

DOI: 10.5846/stxb201801250199

刘佳,尹海伟,孔繁花,李沐寒.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化.生态学报,2018,38(12): - .

Liu J, Yin H W, Kong F H, Li M H. Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (12): - .

基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化

刘 佳¹, 尹海伟^{1,*}, 孔繁花², 李沐寒¹

¹ 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

² 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

摘要:城市绿色基础设施的连通性与格局优化能显著提升城市的生物多样性和可持续发展能力,对维持城市生态系统的健康与稳定具有重要意义。基于电路理论构建了南京市主城区绿色基础设施景观格局,根据电流密度分析斑块、廊道重要性,并借助移动窗口搜索法识别障碍点,提出南京市景观格局优化策略。研究结果表明:(1)南京主城区景观破碎化程度较高,40%的生境斑块(约为 28.18 km²)对连通性的贡献较低,南部重要廊道的数量最多,局部簇团成网,网络结构较为复杂,其次为中部,且河流廊道(秦淮河)是其主要廊道类型,北部廊道数量最少,斑块多呈孤岛分布;(2)研究区共有 155 处障碍点,其中 84.5%面积小于 5hm²,可见主城区景观连通性仍有较大的提升空间。本研究丰富了城市绿色基础设施景观格局的构建方法,对南京主城区绿色基础设施的连通性与格局优化具有一定的实践指导意义与参考价值。

关键词:绿色基础设施;景观连通性;电路理论;障碍点识别

Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China

LIU Jia¹, YIN Haiwei^{1,*}, KONG Fanhua², LI Muhan¹

¹ School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

² International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The connectivity of urban green infrastructure (UGI) can significantly improve the biodiversity and sustainable development ability of cities, which is of great significance to maintaining the health and stability of urban ecosystems. In the present study, we used circuit theory to map the landscape connectivity of UGI in the main urban area of Nanjing and identify the important patches and corridors according to current density, and then used a search window to detect barriers and to develop a landscape connectivity optimization strategy for Nanjing. 1) Habitat fragmentation in the main urban area of Nanjing was significant. The total area of the patches was about 70.45 km², and 40% of patches area had a low contribution to connectivity. The southern part of the study area exhibited the best landscape connectivity, followed by the middle and northern parts. In the south, numerous corridors clustered into net structure, and the network structure is complex. In the middle of the study area, the Qinhuai River mainly formed a circular corridor. Relatively few corridors were observed in the northern part of the study area, and the patches were isolated. 2) There were 155 barriers in the study area, and 84.5% of those barriers were >5 ha, so the landscape connectivity in the main urban area of Nanjing can still improve greatly. Although many methods have been developed and used for predicting connectivity, circuit theory has rarely been used to map connectivity in urban areas. The present study demonstrates how circuit theory can be used to map connectivity in complex landscape and to identify important habitat patches and movement corridors for conservation planning, which is an

基金项目:国家自然科学基金(31670470);国家自然科学基金(51478217)

收稿日期:2018-01-25; **修订日期:**2018-03-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzyinhaiwei@163.com

advance in mapping the landscape connectivity of UGI. The circuit theory incorporates all possible pathways and combines structural and functional corridors, which improves corridor redundancy and provides an efficient and cost-effective tool for mapping UGI landscape connectivity. The results of this study provided an important reference for Nanjing UGI networks.

Key Words: green infrastructure; landscape connectivity; circuit theory; barrier mapper

气候变化与快速城镇化导致城市热岛效应加剧、空气质量恶化、生境斑块破碎化、景观连通性和生物多样性降低等一系列生态环境问题,打破了城市生态系统的平衡,严重削弱了城市可持续发展能力^[1-3]。目前,通过构建与优化城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)网络格局来提高城市自然生态景观的连通性,业已成为提升城市生态弹性与可持续发展能力的重要景观安全策略,受到国内外专家学者的广泛关注^[4-7]。

目前 UGI 网络构建的方法主要有 3 种:GIS 空间叠置方法(即“千层饼”),最小成本路径(least-cost path, LCP)与重力模型、图谱理论相结合的方法,形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)方法。GIS 空间叠置方法强调景观单元内地质-土壤-水文-植被-野生动物与人类活动以及土地利用变化之间的垂直过程与联系^[8-10];LCP 与重力模型、图谱理论相结合的 UGI 网络构建方法根植于景观生态学与保护生态学等相关理论,考虑了景观的地理学信息和生物体的行为特征,能反映景观格局与水平生态过程,较为科学地确定生态廊道的空间位置和格局、辨识廊道的相对重要性^[2,11-16]。然而,该方法需要收集自然地理信息、物种行为特征等数据信息,对数据的需求量大。MSPA 方法仅利用土地利用数据,将林地、湿地等自然生态要素作为前景(Foreground),其他土地类型作为背景(Background),采用一系列的图像处理方法将前景按形态分为互不重叠的七类(即中心 Core,桥 Bridge,环 Loop,分支 Branch,边缘 Edge,孔 Perforation 和岛 Islet),进而进行 UGI 网络的构建^[1,6,17-19]。该方法强调结构性连接,不仅可以辨识枢纽和廊道的位置,而且可以识别廊道的类型(比如线形廊道、带状廊道)^[18]。

