

基于最佳尺度的长株潭城市群景观破碎化时空异质性研究

蒙诗琪 陈彩虹 余济云 徐叶

中南林业科技大学, 中国·湖南 长沙 410004

摘要: 长株潭城市群自推进一体化以来经历了快速城镇化进程。与此同时, 区域景观生态结构发生了显著变化, 景观破碎化程度加剧。因此全面准确分析景观破碎化的时空规律, 对于长株潭景观格局的优化和分析尺度研究提供了科学参考。基于 ArcGIS、GS+ 和 Fragstats 软件, 结合拐点分析、面积损失指数和地统计学模型, 确定了 2005-2023 年景观破碎化的最优尺度。此外, 研究还分析了景观破碎化的时空变化特征。研究结果表明: (1) 长株潭地区景观破碎化分析的最佳粒度为 60m, 最佳移动窗口半径为 900m。(2) 长株潭地区以林地和耕地为主导, 2005-2023 年间, 长株潭地区林地面积占比缩减 5%, 建设用地面积占比增加 2.6%, 城市空间扩张趋势显著。(3) 2005-2023 年间长株潭景观破碎化程度从时间上看呈微弱下降—显著上升—微弱下降的变化趋势, 从空间上看, 中西部平原地区破碎度明显高于东部山脉地区。2020 年达到最高水平, 高破碎化区域显著扩大。

关键词: 长株潭城市群; 移动窗口法; 景观破碎化; 时空异质性

Spatiotemporal Heterogeneity of Landscape Fragmentation in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration Based on Optimal Scale

Meng Shiqi, Chen Caihong, She Jiyun, Xu Ye

Central South University of Forestry and Technology, China Hunan Changsha 410004

Abstract: Since the promotion of integration, the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration has experienced a rapid urbanization process. Meanwhile, the regional landscape ecological structure has undergone significant changes, and the degree of landscape fragmentation has intensified. Therefore, a comprehensive and accurate analysis of the spatiotemporal patterns of landscape fragmentation provides a scientific reference for the optimization of the landscape pattern and the research on analysis scales in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region. Based on ArcGIS, GS+ and Fragstats software, combined with inflection point analysis, area loss index and geostatistical models, the optimal scales for landscape fragmentation analysis from 2005 to 2023 were determined. In addition, the study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of landscape fragmentation. The results show that: (1) The optimal grain size for landscape fragmentation analysis in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region is 60 meters, and the optimal moving window radius is 900 meters. (2) The Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region is dominated by forestland and cultivated land. From 2005 to 2023, the proportion of forestland area in the region decreased by 5%, while the proportion of construction land area increased by 2.6%, indicating a significant trend of urban spatial expansion. (3) From 2005 to 2023, the degree of landscape fragmentation in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region showed a temporal variation trend of slight decrease - significant increase - slight decrease. Spatially, the fragmentation degree in the plain areas of the central and western parts is significantly higher than that in the mountainous areas of the eastern part. It reached the highest level in 2020, with a significant expansion of high fragmentation areas.

Keywords: Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration; Moving window method; Landscape fragmentation; Spatiotemporal heterogeneity

