

DOI: 10.20103/j.stxb.202210182947

何建华, 袁毅, 张苗苗, 覃荣诺, 陈志朋. 基于网络群组特征的生态管理分区——以武汉市为例. 生态学报, 2024, 44(4): 1514-1525.

He J H, Yuan Y, Zhang M M, Qin R N, Chen Z P. Ecological management zoning based on network group characteristics: a case study of Wuhan City. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1514-1525.

基于网络群组特征的生态管理分区 ——以武汉市为例

何建华, 袁毅*, 张苗苗, 覃荣诺, 陈志朋

武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

摘要: 生态管理分区是维持区域生态安全、实现城市生态差异化治理的重要手段。然而现有分区方法侧重生态功能属性, 较少考虑生态斑块之间联系强度差异, 忽视了斑块的群组结构。以武汉市为例构建生态网络, 从生态系统结构和功能的视角, 结合斑块空间组织和斑块联系强弱, 运用凝聚子群方法, 提取联系紧密的生态组分, 将网络划分为异质性群组, 基于网络群组特征和生态景观辐射范围进行分区覆盖分析, 并进行分区评价。结果表明: (1) 86 条生态廊道连接研究区 34 处生态斑块, 进一步形成 8 个生态群组; (2) 多数群组内部连通性较好, 北部群组之间联系较强, 南部群组之间联系相对较弱; (3) 依据群组结构功能特征, 形成 6 大网络群组分区, 通过与武汉市经济发展规划分区对比, 两者具有较高的一致性; (4) 城市外围的分区网络稳定性较好, 中部稳定性较差, 识别分区内 13 个重要斑块和 16 条重要廊道, 作为重点发展保护对象; (5) 综合分区特征将 6 大分区确立为生态屏障区、生态控制区、生态改善区、生态修复区、生态开发区以及生态保育区, 并提出生态发展差异化保护措施。研究将生态功能属性和空间结构属性进行有机关联并制定分区策略, 为区域生态管理分区、生态保护规划提供新视角。

关键词: 生态分区; 生态网络; 凝聚子群; 网络群组; 武汉市

Ecological management zoning based on network group characteristics: a case study of Wuhan City

HE Jianhua, YUAN Yi*, ZHANG Miaomiao, QIN Rongnuo, CHEN Zhipeng

School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Ecological management zoning is an important means to maintain regionally ecological security and achieve differentiated urban ecological governance. However, the existing zoning methods mainly focus on ecological functional attributes, with less consideration of the differences in linkage strength between ecological patches, and ignore the group structure of patches. In this paper, Wuhan City was taken as an example to construct an ecological network. From the perspective of ecosystem structure and function, combined with the spatial organization of patches and the strength of patch linkages, the cohesive subgroup method was applied to extract the ecological components that were closely connected, and the network was divided into heterogeneous groups, and regional coverage analysis was carried out based on the characteristics of network groups and the radiation range of ecological landscape, followed by a comprehensive evaluation of the zoning. The results showed that: (1) 86 ecological corridors connected 34 ecological patches in the study area, which further formed 8 ecological groups. (2) Most of these ecological groups had good internal connectivity, with strong connections between the northern groups and relatively weak connections between the southern groups. (3) According to the structure and function characteristics of the groups, they were divided into 6 network group zones. By comparing with the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171260); 《湖北长江经济带国土空间生态修复的重点与措施》项目 (ZWWH-22ZC-FW190)

收稿日期: 2022-10-18; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 2021202050015@whu.edu.cn

Wuhan economic development planning zones, the two zones had a high degree of consistency. (4) The network stability of the zone near the city periphery was good, while the stability of the central zone was poor. In addition, the 13 important patches and 16 important corridors within the zone were identified as key development and protection objects. (5) Based on the integrated characteristics of the zoning, six major zoning categories are established, namely as ecological shield area, ecological control area, ecological improvement area, ecological remediation area, ecological development area and ecological conservation area. In conjunction with these zoning categories, differentiated protection measures for ecological development in the zone were finally proposed. This research promotes an organic correlation between ecological function attributes and spatial structure attributes, culminating in the formulation of effective zoning strategies. In turn, this provides a new perspective for regional ecological management zoning and ecological protection planning.

Key Words: ecological zoning; ecological network; cohesive subgroup; network group; Wuhan City

随着城镇化进程与人类活动的不断加快,生态系统结构与功能遭到破坏,城市生态安全受到严重威胁^[1-2]。生态分区分管是生态保护领域的重要科学问题,对于维持区域生态安全具有重要意义。城市生态管理分区所体现的城市生态异质性,是城市开发指引和生态管控的重要依据^[3]。如何准确、科学、合理的划分城市生态管理分区,对于城市生态差异化治理,生态文明新时代保护与开发相协调尤为重要^[4]。

大部分学者通过生境质量^[1]、生态系统服务价值^[5]、生态景观弹性^[6]等评价指标体系实现生态分区划定。这些方法主要以静止状态下生态要素的功能属性为依据进行划分^[7],而没有顾及要素之间的交互。因此,也有许多学者基于景观生态学“斑块-廊道-基质”理论,通过“源地识别-阻力面提取-生态网络生成”的基本模式构建生态安全格局^[8],从景观中心度评价^[9],廊道重要性评价^[10-11],生态夹点与障碍点评价^[12-13]等方面对生态网络进行优化,明确发展战略节点、廊道,从而进行分区管理^[14-15]。生态网络分析兼顾了生态要素的结构、功能及其交互^[4];源地是区域重要景观功能斑块^[16],阻力面反映景观基底的环境异质性^[17],廊道是斑块之间维持重要生态过程的有效连接^[18]。然而,这类研究通常以提高网络整体连通性为主要目标,较少关注网络内因节点联系强度差异而产生的网络社区结构^[19]。“社区结构”是网络分析中的重要特征之一,每个节点之间联系强度不同,导致生态斑块在空间中形成不同的群组,使各生态区域的服务功能产生“1+1>2”的效果^[9,20-21]。群组内部连接紧密,而不同群组间的联系相对松散,这样既可以维系较好的网络整体连通性,又可以保持各分区生态过程的独立性和稳定性^[19,22],有助于生态网络的可持续管理。凝聚子群是一种常用的网络聚类分析方法^[23],基于网络节点间可达性、关系密度或景观连接度强弱特征形成不同的子集合^[24-25]。将凝聚子群方法与生态网络相结合,能够有效提取网络集群属性,为理解和可视化网络群组特征提供信息,从而进一步耦合景观结构与功能,实现管理分区。

