

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-720-11

空气源热泵供热蓄热技术在温和地区的优化应用

李建尧¹ 肖云峰¹ 黄磊²

(1. 昆明市建筑设计研究院股份有限公司 昆明 650000;

2. 云南新朗和暖通技术服务有限公司 昆明 650000)

【摘要】 以温和地区代表城市-昆明(温和 5A2 区)某标准化花卉种植大棚冬季空气源热泵供热系统为研究对象。通过建立能耗模型并以此为基础进一步地深挖该系统的节能潜力。以空气源热泵供热系统的高效运行区间作为系统优化运行的着力点,创新性的应用空气源热泵供热蓄热技术对源侧能耗及用户侧热负荷需求进行优化调配,达到“低能高就、削峰填谷”的节能效果。在没有阶梯电价的能源政策背景下,基于温和地区有利的气候条件,以“气候条件与负荷特性的变化规律、气象资源与设备特性的动态耦合、蓄热技术与运行策略的优化适配”作为分析框架。通过对该研究对象第一个供暖季的实测运行数据分析来验证该供热蓄热系统的节能性。意在为空气源热泵供热系统在温和地区的优化应用提供思路和借鉴。

【关键词】 能耗计算模型; 空气源热泵; 空气源热泵蓄热; 节能性分析

中图分类号 TU833 文献标志码 B

Optimized Application of Air Source Heat Pump Heating and Heat Storage Technology in Mild Regions

Li Jianyao¹ Xiao Yunfeng¹ Huang Lei²

(1. Kunming Architectural Design & Research Institute Co., Ltd, Kunming, 650000;

2. Yunnan Xinlang HVAC Technical Service Co., Ltd, Kunming, 650000)

【Abstract】 This paper takes an air-source heat pump heating system in winter for a standardized flower planting greenhouse in Kunming (Mild Zone 5A2), a representative city in mild regions, as the research object. By establishing an energy consumption model, the energy-saving potential of the system is further explored. Taking the high-efficiency operation range of the air-source heat pump heating system as the focus of system optimization and operation, the innovative application of air-source heat pump heating and thermal storage technology optimizes and allocates the energy consumption on the source side and the heat load demand on the user side, achieving the energy-saving effect of "low energy input with high efficiency output and peak load shifting". Against the background of energy policies without tiered electricity prices, and based on the favorable climatic conditions in mild regions, the analysis framework is constructed with "the variation law of climatic conditions and load characteristics, the dynamic coupling of meteorological resources and equipment characteristics, and the optimal adaptation of thermal storage technology and operation strategies". The energy-saving performance of the heating and thermal storage system is verified through the analysis of measured operation data from the first heating season of the research object. This study aims to provide ideas and references for the further optimized application of air-source heat pump heating systems in mild regions.

【Keywords】 Energy consumption calculation model; Air-source heat pump; Air-source heat pump thermal storage; Energy-saving analysis

作者(通讯作者)简介: 李建尧(1987.04-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 175387095@qq.com
收稿日期: 2025-07-09

0 引言

花卉作为云南省重要的经济型农产业,冬季温室供暖系统的能效提升是我省响应“十四五规划—推动碳达峰、碳中和,实现绿色发展”的重要议题。作为温和气候区典型代表城市—昆明(5A2),虽然全年大部分时间内少有供热需求,但由于生产工艺需求,花卉种植大棚在冬季仍应有充分的供热保证。空气源热泵作为可再生能源应用技术,因其清洁高效适用性广泛等诸多优点成为了温和地区供暖热源的首选。然而其制热能力随室外气温降低而衰减的症结一直以来都是业内备受关注的重点。本文意在将空气源热泵与蓄能技术相结合,在平衡冬季建筑热负荷峰谷需求的同时,提高热泵工作区间的运行效率,以此为手段整体提升系统的运行能效。

传统意义上的谷电蓄能技术实现能量从时间上的转移,现有研究多聚焦于寒冷地区利用峰谷电价的热泵供热蓄热系统的应用,主要关注点多在于对供暖空调系统经济性的提升。例如:冯国会等^[2]通过模拟,给出了不同使用需求下蓄热水箱在热泵谷电蓄热供暖系统中的运行方案。黄鑫等^[3]给出了确定电蓄热供暖用蓄热水箱的有效体积的计算方法和计算公式。陈进等^[4]从能效和经济两个方面提出了蓄热空调系统的主要技术评价指标、计算方法和测试方法。然而,对于无阶梯电价政策背景下的热泵蓄热技术的运用却少有人关注,特别是温和地区—昆明,其良好的气候资源本就非常适用于空气源热泵系统的运行。在此“利好”的前提下,利用蓄热技术深挖空气源热泵机组的节能潜力,通过合理科学的运行策略对建筑负荷及能耗进行优化调配,可以更大的发挥其节能优势。

本文以建筑能耗模型为研究基础,结合当地典型气象参数和热泵运行特性,提出基于蓄热技术“低能高就、削峰填谷”的供热优化方案。通过首个供暖季(12月、1月、2月)的实测数据验证:优化系统较数据能耗模型建立的传统运行模式,节能率达到21%。研究成果为温和地区空气源热泵供热蓄热技术的应用提供了新的思路和方向。

1 研究对象与建筑负荷特性

1.1 研究对象

研究对象搭载建筑为云南省昆明市嵩明地区

某一标准化花卉种植大棚的供暖系统,总建筑面积9883.6m²。由于一般花卉生长温湿度条件为:15~25℃/60%~80%。根据业主提供相关技术要求结合昆明地区的气候条件,全年室内相对湿度控制由机械通风系统及自动喷灌系统共同保证;在无工冷热源条件下,全年大部分时间内的室内温度均能满足要求,但为满足冬季大棚室内设计温度维持在15℃以上,仍需自备热源进行供热,拟采用空气源热泵机组作为供暖热源。根据以上内容创建建筑能耗模型(见图1),设定一个供暖季周期为:当年12月至次年2月(共90天)。综合考虑实际需求和建筑节能需求,分别按照日间和夜间设定大棚室内设计温度:≥20℃(白天:9:00~20:00);≥15℃(夜间:21:00~8:00)。

