大都市区城市扩张过程及形态对比分析 ——以东京、纽约和上海为例

焦利民^{1,2}, 龚晨^{1,2}, 许刚^{1,2}, 董婷^{1,2}, 张博恩³, 李泽慧^{1,2}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079;

3. 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 香港 九龙 999077)

摘要:大都市区化是全球城市化进程中的普遍现象,研究大都市区域城市扩张进程对理解其未来增长趋势、区域可持续发展具有重要意义。大都市区土地扩张及区域间的对比分析,以及都市区发育过程中城市扩张的一般化空间模式还未被深入理解。论文选取东京、纽约和上海3个大都市区,获取1990—2015年间3期Landsat影像数据,使用梯度和格网分析法,采用城市土地密度函数和城市扩张指数,从建设用地数量变化及其时空分布、城市形态变化等方面,多角度对比分析各城市不同阶段建设用地增长的时空差异。结果表明:①大都市区边界仍在不断扩展,建设用地在研究期内持续增长;20多年间东京、纽约和上海的建设用地面积分别增长了63%、53%和233%;上海一直处于高强度扩张状态,而纽约的城市扩张在后期几近停滞。②大都市区建设用地密度从中心向外呈圈层递减式分布,城市核心区和边缘区半径的增长最明显;城市形态均趋向于紧凑。③新增建设用地时空异质性明显。东京的远郊新城不断建设,纽约一些尚有发展潜力的区域次中心仍在扩张但速率逐渐放缓,上海的核心区外围增长剧烈并逐渐向远城区推进。④大都市区域扩张先后经历高速期—缓慢期—停滞期,扩张进程表现为核心区膨胀—次中心及新城建设—逐步形成稳定的多中心结构。

关键词:城市扩张;大都市区;城市土地密度;城市形态;时空分异

目前,全球超过50%的人口居住在城市,城市人口中的41%(约16亿)居住在大都市区域(人口≥100万),2030年这一数字还将增长6亿(United Cities and Local Governments, 2016)。全球城市化使得人口不断向城市尤其大都市集聚,城市建设用地规模不断增大,而城市土地增长又远快于人口增长,城市空间结构发生重组;世界城市化进程进入了一个新的发展阶段——大都市区化(许学强等, 2007; Angel et al, 2011; Seto et al, 2011; 荣朝和, 2014)。作为城市化发展的高级形态,大都市区是未来城市化发展的趋势与必然,中国目前也正处在城市化阶段转变的关键时刻(张欣炜等, 2015; Department of Economic and Social Affairs, United Nations, 2017)。

定量分析大都市区域及全球尺度城市扩张过程和城市形态演变对城市规划、城市发展进程研究以及区域协调可持续发展等具有重要意义(唐路等, 2004; Taubenböck et al, 2012; 冷炳荣等, 2016)。

都市区形态及其扩张机制已成为城市地理学的核心议题,相关研究已较为充分。研究数据及方法方面,国内外学者基于社会统计数据、夜间灯光遥感数据、兴趣点POI(Point of Interest)及微博签到大数据等,并综合运用GIS空间分析、网络分析、格局指数等多种方法,从多维时空尺度对城市扩张的过程、格局和形态特征等开展了广泛的研究(Ji et al, 2006; Bhatta et al, 2010; 贺振等, 2011; Xu et al, 2013; 毛卫华等, 2013; 陈凯等, 2015; 刘纪远等,

收稿日期:2018-10-25;修订日期:2019-01-18。

基金项目:国家自然科学基金项目(41571385)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41571385.]

第一作者简介:焦利民(1977—),男,河南安阳人,教授,博士生导师,主要从事土地利用覆盖变化、城市扩展、空间分析等方面的研究。E-mail: lmjiao027@163.com

引用格式:焦利民, 龚晨, 许刚, 等. 2019. 大都市区城市扩张过程及形态对比分析: 以东京、纽约和上海为例[J]. 地理科学进展, 38(5): 675-685. [Jiao L M, Gong C, Xu G, et al. 2019. Urban expansion dynamics and urban forms in three metropolitan areas—Tokyo, New York, and Shanghai. Progress in Geography, 38(5): 675-685.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.05.005

2016)。其中梯度分析法在城市扩张及城市形态的研究中被广泛运用,空间指标的多样性及由城市中心向外密度的变化也经常被讨论(Irwin et al, 2007; Schneider et al, 2008; Taubenböck et al, 2009)。Seto等(2005)和Schneider等(2008)均基于圈层分析对城市时空格局变化进行了量化。研究发现通常情况下,城市建设用地密度从城市中心向外逐渐递减,Jiao(2015)基于圈层梯度划分对中国28个主要城市的研究定义了城市土地密度方程。基于格网(grid cells)空间单元并融合遥感数据的分析在城市问题研究中也较广泛的应用,如500 m×500 m、1 km×1 km格网单元(Bagan et al, 2012; Hou et al, 2016)。空间格局指数、圈层梯度分析及格网分析等方法的综合运用将有助于深入揭示大都市区城市扩张时空过程特征。

