

基于生态网络构建的富春江流域自然保护地空间优化

聂文彬 范成傲 林锦 吴以伦 徐斌*

摘 要: 构建自然保护地体系是我国在推进生态文明建设过程中的重要举措, 但其与区域重要生态空间的匹配关系尚不明确。以富春江流域为例探究区域生态网络与自然保护地的空间匹配关系, 并基于此提出自然保护地空间优化策略。利用InVEST模型、MSPA模型、空间主成分分析法 (SPCA) 和电路理论构建生态网络; 在此基础上, 将生态网络与自然保护地进行空间叠加分析, 根据空间重合关系将自然保护地划分为3类, 并提出分类型优化和管控策略。结果显示: 1) 共识别富春江流域生态源地25个, 总面积为557.39 km²; 提取54条生态廊道, 总长度为684.55 km, 总面积为632.80 km²; 识别生态夹点114个, 总面积为8.61 km²; 2) 划分严格保护区280 km²、生态修复区370 km²、潜在保护区386.73 km²; 3) 优化后的自然保护地空间更具生态上的完整性, 为未来自然保护地规划、生态保护与修复提供依据与参考。

关 键 词: 风景园林; 生态网络; 富春江流域; 自然保护地; 空间优化

文章编号: 1000-6664(2026)03-0107-08

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0107

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-28

修回日期: 2025-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32501738)

自然保护地是由各级政府依法划定或确认, 对重要的自然生态系统、自然遗迹、自然景观及其所承载的自然资源、生态功能和文化价值实施长期保护的陆域或海域, 主要包括国家公园、自然保护区、自然公园3种类型^[1]。自然保护地是保障区域生态安全、维持生物多样性, 服务人类社会等功能的核心载体^[2], 对于缓解生态系统退化、城镇空间无序扩张有重要作用^[3]。

在生态文明建设的背景下, 中国自然保护地的类型逐渐丰富, 规模也逐渐扩大, 但同时也面临着斑块孤岛化和破碎化等问题^[4], 因此优化自然保护地空间的需求迫切且意义重大。目前聚焦于生态空间优化的研究主要集中在空间识别和分区规划2个方面。前者主要是基于生态要素或生态功能评价识别区域重要生态空间, 如范琳等^[5]利用地形、植被、水系等生态要素筛选保护空间; 申佳可等^[6]通过生态系统服务评估识别区域重要的生态源地, 并基于此对区域生态空间进行了优化。后者主要在生态评价的基础上对生态空间进行分级分类, 细化管控, 如苑竟达等^[7]通过风景特质评价与生态完整性评价对青海省湟水谷地进

行了分级, 并提出相应的管控措施。

整体而言, 当前研究主要基于生态功能开展识别和评估, 并据此优化保护区的分布。但多数研究往往将生态斑块视为彼此独立、边界固定的单元, 未能在空间上构建连通完整的生态体系^[8]; 同时, 相关研究对自然保护地这一关键生态空间的关注相对不足, 而基于生态网络优化生态空间被认为是解决上述问题的有效的措施之一^[4, 9]。

生态网络是平衡区域发展和保护生态安全的有效途径^[10], “识别源地-构建阻力面-提取廊道”已成为主要的研究范式^[11]。生态源地识别通常以分析生态敏感性和生态系统服务的重要性^[12-13]或选择具有高质量的栖息地并达到一定规模的生态斑块^[14]作为依据, 其中生态系统服务综合评估因指标全、科学性高而被广泛运用^[15]。此外, 形态学空间格局分析(MSPA)也是提高斑块识别水平的主流方法, 能够有效识别生态斑块核心区^[16]。在生态廊道提取方面, 多采用图论模型^[17]、最小累积阻力模型^[18]、电路理论^[19]。其中, 电路理论可模拟物种随机游走扩散过程中的迁移路径,

识别具有宽度的生态廊道, 突破了最小阻力模型仅能识别几何路径的局限性^[20]。在构建生态阻力面时, 通过空间主成分分析法 (SPCA) 可消除因素间的共线性, 避免权重设定的主观性^[21]。因此, 本研究基于生态系统服务综合性评估与MSPA模型来提高生态源地的识别水平, 运用SPCA确定阻力因子权重, 利用电路理论提取生态廊道和生态夹点。

生态网络可在空间上形成完整的体系, 对提高各生态用地的连通性, 降低景观破碎化有重要意义^[8]。为探究现有自然保护地与区域重要生态空间的关系, 本研究根据生态源地、生态廊道与自然保护地之间的空间重叠关系, 对自然保护地进行了空间分类, 以实现更精准的分区管控。

富春江流域位于杭州市近郊的快速城市化地区, 面临着各类城市化问题, 同时也是生态涵养保护的重点区段, 具有重要的生态地位^[22]。本文以富春江流域为研究样本, 探究自然保护地与生态网络的空间关系, 并提出优化调控策略, 期为自然保护地及国土空间相关规划提供参考。

* 通信作者 (Author for correspondence) E-mail: 20010051@zafu.edu.cn

1 研究区域数据与来源

1.1 研究区域概况

富春江流域总面积3 829.15 km²，涉及余杭区、萧山区、西湖区、富阳区、临安区、桐庐县、建德市、浦江县、诸暨市9个区县。流域地势自西南向东北倾斜，以山地、丘陵为主。良好的自然环境为生物的生存和繁衍提供了优越的条件，但同时也面临着城市化带来的各种问题。富春江流域自然景观资源和名胜古迹众多，包括国家级森林公园、风景名胜区、省级森林公园、湿地公园等各级各类自然保护地18处，面积为751.88 km²，占研究区面积的19.64%(图1)。

