

# 基于ENVI-met软件对热环境模拟及人体热舒适性研究：以安徽省建科院绿色屋顶为例

胡鑫康<sup>1</sup>, 顾康康<sup>1,2</sup>, 耿世尧<sup>1</sup>, 解卫东<sup>1</sup>

1. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 安徽 合肥 230022

2. 安徽省国土空间规划与生态研究院, 安徽 合肥 230022

## 摘要：

**[背景]** 在全球气候变化背景下, 随着城市热岛效应加剧, 对城市热环境及人体热舒适性研究日益得到重视。夏热冬冷地区绿色屋顶在夏季有着显著的降温增湿效应。

**[目的]** 探索绿色屋顶在降低城市热岛效应, 提升人体热舒适性等方面的机制, 为城市绿色屋顶的规划设计提供科学依据。

**[方法]** 以安徽省建筑科学研究设计院(后简称: 建科院)绿色屋顶为研究对象, 选取晴朗无风的典型天气条件下对花园式绿色屋顶进行实地监测, 在验证模型精度可靠性的基础上运用ENVI-met 4.4.5软件模拟花园式与草坪式两种不同类型绿色屋顶, 随机式、组团式与围合式三种不同植被布局形式, 从“面”的角度测量绿色屋顶降温增湿效应以及用生理等效温度(PET)对人体热舒适性进行评价。

**[结果]** 结果表明: (1) 绿色屋顶在夏季有着明显的降温增湿效应, 降温效应呈现白天弱夜间强, 增湿效应呈现白天强夜间弱的总体分布特征。(2) 草坪式与花园式绿色屋顶类型呈现的降温和增湿的变化趋势较为一致; 降温幅度分别在0.002~0.068°C与0.001~0.141°C之间, 增湿幅度分别在0.367%~1.952%与0.555%~2.305%之间; 花园式略强。(3) 在19:00至次日6:00时间段, 此时空气温度处于26.462~28.436°C之间, 相对湿度处于54.192%~66.608%之间, PET处于18~23°C, 为人体热舒适性水平最佳的时段; 在11:00—16:00时间段, 此时空气温度处于28.557~30.349°C之间, 相对湿度处于49.646%~57.636%之间, PET>41°C, 人体热舒适性处于一天中最差水平; 在6:00—11:00以及16:00—19:00时间段, PET处于23~41°C, 人体热舒适性处于一般水平。(4) 在植被配置比例相同, 植被布局不同的情境中, 地块平均温度依次为随机式布局<组团式布局<围合式布局, 且温度的高低与风速大小呈正相关, 与相对湿度大小呈负相关的关系, 相同时间点三种不同植被布局形式呈现相同的热应激水平。

**[结论]** 在夏热冬冷地区, 草坪式与花园式绿色屋顶在夏季都具有一定的降温增湿效果, 一天中不同时间段的人体热舒适水平也会表现不同, 所以增加绿色空间和城市绿量, 对于改善城市微气候和提高人体热舒适性具有重要意义。

**关键词:** 夏热冬冷地区; 绿色屋顶; 降温增湿效应; 人体热舒适性; 微气候; ENVI-met

**Study on thermal environment and human thermal comfort of green roof based on ENVI-met simulation—Green roofs of Anhui Institute of Building Research and Design as an example** HU Xinkang<sup>1</sup>, GU Kangkang<sup>1,2</sup>, GENG Shiyao<sup>1</sup>, XIE Weidong<sup>1</sup> (1.School of Architecture & Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230022, China; 2.Anhui Institute of Territorial Spatial Planning and Ecology, Hefei, Anhui 230022, China)

## Abstract:

**[Background]** In the context of global climate change, with the intensification of urban heat island effect, research on urban thermal environment and human thermal comfort is gaining increasing attention. Green roofs in the hot summer-cold winter regions have significant cooling and humidifying effects in summer.

**[Objective]** The study is designed to explore the mechanism of green roofs in reducing urban heat island effect and improving human thermal comfort, and provide a scientific basis for the design of urban green roofs.

**[Methods]** The garden green roofs of Anhui Institute of Building Research and Design were

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011

## 作者简介

胡鑫康(1997—), 女, 硕士;  
E-mail: 2694160448@qq.com

## 通信作者

顾康康, E-mail: kangkangu@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-01-08

录用日期 2021-05-13

文章编号 2095-9982(2021)07-0694-07

中图分类号 R126; TU985.12

文献标志码 A

## 补充材料

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011

## ►引用

胡鑫康, 顾康康, 耿世尧, 等. 基于ENVI-met软件对热环境模拟及人体热舒适性研究: 以安徽省建科院绿色屋顶为例[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(7): 694-700.

