

# 基于手机信令数据的居民夜间出行时空特征分析

——以北京市为例

Spatial and temporal analysis of residents' nighttime travel activity based on mobile signaling data: A case study in Beijing

李东航 北京大学城市与环境学院

## 摘要 Abstract

随着我国城市经济的迅速发展以及人民生活水平的不断提高，城市居民的消费观念也在不断演进，对于高品质生活方式的追求逐渐成为主流，**夜间活动**成为城市居民一种新的现代化生活方式。同时，**夜间经济**这一名词也成为了各级政府陆续关注的热点。目前，相关部门已出台多项政策来促进城市夜间经济的运行。然而，**现有的城市研究较少关注夜间时段，同时也缺少以夜间出行行为来反映城市夜间经济活力的视角。**

针对上述问题，本文以北京市中心城区为例，利用**手机信令大数据**分别分析**居民在工作日以及周末夜间出行的时空特征**，并分析**不同年龄群体夜间出行行为的差异**。同时，利用高德地图、OSM开放地图等开放数据平台，收集北京市中心城区内部的建成环境特征要素，包括POI、城市道路网、公共交通站点等数据，分析北京市中心城区的建成环境特征。在此基础上，通过空间自相关、空间杜宾回归等方法，分析**影响城市夜间经济活力的关键建成环境因子**，并分析**建成环境对于不同居民群体夜间出行的异质性影响**。

### ■ 中心城区夜间人口分布在工作日与周末呈现不同特征

在工作日，居民夜间主要活动范围不仅位于中心城区内**各大商圈**，也位于**主要办公地点**附近，例如西北旺、望京等区域。在周末，**位于办公地点的夜间活动人口大幅下降，主要人口集聚在中心城区内的大型商圈附近。**

### ■ 夜间出行空间分布较为均衡，中心商圈为居民夜间出行最常访问地

出行的空间分布上，**整体中心城区夜间平均出行距离较为均衡**，说明整体夜间经济活动较为均匀。但**外围区域夜间平均出行距离略高于中心区域**，说明外围区域往往需要经过更远的距离到达夜间服务场地。**各个区域内的中心商圈是居民夜间出行最常到访的区域**，在周末，中心商圈与周围区域的交互更为密切、显著。

### ■ 不同年龄段的居民群体夜间出行模式略有差异

**随着入夜程度加深，北京市中心城区居民夜间出行量显著下降，但平均出行距离增加**，说明深夜的出行往往对应更少的次数以及更长的距离。不同群体方面，青年人与中年人的夜间出行特征更为相似，大学生因为特殊的管理规定呈现独特的夜间出行模式，而老年人群体则极少在22:00以后的深夜进行出行。

### ■ 建成环境因素对于不同年龄群体居民的影响存在差异

**交通可达性、购物消费设施数量以及生活服务设施数量是影响区域夜间访客数量的最显著的因子**。休闲娱乐设施在周末对于区域内访客数量具有显著正向影响，在工作日的影响则不显著。随着年龄的增加，休闲娱乐设施的影响逐渐变小，广场等公共开放空间的影响逐渐变大。

## 1 研究背景与研究简介

### 研究背景

#### ■ 社会背景

- 城市经济快速发展以及居民生活水平提高
- 城市居民对夜间活动的需求不断增加
- 居民夜间活动逐步转向多样化和个性化

#### ■ 政策背景

- 夜间经济对于城市经济发展愈加重要
- 各级政府大力支持夜间经济的发展
- 促进夜间经济发展的政策逐渐出台

#### ■ 学术背景

- 现有研究主要关注日间活动，缺乏夜间活动
- 居民日间和夜间活动存在显著差异
- 人类移动对于预测经济增长的重要性

### 研究意义

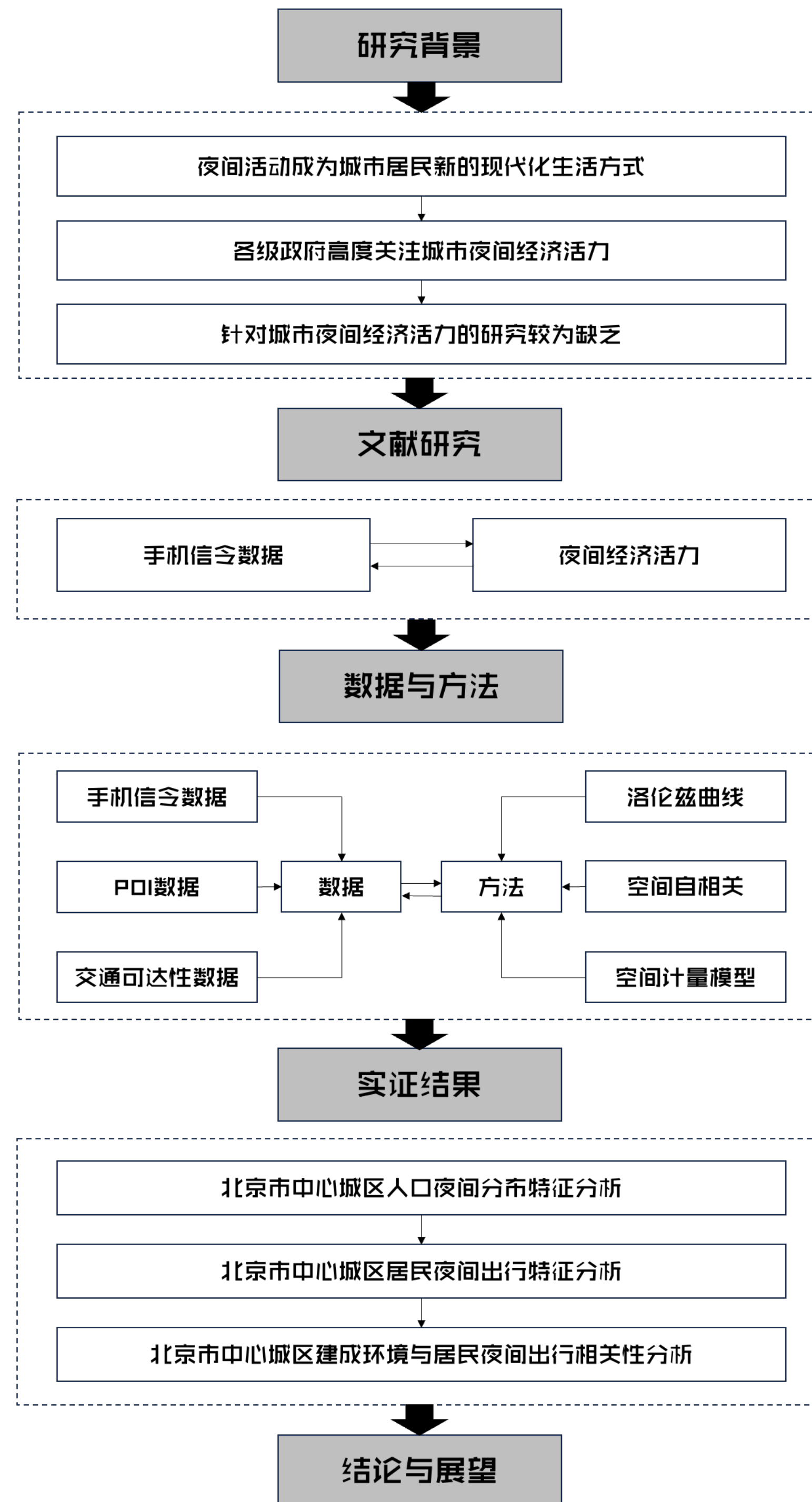
#### ■ 理论意义

目前针对城市经济活力的研究主要集中在城市日间时段，**对于夜间这一特殊时段的探索依旧十分有限**。此外，**现有研究缺乏以出行行为特征反映城市经济活力的研究路径**。本文通过分析居民的夜间出行行为以推断城市夜间经济活力，扩充了现有针对夜间经济的研究方法，提供了以出行行为反映城市空间经济活力的新的视角。

