

# 全国建筑物遥感监测与分布式光伏建设潜力分析

王光辉<sup>1,2</sup>, 唐新明<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 戴海伦<sup>1,3</sup>, 彭瑶瑶<sup>1,3</sup>

(1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048; 2. 中国矿业大学, 江苏徐州 221116;  
3. 北京国测星绘信息技术有限公司, 北京 100040)

**摘要:** 作为典型的清洁能源类型之一, 分布式光伏具有投资小、建设快等特点, 可以有效解决能源短缺的农村地区和负荷密度高的工业区用电问题。建筑物屋顶是分布式光伏设施建设的重要载体, 建筑物的数量直接关系着分布式光伏的建设潜力, 因而监测和分析全国建筑的空间分布对分布式光伏的规划建设具有重要价值。本文以 2 m 分辨率国产高分卫星遥感影像为数据源, 利用深度学习技术提取了全国范围的建筑区, 典型区域建筑占比系数表征全国不同区域的建筑屋顶面积; 分析全国建筑屋顶的空间特征, 研究分布式光伏的建设潜力分布格局, 结合人口空间分布提出了分布式光伏的建设路径建议。研究表明, 遥感提取建筑物技术精度达到 81.63%, 能够满足后续分析的数据需求; 全国约  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$  的建筑屋顶有潜力建设分布式光伏。按照分布式光伏就地建设、就地使用原则, 各省份可分为四个梯队, 从东部人口稠密且分布式光伏建设潜力大的区域开始建设, 分级分步推进全国的分布式光伏建设实施; 建立基于卫星遥感的全国分布式光伏建设动态监测机制, 为分布式光伏建设规划路径的动态更新提供支撑。

**关键词:** 卫星遥感; 建筑物提取; 分布式光伏; 深度学习  
**中图分类号:** TP79   **文献标识码:** A

## Building Monitoring by Remote Sensing and Analysis of Distributed Photovoltaic Construction Potentials

Wang Guanghui<sup>1,2</sup>, Tang Xinming<sup>1</sup>, Zhang Tao<sup>1</sup>, Dai Hailun<sup>1,3</sup>, Peng Yaoyao<sup>1,3</sup>

(1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;  
2. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. Beijing Satlmage Information Technology Co., Ltd., Beijing 100040, China)

**Abstract:** Distributed photovoltaic is a typical type of clean energy and has the characteristics of small investment and fast construction. Distributed photovoltaic power can address the power consumption problem in rural areas with energy shortage and industrial areas with high load densities. Building roofs are important carriers for distributed photovoltaic facilities and thus directly related to the construction potential of distributed photovoltaic. Therefore, monitoring and analyzing the spatial distribution of buildings in China has an important reference value for the planning and construction of distributed photovoltaic. In this research, we use 2 m-resolution satellite remote-sensing images as the data source and extract the building zones in China using the deep learning technology. The areas of building roofs in typical regions are calculated according to the proportion coefficients of these regions. Subsequently, we analyze the spatial characteristics of the building roofs in China and the distribution pattern for construction potentials of distributed

**收稿日期:** 2021-10-08; **修回日期:** 2021-11-15

**通讯作者:** 张涛, 自然资源部国土卫星遥感应用中心高级工程师, 研究方向为国土空间卫星遥感综合监测及分析评价; E-mail: zhangt@lasac.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“我国碳达峰、碳中和战略及路径研究”(2021-HYZD-16)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

photovoltaic. Based on this, we propose some suggestions for the construction path of distributed photovoltaic in different areas considering the spatial distribution of population. The research shows that the accuracy of building extraction by remote sensing was 81.63%, which can satisfy subsequent data analysis requirement. Approximately  $1.4 \times 10^4$  km<sup>2</sup> of building roofs in China have the potential to develop distributed photovoltaic. We suggest that distributed photovoltaic should be developed hierarchically following the principle of local power generation and local consumption. The provinces in China can be categorized into four echelons and the construction should start from the east part of China that is densely-populated and has great potentials for distributed photovoltaic development. Moreover, it is necessary to establish a nation-wide dynamic monitoring mechanism for distributed photovoltaic construction based on satellite remote sensing, thereby supporting the dynamic update of the distributed photovoltaic planning path.

**Keywords:** satellite remote sensing; building extraction; distributed photovoltaic; deep learning

## 一、前言

2020 年,我国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”。要实现这一目标,需要降低化石燃料的消费比重,加快调整能源结构,推进风能、太阳能、生物质能等绿色能源的开发,实现能源的转型与变革 [1~5]。通过经济社会综合效益评价模型的情景模拟与综合效益分析发现,以新能源为主体的深度能源转型是实现碳中和目标的必然选择 [6]。