## ►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011

## Correspondence to

GU kangkang, E-mail: kangkangu@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-01-08

Accepted 2021-05-13

## Supplemental material

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011

## ►To cite

HU Xinkang, GU Kangkang, GENG Shiyao, et al. Study on thermal environment and human thermal comfort of green roof based on ENVI-met simulation—Green roofs of Anhui Institute of Building Research and Design as an example[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(7): 694-700.

## ►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011

monitored under a clear and windless weather condition. The ENVI-met 4.4.5 software was used to simulate two different types of roof greening (garden and ground-cover) and three different vegetation layout forms (random, group, and enclosed) based on verifying the accuracy and reliability of the model. The cooling and humidifying effects of green roofs were measured from a "surface" perspective, and the physiological equivalent temperature (PET) was used to evaluate human thermal comfort.

**[Results]** (1) Green roofs had significant cooling and humidifying effects in summer, with a stronger cooling effect during the day than at night and a stronger humidifying effect at night than during the day. (2) Ground-cover and garden roof greening showed similar trends in cooling and humidifying effects. The daily temperature decline of ground-cover and garden green roofs ranged from 0.002°C to 0.068°C and from 0.001°C to 0.141°C, respectively; the humidity increase ranged from 0.367% to 1.952% and from 0.555% to 2.305%, respectively; garden roof greening showed steeper changes. (3) During 19:00—6:00 the next day, i.e., when the air temperature was between 26.462°C and 28.436°C, the relative humidity was between 54.192% and 66.608%, and PET was between 18-23°C, the human thermal comfort was at its highest level. During 11:00—16:00, i.e., when the air temperature was between 28.557°C and 30.349°C, the relative humidity was between 49.646% and 57.636%, and PET was >41°C, the human thermal comfort was at its lowest level. During 6:00—11:00 and 16:00—19:00, i.e., when PET was between 23-41°C, the human thermal comfort was at an average level. (4) In the context of same vegetation configuration proportions and different vegetation layouts, the average temperature of the plot from low to high was random layout < group layout < enclosed layout; the temperature was positively correlated with the wind speed and negatively correlated with the relative humidity; the three vegetation layouts showed same heat stress levels at same time points.

**[Conclusion]** In the hot summer-cold winter zones, both ground-cover and garden roof greening have certain cooling and humidifying effects in summer. Associated human thermal comfort levels change in a day. Therefore, increasing green space and urban green volume is important to improve urban microclimate and enhance human thermal comfort.

**Keywords:** hot summer-cold winter zone; green roof; cooling and humidifying effect; human thermal comfort; microclimate; ENVI-met

快速城镇化进程导致城镇建设用地面积增大,城市绿地空间减少,城市下垫面热力性质发生明显改变,特别是在夏季,城市遭到热浪袭击的强度和频率增加,致使城市热环境效应和人体热舒适性水平逐渐降低,而多种环境暴露因素与健康效应存在线性关系<sup>[1]</sup>。为了缓解这种现象的产生,在城市规划设计中已提倡增加绿地空间和使用绿色基础设施来提供重要的温度调节系统,但因城市地区面临土地资源紧张、地价昂贵等问题,人们纷纷将目光投向城市“第五立面”的绿色屋顶。绿色屋顶为城市绿地提供了一种新型的绿化方式,已有大量的研究证实了绿色屋顶在径流调控和生态修复<sup>[2-3]</sup>,改善径流水质<sup>[4]</sup>,缓解城市热岛效应<sup>[5]</sup>,降低建筑能耗<sup>[6]</sup>,减少温室气体排放,降低噪声以及维护生物多样性方面<sup>[7]</sup>的巨大效益。更重要的是与传统裸露屋顶相比,绿色屋顶具有明显的降温增湿效果,尤其在夏热冬冷地区的夏季。热环境和人体热舒适性对人居环境质量提升影响较大,国内外学者对人体热舒适性的研究主要集中于建筑室内空间<sup>[8]</sup>、地下空间<sup>[9-10]</sup>以及室外开放空间<sup>[11-12]</sup>的定量评价,也有研究探索了绿色屋顶在不同气候条件下<sup>[13]</sup>以及不同建筑高度下<sup>[14]</sup>对屋顶表面和行人尺度下的降温效应,但较少研究关注绿色屋顶等绿色基础设施对人体热舒适性的影响,缺少人自身对热环境满意度的定量评价。

本研究拟以安徽省建筑科学研究设计院(简称:建科院)绿色屋顶为例,在实地监测和 ENVI-met 4.4.5 软件模拟验证的基础上,选取绿色屋顶类型、植被布

局形式两个方面,分析绿色屋顶的降温增湿效能以及对人体热舒适性等方面的影响,特别是绿色屋顶对微观尺度上的热环境影响,从而为通过增加城市绿色空间,优化城市热环境,缓解城市热岛效应,提高人体热舒适性和人居环境质量水平提供实证依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

