

中部快速城市化地区城市扩张与生态景观时空异质性分析—以武汉市为例¹

张雪松^{1,2}, 王云冬^{2*}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

【摘要】: 中国正处于城市化快速发展阶段, 城市扩张侵占生态空间, 导致大量生态景观日益破碎, 分析城市扩张与生态景观的时空异质性可促进生态文明建设和城市可持续发展。采用景观扩张指数(LEI)结合形态学空间格局分析法(MSPA)研究武汉市城市扩张与生态景观时空异质性特征, 并通过建立多环缓冲区分析城市扩张类型与生态景观类型变化的关联特征。结果表明: (1) 城市扩张类型中边缘式扩张处于主导地位但扩张速度逐渐减慢, 飞地式扩张数量减少, 分布于远城区且分散较广, 填充式扩张则较集中连片, 主要集中于江岸区等中心城区; (2) 不同圈层的城市扩张类型和生态景观类型的关系在不同发展阶段差异显著; (3) 生态景观类型以景观核心区为主, 中心城区景观核心区面积随城区扩张减少, 在城市扩张过程中, 生态景观总体上越加破碎, 边缘式扩张会加速生态景观核心区减小, 飞地式扩张加剧景观单元的破碎化, 填充式扩张则会弱化生态景观的破碎。本研究结果可为武汉市国土空间规划中提供决策参考, 并对中部快速城市化地区同类研究具有借鉴意义。

【关键词】: LEI; MSPA; 城市扩张; 生态景观; 武汉市

【中图分类号】: F301.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023) 08- 1583- 11

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj202308003

随着社会经济的快速发展与城市化进程持续推进, 城市扩张难免与生态资源争夺空间, 进而导致一系列生态环境问题, 严重制约快速城市化地区的可持续发展[1]。我国正处于城市化快速推进阶段, 城市建设用地需求和规模都在扩大, 大中型城市迅速发展, 形成多个城市群、城市圈, 由城市无序蔓延所导致的社会、经济、生态问题频发[2]。如何协调城市扩张与生态环境保护之间的关系, 成为社会重点关注的问题。中共十八大作出“大力推进生态文明建设”的重大战略决策[3], 强调要控制城市开发强度, 防止“摊大饼式扩张”。党的二十大报告中指出, 要“推动绿色发展”, 强调“要解决城市发展的不平衡不充分”[4]。加强城市扩张与生态景观变化异质性的研究, 对认清城市扩张所带来的负效应, 进而提出促进可持续发展相关决策具有重要现实意义。

目前, 关于城市扩张的研究主要集中于建设用地扩张模式和形态[5,6,7,8,9,10]、驱动机制[10,11,12]、空间模拟预测[13,14,15]、城市扩张与碳排放[16,17,18,19,20]以及城市热岛斑块扩张[21]等方面。对于城市扩张与生态景观研究, 主要有景观格局演变、生态系统服务[22]等。城市建设用地扩张会侵占不同类型的生态景观, 如林地、湖泊及草地等[23], 然而现有研究大都只涉及到建设

¹ 收稿日期: 2022- 12- 21; 修回日期: 2023- 06- 12

基金项目: 湖北省国土整治中心 2022 年度专项科研课题; 自然资源部土地整治重点实验室江汉平原一体化国土整治修复湖北科研工作站 2022 年度专项科研课题(HBZC- CG- 2022- Z1015)

作者简介: 张雪松(1971~), 男, 教授, 主要研究方向为国土空间规划、国土整治、景观生态学. E-mail: zxsqgs@263.net

*** 通讯作者** E-mail: wyd9810@163.com

用地扩张对某一类型景观的研究，如城市扩张对森林[24]、基本农田[25]和水[26]的影响研究，鲜有涉及到不同城市扩张类型与多种生态景观类型的关联研究。当前我国生态文明建设进程加快，实现城市发展与生态保护的协调，促进经济社会高质量发展，显得尤为迫切。随着国家“中部崛起”战略的进一步推进，中部地区城市化正处在快速发展阶段，统筹城市扩张与生态文明建设对保障该区域生态系统功能和推动社会高质量发展具有重要意义。对此，本文以处于中部的国家中心城市武汉市为研究区，通过景观扩张指数方法分别计算 2000~2020 年 3 个时段的景观扩张指数值，并将城市扩张划分为 3 种类型：填充式(Infilling)、边缘式(Edge-expansion)以及飞地式(Outlying)。运用 GuidosToolbox 软件进行 MSPA 分析，得到 7 种生态景观类型，分析城市扩张与生态景观时空异质性特征，并通过建立多环缓冲区分析武汉市不同的城市扩张模式与不同的生态景观类型变化之间的关联特征，在此基础上提出国土空间规划相关建议，以促进“山水林田湖草沙”生命共同体建设，为武汉市可持续发展提供决策参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区域概况

武汉市(113° 41' E~115° 05' E,29° 58' N~31° 22' N)为湖北省的省会,位于长江及其最大支流汉江交汇的华中地区(图 1)。武汉市总面积 8 569.15 km²,辖武昌、江岸、江汉、青山、硚口、汉阳和洪山 7 个中心城区和江夏、蔡甸、东西湖、黄陂、汉南和新洲 6 个远城区[27]。据第七次全国人口普查显示,武汉市人口 2020 年比 2000 年增加 483.46 万人,常住人口总量持续增长,人口质量显著提升,人口流入趋势更加明显。城镇化水平不断提高,2020 年城镇化率 84.31%,较 2010 年增加 7.24%。武汉市生态资源丰富,拥有 166 个湖泊,境内长江、汉江、梁子湖和东湖等不同水体交织在一起,形成了纵横交错的江湖水网,水域资源极为丰富,是城市发展建设的战略性资源。近年来武汉市作为长江中游城市群的核心城市,在“中部崛起”战略的推动下,正经历着土地利用的高速重构、社会经济的逐步转型,2000~2020 年建设用地面积增长了 2.5 倍,水域和耕地面积出现不同程度的下降,城市空间扩张特征明显,生态景观格局变化显著。

