

引用本文: 骆天庆, 周婷慧, 刘 东, 等. 模块式屋顶绿化热工性能模拟及排布优化[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 216-222.  
LUO Tianqing, ZHOU Tinghui, LIU Dong, et al. Thermal performance simulation and optimal layout of modular green roof[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 216-222.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.12040

## 模块式屋顶绿化热工性能模拟及排布优化

骆天庆<sup>1</sup>, 周婷慧<sup>2</sup>, 刘 东<sup>3</sup>, 杨胜维<sup>3</sup>

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 上海市园林设计研究总院有限公司, 上海 200031;  
3. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092)

**摘要:**以屋顶绿化为削减上海夏季空调高能耗的重要手段,探究其在不同建设布局下的节能效益差异,以期在推广建设中获得更好的节能实效;首先穷举对应不同屋面绿化率的模块排布单元,然后在 FLUENT 软件中借助经实测校准的佛甲草屋顶绿化模块传热模型,模拟不同排布单元的热通量,最终比选节能潜力突出的排布单元,考察低建养成本的排布方式并计算其导热系数。结果表明:不同排布单元的热通量存在差异;随着屋面绿化率的增长,相应排布单元的平均热通量显著下降;在屋面绿化率相同的情况下,模块相对集中的排布单元热工性能较佳;屋面绿化率为 80% 的排布单元较 100% 绿化单元可降低 20% 的模块产品价格成本,其导热系数可达  $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,较未绿化单元减少 50%;夏季在上海地区屋面绿化率改变对于模块式屋顶绿化的热工性能影响显著;通过小尺度抽象场景模拟可推得具有科学实践引导价值的应用场景,即模块式屋顶绿化在屋面覆盖率达到 80% 且绿化模块相对集中排布时,具有较好的经济节能效益。

**关键词:**建筑节能;屋面绿化排布;热工性能模拟;模块式屋顶绿化

中图分类号: TU986

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)05-0216-07

## Thermal performance simulation and optimal layout of modular green roof

LUO Tianqing<sup>1</sup>, ZHOU Tinghui<sup>2</sup>, LIU Dong<sup>3</sup>, YANG Shengwei<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Landscape Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200031, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Taking green roof as an important measure to reduce the high energy consumption of air conditioning in Shanghai in summer, the differences in energy-saving benefits under different construction layouts were explored to achieve better energy-saving results in promotion and construction. Firstly, the module layout units corresponding to different roof greening rates were enumerated, and then the calibrated heat transfer model of the *Sedum* roof greening module in FLUENT software was used to simulate the heat flux of different layout units. Finally, the layout unit with outstanding energy-saving potential was selected, the layout method with low construction and maintenance costs was investigated, and its thermal conductivity was calculated. The results show that there are differences in heat flux among different layout units. As the

收稿日期: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078350)

作者简介: 骆天庆(1970-), 女, 工学博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: luotq@tongji.edu.cn.

greening rate of the roof increases, the average heat flux of the corresponding layout units significantly decreases. Under the same roof greening rate, the layout units with relatively concentrated modules have better thermal performance. The layout unit with an 80% greening rate on the roof can reduce the cost of module products by 20% compared to the 100% greening unit, and its thermal conductivity can reach  $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , which is 50% less than that of non greening units. The change in roof greening rate in summer in Shanghai has a significant impact on the thermal performance of modular green roof. Application scenarios with scientific practical guidance value can be derived through small-scale abstract scene simulation. Modular green roof is expected to have good economic and energy-saving benefits when the roof coverage rate reaches 80% and the greening modules are relatively concentrated.

**Key words:** building energy-saving; roof greening layout; thermal performance simulation; modular green roof

# 0 引 言

太阳辐射下建筑屋顶传热是空调能耗的主要影响因素之一<sup>[1]</sup>。屋顶绿化具有良好的隔热保温效果,是利于建筑节能的重要围护结构,在城市高密度区域大规模部署建设可带来巨大的节能效益<sup>[2]</sup>。与花园式屋顶绿化相比,轻薄的简单式屋顶绿化造价相对低廉、安装维护简便,在既有建筑为主的高密城市区更具推广优势<sup>[3]</sup>。上海作为高密度城市,既有建筑量大,绿地拓展空间有限,立体绿化逐渐成为城市绿化整体发展的重要组成部分<sup>[4]</sup>。佛甲草模块在上海常用于轻型屋顶绿化,可达到常年景观效果<sup>[5]</sup>。

