

DOI: 10.5846/stxb202007301988

汪勇政,李久林,顾康康,陆林.基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化——以合肥市为例.生态学报,2022,42(5):2022-2032.
Wang Y Z, Li J L, Gu K K, Lu L. Optimization of urban green infrastructure network layout based on MSPA-CIRCUIT: Case of Hefei. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 2022-2032.

基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化

——以合肥市为例

汪勇政^{1,2}, 李久林², 顾康康², 陆林^{1,*}

1 安徽师范大学地理与旅游学院/旅游发展与规划研究中心, 芜湖 241002

2 安徽建筑大学建筑与规划学院/安徽省城镇化发展研究中心, 合肥 230022

摘要:绿色基础设施格局对于城市环境的改善、经济社会的发展、城市形象的提升等有着重要的作用。以合肥市域为研究范围,基于形态学空间格局分析法(MSPA)提取 UGI 要素与生态源地,使用夜间灯光数据与坡度数据校正 InVEST 模型中生境质量模块生成的阻力面,进而结合电路理论运用 Circuitscape 软件与 Linkage Mapper 工具模拟构建 UGI 网络并识别生态走廊中的关键节点,最后基于斑块、廊道、障碍点的空间特征,提出合肥市城市绿色基础设施网络格局的优化策略。结果表明:(1)合肥市 UGI 网络由 120 个生态源地斑块、4442.4km²的廊道、62 处障碍点构成,生态斑块大部分面积较小且分散,生态斑块集中度南部优于北部。生态走廊在主城区以外环状蔓延分布,分别集中在市域东部、北部与南部,网络整体连接性较低。障碍点多数分布在生态源地边缘或生态走廊内,主要为建设用地与道路用地,低于平均阻力值的障碍点面积占障碍点总面积的 71.1%,相对容易修复;(2)合肥市现有重要生态走廊集中分布于巢湖东北、巢湖西北、市域南部,各区域内的廊道连接自成体系,未形成整体的网络连接。依据廊道分析提出保护 72 条重要生态走廊,恢复 11 条潜在生态走廊的廊道优化策略;(3)根据障碍点分析划分了 615.6km²的一级改善区、1818.3km²的二级改善区与保护区范围。研究基于 MSPA-CIRCUIT 的模型构建为合肥未来的城市绿色基础设施建设及其优化路径提供了重要的方法支撑,同时也为其他地区 UGI 网络构建与优化提供了借鉴意义。新发展理念引领下,城市绿色基础设施将在科学识别基础上,更加凸显人类福祉提升导向下的价值复合和可持续利用。

关键词:形态学空间格局分析法;电路理论;城市绿色基础设施

Optimization of urban green infrastructure network layout based on MSPA-CIRCUIT: Case of Hefei

WANG Yongzheng^{1,2}, LI Jiulin², GU Kangkang², LU Lin^{1,*}

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University/ Center for Tourism Planning and Research, Wuhu 241002, China

2 School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University/ Urbanization Development Research Center of Anhui Province, Hefei 230022, China

Abstract: Green infrastructure (GI) pattern plays an important role in the improvement of urban environment, economic and social development, and the promotion of urban image. Taking Hefei as the research area, Urban Green infrastructure (UGI) elements and ecological sources were extracted based on morphological spatial pattern analysis (MSPA), and nighttime light image data and slope data were used to correct the resistance surface generated by the habitat quality module in InVEST model. Then combining circuit theory, using Circuitscape software and Linkage Mapper tool to simulate the construction of UGI network and identify the key nodes in the ecological corridor. Finally, based on the spatial

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41930644)

收稿日期:2020-07-30; 网络出版日期:2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llin@263.net

characteristics of patches, corridors and barriers, the optimization strategy of Hefei's urban green infrastructure network pattern is proposed. The results indicated that: (1) the UGI network in Hefei is composed of 120 ecological source patches, 4442.4km² corridors and 62 barriers. Most of the ecological patches are small and scattered, and the concentration of ecological patches in the south is better than that in the north. The ecological corridor is distributed in the ring outside the main urban area of Hefei, which is concentrated in the East, North and south of the city respectively, and the overall connectivity of the network is low. Most of the barriers are distributed in the edge of the ecological source area or ecological corridor, mainly for construction land and road land. The area of barriers below the average resistance value accounts for 71.1% of the total area of barriers, which is relatively easy to restore; (2) The existing important ecological corridors in Hefei are mainly distributed in the northeast of Lake Chaohu, the northwest of Lake Chaohu and the south of the city. The corridor connection in each region is self-contained and does not form an overall network connection. According to the corridor analysis, the corridor optimization strategies of protecting 72 important ecological corridors and restoring 11 potential ecological corridors are proposed. (3) According to the analysis of barriers, 615.6km² of primary improvement area, 1818.3km² of secondary improvement area and protection area are divided. The research based on MSPA-CIRCUIT model construction provides an important method support for Hefei's future UGI construction and its optimization path, and also provides reference for UGI network construction and optimization in other regions. Under the guidance of the new development concepts, urban green infrastructure will highlight the value compounding and sustainable utilization guided by the promotion of human well-being.

Key Words: morphological spatial pattern analysis(MSPA); circuit theory; urban green infrastructure(UGI)

城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)的概念最早出现在 1994 年美国佛罗里达州的土地保护报告中^[1],其所强调的是城市自然景观与资源保护,主要由绿道、雨水花园、植被、湿地、森林等多要素组成的一个密切联系的城市绿色网络空间,是维系城市人居安全的重要支撑系统。然而随着气候变化和城市建设的快速蔓延,地区 UGI 格局呈现出破碎化的孤立状态,导致了城市热岛加剧、内涝严重、洪涝频发、空气质量恶化、生物多样性降低等一系列生态问题^[2-4],严重威胁到城市人居安全,随着近年来对生态文明的不断倡议,重构 UGI 格局已成为缓解城市生态问题,促进城市自然空间连通,提升城市综合魅力的重要举措^[5]。

