

# 基于太阳能高效利用的内蒙古西部超低能耗草原民居构建

金国辉<sup>1,2</sup>, 陈伟<sup>3</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710043; 3. 中建三局西北公司兰州分公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**为使内蒙古西部地区太阳能得到高效利用,有效解决草原民居围护结构性能差,能耗高,室内热环境差并造成大量污染等问题,研究基于太阳能的高效利用来构建内蒙古西部超低能耗草原民居,利用当地丰富的太阳能资源,结合当地传统的火炕,构建太阳能热水循环供暖系统,在此基础上对民居朝向、外墙保温层厚度、屋顶保温层厚度进行优化,并进行数值模拟及综合评价。结果表明:与普通民居相比,超低能耗草原民居采暖能耗降低 10 146.36 kw·h,能耗降低率为 83.36%;采暖期室内平均温度提高了 8.72℃,PMV 值提高了 1.91,室内热舒适性大幅提升;增量效益费用比为 1.375,经济性较好;整个采暖期减少污染物 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、氮氧化物、烟尘的排放量分别为 9 956、32.3、28.12、20.9 kg,有效推进了农牧区的绿色发展。

**关键词:**太阳能;超低能耗;草原民居;供暖系统;综合评价

**中图分类号:**TU832 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0124-08

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.02.018



低能耗、超低能耗甚至零能耗住宅是未来建筑发展的趋势。内蒙古西部地区因独特的地理优势拥有丰富的太阳能资源,但当地居民未能将太阳能有效地利用,现有草原民居存在围护结构差,采暖能耗高,室内热环境差并造成大量污染等问题,所以,高效地利用太阳能来构建超低能耗草原民居,对能源的可持续发展和推进农牧区的绿色发展建具有极其重要的意义。

在太阳能的高效利用与超低能耗建筑方面,许多

学者做了大量的研究。Fabrizio Ascione 等<sup>[1]</sup>研究了意大利南部贝内文托市的一座超低能耗建筑,提出了四种不同空调方案性能参数的测量方案。Li Ji 等<sup>[2]</sup>将建筑环境、供暖系统和可再生能源利用等影响因素综合分析,在此基础上提出一种超低能耗建筑的性能化设计方法,并分析了相关案例的设计过程,设计出案例中超低能耗建筑的优化方案。Wang Z 等<sup>[3]</sup>根据德国被动房标准建造了被动式建筑,与普通建筑相比,被动式建筑室内温度波动比较小,通风系统可以明显的改善室内环境,德国被动式标准适合于中国的严寒地区。Huang Pei 等<sup>[4]</sup>提出一种用于分析超低能耗建筑的纵向性能的方法,并提出用两阶段方法来确定建筑的尺寸,结果表明,由于组件退化的影响,超低能耗建筑可能会在运行几年后无法满足要求。张宏等<sup>[5]</sup>以江苏省超低能耗示范工程溧水孔家村为民服务中心作为案例,从建筑设计全生命周期中总结和提炼出农村用超低能耗建筑的设计和技术要点。潘黎等<sup>[6]</sup>对上海超低能耗办公建筑的围护结构进行了研究,以夏季空调为主、兼顾冬季供暖,确定了建筑全年冷/热/总负荷随

**收稿日期:**2020-10-10; **修回日期:**2021-11-09

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51768053);内蒙古自然科学基金项目(2019MS05007);西部绿色建筑国家重点实验室培育基地开放研究基金(LSKF201803)

