



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403464

引用格式: 金国辉, 史雅婕, 史智婕, 等. 基于随机森林算法的内蒙古西部绿色低碳农宅灰色模糊综合评价[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(8): 3340-3348.

Jin Guohui, Shi Yajie, Shi Zhijie, et al. Grey fuzzy comprehensive evaluation of green and low-carbon farmhouses in western Inner Mongolia based on random forest algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3340-3348.

建筑科学

## 基于随机森林算法的内蒙古西部绿色低碳农宅灰色模糊综合评价

金国辉<sup>1,2</sup>, 史雅婕<sup>1,2\*</sup>, 史智婕<sup>3</sup>, 张凯歌<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心, 包头 014010; 3. 辽宁师范大学计算机与人工智能学院, 大连 116000)

**摘要** 为推进内蒙古西部农村地区绿色低碳高质量发展, 结合走访调查、文献收集的数据, 通过 DeST 和 Trnsys 软件联合模拟农宅能耗, 进行单因素分析, 利用正交试验法获得多组方案, 采用基于随机森林算法的灰色模糊综合评价法对围护结构、采暖系统等方面进行综合优化研究, 选出最适合内蒙古西部的绿色低碳农宅方案。结果表明: 内蒙古西部绿色低碳农宅最优方案具体为: 建筑朝向坐北朝南、层高 3.4 m、地面为 20 mm 聚苯乙烯挤塑保温板(XPS)瓷砖地面、屋面为 120 mm 膨胀型聚苯乙烯泡沫保温板(EPS)倒置式混凝土砌块屋面、外墙为 160 mm 聚苯乙烯挤塑保温板(XPS)外墙外保温混凝土砌块墙、外窗为 6C+12Ar+6C 的 6 mm 双层普通玻璃惰性气体塑钢窗、南向窗墙比 0.5、北向窗墙比 0.5、阳光间进深 1.2 m、阳光间材质为 6C+12Ar+6C 的 6 mm 双层惰性气体普通玻璃+塑钢窗框+保温窗帘、风能发电效率 45%。最优方案的采暖能耗为 2 661.15 kW·h, 室内最冷日平均温度为 11.62 °C, 碳排放减少量为 10.02 t/a, 太阳能得热量为 67 702.75 kW, 净现值 >0, 经济性良好, 在内蒙古西部农村地区具有一定的推广性, 为内蒙古西部农宅绿色低碳转型提供了发展方向。

**关键词** 绿色低碳农宅; DeST 和 Trnsys; 随机森林算法; 灰色模糊综合评价; 绿色低碳转型

中图分类号 TU241.4;

文献标志码 A

### Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation of Green and Low-carbon Farmhouses in Western Inner Mongolia Based on Random Forest Algorithm

JIN Guo-hui<sup>1,2</sup>, SHI Ya-jie<sup>1,2\*</sup>, SHI Zhi-jie<sup>3</sup>, ZHANG Kai-ge<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Intelligent Construction and Operation Engineering Research Center at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

3. School of Computer and Artificial Intelligence, Liaoning Normal University, Dalian 116000, China)

**[Abstract]** In order to promote the green, low-carbon and high-quality development of rural areas in western Inner Mongolia, the data collected from the survey and literature was combined, the energy consumption of farmhouses was jointly simulated through DeST and Trnsys software, single factor analysis was carried out, the orthogonal test method was used to obtain multiple schemes, and the gray fuzzy comprehensive evaluation method based on random forest algorithm was used to comprehensively optimize the enclosure structure and heating system, and selected the most suitable green and low-carbon farmhouse scheme in western Inner Mongolia. The results show that the optimal scheme of green and low-carbon farmhouses in western Inner Mongolia is as follows: the building is facing north and south, the floor height is 3.4 m, the ground is 20 mm polystyrene extruded polystyrene board(XPS) thermal insulation tile floor, the roof is 120 mm expanded polystyrene foam board(EPS) insulation board inverted concrete block roof, the external wall is 160 mm polystyrene extruded polystyrene board(XPS) insulation board external insulation concrete block wall, the external window is

收稿日期: 2024-05-10; 修订日期: 2024-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51768053); 内蒙古自然科学基金(2019MS05007, 2022MS05005)

第一作者: 金国辉(1965—), 男, 汉族, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士, 教授。研究方向: 建筑节能与绿色建筑。E-mail: jinguohuimba@163.com。

\* 通信作者: 史雅婕(1994—), 女, 汉族, 河北张家口人, 硕士研究生。研究方向: 建筑节能与绿色建筑。E-mail: 2357135094@qq.com。

6C + 12Ar + 6C 6 mm double-layer ordinary glass inert gas plastic steel window, the south-facing window-to-wall ratio is 0.5, the north-facing window-to-wall ratio is 0.5, and the sunlight depth is 1.2 m. The material of the sunshine room is 6C + 12Ar + 6C 6 mm double-layer inert gas ordinary glass + plastic steel window frame + thermal insulation curtains, and the wind power generation efficiency is 45%. The heating energy consumption of the optimal scheme is 2 661.15 kW·h, the average indoor temperature on the coldest day is 11.62 °C, the carbon emission reduction is 10.02 t/a, the solar heat gain is 67 702.75 kW, and the net present value > 0, which is economical and has a certain degree of popularization in the rural areas of western Inner Mongolia, providing a development direction for the green and low-carbon transformation of rural houses in western Inner Mongolia.