随着人们对于生态环境保护意识日趋强烈,环境品质逐渐成为城市吸聚力的重要动力来源,此时期的 UGI 网络格局,逐渐成为城市资金投放、人才引进、以及城市形象塑造等的重要标准之一,并促进城市经济增长、效率提高以及地位上升,是当代城市经济社会发展的重要增长趋向^[6-8]。城市拥有密集的建成环境,UGI 有助于疏解城市紧密空间,并为现有建成环境提供休息、游憩场所^[9],然而如何有效识别对整体格局影响较大的重要生态斑块,并基于斑块提取构建 UGI 网络格局,已然成为当前研究的热点,其构建方法主要包括 GIS 分层叠加法^[10-11]、图论法^[12]、形态空间模式分析^[13-16]以及电路理论模型^[17-19]。既有的 UGI 网络构建方法多是直接按照斑块面积提取生态斑块、依据地形自然条件构建阻力面,未考虑到不同斑块的生态质量差异性以及经济社会与自然生态多重因素对生态质量的复合影响。而形态学空间格局分析法(MSPA, Morphological Spatial Pattern Analysis)是基于腐蚀、膨胀、开启、闭合等数学形态学原理对栅格图像的空间格局进行度量、识别和分割的一种图像处理方法^[20],欧盟科学中心用于森林格局、生物保护研究的主要方法,从像元的层面上识别重要斑块和廊道,强调结构性连接。电路理论模型则是将电子随机迁移的特性应用于景观生态学领域,可有效模拟生态流随机蔓延过程,并具有十分显著的拟合性^[21]。综上,研究首先基于形态学进行用地要素识别,再进一步从斑块面积规模限定提取生态源地;在阻力面构建中,本研究首先对区域生境质量进行分析,再以自然地理因素(坡度)、社会经济因素(夜间灯光数据)进行阻力面校正,从而构建综合阻力面;最后基于电路理论识别廊道并构建 UGI 网络。鉴于以上探讨,基于现有建成环境,通过“MSPA——CIRCUIT”构建 UGI 网络,利用形态空间模式分析识别重要绿色基础设施,模拟在建成环境下的网络路径,对于 UGI 网络格局构

建与优化具有十分重要的意义,在一定程度上提高了源地、廊道、障碍点识别的准确性,能够有效提高对区域 UGI 的系统性综合分析。

合肥市生态条件良好,全市处于发展的高速时期,如何协调社会经济发展和生态保护之间的矛盾是当前面临的重要问题。本研究根据遥感图像解译土地利用类型,采用 MSPA 方法,识别出研究区核心景观要素作为合肥市生态源地,基于 InVEST 模型构建景观阻力面,利用电路理论模型构建 UGI 网络格局并识别生态夹点、障碍点以及划分改善区,针对改善区提出对区域生态保护管理和构建生态空间网络建议。以期合肥市国土空间规划、生态空间构建和生态保护红线管控提供有效支撑,也为类似区域生态空间网络研究提供参考和示范。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域

合肥,安徽省省会,国土总面积 11445.1km²(图 1)。合肥地处江淮之中,城市缘水而起、因水而兴,南有巢湖、北有董铺水库与大房郢水库,形成南北两个生态扇面;市域东侧有公安山、浮槎山、银屏山等,西侧有紫蓬山,南侧有牛王寨、冶父山、雾顶山等;良好的生态本底能够保护合肥市生态环境,弘扬水绿交融的生态空间。但经济社会的快速发展,生态问题日益突出,景观斑块破碎化严重、生态廊道连接较弱。近年来,合肥城市综合竞争力快速提升,综合性国家科学中心、长三角城市群副中心城市等国家战略定位促进了城市规模快速扩张。城市快速发展引发人地关系不断发生剧烈变化,给城市的持续健康发展带来严峻的挑战。在转型发展背景下,城市生态环境质量成为高质量发展重要支撑,构建合肥市 UGI 网络对于国土整治和优化国土空间格局,改善合肥市人居环境,吸引创新要素集聚,提升国土魅力空间等都具有重要作用。

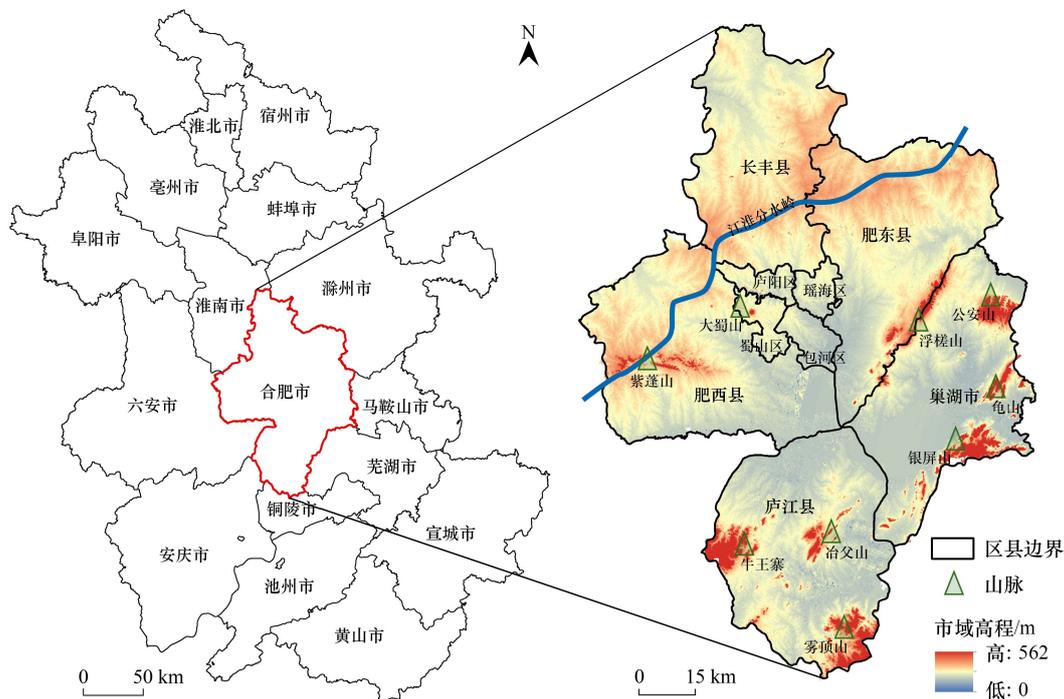


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area

1.2 数据来源

本研究主要依据 Landsat8 OLI-TIRS 卫星数字产品,下载的合肥市 2018 年 5 月 30 号的空间分辨率 30m×

30m 遥感影像,并对研究区域土地利用类型进行解译。

阻力面构建中所使用的 30m 分辨率 DEM 数据来源于地理空间数据云 GDEMDEM 空间数据集 (<http://gscloud.cn>);夜间灯光数据来源于资源环境云平台 (<http://resdc.cn>),基于数据的可获得性,本研究夜间灯光数据采用 2018 年 VIIRS 数据。