在诸多能源类型中,太阳能是一种十分清洁的能源且蕴含量巨大。分布式光伏具有投资小、建设快等特点,可以有效利用太阳能转换为电能,从而解决能源短缺的农村地区和负荷密度高的工业区用电问题。近年来,光伏建筑一体化系统已经被证明是一种技术经济可行的可再生发电技术,西班牙、澳大利亚、韩国、美国等国家从不同角度开展了分布式光伏与建筑结合的技术研究 [7]。国内有学者利用遥感数据,考虑气象、地形的因素,完成了我国建设光伏电站的适宜性分析 [8,9]。根据新建、既有城镇公共建筑以及农村建筑的屋顶和南立面估算我国分布式光伏的装机容量,“十四五”末可达 100 GW,2030 年可达 215 GW [10]。

作为分布式光伏的重要载体,建筑物屋顶的数量和空间分布事关建设规模与效益。已有研究主要是在小区域建立建筑屋顶的数据模型样本并据此推算大区域或者全国范围的体量 [11,12],相应推算结果由于受到各地区建筑物建筑特性的影响而存在不确定性。因此,掌握全国范围的建筑物面积是进行分布式光伏潜力推算的关键内容。采用传统实地测量的方式无法及时、全面地掌握全国范围的建筑物面积情况。随着高分辨率卫星遥感技术的发展,卫

星遥感数据类型丰富多样,空间分辨率达到米级,为地表建筑物的特征提取提供了数据源条件。人工智能、深度学习技术的发展也为建筑物的智能识别与特征提取提供了技术基础,如建筑物提取主要采用合成孔径雷达(SAR)、激光探测及测距(LiDAR)、多光谱等遥感数据 [13~16],基于深度学习的智能识别和提取 [17~19] 形成了典型城市的建筑物数据集 [20] (提取精度可以达到 80%~85%)。

以往的研究大多采用局部区域提取建筑物屋顶,推算全国范围的分布式光伏建设潜力或装机容量,由样本至全体的估算过程存在诸多不可控误差。本文以 2020 年全国高分辨率卫星遥感影像为数据源,利用深度学习技术提取全国建筑物(区);通过典型区域的建筑占比系数,利用分级、分区和全国平均的方法进行建筑物屋顶面积转换,获得全国范围的建筑物屋顶数据。这一方法的应用价值体现在:①能够精确获取全国范围建筑物(区)的空间分布,掌握可承载分布式光伏的建筑区(物)的底数;②可将建筑物(区)落实到地块,便于构建建筑物(区)和分布式光伏建设的动态监测机制,动态掌握分布式光伏项目的建设进度;③可将分布式光伏数据与人口经济数据进行融合分析,为分布式光伏建设路径规划提供技术性支撑。

## 二、建筑物屋顶高分辨率卫星遥感提取数据与方法

### (一) 高分辨率卫星遥感影像及辅助数据

#### 1. 底图数据

使用的主要数据源为基于“资源三号”“高分一号”等 2 米级空间分辨率的卫星遥感影像制作的

2020年版全国版图。一年一版图作为当前分辨率最高的全国范围覆盖的真彩色正射卫星影像库，具有现势性强、定位精度高等特色，已在多个行业和部门得到广泛应用。

### 2. 训练样本数据

考虑因地域差异、发展水平造成的建筑物（区）样本差异，可将全国划分为东北、西北、华北、华中、华南、西南6个片区。建筑物（区）训练样本来源于2017年地理国情数据。每个片区选择2个省会城市、5个普通城市、10个县，将其中的房屋建筑区作为本研究的训练样本（见图1）；收集了部分城市白模数据作为底图矢量，经过人工编辑后用于独立建筑的训练样本，制作成29个典型城市独栋建筑物数据（见图2）。

### 3. 验证及辅助数据

使用的验证数据主要是利用2m分辨率的卫星遥感影像经过人工编辑形成的城区范围矢量，对提取的建筑矢量进行划分，确定城镇和农村建筑范围。依据典型城市提取的独栋建筑和建筑区矢量，计算对应的建筑占比系数；爬取百度地图等网络建筑轮廓数据作为辅助参考，优化样本精度。此外，使用国家统计局发布的2020年末总人口数据分析屋顶面积与人口的相关性及匹配性。