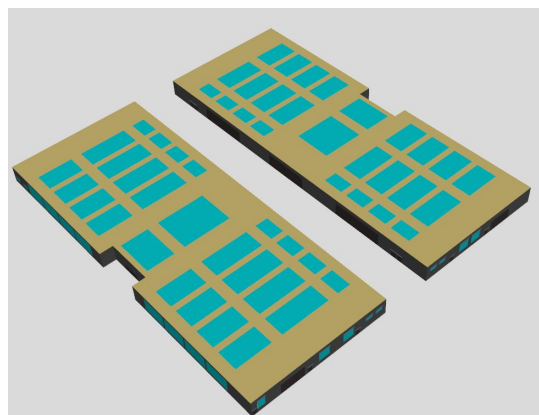


图1 研究对象

Fig.1 Research subject

1.2 建筑负荷特性

由于采用空气源热泵机组作为热源,拟以室外干球温度≥7℃(其额定制热工况下的进风干球温度)的时间段作为热泵高效运行区间并制定运行策略(见后文)。因此,需要对昆明地区冬季室外气象参数日变化规律进行分析。根据中国气象信息中心气象资料室编制的《中国建筑热环境分析专用气象参数集》对昆明地区12月、1月、2月逐时气象数据进行整理统计,供暖季全天24小时当中,室外干球温度≥7℃的区间范围大部分出现在10:00至20:00,其中,室外干球温度≥10℃的区间范围大部分出现在12:00至19:00。对供暖季室外逐时干球温度进行统计(见图2)。对供暖季每一天的夜间(21:00至次日清晨8:00,后同)及日间(12:00至19:00,后同)的室外干球平均温度进行统计(见图3)。

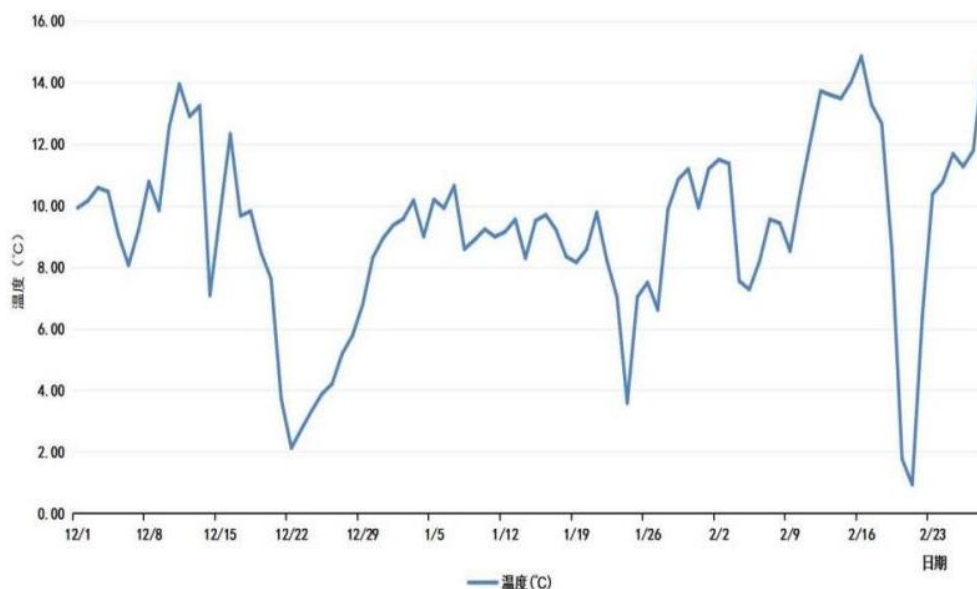


图2 供暖季室外逐时干球温度

Fig.2 Outdoor hourly dry - bulb temperature during the heating season

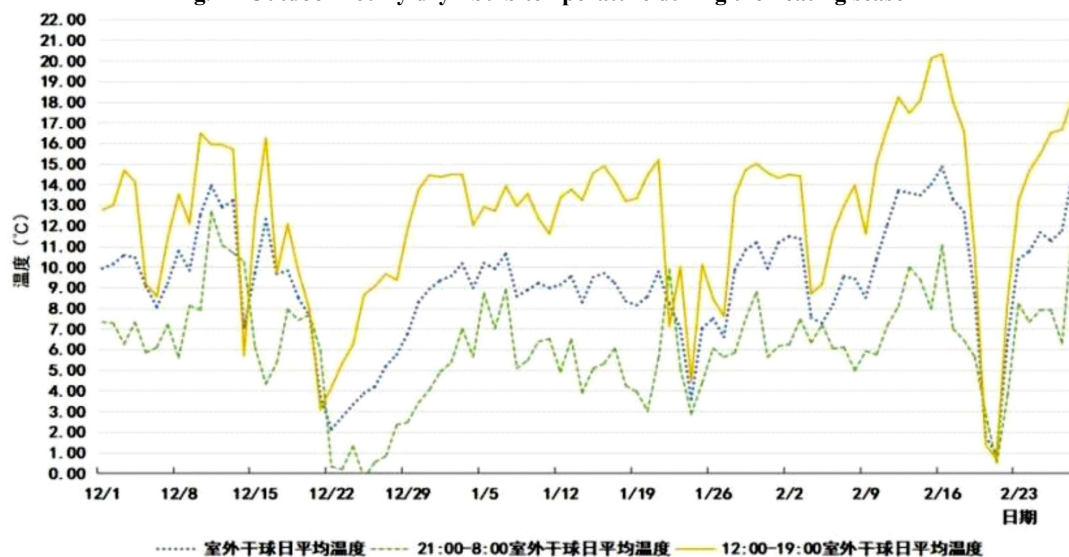


图3 供暖季室外干球平均温度

Fig.3 Average outdoor dry - bulb temperature during the heating season

笔者以国内某主流数字设计性能化分析平台 (GLD) 对该建筑建立能耗模型并对该模型供暖季逐时热负荷进行模拟计算。该能耗模型采用模型三维空间和设计参数信息与计算功能相结合的计算逻辑, 基于谐波反应法或辐射时间序列法 (RTS) 计算供暖季的冬季热负荷。首先, 根据该研究对象的建筑平面图创建建筑空间模型, 同步输入建筑房间的几何、物理信息 (如房间面积、房间高度、围护结构尺寸及热工性能参数等), 该部分内容将作为负荷计算参数依据被记录并在计算过程中进行

