用地类型,对应选取缓冲区内交通设施、餐饮等 9 类 POI 为测度指标<sup>[25-28]</sup>,各用地类型对应的 POI 见表 1 所列,最后根据缓冲区内各类 POI 的密度对站点进行聚类,以此确定站点的用地属性。

表 1 出行模式测度指标

用地类型	居住用地	公共管理与公共服务用地	商业服务设施用地	工业用地	交通设施用地
POI	住宅	医疗保健、科教文化、政府及社会团体	生活服务、购物设施、餐饮、金融保险、商务住宿设施	公司(企业)	交通设施

1.2 出行模式影响因素

影响公共自行车出行模式的主要因素包括站点位置、土地利用及公共设施情况等<sup>[22-23]</sup>,为探究影响公共自行车出行模式的关键因素,本文以 1.1 节所述的缓冲区作为基本的研究单元,选取密度、混合度、可达性和骑行环境 4 类变量建立建成环境指标体系,4 类变量的定义见表 2 所列。

表 2 建成环境指标

变量类别	变量	变量含义
密度	临近站点数量/个	研究单元内其他站点数量
混合度	土地利用混合度	包括餐饮、商务住宅等 9 类 POI
可达性	与地铁站的距离/m	站点与最近地铁站之间的距离
	公交站点数量/个 与公交站的距离/m	研究单元内的公交站点数量 站点与最近公交站之间的距离
骑行环境	主干道长度/m	研究单元内主干道总里程
	支路长度/m	研究单元内支路总里程
	人行道长度/m	研究单元内人行道总里程

2 研究方法

2.1 出行模式划分

以公共自行车站点为中心,运用 ArcGIS 软件建立缓冲区,采用空间连接提取缓冲区内 POI,根据缓冲区内各类 POI 的密度,通过 K-means 聚类算法对公共自行车站点进行聚类分析,确定缓冲区内主要的 POI 类型,以此定义站点类型。

根据聚类结果,可将研究区域内的所有公共自行车站点划分为  $n$  个类别( $S_1, S_2, \dots, S_n$ ),根据站点类型,公共自行车出行对应  $n$  类起点( $O_1, O_2, \dots, O_n$ )和  $n$  类终点( $D_1, D_2, \dots, D_n$ ),由此确定  $C_n^1 \times C_n^1$  种公共自行车出行模式。每次公共自行车出行对应 1 种出行模式,使用本文研究的基础数据,可得到本研究所需出行模式频次总量。公共自行车出行模式划分流程如图 1 所示。

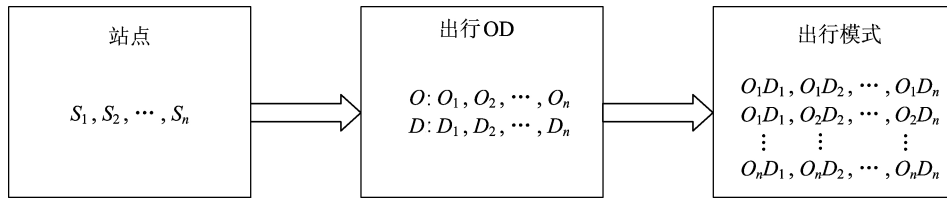


图 1 公共自行车出行模式划分流程

2.2 公共自行车出行模式影响因素评估模型

为了分析建成环境对公共自行车出行模式的影响,使用 ArcGIS 软件空间连接和网络分析等方法提取缓冲区内建成环境因子,以各出行模式的频次作为因变量,以缓冲区内各类建成环境因子为自变量,使用地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型分析影响程度。GWR 模型是体现空间异质性的局部变系数回归模型,可以解决全局回归模型中存在的空间非平稳性问题,并根据样本数据的空间位置信息生成随空间位置变化而变化的局部回归系数,其回归方程为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_m \beta_m(u_i, v_i)x_{im} + \epsilon_i \quad (1)$$

其中: $Y_i$  为以第  $i$  个站点为出行起点的出行频次; $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个站点的经纬度; $\beta_0(u_i, v_i)$  为第  $i$  个

