引文格式：刘建华,孙梦怡,韩寒 ,等. 高分遥感建筑物屋顶太阳能光伏碳中和潜力研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 92-97. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.12.021

高分遥感建筑物屋顶太阳能光伏碳中和潜力研究

刘建华[1]，孙梦怡[1]，韩　寒[1]，孙雨晴[1]，宁小禾[1]，王梦辰[1]，王鑫宇[1]
（1. 北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院 移动地理空间大数据云服务创新团队，北京 100044）

摘　要：建筑物屋顶分布式太阳能光伏发电潜力评估随着“碳中和”可持续发展战略目标的实施已成为该领域的研究热点，然而相关普适性应用的实施方法仍相对缺乏。基于高分遥感建筑物屋顶识别和空间分析建模技术创新性提出了一套完备的多标准决策太阳能光伏潜力计算方法以及高可用性技术应用流程；对影响建筑物屋顶太阳能光伏潜力估算的因素进行分析并提出一种屋顶绿碳指数计算方法。依据该方法建立了建筑物屋顶太阳能光伏潜力“碳中和”计算应用模型以及投融资分析系统，实现了建筑物屋顶太阳能光伏潜力的快速评估，并同步分析“碳中和”效益以及经济效益。实证应用表明，本方法的可行性和实际工程化应用价值显著，同时具有良好的普适性与泛化能力。

关键词：建筑物屋顶；太阳能光伏潜力；屋顶绿碳指数；光伏气象参数；碳中和可视化分析系统
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）12-0092-06

Research on the Carbon Neutral Potential of Rooftop Solar Photovoltaic on Buildings by High-resolution Remote Sensing

LIU Jianhua[1], SUN Mengyi[1], HAN Han[1], SUN Yuqing[1], NING Xiaohe[1],
WANG Mengchen[1], WANG Xinyu[1]
(1. Mobile Geospatial Big Data Cloud Service Innovation Team, School of Geomatics and Urban Spatial Information, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The assessment of distributed solar photovoltaic potential on building rooftops has become a hot research topic in this field with the implementation of the “carbon neutral” sustainable development target, but there is still a lack of implementation methods for relevant universal applications. In this paper, we proposed a comprehensive multi-criteria solar photovoltaic potential calculation method and a high availability technology application process based on the identification and spatial analysis of building rooftops by high-resolution remote sensing. On the basis of this, we established a “carbon neutral” calculation model and an investment and financing analysis system, which could enable a rapid assessment of the solar photovoltaic potential of building rooftops and a simultaneous analysis of the “carbon neutral” benefits and economic benefits. The empirical application shows that the feasibility and practical engineering application of this method are significant, and it has good generalization and applicability.

Key words: building rooftop, solar photovoltaic potential, roof green carbon index, photovoltaic meteorological parameter, “carbon neutral” visual analysis system

目前，新能源种类众多，相较风能、水能、核能等，太阳能亦具有相对优势。住建部、发改委印发《城乡建设领域碳达峰实施方案》，提出了优化城市建设用能结构的能源发展战略。一般太阳能可以在有光照的地方进行能量转化，实施灵活性强，而在建筑物屋顶铺设光伏具有利用闲置资源的显著优点。国家能源局印发《国能综通新能〔2021〕84号》通知公布了屋顶分布式光伏的开发试点，高分遥感建筑物屋顶数据以及屋顶光伏潜力评估规划数据将支撑全国屋顶光伏开发工作的顺利开展。建筑物屋顶太阳能光伏项目形成一定规模，并在太阳能光伏板生产成本大幅下降的同时[1]，碳积分产生的碳中和规模化环境及经济效益将十分可观。

1　研究现状

1.1　高分遥感建筑物屋顶识别研究进展

在建筑物屋顶太阳能光伏投融资项目中，准确地

收稿日期：2023-04-28。
项目来源：北京市重点实验室资助项目（20220112）；北京建筑大学教育科学研究重点项目（Y2111）；北京市高等教育学会重点项目（ZD202244）。
第一作者简介：刘建华（1981—），博士，副教授，研究方向为地理信息科学与遥感应用技术，E-mail：www.dxkjs.com。

获取项目区域建筑物屋顶的基础信息至关重要。近年来建筑物屋顶提取技术不断取得突破，学者们围绕建筑物屋顶的高精度提取工作展开了广泛的研究[2-11]。同时随着遥感对地观测技术的快速发展，遥感影像的分辨率得到了大幅度提升，为建筑屋顶提取的工程化实施提供了良好的数据基础。

