

全球超大城市空间扩张及分形特征研究

侯亚丽^{1,2}, 匡文慧¹, 窦银银¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 超大城市是全球经济、文化以及高科技产业发展的承载体和重要纽带, 其形态结构特征和人口聚集效应是城市化影响的典型表现, 然而当前对于全球超大城市形态特征及扩张模式的研究相对不足。基于2000—2020年全球城市土地利用/覆盖变化数据(GULUC-30), 利用城市扩张强度差异指数分析了超大城市用地的时空变化规律; 而后运用面积一半径标度分析模型研究了超大城市的分形特征及扩张模式, 最后基于城市用地面积和城市人口之间的线性关系评价城市用地效率。结果发现: ① 2000—2020年东南亚和东亚的中国超大城市用地扩张最剧烈, 城市用地面积分别扩张了3148.32 km²和5996.26 km², 城市扩张强度差异指数平均值大于3; ② 2000—2020年超大城市的形态特征和扩张模式向着更加集约和紧凑的方向发展, 径向维数平均值由1.54增加至1.56, 分维差呈逐年减少趋势, 城市内部结构一体化特征显著; ③ 北美和欧洲的超大城市用地效率低, 2020年城市用地面积与城市人口比值系数范围为0.89~4.11; 南亚和非洲城市用地效率高, 比值范围为0.23~0.87。超大城市空间扩张格局和形态变化的认识对于城市用地的集约利用和可持续发展具有重要参考价值。严格控制超大城市扩张规模, 促进城市用地的均衡发展是建设韧性城市 and 实现城市地区可持续发展的必要条件。

关键词: 全球超大城市; 径向维数; 分维差; 城市扩张模式; 城市用地效率

DOI: 10.11821/dlxb202211001

1 引言

19世纪以来世界城市化进程加快, 城市用地实现了前所未有的增长^[1-3]。根据联合国人口预测, 2050年全球城市人口将占世界人口的2/3^[4]。随着城市人口的增长, 2050年全球城市建成区面积将增加3倍^[5]。城市用地面积的大幅度扩张以及人口大量涌入促进了超大城市的形成^[6]。超大城市的经济产出和人口分布高度集聚, 由此产生的固体废物污染加剧、极端热现象频发、空气污染以及淡水供应不足等环境问题在全球范围内都产生重大影响^[7-9]。可持续是当今城市发展的主题, 因此量化城市地区尤其是超大城市的空间形态变化对于理解城市化的阶段特征及其生态影响具有重要意义。

超大城市空间扩张及形态变化特征是城市地理学研究的重要方向之一, 相关学者就此内容已经展开许多研究^[10-13]。Mandal等^[14]对加尔各答及其周边地区的城市增长动态及扩张方向与强度展开研究; Xu等^[15]基于城市用地密度变化趋势就非洲城市扩张与形态特征变化展开分析; Estoque等^[16]以行政边界为单位分析了东南亚特大城市马尼拉和曼谷的城

收稿日期: 2021-10-09; 修订日期: 2022-10-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040403, XDA23100201) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040403, No.XAD23100201]

作者简介: 侯亚丽(1995-), 女, 山西晋中人, 博士生, 主要从事城市遥感方向研究。E-mail: houyl.19s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 窦银银(1986-), 女, 山东高唐人, 博士, 助理研究员, 主要从事城市生态遥感研究。

E-mail: douyinyin@igsrr.ac.cn

市土地利用强度和空间格局变化规律;Ou等^[17]量化了北京、上海、天津和广州4个城市的扩张模式;Dutta等^[18]基于V-I-S模型对新德里不透水地表的扩张进行估计,结果发现随着人口密度的不断增大,城市用地向周边地区扩张。现有关于超大城市形态特征的分析往往就单个城市或某一区域展开,缺乏全球不同气候条件和自然地理背景下城市之间的对比分析;以上研究基于不同的方法评价了城市空间格局,但评价过程中忽略了城市系统的复杂性和无尺度性,因此无法区分不同城市的形态维度。

城市是一个复杂的系统^[19],其形态变化遵循某种空间组织原则^[20-21],这些原则可以通过分形几何进行定量表征^[22-23]。分形是由以某种方式与整体相似的部分构成的一种形体,破碎和不规则是分形的基本特征,分维是反映分形特征的主要参数^[24-25]。Frankhauser^[26]基于分形理论,对全球城市开展面积—半径的标度分析,发现由此而得的分维参数可以很好地反映城市扩张情况;White等^[27]在城市元胞自动机模拟中发现了城市用地的双分形特征;Bosch等^[28]通过面积—半径分形分析的方法探究瑞士城市群不同时空格局下的标度区;张凤等^[29]利用径向维数揭示了京津冀城市群的空间格局及其演变特征。因此分形分析可以较好地刻画城市形态特征,面积—半径标度分析模型是实现这一目标的有力工具。

本文以全球33个超大城市为例,运用面积—半径标度分析模型量化超大城市的标度区,将城市分为内城区和外城区。在分形分析的基础上,比较内外城区城市扩张率的差异以及城市扩张与人口增长之间的关系,进而评估城市的扩张模式及用地效率。研究结果揭示了21世纪以来超大城市用地扩张趋势,可为各个地区不同类型城市的发展与规划提供参考。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究区域

超大城市是指常住人口在1000万以上的城市区域^[4]。本文采用联合国经济和社会事务部在2018年“世界城市化前景”报告中公布的全球33个超大城市作为研究对象^[4]。这33个城市遍布全球5个大洲,位于不同收入水平的国家。超大城市中有5个分布在高收入国家,27个位于中等收入国家,1个分布在低收入国家,受地理位置和经济发展水平等因素影响形成了不同的城市形态与扩张模式。

2.2 数据来源

2.2.1 GULUC-30 数据产品 城市边界数据来源于全球城市土地利用/覆盖变化数据产品(Global Urban Land Use/Cover Composites with 30 m spatial resolution, GULUC-30, <http://www.chinageoss.cn/geoarc/2020>)^[30]。该数据应用大数据平台和机器学习方法,基于等级尺度的城市下垫面结构组分制图原理,生成归一化人居地密度指数数据,基于此运用密度分割法生成原始的城市边界数据,而后对城市边界数据进行后处理,最终生成城市边界数据。该数据总体精度为91.20%,用户精度为91.73%,满足本文分析与制图需要。

2.2.2 Worldpop 人口数据 人口数据来源于英国南安普顿大学研发的Worldpop人口数据(<https://www.worldpop.org/>)^[31]。该数据集以人口普查数据、建筑数据和地形地貌等数据为基础,运用随机森林法估算各个栅格中的人口。Worldpop是目前已公开长时间序列数据中精度最高的人口数据。该数据采用WGS84地理坐标系,空间分辨率为3 arc (赤道约100 m)。

表1 全球33个超大城市名单
Tab. 1 List of global 33 megacities

超大城市	国家	地区	人口(千万)	超大城市	国家	地区	人口(千万)
班加罗尔	印度	南亚	1.14	拉各斯	尼日利亚	西非	1.35
曼谷	泰国	东南亚	1.02	拉合尔	巴基斯坦	南亚	1.17
北京	中国	东亚	1.96	利马	秘鲁	南美	1.04
波哥大	哥伦比亚	南美	1.06	洛杉矶	美国	北美	1.25
布宜诺斯艾利斯	阿根廷	南美	1.50	马尼拉	菲律宾	东南亚	1.35
开罗	埃及	北非	2.01	墨西哥城	墨西哥	北美	2.16
金奈	印度	南亚	1.05	莫斯科	俄罗斯	欧洲	1.24
重庆	中国	东亚	1.48	孟买	印度	南亚	2.00
德里	印度	南亚	2.85	纽约	美国	北美	1.88
达卡	孟加拉国	南亚	1.96	大阪	日本	东亚	1.93
广州	中国	东亚	1.26	巴黎	法国	欧洲	1.09
伊斯坦布尔	土耳其	欧洲、西亚	1.48	里约热内卢	巴西	南美	1.33
雅加达	印度尼西亚	东南亚	1.05	圣保罗	巴西	南美	2.17
卡拉奇	巴基斯坦	南亚	1.54	上海	中国	东亚	2.56
金沙萨	刚果(金)	非洲	1.32	深圳	中国	东亚	1.19
加尔各答	印度	南亚	1.47	天津	中国	东亚	1.32
东京	日本	东亚	3.75				

