

# 北方农村住宅节能建筑外围护系统优化分析\*

Optimization Analysis of the Exterior Enclosure System for Energy-saving Buildings in Northern Rural Areas

郭朝辉<sup>1</sup>, 霍光<sup>2</sup>, 刘士龙<sup>1</sup>, 曹权宇<sup>3</sup>, 李梦迪<sup>1</sup>, 石佳磊<sup>1</sup>

- 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227;
- 河北建研科技有限公司, 河北 石家庄 050227;
- 河北融舟科技发展有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 现阶段我国北方农村住宅存量巨大且耗能高, 为推进《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》实施, 实现北方农村住宅绿色低碳建造技术优化分析, 通过数值模拟方法对不同外围护系统北方农村住宅能耗进行计算, 结合回归分析方法建立保温材料厚度与建筑能耗函数模型。在此基础上, 进一步考虑建筑全寿命周期内, 不同阶段下保温材料厚度对建筑成本、能耗、碳排放直接与间接作用及时间价值影响, 采用费用效益法建立北方农房外围护系统优化决策函数模型, 研究结果可为北方农村住宅低碳建造优化设计提供依据。

**关键词:** 北方农村住宅; 外围护系统; 数值模拟; 回归分析; 费用效益法

**中图分类号:** TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0151-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.029

GUO Zhaohui<sup>1</sup>, HUO Guang<sup>2</sup>, LIU Shilong<sup>1</sup>, CAO Quanyu<sup>3</sup>, LI Mengdi<sup>1</sup>, SHI Jialei<sup>1</sup>

- Hebei Institute of Building Science Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
- Hebei Jianyan Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
- Hebei Rongzhou Technology Development Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** At present, the stock of rural residential buildings in northern China is large and the energy consumption is high. In order to promote the implementation of the "Work Plan for Accelerating Energy Saving and carbon Reduction in the Building Field", the optimization analysis of green and low-carbon construction technology for rural residential buildings in northern China is realized. The consumption of rural residential buildings in northern China was calculated by numerical simulation method, and the function model of insulation material thickness and building energy consumption was established by regression analysis method. On this basis, further considering the direct and indirect effects of insulation material thickness on building cost, energy consumption and carbon emission at different stages during the whole life cycle of the building as well as the time value, the cost-benefit method was adopted to establish the optimization decision function model of the northern rural housing peripheral protection system, and the research results can provide a basis for the optimization design of low-carbon construction of rural residential buildings in the north.

**Keywords:** rural residential buildings in northern; peripheral protection system; numerical simulation; regression analysis; cost benefit method

\* 基金项目: 河北省住房和城乡建设厅建设科技研究项目 (2022-2075、2022-2081、2023-2114、2023-2115)。

作者简介: 郭朝辉 (1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 绿色建筑、建筑节能。

通信作者: 霍光 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 结构优化设计、建筑节能。

收稿日期: 2023-12-12

## 研究与应用

### 0 引言

我国北方农村住宅建筑大多未采取保温措施,冬季需要采用煤、电、天然气等自然能源进行供暖,能源消耗较大,并产生大量温室气体排放<sup>[1-3]</sup>。据统计:2020年农村住宅建筑能耗为2.29亿tce,占全国建筑总能耗的22%。基于此背景,2024年3月国家发展改革委、住房城乡建设部联合印发的《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》,提出坚持农民自愿、因地制宜原则。推进绿色低碳农房建设,提升严寒、寒冷地区新建农房围护结构保温性能,有序开展既有农房节能改造,对房屋墙体、门窗、屋面、地面等进行菜单式微改造。为推进该方案的实施,学者对既有农房绿色低碳建造技术进行研究。

