

引用格式:朱菁玮,方志祥,杨喜平,等.城市邻近基站间人群流动时空变化同步性分析[J].地球信息科学学报,2018,20(6):844-853. [Zhu J W, Fang Z X, Yang X P, et al.. Flow synchronization of mobile communication network in cities areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(6):844-853.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170550

城市邻近基站间人群流动时空变化同步性分析

朱菁玮¹,方志祥^{1,2*},杨喜平³,尹 凌⁴

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心,武汉 430079; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119; 4. 中国科学院深圳先进技术研究院,深圳 518055

Flow Synchronization of Mobile Communication Network in Cities Areas

ZHU Jingwei¹, FANG Zhixiang^{1,2*}, YANG Xiping³, YIN Ling⁴

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, 430079, China; 2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710119, China; 4. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China.

Abstract: Distribution and movement of people in urban areas are important information for studying urban dynamics and crowd displacement rhythm. The temporal variation of people flow between different spatial regions shows how people interact with physical locations and is highly related to its function and structure in the city. Previous researches usually use density-based approaches to investigate the temporal variation of people flows in different spatial regions. This kind of approach can present time slice-based hot-spot maps but cannot reflect the consistency of changing processes. Therefore, this paper proposes an approach of synchronization measurement to fill in this gap. Our method is designed to measure the similarity of temporal people flow processes between stations in the 3D feature space and quantify property of synchronization of communication network areas based on the average similarity. An experiment of measuring synchronization was conducted using a dataset of mobile phone data in Shenzhen. The people flow processes within this city was derived from the mobile phone dataset. The results show: firstly, the neighboring-area radius and feature space threshold depend on the distribution of mobile station and flow process in corresponding serving areas. In most cases, the neighboring-area radius can be set as the average distance between mobile stations. The feature space threshold depends on the neighboring area radius, and the smaller the radius, the smaller the threshold should be. Secondly, different from administrative areas, the synchronized areas show the characteristics of human dynamics in the city with a smaller spatial unit. We found that the centers with higher level of planning have more synchronized regions with relatively small area in them. Finally, compared with the density map result, our approach indicates that the synchronized regions not only exist in the city centers with high flow changes but also in rural areas with

收稿日期 2017-11-20;修回日期:2018-03-18.

基金项目 国家自然科学基金项目(41231171、41771473);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2042017kf0235、GK201803049)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41231171, 41771473; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.2042017kf0235, GK201803049.]

作者简介 朱菁玮(1993-),女,硕士生,主要从事时空地理信息科学研究。E-mail: zhujw@whu.edu.cn

*通讯作者 方志祥(1977-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事轨迹大数据时空行为、时空GIS行人智慧导航,交通地理分析研究。E-mail: zxfang@whu.edu.cn

relatively small flow changes. Combined with additional information such as land use attributes, the synchronized areas clarify the spatial structure of the population and its aggregated boundary effect in the city. This approach can be used to assess the output of urban planning and optimize the distribution of service facilities such as emergency management and transportation network design.

Key words: mobile phone data; space-time trajectory similarity; flow synchronization; synchronized areas; flow processes

***Corresponding author:** FANG Zhixiang, E-mail: zxfang@whu.edu.cn

摘要: 不同区域人群流量随时间的变化可以反映城市结构的时空差异。现有对于城市人群空间分布特性的研究大都以人群密度计算为基础,注重时空切片尺度,但是不能有效刻画邻域空间单元间流量变化的时空过程同步特性。本文提出一种基于基站间流量变化过程相似度的城市邻域基站流量变化同步性度量方法,量化分析不同区域的人群进出流量过程的相似程度,研究城市中具有相同人群流量变化过程的同步性区域空间分布规律。以深圳市为例,对城市同步性区域的空间分布与特点进行剖析。实验发现:计算同步性时参数选择需根据城市本身基站分布及流量特点分析,一般研究中,城市基站平均距离可作为邻近区域半径 d ,描述基站间流量变化相似度的特征阈值 λ 选取与邻近区域半径有关,半径越小,阈值取值越小。通过基站人群流量同步性得到的城市同步区域的空间分布不同于行政区域划分结果,同步区域面积小,划分更为精细;且规划级别越高的中心区,其范围内基站同步区域数目越多。最后,将同步区域结果与流量密度图对比,发现该方法不仅能够发现流量变化大的同步区域,并且能够发现城市中流量变化小的同步区域。本文提出的方法能量化衡量区域流量变化同步性并发现具有不同流量变化特点的同步性整体区域,对城市人群空间变化特点进行分析,可用于指导和评价城市规划与实际人群活动区域效果,以及城市服务设施布局等。

关键词: 手机数据;时空轨迹相似度;流量同步性;同步区域;流量变化过程

1 引言

人类活动作为影响城市设施空间区域分布的重要因素,其活动性建模是GIS研究的前沿问题之一。城市人群活动在空间分布上的同步性规律研究,可为理解和解决城市问题提供的可操作性的资源配置决策,对建设和管理智慧城市有重要意义。已有研究主要集中在3个方面:①人群活动的获取。传统的人类移动空间特性研究主要利用交通日志以及调查数据,样本少,费时费力,且往往不能真实反映全部城市人群活动的规律;随着信息通讯、定位以及网络技术的发展,手机、社交签到等数据对大规模人群活动信息获取成为可行的方案。②人群活动规律研究。人群空间移动行为模拟^[1-2],人群出行规律的发现^[3-5]与可视化^[6],不同时段城市中的人群空间分布^[7],通过核密度对城市密度热点区域发现^[8-9],以及通过群体行为的规律与地理环境的关联分析^[10],反映居民日常行为社会分异的时空关系^[11-12]。③人群活动应用研究。由于城市空间结构反映了城市资源分布和人类在城市活动中对于资源的利用情况^[13-14],利用人群空间活动特点发现城市扩张变化、区域联系以及评价区划合理性^[15],开展人群异常事件预测以及预警^[16-18]、公共资源配置

