

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.014

夏热冬冷湿润气候下绿化屋面对建筑环境影响的研究

李 港,秦孟昊

(南京大学建筑与城市规划学院,南京 210093)

摘要:绿化屋面是一种被动式建筑技术,通过提高建筑屋面对太阳辐射的反照率,以及附加的种植基质保温性能,实现减缓热岛效应、降低建筑能耗的作用。结合夏热冬冷湿润地区气候特点,使用温度实测、软件能耗模拟的方法,分析绿化屋面对建筑内部及外部环境的影响。通过对南京1个办公建筑屋面温度实测显示,夏季晴朗日间应用绿化的建筑屋面外表面比裸露屋面温度平均低约16℃。通过EnergyPlus模拟,有保温屋面增加绿化屋面后,其顶层全年能耗降低了2.6 kWh/m²,无保温屋面增加绿化屋面后,其顶层全年能耗降低了14.1 kWh/m²;通过Airpak对一个居住区的室外环境模拟,在应用屋顶绿化后,其室外环境温度可降低约0.2℃。

关键词:绿化屋面;绿色建筑;实验监测;软件模拟

中图分类号:TU83 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0067-05

The impact of the extensive green roof on the build environment in hot-summer and cold-winter moist climate

Li Gang , Qin Menghao

(School of Architecture and Urban Planning , Nanjing University , Nanjing 210093 , P. R. China)

Abstract: Green roofing is a passive building technology. By using additional green roof layers, it improves the thermal performance inside the building, it also increases the green area of the city of the building roof layer outside the building. These dual effects can reduce energy consumption inside the building, and relieve urban heat island effect outside the building. In the middle and lower reaches of Yangtze River, weather in winter and summer go to extremes and is always humid and rainy all year round. The impact of extensive green roof on the building environment was verified by experimental monitoring and energy simulation. To prove the green roof effect on energy consumption of building, the temperature of a model office building in Nanjing City was monitored, temperature distribution in green roof and general roof in real-time were recorded, the result shows that the average temperature is 16 ℃ lower on the green roof . Energyplus simulation software was used to simulate the energy in the same building, the energy consume was reduced 2.6 kWh/m² totally when the roof have a insulation layer, and it can enhanced to 14.1 kWh/m² when the roof have no insulation layer. Airpak simulation software was used to simulate the effect on the environment in a residential area in Shanghai after the application of green roofs, the result shows the temperature was 0.2 ℃ than before.

Key words: green roof ;green building; temperture experiment ; energy simulation

收稿日期:2015-03-15

基金项目:国家自然科学基金(51108229)

作者简介:李港,男,硕士,主要从事建筑设计及其理论研究,(E-mail)makearc@126. com。

秦孟昊(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)mqin@nju. edu. cn。

绿化屋面,又被称为生态屋面、种植屋面,通过增加植物层来提高屋面的美学及热工性能表现。开敞型绿化屋面是专门指代:低维护、使用肉质植物或耐寒植物、种植在浅基质中(通常少于 150 mm)、不需要灌溉、结构上非常轻盈的绿化屋面系统。开敞型绿化屋面产品有“分层构造式”和“预种植模块式”2 种类型。绿化屋面对建筑环境的影响有:提高建筑热工性能、对抗气候变化和城市热岛效应、经济性、雨水蓄积、改善生物多样性、改善空气质量、创造宜人的室外环境及活动区域。

