

“一带一路”沿线地区城市扩张和形态变化分析

海凯^{1,2}, 王思远^{1,3}, 马元旭¹, 杨瑞霞¹, 涂平², 梁娟珠², 刘卫华¹, 吴林霖¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 福州大学数字中国研究院 (福建), 福州 350002; 3. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 尽管越来越多的人认识到“一带一路”沿线各国的城市化进程对其经济、政治和环境系统所起的重要作用, 但对监测区域范围内城市扩张和形态变化的比较研究却极为有限。基于欧空局气候变化倡议项目最新发布的1992—2015年300 m分辨率的全球土地覆盖数据集、1992—2012年DMSP/OLS夜间灯光数据和2000—2015年LandScan人口数据, 本文首先分析了1992—2015年“一带一路”陆域城市用地增长的空间格局和十大分区城市用地面积的动态。其次, 通过分析3个时间点(1992年、2003年和2015年)上同心环内城市用地密度的时空变化, 量化了“一带一路”沿线80个城市的扩张和形态变化。最后采用3种统计模型(线性、幂律和指数函数模型)来分析城市用地面积、加权灯光面积和城市人口之间的长期关系。结果显示, “一带一路”陆域城市用地面积占土地总面积的比例从1992年的0.24%上升至2015年的0.56%, 并且非洲和亚洲的发展中国家是“一带一路”监测区域城市化的主要贡献者。同心环内城市用地密度从城市中心到城市边缘呈递减趋势, 且城市间的空间分布完全不同。中国、欧洲、非洲、西亚、东南亚和印度6个分区人口数超过100万的城市间比较显示, 除了中国城市形态变得分散, 其他分区城市形态总体变得紧凑。分析结果也显示, 夜间灯光信号所反映的城市经济活力和城市人口分布趋势在不同程度上影响城市空间扩张和形态变化。

关键词: “一带一路”; 城市扩张和形态变化; 同心环; 城市用地密度

DOI: 10.11821/dlxb202010005

1 引言

城市化改变了土地覆盖、水文系统、生物地球化学、栖息地和生物多样性^[1-3]。了解这些因素之间的关系, 有助于深入认识不同的城市环境问题, 如地表径流污染、固体废物污染、城市“热岛效应”和二氧化碳排放^[4-7]。

16世纪以来, 城市紧凑且人口密度高, 城市空间扩展缓慢, 但这一趋势自20世纪50年代以来发生了逆转^[8]。如今世界大多数国家和地区的城市用地扩张速率超过了城市人口的增长速度^[8]。全球城市人口预计将从2000年的26亿增加到2030年的50亿^[9], 而城市用地面积预计将在此期间增加两倍^[10]。21世纪的前30年极有可能经历比历史上任何时期都要多的城市用地扩张^[10], 且新增城市用地主要集中在发展中国家, 特别是“一带一路”沿线国家。

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-06-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19030501); 第二次青藏高原综合科学考察专题(2019QZKK0204)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19030501; Second Comprehensive Scientific Investigation of the Tibetan Plateau, No.2019QZKK0204]

作者简介: 海凯(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为环境遥感。E-mail: hai_kai@163.com

通讯作者: 王思远(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感地学分析与陆地生态系统。

E-mail: w_siyuan@126.com

“一带一路”始于2100年前（公元前206—公元24年）的汉代，其主要目的是促进中西方国家之间的经济、文化、政治和宗教交流^[11]。2013年9月和10月，习近平主席在出访中亚和东南亚国家期间，先后提出了共同建设“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”（简称“一带一路”倡议），为沿线国家和地区的发展带来重大的发展机遇^[12]。如今，“一带一路”的监测区域扩大到亚洲、欧洲、非洲和大洋洲^[12]，沿线各国自然地理环境和人文因素的显著差异，造成了沿线城市扩张和形态变化具有明显的地域性。了解“一带一路”沿线城市扩张的特点，对促进现在和未来的可持续城市发展具有重大潜力，对“一带一路”倡议的未来推进具有重要意义。然而，对“一带一路”沿线国家城市扩张的相关研究更多集中于区域型^[13]和特大型城市研究^[14]，而对沿线不同规模和不同地理分区城市扩张和形态变化的研究尚少。因此，本文以“一带一路”沿线80个城市为例，从城市用地密度时空分析的角度，系统、全面地考察了1992—2015年陆域城市扩张的特征和形态变化。本文比较了不同规模城市间的扩张和形态变化差异，并进一步探讨了城市用地面积、夜间灯光加权面积和城市人口之间的长期关系。

2 研究区和数据来源

2.1 研究区域和样本城市选择

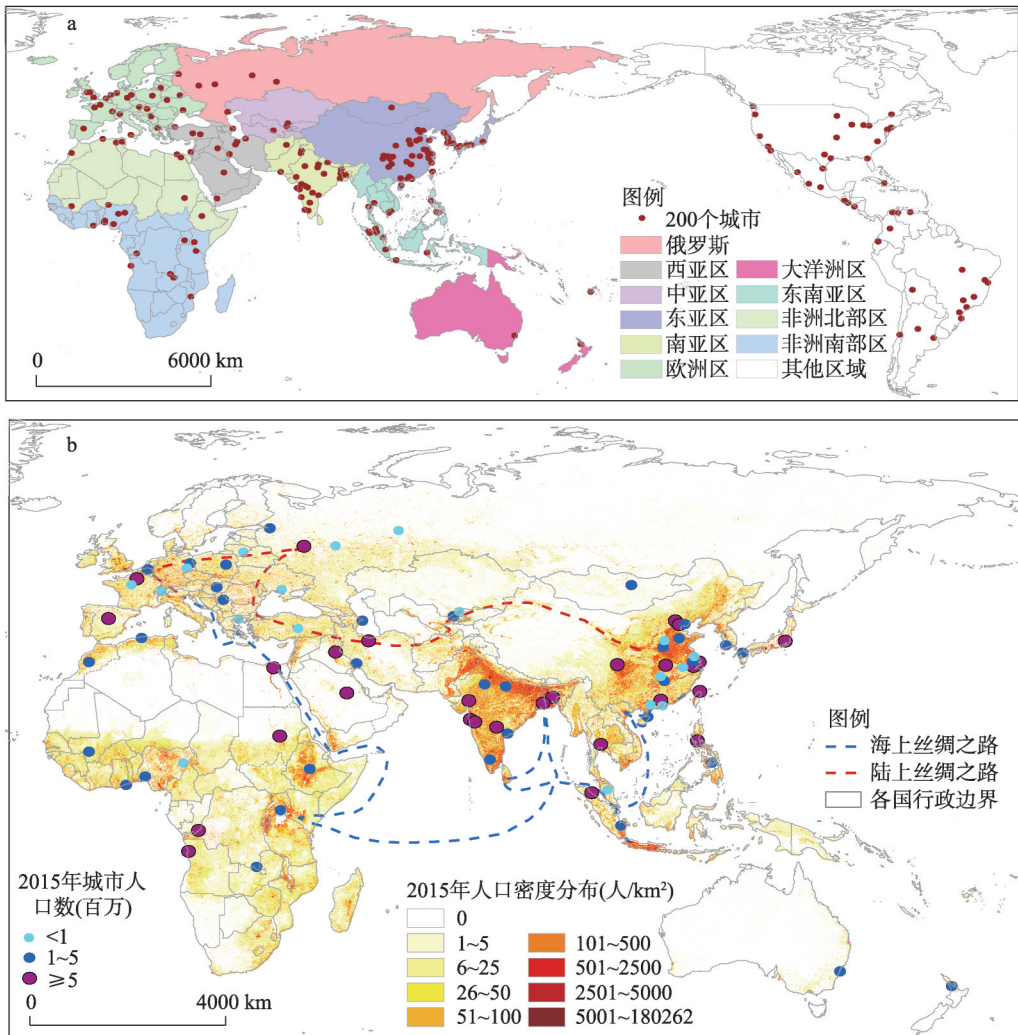
“一带一路”建设是一个开放的国际区域合作网络，并没有精确的空间范围，其旨在通过强化世界各国互联互通建设，打造更加开放、透明的全球统一大市场^[15]。全球生态环境遥感监测2017年度报告^[12]中指出“一带一路”监测区域包括亚洲、欧洲、非洲和大洋洲，并将其划分为东亚、南亚、中亚、西亚、东南亚、俄罗斯、欧洲、大洋洲、非洲北部和非洲南部，共10个地理分区（图1a）。

