

DOI: 10.20103/j.stxb.202410122479

赵振宇, 贾世桐. 考虑树荫遮挡的低层社区屋顶光伏效率及树板降碳分析. 生态学报, 2025, 45(17): - .

Zhao Z Y, Jia S T. Analysis of rooftop photovoltaic efficiency and tree-panel carbon reduction in low rise communities under shading. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

考虑树荫遮挡的低层社区屋顶光伏效率及树板降碳分析

赵振宇, 贾世桐*

华北电力大学经济与管理学院, 北京 100096

摘要: 屋顶光伏以其清洁高效、成本低廉、节省用地、安装方便等优势已成为分布式能源开发利用的重要选择。在我国推进“双碳”目标背景下, 对低层社区屋顶光伏系统发电效率以及降碳潜力进行评估有助于低碳社区建设。综合考虑树木生长对屋顶光伏造成的动态遮荫影响, 建立树木与光伏板组合模型, 选取北京、西安、沈阳为代表城市、国槐为典型树种, 以光伏板离地高度、树木与光伏板间垂直距离、树木年龄等指标为变量, 通过计算年份累进屋顶光伏板发电量以及树木与光伏板共同作用下的降碳量, 对低层社区屋顶光伏系统发电效率及社区树板系统碳减排贡献进行对比分析。结果表明: 在首个光伏板生命周期内, 3 个代表城市的树板社区均未受到过多影响, 但在末期光伏板受树木影响幅度明显增大。在设定的 84 种情况中, 北京、西安和沈阳市光伏家庭用电满足率分别为 40.5%、47.6%、29.8%。当光伏板离地高度超过 6.5 m、树板垂直距离超过 6 m、树龄 30 年以内时, 西北、华北地区的光伏板基本满足用户需求, 树板匹配理想; 而东北地区仅在光伏板离地高度超过 6.5 m、树板垂直距离超过 5 m、树龄 20 年以内时满足度较好, 东北相对西北、华北地区较不适宜规划树板社区。在所有设定情况下光伏板的碳减排贡献占比均超过 80%, 种植树木带来的固碳量均不足以抵消其减少的光伏系统降碳量。研究成果可为我国北方城乡低层社区屋顶光伏配置及其植树规划提供重要参考。

关键词: 屋顶光伏; 树木; 遮荫; 发电效率; 低碳

Analysis of rooftop photovoltaic efficiency and tree-panel carbon reduction in low rise communities under shading

ZHAO Zhenyu, JIA Shitong*

School of Economic and Management, North China Electric Power University, Beijing 100096, China

Abstract: Rooftop photovoltaics have become a prominent solution for the development and utilization of distributed energy due to the advantages of cleanliness, high efficiency, low cost, land conservation, and easy installation. Under the background of promoting the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals in China, evaluating the power generation efficiency and carbon reduction potential of rooftop photovoltaic systems in low rise communities was essential for supporting the construction of the low-carbon community. The study comprehensively considered the dynamic shading effect of tree growth on photovoltaic panels, established a combination model of trees and photovoltaic panels. Beijing, Xi'an, and Shenyang were selected as representative cities, and *Sophora japonica* was chosen as the typical tree species. Key parameters including the height of photovoltaic panels above the ground, the vertical distance between trees and photovoltaic panels, and the age of trees were used to calculate the cumulative rooftop photovoltaic power generation and carbon reduction under the joint action of trees and photovoltaic panels in simulated years. A comparative analysis was conducted on

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目 (8232013)

收稿日期: 2024-10-12; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1741556069@qq.com

the power generation efficiency of low rise community rooftop photovoltaic systems and the carbon reduction contribution of tree-panel system through the calculation results. The results demonstrated that during the first photovoltaic panel lifecycle, the tree-panel communities in three representative cities were not significantly affected, nevertheless, the impact of trees on the photovoltaic panels increased patently in the later stage of the lifecycle. Among the 84 parametric scenarios, household electricity satisfaction rates attained 40.5%, 47.6%, and 29.8% in Beijing, Xi'an, and Shenyang respectively. When the height of the photovoltaic panel above the ground exceeded 6.5 meters, the vertical distance exceeded 6 meters, and the age of trees was within 30 years, the photovoltaic panels in the northwest and north China regions basically meet the needs of users, simultaneously, the tree-panel matching was ideal. However, in the northeast region, the satisfaction was merely enhanced when the height of the photovoltaic panel above the ground exceeded 6.5 meters, the vertical distance exceeded 5 meters, and the age of the trees was within 20 years. Compared with the northwest and north China regions, the northeast region is less suitable for planning tree-panel communities. Additionally, in all settings, the carbon reduction contribution of photovoltaic panels surpassed 80%, and the carbon sequestration brought by planting trees in three regions was insufficient to offset the reduced carbon reduction of photovoltaic systems. These findings provided important references for the rooftop photovoltaic configuration and tree planting planning of low rise urban and rural communities in northern China.