自动识别。其次, 根据该建筑空间模型对建筑房间的功能类型及设计参数进行设置, 如房间的室内设计参数、新风量、内扰 (设备、照明、人员等)。同时根据业主提供的生产工艺要求进行 24 小时的时间指派设置。最后, 使用负荷计算功能, 自动读取模型中已创建的空间及其信息。并采用谐波反应法或辐射时间序列法 (RTS) 对任意地点、任意朝向, 各类类型围护结构的各类房间进行逐项逐时负荷计算。对研究对象负荷计算主要设计参数进行统计 (见表 1)。

表 1 负荷计算主要设计参数

Table 1 Main design parameters for load calculation

参数	室温 (日间/夜间) /℃	通风 /(次/h)	渗透 /(次/h)	照明 /(W/m²)	外墙传热系数 /(W/m²·℃)	透光围护结构 传热系数/(W/m²·℃)	透光围护结构 太阳得热系数
数值	≥20℃/≥15℃	2	0.5	15	1.1	3.2	0.55

对该建筑供暖季逐时热负荷进行模拟计算得到: 冬季设计日计算热负荷为 1105kW (12 月 22 日 8 时), 日累计负荷最大值为 17772kWh (2 月 21 日)。供暖季总热负荷为 546229kWh; 各个月的累计计算热负荷分别为: 227599kWh (12 月),

184636kWh (1 月), 133994kWh (2 月)。其中, 对供暖季每一天的夜间 (21:00 至次日清晨 8:00, 后同) 及日间 (12:00 至 19:00, 后同) 的日累计计算热负荷进行统计 (见图 4)。

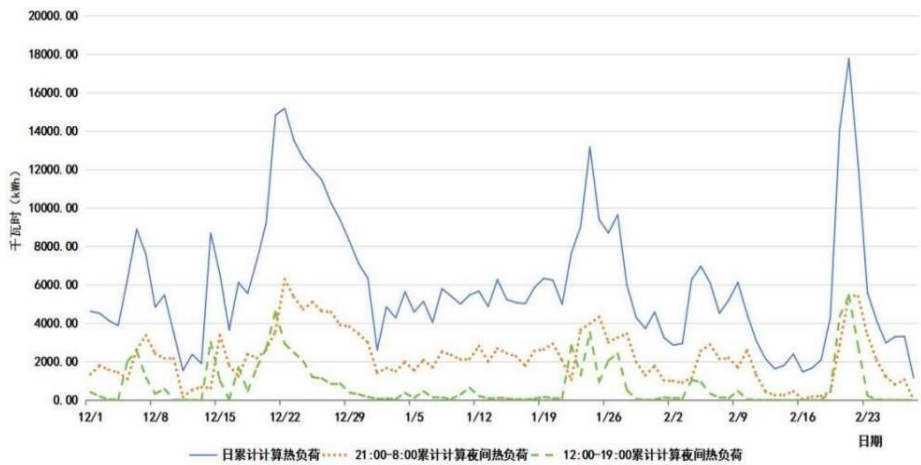


图 4 供暖季日累计计算热负荷

Fig.4 Daily cumulative calculated heat load during the heating season

由图 4 可知, 整个供暖季累计夜间总热负荷为 199952kWh, 占比 36.6%。各个月的累计夜间热负荷统计值分别为: 84159kWh (12 月), 73134kWh (1 月), 44078kWh (2 月); 累计夜间热负荷的最小值为: 140kWh, 最大值为 6291kWh。累计日间总热负荷为 68905kWh, 占比 12.6%; 各个月的

累计日间热负荷统计值分别为: 34975kWh (12 月), 17194kWh (1 月), 16736kWh (2 月)。累计日间热负荷的最小值为 0kWh, 最大值为 5450kWh; 根据统计结果分别整理计算供暖季各个月的夜间/日间室外干球计算平均温度、夜间/日间平均负荷 (见表 2)。

表 2 供暖季夜间/白天计算热负荷统计表

Table 2 Statistical table of calculated heat load during night/day heating season

数据	月份			
	12 月	1 月	2 月	供暖季
累计总热负荷/kWh	227599	184636	133994	546229
夜间 (21:00-8:00) 室外干球计算平均温度/℃	5.62	5.86	6.86	6.11
累计夜间总热负荷/kWh	84159	73134	44078	199952
夜间累计平均负荷/(kWh/d)	2715	2359	1574	2216
日间 (12:00-19:00) 室外干球计算平均温度/℃	11.08	12.63	13.86	12.52
累计日间总热负荷/kWh	34975	17194	16736	68905
日间累计平均负荷/(kWh/d)	1128	554	598	760

根据以上图表结果,供暖季夜间累计平均热负荷(2216kWh)远大于日间累计平均热负荷(760kWh)。整个供暖季夜间 21:00 至次日清晨 8:00,该时段内室外干球平均温度为 6.11℃;夜间累计热负荷小于等于 2500kWh 的天数共 56 天,其负荷分布区间占比为 62%,绘制供暖季夜间负荷分布区间图(见图 5)。整个供暖季日间 12:00 至 19:00,

该时段内室外干球平均温度为 12.52℃;日间累计热负荷小于等于 2000kWh 的天数共 75 天,其负荷分布区间占比为 83%,绘制供暖季日间负荷分布区间图(见图 6)。可见,由于研究对象在夜间室外干球温度较低情况下依然具有较高的供热需求,导致计算热负荷呈现出峰(夜间)谷(日间)波动的变化规律。

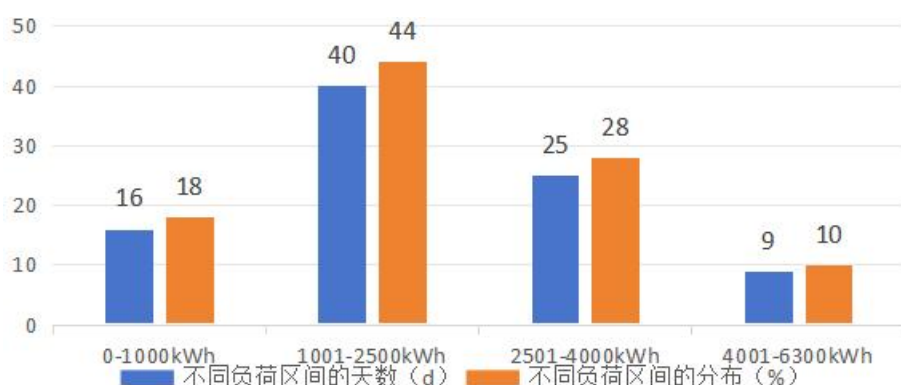


图 5 供暖季累计夜间负荷分布区间图

Fig.5 Chart of the distribution range of cumulative nighttime loads during the heating season