2016年版《城市扩张地图集》提供了全球200个典型城市的中央商务区（Central Business District, CBD）中心坐标（图1a），这些城市是从2010年世界4231个10万人口及以上城市中选取了200个具有代表性的城市作为样本^[16]。考虑到300 m空间分辨率的不足以及城市的空间分布，从200个城市中选取合适的80个城市（图1b）。这些城市均是“一带一路”沿线国家的首都或重要城市，且代表着不同的城市景观特征，包括沿海城市（如阿尔及尔、奥克兰和广州），内陆城市（如莫斯科、郑州和成都），山地城市（如亚的斯亚贝巴），平原城市（如天津和坎普尔），以及沙漠城市（如利雅得和开罗）。并根据2015年LandScan人口数据集将这些样本城市划分为3种不同规模类型：大城市（> 500万人），中等城市（100万~500万人）和小城市（< 100万人）。

2.2 数据来源

2.2.1 ESA-CCI土地覆盖产品 土地覆盖数据来源于ESA-CCI最新发布的1992—2015年共24年300 m分辨率的全球土地覆盖数据集^[17]。该数据集的总体精度为75.38%，其中城市用地的用户精度高达88%。ESA-CCI按照联合国土地覆盖分类系统（United Nations-Land Cover Classification System, UN-LCCS）定义37个土地覆盖类别^[18]，其中一级类别22种，二级类别15种。同时按照政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）土地覆盖分类系统，将原始的37个土地覆盖类别归并为耕地、森林、草地、湿地、城市用地、灌木、稀疏植被、裸地和水体等9个类别^[17]。

2.2.2 DMSP/OLS夜间灯光数据 DMSP/OLS长时间序列夜间灯光（Nighttime Light, NTL）数据来源于NOAA下属的国家地球物理数据中心，该数据有助于研究人类活动的变化^[19-20]。本文中采用了Zhang等提供的1992—2012年校正后的全球NTL数据^[21]。根据不



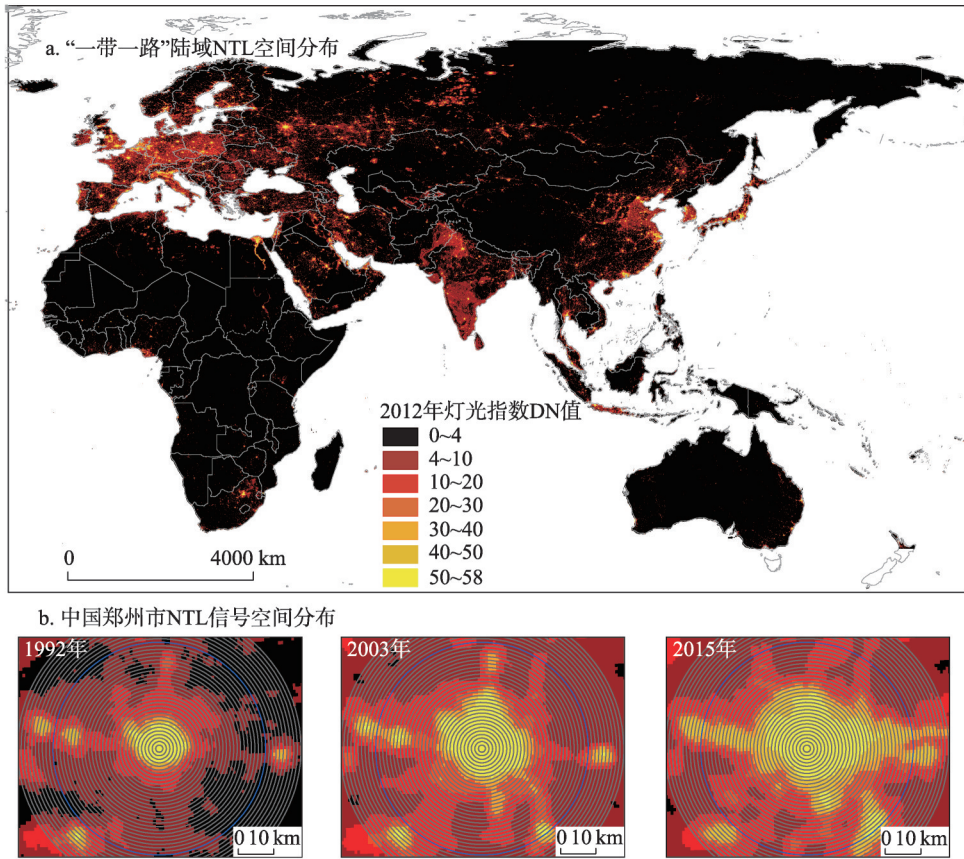
注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图1 全球200个城市空间分布(a)和“一带一路”陆域80个城市空间分布(b)

Fig. 1 Spatial distribution of 200 cities around the world (a) and 80 cities along the Belt and Road (b)

同年份和卫星的总DN值的时间趋势^[22], 选择1992—2012年期间的以下组合来描述“一带一路”沿线城市动态, 即F10 (1992—1994年), F12 (1995—1996年), F14 (1997—2003年), F16 (2004—2009年)和F18 (2010—2012年)。图2展示了该数据2012年“一带一路”陆域NTL信号分布以及中国郑州市在3个时间点 (1992年、2003年和2012年)的NTL信号空间分布。

2.2.3 LandScan人口数据 2000—2015年LandScan高分辨率全球人口分布数据集 (30弧秒或赤道1000 m)由美国能源部橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 开发, 其人口分布模型的构建是根据各个国家和地区的数据条件和地理特征进行调整^[23]。LandScan是全球最为准确、可靠, 基于地理位置的、具有分布模型和最佳分辨率的全球人口动态统计分析数据库。图1b包含了2015年“一带一路”监测区域LandScan人口分布情况。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图2 2012年“一带一路”陆域NTL空间分布(a)和中国郑州市NTL信号空间分布(b)

Fig. 2 Spatial distribution of intercalibrated nighttime lights along the Belt and Road (a), and the distribution of intercalibrated nighttime lights in Zhengzhou, China (b)

3 研究方法

3.1 梯度分析

本文以中央商务区（CBD）中心作为城市中心，并使用梯度分析中同心环的圈层划分法将城市从市中心划分为一系列的同心环。利用2016年《城市扩张地图集》提供的CBD中心位置，生成一系列1 km等距的同心环，并选择一个外环作为城市边界，这个边界既包括具有连续城市功能的城市区域和城市的外环路，又应排除远离城市核心的小城市^[24]。图3展示了中国郑州市一系列1 km等距缓冲区和外边界。

3.2 城市用地密度分布反S函数

同心环内城市用地密度定义为城市用地占可建设面积（总土地面积减去水体面积）的比例。城市用地密度在核心区较高，从核心区向内城区、近郊区和边缘区递减。本文使用Jiao提出的城市用地密度分布反S函数来表征这种递减规律^[24]。公式为：

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

式中： f 表示城市用地密度； r 表示离城市中心的距离； e 指自然常数； α 、 c 和 D 是拟合参

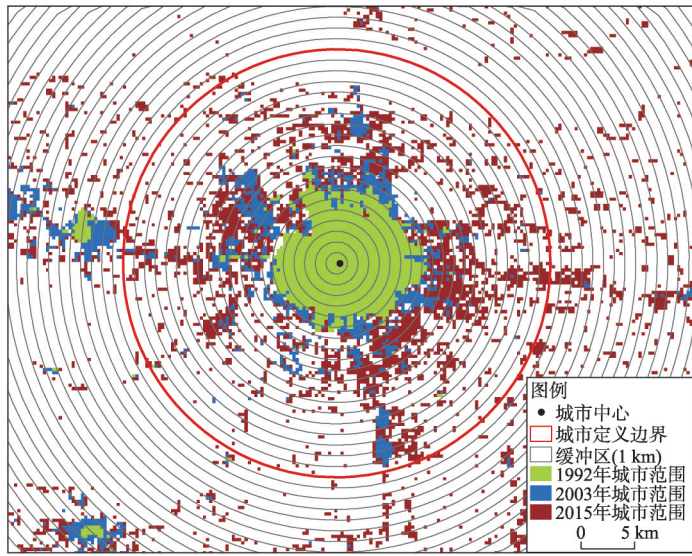


图3 中国郑州市1 km同心环圈层划分和城市用地空间分布

Fig. 3 Division of 1 km concentric ring layer and spatial distribution of urban land in Zhengzhou, China

