

基于夜间灯光数据的长株潭都市区建成空间演化

何昱洁

南华大学松霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳

收稿日期: 2024年2月23日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年3月27日

摘要

长株潭都市区是长株潭城市群的核心区域, 是国内较成熟的都市连绵区。研究利用1993~2017年夜间灯光数据进行建成空间扩张动态度、空间分布、重心变动、景观格局变化分析, 揭示长株潭都市区建成空间扩张时空演变特征。结果表明: 1) 长株潭都市区建成空间在1993~2017年间扩张整体呈现“减慢-加快-减慢”波动式增长发展, 空间扩张从中心向外围扩散。2) 建成空间规模增长演化离散度表现为“向心-离散-向心”波动中保持稳定的态势。3) 长沙城市建设总体发展程度远超前于株洲和湘潭, 都市区建成空间分布整体呈现“南-北”格局, 空间重心整体向西北方向转移。4) 都市区外围建成空间斑块形状不断复杂化, 斑块数量不断增加, 破碎化发展趋势明显; 内部用地斑块相互融合, 连通性增强。

关键词

夜间灯光数据, 建成空间, 扩张, 重心, 景观格局, 长株潭都市区

Built-Up Spatial Evolution of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metro Area Based on Nighttime Light Data

Yujie He

Solux College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang Hunan

Received: Feb. 23rd, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metro area is the core area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, which is a relatively mature urban continuous area in China. The study used the

night light data from 1993 to 2017 to analyze the expansion dynamics, spatial distribution, center of gravity change, landscape pattern change of built-up space. It revealed the spatial-temporal evolution characteristics of the expansion of built-up space in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metro area. The research finds that: 1) The expansion of built-up space in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metro area showed a fluctuating growth pattern of “slowing-quickly-slowng down” during the period from 1993 to 2017, and the spatial expansion spread from the center to the periphery. 2) The spatial evolution dispersion of the scale growth of built-up space in the metropolitan area showed a stable trend in the fluctuation of “centripetal-discrete-centripetal”. 3) The overall development degree of urban construction in Changsha is much higher than that in Zhuzhou and Xiangtan. The spatial distribution of built-up space in the metropolitan area presents a “south-north” pattern. The overall spatial center of gravity shifted to the northwest. 4) The patch shape of built-up space in the periphery of the metropolitan area is becoming increasingly complex, the number of patches is increasing, and the fragmentation development trend is obvious; the internal patches of land merge with each other and the connectivity is enhanced.

Keywords

Nighttime Light Data, Built-Up Space, Expansion, Gravity Center, Landscape Pattern, Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metro Area

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着遥感技术的飞速发展, 遥感卫星数据已广泛应用于国土、交通、环境等领域管理与监测, 城市空间研究也开辟了新的技术路线[1]。可用于遥感监测的高分辨率卫星遥感数据有法国 SPOT5、美国 IKONOS、QUICKBIRD、WORLDVIEW 等, 空间分辨率约 1 m [2]。对于城市空间扩张分析主要采用 Landsat 系列数据和 DMSP/OLS、NPP-VIIRS 夜间灯光数据[3] [4]。Landsat 系列数据精度高达 30 m, 且能免费获取, 近年来涌现出较为丰富的研究成果[5] [6]。而 DMSP/OLS、NPP-VIIRS 夜间灯光数据虽然精度不及 Landsat 系列数据, 但是夜间灯光数据更能真实反映人类经济活动空间信息[7] [8]。李德仁等[9]系统总结了夜光遥感数据的挖掘与应用。夜间灯光数据最早由 Croft [10]将美国军事气象卫星(DMSP)搭载的 OLS 传感器数据应用于城市研究。舒松等[11]、杨洋等[12]、王晓慧等[13]、Zhou 等[14]提出了利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据提取城市建成空间信息的方法。卓莉等[15]、刘沁萍等[16]、Huang 等[17]、范俊甫等[18]、陈征等[19]、万意等[20]、李靖业等[21]、高宁等[22]运用 DMSP/OLS 夜间灯光数据从全国、区域、省域、城市等层面开展了城镇用地空间演变研究。2013 年随着 DMSP/OLS 衰减失效, 以及新的 NPP-VIIRS 数据出现, 江威等[23]对比 DMSP/OLS 和 NPP-VIIRS 数据发现, NPP-VIIRS 数据在模拟社会经济参量上更具有优势。周翼等[24]、李明峰等[25]提出了 NPP-VIIRS 夜光遥感影像合成与校正方法, 张景奇等[26]、董鹤松等[27]、白贺庭等[28]综合运用 DMSP/OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据分析了城市群、市域城镇空间扩张特征。以上研究思路与方法为本文提供了参考借鉴。

都市区是以某一个大城市或特大城市为中心, 以及周围相邻地域单元的城市化地区。通常包括一个高密度的人口核心地区和围绕这个核心具有高度经济与社会融合的相邻区域[29]。长株潭都市区作为长株潭 3 + 5 城市群的核心区域, 在长株潭一体化进程中, 长株潭三市集中建成区不断相向扩张, 融合趋势明

