

DOI: 10.5846/stxb201906101220

张亮, 岳文泽, 陈阳. 基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建——以杭州市为例. 生态学报, 2021, 41(11): 4632-4640.

Zhang L, Yue W Z, Chen Y. Construction of urban ecological security pattern based on of patch composite characteristics: A case study of Hangzhou. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4632-4640.

基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建 ——以杭州市为例

张 亮^{1,2}, 岳文泽^{2,*}, 陈 阳²

1 浙江树人大学城建学院, 杭州 310058

2 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058

摘要:城市生态安全格局构建是保障国家与区域生态安全的基础与核心,是实现城市可持续发展的重要途径。生态源地识别与空间阻力面判断一直是生态安全格局构建中的技术难点。以杭州市为例,从城市生态斑块的复合属性特征出发,提取生态源地并判别空间阻力关系,运用最小累积阻力模型构建综合生态安全格局,明确城市关键性生态廊道的空间分布。结果表明:杭州城市生态安全格局围绕生态源地向周围辐射递减,整体呈东部低、西部高态势。源间连接通道对城市生态斑块维护具有较大影响。根据生态安全格局的不同等级划分了城市生态保障空间、城市生态缓冲空间以及城市生态过滤空间,并提出相应的格局优化策略,为城市生态网络建设提供参考,从而有效引导城市空间发展与规划。

关键词:生态安全格局;生态源地;生态廊道;最小累积阻力模型;杭州市

Construction of urban ecological security pattern based on of patch composite characteristics: A case study of Hangzhou

ZHANG Liang^{1,2}, YUE Wenzhe^{2,*}, CHEN Yang²

1 Urban Construction College, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310058, China

2 School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The construction of urban ecological security pattern is an important approach to ensure national and regional ecological security and achieve sustainable urban development. The identification of ecological sources and the construction of spatial resistance surface have been the technical difficulties in the study of ecological security pattern. Considering its own functions and structural importance in the landscape, an integrated identification index system is established on the basis of natural, artificial, and natural-artificial interactive attributes of the ecological patch. Thus, the spatial resistance surface is also identified from the aspects of its composite attribute characteristics. And the minimum cumulative resistance model is used to construct an integrated ecological security pattern to determine the spatial distribution of key urban ecological corridors. Hangzhou, which is faced with pressure of both ecological conservation and economic development, is taken as an example to test the function and effectiveness of our method. The results show that the landscape connectivity has great influence on the formation of ecological patches. The urban ecological security pattern shows a downward trend around the ecological source to the surrounding radiation. The overall trend is low in the east and high in the west. According to the spatial distribution of the ecological source areas and key corridors, the targeted pattern optimization strategy has important reference significance for urban ecological network construction. The results can provide with effective

基金项目:浙江省哲学社会科学规划课题(21NDQN270YB);浙江省自然科学基金探索项目 Q(LQ20D010004);浙江树人大学青年博士创新计划项目(2019QC02)

收稿日期:2019-06-10; 网络出版日期:2021-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzyue@zju.edu.cn

guidance for the related urban spatial planning.

Key Words: ecological security pattern; ecological source; ecological corridor; minimum cumulative resistance model; Hangzhou

城市生态安全作为生态安全的一个重要内容,是城市自然生态环境在其承载力内支持经济社会持续发展,实现自身可持续发展的保证和条件^[1]。快速城市化进程下,社会经济的高速运作加剧了对自然资源的攫取和生态容量的占用,逐渐成为城市生态安全的重要威胁和问题根源^[2],城市可持续发展面临严峻的挑战。随着我国生态文明建设的大力推进,城市生态安全格局作为对维护生态过程安全起着关键作用的局部、点和空间关系构成的空间格局^[3-4]越来越受到广泛关注。

国内外学者在地理学、生态学、城市规划等领域对生态安全格局开展了大量研究。从早期的“绿道”^[5]、“田园城市”^[6]的规划理念,到“千层饼”模式^[7]的生态规划方法、生态网络^[8-9]和绿色基础设施规划^[10-11]等,无一不体现着生态安全格局构建的雏形。国外学者主要从景观生态^[12-15]和土地利用优化配置^[16-18]等角度对其进行研究。国内的研究则集中在内涵辨析^[19]以及从景观功能^[20]、生态价值^[21]、生物多样性保护^[22]等视角积极探索。目前,“识别源地—构建阻力面—提取廊道”已成为生态安全格局构建的典型范式^[23]。但在生态源地的识别和阻力面构建方面,并未形成统一的方法。源地辨识多从生态功能重要性和适宜性评价等方面展开^[24],方法可分为直接识别^[25-27]和多因子综合评价^[28-30]两种。空间阻力关系方面,学者们探索了土地利用覆被^[23]、生态系统服务^[25]、多因素综合^[31]等方法。格局构建方面,当前已发展出最小累积阻力模型^[3]、图论^[32]以及电路理论^[33]等理论与方法。其中,最小累积阻力模型由于能较好地模拟生物空间运动的潜在趋势与景观格局改变之间的关系,已被广泛应用^[34]。

