

建筑屋顶光伏与太阳能集水器综合效益评价

赵 翔, 徐 伟

(内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古自治区 包头 014017)

摘要: 安装光伏和太阳能集热器都会对环境产生积极影响, 因为它们在减少碳排放的同时还能带来外部经济效益。不过, 与光伏发电相比, 太阳能集热器的转换效率更高, 生命周期碳排放量更低。由于集热器和光伏发电的储能方式和目的不同, 在建筑屋顶安装光伏或太阳能集热器应根据具体情况决定。为了确定建筑适合安装节能系统的类型, 文章对内蒙古科技大学研究生公寓楼屋顶太阳能集热器从碳排放、产热量、节电量、经济性和能源浪费率 5 个角度进行逐一分析, 此外还设计了光伏系统、太阳能集热器系统和光伏耦合系统, 并利用模糊综合评价法对 3 个能源系统进行了进一步的综合评价, 最后分别讨论了影响这 3 种系统性能的因素, 并就是否在建筑屋顶安装光伏或太阳能集热器提出了建议。最终结果显示太阳能集热器、光伏集热器耦合系统和光伏得分别为 74.32、71.4 和 63.4, 隶属度分别为 0.622、0.574 和 0.841。

关键词: 集热器; 光伏; 经济环境效益; 熵值法; 模糊综合评价

中图分类号: TU8

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)04-0068-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.04.053

Evaluation on comprehensive benefits of integrating building rooftop photovoltaics and solar water collectors

ZHAO Xiang, XU Wei

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014017, Inner Mongolia, China)

Abstract: Installing both photovoltaics and solar collectors has positive environmental impact, as they reduce carbon emissions while providing external economic benefits. However, solar collectors have a higher conversion efficiency and lower lifecycle carbon emissions compared to photovoltaics. Since collectors and photovoltaic energy have different storage methods and purposes, the decision to install either photovoltaics or solar collectors on building rooftops should be based on the specific circumstances. In this paper, a detailed examination of the rooftop solar collectors within the graduate apartment building of Inner Mongolia University of Science and Technology is put forward various critical factors are analyzed, namely carbon emissions, heat generation, energy savings, economic viability, and energy waste rate. Furthermore, the performance of three solar energy systems: the photovoltaic system, solar collector system, and photovoltaic coupled system are assessed. To arrive at a comprehensive evaluation, the fuzzy comprehensive evaluation method are employed for these systems. Ultimately, our findings demonstrate that the collector system achieves the highest score in terms of performance and effectiveness. The factors influencing the performance of these three systems are discussed individually, leading to recommendations regarding whether to install photovoltaics or solar collectors on building rooftops.

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 2022 年度内蒙古自治区哲学社会科学规划项目(2022NDC220)

作者简介: 赵翔(1997—), 男, 硕士研究生, 从事能源系统评价方向的研究。

通信作者: 徐伟(1970—), 女, 教授, 从事能源评估研究。

Key words: solar collectors; photovoltaics; economic and environmental benefits; entropy method; fuzzy comprehensive evaluation

近几十年期间, 太阳能得到了大量研究者的关注和研究, 光伏和太阳能集热器是将太阳能转化为供人类使用的清洁能源主要研究领域。相比于光伏, 太阳能集热器具有更低的碳排放和更高的能源效率, 但是能源利用范围单一。光伏则应用范围广, 不仅可以自发自用, 还可以余电上网, 获得更多的外部收益。相比较于光伏, 太阳能集热器需要更多的屋顶可安装面积来容纳水箱等设备, 且屋顶设计荷载必须支持住水箱的荷载, 因此集热器相比与光伏的应用范围受到限制。所以在住宅屋顶上安装光伏, 还是太阳能集热器备受争议。

光伏、集热器系统、光伏与集热器耦合系统从经济、环境等单一角度评价不能充分说明该系统的价值潜力大小, 而是需要综合多方面因素共同考虑。张小莲等^[1]通过模糊综合评价法对多站融合能源互补系统进行了评价, 得到了最佳开发多能源互补系统的选址。徐伟等^[2]利用模糊综合评价法对光伏建筑进行了技术效益、经济效益和社会效益进行了评价, 最终得到该项目综合效益为优; 赵泰等^[3]从 5 个角度构建了某绿色建筑的模糊度综合评价模型, 得到该评价建筑绿色效果为深绿, 该模型具有较大的实用性。