**作者简介:**金国辉(1965-),男,内蒙古乌拉特中旗人,硕士,教授,主要从事绿色建筑及建筑节能技术方面研究。

E-mail:jinguohuimb@163.com

陈伟为通讯作者。

E-mail:cwtimeless@163.com

围护结构性能参数水平的变化趋势。曹森<sup>[7]</sup>着眼于建筑设计的基本问题,在被动式超低能耗导向下,将一般性公共建筑设计作为研究对象,分析影响建筑设计的关联因素,使得建筑系统能够高效利用环境资源,提升自身对环境的调节缓冲能力。郭钊<sup>[8]</sup>结合郑州地区气候条件,以建筑能耗模拟软件 Design Builder 作为研究工具,得出室外气候适宜时配合自然通风可进一步降低建筑能耗。崔宝霞等<sup>[9]</sup>对内蒙古河套地区建筑的外窗做了节能分析,以窗框的材料及窗户玻璃的材质为研究对象,通过逆向建模的方法得出各朝向窗墙比对该地区太阳能利用的影响大小。牛艳<sup>[10]</sup>以充分利用太阳能的理念对昆明地区进行了采暖设计,以搭建的太阳能采暖实验房作为研究对象,利用散热器加热,最后进行了实测实验跟数值模拟,为昆明地区的太阳能采暖提供了数据支持和工程参考。宣庆东<sup>[11]</sup>将太阳能利用系统与建筑外部结构结合,提出聚光条件下的太阳能综合利用系统,此系统能够实现将大部分入射的太阳辐射能量聚集到光伏电池上输出电能,更好地缓解建筑能耗的压力,提高能源的综合利用效率,促进太阳能利用技术在建筑上的推广。杨坤<sup>[12]</sup>对拉萨市多层住宅优先利用太阳能技术进行研究,并对设计的节能效果进行数据验证,从而得出适合拉萨当地的太阳能建筑设计模式。陶进等<sup>[13]</sup>对吉林城建学院超低能耗建筑做了多方面详细介绍,为我国严寒地区超低能耗建筑的构建提供了借鉴与参考。王杨洋等<sup>[14]</sup>研究了严寒地区超低能耗建筑的联合供能系统,在采暖期内进行测试分析,表明采用太阳能和地热能组合为建筑供能是可行的,为严寒地区太阳能—地热能联合供能系统的应用提供了参考。蒋婧等<sup>[15]</sup>提出兼顾被动有效得热和主动系统非连续供热的太阳能采暖有效保证率,与传统太阳能保证率对比,不同建筑热需求下,不仅采暖保证率有很大程度的提升,能源利用率也

有提升。王盼盼<sup>[16]</sup>对寒冷地区超低能耗建筑围护结构设计做了研究,通过对建筑的能耗分析,对墙面、屋面、楼地面等围护结构提出相应的节能设计措施,为严寒地区超低能耗建筑围护结构的构建提供了参考。综上所述,内蒙古西部地区超低能耗民居的研究较少,因此,本研究基于太阳能的高效利用构建内蒙古西部超低能耗草原民居,以期为该地区超低能耗住宅的设计构建提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 典型草原民居模型的建立

对内蒙古西部典型民居进行实地测量及考察,典型民居为单层砖混结构,南北朝向,层高 3.6 m,三开间,建筑面积 70.56 m<sup>2</sup>(图 1)。东侧为主卧室,结构尺寸为 3.8 m×6.3 m;西侧为次卧室,结构尺寸为 3.8 m×4.0 m;中间为客厅和厨房,结构尺寸分别为 3.6 m×4.0 m 和 3.6 m×2.3 m;次卧北面为储藏室,尺寸为 3.8 m×2.3 m,无阳光间设置。依据建筑实际布局与构造,构建典型民居的数值分析模型,各个围护结构构造如表 1 所示。

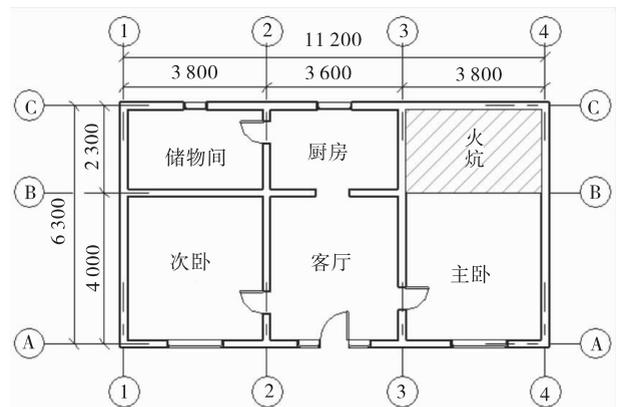


图 1 初始典型民居平面图

Fig. 1 Plan of initial typical dwellings

注:数字单位为 mm。下同

表 1 围护结构参数设定

Table 1 Setting of envelope parameters

围护结构	材料构造	传热系数/(w·m <sup>-2</sup> ·k <sup>-1</sup> )
外墙	10 mm 水泥砂浆+370 mm 红砖+10 mm 水泥砂浆	1.605
内墙	10 mm 水泥砂浆+240 mm 红砖+10 mm 水泥砂浆	1.726
屋顶	10 mm 面层+10 mm 找平层+10 mm 防水层+10 mm 找平层+150 mm 结构层	3.296
外窗	双层单玻璃钢窗,玻璃厚度 6mm	2.600
门	50 mm 普通厚度木门	2.734
地面	10 mm 水泥砂浆+40 mm 素混凝土垫层	1.706

