

引用格式:李明晓,陈洁,张恒才,等.上海市精细时空尺度人口分布估计与特征分析[J].地球信息科学学报,2017,19(6):800-807. [Li M X, Chen J, Zhang H C, et al. 2017. Fine-grained population estimation and distribution characteristics in Shanghai. Journal of Geo-information Science, 19(6):800-807.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00800

上海市精细时空尺度人口分布估计与特征分析

李明晓^{1,2}, 陈洁^{1*}, 张恒才¹, 仇培元¹, 刘康^{1,2}, 陆锋¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Fine-grained Population Estimation and Distribution Characteristics in Shanghai

LI Mingxiao^{1,2}, CHEN Jie^{1*}, ZHANG Hengcai¹, QIU Peiyuan¹, LIU Kang^{1,2} and LU Feng¹

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Urban population distribution and its dynamic changes have been playing a key role in urban planning and management. Currently, the wide use of information communication technology (ICT) provides an opportunity to support fine-scale studies by acquiring accurate individual positioning data. By extracting regular individual trajectories from a mobile communication signaling dataset, this study established an estimation procedure of urban population distribution and quantitatively analyzed spatiotemporal characteristics of population distribution and migration in Shanghai. The results indicated that, firstly, mobile communication signaling data had the ability to describe the dynamic characteristics of urban population and to estimate the real population size of a city in a quantitative and relatively an authentic way by taking its advantages of wide sample coverage, high spatial resolution, good timeliness and multiple spatiotemporal scales. Secondly, population distribution of Shanghai on the whole is stable all day long. Comparatively, population at the daytime showed a more remarkable spatial agglomeration phenomenon than population at night. Thirdly, the population migration between urban functional areas and other areas is rare. During the rush hour in the morning and evening, the population migration was mainly depicted as a relatively equally both-way movements between central urban area and other new urban functional areas. Within each functional area, more than half of its population is not moving out. In conclusion, this study can be useful for urban planning, emergency management and public traveling information services.

Key words: mobile communication signaling data; population distribution; population migration; fine scale; Shanghai

*Corresponding author: CHEN Jie, E-mail: chenjie@reis.ac.cn

摘要 城市人口实时分布与动态变化特征是城市规划与综合治理的重要依据。受数据获取手段的局限性,准确地获取城市人口的实时分布状况一直是技术瓶颈,而移动通讯技术的迅速普及为这一问题的解决提供了技术途径。本文基于移动通讯信令的连续轨迹数据,实现了城市精细尺度人口分布时空估算的方法流程,并以上海市为研究区,对城市人口分布特征及时空移动过程进行了量化分析。研究表明:①在数据方面,基于移动通讯信令数据估算城市人口分布的方式样本覆盖广、时空精

收稿日期 2016-08-01;修回日期:2016-10-20.

基金项目 国家自然科学基金面上项目(41571431、41401460、41271408);国家自然科学基金重点项目(41231171)。

作者简介 李明晓(1991-),男,吉林长春人,博士生,研究方向为时空大数据挖掘。E-mail: limx@reis.ac.cn

*通讯作者 陈洁(1982-),女,湖北武汉人,博士,助理研究员,研究方向为地理时空大数据分析。E-mail: chenjie@reis.ac.cn

度高、时效性较强且支持时空尺度灵活多变的应用研究需求,能够定量地描述城市人口分布时空动态特征且能推算城市真实人口规模;②在人口分布时空特征方面,上海市在全市尺度上,各时段人口空间分布较为稳定且差异较小,而在中心城区日间人口较夜间人口呈现更为显著的空间集聚特征;③在人口移动时空特征方面,城市功能承载区与其它区域之间人口移动很少,早晚高峰期各城市功能承载区之间人口移动均体现为中心城区与其它新城之间的移动,且2个方向移动人数较为平衡;各城市功能承载区内均有超过半数的人口全天仅在其所在城区内部活动。本文的研究成果可为上海城市规划、应急管理、交通出行等提供更精准的科学依据。

