苏南水网乡村绿色基础设施时空演变及多情景模拟预测*

李 露 丁金华

苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215001

摘要：【目的】探究不同时期水网地区绿色基础设施空间演变特征，模拟预测其未来变化趋势，为保障区域生态系统稳定和推动可持续发展提供参考依据。【方法】以苏州市吴江区为例，基于 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据，运用 MSPA 与景观连通性评价，从景观要素空间形态与结构连通性综合分析绿色基础设施演变特征，并运用 CA-Markov 模型模拟自然发展、生态保护和城镇发展优先 3 种情景，预测不同情景下 2030 年绿色基础设施变化趋势，动态分析吴江区绿色基础设施时空分异特征。【结果】2000—2020 年吴江区绿色基础设施呈现总面积减少、生境逐步破碎化且景观连通性下降的演变特征。在多情景模拟预测下，自然发展和城镇发展优先情景下核心区等绿色基础设施要素减少明显，且斑块多呈破碎化发展趋势，景观连通性持续下降，其中城镇发展优先情景下斑块破碎化程度加剧，连通性下降显著；而生态保护情景中核心区、桥接区等要素小幅增长，生态系统完整性与稳定性得到提升。【结论】快速城镇化背景下，吴江区绿色基础设施总面积显著减少，破碎化程度加剧，景观连通性有所下降，整体格局趋于分散。多情景模拟预测结果显示，生态保护情景可较好维持绿色基础设施空间稳定性以及连通性，有利于格局可持续发展。建议加强 GI 空间保护，保障生态系统规模化；优化各类 GI 要素空间形态，维护生态系统完整性；增强 GI 斑块景观连通性，提升生态系统稳定性。

关键词：绿色基础设施；水网乡村；MSPA；景观连通性评价；CA-Markov

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.24.0001

Temporal Evolution and Multi-Scenario Simulation Prediction of Green Infrastructure in Southern Jiangsu Water Net

Li Lu Ding Jinhua

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215001, Jiangsu, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the spatial evolution characteristics of green infrastructure (GI) in water network areas during different periods, simulate and predict its future trends, and provide a reference for maintaining regional ecosystem stability and promoting sustainable development. 【Method】 Taking Wujiang District of Suzhou as an example, based on land use data from 2000, 2010, and 2020, this study applies Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) and landscape connectivity evaluation to comprehensively analyze GI evolution from the perspectives of spatial morphology and structural connectivity. The CA-Markov model is used to simulate three scenarios—natural development, ecological protection, and urban development priority—to predict GI changes in 2030 and analyze its spatiotemporal

收稿日期：2024-06-24

* 基金项目：国家自然科学基金（41301191）；苏州科技大学研究生优质资源建设项目（23SZKC-01）；2023 年江苏省研究生实践创新计划（SJCX23_ 1755）；“十四五”江苏省重点学科资助项目（风景园林学）

第一作者：李露（2000- ），女，硕士生，研究方向为地域景观生态规划与生态修复。E-mail：1362210675@ qq. com

通信作者：丁金华（1973- ），女，教授，硕士生导师，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：yzdingjh@ 163. com

differentiation.【Result】From 2000 to 2020, GI in Wujiang showed a decrease in total area, gradual habitat fragmentation, and reduced landscape connectivity. Under multi-scenario simulations, GI elements such as core areas declined significantly under natural development and urban development priority scenarios, with increased fragmentation and continuous decline in connectivity—particularly severe under urban development. In contrast, the ecological protection scenario showed slight increases in core and bridge areas, enhancing ecosystem integrity and stability.【Conclusion】Under rapid urbanization, GI in Wujiang significantly shrank, fragmentation intensified, and connectivity declined, showing a dispersed pattern. Scenario predictions indicate that ecological protection better maintains spatial stability and connectivity of GI, supporting sustainable pattern development. It is recommended to strengthen spatial protection, optimize GI morphology, and enhance landscape connectivity to improve ecosystem stability.

Keywords: Green Infrastructure; water net village; MSPA; Landscape Connectivity Evaluation; CA-Markov

绿色基础设施（Green Infrastructure，GI）是指由自然、半自然空间及其他环境要素所构成相互连接的绿色空间网络[1]，具有保障区域生态过程永续发展的重要生态功能，为区域环境维护提供空间载体。在快速城镇化进程中，建设用地扩张导致区域 GI 面积日益减少、生态空间趋向孤岛化与破碎化。剖析 GI 时空演变特征，厘清其未来发展趋势是优化区域 GI 格局及生态保护决策的基础[2]。

已有研究多聚焦于 GI 时空格局演变、生态网络构建以及生态系统服务评价等[3-5]，基于景观格局指数[6]、形态学空间分析法（Morphological Spatial Pattern Analysis，MSPA）分析 GI 景观格局、要素形态等特征[7]，或通过景观连通性评价[8]、最小费用距离[9]及空间句法[10]等评估其结构和功能连接性；研究尺度而言，GI 研究聚焦于流域[11]、省域[12]、市域[13]等范围，而乡村等地域化研究不足，尤其针对具有典型水网特征的苏南乡村地区研究相对较少。近年来城市化加速引发了诸多生态问题，国内外学者逐渐关注多情景模拟下生态环境变化并展开相关研究。研究方法包括 Markov 模型[14]、CA 模型[15]以及 PLUS 模型[16]等，研究主要聚焦于城市扩张情景下土地利用格局的演变特征，对多情景模拟下 GI 演变趋势的研究相对缺乏。

