

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.005

夏热冬暖地区乡村建筑立体绿化节能改造性能研究

刘晓勤¹, 刘龙斌², 丁云飞³, 黄 任³

(1. 湖州职业技术学院 建筑工程学院, 浙江 湖州 313000; 2. 广东省建筑设计研究院, 广东 广州 510010;

3. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 夏热冬暖地区既有乡村建筑围护结构热工性能较差, 室内热环境不佳, 空调使用能耗高, 在新农村建设工程中有必要对其进行绿色节能改造。立体绿化能够有效利用原有建筑结构, 实现建筑低成本的节能改造。搭建了立体绿化热工性能对比测试室, 对夏热冬暖地区屋顶绿化及垂直绿化围护结构的热工性能进行了测试; 建立了既有乡村建筑能耗分析模型, 分析了其围护结构在不同绿化形式下的节能改造效果。结果显示: 与普通屋面相比, 绿化屋面内外表面温度更稳定, 其屋面内表面温度最高下降 4.4℃, 屋面外表面最高下降 16.8℃, 逐时空调负荷最大值减小 14.79%, 空调季耗冷量减小 15.85%; 与普通墙体相比, 采用附架式垂直绿化时, 墙体外表面风速和太阳辐射度分别减少了 80% 和 90%, 逐时空调负荷最大值减小 16.32%, 空调季耗冷量减小 16.62%; 如同时采用屋面绿化及墙体垂直绿化, 逐时空调负荷最大值减小 32.26%, 空调季耗冷量减小 33.90%。

关键词: 立体绿化; 乡村建筑; 节能改造; 能耗

中图分类号: TU55+1.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)01-0033-08

Study on the energy-saving renovation performance of rural buildings based on three-dimensional greening in hot summer and warm winter areas

LIU Xiaoqin¹, LIU Longbin², DING Yunfei³, HUANG Ren³

(1. Institute of Civil Engineering, Huzhou Vocational & Technical College, Huzhou 313000, China;

2. Guangdong Province Architectural Design and Research Institute, Guangzhou 510010, China;

3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In the hot summer and warm winter area, the thermal performance of the rural building envelope is poor, the indoor thermal environment is not good, and the energy consumption of air conditioning is high. It is necessary to carry out green energy-saving renovation in the new rural construction project. Three-dimensional greening can effectively use the original building structure to achieve the low-cost energy-saving renovation of the building. A three-dimensional greening thermal performance comparison test room was built by which to test the thermal performance of the roof greening and vertical greening enclosure in the hot summer and warm winter area. The energy analysis model of the existing rural buildings was established, with the energy-saving retrofit effect of different greening forms of the envelope structure analyzed. The results show that when roof greening is used, the temperature of the inner and outer surfaces of the roof remains stable relative to the un-greened roof. The inner surface temperature of the roof can be reduced by 4.4℃, the outer surface of the roof can be reduced by 16.8℃, and the maximum hourly load of the roof can be reduced by 14.79%. In the air-conditioning season, the cooling capacity is reduced by 15.85%. When using the vertical greening, the external wind speed and solar irradiance of the wall are attenuated by 80% and 90%, respectively, the maximum hourly load is reduced by 16.32%, and the cooling capacity of the air conditioning season is reduced by 16.62%. At the

收稿日期: 2019-05-21; 网络出版日期: 2020-04-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200421.1414.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878187)

第一作者: 刘晓勤, 女, 副教授, 研究方向为建筑节能与暖通空调技术。E-mail: lxq-xj@126.com

same time, when roof greening and vertical greening are adopted, the maximum hourly load is reduced by 32.26% and the air-conditioning season cooling capacity is reduced by 33.90%.

Key words: three-dimensional greening; rural building; energy-saving renovation; energy consumption

