

绿化屋顶对室内热环境及人体热舒适性的影响^①

李思阳, 潭 洋, 王乐乐, 郑汛涛, 石军锋, 潘云霞

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为考察绿化屋顶在夏季对室内热环境和人体热舒适性的影响, 以重庆某小区两栋同向齐高的 6 层住宅楼为研究对象, 分别比较绿化屋顶和普通屋顶内、外表面温度及室内不同高度的温度分布情况, 并进行 PMV-PPD 热舒适性分析. 结果显示: 绿化屋顶具有良好的隔热效应, 室内降温效果明显, 在试验期内, 绿化屋顶室内平均温度较普通屋顶低 4.9℃, 且室内不同高度无明显温度分层现象; 在绿化屋顶室内, PMV 值均低于 2, PPD 值也都小于 66.7%, 绿化屋顶很好地改善了室内热环境, 提高了人们的室内热舒适度和热满意度.

关 键 词: 绿化屋顶; 温度; 热环境; 热舒适性; PMV-PPD 模型

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)04-0180-05

室内热环境一直是人们关注的焦点, 在炎热的夏季, 单纯依靠空调对房间降温需消耗大量能源, 绿化屋顶对室内热环境的调节发挥着重要作用^[1-3]. 绿化屋顶对室内热环境的影响取决于太阳辐射、风速、降雨、外界温度、湿度以及植物种类等^[4-7]. 由于不同地域气候特点不同, 绿化屋顶对室内热环境的影响也不相同^[8-9], 而室内热环境的质量对人的身体健康、生活水平以及工作和学习效率都将产生很大影响^[10].

重庆夏季炎热, 湿度较大, 当地居民对室内热环境的要求更加苛刻. 室内气温是表征室内热环境的主要指标, 它是影响人体热舒适的主要因素. 目前, 对绿化屋顶的室内热特性进行实测分析, 并结合 PMV-PPD 对人体热舒适度进行评价的研究相对较少^[11-13]. 基于此, 论文针对重庆特有的地理气候特点, 以测定的外界温度作为对照, 比较普通屋顶和绿化屋顶两种工况下, 屋顶内、外表面温度及室内温度分层情况, 并进行 PMV-PPD 人体舒适性分析, 以期获得重庆地区绿化屋顶的室内热环境与人体热舒适性的关系.

1 试验设备与方法

1.1 试验对象

试验选择在重庆市北碚区某小区两栋同向齐高的 6 层住宅楼顶层进行, 两套房间建筑面积均为 34 m², 均朝南向开窗. 其中, 南侧楼建成轻质粗放绿化屋顶(图 1a), 北侧楼为普通屋顶(图 1c). 两栋楼屋顶从中部到四角倾斜, 倾角约为 5°, 排水效果良好. 南侧轻质粗放绿化屋顶, 从上到下分为生长基质层(厚度约 12 cm)、过滤层(厚度约为 0.3 cm)、引流层(厚度约为 2 cm)、防水层、支持面板、保温隔气及混凝土楼板共计八层(图 1b), 北侧屋顶仅有压重保护层、支持面板、保温隔气及普通混凝土楼板(图 1d). 测试时间为 2016 年 7 月 1 日至 2016 年 7 月 31 日.

① 收稿日期: 2017-04-12

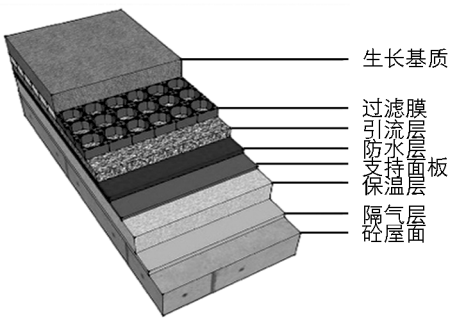
基金项目: 国家自然科学基金项目(51306155); 重庆市社会民生科技创新专项(cstc2016shmszx80114); 中央高校基本科研业务费重点项目(XDJK2017B059); 中央高校基本科研业务费学生项目(XDJK2017D192).

作者简介: 李思阳(1991-), 男, 成都人, 硕士研究生, 主要从事可再生能源的开发及利用的研究.

通信作者: 潘云霞, 副教授, 博士.



