

1990—2014年印度城市扩张时空特征对比分析

熊瑶¹, 潘润秋^{1,2*}, 许刚¹, 焦利民^{1,2}, 李凯³

(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. 中建三局集团有限公司, 武汉 430073)

摘要:印度是人口仅次于中国的发展中国家,也是“一带一路”倡议的重要节点。印度正处于城市化快速发展阶段,分析印度城市化特征具有重要意义,而中国国内关于印度城市化和城市扩张的研究和报道相对较少。论文选取10个人口超过100万的印度城市,获取1990、2000和2014年基于Landsat影像的土地利用数据和人口数据,采用圈层分析法将城市划分为等间距的同心圆圈层后统计各圈层内建设用地密度,选取增长率、密度、强度以及景观指数指标对印度城市扩张进行多维度对比分析。研究发现:①城市土地扩张快于人口增长,1990—2000、2000—2014年土地年均增长率分别是人口年均增长率的3.27和2.43倍。②建设用地密度随着与城市中心距离增加而衰减,且在一定距离内快速下降;同圈层内建设用地密度随时间逐渐增加;城市以分散的方式向外扩张,城市形态变得更加松散,特别是在第二阶段(2000—2014年)。③建设用地斑块破碎化程度与城市扩张强度的空间变化相吻合。城市扩张最活跃区域与景观破碎度最严重区域都随时间不断向外推进,城市扩张对景观格局产生显著影响。在全球城市扩张背景下,研究结果将为理解城市扩张时空特征而提供印度样本,也将为研究其他地区城市扩张提供分析方法和思路。

关键词:城市扩张;城市形态;圈层分析;景观破碎度;印度

印度位于亚洲南部,是“一带一路”倡议沿线体量最大的国家;2016年印度GDP达2.26万亿美元,居世界第7位。随着社会经济的发展,印度城市人口迅速增长,2016年底,其城市化率达到33.14%(Word Bank, 2017);同时,城市土地不断扩张。但由于城市公共服务与基础设施极度缺乏导致印度城市“贫民窟”现象严重(Ezeh et al, 2017; Nagpure et al, 2018),快速发展的城镇化也使城市生态环境急剧恶化(Mohanraj et al, 2005; Narain, 2008; Sood, 2012)。印度是仅次于中国的人口大国,加之城镇化水平相对较低且处于快速城镇化发展阶段,未来将有更多的农村人口转移至城市。大量的新增城市人口势必会给有限的城市土地资源利用带来巨大压力,城市土地扩张无法避免。

如何测度城市扩张并分析其时空特征是城市地理学的重要研究内容。Galster等(2001)认为,城

市扩张是个多维度现象,可以从密度、连续性、集中度、聚集度、中心性、核心度、混合度和邻近度这8个不同维度进行测度和刻画。Frenkel等(2008)将刻画城市扩张特征的指标分成5大类:增长率、密度、空间几何、通达性和对称性指标。城市扩张存在多种类型,由各种维度的不同组合反映(Galster et al, 2001; Torrens, 2008; Ewing et al, 2015)。如蒋芳等(2007)从扩展形态、扩展效率和外部影响等3个方面选取13个指标来测度和量化北京市城市扩张;张琳琳等(2014)利用城市土地扩张指标和人口密度指标对杭州市城市扩张进行时空动态变化分析。城市生态学领域的研究发现城市扩张过程伴随着城市景观格局的变化,因此也有不少学者运用景观格局指标反映城市扩张的时空演变(Irwin et al, 2007; 杨叶涛等, 2010; 杨振山等, 2010; Jiao et al, 2017)。城市扩张主要是人口、土地变化以及由此引起的景

收稿日期:2018-04-03;修订日期:2018-10-11。

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:熊瑶(1991—),男,江西丰城人,硕士生,主要从事土地资源评价与城市扩张研究。E-mail: xiongy0@whu.edu.cn

*通信作者简介:潘润秋(1964—),男,黑龙江友谊县人,副教授,主要从事土地规划与评价研究。E-mail: 478622375@qq.com

引用格式:熊瑶, 潘润秋, 许刚, 等. 1990—2014年印度城市扩张时空特征对比分析 [J]. 地理科学进展, 38(2): 271-282. [Xiong Y, Pan R Q, Xu G, et al. 2019. A comparison of spatial and temporal characteristics of urban expansion in India during 1990-2014. Progress in Geography, 38(2): 271-282.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.010

观格局改变,衡量城市扩张可选择反映这几方面变化的指标,具体有增长率、密度、强度以及景观指数等。

城市扩张作为一种普遍的城市地理现象,既有全球性的共同特征,也存在地区性差异。在空间增长模式上,研究发现中国城市呈现同心圆结构模式由城市中心向城市外围蔓延的特点;而美国城市主要以内部填充的模式向外扩张(Schneider et al, 2008; Kuang et al, 2014)。从城市形态上来看,美国城市具有典型的松散特征(Huang et al, 2007; Kuang et al, 2014),而欧洲城市则表现为更加紧凑的形态(Schwarz, 2010)。近年来已有研究关注了印度的城市扩张,例如对比分析不同数据来确定城市变化(Pandey et al, 2013; Pandey et al, 2015),结合变化率指标和社会经济指标研究城市扩张动态(史佳颖, 2013; Kantakumar et al, 2016; 李佳洺等, 2017),以及城市扩张过程中的景观破碎度特征(Ramachandra et al, 2012; Ramachandra et al, 2015)等。但现有关于印度城市扩张及其空间特征的研究多是基于单个或少量城市,研究的时段也局限于单个或少量时点(Dwarakish, 2012; Ramachandra et al, 2012; Ramachandra et al, 2015; Ahmad et al, 2016; Kantakumar et al, 2016),对多个样本城市的多个时点对比研究较少(Taubenböck et al, 2008; Taubenböck et al, 2009)。

本文获取印度10个人口超过100万的城市,采用圈层分析方法,将研究样本城市划分成若干同心圆环,以刻画城市内部土地利用变化特征。选用增长率、密度、强度以及景观指数等多个指标,对比并综合不同指标的结果来反映印度城市扩张时空变化。研究印度城市扩张的时空特征,有利于了解发现印度城市发展规律。本文对城市扩张模式及其空间结构演变规律的研究方法和思路也可作为研究其他地区城市扩张提供借鉴。

1 研究区域与数据

本文基于美国纽约大学、联合国人居署、美国林肯土地政策研究所研究团队联合发布的全球城市扩张数据集(<http://www.atlasofurbanexpansion.org>),筛选印度2014年人口超过100万的10个样本

城市,样本城市空间位置分布如图1所示。其中,孟买人口规模最大,2014年人口总数为1960万;科泽科德人口总数最少,只有将近117万。

从上述城市扩张数据集获取1990、2000和2014年3个时点的土地利用数据和城市范围内人口数据。土地利用数据来源于Landsat影像(空间分辨率30 m),解译Landsat影像后,采用Google Earth高空间分辨率影像进行了分类精度验证,结果显示,91%的分类后土地利用类型与Google Earth影像一致(Angel et al, 2016)。城市范围内人口是依据城市统计区(人口调查统计的城市行政区域)内人口,利用内插或外推得到城市范围内人口总数。详细数据生产和处理流程见文献(Angel et al, 2016)。