Key Words: rooftop photovoltaics; trees; shading; power generation efficiency; low-carbon

中国正在加速构建以可再生能源为主的能源消费结构^[1],推进太阳能等清洁可再生资源开发。屋顶光伏以其布设灵活、消纳能力强、清洁高效、成本低廉的特点成为分布式能源开发利用的重要选择,在推动低碳城乡建设建设方面具有显著优势^[2-3]。与高层建筑相比,城乡低层社区安装屋顶光伏更利于实施和灵活应用、开发潜力大,但同时光伏板也更易被树木遮挡,树木和光伏板“争夺阳光”的情况时有发生。因此研究低层社区树木与屋顶光伏的空间关系,根据树木生长特点分析其对屋顶光伏系统发电效率的影响,厘清树板组合共同作用下的碳减排收益问题,对科学规划树板和谐的绿色社区具有应用价值和现实意义。

针对低层社区树板之间“争夺阳光”的有关问题,国内外学者开展的研究甚少,相关的研究主要有:文献[4]针对屋顶光伏发电潜力,探讨了基于地理信息系统(GIS)的屋顶光伏潜力估算方法及其在不同区域尺度上的应用。文献[5]基于融合模型方法预测在树木遮阳情况下城镇建筑屋顶接收的太阳辐照度。文献[6]提取北美中纬度城镇夏至、冬至和春分日建筑屋顶太阳辐射信息,结果表明树木平均减少了住宅建筑屋顶接收的38%的太阳辐射,且树木结构是建筑屋顶拦截太阳辐射的关键因素。文献[7]考虑建筑物、树木等障碍造成的不均匀遮阳,通过MATLAB模拟预测太阳辐照度不均匀情况下对各类光伏系统的影响。文献[8]针对树木位置对建筑屋顶光伏遮阳情况的分析,确定了美国中西部20类常见树种栽种在建筑物八个方位上对低层社区屋顶光伏无影响的最小距离。相较国外,我国城乡社区建筑和道路更加密集,树木通常更普遍地栽种在可能影响屋顶光伏工作的位置,但国内对社区树木与光伏板“争夺阳光”这一现实问题的研究甚少,尚未见关于树木遮阳对屋顶光伏发电效率影响程度方面的系统性量化研究。

基于上述,本文将考虑树荫遮挡对低层社区屋顶光伏工作的影响,通过建立树木和光伏板的组合模型模拟树板环境下光伏系统的运行情况,对不同寿命阶段的树板系统进行碳减排贡献分析,并选择代表地区进行对比,为我国城乡低层社区处理好树板关系、更好配置开发分布式光伏提供重要参考。

1 树板组合模型建立

本文针对树木和光伏板“争夺阳光”的现状,运用MATLAB软件建立树板组合动态模型,以国槐作为低层社区典型树种,分别选择太阳能资源较为丰富的华北、西北、东北(“三北”)地区的三个典型城市北京、西安和沈阳为研究对象,分析树木对其屋顶光伏的影响方式和影响程度,并探讨树板共同作用下的碳减排贡献。

1.1 基础模型

建立基础屋顶光伏模型涉及对周围环境的合理假设以及无遮挡情况下屋顶光伏的发电能力。基础模型不考虑树荫遮挡,只考虑光伏板自身和太阳辐射变化影响发电,因此可为所有安装光伏板的用户提供参考,而非仅限于低层社区。为计算光伏板最大输出效率,需针对研究地区设定光伏板规格、朝向和倾斜角度。国内市场普遍使用额定功率为 250 W 的多晶硅光伏板,板面面积多在 1—2 m² 之间。因此本文以额定功率 250 W、面积为 1.6 m² 的多晶硅光伏板组件作为研究对象进行发电量和降碳研究,以保证结果有较好普适性。我国全境位于北半球,光伏板朝向为正南;光伏板倾斜角度设定参考 Solargis 网站数据,以北京为例为 37°。无外界遮挡时,光伏发电效率直接受太阳辐射影响,为使结果更能符合实际,考虑了散射辐射对光伏系统发电的影响^[9],研究地区的太阳辐射初始数据由羲和能源大数据平台 2023 年全年法向直接辐射数据和散射辐射数据构成,以 1 h 为间隔记录数据,辐射单位均为 W/m²。结合太阳辐射和运动轨迹推导全年光伏板接收总辐射可由式(1)—(6)表示^[10—11]:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{id}} + R_{\text{is}} \quad (1)$$

$$R_{\text{id}} = R_{\text{nd}} \cos \theta_i \quad (2)$$

$$\cos \theta_i = \sin \varphi \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos \omega \cos(\varphi - \beta) \quad (3)$$

$$\omega = 15(T - 12) \quad (4)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + d)}{365}\right) \quad (5)$$

$$R_{\text{is}} = R_{\text{ns}} \frac{2 + \cos \beta}{3} \quad (6)$$

式中, R_{total} 为倾斜面总辐射, R_{id} 为倾斜面直接辐射, R_{is} 为倾斜面散射辐射, R_{nd} 为法向直接辐射, θ_i 为倾斜面太阳入射角, φ 为纬度, β 为倾斜角, δ 为太阳赤纬, ω 为太阳时角, d 为日序数, R_{ns} 为水平面散射辐射。

本文使用 MATLAB 软件处理大数据平台记录的辐射数据,通过循环机制模拟时间延续以每小时为单位对光伏系统发电量进行累加。以北京为例,夏季晴朗天气单日照时间可达到 13—14 h,太阳方位角变化范围增大。当太阳方位角超过 90°时,部分太阳光线不能被光伏板接收,且夏季阴雨天气较多,光辐射减少,因此夏季光伏板发电效率略低于春季。通过对比北京地区光伏家庭一年内月平均发电量和用电量^[12](图 1)可知,家庭安装 10 m²光伏板时,夏季和冬季的部分月份家庭用电量高于光伏发电量,而春季和秋季家庭用电均能由光伏系统承担,家庭用电消耗不均衡。如要实现家庭用电全部由光伏系统供给,光伏板仍需加装 5—10 m²。且当前面积计算仅以光伏板在初始年份的效率为准,如进一步考虑光伏板随使用时间产生的效率折损,仍需增大光伏板安装面积。

1.2 树板组合模型

树木对城乡生态调节和绿色降碳发挥着重要作用^[13]。存在被树木遮挡问题的低层建筑大多为民宅及商用房,树干和枝叶会阻碍阳光射进屋内,影响住房用户的采光需求。由于国槐符合我国华北、西北、东北地区南部的地域气候^[14],是我国北方城市重要的行道树树种,在“三北”地区广泛种植,且其树冠、枝叶的生长