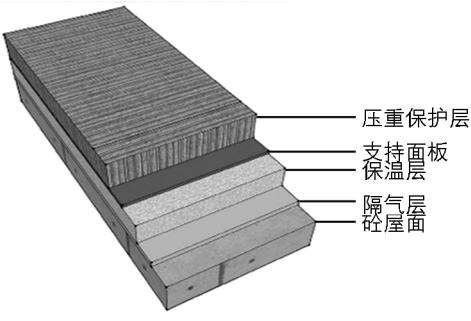
(a) 绿化屋顶



(b) 绿化屋顶结构



(c) 普通屋顶

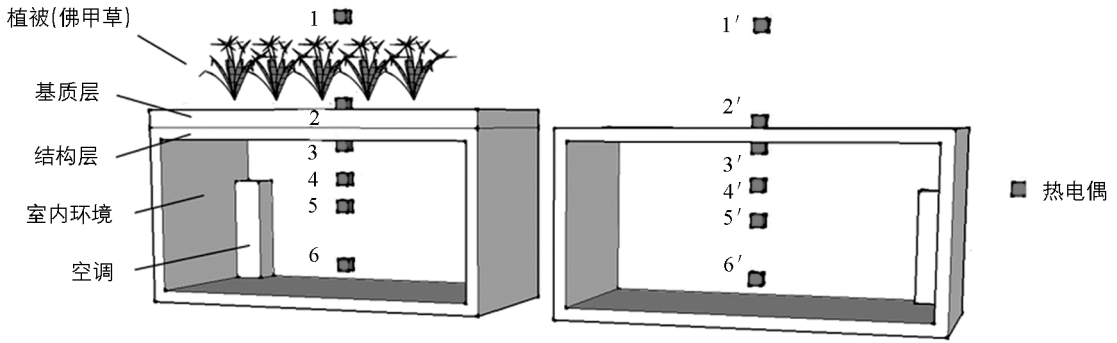


(d) 普通屋顶结构

图 1 绿化屋顶与普通屋顶

1.2 试验设备布置

试验中，考虑室内人员频繁活动的高度大致距地面 1.5~2.5 m 之间，同时考虑室内温度分层对人体热舒适性的影响，将 T 型热电偶分别设置在绿色屋顶与普通屋顶沿垂直方向的 6 个不同测点上(图 2)，试验设备信息如表 1。测试期间不使用空调，室内自然通风，热感觉投票与温度测试同步进行。



1. 绿化屋顶植被层之上 1 m 的空气处, 2. 屋顶外表面, 3. 屋顶内表面, 4. 距地面高度 2.5 m 处, 5. 距地面高度 1.5 m 处, 6. 距地面高度 0.5 m 处。

图 2 绿化屋顶与普通屋顶试验测点布置

表 1 试验设备信息

设备	型号	量程	精度
热电偶	T	−200~100	0.1
12 位温度计	DS18B20	−40~100	<0.03
数据采集仪	Agilent3499A	—	—

2 结果与分析

2.1 绿化屋顶和普通屋顶在试验期温度变化

太阳辐射是影响室内温度的一个重要因素，不同季节、一天中的不同时段，太阳辐射量都会发生改

变. 7 月是重庆一年中温度最高的月份, 在此期间, 太阳升起和降落的时间分别为 6: 00 和 20: 00. 试验选取一天当中气温最高的 14: 00 和普通屋顶室内温度滞后效果最显著的 18: 00 进行温度测试, 结果如图 3 和图 4 所示. 由图 3 可知, 在正午 14: 00, 普通屋顶室内温度稍低于外界温度, 而绿化屋顶的室内温度明显低于外界温度, 31 d 内两种屋顶室内的平均温差达到 4.9 °C, 而绿化屋顶室内平均温度较外界温度降低了 5.8 °C, 这表明绿化屋顶在炎热季节具有很好的隔热作用, 对室内降温效果显著. 7 月 24 日是测试期天气最热的一天, 该日天气晴朗, 太阳辐射总量为 25.54 MJ/m², 正午 14: 00 室外最高温度达到 40.5 °C, 而绿化屋顶的房间室温仅为 32.9 °C, 绿化屋顶和普通屋顶的室内温差竟达到了 5.4 °C; 7 月 14 日为阴雨天, 该日的室外平均温度是测试期最低的, 在正午 14: 00, 两种屋顶房间的室内温差仅有 3.7 °C. 这表明, 绿化屋顶对室内的降温效果受天气影响较大, 天气晴朗, 外界温度越高, 绿化屋顶降温效果越明显.

图 4 显示, 在测试期内, 下午 18: 00 绿化屋顶室内温度最低, 但普通屋顶室内温度高于室外温度. 这是由于普通屋顶的钢筋混凝土具有较大的导热系数, 可以蓄积更多的热能, 当室外温度降低时, 钢筋混凝土蓄积的热能释放到室内, 使得下午 18: 00 普通屋顶室内温度高于外界温度, 而绿化屋顶由于绿植和基质的隔热作用, 热能蓄积少, 对室内的降温效果明显, 在正午日光辐射最强时, 绿化屋顶降温效果最为显著, 且室温波动不大.