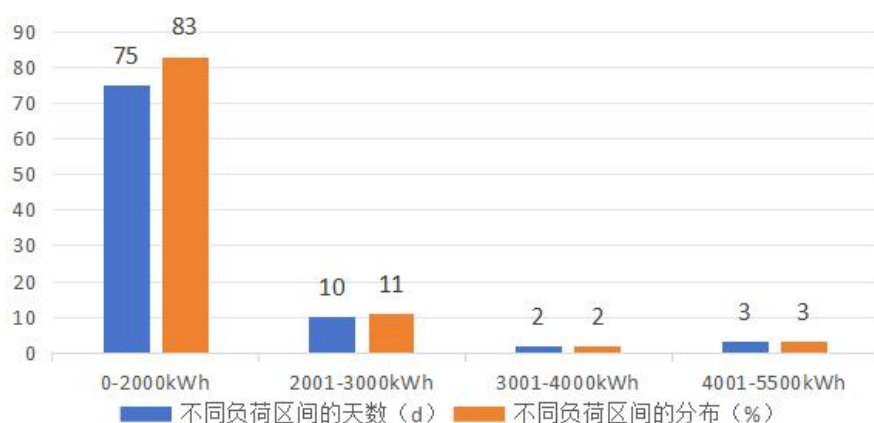


图 6 供暖季累计日间负荷分布区间图

Fig.6 Chart of the distribution range of cumulative daytime loads during the heating season

2 能耗模型分析及系统优化策略

2.1 供暖季热泵机组能耗模拟计算分析

根据以上负荷计算结果对研究对象搭载传统空气源热泵供热系统进行能耗模拟计算,拟设置两台变频螺杆式空气源热泵机组作为供暖热源,空气源热泵产热通过循环水泵直接输送至末端。额定工况下,该热泵机组制热量为 570kWh,耗功率为 158.2kW,性能系数(COP)为 3.6,热水供回水温

度为 45/40℃。根据昆明地区以往冬季室外干球温度的变化情况,极端最低温度可能低至-5℃左右,对应空气源热泵机组的蒸发温度还将更低。因此,笔者以某主流制造商提供的同类产品室外温度区间-7~7℃内的相关技术参数为依据,绘制其制热量、耗电量及性能系数(COP)的变化曲线如图 7 所示。

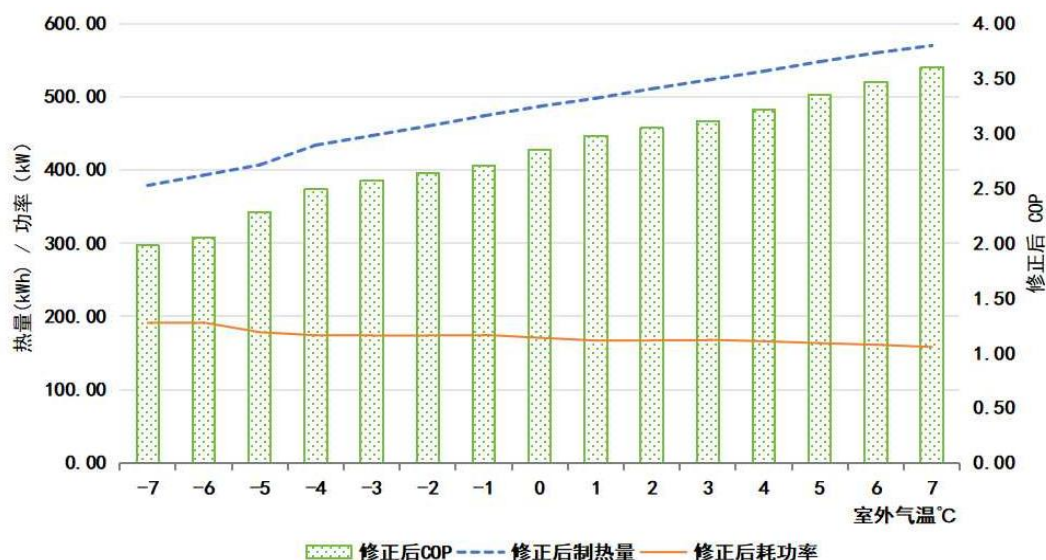


图 7 空气源热泵机组制热能力变化曲线

Fig.7 Heating capacity change curve of air - source heat pump units

由图 7 可知, 室外温度由 7℃ 降至 -5℃ 时, 热泵机组制热量由 570kWh 降低至 407kWh, 性能系数 (COP) 由 3.6 降低至 2.28。气温每下降 1℃, 其制热量的平均下降率约为 3%/℃, 其性能系数的平均下降率约为 3.5%/℃。该分析结果再次印证了环境温度对于空气源热泵机组制热性能的影响巨

大。在此基础上对传统空气源热泵供热系统能耗模型在整个供暖季的日累计计算能耗及夜间累计计算能耗进行整理统计 (见图 8)。并根据统计结果对整个供暖季热泵机组的平均 COP_平 及夜间平均 COP_夜 进行计算 (见表 3)。

