

严寒地区住宅建筑夏季过热评估及应对策略研究

赵伯伦¹, 于洋², 徐艺桐³, 于嘉慧⁴, 郭海博⁵

摘要: 在全球变暖的趋势下, 以冬季保温为主要设计原则的严寒地区住宅, 夏季室内温度“过热”的现象不断加剧, 居住者的热舒适度与身心健康状况正受到严峻的威胁。于 2021 年 5-9 月间现场实测了长春某住宅室内温度的变化情况, 基于 EnergyPlus 模拟并评估、预测了被测住宅 2007-2020 典型气象年和未来不同碳排放情景下的室内过热的风险。实验和模拟的结果显示: 被测卧室和客厅的过热小时数均远超 CIBSE TM59 规定的指标; 相较于高碳排情景 (RCP8.5), 低碳排情景 (RCP2.6) 下住宅过热时长有显著下降趋势。以此提出严寒地区住宅建筑的过热应对策略和政策建议, 为解决室内夏季过热风险进而营造健康舒适的人居环境提供有益参考。

关键词: 严寒地区; 住宅建筑; 室内过热; 气候变化; 情景模拟; 碳排放

Keywords: Severe cold region; Residential building; Indoor overheating; Climate change; Scenario simulation; Carbon emission

资助项目情况: 国家自然科学基金面上项目 (52078153); 哈尔滨工业大学研究生教学改革项目——研究生“点子”专题项目 (23Z-DZ036)

1 引言

全球气候变化导致欧洲、北美、东亚等北半球中高纬度地区极端高温事件的频率、幅度和持续时间增加^[1], 也对我国住宅建筑的气候适应性提出新的挑战。在当前的气候环境下, 以保温为主要设计准则的严寒及寒冷地区住宅建筑, 夏季室内温度升高的现象在不断地加剧^[2]。据研究预测, 2018 年我国年平均气温比 1901 年高约 1.2 °C^[3], 2030 年将比 1961—1990 年的平均温度高 1.5 °C-2.8 °C, 2080 年将高出 3.4-5.3 °C^[4], 我国作为世界上最大的发展中国家, 严寒地区聚集着全国近半的人口, 因夏季气温变化导致的建筑节能考验非常艰巨。

近 40 年, 我国严寒^[5]主要城市夏季平均温度有显著升高趋势, 当地住宅建筑夏季过热现象也日益严重。这不仅影响了室内环境的热舒适度, 还会造成居住者出现睡眠质量变差、工作效率下降的困扰, 影响其心理的健康^[6]。极端情况下, 长期过热还可能导致呼吸系统、心脑血管疾病及热射病患病风险的增加, 甚至危及生命^[7]。因此, 保障夏季住宅建筑维持适宜的室内温度, 并提供适度的通风散热措施、采取科学的热防护手段, 逐渐成为维护严寒及寒冷地区居住者身体健康和生活品质的关键任务。

¹ 赵伯伦, 哈尔滨工业大建筑与设计学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 博士研究生

² 于洋, 天津大学建筑学院, 博士研究生

³ 徐艺桐, 哈尔滨工业大建筑与设计学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 博士研究生

⁴ 于嘉慧, 哈尔滨工业大建筑与设计学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 博士研究生

⁵ 郭海博(✉), 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 教授, guohb@hit.edu.cn

在此背景下，亟须通过实测和模拟以验证严寒地区代表城市住宅建筑夏季过热的现象和潜在风险，探讨不同碳排放情景对建筑室内热环境的影响，以此提出完善严寒地区建筑评价标准和设计规范的建议，从而保障住宅建筑冬季室内温度不受影响的前提下，解决夏季室内过热问题。

2 研究方法

2.1 方法框架

研究方法框架如图 1 所示，包含环境监测、分时模拟和过热评估三个流程。首先，2021 年 5 月至 9 月期间，使用温湿度传感器监测了长春某住宅区 18 层住宅楼的室内温度，记录建筑过热时长（Hours of exceedance, H_e ）并验证模拟数据。其次，使用皮尔逊相关系数（Pearson's R）、回归方程和均方根误差（RMSE）来检验监测数据与模拟数据之间的拟合关系，并使用 2021 年的天气数据来修正模拟参数设置；利用典型气象年（TMYx）和预测气象年（2030 年、2060 年）的模拟室内温度。最后，依据英国建筑服务工程师学会（CIBSE）的 TM59 标准，分别评估该住宅典型气象年（2007—2020 年）、2021 年、2030 年和 2060 年的建筑过热风险。

