

长沙市绿色空间与城市扩张耦合关系研究¹

李启珍^{1, 2, 3} 胡希军^{*1, 2, 3} 韦宝婧^{1, 2} 张亚丽^{1, 2}

陈存友^{1, 2, 3} 刘路云^{1, 2, 3}

(1. 中南林业科技大学 风景园林学院, 中国湖南 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学 城乡景观生态研究所, 中国湖南 长沙 410004;

3. 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心, 中国湖南 长沙 410004)

【摘要】：基于长沙市 2000、2010、2020 年土地覆被数据和统计数据，借助 ArcGIS、SPSS 分析工具，提取长沙市 6 区 1 县绿色空间和城市空间数据，从绿色空间迁移、城市重心迁移、城市扩张速率以及景观指数变化趋势等方面对长沙城市扩张的时空特征进行研究。结果表明：①2000—2020 年，6 区 1 县城市绿色空间和城市空间向东部和东北部迁移，城市空间吸引绿色空间集聚，向心力作用起主导作用。②绿色空间和城市空间“此消彼长”，6 区 1 县在近 20 年间城市空间以 14.23% 的扩张速率推进城市化进程，扩张总面积达 576.78 km²。③近 20 年间 6 区 1 县绿色空间的破碎度增加，集聚性降低，人为干扰强度大，而城市空间的集聚性增强，但两类空间的最大斑块面积均呈持续增加的状态，表明城市空间在成片扩张的同时也注重对生态空间的整合。

【关键词】：绿色空间；城市扩张；重心迁移；景观格局；耦合关系

【中图分类号】：C922 **【文献标志码】**：A **【文章编号】**：1000 - 8462 (2022) 11 - 0087 - 08

【DOI】：10.15957/j.cnki.jjdl.2022.11.010

城市扩张在发达国家主要表现为城市向周边农村地区进行的分散化、低密度的蔓延，而在我国则主要表现为随着城市经济快速增长和人口激增带来的城市边界扩张^[1]。城市绿色空间 (urban green space, UGS) 是自然生态环境与城乡人工环境的结合，指城市规划区内，环绕包裹城市建成区，以维系生态、保护土地为核心功能的自然或近自然开放空间系统^[2]。UGS 是人类生存的并维持美好生活的生态本底，城市的发展建设依赖于生态本底所提供的各类物质基础，广袤的绿色生态空间同时也促进了城市在扩张过程中的健康可持续。

¹ 收稿时间：2022 - 01 - 05；修回时间：2022 - 08 - 21

基金项目：湖南省“双一流”学科建设项目 (湘教通 [2018] 469 号)；国家自然科学基金项目 (31901363)

作者简介：李启珍 (1978—)，女，湖南长沙人，博士研究生，讲师，研究方向为城乡规划、景观规划与生态修复。E-mail: 67657221@qq.com

※通讯作者：胡希军 (1964—)，男，浙江东阳人，博士，教授，博士生导师，研究方向为景观规划与生态修复、风景园林规划与设计。E-mail: 120795043@qq.com

统计资料显示,改革开放后,1981—2014年,中国城市建设用地增加了6.44倍,年均净增1311km²^[3]。城市快速发展的同时,生态环境问题日渐突出,如生态资源损失、UGS比例下降、城市热环境效应增强、不透水表面和高建筑密度增加等^[4]。UGS发展重心不断迁移且面积逐渐缩小,其退化破坏了城市生态系统的结构,影响了城市发展的可持续性^[5]。为此,深入探讨城市绿色空间与城市扩张重心变化之间的内在机理,对科学布局各功能用地、引导城市健康可持续发展有着重大意义^[6]。

目前,已有学者从不同角度对城市扩张做了大量研究,主要集中在城市扩张的时空演变、驱动机制、城市扩张与经济及人口增长的耦合等方面。Gregory等认为,税收政策、经济活动、人口增长是城市扩张的主要原因^[7,8];Li Qizhen等采用重心法和循环统计法,分析了美国和中国10个不同城市的人口、经济和绿地重心的移动,认为除了一些特殊情况,如自然屏障或一些限制性的规划过程,这三个中心可以并排移动^[9];李晓燕等采用年均扩展指数、景观扩展指数等代表性景观指数,分析了建设用地扩展强度和模式的时空变化特征及驱动因素,认为国家政策、非农产业发展是加快城市扩展的重要力量^[10];Woldesemayat Eyasu Markos等对亚的斯亚贝巴1989—2019年城市扩张和城市绿地在变化幅度和方向上进行了评估,为城市规划走向可持续发展提供依据^[11];Kühn等研究发现城市绿地影响城市空间结构,对城市空间起着隔离和连接作用^[12,13]。但关于城市扩张和城市绿色空间的耦合分析相对缺乏。

本研究选取长沙市6区1县作为研究对象,采用重心分析法、景观格局指数和移动窗口法,探讨2000—2020年长沙市各区县城市绿色空间与城市空间、人口、经济重心迁移变化,进一步分析城市绿色空间与城市扩张的耦合关系及内在机理,为改善城市环境和优化城市空间布局提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长沙市位于111°53'E~114°15'E,27°51'N~28°41'N,总面积11819.5km²。本文以长沙市6区1县(以下统称“研究区”)作为研究长沙市绿色空间与城市扩张的区域,包括芙蓉区、天心区、岳麓区、开福区、雨花区、望城区和长沙县(紧邻核心城区),面积共计3906km²,占长沙市总面积的33%,常住人口约735.52万人,占长沙市总人口73.2%。

