

城市夜间灯光强度空间衰减规律及应用

郑沐辰¹, 许刚^{1*}, 肖锐², 焦利民¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要:夜间灯光强度是城市社会经济活动强弱的直观表征,通常随到城市中心距离增加而逐渐降低。但其空间衰减过程是否可以量化、模型化,以及空间衰减规律关于城市形态的指示意义仍不明确。论文获取32个中国主要城市2012年和2020年NPP-VIIRS夜间灯光年度合成数据,以城市中心为圆心,计算同心圆圈层内平均夜光强度;受建设用地密度空间衰减函数启发,采用反S函数拟合城市夜间灯光强度空间衰减特征。结果表明:反S函数可以很好地拟合夜间灯光强度空间衰减特征,模型参数 D 和 α 的变化分别反映了城市扩张过程和形态变化。2012—2020年间,各城市半径(参数 D)增长到1.1~3.6倍;城市规模较小的长春、银川和西宁经历的夜光亮度增长幅度最大,而东部沿海城市增长幅度较小。参数 α 的变化说明中国主要城市由夜间灯光反映的空间形态趋于紧凑。反S函数为刻画夜间灯光强度空间衰减提供了新工具,为测度城市扩张和形态变化提供了新指标。

关键词:夜间灯光;城市扩张;梯度分析;反S函数;城市形态

随着城镇化的发展,城市人口不断增多,伴随而来的是城市空间迅速扩张^[1-4]。由于城市要素的空间集聚,城市空间结构表现出明显的“中心—边缘”特征^[5],即城市要素随到城市中心距离的增加而逐渐衰减,其中最典型的是城市人口密度的空间衰减,定量模型包括负指数模型^[6]、逆幂模型^[5]等。城镇化过程中,城市人口与土地利用变化密不可分^[7]。近年来,针对城市建设用地密度空间衰减特征, Jiao^[8]提出了反S函数模型,揭示了城市建设用地密度空间衰减规律。反S函数模型不仅对城市建设用地密度的拟合精度高,更重要的是模型参数具有明确的物理意义。反S函数不仅在中国城市适用,在全球多个国家的不同规模城市仍然适用^[9-10];反S函数不仅可以拟合建设用地密度空间衰减^[11],还可以拟合城市人口密度、路网密度、电子地图兴趣点(POI)密度的空间衰减特征^[12-14]。

夜间灯光数据为城市研究提供了新数据。相

较传统遥感影像,夜间灯光数据更能反映出人类的社会经济动态,提供城市多维空间信息^[15-17]。夜间灯光数据在分析城市空间结构^[18]、计算社会经济指标等领域都有广泛应用^[19-21]。城市规模、经济发展水平等与城市夜间灯光强度直接相关^[22]。现有夜间灯光数据在城市研究中的应用主要包括:城市边界提取^[23-25],结合城市扩张紧凑度、蔓延度、扩张强度等指标描述城市扩张时空变化格局^[26-27],通过数学统计分析等方法统计夜间灯光增量和演化特征^[28]等。此外,还有融合夜间灯光数据和其他遥感产品(植被指数等)的综合分析^[29-30]。

夜间灯光强度与城市建设用地密度相同,都与城市人口密度紧密相关。城市人口稠密地区,社会经济活动更活跃,夜间灯光亮度值也越大;人口稀疏,夜间灯光亮度值也更低。城市土地密度的反S函数模型对于夜间灯光数据是否适用,夜间灯光强度空间衰减规律反映了城市扩张及城市形态的何

收稿日期:2021-10-15;修订日期:2022-01-18。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0126800);国家社会科学基金项目(21CGL057);中国博士后科学基金项目(BX20190251, 2019M662699)。[Foundation: National Key Research and Development Project of China, No. 2019YFE0126800; National Social Science Foundation of China, No. 21CGL057; China Postdoctoral Science Foundation, No. BX20190251 and 2019M662699.]

第一作者简介:郑沐辰(2000—),女,硕士生,主要从事城市空间扩张研究。E-mail: zmchen@whu.edu.cn

*通信作者简介:许刚(1992—),男,博士,副研究员,主要从事城市化与土地利用变化研究。E-mail: xugang@whu.edu.cn

引用格式:郑沐辰,许刚,肖锐,等.城市夜间灯光强度空间衰减规律及应用[J].地理科学进展,2022,41(7):1251-1260.[Zheng Muchen, Xu Gang, Xiao Rui, et al. Distance decay of nighttime lights from urban centers and its application. Progress in Geography, 2022, 41(7): 1251-1260.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.07.009

种变化? 本文以中国32个主要城市为研究区,利用圈层梯度分析法和反S函数对2012年和2020年2期夜间灯光数据的空间衰减进行拟合,探究反S函数模型对于夜间灯光数据的适用性及其表征城市扩张过程的能力;还从城市扩张幅度和紧凑度方面分析和讨论2012—2020年间中国主要城市的城市扩张格局与形态变化,以期定量刻画城市空间扩张特征提供参考。

