

# 粗放型屋顶绿化隔热效果分析

杨真静<sup>1</sup>, 唐鸣放<sup>1</sup>, 郑澍奎<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都, 610039)

**摘要:**以自然通风层的屋顶绿化为研究对象, 对有无绿化屋顶内表面温度进行比较, 采用实测数据统计分析的方法, 以全夏季为研究周期, 按不同温度区间分析屋顶内表面温度的分布特性, 比较2种状态下屋顶内表面温度的分布频率以及总温度, 得到绿化屋顶内表面温度 $<34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现的频率占总周期的90%, 是无绿化屋顶的1.6倍, 大于 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温的频率为无绿化屋顶的4.6%, 绿化屋顶内表面大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度总量约为无绿化屋顶的1/3, 且绿化屋顶的隔热性能与室外气温有较强的正向性, 随着气温的升高, 绿化屋顶的隔热性能体现得更加充分。

**关键词:**屋顶; 绿化; 表面温度; 隔热特性

中图分类号: TU111 文献标志码: 文章编号: 1674-4764(2012)03-0124-05

## Analysis on Thermal Insulation Characteristics of Extensive Green Roofs

YANG Zhenjing<sup>1</sup>, TANG Mingfang<sup>1</sup>, ZHENG Shukui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China)

**Abstract:** Through comparison of internal surface temperature (IST) of green roofs with that without green roofs through field measurement and statistics analysis, green-roof under natural convention climate in summer was analyzed. Distribution frequency and sum of IST under the conditions with and without green roofs were investigated by dividing IST into several ranges. It is shown that the frequency of IST lower than  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  for green roofs was 90%, which was about 1.6 times of that for roofs without green. While the frequency of IST exceeding  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  for green roofs was 4.6% of that for roofs without green, and the sum of IST exceeding  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  was about 1/3 of that for roofs without greening. Moreover, the property of thermal insulation of green roofs had strong positive relation with outdoor temperature. The thermal insulation characteristic was better as outdoor temperature grew up.

**Key words:** roofs; green; surface temperature; thermal insulation characteristic

近年来,屋顶绿化减少能耗增加城市绿量的作用得到了越来越多的认可,屋顶绿化是生态化的建筑节能措施,其绿化层可看作生态化的隔热构件,将大部分的太阳热辐射能转化为土壤植物的蒸腾<sup>[1]</sup>,在不加热周围环境的同时能有效降低顶层房间温度<sup>[2-3]</sup>;对提高建筑能效和改善室内舒适度有明显的效果<sup>[4-5]</sup>。对于屋顶绿化,从其热工性能、节能评价、生态效益等方面国内外都有较多研究。目前有关绿化屋面的热工性能研究主要集中在基于实测的性能

研究和以实测为基础的理论模型上,Fang<sup>[6]</sup>和Liu等<sup>[7]</sup>采用了实测的方法来评价屋顶绿化的隔热效果;Hodo、Abalo等<sup>[8]</sup>按照数值模拟提出传热计算模型,计算特定气候条件下各参数对传热的影响;Barrio等<sup>[9-12]</sup>建立了绿化屋顶的数学模型,并获得一些绿化层的隔热效果定量评价指标;孟庆林等<sup>[13-14]</sup>确定了常用屋顶绿化植物的辐射参数,并据此提出了屋顶能量平衡模型,用来研究草地型绿化屋顶太阳辐射的能量分配;赵定国等<sup>[15]</sup>对轻型绿化屋面的植

收稿日期:2011-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978261)

作者简介:杨真静(1975-),女,博士生,主要从事建筑节能与热环境研究,(E-mail)young30331@163.com。

唐鸣放(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)tmf@cqu.edu.cn。

物选择、构造措施、隔热性能进行了实验研究;唐鸣放等<sup>[16-17]</sup>研究了绿化屋面在特定气候条件下的当量热阻及其隔热特性,已获得一些植被层热工性能参数。

目前的屋顶绿化传热特性研究大多是选取一个或几个时间段,基本都是在典型晴热气候、室内空调状态下,缺乏对全夏季晴雨相交下屋顶绿化的隔热进行持续性研究,因为屋顶绿化本身作为建筑隔热构件,其效果是植被层、土层综合作用下的结果,植被会随着气温时盛时衰,土层在晴雨作用下,含湿率会相应随之变化,这些因素对屋顶绿化隔热效果的影响在短时间内无法做出系统的分析。本文对屋顶绿化隔热效果进行全夏季的持续测量,在自然通风状态下比较有绿化屋顶内表面温度,按照科学统计的方法,分析其温度分布,统计其温度总量。