由于三种 UGI 网络构建方法在选取枢纽、确定廊道、考虑边界效应、选择目标物种等具体的操作层面差异很大,因而得到的 UGI 网络格局多有不同,存在明显的不确定性^[8],即使是同一种方法也可能会得到不同的网络结构^[13]。另外,物种的扩散行为多具有随机性,难以选择模拟的最佳廊道进行迁徙,且一个物种的扩散廊道不一定会被其他物种所使用^[20-22]。因而,UGI 所依据的景观生态学原理比如廊道的有效性依然面临挑战,因为目前对景观的介入措施缺乏足够的经验证据^[23-24]。再者,由于获取的生态数据有限,这三种方法多侧重结构连接性的测度,对功能连通性的关注不足,且均难以分析物种的多路径扩散概率问题^[6,13,25]。

功能连通性是指景观结构促进或阻碍生物体在生境斑块间运动的程度^[4,26],它的降低会产生小的、孤立的种群,致使近亲繁殖的几率增大,从而增加物种灭绝的风险^[4,27]。因而,识别和保护能够满足多物种功能连通性的廊道,对于栖息地管理与城市生态环境保护政策制定具有非常重要的参考价值^[4,20,28]。McRae^[29]首次将物理学中的电路理论(Circuit Theory)融入景观生态学、景观遗传学领域,将景观面看作一个电导面,用电子在电路中随机流动的特性来模拟物种个体或基因在景观中的迁移扩散过程,从而预测物种的扩散和迁移运动规律、识别景观面中多条具有一定宽度的可替代路径,并可通过源地之间电流的强弱确定生境斑块和廊道的相对重要性^[29-31]。该方法因计算所需的数据量少、过程简便,整合了生境斑块间的结构性与功能性廊道,可满足多物种迁徙需求,更符合物种运动的真实情况而逐渐被应用到国外 UGI 网络格局的构建中^[7,30-35]。然而,目前国内基于电路理论来进行 UGI 网络构建的相关文献还较少^[15,36-37],而基于该理论探讨城市内部空间 UGI 网络构建方面的研究则更为少见。

本文基于 Circuitscape 4.0 软件平台,采用电路理论对南京市主城区自然生态斑块之间的景观连通性进行了定量分析,获取了自然生态斑块之间所有潜在的物种迁移扩散路径及其相对重要性(根据电流密度的大小),并借助 GIS 软件的 Linkage Mapper 工具识别了研究区的主要障碍点,进而有针对性地提出了南京市主城

区 UGI 网络格局优化的具体策略。研究结果可为南京市 UGI 网络格局的优化提供重要的科学依据与决策参考。

1 研究区概况

本文以南京市城市总体规划(2011—2020)确定的主城区作为研究区(图 1),总面积约 282km²。研究区人口密度大,城市化水平高,自然生态斑块的破碎化程度高,因而亟需进行 UGI 网络格局的优化,以提升城市生态弹性与可持续发展能力。

基于电路理论进行研究区景观连通性计算的过程中,由于人为划定的研究边界限制了电子随机流动的空间(特别是在边界附近),增加了边界区域景观阻力与景观隔离程度,从而减少了边界附近潜在路径的生成^[32]。根据 Koen 的研究结果^[4],在研究区外围设置其宽度约 20%的缓冲区便可消除人工划定边界可能带来的模拟偏差,因而本文在研究区外围设置了 3000 m 的缓冲区(图 1)。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究数据的主要来源有:2013 年 8 月 11 日的 TM 遥感影像数据、数字高程模型(DEM)数据(空间分辨率为 30 m)(数据来源:中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 <http://www.gscloud.cn>);精度为 15 级的谷歌影像图及天地图地图数据;1:50000 地形图以及南京市城市总体规划(2011—2020 年)相关图集。

首先,基于 ERDAS 软件平台,使用研究区地形图对波段融合后的 TM 遥感数据进行几何精校正(均方根误差(RMS)<1);然后,采用监督分类方法将遥感影像解译为建设用地、草地、林地、农田、道路、水体和裸地 7 种类型;最后,借助谷歌影像图、天地图、南京市总体规划等数据,对研究区的土地利用现状图斑进行了修正,得到了研究区最终的土地利用现状图。

2.2 研究方法

2.2.1 电路理论的基本原理

电路理论利用电子在电路中随机游走的特性(即随机漫步理论^[38], Random Walk Theory)来模拟物种个体或基因流在某一景观中的迁移扩散过程;物种个体或基因流被视为电子,景观被视为电导面(Resistance Map,与生态学中的景观阻力面概念相似),利于物种迁移扩散的景观类型被赋予较低的电阻(Resistance,与景观阻力概念相似),反之亦反;景观中生境质量比较好的自然生态斑块称之为节点^[29,31](Node,与生态源地概念相似)。模拟时,部分节点接地,向其他节点输入电流,结合给定的每一个栅格的电阻值,可以计算出节点间的电流密度值^[39](Current),其大小可以表征物种沿某一路径迁移扩散概率的大小^[31]。由于并联电路中有效电阻会随着电路路径数的增加而降低,相应的电流会增大,因而当廊道冗余度、宽度和连接度增加时,生物迁徙受到的阻力会减小,成功扩散的概率会增大^[32]。

