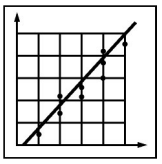

# 基于公交卡数据的城市多尺度职住空间结构特征：以厦门为例*

史瑞铮　高悦尔　杨　春

**提　要**　多尺度下的职住空间结构特征研究可为城市职住空间的合理布局奠定研究基础，在减少资源浪费、缓解交通拥堵、改善生态环境等方面具有重要意义。以厦门为例，基于公交智能卡数据，引入职住识别方法得到职住OD矩阵，应用曲线拟合、社区发现方法对城市的宏观、中观、微观等3个尺度下的职住空间结构特征进行研究。由于尺度效应的存在，单纯依据单元划分会造成对中心分布特征的误判，为弥补这一不足，通过确定全域就业中心分析更大尺度下厦门的多中心空间结构，并构建全域、宏观、中观、微观等4个尺度下的职住通勤圈，对职住空间结构的运行特征作进一步分析。结果发现，不同尺度下通勤圈的相互耦合情况反映了厦门等级化的职住空间结构运行特征。基于本研究的分析结果，可为厦门多尺度的城市空间结构调整提供参考。

**关键词**　空间结构；多尺度；职住空间；社区划分；厦门

中图分类号　TU984　文献标志码　A
DOI　10.16361/j.upf.202204011
文章编号　1000-3363(2022)04-0087-08

Structural Characteristics of Multiscale Jobs-housing Space Based on SCD: A Case Study of Xiamen

SHI Ruizheng, GAO Yueer, YANG Chun

**Abstract:** Understanding the structural characteristics of multiscale jobs-housing spaces can help rationally design such spaces. It is of great significance because rational layout serves to reduce resource waste, alleviate traffic congestion, and improve the ecological environment. The paper takes Xiamen as an example and builds the analysis based on Smart Card Data. The jobs-housing OD matrix is obtained by the identification method. Curve fitting and spatial community detection algorithm are applied to study the structural characteristics of jobs-housing spaces at the macro-level, the median level and the micro-level. Due to the existence of scale effect, simple application of community detection algorithm tends to cause misjudgment of structural features. To make up for this deficiency, the polycentric structure at a larger scale is analyzed by defining the global employment center. The global, macro, median and micro jobs-housing commuting circles are constructed respectively to further reveal the operational characteristics of the jobs-housing spatial structure. The results show that the coupling of commuting circles at different levels reflects the operational characteristics of multiscale jobs-housing spatial structure in Xiamen. The study provides a reference for the adjustment of multiscale urban spatial structure in Xiamen.

**Keywords:** spatial structure; multiscale; jobs-housing space; community division; Xiamen

城市职住空间结构概念来源于城市空间结构理论，指承担职住功能的城市空间所表现出来的空间结构。城市空间结构包括3部分内容，分别为城市形态、城市的相互作用、规定前两者关系的一系列组织原则[1]。城市空间是城市发展的外部表征，具有层次性，是内涵式的、动态变化的，基于这一观点，本研究对多尺度视角下城市职住空间形态及相互作用网络进行探究。根据《2015年厦门市居民出行调查及公交调查报告》，机动化出行中，公交出行占比达46.0%；典型公交站点调查中，72%公交乘客为通勤出行。可以认为基于厦门公交SCD（Smart Card Data）数据，可对其职住空间结构进行探究。本文所提到的城市多尺度职住空间结构特征，主要指公交出行所反映的职住空间位置关系及因各职住空间相互作用而显示的层次化特点。

基于移动定位大数据可对城市空间结构进行模拟。已有研究涵盖了空间社区划分[2]、

**作者简介**

史瑞铮，华侨大学建筑学院硕士，深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司交通规划工程师，ruizheng123@126.com

高悦尔，华侨大学建筑学院教授，通信作者，gaoyueer123@gmail.com

杨　春，厦门市城市规划设计研究院有限公司副总规划师

*国家自然科学基金面上项目：“面向复杂网络的城市大运量公交站点影响区空间关系识别与土地利用模式研究（2021—2024）”，（项目批准号：52078224）

人群活动热点研究[3-5]、土地利用推测[6]、都市圈圈层研究[7-10]等。职住方面，数据维度下职住空间研究涵盖了通勤模式[11]、通勤效率[12]、职住地空间关系识别[13]等。在基于出行网络特征量化认识城市空间结构方面，相关研究已涵盖城市空间结构绩效机理分析[14-15]、不同尺度职住平衡研究[16]、多尺度单元职住关联特征[17]、城市内部空间结构功能联系特征[18]等，但往往采用行政区、城市内外圈层、人口普查区等人为边界进行分析，基于客观的数理统计进行多尺度空间边界划分并应用于职住空间结构特征的研究存在缺失。

同时，流动空间理论为人们理解城市空间结构关系提供了新视角。由于可塑性面积单元问题（modifiable areal unit problem，MAUP）中尺度效应[19]的存在，不同尺度下空间结构特征可能存在很大不同。通过拟合出行距离概率分布，使两端的分布函数不同以确定距离截断阈值，进而将整体数据划分为不同的出行网络，可精细确定不同尺度下城市空间结构特征。如：基于出租车OD数据构建不同出行距离网络，识别城市两级空间结构[20]；基于出行距离指数衰减率探究城市内人口流动指数规律[21]；基于推特OD数据，拟合距离分布函数幂律差异对城市局部、全局和城际间的出行OD进行分组[22]；通过曲线拟合确定长距离和短距离出行距离衰减参数[23-24]；基于出行长度幂律拟合确定不同交通模式距离衰减效应[25]等。这一系列研究对城市空间进行了精细划分，揭示了不同尺度下城市人群活动空间边界，对规划策略制定具有重要意义。但根据中心地理论，城市空间结构层次是多维的，一般可将其划分为宏观、中观、微观等3级[26]，而现有研究往往忽略了微观层次。为弥补这一缺陷，本研究以厦门为例，引入职住OD数据，结合网络分析和空间统计，尝试以小区单元、中区单元、大区单元对应于微观、中观、宏观等3维度城市职住空间情况，对不同尺度职住空间结构特征进行研究。所得的分析结果均为职住社区，为避免与一般意义上的“社区”相混淆，以下简称为“单元”。