本研究结合苏南水网乡村地域特征，运用 MSPA 与景观连通性评价方法，从 GI 景观要素空间形态及结构连通性特征切入，更为全面分析时空动态变化视角下吴江区 GI 演变特征，并运用 CA-Markov 模型预测 2030 年 GI 在不同情景下的未来趋势，实现对城镇发展与生态系统耦合状态多情景动态评估，并提出适应性优化建议，为 GI 格局优化以及国土空间规划决策提供前瞻性科学支持。

1 研究区概况

吴江区（120°21′—120°54′E，30°46′—31°14′N）位于江苏省苏州市东南部，总面积约为 1 216.53 km^2，水域约占全域面积的 26%，区域内荡漾棋布，水田相接，湖荡、湿地以及水田等 GI 生态资源禀赋，具备典型的水网乡村特征。伴随城镇化水平快速发展，吴江区 GI 受到不同程度的干扰，面临生境质量下降、生态功能脆弱等问题。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究数据主要包括 2000、2010、2020 年 3 期土地利用类型数据、环境数据以及社会经济数据（表 1），所有数据均在 ArcGIS 平台经过预处理后统一投影，分辨率为 30 m×30 m。依据《土地利用现状分类》（GB/T 21010-2017），将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域和建设用地 5 类，其中耕地、林地、草地和水域为 GI 用地类型[17-18]。

2.2 形态空间格局分析

MSPA 运用数学形态学原理识别分割栅格图像的空间格局，能够精准界定 GI 要素结构与空间形态特征[19]。基于研究区土地利用现状分布，将生境质量良好的耕地、水域、林地、草地划为前景，建设用地为背景，运用 Guidos Toolbox 软件将吴江区 GI 分为核心区、孤岛等 7 类要素类型，解析其要素空间形态特征。

表 1　研究数据来源及说明

数据类型	数据名称	数据来源及说明
基础数据	土地利用数据	利用 LandsatTM/OLI 遥感影像的土地利用数据绘制
环境数据	高程	从地理数据空间云(http://www.gscloud.cn/)下载吴江区的数字高程模型(DEM)
	坡度	在 ArcGIS10.4 中,利用下载、处理的 DEM 数据计算坡度
	距道路距离	从 OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)下载,借助 ArcGIS10.4 中的欧氏距离法进行计算
	距水域距离	
社会经济数据	人均 GDP	从中国科学院资源环境与数据中心(http://www.resdc.cn)下载
	人口密度	

2.3　景观连通性评价

景观连通性量化 GI 在生态过程与生态功能上的互相联系程度，反映生态系统中 GI 在空间结构上的连续性[20]，对生态系统稳定和生物多样性保护至关重要。本研究运用景观连通性指数评估水网乡村 GI 结构连通性特征，包括可能连通性指数（*PC*）、重要性指数（*dI*）[21-22]。

为选取核心区景观要素，本研究利用 Conefor 2.6 分析不同距离阈值景观连通性指数的变化趋势与稳定性，设定 500 m 为连通距离阈值，0.5 为连通概率，评估研究区景观连通性[7,23]。按照重要性指数评价各核心区斑块在整体景观中的重要值，作为评判核心区景观连通性的指标，记作 *dPC*（可能连通性重要值）。

2.4　GI 多情景模拟预测

2.4.1　CA-Markov 模型参数设置

研究基于 IDRISI 17.0 软件中的 CA-Markov 模型，首先以 2000 年和 2010 年土地利用数据为首期和末期数据，获得 2000—2010 年土地面积转移矩阵；其次以 2020 年吴江区土地利用图为基础年数据，基于高程、坡度、人均 GDP、距水域距离及距道路距离 5 类主要影响因子生成适宜性图集，并在精度满足要求的情况下，分别选取 3 种情景下的转移概率和适宜性图集运行模型；最终得到 2030 年吴江区多情景土地利用模拟预测图像，进而预测分析其 GI 要素空间形态和结构连通性特征。

2.4.2　多情景设置

1）自然发展情景。基于 2010—2020 年吴江区土地利用变化规律进行 GI 未来情景模拟，不对 GI 与非 GI 的互相转换进行限制，预测自然发展情景下 2030 年 GI 演变状况。

2）生态保护情景。以保护重要 GI 空间，实现生态效益最大化为首要目标，结合水网地区生态本底特征，并参照《苏州市吴江区“十四五”生态环境保护规划》将生态保护红线以及永久基本农田保护区范围作为限制转化区，同时严控新增建设用地规模，设置耕地、水域向建设用地的转化率减少约 20%，林地、草地向建设用地的转化率减少约 30%，建设用地向 GI 类型转化率减少约 10%，预测生态保护情景下 2030 年 GI 演变状况[24]。