## 1 实验概况

粗放型屋顶绿化(extensive green roofs)是最简单的一种屋顶绿化形式,近年被广泛推广<sup>[18]</sup>,粗放型屋顶绿化具有以下基本特征:1)管理粗放、低养护;2)免灌溉,完全在自然气候下晴雨交替作用,植物自由生长;3)从苔藓、景天到草坪地被型绿化,植被矮;4)基质薄,荷载小。

选择粗放型屋顶绿化为研究对象,实测重庆地区某住宅屋顶,该建筑针对重庆湿热气候采取了在屋顶层增加通风隔热层的做法,其屋顶构造如图1,屋顶面积约100 m<sup>2</sup>,一半屋面为粗放型自然状态屋顶绿化,无人管理,一年生草本植物自由生长,土层厚度约为100 mm。

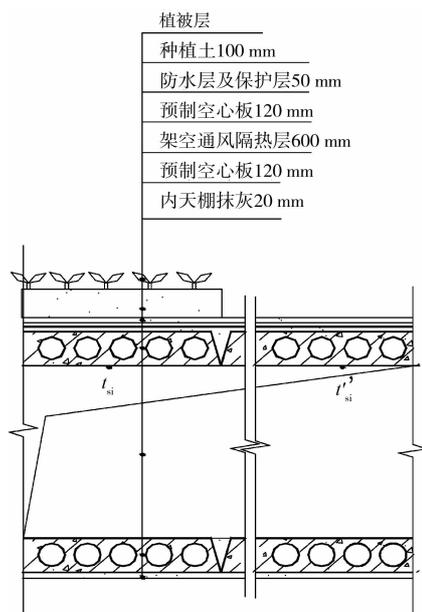


图1 屋顶构造

因是通风隔热屋顶,有上、下2个屋顶层,下层

屋顶内表面直接在建筑室内,其温度是受外扰和内扰的综合结果,屋顶层的隔热效果为绿化屋顶和通风隔热层的共同作用,根据已有研究,对已采取了较好隔热措施的建筑,屋顶绿化对室内的降温没有明显效果<sup>[10-12]</sup>,屋顶绿化隔热结果最终是直接反映在上层屋顶的内表面温度上,其温度  $t_{si}$  (见图1)最能直接反映屋顶对太阳辐射的隔热作用。

因此,选择测量内容为有、无绿化屋顶内表面温度  $t'_{si}$ 、 $t_{si}$ ,室外空气温度  $t_a$ 、湿度、太阳辐射强度、风速、降水量等气候参数,数据采集间隔时间为1 h,测量时间为全夏季6月1日—9月29日,共122 d。

在为期4个月的测试期间,室外气温及降雨量见图2,测试期间的日平均气温为27.7℃,波动范围在20~35℃,高温集中在7月,日平均气温29.9℃,最高气温为38.7℃,平均太阳辐射照度为135.9 W/m<sup>2</sup>,最大太阳辐射照度为985 W/m<sup>2</sup>,降雨6—8月都比较充沛,总降雨量为351.8 mm,平均风速为0.4 m/s。

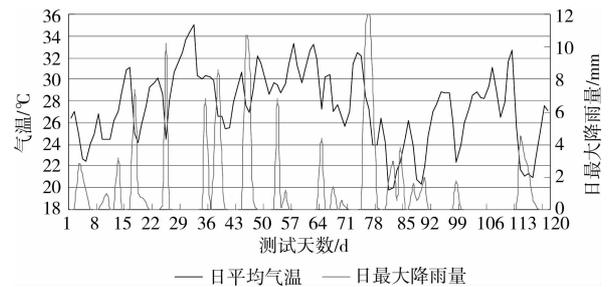


图2 测试期间室外气候参数

## 2 内表面温度比较分析

屋顶有、无绿化的差别直接体现在屋顶内表面温度上。但屋顶绿化因为土层和植物层的共同作用,在雨水的作用下,土层干湿循环,连续晴天和下雨后的隔热机理是不一样的,因此有必要把长时间段综合气候下的数据进行统计,从数据的分布来分析其热特性。