关键词 移动通讯信令;人口分布;人口移动;精细尺度;上海市

1 引言

人口分布是人口移动过程的空间表现形式,与社会经济发展息息相关^[1]。人口分布统计数据广泛应用于城市规划、道路交通、环境保护、医疗卫生等领域。掌握不同时间不同空间城市人口密度的动态变化,探索城市人口移动特征及其演化规律,可为城市用地规划与交通规划、公共安全事件风险评估与应急指挥、商业选址与广告投放等提供重要的决策依据。广义上,人口分布涉及各种人口过程和人口现象的空间表现形式^[1]。狭义上,人口分布特指人口数量的空间差异。本文从狭义的人口分布出发,研究城市人口的时空分布差异及其蕴含的人口移动特征。

现有人口分布的研究方法包括基于自然、社会经济数据推导的人口分布研究^[2-4],基于多源遥感影像反演的人口分布研究^[5-7]和基于移动目标(居民和交通工具等)离散出行轨迹或通讯频度推导的人口分布研究^[8-12]。上述方法各有特色:①基于自然、社会经济数据推导的人口分布研究虽然具有良好的空间覆盖度,但其空间尺度粗放,虽能在一定程度上提高人口分布估计的空间精度,但存在数据时效性滞后、更新周期长等问题。此外,当把社会经济数据与人口普查数据二者结合使用,存在的数据间时相不匹配、多统计口径不一致、数据拆分等问题会极大地影响人口分布估计精度。②基于多源遥感数据反演的人口分布研究大幅提高了空间精度和时效性,但遥感数据获取受卫星过境时间限制,仅能反映部分时刻的人口分布情况,难以掌握人口分布特征的动态变化过程。③基于移动目标离散出行轨迹或通讯频度推导的人口分布研究通过获取大量用户的出租车轨迹、社交网络定位结果或移动通讯行为发生时所在基站位置,反映地理单元上人口分布的变化情况。该类数据仅能获取用户出行轨迹的片段,且获取的人口仅为人口总体中的一部分,存在人口采样偏差问题。

随着移动通讯技术的发展,移动通讯设备的普及率已达到极高比例。截止2013年底,中国移动电话用户数达11.06亿,移动设备普及率约81.3%,其中上海等特大城市移动设备普及率已达到126%^[13-14]。移动通讯信令数据准确记录了移动通讯用户在移动通讯网络中活动时的通讯基站位置和活动的的相关信息。当移动通讯终端产生开关机、通话或收发短信、访问移动互联网、甚至基站切换行为时,用户所关联的蜂窝基站及时间将被保存在信令数据中,辅之以蜂窝基站的精确坐标及其多个基站的信号交会方法,可以获取误差范围在市区500 m、郊区1000 m以内的用户位置信息^[13,15]。移动通讯信令数据较全面地反映了用户的连续出行轨迹,具有样本数量庞大、样本相对其他数据源无偏性较好,且支持定位精度以上多时空尺度自由切分的数据特点。移动通讯信令数据为精细时空尺度下人口分布动态特征分析提供了全新、优质、可靠的数据源,能有效支持动态人口分布估算及特征研究^[13,16]。

上海市是中国人口集聚能力最强的城市之一,城市人口长期保持净流入状态。目前,已有大量关于上海市人口分布变化时空特征的研究成果,包括都市区人口增长与分布规律^[17-18]、人口未来情景预测^[19]、就业空间格局变化^[18,20-23]、城市空间结构演变^[13]、流动人口变化及聚集区空间分布规律^[24-25]等。上述研究对于增进上海市人口分布时空特征及变化规律的认识具有重要价值,但已有研究多依据区县尺度分析,缺乏对精细时空尺度下的动态人口分布的系统认知,且无法全面、准确地反映上海市全人口分布及时空变化特征。

鉴于此,本文以上海市人口为研究对象,基于移动通讯信令轨迹数据,开展全市域人口分布与人口移动特征分析,以期通过精细时空尺度下城市人口分布与移动的动态感知及量化分析,为上海城市规划、应急管理、交通出行等提供更加精准的科学依据。

