

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.085



# 屋顶绿化对室外微气候的降温增湿效果

彭明熙<sup>a</sup>, 杨真静<sup>a, b</sup>

(重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**在密度城市中,建筑屋顶具有巨大的开发利用潜力,通过结合绿化打造屋顶休闲空间,不仅可以改善屋顶上部微气候,还能有效提高城市绿量。以重庆典型气候条件下绿化屋顶常用的 3 种屋顶绿化植物为研究对象,采用实测与理论分析相结合的方法,探究不同屋顶绿化植物对周围环境的降温增湿效果。实验结果表明,屋顶绿化的降温增湿作用从正午高温之后持续至次日日出,增湿作用夜间效果更为突出,植物的降温效果在其表面最显著;植物叶面积指数与其反射辐射量呈反向相关。3 种植物中,小叶景天综合效果最好,在其表面日间最大降温 11.7 °C,在 300、700 mm 处夜间分别降温 4.64、3.97 °C,其最大增湿效果出现在 19:00,增湿 33.1%。

**关键词:**屋顶绿化;室外气候;降温增湿;景天植物;叶面积指数

中图分类号:TU111.4 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)04-0165-09

## Cooling and humidification effect of green roof on the outdoor microclimate

Peng Mingxi<sup>a</sup>, Yang Zhenjing<sup>a, b</sup>

(a. College of Architecture and Urban Planning; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:**Green roof has been recognized as a complement of urban green and an ecological solution to mitigate urban heat island (UHI) effects. The benefits of green roof in microclimate at the building scale have been identified by previous studies, but some quantitative data of the wider influence on neighborhood microclimate are still needed. Therefore, a field measurement was conducted in Chongqing to investigate the green-roof effects on outdoor microclimate. From the derived data, it has been verified that the thermal benefits of green roof begin from the high temperature noon to the next sunrise, and the humidification effect was more prominent at night, the most significant cooling effect of plants was at the surface. Meanwhile, the leaf area index of plants was inversely correlated with the amount of reflected radiation. The Sedum Makinoi had the best combined effect of three plants, the maximum cooling temperature was 11.7 °C during the day and the temperature was 4.64 °C and 3.97 °C respectively at 300 mm and 700 mm,

收稿日期:2018-11-26

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700302);国家自然科学基金(51508048)

作者简介:彭明熙(1992-),女,博士生,主要从事建筑技术研究,E-mail:mingxipeng@cqu.edu.cn。

杨真静(通信作者),女,副教授,博士生导师,E-mail:youngzj@cqu.edu.cn。

Received:2018-11-26

**Foundation item:**China National Key R&D Program (No. 2016YFC0700302); National Natural Science Foundation of China (No. 51508048)

**Author brief:**Peng Mingxi(1992-), PhD candidate, main research interest: architectural technology, E-mail: mingxipeng@cqu.edu.cn.

Yang Zhenjing(corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: youngzj@cqu.edu.cn.

the maximum humidification effect appeared at 19:00 at sunset and humidified 33.1%.

**Keywords:** green roof; outdoor microclimate; cooling and improving humidity effect; sedum plants; leaf area index

在高密度的城市空间,建筑屋顶具有巨大的开发利用潜力,但因屋顶是建筑围护结构中的水平构件,受太阳辐射时间长,裸露屋顶吸收的太阳辐射会以长波辐射的方式持续加热周围空气,引起上部人体的不舒适。结合绿化来打造屋顶休闲空间是改善屋顶上部微气候的有效措施,不仅弥补和挖掘了城市空间,还有效提高了城市绿量,Ng等<sup>[1]</sup>在其研究中指出,若城市面积的33%种植树木,则可降低行人层面空气温度约1℃。屋顶绿化不仅能减少屋面热流量,降低建筑能耗,还可通过植物的光合作用和蒸腾作用对太阳辐射进行吸收和转化,对周围空气起到降温增湿的效果,达到缓解城市热岛效应的目的<sup>[2]</sup>。

有学者<sup>[3-5]</sup>通过实验证明屋顶绿化对周围微气候具有一定影响,不仅能降低屋顶层面的空气温度,对行人层面也有一定降温效果。在建筑密度极高的城市,例如香港,Peng等<sup>[6]</sup>通过实验和模拟发现粗放型绿化屋顶可以降低行人层面空气温度0.4~0.7℃,精细型绿化屋顶可降低0.5~1.7℃。中国关于绿化屋顶的研究始于20世纪80年代初,2000年以后,不同专业领域都对屋顶绿化进行了大量的研究,但研究水平还处在相对较低的层次。2011年以后,屋顶绿化对雨水径流的缓解、城市小气候和空气质量改善的研究逐渐成为研究的热点<sup>[7-10]</sup>。对于绿化对室外热环境的影响,林波荣<sup>[11]</sup>研究了植物对室外热环境的影响,之后,李延明等<sup>[12]</sup>、李月鹏<sup>[13]</sup>、秦文翠等<sup>[14]</sup>研究了屋顶绿化与城市热岛效应之间的关系。