2.3 研究方法 with 指标

2.3.1 面积—半径标度分析模型 本文基于距离衰减定律，运用径向维数来描述超大城市的分形结构^[29]。其基本原理为：由城市中心向外等距离做同心圆，若半径*r*和其对应圆内城市用地面积 *A*(*r*) 存在面积—半径标度关系，则通过双对数形式处理可得：

$$\ln A(r) = D \ln r + \ln A_0 \tag{1}$$

式中：*A*(*r*) 表示半径为*r*的同心圆内城市用地面积；*A*₀ 为比例系数。利用最小二乘法对同心圆半径*r*和相应城市用地面积 *A*(*r*) 进行线性回归，其斜率就是径向维数*D*。径向维数表示城市用地密度从市中心向四周递减的相对速率以及空间填充能力，当*D*>2时，城市用地密度从中心向外围递增；*D*=2时，密度不变；*D*<2时，密度递减，城市内部填充度降低^[29]。

本文以城市中心商务区（Central Business District, CBD）作为同心圆的圆心，而后以逐步递增的方式创建 1 km缓冲区形成同心圆。各个城市CBD的中心来自《城市扩张地图集》^[32]，该图集中不包含的城市则通过谷歌地图获取CBD位置。对于多中心发展城市，首先确定城市发展的中心点位，任意选取两个中心点位，判别这两个中心点位之间城市用地密度最低的环带作为这两个中心的边界，对剩余的中心点两两一组重复以上操作，至此完成对多中心城市的缓冲区划分工作（图1）。城市半径与城市用地面积的双对数坐标图有明显的转折点，转折点之前的散点形成第一标度的内城区，其余散点形成第二标度的外城区。本文通过最小残差平方和的方法确定转折点。

2.3.2 城市用地扩张强度差异指数 城市用地扩张强度差异指数（Urban Expansion Intensity Differentiation Index, UEDI）指的是城市用地面积扩张率与所有城市用地面积扩

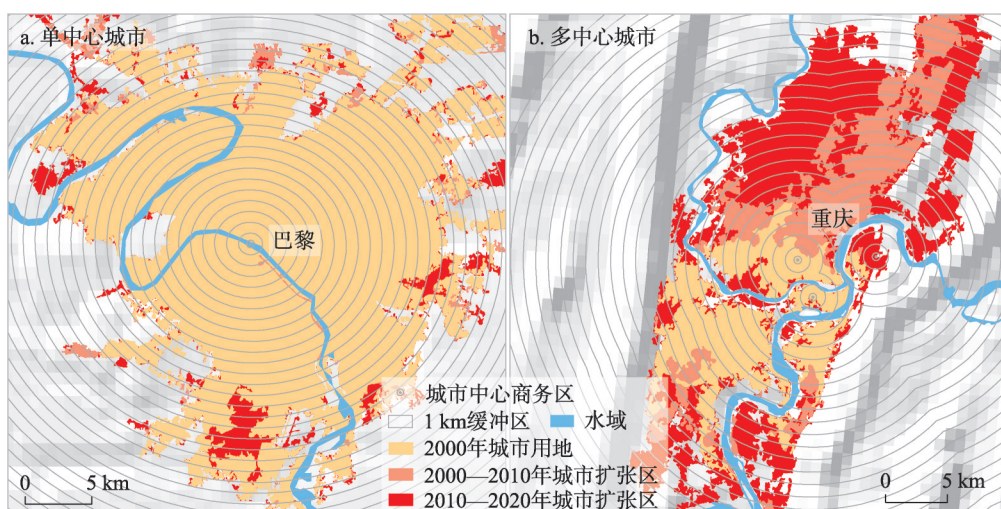


图1 巴黎和重庆的同心环圈层划分

Fig. 1 Division of concentric ring layers in Paris and Chongqing

张率的比值^[33], 本指数是对所有城市用地总面积进行标准化, 使得同一时期不同空间规模城市之间的扩张强度具有可比性。具体公式如下:

$$UEDI_n = \frac{|UL_n^{t_2} - UL_n^{t_1}| \times UL^{t_1}}{|UL^{t_2} - UL^{t_1}| \times UL_n^{t_1}} \quad (2)$$

式中: $UEDI_n$ 代表第 n 个城市用地扩张强度差异指数; $UL_n^{t_1}$ 和 $UL_n^{t_2}$ 分别代表 t_1 年和 t_2 年第 n 个城市用地面积; UL^{t_1} 和 UL^{t_2} 分别代表 t_1 年和 t_2 年所有城市用地面积。

3 结果分析

3.1 全球超大城市用地时空变化特征

21 世纪以来, 全球 33 个超大城市用地面积与扩张强度差异显著。分布在高收入国家的超大城市空间规模最大, 亚洲发展中国家城市扩张强度最强, 欧洲和南美洲超大城市的空间规模及扩张强度相对较弱。2020 年全球 33 个超大城市用地面积为 $5.36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中分布在高收入国家的洛杉矶、纽约和东京城市用地面积最大, 均在 3000 km^2 以上 (图 2), 占超大城市用地总面积的 29.38%。波哥大、孟买和达卡等城市用地面积不足 500 km^2 。2000 年以来, 超大城市扩张主要发生在亚洲发展中国家。重庆和雅加达的扩张强度差异指数最大, 分别为 6.69 和 6.05 (图 2), 其扩张面积均为 2000 年城市用地面积的 3 倍以上。欧洲巴黎以及南美洲的利马和里约热内卢等城市扩张强度差异指数小于 0.30, 20 年来城市扩张面积在 150 km^2 以下。依据城市扩张强度差异指数将超大城市分为 3 种类型: 城市规模稳定型 ($UEDI < 1$)、缓慢扩张型 ($1 \leq UEDI < 2$) 和快速扩张型 ($UEDI \geq 2$)。

3.2 全球超大城市用地形态的双分形特征

对 2000 年、2010 年和 2020 年各超大城市的样本点分别进行整体与分段拟合, 以 R^2 为测算依据, 结果显示第一、第二标度分段拟合的效果优于整体 (图 3~图 5), 遵循 White 等^[27]提出的双分形城市模型, 表明全球超大城市具有双分形特征, 城市发展呈各向

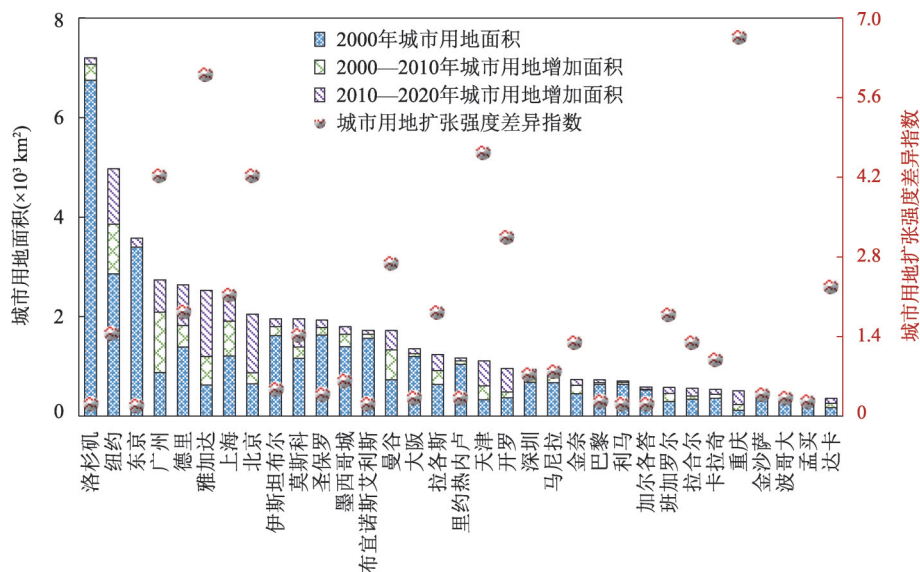


图2 2000—2020年超大城市用地面积变化及城市用地扩张强度差异指数

Fig. 2 Urban land area changes and urban expansion intensity differentiation index of megacities from 2000 to 2020