城市扩张格局特征分析及过程模拟是近来的研究焦点,研究对象涉及单个城市、城市群以及城市、城市群间的对比分析。Schneider等(2008)从4个方面对全球25个大城市对其扩张和形态作了深入分析;Angel等(2011)对全球城市分析发现1990—2000年间城市扩展速率为人口增长的2倍;Kuang等(2014)对中美6个主要大都市的对比研究发现2个国家城市扩张模式存在差异;学者还对中国珠三角以及西部4个都市区的扩张进行了研究(Wu et al, 2011; Schneider et al, 2015)。但现有研究多集中在单个城市或某个特定区域,有关大都市区的对比分析也多集中在一个国家内部(Seto et al, 2005; Bagan et al, 2012; Sexton et al, 2013; Xu et al, 2013; 陈江龙等, 2014; Hou et al, 2016; 周艳等, 2016; Tian et al, 2017; 焦利民等, 2017)。对处于不同社会经济背景和城市化水平的大都市区,随着其城市扩张进程的不断推进,城市空间动态演变及扩张模式发生着变化,都市区发育过程中城市扩张的一般化模式还有待被进一步理解。

本文选取处于不同社会经济背景和城市化水平的东京、纽约、上海大都市区,运用遥感解译数据定量分析20多年来大都市地区城市扩张动态特征及时空格局。通过对样本城市扩张时空过程的研究,总结不同发育阶段大都市区城市扩张时空规律及差异,以期发现都市区发育过程中城市扩张的一般化空间模式和未来增长趋势,研究结果可对大都市区自身发展及世界范围内其他大都市化进程中的城市提供规划参考。

1 研究区域及数据

1.1 研究区域概况

东京、纽约和上海大都市区分别是亚洲发达地区、美国发达地区及亚洲发展中地区的典型大都市地区。3个都市区处于不同社会经济背景 and 不同都市区发育阶段,且在城市发展模式方面存在差异。东京自1958年起重点建设城市副中心及郊区卫星城,不断疏散城市中心结构;纽约大都市区规划由纽约规划协会组织制定,20世纪20年代以来先后经历城市化、城市化向城郊化过渡和再城市化,东京、纽约现已基本形成成熟的多中心城市复合化结构。上海区域规划主要由政府引导且起步较晚,自20世纪80年代开始着重打造小城镇及卫星城建设,城市空间结构尚处于多中心形成阶段。选取东京、纽约、上海都市区作为研究对象,对于定量刻画不同发展阶段大都市区城市扩张形态演变特征及对比分析具有代表性。

东京位于日本本州关东平原南端,是亚洲第一大城市。东京都市圈占据了日本国土面积的20%,集聚了全国50%的人口;2015年东京大都市区人口超过3500万,GDP总量位于全球首位,城镇化率高于90%。纽约位于美国东北部的大西洋海岸,是美国最大城市和全球金融中心。本文中纽约大都市区范围包含纽约州及新泽西州的一部分,共27个市县,2015年纽约都市区人口超过2000万。上海坐落于长江及黄浦江入海口,是中国最大的国际化都市,也是全球城市的重要节点,2015年人口超过2400万。上海大都市区20多年来经历了快速的城市扩张,人口和建设用地都发生了剧烈的增长。本文中,东京、纽约、上海都市区研究时点分别在1990、2000、2014年左右(后文分别简称T1、T2、T3),数据时点详见表1,各都市区对应时点建设用地空间分布如图1所示。

1.2 数据来源及处理

东京、纽约、上海大都市区1900—2015年3期土地利用遥感影像解译结果(30 m空间分辨率)来源为全球城市扩张图集(<http://www.atlasofurbanexpansion.org/data>)。该数据集的土地利用数据分为建设用地、植被和水体3种类型,本文重点分析城市建设用地的时空分布及变化。该数据集还包括研究区矢量边界、城市中心以及人口信息,同时本研究还获取了城市行政边界、路网等辅助数据(<https://download.bbbike.org/osm/>)。研究区3期人口及土地

表1 三大都市区人口及土地变化
Tab.1 Population, built-up area, population density, and their annual change rates
in Tokyo, New York and Shanghai in T1, T2 and T3

大都市区		影像获取时间	人口/百万人	人口年均增长率/%	建设用地面积/km ²	建设用地面积年均增长率/%	人口密度/(万人/km ²)	人口密度年均变化率/%
东京	T1	1990-05	29.18	—	2799.62	—	1.04	—
	T2	2000-10	31.35	0.74	3293.50	1.82	0.95	-0.87
	T3	2014-05	34.76	0.78	4563.51	3.01	0.76	-1.43
纽约	T1	1991-01	16.23	—	5178.69	—	0.31	—
	T2	2000-08	17.95	1.18	7606.34	4.36	0.24	-2.51
	T3	2011-08	18.41	2.23	7899.47	0.25	0.23	-0.09
上海	T1	1991-12	10.04	—	962.23	—	1.04	—
	T2	2000-09	14.46	4.89	2043.07	7.82	0.71	-3.52
	T3	2015-05	24.38	4.57	3204.22	3.27	0.76	0.47