本文将从太阳能集热器和光伏的对比研究出发, 分别从环境、经济和利用率角度分析光伏和集热器系统价值潜力, 并利用模糊综合评价法对 3 个系统进行综合评估, 以期可为太阳能集热器和

光伏投资建设投资者和低碳节能相关研究提供参考。

1 项目概况

项目位于内蒙古包头市, 研究生公寓楼共 17 层, 每层每户住 4 人。集热器采用 PMH200 型平板集热器, 水平安装, 集热器面积为 2 m^2 , 共 54 组, 安装倾角为 12° , 日太阳能辐射量为 18.29 MJ/m^2 , 屋顶集热器平面位置布置如图 1 所示。水箱容积为 9 000 L, 水温加热到 60°C 时, 温度控制系统将控制集热器不再对水箱进行加热。当太阳能热水不充足时, 由高温锅炉进行辅热。设计小时热水量 11 340.01 L/h, 设计小时耗热量为 2 334 145.31 kJ/h, 阳光充足时每天可以生产 6 t 的热水。

2 技术潜力

2.1 公寓楼热水需求量估算

在实际使用过程中, 当水箱温度达到 60°C 时集热器就不再工作, 所以根据公寓楼用水需求特征计算出实际热水量。由于公寓楼热水淋浴系统还未投入使用, 所以根据人均用水量计算出需求热水量。根据采访调查结果数据显示, 大部分学生天冷的冬季每周洗澡两次, 夏季大部分每天都洗, 凉爽的春秋大部分学生每周洗澡 3 次, 假设按大部分同学每周洗澡次数统计, 去除掉寒暑假, 假设全年洗澡次数为 120 次/人, 每次用水约 30 L, 公寓楼能容纳住户 2 304 人, 假设热水全部由集热器

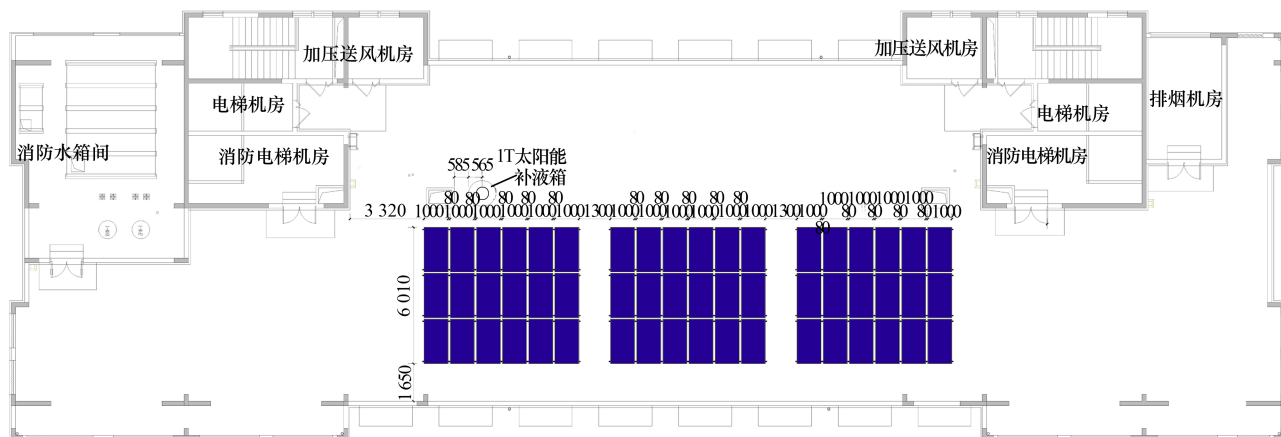


图 1 内蒙古科技大学 27 研究生公寓楼屋顶集热器平面布置概况

mm

供应,则太阳能年实际产热量为 $8.2\,944 \times 10^6$ L,将其从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要热量 $1\,706\,913\,285\text{ kJ}$,对应的节电量为 $499\,097.4\,518\text{ kWh}$,需要集热器面积为 844 m^2 。如果全部由光伏发电供应,需要 410 W 的光伏板面积为 $1\,478\text{ m}^2$ 。