异性。第一标度区与第二标度区径向维数的差值为分维差，分维差越小表明内外城区发展越均衡，城市的自相似特征明显。

3.2.1 超大城市的面积一半径关系变化特征 2000—2020年不同扩张类型的城市其半径与用地面积双对数拟合曲线变化特征各异。规模稳定型城市曲线变化趋势无明显的年际差异（图3），缓慢扩张型和快速扩张型城市曲线对数最大值呈逐年递增趋势，城市用地面积逐年增加。缓慢扩张型城市双对数曲线年际间隔较近（图4），且上升趋势较为缓和，表明2000—2010年和2010—2020年这两个阶段城市用地扩张面积较小；快速扩张型城市曲线年际间隔较大（图5），上升斜率逐渐增大，城市用地呈明显的阶段扩张特征，扩张趋势较为剧烈。

规模稳定型城市多处于城市化进程的成熟阶段且受自然地理环境限制，城市扩张空间范围已达到可用土地的极限。洛杉矶、东京以及大阪等在21世纪之前已进入城市化成熟阶段的城市，2020年和2000年其城市用地面积对数差值在0.10以内，城市空间规模基本稳定（图3）。圣保罗地处巴西高原东南边缘大崖壁的马尔山山麓，市内地形起伏，平坦的地区几乎全部建成了城市用地；海岸和山脉之间东西狭长的平原地带形成了伊斯坦布尔城市线性发展的基本形态，随着城市化进程的不断推进，其城市用地已扩张至山麓和海岸线附近。缓慢扩张型城市主要分布在亚洲的印度和巴基斯坦。2020年和2000年城市用地面积对数差值在0.40~0.70之间，其中班加罗尔、拉各斯和德里差值最大在0.64以上，是缓慢扩张型城市中扩张面积较大的城市。2000—2010年和2010—2020年，此类城市用地面积对数差值基本保持稳定（图4），表明近20年来城市用地面积稳定增长且无明显的阶段特征。快速扩张型城市主要分布在亚洲的中国以及东南亚地区。雅加达和重庆曲线年际间隔最大（图5），曲线对数差值分别为1.40和1.47，城市用地面积在前后十年均进行大幅度增加。开罗、曼谷以及广州等城市前后十年曲线对数差值明显，表明城市扩张分阶段进行。

3.2.2 标度区范围厘定与径向维数的时空差异 规模稳定型城市内城区范围较大，且保持稳定；快速扩张型城市内城区范围最小，变化剧烈（图6）。内城区范围与城市空间规模的

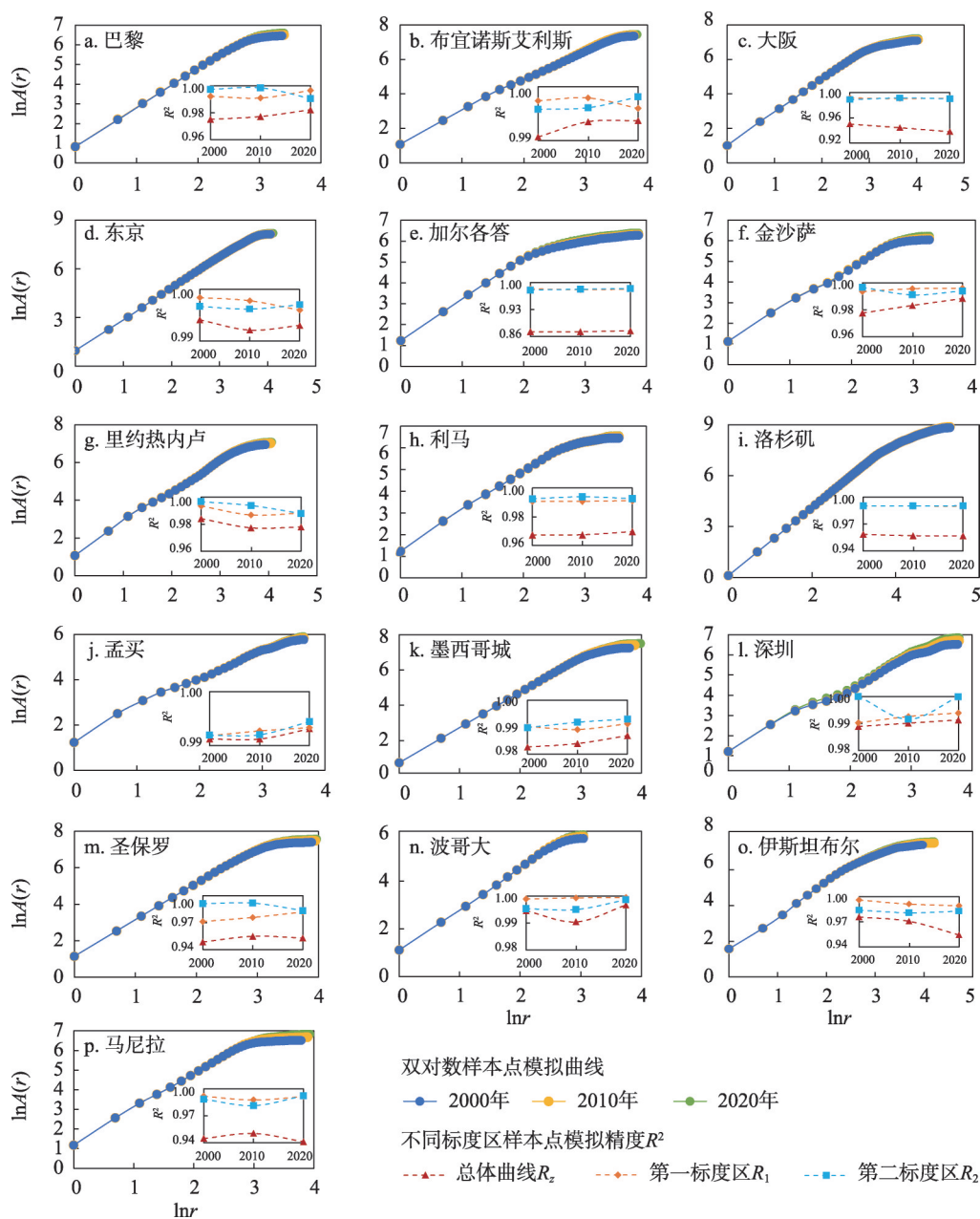


图3 规模稳定型城市用地面积—半径关系

Fig. 3 Log-log plots of radius and urban land area in stable megacities

分布规律一致,城市用地面积在3000 km²以上的洛杉矶、纽约和东京其内城区范围也最广,半径在50 km以上。波哥大和加尔各答等用地面积小于600 km²的城市,内城区范围也较小,半径在15 km以下。内城区范围变化趋势与城市扩张类型一致,快速扩张型城市如广州、雅加达、北京和上海等内城区范围变化最大,半径外扩10 km以上。稳定型城市如欧洲的巴黎、南美洲的波哥大、利马以及北美的洛杉矶等城市20年来内城区范围基本保持稳定。