0 引言

我国已进入城镇化快速发展的后期阶段, 如此高度的发展所带来的问题也逐渐显露出来, 城市人口高度密集,

土地利用结构变化剧烈。城市生态空间的自然基底, 正从原本均质、连续的景观形态, 逐步演变为异质化、离散化的复合景观格局, 其格局特征的复杂性持续加剧, 驱动着

生态过程与功能深刻转变。景观破碎化作为刻画土地利用空间异质性与复杂性的核心切入点,是指景观内斑块数量递增、斑块面积缩减,导致景观从单一均质的连续状态,向复杂异质的分散格局演变的过程,这一过程不仅会对生态系统的生物多样性维持、能量传递及物质循环等生态功能产生显著扰动,更可能通过生境退化、生态过程阻断等连锁反应,最终导致土地质量衰退与生态系统服务功能退化^[1]。因此,深入剖析区域景观破碎化的动态演变过程,具有重要的理论与实践价值。景观破碎化具有尺度效应,作为景观格局演变的一种形态,景观空间异质性会随空间粒度或幅度的变化而产生相应改变。现有研究表明,国内学者针对景观格局尺度效应的实证分析普遍揭示,由于区域异质性和景观系统复杂性的客观存在,不同地理单元及研究对象对应的景观格局最佳分析尺度存在明显差异,因此,如何为特定区域选取最佳分析尺度,是景观生态学领域的核心议题之一。现有研究中,多数研究者往往仅围绕空间粒度或空间幅度的某一层面,进行特定尺度的确定^[2],然而,将空间粒度与空间幅度二者结合考量,并借助长时间序列数据揭示区域景观破碎化时空演变规律的研究尚不多见。本研究立足于景观破碎化最优分析尺度的筛选,进而探究研究区景观破碎化的时空演变特征。

长株潭城市群是湖南省经济核心增长极,快速城镇化驱动区域土地利用快速转型,严重干扰生态系统结构与功能,景观破碎化问题日益凸显^[3]。目前学界针对自然本底特征复杂、社会发展差异大的城市群研究仍存在不足,且缺乏基于长时间序列的区域异质性分析^[4]。本文以长株潭城市群为研究对象,结合移动窗口法确定景观破碎化最佳分析尺度,聚焦其时空异质性开展研究,研究目的如下:(1)采用样带法与移动窗口法结合的方式,确定长株潭城市群景观破碎化的最佳分析尺度;(2)分析 2005—2023 年研究区土地覆盖的动态变化特征;(3)构建景观破碎化综合指数,定量评估并分析该时段内区域景观破碎化的时空异质性。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长株潭城市群位于湖南省中东部、湘江流域中游,由长沙、株洲、湘潭三市及其下辖 23 个区县共同组成,呈“品”字形沿湘江分布,核心城区两两相距不足 50 km,区域总面积约 2.8 万平方千米。同时,区内森林、湖泊、河流等生态资源丰富,湘江自北向南贯穿全域,构成“一江联三市”的“水上生态走廊”。随着中国经济的快速发展和

城市化进程的推进,长株潭城市群作为长江中游城市群的重要战略支点和湖南省“三高四新”战略的核心承载区,已成为中部地区经济增长最快、人口密度最高的城市群之一。但在城镇化进程中,绿地空间被不断挤占并转化为建设用地,致使区域景观破碎化程度日益加深,严重制约了长株潭地区的可持续发展进程。

1.2 数据来源

研究选取的 2005、2010、2015、2020、2023 年五期土地利用数据,对长株潭城市群 2005—2023 年景观破碎化的时空演变进行分析,土地利用数据来源于来源于武汉大学杨杰、黄昕教授团队发布的 30m 分辨率逐年土地覆盖数据集(CLCD)。基于 ArcGIS 10.8 软件,对长株潭城市群土地覆盖数据进行提取与预处理。将研究区土地覆盖划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 种类型。行政区矢量数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>),为保证数据空间一致性,所有数据均统一采用 WGS-1984-UTM-Zone-49N 坐标系作为空间参考基准。

2 研究方法

2.1 最佳尺度

本研究综合运用景观指数粒度效应分析法与基于均方根误差模型的区域土地面积变化指数法,筛选适用于长株潭城市群的景观破碎化指数,并进行粒度效应分析,具体计算公式如下。

$$L_i = \frac{A_i - A_{bi}}{A_i} \times 100$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^2}{n}}$$

式中: L_i 面积损失相对值; A_i 为尺度转换后某土地类型面积; A_{bi} 为尺度转换前该土地类型面积; S_i 为区域土地面积变化指数; n 为区域土地类型数量。