1.2 数据来源

本研究所用数据详见表1。

2 研究方法

2.1 生态网络构建

2.1.1 生态系统服务重要性评估

1)产水量服务。

产水量是生态系统服务重要组成部分，对于保护区域生物多样性，维持生态系统平衡，增进人类福祉有重要意义。计算公式如下^[25]：

$$Y_i = \left(1 - \frac{AET_i}{P_i}\right) P_i$$

式中：*i*为栅格单元的年产水量；*P_i*为栅格单元的年降水量；*AET_i*为栅格单元的年实际蒸散量。

2)土壤保持服务。

土壤保持是重要的生态系统调节服务之一^[26]，计算公式如下：

$$A_{pot,i} = R_i K_i L S_i$$

$$A_{act,i} = R_i K_i L S_i C_i P_i$$

$$A_{con,i} = A_{pot,i} - A_{act,i} = R_i K_i L S_i (1 - C_i P_i)$$

式中：*A_{pot,i}*为土壤实际流失量；*A_{act,i}*为土壤潜在流失量；*A_{con,i}*为土壤年保持量；*R*为降雨侵蚀力因子；*K*为土壤侵蚀性因子；*C_i*为植被覆盖；*LS_i*为坡长坡度因子；*P_i*为影响土壤保持的人为措施因子。

3)碳固存服务。

在联合国《千年生态系统评估报告》中将碳固存服务列为重要的生态系统服务之一^[27]，计算公式如下：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$

式中：*C_{total}*为区域总碳固存量；*C_{above}*为地上生物量的碳固存量；*C_{below}*为地下生物量的碳固存

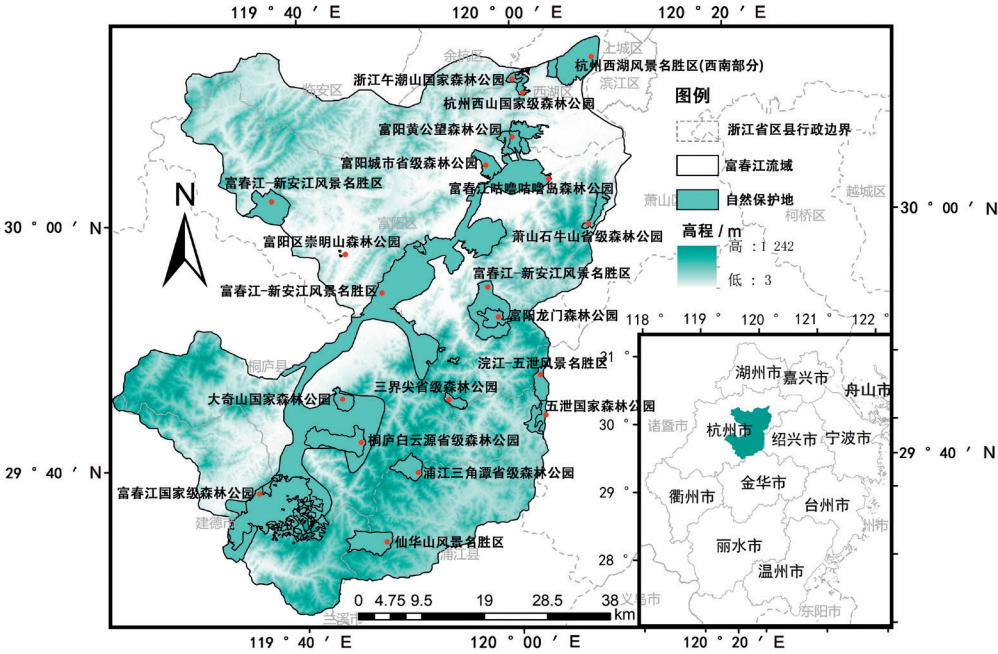


图1 研究区概况

量；*C_{soil}*为土壤有机质中的碳固存量；*C_{dead}*为死亡有机质中的碳固存量。

4)生境质量。

生境质量是重要的生态服务功能，也是评估生物多样性的关键指标^[28]。计算公式如下：

$$Q_{ij} = H_j \left(1 - \frac{D_{ij}^z}{D_{ij}^z + k^z}\right)$$

式中：*Q_{ij}*栅格*i*上土地覆被类型*j*的生境质量；*H_j*为类型*j*的生境适宜度；*D_{ij}*为栅格*i*、类型*j*受到的综合威胁水平；*k*为半饱和常数；*z*为尺度参数，取2.5。

5)文化服务。

文化服务有别于其他生态系统服务，因其“无形性”而具有不易量化的特征^[37]，在众多评估方法中，可达性分析法被认为具有一定合理性^[38-39]。

利用Python接入高德地图API接口，爬取研

究区游憩娱乐服务兴趣点，如湿地公园、文化遗产、植物园等，再基于交通网络可达性的时间成本分析法评估文化服务。可达性计算公式如下：

$$A_i = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d \frac{1}{T_{ij}}$$

式中：*A_i*为节点*i*的可达性；*j*为区域中的点；*T_{ij}*为区域中的节点*i*通过交通网络中通行时间最短的路线到达*j*的通行时间；*d*为点的个数。

2.1.2 基于MSPA的生态源地识别

MSPA(morphological spatial pattern analysis)是基于数学形态学对二值栅格图像进行分类的技术，利用膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等运算序列，分辨出核心区、孔隙、孤岛、环道、桥接、支线、边缘7种类型^[29-31]。本研究将生态系统服务综合评估高值区域作为前景，然后利用Guidos Toolbox软件提取核心区。

表1

数据类型				
数据类型	年份	分辨率/m	来源	用途
土地覆被	2020	30 × 30	中国科学院环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	研究底图
自然保护区数据	2021	矢量	浙江省林业局(http://lyj.zj.gov.cn/index.html)	
土壤数据	2020	30 × 30	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpd.ac.cn)	
气温、降水	2020	30 × 30	CUR数据集(https://sites.uea.ac.uk/cru)	
降雨侵蚀力	2020	30 × 30	根据参考文献[23]和月平均降水量计算	
生物物理表、威胁因子	—	—	来自文献[24]和InVEST用户指南	生态系统服务评估/阻力面构建
景点POI数据	2020	矢量	高德地图	
交通路网	2020	30 × 30	中国科学院成都山地灾害与环境研究所	
DEM数据	2020	30 × 30	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)	
NDVI	2020	30 × 30	中国气象科学数据网(http://data.cma.cn)	

