

郑伯红,李家宇,饶继发,等. 湘南住区垂直绿化的冬季节能绩效研究[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 195-202.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.022

湘南住区垂直绿化的冬季节能绩效研究

郑伯红¹, 李家宇¹, 饶继发¹, 戚智勇¹, 郑舰²

1. 中南大学建筑与艺术学院, 长沙 410075; 2. 华南理工大学建筑学院, 广州 510800

摘要 由于夏热冬冷的特殊气候特征,我国垂直绿化的运用不能照搬新加坡和我国香港等热带高密度城市的实践经验。本研究运用“Envi-met+TRNSYS”耦合方法,从冬季视角理性分析不同垂直绿化模式的节能效应。首先对我国湘南地区居住区的空间结构、湘南地区典型冬季气象日特征进行解析;并对装配3种不同垂直绿化模式的小区分别进行冬季室内热环境的模拟分析;最后,依据湖南人体对寒冷的受耐性特征,运用TRNSYS模拟不同垂直绿化模式情景下的室内采暖能耗需求。研究结果显示,垂直绿化在寒冷气候条件下可能增大建筑采暖能耗需求,对节能不利;湘南地区典型冬季气象日,墙生垂直绿化户均增加采暖用电量为1.2~1.5 kW·h;地生墙表垂直绿化在冬季仍然具有节能效应,户均采暖节能约为0.2 kW·h。

关键词 垂直绿化; 绿色规划; 绿色建筑; 建筑节能; 城市微气候; 节能绩效; Envi-met; TRNSYS; 生态效益; 碳汇要素

中图分类号 TU 241.91 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0195-08

“生态优先、绿色发展”是我国国土空间规划的基本准则之一^[1-2]。垂直绿化作为建成空间里重要的“碳汇”要素,受到了研究人员的广泛关注。然而,我国关于垂直绿化的研究集中于城市绿化对于微气候和大气污染净化的研究。就城市微气候研究而言,现有研究主要探讨绿化大气温度、湿度、风速、热舒适性等要素的影响,研究周期以“典型夏季气象日”评价为主。“绿色建筑全产业链发展计划”要求延伸建筑前端的规划设计环节,使得“绿色规划”与“绿色建筑”协同发展,构成绿色建筑全产业链,这也是当下国土空间规划的内在要求之一^[3]。

然而,我国城市绿化的研究尚存两个主要瓶颈,导致“绿色建筑全产业链发展计划”无法高效地实施。首先,“城市绿化”与“建筑节能”的研究之间存在沟壑,无法实现“绿色规划”与“绿色建筑”的有效衔接;现有的城市绿化研究仅探讨了城市空间要素对城市建成空间微气候的影响,尚未实现经由微气候向建筑节能的二次耦合研究。其次,我国现有的城市绿化对微气候的影响研究主要探讨夏季的“热岛缓解”问题^[4-5],这个学术问题起源于对新加坡和

我国香港等热带城市的研究^[6-7];然而,我国拥有多个气候区,仅研究绿化对其在夏季“降低温度”中的积极作用^[8],特别是有大量的疆域位于夏热冬冷气候区的背景下^[9],仍忽视绿化在冬季潜在的“加剧寒冷”的负面影响研究^[10],这样的研究是不科学的。

本研究从冬季环境负面效应的视角出发,通过探索“城市绿化”这一城市规划学科的空间参数对城市微气候的影响,并进一步探讨该微气候条件下的建筑能耗需求情况,从而实现由规划参数到建筑能耗的耦合研究,厘清不同垂直绿化模式在冬季的能耗需求情况和冬季湘南地区不同垂直绿化模式对建筑能耗需求的影响。

1 研究方法

1.1 湘南地区典型住区形态

垂直绿化由于受到自重的限制,目前尚未在高层建筑中广泛地装配^[11]。湘南地区垂直绿化较常见地装配于低层和多层居住建筑。由于低层住宅不利于集约使用土地,低层住宅早已被明令禁止建设^[12]。因此,湘南地区装配垂直绿化的典型住区为

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478470); 湖南省研究生自主探索创新项目(CX20200375); 中南大学中央高校基本科研项目(2020zzts012)

郑伯红, E-mail: zhengbohong@csu.edu.cn

通信作者: 郑舰, E-mail: 141311010@csu.edu.cn

多层住宅小区。湘南多层住宅小区按照《城市居住区设计标准》的消防和采光要求,建筑东西间距不低于 6 m,满足消防需求;日照系数 1 : 1^[13]。湘南地区的住区大多为商业开发小区,为高效利用土地资源,住区基本都是依据规划退让的底限要求布局的,典型住区模型见图 1。

