城市脉搏：基于多源大数据的城市动态结构研究

□ 杨俊宴

［摘　要］城市空间结构是城乡规划领域持续关注的关键问题，随着交通信息技术的发展和生活工作节奏的加快，海量人群的高频活动迁移带来了城市内在结构的流动变化，在静态物质空间结构的基础上呈现出动态的潮汐波动，如何解析这种结构上的动态变化过程，对于解释城市真实空间变化规律、合理创造未来城市具有重要意义。文章以上海为例，以高精度、大样本的城市全域建筑空间数据和手机信令数据为基础，通过挖掘城市中人群活动与空间形态之间的潜在规律，揭示在城市空间中的人群活动的动态迁移和演化特征；凝练 8 种基本动态空间模式和 6 种复合动态空间模式，在分析各项要素变化中揭示城市结构阶梯圈层的耦合关联，建构基于大数据的城市动态结构模式，进而发现人群活动依托基准结构波动的潮汐波动特征，揭示城市变化活动的规律。

［关键词］大数据；空间形态；城市动态结构；潮汐波动；上海
［文章编号］1006-0022(2020)21-0064-08　［中图分类号］TU984　［文献标识码］B
［引文格式］杨俊宴．城市脉搏：基于多源大数据的城市动态结构研究［J］．规划师，2020(21)：64-71．

Research on Urban Dynamic Structure Based on Multi-source Big Data/Yang Junyan

[Abstract] Spatial structure is a focus issue in urban and rural planning. With the acceleration of life and work pushed by information technology, the large number of high frequency human activities brings about structural flow of city. It represents a tidal fluctuation in a static physical space structure. An analysis of the structural flow and an explanation of actual space change is significant to creating a reasonable future city. With Shanghai as an example, the paper uses big data of buildings and cellphone signaling, explores the hidden rules of population activity and spatial morphology, and reveals dynamic flow and evolution characters of people's activities. It concludes 8 basic dynamic models and 6 compound dynamic models, analyzes the connection and interaction of urban structural ladder and circles, and establishes a dynamic urban structural model based on big data so as to reveal the tidal fluctuation by basic structure and rules of people's activities.

[Keywords] Big data, Spatial morphology, Urban dynamic structure, Tidal fluctuation, Shanghai

巴蒂在《创造未来城市》一书中提出："我们无法预测城市，但是我们可以创造他们"，这指出了城市未来的不可预测性与创造的可能性[1]。当前，数字化、信息化的发展造成的时间周期变化和要素流动尽管增加了城市的复杂性，但也促进了创造未来城市的可能性，即人们可以依托数字化和信息化技术的进步，实现对复杂城市系统运行规律的理解和把握，并基于这些规律对城市进行管控和设计，从而通过科学、有效的方法合理规划未来城市的发展。而城市作为一个复杂巨系统，同时又是一个生命有机体，有如同动脉一样向其各部分输送能量的流动网络，这些网络在流动过程中的振幅和频率（包括城市人流、车流及信息流等活动要素在城市空间中的动态活动特征规律）便如同城市的脉搏，反映了城市有机体的健康程度。因此，如何利用数字化技术手段实现对城市脉搏的感知，解析快速发展变化中的城市活动要素在空间中的动态结构，并且使城市脉搏能够有规律地跳动，是大数据时代背景下我国城市空间研究的现实需求，也是实现未来城市创造的重要基础。

城市空间结构是城市内部各功能组成部分的空间位置关系及相互联系，是城市功能组织及其内在联系在空间上的投影[2]，其研究内容发展至今主要集中于城市空间结构与形态特征变化及城市空间结构的形成演化机理、结构调整机制等方面[3-6]。在城市交通体系与功能格局不断完善的信息化时代背景下，城市活动要素也呈现出新的高频流动的特征，传统的静态空间分析方法对城市结构动态特征的感知已难以满足未来城市发展的需

［基金项目］　国家自然科学基金重点项目（51838002）
［作者简介］　杨俊宴，博士，东南大学建筑学院教授。

求。而大数据平台打通了人群活动的聚散结构与城市空间结构之间的互动关系，不仅使城市结构的定量分析能够在更高的精度和维度得以实现，还能以更宽阔的视野来揭示城市复杂形态背后的动态演化与结构性规律，使未来城市的创造成为可能。特别是移动定位数据的出现，如手机定位数据[7-8]、出租车轨迹数据[9-10]和智能卡记录数据[11]等，为研究城市人群动态变化和城市空间结构的交互作用提供了非常有效的工具[12]。在城市动态结构特征识别方面，段亚明等人利用腾讯宜出行数据和核密度分析等方法，识别了重庆主城的多中心空间结构特征、影响范围与组团发育情况[13]；Yang等人则基于手机定位数据，从人群活动热点的角度来刻画城市的时空动态结构特征[14]；钮心毅等人利用工作日与休息日特定时间收集用户密度空间分布信息来进行上海城市公共中心的等级和职能类型的识别[15]。还有学者利用社交网络数据中用户的社会属性信息（如年龄、性别等）及发布消息的位置和时间信息，研究城市中不同社会群体活动的时空模式和城市空间结构[16-17]；同时，也有部分学者关注城市中不同区域的人群移动与城市空间结构的交互关系[18-19]，提出可通过提取城市人群的OD位置来反映城市空间之间的交互强度[20]。

当前，以大数据为支撑进行的城市动态结构研究尚处于探索阶段，这也是未来城市理论研究的新领域。尤其通过复合性的多源大数据集成和协同研究，凝练城市的动态结构发展规律，以此为基础对城市未来一定时空范围内的发展进行预测，进而提出城市的运行和管控决策，从而实现对未来城市的合理创造。

