

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.004

基质层厚度对湿热地区种植屋面隔热性能影响研究

陈志扩, 王志勇, 刘畅荣, 宋子涵, 王玉蝶

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为研究基质层厚度对湿热地区容器式种植屋面隔热性能的影响规律, 采用 Energy Plus 软件模拟裸屋面和 3 种基质层厚度 (100, 200, 300 mm) 种植屋面的内外表面温度全年变化情况。结果表明: 与裸屋面相比, 种植屋面的内表面温度波动不大, 且内表面温度始终略低于外表面温度, 体现了种植屋面的热阻效应。对于 100 mm 厚度的种植屋面, 在夏季其内表面平均温度可降低 15 °C; 在过渡季节, 当室外空气干球温度高于 20 °C 时其内表面平均温度降低 12.5 °C, 而当室外空气干球温度低于 20 °C 时, 其内表面平均温度升高 5 °C; 在冬季, 其内表面平均温度可升高 5 °C。3 种厚度的种植屋面, 其内外表面温度变化规律基本相同, 基质层厚度每增加 100 mm, 内表面平均温度在夏季可降低 2 °C, 在冬季则升高 1 °C。

关键词: 容器式种植屋面; 基质层; 隔热性能; 数值模拟

中图分类号: TU119⁺.22

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)03-0021-06

引文格式: 陈志扩, 王志勇, 刘畅荣, 等. 基质层厚度对湿热地区种植屋面隔热性能影响研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 21-26.

Influence of Substrate Thickness on Thermal Insulation Performance of Planted Roofs in Hot and Humid Areas

CHEN Zhikuo, WANG Zhiyong, LIU Changrong, SONG Zihan, WANG Yudie

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an inquiry into the influence of substrate layer thickness on thermal insulation performance of container planted roofs in hot and humid areas, by using Energy Plus software, a simulation and analysis have been made of the annual changes of internal and external surface temperatures of bare roofs and planted roofs with three substrate layer thicknesses (100, 200, 300 mm). The results show that, compared with bare roofs, the temperature of the inner surface of planted roofs is characterized with a little fluctuation, with the inner surface temperature constantly slightly lower than the outer surface temperature, thus verifying the thermal resistance effect of planted roofs. For planted roofs with a thickness of 100 mm, the average temperature of its inner surface can be reduced by 15 °C in summer; the average temperature of its inner surface decreases by 12.5 °C, and increases by 5 °C when the outdoor dry-bulb temperature is lower than 20 °C in the transition season. In winter, the average temperature of its inner surface increases by 5 °C. The change rule of the internal and external surface temperature of the three kinds of planted roofs remains basically the same, with the average temperature of the internal surface reducing by 2 °C in summer while increasing by 1 °C in winter when the thickness of the substrate layer increases by 100 mm.

收稿日期: 2022-04-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ50007); 国家级大学生创新创业训练计划基金资助项目 (S202111535016); 湖南省大学生创新创业训练计划基金资助项目 (湘教通 [2020]191 号 -3068)

作者简介: 陈志扩 (1998-), 男, 河南濮阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为绿色建筑与城市人居环境, E-mail: 1634915801@qq.com

通信作者: 王志勇 (1978-), 男, 山东济宁人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为通风空调与建筑节能技术, 绿色建筑理论及技术, E-mail: wzy@hut.edu.cn

Keywords: container planted roof; matrix layer; thermal insulation performance; numerical simulation

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进,城市绿地面积破碎化趋势日益明显。对城市建筑屋顶进行绿化,是增加城市绿地面积、改善城区生态环境的有效途径^[1]。种植屋面有保温、隔热双重效应^[2],根据施工方式可分为简单式、花园式和容器式3种。其中,容器式种植屋面是在具过滤和排(蓄)水等功能的可移动组合容器模块中种植植物,它有造价和维护成本低廉、对建筑承重要求较低的显著优点,是一种广泛应用的高效绿化方式,一直是行业和科学研究关注的重点。