2.2.2 电路理论所需数据准备

首先,根据研究区实际情况,将土地利用现状图中的林地、草地、水体作为 UGI 的组成要素,并选取面积

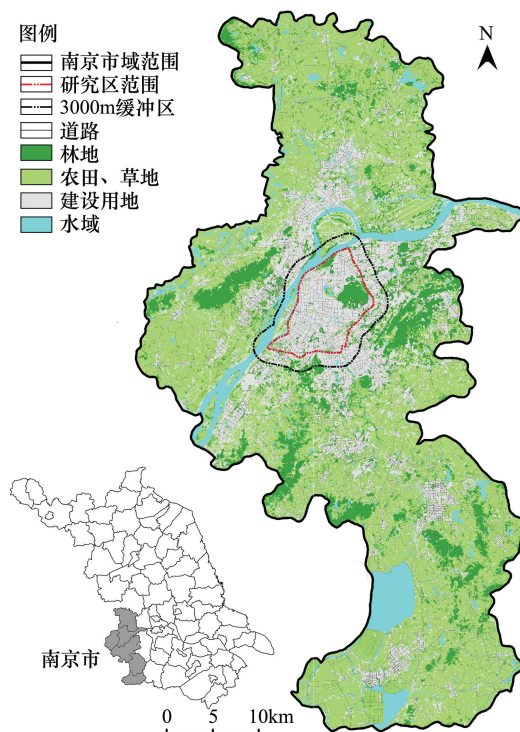


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area

大于 0.1 hm²的斑块作为节点,共计 209 处(图 2)。其次,根据不同用地类型的相对生境适宜性程度来进行其电阻的赋值(表 1),进而创建研究区的电导面(这一过程与 LCP 方法中景观阻力设置与消费面 Cost Surface 构建过程相似,具体方法参见孔繁花等^[40])。研究区属于高密度建成区,建成环境特征会对生物的迁移产生一定的影响,因而采用容积率(R)和建筑密度(C)两个因子对建设用地类型进行了细分(表 2),两个因子权重相等,即均为 0.5。最后,由于坡度对于物种的迁徙也具有一定的影响^[3],因而根据公式 1,将坡度因子叠加到构建的电导面上,得到本研究最终使用的电导面(图 2)。

$$R_{\text{final}} = R_i(1 + \alpha \times S_i)$$

(1)

R_{final} 是指每个栅格最终的电阻值, R_i 是指栅格*i*的电阻值, S_i 是指栅格*i*的百分比坡度, α 是控制坡度的阻力值系数,本文 α 取值为 1。

表 1 不同土地利用类型电阻值

Table 1 Resistance values of each land use type

土地利用类型 Land use type	分类 Classification	电阻值 Resistance	土地利用类型 Land use type	分类 Classification	电阻值 Resistance
绿地 Green space	$S \geq 10 \text{ hm}^2$	1	道路 Road	铁路	700
	$3 \text{ hm}^2 \leq S < 10 \text{ hm}^2$	3		快速路	600
	$S \leq 3 \text{ hm}^2$	5		干路	500
水体 water	$S \geq 100$	600		支路	300
	$10 \text{ hm}^2 \leq S < 100 \text{ hm}^2$	9	建设用地 Construction land	$1 \leq p < 2$	750
	$S < 10 \text{ hm}^2$	7		$2 \leq p < 3$	800
裸地 Bare land		50		$3 \leq p < 4$	850
农田 Farmland		100		$4 \leq p < 5$	900
				$5 \leq p < 6$	950
				$p \geq 6$	1000

$p = 0.5R + 0.5C$; p : 建设用地得分值 The score of construction land; R : 容积率 Plot ratio; C : 建筑密度 Building density; S : 面积 Square

表 2 容积率及建筑密度分级

Table 2 Plot ratio and building density classification

容积率 Plot ratio	等级 Class	建筑密度/% Building density	等级 Class	容积率 Plot ratio	等级 Class	建筑密度/% Building density	等级 Class
$R < 0.8$	1	$C < 10$	1	$4.0 \leq R < 6.0$	5	$40 \leq C < 60$	5
$0.8 \leq R < 1.5$	2	$10 \leq C < 20$	2	$6.0 \leq R < 8.0$	6	$60 \leq C < 80$	6
$1.5 \leq R < 2.5$	3	$20 \leq C < 30$	3	$R > 8.0$	7	$C > 80$	7
$2.5 \leq R < 4.0$	4	$30 \leq C < 40$	4				

2.2.3 基于电路理论的 UGI 网络构建

南京市主城区人口密度大、用地紧张,斑块总面积约 70.45 km²,占主城区总面积的 25%,但其发挥的景观连通性作用不一,通过电路理论模拟可识别重要斑块与廊道,对现有 UGI 的保护与优化具有重要意义。电路理论中有 4 种测度连接度的计算模式^[39],本研究基于 Circuitscape 4.0 软件平台,选用成对计算(Pairwise)和多对一计算(All-to-One)两种模式来模拟研究区自然生态景观斑块间的连通性。成对模式将景观面中的生态斑块两两配对,向其中一个斑块输入 1A 的电流,另一个斑块接地,计算得出这一对斑块之间的电流值,通过迭代运算得到所有成对斑块的电流密度分布图(图 3a)。多对一模式则将景观面中的一个生态斑块接地,其余斑块均输入 1A 电流,计算所有斑块到这一斑块的电流值,通过迭代运算得到多对一模式下的电流密度分布图(图 4 a)。结合相关研究结果^[41-44],本文选取电流密度值排名前 30%的区域组成了研究区重要功能连通