快速城市化地区的城市建设与生态空间之间交互作用频繁。城市作为复杂的巨系统,其生态安全格局构建中生态源地和生态廊道的识别都不应忽视城市生态斑块的复合属性特征以及生态系统功能与过程对于人类活动的反馈。研究选取长三角地区发展迅速的杭州市作为研究区,从城市斑块的复合属性特征出发,建立核心生态源地斑块辨识以及空间阻力判别的多因素综合评价体系,借助于最小累积阻力模型,明确城市生态源地和关键生态廊道的空间布局,并根据城市生态安全强度等级差异提出相应的优化策略,以期为杭州市城市生态安全提供空间指引,缓解城市社会经济生态发展的生态约束,推进城市生态转型发展。

1 研究区域与研究数据

1.1 研究区概况

杭州市地处我国华东地区,是长江三角洲中心城市之一,也是浙江省省会城市。杭州市地势西高东低,天目山等主干山脉皆位于西部丘陵地区;东部为冲积平原,是城市生产生活的主要区域。区域内河网与湖泊密布,水系发达,城市森林覆盖率高。整个城市具有丰富的生态资源和自然人文景观。杭州市城市发展迅速,从最早的 430 km² 中心城区面积扩展到 683 km²,至整个萧山和余杭地区融入杭州市中心城区后,城市面积达 3068 km²,成为中国重要的大都市之一。本研究的对象即上城、下城、拱墅、西湖、江干、滨江、余杭和萧山 8 个行政区构成的杭州中心城区。区内包含城市建成区、西湖景区、西溪湿地、滨海滩涂、森林公园等多样景观,京杭大运河和钱塘江穿城而过,形成城、江、河、湖、山、林交融的总体格局。

1.2 研究数据与来源

研究数据包括遥感影像、数字高程模型数据、土地利用现状数据、DMSP/OLS 夜间灯光数据、城市交通数据、行政区划空间数据、研究区人口普查数据、地质灾害调查数据以及规划图件等多种类型。其中,数字高程模型、2015 年 Landsat8 卫星影像数据以及 DMSP/OLS 夜间灯光数据分别从地理空间数据云、美国地理调查局网站以及美国国家海洋和大气管理局网站下载。人口统计数据从杭州市统计局获得。杭州市城市总体规划

(2001—2020 年)、杭州市土地利用总体规划(2006—2020 年)等相关规划图件以及城市交通数据、行政区划空间数据、地质灾害调查数据等从杭州市建设局和国土资源管理部门收集。土地利用现状数据是基于研究区的遥感影像数据进行解译后获得。所有数据载入 ArcGIS 软件平台中,统一数据空间参考,进行空间数据预处理和初步分析。

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

研究围绕城市斑块的复合属性特征来构建景观要素辨识体系,提取空间阻力因子。综合判定城市生态源地的空间定位,实现重要空间阻力关系判别。根据确定的生态源地和空间阻力因子,采用最小累积阻力模型明确城市生态安全等级空间分布,并识别城市关键性生态廊道。从而对不同的生态空间提出针对性优化策略。研究思路见下图 1。