目前研究发现,不同的地域气候、天气条件、屋顶绿化类型结构、建筑及其周边环境均可显著影响屋顶绿化的节能实效<sup>[6]</sup>。上海地区佛甲草模块绿化屋顶在不同季节、天气和日照环境下的昼夜隔热保温效应存在差异<sup>[7]</sup>,满铺建设的节能效益并不一定最优<sup>[8]</sup>。上海属于夏热冬冷地区,在气候变暖趋势下建筑物的夏季空调使用能耗尤其显著<sup>[9]</sup>,佛甲草绿化模块的节能潜力较大,但绿化屋顶的夏季热工性能会受到不同排布形式的影响<sup>[10]</sup>。在实际应用场景下开展不同排布形式的实测研究对于确定屋顶绿化热工性能至关重要,但通常难以获得规模化、多样化应用场景的实测数据。借助经实测校准的模块式绿化屋顶传热模型,以小尺度抽象场景进行多排布情景模拟,可经济快捷地获得较为可靠的节能效益评价,比选、推断节能潜力突出的应用场景,引导科学的建设实践。

建设成本是屋顶绿化大规模推广的主要制约<sup>[3]</sup>,非满铺建设、减少绿化模块的覆盖率可节约建造和养护成本。本文出于上海地区夏季节能效果优

化、建养成本经济以及留取施工通道以便于施工维护的考虑,对不同排布方式下屋顶绿化模块单元的夏季热工性能进行模拟研究,藉此确定经济节能的屋面绿化率和绿化模块排布形式,以指导上海地区模块式轻型屋顶绿化的科学推广建设。

# 1 研究对象

基于模块式轻型绿化屋顶的建设方法,借助绿化模块的规则化连续排布或间隔排布的特征,设计构建屋顶绿化模块的理论排布单元作为研究对象,并对应实际建设时不同的屋面绿化覆盖布局。出于简化研究的考虑,以 10 个模块单位单列排布为 1 个理论排布单元;排布单元顺次拼接可形成整体屋面绿化,单元中的模块个数可直接对应按 10% 增减的屋面绿化率,便于讨论不同屋面绿化率的节能效果和经济性差异;拼接时排布单元的间隔排布处可形成整条平行的通道,便于施工及后期养护(图 1)。

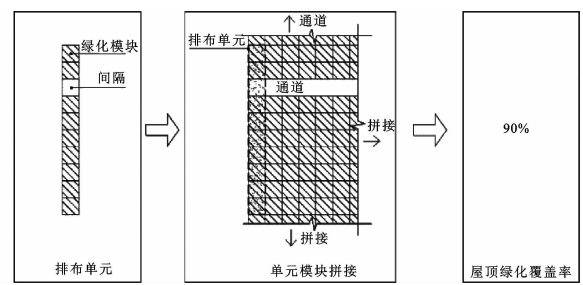


图 1 理论排布单元构建图解

Fig. 1 Diagram of theoretical layout unit construction

去除单元中模块排布的对称性重复情况,可穷举得到与屋面绿化率 100% 和 0%、90% 和 10%、80% 和 20%、70% 和 30%、40% 和 60%、50% 相对应的排布单元分别为 1、5、25、60、56、81 种,共 375 种排布单元。为便于后续讨论,每种排布单元均以

字母“lv”和具体数字编号单独命名,其中字母“lv”代表绿化,具体数字编号则按照屋面绿化率及穷举顺序赋给,如 lv-10-1 表示屋面绿化率 10% 的第一种布置形式,以此类推(图 2)。

2 研究方法

2.1 上海佛甲草模块屋顶的传热模拟及模型验证

借助当量热阻的概念,屋顶绿化复杂的传热、传湿及相变耦合过程可简化为相对简单的类似一般屋顶的传热模型,进行佛甲草模块的热工性能模拟<sup>[10]</sup>。该简化模型忽略了环境风速、各材料层内部差异、屋面坡向和绿化植被投射阴影的影响,以及植被蒸腾作用和土壤层导热系数随体积含水率变化的特征,可基于实测采集的试验屋面环境温度、太阳辐射和室内温度数据,以及种植模块各构造层的材料厚度、密度、比热、导热系数和太阳辐射吸收率等物性参数,设定各材料层的非稳态能量方程、受到太阳直接辐射影响的材料层边界条件及靠近室内环境的材料层内表面边界条件。借助该模型,可在 FLU-