性廊道分布图(图 3b),并将排名前 20%的斑块作为在景观面中发挥“踏脚石”功能的重要斑块(图 4 b)。

2.2.4 基于障碍点识别的南京市 UGI 格局优化

障碍点识别可通过计算障碍点清除后连通性恢复值的大小来帮助决策者衡量保护现有斑块廊道还是清除一个障碍点更经济,从而使投资效益最大化。首先,借助 Conefor 工具计算所有斑块之间的地理空间距离,并将距离输入 Linkage Mapper 工具中来构建 UGI 的连接。然后,基于 Barrier Mapper 工具,设定 30 m 的搜索半径,采用移动窗口法搜索整个景观面中移除某一区域后可大幅提升连通性的潜在区域,即障碍点(图 5)。通常采用单位距离连通性恢复值(土地利用类型改变前后成本的差值与搜索半径的比值,即每米恢复值)的大小来表征障碍点对于景观连通性的影响强弱^[45](图 5)。最后,为了更为直观地显示障碍点清除前后研究区功能连通性的变化,将所有识别出的障碍点全部替换为绿地,即在理想情况下所有识别出的障碍点均可以清除,均可恢复为生境质量良好的绿地,并采用成对模式再次对景观连通性进行计算模拟,对比分析障碍点清除前后景观连通性的变化(图 6)。

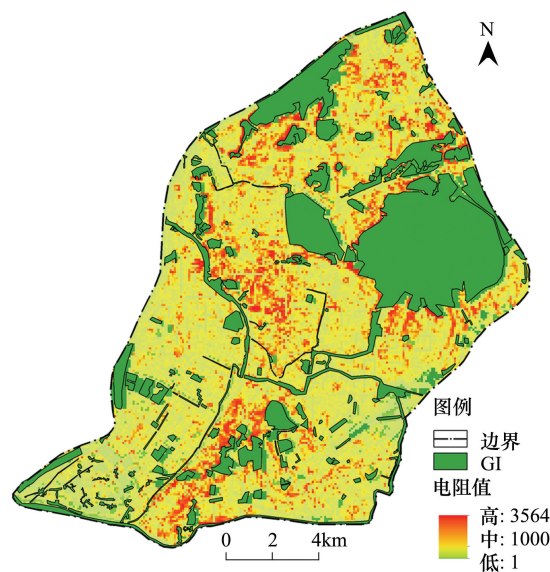


图 2 GI 要素与电阻面

Fig.2 GI components and resistance map

GI:绿色基础设施 green infrastructure

3 结果与分析

3.1 重要廊道的空间分布特征

由图 3a 可见,南京市主城区东南部和中部的电流值较大,而紫金山与玄武湖以北的片区电流值最低,这与生境斑块数量及斑块间的距离有关,斑块分布越密集、距离越近,其功能连通性就会越高。西部滨江地带与南部滨河地区的电流密度呈高低错落分布,主要是由于绿地斑块的质量及斑块间连接程度参差不齐。提取电流密度排名前 30%的区域组成了研究区的重要功能连通性廊道(图 3 b),可以发现,研究区存在多条宽窄不一的功能连通性廊道,且总体上斑块密集之处多是功能连通性廊道所在之处;西南部重要廊道的数量最多,局部簇团成网,网络密度大且破碎,结构较为复杂,其次为中部,且河流廊道(秦淮河)是其主要廊道类型,北部廊道数量最少,斑块多呈孤岛分布。

3.2 重要斑块的空间分布特征

由图 4a 可见,研究区景观破碎化程度较高,北部斑块大而孤立,南部斑块小且分散;40%的生境(约为 28.18 km²)对连通性的贡献较低,这与景观类型、斑块面积及植物群落等因素有关。例如,1 号斑块北部被多条铁路所分割,斑块内部无法形成良好的植物群落,2 号斑块及 4 号斑块中部为水体、3 号斑块中部为山体,这对于陆生物种而言,其生境适宜性会相对较差。提取多对一模拟结果中电流密度排名前 20%的区域组成重要斑块分布图(图 4 b),可以发现,生态关键区域多位于现有斑块内部,其次为斑块之间或斑块周边,在斑块密集区发挥踏脚石功能的斑块比例较高,斑块间的功能连通性廊道数量越多,斑块的重要程度越高,例如研究区西南角发挥景观踏脚石功能的斑块数量明显较多,这主要与斑块间的功能连通性廊道数量有关(图 3)。