武汉市作为国家中心城市之一,也是长江经济带重要战略城市,城市快速发展过程中对生态保护产生了巨大威胁。近年来,武汉市政府通过水网配置,公园和绿地建设等,使生态环境得到了相应改善。然而,武汉市大部分生态空间仍然是碎片化的,缺乏空间连续性,因此需要构建生态网络,维持生态联系,并进行分区管理。本文以武汉市为研究区,识别生态源地、提取生态廊道构建生态网络,在引力模型的基础上,借助凝聚子群方法,探讨局部网络中斑块间联系状态,进行群组划分,实现管理分区,以期生态差异化治理提供新视角,为区域发展提供方法指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武汉市地处湖北省东部(29°58'—31°22'N、113°41'—115°05'E),是中国中部地区的中心城市,全市下辖13个区,总面积8569.15km²(图1)。地势中间低平,南北丘陵、北部低山林立。长江与汉江在城中交汇,市内江河纵横、湖港交织,水域面积占全市总面积四分之一,被誉为“百湖之市”。武汉市动物资源种类繁多,植物

资源丰富,拥有大量常绿阔叶林和落叶阔叶林组成的混交林。在《武汉市城市总体规划(2017—2035 年)》中,提出坚决贯彻落实山水林田湖草的生态保护和修复工程,筑牢生态安全屏障,构建武汉市生态管理分区意义重大。

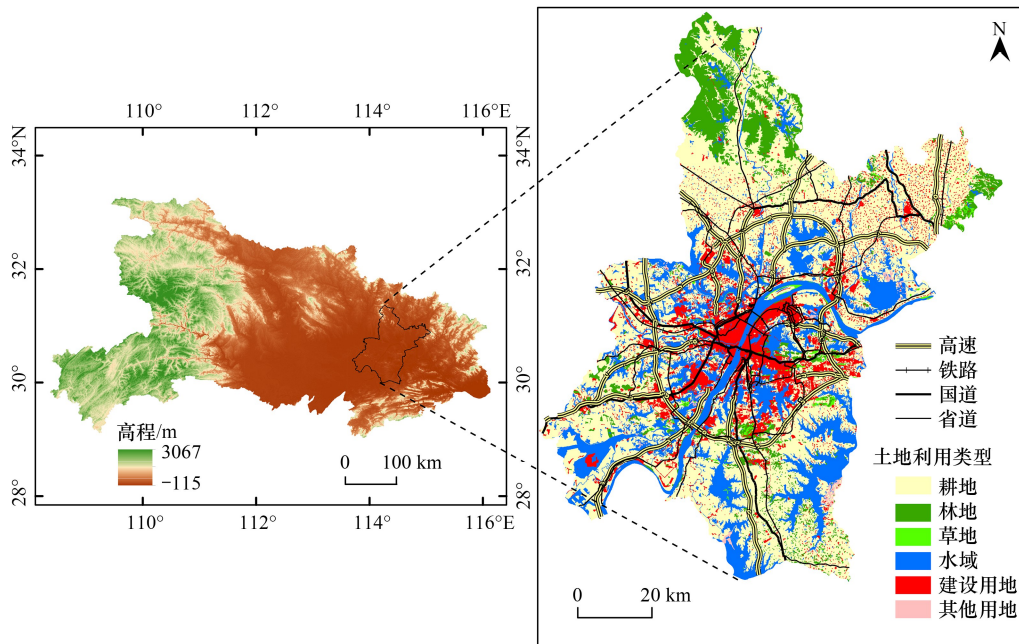


图1 武汉市地理位置及土地利用分布

Fig.1 Geographical location and land use distribution of Wuhan

1.2 数据来源

本研究所用数据主要包括 2020 年武汉市土地利用数据、高程数据、路网数据等。其中土地利用数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30m;高程数据由地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供,空间分辨率为 30m,并据此计算坡度,坡向以及地形起伏度;路网数据源自 OpenStreetMap(<http://www.openstreetmap.org>)。基础地理数据来自国家地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)。同时参考武汉市相关文件获取武汉市资源现状及规划信息(<http://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/>)。

2 研究方法

2.1 研究技术路线

本文研究思路如图 2 所示。(1)采用 InVEST 模型进行生境质量评价,并利用 MSPA 方法识别核心区,根据景观连通性与面积筛选生态源地;构建综合阻力面,基于 MCR 模型提取生态廊道构建生态网络;(2)在整体网络基础上,考虑源地间相互联系,通过引力模型分析源地间联系紧密程度,运用凝聚子群方法,提取联系紧密的生态组分,将网络划分为异质性群组,分析各群组的分布特征与联系特征;(3)基于群组特征,考虑斑块、廊道辐射范围进行覆盖分析,形成不同生态分区,并对分区网络进行稳定性分析和关键要素识别,以评价分区特征。(4)根据区域特征,确立为不同生态管理分区,并提出差异化治理措施。

2.2 生态网络构建

2.2.1 生态源地综合识别

生境质量的高低反映了生态系统能够为生物提供生存条件的能力^[14],体现区域的生态功能特点,因此生态源地应当具有较高的生境质量^[26]。本文利用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块,对研究区的生境质量进行量化分析。此外,由于斑块连接度与面积是维持景观生态功能的重要载体^[18],MSPA 能够从像元层面,