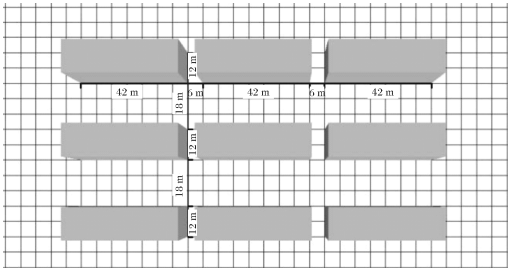


图 1 湘南典型多层住区形态

Fig.1 Typical multi-storeys in southern Hunan

1.2 湘南地区垂直绿化模式

湘南地区居住区装配的垂直绿化主要分为 3 种

类型^[14],本研究的对比模式(图 2A)及 3 种垂直绿化模式(图 2B,C,D)如图 2 所示。

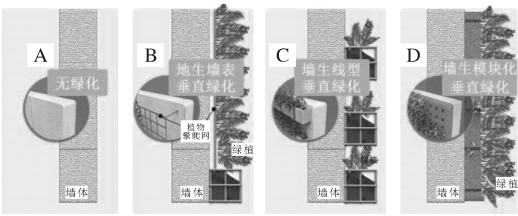


图 2 不同垂直绿化模式

Fig.2 Vertical greening modes

笔者所在课题组对 3 种垂直绿化模式进行了全年周期的栽培试验,栽培植物采用湘南当地四季常绿植物(图 3)。图 3D 为垂直绿化的滴灌针,滴灌针每隔 0.5 m 设置 1 个,由插入绿化基质里的湿度传感器来探测并控制滴灌液的供给,保障垂直绿化在湘南地区能够全年周期存活。研究测定了 3 种垂直绿化基质与植物在正常存活状态下的参数(表 1)。



图 3 不同垂直绿化模式栽培试验

Fig.3 Experiment on vertical greening cultivation of different modes

表 1 绿墙构成要素属性

Table 1 Attribute table of green wall elements

要素 Component	参数 Parameters	地生墙表 Green facades wall	墙生线型 Linear green wall	墙生模块 Modular green wall
植物 Plants	种类 Species	常青藤 Lvy	常青藤 Lvy	常青藤 Lvy
	厚度/mm Thickness	300.00	300.00	300.00
	叶面积指数 Leaf area index	1.50	1.50	1.50
	叶倾角分布 Leaf angle distribution	0.70	0.70	0.70
基质 Substrates	种类 Species	/	壤土 Loam soil	垒土 Super soil
	厚度/mm Thickness	/	200.00	200.00
	发射率 Emissivity	/	0.05	0.03
	反照率 Albedo	/	0.18	0.15
	饱水率 Water coefficient	/	0.18	0.70
	墙体和基质间距/mm Air gap between substrate and wall	/	0	0

1.3 湘南冬季气候特征

研究采用湖南省郴州市国家气象站 2009 — 2019 年的温度监测数据,并对每个月的月平均高

温、月平均低温、月均高温发生时间、月均低温发生时间进行了统计分析(图 4)。由图 4 可知,郴州地区最冷的月份为 1 月。因此,研究以郴州市 1 月为

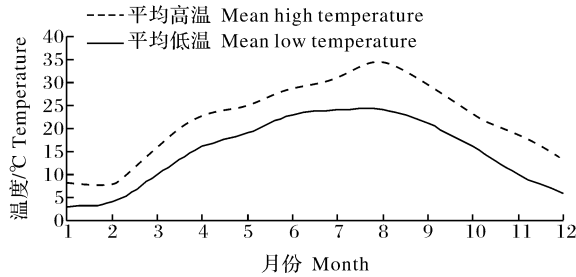


图4 2009—2019年郴州全年气温分布特征

Fig.4 Annual temperature distribution
in Chenzhou City from 2009 to 2019

典型冬季月。

以高温为8℃、低温为3℃的特征,对2009—2019年郴州市国家气象站(No.57972)1月份的气温特征进行了分析,获得了郴州市1月份典型的冬季气象日室外温度(图5)。

