湖州市域生态网络构建的关键区空间辨识*

刘 杰[1] 罗玉兰[1] 张 浪[2] 吕永龙[3] 赵得明[4]

1 上海市园林科学规划研究院 上海 200232
2 城市困难立地生态园林国家林草局重点实验室 上海 200232
3 厦门大学环境与生态学院 福建厦门 361102
4 中国科学院大气物理研究所 北京 100029

摘要:【目的】探究城市生态网络构建的关键区科学辨识,以期为市域生态修复策略分类实施、生态资源格局巩固及生态系统效能提升提供参考。【方法】以湖州市为研究区域,通过综合评价(CE)法构建自然、社会因素不同指标权重下的生态源地辨识体系;运用最小累积阻力(MCR)模型与电路理论构建综合阻力面;结合生态“夹点”“障碍点”模拟,构建生态网络,辨识关键生态廊道、生态保护优先区与生态修复优先区。【结果】1)生态系统服务、生态环境安全等自然因素是辨识生态源地的主导因素。2)生态源地主要分布在湖州市长兴县、安吉县,城市化程度较高的南浔区分布最少,共辨识生态源地 16 个,面积共计 2 449.17 km^2。3)生态保护和修复优先区主要分布在长兴县、吴兴区,共辨识关键生态廊道 18 条,生态夹点 32 个,生态障碍点 6 处。【结论】自然—社会因素不同指标权重试验、综合阻力面修正可以显著提升生态源地的辨识结果,城市化水平影响生态网络构建的关键区分布,湖州市域关键生态廊道、生态保护和修复优先区的区县空间分布基本一致。研究结果实现了生态网络构建的关键区空间辨识,有助于市域内生态资源的高效整合,为市域国土空间生态网络的精准保护修复和综合效能提升提供参考依据。

关键词:生态安全格局;生态网络;生态源地;生态夹点;生态障碍点;湖州市
DOI:10.12169/zgcsly.2025.04.24.0003

Spatial Identification of Critical Areas for Huzhou Municipal Ecological Network Construction

Liu Jie[1] Luo Yulan[1] Zhang lang[2] Lyu Yonglong[3] Zhao Deming[4]

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China; 3. College of Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract:【Objective】To explore the science-based identification of critical areas for the construction of urban ecological networks, aiming to provide references for classification implementation of urban ecological restoration strategies, consolidation of ecological resource patterns, and improvement of ecosystem efficiency. 【Method】Taking Huzhou City as the study area, the paper constructs an ecological source identification

收稿日期:2025-04-24
* 基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFC3802604、2023YFC3804902);国家自然科学基金(32171569);上海市绿化和市容管理局科研专项(G250202)
第一作者:刘杰(1990-),女,博士,工程师,研究方向为城市生态网络构建。E-mail:liujie@shsyky.com
通信作者:张浪(1964-),男,博士,教授级高工(二级),研究方向为生态园林规划设计与技术研究。E-mail:zl@shsyky.com

system under different weights of natural and social factors using the comprehensive evaluation (CE) method. Then, the MCR model and circuit theory are employed to construct a comprehensive resistance surface. By simulating ecological "pinch points" and "obstacle points", an ecological network is constructed to identify the critical ecological corridors, ecological protection priority areas, and ecological restoration priority areas.【Result】 1) Natural factors such as ecosystem services and ecological environment security are the dominant factors in identifying ecological source areas; 2) The ecological source areas are mainly distributed in Changxing County and Anji County of Huzhou City, while least distributed in Nanxun District, which has a higher degree of urbanization. A total of 16 ecological source areas are identified, with a total area of 2 449.17 km^2; and 3) The priority areas for ecological protection and ecological restoration are mainly distributed in Changxing County and Wuxing District. A total of 18 key ecological corridors, 32 ecological checkpoints, and 6 ecological obstacle points are identified.【Conclusion】 Experiments on the weighting of different natural and social indicators, as well as comprehensive resistance surface correction, can significantly improve the identification of ecological source areas. The level of urbanization affects the distribution of critical areas in the construction of ecological networks. The spatial distribution of key ecological corridors, the priority areas for ecological protection and ecological restoration in Huzhou City are basically consistent among its districts and counties. The study has achieved spatial identification of critical areas for ecological networks construction, which is conducive to the efficient integration of ecological resources within the city and provides references for the precise protection, restoration, and comprehensive efficiency improvement of urban spatial ecological networks.