合肥市是安徽省的省会城市,地处安徽中部,江淮之间,环抱巢湖,冬冷夏热,四季分明,气候温和,雨量适中,年均气温约 15.7°C,年均降水量约 1000 mm,年日照时间约 2000 h,年均无霜期 228 d,平均相对湿度为 77%。安徽省建科院为三星级绿色建筑,建筑高度 88.35 m,总建筑面积为 28 000 m<sup>2</sup>,在屋顶设置太阳能光伏发电系统,全面积利用屋面建立屋顶花园,主要由植被层、基质层、过滤层、排水层和防水层组成,面积 900 m<sup>2</sup>,花园内组织配备绿植和小品。

### 1.2 研究点设计

以安徽省建科院屋顶花园作为实测场地,根据场地现状,绿色屋顶由“草+灌木+乔木”三种不同植物类型组成,其中草地的面积约为 328 m<sup>2</sup>,灌木 60 棵且面积约为 73 m<sup>2</sup>,乔木 42 棵且树冠面积约为 72 m<sup>2</sup>,具体植物配置见补充材料 <http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011>。实地测量选了三个实测点,在行人高度 150 cm 处设置风速仪测量温度、湿度与风速,监测点 A 位于草、乔木与灌木

处, 监测点B位于太阳直射的铺装, 监测点C位于灌木之间, 具体布点与传感器安装位置见补充材料 <http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21011>。

在ENVI-met软件模拟中, 选取草坪式和花园式两种不同类型的绿色屋顶以及与实测场地等数量的乔木、灌木, 设置随机式、组团式、围合式三种不同布局, 具体类型参考城市常见的布局形式<sup>[15]</sup>。随机式布局以大面积草地铺装为基底, 乔木与灌木随机种植; 组团式布局以同种植被类型集聚种植, 从而形成多个组团; 围合式布局则是一种以大面积草地铺装为基底, 乔木集中种植, 灌木围合乔木的布局形式。

### 1.3 数据收集

在晴朗无风典型天气条件下进行实地观测, 时间选取2020年9月12日和9月30日的9:00—18:00, 收集共计2d(18h)的数据。本研究采用手持式风速气象仪(NK-5500, 上海首荣工业设备有限公司, 中国)在行人高度150cm处获取温度、湿度与风速, 观测前统一调试设备, 确保数据的精确度, 数据每30min记录一次。

### 1.4 研究区模型ENVI-met软件模拟参数的设置

ENVI-met软件是一种三维非流体静力模型, 基于计算流体动力学和热力学原理模拟城市建筑-植被-大气之间的相互关系<sup>[16]</sup>。软件模拟计算需要三个文件: 模型、数据库以及模拟配置文件, 用于定义边界条件。研究区域建筑物主体屋顶为50m×20m, 将屋顶花园平面图转化成可被ENVI-met软件识别的底图, 并基于此进行研究区模型的构建。在水平方向上, x轴代表研究对象绿色屋顶的长度, y轴代表绿色屋顶的宽度; 在垂直方向上, z轴代表模型中的垂直高度, 三者均为选择1m的最高分辨率。所以在模拟实验中共设置70×40×30个网格单元, 网格大小为1m×1m×6m。为了减小模型边界的影响, 建筑四周边界均设置20m的空地, 以保证模拟的精确度, 表1列出了模型模拟的主要输入参数及获取途径。

本研究采用ENVI-met软件自带的ALBERO组件, 根据实地调查数据, 不考虑植物栽植年限, 通过定义冠层形状、树木高度、枝下高、叶面积密度等主要因素构建植物模型, 与实地调研的植被具有一定的可比性。草地采用ENVI-met软件自带的植株高度为25cm的简单模型; 灌木球的植株高度为2m, 冠幅为1m, 叶面积指数为2.2; 灌木丛的植株高度为1m, 冠幅为

1m, 叶面积指数为2.5; 乔木的植株高度为4m, 冠幅为3m, 叶面积指数为1.2。

表1 ENVI-met软件模拟初始条件设置

Table 1 ENVI-met simulation parameters

参数 Parameter	取值 Value	数据来源 Data source
模拟时间 Simulation time	12:00至次日24:00 12:00—24:00 the following day	—
模拟时长/h Simulation time/h	36	—
太阳辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> ) Solar radiation intensity/(W·m <sup>-2</sup> )	1.0	默认值 Default value
大气温度/°C Atmospheric temperature/°C	min : 23.0, max : 33.3	实地监测 Field monitoring
相对湿度/% Relative humidity/%	min : 42.0, max : 70.1	实地监测 Field monitoring
风速(10m处)/(m·s <sup>-1</sup> ) Wind speed(10m)/(m·s <sup>-1</sup> )	0.6	观测平均值 Observed average
风向 Wind direction	135°(东南风) 135°(Southeast wind)	气象站数据 Weather station data
粗糙度/μm Roughness/μm	0.01	默认值 Default value
土壤湿度/% Soil moisture/%	70	默认值 Default value
土壤初始温度/K Soil initial temperature/K	19.85	默认值 Default value