2 研究方法说明

2.1 基于 MSPA 的生态源地识别

MSPA 是基于土地利用划分景观类别的方法^[22]。分析过程中选取具有良好生态服务功能的用地类别作为“前景”,本文具体包括林地、草地、水体^[23]。MSPA 对于景观的研究尺度十分敏感,合理选择 MSPA 的像元大小与边缘宽度值方能得到对生态过程的正确解释,为此根据已有对于研究区整体景观生态格局的分析以及国内外对于 MSPA 的相关参数设置^[24-26]。首先将合肥市 30m×30m 的土地利用类型栅格图转换为前景与后景的二元图像,再使用 Guidos Toolbox 软件将其处理为 7 类景观要素(表 1、图 2)。

MSPA 景观分类中核心区多为大面积林地、水体等自然生态良好的区域,是 UGI 网络中重要的生态服务来源,因此将“核心区”用地作为 UGI 的组成要素,得到的生态资源面积占市域面积的 54.46%。并进一步限定面积大于 1km²的斑块作为生态源地,提取到市域范围内生态源地共 120 个(图 2),总面积达 1439.5km²,占市域总面积的 12.58%。生态源地主要由水体与山脉组成,包括巢湖、大房郢水库、董铺水库、紫蓬山、牛王寨、冶父山、雾顶山、浮槎山、公安山以及银屏山等。生态源地在空间上呈现出较为分散状态,南部生态源地较北部相对集中,最大的生态源地为位于城市中部的巢湖,使得合肥大湖名城的气质名副其实。

表 1 MSPA 景观类型及其占比

Table 1 MSPA landscape types and their proportion

MSPA 景观类型 MSPA ⁽¹⁾ Landscape type	面积占比 Proportion/%	MSPA 景观类型 MSPA Landscape type	面积占比 Proportion/%
核心区 Core	54.46	环 Loop	0.66
孤岛 Islet	14.05	桥接区 Bridge	2.52
穿孔 Perforation	0.58	分支 Branch	8.97
边缘 Edge	18.76		

MSPA, 形态学空间格局分析 Morphological Spatial Pattern Analysis

2.2 基于生境质量的阻力面

根据研究区内各类型用地的生境质量构建阻力面,能够较好地反映不同用地之间的差异,也能在一定程度上描述同种类型用地在不同环境中的差异。

使用 InVEST 模型中 Habitat Quality 模块对研究区生态进行评估,模型最终会输出 0—1 之间的质量得分值来表征生境质量。结合已有研究^[27-29],生态阻力面的设定不仅仅需要考虑土地覆被类型,还要关注自然地形条件以及人工干扰强度对生态流动的阻力差异,因此本文再使用夜间灯光数据与坡度数据作为校正因子(图 3)根据公式(1)进行校正,得到本研究最终使用的电导面(图 4)。

$$R = R_0 \times S_{per} \times OLS \quad (1)$$

式中, R 为研究区每个栅格校正后的最终电阻值, R_0 为生境质量倒数构建的初始电阻值, S_{per} 为百分比坡度,OLS 为归一化夜间灯光指数。

据图 4 看,电导面中电阻值较大的区域主要表现在中心城区及下属各县城的城市建成区范围内,且不难看出中心城区呈现出指状放射式发展态势。

2.3 基于电路理论的城市绿色基础设施网络构建

电路理论中将动植物的运动和基因流类比为电流,将阻力面定义为电阻面;电子在电路中的移动受电阻的干扰,低电阻区域电子移动通畅,则该区域累积电流值越高,电路网络连通性较好;反之亦反。根据电子在

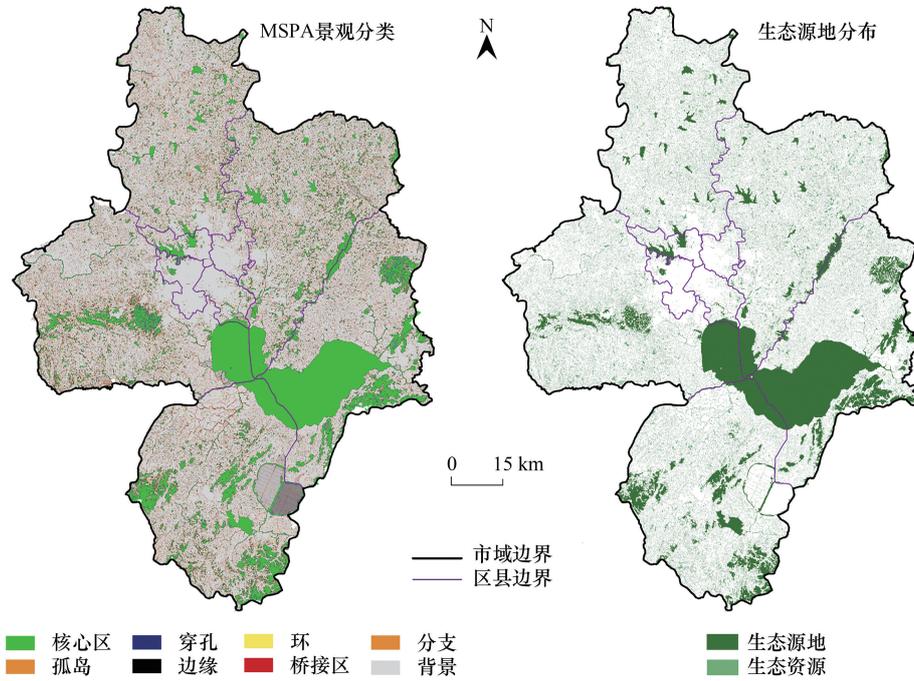


图2 MSPA 景观分类与 UGI 生态源

Fig.2 MSPA landscape classification and GI ecological source

MSPA, 形态学空间格局分析 Morphological Spatial Pattern Analysis; UGI, 城市绿色基础设施 Urban Green Infrastructure