站点的常数项; $\beta_m(u_i, v_i)$  为第  $m$  个解释变量在第  $i$  个站点的回归系数; $x_{im}$  为第  $i$  个站点的第  $m$  个解释变量; $\epsilon_i$  为随机误差。 $\beta_m(\mu_i, v_i)$  为距离衰减函数,采用加权最小二乘法进行计算,计算公式为:

$$\beta_m(u_i, v_i) = [\mathbf{X}^T \mathbf{W}(u_i, v_i) \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}(u_i, v_i) \mathbf{Y} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{X}$  为自变量; $\mathbf{Y}$  为因变量; $\mathbf{W}(u_i, v_i)$  为空间权重矩阵。确定带宽时,本研究采用校正的 Akaike 信息准则 (Akaike information criterion corrected, AICc),选择 AICc 最小值时对应的带宽为最优带宽。AICc 值计算公式为:

$$A = \{2t - 2\ln[L(\hat{\theta}_i, x)]\}/i \quad (3)$$

其中: $A$  为 AICc 值; $t$  为 GWR 模型独立参数数量; $\hat{\theta}_i$  为极大似然估计值; $L(\hat{\theta}_i, x)$  为  $\theta$  的极大似

然函数。

### 3 实证分析

#### 3.1 研究区域及数据来源

1) 研究区域。昆明市作为云南省的省会,是中国西部地区重要的中心城市之一。本文研究区域为昆明市区,自昆明市公共自行车系统投入使用以来,截至 2019 年 3 月底,运营站点发展至 543 个。昆明市区范围及公共自行车站点空间分布如图 2 所示(基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1580 的标准地图绘制,底图边界无修改)。其中,锁止器约为  $1.9 \times 10^4$  个,

累计投放自行车约为  $1.5 \times 10^4$  辆,日均租用量约为  $1.5 \times 10^4$  人次,免费使用率达 98.27%;线上(叮嗒出行 APP)和线下(昆明公交一卡通)相结合的租车方式拓宽了使用人群,1 h 内免费和公交换乘优惠的收费方式提高了公共自行车的吸引力。

2) 数据来源。本文数据主要包含公共自行车运营数据和昆明市建成环境数据 2 类,其中运营数据采集自昆明市公共自行车运营管理有限公司,包含 2019 年 3 月昆明市所有正常使用的记录完整骑行过程的公共自行车数据,具体包含租车卡号,租、还车时间点,租、还车网点名称及编号,车辆编号,使用时长等信息,样例见表 3 所列。

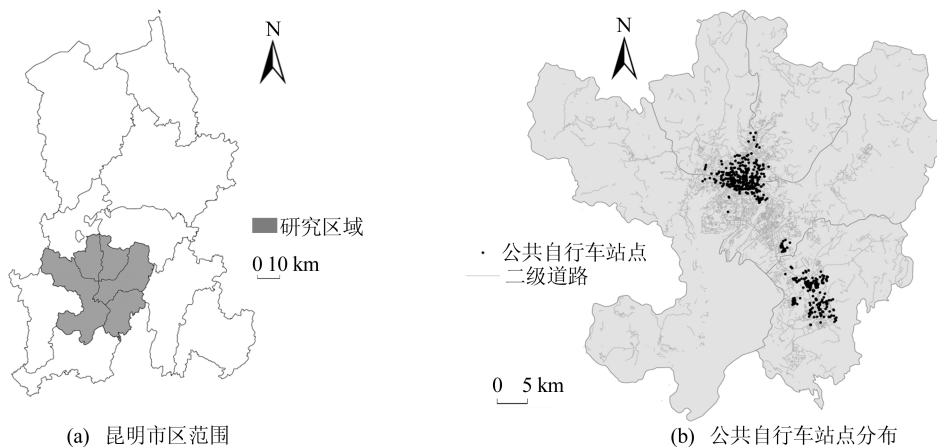


图 2 研究区域及公共自行车站点分布

表 3 公共自行车刷卡数据样例

租车卡号	租车时间点	租车点	车辆编号	还车时间点	还车点	租车点编号	使用时长	还车点编号
u05561385	2019-03-05 23:55:07	东华小区	01711815	2019-03-05 23:58:10	小龙路中段	2139	03 min 03 s	1103
0277184709	2019-03-05 23:46:02	云兴路	01706216	2019-03-06 00:03:28	环城西路	3121	17 min 26 s	3018
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3183071329	2019-03-05 23:11:15	滇池路	01700091	2019-03-05 23:15:08	气象路	3004	03 min 53 s	3119