### 1.5 热环境特征模拟及ENVI-met模型精度验证

选取2020年9月12日和9月30日监测点A、B、C距离地面1.5m高度处空气温度的观测值, 与距离屋面1.0m高度处ENVI-met软件的温度模拟值进行对比与分析, 并采用趋势分析法对软件模拟的数值进行验证。采用均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)评价模型的精度<sup>[17]</sup>。目前公认的RMSE介于0.52~4.30°C、MAE介于0.27~3.67°C是可以接受的<sup>[18]</sup>。

### 1.6 测度降温增湿效应的方法

基于ENVI-met软件模拟结果, 从“面”的角度进行测度, 分别在屋顶表面1.0m高度处获得相同时刻的绿色屋顶与裸屋顶的大气温度 $T_G$ 、 $T_B$ , 以及相对湿度数据 $R_G$ 、 $R_B$ , 通过计算获得模拟时间段内逐小时降温、增湿均值(即 $\bar{T}$ 、 $\bar{R}$ ), 获取不同屋顶类型以及不同植被配置形式的绿色屋顶降温、增湿效应( $\Delta T = \bar{T}_G - \bar{T}_B$ ,  $\Delta R = \bar{R}_G - \bar{R}_B$ ), 以表征一天内降温、增湿效应的时间变化特征<sup>[19]</sup>。

### 1.7 人体热舒适性评价体系

人体热舒适性被定义为“对热环境表示满意的精神状态”, 是对周边地区热环境情况进行的主观满意度评价<sup>[20]</sup>。人体热舒适性评价体系中, 热感觉

分区较为完整,适用的温度范围较广的指标有预测平均热感觉(prediction of average thermal sensation index, PMV)、生理等效温度(physiological equivalent temperature, PET)以及通用热气候指数(universal thermal climate index, UTCI)等<sup>[21]</sup>。PMV、PET和UTCI都充分考虑了热生理因素在热量交换中的作用,但UTCI未充分考虑衣物热阻的影响,存在20%的误差;而PMV适用于着装轻便、活动量较少的人群<sup>[22]</sup>。PET是基于慕尼黑人体热量平衡模型基础上计算出来的,能建立人体与环境间的对流辐射换热关系<sup>[23]</sup>。PET不仅考虑了温度、相对湿度、风速、太阳辐射等物理因素的外界客观条件,同时也考虑了皮肤温度、发汗率、着装、活动强度等生理因素的内在调节条件,以及人体在特定环境中的主观感觉。所以本研究采用更为科学、合理的PET来进行衡量,该指标采用了9级分度<sup>[24]</sup>,具体见表2。其中人体因素设置为男性、身高、体重与年龄分别为175 cm、70 kg、35岁,服装热阻系数为 $0.0775 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ,活动方面新陈代谢率为 $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[25]</sup>,根据ENVI-met软件中的BIO-met模块计算得到PET值。

表2 生理等效温度等级标度  
Table 2 Physiological equivalent temperature grade

生理等效温度/ $^{\circ}\text{C}$ Physiological equivalent temperature/ $^{\circ}\text{C}$	感知状态 Perception state	生理应激水平 Physiological stress level
<4	很冷 (Very cold)	极端冷应激反应 (Extreme cold stress reaction)
4~	冷 (Cold)	强烈冷应激反应 (Intense cold stress reaction)
8~	凉 (Cool)	中等冷应激反应 (Moderate cold stress reaction)
13~	微凉 (Slightly cool)	轻微冷应激反应 (Mild cold stress reaction)
18~	舒适 (Comfort)	无热应激反应 (No heat stress reaction)
23~	微暖 (Slightly warm)	轻微热应激反应 (Mild heat stress reaction)
29~	暖 (Warm)	中等热应激反应 (Moderate heat stress reaction)
35~	热 (Hot)	强烈热应激反应 (Intense heat stress reaction)
41~	很热 (Very hot)	极端热应激反应 (Extreme heat stress reaction)