2 研究区与数据源

2.1 研究区概况

本文以上海市为研究区。上海市是中国的经济、金融、贸易、航运中心。2010年11月完成的全国第六次人口普查结果显示上海市常住人口为2301.91万人。2015年上海市GDP为24 964.99亿元,蝉联中国城市第一。依据上海市“十一五”经济社会发展纲要,上海市城镇体系按照中心城和郊区2条主线,构建“1个中心城”和“9个新城”共10个城市功能承载区,如图1所示。



图1 上海城市功能承载区示意图

Fig.1 Urban functional areas in Shanghai

2.2 数据预处理

本文所用数据为匿名化处理后的某工作日上海移动通讯信令轨迹数据。该数据空间覆盖全上海市域,用户数逾1700万,信令数据记录量超过10亿条。每条记录包括用户ID、记录时间、所在位置经纬度及通讯事件类型。对于每个用户而言,一天的轨迹为 $T=((x_1, y_1, t_1, e_1), (x_2, y_2, t_2, e_2), \dots, (x_n, y_n, t_n, e_n))$, 其中 t_i 为记录时间, (x_i, y_i) 为地理坐标, e_i 为事件类型。该数据的空间定位精度为上海市移动基站小区,基站小区空间覆盖范围半径在市区约100~500 m、郊区约400~1000 m^[15],平均时间间隔约30 min。

本文面向全上海市域人口分布研究需求,以公里格网为空间单元、一小时为时间间隔,对轨迹进行时空重采样,生成用户轨迹表示为 $T=((Gid_1, t_1), (Gid_2, t_2), \dots, (Gid_{24}, t_{24}))$ 。对重采样后各空间单元移动通讯信令轨迹数进行统计,同时依据上海市移动公司市场渗透率对各空间单元手机用户数进行反演,将手机用户数近似为人口规模,获取城市人口分布时空图谱,并在此基础上开展上海市人口分布时空特征分析。

3 上海市人口分布时空特征

3.1 上海市总体人口规模估算

城市人口规模是城市地理研究、城市规划编制以及城市发展政策制定过程中所必需的一个基本数量指标。以往多借用人口普查数据,但受普查员入户查点询问、当场填报资料的数据获取手段限制,人口普查数据难以准确表达实际的城市人口规模。移动通讯信令数据记录了移动通讯用户在移动通讯网络中活动时的所在城市位置,依据城市内移动通讯信令用户数量和用户市场渗透率计算潜在在手机用户数量,可将其近似为城市人口规模,成为一种快速、有效的城市人口规模调查方式。

考虑夜间人口相对稳定,研究以夜间用户数量均值1619.75万人作为基数,结合当前上海市移动公司约65%的用户市场渗透率^①,计算得到上海市夜间实际人口规模为2491.92万人。而据全国第六次人口普查数据显示,上海市常住人口数为2301.91万人。二者相差190.01万人。

3.2 上海市人口分布时空演化

基于移动通讯信令反演获取的人口分布结果较人口普查和灯光遥感反演方法具有更高的时空分辨率。采用移动通讯信令数据,分析得出上海市公里格网级每小时人口密度时空图谱,某工作日2时、6时、10时、14时、18时、22时等典型时段人口动态分布特征如图2所示。可以看出,上海市不同时刻的人口分布在早晚高峰前后发生显著变化,白天、夜晚各时段人口分布基本保持不变。人口密集区域在地理空间上呈稳定分布态势,密集区域与中心城区及新城范围大致相符且在不同时段基本保持稳定。得益于上海市城镇体系规划导向、中心城