图1 研究区空间范围及建设用地分布
Fig.1 Spatial distributions of built-up areas in the study areas

变化如表1所示。

2 研究方法

2.1 梯度分析及格网分析

本文划分了2类空间单元:1 km半径缓冲圈层和1 km格网单元。圈层分析法主要分析思路为:选取都市区最核心城市主中心(CBD),并以此为圆心向外以一定缓冲半径做若干缓冲区,得到若干圆环;再将圆环与不透水表面叠加,计算不同缓冲区内的城市土地密度(密度=建设用地面积/可用面积)。圈层城市土地密度定义为圈层内建设用地面积与可建设用地总面积之比(含已建设面积);可建设用地总面积等于圈层总面积扣除水域和因受保护等不可建设用地面积。本研究数据集中不可建设用地主要指湖泊、河流等水域。研究区土地利用

图是通过不规则边界(如行政边界)裁剪 Landsat 影像分类结果得到的,外围圈层可能非完整圆环。这些外围圈层内可建设用地面积等于边界内圆环面积扣除水域面积。其中缓冲距离的确定及其对实验结果的影响一直是学术界的研究焦点,被普遍接受的距离有1 km、3 km等。Kuang等(2014)对6个中美城市以及Jiao(2015)对中国28个城市的研究中均采用1 km为缓冲半径,实验结果证明了其合理性。因此,本文以1 km为缓冲半径,将研究区划分为一系列由中心向外延伸的1 km圆环,作为分析城市空间动态变化的基本单元。此外,对研究区划分1 km×1 km的若干单元格网,再与不透水表面叠加,以此作为相关计算和分析城市新增建设用地空间分布的基础。

2.2 城市土地密度分布反S函数

Jiao(2015)定义了城市土地密度分布反S模型,

该模型量化描述了城市不透水表面密度随其距城市中心距离的增加而递减的规律。对中国28个主要城市的验证结果显示其具有较好的拟合效果,模型如下:

$$f(r) = \frac{1-c}{1+e^{\alpha(2r/D)-1}} + c \quad (1)$$

式中: f 表示城市土地密度; r 表示到城市中心的距离; α 、 c 、 D 为待定参数,其中 α 表示曲线的斜率; c 表示函数的下渐近线,代表城市边缘区城市土地密度的背景值; D 代表由城市土地密度函数定义的城市半径的估计值。

根据计算和推导,将城市划分为4个部分:核心区、近城区、远城区和边缘区,其半径范围可依次表达为 r_1 、 r_0-r_1 、 r_2-r_0 、 $D-r_2$,见图2($\alpha=4$, $c=0.05$, $D=30$)。核心区内建设用地密度最高且下降缓慢,密度值在近城区和远城区迅速下降,到边缘区再次缓慢下降。参数刻画了城市形态和城市扩张动态过程;曲线斜率越大,建设用地密度下降越快,城市形态越集聚,反之越蔓延。

2.3 城市扩张指数

城市扩张指数能很好地反映城市扩张过程中空间结构的动态变化。本文选取城市扩张核心度指数(UCI)、城市扩张强度指数(UII)及反S方程推导出的城市紧凑度指数(Kp)进行分析。各指数定义及计算方法如下。

(1) 城市扩张核心度指数

城市扩张核心度指数(UCI)是城市核心区半径和核心区外围地区半径的比值(焦利民等, 2015)。其一般表达式为:

图2 城市土地密度分布函数

Fig.2 Schematic diagram of urban land density function

$$UCI = R_{core}/R_{fringe} \quad (2)$$

式中: R_{core} 和 R_{fringe} 分别代表城市核心区(市中心到建设用地密度 $\geq 50\%$ 的圆环之间的区域)和核心区外围地区(核心区边界到建设密度 $\geq 10\%$ 的圆环之间的区域)的半径。该指数衡量了城市建成区向中心城区的集中程度。值越大,中心城区核心度越强,城市形态越紧凑;值越小,城市蔓延性越强。

(2) 城市扩张强度指数

城市扩张强度指数(UII)表示一个空间单元在单位时间内建设用地扩张面积占总面积的百分比,该指数衡量了城市发展的强弱快慢,公式对各圆环单元年平均扩展速度做了标准化处理(李晓文等, 2003),使样本城市及同一城市不同时段城市扩张程度具有可比性。表达式为:

$$UII_{i,t-t+n} = \frac{(UA_{i,t+n} - UA_{i,t})}{TA_i} \times \frac{1}{n} \times 100 \quad (3)$$

式中: $UII_{i,t-t+n}$ 为第 i 个缓冲区圆环在 $t \sim t+n$ 时段内的扩张强度指数; $UA_{i,t+n} - UA_{i,t}$ 表示 $t \sim t+n$ 时段内建设用地面积的增长量; TA_i 表示第 i 个缓冲区圆环内可利用土地的总面积。