本文在课题组建筑物屋顶识别研究工作的基础上[6]，进行建筑物屋顶信息提取并应用于太阳能光伏资源潜力方法的构建和碳中和投融资系统开发。

1.2　建筑物屋顶太阳能光伏潜力评估研究进展

随着太阳能光伏发电技术的发展，国内外对太阳能光伏潜力评估展开了广泛的研究。2022年，Liao[12]等提出了基于机器学习模型的空间连续地表太阳辐射估计方法，该方法能够准确可靠地估计地表太阳辐射，而不受大气阻碍，为指导光伏辐射安装提供数据支持。2022年，Zhu[13]等通过3种层次光伏空间优化，最大限度地收集太阳能，并建立了时空分析模型和技术经济评估模型来优化光伏供应，以确保光伏系统能够满足电力需求的同时获得合理的利润[14]。2022年，Chen[15]提出了一种带缓冲区的网格方案估计太阳辐射，评估上海建筑屋顶的太阳能利用潜力。2022年，魏巍[16]等利用无人机倾斜摄影构建城市实景模型，通过GIS技术提取建筑屋顶立面，以此评估城市屋顶碳减排潜力。2022年，王利珍[17]等从发电潜力预测等方面建立了住宅社区分布式光伏系统综合评价模型。2022年，江亿[18]等对我国农村地区发展屋顶光伏系统的资源潜力进行深入探讨。目前，建筑物屋顶光伏发电对碳中和效益评估的普适性方法鲜见，并且没有成套的碳中和投融资分析软件系统。

针对上述问题，本文研究并提出了面向碳中和的高分遥感建筑物屋顶太阳能光伏潜力多标准决策计算方法，据此建立了建筑物屋顶太阳能光伏潜力“碳中和”计算应用模型以及投融资分析系统，实现了对建筑物屋顶太阳能光伏潜力的快速计算评估，获取了模型应用的“碳中和”效益以及经济效益，以便服务于政府、企业等用户进行屋顶分布式光伏项目的整体规划。

2　建筑物屋顶多标准决策光伏潜力计算方法

2.1　数据预处理

利用高分辨率遥感影像进行建筑物屋顶信息提取时需要对原始影像数据进行预处理[19]，以便作为深度神经网络目标识别任务更有效的输入[20]。本研究综合考虑学习样本采集的几何、光谱和纹理特征以及MS-CNN模型[6]输入通道数量的限制，使用Gram-Schmidt变换方法将全色图像与R、G、B波段的多光谱数据进行融合处理[21]。

为了适应MS-CNN模型[6]的负载能力，最大限度地提高模型的训练效率，将获得的遥感图像进行分块预处理，依据生产环境硬件等条件进行适宜尺寸的分割。对分块图像进行线性拉伸增强图像对比度，继而进行双边滤波处理，在抑制目标图像噪声的同时尽可能多保留图像几何边缘细节信息。

依据预处理后的影像数据集构建地域耦合图谱样本库，继而进行谱系化建筑物屋顶识别模型的训练和建筑物影像目标掩膜提取。

2.2　建筑屋顶识别

建筑屋顶数据是开展光伏潜力计算的基础。高分遥感影像数据自身的复杂性导致传统基于多尺度分割[20]的建筑物屋顶提取方法存在自动化效率低与识别精度差的局限性，准确而又高效地识别建筑物屋顶具有很大的挑战性[22]。本文结合课题组研究成果，依托多尺度粒度深度残差网络模型MS-CNN[6]，进行建筑物屋顶目标的识别提取工作。此外，从建筑物屋顶的几何特征与光谱特征两方面，结合图谱理论构建地域耦合的谱系化建筑物屋顶深度学习图谱样本库，据此进行MS-CNN模型的训练、测试和验证。将识别获取到的高精度建筑物屋顶多边形矢量专题数据作为建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算的基础数据。