关于种植屋面的热工性能和节能效益,学者们基于实验测试与数值模拟开展了大量的研究。如D. J. Sailor^[3]基于FASST(the fast all season soil strength)模型分别对土壤层和植被层建立公式,将其耦合到Energy Plus中求解叶冠层和土壤表面的能量平衡方程。Tang M. F.等^[4]取得了土壤与屋顶结构间界面处的最低平均温度,发现土壤底层作为冷热源吸收了绿化屋面上部和内部热量。Wei T. B.等^[5]建立了屋顶外表面温度随机效应模型,预测了土壤厚度和含水量对植被的影响。He Y.等^[6]得出了土壤层厚度对绿化屋面热性能的影响规律,夏季为正效应,冬季为非单调效应。M. L. Vilar等^[7]研究了大面积绿色屋顶植被层和土壤层能量平衡模型,并基于有限体积法获得了模型的近似解。M. Mungur等^[8]开展了热带环境中屋顶绿化隔热效果的数值和实验研究。A. Ávila-Hernández等^[9]基于墨西哥8个城市的天气条件,对传统屋顶和绿色屋顶进行比较,发现绿色屋顶可将室内温度降低4.7℃。S. Vera等^[10-11]通过不同气候区、季节的实验数据,对比分析由D. J. Sailor^[3]和P. C. Tabares-Velasco等^[12]建立的两种绿色屋顶传热传质模型,发现两者在表示植被层和土壤基质层能量平衡的方式上有许多相似之处,但在计算土壤基质层潜热量和显热量的方式上有很大不同,这是由其表面对流换热计算方式不同导致的。D. Zirkelbach等^[13]建立了绿色屋面的热、湿及空气3项耦合传递模型,并通过实验对其准确性进行了验证。

纵观种植屋面热工特性方面的研究,学者们采用多种手段、从不同角度证实了种植屋面可在不同气候条件下发挥保温隔热效应,并发现气候条件、植被种类、叶面积指数、基质层厚度等参数是影响隔热效果和节能效益的重要因素。本文针对湿热地区的气候特点,以株洲市为代表,基于Energy Plus

能耗模拟软件,对容器式种植屋面和裸屋面进行对比分析,探讨基质层厚度对保温隔热效果的影响规律,以期为湿热地区容器式种植屋面的推广应用提供理论依据。

1 模型建立

1.1 模型概况

Energy Plus是由美国能源部开发,目前在国际上应用最为广泛的建筑能耗模拟软件。该软件集成了D. J. Sailor^[3]开发的绿化屋面模块,将植被层和土壤基质层的热过程纳入建筑能耗分析中,通过自定义植被、土壤等各项物理参数实现对绿化屋面的能效模拟与评价。根据Energy Plus软件中的绿化屋面模块能量平衡模型,分别建立植被层的能量平衡及土壤层基质层的能量平衡(如图1所示)。

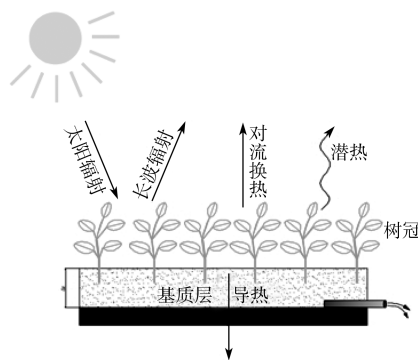


图1 种植屋面能量平衡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy balance of planted roofs

如图1所示,两种平衡分别如下:

1) 植被层的能量平衡。植被层的传热过程包括白天吸收的太阳短波辐射和周围建筑散发的长波辐射及反射、夜晚向天空散发的长波辐射、植被周围空气流动产生的对流换热以及叶片呼吸作用产生的蒸散潜热。影响植被层传热的重要参数包括叶面积指数、气孔阻力、太阳辐射吸收率、长波辐射吸收率和发射率、叶片周围风速。

2) 土壤基质层的能量平衡。土壤层的传热过程包括土壤层的潜热换热、导热、对流换热、辐射换热等过程的能量传输^[14]。土壤基质层热量传递的影响参数包括植被覆盖率、含水量及热工参数。假如植被种植较为密集时,可认为叶冠层叶片完全将太阳挡住,土壤层表面没有吸收太阳短波辐射;含水量对土壤层能量收支的影响在于能量变化是由于水分相变潜热产生的,降水量和水垂直位移产生的热量变化远

小于相变潜热^[15], 故将其忽略。土壤表面和空气之间的显热通量取决于它们之间的温差和冠层内的风速。土壤基质层表面水分蒸散取决于土壤表面的空气湿度以及冠层内的风速。