① 2012年中国移动上海分公司市场部调查。

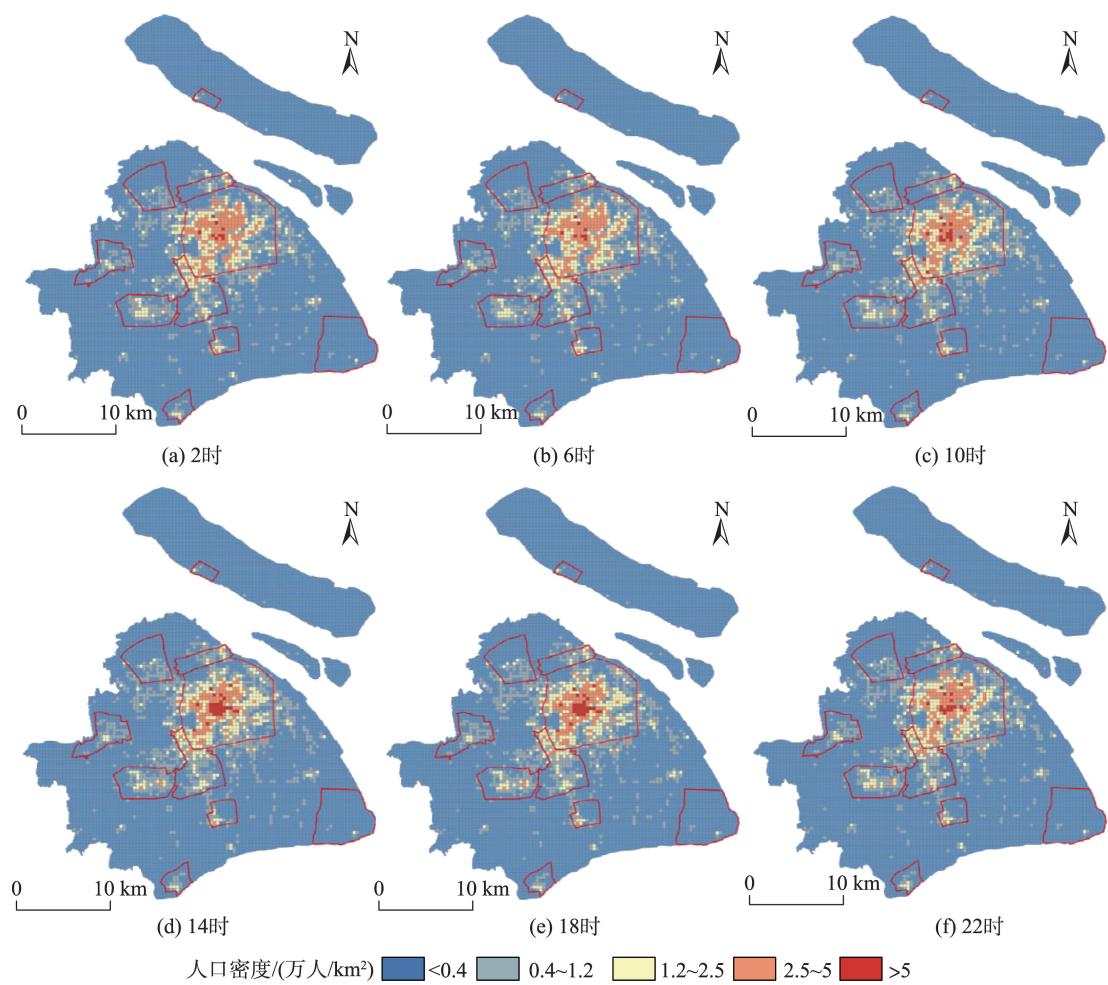


图2 上海市人口密度一日时空图谱(某工作日)
Fig.2 Spatio-temporal mapping of population density in Shanghai (one weekday)

区产业转移和各自新城产业发展,松江新城、闵行新城、南桥新城等城市新城在各时段均表现出较为明显的人口聚集,总体呈现出“一核心、多组团”的网络化城乡空间格局。

3.3 上海市昼夜人口空间分布

城市昼夜人口的空间分布是透视城市发展的重要窗口,掌握上海市昼夜人口的空间分布特征有助于深入了解上海市各片区的城市功能。本文分别选取夜间、日间人口密度变化最小的2时和14时作为夜间和日间代表时段,分析上海市昼夜人口分布特征。

从人口规模来看,上海市中心城区及新城昼夜人口规模如表1所示。可以看出,嘉定新城、青浦新城由于其空间位置距中心城区较远,产业发展较为成熟,对周边地区居民具有较强吸引力,昼夜人口比略高;闵行新城和宝山西新城由于空间位置靠近