最佳分析幅度采用移动窗口法和半变异函数两种方法相结合的方式^[5],先计算出各指数的栅格图,再运用半变异函数确定研究区的最佳分析幅度,计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, h 为目标空间距离, $Z(X_i)$ 与 $Z(X_i + h)$ 为 $Z(X)$ 在 X_i 和 $X_i + h$ 上的值, $N(h)$ 是样本对总数。

2.2 景观破碎化指数

针对长株潭城市群的实际情况,结合景观生态学理

论, 选取斑块密度 (PD)、边缘密度 (ED)、最大斑块指数 (LPI)、景观形状指数 (LSI)、聚集指数 (AI)、景观分离度 (DIVISION) 和香农多样性指数 (SHDI) 7 个景观破碎化指数。

2.3 景观破碎化综合指数构建法

本研究通过景观破碎化综合构建法, 将七个景观破碎化指数结果进行整合, 构建景观破碎化综合指数。其表达式如下:

$$FI_{com} = a \cdot AI_{nor} + b \cdot DIVISION_{nor} + c \cdot ED_{nor} + d \cdot LPI_{nor} + e \cdot LSI_{nor} + f \cdot PD_{nor} + g \cdot SHDI_{nor}$$

式中: FI_{com} 为综合破碎化指数, AI_{nor} 、 $DIVISION_{nor}$ 、 ED_{nor} 、 LPI_{nor} 、 LSI_{nor} 、 PD_{nor} 、 $SHDI_{nor}$ 分别为归一化处理后的数值; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 为上述 7 个景观破碎化指数对应的权重, 通过熵权法^[6] 计算出结果值分别为 0.1326、0.1448、0.1152、0.1317、0.1436、0.1219、0.1440。将 FI 指数归一化处理后参考景观脆弱性评价方法和生态环境评价方法, 将长株潭城市的景观破碎化综合指数按等间距划分为 5 个等级。

3 结果与分析

3.1 最佳尺度分析

3.1.1 最佳粒度分析

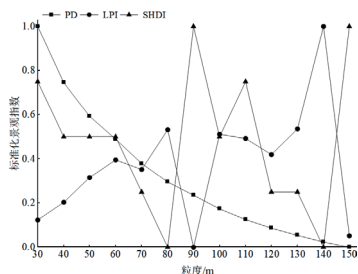


图1 景观格局指数随粒度变化情况

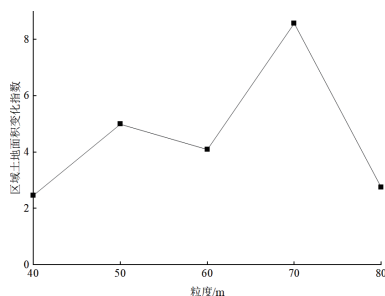


图2 区域土地面积精度随粒度变化情况

根据以往学者的研究选取 PD、LPI、SHDI 三个景观破碎化指数进行景观指数粒度效应分析。以 10m 为间隔、30m 为起点、150m 为终点得到 13 幅不同粒度大小的景观类型图, 再放入 Fragstats 中进行计算。因各景观指数的取

值范围具有差异性, 需要将景观指数进行归一化处理从而得出景观破碎化指数随粒度变化趋势图 (图 1)。随着粒度的变化 PD、LPI 和 SHDI 指数在 30~60m 的粒度区间内变化相对平缓, 在 60~150m 的粒度区间 LPI 和 SHDI 指数均出现剧烈波折, 因此确定研究区景观破碎化分析的适宜粒度区间为 30~60m。面积信息损失评价模型结果表明 (图 2), 粒度大于 60m 时, 面积变化指数快速增大, 景观类型信息丢失严重; 结合粒度效应分析, 确定 40~60m 为适宜分析粒度区间, 在保证分析精度的同时考虑到计算工作量选取 60m 作为最佳粒度进行景观破碎化分析。