2.3　建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算方法

2.3.1　气象参数

气象参数是计算建筑物屋顶太阳能光伏潜力的关键参数之一。太阳能光伏板发电量P主要受到光照强度s、相对湿度h、温度T的影响[23]。相对湿度主要受到降雨、云量、气温的影响，一个区域的相对湿度影响一个地区的降雨量。当一个季度降雨量较多时，平均相对湿度较高，日照强度会被大幅度削弱，导致太阳能板发电效率降低。本研究依据中国气象局降雨级别划分方法[24]进行分季度估算，提高本方法计算模型的应用精度。利用NOAA物理科学实验室气候预测中心（PSL-CPC）提供的全球统一仪表日降雨分析数据进行测算。

本文以北京城市副中心为例，将2019年降雨量数据按照降雨级别天数进行统计可得到小雨、中雨和大雨为75、12 d及4 d。根据WRDC的数据，统计并分析2010—2015年北京市四个季度的太阳辐射量和年总

太阳辐射量，统计分析结果如表1所示。

表1 2010—2015年北京市不同季节时的太阳辐射量统计

季度	太阳辐射量/MJ·m^{-2}					
	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年
第一季度(3–5月)	1 906	1 793	1 759	1 864	1 918	1 681
第二季度(6–8月)	1 875	1 914	1 602	1 726	1 784	1 697
第三季度(9–11月)	1 037	1 038	1 103	1 199	1 120	1 120
第四季度（12月–次年2月）	821	817	795	839	872	849
总计	5 639	5 562	5 259	5 628	5 694	5 347

北京市位于北温带，属于半湿润性的大陆性季风气候，特点为夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥。在一年4个季度中，北京市秋冬季的太阳辐射量远低于春夏季的太阳辐射量。本文依据中国气象局日降水量来划分降雨级别，并依此来判断相对湿度及日照强度。光照强度在不同的季节有明显的差异，因而按季度进行统计降雨级别天数，在不同季度计算时，采用参数权重的方法，来计算有降雨天气时的光照比例系数，如表2。

表2 降雨天气下的光照比例权重表

季度	小雨	中雨	大雨
第一季度	0.9	0.6	0.3
第二季度	0.8	0.5	0.2
第三季度	0.4	0.1	
第四季度	0.2		

光照比例系数为有光照的天数与全季度天数的比值，如公式1。有光照的天数计算，根据表2中的参数权重及降雨级别天数进行计算，如公式2。计算获取的北京城市副中心四季度光照比例系数分别为0.97、0.86、0.85和0.96。

$$\text{光照比例系数}(D_s)=\frac{\text{有光照的天数}}{\text{全季度天数}} \tag{1}$$

$$\text{有光照的天数}=\text{季度中降雨天气下光照比例权重}\times\text{该季度的降雨级别天数} \tag{2}$$

2.3.2 最佳倾角

光伏阵列的最佳倾角是指太阳能光伏板以某一特定角度，能接收到的太阳辐射量最大值。因1 a中太阳的高度持续变化，不同地区，不同季节，光伏阵列的最佳倾角也会有所差异。最佳倾角的计算一般分为数值法和解析法[25]。本文探讨研究的建筑物屋顶太阳能发电系统的最佳倾角是综合考虑光伏阵列在1 a内所能接收到的最大辐照量[26]，倾斜接受面的最佳倾角计算方法[27]如下。

1）太阳赤纬角δ是由年的日序计算。

$$\delta=23.45\sin\left(\frac{360(284+N)}{365}\right) \tag{3}$$

2）水平面上的日落角ω_s由太阳赤纬角δ和倾斜接受面的地理纬度φ计算。

$$\omega_s=\arccos(-\tan\delta\tan\varphi) \tag{4}$$

3）最佳倾角B_{opt}由水平面上月均日太阳直射辐照量H_b（MJ/m^2）、大气层外水平面上太阳辐照量H_0（MJ/m^2）、水平面上月平均日太阳总辐照量H（MJ/m^2）、地面反射率ρ及水平面上的日落角ω_s计算，见公式（5）。

$$B_{opt}=\arctan\left[\frac{2\frac{H_b}{H}+2\frac{H_b}{H_0}\left(1-\frac{H_b}{H}\right)}{\frac{H_b}{H}+\frac{H_b}{H_0}\left(1-\frac{H_b}{H}\right)+(1-\rho)}\times\frac{\tan^2\varphi\tan\omega_s+\frac{\pi}{180}\omega_s}{\tan\varphi(\tan\omega_s-\frac{\pi}{180}\omega_s)}\right] \tag{5}$$