李芳德等<sup>[4]</sup>采用DeST能耗模拟软件对夏热冬冷地区建筑围护结构节能改造进行模拟,提出装配式节能改造方案,并进行了生态性和经济性分析;Han等<sup>[5]</sup>采用逻辑模型确定农村建筑节能改造评估指标,在此基础上依据层次分析法确定指标权重,并通过TOPSIS法实现了甘肃省住宅节能改造项目方案评估;Li等<sup>[6]</sup>考虑综合节能、增量成本、成本效益比、碳排放等因素对严寒地区典型农村住宅增设遮阳棚进行研究,提出了最佳节能改造方案;陈红兵等<sup>[7]</sup>以济南地区既有居住建筑改造为研究对象,分析了不同保温厚度对建筑经济效益和碳排放的影响。上述研究考虑成本、降碳、节能等因素对外围护系统方案进行优化分析与决策。

为更好推行农房绿色低碳建造政策实施,坚持农民自愿,提高农房低碳建造主观能动性。考虑农房建造具有短期投资,长期回报特点,需综合分析低碳、节能、成本、资金价值对农房改造的影响。

鉴于此,为实现北方农村住宅建筑外围护系统优化决策,采用数值模拟、数据分析方法建立典型建筑外维护系统保温材料厚度与建筑能耗函数模型;并考虑建筑全生命周期内,不同阶段下保温材料厚度对建筑成本、能耗、碳排放直接与间接作用及时间价值影响,建立保温材料厚度-建筑费用效益优化决策函数模型,为农房绿色低碳建造优化设计提供参考。

### 1 北方农村住宅数值模型

我国北方农村住宅多为1~2层砖混结构房屋,房间布局多为两室两厅或三室两厅;屋顶形式为平屋顶或坡屋顶,主要外围护系统包括混凝土屋面、砖墙、水泥砂浆地面及木门窗或铝合金门窗<sup>[8]</sup>。基于上述分析,为研究北方农村住宅外围护系统对建筑能耗的影响,选取典型北方农村住宅为实例,分别建立一层平屋顶、一层坡屋顶、二层坡屋顶建筑数值模型。二层坡屋顶住宅如图1所示。

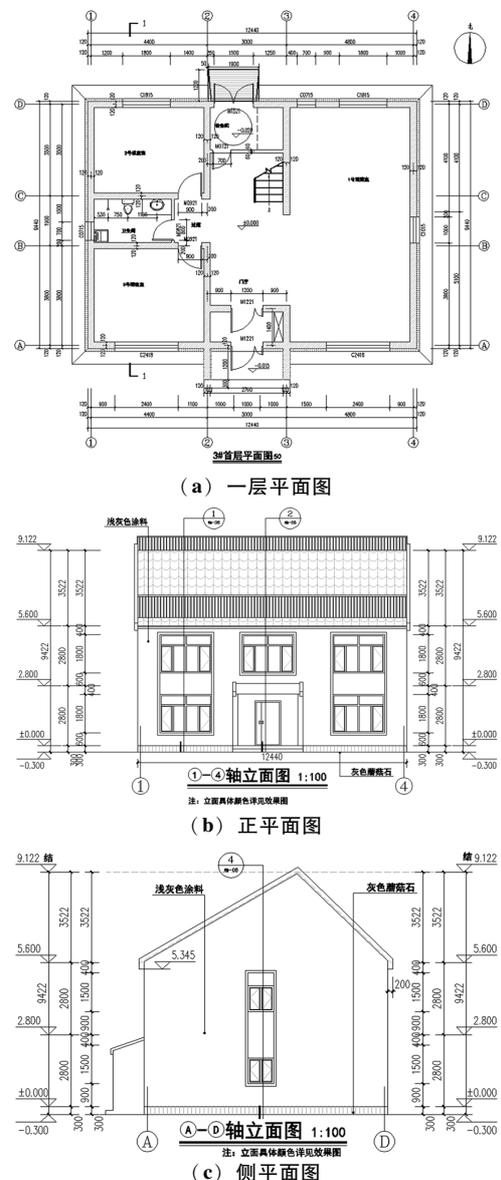


图1 二层坡屋顶建筑

Fig. 1 Two story sloping roof building

考虑外围护系统保温材料厚度、窗户选型对建筑能耗影响较大，将屋顶、外墙、楼地面保温厚度与外窗选型作为模型材料参数控制变量，各模型进行 16 组对比试验。模型材料参数见表 1（通用做法表中未体现），建筑基本信息见表 2~表 4。