### （二）基于卷积神经网络技术提取房屋建筑区

研究涉及的卷积神经网络包括三部分：①特征提取层，采用ResNet50深度残差网络进行特征提取，得到Feature1特征图；②金字塔池化层，设置

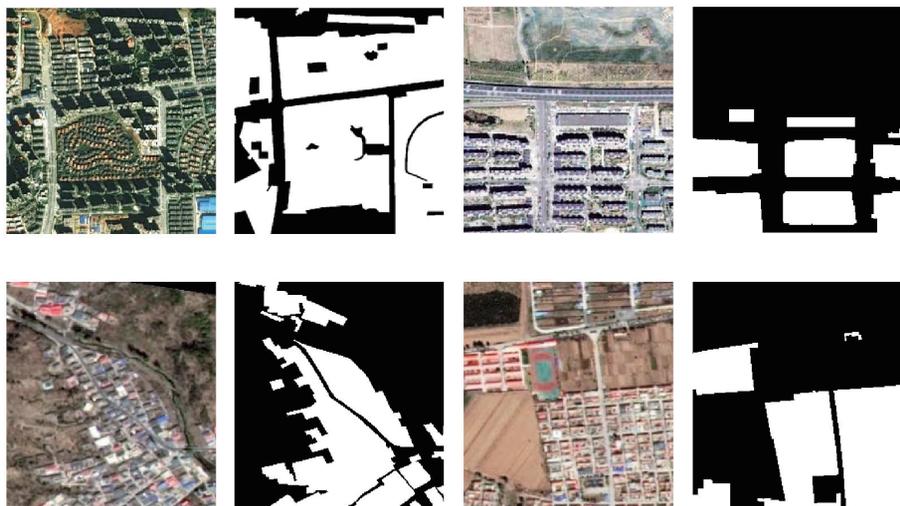


图1 建筑区样本示例



图2 独栋建筑样本示例

不同尺寸的 Pooling (池化) 层, 分别对 Feature1 进行处理, 将每个 Pooling 层得到的特征输入到一层卷积网络再进行特征提取, 最后上采样到与 Feature1 相同的尺寸得到 Feature2; ③特征融合输出层, 将 Feature1、Feature2 进行通道融合, 再经过卷积层输出结果。

神经网络训练基于 PyTorch 搭建的训练平台进行, 针对建筑区提取、独栋建筑提取两种不同的任务, 可调用大量图形处理器 (GPU) 计算资源进行分布式训练, 快速得到深度学习模型, 便于后续算法迭代更新。在选择网络特征提取层、训练超参数时, 宜综合样本区域的情况以便提升最终算法的推广泛化能力。

按上述规则对全国建筑区及典型城市独栋建筑进行自动提取, 得到全国建筑区及典型城市独栋建筑的矢量范围, 为后续屋顶面积计算提供基础数据。

### (三) 建筑物屋顶面积估算

受卫星影像分辨率、同物异谱、建筑形态多样等因素的影响, 独栋建筑提取面临着很大的困难; 尤其是受 2 m 分辨率影像限制, 城市密集建筑区无法区分独栋建筑。因此提取建筑区范围并依据典型城市建立的建筑占比系数, 估算全国城镇建筑的屋顶面积。

在建筑区提取矢量的基础上, 根据城区范围矢量对提取的建筑矢量进行划分, 以此区分典型城市、城镇和农村的建筑范围; 分别计算对应的建筑占比系数, 进一步提升计算精度。建筑占比系数 (CPC) 公式为:

$$CPC = \frac{Area_{\text{独栋建筑}}}{Area_{\text{建筑区}}} \quad (1)$$

公式中,  $Area_{\text{独栋建筑}}$  为目标区提取的独栋建筑总面积,  $Area_{\text{建筑区}}$  为独栋建筑所在的建筑区总面积。建筑区与独栋建筑关系示意如图 3 所示。

考虑全国各地建筑形式及分布情况的差异, 本

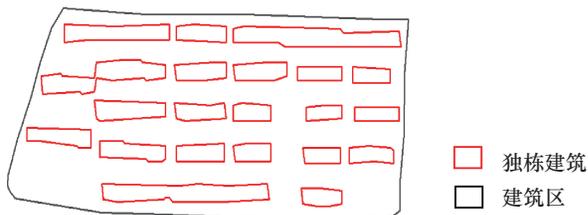


图 3 建筑区与独栋建筑关系示意图

研究设计了 3 种不同的方法计算建筑屋顶面积。

①城市分级, 将典型城市划分为直辖市、省会城市、省会以下城市三级, 分别计算出三个建筑占比系数; 其中将直辖市、省会城市再次划分为主城区和郊区, 使用不同的建筑占比系数计算屋顶面积。②位置分区, 根据所在区域, 将典型城市划分为华北东北、华中、华东、华南、西南西北 5 个大区, 计算各大区建筑占比系数并推广至区内其他地区。③全国平均, 将各典型城市建筑占比系数求平均值, 得到全国平均建筑占比系数, 从而计算各地区的屋顶面积。

### (四) 分布式光伏建设路径分析

将计算得到的全国各省屋顶面积与 2020 年度统计数据中的人口数据进行相关分析, 可得到各省屋顶面积, 即分布式光伏建设潜力与人口的相关关系和匹配程度; 据此规划分布式光伏建设潜力较大、适宜优先安排资源配置的目标省份。

## 三、全国分布式光伏潜力评估结果与分析

### (一) 建筑屋顶面积估算方法评价

根据分级、分区、全国平均建筑占比系数, 分别计算北京市通州区城镇区域、大连市金普新区城镇区域的建筑屋顶面积。根据独栋建筑和建筑区提取算法获得两个城镇区的独栋建筑与建筑区, 以此为真值来比较各方法计算的差异。与建筑区提取的真值相比, 分级、分区、全国平均 3 种方法的计算值在北京市通州区城镇地区的正确率偏低, 在大连市金普新区城镇区域的精度较高; 分级计算方法的平均正确率达到 81.63%, 表明按照城市级别划分不同区域的方法在屋顶面积计算中较为可靠。