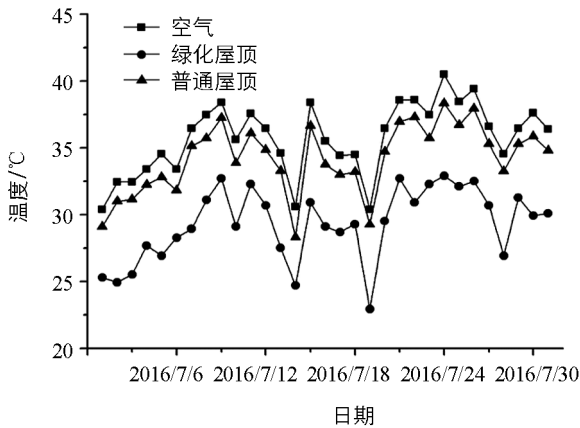


图 3 两种屋顶在正午 14: 00 的温度变化

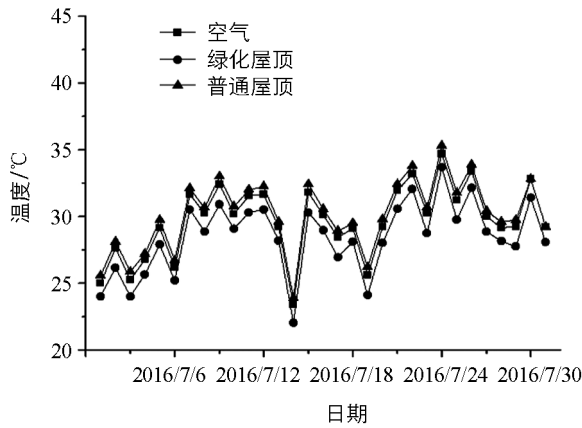


图 4 两种屋顶在下午 18: 00 的温度变化

2.2 绿化屋顶和普通屋顶在夏季典型天气的温度变化

天气变化是影响绿化屋顶室内热环境的一个重要因素. 为减小晴雨天气交替对结果的影响, 试验选择连续晴天, 并且是测试期天气最热的 7 月 24 日进行多点连续观测, 其温度变化如图 5 所示. 由图 5 可知, 普通屋顶内表面温度 $T(3')$ 在 9: 00 达 33.3 °C, 之后迅速上升, 在 14: 00 达 37.4 °C; 而 24h 内, 绿化屋顶内表面温度 $T(3)$ 均维持在 30 °C 左右. 这表明, 绿化屋顶能够有效的降低室内温度波动, 改善室内热环境. 在室内不同高度, 普通屋顶的温度分布呈驼峰型, 在上午 9: 00 和下午 18: 00, 高度 2.5 m 的 $T(4')$ 处温度反而高于屋顶内表面 $T(3')$ 的温度, 而 $T(4')$ 、 $T(5')$ 和 $T(6')$ 也出现较大温差, 即普通屋顶室内出现明显温度分层现象, 这给室内人员带来极差的热舒适度, 而绿化屋顶室内不同高度未出现明显温度分层现象, 这表明绿化屋顶能够实现均匀的室内温度分布.

2.3 绿化屋顶和普通屋顶对人体热舒适性的影响

影响人体热舒适性的因素除了湿、热环境参数以外还包括衣服热阻、人的身体状况、精神状况等, 因此在研究绿化屋顶对人体热舒适性的影响时, 就需要采用能综合反映人体热感觉的方法. 当前判断室内人体热舒适性较广泛使用的方法是热舒适模型评价 (PMV-PPD). PMV (Predicted Mean Vote) 是综合考虑人类活动程度、衣物热阻、室外温度、平均辐射温度、气流和相对湿度的热舒适指数, 它通过 7 个等级反映人的舒适度: 极冷 (-3)、冷 (-2)、稍冷 (-1)、舒适 (0)、略温 (1)、温热 (2) 和热 (3); 而 PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) 反映了人们对热环境的不满意程度, 通常用百分比的形式表示.