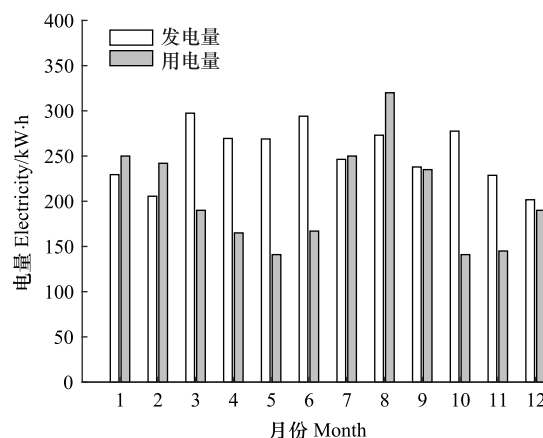


图 1 北京地区光伏家庭发电量(按 10m²光伏板计)与用电量对比

Fig.1 Comparison of photovoltaic household power generation (the level of ten square meters of PV panels) and consumption in Beijing area

PV: 光伏 Photovoltaic

和遮光特点与大多数北方树种类似,固碳量较大^[15]。因此,选用国槐作为代表树种分析我国北方城乡低层社区光伏板受遮挡情况以及树板降碳能力。

纬度与太阳辐射具有密切联系,本文选取的北京、西安和沈阳 3 个城市的纬度范围为 34°—42°,具有明显纬度区分,分别代表华北地区、西北地区南部以及东北地区南部,能够涵盖我国北方大部分人口密集地区。因此,对所选 3 个城市低层社区的树板组合模型展开研究,其结果具有代表性和普适性。

1.2.1 基础数据假设

在分析组合模型之前,需设定参与模型构建的环境和树板相关指标。现阶段生产的多晶硅光伏板使用寿命可达 20—25 年^[16],在适宜气候下运行折损率稳定在 1%/a^[17],故将树板组合模型研究的时间确定为 20 年。考虑国槐生长高度,4 层以下房屋(单层高度通常在 3 m 左右)的屋顶光伏更易受树木遮挡影响,故本文模型将分析 1—3 层的房顶安装光伏板的场景,通过光伏板离地高度、树木与光伏板的垂直距离两个指标表述模型中树木和光伏板的相对位置:(1)光伏板离地高度设定为光伏阵列中心点至地面的高度;(2)树木与光伏板的垂直距离指光伏板阵列中心点到行道树列的最短距离,即点到直线的垂直距离(简称“垂直距离”)。模型研究的典型地区均在北回归线以北,光伏板朝向与基础模型保持一致均为正南,此时仅房屋南侧行道树影响光伏板发电,故模型考虑的是沿东西向栽种的房屋南侧行道树列。根据北京市标准《行道树栽植与养护管理技术规范》(DB11/T 839—2017),定植最小种植株距应不小于 5 m^[18],模型设定栽种株距为 8 m。当某棵树距离光伏板较远时,其对光伏板发电的影响逐渐减少,因此模型考虑栽种 5 株国槐,且相对光伏板对称分布,如图 2 所示。由于低层社区道路与建筑排布较紧密,垂直距离设定为 4—10 m,每隔 1 m 取一次数据。根据上述确定树板组合模型所需指标基础数据如表 1 所示。

表 1 组合模型所需基本指标
Table 1 Basic indicators of the combination model

指标 Indicators	数据 Data
光伏最优倾角 Optimal tilt angle for PV panels ^[19—21]	37° (北京) 26° (西安) 40° (沈阳)
光伏板离地高度 The height of PV panels/m	3.5、6.5、9.5
树木与光伏板垂直距离 Vertical distance between trees and PV panels/m	4、5、6、7、8、9、10
移栽国槐树龄 Sophora japonica age/a	3
光伏板规格 PV panel specifications	额定功率 250 W 面积 1.6 m ²
光伏板折损率 PV panel damage rate/(%/a)	1

PV: 光伏 Photovoltaic

1.2.2 树板组合模型发电影响因素分析

树木对组合模型的影响主要体现在其生长过程中树高、冠幅和落叶对遮挡面积造成的动态影响。国槐是北方常见的落叶类乔木,土壤温度达到 5 ℃ 以上即开始发芽,深秋时期进入落叶期。本文选择的 3 个地区均为温带季风气候,适宜国槐生长,枝叶密度较平均水平略高。研究引入树冠层孔隙度衡量树木的遮阳影响,根据国槐数据^[22]拟定国槐生长期树冠层孔隙度为 0.2。槐树为落叶阔叶林种,休眠期无枝叶,拟定休眠期树冠层孔隙度为 0.8。

光伏板积灰也是影响光伏发电的重要因素,光伏板安装时间越长,灰尘沉积的影响越明显。不同于大规模光伏电站自动化清扫,低层社区屋顶光伏系统需要用户自行处理积灰。考虑到用户是非专业的,且人工清扫周期不固定,根据已有研究^[23—24],拟定屋顶光伏系统的积灰影响系数为 0.8,即积灰影响使光伏工作效率降低 20%。

1.2.3 树板组合模型构建

组合模型运行采用时间累进模拟的方法对光伏系统发电量和降碳量进行累加。与基础模型不同,组合模

型计算光伏系统发电量时需确定某时刻光伏板被树木遮挡的面积大小。本文通过 PVsyst 软件建立三维树木和光伏板模型,对模型运行时间内光伏板被树木的遮挡率进行仿真,当光伏板被树木遮挡形成阴影时,阴影内的辐射不计入光伏板发电。由于树木生长缓慢,其树高、冠幅等数值均以年为单位进行迭代。

