

DOI: 10.5846/stxb202205041230

李泞吕, 赵方凯, 陈利顶. 城市建筑屋顶光伏发电潜力评估方法和模型. 生态学报, 2023, 43(10): 4284-4293.

Li N L, Zhao F K, Chen L D. Review of rooftop solar photovoltaic electrical potential estimation: approaches and models. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4284-4293.

## 城市建筑屋顶光伏发电潜力评估方法和模型

李泞吕<sup>1</sup>, 赵方凯<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>1,2,\*</sup>

1 云南大学生态与环境学院, 昆明 650500

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

**摘要:** 建筑屋顶作为闲置的土地资源已成为光伏发电重要的潜在空间, 屋顶光伏发电是脱碳电力供应的主要方式, 将在实现城市碳中和进程中发挥重要作用。对建筑屋顶光伏发电潜力进行精确评估将有助于分布式光伏的科学规划和合理布局, 提升土地利用效率。旨在对建筑屋顶光伏发电潜力影响因素和评估方法, 以及光伏发电潜力主要评估模型进行系统性阐述, 比较分析不同评估方法的优缺点, 总结未来研究的重点方向。现有研究表明, 建筑屋顶光伏发电潜力评估已从经验取值发展为定量空间分析, 评估尺度、评估精度和评估成本已经成为不同评估方法综合权衡的重点。现有三种评估方法中, 采样法计算成本和数据成本较低, 但评估结果不确定性较大、精度较低; 全面评估法评估精度较高, 但数据获取成本和计算成本较高; 机器学习法能够高效挖掘大数据潜力, 且算法性能显著提升, 因而相较于其他方法更适宜大尺度建筑屋顶光伏发电潜力评估。当前建筑屋顶光伏发电潜力评估仍然存在大尺度精细评估缺乏、评估结果不确定性大以及评估模型计算量大等问题。未来研究重点应关注三个方面: 1) 建立适宜不同区域的高精度简化模型并完善技术潜力评估模型; 2) 阐明建筑屋顶光伏发电潜力的影响因素, 为代表性建筑分类体系的完善、关键特征值的选取提供理论依据; 3) 将光伏安装情景、农村屋顶质量、城市公共建筑屋顶产权和用能需求等因素对建筑屋顶光伏发电潜力的影响纳入评估框架。

**关键词:** 建筑屋顶; 评估方法; 太阳能资源; 太阳能光伏发电潜力制图; 净零碳城市

## Review of rooftop solar photovoltaic electrical potential estimation: approaches and models

LI Ninglü<sup>1</sup>, ZHAO Fangkai<sup>1</sup>, CHEN Liding<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Urban rooftops, one kind of unused land resource, have become the optimal room for solar photovoltaic deployment. Rooftop solar photovoltaic would be the main source of decarbonizing electricity supply and will play a leading role in the realization of future net-zero carbon cities. An accurate estimation of rooftop solar photovoltaic electrical potential contributes to scientific programming and reasonable arrangement of distributed photovoltaic, land-use efficiency improvement, and ecosystem disturbance reduction. This study aims to comprehensively review rooftop solar photovoltaic potential influencing factors, estimation approaches, and models. The advantages and disadvantages of each approach were discussed, and key directions for future research were summarized. The results show that the rooftop solar photovoltaic electrical potential estimation based on rules of thumb has changed into quantitative and spatial analysis. The adoption of an optimal approach for estimation should trade-off between the assessment scale, accuracy and cost. Among the three current

**基金项目:** 中国生态学会学会发展与创新项目

**收稿日期:** 2022-05-04; **采用日期:** 2022-08-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@ynu.edu.cn

approaches, the sample methodology has lower computational cost and data cost, but uncertainties and less accuracy are the main problems. The complete census methodology has higher evaluation accuracy but is limited by high data acquisition and computing costs. The machine learning method is more advantageous than other approaches for large-scale electrical potential estimation due to its ability in big data mining and algorithm performance improvement. However, there are several problems in the research field, including the gap in accurate large-scale assessment, the uncertainties of outcomes and processes, and the lack of specificity. Three aspects should be highly valued in future studies: 1) establish a high-precision simplified model suitable for different regions and complete the technical potential assessment model; 2) figure out the influencing factors of rooftop solar photovoltaic electrical potential, and provide a theoretical basis for the improvement of the representative building classification system and the selection of key feature values; 3) incorporate the impacts of photovoltaic installation scenarios, rural roof quality, urban public building roof ownership and energy demand on building rooftop photovoltaic power potential into the assessment framework.

**Key Words:** building rooftops; estimation approaches; solar energy source; solar photovoltaic potential mapping; net-zero carbon cities

随着社会经济快速发展,碳排放激增导致的气候变暖问题已是当前全球面临的巨大挑战之一,如何实现碳中和被纷纷纳入世界各国的未来发展规划<sup>[1]</sup>。可再生能源的开发利用是实现净零排放的必然选择,预计在达到全球碳中和目标时,可再生能源在一次能源中的占比将由当前的 14% 提升至 60%<sup>[2]</sup>。其中太阳能是最具潜力的可再生能源,每两小时到达地球表面的太阳辐射能量就能满足全球一年的能源需求<sup>[3]</sup>。光伏发电技术能够将丰富的太阳能资源转化为电能,随着技术日益提升和成本不断降低,预计 2050 年光伏能源将满足全球 25%—49% 的用电需求<sup>[4]</sup>,因而光伏能源部署是能源转型进程中不可或缺的部分。