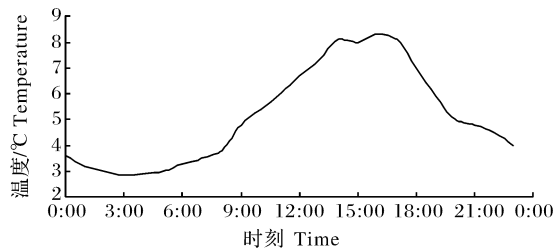


图5 湘南1月室外典型日气温

Fig.5 Typical daily temperature in January
in southern Hunan Province

1.4 冬季节能计算方法

室外热环境与室内能耗的耦合研究是城乡规划学科(城市尺度)与建筑暖通学科(建筑单体尺度)之间的研究沟壑。垂直绿化产生的节能缘于其调节了室内温度,减少制冷和供热的能耗需求^[16]。垂直绿化对建筑的采光、餐厨等能耗无必然的影响。因此,研究不同垂直绿化模式的节能绩效,实质是研究垂直绿化对室内舒适性的提升总量,减少调节室内热环境的能耗需求。本研究提出 Envi-met + TRN-SYS 的耦合研究方法,探索室外参数对室内采暖能耗的影响,研究采用的方法体系如图6所示。

本研究模拟发生的地理位置设置为(25°73'N, 112°98'E);采用湘南1月室外典型日气温(图5)为模拟的气候参数;墙体选用湘南地区常用的普通钢筋混凝土墙,即 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》中的干密度为2500 kg/m³墙体;绿化参数采用表1中实测值。进行1个完整气象日(24 h)的室内温度模拟,并输出24个整时时刻刻的室内温度值。本研究方法体系中涉及室内热环境的计算,舒适性的温度阈值,以及采暖能耗调节的电能计算3项算法,具体如下。

1)室内热环境算法。研究采用 Envi-met 软件,对装配有不同模式垂直绿化的住宅小区进行模拟计

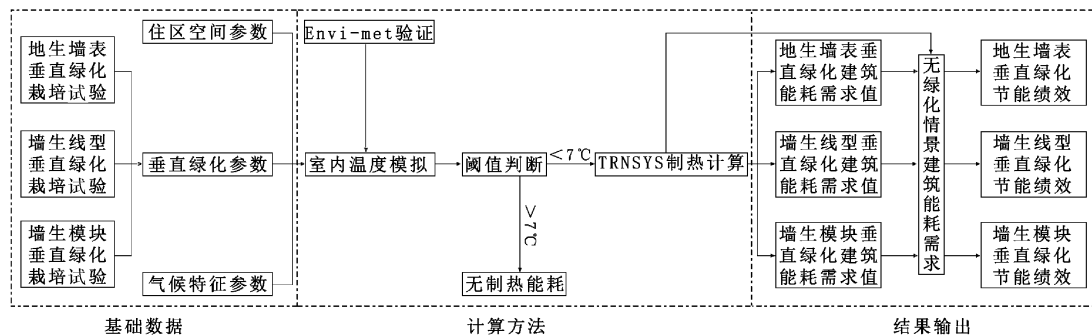


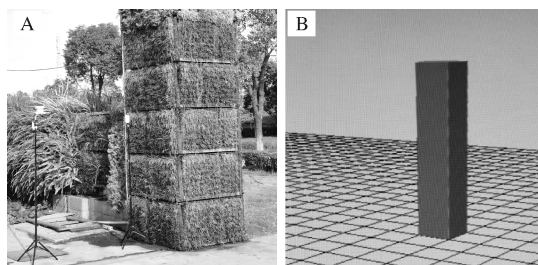
图6 垂直绿化节能计算流程框架

Fig.6 Energy saving calculation method of vertical greening

算。Envi-met 软件是一款成熟的热环境模拟软件,它能计算不同建筑材料、植被等在不同空间形态下的热传导规律^[17]。Envi-met 常见于室外热环境的模拟研究,少见于室内节能的研究。将 Envi-met 技术与能耗模拟软件进行耦合是探索建成空间参数对建筑能耗影响的思路之一;2018 年 Envi-met 软件

新增了墙体绿化模拟计算功能,使得室外参数对室内热环境的研究有了可能;然而目前研究尚未厘清室外绿化参数对室内采暖能耗的影响。研究对 Envi-met 模拟垂直绿化的准确性做了试验验证。在绿化栽培试验基地(113.109°E, 28.235°N),运用 HOBO(MX2302)测试了 2020 年 8 月 22 日 10:00