(3) 城市扩张紧凑度指数

城市土地密度方程中,曲线的坡度反映了城市土地密度的变化情况。根据城市土地密度方程,由相关参数定义的紧凑度指数(Kp)表达式如下,详细推导和计算过程见Jiao(2015)的研究:

$$Kp = \frac{r_2 - r_1}{D} = \frac{1.316957}{\alpha} \quad (4)$$

式中: α 是控制反S方程曲线坡度的参数。紧凑型城市的建设用地密度在核心区域内高,向外则迅速降至一个较低值,曲线陡峭,因此Kp小;而低密度或分散化的城市Kp值通常较大。Kp可作为衡量城市分散化程度的指标,同时避免了城市边界任意性对紧凑度计算的影响。

3 结果与分析

3.1 城市扩张数量特征

东京、纽约和上海大都市区建设用地面积及其年均变化率如图3所示。T1—T3时期,东京、纽约和上海都市区建设用地面积分别增长了63%、53%和233%,上海增长幅度最大。T3时刻,都市建成区面积表现为纽约(7899.47 km²) > 东京(4563.51 km²) > 上海(3204.22 km²)。年均增长率方面,T1—

图3 都市区建设用地面积增长情况(a)及其年均增长率(b)

Fig.3 Temporal variations of built-up areas and their annual change rates in Tokyo, New York, and Shanghai

T2阶段上海年均增长率高达12.5%,纽约为5.2%,东京不足2%;T2—T3阶段,上海和纽约增长速率有所放缓,分别下降至3.8%和0.4%左右,分别不及前一阶段的1/3和1/15,而东京2000年后的年均增长率较前10 a有小幅上升(2.8%)。

研究区人口、城市土地、人口密度及其年均变化率如表1所示。从表1看,建设用地年均增长率普遍高于对应的人口年均增长率,人口密度呈下降趋势(上海2000—2015年除外)。人口密度的变化可反映城市土地利用的集约程度,T1—T2阶段,3个大都市区的城市土地利用效率均有所下降,其中上海幅度最大。2000年后,东京人口密度下降速率变快,人口增长速度慢于城市土地扩张速度;纽约该时间段内建设用地无明显增长,人口密度保持相对稳定;2000年后上海的人口密度逐渐增加,城市土地表现出集约增长趋势。

3.2 城市土地密度圈层分布

基于圈层划分法,依据都市区范围,对东京、纽约和上海分别建立了80、150和65个半径为1 km的

圆环,计算城市各圈层内的建设用地密度,再利用城市土地密度函数拟合建设用地密度的空间分布,结果如图4所示;表2列出了拟合方程的参数, R^2 均在0.985以上,拟合精度高。总体上,3组曲线在时空上表现出一致的规律,建设用地密度随距城市中心距离的增大而降低,呈现出先缓慢降低、再快速降低、最后缓慢降低的过程。时间上,3个城市T1—T3对应的曲线不断增长,即同一圈层内的建设用地密度随时间不断升高,城市建设用地在各圈层内均有扩张。

曲线分布形态及拟合参数可反映城市扩张的时空特征。斜率刻画了建设用地在空间分布的集聚程度,3个城市的斜率随时间不断增大,城市形态变得紧凑,其中上海尤为明显。纽约都市区在距中心100 km外的区域处于蔓延状态,相比于东京和上海其城市形态更分散;低密度蔓延性是当代美国大都市区空间结构的一个主要特征,这与美国地方政府实施的土地利用分区制有关(孙群郎等, 2015)。单个城市曲线间的间隔反映了扩张的强度,间隔越

图4 城市土地密度函数拟合结果

Fig.4 Spatial distribution of urban land density with the distance to the city center

表2 城市土地密度函数拟合参数

城市	时期	α	c	D	R^2
东京	T1 (1990年)	2.595	0.008	57.88	0.988
	T2 (2000年)	2.999	0.011	64.55	0.991
	T3 (2014年)	3.533	0.023	78.26	0.993
纽约	T1 (1991年)	2.685	0.001	80.38	0.990
	T2 (2000年)	3.606	0.018	100.40	0.994
	T3 (2011年)	3.603	0.017	103.00	0.994
上海	T1 (1991年)	2.101	0.034	26.06	0.987
	T2 (2000年)	2.920	0.052	46.64	0.985
	T3 (2015年)	4.181	0.076	65.78	0.990

大,扩张越剧烈;处于城市不同圈层的建设用地增长强度具有时空异质性。如东京都市区 T2—T3 阶段(2000—2014年)的增长幅度较前一阶段大,远城区的增长更明显。纽约 T2、T3 这 2 条曲线几乎重合,城市发展已趋近饱和、扩张缓慢。上海在距中心 15~35 km 区间内即核心区外围增长剧烈,说明此时上海市主城区仍在经历高强度建设,城市总体形态以辐射状向外扩展,2000年后整体扩张强度有小幅下降。密度值分布曲线中的异常波动是由新的城市扩展源引起,区域次中心的兴起使城市逐渐演变为复杂的多中心结构。