Keywords: ecological security pattern; ecological network; ecological source area; ecological pinch point; ecological obstacle point; Huzhou City

中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化，国土空间生态修复是加快建设人与自然和谐共生的现代化的重要支撑[1]。立足生态资源要素本底，明确自然生态系统是处于正常群落演替还是生态退化，对于国土空间生态保护修复的实施至关重要[2]。作为推进生态文明建设的重要抓手，市级国土空间生态修复通过从宏观、中观层面统筹生态资源要素，构建生态安全格局[3]。市域生态空间是市级国土空间生态修复的重要载体[4]，科学构建市域生态网络是确保生态空间充分发挥其效能的必要途径[5-6]。而如何科学辨识市域生态网络构建的关键区空间，重点保护、修复其基于资源要素的生境质量和功能连通性，成为现阶段市级国土空间生态修复的关键问题[7-8]。

目前，市域生态网络的功能正从单一关注生物多样性，向多功能复合型拓展[9-11]，其研究路径也已趋于成熟[12-13]，形成了“源地识别-阻力面构建-网络生成”的基本研究范式，涉及的方法通常基于最小累积阻力（minimum cumulative resistance，MCR）模型[14]，结合电路理论[15-16]、图论[17-18]，并将景观连通性、生境质量、生态系统服务[12,19-21]等纳入具体分析环节。市域生态网络构建的关键区空间辨识多参照学者关于“景观战略点”[22]的阐释，这些战略点的辨识往往依赖于对生态网络构建中生态过程动态的理解和模拟才能进行判别。科学辨识市域生态网络构建的关键区空间，有助于破解生态保护修复面临的碎片化难题，提升连通性、维系生物多样性迁徙通道，筑牢生态安全屏障。然而，以往研究在进行市域生态网络构建的关键区空间辨识中尚存在以下问题：1）生态源地识别多局限于依赖经验判断法选取试验数据源[23]，且生态源地评价体系中自然、社会因素的指标权重影响关系不明确；2）对于具有山地占比大、植被覆盖度高等特征的资源富集型城市，缺乏对这些特征影响下生态源地识别精度、综合阻力面修正等方面的科学探讨。

湖州市是“两山”理念诞生地，新时期加强国土空间生态保护修复，是湖州市实现生态文明建设示范目标的重要探索。鉴于此，本研究以湖州市为例，创新性地将复杂生态资源要素纳入市域生态网络构建研究范式，建立自然-社会因素不同指标权重下的生态源地辨识体系，基于MCR模型与电路理论构建综合阻力面，辨识市域生态网络构建的关键区空间，以期为市域生态修复策略分类实施、

生态资源格局巩固及生态系统效能提升提供参考。

1　研究区概况

湖州市（119°14—120°29′E，30°22′—31°11′N）地处浙江省北部，浙苏皖三省交汇处，下辖 2 个区、3 个县，总面积 5 820 km^2，其中市区行政辖区面积 1 565 km^2，中心城区面积 700 km^2。气候属于北亚热带季风气候，四季分明。湖州东北濒太湖，“五山一水四分田”是湖州千年未变的自然资源本底，山水林田湖草自然生态要素完整，地势由西南向东北倾斜，西部以山地、丘陵为主，最高海拔 1 587 m，东部为水乡平原，平均海拔仅为 3 m。市域内山体面积占比 50%，森林覆盖率达 48.57%。2023 年 4 月，湖州市自然资源和规划局印发的《2023 年全市自然资源和规划工作要点》强调，坚持最自然的路径，着力强化生态系统修复。在此背景下，科学评价湖州市的资源本底，辨识其生态保护修复关键区，是构建其国土空间生态安全格局的重要途径。

2　研究方法

2.1　数据来源与处理

本研究所涉及的数据及来源为：1）地形 DEM 数据来源于地理空间数据云平台（分辨率 30m，http://www.gscloud.cn）；2）土地利用数据来源于中国科学院空天信息创新研究院 GLC-FCS30（分辨率 30 m，2020 年，https://zenodo.org/record/4280923#）或武汉大学 CLCD 数据集（分辨率 30 m，2021 年，https://zenodo.org/records/5816591）；3）气象数据如降水量等数据来源于资源环境科学数据平台（http://www.resdc.cn）；4）植被因子数据中植被净初级生产力（NPP）数据为 MODIS/006/MOD17A3HGF 产品，来自美国航天局（分辨率 500 m，http://reverb.echo.nasa.gov），归一化植被指数（NDVI）来源于地理空间数据云平台（分辨率 30 m，http://www.gscloud.cn）；5）夜间灯光数据来自全球光污染地图，城市尺度的精度（R^2）为 0.95（https://www.lightpollutionmap.info），人口密度（POP）及国内生产总值（GDP）来自资源环境科学数据平台（http://www.resdc.cn）；6）河网密度、污染工厂、公园数据来自 Bigemap 平台（http://www.bigemap.com）。