2.3.3 倾角辐射

在倾斜接收面上，太阳辐射值主要包括以下三类：太阳直射、太阳散射、地表反射。本文利用Solargis官网上提供的GIS数据：长期年平均的日总量，获取实验地区和实证地区倾角辐射值GTI，再用日值乘以该年晴天天数，得到全年总辐照量，单位为[MJ/m^2]。

倾角辐射（GTI）等于在指定的倾斜面上接收到的直接辐射（DNI）和散射辐射（DHI）数值相加，是计算固定倾角光伏电站产能的重要指标，对于计算建筑物屋顶光伏发电具有参考价值。

$$\text{GTI}=\text{DNI}+\text{DHI} \tag{6}$$

式中，DNI为法向直接辐射量；DHI为水平面总辐射量。

2.3.4 屋顶类型

屋顶的几何形态与房屋的使用功能、结构造型以及所处气候环境有关，可分为平屋顶、坡屋顶和其他形式屋顶。将坡度（i）大于10%的屋顶划分为坡屋顶，坡度（i）小于10%的屋顶划分为平屋顶。

$$\text{坡度}(i)=\frac{\text{高程差}}{\text{水平距离}}100\% \tag{7}$$

由于其他形式屋顶数量较少且可用屋顶铺设光伏面积较小，因此只对平、坡屋顶进行研究实验。可安装光伏系统有效利用面积与建筑屋顶总面积之比，即可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）。

$$\text{可用屋顶面积比例系数}(A_{s2})=\frac{\text{可安装光伏系统有效利用面积}}{\text{建筑屋顶总面积}} \tag{8}$$

实际应用中一般利用GIS空间分析工具对三类典型建筑按照5%的概率进行随机抽样，统计出每类屋顶的面积占比，继而计算不同建筑类型的可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）。

考虑屋顶光伏和屋顶绿地对碳中和的效益，本文创新性提出一种面向工程化应用实效核算的屋顶绿碳指数（roof green carbon index，RGCI）。RGCI是指屋顶铺设光伏面积和屋顶绿地面积对应的实际碳中和量与研究区域屋顶的总面积对应的理论碳中和量之比，实际中可分别进行屋顶光伏和屋顶绿地的RGCI指数计算。

$$\mathrm{RGCI}=\frac{(\text{屋顶铺设光伏面积}+\text{屋顶绿地面积})\text{对应的实际碳中和量}}{\text{屋顶总面积对应的理论碳中和量}} \tag{9}$$

2.3.5　建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算模型

对于建筑物屋顶太阳能光伏潜力评估方法，不同国家、地区、城市的参数需要进行适宜性配置，研究区域的地理位置以及自然环境耦合的屋顶类型对评估精度的影响较大。此外，城市中建筑物高度、密度和形态的复杂多样性，造成建筑物屋顶太阳能光伏潜力评估成为一项非常复杂的工作。

针对以上问题，本研究创新性提出一种面向碳中和的多标准决策建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算方法，一般性地实现更加精准的建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算任务，有效的用于评估屋顶光伏可再生能源的潜力。

高分遥感建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算模型见公式10，该模型涉及到的参数包括不同屋顶类型可铺设太阳能光伏板比例参数（A_{s1}）、可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）、光电转换效率（T_r）、倾角辐射（R_{GTI}）和光照比例系数（D_s）。该模型能够针对大范围尺度的不同建筑物屋顶类型进行太阳能光伏潜力评估，计算出年光伏潜力理论值（Y_e）、CO_2减排量（Y_C）和平准化度电成本（LCOE）等碳中和效益指标值。

$$Y_e=A_{s1}\times A_{s2}\times\times R_{\mathrm{GTI}}\times D_s \tag{10}$$

3　实验与应用

3.1　不同屋顶类型可用面积实验

3.1.1　实验区概况

选择北京城市副中心进行方法的可行性验证，基于提出的多标准决策太阳能光伏潜力计算模型评估实验区的碳中和效益。北京城市副中心内建筑多以普通屋顶为主，多为城镇居住类建筑。按照建筑物几何形态分类，将该区域内的屋顶分为平屋顶和坡屋顶进行研究，其他屋顶类型的几何形貌过于复杂，且数量稀少，实际工程利用价值不高故未采用。