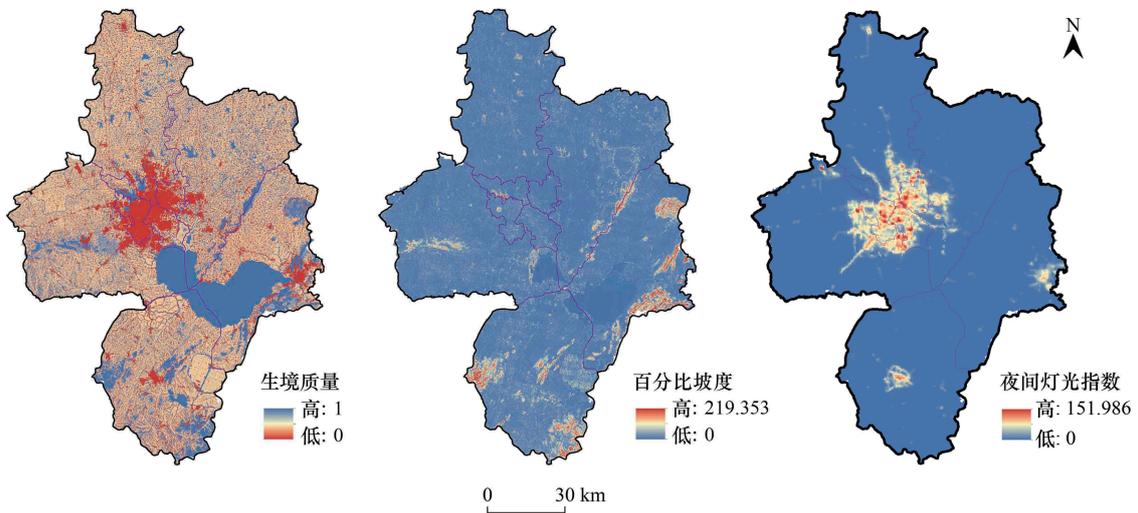


图3 校正因子

Fig.3 Correction factor

电路中随机游走的特性使用不同计算方式,评估多种分散路径在网络中的表现。

本研究基于电路理论使用 Circuitscape 软件与 Linkage Mapper 工具进行模拟。Circuitscape 软件提供了四种计算方式,其中“All-to-one”(多对一模式)主要用于重要生态斑块的识别,“Pairwise”(成对模式)主要用于廊道的识别。研究选取“All-to-one”(多对一模式)与“Pairwise”(成对模式)进行生态源地间的连通性模拟。使用 Linkage Mapper 工具构建 UGI 网络,并使用 Barrier Mapper 工具设定搜索半径为 300m 进行网络中障碍点

的识别。

3 结果分析

3.1 重要生态源地的空间特征

在多对一模式中, Circuitscape 将一个节点接地, 其余所有节点注入 1A 电流, 对每个节点依次重复此过程, 生成电流累积图, 如图 5 所示。研究区域平均电流值为 609A, 可以发现绝大多数生态斑块累积电流值较低。最高电流累积值为 7850A, 出现在巢湖, 面积达 796km²。提取出研究区内相对电流值较高的斑块, 识别出图 5 中一级重要斑块面积达 1443.3km², 二级斑块面积 452.6km², 三级斑块面积 56.5km², 三个等级斑块的总面积占研究区总面积的 17.06%, 三个等级的斑块对 UGI 网络的连通性奠定了重要基础。

市域内的斑块除巢湖外, 面积均较小且分散, 形成以巢湖为中心的斑块分布。从行政区划上看, 县级巢湖市由于占据了巢湖大部分水域面积, 成为市域内拥有绿色基础设施面积最大的行政单元; 其次为庐江县, 庐江县域北部有巢湖, 中部有冶父山、黄陂湖, 西部有牛王寨, 南部有雾顶山, 山脉水系纵横, 生态系统稳固; 而主城区内的瑶海区, UGI 斑块分布为零, 现状最为缺乏, 主要源于早期合肥市在该区域的发展定位中以重工业和高耗能产业为主, 亟待进行环境整治与生态恢复。整体而言, 市域南部 UGI 斑块集中, 北部稀缺, 表明合肥市南部城市绿色基础设施质量明显好于北部地区, 南北差异显著。

3.2 重要生态走廊的空间特征

在成对模式下, 对所有节点进行成对处理, 依次使每对中的一个节点连接到 1A 电流, 而另一个节点接地。对所有成对节点之间进行迭代计算生成有效电路图 6。成对模式下能够映射网络中连通性较好的走廊, 廊道中电流值最高为 465.07A, 主要分布在南部庐江县的冶父山与黄陂湖之间、北部肥东县的江淮分水岭途经之处, 两处在网络连接中起到重要作用。其余生态斑块密集之处, 廊道出现的数量也越多, 网络联系越强。

对累积电流值进行分类, 提取大于 20A 的较高部分作为研究区域 UGI 网络中的廊道构成, 其空间分布如图 6。其中重要廊道面积 2445.7km², 次要廊道面积 1996.7km², 廊道总面积占研究区总面积的 38.8%。

从图 6 可以发现, 廊道主要在主城区以外蔓延, 这与主城区内城市化特征显著, 建设用地密集, 各类生产活动使得人工干扰强度较大, 与自然环境产生较大冲突, 导致生态斑块稀少。而廊道的走势可近似看作沿市域范围的环状分布, 这与近年来合肥环形放射式空间拓展模式基本吻合, 生态廊道形成天然绿环, 对于市域 UGI 网络的构建与维护具有明确的指向性意义。市域东南部廊道最为密集, 西部肥西县以北廊道最为薄弱, 这表明在下一步生态维护的同时, 应以生态薄弱地区为抓手, 重点恢复, 从而提升 UGI 网络稳定性。