城市建筑屋顶作为一种闲置的土地资源是发展光伏发电的潜在重要场所之一。2021 年以建筑屋顶光伏为主的分布式光伏发电市场在总光伏市场中的占比超过 50%<sup>[5]</sup>,相较于其他发电方式,建筑屋顶光伏不仅提高了土地利用效率、降低了土地利用成本,也避免了因光伏电站建设带来的生态干扰。此外,建筑屋顶光伏具有布设灵活性高、就近消纳能力强、能源利用效率高和生命周期碳排放低等特点。根据国家能源局光伏新增装机量数据<sup>[6]</sup>,2013—2021 年我国建筑屋顶光伏年碳减排总量从 0.10 Mt/a 左右升高至 12.18 Mt/a 左右,累计碳减排总量达到了 46.18 Mt。随着建筑屋顶光伏市场占比持续上升,通过建筑屋顶光伏发电供应脱碳电力将成为实现城市碳中和的主要路径<sup>[7]</sup>。

建筑屋顶光伏在我国还处于高速发展推广时期,许多建筑屋顶资源尚待开发,因而对建筑屋顶光伏发电潜力进行精确评估具有重要意义。由于建筑环境的复杂性,建筑屋顶光伏的发电潜力在建成区分布极为不均<sup>[8]</sup>。从不同尺度对建筑屋顶光伏发电潜力进行评估并进行空间制图,一方面能够为建筑能源规划和智能电网构建提供基础数据,另一方面也可为光伏能源发展目标、屋顶光伏政策制定和经济表现评估提供理论和数据支撑。本文旨在系统阐述建筑屋顶光伏发电潜力影响因素以及现有建筑屋顶光伏发电潜力评估方法和模型,针对当前模型和方法的应用及存在的问题对未来研究方向和发展重点进行总结,以期为推动我国城市建筑屋顶光伏发电有序开发、提升城市碳中和潜力提供参考。

## 1 城市建筑屋顶光伏发电潜力影响因素

建筑屋顶光伏发电的潜力主要取决于三个方面:物理潜力、地理潜力和技术潜力<sup>[9]</sup>。物理潜力是指建筑区域能够接收的水平面太阳总辐射,是评估区域光伏可利用性的首要基础条件。地理潜力以水平面辐射为数据基础,通过考虑建筑环境和安装规范对实际太阳辐射的影响,计算建筑屋顶光伏可接收的实际总太阳辐射。技术潜力则主要取决于光伏发电系统的光电转换效率,直接影响建筑屋顶光伏的可推广性。建筑屋顶光伏发电潜力评估概括如下(图 1)。

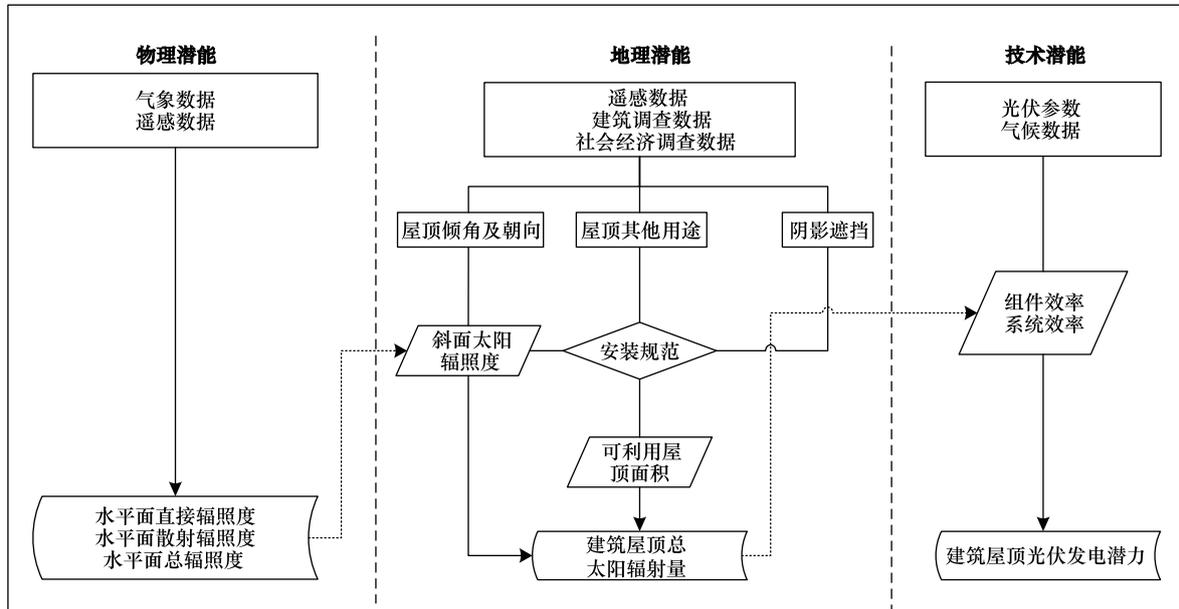


图 1 建筑屋顶光伏发电潜力评估

Fig.1 A hierarchical approach to rooftop solar photovoltaic electrical potential estimation

### 1.1 物理影响因素

太阳辐射穿过大气会发生吸收和散射现象,一部分辐射直接到达地表称为直接辐射,另一部分经大气发生散射再通过多次反射到达地表称为散射辐射,两者之和为水平面总辐射<sup>[10]</sup>。影响太阳辐射的主要因素为大气质量和大气组成<sup>[11-12]</sup>。大气质量由海拔和太阳位置决定,海拔越高水平面总辐射也就越高,太阳位置则随着时间不断地发生变化。对于特定地理位置来说,其特定时间或者时间段内太阳辐射在理想条件下相同,但如果大气中含有大量云、水蒸气和尘埃,则会大大减弱地表辐照度,因而水平太阳辐射也受气候条件以及大气能见度等因素的影响。