试验中热感觉投票测试的时间与 PMV-PPD 热舒适模型评价测试时间、条件相同, 在一个月的问卷调查过程中共进行了 50 人次的投票测试, 其中男性 26 人, 女性 24 人. 被调查人员的年龄分布状况如表 2 所

示. 由于受试人员在测试前所处的热环境不同, 他们的热期望和热感觉也会不同, 这将导致测试结果的偏差, 为此, 受试人员需在一恒定室温为 26 ℃ 的缓冲房间停留至少 30 min 后方能进入两种不同工况房间进行热感觉投票测试. 考虑到两种不同工况房间温度的差异, 受试人员先进入普通屋顶的房间, 其后才进入绿化屋顶的房间, 测试结果见图 6.

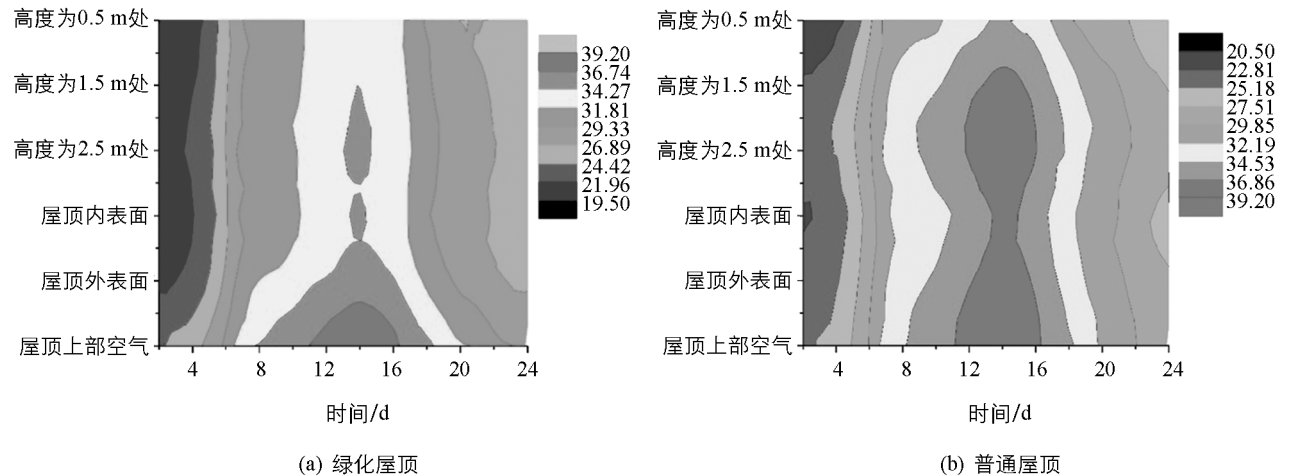


图 5 两种屋顶典型天气条件下温度分布

表 2 被调查人员年龄分布

年龄	≤10	11~20	21~30	31~40	41~50	≥50
人数	1	18	18	7	5	1

考虑到测试期间正午 14: 00 的温度最高, 故选择 7 月 1 日至 31 日正午 14: 00 作为典型天气进行热舒适性的评价分析, 结果如图 6 所示. 由图 6 可知, 绿化屋顶在 31 d 的试验期 PMV 值都在 2 以下, 且变化幅度较小, 而 PPD 值也都在 40%~66.7% 之间变动, 这是自然环境条件下人体可以接受的热环境条件, 说明人们在具有绿化屋顶的室内, 获得了较高的热舒适性和热满意程度; 普通屋顶室内的 PMV 值在 2~3.5 之间变动, 而 PPD 值大都在 70% 以上, 且变化幅度较大, 在最热的 7 月 24 日, 普通屋顶室内 PPD 值甚至达到了 99.7%, 人们对热环境感觉极不舒适, 这意味人们在夏季普通屋顶的室内热舒适性不高.

3 结 论

- 1) 绿化屋顶在重庆夏季炎热季节表现出良好的隔热效应, 与普通屋顶相比, 绿化屋顶对室内降温效果显著, 在试验期内, 绿化屋顶室内平均温度较普通屋顶低 4.9 ℃, 在测试期最热一天的正午 14: 00, 绿化屋顶室内温度较普通屋顶低 5.4 ℃;
- 2) 绿化屋顶在屋顶外表面、屋顶内表面及室内不同高度, 未出现明显温度分层现象, 普通屋顶在室内外不同高度的温度分布呈驼峰型, 呈现明显温度分层现象;
- 3) 在绿化屋顶室内, PMV 值均低于 2, PPD 值也都小于 66.7%, 人们获得较高的热舒适性和热满意度.