1 数据和方法

1.1 研究区域

本文选取中国32个主要城市作为研究样本,包括4个直辖市和28个省会城市,如图1所示。所选城市包括北京、上海、广州等超大型城市,武汉、成都、杭州等特大型城市,以及哈尔滨、兰州、西宁等大中型城市。所选城市处于不同发展阶段,具有不同的城市空间扩张特征,并且空间分布广泛。鉴于此,选取的研究样本对于分析中国不同区域城市扩张特征具有代表性。

1.2 数据及预处理

本文选取了2012年和2020年NPP-VIIRS年度合成夜间灯光数据。该数据来源于美国国家海洋

中心气象局(https://eogdata.mines.edu/nighttime_light/annual/v20/),影像空间分辨率约为500 m,已对云覆盖像元进行校正。本文针对火光、油气燃烧等不稳定光源及干扰噪声进行了预处理,以确保亮度值处于合理范围^[31]。采用城市行政边界线对所选研究区进行裁剪,其中2020年样本城市夜间灯光强度空间分布如图2所示。可以看出,城市中心的夜间灯光强度明显高于城市周边,各城市夜间灯光呈现的空间形态各异。

1.3 圈层梯度分析法

圈层梯度分析法是以城市中心为圆心构建系列缓冲区,统计缓冲区内平均夜间灯光亮度,最后分析夜间灯光亮度到城市中心距离的空间衰减特征^[32]。本文根据夜间灯光亮度空间分布以及城市路网放射中心确定城市中心位置。以城市中心为圆心向外生成1 km等间隔的多环缓冲区,一个圈层即为计算夜间灯光数据亮度均值的基本单元^[33]。图3为以成都市为例建立的一系列缓冲区。

同心环内的夜间灯光亮度均值定义为圈层内夜间灯光亮度值总和与圈层面积之比。本文以2020年城市夜间灯光影像为基准选择城市预设边界,并对各城市2012年和2020年的圈层夜间灯光亮度均值进行离差标准化处理,使夜间灯光数据线