### 1.2 地理影响因素

除了考虑物理因素以外,复杂的建筑环境对太阳辐射的影响也不容忽视,地理影响因素主要包括阴影遮挡、建筑屋顶特征和屋顶其他用途<sup>[13]</sup>。阴影遮挡包括地形遮挡、建筑遮挡和树木遮挡三个部分,阴影遮挡可以削减太阳辐射,从而降低光伏发电效率。屋顶特征包括屋顶面积、倾角和朝向,屋顶面积决定了光伏阵列的安装上限<sup>[14]</sup>,屋顶倾角和朝向则决定了光伏阵列能够接收的实际太阳辐射量。屋顶其他功能设施会改变屋顶可用于光伏发电的面积,例如女儿墙、电梯间、通风井和中央空调机组占用<sup>[15]</sup>。根据建筑屋顶光伏安装规范<sup>[16]</sup>,光伏安装有效面积需综合考虑光伏电池板大小和倾角、屋面形状、光伏阵列对齐方式、维护间隔、最小连续面积、最小太阳辐射强度、屋顶承重和屋檐安全距离等因素的影响,因此需要根据实际情况优化光伏布局,以达到实际安装有效面积最大化的目的。此外,光伏阵列会接收一部分来自周围建筑环境的反射辐射,能够补偿部分屋顶光伏接收的太阳辐射损失。

### 1.3 技术影响因素

光伏发电系统的光电转换效率决定了光伏系统最终将实际接收的太阳辐射转换为电能的总量,主要受内部因素和外部因素的共同影响<sup>[17]</sup>。内部因素影响光伏组件效率,主要包括电池材料、电池生产技术和光伏组件技术等因素。而外部因素影响系统效率,主要包括污尘损失、组件适配性损失、组件老化损失、线缆损失和设备损耗等因素。不同地区建筑屋顶光伏发电系统的建立即使采用同类光伏组件,受外部因素差异影响,其最终发电效率也会存在较大差异。

## 2 数据来源和分析策略

本文基于“知网中国数据库”和“Web of Science 核心合集数据库”对关键文献进行检索筛选。其中,中文专业检索式为“SU=(城市屋顶+街区+建筑)\* (太阳能光伏发电潜力+太阳能光伏利用潜力+太阳能潜力)\* (评估+制图+研究+分析)”;英文高级检索式为“TS=((‘rooftop photovoltaic’ or ‘rooftop solar photovoltaic’) and (‘mapping’ or ‘assessment’ or ‘estimation’ or ‘quantification’))”,时间范围为2000年1月—2022年6月,共检索到中文文献13篇,英文文献400篇。根据筛选标准选取出93篇核心文献,筛选标准包括:1)研究内容至少包括建筑屋顶光伏物理潜力和地理潜力评估两个部分;2)研究方法为采样法、全面评估法和机器学习法。结果表明2005年以前建筑屋顶光伏发电潜力研究较少,2005年以后呈现逐年增长趋势(图2)。早期研究主要基于采样法对建筑屋顶太阳能光伏潜力进行评估;2005—2010年,遥感技术的成熟促进了全面评估法的应用;2010—2015年随着空间数据的不断累积,以数据驱动为基础的机器学习法开始得到发展。城市建筑屋顶光伏发电潜力的研究主要分布在太阳能光伏普及率较高的欧洲区域,其次为北美洲和亚太地区,而我国则处于快速发展时期。

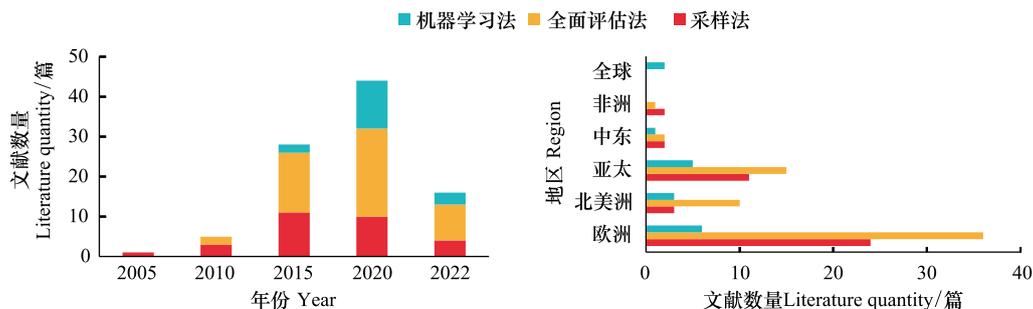


图2 文献数量和评估方法的区域分布

Fig.2 The literature quantity and geographic distribution of methodology

## 3 城市建筑屋顶光伏发电潜力评估方法与模型

### 3.1 评估方法

#### 3.1.1 采样法

在空间数据缺乏或进行大尺度评估时,根据建筑特征和功能对代表性建筑进行分类,通过分层采样评估不同代表性建筑的屋顶可利用性,以计算大尺度建筑屋顶光伏发电潜力的方法称为采样法,包括简单采样法和多元采样法。简单采样法根据建筑特征和功能将建筑进行分类,对不同类型建筑屋顶可利用性进行抽样调查,最终确定屋顶可利用系数并进行推广。国际能源署(IEA)<sup>[18]</sup>将屋顶可利用性分为建筑适宜性和辐射适宜性,根据IEA成员国的加权平均数据得出建筑屋顶可利用系数取值为0.4,该类方法在早期的评估研究中被广泛采纳。一些研究通过文献综述方法<sup>[19-20]</sup>,直接采用多个研究区屋顶可利用系数平均值进行建筑屋顶光伏发电潜力快速评估。但是不同研究区建筑建造文化、政策和气候背景差异较大,因而屋顶可利用系数取值具有地区差异<sup>[21-23]</sup>。即便是同一功能型建筑,其取值差异也较为明显<sup>[15, 24-25]</sup>。为了提高采样法的精确度,一些研究不仅根据建筑功能进行分层抽样,同时综合考虑屋顶类型<sup>[18]</sup>和建筑形态<sup>[26]</sup>,分别计算不同类型建筑屋顶的可利用系数,以获取更为精确的评估结果。此外,将人口密度和建筑密度等更多因素纳入可利用屋顶评估的多元采样法也可进一步提高预测精度,但其评估成本也随之提高<sup>[9]</sup>。