本次研究力图突出多源大数据研究中高颗粒度、协同集成和潮汐动态的特征，以城市全域建筑大数据为基础平台，以手机信令大数据解译的人群迁移活动为研究样本，深入空间单元进行微观特征的高精度分析；通过分析城市中复杂而微妙的个体变化，并将其最终投影在城市空间上，可以揭示城市动态结构的变化规律，以定量研究城市空间形态要素的动态演化、规律特征及结构模式等问题。在以上多个维度的大数据综合集成基础上，对数据分布和动态变化情况进行进一步的叠加耦合分析，剖析城市空间形态的聚集和离散机理，对于城市规划如何介入未来城市创造的科学决策和理性规划具有实践创新意义。

因此，可以认为城市空间动态结构是人流、车流和信息流等活动要素在静态的城市空间中动态迁移、聚散而形成的一种整体的动态组织关系。城市动态结构具有对象、载体、条件与表征4个关键要素。对象即动态结构的本体为人、车、信息等与城市生活密切相关的高频率变化要素；载体为空间与时间，两者缺一不可；本体在时间与空间中的迁移、聚散是动态结构的基本条件；表征是一种整体组成关系，对于这种组成关系所呈现出的规律进行挖掘则是动态结构模型建构。城市动态结构具有对象复合性、结构动态性、时间连续性及动静相对性的特征，深入研究这种动态结构，能够更好地把握城市发展和运行的规律，进而实现对未来城市的创造。尤其对于现代都市而言，城市是一个24小时均处于高速运转并保持着昼夜紧凑生活、工作节奏的动态有机体，对其空间结构进行精确而动态的解析，需要更新频率更高、更动态的数据来支撑。

1 数据来源与技术方法

本次研究以上海为实证研究对象，是因为上海作为中国现代大都市的典范，同时也是快速城镇化进程中迅速崛起的最显著代表，在人群活动的数量、人群构成特征及人群活动频率上具有显著代表性。

1.1 数据来源与处理

本次研究采用的大数据包含两个部分：空间形态数据与手机信令数据。其中，空间形态数据覆盖上海城市的陆地市域范围（除崇明岛、长兴乡及横沙乡3个长江岛屿），面积约为6 540 km²，包括建筑密度、容积率和平均高度等基本空间形态信息（图1）。手机信令数据选取自2013年的4个典型工作日（周三或周四）、4个典型周末（周日）与1个典型节假日的匿名手机信令数据，以此为基础，使用Thiessen多边形算法计算上海市域内每个基站服务的基站小区范围，使每个基站小区范围内有且仅有一个基站，基站小区内任一点距离该基站的距离小于其他基站。最终，本次研究涉及上海市域范围内手机基站约为8 500个，在市域范围内人群取样率约为70%，各基站时均用户数据为2 000万，日均数据量约为15亿条①。

基于对空间形态和手机信令数据的

表1　基础数据指标一览

项目	人群活动指标				建筑形态指标					城市用地指标	
	指标1	指标2	指标3	指标4	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5	指标1	指标2
指标名称	地块人群总数（人）	地块人群密度（人/平方米）	街区人群总数（人）	街区人群平均密度（人/平方米）	地块建筑密度	地块容积率	地块平均高度（m）	街区平均建筑密度	街区平均容积率	地块用地性质	地块建设属性
统计方法	手机小区基站人群数据空间连接	地块人群总数/地块基底面积	街区内所有地块人群总数的总和	街区人群总数/街区基底面积	地块建筑基底面积的总和/地块基底面积	地块建筑总面积总和/地块基底面积	地块建筑层高总和/地块建筑栋数	街区建筑基底面积的总和/街区基底面积	街区建筑面积的总和/街区基底面积	根据城市用地性质分类表统计	根据城市用地性质分类表统计

