

引用格式: 刘晓阳, 魏铭, 曾坚, 等. 闽三角城市群生态网络分析与构建[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 357-367. [Liu X Y, Wei M, Zeng J, et al. Ecological network analysis and construction: A case study of the urban agglomeration of the Min River Delta, China [J]. Resources Science, 2021, 43(2): 357-367.] DOI: 10.18402/resci.2021.02.13

闽三角城市群生态网络分析与构建

刘晓阳^{1,3}, 魏 铭², 曾 坚³, 张 森³

(1. 武汉大学城市设计学院, 武汉 430070; 2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 天津大学建筑学院, 天津 300072)

摘要:快速城镇化进程导致区域生境斑块日益破碎化和孤岛化, 科学构建生态网络是有效连接生境斑块的重要手段, 对保障区域生物多样性和生态安全具有关键意义。以闽三角城市群为研究对象, 依照“生态源地识别—阻力面设置—潜在廊道模拟”模式, 根据生物栖息地适宜性评价识别生态源地, 采用夜间灯光数据修正传统土地覆被赋值确定生态阻力面, 基于最小累积阻力模型模拟潜在生态廊道。在此基础上, 结合潜力模型进行廊道重要性评价, 通过计算网络连通性指数和经济成本比确定廊道提取的合理阈值, 提出生态与经济并重型生态网络构建方案。研究表明: ①识别的生态源地共计45处, 总面积约为3542 km²; 模拟的潜在生态廊道共计990条, 总长度约为5941 km。②源地及廊道的分布均呈现出显著的空间分异, 研究区西北部山区丘陵地带的德化县、安溪县、南靖县等分布较为密集, 而东南沿海建成区几乎没有分布。③0.73分位数所对应的网络连通性指数成本比达到最高值, 此方案下提取的268条潜在廊道可有效连通45处生态源地。研究结果从生态保护与经济发展兼顾视角合理构建区域生态网络体系, 可为闽三角城市群生态网络的建设优化提供科学依据。

关键词:生态源地; 最小累积阻力模型; 生态廊道; 生态网络; 网络连通性指数; 闽三角城市群

DOI: 10.18402/resci.2021.02.13

1 引言

随着中国城镇化的快速推进和人类活动干扰的不断加剧, 区域生境破碎化现象日趋严峻, 造成生态系统服务功能降低、物种迁移困难及生存几率降低等难以逆转的后果^[1,2]。大量研究表明, 在生物栖息地等自然资源被不断蚕食的现实背景下, 构建生态网络是缓解生境破碎化对生物保护产生负面影响的有效手段之一, 通过构建生态廊道增加生境斑块的连接性, 可维持生态系统的稳定性, 保障区域生态安全^[3]。

生态网络是由各类生物栖息地、生态廊道以及节点组成的可以保证区域物质循环、能量交换以及信息流通的复合型网络, 其概念起源于生物保护领域, 最早可追溯到20世纪90年代, 经过近30年的发

展实践, 现已被学界广泛认可。国际上, 生态网络的发展经历了由关注生态环境到涵盖生态、经济、社会、人文等多层次多目标的网络构建过程, 从最初关注城市美学的欧洲景观林荫大道, 到早期抑制城市扩张、保护生物多样性的欧洲绿带、美国公园路, 再到改善生态环境与保护文化资源的美国绿道, 再到如今多目标多层次的绿地生态网络实践, 形成了较为成熟的规划操作模式。即基于区域生境评价、生物多样性保护等目标, 通过可达性评价、连通性评价、适宜性评价等方法选取生态节点和廊道, 形成生态网络方案并进行最优方案研判^[3-6]。相对而言, 中国生态网络研究起步较晚, 当前主要处于关注廊道连接的初级阶段, 目前基于“廊道—斑块—基质”理论的“生态源地识别—阻力面设置—潜

收稿日期: 2020-02-14; 修订日期: 2020-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502903); 中国博士后科学基金项目(2018M640235)。

作者简介: 刘晓阳, 女, 山东菏泽人, 副研究员, 研究方向为城乡生态规划与设计。Email: lxyquiet@163.com

通讯作者: 曾坚, 男, 广东梅州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡生态规划与韧性防灾。Email: 13602058416@vip.163.com

在廊道模拟”已成为中国生态空间规划的基本思路^[7]。生态源地选取上,现有研究多根据斑块自然功能属性,基于面积、生物多样性丰富度等进行直接识别,这种方法较主观且忽略了局部地区生态退化的现实情况^[8];阻力面设置上,已有研究大多基于土地覆被类型根据专家经验直接赋值,但这种方法忽略了相同地类的内部空间分异,近年来已有学者尝试引入空间数据,对基于土地覆被类型赋值的生态阻力系数进行修正^[9];潜在廊道模拟上,最小累积阻力模型(Minimal Cumulative Resistance, MCR),因其能较好模拟景观格局与空间运动之间的相互作用关系、科学合理判断潜在廊道而被广泛运用^[10-12]。值得注意的是,对潜在廊道进行重要性评价,还需结合空间相互作用模型、图谱理论、网络评价指数等进行定量分析,从而对后续生态网络框架规划提供科学依据^[13],但现有研究在确定廊道提取阈值时,多基于主观判断,缺乏具体的数据分析。综上,研究如何科学客观地识别生态源地,采用空间数据修正阻力面,以及在综合考虑网络连通性与建设成本下,合理确定廊道提取阈值,对于准确高效构建区域生态网络具有一定理论及现实意义。

处于快速城镇化与就地工业化等多重胁迫下的闽三角城市群,长期面临着经济发展与资源环境难以协调的压力,作为国家生态文明试验区(福建)核心区,由于其地理区位、开发强度等造成的空间开发需求与资源环境本底空间上不匹配的问题日益突出,城镇用地快速扩张,区域生态格局趋向破碎化和孤岛化。因此,研究以闽三角城市群为例,基于生物栖息地适宜性评价识别生态源地,利用夜间灯光数据修正基于地表覆被赋值的生态阻力面;在此基础上,运用最小累积阻力模型模拟潜在生态廊道,结合潜力模型和网络连通性评价指数对廊道重要性进行定量分析,并结合网络建设成本探索合理阈值,提出最优化生态网络构建方案。研究结果可为闽三角城市群生态网络建设及相关区域规划提供科学依据。本文尝试从生态资源保护和社会经济发展的协调共生视角,为构建生态与经济并重生态网络系统提供理论和实践参考,以达到区域可持续发展的终极目标。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