[**Keywords**] green and low-carbon farmhouses; DeST and Trnsys; random forest algorithm; gray fuzzy comprehensive evaluation; green and low-carbon transformation

建筑业是中国高能耗、高碳排放的行业之一,2022年,中国建筑业相关能耗占全社会总能耗的37%;建筑运行能耗高达 $11.1 \times 10^8$  tce,约占全国总能耗的21%;产生的与化石能源消耗相关碳排放为 $22 \times 10^8$  t,占全国碳排放总量的22%<sup>[1]</sup>。随着乡村振兴战略的不断开展,农村地区经济水平不断提高,同时中国农村占地面积巨大,新建农宅数量也在不断扩大。但由于农宅建造水平较城镇地区相对落后,导致大部分农宅建筑施工质量不高,室内热环境未达到良好效果,从而使得能源消耗量居高不下。

Lü等<sup>[2]</sup>、金国辉等<sup>[3]</sup>提出了利用相变材料对围护结构、采暖系统等与农宅采暖有关的部分进行优化。李洁等<sup>[4]</sup>、金国辉等<sup>[5]</sup>通过改造围护结构、增加阳光间等措施,提高农宅的可再生能源利用率,改善农宅室内舒适度。朱轶韵等<sup>[6]</sup>、高源等<sup>[7]</sup>通过一系列的软件模拟和多目标优化设计,找出了符合研究地区实际情况的农宅节能方案。陈平等<sup>[8]</sup>、李勤等<sup>[9]</sup>通过对人工神经网络、K-means聚类、熵权-TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)等方法的应用与分析,为农宅节能降碳方案高维多目标权衡提供参考。张森林等<sup>[10]</sup>从建筑设计、建筑室内环境和场地生态与室外物理环境3个全新的角度建立农宅绿色舒适度评价体系,为庭院式农宅的设计与改造提供优化方向。

综上所述,现有研究大多是对农宅建筑围护结构或者采暖系统单方面进行研究,或者对既有农宅进行部分改造,未考虑多因素的耦合影响,且对农宅的研究很少与机器学习等人工智能方法结合,使得农宅多因素方案组合的复杂问题的研究没有很好的进展。因此,进行基于随机森林算法的内蒙古西部绿色低碳农宅灰色模糊综合评价研究具有重要意义。

运用随机森林算法代替灰色模糊综合评价法中常用的层次分析法、专家打分法等主观的权重算法,可更加客观准确的计算出指标的权重;运用灰色关联度法计算隶属度矩阵,在模糊环境下考虑多

个因素耦合,对某一事物做出全面的评价,为内蒙古西部农宅的绿色低碳转型研究提供一种新思路。对内蒙古西部绿色低碳农宅方案的构建,考虑农宅本身空间和围护结构的绿色低碳设计的同时,也考虑增设风能和被动式太阳能等可再生能源联合采暖系统,可为提升该地区农宅的可再生能源利用率提供研究方向。

## 1 研究方法

提出一种基于随机森林算法的内蒙古西部绿色低碳农宅灰色模糊综合评价方法。该方法以内蒙古西部农宅为研究对象,从当地实际情况出发,使用DeST-h与Trnsys软件相结合构造农宅基准模型,进行单因素分析得到对方案影响较大的几个因素,运用正交试验法得出围护结构、采暖系统、可再生能源利用等多方面因素组成的多组绿色低碳农宅方案,利用随机森林原理计算指标权重,应用灰色模糊综合评价法建立评价模型对多组试验进行综合评分,从而确定适用于内蒙古西部农村地区的最佳方案,整体流程如图1所示。

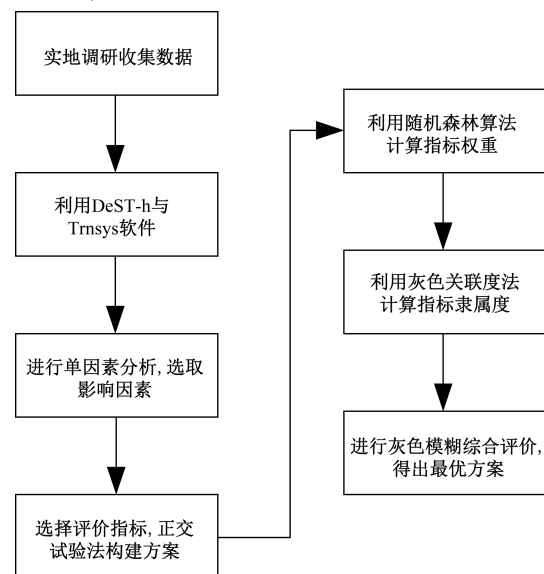


图1 综合评价方法整体流程图

Fig. 1 Overall flow chart of the comprehensive evaluation method

## 2 内蒙古西部农宅与可再生能源采暖系统构建

### 2.1 内蒙古西部农宅基准模型构建

选取包头市周围村庄作为研究地区,达尔罕联合旗气象参数作为主要气候参数来源,根据走访调研及查阅文献收集相关数据构建农宅基准模型,具体为坐北朝南,层高 3.3 m,长 15.4 m,宽 7.2 m,建筑面积为 110.88 m<sup>2</sup>。室内布局符合当地居民的生活方式且尽量多的利用被动式太阳能,但无阳光间与风能发电系统的设置,具体图形如图 2 所示。使用 DeST-h 软件对农宅基准模型进行数值模拟。根据当地现存农宅相关数据对农宅基准模型围护结构及供暖系统进行设置,具体参数设置如表 1 所示。

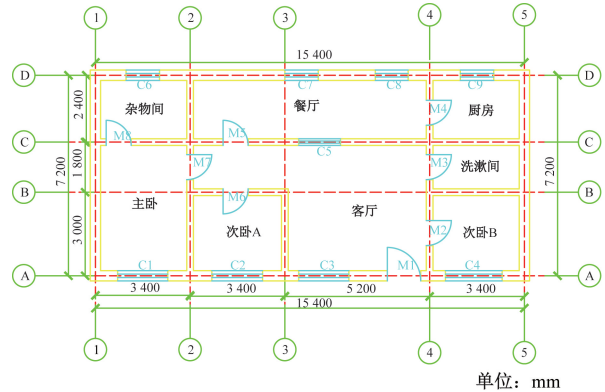
模拟结果如表 2 所示,基准模型整个供暖期所需能耗为 24 706.28 kW·h,全年累计热负荷指标为 240.52 kW·h/m<sup>2</sup>,能耗较高;室内最冷日平均温度为 -5.28 ℃,处于零下。因此,内蒙古西部现存农宅在节能减排方面存在较大不足,其绿色低碳转型之路还很漫长。且使用 testo 175 H1 温湿度记录仪,在最冷日(1月13日)进行实地农宅 24 h 不间断温度测试,误差率为 4.21% (<5%)<sup>[10]</sup>,在合理范围之内,所以模型的参数设置具有科学性。