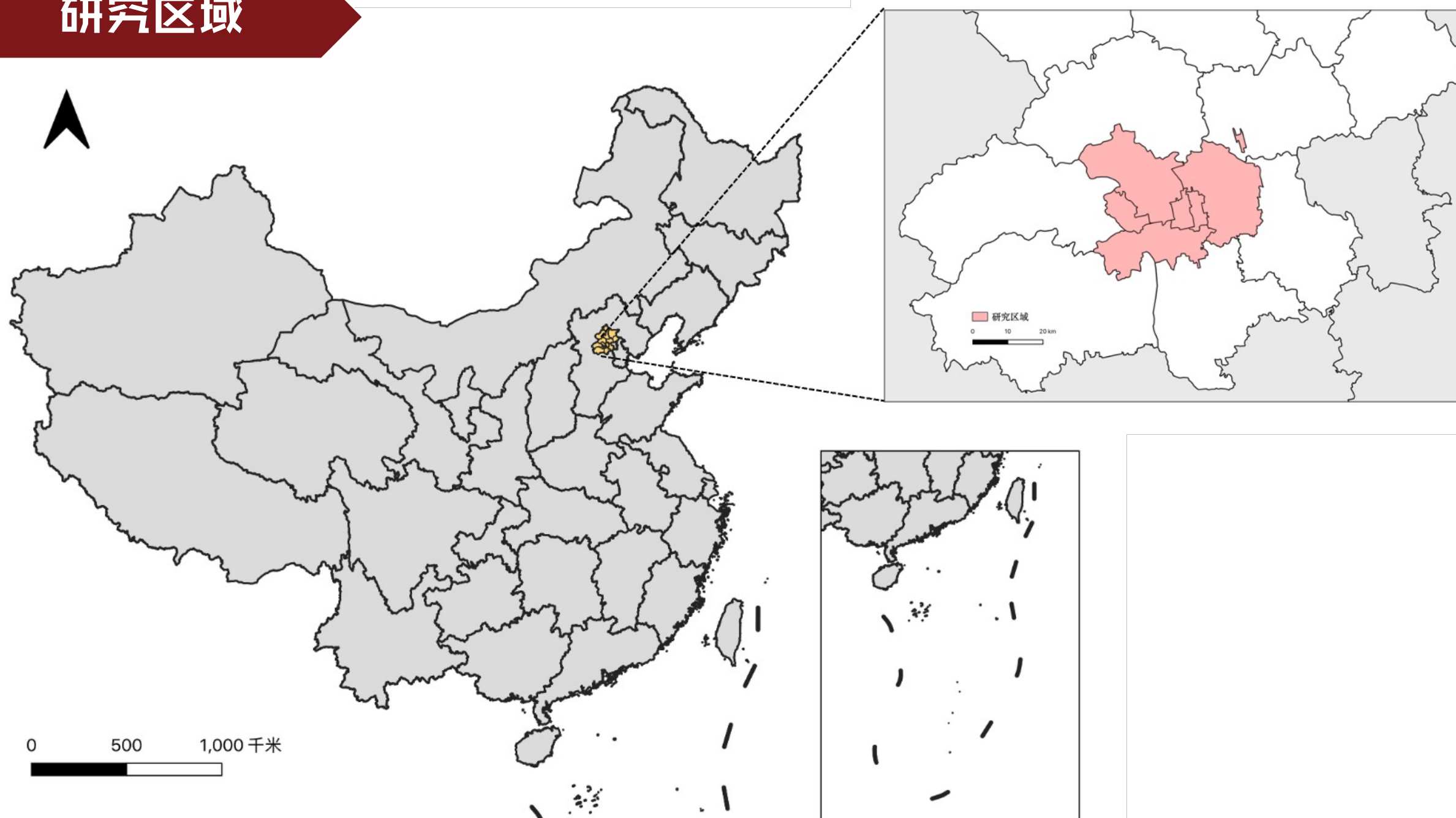
#### ■ 实践意义

本文以北京市中心城区为例进行实证研究，**分析中心城区居民夜间出行的时空特征，并基于不同居民类别分析了建成环境与居民夜间出行的关系，提取了对于夜间经济活力最为关键的建成环境因子**。本文研究结果对于**挖掘城市夜间经济活力空间特征要素、增强城市夜间经济活力、进行城市规划、配合公共交通管理以及城市精细化治理都具有重要的参考意义**。

### 研究流程



### 研究区域



# 基于手机信令数据的居民夜间出行时空特征分析

——以北京市为例

Spatial and temporal analysis of residents' nighttime travel activity based on mobile signaling data: A case study in Beijing

李东航 北京大学城市与环境学院

## 2 文献研究

手机信令数据

动态人口监测

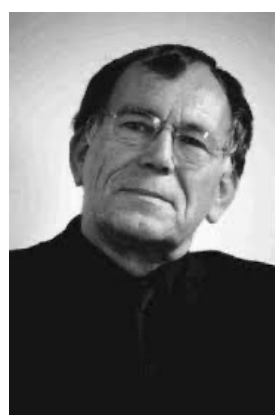
出行特征分析

城市活力探测

规划辅助支持

城市活力

手机信令数据作为新兴数据源，在探索城市活力方面拥有巨大潜力



Jan Gehl

建筑学角度

功能混合的开放街区，  
宽阔的慢行系统



Jane Jacobs

社会学角度

功能混合、小规模街区、丰富的历史空间  
以及密集的人口



Kevin Lynch

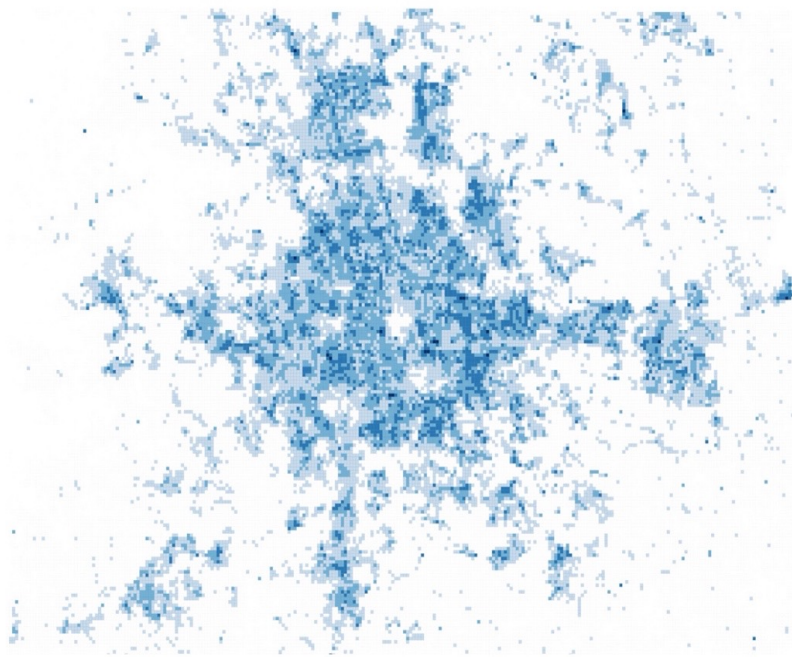
城市学角度

完善的城市功能、良好的城市形态以及丰富的城市活动

## 3 研究数据与研究方法

### 手机信令数据

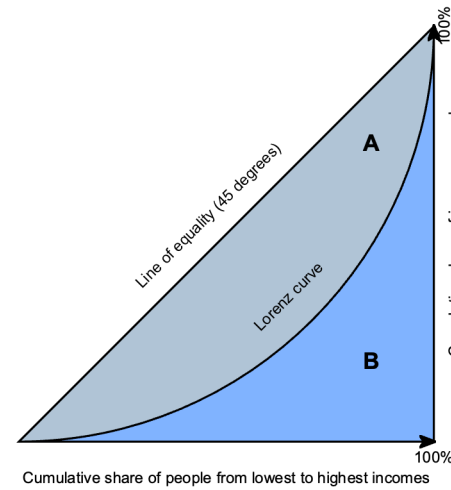
本研究中使用手机信令数据来源于中国联通。数据经过泛化处理，会被放置在一个以基站位置点为中心的网格内。研究一共选择了北京市中心城区内部共计22651个格网，每个格网大小的边长为250米。为了记录居民的夜间出行状况，本文对时间在18:00到次日凌晨2:00的用户手机信令进行提取，时间为2019年6月。数据均已加密脱敏。



手机信令数据概况

### 研究方法

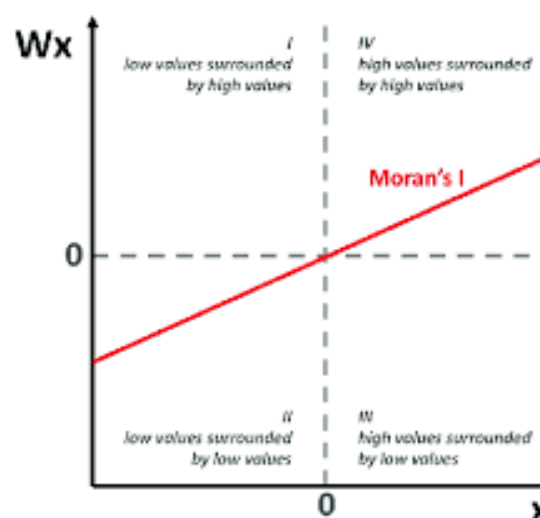
#### 洛伦兹曲线 (Lorenz Curve) 与基尼系数 (Gini Index)



洛伦兹曲线 (Lorenz Curve) 用来衡量一个国家或地区收入或财富分配不平等程度，曲线与完美平等线之间的面积越大，表示不平等程度越高。基尼系数 (Gini Index) 是洛伦兹曲线的一个量化指标，其值介于0到1之间，Gini系数越大说明社会经济属性分布越不平等。计算方法如下：

$$Gini\ Coefficient = \frac{S_A}{S_A + S_B}$$

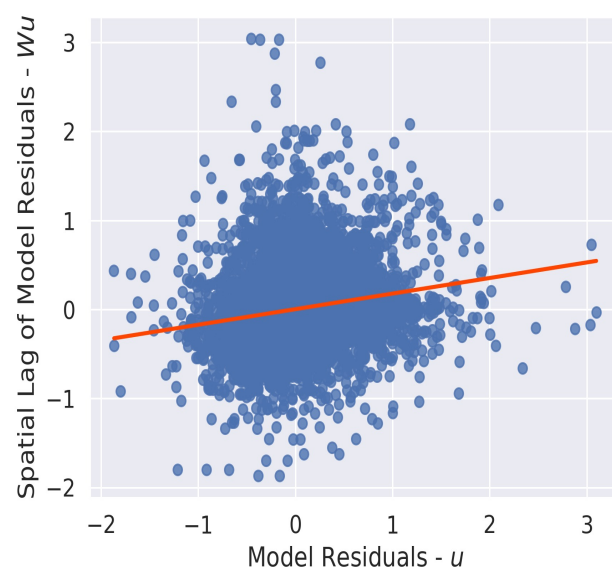
#### 空间自相关 (Spatial Autocorrelation)



在本文中，我们采用莫兰指数 (Moran's I) 来测度全局空间自相关，并使用LISA (Local Indicator of Spatial Association) 来进行局部空间自相关的测度。LISA 值不仅能够反映每个空间个体与其周边邻居的相关性特征，还可以将全部空间划分为高值集聚、低值集聚、高-低异常与低-高异常四个等级。Moran's I和LISA值的计算方法如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad I_i = \frac{(y_i - \bar{y})}{S^2} \sum_{j \neq i} w_{ij} (y_j - \bar{y})$$

