

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.01.006

# 自然运行下乡村太阳能建筑热工参数 对室内空气温度的影响

桑国臣, 韩艳, 朱轶韵, 黄鑫, 赵钦

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 我国西北地区太阳能资源丰富, 但传统乡村建筑的太阳能热利用效率并不理想。以宁夏中卫地区的气候特征和乡村建筑模型为例, 采用调研测试与建筑热平衡分析相结合的方法, 揭示了自然运行条件下乡村太阳能建筑的构造参数对冬季室内空气温度的影响规律。结果表明, 建筑的南向窗墙面积比、外墙传热系数对冬季室内温度影响显著, 而外窗的构造及热工参数影响较小。南向窗墙面积比由 0.30 增大至 0.55 时, 采暖期室内平均温度可提高 35.9%, 最冷月室内平均温度可提高 153.3%。南向窗墙面积比为 0.5 时, 采用 SI-3 型夹芯保温构造墙体, 自然运行条件下, 采暖期平均室内温度可达 10.2℃, 1 月份室内平均温度可达 5.2℃。研究结果可为西北乡村太阳能采暖建筑构造优化及室内热环境改善提供理论参考。

**关键词:** 宁夏地区; 乡村太阳能建筑; 自然运行; 室内温度; 热工参数

**中图分类号:** TU111.4<sup>+5</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2016)01-0030-05

## Effect of thermal parameters of rural solar buildings on indoor air temperature under natural operating conditions

SANG Guochen, HAN Yan, ZHU Yiyun, HUANG Xin, ZHAO Qin

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Northwest China has abundant solar energy, which, however, is utilized inefficiently in the traditional rural building. Combination of investigation and thermal balance analysis is implemented in the paper based on the climate characteristics and rural building model in Zhongwei, Ningxia, to reveal the influence of the construction parameters on the indoor temperature. The survey results indicate that the south window-wall ration and heat transfer coefficient of exterior wall have prominent effect on the indoor temperature, whilst the construction and thermal parameter of exterior window have slight effect. There is an upward trend with the south window-wall ratio from 0.30 to 0.55, the average indoor temperature during heating period and the coldest month would rise by 35.9% and 153.3%. The average indoor temperature during heat period reached 10.2℃, when SI-3 sandwich insulation wall was applied and south window-wall ratio was 0.50. The results obtained from this study could provide theoretical reference for the improvement of indoor thermal environment and envelope optimization in the rural area in northwest of China.

**Key words:** Ningxia Area; rural solar building; natural operation; indoor temperature; thermal parameters

我国太阳能资源丰富, 但分布并不均衡, 其中西北大部分地区属于太阳辐射资源丰富区, 年均总辐射值在 4 200 MJ/(m<sup>2</sup> · a) 以上, 年均日照时数在 2 500 h 以上<sup>[1-2]</sup>。但是西北地区生态环境脆弱、经

济发展滞后。发展太阳能采暖乡村建筑, 对于解决采暖用能与生态保护之间的矛盾具有积极的作用<sup>[3]</sup>。宁夏自治区中卫地区位于西北腹地, 处于宁、甘、蒙三省区交汇地带, 其气候特征与民居形式均具

**收稿日期:** 2015-10-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51278419); 陕西省科学技术研究发展计划项目(社发攻关)(2012K12-04-01); 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(2013JK0945)

**作者简介:** 桑国臣, 男, 博士, 副教授, 研究方向为建筑节能与节能材料。E-mail: sangguochen@xaut.edu.cn

有西北地区的代表性<sup>[4]</sup>。该地区采暖期长达 137 天,平均气温为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度约为 30%<sup>[5]</sup>,水汽含量少,大气透明度较高,因而日照强烈,年平均日照时数可达 3 796 h 以上,年累计太阳辐射总量达 5 893 MJ/m<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。丰富的太阳能资源为当地乡村民居冬季采暖提供了必要的能源条件,但由于传统乡村建筑缺乏科学的热工设计,太阳能热利用效果不十分理想。