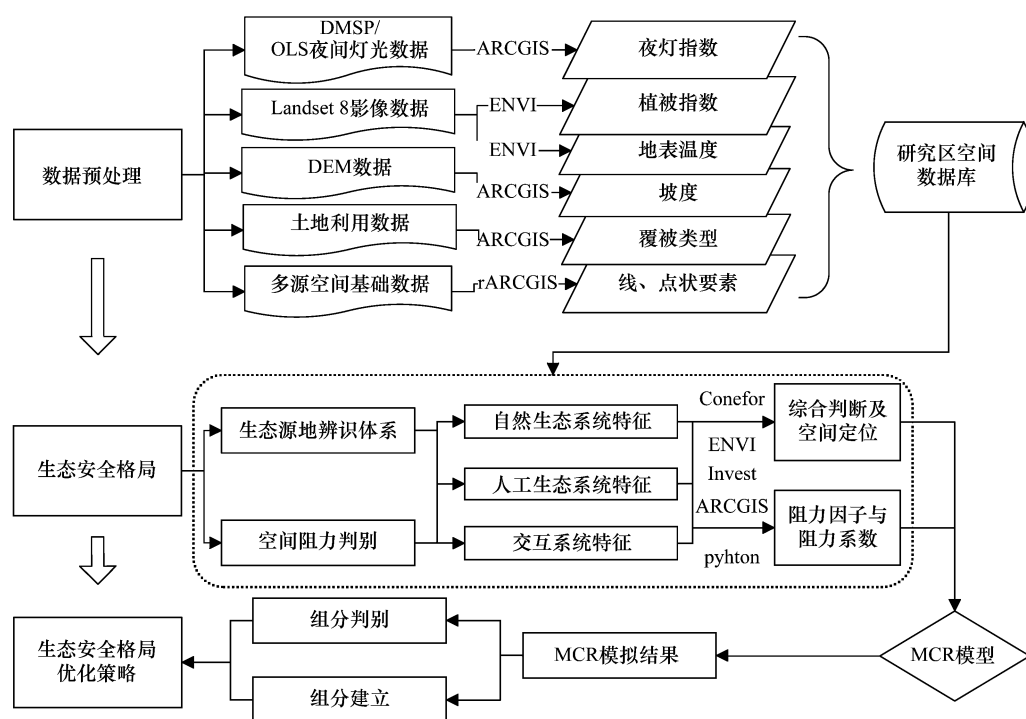


图 1 生态安全格局构建思路

Fig.1 Technology roadmap for constructing urban ecological security pattern

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地辨识体系

城市作为自然和人工生态系统交互的复杂巨系统,生态源地的形成是自然系统和人工系统特征的空间耦合所决定的,其自身的不同属性具有不同的生态服务功能^[35]。以城市生态斑块复合属性为切入点,自然、人工属性特征以及交互属性特征 3 个评价因素选取了 12 个评价因子,构建识别城市生态源斑块的指标体系^[30,35]。自然属性是斑块的禀赋特征,与源地存在呈正相关;人工属性特征越强则成为源地的可能性越低;交互属性中归一化植被指数、地质灾害点分布以及生境质量与源地存在呈正相关,土地利用类型因子则需要根据类型来确定。按照自然断点法将因子划分等级,并根据各因子对生态源地可能产生的正负影响和程度大小,采取 9—1 或 1—9 的梯度分级赋值。在 ArcGIS 中以 200m×200m 空间分辨率制作各因子图层,采用空间主成分分析方法计算每个指标的权重,进行栅格运算。具体指标情况见表 1。

表 1 辨识指标体系与权重赋值
Table 1 The evaluation system of urban ecological patch

准则 Dimensions	指标 Indicators	指标提取或计算公式 Indicator interpretation	权重 Weights
自然因素影响 Natural feature	高程	数字高程模型 DEM	0.01
	坡度	根据 DEM 获取坡度信息	0.03
	地形起伏度	根据 DEM 获取地形起伏度信息	0.01
$PC = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j p_{ij}}{A_L^2}$			
	景观连通度	$DPC = \frac{PC - PC_{remove}}{PC} \times 100$ n 表示景观中斑块总数; a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的属性(面积); A_L 是研究区的最大景观属性(总面积); P_{ij} 斑块 i 和斑块 j 之间所有可能路径的最大乘积概率; DPC 表示景观连通的重要程度	0.11
人类影响 Artificial feature	人口密度	以街道人口和街道面积计算人口密度	0.03
	夜间灯光强度	研究区界线裁切 DMSP/OLS 夜间灯光数据	0.05
	交通网络密度	以交通线路进行线密度分析	0.03
自然与人类共同影响 Interactive feature	地表温度	Landset8 遥感影像采用辐射传输方程法计算	0.03
	归一化植被指数	Landsat8 多光谱遥感影像数据计算	0.05
	土地利用类型	划分为耕地、园地、林地、建设用地、水域、湿地和未利用地 7 种类型	0.60
	地质灾害点分布	根据地质灾害调查资料将灾害点上图后进行点密度分析	0.03
	生境质量	INVEST 模型 Habit Quality 模块计算	0.02