#### 空间杜宾回归分析 (Spatial Durbin Regression Model)



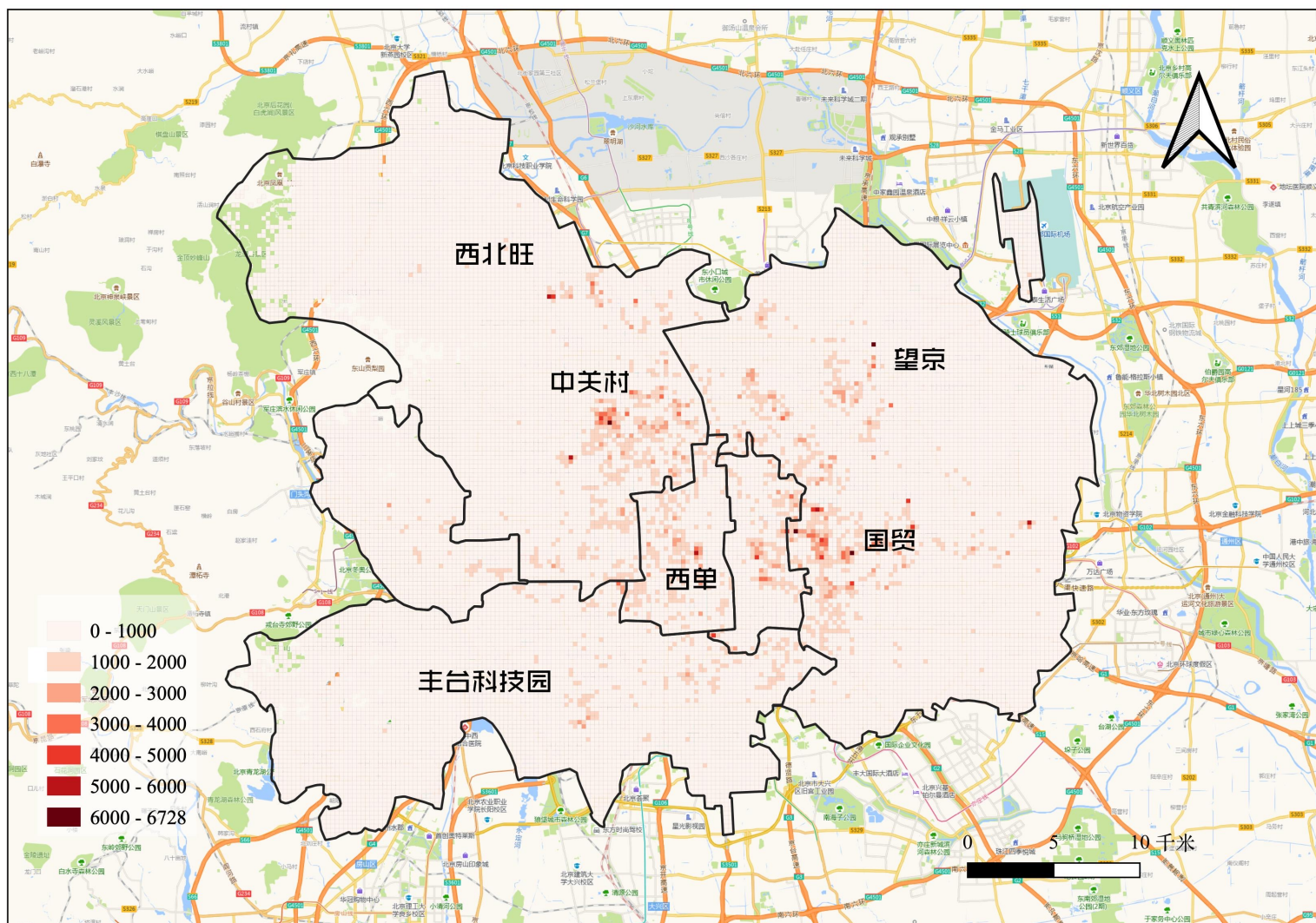
空间杜宾模型 (Spatial Durbin Model, SDM) 是一种用于分析空间数据的回归模型，它扩展了传统的杜宾模型 (Durbin Model)，以考虑空间相互作用和空间异质性。空间杜宾模型 (SDM) 结合了空间滞后模型 (SLM) 以及空间误差模型 (SEM) 的特征，同时考虑到因变量以及自变量存在空间自相关时的情况，广泛适用于各类空间回归分析。其一般设定形式如下：

$$y = \rho W y + X \beta + W X \theta + \varepsilon$$

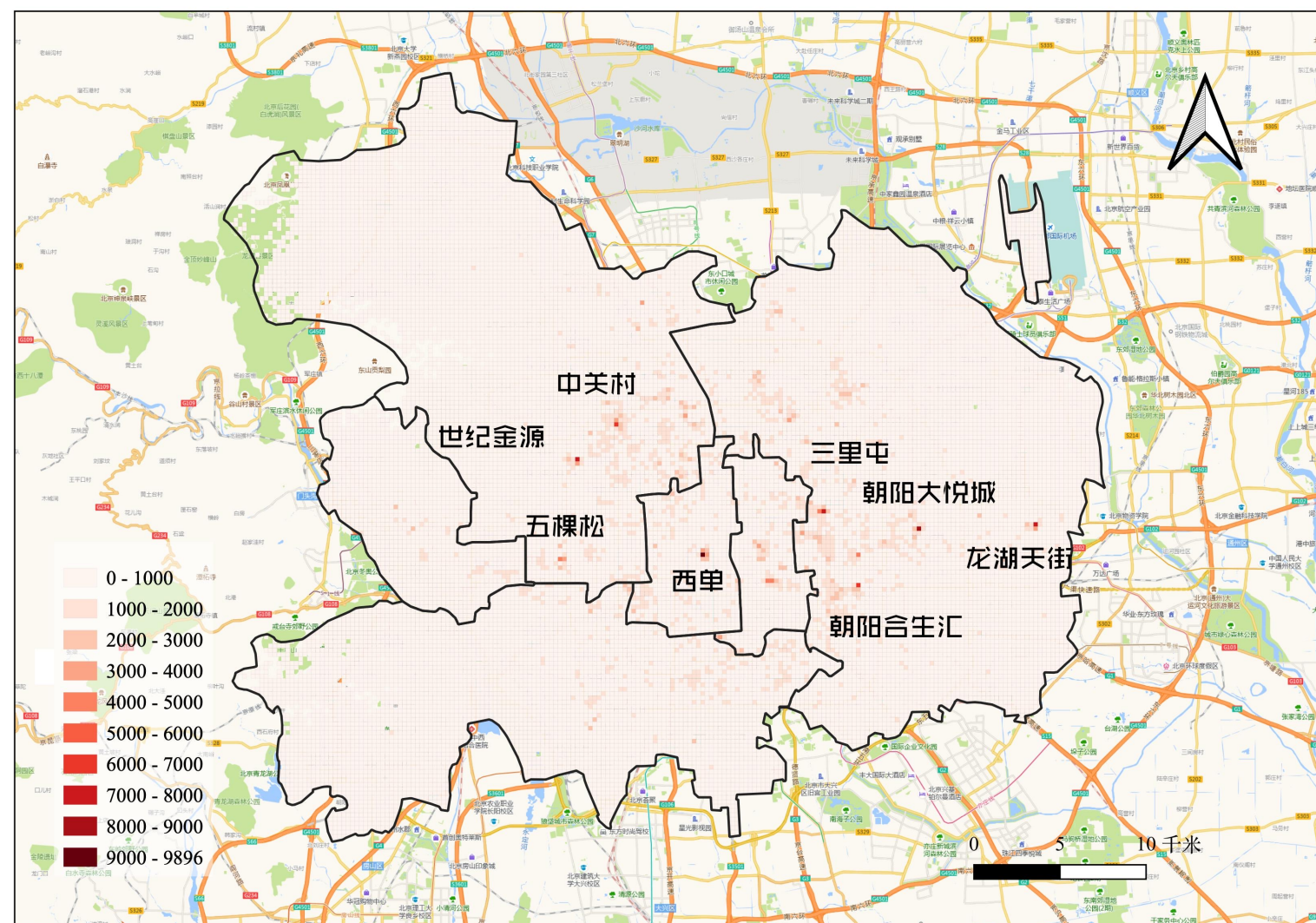
## 4 居民夜间分布分析

### 夜间人口空间分布

- 在工作日，北京市居民呈现集聚在**办公区域附近**的特征，例如西北旺、中关村等区域。人口密度显著高于周边区域。
- 在周末，北京市居民更加聚集在**主要商圈**当中，人口热力点几乎全部为大型商场所在地，例如世纪金源、五棵松、西单、三里屯、朝阳大悦城等核心商圈。
- 相比于**工作日夜间**，西北旺、望京、丰台科技园等地的人口热力值显著下降，凸显了这些地区**高度职住分离**的缺陷。



工作日夜间人口分布热力图



周末夜间人口分布热力图

# 基于手机信令数据的居民夜间出行时空特征分析

——以北京市为例

Spatial and temporal analysis of residents' nighttime travel activity based on mobile signaling data: A case study in Beijing