本文选取天气状况良好的所有租车记录,剔除异常租车数据之后得到 393 099 条骑行数据,将其作为本文研究的基础数据,结合叮嗒出行 APP 和百度地图拾取公共自行车站点经纬度坐标。建成环境数据包括 POI 数据、昆明市道路数据和公共交通基础设施数据等。利用百度地图所提供的开放接口,采集研究区域内所有的空间 POI,根据文献[24]将所有 POI 数据按其功能匹

配 31 类用地性质<sup>[25]</sup>得到 POI 数据。

#### 3.2 公共自行车出行模式

1) 站点类型划分。根据文献[13,27]研究,公共自行车站点的最佳吸引范围为 250~400 m,结合文献[28-29]的研究和样本分布情况,本文以公共自行车站点为中心建立 300 m 缓冲区。采用空间连接提取缓冲区内 POI,结合缓冲区面积和缓冲区内各类 POI 数量计算各类 POI 的密度,

以此为依据采用 *K*-means 聚类算法将昆明市 543 个公共自行车站点分为 4 类,分别为公司(企业)主导型站点、住宅主导型站点、商业服务主导型站点和公共服务主导型站点,见表 4 所列。

2) 出行模式划分。根据聚类结果将昆明市公共自行车出行模式划分为 16 种,根据出行频次计算比例结构,见表 5 所列。从表 5 可以看出,昆明市公共自行车主要出行模式为“公司—公司型”“公司—住宅型”“住宅—公司型”和“住宅—住宅

型”,其余出行模式占比均较小。

表 4 4 类站点数及其比例

站点类型	站点数	比例/%
公司(企业)主导型	187	34.44
住宅主导型	290	53.41
商业服务主导型	38	7.00
公共服务主导型	28	5.16

表 5 16 种出行模式出行频次占比情况

出行模式	公司—公司型	公司—住宅型	公司—商业型	公司—公共服务型	住宅—住宅型	住宅—公司型	住宅—商业型	住宅—公共服务型
占比	10.26	16.60	2.38	2.80	25.90	16.50	2.87	2.78

出行模式	商业—商业型	商业—公司型	商业—住宅型	商业—公共服务型	公共服务—公共服务型	公共服务—公司型	公共服务—住宅型	公共服务—商业型
占比	2.15	2.47	2.92	1.60	2.79	3.23	3.03	1.73

### 3.3 公共自行车出行模式影响因素分析

#### 3.3.1 模型诊断及输出

采用 GWR 模型分析 4 类建成环境因子对公共自行车出行模式的影响程度,考虑到样本量的问题,选取统计结果中占比较高的“公司—住宅型”和“住宅—公司型”出行模式进行分析。在模型拟合前对站点进行筛选,去掉混合程度较高的难以确定其主导类型的站点,得到住宅主导型站点 270 个和公司(企业)主导型站点 172 个。使用 SPSS 软件对所有自变量进行共线性检验,所有影响因子方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)均满足共线性检验,无需剔除变量。使用 ArcGIS 软件分析空间相关性,其中“公司—住宅型”出行模式莫兰指数(Moran's *I*)为 0.055, *Z* 值为 2.629, *P* 值为 0.015;“住宅—公司型”出行模式 Moran's *I* 为 0.080, *Z* 值为 3.922, *P* 值为

0.001。该结果表明,这 2 种出行模式存在较强的集聚性和空间依赖性。在模型诊断指标中, *R*<sup>2</sup> 越大, AICc 值越小,表示解释变量对被解释变量的解释能力越强,诊断结果见表 6 所列。

表 6 GWR 模型诊断结果

出行模式	带宽/m	AICc 值	<i>R</i> <sup>2</sup>	修正后 <i>R</i> <sup>2</sup>
公司—住宅型	1 000	286.84	0.93	0.76
住宅—公司型	400	432.29	0.96	0.41

选取拟合系数的最大值、最小值、均值、最小四分位数、中位数和最大四分位数 6 个指标进行统计描述,当拟合系数为正值时,表明该自变量与因变量正相关;拟合系数为负值时,表明该自变量与因变量负相关。2 种出行模式下 8 个建成环境变量拟合系数描述性统计结果见表 7 所列。