3.3 障碍点的空间特征

障碍点是因为阻隔了生态系统中信息传递而被定义的, 主要出现在物种或基因移动的廊道内。基于电路理论使用 Linkage Mapper 工具内的成对算法进行障碍点分析, 识别出研究区障碍点共 62 处 (图 7), 总面积达 615.6km², 占研究区总面积的 5.38%。其中面积大于 1km² 的障碍点共有 52 个, 占障碍点总数的 83.9%, 成为未来区域网络连通性改善的重点区域。障碍点的颜色深浅表征了障碍点的阻力值高低, 颜色越深的障碍点,

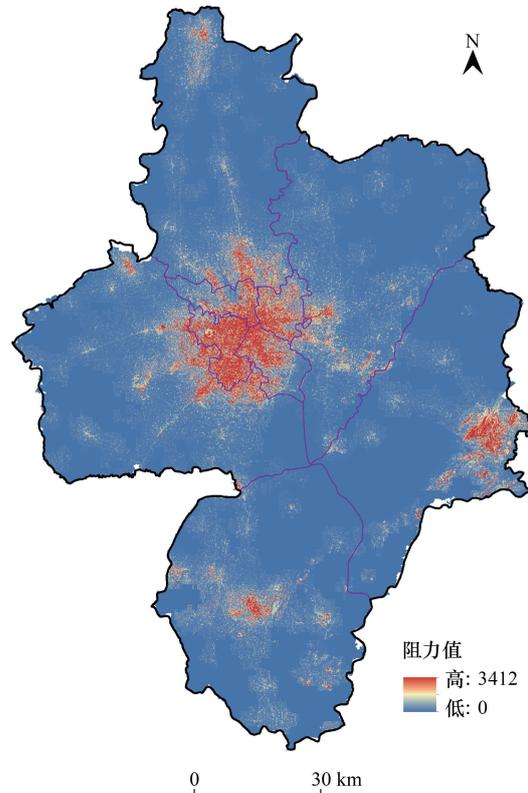


图 4 阻力面

Fig.4 resistance surface

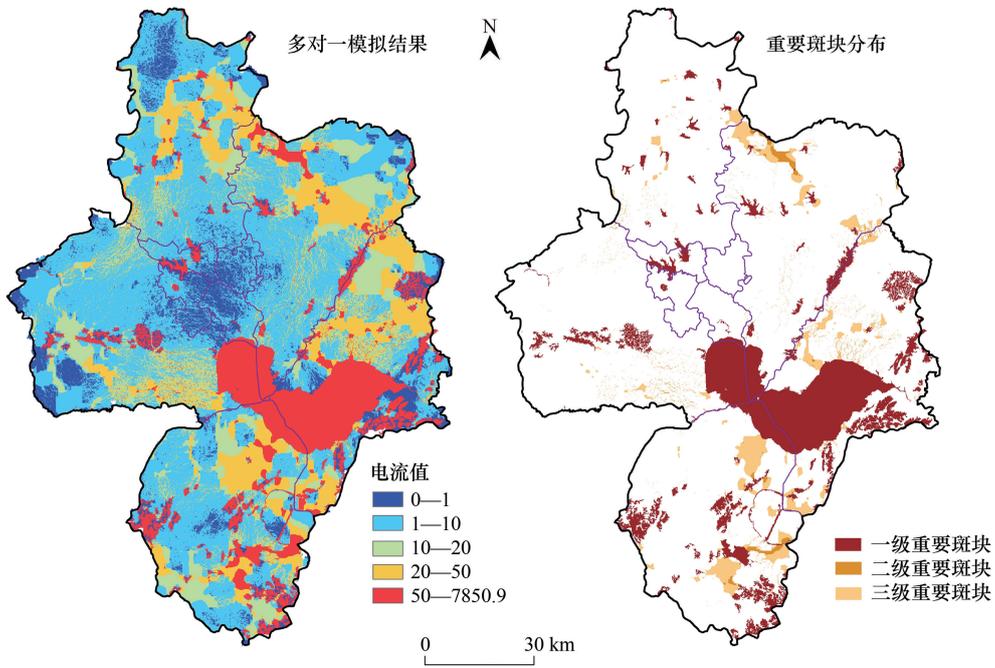


图 5 多对一模拟结果及重要斑块分布

Fig.5 Many-to-one simulation results and important plaque distribution

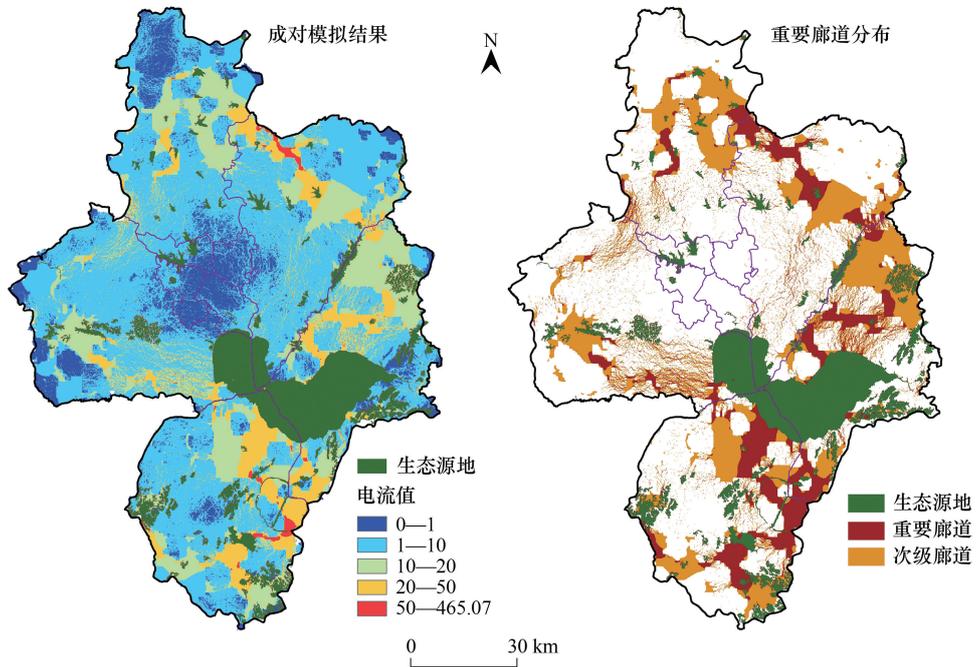


图 6 成对模拟结果及重要廊道分布

Fig.6 Paired simulation results and important corridor distribution

阻力值越高,修复越难越大。以平均阻力值分类,低于平均阻力值的障碍点面积占障碍点总面积的 71.1%,表明区域内大部分障碍点被修复的可能性大。

图 7 中编号 13 的障碍点面积最大,达 96.2km²,该障碍点的东南即为董铺水库与大房郢水库,障碍点 13

以西是合肥新桥机场。但该障碍点的整体阻力与障碍 6、11、15、57 等相较而言偏低,因此可以判断该处障碍修复难度较低,但由于面积覆盖区域大而修复周期较长。