3.3 城市扩张总体形态变化

如图 5 所示, T1—T3 期间东京、纽约和上海的半径(D)分别增长了 35%、28%和 152%,上海都市区增长最剧烈,城市半径由 1991 年的 26.1 km 增长至 2015 年的 65.8 km。城市内部不同区域扩张强度不同,近城区和远城区半径变化不大,而核心区和边缘区的增长明显。研究期内东京、纽约、上海核心区及边缘区半径分别增长了 71%、60%和 360%,城市扩张主要表现为核心区的膨胀和远郊边缘区土地的大规模开发。城市内部形态处于动态变化之中,城市扩张指数可以定量表征城市形态的变化。根据 2.3 节中的方法计算各都市区核心度指数、城市扩张强度指数及紧凑度指数,结果如图 6 所示。

图5 城市分区空间范围变化

Fig.5 Spatial variations of the extent of different urban areas

图 6a 显示,东京的核心度值(UCI)最高,但 T3 时由于远城区的增长加剧,东京的核心地位逐渐下降;纽约都市区的 UCI 值先减小后增大,总体变化不明显;随着上海大都市区的迅速扩张,其核心区地位日益上升,上海主城区在经历高强度的扩张。由图 6b 可知, T1—T3 期间,上海的扩张强度远高于东京和纽约。这是由于 1990—2015 年正值上海城市建设高速期,1990 年中共中央和国务院决定设立浦东新区,此后以浦东新区等为代表的区域快速发展,上海市区向周围快速扩展;上海城市扩张强度在 2000 年后略有降低。而此时,城市化水平更高的东京和纽约已进入城市扩张的缓慢期, T2—T3 (2000—2011 年)纽约增长微弱,而东京由于远郊新城的开发使扩张强度再一次上升。图 6c 中, Kp 结果显示: T1—T3 时段内 3 个城市紧凑度值均在下降,城市空间形态趋向紧凑,没有出现蔓延摊大饼的无序增长,这是区域规划和城市自我选择的综合结果。

图 7 为研究区城市扩张强度指数随距中心距离变化的分布图, 2 组实、虚线分别代表 T2 和 T3 时的 r_1 和 r_2 。3 组曲线均呈现锯齿状,东京、纽约最明显,而上海相对平滑;几处明显波峰暗示此处存在新的扩展源,城市朝多中心空间结构演变。然而,曲线又呈现出了不同的时空特征。时间上,纽约的扩张

图6 城市扩张核心度、强度和紧凑度的时间变化

Fig.6 Temporal variations of concentration, intensity, and compactness of urban expansion

图7 城市扩张强度指数随距中心距离变化分布

Fig.7 Spatial disparity of urban expansion intensity with the distance to the city center

强度大幅下降,上海也有所降低,而东京明显上升。分别来看,东京都市区在距中心20 km外的区域扩张强度更高且T2(2000年)后又有加剧,尤其在原本增长缓慢的远城区(50~70 km),都市区形态向远处延伸。这一现象由该时期空间规划的政策性引导导致,东京于1986年实施第4次首都圈规划,重点打造距中心20~50 km范围内的商务核心区;1999年第5次总体规划在上一轮规划基础上继续增强远郊新城和邻县中心建设,如60 km外茨城的筑波新城和千叶市的成田。T1—T2期间(1991—2000年),纽约在距中心0~90 km内一直处于较高扩张强度,而后跌至较低水平;2000年左右,城市发展进入稳定期,建设用地增长微弱、几近停滞,空间结构趋于稳定。上海的扩张强度随距中心距离的增

加先上升后下降,在15~35 km内的核心区外围增长最剧烈,曲线峰值的右移表明城市核心区范围在逐步向外推进;随着核心区的不断建设和日益完善,2000年后扩张强度开始放缓,而远城区的强度却没有下降,远离核心的区域次中心及远郊新城的建设正在逐步推进。

3.4 城市扩张时空分布结构

在圈层分析基础上,采用格网分析法进一步分析新增建设用地的时空特征。综合圈层划分及格网分析,可以更有效地定量刻画都市区不同区域城市扩张的时空格局。图8为研究区1 km格网T1—T2、T2—T3建设用地年均增长量,每个格网的年均增长量(km²)数值从0至0.11不等。东京都市区不同区域增长情况差异悬殊,1990—2000年几处高值

注:图中圆环分别表示各都市区核心区、近城区、远城区和边缘区在T1—T2、T2—T3时期的边界。

图8 1 km 格网建设用地年均增长量

Fig.8 Spatial distributions of annual increase of built-up areas in 1 km grid

集聚在远离中心的西北部;2000年后,北部的边缘区多处增长剧烈,尤其是东北部几个集中连片新城的兴起(茨城)。纽约都市区不同于东京的连片集中增长模式,1991—2000年间,都市区内分布着大量且离散的不同增长强度的小块区域,正在经历以填充式为主的城市扩张模式,区域边缘处增长更为剧烈,城市扩张模式表现为填充式与边缘式并存;2000年后只有西南部发生了明显增长。相比于东京和纽约,上海都市区表现出明显的由核心区向外膨胀的城市扩张模式,核心区边缘增长剧烈,新壮大后的核心区又继续向外膨胀推进。同时远处的新兴城市组团也在不断发展,上海市远城区及边缘区的范围逐渐向外拓展,这与城市扩张总体形态分析相一致。