首先，基于SCD数据职住地识别方法，构建城市职住OD矩阵，并根据通勤距离曲线拟合确定截断阈值，将职住通勤矩阵初步划分为中区和大区两级，对应相关研究的局部尺度（local scale）和全局尺度（global scale）。通过应用社区发现（community detection）方法，将研究区域划分为内部连接紧密外部连接稀疏的单元，以确定中区和大区单元边界。其次，确定极短距离通勤阈值，根据该值确定小区单元边界，并依据空间单元耦合情况构建3级职住空间结构。最后，应用PageRank①指标识别全域就业中心，并构建不同尺度职住通勤圈，进一步探讨城市多尺度职住空间结构特征。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况与数据

厦门下辖思明、湖里、集美、海沧、同安、翔安等6区，思明和湖里位于厦门岛内，其他4区位于岛外。空间研究范围为常规公交、轨道、BRT所覆盖的厦门岛及厦门岛外主体陆地，不包括厦门所辖其他海岛及上述交通模式未覆盖区域。数据方面，应用2019年4月21个工作日SCD数据，参照已有职住识别方法[13]，识别研究区内各持卡人职住地，对同一职住OD人数进行汇总，以存在职住样本的站点作为统计对象，识别流程见图1，数据识别及校核见表1。

职住地均识别成功的持卡人数为159 344人，对应大区尺度职住空间网络。根据《2015年厦门市居民出行调查及公交调查报告》，机动化出行中，公交出行人群占比接近一半，典型公交站点调查中，通勤出行占比近3/4。考虑到机动化出行覆盖空间范围较大，通勤人群在公交乘客中占比高，结合校核结果，可认为本数据较好反映了2019年4月厦门职住空间分布及动态关联情况。另外，公交站间的通勤反映了两个区域的职住空间联系，根据相关做法[2]，本研究基于公交站位置构建泰森多边形（Thiessen polygon）界定站点职住表征区（以下称为“空间基本单元”）并将其应用于多尺度空间单元划分。

### 1.2 空间网络的构建

（1）基于职住识别规则，得到不同卡号职住站点矩阵。

以职住地欧氏距离作为拟合对象，确定截断阈值以构建短途通勤矩阵和长途通勤矩阵，初步建立中区和大区尺度职住网络。具体为：拟合出行距离概率分布函数，使其两端分布不同，比较不同距离的确定系数$R^2$，确定相应职住通勤截断阈值[24]。

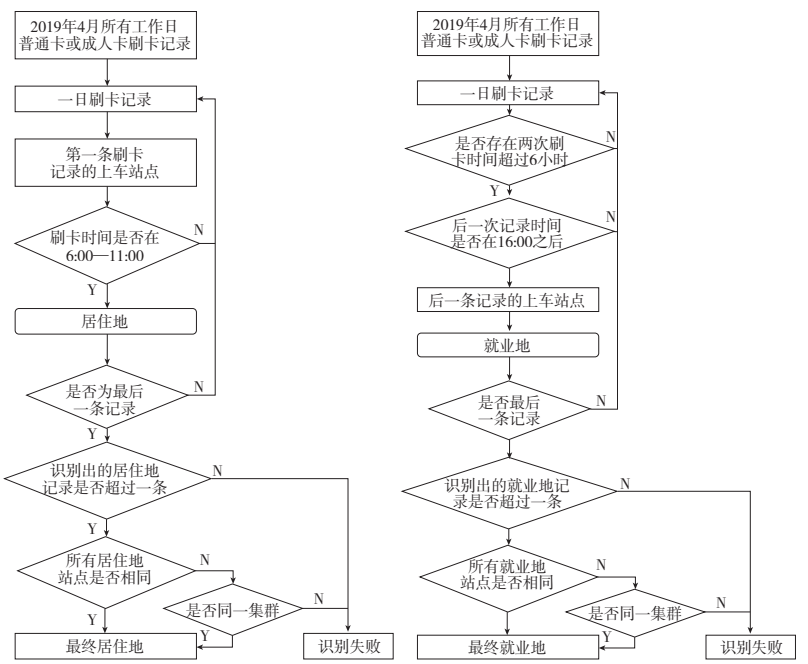


**图1 持卡人居住地和就业地识别流程**

Fig.1 The process of identifying cardholder's jobs - housing location

**表1　本次厦门市SCD职住识别与校核**

Tab.1　Identification and verification of SCD in Xiamen

| 识别情况 | 相关指标 | 识别情况 |
|---|---|---|
| 居住人群 | SCD数据识别居住人口/万人 | 52.2 |
| | 2019年常住人口/万人 | 512 |
| | 识别率 | 0.102 |
| | 与第六次人口普查数据校核检验 | Spearman相关系数=0.849 |
| | | $P$<0.01 |
| | | $N$=36 |
| 就业人群 | SCD数据识别就业人口/万人 | 38.71 |
| | 2019年就业人口/万人 | 约178 |
| | 识别率 | 约0.23 |
| | 与厦门市资源规划信息平台中就业数据校核检验 | Spearman相关系数=0.700 |
| | | $P$<0.01 |
| | | $N$=36 |
| 识别职住通勤人口/万人 | | 15.93 |

资料来源：2019年厦门交通运输局SCD数据，相关统计年鉴、普查数据、政务系统数据。

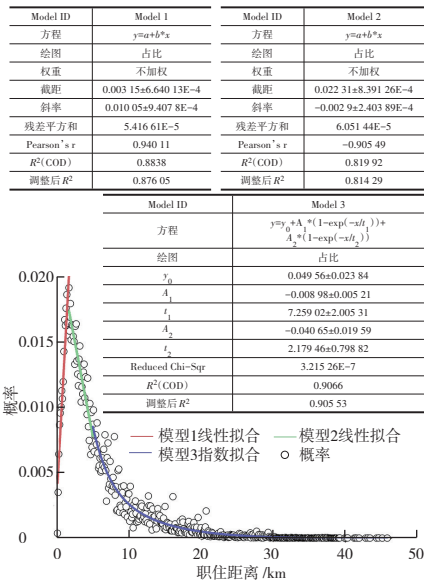


**图2　职住距离概率分布图最优拟合情况**

Fig.2　Optimal fitting of probability distribution diagram of employment and housing distance