等应用研究。目前这些研究为人群活动的分析提供了初步的研究方法与结论,但是在面向城市问题的时空资源配置时,还缺乏区域性的人群流动时空同步规律,无法从宏观上掌握区域性的人群流动变化特征,难以做出有针对性的城市时空资源配置的科学决策,在解决通讯资源的优化调度、警力资源布局与快速响应、人群踩踏等异常事件预警与应对等现实问题时存在较大难度。

本文提出基于特征空间轨迹相似度的邻域人群流动同步性分析方法,以邻近空间内手机基站流量变化的时空过程为例,分析城市尺度上基站区域间人群流量同步性性能及空间分布规律,为城市日常与应急管理、人群活动功能识别、区域交通与空间规划等提供群体性的人群流动分析与决策方法支撑。

2 基于特征空间轨迹相似度的邻域人群流动同步性

为了衡量不同区域人群流量变化的同步性,本文利用手机数据,提出一种特征空间轨迹相似度的邻域人群流动同步性分析方法,来反映基站间人群流动的同步性规律。该同步性是指邻域空间(如基站区域)人群流入流出在时间维度上呈现类似的变

化趋势。该类同步性分析受基站间人群流动量时空变化的相似性,以及不同邻域内空间人群流动量的一致性等影响,需要二者整合起来反映同步性能。

2.1 基站间人群流动量变化时空过程的相似性度量

本文在已有研究^[19-21]的基础上,建立基于特征流量空间的表达方式,对基站间人群流动量时空变化过程相似性进行度量。

特征流量空间由人群流入量、人群流出量和时间维等组成,图1中的 x 轴表示人群流入量, y 轴表示人群流出量, z 轴表示时间。在该特征空间中,任意一个基站 P 在某一时段的人群流动量都可以用一点 (x_P, y_P) 表示(图1(a)中的点),随着时间的延伸,每个基站都可以形成一条时空轨迹(图1(b)中由连点形成的线)。此时的时空轨迹能够表示基站人群流入量与人群流出量的相对变化关系。

在某个时刻,任何2个基站间(如图1(a)中的 P 和 $Q1, Q2$)的人群流入流出特征相似性被定义为式(1)所示。

$$S_{P,Q}^2 = \begin{cases} 1, D_{PQ} \leq \lambda \\ 0, D_{PQ} > \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{P,Q}^2$ 是 P 点和 Q 点之间的人群流入与流入特征相似性; D_{PQ} 是2个基站之间的特征距离; λ 是特征空间的距离阈值,若2个点之间的距离小于 λ (即 $D_{PQ} < \lambda$),基站相似度为1,2个基站流量相似(如图中 P 和 $Q1$);若2个点之间的距离大于 λ (即 $D_{PQ} > \lambda$),基站相似度为0,2个基站不相似(如图中 P 和 $Q2$)。 λ 的选择跟要分析的问题和空间尺度有关,在应用的时候需要慎重取值。根据定义,相似基站人群流入量范围在 $[x_P - \lambda, x_P + \lambda]$,人群流出量范围在 $[y_P - \lambda, y_P + \lambda]$,表示在这个特征范围以内,可认为某个时刻2个基站人

群的流入流出特性相似。

从不同时间长度分析单元来分析两个基站人群流入和流入量的相似性,则通过时空轨迹的相似性度量来分析。如图1(b)所示,表示 t 时刻基站 P 人群流入流出量,那么 k 时段内该基站的人群流量变化过程表示为序列 $Trj_P(1,k) = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ 。图中黑色圆点为中心基站 P 各个时刻人群流动量,红色圆点为基站 Q 相对于基站 P 相似时刻流量,蓝色圆点为不相似时刻流量。2个基站的人群流量变化特征的相似度 $S_{P,Q}$ 由流量特征空间中的相同采样时刻的加权空间距离之和与总的特征空间距离的比值来衡量,如式(2)、(3)所示。

$$S_{P,Q} = \frac{\sum_{t=1}^k D_{P_t, Q_t} \cdot W_{P_t, Q_t}}{\sum_{t=1}^k D_{P_t, Q_t}} \quad (2)$$

$$W_{P_t, Q_t} = \begin{cases} 1, D_{P_t, Q_t} \leq \lambda \\ 0, D_{P_t, Q_t} > \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_{P_t, Q_t} 是距离累加时的权值,当流量特征空间内基站 Q 与基站 P 的距离小于或等于 λ 时,距离权值 W_{P_t, Q_t} 为1,否则为0。 k 是等长时间单位的数目。 D_{P_t, Q_t} 为 P_t 和 Q_t 在流量特征空间 t 时的距离。式(2)能够对任意两基站在任意长度时间段内人群流量变化过程的相似度进行描述,计算结果区间是 $[0, 1]$ 。当基站相似度为0时,表示在设定的阈值 λ 条件下在研究的时段内基站人群流量变化过程在任何时间单元内都不相似;当其为1是,则表示任何时间单元内其人群流量变化特征都处于邻近状态,非常相似。