树木的生长过程可借助异速生长方程较为直观地体现,该方程能够有效反映单木生长情况,估算城市行道树的碳汇能力^[25-26]。国槐的树高与冠幅生长方程参考文献[22]、[27]中数据拟合而成如式(7)~(8),胸径生长方程在树高的基础上参考北京市国槐树高-胸径相关关系^[28]得到,如式(9):

$$H = -3.5 \times 10^{-3} Y^2 + 0.5113 Y + 0.4239 \quad (7)$$

$$C = -2.4 \times 10^{-3} Y^2 + 0.3418 Y + 0.3788 \quad (8)$$

$$D = 4.524 H^{0.593} \quad (9)$$

式中, H 为树高(m), Y 为树龄(年), C 为冠幅(m), D 为胸径(cm)。

根据北京市地方标准《林业碳汇计量监测技术规程》(DB11/T 953—2013)中豆科刺槐种总生物量异速生长方程^[29]和文献[30]乔木净生产力公式估算光伏板生命周期内移栽国槐的固碳量。其中,由于国槐为落叶乔木,年凋落量以整株生物量的 8.73%^[31]计算。推导过程如式(10)~(12):

$$W = 0.093 (D^2 H)^{0.869} (1 + \rho) \quad (10)$$

$$NPP = MABI + L + Pr \quad (11)$$

$$Q = \alpha m \times NPP \quad (12)$$

式中, W 为国槐单株生物量(kg), ρ 为根茎比转换参数,取 0.3, NPP 为树木净初级生产力, $MABI$ 为树木年平均生物量增量, L 为树木年凋落量(kg), Pr 为树木年修剪量(暂不计,取 0), Q 为单株树木固碳量(kg), m 为碳与二氧化碳的转化系数,取 44/12, α 为碳转换系数,取 0.5。

低层社区安装屋顶光伏系统的目的是使电力尽可能自产自用,且期望通过光伏系统节省用电费用或向电网出售多余电力获得收益。考虑大多数社区用户实际情况,以安装 12.8 m²,即 8 块 1.6 m²光伏板为标准运行模型。光伏板离地高度和垂直距离的数值取表 1 平均值为例进行计算。根据北京市标准《行道树栽植与养护管理技术规范》(DB11/T 839—2017),落叶乔木苗胸径应不小于 8 cm^[32],因此模型初始移栽的国槐树龄为 3 年,以式(7)~(12)计算树木降碳量。光伏板降碳量以同等发电量下火电发电的碳排放量(火电发电 1 kWh 约排放 0.97 kg 二氧化碳)为准。模型运行结果如图 3、图 4。

通过图 3 和图 4 三地树荫遮挡造成的光伏发电量减少对比发现,模型运行至第 13 年时,树木遮挡开始影响屋顶光伏发电,其中北京和沈阳地区在第 17 年时,曲线斜率明显增大,西安地区由于地理位置偏南,纬度较低,在模型运行 20 年内发电量减少曲线增长幅度有限,但已有斜率增长趋势。模型运行最后一年,北京市和沈阳市的发电影响量达到 0.43 kWh/m²和 0.45 kWh/m²,相较第 17 年的影响增长率均超过 200%;西安市仅为 0.22 kWh/m²,与前两市相差近一倍,影响增长率达到 174%。尽管树木对光伏效率整体影响有限,但在模型运行最后 4 年影响程度不断增加且斜率呈上升趋势,可见树木年龄增大会对屋顶光伏产生更大影响。

以北京地区为例(图 5),在模型运行期内新安装光伏板的降碳能力远大于种树带来的固碳收益,不仅由于树木种植初期固碳对比光伏发电降碳有明显差异,且树木在生长初期固碳量的涨幅有限。在光伏板生命末期,光伏系统仍然提供了组合模型中约 93%的降碳量。结合发电量和降碳量两方面分析,低层社区安装屋顶光伏系统的同时移栽树木幼苗不会明显影响光伏板发电效率,树板环境契合程度较好。