1.2 数据来源及其预处理

研究区数据来源包括 2000、2010 和 2020 年土地利用数据,来自 Zenodo 网站(<https://doi.org/10.5281/zenodo.5210928>)提供的 CLCD 土地覆盖数据集。该数据集包括耕地、林地、灌木、草地、水域、冰川、裸地、建设用地和湿地 9 个一级类型,空间分辨率为 30m。遥感影像数据来源于国家地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),行政区划数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;社会经济统计数据来源于相应年份的《武汉市统计年鉴》;本文利用武汉市土地利用数据确定建设用地,同时利用图新地球历史影像图判读对比以辅助筛选参考。

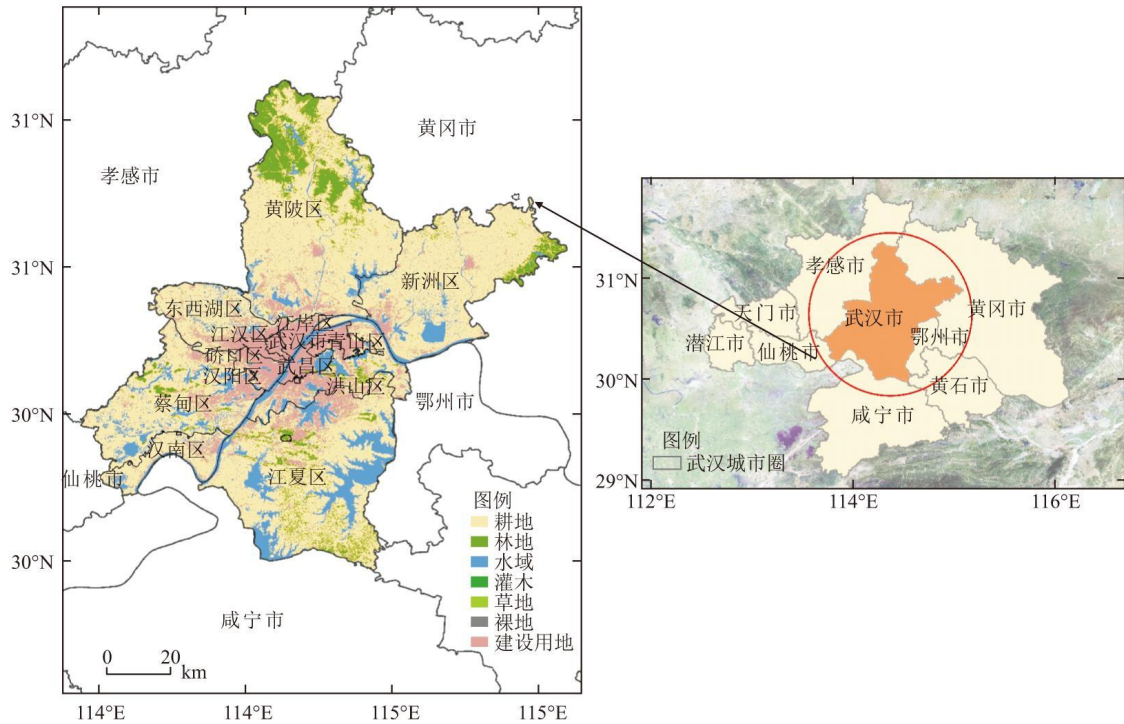


图 1 研究区地理位置示意图

2 研究方法

2.1 形态学空间格局分析(MSPA)

形态学空间格局分析(MSPA)[28]可以识别土地利用类型与结构要素之间的空间拓扑关系,运用形态学中序列运算的方法将图像分成互斥的类别。对研究区的土地利用数据进行重分类,根据武汉市特征,提取林地、灌木、草地、水域土地利用类型景观斑块为前景数据并赋值为 2,其他地类设为背景数据并赋值为 1,Nodata 缺失数据赋值为 0。将数据导入 GuidosToolbox 软件转换为二值栅格数据,通过八邻域法进行分析,得到具有核心区、桥接区、孔隙、边缘区、孤岛斑块、支线、环道区 7 种生态景观类型的栅格数据,然后,再对生成的栅格数据进行统计处理。

2.2 景观扩张指数(LEI)

景观扩张指数(Land Expansion Index, LEI)是通过现有城市斑块与新增斑块的空间位置关系来确定城市用地的空间扩张模式。景观扩张指数是由刘小平等[29]提出的,可以用来定量描述景观的动态扩张类型和空间分布,常应用于城市景观格局演变、扩张模式的相关研究,LEI 指数是基于目标景观斑块的缓冲区计算的,具体计算方法如下:

$$LEI = \frac{a_0}{a_0 + a_v} \times 100$$

式中:LEI 是新增建设用地斑块的景观扩张指数; a_0 是新增斑块的缓冲区与原有斑块相交区域的面积; a_v 是缓冲区与空白

部分相交区域的面积。根据 LEI 的计算结果, LEI=0,为飞地式扩张; 0<LEI<50,为边缘式扩张; LEI>50,为填充式扩张。飞地式是指独立现有城市建设用地的新增用地, 边缘式是指在现有的城市用地边缘新增用地, 填充式是指在现在的城市用地里面填充新增用地。根据数据来源以及武汉市的实际情况, LEI 缓冲区距离采用 200 m 计算景观扩张指数。