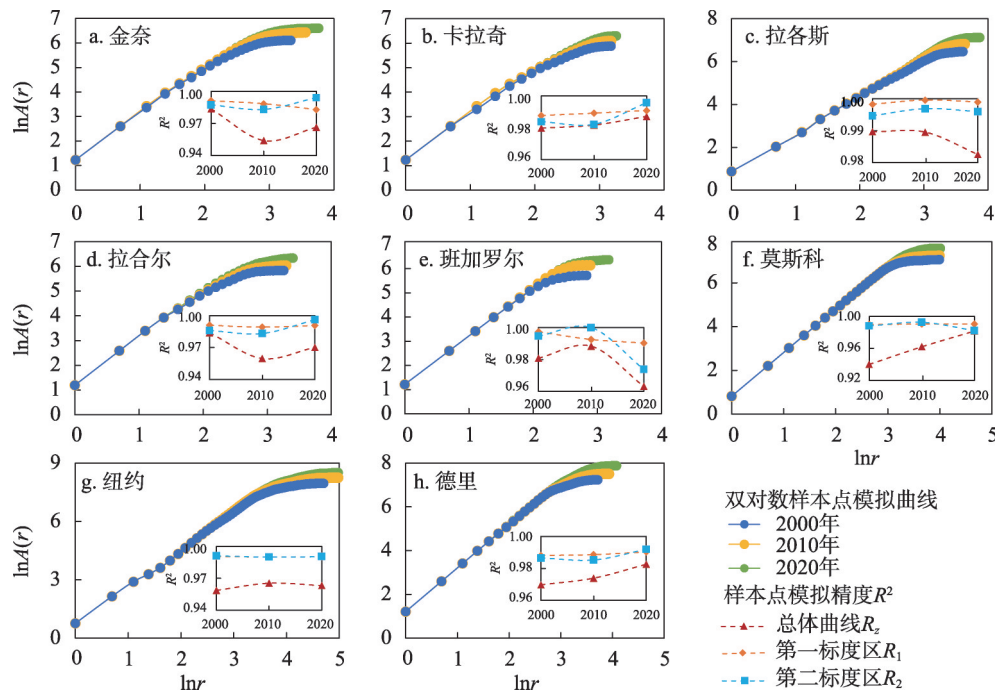


图4 缓慢扩张型城市用地面积—半径关系

Fig. 4 Log-log plots of radius and urban land area in slowly expanded megacities

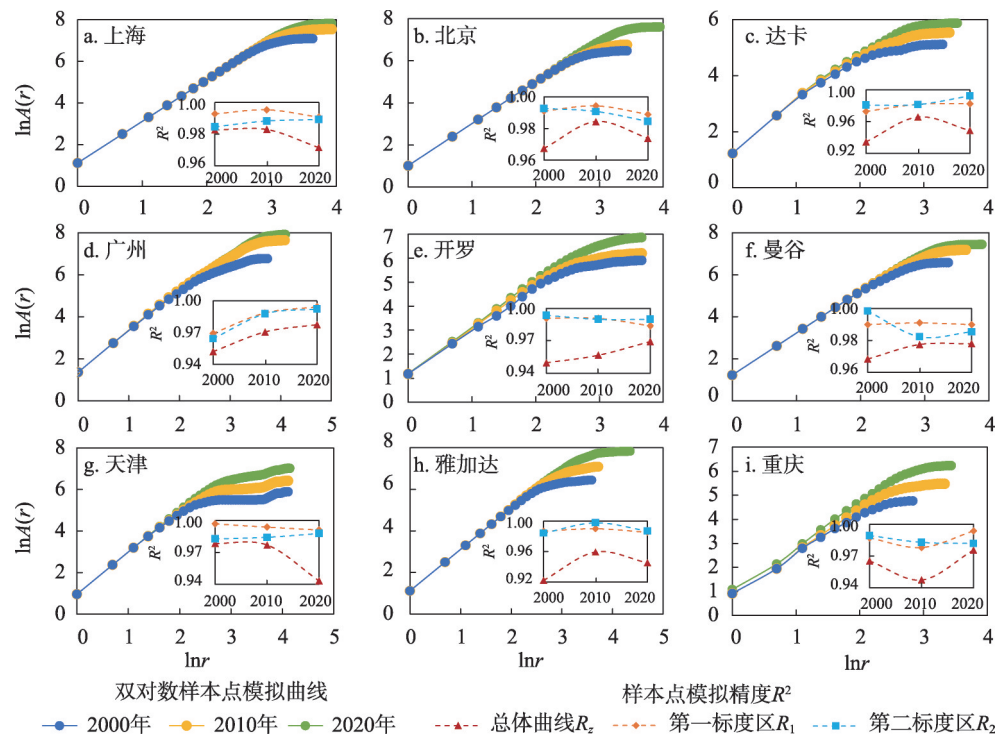


图5 快速扩张型城市用地面积—半径关系

Fig. 5 Log-log plots of radius and urban land area in rapidly expanded megacities

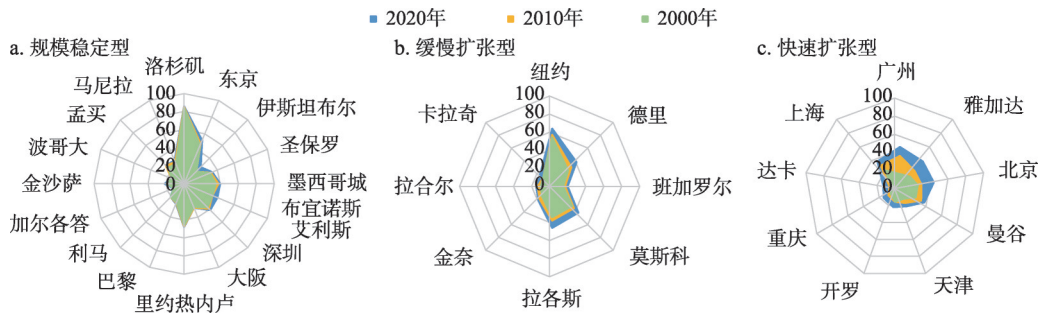


图6 2000年、2010年和2020年超大城市第一标度区范围分布
Fig. 6 Scaling ranges of megacities in 2000, 2010 and 2020

全球超大城市的形态特征总体向着更加集约的方向发展，城市自相似特征增强，空间结构更加紧凑。位于内陆地区的规模稳定型城市形态特征较为紧凑，2000—2020年径向维数变化值在0.03上下波动（图7），2020年径向维数均值约为1.70，表明城市用地密度由市中心向郊区下降速度较慢，城市空间结构较为紧凑；而沿海或者被河流分隔的城市形态特征较为分散，比如马尼拉、伊斯坦布尔等城市径向维数较小，仅为1.37和1.42。巴黎、波哥大和金沙萨等城市径向维数大于1.60，分维差值小于0，表明此类城市内外城区发展较为均衡，城市发展的一体化趋势逐渐增强。东京、布宜诺斯艾利斯、伊斯坦布尔以及孟买等城市分维差值较大，表明内外城区发展不均衡，城市用地形态呈现各向异性的分形特征。