### 2.2 可再生能源供暖系统构建

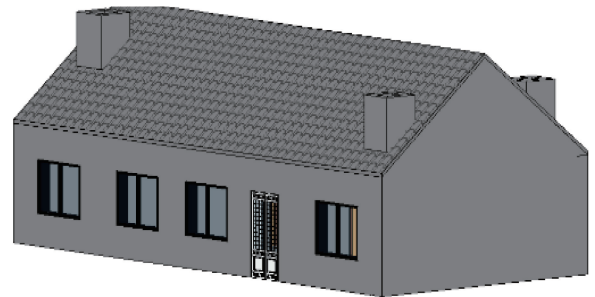
通过附加阳光间、风能发电系统的构建,对农宅采暖系统进行优化,探究如何有效降低农宅采暖能耗、改善室内舒适度、提高可再生能源利用率,进而有效促进内蒙古西部农宅的绿色低碳发展。

### 2.2.1 附加阳光间构建

在农宅基准模型南侧外墙处增设凸出式附加阳光间,按照《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)规定,对附加阳光间进行参数设定<sup>[11]</sup>,具体为单层通高、平屋顶形式,进深为 1.4 m、东西南三立面的窗墙比均为 1.0、透明围护结构为



(a) 农宅基准模型平面图



(b) 农宅基准模型三维图

C1 ~ C9 为窗户的编号;M1 ~ M8 为门的编号  
图 2 农宅基准模型图形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the benchmark model of farmhouses

表 1 农宅基准模型围护结构参数设置

Table 1 Parameters of the envelope structure of the rural house benchmark model

序号	围护结构类型	部位	构造方式	尺寸/ (mm × mm)	传热系数/ (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	超低能耗建筑标准值/ (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
1	外墙	全部	20 mm 砂浆抹面 + 370 mm 普通烧结砖 + 20 mm 砂浆抹面	—	1.357	0.10 ~ 0.15
2	外门	全部	钢质防盗门	1 200 × 2 400	2.110	≤ 1.20
3	外窗	北侧	普通双层塑钢窗(6 + 9A + 6,距地 900 mm)	1 200 × 1 500	3.100	≤ 1.00
		南侧	普通双层塑钢窗(6 + 9A + 6,距地 900 mm)	1 800 × 1 500	3.100	≤ 1.00
5	内墙	全部	10 mm 砂浆抹面 + 240 mm 普通烧结砖 + 10 mm 砂浆抹面	—	1.669	0.10 ~ 0.15
6	内门	全部	单层木门	900 × 2 100	5.700	≤ 1.30
7	内窗	全部	普通双层塑钢窗(6 + 9A + 6,距地 900 mm)	1 500 × 1 500	3.100	≤ 1.00
8	屋顶	全部	30 mm 石棉瓦 + 30 mm 水泥砂浆 + 25 mm 水泥石棉板	—	2.231	0.10 ~ 0.15
9	地面	全部	20 mm 水泥砂浆找平层 + 40 mm 素混凝土垫层	—	3.432	0.15 ~ 0.30

表 2 农宅基准模型模拟计算结果汇总

Table 2 Summary of the simulation results of the benchmark model of rural houses

项目名称	相关面积		建筑热负荷统计		建筑单位面积负荷指标		
	建筑面积/ m <sup>2</sup>	建筑采暖 面积/m <sup>2</sup>	全年最大热 负荷/kW	全年累计热 负荷/(kW·h)	全年最大热负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	全年累计热负荷 指标/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	采暖期热负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )
数量	110.88	102.72	34.44	24 706.28	335.29	240.52	54.76

6 mm 单层普通玻璃与塑钢窗框,且在阳光间玻璃上增设保温窗帘,维持室内温度的相对稳定,阳光间平面图如图 3 所示。

对增设阳光间的农宅模型进行模拟,得到的全年累计总能耗为 19 642.62 kW·h,最冷日平均室内温度为 -2.89 ℃,都明显优于农宅基准模型,被动式太阳能得到充分的利用。

### 2.2.2 风能发电系统构建

选用 1.5 kW 家用小型水平轴升力型风力发电机组,利用串联 4 组免维护胶体蓄电池储蓄电量,每个电池的充电效率为 0.9、总电压为 48 V。选择的逆变器额定输出功率为 15 kW,逆变效率为 0.96,电压为 48 V。电散热器的具体分布位置在 3 个卧室各 1 组、客厅 1 组,共 4 组。

利用 DeST-h 软件对农宅基准模型进行数值模拟,以计算出的全年逐时建筑热负荷为基础,在 Trnsys 软件平台上完成风能发电系统的容量配置,形成风能发电采暖系统模型<sup>[12]</sup>,具体的系统示意图如图 4 所示。模拟出该系统发电量为 6 392.67 kW·h,节能率为 25.87%。

## 3 内蒙古西部绿色低碳农宅方案构建

### 3.1 单因素分析

构建内蒙古西部绿色低碳农宅方案,首先要对影响农宅能耗和舒适性的各个因素进行分析。

#### 3.1.1 建筑朝向

通过对《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中包头市典型气象年数据分析,使用 Weather