3 结果与分析

3.1 武汉市土地利用时空变化

由表 1 知, 武汉市土地利用类型中耕地面积最大, 其次是水域、建设用地、林地, 灌木、草地与裸地面积较小。建设用地面积在 2010 年以前小于水域用地面积, 2020 年建设用地面积与水域面积基本持平。研究期内, 耕地、水域和灌木面积持续下降, 耕地面积由 2000 年的 6 237.308 3 km² 下降到 2020 年的 5 560.302 3 km²,减少 677.006 0 km²(10.85%);水域面积由 2000 年的 1 300.169 8 km² 下降到 2020 年的 1 190.042 0 km²,减少 110.127 8 km²(8.47%);建设用地面积由 2000 年的 525.527 1 km² 增加到 2020 年的 1 177.989 0 km²(124.15%),呈现出明显的倍数扩张态势, 变化程度较剧烈。2000~2020 年林地面积增加了 137.271 1 km²,2000~2010 年草地略有增加, 2010 年之后减少了 2.717 0 km²。20 年间灌木用地面积持续减少; 2010 年裸地面积与 2000 年相比减少了 0.794 5 km²,2020 较 2010 年略有增加, 增加了 0.109 8 km²。以上土地利用演变过程表明, 20 年期间武汉市经历了快速的城镇化过程, 大量的水域、耕地、草地转化为建设用地, 建设用地面积总体呈上升, 扩张十分显著。

表 1 2000~2020 年武汉市不同年份土地利用类型面积及其增长率

年份	耕地		林地		灌木		草地	
	面积 (km ²)	增长率 (%)	面积 (km ²)	增长率 (%)	面积 (km ²)	增长率 (%)	面积 (km ²)	增长率 (%)
2000	6 237.308 3	-	508.095 7	-	0.027 0	-	3.130 2	-
2010	5 927.052 2	-4.97	515.506 8	1.46	0.015 3	-43.33	3.954 5	26.33
2020	5 560.302 3	-6.19	645.366 8	25.19	0.005 2	-66.01	1.237 5	-68.71

年份	水域		裸地		建设用地	
	面积 (km ²)	增长率 (%)	面积 (km ²)	增长率 (%)	面积 (km ²)	增长率 (%)
2000	1 300.169 8	-	1.055 5	-	525.527 1	-
2010	1 269.277 3	-2.38	0.261 0	-75.27	859.246 5	63.50
2020	1 190.042 0	-6.24	0.370 8	42.07	1 177.989 0	37.10

2000~2020 年武汉市下辖 13 个区土地利用变化存在明显的异质性, 主要体现在: 2000~2020 年, 除武昌区和新洲区, 其他 11 个区耕地面积均明显减少, 武昌区和新洲区耕地面积在 2010~2020 年有小幅增加, 但较 2000 年耕地面积总体减少; 蔡甸区水域面积由 2000 年的 165.059 2 km² 增加到 2020 年的 181.685 4 km²;汉阳区、洪山区、黄陂区、江岸区、江汉区、青山区、武昌区水域面积呈现出明显的减少态势, 其中洪山区水域面积减少量最大, 为 38.286 4 km²;13 个区建设用地面积均显著增加, 其中江夏区建设用地面积增加最多, 增加率为 294.37%;蔡甸区、东西湖区、汉南区、汉阳区、洪山区裸地面积 2020 较 2010 年

略有增加,黄陂区、新洲区、江汉区裸地面积减少,总体各区变化幅度较小;黄陂区、江夏区、新洲区、青山区林地面积持续增加,江岸区、武昌区林地面积持续减少,蔡甸区、东西湖区、汉南区、汉阳区、洪山区林地面积先减少后增加;2000~2020年黄陂区、江岸区、新洲区草地面积持续减少,汉阳区草地面积持续增加,其他9个区草地面积总体呈波动下降。