1.2 模型参数

在 SketchUp 中使用 Open Studio 插件创建建筑模型, 模型尺寸长 8 m、宽 6 m、高 2.7 m (如图 2 所示)。

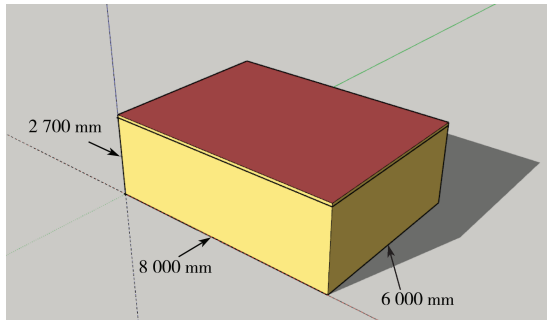


图 2 标准建筑模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a standard building model

裸屋面 (以下简称屋顶 A) 采用厚度为 0.2 m 的炉渣混凝土和钢筋混凝土混合材料, 其传热系数为 $2.737 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。种植屋面的热工参数主要包括植物高度、叶面积指数、叶面反射率、土壤基质层厚度、干土壤层导热系数及干土壤太阳辐射吸收率。本模拟构建的容器式种植屋面模块, 土壤基质层选择质量分数为 65% 珍珠岩和 35% 蛭石混合而成。根据《种植屋面工程技术规程 (JGJ155—2013)》, 土壤基质层厚度不宜小于 100 mm, 本模拟设置 100, 200, 300 mm 3 种厚度 (以下分别简称屋顶 B、C、D)。目前屋顶绿化主要用景天科多浆植物, 且以景天科佛甲草为主, 因此本模型植株选用高度为 150 mm 的佛甲草。其它热工参数基础数据采用文献参考值或软件默认值, 模型验证所需主要输入参数见表 1。

表 1 容器式种植模块模型输入参数及取值

Table 1 Input parameters and values of container planted roof model

热工参数	取值
植物高度 /m	0.15
叶面积指数	4.6
叶面反射率 /%	0.32
叶面发射率 /%	0.82
粗糙度	中等
气孔阻力 $/(s \cdot m^{-1})$	150
土壤层厚度 /mm	100/200/300
干土壤导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.2
干土壤密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	300
土壤比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 200
热吸收率 /%	0.81
太阳吸收率 /%	0.7
可见光吸收率 /%	0.7
干土壤饱和和体积含水率 /%	0.5
干土壤初始体积含水率 /%	0.1
干土壤残余体积含水率 /%	0.01

2 模型验证

选取重庆地区作为模型验证所需实测数据^[16]的地点, 选取屋顶内表面温度的逐时数据作为对比数据。利用 Energy Plus 模拟计算出种植屋面建筑模型的屋顶内表面温度, 选取夏季典型日 6 月 25 日的数据与对应的实测数据进行对比, 结果如图 3 所示。

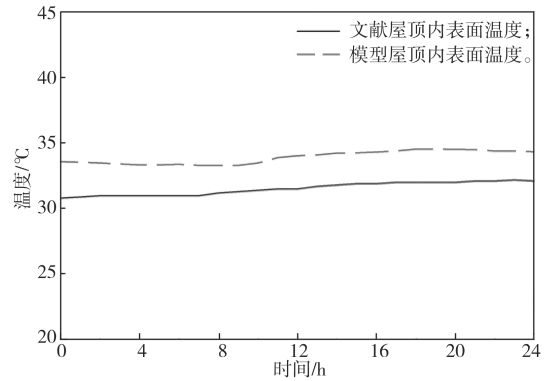


图 3 种植屋面的屋顶内表面温度模拟值与实测值对比
Fig. 3 Comparison of simulated and measured temperatures of the internal surface of planted roofs

通过对比可以看出, 屋顶内表面温度的模拟数据和实验数据变化曲线吻合较好。经过计算, 各时刻误差最大为 9.09%, 不超过 10%, 误差较小, 表明具有较好的计算精度, 因此本文建立的模型客观可靠, 可以用来进行模拟研究。

3 模拟结果对比与分析

本模拟计算出裸屋面 (屋顶 A) 和 3 种容器式种植屋面 (屋顶 B、C、D) 的全年屋面内外表面温度, 每个季节各选取连续 7 d 作为典型代表时间进行数据分析, 夏季选取 7 月 28 日—8 月 3 日; 过渡季节选取 10 月 1 日—10 月 7 日; 冬季选取 1 月 17 日—1 月 23 日。天气采用 CSWD (Chinese Standard Weather Data) 提供的典型气象年逐时数据。

