

基于生态敏感性与生态网络的南昌市 生态安全格局构建

陈瑶瑶^{1,2}, 罗志军^{1,2}, 齐松^{1,2}, 赵杰^{1,2}, 袁媛^{1,2}, 李芳³

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院, 南昌 330045;

2.江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045; 3.赣州市城乡规划设计研究院, 江西 赣州 341000)

摘 要:为构建科学合理的生态安全格局,以江西省南昌市为例,综合生态敏感性与生态网络展开研究。首先从地形、土壤、水资源、植被与土地利用和政策保护等方面选取因子评价生态敏感性;然后结合景观连通性分析和形态学空间格局分析(MSPA)获得生态源地,基于最小路径方法模拟生态廊道并识别出生态节点;最后综合生态敏感性评价与生态网络构建结果得到了生态安全格局。结果显示:南昌市生态敏感性以极敏感和高敏感为主,占总面积的 69.55%;共识别生态源地 12 块,主要分布在南昌市南北部地区;综合阻力值表现为南北低中部高的分布情况;共识别 18 条生态廊道,其景观类型主要包括耕地、水体、林地和湿地。这表明南昌市生态条件好,且生态廊道稳定性较高,但区域南北之间的景观连通能力较差,中部地区是生态修复与保护的重点区域。

关键词:生态敏感性;景观连通性;生态网络;生态安全格局

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0342-08

Ecological Security Pattern Construction of Nanchang City Based on Ecological Sensitivity and Ecological Network

CHEN Yaoyao^{1,2}, LUO Zhijun^{1,2}, QI Song^{1,2}, ZHAO Jie^{1,2}, YUAN Yuan^{1,2}, LI Fang³

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology,

Nanchang 330045, China; 3.Urban Planning Design Institute of Ganzhou, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Rapid urbanization areas are facing many ecological problems. The construction of ecological security pattern can coordinate the contradiction between social economic development and urban ecological security maintenance. In order to construct a scientific and reasonable ecological security pattern, Nanchang City, Jiangxi Province was taken as an example to study the ecological security pattern by integrating ecological sensitivity and ecological network. Firstly, ecological sensitivity was evaluated by selecting factors such as terrain, soil, water resources, vegetation and land use and policy protection. Then, the morphological spatial pattern analysis (MSPA) and landscape connectivity analysis were used to get the ecological sources, and the ecological corridors were simulated, and ecological nodes were identified by using Least-Cost Path Method. Finally, comprehensive ecological sensitivity evaluation results and ecological network construction results figured out the ecological security pattern of Nanchang City. The results showed that: the ecological sensitivity of Nanchang city was mainly extremely sensitive and highly sensitive, accounting for 69.55% of the total area; a total of 12 ecological sources were identified, mainly distributed in the north and south of Nanchang City; the comprehensive resistance value was low in the north and south and high in the middle; a total of 18 ecological corridors were identified, and their landscape types mainly included cultivated land, water body, forest land and wetland. These results show that Nanchang has good ecological conditions and high stability

收稿日期:2020-08-03

修回日期:2020-09-23

资助项目:国家自然科学基金(41961042);教育部人文社会科学研究规划资助项目(19YJAZH061);江西省高校人文社科项目(GL18128);江西省教育厅科技项目(GJJ180193)

第一作者:陈瑶瑶(1996—),女,贵州沿河人,硕士研究生,研究方向为土地利用、GIS运用。E-mail:chenjiayao424@163.com

通信作者:罗志军(1976—),男,江西新余人,教授,博士,主要从事土地管理和3S应用研究。E-mail:luozj10@163.com

of ecological corridor, but the landscape connectivity between the north and the south is poor, and the central region is the key area of ecological restoration and protection.

Keywords: ecological sensitivity; landscape connectivity; ecological network; ecological security pattern

近年来,城市空间急剧扩张使人类活动影响的生态景观的范围和程度愈来愈大,同时给区域生态环境带了许多严重问题。在此背景下,众多学者提出由点线面等生态斑块组成的区域潜在格局——生态安全格局,来维护区域生态平衡和自然生命支持系统^[1-6]。通过构建城市生态安全格局,对缓解城市发展与生态保护之间的矛盾、提升城市发展水平意义重大^[7]。

1990 年以来,诸多学者从土地利用优化^[8]、生态网络构建^[9]、生态红线划定等^[10]视角出发,对农牧交错带^[2]、海岛^[7]、地质灾害敏感区^[11]、干旱区^[12]等区域对生态安全格局进行了较多探讨,并形成了“源地识别—廊道模拟—节点提取”这一生态安全格局构建的基本框架,其中,构建生态安全格局的基础是识别生态源地和模拟生态廊道。部分学者直接将自然保护区等^[13-14]作为生态源地的做法存在一定的主观性,采用指标体系识别生态源地能够考虑多方面因素,但评价指标体系往往具有针对性^[6]。在相关研究中,生态廊道模拟常使用最小累积阻力模型方法,其核心是生态阻力面的构建,其一般做法是对景观类型进行赋值并考虑地形的影响,但忽略了人类行为给周边环境带来的破坏。针对当前生态源地识别、生态阻力面构建和生态廊道识别存在一定的主观性与不全面性,本文尝试从景观结构性与连通性角度入手并考虑政策因素,采用形态学空间格局分析(MSPA)和景观连通性分析方法,综合重要性高的生态斑块和自然保护区等识别生态源地;生态阻力面构建中通过距居民点与道路的距离来反映人类活动干扰这一阻力因子。通过将生态敏感性综合评价与生态网络研究结果相结合,科学构建南昌市生态安全格局,并提出优化建议,能够缓解社会发展和城市生态环境二者的冲突,对优化城市空间格局、推动可持续发展和保护生态安全有指导意义。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

