

多尺度生态网络构建与生态修复关键区识别

——以南京市为例

范龙珂, 曲艺, 程嘉璇, 舒帮荣

(江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: [目的] 构建南京市“市域—主城区”双尺度生态网络并识别生态修复关键区, 以提升区域生态连通性与生态系统服务功能。[方法] 基于形态学空间格局分析(MSPA)和连通性分析识别生态源地, 运用最小费用路径法和电路理论构建生态网络, 并分析廊道、夹点与障碍点, 进而结合 InVEST 模型确定生态修复关键区。[结果] (1) 南京市域和主城区分别识别出生态源地 12 个和 7 个, 其总面积分别为 638.33 km², 118.86 km², 两个尺度生态源地重合面积为 103.02 km²; (2) 南京市域和主城区分别提取出生态廊道 27 条和 12 条, 其长度分别为 568.21 km 和 74.14 km; (3) 南京市域和主城区分别识别出生态夹点 19 个和 16 个, 重叠生态夹点为 2 个, 市域和主城区生态障碍点分别为 14 处和 7 处; (4) 南京市修复关键区面积达 38.94 km², 分为城镇扩展、山体破坏、道路阻隔 3 类; [结论] 南京市生态网络在“市域—主城区”双尺度间层级嵌套特征不明显, 生态连通性有待加强, 未来生态保护修复需针对不同尺度进行差异化施策。

关键词: 生态网络; 形态学空间格局分析; 最小费用路径法; 电路理论; 多尺度; 南京市

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0355-09

Construction of multi-scale ecological network and identification of key areas of ecological restoration

—a case study of Nanjing

Fan Longke, Qu Yi, Cheng Jiaxuan, Shu Bangrong

(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: [Objective] This study aims to construct a dual-scale ecological network of “municipal area - main urban area” for Nanjing City and identify key areas of ecological restoration, thereby improving regional ecological connectivity and ecosystem service functions. [Methods] Ecological sources were identified using morphological spatial pattern analysis (MSPA) and connectivity analysis. The ecological network was constructed using the least cost path method and circuit theory, followed by analysis of corridors, pinch points, and barrier points. Subsequently, key areas of ecological restoration were determined by integrating the InVEST model. [Results] (1) Twelve ecological sources were identified in the municipal area and seven in the main urban area, with total areas of 638.33 km² and 118.86 km², respectively. The overlapping area of ecological sources across the two scales was 103.02 km². (2) Twenty-seven ecological corridors were extracted in the municipal area and twelve in the main urban area, with total lengths of 568.21 km and 74.14 km, respectively. (3) Nineteen pinch points were identified in the municipal area and sixteen in the main urban area, with two overlapping pinch points. Fourteen barrier points were identified in the municipal area and seven in the main urban area. (4) The key areas of ecological restoration in Nanjing covered a total area of 38.94 km² and were categorized into three types:

收稿日期: 2025-07-11

修回日期: 2025-08-11

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42471303; 42001191); 江苏师范大学研究生科研创新项目(2025XKT1091)

第一作者: 范龙珂(2001—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为国土空间规划。E-mail: flk960201@163.com

通信作者: 舒帮荣(1982—), 男, 四川泸州人, 博士, 教授, 研究方向为国土空间规划、土地经济与管理。E-mail: bangyunshu@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

urban expansion, mountain destruction, and road obstruction. [Conclusion] The ecological network of Nanjing City shows no obvious hierarchical nesting characteristics between the municipal area and main urban area scales, and ecological connectivity requires enhancement. Future ecological conservation and restoration should implement differentiated strategies across different scales.

Keywords: ecological network; morphological spatial pattern analysis; least cost path method; circuit theory; multi-scale; Nanjing

快速城镇化与工业化引起建设用地快速扩张,导致了区域生态景观的破碎化、生态系统服务功能下降和生物多样性减少等全球性生态问题^[1]。改革开放以来,中国城市化进程取得了显著成就,但同时建设用地的持续扩张也带来了一系列生态环境问题,制约了区域的可持续发展^[2]。为保障生态安全与生态产品供给,我国近年来持续推进整体性生态修复工程,众多城市也相继编制专项生态修复规划,通过系统性、多层次的生态修复举措,有效增强了城市生态系统韧性与可持续性^[3],一定程度上提升了区域生态质量与综合服务功能,但其仍难以满足生态系统保护、恢复及生物多样性保护等要求。而生态网络通过生态廊道连接生态源地及重要生态节点^[4],可促进区域生物物质能量流通、维系生物多样性,有效保护区域景观连通性以及生态安全,因而构建生态网络成为实现生态系统保护与生态安全目标的关键战略^[5-6]。

目前,有关生态网络构建的研究内容主要聚焦于源地识别、廊道—节点提取、面向多目标的复合生态网络等^[7]方面,其发展趋势正从单一尺度分析向多尺度嵌套研究演进,并强调源地识别方法的持续优化与跨区域生态功能的协同整合,基本形成“源地选取—阻力面确定—廊道识别—节点优化—网络构建”这一研究范式^[8]。研究方法上,生态源地识别已形成了多维度技术路径,主要基于源地—廊道视角,运用形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)^[9]、生态系统服务评估与物种迁移模拟相结合的方式识别关键生态源地^[10],也有学者嵌套使用MSPA与斑块重要性指数(dPC),通过设定动态阈值筛选出具有辐射效应的核心源地,同时机器学习技术也开始引入,如利用随机森林算法^[11]优化源地识别的特征权重分配。在阻力面构建方面,学者们普遍采用多因子加权叠加法来整合NDVI植被指数、土地利用类型和人为干扰强度等指标;生态廊道的构建多采用最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型^[12]、蚁群算法^[13]以及电路理论等^[14]方法。研究尺度上,相关研究已从省域、城市群、市县域、中心城区等单一行政单元扩展到“区域—流域—城市群”多级空间嵌套体