3.1 不同季节种植屋面隔热特性

3.1.1 夏季

图 4~5 为夏季典型周裸屋面和 3 种容器式种植屋面的内外表面温度与室外温度变化曲线。由图 4 可看出, 中午 12:00 到第二天凌晨 2:00 期间, 裸屋面 (屋顶 A) 的外表面温度比室外空气的干球温度高, 说明从 12:00 开始太阳辐射换热热量大于对流换热热量。下午 14:00 到第二天凌晨 2:00 期间, 裸屋面 (屋顶 A) 比种植屋面的外表面温度明显偏高, 而在每天上午差异不明显, 这是因为下午太阳辐射强度较高, 裸屋面直接吸收太阳辐射能, 而种植屋面的植被层可阻挡基质层直接吸收太阳辐射能, 从而减少升温,

等太阳下山时裸屋面温度依然较高，降温持续到凌晨 2:00 才和种植屋面外表面温度相同。

3 个种植屋面比裸屋面（屋顶 A）的外表面温度都要低，且外表面温度没有明显变化规律，因为白天屋顶热流方向是从上到下，基质层厚度对外表面温度影响较小，因此分析一个种植屋面即可。其中，100 mm 土壤基质层厚度的种植屋面（屋顶 B）的外表面温度在白天平均可降低 10℃，而晚上则没有太大差异，是由于每天中午 12:00 太阳辐射强度显著升高，植被层可以阻挡太阳光直接辐射到基质层表面，有效减少外表面的升温幅度，以及植被呼吸作用产生的潜热降温。当太阳下山后，基质层表面向天空及周边建筑物发出长波辐射而降温，到凌晨 2:00 外表面温度与空气温度持平后不再变化。这表明种植屋面的植被层吸收了更多的太阳辐射能，可以削弱太阳辐射对土壤基质层的影响，进而减少进入室内的热量，提升屋面的节能降耗效应。

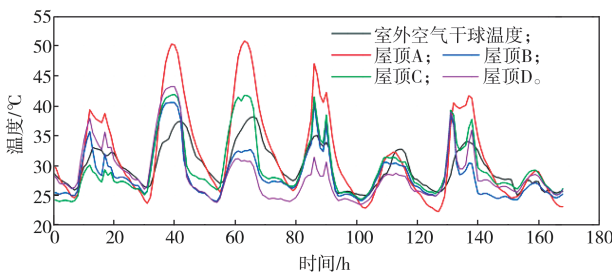


图 4 夏季各屋面外表面温度与室外温度变化曲线
Fig. 4 External surface temperature and outdoor temperature changes in summer

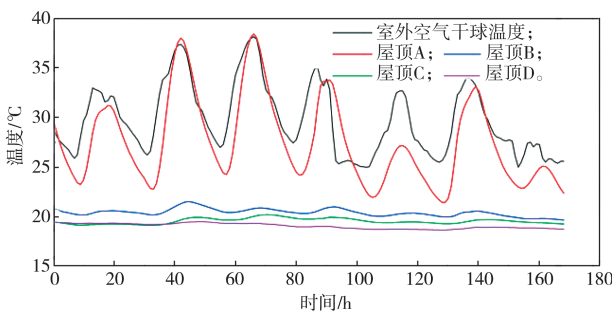


图 5 夏季各屋面的内表面温度与室外温度变化
Fig. 5 Internal surface temperature and outdoor temperature changes in summer

由图 5 可以看出，裸屋面（屋顶 A）的内表面温度相比于室外空气干球温度，有延迟和衰减效果。种植屋面内表面温度相比于裸屋面有明显降低；其中 100 mm 土壤基质层厚度种植屋面（屋顶 B）的内表面温度在白天平均可降低 15℃，在晚上平均可降低 5℃。由前文分析可知植被层可减少太阳辐射量，内表面温度变化除了受太阳辐射的影响外，还受到基质

层的显热和潜热换热的影响，表明种植屋面在夏季有显著的隔热效果。而随着土壤基质层厚度增加，3 个种植屋面（屋顶 B、C、D）内表面温度呈均匀降低的变化趋势，且变化规律基本相同；土壤基质层厚度每增加 100 mm，内表面温度可平均降低 2℃，由此看出夏季基质层对屋面的导热换热影响较大。