ENT 软件中构建研究对象的几何模型,基于网格节点和网格单元的梯度算法对几何模型进行热传递模拟,根据环境温湿度、太阳辐射条件以及模拟研究对象的物性参数进行稳态和瞬态的传热模拟。其中稳态模拟可计算获得研究对象不同部位的温度分布情况,瞬态模拟可计算获得研究对象特定部位的历时温度改变情况。

前期通过上海夏季某佛甲草模块屋顶的实测试验对该模型进行了稳态和瞬态的测试模拟,并对该模型的准确性进行了验证<sup>[10]</sup>。验证结果表明,稳态测试模拟的相对误差在 10% 以内,瞬态模拟结果与实测结果显示明显的一致性。因此,该模型与实际结果匹配良好,可用于上海地区佛甲草屋顶绿化模块的传热模拟。

2.2 佛甲草绿化模块排布单元的热工性能模拟

利用 FLUENT 软件进行屋顶绿化的稳态模拟并计算输出其热工评价参数,可考察不同的绿化布置形式对绿化屋顶热工性能的影响。为考察图 2 中不同绿化布置形式的热工性能差异,依据佛甲草种



图 2 排布单元穷举结果

Fig. 2 Exhaustive results of layout units

植模块的实际尺寸,在 FLUENT 中对 375 种排布单元分别构建 1:1 的几何模型,以 0.035 m(土壤厚度的一半)网格进行稳态模拟。鉴于夏季日间太阳辐射导致屋面高温不利于空调节能,为简化研究仅模拟计算各排布单元在日间太阳辐射最大时单位时间通过单位面积的热通量值,借夏季高温日的日间传热情况反映其夏季节能效果。

模拟采用与测试模拟同样的物性参数取值,并将各排布单元的边界均简化为绝热边界条件。参考前期研究中稳态测试模拟获得的太阳辐射条件下的屋顶温度分布曲线<sup>[10]</sup>,将屋面综合环境温度设为 55℃。因稳态测试模拟依据的是测试日 6:00~18:00 的实测数据<sup>[10]</sup>,该日全天晴朗,实测得到的平均温度大于上海夏季标准气象日的日均温度 28.5℃<sup>[11]</sup>,鉴于夏季标准气象日是典型气象年最热月中的温度、日较差、湿度、太阳辐射照度的日平均值与该月平均值最接近的一日,认为稳态测试模拟获得的屋顶温度分布曲线可反映上海夏季高温日的普遍情况。此外,参照夏季空调制冷的人体舒适控制温度,将室内温度设为 26℃。

### 2.3 排布单元的比选与经济节能性评估

各排布单元热通量的正负可反映传热方向,绝对值大小则可反映传热的多少;夏季日间室外向室内传热越少,则节能效果越好。因此,在所对应的屋面绿化率相同的情况下,比较各排布单元的热通量值,可获得节能效果最优的排布方式。综合各最优排布方式,可探讨不同屋面绿化率下的排布优化规律。

屋顶绿化的建养成本明显高于地面绿化,但是从长远的角度看,建设屋顶绿化的投入相对于获取包括节能在内的综合生态效益,仍具有一定的经济性<sup>[12-14]</sup>。然而,热工性能模拟无法获得排布单元的确切造价和节能收益,难以进行直接的经济节能性定量评估。忽略建养成本中的人工、运输、养护方式、绿化屋顶存续时间等各种不确定因素,仅考虑种植模块的材料成本,则成本随屋面绿化率的减少而降低。由此,综合各排布单元所对应的屋面绿化率水平及其节能效果,可比选最为经济节能的排布方式,并评估其经济节能性。

屋面绿化率是建设实践中最重要的管控指标。因此,首先取对应不同屋面绿化率的排布单元组,比较其整体节能效果和成本差异,明确经济节能的屋面绿化率水平。目前模块式屋顶绿化产品的价格差异较大,假设采用同样价格的佛甲草屋顶绿化模块