为便于空间数据分析，所有数据均转换为高斯-克格投影，WGS1984 坐标系，数据统一重采样至 30 m×30 m 空间分辨率。根据中国科学院空天信息创新研究院提供的覆被分类，参照《城市用地分类与规划建设用地标准》（GB 50137-2011）、《土地利用现状分类》（GB/T21010-2017），本研究划分 6 类土地利用类型：耕地、林地、草地、水体、建设用地和湿地。

2.2　生态网络关键区辨识方法

2.2.1　生态源地识别

目前已形成的生态源地评价指标体系包括：形态学空间格局分析（MSPA）、基于生态系统服务价值重构和综合评价法（comprehensive evaluation，CE）等[24-25]。本研究基于两大土地利用主流产品 CLCD 数据集和 GLCFCS30 数据，结合研究目的和研究区特征，选取 CE 法辨识生态源地，具体辨识的指标见表 1。研究通过调整自然因素与人为因素的指标权重占比，设置对照组与对比组，验证自然因素与人为因素对生态源地辨识的重要性。权重值的设置分别对应表 1 中的 3 个指标类型。

权重设置首先考虑湖州市的自然本底优势和国土开发强度（不到 20%），因此生态源地辨识首先保障自然生态过程的完整性，自然因素的基础权重需显著高于人为因素。由此试验中设置对照组，即表 1 中的 3 大指标类型（A∶B∶C）设置比例为（1∶0∶0），完全排除人为因素，旨在建立“自然驱动”的基准情景，用于隔离和量化生态系统服务功能指标对于源地辨识结果的独立影响；试验中设置 3 组对比组，逐步增加自然因素相对于人为因素的权重，参照敏感性分析和层次分析法标度原则[26]，并通过整数比例简化模型复杂度，增强结果的可解释性。本研究设置（A∶B∶C）梯度变化为（1∶1∶1→3∶2∶1→5∶2∶1），结合对照组，自然因素重要性递增时，则形成均衡权重→自然主导→显著自然主导→纯自然的梯度情景，便于分析辨识结果对于纯自然驱动以及纳入人为因素干扰后的敏感性。

将对照组按照不同赋值叠加后，采用自然间

断点分级法分为 5 个等级，其中，5 级的赋值之和最高，取 4 级和 5 级对应辨识结果作为生态源地。结合研究区域自然保护区和自然保护地的空间分布，最后得到研究区域生态源地分布。考虑到研究区域内高山体面积占比、高森林覆盖率，景观连通性的计算考虑大块林地，并利用反地形 DEM 提高生态源地选取的精度。

表 1 基于综合评价法的生态源地识别指标

指标类型	具体指标
生态系统服务指标体系 A	生境质量
	生物多样性
	景观连通性(斑块重要性指数 dPC)
	固碳释氧(植被净初级生产力 NPP)
生态环境安全指标体系 B	年降水量
	归一化植被指数(NDVI)
	河网密度
人为环境指标体系 C	距污染工厂的距离
	距离公园的距离

2.2.2 综合阻力面构建

关于综合阻力面，目前主要基于阻力系数设置与修正因子校正的方法获取[12]。本研究通过 MCR 模型[14]构建生态阻力面。

结合湖州市生态本底现状，选取土地利用类型、高程、坡度和 NDVI 这 4 个方面阻力因子，参考已有研究中物种迁移难易程度与赋值一般规律[27]，将各阻力因子划分为 5 级，赋值越大表示阻力系数越大，对各阻力因子赋值，按照权重（表 2）构建综合阻力面，并将夜间灯光指数作为校正因子。

表 2 综合阻力面指标因子赋值

阻力因子	分级	阻力值	权重
土地利用类型	林地	1	0.35
	草地	5	
	水体、湿地	100	
	耕地	200	
	建设用地	500	
高程/m	[0，50）	50	0.30
	[50，100）	100	
	[100，150）	150	
	[150，200）	300	
	≥200	500	
坡度/（°）	[0，10）	100	0.15
	[10，20）	120	
	[20，30）	180	
	[30，40）	300	
	≥40	500	
归一化植被指数	[0，0.3）	500	0.20
	[0.3，0.5）	300	
	[0.5，0.6）	120	
	[0.6，0.7）	50	
	[0.7，1）	1	

