DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.013

严寒地区农村住宅太阳能光伏利用潜力研究——以吉林省中部地区为例

周春艳[1,2], 朱厚霖[1]

(1. 吉林建筑大学 建筑与规划学院,吉林 长春 130118; 2. 吉林建筑大学 寒地建筑综合节能教育部重点实验室,吉林 长春 130118)

摘要: 我国在"双碳"目标的驱动下,积极探索太阳能光伏利用潜力,提升可再生能源的比例。我国农村地区幅员辽阔,尤其是在东北严寒地区,农村住宅以其占地面积大、遮挡少等特点在太阳能利用方面具有较大的优势。研究以吉林省中部农村地区为切入点,通过实地调研、Arcgis数据分析和计算机模拟分析等方法,探究当地太阳能资源分布特征,评估当地住宅太阳能光伏利用潜力。结果表明:吉林省中部地区农村住宅屋面太阳能辐射潜力为329 432.06 GWh/a,光伏利用潜力为24 722.11 GWh/a;并绘制太阳能光伏利用潜力地图,从潜力地图上可以看出,该地区太阳能光伏利用潜力存在西部高于东部的分布特征,而且最高值出现在西部的中间地域,并向四周逐渐降低。依据潜力地图,可对该地区的太阳能光伏规模化发展提供依据。

关键词: 严寒地区; 吉林省中部地区; 农村住宅; 光伏利用潜力; Arcgis

中图分类号: TU241.4 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0589-09

Study on potential of solar photovoltaic utilization in rural residential buildings in severe cold regions: A case study of central Jilin Province

ZHOU Chunyan[1,2], *ZHU Houlin*[1]

(1. School of Architecture and Urban Planning, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;
2. Key Laboratory of Architectural Cold Climate Energy Management, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Driven by the "dual carbon" goals, China is actively exploring the potential of solar photovoltaic utilization to increase the proportion of renewable energy. China's rural areas have a vast territory, especially in the severe cold regions of the northeast, where rural residential buildings have significant advantages in solar energy utilization due to their large land occupation and less shading. Taking the rural areas in the central part of Jilin Province as the starting point, through field research, Arcgis data analysis and computer simulation analysis, this study explores the distribution characteristics of local solar energy resources and evaluates the potential of local residential solar photovoltaic utilization. The results show that the solar radiation potential of rural residential roofs in the central region of Jilin Province is 329 432.06 GWh/a, and the photovoltaic utilization potential is 24 722.11 GWh/a. A potential map of solar photovoltaic utilization is compiled, and it can be seen from the map that the solar photovoltaic utilization potential in this region exhibits a distribution characteristic of being higher in the west than in the east, with the highest value appearing in the central western area and gradually decreasing outward. This potential map can provide a reference for the large-scale development of solar photovoltaic power in this region.

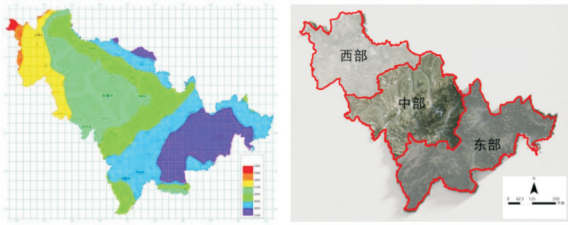
Key words: severe cold regions; central area of Jilin Province; rural residential buildings; PV utilization potential; Arcgis

近年来,随着我国对乡村振兴以及"双碳"政策落实力度的不断提升,在农村地区规模化地应用光伏技术越来越成为节能降碳的一条重要途径[1-4]。吉林省为加快用能结构调整,在《吉林省电力发展"十四五"规划》提出:预计到2025年,全省光伏发电装机达到800万kW,其中着重在中部长春、吉林等地区推广光伏建筑一体化分布式光伏发电项目[5]。而且据现有资料可知,吉林省资本金内部收益率超

收稿日期: 2024-10-13 **修回日期**: 2025-11-26
基金项目: 吉林省教育厅科技项目(JJKH20240367KJ)
第一作者: 周春艳(1976—),女,博士,教授,主要从事绿色建筑、低碳城市与乡村、可持续人居环境等方面研究。 E-mail:406388061@qq.com

过 10%,光伏项目具有良好的经济效益[6]。

吉林省中部地区包含长春市、吉林市、辽源市和四平市。该地区年均日照 2 919 h,年光伏发电有效时数达 1 500 h左右,见图 1(a),太阳能资源较为丰富;其次该地区主要为平原区,见图 1(b),农村区域地势平坦、幅员辽阔,农村住宅以其占地面积大、遮挡少等特点在利用太阳能方面具有较大的优势;且从经济、技术发展水平来看,吉林省中部地区拥有省会城市——长春——作为全省的政治、科技和经济中心,因此在技术应用和资金投入方面也明显优于西部和东部地区[7],所以将中部地区作为吉林省农村地区太阳能光伏技术推广的切入点具有较大的可行性。