我国建筑运行总能耗每年达 8.64 亿 t 标煤,约占全国能源消耗总量的 20%,年碳排放高达 22.2 亿 t 标煤^[1],建筑节能已是我国节能减排的重点工作。在夏热冬暖地区,大量乡村建筑热环境差,随着生活水平的提高,这些建筑逐渐安装了空调,但由于乡村建筑并未纳入建筑节能管理体系,导致建筑热工性能差,空调运行能耗高,迫切需要应用低成本适宜技术对乡村建筑进行节能改造^[2]。立体绿化是运用各种手段对具有可再生空间的建筑物进行多层次、多形式的绿化、美化的节能改造方法之一^[3]。将立体绿化应用于乡村建筑改造,不仅可显著改善热工性能,而且美化环境,与自然和谐共生,是乡村建筑节能改造适宜的低成本被动式技术^[4]。姜慧乐等^[5]以杭州市解放路及其周边地区的公共建筑物为研究对象,对基于群落结构的杭州市公共建筑立体绿化温湿效应进行了研究。黄思成等^[6]对北京地区建筑垂直绿化现状进行了分析,并从综合效益的角度为垂直绿化植物的选择提供了思路。吴玲等^[7]对上海市立体绿化的植物材料,特别是现代绿墙应用的植物材料进行了调查和分析。单银丽等^[8]在对上海、杭州等夏热冬冷地区建筑墙面垂直绿化技术及植物配置现状调研的基础上,提出了适用于该地区建筑墙面垂直绿化的植物配置措施。杨金雨露等^[9]对杭州市垂直绿墙进行调查,在分析杭州现有绿墙特点的基础上提出了推广应用建议。丁云飞课题组^[10-11]采用数值模拟和实验测试方法研究了立体绿化对建筑室内外环境的影响。Patrick Blanc^[12]分析了植物对建筑的影响以及“垂直花园”绿化体系构造、安装以及维护情况。Katia Perini^[13]分析了不同绿化墙体和裸露墙体的气流、温度变化,以及风速改变对建筑围护结构热阻的影响。上述文献表明,立体绿化节能优势明显,但针对夏热冬暖地区乡村建筑节能改造的应用效果还需进一步研究。夏热冬暖地区夏季炎热且持续时间长,太阳辐射强烈,降低夏季空调制冷能耗是建筑节能的重点任务,而提高围护结构隔热性能则是主要手段。在夏热冬暖地区采用立体绿化有其独特的优势,一方面可以强化围护结构隔热,改善室内环境,另一方面夏热冬暖地区全年气候均适合绿化植物的生长。本文以夏热冬暖地区乡村建筑为对象,搭建立体绿化热工性能对比

测试平台,并以某乡村建筑为例,建立 EnergyPlus 能耗分析模型,分析立体绿化的节能效果,开展基于立体绿化的建筑节能改造性能研究,为新农村建设提供参考。

1 既有乡村建筑围护结构热工性能

对广州市增城区 4 个乡村进行实地调研发现,由于目前乡村建筑还没有纳入节能监管体系,许多建筑仍然沿用传统的建筑形式与构造,许多建筑外墙采用 8 mm 釉面砖+10 mm 厚水泥砂浆+240 mm 厚普通烧结砖+10 mm 厚混合砂浆结构形式。图 1 是某既有乡村建筑实景图。



图 1 某乡村建筑实景图

Fig. 1 Real picture of a rural building

1.1 围护结构热工性能测试方案

如图 2 所示,应用热流计法现场测试墙体的热阻,所采用的仪器包括:控温箱(1.2 m×1.2 m)、大功率热风机(SK-4500)、热流检测仪(SK-FHRL1810W)、热阻式热流传感器、PT100 温度传感器。利用控温箱控制温度,保持墙体两侧的温差在 10℃ 以上^[14]。连续测试一周,每小时记录一次数据。现场测试如图 3 所示。

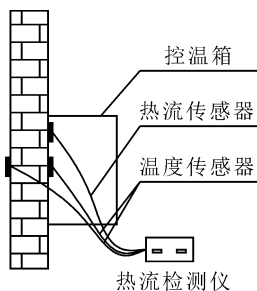


图 2 测试方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test method

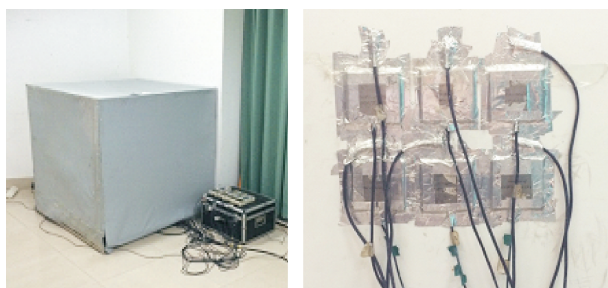


图3 测试现场图
Fig.3 Field test diagram

1.2 测试结果分析

从表1可以看出,既有乡村建筑外墙传热系数理论计算值及实测值均未达到《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准广东省实施细则》(DBJ15-50-2006)中对外墙的设计限值要求,且相差较大,因此对既有乡村建筑进行围护结构节能改造十分必要。

表1 外墙传热系数对比
Tab.1 Comparison of external wall heat transfer coefficients

围护结构	结构组成	传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)		
		理论计算值	实际测试值	标准设计限值
外墙	8 mm 厚釉面砖	2.02	1.97	≤ 0.7
	10 mm 厚水泥砂浆			
	240 mm 厚普通烧结砖			
	10 mm 厚混合砂浆			

2 立体绿化改造与测试分析

2.1 立体绿化改造方案

1) 屋面绿化:佛甲草具有节水、耐旱、耐寒、耐贫瘠和病虫害少、管理费用低等特点,是一种优良的屋面绿化植物。目前,屋面绿化主要有容器式、卷铺式等,考虑既有乡村建筑改造屋面承重必须在安全范围内,卷铺式佛甲草绿化屋面基质厚度约3~5 cm,在吸足水分的状态下最大湿重小于 80 kg/m^2 ,故采用卷铺式佛甲草绿化屋面方式,其施工流程及实景如图4所示。