3.1.2 过渡季

图 6 和 7 为过渡季典型周裸屋面和 3 种容器式种植屋面的内外表面温度与室外温度全天变化曲线。

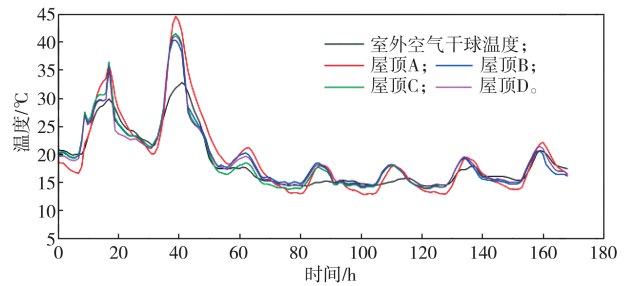


图 6 过渡季各屋面的外表面温度与室外温度变化曲线
Fig. 6 External surface temperature and outdoor temperature change curves in transition season

由图 6 可看出，裸屋面（屋顶 A）和 3 种不同土壤基质层厚度种植屋面（屋顶 B、C、D）的外表面温度差别不明显，每天 12:00—20:00 期间，100 mm 土壤基质层厚度种植屋面（屋顶 B）的外表面温度比室外空气干球温度平均高 5℃，比裸屋面（屋顶 A）低 1℃，这与过渡季种植屋面植被层吸收的太阳辐射量低于夏季有关，且当屋顶外表面温度与空气温度相差不大时，植被层对外表面温度影响较小，由于温度变化较低，与夏季降温持续到凌晨 2:00 相比，过渡季持续时间较短。

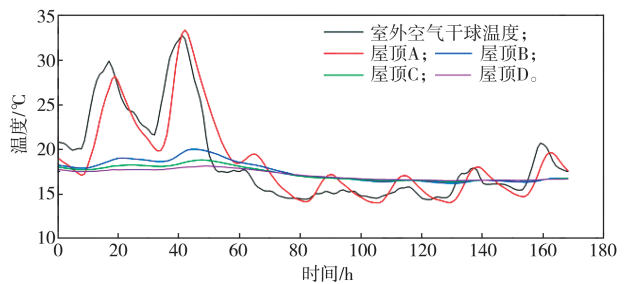


图 7 过渡季各屋面的内表面温度与室外温度变化曲线
Fig. 7 Internal surface temperature and outdoor temperature change curves in transition season

由图 7 可以看出，裸屋面（屋顶 A）内表面温度随着室外空气干球温度变化而变化，而 3 个种植屋面（屋顶 B、C、D）的内表面温度变化不大，表明过渡季基质层厚度对换热影响不大。在室外空气干球温度高于 20℃ 时，种植屋面表现出降温效果；在室

外空气干球温度小于 20 °C 时, 种植屋面表现出升温效果, 对于种植屋面而言, 20 °C 是温度变化分界线, 这是由植被生长习性导致的, 屋顶内外温差较小, 表明种植屋面在过渡季节表现出降低温度变化幅度的效果不明显。

3.1.3 冬季

图 8~9 为冬季典型周裸屋面和 3 种容器式种植屋面的内外表面温度与室外温度全天变化曲线。

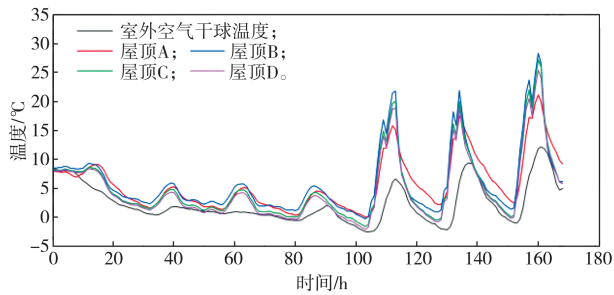


图 8 冬季各屋面的外表面温度与室外温度变化曲线

Fig. 8 External surface temperature and outdoor temperature change curves in winter