注:此图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4632号的标准地图制作,底图无修改。

图1 样本城市空间分布

Fig.1 Spatial distributions of the 32 sample Chinese cities

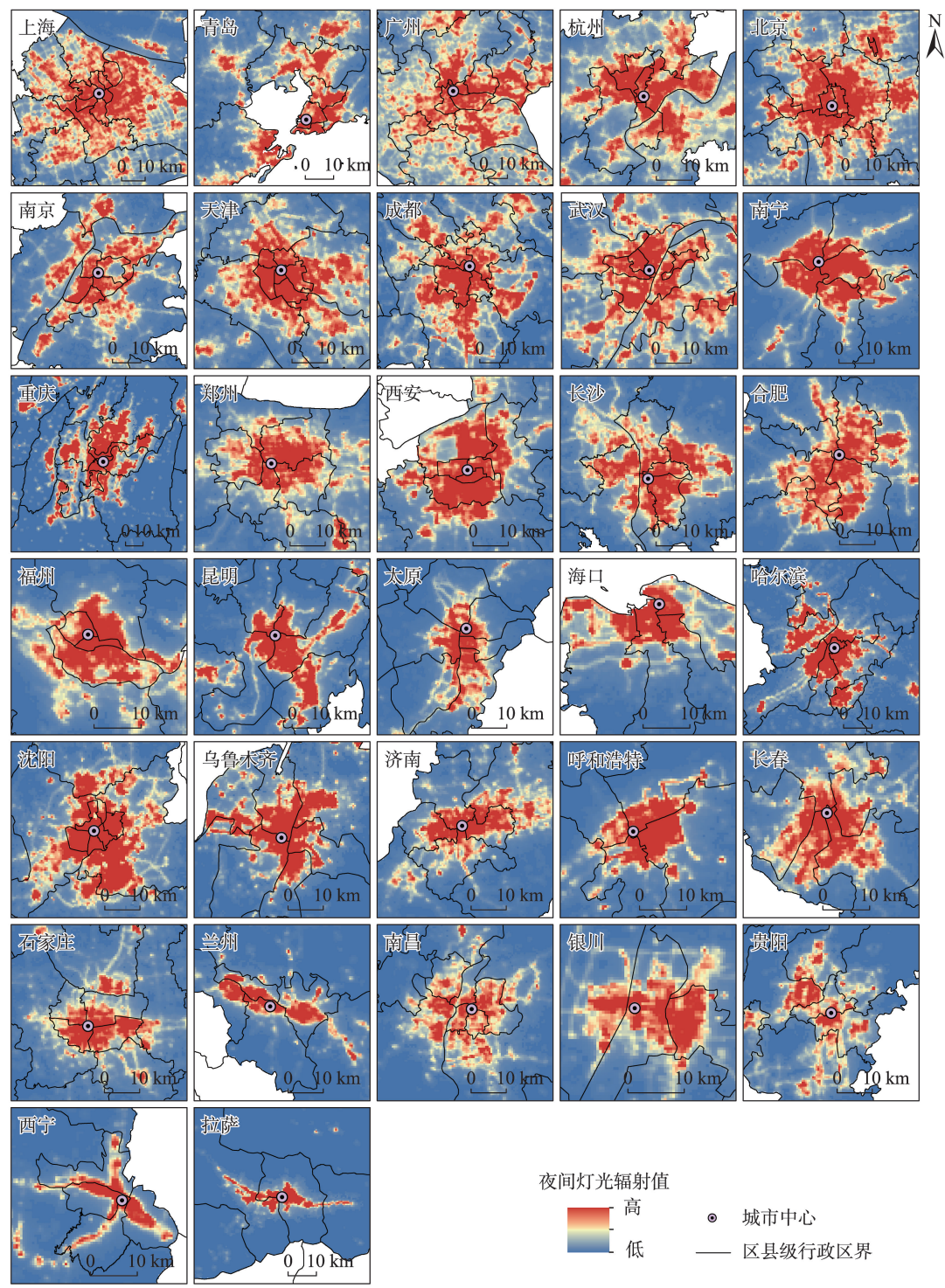


图2 32个城市2020年夜间灯光辐射值空间分布

Fig.2 Spatial distributions of nighttime lights in the 32 sample cities in 2020

性映射到0~1之间。夜间灯光数据归一化公式为：

$$DN_i' = \frac{DN_i - DN_{\min}}{DN_{\max} - DN_{\min}} \quad (1)$$

式中： DN_i 为从城市中心起第*i*个圈层的夜间灯光

亮度均值， DN_i' 为标准化处理后*i*个圈层的夜间灯光亮度均值； DN_{\min} 为2期夜间灯光影像中圈层夜间灯光亮度均值的最小值， DN_{\max} 为2期影像中圈层夜间灯光亮度均值的最大值。

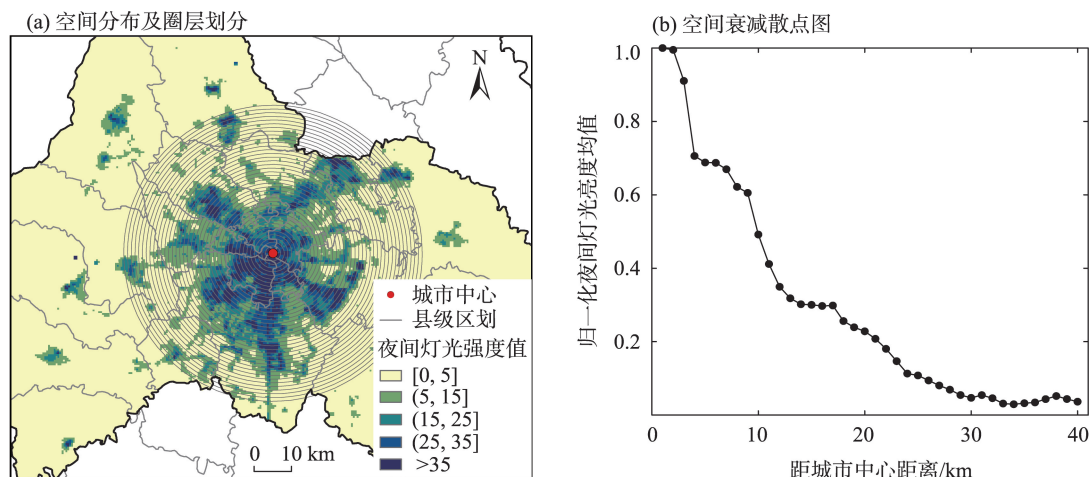


图3 成都市2020年夜间灯光空间分布及圈层划分(a)和归一化夜间灯光亮度均值的空间衰减(b)

Fig.3 Spatial distributions of nighttime lights (a) and distance decay (b) in Chengdu City in 2020

由成都市2020年圈层归一化夜间灯光亮度值随到城市中心距离的衰减特征可以看出:城市夜间灯光亮度值在城市核心区最高,随着向四周的距离增加,夜间灯光强度先缓慢衰减,然后快速衰减,再次缓慢衰减,最终在城市边缘区趋于0,其衰减曲线呈现“反S”形态(图3b)。

1.4 反S函数

有研究在分析城市建设用地密度到城市中心距离的衰减规律基础上提出了反S函数模型^[8,34]。本文利用反S函数对32个样本城市的夜间灯光强度空间衰减特征进行拟合。反S函数表达式如式(2)所示,函数图像如图4所示:

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

式中: $f(r)$ 为夜间灯光强度均值; r 为到城市中心的距离; e 为自然常数; α 、 c 和 D 为拟合参数。其中参数 α 控制反S函数曲线斜率,参数 α 越大,曲线衰减越快,城市形态越紧凑^[34]; 参数 c 为城市边缘处的夜间灯光强度值,参数 D 为城市半径(图4)。反S函数及参数含义的详细推导过程见文献[8]。

2 结果与分析

2.1 夜间灯光强度衰减特征与拟合

中国主要城市夜间灯光强度空间衰减特征如图5所示。随着到城市中心距离的增加,夜间灯光强度逐渐衰减,在城市边界处降至最低。本文利用非线性最小二乘法对32个城市的同心环内夜间灯