Sailor、Frankenstein 和 Koenig 在论述绿化屋面对建筑能耗的影响时,设置了数学公式分析绿化屋面的能量传递过程,绿化屋面的能量平衡包含植物和土壤两个部分^[1]。Alcazar 和 Bass 使用热模拟程序 EPS-r 模拟了一栋西班牙马德里的居住建筑^[2]。在附加绿化屋面后,屋面 U 值由 0.59 降至 0.42。带蓄水功能的绿化屋面屋面 U 值则由 0.59 降至 0.38。绿化屋面使得建筑年能耗降低了 1%,其中 6% 是在制冷的减少,0.5% 是制热的减少。Santamouris 等人对希腊一所护士学校屋顶的节能性能进行了调研,测试发现具有良好保温的建筑在增加绿化屋面后,其制冷负荷被降低了约 6%~49%,同时有更高范围舒适室内温度分布^[3]。Nichaou 等人测算了绿化屋面在不同性能屋面上的所能带来的舒适度变化^[4]。通过对雅典 2 个有相似的热工性能的屋面的室内温度监测,结果显示普通屋面的建筑 68% 的时间内室内温度超过了 30 ℃,但增加绿化屋面的建筑仅有 15% 的时间内室内温度超过了 30 ℃。Santamouris 指出城市反照率范围可以从 0.01 提高至 0.35,相对应的估算平均温度降低范围为 0.0~1.0 K。通过分析,当城市反照率每提高 0.1 时,周边环境温度可降低约 0.0~0.61 K^[5]。

根据夏热冬冷湿润地区气候特点,采用实验监测的方法,记录了南京地区一处绿化建筑屋面夏季 3 个月的温度变化,用以分析绿化屋面对建筑内部能耗及舒适度的影响。通过建立与实验场地相同的虚拟模型,使用 Energyplus 软件分析使用不同类型的绿化植物、覆盖不同区域、应用于不同类型屋面构造(有保温屋面和无保温屋面)的情况下,建筑内部能耗的变化。同时,使用 Airpak 软件,模拟了一个居住区进行绿化屋面改造后,环境温度的变化情况。

1 绿化屋面对建筑环境影响分析

通过在建筑屋面施加绿化层,对建筑内部而言,

可以改善建筑顶层的热工性能,对建筑外部而言,可以增加城市绿化面积并改善环境。通过这种双重的作用,在实现减少建筑内部能耗的同时,对建筑外环境如热岛效应有一定的缓解作用。

绿化屋面对建筑内环境的影响,表现在通过附加的绿化层阻隔了太阳辐射,改善了屋面的热工性能,减少了建筑能耗量。在屋面增设了绿化层后,基本传热过程不变,但因绿化层的 2 种构成物(植物和种植基质)均为不稳定物,会随外环境的状态导致热性能变化,导致绿化层及种植基质层的传热过程是及其复杂的,并且伴随着室外环境的变化而出现较大的波动。通过普通屋面的传热过程分析可以发现,作为人工制成品的屋面层(各构造层均为无机物且热性能稳定),其传热系数与热阻值是基本恒定的,故要得出绿化屋面对建筑内部能耗的影响,可以根据热量在屋面构造层内传递的过程进行分析,故需要通过实验测出绿化层与屋面层的交接面处的温度变化。

在对建筑外部环境的影响上,当绿化屋面大面积使用时,其对建筑环境的益处将进一步凸显,通过对已存在区域,及模拟改造后区域的绿化屋面研究发现,其对建筑外环境的主要作用为:缓解城市热岛、雨水缓流与净化。对建筑外部环境的影响分析,可以使用模拟软件对一个片区应用绿化屋面后的室外环境进行模拟,分析室外温度、辐射的变化。

2 实验测试

先对绿化屋面对室内环境的影响进行了实验研究,通过实验的方法记录绿化层与屋面层的交接面处各构造层的温度变化。实验场地位于南京大学费彝民楼 6 层屋面,面积约 2 340 m²,为倒置式平屋面构造。实验材料为在屋面布置 2.5 m × 2.5 m 的种植模块,以及铺设 2.5 m × 2.5 m 的户外木地板。