### (二) 全国建筑物面积提取结果与分析

#### 1. 建筑区面积

全国建筑区面积约为  $1.18 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 主要分布在山东、河南、河北、江苏等省份, 约占全国建筑总面积的 40%; 西部地区的宁夏、青海、西藏等省份的建筑区面积较小, 仅占全国建筑总面积的 1.4% (见图 4)。

按照建筑区面积大小划分, 第一梯队为山

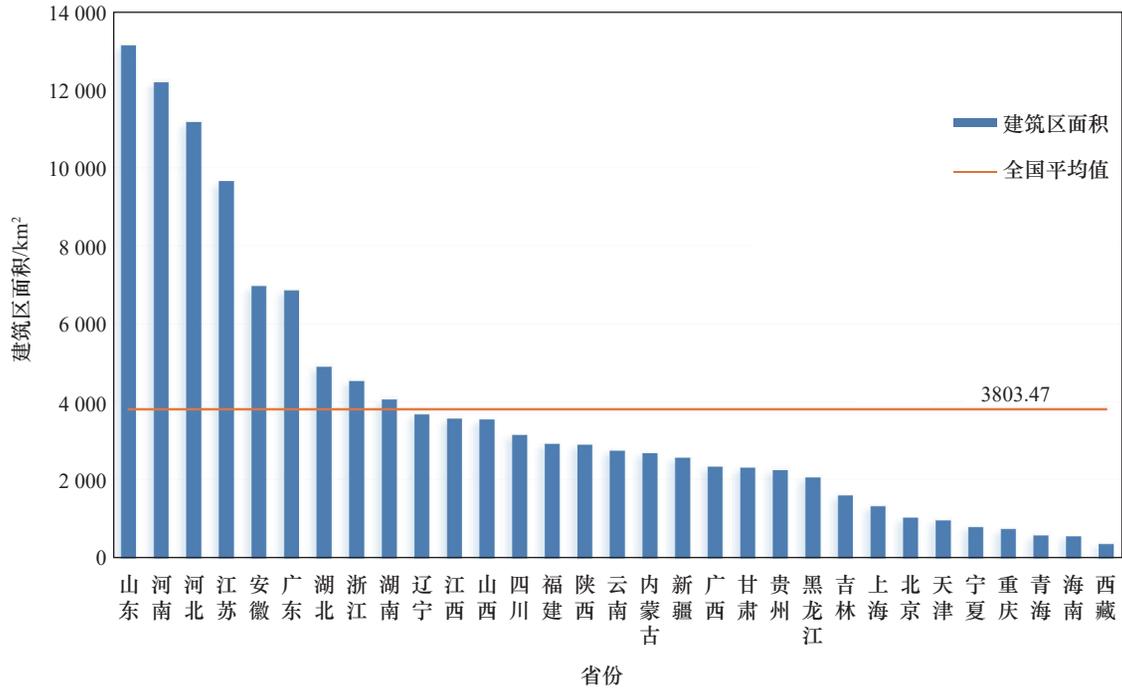


图4 全国各省份建筑区面积统计图

东、河南、河北、江苏，统计建筑区面积均超过8000 km<sup>2</sup>；第二梯队为安徽和广东，统计面积为5000~8000 km<sup>2</sup>；第三梯队为湖北、浙江、湖南、辽宁、江西、山西，统计面积为3000~5000 km<sup>2</sup>；第四梯队为福建、陕西、云南、内蒙古、新疆、广西、甘肃、黑龙江、四川、吉林，统计面积为1500~5000 km<sup>2</sup>；第五梯队为上海、北京、贵州、天津、宁夏、重庆、青海、海南、西藏，统计面积在1500 km<sup>2</sup>以下。

### 2. 典型城市独栋建筑面积

为了计算建筑占比系数，选取北京、天津、上海、重庆、石家庄、呼和浩特、哈尔滨、南京、杭州、合肥、福州、南昌、济南、郑州、武汉、广州、深圳、贵阳、昆明、西安、成都、拉萨、长沙、兰州、西宁、保定、常州、苏州、青岛等29个典型城市，提取独栋建筑进行面积统计。29个典型城市的独栋建筑总面积约为1900 km<sup>2</sup>，上海、北京、广州位于前三位（超过150 km<sup>2</sup>），拉萨、西宁、呼和浩特位于后三位（不足15 km<sup>2</sup>）。

### 3. 建筑占比系数及屋顶面积估算

在城市分级方面，计算得到的直辖市建筑占比系数平均值为0.5539，省会城市建筑占比系数平均值为0.4726，省会以下城市建筑占比系数平均值为

0.3769。建筑屋顶面积的具体计算方法可表述为：将直辖市分成主城区和郊区，主城区按照0.5539的系数来计算建筑屋顶面积，郊区按照0.3769的系数来计算建筑屋顶面积；将省会城市同样划分为主城区和郊区，主城区按照0.4726的系数来计算建筑屋顶面积，郊区同样按照0.3769的系数来计算建筑屋顶面积；省会以下城市统一按照0.3769来计算建筑屋顶面积；根据求出的分级建筑占比系数，计算全国各省建筑屋顶面积。