（2）结合职住地站点和截断阈值，构建职住空间网络。

首先，汇总同一职住站点对的职住人数，以某一出行距离内职住OD构建矩阵，由于通勤的双向性，将其构建为加权无向图，代表2019年4月厦门公交通勤OD行程。该图由节点集、行程集和行程量3元素构成，将其定义为$G_1$≡($N$, $L$, $W$)。其中：$N$表示站点表征区域集合；$L$表示任意两区域间行程集合，$L$是一组有序的$N$元素对；$W$表示任意两区域间职住人数集合。为识别就业中心，以居住地至就业地“就业”方向构建加权有向图$G_2$，$G_1$和$G_2$共用节点集、行程集和行程量，仅在方向设定上不同。

### 1.3　复杂网络分析和社区发现

基于所构建的加权图，本研究定义中心和边界2种城市空间结构要素。

（1）中心（centers）是指在城市出行中被访问概率最高的区域。以PageRank指标定义城市中心。以反距离加权法（inverse distance weighted，IDW）进行插值运算，将离散节点属性值转换成结构化区域并基于自然间断点法将插值图划分为低中高3级，将高等级包络区定义为中心[27]。

（2）边界（borders）指社会经济边界，由聚集的出行区位选择而产生，出行选择将整体区域划为多个单元。针对$G_1$，应用社区发现方法确定单元边界。社区发现方法中，Infomap算法性能优异，其形成的单元结构稳定，适合当前的加权职住网络[28]。本实验重复运行Infomap算法1000次，以最优结果作为最终实验结果。所划分原始单元边界邻接处可能存在噪声点，通过计算各单元PageRank总和表示各单元被访概率，当某空间基本单元有归属问题时，将其归为邻接PageRank总和最大单元。至此，空间边界连续的单元得以确定。

## 2　多尺度下的职住空间结构

### 2.1　不同尺度职住空间单元的确定

不同尺度通勤形成了不同级别单元边界。单纯基于中观和宏观层次将城市空间划分为中区和大区两级，忽视了微观层次城市空间结构运行情况。本研究尝试根据极短距离通勤矩阵确定小尺度空间单元边界，以弥补相关研究对微观层面关注较少的不足。

#### 2.1.1　确定截断阈值

通过对职住距离概率分布进行拟合，参照确定系数$R^2$确定截断阈值，最优拟合如图2所示。可以看出，职住出行距离在1.7 km处达到峰值，于1.7 km至5.0 km职住出行距离下降速率较均匀。为便于统计，阈值均精确到整数。由于在2 km至5 km段呈线性分布，大于5 km段明显呈指数分布，$R^2$分别为0.82和0.91，拟合优度总体最高，因而确定截断阈值为5 km。基于职住矩阵和截断阈值，以5 km以内职住OD构建中区尺度职住矩阵。以全体职住OD构建大区尺度职住矩阵。

#### 2.1.2　基于极短距离出行的小区单元划分

从“流动空间”理论[29]角度看，多尺度空间结构的产生依赖于城市内部人员不同出行距离相互耦合，城市内短途和长途出行通常存在不同的出行目的和出行模式，因而不同出行距离下形成的空间结构存在一定差异。可以认为：出行距离越短，所形成单元空间级别越低，基于极短距离出行分布可确定城市低级别职住单元。根据图2，在0—2 km与2—5 km分布函数存在明显差异，极短距离阈值应介于0—2 km。为与截断阈值精度一致，重点对1 km和2 km比选，并从空间分布和数据分布两维度确定极短距离阈值。

空间维度方面（图3），1 km和2 km单元尺度差异较大，2 km单元多由1 km单元组成。数据维度方面（图4），从冲积图（alluvial diagrams）②所描述1 km单元和2 km单元节点构成变化可见：1 km单元内部节点多以整体合并形式构成2 km单元。这均说明1 km单元已具备通勤内聚的特征，1 km单元和2 km单元的空间规模、运行模式、中心地级别存在一定不同，且1 km单元站点涵盖了92.96%的全局职住OD，全局尺度通勤量极大，边界连续。综合确定1 km为极短距离通勤阈值。以该距离内通勤OD为基础确定微观层次空间边界，并将其命名为“小区单元”。

#### 2.1.3　3种尺度单元分布情况

基于极短距离通勤阈值和截断阈值，分别以1 km内职住OD矩阵、5 km内职住OD矩阵、总体职住OD矩阵构建

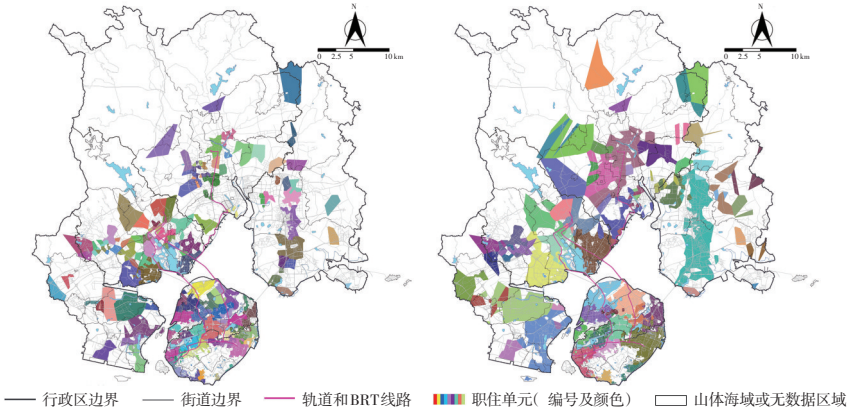


图3 1 km单元（左）和2 km单元（右）分布

Fig.3 Distribution of 1 km units (left ) and 2 km units (right)

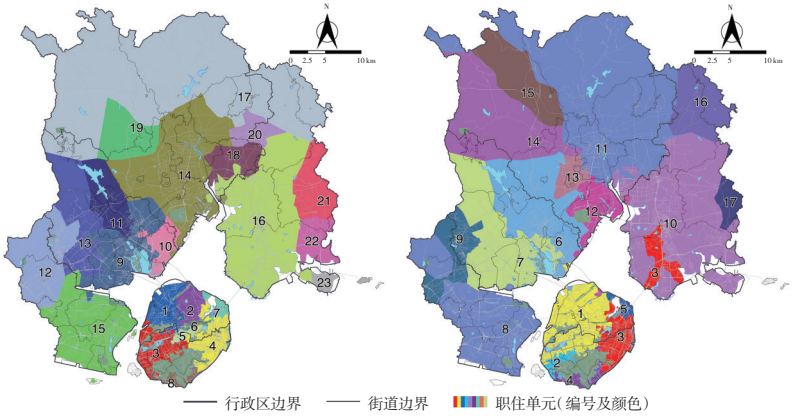


图5 厦门市中区（左）和大区（右）单元划分情况

Fig.5 Division of local (left) and global (right) units in Xiamen

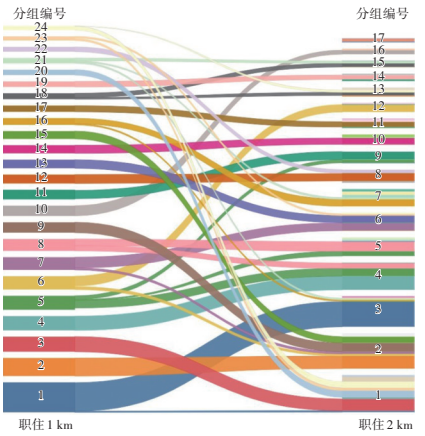


图4 1 km单元（左）和2 km单元（右）冲积图②

Fig.4 Alluvial diagrams of 1 km units (left) and 2 km units (right)