表 1 北方农房围护系统模型材料参数

Table 1 Material parameters of the northern agricultural house enclosure system model

编号	屋顶 PUR /mm	外墙 PUR /mm	楼(地)面 PUR/mm	外窗选型
1	0	0	0	C1
2	0	0	0	C2
3	0	20	20	C2
4	0	40	40	C2
5	0	60	60	C2
6	0	80	80	C2
7	0	100	100	C2
8	0	120	120	C2
9	0	150	150	C2
10	20	60	60	C2
11	40	60	60	C2
12	60	60	60	C2
13	80	60	60	C2
14	100	60	60	C2

注：表中 C1 表示普通双层塑钢窗，C2 表示 5 + 12A + 5 塑钢平开窗 2 层，中间隔 60 mm 空气。

结合上述设置，课题组基于河北省唐山市曹妃甸区气象数据库，并采用符合当地标准的围护结构材料、暖通设备实现了北方农房建筑外围护系统热工性能模拟计算。计算周期取一个供暖季（11 月 1 日至次年 3 月 31 日），室内温度 18 ℃。

表 2 建筑基本信息

Table 2 Basic information of buildings

建筑类型	墙体/m <sup>2</sup>	体形系数	建筑高度/m
一层平屋顶	120.66	0.52	3.0
一层坡屋顶	139.52	0.59	4.6
二层坡屋顶	201.69	0.50	7.4
标准限值	—	0.80	—

表 3 保温材料铺贴面积

Table 3 Insulation board paving area /m<sup>2</sup>

建筑类型	屋顶	墙体	地面
一层平屋顶	146.61	120.66	146.61
一层坡屋顶	132.46	139.52	107.55
二层坡屋顶	143.06	201.69	117.43

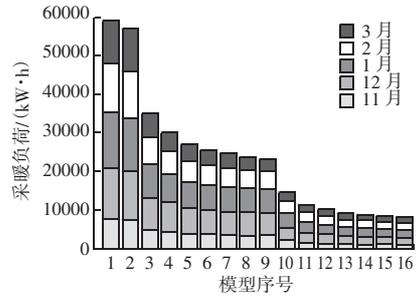
表 4 建筑窗墙比

Table 4 Building window to wall ratio

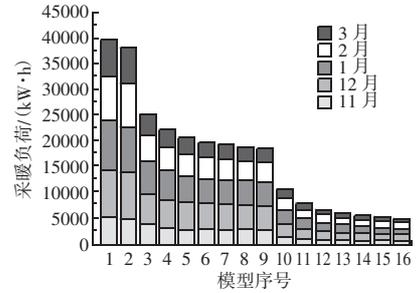
建筑类型	窗墙比			
	南	北	东	西
一层平屋顶	0.34	0.28	0.08	0.18
一层坡屋顶	0.32	0.24	0.08	0.03
二层坡屋顶	0.29	0.32	0.32	0.32
标准限值	0.40	0.45	0.45	0.45

## 2 模拟结果及能耗分析

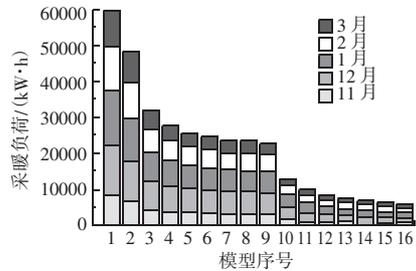
采用 PKPM 建筑能耗模拟分析软件对模型供暖季农村住宅能耗进行数值模拟，模拟结果如图 2~3 所示。