(a) 太阳辐射分布图 (b) 区域划分图

图 1 吉林省太阳能辐射分布与区域划分图[7]

Fig. 1 Map of solar radiation distribution and regional division in Jilin Province[7]

Izquierdo 等[8] 在 2007 年提出太阳能应用潜力评估体系,需要考虑物理潜力、地理潜力、技术潜力、经济潜力和社会潜力五个方面。而本文所关注的太阳能利用潜力是在综合考虑太阳能辐射潜力、安装潜力和技术潜力的基础上界定的[9]。关于太阳能利用潜力的研究,从研究对象尺度方面看,目前主要从宏观、中观和微观三个地理尺度展开:宏观尺度偏向于全国及全省范围的太阳能利用潜力分布情况[10-14];中观尺度主要为省内局部地区和城市范围的太阳能利用潜力[15-19];微观尺度主要从街区和住区的范围研究建筑的太阳能利用潜力[20-22]。从研究地域方面看,大多集中在我国中东部和南方发达区域[23-25],对东北严寒地区研究较少。从研究维度上来看,以 Zhu[26]为代表主要研究二维屋顶平面太阳能光伏潜力评估[27-28],随着 3D GIS 的兴起,许多研究开始涉足三维形态的太阳能光伏潜力评估[29-30]。

因此本文基于东北严寒地区对中观地理尺度中较为欠缺的农村层面进行研究,综合考虑太阳能辐射资源、系统效率以及建筑可利用面积等相关因素,探索吉林省中部地区农村住宅太阳能利用潜力。

1 吉林省中部农村住宅太阳能利用现状

吉林省农村住宅在太阳能的利用方面一直是以被动式为主,最常见的形式是在南向入口位置或整个南向墙面外侧附加阳光间,常以塑料薄膜或玻璃作为透光材料,既可以在冬季挡风防寒,吸收太阳能热量,减少冬季采暖能耗,又可以增加使用空间,见图 2。



图 2 被动式阳光房[31]

Fig. 2 Passive solar sunroom[31]

随着农民经济水平、生活质量的日益提高,主动式太阳能利用技术也逐渐开始使用,例如太阳能热水器在农村住宅上的使用已经比较普及,经调研,约 60% 的住宅屋顶上已安装太阳能热水器,如图 3,在很大程度上解决了东北农村地区家庭洗澡的问题。但光伏产品在住宅上的利用还比较少,大多数应用在村道的路灯上,如图 4。主要原因是光伏产品还未形成家用市场化规模,在安装和使用技术上相对复杂,因此普及率较低。但从当地太阳能的资源条件和利用程度来看,具有较好的利用基础,因此可以作为农村住宅进一步节能降碳的切入点。



图 3 太阳能热水利用情况

Fig. 3 Utilization of solar hot water



图 4 太阳能光伏路灯

Fig. 4 Solar photovoltaic street lamp

2　吉林省中部农村地区太阳辐射分布特点

为了评估大规模农村住宅的太阳能潜力，本文首先对当地的太阳能分布特点进行调研，了解当地村落规模、布局形态及住宅造型对太阳辐射量的影响关系，以便对村落进行分类提样，为接下来的太阳能辐射面积测算提供基础和依据。

2.1　村落布局对太阳辐射量的影响

本文通过卫星地图观测的方法，在吉林省中部地区随机选取 300 个村落进行观察，发现村落在规模和布局形态上有明显的差别。首先在规模上，由于地理位置和经济条件的差别，村落在人口数量和面积上都呈现出明显的差别：小型村落通常为 50～150 户，面积为 2～10 万 m^2；中型村落通常为 151～300 户，面积为 10～20 万 m^2；大型村落通常为 301～800 户，面积超过 20 万 m^2。其次在村落布局形态上，由于村落形成的年代和演变机制的不同，村落在布局形态肌理上也呈现出明显的差别：早期传统村落受到自然因素或社会条件的影响，建筑的选址和布局具有一定的自由性和随机性，从而形成的村落通常边界形状不规整、建筑间距较大；后期随着国家政策的干预，国土空间规划设计要求对村落布局的影响逐渐增强，从而形成的村落通常较为集中而规整，而且建筑密度较大（图 5）。



(a) 自由式布局　　(b) 集中式布局

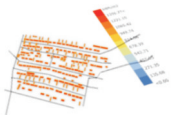
图 5　村落肌理图

Fig. 5　Village texture map

为了了解不同村落布局形态对太阳辐射量的影响差异，分别选取吉林市下辖的桦甸市中等规模的刘家店村和小红石村，进行建筑屋顶太阳辐射量模拟，见表 1。其中刘家店村为自由式布局形态，占地面积 11.6 万 m^2，建筑密度 11%；小红石村属集中式布局形态，占地面积 11.3 万 m^2，建筑密度 18.6%。通过模拟可知，刘家店村建筑屋顶的年累积辐射值 10 324 536 kWh/a，单位面积辐射量 89.37 kWh/m^2·a；小红石村的建筑屋顶年累积辐射值 16 488 948 kWh/a，单位面积辐射量 145.81 kWh/m^2·a。由此可见，集中式布局相对自由式布局单位建筑屋顶面积辐射量较高，说明村落布局形态对村落整体太阳能辐射量有一定的影响。