$$Q_{\text{actual-sun-water}} = L_{\text{actual-sun-water}} \times \rho_{\text{water}} \times C_{\text{W}} \times (t_1 - t_0) \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{actual-sun-water}}$ 为热水供应系统年产热量对应的产热量, kJ ; $L_{\text{actual-sun-water}}$ 为集热器年实际产热量, L ; ρ_{water} 为水温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的密度, 983 kg/m^3 ; C_{W} 为水的定压比热容, $4.187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2.2 太阳能集热器的技术潜力

太阳能集热器通过吸收太阳光,将光能转化为热能储存在水中,假设集热器一直处于工作状态,通过式(2)和(3)^[4]计算出集热器理论生产的热水量和对应的节电量。太阳能丰富度、吸热涂层、表面污染物都会影响集热器热水的效率^[5],公寓楼屋顶采用的是平板型集热器,平板集热器相比较于传统集热器具有效率高、抗腐蚀等优点^[6]。利用 PVsyst 软件模拟光伏和集热器一年内不同月份表面所接收的平均日太阳能辐射量,如表 1 所示。

表 1 集热器、光伏板日接收太阳辐射量

月份	太阳辐射量	
	集热器采光面水 平面总辐射量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	光伏采光面水 平面总辐射量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
1	3.26	4.8
2	4.5	5.8
3	4.6	5.1
4	6.1	6.1
5	6.8	6.3
6	6.29	5.6
7	5.44	4.9
8	5.52	5.3
9	4.55	4.8
10	4.55	5.6
11	3.34	4.55
12	2.78	4.16

$$Q_{\text{hot-water}} = H_{\text{D}} \times A_{\text{S}} \times \eta_0 \times (1 - \eta_1) \times f \quad (2)$$

$$E_{\text{sun-water}} = \frac{Q_{\text{hot-water}}}{3\,600\eta_2} \quad (3)$$

式中: $L_{\text{sun-water}}$ 为太阳能日产热量, L ; H_{D} 为集热器采光面日太阳能辐射量, $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{d}$; η_0 为集热器转化效率,取 50% ; η_1 为储水箱和管路的热损失率,取 20% ; f 为太阳能保证率,取 80% ; $Q_{\text{hot-water}}$ 为集热器日产热量对应的产热量, kJ ; $E_{\text{sun-water}}$ 为集热器的节电量, ($\text{kW}\cdot\text{h}$); η_2 为作为基准的常规能源的能效比,取 95% 。

太阳能集热器在寒暑假不工作,理论年产热量为 $835\,866.4\,243\text{ L}$,不能满足公寓楼年总热水需求量。在 $4\sim 6$ 月份日产热量在全年日热量最多,约日产 $4\,000\text{ L}$ 热水,在太阳辐射量低的月份日热量在 $2\,000\text{ L}$ 左右,最低出现在 12 月份,日产热量仅为 $1\,681\text{ L}$,太阳能集热器均不能满足公寓楼用水的需求,不能满足的部分由高温锅炉补偿。根据公式(3),将太阳能集热器产生的热水消耗的热量换算成电气消耗的所需要电量为 $50\,296.44\,126\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。由于集热器在学生放寒暑假期间不运行,相对应的浪费电量与对应的理论节电量之比为能源浪费率,数值为 21.3% 。

$$\mu = \frac{E_{\text{A}}}{E_{\text{T}}} \quad (4)$$

式中: μ 为能源浪费率; E_{A} 为相对应的浪费节电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; E_{T} 为对应的年理论节电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

2.3 光伏的技术潜力

由于在学校公寓楼安装太阳能集热器只能给公寓楼供应洗澡热水,加上寒暑假学生放假,造成经济收益受到限制。如果在公寓楼安装光伏,光伏不仅可以为公寓楼提供热水,还可以为公寓楼供电,在热水充足的情况下,剩余的电量可以上网和自发自用获取收益,在理想的情况下能源浪费率为 0 。