2) 墙面垂直绿化:墙面垂直绿化是人为地将绿色植物覆盖在建筑物墙体上,形成绿色空间的做法,有预制挂箱式和藤蔓支架式。藤蔓支架式墙面绿化是通过搭建木架、金属丝网等辅助工具,使植物攀援在建筑墙面外的构架上,达到对建筑的遮阳效果;其

结构简单,施工方便,造价便宜,故墙面垂直绿化采用藤蔓支架式。

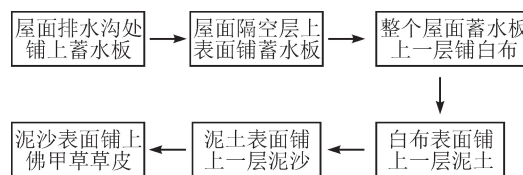


图4 卷铺式佛甲草绿化屋面施工流程及实景
Fig.4 Construction process and real scene of rolling flooring floss grass green roof

2.2 性能测试

为分析立体绿化建筑性能,搭建了两个相同的测试室,对其中一个围护结构进行立体绿化。对普通屋面及佛甲草绿化屋面内外表面进行温度测量,对垂直绿化墙面进行墙体近壁侧风速和太阳辐射度测量,并对测试结果进行对比分析。

室内外环境参数测量采用精密型温湿度仪(testo 625,德国),测试精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$;风速测量采用精密型叶轮风速仪(testo 416,德国),测试精度 $\pm 0.2 \text{ m/s}$;太阳辐射度测量采用太阳能辐射度测试记录仪(Survey200,中国),测试精度 $\pm 5\%$;绿化层温度由T型热电偶测量,测试精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,测点布置如图5(a)所示。

藤蔓支架式垂直绿化墙外表面的观测样点位于西向,分别设在墙面、绿化层中间点、绿化层表面、距绿化层面1 m处,观测高度为距地面1.5 m,测点布置如图5(b)所示。测试在2016年9月进行,测试日为晴天,室外最高/最低温度为 $37^\circ\text{C}/26^\circ\text{C}$,室外平均风速为 2.2 m/s 。

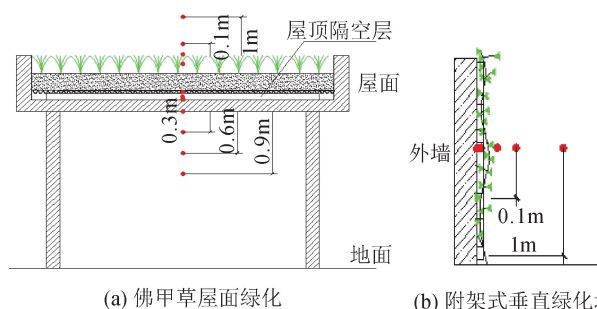


图5 测点布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of measuring points

2.3 结果分析

1) 屋面室外侧温度

图6是绿化屋面及普通屋面室外侧不同测点温度变化。从图中可以看出,在屋面室外侧测点处,普通屋面外表面温度最低为 26.1°C (6:00时),最高 46.6°C (14:00时),波动幅度为 20.5°C ,温度变化趋势与太阳辐射强度相关,呈现出早晚低、中午高,由于屋面的蓄热,到17:00时屋面外表面温度仍高达 43.4°C ;绿化屋面外表面(即屋面近隔空层表面)温度最低为 28.4°C (6:00时),最高 30.8°C (17:00时),波动幅度为 2.4°C ,全天温度变化趋势平坦,即使在14:00,其屋面外表面温度仅 29.8°C 。其余测点处呈现相同的变化趋势,由此可见,屋面绿化后,由于绿色植物的遮挡作用及植物表面水分的蒸发作用,可较大程度上降低屋面室外侧温度,且屋面外表面温度维持稳定($\pm 2.4^{\circ}\text{C}$);绿化前后,最大温差出现在14:00时,绿化屋面外表面温度比普通屋面低 16.8°C 。