2.1 测试方法

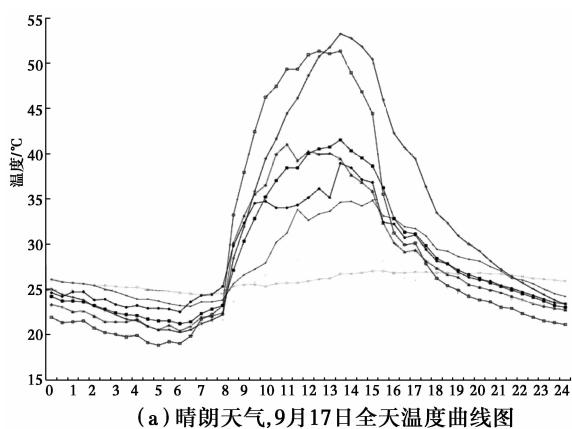
实验设备为“JTRG-II 型建筑热工温度与热流自动测试系统”,通过铜导线将热电偶片将测试点与仪器相连,电偶片埋置于各测试点。测试点包括:室外空气温度(1 个)、绿化屋面植物各层温度(3 个)、户外木地板各层温度(3 个)、裸露屋面温度(1 个)。数据记录方式为每隔 5 min 记录一次温度值,全天记录 24 h。测试时间为 2013 年 7、8、9 月。实验布置完成效果如图 1。



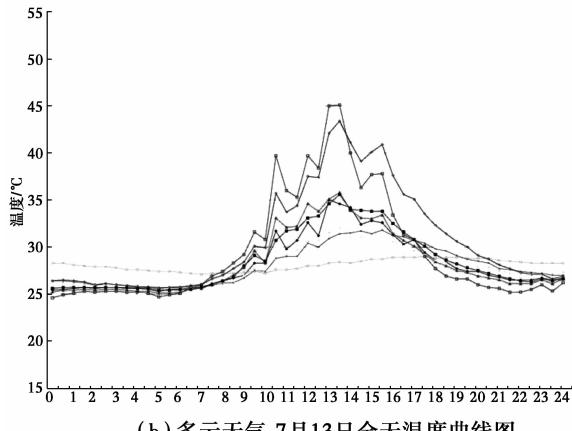
图1 实验基本布置

2.2 实验结果及分析

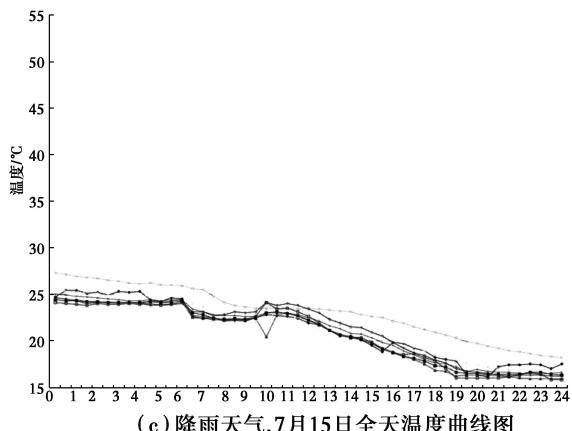
以2013年9月为例,分别选取晴朗、多云、降雨3种典型天气的温度记录数值制作曲线,如图2所示。



(a) 晴朗天气,9月17日全天温度曲线图



(b) 多云天气,7月13日全天温度曲线图



(c) 降雨天气,7月15日全天温度曲线图

注:— 植物上 + 植物中 土壤中 — 绿化底 * 地板上 ▲ 地板下 △ 地板底 ▲ 裸屋面

图2 不同天气下温度曲线图

图3为3个屋面面层的温度曲线,温度由低到高分别为绿化下部屋面、木地板下部屋面、裸露屋面。从曲线的走向看,三者基本是伴随太阳辐射的强度而变化,由于裸露屋面式中暴露在太阳辐射下,故其升温降温也最剧烈。绿化底部屋面和木地板下屋面均不直接接受太阳辐射。8月份裸露屋面温度与绿化底部屋面温度相差约30~50℃。