2.2 基站邻域人群流动同步性

基站邻域人群流动同步性研究,能够辨识在人

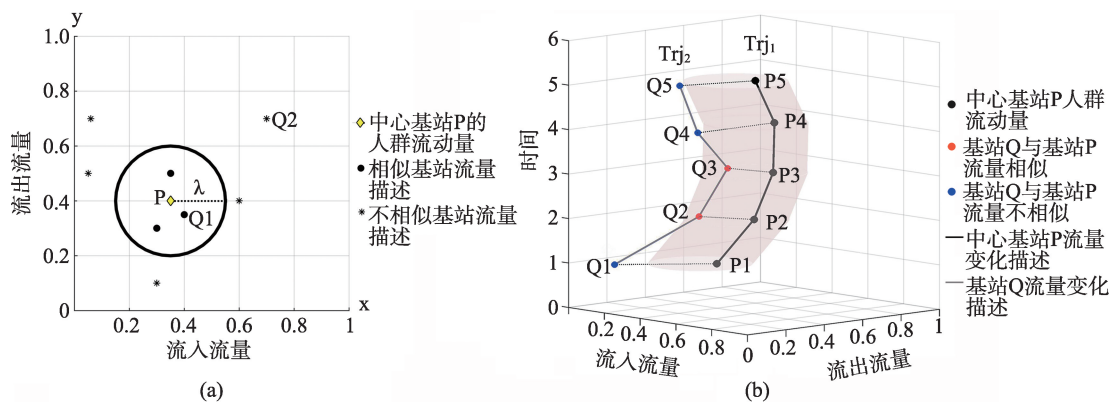


图1 流量特征空间示意图

Fig. 1 Diagrams of flow feature space

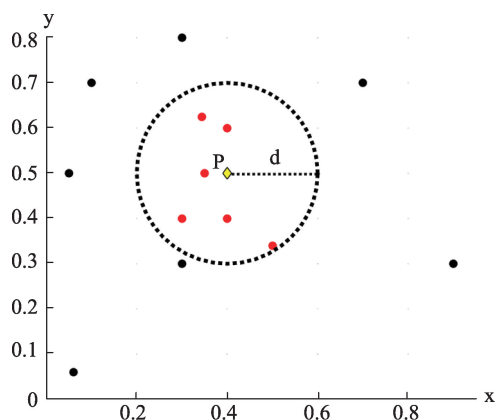


图2 邻近基站示意图

Fig. 2 Diagram of neighboring mobile base station

群流动特性上具有空间邻近和时间相似的区域,区分出具有相同人群流动特性的连续空间区域,对建立精细区域以应对的时空资源配置与管理服务提供关键的空间分析方法。根据地理学第一定律,空间越接近,其相关性越大,这里根据空间距离来对基站进行加权,从而计算出一定区域范围内的同步性。如图2所示,中心基站 P 的邻近基站为以基站 P 为中心, d 为半径的圆所覆盖的空间区域内的所有基站。其邻域基站人群流量变化同步性定义为:中心基站与邻近区域内所有基站的基站相似度的反距离加权平均计算结果,如式(4)所示。

$$C_P(d, r) = \frac{\sum_{k=1}^n S_{P, Q_k} \cdot \frac{1}{d_{P, Q_k}}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{d_{P, Q_k}}} \quad (4)$$

式中: n 是邻近基站个数; S_{P, Q_k} 是中心基站 P 与邻近基站 Q_k 的人群流量变化相似度。 $C_P(d, r)$ 计算值的范围在 $[0, 1]$ 之间。周围基站与中心基站 P 的人群流量变化过程的相似度越高,则基站 P 的同步性值越

接近1,该区域的流量变化同步性就越好;反之,其同步性越差。

3 实验分析

本文利用2011年深圳市某工作日约1600万用户,5952个基站流量变化数据,进行邻域基站流量变化同步性分析。基站流量数据采用主动式方式收集,采样间隔为1 h。基站间最小距离为1 m,最大距离为2790 m,99%的基站与最邻近基站的距离在1000 m之内,93%的基站与其最邻近基站距离小于500 m。对基站人群流量进行分析,一天内基站最大的流入流量为23 974人次,最大流出流量为17 106人次;90%以上的基站的每小时人群流入或者流出流量均值小于3000人次。本研究对每个基站不同时段进出流量进行统计,处理得到1-24 h的以小时为时间单元的23个连续时段数据,并根据其最大人群流入量与流出量进行归一化处理。

3.1 不同参数下的结果敏感性分析

本文提出的方法对于基站同步性的计算涉及2个变量:中心基站的邻近空间区域半径 d ,以及特征流量空间中相似阈值 λ 。首先对 d 和 λ 分别取值进行计算,分析这些参数的敏感性。依据该手机数据集中的基站相邻距离分布, d 的取值设定为200、300、400、500、600、700、800、900、1000 m;阈值 λ 的取值范围0.025, 0.03, 0.035, 0.04, 0.045。图3给出不同参数组合下基站最大邻域范围内基站的同步性分布。其中,图3(a)是不同参数设置下的同步性的均值,可以发现:整体上随着 d 增加,其同步性呈现增大趋势,但当 $d > 600$ m之后,即使半径增大,其平均同步性增加较小、趋于稳定,说明邻域半径参

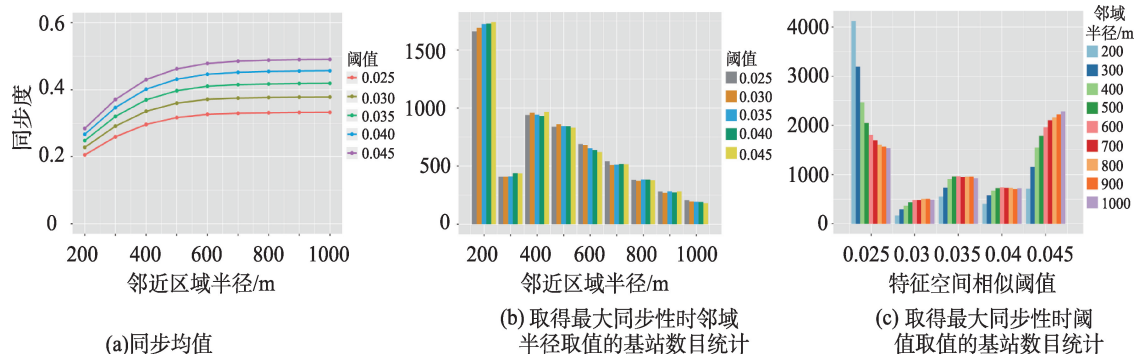


图3 不同参数下同步均值统计和基站最大邻域基站同步分布

Fig. 3 Average synchronization and maximum synchronization of different parameters