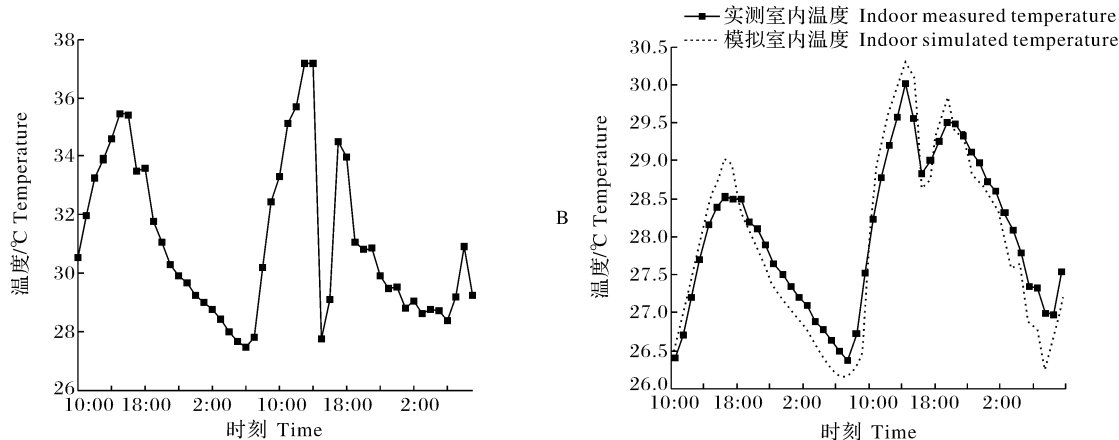
至 2020 年 8 月 24 日 10:00 的连续 2 d 垂直绿化墙体内外温度、湿度数据(图 7A)。研究按照实际绿化参数与尺寸构建了 Envi-met 模型(图 7B);以 HOBO 实测的局地气候参数为模拟条件,进行了室内温度模拟。



A: 实测试验 Field experiment; B: 模拟模型 Simulated model.

图 7 实测试验与模拟模型

Fig.7 Field experiment and simulated model



A: 室外实测温度 Measured temperature outdoor; B: 室内实测与模拟温度 Measured and simulated temperature indoor.

图 8 室内外试测与模拟温度

Fig.8 Measure and simulated temperature indoor and outdoor

3) 等效能耗算法。等效能耗是指超过舒适度阈值后,调节温度所需要补给的能耗。研究运用 TRNSYS 18 软件的 TRNBuild 模块对建筑的热过程进行仿真模拟^[20],计算维持舒适状态下,不同垂直绿化装配的建筑所需要的制热能量,仿真模拟的原理图见图 9。

2 结果与分析

2.1 不同垂直绿化模式建筑的冬季日温度

Envi-met 软件模拟了湘南地区典型冬季气象日内 24 h 的室内温度变化情况;研究提取了整时时刻的数据作为分析数据。例如,该日 19:00 的模拟

通过试验验证,证实 Envi-met 可准确地计算植物、基质的热传导关系,准确性校验试验如图 8,图 8 表明,Envi-met 模拟试验和测量试验结果的皮尔森系数为 0.856,表明 Envi-met 的模拟结果是可信的。

2) 采暖能耗启动阈值算法。人体对温度的受耐性特征受到地域气候的影响,新加坡和我国香港等城市已经系统的研究了当地人群需要启用空调制冷或制热的群体阈值^[18],这个阈值不可照搬到湘南地区。刘蔚巍等^[19]对湖南地区人体的温度受耐性特征进行了系统的研究,并得出湖南人群对冷和热的受耐性特征值。根据刘蔚巍等^[19]的研究,本研究采用 7℃ 为制热启动温度,30℃ 为制冷启动温度,7~30℃ 湖南人大部分群体不会使用温度调节设备。

结果见图 10,图 10A-D 分别是无绿化、地生墙表垂直绿化、墙生线型垂直绿化和墙生模块化垂直绿化对应的建筑室内温度。无绿化、地生墙表垂直绿化、墙生线型垂直绿化和墙生模块化垂直绿化对应的室内温度见图 11,图 11 共计 24 个时刻,每个时刻的温度指的是整时时刻室内温度的瞬时模拟值。

由图 11 可知,在室内温度最低时刻,3 种绿化墙体都具有保温作用;然而,随着室内温度的上升,墙生线型垂直绿化和墙生模块化垂直绿化表现出明显的降温绩效。地生墙表垂直绿化在室内温度下降时具有保温作用,在室内温度上升时具有阻滞室内升温的作用。