3）城镇发展优先情景。以适应经济效益需求为发展目标，为满足水网地区城镇产业空间发展需求，新增建设用地可能会占用周边部分 GI，分别设置耕地、水域向建设用地的转化率增加约 30%，林地、草地向建设用地的转化率增加约 20%，预测城镇发展优先情景下 2030 年 GI 演变状况。

3　结果与分析

3.1　GI 面积演变与预测

3.1.1　2000—2020 年 GI 面积演变

由表 2 和图 1 可知，2000—2020 年吴江区 GI 总面积递减。2000—2020 年耕地面积锐减 18 699.12 hm^2，占比下降 15.37%；水域面积总体呈下降趋势，共下降 1 118.07 hm^2，林地、草地面积在 2000—2020 年分别增加 1 456.65 hm^2、158.13 hm^2。总体而言，研究期间吴江区受城镇化快速发展导致 GI 总面积显著缩减，耕地面积减少明显，水域面积小幅下降，而草地、林地面积略有增加。

3.1.2　多情景模拟下 2030 年 GI 面积预测

由表 3 和图 2 可知，3 种情景下 GI 面积及占比变化差异较大。自然发展情景下，由于建设用地小幅扩张，水域面积下降最为明显，共减少 4 249.62 hm^2，占比下降 3.49%；其次耕地占比下降 1.49%。生态保护情景下，基于生态保护优先

表 2 2000—2020 年吴江区 GI 面积及比例

土地利用类型		2000 年		2010 年		2020 年	
		面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%
GI 用地	耕地	73 828.08	60.69	55 561.05	45.67	55 128.96	45.32
	草地	23.13	0.16	23.67	0.02	181.26	0.15
	林地	195.93	0.02	181.80	0.15	1 652.58	1.36
	水域	32 984.64	27.11	36 484.02	29.99	31 866.57	26.19
非 GI 用地	建设用地	14 621.31	12.02	29 402.55	24.17	32 823.72	26.98

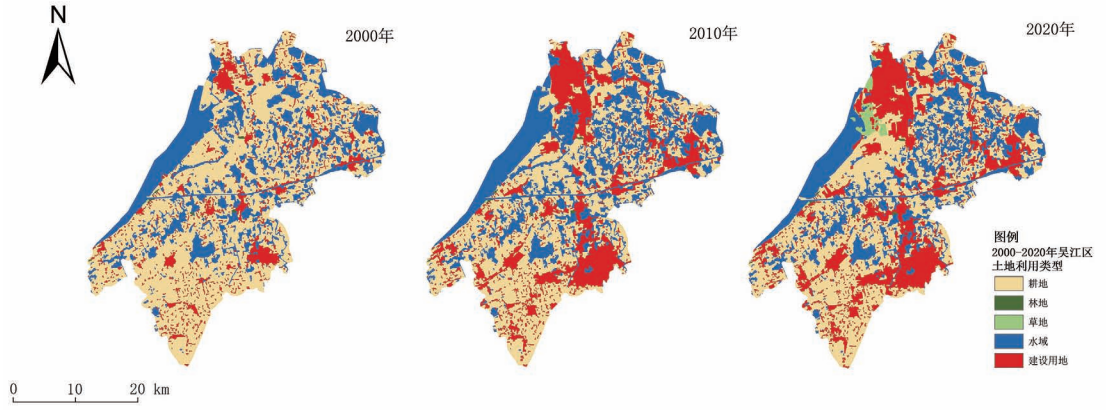


图 1 2000—2020 年吴江区 GI 类型分布

表 3 2030 年 3 种情景下吴江区 GI 面积以及比例

土地利用类型		2020 年		2030 年自然发展情景		相较 2020 年	2030 年生态保护情景		相较 2020 年	2030 年城镇发展优先情景		相较 2020 年
		面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%	变化率/%	面积/hm^2	比例/%	变化率/%	面积/hm^2	比例/%	变化率/%
GI 用地	耕地	55 128.96	45.32	53 325.72	43.83	−3.27	56 018.34	46.04	1.61	45 590.25	37.47	−17.30
	草地	181.26	0.15	177.57	0.15	−2.04	185.76	0.15	2.48	132.21	0.11	−27.06
	林地	1 652.58	1.36	2 202.93	1.81	33.30	3 080.79	2.53	86.42	1 751.94	1.44	6.01
	水域	31 866.57	26.19	27 616.95	22.70	−13.34	28 214.37	23.19	−11.46	26 389.47	21.69	−17.19
非 GI 用地	建设用地	32 823.72	26.98	38 335.68	31.51	16.79	34 171.65	28.09	4.11	47 793.36	39.29	45.61