闽三角城市群(23°33'20"N—25°56'45"N, 116°

53'21"E—119°01'38"E)位于中国福建东南沿海,包括厦门、泉州与漳州市(本文研究区未包含泉州市金门县)。该区域位于亚热带季风气候区,地形以低山丘陵为主,地势从西北向东南降低。研究区生态环境质量较好,水系发达,分布有九龙江、晋江等流域;区内森林覆盖率约60%,地带植被是常绿阔叶林,拥有戴云山自然保护区、清源山风景名胜區、莲花国家森林公园等省级以上自然保护区、森林公园等50余处(图1)。截至2018年底,研究区总面积约2.53万km²,常住人口达1795万人,地区生产总值GDP达17207.02亿元,分别占福建省总面积的21%,总人口的46%,GDP的48%左右,是改革开放后经济较发达区域之一。但近年来区域开发建设的大力推进,导致生态系统服务功能受损、土地资源供需矛盾激增等问题凸显,区域的生物多样性保护以及生态安全受到极大威胁。

2.2 数据来源

研究采用的主要数据包括:①研究区2018年分辨率为30 m的土地利用现状数据,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);②分辨率为30 m的ASTERGDEM数字高程数据,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);③分辨率为30 m的NDVI数据,通过2015年Landsat8遥感影像反演计算获取,来自美国国家地质勘探局USGS网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>);④分辨率为100 m的珞珈一号遥感卫星夜间灯光数据,来自高分辨率对地观测系统湖北数据与应用网(<http://www.hbeos.org.cn/>);⑤交通干道(包括铁路、高速公路、国道、省道、县道等)数据,来自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/>);⑥自然保护区、风景名胜区等空间数据,基于百度、高德地图通过Python语言编写网络爬虫获取。

3 研究方法

3.1 基于栖息地适宜性评价的生态源地识别

源地是为物种提供栖息与繁衍环境、促进物种迁徙扩散的高生境价值的资源斑块,它既是生物多样性的重要保障空间,也是生态网络构建的重要节点,本文采用栖息地适宜性评价,识别物种生存繁衍交流的关键源空间^[14,15]。在前人研究基础上^[16-18],选取了7个与栖息地适宜性相关的评价因子建立评价体系,根据研究区的生境特点和物种的生活习

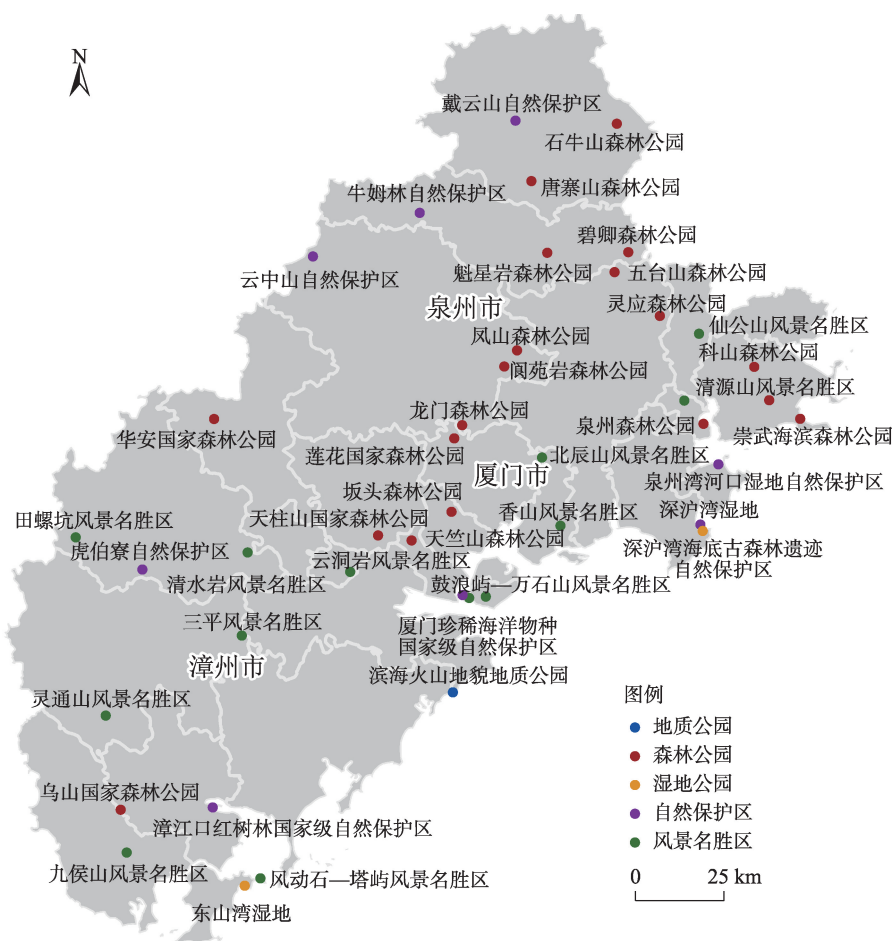


图1 闽三角城市群生态资源分布示意图

Figure 1 Ecological resources of the urban agglomeration of the Min River Delta

性^[19,20]:首先,对各个指标进行合理的分级划分调整,并进行标准化赋值1、3、5、7、9,分别对应不适宜、低适宜、中适宜、高适宜和极高适宜区5个等级;然后,采用主客观综合赋权法^[21]获取各指标的权重赋值(表1),获取生物栖息地适宜性评价图,选取极高和高适宜区为生态源地的初步备选区。根据岛屿生物地理理论与集合种群理论,源地斑块面积越大、质量越好、位置越邻近,对物种迁徙和生物多样性保护越有利^[22],故去除面积较小且较破碎化的斑块,合并面积小且分布集中的相邻斑块,然后根据区域地理特征和斑块分布,按照10 km²为阈值获取最终的核心生态源地。