3.3 障碍点的空间分布特征

研究区识别出的障碍点共有 155 处,但面积均相对较小(图 5),面积小于 5hm²的障碍点共有 131 处,占障碍点总数的 84.5%,其中面积小于 1 hm²的障碍点个数最多,有 48 处。障碍点面积越小则被清除的难度就越小,因而主城区景观连通性仍有较大的提升空间。障碍点多位于斑块之间或斑块边缘(图 5),且三分之二

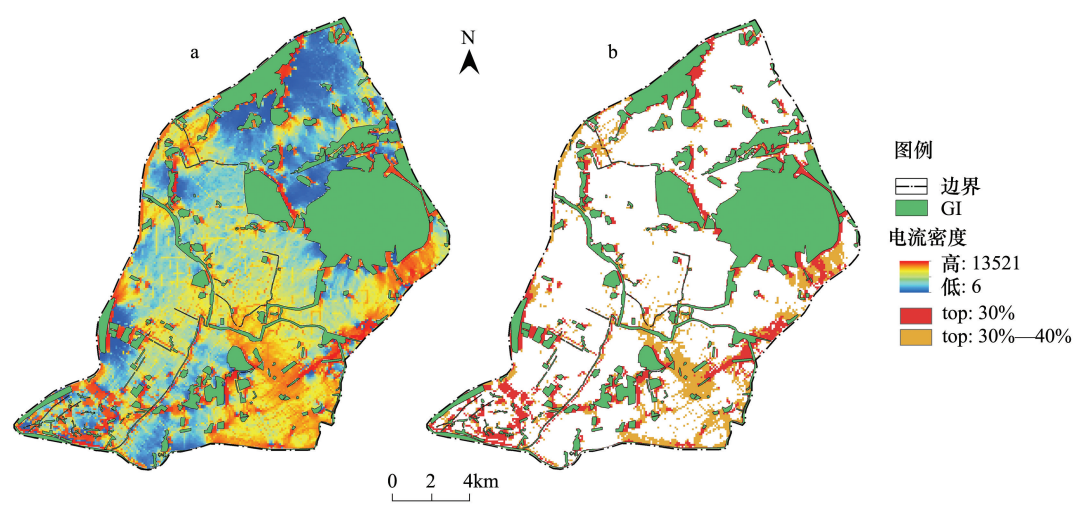


图3 成对模式模拟结果及重要廊道分布图

Fig.3 Simulation result of pairwise mode and distribution of important corridors

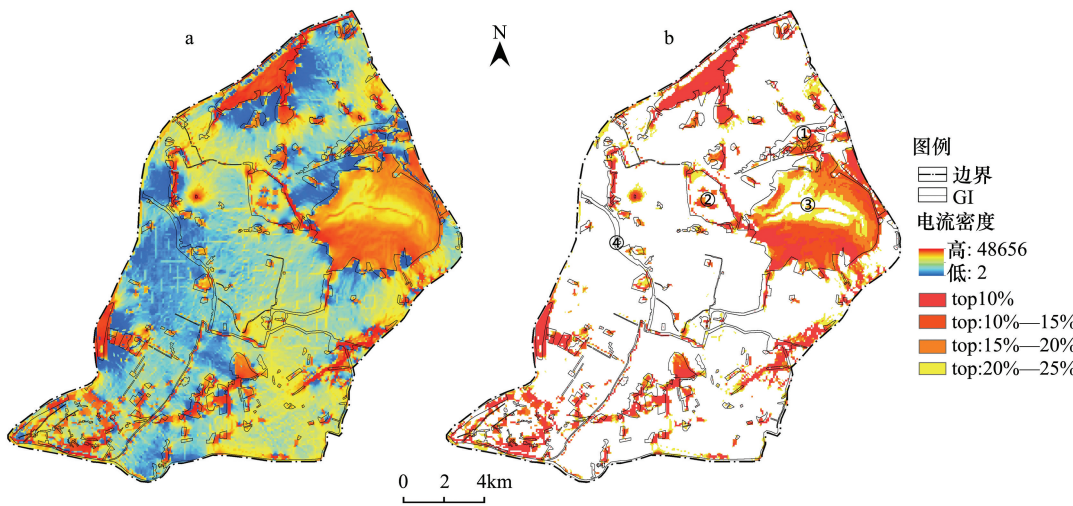


图4 多对一模式模拟结果及重要斑块分布图

Fig.4 Simulation result of all-to-one mode and distribution of important patches

的障碍点为道路,其次为居住用地等其他建设用地。道路对于生境的分割作用明显,且会一定程度上增加物种的死亡率,同时由于下垫面性质的改变,沥青、水泥的热容小,反射率大,导致盛夏时分道路多呈现出与周边不同的小气候特征,加上噪声扰动和空气污染等使得物种难以通过,因而道路对于研究区景观连通性的影响最大。建设用地是人类活动的主要场所,居住等其他建设用地由于下垫面性质的改变,均对物种迁徙产生了不同程度的阻碍作用,侧面反映出了人类活动对于生态及景观连通性的负面影响。