数。参数 α 是控制城市用地密度函数曲线的斜率，参数 c 表征城市边界附近城市用地密度，参数 D 是对城市主城区半径的估计。城市用地密度函数曲线图及其导函数曲线图参照Jiao文献中的图4b和图6^[24]。

根据城市用地密度反S函数，可以得到拟合参数 α 、 c 和 D 的结果，从而可以推导得到各城市的 r_1 和 r_2 ^[24]。公式为：

$$r_1 = \frac{D}{2} \left(\frac{-1.316957}{\alpha} + 1 \right) \tag{2}$$

$$r_2 = \frac{D}{2} \left(\frac{1.316957}{\alpha} + 1 \right) \tag{3}$$

式中： r_1 表示城市核心区范围； r_2 为郊区半径。Jiao在此基础上提出指数 k_p 和 S_r ，分别用来衡量城市紧凑度和城市扩张程度^[24]。公式为：

$$k_p = \frac{r_2 - r_1}{D} = \frac{1.316957}{\alpha} \tag{4}$$

$$S_r = \frac{dr_2}{dr_1} = \frac{(r_2^i - r_2^{i-1})r_1^{i-1}}{r_2^{i-1}(r_1^i - r_1^{i-1})} \tag{5}$$

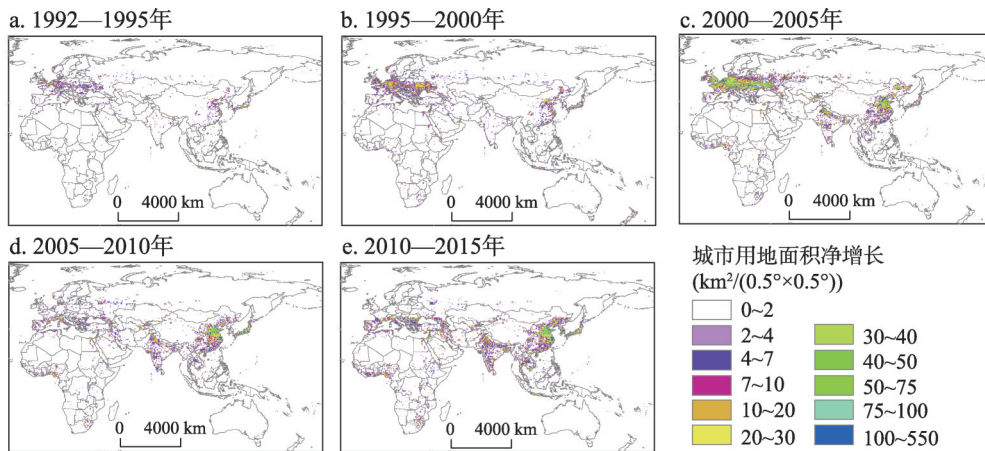
式中： k_p 的大小只与拟合参数 α 有关， k_p 值越小城市越紧凑； dr_1 和 dr_2 分别代表 r_1 和 r_2 的增长率； r_1^i 和 r_2^i 分别表示第 i 年城市核心区和郊区的半径； r_1^{i-1} 和 r_2^{i-1} 分别表示第 $i-1$ 年城市核心区和郊区的半径。

3.3 相关分析和回归分析

本文应用3个统计模型（线性模型、幂律模型和指数模型）来拟合夜间灯光信号对城市用地面积和城市用地面积对城市人口随时间推移的响应。线性模型 $y = a + bx$ 用以描述变量A对变量B的增加具有恒定比例的响应。幂律模型 $y = a + bx^c$ ($0 < c < 1$) 可用于量化变量A的动态，随着时间的推移，变量A对逐步增长的变量B的响应速率可能会逐渐降低。指数模型 $y = a + be^{cx}$ ($c > 0$) 用来量化变量A对变量B随着时间的推移响应速率会逐渐增长。

4 一带一路 陆域城市用地时空变化特征

由欧空局土地覆盖数据得到的城市范围的时空动态特征在不同的地理区域是不一样的(图4)。在“一带一路”监测区域内,城市用地面积占陆域土地总面积的比例从1992年的0.24%上升至2015年的0.56%,并且欧洲、中国和印度对城市用地面积的增加分别贡献了27.51%、30.15%和6.43%。在空间分布方面,1992—2015年城市用地面积增加集中分布在中东欧区、印度和中国的胡焕庸线^[25]东南侧,而俄罗斯的高纬度寒冷地区以及非洲北部的撒哈拉沙漠的广大地区相对变化较小。此外,欧洲区在2000—2005年城市扩张最为明显,但在2005年之后扩张缓慢,而印度和中国城市用地扩张趋势相反。图5描述了陆域十大分区城市用地的动态。整体来看,1992—2015年间东亚和欧洲城市用地的增长速度比其他区域更快。但就城市发展而言,非洲和亚洲的发展中国家似乎是“一带一路”陆域城市化的主要贡献者。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图4 1992—2015年“一带一路”陆域城市用地净增长

Fig. 4 Net increase in urban land along the Belt and Road from 1992 to 2015

5 城市扩张和形态变化特征比较分析

5.1 城市用地密度的距离衰减特征分析

为了定量研究各同心环内城市用地密度随市中心向外递减的规律,本文利用城市用地密度分布反S函数,基于Matlab软件,采用非线性最小二乘法拟合80个城市的城市用地密度。各城市3个时间点的散点图和拟合曲线如图6所示。该模型广泛适用于拟合“一带一路”80个典型城市用地密度,且所有 R^2 都在0.90以上。空间上,同心环内城市用地密度从城市中心向边缘区递减(图6)。时间上,从1992—2003年到2003—2015年,所有同心环内的城市用地密度均有所增加,表明所有城市均发生了持续的空间扩张。

城市用地密度函数的估计参数反映了不同规模城市化动态发展的时间变化和差异(图7)。参数 α 反映城市形态和变化, α 值越大表明城市形态越紧凑。整体来看,大中城市 α 值的中值大于小城市的,表明小城市的城市形态相对来说较分散。参数 α 的中值在3种规模的城市中均随着时间的推移而增加,但在大城市中不明显,表明大多数中小城市

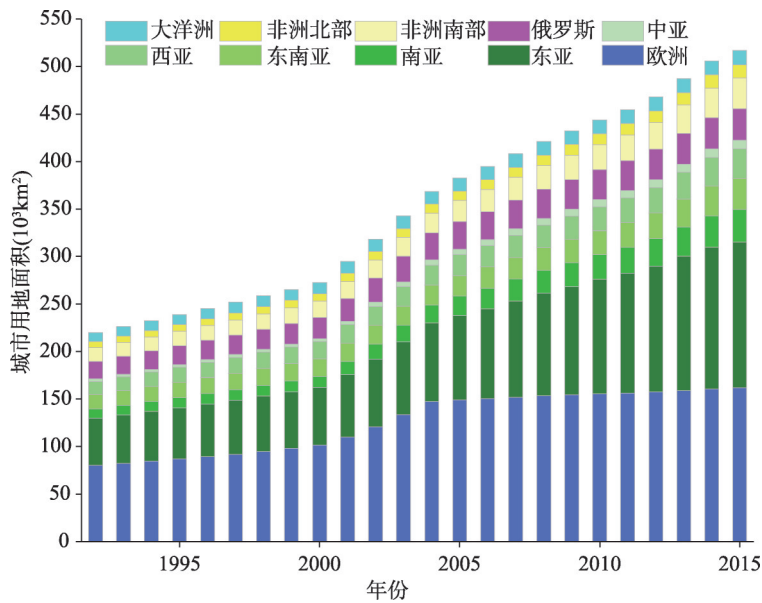


图5 1992—2015年十大分区城市用地面积年际变化

Fig. 5 Inter-annual changes of urban land area in the ten major sub-regions from 1992 to 2015