表 7 2 种出行模式下 8 个建成环境变量拟合系数描述性统计结果

出行模式	变量	最大值	均值	最小值	最小四分位数	中位数	最大四分位数
公司—住宅型	临近站点数量	16.185	1.374	-15.119	-1.103	1.113	4.703
	土地利用混合度	291.180	12.325	-187.379	-24.972	1.437	37.943
	与地铁站的距离	0.040	0.002	-0.023	-0.007	0.003	0.008
	公交站点数量	1.730	-0.119	-2.453	-0.413	-0.174	0.182
	与公交站的距离	0.066	0.007	-0.158	-0.023	-0.005	0.093
	主干道长度	0.105	-0.020	-0.158	-0.039	-0.013	0.006
	支路长度	0.042	-0.010	-0.170	-0.029	-0.010	0.028
	人行道长度	0.204	0.020	-0.328	0.008	0.030	0.058

续表

出行模式	变量	最大值	均值	最小值	最小四分位数	中位数	最大四分位数
住宅—公司型	临近站点数量	19.081	0.691	-8.541	0.000	0.001	1.222
	土地利用混合度	187.494	-12.691	-858.192	-6.866	0.005	5.182
	与地铁站的距离	0.065	-0.001	-0.194	-0.001	0.003	0.002
	公交站点数量	0.788	-0.058	-2.645	-0.108	0.037	0.049
	与公交站的距离	0.350	-0.005	-0.410	-0.008	0.007	0.008
	主干道长度	0.633	0.007	-0.315	-0.002	0.022	0.003
	支路长度	0.434	0.003	-0.101	-0.001	0.091	0.003
	人行道长度	0.628	0.003	0.175	-0.003	0.311	0.005

### 3.3.2 拟合系数空间特性

对 8 个建成环境变量分别进行  $p < 0.1$  显著性检验,结果见表 8 所列。由表 8 可知,影响“公司—住宅型”出行模式的关键因素(通过  $p < 0.1$  显著性检验的站点比例超过 40%)为临近站点数量、土地利用混合度、与地铁站的距离、公交站点数量和人行道长度,“住宅—公司型”出行模式的

关键影响因素为临近站点数量、土地利用混合度、公交站点数量、主干道长度和人行道长度,各关键变量的影响程度及显著性存在较大差异。“公司—住宅型”“住宅—公司型”出行模式中分别有平均 69%、73% 的样本参数估计满足  $p < 0.1$ ,说明变量对“住宅—公司型”出行模式的异质性更加显著。

表 8 2 种出行模式下 8 个建成环境变量显著性检验结果

%

出行模式	临近站点数量	土地利用混合度	与地铁站的距离	公交站点数量	与公交站的距离	主干道长度	支路长度	人行道长度
公司—住宅型	47	89	41	71	37	29	18	69
住宅—公司型	50	96	38	62	33	45	24	82

注:表中数据为通过  $p < 0.1$  显著性检验的站点比例。

根据显著性检验结果,选取临近站点数量、土地利用混合度、人行道长度和公交站点数量 4 个关键变量的空间分布进行可视化处理,进一步分析拟合系数的空间特性。

1) 人行道长度。人行道长度拟合系数分布如图 3 所示。人行道长度对 2 种出行模式的影响效应存在显著的空间差异,对“公司—住宅型”出行模式在大部分区域呈正向作用,而对“住宅—公司型”出行模式在大部分区域呈负向作用。这主要是由于人行道条件较好的区域主要分布于行政中心所在的呈贡新区,该区域远离城市商业中心区,平均出行距离相对更远。对远距离出行而言,公共自行车难以满足“住宅—公司型”出行模式的出行需求。

2) 临近站点数量。临近站点数量拟合系数分布如图 4 所示。临近站点数量与 2 种出行模式在大部分区域均呈负向作用。这说明无论是商业中心区域还是行政中心区域,当前公共自行车站点分布可能较为密集,值得注意的是,在公共交通枢纽附近临近站点数量与 2 种出行模式均为正相

关,这说明昆明市公共自行车对公共交通通勤方式存在较好的接驳作用。

3) 公交站点数量。公交站点数量拟合系数分布如图 5 所示。公交站点数量对“公司—住宅型”出行模式主要呈正向作用,而对“住宅—公司型”出行模式主要呈负向作用。这说明公共自行车对“公司—住宅型”出行时长要求较低的出行模式存在更高的吸引力,与公交互为补充;而对“住宅—公司型”出行模式作用效果不明显,与公交互为竞争关系。