民居围护结构构造简单,外墙跟内墙均无保温层设置,室内热量容易通过围护结构传热而散发到室外,造成房间保温性能差。

### 1.2 太阳能供暖系统的建立

内蒙古西部草原民居现有的供暖方式为传统的煤

炉、土暖气、火墙和连炕灶为主,采暖效率低,大量燃烧石化能源的同时产生有毒有害气体,严重影响了当地居民的身体健康和室内空气的质量。利用当地丰富的太阳能资源,结合当地独具民族特色的火炕,构建太阳能供暖系统(图 2)。

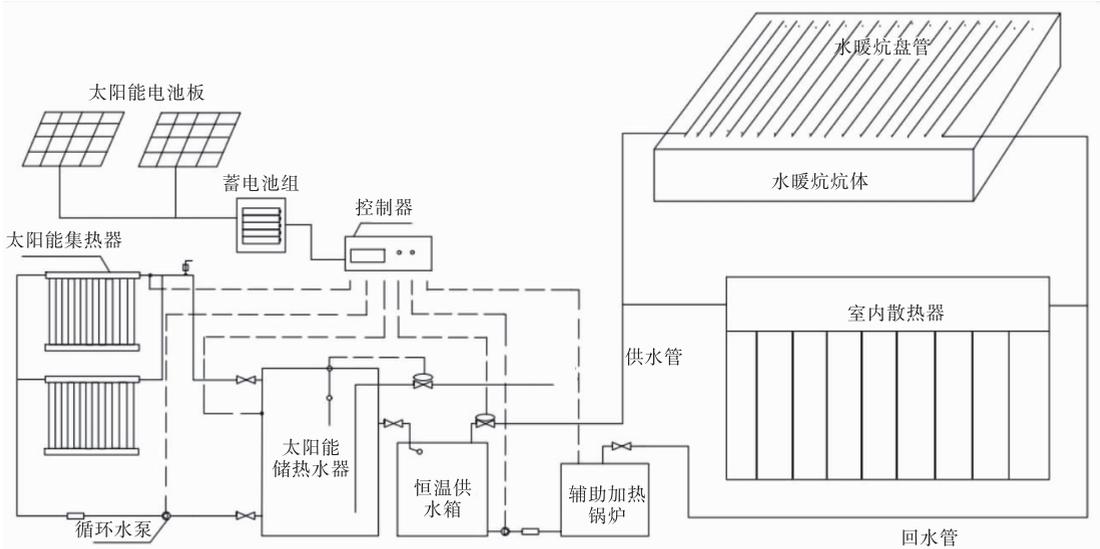


图 2 太阳能热水循环供热系统

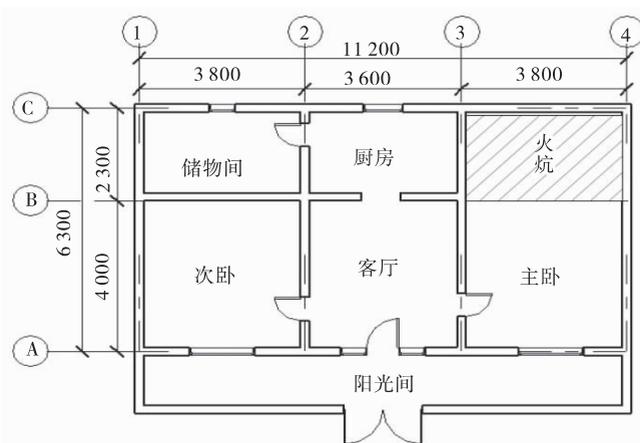
Fig. 2 Solar hot water circulating heating system

在草原民居的坡屋顶上安装太阳能电池板和太阳能集热器,太阳能电池板将太阳能转换为电能储存在蓄电池组中供循环水泵及辅助加热锅炉使用,经集热器加热后的水,通过循环水泵流入储热水箱及恒温水箱后再的再别进入房间内的散热器和水暖炕的盘管进行供暖。散热器和水暖炕的回水通过回水管道进入辅助加热锅炉,经辅助加热锅炉加热后流入恒温水箱,如此循环。控制器对太阳能电池板产生的电能、温度传