由图 6 可见,清除障碍点可有效提升研究区景观的连通性。障碍点清除前,研究区最大电流值为 13521A,存在的功能连通性廊道数量较少(图 6 a),清除后研究区最大电流提升为 26927A,提升近 2 倍,北部新增 4 条功能连通性廊道,中部结构性廊道围合的区域内部功能连通性得到改善,形成网状结构,南部功能连通性得到大幅提升,形成密集的网状结构(图 6 b)。障碍点清除后电流值小于 605A 的区域(即功能连通性较差的区域)减少了 520.38hm²,电流值大于 685A 的区域则共增加了 520.92 hm²。障碍点清除为研究区提供了多条功能连通性廊道,极大地提高了廊道冗余度,提升了生态系统抵御各种风险的能力。

4 研究区 UGI 格局优化的对策及建议

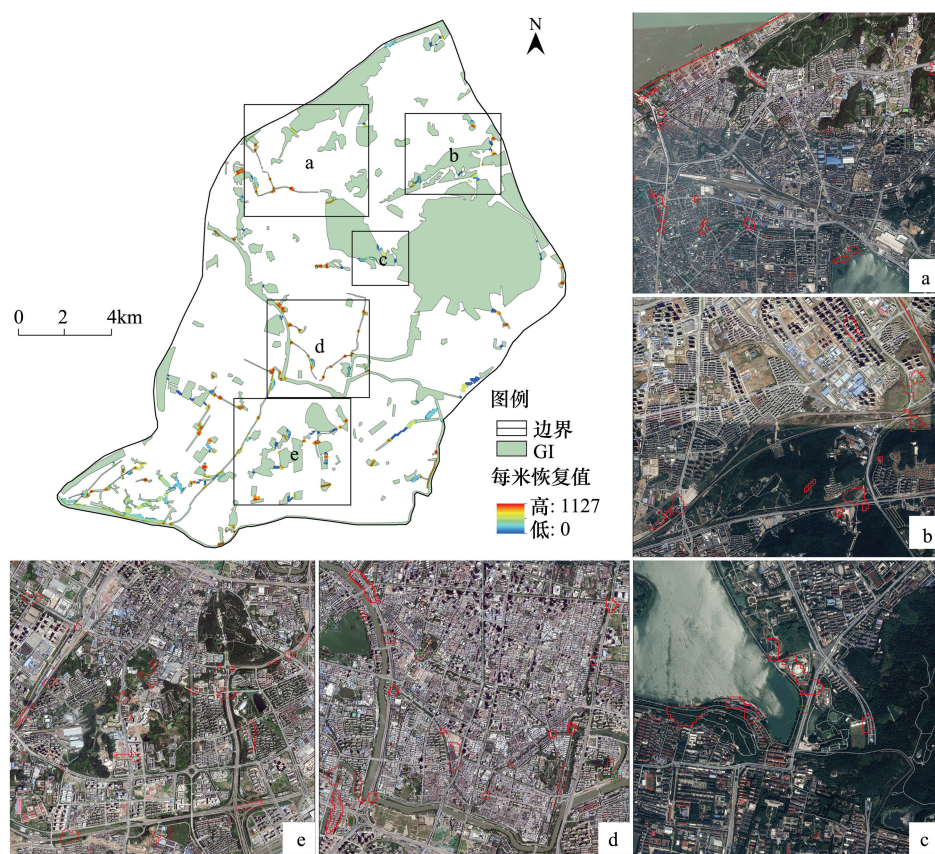


图5 障碍点识别结果及局部细节图

Fig.5 Detection result of barrier and local detail

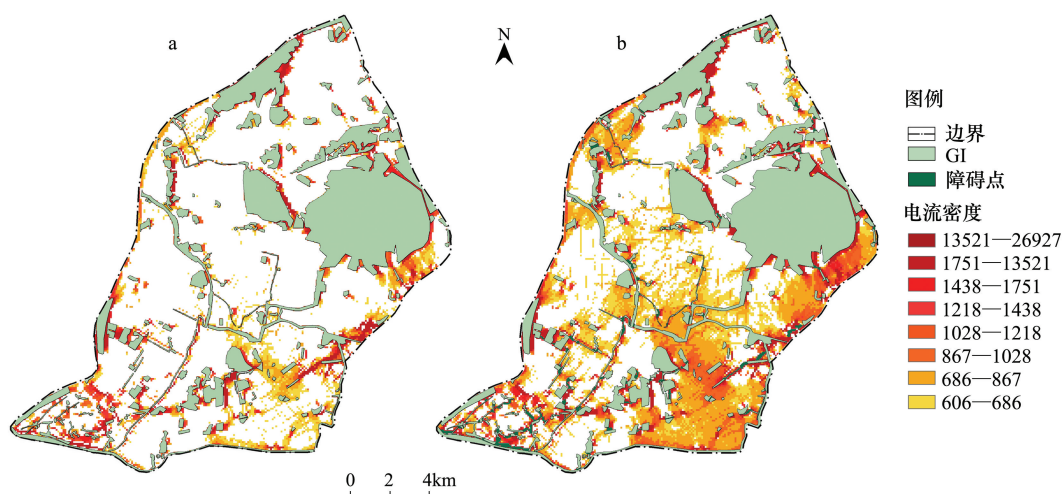


图6 障碍点清除前及清除后功能连通性廊道分布图

Fig.6 Distribution of important corridors before and after removing barriers

4.1 保护重要生态廊道与斑块,提升廊道与斑块的质量

重点保护电流密度排名前 30% 的重要生态廊道(图 3b)和电流密度排名前 20% 的生境斑块(图 4 b),并重点恢复排名前 40% 的廊道和前 25% 的斑块;在无法连接成廊道的区域(如主城区北部)适当增加点状斑块即景观“踏脚石”的数量,以减少斑块间距离,提升功能连通性。同时,提升部分现有廊道与斑块的质量,如拓