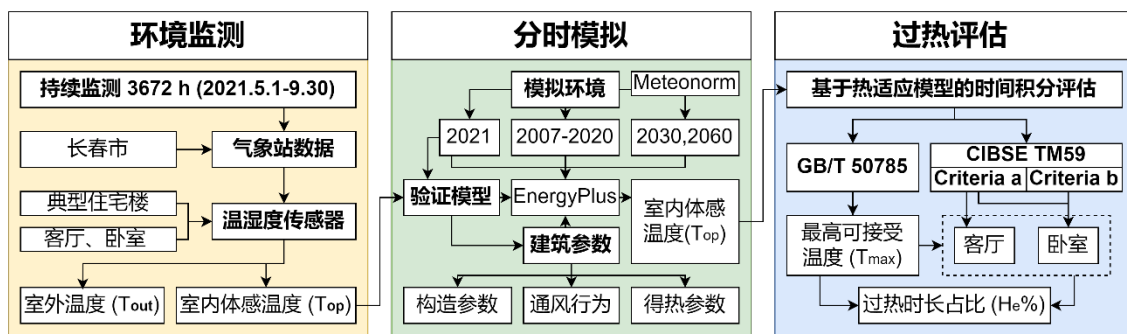


图 1 研究方法框架（图片来源：作者自绘）

2.2 监测方法

以长春市的一栋 18 层 4 单元的典型钢混住宅楼作为研究对象。在 2022 年 5 月 1 日至 9 月 30 日期间，选取该楼住宅楼 10 层某户的一个客厅（朝南）和两间卧室（南北朝向各一间）为主要研究对象。被测房间在此期间始终维持自然通风状态，未采用空调系统或机械通风措施。参照 GB/T 50785 的相关要求，在室内放置了 Ubibot-WS1 传感器进行逐时的温湿度监测与记录（图 2）。

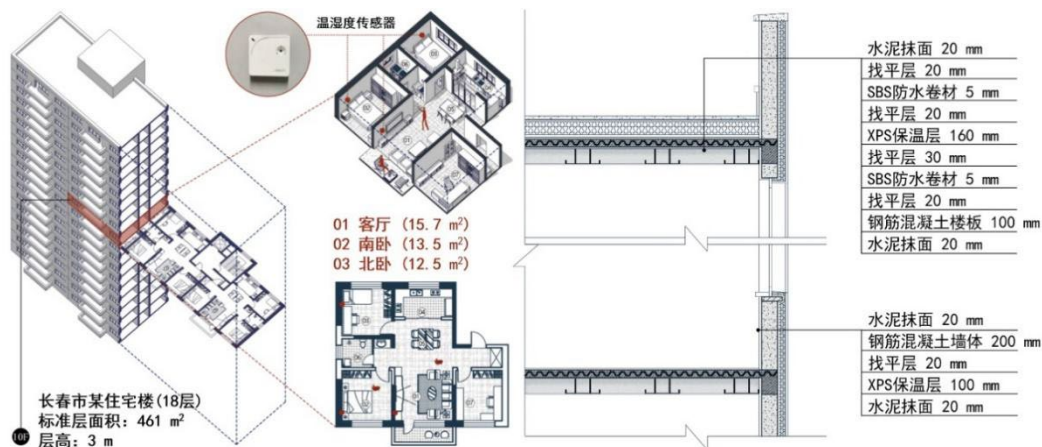


图 2 被测住宅的基本信息（图片来源：作者自绘）

3.3 模拟方法

基于 EnergyPlus 建立案例模型，模拟其室内温度逐时变化情况，从而评估三个被测房间夏季的过热程度。使用 2007—2020 年、2021 年以及 2030 年和 2060 年的气象数据作为模拟环境，参照建筑实际使用情况设置模拟参数。

(1) 气象参数设定。模拟所使用的四组气象数据：2007—2020 年的典型气象年 (TMY) 数据代表近期情况；2021 年的观测数据代表当年天气情况；2030 和 2060 年的预测数据由 Meteonorm 软件根据三种不同程度的碳排放情景 (RCP2.6、RCP2.6、RCP8.5) 生成。不同年份 5 月至 9 月室外温度变化对比如图 3 所示，可发现 2030 年和 2060 年在 RCP 8.5 情景下的夏季平均室外温度相较近期分别升高了 1.45 °C 和 3.16 °C。

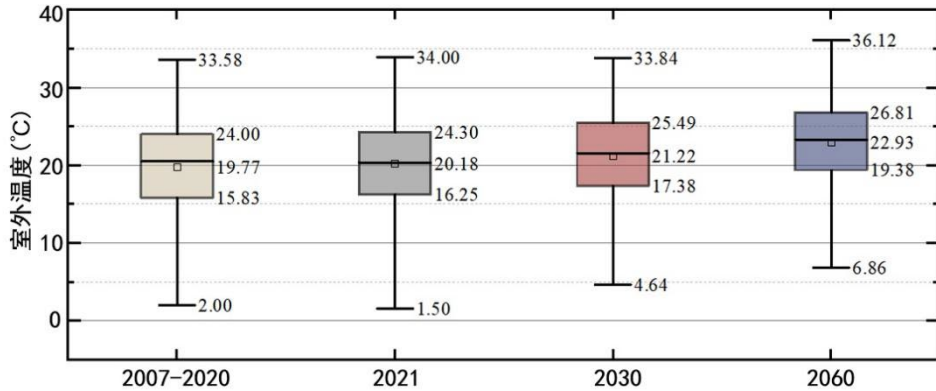


图 3 不同年份长春 5-9 月室外温度变化情况 (图片来源: 作者自绘)

(2) 构造参数确定。建筑外墙和楼板主要由钢筋混凝土构成，内部隔墙采用混凝土砖建造。外墙、屋面、地坪和窗户的热工设计参数均满足民用建筑热工设计规范 (GB 50176-2016)，使用热流计测得传热系数分别为 0.28 W/m² K、0.18 W/m² K、0.48 W/m² K、1.57 W/m² K。