李东航 北京大学城市与环境学院

## 夜间人口分布时空变化

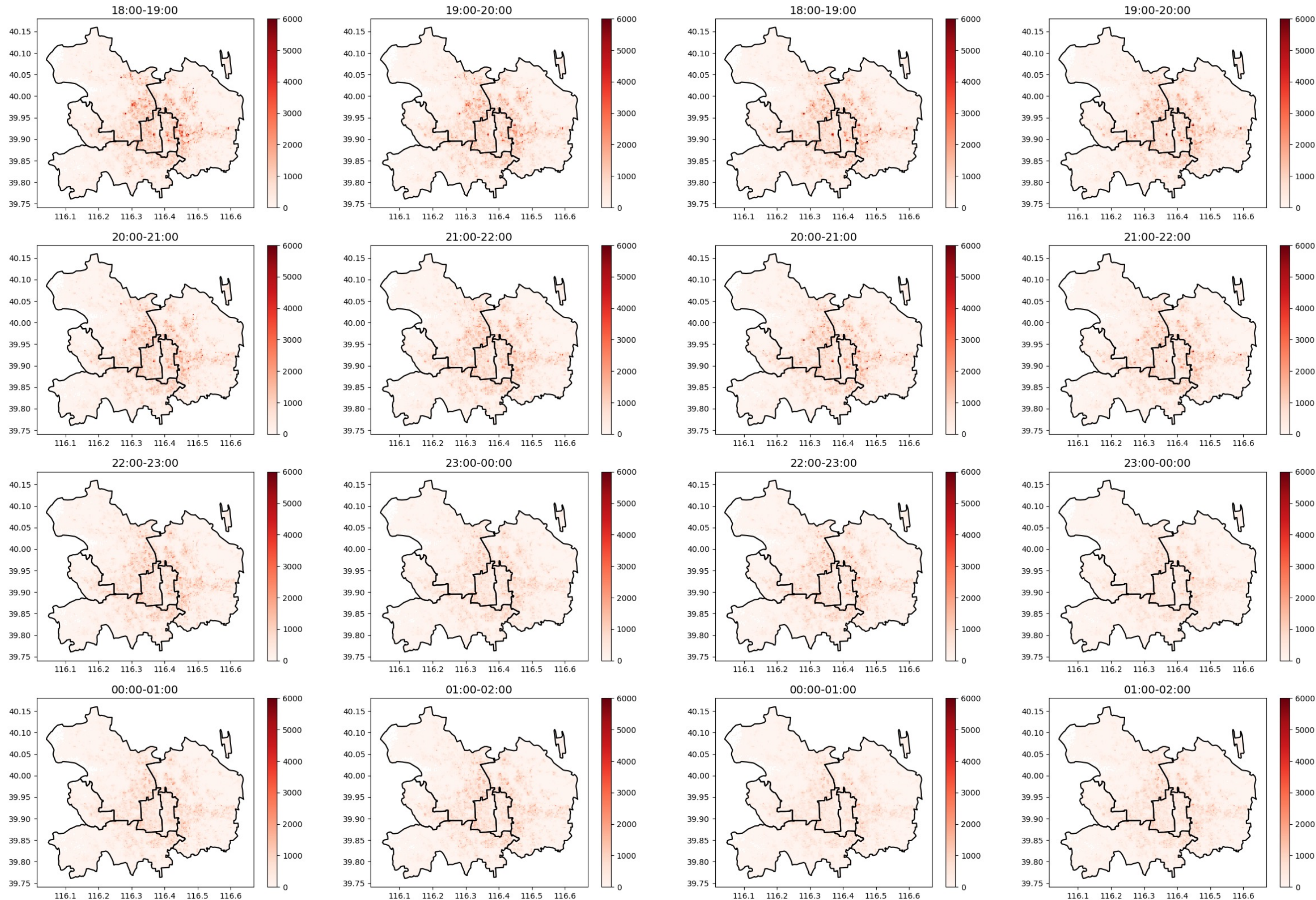
### ■ 工作日：集聚分布—快速下降—趋于平稳

在18:00-22:00的区间内，中心城区人口集聚区的人口密度存在快速的下降。其中最为明显的当属国贸地区、中关村地区，以及西北旺地区。这些地区用地结构相对单一，缺乏娱乐购物场所配套，夜间经济服务能力相对稍弱，因此下班人口大量流出。与之相反，西单地区在这个区间内仍然保持着一定的热度，说明存在一定的娱乐休闲活动场所可以继续容纳人口的夜间活动，延续工作日白天的经济活力。

### ■ 周末：高值稳定—快速下降—低值稳定

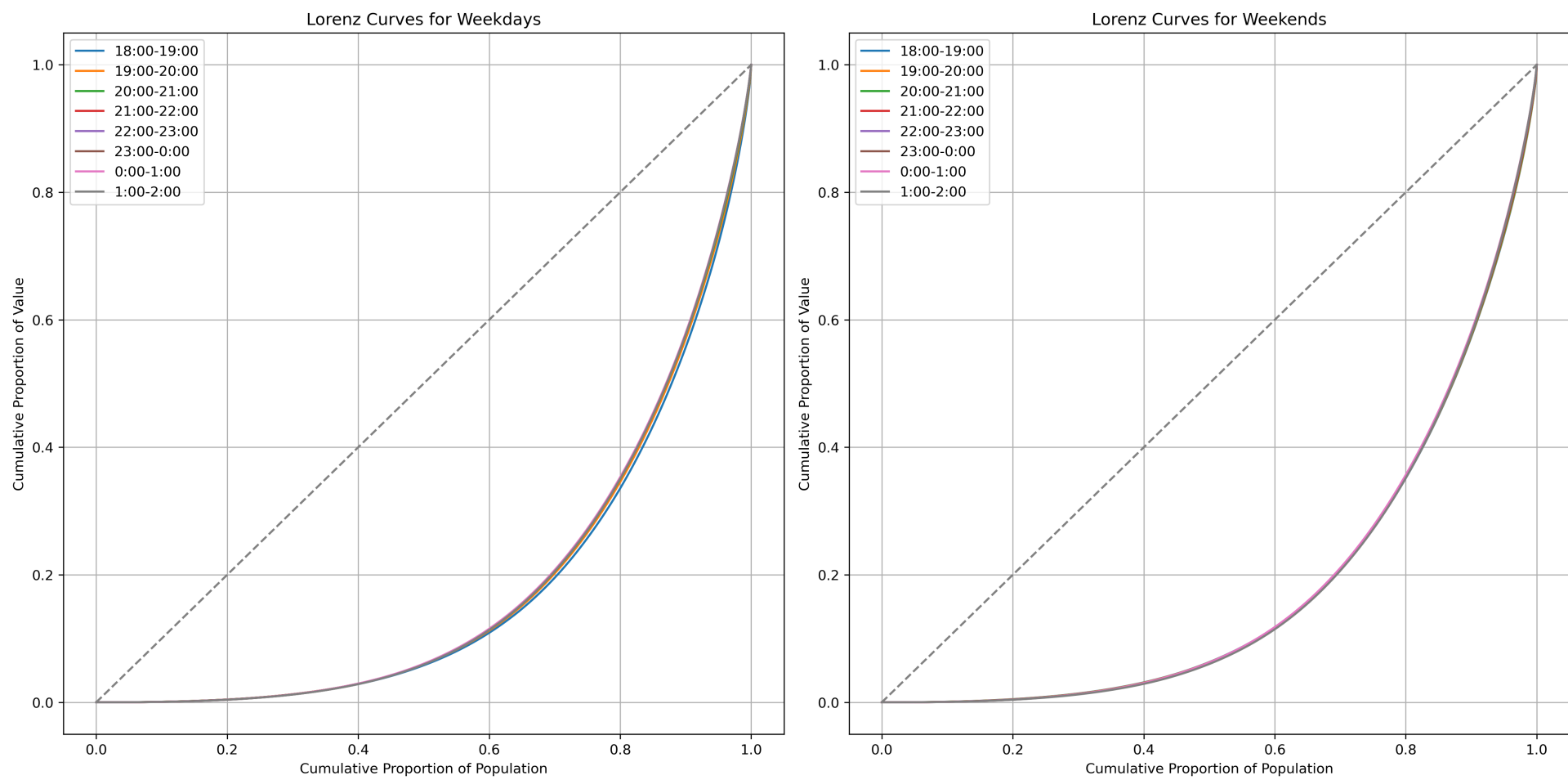
在18:00-22:00的区间内，中心城区人口集聚区的人口密度保持着相对稳定的趋势。主流商圈诸如西单、王府井、五棵松、世纪金源、三里屯、朝阳大悦城、龙湖天街等地在这一段时间内一直维持着相对较高的人口热力。可见，购物综合体对于区域内维持长期稳定的人流量具有重要的作用。

在22:00以后，中心城区的人口分布热点区域呈现“断点式”下降，主流商圈的人口密度显著减少，主要原因是商场营业时间的限制。值得注意的是，在22:00-0:00区间内，存在一个人口集聚的“热点”，即三里屯-工体片区，广泛存在着酒吧、KTV等休闲娱乐场所，成为深夜活动的“主力军”。