#### 3.1.2 全面评估法

全面评估法是基于地理空间数据建立三维模型,精确刻画建筑复杂环境,获取屋顶特征、阴影遮挡以及屋顶其他用途等参数,结合物理和经验模型对建筑屋顶光伏发电潜力进行评估的方法。当前,基于建筑三维模

型的地理潜能评估,可直接通过计算太阳相对位置,根据太阳辐射模型获取建筑面每小时的太阳辐射量<sup>[27-30]</sup>,但由于三维数据获取成本较高,该类研究大多都在小尺度范围内进行评估。在缺乏三维数据或进行更大尺度评估时,常用2.5维数据进行评估,2.5维数据仅含建筑高度,且将复杂建筑形态简化为长方体,其评估技术手段和模型与三维数据基本一致,数据成本和时间成本较低,但评估结果的精度低于三维模型,忽略了建筑屋顶形态和倾角对太阳能潜力的影响。此外,二维数据也常被用于大尺度的评估工作,但由于缺乏高度信息,因而评估结果忽略了地理因素的影响<sup>[31]</sup>。为了降低计算成本并保证较高的评估精度,一些研究结合多源数据优化评估流程,如利用不同分辨率数字地形模型分别评估建筑和山体阴影<sup>[32]</sup>、先筛选可利用屋顶再进行太阳辐射计算<sup>[33-37]</sup>。此外,利用 Arcgis、RADIANCE/DAYSIM 和 v.sun 等软件可自动提取屋顶倾角和朝向、阴影、屋顶形状和建筑轮廓等信息,进一步降低技术成本<sup>[30,38-42]</sup>。

### 3.1.3 机器学习法

机器学习法以地理空间数据、气候数据和社会经济数据为输入变量,进行水平太阳辐射估算、屋顶和建筑特征预测、发电量预测以及建筑轮廓提取,从而对建筑屋顶光伏发电潜力进行评估。该方法发展初期基于线性回归模型进行预测,以规避高成本瓶颈<sup>[41,43-44]</sup>。随着计算机技术进步,机器学习算法得到广泛运用和发展。Assouline 等<sup>[45]</sup>将支持向量机和 GIS 相结合,以建筑特征为输入变量预测地理潜能相关因子,进而对瑞士 1901 个市镇的建筑屋顶光伏发电潜力进行评估;在此基础上利用随机森林算法对瑞士建筑屋顶光伏发电潜力进行更高空间分辨率(200 m)的评估与制图<sup>[46]</sup>,通过考虑屋顶形态对太阳辐射的影响,使得评估结果更加精确。此外,卷积神经网络算法结合高清卫星影像可精确提取建筑屋顶和上层结构轮廓,相较于其他算法其数据成本更低且提取精度更高<sup>[47]</sup>。在进行不同尺度研究时需要权衡不同算法的计算成本和预测精度,通过比较多个算法后得出随机森林算法比较适合局域尺度研究<sup>[48]</sup>,极限梯度提升算法更适用于区域尺度和全球尺度研究<sup>[49]</sup>。

## 3.2 建筑屋顶光伏发电潜力评估模型

### 3.2.1 太阳辐射潜力评估模型

太阳辐射潜力模型可对水平面太阳辐射进行计算,主要包括经验模型和物理模型两类。经验模型通过建立太阳辐射和气候学要素关系统计方程估算水平面太阳辐射,常用经验模型为 Angstrom<sup>[50]</sup>提出的日照百分率模型(式 1)。该模型基于日照时数和可日照时数(duration of possible sunshine)对水平面总辐射进行计算,由于其物理意义明确且预测精度高而被广泛采用。此外,基于现代辐射传输理论的物理模型,通过结合卫星遥感观测资料可获取高时空分辨率的水平面太阳辐射数据,主要包括晴空模型和云模型<sup>[10]</sup>。晴空模型以大气参数和环境变量为输入变量,通过量化大气对太阳辐射的削弱作用,计算晴空辐照度;云模型以可见光波段、红外线波段以及环境变量为输入变量,通过量化云对太阳辐射的削弱作用,计算全天空总辐射<sup>[10]</sup>。当前, SolarGIS、PVWatts 和 PVGIS 均是基于物理模型建立了全球太阳能辐射开源数据库,并被多数研究广泛采用。

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

其中,  $G$  为实际水平面总辐射,  $G_0$  为晴天总辐射,  $a, b$  为系数,  $S, S_0$  分别为日照时数和可日照时数。

### 3.2.2 地理潜力评估模型

地理潜力评估模型旨在准确计算不同倾角和朝向设置下建筑屋顶光伏阵列实际接收的太阳辐射,可分为倾斜面直接辐射、散射辐射和反射辐射三个部分(式 2)<sup>[51]</sup>:

$$G_t = \text{Dir}_n \cos\theta + \text{Dif}_n F_{\text{dif}} + \rho G_h F_{\text{ref}} \quad (2)$$