Tool 工具分析,内蒙古西部农宅最佳建筑朝向的范围在南偏西 30°~南偏东 30°。

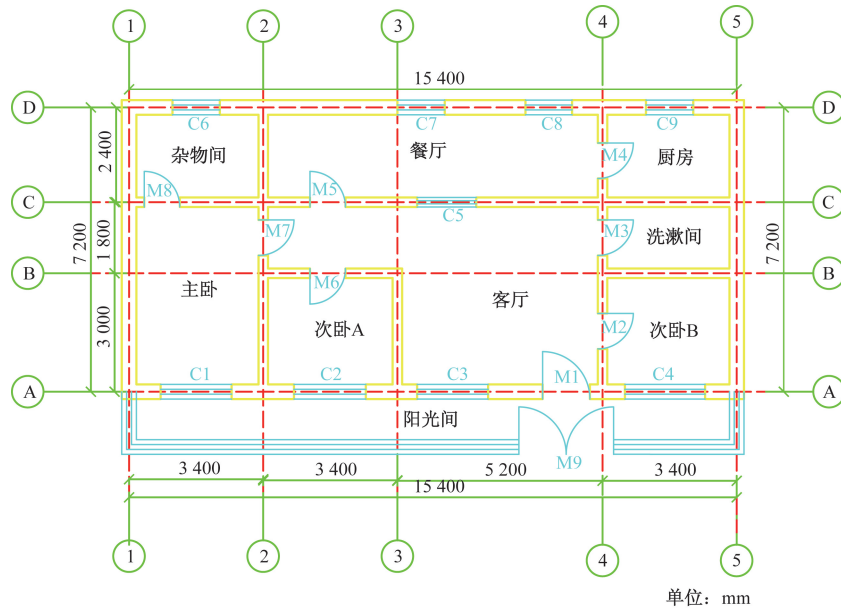
#### 3.1.2 建筑层高

体形系数越大,建筑外表面积就越大,散热面就越大,对建筑的保温隔热不利,增加建筑能耗,所以建筑层高的变化直接影响建筑能耗的变化。内蒙古西部地区农宅的建设要想向绿色低碳转型,新建时就应该考虑较小体形系数的建设方法。可以新建联排农宅以减少外墙面积,同时更要注意层高不能太高,从而从农宅本体改善上降低建筑采暖能耗,提高室内舒适度。且经过实地调研和查阅相关标准及文献,现存内蒙古西部农宅层高大都在 2.8~4.0 m。

#### 3.1.3 保温材料

根据内蒙古西部农宅的调研,内蒙古西部农宅多为含闷顶坡屋顶+倒置式屋面的形式。依据在当地市场收集到的数据和《农村单体居住建筑节能设计标准》(CECS 332:2012)中推荐的居住建筑屋面保温材料,得出复合硅酸盐保温砂浆、憎水珍珠岩板、木屑板、膨胀型聚苯乙烯泡沫塑料保温板、挤塑型聚苯乙烯泡沫塑料保温板 5 种屋面保温材料,厚度范围在 20~120 mm,为最值得讨论的内蒙古西部绿色低碳农宅屋面保温材料。

根据《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)规定,内蒙古包头市属于严寒地区,外墙外保温是首选的外墙保温形式,且对保温材料的性能要求严格。同时考虑到当地农户经济条件有限和材料易得性,得到聚氨酯泡沫塑料(PUR)、



C1 ~ C9 为窗户的编号;M1 ~ M8 为门的编号

图 3 阳光间模型平面图

Fig. 3 Floor plan of the model of the sunshine room

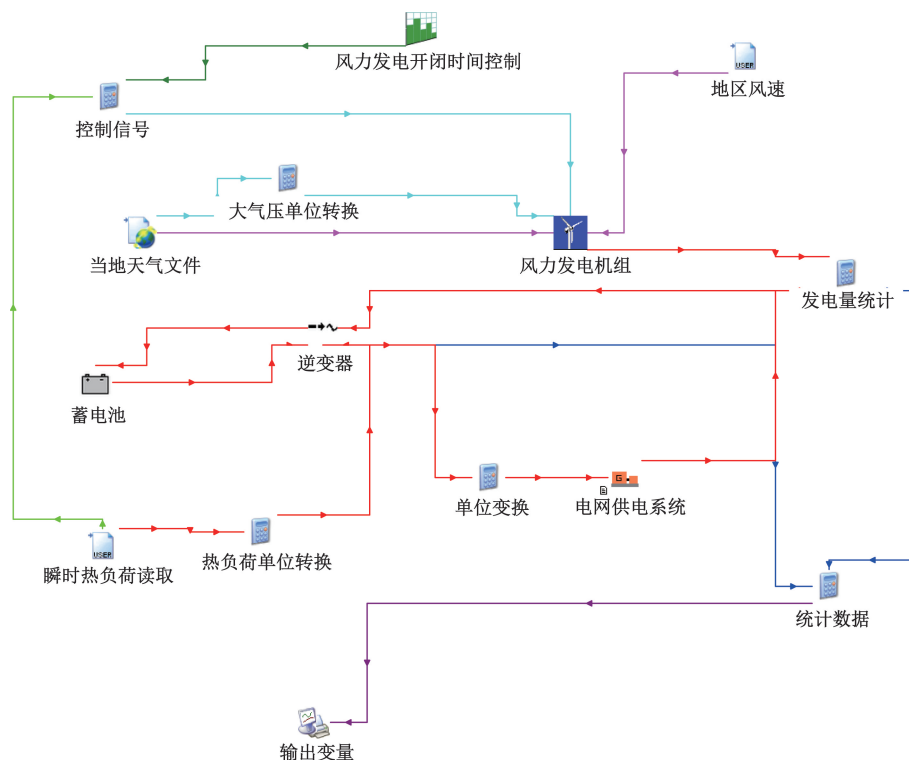


图4 Trnsys 风能发电采暖效果图

Fig. 4 Diagram of Trnsys wind-powered heating system

聚苯乙烯挤塑板(XPS)、膨胀型聚苯乙烯泡沫板(EPS)、保温岩棉板和无机保温砂浆共5种当地易得的保温材料,厚度在80~200 mm,为最值得讨论的内蒙古西部绿色低碳农宅墙面保温材料。