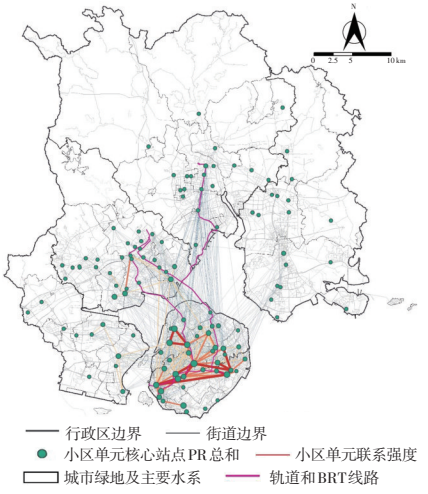


图6 小区单元联系强度分布图

Fig.6 Distribution of contact strength between small units

小区、中区、大区尺度无向加权网络，并确定单元边界。3级单元划分结果如图3左和图5所示。

整体上看，多数大区单元主体可视作由中区单元在空间上合并产生。现将低等级单元合并为高等级单元现象称为“单元合并”。单元合并在岛内分布较多，如大区单元1可视为中区单元1、2、3、5、6的合并。海陆岸线对所得单元边界具有绝对影响，多数中区单元横跨多街道，其陆地边界与行政边界差异较大。部分大区单元边界和行政区边界存在一定一致性，如大区单元8、10分别可指代海沧、翔安。主体位于岛内的大区单元3的部分区域位于岛外，可说明当前跨岛通勤现象明显。

## 2.2 城市职住空间相互作用辨析

为进一步揭示不同尺度职住空间相互作用，在所得单元边界基础上，应用职住OD，对3种尺度下单元相互作用进行分析。

### 2.2.1 小区单元相互作用测度

所构建的复杂网络中，各单元所覆盖站点PageRank总值为各单元被访问总体概率。为便于分析，将各单元中最高被访概率站点作为其中心地。汇总各小区单元OD量，应用所涵盖的全局OD矩阵，得到OD联系图（图6）。可看出，高强度通勤集中分布在岛内，并以厦门岛为中心向岛外发散。基于1 km内的职住OD，绘制单元内部站点职住人数分布图及职住期望线分布图（图7）。由于1 km通勤距离较短，未覆盖全部站点，部分站点未分组（图中灰色区域）。厦门岛内短距离通勤强度高于岛外，且呈团块分布，高职住强度站点多分布在轨道和BRT沿线。

### 2.2.2 中区单元和大区单元空间相互作用分析

进一步构建中区、大区单元间通勤期望线分布（图8）。从中区期望线可见，岛内通勤内聚性很强，通勤密度极高。从大区单元通勤期望线看，岛内岛外职住空间相互作用强度较高。结合图7右与图9可以看出，尽管在图6和图8中，3级空间单元间职住通勤期望线分布所应用的数据大致相同（小区单元未完全覆盖所有站点，占总量的92.96%，中区单元、大区单元所应用的均为总体职住OD数据），但呈现的联系强度存在很大差异。具体表现为：小区和中区层面，岛内单元间强相互作用和岛内岛外单元间的弱相互作用；大区层面，岛内单元间和岛内岛外单元间的强相互作用。这一结果也印证了MAUP效应中尺度效应的存在。

## 2.3 职住空间结构图的构建

基于上述角度，汇总各空间基本单

元在3个尺度下的从属关系。当某较大尺度单元所覆盖的空间基本单元位于某较小尺度单元内时，则将该较小单元作为该较大单元的子单元，并认为这两尺度单元的中心地存在从属性。参照传统城市空间结构规划图（图10右）形式，基于各尺度单元中心地点位及规模，构建层次化职住空间结构图。最终结果如图10左所示。各尺度单元空间联系方向反映了各等级中心地与腹地的耦合细节，尽管存在大区单元跨岛分布情况，但中区单元空间联系方向均未跨岛，说明岛内空间和岛外空间均具有强内聚性。等级明确的职住中心体系及相互作用关系揭示了城市内部层次化的职住空间结构。

## 3　多尺度职住空间结构特征

根据“流动空间”理论，网络是流动空间主要表现形式，城市空间网络的层级与腹地存在模糊性。所确定的3个尺度单元倾向于将城市划分为多个子单元，强调子单元内部联系紧密的同时，忽略了全域尺度下通勤人员高度集聚产生的多中心空间结构特征。为弥补这一不足，揭示同一尺度和上一尺度间的腹地模糊性，引入加权一级标准差椭圆构建通勤圈以锁定各单元核心节点群[31]，通过纵向对比各尺度通勤圈分布，揭示其集聚程度。高等级通勤圈是揭示低等级通勤单元通勤集聚性的基础，大区单元的集聚性特征需通过参照更大尺度通勤圈进行解释。为此，通过识别全域就业中心构建全域通勤圈，揭示大区单元集聚情况。

### 3.1　全域就业中心识别

基于通勤联系对区域尺度就业中心分布进行测度，可揭示城市区域多中心空间结构[32]。基于PageRank识别城市就业中心，结合地块边界，确定规模较大的3个空间连续区为就业中心。根据其覆盖职住人数，由高至低分别命名为1—3号（图11）。可见厦门岛集聚了大量职住人口，是城市主核，岛外小规模就业中心分布说明规划结构所描绘的“环湾城市带”开始显现，呈现出“一岛一带多中心”的职住空间结构，并且岛内中心多呈团带状分布，岛外多呈点状分布。