本研究选择斑块重要性指数(dPC),用于衡量研究区生态源地的重要性,dPC值越高,表示该生态源地的结构越重要。因此,本文在MSPA提取核心区的基础上,借助Conefor 2.6软件进行生态斑块的重要性评估^[32-33],选取面积大于2 km²、dPC大于0.5的源地。计算公式如下:

$$PC = \frac{1}{A_L} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}$$

$$dPC_i = \frac{PC - PC_{(-i)}}{PC} \times 100\%$$

式中:PC为研究区内某个斑块的连通性概率;n为景观中生态斑块的总数;a_i和a_j为斑块i与斑块j的面积;p_{ij}为2个斑块i与斑块j之间物种扩展的最大概率;A_{L2}为研究区总面积;PC_(-i)为移除斑块i后的PC。

2.1.3 基于SPCA的生态阻力面构建

生态阻力面是指区域中能量流、物质流在空间中扩散时需要克服的障碍等值面。选择高程、坡度、土地覆被、NDVI、铁路、主干道、次干道7个指标作为阻力因子(表2),阻力因子选择与赋值根据实际并参考相关文献^[24]。

通过SPCA确定各阻力因子的权重,该方法结合了统计学和GIS空间分析,将主成分因子确权结果直观地呈现在二维空间中,且可避免信息冗余^[34]。计算公式如下:

$$E_i = \sum_{k=1}^m a_{ik} w_k$$

式中:E_i为栅格i的综合阻力值;a_{ik}为栅格i在第k个阻力因子上的标准化值/重分类阻力值;w_k为第k个因子权重;m为因子数。

2.1.4 基于电路理论的廊道提取与夹点识别

生态廊道能够将孤立的生态要素连通,是维持生态过程,促进物种交流的重要纽带^[35-36]。电路理论将整体景观视作导电面,将生态源地是视作节点,根据最小累积阻力值计算识别最佳生态廊道,并且得出具有宽度信息的潜在廊道。本研究利用linkage mapper工具提取生态廊道。参考廊道宽度对生物迁徙的影响^[37],将成本加权距离阈值设为3 000,此阈值下廊道平均宽度为1 200 m,拥有真正的内部生境,可创造自然化的景观结构。

生态夹点表示廊道中电流密度高值区域,是需重点保护的生态景观关键点^[16]。本研究利用pinchpoint模块识别生态夹点。

2.2 生态网络与自然保护地叠加分析法

利用ArcGIS软件的相交、擦除、交集取反等空

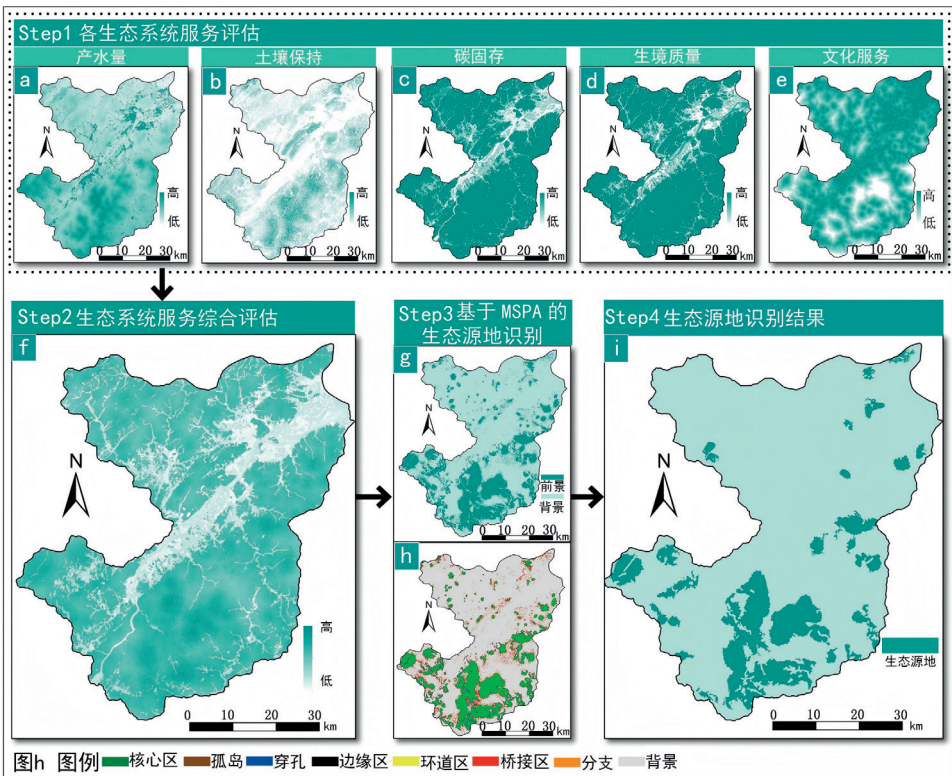


图2 生态系统服务重要性评估与生态源地识别结果

间工具,将生态网络与自然保护地进行叠加分析,并根据不同的空间关系对自然保护地进行分类。

3 研究结果

3.1 富春江流域生态网络构建

3.1.1 生态源地分布

如图3所示,通过各生态系统服务评估后,将其等权叠加得到生态系统服务综合评价(图2f)。通过MSPA提取生态核心区,并进行面积与连通性筛选,最终共识别生态源地25块(图2i),总面积为557.39 km²,约占富春江流域总面积的14.56%。

3.1.2 生态阻力面构建

通过SPCA对研究区7个阻力因子进行分析发现,前4个主成分的累积贡献率达到91.40%,表明其已足以表征研究区的阻力信息^[39]。因此,

本文选取前4个主成分的载荷作为衡量各阻力因子贡献程度的依据,通过平方和公式确定权重。最终,经加权计算后得到的综合阻力面。

3.1.3 生态廊道提取与生态节点识别

基于识别的生态源地,结合生态阻力面与电路理论,运用累积电阻作为成本加权距离表示廊道的宽度范围。共提取54条生态廊道(图3),总长度为684.55 km,总面积为632.80 km²。

通过pinchpoint模块识别高电流区域,综合分析出生态夹点114处(图3),共计8.61 km²,这些区域生物通过的概率较大,且周围分布着阻力较高的景观,是需要重点保护的区域。

3.2 富春江流域自然保护地空间优化

3.2.1 生态网络与自然保护地空间匹配关系

因富春江-新安江风景名胜(511.15 km²)