纵观对屋顶绿化改善室外微气候的研究,学者们采用实验或数学模型从不同角度定量研究屋顶绿化对室内外的热效益,明确了屋顶绿化通过对周围环境的降温增湿作用可以改善微气候<sup>[15]</sup>,发现叶面积指数、土壤厚度、植被类型等都是影响因素。因植

物具有很强的地域性,笔者选择夏热冬冷气候区的典型城市重庆,以屋顶绿化常用的3种景天科植物屋顶为研究对象,采用对比测试的方法定量分析不同绿化对上部空间的热影响。

## 1 实验测试

### 1.1 预备实验

为粗略确定屋顶绿化对微气候的大致影响范围和被测植物的叶面积指数,在正式实验前进行范围较广的预备实验,为正式实验提供设置高度及叶面积指数计算的基础。预备实验中,参考相关文献<sup>[16]</sup>中的实验设置高度,分别选择300、700、1000 mm。研究发现,700 mm与1000 mm的实验结果相同,说明植物对微气候的影响范围在700 mm以内。此外,在预备实验中,采用直接测量法中的收割法取10 cm×10 cm的面积对3种植物的叶面积指数进行大致测算,佛甲草、小叶景天、落地生根的叶面积指数分别为2.5、3.1和3.8。

### 1.2 实验设置

实测重庆大学建筑城规学院屋顶,该屋顶绿化属于粗放型单元式屋顶绿化,建筑共7层,周围无高层建筑遮挡,可避免实验中出现太阳辐射不均的现象。为确定不同植物特性对室外微环境的影响效果,对小叶景天、佛甲草、落地生根3种景天科植物在室外的降温增湿效果进行实测,并以裸屋顶作为实验的对比工况。

由于预备实验得到植物对微气候的影响范围在700 mm以内,故将测量高度设定为0、300、700 mm,测量内容包括3种植物和裸屋顶在各个高度处的温湿度,以及距裸屋顶表面和3种植物冠层顶部300 mm处的热辐射量,具体实验布置见图1。