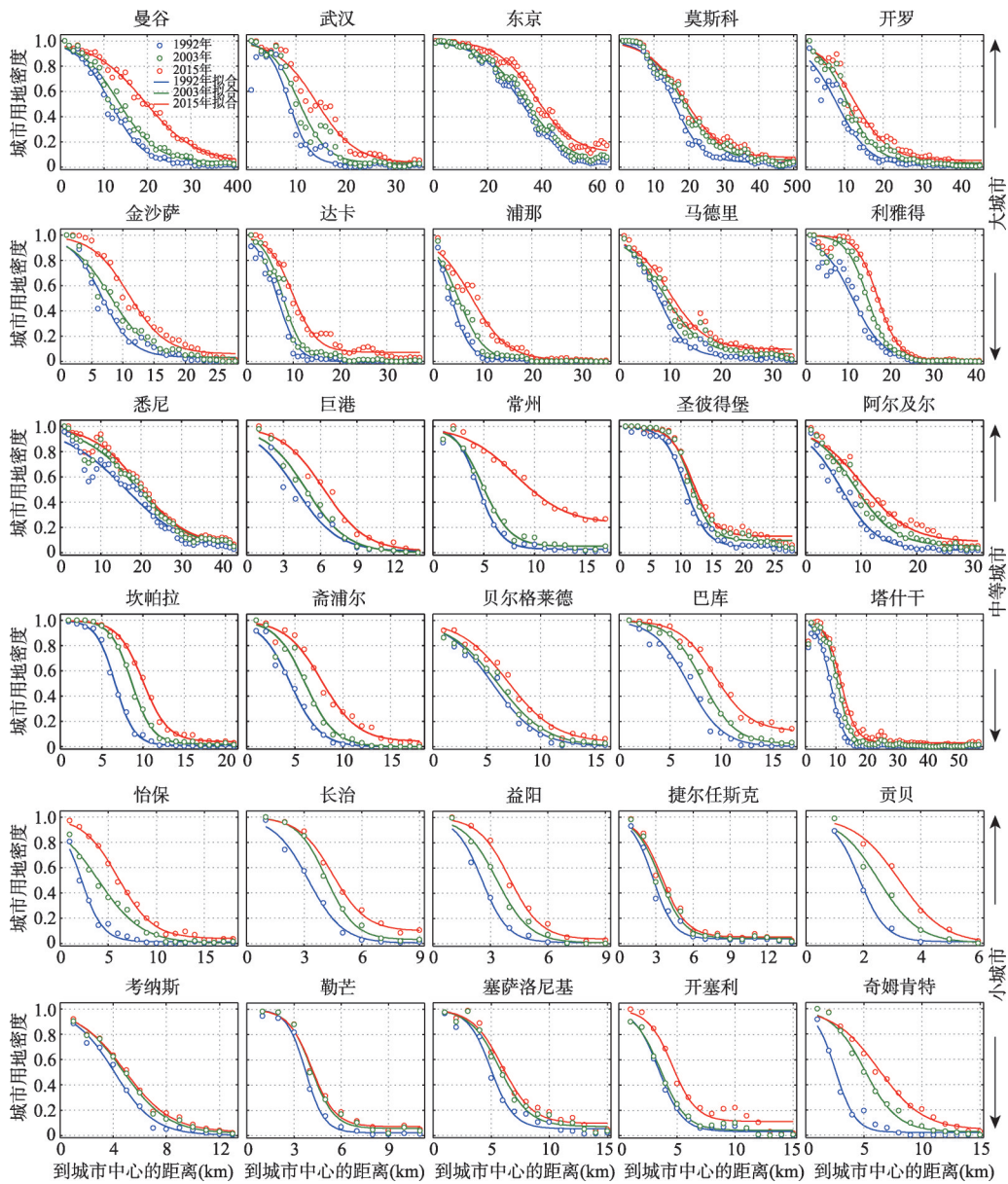
随着城市的扩张变得紧凑。参数 c 代表城市边界附近城市用地密度，且3种规模城市 c 值的中值随着时间的推移而增加。1992年大、中和小城市的主城区半径的平均值分别为21.056 km, 12.931 km和6.367 km, 而2015年分别为29.403 km, 17.534 km和9.005 km。

为了比较不同规模城市扩张和形态差异，将不同规模的城市用地密度取平均值后再进行城市用地密度函数拟合（图8）。大城市用地密度平均后的曲线最接近反“S”型，城市用地密度较高，在靠近城市中心的地方逐渐减小。然而，小城市反“S”型并不明显，城市用地密度呈线性下降趋势，直至达到稳定的城市用地密度。根据城市用地密度估计参数，计算不同规模城市核心区半径 r_1 ，内城区半径 r_0 和郊区半径 r_2 。可以发现，小城市的核心区半径不足3 km，内城区和郊区范围不足2 km，这反映出小城市仍处于城市发展的初级阶段。此外，大城市经历了更快的城市扩张，因为大城市用地密度平均值的拟合曲线之间的间隔更大。

5.2 不同地理分区城市扩张和形态变化比较分析

为了方便比较，选取了中国、欧洲、非洲、西亚、东南亚和印度6个地区人口数超过100万的城市进行聚集分析，即将不同地区各城市同心环内城市用地密度进行平均化，再进行城市用地密度函数拟合（图9）。通过比较可以发现中国城市用地密度函数距离衰减特征最符合反“S”型，而欧洲和东南亚地区城市用地密度函数拟合曲线经历了两个阶段的线性减少，非洲、印度和西亚城市用地密度函数拟合曲线经历了反“S”和一个阶段的线性减少，其中欧洲城市用地密度变化的规律已有研究表明^[26]。

城市用地密度的距离衰减规律反映了城市形态及其变化。总体而言，各地区城市形态变得紧凑，且2015年西亚城市的紧凑度最高。但是，2015年中国城市紧凑度较2003年分散。此外，相对于其他地区，2003—2015年12年期间欧洲城市用地密度拟合曲线的间隔很小，表明其城市用地扩张相对缓慢。中国和非洲城市同心环内的城市用地密度间隔较大，表明这两个地区的城市扩张相对较快。



注：图中仅列出30个典型城市，并且按照大、中和小城市的规模进行排列；不同规模的城市来自不同的地区或国家。

图6 1992年、2003年和2015年拟合的城市用地密度函数曲线图

Fig. 6 Fitting curves of urban land density functions in 1992, 2003 and 2015

5.3 沿线城市紧凑度对比分析

紧凑型城市的城市用地密度在核心区较高，在核心区周围急剧下降至极低值，并且其城市用地密度曲线陡峭，而蔓延型城市的城市用地密度曲线下降缓慢。为了比较不同城市规模紧凑度的时间变化和差异，计算各个城市郊区半径 r_2 与核心区半径 r_1 的差值与城市主城区半径 D 的比值 k_p ，即内城区和郊区所占城市范围的百分比，并按照不同城市规模和地区进行排序（图10）。大城市中，越来越分散的城市主要分布在中国，占所选中国大城市的3/4，Jiao也指出中国大多数的大城市扩张是分散的^[24]；而其他地区的大城

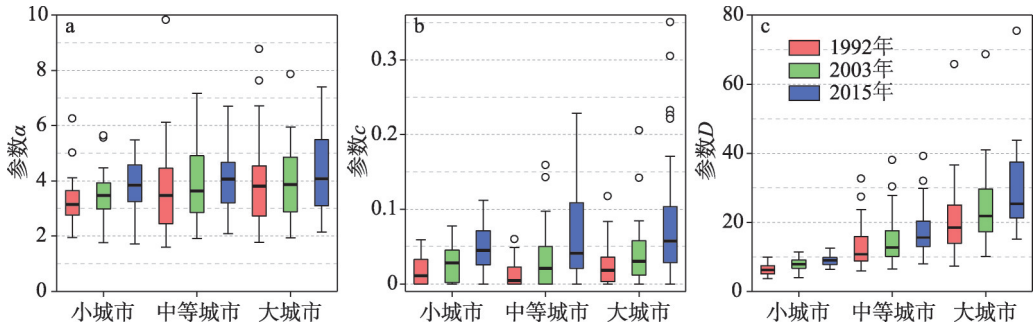


图7 1992年、2003年和2015年不同规模城市用地密度函数的拟合参数 α 、 c 和 D 的箱线图
 Fig. 7 Box-plots of fitting parameters α , c , and D of urban land density functions of different urban sizes in 1992, 2003 and 2015

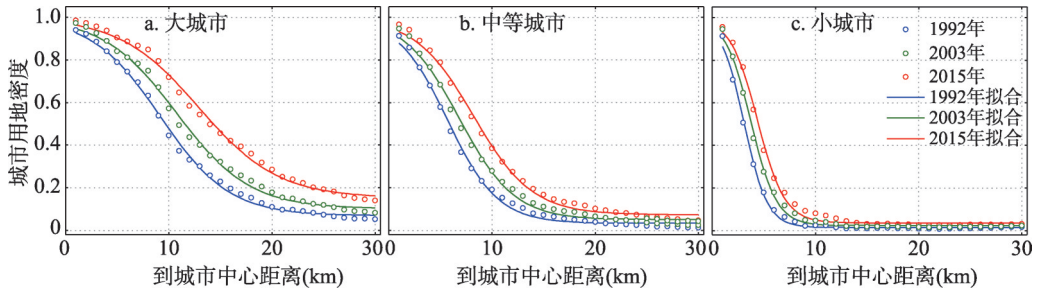


图8 “一带一路”沿线3个不同规模城市用地密度函数拟合曲线图
 Fig. 8 Fitting curves of urban land density functions of three different urban sizes along the Belt and Road