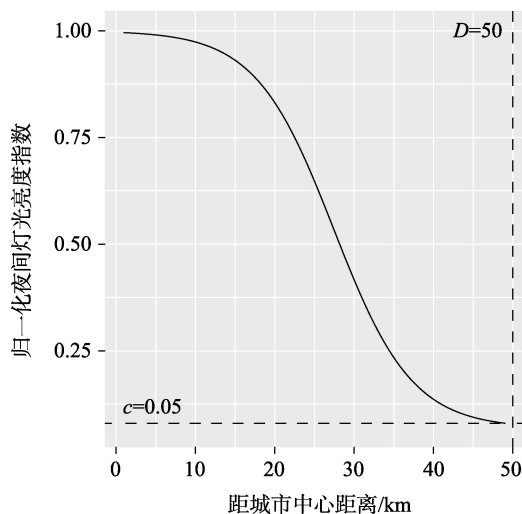


图4 反S函数图像

Fig.4 The inversed-S function

光强度均值进行反S模型拟合,得到的拟合曲线如图5所示,各城市的拟合参数结果如表1所示。

从拟合曲线形态来看,夜间灯光强度的空间衰减普遍呈现先缓慢衰减、再快速衰减、最后缓慢衰减的“反S”形态(图5)。相对于2020年,各城市2012年中心区域缓慢衰减区间较短。2020年大部分城市拟合曲线“反S”形态完整,城市核心区出现明显的平缓特征。两期夜间灯光数据拟合曲线之间间隔越大,则该城市在2012—2020年间夜间灯光强度增长幅度更大。由表1可以看出,反S函数具有很好的拟合结果,所有城市的 R^2 均在0.90以上。① α 值反映城市形态紧凑度, α 值越大,形态更加紧凑。样本城市在2个时点的 α 值的取值范围在

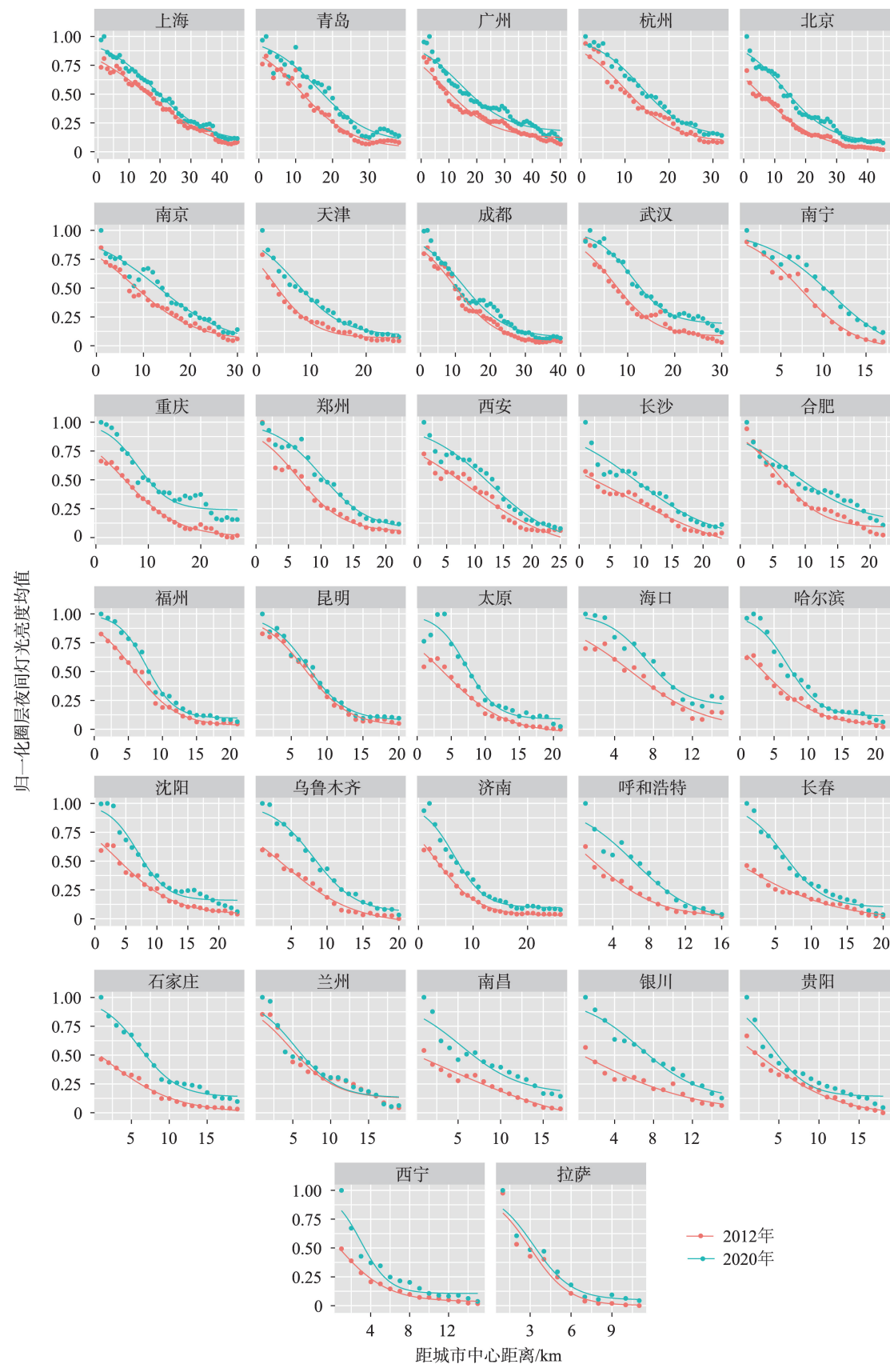


图5 中国32个主要城市夜间灯光亮度空间衰减特征及反S函数拟合曲线

Fig.5 Distance decay of nighttime lights and fitting curves using the inversed-S function in 32 major cities in China