(a) 一层平屋顶农房



(b) 一层坡屋顶农房



(c) 二层坡屋顶农房

图 2 能耗模拟结果

Fig. 2 Energy consumption simulation results

由图 2 可看出，对比模型 1、模型 2 结果，窗户采用 2 层 5 + 12A + 5 塑钢平开窗时，建筑能耗明显低于采用普通双层塑钢窗时产生的建筑能耗。说明选用 2 层 5 + 12A + 5 塑钢平开窗作为外围护系统窗体时建筑节能效果更好。对比模型 2~模型 16 可看出，随着保温材料厚度的增加，建筑能耗逐渐降低，各月能耗降低曲线梯度近似相同。模型 2 与模型 3 能耗相差较大，反映了节能建筑与非节能建筑的能耗差异较大，仅 20 mm 厚聚氨酯保温材料可使得建筑能耗大幅减少；随着保温材料厚度增加，建筑能耗持续降低，呈现出明显非线性特征。对比模型 9、模型

研究与应用

10, 采暖能耗降低明显, 说明屋顶保温隔热处理对于北方农房节能降碳有重要作用。由图3可看出, 模型2~模型9、模型10~模型16段曲线基本呈对数函数规律, 且三种建筑形式能耗曲线梯度下降规律具有相似性。以此为基础, 建筑课题组建立保温材料厚度与采暖能耗函数模型:

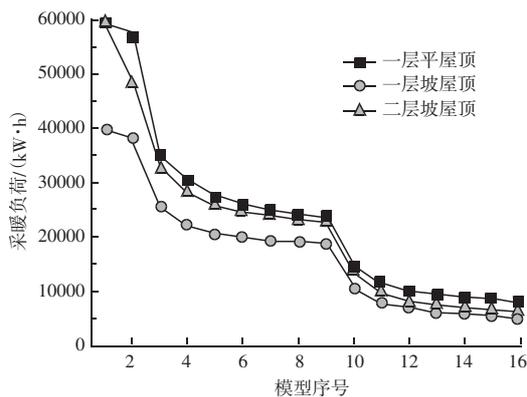


图3 总建筑能耗变化曲线  
Fig. 3 Total building energy consumption change curve

$$\begin{cases} Q_{op} = alg(1+x) + blg(1+y) + c \\ x \geq 0, y \geq 0, Q_{op} \geq 0, c \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q_{op}$  为建筑能耗模拟软件计算所得建筑年采暖负荷;  $x$  为屋顶保温材料厚度;  $y$  为墙面及地面保温材料厚度;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数。

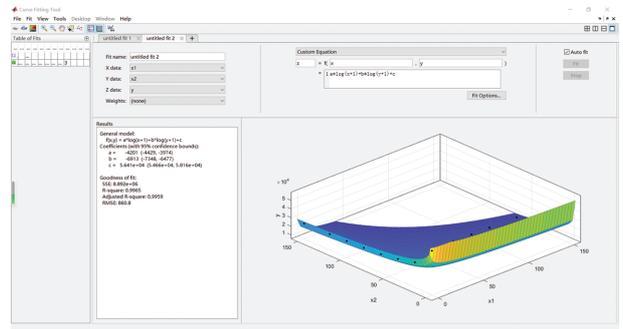
采用 *Matlab* 拟合工具箱进行回归分析, 回归分析结果如图4、回归参数如表5所示。由图4及表5可看出, 函数曲面拟合结果较好,  $R$  方均大于0.995, 表明拟合结果准确度较好, 可以准确反映保温材料厚度对建筑能耗的影响。

3 基于费用效益法的围护系统优化分析

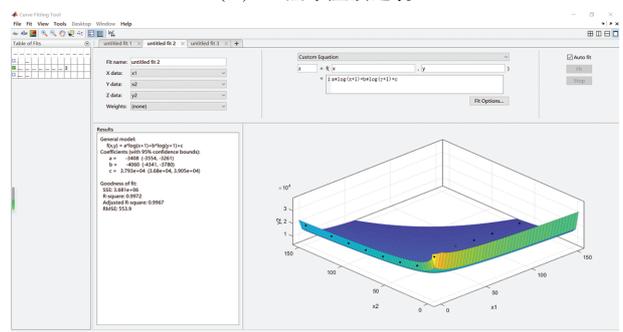
为实现北方农村住宅外围护系统优化分析, 进一步考虑全寿命周期内, 不同阶段下保温材料厚度对建筑成本、能耗、碳排放直接与间接作用及时间价值影响, 以建立保温材料厚度-建筑费用效益优化决策函数模型, 研究结果可为北方农村住宅绿色低碳建造优化设计提供依据。

