

DOI: 10.20103/j.stxb.202303140478

王一鸣, 尹海伟, 孔繁花, 苏杰. 顾及屋顶绿化的城市三维生态网络构建——以南京市中心城区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9121-9132.

Wang Y M, Yin H W, Kong F H, Su J. Construction of urban 3D ecological network considering green roofs: A case study of downtown Nanjing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9121-9132.

# 顾及屋顶绿化的城市三维生态网络构建 ——以南京市中心城区为例

王一鸣<sup>1</sup>, 尹海伟<sup>1,\*</sup>, 孔繁花<sup>2</sup>, 苏 杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

<sup>2</sup> 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

**摘要:** 屋顶绿化作为一种新型绿色基础设施与基于自然的解决方案, 已成为提升城市生态韧性与维持生物多样性的重要生态路径。然而, 目前城市生态网络研究多关注二维的地面生态空间, 而顾及屋顶绿化的三维生态网络构建研究尚不多见。以南京市中心城区为例, 基于 LiDAR、高分辨率遥感及建筑属性等多源数据, 采用多因子叠置与电路理论等方法, 构建了顾及屋顶绿化的城市三维生态网络整合分析框架; 即采用多因子叠置方法, 从建筑高度、屋面坡度、建筑年代、历史文化属性四个方面分析了屋顶绿化建设的适宜性; 其次, 结合建筑与植被三维结构特征数据, 采用电路理论构建了有无屋顶绿化两种情景下的生态网络; 最后, 通过比较生态廊道数量、长度、平均阻力等指标分析了屋顶绿化对城市三维生态网络结果的潜在影响。研究结果表明: 1) 研究区有 46.59% 的屋顶适宜进行绿化, 表明屋顶绿化具有很大的发展潜力。2) 顾及屋顶绿化的生态廊道数量由 205 条增加到 209 条, 生态网络总长度增加, 单位长度阻力值减小, 表明屋顶绿化能够显著提高城市生态空间的景观连通性、增加生态廊道密度, 为高流动性生物提供重要的栖息地和垫脚石。3) 屋顶绿化对城市生态网络优化的作用存在显著的空间差异, 在城市中心区的优化作用最大, 工业区次之, 在生态良好片区优化作用较小。研究结果可为实现城市高密度区域地面生态空间与屋顶绿化空间的整合分析与统筹规划提供决策参考。

**关键词:** 屋顶绿化; 三维生态网络; LiDAR; 电路理论; 南京市中心城区

## Construction of urban 3D ecological network considering green roofs: A case study of downtown Nanjing

WANG Yiming<sup>1</sup>, YIN Haiwei<sup>1,\*</sup>, KONG Fanhua<sup>2</sup>, SU Jie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

<sup>2</sup> School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** As a new green infrastructure and nature-based solution, green roofs have become an important ecological strategy to enhance urban ecological resilience and maintain biodiversity. However, urban ecological network studies mostly focus on 2D ground ecological space, and few studies focus on the construction of 3D ecological network considering green roofs. The studies of 3D ecological network that integrate ground and roof space and take green roofs into account are much less common. Green roofs can play an important role in improving landscape connectivity between fragmented urban ecological patches and optimizing the 3D urban ecological network. Therefore, it is necessary to integrate ground and rooftop ecological spaces, and to conduct research on the construction of urban 3D ecological networks that take green roofs into account, to fulfill the effective connection between urban green roof ecosystems and ground ecological spaces. In this paper, based on the data of LiDAR, high-resolution remote sensing, and building attributes, we firstly structured a framework to

**基金项目:** 科技部国家重点研发计划项目 (2022YFC3802604, 2017YFE0196000); 国家自然科学基金面上项目 (51878328, 32171571)

**收稿日期:** 2023-03-14; **采用日期:** 2023-06-02

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

integrate urban 3D ecological networks and green roofs by the multi-factor superposition and circuit theory. We used multi-factor superposition to analyze the suitability of green roofs in four aspects: building height, roof slope, building age, and historical and cultural attributes. Secondly, combining 3D structural features data of buildings and vegetation, we constructed the ecological networks under two scenarios with or without green roofs by the method of circuit theory. Finally, the potential impact of green roofs on urban 3D ecological networks was analyzed by comparing the number, length and average resistance of ecological corridors. The results showed that: 1) There were 2879.62 hm<sup>2</sup> of roofs in the study area suitable for greening, accounting for 46.59% of the total roof area in the study area. It indicated that green roofs had great potential for development. 2) The number of ecological corridors considering green roofs increased from 205 to 209, the total length of the ecological network increased and the resistance value per unit length decreased, indicating that green roofs could significantly improve the landscape connectivity of urban ecological spaces, increase the density of ecological corridors, and provide important habitats and stepping stones for high-mobility species. 3) The effects of green roofs on ecological networks were significantly regional different, with the largest optimization effect in the central urban area, followed by the industrial area, and few optimization effects in ecologically sound areas. The results of the study can provide decision basis and reference information for analysis and planning of ground ecological space and green roof space in high-density urban areas.

**Key Words:** green roof; 3D ecological network; LiDAR; circuit theory; downtown Nanjing

快速城镇化致使城市生态空间不断被侵占,进而导致生境破碎化、生物多样性减少、生态系统服务功能下降等一系列生态环境问题。城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)作为城市结构中的自然生产力主体与自然生命支持系统,是城市各项生态系统服务的主要供给来源<sup>[1-2]</sup>。因而,通过增加城市绿地面积、提高绿化覆盖率与植被绿量、优化绿地空间格局被认为是一种有效缓解城市各类生态环境问题的基于自然解决方案(Nature-based solutions, NbS)<sup>[3]</sup>。实际上,在土地供应紧张、土地价格昂贵的城市高密度区可用于增加地面绿化的面积非常有限<sup>[4-5]</sup>,而有建筑“第五立面”之称的屋顶绿化(Green roof, GR)日益成为解决高度城市化地区城市生态环境问题的重要手段和核心生态战略<sup>[6-8]</sup>,已在德国、美国、新加坡、日本等许多国家得到了大力推广应用<sup>[9]</sup>。

尽管 GR 已在许多国家推广应用了多年,但目前大量的研究仍主要集中在 GR 植物筛选、种植基质调配、发展潜力评价、生态环境效益评估、政策法规制定等方面<sup>[5, 10-11]</sup>,而在片区和城市尺度上对其空间格局进行优化配置的研究尚不多见,顾及 GR 的城市三维生态网络构建与优化研究则更少。目前,许多国家出台了一系列推进 GR 的政策和法规,使其建设面积和建成率大幅增长<sup>[12]</sup>,但这些屋顶生态空间仍十分破碎、缺乏相互之间,以及与地面生态空间之间的联系。因而,随着 GR 的不断发展,亟需实现由建筑物单体的自主选择向区域统筹和整体优化转变,并建立 GR 空间与地面生态空间的有效连接,从而实现屋顶与地面生态空间的整合分析与统筹规划。