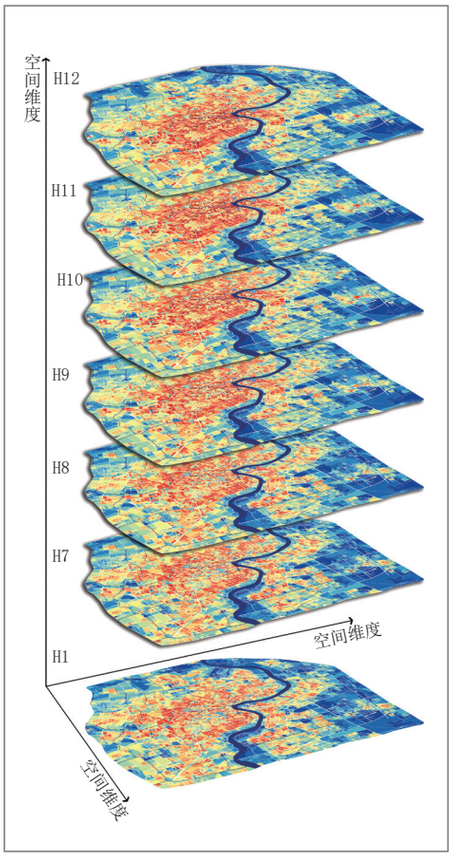


图 2　上海个体行为密度计算的时间精度示意图

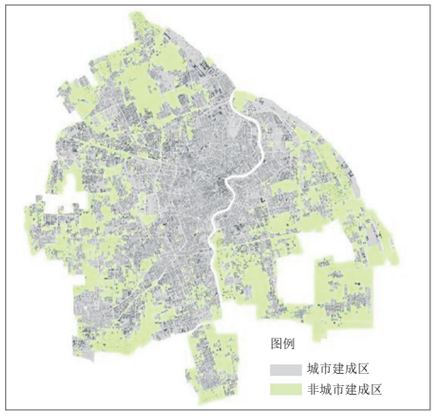


图 1　上海市域空间大数据平台示意图

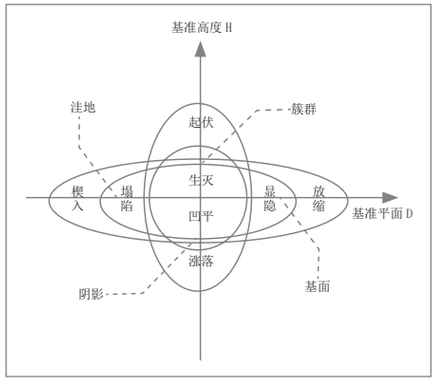


图3　人群活动的基本动态空间模式示意图

采集与集成，综合考虑两大数据类型特征，按照可比、可量及可行的原则，将原始数据划分为人群活动、建筑形态及城市用地这三个维度的基本数据指标，进而探索动态人群活动在静态物质空间结构上的迁移与演变特征（表 1）。

本次研究所使用人群活动的时间精度以小时为基本单位，以不同天数的平均数据为基准，构建 9 天平均 24 小时动态时间切片数据，并将其与空间形态数据叠合，最终得到上海不同时刻人群活动的密度分布态势（图 2）。这种切分方式可在一定程度上减小特殊日期和时间节点对研究造成的误差，降低偶然性。

1.2 界定分析方法

目前学界对于城市圈层的界定以定性化表达为主，尚未形成共识的定量化方法论断，特别是对于人群活动的动态圈层划分涉猎较少，因此本次研究通过对人群活动密度和空间形态密度等多种指标的不同界定方法，对界定结果进行分析比较，得出最优方案，具体包含克里金插值法、聚类分析法、临界值假设法及比例统计法等，最终通过可视化的方式，形象直观地划定各圈层范围。本次研究经过综合比较，最终选择城市密度作为界定方式，即单位土地面积上的建筑或者人群的数量。从开发建设角度看，密度是指开发强度；从人群活动角度看，密度是指集聚程度。该方法能够快速准确地寻找到密度数值的突变拐点及过渡节点所代表的区域。具体的界定方法为：

(1) 基于 ArcGIS 平台计算出街区容积率及每个街区 9 天平均 24 个整点时刻的人群密度，并运用克里金插值法进行差值分析，从而得到全城范围内容积率和人群密度的集聚态势。分析结果表明，上海空间形态的开发强度及人群分布密度均呈现出明显的圈层结构特征。

(2) 对于空间形态数据，利用简单插值法将全城的容积率按照从高到低、从中心城区向外围逐步递减的分布趋势分为 13 类，并将其落到地块当中，计算出每一等级的平均容积率；寻找数据的突变拐点，并结合相关学者研究及相关政府文件，将 13 类容积率进行空间区位的合并叠加，最终得出从中心城区向外扩展的城市静态空间形态的 4 个圈层。对于手机信令数据，选择自然间断分级法作为阶层切分的方法，寻找人群密度变化的突变区域。随后以与空间数据相类似的方式将 20 类人群密度圈层落到地块当中，计算出每一等级的人群密度。依据数据本体特征，同时为方便与静态空间圈层进行耦合研究，选取 3 个较为明显的密度数据突变拐点，最终将人群密度归并为 4 个人群活动圈层。

(3) 由于人群活动具有时空双重属性，为城市内在结构带来了流动变化，在静态物质空间结构的基础上呈现出动态的变化结果。因此，本次研究将 9 天平均数据的 24 个时刻人群活动按上述方式各自归并为 4 个圈层，并在 ArcGIS 平台中进行统一的归档叠合，以便分析人群动态圈层在静态空间圈层结构中的变化。

2 城市人群活动的动态空间模式解析

本次研究将城市人群活动的时空研究的时间维度划分为日时间段、周时间段及特殊假日时间段，其中日时间段的基础数据库为一年当中典型 9 天人群的平均密度，同时将一日划分为凌晨、白天及夜晚 3 个时间段②；采用人群密度分级法及 Kernel Density 分析法探究出各典型时间段人群分布的空间区位及其变化，最终对比得出其动态空间变化特征，即基本动态与复合动态两种模式。

2.1 人群活动的基本动态空间模式

基本动态空间模式代表单个簇群在 24 小时内的变化特征，主要包括人群活动冷热点的出现与消失及其规模的扩大和缩小。对城市中特定区域的单个人群活动冷热点进行解构可以发现，其变化往往表现为人群密度高低变化和簇群面

积放缩变化，从而形成8种不同的基本动态空间模式。以冷热点所在基面为基准平面H_0，根据人群密度的数值变化情况及与基准高度之间的相互关系，可以将人群冷热点分为生灭、起伏、凹平和涨落4种基本动态空间模式；根据簇群面积放缩变化及与基准面积之间的关系，则可将人群冷热点分为显隐、放缩、塌陷和楔入4种基本动态空间模式（表2，图3）。

2.2 人群活动的复合动态空间模式

多个簇群通过各自的起伏、放缩、楔入等基本动态变化在彼此之间合成丰富的聚散组合模式，在24小时人群密度的动态变化中呈现出复杂多变的形态。但是，无论这些簇群形态在不同的时间切片中如何变化，或聚集或塌陷，或消失或壮大，同样可以从簇群的重心变化和聚集的规模程度两个维度对复杂的复合动态空间模式进行解构，从而形成6种复合动态空间模式。当多个簇群的集体重心偏移程度低于某特定阈值时，可将此类簇群定义为重心稳定簇群，并根据簇群集聚规模程度由弱到强分为凹凸、收放和聚核3种复合动态空间模式；当多个簇群的集体重心偏移程度高于某特定阈值时，根据簇群集聚规模程度由弱到强可分为迁移、断续和聚散3种复合动态空间模式（表3，图4）。