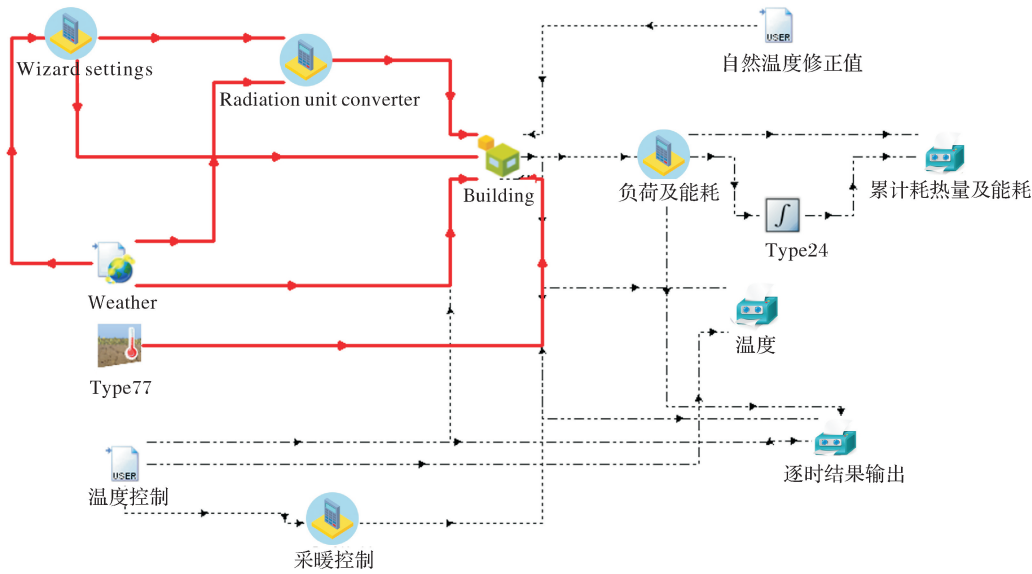


图9 能耗算法模型

Fig.9 Energy consumption algorithm model

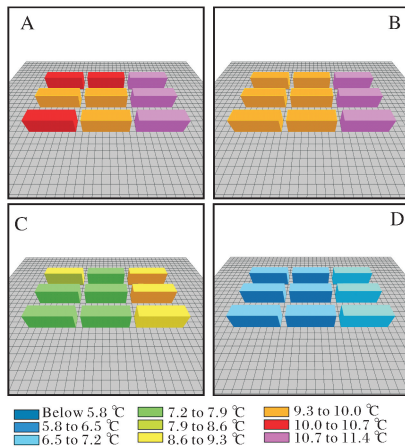


图10 19:00 室内温度模拟图

Fig.10 Indoor temperature simulation at 19:00

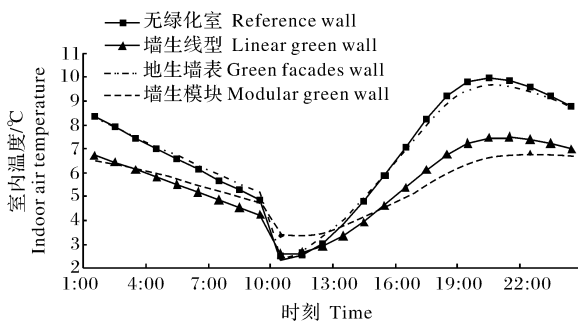


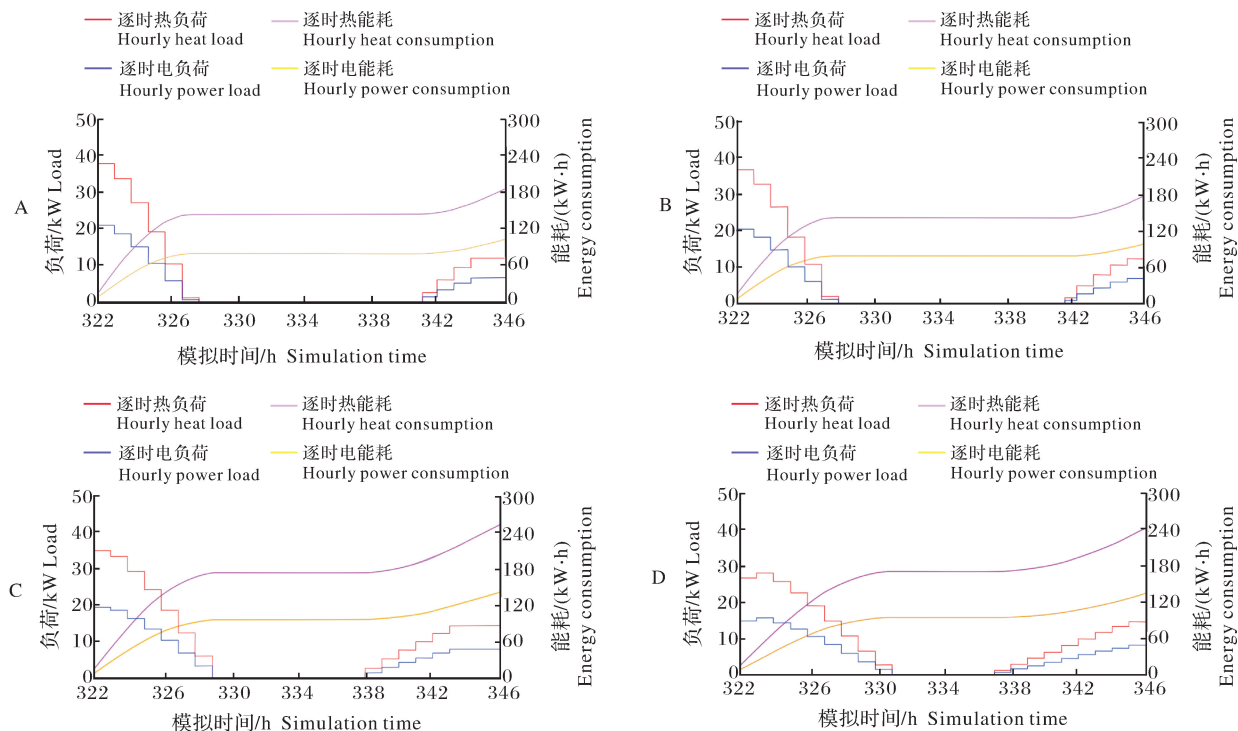
图11 4种墙体居住建筑典型冬季气象日的室内温度

Fig.11 Indoor temperature of the four wall residential buildings on typical winter weather day

2.2 不同垂直绿化模式建筑的冬季日采暖能耗需求

在湘南典型冬季气象日的室外环境下,TRN-SYS18 软件的 TRNBuild 模块模拟分析了无绿化情景,以及分别装配有 3 种不同垂直绿化模式的居住建筑,在墙体动态热传导的作用下,维持室内温度不低于 7℃ 所需要供给的能量。装配有 3 种不同垂直绿化模式的建筑采暖能耗需求如图 12 所示,其中图 12A 为没有垂直绿化的居住采暖能耗需求情况,图 12 中折线表示逐时负荷需求,曲线表示采暖能耗总需求。