3.2 基于最小累积阻力模型的生态廊道模拟

最小累积阻力模型被广泛应用于生物多样性保护和景观格局分析等领域,如生态网络构建、生态安全格局构建、土地适宜性评价等^[10,11,23]。该模型

能计算景观单元对物种迁徙所产生的空间维度的阻力,累积阻力值最小的通道,即是物种扩散可能性最高且耗费成本最小的路径,反映了不同景观单元之间的可达性与连通性^[24]。该模型表达如下^[25]:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R'_i \quad (1)$$

式中: MCR 为物种从源扩散到空间某目的地的最小累积阻力值; f_{\min} 为 MCR 与变量 $D_{ij} \times R'_i$ 的正函数; D_{ij} 表示物种从源 j 到景观单元 i 的空间距离; R'_i 表示景观单元 i 对源 j 扩散过程中产生的成本值。该方法的关键在于生态阻力面的设定。

3.2.1 生态阻力面设置

生态阻力面反映了物种在不同景观类型迁徙交流时受到的阻碍程度,主要由地表覆被类型与人为干扰程度决定^[9]。本文中,前者基于不同土地覆被类型,根据经验值获取基本阻力面,后者选取夜

表1 生物栖息地适宜性评价指标及划分标准

Table 1 Evaluation indicators and classification criteria of biological habitat suitability

评价指标	分级及赋值					权重
	不适宜 (1)	低适宜 (3)	中适宜 (5)	高适宜 (7)	极高适宜 (9)	
土地覆被类型	农村居民点 城镇用地 其他建设用地	旱地 园地 低覆盖度草地	中覆盖草地 其他林地 河渠	灌木林 疏林地 湖泊 水库坑塘 沼泽地	有林地 高覆盖草地 水田 滩涂 滩地	0.216
植被指数(NDVI)	[0.0, 0.1)	[0.10, 0.25)	[0.25, 0.40)	[0.40, 0.55)	[0.55, +∞)	0.123
海拔高度/m	[800, +∞)	[600, 800)	[400, 600)	[200, 400)	[0, 200)	0.103
坡度/°	[35, +∞)	[25, 35)	[15, 25)	[5, 15)	[0, 5)	0.095
距水源地距离/km	[3.0, +∞)	[1.5, 3.0)	[1.0, 1.5)	[0.5, 1.0)	[0.0, 0.5)	0.134
距建成区距离/km	[0.0, 2.0)	[2.0, 4.0)	[4.0, 6.0)	[6.0, 8.0)	[8.0, +∞)	0.177
距交通干线距离/km	[0.0, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[2.0, 4.0)	[4.0, +∞)	0.152

间灯光数据用以表征人类干扰程度^[9,26],并使用此数据对基本阻力面进行修正,以期有效提升廊道模拟的准确性与合理性。对不同栅格地块进行夜间灯光赋值时,采取的是平均夜间灯光赋值法,计算公式如下:

$$NLI_x = \sum_{y=1}^n \left(\frac{Area_{x(y)}}{Area_x} \times NLI_y \right) \quad (2)$$

式中: NLI_x 为整个地块 x 的平均夜间灯光值; 地块 x 被夜间灯光数据分成 n 个地块; $Area_x$ 为地块 x 的总面积; $Area_{x(y)}$ 为小地块 y 的总面积; NLI_y 为小地块 y 的夜间灯光值。

然后采用夜间灯光数据对景观阻力面进行修正,计算公式如下:

$$R'_x = \frac{NLI_x}{\left(\sum_{k=1}^n NLI_{k(x)} \right) / n} \times R_x \quad (3)$$

式中: R'_x 为地块 x 修正后的阻力值; NLI_x 定义同上; $\left(\sum_{k=1}^n NLI_{k(x)} \right) / n$ 为对应的用地类型 k 的总灯光值; n 为用地类型 k 的总地块数; R_x 为地块 x 原始阻力值。

3.2.2 潜在生态廊道模拟

生态廊道通过实现源地空间上的有效连接,成为物种扩散与迁徙的重要路径,具有通道和阻隔的双重作用,并表现出水源涵养、生物保护及固碳释氧等生态功能^[27]。本步骤可借助 ArcGIS 空间分析中的 Distance 模块通过 Model Builder 建模进行操作,通过迭代运算,依次模拟两两源地之间所有的

最小成本路径,共获取 1980 条潜在廊道;然后将所有廊道进行空间叠加合并,去除重合度达 95% 以上的重复路径,获取最终模拟结果。

3.3 基于潜力模型的生态廊道重要性评价

理论上,区域生态廊道越多,物种迁徙扩散的可能选择路径越多,区域的生态网络系统就越趋向于稳定与完善^[28]。事实上,实际进行网络建设时需综合考虑生态网络安全和经济建设成本,选择合理阈值进行廊道提取。潜在廊道重要性通过源地之间的相互作用强度来定量表征,研究引入潜力模型对相互作用强度进行定量计算,潜力模型的基本思想是:空间联系与两点间的空间阻隔、两点自身的活动规模有关^[29]。本文用最小累积阻力值代表源地之间的空间阻隔;用源地的面积代表活动规模。修改后的适用于本文的潜力模型公式^[29]如下:

$$C_{ab} = S_a S_b f(MCR_{ab}), f(MCR_{ab}) = e^{-\beta \cdot MCR_{ab}} \quad (4)$$

式中: C_{ab} 为源地 a 与 b 之间潜在廊道的联系强度; S_a 、 S_b 分别为源地 a 与 b 的面积标准化取值; MCR_{ab} 为源地 a 与 b 之间的最小累积阻力值; $f(MCR_{ab})$ 为一个负指数阻抗函数; β 是调整参数,取值范围是 0~1 之间, β 对最小累积阻力值作用于联系强度的结果产生影响,根据经验值及多次尝试赋值的最优拟合效果,本文中 β 取 10^{-6} 。