3.1 增量费用

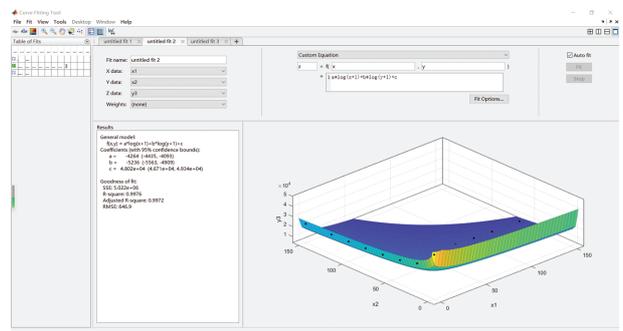
保温材料增量费用由直接增量费用与间接增量费用构成, 其中直接增量费用指建筑全寿命周期(规划阶段、建造阶段、运营阶段、拆除阶段)内产



(a) 一层平屋顶建筑



(b) 一层坡屋顶建筑



(c) 二层坡屋顶建筑

图4 回归分析结果

Fig. 4 Regression analysis results

表5 回归参数

Table 5 Regression parameters

建筑类型	a	b	c	R - square
一层平屋顶	-4201	-6913	56410	0.9965
一层坡屋顶	-3408	-4060	37930	0.9972
二层坡屋顶	-4264	-5236	48020	0.9976

生保温材料成本增量费用, 间接增量费用指建筑全寿命周期内由保温材料厚度变化导致建筑能耗和温室气体排放变化, 进而产生的增量费用。各增量费用采用下式计算:

$$\begin{cases} \Delta C_{c,t} = C_{c,t} - C_{c,0} \\ C_{c,t} = LCC_{c,t} + CLCE_{c,t} + CLCG_{c,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $t$  为保温材料厚度； $\Delta C_{c,t}$ 、 $C_{c,t}$ 、 $LCC_{c,t}$ 、 $CLCE_{c,t}$ 、 $CLCG_{c,t}$  分别为保温材料厚度  $t$  下建筑全寿命周期内，外围护系统材料变化引起的总增量费用、总费用、费用成本增量净现值、能耗货币化费用、温室气体排放货币化费用； $C_{c,0}$  为保温材料厚度取 0 时围护结构保温材料费用。

费用成本增量净现值计算时，由于保温材料厚度对规划、运营、拆除阶段影响较小，为简化计算，仅考虑建造阶段产生的直接增量费用，计算公式为：

$$LCC_{c,t} = 10^{-3} C_1 A_1 t \quad (3)$$

式中： $C_1$  为保温材料单价，本文取 1700 元/m<sup>3</sup>； $A_1$  为保温材料铺贴面积。

能耗、温室气体排放货币化费用计算时，考虑保温材料能耗主要发生在生产阶段，故忽略规划、运营、拆除阶段产生的能耗、温室气体排放费用影响。采用下式计算：

$$CLCE_{c,t} = 10^{-3} C_1 E_1 A_1 t \rho \quad (4)$$

$$CLCG_{c,t} = 10^{-3} C_2 G_1 A_1 t \rho \quad (5)$$

式中： $C_1$  为能耗的货币化系数，本文取 0.08 元/MJ； $E_1$  为每单位重量保温材料生产阶段能耗，本文取 150 MJ/kg； $\rho$  为外围护系统保温材料密度，参照《外墙外保温工程技术标准》(JGJ144—2019)<sup>[11]</sup> 聚氨酯材料表观密度不小于 35 kg/m<sup>3</sup>，本文取 35kg/m<sup>3</sup>； $C_2$  为温室气体排放的货币化系数，本文取  $6.08 \times 10^{-4}$  元/kgCO<sub>2eq</sub>； $G_1$  为保温材料生产阶段温室气体排放，本文取 5.22 kg CO<sub>2eq</sub>/kg<sup>[10]</sup>。

