



· 海绵城市 ·

绿色屋顶适建潜力评估 ——以天津市南开区为例

王选懿¹, 饶良懿²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要 绿色屋顶对缓解城市化的不利影响有着重要意义。天津地区城市化程度高,绿色屋顶发展相对滞后,缺乏绿色屋顶规模性建设的可行性评估及规划方案。该文以天津市南开区为例,选取建筑属性和绿化需求度作为评价标准,建立绿色屋顶适建潜力评估体系。基于GIS和优劣解距离法(TOPSIS)呈现天津市南开区绿色屋顶综合适建潜力空间分布。研究结果表明,南开区绿色屋顶适建面积约5.17 km²,适建潜力平均分为0.53,适建潜力呈“北高南低”趋势。南开区共有46个高度适建社区,优先于适建社区开展绿色屋顶建设可更有效地发挥绿色屋顶在改善城市环境方面的作用。

关键词 绿色屋顶; 屋面类型; 绿化覆盖率; 建筑密度; 优劣解距离法
中图分类号: S731.2 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-03-004

Assessment of green roof potential: A case study in Nankai District, Tianjin WANG Xuanyi¹, RAO Liangyi²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract Green roofs are of great significance in mitigating the adverse effects of urbanization. The Tianjin area is highly urbanized, but the development of green roofs is relatively lagging behind, and there is a lack of feasibility assessment and planning schemes for the large-scale construction of green roofs. This study takes Nankai District of Tianjin as an example, and selects building attributes and greening demand degree as evaluation criteria to establish a system for assessing the potential of green roofs suitable for construction. Based on GIS and TOPSIS, the spatial distribution of green roofs in Nankai District of Tianjin is presented. The results of the study show that the suitable area of green roofs in Nankai District is about 5.17 km², and the average score of suitable potential is 0.53, and the suitable potential shows a trend of "high in the north and low in the south". There are 46 highly suitable communities in Nankai District, and prioritizing the construction of green roofs in suitable communities can more effectively play its role in improving the urban environment.

Keywords green roof; roof type; green coverage; building density; TOPSIS

收稿日期: 2024-01-14

基金项目: 北京市科技新星计划(2006A22)

第一作者: 王选懿, 男, 从事屋顶绿化研究, wangxuanyi35@163.com。

通信作者: 饶良懿, 女, 教授, 从事水土保持、生态修复与管理研究, raoliangyi@bjfu.edu.cn。

随着社会经济的迅速发展,城市化进程不断推进。2022 年末,中国城市化率已达到 65.22%。持续的城市化使城市生态系统面临着严峻挑战。大面积的自然植被混凝土、沥青等反射率较低的不透水材料取代,加剧了热岛效应和城市内涝^[1]。增加植被是缓解城市化负面影响的最佳策略之一。然而,城市地区密集的建筑布局和复杂的道路网络极大地限制了绿地的可用性。绿色屋顶作为一种在建筑物屋顶种植植物的绿化形式,能有效解决建筑用地和绿地之间的矛盾。相比裸露屋顶,绿色屋顶能反射更多太阳辐射,并将部分太阳辐射用于植物的光合作用,植物的蒸腾作用可进一步降低建筑温度和空气温度。芝加哥的一项研究表明,绿色屋顶的广泛应用将使城市环境温度降低 3℃^[2]。此外,绿色屋顶可减少雨水径流,降低并推迟径流峰值,改善城市水文循环。Hutchinson^[3]等长期监测结果表明,基质厚度为 10~13 cm 的绿色屋顶对降水的平均保持率为 69%。另一项研究中,Simmons^[4]观测发现,绿色屋顶对中雨的保持率高达 88%,径流量显著低于裸露屋顶。

我国绿色屋顶建设起步较晚,仅深圳、上海等少数发达城市在推广绿色屋顶上取得进展,其他城市由于缺乏绿色屋顶的鼓励政策、可行性评估以及技术指导,绿色屋顶发展相对滞后,屋顶绿化覆盖率较低。通过分析城市布局、建筑属性、绿化分布等具体条件,评估绿色屋顶在不同地区的适建潜力,可为城市绿化工程的优先推进提供依据。目前关于绿色屋顶适建潜力的研究较少。邵天然等^[5]以建筑年代、建筑结构等建筑属性为绿色屋顶适建要素对深圳福田区进行了案例分析,结果表明,研究区有 51% 的建筑满足绿色屋顶建设的基本条件。王晶晶^[6]以建筑高度、屋面形式、建筑年代、历史保护等级为适建要素对南京鼓楼区建筑筛选,并模拟了绿色屋顶建设后的降温效应。现行研究主要以建筑属性作为适建潜力的评估标准,很少有研究者考虑不同地区对绿色屋顶的需求程度^[7]。此外,现有评估体系并未体现适建性因素间的重要性差异,导致评估结果缺乏科学性和客观性。因此,本研究以天津市南开区为例,从建筑属性、绿化需求两方面选取绿色屋顶适建潜力指标,采用专家打分法赋予指标权重并进行等级划分,创建屋顶绿化适建潜力评估体系。最后应用 GIS 技术对城市建筑进行系统筛选和综