3.4 基于连通性指数和中心性指数的生态网络构建方案选择

3.4.1 连通性评价指数

生态廊道与所有生态节点之间的连接程度称

2021年2月

为网络连通性,而网络连通性评价指标是评价景观生态过程与生态功能联系程度的指标^[30]。本文主要选取景观生态学中常用的评价指标 α 指数、 β 指数和 γ 指数,测度不同阈值所获取的生态网络系统的有效性。 α 指数又称网络闭合度指数,表征网络中出现闭合回路的程度; β 指数又称网络连接度指数,是指网络中每个节点的平均连线数,表征网络结构的复杂程度; γ 指数又称网络连通率指数,表征网络中所有节点被连接的程度。这些指数均是值越大,说明生态网络连通性越高、网络结构越完善、能量传递越流畅^[31]。同时引入成本值Cost指数,用廊道总长度表征。基于这4个指标,计算不同方案下连通性指标与成本值指标的比值,值越大说明网络建设性价比越高。在此基础上,探求经济建设成本需求适中,又能保持较高网络连通性的最优化网络构建方案。计算公式如下^[32]:

$$\alpha = \frac{E-F+1}{2F-5}, \beta = \frac{E}{F}, \gamma = \frac{E}{3(F-2)}, G = \sum_{e=1}^n H_e \quad (5)$$

式中: α 、 β 、 γ 为相应的指数; E 为廊道数量; F 为连接点数量($F \geq 3$); G 为成本价值比; H_e 为廊道长度。

3.4.2 中心性评价指数

生态源地的重要性可以通过中心性评价指数来定量计算,中心性评价指数主要包括度数中心度、接近中心度和中介中心度,这3个指标分别反映了源地在网络中的直接交流能力、空间可达能力和控制网络交流能力,可以刻画某个节点在整个网络中所在中心的程度和综合影响力,中心性评价指数计算公式如下^[33,34]:

$$K_p = \sum_{q=1, q \neq p} E_{pq}, L_p = \frac{1}{\sum_{q=1, q \neq p} W_{pq}}, M_p = \sum_{s, t \in V; s, t \neq p} \frac{\sigma(s, t|p)}{\sigma(s, t)} \quad (6)$$

式中: K_p 、 L_p 、 M_p 分别为源地 p 的度数中心度、接近中心度和中介中心度; E_{pq} 是源地 p 和 q 之间的边数; W_{pq} 代表源地 p 和 q 之间的最小成本路径距离; V 为研究区内源地集合; s, t 为集合 V 中除 p 外的任意点对; $\sigma(s, t|p)$ 为 s 和 t 之间所有最小成本路径中通过源地节点 p 的次数; $\sigma(s, t)$ 为 s 和 t 之间所有最小成本路径的条数。

值得注意的是,因为 K_p 、 L_p 、 M_p 数值差异较

大,为消除指标之间的量纲影响,采用Min-Max Normalization方法对数值进行归一化处理^[35]。研究认为3个指标对于生态源地中心性评价的影响是同等重要的,即3个指标的权重系数相同,故源地中心性评价模型如下:

$$Z_p = K'_p + L'_p + M'_p \quad (7)$$

式中: Z_p 为源地 p 的中心性水平; K'_p 、 L'_p 、 M'_p 为源地 p 的3个指标的归一化数值; Z_p 值越大,说明源地在生态网络中的重要性越高。

4 结果与分析

4.1 生态源地识别结果分析

根据栖息地适宜性评价结果(图2)和面积阈值设置,最终获取了45处生态源地,总面积约3542 km²,占研究区总面积的13.85%(图3)。与区域现状对比,识别的生态源地主要由林地、耕地及大面积草地构成,与戴云山、清源山、莲花山、漳江口红树林等自然保护区及大型生态用地空间位置相契合,说明选取的源地具有一定科学性。从空间格局来看(图3),生态源地主要集中在研究区域西北部山区丘陵地带,这些区域受人类干扰程度较低,景观生态服务功能完善,生态退化风险较小,分布于此的生态源地面积较大,综合生态服务功能较好,有利于动植物的繁衍生息。从行政区划来看(图4),

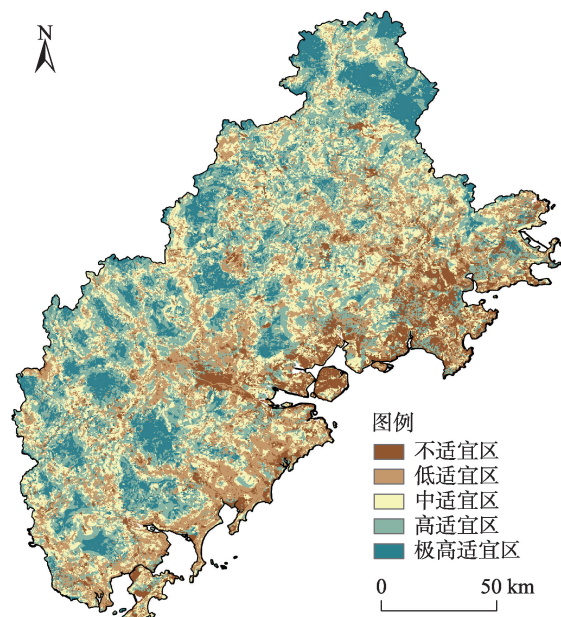


图2 生物栖息地适宜性评价图

Figure 2 Biological habitat suitability assessment

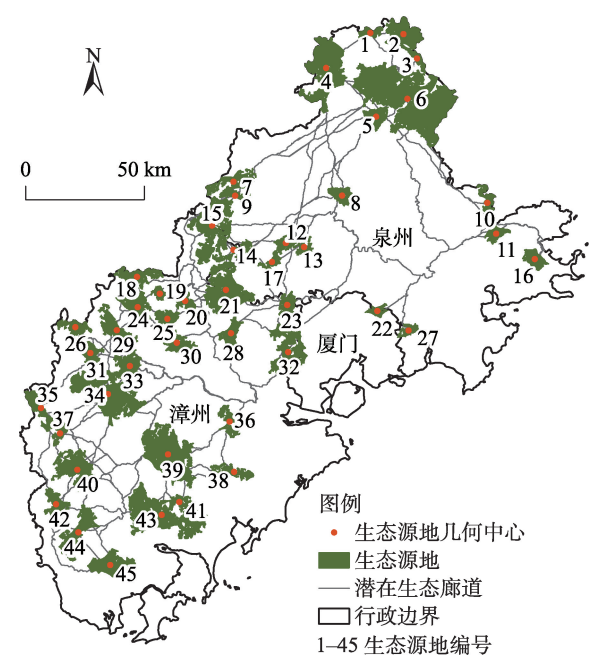


图3 生态源地与潜在生态廊道分布图

Figure 3 Distribution of the ecological habitats and potential ecological corridors