### 3.2 增量效益

增量效益主要与建筑采暖能耗有关，包括基于建筑采暖负荷计算的直接增量效益和间接增量效益。可采用下式计算：

$$\begin{cases} \Delta C_{b,t} = C_{b,t} - C_{b,0} \\ C_{b,t} = LCC_{b,t} + CLCE_{b,t} + CLCG_{b,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $C_{b,0}$  为保温材料厚度取 0 时围护结构保温材料效益； $C_{b,t}$ 、 $LCC_{b,t}$ 、 $CLCE_{b,t}$ 、 $CLCG_{b,t}$  分别为保温材料厚度  $t$  下建筑全寿命周期内，外围护系统能耗变化引起的总增量费用、费用成本增量净现值、能耗货币化费用、温室气体排放货币化费用。分别采用下式计算：

$$LCC_{b,t} = C_{op} Q_{op} \quad (7)$$

$$CLCE_{b,t} = C_1 E_{1op} E_{2op} Q_{op} \quad (8)$$

$$CLCG_{b,t} = C_2 G_{op} Q_{op} \quad (9)$$

式中： $C_{op}$  为建筑采暖能耗单价，本文取 0.33 元/kwh； $E_{1op}$  为每单位建筑采暖负荷折合标准煤，本文取 0.404 kgce/kwh； $E_{2op}$  为每单位标准煤换算成兆焦的换算系数，本文取 29.3 MJ/kgce； $G_{op}$  为天然气温室气体排放因子，本文取 0.199 944 kg CO<sub>2</sub>/MJ<sup>[10]</sup>。

### 3.3 外围护系统费用效益优化分析

基于前述分析可得到外围护系统费用及效益增量，考虑资金具有时间价值特性，外围护系统费用效益增量可采用下式计算：

$$\begin{cases} \Delta B = C_{c,t} + \Delta C_{b,t} (P/A, i, Ne) \\ (P/A, i, Ne) = \frac{(1+i)^{Ne} - 1}{(1+i)^{Ne} i} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\Delta B$  为围护系统总费用及效益增量； $i$  为社会收益率，本文取 10%； $Ne$  为建筑结构生命全周期，本文取 50 年。

结合式 (1) ~ 式 (10)，可计算得到围护系统保温材料厚度变化时总的费用及效益增量函数。以此为基础建立优化函数模型，见式 (11)，结合模型参数可计算得到费用及效益增量最小时外围护系统保温材料厚度。进而实现北方农村住宅建筑外围护优化决策。各模型计算结果如图 5 所示。

$$\begin{cases} \max & -\Delta B_{x,y} \\ s. t. & x \geq 0, \\ & y \geq 0 \\ & x \bmod 5 = 0 \\ & y \bmod 5 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

图 5 中可看出，当保温材料厚度较小时，随着保温材料厚度增加，建筑总费用效益值不断增大，当保温材料厚度取 100 mm 左右时费用效益值最大，继续增大保温材料厚度，建筑总费用效益值减小。这是由于开始增加保温做法时，建筑节能效果明显。当保温厚度增大到一定值时，继续增大保温材料厚度其产生的节能效果增加不甚明显，而保温材料成本增量较大，导致建筑总费用提高。综合上述研究可知，当采用聚氨酯保温材料作为外围护系统保温材料进行北方农村住宅建造时，保温材料厚度取 100 mm 左右可取到较大收益。