GR 建设适宜性评价是进行 GR 空间格局优化、建设顾及 GR 的城市三维生态网络的重要前提和基础。目前的研究大多基于现状调查与高分辨率遥感影像数据,选取建筑年代、结构特征、屋顶小气候、功能属性等评价指标<sup>[10, 12-14]</sup>,采用多因子叠置方法评价 GR 的建设适宜性。然而,这类研究尚难以准确提取建筑高度和屋顶坡度等建筑物的重要结构参数及其周边地面生态空间的三维冠层结构信息(这些参数对 GR 技术的适用性和具体方案设计具有重要影响<sup>[10]</sup>),且未统筹考虑地面与屋顶空间的潜在联系,造成 GR 建设适宜性评价的指标体系不够全面、结果仍存在较大偏差<sup>[15]</sup>。近年来,激光雷达(LiDAR)技术的快速发展,能够大幅减少野外调查的工作量<sup>[16]</sup>。使用高精度的 LiDAR 三维点云数据,为准确提取三维绿地冠层结构信息与建筑结构参数提供了新的解决方案<sup>[14, 17]</sup>,高效推动城市生态空间网络构建由二维走向三维<sup>[18-19]</sup>。同时,构建更为全面的 GR 建设适宜性评价的指标体系,还需要结合高分辨率遥感影像、网络中的建筑大数据等常用数据,获取建筑物高度、屋顶坡度等结构参数、建筑年代与功能属性等信息,以提高 GR 建设适宜性评价的准确度。

构建多维多尺度的生态网络体系,实现破碎生态斑块之间的有效连接,已成为世界各国提升景观连通性、保护生物多样性、修复生态系统服务功能的重要生态战略<sup>[20-22]</sup>。近年来,城市生态网络构建与优化的研究大量涌现,技术方法也日益丰富<sup>[23-25]</sup>,常用的方法有图谱理论<sup>[26]</sup>、最小费用路径<sup>[27]</sup>、MSPA、电路理论<sup>[28]</sup>等。但是,既有研究多关注二维的地面生态空间,多基于二维数据信息进行生态源地选取、阻力面构建,考虑地面生态空间三维植被冠层结构信息与生境质量的城市三维生态网络构建研究尚不多见<sup>[29-30]</sup>,且统筹考虑地面与屋顶空间、顾及 GR 的三维生态网络构建研究则更为少见。作为城市的空中绿化系统,GR 是城市三维生态系统的重要组成部分,它能够为通过飞行或者依靠气流传播的高流动性生物(鸟类、昆虫等)提供栖息地和垫脚石,并为植物的花粉传播提供更多机会<sup>[31-34]</sup>。可见,GR 在提高城市破碎生态斑块之间的景观连通性和优化城市三维生态网络等方面能够发挥重要作用。因此,有必要整合地面与屋顶生态空间,开展顾及 GR 的城市三维生态网络构建研究,实现城市 GR 生态系统与地面生态空间的有效连接。

鉴于此,本文以南京市中心城区为例,在高精度 LiDAR、高分辨率遥感及网络建筑大数据等多源数据的支撑下,首先采用多因子叠置方法,从建筑高度、屋面坡度、建筑年代和历史文化属性四个方面,对研究区 GR 建设的适宜性进行了评价;其次,在三维建筑与植被冠层结构信息基础上,利用最小费用路径、电路理论等方法,构建了有无顾及 GR 两种情景下的三维生态网络,进而分析了顾及 GR 对城市三维生态网络的潜在影响。本研究构建了顾及 GR 的城市三维生态网络整合分析框架,实现了 GR 空间与地面生态空间的有效连接与统筹规划,可为高密度城市地区三维生态空间的整体优化提供决策依据与参考信息。

## 1 研究区概况

南京市位于亚热带季风气候区,自然环境条件优越,适宜发展 GR。南京中心城区高密度开发建设致使城市绿地匮乏、景观连通性不断下降、生物多样性日益减少,因而大力发展 GR 是提升中心城区绿地率、修复绿地系统生态功能的重要策略。2014 年以来,南京出台了鼓励 GR 发展建设的相关政策,但 2019 年南京市绿化园林局的统计数据显示,南京市既有 GR 面积约 0.49km<sup>2</sup>,建成率仅为 0.7%,这说明亟需进一步加大 GR 建设的支持力度,同时也表明未来 GR 仍有很大的发展潜力。本文根据 LiDAR 数据的范围,选择南京市中心城区作为研究区(图 1),包括鼓楼区、玄武区、秦淮区全部区域,以及建邺区、雨花台区、栖霞区和江宁区部分地区,面积约为 488.95km<sup>2</sup>。

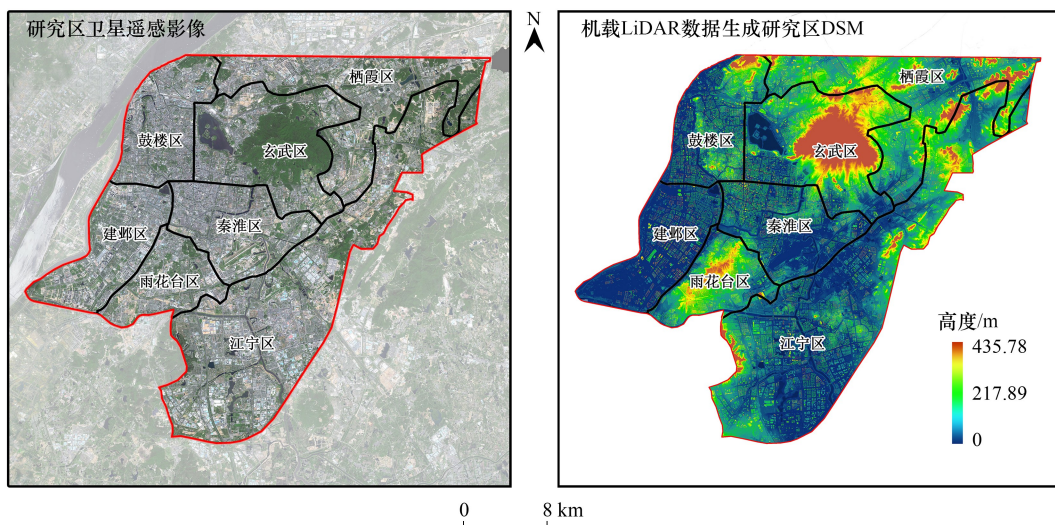


图 1 研究区域概况

Fig.1 Overview of the study area

DSM:数字地表模型



## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

本研究使用的数据主要包括:1)2019年南京高分辨率卫星影像图(分辨率 $1\text{m}\times 1\text{m}$ )和机载LiDAR点云数据( $4.16\text{点}/\text{m}^2$ ),数据来源于江苏省测绘工程院;2)2020年7月的Landsat8卫星遥感影像数据(NASA:<https://www.nasa.gov/>),3)从开放网站(<https://nanjing.fang.com>和<https://sn.lianjia.com>)获取的居住区、建筑大数据等信息,包含建筑建设年代、面积、位置和数量的属性。