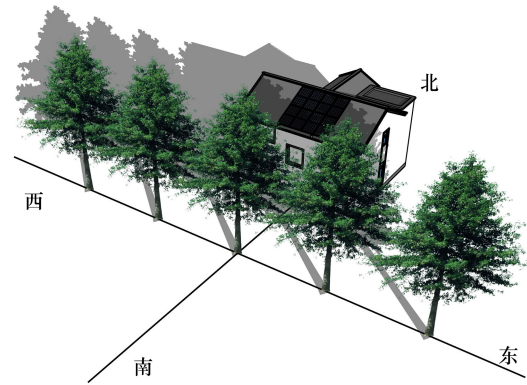


图 2 树板空间关系

Fig.2 The spatial relationship between trees and PV panels

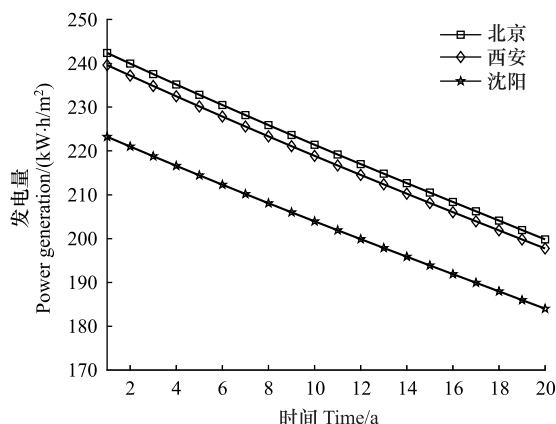


图3 树荫遮挡下典型地区光伏发电量对比

Fig.3 Comparison of photovoltaic power generation in typical areas under shading

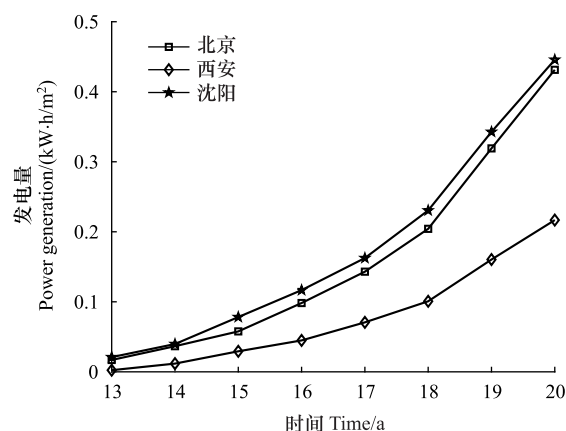


图4 树荫遮挡造成光伏发电量减少对比

Fig.4 Comparison of the reduction in photovoltaic power generation under shading

2 组合模型发电与降碳匹配度分析

行道树国槐的生命周期一般为 50 年左右,少数个体寿命能达到 60—70 年。根据上述计算结果,新移栽的幼年国槐在光伏板生命末期生长至 10 m,对周期内总体发电效率影响有限,因此当社区树木树龄较小时,鼓励低层社区用户安装光伏板。但由于大多数低层社区的树木或光伏板已经有相应实施方案,未考虑两者之间的契合,因此以下对不同步更新情况下树木和光伏板的匹配度进行探讨。

2.1 新装光伏板影响分析

用于行道树栽种的国槐树种高度峰值约 20 m,普遍高于 4 层以下的临街社区,因此研究以 3 个代表地区基础模型光伏板发电量作为发电效率衡量标准,20 年为研究周期,根据光伏板离地高度、垂直距离和树木年龄为指标对 1—3 层平屋顶的建筑高度的光伏板作效率评估。对 3 个城市、3 个光伏板高度、7 个垂直距离以及 4 个树木栽种年龄共计 252 种情况进行效率评估,会出现树木冠幅大于垂直距离的情况,此时树枝与房屋重叠,为确保真实性,行道树列边缘直线与光伏板阵列中心点最短距离至少为 2 m。

由表 2 可知,不考虑树木遮挡时,北京地区光伏板发电量最高,沈阳地区最低;图 6 对比可知,考虑树木遮挡时 3 个地区新装光伏板发电效率沈阳地区同样为最低。伴随地区纬度升高,光伏板最优倾角相应增大。当各地区最优倾角下接收太阳辐射量相似时,大角度倾角不会过多影响光伏板效率,但会使光伏板更易被树木遮挡。因此,北京市与西安市光伏板接收太阳辐射量相近,但北京地区最优倾角角度较大,导致其光伏发电效率仅达到西安地区的 90%。横向对比,垂直距离、树木

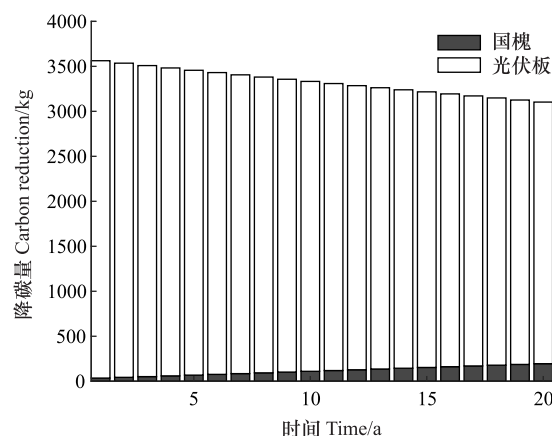


图5 北京地区树板组合模型降碳量

Fig.5 Carbon reduction of combination model in Beijing area

表 2 无树木影响下典型地区光伏板全寿命发电量对比
Table 2 Comparison of lifetime power generation of PV panels in typical areas without the influence of trees