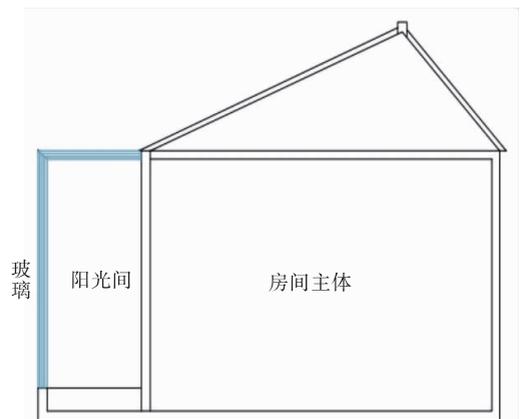
感器、循环水泵、电磁阀、辅助加热锅炉进行调控。

### 1.3 附加被动式阳光间构建与朝向优化

附加被动式阳光间以充分利用太阳辐射为目标,在民居建筑南向的外墙上增加一个主要由玻璃组成的围护结构空间,形成玻璃温室(图 3)。附加被动式阳光间采用 6 mm 高透光 Low-e 玻璃+12 氩气+6 mm 透明玻璃,窗框为多铝合金型材。在冬季,白天阳光充足的时候,太阳辐射的热量储存在阳光间中,通过与



附加被动式阳光间平面图



附加被动式阳光间侧立面图

图 3 附加被动式阳光间系统图

Fig. 3 Additional passive sunbeam system diagram

房屋南向主体围护结构之间的热对流来对房间主体进行加热。

合理的建筑朝向有利于冬季用太阳辐射采暖, 应使建筑南向处于冬季太阳辐射最佳位置。选取建筑朝向为南偏西  $35^{\circ}$ ~南偏东  $35^{\circ}$  的区域, 以  $5^{\circ}$  的变动幅度进行分析。利用 DeST-h 室内热环境模拟软件, 通过变化建筑朝向参数, 得出冬季最冷日室内温度均值 (图 4)。

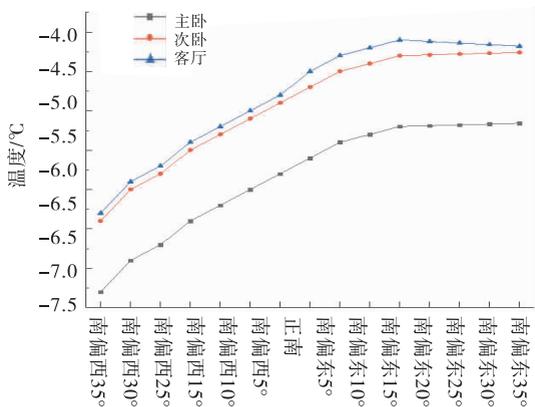


图 4 最冷日民居不同朝向室内温度均值变化曲线

Fig. 4 The average change curve of indoor temperature in different orientations of dwellings in the coldest days

随着建筑朝向从南偏西  $35^{\circ}$  逐渐变化到南偏东  $35^{\circ}$ , 主卧、次卧及客厅的室内温度均值都呈现先稳步增长后趋于稳定或微弱降低的趋势。当建筑朝向为南偏西  $35^{\circ}$  时, 主卧室、次卧室和客厅的温度均值最低, 分别为  $-7.3$ 、 $-6.4$  和  $-6.3$   $^{\circ}\text{C}$ ; 当建筑朝向为南偏东  $15^{\circ}$  时, 客厅的温度均值达到最大, 为  $-4.1$   $^{\circ}\text{C}$ , 主卧室和次卧室的温度均值开始趋于平稳, 此时温度均值分别为  $-5.2$  和  $-4.3$   $^{\circ}\text{C}$ 。分析原因可知, 在建筑朝向逐渐变化到南偏东  $15^{\circ}$  时, 各个房间进入室内的阳光辐射量及强度逐渐增大, 因此在南偏东  $15^{\circ}$  时整个房间温度均值达到最大或开始趋于平稳。所以, 草原民居朝向为南偏东  $15^{\circ}$  时太阳能利用率最高。

#### 1.4 围护结构保温层厚度的优化

增加保温层是北方地区常用的一种保温方式, 它增加了建筑墙体的保温隔热性能, 减少了冬季室内热损失量, 保障了室内热环境的稳定。因此, 在不改变外墙与屋顶材质的基础上, 对外墙和屋顶覆盖市面上常见的聚苯乙烯泡沫板 (EPS 板), 来提高草原民居建筑外墙的保温隔热性能。选取外墙保温层厚度在  $20\sim 220$  mm, 屋顶保温层厚度  $10\sim 150$  mm, 进行相关分析, 并与典型民居无外保温时进行对比。利用 DeST-h

室内热环境模拟软件, 对不同保温层厚度条件下建筑物进行模拟分析, 得出不同外墙保温厚度下最冷日室内温度均值变化曲线 (图 5) 和不同屋顶保温层厚度条件下最冷日室内温度均值变化曲线 (图 6)。