3个都市区所表现出的不同城市扩张时空分布模式正是区域发展生命周期和城市生长机理的体现,城市内部物理和社会要素随着城市的发展不断积累,城市扩张模式从最初的核心区膨胀到城市复合化多中心结构建设,区域空间结构不断向一个更加均衡、高效率的结构演变发展,不同发育阶段都市区在城市规划和自我选择下表现出相应的时空增长特征。

为更好地识别城市扩张过程中的热点组团,运用ArcGIS 10.2中聚类分布制图模块的优化热点分析功能提取不同时段99%置信度条件下的热点区域,结果如图9所示。T1—T2东京的增长热点区域主要连片分布在都市区核心周围及埼玉县;此后建设用地开发集中在埼玉县东部、茨城和千叶,以用于新城建设。纽约都市区1991—2011年间的热点区域主要位于新泽西州中东部,如蒙茅斯和米德尔赛克斯等土地利用率尚低的县市。而在上海都市

区,热点区域呈环状围绕在主城区外围,并随时间逐渐向远处推移;同时一些新的组团出现在南汇、奉贤及金山区,上海的城市建设在继续扩大其主城区的同时也逐渐由中心区域向远郊转移。

4 结论与讨论

本文选取处于不同城市化水平的3个典型大都市区东京、纽约和上海,基于城市土地密度方程和城市扩张指数,从多个角度对城市扩张的时空分布模式进行了深入探索。研究发现,大都市区城市扩张模式因城市所处的不同发展阶段而不同;大都市区城市扩张的步伐仍未停止,城市内部还在经历着不同程度的开发建设,城市边界仍在持续向外扩展。具体结论如下:

(1) 大都市区边界仍在不断扩展,建设用地在研究期内持续增长;20多年间东京、纽约和上海的建设用地面积分别增长了63%、53%和233%;上海一直处于高强度扩张状态,而纽约的城市扩张在后一阶段几近停滞。

(2) 大都市区建设用地密度从中心向外呈圈层递减式分布,城市半径增长主要表现为核心区 and 边缘区的增长,研究期内东京、纽约、上海核心区及边缘区半径分别增长了71%、60%和360%。城市形态均趋向于紧凑。

(3) 新增建设用地时空异质性明显。东京的远郊新城不断建设,纽约一些尚有发展潜力的区域次中心仍在扩张且速率逐渐放缓,上海的核心区外围增长剧烈并逐渐向远城区推进。

(4) 大都市区扩张模式与其所处发展阶段有关。城市增长先后经历高速期—缓慢期—停滞期,

图9 城市扩张热点区域

Fig.9 Hotspots of urban expansion in the three case study metropolitan areas

城市扩张时空进程表现为核心区膨胀(Ⅰ)一次中心及新城建设(Ⅱ)——逐步形成高密度且稳定的多中心结构(Ⅲ)。

本文多角度对比分析了处于不同发展阶段的大都市区域城市扩张模式及时空分布规律;通过对典型案例的分析总结出了都市区发育过程中城市扩张的一般空间模式,即核心区膨胀(Ⅰ)一次中心及新城建设(Ⅱ)——逐步形成高密度且稳定的多中心结构(Ⅲ)。分析表明东京、纽约和上海大都市区分别处于Ⅱ阶段、Ⅲ阶段及Ⅰ、Ⅱ过渡阶段,在规划政策引导下具体表现为东京郊区新城建设迅速;纽约的次中心在不断完善;上海核心区膨胀的同时伴随次中心的兴起,城市化进程将逐步向Ⅱ、Ⅲ阶段推进。

随着城市化水平的提高,城市增长强度放缓、核心区趋于饱和,而土地数量有限,只有一些尚不成熟的次中心还有扩张潜力。大都市区发展的极限还未知,区域增长与生态平衡的矛盾在不断加剧。对于大都市区这一经济高度一体化、超越行政的复杂区域,跨行政界限的综合区域规划对实现大都市区域的可持续发展必不可少。中国一些城市正在向大都市高速迈进,未来也将不断进入复合型多中心的城市发展阶段。科学的区域规划在大都市区的发展过程中起着不可替代的作用,东京、纽约着眼于大都市区域的规划思想及纽约由“第三部门”主导的区域规划模式可以给中国城市很好的借鉴,该模式突破了地域空间限制和行政体制制约,对区域规划的合理制定和有效实施具有积极推动作用。大都市区域规划应着重城市宜居性及可持续性建设,加强政企之间的沟通协作及跨行政区发展的协调力度;规划过程中怎样权衡好城市功能的集中与分散,实现大都市区的协调可持续发展还有待进一步的深入探讨。

参考文献(References)

陈江龙, 高金龙, 徐梦月, 等. 2014. 南京大都市区建设用地扩张特征与机理 [J]. 地理研究, 33(3): 427-438. [Chen J L, Gao J L, Xu M Y, et al. 2014. Characteristics and mechanism of construction land expansion in Nanjing metropolitan area. *Geographical Research*, 33(3): 427-438.]