表 1　不同形态村落的太阳辐射量对比

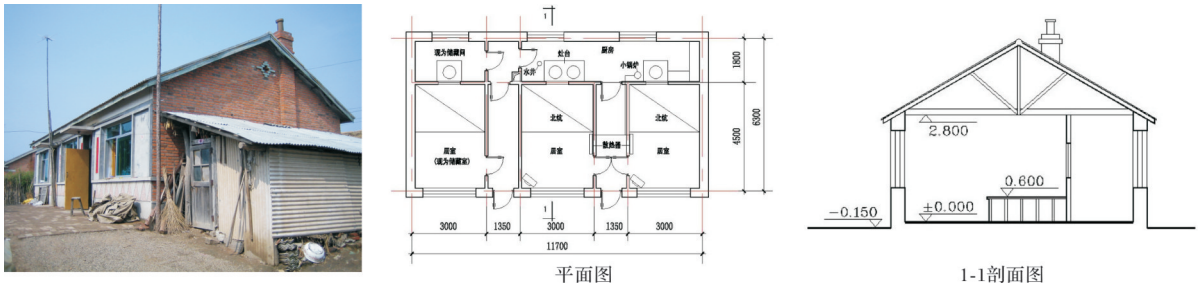
Tab. 1　Comparison of solar radiation in different forms of villages

村落名称	卫星地图	村落肌理图	太阳能辐射模拟
刘家店村			
小红石村			

2.2　住宅形态对光伏构件安装位置的影响

通过实地调研，当地农村住宅大多为南北向布局，整体形态多为矩形、单层、坡屋顶。住宅长度为 6～15 m，宽度为 5～8 m，高度为 3～4 m，坡屋顶的坡度为 27°～32°，如图 6 为该地区典型住宅形式。

住宅对于太阳辐射的接收面主要为屋面和南



平面图　　1-1剖面图

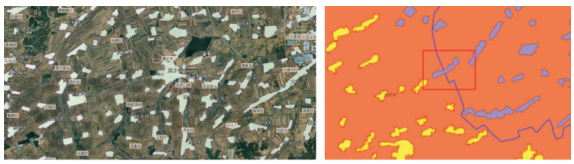
图 6　当地典型农村住宅形式（mm）

Fig. 6　Typical forms of local rural residences（mm）

向立面,接收效果主要取决于太阳辐射时间和遮挡情况。从太阳辐射时间来看,屋面辐射时间明显高于南向立面;从遮挡情况看,屋面的遮挡来主要自于屋面构筑物和设备,如烟囱、太阳能热水器等,而南向立面上的遮挡不仅来自于建筑形体本身和构配件,还受到使用者日常活动的影响,如在外墙上悬挂物品或来回走动等,具有较大的不确定性。因此,对于当地农村住宅,光伏构件的安装更适合安装在屋顶上,不适合安装在立面上。

2.3 村落分类

为了对大规模的村落进行分类取样,本文根据不同村落布局形态对太阳辐射量的影响关系,利用地理信息工具对其布局形态进行定义,然后进行分类。首先通过Arcgis获取吉林省中部地区每个村落的地块信息,包含每个地块的村落所属地、所占面积及围合边数,见图7。通过统计观察发现,自由式村落的围合边数要远远大于集中式村落,而且村落规模越大,围合边数越多。因此,本文将根据村落面积和围合边数作为村落的分类依据。经过统计分析,将村落面积以10万 m^2、20万 m^2作为分界值,分为小型村落、中型村落和大型村落;在不同规模的村落中,又以围合边数8、10、14作为分界值,分为自由式村落和集中式村落,见表2。



(a) 卫星地图中的村落形态 (b) Arcgis中的村落形态提取

图7 吉林省中部地区村落形态提取

Fig. 7 Extraction of village morphology in central Jilin Province

通过Arcgis的统计与分类,吉林省中部地区共有24 983个村落,其占地面积为331 021.4万 m^2。集中式村落比自由式村落数量多,尤其是小型集中式村落在六个类型中数量占比最高,在不同市区均占50%左右;其次是中型村落,占比约29%;大型村落占比最少,约为11%左右,见图8。

3 吉林省中部地区农村住宅太阳能光伏利用潜力评估

3.1 太阳能光伏利用潜力评估方法

太阳能光伏利用潜力是指单位用地面积下的建筑表面太阳能光伏的可利用能力,它受到三方面因素的影响:太阳辐射潜力、建筑屋面利用潜力及光伏系统的整体效率。其中太阳辐射潜力是指建筑表面的年累积太阳辐射值大于阈值的比例[24];建筑屋面利用潜力是建筑屋面适合安装光伏组件的面积比例;光伏系统的效率是指光伏电池将太阳能转换为电能的比率,由整个运行系统效率和光伏板的效率决定。