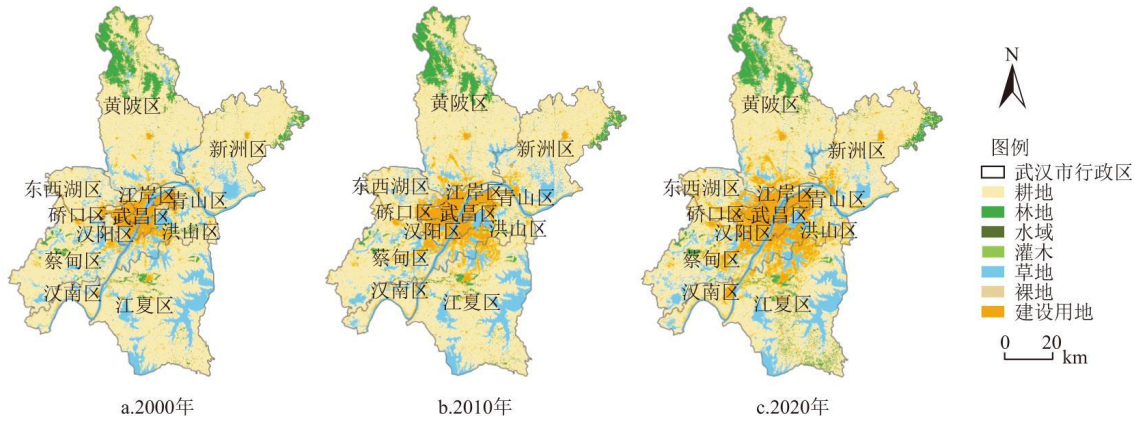


图 2 2000~2020 年武汉市土地利用图

3.2 武汉市建设用地扩张时空演化

2000~2010、2010~2020 年武汉市城市建设用地斑块数分别增加 853、890 块,扩张斑块数明显增加,2010~2020 年城市扩张更为迅速。从表 2 知,研究期内武汉市城市扩张以边缘式为主,占比 70%以上,在 2000~2010 年间,边缘式扩张占据了新增建设用地面积的 74.62%,在 2010~2020 年间增至 78.14%。飞地式扩张和填充式扩张所占的面积比例不断减少,飞地式扩张所占的比例由 2000~2010 年的 4.91%减至 2010~2020 年的 1.78%,主要分布于远城区且分散较广;填充式扩张所占的比例由 2000~2010 年的 20.48%减少到 2010~2020 年的 20.08%,减小幅度较小,仅为 0.40%,空间分布则较集中连片,主要集中于江岸区、汉阳区、江岸区、硃口区,这与中心城区开发建设利用率有关。

2000~2010 年,城市建设用地扩张主要集中在蔡甸区、东西湖区、洪山区、黄陂区、江夏区,占据了新增建设用地总面积 10%以上,青山区、武昌区扩张面积相对较小;2010~2020 年,江夏区建设用地扩张面积最大,占比达到 22.08%,江夏区处于以武鄂黄黄为核心的武汉都市圈中心位置,自 2007 年武汉城市圈获批后重点发展车光产业,城市建设用地扩张迅速;其次是洪山区和蔡甸区,江汉区和武昌区扩张面积占比较小。从图 4 可知,蔡甸区、东西湖区、汉南区、洪山区、黄陂区、江夏区、武昌区、新洲区 8 个区扩张类型以边缘式为主,与区域产业发展有关;汉阳区、江汉区、江岸区、硃口区扩张类型以填充式为主,汉南区以边缘式为主,飞地式为补,青山区扩张类型 2000~2010 年只有边缘式,2010~2020 年为填充式和边缘式,但扩张面积占比较小。

表 2 2000~2020 年武汉市各区扩张类型斑块面积百分比(%)

行政 区	飞地式		边缘式		填充式		合计	
	2000~2010	2010~2020	2000~2010	2010~2020	2000~2010	2010~2020	2000~2010	2010~2020

蔡甸区	0.42	0.20	6.68	12.17	4.75	2.86	11.86	15.25
东西湖区	0.55	0.33	3.95	9.04	4.94	1.74	9.44	11.13
汉南区	0.22	0.55	1.98	2.91	0.00	0.00	2.21	3.49
汉阳区	0.09	0.00	1.16	2.62	3.97	2.00	5.22	4.63
洪山区	0.48	0.37	17.88	11.88	0.22	4.00	18.58	16.26
黄陂区	0.93	0.47	12.83	12.07	1.07	2.75	14.83	15.31
江岸区	0.01	0.00	0.30	0.71	3.64	1.10	3.95	1.81
江汉区	0.00	0.00	0.00	0.01	0.61	0.23	0.61	0.25
江夏区	1.39	0.44	18.34	18.32	0.00	3.22	19.73	21.99
硚口区	0.02	0.00	0.08	0.37	1.73	0.54	1.82	0.92
青山区	0.00	0.00	0.80	0.02	0.01	0.22	0.81	0.24
武昌区	0.00	0.00	1.10	0.10	0.01	0.15	1.12	0.26