由图 8 可以看出, 裸屋面(屋顶 A)和种植屋面(屋顶 B、C、D)外表面温度相差不大, 因为冬季太阳辐射强度较低, 植被层对外表面温度影响较小。裸屋面吸收的太阳辐射量和散发的长波辐射量以及对流换热量产生的综合效果与植被层换热量相当。所有屋面的外表面温度都高于室外空气干球温度, 说明屋顶外表面接收太阳辐射量超过了对流换热散热量; 不同土壤基质层厚度的种植屋面也没有较为明显的温度差异, 故取一个种植屋面分析即可, 其中 100 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶 B)外表面温度, 比室外空气干球温度平均高 7°C, 说明植被层对基质层表面有保温效果。

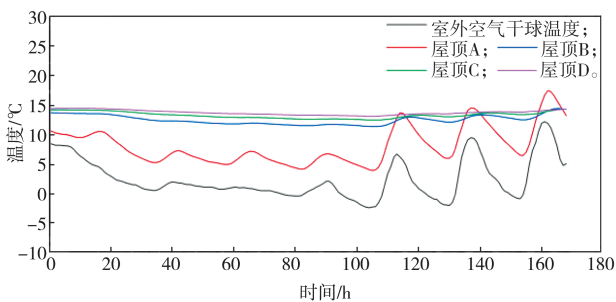


图 9 冬季各屋面的内表面温度与室外温度变化曲线

Fig. 9 Internal surface temperature and outdoor temperature change curves in winter

由图 9 可以看出, 裸屋面(屋顶 A)的内表面温度相比于室外空气干球温度, 有延迟和升温效果。种植屋面相对于裸屋面, 内表面温度明显升高, 不同基质层厚度的种植屋面变化规律相同, 故取一种进行分

析; 其中 100 mm 土壤基质层厚度种植屋面(屋顶 B)的内表面温度比裸屋面(屋顶 A)平均高 5 °C。由比较得知, 种植屋面和裸屋面的外表面温度差距不大, 所以内表面温度差异是由于基质层换热导致的。而随着土壤基质层厚度增加, 3 个种植屋面(屋顶 B、C、D)内表面温度呈均匀升高的变化趋势; 土壤基质层厚度每增加 100 mm, 内表面温度可平均升高 1 °C, 这是固体导热换热影响所致。

3.2 不同基质层厚度种植屋面隔热特性

由图 5 可看出, 100 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶 B)在夏季的内表面温度始终在 22 °C 左右, 与室外温度无关; 由图 7 可看出, 在室外温度大于 20 °C 时, 100 mm 土壤基质层厚度种植屋面(屋顶 B)在过渡季的内表面温度稳定在 19 °C 左右, 在室外温度小于 20 °C 时, 内表面温度稳定在 17 °C 左右; 由图 9 可看出, 100 mm 土壤基质层厚度种植屋面(屋顶 B)冬季内表面温度始终稳定在 13 °C 左右。故从全年角度出发, 100 mm 土壤基质层厚度种植屋面(屋顶 B)的内表面温度控制在 13~22 °C 之间, 可以提供很好的热阻效应, 提高人体热舒适性。

由图 5、7、9 可知, 种植屋面夏季表现出每增加 100 mm 土壤基质层厚度, 屋顶内表面温度约减少 2 °C; 在过渡季表现出当室外温度大于 20 °C 时, 每增加 100 mm 土壤基质层厚度, 屋顶内表面温度约减少 2 °C, 当室外温度小于 20 °C 时, 改变基质层厚度内表面温度没有明显变化; 在冬季表现出每增加 100 mm 土壤基质层厚度, 屋顶内表面温度约增加 1 °C。因此从全年角度出发, 200 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶 C), 其内表面温度控制在 14~20 °C 之间; 300 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶 C), 其内表面温度控制在 15~18 °C 之间。故基质层厚度对种植屋面的导热换热过程影响较大, 且随着基质层厚度的增加, 屋顶内表面温度的全年温度变化越稳定, 但由于变化幅度较小, 在实际推广种植屋面时应综合考虑经济效益来设计基质层厚度。

4 结论

经上述研究, 得出如下结论:

1) 与裸屋面相比, 100 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶 B)在不同季节对屋顶表面温度的影响规律不同。在夏季, 屋顶 B 的外表面温度在白天平均可降低 10 °C, 而晚上没有太大差异, 可知植被层吸收了较多的太阳辐射, 可以削弱太阳辐射对土壤基质层的影响, 进而减少进入室内的热量, 提升屋面的节能降耗效应。在过渡季, 种植屋面对内表面温度的影响取决于室外空气的干球温度, 当其大于 20 °C