显。然而随着城市之间相向扩张,城市群生态绿心不断被侵蚀,对区域生态可持续发展造成了极大威胁。本研究以 1993~2017 年夜间灯光数据为主要空间数据,以 Landsat 数据、统计数据作为辅助数据,采用辅助资料对比法,提取长株潭都市区建成空间信息,运用空间扩张指标对都市区扩张模式、扩张形态、空间分布、重心变动、景观格局变化等进行分析,揭示长株潭都市区 24 年来建成空间扩张时空过程及主要特征。试图通过长株潭都市区建成空间的时空格局变化研究,探寻其空间发展规律,为长株潭都市区空间可持续发展,城市群生态绿心保护提供思路建议。

2. 研究区域与数据来源

2.1. 研究区域

长株潭三市中心城区距离较近,空间结构紧凑(见图 1)。本次研究范围为长株潭都市区建设用地所在的行政区与绿心红线范围相结合的区域,包括长沙市芙蓉区、雨花区、天心区、开福区、岳麓区、望城区、长沙县,株洲市荷塘区、芦淞区、石峰区、天元区和湘潭市岳塘区、雨湖区、湘潭县。总体来说就是长株潭三市市辖区以及长沙县和湘潭县,这两个县放入研究范围主要是考虑到部分行政范围在长株潭城市群绿心内,并且在长株潭一体化过程中作为建设用地延伸的重要部分,研究范围总面积 7251.15 平方公里。



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 3333 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Changsha, Zhuzhou and Xiangtan metropolitan area
图 1. 长株潭都市区范围

2.2. 数据来源及处理

1) 夜间灯光数据:本研究夜间灯光数据采用 DMSP/OLS 以及 NPP-VIIRS 两种,数据来源于美国国家地球物理数据中心(<http://ngdc.noaa.gov>)。其中 1993~2011 年夜间灯光影像使用 DMSP/OLS 数据,

2013~2017 年夜间灯光影像使用 NPP-VIIRS 数据。DMSP/OLS 夜光图像是美国国防气象卫星(defense meteorological satellite program, DMSP)搭载的业务型线性扫描传感器(operational linescan system, OLS)获取的数据, 由 F10、F12、F14、F15、F16、F18 多颗卫星获取, 于 2013 年停止更新。该数据为栅格灰度遥感影像, 灰度值范围 0~63, 空间分辨率为 1 km。数据已经消除云、火光等干扰因素, 并且对全年 VNIR 通道灰度值直接平均化处理后得到, 数据整体准确率、真实性较高。NPP-VIIRS 数据是美国国家极地轨道合作卫星(national polarorbiting partnership, NPP)搭载的可见光红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS)获取, 数据存档时间为 2012 年至今。该数据空间分辨率为 0.5 km, 与 DMSP/OLS 相比, 具有更强的地表探测能力, 能够更精确地反映人类活动空间信息。研究选取各年 12 月影像代表该年份数据。

2) 辅助数据: 为了提高空间计算精度, 研究用 Landsat 系列卫星同期数据进行纠正, 并且进行抽样检验精度, 卫星数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。另外基础地理数据来源于国家基础地理信息系统(<https://ngcc.cn/ngcc/>)全国 1:400 万数据库中的县(区)级和市级面状数据; 城市建成区面积数据来源于《中国城市统计年鉴》。

3. 研究方法

3.1. 辅助资料对比法提取建成空间

采用辅助资料对比法, 以夜间灯光数据为主要数据源, 城市统计年鉴数据和 Landsat 系列卫星影像作为辅助数据, 确定不同年份的最佳灯光阈值。

研究利用长株潭都市区 Landsat 30 m × 30 m 高分辨率影像作为验证数据, 评价辅助资料对比法所提取建成空间信息的相对精度。抽样选取 1993、2005 和 2017 年数据, 将样本点与相对应的 Landsat TM/ETM+/OLI 影像进行数据验证, Kappa 系数为 0.8502。可看出研究所用的辅助资料对比法提取灯光数据样本精准度较高, 提取结果可用来研究长株潭都市区建成空间扩张特征分析。

3.2. 扩张动态度

建成空间扩张动态度分析主要从扩张规模、扩张速度、扩张强度等指标衡量。扩张速度为城市用地在不同阶段的扩张面积的绝对增量, 代表城市用地扩张的总体规模和趋势。

$$A = \frac{\Delta S}{\Delta t \times S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 为用地扩张速度; S 为研究期初用地总面积; Δt 为时间间隔; ΔS 为用地扩张面积。

由于扩张速度无法对城市扩张的程度进行定量化比较, 因此引入城市扩张强度来反映扩张的强弱, 使得不同时期的城市扩张速度具有可比性。

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta t \times TA} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I 代表扩张强度指数; ΔU 不同时期扩张的面积差, TA 为土地总面积。

3.3. 重心变动与空间要素分布

建成空间重心为研究区建成空间的平均中心, 通过建成空间重心位置迁移可以反映建成空间分布变化情况。研究提取建成空间是由不同灰度值的像元构成的, 第 t 年第 i 个像元的平均中心坐标为 (x_{ti}, y_{ti}) , M_{ti} 为第 t 年该像元的灰度值, 式中 X_t 、 Y_t 表示第 t 年研究区域平均中心的经纬度坐标。则以灰度值为权重的区域建成空间重心坐标为:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n M_{it} x_{it}}{\sum_{i=1}^n M_{it}} \quad Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n M_{it} y_{it}}{\sum_{i=1}^n M_{it}} \quad (3)$$