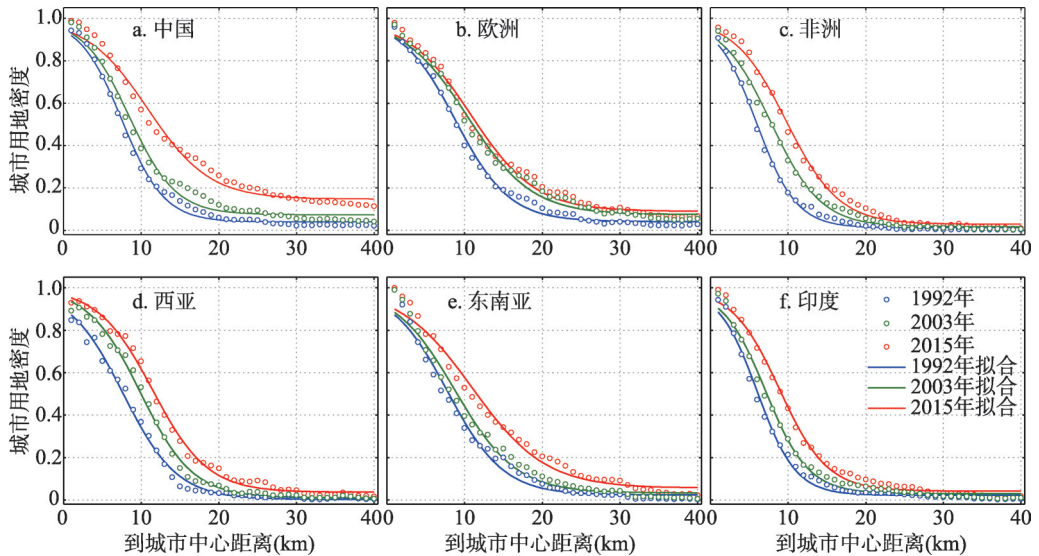


图9 “一带一路”沿线六大分区城市用地密度函数拟合曲线图
 Fig. 9 Fitting curves of urban land density functions in the six sub-regions along the Belt and Road

市大多变得紧凑, 约占“一带一路”所选大城市的2/3。大部分中小城市变得紧凑, 且非洲大中城市的紧凑型扩张特征与Xu等描述一致^[27]。

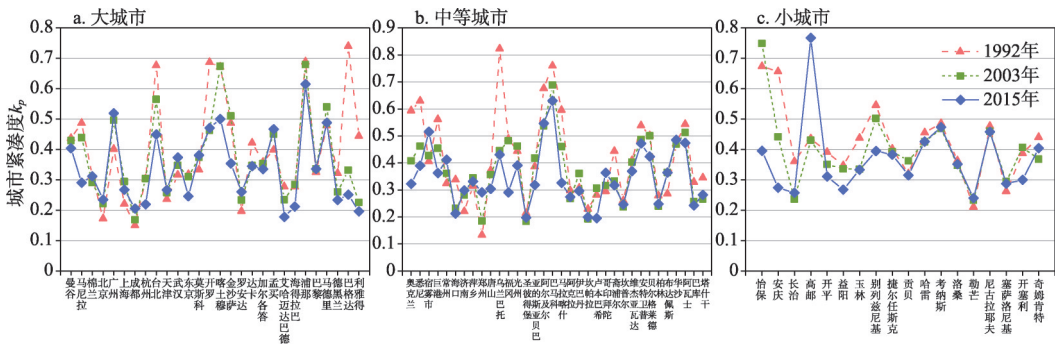


图10 1992年、2003年和2015年不同规模城市紧凑度 k_p 统计图
 Fig. 10 Statistics of k_p for different urban sizes in 1992, 2003 and 2015

5.4 沿线城市扩张速度对比分析

一个城市的城市扩张速度是由城市规模的增长率来反映的，通过研究城市主城区半径 D 这一参数的变化，我们可以比较各个城市的增长率。如图11所示，按照不同城市规模和地区进行排序。大城市中，城市扩张速度后12年大于前12年的城市占比约1/2，其中中国大城市占了2/5，说明中国大城市比其他地区的大城市扩张的快，且后12年处于快速扩张，城市经济发展迅速。欧洲城市巴黎后12年主城区半径增加不明显，这可能和经济发达程度以及人口规模有关。中等城市的扩张速度明显小于大城市，城市扩张速度后12年大于前12年的城市占44.12%。安特卫普、柏林和布达佩斯3个城市后12年并没有发生明显扩张，这可能主要归因于这3个城市都属于欧洲发达城市。小城市中，城市扩张速度后12年大于前12年的城市占比约1/3。整体来看，后12年主城区扩张不明显的城市主要位于欧洲发达国家。

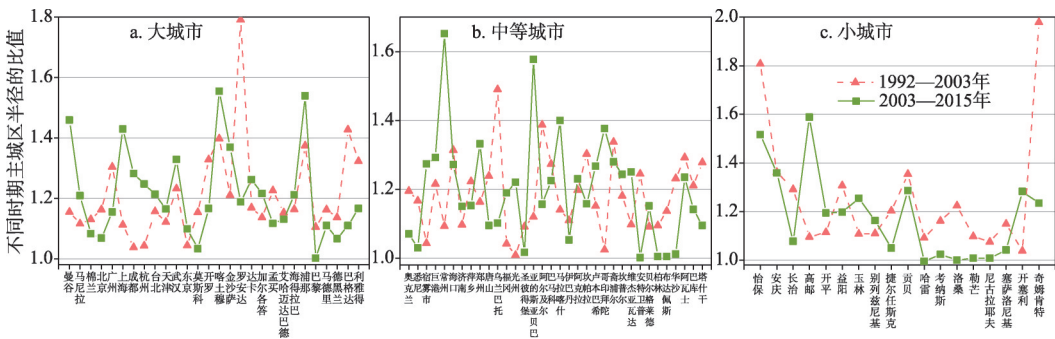


图11 1992—2003年和2003—2015年不同规模城市主城区范围变化
 Fig. 11 Changes of main urban areas of different urban sizes from 1992 to 2003 and 2003 to 2015

5.5 沿线城市扩张程度对比分析

通过计算某个时间跨度城市郊区增长率与核心区增长率的比值，可以推断城市扩张是分散型增长还是填充式增长。图12展示了用于说明3种不同规模城市扩张程度的二维散点图，个别城市没有包括在图中，因为它们的坐标超出了坐标轴的范围，它们的坐标在每个图中都有列出。对于对角线上方的城市，属于蔓延型城市，反之，对角线下方的城市属于紧凑型城市。远离原点且最靠近左上角的城市是增长最快、最无序的，而远离原点且靠近右下角的城市，城市核心区增长率较大，保持着紧凑的形状。对角线上下十

分接近的城市，既不属于蔓延型，也不属于紧凑型，但那些远离原点的城市扩张速度快于靠近原点的。

2003—2015年的12年间，大多数城市的发展较前12年扩张了许多。图10和图12都表明中国大多数的大中城市发展属于蔓延型，意味着在这24年中，大中城市总体上是在不断扩张的。中国小城市更倾向于紧凑型发展，主要表现为核心区增长，但长治在后12年表现为蔓延型发展。欧洲大城市在前12年表现为蔓延型发展，在后12年表现为紧凑型