2.2.2 空间阻力关系判别

建立城市生态安全格局还需要对源斑块向外扩展的空间阻力关系进行判别。生态源地保持和扩展的空间阻力同样需要考虑其穿越的城市景观要素斑块的复合属性特征。生物流的移动速度和穿越时间需要考虑自然属性中的坡度影响。人工属性特征方面,生态源地的扩展在穿过不同城市环境要克服的阻力值不同。生态适宜性越高的区域,生态源地受到的阻力值越小;生态敏感的区域,阻力值则越大。从交互属性来看,景观要素空间分布异质性对与生态源地之间物质流、能量流、信息流等交互过程产生作用。人类开发活动所塑造的城市景观要素与生态源地的景观类型特征越接近,越有利于生态源地的保持和扩展;相反地,城市景观要素受人类行为干扰越显著,生态源越难以穿越或驻留。生态用地和建设用地的空间分布密度在维护生态系统的物质和能量流动方面产生影响,从而作用于生态源地的保持和扩展。研究以 9×9 网格范围内生态用地或建设用地像元数与总像元数的比值表征生态密度和建设密度因子。采用自然断点法将所有阻力因子划为 5 级。

设定阻力因子需考虑阻力系数,以量化表征生态流经过城市景观斑块的难易水平。不同生态流穿越城市景观斑块的难易具有异质性,绝对阻力值难以直接界定^[36],一般以相对值来表征的城市景观斑块的阻力^[37]。综合既有研究^[23]与专家评估,设定不同因子的相对阻力系数^[38],其取值范围为 0 到 100,如表 2 所示。

2.2.3 生态安全格局构建

研究采用最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)构建杭州城市生态安全格局。该模型需要考虑源、距离和景观基面特征三个方面的因素。源是 MCR 模型中扩展主体向外扩散的起点或基地,具有内部同质性和向四周扩张或吸引的能力^[3,39],即通过构建辨识体系提取的生态源地。阻力系数可定量判定生态源地在景观要素空间拓展中所受到的相对阻力大小。MCR 模型基本公式如下:

$$MCR = f\min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$

其中, f 代表空间中任一点的最小阻力与其到所有源的距离和景观基面特征的正相关关系。 D_{ij} 是从源 j 穿越

某景观 i 到达某一点的空间距离; R_i 是景观 i 对源扩展需要克服的累积阻力。

表 2 空间阻力系数表
Table 2 The Space resistance coefficient

阻力因子 Resistance factor	因子提取 Factor interpretation	阻力系数 Resistance coefficient				
		高	较高	中	低	最低
坡度 Slop	根据 DEM 在 ArcGIS 中获取坡度信息	40	30	20	10	0
敏感性因子 Sensitivity	与主要道路的距离、与城市建成区的距离	90	60	40	20	10
适宜性因子 Suitability	与主要水系的距离、与一定高程林地距离	0	10	30	40	60
景观类型因子 Landscape	按照与源地景观类型接近程度划分为林地、湿地与水域、耕地与园地、未利用地、建设用地 5 个类型	100	20	15	10	5
生态密度 Ecological density	生态用地赋值为 1,非该用地赋值为 0,然后采用 9×9 移动窗体,利用 Python 计算每个像元网格的密度值	0	5	10	15	20
建设密度 Construction density	建设用地赋值为 1,非该用地赋值为 0,然后采用 9×9 移动窗体,利用 Python 计算每个像元网格的密度值	90	80	70	50	40

3 结果与分析

3.1 生态源地辨识结果

利用 ArcGIS 进行栅格运算得到生态源地可能性判定结果,并采用自然断点法划分等级,斑块强度等级越高,反映该斑块在生态安全格局中重要性越高,如图 2。

值域范围 108—298 的斑块面积约为 1126.1 km²,占研究区总面积的 35.00%。这类斑块强度值最低,是人类活动和城市建设用地的集中区域。值域范围在 299—615 的斑块规模 1406.66 km²,占研究区总面积 43.72%,该区域斑块生态强度中等,是生态因素和人类活动的主要交互区域;值域范围在 616—864 的生态斑块面积共 684.55 km²,占比为 21.28%。这类斑块生态强度高,是为城市提供最重要的生态服务功能的核心生态斑块,即研究要提取的生态源地,是组建城市生态安全格局的“底盘”,也是生态安全格局的保障基础。初步识别得到的生态源地中有少量独立分布斑块和碎小斑块。考虑到生态源地斑块形状与面积影响生物流活动^[40],不能直接剔除细碎斑块。结合杭州城市总体规划、土地利用规划以及相关生态规划中的空间分区情况,剔除面积小于 1hm²易受干扰失去生态属性的零星斑块,保留城市内部能够提供一定生态功能并维持景观连通度的集中斑块^[35,38]。最终通过综合判断确定杭州市生态源地空间分布情况如图 3。