重心偏移距离 ΔX 是区域建成空间重心在某一研究时期内的移动距离。偏移角度 α_t 是区域建成空间重心在某一研究时期内移动的方向与正东的夹角。

$$\Delta X = \sqrt{(X_{t_{i+1}} - X_{t_i})^2 + (Y_{t_{i+1}} - Y_{t_i})^2} \quad (4)$$

$$\alpha_t = n\lambda + \arctan \frac{Y_{t_{i+1}} - Y_{t_i}}{X_{t_{i+1}} - X_{t_i}}, (n = 0, 1, 2) \quad (5)$$

式中: X_t, Y_t 分别为某一时刻区域建成空间的平均重心坐标; $t_{i+1} - t_i$ 表示区域建成空间重心转移研究测度的时间差值。

为更好度量建成空间分布情况, 在进行重心测度的基础上, 利用标准差椭圆方法来表征都市区空间要素的分布态势与演化情况。其中椭圆长短轴分别表征都市区建成空间要素布局的主趋势方向和次要方向的分布范围, 椭圆面积表示要素空间分布的集中程度。标准差椭圆可表现离散数据集空间密集性、分布范围、方向和形态随时间变化的动态特征[30]。

$$\delta_{t1,2} = \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_{it}^2 + \sum_{i=1}^n y_{it}^2 \right) \pm \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_{it}^2 - \sum_{i=1}^n y_{it}^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n x_{it} y_{it} \right)^2}}{2n} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中: $\delta_{t1,2}$ 表示第 t 年 X 轴和 Y 轴的标准差。

3.4. 景观格局指数

景观格局指数能够反应建成空间扩张形态演变特征。研究选取斑块数量(Number of patches, NP)、最大斑块指数(Largest patch index, LPI)、景观形状指数(Landscape shape index, LSI)、平均边界密度(Edge density, ED)、连接度指数(Connectivity index, COHESION)、聚集度指数(Aggregation index, AI)、蔓延度指数(Contagion index, CONTAG)、周长面积分维数(Perimeter area fractal dimension, PAFRAC)等 8 个指数分析长株潭都市区建成空间格局。利用 Fragstats4.2 软件对景观格局指数进行计算(见表 1)。

Table 1. Landscape pattern index calculation formula [31]

表 1. 景观格局指数计算公式[31]

指数	公式
斑块数量 (NP)	$NP = \sum_{i=1}^n N_i$ N 为景观内斑块数量。
最大斑块指数 (LPI)	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$ a_{ij} 为斑块 ij 的面积; A 为景观总面积。
景观形状指数 (LSI)	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$ E 为景观斑块边缘总长度; A 为景观总面积。

续表

平均边界密度 (ED)	$ED = \frac{E}{A}(10,000)$ <p>E、A 同上。</p>
连接度指数 (COHESION)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}^* \sqrt{a_{ij}^*}} \right] \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \times 100$ <p>P_{ij}^* 为斑块周长; a_{ij}^* 为斑块面积; Z 为景观中元胞数量。</p>
聚集度指数 (AI)	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] (100)$ <p>g_{ii} 为相应景观类型的相似邻接斑块数。</p>
蔓延度指数 (CONTAG)	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left(P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right) \left[\ln \left(P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] (100)$ <p>P_i 为 i 类型斑块所占的面积百分比; g_{ik} 为 i 类型斑块和 k 类型斑块毗邻的数目; m 为景观中的斑块类型总数目。</p>
周长面积分维数(PAFRAC)	$PAFRAC = \frac{\frac{2}{n_{ij} \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} - \ln a_{ij})} - \left[\left(\sum_{j=1}^n p_{ij} \right) \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \right]}{\left(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}$ <p>a_{ij} 为斑块 ij 的面积; P_{ij} 为斑块 ij 的周长; n_i 为斑块数目。</p>

4. 结果分析

4.1. 长株潭都市区建成空间总体特征

以灯光值为权重计算得到长株潭都市区各行政区的灯光总量和灯光密度, 通过灯光总量和灯光密度反映长株潭都市区建成空间的变化情况。运用自然断点法, 将灯光总量和灯光密度划分成 5 个不同值域的区间段, 以颜色的深浅来表示强弱关系。

从 1993~2017 年长株潭都市区的灯光总量分布时空特征可知(图 2), 灯光值总量的分布呈现出从中心向外围扩散, 由北向南发展的总体态势。2003 年灯光主要集中在开福区、岳麓区、芙蓉区、雨花区、天心区、石峰区、荷塘区, 而岳塘区、天元区、芦淞区相对较少, 长沙县和湘潭县灯光值分布则非常少; 1997~2005 年可以发现长沙县的灯光值总量以非常快的速度增加, 从 8614.41 增长到 36237.79。荷塘区、芦淞区、天元区也有相对较快的增加, 而其他几个区灯光值增加相对原有基础则相对慢一些; 2005~2017 年灯光增长慢慢向西发展, 望城区成了发展最快的区域, 湘潭县、岳塘区、石峰区、天元区等皆有发展, 并且在此阶段长沙有明显向南发展与株洲湘潭融成一体趋势。在此快速发展阶段由于行政区划较小的原因, 天心区和芙蓉区的灯光总量慢慢落后于其他行政区域。