(3) 建筑通风和得热参数设定。该住宅内部得热量、通风频率和居住时段根据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015-2021) 和住户的实际居住习惯进行设置。通风时段根据室外温度设定，不设置空调系统，各项参数如表 1 所示。

表 1 建筑通风和得热参数设定 (数据来源: 作者调查)

模拟参数	类别	值	时段
通风	渗透风	0.3 ac/h	5-9 月 (00:00-24:00)
			5-6 月 (08:00-20:00)
	自然通风	3 ac/h	7 月 (00:00-11:00, 14:00-24:00)
内得热	居住者	2 人/间	8 月 (00:00-24:00)
	照明	5 W/m ²	9 月 (08:00-18:00)
	设备	3.8 W/m ²	5-9 月 (00:00-24:00)

3.3 验证方法

以 2021 年的实测数据为基准，使用皮尔逊相关系数 (Pearson's R)、回归线斜率 (k) 和均方根误差 (RMSE)，校验模拟数据的准确性，可以根据公式 (1) 至 (3) 计算。为了使模拟模型适应未来的气象数据，根据 2030 年和 2060 年室外温度的变化适当调整了通风时段。

$$\text{Pearson's } R = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Meas}_i - \overline{\text{Meas}})(\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}})}{(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Meas}_i - \overline{\text{Meas}})^2})(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}})^2})} \quad (1)$$

$$\text{Sim} = k \cdot \text{Meas} + \text{int} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Meas}_i - \text{Sim}_i)}{n} \quad (3)$$

在公式（1）和（3）中， n 表示从5月至9月的3672小时， i 表示研究期间的每一小时。在公式（2）中， k 和 int 分别代表假设的线性方程的斜率和截距。

3.4 过热评估标准

以CIBSE TM59（Design methodology for the assessment of overheating risk in homes）^[8]作为评估建筑是否过热的标准，住宅的各房间必须满足以下两条准则。

（1）准则 a：从5月至9月期间，客厅和卧室中体感温度（ T_{op} ）与最大可接受温度（ T_{max} ）之差（ ΔT ）大于或等于 1°C 的时长不应超过居住总时长的3%。研究时段的过热时长百分比（ $H_e\%$ ）可根据以下公式（4）至（6）计算， T_{rm} 可以根据室外温度的运行平均值（ T_{rm} ）计算得出。

$$T_{rm} = (1 - \alpha)(T_{od-1} + \alpha T_{od-2} + \alpha^2 T_{od-3} \dots) \quad (4)$$

$$T_{max} = 0.33T_{rm} + 21.8 \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{op} - T_{max} \quad (6)$$

$$H_{e(a)}\% = \frac{\sum_{i=1}^{\text{occupied period}} w f_i h_i}{\sum_{i=1}^{\text{occupied period}} h_i} \times 100\%, \quad (7)$$

$$w f_i = \begin{cases} 1; & \Delta T \geq 1^\circ\text{C} \\ 0; & \Delta T < 1^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

（2）准则 b：就卧室而言，晚上10时至早上7时的室内温度高于 26°C 的时间不应该超过夏季总时长的1%。 $H_e\%$ 可以根据以下公式（9）至（10）计算。

$$H_{e(b)}\% = \frac{\sum_{i=1}^{\text{occupied period}} w f_i h_i}{\sum_{i=1}^{\text{occupied period}} h_i} \times 100\% \quad (9)$$

$$w f_i = \begin{cases} 1; & T_{op} \geq T_{lim} \\ 0; & T_{op} < T_{lim} \end{cases} \quad (10)$$

4 实验结果

温度实测结果和模拟结果都直接或间接证实了我国严寒地区住宅建筑存在严重的过热风险，并且在未来有继续恶化的趋势。验证结果与实测结果吻合度较好，证实了模拟结果的有效性。

4.1 实测结果

根据2021年夏季长春住宅的室内温度实测结果，被测房间均出现了较为严重的过热现象。这些房间在7月处于过热状态，温度主要在 $25\text{--}26^\circ\text{C}$ 之间波动，如图4所示。所有被监测的房间都不满足CIBSE TM59所规定的标准：客厅69 h（3.47%），南卧157 h（4.28%），北卧279 h（7.60%）；在睡眠时间室内温度超过 26°C 的时长分别为：南卧420 h（12.79%）和北卧309 h（9.41%）。