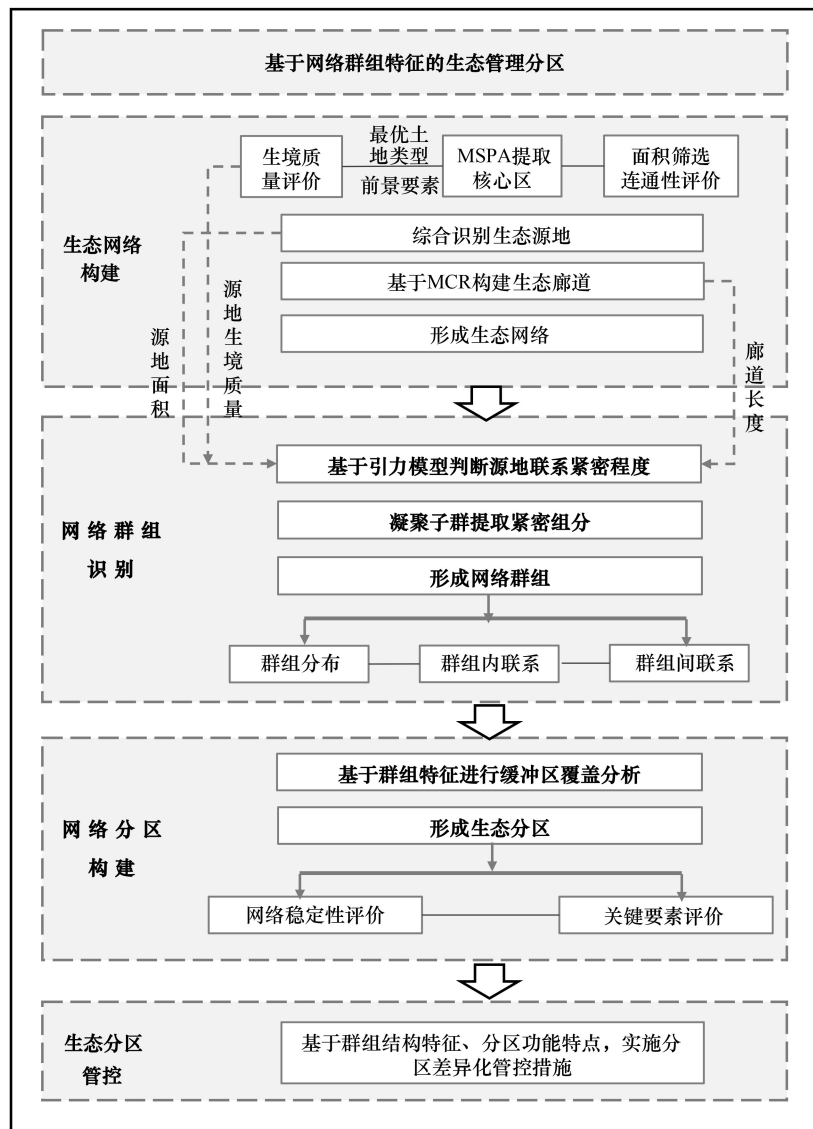


图2 分区技术路线图

Fig.2 Technological roadmap of zoning

MSPA:形态学空间格局分析;MCR:最小累计阻力模型

根据连通性规则识别核心区,并全面的提取结构性景观要素^[27]。本文将生境质量最优的土地利用类型作为MSPA分析的前景要素,提取核心区,并将面积小于1km²的细碎斑块剔除;采用Conefor软件对剩余核心区斑块进行景观连通性评价,最终将斑块重要性(dPC)值大于1的斑块作为生态源地,其计算公式为:

$$dPC = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100$$

式中,PC值表示所有核心区都存在时,景观整体的可能连通性指数,PC_{remove}指缺少某一核心区后剩余核心区组成的景观的可能连通性指数;当dPC越大时,说明缺少该核心区时,整体的可能连通性指数变化量大,表示该核心区在景观连通中的重要性越大。

2.2.2 生态廊道识别

景观阻力用于反映生物在不同空间单元间迁移扩散的难易程度^[28],本文参考相关研究^[12,28-29]选取土地利用类型,地形要素,距道路距离三种因素,利用层次分析法AHP确定各因子权重,构建武汉市综合阻力面

(表 1)。基于 MCR 模型获取物种扩散迁移的最佳路径^[29]。

表 1 阻力等级表
Table 1 Resistance class

影响因子 Impact factor	阻力因子 Resistance factor	阻力系数 Drag coefficient	权重 Weight	影响因子 Impact factor	阻力因子 Resistance factor	阻力系数 Drag coefficient	权重 Weight
土地利用类型 Land use type	耕地	5	0.4	坡向	阳坡	1	0.1
	林地	1		Slope aspect	平地	3	
	草地、水域	3			半阳坡	5	
	建设用地	9			半阴坡	7	
	未利用地	7			阴坡	9	
地形起伏度 Degree of relief	<25°	1	0.13	距高速公路、	<500	9	0.13
	25°—50°	3		铁路距离/m	500—1000	7	
	50°—75°	5		Dis_ highways and railways	1000—1500	5	
	75°—100°	7			1500—2000	3	
	>100°	9			>2000	1	
坡度 Slope	<8°	1	0.12	距国、省、	<400	9	0.12
	8°—15°	3		县道距离/m	400—800	7	
	15°—25°	5		Dis_ national, provincial and county roads	800—1200	5	
	25°—35°	7			1200—1600	3	
	>35°	9			>1600	1	

2.3 网络群组识别

2.3.1 引力模型

引力模型通过计算生态源地间的相互作用,确定联系紧密的生态源地^[10,24]。源地的紧密关系是群组形成的基础。斑块生境质量的高低,面积大小,距离的远近会影响区域内物质、能量、生物有机体等的交换与流动,从而反映出斑块间联系的紧密程度。本文选取斑块生境质量的高低、面积大小、廊道距离,基于引力模型判断源地联系的紧密程度,其公式如下:

$$G_{ab} = \frac{N_a \times N_b}{D_{ab}^2}$$

式中, G_{ab} 指节点 a 、 b 之间的联系紧密程度, N_a 、 N_b 为节点 a 、 b 的权重,这里指节点生境质量与斑块面积的乘积,反应斑块的属性, D_{ab} 为两斑块之间廊道连接的最短距离。

2.3.2 凝聚子群

本文选用 CONCOR 算法反映廊道连接的生态斑块的关系强弱,斑块之间的联系越紧密,就越有可能被划分为同一群组,从而探讨网络中群组性质,群组间关系。以 G_{ab} 值为指标,基于 Ucinet 中的 CONCOR 算法进行凝聚子群分析。CONCOR 算法是一种迭代相关收敛法,它通过对 G_{ab} 矩阵以及相关系数矩阵的多次迭代运算,将最终矩阵的相关系数值转化为-1 和 1,对其进行重新排列以形成不同分组^[25]。通过凝聚子群使得整体网络中的群组结构量化测评效果更加明显。