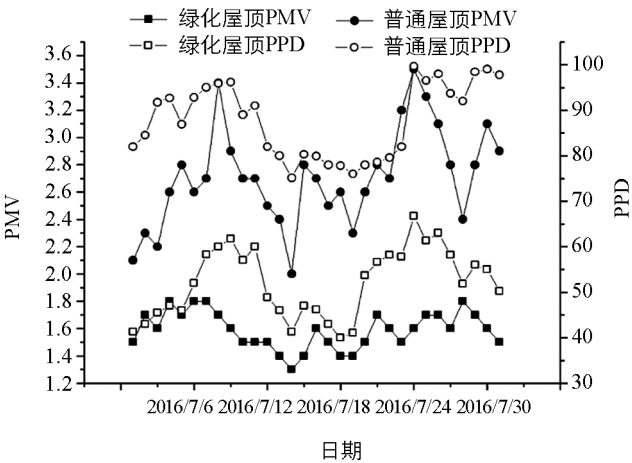


图 6 两种工况 PPD-PMV 值变化图

参考文献:

- [1] 王婷婷,刘艳峰,王登甲,等.集热蓄热屋顶式太阳房热过程及优化设计[J].太阳能学报,2016,37(9):2286—2291.
- [2] 杨真静,唐鸣放,郑澍奎.绿化屋顶室内热环境研究[J].土木建筑与环境工程,2010,32(4):80—84.
- [3] 刘婧,秦华.基于朴门永续理念下社区农园的生态设计解析——以阳曲农场为例[J].西南大学学报(自然科学版),2017,39(9):167—172.
- [4] HUANG Y Y, CHEN C T, TSAI Y C. Reduction of Temperatures and Temperature Fluctuations by Hydroponic Green Roofs in a Subtropical Urban Climate [J]. *Energy & Buildings*, 2016, 129: 174—185.
- [5] 卢浩,康威,谭松明,等.屋顶绿化基质对雨水径流水质的影响[J].中国给水排水,2016,32(7):135—138.
- [6] WAI W H O, HU W Q, LI C W, et al. Effects of Green Roof on the Wind Field of a Low-Rise Building [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 126: 405—409.
- [7] 曾红,温庚金,罗旭荣,等.4种轻型屋顶绿化植物抗旱能力的综合评价[J].草业科学,2016,33(6):1084—1093.
- [8] HE Y, YU H, DONG N, et al. Thermal and Energy Performance Assessment of Extensive Green Roof in Summer: A Case Study of a Lightweight Building in Shanghai [J]. *Energy & Buildings*, 2016, 127: 762—773.
- [9] WU Z Z, ZHOU M. The Ecological Effects of Roof Greening in Chongqing [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2015, 1: 87—91+99.
- [10] 徐小林,李百战.室内热环境对人体热舒适的影响[J].重庆大学学报(自然科学版),2005,28(4):102—105.
- [11] POURSHAGHAGHY A, OMIDVARI M. Examination of Thermal Comfort in a Hospital Using PMV-PPD Model [J]. *Applied Ergonomics*, 2012, 43(6): 1089—1095.
- [12] HOMOD R Z, SAHARI K S M, ALMURIB H A F, et al. RLF and TS Fuzzy Model Identification of Indoor Thermal Comfort Based on PMV/PPD [J]. *Building & Environment*, 2012, 49(1): 141—153.
- [13] WEI S, LI M, LIN W, et al. Parametric Studies and Evaluations of Indoor Thermal Environment in Wet Season Using a Field Survey and PMV-PPD Method [J]. *Energy & Buildings*, 2010, 42(6): 799—806.

Effects of Green Roof on Indoor Thermal Environment and Human Thermal Comfort

LI Si-yang, TAN Yang, WANG Le-le,
ZHENG Xun-tao, SHI Jun-feng, PAN Yun-xia

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: A comparative experiment was carried out in summer to investigate the inner and outer temperature distribution of 2 six-storeyed residential buildings in Chongqing, which faced the same direction and had similar height, and PMV-PPD indoor thermal comfort analysis was made of the two kinds of roofs (green and ordinary). The results showed that building insulation and cooling effect of the green roof was obviously better than that of the ordinary roof. During the test period in July, the average indoor temperature of the building with a green roof was 4.9 °C lower than that of the building with an ordinary roof at 14:00, and no obvious temperature stratification was detected in indoor different heights of the building with a green roof. Its indoor PMV (predicted mean vote) value was lower than 2 and its PPD (predicted percentage of dissatisfied) value was less than 66.7%. In conclusion, the green roof can significantly improve indoor thermal environment and increase human indoor thermal comfort and thermal satisfaction.

Key words: green roof; temperature; thermal environment; thermal comfort; PMV-PPD model