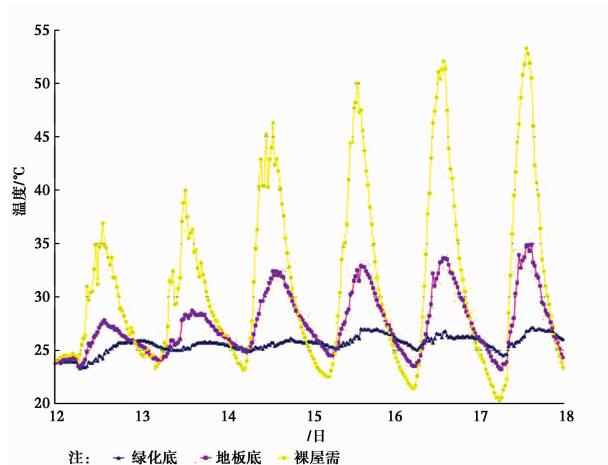


图3 3种屋面面层温度曲线图

在经过3个月的实验监测后,通过数据可以发现,在正常的晴朗天气下,绿化底部屋面温度在24~26℃之间,比裸露屋面温度平均低约25℃,最高达到约40℃,通过温度的降低可以减少传导进入室内的热量。由于夏热冬冷地区夏季降水较多(约占据夏季三个月中1/3的天数),在有雨水的天气,绿化底部屋面温度与裸露屋面温度接近,这说明雨水会使绿化屋面减少夏季制冷能耗的作用降低。户外木地板作为一个参照物,类似于“大阶砖”屋面,即通过架空一层材料,阻挡太阳辐射直接照射到屋面上,同时利用架空层的空气流动带走热量。在该实验数据中,户外木地板下的温度波动在24~34℃之间,高于绿化下的温度,这主要是室外热空气对流换热导致。另外,在三种屋面(绿化底、地板底、裸屋面)的温度曲线图中可以看到,绿化下部屋面温度波动幅度是最小的,因温度的变化会带来不同材料的膨胀拉伸,这也在一定程度上佐证了使用绿化屋面后,可以延长屋面构件的寿命。

3 对建筑内部环境影响的模拟

使用EnergyPlus对建筑内部能耗进行模拟,该模拟模型采用费彝民楼南侧的裙楼部分。在模拟中假设2栋相同的建筑,其中1栋为有保温屋面构造,

1栋为无保温屋面构造。

3.1 模拟方法

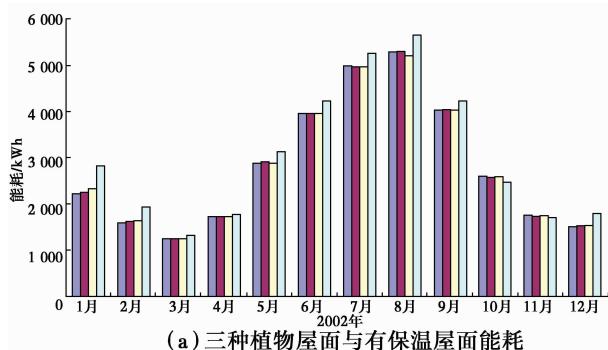
应用的开敞型绿化植物有3种,分别为:佛甲

草、德国景天、麦冬。3种植物的特性如表1所示:

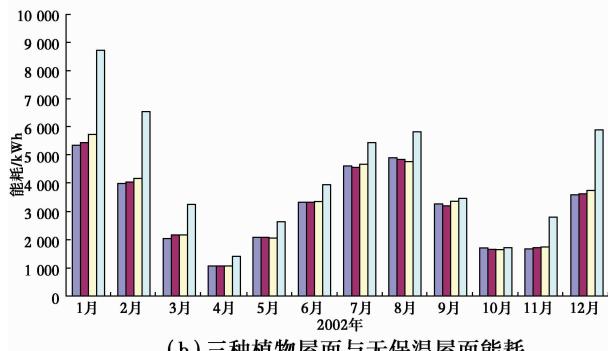
通过Energyplus中两种构造屋面与3种植物组合,模拟得出的年能耗如图4所示。

表1 3种植物特性值

植物	植株高度	叶面积指标(LAI)	叶片反射率(反射性)	叶片发射率(辐射系数)	最小的气孔阻力/(s/m)	饱和状态下最大含湿量	最小剩余体积含湿量	初始体积含湿量
佛甲草	0.11	4.6	0.32	0.83	105	0.52	0.013	0.06
德国景天	0.23	5.0	0.40	0.83	105	0.50	0.013	0.16
麦冬	0.43	5.0	0.40	0.95	125	0.50	0.033	0.36