本文以该地区典型的乡村建筑作为研究对象,分析自然运行条件下围护结构热工参数对采暖期室内温度的影响规律,探索乡村节能建筑构造优化及室内热环境改善的有效途径。

## 1 典型建筑参数与室内热状况

课题组通过对宁夏中卫地区乡村建筑实地调研,获取了当地典型乡村建筑的基本特征参数,见表 1。

表 1 典型建筑基本特征参数

Tab. 1 Basic characteristic parameters of typical building

建筑 面积 /m <sup>2</sup>	层高 /m	窗墙面积比		平面尺寸/m	
		南向	东、西、 北向	东西轴线 长度	南北轴线 长度
115.0	3.3	0.3	0.0	21.3	5.4

该地区的典型建筑为南北朝向,东西轴线长、南北轴线短,外墙为 370 mm 实心粘土砖且外贴灰白色墙砖,屋顶为双面挂瓦坡屋顶,建筑仅南向开窗,且普遍采用铝合金单玻推拉窗。典型建筑的特征参数表明,该地区乡村建筑已经融合了一些对太阳能热利用的思想和手段。

为探究典型建筑的太阳能热利用效果,课题组选取了一栋代表性建筑,于 2015 年 1 月 17 日对其进行室内热环境测试,测试期间无辅助热源采暖,测试时间为 24 小时持续测试,典型建筑南立面图及测试结果分别见图 1 和图 2。



图 1 典型乡村建筑南立面

Fig. 1 The south elevation of typical rural building

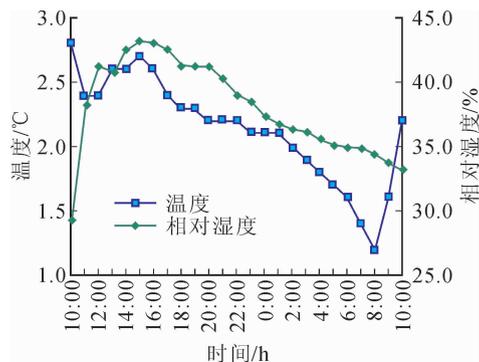


图 2 室内温湿度测试值

Fig. 2 Test values of indoor temperature and humidity

由图 2 可知,室内相对湿度适中,平均值为 38.0%,但室内温度较低,平均值仅为 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 。当地民居自然运行状态下冬季采暖期室内热状况较差,表明建筑的被动式集热效果并不理想。

## 2 室内温度影响因素分析

### 2.1 围护结构传热的外边界条件

建筑所受到的室外热作用是室外空气温度、太阳直射辐射、天空散射辐射、地面反射辐射及有效长波辐射散热作用的综合作用。由于太阳直射辐射具有朝向不均衡特点,与一般内陆地区相比,太阳辐射度较高的宁夏中卫地区<sup>[1,4]</sup>,室外热作用的朝向差异性更为显著。

因此采用“室外综合温度  $t_{sa}$ ”作为围护结构传热分析的外边界条件<sup>[6-8]</sup>,能够更准确地反映出室外热环境对建筑的综合作用特征。

根据文献[7]、[8]计算不同朝向室外综合温度,见式(1)。

$$t_{sa} = t_e + \frac{q_s + q_R}{\alpha_e} - \frac{q_e}{\alpha_e} \quad (1)$$

式中, $q_e$  为外表面有效长波辐射热量;围护结构外表面对太阳辐射热的吸收系数  $\rho_e$  取 0.74<sup>[7]</sup>;外表面换热系数  $\alpha_e$  取 23.0 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[7]</sup>;  $q_s$ 、 $q_R$  分别为围护结构外表面所吸收的地面反射辐射热量和太阳辐射热量(W/m<sup>2</sup>)。

根据典型气象年数据<sup>[1]</sup>,计算出宁夏中卫地区采暖期不同朝向围护结构室外综合温度、室外空气温度平均值和集热面日平均太阳辐射强度,结果见表 2。