本文首先将原土地利用数据重分类为3种类型:建设用地、植被及水域。该部分数据结合圈层分析方法来分析各个城市的城市土地密度变化、城市扩张强度变化、城市核心度值变化以及景观破碎度特征情况。印度各城市的建成区范围1990—2014年不断增加,图2展示了10个样本城市在3个时间点其建成区边界的空间变化情况。与中国同等人口规模城市相比,印度城市建成区规模相对较小。例如在2014年,建成区面积最大的城市加尔各

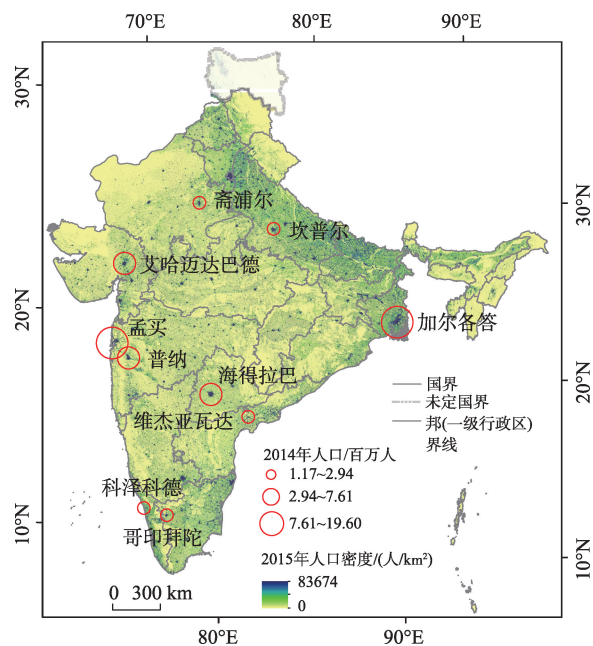
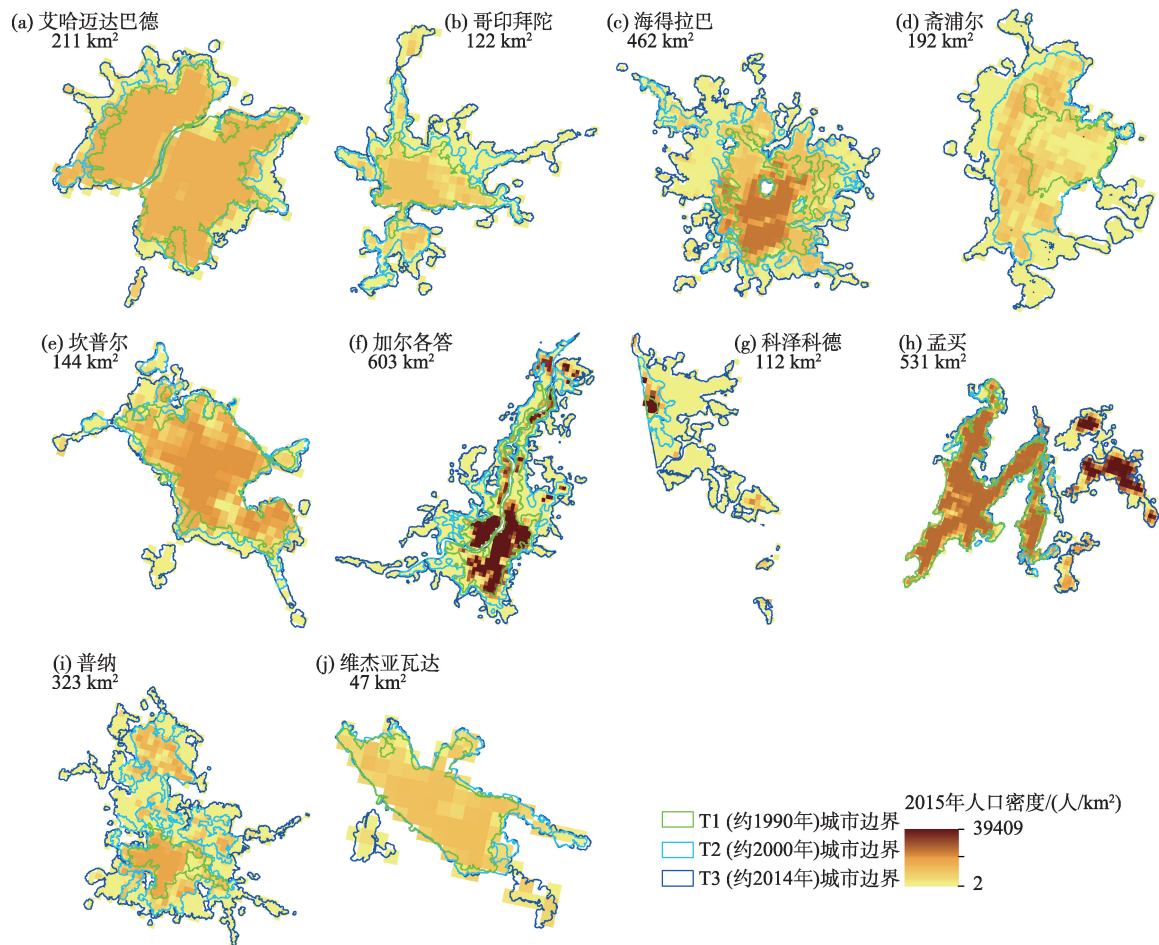


图1 样本城市空间分布^①

Fig.1 Spatial distribution of the 10 sample cities in India

① 图中使用的2015年人口密度影像数据来源于WorldPop网站(<https://www.worldpop.org/>)。该数据只用于图1、图2的空间分布展示,不作其他分析。



注：图中城市下方数据为各城市2014年建成区面积。

图2 研究城市在3个时点的空间范围变化
Fig.2 Urban extent at three temporal points in the sample cities

答只有 603 km²,其人口为 1512 万人,人口密度为 25090 人/km²。样本城市中有一半城市的建成区面积不到 200 km²,其中最小只有 47 km²。

2 研究方法

2.1 圈层分析

圈层分析是指以城市中心为圆心,将城市划分成一定半径圆环。每个同心圆环作为城市扩张空间分异的基本单元,以此计算有关维度指标(李晓文等, 2003; 焦利民等, 2015)。城市中心的确定首先是依据数据集中公布的 CBD 位置,然后对比 Google 高分影像进行判读、验证和调整。在划分圆环时,一般采用 1 km 作为缓冲区半径,但由于对艾哈迈达巴德、坎普尔和维杰亚瓦达划分的圆环数相对较少,其缓冲区半径改为 0.5 km,以增加圈层样