表2 阻力因子分类及赋值

阻力因子	阻力值				
	20	40	60	80	100
高程/m	< 100	100~300	300~600	600~900	≥900
坡度/°	< 5	5~15	15~25	25~35	≥35
土地覆被	林地	耕地	草地或未利用地	水域	建设用地
NDVI	≥0.7	0.5~0.7	0.3~0.5	0.1~0.3	< 0.1
距离铁路距离/m	≥3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	500~1 000	< 500
距离主干道距离/m	≥3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	500~1 000	< 500
距离次干道距离/m	≥1 200	900~1 200	600~900	300~600	< 300

与富春江国家级森林公园、大奇山国家森林公园、富阳区城市省级森林公园、桐庐白云源省级森林公园、富阳区黄公望森林公园、富阳区龙门森林公园6个森林公园有不同程度的重叠,故在空间对比时,将重叠部分删除,删除后的富春江-新安江风景名胜区面积为409.80 km²,自然保护地总面积为650.56 km²。

识别的生态源地与研究区自然保护地对比发现,重合的面积有173.86 km²,占现有自然保护地总面积的26.89%。如表4所示,在18个自然保护地中,有14个与生态源地有重叠区域。其中浦江三角潭省级森林公园被2号生态源地覆盖(图4-1),重叠部分占自然比最高,为99.53%,主要是由于该地域生态系统服务处于较高水平,生态环境良好;富春江-新安江风景名胜区与生态源地的重叠面积最大,为77.22 km²,但其重叠面积占比并不高,主要原因是该地区大部分处于富春江沿岸,是人类活动最活跃的地区,生态系统服务水平相对较低。富春江咕噜咕噜岛湿地公园、三界尖省级森林公园、富阳区贤明山森林公园、五泄国家森林公园4个自然保护地未处于生态源地之中,可能是由于其面积较小且连通性较低,而未被识别为生态源地。

将提取的生态廊道与自然保护地对比发现,重合面积有114.60 km²,占自然保护地总面积的17.62%。如表4所示,有11个自然保护地与生态廊道有不同程度的重叠,其中大部分自然保护地与生态廊道重叠的区域较少,为10%~30%,有4个在30%以上。其中富春江咕噜咕噜岛湿地公园、富阳区贤明山森林公园、三界尖省级森林公园,虽未被生态源地识别(图4-1),但与生态廊道的重叠占比处于较高水平,说明该地生态阻力较小,是生态系统中物质和能量交流的良好通道。

未与现有自然保护地重叠的生态源地有383.53 km²,这些区域主要分布在南部地区。如图4-1所示,3、5、7、8、9、12、14、15、16、21号生态源地独立于现有自然保护地。

3.2.2 自然保护地空间体系优化

本研究综合考虑生态网络与自然保护地的空间关系,将自然保护地划分为严格保护区、生态修复区和潜在保护区3类(图4-2)。

1)划分严格保护区。生态源地是自然保护价值较高且面积较大的自然地理空间实体;生态廊道是促进物种、信息和能量在生态源地间流动的

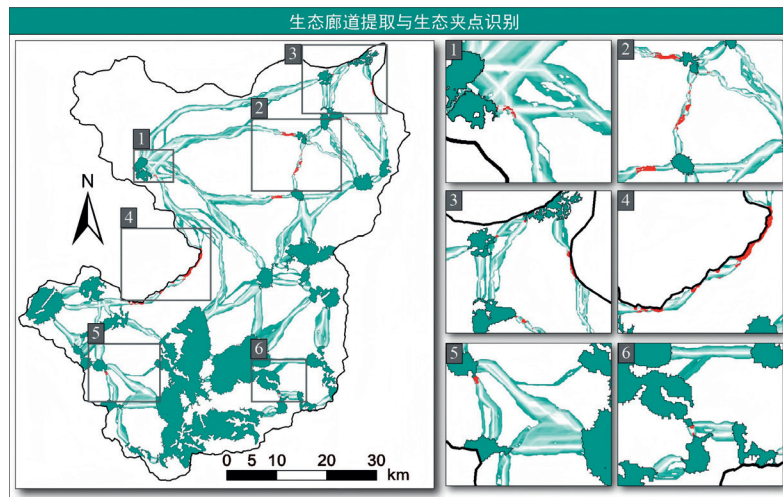


图3 生态廊道提取与生态节点识别

重要通道。因此,将源地和廊道与自然保护地重叠的区域设定为严格保护区,如表4、图4-2所示,对16个自然保护地约280 km²的区域纳入严格保护区,对其采取严格的生态保护措施。

2)划分生态修复区。在现有自然保护地空间中,约有57%的面积未被生态网络识别,可能是该地区已遭受破坏,导致生态系统服务水平不高,亟须自然恢复和生态修复。如表5、图4-2所示,将18个自然保护地,约370 km²的空间纳入生态修复区,对其采取近自然、适当的人工措施进行生态保育。

3)划分潜在保护区。在研究区识别的生态源地中,存在383.53 km²的生态源地(图4-2),并未纳入现有的自然保护地空间中,而该地的综合生态系统服务水平较高,具有较高的生态潜力,可纳入自然保护地保护空间中的潜在保护区。此外,有3.2 km²的生态节点位于现有保护空间之外,也可纳入其中,以提高区域整体生态水平。

4 讨论

4.1 基于生态网络构建优化自然保护地的优势

生态网络是提升生物多样性和区域生态系统稳定性的重要基础。本研究通过多元生态系统服务综合评估识别生态源地的方法,识别的源地约占研究区面积的14.56%。与同类研究相比,如刘秀萍等^[40]以北京大兴区为例,直接采用草地、林地、水域作为识别生态源的基础,识别的源地占比为33.73%,高于本研究。究其原因,可能是直接采用生态空间的方法虽然简便,但一定程度上忽视了斑块内部异质性^[41],而本研究识别出更为综合的生态用地,结果更为契合自然保护地

的自然与功能属性,可作为自然保护地的重要补充。此外,本研究运用电路理论识别出生态廊道54条,总长度为684 km,总面积为632.80 km²,相较于基于MCR方式^[18]提取仅有路径的生态廊道而言,本研究提取了具有宽度信息的生态廊道,更具保护与建设的实际意义。