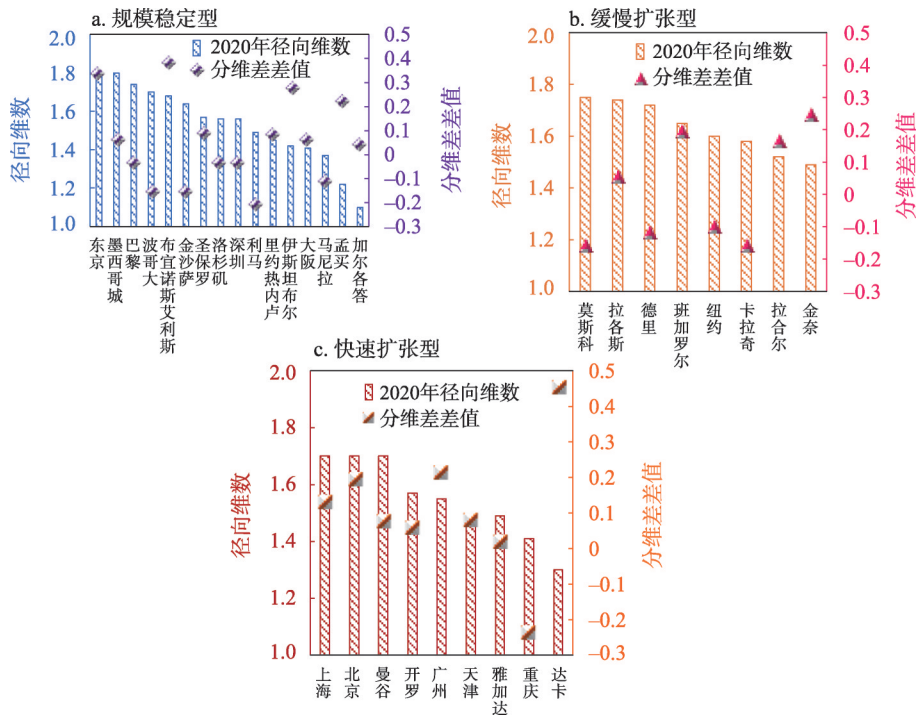


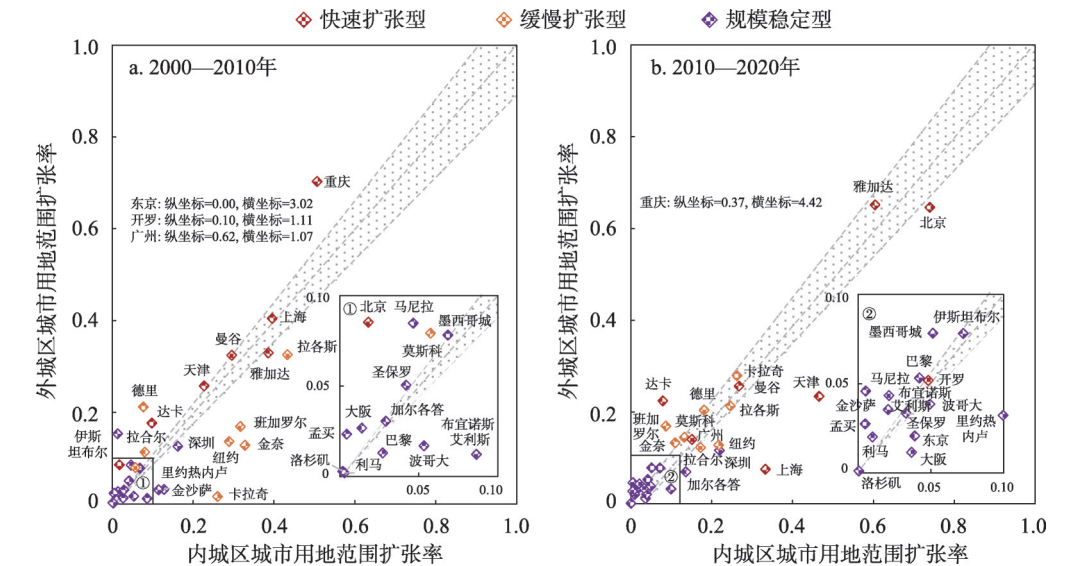
图7 2000—2020年超大城市分维差值变化
Fig. 7 Changes of fractal dimension differences in megacities from 2000 to 2020

缓慢和快速扩张型城市在发展过程中,城市用地形态趋向集约和稳定的状态。2020年缓慢扩张型城市径向维数平均值为1.63较2000年增加了0.30,表明城市用地密度由市中心向郊区的下降速率变慢,内外城区差异减小,城市发展更为紧凑。莫斯科、拉各斯以及德里3个城市2020年径向维数分别为1.75、1.74和1.72(图7),城市内部填充度较强,城市形态集聚。2000—2020年莫斯科、德里、卡拉奇和纽约的分维差值小0,表明其内外城区自相似特征逐渐增强。快速扩张型城市径向维数均值小于缓慢扩张型和规模稳定型,但其变化趋势呈现逐年增长态势。开罗、广州以及雅加达等城市2000—2020年径向维数增加值在0.1以上,但其内外城区分维差值大于0,表明城市内部空间发展不协调性加剧。上海、北京、广州以及达卡内外城区分维差值在0.10以上(图7),城市形态各向异性特征显著,外城区以低密度扩张为主。

3.3 全球超大城市用地扩张模式

城市空间结构的紧凑程度是研究城市无序蔓延所带来城市问题的主要依据。本文定义当内城区和外城区的扩张率趋于一致即外城区扩张率为内城区的0.90~1.10倍时,该城市扩张类型属于既非紧凑也非蔓延的过渡型。若内城区的填充率高于外城区,则表明城市发展属于内部填充型,城市扩张模式较为紧凑,反之则属于蔓延型。当内城区和外城区城市用地范围变化率在0.05以下,则认为城市基本没扩张,将其归为过渡型城市。

紧凑和过渡是超大城市空间扩张的主要类型,全球超大城市发展呈现更加集约的扩张模式。规模稳定型城市除墨西哥城城市外,其余城市内外城区扩张率近乎一致。16个规模稳定型城市中12个城市的扩张类型为过渡型(图8);深圳、里约热内卢和加尔各答均属于紧凑型,外城区与内城区的城市用地范围扩张率之比在0.6以下,城市空间扩张以内部填充为主,城市土地利用效率高;而墨西哥城城市扩张属于蔓延型,其外城区与内城区的城市用地范围扩张率之比由2000—2010年的1.14上升至2010—2020年的1.52,城



注:个别城市因坐标超出了坐标轴范围没有包括在图中,它们的坐标在图中列出;
城市点位于左上角区域属于蔓延型,阴影部分区域属于过渡型,右下角区域属于紧凑型。

图8 2000—2010年和2010—2020年超大城市内外城区城市用地范围扩张率对比

Fig. 8 Comparison of the inner and outer urban area expansion rates for megacities between 2000-2010 and 2010-2020 periods

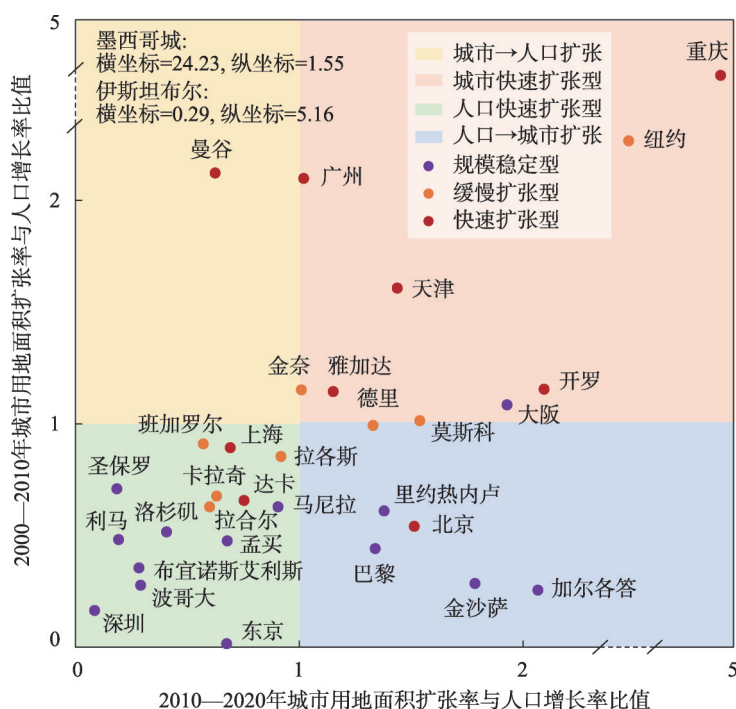
市蔓延呈现愈演愈烈的趋势。缓慢扩张型城市中拉合尔由蔓延型转变为紧凑型, 2000—2010年城市以外城区扩张为主, 外城区的扩张率是内城区的1.40倍, 历经10年的发展这一比值降至0.71, 拉合尔城市发展模式由外部蔓延式扩张转向内部填充式发展, 城市结构更加紧凑; 莫斯科2000—2020年均属于蔓延型城市, 但外城区与内城区的扩张率由1.38下降至1.09, 蔓延趋势有所减缓。快速扩张型城市中, 城市扩张模式由蔓延或过渡型转向紧凑型, 如曼谷外城区与内城区城市扩张率比值由2000—2010年的1.10下降至2010—2020年的0.96, 城市发展愈发紧凑。

4 讨论

城市空间扩张及形态变化是一个复杂的过程, 其演化规律及对城市可持续发展的影响应从多个维度展开分析^[34-35]。在世界各地的许多地区, 城市用地扩张的速度超过了人口增长速度, 导致了蔓延式城市发展模式^[36-37]。可持续是当今城市发展的主题, 联合国2030可持续发展目标将人均城市用地面积确定为可持续城市化的关键指标^[38]。本文通过量化城市用地和人口的关系探讨不同形态特征和扩张模式城市的用地效率。

4.1 超大城市用地扩张与人口增长的协同程度

不同扩张类型的城市其人口—城市用地协同程度呈现明显的差异性。规模稳定型和缓慢扩张型城市人口增长速度往往快于城市扩张速度; 快速扩张型城市用地面积增长仍占主导地位。快速扩张型城市如广州、重庆、天津、雅加达等城市在2000—2010年和2010—2020年两个时间段内, 其城市扩张明显快于人口增长(图9), 表明这些城市发展模式趋于粗放, 城市用地效率低^[39]。由于城市人口聚集效应具有滞后性导致城市人口并没有以相同速度同步增加, 人口和城市用地协调发展程度不高, 这与Seto等^[40]在对全球城市扩张的综合分析中得出的结论一致。规模稳定型城市如利马、布宜诺斯艾利斯和圣保罗等以及城市用地规模在1000 km²以下的城市, 其人口增长速度高于城市用地的扩张速度(图9), 结合上一节关于城市扩张模式的分析, 这些城市呈现过渡型或紧凑型的扩张模式, 其城市规模基本稳定, 而超大城市对人口集聚的虹吸效应导致此类城市人口迅速增长^[6], 城市发展较为紧凑。