产品,且忽略项目规模等差异所致的建设成本差异以及屋顶绿化建设投入与节能收益的体量差异,通过计算各排布单元组的平均热通量相对于无绿化单元热通量的削减率,以及各排布单元组相对于 10%绿化率排布单元的价格成本增长率,并取两者的比值,可以综合考察排布单元组的整体节能效益与成本随着屋面绿化率增加而改变的情况,比值越大则经济节能性越佳。然后,取经济节能的屋面绿化率下节能效果最优的排布单元为经济节能的最优排布单元。

中国现行的建筑节能标准将建筑外围护结构的传热系数作为热工性能评价指标<sup>[15]</sup>,要求不断提高<sup>[16-17]</sup>。虽然对于单一材料的围护结构,可以简单采用有限元法准确计算传热系数<sup>[18]</sup>,但对于复杂的非均质围护结构,目前常用的简化计算方法和计算机模拟均有局限性,需要直接检测<sup>[19]</sup>,而成熟高效的检测方法还需探讨<sup>[20]</sup>。因此,鉴于夏热冬冷地区的建筑节能设计中,常常采用屋面保温设计和选用导热系数小的保温隔热材料来达到节能目的,本文通过考察经济节能的最优排布单元较无绿化的 lv-0 的导热系数降低率及其较满铺建设的 lv-100 的种植模块成本降低率,评估其经济节能性。热通量与导热系数的换算公式为

$$q=\lambda(T_1-T_2)/d \quad (1)$$

式中: $q$  为热通量; $\lambda$  为导热系数; $T_1$  为热表面温度; $T_2$  为冷表面温度; $d$  为材料厚度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 各排布单元的模拟结果

对图 2 中 375 种排布单元逐一进行稳态模拟并计算得到的热通量值均为负值,表明上海地区夏季整体而言是室外热量向室内传递。以所对应的屋面绿化率分组统计各排布单元热通量的绝对数值,结果如图 3 所示。总体上看,随着所对应的绿化率不断增长,各组之间排布单元的平均热通量显著下降;lv-10~lv-90 各组内部各排布单元的热通量也存在一定的差异。

### 3.2 不同屋面绿化率下夏季节节能效果最优排布单元

除去满铺状态的 lv-100 及无绿化的 lv-0,比较筛选与同一屋面绿化率所对应的排布单元组中热通量值最小的排布单元,可得到表 1 所示的节能效果最佳的排布单元集合。总体上看,对应的屋面绿化率越小,最佳排布单元的热通量值越大,节能效果越