系^[15]。在基于生态网络构建生态安全格局以识别生态修复关键区域时,已有研究通常基于维持和恢复生态系统完整性与连通性的目标,将生态网络中识别出的夹点、障碍点、断裂点等关键结构要素,作为国土空间生态修复的关键区域^[16]。然而,现有研究虽涉及多尺度生态网络构建,但针对兼具区域自然生态本底与高强度城市化核心区的复杂城市系统,其在跨尺度生态要素的协同识别及结构嵌套分析等方面仍存在深化空间;同时,生态修复关键区的识别策略多聚焦于生态网络的内部结构缺陷,而外部环境胁迫对生态网络稳定性的影响评估则相对薄弱,故还需进一步探讨。

南京市作为长三角城市群中重要的生态敏感型城市,其高强度城镇化引发了生态胁迫,其“山水城林”格局正面临系统性威胁,急需构建生态网络以提升其生物多样性,增强生态系统服务功能^[17]。基于此,本文以南京市为例,基于“源地—廊道”视角,利用形态学空间格局分析(MSPA)和连通性分析识别生态源地,结合最小费用路径(least cost path method, LCP)法和电路理论构建“都市圈—主城区”两个尺度的生态廊道,识别其生态夹点和障碍点,构建南京市“市域—主城区”双尺度生态网络,并结合InVEST模型诊断其生态修复关键区,以期为研究区生态网络构建与完善提供决策参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

南京市地处长江下游平原,是长三角核心城市之一(图1),总面积6 587.04 km²,2020年常住人口约931.47万人。作为典型的“山水城林”复合型城市,其生态基底特征显著:地貌以低山丘陵与沿江平原为主,北部宁镇山脉与南部茅山余脉构成屏障,长江、秦淮河、滁河等水系贯穿全境;植被以亚热带常绿阔叶林为主。然而,快速城市化导致生态空间破碎化加剧,如1990—2018年建设用地增加105.67%,生态系统服务价值下降8.13%^[18],江心洲、青龙山等生态节点面临割裂风险。因此,亟需构建科学合理的生态网络以保障生态系统安全,促进南京市可持续发展。本

研究从两个尺度开展,大尺度为南京市行政管辖范围,这是由于市级行政边界是国土空间规划、生态保护红线划定的法定单元;小尺度为包括玄武区、秦淮区、建邺区、鼓楼区、栖霞区、雨花台区这6个区的主城区,主城区是人口、经济活动的密集区,生态问题直接影响居民生活质量。因此,以上尺度的划分本质上是将区域生态安全格局与城市人居环境改善相结合。

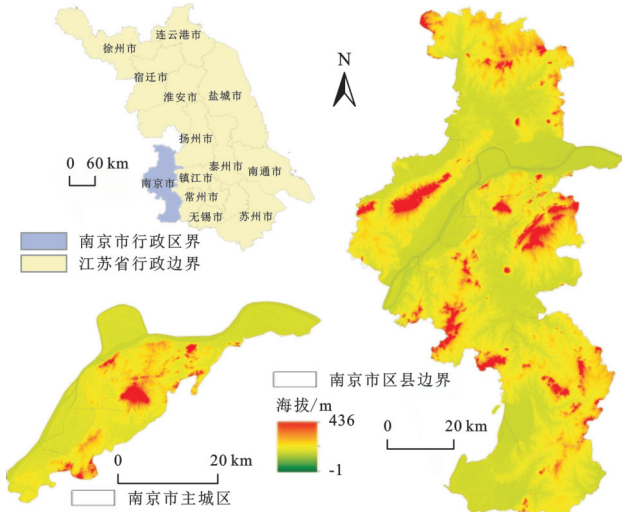


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

1.2 数据来源

本研究主要涉及土地利用、行政边界、遥感影像、DEM以及路网数据等。其中,2020年南京市土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据平台,空间分辨率30 m;路网数据来自OpenStreetMap网站(<https://www.openstreetmap.org>);2020年南京市行政边界数据、南京市Landsat8遥感影像及DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)。以上所有数据均采用统一坐标系,栅格数据重采样为30 m分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 基于MSPA方法的生态源地识别 生态源地

识别对维护生态系统稳定与生物多样性保护至关重要,基于MSPA的生态源地识别方法是一种利用形态学原理,通过分析景观格局来识别生态源地的方法^[19]。根据研究区特点和生态保护目标,从土地利用类型中选取与生态源地密切相关的具有较高生态功能价值的景观类型作为潜在生态源地,如自然林地、大型湖泊、湿地等。本文以林地、草地和水域作为前景并赋值为2,其他景观类型赋值为1^[20],并将生态景观类型图转为二值图,再通过Guidos工具箱的MSPA工具识别出研究区的核心区、孤岛、孔隙、边缘等7种景观类型,其中核心区类型斑块面积较大、完整性较高,适合作为生态斑块进一步分析^[21]。然后,通过分析土地生态斑块面积的累积比例,将较大斑块作为备选生态源地。结合研究区实际并参考相关研究^[22],运用Conefor2.6软件将市域连通距离阈值设为3 000 m,连通概率设为0.5;主城区连通距离阈值设为1 500 m,连通概率设为0.5,对识别出的备选源地进行斑块重要性指数(dPC)计算,将dPC值位于前60%的备选源地划分为一级生态源,其他源地划分为二级生态源^[23]。对于小尺度的生态源地识别则是利用ArcGIS中的距离选择工具选取与大尺度相交的斑块作为主城区的一级生态源,再对剩下的斑块进行dPC计算,按前述标准划分出二级生态源地。