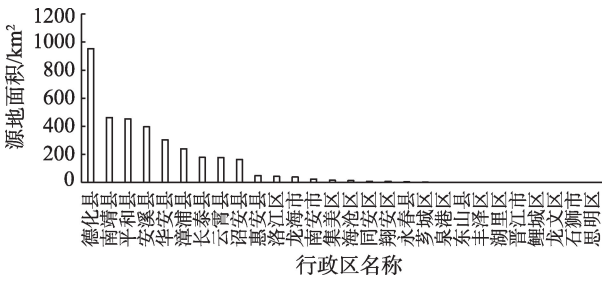


图4 各县区生态源地面积图

Figure 4 Area of the ecological habitat in each county/district

生态源地主要位于德化县、南靖县、平和县、安溪
县、华安县等北部区域,这些区域森林覆盖率较高,
生态破碎化较低;对比来看,思明区、湖里区、龙文
区、鲤城区、丰泽区等沿海的厦漳泉城市中心区均
为建设用地,城镇化较高,几乎没有生态源地分布。

4.2 生态廊道模拟与重要性评价结果分析

参考相关研究成果^[9,36,37],对不同土地覆被类型
进行阻力系数赋值。林地生态功能最强,其对物种
迁徙的阻力最小,阻力系数赋值为1;城镇用地生态
功能最弱,故赋值为最高值500;其余类型赋值范围
在1~500之间(表2),生成基本阻力面。然后应用夜
间灯光数据进行修正,计算获取最终生态阻力面。
通过MCR模型运算并整合筛选,最终获取生态源
地间潜在生态廊道990条(图3)。

由图3可看出,生态廊道在研究区域存在显著
的空间分布差异。在远离城市建成区的郊区及北
部山区丘陵地带,廊道分布密度较高;在研究区域
的东南部沿海,廊道分布非常稀疏。按照行政区划
对廊道分布长度进行提取统计(图5),廊道总长度
约为5941 km,但在各个县区内分布极不均衡,经统
计:安溪县、南靖县、德化县、平和县以及华安县5个
县区的廊道长度分布呈现明显的优势,共计4087
km,约占生态廊道总长度的68%,廊道在这些区域
也呈现出较好的环状度;约有1/4的县区(思明区、
湖里区、丰泽区等)没有廊道分布。

基于潜力模型计算45处生态源地间的相互作
用强度,量化评价源地间廊道的重要程度。因数据
量较大,运用R语言进行数据处理获取可视化视图
(图6),图中连接线宽度大小代表相互作用强度的
强弱。从图6可以看出,源地4和6的之间的相互作
用强度最大,为99.407;这两个源地分别为戴云山自
然保护区和石牛山森林公园,是区域生物多样性保
护关键区;源地6与39、34、15,39与43、34之间的相
互作用力强度也较大,对比其空间位置不难发现,
相互作用强度较大的源地均是距离较近、斑块面积
中等偏上、生境质量良好且位于生态网络的关键连
接点,物种在迁徙过程中遇到的阻力较小,因此后

表2 生物空间运动土地覆被阻力系数

Table 2 Land cover resistance coefficient for spatial movement of wild animals

土地覆被类型	阻力系数	土地覆被类型	阻力系数
有林地	1	滩涂、滩地	100
灌木林、高覆盖草地	10	旱地	200
中覆盖草地	20	裸地、盐碱地	300
疏林地、其他林地	30	农村居民点	400
水田、沼泽地	50	城镇用地	500
河渠、湖泊、水库坑塘	50	其他建设用地	500

2021年2月

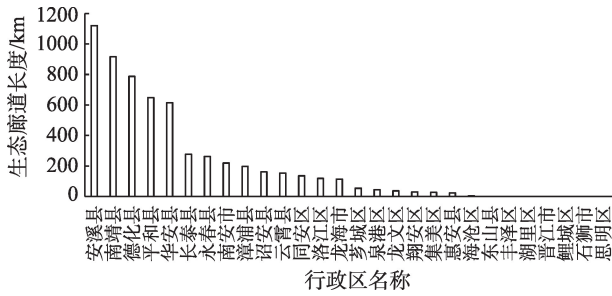


图5 各县区生态廊道长度统计图

Figure 5 Total length of the ecological corridors in each country/district

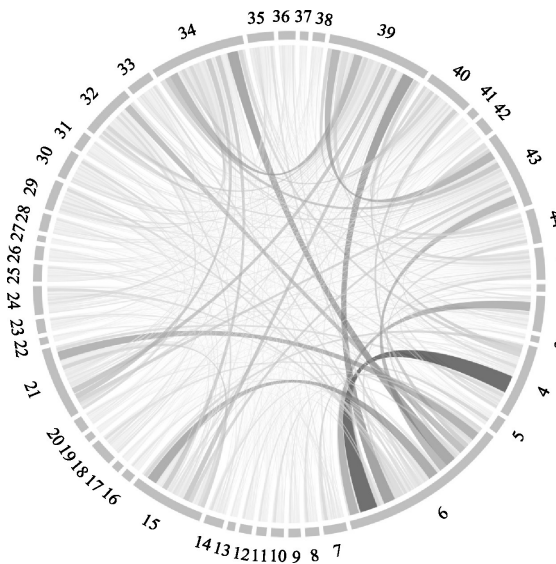


图6 基于潜力模型的生态源地相互作用强度可视化图

Figure 6 Interaction intensity between ecological habitats based on the potential model

续规划中,要严格保护这些源地间的生态廊道。生态源地3和37之间的相互作用力最弱,为0.135,两斑块位于研究区东北和西南两侧,距离较远且面积较小,景观阻力较大,物种迁徙的可能性较小。