研究区内的障碍点多分布在生态源地边缘或生态走廊内,通过图 7 中与影像图的对比可以发现,大部分的障碍点为建设用地与道路用地,个别障碍点出现在山脉边缘,如市域南部冶父山脉,出现多处小面积的障碍点。同时可以发现面积较大的障碍多出现在自然与人工生态系统交融的区域;而面积相对小的障碍多出现在人为活动频繁的区域,多为城镇居民点用地,这些区域内生态走廊本身就比较短而窄,随着障碍点的阻力值升高,可能直接切断生态走廊。因此,障碍点的改善与修复是 UGI 网络优化关注的重点。

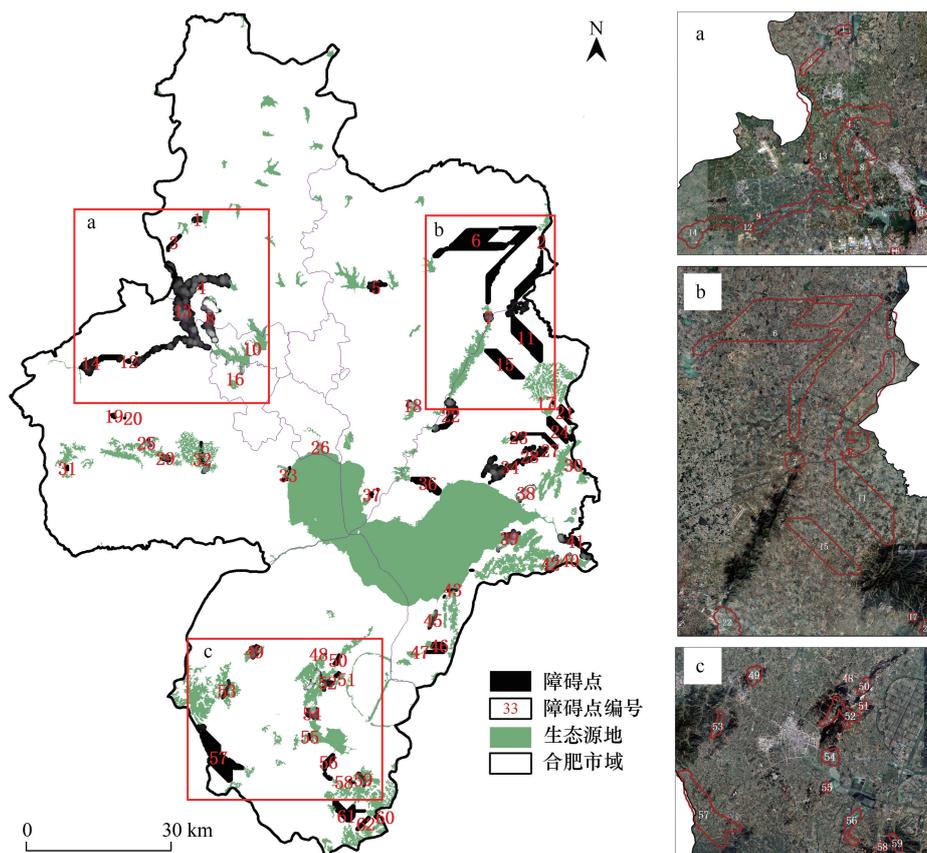


图 7 障碍点的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of barriers

4 城市绿色基础设施网络格局优化路径

4.1 斑块与廊道的生态保护与质量提升

UGI 格局优化结构最直接的显性表征即生态斑块数量与面积的增加、生态廊道的拓展、障碍点的减少。基于 Circuitscape 多对一模式识别出的重要生态斑块,在 Linkage Mapper 中进行 UGI 网络廊道优化的研究。据分析,合肥市现有重要生态走廊 72 条,最长的廊道达 34.9km;因环境质量改善可能出现的潜在走廊有 11 条(图 8),这种潜在廊道对于 UGI 网络之间的连接起到重要促进作用。

廊道的分布集中在三个区域:巢湖东北、巢湖西北、市域南部。巢湖东北部区域廊道主要以浮槎山、公安山为中心连接周边斑块,巢湖西北区域以董铺水库、紫蓬山山脉为中心连接区域 UGI 斑块,市域南部则是主要连接庐江县域内的山脉水系。各区域内的廊道连接自成体系,未形成整体的网络连接。

在保护和提升 UGI 网络稳定性和连通度的过程中,应当首先明确对于生态斑块即生态源地的保护,诸如

浮槎山、公安山、紫蓬山这类天然生境质量较好的生态源地,必须严格执行生态保育措施,以生态保护为前提,加强生境系统的保护与维护,实施退耕还林、封山育林等生态保护工程,提高森林覆盖率。在经济发展过程中切忌城市性建设痕迹过重,充分发挥资源优势,大力生态林果产业和旅游度假休闲产业,立足于生态优先前提下推动片区经济发展。