在位置分区方面，根据求出的分区建筑占比系数（见表1），对全国各省份计算城镇建筑屋顶面积。华东地区建筑屋顶面积最大，远大于其他地区，其次为华北、华南、华中地区，而西北、西南、东北地区的屋顶面积较小。

在全国平均方面，对全国典型城市建筑占比系数求平均值，得出全国平均系数为0.4789。利用该系数，计算得到各省份的城镇建筑屋顶面积，江苏、山东、广东排名前三位，西藏、青海、海南排名后三位。

对城市分级、位置分区、全国平均3种计算方法得到的全国城镇建筑屋顶面积进行统计对比（见图5）。整体来看，除少部分地区外，城市分级计算所得屋顶面积最小，全国平均计算所得屋顶面积最大。

### (三) 屋顶面积与人口数量相关分析

将 3 种方法计算所得的各省份屋顶面积与 2020 年各省份人口统计数据进行相关分析, 结果表明 3 种方法计算的屋顶面积与人口数量均存在明显的正相关关系, 相关系数均在 0.84 以上 (见图 6)。

进一步, 利用平均正确率最高的城市分级算法计算得出的屋顶面积与 2020 年年底各省人口数据绘制散点图, 将各省份划分为屋顶面积大-人口多、屋顶面积小-人口多、屋顶面积小-人口少、屋顶面积大-人口少四类 (见图 7)。江苏、山东、广东、河南、河北、浙江、安徽、湖北 8 个省份位于第一象限, 屋顶面积多, 分布式光伏潜力大且人口数量多; 云南、广西、湖南、四川 4 个省份位于第二象限, 屋顶面积小但人口数量相对多; 西藏、宁夏、青海、海南、天津、北京、

吉林、甘肃、重庆、贵州、内蒙古、黑龙江、上海、新疆、山西、辽宁、陕西、江西 18 个省份位于第三象限, 屋顶面积小且人口数量相对少; 位于第四象限的仅有福建, 屋顶面积偏大而人口数量少。

## 四、研究结论与发展建议

### (一) 研究结论

本研究利用 2020 年全国高分辨率卫星遥感影像获得了全国范围的建筑物屋顶数据; 通过分析不同区域建筑物屋顶面积的空间分布, 探讨了分布式光伏的建设潜力; 结合我国不同区域的人口数据, 分析了分布式光伏建设的推进路径。

卫星遥感具有宏观、精细、客观真实的特点, 是开展大范围建筑物屋顶提取和分布式光伏监测重要的和可行的手段。利用深度学习技术实现了建筑物屋顶提取精度为 81.63%, 能够满足后续分析的数据需求。

分析全国建筑屋顶面积发现, 有约  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$  的屋顶可以布设分布式光伏, 潜力巨大; 主要分布在江苏、山东、广东三省, 合计占全国分布式光伏潜力约 30%。

表 1 基于位置分区的平均建筑占比系数表

区域	平均建筑占比系数
东北	0.4327
华北	0.4829
华东	0.4619
华南	0.5597
华中	0.4099
西南	0.5054
西北	0.6214