1.3.2 生态阻力面构建 生态系统中,物质、能量和物种的流动受到各类因素的阻碍。构建阻力面能将阻碍因素量化并可视化,形象地展示生态流在景观中的运动难度。首先,根据已有研究^[15,24],结合研究区实际,选取高程、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、距道路距离5个阻力因子构建市域尺度指标体系并划分因子等级,考虑到两个尺度在个别自然条件上无太大差别,因此酌情选取指标构建主城区指标体系,并基于层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)确定各阻力因子的权重(表1),进而通过加权叠加生成综合阻力面。

表 1 生态阻力因子等级及其权重

Table 1 Ecological resistance factor levels and their weights

| 评价因子 | 单位 | 阻力值 | | | | | 权重 | |
|--------|-----|-------|-----------|-----------|----------|------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 市域 | 主城区 |
| 高程 | m | ≤20 | 20~100 | 100~180 | 180~260 | ≥260 | 0.1094 | — |
| 坡度 | (°) | <3 | 3~10 | 10~20 | 20~40 | >40 | 0.1094 | 0.1200 |
| 土地利用类型 | — | 林地、草地 | 水域 | 耕地 | 未利用地 | 建筑用地 | 0.3684 | 0.4200 |
| 植被覆盖度 | — | >0.8 | 0.6~0.8 | 0.4~0.6 | 0.2~0.4 | <0.2 | 0.2064 | 0.2300 |
| 距道路距离 | m | >2000 | 1500~2000 | 1000~1500 | 500~1000 | <500 | 0.2064 | 0.2300 |

1.3.3 多尺度协同的生态网络格局构建

(1) 基于LCP和电路理论的生态廊道综合模拟。

通过构建合适的LCP模型,可将生态过程中的各种因素转化为数学表达式,从而实现了对生态系统的量

化分析。在生态廊道模拟中,将生态流类比为电流,生态阻力类比为电阻,生态节点类比为电路节点。本文基于LCP和电路理论,通过Circuitscape工具中的Linkage Mapper插件来进行生态廊道的综合模拟,该插件能够精准模拟物种随机游走的特性,计算出生态迁徙的多种可能路径,并从中确定最优路径。这有效避免传统方法可能出现的复杂性和数据冗余问题,提高模拟的效率和准确性^[25]。

(2) 生态网络嵌套分析。通过识别生态网络的嵌套结构,能更精准地确定关键生态区域和生态联系,提高生态保护的效率和效果。基于Linkage Mapper的Linkage Priority工具识别出的生态廊道重要性,并采用自然断点法将其分为3个等级。同时,分别采用Linkage Mapper插件的Pinchpoint Mapper和Barrier Mapper模块提取路径上的生态夹点并呈现生态障碍点的整体状况。其中,生态夹点是指景观廊道中空间狭窄、连通性高度集中且缺乏替代路径的区域^[26]。生态障碍点是指在生态廊道中易降低生态要素迁移成功率的阻碍区域,通过合理修复,这些区域的连通性能够得到显著增强。

(3) 基于InVEST模型的生境质量评估。InVEST模型中的生境质量模块能有效关联土地利用图与威胁源。该模块依据不同生境对威胁源的各异响应程度,对不同景观格局之下的生境分布状况及退化程度展开评估^[27]。本文参考相关研究^[28],结合研究区实际选取耕地、建设用地、未利用地这3类作为威胁源,其原因是人类对这几种地类的开发和扩张易对周边生境造成胁迫。参考模型手册并考虑实际情况对威胁源的影响权重、最大影响距离以及敏感度进行赋值,据此计算出生境质量指数,以辅助确定生态修复关键区域。

2 结果与分析

2.1 生态源地识别结果

基于MSPA分析,确定了研究区生态源地斑块,经过conefer连通性检验共提取出12个生态源地,总面积为638.33 km²,约占南京市面积的10%,其中一级生态源地6个,二级生态源地6个,将市域和主城区相交的两个生态源地作为主城区尺度的一级生态源地,另提取出二级生态源地5个,总面积为118.86 km²,约占主城区面积的15%。整体来看,南京市生态源地主要分布在城市中部和南部地区,北部地区只有1个一级生态源地。市域生态源地中面积最大的5号生态源地横跨城市中心的多个区,而城市北部因缺少生态源地可能会对生态连通性造成一定影响。主城

区一级生态源地中除了和市域重叠的5号源地,另一个源地位于玄武区;主城区二级生态源地主要分布于雨花台区、玄武区和栖霞区,主城区生态源地多为城市中的林地及水域,在中心城区零星分布,景观连通性较低,需重点维护恢复其生态连通性(图2)。

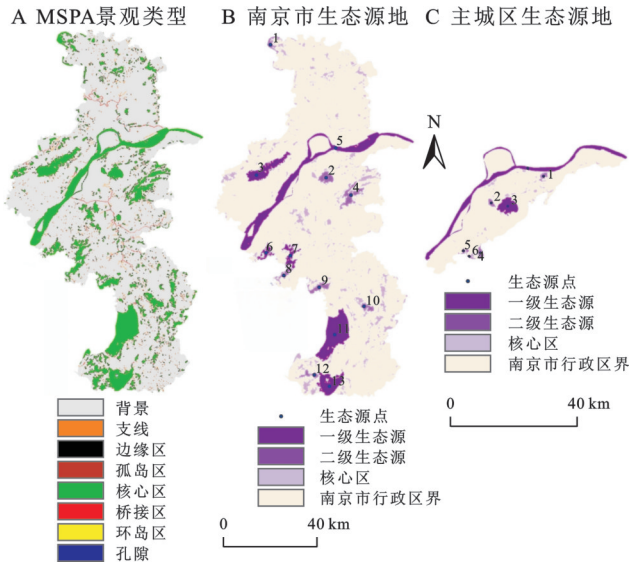


图2 南京市景观类型及生态源地分布

Fig. 2 Distribution of landscape types and ecological sources in Nanjing

2.2 生态阻力面构建结果

依据前述生态阻力指标(图3)及分析过程,得到南京市综合阻力面。结果表明,南京市生态阻力空间异质性特征显著:高阻力值区域呈集聚化分布,以城市中部建成区为核心,沿交通干线向边缘区域扩散。该区域高强度城镇化建设、高密度交通网络布局等人类活动,显著改变了生态基底属性,形成生态过程的物理阻隔与功能破碎化效应,致使生态连通性指数显著下降,生态系统服务功能的空间协同性受到抑制。阻力低值主要分布于城市外围的自然生态本底区域,如山林、湿地等,这些区域受人类干扰强度较低,生态系统完整性与连续性得以较好维持,有利于生态流的通过,对于生态网络构建中的物种迁徙、物质能量流动等生态过程较为有利。