其中,  $G_t$  为倾斜面总太阳辐射,  $\text{Dir}_n$  为水平面直接辐射,  $\text{Dif}_n$  为水平面散射辐射,  $G_h$  为水平面总辐射,  $\theta$  为太阳辐射入射角,  $\rho$  为地表反照率,  $F_{\text{dif}}$  和  $F_{\text{ref}}$  分别为散射辐射和反射辐射转换因子。

通过散射辐射模型计算散射辐射转换因子是地理潜力评估的关键。基于各向同性散射和异向同性散射的前提假设,散射模型分为各向同性散射模型和各向异性散射模型。在地理潜力评估研究中,常用的各向同

性散射模型为 Liu 和 Jordan 模型<sup>[52]</sup>(式 3),常用的各向异性散射模型为 Perez 模型<sup>[53]</sup>(式 4)和 Hay 模型<sup>[54]</sup>(式子 5)。

$$F_{\text{dif}} = (1 + \cos\beta)/2 \quad (3)$$

其中,  $\beta$  为光伏阵列倾角。

$$F_{\text{dif}} = f_1 \frac{b}{a} + (1 - f_1) \frac{1 + \cos\beta}{2} + f_2 \sin\beta \quad (4)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  为经验系数,  $a$  和  $b$  为与太阳位置相关的几何系数。

$$F_{\text{dif}} = A \cos\theta + (1 - A) \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (5)$$

其中,  $A$  为水平直接辐射与天文辐射的比值。

反射辐射转换因子主要根据 Duffie 和 Beckman<sup>[55]</sup>的研究进行取值,该模型将地面反射假定为漫反射,其计算公式如下:

$$F_{\text{ref}} = (1 - \cos\beta)/2 \quad (6)$$

### 3.2.3 技术潜力评估模型

技术潜力模型旨在量化太阳能光伏系统的光电转化效率,进而对发电量进行计算,光电转化效率主要分为光伏组件效率和系统效率<sup>[32]</sup>(式 7)。光伏组件效率是在特定环境温度和太阳辐射条件下光伏组件的转换效率,利用温度模型<sup>[56]</sup>和仿真模型<sup>[57]</sup>进行评估。温度模型以风速、环境温度、地表温度和云盖度等环境因子为输入变量,计算光伏组件的实际操作温度;仿真模型通过输入操作温度、倾斜面总太阳辐射以及光伏组件参数计算光伏组件的转换效率。系统效率主要评估污尘损失、逆变器损失、退化损失和线缆损失等外部因素对光电转换效率的影响,其中退化损失和逆变器损失可分别通过退化率和 PVWatt 模型进行计算,其他损失则参考相关资料进行经验取值<sup>[32]</sup>。当环境因子缺乏时,可通过参考其他文献直接选取光伏组件效率和系统效率的经验值以估算发电量,其中组件效率取值为 14%—17%<sup>[58]</sup>,系统效率的取值为 80%—90%<sup>[59]</sup>。

$$P = G_i \cdot A \cdot \eta \cdot PR \quad (7)$$

其中,  $P$  为建筑屋顶光伏发电总量,  $G_i$  和  $A$  分别为倾斜面太阳辐照度和太阳能光伏阵列总面积,  $\eta$  为光伏组件效率,  $PR$  为光伏系统效率。

## 4 方法及模型的发展与应用

### 4.1 方法的发展与应用

欧洲国家对建筑屋顶光伏推广最早,因而对建筑屋顶光伏发电潜力评估方法的建立具有重要的推动作用,随后以美国为主的北美地区和以中国、韩国为主的亚太地区在方法的运用和优化上也做出重要贡献。由于三种评估方法各有优劣(表 1),因而不同地区的研究者需综合考虑数据可获取性、数据质量、评估尺度和评估精度等因素,以确定适宜的评估方法。

由于欧洲地区具有较为完整的建筑地籍数据,因而采样法最早被 IEA 提出用于其成员国的建筑屋顶光伏发电潜力评估<sup>[18]</sup>,由于该方法数据和计算成本低且尺度转换容易实现,因而目前在大尺度以及空间数据缺失区域的研究中仍被广泛采纳,但研究表明即使在相邻区域,基于屋顶可利用系数的评估结果仍存在较大误差<sup>[60]</sup>。其次,不同研究在选取代表性建筑样本时缺乏统一标准,一些研究选取样本数量少且缺乏统计检验,使得其评估精度受到影响<sup>[61]</sup>。随着遥感技术和地理信息软件的发展,以光学影像和 LiDAR 数据为基础数据的全面评估法在局域尺度和区域尺度上得到发展,该方法能够精确提取建筑形态参数以精确计算建筑屋顶光伏发电的实际潜力,数字地表模型(DSM)作为核心数据,在屋顶轮廓提取、屋顶倾角和朝向计算、屋顶形态识别、屋顶上层结构提取和阴影计算等方面具有重要作用,但由于全球大部分区域缺乏高精度的 LiDAR 数据<sup>[62]</sup>,因而在屋顶特征参数的精确提取上仍存在较大误差。此外,高计算成本限制了该方法在大区域尺度研究中的推广应用。机器学习法目的与采样法一致,均是为了实现局域尺度以上较为精确的建筑屋顶光伏发电

潜力评估,由于该方法能够充分整合挖掘大量社会经济数据和空间资料数据,因而其预测精度要高于采样法。机器学习法需要大量的数据特征值,在区域尺度上可实现建筑面积的计算,但要精确地预测屋顶形态、屋顶朝向和倾角等关键参数,当前只有在高精度 LiDAR 数据覆盖面较高的欧洲和北美地区才能实现<sup>[32,61]</sup>。此外,机器学习算法和特征值的选取以及训练样本质量均会对其评估精度产生影响。综上所述,在大尺度的评估研究中,机器学习法和全面评估法虽然在评估精度上优于采样法,但受制于数据可获取性、数据质量和计算成本的影响,大部分地区还需结合采样法获取关键建筑参数或采用理想倾角和朝向以进行建筑屋顶光伏发电潜力评估。