数选择小于 600 m 对结果影响比较大。本文统计了不同阈值 λ 条件下每个基站取最大同步性值时所采用的邻域半径, 针对这些邻域半径值进行统计, 得到不同邻域半径下的基站数目, 如图 3(b) 所示, 当 $d=200$ m 时, 邻域内的基站平均数目为 1.55 个, 大部分基站只有 1 个相邻基站, 邻域设置范围过小。由于邻近基站近且少, 流量特征相似, 容易得到较大的同步值, 因此 $d=200$ m 的结果不能准确反映区域真实的同步规律结果。当 $d=400$ m 时, 平均邻域基站为 6 个, 区域范围设置合理, 同步性的计算能够考虑到足够的基站表达区域特性。根据已有研究^[22], 深圳市基站之间平均距离为 375 m, 因此依据平均距离来设置参数时合理的。综上, 在对深圳市的研究中, $d=400$ m 是合适的邻近区域范围半径设置, 这时该实验区域的大多数基站都取得最大的同步性。另外, 本文还统计了不同邻域半径 d 条件下每个基站取最大同步性值时所采用的阈值 λ , 针对这些阈值进行统计, 得到不同阈值下的基站数目, 如图 3(c) 所示, 当要保障大多数基站取得最大同步性值时, 特征空间阈值的选取与邻近区域半径紧密相关, 半径越小, 特征阈值选择就要越小, 半径越大, 特征阈值就要较大。具体地, 在 λ 取最小值 0.025 或者 0.045 时取得最大同步性的基站数目多于其他中间值, 但是在具体数值差异较大。当邻域半径 $d=200$ m, λ 取 0.025 时取得最大同步性的基站数目多于 λ 取 0.045 的结果, 主要由于邻域半径 d 取值较小, 基站间空间距离近, 基站相似度高。在邻域半径 d 一定时, 邻近区域基站数目一定, 当基站间相似度高时, 增加特征阈值 λ 对基站相似度影响小, 同步性影响小。当邻域半径 $d=1000$ m, λ 取 0.025 时取得最大同步性的基站比 0.045 少。主要由于此时邻域半径 d 较大, 邻近区域范围增大, 区域内基站较多, 平均数目为 31.9 个, 基站相似度差异较大。当 λ 取 0.025 时相似基站流量相似标准要求严格, 区域内流量相似度低的基站数目较多, 同步性低; 当 λ 取 0.045 时相似基站流量相似标准较为宽松, 整体基站相似度增加, 同步性增加。除了最大最小情况, 当特征阈值 λ 取中间值 0.3–0.4 之间时, 得到最大同步性的基站数目较稳定, 特别是邻域半径 d 为 400~1000 m。

综上所述, 增大区域半径 d 和特征阈值 λ 都会使得基站总体同步性数值增大。邻近区域半径 d 主要影响邻域内的基站数目与考虑的范围, 半径越小, 区域越小, 基站间的差异越小; 半径越大, 考虑范围越大, 基站间差异越大。特征阈值 λ 影响基站相似

度的判断, 阈值越大, 基站相似度越高, 同步性越高。不论是 λ 还是 d , 具体选择需要与城市本身特点以及研究范围结合分析。在参数的选择时, 若城市中基站布设较密集, 可以选择较小的邻近区域范围 d 和较小的空间阈值 λ , 这时能够精细的同步性单元。邻近区域范围和空间阈值的结果能够在一定程度上体现城市区域内人群移动基本单元特点。但对一般研究来说, 可以根据以该城市的平均基站距离为参考依据来设定参数 d 。

根据基站同步性结果, 本文利用 ArcGIS 做出基于同步性的等高线, 对结果进行可视化表达得到同步性高的区域。如图 4 所示, 带有颜色区域是深圳市具有较好的同步性的空间区域。不难发现: 这些区域的空间分布不均和形状大小不同, 与行政区域边界没有必然的联系, 说明城市中同步性区域与基本城市规划有一定的差别。对区域进行统计分析, 发现 d 和 λ 取值不同, 城市区域内同步性区域数目及平均面积不相同, 主要呈现两种基本变化: 区域数目变化和面积变化。图 4(a)–(b) 主要表现基站同步区域的数目增加, 图 4(c)–(d) 主要表现同步区域的面积增加。

对于不同组合条件结果进行统计, 不同参数条件下的同步性区域的数目和面积结果如表 1 所示。当邻近区域半径 d 一定, λ 从 0.025 增加到 0.03 时, 所有同步区域的数目和面积增加, 此时特征阈值较小, 其增加主要使得同步区域继续扩大。当 λ 继续从 0.03 增加到 0.045 时, 邻近空间半径较小的区域特别是半径为 300~600 m 的区域其数目开始减小, 但是面积增加, 同步性提高使得具有相似同步性的区域开始聚集。而邻近空间定义较大的区域由于覆盖范围较大, 区域内流量时空相似度有大有小, 对于特征空间阈值设定较为敏感, 因此同步区域面积和数目变化较为复杂。随着 λ 继续增加, 邻近空间定义范围较小的区域持续聚合。