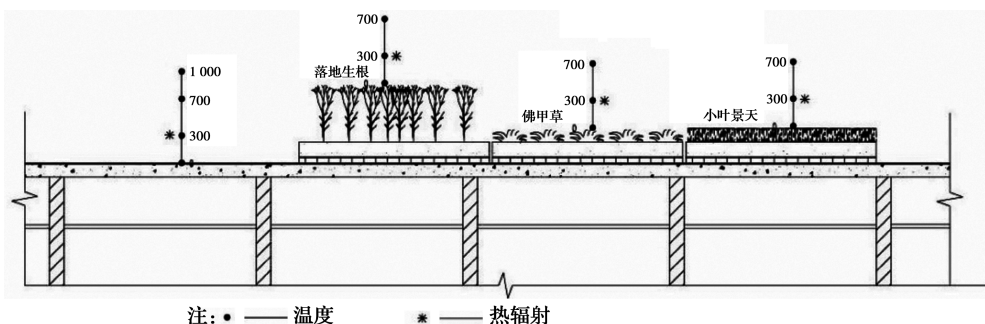


图1 实验布置图

fig. 1 Layout of the experiment

测量时间为 2016-10-01—2016-10-06,测试期间连晴无雨,气温稳定,室外气象参数见图 2。

测仪,数据采集间隔时间为 10 min,仪器参数见表 1。

### 1.3 仪器装置

实验所用仪器包括温湿度仪和手持式热辐射检

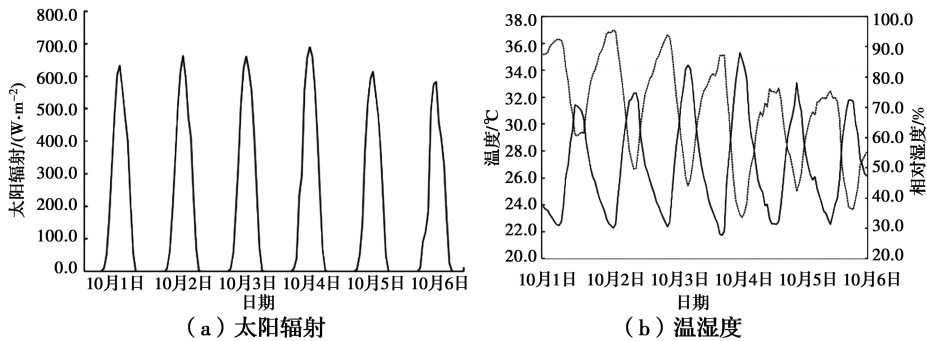





图 2 室外气象参数

Fig. 2 Outdoor weather parameters

表 1 实验仪器及被测参数

Table 1 Instrumental specifications

仪器名称	型号	图片	测量指标	量程	精度
Testo 温湿度计	174H		空气温度	-20 $^{\circ}C$ ~ +70 $^{\circ}C$	$\pm 0.5$ $^{\circ}C$
			相对湿度	0 ~ 100.0 %	$\pm 3$ %
Testo 温湿度计	175-H1		空气温度	-20 ~ 55 $^{\circ}C$	$\pm 0.4$ $^{\circ}C$
			相对湿度	0 ~ 100 %	$\pm 3$ %
热辐射记录仪	JTR09		辐射热	0 ~ 10 $kW/m^2$	$\pm 4$ %

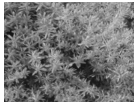
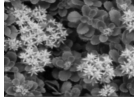

### 1.4 植物简介

由于景天科植物适应性极强,不择土壤,可以生长在较薄的基质上,因此,适用于承载能力有限且无

需细致管理的屋顶。选择景天科中具有代表性、高度不同的 3 种植物作为实验对象。3 种植物主要特征参数见表 2。

表 2 植物参数

Table 2 Plant specifications

植物名称	高度/cm	植物特征	叶片透射比	叶面积指数	图片
佛甲草	10~20	多年生草本,无毛。	0.21	2.5	
小叶景天	10~20	多年生肉质宿根草本,地下茎肥厚,地上茎簇生,粗壮而直立。	0.15	3.1	
落地生根	30~150	多年生肉质草本植物,可长成亚灌木状。	0.10	3.8	

## 2 实验结果

为确定屋顶绿化对微气候的降温增湿效果,选

择室外气候稳定的 10 月 3 日作为典型日,对所测数据进行分析。

### 2.1 表面温湿度

由图 3 可以看出,裸屋顶和 3 种绿化屋顶表面空气温度均在 14:00 达到最高,其中,裸屋顶表面最高温度为 50.72 °C,与小叶景天叶面上方空气温度相差最大,为 11.69 °C,与佛甲草温差最小,为 6.57 °C。说明当周围空气温度升至最高时,屋顶绿化对近表面的降温效果显著。观察各屋顶的最低温度发现,小叶景天表面空气温度在 6:00 达到最低,仅有 21.02 °C,但与裸屋面相比仅降温 1.5 °C。比较表面空气平均温度发现,佛甲草虽然日较差最大,但其表面空气平均温度与落地生根相近,约 29.6 °C,与裸屋顶相比约低 3 °C。而小叶景天表面空气平均温度最小,为 27.26 °C。从表面温度来看,小叶景天的降温效果最好。

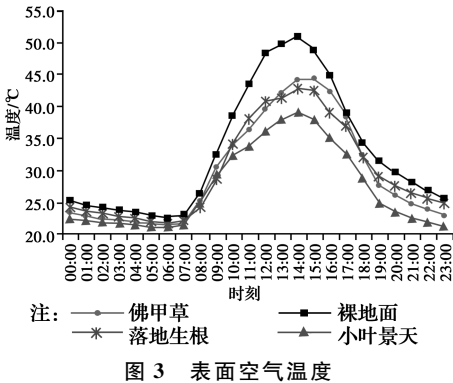


图 3 表面空气温度

图 4 为 3 种植物表面空气湿度,从图 4 可以看出,小叶景天的增湿效果明显优于其他两种植物,其平均湿度为 79.95%,表面空气最高相对湿度高达 99.90%。与另外两种植物相比,小叶景天的最低湿度和平均湿度均高出约 10%。观察 3 种植物的湿度曲线可以发现,其表面空气湿度在日落之后均有大幅度上升,其中两种小叶片植物——佛甲草和小叶景天的上升斜率更大,说明肥厚的叶片能储存更多的水分,对空气的增湿效果更佳。