《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》(以下简称《意见》)出台,对识别自然保护地保护空缺、调整保护范围、解决区域交叉及空间重叠问题提出了更高要求^[42]。本研究通过构建生态网络,将其叠加现有自然保护地,识别出重叠区域279.77 km²、未重叠区域383.53 km²,说明现有自然保护地存在保护空缺,需要优化。这一结果在同类研究中得到验证,如姜苒孜等^[43]通过生态系统服务评估与生态敏感性评价识别出威海市自然保护地存在保护空缺。与基于识别斑块^[43-44]的方法相比,本研究在识别斑块的基础上,添加生态廊道、生态节点形成生态网络,更具区域生态整体性。

当前,较多的研究关注到生态网络的属性评价,如用地比例和布局、连接度^[45]、结构^[46]等。因此,也可借鉴生态网络评价的方法,将其引入到自然保护地保护优化中,为自然保护地体系优化提供新思路新方法。

4.2 自然保护地分区管控建议

《意见》提出保护自然、服务人民、永续发展作为自然保护地体系建设的三大目标,应平衡好发展与保护的关系^[42]。针对上述自然保护地的空间分类,本文提出不同的管控建议,以供探讨。

严格保护区是生态网络与现有自然保护地的交集区域,从空间分布来看,大多位于各自然保

护地的中心区域，自然生态环境质量和生态系统服务水平高。因此，可采取严格控制人类活动的措施，如严禁开发建设、严格控制人员进入等；也可在严格保护区周围设置生态缓冲区，降低外界干扰，保护区域自然演替生态过程的稳定；对生态夹点区域进行重点保护，加强林网建设、河道综合治理、森林保育等。

生态修复区处于未被生态网络识别的现有自然保护地中。该区域从空间分布来看主要处于近城镇建设的乡村郊野地区，人为干扰较大，农田与低海拔山林是主要用地类型。可采取弹性发展的生态修复策略^[38]，限制开发力度、制定恢复生态系统的保护措施。应管控城镇扩张的边界，开展农业空间综合整治与修复，打造“三生”乡村空间；其次，坚持自然恢复与人工修复相结合的原则，利用流域中的水系统，串联“山、林、田”等要素；最后，为平衡经济发展，可适当开展生态农文旅等活动。

潜在保护区是未纳入现有自然保护地的生态源地与生态夹点。主要分布在流域南部远离城镇建设的区域，该地山林密集，自然生态环境质量高。《意见》提出需制定自然保护地整合优化办法和归并优化相邻自然保护地的要求。因此，建议将位于现有自然保护地周围的潜在保护地作为候补保护地，如浦江三角潭省级森林公园周围的潜在保护地；位于2个以上现有自然保护地之间的潜在保护地，可以将自然保护地合并，进而统一保护管理，

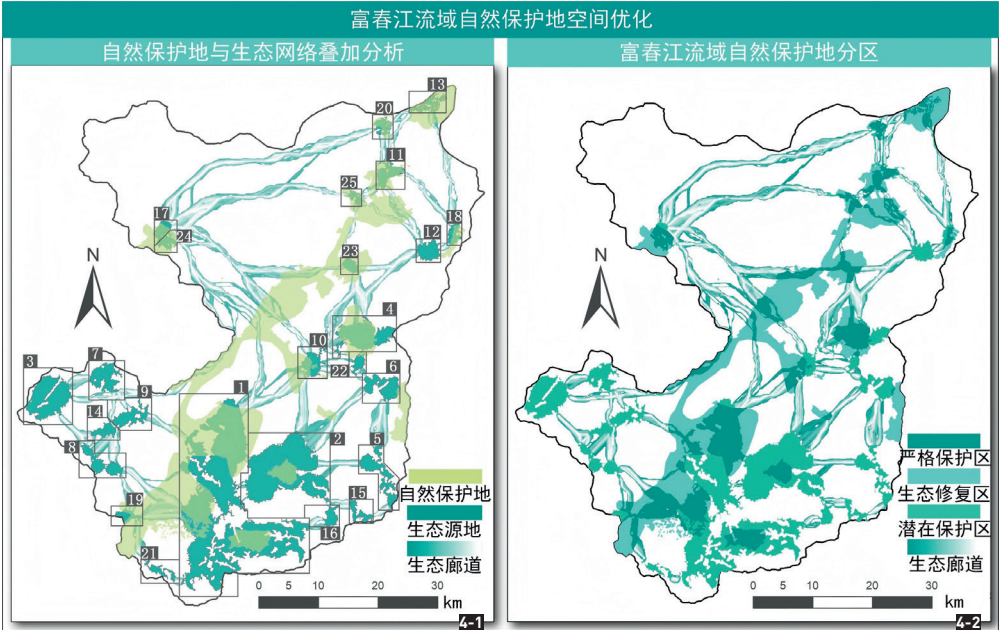


图4 富春江流域自然保护地空间优化

如大奇山国家森林公园、桐庐白云源省级森林公园、富春江国家森林公园、仙华山风景名胜区可以通过潜在保护地合并。独立于自然保护地的潜在保护地可划分为新的自然保护地。生态夹点可设为踏脚石，以提升整体生态系统的有效运转^[46]。

4.3 不足与展望

本文以富春江流域为例，基于生态网络为自然保护地空间优化提供新思路，但仍有不足。1)本文基于生态系统服务综合评估的方式识别生态源地，该方法在针对自然保护地特殊

性方面缺乏一定考量，如评估具有较高文化价值的风景名胜区及识别濒危物种的重点保护区。2)在生态系统服务评估方面，本文采用了等权叠加，未来的研究应进一步结合层次分析法和空间主成分分析等方法，更客观地确定权重，从而提升评估的科学性。3)富春江流域是快速城市化地区，区域经济社会发展需求较大，而本文在自然保护地空间优化中，对平衡经济社会发展的考虑仍有不足，在未来的研究中应充分协调经济、生态、社会发展的各方利益。