最终辨识结果显示杭州市生态源地规模为 483.89km²,主要用地类型为林地、耕地以及湿地。杭州生态源地集聚分布于西北、西南和南部。其中,西北部为杭州最大的生态源地,斑块集中且面积较大,人为活动干扰小,生态要素丰富,自然面貌保存完整,能够提供丰富的生态调节、供给、支撑和文化等生态系统服务。西南部和南部的生态源地强度总体略低于西北部。西南部生态源地依托龙坞风景区和西湖风景,人文景观与自然景观丰富,为城市提供生态农业、生态旅游等服务。南部以湘湖及白马湖为重要的生态核心区,为城市提供大量生态农林产品以及森林生态保育、山地观光旅游等功能。在行政区分布上,余杭区的生态源地分布规模最大,且斑块强度普遍较高;萧山区和西湖区的规模次之,前者分布于钱塘江口与塔楼、河上、戴村等区域,后者集中于西湖风景区、午潮山国家森林公园、西山国家森林公园等地区。

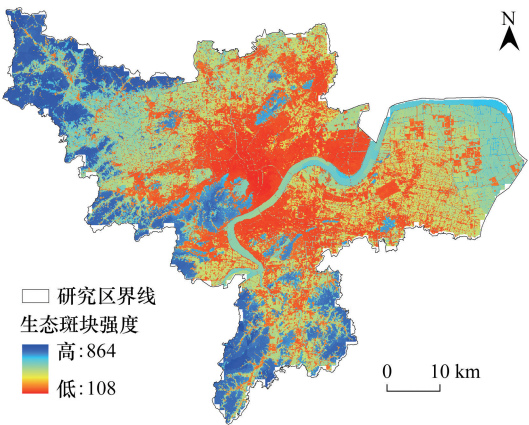


图 2 杭州市生态源地初步辨识结果
Fig.2 The identification and classification of the urban ecological patch

3.2 生态安全强度评价

将得到的生态源地以及阻力因子图层载入 ArcGIS 平台中,基于 MCR 模型得到连续的生态安全强度评价结果。依据阻力阈值特征点,研究将评价结果划分为 5 个安全等级。结果如图 4 所示:

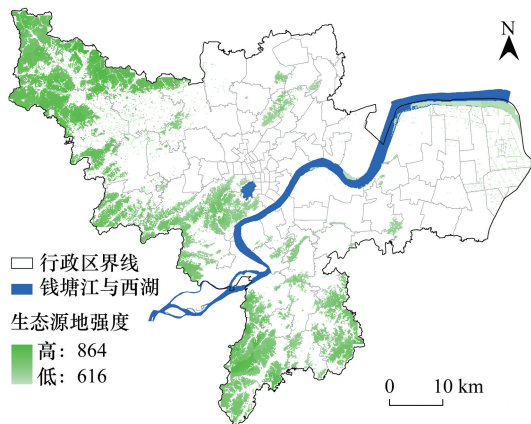


图 3 杭州市生态源地空间分布情况

Fig.3 Spatial distribution of ecological sources in Hangzhou

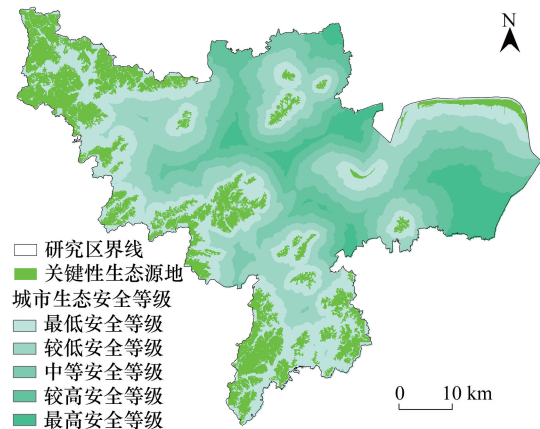


图 4 杭州市城市生态安全格局等级图

Fig.4 The evaluation results of urban ecological security level in Hangzhou

生态安全格局等级是从人类活动的角度出发,反映生态系统稳定性与维持服务功能的重要性。杭州的城市生态安全格局呈现“西强东弱”特征。最低安全等级区围绕东部、南部和西北部的生态源地紧密分布,规模为 1428.24 km²,占研究区总面积的 43.03%。最低安全等级区分布在人类开发相对羸弱的地区,承担维护生态源地整体性、景观连通性和生态多样性的重任,是确保城市生态安全的“底线”。该区是为城市提供多种生态系统服务的主导地区,是维护城市生态安全与可持续发展的生态基础。较低安全等级区围绕生态源地和最低安全等级区形成外围屏障,其面积为 701.33 km²,占比 21.13%。该区是城市生态过渡区,具有一定城市生态功能,不适宜大规模的城市开发建设活动。中等安全等级区面积为 538.63 km²,占总面积的 16.23%。该区对人类活动的干扰敏感性相对较低,是城市开发与生态保护的“临界带”,肩负隔离城市建设与生态区域的作用。较高安全等级区和高安全等级区面积分别为 422.08 km²和 228.69 km²,占比 12.72%和 6.89%。这两个区域属于人类活动与开发建设起主导作用的地区,是对生态系统负面影响最大的区域,生态源地扩展效率趋于零增长。

3.3 城市生态廊道识别

连通城市生态源地的生境廊道保证了源地间信息、能量、生物的交流,是维持生态功能的连续性,保障区域生态安全格局的有效途径^[29,41]。研究将生态源地的几何中心点作为源,基于图层(BEST-SINGLE)方式提取出该源点到剩余源点间的最小耗费路径作为生态源地间的生态廊道。将所有最小耗费路径进行合并和筛选,得到杭州市关键性城市生态廊道网络。如图 5 所示。

杭州市生态廊道的空间分布整体从城市西翼的生态源地聚集区向向南面和东面延伸,并穿越城市内部形成网络,呈“西密东疏”的总体格局。受到天目山脉影响,生态廊道的分布与城市地形地貌总体趋势相契合,沿谷地分布集中于杭城西北与西南,连接西翼生态源地,为源地间的物种迁徙和能量传输提供了大量流通通道,使得这一区域城市生态源地间景观连通度高,物质与能量交流程度较好。未来城市开发需将这些廊道纳入到生态保护的范畴,尽量避免人类活动干扰破坏现有自然廊道,阻断区域生态斑块间物质与能量的扩散和流通;另一方面,加强生态绿化建设以提升廊道的生态功能,维持城市生态安全。城区东部钱塘江沿岸湿地与城市河网鲜有廊道连接,与周边源地仅存在单条廊道。这类区域易受到人类活动的干扰和阻断,需以城市水网与绿带建设为契机,补充廊道建设与功能提升,增强生态源地之间的连通度,削弱人类开发活动对生态源地

的干扰,避免独立分布的生态斑块功能丧失。此外,廊道的宽度应针对不同的地区具体经验数据和模型来估算^[42]或尝试收集足够的信息采取直接赋值的方式^[43]。囿于研究目标与尺度的局限,本文不再进一步讨论生态廊道宽度测算。

3.4 城市生态安全格局优化策略

生态安全格局能够对城市的开发建设以及生态保护进行有效的空间引导,利于城市空间布局的科学合理规划,协调发展与保护之间的矛盾,实现城市可持续发展。杭州市城市生态安全格局优化以不同等级安全格局为基础划分为三类空间,从生态源地和廊道空间分布的角度考虑城市生态保护。

(1)城市生态保障空间的保护。这一空间是城市最低生态安全等级。该空间内基本包含城市全部的核心生态斑块,是生态功能集中与向外扩展的起点。城市

生态源地和廊道都集中分布于城市西侧。生态源地的用地类型多以林地为主,自然生态面貌保护较好,是城市生态安全的核心保障。西北翼源间廊道较少,但是对外廊道网络丰富,景观连通度较高。这一区域的生态空间以保持原有自然生态系统完整性和功能稳定性为首要目的,严格限制区域人口密度和建设活动,强调生态源地和重要自然生态网络的有效保护,避免人类活动干扰。南部与西南部的生态源地强度略低于西北部,区内源间网络密度相对较高,两区的生态源地之间物质与能量流通好,生态服务功能较为稳定。这两区相对西北部更靠近城市建设区,生态空间的保护应加强源地和廊道的功能维持与对外源间联结通道完善和植被保护,避免城市扩张对生态环境的蚕食,保障生态系统的抗干扰性和可恢复性,维护城市生态安全“底线”。