### 2.2 上部空气温湿度

为确定屋顶绿化对微气候的影响效果,对其上部 300 mm 和 700 mm 处空气温湿度数据进行分析。在 300 mm 处,其上方空气温湿度与裸屋顶差别较小(见图 5)。落地生根对最高温度的削峰效果优于小叶片植物(佛甲草与小叶景天),降温约 1 °C。从平均温度来看,小叶景天降温 1.70 °C,这是因为

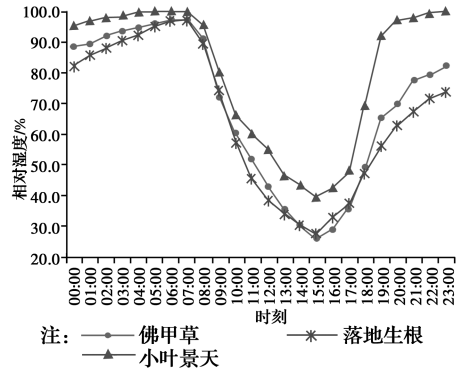


图 4 植物表面空气湿度

Fig. 4 Comparison of relative humidity measured at 0 mm heights above vegetation

在中午的高温过后,小叶景天上方 300 mm 处的空气降温迅速,尤其在 23:00,低于裸屋顶约 5 °C。当升高到 700 mm(见图 6),同 300 mm 的曲线变化相似,小叶景天上方的空气温度在 14:00 后急速下降,佛甲草和落地生根上部空气温度与裸屋顶相近。

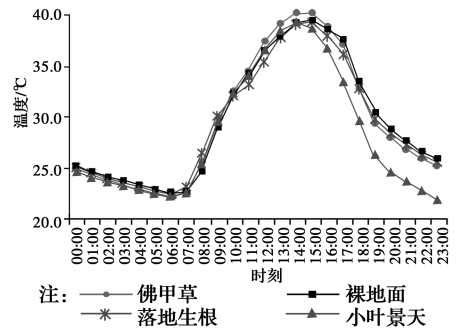


图 5 300 mm 处空气温度

Fig. 5 Air temperature at 300 mm above the vegetation and hard surface

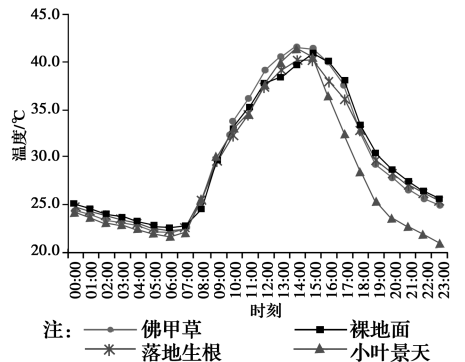


图 6 700 mm 处空气温度

Fig. 6 Air temperature at 700 mm above the vegetation and hard surface

对比 300 mm 处的湿度数据(见图 7),佛甲草和落地生根上部空气平均湿度仅比裸屋面高约 2%,而小叶景天高出 12.87%,平均湿度 75.19%。分析



增湿规律发现,植物在正午高温后开始对微气候增湿,在 15:00,小叶景天 300 mm 处相对湿度为 35.15%,高于裸屋面 7.58%。日落后植物的增湿效果更加显著,19:00 小叶景天上部空气湿度与裸屋顶的差值达到最大,为 33.1%。佛甲草与裸地面的最大差值出现在 21:00,落地生根则出现在日落之前。当升高到 700 mm(见图 8),落地生根和佛甲草上部空气湿度曲线与裸地面重合,仅小叶景天上部空气的湿度在午后高于裸地面,说明小叶景天对上部空气的增湿效果最显著,其次是佛甲草。

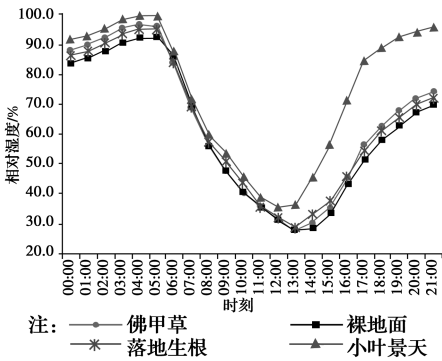


图 7 300 mm 处空气湿度

Fig. 7 Comparison of relative humidity measured at 300 mm heights above vegetation and hard surface