合评分,分析绿色屋顶适建潜力空间分布格局,为推广城市绿色屋顶建设提供科学的规划方案及指导建议。

1 研究区概况

南开区位于天津市西南部,总面积为 40.63 km²,属温带季风型气候。截至 2021 年底,南开区绿化覆盖率为 37.95%,拥有绿地 13.55 km²,公园 2.81 km²。南开区绿地分布不均衡,且屋顶绿化率几乎为零。大量绿地集中在南开区东南部分的天津水上公园、天津动物园、南翠屏公园以及天大南开校区,其他区域绿化率普遍较低。因此,本文将除天津水上公园、天津动物园、南翠屏公园、天大南开校区以外的区域作为研究对象,旨在评估绿色屋顶适建潜力,以期推广屋顶绿化建设,改善南开区绿地的分布状况,提高整体绿化水平。

2 研究方法

2.1 数据来源

①南开区 2023 年建筑轮廓和层数矢量数据来源:天地图地理信息平台。②高分影像来源:Google Earth Pro。③建筑年代获取途径:高德地图 AOI 矢量数据、安居客小区信息汇总数据,高德地图、全国房价行情等地图房产平台,建筑所属单位官方网站。④南开区绿地分布数据来源:文献[8]通过深度学习方法,基于 GoogleEarth 影像和城市边界绘制的栅格数据。⑤地表温度数据来源:基于 GEE 开发的在线 landsat 地表温度获取系统。⑥天津市社区边界矢量来源:天地图地理信息平台。

2.2 适建潜力指标选取及划分标准

本研究基于现有研究结论和建设规范,以建筑属性和绿化需求度为评价标准,选取建筑层数、屋面类型、建筑年代、绿化覆盖率、地表温度、容积率、建筑密度 7 项绿色屋顶适建潜力评价指标^[5-7,9-10]。具体划分标准见表 1。

1)建筑高度。屋顶不是植物的天然生长空间,随着建筑高度增加,风力增大,植物生长环境更加恶劣,屋顶绿化的安全性也随之降低^[5,11]。建筑高度的增加还将显著增加运输、建造以及维护成本。《成都市屋顶绿化及垂直绿化技术导则》规定,不宜在 12 层以上的建筑建设绿色屋

顶。姜之点等^[12]和 Zhang 等^[13]研究表明,绿色屋顶的三维空间降温强度随高度增加而递减,当绿化高度小于 12 m(4 或 5 层)时,冷空气向地面传输的距离更短,能起到更好的近地降温效果。文献[14]提出,绿化高度的增加将降低城市绿地的连通性。通过查阅《民用建筑设计通则》,建筑按层数可划分为:低层建筑(1~3 层)、多层建筑(4~6 层)、中高层建筑(7~9 层)、高层建筑(10 层以上)。结合设计规范和相关研究结论,以建筑层数作为建筑高度衡量标准,将研究区建筑屋顶按建筑层数越高,植物生长环境质量降低、建造成本增加、环境效益降低的原则,分为 3 个等级:1~3 层、4~6 层以及 7~12 层,12 层以上建筑不适合建设绿色屋顶。

2) 屋面类型。建筑屋顶按照坡度可分为平屋顶和坡屋顶,屋顶绿化的难度和成本随屋面坡度的增加而增加,常见的颗粒基质材料只能应用于平坦或略微倾斜的屋面^[6,15]。《屋顶绿化技术规范》规定,绿色屋顶坡度需小于 15°,《天津市屋顶绿化技术规程》规定,当屋面坡度超过 30°时,不应建设绿色屋顶。经实地调查发现,天津地区坡屋顶为了达到更好的排水性能,坡度一般在 30°以上,均不适宜建设绿色屋顶。对于钢筋混凝土结构和砖混结构建筑,其屋面材料多为现浇混凝土板和预制混凝土板,上人屋面活荷载在 2.0 kN/m² 以上。钢结构适用于跨度较大的建筑,例如体育馆、车间、厂房等,屋面多为不上人设计,屋面活荷载在 0.5 kN/m² 以上。根据《建筑结构荷载规范》,屋顶花园屋面活荷载应大于 3.0 kN/m²,但粗放型绿色屋顶对屋面的承载能力要求更低(活荷载标准值大于 1.0 kN/m²)^[16-18]。因此,钢筋混凝土结构和砖混结构建筑的上人屋面可满足粗放型绿色屋顶的基本承载要求,大跨度钢结构建筑屋顶则不宜建设绿色屋顶。综上所述,将研究区建筑屋顶按屋面类型划分为混凝土结构平屋顶(满足建设条件)、其他形式屋顶(不宜建设绿色屋顶)。