## 2 结果

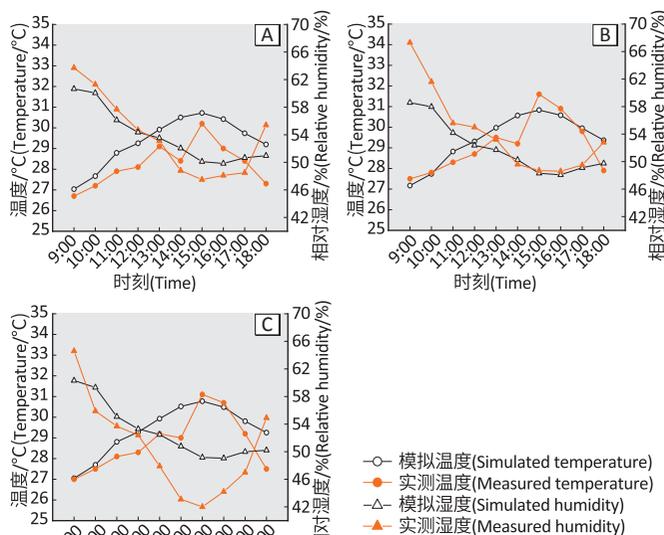
### 2.1 热环境特征模拟及模型精度

从图1可以看出,各监测点的变化规律均为空气温度先升后降,相对湿度先降后升,均在15:00时空气温度达到当日的最高值,相对湿度达到当日的最低值。三个监测点大气温度实测值和模拟值的RMSE介于 $0.756\sim 1.233\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,MAE值介于 $0.607\sim 1.093\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,模型的准确性较好。

### 2.2 不同绿色屋顶类型屋顶表面降温增湿效能

草坪式和花园式两种不同类型绿色屋顶的降温

效应呈现白天弱夜间强,增湿效应呈现出白天强夜间弱的总体分布特征,总体来看两种绿色屋顶类型呈现的变化趋势较为一致(图2),只是在量值上有所差异。草坪式与花园式绿色屋顶当日降温幅度分别在 $0.002\sim 0.068\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $0.001\sim 0.141\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,增湿幅度分别在 $0.367\%\sim 1.952\%$ 与 $0.555\%\sim 2.305\%$ 之间;花园式绿色屋顶的降温增湿效应略强于草坪式绿色屋顶。由图2可以看出,不同类型绿色屋顶白天7:00—10:00降温效应逐渐减弱,特别是10:00—14:00时降温效果可忽略不计,但在15:00至次日7:00降温效应逐渐增强且趋于稳定,在任何情况下观察到的表面温差不超过 $0.150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同类型绿色屋顶在白天(6:00—18:00),特别是在6:00—9:00时间段具有较强的增湿效应,而在夜间(19:00—次日5:00)增湿效应减弱。



[注] A: 监测点A; B: 监测点B; C: 监测点C。

[Note] A: Monitoring point A; B: Monitoring point B; C: Monitoring point C.

图1 温度、湿度实测与模拟数据对比

Figure 1 Comparison of observed and simulated data

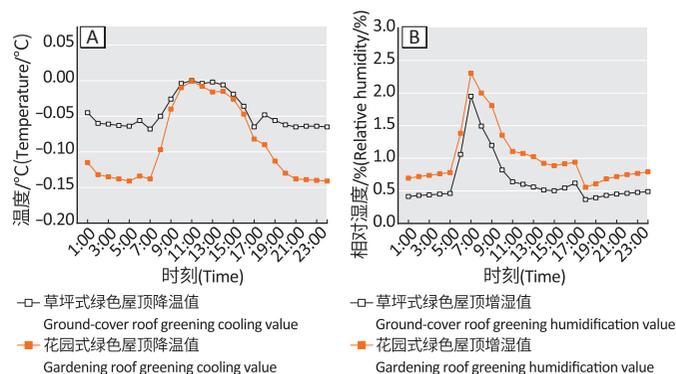


图2 不同形式绿色屋顶降温(A)增湿(B)效应逐时变化曲线  
Figure 2 Hourly variation curves of cooling (A) and humidifying (B) effects of different types of green roofs

### 2.3 不同绿色屋顶类型的人体热舒适性

利用 ENVI-met 软件模拟得出一天 24 h 的人体热舒适性指标 PET, 如图 3 所示。结果显示, PET 与空气温度呈正相关, 与相对湿度呈负相关。在 19:00 至次日 6:00 时, PET 值处于 18~23°C 这一等级, 即人体热舒适性水平处于最佳状态, 此时空气温度处于 26.462~28.436°C 之间, 相对湿度处于 54.192%~66.608% 之间; 在 11:00—16:00 时, PET 值大于 41°C, 生理应激水平为极端热应激水平, 此时空气温度处于 28.557~30.349°C 之间, 相对湿度处于 49.646%~57.636% 之间, 人体热舒适性水平处于一天中最差的时段。而在 6:00—11:00 和 16:00—19:00 时, PET 值处于 23~41°C, 人体热舒适性处于一般水平。