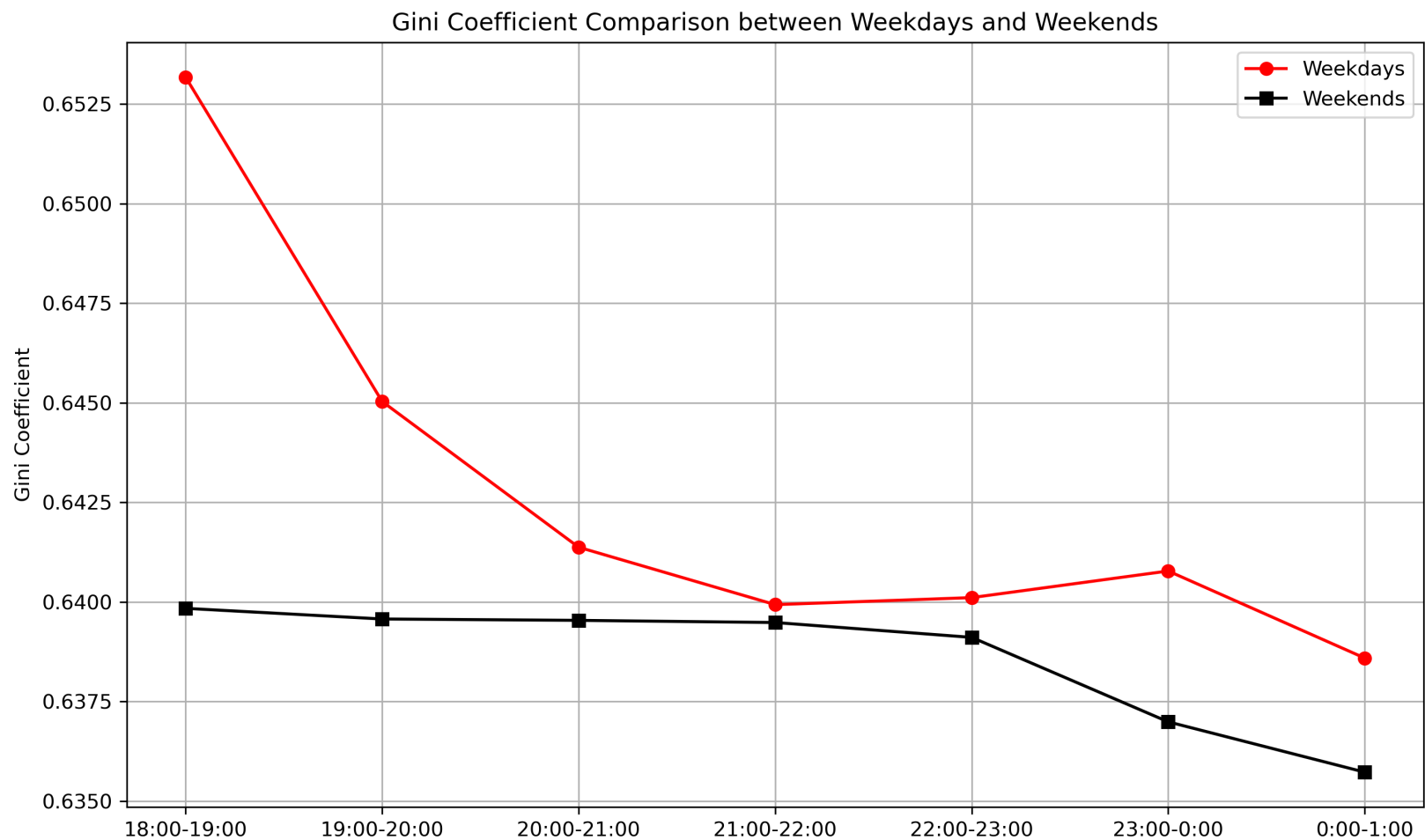


工作日夜间人口分布时空演变

周末夜间人口分布时空演变



中心城区工作日与周末人口空间分布洛伦兹曲线



中心城区工作日与周末人口空间分布基尼系数

## 5 居民夜间流动分析

➢ 夜间出行是城市交通出行的重要组成部分，也是衡量城市夜间经济活动的重要指标。考虑到不同年龄的群体往往具有不同的出行模式，因此本节内将居民群体按年龄进行分类，分别研究不同年龄段居民的夜间出行特征。

居民年龄群体划分

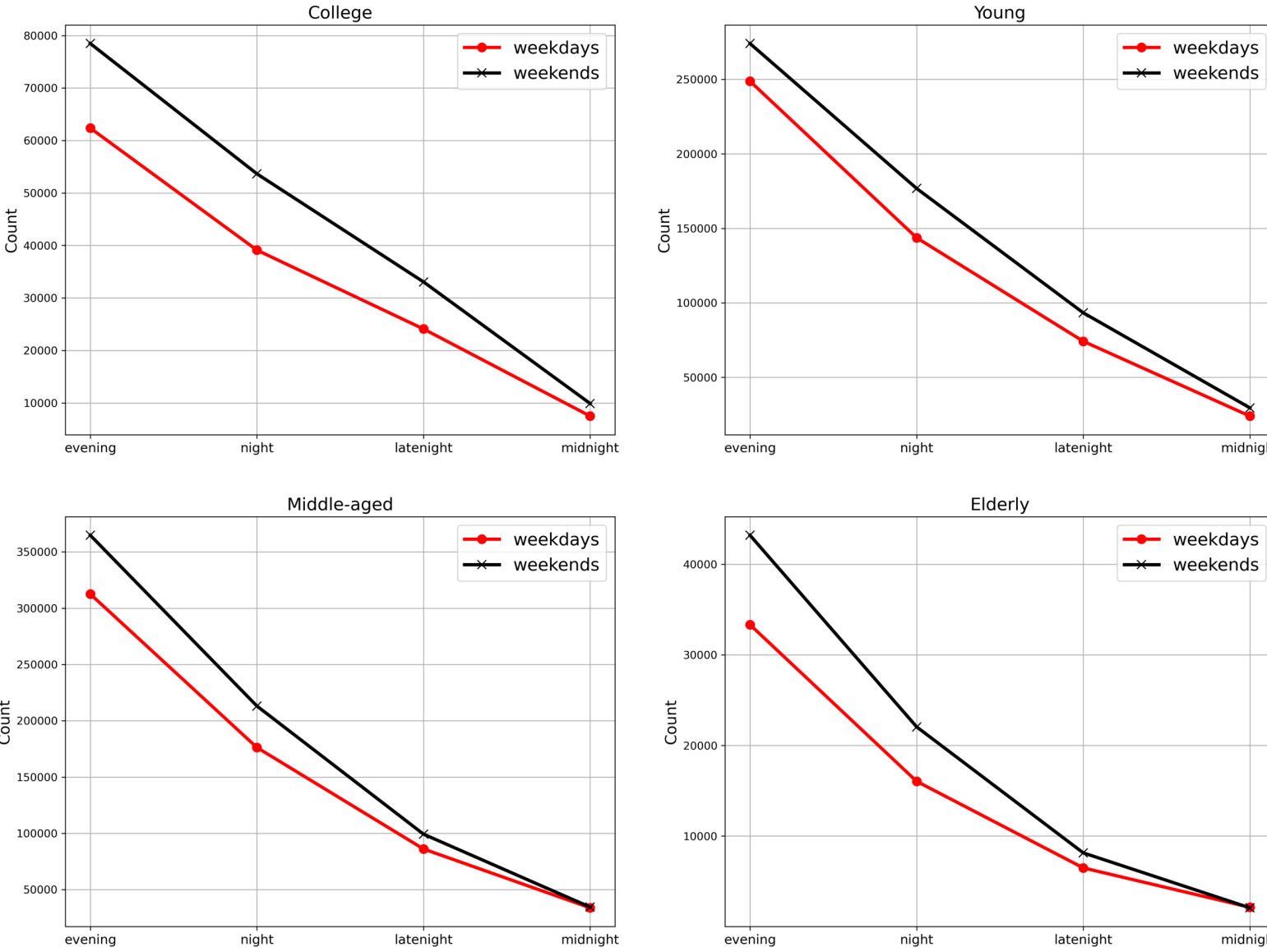
| 序号 | 类别  | 代码          | 年龄范围  |
|----|-----|-------------|-------|
| 1  | 大学生 | college     | 18-24 |
| 2  | 青年  | young       | 25-34 |
| 3  | 中年  | middle-aged | 35-59 |
| 4  | 老年  | elderly     | 60以上  |

夜间时段划分

| 序号 | 类别 | 代码         | 时间范围  |
|----|----|------------|-------|
| 1  | 傍晚 | evening    | 18-20 |
| 2  | 夜晚 | night      | 20-22 |
| 3  | 深夜 | late night | 22-0  |
| 4  | 午夜 | midnight   | 0-2   |

### ■ 居民夜间出行量分析

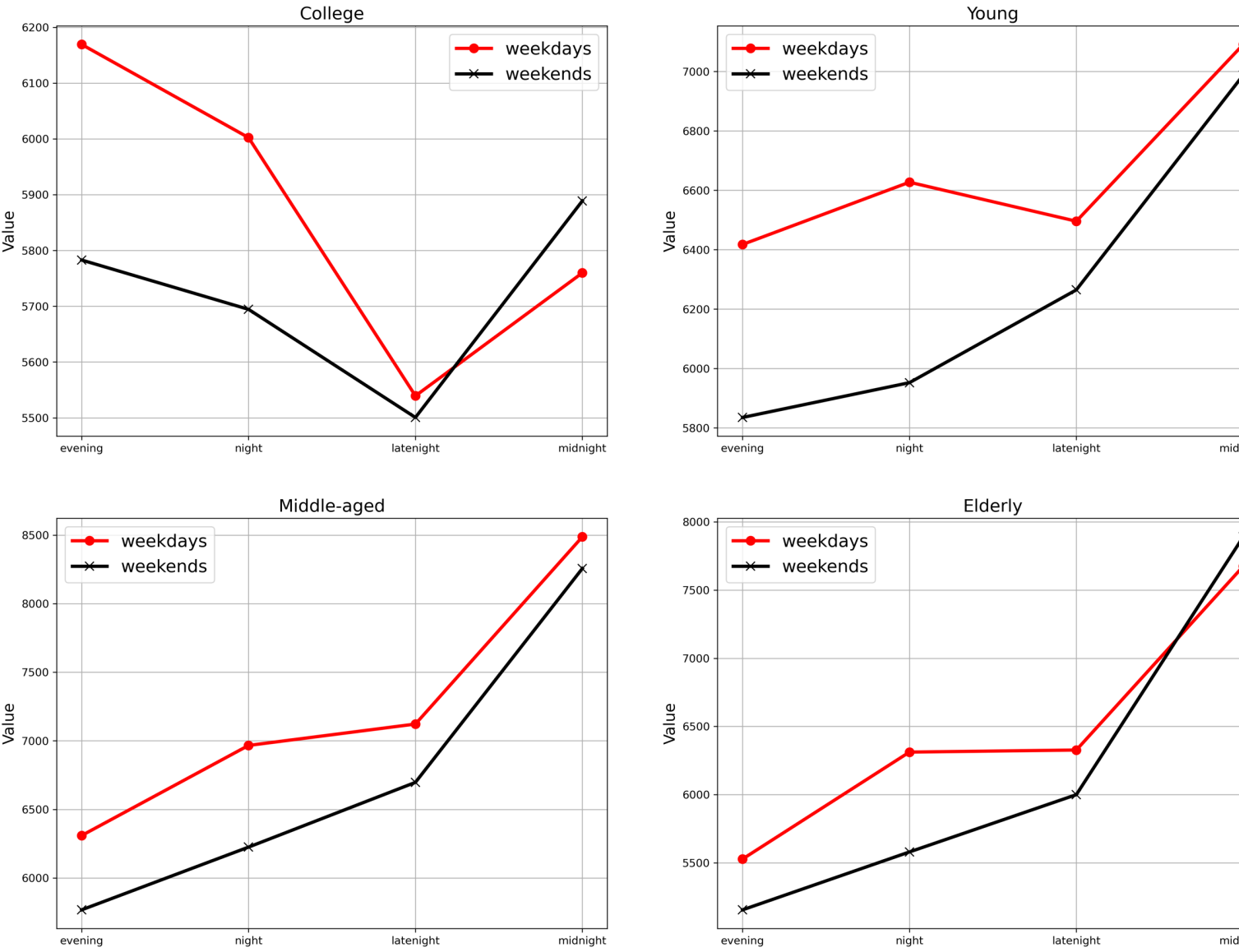
□ 四组人群的出行量存在着相同的变化趋势：随着入夜程度加深，出行量逐渐下降。下降速度上，中年人、老年人群体夜间出行量随时间衰减较快，而大学生、青年人群体则较为平稳。不论对于任一年龄群体，周末的夜间出行量均高于工作日的夜间出行量。