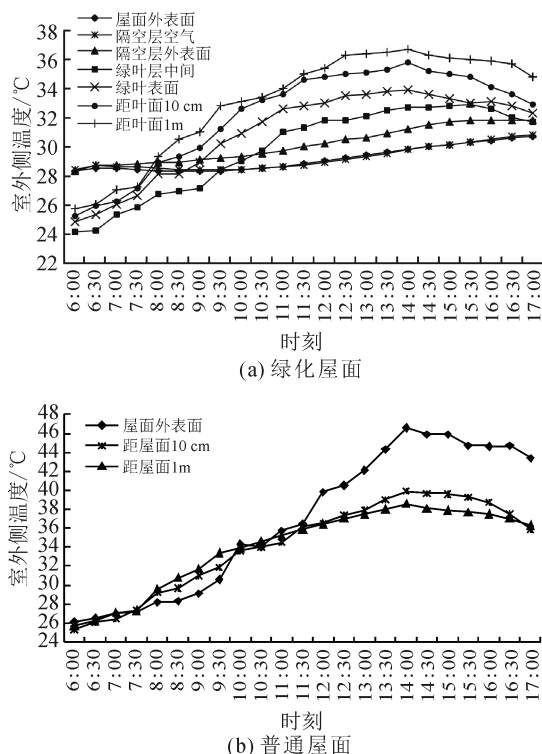


图6 屋面室外侧温度变化
Fig. 6 Outside side temperature of the roof changes

2) 屋面室内侧温度

图7是绿化屋面及普通屋面室内侧不同测点温度变化。从图中可以看出,在屋面室内侧测点处,普通屋面内表面温度最低为 27.7°C (6:00时),最高 34.6°C (15:00时),波动幅度为 6.9°C ,温度变化趋势呈现出早晚低、中午高,相对于屋面外表面温度变

化存在一定的延时效应;对于绿化屋面,屋面内表面温度最低为 28.1°C (6:00时),最高 30.6°C (17:00时),波动幅度为 2.5°C ;绿化前后,屋面内表面最大温差出现在15:00时,绿化屋面内表面温度仅 30.2°C ,比普通屋面低 4.4°C 。其余测点处呈现相同的变化趋势,由此可见,采取屋面绿化措施后,可明显降低屋面室内侧温度,不仅可以改善室内热环境,延迟空调运行时间,还可以降低空调负荷。

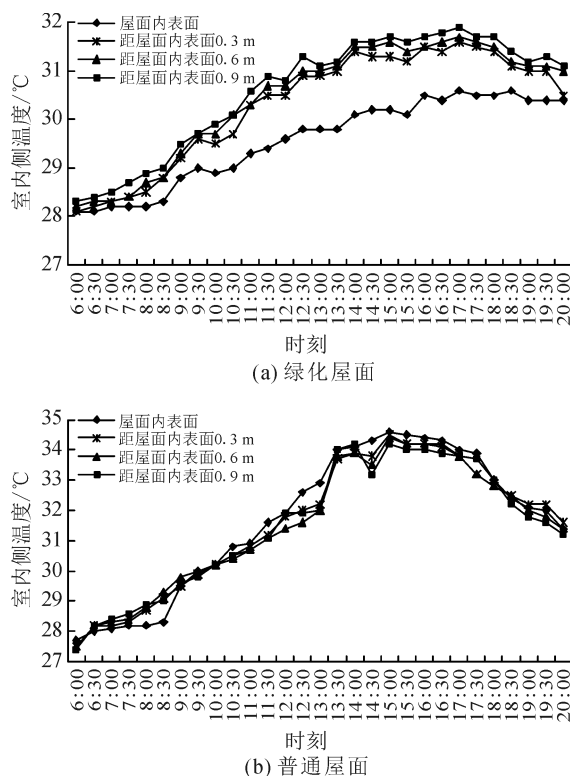


图7 屋面室内侧温度变化

Fig. 7 Indoor side temperature of the roof varies

3) 绿化墙对室外风速的影响

如图8所示,藤蔓附架式绿化墙植物层底面处平行墙面的空气流速最低,平均流速只有 0.5 m/s ,其次藤蔓层表面平均流速是 1.5 m/s ,而距绿叶面 1 m (室外环境)处平行墙面方向平均风速为 2.4 m/s 。可见,在测试日环境条件下,藤蔓附架式绿化墙表面风速衰减了约80%,有效降低了外墙表面的对流换热系数,增加了外墙热阻,在夏季可以减少因外墙传热造成的冷负荷,在冬季可以减少室内热损失,降低热负荷。

4) 绿化墙对太阳辐射度的影响

如图9所示,藤蔓附架式绿化墙植物层底面处的太阳辐射度最小,平均值为 47 W/m^2 ,其次藤蔓表面处的平均太阳辐射度为 127 W/m^2 ,距绿叶面 1 m 处的太阳辐射度最大,平均值为 477 W/m^2 。可见,在测试日环境条件下,藤蔓附架式绿化墙表面平

均太阳辐照度衰减了 90%, 具有较好的遮阳效果。需要注意的是, 藤蔓附架式绿化墙植物层的遮阳效果主要取决于绿化植物的茂密程度。

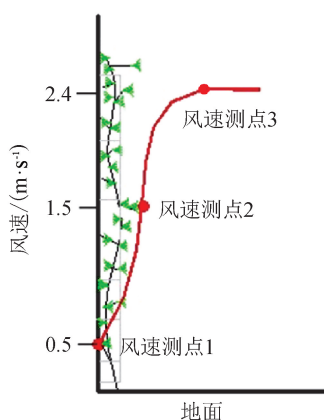


图 8 垂直绿化墙外表面各点风速变化趋势

Fig. 8 Wind speed change trend at each point on the external surface of vertical green wall