#### 3.1.4 玻璃类型

在内蒙古西部地区,通常情况下外门窗占农宅围护结构总表面积约15%,但通过外门窗损失的能耗占总能耗的50%以上。而外窗最耗能的部分是玻璃,选择适宜研究地区的玻璃类型是抵御冬季室外寒冷气候、降低农宅能耗、解决农宅整体节能问题的关键环节。在增加了附加阳光间后,阳光间的保温性能与其玻璃类型也是息息相关的。

经过在当地走访调研和相关标准查阅,得出符合内蒙古西部农宅节能保温且常用的14种玻璃类型,分别为6C、6L、6C+9A+6C、6C+12A+6C、6C+9Ar+6C、6C+12Ar+6C、6L+9A+6C、6L+12A+6C、6L+9Ar+6C、6L+12Ar+6C、6C+12A+6C+12A+6C、6C+12Ar+6C+12Ar+6C、6L+12A+6C+12A+6C、6L+12Ar+6C+12Ar+6C,其中,C为普通玻璃,L为Low-E玻璃,A为空气夹层,Ar为氩气夹层,6、9、12均表示厚度。

#### 3.1.5 窗墙比

内蒙古西部地区太阳能丰富,外窗是农宅室内获得太阳辐射、进行自然采光的主要构件,建筑能耗和室内温度会随着外窗窗墙比的变化而有所改

变,而外窗是围护结构中保温隔热能力最差的,因此窗墙比是内蒙古西部地区农宅需要着重控制的指标。

根据《严寒与寒冷地区农村住宅节能技术导则》对严寒地区农宅不同朝向窗墙比的规定,以及当地农宅建筑朝向等的影响可以分析出南北向窗墙比增大对降低冬季采暖能耗、改善室内热舒适度以及提高经济性更有利。因此选择对南北向窗墙比在0.2~0.8的变化影响进行讨论。

#### 3.1.6 可再生能源联合供暖系统

按照《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)规定,阳光间进深宜等于或小于1.5 m,又考虑到农宅居住者需要利用阳光间进行休息、晾衣以及储藏等活动,所以对0.9~1.5 m的阳光间进深进行讨论。并且标准中建议阳光间玻璃不宜直接落地,以免加大热损失,建议高出地面0.3~0.5 m,因此,窗墙比为0.9时的阳光间最为适宜。

风能发电系统发电效率越高,发电量越多,农宅采暖期能耗就越小。但根据贝兹理论:理想情况下风能所能转换成电能的极限值比值为16/27,约为59.3%。因此,实际上风能发电的效率远远不能达到60%,一般的发电效率在30%~50%,且不会经常达到50%,因此风能发电采暖系统的发电效率为30%~45%是最适宜讨论的状态。

表3 正交试验选取因素与水平汇总  
Table 3 Summary of factors and levels of orthogonal experiments

因素	水平						
	1	2	3	4	5	6	7
建筑朝向/(°)	-30	-20	-10	0	10	20	30
建筑层高/m	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
屋面保温类型及厚度	120 mm 木屑板	80 mm EPS 板	100 mm EPS 板	120 mm EPS 板	80 mm XPS 板	100 mm XPS 板	120 mm XPS 板
外墙保温类型及厚度	160 mm PUR 板	180 mm PUR 板	200 mm PUR 板	160 mm XPS 板	180 mm XPS 板	200 mm XPS 板	160 mm EPS 板
外窗玻璃类型	6C+9A+6C	6C+12A+6C	6C+9Ar+6C	6C+12Ar+6C	6L+9A+6C	6L+12A+6C	6L+9Ar+6C
建筑南向窗墙比	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
建筑北向窗墙比	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
阳光间玻璃类型	6C	6L	6C+12A+6C	6C+12Ar+6C	6L+12A+6C	6L+12Ar+6C	6C+12A+6C+12A+6C
阳光间进深/m	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
风能发电效率/%	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	42.5	45.0

注:建筑朝向中 0° 为正南向,负值为南偏西,正值为南偏东;玻璃类型中,C 为普通玻璃,L 为 Low-E 玻璃,A 为空气夹层,Ar 为氩气夹层。

### 3.2 正交试验法构建绿色低碳农宅方案

通过实地走访调研、阅读相关文献、查阅相关标准以及询问有关专家等方式收集相关数据,选取建筑朝向、建筑层高、屋面保温材料及厚度、外墙保温材料及厚度、外窗玻璃类型、南向窗墙比、北向窗墙比、阳光间玻璃类型、阳光间进深、风能发电效率 10 个因素,每个因素 7 个水平,利用正交试验原理<sup>[13]</sup>得出 83 个具体方案,其中地面改为 20 mm 厚 XPS 保温瓷砖地面,外墙结构材料改为混凝土砌块,屋面结构材料改为混凝土砌块坡屋面,阳光间玻璃窗墙比为 0.9,但这些因素不在本研究因素变量的讨论范围内,软件模拟时保持其改后不变即可,正交试验选取的因素与水平如表 3 所示。

### 3.3 基于随机森林的灰色模糊综合评价

选择农宅采暖能耗、最冷日室内平均气温、净现值(net present value, NPV)、太阳能得热量和碳排放减少量 5 个指标作为方案的目标变量,结合 2.2 节 10 个因素变量,利用基于随机森林算法的灰色模糊综合评价在 83 个综合方案中选出最优。其中,农宅采暖能耗、最冷日室内平均气温、太阳能得热量 3 个目标变量由 DeST-h 和 Trnsys 软件联合模拟得出;NPV 利用式(1)计算;对于标准煤,常规能源 CO<sub>2</sub> 每年减少排放量通过式(2)计算。