(2)城市生态缓冲空间的维护与优化。生态缓冲区域属于城市较低生态安全等级。主要分布在生态保障空间外围起着缓冲作用,更多的表现为自然与人文景观的交融。这一区域内自然条件较好、生态强度高的斑块可作为生态源地的“后备区”,既能扩展生态保障空间,还能维护穿越区域的生态廊道。另一方面,该区生态安全水平受到一定的城市发展影响,生态强度较低的斑块容易在干扰下逐渐丧失自然属性。这一区的生态网络建设应保护区内自然生态资源与环境,加强区内山体与植被维护以及生态恢复。从维护自然景观角度出发,淘汰区域内对生态环境产生负面影响的产业,控制区内建筑密度和人工旅游景点开发与人造景点的建设。充分考虑区域自然地理环境,结合现有的生态廊道和城市绿道布局与建设等相关活动,完善和优化区域的生态网络。

(3)城市生态过滤空间的提升。生态过滤空间是城市生态安全等级的中值区,最靠近城市建设区,对城市扩张的强烈影响起着隔离过滤的作用。这一区域仅存在少量类型单一、生态强度较低的斑块。以河流向外辐射形成对外廊道,缺少与其他方向的源间联结,主要依靠生态保障空间和缓冲空间的对外渗透,生态环境相较更为脆弱。该区域应以维持稳定为主导,为改善区域生态环境创造条件。围绕生态廊道补充建设,加强湿地生态保育、污染控制,从而提升区域生态网络的结构和功能稳定性,避免人类开发活动引发生态风险。

4 结论与讨论

研究以杭州市为例,围绕城市生态斑块的复合属性特征构建生态源地空间重要性辨识体系,并对其向外扩展的空间阻力关系进行判别。借助最小累积阻力模型明确城市生态安全强度等级和廊道的空间分布情况。针对不同等级的城市生态安全格局制定差异化的空间优化策略。研究结果表明:第一,杭州市城市生态源地和廊道集中于城市西翼,呈“西密东疏”的空间布局;杭城市生态安全格局整体表现为东部低、西部高的态势。

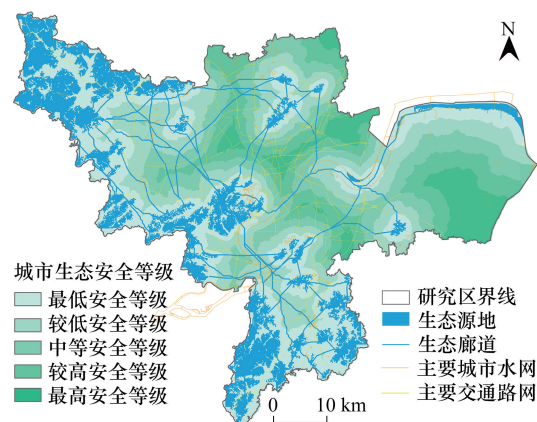


图5 杭州市生态安全格局组分判别结果

Fig.5 Spatial distribution of key patches and ecological corridors in Hangzhou

第二,景观连通度对生态源地的保持和扩展影响较大,廊道是提高区域景观连通度的有效途径,加大生态源地周边的生态绿化建设,提升源地间的有效联结有利于总体改善城市生态环境。第三,围绕生态源地和关键廊道的空间分布情况分别对生态保障空间、生态缓冲空间以及生态过滤空间提出针对性城市生态安全格局优化策略,对城市生态网络建设具有重要参考意义,更能体现生态安全格局对城市空间发展和规划的引导。

当前生态安全格局的构建多以静态视角进行研究。研究在生态源地识别和空间阻力判别中考虑了一定的动态因子。未来研究有必要关注区域生态要素的动态演化,借助于地理空间数据和大数据,采用多个时间序列下安全格局来深入探讨城市生态空间保护问题。

参考文献 (References):