宽中部环状廊道以提升其对连通性的贡献率,在大型斑块周边(如图 4 b 中 2、3 号斑块)开展相应的复绿工程。另外,保护并非意味着完全禁止建设,应注重自然生态空间的复合利用,如控制斑块内部电流密度较高区域的建设活动和开发力度,依据电流值大小设定不同的开发等级,限制容积率,规定绿地率,对电流密度较低的区域可有选择的建设不同功能的设施,在不破坏生态功能的前提下复合游憩等其他用途,形成复合型绿色基础设施网络体系。

4.2 因地制宜清除影响景观连通性的障碍点

建议依据障碍点恢复值的大小由高至低逐一清除障碍点,在原用地上覆盖植被,恢复其生态属性。同时,可根据障碍点所处的空间位置划分清除的优先级,建议依次为斑块内部、斑块之间、斑块周边。当障碍点很难清除时,可因地制宜打通斑块之间的连接路径或对内部用地进行局部调整。例如,对于居住区性质的障碍点,可适当增加绿地面积和植被丰富度;对于河岸两旁的障碍点,可拆除蓝线范围内的部分建筑,适当拓宽河岸绿地,提升河道的生态功能,塑造特色的滨水景观;对于道路障碍点,可适当拓宽绿化带、增加绿化带内的植被群落层次或结合过街天桥建设拱涵型生物通道。

5 结论与讨论

在人口密度、城市化率较高的区域,人类活动对于绿地的侵蚀较为严重,优化 UGI 格局是提升城市生物多样性和可持续发展能力的有效方法。本文基于电路理论,采用成对和多对一计算模式模拟了研究区自然生态景观的连通性,并根据电流密度分析了斑块、廊道的相对重要性,借助移动窗口搜索法识别了研究区的主要障碍点,提出了南京市 UGI 网络格局优化的具体策略。研究结果表明,研究区景观破碎化程度较高,40%的生境斑块对连通性的贡献较低,景观连通性南部最优、中部次之、北部最差;南部重要廊道的数量最多,局部簇团成网,网络结构较为复杂,其次为中部,且河流廊道是其主要廊道类型,北部廊道数量最少,斑块多呈孤岛分布;研究区共有 155 处障碍点,多位于斑块之间或斑块边缘,障碍点清除后研究区最大电流值提升近 2 倍,电流值小于 605A 的区域减少了 520.38 hm²,表明障碍点清除可有效提升景观连通性。电路理论能够识别研究区所有的潜在廊道及其相对重要性,能够整合结构性与功能性廊道,对城市高密度建成区 UGI 网络格局的构建优化提供了简单易行的方法框架。研究结果可为南京市主城区 UGI 格局优化提供参考依据。

电路理论因结合了电子随机游走的特性而区别于以往的景观连接度模型,在模拟物种的出生扩散时具有更大的优势,新物种由于个体小,扩散行为难以被记录,且新物种对于将要穿越的环境缺少先知,仅能依据路径上所遇到的景观特征而进行随机的运动决策,因而迁徙的路径有多种可能性。然而也正因为电路理论结合了电子随机游走的特性,电子对于人工边界的阻力感知较为敏感。本文参考已有文献设置了 3000m 的缓冲区,但由于不同研究区的形状不同,缓冲区的宽度应视具体情况而定,本文将于后续探讨具体的边界效应及适宜的缓冲区宽度。在障碍点识别过程中,本文考虑到南京市主城区城市化率较高,障碍点清除的成本高,应当以最小的成本最大限度的提高景观连通性,故而选用最小的搜索半径即遥感影像最高分辨率的一个象元大小(30m)识别障碍点,但当障碍物更大时,应选用更大的搜索半径。同时,移动窗口的阻力值设定为 1 过于理想化,障碍点并非都会被恢复为绿地。今后可以根据不同的规划目标和改建措施设定障碍点识别的搜索半径和窗口阻力值。

参考文献(References):

- [1] 于亚平,尹海伟,孔繁花,王晶晶,徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. 生态学报, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [2] 张宇,李丽,吴巩固,周跃,覃顺萍,王小明. 基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析. 生态学报, 2016, 36(1): 51-58.
- [3] 陈春娣,贾振毅,吴胜军,童笑笑,周文佐,陈若漪,张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [4] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, Walpole A A. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps.

- Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 626-633.
- [5] 杰克·埃亨, 秦越, 刘海龙. 从安全防御到安全无忧: 新城市世界的可持续性和韧性. 国际城市规划, 2015, 30(2): 4-7.
- [6] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [7] Braaker S, Moretti M, Boesch R, Ghazoul J, Obrist M K, Bontadina F. Assessing habitat connectivity for ground-dwelling animals in an urban environment. Ecological Applications, 2014, 24(7): 1583-1595.
- [8] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评. 城市规划, 2012, 36(5): 84-90.
- [9] 俞孔坚, 李博, 李迪华. 自然与文化遗产区域保护的生态基础设施途径——以福建武夷山为例. 城市规划, 2008, 32(10): 88-91, 96-96.
- [10] 李博. 绿色基础设施与城市蔓延控制. 城市问题, 2009, (1): 86-90.
- [11] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [12] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(4): 181-191.
- [13] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [14] Hong S H, Han B H, Choi S H, Sung C Y, Lee K J. Planning an ecological network using the predicted movement paths of urban birds. Landscape and Ecological Engineering, 2013, 9(1): 165-174.
- [15] 青菁, 胥池, 杨彪, 杨志松, 齐敦武, 杨旭煜, 古晓东, 戴强. 小相岭山系大熊猫廊道规划. 生态学报, 2016, 36(4): 1125-1133.
- [16] 徐文彬, 尹海伟, 孔繁花. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定. 生态学报, 2017, 37(12): 4019-4028.
- [17] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [18] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 186-195.
- [19] Saura S, Vogt P, Velázquez J, Hernando A, Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 150-160.
- [20] Koen E L, Bowman J, Walpole A A. The effect of cost surface parameterization on landscape resistance estimates. Molecular Ecology Resources, 2012, 12(4): 686-696.
- [21] Beier P, Majka D R, Newell S L. Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages. Ecological Applications, 2009, 19(8): 2067-2077.
- [22] Cushman S A, Landguth E L, Flather C H. Evaluating population connectivity for species of conservation concern in the American Great Plains. Biodiversity and Conservation, 2013, 22(11): 2583-2605.
- [23] Jongman R H G, Külvik M, Kristiansen I. European ecological networks and greenways. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2/3): 305-319.
- [24] Battisti C. Ecological network planning-from paradigms to design and back: a cautionary note. Journal of Land Use Science, 2013, 8(2): 215-223.
- [25] 李慧, 李丽, 吴巩固, 周跃, 李雯雯, 梅泽文. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. 生态学报, 2018, 38(6), doi: 10.5846/stxb201706031022. (未出版)
- [26] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. Oikos, 1993, 68(3): 571-573.
- [27] O'Grady J J, Brook B W, Reed D H, Ballou J D, Tonkyn D W, Frankham R. Realistic levels of inbreeding depression strongly affect extinction risk in wild populations. Biological Conservation, 2006, 133(1): 42-51.
- [28] Beier P, Majka D R, Spencer W D. Forks in the road: choices in procedures for designing wildland linkages. Conservation Biology, 2008, 22(4): 836-851.
- [29] McRae B H. Isolation by resistance. Evolution, 2006, 60(8): 1551-1561.
- [30] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [31] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. Ecology, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [32] Koen E L, Garroway C J, Wilson P J, Bowman J. The effect of map boundary on estimates of landscape resistance to animal movement. PLoS One, 2010, 5(7): e11785.
- [33] Leonard P B, Duffy E B, Baldwin R F, McRae B H, Shah V B, Mohapatra T K. GFLOW: software for modelling circuit theory - based connectivity at any scale. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8: 519-526.
- [34] McClure M L, Hansen A J, Inman R M. Connecting models to movements: testing connectivity model predictions against empirical migration and dispersal data. Landscape Ecology, 2016, 31(7): 1419-1432.

- [35] Merrick M J, Koprowski J L. Circuit theory to estimate natal dispersal routes and functional landscape connectivity for an endangered small mammal. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1163-1179.
- [36] 王放. 栖息地适宜度与连通性: 秦岭渭水河大熊猫走廊带案例研究[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [37] Jiang G S, Qi J Z, Wang G M, Shi Q H, Darman Y, Hebblewhite M, Miquelle D G, Li Z L, Zhang X, Gu J Y, Chang Y D, Zhang M H, Ma J Z. New hope for the survival of the Amur leopard in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15475.
- [38] Doyle P G, Snell J L. *Random Walks and Electric Networks*. Washington, DC: Mathematical Association of America, 1984.174.
- [39] McRae B H, Shah V B, Mohapatra T K. 2013. Circuitscape 4 User Guide. The Nature Conservancy. [2018-01-20]. http://docs.circuitscape.org/circuitscape_4_0_user_guide.html?&id=gsite.
- [40] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [41] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 026113.
- [42] Carroll C, McRae B H, Brookes A. Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of gray wolf populations in western North America. *Conservation Biology*, 2012, 26(1): 78-87.
- [43] Bishop-Taylor R, Tulbure M G, Broich M. Surface water network structure, landscape resistance to movement and flooding vital for maintaining ecological connectivity across Australia's largest river basin. *Landscape Ecology*, 2015, 30(10): 2045-2065.
- [44] Dickson B G, Albano C M, McRae B H, Anderson J J, Theobald D M, Zachmann L J, Sisk T D, Dornbeck M P. Informing Strategic Efforts to Expand and Connect Protected Areas Using a Model of Ecological Flow, with Application to the Western United States. *Conservation Letters*, 2017, 10(5): 564-571.
- [45] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS One*, 2012, 7(12): e52604.