

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.027

东北严寒地区农村住宅热环境优化设计

甄蒙,孙澄,董琪

(哈尔滨工业大学 建筑学院,哈尔滨 150006)

摘要:为提高东北严寒地区农村住宅室内热舒适水平,并降低采暖能耗,通过实地测试、软件模拟对其重要影响因素进行了量化分析,并建立了采暖能耗预测模型.采用 BES-01 型温度采集记录器、DeST-h 软件研究了体形系数、窗墙面积比、围护结构传热系数、朝向、吸收系数、热惰性、附加阳光间、冰雪覆盖层等 10 项因素对农村住宅热环境的影响.实验结果表明:东北严寒地区农村住宅体形系数、窗墙面积比、围护结构传热系数与采暖能耗正相关,正南及南偏东为最佳朝向,吸收系数与采暖能耗负相关,附加阳光间能够有效改善室内热环境,冰雪覆盖层能够起到屋面保温作用,采暖能耗预测模型能够为农村居民建筑节能住宅提供设计依据,研究能够引导并提升东北严寒地区农村住宅的节能设计水平.

关键词:东北严寒地区;农村住宅;采暖能耗;预测模型

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)10-0183-06

Thermal environment optimization design of rural residential buildings in severe cold regions of northeast China

ZHEN Meng, SUN Cheng, DONG Qi

(School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: In order to improve indoor thermal comfort and reduce the energy consumed for heating in rural residential buildings in severe cold regions of northeast China, the paper analyzed the influencing factors using field survey and software simulation and established the heating energy consumption prediction model. The paper studied the influence factors of shape coefficient, window to wall ratio, heat transfer coefficient of building envelope, orientation, absorption coefficient, thermal inertia, attached sunspace, snow cover with the help of BES-01 temperature recorder and DeST-h software. The results showed that the shape coefficient, windows to wall area ratio and heat transfer coefficient were positively correlated with heating energy consumption, the best orientation is south and southeast, absorption coefficient was negatively correlated with heating energy consumption, attached sunspace can effectively improve indoor thermal environment, and snow cover can play a role in roof insulation. The prediction model can provide design basis for rural energy-saving residential buildings. The paper can guide and improve energy efficiency design level of rural residential buildings in severe cold regions of northeast China.

Keywords: severe cold regions of northeast China; rural residential buildings; heat consumption; prediction model

东北严寒地区农村住宅采暖季普遍存在采暖能耗高、热舒适度低的问题,如何在提高其热舒适度的前提下,降低采暖能耗是寒地农村住宅需解决的实际问题.文献[1-4]致力于热舒适研究,文献[5-7]探讨了建筑能耗预测问题,文献[8-11]研究了太阳能等可再生能源在建筑上的应用,从而减少煤炭等化石能源的使用,降低 CO₂ 排放量.文献[12-14]对相变材料的节能作用进行了研究,文献[15]考察了家庭用能习惯对建筑能

耗的影响,研究表明年龄、性别、教育背景等因素影响用能习惯,不同国家之间用能方式也存在差异.

已有研究成果表明,寒地农村住宅热环境受多因素的共同作用,如果仅考虑单一因素对其采暖能耗的影响会存在一定的不确定性.但是,目前针对寒地农村住宅热环境的多因素综合分析还相对缺乏.本文以东北严寒地区农村住宅为研究对象,应用实地测试、软件模拟等方法对其主要影响因素逐一进行了考量,并建立了采暖能耗预测模型.

1 农村住宅热环境影响因素分析

1.1 理论分析

农村住宅耗热量指标计算公式如下,其计算过

收稿日期: 2015-02-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278149)

作者简介: 甄蒙(1985—),男,博士研究生;

孙澄(1971—),男,教授,博士生导师

通信作者: 孙澄, suncheng@hit.edu.cn

程见文献[16].

$$q_H = q_{HT} + q_{INF} - q_{IH} \quad (1)$$

式中: q_H 为建筑物耗热量指标, W/m^2 ; q_{HT} 为折合到单位建筑面积上单位时间内通过建筑围护结构的传热量, W/m^2 ; q_{INF} 为折合到单位建筑面积上单位时间内建筑物空气渗透耗热量, W/m^2 ; q_{IH} 为折合到单位建筑面积上单位时间内建筑物内部得热量,取 $3.8 W/m^2$.