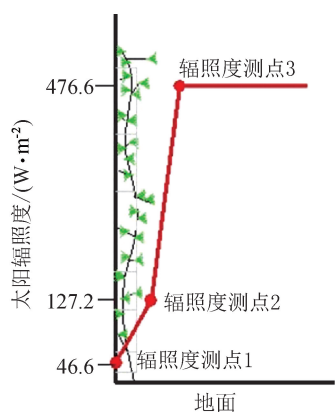


图 9 垂直绿化墙外表面太阳辐照度变化趋势

Fig. 9 Solar irradiance change trend at each point on the external surface of vertical green wall

3 立体绿化节能效果分析

利用能耗模拟软件 EnergyPlus 对立体绿化改造前后建筑负荷及能耗情况进行对比分析。

3.1 建筑模型

分析对象为广州市增城区某村 3 层传统建筑, 第一层层高为 3.6 m, 建筑面积 105 m²; 第二层层高为 3 m, 建筑面积为 96 m²; 第三层层高为 2.8 m, 建筑面积为 66 m²。

围护结构构造为:

1) 屋面: 找平层(15 mm 厚水泥砂浆)+210 mm 厚钢筋混凝土+找平层(15 mm 厚水泥砂浆);

2) 既有外墙: 8 mm 釉面砖+10 mm 厚水泥砂浆+240 mm 厚普通烧结砖+10 mm 厚混合砂浆;

3) 满足标准要求的推荐外墙: 25 mm 厚水泥砂

浆+190 mm 厚加气混凝土+20 mm 厚聚苯板+4 mm 厚粉刷石膏抹灰压入网格布;

4) 玻璃: 普通铝合金窗框+3 mm 普通玻璃;

5) 门: 底层大厅处采用 10 mm 厚钢化玻璃门, 传热系数为 5.82 W/(m²·K); 房间门采用木门, 传热系数为 4.65 W/(m²·K);

6) 墙体立面绿化: 藤蔓附架绿化(70 mm 厚);

7) 屋面绿化: 佛甲草种植屋面(10 cm 土壤层厚度);

8) 其它参数: 照明密度为 11 W/m², 设备负荷密度为 5 W/m²。

利用 EnergyPlus 进行建筑夏季冷负荷及耗冷量模拟, 空调运行时间从 5 月 1 日至 10 月 31 日。建筑模型如图 10 所示。

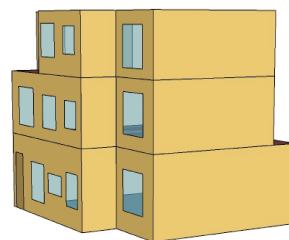


图 10 建筑模型

Fig. 10 Building model

3.2 模拟结果分析

3.2.1 建筑夏季逐时冷负荷对比

如图 11~图 15 所示, 对于所模拟的既有乡村建筑, 其逐时冷负荷最大值为 26.10 kW, 单位面积冷负荷为 97.75 W/m²; 而采用满足标准要求的推荐外墙结构时, 其逐时冷负荷最大值为 21.98 kW, 单位面积冷负荷为 82.32 W/m²。

当对乡村建筑单独进行屋面绿化改造时, 单位面积冷负荷为 83.30 W/m², 其逐时冷负荷最大值为 22.24 kW, 相对于未改造前逐时冷负荷最大值减小了 14.79%, 但依然高于采用推荐外墙时的负荷最大值。

当对乡村建筑单独进行墙体垂直绿化改造时, 单位面积冷负荷为 81.80 W/m², 其逐时冷负荷最大值为 21.84 kW, 相对于未改造前逐时冷负荷最大值减小了 16.32%, 其改造效果接近标准要求。

当同时采用屋面绿化及墙面垂直绿化时, 单位面积冷负荷为 66.22 W/m², 逐时冷负荷最大值为 17.68 kW, 相对于未改造前逐时冷负荷最大值减小了 32.26%, 节能改造效果较好, 满足要求。

3.2.2 建筑夏季耗冷量对比

如图 16 所示, 当夏季空调系统运行时, 对于既有乡村建筑, 其所需总冷量为 1.38×10⁸ kW·h; 而

采用满足《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》的外墙构造时,所需总冷量为 $1.13 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,采用屋面绿化及墙面垂直绿化后,各月耗冷量均有所减少。

其中,当单独采用屋面绿化时,其所需总冷量为 $1.16 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,相对于普通建筑减少了 15.85%,比满足节能标准建筑高 2.7%;当单独采用墙面垂直绿化时,其所需总冷量为 $1.15 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,相对于普通建筑减少了 16.62%,比满足节能标准

建筑高 1.8%;当同时采用屋面绿化及墙面垂直绿化时,其所需总冷量为 $9.11 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h}$,相对于普通建筑减少了 33.90%,比满足节能标准建筑低 19.4%。