为了剔除行政区面积对灯光值影响, 在灯光总量的基础上计算各行政区的灯光密度(图 3), 可以看出芙蓉区、天心区、雨花区、雨湖区、芦淞区灯光密度增长一直保持领先, 而随着建成用地发展, 岳麓区、

开福区、石峰区、荷塘区和岳塘区不断增强，而由于行政区面积较大，长沙县、望城区、湘潭县整体灯光密度相对较低。



Figure 2. Total amount of lights in each district of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area (1993~2017)
图 2. 长株潭都市区各行政区灯光总量(1993~2017)

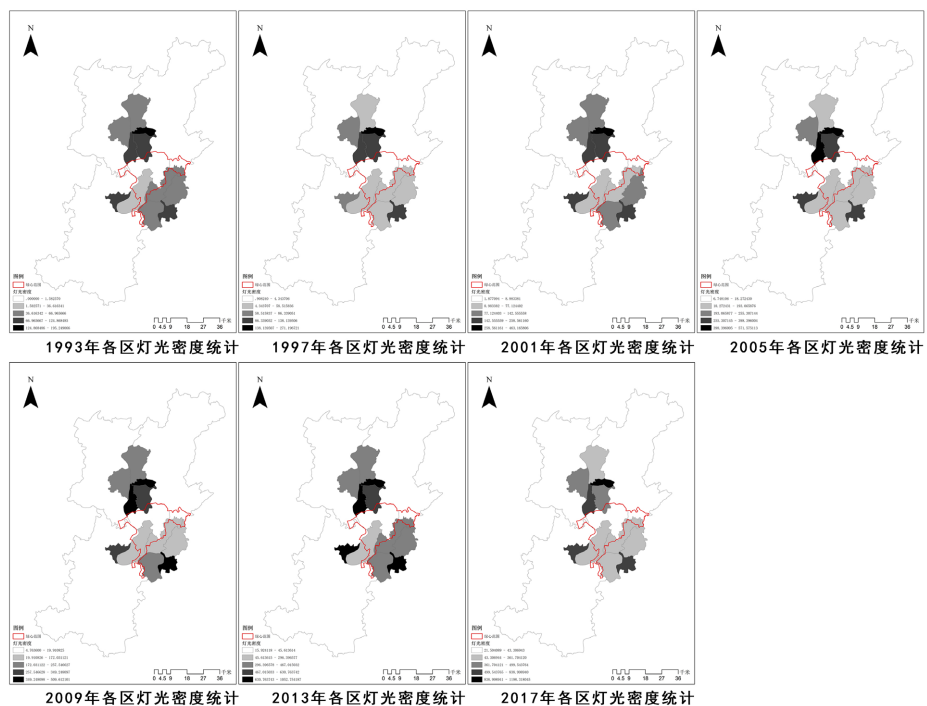


Figure 3. Light density of each district in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area (1993~2017)
图 3. 长株潭都市区各行政区灯光密度(1993~2017)

为更直观地展现长株潭都市区建成空间扩张情况,根据不同年份所提取建成空间范围描绘 1993~2017 年都市区建成空间扩张过程(图 4),可看出长株潭都市区各城市主城区以面状发展模式为主,不规则圈层向外扩张。整体来看长株潭三市一体化趋势明显,长沙除了向南与株洲湘潭融合以外,还不断向西北方向拓展。株洲和湘潭相互向北扩张外,两者之间相互靠拢,融合趋势明显。同时可以发现 2001 年长株潭三市建成空间开始扩张到绿心范围边缘,2003~2007 年之间向绿心地区扩张相对较少,而 2007~2013 年长株潭三市向绿心扩张速度加快,绿心范围内出现了大量的建成空间,2013~2017 年绿心范围内建成空间增量相对不多。

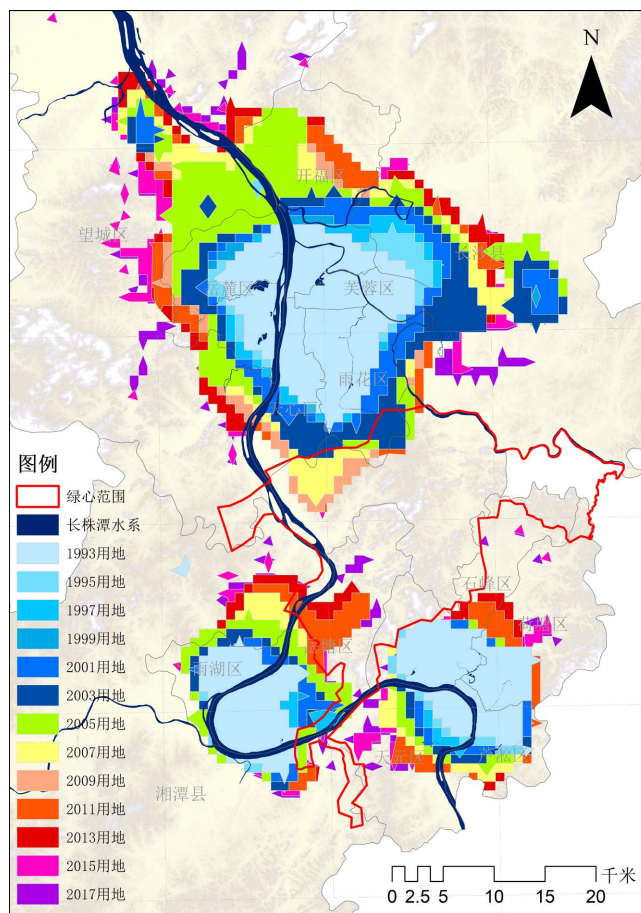


Figure 4. Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area built space expansion (1993~2017)
图 4. 长株潭都市区建成空间扩张示意(1993~2017)