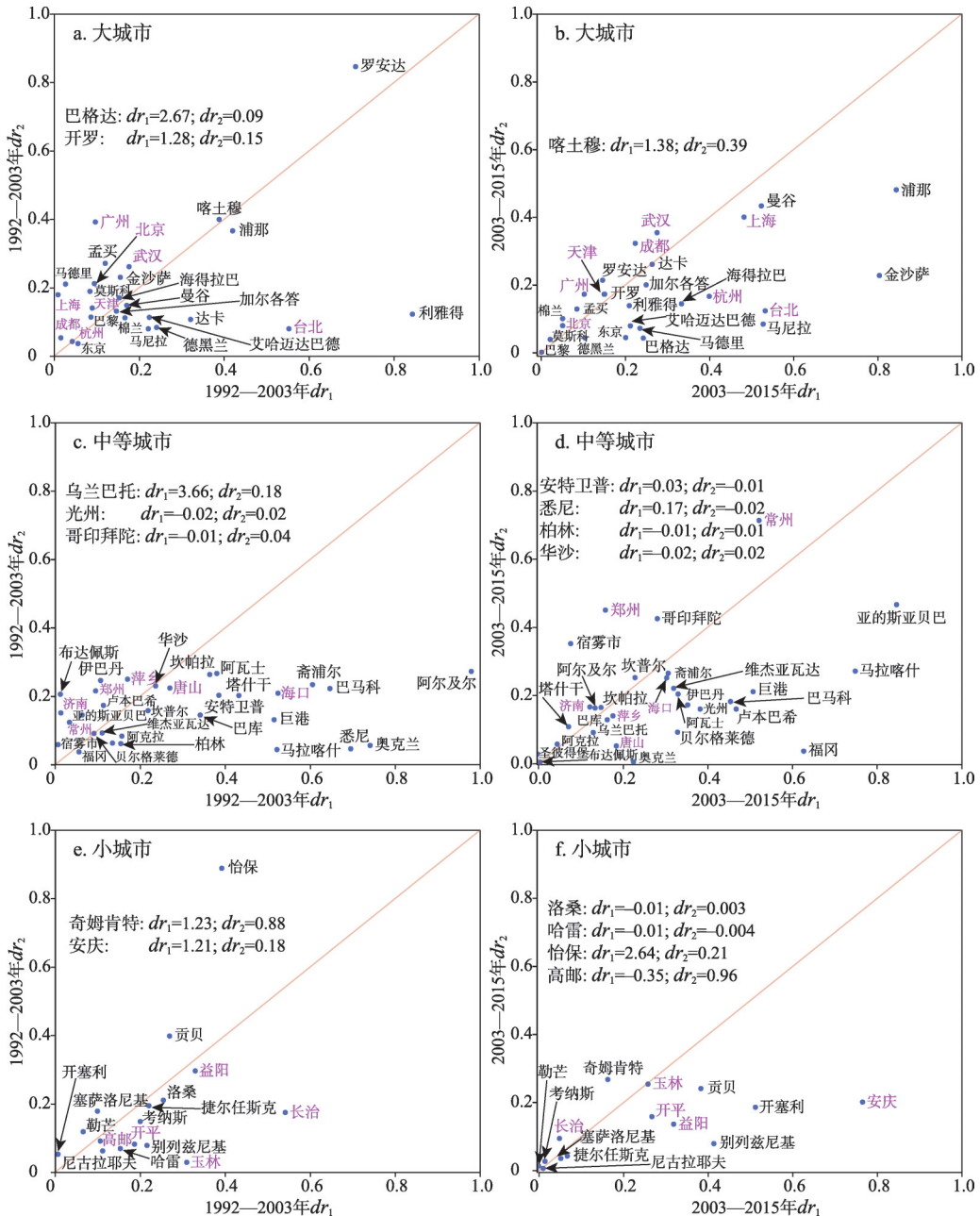


图12 1992—2003年和2003—2015年不同规模城市 r_2 和 r_1 增长率比较

Fig. 12 Comparison of the growth rates r_2 and r_1 for different urban sizes from 1992 to 2003 and 2003 to 2015

发展，且后12年巴黎发展十分缓慢；大部分中小城市是紧凑型发展，且后12年扩张缓慢。非洲大城市的发展较快，其中金沙萨和喀土穆在后12年转为紧凑型发展，罗安达在后12年转为慢速蔓延发展。非洲北部的大多数中等城市在24年中都表现为紧凑型发展，其中亚的斯亚贝巴和马拉喀什在后12年表现得更紧凑，而非洲南部的大多数中等城市的发展形态不明显，且发展较为缓慢。

6 讨论

6.1 城市用地面积与加权灯光面积的长期关系分析

城市扩张与DMSP/OLS影像的灯光面积有着直接的联系^[28]，夜间灯光面积及其变化能够反映城市区域社会经济发展现状和变化态势。本文通过计算各城市的加权灯光面积，来评估加权灯光面积与城市用地面积之间随时间变化的关系，用以考察夜间灯光信号是否协调、同步地响应城市用地的空间扩张。结果表明（表1），从1992年到2012年，“一带一路”陆域有71.25%以上的城市用地面积与加权灯光面积呈很强的正线性关系（ $R^2 > 0.5$ 和 $p < 0.01$ ）。这一结果可能意味着在过去24年里，“一带一路”陆域城市在扩张过程中，城市用地面积和夜间灯光信号都有类似的增长。

表1 “一带一路”沿线城市用地面积、城市人口和夜间灯光加权面积的统计回归分析

Tab. 1 Statistical regression analysis of urban land area, urban population and weighted lighting area along the Belt and Road

变量	N	拟合优度						最优拟合模型		
		线性模型		幂律模型		指数模型		LN	POW	EXP
		$R^2 > 0.5$	$R^2 < 0.5$	$R^2 > 0.5$	$R^2 < 0.5$	$R^2 > 0.5$	$R^2 < 0.5$			
NTL	80	57	23	64	16	65	15	16	14	50
城市人口	80	55	25	60	20	61	19	38	24	18

注：N：参与回归分析的城市数量；LN：线性模型；POW：幂律模型；EXP：指数模型；NTL：夜间灯光加权面积。

然而，对于个别城市而言，随着时间的推移，加权灯光面积对城市用地面积增加的响应模式可能会略有不同。浦那和亚的斯亚贝巴加权灯光面积的增速低于1992—2012年同时期城市用地面积的增速（分别为3.79:3.03倍和3.22:2.44倍，图13a、13b），这可能意味着经济发展跟不上城市扩张。但安庆，斋浦尔，益阳和开罗加权灯光面积和城市用地面积在1992—2012期间均呈现持续增长（分别为2.78:2.77倍、2.85:2.68倍、2.57:2.47倍和2.13:2.05倍，图13c~13f）。此外，加尔各答，喀土穆和阿尔及尔更适用于指数模型，表明这3个城市的加权灯光面积先缓慢增加，后快速增加，而此时城市用地扩张放缓（图13g~13f）。此外，中亚塔什干加权灯光面积和城市用地面积呈负相关关系（ $r = -0.51$ 和 $p < 0.05$ ），这可能和1991年乌兹别克斯坦独立后的一段时间内国内经济持续衰退有关。Raupova等指出1992—1995年乌兹别克斯坦改革初期，国内GDP明显减少，工农业发展受阻；2003—2011年虽然GDP增长明显，但国内物资消费水平（Domestic Material Consumption, DMC）与GDP明显脱钩^[29]。

6.2 城市用地面积与城市人口的长期关系分析

人口是评价城市化最常用的指标之一。以往的一些研究表明，不论在区域范围上^[30]还是全球范围^[31]，城市扩张最有可能与城市人口增长有关，且大部分呈正线性相关关系。结果表明城市人口和城市用地面积在时间序列上有很强的线性关系（表1、图14）。