4) 土地利用混合度。土地利用混合度拟合系数分布如图 6 所示。土地利用混合度在城市商业中心区域与 2 种出行模式大多呈正向作用,而在行政中心区域多呈负向作用。这表明高土地利用混合度造成的商业中心区域私人汽车和公交出行不便的情况为公共自行车提供了较好的骑行条件,有利于公共自行车出行。此外已有研究表明,城市中的低收入人群工作、生活、娱乐大多集聚于高密度低档空间<sup>[12]</sup>,因此公共自行车这种低消费的出行方式是此类低收入人群较好的选择。

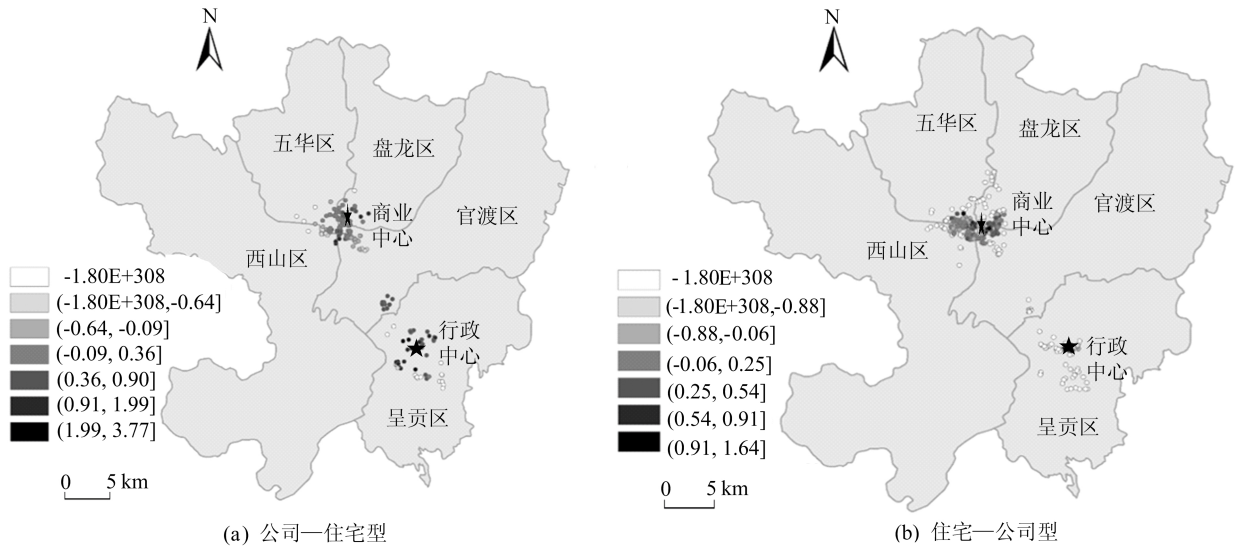


图 3 人行道长度拟合系数分布

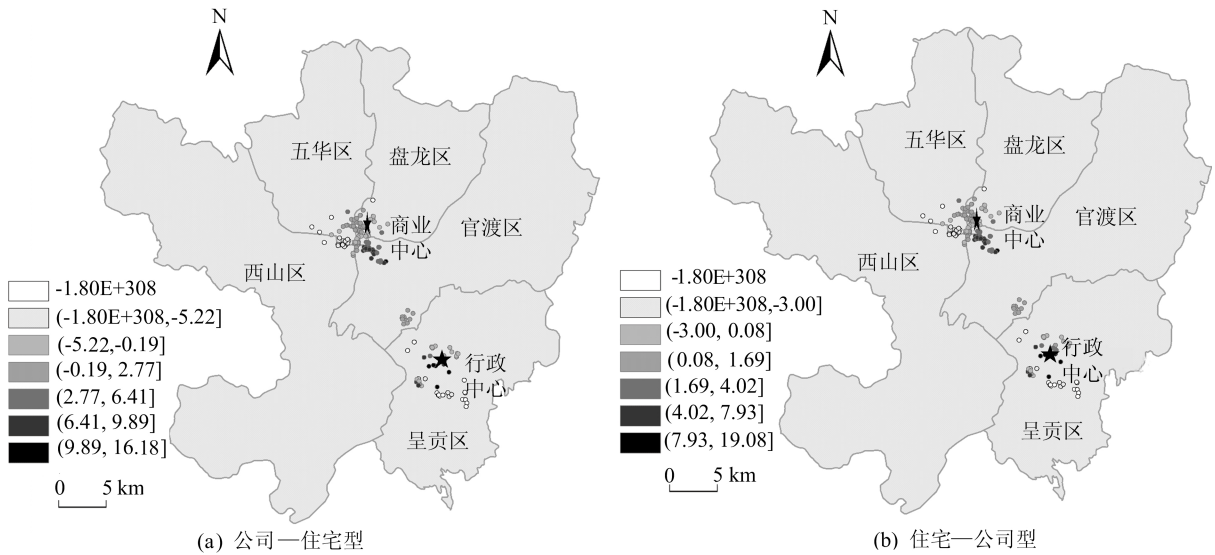


图 4 临近站点数量拟合系数分布

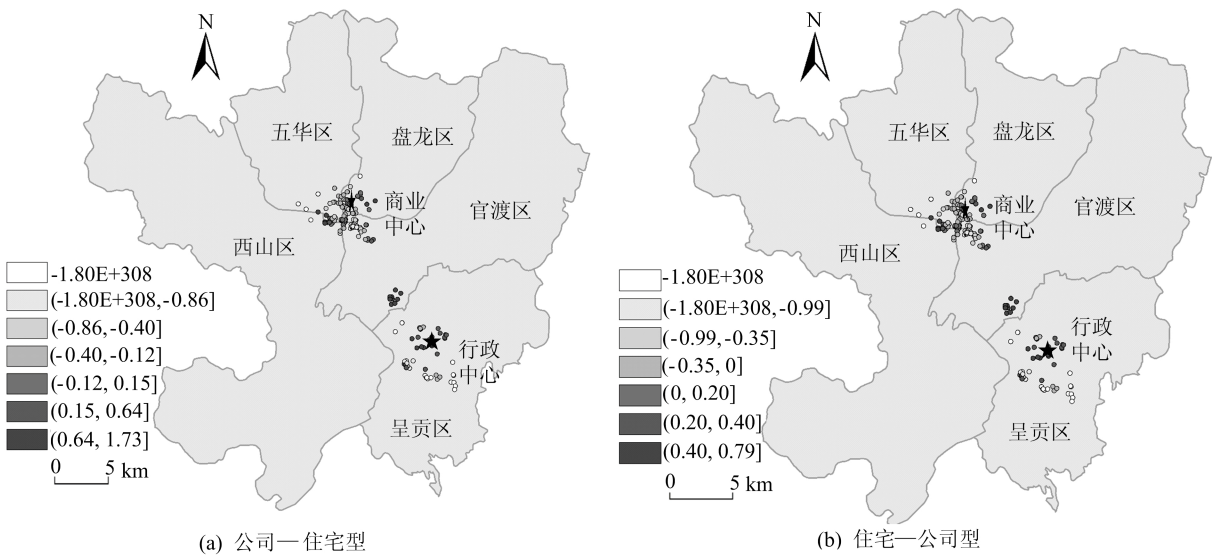


图 5 公交站点数量拟合系数分布

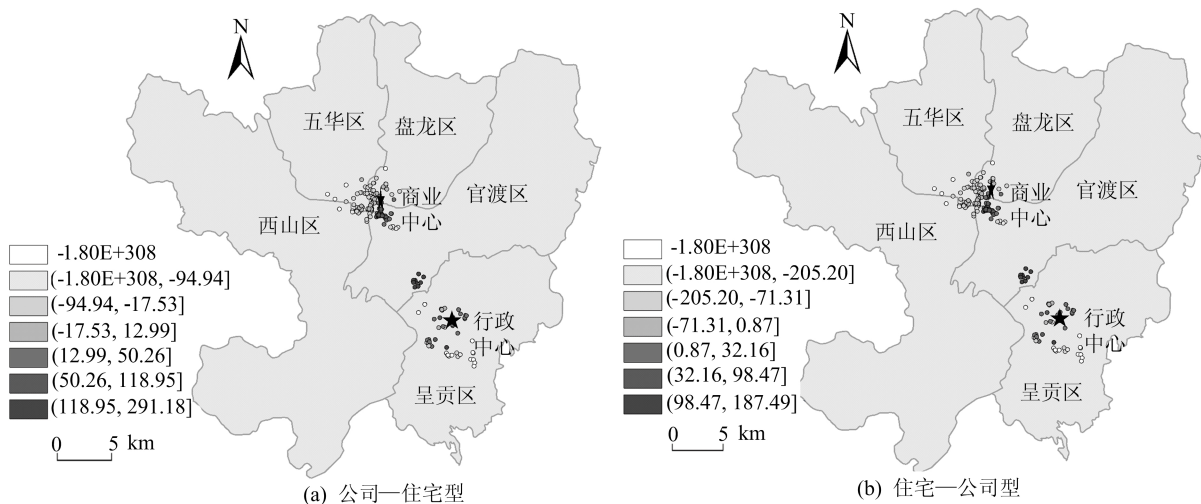


图 6 土地利用混合度拟合系数分布

## 4 结 论

1) “公司—公司型”“公司—住宅型”“住宅—公司型”和“住宅—住宅型”是昆明市公共自行车主要出行模式。

2) 建成环境对“公司—住宅型”和“住宅—公司型”出行模式的影响效应存在不同的空间特征,在与“公司—住宅型”出行模式呈正向作用的区域大多与“住宅—公司型”出行模式呈负向作用。

3) 出行模式主要受到临近站点数量、土地利用混合度、人行道长度和公交站点数量的影响,其中土地利用混合度对“公司—住宅型”和“住宅—公司型”出行模式的影响效果最显著。

需要指出的是,由于数据可获取性等客观条件限制,本文在定义公共自行车出行模式时主要侧重于公共自行车自身使用特征和站点附近的 POI 类型,缺乏对使用者本身出行特征的考虑和对人口分布特点、共享单车分布情况等因素的分析。下一步研究可在本文的基础上完善建成环境指标,加入出行者的社会经济属性数据定义出行模式,深入分析建成环境对公共自行车出行模式的影响机制。

## [参 考 文 献]

- [1] FISHMAN E. 公共自行车近期文献综述[J]. 魏贺,译. 城市交通,2015,13(6):80-94.