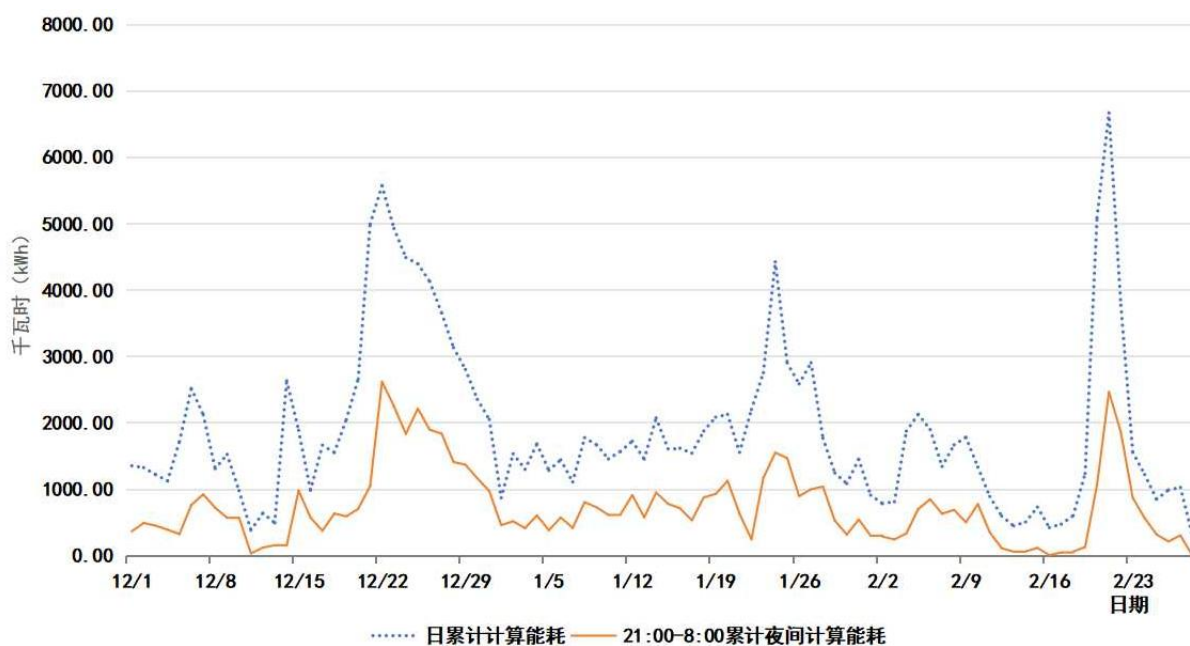


图 8 供暖季热泵机组累计计算能耗统计

Fig.8 Statistics on the cumulative calculated energy consumption of heat pump units during the heating season

表 3 供暖季热泵机组能耗统计及性能系数计算表

Table 3 Energy consumption statistics and performance coefficient calculation of heat pump units during heating season

数据	月份			
	12 月	1 月	2 月	供暖季
总热负荷/kWh (见表 2)	227599	184636	133994	546229
累计计算能耗/kWh	72729	56769	41992	171490
平均 COP _平	3.13	3.25	3.19	3.19
夜间热负荷/kWh (见表 2)	84159	73134	44078	201372
夜间累计计算能耗/kWh	28579	22997	13983	65560
夜间平均 COP _夜	2.94	3.18	3.15	3.07

由表 3 可知,供暖季热泵机组的累计计算能耗为 171490kWh,各个月分别为:72729kWh(12 月)、56769kWh(1 月)、41992kWh(2 月);夜间累计计算能耗为 65560kWh,各个月分别为:28579kWh(12 月)、22997kWh(1 月)、13983kWh(2 月)。根据表 2 中负荷计算结果及表 3 中的能耗计算结果对热泵机组的性能系数进行计算,供暖季热泵机组的平均性能系数 $COP_{平}$ 为 $3.19 < 3.6$ (该热泵机组在标准工况下的 COP)。夜间平均性能系数 $COP_{夜}$ 仅为 3.07 更是低于供暖季该热泵机组的平均性能系数 (3.19)。

究其原因,本研究对象区别于一般热泵供热系统分时段区间工作的运行规律。在整个供暖季,夜间热负荷占比接近 36.6% (见前文),夜间能耗占比接近 38.2% (65560/171490)。说明为满足夜间供热需求,空气源热泵机组需要在不利的室外环境下连续运行,其制热能力及性能系数的衰减尤为明显。相反,在日间室外环境较为有利的条件下,虽然热泵机组运行效率较高,但由于日间供热需求较少,导致整个供暖季的平均能效低于标准值。

2.2 系统优化及运行策略方案

为解决上述问题,尽量保证空气源热泵机组高效运行,搭建热泵与源侧蓄热水箱相结合的双热源热泵供热蓄热系统。拟对该系统制定运行策略方案如下:

(1) 夜间 21:00 至次日清晨 8:00 的时间段内 (共 11 个小时),室外干球计算平均温度维持在 6℃ 左右 (见表 2)。在该时间段内室内热负荷需求随气温降低逐渐增加,主要利用蓄热水箱作为热源向大棚进行供热,不足时切换至热泵机组供热。

(2) 日间 12:00 至下午 19:00 的时间段内 (共

7 个小时),室外干球计算平均温度维持在 12℃ 左右 (见表 2)。由于太阳辐射及土壤的蓄热性能,在该时间段内室内热负荷需求较少甚至没有,利用热泵机组对大棚供热,同时对蓄热水箱进行蓄热。

(3) 其余时间段内,室外干球计算平均温度基本维持在 7℃ 左右,为节省蓄热水箱的初投资,利用热泵机组对大棚进行供热。

(4) 考虑到整个供暖季的实际运行情况,当全天室外气温较低,不具备按照上述第 (1)、(2) 条运行策略执行时,只利用热泵机组对大棚进行供热。

由于供暖季夜间累计热负荷小于等于 2500kWh 的天数共 56 天,该负荷区间分布占比为 62% (见图 5)。综合考虑用热保证率和蓄热水箱的初投资,即按照夜间累计供热量 2500kWh 计算蓄热水箱的容积。考虑到蓄热水箱的热损失及末端换热器由于供水温度降低后供热能力的衰减,设计蓄热水箱的起始供/回水温度为 45/40℃,平均最高水温为 42.5℃;终了供/回水温度为 35/30℃,平均最低水温为 32.5℃;蓄热水箱供热时的供回水温差取 5℃。即当用户侧回水温度低于 30℃ 时,蓄热水箱停止供热转而利用热泵机组提供热量。蓄热水箱的容积 V_x 可由式 (1) 进行计算。

$$V_x = \frac{Q_p \times 3.6}{C \times (T_1 - T_2)} \times K = \frac{2500 \times 3.6}{4.187 \times (42.5 - 32.5)} \times 1.1 = 236 \text{ m}^3 \quad (1)$$

式中: V_x 为蓄热水箱的容积, m^3 ; Q_p 为蓄热水箱的设计供热量, 2500kWh; C 为水的比热容, 4.187kJ/(kg·℃); T_1 为蓄热水箱的平均最高水温,