展开式(1)可以发现农村住宅室内热环境的影响因素包括室内外温度、传热系数、围护结构面积、窗的综合遮阳系数、太阳辐射热、换气次数、换气体积等.

1.2 实地调研

本文对东北严寒地区农村住宅进行了系统调研,总结了影响农村住宅热环境的主、客观因素。客观因素包括农村住宅朝向、体形系数、窗墙面积比、热惰性、围护结构颜色等;主观因素包括农村居民的行为习惯、用能习惯、地域风俗等.

综合理论分析与实地调研的结果,确定影响农村住宅热环境的重要影响因素,并应用实测与模拟相结合的方法对每项影响因素与能耗之间的关系分别进行量化研究.重要影响因素分别为:室内外温差(气候子区)、传热系数、建筑面积、窗墙面积比、窗的综合遮阳系数、换气次数、农村住宅朝向、体形系数、热惰性(围护结构材料、厚度、设置顺序)、保温层、围护结构颜色、附加阳光间和冰雪覆盖层.

2 研究方法

2.1 软件选取

DeST-h 是由清华大学为住宅建筑专门开发的能耗模拟软件,该软件兼顾人的主观能动性和计算机的计算能力,以状态空间法为计算核心,应用“全工况分析”和“分阶段模拟”的概念进行模拟计算,DeST-h 经过理论验证和程序间对比验证证明软件计算结果准确可靠.

2.2 影响因素数值设定

为方便模拟研究,对农村住宅热环境影响因素进行数值设定,并以哈尔滨地区为主要模拟地区,见表 1,2.

3 农村住宅采暖能耗实测与模拟

3.1 气候子区

文献[16]根据不同的采暖度日数(HDD)和空调度日数(CDD)将东北严寒地区分为严寒(A)区、严寒(B)区和严寒(C)区 3 个子气候区.东北严寒地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东北部,结合气候子区和 4 个省份选取 16 个代表地区研究气

候子区与农村住宅采暖能耗之间的关系(见表 3).根据东北严寒地区供暖时间及实际调研情况,设定采暖季时间为 10 月 15 日至次年 4 月 15 日.

表 1 寒地农村住宅热环境设计变量数值表(I)

Tab.1 Thermal environment influence factors of rural residential buildings in severe cold regions (I)

体形系数		窗墙面积比		非透明围护结构传热系数		透明围护结构传热系数	
编号	数值	编号	数值	编号	数值	编号	数值
S1	0.55	R_{ww1}	0	K_{n1}	0.1	K_{t1}	1.0
S2	0.60	R_{ww2}	0.1	K_{n2}	0.2	K_{t2}	1.2
S3	0.65	R_{ww3}	0.2	K_{n3}	0.3	K_{t3}	1.4
S4	0.70	R_{ww4}	0.3	K_{n4}	0.4	K_{t4}	1.6
S5	0.75	R_{ww5}	0.4	K_{n5}	0.5	K_{t5}	1.8
S6	0.80	R_{ww6}	0.5	K_{n6}	0.6	K_{t6}	2.0
				K_{n7}	0.7	K_{t7}	2.2
				K_{n8}	0.8	K_{t8}	2.4

表 2 寒地农村住宅热环境设计变量数值表(II)

Tab.2 Thermal environment influence factors of rural residential buildings in severe cold regions (II)

朝向/(°)		吸收系数		墙体厚度/mm		冰雪覆盖层/mm	
编号	数值	编号	数值	编号	数值	编号	数值
01	0	ρ_1	0.2	T_1	120	Snow1	0
02	30	ρ_2	0.4	T_2	240	Snow2	40
03	60	ρ_3	0.6	T_3	370	Snow3	60
04	90	ρ_4	0.8	T_4	490	Snow4	100
05~011	120~300	ρ_5	1.0	T_5	620	Snow5	150
012	330					Snow6	200

3.2 体形系数

本文根据调研数据计算了典型农村住宅体形系数,其体形系数多在 0.6~0.7 之间,高于城市住宅体形系数限值(0.5)^[16],由于农村住宅多为独栋一层,其具有显著不同于城市住宅的特点,因此应根据农村住宅实际情况确定其合理的体形系数范围(见图 1).由图 1 可以看出,体形系数与采暖能耗正相关,体形系数减小 0.1,采暖能耗降低 15.57%.文献[17]暂未对农村住宅体形系数进行限值规定,因此,应尽量降低体形系数,将其控制在 0.65 以内.