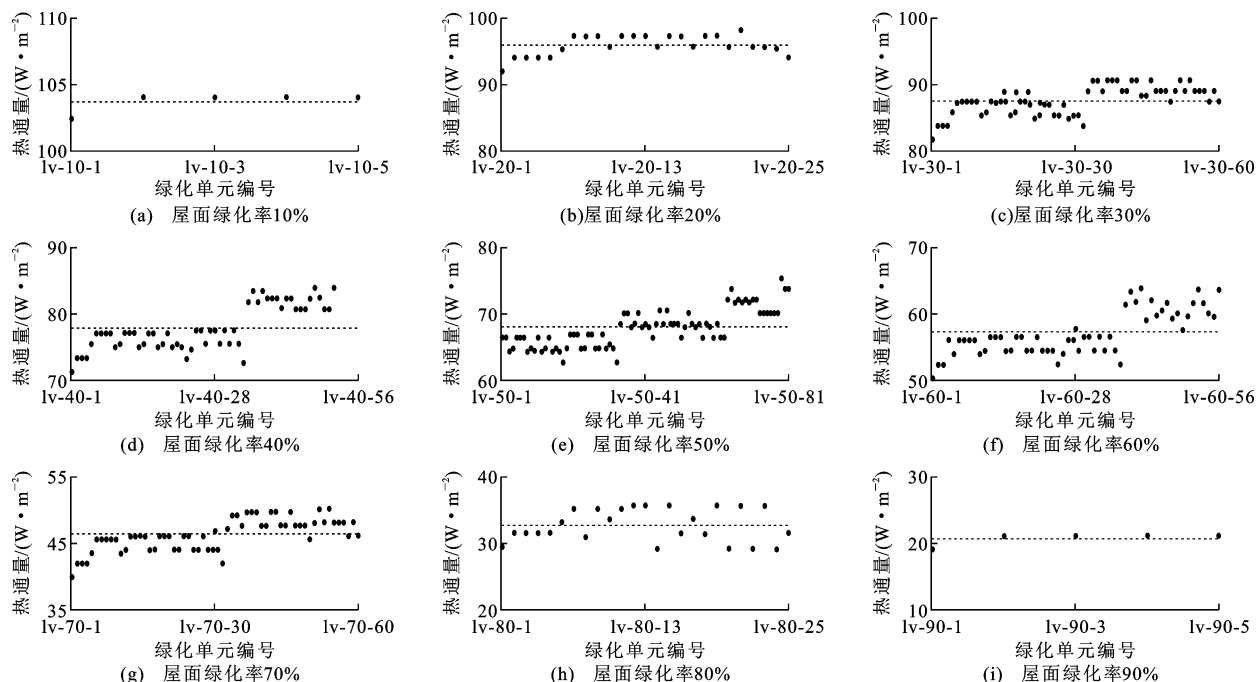


图3 各排布单元热通量

Fig. 3 Heat flux of each layout unit

差,这与各排布单元组平均热通量的变化情况一致;对于每一屋面绿化率而言,相对于种植模块分散的排布单元,在一定程度上集中排布的单元节能效果较好。

### 3.3 经济节能的屋面绿化率及最优排布单元

对应不同屋面绿化率各排布单元组相对于无绿化单元的热通量削减率,以及相对于10%绿化率排布单元的成本增长率比值分析结果见表2。对应80%和90%屋面绿化率的排布单元组与lv-100具有相近的经济节能性。这意味着当屋面绿化覆盖率达到80%及以上时,模块式屋顶绿化可具有较好的节能效果。从节约建设成本出发,80%屋面绿化率的排布单元组较lv-100的价格成本减少20%,更具经济性。因此,综合表1和表2的分析结果,经济节能的屋面绿化率为80%,相应的最优排布单元为lv-80-24。

### 3.4 最优排布单元的经济节能性评估

以式(1)进行lv-80-24的导热系数计算,其中热表面温度 $T_1$ 取热工性能模拟时采用的屋面综合环境温度 $55^\circ\text{C}$ (328.15 K),冷表面温度 $T_2$ 取室内温度 $26^\circ\text{C}$ (299.15 K),材料厚度 $d$ 取试验屋顶的综合材料厚度0.316 m(即未绿化屋顶厚度0.18 m与绿化屋顶厚度0.35 m的综合平均值),则导热系数 $\lambda$ 为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

以式(1)进行lv-0的导热系数计算, $T_1$ 和 $T_2$

同样取值, $d$ 取试验屋顶未绿化屋顶厚度0.18 m,则导热系数 $\lambda$ 为 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

lv-80-24的导热系数较lv-0减少了50%,种植模块成本较绿化率100%下降20%,具有经济节能性,其导热系数为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,略优于同处于夏热冬冷地区、纬度相近的长沙市报告的屋顶绿化轻质种植土导热系数水平,接近隔热、保温材料的常规要求 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。若结合保温材料形成复合保温种植模块,则导热系数可进一步大幅下降,并使屋面传热系数基本符合《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)中夏热冬冷地区建筑屋面传热系数小于等于 $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 的限值要求。

## 4 结 语

(1)佛甲草模块排布单元的热传导模拟表明,屋面绿化率改变对于上海模块式屋顶绿化在夏季的热工性能影响显著。排布单元所对应的屋面绿化率越小,其热通量值越大,节能效果越差。

(2)不同屋面绿化率下节能效果最优的排布单元均为佛甲草模块相对集中的排布方式,因此在屋面绿化率相同的情况下,相对于种植模块分散的排布,模块集中排布的绿化屋顶热工性能较佳,节能效果较好。

(3)在上海地区,模块式屋顶绿化的屋面覆盖率

表 1 不同屋面绿化率下最佳节能排布单元模拟结果

Table 1 Simulation results of layout units of optimum energy-saving performance with different greening rates