取 42.5℃; T_2 为蓄热水箱的平均最低水温为, 取 32.5℃; K 为考虑水箱散热损失及输配热损失的安全系数, 取 1.1。

按照研究对象搭载热泵机组的制热量复核, 在标准工况下, 该热泵机组满负荷率加热该蓄热水箱的理论时长 T 可根据式 (2) 计算。

$$T = \frac{Q_p}{q \times n} \times K = \frac{2500}{570 \times 2} \times 1.1 = 2.41\text{h} \quad (2)$$

式中: T 为加热蓄热水箱理论上所需要的时长, h; q 为空气源热泵机组额定制热量, 570kW; n 为台数, 共 2 台; Q_p 、 K 的物理意义同式 (1)。

根据以上计算结果, 拟设置两个 120m³ 的蓄热

水箱作为夜间供热主要热源, 保证供暖季大部分时间的夜间供热需求。由于在热泵机组满负荷运行的情况下, 加热蓄热水箱的时长仅需 2.41 个小时, 小于运行策略 2 中热泵机组的理论运行时长(12:00 至 19:00, 共 7 个小时)。虽然在运行策略 2 的模式下热泵机组同时供热蓄热, 实际加热蓄热水箱的时长会比理论计算值 (2.41h) 更长。但考虑到该时段内室外气温较高, 室内少有供热需求且热泵机组的实际制热量和运行效率都会显著提高。所以笔者认为在该时段热泵机组按照运行策略 2 进行供热蓄热是合理可行的。空气源热泵供热蓄热系统流程如图 9 所示。

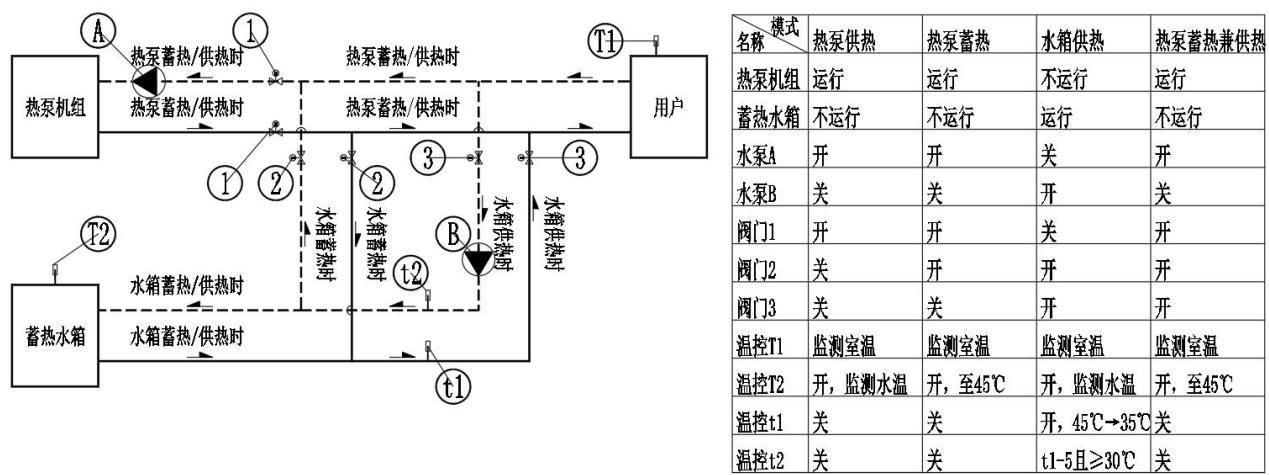


图 9 空气源热泵供热蓄热系统流程图

Fig.9 Flow chart of air - source heat pump thermal storage heating system

3 节能分析

为实现热量计量及其远程通信功能。研究对象在热源侧两台风冷热泵机组的回水侧设置了一种集成温度传感器 (量程 0~100℃, 精度±0.1℃)、流量传感器 (量程 0~150m³, 精度±0.5%)、压力传感器 (量程 0~1MPa, 精度±0.5%FS) 等多种类型的传感器于一体的超声波式热量计, 达到行业标准 2 级表的要求。该智能传感器结合先进的数据算法与热泵控制系统进行融合, 能够实现连续、精确、响应迅速的能效监测。优化后的供热方案于 2024 年 8 月进行实施 (见图 10), 于 2024 年 10 月下旬投入使用, 经过一个月的运行调试于同年 12 月正式运行。笔者及相关参建单位收集了第一个供暖季 (2024 年 12 月、2025 年 1 月、2025 年 2 月)

的实测运行数据进行整理统计, 将从整个供暖季空气源热泵机组实际供热量、实际耗电量与能耗模型中的理论计算数据进行对比分析从而对该供热蓄热系统的节能性进行佐证。





图 10 现场施工照片

Fig.10 Photos of the construction site

增设了蓄热水箱的空气源热泵供热蓄热系统

实测供热量与计算热负荷数据对比分析如图 11 所示；实测耗电量与计算能耗数据对比分析如图 12 所示；能耗对比分析及节能率计算如表 4 所示。根据前文的能耗模型的理论计算结果与实测数据进行对比，供暖季空气源热泵机组实际供热量为 530178kWh，对比计算热负荷 546229kWh（见表 2），共减少 16051kWh。夜间实际供热量为 42568kWh，对比夜间计算热负荷 201372kWh（见表 2），共减少 158804kWh。与此同时，供暖季空气源热泵机组实际耗电量为 135533kWh，对比计算能耗 171490kWh（见表 3），共减少 35957kWh。夜间实际耗电量为 18628kWh，对比夜间计算能耗 65560kWh（见表 3），共减少 46932kWh。