本。各圈层城市土地密度等于各圈层内建设用地面积与总土地面积减去不可建设用地(水体)的比值(高向东等, 2005; 焦利民等, 2015)。

2.2 城市扩张指标

2.2.1 城市扩张强度指数

城市扩张强度指数(Urban Expansion Intensity, UEI)表示一个区域在 2 个时间点内建设用地的年平均增长率,该指标反映城市发展的强弱快慢(李晓文等, 2003; 凌赛广等, 2016),其计算公式为:

$$UEI = \frac{U_{t+n} - U_t}{A} \times \frac{1}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_t 和 U_{t+n} 分别为前后 2 个时间点的建设用地面积; A 为土地总面积; n 为时段长度。UEI 值越大,城市扩张强度越高。

2.2.2 城市扩张核心度指数

城市扩张核心度指数(Urban Concentricity In-

dex, UCI)是城市核心区半径与外围区半径的比值(Schneider et al, 2008; 焦利民等, 2015; 孙斌栋等, 2017)。它衡量城市扩张的紧凑程度,即整个城市建成区向中心城区的集中程度。该比值越小,表明建成区越分散,趋向于蔓延式的低密度扩张。比值越大,城市结构越紧凑,城市为紧凑型的城市(燕月等, 2013; 匡文慧等, 2014)。其计算公式为:

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

式中: R_{core} 和 R_{fringe} 分别代表城市核心区(城市中心到建设用地密度 $\geq 50\%$ 圆环之间的区域)和外围区(核心区边界到建设用地密度 $\geq 10\%$ 的圆环)的半径。

2.3 景观格局指标

本文总结已有研究(邬建国, 2007; 洪冬晨, 2015)并结合实际情况选取了最能刻画景观破碎度的2个指标:斑块密度(Patch Density, PD)和边缘密度(Edge Density, ED)。斑块密度是指单位面积的斑块数;边缘密度是指单位面积内含有斑块边界的长度。斑块密度和边缘密度的计算公式分别为:

$$PD = N_i / A \times 10^6 \quad (3)$$

$$ED = E_i / A \times 10^6 \quad (4)$$

式中: N_i 为景观类型 i 的斑块个数; A 为景观总面积(m^2);乘以 10^6 , 单位转化成 km^2 ; E_i 为景观类型 i 斑块边界总长度。PD取值范围大于0, 无上限; ED取值范围也大于0, 无上限。

在景观分析背景下,斑块密度作为整个景观格局中分析空间异质性的基本指标,可用于描述景观

破碎度和优势度;指标值的大小与景观破碎度成正比,指标值越大,景观的破碎度越大。边缘密度作为分析景观形状的基本指标,可反映景观类型的复杂性,指标值大小与景观类型的复杂性成正比。这2个指标有利于不同规模景观之间的比较,从而从优势度和形状复杂性2个方面来对照分析城市扩张过程中景观破碎度。

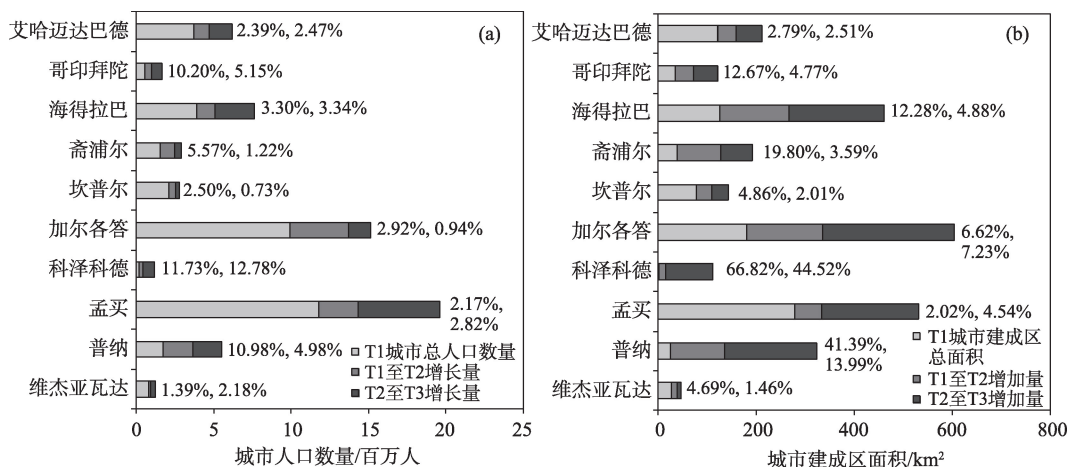
3 城市土地空间结构及扩张强度对比

3.1 人口增长与土地扩张的数量分析

样本城市规模存在很大差异,包括人口规模和土地规模(叶尔肯·吾扎提等, 2014)。图3展示了样本城市人口数量和土地数量的变化情况。

从数量上看,每个城市人口总数初始规模显著不同(约1990年),大小从20万~1179万。建成区面积也存在明显差异,从科泽科德的 $2.17 km^2$ 到孟买的 $278.06 km^2$ 。从T1(约1990年)到T2(约2000年)再到T3(约2014年),城市人口数量和土地面积呈现不同程度的增加,其中大部分城市(除维杰亚瓦达与斋浦尔之外)的城市土地面积增加数量在T2至T3时要比在T1至T2时大。

在变化率上,对于人口数量增长速度,其中增长较快的城市有普纳、科泽科德和哥印拜陀。对于城市土地面积增加速度,大部分城市增速比较大,且后一个时段较前一个时段有所下降,规模相对较小的城市更明显。对比两者,发现基本上所有城市在2个时段中城市人口数量的变化速度都要小于城



注:图中百分数分别为T1至T2、T2至T3的年平均增长率。

图3 城市人口数量(a)和建成区面积(b)时间变化

Fig.3 Temporal variations of urban population (a) and built-up areas (b)

市建成区面积的变化速度(除个别城市在个别时期不同)。尤其是规模较小的城市要相对更加明显,例如科泽科德在T1时段人口增长速度为11.73%,土地增长速度为66.82%,前者比后者小55.09%。且计算得到样本城市人口年均增长率前后2个阶段分别为5.31%和3.66%;而土地年均增长率分别为17.39%和8.92%。土地年均增长率分别是人口年均增长率的3.27和2.43倍。

3.2 城市土地密度

城市圈层内建设用地密度在各个时点随到城市中心距离的变化如图4所示。大部分城市土地密度曲线呈现类似反“S”曲线的形状,此结果与之前的相关学者的研究相同(Jiao, 2015)。从空间特征来看,每个城市随着离城市中心距离增加,城市土地密度逐渐降低,且在一定距离内快速下降。从T1至T2再到T3,城市各个圈层土地密度增加。该变化规律说明随着时间的推移,各圈层建设用地面积

逐渐增加,内部有新开发土地填充。

3.3 城市扩张核心度指数

城市扩张核心度指数反映城市紧凑度的重要指标,由图5可知,各个城市的城市扩张核心度指数值各不相同,其中较为突出的是艾哈迈达巴德和科泽科德2个城市。艾哈迈达巴德在3个研究时点比其他城市的要大,特别在T1时值高达2.6,由此说明该城市相对其他城市来说,城市建成区向中心城区的集中程度要高;而科泽科德的城市扩张核心度值相对较小,且在T1时值为0(因其在该时点核心区半径为0),这反映该城市集中程度低。