由此可见,单独采用藤蔓附架绿化(70 mm 厚)或者佛甲草屋面绿化(10 cm 土壤层厚度)进行改造后,其能耗接近满足节能标准要求的建筑能耗,同时进行墙体及屋面绿化改造时,节能效果优于满足节能标准要求的建筑能耗。

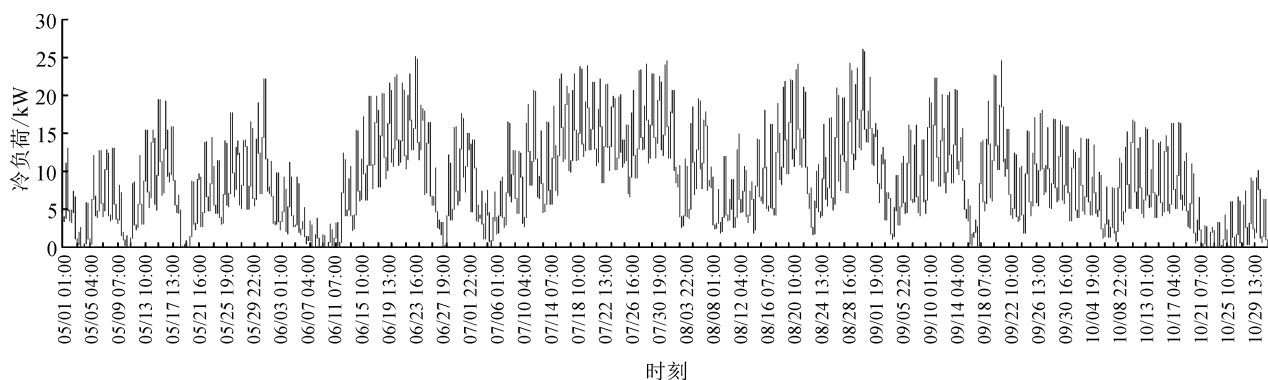


图 11 既有乡村建筑冷负荷

Fig. 11 Cooling load of rural buildings

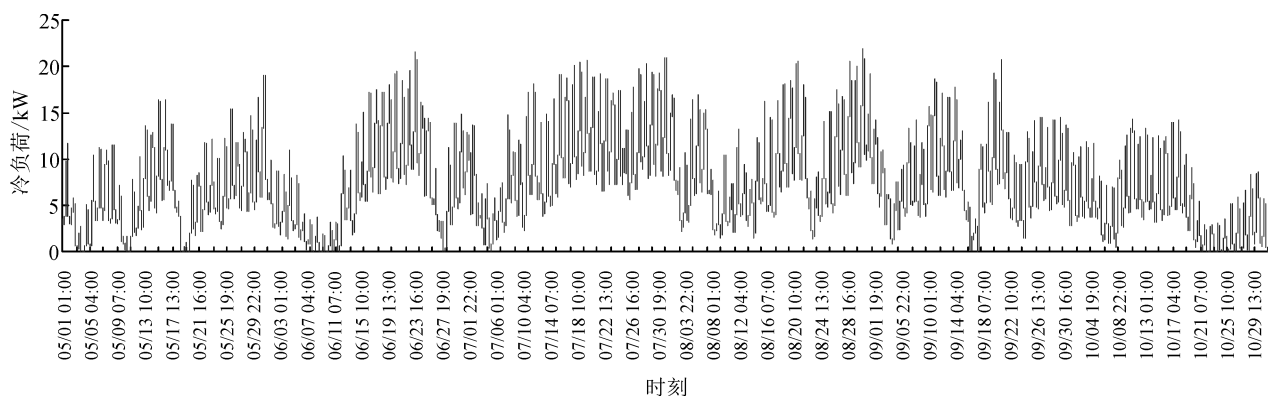


图 12 采用满足标准要求的推荐外墙结构时建筑冷负荷

Fig. 12 Cooling load when adopting recommended exterior wall structure meeting the standard requirements