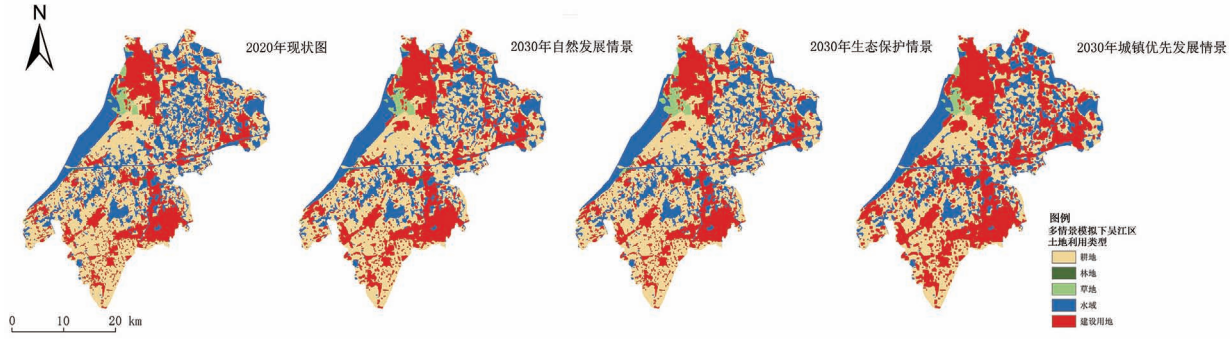


图 2 2030 年吴江区 GI 类型分布

原则，建设用地扩张得到控制，与自然发展情景相比，耕地、水域及林地占比分别增加了 2.21%、0.49%及 0.72%。城镇发展优先情景下，建设用地迅速扩张侵占了部分 GI，相较于生态保护情景，耕地、水域面积减幅较大，占比分别下降 8.57%、1.50%，而林地减少 1 328.85 hm^2。总体而言，生态保护情景下 GI 各类型呈现较好发展态势，而自然发展情景与城镇发展优先情景下吴江区 GI 总面积持续减少。

3.2 基于 MSPA 的 GI 要素演变与预测

3.2.1 2000—2020 年 GI 要素演变

由表 4 与图 3 可知，核心区作为大型生境斑块，是保护生物多样性的重要栖息地，2000—2010 年核心区面积大幅减少 13 478.33 hm^2，其分

布具有空间集聚性，如吴江区西部东太湖片区、中部张鸭荡片区等；孔隙作为核心区的内部边缘，具有边缘效应，2000—2010 年孔隙占比减少 6.07%；而边缘区是核心区的外部边缘，作为核心区的缓冲区，2000—2010 年边缘区占比显著增加 7.57%，表明 2000—2010 年吴江区生境斑块多从孔隙化转为边缘化，景观异质性有所提高。2010—2020 年核心区减少趋势减缓，占比下降 2.13%，以吴江开发区以及吴江高新区缩减最为明显；环道区、桥接区及支线可作为连接斑块的结构性生态廊道，3 类要素总体占比增至 6.44%，表明 2010—2020 年吴江区 GI 物质与能量交换水平增加，破碎化程度有所缓解。总体而言，2000—2020 年核心区面积均为占比最大的类型，但占比逐年减少，其中孤岛、边缘区、桥接区以及支线占比增加，孔隙、环道区占比先减后增，表明建设用地扩张导致 GI 核心区萎缩，GI 呈现细碎化、离散化的发展趋势。

表 4　2000—2020 年吴江区 GI 要素面积变化

类别	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/hm^2	占 GI 比例/%	面积/hm^2	占 GI 比例/%	面积/hm^2	占 GI 比例/%
核心区	74 620.14	69.72	61 141.81	66.28	56 986.38	64.15
孤岛	749.20	0.07	119.92	0.13	194.31	0.22
孔隙	17 734.59	16.57	9 686.01	10.50	7 845.84	10.72
边缘区	10 274.72	9.60	15 838.94	17.17	11 080.26	18.47
环道区	1 509.10	1.41	1 023.95	1.11	4 009.23	1.24
桥接区	1 519.80	1.42	2 075.57	2.25	6 198.75	2.37
支线	1 295.04	1.21	2 361.54	2.56	2 514.60	2.83
GI 总面积	107 028.32	100.00	92 247.76	100.00	88 829.37	100.00