南昌市地处江西省中北部,位于东经 115°27′—116°35′,北纬 28°10′—29°11′,是一座红色文化城市,与长三角、珠三角以及闽三角接壤,是连接周边经济区的省际交通廊道。辖区内日照与降水充足、气候温和,全境山、丘、岗、平原相间,呈“西山东水”地理分布格局,拥有丰富的水资源与矿产资源。截至 2017

年末,常住人口 546.35 万人,生产总值 5 003.19 亿元。南昌市是江西省发展的核心,也是国家森林城市,具有明显的生态优势,社会经济和城市化程度正持续进步,如何科学地调节社会发展与生态安全保护的矛盾、促进区域可持续发展,是目前亟需解决的关键问题。

1.2 数据来源与处理

根据研究区范围,为保证景观要素的完整性,本文选择 30 m×30 m 的栅格作为研究单元。采用的数据主要有:(1) 2017 年 Landsat8/OLI 的 2 幅遥感影像(来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m)。利用 ENVI 5.0 软件对影像进行解译获得土地利用数据,解译精度大于 90%;(2) DEM 数据(来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m)。通过 ArcGIS 10.2 软件生成研究区坡度和洪水调蓄区;(3) 植被覆盖度基于 NDVI 数据估算得到,NDVI 数据利用遥感数据不同波段之间的关系得到,分辨率 30 m;(4) 土壤矢量数据(来源于南昌市耕地地力评价成果),包含土壤类型、土壤侵蚀等数据;(5) 2017 年道路数据(来源于地理国情监测云平台);(6) 地质灾害数据。根据江西省地质灾害“十三五”规划,利用 ArcGIS 10.2 经过配准、数字化获得;(7) 基本农田数据与生态保护红线(来源于江西省自然资源厅)。

2 研究方法

2.1 生态敏感性分析

生态敏感性是区域生态安全受到影响和破坏的难易性程度,是评价生态系统稳定性的重要标准^[15-16]。结合研究区实际情况与数据的可获取性,从地形、土壤、水资源、植被与土地利用方面构建生态敏感性评价体系,参考相关研究^[16-20]确定指标因子等级划分标准,使用层次分析法确定指标因子权重(表 1)。基于叠加分析法获得生态敏感性初步评价结果,在此基础上利用政策保护因子对其进行修正,获得最终的生态敏感性的评价结果。

2.2 生态网络构建

2.2.1 生态源地识别 生态源地是维护区域生态健康的重要生境斑块,对保护生物多样性和生态稳定性意义重大^[1,21],在满足人类活动所需的生态环境质量方面也有重要地位^[22]。本文结合形态学空间格局分析和景观连通性分析获得生态源地,同时将自然保护区作为生态源地的补充。

表 1 生态敏感性评价指标体系

指标	因子	权重	赋值/分区				
			1	3	5	7	9
地形	高程/m	0.0757	<30	30~120	120~250	250~450	>450
	坡度/(°)	0.1514	0~3	3~8	8~15	15~25	>25
土壤	地质灾害	0.0505	不易发区	低易发区	中易发区	高易发区	极易发区
	土壤类型	0.0585	水稻土、潮土	山地草甸土	黄褐土	红壤	紫色土
	土壤侵蚀	0.1171	低	较低	中	高	极高
水资源	洪水调蓄区	0.0374	利用自然断点法分为五级并赋值 1,3,5,7,9				
	水体缓冲区/m	0.0748	>1500	1000~1500	500~1000	0~500	水体
植被与土地利用	植被覆盖度	0.1448	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~0.8	0.8<
	土地利用类型	0.2897	建设用地	其他用地	耕地	草地	林地、水体
政策保护因子	基本农田	划为高敏感区					
	生态红线	一级管控区划为极敏感区,二级管控区划为高敏感区					

(1) 基于 MSPA 方法的景观格局分析。形态学空间格局分析通过腐蚀、膨胀、开闭运算等数学形态学原理分辨栅格图像结构^[23-26],能将前景分为互不重叠的 7 类景观。该方法强调数据的结构特征,能很好地体现生态斑块在生态过程中的作用,有助于生态源地的选取^[24-25]。

(2) 景观连接度评价。景观连接度是指景观适宜某种生态过程发生的程度^[27-28],通过对不同生态斑块的连通性来判断其重要性,能够较好选取生态源地^[29]。本文采用可能连通性指数(PC)评价区域景观连通性,并采用斑块重要性指数(d_{PC})衡量斑块重要程度并提取源地。

$$PC=(\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nP_{ij}^*a_ia_j)/A_L^2$$

(1)

$$d_{PC}=(PC-PC_{remove})/PC\times 100\%$$

(2)

式中: $i\neq j$, P_{ij}^* 为斑块 i 和 j 之间所有路径的最大乘积概率; a_i 、 a_j 分别为斑块 i 和 j 的面积; A_L 为景观总面积; PC 取值范围为 $[0,1]$, PC 值越小,斑块之间连