表3 自然保护地与生态廊道叠加对比

自然保护地	生态源地	保护地面积/km ²	源地重叠面积/km ²	源地重叠占比/%	廊道重叠面积/km ²	廊道重叠占比/%	生态网络占比/%
富春江-新安江风景名胜区	1、4、10、11、17、19、22、23、24	409.80	77.22	18.84	75.53	18.43	37.28
杭州西山国家森林公园	11、13、20	15.78	7.99	50.66	2.23	14.16	64.82
富阳区黄公望森林公园	11	4.71	2.93	62.18	0.65	13.72	75.90
大奇山国家森林公园	1	7.01	6.08	86.70	—	—	86.70
桐庐白云源省级森林公园	1	23.03	18.21	79.05	—	—	79.05
仙华山风景名胜区	1	18.20	17.05	93.66	—	—	93.66
富阳区龙门森林公园	4、10	10.49	8.18	78.00	1.45	13.78	91.78
杭州西湖风景名胜区	13	30.39	5.40	17.78	3.08	10.13	27.91
富春江国家森林公园	1、19	73.24	12.44	16.99	26.44	36.10	53.09
浦江三角潭省级森林公园	2	11.09	11.04	99.53	—	—	99.53
浣江-五泄风景名胜区	6	18.24	0.47	2.58	—	—	2.58
萧山石牛山省级森林公园	18	7.08	2.79	39.42	0.15	2.06	41.48
浙江午潮山国家森林公园	20	2.27	1.49	65.63	—	—	65.63
富阳区城市省级森林公园	25	9.59	2.58	26.91	3.34	34.80	61.71
富春江咕噜咕噜湿地公园	—	0.90	—	—	0.46	51.01	51.01
富阳区贤明森林公园	—	0.13	—	—	0.04	30.74	30.74
三界尖省级森林公园	—	4.46	—	—	1.24	27.87	27.87
五泄国家森林公园	—	4.10	—	—	—	—	—

5 结束语

本研究通过构建生态网络并分析其与自然保护区的空间匹配性，提出了自然保护区地分类型优化的全新视角，旨在提升区域生态系统的连通性和整体稳定性，缓解当前自然保护区面临的破碎化和孤岛化问题，增强了生态空间的完整性。研究框架具有广泛的应用潜力，除了可为自然保护区体系构建和优化提供参考，也可为国土空间规划中的“一张图”提供科学支撑。

注：文中图片均由作者绘制。

参考文献：

[1] 中共中央办公厅，国务院办公厅.关于建立以国家公园为主体的自然保护区体系的指导意见[EB/OL]. (2019-06-26)[2024-05-28].https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635405.htm.
General Office of the Central Committee of the Communist Party of China, General Office of the State Council. Guiding Opinions on Establishing a Nature Reserve System with National Parks as the Mainstay[EB/OL]. (2019-06-26)[2024-05-28]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635405.htm.

[2] 蔡晓梅，苏杨，吴必虎，等.生态文明建设背景下中国自然保护区发展的理论思考与创新实践[J].自然资源学报，2023，38(4)：839-861.
CAI X M, SU Y, WU B H, et al. Theoretical debates and innovative practices of the development of China's nature protected area under the background of ecological civilization construction[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(4): 839-861.

[3] 王昌海，谢梦玲.以国家公园为主体的自然保护区治理：历程、挑战以及体系优化[J].中国农村经济，2023(5)：139-162.
WANG C H, XIE M L. Governance of Nature Reserves with National Parks as the Main Body: History, Challenges, and Systemic Optimization[J]. Chinese Rural Economy, 2023(5): 139-162.

[4] 杨锐，曹越.论中国自然保护区的远景规模[J].中国园林，2018，34(7)：5-12.
YANG R, CAO Y. Discussion on the Long-term Target of Protected Area Coverage in China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(7): 5-12.

[5] 范琳，刘楠，赵力，等.荒漠类型自然保护区空间布局及区划[J].中国水土保持科学，2023，21(6)：80-92.
FAN L, LIU N, ZHAO L, et al. Spatial layout and regionalization of desert nature reserves[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(6): 80-92.

[6] JIAKE S, YUNCAI W. Landscape ecological network planning: ecological spaces system building from spatial structural priority to

表4 严格保护区与生态修复区

自然保护区	严格保护区/km ²	严格保护区占比/%	生态修复区/km ²	生态修复区占比/%
浙江午潮山国家森林公园	1.49	65.72	0.78	34.41
杭州西山国家级森林公园	9.40	59.58	6.41	40.60
杭州西湖风景名胜	8.40	27.62	22.00	72.39
萧山石牛山省级森林公园	2.92	41.18	4.17	58.88
富春江咕噜咕噜湿地公园	0.46	50.96	0.44	48.94
富春江-新安江国家级风景名胜	147.17	35.91	262.64	64.09
富阳区贤明山森林公园	0.04	30.74	0.09	69.26
富阳区城市省级森林公园	5.47	57.02	4.13	43.03
富阳区龙门森林公园	9.07	86.46	1.42	13.55
富阳区黄公望森林公园	2.93	62.12	1.31	27.89
大奇山国家森林公园	6.08	86.66	0.93	13.29
桐庐白云源省级森林公园	18.21	79.07	4.82	20.95
富春江国家森林公园	38.35	52.37	34.88	47.63
浣江-五泄风景名胜	0.47	2.60	17.77	97.41
三界尖省级森林公园	1.24	27.90	3.22	72.20
五泄国家森林公园	0.00	0.00	4.10	100.00
仙华山风景名胜	17.05	93.68	1.15	6.34
浦江三角潭省级森林公园	11.04	99.52	0.05	0.47

ecosystem services improvement[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(10): 37-42.

[7] 苑竟达，高瞳曦，刘楠，等.面向区域自然保护区整合优化的风景特质评价：以青海省湟水谷地为例[J].风景园林，2022，29(1)：88-94.
YUAN J D, GAO T X, LIU N, et al. Landscape Character Assessment for the Integration and Optimization of Regional Protected Areas: A Case Study of the Huangshui Valley in Qinghai Province[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(1): 88-94.

[8] 赵智聪，王沛.中国自然保护区连通性的重要意义与关键议题[J].风景园林，2022，29(7)：12-17.
ZHAO Z C, WANG P. Significance and Key Issues of Protected Area Connectivity in China[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(7): 12-17.

[9] 汪再祥.自然保护区地法体系的展开：迈向生态网络[J].暨南学报(哲学社会科学版)，2020，42(10)：54-66.
WANG Z X. Expansion of the law system for nature reserves: Towards an ecological network[J]. Jinan Journal (Philosophy and Social Sciences), 2020, 42(10): 54-66.