1.2 数据来源与处理

本文数据主要包括统计数据与土地覆被数据。其中统计数据来源于2001、2011和2021年长沙市统计年鉴。土地覆被数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)2000、2010和2020年全球30m地表覆盖数据(Global30),根据研究区行政边界矢量裁剪,获取研究区2000、2010和2020年土地覆被数据,包括森林、水体、耕地、草地、湿地、灌木地、城市绿地和人造地表。本研究将森林、水体、耕地、草地、湿地、灌木地、城市绿地归属于城市绿色空间,人造地表归属于城市空间(图1),统计数据见表1。矢量边界从国家基础地理信息数据中提取,矢量及栅格数据坐标系统一。

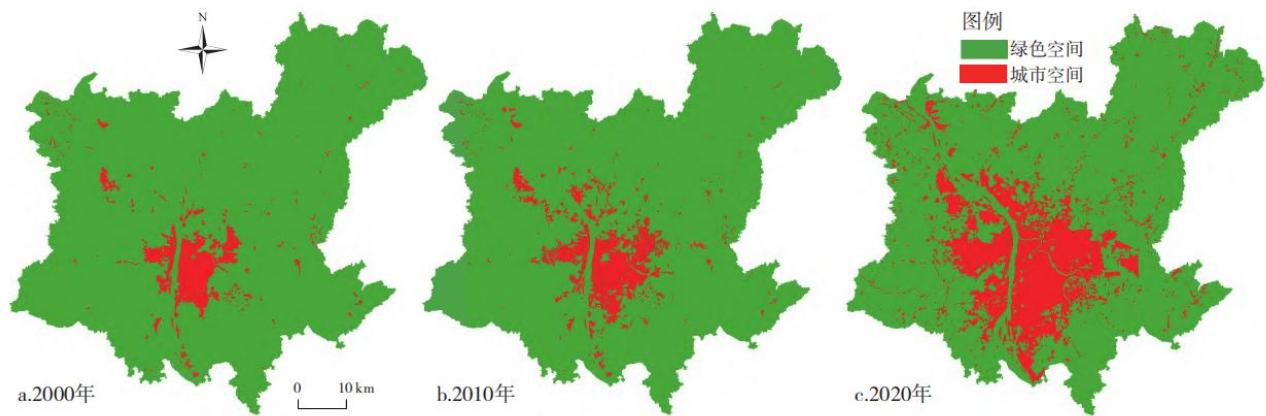


图1 绿色空间与城市空间分布(2000、2010、2020年)
Fig.1 Green space and urban space (2000, 2010 and 2020)

表1 绿色空间与城市空间面积(2000、2010、2020年)

年份	绿色空间(km ²)	城市空间(km ²)
2000	3 705.71	202.65
2010	3 616.59	291.77
2020	3 128.93	779.43

2 研究方法

2.1 重心分析

采用重心模型和重心的空间耦合态势构建总体耦合态势模型，以此来反映研究区城市扩张与绿色空间的整体耦合态势。重心模型源于力学领域，某一区域的重心表示该重心点的各个方向的力量基本持平^[14]。重心分析方法对研究不均衡分布的属性空间变化规律具有重要参考价值，其原理源于物理学，在研究中往往采用区域重心模型计算^[9]。

研究假设某区域由 n 个次级单元构成， (X_i, Y_i) 表示第 i 个次级区域中心城市坐标^[15]。重心计算公式为：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i}; Y = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

式中： X 、 Y 分别表示研究区域某种属性的经度值和纬度值； X_i 、 Y_i 分别表示第 i 个子区域该属性的经度值和纬度值； M_i 表

示第 i 个子研究区的某种属性值。

绿色空间和城市空间重心获取基于 ArcGIS 平台，将绿色空间和城市空间栅格转矢量、计算重心和点集转线等操作，得到绿色空间和城市重心迁移路径。重心迁移距离及迁移角度采用 ArcGIS COGO 工具中的 COGO Report 进行测量。

2.2 景观动态度模型

景观变化幅度为景观在某一段时间内的变化量，公式为：

$$\Delta U = U_b - U_a \quad (2)$$

景观动态度是指某一时间段内某一景观类型变化情况，用来评价不同景观类型在一定时间段内的变化量与变化速度，能够揭示景观类型变化的剧烈程度和变化趋势，在谭诗成的研究中也把景观动态度定义为景观扩张强度指数^[16]，在胡盼盼等的研究中将其称为扩张速率^[17]，用以表征城市扩张的总体趋势，计算公式为：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中：K 为某一景观类型动态度；U_a 和 U_b 分别为研究初期和末期某景观类型的面积，单位为 km²；T 为研究时段长。