中心城区居民夜间出行量分析

### ■ 居民夜间出行距离分析

□ 一般情况下，随着入夜程度的加深，居民夜间出行的平均距离逐渐增加。大学生群体展现出独特的夜间出行模式，夜间出行活动距离则呈现独特的先下降、后上升的“V型曲线”。周末与工作日相比，在不同夜间时间段内，往往都具有更短的平均出行距离。



中心城区居民夜间平均出行距离分析

# 基于手机信令数据的居民夜间出行时空特征分析

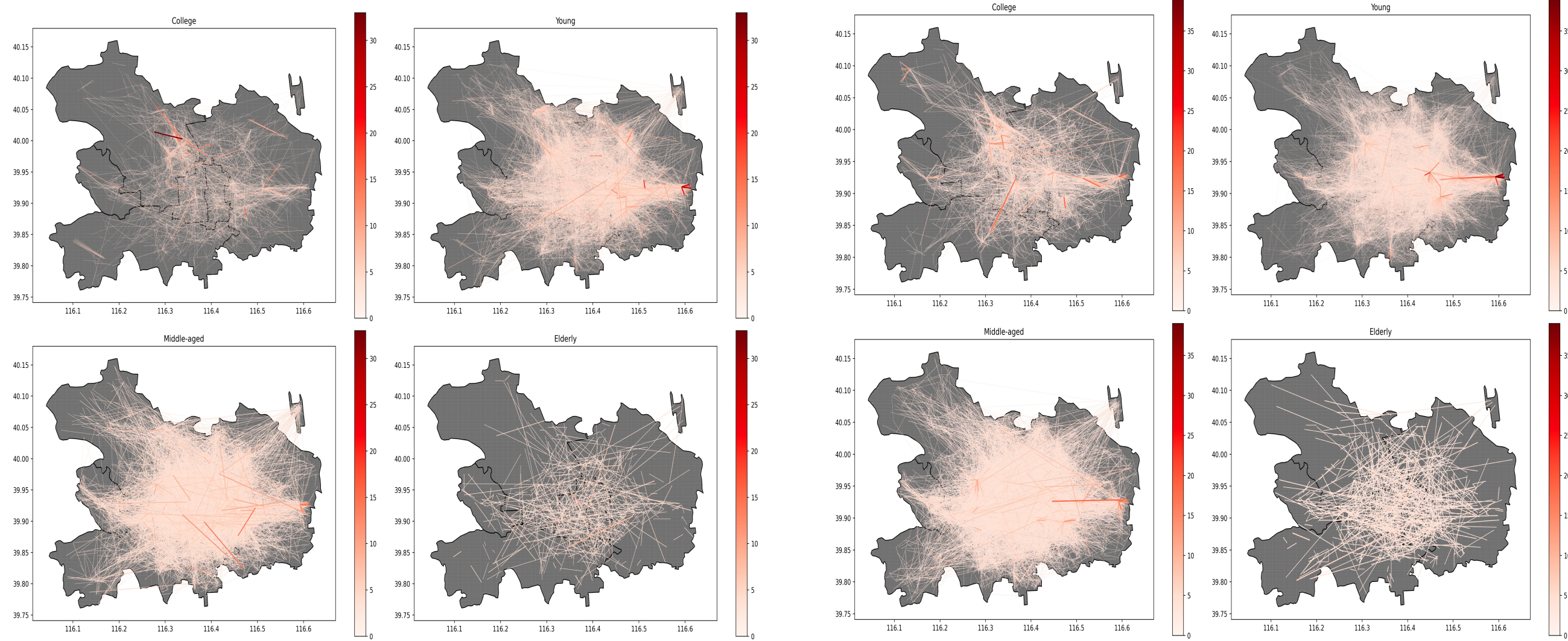
——以北京市为例

Spatial and temporal analysis of residents' nighttime travel activity based on mobile signaling data: A case study in Beijing

李东航 北京大学城市与环境学院

## 居民夜间出行OD分析

- 在工作日晚间，对于大学生群体来说，显著的夜间人口流动位于**海淀区**内。对于青年人与中年人群体来说，夜间人口流量最大的地区则位于**朝阳区**内。其中，与周围区域联系最密切的则是**龙湖天街**区域。对于老年人群体来说，不存在明显的人口集聚热点，整体的空间流动较为均衡。
- 相比于工作日的夜间人口流动，居民在周末的人口流动呈现出更为清晰的空间结构。区域内的商业中心，例如五道口、世纪金源、朝阳大悦城、龙湖天街等，存在着大量与周围区域的人口交互。这显示了相对于工作日，周末的人口流动更为集中在区域内商业中心附近。
- 综上，可见居民夜间人口流动呈现**工作日流量小、周末流量大**，**工作日流动较为均匀、周末人口流动更趋向于区域内商业中心**的特征。