光伏最佳倾角安装能使光伏板接收到更多的太阳辐射^[7],增加光伏的全年发电量。光伏板表面上附着的灰尘如果不及时处理,灰尘堆积会影响光伏的发电量^[8]。在纬度越高的地区,为了减少光伏阵列间阴影的影响必须扩大阵列间的间距,从而减小了光伏装机容量^[9]。假设光伏板最佳倾斜角度安装,方位角朝南,采用户棚式安装。根据屋顶表面情况,光伏板尺寸为 $2\text{ m} \times 1\text{ m}$,单片

峰值功率为 410 W, 18 块光伏板组成一单元, 单元之间间距为 1.2 m 作为人工通道, 共有 6 个光伏单元, 光伏装机容量为 44 280 W, 系统效率取 86%, 光伏的年发电量为 72 919 kWh。

3 经济与环境潜力

3.1 公寓楼热水系统经济收益

经济效益不仅受太阳能辐射量和晴阴天的影响, 还会受到学生洗澡次数和洗澡时长的影响。按照每人每年洗澡次数共 120 次和每次用水 30 L, 每升热水 0.1 元计算, 则经济收益为每人每年 360 元, 按照 2 304 人计算, 则每年收益为 82.944 万元。

产生的热水主要供应对象是学生, 集热器的经济收益只能来自沐浴热水费, 经济收益单一。假设集热器生产的热水全部由学生消纳, 集热器每年生产热水 835 866.4243 L, 则来自集热器部分每年经济收益为 83 586.6 元。

光伏的经济收益可以来自热水和余电上网收益, 上网电价为 0.2 829 元/(kW·h), 光伏生产的热水量为 995 224 L, 上网电量为 16 028 kW·h, 则来自光伏的经济收益为 104 056 元。

3.2 环境效益

根据集热器碳足迹制程地图和相关文献分析^[10-11], 生产集热器需要用到玻璃、镀锌角钢、铝合金、不锈钢、铜、聚氨酯泡沫、橡胶泡沫以及水和电力, 如表 2 所示, 各产品碳排放系数来自于中国产品全寿命周期温室气体排放系数库。

单晶硅碳排放高于多晶硅碳排放, 光伏的碳排放受生产材料的获取方式、运输距离等因素影响^[12-15], 多晶硅光伏碳排放系数在 0.7 ~ 1.7 kgCO₂e/W,

本文选取来自英国一建筑屋顶 4 kW 单晶硅光伏系统, 碳排放系数为 2.97 kgCO₂e/W。

内蒙古电网的电力主要来自火电、风电、太阳能发电、核电和水电, 以及其它电网调过来的电。很多研究者直接使用煤电的碳排放因子测算碳减排效益, 这对测算结果造成极大不准确性。本文使用来自中国产品全寿命周期温室气体排放系数库中 2020 年内蒙古电网排放因子 1.054 tCO₂e/MWh。经过计算, 集热器的全年节电量为 67 325 kWh, 碳排放回收期需 45 d, 光伏全年发电量为 72 919 kWh, 光伏的碳排放回收期为 1.7 a。

4 模糊综合评价

为了进一步评价集热器、光伏和光伏与集热器耦合系统, 构建评价指标模型, 使用模糊综合评价法对 3 个系统进行了评价。利用隶属度将子标准进行标准化, 利用数学的方法使研究结果更加令人信服。

4.1 模糊综合评价思路

1) 确定评价对象因素集和权重向量, 评价对象因素指标集 $U = \{\text{热水产量, 节电量, 经济收益, 碳回收期, 能源利用率}\}$; 2) 确定评价对象评语集, $V = \{\text{差、一般、良好、优秀}\}$; 3) 确立模糊关系综合评价隶属度矩阵; 4) 将隶属矩阵与指标权重模糊合成; 5) 根据隶属度最大原则或者加权平均法确定最终评价结果。