表1 各城市反S函数拟合参数
Tab.1 Parameters of the inversed-s function for the sample cities

城市	2012年				2020年			
	α	c	D/km	R^2	α	c	D/km	R^2
上海	2.26	0.02	63.59	0.995	2.95	0.08	70.71	0.992
青岛	1.55	0.03	43.96	0.989	2.29	0.08	63.05	0.971
广州	0.88	0.12	31.03	0.981	1.57	0.07	54.25	0.971
杭州	1.69	0.09	38.03	0.985	2.51	0.13	52.27	0.992
北京	2.51	0	39.09	0.995	2.70	0.05	52.18	0.985
南京	1.13	0.04	29.75	0.989	1.68	0.01	50.77	0.973
天津	0.74	0.02	30.82	0.989	1.51	0.05	46.28	0.981
成都	1.53	0.03	37.31	0.992	1.80	0.07	45.54	0.977
武汉	1.49	0.08	26.43	0.987	2.71	0.09	41.66	0.991
南宁	2.13	0.04	27.78	0.989	2.71	0.05	39.16	0.994
重庆	0.96	0.01	29.86	0.997	2.41	0.04	38.92	0.967
郑州	1.69	0.05	23.56	0.982	2.66	0.07	38.38	0.988
西安	0.73	0.05	21.04	0.986	1.54	0.04	38.06	0.977
长沙	1.56	0.04	24.83	0.989	2.38	0.03	35.25	0.953
合肥	1.59	0.08	20.04	0.980	1.39	0.12	29.76	0.971
福州	1.67	0.03	21.18	0.996	2.47	0.10	28.55	0.995
昆明	1.12	0.03	25.92	0.996	1.73	0.08	27.15	0.993
太原	1.02	0.03	14.34	0.992	2.09	0.09	27.03	0.969
海口	1.34	0	20.80	0.986	1.79	0.20	26.75	0.982
哈尔滨	0.66	0.03	10.64	0.996	1.76	0.12	25.91	0.982
沈阳	0.68	0.04	12.55	0.995	2.70	0.16	25.63	0.978
乌鲁木齐	0.66	0.04	13.19	0.996	2.61	0.06	24.58	0.992
济南	0.68	0.03	10.49	0.998	2.15	0.10	24.07	0.986
呼和浩特	0.56	0.01	7.14	0.994	1.77	0.02	23.52	0.964
长春	0.83	0.05	6.48	0.996	2.13	0.10	23.02	0.979
石家庄	1.07	0	11.29	0.997	2.19	0.14	22.21	0.988
兰州	1.39	0.12	16.76	0.968	1.81	0.13	19.66	0.953
南昌	0.77	0.09	9.75	0.990	1.39	0.16	19.36	0.935
银川	0.75	0.09	5.07	0.995	2.08	0.04	16.11	0.983
贵阳	0.44	0.02	8.62	0.989	1.54	0.04	14.33	0.951
西宁	0.72	0.02	4.21	0.996	2.01	0.09	12.97	0.962
拉萨	0.75	0	10.00	0.968	1.94	0.05	10.97	0.971

0.44~2.95之间。② c 值为城市边缘腹地处的夜间灯光强度值,一般 c 值小于0.2。③ D 值为城市半径,各样本城市的城市半径在2012—2020年间都呈现出不同程度的增长。

2.2 城市扩张过程与形态变化

本文根据各城市参数 D (城市半径)来判断各城市的扩张过程。2012年和2020年各城市拟合半径如图6所示,各城市城区半径都有不同程度的扩张,增长倍数在1.1~3.6倍之间,其中以长春、呼和浩

特、银川、西宁4个城市扩张幅度最为明显。

北京、上海为超大型城市,其半径增长速率较低。广州虽然也属超大型城市,但因其受地理位置因素影响,形成了沿江发展、顺山延伸的分散型城市格局,实体城市范围与佛山相融合,并不是严格按照城市中心扩张,因此城市半径增长幅度较大。杭州、武汉、南京等特大型城市可利用未建设土地密度比北京、上海更高,较西部城市具有更好的经济发展基础,2020年城市半径增长至2012年的1.5