地区 Area	发电量/(kW·h/m²) Power generation
北京	4414.08
西安	4363.64
沈阳	4065.62

年龄均对光伏板效率造成较大影响,且影响幅度伴随垂直距离和树木的增大而减小。

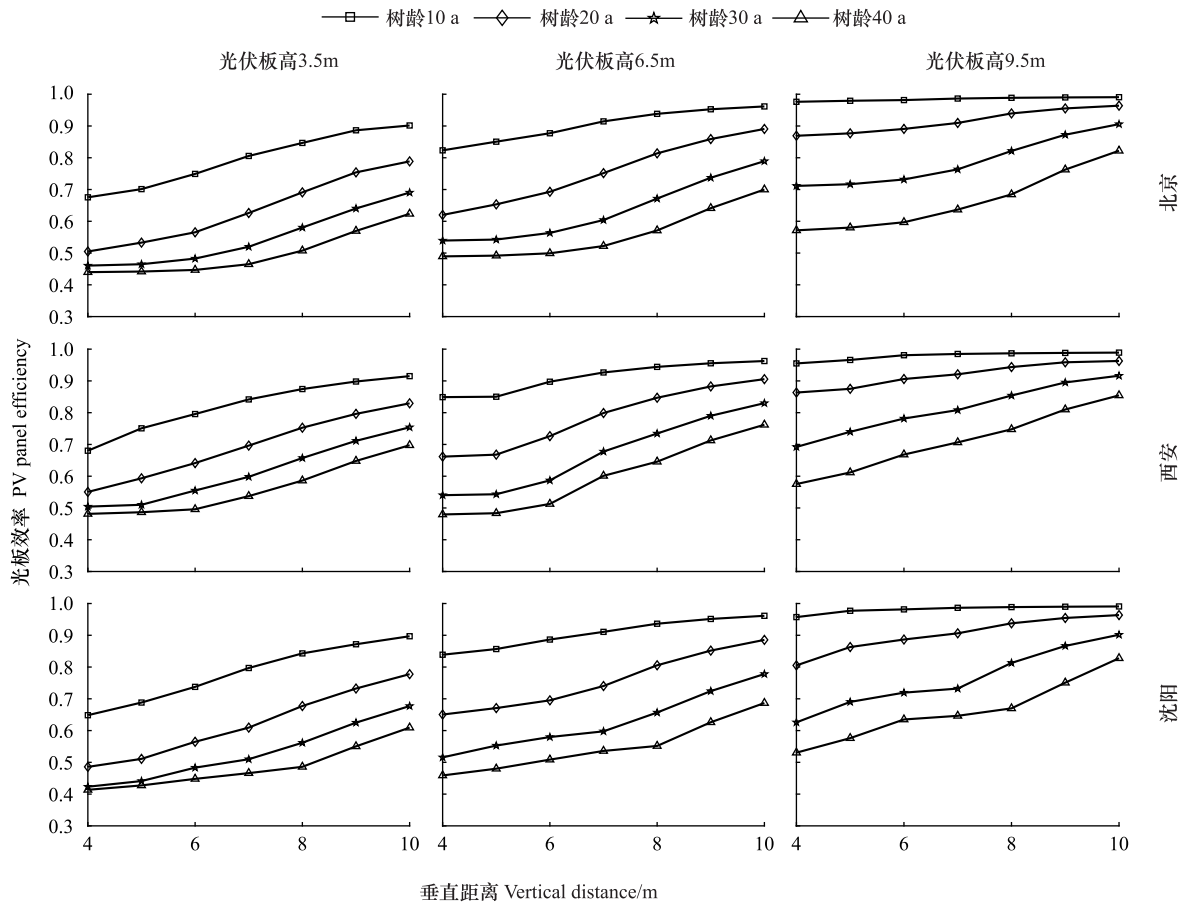


图6 新安装光伏板发电效率曲线

Fig.6 Efficiency curves of newly installed PV panels for power generation

根据调查,我国单户家庭年用电量在 2200 kWh 左右^[33]。在不考虑谷峰时段用电差异的影响下,如按单户家庭安装 12.8 m²(8 块 1.6 m²光伏板)屋顶光伏计算,北京、西安、沈阳 3 地的光伏平均效率需要至少达到 77.9%、78.8%、84.6%才能承担用户全部用电量。然而,根据图 6,即使假定 20 年中光伏板效率保持不变,在设定的 3 个城市共 252 种情况下,60%的光伏系统无法满足家庭全部用电需求,尤其是树龄较高或垂直距离不够远时。当安装面积增加到 16 m²(10 块 1.6 m²光伏板)时,光伏效率需求下限降至 62.3%、63.0%、67.6%,此时,在光伏板高 9.5 m 的情况下,87%的光伏用户用电需求可全部由屋顶光伏发电提供。考虑到光伏效率逐年递减,在光伏生命后半周期光伏效率低于需求下限,用户需从电网购电,而其他情况下光伏效率更低、用户购电需求更大,即安装光伏板不经济,不建议安装。

对比不同地区发电效率发现,地区纬度对光伏发电效率影响大,随着纬度升高,光伏板接收辐射减少且光伏最优倾角增大导致光伏板更易被树木遮挡。以沈阳为例,图 6 中部分发电效率曲线已接近 40%,与相同条件下西安地区发电效率相比降低约 7%,相当于平均每年每万 m²光伏板损失约 1.4×10^5 kWh 发电量。此外,随着纬度的升高,用户在冬季的用电需求增加,从而需要安装更多的光伏板,而高纬度会使光伏板效率降低,因此纬度较高的地区相对较不适用树板社区模式。

以下考虑能较大程度满足 3 个代表城市的光伏用户用电需求的指标数据。仍以安装面积 12.8 m²为例,表 3 展示了有树社区光伏家庭用电满足情况:3 个城市中西安市表现最好,在 47.6%的情况下光伏系统均能满足家庭用电需求,这缘于其充足的太阳辐射与更低的纬度,而西北地区人口密集城乡多集中在其南部,与西

安市情况类似,因此西北地区推行树板社区更能满足当地用户需求。北京市纬度相较西安市更高,但由于地理位置使当地光伏板处于更高的太阳辐射强度中,因此北京市整体用电满足情况仅略弱于西安市,满足率为40.5%。沈阳市满足率仅29.8%,表现较差,在光伏板离地高度为3.5 m时仅有两种情况可满足家庭用电需求,由于东北地区纬度高、太阳辐射少,且吉林省与黑龙江省各地市相较沈阳市条件更加不利,因此东北地区普遍不适合树板社区模式,仅树龄年轻时可考虑安装光伏板。综上,在华北和西北地区,以光伏板离地高度6.5 m、垂直距离7 m、树龄30年为划分界限;在东北地区,以光伏板离地高度6.5 m、垂直距离5 m、树龄20年为划分界限。界限内情况下的光伏板能够较大程度满足当地用户用电需求,树板环境较为理想。

表3 安装12.8 m²光伏板条件下北京、西安、沈阳3市家庭用电满足情况

Table 3 Household power supply in Beijing, Xi'an and Shenyang under the condition of installing 12.8 square meters of PV panels