T1至T2时,样本城市中有4个城市的指数值降低,分别为艾哈迈达巴德、坎普尔、加尔各答和维杰亚瓦达,这4个城市在前一时段,城市发展表现出以蔓延式的形式向外扩张;哥印拜陀、斋浦尔、孟买和普纳的指数值增加,其中斋浦尔的增加幅度最大,说明这4个城市的建成区向中心城区集中,城

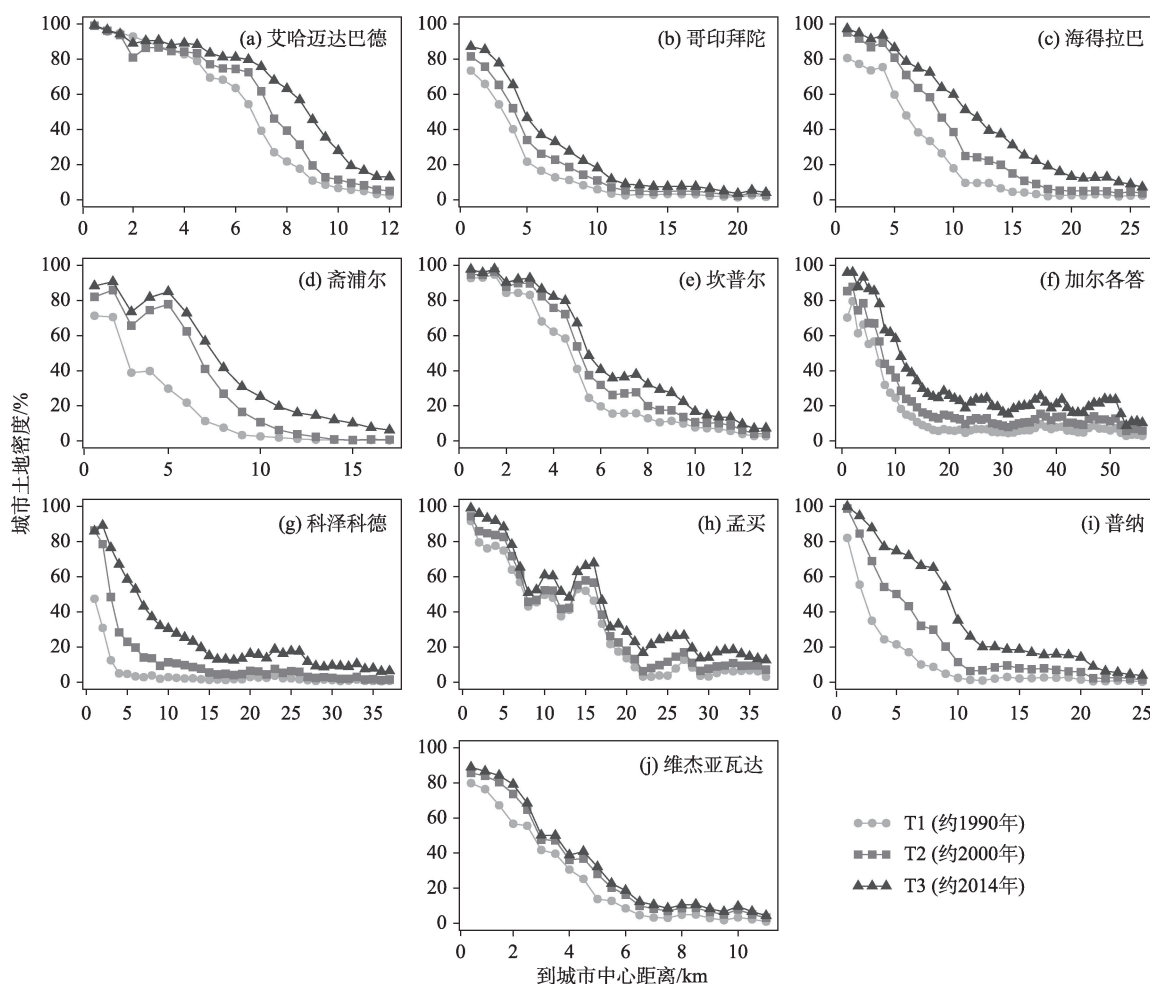


图4 各圈层内城市土地密度时空变化

Fig.4 Temporal and spatial changes of urban land densities of concentric rings

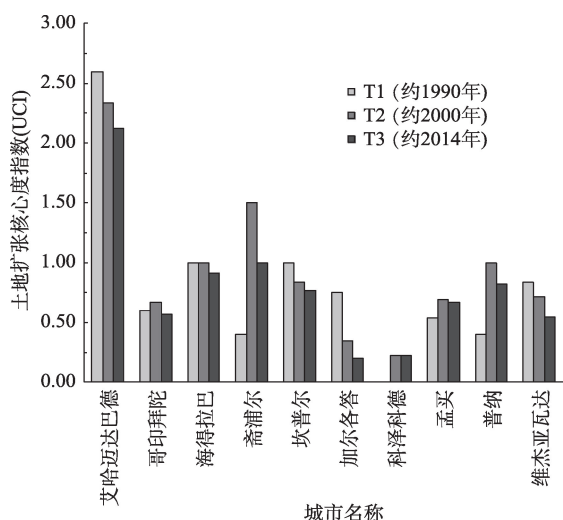


图5 样本城市在3个时间点的城市扩张核心度指数变化

Fig.5 Urban expansion concentricity index at three temporal points in the sample cities

市体现出以紧凑方式向外扩张。T2至T3时,基本所有城市的指数值都有所降低(除科泽科德不变外),城市扩张模式更加趋向于蔓延式的低密度发展模式。

3.4 城市扩张强度指数

城市扩张强度指数反映2个时点期间建设用地增加幅度情况,常作为城市扩张分析的重要指标之一,可描述空间结构演变发展进程。各个城市每个环内建设用地扩张强度如图6所示。

每个城市的土地扩张强度随着离城市中心距离增大而变化,其扩张强度曲线均出现至少一个峰值。其中像孟买和加尔各答有多个峰值,城市扩张强度曲线的形状呈现明显的锯齿状,这表明这些城市可能除了市中心外还含有其他的扩张源出现。艾哈迈达巴德、哥印拜陀和普纳等城市的扩张强度曲线较为光滑,曲线峰值只有1~2个,这些城市扩张强度最大值处在2个时点的核心区边界范围之内,