2.2.3 生态保护与生态修复优先区辨识

将退化或损失极有可能切断生态源地之间连通的关键区称为生态“夹点”[28-29]。生态夹点对于生态保护具有重要作用，因此是生态保护优先区的重要参考。基于电路理论及电流变化，将移除后可增加生态源地之间连通的区称为生态“障碍点”。生态障碍点是影响生态网络内部正常生态流动的高阻力值点，通过修复可以显著增强景观连通性[30]。

采用基于 MCR 模型与电路理论的 Linkage Mapper 工具提取潜在生态廊道，对廊道等级进行进一步明确，低阻力廊道（连通性指数值在前 10%）需要保护，而高阻力廊道（连通性指数值在后 10%）需要修复[31]；通过 Linkage Mapper 插件中的 Pinchpoint Mapper 模块，选取“all－to－one”模式进行迭代运算，识别生态夹点；通过 Linkage Mapper 插件中的 Barrier Mapper 模块，采用移动窗口搜索法，设置低阻力移动窗口搜索，进行迭代运算，识别生态障碍点。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别结果

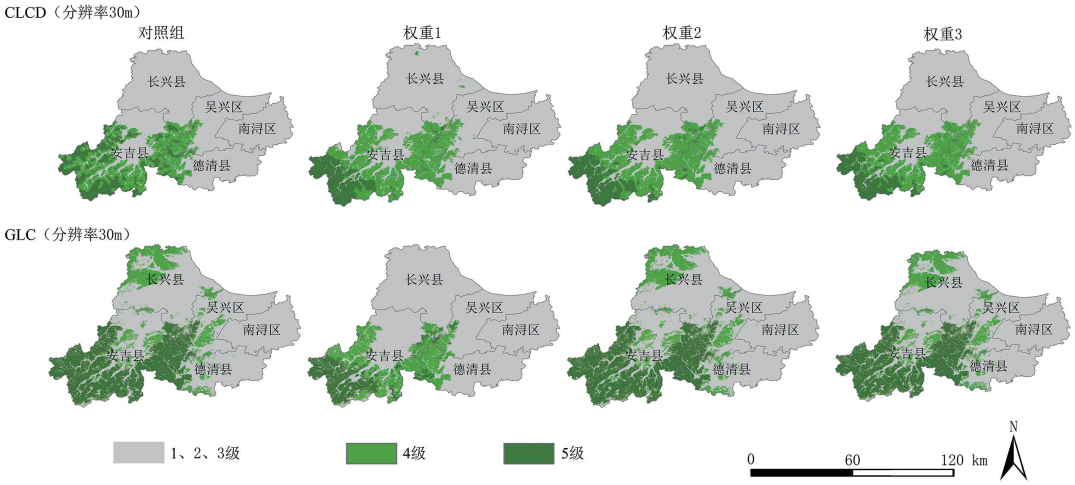
通过 CLCD 数据集和 GLCFCS30 数据生成的结果对比（图 1）可得：GLCFCS30 将长兴县北部大面积林地识别为较高值区，在权重（1∶1∶1）对应的识别结果中呈现两极分化，部分转化为低值（1 至 3 级），一定程度影响了生态源地识别的稳定性和有效性；GLCFCS30 将安吉县、德清县内大面积的林地、耕地无差别识别为高价值区（5 级），不符合实际生态源地筛选的原则，不能有效识别高价值耕地。另外，对比研究区域自然保护区和自然保护地的实际空间分布，基于 CLCD 数据集（MODIS and LandSat）的识别结果可更准确地反映研究区生态源地分布。

对比 CLCD 对照组（1∶0∶0）以及在权重 1∶1∶1、3∶2∶1、5∶2∶1 下的辨识结果可得：对照组纯自然驱动的源地辨识面积过大，而纳入人为因素干扰的辨识结果与《湖州市国土空间总体规划（2021－2035）》以及实际空间分布贴合度更高；在纳入人为因素的 3 组对比试验中，随着自然因素权重占比的递增，辨识结果更为准确，

但 3∶2∶1 和 5∶2∶1 的辨识结果差异主要体现在边缘区域，而核心生态源地（如自然保护地）的识别结果重合度达 92%，因此，本研究采纳了 5∶2∶1 的辨识结果。由此可得，市域生态源地的评价体系中，不能忽略人为影响因素，但相对而言，生态系统服务、生态环境安全等是影响生态源地辨识的主导因素。