首先,基于高分辨率卫星图像通过目视解译获取研究区的土地利用数据。然后,使用2020年Landsat8卫星遥感影像数据计算归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),并提取NDVI值大于0.2的区域作为植被区域<sup>[18]</sup>。再次,使用LiDAR360 4.0版软件对LiDAR点云数据进行预处理<sup>[16]</sup>,并结合土地利用数据,从点云数据导出归一化数字地表模型(nDSM)、植被nDSM-V(vegetation nDSM)和建筑nDSM-B(building nDSM)。最后,将所有空间数据(如建筑、NDVI等)均重采样或预处理为2米空间分辨率的栅格数据。

### 2.2 研究方法

本文从GR建设适宜性评价、基于LiDAR点云植被冠层提取以及城市三维生态网络构建等三个步骤,搭建了顾及GR的城市三维生态网络构建的技术框架(图2)。

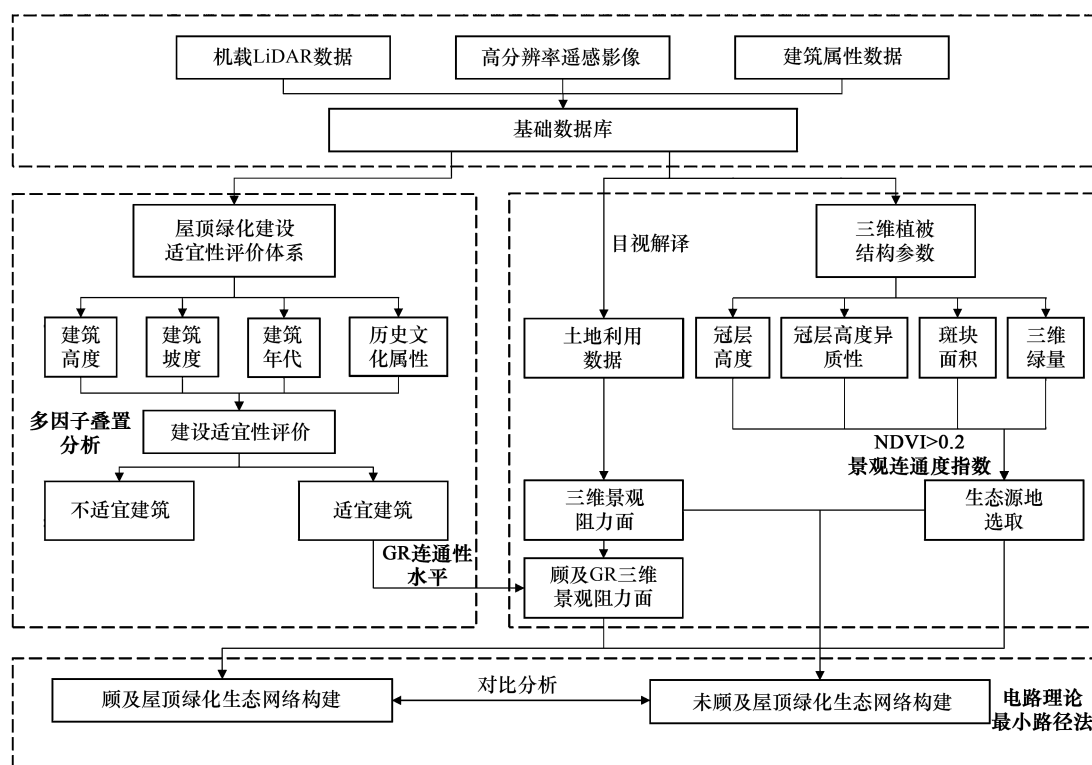


图2 技术路线

Fig.2 Technical workflow

NDVI:归一化植被指数;GR:屋顶绿化

#### 2.2.1 基于多因子叠置分析的GR建设适宜性评价

根据前人的相关研究<sup>[10, 29, 35]</sup>、研究区的实际情况和数据的可获得性,本文选择建筑高度、屋面坡度、建筑年代和历史文化属性四个因子,采用多因子叠置分析综合评价GR建设的适宜性(表1、图3),选取同时满足