3.1.2 最佳幅度

本文以上述所得的 60m 作为分析最佳幅度的分析粒度, 综合考虑 fragstats 软件的特性以及为了避免计算工作冗余, 选取 60m 的奇数倍作为移动窗口的尺寸, 分别计算出 PD、LPI 和 SHDI 三个指数在不同尺寸的移动窗口中所得到的景观指数栅格图, 再通过 GS+ 软件计算三个指数的半变异函数和块基比。

如图 3 所示, LPI 的块基比在窗口半径为 420m、660m、1140m、1260m 时出现明显拐点, 在 780m~1140m 内趋于平稳; PD 的块基比在 180~780m 的窗口半径区间内拐点明显有明显波折, 780m 后随窗口半径的增大 PD 的块基比趋于稳定; SHDI 的转折点则在 900m, 900m 之前 SHDI 的块基比较稳定, 但当窗口半径大于 900m 后, 块基比出现了明显曲折。综合 LPI、PD 和 SHDI 指数在各移动窗口大小的块基比变化, 表明 900m 的窗口半径可以作为反映研究区景观破碎化空间变异特征的内在尺度。

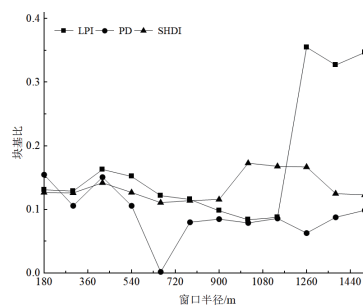


图3 景观指数空间变异特征

3.2 土地覆盖和景观格局指数变化特征

3.2.1 土地覆盖变化特征

根据长株潭城市群 2005、2010、2015、2020、2025 年五期土地覆盖图可知, 研究区 2005~2023 年的林地面积一直稳占总面积的 55% 以上, 其次为耕地占比超 35%, 二者面积之和占长株潭总面积的 90% 以上, 是研究区的两大优势地类, 其余土地覆盖类型占比按从大到小依次为建设

用地、水域、草地和未利用地。2010–2015 年，除林地外其他地类面积持续增加，耕地面积增加 391.33km²，建设用地面积增加 218.54km²，水域面积增加 10.58km²，草地和未利用地的面积增幅较小，林地面积减少 621.42km²；2015–2020 年，除建设用地和未利用地外，其他地类面积均出现不同程度的减少，耕地面积减少 146.82km²，林地面积减少幅度大幅降低，仅减少 22.17km²，水域面积减少 24.86km²，草地减少 1.13km²，建设用地面积增加了 194.83km²，未利用地增加 0.15km²；2020–2023 年，林地面积增加 239.71km²，建设用地面积增加 80.60km²，未利用地增加 0.04km²，耕地面积减少 283.40km²，水域面积减少 36.36km²，草地减少 0.58km²（见表 1）。

3.2.2 景观格局指数变化特征

本研究通过分析 60m 适宜空间分析粒度下的 2005 至 2023 年间的景观格局指数值，探讨了研究区域景观破碎化的变化趋势。2005–2015 年，斑块密度（PD）从 1.3467 逐年上升至 1.4536 呈增加趋势，在 2015–2023 年呈减少趋势，但整体斑块密度略有增加。2005–2023 年，最大类型斑块指数（LPI）从 67.3147 下降至 67.2681，表明区域优势景观斑块的优势度逐渐减弱。2005–2020 年，边缘密度（ED）呈显著增加趋势从 14.6145 增加至 16.0298，表明景观中的边缘数量增加，这是反映景观破碎化的直接指标。2005–2020 年，景观形状指数（LSI）从 107.8888 增至 118.2392，指示景观形状复杂度的增加。2005–2020 年，分离度指数（DIVISION）呈增加趋势，2020 年后呈减少