2.3 景观格局分析

2.3.1 景观格局指数选取

景观格局指数高度浓缩景观格局信息，用来定量描述景观空间格局的变化，从一定程度上反映区域人类活动对景观的干扰程度^[18]。为了定量分析研究区 20 年来的景观格局变化情况，从斑块的破碎度、异质性及聚集度三个方面分别选取以下几个景观指数：破碎度包括斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、平均斑块面积（AREA_MN），景观异质性包括周长与面积比（PERA_MN）、分维数（FRAC_MN），多样性/聚集度包括聚集度指数（AI）^[19]。

2.3.2 移动窗口法

景观生态学领域中常用移动窗口法来表达不同类型景观要素的空间异质性、结构及动态变化^[20]。采用移动窗口法分析研究区景观空间分布格局，在空间上可以直观地观察绿色空间和城市空间在 2000—2020 年的景观动态变化。移动窗口法实现步骤：对设定固定值的移动窗口进行窗口内选中的栅格景观指数计算，每次移动 1 个栅格并计算，并将该值赋栅格中心，形成包含景观指数值的连续栅格图，研究表明当移动窗口为 1 km×1 km 时能更好地反映出长沙市景观格局的情况^[21]，利用 Fragstates4.2 的移动窗口模块，建立 1 km×1 km 的矩形窗口，以窗口为基本分析单元，将计算得到景观指数赋予窗口中心栅格，并从影像图像的左上方栅格依次移动窗口进行计算得到景观指数空间分布格局，计算结果能直观地表现研究区生态变化。

3 结果与分析

3.1 绿色空间与城市重心迁移分析

3.1.1 绿色空间重心迁移

2000—2020 年，长沙市绿色空间重心向东北方向共迁移了 1.73 km（表 2），迁移角度 27.47°。其中 2000—2010 年迁移距离比较小，往北偏东方向仅为 0.2 km，偏移角度 35.92°，而 2010—2020 年的迁移距离比较明显，往北偏东方向 1.53 km，偏移角度 26.35°。整体绿色空间的重心基本在长沙东北部地区。分区县来看（图 2），芙蓉区绿色空间整体向西部迁移了 1.52 km，偏移角度 6.92°；天心区绿色空间重心迁移 1.2 km，偏移角度最小，往西偏北迁移了 5.75°；长沙县和开福区绿色空间重心整体均向北部和东北部偏移，偏移距离在 1.5 km 左右，其偏移角度分别为 34.70° 和 24.61°；望城区绿色空间重心偏移最小，仅为 0.54 km，但其偏移角度较大，向西北迁移了 44.76°；雨花区和岳麓区绿色空间重心向东南方向迁移显著，重心迁移距离约 2 km，角度为 11° 左右，岳麓区整体向南偏东迁移，重心迁移距离在 2.1 km。其中长沙县和开福区绿色空间重心偏移方向与研究区的绿色空间重心方向一致，均往东北方向。

表 2 绿色空间与城市空间重心迁移

类型	时间段	迁移距离(km)	迁移方向	迁移角度(°)
绿色空间	2000—2010	0.20	北偏东	35.92
	2010—2020	1.53	北偏东	26.35
	2000—2020	1.73	北偏东	27.47
城市用地	2000—2010	0.95	北偏东	1.81
	2010—2020	0.44	东偏北	17.25
	2000—2020	1.17	北偏东	22.54

3.1.2 城市空间重心迁移

城市空间重心 2000—2020 年往北偏东方向迁移了 1.17 km，迁移角度 22.54°，这个时期，城市空间向东跨越了京港澳高速，星沙和马坡岭片区与主城区融合，并在北边跨越了石长铁路。2000—2010 年城市空间重心往北偏东迁移距离 0.95 km，角度为 1.81°，2000—2010 年，城市建设进入了发展机遇期，从 2007 年长株潭城市群的全国两型社会建设综合配套改革试验区，到 2009 年的《促进中部崛起规划》，系列政策促使长沙城市用地的扩张达到历史最高值，整体城市空间增加 89.12km²。而 2010—2020 年往东偏北方向仅迁移了 0.44 km，角度为 17.25°，这说明城市空间的快速扩张趋势得到了一定程度的控制与改善。长沙城市空间重心的迁移变化过程很好地反映了湘江新区建设、长株潭城市群一体化发展战略、城市规划的指导和行政区划调整对城市建设用地扩张的影响。对比研究区绿色空间和城市用地重心变化发现，2000—2020 年，城市绿色空间重心迁移方向与城市用地重心方向基本一致，且都在开福区，说明城市用地吸引绿色空间集聚，且向心力作用起主导作用。

3.2 绿色空间与城市扩张耦合分析

3.2.1 绿色空间与城市空间扩张的耦合

从研究区绿色空间与城市空间的变化幅度及动态度来看（表 3），绿色空间和城市空间是此消彼长的关系，长沙市在近 20 年间城市空间以 14.23% 的扩张速率推进城市化进程，扩张总面积达 576.78km²。2000—2010 年扩张速率为 4.40%，2010—2020 年

的 10 年间城市扩张加速, 扩张速率为 16. 71%, 接近前一阶段扩张速率的 4 倍, 在扩张面积上, 2010—2020 年扩张面积为 487. 66 km², 是前 10 年的扩张面积的 5 倍多; 绿色空间在近 20 年中一直处于被城市空间蚕食的状态, 2000—2020 年以 0. 78% 的萎缩速率被城市空间侵占, 2000—2010 年以 0. 24% 的速率被城市空间侵占, 面积达 89. 12km², 在 2010—2020 年萎缩速率加快, 为 1. 35%, 是前一阶段的 5. 6 倍多, 说明绿色空间被城市扩张侵占的幅度增大、速率加快。