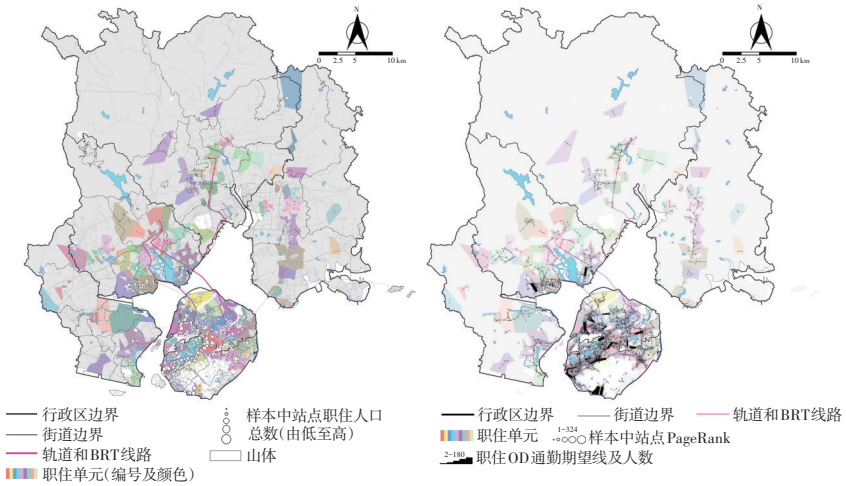


**图7　通勤距离1 km内小区单元节点职住人数分布（左）和通勤距离1 km内节点职住期望线分布（右）**

Fig.7　Distribution of workers and residents in the small units within 1 km of commuting trips (left) and distribution of expectation line at nodes within 1 km of commuting trips (right)

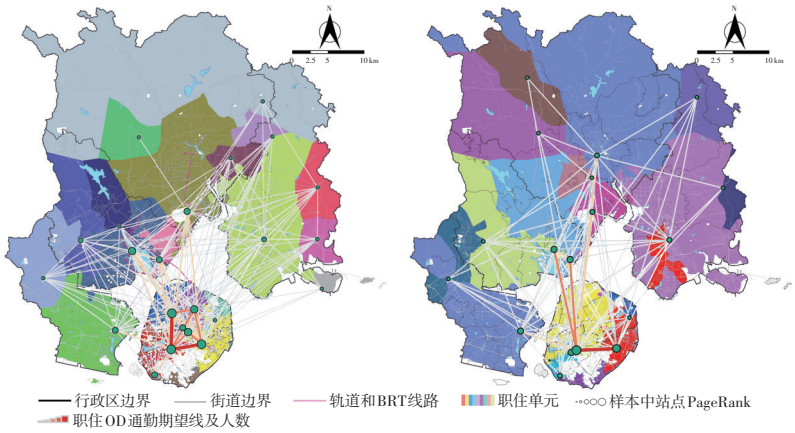


**图8　中区单元间通勤期望线分布（左）和大区单元间通勤期望线分布（右）**

Fig.8　Distribution of commute desire lines between local units (left) and global units (right)

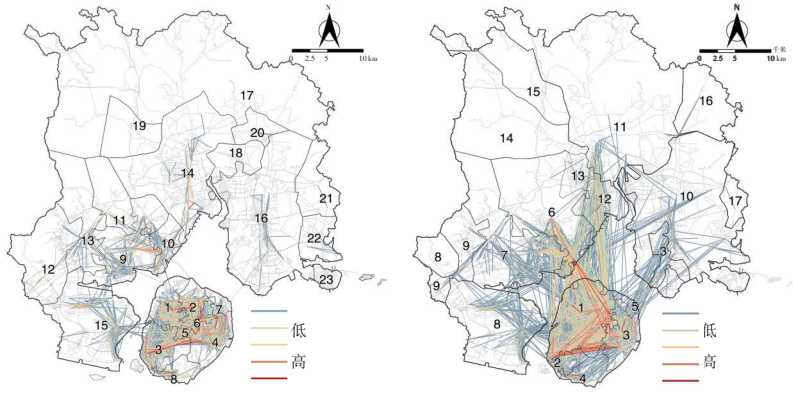


**图9　中区单元通勤链接（左）和大区单元通勤链接（右）**

Fig.9　Commuting trips count aggregated at the local scale (left) and global scale (right)

### 3.2　多尺度通勤圈空间运行特征

“通勤圈”是指在一定通勤区范围内，以通勤中心为核心，以完成一定通勤出行为目的的空间范畴集合[31]。以不同尺度单元内部公交站点为对象，以各站点职住人数为权重，应用加权一级标

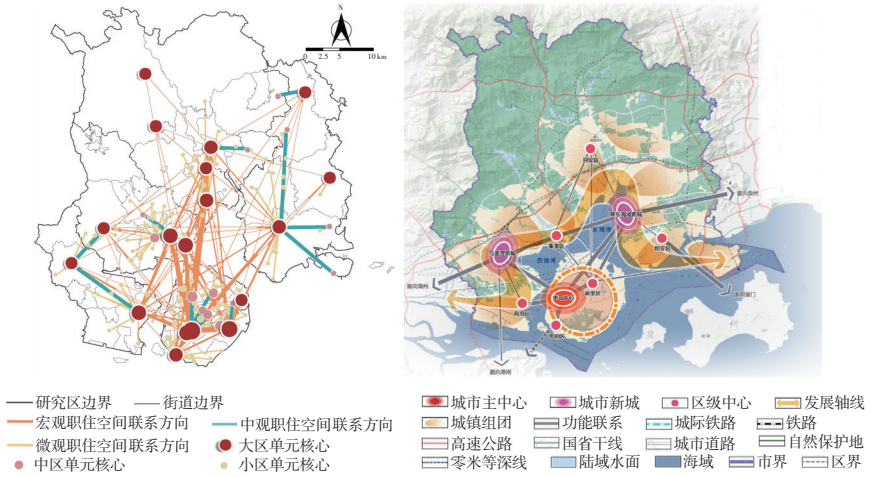


**图10 层次化职住空间结构（左）和厦门国土空间总体规划（2020—2035）城市空间结构示意图（右）**

Fig.10 Hierarchical occupational and residential spatial structure (left) and urban spatial structure plan of Xiamen territorial spatial planning (2020–2035) (right)