2.4 生态分区构建

2.4.1 分区构建

斑块与廊道对周边区域具有一定的生态服务作用。结合武汉市实际情况及相关研究,将廊道宽度设定为 200m,此时廊道内部的林地与建设用地占比在较为合适的范围^[28,30],可以提供物种丰富的景观结构。力求实现生态服务全覆盖,参照相关标准及已有研究^[31—32],以 3km 为斑块、廊道的服务半径,基于网络群组分布,进行覆盖分析,形成生态分区。

2.4.2 分区稳定性评价

判断生态网络对破坏事件的反映,是预防分区生物多样性灭绝的必要条件^[33]。分区网络虽能保持较高的独立性,在其他网络受到破坏时不受干扰,但如果自身网络属性容易遭受破坏,则需要特别保护。结构鲁棒性能够用来衡量生态网络在遭受到外界干扰破坏时,维持其正常结构和功能的能力^[34]。探讨生态分区覆盖的建设用地面积,可以评估群组范围城市空间发展对生态环境可能造成的威胁程度。本研究通过结构鲁棒性的起始值与分区内部建设用地覆盖程度来综合反映群组分区的稳定性能。

2.4.3 分区关键要素评价

中心性能够反映景观要素在生态网络空间结构关系和生态过程中的重要程度^[9]。本研究分别对整体网络和分区网络进行斑块中心性评价,通过度中心性与中间中心性加权求和来反映斑块的重要程度。在整体网络中选取得分最高的 10 个斑块作为全局重要斑块,在分区网络中选取得分最高的作为一级、二级重要斑块,其中一级重要斑块是在整体网络和分区网络中都具有重要性的斑块。本文将核心斑块之间的廊道确立为重要廊道。

3 结果与分析

3.1 生态网络特征分析

图 3 可知,本文识别生态源地 34 个,总面积 1387.44km²,占武汉市总面积的 16.19%。水域是生态源地最主要的斑块类型,面积 976.94km²,占其总面积的 70.41%;其次是林地,面积 402.63km²。整体生态网络空间分布不均,北部生态源地数量较少,但面积较大,有较好的生态辐射,南部源地较为密集,大型斑块与小型斑块交

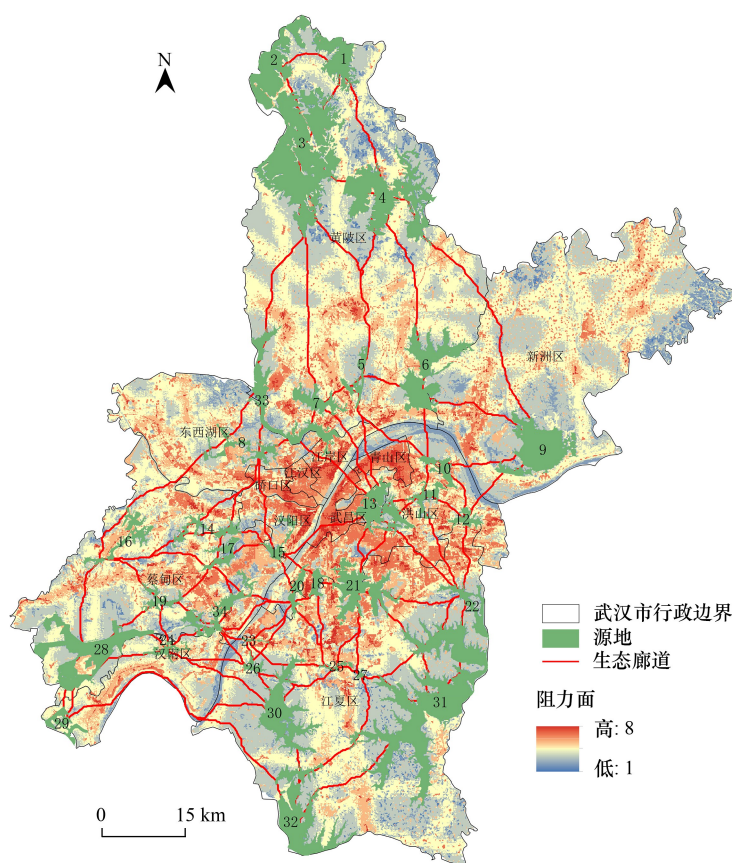


图 3 武汉市生态网络

Fig.3 Ecological network in Wuhan

错分布,有利于形成多个群体。基于景观类型,地形坡度,距道路距离构建综合阻力面,可以发现阻力低值区域主要分布在生境质量较高的湖泊河流及林地区,但这些区域之间缺乏景观过度,被高阻力区域切割,表现出明显的生境破碎化现象。基于源地与阻力面,利用 MCR 模型提取生态廊道共 86 条,总长度 1835.45km。廊道交错形成复杂的网状连接,搭建破碎化斑块的联系通道。不同的廊道距离,在一定程度上反映出斑块之间联系的亲疏关系,从而产生不同的组群效应。

3.2 网络群组特征分析

3.2.1 群组分布特征

图 4 可知,整体生态网络可被分为 8 个群组。各群组内部生态源地斑块较为集中。廊道的连接效应使武汉市生态网络形成八大分布较为均匀的群组。

群组①、②位于北部黄陂区,主要包括木兰文化生态旅游区等,以林地景观为主。该区域植被覆盖大,生态环境良好,具有良好的生态功能,是天然的生态屏障。群组③、④、⑦位于中部主城区及周边,包括东湖生态旅游风景区、金银湖国家湿地公园等各湖泊、湿地,以建成区内水域景观为主。该区域的土地利用类型较为复杂,主城区外围水域较多,生态环境相对较好,而主城区内部这些地区的土地覆盖以建设用地为主,流域面积小,植被覆盖率低,受人类活动干扰程度高,生态环境相对较差,需要加强控制与修复。群组⑤、⑥位于西南部蔡甸、汉南区,包括后宫湖国家湿地公园等各湿地、森林,以城郊水域景观为主。该区域经济实力相对较弱,人口密度相对较低,具有少许荒地,需要进行改善,但同时也许多宝贵的生态资源,需要一定的开发。群组⑧位于东南部江夏区,包括梁子湖风景区等各大小湖泊、农田,以水域、耕地景观为主。该区域南部农业较为发达,同时拥有丰富的湖泊和水库资源,具有良好的生态功能,对改善周边地区的生态环境具有重要意义。

3.2.2 群组内部联系特征

凝聚子群密度表反映的是网络中各节点之间联系的紧密程度,密度越大,表明网络节点之间的关系越密切(表 2)。对角线数据反映群组内部的相互作用程度,体现各群组自我连通性。总体看,大部分群组内的连通性较好,生态完整性较高。