光伏板离地高度/m The height of PV panels	垂直距离/m Vertical distance	北京市 Beijing				西安市 Xi'an				沈阳市 Shenyang			
						树龄 Tree age/a							
		10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
3.5	4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	6	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
	7	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
	8	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
	9	√	×	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	10	√	√	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	4	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
	5	√	×	×	×	√	×	×	×	√	×	×	×
	6	√	×	×	×	√	×	×	×	√	×	×	×
6.5	7	√	×	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	8	√	√	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	9	√	√	×	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	10	√	√	√	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	4	√	√	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	5	√	√	×	×	√	√	×	×	√	√	×	×
	6	√	√	×	×	√	√	×	×	√	√	×	×
	7	√	√	×	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	8	√	√	√	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	9	√	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×
9.5	10	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×
	4	√	√	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	5	√	√	×	×	√	√	×	×	√	√	×	×
	6	√	√	×	×	√	√	×	×	√	√	×	×
	7	√	√	×	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	8	√	√	√	×	√	√	√	×	√	√	×	×
	9	√	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×
	10	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×
	4	√	√	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×
	5	√	√	×	×	√	√	×	×	√	√	×	×

考虑光伏板自身效率折损和季节用电差异,用户可选择两种方案:一是增加光伏安装面积以最大程度实现自给自足(如屋顶仍有空间);二是发挥屋顶光伏经济性,峰时向发电端购电,谷时向发电端出售电力。高纬度地区或垂直距离过近的街区的光伏系统效率较低,两种方案对此类用户可能均不经济,用户需评估当前的投资期望和安装屋顶光伏系统的回收期。

2.2 树板模型降碳指标分析

通过运用组合模型统计3个代表城市的树木和光伏板在非同步安装情况下的碳减排数据。在光伏板高6.5 m,垂直距离为7 m的条件下(表4),单户范围内的屋顶光伏系统和树木在一个光伏生命周期内创造碳减排的最高值为西安地区的34.0 t,其中光伏减排29.0 t,可见西北地区较华北和东北地区规划树板社区对碳减排贡献更大。对比不同条件组合的降碳量发现:在所有情况下光伏板的碳减排贡献占比均超过整体的80%;树木通过光合作用带来的降碳正收益远小于其遮挡对光伏板带来的负收益。因此,居住在偏高纬度和垂直距离较近的低层社区管理者和光伏用户在南侧临街树木超过一定年龄时应采取如下措施:一是停止安装光伏板,避免低效率光伏投入;二是安装光伏板同步对树木进行修剪,防止遮阳影响。考虑到树木与光伏板降碳贡

献差异巨大,第二种措施更能响应用户真实需求。此外,树木遮挡降低夏季室内温度,通过降低用户制冷需求减少电力消耗,从而降低碳排放,也可形成降碳正收益,可见树木对社区降碳有多方面贡献,应当兼顾降碳、发电收益与树木的环境综合效益。

表 4 单用户树板组合模型降碳表现
Table 4 Carbon reduction of combination model of single user

地区 Area	移栽国槐树龄/a Sophora japonica age	光伏板安装数量/块 Number of PV panels	光伏板降碳量/t Carbon reduction of PV panels	树板组合降碳量/t Carbon reduction of the system
北京	20	8	22.1	26.1
		10	27.6	32.6
	30	8	17.7	21.7
		10	22.2	27.2
西安	20	8	23.2	27.2
		10	29.0	34.0
	30	8	19.7	23.7
		10	24.6	29.6
沈阳	20	8	20.0	24.0
		10	25.0	30.0
	30	8	16.2	20.2
		10	20.2	25.2

3 结论

本文构建了考虑树荫遮挡的低层社区屋顶光伏发电效率与树板降碳分析模型,可用于预测低层社区中存在树木遮挡情况下的屋顶光伏系统发电效率,分析社区树木与光伏板对降低碳排放做出的贡献,帮助解决低层社区树木与光伏板“争夺阳光”问题。得出结论如下:

(1)选取北京、西安、沈阳为华北、西北、东北地区的代表城市,以国槐为典型树木,以光伏使用寿命为周期,模拟 3 个城市低层社区树木对光伏板造成的发电影响和降碳量变化趋势。树木对三地光伏板发电影响有限,但在模型运行末期影响幅度明显增大,北京市和沈阳市的树木影响发电程度相似,约为西安市的 2 倍。

(2)分析了在树板非同步安装情况下垂直距离、光伏板高度和树龄的变化对光伏板输出效率的影响趋势。结果表明,在设定条件下,北京、西安、沈阳 3 地光伏家庭用电满足率分别为 40.5%、47.6%、29.8%。华北、西北地区树板匹配的理想场景是光伏板离地高度超过 6.5 m、垂直距离超过 7 m、树龄 30 年以内的社区;东北地区则是光伏板离地高度超过 6.5 m、垂直距离超过 5 m、树龄 20 年以内的社区。

(3)以地区、树木年龄、光伏板安装面积为变量统计了单户组合模型的降碳数据。结果表明,种植树木而增加的固碳量不足以抵消其减少的光伏降碳量,在光伏系统受树荫遮挡严重时,应对树木进行修剪。但考虑到树木具有提高生态多样性、美化环境等优点,城乡社区应平衡树木和光伏板之间的环境收益,在满足用户用电需求的基础上尽可能保留社区树木。

为简化问题,本文研究主要考虑“三北”地区树木生长对屋顶光伏板遮挡产生的影响,尚未计及树木美化景观的环境效益及树木本身的经济价值;亦未考虑光伏制造、回收过程中的碳排放水平以及光伏板成本和电价的变化趋势。未来可考虑加入更多的因素变量,并针对全国区域范围,开展进一步的研究工作。

参考文献(References):