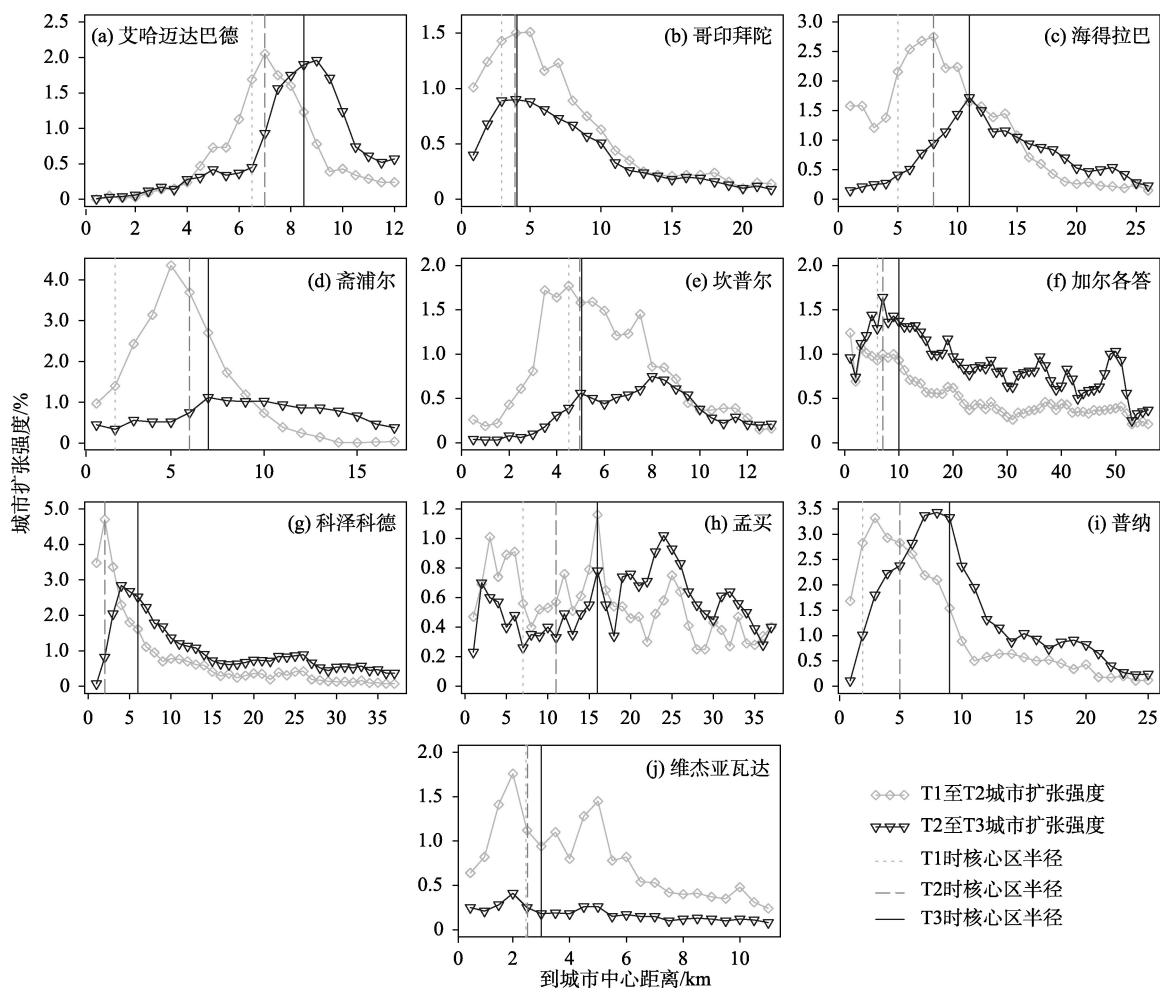


图6 样本城市在2个时间段的城市扩张强度指数空间变化

Fig.6 Spatial variation of urban expansion intensity index during two periods in the sample cities

例如普纳在T1至T2时段,城市增长最大值的位置位于离城市中心的3 km处,其在T1时点城市核心区边界位于离城市中心的2 km处,T2时点位于5 km处。

比较不同时段,发现样本城市的曲线峰值普遍右移。此外,在距离城市中心近的区域,后一时段的扩张强度要小于前一时段扩张强度;而距离城市中心越远,则呈现相反的情况。此特征规律明显反映城市扩张向外以分散的方式发展,城市空间范围向郊区化、边缘化发展。除维杰亚瓦达没有此规律,该城市各圈层内城市扩张强度在后一时段均小于前一时段。

4 城市扩张下的景观破碎度响应分析

4.1 斑块密度

建设用地斑块密度可以反映建设用地在该区

域的破碎度大小以及建设用地的优势度。图7反映各个城市的每个圈层在时间和空间上的斑块密度变化情况。

整体上,样本城市在最内圆环的斑块数最少,但从城市中心向外移动斑块数快速增加。随着离城市中心的距离增加,斑块密度曲线开始出现第一个峰值,其位置大约在城市核心区边界远离城市中心的位置。在城市核心区边缘的建设用地周围混杂着农林用地、水域和其他非建设用地,其呈现出更多分散斑块的特点。在核心区边缘周围的峰值之后,每个圆环内斑块数开始降低,这是因为在这些圆环处没有大量的建设用地。离城市中心的距离进一步增加,大部分城市开始出现第2个或是2个以上的峰值,这与图6的城市扩张强度指数图有着类似规律。从这些峰值可以看出,城市扩张更多地趋向于宏观尺度上扩散而不是破碎本身所造成的。此外,值得注意的是,像艾哈迈达巴德、坎普尔