3.2　生态源地空间分布特征

结合 CLCD 权重下辨识结果，叠加湖州市自然保护区和自然保护地数据，研究共识别 16 处生态源地，面积共计 2 449.17 km^2，占湖州市域面积的 42.08%。由图 2、表 3 可知：从整体空间分布来看，生态源地在东部分布较少，主要分布在北部、西南部以及中部的林地、自然保护地等。从区县分布来看，生态源地主要分布在湖州市长兴县和安吉县，城市化程度较高的南浔区分布最少。其中，长兴县生态源地数量为 5 处，南浔区生态源地数量为 1 处。从生态源地的平均面积来看，安吉县的生态源地数量仅次于长兴县，但生态源地平均面积最大；南浔区生态源地数量最少且平均面积最小。可见生态源地整体分布情况与区县城市化水平相一致。



注：底图审图号为浙 S（2023）38 号，下同；对照组权重为（1∶0∶0），权重 1、2、3 分别为（1∶1∶1）（3∶2∶1）（5∶2∶1）

图 1　研究区生态安全综合赋值五级分布

湖州市生态源地的整体分布主要受林地分布的影响，两者分布情况基本一致。截至 2024 年，湖州市森林覆盖率高达 48.57%，该类生态本底较佳的区域适合作为生态源地，利于栖息地保护，以促进生物多样性保护与可持续发展。

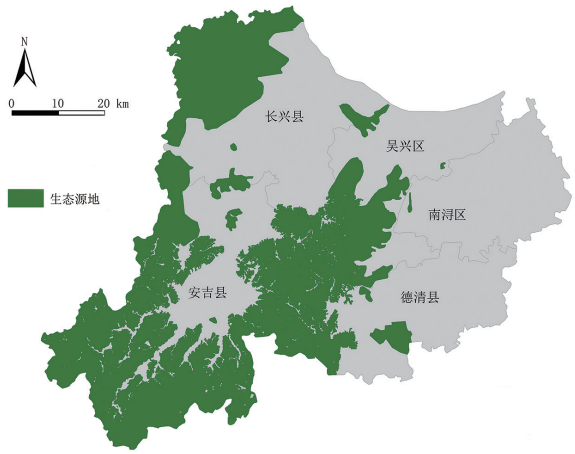


图 2　研究区生态源地分布

表 3　不同行政区划生态源地分布

行政区划	面积/km^2	城市化水平	生态源地数量/个	生态源地面积/km^2	生态源地平均面积/km^2
吴兴区	861.82	高	3	305.40	101.80
南浔区	701.76	较高	1	2.20	2.20
德清县	936.38	中等	3	265.77	88.59
长兴县	1 429.61	较低	5	600.12	120.02
安吉县	1 886.40	低	4	1 275.68	318.92

注：湖州市整体国土开发强度不到 20%，因此表格中城市化水平为相对结果。

3.3　综合阻力面构建

由图 3 可知，阻力高值区主要分布在两区三县人口聚集地区，即城市化程度较高的区域，人为活动扰动较为明显；较高阻力值区主要分布在长兴县的顾渚山、安吉县的龙王山、吴兴区的弁山及金盖山、德清县的莫干山；低阻力值区主要分布在两区三县的耕地和养殖坑塘等区域。

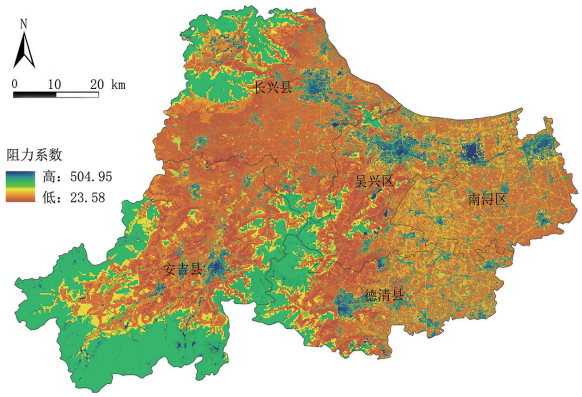


图 3 研究区综合阻力面空间分布

3.4 生态网络关键区域分布

3.4.1 生态廊道分级辨识

由表 4 可知，共辨识生态廊道 18 条，总长度 120.23 km。将研究区内的生态廊道按照单位长度阻力值分为高阻力廊道、中阻力廊道、低阻力廊道。高阻力廊道和低阻力廊道均主要分布在长兴县、吴兴区（图 4），其中高阻力廊道长度占比为 5.23%，需要结合生态修复优先区进行重点修复；低阻力廊道长度占比为 30.18%，需要结合生态保护优先区进行重点保护。