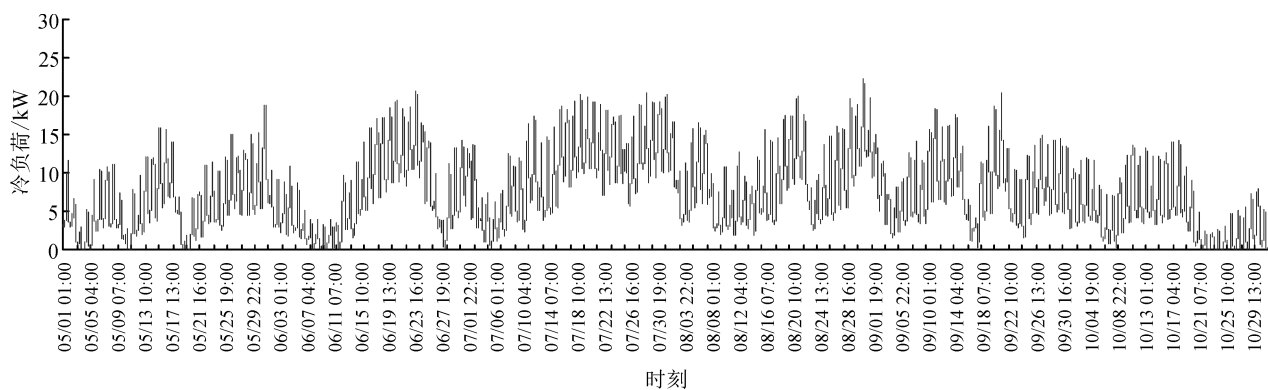


图 13 乡村建筑仅屋面绿化时冷负荷

Fig. 13 Cooling load of rural buildings when only roofing

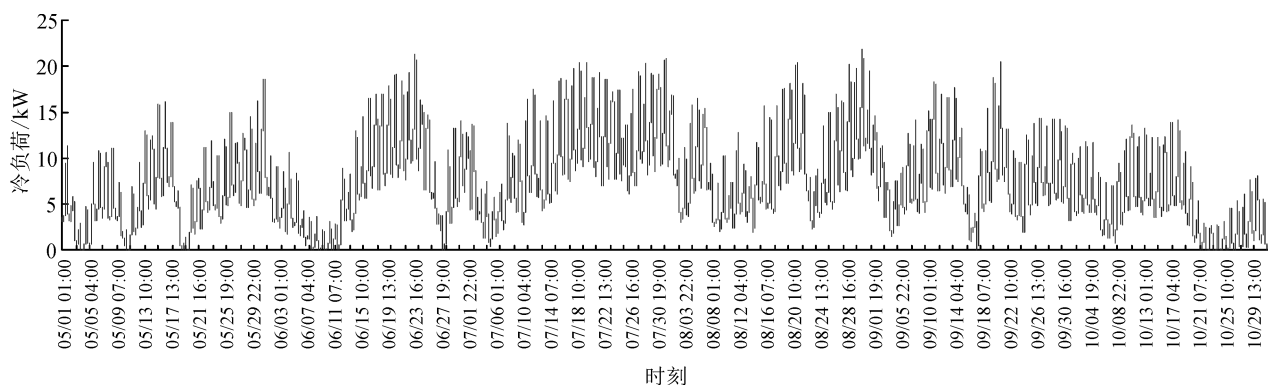


图 14 乡村建筑仅墙面绿化时冷负荷

Fig. 14 Cooling load of rural buildings when only wall greening

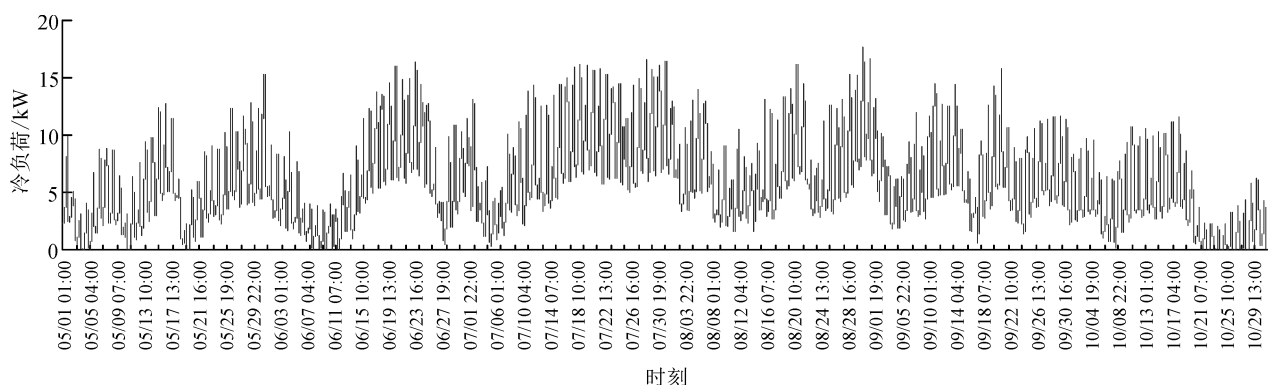


图 15 乡村建筑立体绿化(墙面+屋面)时冷负荷

Fig. 15 Cooling load of three-dimensional greening (wall + roof) of rural buildings