四个因子的屋顶作为适宜建设的 GR。

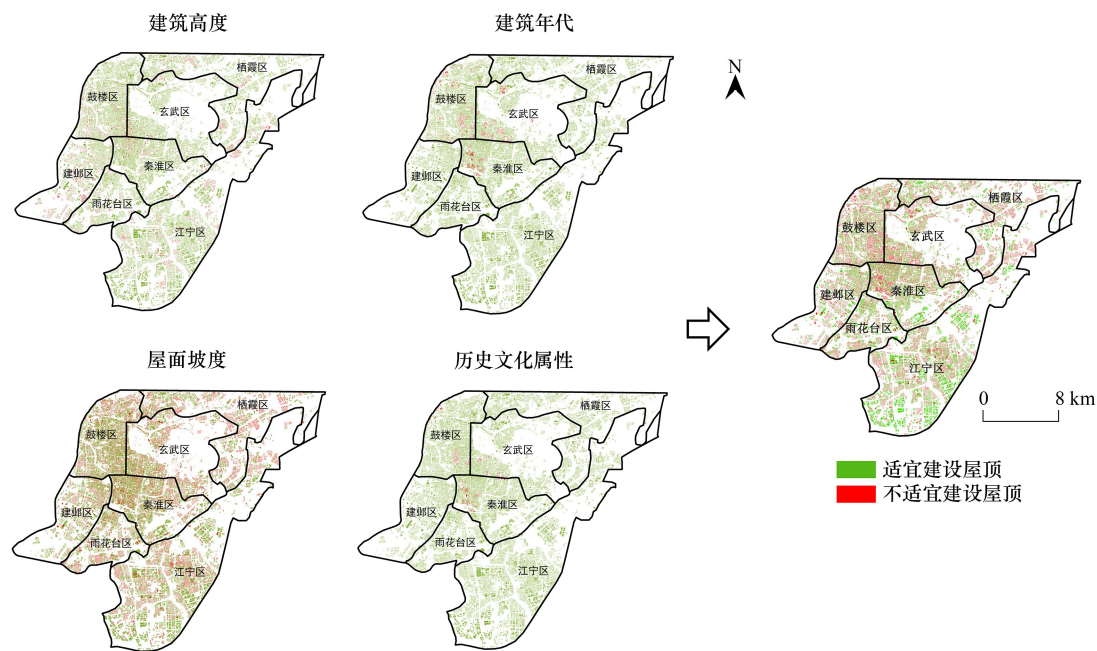


图 3 屋顶绿化建设适宜性评价结果  
Fig.3 Suitability evaluation results of green roof

表 1 适宜屋顶绿化筛选指标

Table 1 Indicators for selecting suitable green roofs

| 评价要素<br>Indices                              | 要素阈值<br>Threshold                   | 建设指引<br>Construction<br>guidelines | 其他说明<br>Explanation                                     |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 建筑高度<br>Building height                      | <12 层(高度低于 40m)或 ≥12 层具有 1.5m 以上女儿墙 | 适宜建设                               | 建筑高度大于 40m 时,屋顶风速较大,不利于植物生长 <sup>[35]</sup>             |
|                                              | ≥12 层(高度高于 40m)且不具有 1.5m 女儿墙        | 限制建设                               |                                                         |
| 屋面坡度<br>Roof slope                           | 屋面坡度<20°                            | 适宜建设                               | 屋面坡度影响屋顶绿化的安装 <sup>[13, 36]</sup>                       |
|                                              | 屋面坡度≥20°                            | 限制建设                               |                                                         |
| 建筑年代<br>Building age                         | 建筑年限<50 年                           | 适宜建设                               | 建筑年限可以作为标准,间接表示屋顶承载力,同时我国普通建筑使用年限为 50 年 <sup>[37]</sup> |
|                                              | 建筑年限≥50 年                           | 限制建设                               |                                                         |
| 历史文化属性<br>Historical and cultural attributes | 国家、省、市级文物保护街区、保护单位、历史风貌区            | 禁止建设                               | 历史建筑因其历史文化保护价值,禁止安装屋顶绿化                                 |

高层建筑屋顶的风速远高于地面,而 GR 通常选择根系较浅的植物群落,其抗风能力较弱。因而,通常认为当建筑高度大于 40m 或超过 12 层时,不适宜建设 GR<sup>[35]</sup>,但如果高层建筑屋顶建有 1.5m 以上的挡风板、女儿墙等挡风装置时,则适宜建设 GR<sup>[29]</sup>。本文基于 LiDAR 三维点云数据生成的数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),提取建筑高度,并辨识屋顶是否建有挡风装置,从而筛选出 40m 以下或 40m 以上具有 1.5m 以上女儿墙的建筑屋顶作为建设 GR 的候选建筑(图 3)。

既有研究表明,当屋顶坡度超过 20°时,GR 的工程难度显著增加,建设、维护和管理成本大幅提高<sup>[29]</sup>。因而,本文基于 DSM 进行坡度分析,并提取屋顶坡度小于 20°的建筑作为建设 GR 的候选建筑(图 3)。由于

不同时期建设的建筑物执行的建筑标准不同,因而建筑年代可间接表征不同时期建筑屋顶的承载力<sup>[14]</sup>。本文通过在大数据采集的居住区和建筑信息中提取建筑年代数据,按照 50 年的阈值将 GR 建设的适宜性分为两类(图 3)。另外,南京作为历史文化名城,中心城区内有许多历史保护建筑,因其独特文化价值和不可再生的特性,加之历史建筑年代久远、屋顶承重载荷低、多为坡屋顶,故历史保护建筑不适宜建设 GR<sup>[35]</sup>。因此,本文根据《南京市历史名城保护规划》,辨识出历史保护区内的建筑,并将其设置为不适宜建设 GR(图 3)。

2.2.2 基于 LiDAR 三维点云数据的植被冠层结构参数提取

本文基于 LiDAR 三维点云数据,提取冠层高度、冠层高度异质性、斑块面积、三维绿量四个三维植被结构参数<sup>[38—39]</sup>(图 4)。冠层高度既可以表征地面生态空间的三维结构,也可以间接表征地面生态空间与 GR 的生态联系强度,因为 GR 一定范围内适宜的地面植被冠层高度能够增加昆虫等生物在地面生态空间与 GR 之间迁移扩散的可能性,促进生物在 GR 上筑巢和觅食<sup>[40]</sup>。冠层高度异质性可以表征生境的复杂性和生物多样性<sup>[41]</sup>;斑块面积直接影响城市生态空间中能量和养分的分布,进而影响物种的分布和生产水平,是决定物种丰富度的主要因素<sup>[42]</sup>;三维绿量能更好地描述植被的空间结构,更精确地表征植被的生态效益水平及物种群落的丰富程度<sup>[43]</sup>。具体提取方法详见表 2。

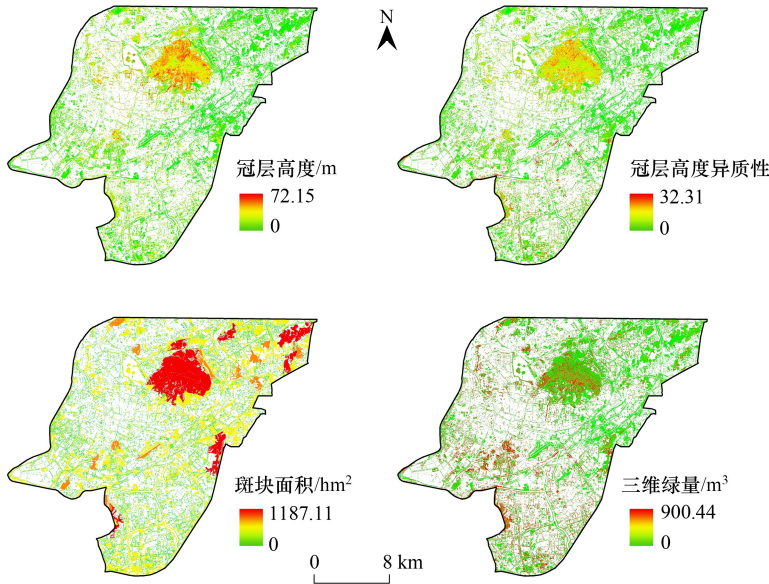


图 4 基于 LiDAR 数据提取的植被结构参数

Fig.4 Vegetation structure index derived from LiDAR data

表 2 三维植被结构参数提取

Table 2 3D vegetation structure parameter extraction

| 植被结构分类<br>Vegetation structure classification | 提取方法及描述<br>Extraction method and description |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 冠层高度 Canopy height/m                          | 95%分位高度,近似于森林冠层的峰值高度 <sup>[44]</sup>         |
| 冠层高度异质性 Canopy height heterogeneity           | 冠层高度的标准差,反映树高的离散程 <sup>[41]</sup>            |
| 斑块面积 Patch area/hm <sup>2</sup>               | 以 NDVI 大于 0.2 的区域作为备选源地 <sup>[18]</sup>      |
| 三维绿量 Green volume/m <sup>3</sup>              | 通过计算单位面积内的植被体积获得 <sup>[43]</sup>             |

2.2.3 顾及 GR 的城市三维生态网络构建

首先,将 NDVI 大于 0.2、面积大于 1hm<sup>2</sup>的生态斑块作为景观连通性的评价对象,以可能连通性指数(PC)作为评价参数,在 Conefor 2.6 软件中将距离阈值设为 1000m,连通性概率设为 0.5,并将获取的斑块重要性指数(dPC)前 10%的斑块作为生态源地<sup>[18]</sup>。