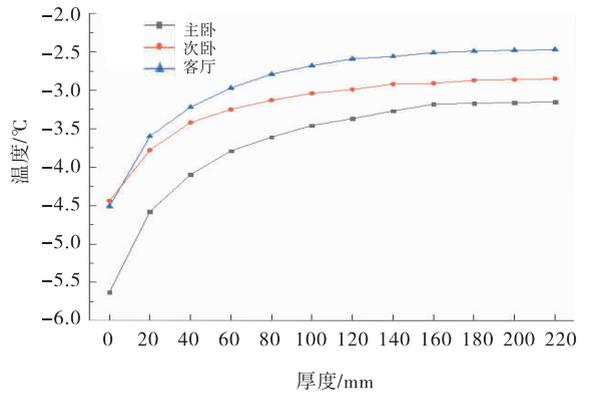


图 5 不同外墙保温厚度下最冷日室内温度均值变化曲线

Fig. 5 The average change curve of indoor temperature on the coldest day under different external wall insulation thickness

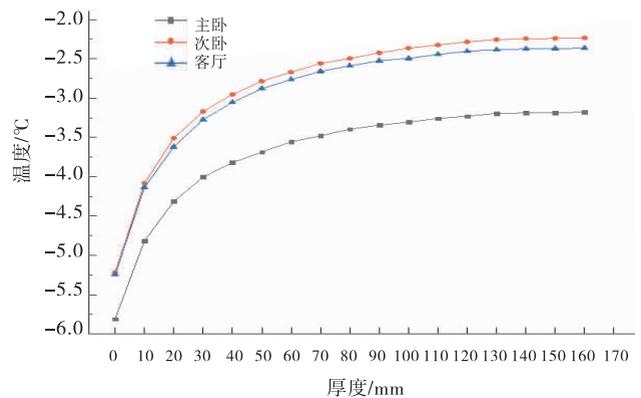


图 6 不同屋顶保温层厚度下最冷日室内温度均值变化曲线

Fig. 6 Average indoor temperature variation curve of the coldest day under different roof insulation thickness

随着外墙保温层厚度增加, 最冷日室内温度均值呈现出先增加后逐渐稳定的趋势 (图 5)。当无外墙保温时, 主卧室、次卧室和客厅房间温度均值最小, 分别为  $-5.63$ 、 $-4.51$  和  $-4.44$   $^{\circ}\text{C}$ 。当保温层厚度增加到  $80$  mm 时, 室内温度提升明显; 当保温层厚度由  $80$  mm 增加到  $160$  mm 时, 室内温度变化逐渐变慢; 当保温层厚度大于  $160$  mm 时, 室内温度开始逐渐趋于平缓, 变化较小。考虑到经济因素, 外墙保温厚度选取  $160$  mm 为宜。屋顶保温层随着厚度的增加, 室内温度均值呈现出先增加后平缓的趋势, 当屋顶无保温层时, 各房间室内温度均值都为最低, 当屋顶保温层厚度

增加到 50 mm 时,由于屋顶传热系数降低,使得室内温度的最大、最小值均得到大幅提升,因此主次卧室及客厅的室内温度均值提升明显,当保温层厚度超过 130 mm 后,室内温度均值逐渐趋于平缓(图 6),说明再增加屋顶保温层厚度已不能取得更好的保温效果。分析原因可能是因为保温层达到一定厚度时,屋顶保温性能提升较慢,通过墙体而散失的热量极少,因此使得温度提升不太明显。因此屋顶保温厚度应该选择 130 mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 能耗与热舒适度分析

利用 Design-Builder 能耗分析软件分别对建立的初始草原民居模型与基于太阳能高效利用的草原民居模型进行能耗分析,根据农牧区冬季采暖标准<sup>[17]</sup>,设置当室内最低温度为 14 °C 的前提下计算草原民居在采暖期室内所需的能耗需求量(图 7)。在冬季最冷月(1 月 1 日—1 月 31 日)的室内平均温度跟平均舒适度对比如图 8 所示。