资料来源：左图为作者自绘，右图来源于厦门市自然资源和规划局官网，《厦门市国土空间总体规划（2020—2035年）（草案）》，2021-11-27

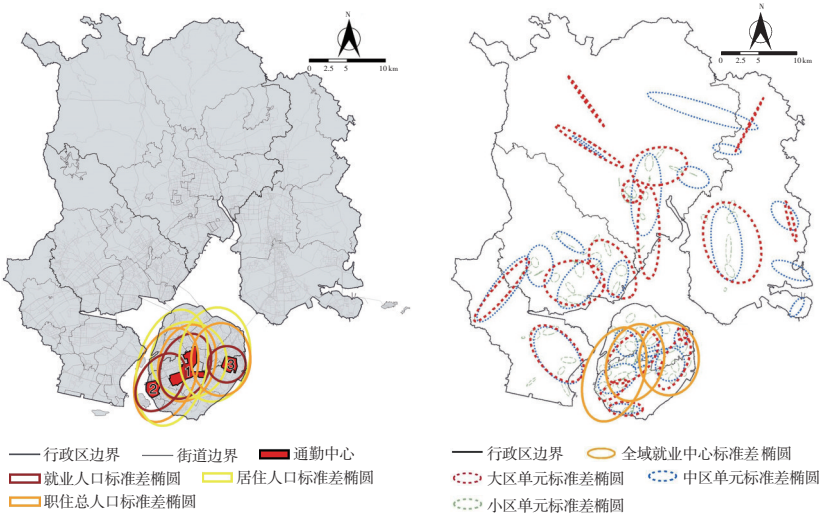


**图12 各就业中心通勤圈外部形态分布（左）和不同尺度下的通勤圈分布（右）**

Fig.12 Distribution of external forms of commuting circle of employment centers (left) and distribution of commuter circles at different scales (right)

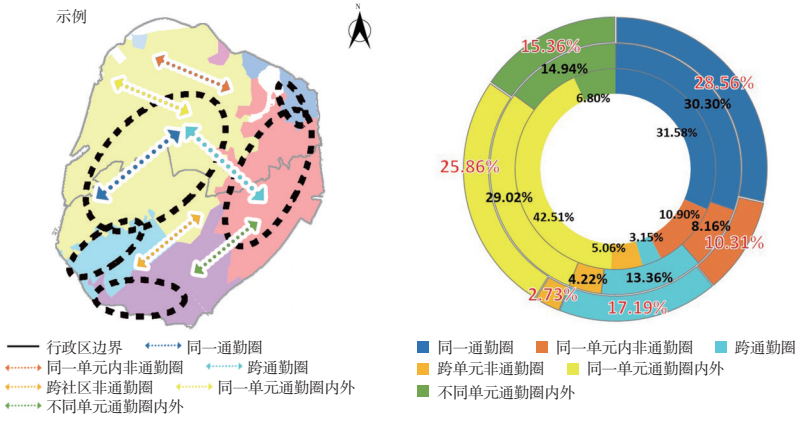


**图13 单元通勤圈通勤类型（左）及3个尺度下通勤圈通勤比例（右）**

Fig.13 Commuting type of unit commuting circle (left) and proportion of unit commuting circle under three scales (right)

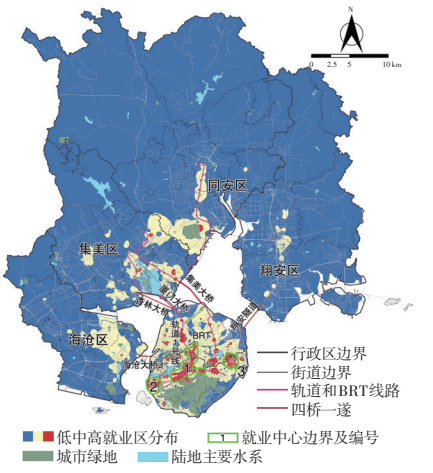


**图11 城市就业中心编号图**

Fig.11 Numbering of urban employment centers

准差椭圆测度不同单元通勤圈形态特征。基于图11所得的3个中心边界，分别以居住人数、就业人数、职住总人数作为权重测度通勤圈（图12左）。对比3类椭圆面积可发现，各就业中心就业人口通勤圈面积均最小，居住人口通勤圈面积最大。这说明与就业中心相关的就业人口分布相对内聚，居住人口分布相对发散。为揭示小区、中区、大区通勤圈与就业中心通勤圈耦合情况，以职住人数为各站点权重，构建4个尺度下的通勤圈分布图（图12右）。并根据单元边界和通勤圈分布，将小区、中区、大区3个尺度的通勤OD分为6类（就业中心通勤圈无单元边界，无法纳入），对同尺度各单元间联系进行量化（图13）。

从同尺度单元内部联系（图13）看，小区、中区、大区通勤圈内及通勤圈间的客流占比分别为34.73%、43.66%、46.47%，同一单元内通勤占比分别为84.99%、67.48%、64.73%，说明单元内部通勤占比较高，通勤活动在通勤圈内部集聚。

从不同尺度单元来看，在通勤圈分布方向上，小区单元通勤圈（以下简称“小区圈”，其他尺度亦同）的长轴方向多与所覆盖区域主要道路走向一致。岛内中区圈长轴多指向1号中心，并沿快速路、主干路、轨道和BRT线延伸。大区圈趋于将岛内中区单元整合，在中区圈整合基础上，长轴方向与快速路和重要桥隧方向较为一致。

从覆盖范围看，小区圈多被中区圈

完整覆盖，表明小区单元与中区单元的高度从属关系。但中区圈和大区圈相互覆盖情况岛内岛外明显不同：岛内这两尺度通勤圈多为交叉叠合，覆盖区域差异明显；岛外多为方向旋转，覆盖区域差异不大。事实上，这揭示了城市内部不同尺度单元腹地争夺区分布情况：中区圈和大区圈覆盖范围差异越小，对应大区单元的腹地范围越稳定。岛内大区单元腹地争夺主要由3个就业中心主导，多数岛内中区圈长轴也指向邻接的就业中心。针对岛外中区圈和大区圈方向分布差异，按照中区圈覆盖区域在大区圈的变化程度，可将岛外大区圈分为微变型和分解型。微变型说明其对应单元内长距离通勤占比较低，公交通勤内聚程度较高，具备成为独立城市次级节点的潜力，如主体位于海沧和翔安两区的大区圈（除长轴方向存在小角度旋转外并无明显差异）；分解型说明在该单元内长距离通勤占比较高，具备成为宏观城市核心节点潜力，如位于集美和同安的4个大区圈（中区尺度下，所覆盖区域被分解为多个方向差异较大的中区圈）。各类椭圆相互交叠反映了城市空间的层次关系，同一尺度单元以及不同尺度单元间的相互耦合，构成了厦门多尺度的职住空间结构体系（图14）。