[10] LOOKINGBILL T R, GARDNER R H, FERRARI J R, et al. Combining a dispersal model with network theory to assess habitat connectivity[J]. Ecological Applications, 2010, 20(2): 427-441.

[11] 张晓琳，金晓斌，韩博，等.长江下游平原区生态网络识别与优化：以常州市金坛区为例[J].生态学报，2021，41(9)：3449-3461.
ZHANG X L, JIN X B, HAN B, et al. Identification and optimization of ecological network in the plain area of the lower Yangtze River: A case study of Jintan District, Changzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3449-3461.

[12] NIEMELÄ J, SAARELA S R, SÖDERMAN T, et al. Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study[J]. Biodiversity and Conservation, 2010, 19: 3225-3243.

[13] NEWTON A C, HODDER K, CANTARELLO E, et al. Cost - benefit analysis of ecological networks assessed through spatial analysis of ecosystem services[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(3): 571-80.

[14] TENG M, WU C, ZHOU Z, et al. Multipurpose greenway planning for changing cities: A framework integrating priorities and a least-cost path model[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(1): 1-14.

[15] ZUO Q, ZHOU Y, LIU J. 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.

[16] 李权奎，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.
LI Q Q, JIN X B, ZHANG X L, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1461-1473.

[17] 张利，何玲，闫丰，等.基于图论的两栖类生物栖息地网络规划：以黑斑侧褶蛙为例[J].应用生态学报，2021，32(3)：1054-1060.
ZHANG L, HE L, YAN F, et al. Amphibian habitat network planning based on the graph theory: A case study of Pelophylax nigromaculata[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1054-1060.

[18] WANG S, WU M, HU M, et al. Promoting landscape connectivity of highly urbanized area: An ecological network approach[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107487.

[19] 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.

[20] HUANG J, HU Y, ZHENG F. Research on

- recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: A case study of Jinan City[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 12414–12427.
- [21] ZOU T, YOSHINO K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 78: 405–415.
- [22] 聂文彬, 裴辉, 庞利伟, 等. 区域蓝绿空间时空演变及驱动力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(11): 2266–2276.
- NIE W B, PEI H, PANG L W, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Force of Regional Blue-Green Spaces[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(11): 2266–2276.
- [23] 贾路, 于坤堃, 李占斌, 等. 长江经济带降雨侵蚀力与NDVI耦合协调关系时空变异分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 102–114.
- JIA L, YU K X, LI Z B, et al. Spatial-temporal variability analysis of the coupling coordination relationship between rainfall erosivity and NDVI in the Yangtze River Economic Belt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(4): 102–114.
- [24] NIE W, SHI Y, SIAW M J, et al. Constructing and optimizing ecological network at county and town Scale: The case of Anji County, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108294.
- [25] LI M, LIANG D, XIA J, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112212.
- [26] RAO E, OUYANG Z, YU X, et al. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China[J]. Geomorphology, 2014, 207: 64–70.
- [27] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington, D.C.: Island Press, 2005: 1–160.
- [28] WEBER D, SCHAEPMAN-STRUB G, ECKER K. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using Landsat NDVI phenology[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 447–60.
- [29] 陈泓宇, 李雄. 基于MSPA-InVEST模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化[J]. 风景园林, 2021, 28(2): 16–21.
- CHEN H Y, LI X. Optimization of Green Space Habitat Network of Central Beijing Based on MSPA-InVEST Model[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(2): 16–21.
- [30] 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[J]. 中国园林, 2017, 33(5): 68–73.
- WANG Y, LIN Q. The Transformation of Planning Ideas and the Exploration of Planning Methods of Urban Green Space Ecological Network Based on MSPA[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(5): 68–73.
- [31] WANG Y, QU Z, ZHONG Q, et al. Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109258.
- [32] WEI Q, HALIKE A, YAO K, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108857.
- [33] HU C, WANG Z, WANG Y, et al. Combining MSPA-MCR Model to Evaluate the Ecological Network in Wuhan, China[J]. Land, 2022, 11(2): 213.
- [34] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036–1045.
- LI H H, MA T H, WANG K, et al. Construction of Ecological Security Pattern in Northern Peixian Based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1036–1045.
- [35] 陈南南, 康师直, 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.
- [36] 樊柏青, 成玉宁. 乡村生态景观识别与生境网络优化: 以南京市江宁区为例[J]. 风景园林, 2023, 30(4): 27–33.
- FAN B Q, CHENG Y N. Rural Ecological Landscape Identification and Habitat Network Optimization: A Case Study of Jiangning District, Nanjing[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(4): 27–33.
- [37] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406–2412.
- ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of the ecological corridor in landscape planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(9): 2406–2412.
- [38] 聂文彬, 史琰, 杨凡, 等. 基于综合生态安全格局的山地景观韧性体系构建研究: 以浙江莫干山为例[J]. 中国园林, 2022, 38(2): 127–132.
- NIE W B, SHI Y, YANG F, et al. Study on the Construction of Mountain Landscape Resilience System Based on Comprehensive Ecological Security Pattern: A Case Study of Mogan Mountain in Zhejiang Province[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(2): 127–132.
- [39] ZHANG C, JIA C, GAO H, et al. Ecological security pattern construction in hilly areas based on SPCA and MCR: A case study of Nanchong City, China[J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11368.
- [40] 刘秀萍, 李新宇, 李延明, 等. 快速城市化地区生态网络构建与优化: 以北京市大兴区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8321–8331.
- LIU X P, LI X Y, LI Y M, et al. Construction and Optimization of Ecological Network in Rapidly Urbanized Area: A Case Study of Daxing District, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8321–8331.
- [41] SU X, SHEN Y, XIAO Y, et al. Identifying ecological security patterns based on ecosystem services is a significant practice for sustainable development in southwest China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 9: 810204.
- [42] 李晓肃, 邓武功, 李泽, 等. 自然保护区整合优化: 思路、应对与探讨[J]. 中国园林, 2020, 36(11): 25–28.
- LI X S, DENG W G, LI Z, et al. Integration and Optimization of Protected Areas: Thinking, Responses and Discussion[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(11): 25–28.
- [43] 姜芊孜, 刘娜, 赵怡康, 等. 基于生态评价的威海市自然保护地保护空缺识别与优化[J]. 园林, 2023, 40(6): 99–107.
- JIANG Q Z, LIU N, ZHAO Y K, et al. Identification and Optimization of Natural Reserve Vacancies in Weihai City Based on Ecological Assessment[J]. Landscape Architecture, 2023, 40(6): 99–107.
- [44] 李海韵, 王洁, 燕翊翔, 等. 基于人为干扰评价的东莞市自然保护地空间优化[J]. 风景园林, 2022, 29(8): 102–107.
- LI H Y, WANG J, YAN H X, et al. Spatial Optimization of Protected Areas in Dongguan City Based on Human Disturbance Evaluation[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(8): 102–107.
- [45] 王海珍, 张利权. 基于GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144–152.
- WANG H Z, ZHANG L Q. A GIS, Landscape Pattern and Network Analysis Based Planning of Ecological Networks for Xiamen Island[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1): 144–152.
- [46] 袁少雄, 宫清华, 陈军, 等. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 431–440.
- YUAN S X, GONG Q H, CHEN J, et al. Evaluation of an Ecological Network of Nature Reserves in Guangdong Province, and Suggestions for Ecological Restoration[J]. Tropical Geography, 2021, 41(2): 431–440.