中心城区,承担部分中心城区卧城功能,昼夜人口比略低;上海市中心城区及其它新城昼夜人口比均接近于1,说明各区域城市功能具有混合性质,昼夜间人口输入输出相对平衡。

表1 上海市中心城区及各新城昼夜人口规模
Tab.1 The day and night population size of central urban area and new urban areas in Shanghai

区域	白天人口/万人	夜间人口/万人	昼夜人口比/%
中心城区	1109.30	1061.71	104.48
南桥新城	28.30	28.09	100.75
松江新城	92.87	89.67	103.57
闵行新城	145.16	152.73	95.04
嘉定新城	39.44	35.11	112.33
青浦新城	45.00	42.31	106.36
宝山新城	38.25	40.36	94.77
城桥新城	5.75	5.72	100.52
金山新城	18.94	19.54	96.93
临港新城	21.05	20.52	102.58

从空间分布特征角度来看,上海市人口昼夜空间分布特征差异主要体现在上海市中心城区。日间,上海市中心城区人口存在明显的空间集聚中心,即人民广场区域;人口高值区域较多且分布集中,人口密度呈明显的环状结构向外递减。夜间,人口高值分布较为破碎且数量较少,人口由日间高值区域向较高区域迁移。与日间人口分布相比,夜间人口较高密度区域和中密度区域范围更广泛,人口集中程度较低。

4 上海市人口移动时空特征

人口分布时空变化的背后,蕴含着不断的人口移动。移动通讯信令数据为全面、准确、量化地研究城市人口移动提供了可能。在上海市人口分布时空特征分析的基础之上,为了深入解读不同时段上海市人口分布变化的时空过程,本文重点分析不同时空层次上的上海市人口移动特征。

4.1 上海市功能承载区内外人口移动特征

由上海市中心城区和各个新城构成的城市功能承载区在上海市人口聚集中占据了重要位置。依据基于移动通讯信令反演获取的人口分布结果,城市功能承载区土地面积仅占上海市全市面积的31.38%,而24 h人口占比稳定且高达72.61%~73.51%。基于移动通讯信令数据较全面地反映用户的连续出行轨迹的数据特性,本文借鉴人口学中迁移率^[26]概念,计算各个时刻上海市城市功能承载区与其它区域之间的人口移动率,结果如图3所示。其中,红色代表人口由其他区域流入城市功能

承载区,蓝色代表人口由城市功能承载区流入其它区域。可以看出,城市功能承载区内外人口移动呈现明显的早晚双峰结构。此外,各时刻人口流出、人口流入比率大致相当,且总流动率均小于10%,表明上海市城市功能承载区与其他区域之间人口移动很少。

4.2 上海市功能承载区内人口移动特征

进一步地,针对各个城市功能承载区,研究选取早晚高峰时段,计算上海市城市功能承载区内部人口流动OD矩阵,其结果如图4所示。其中,红色/蓝色箭头代表两地之间人口流量较多/较少的方向,箭头粗细反映两地之间人口的流量大小。可以看出,上海市功能承载区内部人口移动主要体现为中心城区与各个新城之间的人口移动,除闵行新城承担次级中转中心功能吸引部分人流外,新城之间人口移动较少。

为分析各个通道双向人口移动不平衡程度,定义通道不平衡性系数为大流量方向人流量和小流量方向人流量的比值^[22],分析结果如表2所示。分析发现,除临港新城与嘉定新城由于学校或产业由中心城区向新城迁移导致中心城区与两新城通道不平衡系数略大于1.4外,其他通道不平衡系数均较低,反映出上海市早晚高峰时段中心城区与新城间双向人口流量近似的人口移动特征。此外,针对各城市功能承载区区内人口移动轨迹的统计发现,上海市所有城市功能承载区内均有超过半数的人口全天仅在其所在城区内部活动,未跨出城区一步,该结果在一定程度上体现出上海市各城市功能承载区在满足区内人口基本生活的各项功能发展方面已相对健全与完备。

5 结论与讨论

城市精细尺度的人口分布状况对于理解城市社会、经济、环境的发展现状及规划其未来发展方向均具有十分重要的意义。移动通讯信令数据记录了城市人口移动行为,具有时空精度高,样本覆盖面广,且支持定位精度以上多时空尺度自由切分的数据特点,为研究精细时空尺度城市人口分布提供了新的研究方案。本文依据移动通讯信令的轨迹数据,依托时空重采样,实现了城市精细尺度人口分布时空估算的方法流程,通过搭建大数据并行