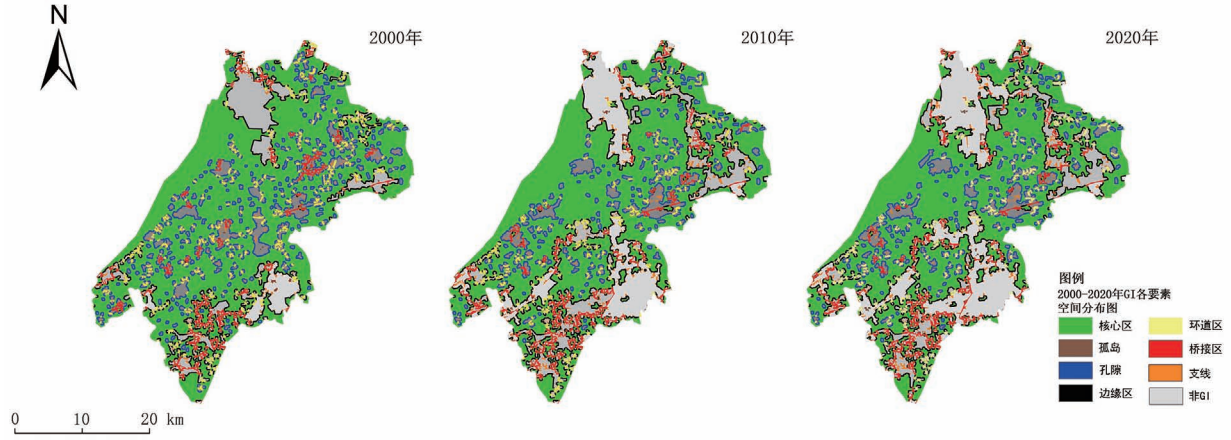


图 3　2000—2020 年吴江区 GI 形态学空间分析

3.2.2　多情景模拟下 2030 年 GI 要素预测

自然发展情景下，GI 各要素面积均呈现下降趋势，其中与 2020 年相比，支线、桥接区减少最为显著，变化率分别为−33.17%、−19.42%，同时相对孤立且面积较小的孤岛斑块面积进一步减少了 25.29 hm^2，表明在自然发展情景下吴江区部分小型生境节点消失，且结构性生态廊道大幅减少，吴江区 GI 整体呈现孤岛化、破碎化发展趋势（表 5、图 4）。

生态保护情景下，相较于自然发展情景，核心区面积增加了 2 420.32 hm^2，支线及桥接区占比分别增加了 0.45%、0.62%，表明 GI 核心区斑块整体性与连通性得到提高，表明生态保护情景下吴江区生态结构趋于稳定，生态功能有所增强（表 5、图 4）。

在城镇发展优先情景下，建设用地外延扩张明显，相较生态保护情景核心区面积大幅减少 10 073.65 hm^2，而边缘区占比增加 3.66%，表明 GI 核心区与非生态用地的过渡地带建设持续增加，核心区进一步被蚕食导致破碎化程度加剧，GI 生态系统更易受到经济建设或人类活动的干扰（表 5、图 4）。

表 5 2030 年不同情景下吴江区 GI 要素面积变化

类别	2020 年实际面积/hm²	2030 年自然发展情景			2030 年生态保护情景			2030 年城镇发展优先情景		
		2030 年预测面积/hm²	面积变化/hm²	变化率/%	2030 年预测面积/hm²	面积变化/hm²	变化率/%	2030 年预测面积/hm²	面积变化/hm²	变化率/%
核心区	56 986.38	54 745.65	−2 240.73	−3.93	57 165.97	179.59	0.32	47 092.32	−9 894.06	−17.36
孤岛	194.31	169.02	−25.29	−13.02	200.97	6.66	3.43	216.27	21.96	11.30
孔隙	7 845.84	7 385.04	−460.80	−5.87	7 715.97	−129.87	−1.66	4 718.79	−3 127.05	−39.86
边缘区	11 080.26	10 589.42	−490.84	−4.43	10 897.20	−183.06	−1.65	11 768.94	688.68	6.22
环道区	4 009.23	3 948.48	−60.75	−1.52	3 952.98	−56.25	−1.40	3 101.58	−907.65	−22.64
桥接区	6 198.75	4 994.98	−1 203.77	−19.42	5 800.95	−397.80	−6.42	4 780.98	−1 417.77	−22.87
支线	2 514.60	1 680.58	−834.02	−33.17	2 165.22	−349.38	−13.89	1 584.99	−929.61	−36.97

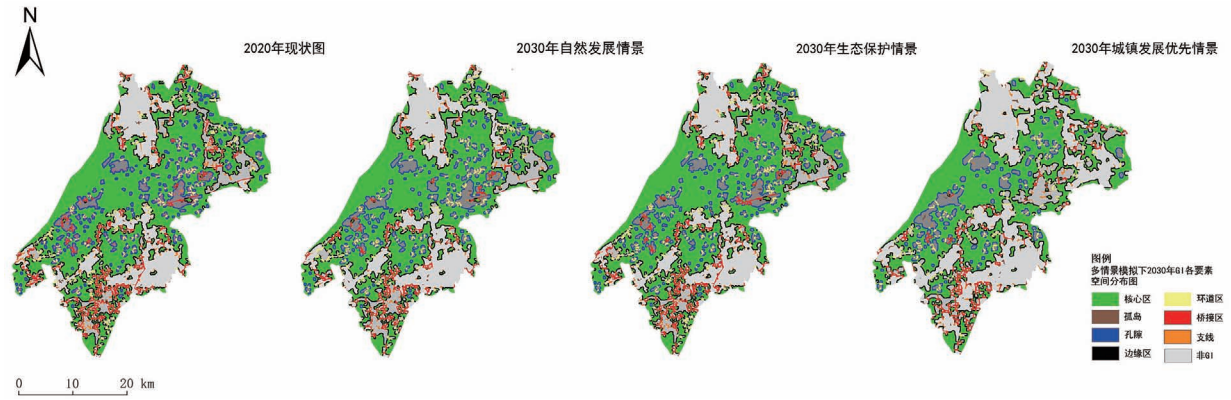


图 4 不同情景下吴江区 GI 形态学空间分析

3.3 基于景观连通性评价的 GI 连通性时空演变与预测

3.3.1 2000—2020 年 GI 连通性时空演变

由图 5 可知，2000—2010 年吴江区 GI 景观连通性下降幅度较大，其中斑块 A 与斑块 D 的 dPC 值降幅较大，分别为 8.91%、8.50%，主要分布在南星湖、长畸荡以及北麻漾区域；2010—2020 年 GI 景观连通性略有上升，其中斑块 C、斑块 E 的 dPC 值分别增加 1.641 2、0.274 2，表明吴江区北部九里湖、元荡等以及西部东太湖重要核心区连通性得到改善，一定程度上受到生态环境保护政策的推动。总体而言，GI 景观连通性较高区域分布在吴江区西部及中部，面积相对较大，分布集中，而南部连通性较差，斑块面积较小且分散，说明 2000—2020 年吴江区 GI 景观连通性总体有所下降。

