

南昌市生态用地景观结构与网络连通性多情景模拟

谢名睿^{1,2}, 危小建^{1,2,3}, 赵莉², 程朋根²

(1.东华理工大学 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 江西 南昌 330013;

2.东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 江西 南昌 330013; 3.江西省测绘地理信息工程技术研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: [目的] 探究未来不同发展情境下, 江西省南昌市生态用地景观结构与网络连通性变化差异, 以期
为该市环境保护规划与工程建设提供科学参考。[方法] 基于 PLUS 模型对未来南昌市生态用地格局进行
多情景预测, 并通过景观格局指数、形态学空间格局分析(MSPA)与网络连接度分析, 从数量与结构两个角
度, 研究不同开发强度下, 城市不同区域与结构的生态用地景观结构与网络连通的差异。[结果] ①不同发
展情境下, 生态用地破坏均主要集中于安义县、新建区境内; ②草地破碎化极为严重, 在任意发展情景下景
观结构差异不大, 而林地与水域在情景 ED(经济优先)与 EP(环境保护)下, 景观指数差异较小, 对中高强
度的开发表现出较强的抗性; ③不同发展情景下, 生态核心区面积之间的差异高达 90.36 km², 且多类型均
匀混合结构的生态用地可以有效抑制孤岛的产生, 维护区域生态安全; ④相较于 2020 年, 在各情景下, 南
昌市等效可能连通性指数 EC(PC)下降了 18.76%~23.24%, 新建区、安义县境内网络连通性下降较为明
显。[结论] 生态保护情景(EP)发展方案可以有效地保护南昌市生态景观结构与网络安全, 保障城市的可
持续发展; 同时在进行生态保护规划与修复工程时, 优先考虑在新建区、安义县等生态景观结构脆弱区域
开展, 可以较好地维护南昌市生态安全。

关键词: PLUS 模型; 景观格局; 形态学空间分析; 网络连通性; 南昌市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)02-0202-10

中图分类号: F301.2

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.024; Xie Mingrui, Wei Xiaojian, Zhao Li,
et al. Multi scenario simulation of landscape structure and network connectivity of ecological land in Nanchang
City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 202-211.

Multi Scenario Simulation of Landscape Structure and Network Connectivity of Ecological Land in Nanchang City

Xie Mingrui^{1,2}, Wei Xiaojian^{1,2,3}, Zhao Li², Cheng Penggen²

(1. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving Around Poyang Lake, Ministry of
Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. School of Surveying
and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. Jiangxi
Province Engineering Research Center of Surveying, Mapping and Geographic Information, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: [Objective] The changes and differences in landscape structure and network connectivity of ecological
land in Nanchang City, Jiangxi Province under different development scenarios in the future in order to
provide a reference for environmental protection planning and project construction in Nanchang City.
[Methods] Based on the PLUS model, the future ecological land use pattern of Nanchang City was predicted
for multiple scenarios. Differences in landscape structure and network connectivity of ecological land in
different regions and the structures of the city under different development intensities were studied from the
perspectives of quantity and structure through landscape pattern index, morphological spatial pattern analysis
(MSPA), and network connectivity analysis. [Results] ① Under different development scenarios, the

收稿日期: 2022-07-15

修回日期: 2022-09-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“人本视角下‘城—绿’空间耦合调控: 作用机制、调控模型与优化路径”(52168010), “大数据支持下城市生
态环境综合评价及其与人的时空行为耦合效应研究”(41861052)。

第一作者: 谢名睿(1999—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用规划、评价。Email: mingrui_xmr@163.com。

通讯作者: 危小建(1988—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用规划、评价和土地资源可持续发展研
究。Email: 631000872@qq.com。

destruction of ecological land was mainly concentrated in Anyi County and Xinjian District; ② The fragmentation of grassland was very serious, and there was little difference in landscape structure under any development scenario. The difference in landscape index between forest land and water area was small under the ED and EP scenarios, showing strong resistance to medium and high intensity development; ③ Under different development scenarios, the difference in ecological core area was as high as 90.36 km². Ecological land with multiple types of uniform mixed structure can effectively suppress the generation of isolated islands and maintain regional ecological security; ④ Compared with 2020, under various scenarios, the equivalent possible connectivity index EC (PC) of Nanchang City decreased by 18.76% ~ 23.24%, and the network connectivity in Xinjian District and Anyi County decreased significantly. [Conclusion] The ecological protection scenario (EP) development plan can effectively protect the ecological landscape structure and network security of Nanchang City, thereby ensuring the sustainable development of the city. At the same time, when carrying out ecological protection planning and restoration projects, priority should be given to the construction of new areas, Anyi County, and other fragile ecological landscape areas so as to better maintain the ecological security of Nanchang.

Keywords: PLUS model; landscape pattern; morphological spatial analysis; ecological network connectivity; Nanchang City

随着城市的扩张与发展,区域土地利用结构与布局的不断变化导致生态用地占有量持续减少与破碎化^[1]。生态用地作为人类与自然连接的桥梁,破碎化的生态用地导致物种多样性下降、自然环境恶化、城市发展滞缓等问题,这些问题已然成为当前发展的桎梏^[2]。党的十九大报告^[3]明确指出,人与自然是生命共同体,人与自然命运密切相关,生态文明建设关系人民福祉,关乎民族未来。在这个人与自然命运与共的新时代,探究未来生态用地的形态与结构,对国家生态文明建设,缓解人与自然的冲突,实现可持续发展有重要的参考价值。

随着土地利用模型的不断改进与优化,近年来,国内外学者^[4-5]对多情景生态用地模拟开展了大量的研究,以期探究生态用地未来的演变的趋势及特征,寻求土地利用的优化配置。这些研究主要聚焦于时空演变^[6]、驱动机制^[7]、生态系统服务价值^[8]、生态系统服务功能等^[9]方向。其中,多情景生态用地的时空演变研究是相关研究的基础与核心。大量的多尺度、长时间序列的模拟研究^[10-11]为多情景生态用地变化及其效应研究建立了较为成熟的研究框架与体系。诸如,林彤等^[12]基于 FLUS 模型,对宁远县 2000—2030 年生态用地时空变化进行了多情景模拟预测;张晓瑶等^[13]基于 FLUS 模型对深圳市 1995—2035 年生态用地及其生态系统服务价值演变进行了分析。然而,需要指出的是,现阶段大多关于多情景生态用地变化模拟的研究仅聚焦于生态用地本身与生态系统服务价值变化,缺乏对未来生态用地景观结构与网络变化的考量。生态用地的景观结构与网络作为人与自然耦合的结果^[14],深刻地影响着人类的生活、生