2.3 人群活动的整体动态结构区识别

为了更有效地对人群活动的整体动态结构区进行准确识别，本次研究通过克里金插值法对上海中心城区范围内24小时的人群活动情况展开研究，在各时间切片中寻找簇群数量最多的时刻，并标识出每个簇群的范围。由此发现，中心城区共形成37个单一簇群。由于若干单一簇群会通过聚散及聚核的复合动作形成更大的簇群，可通过动态图片在单个簇群的边缘识别出中心城区的人群活动断续点。对照8种基本动态空间模式和6种复合动态空间模式对每一个簇群内部的人群变化情况进行识别，结果发现：当簇群强度等级不变，其所占面积发生波动时，则将该簇群所覆盖区域定义为放缩区；当簇群面积不变，其强度等级在基面以上持续高值波动时，则将该簇群所覆盖区域定义为涨落区；当簇群面积不变，其强度等级在基面及基面以上强烈波动时，则将该簇群所覆盖区域定义为生灭区；当簇群面积不变，其强度等级在基面上下波动时，则将该簇群所覆盖区域定义为凹凸区；当簇群面积和强度都不发生变化时，则将该簇群所覆盖区域定义为稳静区；当簇群面积和强度均发生变化时，则将该簇群所覆盖区域定义为复合动态区；当簇群的强度等级持续低于其所在基面时，则将该簇群所覆盖区域定义为阴影区（图5）。

从整体视角看，通过手机信令大数据得到上海全城人群活动的基本动态空间模式与复合动态空间模式，并将这些

表2　人群活动的8种基本动态空间模式

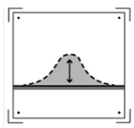
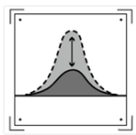
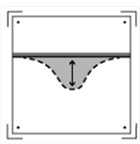
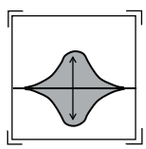
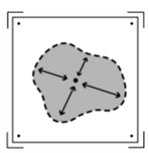
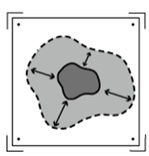
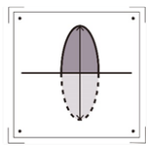
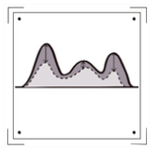
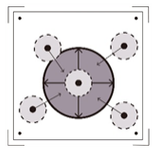
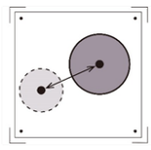
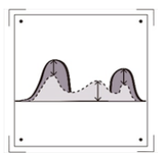
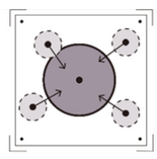
动态名称	定义描述	数学模型	模式图
生灭	在不同的时间切片内，人群活动热点呈现从无到有或从有到无的动态变化	$H \in [H_0, > H_0]$	
起伏	表示簇群的高低特征。在不同的时间切片内，人群活动热点的聚集规模呈现大小程度的变化，即表现为簇群在“高”（小规模簇群）与“更高”（大规模簇群）相对状态间的连续变化	$H \in [>H_0, >> H_0]$	
凹平	在不同的时间切片内，人群活动冷点呈现从无到有或从有到无的动态变化	$H \in [<H_0, H_0]$	
涨落	表示阴影下凹的高低特征。在不同的时间切片内，人群活动相对冷点的规模呈现大小程度的变化，即表现为阴影在“低”（小规模阴影）与“更低”（大规模阴影）相对状态间的连续变化	$H \in [<<H_0, < H_0]$	
显隐	在不同的时间切片内，人群活动密度值在特定阈值区间内的空间所组成的平面呈现从无到有或从有到无的动态变化	$D \in [D_0, >D_0]$	
放缩	表示基面边界的扩张与收缩特征。在不同的时间切片内，人群活动密度值在特定阈值区间内的空间所组成的平面在二维形态上呈现扩张或收缩的变化，即表现为基面在“高”（小规模基面）与“更高”（大规模基面）相对状态间的连续变化	$D \in [>D_0, >>D_0]$	
塌陷	在不同的时间切片内，人群活动密度值低于特定阈值区间的空间所组成的平面呈现从无到有或从有到无的动态变化	$D \in [<D_0, D_0]$	
楔入	表示洼地边界的扩张与收缩特征。在不同的时间切片内，人群活动密度值低于特定阈值区间的空间所组成的平面在二维形态上呈现扩张或收缩的变化，即表现为洼地在“低”（小规模洼地）与“更低”（大规模洼地）相对状态间的连续变化	$D \in [<<D_0, <D_0]$	