3.1.2　实验方法

本次实验基于北京城市副中心的遥感影像处理后生成的建筑物屋顶矢量数据进行验证研究。利用屋顶遥感影像目标判读的几何形态等特征进行分类（也可按统计比例划分），依据高分遥感影像判读，将实验区屋顶类型划分为平屋顶，坡屋顶，以及其他屋顶。影响可用屋顶面积比例系数的因素主要是光热系统、设备井等房屋配套设施的占用，导致在建筑物屋顶上无法最大限度铺设太阳能光伏板，一般根据实际施工统计，可用屋顶面积比例系数约为0.3（同时考虑到实际施工和运维的留白空间）。本实验在此基础上继续细化，将屋顶类型细分为上述三类进行研究，在北京城市副中心核心区内根据7个不同功能规划区结合随机抽样法选取出10个代表性样区进行建筑物屋顶分类可用面积计算。

若屋顶面积过小，铺设光伏系统的难度和投资收益都将受到影响。Wei[28]等研究表明当建筑物屋顶面积超过6 m^2时光伏系统将比光热系统产生更好的性价收益。在本次实验的数据预处理过程中，采用面积筛选的方法，将小于6 m^2的建筑物屋顶进行剔除，保留大于6 m^2的建筑物屋顶进行后续的太阳能光伏潜力计算评估。

通过GIS统计分析和面积几何工具，对屋顶总面积与3类屋顶所占比例进行统计计算和重分类，分别得出3类屋顶的可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）。

如表3，实验统计分析表明，北京城市副中心平屋顶可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）为0.185 1，坡屋顶可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）为0.111 9，其他屋顶类型可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）为0.003。实验结果与同类研究“居住建筑可利用屋顶面积约占建筑投影面积的25%”[29]结论基本吻合。

表3　北京城市副中心屋顶类型可用屋顶面积比例系数计算表

	屋顶数量/个	屋顶总面积/m^2	占比	可用屋顶面积比例系数（A_{s2}）
平屋顶	1 798	568 892	0.617	0.185 1
坡屋顶	1 244	344 494	0.373	0.111 9
其他屋顶	18	8 760	0.010	0.003 0
总计	3 060	922 146	1	0.3

3.2　建筑物屋顶太阳能光伏碳中和潜力计算实验

3.2.1　实验数据

本研究利用2014年北京城市副中心的遥感影像，以及提取出的建筑物屋顶矢量数据来完成实验，

计算模型的参数按照前述分析结果进行配置来计算最终的光伏潜力评估结果。

3.2.2 实验方法

根据本文提出的建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算模型来评估实验区内理论发电量值，进而推算出碳中和效益。实验的工艺技术流程如图1所示，首先对实验区域的建筑物屋顶进行投影转换并计算面积，其次按照统计参考值进行屋顶类型划分，最后根据多标准决策太阳能光伏潜力计算模型计算实验区域的发电量及折算CO_2减排量。