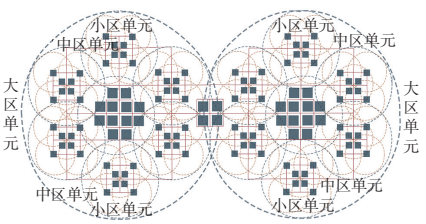


**图14　多尺度职住空间结构示意图**

Fig.14　Schematic diagram of multiscale jobs-housing spatial structure

## 4　结论与讨论

本文应用厦门SCD数据，引入职住识别方法得到职住OD矩阵，应用曲线拟合和社区发现算法对城市空间进行分层，对城市的多尺度职住空间结构特征进行研究。结果发现，目前海沧、集美、同安的沿海区域存在大面积中等级就业区，但翔安沿海区域中等级以上就业区较少，厦门的“一岛一带多中心”职住空间结构开始初步显现。城市多尺度职住空间存在相互耦合的特征，由于MAUP尺度效应的存在，不同尺度单元分布存在差异，主要表现为：小区尺度下岛内单元内部强相互作用；中区尺度下岛内单元间强相互作用和岛内单元与岛外单元间弱相互作用；大区尺度下岛内岛外单元间强相互作用。为揭示同一尺度和上一尺度的空间模糊性问题，构建了全域、宏观、中观、微观等4个尺度的职住通勤圈。各尺度通勤圈在空间上呈明显的层次关系，同尺度通勤圈存在内部集聚和外部整合特征，小区和中区单元从属关系较强，中区和大区单元从属关系较弱，岛内大区圈分布多指向临近的全域就业中心。各尺度通勤圈空间耦合反映了厦门多尺度下职住空间结构特征。

通过确定阈值所得的各层级单元边界一定程度上也反映了通勤人群对通勤尺度的认知，填补了相关研究在微观层面的缺失，并揭示了宏观层面的通勤集聚情况，丰富了城市职住空间结构研究的层次化视野。所提的研究体系可用于不同规模城市职住空间结构研究，其结果可为更精细的城市空间结构规划提供参考，并有利于城市空间规划评估工作的展开。

本研究缺陷在于所用的SCD数据只针对公交客流，公交出行在1 km内竞争力较低，且受制于站点位置、线路布局、刷卡设备等因素，SCD数据并不能完全反映城市整体人员的出行。未来可引入多源数据，如手机数据、浮动车数据、出行问卷调查数据等，进一步对职住空间结构进行校核，为积极调整城市空间结构、缓解城市问题、实现城市高质量发展提供有益的思路。

### 注释

① PageRank[33]这一指标可度量一个节点或社区在网络中所有节点或社区内部流量的聚集强度，具体含义为访问任何节点$j$的概率$r_j$。其定义为：$r_j=\left[(1-\rho)/N\right]+\rho\sum_i r_i p_{ij}$，其中，$\rho$是一个阻尼系数，通常设置为0.85。$p_{ij}$是从节点$i$切换到$j$的概率，且与连接$i$到$j$的行程权重成比例，即：$p_{ij}=w_{ij}/\sum_k w_{ik}$，且$\sum_j p_{ij}=1$。

② 冲积图[30]可揭示两个网络分组的节点变化情况。各行中的每个独立分区（分区以空白间隔为界）代表一个分组，块的高度反映了节点数的多少，高度越高节点数越多。图上的平滑色带表示1 km网络向2 km网络转变时，1 km单元转换至相应2 km单元的站点数量。

### 参考文献（References）

[1] BOURNE L S. Urban spatial structure: an introductory essay on concepts and criteria[J]. Internal Structure of the City, 1982: 28-45.

[2] CHEN Zhong, ARISONA S M, HUANG Xianfeng, et al. Detecting the dynamics of urban structure through spatial network analysis[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(11): 2178-2199.

[3] HOTEIT S, SECCI S, SOBOLEVSKY S, et al. Estimating human trajectories and hotspots through mobile phone data[J]. Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking, 2014, 64(4): 296-307.

[4] YANG Xiping, FANG Zhixiang, XU Yang, et al. Understanding spatiotemporal patterns of human convergence and divergence using mobile phone location data [J]. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing International Journal of Geo-Information, 2016, 5(10): 177-177.

[5] 黄哲, 钟卓乾, 袁奇峰, 等. 东莞样本: 全球城市区域腹地城市的发展挑战与地方响应 [J]. 城市规划学刊, 2021(3): 36-43. (HUANG Zhe, ZHONG Zhuoqian, YUAN Qifeng. Challenges and local responses of the hinterland city in China's global city regions: a case study of Dongguan[J]. Urban Planning Forum, 2021(3): 36-43.)

[6] TU Wei, CAO Jinzhou, YUE Yang, et al. Coupling mobile phone and social media data: a new approach to understanding urban functions and diurnal patterns[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017: 1-28.

[7] 马璇, 林辰辉, 陈阳, 等. 区域尺度下空间规划技术框架思考: 基于上海大都市圈规划实践[J]. 城市规划学刊, 2022(2): 83-89. (MA Xuan, LIN Chenhui, CHEN Yang, et al. Study on the technical framework of spatial planning at the regional scale based on the planning of greater Shanghai metropolitan area[J]. Urban Planning Forum, 2022(2): 83-89.)

[8] 郑德高, 朱郁郁, 陈阳, 等. 上海大都市圈的圈层结构与功能网络研究[J]. 城市规划学刊, 2017(5): 41−49. (ZHENG Degao, ZHU Yuyu, CHEN Yang, et al. Structure and functional network of Shanghai metropolitan[J]. Urban Planning Forum, 2017(5): 41−49.)

[9] 郑德高. 等级化与网络化: 长三角经济地理变迁趋势研究[J]. 城市规划学刊, 2019(4): 47−55. (ZHENG Degao. Hierarchy and networking: a study on the trend of economic geography in the Yangtze River Delta region[J]. Urban Planning Forum, 2019(4): 47−55.)