- [1] 谢花林,李波.城市生态安全评价指标体系与评价方法研究.北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(5):705-710.
- [2] 施晓清,赵景柱,欧阳志云.城市生态安全及其动态评价方法.生态学报,2005,25(12):3237-3243.
- [3] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1):1-17.
- [4] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报,1999,19(1):8-15.
- [5] Fabos J G. Introduction and overview: the greenway movement, uses and potentials of greenways. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1/3): 1-13.
- [6] Howard E. Garden Cities of To-morrow. Cambridge: MIT Press, 1965.
- [7] 麦克哈格.设计结合自然.北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [8] Fath B D, Scharler U M, Ulanowicz R E, Hannon B. Ecological network analysis: network construction. Ecological Modelling, 2017, 208(1): 49-55.
- [9] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1/3): 179-193.
- [10] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.
- [11] Sutton-Grier A E, Wovk K, Bamford H. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. Environmental Science and Policy, 2015, 51: 137-148.
- [12] Sun K Z. Research on the ecological strategies in landscape design and planning. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 1805-1808.
- [13] Szabo S, Csorba P, Szilassi P. Tools for landscape ecological planning-scale, and aggregation sensitivity of the contagion type landscape metric indices. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2012, 7(3): 127-136.
- [14] Brouwer R, Van Ek R. Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands. Ecological Economics, 2004, 50(1/2): 1-21.
- [15] Zagas T D, Raptis D I, Zagas D T. Identifying and mapping the protective forests of southeast Mt. Olympus as a tool for sustainable ecological and silvicultural planning, in a multi-purpose forest management framework. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 286-293.
- [16] Reshmidevi T V, Eldho T I, Jana R. A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. Agricultural Systems, 2009, 101(1/2): 101-109.
- [17] Shaygan M, Alimohammadi A, Mansourian A, Govara Z S, Kalami S M. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(3): 906-916.
- [18] Esbah H, Cook E A, Ewan J. Effects of increasing urbanization on the ecological integrity of open space preserves. Environmental Management, 2009, 4(5): 846-862.
- [19] 陈利顶,景永才,孙然好.城市生态安全格局构建:目标、原则和基本框架.生态学报,2018,38(12):4101-4108.
- [20] 张小飞,李正国,王如松,王仰麟,李锋,熊侠仙.基于功能网络评价的城市生态安全格局研究——以常州市为例.北京大学学报:自然科学版,2009,45(4):728-736.
- [21] 方淑波,肖笃宁,安树青.基于土地利用分析的兰州市城市区域生态安全格局研究.应用生态学报,2005,16(12):2284-2290.
- [22] 王棒,关文彬,吴建安,马克明,刘国华,汪西林.生物多样性保护的区域生态安全格局评价手段——GAP分析.水土保持研究,2006,13(1):192-196.
- [23] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸.雄安新区生态安全格局识别与优化策略.地理学报,2018,73(4):701-710.
- [24] 陈昕,彭建,刘焱序,杨旸,李贵才.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建.地理研究,2017,36(3): 471-484.
- [25] 何玲,贾启建,李超,张利,许皞.基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟.农业工程学报,2016,32(3):275-284.

- [26] 李晶, 蒙古军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建——以鄂尔多斯市准格尔旗为例. 北京大学学报:自然科学版, 2013, 49(4):707-715.
- [27] 李宗尧, 杨桂山, 董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建——以安徽沿江地区为例. 自然资源学报, 2007, 22(1):106-113.
- [28] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1):1-14.
- [29] 赵筱青, 王海波, 杨树华, 徐晓雅. 基于 GIS 支持下的土地资源空间格局生态优化. 生态学报, 2009, 29(9):4892-4901.
- [30] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13):4125-4133.
- [31] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建——以深圳市为例. 地理科学进展, 2018, 37(12):1663-1671.
- [32] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology*, 2001, 82(5):1205-1218.
- [33] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:781-790.
- [34] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例. 生态学报, 2019, 39(7):2298-2310.
- [35] 张亮, 岳文泽. 城市生态空间多元综合识别研究——以杭州市为例. 生态学报, 2019, 39(17):6460-6468.
- [36] Sutcliffe O L, Bakkestuen V, Fry G, Stabbeorp O E. Modelling the benefits of farmland restoration: methodology and application to butterfly movement. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(1):15-31.
- [37] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1):1-16.
- [38] 张亮. 基于生态安全格局的城市增长边界划定与管理研究. 杭州:浙江大学, 2018.
- [39] Adriaensen F, Chardon J P, De Blust G, Swinnen E, Villalba S, Gulinck H, Matthysen E. The application of ‘least-cost’ modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(4):233-247.
- [40] 傅伯杰, 陈利顶. 景观多样性的类型及其生态意义. 地理学报, 1996, 51(5):454-462.
- [41] 王军, 傅伯杰, 陈利顶. 景观生态规划的原理和方法. 资源科学, 1999, 21(2):71-76.
- [42] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9):2406-2412.
- [43] Li H, Li D, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang, H. Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake—Case study of Wolong Nature Reserve in China[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(6):944-952.