本文将研究区的景观类型划分为绿地、农田、水域、道路及建设用地 5 种类型,参考相关文献,基于不同景观类型进行基础阻力赋值(表 3),并对斑块内部不同的属性进行分级,参考相关研究<sup>[18, 20, 42]</sup>,确定相应的阻力系数(表 4),并采用公式 1 计算不同景观类型的阻力值<sup>[45]</sup>,所景观类型合并得出总阻力面。

$$C_i = M_i \times \prod W_{ij}$$

(1)

式中,  $C_i$  为斑块  $i$  的景观阻力值,  $M_i$  为斑块  $i$  对应的景观类型的基准阻力值,  $W_{ij}$  为斑块  $i$  的第  $j$  个属性分级后的景观阻力系数。

表 3 不同景观类型的基准阻力值  
Table 3 Base resistance values of different land use type

|                             | 绿地<br>Garden land | 农田<br>Farmland | 水域<br>Water | 道路<br>Road | 建设用地<br>Construction land |
|-----------------------------|-------------------|----------------|-------------|------------|---------------------------|
| 基准阻力值 Base impedance values | 5                 | 20             | 40          | 80         | 100                       |

表 4 不同土地利用类型的阻力值  
Table 4 Resistance value of different land use types

| 土地利用类型<br>Land use<br>type | 分类<br>Classification | 分级<br>Grading  | 阻力系数<br>Resistance<br>coefficient | 土地利用类型<br>Land use<br>type | 分类<br>Classification | 分级<br>Grading | 阻力系数<br>Resistance<br>coefficient |        |     |     |     |       |     |
|----------------------------|----------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-----------------------------------|--------|-----|-----|-----|-------|-----|
| 绿地<br>Garden land          | 斑块面积/hm <sup>2</sup> | ≥100           | 0.8                               | 道路 Road                    | 道路等级                 | 铁路            | 1.75                              |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 10—100         | 1                                 |                            |                      | 快速路           | 1.5                               |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 1—10           | 1.6                               |                            |                      | 主干路           | 1.25                              |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | ≤1             | 2                                 |                            |                      | 次干路           | 1                                 |        |     |     |     |       |     |
|                            | 冠层高度/m               | ≥15            | 0.8                               |                            |                      | 支路            | 0.75                              |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 10—15          | 1                                 | 建设用地<br>Construction land  | 适宜屋顶绿化               | 连通性 3 级       | 0.5                               |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 5—10           | 1.2                               |                            |                      | 连通性 2 级       | 0.35                              |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | ≤5             | 1.3                               |                            |                      | 连通性 1 级       | 0.2                               |        |     |     |     |       |     |
|                            | 冠层高度                 | ≥5             | 0.8                               |                            | 其他建 容容积率<br>设用地      | <1            | 0.8                               |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 异质性/%          | 2.5—5                             |                            |                      |               |                                   | 1      | 1—2 | 0.9 |     |       |     |
|                            |                      | 1—2.5          | 1.2                               |                            |                      |               |                                   | 2—4    |     |     | 1   |       |     |
|                            |                      | <1             | 1.3                               |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     | 4—6   | 1.1 |
|                            | 三维绿量/m <sup>3</sup>  | ≥100           | 0.8                               |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 50—100         | 1                                 |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 20—50          | 1.2                               |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | <20            | 1.3                               |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 农田<br>Farmland | 水田                                |                            |                      | —             | 0.8                               | 建筑 密度% | <20 | 0.8 |     |       |     |
|                            | —                    |                |                                   |                            |                      | 1             | 20—40                             |        |     |     | 0.9 |       |     |
|                            | —                    |                |                                   |                            |                      | 1.2           |                                   |        |     |     |     | 40—60 | 1   |
| 水域<br>Water                | 面积/hm <sup>2</sup>   | <10            | 1                                 |                            |                      | 60—80         |                                   | 1.1    |     |     |     |       |     |
|                            |                      | 10—100         | 1.25                              |                            |                      |               | ≥80                               |        | 1.2 |     |     |       |     |
|                            |                      | >100           | 1.5                               |                            |                      |               |                                   |        |     |     |     |       |     |

本文构建了顾及 GR 与否两种情景下的景观阻力面,在顾及 GR 的情景中,本文统筹考虑 GR 景观连通性水平。基于 Dong 等人的研究,本文将 GR 的高度、面积和斑块之间的水平距离视为景观连通性的主要影响因素<sup>[30]</sup>,计算了两个城市屋顶景观格局指数:可达性指数(Accessibility Index, ACI,反映生物从地面到达屋顶,并停留甚至栖息的可能性)和阻力指数(Resistance Index, RI,测度在城市某范围内生物、水分及养分在地面绿地与各屋顶生态斑块之间运动的难易程度)(公式 1、公式 2)<sup>[30, 46]</sup>,并将两个指标归一化后等权重相加得到 GR 的连通性水平,并采用自然间断点法将其由高到低分为 3 级。最后,基于 ArcGIS 平台中的 Linkage Mapper



Toolkit 工具箱,模拟得到顾及 GR 与否的两种情景下生态源地之间的最小费用路径,形成生态网络(图 5)。

$$I_{ACI} = \frac{\ln a_i}{2\ln(h_i + 2)} \quad (2)$$

$$I_{RI} = \frac{D_i \exp(z h_i)}{\sqrt{a_i a_h}} \quad (3)$$

式中, $I_{ACI}$ 为可达性指数; $a_i$ 为(屋顶)斑块*i*的面积; $h_i$ 为(屋顶)斑块*i*离地面最近处的高度。 $I_{RI}$ 为阻力指数; $z$ 为矫正系数,取值城市平均屋顶界面高度倒数; $D_i$ 为(屋顶)斑块*i*到最邻近斑块距离,计算时取两斑块中心之间的距离; $a_h$ 为与(屋顶)斑块*i*距离最近的斑块面积。

### 3 结果与分析

#### 3.1 适宜建设的 GR 分布特征

屋顶绿化建设适宜性研究结果表明:适宜屋顶绿化面积约为 2879.62hm<sup>2</sup>, 占总建筑面积 6181.03hm<sup>2</sup> 的 46.59%, 比重接近一半。南京市中心城区适宜的 GR 分布较为不均衡, 由分区适宜 GR 面积统计表(表 5)以及适宜建设 GR 识别结果(图 3)可见, 鼓楼区、玄武区适宜 GR 分布相对密集, 但占区总屋顶面积比重较低。这两个区作为南京老城区, 建筑分布较为密集, 但由于建筑年代较为久远、坡屋顶建筑较多、面积较小以及市中心高层建筑较多, 导致适宜的 GR 占比较低。而江宁区、雨花台区和栖霞区开发建设较晚, 屋顶面积较大且以平屋顶为主, 因此适宜建设 GR 建筑的比例较高。总体而言, 南京市中心城区适宜建设 GR 面积占比接近 50%, 具有较高的 GR 建设潜力, 如果将潜在区域进行 GR 建设, 将对整个中心城区生态、社会、经济产生重要的积极影响。