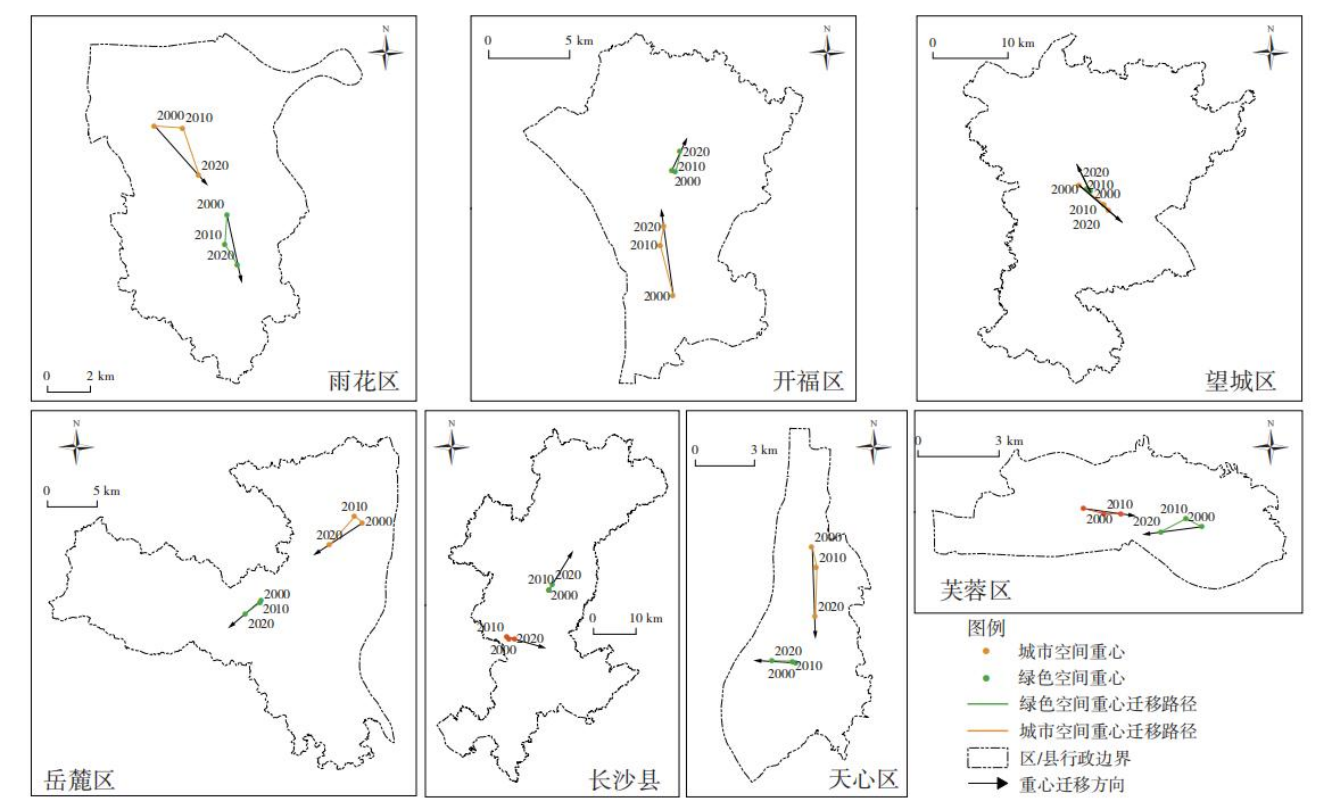


图2 分区县绿色空间与城市空间重心迁移路径(2000—2020年)
Fig.2 Gravity center migration of green space and urban space in each district and county (2000–2020)

表 3 绿色空间和城市空间动态变化

时间段	绿色空间		城市空间	
	变化幅度 (km ²)	动态度 (%)	变化幅度 (km ²)	动态度 (%)
2000—2010	-89. 12	-0. 24	89. 12	4. 40
2010—2020	-487. 66	-1. 35	487. 66	16. 71
2000—2020	-576. 78	-0. 78	576. 78	14. 23

从研究区绿色空间与城市空间的转移情况来看（表 4，图 3），2000—2010 年有 111.29 km² 的绿色空间被开发建设为城市空间，占研究区总面积的 2.85%，新增城市空间均在原城市空间外围扩张。2000—2010 年有 22.18 km² 的城市空间转为绿色空间，仅占长沙市区总面积的 0.57%。2010—2020 年城市空间在前一阶段的基础上继续向周边扩张，有 498.07 km² 的绿色空间转为城市空间，而城市空间转为绿色空间为 10.45 km²，零星分布在成片的城市空间中。整体来说 2000—2020 年城市空间从中心城区向周边各个方向进行扩张，以成片开发为主，零星建设为辅，以城市主要道路建设为引力带动城市发展方向。较大斑块的绿色空间逐步被压缩在城市空间的外围，零星的绿色空间分布在城市空间中，承担着改善、调节城市人居环境的重要生态作用，从空间分布、数量上来看并不能满足缓解城市热岛效应、净化空气等需求。穿城而过的湘江及湘江风光带成为良好的通风廊道，为长沙市的空气流通及能量输送发挥了极为重要的作用。此外，在这 20 年间长沙市还建设了浏阳河、捞刀河、靳江河等多条滨水绿道，将密集的城市空间分割开来，增加绿色空间的景观连通性，打造独特的“山水洲城”。