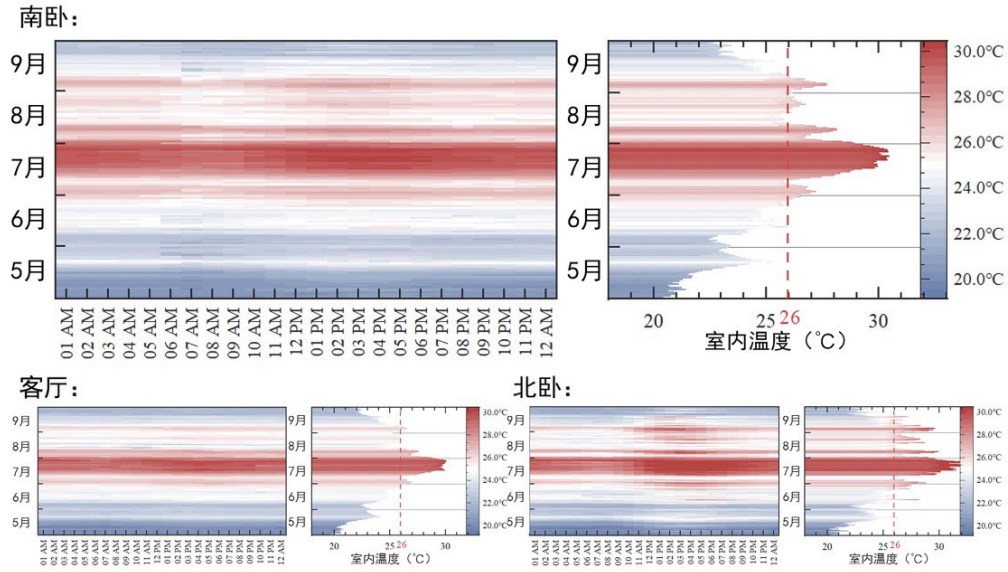


图 4 2021 年夏季被房间温度变化及分布情况（图片来源：作者自绘）

4.2 验证结果

为了提高实验结论的准确性，根据实测数据对模拟结果进行了验证。通过调整通风参数，使得模拟数据与实测数据相吻合。如图 5 所示，被测房间的回归线中的斜率(k 值)分别为 1.11、1.08 和 0.99。皮尔逊相关系数(Pearson's R)分别为 0.82053、0.8586 和 0.883。而均方根误差(RMSE)分别为 1.74388°C、1.85676°C 和 1.93382°C。以上指标均表明模拟数据与实测结果有较好的吻合度，表明所建模型可保障后续模拟结果的准确性和有效性。

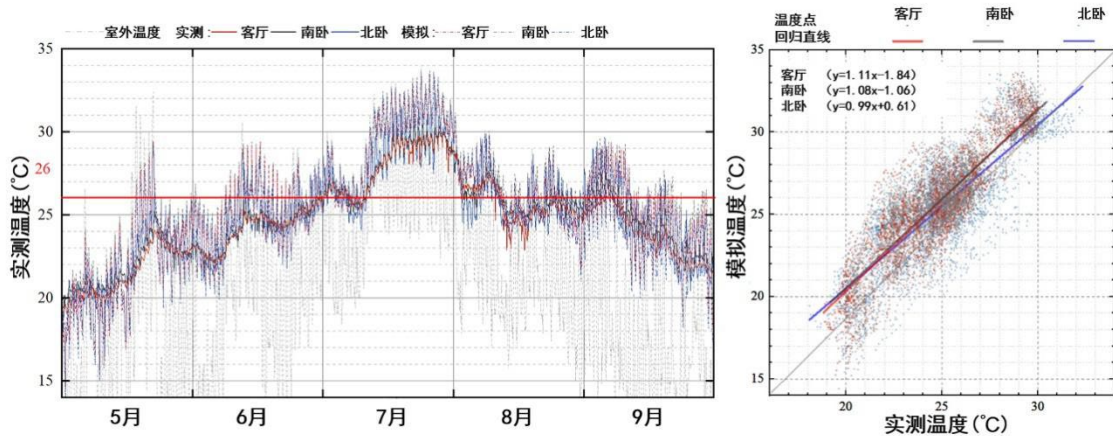


图 5 基于 2021 年实测数据的模型验证结果（图片来源：作者自绘）

4.3 模拟结果（2007 - 2020）

模型校正后，使用典型气象年 (TMY) 气象数据在 EnergyPlus 中模拟了长春住宅前 14 年（2007—2020 年）内的过热风险。所有房间同样呈现出了较严重的过热风险，其过热时长分别为：客厅 529 小时（26.60%），朝南卧室 742 小时（20.21%），朝北卧室 361 小时（9.83%）。在睡眠时间室内温度超过 26°C 的小时数分别为：南卧室 539 小时（16.41%），朝北卧室 406 小时（12.36%）。与 Bo 等在同气候分区（哈尔滨）住宅过热的研究所得的结果相近^[9]。图 6 呈现的是南卧室的室内温度和过热时长，可发现室内温度主要在 25°C 至 27°C 之间波动，超过 26°C 的时间占研究时段的 50% 以上，而过热主要发生在 7 月、8 月和 9 月。