通性越低。 PC_{remove} 为去除某斑块后剩余斑块的整体指数值。 d_{PC} 通过 PC 的变化分析斑块在维持景观连通性的重要程度。

借鉴相关研究^[30-32],基于 Conefor 2.6 软件,将连通概率设为 0.5,同时选取 500,1 000,1 500,2 000 m 4 个距离阈值进行比较,最终选择 1 000 m 的距离阈值进行南昌市斑块连接度分析。使用自然断点法分别将斑块重要性值划分为非常高、高、一般和低 4 种类型,将非常高、高两个等级作为生态源地。

2.2.2 生态阻力面构建 依据生态安全格局理论,物种迁移和能量流动在空间上活动会受到外界干扰,阻力最低的通道即可为生态廊道^[33-34]。基于相关研究成果^[34-36],考虑南昌市发展现状,从地形、景观和人类活动干扰等方面选择 10 项指标作为生态源地扩张的阻力因素并分等赋值,阻力值大小与阻力强弱呈正相关。根据阻力因子影响生态过程发生的强弱,采用层次分析法获得相应权重(表 2)。

表 2 研究区生态阻力面评价体系

因子	权重	阻力值				
		5	4	3	2	1
高程/m	0.0636	<30	30~120	120~250	250~450	>450
坡度/°	0.0636	>25	15~25	8~15	3~8	<3
景观类型	0.5299	建设用地	未利用地	耕地	草地	林地、水体
距水体距离/m	0.1034	>2000	1500~2000	1000~1500	500~1000	<500
距居民点距离/m	0.1273	<250	250~500	500~1000	1000~2000	>2000
距铁路距离/m	0.1122	<500	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
距高速公路距离/m		<500	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
距国道距离/m		<500	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
距省道距离/m		<250	250~500	500~1000	1000~1500	>1500
距县道距离/m		<100	100~200	200~500	500~1000	>1000

2.2.3 生态廊道的识别 生态廊道作为生物迁移和物质能量流动的最佳路径,是不同生态源地相互联系的通道。本文在构建的阻力面的基础上,利用最小累积阻力模型获得生态廊道。

$$MCR=f\min\sum_{j=n}^{i=m}(D_{ij}\times R_i)$$

(3)

式中: D_{ij} 为源地 i 与 j 之间的距离; f 为最小累积阻力和生态过程的正相关函数; n,m 为源地总数; R_i 是

源地*i*对生态过程发生的阻力系数。

2.2.4 生态节点的识别 生态节点是指衔接相邻源地的区域,对物种迁移扩散有着至关重要的影响^[14],与生态源地和生态廊道共同构成城市生态网络。借鉴相关研究成果,本文将生态廊道间的交点^[37]、以邻近“源”为中心的等阻力线切点^[38]作为生态节点。

3 结果与分析

3.1 生态敏感性评价

由图 1 和表 3 可以看出,南昌市生态敏感性主要为极敏感性和高敏感性,占总面积的 69.55%,表明南昌市生态环境较好,其中极敏感区面积为 118 001.74

hm²,占总面积的 16.40%,呈现大斑块孤立,小斑块破碎的分布特征,大面积极敏感区主要为生态环境良好的林地与水体,比如梅岭国家森林公园、鄱阳湖南矶湿地自然保护区;高敏感区面积为 382 477.42 hm²,占总面积的 53.15%,可作为人类活动区域与极敏感区之间的缓冲地带。

中敏感区、轻敏感区和低敏感区面积相差不大,各占总面积的 10.09%,9.90%,10.46%,其中轻敏感区和低敏感区大多是城乡建设用地和主要交通干线及周边区域,是人类主要的活动场所,生态环境也更易遭到破坏,对于此类地区需要强化生态环境建设,控制建设用地扩张。