模拟结果显示,在湘南地区的典型冬季气象日,为避免室内出现极端寒冷的温度,即保持室内温度不低于 7℃,1 栋 24 户的 6 层居住建筑在无绿化以及装配不同垂直绿化模式的情景下,无垂直绿化、地生墙表绿化、墙生线型绿化、墙生模块绿化情景的日需电负荷分别为 103.57、98.74、140.98、134.10 kW·h。研究表明:垂直绿化在寒冷气候条件下存在环境负面效应。墙生线型垂直绿化和墙生模块化垂直绿化都加剧了室内采暖能耗的需求。以湘南为例,典型冬季气象日下,24 户的 6 层民居一日需要多用电量分别为 37.40、30.53 kW·h,每户日均制热能耗的需求提升 1.2~1.5 kW·h。研究进一步表明,垂直绿化在冬季的环境效应是否向好取决于气候特征、垂直绿化模式等多要素。研究结果



A:无垂直绿化的住区建筑采暖能耗需求 Energy demand of residential buildings without vertical greening; B:地生墙表绿化的住区建筑采暖能耗需求 Energy demand of residential buildings with green facades walls; C:墙生线型绿化的住区建筑采暖能耗需求 Energy demand of residential buildings with linear green walls; D:墙生模块绿化的住区建筑采暖能耗需求 Energy demand of residential buildings with modular green walls.