表 3　人群活动的 6 种复合动态空间模式

动态名称	定义描述	数学模型	模式图
凹凸	表示簇群（人群活动热点）和洼地相互转化的特征。在不同的时间切片内，人群活动密度的聚集规模呈现大小程度的变化，即表现为人群活动密度在簇群“高”与洼地“低”相对状态间的连续变化	$W \in [-W_0, W_0]$，$H \in [-H_0, H_0]$	
收放	表示线状簇群在基面的数量变化特征。在不同的时间切片内，线状人群活动热点在二维形态上呈现扩张或收缩的变化及高度在相对基准正值上的变化，但是人群活动热点数量和重心没有发生变化，即表现为簇群的收放	$W \in [-W_0, W_0]$，$H \in [>H_0, >> H_0]$	
聚核	表示多个簇群在基面的融合特征。在不同的时间切片内，多个点状人群活动热点呈现在基面上通过位移形成一个相对更大的面状人群活动热点，并位移在基准值内，即表现为簇群的聚核	$W \in [-W_0, W_0]$，$H \in [H_0, > H_0]$	
迁移	表示点状簇群在基面（人群活动密度特定阈值区间）的位移特征。在不同的时间切片内，人群活动热点呈现从基面某位置到另一位置的动态变化，即表现为簇群的迁移	$W \in [W_0, >W_0]$，$H \in [H_0, > H_0]$	
断续	表示线状簇群在基面的数量变化特征。在不同的时间切片内，线状人群活动热点在二维形态上呈现扩张或收缩的变化及高度在相对基准正值上的变化导致人群活动热点数量和重心发生变化，即表现为簇群的断续	$W \in [W_0, >W_0]$，$H \in [>H_0, >> H_0]$	
聚散	表示多个簇群在基面的分合特征。在不同的时间切片内，多个点状人群活动热点呈现在基面上通过位移形成一个相对更大的面状人群活动热点，且形成的更大的人群活动热点较以前的重心位移大于某基准值，即表现为簇群的聚散	$W \in [W_0, >W_0]$，$H \in [>H_0, >> H_0]$	

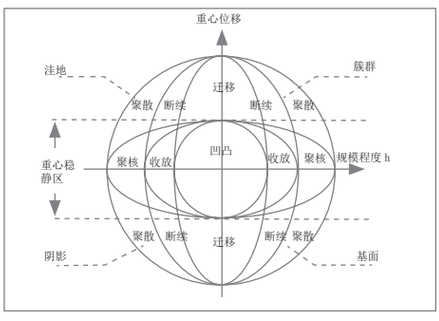


图4　人群活动的复合动态空间模式示意图

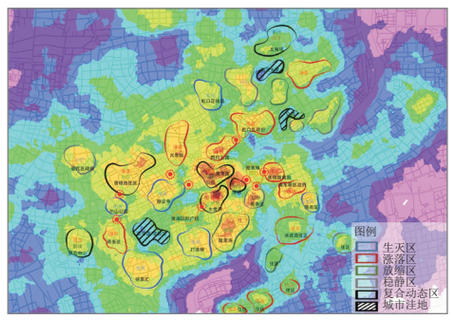


图 5　中心城区不同人群活动聚集特征区识别图

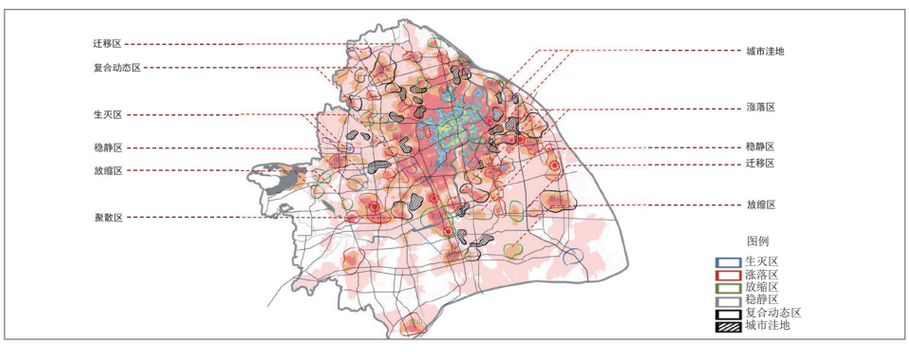


图 6　上海全城动态结构区识别图

动态空间模式进一步投影到上海全城的城市空间中；把动态的人群活动规律与静态的空间分布相耦合，对上海全城展开动态结构区识别，最终得到 6 类动态结构区，包括生灭区、涨落区、放缩区、稳静区、复合动态区及人群活动相对较少的城市洼地（图 6）。

在全城动态结构区识别的基础上，梳理其分布特征并进一步整合，探究全城动态结构的要素，包括动态基面、动态簇群、动态洼地、动态轴廊和动态阴影 5 个要素。其中，动态基面是城市人群活动动态分布的基准面，依托“核—城—边—乡”呈现跌台式递减，是城市动态结构中相对静止的活动载体；动态簇群是人群活动的主要集聚区，“核—城—边—乡”不同空间范围内的人群动态簇群的规模大小与分布密度存在差异，而动态簇群的生灭与涨落是城市动态变化的主要体现；动态洼地是随着时间迁移城市人群活动始终较少的片区，在空间上主要体现为城市绿地及待建地区等；动态廊轴是人群活动迁移的重要线索与脉络，在空间上体现为重要的交通廊道及城市水系等。

3 潮汐式的城市动态空间模型建构

将识别出来的动态结构区及相应的动态要素进行整合与分析，发现城市结构在静态的空间结构基础上随着人群活动在环状和交通轴状的空间迁移变化，呈现出一种潮汐式的往复波动状态，这种关联是动态的、断续的、生灭的、潮汐式的。因此，本次研究在整个城市的层面上研究如何建构城市的动态结构关系。

3.1 城市动态结构的基本构成

通过对城市动态特征的分析，发现其基本框架主要由动态基面、动态簇群、动态廊道和动态阴影等要素组成，因此本次研究主要探讨总体结构与形态格局构建的重点和原型。在这样的拓扑分析模式下，城市人群活动逐步形成由核心区向外逐步圈层式发展的态势。城市的

动态结构由类似于同心圆的四层阶面的圈层构成，即动态中心圈层、动态城区圈层、动态边缘圈层和动态乡村圈层。在不同圈层的各个核心点位上，区位条件非常优越的地段存在大量因人群聚集而形成的动态簇群。这些圈层是城市动态活动的重要空间板块，每一个圈层内的动态基面、动态簇群、动态洼地和动态轴廊等动态要素存在不同的特征规律。而不同圈层之间出现了非常鲜明的数据断层，类似于台地一般，动态圈层之间通过动态轴廊产生联系，并通过动态簇群间的迁移变化引发城市层面的整体动态变化（表4）。