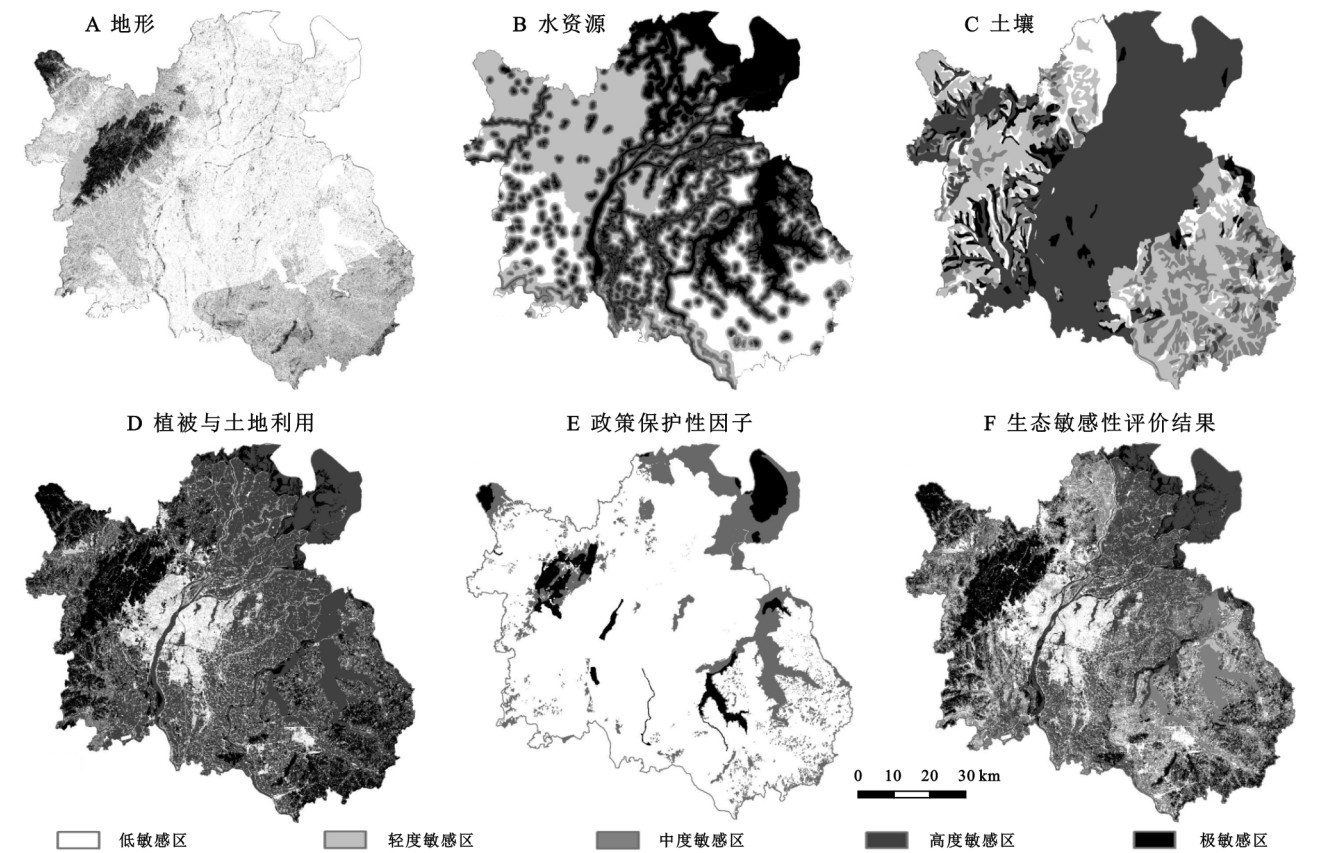


图 1 生态敏感性评价指标因子与结果

表 3 生态敏感性评价结果分区统计

敏感性分区	面积/hm ²	占总面积比例/%
低敏感区	75246.39	10.46
轻敏感区	71240.42	9.90
中敏感区	72668.43	10.09
高敏感区	382477.42	53.15
极敏感区	118001.74	16.40
合计	719634.40	100.00

3.2 生态网络构建

3.2.1 生态源地识别 (1) MSPA 与景观连通性分析。结合图 2 和表 4 发现,核心区占总面积的 22.47%,为 161 693.91 hm²,表明研究区生态底蕴深厚,主要分

布在湾里区、进贤县、上新建东北部、下新建西部、安义县北部等地区。桥接区作为连通景观单元的关键区域,其仅占总面积的 0.37%,表明核心区间联系较为薄弱。孔隙和边缘区为核心区的内外边缘,面积分别为 1 699.40,21 742.19 hm²,共占总面积的 3.26%,表明核心区抵御外界干扰能力较强。支线具备一部分连接功能,占总面积的 0.55%。岛状斑块在生物迁徙运动时具有踏脚石的功能,占总面积的 0.24%。作为核心区斑块内部物种迁移扩散和物质流动循环通道的环道区占总面积的 0.18%。

(2)生态源地的确定。将景观连通性评价结果与自然保护地等相结合得到 12 个生态源地斑块,总面

积为 120 871.31 hm²。从图 3 中可以看出,生态源地主要为安义县、湾里区等生态基础较为良好、物种资源充裕的林地区域以及鄱阳湖、军山湖等大面积湖泊及河流,这些区域作为生物的重要栖息地,是维持南昌市生物的繁衍以及生态系统健康不可或缺的部分。

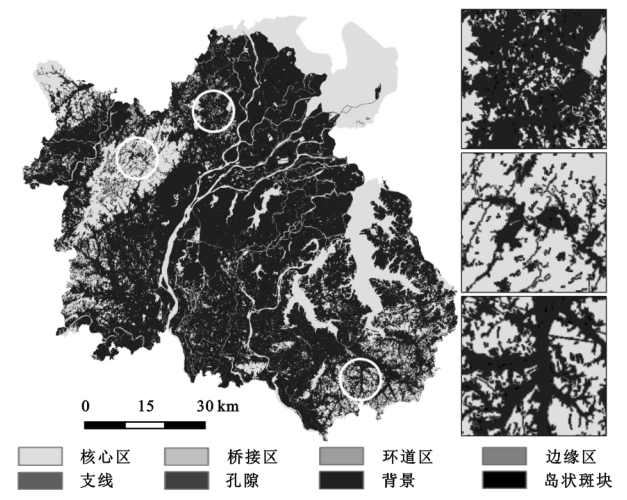


图 2 基于 MSPA 的景观要素分类

表 4 景观要素分类统计

景观类型	面积/hm ²	占总面积的百分比/%
核心区	161693.91	22.47
桥接区	2672.22	0.37
边缘区	21742.19	3.02
孔隙	1699.40	0.24
环道区	1287.24	0.18
支链	3993.93	0.55
岛状斑块	1750.83	0.24
总计	194839.72	27.07