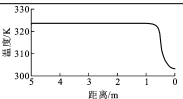

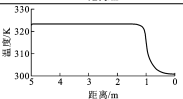

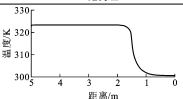

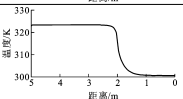

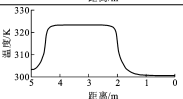

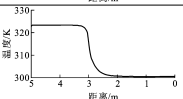

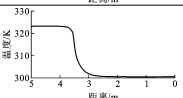

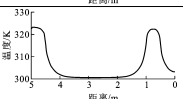

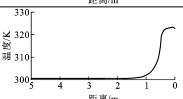
排布单元编号	对应的屋面绿化率/%	绿化排布方式	纵断面温度曲线模拟结果	热通量/(W·m <sup>-2</sup> )
lv-10-1	10			102.42
lv-20-1	20			92.02
lv-30-1	30			81.61
lv-40-1	40			71.16
lv-50-18	50			62.83
lv-60-1	60			50.31
lv-70-1	70			39.88
lv-80-24	80			29.08
lv-90-1	90			19.02

表 2 排布单元组的热通量削减率和成本增长率

Table 2 Rates of heat flux decrease and cost increase in layout unit groups

排布单元组编号	热通量平均值/(W·m <sup>-2</sup> )	相对于无绿化屋顶的热通量削减率/%	相对于 10% 屋面绿化率排布单元的成本增长率/%	节能效率与成本增长率的比值
lv-0	98.14			
lv-10	103.71	—5.7		
lv-20	95.95	2.2	10	0.2 : 1
lv-30	87.49	10.9	20	0.5 : 1
lv-40	77.78	20.7	30	0.7 : 1
lv-50	68.01	30.7	40	0.8 : 1
lv-60	57.08	41.8	50	0.8 : 1
lv-70	46.26	52.9	60	0.9 : 1
lv-80	32.71	66.7	70	1 : 1
lv-90	20.71	78.9	80	1 : 1
lv-100	6.52	93.4	90	1 : 1

达到 80%及以上可在夏季获得较好的经济节能效益;80%的屋面绿化覆盖率可节约 20%的材料成本,其导热系数可比未绿化屋面减少 50%,大幅降低建筑能耗。

参考文献:  
References:

[ 1 ] LI D,ZHENG Y M,LIU C Y,et al. Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters[J]. Sustainable Cities and Society,2016,22:86-93.

[ 2 ] 埃德蒙·克林顿·斯诺德格拉斯,琳达·麦金太尔. 绿色屋顶手册:设计、安装及维护指南[M]. 戴代新,董楠楠,译. 北京:中国建筑工业出版社,2018. SNODGRASS E C,MCLNTYRE L. Green roof manual:a professional guide to design, installation and maintenance[M]. Translated by DAI Daixin,DONG Nannan. Beijing: China Architecture & Building Press,2018.

[ 3 ] 骆天庆,苏怡柠,陈思羽. 高度城市化地区既有建筑屋顶绿化建设潜力评析:以上海中心城区为例[J]. 风景园林,2019,26(1):82-85. LUO Tianqing,SU Yining,CHEN Siyu. A potential analysis of roof greening on existing buildings in highly urbanized areas:a case study of Shanghai central city[J]. Landscape Architecture,2019,26(1):82-85.

[ 4 ] 许恩珠,李莉,陈辉,等. 立体绿化助力高密度城市空间环境质量的提升:“上海立体绿化专项发展规划”编制研究与思考[J]. 中国园林,2018,34(1):67-72. XU Enzhu,LI Li,CHEN Hui,et al. Vertical greening benefits the environmental quality improvement in high-density urban space-research and meditation on Shanghai specialized vertical greening development master plan[J]. Chinese Landscape Architecture,2018,34(1):67-72.

[ 5 ] 徐阳. 城市轻型屋顶绿化技术研究[J]. 工程技术研究,2019,4(13):59-60. XU Yang. Study on greening technology of urban light roof[J]. Engineering and Technological Research,2019,4(13):59-60.

[ 6 ] RAJI B,TENPIERIK M J,VAN DEN DOBBELS-TEEN A. The impact of greening systems on building energy performance;a literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,45:610-623.