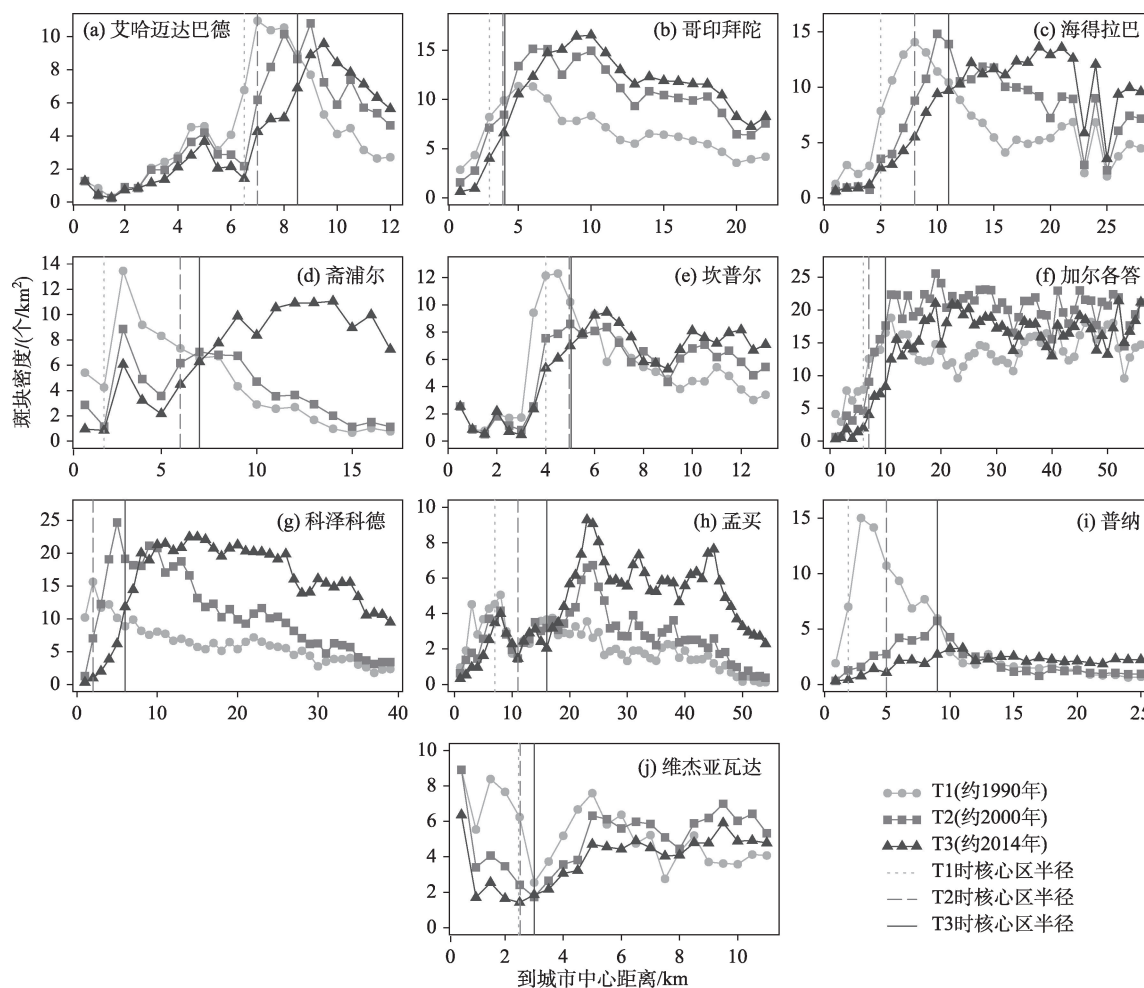


图7 斑块密度时空变化

Fig.7 Patch density measured across space and time

等部分城市的斑块密度在城市中心周围的一定区域内出现下降特征,这是因为内环的建设用地斑块数相差不大甚至相等,而圆环的面积逐渐增加,所以靠外的圆环内斑块密度要小些。

从城市中心到少部分外围区的区域,各圈层内建设用地的斑块密度值依次为 $T1>T2>T3$,这也说明城市在扩张过程中,靠近城市中心的一段区域内建设用地斑块数减少,建设用地的优势度逐渐增强。然而从外围区开始,离城市中心的距离逐渐增加,逐步出现 $T2$ 的斑块密度值大于 $T1$ 的斑块密度值, $T3$ 的大于 $T2$ 的。这是由于随着时间的变化,该区域建设用地斑块数和斑块密度的增加,建设用地的景观格局呈现出越来越分散的景观特征,可能是因为在该区域,其他用地转化为建设用地,出现大量小的建设用地斑块,增加该区域的景观破碎度。

4.2 边缘密度

边缘密度变化如图8所示。在空间特征上,大

部分城市从城市中心到核心区边界,边缘密度增加,城市核心区内建设用地斑块的形状复杂性增加。接着从城市核心区边界向外移动,边缘密度减少,该区域内建设用地斑块形状的复杂性降低。对比各个时点变化,发现从城市中心到核心区边界周围,各圈层内建设用地的边缘密度值依次为 $T1>T2>T3$,建设用地复杂性依次降低。随着离城市中心距离的继续增加,边缘密度大小从 $T1$ 、 $T2$ 至 $T3$ 依次出现反超,建设用地复杂性增加。

边缘密度反映斑块形状的复杂性,斑块密度呈现斑块类型的优势度。样本城市边缘密度曲线变化趋势与斑块密度相似,两者从不同角度上呈现各个城市在时间和空间上景观破碎度变化。两者的曲线峰值随着时间向右移动,都反映景观破碎度的最活跃点在城市核心区边界周围,且不断向外推移。其主要的不同点在于边缘密度曲线要相对平滑一些,且曲线上离城市中心最近的峰值一般处在

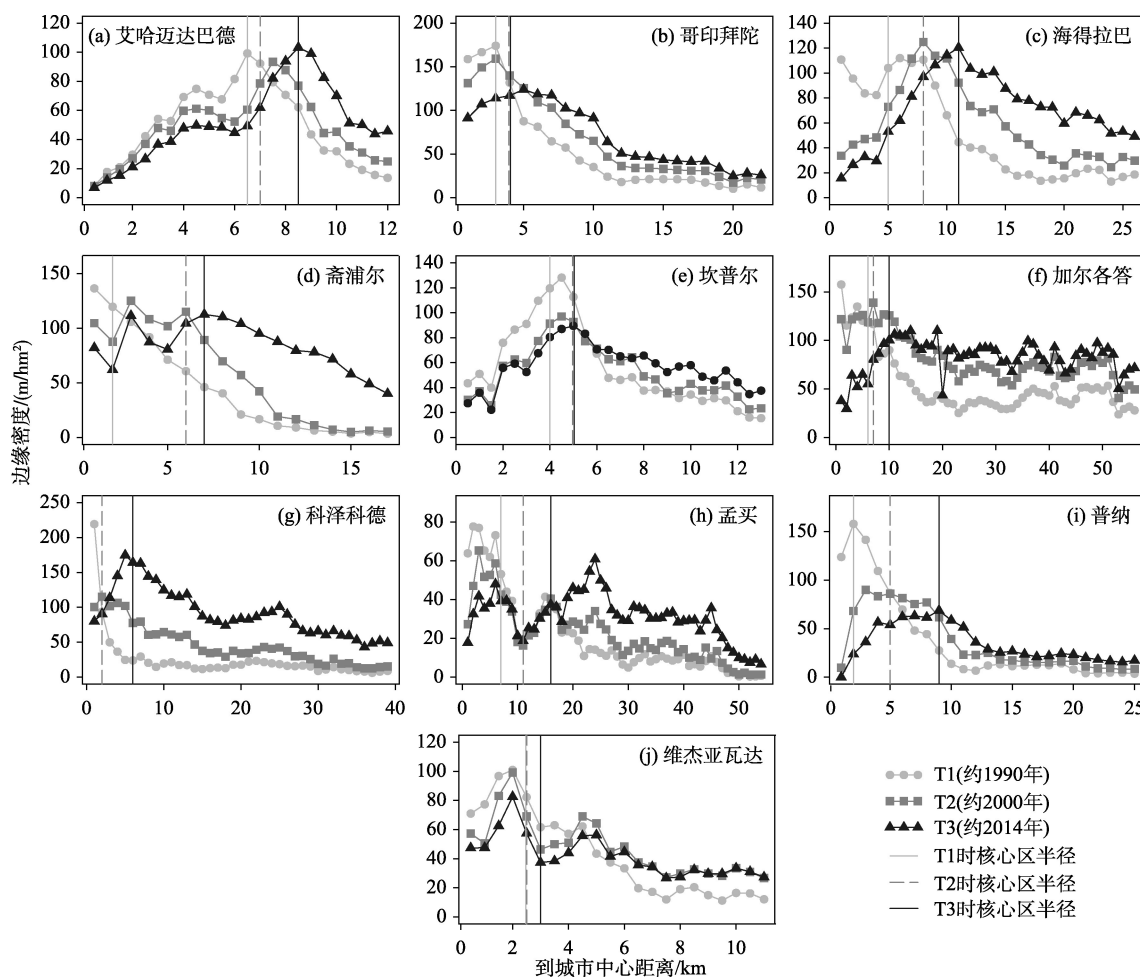


图8 边缘密度时空变化

Fig.8 Edge density measured across space and time

核心区边界位置上或是较近的周围。而离城市中心最近斑块密度峰值一般在城市核心区范围外稍微远离城市中心的位置,也就是说城市在向外扩张中形状复杂性达到最大晚于斑块数量增加到最大值。