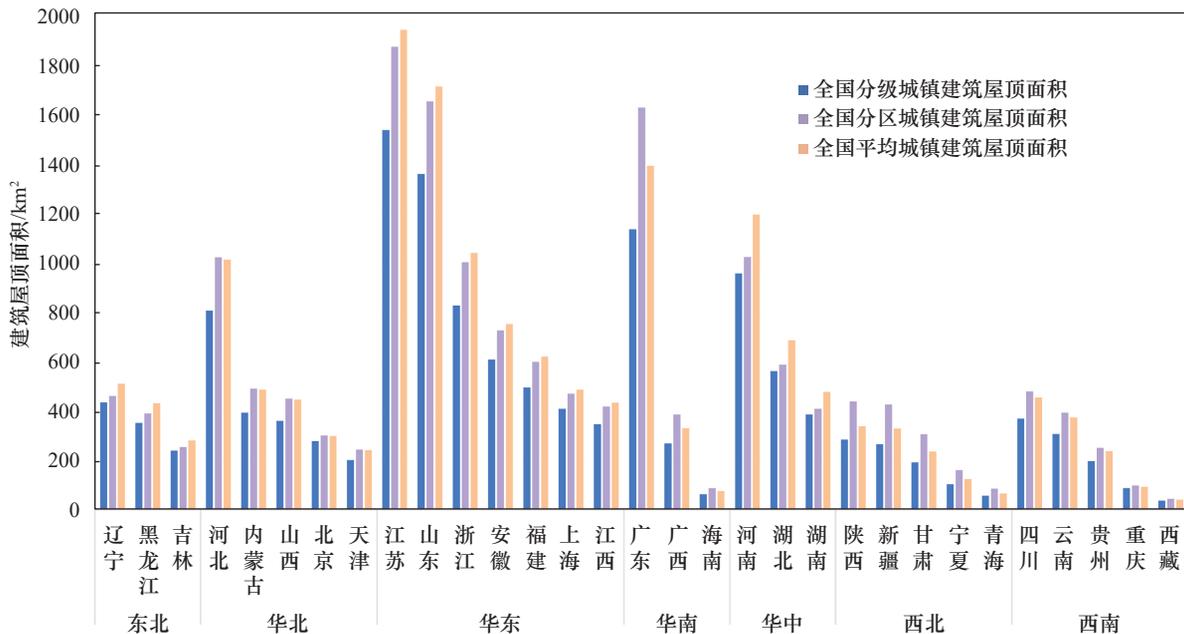


图 5 各省份城镇建筑屋顶面积统计图

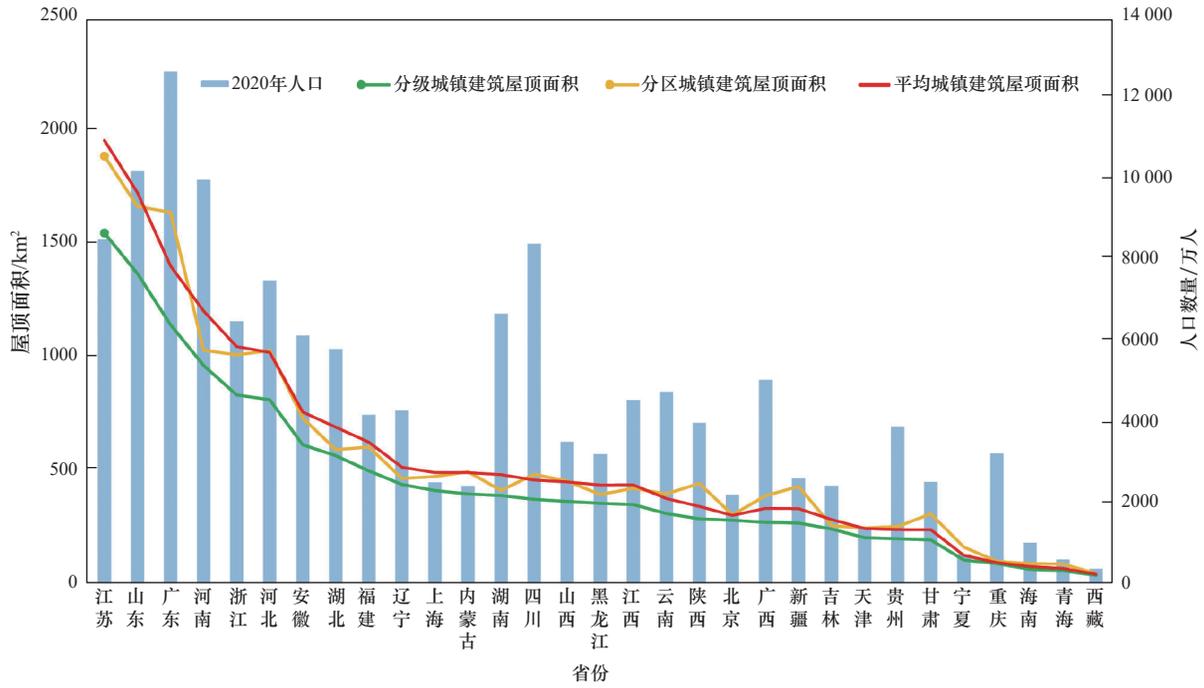


图6 城镇建筑屋顶面积与人口数量统计图 (2020年)