[ 7 ] 周婷慧,骆天庆. 上海地区佛甲草模块屋面绿化的隔热保温效能研究[C]//中国风景园林学会. 中国风景

- 园林学会 2017 年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 392-395.
- ZHOU Tinghui, LUO Tianqing. Study on thermal effect of sedum module green roof in Shanghai area [C]//Chinese Society of Landscape Architecture. Proceedings of 2017 Conference of Chinese Society of Landscape Architecture. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 392-395.
- [8] 骆天庆, 周婷慧, 刘东, 等. 上海佛甲草模块式屋顶绿化夏季昼夜节能效应研究[J]. 风景园林, 2019, 26(5): 94-98.
- LUO Tianqing, ZHOU Tinghui, LIU Dong, et al. Energy saving effects of sedum module green roof in Shanghai through day and night in summer[J]. Landscape Architecture, 2019, 26(5): 94-98.
- [9] 朱荣鑫, 赵乃妮, 王清勤, 等. 城市热岛效应对我国不同气候区既有居住建筑采暖空调能耗的影响研究[J]. 南方建筑, 2020(5): 16-20.
- ZHU Rongxin, ZHAO Naini, WANG Qingqin, et al. Research on the influence of urban heat island(UHI) intensity on energy consumption for heating and cooling of existing residential buildings in different climate zones[J]. South Architecture, 2020(5): 16-20.
- [10] 黄丽君, 刘东, 骆天庆, 等. 某绿化屋顶夏季热工性能模拟研究及验证[J]. 建筑科学, 2018, 34(8): 44-50.
- HUANG Lijun, LIU Dong, LUO Tianqing, et al. Study on heat transfer models of some green roof and its thermal performance in summer[J]. Building Science, 2018, 34(8): 44-50.
- [11] 张晴原, 杨洪兴. 建筑用标准气象数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- ZHANG Qingyuan, YANG Hongxing. Typical meteorological database handbook for buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] 董楠楠, 吴静, 石鸿, 等. 基于全生命周期成本-效益模型的屋顶绿化综合效益评估: 以 Joy Garden 为例[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 52-57.
- DONG Nannan, WU Jing, SHI Hong, et al. Comprehensive benefits evaluation of green roofs based on cost-benefit model of whole life cycle — a case study of Joy Garden[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(12): 52-57.
- [13] 方眠, 张雁, 王幼松, 等. 屋顶绿化成本及节能效益实证分析[J]. 建筑经济, 2015, 36(9): 109-111.
- FANG Mian, ZHANG Yan, WANG Yousong, et al. Empirical analysis on cost and energy saving benefits of roof greening [J]. Construction Economy, 2015, 36(9): 109-111.
- [14] 宫永伟, 杨一帆, 李俊奇, 等. 屋顶绿化的效益及成本分析[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(3): 133-137.
- GONG Yongwei, YANG Yifan, LI Junqi, et al. The analysis of the effect and cost of green roofs[J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(3): 133-137.
- [15] 梁锐, 眺瀚. 关于《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134—2010)几个问题的商榷[J]. 中国标准化, 2014(8): 102-107.
- LIANG Rui, TIAO Han. Discussion on several questions in *Hot Summer and Cold Winter Region Residential Building Energy Efficiency Design Standards* (JGJ 134—2010) [J]. China Standardization, 2014(8): 102-107.
- [16] 邹瑜, 郎四维, 徐伟, 等. 中国建筑节能标准发展历程及展望[J]. 建筑科学, 2016, 32(12): 1-5, 12.
- ZOU Yu, LANG Siwei, XU Wei, et al. Development and prospects for China's building energy efficiency standards[J]. Building Science, 2016, 32(12): 1-5, 12.
- [17] 纪博雅, 毛晓峰, 曹勇, 等. 我国建筑节能低碳技术标准体系现状与发展建议[J]. 建筑经济, 2022, 43(1): 19-26.
- JI Boya, MAO Xiaofeng, CAO Yong, et al. Current situation and development suggestions of building energy saving and low carbon technology standard in China[J]. Construction Economy, 2022, 43(1): 19-26.
- [18] 李旭光, 万少强. 建筑外围护结构热流密度优化研究[J]. 建筑节能, 2019, 47(1): 18-23.
- LI Xuguang, WAN Shaoqiang. Heat flux density optimization of building envelope[J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(1): 18-23.
- [19] 冉茂宇. 非均质围护结构传热系数的简化计算及检测方法[J]. 建筑科学, 2007, 23(3): 26-30.
- RAN Maoyu. The calculation and testing methods of the thermal transmittance of inhomogeneous building envelope[J]. Building Science, 2007, 23(3): 26-30.
- [20] 张赞. 基于解析解的建筑围护结构传热系数检测新方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- ZHANG Yun. Study on the new measurement method of heat transfer coefficient of building envelope based on analytic solution[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.