(a) 三种植物屋面与有保温屋面能耗



(b) 三种植物屋面与无保温屋面能耗

注: ■ 佛甲草 ■ 德国景天 □ 麦冬 □ 裸露无保温屋面

图4 三种植物绿化屋面与有保温、无保温屋面能耗

3.2 模拟结果

在应用绿化后,3种绿化(佛甲草、德国景天、麦冬)下顶层的建筑能耗值差异不大,在有保温情况下分别为33 802、33 795、33 846 kWh;在无保温情况下分别为37 458、37 501、38 261 kWh。有保温的情况下以应用佛甲草为例,应用前后的能耗分别为33 802、36 356 kWh,全年能耗差值为2 554 kWh,因此在使用佛甲草绿化后,该层的节能量为2.554 kWh/m²,节能率为7.02%(能耗差/有保温能耗)。有无温的情况下以应用佛甲草为例,应用前后的能耗分别为37 458、51 510 kWh,全年能耗差值为14 052 kWh,因此在使用佛甲草绿化后,该层的节能量为14.052 kWh/m²,节能率为27.28%(能耗差/有保温能耗)。

4 对建筑外部环境影响的模拟

使用Airpak模拟一个中等容积率(1.8~2.2)的社区/基地进行模拟,模拟选择上海市一处用地面积

为46 000 m²,地上面积为83 000 m²的居住区。在现有规划设计的基础上,各楼栋屋面增设开敞型绿化层,模拟在无绿化屋面的情况下和添加了绿化屋面的情况下,室外环境的变化。通过模拟空气温度级小区辐射强度变化,模拟结果如图5所示:

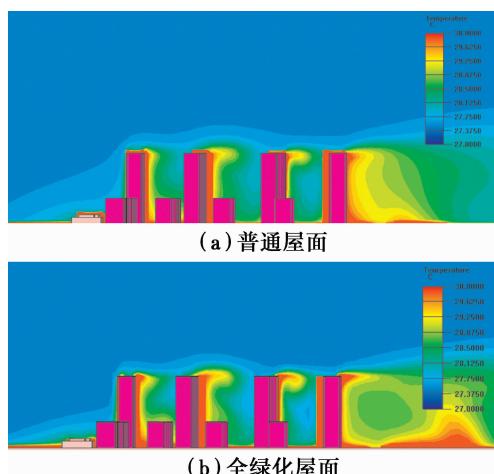


图5 室外空气温度模拟示意图

从模拟结果可以看出,当该小区的屋面全部覆盖绿化后,在10 m(6层建筑一半高度处)、20 m(6层建筑屋面高度,18层建筑约一半高度处)高度处温度可降低0.2 °C,在55 m(18层建筑屋面高度)高度处温度可降低0.3 °C,但在0.15 m高度(人行高度)处,温度与无绿化屋面的情况一样。同时,由于夏季东南风的影响,小区西北部的环境温度有明显的降低。这说明绿化可降低其高度附近的室外温度,相应可降低室内制冷负荷。

5 分析与讨论

使用EnergyPlus对建筑应用3种不同的绿化后,有保温屋面和无保温屋面的能耗变化,室内温度变化进行了模拟,通过模拟结果可以看到在建筑能耗中起决定作用的还是保温层的设置,绿化屋面对建筑能耗的作用较小,不起主导作用。从月能耗模拟可以看出,无保温屋面和有保温屋面在夏季和春季、秋季的相对能耗变化上基本一致,但在冬季差异

较大,因此可以得出绿化屋面在其遮阳作用上的贡献大于其所起到的保温功能。其次,从两种屋面夏季的表现看,无保温屋面的能耗甚至低于有保温屋面,这与温度实测的分析一致,即:当绿化底部的屋面温度低于 26 ℃时,室内向室外传导热量,无保温屋面的导热系数大于有保温屋面,其能耗降低更多,室内温度的模拟也同样反映了这一点。从三种植物的表现看,在屋面有保温的情况下,各绿化屋面下的能耗差异不大。在屋面无保温的情况下,佛甲草与德国景天的能耗接近,但麦冬屋面的能耗较大。