4.2. 长株潭都市区建成空间扩张分析

根据最佳灯光阈值提取的建成空间面积与《中国城市统计年鉴》建成区面积数据之间的平均误差值分别为 1.64%、-0.10%、2.27%、0.54%、-0.85%、0.27%、0.05%、-0.22%、0.05%、1.19%、-0.88%、1.34%、1.35%, 误差值均控制在 3%以内, 数据整体准确率相对较高。依据每个城市最佳阈值分别提取 1993~2017 年长株潭都市区建成空间, 所提取的建成空间面积分别为 448.73 km²、498.29 km²、542.72 km²、552.10 km²、670.30 km²、829.82 km²、1066.62 km²、1171.71 km²、1210.77 km²、1318.35 km²、1399.93 km²、1467.56 km²、1528.26 km²。

测算长株潭都市区建成空间扩张规模、扩张速度、扩张强度三个指标, 发现建成空间扩张在时间尺

度上表现出一致性(图 5), 在 1993~2017 年间扩张整体呈现“减慢 - 加快 - 减慢 - 加快 - 减慢”波动式增长发展趋势, 1993~1999 年扩张面积和扩张速度表现出缓慢降低趋势, 其中 1997~1999 年间扩张面积和扩张速度达到最低值, 分别为 9.38 km² 和 4.69 km²/y; 1999~2005 年间扩张面积和扩张速度出现暴发式快速增长, 并在 2003~2005 年间达到最大值, 分别为 236.80 km² 和 118.40 km²/y; 而后在 2005~2009 年出现断崖式降低, 几乎接近最低值; 在 2009~2011 年出现了反弹, 稍有加快增长; 在 2011~2017 年扩张缓慢降低, 逐渐趋向稳定。

扩张强度整体趋势和扩张面积与扩张速度保持一致, 但是局部的发展趋势稍有不同, 其中 1997~2001 年扩张强度出现急速增加, 从 0.017 直接增长到 0.214, 2003~2009 年则急速降低, 从 0.285 直接降到 0.033, 其余年度区间扩张强度变化都相对较小。总体上, 长株潭都市区建成空间规模不断增加, 扩张面积、扩张速度和扩张强度经历波动之后, 逐渐降低趋于稳定。说明长株潭都市区在经历快速波动式扩张变化之后, 慢慢趋于稳定发展。

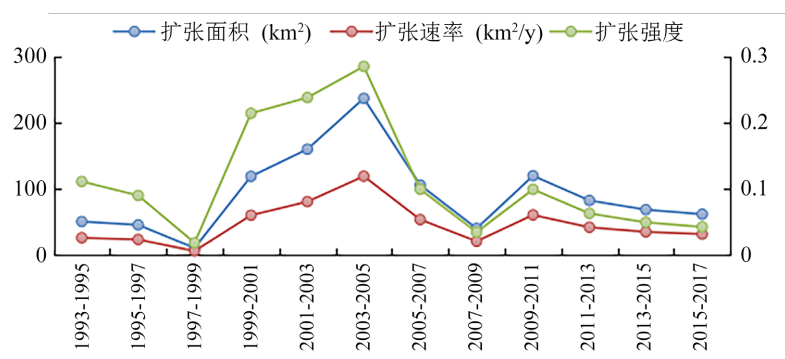


Figure 5. Analysis on the spatial expansion of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area (1993~2017)
图 5. 长株潭都市区建成空间扩张分析(1993~2017)

4.3. 长株潭都市区建成空间要素分布与重心变动

通过长株潭都市区建成空间重心坐标和椭圆长短轴变化, 可以更好反映建成空间扩张方向。研究发现长株潭都市区标准差椭圆长轴比短轴长很多, 椭圆呈现比较明显的扁平形状, 主要呈现南北方向, 表明长株潭都市区东西方向发展明显不如南北方向, 空间分布整体呈现出“南 - 北”格局。都市区范围内基本形成了株洲和湘潭为南端点和长沙为北端点的“南 - 北”两极空间格局(图 6)。

1993~2017 年长株潭都市区建成空间增长演化表现出两种完全不同的态势, 离散度在 1993~2017 年间表现为“向心 - 离散 - 向心 - 离散 - 向心”波动中保持稳定的态势, 而方向性则表现出明显的“增强 - 减弱 - 增强 - 减弱”的趋势。具体而言: 1) 向心力方面: 1993~1999 年向心力增强; 1999~2003 年离散度增加; 2003~2007 年向心力增强又增强; 2007~2015 年离散度又增加; 2015~2017 年向心力再次增强, 整体波动不大, 向心力略微增强。2) 方向性方面: 1993~1999 年方向性增强; 1999~2013 年方向性急速减弱, 2013~2015 年方向性再次增强, 2015~2017 年方向性又一次减弱。向心力和方向性变化和长株潭都市区建成空间扩张整体趋势保持基本一致, 当扩张加快时, 离散程度就会增强, 方向性明显增强; 而当扩张减慢时, 向心力程度就会加强, 而方向性减弱。