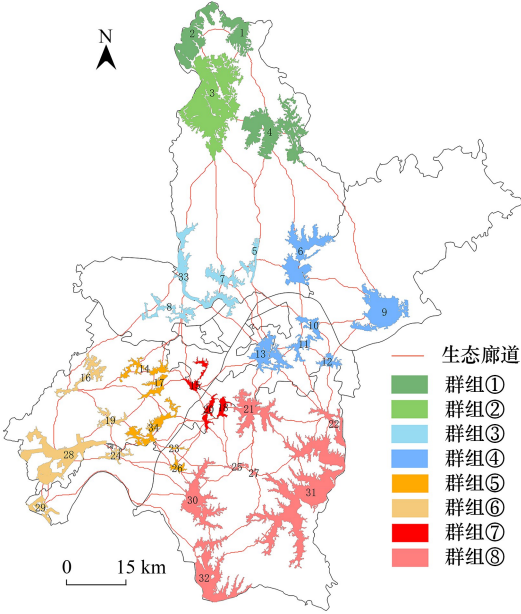


图 4 生态网络群组分布
Fig.4 Distribution of ecological network groups

表 2 凝聚子群密度表

Table 2 Density of cohesive subgroups

名称 Name	群组① Group①	群组② Group②	群组③ Group③	群组④ Group④	群组⑤ Group⑤	群组⑥ Group⑥	群组⑦ Group⑦	群组⑧ Group⑧
群组① Group①	751.81							
群组② Group②	3255.09	—						
群组③ Group③	39.55	134.28	484.11					
群组④ Group④	55.57	118.74	77.36	182.46				
群组⑤ Group⑤	7.42	25.24	21.21	11.19	73.28			
群组⑥ Group⑥	10.96	36.85	15.62	11.42	42.81	138.45		
群组⑦ Group⑦	5.86	19.90	17.29	16.88	27.40	10.73	90.01	
群组⑧ Group⑧	29.82	84.62	36.57	90.39	49.99	39.00	64.52	318.58

具体来说,群组①的密度值远高于其他群组,联系十分紧密,一方面是因为源地集中更利于生态流动,另一方面是由于面积较大,生境水平高。其具有较好的生境质量,有利于维护区域的生态安全。群组②没有密度值,因为其内部只有一个大型生态源地,更适合与群组①结合在一起。群组③、⑧也都具有很高的连通性,其中群组⑧虽然斑块众多较为分散,但具有较多大型生态斑块,总体生境质量较高,可以为内部带来较好的生态辐射,产生紧密联系。群组④、⑥由于斑块间较为分散,但斑块面积较大,联系紧密程度较高,因此密度值处于较高水平。群组⑤、⑦虽然斑块分布集中,但是由于较多斑块面积较小,本身具有的安全水平较低,不能在群组内部产生很好的联系,因此密度值偏低,并不适合单独成组。

3.2.3 群组间联系特征

根据群组之间密度值绘制图 5,圈越大,线越粗表示密度值越大。结合图 5 与表 2 可以看出,群组间的联系程度远小于群组内部的联系程度,这是因为模块化使子群具有一定的独立性。同时各群组间又有着不同程度的生态流动,总体来看,中北部群组之间的联系较强,南部群组之间的联系相对较弱。其中,群组①与群组②之间的联系紧密程度远超其他群组,表明他们之间具有密切的生态交流,而群组⑤、⑦与大部分群组之间的联系普遍偏低,但他们又处于中南部相对关键的位置,因此需要进行适当的生态修复与保护。群组⑧与大部分群组之间存在较高的连通性,即与其他群组之间生态关联作用较强,表明其不仅自身具有良好的生态功能,而且对改善武汉整体生态环境具有重要作用。

3.3 生态分区及区域特征分析

3.3.1 群组分区结果

基于网络群组识别与分析,从生态系统完整性出发进行生态分区,最终划分 6 大分区(图 6)。黄陂北部区,面积 977.56km²;主城西部区,面积 649.98km²;主城东部区,面积 1107.10km²;主城南部区,面积 665.28km²;蔡甸-汉南区,面积 912.66km²;洪山-江夏区,面积 1466.90km²。生态分区规划应当具有前瞻性,需要以生态保护需求和国土空间开发适宜性为基础,考虑未来的城市开发与经济建设,实现社会、经济、生态效益相统一^[35-36]。本文将生态分区规划结果与武汉市未来经济规划——“1 主 4 副”的城市发展格局对比,发现生态与经济

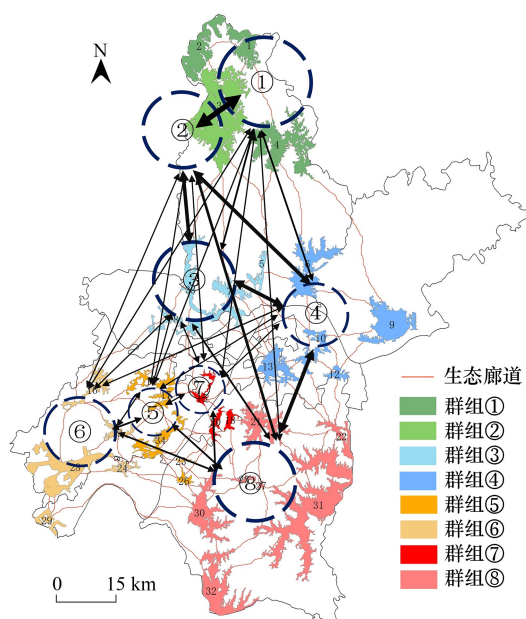


图 5 网络群组连接关系

Fig.5 Connection relation of network groups

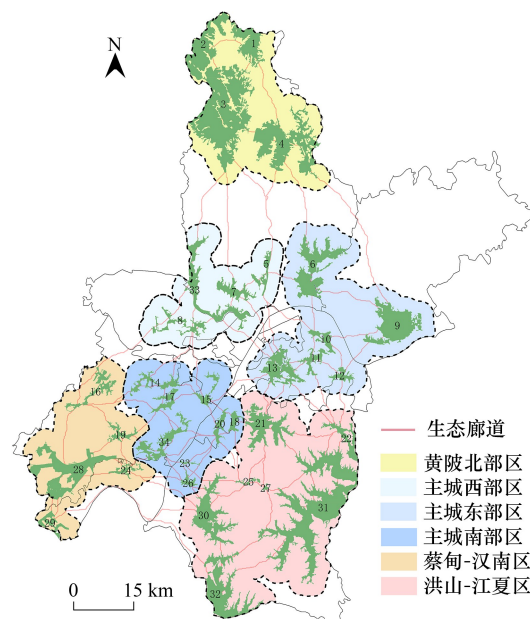


图 6 生态网络群组分区

Fig.6 Zoning results of ecological network groups

有一定的功能匹配性,这证明了生态分区的合理性与必要性。生态文明建设背景下,强调经济与生态协同发展,基于连通性的生态网络群组分区能够为城市发展提供重要的生态支持,缓解城市发展带来的生态压力,满足社会经济发展的需求。