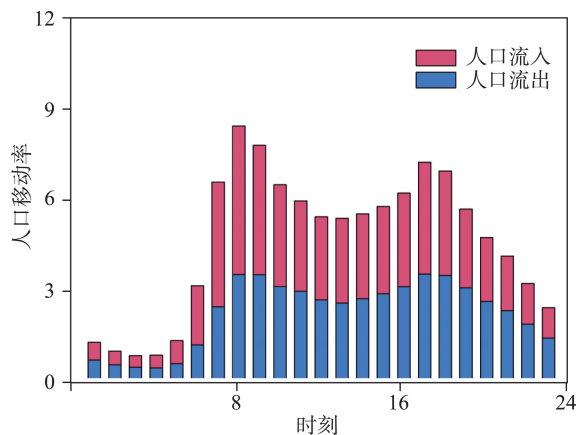


图3 上海市城市功能承载区内外的人口移动率

Fig. 3 The ratios of inflow and outflow population between urban functional areas in Shanghai

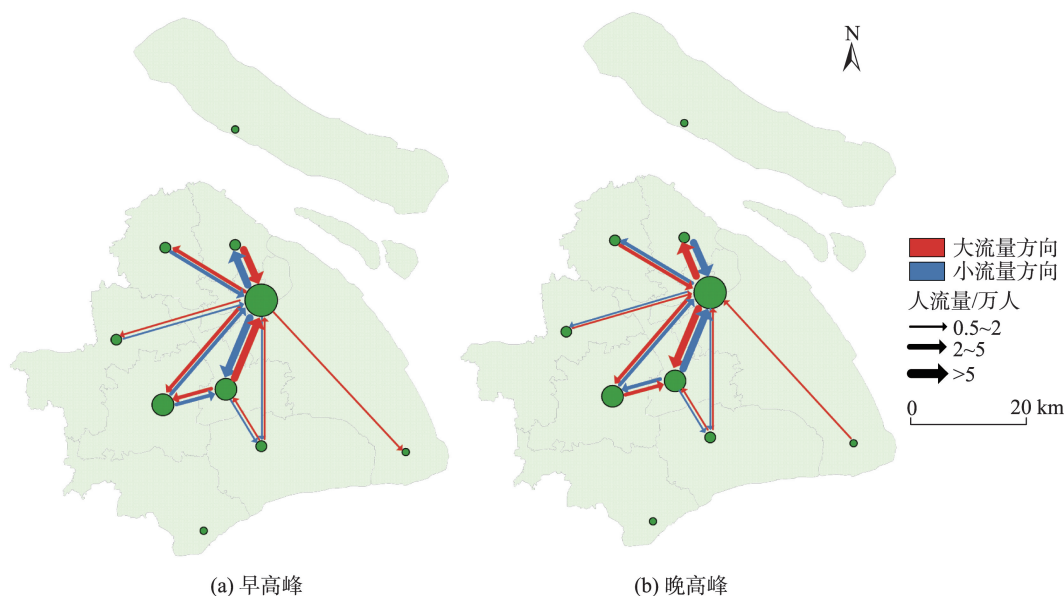


图4 上海市城市功能承载区内部人口移动

Fig. 4 The population movement within urban functional areas in Shanghai

表2 上海市人口移动主要通道不平衡系数

Tab.2 The unbalanced factor of the main channels of population movement in Shanghai

主要通道	不平衡系数(早高峰)	不平衡系数(晚高峰)
中心城区-闵行新城	1.352	1.389
中心城区-宝山新城	1.269	1.166
中心城区-松江新城	1.181	1.144
中心城区-嘉定新城	1.582	1.518
中心城区-青浦新城	1.366	1.378
中心城区-南桥新城	1.022	1.071
中心城区-临港新城	2.115	2.174
闵行新城-南桥新城	1.111	1.049
闵行新城-松江新城	1.236	1.172