同理,根据主城区生态阻力指标(图4)分析可得到主城区生态阻力面,结果显示高阻力值区域呈大面积连续分布,表明该区域生态过程受高强度、广范围的人类活动干扰,具体表现为新街口、鼓楼等中心商业区建筑密集、人类活动频繁形成持续性干扰源;高速公路、铁路及主干道形成物理屏障阻碍物种迁移;河西新城、江宁开发区等工业区大面积不透水面进一步强化了空间阻力。低阻力值区域则呈零星斑块状,主要对应生态保存较好的城市公园、绿地及受保护的天然区域,具体表现为紫金山、玄武湖、秦淮

河沿岸等植被覆盖率高的区域;老山国家森林公园、青龙山等受保护的天然区域人为干扰少,生态功能也相对较为完整。数据显示,主城区阻力值区间上限高于市域平均水平,直接印证了其面临更为突出的生态阻力胁迫,高强度城市化进程导致的生境破碎化效应加剧,生态连通性与功能保护面临双重挑

战。从分布上看,主城区高阻力值区域分布特征与市域图中主城区位置的高阻力值区域相符,印证了该区域长期承受高强度人类活动带来的生态压力。同时,南京市域中的低阻力值区域在主城区中也有体现,不过随着范围的缩小,其分布特征在主城区内得到了更为精细化地展现。

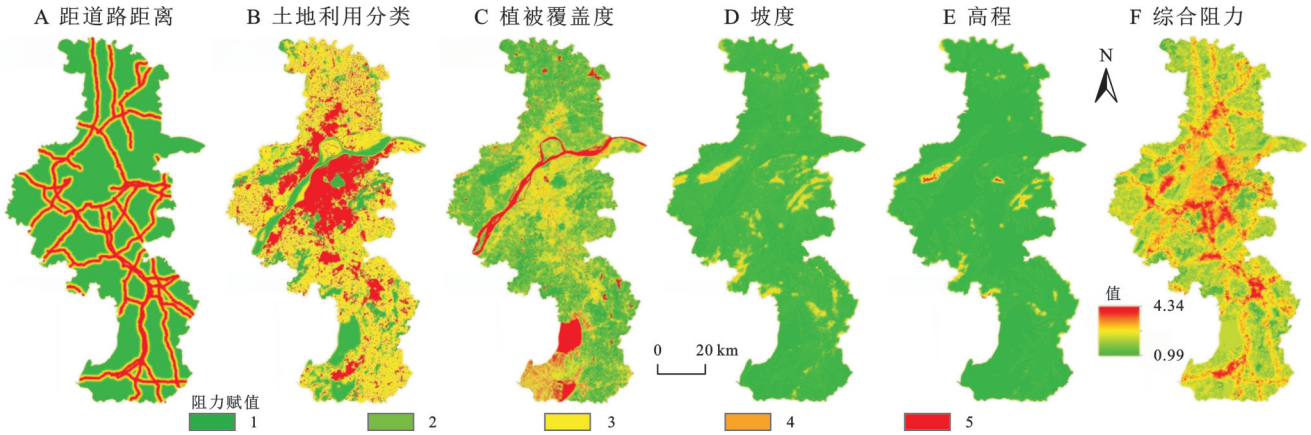


图 3 南京市各阻力因子及综合阻力面

Fig. 3 Resistance factors and comprehensive resistance surface of Nanjing

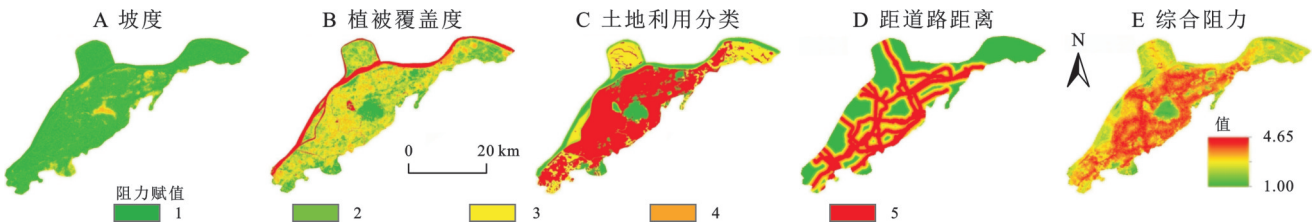


图 4 主城区各阻力因子及综合阻力面

Fig. 4 Resistance factors and comprehensive resistance surface in main urban area

2.3 生态网络格局构建

2.3.1 生态廊道提取结果 运用Linkage Mapper分析,在南京市域范围内识别出 22 条重要廊道和 5 条潜在生态廊道(图 5);主城区内识别出重要生态廊道 9 条,潜在生态廊道 3 条,主城区生态廊道是南京市生态廊道网络的局部组成,与市域生态廊道相互连通,共同促进南京市生态系统的整体连通性。市域生态廊道和主城区生态廊道重叠较少,主城区生态廊道数量较少,尚未形成比较成熟的生态网络。