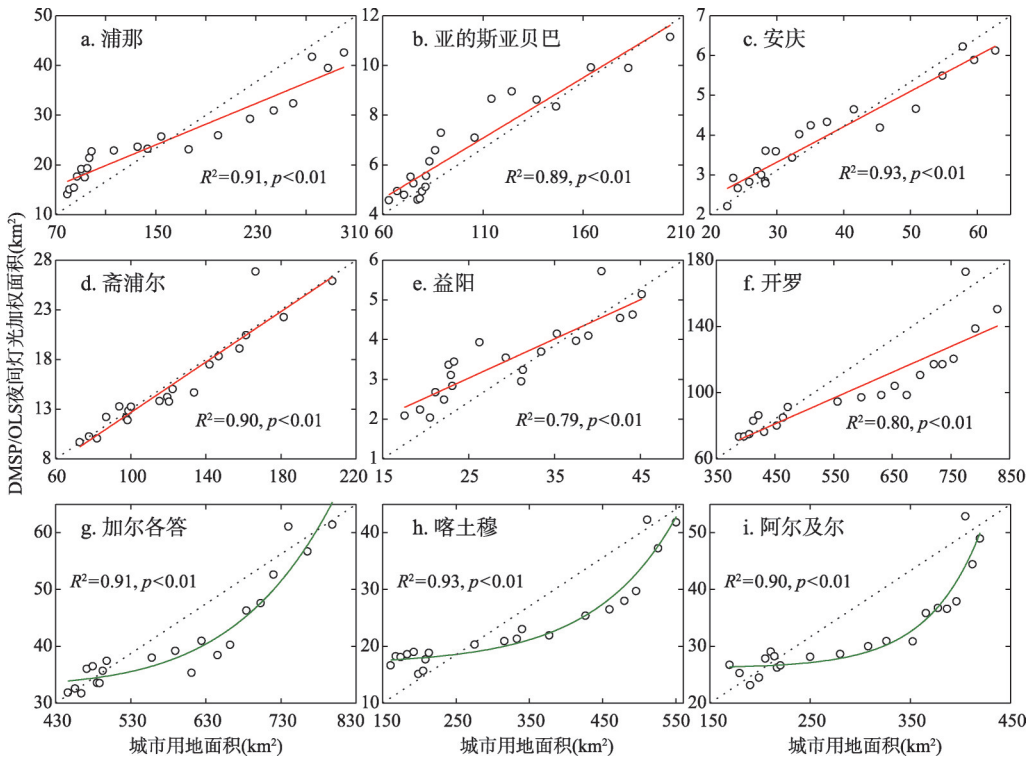


图13 “一带一路”沿线9个城市加权灯光面积与城市用地面积的统计关系

Fig. 13 Statistical relationship between the weighted lighting area and urban land area of 9 cities along the Belt and Road

“一带一路”沿线63.75%的城市显示城市人口与城市用地面积成正比 ($R^2 > 0.5$ 和 $p < 0.01$)。这表明城市人口和城市用地面积有着相似的时间趋势。例如，亚的斯亚贝巴城市用地面积 ($R^2 = 0.98$ 和 $p < 0.01$) 和城市人口 ($R^2 = 0.99$ 和 $p < 0.01$) 年增长符合稳定的指数模型，喀土穆的城市用地面积 ($R^2 = 0.99$ 和 $p < 0.01$) 和城市人口 ($R^2 = 0.88$ 和 $p < 0.01$) 都有明显的幂律增长。然而，2000—2015年“一带一路”沿线57.50%的城市，城市用地面积的增速明显超过城市人口的增速，即两个变量的增速比值大于1.3。例如，益阳城市用地面积增长了1.82倍，而城市人口增长了1.33倍，且两个变量之间的关系能够很好地被指数模型拟合 ($R^2 = 0.91$ 和 $p < 0.01$) (图14g)。这一结果可能意味着城市人口的增长并不是城市用地面积增长的主导因素，而存在其他城市变量驱动着城市用地面积的增长。例如，斋浦尔城市用地面积的增长符合指数模型 ($R^2 = 0.97$ 和 $p < 0.01$)，并且与加权灯光面积的增长有着一致的拟合模型 ($R^2 = 0.89$ 和 $p < 0.01$)，这意味着城市经济的活跃程度影响城市用地面积的扩张，而城市人口的增长符合线性模型 ($R^2 = 0.95$ 和 $p < 0.01$)。部分城市(12.50%)的人口和城市用地面积之间的关系符合幂律模型，例如巴马科，城市人口(符合线性模型， $R^2 = 0.95$ 和 $p < 0.01$)的增速(2.77倍)明显超过城市用地(符合幂律模型， $R^2 = 0.99$ 和 $p < 0.01$)的增速(2.14倍)。此外，圣彼得堡城市人口和城市用地面积之间的关系是负相关关系 ($R^2 = 0.82$ 和 $p < 0.01$) (图14f)，且城市用地面积的增长 ($R^2 = 0.99$ 和 $p < 0.01$) 和城市人口的减少 ($R^2 = 0.83$ 和 $p < 0.01$) 符合幂律模型。这可能意味着城市扩张和城市人口的减少都变得缓慢。相关研究也表明，自1992年以来，俄罗斯城市用地虽然在缓慢扩张，但城市人口总体减少^[32-33]。

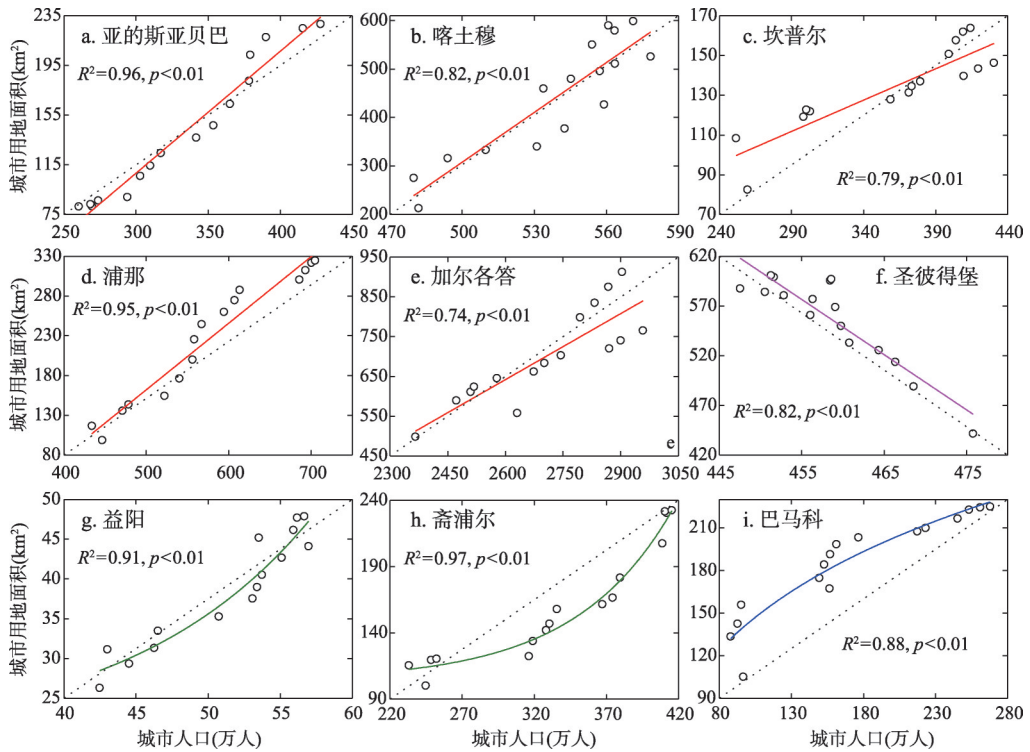


图14 “一带一路”沿线9个城市用地面积与城市人口的统计关系

Fig. 14 Statistical relationship between urban land area and urban population of 9 cities along the Belt and Road

6.3 不足之处

总体来说，ESA-CCI提供的土地覆盖数据集能很好地反映“一带一路”沿线地区城市扩张和形态变化特征，但300 m分辨率较为粗糙，难以精确衡量同心环内城市用地密度。随着国内外全球高精度城市不透水面提取研究的迅速发展，对于城市扩张特征的描述也更加精准。本文数据来源部分介绍了ESA-CCI提供的城市用地类别的用户精度高达88%，为了更好地说明该数据集及其研究结果的可靠性，将其与2020年清华大学宫鹏教授团队提供的1985—2018年30 m分辨率的全球不透水面（Global Artificial Impervious Area, GAIA）数据集进行比较^[34]。如图15所示，将选择的80个城市在3个时间点（1992年、2003年和2015年）上的ESA-CCI城市用地面积与GAIA城市不透水面面积进行比较， R^2 分别为0.82、0.90和0.91，且都符合统计学规律。结果表明，两种数据集的空间分

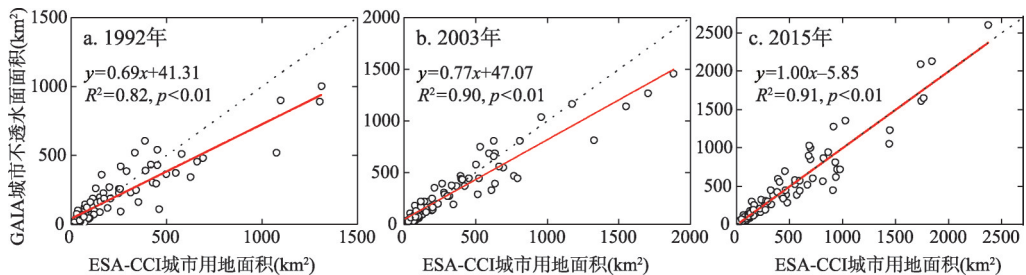


图15 1992年、2003年和2015年ESA-CCI和GAIA城市用地面积对比分析

Fig. 15 Comparative analysis of urban land area of ESA-CCI and GAIA in 1992, 2003 and 2015