表 4 生态廊道分类结果

生态廊道类型	数量/条	数量占比/%	长度/km	长度占比/%
高阻力廊道	2	11.11	6.29	5.23
中阻力廊道	9	50	77.66	64.59
低阻力廊道	7	38.89	36.28	30.18
合计	18	100	120.23	100

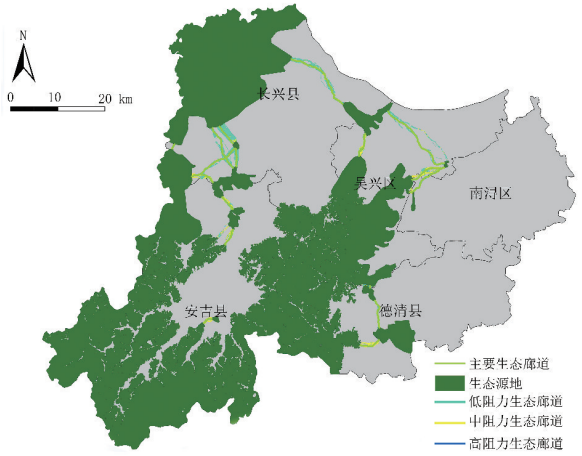


图 4 生态廊道等级分布

3.4.2 生态保护优先区辨识

湖州市生态保护优先区整体空间分布及生态夹点统计分别如图 5、表 5 所示。湖州市生态夹点共 32 个，其中，安吉县最多（11 个），数量占比较高但生态夹点总面积占比较低；其次为长兴县（7 个），数量较多同时面积占比最大；南浔区和德清县数量相同（4 个），数量少且生态夹点面积占比较低。因此，湖州市的两区三县中，生态保护优先区主要分布在长兴县及城市化程度较高的吴兴区。

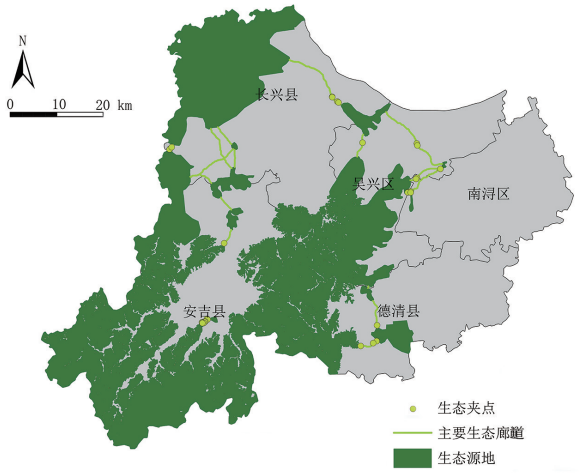


图 5 生态保护优先区空间分布

表 5 生态夹点分布统计

行政区划	生态夹点数量/个	生态夹点数量占比（%）	生态夹点面积/hm^2	生态夹点面积占比（%）
吴兴区	6	18.75	37.62	40.74
南浔区	4	12.50	3.51	3.80
德清县	4	12.50	5.31	5.75
长兴县	7	21.88	37.8	40.94
安吉县	11	34.38	8.1	8.77
合计	32	100	92.34	100

3.4.3 生态修复优先区辨识

湖州市生态修复优先区整体空间分布及生态障碍点统计分别如表 6、图 6 所示。研究共辨识湖州市域生态障碍点 6 处，面积 186.45 km^2，主要分布在吴兴区、长兴县。吴兴区和长兴县生态障碍点各有 2 处，面积占比分别为 56.39%、33.49%；安吉县无生态障碍点分布。分析可得，生态障碍点均位于关键生态廊道范围内，资源要素主要包括耕地、湿地以及部分林地。

表 6 生态障碍点分布统计

行政区划	阻碍点数量/处	阻碍点数量占比/%	阻碍点面积/km^2	阻碍点面积占比/%
吴兴区	2	33.33	105.14	56.39
南浔区	1	16.67	9.91	5.31
德清县	1	16.67	8.95	4.81
长兴县	2	33.33	62.44	33.49
合计	6	100	186.45	100