3.2.2 绿色空间与城市空间景观格局耦合

对研究区 2000—2020 年绿色空间和城市空间进行景观格局分析，结果表明两种类型空间的景观格局变化显著（表 5）。由图 4 可知，在这 20 年间，绿色空间和城市空间用地面积（CA）呈相反趋势发展，尤其在 2010—2020 年，城市空间的用地面积急剧增长，而绿色空间面积则不断下降，西北部和南部变化显著。同时，城市空间的 PD 增加了 5 倍，绿色空间的 PD 呈现出先上升后下降的趋势，2010—2020 年下降速度较快，表明绿色空间斑块的破碎化程度有所降低。

表 4 绿色空间和城市空间转移情况

时间段	保持城市空间		保持绿色空间		城市空间转绿色空间		绿色空间转城市空间	
	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	(km ²)	占比(%)
2000—2010	180.48	4.62	3 594.42	91.97	22.18	0.57	111.29	2.85
2010—2020	281.32	7.20	3 118.13	79.79	10.45	0.27	498.07	12.74
2000—2020	192.62	4.93	3 118.55	79.80	10.03	0.26	586.76	15.01

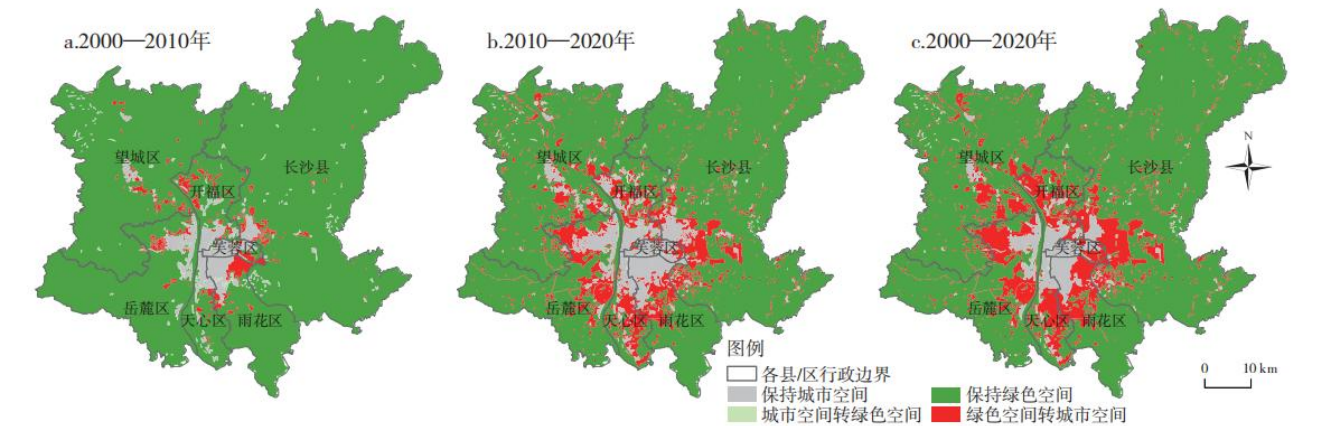


图 3 绿色空间与城市空间时空转移
Fig.3 Distribution of area change of green space and urban space

2000—2010 年，城市空间的 LPI 有所降低（图 5），绿色空间 LPI 则迅速下降。2010—2020 年，两种类型空间的 LPI 随着城市空间增长而增长，表明城市空间在成片扩张的同时也注重对生态空间的整合。绿色空间的 AREA_MN 在 2000—2010 年呈现急剧下降，2010—2020 年增长迅速，这与 PD 的变化趋势相一致，城市空间在这期间也经历了先下降后上升的多重阶段。

绿色空间和城市空间两类型空间的 PARA_MN（图略）变化趋势较为一致，2000—2010 年稳步上升，2010—2020 年逐步下降，斑块形状由复杂向规则化发展，斑块异质性降低，表明受人类活动干扰影响较大。两类空间的 FRAC_MN 呈相反趋势（图略），在 2000—2010 年阶段城市空间逐步上升，绿色空间缓慢下降；2010—2020 年则与上一阶段的发展方向相反，表明空间斑块的破碎程度较不稳定。

由图 6 可知，城市空间聚集度 AI 表现为先下降后上升的趋势，而绿色空间的 AI 持续缓慢下降，表明城市空间的聚集性不断增强，结构更加紧凑，绿色空间逐渐散状分布。2000—2010 年城市空间和绿色空间在聚集度增加区域呈现分异，绿色空间减少的区域与其异质性增强的区域一致。2010—2020 年城市空间增加区域与其景观格局指数的降低区域重叠。