测试期间,各测试点共记录2 903次数据,将室外气温与屋顶内表面温度进行统计,重点考察在高温状态下屋顶的隔热能力,因此,从28℃开始按温度2℃为步长,到46℃共分为9个时间区间,室外气温与有、无绿化内表面温度分别落在这9个区间,每个区间的温度分布频率表示如下:

$$f(i, i+1.9) = \frac{\sum n}{N},$$

$$i = 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44 \quad (1)$$

式中:  $f$  为  $(i, i+1.9)$  温度区间内温度的分布频率,%;  $N$  为总测试次数,为2 903;  $n$  为各测点温度在  $(i, i+1.9)$  区间内出现的次数。

按照式(1)的统计,得到各测试点温度分布结果见表1。室外最高气温为38.7℃,分布于6个温度区间;绿化屋顶内表面最高温37.5℃,分布于5个温度区间;无绿化屋顶内表面最高温45.5℃,分布于9个温度区间,最高温比绿化屋顶高8℃。统计全部高于28℃的温度频率,室外气温频率为44.1%,绿化屋顶为60%,无绿化屋顶为69.1%。

表1 测试期间(6—9月)室外气温与内表面温度频率分布

温度区间/℃	室外气温		绿化屋顶内表面		无绿化屋顶内表面	
	次数	频率/%	次数	频率/%	次数	频率/%
28~29.9	447	15.4	570	19.6	373	12.8
30~31.9	315	10.9	595	20.5	380	13.1
32~33.9	249	8.6	419	14.4	371	12.9
34~35.9	162	5.6	137	4.7	324	11.2
36~37.9	89	3.1	22	0.8	256	8.8
38~39.9	15	0.5	0	0	194	6.7
40~41.9	0	0	0	0	69	2.4
42~43.9	0	0	0	0	25	0.9
44~45.9	0	0	0	0	11	0.4
Σ	1 277	44.1	1 743	60.0	2 003	69.1
>34℃	266	9.2	159	5.5	879	30.3

从表1和图3中分析得到,室外气温在28~29.9℃温度区间内分布频率最高,因为有太阳的直接辐射热,有无绿化屋顶内表面温度分布频率最高的都落在30~31.9℃区间,比室外高出一个温度区间。

在内表面温度<31.9℃的比较舒适的温度范围,绿化屋顶内表面温度出现频率最高,达到40.1%,占整个统计范围的67%,比室外气温还高出13.8%,在该范围,无绿化屋顶为25.9%。可见绿化屋顶内表面温度在比较舒适温度范围的分布频率是无绿化屋顶的1.5倍。

由图3可见,有、无绿化屋顶内表面温度与室外气温在33.5℃左右为分界点。低于33.5℃屋顶内表面温度分布频率几乎都比室外气温高,这表明有无绿化屋顶都有一定的隔热能力。在32.0~33.9℃范围,有、无绿化屋顶内表面温度频率最为接近,在该温度范围,绿化屋顶出现频率为14.4%,无绿化屋顶出现频率为12.9%,相差较小。但超过33.5℃分界点,有绿化屋顶与无绿化屋顶就表现出截然不同的走势,绿化屋顶的频率急剧下降,止步于36.0~37.9℃的温度范围,此区间出现了22次,占总频的0.76%,比室外气温的频率要低得多,表现出显著的隔热能力。而无绿化屋顶内表面温度分布频率下降较为缓慢,其频率大大高于室外气温和绿化屋顶,尤其是在大于40℃的极端高温区间仍出现了105次,占总次数的3.64%。

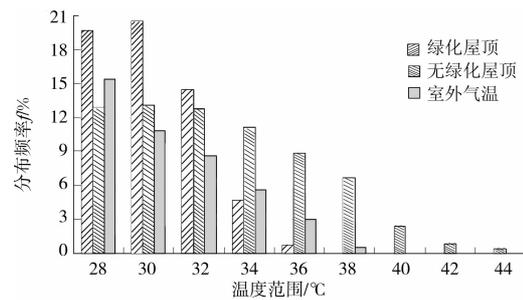


图3 室外气温与内表面温度的分布频率

图3中,如果把低于34℃定义为相对低温区,高于34℃定义为高温区,绿化屋顶内表面温度在高温区只出现了159次,占总频的5.5%,而无绿化屋顶内表面在高温区出现了879次,占总频的30.3%(见表1),如果把28~40℃温度范围总频率设为100%,那么,绿化屋顶内表面温度90%都落在低温区,高温区仅为10%,而无绿化屋顶的内表面温度在低温区为56%,高温区高达44%,绿化屋顶在能接受的相对低温范围出现频率是无绿化屋顶的1.6倍,高温范围仅占无绿化屋顶的22.7%,绿化屋顶的降温效果是显而易见的。