产活动与区域生物、物质、能量流动。在多元需求不断增多、人与自然冲突加剧的未来发展中,如何保障区域生态用地景观结构稳定与维护网络连通,是平衡人与自然和谐共生,实现可持续发展的关键,因此亟需加强对未来生态用地的景观结构与网络连通变化研究,为未来城市规划与发展提供参考与方向,保障区域的可持续发展。为此,本文基于 PLUS 模型,通过 2000—2020 年南昌市土地利用变化,对 2040 年南昌市土地利用进行多情景预测;提取龙花楼等^[15]学者提出的生态用地概念框架中的原生生态用地(林地、草地、水域)作为城市生态用地,耦合景观格局指数、形态学空间分析、网络连通性分析,探究未来不同开发强度下城市不同区域生态用地的景观结构与网络变化,以期为城市发展与生态保护规划提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

南昌市位于江西省北部(东经 115°27'—116°35', 北纬 28°10'—29°11'),地处赣江下游,鄱阳湖西南岸。南昌市全境以鄱阳湖平原为主,西部与东南部为丘陵,地势呈现出 U 形,整体山、丘、岗、平原相间,水网密布,湖泊众多。年平均气温 19.1 °C,年平均降雨 2 139.4 mm,年平均相对湿度 75.9%,典型的亚热带季风气候。研究区自然条件优越,耕地面积 2.74×10^5 hm²,林地 1.44×10^5 hm²,森林覆盖率 21.27%,地表水资源量 9.07×10^9 m³,气候宜人,资源丰富,生物种类繁多,有“国际花园城市”之称。尽管南昌市拥有诸如:梅岭国家森林公园、鄱阳湖国家自然保护区等丰富的森林与湖泊资源,但在过去几十年的发展过

程中,城市生态空间急速萎缩。作为江西省的省会城市与大南昌都市圈的核心区域,南昌市是未来江西省发展的重心,必将经历大规模、高强度的土地利用开发与调整,在该过程中如何保持经济与生态的平衡,实现区域的可持续发展是城市必须解决的重大难题。

1.2 数据来源与预处理

本研究将中科院资源环境科学与数据中心的 2000 和 2020 年南昌市土地利用图,依据其提供的

分类表,通过 ArcGIS 重分类功能分成 6 个大类:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地;对南昌市路网数据进行欧氏距离分析,输出大小为 30 m × 30 m;并将气温与降雨数据进行 ANUSPLIN 空间插值处理成 1 km × 1 km 的栅格影像;之后对南昌市 GDP 值、人口等 1 km × 1 km 栅格数据进行重采样成 30 m × 30 m,并依据研究区范围对所有数据进行裁剪(表 1)。

表 1 本研究主要数据格式及来源

Table 1 Main data format and sources used in this study

数据名称	数据格式	数据来源
2000 年南昌市土地利用图 2020 年南昌市土地利用图	栅格大小为 30 m × 30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
南昌市 GDP 图 南昌市人口分布图	栅格大小为 1 km × 1 km	
南昌市高程图 南昌市路网图	栅格大小为 30 m × 30 m Shapefile	SRTM(https://srtm.csi.cgiar.org/) OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)
南昌市年平均降雨数据 南昌市年平均气温数据	txt	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)

2 研究方法

2.1 基于 PLUS 模型的多情景生态用地模拟

2.1.1 PLUS 模型结构 PLUS 模型是耦合自上而下与自下而上机制的 CA 模型,包含两个部分:①基于土地扩张分析策略(LEAS)的规则提取框架;②基于多类型随机斑块种子(CARS)的 CA 模型,相较于其他土地利用模型具有较高的模拟精度,模拟结果可以更好地与规划政策相衔接,以实现可持续发展^[16]。

(1) 基于土地扩张分析策略(LEAS)的规则提取框架。该部分采用了一种新的土地扩张分析策略,通过提取两期土地利用变化区域中各地类扩张区域与土地利用变化影响因子,采用随机森林算法^[17]探究土地利用类型与土地变化驱动因子之间的关系。该方法融合格局分析策略(PAS)与转化分析策略(TAS)两种土地利用扩张分析的优点,在有效简化土地利用变化的分析程序的同时,可以更好地诠释土地利用影响因子的影响机制。随机森林算法公式为:

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(x) = d]}{M} \quad (1)$$

式中: $P_{i,k}^d$ 为地类 k 在栅格 i 上的土地利用变化概率; d 的取值为 0 或 1; x 为所有土地利用影响因子组成的向量; $I(*)$ 为决策树集函数; $h_n(x)$ 是向量 x 的第 n 个决策树的预测类型; M 是决策树的总数。

(2) 基于多类型随机斑块种子(CARS)的 CA 模型。多类型随机斑块种子(CARS)耦合自适应竞争机制^[18]与阈值递减机制^[19],通过统计模拟法(MCMC)生成斑块种子,斑块种子则可以转变成为相关土地利用类型,并使用阈值递减规则约束斑块种子的扩张,以达到约束各土地利用数量的作用。因此 PLUS 模型可以有效地对复杂的土地利用进行较高精度模拟。自适应竞争机制相关公式为:

$$\Omega_{i,k}^t = \frac{\text{con}(c_i^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \quad (2)$$

$$D_k^t = \begin{cases} D_k^{t-1} & (\text{if } |G_k^{t-1}| \leq |G_k^{t-2}|) \\ D_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & (\text{if } 0 > G_k^{t-1} > G_k^{t-2}) \\ D_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & (\text{if } 0 < G_k^{t-2} < G_k^{t-1}) \end{cases} \quad (3)$$

$$OP_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^{d=1} \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \quad (4)$$

式中: $\Omega_{i,k}^t$ 为栅格 i 的邻域效应,即土地利用类型 k 在邻域内的覆盖比例; $\text{con}(c_i^{t-1} = k)$ 为在 $n \times n$ 窗口内最后一次迭代中土地利用类型 k 占用的网格单元总数; ω_k 为不同土地利用类型之间的权重; G_k^{t-1} 为第 $t-1$ 次和迭代中地类 k 当前数量和未来需求量之间的差异; D_k^t 为自适应系数,表示未来对地类 k 需求的影响; $OP_{i,k}^{d=1,t}$ 为地类 k 的整体变化概率。