3.3 窗墙面积比

文献[17]规定农村住宅的窗墙比限值为:北向 ≤ 0.25 ;东、西向 ≤ 0.30 ;南向 ≤ 0.40 ,课题组调研发现寒地农村住宅南向窗墙比偏大,需要对其进行优化设计.考虑到农村住宅各个朝向的太阳辐射值不同,分别对其 4 个朝向的窗墙比进行了模拟(见图 2),发现窗墙比与采暖能耗正相关.当窗墙比相

同时,其采暖能耗由低至高排列顺序为:南向<西向<东向<北向,北向窗墙比减小 0.1,采暖能耗降低

4.15%。因此,寒地农村住宅北向应控制开窗面积,并减少东、西向的开窗面积。

表 3 代表地区

Tab.3 Typical areas

序号	气候区	省份	地点	纬度 $N/(\circ)$	经度 $E/(\circ)$	海拔高度/m	采暖度日数 HDD18	空调度日数 CDD26	
1	严寒(A)区	黑龙江省	漠河	52.13	122.52	433	7 994	0	
2	严寒(A)区		嫩江	49.17	125.23	242	6 352	5	
3	严寒(B)区		齐齐哈尔	47.38	123.92	147	5 259	23	
4	严寒(B)区		哈尔滨	45.75	126.77	142	5 032	14	
5	严寒(B)区	吉林省	敦化	43.37	128.20	524	5 221	1	
6	严寒(C)区		长春	43.90	125.22	236	4 642	12	
7	严寒(C)区		前郭尔罗斯	45.08	124.87	136	4 800	17	
8	严寒(C)区		临江	41.72	126.92	332	4 736	4	
9	严寒(C)区	辽宁省	彰武	42.42	122.53	79	4 134	13	
10	严寒(C)区		沈阳	41.77	123.43	44	3 929	25	
11	严寒(C)区		本溪	41.32	123.78	185	4 046	16	
12	严寒(C)区		宽甸	40.72	124.78	260	4 095	4	
13	严寒(A)区	内蒙古自治区	海拉尔	49.22	119.75	610	6 713	3	
14	严寒(A)区		阿尔山	47.17	119.93	997	7 364	0	
15	严寒(B)区		区东北部	西乌珠穆沁旗	44.58	117.60	995	5 812	4
16	严寒(C)区		通辽	43.60	122.27	178	4 376	22	

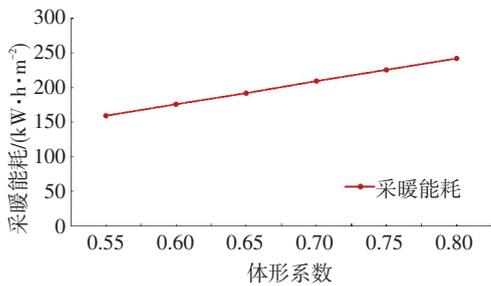


图 1 采暖能耗与体形系数关系

Fig.1 Correlation between shape coefficient and heating energy consumption

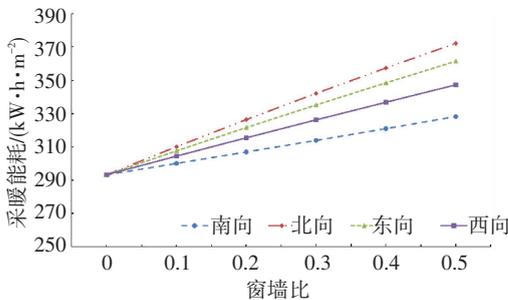


图 2 采暖能耗与窗墙比关系

Fig.2 Correlation between window to wall ratio and heating energy consumption

3.4 非透明围护结构传热系数

调研发现寒地农村住宅墙体多采用红砖、土坯、塔头等材料,并加设保温层或塑料薄膜以增强墙体的保温性能。通过模拟非透明围护结构与采暖能耗的数值关系可以看出非透明围护结构传热系数与采暖能耗正相关,其传热系数减小 0.1,采暖能耗降低 9.35%。因此,应采用传热系数较小的围护结构材料,