3) 建筑年代。建筑年代是制约绿色屋顶建设的关键要素。随着建筑年代的增加,屋面防水层最易受到破坏。而绿色屋顶植物需要基质长期处在湿润状态,加上土壤的化学腐蚀作用以及植物根系的物理穿刺作用,进一步增加了屋面渗漏的风险。因此,绿色屋顶对防水层质量提出了更高的要求。《JGJ 155—2013 种植屋面工程技术规

程》规定,绿色屋顶防水层的合理使用年限不应少于 15 a,采用二道及二道以上设防,其中上道必须具备耐根穿刺作用^[19]。在建设绿色屋顶之前,应对原有屋面进行严格的防水性能检测,通过闭水处理找出渗漏部位并进行修补。待修补完成后,对屋面做二次防水处理,并采取物理阻根或化学阻根措施^[16,20]。《屋面工程技术规范》中指出,一般建筑和非永久性建筑的防水层合理使用年限为 5~10 a。《房屋修缮技术标准》规定,当房屋已使用年限小于 25 a 时,屋面的修缮周期为 12 a。Brucker 等^[21]对传统平屋顶的使用寿命进行了预测并提出了维护计划,分析结果表明,传统平屋顶的瓷砖(上人屋面)、防水层以及保温层的使用寿命约为 30~40 a,承重结构的使用寿命则约为 40~60 a。当建筑年代超过 30 a 时,屋面防水层水密性降低,屋面保温层受潮破坏。此外,随着时间推移,屋面承重结构中钢筋、混凝土的老化以及裂缝等问题将进一步降低建设绿色屋顶的安全性^[22]。综上所述,当建筑使用年限小于 5 a 时,防水层、保温层等功能性良好,改造绿色屋顶不需进行额外的修缮工作;当建筑使用年限在 5~12 a 时,改造绿色屋顶需对原有屋面防水层适当修补,成本增加;当建筑使用年限在 13~30 a 时,屋面防水层的破坏程度较大,需进行较为系统的修缮才可满足屋顶绿化条件,成本进一步提高;当建筑使用年限大于 30 a 时,建筑的整体结构和屋面防水层都出现明显老化,结构加固和防水修缮将耗费大量成本。

4) 绿化覆盖率。绿化覆盖率是指绿化垂直投影面积之和与总用地面积的比率,代表了单位区域内植被覆盖水平。植被可以净化空气、改善城市水循环、缓解热岛效应,在城市中发挥着重要的生态功能^[23-24]。植被缺失可能引发生态功能衰退、居住舒适度下降等问题。通过引入绿色屋顶,可以增加绿化覆盖,有效改善城市生态环境,为居民提供更舒适的居住环境。

5) 地表温度。夏季地表温度反映了热岛效应的剧烈程度^[25-26]。绿色屋顶具备蒸散和遮阳作用,可促进城市冷却^[27-28]。通过分析地表温度,可以确定各区域对绿色屋顶降温效应的需求程度^[9]。

6) 建筑密度和容积率。城市几何是影响城市气候、宜居性的重要因素,而建筑密度和建筑容积率是城市几何的关键参数。建筑密度是范围内

建筑底面积与总用地面积之比,与不透水表面比例存在密切联系。容积率则是指建筑物的容积面积与总用地面积之比,反映了建设土地使用强度和居住舒适度。高密度的城市建设使绿化水平的发展远滞后于城市开发,建筑聚集压缩了土地和

植被空间,增加了不透水表面和城市热源,导致了城市热岛、地表径流加剧、居住舒适度降低、环境污染等问题,绿色屋顶可有效缓解建筑堆积带来的负面效应。

表 1 绿色屋顶适建潜力指标划分标准
Tab.1 Green roof potential indicator criteria

适建潜力指标	评估标准	划分标准
建筑层数	建筑属性	1~3 层适建潜力高,评分为 3;4~6 层适建潜力中,评分为 2;7~12 层适建潜力低,评分为 1;高于 12 层不宜建设绿色屋顶
屋面类型	建筑属性	平屋顶适宜建设,坡屋顶不宜建设。砖混、钢混结构屋面适宜建设,钢结构等其他材料屋面不宜建设绿色屋顶
建筑年代	建筑属性	建造成本随建筑年代增加而增加。建筑年代小于 5 a 评分为 4,5~12 a 评分为 3,13~30 a 评分为 2,大于 30 a 评分为 1
绿化覆盖率	绿化需求	以社区为单位计算绿化覆盖率。绿化覆盖率越低,绿色屋顶需求度越高,绿色屋顶环境效益越显著
夏季地表温度	绿化需求	夏季地表温度越高,热岛效应越剧烈,绿色屋顶需求度越高
建筑容积率	绿化需求	以社区为单位计算容积率。容积率越高,人均绿地面积越低,居住舒适度越低,绿色屋顶需求度越高
建筑密度	绿化需求	以社区为单位计算建筑密度。建筑密度越高,不透水表面比例越高,绿地缺失越严重,绿色屋顶需求度越高