2.1.2 多情景模拟设置 本文基于 2000 与 2020 年两期的土地利用图进行模拟,以此等时间跨度地模拟

2040 年土地利用。此外,为了更贴近实际发展,本文参考前人研究^[20],设置了 3 种不同的发展情景的 2040 年南昌市的土地利用:①惯性发展情景(HD)。假定城市沿 2000—2020 年惯性发展,以 5 a 为间隔,将南昌市各类土地利用规模数据进行线性拟合,通过较长时间的土地利用序列数据进行 2040 年土地利用规模预测,以保障预测结果的客观性,并不做其他限制处理。②经济优先发展情景(ED)。南昌市“十四五”规划纲要与《南昌大都市区规划(2015—2030)》等规划指出南昌市是江西省未来发展的核心,要求突出南昌市的省会城市作用,以南昌市为核心,协同带动周边区域共同发展。因此,综合考虑近 20 a 南昌市 GDP 增长率与各土地利用变化,在惯性发展的基础上,设定建设用地扩张幅度增加 15%;未利用地、耕地、水域衰减幅度增加 15%;林地、草地受人类大范围生产活动影响,衰减幅度惯性增加 25%,城市化进度进一步加速。③环境保护发展情景(EP)。《南昌市

生态环境保护“十四五”规划》为南昌市的生态保护工作制定了明确目标,要求市内实现低碳、节约、集约发展,严禁侵占生态红线。

为了保障南昌市的生态安全,综合考虑南昌市“十四五”规划的目标与南昌市生态红线,在惯性发展的基础上,设定林地、草地衰减幅度减缓 40%;耕地、水域、未利用地衰减幅度减缓 20%;建设用地增幅减缓 20%;同时将梅岭与赣江等重要保护区域作为限制区,禁止进行土地利用转变。为确保 PLUS 模型模拟结果的可靠性,本文在模拟 2020 年与多情景 2040 年土地利用时统一设置为:随机采样 5%,mTry 为 10,邻域大小为 3×3 的摩尔邻域、衰减系数为 0.5,扩散系数为 0.1,随机种子最大比例为 0.000 1;同时引入 kappa 系数,对 PLUS 模型的精度进行验证,通过模拟 2020 年土地利用,与 2020 年实际土地利用情况进行比对,确定模型的模拟精度,以保证 PLUS 模型的可靠性(表 2)。

表 2 南昌市土地利用多情景预测规模

Table 2 Land use multi scenario prediction scale in Nanchang City

km²

情景设置	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
情景 HD	3 503.421 9	1 046.724 3	60.297 3	1 196.863 2	1 213.532 1	365.491 8
情景 ED	3 473.698 5	1 022.724 9	56.680 2	1 187.546 4	1 280.799 9	364.880 7
情景 EP	3 532.002 3	1 085.122 8	66.084 3	1 212.747 3	1 123.841 7	366.532 2

2.2 生态用地结构与布局分析方法

2.2.1 生态用地景观格局分析方法 景观格局反映景观在空间上的分布,对景观格局进行科学分析是进行景观生态规划与评价的基础。景观格局指数作为一种定量表达景观格局的空间分析方法,高度反映景观结构和空间特征,通过计算不同时期景观格局指数可以分析和评价区域的景观和土地利用格局的演变特征与规律,为区域生物多样性保护和区域景观规划提供科学合理指导^[21]。

景观格局指数尽管种类繁多,但相当一部分指数都有其局限性,且存在冗余^[22]。因此,根据本文需要、各景观指数的生态学意义以及参考前人的研究^[23],在景观类型层面,选取斑块面积(CA)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、景观连接指数(CONNECT)、破碎化指数(SPLIT)、聚集指数(AI)作为评价依据,利用 Fragstats 软件对南昌市的生态用地进行景观格局指数进行计算,选取的景观指数释义详见表 3。

表 3 南昌市景观格局指数

Table 3 Landscape pattern index in Nanchang City

景观指数类型	含义
斑块密度(PD)	反映景观整体的异质性与破碎度,代表景观单位面积上的异质性
最大斑块指数(LPI)	反映景观中的优势斑块类型,取值范围为(0,100]
景观形状指数(LSI)	反映景观形状的复杂程度,取值范围为 ≥ 1 ;值越趋于 1,形状越简单
景观连接指数(CONNECT)	反映景观斑块之间的连通性,取值范围为[0,100],值越大连通性越高
分离度指数(DIVISION)	反映景观斑块的离散程度,取值范围为[0,1);值越趋于 0,景观越集中
聚集指数(AI)	反映区域相同景观类型斑块间的连通性,取值范围为[0,100]

2.2.2 生态用地形态学空间分析方法 形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)是一种基于腐蚀、膨胀、开闭运算等数学形态

学原理,提出的一种可以识别目标像元与结构要素之间的空间拓扑关系的方法^[24]。该方法基于土地利用数据,将土地利用类型中的具备生态功能的地类作为

前景 (foreground), 并将其他地类作为背景 (background), 通过一系列的图像处理方法将前景按形态分为核心区、孤岛、孔隙、边缘、连接桥、环道和支线 7 种生态景观类型。

景观类型的详细定义详见表 4。本文基于研究

区的 2020 年土地利用数据与 PLUS 模型多情景预测的土地利用数据, 提取出原生生态用地 (即林地、草地与水域) 作为 MSPA 的前景要素, 其他地类作为背景要素, 采用 Guidos 软件^[25] 采用 8 领域、设置边缘宽度为 1 进行处理。

表 4 形态学空间格局分析景观类型

Table 4 Morphological spatial pattern analysis landscape pattern index

景观类型	定义
核心类	指大量绿色像元的聚集, 且与边界有一定距离
孤岛类	指不相连且聚集数量少而不能作为核心类的绿色像元集合
孔隙类	指核心类和非绿地斑块之间的过渡区域, 即绿色空间内部边缘地带
边缘类	指核心类和主要非绿地区域之间的交接区域
桥接类	指连接至少两个不同核心类的非核心绿色像元集, 并表现出狭长的廊道特征
环道类	指连接一处核心类的狭长绿色像元集合, 同样也具有廊道的特征
支线类	指非核心类区域且只有一端与边缘类、桥接类、环道类或孔隙类相连的绿色像元集合

2.2.3 生态用地网络连通性分析方法 生态网络是由节点和廊道相互交叉连接形成的物质、能量、物种迁移的适宜路径, 评估和优化生态网络的连通度对区域生态安全与稳定具有重要意义。其中, 生态源地 (节点) 通常是具有一定规模面积可供生物作为栖息地进行相互交流、具有较高生态价值与自我调节能力的生态斑块。因此, 参考前人研究^[26-27], 本文选择 MSPA 中面积大于 0.1 km² 的核心区作为生态源地, 利用 Conefor 软件^[28], 采用可能连通性分析 (probabilistic connectivity analysis) 进行生态源地的网络连接度分析, 距离阈值设置为 5 km, 连接概率为 0.5, 并