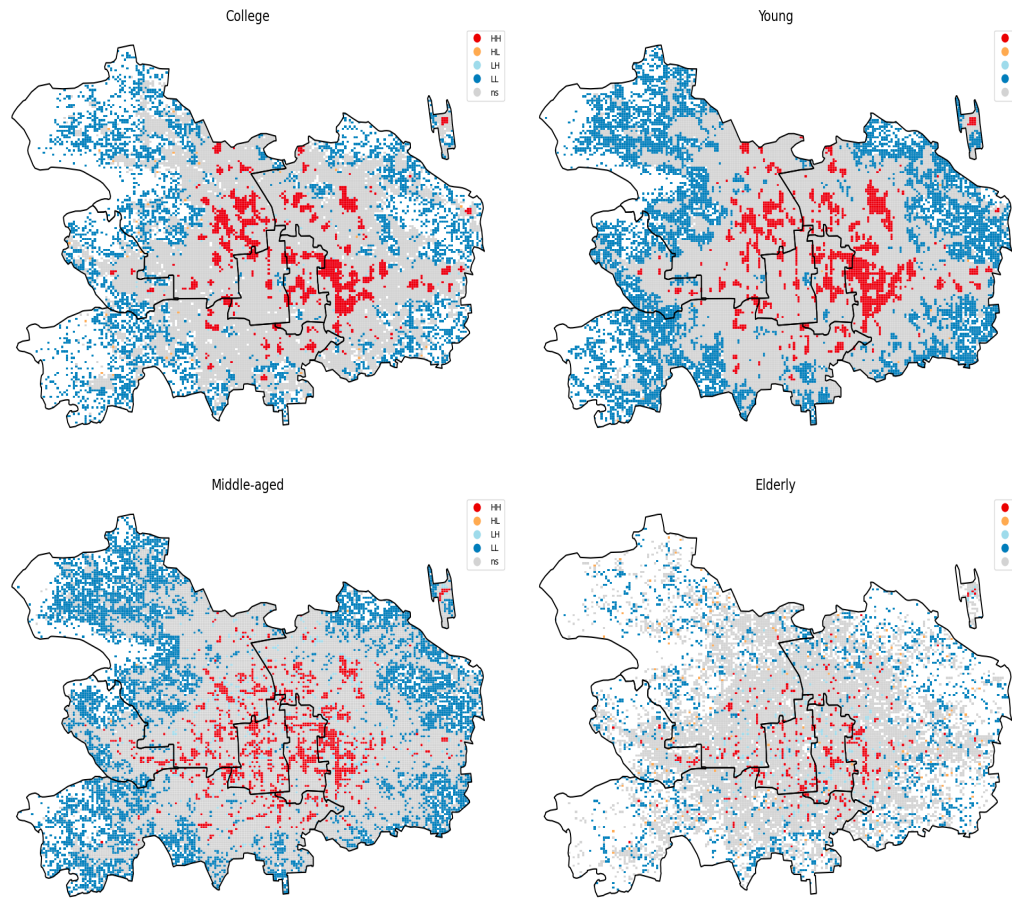


工作日晚间居民出行OD分析

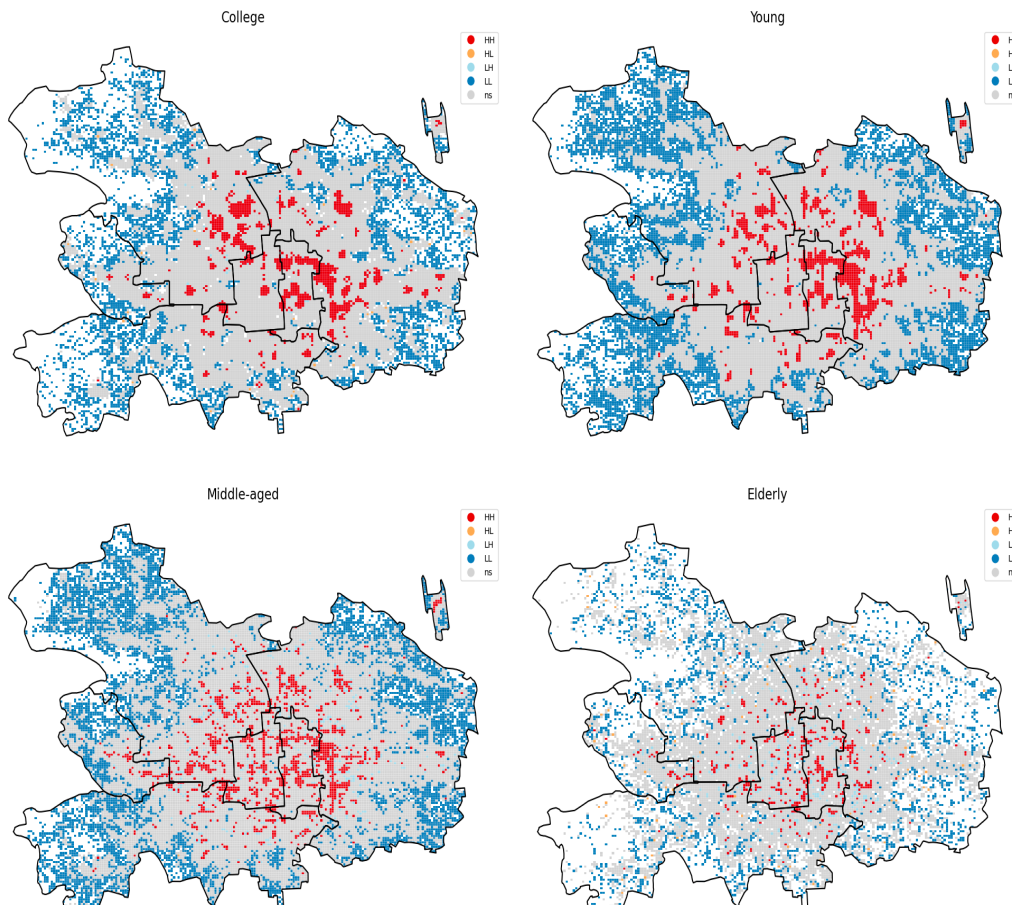
周末晚间居民出行OD分析

## 6 居民夜间出行与建成环境的关系

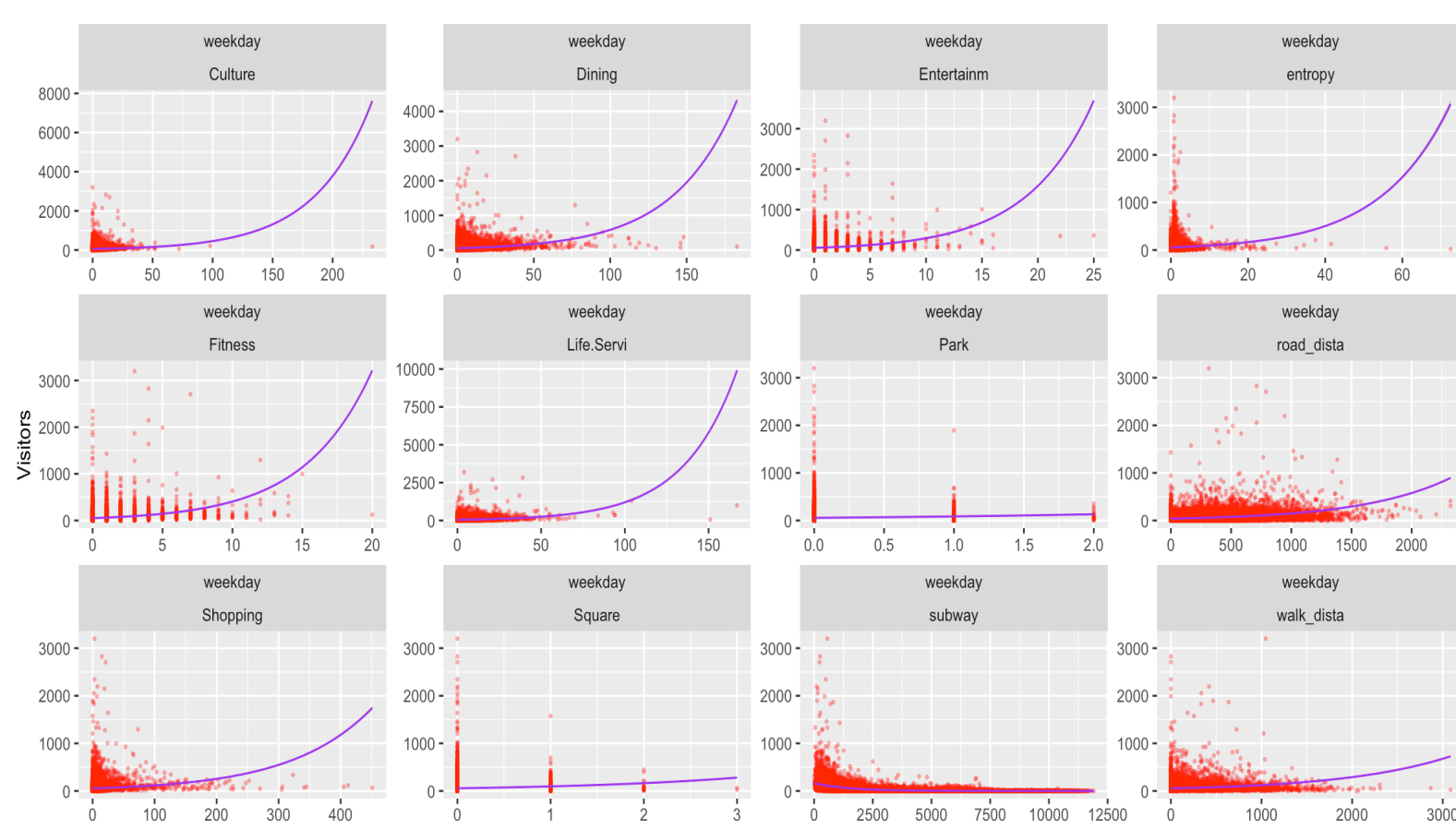
- 可达性是影响区域夜间经济活力的关键因素。生活服务设施和休闲娱乐设施的相对影响在周末更加显著，则说明居民在周末更频繁进行生活服务活动以及休闲娱乐活动。其中，**休闲娱乐设施对于提升周末夜间访客人数具有显著作用，而对于工作日夜间访客人数则并没有显著的提升作用。**
- 建成环境因子对于不同类别居民群体具有大致相似的影响，但也存在一定差异。总体差异体现在，**休闲娱乐设施对于年轻群体的夜间活动具有更强的吸引力，而购物消费设施和广场则对于年长群体的夜间活动具有更强的吸引力。**