- [2] FISHMAN E, WASHINGTON S, HAWORTH N. 公共自行车文献综述[J]. 张晓为,译. 城市交通,2014,12(2):84-94.
- [3] LIU Z L, JIA X D, CHENG W. Solving the last mile problem: ensure the success of public bicycle system in Beijing[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2012,43:73-78.
- [4] 钱佳,汪德根,牛玉. 城市居民使用市内公共自行车的满意度影响因素分析:以苏州市为例[J]. 地理研究,2014,33(2):358-371.
- [5] 周杨,张冰琦,李强,等. 公共自行车系统选址适宜性评价:以北京市地铁 1 号线为例[J]. 城市问题,2015(10):43-48.
- [6] 常山,宋瑞,何世伟,等. 共享单车故障车辆回收模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(6):1677-1684.
- [7] 赵迪,王航臣. 考虑使用特征的城市公共自行车租赁点布局优化[J]. 交通运输工程与信息学报,2019,17(3):152-161.
- [8] BACHAND-MARLEAU J, LEE B H Y, EL-GENEIDY A M. Better understanding of factors influencing likelihood of using shared bicycle systems and frequency of use [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2012,2314(1):66-71.
- [9] ZHAO P J, LI S X. Bicycle-metro integration in a growing city: the determinants of cycling as a transfer mode in metro station areas in Beijing [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,2017,99:46-60.
- [10] RIXEY R A. Station-level forecasting of bikesharing ridership: station network effects in three US systems [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2013,2387(1):46-55.
- [11] 赵怡虹,陈玉红. 基于需求特征的太原市公共自行车服务影响研究[J]. 交通科技与经济,2015,17(6):14-18.
- [12] 刘冰,曹娟娟,周于杰,等. 城市公共自行车使用活动的时空特征研究:以杭州为例[J]. 城市规划学刊,2016(3):77-84.
- [13] FAGHIH-IMANI A, ELURU N, EL-GENEIDY A M, et al. How land-use and urban form impact bicycle flows: evidence from the bicycle-sharing system(BIXI) in Montreal [J]. Journal of Transport Geography,2014,41:306-314.
- [14] 唐炉亮,陈西,杨雪,等. 基于城市用地的公共自行车骑行量建模[J]. 交通运输工程学报,2018,18(1):150-158.
- [15] FRADE I, RIBEIRO A. Bicycle sharing systems demand [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2014,111:518-527.
- [16] ZHAO D, ONG G P, WANG W, et al. Effect of built environment on shared bicycle reallocation: a case study on