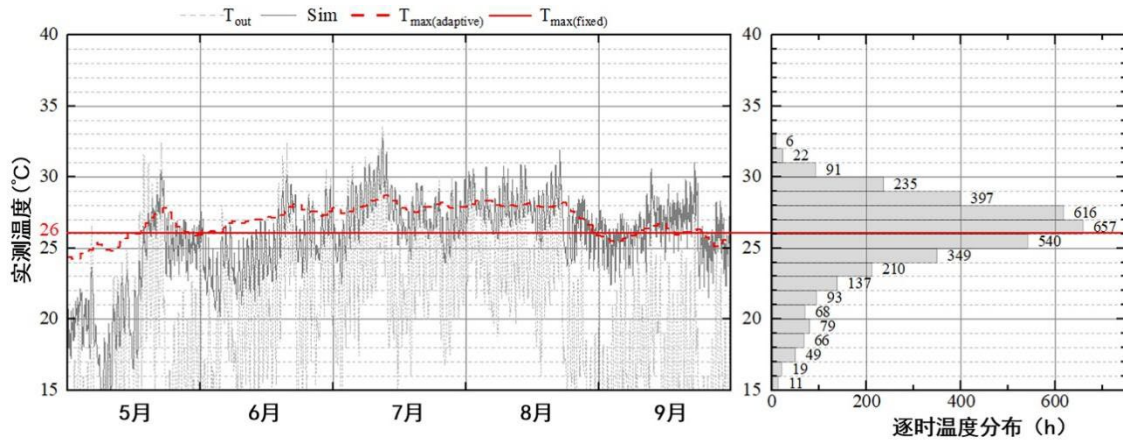


图6 南卧室内温度与过热时长的模拟结果（图片来源：作者自绘）

4.4 模拟结果（2030/2060）

进一步使用2030年和2060年不同碳排放情景下的气象数据进行模拟和评估，其结果均指向了不同程度的建筑过热风险，其过热时长如表2所示。以南卧为例，在RCP2.6碳排放情景下，2030年的过热时长为889h（24.21%），2060年为1131h（30.80%），睡眠时间室内温度超过26°C的时长分别为541h（16.47%）和696h（21.19%）；在RCP4.5碳排放情景下，2030年的过热时长为1007h（27.42%），2060年为1437h（39.13%），睡眠时间室内温度超过26°C的时长为561h（17.08%）和839h（25.54%）；在RCP8.5碳排放情景下，2030年的过热时长为1043h（28.40%），2060年为1719h（46.81%），睡眠时间室内温度超过26°C的时长分别为625h（19.03%）和892h（27.15%）。

总体来说，随着未来的发展，建筑过热时长呈现出显著的增加趋势。如图7所示，随着室外温度的升高，室内温度也相应升高，这一趋势在9月份尤为明显。室内过热时长的分布也发生变化，高温时长显著增加：2030年主要分布于24°C-29°C，2060年则主要分布于25°C-30°C。

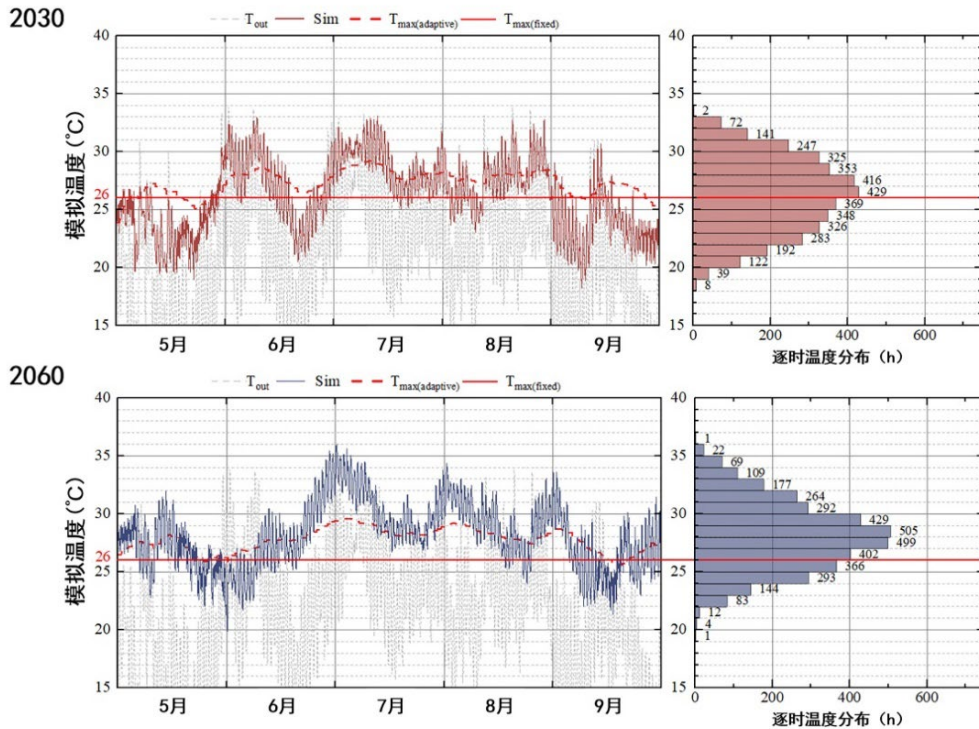


图7 2030年和2060年南卧室内温度模拟结果（图片来源：作者自绘）

表 2 不同碳排放情景对室内过热时长的影响（数据来源：作者模拟）

年份	碳排放情景	准则（a）				准则（b）					
		客厅		南卧		北卧		南卧		北卧	
		He(h)	He%	He(h)	He%	He(h)	He%	He(h)	He%	He(h)	He%
2030	RCP2.6	683	34.34%	889	24.21%	665	18.11%	541	16.47%	474	14.43%
	RCP4.5	687	34.54%	1007	27.42%	777	21.16%	561	17.08%	505	15.37%
	RCP8.5	785	39.47%	1043	28.40%	800	21.79%	625	19.03%	559	17.02%
2060	RCP2.6	797	40.07%	1131	30.80%	808	22.00%	696	21.19%	622	18.93%
	RCP4.5	967	48.62%	1437	39.13%	1101	29.98%	839	25.54%	756	23.01%
	RCP8.5	1143	57.47%	1719	46.81%	1377	37.50%	892	27.15%	809	24.63%