表 5 绿色空间和城市空间景观格局指数（2000—2020 年）

年份	CA		PD		LPI		AREA_MN		FRAC_MN		PARA_MN		AI			
	绿色	城市	绿色	城市	绿色	城市	绿色	城市	绿色	城市	绿色	城市	绿色	城市		
	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间	空间		
2000	370	537.74	20	295.90	0.08	0.04	94.70	2.28	1161.56	118.00	1.04	1.07	1026.17	169.03	99.71	96.76
2010	361	753.47	29	080.17	0.36	0.05	49.49	2.09	136.67	76.33	1.03	1.07	1108.20	589.42	99.40	94.03
2020	312	827.13	78	006.51	0.07	0.22	78.47	10.74	1089.99	90.18	1.05	1.07	680.14	252.09	99.03	96.68

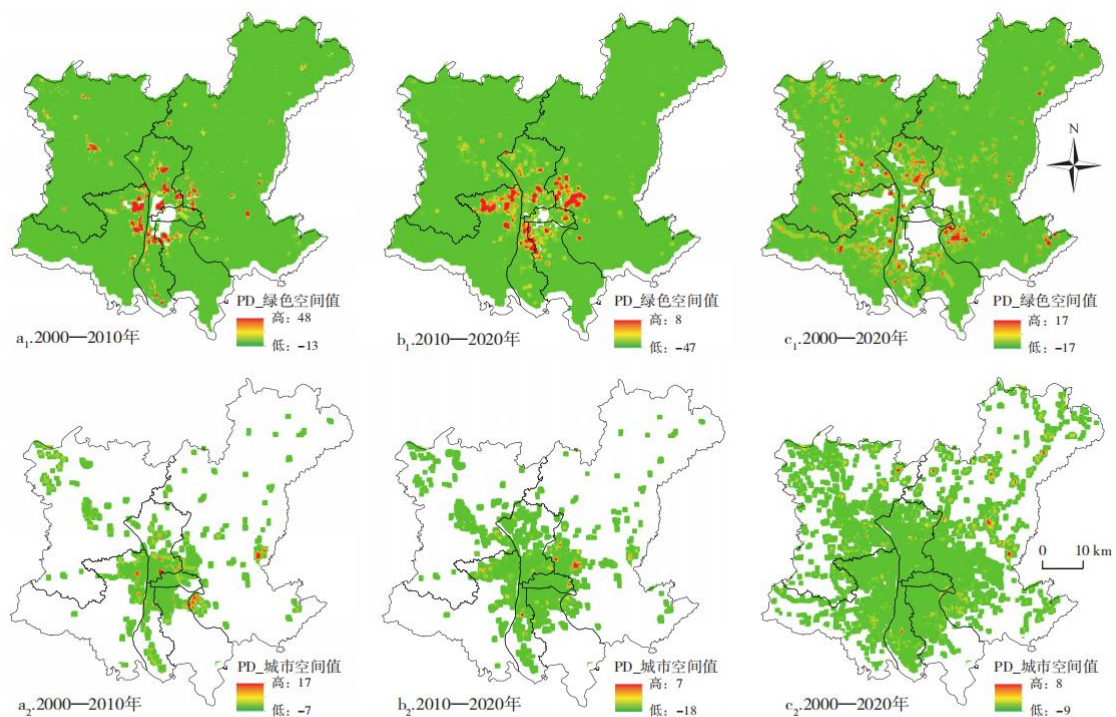


图4 绿色空间与城市空间斑块密度时空变化
Fig.4 PD changes of green space and urban space

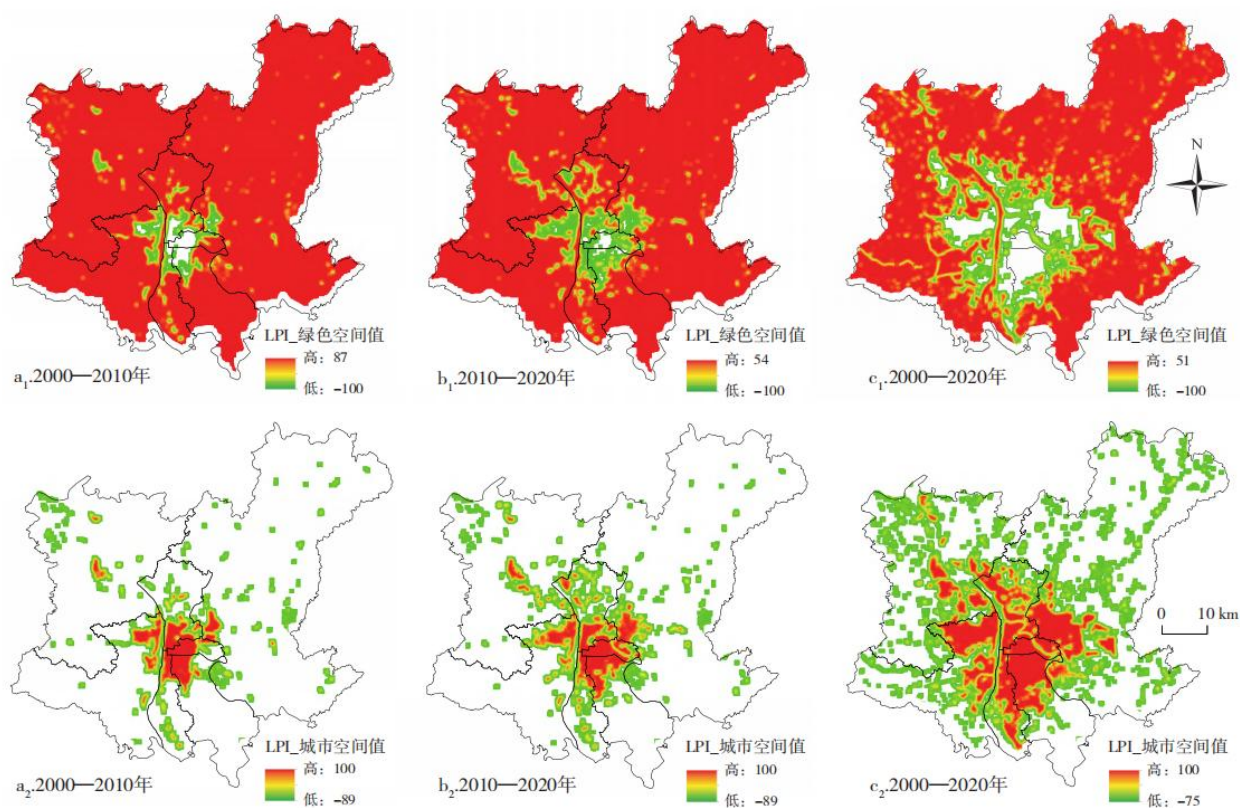


图5 绿色空间与城市空间最大斑块面积时空变化
Fig.5 LPI changes of green space and urban space

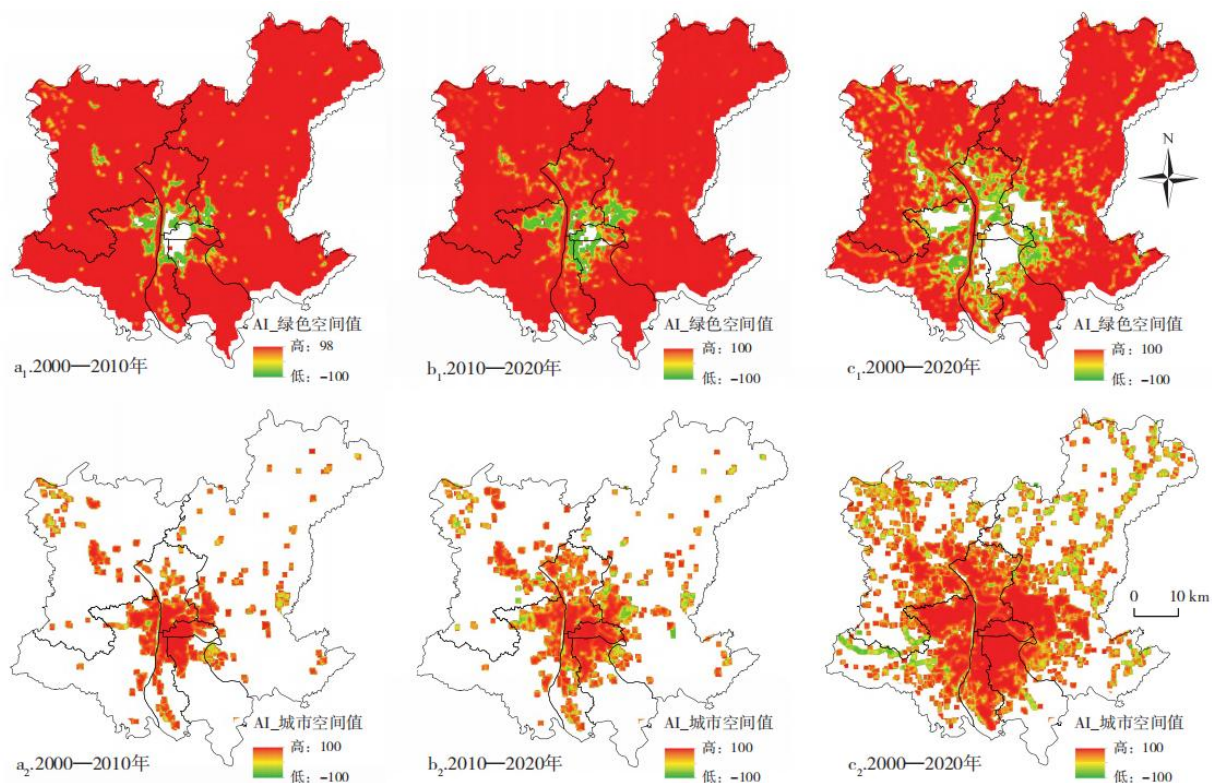


图6 绿色空间与城市空间斑块聚集度时空变化
Fig.6 AI changes of green space and urban space

4 结论与讨论

城市扩张是最激烈的土地利用变化形式，在多个时空尺度上影响了城市的景观格局、生态环境、土地利用[22, 23, 24]的变化。本文聚焦城市绿色空间与城市扩张，从理论与实证两方面进行了较为深入的研究。主要研究结论有：①基于土地覆被和长沙市统计数据的重心分析表明，2000—2020 年研究区城市绿色空间和城市空间向东部和东北部迁移，城市空间吸引绿色空间集聚，向心力作用起主导作用。②从绿色空间与城市空间的变化幅度及动态度来看，绿色空间和城市空间是此消彼长的关系，研究区在近 20 年间城市空间以 28.46%的扩张速率推进城市化进程，扩张总面积达 576.78 km²。③从绿色空间和城市空间景观格局耦合来看，2000—2020 年研究区绿色空间和城市空间用地面积的斑块类型面积（CA）呈相反趋势发展，斑块密度（PD）与最大斑块占景观面积比例（LPI）的变化趋势表明城市空间在成片扩张的同时也注重对绿色空间的整合；平均斑块大小（AREA_MN）和平均斑块分维数（FRAC_MN）的变化趋势表明人类活动对绿色空间的干扰增大；在绿色空间集聚性（AI）持续缓慢下降的同时，城市空间的集聚性不断增强。

通过对研究区绿色空间与城市扩张耦合关系的研究表明，城市发展应充分发挥城市绿色空间对城市空间结构的引领作用，强化城市绿地系统规划。在城市中心“见缝插绿”，增加绿地斑块；在新城区规划时提前部署城市绿地，合理估算城市绿地的辐射范围，避免城市空间的不合理蔓延，科学引导城市空间有序向外拓展以满足人们生活和社会经济发展需求。

参考文献