城市不同区域的人群流量随时间变化不同, 可以通过计算邻域基站同步性以及形成的区域体现。不同 λ 和 d 的取值影响基站间流量相似度的大小以及邻域基站的范围, 其变化过程和区域分布呈现不同的特点。综上所述, 基站同步性区域空间位置和数目应具有一定的稳定性或者连续变化, 反映区域本身流量变化区域特点。结合结果分析, 对于深圳市, 当时大量基站能取得其相似度最大值, 而对不同 d 在 $\lambda=0.035$ 之后同步区域识别也趋于聚合

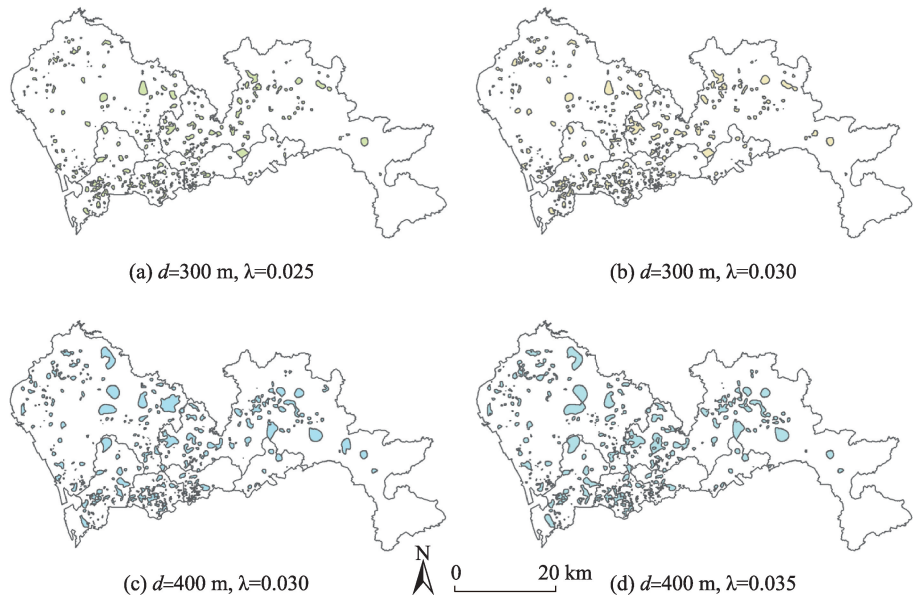


图4 不同参数下基站同步区域空间分布结果
Fig. 4 Synchronized areas of different parameters

表1 不同参数设置基站同步区域的数目和面积(10⁴ m²)
Tab. 1 Statistical result of synchronized area

d值/m	统计	λ值				
		0.025	0.03	0.035	0.04	0.045
200	数目	312	327	338	334	340
	面积	18.63	21.05	23.30	26.42	28.91
300	数目	350	362	356	336	329
	面积	26.13	31.77	38.34	46.04	52.60
400	数目	329	364	349	324	280
	面积	43.82	46.68	54.79	68.42	87.11
500	数目	334	338	317	289	258
	面积	48.21	57.95	76.13	98.03	103.47
600	数目	320	349	299	293	292
	面积	57.25	62.11	70.36	66.23	73.33
700	数目	336	339	323	292	295
	面积	56.52	47.55	47.03	49.74	57.72
800	数目	315	326	309	300	308
	面积	44.12	48.85	53.84	63.26	70.57
900	数目	314	324	346	327	320
	面积	50.19	61.41	57.70	56.31	58.89
1000 m	数目	312	334	315	322	321
	面积	47.51	49.40	52.27	55.14	39.33

而不是简单增加,因此选择 $d=400\text{ m}$ 和 $\lambda=0.035$ 的同步区域结果进行后续分析。

3.2 不同行政区域范围内的基站人群流量同步性差异

图5(a)是《深圳市总体规划(2010–2020)》^[23]的

行政区边界图,体现3个主中心,5个副中心,8个城市组团的“多中心”城市发展体系。5(b)是计算城市同步性区域划分结果,其参数取值为 $\lambda=0.035$ 和 $d=400\text{ m}$ 。表2给出了不同行政区基站同步区域统计结果,包括同步区域的个数和平均面积。结合两者,分析结果发现:该市区域规划中心的级别越高,所呈现的基站同步性区域数目越多,而人群流动同步性区域划分粒度越小,区域面积也较小。比如:南山、罗湖和福田的同步性区域较多,均在40个以上,且平均面积较小,在 $20\times 10^4\sim 70\times 10^4\text{ m}^2$ 之间,说明该区域的功能区域集中、结构紧凑;城市规划的副中心,除盐田区外,基站同步区域数目在13~24个之间,数目略少于规划的主中心区域,整体比组团中心区域多,光明和坪山区域的同步区域较多且平均面积较大,平均面积在 $120\times 10^4\text{ m}^2$ 以上,龙岗和龙华是区域交通枢纽区域,人流量大,同步区域数目较多;组团中心区域除沙井和航空城(人流量大产生的同步区域较多),其他同步区域均在20个以下,整体最少。这些研究所发现的同步区域范围大,在配置通讯资源的时候,可以把整个同步区域的基站作为组群,做同步的带宽配置、应急通讯措施等处理,就能满足其服务要求;而针对所发现的同步区域面积较小而且破碎程度较大的区域,其内人群流动规律不明显,因此这些区域的通讯资源配置不能简单的做组群化处理,需要建立破碎区域间的覆盖能力动态协调机制,才能保障这些区域的通讯覆盖能力。