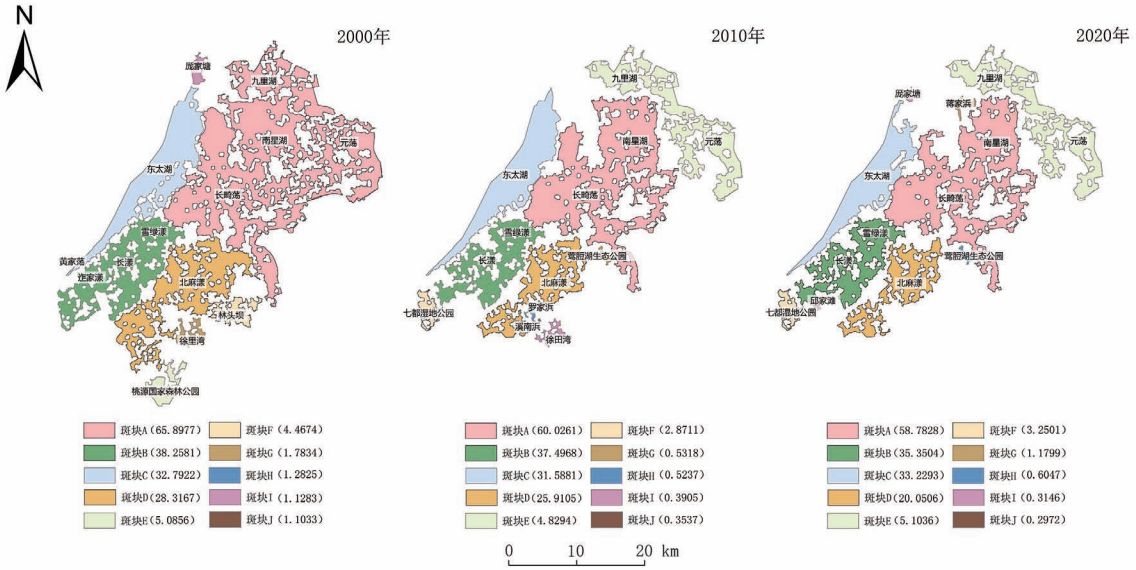


图 5 2000—2020 年吴江区 GI 景观连通性变化

3.3.2　多情景模拟下 2030 年 GI 连通性时空预测

由图 6 可知，自然发展情景下，吴江区 GI 景观连通性略微下降，与 2020 年 GI 景观连通性相比，斑块 B、斑块 D 的 dPC 值分别下降 2.656 8、1.446 7，表明自然发展情景下吴江区整体 GI 连通性减弱，其中位于斑块 B 的长漾、雪绿漾以及斑块 D 的北麻漾区域景观连通性下降较为明显，一定程度上受到地区建设用地扩张的影响。

生态保护情景下，吴江区核心区斑块面积有所增大且分布集中，GI 景观连通性呈现上升趋势。相较于自然发展情景，斑块 C、斑块 D 景观连通性显著增强，dPC 值分别增长至 32.419 0、19.422 9，表明东太湖与九里湖、元荡景观连通性的上升促进生物迁徙和能量的相互流通和扩散，景观破碎化趋势得到缓解，生态系统趋于稳定（图 6）。

城镇发展优先情景下，受建设用地快速扩张致吴江区核心区急剧缩减且 GI 景观连通性大幅下降，九里湖、元荡等与北麻漾区域的斑块被分解为多个小型斑块，导致景观连通性显著下降。其中与生态保护情景相比，斑块 G 更是受七都镇经济建设影响，dPC 值下降至 2.284 4，降幅约为 39.54%，表明城镇发展优先情景下部分斑块间孤立现象加剧，连通性显著下降，该情景应严控城镇发展边界并以生态手段提升生态系统结构稳定性与完整性（图 6）。