提取出生态廊道后再利用linkage priority工具将生态廊道划分成 3 个等级(图 6),核心廊道是生态廊道中的关键部分,对生态连通性起到支撑作用,是物种迁徙、物质能量流动的主要通道,市域核心廊道主要集中在城市中部和南部,连接城市中心的几个一级生态源,是维持生态系统功能的“生命线”;一般廊道主要分布在城市中南部,在局部区域内串联碎片化绿地,辅助核心廊道完成生态过程,连接二级生态源并且部分可与人类活动共存,兼具生态与社会服务功能;脆弱廊道主要位于北部,其自身结构不稳

定,廊道宽度不足、植被破碎,需依赖人工维护或修复才能维持连通性。主城区内主要为核心廊道,因区域范围较小,所形成的生态廊道都具备在城市中心调节气候、涵养水源、净化水质、土壤保持等功能。

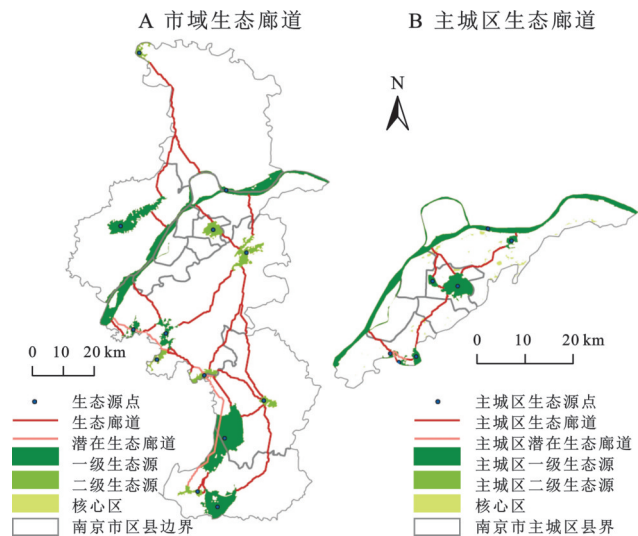


图 5 南京市域—主城区生态廊道分布

Fig. 5 Distribution of ecological corridors in municipal area and main urban area of Nanjing

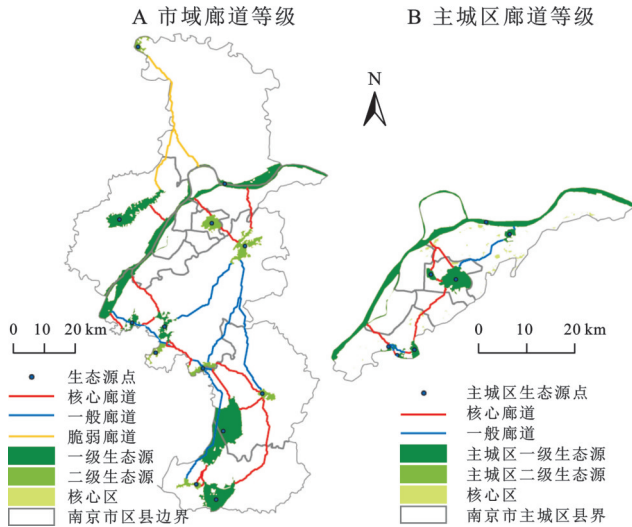


图 6 南京市域—主城区生态廊道分级

Fig. 6 Classification of ecological corridors in municipal area and main urban area of Nanjing

2.3.2 生态夹点嵌套分析 市域及主城区生态夹点识别结果(图 7)显示,南京市内共识别出生态夹点 19 个,主城区内共识别出生态夹点 16 个,两个尺度重叠生态夹点 2 个,这些生态夹点土地利用现状大多为耕地、零散林地、草地等具有一定生态功能的地块。市域内生态夹点在江宁区分布最为集中,位于江宁区西南部耕地区域,这些位置对环境变化非常敏感,微小的干扰也会对其生态功能产生显著影响。对这些生态夹点进行保护能确保生态流的畅通,维持生态系统内各部分之间的联系,比如为物种在不同栖息地间的迁移提供通道,避免物种因栖息地隔离而导致种群衰退等问题^[27]。

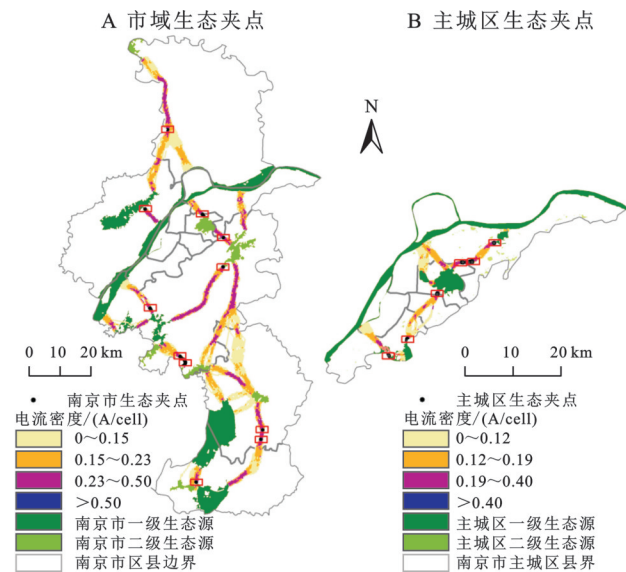


图 7 南京市域—主城区生态夹点分布

Fig. 7 Distribution of ecological pinch points in municipal area and main urban area of Nanjing

2.3.3 生态障碍点分析 生态障碍点识别结果显示,市域生态障碍点共有 14 处,主城区生态障碍点

共有 7 处。结合土地利用类型图可知,生态障碍点的土地利用现状多为城镇用地、农村居民点等建设用地,这些区域涉及城市大型建筑群、高速公路、长江岸线湿地,以及紫金山周边、老山国家森林公园等生态源地与廊道衔接处,此类格局会妨碍物种的扩散和基因交流,阻碍物质和能量在不同生态斑块间的流动。市域尺度与主城区尺度障碍点在鼓楼区、玄武区和栖霞区较为相似,而在秦淮区和雨花台区有明显差异(图 8)。