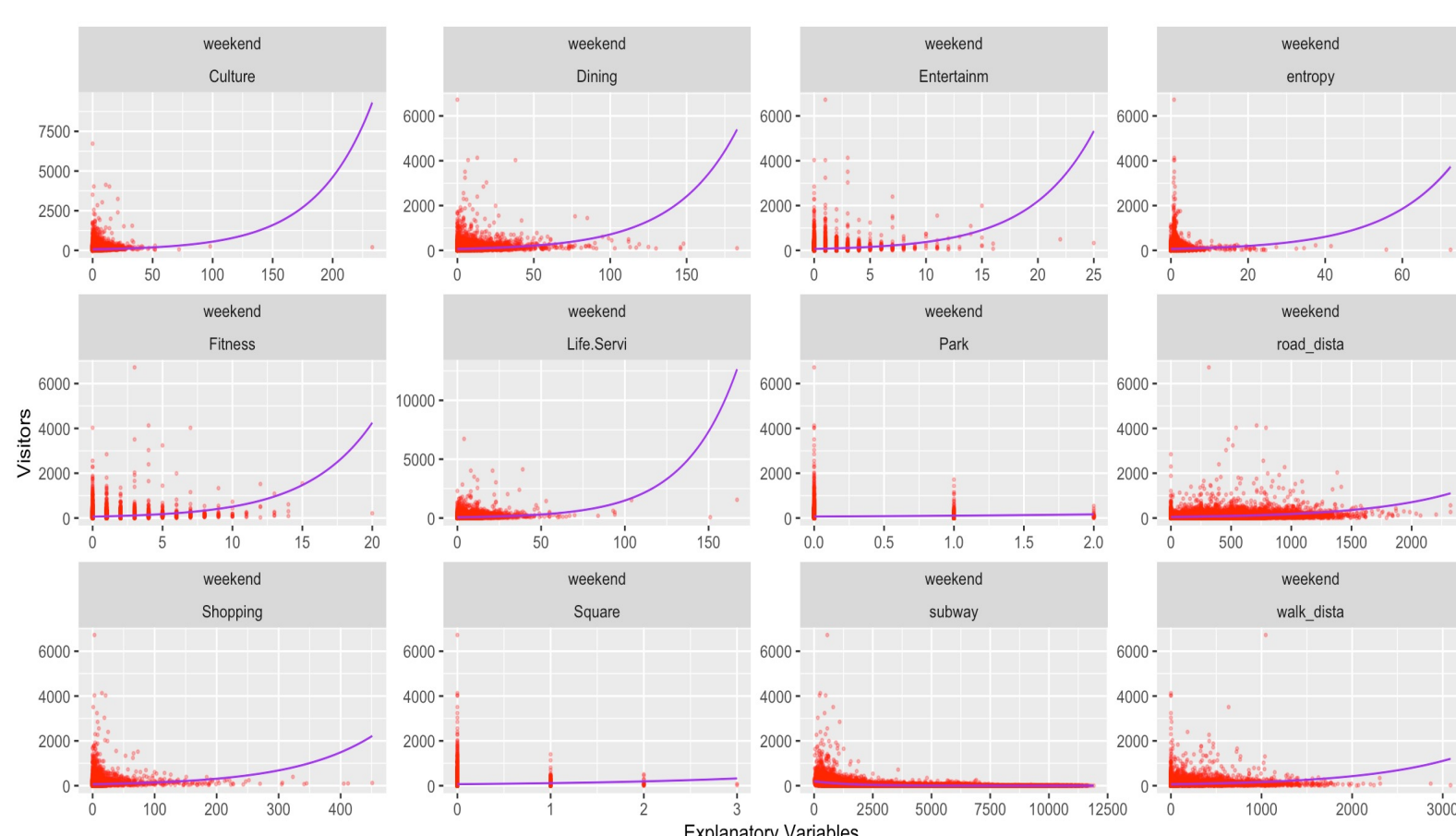
工作日晚间居民出行冷热点分析



周末晚间居民出行冷热点分析



工作日居民夜间出行与建成环境关系散点图



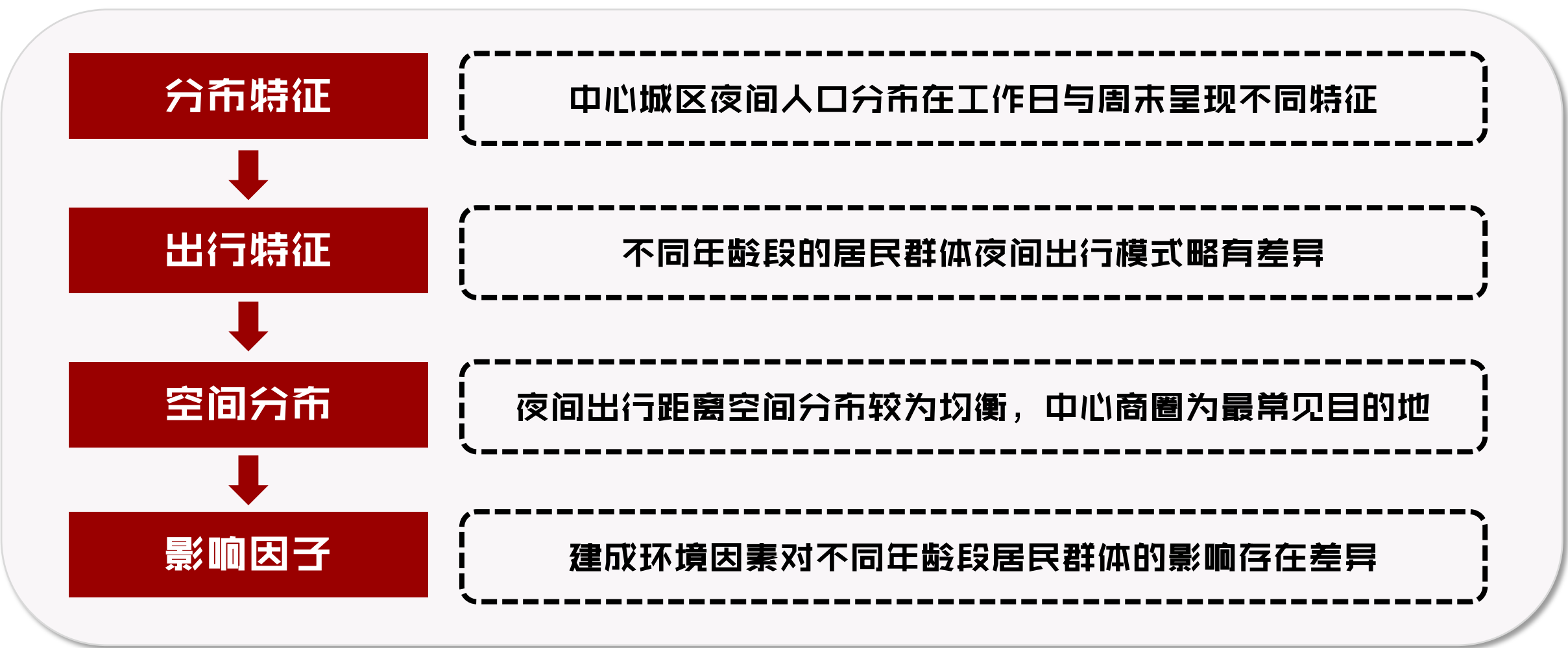
周末居民夜间出行与建成环境关系散点图

|                | Weekdays              |                       |                       |                       | Weekends              |                       |                       |                       |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                | Type 1                | Type 2                | Type 3                | Type 4                | Type 1                | Type 2                | Type 3                | Type 4                |
| dining         | 0.029**<br>(2.030)    | 0.023<br>(0.534)      | 0.021<br>(0.574)      | 0.002<br>(0.305)      | 0.042*<br>(1.786)     | 0.127*<br>(1.944)     | 0.088*<br>(1.735)     | 0.014**<br>(2.264)    |
| shopping       | 0.014**<br>(2.098)    | 0.070***<br>(3.509)   | 0.067***<br>(3.981)   | 0.009***<br>(3.843)   | 0.020*<br>(1.866)     | 0.082***<br>(2.711)   | 0.085***<br>(3.617)   | 0.011***<br>(3.777)   |
| life           | 0.118***<br>(5.711)   | 0.402***<br>(6.372)   | 0.346***<br>(6.523)   | 0.037***<br>(5.000)   | 0.175***<br>(5.099)   | 0.570***<br>(6.011)   | 0.605***<br>(8.244)   | 0.079***<br>(8.492)   |
| entertain      | 0.211**<br>(2.171)    | 0.735**<br>(2.483)    | 0.528**<br>(2.117)    | 0.059*<br>(1.732)     | 0.507***<br>(3.140)   | 1.252***<br>(2.814)   | 0.800**<br>(2.321)    | 0.114***<br>(2.626)   |
| culture        | 0.009<br>(0.354)      | 0.034<br>(0.438)      | 0.089<br>(1.369)      | 0.018**<br>(2.000)    | 0.064<br>(1.507)      | 0.061<br>(0.512)      | 0.108<br>(1.202)      | 0.041***<br>(3.609)   |
| fitness        | 0.057<br>(0.720)      | 0.445*<br>(1.842)     | 0.160<br>(0.785)      | 0.025<br>(0.878)      | 0.041<br>(0.308)      | 0.683**<br>(1.881)    | 0.025<br>(0.088)      | 0.042<br>(1.176)      |
| park           | 0.082<br>(0.223)      | 0.028<br>(0.025)      | 0.579<br>(0.613)      | 0.031<br>(0.238)      | 0.151<br>(0.247)      | 0.017<br>(0.010)      | 0.945<br>(0.724)      | 0.089<br>(0.539)      |
| square         | 0.882*<br>(1.776)     | 2.814*<br>(1.863)     | 2.445*<br>(1.924)     | 0.195<br>(1.115)      | 1.219<br>(1.481)      | 4.430*<br>(1.950)     | 4.032**<br>(2.292)    | 0.569**<br>(2.569)    |
| entropy        | 0.002<br>(0.033)      | 0.098<br>(0.630)      | 0.073<br>(0.561)      | 0.032*<br>(1.778)     | 0.015<br>(0.171)      | 0.042<br>(0.181)      | 0.063<br>(0.350)      | 0.034<br>(1.490)      |
| road_dense     | 0.002***<br>(8.606)   | 0.008***<br>(9.467)   | 0.009***<br>(13.211)  | 0.001***<br>(9.592)   | 0.002***<br>(5.616)   | 0.008***<br>(6.954)   | 0.010***<br>(10.615)  | 0.001***<br>(8.738)   |
| walk_dense     | 0.000<br>(1.073)      | 0.003**<br>(2.378)    | 0.002<br>(1.459)      | 0.000**<br>(2.385)    | 0.001*<br>(1.794)     | 0.007***<br>(3.193)   | 0.006***<br>(3.450)   | 0.001***<br>(2.957)   |
| subway_dis     | -0.006***<br>(-7.725) | -0.018***<br>(-8.256) | -0.014***<br>(-7.683) | -0.001***<br>(-4.959) | -0.007***<br>(-5.438) | -0.018***<br>(-5.500) | -0.015***<br>(-5.755) | -0.001***<br>(-3.883) |
| Observations   | 22651                 | 22651                 | 22651                 | 22651                 | 22651                 | 22651                 | 22651                 | 22651                 |
| R <sup>2</sup> | 0.485                 | 0.546                 | 0.656                 | 0.487                 | 0.466                 | 0.512                 | 0.604                 | 0.525                 |

空间杜宾模型回归分析结果

## 7 结论与讨论

### 主要结论



### 研究不足

#### 缺乏考虑中心城区与周围区域的交互作用

由于从运营商平台获取数据的大小存在限制，因此本文将研究区域从北京市全域缩小至北京市中心城区，研究中心城区的居民夜间出行。然而，考虑到北京市具有独特的空间结构，中心城区外围，例如昌平区、顺义区、通州区、大兴区等地依然存在大量通勤人口。由于这些区域夜间经济活动较弱，居民依然会停留在中心城区内部进行夜间活动。基于此，忽略这部分人口可能会对总体结果产生一定的影响。

#### 手机信令数据的样本代表性不足

本文的数据来源为运营商平台提供的手机信令数据。然而，手机信令数据并不能代表全体北京市居民，例如小孩、老年人可能并不使用手机，或者出行时并不将手机带在身旁。同样，不同运营商的客户群体也存在一定差异。为了消除样本代表性的影响，本文将未满18岁的未成年人排除在外，着重分析了其他年龄群体人群的出行活动。