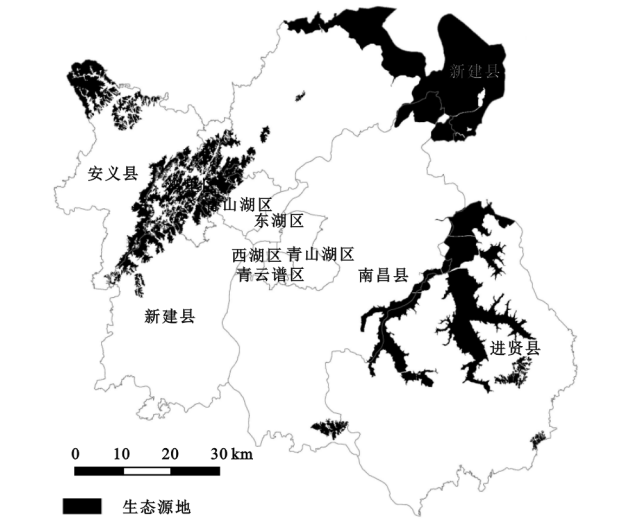


图 3 生态源地分布

3.2.2 综合阻力面 利用 ArcGIS 10.2 软件得到各阻力因素阻力值分级(图 4),并在此基础上得到研究区综合阻力面和最小累积阻力面。从图 5 可以看出,综合阻力呈现南北低、中部高的特征,高阻力区主要

位于现状建设用地及其周边地区,低阻力区主要为人类活动强度较低的林地与河流湖泊;从最小累积阻力面结果可以看出,中部区域对物种的迁移扩散和物质流动有较大的阻碍作用,南北区域之间的连通性较差,需要加强中部地区林地与湿地景观的保护,控制好建设用地的扩张。

3.2.3 生态廊道判别 基于生态源地和综合阻力面,运用 Linkage Mapper 工具模拟生态廊道(图 6),结合已有研究^[38],将廊道宽度设为 1 km。由表 5 可知,生态廊道总面积为 45 304.66 hm²。由于研究区耕地面积大、分布广泛,且耕地对生态过程发生的影响较小,使得生态廊道中耕地占 44.85%,为 20 321.15 hm²;林地和水体在生态廊道中面积分别为 10 192.88, 7 703.51 hm²,共占生态廊道总面积的 39.5%,这是因为生态源地主要为生态基础较为良好、物种资源充裕的林地区域以及鄱阳湖、军山湖等大面积湖泊及河流,生态源地间发生生态过程时需要穿越周边林地及水体;建设用地占生态廊道总面积的 11.45%,表明研究区城镇建设用地、村庄以及交通用地对生态过程发生的阻碍作用较为突出,生态廊道的稳定性较低,因此在未来的发展建设,应尽量避免占用生态廊道,以保护区域内生态系统稳定与生物多样性。

3.3 生态安全格局构建

构建生态安全格局的目的在于缓解城市建设和生态安全保护两者的冲突,为城市发展与土地资源科学合理利用提供有力支撑。本文结合生态敏感性综合评价与生态网络研究结果构建南昌市生态安全格局,将极高敏感区与生态源地作为低生态安全格局,高敏感区与中敏感区作为中生态安全格局,轻敏感区和低敏感区作为高生态安全格局(图 7)。基于生态安全格局,分别将高、中、低的生态安全格局划为适宜建设区、限制建设区和禁止建设区。在未来发展规划中,适宜建设区内建设用地应尽可能避免占用生态廊道,留有一定的空间作为生态廊道与外界的缓冲区,保护廊道的稳定性,充分发挥生态廊道的连接功能;限制建设区内的开发活动应该以生态保护优先,对维护生态环境以及生态稳定性的活动应该严格控制;建设区中除了国家规划必须要开发建设的项目外,禁止开展任何建设项目。

3.4 生态安全格局优化建议

3.4.1 加强生态源地保护 生态源地是区域生态安全格局中最基础、最核心的区域,是生物生存繁衍的重要场所,能够维护区域生态环境及生态过程,所以保护生态源地环境及其重要。针对大型林地生态源地应加强该区域现有动植物资源的保护力度,有效保