图 12 4 种墙体的居住建筑的采暖能耗需求

Fig.12 Heating energy consumption of residential buildings with the four kinds of walls

表明,我国湘南地区地生墙表垂直绿化在冬季仍然具有节能效益;24 户的 6 层民居一日需要的采暖能耗可减少 $4.83 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。墙生垂直绿化在冬季具有明显的耗能效应,在典型 24 户的 6 层民居中,日增加采暖能耗分别为 37.40 、 $30.53 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

3 讨论

垂直绿化在建筑上的运用主要由高密度城市的学者们推动,尤以我国香港和新加坡为盛。然而,不同于这两个热带城市,我国其他大部分城市处于夏热冬冷、寒冷甚至严寒气候区,垂直绿化在寒冷季节的节能性能表现尤为重要。然而,垂直绿化在寒冷气候下的研究开展较少;这是由于垂直绿化主要用于高密度城市,但采取高密度城市建设模式的国家或地区并不多,且已展开研究的国家或地区大都位于热带气候区。本研究一方面证实了垂直绿化模式在寒冷的气候条件下有可能增大室内采暖能耗需求。此外,研究还厘清了湘南地区不同垂直绿化模

式在典型冬季气象日的节能绩效,即地生墙表垂直绿化在冬季仍然具有节能效益;24 户的 6 层民居一日需要多用电量可减少 $4.83 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。墙生垂直绿化在冬季具有明显的耗能效应,在典型 24 户的 6 层民居中,日增加能耗分别为 37.40 、 $30.53 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。本研究厘清了垂直绿化在我国典型夏热冬冷气候区冬季的节能绩效,给照搬其他城市垂直绿化的盲目建设一个理性的呼吁。同时,本主题研究仍需深入开展,后续研究将通过对不同气候区内不同垂直绿化模式的全年周期节能绩效研究,研判出不同气候区最有利于住区节能的垂直绿化模式,并指明不同垂直绿化模式有利于住区建筑节能的地理界线。

参考文献 References

- [1] 项广鑫,符金豪,曾丽婷,等.基于“双评价”的城镇开发边界划定技术——以湘潭县中心城区为例[J].自然资源学报,2020,35(10):2401-2414.XIANG G X,FU J H,ZENG L T,et al.Demarcation technology of urban development boundary based on evaluation of carrying capacity of resources environment and