总结以上,潜在廊道多分布于研究区内陆西北部,表明内陆北部和西部之间的源地连通性较好;而东南部沿海生态廊道分布较少,表明东南沿海地区东北和西南的连通性较差,且内陆与沿海区域的连通性也较弱,整体生态网络不够完善。因此,从维护生态系统稳定发展的角度出发,应在潜力模型的基础上提取重要廊道,结合研究区现状,在区域东南部沿海规划构建新的生态源地和廊道来优化生态网络系统,统筹提升区域生态服务功能。

4.3 生态网络构建方案结果分析

研究借鉴统计学中的百分位数统计^[38],对不同分位数阈值所提取的生态网络方案进行网络连通性指数计算与指数成本比计算,运用R语言进行数据处理与计算,结果如表3所示。本文试图探索在最高指数成本比的基础上,网络评价指数变化最为可观、网络结构优化性价比最为显著的方案,即生态与经济并重型网络构建方案。根据表3结果可以看出,对比0.1~0.9分位数阈值提取下的生态网络构建方案,0.8分位数方案可以保证45处生态源地均能被潜在廊道连通;在保证45处源地均可被连通的基础上,0.7分位数方案下的网络建设成本比即建设效用达到最大。经过对分位数提取方案计算到百分之一的精确修正,在综合考虑 α 指数、 β 指数、 γ

表3 不同百分位数下的生态网络构建方案评价结果

Table 3 Evaluation results of ecological network construction under different percentile

变量	百分位									
	0分位	0.1分位	0.2分位	0.3分位	0.4分位	0.5分位	0.6分位	0.7分位	0.8分位	0.9分位
相互作用强度提取阈值(百分位数)	0.134	0.367	0.550	0.767	1.023	1.424	2.052	3.073	4.568	8.935
α 指数	11.13	9.96	8.80	7.64	6.47	5.31	4.14	2.98	1.81	0.96
β 指数	22.00	19.80	17.60	15.40	13.20	11.00	8.80	6.60	4.40	2.75
γ 指数	7.67	6.91	6.14	5.37	4.60	3.84	3.07	2.30	1.53	0.97
C 指数(标准化)	1.00	0.88	0.78	0.67	0.57	0.46	0.37	0.28	0.18	0.10
连通性指数成本比										
α/C	11.13	11.33	11.25	11.32	11.41	11.50	11.17	11.60	9.85	9.96
β/C	22.00	22.51	22.51	22.83	23.27	23.85	23.73	23.90	23.91	28.68
γ/C	7.67	7.85	7.85	7.96	8.12	8.32	8.28	8.34	8.34	10.12
生态节点数量	45	45	45	45	45	45	45	45	45	36
生态廊道数量	990	891	792	693	594	495	396	297	198	99

注:百分位数即将一组数据从小到大排序,并计算相应的累积百分位,则某一百分位所对应数据的值就称为这一百分位的百分位数。

指数成本比均可达到最高值的基础上,最终确定生态与经济并重型网络构建方案为0.73分位数,即提取相互作用强度超过3.464的、可连通45处生态源地的268条廊道为最终选择的重要性廊道,并可基于此计算生态源地中心性评价指数。采用Natural Breaks(Jenks)分类方法,将45处生态源地与268条潜在廊道分别按照中心性评价指数与相互作用强度划分为3个级别,得到闽三角城市群生态网络分布图(图7)。其中,I级源地和廊道是保障区域安全的核心区,对于保护关键性生态资源、维护源地景观连通性以及生态过程完整性具有重要作用,应划入主体功能区划中的禁止开发区域,是城镇用地扩展不可逾越的生态底线;II级源地和廊道是生态核心保护区的后备发展区,是需要次级保护与建设的区域,应限制城市开发建设活动,对于维护区域整体的生态网络连通性及有效性具有重要作用;III级源地和廊道相对来说对人类生产生活的敏感程度降低,人类活动的影响也相应增加,是生态空间区域与建设用地区域的过渡区,对于保障生态安全网络的最优化格局构建具有重要作用。

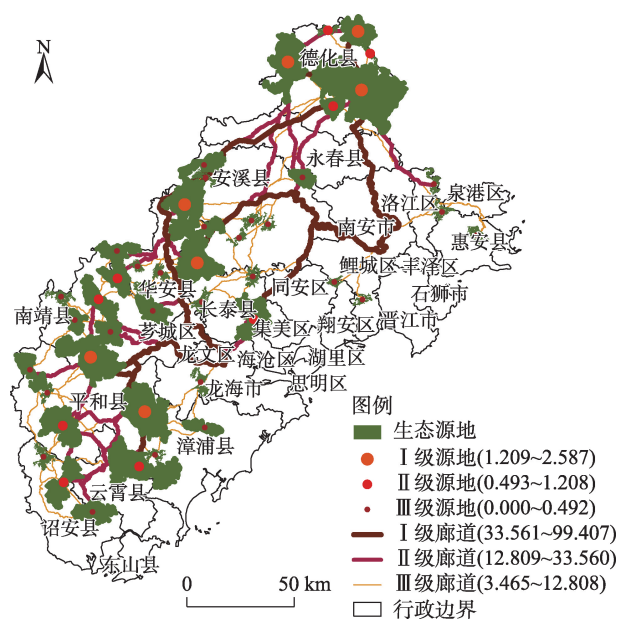


图7 闽三角城市群生态网络分布图

Figure 7 Ecological network of the urban agglomeration of the Min River Delta

5 结论、建议与展望

5.1 结论

本文基于土地覆被、区域地形、人为活动干扰

等评价指标进行生物栖息地适宜性评价,识别生态源地;通过经验值结合夜间灯光数据判别生态阻力面,采用MCR模型模拟潜在生态廊道,根据潜力模型计算生态源地之间的相互作用强度,基于分位数回归方法结合网络连通性指标(α 指数、 β 指数和 γ 指数)与成本值指标(Cost指数)计算连通性指标成本比,获取重要廊道提取的合理阈值;同时引入中心性指数,定量评价在此阈值提取下对应方案的生态源地重要性,提出可满足区域生态环境保护与社会经济发展等多目标需求的最优化网络构建方案。通过上述研究内容得到以下结论:

(1)本文构建出包含45处源地和990条潜在廊道的区域生态网络体系。结合相关统计分析,生态源地总面积约3542 km²,主要由林地构成,质量较好的生态源地集中分布在研究区西北部山区丘陵地带的德化县、南靖县、平和县等区域,东南沿海的城市建成区基本没有生态源地的分布;潜在生态廊道总长度约5941 km且呈现出显著的空间分异,安溪县、南靖县、德化县等北部郊县廊道分布较为密集,东南沿海区域分布十分有限。

(2)在保证所选取的重要廊道可连通所有45处生态源地的基础上,根据0.73分位数对应的相互作用强度所提取的268条廊道组成的生态网络构建方案,其连通性指数成本比达到最高值;同时通过中心性指数定量评价在此方案下的生态源地重要性,得到生态与经济并重型生态网络构建方案,按照Natural Breaks(Jenks)分类方法将源地与廊道分为3级进行保护规划,可作为研究区生态网络设计的科学借鉴与指导。

5.2 优化建议

基于本文生态网络构建结果,并结合现有源地及廊道的空间分布,本文提出对该区域生态网络框架优化的建议:

(1)加强对核心生态源地的保护力度。建议严格保护研究区内省级以上自然保护区、森林公园等生态源地的完整性,将其作为“生态绿心”,加强生态治理和环境保护力度。

(2)增加自然、人工廊道的连通性。针对源地与廊道分布不均的现象,建议根据区域自然保护区、森林公园等的空间分布,在东南沿海增设自然、人工生态廊道,加强网络沿线的生态绿化建设,提

2021年2月

升生态源地间的连通度,优化整体生态网络体系,并可通过建设生态控制带、生态功能区等措施来减少城市人类活动对生态网络建设的影响。

(3)提升生态廊道规划的合理性。根据生态网络体系中源地与廊道的分级设置,严格保护Ⅰ级、Ⅱ级生态源地的完整性,优先建设Ⅰ级生态廊道,加强Ⅱ级廊道的保护,提升Ⅲ级廊道的连通度,更好地发挥与提升区域生态系统的服务功能。

5.3 展望

在本文的研究基础上,相关生态网络构建及优化的研究工作有待进一步深化:

(1)本文侧重于研究区域陆域生态网络构建,作为海湾型城市群,陆海统筹协调发展必将是未来区域发展的迫切需求,下一步研究应致力于探索综合统筹陆域生态网络与海域生态网络耦合叠加的研究方法。

(2)不同尺度、不同层次生态网络的衔接是今后生态网络化过程中不可避免的问题,在生态资源保护和社会经济发展协同演进的基础上,统筹安排“国家-区域-城市-片区”生态网络规划与城乡规划建设的协调发展,也是生态网络规划研究的一大重要发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 高阳,刘悦忻,钱建利,等.基于多源数据综合观测的生态安全格局构建:以江西省万年县为例[J].资源科学,2020,42(10): 2010-2021. [Gao Y, Liu Y X, Qian J L, et al. Improving ecological security pattern based on the integrated observation of multiple source data: A case study of Wannian County, Jiangxi Province [J]. Resources Science, 2020, 42(10): 2010-2021.]
- [2] 管青春,郝晋珉,许月卿,等.基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区[J].资源科学,2019,41(7): 1359-1373. [Guan Q C, Hao J M, Xu Y Q, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1359-1373.]
- [3] 曲艺,陆明.生态网络规划研究进展与发展趋势[J].城市发展研究,2016,23(8): 29-36. [Qu Y, Lu M. Research progress and development trend of ecological network planning[J]. Urban Studies, 2016, 23(8): 29-36.]
- [4] 刘晓阳,曾坚,贾梦圆,等.闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟[J].生态学报,2020,40(21): 7873-7885. [Liu X Y, Zeng J, Jia M Y, et al. Construction of ecological security pattern and simulation of urban sprawl in the urban agglomeration of Min Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7873-7885.]
- [5] Field R D, Parrott L. Multi-ecosystem services networks: A new perspective for assessing landscape connectivity and resilience[J]. Ecological Complexity, 2017, 32: 31-41.
- [6] Cunha N S, Magalhaes M R. Methodology for mapping the national ecological network to mainland Portugal: A planning tool towards a green infrastructure[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 802-818.
- [7] 曹靖,张文忠,刘俊杰.经济与生态双重视角下大都市边缘城镇开发边界划定:以广州市番禺區为例[J].资源科学,2020,42(2): 262-273. [Cao J, Zhang W Z, Liu J J. Delimiting urban development boundaries in metropolitan fringe with economic and ecological perspectives: A case study of Panyu District, Guangzhou City[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 262-273.]
- [8] 吴敏,吴晓勤.基于“生态融城”理念的城市生态网络规划探索:兼论空间规划中生态功能的分割与再联系[J].城市规划,2018,42(7): 9-17. [Wu M, Wu X Q. Urban ecological network planning based on “eco-integrated city” concept: On the division and re-connection of ecological functions in spatial planning[J]. City Planning Review, 2018, 42(7): 9-17.]
- [9] 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. [Peng J, Zhao H J, Liu Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [10] 刘晓阳,曾坚,曾鹏.厦门市绿地生态网络构建及优化策略[J].中国园林,2020,36(7): 76-81. [Liu X Y, Zeng J, Zeng P. Construction and optimization of the green space ecological network in Xiamen City[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(7): 76-81.]
- [11] 黄丽明,陈健飞.广州市花都区城镇建设用地适宜性评价研究:基于MCR面特征提取[J].资源科学,2014,36(7): 1347-1355. [Huang L M, Chen J F. Suitability evaluation of urban construction land based on features extraction of a MCR surface[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1347-1355.]
- [12] Li G, Hu W M. A network-based approach for landscape integration of traditional settlements: A case study in the Wuling Mountain area, southwestern China[J]. Land Use Policy, 2019, 83: 105-112.
- [13] 刘兴坡,李璟,周亦昀,等.上海城市景观生态格局演变与生态网络结构优化分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(10): 2340-2352. [Liu X P, Li J, Zhou Y Y, et al. Analysis of landscape ecological pattern evolution and ecological network structure optimization for Shanghai[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2340-2352.]
- [14] 李道进,逢勇,钱者东,等.基于景观生态学源-汇理论的自然保护区功能分区研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(S1): 53-59. [Li D J, Pang Y, Qian Z D, et al. Research of nature reserve zoning based on landscape ecology source-sink theory[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(S1): 53-59.]