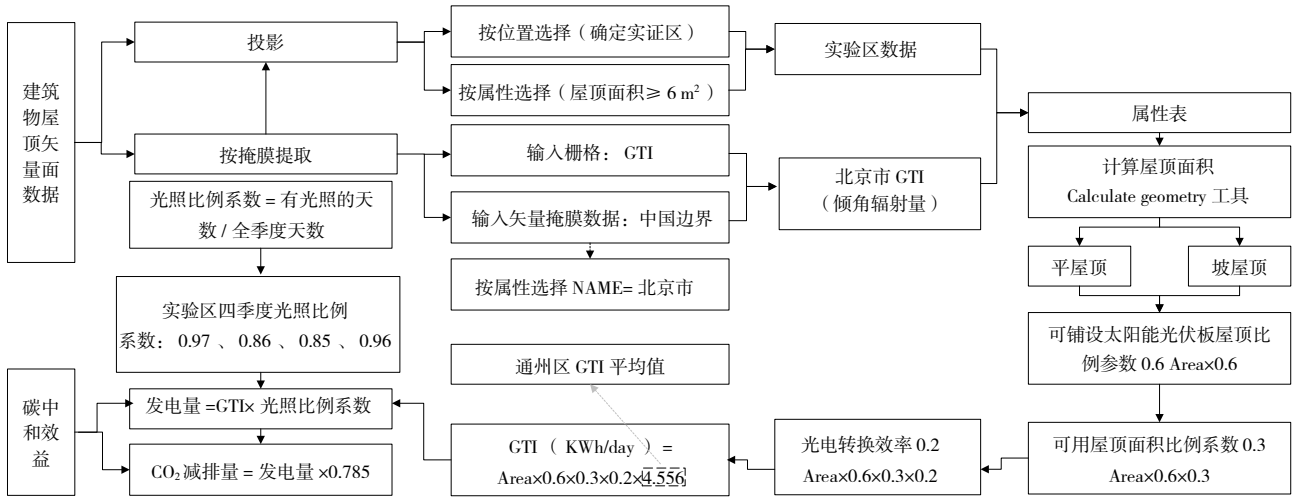


图1 建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算工艺流程图

（参数以北京城市副中心为例）

3.2.3 实验结果

通过多标准决策太阳能光伏潜力计算模型验证实验，能够确定可行的各项太阳能光伏潜力计算参数，从而得出建筑物屋顶太阳能光伏潜力值，进而推算碳中和效益。通过高分遥感建筑物屋顶信息提取，共获取到北京城市副中心实验区3 060个建筑物屋顶，屋顶总面积为922 146。在此基础上，对计算模型输入各项参数，可用屋顶面积比例系数0.3、可铺设太阳能光伏板屋顶比例参数0.6、四季度光照比例系数为0.97、0.86、0.85和0.96、倾角辐射4.556（kWh/m²）和光电转换效率0.2。如表4所示，建筑物屋顶年发电量理论值以及光伏潜力评估实验结果表明，北京城市副中心平屋顶年发电量339 681.93 kWh，折算CO_2减排量266.65 t。坡屋顶年发电量205 350.68 kWh，折算CO_2减排量161.2 t。平坡两类型屋顶的比例为1.654∶1，年共计发电量545 032.61 kWh，折算CO_2减排量为427.851 t。

3.3 碳中和效益可视化分析应用系统

在建筑物屋顶太阳能光伏潜力评估应用中，使用碳中和建筑物屋顶太阳能潜力GIS计算与可视化分析系统，能够更高效直观地表达区域可再生能源的空间分布形态和潜力，更明确地为可再生清洁能源指定未来发展规划，为设立更科学的可再生能源发展目标提供高效的软件工具。

碳中和建筑物屋顶太阳能潜力GIS计算与可视化分析系统主要分析4种类型的碳中和效益财务指标。一是输入指标，即需要用户人工输入的基础指标值；二是中间指标，即经输入指标计算后得到的指标；三是默认指标，即项目中的默认值；四是最终指标，即经前面3种直接计算后输出的碳中和效益财务指标。

为了更广泛的检验本文提出的方法，实验利用课题组越南、印尼、缅甸等相关区域数据，使用碳中和建筑物屋顶太阳能潜力GIS计算与可视化分析系统进行多角度的评估，并进行数据可视化分析生成图表和报告。

4 分析讨论

本文根据提出的建筑屋顶太阳能光伏潜力GIS计算方法，以及多标准决策太阳能光伏潜力计算模型在北京城市副中心区域进行验证实验。首先对实验区域内的建筑物屋顶矢量数据进行投影转换并计算面积，其次对屋顶类型进行人工分类，最后根据多标准决策太阳能光伏潜力计算模型计算实验区域的发电量及折算CO_2减排量。计算结果表明，北京城市副中心年发电量为545 032.61 kWh，折算CO_2减排量为427.851 t，验证了该计算模型的可行性，该方法通过调整气象参数中的降雨量数据和屋顶类型划分中坡屋顶和平屋顶的比例系数，使计算方法更加精准。在建筑物密集区域，屋顶边界可能存在遮挡现象，

导致提取的建筑物之间的界限不明确，进而影响铺设的太阳能光伏板的评估精度，并且多因素光伏潜力计算模型会受到不同地区建筑物屋顶实际风貌类型的影响，导致建筑物屋顶理论光伏值与实际光伏潜力值存在一定差异。因此，在实际应用中需要对屋顶情况进行进一步分析。

5　总结与展望

本文提出了一种面向碳中和的多标准决策建筑物屋顶太阳能光伏潜力计算方法，该方法综合了可铺设太阳能光伏板比例参数、分类后的可用屋顶面积比例系数、光电转换效率、光照比例系数以及GTI（倾角辐射）等影响因素，同时建立了多标准决策太阳能光伏潜力计算模型，并实现了北京城市副中心年发电量和二氧化碳减排量的计算。实验结果表明，北京城市副中心建筑物屋顶年发电量545 032.61 kWh，折算CO_2减排量为427.851 t。研发的碳中和建筑物屋顶光伏潜力计算与可视化分析系统，能够更高效直观地表达项目可再生能源的空间统计信息，为屋顶光伏可再生能源发展目标规划提供了更高效的软件工具。