采取等效连接值 [EC(PC)] 代替 PC^[29], EC 除了具备 PC 的特征, 此外还具备与节点属性相同的单位, 有助于对结果进行解释; 此外, 通过 Link remove 构建、分析重要生态源地的可能连通性网络, 以此探究未来南昌市生态网络连通性的空间变化 (表 5)。

$$EC(PC) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*} \quad (5)$$

式中: EC(PC) 表示等效可能连通性、等效整体连通性; n 代表斑块数; a_i, a_j 为斑块 i 和斑块 j 的面积; A_L 代表景观总面积; P_{ij}^* 表示斑块 i 与斑块 j 之间扩散的最大可能性。

表 5 网络连通性分析指数选择及其含义

Table 5 Index selection of network connectivity analysis and its meaning

指标	含义
通量 (F)	仅基于斑块连接进行考虑的景观之间潜在生物、物质、能量流动强弱
面积加权通量 (AWF)	通过面积修正后的通量, 可以较为准确反映区域景观之间潜在的生物、物质、能量流动强弱
可能连通性指数 (PCnum)	反映区域景观斑块潜在连通性强弱的指标
等效可能连通性指数 [EC(PC)]	可能连通性指数计算分子的算术平方根, 可以较好地反映不同时期连通性大小的变化

3 结果与分析

3.1 生态用地模拟及多情景预测结果与分析

基于 PLUS 模型的 2020 年南昌市土地利用预测

结果与 2020 年真实的土地利用具有较高的空间一致性, 模拟总体 kappa 精度为 0.936 9, FOM 指数为 0.112 47。PLUS 模型模拟精度较高, 可以满足本文对预测精度的需要, 各地类模拟精度详情详见表 6。

表 6 南昌市 PLUS 模型模拟精度

Table 6 Simulation accuracy of plus model in Nanchang City

项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020 年面积/km ²	3 756.79	1 142.72	74.76	1 276.28	765.08	370.70
模拟 2020 年面积/km ²	3 756.76	1 142.72	74.76	1 280.06	761.29	370.70
kappa 精度/%	95.21	92.72	90.94	94.92	84.10	97.18

从土地利用规模变化上看,林地在情景 HD, ED, EP 下减少 5.04%~10.50%,相较于 2020 年林地面积分别减少 96.00, 120.00 和 57.60 km²,不同情境下衰减幅度差异较大,说明生态保护情景可以有效地保护林地的数量,防止林地城市建设中被大量侵占;而草地的衰减幅度在情景 ED 下最高为 24.19%,在情景 EP 下最低衰减幅度为 11.61%,证明草地结构较为脆弱,极受土地利用变化影响,导致破碎化;与 2020 年水域面积相比,水域在各情景下,减小幅度仅为 4.98%~6.95%,变化弹性空间小,相对稳定。2040 年多情景土地利用模拟详情如图 1 所示。从空间分布上看,南昌市生态用地主要分布在 3 个主要区域:①以水域为主的北部生态区(由北新建区水域与

南昌县北部水域构成);②以林地与水域混合构成的东部生态区(以南昌县东部水域与进贤县生态用地共同构成);③以林地为主的西部生态区(主要由安义县与市直辖区的生态用地构成)。3 个大区域之间零散分布着小规模生态用地,将三大区域紧密地连接到一起进行物质、能量流动。根据 PLUS 模型 2040 年土地利用变化模拟结果,不同情景下,市中心建设用地附近、安义县境局部区域土地利用有较为明显的差异,证明城市中心及安义县主城区建设用地附近的耕地、生态用地在城市化发展中容易受到人类活动影响,应当注意设立生态缓冲地带,以降低人类活动对周边生境的负面影响,维护城市的生态安全及可持续性。

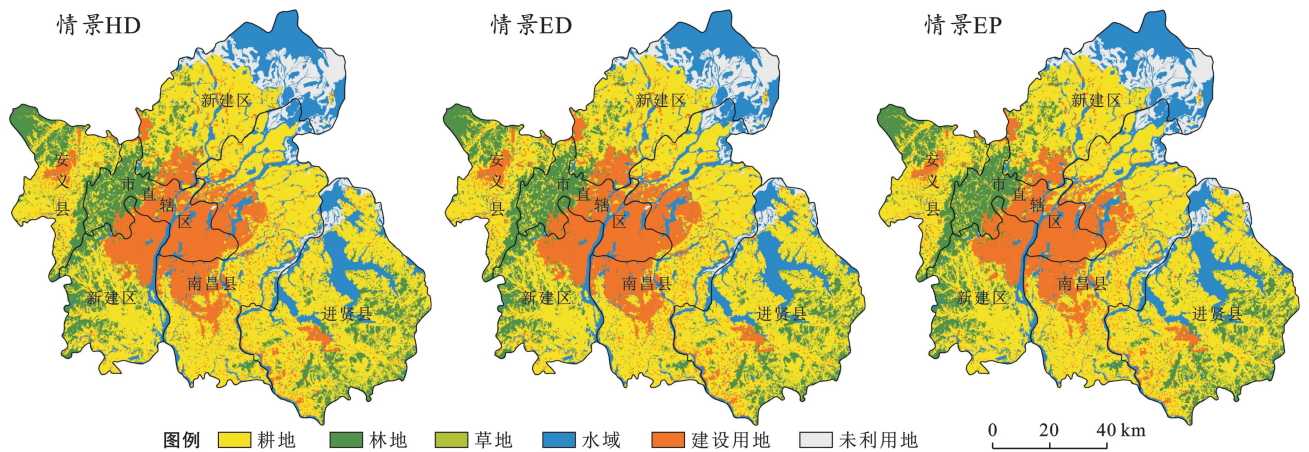


图 1 南昌市 2040 年多情景土地利用预测

Fig.1 Land use forecast of Nanchang City in 2040 under different scenarios

3.2 多情景生态用地结构与布局分析结果

3.2.1 生态用地景观格局分析结果 2020 年与多情景 2040 年的景观格局指数计算结果如图 2 所示。同 2020 年,从斑块物理特征指数上看,林地在 3 种情景下,最大斑块指数(LPI)的衰减幅度分别在 4.89%~5.71%之间,最大斑块面积(CA)减小幅度分别在 5.04%~10.5%之间;草地最大斑块指数(LPI)衰减幅度在情景 EP 下最低为 28.42%,在情景 HD 下最高为 36.3%、在发展情景 HD 与 ED 下,边缘密度(ED)增幅差异较大,分别为 50.87%, 53.01%。因此,仅从地类而言,林地与水域对中低程度的开发强度的敏感性不高,抗人类活动干扰能力较强,而草地生境敏感性较高,易受中低开发强度干扰,导致大规模破坏。从斑块聚合指标上看,水域斑块密度(PD)增加 0.56~0.59,但 2040 年不同发展情景之间的差异不大,而水域斑块形状指数(LSI)差异在 2.74%~6.67%,结合土地利用变化可知,尽管水域有破碎化的风险,但这种风险更多地来自于大规模的土地利用