生态廊道的维护着眼于两个方面,其一,节点的数量和质量是保障廊道形成的基础,因此,廊道尤其潜在廊道的形成必须依赖于生态源地的不断增多和品质的提升;其二,就其本身而言,尽量拓宽廊道宽度以提升对网络连通性的贡献,开展廊道周边的复绿工程建设。对于本项研究,在保护 UGI 网络中生态斑块的基础上,除了要恢复障碍点的生态以外,还需构建并优化 UGI 网络,形成环网状的布局。即以巢湖为市域 UGI 核心,重点修复市域东部与西部的廊道连接,将庐江县内的绿色基础设施系统连接至巢湖并入市域 UGI 网络,增加合肥绿色基础设施网络的连接效率与稳定性。

4.2 基于障碍点分析的改善区划分

通过对 UGI 网络中的障碍分析,识别市域内生态优先改善区的范围(图 9),能够较为清晰地指明下一步生态工作的重点。根据障碍分析的结果,划分为两级改善区与保护区,其中一级改善区 615.6km²、二级改善区 1818.3km²,保护区即为一级重要斑块。一二级改善区主要分布在生态斑块之间的廊道连接处,一级改善区的改善要求最为迫切,一旦措施显著改善效果亦最为明显,该区域内的生态恢复能够直接提升 UGI 网络整体的连接效率。二级改善区的面积分布广,对区域的改善成效相对缓慢,因而是一项需要长期的改善与维护的工作。作为一级重要斑块的保护区是区域基础设施网络形成的基石。

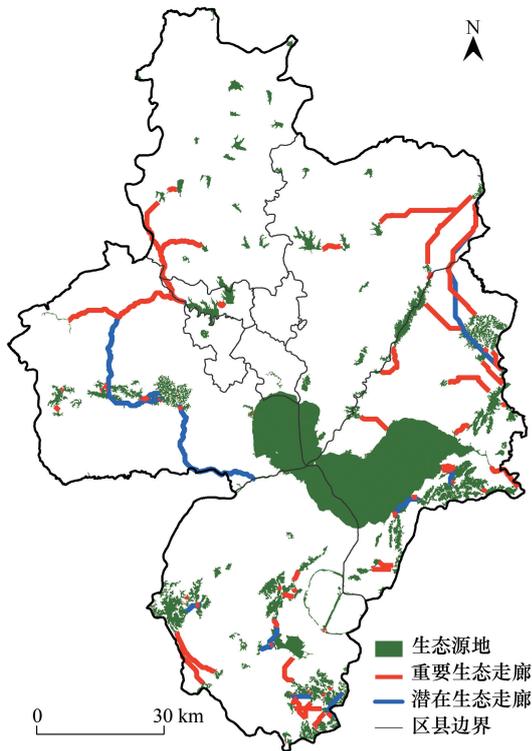


图 8 廊道优化结构

Fig.8 Corridor optimization structure

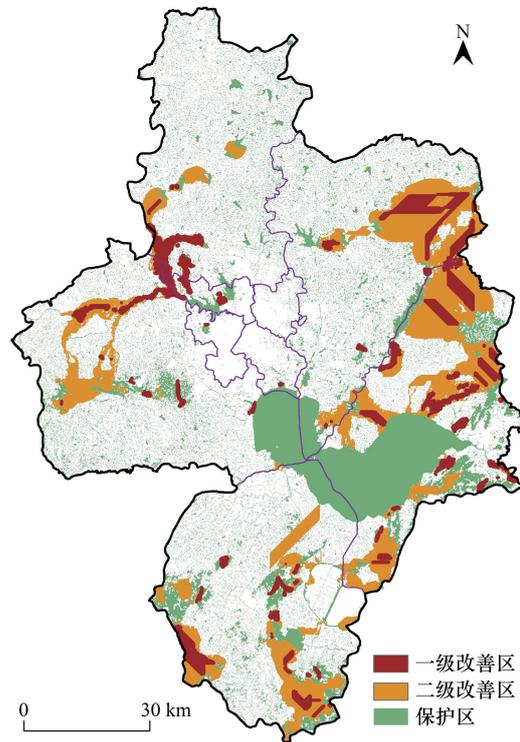


图 9 改善区范围

Fig.9 Improvement zone

5 结论与讨论

5.1 结论

根据 MSPA 进行 UGI 网络生态源的提取,再根据电路理论进行网络的构建以及廊道中关键点的识别,得

出以下结论:

(1)合肥市域范围内生态源地共 120 个,主要分布在市域山脉内,总面积达 1439.5km²,占市域 12.58%;重要廊道面积 2445.7km²,次要廊道面积 1996.7km²,廊道总面积占研究区的 38.8%;识别出障碍点共 62 处,总面积达 615.6km²,占研究区总面积的 5.38%。

(2)根据电路理论进行廊道的优化,合肥市现有重要生态走廊 72 条,潜在走廊 11 条;呈现区域局部集中、整体分散的空间分布格局;对斑块和廊道的修复能够显著提升市域 UGI 网络的稳定性和连接效率。

(3)障碍分析是 UGI 网络优化的重点内容,根据障碍点的阻力值,划分为一级改善区、二级改善区与保护区,一级改善区 615.6km²、二级改善区 1818.3km²;改善区的划分对于合肥市 UGI 的时序性建设具有重要意义。

5.2 讨论

本次 UGI 网络格局优化研究主要是从生态保护单向维度关注了生态保护发展的多样性和可持续性。MSPA 可应用于在复杂生态环境为生态景观恢复和区域生态廊道管理提供参考。然而,本次研究也有一些不足之处。首先,在合肥市 UGI 网络格局的建设中没有考虑特定物种对生态廊道宽度的敏感性,生态走廊的宽度也应该是大型物种未来需要考虑的因素之一。其次,没有及时分析区域景观格局和生态系统服务功能的变化对生态廊道的影响。合肥市的生态景观和生态系统服务功能随着时间的推移发生了显著变化,研究它们的变化趋势,可以为生态恢复或生态廊道建设提供重要参考。第三,虽然基于 INVEST 模型的生态系统服务功能被纳入生态阻力方面的构建中,但仍有一些社会经济因素没有被纳入,未来的生态网络研究应充分考虑自然和社会因素的影响。