### 3 内表面温度总量比较分析

为了更好地分析绿化屋顶在高温状态下的表现,选择在测试期间各测试点温度超过30℃的温度进行温度总量统计,有、无绿化屋顶内表面温度总量反映了屋顶得到热量总量的多少。

设定1℃为步长,将在一定温度区间内屋顶内表面温度扣除该区间起始温度后逐个累加得到内表面温度总量,这相当于去掉各温度相同的部分,剩下不同部分进行比较,每个区间的温度总量表达为:

$$T_{(i,i+0.9)} = \sum (t_{(i,i+0.9)} - i),$$

$$i = 30, 31, 32, \dots, 45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: $T_{(i,i+0.9)}$ 为*(i, i+0.9)*温度区间内的温度总量,℃; $t_{(i,i+0.9)}$ 为温度区间内逐时温度,℃; $i$ 为1℃步长的温度值,分别为30、31、32、……、45℃。

按照公式(2),得到各测试点不同温度区间下的温度总量见表2和图4,从表2中可以看出,室外气温与绿化屋顶在整个统计区间的温度总量是非常接近的,仅相差45.7℃,占气温总量的1.8%,而无绿化屋顶的温度总量达到7 815.4℃,是绿化屋顶的3倍多,这表明在整个夏季,无绿化屋顶吸收了更多的热量来加热屋顶内表面,而绿化屋顶阻挡和吸收很大部分的热量,其屋顶内表面的得热量仅为无绿化屋顶的1/3。

在初始统计区间30~30.9℃,有、无绿化屋顶内表面的温度总量相差还不是很大,绿化屋顶内表

面温度总量为 1 023.3 °C,无绿化屋顶为 1 545.5 °C,而随着温度的上升,在超过 32 °C后,无绿化屋顶内表面温度总量跃升为绿化屋顶总量的 3 倍,到 35 °C 为 14 倍,到 37 °C,达到 286 倍。显然可以得出,无绿化屋顶对室外气温更加敏感,随着室外气温的增加,无绿化屋顶内表面温度反应剧烈,成倍上升,而绿化屋顶因其种植层,对室外气温反应较为迟钝,在超过 34 °C 的高温区间,绿化屋顶反应更为迟钝,温度总量为无绿化屋顶的 5.8%,因此可以说绿化屋顶在高温下的隔热表现更加突出。

表 2 室外气温与内表面温度总量

温度区间/°C	室外气温/°C	绿化屋顶/°C	无绿化屋顶/°C
30~30.9	737.4	1 023.3	1 545.5
31~31.9	582.5	705.4	1 356.0
32~32.9	444.0	442.5	1 141.8
33~33.9	311.5	239.4	950.4
34~34.9	214.6	107.4	784.1
35~35.9	134.2	43.2	623.8
36~36.9	73.5	12.8	489.3
37~37.9	27.5	1.2	357.7
38~38.9	4.3	0	239.8
39~39.9	0	0	146.5
40~40.9	0	0	84.6
41~41.9	0	0	57.5
42~42.9	0	0	17.8
43~43.9	0	0	12.5
44~44.9	0	0	7.4
45~45.9	0	0	1.1
Σ	2 529.5	2 575.2	7 815.4

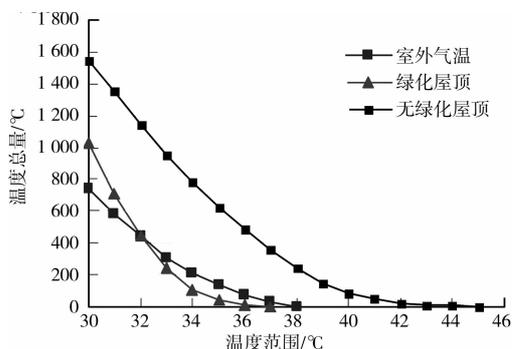


图 4 室外气温与内表面温度总量图

从图 4 可以看出,绿化屋顶和室外气温随着温度区间的升高,下降较为剧烈,终止于 38~38.9 °C,而无绿化屋顶下降较为缓慢,终止于 45~45.9 °C。绿化屋顶与室外气温其总量是很接近的,但曲线在 32 °C 前后发生变化,在低于 32 °C,绿化屋顶内表面比室外气温高,超过 32 °C,绿化屋顶内表面比室外气温