变化导致的景观结构破坏,而非来自城市的扩张与侵占,有较强的自我调节修复能力;林地的斑块形状指数(LSI)增加 29.81~45.49,林地斑块异质性显著上升,选择生态保护发展情景可以有效的控制林地景观破碎化;值得注意的是,南昌市的草地受空间分布影响,景观结构脆弱,在多情景 2040 年预测中景观连接指数(CONNECT)出现了异常增加,主要原因是分布在南昌市中心与各县区边缘的小规模零散分布草地被大量侵占。

3.2.2 生态用地 MSPA 结果 从数量上看,随着土地利用的剧烈变化,对维持生态安全与稳定具有重要意义核心区在情景 HD, ED, EP 下,分别减少 293.67, 303.28 和 212.91 km²,降幅分别为 14.16%, 14.62%, 10.27%;孤岛类在各发展情景下增加 18.97~28.99 km²;环道类的比例显著上升;用于连接核心区,进行生物、能量流动的连接桥与支线类数量分别增加 1.88~2.65 倍和 2.66~3.06 倍。具体情况详见表 7。

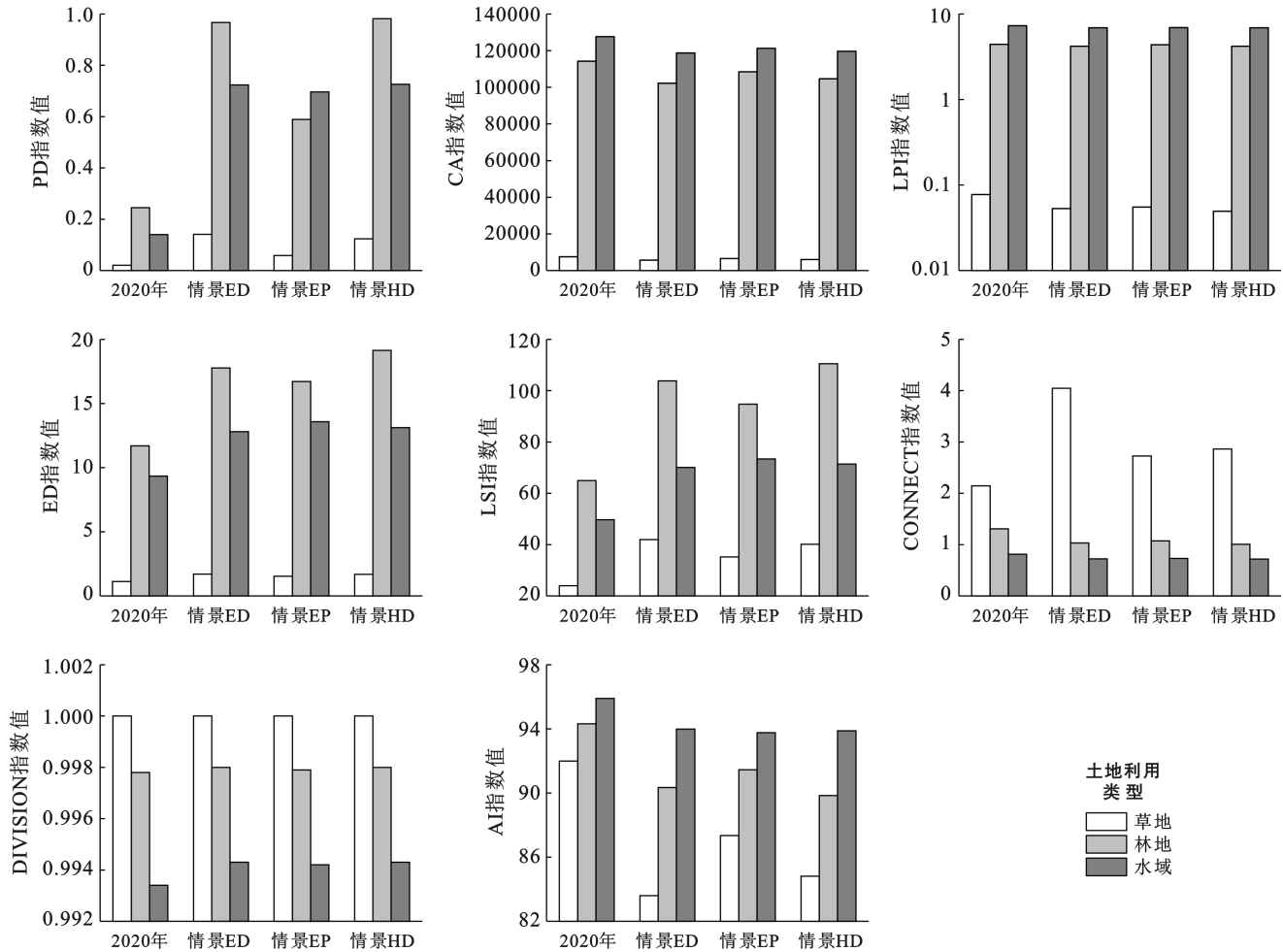


图 2 南昌市生态用地景观格局指数

Fig.2 Landscape pattern index of ecological land in Nanchang City

表 7 形态学空间格局分析面积统计结果

Table 7 Morphological spatial pattern analysis type area statistics

类型	面积统计结果/km ²			
	2020年	情景 HD	情景 ED	情景 EP
支线类	23.74	96.46	88.43	87.11
边缘类	352.56	290.67	287.63	305.17
孔隙类	33.26	22.85	20.10	19.14
孤岛类	0.53	29.52	28.42	19.50
核心类	2 074.13	1 780.45	1 770.85	1 861.21
桥接类	9.10	33.20	26.24	23.04
环道类	0.44	50.73	45.28	48.77
总计	2 493.77	2 303.88	2 266.95	2 363.95

从空间结构上看,不同结构与布局的生态用地生境抗性、破碎化程度存在不同。本文选取 4 个区域来反映这一变化,选择详情如图 3 所示。I 区域以零散的小规模林地、草地为主要生态用地,在土地利用变化中高强度的情景 HD 与 ED 下出现了显著的破碎化,核心区大量出现退化与破坏现象,生态抗性较低,生态结构脆弱。II 区域以主要以水域为主,辅以零星

的林地和草地,生态结构较为单一,一旦出现较大规模的土地利用变化,大量连接类与支线类景观被侵蚀,生境结构显著被破坏,不利于生物的栖息与区域的生态安全维护。III 区域以大小混合分布的林地和草地为主,在中高强度的土地利用变化情景 HD 与 ED 下,零星的核心区大量退化成孤岛类,面积较大的核心区(以林地为主)边缘也有不同程度的侵蚀与破碎化,生境抗性一般,生态结构不稳定。IV 区域以水域、林地混合结构为主,局部零星分布着草地,生态用地构成要素较为均匀,在任意土地利用变化强度下,对生境有重要价值的核心区得到有效保护,只有局部出现破碎化趋势,有较高的生境抗性,能有效地维护区域生境安全与稳定。