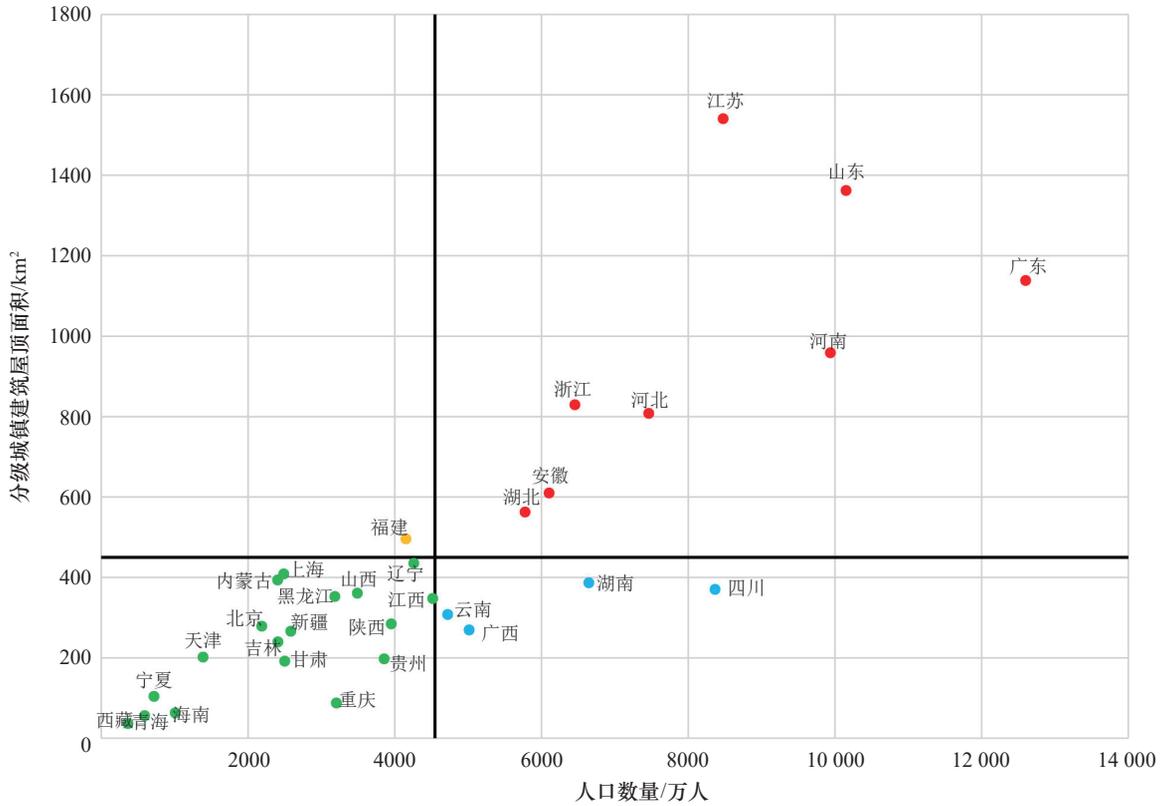


图7 分级城镇建筑屋顶面积与人口数量分布散点图 (2020年)

## (二) 发展建议

面对二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和这一目标, 大力发展太阳能、风能等新能源已成为重要任务。近期印发的《2030 年前碳达峰行动方案》也明确提出要全面推进风电、太阳能发电的大规模开发和高质量发展, 坚持集中式与分布式并举, 加快建设风电、光伏发电基地。实施智能光伏产业的创新升级、特色应用, 创新“光伏+”模式, 推进光伏发电多元布局。根据全国分布式光伏建设潜力监测分析评估结果, 提出以下发展建议。

一是分级分类推进全国分布式光伏建设。按照分布式光伏就地建设、就地使用原则, 以东部人口稠密且分布式光伏建设潜力大的区域开始建设, 分级分步推进全国的分布式光伏建设实施。建议江苏、山东、广东等 8 个省份为第一梯队; 西藏、宁夏、青海等 18 个省份作为第二梯队; 云南、广西、湖南、四川等 4 个省份作为第三梯队, 可以考虑除建筑物屋顶外的分布式光伏建设方式; 福建作为第四梯队, 可以考虑分布式光伏发电量优先满足自身消纳、余电上网获取收益。

二是构建全国分布式光伏建设动态监测机制。通过前沿技术探索与应用, 实现分布式光伏以及建筑物的自动提取和监测能力。以年度更新的全国建筑物(区)遥感监测数据成果为基础, 构建基于卫星遥感的全国分布式光伏建设动态监测机制; 利用多期时序卫星遥感影像, 定期动态跟踪全国分布式光伏建设进度。

三是支撑碳中和、碳达峰路径规划决策。根据全国不同区域分布式光伏的建设进展, 对照政策要求和内容进行实施效果评估; 及时掌握不同地区建筑物面积的动态变化, 适时完善分布式光伏的建设潜力空间格局, 动态更新分布式光伏建设规划路径。

### 参考文献

- [1] 魏文栋. 能源革命: 实现碳达峰和碳中和的必由之路 [J]. 探索与争鸣, 2021 (9): 23–25.  
Wei W D. Energy revolution: The only way to achieve emission peak and carbon neutrality [J]. Exploration and Free Views, 2021 (9): 23–25.
- [2] 林卫斌, 吴嘉仪. 碳中和愿景下中国能源转型的三大趋势 [J]. 价格理论与实践, 2021 (7): 21–23.