趋势，但整体变化幅度较小，表明研究区内景观分布变化不大。2005–2020 年，香农多样性指数（SHDI）呈逐渐增加趋势，景观类型呈现出多样化趋势，破碎化程度较高。2005–2023 年聚合指数（AI）从 95.6281 略降至 92.3089，表明相同类型斑块的聚合程度有所降低。研究区 2005–2023 年的七个景观指数值表明 2005–2020 年研究区景观破碎化程度呈增加趋势，2020 年后景观破碎化程度有较小的减少趋势（见表 2）。

3.3 景观破碎化的时空异质性

3.3.1 景观破碎化时空分异特征

从依据熵权法得到长株潭地区 2005–2023 年景观破碎化的综合指数图表来看。FI 均值由 2005 年的 0.233 降至 2010 年的 0.227，后急剧增加至 2020 年的 0.270，2023 年略降低至 0.264。从空间分布上来看，破碎化程度较为严重的地区主要集中在长沙、株洲、湘潭三市交界处和长沙市西部地区以及株洲市的醴陵市、攸县、茶陵县呈现出沿交通干线分布的特征。受地形影响山脉分布区域人类活动较小，研究区东部地区破碎化程度较轻。2010 年较 2005 年景观破碎化程度相对好转，重度和极度破碎化面积有明显减少，中度破碎化区域多集中在以长株潭核心区为中心的平坦地区以及醴陵市至攸县一带和茶陵县周边，是 2005–2023 年景观破碎化程度最低的时期。从 2010 年后，研究区景观破碎化程度不断增加，在 2020 年达到峰值，区域破碎化程度显著增加，重度和极度破碎化区域面积不断扩大，且中度破碎化区域不断向山地蔓延（见表 3）。

表1 长株潭城市群2005–2023年各地类面积

土地利用类型	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
	面积/km ²	面积/km ²	面积/km ²	面积/km ²	面积/km ²
耕地	9832.71	10576.97	10968.29	10821.48	10538.07
林地	17118.68	16138.53	15517.11	15494.94	15734.65
草地	2.04	3.43	4.38	3.25	2.67
水域	458.37	453.00	463.58	438.72	402.37
未利用地	0.01	0.04	0.04	0.19	0.23
建设用地	648.21	888.07	1106.61	1301.44	1382.04

表2 长株潭城市群2005–2023年景观格局指数变化

年份	PD	LPI	ED	LSI	DIVISION	SHDI	AI
2005年	1.3467	67.3147	14.6145	107.8888	0.5394	0.9028	95.6281
2010年	1.3944	67.3112	15.0250	110.8905	0.5396	0.9156	93.5052
2015年	1.4536	67.2344	15.6372	115.3679	0.5401	0.9249	93.3217
2020年	1.4411	67.2656	16.0298	118.2392	0.5403	0.9290	92.2039
2023年	1.3702	67.2681	15.6802	115.6826	0.5392	0.9285	92.3089

表3 长株潭城市群2005–2023年景观破碎化综合指数值变化

年份	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
FI均值	0.233	0.227	0.260	0.270	0.264

表4 长株潭城市群2005–2023年各级景观破碎化程度面积及占比变化

年份	面积/占比	微度破碎	轻度破碎	中度破碎	重度破碎	极度破碎
2005	面积km ²	12984.90	8706.47	5760.05	601.58	6.99
	占比%	46.28%	31.03%	20.53%	2.14%	0.02%
2010	面积km ²	12975.99	9454.48	5316.62	308.84	4.06
	占比%	46.24%	33.69%	18.95%	1.10%	0.01%
2015	面积km ²	11362.64	8945.97	6889.44	851.01	10.92
	占比%	40.49%	31.88%	24.55%	3.03%	0.04%
2020	面积km ²	10742.29	9031.96	7425.68	848.80	11.25
	占比%	38.28%	32.19%	26.46%	3.02%	0.04%
2023	面积km ²	11026.27	9116.99	7175.84	731.17	9.72
	占比%	39.30%	32.49%	25.57%	2.61%	0.03%