- [1] Amponsah O, Blija D K, Ayambire R A, et al. Global urban sprawl containment strategies and their implications for rapidly urbanising cities in Ghana[J]. Land Use Policy, 2022, 114:105979.

-
- [2] 曹加杰, 傅剑玮. 基于 InVEST 模型和最小成本路径的城市绿色空间生境网络构建方法研究——以南京为例[J/OL]. 中国园林: 1-10[2022-10-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail>.
- [3] 崔秀萍, 郭永新. 近 40a 西部城市群土地利用结构时空动态演化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2):16-24.
- [4] Peng J,Xie P,Liu Y,et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors:A case study in the Beijing metropolitan region[J]. Remote Sensing of Environment,2016,173:145-155.
- [5] Trinder J,Liu Q. Assessing environmental impacts of urban growth using remote sensing[J]. Geo-Spatial Information Science, 2020, 23(1):20-39.
- [6] 王旭熙, 彭立, 刘守江, 等. 中国西南山区城市建设用地扩张特征及其驱动机制[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9):2895-2903.
- [7] Squires G. Urban Sprawl:Causes,Consequences,and Policy Responses[M]. Washington,D.C.:Urban Institute Press,2002.
- [8] Surya B,Salim A,Hernita H,et al. Land use change,urban agglomeration,and urban sprawl:A sustainable development perspective of Makassar City,Indonesia[J]. Land, 2021, 10(6):556.
- [9] Li Q,Thapa S,Hu X,et al. The relationship between urban green space and urban expansion based on gravity methods[J]. Sustainability, 2022, 14(9):5396.
- [10] 李晓燕, 李慧颖, 满卫东, 等. 哈长城市群城镇用地扩展进程及其驱动因素研究[J]. 地理科学, 2018, 38(8):1273-1282.
- [11] Woldeamayrat E M,Genovese P V. Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa:Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index[J]. Forests, 2021, 12(4):389