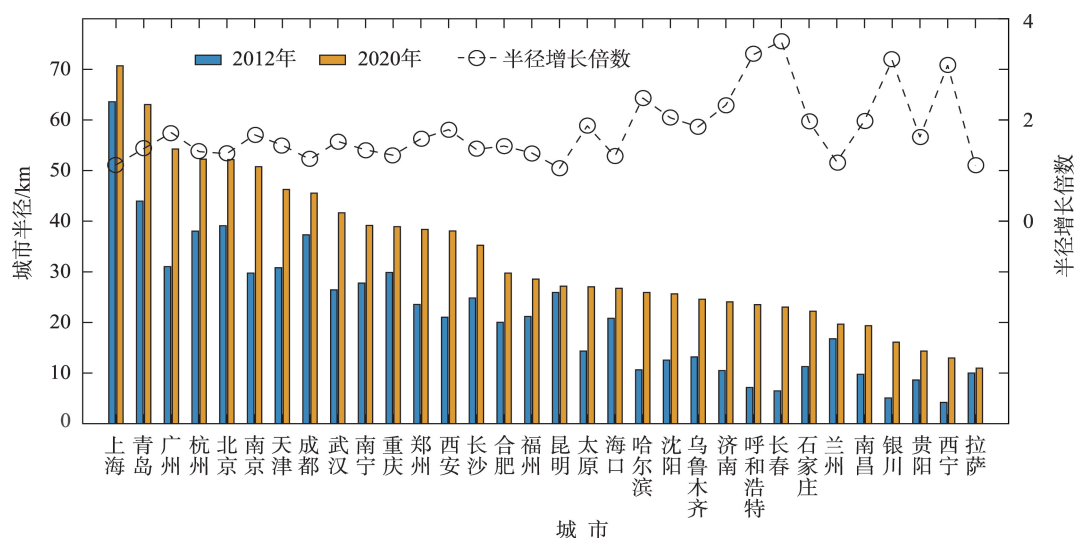


图6 2012年与2020年各城市半径对比

Fig.6 Comparison of the radius of the sample cities in 2012 and 2020

倍左右。西部和东北部城市在近几年发展尤为迅速,由于城市半径基数小,可发展空间大,城市半径增长幅度大,速度快。

参数 α 反映了城市紧凑度及其变化。2期拟合参数 α 如图7所示,图中以1:1直线为基准衡量城市形态是否变得更加紧凑,如在1:1直线右边,说明参数 α 减小,城市紧凑度降低,城市变得蔓延;反之则变为更加紧凑。直线 $y=1.78x$ 为所有城市紧凑度变化的均值线,距离该直线越近,则该城市紧凑度变化越接近平均水平。除合肥外,其余31个城市的

紧凑度都呈现不同程度增长。从同一年份来看,2012年各城市紧凑度跨度范围大,紧凑程度参差不齐;2020年各城市之间紧凑度差异减小,城市紧凑度水平趋于一致。北京、上海等超大型城市由于城市核心区极高的社会经济活动强度,相比于其他城市一直保持着较高的紧凑度。西部和东北部城市普遍分布在直线 $y=1.78x$ 左侧,城市紧凑度增长最为明显。这些城市在2012年参数值很小,相比其他城市呈现蔓延状态,2020年参数值约在2.0左右,增长近1倍,城市紧凑度增长幅度最大,但与其他大部分东部城市相比还有一定差距。

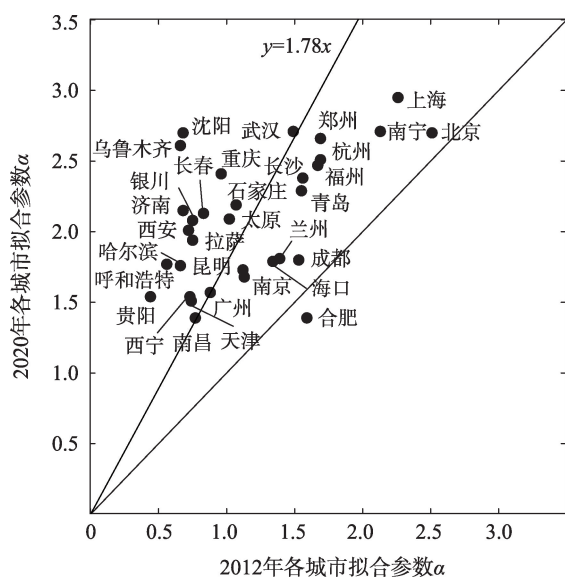


图7 2012年与2020年各城市紧凑度对比

Fig.7 Comparison of compactness of the sample cities in 2012 and 2020

3 结论与讨论

3.1 结论

本文采用反S函数模型揭示了城市夜间灯光强度空间衰减规律,并讨论了其在测度城市扩张过程和形态变化的应用。主要结论如下:

(1) 城市夜间灯光强度随到城市中心距离增加而逐渐衰减,其衰减特征表现为先缓慢衰减,后快速衰减,再缓慢衰减,整体呈现反S型变化。反S函数可以很好地拟合夜间灯光强度空间衰减过程,拟合优度(R^2)在0.9以上。

(2) 反S函数模型参数 D 和 α 的变化分别反映了城市扩张过程和形态变化。2012—2020年间,各城市半径(参数 D)增长到1.1~3.6倍;城市规模较小的呼和浩特和长春经历的夜间灯光增长幅度最大,而