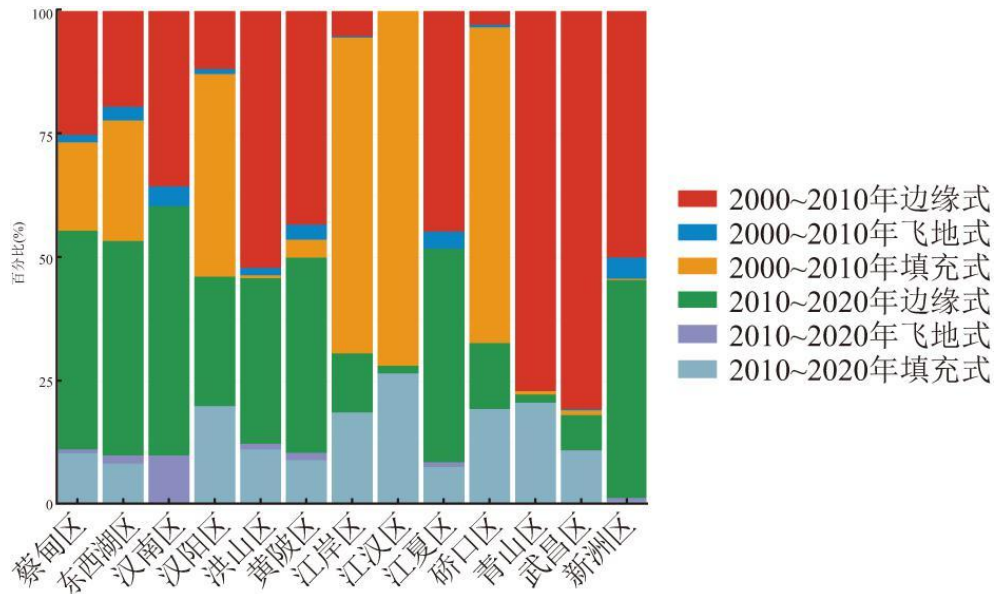


图 4 2000~2020 年武汉市各区建设 用地扩张类型占比

3.3 武汉市生态景观类型时空演化

经过 MSPA 分析得到 2000、2010、2020 年武汉市生态景观类型空间分布图(图 5)。2000~2010 年,随着城市建设用地的快速扩张,武汉市中心城区的生态景观核心区面积减少,斑块逐渐被蚕食,生态景观破碎度加剧,而在武汉远城区核心区面积略有增加。由表 3 可知,景观类型核心区分布最广,在 2000~2020 年内面积均为 1 000 km² 以上,2020 年核心区面积最大,为 1 300.79 km²,其次是边缘区、孤岛、支线、连接桥、环岛,孔隙面积最小。2000~2010 年孔隙、边缘区、连接桥、环岛、支线面积总体上以较慢的速度递减,核心区、孤岛则以较小的幅度增加;2010~2020 年连接桥、环岛和支线 3 类生态景观类型面积减少,核心区面积均明显增加。20 年核心区表现持续增加的趋势;生态景观总面积先减后增,孤岛总体上以较慢的速度递增,在一定的程度上表明 2000~2010 年武汉市建设用地不断增加,生态景观面积不断减小,城市景观破碎度增加,这与该时期武汉市的城市空间快速扩张有关。而 2010~2020 年生态景观类型总面积以及核心区面积增加,主要原因如下:一是《武汉市总体规划(2010~2020 年)》注重生态敏感性、资源保护等方面因素,在市域划定禁建区、限建区、适建区和已建区,实行分区控制和分级管理,以保护市域生态环境;二是武汉市划定水体蓝线,严禁填占湖泊水体;三是《武汉市土地利用总体规划大纲(2006~2020 年)》[30]宏观上对土地利用起到了根本上的调控作用,这是发生变化的重要原因。

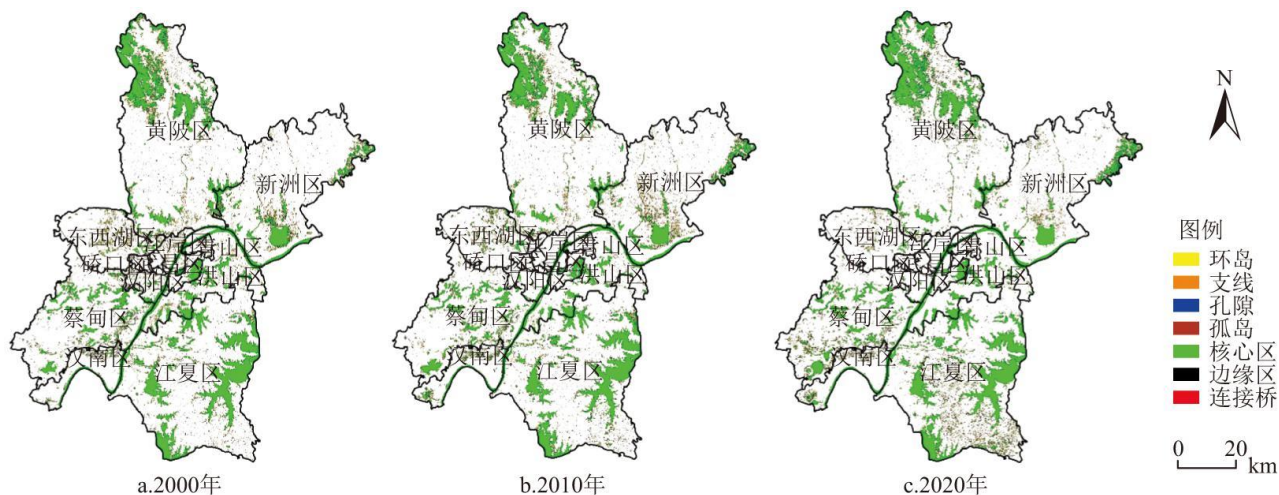


图 5 2000~2020 年武汉市 MSPA 类型分布

表 3 2000~2020 年武汉市各生态景观类型统计表 导出到

年份	核心区 (km ²)	孤岛 (km ²)	孔隙 (km ²)	边缘区 (km ²)	连接桥 (km ²)	环岛 (km ²)	支线 (km ²)	生态景观总面积 (km ²)
2000	1 253.33	90.94	18.11	283.90	48.39	24.38	92.37	1 811.42
2010	1 254.13	91.08	16.66	277.73	40.68	22.96	85.52	1 788.75
2020	1 300.79	93.45	17.28	304.76	27.82	15.15	77.41	1 836.65

3.4 武汉市城市扩张类型与生态景观变化关联分析

结合武汉市的实际情况，对各阶段扩张类型和 MSPA 生态景观类型以 5 km 作为缓冲距离，建立 17 个缓冲区(图 6)。分别统计各扩张类型和生态景观类型在不同时段各圈层中的面积得出以下结论：

(1)2000~2010 年，武汉市在 1~3 圈层中建设用地面积快速扩张且速度远大于 2010~2020 年阶段，究其原因是中心城区的快速发展，以边缘式扩张扩大城区面积，以填充式扩张来挖掘城市内部潜力，飞地式扩张面积较少。在 1~5 圈层中，建设用地面积快速扩张，生态景观总面积呈现下降趋势，核心区、孔隙、环道、支线、孤岛、边缘区及连接桥的面积呈现下降趋势，生

边缘区和破碎的孔隙等景观面积增加。

4 结论

本文运用建立缓冲区求取 LEI 值的方法, 识别出不同时段武汉市建设用地扩张类型, 采用 MSPA 识别出 7 种景观类型, 研究了城市扩张与生态景观时空异质性特征, 并通过建立多环缓冲区分析武汉市城市扩张类型与生态景观类型变化关联。与前人的研究成果[31,32,33]相比, 本研究创新性的尝试把生态景观和城市扩张时空异质性进行关联分析, 探究生态景观保护和城市扩张之间的协调关系, 从而为中部快速城市化地区的可持续发展研究与相关决策提供参考。结果显示:

(1)20 年间武汉市经历了快速的城镇化过程, 大量的水域、耕地、草地转化为建设用地, 建设用地面积呈上升趋势, 扩张十分显著。城市扩张会分割不同的生态景观类型, 导致生态景观越加破碎且生态景观总面积大致呈现减少趋势, 2000~2020 年中心城区生态景观核心区大量减少, 城市建设用地扩张明显, 要严格控制新增建设用地的审批与开发; 而 2010~2020 年阶段远城区的核心区面积增加, 这与《武汉市总体规划(2010~2020 年)》的实施, 划定水体蓝线, 控制生态红线有关。

(2)武汉市城市扩张过程中, 不同阶段的城市扩张类型和生态景观类型的关系差异显著。研究期内边缘式扩张起主导作用但速度逐渐减慢, 飞地式扩张面积减少, 分布于远城区且分散较广, 飞地式扩张会引起生态景观单元的破碎化, 填充式扩张分布较集中连片, 主要集中于江岸区等中心城区; 蔡甸区、东西湖区、汉南区、洪山区等 8 个区扩张类型以边缘式为主, 加速了生态景观核心区的减小, 而汉阳区、江汉区、江岸区、硚口区等中心城区为提高土地利用效率, 扩张类型以填充式为主。武汉市作为中部地区中心城市和湖北省省会, 其建设用地扩张过程既是经济高速增长的结果, 也是武汉市上一轮城市规划与土地利用总体规划宏观调控在空间上的表现。

5 讨论与建议

5.1 讨论

(1)2000~2010 年, 建设用地扩张主要集中在蔡甸区、东西湖区、洪山区、黄陂区、江夏区; 2010~2020 年, 江夏区建设用地扩张面积最大, 其次是洪山区和蔡甸区; 蔡甸区、东西湖区、汉南区、洪山区、黄陂区、江夏区、武昌区、新洲区 8 个区扩张类型以边缘式为主, 汉阳区、江岸区、硚口区扩张类型以填充式为主, 江汉区扩张类型只有填充式, 青山区 2000~2010 年只有边缘式扩张, 2010~2020 年为填充式和边缘式, 但扩张面积占比较小。主要原因是 2010 版武汉市城市总体规划提出“以主城为核心, 在重要出口通道构筑 6 个方向的城市主要空间发展轴”, 武汉市城市化呈现多中心发展趋势。

(2)在武汉市 MSPA 的分析结果中, 生态景观核心区分布最为广泛且变化较其他景观类型明显, 另外 6 种景观类型变化较小。影像分辨率对 MSPA 结果影响较大, 小的景观类型不能精确提取, 进而影响 7 种景观类型的面积和空间分布, 故有可能使得除核心区外其他 6 种景观类型的变化不显著。

(3)2010~2020 年阶段, 远城区的生态景观核心区面积增加, 可能的原因是武汉市城市总体规划(2010~2020 年)在市域划定禁建区, 保护市域生态环境, 禁建区是指河道、湖泊、湿地及周边控制区等, 主要位于远城区, 使得核心区在 2010~2020 年有所增加。

(4)通过对建立的 17 个圈层分析, 宏观上可以得到边缘式、飞地式扩张会加速生态景观核心区减少, 促进景观破碎化, 1~5 圈层的中心城区主要以边缘式、填充式扩张为主, 通过边缘式扩大城区范围, 但扩张速度逐渐减慢。本文对城市扩张类型与生态景观变化关联分析方面仅停留在定性分析, 武汉市处于城市快速发展的阶段, 未来研究会从复杂性角度深入, 使模型更符合地域代表性, 采用景观指数、多因素线性回归分析方法定量分析。

5.2 建议

在上述研究基础上，为促进武汉市高质量发展，结合武汉市实际情况提出以下几点建议：

(1)严格落实城镇开发边界，控制建设用地规模

城镇开发边界是在一定时期内允许城市建设用地拓展的最大边界，是国土空间规划中应当明确的控制线。划定城镇开发边界是加强空间开发管制、控制城市和小城镇无序蔓延的重要措施。2000~2020年建设用地增长率高达124.15%，呈现出明显的倍数扩张态势，武汉市城镇空间不断向外蔓延，严重挤压了生态空间和农业空间。因此，在武汉市国土空间规划中，要严格落实城镇开发边界，对蔡甸区、东西湖区、汉南区、洪山区等8个扩张类型以边缘式为主的城区需着力控制建设用地规模，通过总量控制倒逼建设用地利用效率提升。

(2)提升中心城区内部挖潜，推动城市更新行动

2020年底武汉常住人口城镇化率为80.49%，建成区面积885.11 km²，全市GDP为16223.21亿元，建设用地利用效率18.33亿元/km²。边缘式扩张是武汉市城市扩张主要模式，中心城区内部挖潜程度不足。因此，对于武汉市中心城区首先要控制建设用地规模，其次推行城市更新行动，推动城市结构调整优化和品质提升，加强内部挖潜，推动城市开发建设方式从粗放型外延式发展转向集约型内涵式发展，江夏区等6个远城区丰富的生态资源已限制城市空间的进一步拓展，更需要加强内部挖潜和自身空间治理，“主城做优，四副做强”，彰显职能，形成要素配置最优、空间效率最高的区域，推动城市合理、有序扩张。