- 2.3 适建潜力指标权重确定
- 1)建立层次目标模型及判断对比矩阵。

2)对天津市绿化行业的 12 位专家进行线下问卷调查,记录评价结果。

3)根据学历、职称、绿色屋顶熟悉程度确定
- 专家权重。

4)计算判断矩阵相对权重并检验一致性。

5)根据权重组合构建权重矩阵,计算适建潜力指标最终权重。评估结果见表 2、3。

表 2 专家权重及绿色屋顶适建潜力指标权重
Tab.2 Expert weights and green roof suitability indicator weights

专家序号	专家权重	建筑层数	建筑年代	绿化覆盖率	地表温度	容积率	建筑密度
1	0.038	0.103 3	0.071 3	0.469 6	0.279 1	0.053 9	0.022 7
2	0.053	0.389 8	0.324 6	0.151 7	0.076 0	0.022 4	0.035 4
3	0.114	0.301 7	0.301 7	0.224 3	0.046 0	0.024 7	0.101 7
4	0.136	0.151 4	0.087 6	0.407 2	0.285 6	0.047 8	0.020 4
5	0.091	0.444 5	0.220 3	0.166 6	0.090 3	0.027 0	0.051 3
6	0.076	0.339 2	0.339 2	0.187 1	0.042 0	0.027 3	0.065 3
7	0.091	0.152 6	0.057 5	0.486 9	0.238 7	0.041 4	0.022 8
8	0.076	0.446 2	0.253 1	0.140 0	0.094 1	0.025 7	0.040 9
9	0.076	0.366 2	0.283 3	0.180 4	0.105 0	0.023 3	0.041 8
10	0.068	0.358 1	0.307 4	0.188 7	0.081 2	0.025 0	0.039 6
11	0.091	0.366 7	0.272 0	0.201 8	0.085 7	0.025 2	0.048 5
12	0.091	0.148 4	0.053 0	0.566 8	0.053 0	0.030 4	0.148 4

表 3 绿色屋顶适建潜力指标最终权重
Tab. 3 Final weighting of green roof suitability potential indicator

评价指标	建筑层数	建筑年代	绿化覆盖率	地表温度	容积率	建筑密度
最终权重	0. 292 3	0. 208 2	0. 287 4	0. 125 1	0. 031 4	0. 055 6

2.4 数据处理

1)对基础数据进行转换、裁剪、连接、修正等预处理。基于层高数据和 Google Earth Pro 卫星影像,应用要素筛选和目视解译等方法,剔除层数和屋面类型不满足屋顶绿化要求的建筑,将剩余建筑作为适建潜力评价对象,图 1 为屋面类型识别标准。



图 1 屋面类型识别标准
Fig. 1 Roof type identification criteria

3 结果分析

3.1 绿色屋顶适建潜力指标分析

研究区共有 12 171 座建筑,其中符合屋顶绿化基本要求的有 7 093 座,占比 58.3%。在满足建设要求的建筑中,1~3 层建筑占比为 43.2%,共 3 066 座;4~6 层建筑占比 45.7%,共 3 240 座;7~12 层建筑占比 11.1%,共 787 座。由图 2(a)可见,基本适建建筑以低层和多层建筑为主,这可能与南开区老城区和商业底商建筑较多有关。对建筑年代的进一步统计验证了这一推测,对于满足屋顶绿化基本要求的中低层建筑,有 91.7% 建于 2011 年前,35.5% 建于 1993 年前。尽管中低层建筑更有利于植物生长和减少建造维护成本,但在对老旧建筑进行绿色屋顶改造时,需要额外的工作来修复防水层甚至加固屋面结构,以满足绿色屋顶建设要求。

南开区社区的平均绿化覆盖率为 19.6%,标准差为 0.12。由图 2(c)可见,南开区社区绿化水平存在较大差异,迎风里、俊城浅水湾等 28 个社区的绿化覆盖率已超过 30.0%,而卫安西里、幸福南里、宜君里等 71 个社区的绿化覆盖率却不足 15%。以保山道和天大南开校区分界将南开区划分为南北两部分,发现南北方向上社区绿化覆盖

2)基于空间连接、字段重分类、汇总统计等工具对建筑矢量添加层数评分、建筑年代评分、绿化覆盖率、地表温度、容积率、建筑密度等属性,导出综合适建属性表。

3)应用优劣解距离法(TOPSIS)进行标准化处理,计算建筑要素综合适建潜力评分,连接 GIS 呈现天津南开区建筑综合适建潜力空间分布。

率呈现“南高北低”的趋势。南部地区由于公园面积庞大,绿化水平较高,社区平均绿化覆盖率达到 27.7%,而北部地区社区平均覆盖率仅有 15.4%,特别是在南开区西北部,共有 30 个低覆盖率社区,绿化缺失严重。通过分析卫星影像和社区绿化覆盖率空间分布发现,南开区西北部的向阳路西侧区域工业区面积较大,且存在建筑拆除后待开发的土地,这可能是绿化覆盖率较低的原因。此外,工业区产生的废物和残留的建筑垃圾对城市环境的危害不容忽视。因此,在南开区西北部,特别是向阳路西侧区域建设绿色屋顶将有效改善绿化分布并缓解环境污染。