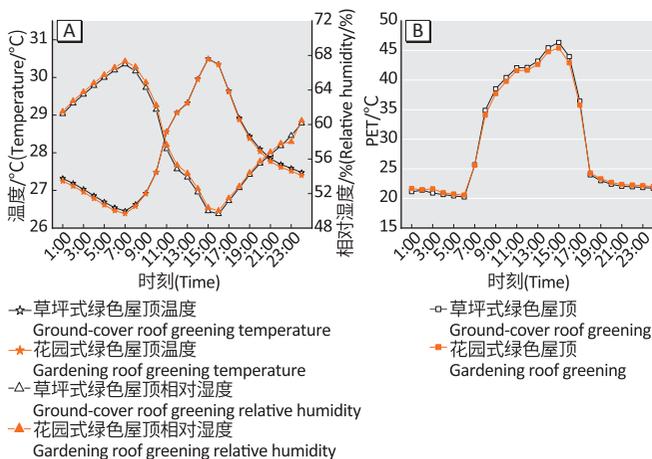


图3 不同形式绿色屋顶温、湿度 (A) 和 PET (B) 逐时变化曲线  
Figure 3 Hourly variation curves of temperature, relative humidity (A) and PET (B) of different types of green roofs

### 2.4 屋顶花园不同植被布局形式降温增湿效应和人体热舒适性评价

利用 ENVI-met 软件模拟出一天中随机式、围合式和组团式三种不同植被布局形式在 8:00 和 15:00 时的热环境气象参数, 如表 3 所示。可得到温度与风速呈正相关, 与相对湿度呈负相关。与围合式布局相比, 随机式和组团式布局在 8:00 时降温幅度分别是 0.031、0.013°C, 在 15:00 时降温幅度分别是 0.008、0.003°C。在植被配置比例相同, 植被布局不同情境中, 随机式布局的降温效果最佳, 其次为组团式布局, 降温效果最差的为围合式布局。根据 PET 等级划分表来看, 夏季在 8:00 时人体的感知状态为暖, 呈现中等热应激反应; 而在 15:00 时人体的感知状态为很热, 呈现极端热应激反应。但是相同时间点三种不同植被布局形式呈现出相同的热应激水平。

表 3 不同植被布局形式的热环境气象参数

Table 3 Meteorological parameters of thermal environment for different vegetation layout forms

时刻 Time	布局形式 Layout form	温度 /°C Temperature/°C	相对湿度 /% Relative humidity/%	风速 / (m·s <sup>-1</sup> ) Wind speed/ (m·s <sup>-1</sup> )	生理等效温度 /°C PET/°C
8:00	随机式布局 Random layout	26.844	59.478	0.937	30.342
	组团式布局 Group layout	26.862	59.275	0.970	30.959
	围合式布局 Enclosed layout	26.875	51.644	0.981	31.187
15:00	随机式布局 Random layout	30.800	48.522	0.737	42.358
	组团式布局 Group layout	30.805	48.374	0.766	43.007
	围合式布局 Enclosed layout	30.808	51.530	0.775	43.131

## 3 讨论

基于 ENVI-met 软件模拟的草坪式和花园式两种不同类型绿色屋顶在夏季具有良好的降温增湿效应, 对人体热舒适性水平有较好的提升作用, 绿色空间的增加对改善城市热环境和降低城市热岛效应具有重大的作用。

在 ENVI-met 软件模型模拟验证时, 各监测点模拟温度与实测温度之间有 0~2°C 的误差。是因为实测数据受周围环境影响较大, 特别是实时风速变化大以及云量遮挡太阳辐射, 且风速仪测量的空气温度和相对湿度均为瞬时值, ENVI-met 模拟的数值是一定时间与空间内的平均值<sup>[26]</sup>; ENVI-met 在模拟时对建筑材料热值的稳定性、环境热辐射、周边人为放热等其他不可控因素的影响, 都是造成误差的原因<sup>[27]</sup>。

在探讨绿色屋顶的降温增湿效应时, 降温效应呈现白天弱夜间强的主要原因在于植被生理特征和环境要素<sup>[19]</sup>, 植物气孔在 10:00—14:00 温度较高时关闭以减少水分流失, 蒸腾作用减弱伴随降温增湿效应减弱, 但仍进行呼吸作用, 叶表面变暖, 产生一定的热量。其次因为绿色屋顶导热率较小, 白天净辐射还难向下传递, 转化为感热加热大气, 使周围温度升高, 而夜晚屋顶表层迅速辐射冷却, 深层温度较高很难向表层传输, 导致屋顶表面气温下降<sup>[27]</sup>。最后由于屋顶反照率的变化对降温效果产生的影响, 根据之前学者的研究, 种植绿色植被后的屋顶反射率为 0.15 左右, 而水泥的反射率为 0.2, 白天可以造成 0.21°C 的升温, 而在夜间对气温的影响可忽略不计<sup>[27]</sup>。