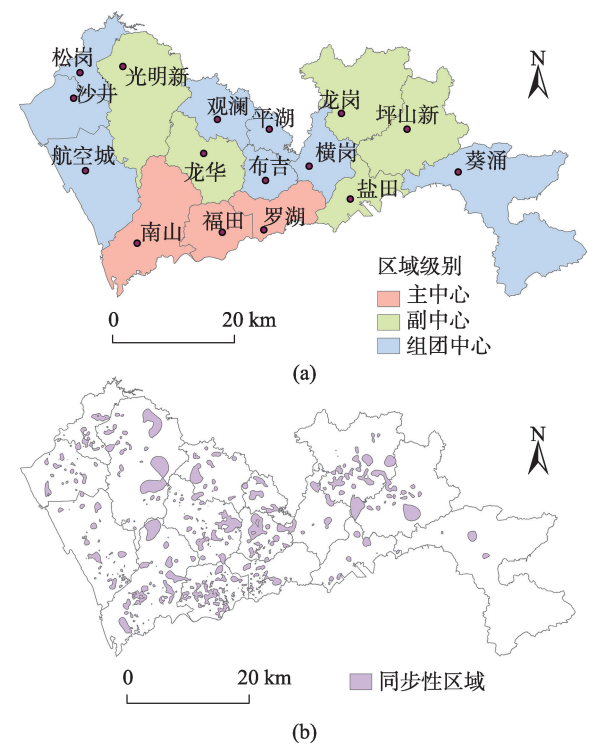


图5 深圳市区域规划和基站同步结果图
Fig. 5 Shenzhen's city planning map and synchronized area results

表2 不同行政区基站同步区域统计结果
Tab. 2 Statistical results of synchronized area in different administrative district

中心级别	中心区名称	数量/个	平均面积/10 ⁴ m ²
主中心	福田	53	37.129 13
	罗湖	36	21.741 72
	南山	42	65.253 07
副中心	光明新城	24	143.683 70
	龙岗	28	104.982 20
	龙华	38	56.657 80
	坪山新城	18	128.857 20
	盐田	13	75.796 65
	布吉	18	123.960 40
组团中心	观澜	13	81.174 19
	航空城	41	27.042 90
	横岗	8	175.219 70
	葵涌	4	72.110 76
	平湖	6	156.920 10
	沙井	25	28.574 77
	松岗	13	56.319 55

3.3 与密度图分析方法的对比

密度图是常用的空间离散化分析方法,能够反

映人群数量的空间分异特征。本文将深圳市划分为1000 m×1000 m的格网,采用每个格网区域内所有基站的归一化净流量作为统计量,在ArcGIS中做出密度图,依据流入和流出特性将其分为11级,越接近1级,表示区域流出流量越多,越接近11级,表示流入流量越多,6-7级表示变化最小。图6给出了4个代表时间段 $t=1$, $t=8$, $t=12$ 和 $t=20$ 时城市人群密度结果进行分析。根据分类结果,图6(a)的时间段是1时,该时间段内人群没有明显移动;图6(b)为7-8时上班时段,城市中部人群减少,南部区域,特别是南山、罗湖和福田等中心区域人群密度迅速增加。图6(c)为中午12时午休时段,人群有少量的移动,但是范围和流量密度变化都不大。图6(d)为晚上19-20时下班时段,人群开始从南部区域向城市中部及周围区域移动。

同步性体现区域本身流量的变化特点,我们将区域基站同步性结果与深圳市空间区域流量密度图的结果进行对比。将不同格网中所有基站的同步性值取平均,得到每个格网的同步性,并将同步性结果根据取值为0-1的范围平均分为10级,分级结果如图7所示。级别越接近10,格网同步性越高。对于不同同步级别格网与其对应的所有23个时段的归一化净流量级别进行统计,结果如表3所示。由表3可知,流量密度级别高的格网,其同步性级别较低。具体来说,首先大部分格网的净流量级别处于在6-7级,说明城市中大部分时间大部分区域净流量密度较小。流量密度级别高的格网(小于4或大于9)其同步性级别不会太高,一般处于7级以下,即同步性值小于0.7。图8将密度图与同步区域对比分析,图中黑色区域为同步区域,红色为流量密度较高的区域。可以看到,同步区域是具有相似流量变化过程的区域,因此其不仅处于城市中心流量密度较大区域,并且存在于城市周边流量密度较小但具有相似流量变化的区域。在深圳市南边的南山区、福田区和罗湖区,流量密度较大,该方法得到的同步区域的面积小且紧密。其他区域(如龙华和坪山)虽然流量密度较低,但也存在具有相似流量变化的同步区域,且这些同步区域的面积较大。对于不同区域流量特点和空间分布进行分析,不仅可以对于密度大区域的交通和设施进行管控和分析,而且对于流量稳定的同步区域也可进行评估和规划。