由图 2(d)可见,南开区共有 49 个建筑密集区,其中有 45 个分布在北部,占比高达 91.8%。工业和商业用地的空间分布、优质教育资源的吸引力是北部地区建筑聚集的主要原因。例如,延长里、南泥湾路、广灵里、华美里等高密度社区分布着大面积的工业园区,而天津大学、南开中学、南开大学附属中学作为天津市重点学校,附近存在大量学区房,人口和建筑高度集中。相比之下,南开区南部分布着水上公园、南翠屏公园、天津动物园、奥体中心等旅游景区,工业区、住宅区和教育资源相对较少,建筑密度相对较低。建筑密集社区不透水表面积更大,增加了城市雨水管理设施压力。与普通不透水屋面不同,绿色屋顶能存

储雨水,并以较慢的速度释放,而不是通过排水管道直接排放。在建筑密集区建设绿色屋顶有助于减少不透水表面比例,加强城市雨洪管理。此外,根据 2023 年天津统计年鉴,南开区医疗条件发达,共有医院 53 座,位列天津市各区首位。南开区中小学、幼儿园共计 154 所,其中,南开区小学人均建筑面积仅有 3.89 m²,为天津市各区最低。医院、学校及其周边区域建筑密度大,人员密集,而绿色屋顶具备吸收污染物、改善空气质量、降低噪音,缓解情绪压力等功能。以医疗和教育资源为中心建设绿色屋顶有助于改善学习或疗养环境,促进青少年和病人的身心健康^[29-34]。

为更好地分析南开区夏季地表温度在空间上的分布规律,研究利用空间连接、汇总统计等功能,计算了南开区社区平均地表温度。由图 2(e)可见,南开区社区地表温度普遍较高,有 87 个社区的平均地表温度超过 43.5℃。对比图 2(d)、图 2(e)发现,地表温度与建筑密度相关性较高,在 87 个高温社区中,高建筑密度和中建筑密度社区分别占 49.4% 和 47.1%,在 9 个地表温度较低

的社区中有 6 个社区为低建筑密度社区,这一结果与 Zhan 等^[35]的研究结论相似。此外,地表温度也与工业区的分布密切相关,延长里、华美里、广陵里等主要由于工业园区构成的社区,平均地表温度均高于 45.0℃。这是因为工业园区建筑密度大,在生产过程中释放大量热量,是城市的主要热源之一,且工业厂房多采用导热性较高的钢材材料,保温措施相对混凝土建筑较差。为了缓解工业园区对热岛效应的加剧以及污染问题,应在其内部增加绿化,在周边地区建设绿色屋顶。

根据图 2(f)、图 2(a)、房产小区统计数据发现,研究区东北部容积率较高,容积率与绿化覆盖率、地表温度、建筑密度无显著相关性。容积率主要受区域内建筑的平均层数影响,高层小区的容积率远高于多层和低层小区,高层建筑群通常会拉大社区容积率。此外,通过调查社区人口密度发现,容积率与人口密度正向相关,容积率高的社区普遍存在人均绿化率、居住舒适度偏低的问题。在容积率高的区域建设绿色屋顶有助于提高人均绿化率和居住舒适度。