表 1 城市建筑屋顶光伏太阳能潜力评估方法原理及优缺点

Table 1 Principle, advantages and disadvantages of rooftop solar photovoltaic electrical potential estimation approaches

评估方法 Methodology	描述 Description	优势 Advantages	劣势 Disadvantages
采样法 Sampling method	利用统计推断的方法,计算不同建筑类型的屋顶可利用系数并进行尺度转换,以在更大尺度评估建筑屋顶光伏发电潜力。	a) 实现成本低; b) 利于尺度转换。	a) 评估精度和分辨率低; b) 受区域异质性影响较大; c) 多数研究样本量缺乏统计检验。
全面评估法 Complete census method	基于多源遥感数据,结合计算机模型和地理空间软件,量化建筑屋顶光伏发电潜力。	a) 评估精度高; b) 可以实现建筑尺度评估。	a) 实现成本高;b) 评估范围小; c) 依赖高分辨率 DSM 数据。
机器学习法 Machine learning method	从空间资料和社会经济数据中提取特征值,利用机器学习算法对建筑屋顶光伏发电潜力进行预测。	a) 评估精度较高; b) 可对多个地理潜能影响因子进行预测,且精度高于采样法。	a) 实现成本高; b) 精度易受训练样本质量、输入特征值和算法影响。

## 4.2 模型的发展与运用

评估模型是精确计算城市建筑屋顶光伏发电潜力的基础。由于物理潜力和地理潜力评估模型发展早且较为成熟,因而在考虑屋顶朝向和倾角的多数研究中均采用本文提及的模型进行太阳辐射强度的计算,其计算结果精度较高。在技术潜力评估中多数研究采用经验值对建筑屋顶光伏发电量进行计算,忽略了天气环境对建筑屋顶光伏光电转换效率的影响。此外,污尘损失、组件老化损失和线缆损失等因素缺乏定量化评估,这些因素在不同区域差异性较大<sup>[63]</sup>,如污尘损失在沙漠、降雪和高空气污染地区更大,因而采用相同的经验取值并不能体现地区背景的影响差异。当前建筑屋顶光伏发电潜力评估模型虽然精度较高,但需要的参数多且计算量大,这也是大尺度精确评估受限的主要原因之一<sup>[51]</sup>。

## 5 未来发展的重点方向

受高精度空间数据缺失和模型计算成本的限制,很难准确评估城市建筑屋顶的发电潜力<sup>[64-66]</sup>。评估精度不仅受到城市形态和建筑风格的影响,而且不同评估方法的结果也存在差异。多数研究对于建筑屋顶可利用面积、阴影计算以及发电量的预测结果常常缺乏可靠实测数据验证,同时也缺乏不确定性分析,导致不同研究区结果可比性较低<sup>[67]</sup>。针对不同方法的优缺点,改进与完善现有评估方法将是未来研究的一个方向。此外,建筑屋顶光伏发电潜力评估模型的简化与技术潜力评估模型的完善将是未来研究发展的难点。

### 5.1 评估方法的改进与完善

为了进一步提升大尺度评估工作的精确性与可行性,采样法需对代表性建筑进行科学分类,以反映建筑适宜性以及辐射适宜性对屋顶光伏发电潜力的影响<sup>[10]</sup>。当前基于建筑功能和屋顶形态以及基于人口密度和建筑密度的代表性建筑分类体系<sup>[9]</sup>,不能体现建筑特征和街区特征对屋顶光伏发电潜力的综合影响,因而未来应挑选合适的建筑特征和街区特征参数建立标准统一的代表性建筑分类框架,以降低采样法的评估误差。以大数据驱动为基础的机器学习法需针对不同的预测变量,简化关键特征值并优化机器学习算法,此外应搭建机器学习算法源代码、建筑物实例数据集、高精度遥感数据和成品数据共享平台,以进一步促进机器学习法

的应用。全面评估法应关注多源遥感数据时空融合,充分结合深度学习算法和高清卫星影像高效提取建筑信息,以弥补高精度 LiDAR 数据缺失和高计算成本的缺陷。随着全面评估法应用的增加,大范围精确的评估结果将为其他两种方法的优化提升、精度验证和不确定性分析提供可靠的数据和理论支撑。全面评估法不仅要关注建筑屋顶光伏发电潜力评估结果的准确性,还应着重进行建筑屋顶光伏发电潜力影响因素的机理性研究(如街区特征对屋顶光伏发电潜力的影响)<sup>[68]</sup>,从而为采样法代表性建筑分类体系的建立、机器学习法关键特征值的选取提供理论依据。此外,应将安装规范和最佳光伏布设空间方案纳入评估框架,以避免高估建筑屋顶光伏发电潜力<sup>[14, 69]</sup>。同时,当前研究应结合我国建筑屋顶光伏规模推广遇到的瓶颈,将农村建筑屋顶质量、城市公共建筑屋顶产权和用能需求等因素对建筑屋顶光伏发展的限制纳入评估框架<sup>[70]</sup>。