注: 个别城市因坐标超出了坐标轴范围没有包括在图中, 坐标在图中列出。

图9 城市用地扩张与人口增长率比值

Fig. 9 Ratio of urban land area growth rate to population growth rate

4.2 超大城市用地效率对比分析

城市用地效率与该地区经济收入水平有关。高收入国家城市用地效率往往较低,城市规模较小且位于发展中国家的城市用地效率高。本文通过城市用地面积和城市人口的比例系数(线性拟合曲线的斜率,以下简称“比例系数”)描述超大城市用地效率。“比例系数”反映了人均拥有城市用地面积的大小,系数越大表明人均拥有城市用地面积越大,城市用地效率往往越低。洛杉矶和纽约的城市规模最大,比例系数也最大,在3以上(图10、图11),城市用地效率低,集约度差。Vogler等^[41]在2000—2010年美国人类足迹趋势的研究中也发现美国超大城市存在人均城市用地面积过高的特点。东京、莫斯科、大阪、伊斯坦布尔、曼谷和布宜诺斯艾利斯的比例系数在1~1.40之间(图10~图12),城市土地利用集约度较高。达卡、孟买和卡拉奇系数在0.50以下(图10~图12),

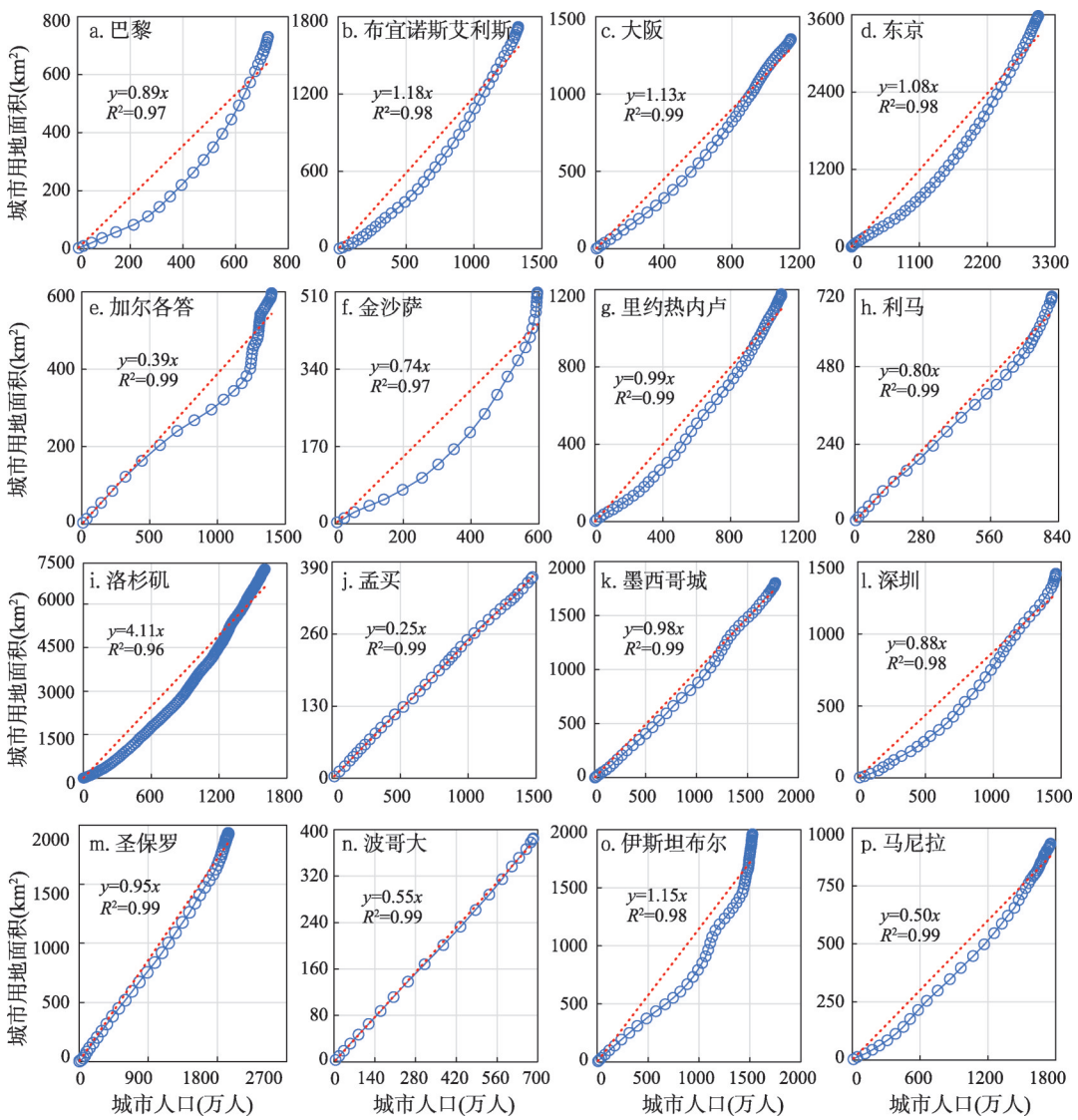


图10 规模稳定型城市用地面积与城市人口关系

Fig. 10 Relationship between urban land area and urban population in stable megacities