5 讨论

5.1 严寒地区住宅建筑过热缓解策略

以上实验结果证实了我国严寒地区住宅建筑存在一定的过热风险，并有可能随未来气候的变化逐渐加剧。如图 8 所示，2021 年的长春市平均和最高室外温度分别比 2007—2020 年高 0.41 °C 和 0.42 °C，而室内温度（以南卧为例）的增幅更大，最高温升高 0.59 °C，最低温升高 1.07 °C。而在 RCP8.5 情景下，2030 和 2060 年的室外温度分别升高 1.45 °C 和 3.16 °C，南卧过热时长也分别增加 194h 和 870 h。

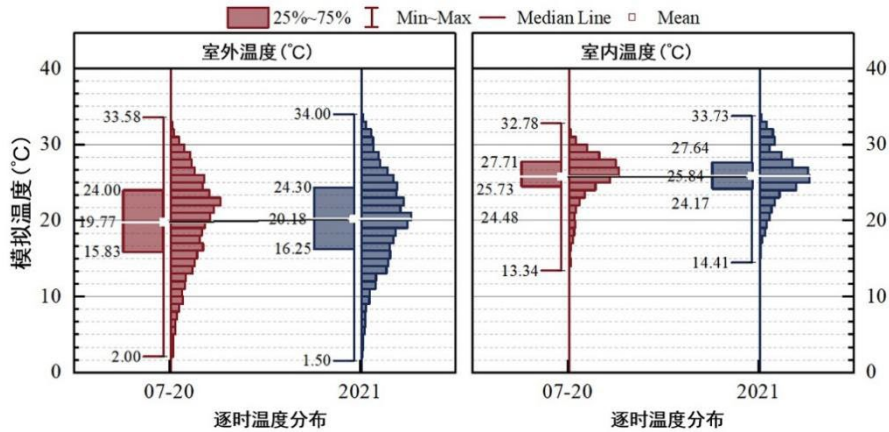


图 8 2007—2020 年和 2021 年夏季室内外逐时温度分布（图片来源：作者自绘）

然而，当前针对严寒地区建筑的相关政策重点关注在冬季保温的措施，缺乏夏季室内过热问题的考虑。在当前全球气候变化的背景下，亟待提出相关的设计对策并完善相关的评价标准，从而使得严寒地区住宅建筑能够同时兼顾冬季的保温和夏季的防热。结合目前国际相关领域的研究综述可知，合理地采取通风和遮阳措施是一类有效缓解住宅建筑过热的被动式解决方案¹⁰。因此，针对我国严寒地区住宅建筑的相关设计标准可提出一定的优化建议，如表 4 所示。

表 3 对相关设计规范和标准的修改建议（内容来源：作者调查）

规范/标准	内容	修改建议
民用建筑热工设计规范 (GB 50176-2016)	4.3.2 夏热冬暖和夏热冬冷地区建筑设计必须满足夏季防热要求，寒冷 B 区建筑设计宜考虑夏季防热要求（严寒地区无要求）。	严寒地区根据当地情况适当考虑夏季防热要求，寒冷建筑设计宜考虑夏季防热要求。
	6.3.1 透光围护结构太阳得热系数与夏季建筑遮阳系数的乘积宜小于表中限值。	增加“严寒地区透光围护结构太阳得热系数与夏季建筑遮阳系数乘积的限值”。
严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 (JGJ26-2018)	4.1.1 严寒和寒冷 A 区建筑的出入口应考虑防风设计，寒冷 B 区应考虑夏季通风。	严寒地区应在保证冬季防风的基础上，应考虑夏季通风设计
	4.2.2 寒冷 B 区夏季外窗太阳得热系数不应大于表 4.2.2-2 规定的限值（严寒地区无要求）	增加“严寒地区和寒冷地区外窗太阳得热系数的相关限值”的规定
	4.2.4 寒冷 B 区南向窗外窗宜设置水平遮阳（严寒地区无要求）。	增加“严寒地区南向窗外窗应酌情设置遮阳措施”。
	4.3.6 换气次数应大于 0.5h ⁻¹	增加“夏季室内换气时间和次数的限值”。

对于既有住宅建筑而言，调整自然通风模式是最便于实施的缓解过热措施。为了了解室内过热与通风模式之间的关系，进一步模拟了四种通风模式的过热缓解效果：原有通风(A)、增加夜间通风(B)、增加换气次数(C)、同时增加换气次数和夜间通风(D)。如表4所示，与原有通风(模式A)相比，使用模式B、模式C和模式D，分别使室内平均温度下降了0.72℃、0.52℃和1.12℃，分别将过热时长减少120h(3.27%)、218h(5.94%)和252h(6.86%)，这与Heracleus等人¹¹的研究结论相近。

表4 不同通风模式对室内过热时长的影响(内容来源:作者计算)