表2 基于围合边数与用地面积的村落分类

Tab. 2 Classification of villages based on number of enclosed edges and land area

村落类型		用地面积/万 m^2	围合边数/个	村落形态提取案例
自由式	小型	<10	>8	
	中型	10—20	>10	
	大型	>20	>14	
集中式	小型	<10	≤8	
	中型	10—20	≤10	
	大型	>20	≤14	

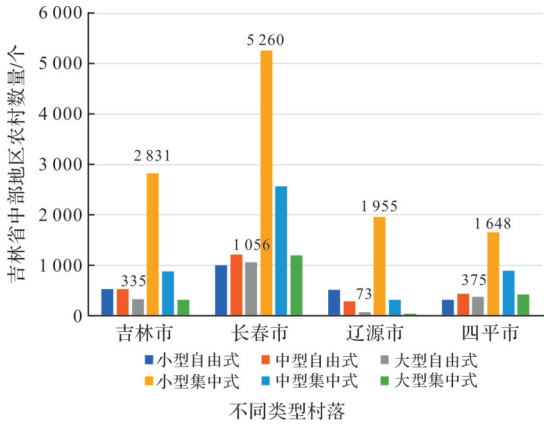


图8 不同类型村落在吉林省中部地区的分布情况

Fig. 8 Distribution of different types of villages in central Jilin Province

3.1.1 太阳辐射潜力

太阳辐射阈值是评估太阳辐射潜力的重要指标,是在光伏系统生命周期内单位面积光伏组件满足系统的投入与产出平衡的最小辐射值[32]。当建

筑表面所接收的太阳辐射值高于阈值时，表示该表面适合安装光伏系统，反之则不适合安装。

不同的地区由于地理位置、光伏产品技术水平以及社会经济等因素的影响，太阳辐射阈值也会不同。同时，随着光伏产品成本的日益降低以及光伏技术的提升，太阳辐射阈值会逐步降低。为了了解吉林省中部农村住宅的太阳能光伏利用潜力，首先需要根据吉林省目前的现状对太阳辐射阈值 t 进行确定，见式(1)。

$$t=\frac{C_{sys}}{\eta_i\times K\times C_{ele}\times\sum_1^N(1-R_d)^{N-1}} \tag{1}$$

式中：η_i 为光伏系统光电转换效率，本文中选用多晶硅光伏组件，因其价格相对便宜，应用更为普遍，其转换效率约为16%[33]；K 为综合效率系数，是衡量光伏系统性能的综合评价参数，根据 Manish Kumar 等的相关研究，本文将光伏系统的 K 设为0.85[34]；C_{ele} 为上网电价，与国家和地方政府的光伏补贴政策密切相关，根据国家和吉林省市相关政策的补贴[35]，将其设为0.966 9 元/kWh；R_d 表示光伏系统的衰减率，通常为1.4%[32]；N 表示光伏系统的生命周期，因国家强制规定太阳能光伏产品20年的发电量不得低于初装发电量的80%，因此本文选用20 年的系统生命周期为标准；C_{sys} 为光伏系统的装机成本，主要包括系统初始投资和维护运营费用，根据公式(2)获得：

$$C_{sys}=C_{su}\times PD\times(1+R_{An\eta}\times N) \tag{2}$$

式中：C_{su} 为光伏组件的安装成本，根据《中国政府采购网》在2019年初公布的数据可知，分布式光伏系统的安装成本在3.5～6.5 元/W 之间，本文取平均值5元/W；PD 为光伏组件的功率密度，根据产品调研，通常为270 W/m²；$R_{An\eta}$ 为年系统维护系数，设为2%[24]。

根据式(2)和式(1)的计算，光伏系统装机成本 C_{sys} 为1 512 元/m²，吉林省中部地区的太阳辐射阈值 t 为928.47 kWh/m²·a。

3.1.2　建筑屋面光伏利用潜力

建筑屋面光伏利用潜力是用来确定建筑屋面适合安装光伏组件面积比例的参数，通常用光伏安装因子来表示。由于在进行大规模村落住宅的太阳辐射模拟时，为了简化模型，通常忽略了一些体积较小的屋顶构件和设备，如烟囱、太阳能热水器等，但这些构件会影响屋面光伏板的铺设，因此本文中引入了安装因子的参数 C_{ri}，即建筑屋顶可利用铺设光伏板的面积比例。安装因子包括设备系数(C_f)、太阳热能系数(C_{st})，阴影系数(C_s)、光伏模块有效面积系数(C_{cov})，其计算公式为如下：

$$C_{ri}=C_f\times C_{st}\times C_s\times C_{cov} \tag{3}$$

式中：设备系数 C_f 是指排除天窗、烟囱等所占表面后的面积比例，根据调研结果取值为0.99；太阳热能系数 C_{st} 是指排除太阳热水系统所占的面积比例，根据户用热水量的计算，将 C_{st} 设为0.9；阴影系数 C_s 是指排除周边建筑、建筑自身等所产生的遮挡影响，根据当地住宅的布局特点，很少被遮挡，所以将 C_s 设为0.9；光伏模块有效面积系数 C_{cov} 是指光伏模块表面积与屋顶表面积的比例，它考虑了光伏模块之间的空隙，以避免相互遮挡而产生倒影，根据国家规范《光伏发电站设计规范》(GB 50797—2012)中的规定，可以得到 C_{cov} 为0.53。