从重心位置来看(见表 2), 1993~1997 重心急速向北转移, 1993~1995 年重心转移速度达到最大值 2100.34 米/年, 城市向北发展趋势明显; 1997~1999 年向南回落 1387.04 米; 1999~2005 年先向东转移, 再向西转回原来的位置; 2005~2009 年重心大幅度向西北方向转移, 其中 2007~2009 年转移 1386.80 米, 偏移角度达到 104.91°; 2009~2011 年重心再次出现大幅向南转移, 偏移距离达到 3591.97 米, 偏移角度

达到 -79.41° ；2011~2015年重心变化不大，稍向西转移；2015~2017年重心向北转移2412.04米。总体来看，重心在1993~2017年间向北向西转移的趋势明显。结合长株潭三市发展来看，长沙的发展明显要快于株洲和湘潭，整体向北部发展趋势明显。

Table 2. Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area built space center of gravity deviation track
表 2. 长株潭都市区建成空间重心偏移轨迹

年份	偏移距离(m)	偏移速度(m/y)	偏移角度($^\circ$)
1993~1995年	4200.68	2100.34	97.26
1995~1997年	1095.13	547.56	86.89
1997~1999年	1387.04	693.52	-97.03
1999~2001年	1158.13	579.07	26.78
2001~2003年	705.33	352.67	-113.44
2003~2005年	918.82	459.41	166.83
2005~2007年	417.79	208.89	99.64
2007~2009年	2773.59	1386.80	104.91
2009~2011年	3591.97	1795.99	-79.41
2011~2013年	305.56	152.78	-154.71
2013~2015年	161.03	80.51	-106.20
2015~2017年	2412.04	1206.02	92.08

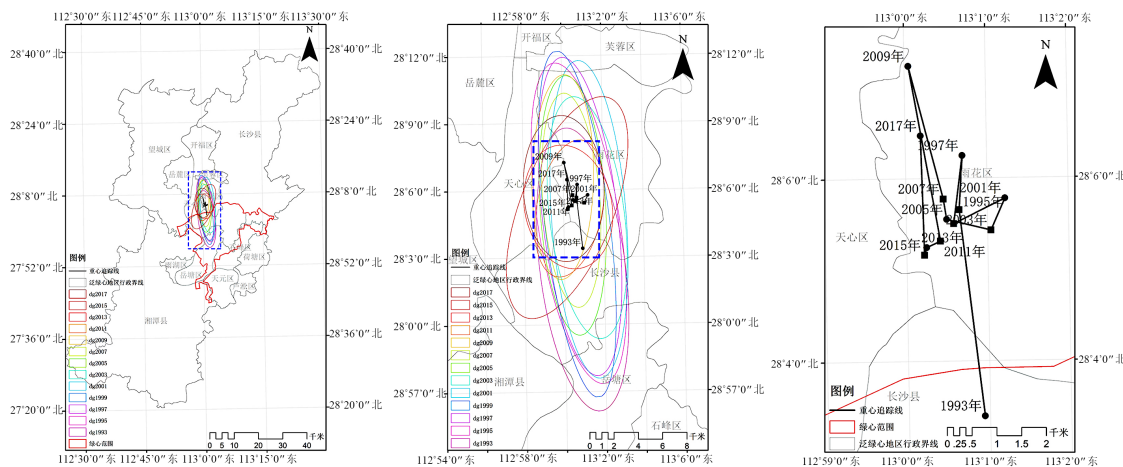


Figure 6. Ellipse of standard deviation and change of center of gravity of built space in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area

图 6. 长株潭都市区建成空间标准差椭圆与重心变动

4.4. 长株潭都市区建成空间景观格局特征

通过长株潭都市区建成空间景观格局指数分析(见图 7)，可以进一步了解用地斑块的变化情况。从1993~2017年长株潭都市区建成空间景观格局各指标变化趋势分析可知，斑块数量(NP)和景观形状指数(LSI)两者都呈现出在波动中不断增加的趋势，均在2017年都达到最大值，斑块数量最大值为54，景观形状指数最大值为7.53。斑块数量在1993~1999年缓慢增加，1999~2017年快速增加，斑块数量年均增

长 1.8 个, 这期间 2009 年和 2015 年斑块数量出现了下降, 说明建成空间在不断向外扩张过程中, 出现新用地斑块的同时有不少单独的用地斑块之间相互融合。景观形状指数的整体趋势和用地斑块数量的趋势相似, 在 1993~1999 年整体不断缓慢增加, 在 1999~2017 年则快速增加, 期间有两个年份出现下降。说明长株潭都市区建成空间内部和外部出现两种不同的趋势, 城市用地斑块外围建成用地的形状不断复杂化, 斑块数量不断增加, 用地斑块内部在城市发展的过程中用地斑块相互融合, 出现了集约化发展, 两种发展趋势同时在进行, 总体来说城市向外扩张破碎化发展的趋势更加强势。这两个指数表现出城镇建成空间扩张的一般规律, 在城镇扩张初期, 城镇建设斑块增长点不连续扩张, 斑块数量增加, 破碎化程度越来越高; 随着时间推移, 城镇继续扩张的同时, 独立的城镇斑块之间趋于成片连通, 复杂程度有降低的趋势, 城镇发展更加紧凑。