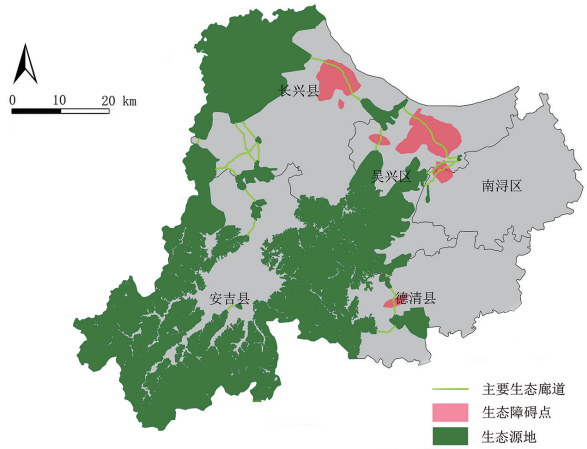


图 6　生态修复优先区空间分布

4　讨论

4.1　生态网络构建关键区辨识精度提升路径拓展

本研究将复杂生态资源要素纳入城市生态网络构建基础研究范式。在源地识别环节，考虑到湖州市高山体面积占比、高植被覆盖率等特征，利用反地形 DEM 提高了生态源地辨识的精度，以夜间灯光数据作为校正因子，降低了人为因素及地类划分等对阻力面构建的影响。本研究侧重物理空间辨识，在生态源地识别和阻力面构建时，未对特定物种或者植物群落[32]进行讨论，后续研究可进一步细化生态源地的识别体系，同时，在阻力面构建时明确目标物种，将物种偏好、迁徙路径、土壤类型、水文条件等[31,33-34]纳入考虑。此外，本研究中生态廊道高、中、低阻力的界定，主要依赖土地利用类型与植被覆盖度进行，阻力分级是相对概念，未来研究还可以考虑人为干扰和障碍、环境条件与物种适应性等影响。

4.2　关键区辨识研究与市级国土空间规划有效衔接

城市生态网络构建的关键区空间是国土空间规划和生态保护修复工程的重要组成部分。城市化进程导致市域内不同尺度上景观过程和功能的分异[35]。将多尺度阻力面进行层级嵌套才能系统性提升生态网络效能。本研究市域层级生态网络构建的关键区空间辨识以市级国土空间规划作为指导，而辨识结果又在一定程度上验证市级国土空间规划的科学性和前瞻性，两者互为补充。因此，以生态网络构建的关键区空间作为“桥梁”，通过逐级尺度推绎和层级传导，实现多尺度生态网络的协同构建和层级优化，可作为后续国土空间生态保护修复研究的重点。

4.3　关键区辨识结果是生态保护修复策略制定的重要参考

结合 2024 年颁布的《湖州市生态文明典范城市建设促进条例》，构建分级管控与协同保护体系，实施精准修复与智能监管结合，多元筹措与绩效导向配置。生态保护优先区聚焦自然主导型核心源地，纳入国土空间规划“一张图”法定管控；生态修复优先区实施差异化技术修复，对需要重点生态修复的现状居住用地、工业用地、商服用地等，补充小型“脚踏板”斑块弱化障碍点，结合线性防护与沿街绿带建设，丰富植被群落结构，提升小斑块生境质量[36-37]。依托空天地监测网络与研究模型动态评估修复成效。推进生态产品价值实现，构建综合的生态产品开发运营体系，鼓励将生态环境保护修复与生态产品开发经营权益挂钩。

5　结论

自然—社会因素不同指标权重试验、综合阻力面修正等探讨可以显著提升生态源地的辨识结果。自然因素是影响生态源地辨识的主导因素，但人为因素不可或缺，将其纳入可使得辨识结果更为准确。城市化水平影响生态网络构建关键区的空间分布，湖州市域关键生态廊道、生态保护和修复优先区的区县空间分布基本一致。

功能连通性改善程度有待进一步研究，尤其需要结合实地调研开展精准智能监测与生态技术适配范式研发，以助力湖州市生态资源提质增效。

参考文献

[1]傅伯杰.国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J].中国科学院院刊,2021,36(1):64-69.

[2]PENG J,XU D M,XU Z H,et al.Ten key issues for ecological restoration of territorial space[J].National Science Review,2024,7(11):176.

[3]仇实,于强,刘泓君,等.基于生态环境质量评价的酒泉市生态空间网络优化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(2):199-208.

[4]张晨笛,刘杰,张浪,等.基于城市生态廊道概念应用的三个衍生概念生成与辨析[J].中国园林,2021,37(11):109-114.