根据公式(3)的计算，屋顶光伏安装因子 C_{ri} 为0.497。

3.1.3　太阳能光伏利用潜力系数确定

为了规模化地计算太阳能潜力，本文以村落为单位，采用村落单位用地面积下的太阳能光伏可利用潜力来表征，称为太阳能光伏利用潜力系数，其计算公式如下：

$$PA=\frac{S_v\times C_{ri}\times\eta\times\eta_i}{S_r} \tag{4}$$

其中 S_v 为辐射量超过阈值的屋面的平均年累积辐射值；C_{ri} 为屋顶光伏安装因子；光伏系统的效率 η 设定为当前光伏系统平均效率的85%[34]，光伏板的效率 η_i 被设定为16%[33]；S_r 为村落用地面积。

3.2　吉林省中部地区农村住宅太阳能光伏利用潜力评估分析

根据太阳能光伏利用潜力的评估方法，本文对六种村落类型进行评估分析。首先针对每一种村落类型从吉林省中部地区随机选取20个村落，共120个村落，然后进行模拟分析，并进行数据整合统计，见表3。

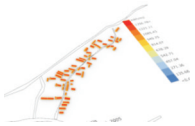
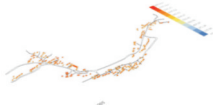
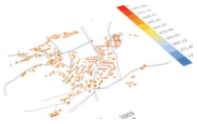
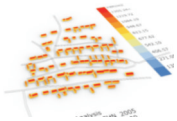
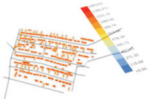
3.2.1　农村住宅屋面太阳辐射潜力分析

从表3中可以看出，住宅屋面阳面单位面积平均年累积辐射值在1 332～1 348.36 kWh/m²·a，阴面932.4～943.72 kWh/m²·a，与太阳能辐射阈值 t (928.47 kWh/ m²·a)比较，发现不论屋顶阳面或者阴面均大于阈值，因此屋顶辐射值超过阈值面积所占的比例为100%。

其次，根据模拟村落住宅屋面年辐射总量与村落面积比值数据，即自由式形态中小型村落住宅屋面年辐射总量与村落面积比值为107.89 kWh/ m²·a，中型村落为89.82 kWh/ m²·a，大型村落为63.30 kWh/ m²·y；集中式形态中小型村落住宅屋面

表 3 六种类型村落农村住宅屋面太阳辐射量相关数据统计表

Tab. 3 Statistics on roof solar radiation of rural residential buildings in six types of villages

村落类型		建筑与村落面积比值	屋面单位面积年累计辐射量(kWh/m²·a)		屋面年辐射总量与村落面积比值(kWh/m²·a)	典型村落肌理图	太阳能辐射模拟结果
			阳面	阴面			
自由式	小型	0.135 6	1 344.21	940.87	107.89		
	中型	0.116 2	1 346.80	943.72	89.82		
	大型	0.078 6	1 346.81	941.11	63.30		
集中式	小型	0.142 4	1 330.12	933.22	114.96		
	中型	0.167 4	1 330.16	930.81	127.22		
	大型	0.159 0	1 332.09	932.42	118.53		

年辐射总量与村落面积比值为 114.96 kWh/ m²·a，中型村落为 127.22 kWh/ m²·a，大型村落为 118.53 kWh/ m²·a。对比相同规模下自由式村落与集中式村落，可发现集中式村落普遍比自由式村落平均年累积辐射值高，如图 9 所示。

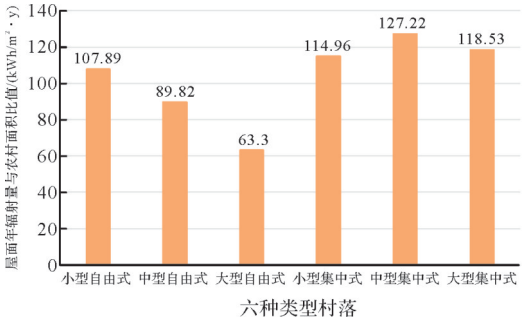


图 9 六种类型村落住宅屋面年辐射量与村落面积比值统计图

Fig. 9 Statistical chart on ratio of annual radiation on residential roofs and village area for six types of villages