并合理应用保温层、乡土保温措施等方式进一步降低其传热系数,从而减小采暖能耗(见图 3)。

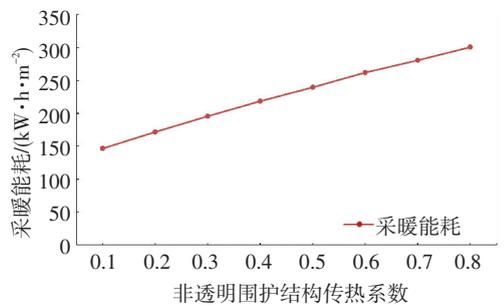


图 3 采暖能耗与非透明围护结构传热系数关系

Fig. 3 Correlation between heat transfer coefficient of nontransparent building envelope and heating energy consumption

3.5 透明围护结构传热系数

透明围护结构是寒地农村住宅保温的薄弱环节,在实际调研中发现农村居民倾向于将窗户开大,这在一定程度上增大了采暖能耗的散失。农村住宅窗户多采用双玻塑钢窗、单玻铁框窗、单玻木框窗,并覆盖塑料薄膜进行保温。考虑到太阳辐射和主导风向对能耗的影响,对其 4 个朝向的窗户传热系数进行了模拟分析,窗墙比设定为 0.4(见图 4),发现透明围护结构传热系数与采暖能耗正相关。从窗户朝向而言,当传热系数一定时,热负荷由高到低的排序为:北向>东向>西向>南向,北向窗户传热系数减小 0.1,采暖能耗降低 0.38%。因此,寒地农村住宅在东向、西向、北向上应减小开窗面积,从而降低采暖能耗。

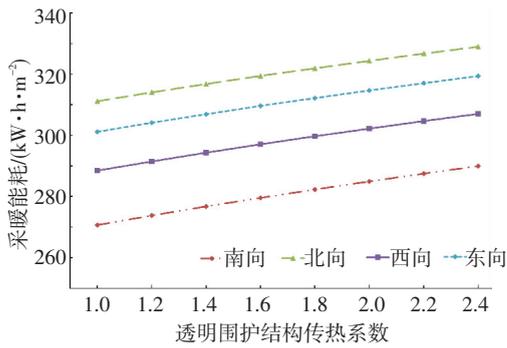


图 4 采暖能耗与透明围护结构传热系数关系

Fig.4 Correlation between heat transfer coefficient of transparent building envelope and heating energy consumption

3.6 朝向

农村住宅朝向会影响采暖能耗,设定 0°为正东,90°为正北,180°为正西,270°为正南,每 30°模拟一次(见图 5)。由图 5 可以看出 270°~315°(正南及南偏东)为寒地农村住宅最佳朝向,其采暖能耗最低。

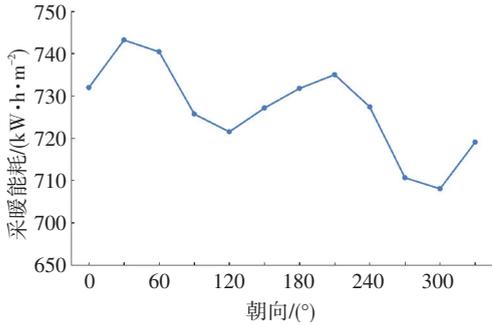


图 5 朝向对采暖能耗的影响

Fig.5 Impact of different orientation on heating energy consumption

3.7 围护结构颜色

颜色会影响围护结构的表面温度,课题组于 2014 年 8 月 23 日至 2014 年 8 月 24 日在哈尔滨市向东村进行了现场试验,实验材料均为相同木质,颜色分别为黑色、红色、木质本色、白色和银灰色(见图 6),白色材料在白天温度最低,8 月 24 日 13 点其温度为 36.6℃,黑色材料在白天温度最高,在 13 点达到了 55.8℃,表面温度为白色材料的 1.52 倍。