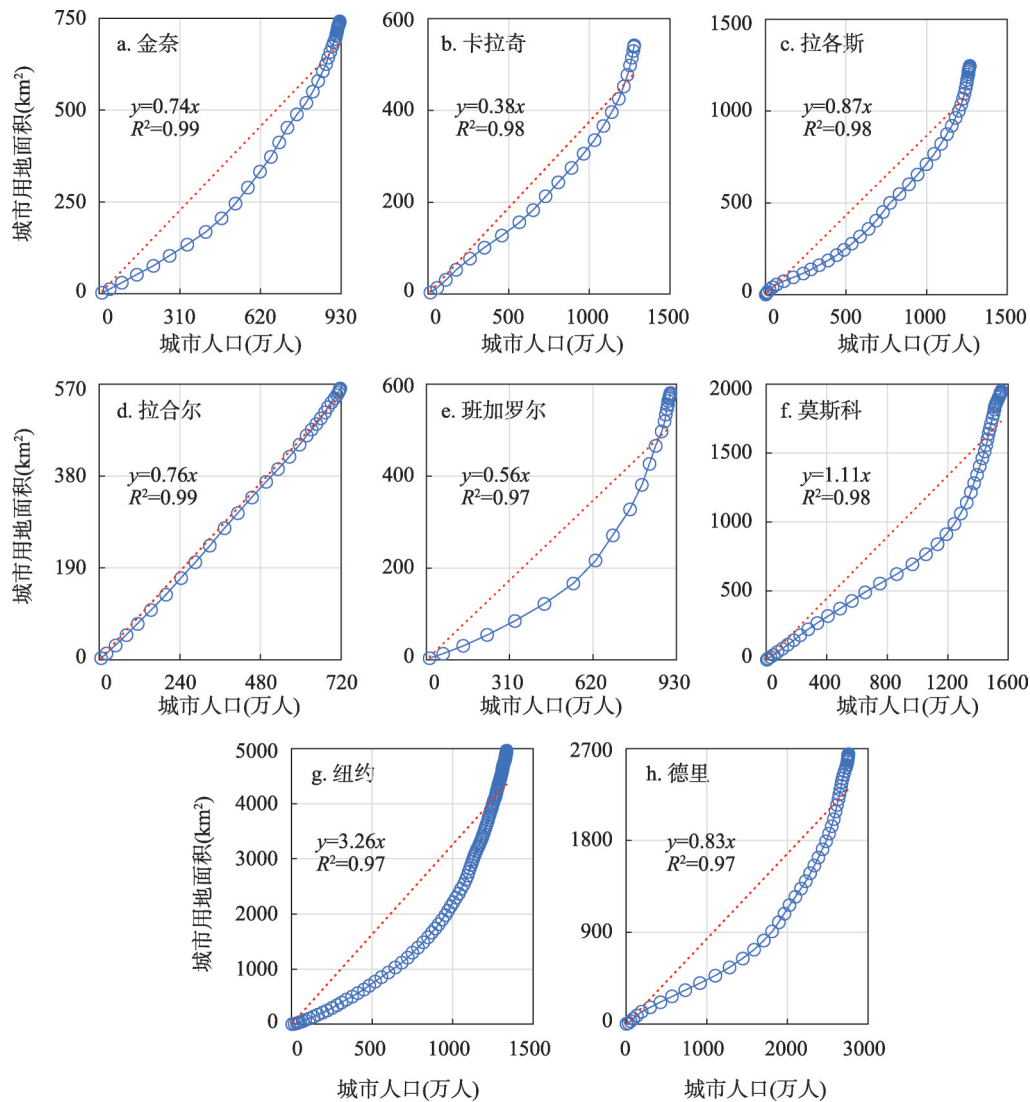


图 11 缓慢扩张型城市用地面积与城市人口关系

Fig. 11 Relationship between urban land area and urban population in slowly expanded megacities

城市规模较小，城市用地面积在 1000 km²以下，人口的增长速度快于城市面积扩张进而导致人均城市用地面积过小，城市用地过于紧凑，进而导致城市内涝^[42]、交通拥堵^[43]和以及绿地空间减少^[44]等城市发展问题。

5 结论

基于 2000—2020 年全球城市土地利用/覆盖变化数据，运用面积—半径标度分析模型对全球超大城市用地双分形特征及扩张模式展开分析。2000—2020 年全球 33 个超大城市的城市用地规模与扩张趋势差异显著，城市用地效率呈现较强的空间异质性。规模稳定型城市形态特征较为紧凑，如东京、洛杉矶城市面积在 3000 km²以上，近 20 年其径向维

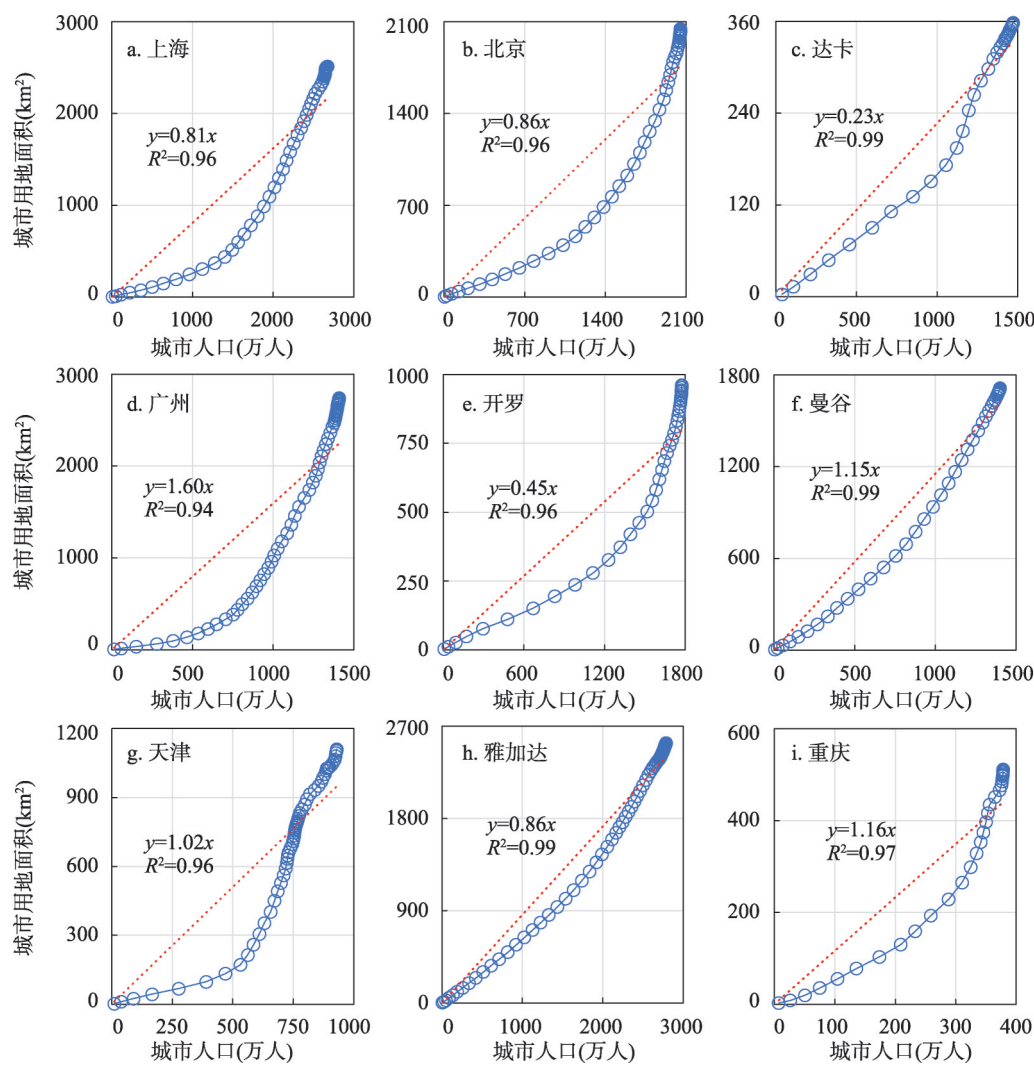


图12 快速扩张型城市用地面积与城市人口关系

Fig. 12 Relationship between urban land area and urban population in rapidly expanded megacities

数变化绝对值为0.04，城市扩张模式保持为紧凑型或稳定型，但受其本身社会环境的影响，城市用地效率往往较低。快速扩张型城市用地扩张剧烈，其城市扩张模式与形态特征向着更加集约和可持续方向发展。雅加达、广州和开罗等城市扩张强度差异指数大于3，其径向维数均小于1.71，但呈逐年增加的变化趋势，城市空间结构愈发紧凑。33个超大城市中有16个城市径向维数差值在0.05以下，城市扩张模式大多由蔓延型转变为紧凑型或稳定型。城市规模在1000 km²以下的超大城市，扩张强度弱，城市形态自相似特征明显，人口增长快于城市用地增长，城市用地效率较高。

建设包容、安全、弹性和可持续的城市和社区是联合国提出的可持续发展目标。本文探究了21世纪以来超大城市扩张和形态变化特点，厘清了超大城市的发展趋势，利用城市用地与城市人口的线性关系量化不同形态城市的用地效率，有助于为可持续目标的实现和城市规划决策提供科学参考和理论依据。

参考文献(References)