4.2 权重的确定

利用熵值法计算评价指标权重, 利用 3 个系统计算得到的 5 个指标数据, 首先进行归一化处理, 得到无量纲的矩阵 P , 再将无量纲矩阵处理

表 2 集热器从摇篮到大门产生的碳足迹

碳足迹	材料质量	碳排放系数	碳排放量/kg	来源
玻璃	864 kg	1.107 kgCO ₂ e/kg	956.448	真空管
热镀锌角钢	277.2 kg	4.347 tCO ₂ e/t	1 204.9 884	支架、水泵
铝合金	129.6 kg	0.722 tCO ₂ e/t	93.5 712	联箱
不锈钢	900 kg	1.889 tCO ₂ e/t	1 700.1	水箱、管路、连接件
铜	76.32 kg	5.795 kgCO ₂ e/kg	442.2 744	吸热体、水泵
聚氨酯泡沫	154.08 kg	8.43 kgCO ₂ e/kg	1 298.8 944	保温材料(水箱、联箱)
橡塑泡沫	54 kg	92.2 kgCO ₂ e/m ³	24.894	保温材料(管路)
水	486 kg	0.15 kgCO ₂ e/m ³	0.0 729	生产过程
电	189.36 kW·h	1.054 tCO ₂ e/(MW·h)	199.58 544	生产过程

成变异矩阵 P_{ij} ，下一步计算出各个指标的熵值，最后计算出每个指标的权重 W ，最终得到的权重大小分别为热水产量 0.2 047、节电量 0.2 047、经济收益 0.2 047、碳回收期 0.1 951、能源浪费率 0.1 908。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.58 & 0.63 \end{bmatrix}$$

4.3 模糊隶属度函数

隶属度的计算方式主要有两种方法：1) 模糊统计法。该方法是制定大量的问卷打分表，然后计算隶属等级所占的比，该方法计算出的隶属度相对主观；2) 通过隶属度函数计算，隶属度 $A(x)$ 函数值域为 $[0, 1]$ ，隶属度 $A(x)$ 越接近于 1，则表明 x 属于 A 的程度越高，隶属度等于 1 为完全隶属于 A ，隶属度 $A(x)$ 越接近于 0，则 x 越不隶属于 A ，隶属度等于 0 为完全不属于。目前大部分研究者使用的是指派型隶属度函数中的梯形隶属度函数，根据评价指标的特点选取相对应的梯形隶属度函数。梯形隶属度函数模型有线性上升型、线性下降型、三角形和梯形^[16]，依据 x 的特点来选取合适的隶属度函数模型，本文主要使用的是线性上升型和线性下降型。

线性上升型：

$$\mu_x = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

线性下降型：

$$\mu_x = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (6)$$

隶属度评价指标边界的确定能影响对系统的

评价结果。该项目公寓楼年总热水需求量高达 829 万升，而 3 个设计的能源系统都远远不能满足用水需求，都需要依靠高温锅炉补偿。集热器系统有更高的热水效率，能节约更多的用来烧热水的电量。由于光伏可以余电上网，且可以在集热器系统不工作时间段仍可发电上网，获取更多的经济收益。集热器具有更低的碳排放，而光伏的全生命周期碳排放相对较高。集热器的能源浪费率比光伏高。评价指标评语等级边界如表 3 所示。

4.4 模糊合成算子

模糊合成算子分为 4 种，大部分研究者使用的是 $M(\cdot, \oplus)$ ^[17]，该模糊合成算子能相比较于其他 3 种算子能充分利用隶属度矩阵 R ，能更明显的体现权数的作用。

$$b_j = \min(1, \sum_{i=1}^m a_i r_{ij}), j=1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中： a_i 为评价指标的权重向量子集； r_{ij} 为隶属度向量子集。

4.5 模糊综合评价结果

由于得到的隶属度向量离散度太小，隶属度最大原则不适用，所以利用线性加权的方法得到最终评价结果。设置边界 50 为差、65 一般、80 良好、95 为优秀，最终得到的结果是集热器系统得分最高为 74.3，评价结果为良好，隶属度为 0.622。光伏和集热器耦合系统得分较高为 71.4，评价结果为一般，隶属度为 0.574。光伏系统得分最低为 63.4，评价结果为一般，隶属度为 0.841，评价结果如表 4 所示。

5 节能系统分析

无论是从减排力度还是经济收益角度看，相同安装面积的集热器都优于光伏。由于寒暑假，集热器的能量损耗比光伏严重，如果安装光伏，可以通过余电上网的模式降低能量损耗。基于此，