而植物的遮阳作用是引起屋顶表面温度变化的另一个重要原因, 随机式布局中的乔木与灌木随机分布, 致使植物产生遮蔽阴影的面积占比较大且植物之

间的通风效果良好,使得屋顶表面温度较低;相同植物类型集中种植的组团式布局会造成局部地区风速较大的情况,但相较于围合式布局来说风速较小,随机式布局来说遮阳面积较小,使得屋顶表面降温效果次之;围合式的乔木与灌木高低错落分布,一定条件下引导风向的流动,使得风速较大,造成局部低温的现象,但灌木围合乔木的种植形式一定范围内导致了通风效果减弱,植物的阴影互相遮挡重叠使得降温效果减弱,从而影响屋顶表面空气温度的分布。

由于实验条件的限制,本研究只测得温度、相对湿度与风速等影响因素,通过ENVI-met的Bio-met模块计算得到PET指标,忽略了相同条件下人体主观热感受。未来可采用调查问卷的方式来探讨人体热舒适性水平,将对热环境的评价由客观评价转变为主客观观测结合评价。

尽管本研究对屋顶花园进行了还原度较高的模拟,但仍存在需要解决的问题。限于合肥市绿色屋顶使用的现状,只对一座建筑物进行研究,导致研究的代表性受限。在实测过程中受天气和实验设备安全影响,未能进行24h多天连续监测作为模型的边界条件。由于选取实地监测点的建筑物高度较高,很难找到类似高度的裸屋顶作为对照组进行实地监测。对绿色屋顶的模拟研究尚停留在乔木、灌木、草地等不同植被类型的基础上进行研究,未对植物的生理特征以及不同反射率下垫面的属性进行探讨。在进行人体热舒适度评价时,没有通过采用问卷调查的方式对不同群体的实际热感觉与ENVI-met软件模拟的人体热舒适性结果进行对比,忽略了不同群体实际热感觉的差异性。因而在未来屋顶绿化微气候模拟过程中,考虑选择夏季晴朗无风的条件下,对多个建筑物以及设计实验组和对照组进行24h的多天连续监测作为模型的边界条件,进一步修正模型的精确度,并通过调查问卷的方式增加不同群体的实际热感觉,更好地对人体热舒适度进行评价。在后续研究中应探讨不同植物种类的叶面积指数、冠幅、枝下高、植被生理特征以及不同下垫面的属性对绿色屋顶降温增湿效果的影响。通过不同植被配置方式,优化绿色屋顶降温增湿策略,为城市合理规划绿地空间,形成更为紧密的绿色空间网络,提高开放空间的人体热舒适性提高理论支撑。

## 参考文献

[1] 赵琦,李珊珊,郭玉明. 随时间变化的分布滞后非线性模

型应用介绍:以气温与死亡关系为例[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(1): 9-14.

ZHAO Q, LI SS, GUO YM. Time-varying distributed lag non-linear model: using temperature-mortality association as an example [J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(1): 9-14.

[2] 葛德,张守红. 基质类型及厚度对绿色屋顶径流调控效益的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 31-38.

GE D, ZHANG SH. Influence of types and depths of substrates on hydrological performances of green roofs [J]. Sci Soil Water Conserv, 2019, 17(3): 31-38.

[3] HERRERA J, FLAMANT G, GIRONÁS J, et al. Using a hydrological model to simulate the performance and estimate the runoff coefficient of green roofs in semiarid climates [J]. Water, 2018, 10(2): 198.

[4] GONG K, WU Q, PENG S, et al. Research on the characteristics of the water quality of rainwater runoff from green roofs [J]. Water Sci Technol, 2014, 70(7): 1205-1210.

[5] FOUSTALIERAKI M, ASSIMAKOPOULOS MN, SANTAMOURIS M, et al. Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year [J]. Energy Build, 2017, 135: 33-38.

[6] 郑馨竺,周嘉欣,王灿. 绿色屋顶的城市降温与建筑节能效果研究[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 222-229.

ZHENG XZ, ZHOU JX, WANG C. Research on the urban cooling and energy saving effect of green roofs [J]. Ecol Econ, 2021, 37(2): 222-229.

[7] CHAN FKS, GRIFFITHS JA, HIGGITT D, et al. "Sponge City" in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context [J]. Land Use Policy, 2018, 76: 772-778.

[8] HAN J, ZHANG G, ZHANG Q, et al. Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China [J]. Build Environ, 2007, 42(12): 4043-4050.

[9] MARZOUK M, ABDELATY A. Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling [J]. Energy Build, 2014, 84: 252-257.

[10] HUSSAIN S, OOSTHUIZEN PH, KALENDAR A. Evaluation of various turbulence models for the prediction of the airflow and temperature distributions in atria [J]. Energy Build, 2012, 48: 18-28.