- [1] Li X C, Zhou Y Y, Hejazi M, et al. Global urban growth between 1870 and 2100 from integrated high resolution mapped data and urban dynamic modeling. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 201. DOI: 10.1038/s43247-021-00273-w.
- [2] Liu X P, Huang Y H, Xu X C, et al. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, 2020, 3(7): 564-570.
- [3] Zhang Y, Wang H Y, Xie P, et al. Revisiting spatiotemporal changes in global urban expansion during 1995 to 2015. *Complexity*, 2020, 2020: 6139158. DOI: 10.1155/2020/6139158.
- [4] United Nations. World urbanization prospects: The 2018 revision. <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>.
- [5] Angel S, Parent J, Civco D L, et al. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Progress in Planning*, 2011, 75(2): 53-107.
- [6] van der Ploeg F, Poelhekke S. Globalization and the rise of mega-cities in the developing world. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2008, 1(3): 477-501.
- [7] Wang J, Chen Y, Liao W L, et al. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities. *Nature Climate Change*, 2021, 11(12): 1084-1089.
- [8] Djehdian L A, Chini C M, Marston L, et al. Exposure of urban food-energy-water (FEW) systems to water scarcity. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101621. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101621.
- [9] Liang L, Gong P. Urban and air pollution: A multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18618. DOI:10.1038/s41598-020-74524-9.
- [10] Zheng Q M, Weng Q H, Wang K. Characterizing urban land changes of 30 global megacities using nighttime light time series stacks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 10-23.
- [11] Dong T, Jiao L M, Xu G, et al. Towards sustainability? Analyzing changing urban form patterns in the United States, Europe, and China. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 632-643.
- [12] Mahtta R, Mahendra A, Seto K C. Building up or spreading out? Typologies of urban growth across 478 cities of 1 million+. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124077. DOI: 10.1088/1748-9326/ab59bf.
- [13] Hai Kai, Wang Siyuan, Ma Yuanxu, et al. Urban expansion and form changes along the Belt and Road Initiative. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2092-2108. [海凯, 王思远, 马元旭, 等. “一带一路”沿线地区城市扩张和形态变化分析. *地理学报*, 2020, 75(10): 2092-2108.]
- [14] Mandal J, Ghosh N, Mukhopadhyay A. Urban growth dynamics and changing land-use land-cover of megacity Kolkata and its environs. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(10): 1707-1725.
- [15] Xu G, Dong T, Cobbinah P B, et al. Urban expansion and form changes across African cities with a global outlook: Spatiotemporal analysis of urban land densities. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 802-810.
- [16] Estoque R C, Murayama Y. Intensity and spatial pattern of urban land changes in the megacities of Southeast Asia. *Land Use Policy*, 2015, 48: 213-222.
- [17] Ou J P, Liu X P, Li X, et al. Quantifying spatiotemporal dynamics of urban growth modes in metropolitan cities of China: Beijing, Shanghai, Tianjin, and Guangzhou. *Journal of Urban Planning and Development*, 2017, 143(1): 04016023. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000352.
- [18] Dutta D, Rahman A, Paul S K, et al. Impervious surface growth and its inter-relationship with vegetation cover and land surface temperature in peri-urban areas of Delhi. *Urban Climate*, 2021, 37: 100799. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100799.
- [19] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun, et al. Geography complexity: New connotations of geography in the new era. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213. [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. *地理学报*, 2018, 73(7): 1204-1213.]
- [20] Encarnação S, Gaudiano M, Santos F C, et al. Fractal cartography of urban areas. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 527. DOI: 10.1038/srep00527.
- [21] Benguigui L, Czamanski D. Simulation analysis of the fractality of cities. *Geographical Analysis*, 2004, 36(1): 69-84.
- [22] Chen Y G, Wang J J, Feng J. Understanding the fractal dimensions of urban forms through spatial entropy. *Entropy*, 2017, 19(11): 600. DOI:10.3390/e19110600.
- [23] Tannier C, Thomas I, Vuidel G, et al. A fractal approach to identifying urban boundaries. *Geographical Analysis*, 2011, 43(2): 211-227.
- [24] Chen Y G, Wang Y H, Li X J. Fractal dimensions derived from spatial allometric scaling of urban form. *Chaos, Solitons*

- & Fractals, 2019, 126: 122-134.
- [25] Chen Y G. Fractal modeling and fractal dimension description of urban morphology. *Entropy*, 2020, 22(9): 961. DOI: 10.3390/e22090961.
- [26] Frankhauser P. The fractal approach: A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations. *Population*, 1998, 10: 205-240.
- [27] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1993, 25(8): 1175-1199.
- [28] Bosch M, Jaligot R, Chenal J. Spatiotemporal patterns of urbanization in three Swiss urban agglomerations: Insights from landscape metrics, growth modes and fractal analysis. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 879-891.
- [29] Zhang Feng, Chen Yanguang, Li Xiaosong. Radial dimension analysis of growth and form of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 65-76. [张凤, 陈彦光, 李晓松. 京津冀城市生长和形态的径向维数分析. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 65-76.]
- [30] Wang Qi'an, Shi Jiancheng, Liu Qinhua, et al. Global ecosystems and environment observation analysis report cooperation (2020): Global urban land composite and expansion in 2000-2020. <http://www.chinageoss.cn/geoarc/2020>. [王琦安, 施建成, 柳钦火, 等. 全球生态环境遥感监测2020年度报告: 全球城市扩张与土地覆盖变化. <http://www.chinageoss.cn/geoarc/2020>.]
- [31] Worldpop. Open spatial demographic data and research. 2020. <https://www.worldpop.org/>.
- [32] Angel S. Atlas of urban expansion, 2016 edition, volume 1: Areas and densities. 2016. <http://www.atlasofurbanexpansion.org>.
- [33] Guan Xingliang, Fang Chuanglin, Zhou Min, et al. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan urban agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1447-1459. [关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城市用地空间扩展时空特征分析. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1447-1459.]
- [34] Stokes E C, Seto K C. Characterizing and measuring urban landscapes for sustainability. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(4): 045002. DOI:10.1088/1748-9326/aafab8.
- [35] Hamidi S, Ewing R, Preuss I, et al. Measuring sprawl and its impacts: An update. *Journal of Planning Education and Research*, 2015, 35(1): 35-50.
- [36] Gao J, O'Neill B C. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and shared socioeconomic pathways. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2302. DOI: 10.1038/s41467-020-15788-7.
- [37] Adhikari P, de Beurs K M. Growth in urban extent and allometric analysis of West African cities. *Journal of Land Use Science*, 2017, 12(2/3): 105-124.
- [38] United Nations. Sustainable development goals metadata repository-sdg indicator metadata: Format version 1.0. <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-11-03-01.pdf>.
- [39] Ouyang Xiao, Zhu Xiang. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 571-588. [欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征. *地理学报*, 2020, 75(3): 571-588.]
- [40] Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, et al. A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE*, 2011, 6(8): e23777. DOI: 10.1371/journal.pone.0023777.
- [41] Vogler J B, Vukomanovic J. Trends in United States human footprint revealed by new spatial metrics of urbanization and per capita land change. *Sustainability*, 2021, 13(22): 12852. DOI:10.3390/su132212852.
- [42] Alam M J. "The organized encroachment of land developers": Effects on urban flood management in Greater Dhaka, Bangladesh. *Sustainable Cities and Society*, 2014, 10: 49-58.
- [43] Chang Y S, Lee Y J, Choi S S B. Is there more traffic congestion in larger cities? Scaling analysis of the 101 largest U.S. urban centers. *Transport Policy*, 2017, 59: 54-63.
- [44] Dong Y L, Ren Z B, Fu Y, et al. Decrease in the residents' accessibility of summer cooling services due to green space loss in Chinese cities. *Environment International*, 2022, 158: 107002. DOI: 10.1016/j.envint.2021.107002.

Analysis of urban expansion and fractal features in global 33 megacities from 2000-2020

HOU Yali^{1,2}, KUANG Wenhui^{1,2}, DOU Yinyin¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ultimate form of urbanization is the megacity, which is the typical form of urban structural characteristics and population agglomeration effects. However, the comparative studies on the urban form and expansion patterns of megacities worldwide are still insufficient. This study first analyzed the spatiotemporal changes of land use in megacities based on the Global Urban Land Use/Cover Composites with a 30 m spatial resolution (GULUC-30) by using the method of urban expansion intensity differentiation index (UEDI). Then, the fractal structure and expansion patterns of megacities were investigated using the area-radius model. Finally, urban land use efficiency was assessed through a linear relationship between urban land area and its internal population. The findings include: (1) Southeast Asia and China had experienced the most dramatic urban land expansion (3148.32 km² and 5996.26 km²) over the last 20 years, along with the average UEDI of both greater than 3. (2) In 2000-2020, morphological characteristics and sprawl patterns of megacities developed toward greater intensification and compactness, with the mean radial dimension increased from 1.54 to 1.56. Meanwhile, radial dimension difference showed a year-by-year decreasing trend, and the intra-city structure showed integration. (3) In 2020, urban land use efficiencies in both North America and Europe were low, with urban land area to its population ratio coefficients ranging from 0.89 to 4.11. On the contrary, high values happened in South Asia and Africa, from 0.23 to 0.87. Spatial patterns and morphological changes in megacities provide important reference values for the intensive utilization of urban land and its sustainable development. Controlling the scale of megacity expansion and promoting the balanced exploitation of urban land are the essential ways for building resilient cities and sustainable urban planning.

Keywords: megacities; radial dimension; radial dimension difference; urban expansion; urban land use efficiency