从表 2 可见,不同朝向室外综合温度平均值有所不同,其中水平面由于长波辐射较大,温度值最低;垂直面中南向最高,北向最低,东向和西向介于南向与北向之间。

表2 宁夏中卫地区采暖期室外温度与太阳辐射强度平均值

Tab.2 Outdoor temperature and solar radiation intensity in Zhongwei of Ningxia Province

集热面日平均太阳 辐射强度/(W/m <sup>2</sup> )	室外空气综合温度/℃					室外空气 温度/℃
	水平面	南向垂直面	东向垂直面	西向垂直面	北向垂直面	
194.6	-0.8	3.4	1.3	1.3	0.4	-0.5

## 2.2 室内温度影响因素分析

直接受益式太阳能建筑,在自然运行状态下的热平衡方程<sup>[9-10]</sup>见式(2)。

$$q_{CC} + q_{1,H} = q_{H,T} + q_{INF} \quad (2)$$

式中, $q_{CC}$ 为单位建筑面积直接受益窗集热量(W/m<sup>2</sup>); $q_{1,H}$ 为单位建筑面积的建筑物内部得热(包括炊事、照明、家电和人体散热),取3.80(W/m<sup>2</sup>); $q_{H,T}$ 为单位建筑面积通过围护结构的传热耗热量(W/m<sup>2</sup>); $q_{INF}$ 为单位建筑面积的空气渗透耗热量(W/m<sup>2</sup>)。

$$q_{CC} = I_{mvs} \cdot \tau_{mvs} \cdot \alpha_a \cdot A_g \cdot X_m \quad (3)$$

式中, $I_{mvs}$ 为南立面日平均总辐射量(W/m<sup>2</sup>); $\tau_{mvs}$ 为通过玻璃和投射在南立面上的日平均辐射量的比值<sup>[9-10]</sup>; $\alpha_a$ 为透过玻璃后被集热系统吸收的和透过玻璃的日平均辐射量的比值<sup>[9-10]</sup>; $A_g$ 为玻璃窗(包括玻璃和窗框)的面积(m<sup>2</sup>); $X_m$ 为玻璃窗的有效透光面积系数<sup>[9-10]</sup>。

式(2)中的 $q_{H,T}$ 可由下式计算:

$$q_{H,T} = q_{Hq} + q_{Hw} + q_{Hd} + q_{Hmc} \quad (4)$$

式中, $q_{Hq}$ 、 $q_{Hw}$ 、 $q_{Hd}$ 和 $q_{Hmc}$ 分别为折合到单位建筑面积上单位时间内通过墙、屋面、地面和门窗的传热量(W/m<sup>2</sup>)。

$$q_{Hq} = \frac{\sum_{i=1}^m q_{Hqi}}{A_0} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{qi} F_{qi} (t_n - t_{sa})}{A_0} \quad (5)$$

$$q_{Hw} = \frac{K_w F_w (t_n - t_{saL})}{A_0} \quad (6)$$

$$q_{Hd} = \frac{K_d F_d (t_n - t_e)}{A_0} \quad (7)$$

$$q_{Hmc} = \frac{\sum_{i=1}^k q_{Hmci}}{A_0} = \frac{\sum_{i=1}^k K_{mci} F_{mci} (t_n - t_e)}{A_0} \quad (8)$$

式中, $t_n$ 、 $t_e$ 和 $t_{sa}$ 分别为室内、室外空气温度平均值和各朝向立面所对应的室外空气综合温度值(℃); $t_{saL}$ 为水平面室外空气综合温度值(℃); $i$ 为各外墙及门窗的编号; $m$ 和 $k$ 分别为外墙及门窗的总数; $K_{qi} F_{qi}$ 、 $K_w F_w$ 、 $K_d F_d$ 和 $K_{mci} F_{mci}$ 分别为外墙、屋面、地面和门窗的传热系数与其对应面积的乘积; $A_0$ 为建筑面积(m<sup>2</sup>)。

$$q_{INF} = \frac{(t_n - t_e)(c_p \rho N V)}{A_0} \quad (9)$$

式中, $c_p$ 为干空气的定压质量比热容,本文取 $c_p = 0.28 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ <sup>[5,7]</sup>;室外温度下的空气密度