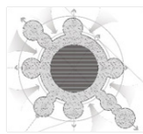
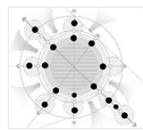
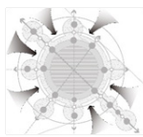
3.2 城市动态空间模型建构

在动态要素识别的基础上，本次研究试图通过定性和定量综合分析建立起城市动态结构关系：①四层圈层的台阶关系。本次研究认为一座巨型城市在没有极大地理制约的情况下会出现动态中心圈层、动态城区圈层、动态边缘圈层和动态乡村圈层，通过量化分析发现四层圈层间存在台阶式的动态断层。②动态基面的内变关系。圈层之间存在着一种动态平面，也就是动态基面，其是在不停地活动、迁移中的，但4个动态基面的活动变化更多是以各自的圈层（也就是依托于圈层的内变）为活动空间载体。③动态簇群的涨落关系。在4个不同的基面中会有不同的簇群存在，这些簇群是核心的活动集聚点，但是它们不会成片存在，也不会在人们想象中的理想位置，它们会受到各种干扰进而呈现出类似于潮涨潮落的动态变化。④动态洼地的塌陷关系。相对于动态簇群，动态基面中还会存在一定的阴影区现象，这种城市里面集聚的、不符合常规地价梯度跌落理论的急剧塌陷区与活动的簇群形成鲜明的、塌陷多样的变化类型。正是因为明显的动态的凸起和明显的人群活动塌陷地，形成城市中非常有趣的独特现象。最终，这些现象与关系由动态轴廊串联起来，形成城市动态结构中的“血管”，实现城市动态变化的多样性，也就是动态轴

表4　城市动态结构的要素构成

圈层	基本要素				
	动态簇群	动态基面	动态阴影	动态轴廊	动态洼地
动态中心圈层	硬核簇群	动态中心基面	动态中心阴影	动态中心轴带	动态中心洼地
动态城区圈层	绝对簇群	动态城区基面	动态城区阴影	动态城区轴带	动态城区洼地
动态边缘圈层	相对簇群	动态边缘基面	动态边缘阴影	动态边缘廊带	动态边缘洼地
动态乡村圈层	村镇簇群	动态乡村基面	动态乡村阴影	动态乡村廊带	动态乡村洼地

表5　上海城市动态结构要素特征总结

序号	结构要素	基本概念	人群密度数值特征	人群密度时间特征	人群密度空间特征	空间形态构成关系示意图
1	动态基面	连续空间范畴内始终处于相对平稳的地块构成的基底	人群密度值域相对中间数值及平均	持续相对稳态	面状分散	
2	动态簇群	空间位置相邻的地块的人群密度数值指标高于周边绝大部分地块	高人群密度集聚	持续相对高值	点状集聚	
3	动态洼地	引领相对低值人群密度地块空间拓展的线性要素	多个低值人群密度片区集聚	持续多个相对低值集聚	线性布局	
4	动态廊道	引领相对高值人群密度地块空间拓展的线性要素	多个高值人群密度片区集聚	持续多个相对高值集聚	线性布局	
5	动态阴影	空间位置相邻的地块群的人群密度数值指标低于周边绝大部分的地块	低人群密度集聚	持续相对低值	点状分散	