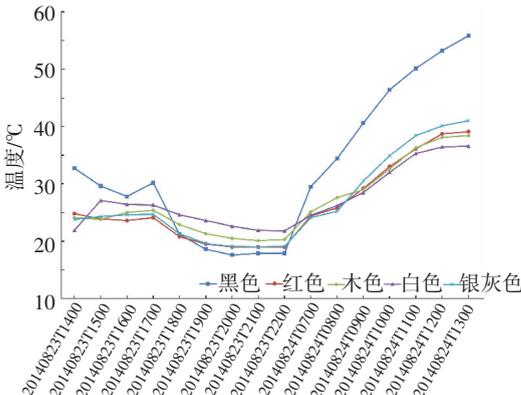


图 6 温度与颜色关系

Fig.6 Correlation between surface temperature and colour

颜色能够影响农村住宅表面温度是由于不同的颜色具有不同的吸收系数,通过对不同吸收系数(0.2~1.0)的农村住宅采暖能耗进行模拟发现吸收系数与采暖能耗负相关(见图 7),吸收系数增加 0.1,采暖能耗降低 1.2%。因此,东北严寒地区农村住宅应尽量选取吸收系数高的围护结构材料及颜色。

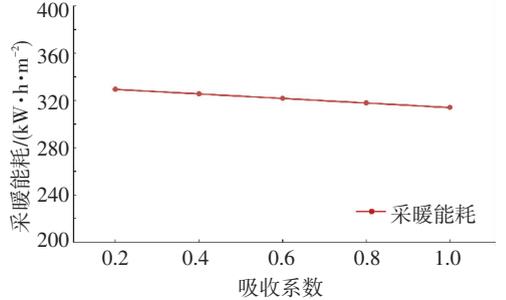


图 7 采暖能耗与吸收系数关系

Fig.7 Correlation between solar absorbance and heating energy consumption

3.8 热惰性

调研发现寒地农村住宅多采用红砖、土坯、塔头等材料,因此选取黏土砖、夯实土坯墙、钢筋混凝土、稻草板、重砂浆空心砖等 5 种材料,分别对 120, 240, 370, 490, 620 mm 等 5 种墙体厚度进行了模拟(见图 8),发现采暖能耗与墙体厚度负相关,5 种材料按照能耗由大到小的排序为:钢筋混凝土>夯实土坯墙>重砂浆空心砖>黏土砖>稻草板。因此,可根据寒地农村地域性和经济水平选用稻草板等传统材料建造节能住宅。

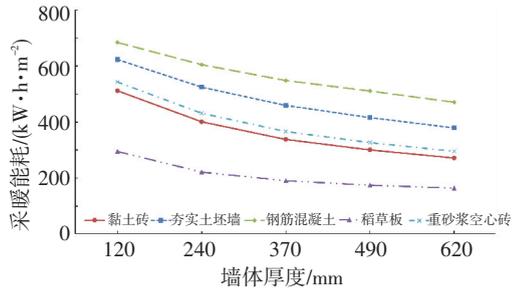


图 8 墙体材料与采暖能耗关系

Fig.8 Correlation between different wall materials and heating energy consumption

同时,课题组对外保温和无保温农村住宅非采暖房间进行了对比测试(见图 9),外保温农村住宅室内平均温度为 9.59℃,无保温农村住宅室内平均温度为 3.85℃,比外保温农村住宅室内温度低 5.74℃。

3.9 附加阳光间

寒地农村住宅多采用附加阳光间进行防风保温,为研究附加阳光间对农村住宅室内温度的影响,课题组于 2014 年 1 月 17 日至 2014 年 1 月 20 日对吉林省扶余市里半号村某农村住宅进行了实地测试(见图 10, 11)。

由图 11 可以看出, 室外平均温度为 $-19.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, 阳光间内平均温度为 $-6.88\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主卧室平均温度为 $11.28\text{ }^{\circ}\text{C}$. 阳光间内平均温度比室外高 $12.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这说明仅靠阳光间形成的温室作用即可减少 $12.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室内外温差.