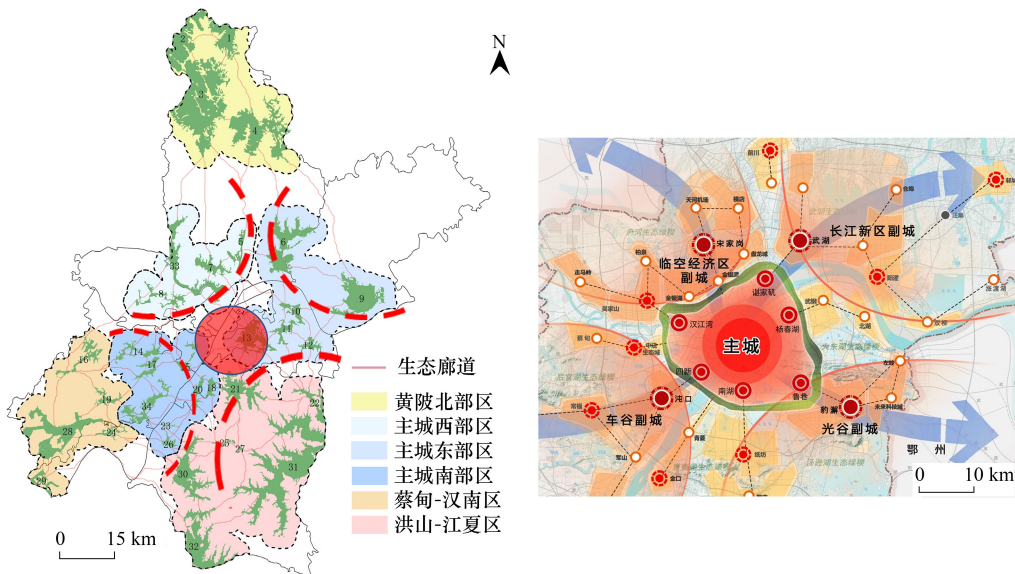


图 7 生态网络群组分区与城市发展格局对照示意图

Fig.7 Comparison diagram of ecological network group zoning and urban development pattern

右图资料来源:《武汉市国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》

3.3.2 稳定性分析

表 3 数据显示,黄陂北部区、蔡甸-汉南区、洪山-江夏区网络连通鲁棒性起始值均为 1,说明网络自身稳定功能较好,而其他分区网络的连通结构相对而言更易遭受破坏,维持其正常结构和功能的能力相对较弱。同时,连通鲁棒性较低的分区,均处于中部建设用地集中区,建设用地占比较高,生态安全更容易受到建设用地及人类活动的威胁。其中主城西部区、东部区内部主要为城市建设用地与工矿用地,主城南部区内部主要为工矿用地,在缓解城市生态需求压力的同时,要保持自身结构功能不被破坏,兼顾经济发展的空间需求和生态效益发挥。蔡甸-汉南区、洪山-江夏区也具有不小面积的建设用地,主要为工矿用地和农村居民点,但在区域范围内的占比不高,对整个区域的生态安全影响较小。黄陂北部区建设用地面积与占比最小,主要为农村居民点,说明其能够较好的保持自身结构功能的稳定。

表 3 分区稳定性评价结果
Table 3 Zoning stability evaluation results

名称 Name	连通鲁棒性 Connectivity robustness	建设用地面积 Construction land area/km ²	建设用地占比 The proportion of construction land/%	稳定性评价 Evaluation of stability
黄陂北部区 The north zone of Huangpi District	1.00	11.21	1.15	高
主城西部区 The western zone of the main city	0.50	135.45	20.84	低
主城东部区 The eastern zone of the main city	0.83	202.57	18.30	低
主城南部区 The southern zone of the main city	0.88	214.64	32.26	低
蔡甸-汉南区 Caidian-Hannan District	1.00	80.88	8.86	高
洪山-江夏区 Hongshan-Jiangxia District	1.00	71.53	4.88	高

3.3.3 关键要素分析

如图 8,重要斑块共 13 个,有一半的分区网络重要斑块与整体网络重要斑块并不重合。整体网络从全局

出发,反映生态要素整体的空间结构关系,分区网络则更针对部分斑块在局部区域的连通作用。这些关键生态要素增加了景观连接度,需要重点开发保护。总体来看,重要斑块主要分布于中南部源地密集区。其中,一级重要斑块有3个:木兰生态旅游區,连通北部地区与中部地区;严西湖——北湖生态区,连通中部地区;青菱湖风景区,连通中部地区与南部地区。重要廊道共16条,串联了各个生态分区,对网络组织结构发挥了较好的连接功能。

3.4 生态分区管控措施及建议

识别生态网络中的群组结构形成分区,充分发挥生态网络的生态连接功能以及社会管理功能,有效促进生态安全的可持续管理。参考《生态功能区划暂行规程》区划命名原则以及相关文献分区依据^[1,5,7,37],结合网络群组结构特征、分区功能特点以及景观类型的现状问题和武汉市发展需求,将6大分区确立为生态屏障区、生态控制区、生态改善区、生态修复区、生态开发区、生态保育区,并进行差异化管理。

黄陂北部区生境质量高,源地之间联系紧密,生态网络稳定,具有良好的生态功能,有利于维护整个大区域的生态安全,同时拥有大量的森林资源,可作为绿色生态屏障区。生态建设的关键点是保持目前的生态质量水平。依托于木兰文化旅游区,增强区域生物多样性,提高生态品质,更好的支持生态服务的功能。同时,也需要加强环境监测和保护,进一步探索该地区生态资源的可能性。另外,通过网络群组带来的生态效益,更好的推动“北乡”发展,实现北部乡村高水平的生态振兴。