- [12] Kühn M. Greenbelt and green heart:separating and integrating landscapes in European city regions[J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(1):19-27.
- [13] Arshad S,Ahmad S R,Abbas S,et al. Quantifying the contribution of diminishing green spaces and urban sprawl to urban heat island effect in a rapidly urbanizing metropolitan city of Pakistan[J]. Land Use Policy, 2022, 113:105874.
- [14] 沈映春, 张之蔚. 城市土地扩张与人口增长耦合测度与政策研究——以京津冀为例[J]. 北京航空航天大学学报: 社会科学版, 2020, 33(1):99-105, 115.
- [15] 沈续雷, 王桂新, 孔超. 中国人口分布和经济发展空间不均衡性对比研究[J]. 人口与发展, 2009, 15(6):69-73.
- [16] 谭诗成. 丘陵水系视角下的长沙市都市区开放空间演变研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [17] 胡盼盼, 李锋, 胡聘, 等. 1980—2015 年珠三角城市群城市扩张的时空特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41(17):7063-7072.

-
- [18] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [19] Hou L, Wu F, Xie X. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108:105720.
- [20] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 图尔荪阿依·如孜, 等. 哈密绿洲生态环境质量空间格局变化[J]. *草业科学*, 2021, 38(1):20-31.
- [21] 徐银凤, 汪德根, 沙梦雨. 双维视角下苏州城市空间形态演变及影响机理[J]. *经济地理*, 2019, 39(4):75-84.
- [22] 蔡永龙, 刘松, 李文辉, 等. 供需视角下城市地域扩张的逻辑框架构建——兼论贵州城市地域扩张[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(1):11-20.
- [23] 党雪薇, 周亮, 胡凤宁, 等. 关中平原城市群扩张对生态用地的多尺度影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(7):3020-3032.
- [24] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于空间区位条件的长株潭城市群城市用地扩张研究[J]. *经济地理*, 2020, 40(5):183-190.