计算平台以实现TB级移动通讯信令数据管理。同时,以上海市为研究区,定量化地分析了上海市人口分布特征及人口移动过程。结果表明:①在数据方面,基于移动通讯信令数据估算城市人口分布的方式样本覆盖广、时空精度高、支持时效性较强且时空尺度灵活多变的应用研究需求,能够定量地描述城市人口分布时空动态特征且能推算城市真实人口规模;②在人口分布时空特征方面,在全市域尺度上,上海市各时段人口空间分布分布较为稳定且差异较小;在中心城区,日间人口较夜间人口呈现更为显著的空间集聚特征;③在人口移动时空特征方面,城市功能承载区与其他区域之间人口移动很少;早晚高峰期间,各城市功能承载区之间人口

移动均体现为中心城区与其它新城之间的移动,且2个方向移动人数较为平衡;各城市功能承载区内均有超过半数的人口全天仅在其所在城区内部活动。本文通过精细时空尺度下城市人口分布与移动的动态感知及量化分析,为上海城市规划、应急管理、交通出行等提供更精准的科学依据。

目前,有关精细尺度下的城市人口分布研究仍处于发展探索阶段:①在研究数据的代表性方面,仅获取上海市移动公司信令数据,在估算人口时采用上海市移动公司市场渗透率进行估算,以手机用户数近似为实际人口规模,暂未考虑各通讯公司在不同区域市场渗透率的差异和低龄幼儿、高龄老人等非潜在手机用户群体对人口规模的影响;②在研究数据的预处理过程中,如何彻底去除因移动通讯信令“乒乓效应”所致的定位误差、如何识别同一用户携带多部手机所致数据冗余等问题有待更合理地解决;③在研究尺度的选择方面,移动通讯信令数据定位精度受基站密度影响,在城市核心区域定位精度较高,而郊区定位精度较低。如何兼顾不同区域的定位精度、选择合适的时空尺度开展人口分布研究需要深入探索;④在数据抽样规模方面,大数据时代为城市精细尺度人口分布研究带来了机遇,然而海量时空轨迹数据的快速处理并非易事。本文选取的某一工作日的移动通讯信令数据在多大程度上表征一般性的人口分布时空特征,还有待进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 张善余.人口地理学概论(第三版)[M].上海:华东师范大学出版社,2013. [Zhang S Y. Population Geography (The Third Edition)[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2013.]
- [2] 闫庆武,卞正富,张萍等.基于居民点密度的人口密度空间化[J].地理与地理信息科学,2011,27(5):95-98. [Yan Q W, Bian Z F, Zhang P, et al. Census Spatialization Based on Settlements Density[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011,27(5):95-98.]
- [3] Krunić N, Bajat B, Kilibarda M. Dasymetric Mapping of Population Distribution in Serbia Based on Soil Sealing Degrees Layer[M]. Surface Models for Geosciences. Springer International Publishing, 2015:137-149.
- [4] Alahmadi M, Atkinson P, Martin D. Estimating the spatial distribution of the population of Riyadh[J]. Saudi Arabia using remotely sensed built land cover and height data. Computers, Environment and Urban Systems, 2013,41: 167-176.
- [5] Ural S, Hussain E, Shan J. Building population mapping with aerial imagery and GIS data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(6):841-852.
- [6] Azar D, Engstrom R, Graesser J, et al. Generation of fine-scale population layers using multi-resolution satellite imagery and geospatial data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013,130:219-232.
- [7] Lung T, Lubker T, Ngochoch J K, et al. Human population distribution modelling at regional level using very high resolution satellite imagery[J]. Applied Geography, 2013,41:36-45.
- [8] Liu X, Wang J. The geography of Weibo[J]. Environment and Planning A, 2015,47(6):1231-1234.
- [9] Pan G, Qi G, Wu Z, et al. Land-use classification using taxi GPS traces[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013,14(1):113-123.
- [10] Cranshaw J, Schwartz R, Hong J I, et al. The livelihoods project: Utilizing social media to understand the dynamics of a city[C]. International AAAI Conference on Weblogs and Social Media. 2012:58-65.
- [11] 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, 2006,33(5):727-748.
- [12] Pierre D, Catherine L, Samuel M, et al. Dynamic population mapping using mobile phone data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014,111(45):15888-15893.