辨率相差较大,但城市用地面积在不同时间点均具有良好的一致性,因此本文的研究结果可信度较高。

7 结论

“一带一路”沿线各国正在经历快速的城市化。本文对“一带一路”沿线城市用地增长空间格局及80个典型城市扩张和形态变化进行了全面分析。“一带一路”监测区域内,城市用地面积占陆域土地总面积的比例从1992年的0.24%上升至2015年的0.56%,并且欧洲、中国和印度对城市用地面积的增加分别贡献了27.51%、30.15%和6.43%。1992—2015年间,非洲和亚洲的发展中国家是“一带一路”监测区域城市化的主要贡献者。每个同心环内城市用地密度的时空变化反映了城市扩张过程和形态变化。“一带一路”沿线不同规模的城市有着独特的城市扩张和形态变化。小城市的城市用地密度较低,城市形态较为分散,仍处于城市发展的初级阶段,应纳入未来的城市规划中。比较中国、欧洲、非洲、西亚、东南亚和印度6个地区人口数超过100万的城市可知,中国城市和非洲城市的城市用地密度拟合曲线间隔较大,表明这两个地区的城市扩张相对较快。制定低碳城市化战略有助于实现沿线各国城市化的永续发展。1992—2015年间,大多数中国大城市的紧凑程度有所降低,变得更加分散。制定紧凑的增长政策有助于实现中国大城市的可持续化。大城市中,城市扩张速度后12年大于前12年的城市占比约1/2,其中中国大城市占了2/5,说明中国大城市比其他地区的大城市扩张的快,且后12年处于快速扩张,城市经济发展迅速;而欧洲城市后12年扩张速度缓慢。夜间灯光信号和城市人口能很好的协调、同步地响应城市用地的空间扩张,但对于个别城市而言,随着时间的推移,这种响应模式可能会略有不同。

本研究的结果为科研人员、政策制定者和决策者了解“一带一路”城市扩张和形态变化提供了依据。了解城市动态变化的地域性和复杂性,并充分认识和应用这项研究成果,将为可持续城市化提供更好的政策、规划和管理对策。

参考文献(References)

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [2] Mcdonald R I, Kareiva P, Forman R T T. The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1695-1703.
- [3] Shochat E, Warren P, Faeth S, et al. From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(4): 186-191.
- [4] Kamali M, Delkash M, Tajrishy M. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 43-53.
- [5] Vongdala N, Tran H D, Xuan T, et al. Heavy metal accumulation in water, soil, and plants of municipal solid waste landfill in Vientiane, Laos. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(1): 22.
- [6] Clinton N, Gong P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 294-304.
- [7] Wang S, Fang C, Wang Y, et al. Quantifying the relationship between urban development intensity and carbon dioxide emissions using a panel data analysis. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 121-131.
- [8] Seto K C, Sánchez-Rodríguez R, Fragkias M. The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 2010, 35: 167-194.
- [9] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html.

- [10] Seto K C, Guneralp B, Hutyrá L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [11] Xu X, Yeats R S, Yu G. Five short historical earthquake surface ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(2): 541-561.
- [12] Wang Qi'an, Shi Jiancheng, Liu Qinhuo, et al. Global ecosystems and environment observation analysis report cooperation (2017): The Belt and Road Initiative ecological and environmental conditions. [王琦安, 施建成, 柳钦火, 等. 全球生态环境遥感监测2017年度报告: “一带一路”生态环境状况. www.chinageoss.org/geoarc/2017/index.html.]
- [13] Gao Qian, Alimujiang Kasimu. Research on the urban expansion of Xinjiang in China, Central Asia and West Asia along the Belt and Road. *Economic Geography*, 2017, 37(5): 51-57. [高倩, 阿里木江·卡斯木. “一带一路”沿线之中国新疆—中亚—西亚城市空间扩张. *经济地理*, 2017, 37(05): 51-57.]
- [14] Pan T, Kuang W, Hamdi R, et al. City-level comparison of urban land-cover configurations from 2000-2015 across 65 countries within the Global Belt and Road. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1515.
- [15] Liu Weidong. Scientific understanding of the Belt and Road Initiative of China and related research themes. *Progress in Geography*, 2015, 34(5): 538-544. [刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题. *地理科学进展*, 2015, 34(5): 538-544.]
- [16] Angel S. Atlas of Urban Expansion, 2016 Edition. Volume 1: Areas and Densities. 2016. <http://www.atlasofurbanexpansion.org>.
- [17] ESA. Land Cover CCI Product User Guide Version 2.0. 2017. http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewerESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf.
- [18] Jansen L J M, Gregorio A D. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. FAO, 2000.
- [19] Ma T, Zhou C, Pei T, et al. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 99-107.
- [20] Shi K, Yu B, Huang Y, et al. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1705-1724.
- [21] Zhang Q, Pandey B, Seto K C. A robust method to generate a consistent time series from DMSP/OLS nighttime light data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 5821-5831.
- [22] Li X C, Zhou Y Y. A stepwise calibration of global DMSP/OLS stable nighttime light data (1992-2013). *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 637.
- [23] ORNL. High resolution global population data set. <https://landscan.ornl.gov/landscan-datasets>, 2000.
- [24] Jiao L M. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 26-39.
- [25] Hu Huanyong. The distribution of population in China, with statistics and maps. *Acta Geographica Sinica*, 1935, 2(2): 33-74. [胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图. *地理学报*, 1935, 2(2): 33-74.]
- [26] Guerois M, Pumain D. Built-up encroachment and the urban field: A comparison of forty European cities. *Environment and Planning*, 2008, 40(9): 2186-2203.
- [27] 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.
- [28] Zhang Q, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2320-2329.
- [29] Raupova O, Kamahara H, Goto N. Assessment of physical economy through economy-wide material flow analysis in developing Uzbekistan. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 89: 76-85.
- [30] Dewan A M, Yamaguchi Y. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 2009, 29(3): 390-401.
- [31] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 563(7732): E26-E26.
- [32] Bennett M M, Smith L C. Using multitemporal night-time lights data to compare regional development in Russia and China, 1992-2012. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5962-5991.
- [33] World Bank. "Russian Federation: Population, Total". 2016. <http://data.worldbank.org/country/russian-federation>.
- [34] Gong P, Li X, Wang J, et al. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510. Doi: 10.1016/j.rse.2019.111510.

Urban expansion and form changes along the Belt and Road Initiative

HAI Kai^{1,2}, WANG Siyuan^{1,3}, MA Yuanxu¹, YANG Ruixia¹,
TU Ping², LIANG Juanzhu², LIU Weihua¹, WU Linlin¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100094, China; 2. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 3. State Key laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: Although more and more people realize the important role of the urbanization process on the economic, political and environmental systems along the Belt and Road, the study on urban expansion and form changes is still limited. Based on the latest 300 m resolution global land cover dataset from 1992 to 2015 released by the ESA Climate Change Initiative project, DMSP/OLS night lighting data from 1992 to 2012, and LandScan population data from 2000 to 2015, in this paper we first analyzed the spatial pattern of urban land growth and dynamics in the ten major sub-regions along the Belt and Road from 1992 to 2015. Then, by analyzing the spatial and temporal changes of urban land density in concentric rings in 1992, 2003 and 2015, the expansion and form changes of 80 cities along the Belt and Road were quantified. Finally, the long-term relationships between urban land area, weighted lighting area and urban population were quantified by using three statistical models, including linear, power-law and exponential function models. The results show that the urban land area along the Belt and Road increased from 0.24% in 1992 to 0.56% in 2015, and developing countries in Africa and Asia are major contributors. The density of urban land in the concentric rings is decreasing from the city center to the urban fringe, and the spatial distribution between cities is completely different. Comparisons among cities in China, Europe, Africa, West Asia, Southeast Asia, and India with populations of more than one million, show that, in addition to the decentralization of China's urban form, the overall urban form of other sub-regions became compact. Further analysis results show that the urban economic vitality and urban population distribution trends will affect the urban spatial expansion and form changes at different levels.

Keywords: Belt and Road Initiative; urban expansion and form changes; concentric rings; urban land density