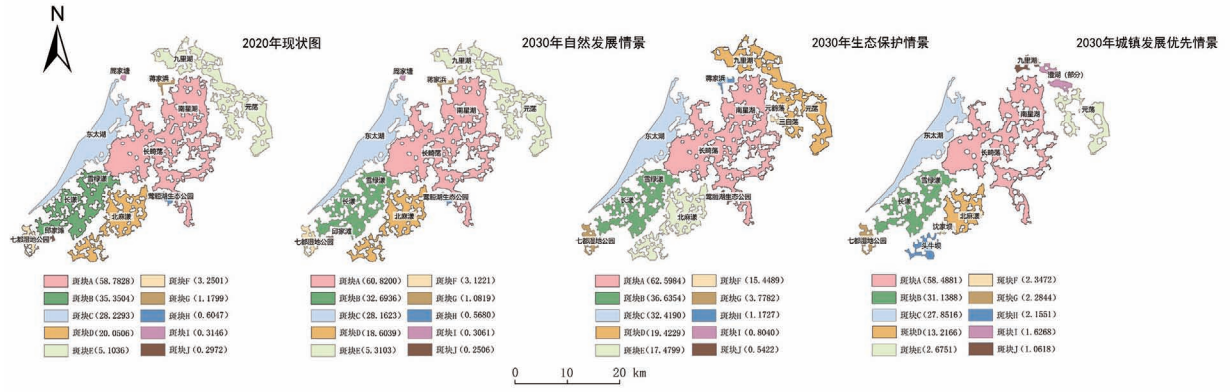


图 6　不同情景下吴江区 GI 景观连通性变化

3.4　GI 优化建议

3.4.1　加强 GI 空间保护，保障生态系统规模化

吴江区 2000—2020 年 GI 面积大幅减少，在自然发展情景与城镇发展情景模拟预测下，建设用地扩张导致耕地、水域等 GI 面积缩减。需统筹优化 GI 空间与非 GI 空间布局，严守生态保护红线，对汾湖高新区等区域的永久基本农田严加监管与保护，遏制耕地退化现象，进一步串联城乡生境斑块；加强元荡、长漾以及莺脰湖等重要生态区域建设，设置水域保护控制带（区），消减人为干扰对生态环境的负面影响，维持生态空间容量以保障生态系统规模化。

3.4.2　优化各类 GI 要素空间形态，维护生态系统完整性

明吴江区 2000—2020 年 GI 要素空间形态趋向破碎化，在自然发展与城镇发展情景模拟预测下，GI 破碎化现象加剧，生态结构更为脆弱。亟需优化 GI 要素空间形态结构，重点保护东太湖、南星湖等大型核心区斑块完整性，控制人工建设干扰程度，保障生境面积与质量，提高生物多样性承载力，对重要生境斑块如震泽湿地公园、桃源森林公园等实施差异化管控，增强生态辐射作用；此外整合孤岛斑块，通过补绿、增绿等方式增设生态“踏脚石”，有效提高吴江区生态系统的完整性，强化生态空间韧性。

3.4.3　增强 GI 斑块景观连通性，提升生态系统稳定性

吴江区 2000—2020 年 GI 景观连通性持续减弱，多情景模拟预测显示自然发展与城镇发展优先情景下，GI 斑块易受人为干扰致断裂，加剧连通性下降。需重点维护南星湖、长畸荡等连通性较高的区域，修复湖荡河网生态，优化水系结构以增强生态资源有机联系，并增设廊道缓冲区，修复易断裂区域以保障生态斑块空间及功能上的有效连接；针对景观连通性相对较低的区域加强廊道培育，如七都湿地公园等，通过保留或修复

踏脚石斑块提供廊道功能，以保障生态流和能量流稳定流通，提升吴江区生态系统稳定性。

4 讨论

年吴江区GI呈现破碎化加剧、连通性下降的演变特征，与陈炯臻等[10]、王诗源等[25]研究结果相一致，表明城镇化进程中GI生态保护滞后于城镇化建设速度，生态保护与经济建设的矛盾加剧，原本连续的GI空间被建设用地分割，生态功能愈加脆弱，为我国城镇化发展面临的普遍问题。然而不同尺度，不同发展状态下GI演变特征也存在一定差异，随着GI破碎化程度加剧，吴江区GI中桥接区、支线等要素增长，而林晋大等[26]、史芳宁等[27]研究发现南昌市、昆明市等城市市域中此类GI要素却不断减少，其原因可能在于相较于城市，吴江水网地区自然基底存在一定复杂性与多样性，破碎化程度增加导致水陆交错带局部分离断裂，桥接区、支线等带状要素则相应增加。

研究综合GI空间格局形态和景观结构特征，从动态演变和模拟预测拓展了GI特征分析的广度和深度，使得在中小尺度上的研究结论更准确和细致，为快速城镇化背景下水网地区GI网络生态保护和科学规划提供参考借鉴。

此外，研究也存在不足：1）GI演变受自然环境、经济发展以及政府调控等多方面影响，目前研究主要侧重GI演变的空间形态与结构视角，未来研究还需从社会经济等宏观角度探究演变驱动机制；2）GI模拟预测受社会政策等因素影响，而政策类因素较难量化研究，可能导致模拟结果与实际情况有所偏离，未来研究将完善多情景模拟的指标体系设置，提升全面性和科学性，以精准指导生态建设管理。

5 结论

2000—2020年吴江区GI面积显著减少，尤以耕地为主。预测表明，自然发展情景下建设用地扩张进一步挤占耕地、水域等GI类型，城镇发展优先情景下水域面积缩减态势更加明显，相较而言生态保护情景下由于生态保护条件的约束，对GI用地类型向建设用地转化设定限制，保障了各GI空间的面积稳定与规模化。

2000—2020年吴江区核心区面积锐减，孔隙、环道区下降幅度较大，表明景观破碎度提高，生态系统易受干扰。预测表明，自然发展情景与城镇发展优先情景下由于经济建设活动干扰致GI要素破碎化程度加深，而生态保护发展情景下更注重生态保护红线的管控要求，核心区等GI要素面积增大，GI要素空间形态的完整性提升，生态系统更为稳定。

2000—2020年吴江区GI景观连通性整体呈下降趋势。预测表明，自然发展情景与城镇发展优先情景下受人为活动和建设用地快速扩张等因素影响，部分斑块断裂致景观连通性进一步下降，而在生态保护情景下建设用地扩张得到控制，GI景观连通性改善，表明生态文明导向的发展模式能显著增强生态系统结构连通性与功能效益。

参考文献

[1]吴伟,付喜娥.绿色基础设施概念及其研究进展综述[J].国际城市规划,2009,24(5):67-71.