3.2.2 吉林省中部地区农村住宅太阳能光伏利用潜力计算

通过公式(4)，可得六种类型村落的太阳能光伏潜力系数，如表 4 所示。对比发现集中式村落整体比自由式村落的潜力系数高。其中大型自由式潜力系数最小，为 4.275；中型集中式潜力系数最大，为 8.586。然后将系数按照类别与 Arcgis 中统计的村落面积相乘，可得吉林省中部地区村落住宅屋面太阳能光伏利用潜力值。经过计算，吉林省中部地区农村住宅屋面太阳能辐射量为 329 432.06 GWh/a，光伏利用潜力 24 722.11 GWh/a。

表 4 农村住宅太阳能光伏利用潜力系数

Tab. 4 Utilization potential coefficient of solar photovoltaics for rural residences

村落类型		系数值
自由式	小型	7.281
	中型	6.066
	大型	4.275
集中式	小型	7.758
	中型	8.586
	大型	8.001

3.3 吉林省中部地区农村住宅太阳能光伏利用潜力地图绘制

为了更加直观地表达吉林省中部地区农村住宅的太阳能光伏利用潜力的空间分布情况，本文将计算结果采用不同的颜色呈现，从而得到太阳能光伏利用潜力地图，见图 10。从图中可以看出吉林省

中部地区太阳能光伏利用潜力呈现西部大于东部的分布特征，而且最高值出现在西部的中间地域，并向四周逐渐降低。通过潜力地图的绘制，可以结合潜力分布关系，对重点区域进行优先发展。

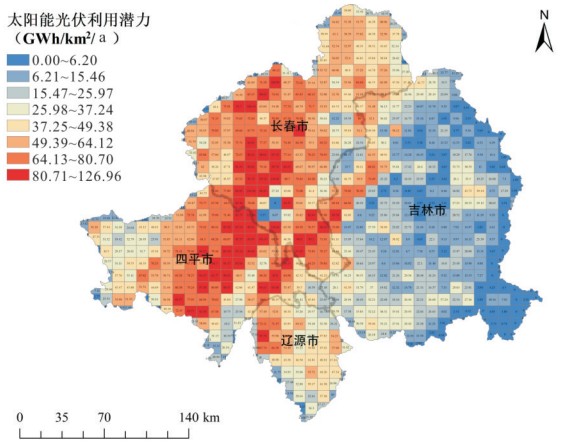


图 10　吉林省中部地区农村住宅太阳能光伏利用潜力地图

Fig. 10　Map of solar photovoltaic utilization potential of rural residences in central Jilin Province

4　结论

本文以吉林省中部农村地区作为研究对象，通过实地调研、Arcgis 数据分析和计算机模拟分析等方法，探究其太阳能资源分布特征，评估当地农村住宅进行太阳能光伏利用潜力，得出以下结论：

（1）根据调研与计算，吉林省中部农村地区的太阳辐射阈值 t 为 928.47 kWh/m²·a，表明大于该阈值的建筑屋面都具有太阳能光伏系统利用的可行性。

（2）通过模拟和计算，吉林省中部地区农村住宅屋面太阳能辐射潜力为 329 432.06 GWh/a，光伏利用潜力 24 722.11 GWh/a。

（3）根据计算结果，绘制吉林省中部农村住宅太阳能光伏利用潜力地图，地图显示该地区太阳能光伏利用潜力存在西部高于东部的分布特征，而且最高值出现在西部的中间地域，并向四周逐渐降低。通过对潜力地图的分析，可对重点区域进行优先发展。

参考文献 References

[1] 胡晓稼，林学淮，王颖，等. 陕北典型乡村住宅供暖用能特征及清洁能源利用潜力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2026，58(2)：250-258.
HU Xiaojia, LIN Xuehuai, WANG Ying, et al. Characteristics of energy use and potential of clean energy utilisation in typical rural dwellings in northern Shaanxi Province[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)，2026，58(2)：250-258.

[2] 李宜赛. 基于光伏建筑一体化技术整合的华北地区乡村住宅性能优化设计研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2025.
LI Yisai. Performance optimization design of rural residential buildings in north China through building-integrated photovoltaic technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.

[3] 张正飞. 贵州西北部以光伏发电为基础的农村建筑能源系统研究[D]. 重庆：重庆大学，2023.
ZHANG Zhengfei. Research on rural building energy system based on photovoltaic power generation in Northwest Guizhou. [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.

[4] 何勇杰，陈喆，魏钰丰. “碳乡”融合背景下乡村低碳公共建筑设计探索[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版). 2025，57(1)：78-88.
HE Yongjie, CHEN Zhe, WEI Yufeng. Rural low-carbon public building design under the background of “dual carbon” and “rural revitalization” integration [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)，2025，57 (1)：78-88.

[5] 吉林省能源局.《吉林省电力发展“十四五”规划》[EB/OL]. 2022-11-07/2023-10-25：http://nyj.jl.gov.cn/zwgk/zcjd/202211/t20221107_2364147.html.
Jilin Provincial Energy Bureau. The Fourteenth Five-year Plan of Electric Power Development in Jilin Province [EB/OL]. 2022-11-07/2023-10-25: http://nyj.jl.gov.cn/zwgk/zcjd/202211/t20221107_2364147.html.