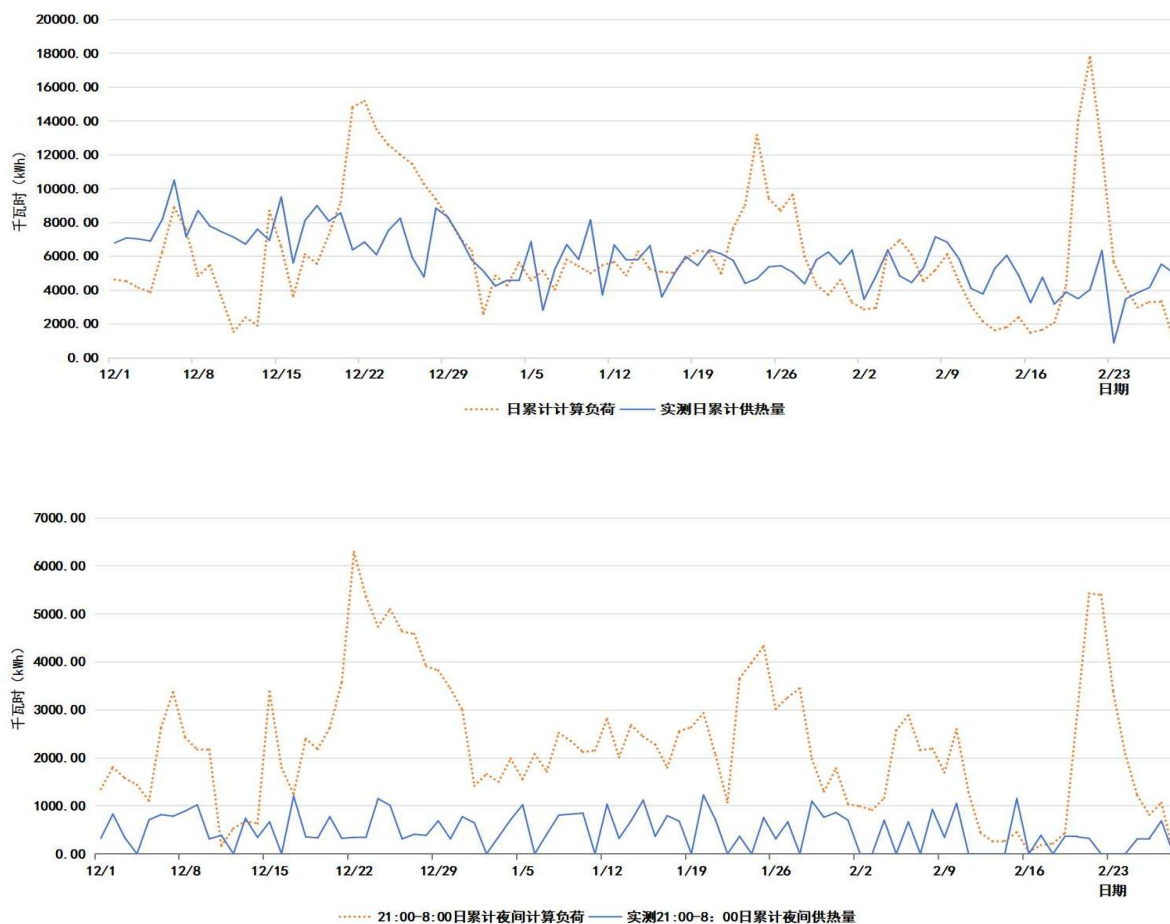


图 11 实测供热量与计算热负荷对比分析

Fig.11 Comparative analysis of measured heat supply and calculated heat load

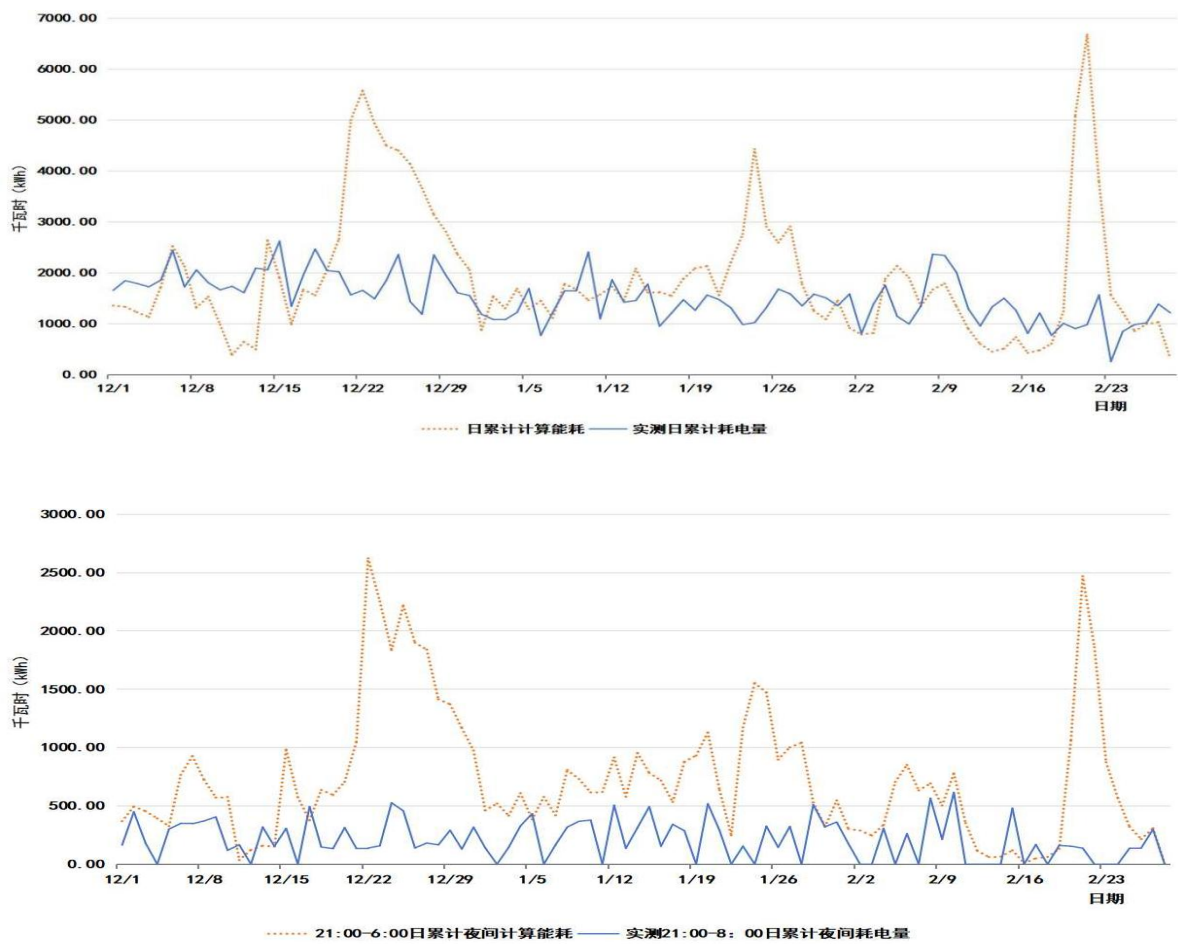


图 12 实测耗电与计算能耗对比分析

Fig.12 Comparative analysis of measured power consumption and calculated energy consumption