东部沿海城市城市增长幅度较小。参数 α 的变化说明中国主要城市由夜间灯光反映的空间形态趋于紧凑。反S函数为刻画夜间灯光强度空间衰减提供了新工具,为测度城市扩张和形态变化提供了新指标。

3.2 讨论

城市土地扩张最直接的是建成区面积不断扩大,也即城市半径的增长。在建成区面积和城市半径增长的同时,城市形态也会变化,变得更加紧凑或松散;这可用紧凑度来衡量。本文采用夜间灯光数据,基于反S函数模型测度中国主要城市2012—2020年城市空间扩张特征及变化,拟合得到的参数 D 和 α 分别反映了城市半径和紧凑度。2012—2020年间,中国主要城市在空间上均有拓展,这直接反映在城市半径的普遍增长;由参数 α 表征的城市形态普遍变得更加紧凑,这说明过去近10年间由夜间灯光反映的城市社会空间集聚效应更加明显。夜间灯光强度空间衰减规律为分析城市扩张过程和形态变化提供了新视角。

本文亦存在不足。夜间灯光强度和城市建设用地密度具有相近的衰减特征,但由于夜间灯光的集聚效应更加明显,其空间衰减更快。后续研究可以对比夜间灯光和城市建设用地密度的“反S”衰减特征,探讨城市社会经济活动和物理空间的集聚效应的差异。此外,本文只选择了单一的城市主中心,未来可针对城市主、副中心建立多中心模型^[35],进一步探究城市要素的空间集聚和距离衰减效应。

参考文献(References)

- [1] Angel S, Parent J, Civco D L, et al. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050 [J]. *Progress in Planning*, 2011, 75 (2): 53–107.
- [2] 焦利民, 刘耀林. 可持续城市化与国土空间优化 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(1): 1–11. [Jiao Limin, Liu Yaolin. Sustainable urbanization and territorial spatial optimization. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 1–11.]
- [3] 许刚, 肖锐. 我国土地城镇化与人口城镇化的趋势与问题 [J]. *中国土地*, 2021(9): 11–13. [Xu Gang, Xiao Rui. Trends and problems of China's land urbanization and population urbanization. *China Land*, 2021(9): 11–13.]
- [4] Kuang W H. 70 years of urban expansion across China: Trajectory, pattern, and national policies [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(23): 1970–1974.
- [5] Batty M, Sik Kim K. Form follows function: Reformulating urban population density functions [J]. *Urban Studies*, 1992, 29(7): 1043–1069.
- [6] Clark C. Urban population densities [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series A (General)*, 1951, 114 (4): 490–496.
- [7] 朱凤凯, 张凤荣, 李灿, 等. 1993—2008年中国土地与人口城市化协调度及区域差异 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(5): 647–656. [Zhu Fengkai, Zhang Fengrong, Li Can, et al. Coordination and regional difference of urban land expansion and demographic urbanization in China during 1993–2008. *Progress in Geography*, 2014, 33(5): 647–656.]
- [8] Jiao L M. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 26–39.
- [9] 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 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 802–810.
- [10] Xu G, Jiao L M, Liu J F, et al. Understanding urban expansion combining macro patterns and micro dynamics in three Southeast Asian megacities [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 375–383.
- [11] 焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式 [J]. *地理学报*, 2017, 72(8): 1432–1443. [Jiao Limin, Li Zehui, Xu Gang, et al. The characteristics and patterns of spatially aggregated elements in urban areas of Wuhan. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (8): 1432–1443.]
- [12] Bonafoni S, Keeratikasikorn C. Land surface temperature and urban density: Multiyear modeling and relationship analysis using MODIS and landsat data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1471. doi: 10.3390/rs10091471.
- [13] Govind N R, Ramesh H. Exploring the relationship between LST and land cover of Bengaluru by concentric ring approach [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192: 650. doi: 10.1007/s10661-020-08601-x.
- [14] Shukla A, Jain K, Ramsankaran R, et al. Understanding the macro-micro dynamics of urban densification: A case study of different sized Indian cities [J]. *Land Use Policy*, 2021, 107: 105469. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105469.
- [15] Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, et al. The Night Light Development Index (NLDI): A spatially explicit measure of human development from satellite data [J]. *Social Geography*, 2012, 7: 23–35.
- [16] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1475–1484. [Chen Qian, Ding Mingjun, Yang Xuchao, et