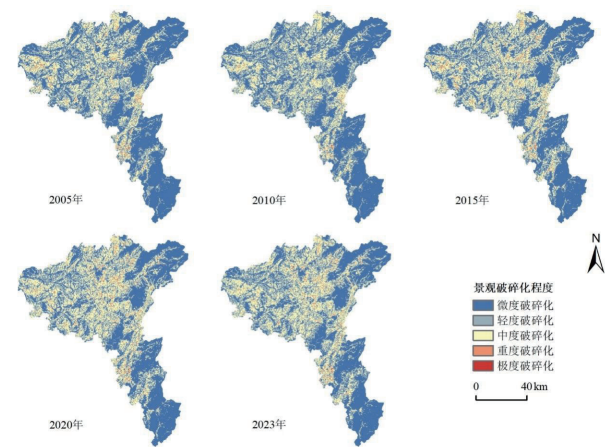


图4 长株潭城市群2005–2023年景观破碎化空间分布

2005 年–2023 年，研究区大部分区域景观破碎化程度基本保持不变，约占总面积的 73.5%，17.1% 区域有轻微增加；显著增加区域占 2.1%，显著减少区域仅占 0.4%，主要分布于长株潭核心区。轻微减少区域占 6.9%。整体来看，研究区景观破碎化程度基本保持稳定，在长株潭核心区城市周边及茶陵县一带呈现出明显的增加与减少相互交织的斑块格局（见表 4）。

4 结语

研究综合运用多种技术方法定量分析了在最佳尺度下长株潭地区 2005–2023 年景观破碎化的时空异质性，主要结论如下：

综合区域面积变化评价指数模型和半变异函数模型进行粒度和幅度效应分析，确定 60m 作为的最佳分析粒度，900m 作为最佳分析幅度用来计算区域景观破碎化指数，从而反映长株潭地区景观破碎化时空分异特征。

长株潭地区以林地和耕地为主导，建设用地和水域面积依次降低，草地和未利用地面积较小。2005–2023 年间，长株潭地区林地面积占比缩减 5%，建设用地面积占比增加

2.6%，城市空间扩张趋势显著。

2010 年景观破碎化程度较低，重度和极度破碎化区域分布较少，多聚集在主要城市周边；2020 年景观破碎化程度最高，大城市的城乡交错区遭受了较大的人为干扰，FI 均值达到 0.27，全域景观破碎化区域显著增加，中西部平坦地区已呈连片式分布，南部地区因地形影响呈带状分布；2023 年较 2020 年破碎化程度有所降低。

参考文献：

[1] 梁加乐, 陈万旭, 李江凤等. 黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测[J]. 生态学报, 2022,42(05):1993–2009.

[2] 陈雅如, 肖文发, 滕明君等. 三峡库区景观格局粒度效应及其对土地利用变化过程的响应[J]. 自然资源学报, 018,33(04):588–599.

[3] 李艺霖, 赵先超. 长株潭城市群生态环境与城镇化时空耦合协调关系——基于遥感生态指数和夜间灯光指数[J]. 地球科学与环境学报, 2024,46(03):307–320.DOI:10.19814.

[4] 张任菲, 肖萌, 刘志成. 京津冀地区景观破碎化的时空异质性及驱动因素研究[J]. 生态环境学报, 2025,34(03):461–473.DOI:10.16258.

[5] 鄢紫荆, 李枝坚, 曾辉. 惠州市景观格局空间分异特征的梯度分析[J]. 生态学杂志, 2021,40(02):490–500. DOI:10.13292.

[6] 沈润. 西双版纳景观破碎化演变与生态安全格局构建[D]. 云南师范大学, 2021.DOI:10.27459.

作者简介：蒙诗琪（2000.07–），女，汉族，四川达州人，中南林业科技大学、资源利用与植物保护专业，硕士研究生，研究方向：农业资源开发与利用。