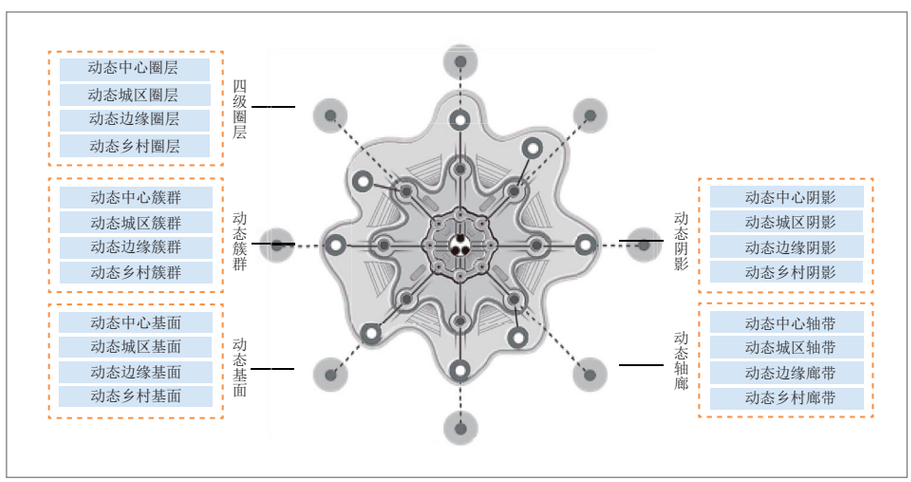


图7　城市动态结构模型示意图

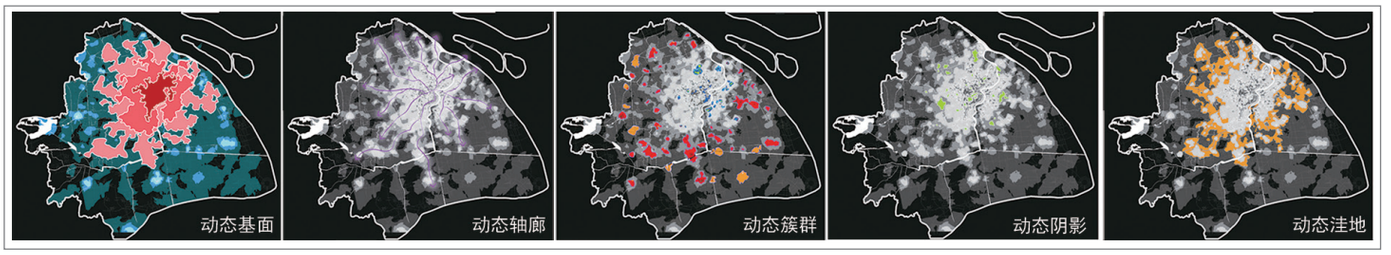


图8　5类城市动态要素识别示意图

廊的连接关系。

在城市动态结构的5种关系的基础上，通过对动态圈层及动态要素进行抽象并拓扑城市动态结构关系，最终得到城市动态结构模型（图7）。在圈层层面上，与“核—城—边—乡”的城市空间范围相呼应，动态中心圈层、动态城区圈层、动态边缘圈层和动态乡村圈层由内而外依次蔓延拓展。在基面层面上，动态中心基面的水平范围相对较小，但活动量却最大，呈团块状积聚；其他基面虽然水平范围较大，但整体活动量却相对较少，且由内向外依次递减，动态城区基面与动态边缘基面依托廊轴呈指状蔓延。在轴廊层面上，主要依托重要的交通骨架联系不同的动态要素，城市内部圈层的形态主要是动态轴，城市外围圈层的形态主要是动态廊，人群活动相对较少。在簇群层面上，4个基面中分别分布有动态乡村簇群、动态边缘簇群、动态城区簇群和动态中心簇群。不同基面的簇群多分布在基面间的轴廊联系的节点之中，这也是动态活动最为丰富且最易形成簇群的区域。而动态边缘簇群在动态边缘基面中会有部分不依托轴廊而相对独立分布，外围的动态乡村簇群更多以飞地的形式存在。动态中心簇群不仅规模与活动最为密集，在分布上地理区位也较为相邻，通过动态中心基面的动态活动形成了动态中心簇群的连绵带。在动态洼地层面上，有动态乡村洼地，也有动态边缘洼地及动态城区洼地，动态乡村洼地相对较少。这些动态洼地多依托基面间的“指缝”及轴廊存在，而且是活动的。

3.3 城市动态结构要素解析

根据上述解析可以认为，对于上海城市人群活动时空分布的研究应重点解析动态基面、动态簇群、动态洼地、动态廊道及动态阴影等结构要素的动态时空变化特征，每个要素在人群密度数值及空间组合模式上均有各自的表现特征 。

动态基面是空间构成中占比相对最大的区域，它是片区发展的基底和背景，为该片区的正常运转提供基本场所，承载了片区的基础功能。上海的城市动态基面总体呈现四圈层分布特征，第一圈层包括黄浦区、静安区及闸北区等城市核心片区，以及南京东路、南京西路、外滩和豫园片区等，是上海历史文化最丰富、社会经济活动最密集的地区；第二圈层涵盖了上海中环快速路内的城市片区，包括长宁区、普陀区、虹口区、杨浦区及浦东新区的中心区；第三圈层是中心城区外围主体部分；第四圈层则是上海中心城区与城外的边缘交界地带。动态簇群指的是人群活动在空间区位上相对高值的聚集或者簇拥的趋势，同时也表示该区域在某一片区内处于空间、职能或者活力方面的核心地位，多为一个片区内的活力点或者魅力点，一般会因其良好的公共服务设施配套、自然生态条件和交通可达性等因素而成为一个片区的人群聚集片区。上海的城市动态簇群主要依托上海内环高架路与轨道交通4号线，以人民广场、黄陂南路和南京东路形成中心城区簇群核心区域。动态洼地包括一定规模的人群活动稀疏甚至空缺的片区，主要是农林用地、防护绿地、生态绿地及水域，对人群活动的吸引力较弱，在上海城市外围地带则由外向内呈楔入式分布特征。动态廊道特指连续、线性的人群活动聚集空间，包括城市铁路、城市主要道路和城市重要水系等，以满足片区内外的重要物资交换及信息传输的需求。上海的城市动态廊道从中心区向外指状放射分布，主要有依托轨道交通1号线南段的徐家汇—梅陇镇动态廊道，依托轨道交通2号线中东段及6号线东北段的陆家嘴—沪东新村动态廊道等。可以发现，相较于城市快速路、主干路等交通性干道，城市动态廊道与轨道交通线、次干路等生活性干道有更紧密的耦合关系。动态阴影与动态簇群为一对相对概念，它指的是人群活动聚集密度在空间区位上相对低值的地块群，主要位于以传统居住功能为主导的尚未进行改造的区域，分布较为分散，包括上海体育馆、豫园和苏州河沿岸等区域均有分布。其特点是公共服务设施功能滞后，导致其对人群活动的吸引力不足（表5，图8）。

4 城市动态结构的规划设计应用前瞻

如何利用规划介入未来城市的创造过程，不仅需要将城市的物质形态与城市动态规律进行结合，识别城市的动态结构，解析城市的动态发展规律，还需要将这种规律运用于规划设计的过程中，包括基于人群潮汐波动规律的城市功能区识别、基于城市人群时空动态分布的空间形态指引等方面。