护区域生态多样性稳定健康的发展,使各类生物有较为良好的生存环境。针对水体生态源地,加强湖泊污染治理,实施水土保持等项目,尽量降低人类活动对生态源地带来的干扰。

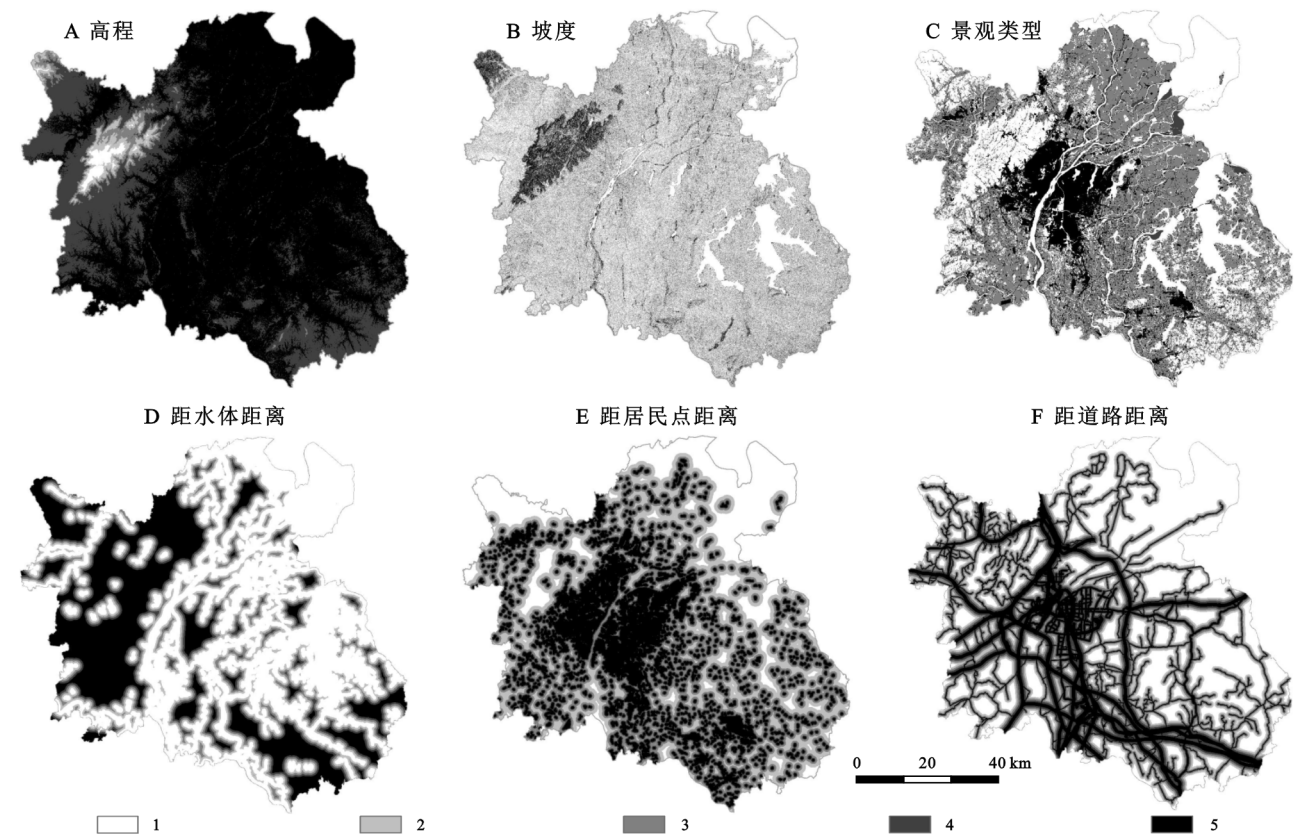


图 4 生态阻力面评价指标因子分级

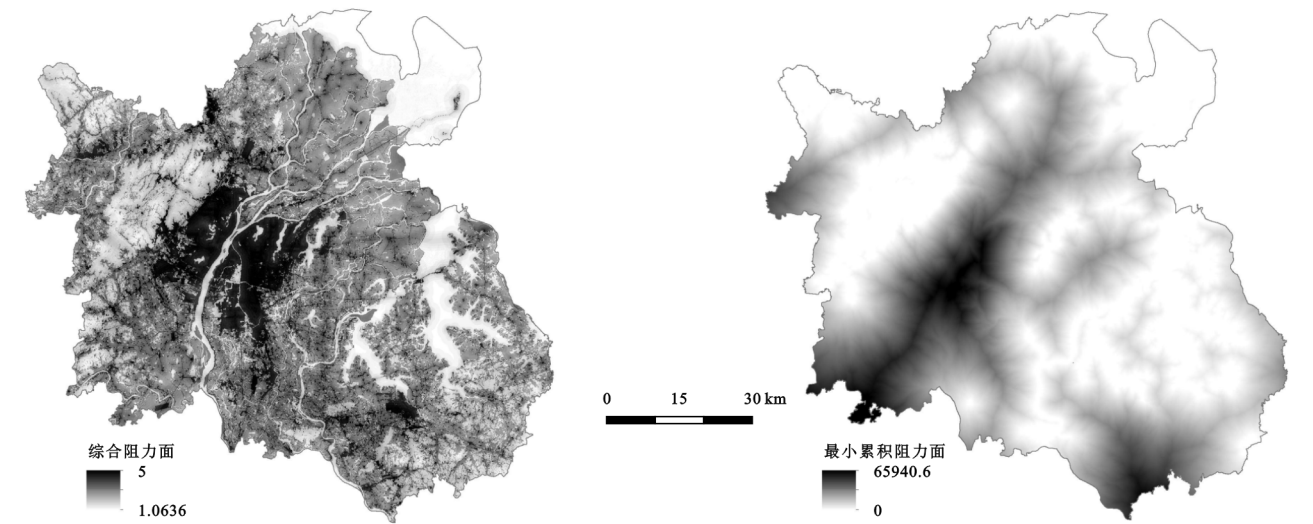


图 5 综合阻力面和最小累积阻力面情况

表 5 潜在廊道的景观组成类型统计

景观类型	面积/ hm ²	在廊道中的 面积/hm ²	占生态廊道 总面积比例/%
耕地	311872.22	20321.15	44.85
林地	113847.77	10192.88	22.50
水体	153532.77	7703.51	17.00
建设用地	124014.30	5189.12	11.45
草地	7562.80	1237.51	2.73
未利用地	8805.71	660.49	1.46
总计	719636.40	45304.66	100.00