## 研究与应用

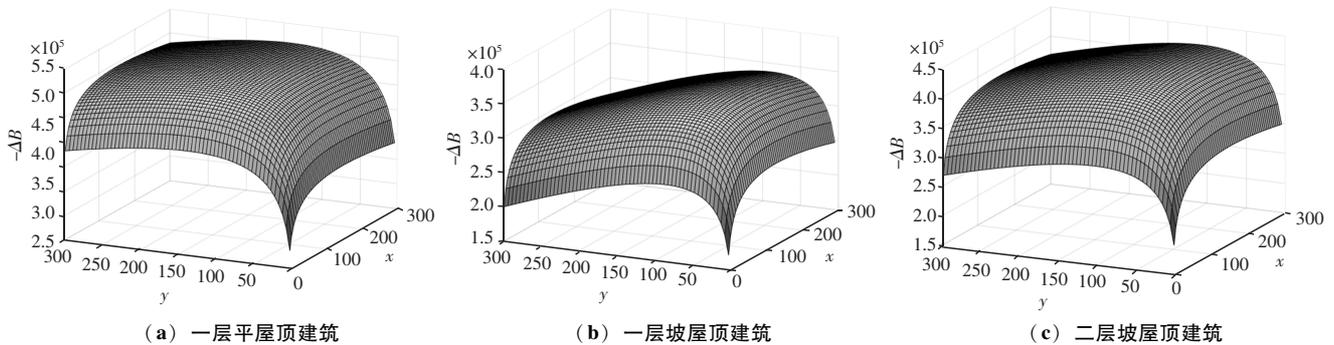


图5 建筑能耗关系曲线

Fig. 5 Building energy consumption relationship curve

## 4 结论

基于北方农村住宅形式及外围护系统调研结果,采用数值模拟方法对北方农村住宅建筑能耗进行模拟计算,并结合回归分析方法建立北方农村住宅保温材料厚度与建筑能耗的函数模型,在此基础上,进一步采用理论分析,综合考虑建筑能耗、建材成本、建筑碳排放产生的直接、间接作用及资金时间价值影响。建立了保温材料厚度与建筑费用效益的优化决策模型,实现了北方农村住宅外围护系统保温材料厚度优化研究,并得到以下结论:

(1) 北方农村住宅多为1~2层砖混结构房屋。房间布局多为两室两厅或三室两厅,建筑屋顶形式为平屋顶或坡屋顶,主要外围护结构包括混凝土屋面、砖墙、水泥砂浆地面及木门窗或铝合金门窗。

(2) 2层5+12A+5塑钢平开窗节能效果明显优于普通双层塑钢窗。农房外围护结构随着保温材料厚度的增加,建筑能耗逐渐降低,并呈现出明显的非线性特点。

综合考虑建筑能耗、建材成本、建筑碳排放产生的直接、间接作用及资金时间价值影响可得出,随着保温材料厚度的增加,建筑总费用效益关系曲线呈现出先增大后减小的特点,当保温材料厚度取100mm左右时,建筑总费用效益最大。研究结果可为农房建筑外围护结构设计提供理论支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 中国建筑节能年度发展研究报告2022 [R]. 中国建筑工业出版社.
- [2] 赵西平, 王景芹, 吕玮, 等. 寒冷地区既有居住建筑能耗现状分析 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42 (3): 5.
- [3] 葛保威. 北方农村住宅供暖现状调研与分析 [J]. 区域供热, 2021 (4): 78-83.
- [4] 李芳德, 张伟捷, 王艳, 等. 夏热冬暖地区农村建筑节能改造与装配式建筑应用分析 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊1): 1059-1065.
- [5] HAN T, LIU P, NIU C, et al. Evaluation of energy-saving retrofit projects of existing rural residential envelope structures from the perspective of rural residents; the Chinese case [J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 25 (8): 8419-8446.
- [6] 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.
- [7] 陈红兵, 薛闪闪, 李德英, 等. 既有居住建筑外墙保温厚度优化及减排效益分析 [J]. 科学技术与工程, 2022 (13): 22.
- [8] 白雪. 寒冷地区农村建筑围护结构传热特性及节能研究 [D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2024.
- [9] 王卓然. 寒区住宅外墙保温体系生命周期CO<sub>2</sub>排放性能研究与优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [10] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [11] 外墙外保温工程技术标准: JGJ 144-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.