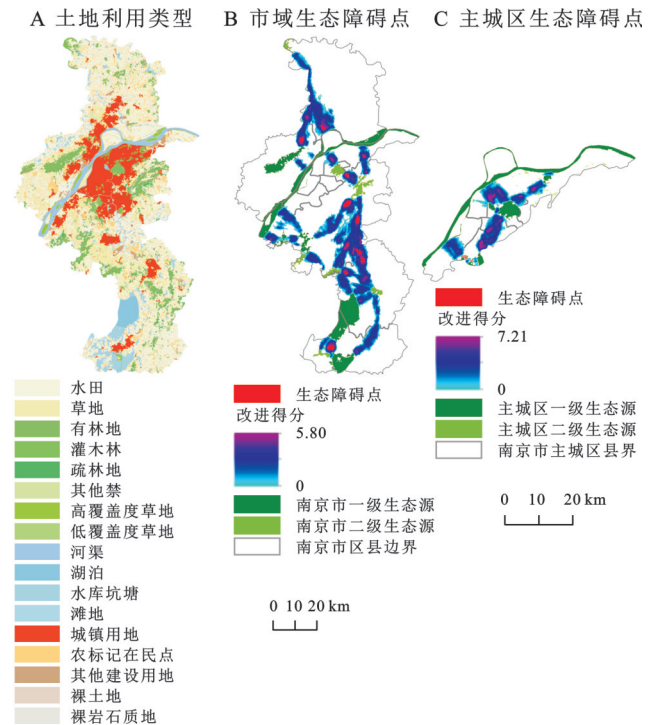


图 8 南京市域—主城区生态障碍点分布及土地利用类型
Fig. 8 Distribution of ecological barrier points and land use types in municipal area and main urban area of Nanjing

2.4 生态修复关键区域识别

通过 InVEST 模型计算出南京市生境质量指数,运用自然断点法分为 4 类(图 9)。低值区集中于主城区中部及工业区,因建设用地挤占和高强度开发导致生态退化与服务功能下降。城市边缘的城乡结合部及部分农田多为中等生境区,这些区域生态功能受城市化、农业开发而削弱。优等及良好生境区主要集中于紫金山、老山、栖霞山、玄武湖、牛首山、六合平山森林公园等自然保护区和大型湿地,其植被覆盖度高、生物多样性丰富且人类干扰较小。

将生境质量低值区与生态障碍点叠置得到生态修复关键区域,其空间分布与生态网络安全格局及都市区空间发展相关。结合遥感影像及相关资料,南京市国土空间生态修复关键区主要包括 3 类:一是城镇扩展干扰型区域,如六合区与浦口区交界的杜圩湿地公园及江苏格冠生态园地带,因其位于城市

边缘过渡带且紧邻密集居住区,受绕城高速、宁连高速等交通干线切割,致使湿地水文调节及生物栖息功能退化;二是山体退化型区域,如江宁区大连山周边地带,其西北部依托紫金山—大连山生态廊道延伸带,因山体陡峭、植被覆盖不足易发生水土流失,威胁下游土壤结构与养分保持,同时其南部因房地产开发扩张侵占生态缓冲带而加剧生境破碎化;三是水陆阻隔型区域,如高淳区固城河边缘与石臼湖南部连接处作为固城湖与石臼湖两大湿地生态系统的重要衔接节点,因城镇扩展建设形成物理阻隔,割裂了水陆生物的迁移廊道,阻碍了生物流动。

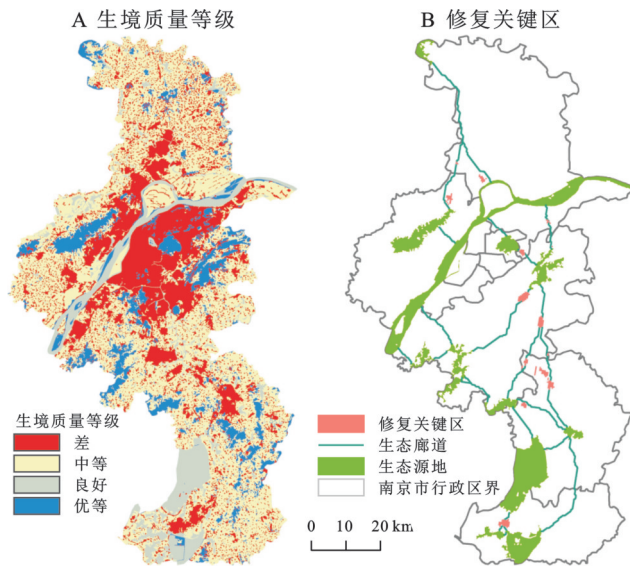


图9 南京市生境质量空间分布及生态修复关键区域

Fig. 9 Spatial distribution of habitat quality and key areas of ecological restoration in Nanjing

3 讨论与结论

3.1 讨论

生态网络构建是应对城市化生态问题的系统性解决方案,其作用涵盖生物多样性保护、生态系统服务提升、生境破碎化缓解、城市韧性增强及科学规划支撑等多维度目标^[29]。其核心价值在于整合自然与人文要素,构建兼具连通性、韧性与适应性的生态安全格局,支撑城市可持续发展。“源地—廊道”理论作为生态网络构建的核心框架,通过识别高质量生态斑块和构建有效连接形成功能网络,其构建质量直接决定了网络的整体功能^[30]。

针对单一尺度局限,本研究构建了“市域—主城区”双尺度生态网络,识别出城市化中的生态修复关键区。通过融合MSPA与LCP及电路理论,实现了源地识别从静态斑块到动态连通的升级,采用植被覆盖度表征植被阻力,能更直接量化地表植被对物种迁移的物理阻隔。研究显示,南京两尺度生态廊