低,这表明绿化屋顶除了能将太阳直接辐射的那部分热量有效转移了外,还具有调节温度的作用,将高温移向低温,使温度区间更短,也使内表面温度更加稳定。

#### 4 屋顶内表面日平均温差与气候相关性分析

有无绿化内表面温度差是屋顶绿化作用的结果,其比较可以反应绿化层隔热效果的好坏,将室外最高气温大于等于 30、31、32、……、38 °C 划定各种热天气范围,统计其在各温度区间内的天数,可以得到不同室外气温下的有无绿化屋顶内表面日平均温差,其表达如下:

$$\Delta \bar{t}_{(i,i+0.9)} = \frac{\sum (t_{si(i,i+0.9)} - t'_{si(i,i+0.9)})}{24n},$$

$$i = 30, 31, 32, 33, \dots, 45 \text{ °C} \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{t}_{(i,i+0.9)}$ 为*(i,i+0.9)*温度区间内的日平均温差,°C; $t_{si(i,i+0.9)}$ 为*(i,i+0.9)*温度区间内无绿化屋顶内表面逐时温度,°C,每天 24 个数据; $t'_{si(i,i+0.9)}$ 为*(i,i+0.9)*温度区间内有绿化屋顶内表面逐时温度,°C; $n$ 为室外最高气温在*(i,i+0.9)*温度区间的天数, $i$ 为 1 °C 步长的温度值,分别为 30、31、……、45 °C。例如室外最高气温为 36~36.9 °C 区间有 9 d,则有无绿化屋顶的测试点各有  $24 \times 9 = 216$  个数据,将各点的逐时温差累加得到总温差,除以 216,得到该温度区间下的日平均温差。

按照式(3),得到以室外最高气温划分的有、无绿化屋顶内表面日平均温差,见图 5,可以看出有无绿化屋顶内表面温差与室外气温具有很好的相关性,计算显示其相关系数为 0.96。这表明在高温天气范围内,随着室外气温的升高,种植层的隔热作用在不断提高,室外气温越高,这种作用体现越充分。

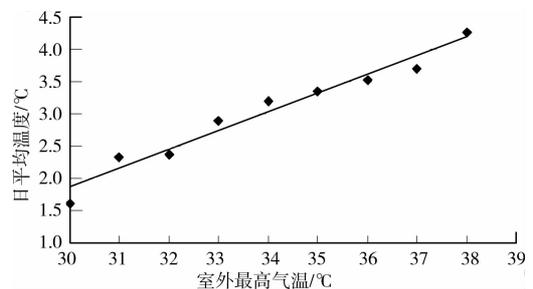


图 5 日平均温差与气候相关性

室外气温小于 35 °C 时,有、无绿化屋顶内表面的逐时温差有正有负,也即绿化屋顶内表面也出现过比无绿化屋顶内表面高情况,尽管这种情况次数不多,但超过 35 °C 的高温,内表面温差都是正值,也即绿化屋顶内表面都比无绿化内表面温度要低,而且相差的数值随着室外气温的升高越来越大。

## 5 结 论

1)在夏季高温天气,屋顶绿化对削减屋顶内表面温度效果显著,使屋顶内表面温度90%都处于小于34℃可以接受的温度范围,而且大于34℃的频率仅为无绿化屋顶的1/5左右。无绿化屋顶对室外气温更加敏感,随着气温的增加,无绿化屋顶内表面温度反应剧烈,增长迅速,而绿化屋顶具有较强的温度调节作用,屋顶内表面对气温反应较为迟钝,内表面温度相对稳定。

2)屋顶绿化因其土壤和植物的共同作用,屋顶内表面温度总量在统计范围内仅为无绿化屋顶的1/3,有效地阻挡了进入室内的热量,相应减少了室内的降温负荷。

3)屋顶内表面日平均温差与室外气温有很强的正相关性,也即绿化屋顶不同于其他建筑构件,其隔热性能不是固定的,而是和室外气温紧密相关,随着室外气温的升高,有无绿化屋顶内表面日温差也在变大,绿化屋顶越在高温状态下越能充分展示其隔热性能。