陈凯, 刘凯, 柳林, 等. 2015. 基于随机森林的元胞自动机城市扩展模拟: 以佛山市为例 [J]. 地理科学进展, 34(8): 937-946. [Chen K, Liu K, Liu L, et al. 2015. Urban expansion simulation by random-forest-based cellular automata: A case study of Foshan City. *Progress in Geography*, 34(8): 937-946.]

贺振, 赵文亮, 贺俊平. 2011. 郑州市城市扩张遥感动态监测及驱动力分析 [J]. 地理研究, 30(12): 2272-2280. [He Z, Zhao W L, He J P. 2011. Remote sensing monitoring of urban sprawl based on object-oriented and driving forces analysis: A case study of Zhengzhou City. *Geographical Research*, 30(12): 2272-2280.]

焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 2017. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式 [J]. 地理学报, 72(8): 1432-1443. [Jiao L M, Li Z H, Xu G, et al. 2017. The characteristics and patterns of spatially aggregated elements in urban areas of Wuhan. *Acta Geographica Sinica*, 72(8): 1432-1443.]

焦利民, 张欣. 2015. 基于圈层建设用密度分析的中国主要城市扩张的时空特征 [J]. 长江流域资源与环境, 24(10): 1721-1728. [Jiao L M, Zhang X. 2015. Characterizing urban expansion of main metropolises in China based on built-up densities in concentric rings. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(10): 1721-1728.]

冷炳荣, 王真, 钱紫华, 等. 2016. 国内外大都市区规划实践及对重庆大都市区规划的启示 [J]. 国际城市规划, 31(6): 112-119. [Leng B R, Wang Z, Qian Z H, et al. 2016. Metropolitan planning practice and the enlightenment for Chongqing metropolitan region plan. *Urban Planning International*, 31(6): 112-119.]

李晓文, 方精云, 朴世龙. 2003. 上海及周边主要城镇城市用地扩展空间特征及其比较 [J]. 地理研究, 22(6): 769-779. [Li X W, Fang J Y, Piao S L. 2003. The comparison of spatial characteristics in urban land use growth among the central and sub-cities in Shanghai region. *Geographical Research*, 22(6): 769-779.]

刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 2016. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析 [J]. 地理学报, 71(3): 355-369. [Liu J Y, Liu W C, Kuang W H, et al. 2016. Remote sensing-based analysis of the spatiotemporal characteristics of built-up area across China based on the plan for major function-oriented zones. *Acta Geographica Sinica*, 71(3): 355-369.]

毛卫华, 胡德勇, 曹冉, 等. 2013. 利用MODIS产品和DMSP/OLS夜间灯光数据监测城市扩张 [J]. 地理研究, 32(7): 1325-1335. [Mao W H, He D Y, Cao R, et al. 2013. Monitoring urban expansion of Zhejiang Province using MODIS/EVI data products and DMSP/OLS nighttime light data. *Geographical Research*, 32(7): 1325-1335.]

荣朝和. 2014. 重视大都市区在城市化过程中的地位与作用 [J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 13(3): 1-9. [Rong C H. 2014. An emphasis on the position and function of metropolis in urbanization. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 13(3): 1-9.]