表 4 供暖季热源侧能耗计算统计表

Table 4 Calculation and statistics of energy consumption on the heat source side during the heating season

数据	月份			
	12 月	1 月	2 月	供暖季
实测制热量/kWh	230826	167905	131447	530178
实测耗电量/kWh	57440	43133	34959	135533
实测夜间制热量 /kWh	16889	17384	8294	42568
实测夜间耗电量 /kWh	7360	7453	3815	18628
系统平均 COP ₀	4.02	3.89	3.76	3.91

根据以上结果, 整个供暖季系统实测供热量与理论计算热负荷基本持平。热泵机组的能耗较理论计算值有大幅下降。节能率可按为式 (3) 进行计算。

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中: η 为节能率, %; N_0 为理论计算能耗 (见表 3), kWh; N 为实测能耗 (见表 4), kWh。

根据式 (3) 计算整个供暖季的节能率为 21%; 计算平均能效 (COP₀) 为 3.91。其中, 月节能率和计算平均能效 (COP₀) 分别为: 12 月 (21%/4.02), 1 月 (24%/3.89), 2 月 (17%/3.76)。实际热泵机组运行平均性能系数相较于额定工况 (3.6) 提高 8.61%; 相较于理论计算值 (3.19) 提高 22.5%。可见, 研究对象的实际供热需求与能耗模型的理论计算值基本一致, 而实际能耗降低的主要原因确实得益于蓄热水箱对热负荷的调峰作用以及在运行策略 2 的模式下热泵机组的高效运行。

4 结论

本文提出一种基于空气源热泵机组供热与蓄

热技术协同优化的系统方案,旨在解决空气源热泵系统在低环境温度下运行制热量衰竭、能效低下的问题。在冬季供热需求持续且稳定的前提下,如何实现能源高效利用与负荷供给的动态平衡成为本次研究的主要方向。结合温和地区有利的气候条件,充分挖掘潜在的“气候红利”,通过负荷计算及能耗数据特性分析,科学合理的制定系统运行策略,对不同时段的热负荷需求进行优化调配,为空气源热泵机组创造理想的运行环境。利用热泵机组高效运行区间进行蓄热,将高效时段产生的热能储备至低效时段使用,达到“低能高就、削峰填谷”的节能效果。使系统能效得到大幅提升。

这样的设计理念也适用于空调制冷系统。例如,在制冷季节,利用夜间冷凝温度较低的特性,在负荷低谷区间,让制冷机组高效运行进行蓄冷,在负荷峰值区间进行释冷,同样也能对冷负荷进行“动态调峰”。这样“主动调节”的设计理念在能源政策更加开放、灵活的地区,系统运行的节能性和经济性将更为突出。

参考文献:

- [1] 国务院公报“十三五”节能减排综合工作方案[EB/OL]. 中华人民共和国中央人民政府,国发(2016)74号.<http://www.gov.cn/>.
- [2] 冯国会,李艾浓,常莎莎,等.热泵谷电蓄热供暖系统设计匹配模式的研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(4):714-722.
- [3] 黄鑫.如何合理确定电蓄热供暖蓄热水箱的容积[J].建筑科学,2000,16(6):57-60.
- [4] 陈进,成建宏,胡明霞.《蓄能空调系统绩效评价与计算测试方法》制定思路分析[J].制冷与空调,2018,18(11):83-86.
- [5] 刘澄宁,梁星宇,邵亮亮,等.基于随机负荷预测的热泵热水系统节能运行策略优化[J].制冷学报,2023,44(6):36-42.
- [6] 蒋绿林,蔡佳临,吕长宁,等.温室大棚多热源热泵供暖系统的研究[J].太阳能学报,2019,40(10):2748-2754.
- [7] 倪龙,等.空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J].制冷学报,2017,38(4):23-30.
- [8] 王汝金,袁旭东,贾甲,等.蓄热温度对水蓄热型空气源热泵系统供暖经济性的影响[J].制冷与空调,2021,21(2):33-37.
- [9] 乔春珍,胡宇晨,朱成凤,等.空气源热泵蓄热供暖运行策略优化研究[J].节能,2023,42(8):30-32.
- [10] 刘胜,梁珍.采用空气源热泵的温室大棚水蓄热供暖系统模拟研究[J].制冷与空调,2023,23(4):15-21.
- [5] Mmerek D, Akpaca W D. Investigation of students' comfort and adaptation in university dormitories in humid subtropical climatic area in winter in Chongqing, China[J]. Cogent Engineering, 2021,8(1): 1968740.
- [6] 韩杰,张国强,周晋.夏热冬冷地区村镇住宅热环境与热舒适研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(6): 13-17.
- [7] 徐樱宸.上海高校宿舍舒适性与空调能耗关系研究[J].建筑节能(中英文),2023,51(5):97-102.
- [8] Corgnati S P, Ansal di R, Filippi M. Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches[J]. Building&Environment, 2009,44(4):785-792.
- [9] Pereira A R, da Silveira Hirashima S Q, Oliveira R D. Thermal comfort assessment in a naturally ventilated university dormitory in tropical climate zone[J]. Brazilian Journal of Development, 2020,6(7):44119-44144.
- [10] 严舸飞,夏博,张新雨,等.停暖前后寒冷地区高校宿舍热舒适对比研究[J].建筑节能(中英文)2024,52(7):70-78.
- [11] 万勇,唐中华,晏旺.四川盆地地区高校学生宿舍冬季室内热环境研究[J].绿色建筑,2015,7(4):50-53.
- [12] 梁晶晶.夏热冬暖地区高校宿舍居住者行为对建筑能耗的影响研究[D].广州:广东工业大学,2022.
- [13] 李文杰.建筑室内自然环境下基于生理—心理的人体热舒适研究[D].重庆:重庆大学,2010.

(上接第 710 页)