目前受研究条件的限制，建筑物屋顶光伏潜力评估结果的精度验证主要通过文献资料进行分析，后续可引入光伏项目运营数据进行交叉验证，进一步提升本方法的评估精度。

参考文献

[1] Ordonez J A, Fritz M, Eckstein J. Coal Vs Renewables: Least-cost Optimization of the Indonesian Power Sector [J]. Energy for Sustainable Development,2022,68:350-363

[2] 季顺平,魏世清. 遥感影像建筑物提取的卷积神经元网络与开源数据集方法[J]. 测绘学报,2019,48(4):448-459

[3] Zhu R, Guo D, Wong M S, et al. Deep Solar Pv Refiner:A Detail-oriented Deep Learning Network for Refined Segmentation of Photovoltaic Areas from Satellite Imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2023,116:103 134

[4] 吕道双,林娜,冯丽蓉,等. 基于改进型U-Net网络的高分辨率遥感影像建筑物提取[J]. 地理空间信息,2021,19(1):6-10

[5] Zhou Y, Chen Z, Wang B, et al. BOMSC-Net:Boundary Optimization and Multi-scale Context Awareness Based Building Extraction from High-resolution Remote Sensing Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2022,60:1-17

[6] Liu Y, Liu J, Ning X, et al. MS-CNN:Multiscale Recognition of Building Rooftops from High Spatial Resolution Remote Sensing Imagery [J]. International Journal of Remote Sensing,2022,43(1):270-298

[7] Zhang Z, Qian Z, Zhong T, et al. Vectorized Rooftop Area Data for 90 Cities in China [J]. Scientific Data,2022,9(1):66

[8] Lin S, Zhang C, Ding L, et al. Accurate Recognition of Building Rooftops and Assessment of Long-term Carbon Emission Reduction from Rooftop Solar Photovoltaic Systems Fusing GF-2 and Multi-Source Data [J]. Remote Sensing,2022,14(13):3 144

[9] Guo H, Du B, Zhang L, et al. A Coarse-to-fine Boundary Refinement Network for Building Footprint Extraction from Remote Sensing Imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,183:240-252

[10] Chantana, J, Kato, T, Sugimoto H, et al.Thin-film Cu(In, Ga)(Se, S)2-Based Solar Cell with (Cd, Zn)Sbuffer Layer and Zn1−xMgxO Window Layer[J].Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2017,25(6):431-440

[11] Wei S, Zhang T, Ji S, et al. BuildMapper:A Fully Learnable Framework for Vectorized Building Contour Extraction [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023,197:87-104

[12] Liao X, Zhu R, Wong M S. Simplified Estimation Modeling of Land Surface Solar Irradiation:A Comparative Study in Australia and China [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2022,52:102 323

[13] Zhu R, Cheng C, Santi P, et al. Optimization of Photovoltaic Provision in A Three-dimensional City Using Real-time Electricity Demand [J]. Applied Energy,2022,316:119 042

[14] Zhu R, Wong M S, Kwan M P, et al. An Economically Feasible Optimization of Photovoltaic Provision Using Real Electricity Demand:A Case Study in New York City [J]. Sustainable Cities and Society,2022,78:103 614

[15] Chen Z, Yu B, Li Y, et al. Assessing the Potential and Utilization of Solar Energy at the Building-scale in Shanghai [J]. Sustainable Cities and Society,2022,82:103 917

[16] 魏巍,汤鹏,杨国淑,等. 无人机倾斜摄影探究城市屋顶光伏碳减排潜力[J]. 城市建筑,2022,19(20):123-125

[17] 王利珍,范宏武,张改景. 基于潜力预测的城市住宅社区分布式光伏发电消纳方式经济性评价[J]. 暖通空调,2022,52(增刊):364-368

[18] 江亿,胡姗. 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究[J]. 气候变化研究进展,2022,18(3):272-282

[19] Liu J, Du M, Mao Z. Scale Computation on High Spatial Resolution Remotely Sensed Imagery Multi-scale Segmen-

（下转第118页）