- [13] 钮心毅,丁亮,宋小冬.基于手机数据识别上海中心城的城市空间结构[J].城市规划学刊,2014(6):61-67. [Niu X Y, Ding L, Song X D. Understanding urban spatial structure of Shanghai central city based on mobile phone data [J]. Urban Planning Forum, 2014,6:61-67.]
- [14] Sanou B. The World in 2013: ICT facts and figures[R]. International Telecommunications Union, 2013.
- [15] 冉斌.手机数据在交通调查和交通规划中的应用[J].城市交通,2013(1):72-81,32. [Ran B. Use of cellphone data in travel survey and transportation planning[J]. Urban Transport of China, 2013,1:72-81,32.]
- [16] 王德,王灿,谢栋灿,等.基于手机信令数据的上海市不同等级商业中心商圈的比较——以南京东路、五角场、鞍山路为例[J].城市规划学刊,2015(3):50-60. [Wang D, Wang C, Xie D C, et al. Comparison of retail trade areas of retail centers with different hierarchical levels: a case study of east Nanjing Road, Wujiaochang, Anshan Road in Shanghai[J]. Urban Planning Forum, 2015,3:50-60.]
- [17] 高向东,吴文钰.20世纪90年代上海市人口分布变动及模拟[J].地理学报,2005,60(4):637-644. [Gao X D, Wu W Y. Population redistribution and modelling of Shanghai City in the 1990s[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(4):637-644.]
- [18] 李健,宁越敏.1990年代以来上海人口空间变动与城市空间结构重构[J].城市规划学刊,2007(2):20-24. [Li J, Ning Y M. Population spatial change and urban spatial restructuring in Shanghai since the 1990s[J]. Urban Planning Forum, 2007,2:20-24.]
- [19] 王裕明,吉祥,刘彩云.上海市人口结构变化预测研究[J].上海经济研究,2014(3):89-98. [Wang Y M, Ji X, Liu C Y. Study on prediction of population change in Shanghai [J]. Shanghai Journal of Economics, 2014,3:89-98.]
- [20] 孙斌栋,魏旭红.上海都市区就业——人口空间结构演化特征[J].地理学报,2014,69(6):747-758. [Sun B D, Wei X H. Spatial distribution and structure evolution of employment and population in Shanghai metropolitan area. Acta Geographica Sinica, 2014,69(6):747-758.]
- [21] 丁亮,钮心毅,宋小冬.上海中心城就业中心体系测度——基于手机信令数据的研究[J].地理学报,2016,71(3): 484-499. [Ding L, Niu X Y, Song X D. Measuring the employment center system in Shanghai central city: a study using mobile phone signaling data[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(3):484-499.]
- [22] 张天然.基于手机信令数据的上海市域职住空间分析[J].城市交通,2016,14(1):15-23. [Zhang T R. Job-housing spatial distribution analysis in Shanghai metropolitan area based on cellular signaling data[J]. Urban Transport of China, 2016,14(1):15-23.]

- [23] 许宁,尹凌,胡金星.从大规模短期规则采样的手机定位数据中识别居民职住地[J].武汉大学学报·信息科学版, 2014,39(6):750-756. [Xu N, Yin L, Hu J X. Identifying home-work locations from short-term, large-scale, and regularly sampled mobile phone tracking data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(6):750-756.]
- [24] 罗仁朝,王德.上海流动人口聚居区类型及其特征研究.城市规划,2009(2):31-37. [Luo R C, Wang D. Types and characteristics of migrant communities in Shanghai. City Planning Review, 2009,2:31-37.]
- [25] 付磊,唐子来.上海市外来人口社会空间结构演化的特征与趋势[J].城市规划学刊,2008(1):69-76. [Fu L, Tang Z L. The social spatial structure of floating population in Shanghai and its evolution since the reform and opening-up. Urban Planning Forum, 2008,1:69-76.]
- [26] 吕晨.人口的迁移与流动[M].广州:中山大学出版社, 2014. [Lv C. The migration and movement of population [M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2014.]