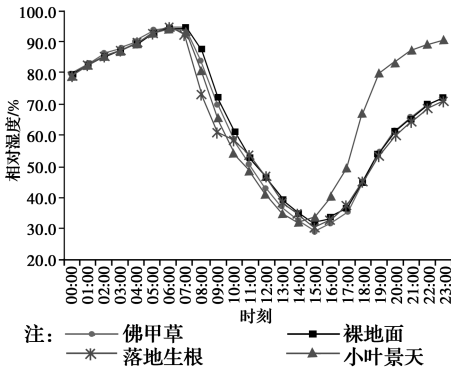


图 8 700mm 处空气湿度

Fig. 8 Comparison of relative humidity measured at 700 mm heights above vegetation and hard surface

### 2.3 热辐射

从图 9、图 10 可以看出,不同植物对太阳辐射的反射和吸收转化作用。日出后,屋顶热辐射值迅速升高(见图 9),绿化屋顶的斜率甚至超过裸屋顶,导致绿化屋顶热辐射峰值早于裸屋顶 1 h。峰值过后至日落之前,植物的热辐射值较裸屋顶下降更缓慢。对比热辐射总量(见图 10)可以看出,3 种植物中对太阳辐射的吸收由强到弱依次为落地生根、小

叶景天和佛甲草,从叶片特征分析,落地生根叶片大且茂密,相对而言,吸收的太阳辐射更多。

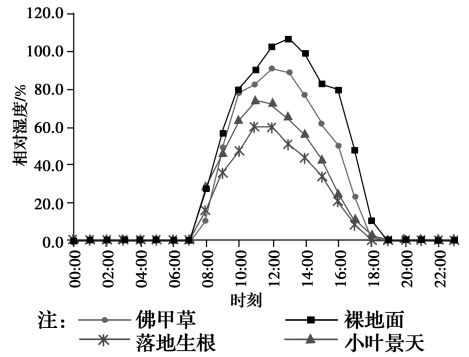


图 9 300 mm 处反射辐射热

Fig. 9 Reflected solar radiation heat of vegetation and hard surface at 300 mm

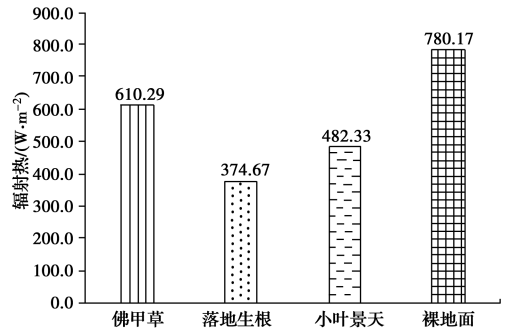


图 10 热辐射总量

Fig. 10 Amount of solar radiation heat of vegetation and hard surface

## 3 分析与讨论

小叶景天对上部空气的降温增湿效果最好,在 300 mm 处降温 1.7 °C,在 700 mm 处降温 0.43 °C,对比已有研究,与 Peng 等<sup>[6]</sup>、Alcazar 等<sup>[17]</sup>的研究结论较为一致,与 Speak 等<sup>[18]</sup>在地中海气候区屋顶绿化实验中 300 mm 处降温 1.06 °C 相比,降温效果高出 60%。小叶景天在 700 mm 处增湿 7%,与林波荣<sup>[11]</sup>得到的草坪增湿上部空气 10% 的结果也较一致。

### 3.1 降温增湿原理

绿化屋顶因有植物和植物生长所需的培养基质,一方面,绿色植物能反射一部分太阳辐射,同时通过光合作用吸收一部分太阳辐射,减少屋顶层的太阳辐射热;另一方面,植物的培养基质层(土壤)中含有水分,当屋顶温度升高时,土壤通过蒸发水分吸收热量,土壤水分的蒸发和叶片的蒸腾作用也增加

了周围空气的湿度。

与传统屋顶一样,绿化屋顶的能量平衡由太阳辐射主导,有显热(对流)和潜热(蒸发)两部分。植物的显热交换来自叶片表面和周围空气之间的温差,受风速和叶面积指数的影响;植物冠层的潜热来自植物失去水分的过程(蒸腾),由植物细胞间的气孔开启关闭而来。潜热中的湿交换受风速、表面粗糙度和大气稳定性的影响,当植物冠层阻力小,叶片表面保持干燥,易于蒸发;当冠层阻力大,水分向叶片表面运动,但不容易蒸发。在3种植物中,落地生根高度约为70 cm,小叶景天和佛甲草约为10~20 cm。较高的植物冠层中空气间隙更大,叶片下的空气对流增加,其隔热和增湿效果均受到影响。