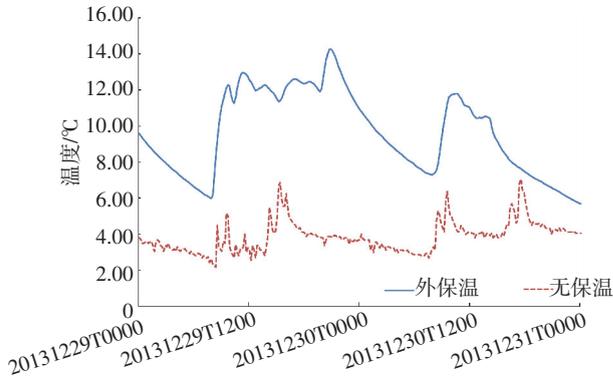


图 9 保温层对室内温度的影响

Fig.9 The influence of insulating layer on indoor temperature

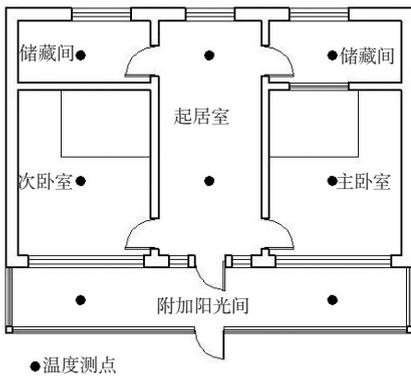


图 10 附加阳光间温度测试布点图

Fig.10 Temperature test points of attached sunspace

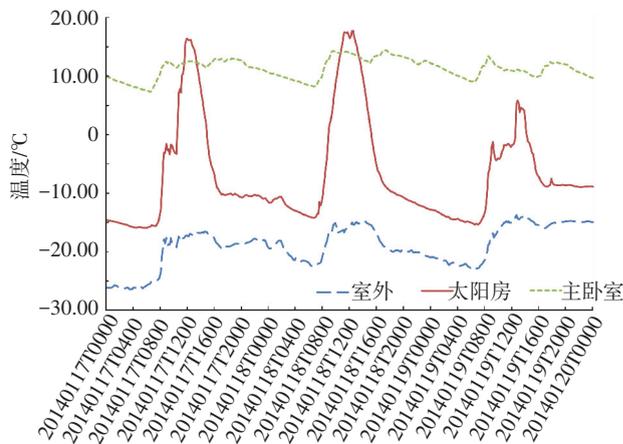


图 11 附加阳光间温度测试

Fig.11 Temperature test of attached sunspace

在 2014-01-18T12:20 阳光间内温度达到最高值 $17.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时刻, 主卧室温度为 $13.80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 阳光间温度比主卧室温度高 $3.94\text{ }^{\circ}\text{C}$. 这说明阳光间在阳光照射充足的正午时分能够为室内提供能量, 进一步降低采暖能耗. 在 2014-01-17T17:50 阳光间内温度达到最低值 $-15.94\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对应的室外温度为

$-25.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在最不利条件下, 阳光间内温度比室外温度高 $9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.10 冰雪覆盖层

农村住宅屋面在长达 6 个月的采暖季被冰雪覆盖, 其室内热环境会受到冰雪的影响. 课题组于 2014 年 12 月 13 日至 2014 年 12 月 14 日分别对 0, 40, 60, 100, 150, 200 mm 厚度的冰雪覆盖层下的混凝土砌块外表面温度进行了实地测试, 测试仪器采用 BES-01 型温度自动记录仪, 每 30 min 采集一次数据(如图 12). 发现有冰雪覆盖层的砌块比无冰雪覆盖层的砌块外表面温度高, 并且冰雪覆盖层越厚, 其外表面温度越高. 无冰雪覆盖层的砌块外表面平均温度为 $-20.13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 40, 60, 100, 150, 200 mm 冰雪覆盖层的砌块外表面平均温度分别为 $-18.15, -17.93, -17.60, -17.13$ 和 $-16.94\text{ }^{\circ}\text{C}$. 其分别比无冰雪覆盖层的砌块外表面温度高 1.98, 2.20, 2.53, 3.00 和 $3.19\text{ }^{\circ}\text{C}$. 这说明冰雪覆盖层能够对屋面起到保温作用, 40~200 mm 的冰雪覆盖层能够将屋面外表面温度提高 $1.98\sim 3.19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