- [1] 赵春黎,马文勇,张雅京,程恩起,曹飞,孙浩,严岩,郭佳玮.不同尺度光伏电站的生态效应.生态学报,2024,44(23):10964-10973.
- [2] 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.
- [3] 黄荣浩,潘登,刘嘉文,蓝晓东,王伟文,王雪梅,彭勃.珠三角城市群屋顶分布式光伏发电的综合潜力研究.气候与环境研究,2024,

- 29(3): 317-328.
- [4] 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.
- [5] Tian B, Loonen R C G M, Hensen J L M. Combining point cloud and surface methods for modeling partial shading impacts of trees on urban solar irradiance. *Energy and Buildings*, 2023, 298: 113420.
- [6] Tooke T R, Coops N C, Voogt J A, Meitner M J. Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(2): 73-81.
- [7] Kumar S, Apoorva, Sadhu P K. MATLAB-Based Simulation to analyze the aftermath of Partial Shading on Solar Cell. 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC). April 13-14, 2018, Greater Noida, India. IEEE, 2018: 437-441.
- [8] Dereli Z, Yücedağ C, Pearce J M. Simple and low-cost method of planning for tree growth and lifetime effects on solar photovoltaic systems performance. *Solar Energy*, 2013, 95: 300-307.
- [9] 柴晋, 乔加飞, 王兵兵, 梁占伟. 散射辐射对光伏发电系统的影响. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 291-298.
- [10] 王恩宇, 郭强, 张学友, 甄金玉. 倾斜面太阳辐射量计算方法研究. *热科学与技术*, 2019, 18(1): 35-41.
- [11] Koronakis P S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy*, 1986, 36(3): 217-225.
- [12] 陈晶, 张真. 居民生活用电特征与影响机理. *统计研究*, 2015, 32(5): 70-75.
- [13] 徐嘉艺, 王小玲, 宋坤, 张桂莲, 仲启铨, 韩玉洁, 达良俊. 上海四种常见树种单株固碳能力差异及其影响因子. *生态学报*, 2024, 44(13): 5532-5541.
- [14] 郅光发, 曹丽雯, 刘宏明, 范欣. 我国城市市树选择应用现状及区域分布特征. *林业科学*, 2019, 55(10): 76-87.
- [15] 钱璟, 廖莎, 范舒欣, 沈思栋, 李涵, 张梦园, 董丽. 北京市常用园林树种全生命周期碳收支. *生态学报*, 2024, 44(17): 7490-7506.
- [16] Yu Z Q, Ma W H, Xie K Q, Lv G Q, Chen Z J, Wu J J, Yu J. Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China. *Applied Energy*, 2017, 185: 68-81.
- [17] Hocine L, Mounia Samira K. Optimal PV panel's end-life assessment based on the supervision of their own aging evolution and waste management forecasting. *Solar Energy*, 2019, 191: 227-234.
- [18] 北京市质量技术监督局. 行道树栽植与养护管理技术规范: DB11/T 839—2017. 北京: 北京市地方标准, 2017.
- [19] 李遥, 李照荣, 王小勇, 刘抗, 王有生, 赵文婧. 基于斜面辐射组合计算模型的光伏阵列最佳倾角研究. *太阳能学报*, 2022, 43(5): 127-136.
- [20] Xu R D, Ni K, Hu Y H, Si J K, Wen H Q, Yu D S. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 100-109.
- [21] 韩斐, 潘玉良, 苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究. *工程设计学报*, 2009, 16(5): 348-353.
- [22] 刘璇, 屈海燕, 王康, 吴美阳. 沈阳市 3 种行道树冠层孔隙度研究. *西北林学院学报*, 2021, 36(2): 54-60, 219.
- [23] 官燕玲, 张豪, 闫旭洲, 肖斌, 周治. 灰尘覆盖对光伏组件性能影响的原位实验研究. *太阳能学报*, 2016, 37(8): 1944-1950.
- [24] 吕玉坤, 杨宇星, 赵伟萍. 低风速环境下光伏组件积灰特性模拟研究. *电源技术*, 2021, 45(6): 801-804, 827.
- [25] 辛士冬, 姜立春, 穆林. 黑龙江省红松人工林林分乔木层可加性碳储量模型. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(1): 115-121.
- [26] 曾鹿敏, 赵毅辉, 李同欣, 高逸平, 党秋伟, 王懿祥. 基于单木的城市绿地乔木碳汇计量及其空间分布特征——以平湖市为例. *生态学报*, 2024, 44(20): 9209-9220.
- [27] 郭湧, 魏云琦, 欧阳翠玉. 基于 LIM 的城市园林树木碳储量基线情景模拟研究——以北京市某高校绿地为例. *北京林业大学学报*, 2022, 44(12): 111-120.
- [28] 韦雪花, 王佳, 冯仲科. 北京市 13 种常见树种胸径估测研究. *北京林业大学学报*, 2013, 35(5): 56-63.
- [29] 北京市质量技术监督局. 林业碳汇计量监测技术规程: DB11/T 953—2013. 北京: 北京市地方标准, 2013.
- [30] 温家石, 葛滢, 焦荔, 邓志平, 彭长辉, 常杰. 城市土地利用是否会降低区域碳吸收能力——台州市案例研究. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 651-660.
- [31] 姚丰平, 吴军寿, 姚理武, 范良敏, 程亚平, 梅建伟. 庆元林场阔叶林主要类型生物量测定及其评价. *浙江林业科技*, 2003, 23(3): 74-78.
- [32] 北京市质量技术监督局. 行道树栽植与养护管理技术规范: DB11/T 839—2017. 北京: 北京市地方标准, 2017.
- [33] 刘心男, 宋来昊, 纪颖波. 城镇住宅家庭用能画像构建——以京津冀地区为例. *清华大学学报: 自然科学版*, 2024, 64(8): 1482-1491.