- Nanjing, China[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 128: 73-88.
- [17] 孙艺玲, 仝德, 曹超. 城市建成环境对公共自行车使用的影响机制研究: 以深圳市南山区为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 1325-1331.
- [18] 罗桑扎西, 甄峰, 尹秋怡. 城市公共自行车使用与建成环境的关系研究: 以南京市桥北片区为例[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 332-341.
- [19] ZHAO J J, ZHANG F, TU L, et al. Estimation of passenger route choice pattern using smart card data for complex metro systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(4): 790-801.
- [20] 汪秉宏, 韩筱璞. 人类行为的动力学与统计力学研究[J]. 物理, 2010, 39(1): 28-37.
- [21] XIA F, WANG J Z, KONG X J, et al. Exploring human mobility patterns in urban scenarios: a trajectory data perspective [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(3): 142-149.
- [22] 朱玮, 庞宇琦, 王德, 等. 上海市闵行区公共自行车出行特征研究[J]. 上海城市规划, 2012(6): 102-107.
- [23] LIU H C, LIN J J. Associations of built environments with spatiotemporal patterns of public bicycle use[J]. Journal of Transport Geography, 2019, 74: 299-312.
- [24] 中国城市规划设计研究院. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 5-12.
- [25] 张延吉, 秦波, 朱春武. 北京城市建成环境对犯罪行为 and 居住安全感的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(2): 238-252.
- [26] 戢晓峰, 李晓娟, 杨晓泉, 等. 基于 POI 数据的城市交通设施空间分布特征提取: 以昆明市主城区为例[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(3): 76-82.
- [27] WANG X Z, LINDSEY G, SCHONER J E, et al. Modeling bike share station activity: effects of nearby businesses and jobs on trips to and from stations[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2016, 142(1): 04015001.
- [28] KARKI T K, LIU T. How accessible and convenient are the public bicycle sharing programs in China? Experiences from Suzhou city[J]. Habitat International, 2016, 53: 188-194.
- [29] ZHANG Y, THOMAS T, BRUSSEL M, et al. Exploring the impact of built environment factors on the use of public bikes at bike stations: case study in Zhongshan, China[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 58: 59-70.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 940 页)

## [参 考 文 献]

- [1] 彭术, 陈浩, 水中和, 等. 废弃混凝土再生粉制备超高性能混凝土基体的性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2125-2130.
- [2] 张圣彩, 耿欧, 赵桂云. 再生微粉混凝土的抗压强度及其活性激发 [J]. 混凝土, 2015(11): 49-52.
- [3] 周文娟, 季志远, 赵磊, 等. 建筑垃圾再生微粉基本材性及对水泥胶砂性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019(3): 93-96.
- [4] 刘力, 刘小艳, 李田雨, 等. 再生微粉对水泥浆早期性能和流变性能的影响 [J]. 混凝土, 2021(7): 114-117.
- [5] 周长顺, 吉红波, 赵丽颖. 再生微粉在水泥基材料中的应用与研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2456-2463.
- [6] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 混凝土和砂浆用再生微粉: JG/T 573—2020[S]. [出版地不详: 出版者不详], 2020: 7.
- [7] 中国建筑材料联合会. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 13-14.
- [8] 张慢. 化学外加剂对水泥水化历程的调控及作用机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [9] 田青, 屈孟娇, 张苗, 等. 废弃混凝土再生微粉激活方式研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2476-2485.
- [10] 张小利. 石灰石质粗骨料废弃混凝土的粉磨特性及其粉体性能评估研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [11] 米国民, 涂文懋, 曾宪滨. 一种制造可膨胀石墨新工艺的研究 [J]. 矿产保护与利用, 1994(2): 23-25.
- [12] 王彬. 几种改性三乙醇胺化合物的合成及其对水泥性能影响的应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [13] 方军良, 陆文雄, 徐彩宣. 粉煤灰的活性激发技术及机理研究进展 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2002, 8(3): 255-260.
- [14] 李琴, 张春红, 孙可伟. 不同激发剂激发建筑垃圾再生微粉活性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7): 2189-2192.
- [15] 徐如林. 建筑垃圾粉料的活性激发及其应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [16] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33: 1939-1947.
- [17] 李若兰, 彭桦, 冯晓军, 等. 热重分析法测定胶磷矿中白云石和方解石的含量 [J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(1): 66-67.

(责任编辑 张淑艳)