4.1 基于人群潮汐波动规律的城市功能区识别

在某市城市设计案例中，基于手机LBS数据获取24小时人群活动数据，对其进行等时差时间切片，获取该市各个

时段人群空间分布聚集程度，用以判断各地段人群流动特征，并根据人群活动模式，识别出城市居住、就业和游憩等功能区。在此基础上，根据城市不同功能区的人群潮汐波动规律，可以进一步识别该城市全时段的活力街区及卧城的居住区等，并通过对数字市民画像的塑造，提出精细化的城市设计策略，增强城市设计的可操作性。例如，通过该市居住地的识别可以发现，该市市民主要集中在老城区、高新区和经开区三大板块，其中老城区由于发展空间不足，生活成本过高，年轻人群分布较少，已经出现了空心化及绅士化的现象。因此，在城市设计中通过整合老城区、经开区的现状职能，形成老城区、经开区两个城市主中心；通过提炼核心职能并对其进行优化组合，形成行政服务、社会服务、生活服务、生产服务及专业市场服务五大职能，以提升老城区的活力。

4.2 基于城市人群时空动态分布的空间形态指引

通过人群活动的时空动态分布特征，探究城市人群集散的动态结构，可以为城市空间形态布局提供指导；在人口全时密集区域布局高层建筑，有利于提高城市社会经济效益。例如，火车站地区往往属于城市人流高频移动的区域，如何通过火车站片区的空间形态布局提升火车站空间活力，这就需要对火车站地区的人群时空动态分布特征和规律进行深入挖掘。在某市火车站片区城市设计中，利用手机信令数据分析火车站地区的人群时空动态分布特征，研判出火车站人群活力洼地、局部节点活跃的人群活动特征，并通过与业态POI数据的交互耦合分析，得出火车站地区最适合布局高层的多个区域，为火车站地区的布局调整和功能提升提供科学合理的指导。

5 结语

多源大数据的集成与协作研究对于发现城市运行和发展的规律具有重要意义，从而可以在此基础上实现对于未来城市的创造。本次研究突出城市大数据平台的多维特征，通过空间大数据和手机信令大数据协同研究，“以更高的分辨率研究城市”，力图剖析城市动态结构的基本模型和特征规律。若能在更多案例的基础上深入研究下去，采用更精确的空间大数据定量研究技术，揭示其完整的空间演化规律和理论框架，对未来城市的发展与优化提升具有前瞻性的意义。

[注　释]

①不同时间段手机活跃用户数是变化的，为了保持研究基数的相对稳定，信令数据清洗中对在夜间（20：00～8：00）同一地点关机的用户采取了连续链接处理。

②凌晨与夜晚两个时间段人群变化的趋势及数值相似，故将其统称为晚上。周时间段针对的是一个完整周段的工作日及周日，采用2012～2013年上海城市中4个不同季节的各自一周的人群密度数据。特殊假日指的是国家节假日，本次研究采集的是五一劳动节时间段的人群密度数据库。

[参考文献]

[1]Batty M. Inventing Future Cities[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2018.

[2] 栾峰. 城市经济学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

[3] 张庭伟. 1990年代中国城市空间结构的变化及其动力机制[J]. 城市规划，2001(7)：7-14.

[4] 吴左宾，姬一丹，程功. 陕西省定边县城市空间结构优化逻辑探究[J].规划师，2019(11)：44-49.

[5] 张润朋，刘玮. 广州城际轨道网络与城市空间结构规划适应性分析及协调策略[J]. 规划师，2017(12)：117-123.

[6] 石崧. 城市空间结构演变的动力机制分析[J]. 城市规划汇刊，2004(1)：50-52，96.

[7] 高兴，施澄，邹智军. 基于手机信令数据的城市短期驻留人口出行时空特征与城市空间结构关系研究——以杭州市为例[J]. 综合运输，2020(7)：6-11，23.

[8]Widhalm P, Yang Y X, Ulm M, et al. Discovering Urban Activity Patterns in Cell Phone Data[J].Transportation, 2015(4): 597-623.

[9]Liu X, Gong L, Gong Y X, et al. Revealing Travel Patterns and City Structure with Taxi Trip Data[J]. Journal of Transport Geography, 2015(43): 78-90.

[10]Liu X, Kang C G,Gong L,et al. Incorporating Spatial Interaction Patterns in Classifying and Understanding Urban Land Use[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016(2): 334-350.

[11]Ren M Y, Lin Y Y, Jin M H, et al. Examining the Effect of Land-use Function Compleme Ntarity on Intra-urban Spatial Interactions Using Metro Smart Card Records[J]. Transportation, 2020(4): 1 607-1 629.

[12]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 & Design, 2006(5): 727-748.

[13] 段亚明，刘勇，刘秀华，等. 基于宜出行大数据的多中心空间结构分析——以重庆主城区为例[J]. 地理科学进展，2019(12)：1 957-1 967.

[14]Yang X P, Zhao Z Y, Lu S W. Exploring Spatial-Temporal Patterns of Urban Human Mobility Hotspots[J]. Sustainability, 2016(7): 674-692.

[15] 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.

[16]Huang Q Y, Wong D W S. Activity Patterns, Socioeconomic Status and Urban Spatial Structure: What can Social Media Data Tell Us? [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016(9): 1 873-1 898.

[17]Uskuplu T, Terzi F, Kartal H. Discovering Activity Patterns in the City by Social Media Network Data: a Case Study of Istanbul[J].Applied Spatial Analysis and Policy, 2020(4): 945-958.

[18] 杨喜平，方志祥，尹凌. 城市空间结构要素与人群聚散稳定性的关联性探索[J].地球信息科学学报，2018(6)：791-798.

[19]Louail T, Lenormand M, Picornell M, et al. Uncovering the Spatial Structure of Mobility Networks[J]. Nature Communications, 2015(6): 6 007-6 014.

[20]Chi G H, Thill J C, Tong D Q, et al. Uncovering Regional Characteristics from Mobile Phone Data: A Network Science Approach[J]. Papers in Regional Science, 2016(3): 613-632.

[收稿日期]2020-09-10