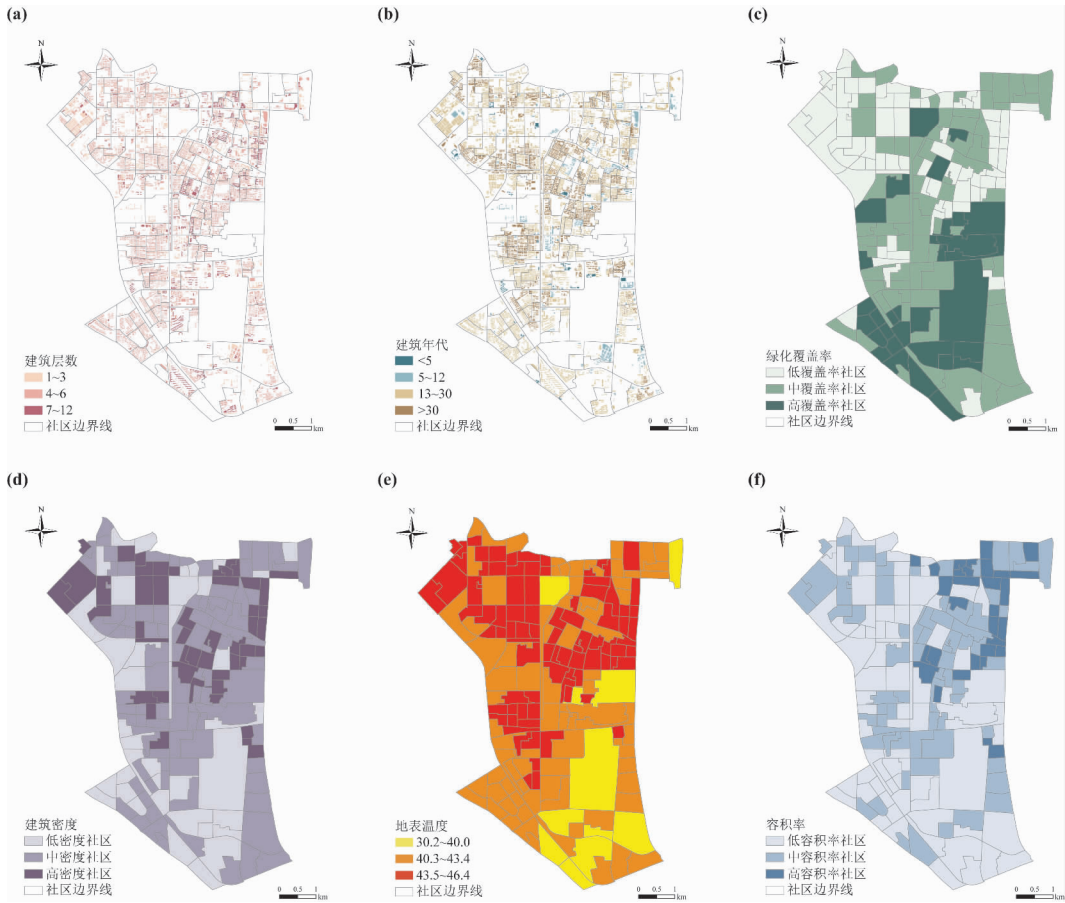


图2 南开区绿色屋顶适建潜力指标空间分布规律

Fig.2 Spatial distribution pattern of green roof potential indicators in Nankai District

3.2 综合适建潜力分析

研究根据综合适建潜力评分将研究区划分为 5 个适建等级,适建等级越高适建潜力越大。图 3 呈现了研究区建筑综合适建潜力空间分布格局。研究区共有 7 093 座适建建筑,适建面积约为 5.17 km²。基于综合适建潜力评分结果,利用汇总统计等功能,得到社区建筑适建平均分和适建面积比。结果表明,南开区北部区域比南部区域更适合建设绿色屋顶。北部地区适建建筑数量 4 537座,适建面积约 3 km²,适建潜力平均分为 0.56;南部地区适建建筑数量 2 556 座,适建面积约 2.17 km²,适建潜力平均分为 0.49。根据自然分段点分级结果,将平均分大于 0.54 且适建面积比大于 26.4% 的社区定义为高度适建社区,研究区共有高度适建社区 46 个,有 42 个位于北部地区,占比 91.3%。南泥湾路社区、紫光苑社区、昆裕里社区、华美里社区、广灵里社区、延长里社区、云阳里社区为最佳适建社区(适建面积比 > 30.0%,适建平均评分 > 0.60)。

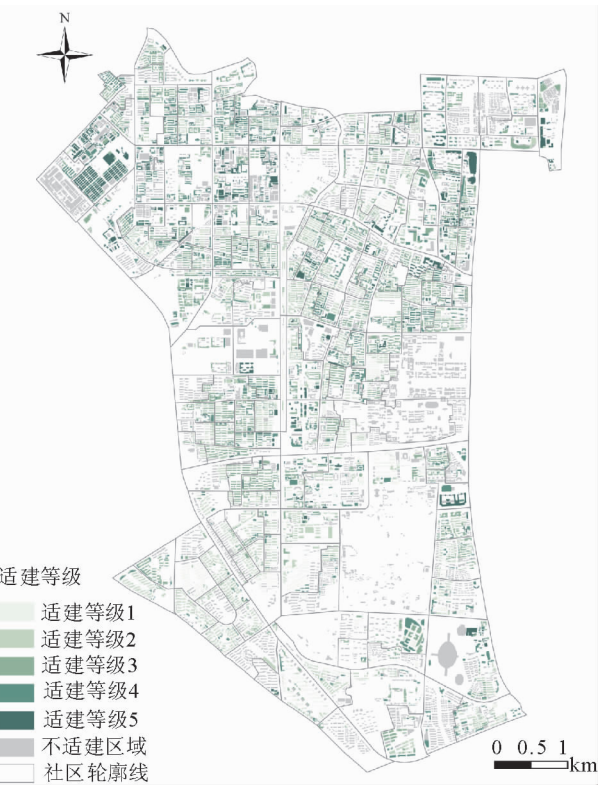


图 3 南开区绿色屋顶综合适建潜力空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of green roof integrated potential in Nankai District