- [11] CHENG B, GOU ZH, ZHANG F, et al. Thermal comfort in urban mountain parks in the hot summer and cold winter climate [J]. *Sustain Cities Soc*, 2019, 51 : 101756.
- [12] LI J, NIU J, MAK CM, et al. Assessment of outdoor thermal comfort in Hong Kong based on the individual desirability and acceptability of sun and wind conditions [J]. *Build Environ*, 2018, 145 : 50-61.
- [13] MORAKINYO TE, DAHANAYAKE KW D K C, NG E, et al. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities : a co-simulation parametric study [J]. *Energy Build*, 2017, 145 : 226-237.
- [14] PENG LLH, JIM CY. Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation [J]. *Energies*, 2013, 6 (2) : 598-618.
- [15] 武雅芝. 城市滨水绿地植被的三维形态构成与微气候效应研究 [D]. 上海 : 华东师范大学, 2020.  
WU YZ. The research on microclimate effect of the three-dimensional morphology on urban waterfront green space vegetation [D]. Shanghai : East China Normal University, 2020.
- [16] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 等. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (19) : 7120-7134.  
JIANG ZD, PENG LH, YANG XS, et al. Thermal effects of block-scale roof greening and their relationships with urban geometry [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38 (19) : 7120-7134.
- [17] CHAI T, DRAXLER RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) ? - Arguments against avoiding RMSE in the literature [J]. *Geosci Model Dev*, 2014, 7 (3) : 1247-1250.
- [18] 董楠楠, 吴静. 基于 ENVI-met 模拟的屋顶绿化热环境影响 [J]. *中国城市林业*, 2020, 18 (4) : 61-66.  
DONG NN, WU J. Thermal environment effects of green roofs based on ENVI-met simulation [J]. *J Chin Urban For*, 2020, 18 (4) : 61-66.
- [19] 陈佳宇, 尹海伟, 孔繁花. 绿色屋顶降温效应的多维时空变化特征 [J]. *生态学报*, 2020, 40 (4) : 1445-1454.  
CHEN JY, YIN HW, KONG FH. Measuring the performance of green roof cooling effects from a multi-dimensional perspective [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40 (4) : 1445-1454.
- [20] 宋丹然. 城市河流宽度对居住环境微气候影响与优化研究 —— 以上海市为例 [D]. 上海 : 华东师范大学, 2019.  
SONG DR. Study on the influence and optimization of urban river width on residential environment microclimate : a case study of Shanghai [D]. Shanghai : East China Normal University, 2019.
- [21] 张伟, 郜志, 丁沃沃. 室外热舒适性指标的研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32 (9) : 836-841.  
ZHANG W, GAO Z, DING WW. Outdoor thermal comfort indices : a review of recent studies [J]. *J Environ Health*, 2015, 32 (9) : 836-841.
- [22] 王若晨. 几何形态对街道夏季热环境影响的模拟分析 —— 以北京中心城区为例 [D]. 北京 : 北京建筑大学, 2020.  
WANG RC. Study on thermal environment effect of geometrical in urban street in summer—a case of Beijing central city [D]. Beijing : Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [23] HÖPPE P. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment [J]. *Int J Biometeorol*, 1999, 43 (2) : 71-75.
- [24] 熊瑶, 严妍. 基于人体热舒适度的江南历史街区空间格局研究 —— 以南京高淳老街为例 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45 (1) : 219-226.  
XIONG Y, YAN Y. Effects of spatial design and microclimate on human thermal comfort in the region south of the Yangtze River : a case study of old street in Gaochun, Nanjing [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 45 (1) : 219-226.
- [25] 张德顺, 王振. 高密度地区广场冠层小气候效应及人体热舒适度研究 —— 以上海创智天地广场为例 [J]. *中国园林*, 2017, 33 (4) : 18-22.  
ZHANG DS, WANG Z. Micro-climate effect and human thermal comfort of square canopy in dense habitat—a case study of Shanghai knowledge and innovation community square [J]. *Chin Landsc Arch*, 2017, 33 (4) : 18-22.
- [26] 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 YP. Research on effects of green roof towards outdoor thermal environment in Shenzhen [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2014.
- [27] 沈滢洁, 王成刚, 曹乐, 等. 屋顶绿化对城市降温效应的模拟分析 —— 以南京市为例 [J]. *气象*, 2017, 43 (5) : 610-619.  
SHEN YJ, WANG CG, CAO L, et al. A case study of simulated cooling effect of roof greening in urban area of Nanjing [J]. *Meteor Mon*, 2017, 43 (5) : 610-619.

(英文编辑 : 汪源 ; 责任编辑 : 丁瑾瑜)