- suitability of land space development; a case study of the central city of Xiangtan county[J]. Journal of natural resources, 2020, 35(10): 2401-2414 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邵一鸣, 周志伟, 胡振宇, 等. 基于文献计量学的垂直农场研究现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 144-154. SHAO Y M, ZHOU Z W, HU Z Y, et al. Bibliometrics-based review of vertical farm [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 144-154 (in Chinese with English abstract).
- [3] 禹湘, 陈楠, 李曼琪. 中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 1-9. YU X, CHEN N, LI M Q. Research on carbon emission characteristics and reduction pathways of low-carbon pilot cities in China[J]. Chinese journal of population resources and environment, 2020, 30(7): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [4] 贾佳, 吴雪飞. 基于生态系统服务供需评估的街道尺度 GI 调适[J]. 现代城市研究, 2020(4): 106-113. JIA J, WU X F. Street scale GI optimization based on ecosystem service supply and demand assessment [J]. Modern urban research, 2020(4): 106-113 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈明, 戴菲, 殷利华. 基于内容分析法的中国垂直绿化研究进展[J]. 风景园林, 2018, 25(5): 104-109. CHEN M, DAI F, YIN L H. Research progress of vertical greening in China by content analysis[J]. Landscape architecture, 2018, 25(5): 104-109 (in Chinese with English abstract).
- [6] 孙晓峰, 宋昆, 叶青, 等. 中新天津生态城绿色建筑实施运行情况及改进建议[J]. 建筑学报, 2019(S1): 129-134. SUN X F, SONG K, YE Q, et al. Green building implementation and operation of China-Singapore Tianjin Eco-city and suggestion for improvement[J]. Architectural journal, 2019 (S1): 129-134 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘少瑜, 林萍英, 秦浩. 香港《可持续建筑设计指引》剖析及应用[J]. 建筑学报, 2013(7): 65-69. LIU S Y, LIN P Y, QIN H. Discussion and application analysis of Hong Kong sustainable building design guidelines [J]. Architectural journal, 2013(7): 65-69 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨小山, 翁素梅, 赵立华. 面向城市热环境的典型气象日确定方法[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 231-6. YANG X S, WENG S M, ZHAO L H. Determination of typical meteorological day for urban thermal environment [J]. Environmental science and technology, 2019, 42(1): 231-236 (in Chinese with English abstract).
- [9] 冒亚龙, 何镜堂. 遵循气候的生态城市节能设计[J]. 城市问题, 2010(6): 44-49. MAO Y L, HE J T. Energy-saving design of eco-city based on climate[J]. Urban problems, 2010(6): 44-49 (in Chinese with English abstract).
- [10] LI J, ZHENG B, CHEN X, et al. Study on a full-year improvement of indoor thermal comfort by different vertical greening patterns[J/OL]. Journal of building engineering, 2021, 35: 101969 [2021-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101969>.
- [11] LI J, ZHENG B, SHEN W, et al. Cooling and energy-saving performance of different green wall design: a simulation study of a block[J/OL]. Energies, 2019, 12(15): 2912 [2021-04-28]. <https://doi.org/10.3390/en12152912>.
- [12] 吴延溢. 居住自由权的构造逻辑及其法理界限[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2020, 36(1): 66-73. WU Y Y. Construction logic and legal threshold of residence freedom right[J]. Journal of Nantong University (social sciences edition), 2020, 36(1): 66-73 (in Chinese with English abstract).
- [13] 于一凡. 从传统居住区规划到社区生活圈规划[J]. 城市规划, 2019, 43(5): 17-22. YU Y F. From traditional residential area planning to neighborhood life circle planning[J]. City planning review, 2019, 43(5): 17-22 (in Chinese with English abstract).
- [14] 梁丽莎. 广州地区攀援垂直绿化降温及节能效益研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. LIANG L S. Research on cooling and energy saving effect in climbing vertical greening in Guangzhou area[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈秋瑜. 夏热冬冷地区建筑活墙研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. CHEN Q Y. Research on the living wall system in hot and cold climate[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张希晨. 低碳概念下的建筑设计应对策略[J]. 城市发展研究, 2010, 17(7): 45-51. ZHANG X C. Architecture design coping with the conception of low carbon[J]. Urban development studies, 2010, 17(7): 45-51 (in Chinese with English abstract).
- [17] 朱宇颐, 解维嘉, 黄华国. 基于三维模型 ENVI-met 对黑河森林和北方森林的潜热及显热通量模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 440-452. ZHU Y Y, XIE W J, HUANG H G. Modeling sensible flux and latent flux in Heihe and boreal forests based on a 3D ENVI-met model[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, 35(3): 440-452 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孙铁钢, 肖荣波, 蔡云楠, 等. 城市热环境定量评价技术研究进展及发展趋势[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2717-2728. SUN T G, XIAO R B, CAI Y N, et al. Research progress and development trend of quantitative assessment techniques for urban thermal environment[J]. Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(8): 2717-2728 (in Chinese with English abstract).
- [19] LIU W, ZHANG Y, DENG Q. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate[J]. Energy and buildings, 2016, 128: 190-197.
- [20] 冯涛, 杨谋存, 朱跃钊. 基于 TRNSYS 软件多能互补耦合系统的模拟分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 649-655. FENG T, YANG M C, ZHU Y Z. Simulation and anal-

ysis of multi-energy complementary coupling system based on TRNSYS software[J]. Journal of Nanjing University of Tech-

nology(natural science edition), 2020, 42(5): 649-655 (in Chinese with English abstract).

Winter energy-saving performance of vertical greening in residential areas in southern Hunan Province

ZHENG Bohong¹, LI Jiayu¹, RAO Jifa¹, QI Zhiyong¹, ZHENG Jian²

1. School of Architecture and Art, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510800, China

Abstract Due to the unique climatic characteristics of hot summer and cold winter, the application of vertical greening in China can not copy the practical experience of tropical high-density cities including Hong Kong and Singapore. The “Envi-met+TRNSYS” coupling method was used to rationally analyze the winter energy-saving effects of different vertical greening patterns. The spatial structure of residential areas and the typical winter meteorological days in southern Hunan were analyzed. The residential building covered with three patterns of vertical greenings was simulated with the indoor thermal data collected. Based on the human body’s tolerance to the cold in Hunan Province, TRNSYS was used to simulate indoor heating energy demand under different vertical greening patterns. The results showed that vertical greening may increase the energy demand for building heating in cold climate conditions, which is unfavorable to energy conservation. In a typical winter day in southern Hunan Province, the buildings with linear green walls and modular green walls increased the electricity consumption per household for heating by 1.2 to 1.5 kW · h. The buildings with green facade walls still had an energy-saving effect in winter, with an average household heating energy saving of about 0.2 kW · h.

Keywords vertical greening; green planning; green building; building energy efficiency; microclimate of city; energy-saving performance; Envi-met; TRNSYS; ecological benefit; elements of carbon sink

(责任编辑:陆文昌)