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CO - CI)(1 + i)^{-t} \quad (1)$$

式(1)中:NPV 为净现值,元;CI 为年节约费用,元;CO 为初始投资费用,元;*i* 为社会折现率,%;*t* 为使用年限,年。

取电价为 0.6 元/kW·h,社会折现率为 10%,使用年限为 25 年。

$$m_{CO_2} = \frac{Q_A}{Q_N \eta} f_{CO_2} \quad (2)$$

式(2)中:*m*<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为二氧化碳排放减排量, t;*Q*<sub>A</sub> 为节省

的热量, MJ;*Q*<sub>N</sub> 为标准煤的热值,取 29.308 MJ/kg;*η* 为燃煤锅炉利用率,取值 0.77;*f*<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为二氧化碳排放因子,依照煤炭排放标准取值 2.85<sup>[14]</sup>。

利用随机森林算法<sup>[15]</sup>得出 10 个因素变量在 5 个目标变量作用下的特征权重如表 4 所示,最终得出建筑朝向、建筑层高、屋面保温材料及厚度、外墙保温材料及厚度、外窗玻璃类型、南向窗墙比、北向窗墙比、阳光间玻璃类型、阳光间进深、风能发电效率的综合权重依次为 0.041 4、0.216 6、0.033 4、0.036 8、0.023 2、0.031 6、0.125 8、0.2182、0.054 6、0.218 4。

运用灰色关联度法<sup>[16]</sup>计算出 83 组综合方案对于 10 个因素变量的关联系数,如图 5 所示。将关联系数作为隶属度矩阵,与综合权重向量合成灰色模糊综合评价矩阵 *B*,可表示为

$$B = (0.52, 0.49, 0.55, 0.59, 0.44, 0.50, 0.59, 0.47, 0.51, 0.54, 0.46, 0.45, 0.52, 0.53, 0.50, 0.57, 0.50, 0.47, 0.51, 0.46, 0.49, 0.52, 0.66, 0.54, 0.47, 0.53, 0.63, 0.47, 0.51, 0.42, 0.60, 0.44, 0.58, 0.52, 0.52, 0.44, 0.56, 0.45, 0.65, 0.45, 0.78, 0.55, 0.51, 0.60, 0.48, 0.50, 0.48, 0.43, 0.59, 0.52, 0.50, 0.44, 0.47, 0.60, 0.43, 0.60, 0.50, 0.52, 0.39, 0.61, 0.55, 0.48, 0.54, 0.48, 0.42, 0.65, 0.56, 0.45, 0.66, 0.48, 0.52, 0.55, 0.59, 0.55, 0.58, 0.59, 0.52, 0.61, 0.00, 0.42, 0.52, 0.41, 0.53) \quad (3)$$

根据最大隶属度原则<sup>[17]</sup>选出方案 41 为最优方案,其隶属度得分最高为 0.78,远远大于其他方案。具体为建筑朝向为坐北朝南;层高中 3.4 m;地面为 20 mm XPS 保温瓷砖地面;屋面为 120 mm EPS 保温板倒置式混凝土砌块屋面;外墙为 160 mm XPS 保温板外墙外保温混凝土砌块墙;外窗材质为 6C +

表4 内蒙古西部农宅方案因素变量权重计算

Table 4 Calculation of the weights of factor variables in the western part of Inner Mongolia

目标变量	因素变量									
	A(建筑朝向)	B(建筑层高)	C(屋面保温材料及厚度)	D(外墙保温材料及厚度)	E(外窗玻璃类型)	F(南向窗墙比)	G(北向窗墙比)	H(阳光间玻璃类型)	I(阳光间进深)	J(风能发电效率)
农宅采暖能耗	0.026 0	0.061 0	0.032 0	0.028 0	0.025 0	0.025 0	0.157 0	0.163 0	0.037 0	0.445 0
最冷日室内平均气温	0.052 0	0.037 0	0.025 0	0.019 0	0.017 0	0.050 0	0.114 0	0.619 0	0.027 0	0.041 0
NPV	0.037 0	0.460 0	0.039 0	0.079 0	0.029 0	0.031 0	0.088 0	0.048 0	0.059 0	0.130 0
太阳能得热量	0.066 0	0.463 0	0.036 0	0.032 0	0.022 0	0.030 0	0.111 0	0.098 0	0.110 0	0.032 0
碳排放	0.026 0	0.062 0	0.035 0	0.026 0	0.023 0	0.022 0	0.159 0	0.163 0	0.040 0	0.444 0
因素变量权重	0.041 4	0.216 6	0.033 4	0.036 8	0.023 2	0.031 6	0.125 8	0.218 2	0.054 06	0.218 4

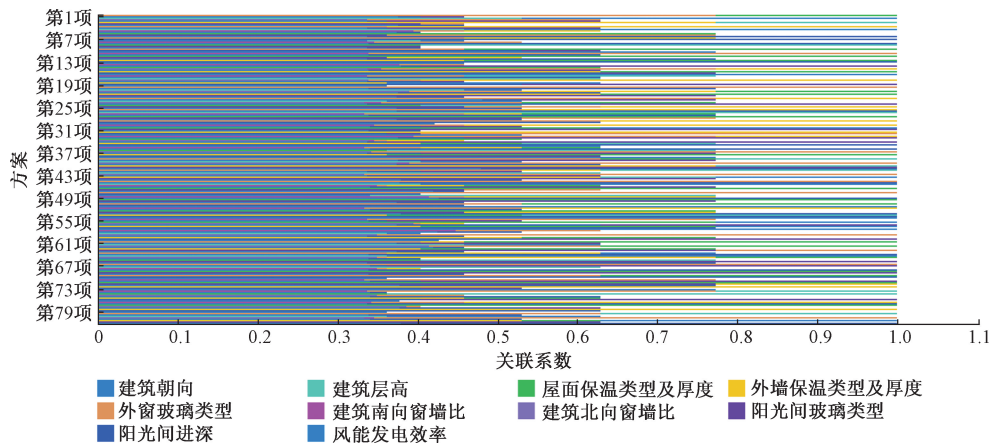


图5 绿色低碳农宅方案与指标关联系数分布情况

Fig. 5 Distribution of correlation coefficients between green and low-carbon rural housing schemes and indicators