[6] 王驰中，高鑫，陈衡，等. 中国各地区光伏发电平价上网成本效益综合分析[J]. 可再生能源，2024，42(10)：1295-1301.
WANG Chizhong, GAO Xin, CHEN Heng, et al. Comprehensive analysis of the cost-benefit of photovoltaic power generation parity in various regions of China [J]. Renewable Energy Energy, 2024，42(10)：1295-1301.

[7] 徐凯恒. 基于社会融合的吉林省乡村建设绩效评价研究[D]. 长春：吉林建筑大学，2017.
XU Kaiheng. Research on the performance evaluation of rural construction in Jilin Province based on social integration [D]. Changchun: Jilin University of Architecture, 2017.

[8] 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 [J]. Solar Energy, 2008, 82 (10): 929-939.

[9] 姜楠. 居住型城市街区太阳能利用潜力研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.
JIANG Nan. Research on the potential of solar energy utilization in residential urban blocks [D]. Wuhan:

Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[10] KANTERS J, WALL M, KJELLSSON E. The solar map as a knowledge base for solar energy use [J]. Energy Procedia, 2014, 48:1597-1606.

[11] BARHDADI A, BENNIS M. PVGIS approach for assessing the performances of the first PV grid-connected power plant in Morocco[J]. Physics, 2012(8):1-11.

[12] 王光辉,唐新明,张涛,等. 全国建筑物遥感监测与分布式光伏建设潜力分析[J]. 中国工程学,2021,23(6):92-100.
WANG Guanghui, TANG Xinming, ZHANG Tao, et al. National remote sensing monitoring of buildings and distributed photovoltaic constructionpotential analysis [J]. Chinese Engineering, 2021, 23(6): 92-100.

[13] 王玉玲,史洋,彭九慧. 承德市太阳能资源评估及开发潜力研究[J]. 甘肃科学学报,2023,35(4):94-98.
WANG Yuling, SHI Yang, PENG Jiuhui. Research on solar energy resources evaluation and development potential in Chengde city [J]. Gansu Journal of Science, 2023,35(4):94-98.

[14] AMIRPOUYA H ,FAEZE R ,MOJTABA M . 伊朗Razavi Khorasan省太阳能和风能潜力评估(英文)[J]. Journal of Central South University,2024,31(6):2027-2038.
AMIRPOUYA H, FAEZE R, MOJTABA M. Solar and wind energy potential assessment in Razavi Khorasan Province, Iran (English) [J]. Journal of Central South University,2024,31(6):2027-2038.

[15] 布吕诺·盖东,亨克·卡恩,唐娜·芒罗,光伏发电在城市环境中的应用—大规模项目中的经验教训[M]. 徐燊,徐键,译. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
BRUNO G, HENK·K, DONNA·M. Application of photovoltaic power generation in urban environment: Lessons learned in large-scale projects [M]. Xu Shen, Xu Jian, translated. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2015.

[16] 廖维,徐燊,林冰杰. 太阳能建筑规模化应用的原型研究—城市形态与太阳能可利用度的模拟研究[J]. 华中建筑,2013,31(4):64-66.
LIAO Wei, XU Shen, LIN Bingjie. Prototype research of large-scale application of solar energy buildings: Simulation research of urban form and solar energy availability [J]. Central China Architecture, 2013 ,31(4) : 64-66.

[17] Sigrid Lindner. Solar urban planning Berlin [EB/OL]. (2008-05-03) [2023-11-15]. http://www.pvupscale.org/MG/pdf/Berlin.pdf.

[18] 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,2017.
ZHANG Hua. Evaluation of the potential of rooftop photovoltaic utilization in urban buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

[19] LIU K , XU X D, HUANG W X, et al. A multi-objective optimization framework for designing urban blockforms considering daylight, energy consumption, and photovoltaic energy potential [J]. Building and Environment, 2023, 242(8):1-19.

[20] EICKER U. Renewable energy sources within urban areas: Results from European case studies [C]// Ashrae Transactions, 2012.

[21] ANGELIS-DIMAKIS A, BIBERACHER M, DOMINGUEZ J, et al. Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1182-1200.

[22] LOBACCARO G, FRONTINI F. Solar energy in urban environment: How urban densification affects existing buildings[J]. Energy Procedia, 2014,48(48): 1559-1569.

[23] 王晓文. 基于深度学习方法的农村地区屋顶太阳能资源潜力评估[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
WANG Xiaowen. Assessment of the potential of rooftop solar energy resources in rural areas based on the deep learning method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology 2020.