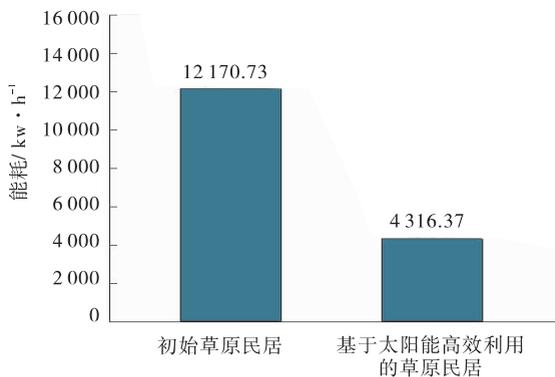


图 7 能耗对比

Fig. 7 Comparison diagram of energy consumption

草原民居初始模型采暖所需能耗为 12 170.73  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,单位面积能耗为 172.48  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,基于太阳能高效利用后的草原民居的采暖能耗为 2 024.37  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,单位面积能耗为 28.69  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,满足超低能耗建筑的标准<sup>[18]</sup>。两者相比,基于太阳能高效利用的草原民居每年减少采暖能耗 10 146.36  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,年采暖能耗降低率为 83.36%。初始草原民居冬季最冷月室内最低温度为 11.08 °C,最高温度为 12.84 °C,平均温度为 12.01 °C,平均 PMV 值为 -1.68,低于《农村牧区居住建筑节能设计标准》中规定冬季室内采暖温度最低值为 14 °C<sup>[17]</sup>,可见,初始的草原民居冬季室

内温度和舒适度不能满足人体热舒适的要求。而基于太阳能高效利用的草原民居室内最高温度可达到 21.27 °C,最低温度为 19.98 °C,平均温度为 20.73 °C,平均 PMV 值为 0.23,室内平均温度提高了 8.72 °C,平均 PMV 值提高了 1.91,满足冬季室内人员采暖与舒适度的要求。

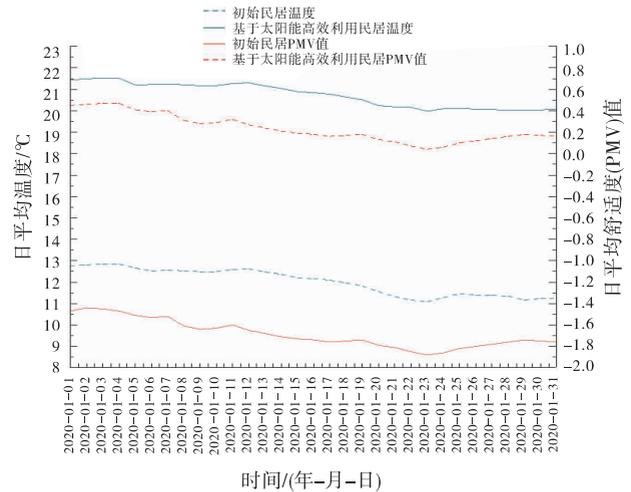


图 8 室内平均温度跟平均舒适度对比

Fig. 8 Diagram of average indoor temperature and average comfort level

### 2.2 基于太阳能高效利用的超低能耗草原民居增量成本分析

相较传统草原民居,基于太阳能高校利用的草原民居在建筑本体的被动式设计和供暖模式改变时,会产生相应的增量成本。但增加相应的增量成本时,也会由于供暖模式与围护结构性能的改善而大幅降低建筑的采暖需求,产生增量效益。因此应该通过计算,得出增量成本和增量效益,为基于太阳能高效利用的草原民居整体构建方案的效益费用比评价提供数据基础。太阳能供暖系统初期增量成本支出为 11 193 元,系统细部构造及成本支出如表 2 所示;围护结构初期增量成本支出为 15 232.38 元,围护结构细部构造及成本支出如表 3 所示;整个基于太阳能高效利用的的草原民居初期增量成本支出为 26 425.38 元。

考虑资金的时间价值,年利率取 6%,利用利用工程经济学的等额系列现金流量公式<sup>[19]</sup>,计算期为 50 年,系统中除了蓄电池组,其他寿命均按 25 年计,将太阳能供暖系统与围护结构初始投资及蓄电池组更换等的支出等额折算到计算周期内,得到整个基于太阳能高效利用的草原民居每年的等效增量成本为 2 066.46 元。

### 2.3 基于太阳能高效利用的超低能耗草原民居增量效益分析

由 2.1 节可知基于太阳能高效利用的草原民居建成后比初始民居每年减少采暖能耗 7 854.36 kw·h, 根据煤电折算标准<sup>[19]</sup>, 通过计算, 年原煤节约量为 2 704.83 kg。根据广材网价格查询可知, 当地普通原煤的综合价格为 0.7 元/kg, 因此, 采暖期增量效益为

1 893.38 元。在非采暖期时, 按照典型气象年的气象条件计算, 太阳能光伏发电板理论发电量为 3 123.85 kw·h, 太阳能热水子系统吸收热量为 3 482.69 kw·h, 二者共计 6 606.54 kw·h。按照当地 0.43 元/(kw·h) 的地方民用电价价格计算, 基于太阳能高效利用的草原民居年增量效益为 2 840.81 元。