### 3.2 叶面积指数与反射辐射

植物层的降温除了其叶片本身的蒸腾作用和对太阳辐射的吸收作用之外,遮阳也是一项重要因素,遮蔽愈好则透过植物层的辐射热量愈少,植物层的遮蔽作用一般采用植物叶面积指数来表示。叶面积指数 LAI 的测定方法主要包括叶面积仪测定法、纸样称重法等。但这些方法都适合于叶片面积较大的植物,对于景天科植物而言,由于其叶片面积小、群落覆盖密集,笔者采用间接算法来估算植物的叶面积指数,并将直接法测得的数据作为参考。

根据门司、佐伯<sup>[19]</sup>对光强在群体内自上而下的衰减与叶面积的关系,假定群体内的叶片分布为一均匀介质,则绿化植物层对太阳辐射的透过率与植物层的叶面积之间的关系为

$$\tau = \exp(-K \cdot \text{LAI}) \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为辐射的穿透函数; $K$ 为消光系数;LAI为叶面积指数。

消光系数与太阳辐射的方向有关,根据已有资料<sup>[20]</sup>,对于直射辐射, $K=0.5$ ;对于散射辐射, $K=0.8$ 。代入前期试验测得的佛甲草、小叶景天和落地生根3种植物对太阳辐射的叶片透射比,分别为0.21、0.18和0.10,近似假设3种植物的 $\tau$ 分别等于0.21、0.15、0.10。在重庆典型气象年中,水平面的太阳散射辐射占总辐射的一半以上,因此,植物对太阳总辐射的消光系数按直射、散射各占一半的比率取为0.65,用式(1)可计算出佛甲草、小叶景天和落地生根植物当量叶面积指数 LAI 分别为2.4、2.92和3.54。

将3种植物的叶面积指数和反射辐射总量进行相关性分析,得到如图11所示曲线,其相关系数 $R^2=0.97$ 。表明植物的叶面积指数与其反射辐射总量强相关,叶面积指数越大,反射的太阳辐射量越少,说明叶片的大小、覆盖面积与反射辐射呈反比关系。落地生根因其叶面积指数较大,反射到周围空气的热辐射量更少,所以,其上部空气的最高温度始终最低,温度日较差也小于其余两种植物。而城市热岛效应形成的原因之一,正是因为硬质表面在吸收太阳辐射之后对周围反射更多的辐射热,导致周围温度升高。高叶面积指数的植物正好解决这一问题,通过减少对周围环境的辐射,缓解城市热岛效应。

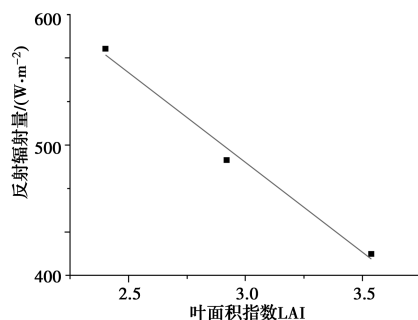


图11 叶面积指数与辐射热相关性曲线

Fig. 11 Correlation curve of leaf area index and radiant heat

### 3.3 不同时段降温增湿效果

通过分析白天和夜间不同屋顶上方空气的平均温湿度变化,可以找到植物对微气候的降温规律。取7:00至19:00为白天,19:00至次日6:00为夜间,图12、图13分别表示白天和夜间屋顶表面和上部300、700 mm处的空气平均温度。在白天,除小叶景天外的屋顶,较低处的空气温度高于较高处,这是因为在白天强烈的太阳辐射下具有较高的表面温度,随后影响到了周围的空气温度,这种影响随着高度的升高逐渐减小,但两种植物的曲线波动在1℃以内。而小叶景天在300 mm处的空气温度高于植物表面的空气温度,说明在白天小叶景天对周围空气有降温效果,但是其效果受限于距离。

与白天相比,夜间的温度曲线完全相反,越接近植被,周围空气温度越低。这是因为在日落之后,环境的空气温度明显下降,植物对周围空气的降温效果也被唤醒。在夜间,植被持续降低周围空气温度,直至日出。比较裸屋顶上方的空气温度发现,测得

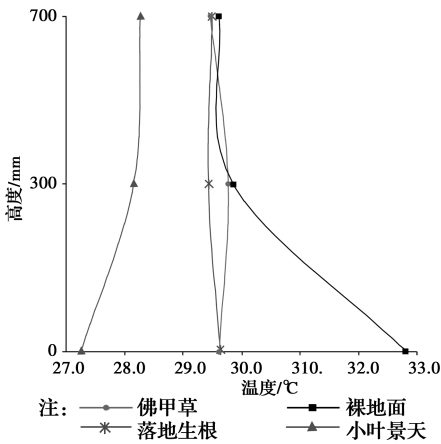


图 12 白天空气温度

Fig. 12 Mean temperature at different height above vegetation and hard surface during 7:00 am to 7:00 pm