[5]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.
[6]仲启铖,张桂莲,张浪.基于社会-生态功能复合与 SPCA 的城市绿地生态网络重要源地识别[J].中国园林,2024,40(2):117-123.
[7]SHEN Z, YIN H W, KONG F H, et al. Enhancing ecological network establishment with explicit species information and spatially coordinated optimization for supporting urban landscape planning and management[J]. Landscape and Urban Planning, 2024,248:105079.
[8]BABÍ A J, BOLOWICH A, ELLIOT T, et al. Assessing habitat loss,fragmentation and ecological connectivity in Luxembourg to support spatial planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2019,189:335-351.
[9]WANG Y J,QU Z Y,ZHONG Q C,et al.Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA[J].Ecological Indicators,2022,142:109258.
[10]刘杰,张浪,余浩然.社会-生态效益权衡下上海市中心城区绿地生态网络多情景模拟[J].中国园林,2025,41(5):100-107.
[11]傅丽华,莫振淳,彭耀辉,等.湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略[J].地理学报,2019,74(7):1409-1419.
[12]李权荃,金晓斌,张晓琳,等.基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J].生态学报,2023,43(4):1461-1473.
[13]张浪,李晓策,刘杰,等.基于国土空间规划的城市生态网络体系构建研究[J].现代城市研究,2021(5):97-100.
[14]DAI L,LIU Y,LUO X.Integrating the MCR and DOI Models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China[J]. The Science of The Total Environment,2021,754:141868.
[15]高滢,苏毅.基于 MSPA 和电路理论的县域生态网络构建[J].中国城市林业,2025,23(2):115-122.
[16]PENG J,YANG Y,LIU Y,et al.Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J].Science of The Total Environment,2018,644:781-790.
[17]LUMIA G, PRATICÒ S, DI FAZIO S, et al. Combined use of urban atlas and corine land cover datasets for the implementation of an ecological network using graph theory within a multi-species approach[J].Ecological Indicators,2023,148:110150.
[18]KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling[J]. Landscape and Urban Planning,2010,95(1):16-27.
[19]李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].生态学报,2024,44(6):2284-2294.
[20]刘骏杰,陈璟如,来燕妮,等.基于景观格局和连接度评价的生态网络方法优化与应用[J].应用生态学报,2019,30(9):3108-3118.
[21]俞孔坚.景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型[J].地理学报,1998(S1):11-20.
[22]范春苗,王志泰,汤娜,等.基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建[J].生态学报,2022,42(16):6620-6632.
[23]汪涛,张家明,禹湘,等.资源型城市的可持续发展路径:以太原市创建国家可持续发展议程示范区为例[J].中国人口·资源与环境,2021,31(3):24-32.
[24]陆禹,佘济云,罗改改,等.基于粒度反推法和 GIS 空间分析的景观格局优化[J].生态学杂志,2018,37(2):534-545.
[25]谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
[26]SAATYTL.Deriving the AHP 1-9 scale from first principles[C]// Proceedings 6th ISAHP.Berna,Suiza.2001:397-401.
[27]叶洁楠,黄亦周,贾舒皓,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的贺兰山生态安全网络评价与优化[J/OL].南京林业大学学报(自然科学版),1-12[2025-06-22].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20241009.1750.002.html.
[28]李彤,贾宝全,刘文瑞,等.宜昌市生态安全网络要素时空动态及其影响因素[J].生态学报,2023,43(15):6154-6169.
[29]王秀明,赵鹏,龙颖贤,等.基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别[J].生态学报,2022,42(2):450-461.
[30]刘杰,胡国华,张浪.上海市中心城区绿地生态网络演化多情景模拟及景观连接度评价[J].风景园林,2024,31(11):70-78.
[31]王晓峰,朱梦娜,张欣蓉,等.基于"源地-阻力-廊道"的三江源区生态安全格局构建[J].生态学报,2024,44(11):4609-4623.
[32]任诗超,张银龙,曹铭昌,等.成都市鸟类多样性时空分布格局及热点区域识别[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):189-196.
[33]刘杰.基于生物多样性保护的城市生态廊道连接度研究综述[J].园林,2025,42(5):62-70.
[34]丁金华,褚涵,孙琦.基于 MSPA 与电路理论的水网地区生态网络构建[J].中国城市林业,2024,22(5):122-129.
[35]HUBER P R,GRECO S E,THORNE J H.Spatial scale effects on conservation network design: trade-offs and omissions in regional versus local scale planning[J]. Landscape Ecology, 2010,25(5):683-695.
[36]XU A, HU M, SHI J, et al. Construction and optimization of ecological network in Inland River Basin based on circuit theory, complex network and ecological sensitivity: a case study of Gansu Section of Heihe River Basin[J].Ecological Modelling,2024,488:110578.
[37]WANG T,HUANG Y,CHENG J,et al.Construction and optimization of watershed-scale ecological network based on complex network method: a case study of Erhai Lake Basin in China[J]. Ecological Indicators,2024,160:111794.