综上所述,南昌市生态用地有破碎化趋势,其中面积越大,结构越复杂的生态用地受土地利用变化、人类生产开发活动干扰影响越小,破碎化程度越小;小规模密集分布的生态用地因大多靠近建设用地,被破坏风险与程度也较高。因此在未来的发展规划中,

应当特别注意保护南昌市市辖区周边以及南新建区内小面积零散分布的生态用地,特别是对大面积生态用地之间零散分布的生态用地应当予以重点关注;此

外在进行生态修复时,可以通过增加区域生态用地种类,提高区域生态景观结构,以更好地维护城市整体的生态结构安全与稳定。

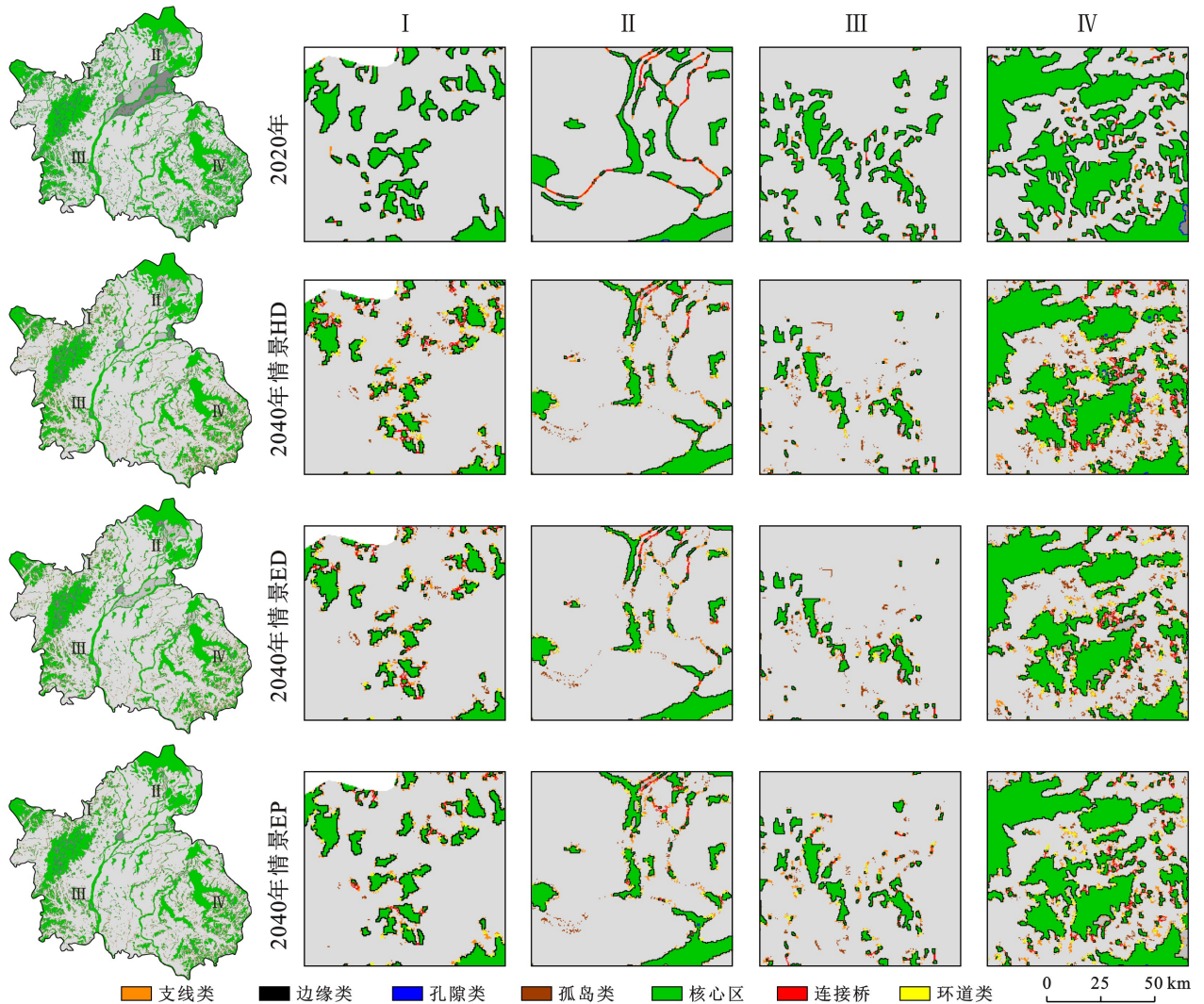


图 3 南昌市 MSAP 景观类型分布

Fig.3 Distribution of MSAP landscape types in Nanchang City

3.2.3 生态用地网络连通性分析结果 相较于 2020 年的生态网络连接度,在情景 HD 下,等效可能连通性指数 $EC(PC)$ 下降 22.43%,连通性保持良好的区域面积为 548.02 km^2 ,城市整体生态网络连接性明显下降;情景 HD 下, $EC(PC)$ 与加权连通量 (AWF) 分别下降 23.24% 与 31.71%,连通性下降区域共计占 49.06%,连通性恶化较情景 HD 进一步下降;情景 EP 下, $EC(PC)$ 下降 18.76%,51.12% 的区域连通性保持良好,生态用地连通性较好。生态连通性网络变化详情见图 4—5 和表 8。

从生态连通性变化的空间分布上看,在情景 HD 下,南新建区、安义县、市辖区西部的梅岭境内的生态网络连接性大面积下降,进贤县境内的斑块可能连

通性保存较好,北新建区北部的鄱阳湖局面积增大,导致斑块连通性增加;而情景 ED 下,南新建区、安义县境内生态连通性网络破坏严重,且由于城市中部赣江两侧的生态斑块数量进一步下降,导致城市东、西两侧的生态用地之间孤立进一步加剧。在情景 EP 下,生态连通性网络下降区域集中于安义县西部与市辖区西部的梅岭境内,其他地区基本完整,城市南部的网络连接性保持较好,可以有效维护城市生态安全,降低景观生态风险。综合对比各生态网络连接性有:①在土地利用变化影响下,城市各区域内小规模生态用地破碎化加剧,生态用地结构愈发脆弱,特别是新建区、安义县与市辖区境内的生态网络连接性有较为显著的下降,应当特别注意保护。②随着