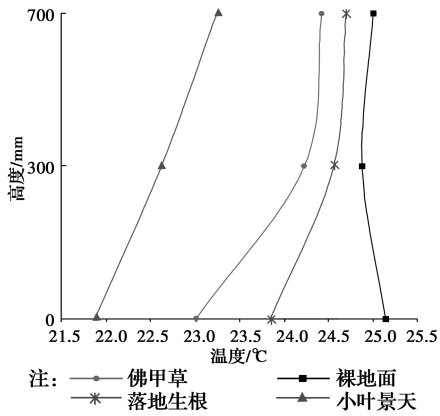


图 13 夜间空气温度

Fig. 13 Mean temperature at different height above vegetation and hard surface during 7:00 pm to 7:00 am

的温度差异不大,在 300 mm 处的空气温度总是高于其表面,这说明硬质表面加热周围空气,距离表面越远,周围空气温度越低。说明硬质表面在白天所吸收的热量被再次以长波的形式对外辐射,加热周围空气,这实际上也是造成城市热岛效应的原因之一。

图 14、图 15 为白天和夜间的平均空气湿度。白天和夜间植物表面的空气湿度均高于裸屋顶表面,但在 700 mm 处,白天仅小叶景天上方的空气湿度高于裸屋顶。在白天和夜间,植物在 300 mm 处的空气湿度均低于其表面,说明在 300 mm 的范围内植物全天增湿周围空气。分析整日情况,佛甲草和落地生根的增湿效果在白天受到限制,只能对 300 mm 范围内的空气进行增湿,夜间则将增湿范围扩大至 700 mm。而小叶景天日夜的空气湿度变化

曲线相近,空气湿度也远高于其余 3 种屋顶。对比 3 种植物的特征发现,佛甲草和小叶景天都属于较矮的景天科草本植物,其叶片肥厚,叶片中可储存的水分较落地生根多,在受到高温低湿的气候影响后,通过蒸发出叶片内的水分用以降低植物本身温度,同时提高周围空气湿度,所以,佛甲草和小叶景天的增湿效果较落地生根更强。再比较佛甲草和小叶景天,佛甲草的增湿效果在白天的 300 mm 处受到距离的限制,表现为白天其 300 mm 处的空气湿度低于 700 mm。然而,小叶景天不仅在中午的高温之后冷却空气温度,还可以在一整天都增加其周围空气的湿度,说明叶面积指数与增湿效果正向相关。

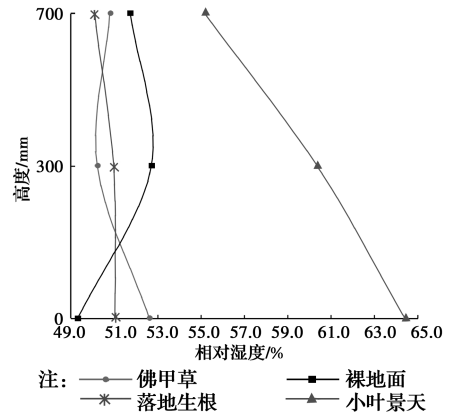


图 14 白天空气湿度

Fig. 14 Mean related humidity at different height above vegetation and hard surface during 7am to 7pm

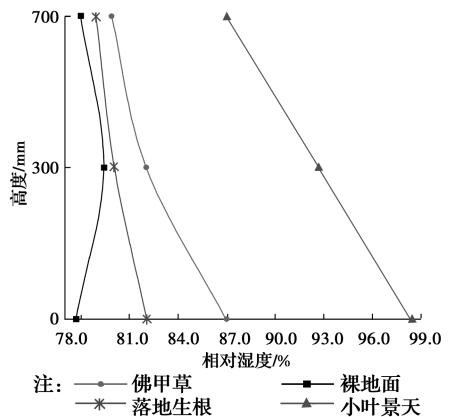


图 15 夜间空气湿度

Fig. 15 Mean related humidity at different height above vegetation and hard surface during 7pm to 7am