4 结论与建议

本研究基于现有研究及相关规范选取了绿色屋顶适建潜力指标,通过 GIS 技术、AHP 法以及 TOPSIS 法,最终呈现了天津南开区绿色屋顶适建潜力空间分布格局。主要结论如下。①建筑层数和建筑年代是限制绿色屋顶建设的主要因素,研究区共有 58.3% 的建筑满足绿色屋顶建设的基本要求。南开区建筑的屋面类型以平屋顶为主、建筑类别多为低层和多层,建筑年代整体偏高。②绿化覆盖率、地表温度、建筑密度 3 项指标主要用于评估绿色屋顶的需求度以及环境效益。南开区绿化覆盖率、地表温度、建筑密度均在南北方向上呈现显著差异,且与工业区分布存在较强的相关性。③南开区约有 5.17 km² 的建筑屋顶满足绿色屋顶建设基本要求,适建潜力平均分为 0.53,研究区北部较南部更适宜建设绿色屋顶。研究区共有高度适建社区 46 个,南泥湾路社区、紫光苑社区、昆裕里社区、华美里社区、广灵里社区、延长里社区、云阳里社区为最佳适建社区。

研究根据评估结果和南开区屋顶绿化现状提出如下建议。

1) 南开老城区较多,改造绿色屋顶的建设维护成本较高。为降低成本,建议采用容器式屋顶绿化。这种方式对屋面的承载能力和防水性能要求较低,有助于降低根刺破坏和渗漏风险,从而节省建设维护成本。此外,南开区相关部门可考虑将屋顶绿化纳入房屋修缮整体规划。

2) 南开区约有 35% 的建筑屋面类型为坡屋顶,改造绿色屋顶受到限制。对于坡屋顶建筑,可以考虑采用垂直绿化的方式,在建筑墙面种植攀援植物,如地棉、金银花、紫藤等。垂直绿化可有效吸收光照、隔离雨水、吸附污染物,延长墙面寿命,提高建筑美学价值和绿化连通性。

3) 南开区绿化覆盖率在南北方向上呈现显著差异,在南开区北部推广绿色屋顶建设可有效改善绿地分布现状。此外,南开区存在较多工业科技园区,园区内外存在绿化缺失、高温问题。建议围绕工业园区重点进行绿色屋顶建设,并根据工业区类型选择特定的抗污染植物种。

4) 目前南开区缺乏绿色屋顶建设经验和案例参考,建议借鉴天津其他市区的成功案例,了解不同地区的适应性方案,结合南开区实际情况进

行创新。以7个最佳适建社区为试点对象,收集数据,总结经验,优化建设方案,制定南开区绿色屋顶指南。明确基质、植物、屋面结构等方面的要求,为南开区绿色屋顶建设提供详细的指导。并在此基础上,进一步于其他高度适建社区开展绿色屋顶建设。

在城市绿地缺失、生态环境恶化的背景下,绿色屋顶被视为重要的解决方案,有必要进一步评估绿色屋顶在城市中的适建潜力并将绿色屋顶建设纳入城市生态规划。

参考文献

- [1] FANG Y, DU X T, ZHAO H Y, et al. Assessment of green roofs' potential to improve the urban thermal environment: The case of Beijing[J]. *Environmental Research*, 2023, 237: 116857.
- [2] SMITH K R, ROEBBER P J. Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 507-522.
- [3] HUTCHINSON D, ABRAMS P, RETZLAFF R, et al. Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA[J]. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 2003: 1-18.
- [4] SIMMONS M T, GARDINER B, WINDHAGER S, et al. Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 339-348.
- [5] 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:以深圳市福田中心区为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4852-4860.
- SHAO T R, LI C S, ZENG H. Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: A case study in Futian central district Shenzhen China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4852-4860.
- [6] 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.
- [7] 杨洁, 周东东, 彭重华. 醴陵市绿色屋顶生态系统服务潜力评估及规划[J]. *生态科学*, 2021, 40(1): 120-128.
- YANG J, ZHOU D D, PENG Z H. Potential assessment and planning of green roof ecosystem services in Li Ling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 40(1): 120-128.
- [8] SHI Q, LIU M X, MARINONI A, et al. UGS-1m: Fine-grained urban green space mapping of 31 major cities in China based on the deep learning framework[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(2): 555-577.
- [9] 李虹, 冯仲科, 唐秀美, 等. 区位因素对绿地降低热岛效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 316-322.
- LI H, FENG Z K, TANG X M, et al. Effect of green space location factors on reducing urban heat island effect[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(S2): 316-322.
- [10] 王新军, 席国安, 陈聃, 等. 屋顶绿化适建性潜力评估指标体系的构建[J]. *北方园艺*, 2016(2): 85-88.
- WANG X J, XI G A, CHEN D, et al. Establishment of an evaluation index system for roof greening constructability[J]. *Northern Horticulture*, 2016(2): 85-88.
- [11] SHAFIQUE M, KIM R, RAFIQ M. Green roof benefits, opportunities and challenges: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 757-773.
- [12] 姜之点, 杨峰. 建筑立体绿化方式和设计高度对三维空间降温潜力的影响[J]. *风景园林*, 2023, 30(5): 75-82.
- JIANG Z D, YANG F. Influence of green building planting form and design height on cooling potential of 3D space[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(5): 75-82.
- [13] ZHANG G C, HE B J, ZHU Z Z, et al. Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(2): 179.
- [14] TAHGUY L L, CÉLINE C, FLAVIE M, et al. Role of green roofs in urban connectivity, an exploratory approach using landscape graphs in the city of Paris, France[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 78: 127765.
- [15] CASCONI S. Green roof design: State of the art on technology and materials[J]. *Sustainability*, 2019, 11(11): 3020.
- [16] 郭柳. 屋顶绿化施工技术要点分析[J]. *河北林业科技*, 2016(6): 70-72.
- GUO L. Green roof construction technology and devel-