- Lin W B, Wu J Y. Three trends for China's energy transition under the carbon neutrality vision [J]. Price: Theory & Practice, 2021 (7): 21–23.
- [3] 李十中. 推动新能源革命促进实现碳中和目标 [J]. 学术前沿, 2021 (14): 42–51.  
Li S Z. Promoting the new energy revolution and achieving the goal of carbon neutrality [J]. Frontiers, 2021 (14): 42–51.
- [4] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010–1018.  
Huang Z, Xie X M. Energy revolution under vision of carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1010–1018.
- [5] 高林, 郑雅文, 杨东泰, 等. 构建碳中和电力系统——碳中和公式 [J]. 科学通报, 2021, 66(31): 1–5.  
Gao L, Zheng Y W, Yang D T, et al. Critical equation of carbon neutrality for power systems [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(31): 1–5.
- [6] 张鸿宇, 黄晓丹, 张达, 等. 加速能源转型的经济社会效益评估 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1039–1048.  
Zhang H Y, Huang X D, Zhang D, et al. Evaluating economic and social benefits of accelerated energy transition [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1039–1048.
- [7] 徐伟, 王雪, 孙维娜, 等. 太阳能建筑能效研究国外综述 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2020 (11): 43–44.  
Xu W, Wang X, Sun W N, et al. Review on energy efficiency of solar energy buildings abroad [J]. Intelligent Building & Smart City, 2020 (11): 43–44.
- [8] 张乾, 辛晓洲, 张海龙, 等. 基于遥感数据和多因子评价的中国地区建设光伏电站的适宜性分析 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 119–127.  
Zhang Q, Xin X Z, Zhang H L, et al. Suitability analysis of photovoltaic power plants in China using remote sensing data and multi-criteria evaluation [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(1): 119–127.
- [9] 王钧, 陈明媛, 冯冠华, 等. 太阳能光伏系统建筑应用技术适宜性探研与典例分析 [J]. 建筑节能, 2021, 49(8): 91–96.  
Wang J, Chen M Y, Feng G H, et al. Technical applicability of solar photovoltaic system used in building and typical case analysis [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(8): 91–96.
- [10] 姚春妮, 马欣伯, 罗多. 碳达峰目标下太阳能光电建筑应用发展规模预测研究 [J]. 建设科技, 2021 (11): 33–35.  
Yao C N, Ma X B, Luo D. Prediction research on mid- and long-term development goals of solar photovoltaic application in buildings under carbon peak target [J]. Construction Science and Technology, 2021 (11): 33–35.
- [11] 苏翠霞, 邢艳艳, 林奕, 等. 我国建筑屋顶光伏应用潜力分析 [J]. 浙江建筑, 2021, 38(3): 59–60.  
Su C X, Xing Y Y, Lin Y, et al. Analysis on photovoltaic application potential of building roofing in China [J]. Zhejiang Construction, 2021, 38(3): 59–60.
- [12] 王思琪, 李铮伟, 王海, 等. 新供给模式下城市建筑屋顶光伏发电的利用潜力分析 [J]. 太阳能, 2021 (6): 11–17.  
Wang S Q, Li Z W, Wang H, et al. Analysis on PV power generation utilization potential of urban building rooftop under new supply mode [J]. Solar Energy, 2021 (6): 11–17.

- [13] 朱俊杰, 范湘涛, 邵芸. 高分辨率SAR与光学图像融合用于建筑物屋顶提取 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2006 (2): 178–185.  
Zhu J J, Fan X T, Shao Y. Building's roof extraction by fusing high-resolution SAR with optical images [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2006 (2): 178–185.
- [14] 谭衢霖. 高分辨率多光谱影像城区建筑物提取研究 [J]. 测绘学报, 2010, 39(6): 618–623.  
Tan Q L. Urban building extraction from VHR multi-spectral images using object-based classification [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(6): 618–623.
- [15] 李亮, 王成, 李世华, 等. 基于机载LiDAR数据的建筑屋顶点云提取方法 [J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(4): 537–541.  
Li L, Wang C, Li S H, et al. Building roof point extraction based on airborne LiDAR data [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(4): 537–541.
- [16] 赵传, 张保明, 陈小卫, 等. 一种利用点云邻域信息的建筑物屋顶面高精度自动提取方法 [J]. 测绘学报, 2017, 46(9): 1123–1134.  
Zhao C, Zhang B M, Chen X W, et al. Accurate and automatic building roof extraction using neighborhood information of point clouds [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(9): 1123–1134.
- [17] 徐佳伟, 刘伟, 单浩宇, 等. 基于PRCUnet的高分遥感影像建筑物提取 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1838–1849.  
Xu J W, Liu W, Shan H Y, et al. High-resolution remote sensing image building extraction based on PRCUnet [J]. Journal of Geoinformation Science, 2021, 23(10): 1838–1849.
- [18] 卢彻, 徐胜华, 朱军. 改进U-Net的高分影像建筑物提取方法 [EB/OL]. (2021-09-23)[2021-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20210922.1137.002.html>.  
Lu C, Xu S H, Zhu J. Building extraction from high resolution remote sensing image based on improved U-Net model [EB/OL]. (2021-09-23)[2021-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20210922.1137.002.html>.
- [19] 刘德祥, 张海荣, 承达瑜, 等. 融合注意力机制的建筑物提取方法 [J]. 遥感信息, 2021, 36(4): 119–124.  
Liu D X, Zhang H R, Cheng D Y, et al. A Building extraction method combined attention mechanism [J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(4): 119–124.
- [20] 吴开顺, 郑道远, 陈妍伶, 等. 中国典型城市建筑物实例数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2021, 6(1): 182–190.  
Wu K S, Zheng D Y, Chen Y L, et al. A dataset of building instances of typical cities in China [J]. China Scientific Data, 2021, 6(1): 182–190.