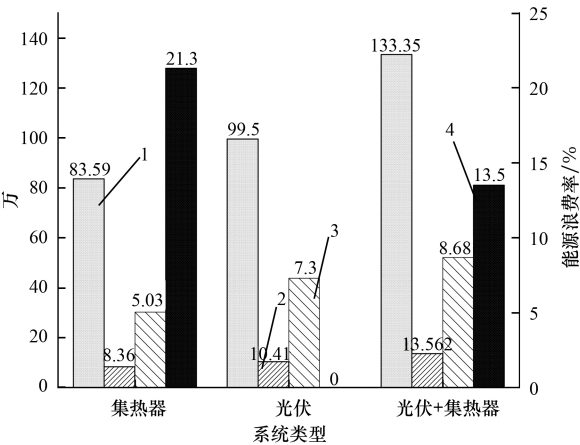
表 3 各指标评语等级

	差	一般	良好	优秀
热水量/L	1 000 000	2 823 600	4 647 200	8 294 400
节电量/(kW·h)	30 000	60 000	90 000	120 000
经济收益/元	50 000	100 000	150 000	20 000
碳回收期/d	700	500	300	100
能源浪费率	20%	15%	10%	5%

表 4 隶属度评价结果

系统类型	差	一般	良好	优秀	线性加权
集热器	0.320 097 656	0.075 402 344	0.266 813 803	0.337 686 197	74.331 328 11
光伏	0.327 613	0.376 824 967	0.104 762 033	0.190 8	67.381 235 49
光伏与集热器	0.167 266 855	0.252 019 03	0.568 032 61 5	0.012 681 5	71.391 931 39

对集热器系统、光伏系统和集热器和光伏耦合系统进行了对比分析，3 个系统安装面积分别为 108、216 和 216 m²，其中光伏集热器耦合系统是光伏和集热器各占屋顶可利用面积一半，分别计算了 3 个节能系统热水产量、经济收益、节电量和能源浪费率，结果如图 2 所示。



1—热水产量（万 L）；2—经济收费（万元）；
3—节电量（万 kW·h）；4—能源浪费率（%）。

图 2 系统价值潜力

集热器和光伏耦合系统的经济效益和碳减排效益优于光伏系统，耦合系统年产热水量 1.33 × 10⁶ L，节约电量 8.68 × 10⁴ kW·h，经济收益为每年 13.562 万元。如果屋顶全部安装太阳能集热器，则年产热水量达 1.67 × 10⁶ L，节电量为 1.01 × 10⁵ kW·h，运营期经济收益 16.72 万元，但是寒暑假期间会造成能源浪费现象，但是碳回收期仅需 45 d，而耦合系统碳回收期需要 287 d，能源浪费率降低到 13.5%。

热水量的多少受到初始水温的影响，夏季水温较高，能通过更少的能量产生更多的热水，集热器的转化效率比光伏高，所以在夏季优先考虑使用集热器。

集热器由于附带体积较大的水箱，减小屋顶可安装面积，且对屋顶环境要求较高，而光伏对屋顶要求低且具有更多的安装面积。

集热器的系统效率不仅取决于转化效率还取决于水箱保温损失率，环境温度越低，水箱热损失率越高。

内蒙古地区在 2018 年拥有建筑屋顶面积 1.74 × 10⁹ m²，若全部安装集热器和光伏耦合系统，可利用面积系数取 0.5，则内蒙古地区建筑屋顶可节约约 3.491 × 10¹¹ kW·h，碳减排量约为 3.679 × 10⁸ t，2021 年内蒙古地区碳排放总量为 843.398 873 4 MtCO₂^[18]，为内蒙古地区减碳力度约贡献 0.044%。

只考虑热量、节电量、碳回收期和经济收益，集热器系统最优。尽管集热器能源浪费现象严重，但是综合热水产量、节电量、经济收益、碳回收期和能源浪费率 5 个评价指标，集热器系统仍是得分最高。

6 结 论

太阳能集热器相比于光伏具有更好的碳减排效益和经济收益，但是能源使用用途单一，而光伏与集热器耦合系统可以应用到电力和热力领域，使用用途广，但是减排力度和经济效益低于集热器热水系统。该项目集热器系统相比较于其它两个系统最优，评价结果为良好，隶属度为 0.622。对于建筑屋顶安装集热器还是光伏，本文给出建议如下。