5 结论与讨论

本文以印度 10 个人口超过 100 万的城市为例,对比分析了印度城市扩张的时空演变规律。研究发现:

(1) 土地扩张速度快于人口增长速度,1990—2000、2000—2014 年土地年均增长率分别是人口年均增长率的 3.27 和 2.43 倍。1990—2014 年间,研究区 10 个城市土地和人口均显著增长,2 个阶段(1990—2000、2000—2014 年)研究区 10 个城市土地年均增长率分别为 17.39% 和 8.92%,而人口年均增长率分别为 5.31% 和 3.66%,土地扩张速度快于人口增长速度。

(2) 城市土地密度呈现随到城市中心距离增加而衰减的特征且城市形态变得更加松散。圈层分析表明城市建设用地密度随到城市中心距离增加而衰减,且在一定距离内快速下降;各圈层内建设用地密度随时间增加。各城市建设用地密度大于 50% 的核心区半径与建设用地密度介于 50%~10% 之间的城市外围区具有明显差异,反映了城市之间形态的差异;且核心区半径与外围区半径之比随时间呈下降趋势,说明城市形态更加松散,特别是在第 2 阶段(2000—2014 年)。

(3) 建设用地斑块破碎化程度与城市扩张强度的空间变化相吻合。城市扩张强度随到城市中心距离增加呈现先增加后降低的趋势,城市扩张强度最高值区域(城市扩张最活跃区域)随时间向城市外围推移。同时,建设用地斑块破碎程度和形状复杂度从城市中心到外围也呈现先上升后降低的趋势,与建设用地扩张强度的空间变化相吻合,反映了城市扩张对景观格局的显著影响。

印度和中国都正在经历快速的经济发展和城市化,城市扩张特征存在一定的相似性。随着到城市中心距离增加,城市土地密度在一定距离内快速降低(Kuang et al, 2014),且土地增长速度快于人口增长速度,城市形态变得更加松散(秦志锋, 2008; 焦利民等, 2016)。美国城市具有典型的松散扩张

特征,城市人口密度及城市紧凑度都比印度城市要低(Huang et al, 2007; Kuang et al, 2014)。把印度放在全球城市扩张的视野下,研究印度城市扩张,将为理解城市扩张机理提供印度样本。本文的研究方法和思路可为研究其他地区城市扩张模式及其空间结构演变规律提供参考。同时,对比分析不同地区城市扩张动态过程和城市形态特征有利于加强和提升对城市扩张普遍规律的认知。城市扩张是复杂的系统过程,是由多变量共同作用的结果,本文仅通过不同的维度来了解印度城市扩张的模式及其空间结构演变规律,今后还应开展深层次的研究,分析印度城市扩张背后的驱动力和效率等问题。

参考文献(References)

- 高向东, 吴文钰. 2005. 20 世纪 90 年代上海市人口分布变动及模拟 [J]. 地理学报, 60(4): 637-644. [Gao X D, Wu W Y. 2005. Population redistribution and modeling of Shanghai City in the 1990s. *Acta Geographica Sinica*, 60(4): 637-644.]
- 洪冬晨. 2015. 哈萨克斯坦土地利用景观格局演变及驱动因素分析 [D]. 杭州: 浙江大学. [Hong D C. 2015. Analysis of land use and landscape pattern change and its driving factors in Kazakhstan. Hangzhou, China: Zhejiang University.]
- 蒋芳, 刘盛和, 袁弘. 2007. 北京城市蔓延的测度与分析 [J]. 地理学报, 17(6): 649-658. [Jiang F, Liu S H, Yuan H. 2007. Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices. *Acta Geographica Sinica*, 17(6): 649-658.]
- 焦利民, 董婷, 谷岩岩. 2016. 2000-2012 年中国地级以上城市空间弹性分析 [J]. 资源科学, 38(7): 1254-1265. [Jiao L M, Dong T, Gu Y Y. 2016. The spatial resilience of prefecture-level cities in China from 2000 to 2012. *Resources Science*, 38(7): 1254-1265.]
- 焦利民, 张欣. 2015. 基于圈层建设用地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.]
- 匡文慧, 迟文峰, 史文娇. 2014. 中国与美国大都市区城市内部土地覆盖结构时空差异 [J]. 地理学报, 69(7): 883-895. [Kuang W H, Chi W F, Shi W J. 2014. Spatio-temporal characteristics of intra-urban land cover in the cities of China and USA from 1978 to 2010. *Acta Geographica Sinica*,