$\rho = 353/(t_e + 273) (\text{kg}/\text{m}^3)$ <sup>[7]</sup>;换气次数 $N$ 取0.5(1/h)<sup>[5]</sup>; $V$ 为换气体积(m<sup>3</sup>)。

由公式(2)~(9),可推出室内空气温度计算公式为:

$$t_n = \left[ (q_{cg} + q_{ab} + q_{1,H}) \cdot A_0 + t_{sa} \cdot \sum_{i=1}^m K_{qi} F_{qi} + t_{saL} \cdot K_w F_w + t_e \cdot (k_d F_d + \sum_{i=1}^k K_{mci} F_{mci} + c_p \cdot \rho \cdot N \cdot V) \right] / \left( \sum_{i=1}^m K_{qi} F_{qi} + K_w F_w + K_d F_d + \sum_{i=1}^k K_{mci} F_{mci} + c_p \cdot \rho \cdot N \cdot V \right) \quad (10)$$

由式(10)可知,当室外热环境确定后,特定建筑模型的室内温度主要受南向窗墙面积比、外墙传热系数、外窗的类型及传热系数等多种因素影响。

## 3 围护结构热工参数分析与优化

### 3.1 南向窗墙面积比

南向外窗是直接受益式太阳能建筑的重要集热部件,并且室内平均温度随窗墙面积比的增大而提高,但对于不同地区和不同建筑模型,室内平均温度随窗墙比的变化趋势会有所差别。对于宁夏地区典型建筑,当外墙采用370mm厚粘土砖墙体,屋顶采用传热系数为0.4W/(m<sup>2</sup>·K)的保温构造屋顶,南向外窗采用铝合金单玻窗时,自然运行条件下冬季室内平均温度随窗墙面积比的变化如图3所示。

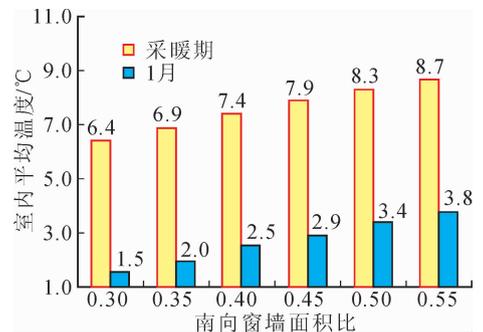


图3 窗墙比对冬季室内平均温度的影响  
Fig.3 Effect of window-wall ratio on the average indoor temperature in the winter

由图3可见,当窗墙比由0.30增大至0.55时,采暖期(11月15日至次年3月31日)室内平均温度由6.4℃增加到8.7℃,提高了35.9%,最冷月(1月)室内平均温度由1.5℃增加到3.8℃,提高

了 153.3%,增加南向窗墙面积比是提高宁夏中卫地区太阳能建筑室内温度的有效途径。但同时由于太阳辐射的周期性特点,随窗墙面积比的增大,室内温度波动也随之增大<sup>[6]</sup>。文献[2]对直接受益式太阳能采暖建筑的南向窗墙面积比下限值的规定,本文采用 0.50 的南向窗墙面积比,进行后续分析。

### 3.2 外墙构造与传热系数

作为建筑围护结构的主体部分,外墙的传热系数对建筑热损失及室内温度具有显著影响<sup>[6]</sup>。外墙

的传热系数取决于墙体构造种类和构成材料,而墙体的构造方式和构成材料与当地的技术经济条件和材料资源状况密切相关。宁夏中卫地区乡村建筑外墙多采用粘土砖、灰砂砖以及多孔砖自保温墙体(Self thermal insulation wall,即“STI”),少量新建建筑采用了夹芯保温构造墙体(Sandwich insulation wall,即“SI”)。课题组通过对该地区墙体构造方式和墙材资源情况的调研,确定以下六种代表性墙体构造类型及热工参数,见表 3。