12Ar+6C的6mm双层普通玻璃惰性气体塑钢窗;南向窗墙比0.5;北向窗墙比0.5;阳光间进深1.2m;阳光间材质为6C+12Ar+6C的6mm双层惰性气体普通玻璃+塑钢窗框+保温窗帘;风能发电效率45%。

### 3.4 最优方案效能分析

最优方案的农宅采暖能耗为2661.15 kW·h/a,节能率高达89.23%,极大降低了采暖能耗;室内最冷日平均温度为11.62℃,相较于农宅基准模型提升6倍以上。由此可说明农宅围护结构的改善和可再生能源联合供暖系统的增设对内蒙古西部农宅绿色低碳转型有很大帮助。

最优方案的碳减排量为10.02 t/a,有效的呼应了国家节能减排的工作,也为居民创造了良好的生活环境;太阳能得热量为67702.75 kW,有效利用了内蒙古西部丰富的可再生能源。由此可说明可再生能源联合供暖系统的增设可以有效地保护内蒙古西部的生态环境的同时也提高居民生活的品质。

最优方案的NPV为3155.16元,为正值,经济上可行,居民可以接受度较高,可在内蒙古西部农村地区推广使用。

## 4 内蒙古西部农宅绿色低碳发展分析

内蒙古西部农村地区在现有农宅大多为居民自建,对农宅的各因素设计不适当,使得其热工性能不佳,应对恶劣天气的能力较差,冬季采暖的能耗无谓的增加,室内热环境无明显改善。

在今后新建农宅或对既有农宅进行改造时,建议在围护结构上加设适当的保温层,使得农宅围护结构可更好的节能保温,稳定室内热环境;外窗玻璃类型也应有所改善,可使用双层惰性气体中空玻璃,节能保温效果明显且经济性良好;窗墙比应设置适当,既不能过大,影响节能保温效果,又不能过小,影响采光通风效果。

内蒙古西部农村地区风能与太阳能等可再生能源丰富,利用被动式太阳能和风能发电对内蒙古西部农宅的绿色低碳发展有重要意义。在新建农宅时,要注重规划,设置适当的建筑朝向和体形系数,利用农宅主体更多的利用太阳能辐射得热。可在农宅的适当位置增设附加阳光间与小型风力发电系统联合的采暖系统,更有效地利用可再生能源,减少一次能源的使用,不仅能优化冬季农宅室内空气质量,还能减少碳排放,促进内蒙古西部农

宅的绿色低碳高质量发展。

综上所述,绿色低碳农宅效能优化是我国农宅绿色低碳转型的具体实践<sup>[18]</sup>。内蒙古西部农宅的绿色低碳发展,需要综合考虑“开源”“节流”两个方面,即最大程度地利用当地丰富的可再生能源的同时农宅本身进行绿色节能设计,同时也要兼顾方案的经济可行性。同时在进行方案构建和对比时,要运用人工智能、大数据等先进的技术手段提高农宅方案与绿色低碳发展要求的契合度。

## 5 结论

在中国建筑业积极推进绿色低碳发展的背景下,为促进内蒙古西部农宅绿色低碳转型,改善农宅采暖能耗高、室内舒适度差等问题,提出基于随机森林算法的内蒙古西部绿色低碳农宅灰色模糊综合评价研究,得出以下结论。

(1)考虑到内蒙古西部绿色低碳农宅方案构建时,数据样本少、因素指标具有模糊性等特征,选择利用正交试验法获得相关数据;运用随机森林算法计算指标权重,参考灰色关联度法建立隶属度矩阵;建立灰色模糊综合评价模型对方案进行选优。此方法能够克服主观赋权的随机性和臆断性,科学的优选出最佳方案,为内蒙古西部农宅的绿色低碳转型研究提供一种新思路。

(2)通过对内蒙古西部农村地区的走访调查和相关文献资料的收集阅读,了解研究地区现存农宅状况,建立农宅基准模型,模拟出其建筑采暖能耗为 24 706.28 kW·h。进行实地检测,数据与模拟数据对比,证明了模拟的准确性。且增设可再生能源联合供暖系统,提高了可再生能源利用率,促进内蒙古西部绿色低碳农宅的发展。

(3)选取建筑朝向、建筑层高、屋面材料及厚度、外墙材料及厚度、外窗玻璃类型、南向窗墙比、北向窗墙比、阳光间玻璃类型、阳光间进深、风能发电效率 10 个因素,每个因素 7 个水平,利用正交试验原理得出 83 组综合方案。选择农宅采暖能耗、最冷日室内平均气温、净现值(NPV)、太阳能得热量和碳减排量 5 个指标作为方案的目标变量,利用基于随机森林的灰色模糊综合评价法在 83 组综合方案中选出最优。最终得出方案 41 最优,该方案大幅度降低了建筑能耗,极大改善了室内热环境,碳减排量为 10.02 t/a,太阳能得热量为 67 702.75 kW, NPV > 0,经济性良好。因此,方案 41 为内蒙古西部农宅的绿色低碳转型提供了研究方向,在内蒙古西部农村地区具有一定的推广性。