3.4.2 加强生态廊道建设 根据区域实际情况设置不同宽度的廊道缓冲区,减少外界的干扰;探索“廊道长制”工作机制,明确工作职责。通过加强廊道建设可以促进不同“源”间以及“源”与基质间的生物迁移和物质能量流动,进一步改善生态质量和生态环境。

3.4.3 加强生态节点建设 生态节点能够促进区域物种的迁移扩散,加强其建设能够提升生态廊道的稳定性,增强景观间的功能联系,对维系破碎的生境斑

块有着重要作用。一方面可通过提高生态节点来有效发挥其“踏脚石”的功能;另一方面应控制生态节点及其周边地区人类活动强度,并对已经遭到破坏的生态节点进行重点保护与恢复。

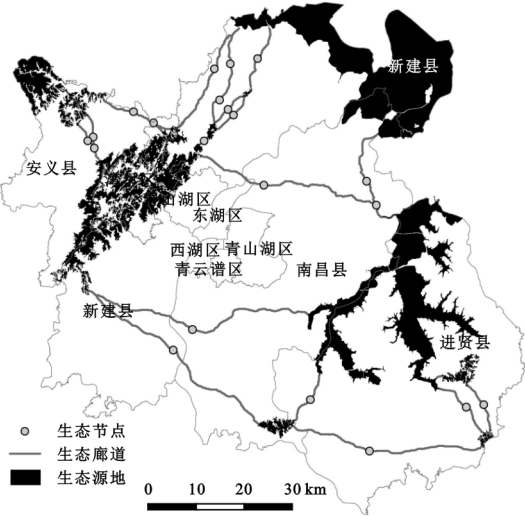


图 6 生态网络构建结果

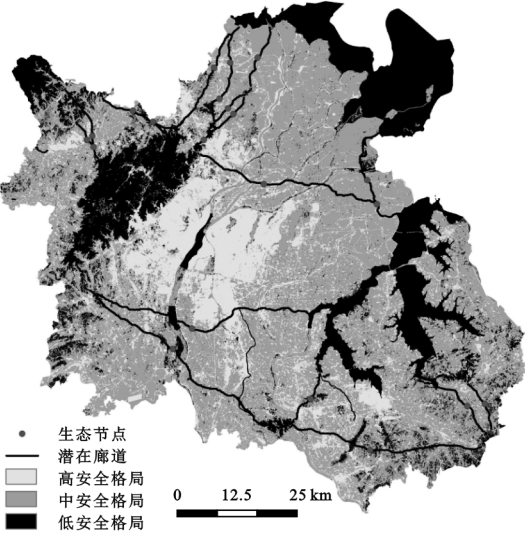


图 7 南昌市生态安全格局构建

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文基于遥感影像数据,结合生态敏感性评价和生态网络研究构建南昌市生态安全格局。在结合形态学空间格局分析和景观连通性评价结果与各类自然保护区数据确定生态源地方面具有一定的创新性,但其他方面存在着不足,具体如下:

(1) 评价指标体系需进一步完善。生态敏感性评价与生态阻力面构建的指标体系虽然从各方面都选取评价因子进行分析,但受数据可获取性的限制,评价指标体系仍有进一步完善的空间。另外采取的层次分析法确定权重时参考相关研究及专家意见的

做法较为合理,但结果还是会受到主观性的影响。

(2) 生态阻力面的构建过程中,由于生物迁徙数据获取有限,所得研究结果对不同生物的适用性存在优劣。各阻力因子的阻力等级通过参考已有的研究确定,生态安全格局的构建是否会受到阻力因子不同等级的影响还需要进一步的研究来加以完善。

(3) 通过构建生态安全格局来划定南昌市适宜建设区、限制建设区和禁止建设区时,并未考虑现有政策、城市规划等方面因素的影响。

针对以上情况,在今后研究中可以从数据的获取方面入手,并采用主、客观相结合的权重赋值方式,多角度综合考虑来进一步完善评价指标体系。在构建区域生态安全格局时,还应考虑政策因素、未来规划等方面的影响,使评价结果更为准确合理。

4.2 结论

(1) 通过生态敏感性综合评价可知,南昌市生态敏感性主要为极敏感性和高敏感性,占总面积的 69.55%,表明南昌市生态条件较好,其中极敏感区呈现“大而孤立,小且破碎”的分布特征。

(2) 通过形态学空间格局分析(MSPA)和景观连通性分析,共识别生态源地 12 块,主要分布于南昌市北部地区与南部地区,为大面积林地和水体,这表明了南北区域之间景观连通能力较弱;综合阻力值表现为南北低中部高的布局特点,表明南昌市中部是生态修复与保护的重点区域;通过最小路径方法,共获得 18 条生态廊道,其中耕地、林地、水体和湿地是生态廊道关键的景观要素,表明生态廊道具有较高稳定性。

(3) 结合生态敏感性综合评价与生态网络研究得到的结果,可以有效构建南昌市生态安全格局,分别将高、中、低的生态安全格局划为适宜建设区、限制建设区和禁止建设区,并有针对性地提出优化建议。

参考文献:

[1] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报, 1999,19(1):8-15.