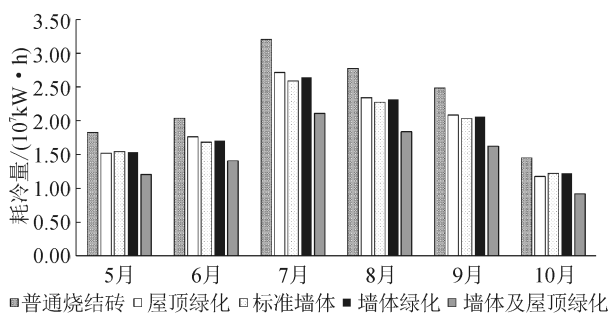


图 16 各月耗冷量分布

Fig. 16 Distribution of monthly cooling capacity

4 结 语

立体绿化可以在不改变原有建筑结构的条件下,实现乡村既有建筑绿色节能改造。对于所研究的既有乡村建筑,实验和模拟结果表明:与普通屋面相比,绿化屋面内外表面温度更稳定,其屋面内表面温度最高下降 4.4°C ,屋面外表面最高下降 16.8°C ,逐时空调负荷最大值减小 14.79% ,空调季耗冷量减小 15.85% ,比满足节能标准建筑高 2.7% ;与普通墙体相比,采用附架式垂直绿化时,墙体外表面风速和太阳辐照度分别减少了 80% 和 90% ,逐时空调负荷最大值减小 16.32% ,空调季耗冷量减小

16.62% ,比满足节能标准建筑高 1.8% ;如同时采用屋面绿化及墙体垂直绿化,逐时空调负荷最大值减小 32.26% ,空调季耗冷量减小 33.90% ,比满足节能标准建筑低 19.4% ,具有较好的节能效果。

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, 2016.
- [2] 赵钦,刘蓬晨,朱轶韵,等. 基于热舒适改善的陕南乡村民居被动式建筑设计策略[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 315-319.
ZHAO Qin, LIU Pengchen, ZHU Yiyun, et al. Rural residence passive design strategies in southern Shaanxi based on improving thermal comfort[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(3):315-319.
- [3] 田华林. 现代城市绿化:立体绿化初探[J]. 贵州林业科技, 2001, 29(3):62-64.
TIAN Hualin. Modern urban greening: a preliminary study of three-dimensional greening [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2001, 29(3):62-64.
- [4] 刘光立,陈其兵. 成都市四种垂直绿化植物生态学效应研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 259-262.
LIU Guangli, CHEN Qibing. Study on the ecological

- benefits of four kinds of vertical plant in Chengdu[J]. Journal of Xihua Teachers College (Natural Science), 2004, 25(3): 259-262.
- [5] 姜慧乐,尹莉娜,韩龙,等. 基于群落结构的杭州市公共建筑物立体绿化温湿效应研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(6):1359-1365.
- JIANG Huile, YIN Lina, HAN Long, et al. Temperature and humidity benefits of the three-dimensional forestation of public buildings in Hangzhou City based on the community structure[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(6):1359-1365.
- [6] 黄思成,张云路,李运远. 北京地区垂直绿化现状与应用研究[J]. 中国城市林业, 2017, 15(5):31-35.
- HUANG Sicheng, ZHANG Yunlu, LI Yunyuan. Status and utilization of vertical greening in Beijing[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2017, 15(5):31-35.
- [7] 吴玲,杨金雨露,谢园园,等. 上海垂直绿墙植物材料的调查[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2):252-256.
- WU Ling, YANGJIN Yulu, XIE Yuanyuan, et al. Survey on the plant species of living wall in Shanghai[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2):252-256.
- [8] 单银丽,朱宏佼. 夏热冬冷地区建筑墙面绿化新技术及植物配置研究[J]. 浙江建筑, 2015, 32(3):55-60.
- SHAN Yinli, ZHU Hongjiao. Study on the new technology of building metope greening and plant disposition in the hot-summer and cold-winter zone[J]. Zhejiang Construction, 2015, 32(3):55-60.
- [9] 杨金雨露,葛亚英,唐斌,等. 杭州市垂直绿化现状调查及分析[J]. 浙江农业科学, 2014, (8):1187-1192.
- YANGJIN Yulu, GE Yaying, TANG Bin, et al. Investigation and analysis of vertical greening in Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2014, (8):1187-1192.
- [10] 苏浩,丁云飞,王剑平,等. 夏热冬暖地区既有建筑屋面绿化改善室内环境效果测试分析[J]. 新型建筑材料, 2016, (6):92-94,98.
- SU Hao, DING Yunfei, WANG Jianping, et al. Test and analysis of green roof effectiveness in hot summer and warm winter zone[J]. New Building Materials, 2016, (6):92-94,98.
- [11] 丁云飞,王元明,苏浩,等. 建筑立体绿化对室外热环境的影响分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(4): 53-57.
- DING Yunfei, WANG Yuanming, SU Hao, et al. Analysis on the influence of building vertical greening to the outdoor thermal environment[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2015, 14(4): 53-57.
- [12] PATRICK B. The vertical garden: from nature to the city [M]. New York: W. W. Norton & Company, 2008.
- [13] PERINI K, OTTELÉ M, FRAAIJ A L A. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope[J]. Building and Environment, 2011, 46:2287-2294.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 居住建筑节能检测标准:JGJ/T132-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑 周 蓓)