### 参考文献:

- [1] Feng C, Meng Q L, Zhang Y F. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(6): 959-965.
- [2] 赵定国,薛伟成. 轻型屋顶绿化的降温效果[J]. *上海农业学报*, 2006, 48(1):125-127.  
ZHAO Dingguo, XUE Weicheng. Effect of greening on light roofing on lowering temperature [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2006, 48(1):125-127.
- [3] 杨晚生,郭开华. 模块化植被屋面隔热层性能测试分析[J]. *新型建筑材料*, 2011(2):40-42.  
YANG Wansheng, GUO Kaihua. Experimental analysis on the insulation characteristics for vegetation roof in buildings [J]. *New Building Materials*, 2011(2):40-42.
- [4] 时真男,高旭东,张伟捷. 屋顶绿化对建筑能耗的影响分析[J]. *工业建筑*, 2005, 35(7):14-15.  
SHI Zhennan, GAO Xudong, ZHANG Weijie. Effect of building roof afforestation on building energy consumption [J]. *Industrial Building*, 2005, 35(7):14-15.
- [5] 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.  
YANG Zhenjing, TANG Mingfang, ZHENG Shukui. Study on indoor thermal environment for green roof [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(4):80-84.
- [6] Fang C F. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(6):1048-1052.
- [7] Liu K, Minor J. Performance evaluation of an extensive green roof [M]. Washington D C: Greening Rooftops for Sustainable Communities, 2005.
- [8] Hodo-abalo S, Banna M, Zeghamati B. Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics [J]. *Renewable Energy*, 2012, 39(1): 140-148.
- [9] Barrio E P D. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings [J]. *Energy and Buildings*, 1998, 27(2):179-193.
- [10] 白雪莲,冯雅,刘才丰. 生态型节能屋面的研究(之二)——种植屋面实测结果与数值模拟的对比分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2001, 27(3): 60-62.  
BAI Xuelian, FENG Ya, LIU Caifeng. Study on results of measurement and simulation in planting roof [J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2001, 27(3): 60-62.
- [11] Sailor D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(11):1466-1478.
- [12] Lazzarin R M, CASTELLOTTI F, BUSATO F. Experimental, measurements and numerical modelling of a green roof [J]. *Energy and Buildings*, 2005(37):1260-1267.
- [13] 孟庆林,张玉,张磊. 热气候风洞内测定种植屋面当量热阻[J]. *暖通空调*, 2006(13):104-105.  
MENG Qinglin, ZHANG Yu, ZHANG Lei. Measurement of equivalent thermal resistance of planted roof in hot-climate wind tunnel [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2006(13):104-105.
- [14] 冯驰,孟庆林,李宁,等. 佛甲草辐射特性的研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(4):65-68.  
FENG Chi, MENG Qinglin, LI Ning, et al. Study on radiative properties of sedum lineare [J]. *Building Science*, 2010, 26(4):65-68.
- [15] 赵定国,薛伟成. 轻型屋顶绿化的节电效果[J]. *上海农业学报*, 2008, 24(1):99-101  
ZHAO Dingguo, XUE Weicheng. Effect of light roof greening on saving electric power consumption [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2008, 24(1): 99-101.
- [16] 唐鸣放,郑澍奎,冯雅. 绿化屋顶内表面对太阳辐射的反应特性[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(5):563-566.  
TANG Mingfang, ZHENG Shukui, FENG Ya. Response features to solar radiation on internal surface of roof greening [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(5):563-566.
- [17] 唐鸣放,杨真静,郑开丽. 屋顶绿化等效热阻[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2007, 30(5):1-5.  
TANG Mingfang, YANG Zhenjing, ZHENG Kaili. Thermal R-values of green roof [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2007, 30(5): 1-5.
- [18] 吉文丽,李卫忠,王诚吉,等. 屋顶花园发展现状及北方屋顶绿化植物选择与种植设计[J]. *西北林学院学报*, 2005, 20(3): 180-183.  
JI Wenli, LI Weizhong, WANG Chengji, et al. A study on present situation of roof garden, plant select and planting design [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(3): 180-183.