时有降温效果,反之有升温效果;在冬季,屋面内表面温度较裸屋面平均约高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明种植屋面有良好的保温效果,提升了屋面的节能降耗效应。

2) 3个种植屋面(屋顶B、C、D)的内表面温度在全年都基本稳定。其中 100 mm 土壤基质层厚度的种植屋面(屋顶B)内表面温度在夏季和过渡季始终保持在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,在冬季保持在 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,大大减少了建筑能耗。随着土壤基质层厚度的增加,3个种植屋面(屋顶B、C、D)的内表面温度呈均匀变化趋势,表现为土壤基质层厚度每增加 100 mm ,内表面温度约变化 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,可知土壤基质层厚度对屋面的导热换热过程影响较大。

参考文献:

- [1] LUO Luhua, CHEN Mingjie, DONG Lulu, et al. Intelligent Identification of Building Patches and Assessment of Roof Greening Suitability in High-Density Urban Areas: a Case Study of Chengdu[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(2): 247-256.
- [2] 何云菲, 彭立华, 杨小山, 等. 夏热冬冷地区屋顶绿化全年能耗削减及成本效益[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(9): 2253-2263.
HE Yunfei, PENG Lihua, YANG Xiaoshan, et al. Annual Energy Effects and Cost-Benefit Analysis of Green Roofs in a Hot-Summer-Cold-Winter Climate[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(9): 2253-2263.
- [3] SAILOR D J. A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1466-1478.
- [4] TANG M F, ZHENG X. Experimental Study of the Thermal Performance of an Extensive Green Roof on Sunny Summer Days[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1010-1021.
- [5] WEI T B, JIM C Y, CHEN A Q. A Random Effects Model to Optimize Soil Thickness for Green-Roof Thermal Benefits in Winter[J]. Energy and Buildings, 2021, 237: 110827.
- [6] HE Y, YU H, CHEN P, et al. Thermal Performance Evaluation of a New Type of Green Roof System[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 384-389.
- [7] VILAR M L, TELLO L. An Energy Balance Model of Heterogeneous Extensive Green Roofs[J]. Energy and Buildings, 2021, 250: 111265.
- [8] MUNGUR M, POORUN Y, JUGGURNATH D, et al. A Numerical and Experimental Investigation of the Effectiveness of Green Roofs in Tropical Environments: The Case Study of Mauritius in Mid and Late Winter[J]. Energy, 2020, 202: 117608.
- [9] ÁVILA-HERNÁNDEZ A, SIMÁ E, XAMÁN J, et al. Test Box Experiment and Simulations of a Green-Roof: Thermal and Energy Performance of a Residential Building Standard for Mexico[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109709.
- [10] VERA S, PINTO C, TABARES-VELASCO P C, et al. Analysis and Comparison of Two Vegetative Roof Heat and Mass Transfer Models in Three Different Climates[J]. Energy and Buildings, 2019, 202: 109367.
- [11] VERA S, PINTO C, TABARES-VELASCO P C, et al. Influence of Vegetation, Substrate, and Thermal Insulation of an Extensive Vegetated Roof on the Thermal Performance of Retail Stores in Semiarid and Marine Climates[J]. Energy and Buildings, 2017, 146: 312-321.
- [12] TABARES-VELASCO P C, SREBRIC J. A Heat Transfer Model for Assessment of Plant Based Roofing Systems in Summer Conditions[J]. Building and Environment, 2012, 49: 310-323.
- [13] ZIRKELBACH D, MEHRA S R, SEDLBAUER K P, et al. A Hygrothermal Green Roof Model to Simulate Moisture and Energy Performance of Building Components[J]. Energy and Buildings, 2017, 145: 79-91.
- [14] 任婧, 闫春辉, 赵莹莹, 等. 屋顶绿化对建筑围护结构节能的模拟研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(4): 33-38, 51.
REN Jing, YAN Chunhui, ZHAO Yingying, et al. Simulation on Energy Saving of Building Envelope by Green Roofs[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(4): 33-38, 51.
- [15] 马路遥. 广州地区佛甲草绿化屋顶实验与模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
MA Luyao. Experiment and Simulation of Sedum Lineare Green Roof in Guangzhou Area[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] 白雷. 种植屋面的热工性能评价指标研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
BAI Lei. Research on Thermal Performance Evaluation Index of Green Roof[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

(责任编辑: 申剑)



图 4~9 彩图二维码