主城西部区生境质量较高,源地之间联系紧密,但生态稳定相对较弱,在未来重点发展的形势下,生态环境将面临巨大压力,可作为生态控制区。生态建设的关键点是要兼顾生态安全的基本条件和土地资源的承载能力,以控制区域生态环境的恶化。在武汉市发展规划中,该区域未来将建设成为临空经济区副城,对区域的生态环境会产生一定的压力,而作为分区内重要生态斑块的“后湖”,目前开发与保护都有明显的不足,因此需要充分利用周边府河风景湖群、盘龙湖等湿地资源大力进行后湖的生态建设,再结合金银湖国家湿地公园的生态辐射作用,来缓解产业集聚,经济发展所带来的生态破坏。

主城东部区生境质量中等,生态稳定性较弱,同时覆盖了大面积的主城区,人类活动频繁,但由于东湖风景区的等生态用地较好的建设,为区域提供了较好的生态支持,可作为生态改善区。生态建设的关键点对城市生态破坏的进一步管控以及注重生态环境的维护和改善。分区南部要严格控制城市的排污、建设等行为,加强城市绿色基础设施建设,构建城市绿化生态体系。同时进一步发挥东湖风景区的生态功能,积极进行北湖、严西湖生态旅游示范区项目的建设,成为与东湖功能扩展和互补的基础,提升区域功能。分区北部处于即将建设的长江新区副城区,而武湖是长江新区重要的联络点,也是市区向外延伸的地点,具有重要的生态功能。整个分区内部廊道纵横交错,数量较多,需要加强廊道建设,将源地斑块连接,提供更好的生态服务功能。

主城南部区生境质量中等,源地之间的联系相对较差,同时生态网络稳定性也相对较弱,区域内部工业历史悠久,有着大面积的工矿用地,面临着严重的生态退化威胁,可以作为生态修复区。生态建设的关键是采取适当的生态修复措施,加强生态源地的开发保护,扩大源地的面积。该分区内部有较多的重要生态源地,其中月湖——南太子湖风景区,青菱湖开发与保护工程一直未得到很好的实施,虽然他们斑块面积较小,但起着连通分区内部与分区之间的“踏脚石”作用,具有十分重要的生态功能,需要加强他们的建设。后官湖虽然进行

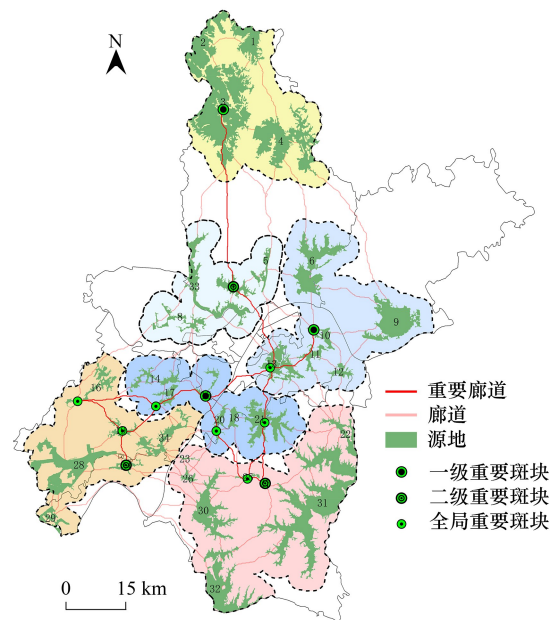


图8 关键生态要素评价结果

Fig.8 Evaluation results of key ecological elements

了生态建设,但是人类、工业活动干扰已经超出其水环境承载力,使其水污染逐渐加剧、生态破坏严重,需要进行产业结构调整、加强工业污水防控、实施“退田”和“退塘”等生态修复措施。

蔡甸-汉南区生境质量较高,生态网络稳定,但由于处在武汉市边缘地区,区域经济实力相对较弱,人口密度相对较低,对生态用地的开发利用程度远远不够,适宜进行开发建设活动,可作为生态开发区。生态建设的关键是在兼顾土地资源的承载能力和经济发展的基础上,更大力度推进绿色生态建设。对于区域内部的荒地,有效的进行植树造林,以及退化林修复,提高区域内部的森林覆盖率。对于水域环境,进行水景生态的开发,创建城市公园,或将废弃建筑群改造成城市花园。

洪山-江夏区生境质量较高,生态网络稳定,与其他分区有相对较好的联系,分区内部存在较多大型生态保护地,与其他斑块产生物种联系,具有较强的辐射效应和重要的区域调控作用,可作为生态保育区。生态建设的关键是对大型斑块综合保护,加强生态源和生态廊道连通性建设,以促进生态要素流动。一方面,对现有生态系统进行培育,另一方面,注意“踏脚石”斑块的保护,增强生态廊道的连通性,保证生态斑块向外辐射能够达到最大范围。根据斑块与廊道的不同类型进行分类建设,以此来强化区域之间联系以及自身的稳定功能。

4 结论与讨论

本文以武汉市为研究对象,重点从网络群组结构和斑块功能联系特征出发,结合凝聚子群分析方法,从系统保护的视角对生态结构和功能进行保护治理,构建武汉市生态管理分区。研究结论如下:(1)武汉市生态源地受高阻力区域的切割,生境破碎化现象显著,亟需构建生态廊道修复破碎化景观。(2)识别出 8 个生态群组,多数群组内部连通性较好,生态完整性较高,且各群组间存在着不同程度的生态流动。总体上,中北部群组之间的联系较强,而南部群组之间的联系相对较弱。(3)依据网络群组特征将武汉市划分为 6 大生态群组分区。靠近城市外围的分区稳定性较好,中部建设用地集中区更易受到建设用地及人类活动威胁。此外,确定 13 个重要斑块和 16 条重要廊道,作为重点开发保护对象。(4)综合分区网络结构与功能特征将其划分为黄陂北部生态屏障区、主城西部生态控制区、主城东部生态改善区、主城南部生态修复区、蔡甸-汉南生态开发区、洪山-江夏生态保育区,并进行差异化管理。