- 孙群郎, 郑殿娟. 2015. 美国地方土地利用分区制与大都市区的低密度蔓延 [J]. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 48(6): 159-165. [Sun Q L, Zheng D J. 2015. US local land use zoning and low-density spread of metropolitan areas. *Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 48(6): 159-165.]
- 唐路, 薛德升, 许学强. 2004. 北美大都市区规划及其对珠江三角洲的启示 [J]. 人文地理, 19(1): 66-70. [Tang L, Xue D S, Xu X Q. 2004. North American metropolitan planning and its enlightenment on the Pearl River Delta. *Human Geography*, 19(1): 66-70.]
- 许学强, 林先扬, 周春山. 2007. 国外大都市区研究历程回顾及其启示 [J]. 城市规划学刊, (2): 9-14. [Xu X Q, Lin X Y, Zhou C S. 2007. A review of the research process of foreign metropolitan areas and its enlightenment. *Urban Planning Forum*, (2): 9-14.]
- 张欣炜, 宁越敏. 2015. 中国大都市区的界定和发展研究: 基于第六次人口普查数据的研究 [J]. 地理科学, 35(6): 665-673. [Zhang X W, Ning Y M. 2015. The definition and development of metropolitan areas in China based on the data from the 6th national census. *Scientia Geographica Sinica*, 35(6): 665-673.]
- 周艳, 黄贤金, 徐国良, 等. 2016. 长三角城市土地扩张与人口增长耦合态势及其驱动机制 [J]. 地理研究, 35(2): 313-324. [Zhou Y, Huang X J, Xu G L, et al. 2016. The coupling and driving forces between urban land expansion and population growth in Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 35(2): 313-324.]
- Angel S, Parent J, Civco D, et al. 2011. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050 [J]. *Progress in Planning*, 75(2): 53-107.
- Bagan H, Yamagata Y. 2012. Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 127: 210-222.
- Bhatta B, Saraswati S, Bandyopadhyay D. 2010. Urban sprawl measurement from remote sensing data [J]. *Applied Geography*, 30(4): 731-740.
- Department of Economic and Social Affairs, United Nations. 2017. World population division: World urbanization prospects, the 2017 revision [R]. New York, USA.
- Hou H, Estoque R, Murayama Y. 2016. Spatiotemporal analysis of urban growth in three African capital cities: A grid-cell-based analysis [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 123: 381-391.
- Irwin E G, Bockstael N E. 2007. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation [J]. *PNAS*, 104(52): 20672-20677.
- Ji W, Ma J, Twibell R W, et al. 2006. Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6): 861-879.
- Jiao L M. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion [J]. *Landscape and Urban Planning*, 139: 26-39.
- Kuang W, Chi W, Lu D, et al. 2014. A comparative analysis of megacity expansions in China and the U.S.: Patterns, rates and driving forces [J]. *Landscape and Urban Planning*, 132: 121-135.
- Schneider A, Chang C, Paulsen K. 2015. The changing spatial form of cities in Western China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 135: 40-61.
- Schneider A, Woodcock C E. 2008. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information [J]. *Urban Studies*, 45(3): 659-692.
- Seto K C, Fragkias M. 2005. Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics [J]. *Landscape Ecology*, 20(7): 871-888.
- Seto K C, Fragkias M, Guneralp B, et al. 2011. A meta-analysis of global urban land expansion [J]. *PLoS One*, 6(8): 1-9.
- Sexton J O, Song X, Huang C, et al. 2013. Urban growth of the Washington, D.C.-Baltimore, MD metropolitan region from 1984 to 2010 by annual, Landsat-based estimates of impervious cover [J]. *Remote Sensing of Environment*, 129: 42-53.
- Taubenböck H, Esch T, Felbier A, et al. 2012. Monitoring urbanization in mega cities from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 117: 162-176.
- Taubenböck H, Wegmann M, Roth A, et al. 2009. Urbanization in India: Spatiotemporal analysis using remote sensing data [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(3): 179-188.
- Tian L, Li Y, Yan Y, et al. 2017. Measuring urban sprawl and exploring the role planning plays: A Shanghai case study [J]. *Land Use Policy*, 67: 426-435.
- United Cities and Local Governments. 2016. GOLD IV: Fourth global report on decentralization and local democracy [R]. Barcelona, Spain.
- Wu J, Jenerette G D, Buyantuyev A, et al. 2011. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States [J]. *Ecological Complexity*, 8(1): 1-8.
- Xu X, Min X. 2013. Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data [J]. *Cities*, 35: 104-113.

Urban expansion dynamics and urban forms in three metropolitan areas —Tokyo, New York, and Shanghai

JIAO Limin^{1,2}, GONG Chen^{1,2}, XU Gang^{1,2}, DONG Ting^{1,2}, ZHANG Boen³, LI Zehui^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Global cities are stepping into the metropolitan era at a high speed. Studying the process of urban expansion in metropolitan areas is of great significance for understanding its future growth trend and regional sustainable development. However, urban expansion in metropolitan area, especially regional comparative analysis, has not been extensively understood. Taking three metropolitan areas—Tokyo, New York, and Shanghai—as examples, we obtained Landsat images in three time periods between 1990 and 2015 (circa 1990, 2000, and 2014). Using gradients and grid analysis and applying urban land density function and urban expansion index, we analyzed the spatiotemporal differences of urban expansion in two time periods from multiple perspectives. We focused on the quantitative changes and spatiotemporal distributions of built-up land, as well as urban form changes. The results show that: 1) Boundaries of these metropolitan areas were expanding and built-up land continued to grow during the study period. The built-up land area in Tokyo, New York, and Shanghai increased by 63%, 53% and 233%, respectively, over the study period. Shanghai experienced intense expansion while urban expansion in New York stagnated during the later period. 2) The density of built-up land in these metropolitan areas gradually decreases with the distance from the city center. The growth of the radii is most obvious in urban core and urban fringe, and the urban forms all tend to be compact. 3) Spatiotemporal heterogeneity of new construction land is apparent. In Tokyo, construction of new urban areas is continuous in the suburban region. In New York, some regional sub-centers with potential for growth were still expanding but the rate gradually slowed, while in Shanghai the peripheral areas of the urban core area had grown rapidly and progressively advanced to the urban fringe. 4) Regional expansion of the metropolitan areas has successively experienced high-speed growth, slow growth, and stagnation period. The expansion process manifests itself as urban core expansion, sub-center and new urban area construction, then gradually forms a stable polycentric structure.

Keywords: urban expansion; metropolitan areas; urban land density; urban form; spatiotemporal differentiation