- [15] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863–2874. [Yi H W, Kong F H, Qi Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863–2874.]
- [16] 张蕾, 危小建, 周鹏. 基于适宜性评价和最小累积阻力模型的生态安全格局构建: 以营口市为例[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 229–236. [Zhang L, Wei X J, Zhou P. Construction of ecological security pattern based on suitability evaluation and minimum cumulative resistance model: A case study of Yingkou City[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 229–236.]
- [17] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长预景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189–1204. [Yu K J, Wang S S, Li D H, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1189–1204.]
- [18] 曲艺, 陆明. 生物多样性保护视角下的城市生态安全格局构建研究[J]. 城市发展研究, 2017, 24(4): 134–137. [Qu Y, Lu M. Construction of urban ecological security pattern based on biodiversity conservation[J]. *Urban Studies*, 2017, 24(4): 134–137.]
- [19] 吴未, 廉文慧. 生态系统服务功能视角下建设用地扩张对生境网络的影响: 以苏锡常地区白鹭栖息地为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1043–1050. [Wu W, Lian W H. Impact of construction land expansion on the little egret habitat networks in Su–Xi–Chang Area from the perspective of ecosystem service function[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5): 1043–1050.]
- [20] 王博, 陈小麟, 林清贤, 等. 厦门鹭类集群营巢地分布及其生境特性的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 734–737. [Wang B, Chen X L, Lin Q X, et al. The distribution and habitat characteristics of heronries in Xiamen[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, 44(5): 734–737.]
- [21] 程鹏, 黄晓霞, 李红岩, 等. 基于主客观分析法的城市生态安全格局空间评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 924–933. [Cheng P, Huang X X, Li H G, et al. The spatial evaluation of urban ecological security pattern based on subjective and objective analysis[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(7): 924–933.]
- [22] 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. [Peng J, Li H L, Liu Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701–710.]
- [23] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420–1437. [Li Q P, Zhang Z D, Wan L W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420–1437.]
- [24] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771–784. [Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771–784.]
- [25] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1–16.
- [26] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing–Tianjin–Hebei region, China[J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20: 701–714.
- [27] 陈剑阳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 环太湖复合型生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3113–3123. [Chen J Y, Yin H W, Kong F H, et al. The complex eco-network development around Taihu Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 3113–3123.]
- [28] 郑茜, 曾菊新, 罗静, 等. 武汉市生态网络空间结构及其空间管治研究[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 191–199. [Zheng Q, Zeng J X, Luo J, et al. Spatial structure and space governance of ecological network in Wuhan City[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(9): 191–199.]
- [29] Karou S, Hull A D. Accessibility modelling: Predicting the impact of planned transport infrastructure on accessibility patterns in Edinburgh, UK[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 35: 1–11.
- [30] Zhao S M, Ma Y F, Wang J L, et al. Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126479.
- [31] Montis A D, Ganciu A, Cabras M, et al. Comparative ecological network analysis: An application to Italy[J]. *Land Use Policy*, 2019, 81: 714–724.
- [32] Huang Y, Liao T J. An integrating approach of cellular automata and ecological network to predict the impact of land use change on connectivity[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 149–157.
- [33] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华, 等. 长江中游城市群县域公路交通网络中心性及其影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 34–42. [Guo W D, Zhong Y X, Feng X H, et al. County-level highway network centrality of urban agglomerations and its influencing factors in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 34–42.]
- [34] 黄杰. 中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 759–772. [Huang J. The spatial network structure of energy–environmental efficiency and its determinants in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4): 759–772.]
- [35] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 159–171. [Zhao J J, Liu Y, Zhu Y K, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 159–171.]
- [36] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群

- 生态空间结构优化布局[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 441–452. [Yang T R, Kuang W H, Liu W D, et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern[J]. Geographical Research, 2017, 36 (3): 441–452.]
- [37] 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. [Peng J, Guo X N, Hu Y N, et al. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: A case study in Yuxi City, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 627–635.]
- [38] Koenker R, Bassett G W. Regression quantiles[J]. *Econometrica*, 1978, 46(1): 211–244.

Ecological network analysis and construction: A case study of the urban agglomeration of the Min River Delta, China

LIU Xiaoyang^{1,3}, WEI Ming², ZENG Jian³, ZHANG Sen³

(1. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430070, China; 2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Contemporary processes of urbanization present a major pressure on aggravating the fragmentation and isolation in ecological environment. Therefore, constructing ecological networks, as an effective way to connect fragmented habitats, becomes increasingly salient in maintaining biological diversity and enhancing ecological security. This study took the urban agglomeration of the Min River Delta, China, as the study context, and developed an optimized scheme for ecological network construction with the consideration of both network connectivity and construction cost. In this study, drawing on a series of indicators, including terrain, landscape, vegetation cover and human activities, a habitat suitability index was established to identify the habitats in the study area. The rectified night satellite images coupled with local land use were incorporated to build the ecological resistance surface. With the two essential elements—habitats and ecological resistance surface as input, the ecological corridors were identified using the minimum cumulative resistance (MCR) model and then classified by a new accessibility potential model. Based on these classified ecological corridors, different schemes of ecological network were proposed by computing a set of connectivity indices. Given the network connectivity and construction costs, this study finally presented an optimized ecological network construction scheme. The results show that: (1) The identified habitats are 45, with a total area of 3542 km²; the 990 ecological corridors have a cumulative length of 5941 km; (2) Both habitats and ecological corridors are spatially concentrated in the northwestern hilly areas and seldom found in the northeastern coastal areas; (3) The maximum value of the ratio of network connectivity and construction costs is at the 73th percentile. Under this scheme, 268 corridors connecting 45 habitats are identified. Our results may provide some scientific basis for constructing and optimizing the ecological network in the urban agglomeration of the Min River Delta.

Key words: ecological habitat; minimum cumulative resistance (MCR) model; ecological corridor; ecological network; network connectivity index; urban agglomeration of the Min River Delta