与传统生态分区相比,基于生态网络群组特征进行分区更利于从实体结构、功能、管理等方面统筹治理。本文从生态源地的功能联系视角出发,考虑网络的群组结构,将联系紧密的生态源地划分到同一群组,依据群组内以及群组间的关系,考虑斑块廊道的辐射影响范围,进行分区规划,从而将网络中点与线的空间格局转化为面的管理,有机联和生态功能属性和空间结构属性,为区域生态安全格局构建,生态保护规划提供了一种新视角。通过将群组分区与武汉市经济发展规划分区相比较,两者具有较高的一致性,这证明了分区的合理性与必要性。而通过斑块重要性评价,发现针对于整体网络的斑块评价会忽略某些在局部区域有着重要作用的斑块。因此将斑块划分为群组对于理解整体与局部景观安全十分重要。

但同时该研究也还存在一些不足,如判断斑块联系紧密程度的指标稍显单薄,怎样更加准确的识别网络中的群组结构,反映更为真实的生态过程是需要进一步考虑的问题,此外,如何论证生态斑块中的分组现象仍需进一步研究。未来的研究可以通过物种分布与迁移活动数据来分析生态网络斑块之间的联系强弱。

参考文献 (References):

- [1] 王子尧,黄楚梨,李惊,林箐. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5789-5798.
- [2] 成超男,胡杨,冯尧,赵鸣. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462.
- [3] 王宏亮,高艺宁,王振宇,沙威,吴健生. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例. 生态学报, 2020, 40(23): 8504-8515.
- [4] 陈阳,岳文泽,张亮,夏皓轩,候勃. 国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考. 中国土地科学, 2020, 34(8): 1-9.
- [5] 韩增林,刘澄浩,闫晓露,李欣媛,王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. 生态学报,

- 2021, 41(22): 9064-9075.
- [6] Zhang H, Liang X Y, Chen H, Shi Q Q. Spatio-temporal evolution of the social-ecological landscape resilience and management zoning in the loess hill and gully region of China. *Environmental Development*, 2021, 39: 100616.
- [7] 张云路, 李雄, 田野. 基于景观生态学“源-汇”理论的城市尺度生态功能分区——以内蒙古通辽市为例. *生态学报*, 2018, 38(1): 65-72.
- [8] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [9] 滕明君, 周志翔, 王鹏程, 徐永荣, 吴昌广. 景观中心度及其在生态网络规划与管理中的应用. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 863-872.
- [10] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 王振宇. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究. *生态学报*, 2020, 40(23): 8417-8429.
- [11] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型. *生态学报*, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [12] 杜雨阳, 王征强, 于庆和, 杨永崇, 张全文. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1069-1078.
- [13] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3406-3414.
- [14] 樊影, 王宏卫, 杨胜天, 刘勤, 衡嘉尧, 高一薄. 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别. *生态学报*, 2021, 41(19): 7614-7626.
- [15] Cui X F, Deng W, Yang J X, Huang W, de Vries W T. Construction and optimization of ecological security patterns based on social equity perspective: a case study in Wuhan, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108714.
- [16] 孙枫, 章锦河, 王培家, 魏国恩, 储光, 曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例. *地理研究*, 2021, 40(9): 2476-2493.
- [17] 于婧, 汤昇, 陈艳红, 张蕾, 聂艳, 邓文胜. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例. *生态学报*, 2022, 42(4): 1290-1299.
- [18] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 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. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [19] Luo Y H, Zhu Z C, Wu J S, Zhang Y N, Li X C, Zhao W Q, Yuan Y, Duanmu Z Y, Li M Y. Exploring habitat patch clusters based on network community detection to identify restored priority areas of ecological networks in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 78: 127771.
- [20] Luo Y H, Wu J S, Wang X Y, Zhao Y H, Feng Z. Understanding ecological groups under landscape fragmentation based on network theory. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 210: 104066.
- [21] 郭荣朝, 苗长虹, 夏保林, 李军甫. 城市群生态空间结构优化组合模式及对策——以中原城市群为例//经济发展方式转变与自主创新-第十二届中国科学技术协会年会(第三卷), 2010: 1877-1884.
- [22] González C. Evolution of the concept of ecological integrity and its study through networks. *Ecological Modelling*, 2023, 476: 110224.
- [23] 张磊, 沙美君, 马超前. 三生功能视角下京津冀城镇圈类型划分与变化特征. *经济地理*, 2022, 42(4): 82-92.
- [24] 王甫园, 王开泳. 珠江三角洲城市群区域绿道与生态游憩空间的连接度与分布模式. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 428-440.
- [25] 杜嵘, 陈洁萍. 基于社会网络分析方法的南京主城边缘带绿色空间景观系统评估. *中国园林*, 2022, 38(4): 68-73.
- [26] 李怡, 赵小敏, 郭熙, 周丙娟, 黄心怡, 易丹, 丁徽. 基于 InVEST 和 MCR 模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化. *自然资源学报*, 2021, 36(11): 2980-2994.
- [27] 王越, 林箐. 基于 MSPA 的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究. *中国园林*, 2017, 33(5): 68-73.
- [28] 杨超, 戴菲, 陈明, 裴子懿. 基于 MSPA 和电路理论的武汉市生态网络优化研究//中国风景园林学会 2020 年会论文集(下册): 中国建筑工业出版社, 2020: 236-240.
- [29] 何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析. *生态学报*, 2020, 40(11): 3590-3601.
- [30] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [31] 丁成呈, 张敏, 束学超, 彭鹏. 多尺度的城市生态网络构建方法——以合肥市主城区生态网络规划为例. *规划师*, 2021, 37(3): 35-43.
- [32] 董晓峰, 梁颖, 侯波, 陈鹭. 基于资源环境评价系统构建的京津冀城市群绿道选线研究. *城市发展研究*, 2021, 28(12): 118-127, 2.
- [33] 刘祥平, 张贞, 李玲玉, 李明欣. 多维视角下天津市生态网络结构演变特征综合评价. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1554-1562.
- [34] 王戈, 于强, YANG Di, 张启斌, 岳德鹏, 刘建华. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 258-266, 312.
- [35] 高吉喜, 徐德琳, 乔青, 邹长新, 王燕, 田美荣, 王玥. 自然生态空间格局构建与规划理论研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 749-755.
- [36] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710.
- [37] Wang T, Li H B, Huang Y. The complex ecological network's resilience of the Wuhan metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108101.