综上所述,密度图反映的是城市不同时段人群

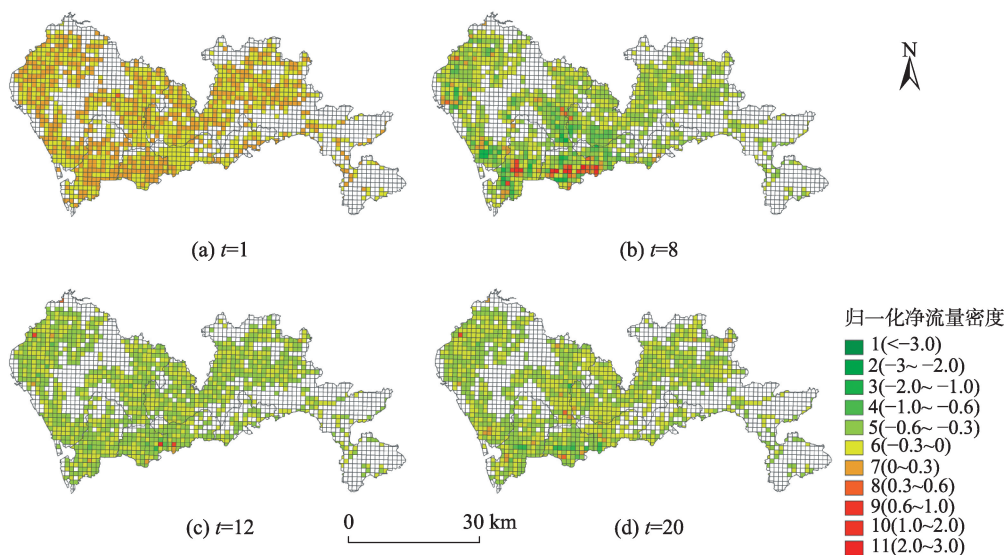


图6 深圳市人流变化密度图

Fig. 6 Density map of Shenzhen's population

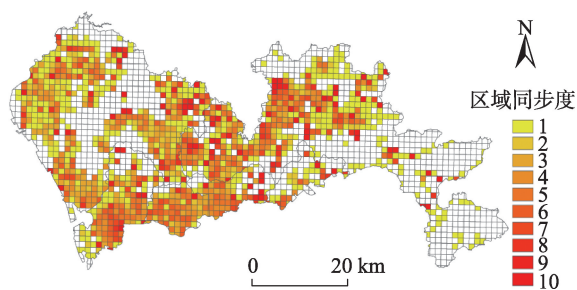


图7 深圳市同步性级别分布图

Fig. 7 Map of synchronization level in Shenzhen

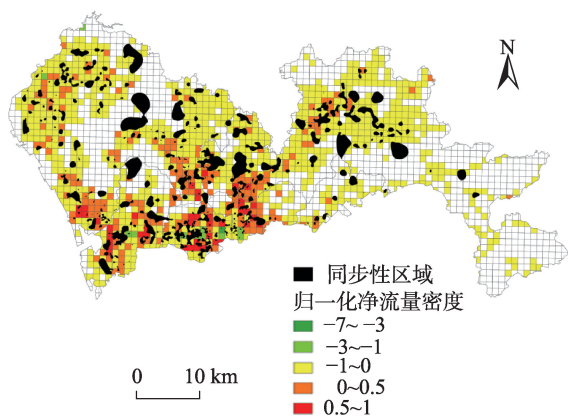


图8 密度图与同步区域对比

Fig. 8 Comparison between density map and synchronization map in Shenzhen

密度大的区域,而同步区域反映的是城市具有相同流量变化(包括流入流量和流出流量)过程的区

表3 不同同步级别区域一天内流量密度变化

Tab. 3 Statistical result in different synchronized area levels

同步 级别	流量级别										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	13	22	72	5099	5153	34	1	3	0
2	4	1	6	8	35	1209	1259	37	5	9	4
3	0	2	6	17	53	1236	1304	67	17	14	0
4	0	3	8	13	62	1395	1502	72	17	11	0
5	1	2	4	16	75	1297	1326	69	9	7	0
6	0	3	4	8	48	1072	1054	54	4	7	0
7	0	0	0	0	6	653	712	9	0	0	0
8	0	0	0	0	1	465	451	3	0	0	0
9	0	0	0	0	2	328	335	2	0	0	0
10	0	0	0	0	1	699	772	0	0	0	0

域。对比二者可发现,同步性区域不仅仅能够发现密度变化较大的区域,同时能发现密度小但具有相同流量变化特征的区域,并且能够较为清晰的将区域边界表示出来,有助于区域的功能评价和变化分析。利用密度图对于不同时段不同区域人流量变化能够进行一定的表示,但是并不能表示其变化过程特点与区域的相关性;同步性检测的结果反映城市人群流量变化的空间特点,能更好地发现人群区域的同步变化规律。

4 结论

本文通过基站间人群流动量变化时空过程的相似性度量和基站邻域人群流动同步性的定义,提出了一种基于流量变化过程的城市同步性区域计算与区域发现算法。利用深圳市一天内所有基站的流量数据,结合城市规划的多中心结构,对城市结构中的这一天内的同步性区域特性进行研究,实验发现:该方法能够对城市基站邻域人群流动变化的同步性进行研究,并对于城市同步区域进行发现。基站邻域人群流动同步性受参数邻域半径 d 和相似阈值 λ 的影响,一般研究中,城市的平均基站距离可作为参考依据来设定参数 d ,相似阈值 λ 与 d 有关, d 越小, λ 可取较小值。同步区域的分布区别于行政区的规划,其面积较小,划分精细,能够在一定程度上描述城市的结构与中心功能。深圳市所规划的层次较高的中心区域,所呈现的基站同步区域数目较多,人群流动的区域结构划分复杂。除此之外,通过同步区域与城市流量密度图的对比,结果发现该方法不仅能发现城市中心具有较高流量的同步区域,并且能够发现城市周边流量较低的同步区域。