(4)内蒙古西部农宅的绿色低碳转型需要依靠

可再生能源的利用和农宅本身的绿色低碳设计才能迅速进行,同时也要利用人工智能等先进手段提高方案构建的实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.  
Center for Building Energy Efficiency, Tsinghua University. Report on building energy efficiency in China [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.
- [2] Lü S, Zhu J, Wang R. Experimental research on a solar energy phase change heat storage heating system applied in the rural area [J]. Sustainability (Basel, Switzerland), 2023, 15(3): 2575.
- [3] 金国辉, 李威风, 张东杰, 等. 内蒙古西部超低能耗草原民居相变墙体调温节能性研究 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 2037-2041.  
Jin Guohui, Li Weifeng, Zhang Dongjie, et al. Research on temperature regulation and energy saving of phase change wall of ultra-low energy consumption grassland dwellings in western Inner Mongolia [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 2037-2041.
- [4] 李洁, 徐鑫, 姚新强, 等. 新疆地区既有农宅被动式改造与供暖初期运行效果分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5332-5337.  
Li Jie, Xu Xin, Yao Xinqiang, et al. Analysis of the initial operation effect of passive renovation and heating of existing farmhouses in Xinjiang [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13): 5332-5337.
- [5] 金国辉, 李威风, 王波, 等. 内蒙古西部超低能耗草原民居多能互补供暖系统集成配制 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 293-298.  
Jin Guohui, Li Weifeng, Wang Bo, et al. There are many ultra-low energy consumption grassland dwellings in western Inner Mongolia [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 293-298.
- [6] 朱轶韵, 陈习习, 马召熙, 等. 基于多因素正交实验的关中民居节能优化分析 [J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(2): 151-159.  
Zhu Yiyun, Chen Xixi, Ma Zhaoxi, et al. Optimization analysis of energy conservation of residential buildings in Guanzhong based on multi-factor orthogonal experiment [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 151-159.
- [7] 高源, 胡可, 丁淳, 等. 河北平原地区“双替代”农宅低碳化改造多目标优化设计 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8565-8573.  
Gao Yuan, Hu Ke, Ding Chun, et al. Multi-objective optimization design of low-carbon transformation of “double substitution” farmhouse in Hebei Plain [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8565-8573.
- [8] 陈平, 张杰. 高维多目标权衡导向下建筑方案性能设计优化研究 [J]. 建筑经济, 2022, 43(S2): 245-252.  
Chen Ping, Zhang Jie. Research on performance design optimization of building scheme under the guidance of high-dimensional multi-objective trade-off [J]. Construction Economics, 2022, 43(S2): 245-252.
- [9] 李勤, 李文龙. 乡村振兴背景下农村危房集中加固改造方案优

- 选研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(2): 106-112.
- Li Qin, Li Wenlong. Research on the optimization of centralized reinforcement and renovation scheme of rural dilapidated houses under the background of rural revitalization[J]. Engineering Seismic & Reinforcement Transformation, 2021, 43(2): 106-112.
- [10] 张森林, 鲍安红, 胡曼, 等. 基于 G1 序-物元可拓模型的重庆庭院式农宅绿色舒适度评价[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 1997-2006.
- Zhang Senlin, Bao Anhong, Hu Man, et al. Evaluation of green comfort of courtyard-style farmhouse in Chongqing based on G1 sequence-matter-element extension model[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 1997-2006.
- [11] 金国辉, 任佩瑶. 内蒙古西部超低能耗草原民居多能耦合供暖效能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8): 136-140.
- Jin Guohui, Ren Peiyao. Study on multi-energy coupled heating efficiency of ultra-low energy consumption grassland dwellings in western Inner Mongolia[J]. New Building Materials, 2021, 48(8): 136-140.
- [12] 王凯鹏, 韩永亮, 汪启龙, 等. 基于 Trnsys 的地源热泵 + 冷却塔复合系统运行特性模拟研究[J]. 节能, 2023, 42(3): 26-29.
- Wang Kaipeng, Han Yongliang, Wang Qilong, et al. Simulation study on operating characteristics of ground source heat pump + cooling tower composite system based on Trnsys[J]. Energy Conservation, 2023, 42(3): 26-29.
- [13] Zhang S, Jiang J, Gao W. Application evaluation and optimization of the sunroom in rural residential houses in southeast Shandong Province, China[J]. Solar Energy, 2023, 251: 208-222.
- [14] Li Q, Hu H, Ma L, et al. Evaluation of energy-saving retrofits for sunspace of rural residential buildings based on orthogonal experiment and entropy weight method[J]. Energy for Sustainable Development, 2022, 70: 569-580.
- [15] 陈明发, 严天峰. 基于随机森林的建筑物场景微蜂窝模型的构建[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(10): 119-124.
- Chen Mingfa, Yan Tianfeng. Construction of microcell model of building scene based on random forest[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(10): 119-124.
- [16] 孟晓华, 许军. 基于熵权灰色关联度分析的中国数字服务贸易综合竞争力影响因素实证研究[J]. 价格月刊, 2023(11): 77-86.
- Meng Xiaohua, Xu Jun. An empirical study on the influencing factors of the comprehensive competitiveness of China's digital service trade based on the analysis of entropy weight grey correlation degree[J]. Price Monthly, 2023(11): 77-86.
- [17] 刁建新, 郭璠, 苟浩楠, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的坝上农宅节能评价[J]. 建筑节能, 2021, 49(3): 127-133.
- Diao Jianxin, Guo Fan, Xu Haowei, et al. Energy efficiency evaluation of rural houses in Bashang based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(3): 127-133.
- [18] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. (2020-11-03) [2024-04-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content\\_5556991.htm?eqid=ab673ed4000aa9e300000005648962ec](https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm?eqid=ab673ed4000aa9e300000005648962ec).
- The State Council, The People's Republic of China. Proposal of the Central Committee of the Communist Party of China on formulating the 14th Five-Year Plan for national economic and social development and the long-range objectives for the year 2035[EB/OL]. (2020-11-03) [2024-04-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content\\_5556991.htm?eqid=ab673ed4000aa9e300000005648962ec](https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm?eqid=ab673ed4000aa9e300000005648962ec).