表 2 太阳能供暖系统细部构造及成本支出

Table 2 Detail construction and cost expenditure of solar heating system

部件名称	规格型号	价格/元
太阳能集热器	375L 可加热	1 700
太阳能光伏板	250W	2 600
蓄电池组	12V、250A·h	1 780
循环水泵	GPD25-6SN-130	630
散热器	8050 型 10 柱×4	720
循环管网、水暖炕盘管及水箱	PPR、DN32	855
充电控制器	12v/24v(自动识别)	108
辅助加热电锅炉	2000W	2 800

表 3 围护结构构造及成本支出

Table 3 Envelopment structure and cost expenditure

部件名称	材料规格型号	增量工程量/m <sup>2</sup>	综合单价/(元·m <sup>-2</sup> )
外墙保温	160 mm 聚苯乙烯泡沫板	94.02	81.68
阳光间	2.7×1.8 m 中空铝合金窗	33.02	126.23
屋顶保温	120 mm 聚苯乙烯泡沫板	73.92	45.56

### 2.4 基于太阳能高效利用的超低能耗草原民居效益费用比分析

效益费用比是指工程项目或方案在整个财务计算期内, 所取得的各项财务收入的折算现值与各项支出费用折算现值之比, 是经济费用效益分析的辅助评价指标。其计算公式为:

$$R=B/C$$

式中: R 为效益费用比; B 为经济效益; C 为经济费用。

当效益费用比大于 1 时, 表明项目资源配置的经济效率达到了可以接受的水平, 该方案可行; 当效益费用比小于 1 时, 表明项目资源配置的经济效率不可以接受, 该方案不可行。2.3 节计算的基于太阳能高效利用的草原民居年增量成本为 2 066.46 元, 年增量效益为 2 840.81 元。根据公式计算可得, 超低能耗草原

民居的效益费用比为 1.375, 说明经济性满足要求, 方案可以被接受。

## 3 讨论

由于初始草原民居围护结构较差且采用传统的供暖模式, 因此在冬季大量燃烧石化能源, 造成 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等有害物质的过度排放, 使整个内蒙古西部地区环境遭到了严重的污染。根据煤电折算标准, 基于太阳能高效利用的草原民居整个采暖季比初始草原民居节约原煤大约为 3.8 吨。据统计我国工业锅炉每燃烧 1 吨煤大约产生 2 620 kg 的 CO<sub>2</sub>, 8.5 kg 的 SO<sub>2</sub>, 7.4 kg 的氮氧化物, 5.5 kg 的烟尘<sup>[20-21]</sup>。因此, 超低能耗草原民居在整个采暖季可减少污染物 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、氮氧化物、烟尘的排放量分别为 9 956、32.3、28.12、20.9 kg。由此可知, 超低能耗草原民居大大减少了有害物

质的排放,对推进我国农牧区的绿色发展具有重要的意义。

## 4 结论

本研究以典型的初始草原民居为研究对象,以太阳能高效利用为目标,先构建太阳能供暖系统,在构建的太阳能供暖系统的基础上对围护结构进行优化,最终构建超低能耗草原民居,并对基于太阳能高效利用的超低能耗草原民居进行数值模拟及综合评价,得到以下结论:

(1)超低能耗草原民居在供暖方面可利用太阳能电池板与太阳能集热器构建供暖系统来减少室内采暖能耗,民居建筑本体最佳朝向为南偏东 $15^{\circ}$ ,外墙保温层最佳厚度为160 mm(聚苯乙烯泡沫板),屋顶最佳保温层厚度为130 mm(聚苯乙烯泡沫板)。

(2)超低能耗草原民居相比传统草原民居采暖期能耗减少 $10\ 146.36\ \text{kw}\cdot\text{h}$ ,能耗降低率为83.36%;冬季最冷月室内平均温度提高了 $8.72\ ^{\circ}\text{C}$ ,平均PMV值提高了1.91;整个采暖季减少污染物 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、氮氧化物、烟尘的排放量分别为9 956、32.3、28.12、20.9 kg,满足冬季室内人员采暖与舒适度要求的同时推动了农牧区民居的绿色发展。

(3)超低能耗草原民居初期增量成本为2 6425.38元,年等效增量成本为2 066.46元,年增量收益为4 869.84元,效益费用比为1.375,满足经济性的要求。内蒙古西部超低能耗草原民居的构建为今后该地区超低能耗住宅的构建及太阳能的高效利用提供了参考。

### 参考文献:

[1] ASCIONE F, BORRELLI M, DEMASI R F, *et al.* Hourly Operational Assessment of HVAC Systems in Mediterranean Nearly Zero-Energy Buildings; Experimental Evaluation of the Potential of Ground Cooling of Ventilation Air [J]. *Renewable Energy*, 2020, 3: 1-68.