通风模式	准则(a)						准则(b)			
	客厅		南卧		北卧		南卧		北卧	
	H _e (h)	H _e %	H _e (h)	H _e %	H _e (h)	H _e %	H _e (h)	H _e %	H _e (h)	H _e %
模式A	529	26.60%	742	20.21%	361	9.83%	539	16.41%	406	12.36%
模式B	465	23.38%	622	16.94%	339	9.23%	461	14.03%	368	11.20%
模式C	411	20.66%	524	14.27%	286	7.79%	404	12.30%	320	9.74%
模式D	389	19.56%	490	13.34%	284	7.73%	376	11.45%	314	9.56%

5.2 低碳政策对建筑室内热环境的影响

由以上实验结果可知，未来不同的碳排放情景对室外温度变化影响显著(图9)。由于时间跨度较短，在2030年的三个情景中室外温度接近，RCP2.6情景下的室外温度比RCP8.5情景低0.19℃。而这种差异在2060年更为明显，RCP8.5情景下的室外温度分别比RCP4.5情景和RCP2.6情景下的室外温度高1.06℃和1.7℃。

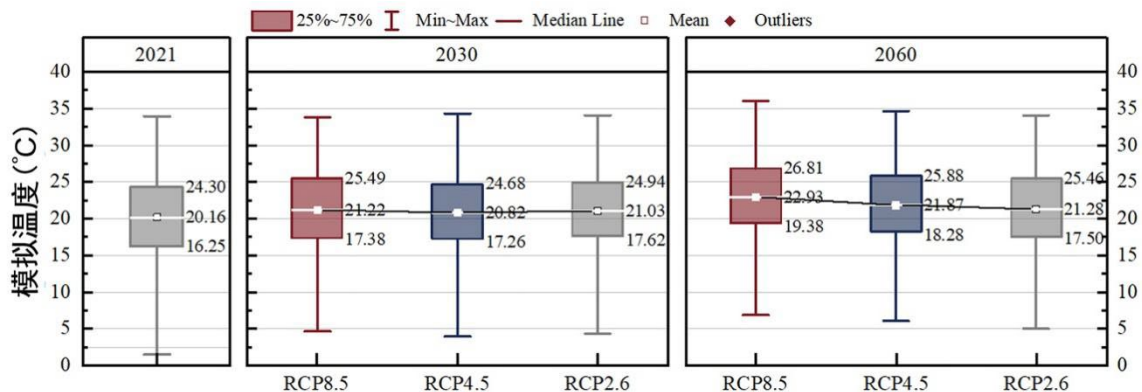


图9 不同碳排放情景下夏季室外逐时温度分布(图片来源:作者自绘)

低碳排放情景也相应地会减少建筑室内过热的时长。以南卧的室内温度模拟结果为例，2030年RCP2.6碳排放情景比RCP4.5和RCP8.5过热时长分别减少了36h(0.98%)和154h(4.19%)；2060年RCP2.6碳排放情景比RCP4.5和RCP8.5过热时长分别减少了282h(7.68%)和588h(16.01%)。图10呈现了夏季期间在不同碳排放情景下南卧的逐时温度分布情况。在低碳排放情景下，低温时长增加，高温时长(特别是超过28℃)显著减少：例如RCP2.6情景下超过28℃的时长在2030年和2060年分别减少105h和771h。因此，在双碳目标的背景之下，推行合理有效的碳排放政策对住宅建筑室内舒适的热环境营造至关重要。

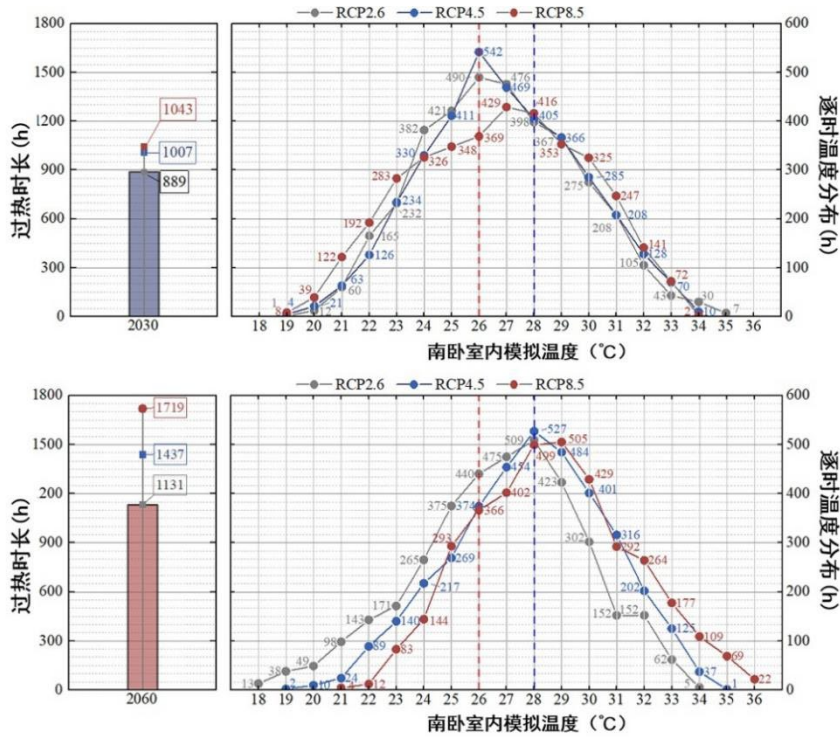


图 10 不同碳排放情景下长春住宅南卧夏季逐时温度分布情况（图片来源：作者自绘）

6 结论与展望

6.1 主要结论

鉴于全球气候变化趋势，研究通过实测和模拟结合的方式，分析了近期和未来气候变化、碳排放和建筑室内热环境的关系，揭示了我国严寒地区住宅建筑近期及未来不同碳排放情景下的过热风险，提出了政策调整建议和优化设计对策。主要结论如下：