城市边缘零散分布的生态用地减少、城市各局部地区生态用地之间愈发孤立。③不同区域的生境抗性不同,安义县与市直辖区生境结构极为脆弱,在土地利用变化强度相对较弱的情景 EP 下依旧出现不同程度连通性下降;南新建区结构脆弱度次之,在未来城市发展规划时应当避免对上述区域进行剧烈土地利用调动。

表 8 研究区 2020 年生态用地网络连通性

Table 8 Ecological land network connectivity

情景类别	F	加权连通量(AWF)	PCnum	EC(PC)
2020 年	3 190.14	543 293	1 941 466	1 393.365
情景 HD	2 542.046	395 857.4	1 168 322	1 080.89
情景 ED	2 470.394	371 034.3	1 144 015	1 069.586
情景 EP	2 755.874	405 215.1	1 281 376	1 131.979

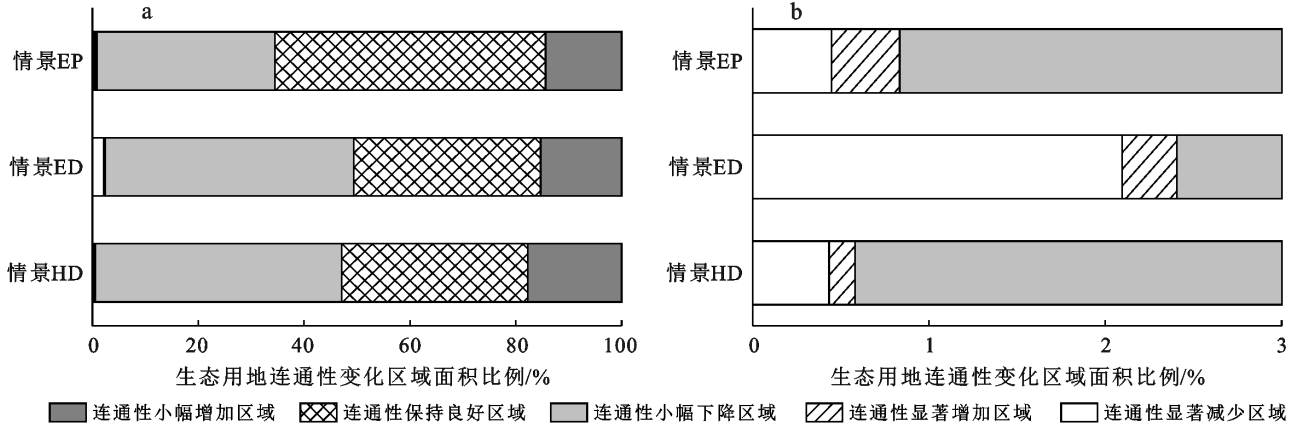


图 4 南昌市 2020—2040 年各情景连通性面积变化(图 4b 为图 4a 的局部放大)

Fig.4 Change of connectivity area in various scenarios in Nanchang City from 2020 to 2040 (Fig.4b shows a partial magnification of Fig.4a)

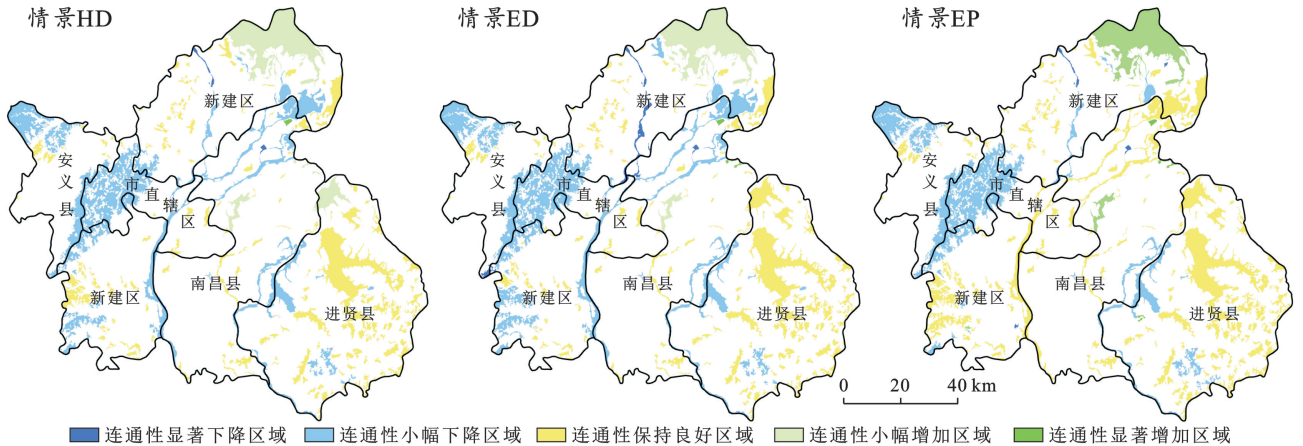


图 5 南昌市 2020—2040 年各情景斑块连通性变化

Fig.5 Change of patch connectivity in various scenarios in Nanchang City from 2020 to 2040

3 讨论与结论

3.1 结论

(1) 南昌市生态用地在不同发展情境下均有不同程度的破坏与蚕食现象,且减少的生态用地分布在城市边缘地区 and 市中心建设用地周边区域,特别是城市南部、西部生态用地破碎化严重。值得注意的是,在生态保护情境下,生态用地的侵占现象较为缓和,生态安全性较高。

(2) 在各生态用地类型中,林地与水域的生态结构较好,对于不同开发强度均有较高的抗性;草地破

碎化严重,分布较为零散,不宜进行中高强度的开发;此外,多类型混合,结构复杂的生态用地在城市化中不易被破坏与侵占,是区域生态安全维系的主体。

(3) 在不同发展情景下,南昌市整体生态网络连通性均呈下降趋势;市直辖区西侧的梅岭、南新建区与安义县境内的网络连通性极易被破坏,尤其在经济发展情境下,生态网络连通性下降显著。

3.2 讨论

(1) 生态用地是人与自然交互的重要媒介,在过去的几十年内,不断被城市化建设侵占,如何保障未来的生态用地安全是可持续发展的重难点。根据研

究模拟预测显示,在城市化不同发展情景下,生态用地的侵占是不可避免的,因此建议政府在进行方案选择时优先考虑生态保护性方案,避免高强度开发以及大规模土地利用的调整对城市生态造成难以修复的破坏、缓解人与自然的紧张关系。

(2) 根据景观结构与网络连通性分析结果,在不同发展情境下,林地与水域均表现出较强的抗性,多类型混合且具有复杂结构的生态用地可以保持良好的空间结构。因此,在城市进行大规模土地利用调整与高强度开发时,建议规划至南昌县与进贤县境内,同时加强安义县、南新建区的生态用地保护,以维护城市生态安全。

(3) 尽管分析未来不同发展情景下生态用地的景观结构与网络连通性变化的差异,可以为未来城市发展方向与规划提供参考,但研究依旧存在不足。尺度问题是景观生态研究的重点之一^[30],本研究采用分析的粒度较为单一,同时对网络连通性阈值选择时也仅是参考他人研究设置,并未进行过调试比对,未充分考虑到尺度效应对生态景观与网络的影响,这有待后续的研究加以补充。

[参 考 文 献]

[1] 尹海伟,孔繁花,祈毅,等.湖南省城市群生态网络构建与优化[J].生态学报,2011,31(10):2863-2874.