- 69(7): 883-895.]
- 李佳洺, 杨宇, 樊杰, 等. 2017. 中印城镇化区域差异及城镇体系空间演化比较 [J]. 地理学报, 72(6): 986-1000. [Li J M, Yang Y, Fan J, et al. 2017. Comparative research on regional differences in urbanization and spatial evolution of urban systems between China and India. *Acta Geographica Sinica*, 72(6): 986-1000.]
- 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.]
- 凌赛广, 焦伟利, 龙腾飞, 等. 2016. 2000-2014年武汉市城市扩展时空特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 25(7): 1034-1042. [Ling S G, Jiao W L, Long T F, et al. 2016. Analysis of spatial and temporal characteristics of urban expansion about Wuhan City in the year of 2000-2014. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 25(7): 1034-1042.]
- 秦志锋. 2008. 中国城市蔓延现状与控制对策研究 [D]. 郑州: 河南大学. [Qin Z F. 2008. Research on Chinese urban sprawl and its control. Zhengzhou, China: Henan University.]
- 史佳颖. 2013. 中国和印度的人口转变与经济增长机遇 [D]. 天津: 南开大学. [Shi J Y. 2013. The demographic transition and economic growth opportunities in China and India. Tianjin, China: Nankai University.]
- 孙斌栋, 华杰媛, 李琬, 等. 2017. 中国城市群空间结构的演化与影响因素: 基于人口分布的形态单中心-多中心视角 [J]. 地理科学进展, 36(10): 1294-1303. [Sun B D, Hua J Y, Li W, et al. 2017. Spatial structure change and influencing factors of city clusters in China: From monocentric to polycentric based on population distribution. *Progress in Geography*, 36(10): 1294-1303.]
- 邬建国. 2007. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社. [Wu J G. 2007. Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy. The 2nd Edition. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 燕月, 陈爽, 李广宇, 等. 2013. 城市紧凑性测度指标研究及典型城市分析: 以南京、苏州建设用地紧凑度为例 [J]. 地理科学进展, 32(5): 733-742. [Yan Y, Chen S, Li G Y, et al. 2013. Urban compactness index and its application: Compactness of built-up areas in Nanjing and Suzhou. *Progress in Geography*, 32(5): 733-742.]
- 杨叶涛, 龚建雅, 周启鸣, 等. 2010. 土地利用景观格局对城市扩张影响研究 [J]. 自然资源学报, 25(2): 320-329. [Yang Y T, Gong J Y, Zhou Q M, et al. 2010. Impacts of landscape pattern on urban expansion: A case study of Beijing City. *Journal of Natural Resource*, 25(2): 320-329.]
- 杨振山, 蔡建明, 文辉. 2010. 郑州市2001—2007年城市扩张过程中城市用地景观特征分析 [J]. 地理科学, 30(4): 600-605. [Yang Z S, Cai J M, Wen H. 2010. Urban expansion and landscape characteristics of land use in Zhengzhou City during 2001-2007. *Scientia Geographica Sinica*, 30(4): 600-605.]
- 叶尔肯·吾扎提, 刘慧, 刘卫东. 2014. 1992—2011年哈萨克斯坦城镇化过程及其影响因素 [J]. 地理科学进展, 33(2): 181-193. [Yeerken W, Liu H, Liu W D. 2014. Evaluation of Kazakhstan's urbanization during 1992-2011 and its influencing factors. *Progress in Geography*, 33(2): 181-193.]
- 张琳琳, 岳文泽, 范蓓蕾. 2014. 中国大城市蔓延的测度研究: 以杭州市为例 [J]. 地理科学, 34(4): 394-400. [Zhang L L, Yue W Z, Fan B L. 2014. Measuring urban sprawl in large Chinese cities: A case study of Hangzhou. *Scientia Geographica Sinica*, 34(4): 394-400.]
- Angel S, Blei M A, Parent J, et al. 2016. Atlas of urban expansion, volume 1: Areas and densities [M]. 2016 Edition. New York: New York University, Nairobi: UN-Habitat, and Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Ahmad S, Avtar R, Sethi M, et al. 2016. Delhi's land cover change in post transit era [J]. *Cities*, 50: 111-118.
- Dwarakish G S. 2012. Land use/land cover change and urban expansion during 1983-2008 in the coastal area of Dakshina Kannada District, South India [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(10): 3576. doi: 10.1117/1.jrs.6.063576.
- Ewing R, Pendall R, Chen D. 2015. Measuring sprawl and its impact [J]. *Journal of Planning Education & Research*, 57(1): 320-326.
- Ezeh A, Oyebo O, Satterthwaite D, et al. 2017. The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums [J]. *The Lancet*, 389: 547-558. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31650-6.
- Frenkel A, Ashkenazi M. 2008. Measuring urban sprawl: How can we deal with it? [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(1): 56-79.
- Galster G, Hanson R, Ratcliffe M R, et al. 2001. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive

- concept [J]. *Housing Policy Debate*, 12(4): 681-717.
- Huang J N, Lu X X, Sellers J M. 2007. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing [J]. *Landscape and Urban Planning*, 82(4): 184-197.
- 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.
- Jiao L M. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion [J]. *Landscape and Urban Planning*, 139: 26-39.
- Jiao L M, Xu G, Xiao F T, et al. 2017. Analyzing the impacts of urban expansion on green fragmentation using constraint gradient analysis [J]. *Professional Geographer*, 2017: 1-14.
- Kantakumar L N, Kumar S, Schneider K. 2016. Spatiotemporal urban expansion in Pune metropolis, India using remote sensing [J]. *Habitat International*, 51: 11-22.
- Kuang W H, Chi W F, Lu D S, 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.
- Mohanraj R, Azeez P A. 2005. Urban development and particulate air pollution in Coimbatore city, India [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 62(1): 69-78.
- Nagpure A S, Reiner M, Ramaswami A. 2018. Resource requirements of inclusive urban development in India: Insights from 10 cities [J]. *Environmental Research Letters*, 13(2). doi: 10.1088/1748-9326/aaa4fc.
- Narain U. 2008. Urban air pollution in India [J]. *Review of Environmental Economics & Policy*, 2(2): 276-291.
- Pandey B, Joshi P K, Seto K C. 2013. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1): 49-61.
- Pandey B, Seto K C. 2015. Urbanization and agricultural land loss in India: Comparing satellite estimates with census data [J]. *Journal of Environmental Management*, 148: 53-66.
- Ramachandra T V, Aithal B H, Sanna D D. 2012. Insights to urban dynamics through landscape spatial pattern analysis [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 329-343.
- Ramachandra T V, Bharath A H, Sowmyashree M V. 2015. Monitoring urbanization and its implications in a mega city from space: Spatiotemporal patterns and its indicators [J]. *Journal of Environmental Management*, 148: 67-81.
- 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. doi:10.1177/0042098007087340.
- Schwarz N. 2010. Urban form revisited: Selecting indicators for characterising European cities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 96(1): 29-47.
- Sood P R. 2012. Air pollution through vehicular emissions in urban India and preventive measures [J]. *International Proceedings of Chemical Biological & Environmental*, 33: 45-49.
- Taubenböck H, Wegmann M, Berger C, et al. 2008. Spatiotemporal analysis of Indian mega cities [C]// *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. Beijing, China: 75-82.
- 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.
- Torrens P M. 2008. A toolkit for measuring sprawl [J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 1(1): 5-36.
- World Bank. 2017. World development indicators database [DB/OL]. (2017-12-22) [2018-10-06]. <http://www.world-bank.org/data/>.

A comparison of spatial and temporal characteristics of urban expansion in India during 1990–2014

XIONG Yao¹, PAN Runqiu^{1,2*}, XU Gang¹, JIAO Limin^{1,2}, LI Kai³

(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. The Third Bureau of China State Construction Engineering Corporation, Wuhan 430073, China)

Abstract: India is a developing country with a population only smaller than China, and is an important location of the Belt and Road Initiative. India is in the process of rapid urbanization and studying the urbanization characteristics of India is of great significance for understanding urban expansion globally. But within China there are relatively limited studies and reports on urbanization and urban expansion in India. In this study, we selected 10 Indian cities with more than 1 million people, and obtained the land use and population data of these cities based on the Landsat images in 1990, 2000, and 2014. The built-up density in each ring was calculated after the cities were divided into equidistant concentric rings by using the concentric ring analysis method. A multi-dimensional comparative analysis of urban expansion was conducted for these India cities through growth rate, density, intensity, and landscape indices. The results show that: 1) Urban land expansion is faster than population growth. The average annual growth rate of urban land is 3.27 and 2.43 times of the average annual growth rate of the population. 2) The density of urban land is decreasing with the distance from the city center and it quickly decreases within the urban core area. Temporally, urban land density gradually increases in the same concentric ring over time. Cities have expanded outwardly in a dispersed manner, and urban forms have become scattered, especially in the second period (2000–2014). 3) The degree of fragmentation of urban land is consistent with the spatial variation of urban expansion intensity. Areas with the most active urban expansion and the most severe landscape fragmentation shifted outward over time, and urban expansion has a significant impact on the landscape pattern. In the context of global urban expansion, this study provides an Indian sample for understanding the spatial and temporal characteristics of urban expansion and also provides analytical methods and ideas for studying urban expansion in other regions.

Keywords: urban expansion; urban form; concentric analysis; landscape fragmentation; India