最大斑块指数(LPI)在 1993~2017 年整体出现下降趋势, 其中在 1995~2015 年 20 年间最大斑块指数下降并不明显, 在 1993~1995 和 2015~2017 年两个时间段中, 最大斑块指数出现了较大的下降, 说明在这两个时间段株洲和湘潭的发展形势超过长沙, 而中间的 20 年三市建成空间扩张相对于自身体量发展速度较为平均, 整体来看, 长沙作为首位城市的地位依然存在, 但是随着时间的推移和长株潭一体化的过程中, 这种优势在慢慢的降低, 说明长株潭三市发展更加均衡。都市区建成空间平均边界密度(ED)随着建成空间向外扩张不断增加。

连接度指数(COHESION)在 1993~2009 年间呈现出在波动中整体不断加速增强的趋势, 且变化的速率由慢变快, 在 2009 年均达到最大值 44.18, 在 2009~2017 年不断降低, 速率由快到慢。聚集度指数(AI)在波动中不断降低, 2013~2017 年有反弹趋势稍微增加, 说明在城市发展过程中破碎化占据优势, 但是随着城市不断发展, 建成空间斑块不断融合, 集约化发展逐渐占据主动。

蔓延度指数(CONTAG)和周长面积分维数(PAFRAC)在 1993~2017 年间呈现出较大的波动幅度, 表明城镇发展过程中是一个复杂的扩张过程, 破碎化和城镇建设用地之间融合是一个相互独立而又不断相互影响的过程。但是这两个指数不断上下波动, 但是还是有不断降低的趋势, 说明建成空间向外围不断扩张的时候出现了大量的零散的独立斑块, 与城市扩张的一般规律相符合。

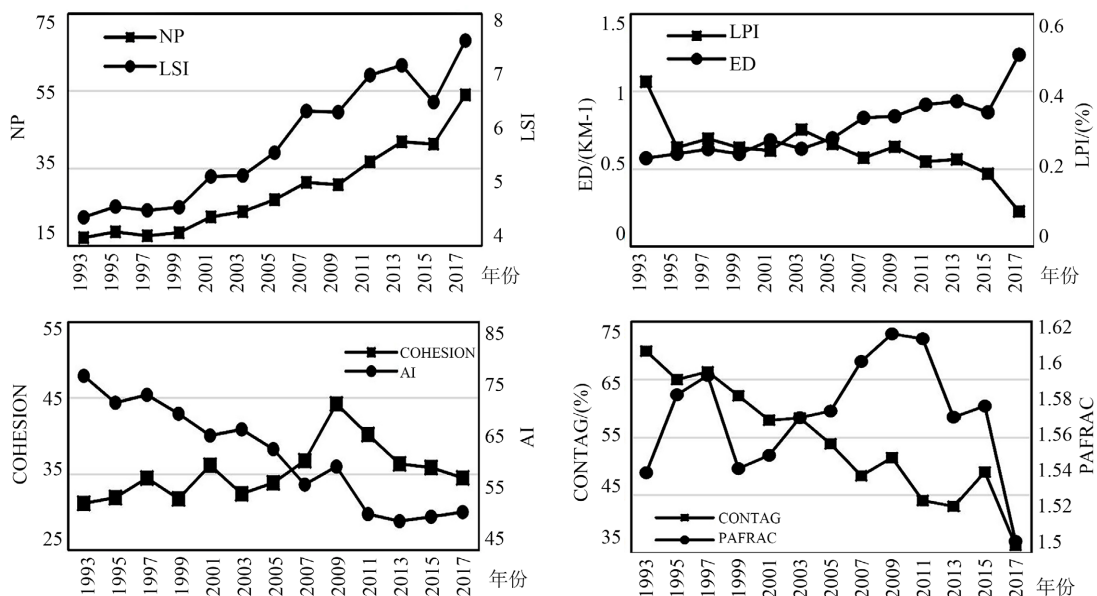


Figure 7. The index change of built spatial landscape pattern in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area
图 7. 长株潭都市区建成空间景观格局指数变化

5. 研究结论

基于 1993~2017 夜间灯光数据提取长株潭都市区建成空间, 利用空间扩张动态度、空间要素分布与重心变动、景观格局指数等方法对长株潭都市区建成空间扩张特征进行了系统分析。结果表明:

1) 长株潭都市区建成空间在 1993~2017 年间扩张整体呈现“减慢 - 加快 - 减慢 - 加快 - 减慢”波动式增长发展趋势, 空间扩张从中心向外围扩散, 长株潭三市建成空间从 2003 年开始相向发展相互融合趋势明显, 并且逐渐向绿心地区侵蚀。

2) 1993~2017 年长株潭都市区建成空间规模增长演化表现出两种完全不同的态势, 离散度在 1993~2017 年 24 年间表现为“向心 - 离散 - 向心 - 离散 - 向心”在波动中保持稳定的态势, 而方向性则表现出明显的“增强 - 减弱 - 增强 - 减弱”的趋势。