- opment[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2016(6): 70-72.
- [17] 陈艺中. 浅谈屋顶绿化施工工艺流程[J]. 中国花卉园艺, 2017(22): 50-52.
- CHEN Y Z. Introduction to the green roof construction process [J]. China Flowers & Horticulture, 2017 (22): 50-52.
- [18] 余伟增. 屋顶绿化技术与设计[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [19] 方富喜. 屋顶绿化规划建设应注意的问题[J]. 中国花卉园艺, 2018(8): 54-55.
- FANG F X. Green roof planning and construction should pay attention to the problem[J]. China Flowers & Horticulture, 2018(8): 54-55.
- [20] 刘波. 屋顶绿化施工关键技术控制浅析[J]. 现代园艺, 2021, 44(12): 168-169.
- LIU B. Green roof construction key technology control analysis[J]. Xiandai Horticulture, 2021, 44(12): 168-169.
- [21] BRUCKER JURICIC B, KRSTIC H, CULO K. Theoretical analysis and comparison of the thermal performance, construction costs, and maintenance complexity between a conventional and an intensive green roof [J]. Journal of Engineering, 2021(1): 1-16.
- [22] 全明研. 老化和损伤的钢筋混凝土构件的性能[J]. 工业建筑, 1990, 20(2): 15-19.
- QUAN M Y. Performance of aged and damaged reinforced concrete members[J]. Industrial Construction, 1990, 20(2): 15-19.
- [23] FERRINI F, FINI A, MORI J, et al. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 4247.
- [24] DIMOUDI A, NIKOLOPOULOU M. Vegetation in the urban environment; Microclimatic analysis and benefits [J]. Energy and Buildings, 2003, 35(1): 69-76.
- [25] 许睿, 董家华, 王凤兰. 城市热岛效应的影响因素、研究方法及缓解对策研究进展[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2020, 33(4): 65-70.
- XU R, DONG J H, WANG F L. Review on the influencing factors methods and countermeasures of urban heat island effect[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2020, 33(4): 65-70.
- [26] MATHEW A, KHANDELWAL S, KAUL N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities[J]. Energy and Buildings, 2018, 159: 271-295.
- [27] TAN C L, WONG N H, TAN P Y, et al. Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment [J]. Building and Environment, 2015, 94: 206-217.
- [28] CASONE S, COMA J, GAGLIANO A, et al. The evapotranspiration process in green roofs: A review[J]. Building and Environment, 2019, 147: 337-355.
- [29] GUO L, LUO J, YUAN M, et al. The influence of urban planning factors on PM_{2.5} pollution exposure and implications: A case study in China based on remote sensing, LBS, and GIS data[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 659: 1585-1596.
- [30] YIN C H, YUAN M, LU Y P, et al. Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model [J]. Science of The Total Environment, 2018, 634: 696-704.
- [31] YUAN M, YAN M R, SHAN Z R. Is compact urban form good for air quality? A case study from China based on hourly smartphone data[J]. Land, 2021, 10(5): 504.
- [32] GASCON M, SÁNCHEZ-BENAVIDES G, DADVAND P, et al. Long-term exposure to residential green and blue spaces and anxiety and depression in adults: A cross-sectional study [J]. Environmental Research, 2018, 162: 231-239.
- [33] VAN DEN BERG M M, VAN POPPEL M, VAN KAMP I, et al. Do physical activity, social cohesion, and loneliness mediate the association between time spent visiting green space and mental health? [J]. Environment and Behavior, 2019, 51(2): 144-166.
- [34] YANG L, HO J Y S, WONG F K Y, et al. Neighbourhood green space, perceived stress and sleep quality in an urban population[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126763.
- [35] ZHAN Q, MENG F, XIAO Y. Exploring the relationships of between land surface temperature, ground coverage ratio and building volume density in an urbanized environment [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-7-W3: 255-260.

(编辑 亢小玉)