表 5 分区适宜屋顶绿化面积统计表

Table 5 Statistics of suitable green roof area in each district

| 区名称<br>District name | 区屋顶总面积<br>Total roof area of each district/hm <sup>2</sup> | 适宜屋顶绿化总面积<br>Total suitable green roof area/hm <sup>2</sup> | 适宜屋顶绿化占区屋顶总面积比值<br>Proportion of suitable roofs to all roofs in each district/% | 适宜屋顶绿化占研究区屋顶总面积比值<br>Proportion of suitable roofs to all roofs in the study area/% |
|----------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 鼓楼区                  | 967.71                                                     | 377.15                                                      | 38.97                                                                           | 13.10                                                                              |
| 建邺区                  | 509.00                                                     | 220.56                                                      | 43.33                                                                           | 7.66                                                                               |
| 江宁区                  | 1884.40                                                    | 1044.22                                                     | 55.41                                                                           | 36.26                                                                              |
| 栖霞区                  | 691.59                                                     | 305.79                                                      | 44.22                                                                           | 10.62                                                                              |
| 秦淮区                  | 947.18                                                     | 441.50                                                      | 46.61                                                                           | 15.33                                                                              |
| 玄武区                  | 723.38                                                     | 266.04                                                      | 36.78                                                                           | 9.24                                                                               |
| 雨花台区                 | 457.77                                                     | 224.36                                                      | 49.01                                                                           | 7.79                                                                               |
| 总计 Sum               | 6181.03                                                    | 2879.62                                                     | —                                                                               | —                                                                                  |

#### 3.2 生态廊道空间分布与差异

在三维情景下对比两种情景生态廊道(表 6)可以发现, 顾及 GR 建设后的生态廊道数量有所增加, 由原先的 205 条增加到 209 条, 廊道总长度由 340.92km 增加为 369.36km, 而平均每条廊道的单位距离加权成本阻力值由 8.49 降低为 7.55。生态廊道数量和长度的增加以及成本阻力值的减小都表明了顾及 GR 的城市三维生态网络格局得到明显改善。顾及 GR 的生态网络的平均长度有所增加, 由 1663.04m 增为 1767.28m, 这是由于顾及 GR 的生态网络以 GR 作为踏脚石, 增加了数条长距离跨越城市建成区的廊道, 弥补了在建筑密集区生态廊道的空白。

在是否顾及 GR 的两种情景下(图 5), 研究区的东北部和西南部区域生态网络分布均较为密集且生态廊道长度较短, 在这些地区生态源地分布较为密集, 建筑密度较低, 使得这些区域的整体景观连通性较好。在研究区中部区域, 两种情景中生态廊道分布均较为稀疏, 这是由于在高密度城市建成区, 缺少生态源地且能够充

当踏脚石的绿地斑块数量较少。两种情景下重合部分生态廊道多穿越城市中生态环境优越的地区,这些地区多为大面积且三维植被景观良好的城市绿地,这些区域阻力值最低,是生物迁徙最为优先选择的生态廊道;在未顾及 GR 情境下的差异生态廊道穿越的地区多为城市水道、道路边绿地以及居住区内绿地,这些区域受到人为干扰的可能性较大;在顾及 GR 情境下差异生态廊道多以建设用地内生态连通性指数较高的适宜 GR 作为踏脚石,结合周边绿地形成新的生态廊道。产生这些差异的原因是由于 GR 的加入降低了部分建设用地的阻力值,而其中生态连通性较高的 GR 作为高流动性生物的踏脚石与周边城市绿地产生有效联系,从而在高密度城市建成区形成新的生态廊道,优化了整体城市生态网络。

表 6 不同情景生态廊道差异统计表  
Table 6 Statistical table of differences in ecological corridors for different scenarios

| 不同情景生态廊道<br>Ecological corridors for<br>different scenarios | 廊道数量<br>Number of<br>corridors | 平均长度<br>Average length/m | 单位距离阻力值<br>Resistance value<br>per unit distance | 廊道重合率<br>Corridor overlap<br>rate/% | 廊道变化率<br>Corridor change<br>rate/% |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 未顾及 GR 生态廊道<br>Ecological corridor not considering GR       | 205                            | 1663.04                  | 8.49                                             | 68.88                               | 31.12                              |
| 顾及 GR 生态廊道<br>Ecological corridor considering GR            | 209                            | 1767.28                  | 7.55                                             | 62.18                               | 37.82                              |

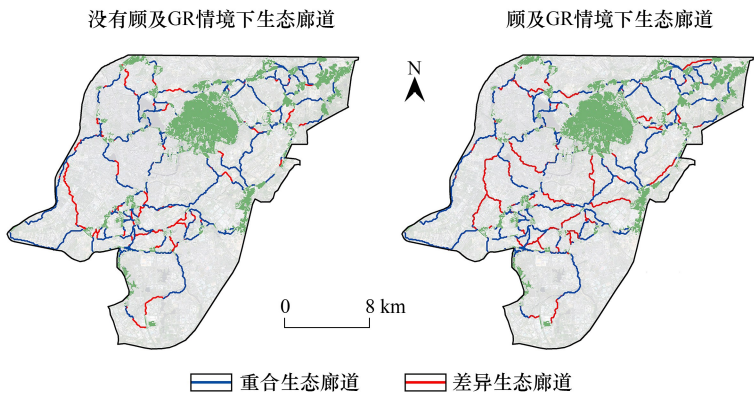


图 5 不同情境下生态廊道总体对比  
Fig.5 Overall comparison of ecological corridors under different scenarios

两种情景下的生态网络在不同区域差异不同(图 6),其中最为明显的是城市中心地区,顾及 GR 情景下的生态廊道数量和密度明显高于未顾及的情景。新增的生态廊道集中在鼓楼区、玄武区西南部、建邺区东北部和秦淮区等核心区域,这些区域建筑分布密集,绿地较为匮乏。GR 能够作为踏脚石,增加这些区域的景观连通性,从而形成长度较长,横跨城市建成区的生态廊道,一定程度上增加了生态网络的密度,对中心区较为稀疏的生态网络有所优化。在雨花台区和江宁区西南部,这些区域分布着大量的工业建筑和较为密集的生态源地,大面积的工业建筑屋顶提供更多的设计可能性和食物来源,对生物多样性有积极的影响。因此在这些区域新增了部分长度较短的生态廊道,对原先生态网络进行了补充。而在栖霞区和江宁区东北部等生态基础较好的地区,建筑多以坡屋顶住宅为主,筛选出的适宜建设的 GR 较少,因此生态廊道整体变化不大。

3.3 生态网络优化及 GR 建设规划建议

结合适宜建设 GR 识别结果以及不同情景下生态廊道模拟结果,针对不同区域应采取针对性的策略,从而使 GR 对于生态网络的优化作用最大化:(1)针对城市中心区域,GR 在优化生态网络方面有着关键性作用。该区域建筑分布密集,多为老旧城区,可以利用城市更新的机会将 GR 建设与老旧建筑更新升级相结合。在政策和资金方面有优势且在该地区分布密集的公共和商业建筑,可以作为 GR 的优先建设区域<sup>[30, 35]</sup>。(2)针