(3)落实武汉市国土空间总体规划，锚固“两轴两环，六楔多廊”框架

武汉市国土空间总体规划(2021~2035)推进以主城为核心，锚固山清水秀的生态框架，大东湖生态绿楔等六大绿楔成为城市生态屏障，在空间上利用江河湖泊的自然格局，规划生态绿廊，对六大轴向和新城进行隔离，形成组团式布局，防止蔓延式发展；远城区是生态文明建设的重要空间载体，避免城区“摊大饼”式的发展；继续加强各城区生态环境建设，高质量统筹生态湿地、口袋公园等的建设，推进城区“留白增绿”，构建大小结合、分布均衡、功能互补、全域覆盖的城市生态绿地系统，改善城区人居环境，增强武汉市可持续发展能力。

(4)加强武汉河湖生态保护与修复，构建都市发展的生态保护圈

作为“百湖之市”、“国际湿地城市”，武汉在江湖联通、湖泊保护条例、海绵城市建设等保护举措上施行有力，成效显著。第二次全国湿地普查数据显示，武汉市湿地面积16.2万ha²，湿地率18.9%，超出国际湿地城市标准。加强对远城区山水资源保护，形成主城外围生态保护圈并深入主城区内部，建立联系城市内外的生态廊道和城市风道，以生态保护红线为核心，将山、水、林、湖等自然生态要素划入生态空间，保证其连续性和完整性。加强生态保育，构建都市发展的生态保护圈。

参考文献：

[1] 谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004(12): 1157-1165. TAN M H, LI X B, LÜ C H. Expansion of construction land and its occupation of cultivated land in large and medium-sized cities in China in 1990s [J]. Science in China, SerD, 2004(12): 1157-1165.

-
- [2] 吴健生, 罗可雨, 赵宇豪. 深圳市近 20 年城市景观格局演变及其驱动因素 [J]. 地理研究, 2020, 39(8): 1725-1738. WU J S, LUO K Y, ZHAO Y H. The evolution of urban landscape pattern and its driving forces of Shenzhen from 1996 to 2015 [J]. Geographical Research, 2020, 39(8): 1725-1738.
- [3] 代颖懿, 刘 辉. 蕉城区城乡建设用地景观格局变化研究 [J]. 生态科学, 2014, 33(4): 774-780. DAI Y Y, LIU H. Research of urban and rural built-up land change based on landscape patterns in Jiaocheng area [J]. Ecological Science, 2014, 33(4): 774-780.
- [4] 吴利平. 十九大报告对生态文明思想的创新 [J]. 时代报告, 2018(9): 10. WU L P. Innovation of ecological civilization thought in the report of the 19th national congress [J]. Time Report, 2018(9): 10.
- [5] 赵小风, 刘梦丽, 王柏源. 基于地理探测器的城市建设用地规模时空差异及影响因素分析 [J]. 中国土地科学, 2018, 32(5): 29-35. ZHAO X F, LIU M L, WANG B Y. Spatio-temporal disparity of urban construction land and its impact factors in China based on geodetector [J]. China Land Science, 2018, 32(5): 29-35.
- [6] 何青松, 王 博. 多尺度视角下中国城市群外部形态紧凑扩张与内部功能发育空间错配 [J]. 中国土地科学, 2022, 36(8): 85-97. HE Q S, WANG B. Spatial mismatch between external urban morphological compactness and internal urban development levels of urban agglomerations in China from a multi-scale perspective [J]. China Land Science, 2022, 36(8): 85-97.
- [7] 徐智邦, 焦利民, 王 玉. 1988—2018 年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比 [J]. 地理学报, 2022, 77(10): 2514-2528. XU Z B, JIAO L M, WANG Y. Comparison of urban land expansion between urban physical and administrative areas in China from 1988 to 2018 [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(10): 2514-2528.
- [8] SANTOS Y L F, YANAI A M, RAMOS C J P, et al. Amazon deforestation and urban expansion: Simulating future growth in the Manaus Metropolitan Region, Brazil [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 304 : 114279.
- [9] LIU X, LI X, CHEN Y, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2400.
- [10] ZHENG Y, HE Y, ZHOU Q, et al. Quantitative evaluation of urban expansion using NPP-VIIRS nighttime light and landsat spectral data [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76 : 103338.
- [11] 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. LI X Y, LI H Y, MAN W D, et al. Process and driving factors of urban land expansion in Harbin-Changchun city cluster [J]. Geographical Research, 2018, 38(8): 1273-1282.
- [12] 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. WANG X X, PENG L, LIU S J, et al. Characteristics and the driving mechanism of urban construction land expansion in mountainous areas of southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2895-2903.
- [13] 李平星, 樊 杰. 城市扩张情景模拟及对城市形态与体系的影响—以广西西江经济带为例 [J]. 地理研究, 2014, 33(3): 509-519. LI P X, FAN J. Scenario simulation of regional urban expansion and effects on urban form and system: A case study of Xijiang River economic belt in Guangxi [J]. Geographical Research, 2014, 33(3): 509-519.