[24] 田佳. 城市居住街区太阳能光伏利用潜力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
TIAN Jia. Research on the potential of solar PV in urban residential blocks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[25] 熊锋. 武汉市住宅街区形态对建筑能耗与太阳能发电潜力的综合影响研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
XIONG Feng. Study on the comprehensive influence of residential block form on building energy consumption and solar power generation potential in Wuhan city [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[26] ZHU Rui, LAU Wingsze, YOU Linlin, et al. Multi-sourced data modelling of′ spatially heterogenous life-cycle carbon mitigation from installed rooftop photovoltaics: A case study in Singapore[J]. Applied Energy, 2024,362,122957.

[27] 黄昭键. 基于深度学习技术的城市总体太阳能光伏利用潜力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
HUANG Zhaojian. Research on the overall solar photovoltaic utilization potential in cities based on deep learning technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[28] 齐中琨,沈朝,王芳. 基于ArcGIS的城市屋顶太阳能应用潜力评估[J]. 低温建筑技术,2023,45(6):96-101.

QI Zhongkun, SHEN Chao, WANG Fang. Assessment of the application potential of urban rooftop solar energy based on ArcGIS [J]. Cryogenic Building Technology, 2023,45(6):96-101.

[29] SARETTA E, CAPUTO P, FRONTINI F. An integrated 3D GIS-based method for estimating the urban potential of BIPV retrofit of façades [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62:1.

[30] 秦子媛. 基于城市三维形态的太阳能光伏潜力评估[D]. 郑州:河南大学,2024.
QIN Ziyuan. Assessment of solar PV potential based on urban 3D morphology [D]. Zhengzhou: Henan University, 2024.

[31] 卜楠. 长春地区农村住宅被动式阳光利用的设计研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2019.
BU Nan. Design study on passive sunshine utilization of rural housing in Changchun [D]. Changchun: Jilin University of Architecture, 2019.

[32] COMPAGNON R. Solar and daylight availability in the urban fabric[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(4): 321-328.

[33] LÜ Fang, XU Honghua, WANG Sicheng. National survey report of PV power applications in Chna[EB/OL]. (2020-04-15) [2024-10-13]. https://docslib.org/doc/9686134/national-survey-report-of-pv-power-applications-in-china

[34] Manish Kumar, Arun Kumar. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,78: 554-587.

[35] 吉林省能源局. 吉林省风电、光伏发电项目分配实施细则[EB/OL]. (2021-06-16)[2024-10-13]. http://www.chinawindnews.com/18853.html.
Jilin Provincial Energy Bureau. Implementation rules for the allocation of wind power and photovoltaic power projects in Jilin Province [EB/OL]. (2021-06-16) [2024-10-13]. http://www.chinawindnews.com/18853.html.

[36] 刘启波，赵涓汝，曹房轩，等. 街区尺度下高校多层宿舍区建筑群能耗模拟与形态因素研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2026，58(1)：120-129.
LIU Qibo, ZHAO Juanru, CAO Fangxuan, et al. Research on energy consumption simulation and form factors of multi-storey dormitories in colleges and universities at block scale[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2026, 58(1): 120-129.

（编辑　吴海西）

（上接567页）

MIN Zhongrong, DING Fan. Spatiotemporal characteristics of street vitality[J]. Urban Development Studies, 2020, 27(2): 31-36.

[25] 魏伟，章阳，洪梦谣，等. 建成环境对户外空间健身活力的影响及其异质性——以武汉市主城区为例[J]. 地理科学进展，2024，43(1)：93-109.
WEI Wei, ZHANG Yang, HONG Mengyao, et al. Built environment effects on fitness vitality [J]. Progress in Geography, 2024, 43(1): 93-109.

[26] 李婷，李朝奎，从政，等. 融合多方法的长沙城市活力空间异质性研究[J]. 现代城市研究，2024，(8)：25-32.
LI Ting, LI Chaokui, CONG Zheng, et al. Spatial heterogeneity of urban vitality in Changsha[J]. Modern Urban Research, 2024(8): 25-32.

[27] 王玉琢. 基于手机信令数据的上海中心城区城市空间活力特征评价及内在机制研究[D]. 南京：东南大学，2017.
WANG Yuzhuo. Study on urban vitality in Shanghai [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[28] 李江苏，王晓蕊，李小建. 中国传统村落空间分布特征与影响因素分析[J]. 经济地理，2020，40(2)：143-153.
LI Jiangsu, WANG Xiaorui, LI Xiaojian. Spatial distribution of traditional villages [J]. Economic Geography, 2020, 40(2): 143-153.

[29] 湛东升，虞晓芬，吴倩倩，等. 中国租赁住房发展的区域差异与影响因素[J]. 地理科学，2020，40(12)：1990-1999.
ZHAN Dongsheng, YU Xiaofen, WU Qianqian, et al. Regional differences in rental housing [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 1990-1999.

[30] 丁寿颐，陈天钰，廖春，等. 国家历史文化名城专项评估方法和新技术应用[J]. 城市规划，2025，49(5)：88-96.
DING Shouyi, CHEN Tianyu, LIAO Chun, et al. Evaluation methods of historic cities[J]. City Planning Review, 2025, 49(5): 88-96.

（编辑　吴海西）