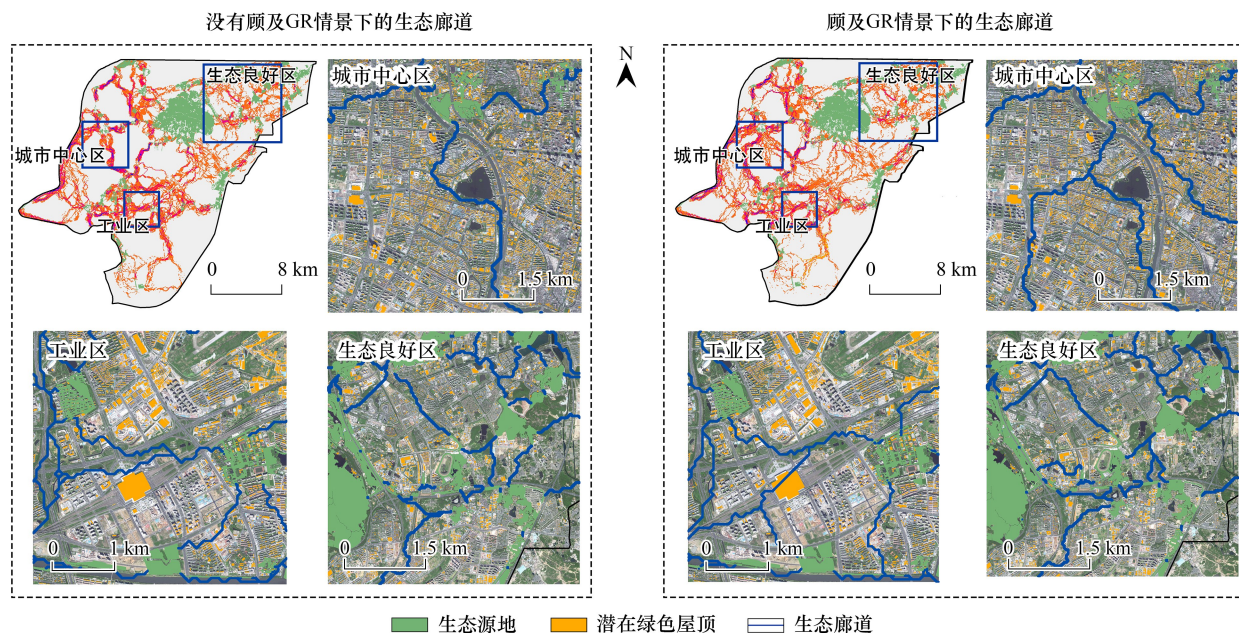


图6 不同情景生态廊道模拟结果

Fig.6 Simulation results of ecological corridor in different scenarios

对城市边缘的工业区,工业建筑较大的屋顶面积有利于 GR 起到作为生物栖息地的作用<sup>[13]</sup>。因此应通过规划工具促进 GR 推广,以便于 GR 和新建筑能够以综合方式进行规划、设计和建造。(3)对于适宜 GR 的密度较低、生态环境较好的栖霞区和江宁区东北部生态区域,该区域整体景观连通性较高,应在保障和利用现有生态空间的基础上结合 GR 优化生态网络,从而保障南京中心城区东部及北部的生态连通性。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

现有研究多关注二维的地面生态空间,多基于平面数据信息构建城市生态网络,忽略了三维植被冠层结构信息所表征的多元生态位以及地面与 GR 之间的衔接作用对于城市生态网络的影响,可能会造成模拟结果的准确性以及生态网络功能有效性的降低。本研究在 GR 对三维景观连通性作用的基础上,构建了顾及 GR 的城市三维生态网络构建的技术框架,该框架通过高精度 LiDAR 数据获取建筑高度、屋面坡度和屋顶周边三维植被信息等关键结构参数,丰富了城市生态网络构建数据源。本文将城市三维植被结构与 GR 的景观连通性水平引入城市生态网络的构建中,响应了高密度城市地区集约发展和三维空间整体优化的需求,同时实现了 GR 空间与地面生态空间的有效连接与统筹规划,为顾及 GR 的三维生态网络构建提供了可操作的技术框架。

本文仍存在一定局限性:在适宜的 GR 筛选时,现有数据仅包含建筑属性数据,缺少建筑物承重信息,同时缺少对业主支付意愿、政策支持等因子的考虑;在生态网络的构建中,不同物种的扩散距离,以及物种在 GR 以及不同土地利用类型之间迁移的能力存在显著差异<sup>[18]</sup>,本文因缺少研究区范围内不同物种生物扩散能力的详细观测数据,未能针对不同物种设置相应的距离阈值和阻力值。虽然垂直绿化可以作为走廊,使生物更容易向屋顶扩散<sup>[47]</sup>,但因缺乏城市建筑立面信息等原因,同时鉴于垂直绿化的高成本,故本研究未将垂直绿化考虑在内。因此,在指导实践的研究中应完善相关数据(建筑承重信息、建筑立面信息、居民支付意愿、物种多样性数据等)的收集整理,从而进一步提高结果的准确性和科学性。

### 4.2 结论

本文依托 LiDAR 点云、高分辨率遥感及建筑属性等多源数据,采用多因子叠置的方法从建筑高度、屋面



坡度、建筑年代、历史文化属性四个方面筛选了适宜建设 GR 的建筑,并在在三维情景下结合 GR,基于最小费用路径、电路理论等方法构建生态网络,进而分析了顾及 GR 对城市三维生态网络的潜在影响。研究结果表明:南京市中心城区适宜建设的 GR 面积占比接近 50%,具有很高的 GR 建设潜力;GR 的建设能够有效优化城市生态网络,提升生态网络密度以及降低生态廊道平均阻力值;GR 对生态网络的优化作用在不同区域存在显著差异,在城市中心区域优化作用最为明显,在工业区次之,在生态良好片区优化作用较小。本研究可为高密度城市地区通过整合地面与屋顶绿地空间来优化生态网络提供参考和决策依据。