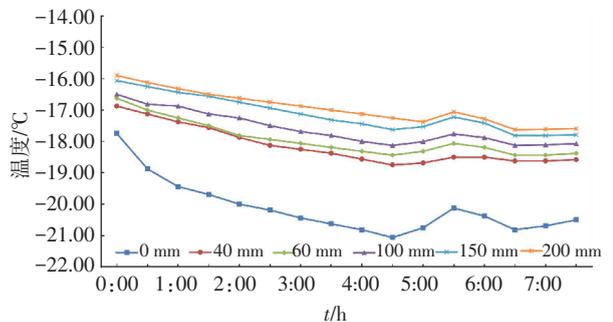


图 12 冰雪覆盖层对农村住宅温度的影响

Fig.12 Impact on roof of rural residential buildings by snow

4 农村住宅采暖能耗预测模型

为探究多因素共同作用下农村住宅的采暖能耗情况, 建立多元线性回归模型. 该模型将体形系数、南向窗墙面积比、非透明围护结构传热系数、南向透明围护结构传热系数和非透明围护结构吸收系数等 5 项因素作为自变量, 将农村住宅采暖能耗作为因变量, 应用 SPSS 进行回归分析. 计算地点为哈尔滨等 16 个地区, 计算时间为 10 月 15 日~次年 4 月 15 日, 回归模型如下:

$$E_c = a \cdot S + b \cdot R_{wus} + c \cdot K_n + d \cdot K_t + e \cdot \rho + f.$$

式中: E_c 为农村住宅采暖能耗, $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^2$; S 为体形系数; R_{wus} 为南向窗墙面积比; K_n 为非透明围护结构传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; K_t 为南向透明围护结构传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ 为非透明围护结构吸收系数; a, b, c, d, e, f 分别为系数, 见表 4.

表 4 多元线性回归模型系数表

Tab.4 Coefficients of multiple linear regression models

地点	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	R^2
漠河	6.82	99.52	128.74	-5.41	-32.30	135.55	1.00
嫩江	-0.72	60.18	105.05	-3.08	-29.01	123.96	1.00
齐齐哈尔	-8.82	25.28	81.00	-1.26	-24.67	110.22	1.00
哈尔滨	4.62	73.21	93.83	-4.10	-23.64	101.86	1.00
敦化	1.74	63.38	89.10	-3.50	-23.17	98.94	1.00
长春	-11.53	16.41	73.41	-0.83	-23.15	105.04	1.00
前郭尔罗斯	51.84	100.78	75.02	-4.17	-65.45	73.07	1.00
临江	-0.54	49.78	78.37	-2.63	-21.53	93.07	1.00
彰武	-1.86	45.66	72.43	-2.58	-19.82	88.41	1.00
沈阳	-5.70	37.34	66.91	-2.13	-18.38	85.46	1.00
本溪	-1.30	44.05	71.13	-2.44	-19.52	86.09	1.00
宽甸	-2.64	43.95	69.88	-2.51	-18.87	85.32	1.00
海拉尔	2.92	63.73	105.78	-3.07	-29.29	119.58	1.00
阿尔山	9.59	96.82	117.39	-5.24	-28.91	115.25	1.00
西乌珠穆沁旗	-9.41	13.94	80.87	-0.19	-26.46	110.11	1.00
通辽	-54.16	-19.57	76.56	-0.11	14.81	118.97	1.00