### 4 结论

通过实测数据分析,证明屋顶绿化对微气候确有降温增湿作用,其降温增湿作用从正午高温之后

持续至次日日出,夜间增湿作用更为突出,植物的降温效果在其表面最显著,其次是在 300 mm 处,日间降温的影响范围受限于 700 mm。通过相关性计算发现,植物叶面积指数与其反射辐射量呈反向相关,植物叶面积指数越高,吸收太阳辐射越多,同时,减少对微气候的热辐射,可以有效改善城市热岛效应。

小叶景天叶片肥厚,叶片中可储存的水分较多,且叶面积指数高于佛甲草,是综合效果最好的植物,在其表面日间最大可降温 11.7 °C,在 300 mm 和 700 mm 处夜间分别降温 4.64、3.97 °C,其次是落地生根。小叶景天的最大增湿效果出现在 19:00,增湿 33.1%,其次是佛甲草。

### 参考文献:

- [1] NG E, CHEN L, WANG Y N, et al. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2012, 47: 256-271.
- [2] ALEXANDRI E, JONES P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 480-493.
- [3] ALCAZAR S S, OLIVIERI F, NEILA J. Green roofs: Experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean-continental climates [J]. *Urban Climate*, 2016, 17: 304-317.
- [4] BERARDI U. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 121: 217-229.
- [5] TAKEBAYASHI H, MORIYAMA M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(8): 2971-2979.
- [6] PENG L, JIM C. Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation [J]. *Energies*, 2013, 6(2): 598-618.
- [7] 俞伟, 关庆伟. 基于文献计量学的屋顶绿化研究综述 [J]. *中国园林*, 2015, 31(1): 74-78.  
YU W, GUAN Q W. A bibliometric review of green roof research [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2015, 31(1): 74-78. (in Chinese)
- [8] 黄瑞, 董靓, 吴林梅. 基于地理信息技术的成都市屋顶绿化现状调查与分析 [J]. *中国园林*, 2015, 31(1): 79-82.
- HUANG R, DONG L, WU L M. Status analysis of Chengdu city green roof based on GIS [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2015, 31(1): 79-82. (in Chinese)
- [9] 史源, 吴恩融. 香港城市高空绿化实践 [J]. *中国园林*, 2015, 31(3): 86-90.  
SHI Y, NG Y Y. Practice of urban skyrise greening in Hong Kong [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2015, 31(3): 86-90. (in Chinese)
- [10] 杨小山, 赵立华. 城市微气候对建筑能耗影响的研究方法综述 [J]. *建筑科学*, 2015, 31(12): 1-7.  
YANG X S, ZHAO L H. Impacts of urban microclimate on building energy performance: A review of research methods [J]. *Building Science*, 2015, 31(12): 1-7. (in Chinese)
- [11] 林波荣. 绿化对室外热环境影响的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.  
LIN B R. Studies of greening's effects on outdoor thermal environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [12] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究 [J]. *中国园林*, 2004, 20(1): 72-75.  
LI Y M, ZHANG J H, GU R Z. Research on the relationship between urban greening and the effect of urban heat island [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2004, 20(1): 72-75. (in Chinese)
- [13] 李月鹏. 深圳市屋顶绿化对室外热环境的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
LI Y P. Research on effects of green roof towards outdoor thermal environment in Shenzhen [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 秦文翠, 胡聘, 李元征, 等. 基于 ENVI-met 的北京典型住宅区微气候数值模拟分析 [J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(3): 56-62.  
QIN W C, HU D, LI Y Z, et al. Numerical simulation of microclimate in Beijing typical residential area based on ENVI-met model [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(3): 56-62. (in Chinese)
- [15] 艾丽皎, 冯义龙, 谭兴晏. 重庆地区屋顶绿化现状调查与分析 [J]. *中国园林*, 2015, 31(11): 27-30.  
AI L J, FENG Y L, TAN X Y. Investigation and analysis of green roof in Chongqing [J]. *Chinese*



- Landscape Architecture, 2015, 31 (11): 27-30. (in Chinese)
- [16] WONG N H, CHEN Y, ONG C L, et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment [J]. Building and Environment, 2003, 38 (2): 261-270.
- [17] ALCAZAR S S, OLIVIERI F, NEILA J. Green roofs: Experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean-continental climates [J]. Urban Climate, 2016, 17: 304-317.
- [18] SPEAK A F, ROTHWELL J J, LINDLEY S J, et al. Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage [J]. Urban Climate, 2013, 3: 40-55.
- [19] THORNLEY J H M. Mathematical models in plant physiology [M]. Academic Press, 1976.
- [20] 李耕. 景天科植物屋顶绿化夏季隔热研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- LI G. The heat insulation of Jingtian green roof plants in summer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)