## 5.2 评估模型的简化与完善

低成本简化模型和全面的技术潜力评估模型有待提出和验证。Calcabrini 等<sup>[51]</sup>将当前普遍运用于光伏发电潜力评估的高成本模型称为辐照度评估模型,并提出新简化模型以解决大尺度光伏潜力评估瓶颈。该研究利用天际轮廓线提取两个关键参数:天空可视域因子和太阳盖度因子(sun coverage factor),以精确预测光伏阵列的地理潜力和技术潜力。该简化模型通过降低数据维度减少计算成本,但目前尚未得到广泛利用,主要原因在于其需要针对不同气候条件、光伏朝向和倾角调整模型系数。因此将简化模型进一步运用到不同城市中,并对比模型参数在不同区域的差异性、适用性和推广性,将有助于推进大尺度精确评估研究。基于全面评估法的建筑屋顶光伏发电潜力影响因素机理性研究,将为简化模型的创新提供理论参考。此外,选取哪些关键参数建立技术潜力模型,以进一步量化污尘损失、组件老化损失和线缆损失等因素对技术潜力的影响仍待探索。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [ 2 ] DeAngelo J, Azevedo I, Bistline J, Clarke L, Luderer G, Byers E, Davis S J. Energy systems in scenarios at net-zero CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6096.
- [ 3 ] International Energy Agency. *Solar Energy: Mapping the Road Ahead*. Paris: IEA, 2019.
- [ 4 ] International Renewable Energy Agency. *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects. A Global Energy Transformation*. Abu Dhabi: IREA, 2019.
- [ 5 ] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2021年版). (2022-02-23)[2022-06-27]. [http://www.chinapv.org.cn/road\\_map/1016.html](http://www.chinapv.org.cn/road_map/1016.html).
- [ 6 ] 国家能源局. 2021年光伏发电建设运行情况. (2022-03-09)[2022-06-27]. [http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c\\_1310508114.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm).
- [ 7 ] Seto K C, Churkina G, Hsu A, Keller M, Newman P W G, Qin B, Ramaswami A. From low- to net-zero carbon cities: the next global agenda. *Annual Review of Environment and Resources*, 2021, 46(1): 377-415.
- [ 8 ] Freitas S, Catita C, Redweik P, Brito M C. Modelling solar potential in the urban environment: state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 915-931.
- [ 9 ] Izquierdo S, Rodrigues M, Fueyo N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 2008, 82(10): 929-939.
- [ 10 ] 申彦波. 我国太阳能资源评估方法研究进展. *气象科技进展*, 2017, 7(1): 77-84.
- [ 11 ] Al-Waeli A H A, Kazem H A, Chaichan M T, Sopian K. Introduction//Al-Waeli A H A, Kazem H A, Chaichan M T, Sopian K, eds. *Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Applications*. Cham: Springer, 2019: 1-64.
- [ 12 ] Kalogirou S A. Chapter two-environmental characteristics//Kalogirou S A, ed. *Solar Energy Engineering*. Boston: Academic Press, 2009: 49-120, 761-762.
- [ 13 ] Gassar A A A, Cha S H. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy*, 2021, 291: 116817.
- [ 14 ] Zhong Q, Nelson J R, Tong D Q, Grubescic T H. A spatial optimization approach to increase the accuracy of rooftop solar energy assessments. *Applied Energy*, 2022, 316: 119128.
- [ 15 ] 张华. 城市建筑屋顶光伏利用潜力评估研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.

- [16] 中国光伏行业学会. 10 项户用并网光伏发电系统标准. (2019-09-11)[2022-06-27]. [http://www.chinapv.org.cn/standard\\_list/770.html](http://www.chinapv.org.cn/standard_list/770.html).
- [17] Rekioua D, Matagne E. Optimization of Photovoltaic Power Systems; Modelization, Simulation and Control. London: Springer, 2012.
- [18] International Energy Agency. Potential for Building Integrated Photovoltaic. Switzerland: IEA, 2002.
- [19] Wiginton L K, Nguyen H T, Pearce J M. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(4): 345-357.
- [20] Vardimon R. Assessment of the potential for distributed photovoltaic electricity production in Israel. *Renewable Energy*, 2011, 36(2): 591-594.
- [21] Defaix P R, Van Sark W G J H M, Worrell E, De Visser E. Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27. *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2644-2653.
- [22] Peng J Q, Lu L. Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 149-162.
- [23] 刘光旭, 吴文祥, 张绪教, 周杨. 屋顶可用太阳能资源评估研究——以 2000 年江苏省数据为例. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 1242-1248.
- [24] Denholm P, Margolis R. Supply Curves for Rooftop Solar PV-Generated Electricity for the United States. Golden: NREL, 2008.
- [25] Lopez A, Roberts B, Heimiller D, Blair N, Porro G. US Renewable Energy Technical Potentials. A GIS-Based Analysis. Golden: NREL, 2012.
- [26] Mainzer K, Fath K, McKenna R, Stengel J, Fichtner W, Schultmann F. A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. *Solar Energy*, 2014, 105: 715-731.
- [27] Redweik P, Catita C, Brito M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 2013, 97: 332-341.
- [28] Bill A, Mohajeri N, Scartezzini J L. 3D model for solar energy potential on buildings from urban LiDAR data//Proceedings of the Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation. Liège: Eurographics Association, 2016: 51-56.
- [29] Lukač N, Seme S, Žlaus D, Štumberger G, Žalik B. Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection and Ranging) data. *Energy*, 2014, 66: 598-609.
- [30] Jochem A, Hofle B, Rutzinger M, Pfeifer N. Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. *Sensors*, 2009, 9(7): 5241-5262.
- [31] Ren H S, Xu C L, Ma Z J, Sun Y J. A novel 3D-geographic information system and deep learning integrated approach for high-accuracy building rooftop solar energy potential characterization of high-density cities. *Applied Energy*, 2022, 306: 117985.
- [32] Buffat R, Grassi S, Raubal M. A scalable method for estimating rooftop solar irradiation potential over large regions. *Applied Energy*, 2018, 216: 389-401.
- [33] Mohajeri N, Assouline D, Guiboud B, Bill A, Gudmundsson A, Scartezzini J L. A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications. *Renewable Energy*, 2018, 121: 81-93.
- [34] Tereci A, Schneider D, Kesten D, Strzalka A, Eicker U. Energy saving potential and economical analysis of solar systems in the urban quarter Scharnhauser Park//Proceedings of the ISES Solar World Congress. Johannesburg: ISES, 2009.
- [35] Brito M C, Gomes N, Santos T, Tenedório J A. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 2012, 86(1): 283-288.
- [36] Strzalka A, Alam N, Duminil E, Coors V, Eicker U. Large scale integration of photovoltaics in cities. *Applied Energy*, 2012, 93: 413-421.
- [37] Kassner R, Koppe W, Schüttenberg T, Bareth G. Analysis of the solar potential of roofs by using official lidar data//Proceedings of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: ISPRS, 2008: 399-404.
- [38] Jo J H, Otanicar T P. A hierarchical methodology for the mesoscale assessment of building integrated roof solar energy systems. *Renewable Energy*, 2011, 36(11): 2992-3000.
- [39] Hong T, Lee M, Koo C, Jeong K, Kim J. Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis. *Applied Energy*, 2017, 194: 320-332.
- [40] Hong T, Lee M, Koo C, Kim J, Jeong K. Estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (PV) system by analyzing the building shadow using Hillshade analysis. *Energy Procedia*, 2016, 88: 408-413.
- [41] Kodysh J B, Omaitomu O A, Bhaduri B L, Neish B S. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 2013, 8: 31-41.
- [42] Latif Z A, Zaki N A M, Salleh S A. GIS-based estimation of rooftop solar photovoltaic potential using LiDAR//2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. Malacca: IEEE, 2012: 388-392.
- [43] Dehwah A H A, Asif M, Rahman M T. Prospects of PV application in unregulated building rooftops in developing countries: a perspective from Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 2018, 171: 76-87.
- [44] Carl C. Calculating Solar Photovoltaic Potential on Residential Rooftops in Kailua Kona, Hawaii [D]. California: University of Southern