5 结 论

1) 室外平均干球温度为 $-18.73 \sim 7.74$ °C 时, 寒地农村住宅体形系数减小 0.1, 采暖能耗降低 15.57%, 其体形系数应控制在 0.65 以内; 当窗墙面积比相同时, 农村住宅采暖能耗由低至高排列顺序为: 南向 < 西向 < 东向 < 北向, 北向窗墙比减小 0.1, 采暖能耗降低 4.15%; 非透明围护结构传热系数减小 0.1, 采暖能耗降低 9.35%; 北向透明围护结构传热系数减小 0.1, 采暖能耗降低 0.38%; $270^\circ \sim 315^\circ$ (正南及南偏东) 为寒地农村住宅最佳朝向; 吸收系数增加 0.1, 采暖能耗降低 1.2%。

2) 室外干球温度为 $19.71 \sim 39.52$ °C 时, 黑色木质材料在白天可达到 55.8 °C, 其表面温度为白色木质材料的 1.52 倍。

3) 室外干球温度为 $-13.74 \sim -26.44$ °C 时, 附加阳光间最高温度为 17.74 °C, 平均温度比室外温度高 12.16 °C, 其能够有效改善室内热环境。

4) 室外干球温度为 $-17.75 \sim -21.06$ °C 时, $40 \sim 200$ mm 的冰雪覆盖层能够将屋面外表面温度提高 $1.98 \sim 3.19$ °C, 这表明冰雪对农村住宅屋面具有保温作用。

5) 通过对各影响因素进行实地测试和模拟计算, 建立了多元回归模型, 该模型能够准确预测寒地农村住宅采暖能耗, 为建筑师及农村居民设计建造节能住宅提供参考。

参 考 文 献

[1] INDRAGANTI M, RAO K D. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: a field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations[J]. Energy and buildings,

2010, 42(3): 273-281. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.003.

- [2] ADUNOLA A O. Evaluation of urban residential thermal comfort in relation to indoor and outdoor air temperatures in Ibadan, Nigeria [J]. Building and Environment, 2014, 75: 190-205. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.02.007.
- [3] ZINZI M, AGNOLI S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region[J]. Energy and buildings, 2012, 55: 66-76. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.024.
- [4] CORGNATI S P, D'OCA S, FABI V, et al. Leverage of behavioural patterns of window opening and heating set point adjustments on energy consumption and thermal comfort in residential buildings [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014: 23-31. DOI: 10.1007/978-3-642-39584-0_3.
- [5] ATTIA S, EVRARD A, GRATIA E. Development of benchmark models for the Egyptian residential buildings sector [J]. Applied Energy, 2012, 94: 270-284. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.01.065.
- [6] EKICI B B, AKSOY U T. Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5352-5358. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.10.021.
- [7] BANOS R, MANZANO-AGUGLIARO F, MONTOYA F G, et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1753-1766. DOI: 10.1016/j.rser.2010.12.008.
- [8] BANOS R, MANZANO-AGUGLIARO F, MONTOYA F G, et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1753-1766. DOI: 10.1016/j.rser.2010.12.008.
- [9] OZGENER O. Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings [J]. Energy, 2010, 35(1): 262-268. DOI: 10.1016/j.energy.2009.09.018.
- [10] ALLARD A. A linear data-driven system identification methodology for an active/passive solar thermal storage system and application to a solar house[D]. Montreal, Quebec: Concordia University, 2013.
- [11] ATHIENITIS A K, SANTAMOURIS M. Thermal analysis and design of passive solar buildings[M]. London: Routledge, 2013.
- [12] SAGE-LAUCK J S, SAILOR D J. Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building[J]. Energy and Buildings, 2014, 79: 32-40. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.04.028.
- [13] HUANG M J, EAMES P C, MCCORMACK S, et al. Microencapsulated phase change slurries for thermal energy storage in a residential solar energy system [J]. Renewable Energy, 2011, 36(11): 2932-2939. DOI: 10.1016/j.renene.2011.04.004.
- [14] FEUSTEL H E, STETIU C. Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application[J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011. DOI: 10.2172/486124.
- [15] MILLS B, SCHLEICH J. Residential energy-efficient technology adoption, energy conservation, knowledge, and attitudes: An analysis of European countries[J]. Energy Policy, 2012, 49: 616-628. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.07.008.
- [16] JGJ26—2010, 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] GB 50824—2013, 农村居住建筑节能设计标准[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.