表 3 墙体构造组成及热工参数  
Tab. 3 The conformation and thermal parameter of external walls

构造类型	构造方式	厚度/mm	导热系数/ (W/(m·K))	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	传热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
无保温构造	STI-1	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	1.54
		实心粘土砖	0.81	1800	
	STI-2	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	1.89
		灰砂砖	1.10	1900	
	STI-3	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	1.20
		KP1 多孔砖	0.58	1400	
夹芯保温构造	SI-1	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	0.75
		实心粘土砖	0.81	1800	
	SI-2	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	0.83
		灰砂砖	1.10	1900	
	SI-3	水泥砂浆(外)+水泥砂浆(内)	0.93	1800	0.67
		KP1 多孔砖	0.58	1400	
		膨胀珍珠岩	0.058	80	

注:①墙体内表面换热阻取 0.11(m<sup>2</sup>·K)/W,外表面换热阻取 0.04(m<sup>2</sup>·K)/W,保温层导热系数修正系数取 1.1<sup>[11]</sup>;②墙体材料的热工参数根据文献[7]、[12]确定。

根据式(10),分析表 3 中的六种代表性构造墙体对典型建筑模型冬季室内温度的影响,结果见图 4。

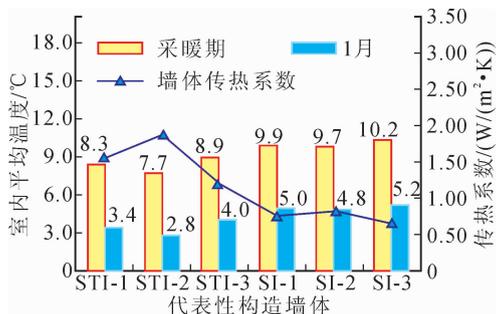


图 4 墙体构造与传热系数对室内平均温度的影响

Fig. 4 Effect of external wall configuration and heat transfer coefficient on average indoor temperature

从图 4 可看出,室内平均温度随外墙传热系数的减小而明显提高。传热系数为 0.67 W/(m<sup>2</sup>·K)的 SI-3 型夹芯保温构造墙体相比 STI-2 型灰砂砖墙体传热系数降低了 64.6%,采暖期平均室内温度提高

了 32.5%,达到 10.2 °C,1 月份室内平均温度提高了 85.7%,达到 5.2 °C。图 4 中的数据表明,外墙传热系数降低对室内温度提高具有显著影响,当采用 SI-3 型节能构造外墙时,在自然运行条件下该地区典型建筑采暖期室内平均温度可达 10 °C 以上,已接近农村建筑室内热舒适的下限值<sup>[5]</sup>。

### 3.3 外窗类型与传热系数

南向外窗既是太阳能建筑的日间集热部件,也是主要的夜间失热部件。南向集热窗的净得热量大小,取决于当地的太阳辐射强度与室内外的温度差两个主要因素。针对宁夏中卫地区的室外气象条件,本文选择四种常规的外窗(见表 4)分析其对室内温度的影响。在南向窗墙面积比为 0.5,外墙采用传热系数为 0.67 W/(m<sup>2</sup>·K)的 SI-3 型节能构造墙体时,四种外窗对典型建筑采暖期室内平均温度的影响见图 5。

表4 外窗类型及其热工参数<sup>[10-11]</sup>

Tab.4 The types and thermal parameters of the external windows

类型	外窗构造	传热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	有效面积 系数	透过 系数
类型1	铝合金单框单玻窗	6.40	0.80	0.76
类型2	塑料单框单玻窗	4.70	0.70	0.76
类型3	铝合金单框双玻窗	3.60	0.80	0.58
类型4	塑料单框双玻窗	2.50	0.70	0.68