[2]KWAK Y,DEAL B.Multi-scaled green infrastructure optimization:Spatial projections and assessment for dynamic planning anddesign[J].Landscape and Urban Planning,2024,249:105128.

[3]李豪,吴明豪,李虹烨,等.北京市朝阳区城市生态网络演变特征及优化研究[J].风景园林,2023,30(S2):33-38.

[4]李波,贺萌,李欣宇.基于源地-廊道法的生态网络构建研究进展[J].中国城市林业,2023,21(2):145-151..

[5]王云才,刘玲.远程耦合:绿色基础设施绩效评价的空间生态智慧[J].中国园林,2023,39(10):51-55.

[6]刘维,周忠学,郎睿婷.城市绿色基础设施生态系统服务供需关系及空间优化:以西安市为例[J].干旱区地理,2021,44(5):1500-1513.

[7]王婷,任云英.城市新区绿色基础设施网络优化:基于景观格局和形态空间格局分析[J].中国城市林业,2023,21(2):105-114.

[8]HOU W,ZHAI L,FENG S S,et al.Restoration priority assessment of coal mining brownfields from the perspective of enhancing the connectivity of green infrastructure networks[J].Journal of Environmental Management,2021,277:111289.

[9]ZHANG F Y,JIA Y Y,LIU X L,et al.Application of MSPA-MCR models to construct ecological security pattern in the basin:a case study of Dawen River basin[J].Ecological Indicators,2024,160:111887.

[10]陈炯臻,季翔,葛希辰,等.基于MSPA和空间句法的县域绿色基础设施网络时空格局演变分析:以徐州市睢宁县为例[J].

现代城市研究,2022,37(10):101-107.

[11]陈晨,徐威杰,张彦,等.独流减河流域绿色基础设施空间格局与景观连通性分析的尺度效应[J].环境科学研究,2019,32(9):1464-1474.

[12]王圳峰,刘燕,王欣珂,等.福建省绿色空间时空演变及驱动因素分析[J].广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(4):227-246.

[13]赵海霞,顾斌杰,王俊淇,等.绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律:以南京市为例[J].生态学报,2024,44(2):463-475.

[14]ZHANG Y, CHANG X, LIU Y F, et al. Urban expansion simulation under constraint of multiple ecosystem services (MESs) based on cellular automata (CA)-Markov model: scenario analysis and policy implications[J].Land Use Policy, 2021,108:105667.

[15]王柯文,秦见,马海涛.基于 CA-Markov 模型的重庆西部新城城市扩张时空演化模拟与生态响应[J].中国科学院大学学报,2023,40(4):496-505.

[16]任维,张嘉林,卢俊涵,等.浙闽山地丘陵地区地域景观时空演变与多情景模拟预测:基于 PLUS-ESV 模型分析[J].中国城市林业,2024,22(3):71-80.

[17]丁金华,孙琦,钱晶.基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究:以吴江东北片区为例[J].西北林学院学报,2022,37(6):183-191.

[18]马银,郑敏睿,郑新奇,等.基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析:以京津冀城市群为例[J].生态学报,2023,43(16):6785-6797.

[19]于亚平,尹海伟,孔繁花,等.基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J].生态学杂志,2016,35(6):1608-1616.

[20]TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, et al. Connectivity is a vital element of landscapestructure[J]. Oikos, 1993, 68(3): 571.

[21]樊凡,田国行,樊巍,等.国土空间规划下县级绿色基础设施网络构建:以河南省周口市川汇区为例[J].地域研究与开发,2023,42(6):66-71,78.

[22]黄河,余坤勇,高雅玲,等.基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建[J].中国园林,2019,35(11):70-75.

[23]倪雨淳,殷敏,魏家星.基于 MSPA 模型的丘陵乡村绿色基础设施构建[J].中国城市林业,2023,21(3):139-145.

[24]谢名睿,危小建,赵莉,等.南昌市生态用地景观结构与网络连通性多情景模拟[J].水土保持通报,2023,43(2):202-211,309.

[25]王诗源,魏琪力,王倩娜,等.基于移动窗口法的绿色基础设施时空分异研究:以四川天府新区及协调管控区为例[J].西北林学院学报,2021,36(5):246-253.

[26]林晋大,多玲花,邹自力.城市扩张背景下景观破碎化动态演变及空间自相关分析:以南昌市为例[J].水土保持研究,2022,29(4):362-369.

[27]史芳宁,刘世梁,安毅,等.城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究:以昆明市为例[J].生态学报,2020,40(10):3303-3314.