[2] LI J, XU W, CUI P, *et al.* Research on a Systematical Design Method for Nearly Zero-Energy Buildings [J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 7032-7049.

[3] WANG Z, XUE Q, JI Y, *et al.* Indoor environment quality in a low-energy residential building in winter in Harbin [J]. *Building and Environment*, 2018, 135: 194-201.

[4] HUANG P, HUANG G S, SUN Y J. Uncertainty-based Life-cycle Analysis of Near-zero Energy Buildings for Performance Improvements [J]. *Building Energy Efficiency*, 2018, 213(3): 486-498.

[5] 张宏, 汤奕, 陈雨蒙, 等. 农村用超低能耗装配式建筑设计实践 [J]. *供用电*, 2020, 37(8): 28-33.

[6] 潘黎, 赵德印, 徐强. 上海超低能耗办公建筑围护结构技术研究与实践 [J]. *暖通空调*, 2020, 50(7): 91-96.

[7] 曹森. 被动式超低能耗导向的一般性公共建筑设计整合优化 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.

[8] 郭钊. 郑州地区超低能耗居住建筑节能设计研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.

[9] 崔宝霞, 陈小娟, 金国辉. 内蒙古河套地区建筑外窗的节能分析 [J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(1): 84-90.

[10] 牛艳. 昆明地区利用散热器的太阳能供暖特性分析 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.

[11] 宣庆东. 基于建筑集成的聚光太阳能光伏一照明综合利用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

[12] 杨坤. 拉萨市多层住宅优先利用太阳能的建筑设计模式研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.

[13] 陶进, 王杨洋, 任楠楠. 吉林城建学院超低能耗建筑示范项目研究 [J]. *建筑科学*, 2017, 33(6): 8-14.

[14] 王杨洋, 刘水滴, 李盈, 等. 严寒地区超低能耗建筑太阳能-地热能联合供能系统运行工况测试分析 [J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2018, 27(2): 29-31.

[15] 蒋婧, 刘艳峰, 王登甲, 等. 太阳能采暖有效保证率分析 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 580-585.

[16] 王盼盼. 寒冷地区被动式超低能耗居住建筑围护结构节能设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[17] 国家市场监督管理总局. 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[18] 内蒙古自治区住房和城乡建设厅. 农村牧区居住建筑节能设计标准: DBJ 03-78-2017 [S]. 北京: 中国建设工业出版社, 2017.

[19] 国家市场监督管理总局. 综合能耗计算通则: GB/T 2589-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[20] 金国辉, 梁娜飞, 王波, 等. 内蒙古西部草原民居太阳能和风能与火炕智能联合供暖模式 [J]. *草原与草坪*, 2020, 40(1): 100-110.

[21] 袁宏伟. 攀钢钒炼钢厂可持续发展战略实践与规划研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

# The construction of ultra-low energy consumption grassland dwelling houses in western Inner Mongolia based on solar energy efficient utilization

JIN Guo-hui<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. State Key Laboratory of Green Buildings in the West, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710043, China; 3. Lanzhou Branch of Northwest Company of China Construction Third Engineering Bureau, Lanzhou 730000)

**Abstract:** Currently the palisade structure of the grassland dwelling houses in the western region of Inner Mongolia performs poorly, including high energy consumption and poor indoor thermal environment which causes severe pollution problems. To make efficient use of solar energy to effectively solve these problems, this research based on the efficient utilization of solar energy to build local-style grassland dwelling houses for western Inner Mongolia with ultra-low power consumption. This can be achieved using the abundant solar energy resources, combined with the traditional fire brick beds, heating system of hot water circulation with solar energy, the residential orientation, optimisation of insulation layer of external wall and roof insulation layer. through numerical simulation and comprehensive evaluation. The results showed that compared with the traditional residential houses, the energy consumption of ultra-low-energy grassland residential houses was reduced by 10 146.36 kw · h, and the energy consumption reduction rate was 83.36%, a significantly reduction in the energy consumption. The average indoor temperature in heating period increased by 8.72 °C, the PMV value increased by 1.91, with a great improvement in the indoor thermal comfort. The incremental benefit cost ratio was 1.375, which increased the economic benefits. The emissions of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, nox and soot were reduced by 9,956, 32.3, 28.12 and 20.9 kg during the entire heating period. The new ultra-low-energy design would effectively promote the green development of farming and pastoral areas.

**Key words:** Solar energy; Ultra-low energy consumption; Grassland dwelling houses; Heating system; Comprehensive evaluation of