- al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta region, China. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11): 1475-1484.]
- [17] Shi K F, Chen Y, Yu B L, et al. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 450-463.
- [18] 于丙辰, 刘玉轩, 陈刚. 基于夜光遥感与POI数据空间耦合关系的南海港口城市空间结构研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(6): 854-861. [Yu Bingchen, Liu Yuxuan, Chen Gang. Urban spatial structure of port city in South China Sea based on spatial coupling between nighttime light data and POI. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(6): 854-861.]
- [19] 余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 等. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 342-364. [Yu Bailang, Wang Congxiao, Gong Wenkang, et al. Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 342-364.]
- [20] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(6): 591-601. [Li Deren, Li Xi. An overview on data mining of nighttime light remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 591-601.]
- [21] 刘冰洁, 陈佐旗, 余柏菡, 等. 夜间灯光遥感对城市发展类动能与相似性评估 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(5): 1187-1200. [Liu Bingjie, Chen Zuoqi, Yu Bolang, et al. Kinetic energy assessment and similarity analysis of urban development based on NPP-VIIRS nighttime light remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(5): 1187-1200.]
- [22] 岳文泽, 吴桐, 刘学, 等. 中国大城市蔓延指数的开发 [J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2730-2743. [Yue Wenze, Wu Tong, Liu Xue, et al. Developing an urban sprawl index for China's mega-cities. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2730-2743.]
- [23] Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al. A technique for using composite DMSP/OLS "city lights" satellite data to map urban area [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(3): 361-370.
- [24] 何春阳, 李景刚, 陈晋, 等. 基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程 [J]. *地理学报*, 2005, 60(3): 409-417. [He Chunyang, Li Jinggang, Chen Jin, et al. The urbanization model and process in Bohai Sea surrounding area in the 1990s by using DMSP/OLS data. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 409-417.]
- [25] 刘源, 李月臣. 基于夜间灯光数据的城市中心区域提取与分析: 以重庆市主城区为例 [J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(3): 160-164. [Liu Yuan, Li Yuechen. Urban centers extraction and analysis using night time light date: A case study of main urban areas of Chongqing. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(3): 160-164.]
- [26] 刘沁萍, 杨永春, 付冬暇, 等. 基于DMSP_OLS灯光数据的1992—2010年中国城市空间扩张研究 [J]. *地理科学*, 2014, 34(2): 129-136. [Liu Qiping, Yang Yongchun, Fu Dongxia, et al. Urban spatial expansion based on DMSP_OLS nighttime light data in China in 1992-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 129-136.]
- [27] 王翠平, 王豪伟, 李春明, 等. 基于DMSP/OLS影像的我国主要城市群空间扩张特征分析 [J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 942-954. [Wang Cuiping, Wang Haowei, Li Chunming, et al. Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 942-954.]
- [28] 李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(6): 711-720. [Li Deren, Yu Hanruo, Li Xi. The spatial temporal pattern analysis of city development in countries along the Belt and Road Initiative based on nighttime light data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 711-720.]
- [29] Yang Y, He C Y, Zhang Q F, et al. Timely and accurate national-scale mapping of urban land in China using Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System nighttime stable light data [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073535. doi: 10.1117/1.JRS.7.073535.
- [30] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 49-61.
- [31] Yu B L, Tang M, Wu Q S, et al. Urban built-up area extraction from log-transformed NPP-VIIRS nighttime light composite data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(8): 1279-1283.
- [32] Jiao L M, Xu G, Xiao F T, et al. Analyzing the impacts of urban expansion on green fragmentation using constraint gradient analysis [J]. *The Professional Geographer*, 2017, 69(4): 553-566.
- [33] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 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*, 2003, 22(6): 769-779, 813. [Li Xiaowen, Fang Jingyun, Piao Shilong. The comparison of spatial characteristics in urban lan-

- duse growth among the central and sub-cities in Shanghai region. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 769-779, 813.]
- [34] 焦利民, 董婷. 城市土地密度圈层分布的反S型规律及其应用 [J]. *测绘地理信息*, 2018, 43(4): 8-16. [Jiao Limin, Dong Ting. Inverse S-shape rule of urban land density distribution and its applications. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(4): 8-16.]
- [35] 毛帅永, 焦利民, 许刚, 等. 基于多源数据的武汉市多中心空间结构识别 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1675-1683. [Mao Shuaiyong, Jiao Limin, Xu Gang, et al. Identification of the polycentric spatial structure in Wuhan City based on multisource data. *Progress in Geography*, 2019, 38(11): 1675-1683.]

Distance decay of nighttime lights from urban centers and its application

ZHENG Muchen¹, XU Gang^{1*}, XIAO Rui², JIAO Limin¹

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

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Nighttime lights are one of the direct representations of urban social and economic activities, which usually decrease with the distance from urban centers. However, quantifying and modeling the process of distance decay can be challenging, and the potential applications of nighttime light data are not specified. In this study, the annual composites of NPP-VIIRS nighttime lights for 32 major cities in China in 2012 and 2020 were obtained and used to calculate the nighttime light intensity within concentric circle layers by taking the city center as the center of the circle. Inspired by the spatial attenuation function of urban land density, this study used the inversed-S function to fit the distance decay characteristics of urban nighttime light intensity. The results show that the inversed-S function model fits the distance decay characteristics well, and the parameters D and α of the model reflect the process of urban expansion and urban form changes, respectively. From 2012 to 2020, the radius of the cities (parameter D) increased by 1.1–3.6 times. Among the sample cities, smaller cities—Changchun, Yinchuan, and Xining—experienced the greatest expansion of nighttime lights, while eastern coastal cities experienced the least expansion. The change of parameter α indicates that the expansion pattern of nighttime lights in China's major cities tends to be compact. The inversed-S function provides a new tool for describing the spatial pattern of nighttime light intensity and a new indicator for measuring urban expansion and urban form change.

Keywords: nighttime light; urban expansion; gradient analysis; inversed-S function; urban form