道及生态夹点重叠数量较少,生态网络层级嵌套不足,这与相关研究在徐州^[5]、长沙^[8]观察到的多尺度生态网络存在较强空间耦合与功能协同形成对比,相较于徐州这类以平原为主且发展相对较慢的城市和长沙这类发展相对均衡的城市,南京市主城区经历了更剧烈、更集中的建设扩张,这种高强度开发导致生态源地严重碎片化,其斑块规模小、分布零散的特征使其形成的廊道难以与市域尺度上依托大型山体和湿地形成的廊道直接贯通。与针对南京的相关研究相比^[15],两者均发现南京市生态源地呈现“南多北少”的空间格局,但因研究范围、阻力因子及廊道分级逻辑等不同,故在生态源地及廊道分析结果上存在一定差异。本文聚焦城市生态现状问题,分析发现市域生态网络侧重自然生境的宏观连通,而主城区网络更关注建成环境中的生态孤岛连接,反映了不同尺度下人类干扰强度与生态功能需求的差异。南京市“山水城林”空间镶嵌结构,形成了尺度间生态流动的天然物理阻隔,长江作为生态廊道在市域尺度作用显著,但其宽阔的水体和两岸密集的港口却在主城区尺度成为阻碍物种交流的屏障。在生态修复关键区识别方面,本研究融合了夹点与障碍点的内部结构特征分析和外部生境质量评估,识别出的修复关键区对应了南京市城镇边缘区扩张、山体开发、水网密集等空间发展矛盾区域,揭示了边缘区生态管理的复杂性。未来需在国土空间规划中强化“区域—城市”多级管控机制,推动生态廊道跨尺度贯通。

本研究仅基于2020年土地利用数据,未涵盖近年快速城镇化的动态影响,此外,生态源地识别以林地、水域为核心,对农田、园地等半自然生境的生态价值挖掘不足,未来可引入生物多样性监测数据,构建基于目标物种的精细化源地评价体系。

3.2 结论

(1) 市域尺度识别出12个生态源地,以自然保护区、大型湿地和林地为主,集中于紫金山、老山等区域;主城区尺度提取出7个生态源地,多为零星分布的城市绿地与水域;两个尺度生态源地重合面积为103.02 km²,体现了城乡生态源地的空间关联性。市域源地呈现“南多北少”格局,主城区源地碎片化特征显著,需重点提升连通性。

(2) 市域和主城区分别提取27条、12条生态廊道,长度分别为568.21 km和74.14 km,廊道功能分级显示核心廊道集中于城市中部和南部,支撑长距离生态流;脆弱廊道分布于北部,依赖人工修复。同时,市域有19个生态夹点、14处生态障碍点,主城区有16个生态夹点、7处生态障碍点,主要受城镇建设、交通网

络和土地开发影响,成为生态连通的瓶颈区域。

(3)南京市生态修复关键区面积达38.94 km²,可划分为城镇扩展干扰型、山体退化型和水陆阻隔型3类。这些区域既是生态网络的关键节点,也是城市化胁迫的直接作用区,修复需兼顾生境连通性与人类活动协调。当前南京市核心廊道重叠度低,主城区网络成熟度不足,未来规划需进一步整合多尺度生态要素,强化网络协同效应。

参考文献(References):

- [1] Zhou X D, Hao C Y, Bao Y, et al. Is the urban landscape connected? Construction and optimization of urban ecological networks based on morphological spatial pattern analysis[J]. Sustainability, 2023,15(20):14756.
- [2] 李权荃,金晓斌,宋家鹏,等.基于尺度嵌套与复合功能视角的高强度城市化地区生态网络体系研究:以江阴市为例[J].生态学报,2023,43(22):9133-9147.
Li Q Q, Jin X B, Song J P, et al. Ecological network system of highly urbanized area based on scale nesting and composite function: a case study of Jiangyin City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(22):9133-9147.
- [3] 唐立娜,欧阳静怡,徐焯,等.基于景感生态学对生态修复的再思考[J].生态学报,2022,42(4):1639-1644.
Tang L N, Ouyang J Y, Xu Y, et al. Rethinking ecological restoration based on landscape ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1639-1644.
- [4] Wang T, Li H, Huang Y. The complex ecological network's resilience of the Wuhan metropolitan area[J]. Ecological Indicators, 2021,130:108101.
- [5] 朱捷,苏杰,尹海伟,等.基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J].自然资源学报,2020,35(8):1986-2001.
Zhu J, Su J, Yin H W, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting[J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(8):1986-2001.
- [6] 张福庆,危小建,谢名睿,等.基于不同尺度源地综合识别的南昌市生态网络嵌套分析[J].水土保持研究,2024,31(4):408-418.
Zhang F Q, Wei X J, Xie M R, et al. Multi-scale nesting analysis of ecological network in Nanchang City based on comprehensive sources identification[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):408-418.
- [7] 高宇,木皓可,张云路,等.基于MSPA分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究:以招远市为例[J].生态学报,2019,39(20):7547-7556.
Gao Y, Mu H K, Zhang Y L, et al. Research on construction path optimization of urban-scale green network system based on MSPA analysis method: taking Zhaoyuan City as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7547-7556.
- [8] 卢洁,焦胜,胡加琦,等.基于多尺度协同的长沙市生态网络构建与层级优化[J].生态学报,2023,43(15):6332-6344.
Lu J, Jiao S, Hu J Q, et al. Construction and hierarchical optimization of Changsha ecological network based on multi-scale collaboration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6332-6344.
- [9] 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.
Yang Z G, Jiang Z Y, Guo C X, et al. Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou City, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(10):3367-3376.
- [10] 陈南南,康帅直,赵永华,等.基于MSPA和MCR模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J].应用生态学报,2021,32(5):1545-1553.
Chen N N, Kang S Z, Zhao Y H, et al. Construction of ecological network in Qinling Mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(5):1545-1553.
- [11] 张紫怡,全照民,张立亭,等.景观格局对生态系统服务的非线性影响和阈值调控:以福建省生态高效协同区为例[J].生态学报,2024,44(21):9535-9551.
Zhang Z Y, Tong Z M, Zhang L T, et al. Nonlinear effects of landscape pattern on ecosystem services and threshold regulation: a case study of eco-efficient synergistic zone in Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(21):9535-9551.
- [12] 杨凯,曹银贵,冯喆,等.基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):555-565.
Yang K, Cao Y G, Feng Z, et al. Research progress of ecological security pattern construction based on minimum cumulative resistance model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(5):555-565.
- [13] 张立坤,李令军,赵文慧,等.基于形态空间格局分析方法和最小累积阻力模型的北京市平原区造林工程生态格局分析[J].中国环境监测,2023,39(S1):7-18.
Zhang L K, Li L J, Zhao W H, et al. Ecological pattern analysis of afforestation project in Beijing plain areas using morphological spatial pattern analysis and minimum cumulative resistance model[J]. Environmental Monitoring in China, 2023,39(S1):7-18.
- [14] 颜钰,陈秀铭,谢宇为,等.多元目标导向下市域复合型绿地生态网络构建研究:以泉州市中心城区为例[J].生态与农村环境学报,2025,41(3):308-322.
Yan Y, Chen X M, Xie Y W, et al. Research on the construction of urban composite green space ecological network based on diverse objectives: a case study of the central urban area of Quanzhou[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025,41(3):308-322.