[10] 汪光焘, 李芬, 刘翔, 等. 新发展阶段的城镇化新格局研究: 现代化都市圈概念与识别界定标准[J]. 城市规划学刊, 2021(2): 15−24. (WANG Guangtao, LI Fen, LIU Xiang, et al. New patterns of urbanization in the new development stage: the concept and identification standards of modern metropolitan areas[J]. Urban Planning Forum, 2021(2): 15−24.)

[11] MONTIS A D, CASCHILI S, CHESSA A. Commuter networks and community detection: a method for planning sub regional areas[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2013, 215(1): 75−91.

[12] 范佳慧, 张艺帅, 赵民, 等. 广州市空间结构与绩效研究: 职住空间的视角[J]. 城市规划学刊, 2019(6): 33−42. (FAN Jiahui, ZHANG Yishuai, ZHAO Min, et al. On the spatial structure and performance of Guangzhou: a perspective of job−housing space[J]. Urban Planning Forum, 2019(6): 33−42.)

[13] LONG Ying, THILL J C. Combining smart card data and household travel survey to analyze jobs − housing relationships in Beijing[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2015, 53: 19−35.

[14] 李峰清, 赵民, 吴梦笛, 等. 论大城市"多中心"空间结构的"空间绩效"机理: 基于厦门LBS画像数据和常规普查数据研究[J]. 城市规划学刊, 2017(5): 21−32. (LI Fengqing, ZHAO Min, WU Mengdi, et al. Polycentric mage−city and its mechanism of spatial performance: findings from Xiamen based on LBS and census data[J]. Urban Planning Forum, 2017(5): 21− 32.)

[15] 李峰清, 赵民, 黄建中. 论大城市空间结构的绩效与发展模式选择[J]. 城市规划学刊, 2021(1): 18−27. (LI Fengqing, ZHAO Min, HUANG Jianzhong. The performance of spatial structure and the choice of development model of maga−city[J]. Urban Planning Forum. 2021(1): 18−27.)

[16] 潘海啸, 王紫瞻. 空间单元选择及多维度要素对职住平衡成效的影响[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 25−31. (PAN Haixiao, WANG Zizhan. The effects of spatial measurement choice and multidimensional factors on jobs−housing balance[J]. Urban Planning Forum, 2020(2): 25−31.)

[17] 郭亮, 毕瑜菲, 黄建中, 等. 大城市职住空间特征的多尺度比较与分析: 以武汉为例[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 88−97. (GUO Liang, BI Yufei, HUANG Jianzhong, et al. Multi−scale comparison and analysis of jobs−housing spatiale characteristics in big cities: taking Wuhan as an example[J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 88−97.)

[18] 丁亮, 宋小冬, 钮心毅. 城市空间结构的功能联系特征探讨: 以上海中心城区为例[J]. 城市规划, 2019, 43(9): 107−116. (DING Liang, SONG Xiaodong, NIU Xinyi. Characters of functional linkage of urban spatial structure: a case study of Shanghai central city[J]. City Planning Review, 2019, 43(9): 107−116.)

[19] 陈江平, 张瑶, 余远剑. 空间自相关的可塑性面积单元问题效应[J]. 地理学报, 2011, 66(12): 1597−1606. (CHEN Jiangping, ZHANG Yao, YU Yuanjian. Effect of modifiable areal unit problem in spatial autocorrelation[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(12): 1597−1606.)

[20] LIU Xi, GONG Li, GONG Yongxi, et al. Revealing travel patterns and city structure with taxi trip data[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 43: 78−90.

[21] LIANG Xiao, ZHAO Jichang, LI Dong, et al. Unraveling the origin of exponential law in intra−urban human mobility[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1−7.

[22] JURDAK R, ZHAO Kun, LIU Jiajun, et al. Understanding human mobility from twitter[J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0131469.

[23] YIN Junjun, SOLIMAN A, YIN Dandong, et al. Depicting urban boundaries from a mobility network of spatial interactions: a case study of Great Britain with geo−located twitter data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(7−8): 1293−1313.

[24] QIAO Mengling, WANG Yandong, WU Shanmei, et al. Fine−grained subjective partitioning of urban space using human interactions from social media data[J]. IEEE Access, 2019, 7: 52085−52094.

[25] ZHANG Xiaohu, XU Yang, TU Wei, et al. Do different datasets tell the same story about urban mobility: a comparative study of public transit and taxi usage[J]. Journal of Transport Geography, 2018, 70: 78−90.

[26] 赵莹. 大城市空间结构层次与绩效: 新加坡和上海的经验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (ZHAO Ying. The hierarchy and performance of spatial structure in metropolitan area empirical study of Singapore and Shanghai[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)

[27] 张逸姬, 甄峰, 罗桑扎西, 等. 基于多源数据的城市职住空间匹配及影响因素研究[J]. 规划师, 2019, 35(7): 84−89. (ZHANG Yiji, ZHEN Feng, Luosangzhaxi, et al. Urban working−housing balance and influencing factors based on multisource data [J]. Planners, 2019, 35(7): 84−89.)

[28] LANCICHINETTI A, FORTUNATO S. Community detection algorithms: a comparative analysis[J]. Physical Review E, 2009, 80(5): 056117.

[29] 王垚, 钮心毅, 宋小冬. 基于城际出行的长三角城市群空间组织特征[J]. 城市规划, 2021, 45(11): 43−53. (WANG Yao, NIU Xinyi, SONG Xiaodong. Spatial organizational characteristics of the Yangtze River Delta urban agglomeration based on intercity trips[J]. City Planning Review, 2021, 45(11): 43−53.)

[30] ROSVALL M, BERGSTROM C T. Mapping change in large networks[J]. PLoS ONE, 2010, 5(1): e8694.

[31] 郭亮, 郑朝阳, 黄建中, 等. 基于通勤圈识别的大城市空间结构优化: 以武汉市中心城区为例[J]. 城市规划, 2019, 43(10): 43−54. (GUO Liang, ZHENG Chaoyang, HUANG Jianzhong, et al. Commuting circle−based spatial structure optimization of mega − cities: a case study of Wuhan central city[J]. City Planning Review, 2019, 43(10): 43−54.)

[32] 李凯克, 钮心毅. 基于非参数分析方法的上海−苏州巨型城市区域就业多中心空间结构研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 1395−1405. (LI Kaike, NIU Xinyi. Polycentric structure of employment in Shanghai−Suzhou mega city−region based on nonparametric analysis[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2020, 48(10): 1395−1405.)

[33] ROSVALL M, BERGSTROM C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(4): 1118 − 1123.

修回：2022−07