- (1) 在电力需求量大的地区，建议安装光伏和集热器耦合系统，因为集热器的效率比光伏高，在满足基本热水需求的情况下，剩余屋顶面积安装光伏。
- (2) 在碳排放强度大的地区优先考虑安装集热器来降低该地区碳排放，促进区域协调经济发展。
- (3) 在学校、宾馆、酒店等具有热水需求量变化较大的地区，避免能源浪费，应优先考虑安装光伏和集热器耦合系统，在热水需求量小的情况下通过光伏发电上网能获得更多经济收益。
- (4) 对于家庭住宅建筑建议安装集水器和光

伏耦合系统,住宅建筑热水需求量相对稳定,且用能多元化,所以在满足基本生活热水下,剩余屋顶安装光伏,该系统已在国外有成功案例。

(5) 对于工商业建筑屋顶,由于用电量且电费相比较于居民用电贵,建议安装光伏来获取更多的经济收益。

(6) 对于屋顶面积较小且荷载不能满足要求的情况下,考虑安装光伏,例如农村瓦房、彩钢瓦、年代较久远的建筑屋顶。

(7) 对于温度较低的北方地区建议安装光伏,温度较温和的地区建议安装集热器。

参考文献:

- [1] 张小莲,李恒聪,胡淇,等. 多站融合选址综合评估研究[J]. 电力工程技术,2022,41(2):53-59.
- [2] 徐伟,宋亚丽. 基于模糊层次分析法的光伏建筑综合效益评价[J]. 太阳能学报,2018,39(2):544-549.
- [3] 赵泰,程东. 基于 IAHP 的住宅建筑绿色度评价研究[J]. 工程建设,2019,51(12):81-85.
- [4] 郭春梅,楚尚玲,由玉文,等. 绿色居住建筑运营阶段碳排放量化指标计算与分析[J]. 环境工程,2017,35(11):168-172.
- [5] 马非,张鹏. 基于相变浆体的直接吸收式太阳能集热器研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(8):1852-1856.
- [6] 李绪泉,黄祯,杨琦,等. 碳塑太阳能平板集热器热损系数的研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):164-169.
- [7] 王宗林,樊亚东,王建国,等. 倾角与方位角对张北地区光伏发电特性的影响[J]. 太阳能学报. 2022,43(10):73-79.
- [8] 李忻哲,高爱华,秦文罡,等. 积灰光伏板表面散射光强度分布实验研究[J]. 光电子激光,2023,34(3):284-290.
- [9] 邹海青,何昌炎,郑涛平. 光伏项目最佳倾角与间距的选择[J]. 电源技术,2023,47(9):1207-1209.
- [10] 原鲲,田雅林,王革华,等. 全玻璃真空管太阳热水器的全生命周期能量环境效益分析[J]. 太阳能学报,2009,30(2):266-270.
- [11] 周志华,刘俊伟,王媛,等. 太阳能热水系统生命周期评价及回收期分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(12):1312-1321.
- [12] 翁琳,陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析[J]. 上海理工大学学报,2017,39(3):282-288.
- [13] 赵若楠,董莉,白璐. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学,2020,40(6):2751-2757.
- [14] 王小虎,楚春礼,曹植. 分布式光伏-储能系统经济-碳排放-能源效益实证分析:以山东省胶州光伏及其储能系统为例[J]. 中国环境科学,2022,42(1):402-414.
- [15] 杜文杰,江源,关梦茜. 新疆多晶硅光伏减碳效益的全生命周期评估[J]. 自然资源学报,2023,38(3):694-706.
- [16] NOOROLLAHI Y, SENANI AG, FADAEI A, et al. A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multicriteria decision-making approach [J]. Renewable Energy, 2022, 186:89-104.
- [17] 齐静静,李家宁,尹志清,等. 油气集输站库雷电防护能力模糊评价模型研究[J]. 电瓷避雷器,2019(6):49-54.
- [18] GUAN Y, SHAN Y, HUANG Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. Earth's Future, 2021, 9(11):002241.