(编辑/张婷)

作者简介:

聂文彬

1991年生/男/安徽铜陵人/浙江农林大学风景园林与建筑学院讲师, 硕士生导师/研究方向为风景园林规划与设计(杭州 311300)

范成傲

1996年生/男/浙江嘉兴人/浙江农林大学风景园林与建筑学院在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计(杭州 311300)

林 锦

2001年生/男/安徽铜陵人/浙江农林大学风景园林与建筑学院在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计(杭州 311300)

吴以伦

2001年生/男/湖南郴州人/浙江农林大学风景园林与建筑学院在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计(杭州 311300)

徐 斌

1977年生/男/浙江杭州人/浙江农林大学风景园林与建筑学院教授, 博士生导师/研究方向为风景园林规划与设计(杭州 311300)

The Spatial Optimization of Natural Protected Areas of the Fuchun River Basin Based on Ecological Network Construction

NIE Wenbin, FAN Chengao, LIN Jin, WU Yilun, XU Bin*

Abstract: The construction of the natural protected area (NPA) system is a fundamental component of China's ecological civilization initiative, yet the spatial alignment between existing NPAs and regional key ecological spaces remains poorly defined, leading to exacerbated habitat isolation and landscape fragmentation. This study focuses on the Fuchun River Basin, a region covering 3,829.15 km² and spanning nine districts - including Yuhang, Xiaoshan, and Fuyang - characterized by significant ecological value and rapid urbanization. Facing the challenges of increasingly fragmented ecological land and intense human-land contradictions, this research aims to identify protection gaps and optimize the spatial configuration of NPAs by constructing a comprehensive regional ecological network. The study integrates diverse quantitative methods to ensure scientific rigor: the InVEST model was first employed to evaluate four key ecosystem services, specifically water yield, soil conservation, carbon sequestration, and habitat quality. Simultaneously, cultural services were quantified through a Python-based accessibility analysis of recreation points using Gaode Map API data to account for the "intangible" value of the landscape. Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) was subsequently applied to identify core landscape patches, and 25 ecological sources totaling 557.39 km² (representing 14.56% of the basin) were selected based on a patch importance index (dPC) threshold of greater than 0.5. To develop a scientific resistance surface, Spatial Principal Component Analysis (SPCA) was utilized to determine the weights of seven resistance factors - including elevation, slope, land cover, NDVI, and proximity to railways and roads - effectively eliminating data redundancy and avoiding the subjectivity of manual weighting. Utilizing circuit theory and the linkage mapper tool, the study extracted 54 ecological

corridors with a total length of 684.55 km and a combined area of 632.80 km². Furthermore, the research identified 114 critical ecological pinch points covering 8.61 km², which represent high-current density areas indispensable for maintaining regional connectivity and species flow. Spatial overlay analysis revealed significant mismatches between current conservation efforts and ecological needs: within the 650.56 km² of existing NPAs, only 173.86 km² (26.89%) overlapped with identified ecological sources, and 114.60 km² (17.62%) coincided with ecological corridors. Notably, ten key ecological sources were found to be entirely independent of the current NPA system, highlighting major protection gaps. Based on these findings, a three-tier spatial optimization framework is proposed: first, the designation of Strict Protection Zones (280 km²) at the intersection of the ecological network and existing NPAs, where human interference is strictly prohibited and buffer zones are established to maintain stable natural succession; second, the identification of Ecological Restoration Zones (370 km²) in areas where ecosystem services are degraded, requiring near-natural restoration, agricultural remediation, and restricted development; and third, the delimitation of Potential Protection Zones (386.73 km²) to incorporate high-value sources and pinch points currently lacking protection by merging adjacent areas or establishing "stepping stones" for migrating species. This study adopts a systemic ecological network perspective to provide scientific evidence and categorized management suggestions for NPA integration under the "One Map" territorial planning framework, offering profound practical guidance for enhancing regional ecological stability.

Keywords: landscape architecture; ecological network; Fuchun River basin; natural protected area; spatial optimization

Biography

NIE Wenbin, male, born in 1991 in Tongling, Anhui Province, Lecturer of the College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Master's Supervisor, research area: landscape architecture planning and design (Hangzhou 311300)

FAN Chengao, male, born in 1996 in Jiaxing, Zhejiang Province, Master's student of the College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, research area: landscape architecture planning and design (Hangzhou 311300)

LIN Jin, male, born in 2001 in Tongling, Anhui Province, Master's student of the College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, research area: landscape architecture planning and design (Hangzhou 311300)

WU Yilun, male, born in 2001 in Chenzhou, Hunan Province, Master's student of the College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, research area: landscape architecture planning and design (Hangzhou 311300)

XU Bin, male, born in 1977 in Hangzhou, Zhejiang Province, Professor of the College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Doctoral Supervisor, research area: landscape architecture planning and design (Hangzhou 311300)