该方法利用邻近区域半径和相似阈值的设置,可对不同城市的同步性区域进行发现和研究。通过这些区域空间位置分布以及流量变化的研究,能够帮助我们更好的了解不同区域对于公共资源的需求大小以及特点,帮助我们针对区域的分布特点升级或增加设施布设,并根据不同时段人流流入流出的特点,调整公共资源调配以及意外事件的监控。例如:对于城市中心商业集中区根据同步区域大小以及公交车站的服务范围调整站点的位置以及数量,或增加公共单车点。对于人流活动大的区域以及时段,加强同步区域内交通路口以及停车场的监控等。文章所提出的方法能够比较好地帮助理解城市中人群活动变化的一致性,下一步的工作将结合更多时段的数据发现和验证一周内不同时间的同步性区域变化及特点,并探究不同城市功能区域内人群的同步特性及其演变规律,对城市规划和公共设施建设等方面有较好的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 张仁军, Daniel Z Sui, 惠红. 多粒度的人群移动模拟通用模型及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 11-15. [Zhang R J, Daniel Z S, Hui H. A general model for people movements based on multi-granularity and its application[J]. Geography and Geo-information Science, 2011, 27(2): 11-15.]
- [2] 宋宏权. 区域人群状态与行为的时空感知方法[D]. 南京: 南京师范大学, 2013. [Song H Q. Spatial-temporal perception methods for regional crowd[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.]
- [3] 徐赞新, 王钺, 司洪波, 等. 基于随机矩阵理论的城市人群移动行为分析[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 53-59. [Xu Z X, Wang Y, Si H B, et al. Analysis of urban mobility behavior based on random matrix theory[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 53-59.]
- [4] Calabrese F, Diao M, Di Lorenzo G, et al. Understanding individual mobility patterns from urban sensing data: A mobile phone trace example[J]. Transportation research part C: Emerging technologies, 2013, 26: 301-313.
- [5] Wang Y, Li L, Yu J, et al. Identifying the urban transportation corridor based on mobile phone data[C]. Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International, 2015: 1-6.
- [6] 包婷, 章志刚, 金澈清. 基于手机大数据的城市人口流动分析系统[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(5): 162-171. [Bao T, Zhang Z G, Jin C Q. An urban population flow analysis system based on mobile big data[J]. Journal of East China normal University (Natural Science), 2015(5): 162-171.]
- [7] 秦昆, 周勃, 徐源泉, 等. 城市交通热点区域的空间交互网络分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1149-1157. [Qin K, Zhou Q, Xu Y Q, et al. Spatial interaction network analysis of urban traffic hotspots[J]. Progress in Geography, 2017, 36(9): 1149-1157.]
- [8] 班雷雨, 霍欢, 徐彪. 基于移动数据的人群活动热点区域的发现[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(10): 829-835, 863. [Ban L Y, Huo H, Xu B. Discovery of hot regions about crowd activities based on mobility data[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(10): 829-835, 863.]
- [9] 丁亮, 钮心毅, 宋小冬. 利用手机数据识别上海中心城的通勤区[J]. 城市规划, 2015, 39(9): 100-106. [Ding L, Niu X Y, Song X D. Identifying the commuting area of Shanghai central city using mobile phone data[J]. Urban Planning, 2015, 39(9): 100-106.]
- [10] 刘瑜. 社会感知视角下的若干人文地理学基本问题再思考[J]. 地理学报, 2016, 71(4): 564-575. [Liu Y. Revisiting several basic geographical concepts: A social sensing perspective[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 564-575.]
- [11] 萧世伦, 方志祥. 从时空 GIS 视野来定量分析人类行为的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6): 667-670. [Shaw S L, Fang Z X. Rethinking behavior research

- from the perspective of space-time GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014,39(6):667-670.]
- [12] 郭璨,甄峰,朱寿佳.智能手机定位数据应用于城市研究的进展与展望[J]. *人文地理*,2014,29(6):18-23. [Guo C, Zhen F, Zhu S J. Progress and prospect of the application of smart phone LBS data in urban researches[J]. *Human Geography*, 2014,29(6):18-23.]
- [13] 王富臣.论城市结构的复杂性[J]. *城市规划汇刊*,2002(4): 26-28,78-79. [Wang F C. On complexity of urban structure[J]. *Urban Planning Forum*, 2002(4):26-28,78-79.]
- [14] Liu X, Kang C, Gong L, et al. Incorporating spatial interaction patterns in classifying and understanding urban land use[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016,30(2):334-350.
- [15] Ratti C, Frenchman D, Pulselli R M, et al. Mobile landscapes: using location data from cell phones for urban analysis[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2016,33(5):727-748.
- [16] 戴蓉蓉,朱海红,李霖.基于ARIMA模型的市内人群移动预测[J]. *测绘工程*,2016,25(2):38-41. [Dai R R, Zhu H H, Li L. Intra-urban human mobility prediction based on ARIMA model[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016,25(2):38-41.]
- [17] Candia J, González M C, Wang P, et al. Uncovering individual and collective human dynamics from mobile phone records[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2008,41(22):224015.
- [18] 张仕学,李石君,余伟,等.突发事件人群异常聚集热点区域预测[J]. *中国安全科学学报*,2015,25(9):159-164. [Zhang S X, Li S J, Yu W, et al. Prediction on hot region of crowd abnormal gathering on unexpected event[J]. *China safety Science Journal*, 2015,25(9):159-164.]
- [19] Dodge S, Weibel R, Laube P. Trajectory similarity analysis in movement parameter space[C]. *Processing of 19th GIS Research UK Annual Conference*, 2011:27-29.
- [20] Gao S, Liu Y, Wang Y, et al. Discovering spatial interaction communities from mobile phone data[J]. *Transactions in GIS*, 2015,17(3):463-481.
- [21] Keogh E. Fast similarity search in the presence of longitudinal scaling in time series databases[C]. *Processing on 9th IEEE International Conference-Tools with Artificial Intelligence*, 1997:578-584.
- [22] 汪伟,尹凌.基于频繁活动点集的手机位置数据隐私保护方法[J]. *计算机应用研究*,2017,34(3):867-870. [Wang W, Yin L. Privacy protection method for mobile phone location data based on matching point sets of frequent activity locations[J]. *Application Research of Computer*, 2017, 34(3):867-870.]
- [23] 《深圳市城市总体规划(2010-2020)》[EB/OL]. http://www.szpl.gov.cn/ywzy/ghzs/201710/t20171024_443924.html. [The comprehensive Plan of Shenzhen City [EB/LO]. http://www.szpl.gov.cn/ywzy/ghzs/201710/t20171024_443924.html.]