- California, 2014.
- [45] Assouline D, Mohajeri N, Scartezzini J L. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: a machine learning approach. *Solar Energy*, 2017, 141: 278-296.
- [46] Assouline D, Mohajeri N, Scartezzini J L. Large-scale rooftop solar photovoltaic technical potential estimation using Random Forests. *Applied Energy*, 2018, 217: 189-211.
- [47] Huang Z J, Mendis T, Xu S. Urban solar utilization potential mapping via deep learning technology: a case study of Wuhan, China. *Applied Energy*, 2019, 250: 283-291.
- [48] Walch A, Castello R, Mohajeri N, Scartezzini J L. A fast machine learning model for large-scale estimation of annual solar irradiation on rooftops// *Proceedings of Solar World Congress 2019*. Santiago: International Solar Energy Society ISES, 2020.
- [49] Joshi S, Mittal S, Holloway P, Shukla P R, Gallachóir B Ó, Glynn J. High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5738.
- [50] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 50(210): 121-126.
- [51] Calcabrini A, Ziar H, Isabella O, Zeman M. A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments. *Nature Energy*, 2019, 4(3): 206-215.
- [52] Liu B Y H, Jordan R C. Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *Ashrae Transactions*, 1961, 3: 526-541.
- [53] Perez R, Seals R, Ineichen P, Stewart R, Menicucci D. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 1987, 39(3): 221-231.
- [54] Hay J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, 1979, 23(4): 301-307.
- [55] Duffie J A, Beckman W A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [56] Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 16(4): 307-315.
- [57] Huld T, Friesen G, Skoczek A, Kenny R P, Sample T, Field M, Dunlop E D. A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(12): 3359-3369.
- [58] International Energy Agency. *Technology Roadmap-Solar Photovoltaic Energy 2014*. Paris: IEA, 2014.
- [59] Kumar M, Kumar A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 554-587.
- [60] Thai C, Brouwer J. Challenges estimating distributed solar potential with utilization factors: California universities case study. *Applied Energy*, 2021, 282: 116209.
- [61] Margolis R, Gagnon P, Melius J, Phillips C, Elmore R. Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(7): 074013.
- [62] 宋晓阳. 基于多源高分遥感数据的屋顶太阳能光伏潜力评估[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [63] Bansal N, Jaiswal S P, Singh G. Comparative investigation of performance evaluation, degradation causes, impact and corrective measures for ground mount and rooftop solar PV plants-A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101526.
- [64] Yang Y, Campana P E, Yan J Y. Potential of unsubsidized distributed solar PV to replace coal-fired power plants, and profits classification in Chinese cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 131: 109967.
- [65] Chen H, Chen W Y. Status, trend, economic and environmental impacts of household solar photovoltaic development in China: modelling from subnational perspective. *Applied Energy*, 2021, 303: 117616.
- [66] Wang Y, He J J, Chen W Y. Distributed solar photovoltaic development potential and a roadmap at the city level in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 141: 110772.
- [67] Walch A, Castello R, Mohajeri N, Scartezzini J L. Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty. *Applied Energy*, 2020, 262: 114404.
- [68] Xu S, Li Z X, Zhang C, Huang Z J, Tian J, Luo Y Q, Du H. A method of calculating urban-scale solar potential by evaluating and quantifying the relationship between urban block typology and occlusion coefficient: a case study of Wuhan in Central China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 64: 102451.
- [69] Shen Y F, Ji L, Xie Y L, Huang G H, Li X, Huang L C. Research landscape and hot topics of rooftop PV: A bibliometric and network analysis. *Energy and Buildings*, 2021, 251: 111333.
- [70] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知. (2022-03-11)[2022-06-27]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202203/20220311\\_765109.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202203/20220311_765109.html).