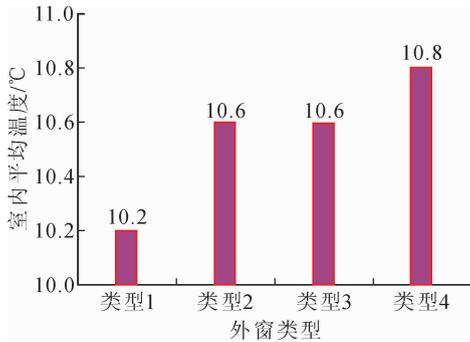


图5 外窗对采暖期室内平均温度的影响

Fig.5 Effect of external window on the average indoor temperature in the heating period

由图5可见,采暖期室内平均温度与外窗的类型有一定的相关性,不同热工参数与构造的外窗对室内温度具有一定的影响,但影响效果较小。采用铝合金单框双玻窗仅比铝合金单玻窗提高了0.4℃,塑料单框双玻窗也仅比塑料单玻窗提高了0.2℃。其原因在于,虽然相同框材的双玻窗比单玻窗传热系数小,但是双玻窗的透过系数却小于单玻窗(见表4)。当采用导热系数低的塑料框材替代铝合金框材时,对应的单玻窗和双玻窗集热量均有所增加,单玻窗室内平均温度提高了0.4℃,双玻窗室内平均温度提高了0.2℃。因此,对于常规类型外窗,在宁夏中卫地区气候条件下,外窗构造方式与热工参数对太阳能建筑室内温度影响较小。

## 4 结论

1) 在自然运行条件下,太阳能采暖建筑冬季室内平均温度主要受南向窗墙面积比、围护结构传热系数的影响,受外窗传热系数的影响较小。

2) 增大南向窗墙比是提高宁夏中卫地区太阳能建筑冬季室内平均温度的有效途径,当窗墙比由0.30增大至0.55时,采暖期室内平均温度可提高35.9%,最冷月(1月)室内平均温度可提高153.3%。

3) 采用低传热系数的夹芯保温构造外墙对室内温度提高影响显著。自然运行条件下,南向窗墙面积比为0.5的典型建筑模型,采用SI-3型夹芯保温构造墙体替代STI-2型灰砂砖墙体,采暖期平均

室内温度提高32.5%,达到10.2℃,元月份室内平均温度提高85.7%,达到5.2℃。

4) 对于常规种类外窗,在宁夏中卫地区气候条件下,采暖期室内平均温度受外窗构造方式与热工参数的影响较小。

## 参考文献:

- [1] 张晴原, Joe Huang. 中国建筑用标准气象数据库[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 中国建筑设计研究院, 山东建筑大学. 被动式太阳能建筑技术规范: JGJ/T 267-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738-1749.  
ZHOU Yang, WU Wenxiang, HU Ying, et al. The temporal-spatial distribution and evaluation of potential solar energy resources in North West China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1738-1749.
- [4] 桑国臣, 陈得勇, 韩艳, 等. 宁夏中卫地区被动式太阳能民居测试研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 273-276.  
SANG Guochen, CHEN Deyong, HAN Yan, et al. Measuring study of passive solar house for dwelling building in Ningxia Zhongwei Area[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 273-276.
- [5] 中国建筑科学研究院. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ26-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 桑国臣, 刘加平. 太阳能富集地区采暖居住建筑节能构造研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 416-422.  
SANG Guochen, LIU Jiaping. Study of energy efficiency envelope configuration of heating residential buildings in solar radiation zone[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(3): 416-422.
- [7] 刘加平. 建筑物理[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [8] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [9] 朱轶韵. 宁夏乡村建筑节能构造体系优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.  
ZHU Yiyun. Optimal study of energy-saving building configurations in Ningxia rural areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [10] 李元哲. 被动式太阳房热工设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [11] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范: GB50176-93[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [12] 中国建筑科学研究院, 中国建筑设计研究院. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T50824-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.