使用 Airpak 软件,模拟当一个片区建筑使用绿化屋面后,其室外环境温度的变化。当一个 11 栋建筑组成的,面积约 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的居住区屋面全部覆盖绿化后,在 10 m 高度以上室外温度较没有覆盖绿化屋面的情况下下降了约 0.2 ℃,说明绿化屋面对缓解城市热岛有积极的作用。当室外环境温度降低,会有部分的用户放弃使用空调制冷,改为使用建筑自然通风,人体在自然通风环境下要求的舒适温度高于空调房间温度,这在一定程度上节省了建筑能耗,为形成良性循环提供了条件^[6]。

6 结 论

通过对夏热冬冷湿润地区绿化屋面的实验监测和软件模拟,绿化屋面对建筑环境影响总结如下:

1)绿化屋面通过阻隔太阳辐射以及植物的蒸腾作用,减少通过屋面由室外传入室内的热量。在夏季,当接触面温度低于室内温度时,室内热量由高温侧向低温侧转移,从而降低室内制冷能耗;在冬季,当接触面温度低于室内温度时,室内热量由高温侧向低温侧转移,从而增加了室内采暖能耗。另一方面,由于绿化阻隔了太阳辐射,一定程度上减少了屋面的自然得热,也变相增加了冬季采暖能耗。

2)保温屋面与无保温屋面:由于绿化层的蒸腾作用,保温的作用在夏季和冬季作用不同。在夏季,无保温屋面因为热阻小,室内热量易于向室外(接触面)传导,而有保温屋面因为热阻较大,室内热量不易向室外(接触面)传导,反而不利于散热。在冬季上述作用恰恰相反,由于无保温而导致更多的热量损失,增加室内采暖能耗。通过对费彝民楼裙房的能耗模拟,在有保温的情况下,添加绿化后可节能 2.554 kWh/m²,节能率 7%,全年节省电费约 1 576 元;在无保温的情况下,添加绿化后可节能 14.05 kWh/m²,节能率 27%,全年节省电费约 8 670 元;

3)通过使用 Airpak 软件对一个 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的住宅区进行模拟,在增加绿化屋面后住区外部温度由 28.3 ℃降低至 28.1 ℃,通过估算,该住区因此可

减少夏季制冷能耗约 156 600 kWh,制冷费用减少 9.66 万元。

4)产品类型选择:在目前已有的 2 种开敞型绿化屋面产品中,结合夏热冬冷地区的气候特点,从能耗角度,由于该地区多雨导致种植基质导热系数提高,分层式绿化屋面产品与屋面外表面直接接触,而模块化绿化产品只有部分支点与屋面层接触,并在底部形成空气夹层,模块化产品对屋面能耗的节省量较大;从安装、施工以及后期检修上,模块式绿化产品便于组装和拆卸检修,更为便捷;从建造成本上,分层式绿化屋面造价更低(分层式综合单价约 120 ~ 300 元/m²、模块化综合单价约 200 ~ 450 元/m²);从景观效果上,模块化绿化产品易较快形成成熟的景观。故在夏热冬冷地区,建议使用模块化绿化产品。

5)绿化植物的选择。仅从建筑能耗的角度考虑,在佛甲草、德国景天、麦冬三种植物中,以植物物理特性判断以麦冬为最优。通过能耗模拟,3 种植物的年能耗节省量比较接近,从景观效果考虑,仍建议以高低搭配的方式,如德国景天、草花的高矮植株组合,即不影响其节能表现,同时在各个季节均有良好的景观效果。

参 考 文 献:

- [1] Sailor D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. Energy and Buildings. 2008, 40: 1466-1478.
- [2] Alcazar S, Bass B. Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in madrid, in: greening rooftops for sustainable communities, washington, DC/S [J]. Energy and Buildings. 2005, 12: 42-50.
- [3] Santamouris M. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece [J]. Energy and Buildings. 2007, 32: 1781-1788.
- [4] Niachou A, Santamouris M, Santamouris M, et al. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance [J]. Energy and Buildings. 2001, 33: 719-729.
- [5] Santamouris M. Cooling the cities-A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. Solar Energy. 2014, 103: 682-703.
- [6] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [J]. Energy and Buildings. 2002, 34: 563-572.