[2] 王让虎,李晓燕,张树文,等.东北农牧交错带景观生态安全格局构建及预警研究:以吉林省通榆县为例[J].地理与地理信息科学,2014,30(2):111-115,127.

[3] 吴健生,马洪坤,彭建.基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建:以深圳市为例[J].地理科学进展,2018,37(12):1663-1671.

[4] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century[J]. Renewable Resources Journal, 2002,20(3):12-17.

[5] Sutton-Grier A E, Wowk K, Bamford H. Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastruc-

- ture to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51:137-148.
- [6] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].*地理研究*, 2017, 36(3):407-419.
- [7] 江源通,田野,郑拴宁.海岛型城市生态安全格局研究:以平潭岛为例[J].*生态学报*, 2018, 38(3):769-777.
- [8] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等.鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J].*生态学报*, 2012, 32(21):6755-6766.
- [9] 王云才,吕东,彭震伟,等.基于生态网络规划的生态红线划定研究:以安徽省宣城市南漪湖地区为例[J].*城市规划学刊*, 2015(3):28-35.
- [10] 欧定华,夏建国,张莉,等.区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨[J].*生态环境学报*, 2015, 24(1):163-173.
- [11] 彭建,郭小楠,胡熠娜,等.基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建:以云南省玉溪市为例[J].*应用生态学报*, 2017, 28(2):627-635.
- [12] 祖拜旦·阿克木,阿里木江·卡斯木,陈探,等.干旱区生态网络构建:以吐鲁番市高昌区为例[J].*干旱区研究*, 2018, 35(5):1242-1249.
- [13] 古璠,黄义雄,陈传明,等.福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J].*应用生态学报*, 2017, 28(3):1013-1020.
- [14] 李晖,易娜,姚文璟,等.基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J].*生态学报*, 2011, 31(20):5928-5936.
- [15] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].*地理研究*, 2017, 36(3):471-484.
- [16] 徐文彬,尹海伟,孔繁花.基于生态安全格局的南京市都市区生态控制边界划定[J].*生态学报*, 2017, 37(12):4019-4028.
- [17] 丛佃敏,赵书河,于涛,等.综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定:以天水市规划区(2015—2030年)为例[J].*自然资源学报*, 2018, 33(1):14-26.
- [18] 张乃夫,刘霞,朱继鹏,等.安徽新安江流域土壤侵蚀敏感性评价及空间分异特征[J].*中国水土保持科学*, 2014, 12(6):8-15.
- [19] 邓伟,刘德绍,胡志毅,等.三峡库区土壤保持重要区生态敏感性空间特征[J].*环境科学与技术*, 2018, 41(7):190-198.
- [20] 钱颖,杨建军.基于生态敏感性和景观格局的城市生态带规划探究[J].*中国园林*, 2014, 30(6):107-111.
- [21] 彭建,李慧蕾,刘焱序,等.雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J].*地理学报*, 2018, 73(4):701-710.
- [22] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义[J].*生态学报*, 2006, 26(5):1444-1449.
- [23] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4):456-459.
- [24] Saura S, Vogt P, Velázquez J, et al. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses[J]. *Forest Ecology & Management*, 2011, 262(2):150-160.
- [25] Wickham J D, Ritters K H, Wade T G, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3/4):186-195.
- [26] Sun J, Southworth J. Indicating structural connectivity in Amazonian rainforests from 1986 to 2010 using morphological image processing analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13/14):5187-5200.
- [27] 吴昌广,周志翔,王鹏程,等.景观连接度的概念、度量及其应用[J].*生态学报*, 2010, 30(7):1903-1910.
- [28] Mitchell M, Bennett E M, Gonzalez A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps[J]. *Ecosystems*, 2013, 16(5):894-908.
- [29] 熊春妮,魏虹,兰明娟.重庆市都市区绿地景观的连通性[J].*生态学报*, 2008, 28(5):2237-2244.
- [30] 杨志广,蒋志云,郭程轩,等.基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J].*应用生态学报*, 2018, 29(10):3367-3376.
- [31] 吴敏.城市绿地生态网络空间增效途径研究[M].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [32] 贾振毅,陈春娣,童笑笑,等.三峡沿库城镇生态网络构建与优化:以重庆开州新城为例[J].*生态学杂志*, 2017, 36(3):782-791.
- [33] 钟式玉,吴箐,李宇,等.基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构:以广州市新塘镇为例[J].*应用生态学报*, 2012, 23(11):3173-3179.
- [34] 潘竞虎,刘晓.基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化:以张掖市甘州区为例[J].*应用生态学报*, 2015, 26(10):3126-3136.
- [35] 陈竹安,况达,危小建,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J].*长江流域资源与环境*, 2017, 26(8):1199-1207.
- [36] 付梦娣,罗建武,田瑜,等.基于最小累积阻力模型的自然保护区网络构建与优化:以秦岭地区为例[J].*生态学杂志*, 2018, 37(4):1135-1143.
- [37] 殷炳超,何书言,李艺,等.基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究[J].*生态学报*, 2018, 38(12):4373-4382.
- [38] 王琦,付梦娣,魏来,等.基于源—汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以安徽省宁国市为例[J].*环境科学学报*, 2016, 36(12):4546-4554.