（1）我国严寒地区住宅建筑存在夏季过热风险并有加剧趋势：2007-2020 年间，客厅过热时长为 559h（28.10%），南卧为 884 h（24.07%），北卧为 376 h（10.24%）；在 RCP8.5 碳排放情景下，2030 年南卧的过热时长为 1043 h（28.40%），到 2060 年则增加至 1719 h（46.81%）。

（2）兼顾严寒地区住宅建筑“冷-热双节能”的设计对策亟待提出。随着夏季室外温度的不断攀升，相关的设计规范和评价标准有必要结合考虑夏季防热的对策和措施。针对既有住宅建筑可通过调整通风模式来缓解室内过热程度，本研究所提出的通风模式能够有效减少南卧 42%的过热时长。

（3）合理的碳排放政策能有效延缓建筑过热发展的趋势。以被测住宅南卧为例，2030 年 RCP2.6 比 RCP8.5 碳排放情景减少 15%的过热时长，2060 年 RCP2.6 比 RCP8.5 碳排放情景减少 34%的过热时长。从长远来看，更为积极的碳排放政策对严寒地区住宅建筑的过热现象有显著的缓解效果。

6.2 未来的工作

当前关于建筑过热的研究仍处于初级阶段，在计算性思维和人工智能技术的加持之下，未来我国相关领域需要开展的工作主要涉及以下三个方面：

（1）建筑室内热环境的实测和模拟。虽然欧洲关于建筑过热的研究已成体系，但其研究成果不能盲目套用。为了应对气候变暖对我国建成环境领域的挑战，首先需要广泛开展现场实测，在此基础上借助未来气候预测模型和建筑模拟平台等手段，对当前和未来情景下建筑环境进行准确量化，从而厘清我国严寒地区建筑夏季过热现象的作用规律。

(2) 住宅建筑过热评价标准的制定。在全面调查住宅建筑夏季室内的热舒适数据的基础上,结合机器学习等人工智能手段完善更适配我国地域特征的人体热舒适模型,明确夏季室内最高可接受温度、热中性温度和舒适温度区间等指标,助力完善建筑过热的评价方法和标准,为后续建筑的优化设计和改造提供理论基础。

(3) 建筑过热的缓解措施和优化设计方法。结合过热评价标准,融合绿色节能技术,从建筑的平面布局、立面设计、围护结构等方面提出组合优化策略;基于 NSGA-II 算法提出适合我国严寒地区建筑特征的多目标优化设计方法,进而对接数据平台并应用于实际工程案例当中;基于 BIM 平台开发各类数据接口,实现多维数据信息协同,以此建立适应气候变化的严寒地区建筑技术集成化模型。

参考文献

- [1] Geng T, Jia F, Cai W, et al. Increased occurrences of consecutive La Niña events under global warming[J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 774-781.
- [2] D'Agostino D, de'Rossi F, Marigliano M, et al. Evaluation of the Optimal Thermal Insulation Thickness for an Office Building in Different Climates by Means of the Basic and Modified "Cost-Optimal" Methodology[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 24: 100743.
- [3] Blue Book on Climate Change of China 2022[R]. China Meteorological Administration, 2022.
- [4] Lei M, van Hooff T, Blocken B, et al. The predicted effect of climate change on indoor overheating of heritage apartments in two different Chinese climate zones[J]. *Indoor and Built Environment*, 2022: 1420326X221085861.
- [5] 何夏曼,姜超,汪君,等. CMIP6 与 CMIP5 全球气候模式对中国东北地区气温模拟性能的比较评估[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(11): 4194-4207.
- [6] Vardoulakis S, Dimitroulopoulou C, Thornes J, et al. Impact of Climate Change on the Domestic Indoor Environment and Associated Health Risks in the UK[J]. *Environment International*, 2015, 85: 299-313.
- [7] Wang Y, Wang A, Zhai J, et al. Tens of Thousands of Additional Deaths Annually in China Cities between 1.5 °C and 2.0 °C Warming[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [8] CIBSE. TM59 Design methodology for the assessment of overheating risk in homes [S]. London: CIBSE, 2017
- [9] Bo R, Chang W S, Yu Y, et al. Overheating of residential buildings in the severe cold and cold regions of China: The gap between building policy and performance[J]. *Building and Environment*, 2022, 225: 109601.
- [10] Schünemann C, Schiela D, Ortlepp R. How window ventilation behaviour affects the heat resilience in multi-residential buildings[J]. *Building and Environment*, 2021, 202: 107987.
- [11] Heracleous C, Michael A. Assessment of overheating risk and the impact of natural ventilation in educational buildings of Southern Europe under current and future climatic conditions[J]. *Energy*, 2018, 165: 1228-1239.