#### 参考文献 (References):

- [1] Langemeyer J, Wedgwood D, McPhearson T, Baró F, Madsen A L, Barton D N. Creating urban green infrastructure where it is needed: A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135487.
- [2] Kabisch N, Frantzeskaki N, Pauleit S, Naumann S, Davis M, Artmann M, Haase D, Knapp S, Korn H, Stadler J, Zaunberger K, Bonn A. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 2016, 21(2): 39.
- [3] Besir A B, Cuce E. Green roofs and facades: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 915-939.
- [4] Santamouris M. Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.
- [5] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 740-752.
- [6] Bevilacqua P, Mazzeo D, Bruno R, Arcuri N. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, 2016, 122: 63-79.
- [7] Solcerova A, van de Ven F, Wang M Y, Rijdsdijk M, van de Giesen N. Do green roofs cool the air? *Building and Environment*, 2017, 111: 249-255.
- [8] Kumar S, Guntu R K, Agarwal A, Villuri V G K, Pasupuleti S, Kaushal D R, Gosian A K, Bronstert A. Multi-objective optimization for stormwater management by green-roofs and infiltration trenches to reduce urban flooding in central Delhi. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127455.
- [9] Ismail Z, Aziz H A, Nasir N M, Taib M Z M. Comparative study on green roof mechanism in developed countries. 2012 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications. September 23-26, 2012, Bandung, Indonesia. IEEE, 2013: 678-683.
- [10] 邵天然, 李超骥, 曾辉. 城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例. *生态学报*, 2012, 32(15): 4852-4860.
- [11] 俞伟, 关庆伟. 基于文献计量学的屋顶绿化研究综述. *中国园林*, 2015, 31(1): 74-78.
- [12] Williams N S G, Bathgate R S, Farrell C, Lee K E, Szota C, Bush J, Johnson K A, Miller R E, Pianella A, Sargent L D, Schiller J, Williams K J H, Rayner J P. Ten years of greening a wide brown land: a synthesis of Australian green roof research and roadmap forward. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 62: 127179.
- [13] Grunwald L, Heusinger J, Weber S. A GIS-based mapping methodology of urban green roof ecosystem services applied to a Central European city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 54-63.
- [14] Joshi M Y, Selmi W, Binard M, Nys, G A, Teller, J. Potential for urban greening with green roofs: a way towards smart cities. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, VI-4/W2-2020: 87-94.
- [15] Xu Y Y, Wu S L, Guo M Q, Xie X J. A framework for the evaluation of roof greening priority. *Building and Environment*, 2021, 206: 108392.
- [16] Kong F H, Chen J Y, Middel A, Yin H W, Li M C, Sun T, Zhang N, Huang J, Liu H Q, Zhou K J, Ma J S. Impact of 3-D urban landscape patterns on the outdoor thermal environment: a modelling study with SOLWEIG. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 94: 101773.
- [17] 龚威, 史硕, 陈博文, 宋沙磊, 吴德成, 刘东, 刘正军, 廖梅松. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用. *光学学报*, 2022, 42(12): 29-40.
- [18] 费凡, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 刘佳, 宋小虎. 基于二维与三维信息的南京市主城区生态网络格局对比分析. *生态学报*, 2020, 40(16): 5534-5545.
- [19] Casalegno S, Anderson K, Cox D T C, Hancock S, Gaston K J. Ecological connectivity in the three-dimensional urban green volume using waveform airborne lidar. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [20] 魏新星, 陈一欣, 黄静, 苏杰, 尹海伟, 曾辉. 城市低效用地更新为绿色基础设施优先度评价. *生态学报*, 2022, 42(16): 6565-6578.
- [21] Delmas E, Besson M, Brice M H, Burkle L A, Dalla Riva G V, Fortin M J, Gravel D, Guimarães P R Jr, Hembry D H, Newman E A, Olesen J M, Pires M M, Yeakel J D, Poisot T. Analysing ecological networks of species interactions. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2019, 94(1): 16-36.
- [22] Albert C H, Rayfield B, Dumitru M, Gonzalez A. Applying network theory to prioritize multispecies habitat networks that are robust to climate and land-use change. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2017, 31(6): 1383-1396.
- [23] 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.
- [24] Van der Jagt A, Elands B, Ambrose-Oji B, Møller M S. Participatory governance of urban green spaces: Trends and practices in the EU. *International Journal of Architectural Research*, 2016, 3: 11-39.
- [25] Kubota T, Lee H S, Trihamdani A R, Phuong T T T, Tanaka T, Matsuo K. Impacts of land use changes from the Hanoi Master Plan 2030 on urban heat islands: part 1. Cooling effects of proposed green strategies. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 295-317.
- [26] 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.
- [27] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [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] 王晶晶. 城市绿色屋顶建设潜力评估及降温效应评价——以南京市鼓楼区为例[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [30] Dong J, Guo F, Lin M X, Zhang H C, Zhu P S. Optimization of green infrastructure networks based on potential green roof integration in a high-density urban area—a case study of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 834: 155307.
- [31] Kyrö K, Brenneisen S, Kotze D J, Szallies A, Gerner M, Lehtvirts S. Local habitat characteristics have a stronger effect than the surrounding urban landscape on beetle communities on green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 122-130.
- [32] Pétremand G, Chittaro Y, Braaker S, Brenneisen S, Gerner M, Obrist M K, Rochefort S, Szallies A, Moretti M. Ground beetle (Coleoptera: Carabidae) communities on green roofs in Switzerland: synthesis and perspectives. *Urban Ecosystems*, 2018, 21(1): 119-132.
- [33] Braaker S, Ghazoul J, Obrist M K, Moretti M. Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs. *Ecology*, 2014, 95(4): 1010-1021.
- [34] Ksiazek-Mikenas K, Fant J B, Skogen K A. Pollinator-mediated gene flow connects green roof populations across the urban matrix: a paternity analysis of the self-compatible forb *Penstemon hirsutus*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 299.
- [35] Hong W Y, Guo R Z, Tang H. Potential assessment and implementation strategy for roof greening in highly urbanized areas: a case study in Shenzhen, China. *Cities*, 2019, 95: 102468.
- [36] Hoeben A D, Posch A. Green roof ecosystem services in various urban development types: a case study in Graz, Austria. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 62: 127167.
- [37] 黄科锋, 张辉, 肖思奇. 考虑使用年限的区域建筑结构运维安全风险评估研究. *安全与环境学报*, 1-10[2023-05-02]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1368>.
- [38] Huang Y, Yu B L, Zhou J H, Hu C L, Tan W Q, Hu Z M, Wu J P. Toward automatic estimation of urban green volume using airborne LiDAR data and high resolution Remote Sensing images. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(1): 43-54.
- [39] Bakx T R M, Koma Z, Seijmonsbergen A C, Kissling W D. Use and categorization of Light Detection and Ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(7): 1045-1059.
- [40] MacIvor J S. Building height matters: nesting activity of bees and wasps on vegetated roofs. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 2016, 62(1/2): 88-96.
- [41] Næsset E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 88-99.
- [42] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [43] Kong F H, Wang D, Yin H W, Dronova I, Fei F, Chen J Y, Pu Y X, Li M C. Coupling urban 3-D information and circuit theory to advance the development of urban ecological networks. *Conservation Biology*, 2021, 35(4): 1140-1150.
- [44] Riaño D, Valladares F, Condés S, Chuvieco E. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124(3/4): 269-275.
- [45] 张林, 田波, 周云轩, 朱春娇. 遥感和 GIS 支持下的上海浦东新区城市生态网络格局现状分析. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2015(1): 240-251.
- [46] 黄瑞, 沈中伟. 测度城市屋顶景观空间格局的新指数研究. *西南交通大学学报*, 2016, 51(5): 951-957.
- [47] Mayrand F, Clergeau P. Green roofs and green walls for biodiversity conservation: a contribution to urban connectivity? *Sustainability*, 2018, 10(4): 985.