3) 长株潭三市虽然以绿心为地理中心呈现三足鼎立的态势, 但是长沙城市建设总体发展程度远超前于株洲和湘潭, 长株潭都市区建成空间分布整体呈现出“南 - 北”格局, 在 1993~2017 年间空间重心整体向西北方向转移。景观形态内部和外部出现两种趋势, 城市外围建成空间斑块的形状不断复杂化, 破碎化发展趋势明显, 内部建成斑块在城市发展过程中相互融合, 连通性增强, 出现集约化发展, 两种发展趋势同时进行, 总体来说城市向外扩张破碎化发展的趋势更加强势。

参考文献

- [1] 张峰, 郑光, 曹荣林. 城市空间扩展问题的遥感技术研究方法: 以南京为例[J]. 遥感信息, 2006, 21(4): 43-45+66.
- [2] 汪波, 龚威平, 王海平, 等. 利用遥感监测成果辅助城市规划管理应用研究: 以石家庄市城市规划管理应用遥感监测成果为例[J]. 城市规划, 2011, 35(6): 55-59.
- [3] Li, Q., Zheng, B., Tu, B., *et al.* (2020) Refining Urban Built-Up Area via Multi-Source Data Fusion for the Analysis of Dongting Lake Eco-Economic Zone Spatiotemporal Expansion. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 1797. <https://doi.org/10.3390/rs12111797>
- [4] 柴宝惠, 李培军, 张瑞洁, 等. 基于 Landsat 数据和 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城市扩展提取: 以天津市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 475-785.
- [5] 王雷, 李丛丛, 应清, 等. 中国 1990-2010 年城市扩张卫星遥感制图[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1388-1399.
- [6] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [7] 杨眉, 王世新, 周艺, 等. DMSP/OLS 夜间灯光数据应用研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(1): 45-51.
- [8] 王海军, 孔祥冬, 武克军, 等. 利用夜光遥感影像进行城市化监测[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(12): 235-239.
- [9] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.
- [10] Croft, T.A. (1973) Burning Waste Gas in Oil Fields. *Nature*, **245**, 375-376. <https://doi.org/10.1038/245375a0>
- [11] 舒松, 余柏菡, 吴健平, 等. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 169-176.
- [12] 杨洋, 何春阳, 赵媛媛, 等. 利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究[J]. 中国图象图形报, 2011, 16(4): 666-673.
- [13] 王晓慧, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国大尺度城镇用地信息提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 159-164.
- [14] Zhou, Y., Smith, S.J., Elvidge, C.D., *et al.* (2014) A Cluster-Based Method to Map Urban Area from DMSP/OLS Nightlights. *Remote Sensing of Environment*, **147**, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.004>
- [15] 卓莉, 李强, 史培军, 等. 基于夜间灯光数据的中国城市用地扩展类型[J]. 地理学报, 2006, 61(2): 169-178.
- [16] 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.
- [17] Huang, X., Schneider, A. and Friedl, M.A. (2016) Mapping Sub-Pixel Urban Expansion in China Using MODIS and DMSP/OLS Nighttime Lights. *Remote Sensing of Environment*, **175**, 92-108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.042>

- [18] 范俊甫, 马廷, 周成虎, 等. 1992-2010 年基于 DMSP-OLS 图像的环渤海城市群空间格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 280-288.
- [19] 陈征, 胡德勇, 曾文华, 等. 基于 TM 图像和夜间灯光数据的区域城镇扩张监测: 以浙江省为例[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 83-89.
- [20] 万意, 陈云浩, 李京. 基于 DMSP/OLS 数据的河南省城市空间格局及动态扩张分析[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 89-94.
- [21] 李靖业, 龚健, 杨建新, 等. 利用夜间灯光数据的武汉城市空间格局演化[J]. 遥感信息, 2017, 32(3): 133-141.
- [22] 高宁, 盖迎春, 宋晓谕. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 207-215.
- [23] 江威, 何国金, 刘慧婵. NPP/VIIRS 和 DMSP/OLS 夜光数据模拟社会经济参量对比[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 28-34.
- [24] 周翼, 陈英, 刘洋, 等. NPP-VIIRS 年度夜间灯光数据的合成方法与验证[J]. 遥感信息, 2019, 34(2): 62-68.
- [25] 李明峰, 蔡炜珩. NPP/VIIRS 多时相夜光遥感影像校正方法[J]. 测绘通报, 2019(7): 122-126.
- [26] 张景奇, 周思静, 修春亮. 基于夜间灯光数据的中国五大区域级城市群空间扩张协同性对比[J]. 中国土地科学, 2019, 33(10): 56-65.
- [27] 董鹤松, 李仁杰, 李建明, 等. 基于 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1161-1174.
- [28] 白贺庭, 马明国, 阎然, 等. 基于夜间灯光数据的重庆市城市扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 216-224.
- [29] 谢守红, 宁越敏. 都市区: 长株潭一体化的必由之路[J]. 经济地理, 2005(6): 834-837.
- [30] Gangopadhyay, K. and Basu, B. (2010) City Size Distributions for India and China. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, **388**, 2682-2688. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2009.03.019>
- [31] 李广东, 戚伟. 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2572-2591.