[2] Young C H, Jarvis P J. Measuring urban habitat fragmentation: An example from the Black Country, UK [J]. *Landscape Ecology*, 2001,16(7):643-658.

[3] 张应杭.十九大报告关于生态文明建设的 3 个创新[J].人民论坛,2017(31):27.

[4] Arora A, Pandey M, Mishra V N, et al. Comparative evaluation of geospatial scenario-based land change simulation models using landscape metrics [J]. *Ecological Indicators*, 2021,128:107810.

[5] 王旭,马伯文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.

[6] 刘建华,张启斌, Yang Di, 等.基于 MCR-ANN-CA 模型的包头市生态用地演变模拟[J].农业机械学报,2019,50(2):187-194.

[7] 刘彦文,刘成武,何宗宜,等.基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素[J].应用生态学报,2020,31(3):987-998.

[8] 杨伟青,张会兰.基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J].水土保持研究,2022,29(5):253-262.

[9] 璩路路,刘彦随,周扬,等.罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应:以井冈山为例[J].生态学报,2019,39(10):3468-3481.

[10] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017,168:94-116.

[11] 李慧颖,李晓燕,贾明明,等.基于 CA-Markov 模型的长吉示范区土地利用格局多情景预测研究[J].地理信息世界,2019,26(3):18-24.

[12] 林彤,冯兆华,吴大放,等.基于 FLUS 模型的喀斯特地区生态用地时空变化及多情景预测:以湖南省宁远县为例[J].水土保持通报,2022,42(2):219-227.

[13] 张晓瑶,张潇,李冬花,等.城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2022,42(6):2086-2097.

[14] Li Yanan. Research progress of landscape ecology [J]. *Journal of Landscape Research*,2021,13(4):67-68,72.

[15] 龙花楼,刘永强,李婷婷,等.生态用地分类初步研究[J].生态环境学报,2015,24(1):1-7.

[16] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021,85:101569.

[17] Yao Yao, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(11/12):2452-2479.

[18] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168:94-116.

[19] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model [J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9):1167-1181.

[20] 李琛,高彬娉,吴映梅,等.基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(01):84-94.

[21] 白军红,欧阳华,王庆改,等.基于 Apack 的若尔盖高原湿地景观空间格局分析[J].中国生态农业学报,2008, NO.67(05):1253-1256.

[22] 李秀珍,布仁仓,常禹,等.景观格局指标对不同景观格局的反应[J].生态学报,2004,24(1):123-134.

[23] 黄辉.长沙市河流廊道景观格局及连通性动态变化研究[D].湖南长沙:湖南师范大学,2016.

- [4] 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
- [5] 李志江, 马晓冬. 基于 GIS 的徐州生态敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 244-247, 253.
- [6] 张强, 冯悦, 魏伟, 等. 基于 GIS 的祁连山生态敏感性评价[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 1056-1064.
- [7] 宋姣姣, 彭鹏, 周国华, 等. GIS 支持下的长沙市生态环境敏感性分析[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2017, 11(4): 21-26.
- [8] Angelo Pecci, Ganapati Patil, Orazio Rossi, et al. Biodiversity protection funding preference: A case study of hotspot geoinformatics and digital governance for the *Map of Italian Nature* in the presence of multiple indicators of ecological value, ecological sensitivity and anthropic pressure for the Oltrepò Pavese and Ligurian-Emilian Apennine study area in Italy [J]. *Environmental and Ecological Statistics*, 2010, 17(4): 473-502.
- [9] 路昌, 韩笑, 韩会芹. 山东省土地利用转型与生态服务功能交叉敏感性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 223-231.
- [10] Jgtap T, Komarpant D, Rodrigues R. Status of asea grass ecosystem: An ecologically sensitive wetland habitat from India [J]. *Wetlands*, 2003, 23(1): 161-170.
- [11] Wiktelius S, Ardo J, Fransson T. Desert locust control in ecologically sensitive areas: Need for guide lines [J]. *Ambio*, 2003, 32(7): 463-468.
- [12] Muhammad A B, Khadij N, Syed A M, et al. Toward GIS-based approach for identification of ecological sensitivity areas: Multi-criteria evaluation technique for promotion of tourism in Soon Valley, Pakistan [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(9): 1527-1536.
- [13] Carrington D, Gallimore R, Kutzbach J. Climate sensitivity to wetlands and wetland vegetation in Mid-Holocene North Africa [J]. *Climate Dynamics*, 2001, 17(3): 151-157.
- [14] Ivan M. Sensitivity of hydrologic systems to climate change [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 2001, 26(2): 233-252.
- [15] 高星, 高宇, 李晏, 等. 雄安新区土地生态系统服务价值变化与敏感性分析[J]. 金陵科技学院学报(社会科学版), 2019, 33(3): 6-10.
- [16] 吴昆, 彭红霞, 李江风, 等. 基于变异系数法的灵宝市土地生态敏感性分析[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(14): 32-37.
- [17] 康婧, 孙永光, 李方, 等. 辽河口海域使用变化下的生态敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4722-4733.
- [18] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 等. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 263-272.
- [19] 李益敏, 管成文, 郭丽琴, 等. 基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 267-276, 316.
- [20] 郝守宁, 董飞, 刘晓波, 等. 尼洋河流域土地利用结构对水质的关联分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1): 194-200.
- [21] 黄静, 崔胜辉, 李方一, 等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7441-7449.
- [22] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值 [J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [23] 赵瑜, 陈超, 胡振琪. 中国西部生态脆弱区生态系统服务价值评估研究进展[J]. 林业经济问题, 2018, 38(4): 91-97, 112.
- [24] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [25] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [26] 戴云哲, 李江风. 洞庭湖区生态用地生态服务价值时空演化的地形梯度效应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 197-204.

(上接第 211 页)

- [24] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [25] Pierre S, Peter V. Morphological segmentation of binary patterns [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 30(4): 456-459.
- [26] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 等. 南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2119-2127.
- [27] 吴钰茹, 吴晶晶, 毕晓丽, 等. 综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1315-1326.
- [28] Santiago S, Josep T. Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2008, 24(1): 135-139.
- [29] 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.
- [30] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.