- [15] Zhang Y, Lu M, Ma W D, et al. Urban multi-scale ecological network sequence and spatial structure optimization: a case study in Nanjing city, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024,167:112622.
- [16] 闫王玉,孙彦伟,刘敏.基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略[J].*应用生态学报*,2022,33(12):3369-3378.
Yan Y Y, Sun Y W, Liu M. Identification and restoration strategy of key areas for territorial space ecological restoration in Shanghai, China based on ecological security pattern[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(12):3369-3378.
- [17] 贾宝全,王成,邱尔发.南京市景观时空动态变化及其驱动力[J].*生态学报*,2013,33(18):5848-5857.
Jia B Q, Wang C, Qiu E F. Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(18):5848-5857.
- [18] 孟孟,张运,支俊俊,等.快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变:以南京市为例[J].*水土保持通报*,2021,41(3):296-304.
Meng M, Zhang Y, Zhi J J, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value under rapid urbanization: a case study of Nanjing City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(3):296-304.
- [19] Zuo Q, Zhou Y, Liu J Y. Construction and optimization strategy of an ecological network in mountainous areas: a case study in southwestern Hubei Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(15):9582.
- [20] 陈德超,施祝凯,王祖静,等.苏州环太湖地区生态网络构建与空间冲突识别[J].*生态与农村环境学报*,2020,36(6):778-787.
Chen D C, Shi Z K, Wang Z J, et al. Ecological network construction and spatial conflict identification around Taihu Lake area in Suzhou City[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020,36(6):778-787.
- [21] 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.
Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26(5):1444-1449.
- [22] 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.
Yu Y P, Yin H W, Kong F H, et al. Scale effect of Nanjing urban green infrastructure network pattern and connectivity analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(7):2119-2127.
- [23] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].*生态学报*,2013,33(13):4125-4133.
Wu J S, Zhang L Q, Peng J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(13):4125-4133.
- [24] 杜箫宇,吕飞南,王春雨,等.基于MSPA-Conefor-MCR的县域尺度生态网络构建:以延庆区为例[J].*应用生态学报*,2023,34(4):1073-1082.
Du X Y, Lyu F N, Wang C Y, et al. Construction of ecological network based on MSPA-Conefor-MCR at the county scale: a case study in Yanqing District, Beijing, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(4):1073-1082.
- [25] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].*应用生态学报*,2016,27(10):3344-3352.
Song L L, Qin M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(10):3344-3352.
- [26] 石晶,石培基,王梓洋,等.基于复杂网络理论和电路模型的酒泉市生态网络优化[J].*应用生态学报*,2024,35(1):237-246.
Shi J, Shi P J, Wang Z Y, et al. Ecological network optimization of Jiuquan City, Gansu, China based on complex network theory and circuit model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(1):237-246.
- [27] 杨志鹏,许嘉巍,冯兴华,等.基于InVEST模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J].*生态科学*,2018,37(6):139-147.
Yang Z P, Xu J W, Feng X H, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model in Northeast China[J]. *Ecological Science*, 2018,37(6):139-147.
- [28] 范祎童,周晓艳,王琪,等.大都市边缘区国土空间生态修复关键区域识别[J].*测绘科学*,2025,50(1):193-201.
Fan Y T, Zhou X Y, Wang Q, et al. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space in metropolitan fringe areas[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2025,50(1):193-201.
- [29] 吕佩锦,刘艳中,陈勇,等.“盲区削减”与“功能结构协调”双目标导向下的生态网络协同优化:以武汉市为例[J].*生态学报*,2025,45(1):420-433.
Lü P J, Liu Y Z, Chen Y, et al. Research on synergistic optimization of ecological network under the dual-objective orientation of “blind zone reduction” and “functional structure coordination”: a case study of Wuhan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(1):420-433.
- [30] 李瑾,金晓斌,孙瑞,等.江南水网区域复合型生态网络构建初探:以常州市金坛区为例[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(11):2427-2435.
Li J, Jin X B, Sun R, et al. Preliminary study on the construction of complex eco-network in Jiangnan water network area: a case study of Jintan district of Changzhou City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020,29(11):2427-2435.