-
- [14] 李 婷, 刘明皓, 陈 春, 等. 基于分区 FA- MLP- CA 模型的城市扩张模拟— 以成渝地区双城经济圈为例[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(5): 16-23. LI T, LIU M H, CHEN C, et al. Urban expansion simulation based on zonal FA- MLP- CA model: A case study of Chengdu - Chongqing economic circle [J]. Geography and Geo- Informa-
- [15] 张 伟, 冯徽徽, 毛小岗, 等. 基于反馈机制的城市扩张模拟研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 70-75. ZHANG W, FENG H H, MAO X G, et al. Research progress on urban growth modelling based on the feedback mechanism [J]. Geography and Geo- Information Science, 2012, 28(2):
- [16] 杜官印. 建设用地对碳排放的影响关系研究[J]. 中国土地科学, 2010, 24(5): 32-36. DU G Y. Research on influences of construction land on carbon emission [J]. China Land Science, 2010, 24(5): 32-36.
- [17] 袁凯华, 甘臣林, 杨慧琳, 等. 建设用地扩张与碳排放增长的 EKC 验证及特征分解研究— 以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2019, 33(1): 56-64. YUAN K H, GAN C L, YANG H L, et al. Validation of the EKC and characteristics decomposition between construction land expansion and carbon emission: A case study of Wuhan city [J]. China Land Science, 2019, 33(1): 56-64.
- [18] 邢梓涵, 李晓燕, 石振宇, 等. 辽中南城市群城市扩张及其碳排放效应 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 272-279. XING Z H, LI X Y, SHI Z Y, et al. Urban expansion and carbon emission effect of the urban agglomeration in south-central Liaoning Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 272-279.
- [19] DU N, OTTENS H, SLIUZAS R. Spatial impact of urban expansion on surface water bodies: A case study of Wuhan, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 175-185.
- [20] 张亦汉, 刘小平, 陈广亮, 等. 基于最大熵的 CA 模型及其城市扩张模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(3): 339-352. ZHANG Y H, LIU X P, CHEN G L, et al. Simulation of urban expansion based on cellular automata and maximum entropy model [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(03): 339-352.
- [21] 乔 治, 卢应爽, 贺 瞳, 等. 城市热岛斑块遥感识别及空间扩张路径研究— 以北京市为例[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1492-1501. QIAO Z, LU Y S, HE T, et al. Identifying urban heat island patches and spatial expansion path based on remote sensing technology: A case of Beijing city [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1492-1501.
- [22] 乔旭宁, 石漪澜, 郭 静, 等. 郑州都市圈不同等级城镇扩张对生态系统服务的影响研究 [J]. 地理研究, 2022, 41(7): 1913-1931. QIAO X N, SHI Y L, GUO J, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in different size cities of Zhengzhou metropolitan area [J]. Geographical Research, 2022, 41(7): 1913-1931.
- [23] 苏伟忠, 马丽雅, 陈 爽, 等. 城市生态空间冲突分析与系统优化方法[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 601-613. SU W Z, MA L Y, CHEN S, et al. Conflict analysis and system optimization of urban ecological space [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 601-613.
- [24] 虞文娟, 任 田, 周伟奇, 等. 区域城市扩张对森林景观破碎化的影响— 以粤港澳大湾区为例 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8474-8481. YU W J, REN T, ZHOU W Q, et al. Forest fragmentation and its relationship with urban expansion in Guangdong- Hong Kong- Macao great bay area, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8474-8481.
- [25] 程 旭, 杨海娟. 城市扩张对大城市周边基本农田的影响— 以西安市长安区为例 [J]. 中

国农业资源与区划, 2017, 38(8): 25-34. CHENG X, YANG H J. Analysis of the effects of urban expansion on the basic farmland around the big city: A case study of Chang'an in Xi'an [J]. Chinese Journal of Agricultural Re-

[26] 张凯, 冉圣宏, 田玉军, 等. 干旱区绿洲城市扩张对水资源的影响—以石河子市为例 [J]. 资源科学, 2011, 33(9): 1720-1726. ZHANG K, RAN S H, TIAN Y J, et al. Influence of oasis urban expansion on water resources in arid areas: A case study for Shihezi city [J]. Resources Science, 2011, 33(9): 1720-1726.

[27] 刘恒, 汤弟伟. 武汉市中心城区城市扩张的时空特征分析 [J]. 地理空间信息, 2020, 18(10): 90-94, 109, 5. LIU H, TANG D W. Spatio-temporal characteristic analysis of urban expansion in the central urban area of Wuhan city [J]. Geospatial Information, 2020, 18(10): 90-94, 109, 5.

[28] 赵燕如, 邹自力, 张晓平, 等. 基于 LEI 和 MSPA 的南昌市城市扩张类型与生态景观类型变化关联分析 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 732-744. ZHAO Y R, ZOU Z L, ZHANG X P, et al. The relationship analysis of urban expansion types and changes in ecological landscape types based on LEI and MSPA in the city of Nanchang [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 732-744.

[29] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用 [J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1430-1438. LIU X P, LI X, CHEN Y M, et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1430-1438.

[30] 武汉市自然资源和规划局. 武汉市土地利用总体规划(2006~2020年) [EB/OL]. http://zrzygh.wuhan.gov.cn/zwgk_18/fdzdgk/ghjh/zzqgh/202001/t20200107_602862.shtml. WUHAN BUREAU OF NATURAL RESOURCES AND PLAN-NING. Overall plan for land use of Wuhan city (2006~2020) [EB/OL]. http://zrzygh.wuhan.gov.cn/zwgk_18/fdzdgk/ghjh/zzqgh/202001/t20200107_602862.shtml.

[31] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究—以长株潭城市群为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1298-1309. OUYANG X, ZHU X, HE Q Y. Study of spatio-temporal pattern and driving mechanism of urban land expansion in urban agglomeration: A case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1298-1309.

[32] 李嘉译, 匡鸿海, 谭超, 等. 长江经济带城市扩张的时空特征与生态响应 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2153-2161. LI J Y, KUANG H H, TAN C, et al. Spatio-temporal characteristics and ecological response of urban expansion in the Yangtze River Economic Zone [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2153-2161.

[33] 关兴良, 胡仕林, 蔺雪芹, 等. 武汉城市群城镇用地扩展的动态模式及其驱动机制 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1493-1501. GUAN X L, HU S L, LIN X Q, et al. Dynamic pattern of urban land expansion and its mechanism in WUHAN urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1493-1501.