在经济发展新常态背景下,以合肥为代表的新兴崛起的特大城市面临高质量发展的转型要求,契合时代特征的 UGI 将成为新时代城市综合竞争力角逐的重要资源和国土魅力展示的核心空间,以 UGI 为基础支撑的国土空间整治和布局优化将进一步支撑人地系统新阶段城市的可持续发展。未来应在科学识别城乡生态资源的基础上,突破生态资源保护与城乡建设发展的空间分割划界,关注新的生产、生活方式引领下,UGI 与城乡发展的互动融合与可持续利用。

在新发展理念引导下,UGI 已成为吸引创新要素集聚的主要空间资本,新的产业路径和新的利用方式将促进人口、土地与生态等要素不断融合、重组,城乡新的功能空间与利用形式不断涌现。近年来,合肥以“大湖名城、创新高地”为城市名片,以打造综合性国家科学中心为契机,在“绿色发展、美丽巢湖”的战略引领下,充分依托巢湖核心生态与文化资源,提出环巢湖绿色发展区和巢湖北岸科技创新走廊发展战略。通过科学识别核心生态资源,强化巢湖生态环境治理,构筑区域“蓝绿交织”生态网络等一系列重要举措,各类发展要素不断积聚发展,创新发展“孵化器”效应初显。另一方面,随着中国进入大众休闲时代,UGI 已成为城市居民休闲游憩的主要承载空间,以环巢湖国家旅游休闲区为标志性的都市“乡土-生态”空间^[30]被不断(再)生产,文化—游憩—生态的融合发展提升了 UGI 的复合价值,增进了地方人口福祉,赋予了 UGI 更为丰富的时代内涵。

参考文献 (References):

- [1] da Silva J M C, Wheeler E. Ecosystems as infrastructure. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017, 15(1): 32-35.
- [2] Galagoda R U, Jayasinghe G Y, Halwatura R U, Rupasinghe H T. The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical microclimatic changes and human thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 34: 1-9.
- [3] Herath H M P I K, Halwatura R U, Jayasinghe G Y. Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 212-222.
- [4] Mekala G D, MacDonald D H. Lost in transactions; analysing the institutional arrangements underpinning urban green infrastructure. *Ecological Economics*, 2018, 147: 399-409.
- [5] 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. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1608-1616.

- [6] Rolf W, Pauleit S, Wiggering H. A stakeholder approach, door opener for farmland and multifunctionality in urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 40: 73-83.
- [7] Rolf W, Peters D, Lenz R, Pauleit S. Farmland-an elephant in the room of urban green infrastructure? lessons learned from connectivity analysis in three German cities. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 151-163.
- [8] Buijs A, Hansen R, Van Der Jagt S, Ambrose-Oji B, Elands B, Rall E L, Mattijssen T, Pauleit S, Runhaar H, Olafsson A S, Møller M S. Mosaic governance for urban green infrastructure: upscaling active citizenship from a local government perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 40: 53-62.
- [9] 西奥多·赵·林. 基于绿色基础设施的城市社区复兴——以华盛顿特区为例. 殷一鸣, 译. *国际城市规划*, 2018, 33(3): 23-31.
- [10] 徐威杰, 陈晨, 张哲, 邵晓龙, 张晓惠, 张彦. 基于重要生态节点独流减河流域生态廊道构建. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 805-813.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Dehaghi I M, Soffianian A, Hemami M R, Pourmanafi S, Salmanmahiny A, Wu G M. Exploring structural and functional corridors for wild sheep (*Ovis orientalis*) in a semi-arid area. *Journal of Arid Environments*, 2018, 156: 27-33.
- [14] Shi X M, Qin M Z. Research on the optimization of regional green infrastructure network. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4649.
- [15] 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.
- [16] 邱瑶, 常青, 王静. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施网络规划——以深圳市为例. *中国园林*, 2013, 29(5): 104-108.
- [17] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [18] 倪庆琳, 丁忠义, 侯湖平, 贾宁凤, 王慧. 基于电路理论的生态格局识别与保护研究——以宁武县为例. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 67-73.
- [19] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [20] Mann D, Agrawal G, Joshi P K. Spatio-temporal forest cover dynamics along road networks in the Central Himalaya. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 383-393.
- [21] 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.
- [22] Wei J X, Qian J, Tao Y, Hu F, Ou W X. Evaluating spatial priority of urban green infrastructure for urban sustainability in areas of rapid urbanization: a case study of Pukou in China. *Sustainability*, 2018, 10(2): 327.
- [23] Kang S J, Kim J O. Morphological analysis of green infrastructure in the Seoul metropolitan area, South Korea. *Landscape and Ecological Engineering*, 2015, 11(2): 259-268.
- [24] Clay E, Moreno-Sanchez R, Torres-Rojo J M, Moreno-Sanchez F. National assessment of the fragmentation levels and fragmentation-class transitions of the forests in Mexico for 2002, 2008 and 2013. *Forests*, 2016, 7(3): 48.
- [25] Wang H F, Pei Z P. Urban green corridors analysis for a rapid urbanization city exemplified in Gaoyou City, Jiangsu. *Forests*, 2020, 11(12): 1374.
- [26] Xiao L, Cui L, Jiang Q O, Wang M L, Xu L D, Yan H M. Spatial structure of a potential ecological network in Nanping, China, based on ecosystem service functions. *Land*, 2020, 9(10): 376.
- [27] Li S C, Xiao W, Zhao Y L, Xu J F. Quantitative analysis of the ecological security pattern for regional sustainable development: case study of Chaohu Basin in Eastern China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2019, 145(3): 04019009.
- [28] 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): 4363-4372.
- [29] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 826-835.
- [30] 陆林, 任以胜, 徐雨晨. 旅游建构城市群“乡土—生态”空间的理论框架及研究展望. *地理学报*, 2019, 74(6): 1267-1278.