

郑高明, 李奕霖. 上海某居住建筑不同外围护结构节能与碳排放研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(7): 61–66. DOI: 10.20169/j. issn. 2095–2163. 25012001

上海某居住建筑不同外围护结构节能与碳排放研究

郑高明¹, 李奕霖^{1,2}

(1 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2 苏州科技大学 江苏省建筑碳中和技术工程研究中心, 江苏 苏州 215011)

摘要: 建筑业是能源消耗和碳排放的重要领域之一。随着技术的发展, 超低能耗建筑已成为建筑业发展的主流趋势。自 2020 年中国在联合国首次提出“双碳”战略目标以来, 中国建筑行业陆续出台了一系列旨在节能减排的政策文件, 致力于全面提高绿色低碳建筑水平。本文以上海某居住建筑为案例, 对比了普通居住建筑节能设计标准与超低能耗建筑设计标准在建筑围护结构热工性能指标方面的差异性, 运用 Design Builder 软件对该建筑在不同围护结构热工参数基准下的能耗进行了模拟, 并使用东南大学开发的东禾建筑碳排放计算分析软件对不同围护结构建筑的碳排放情况进行了分析。研究结果表明, 按照超低能耗建筑节能设计标准设计的建筑, 其制冷制热量和全生命周期的碳排放量分别是按照普通居住建筑节能设计标准设计建筑的 40% 和 55%, 充分证明了超低能耗建筑在节能减排方面的重要性和有效性。

关键词: 节能; 碳排放; 超低能耗; 居住建筑; 围护结构

中图分类号: TP111.4+8

文献标志码: A

文章编号: 2095–2163(2025)07–0061–06

Study on energy saving and carbon emission of different enclosure structures of a residential building in Shanghai

ZHENG Gaoming¹, LI Yilin^{1,2}

(1 School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 Jiangsu Province Engineering Research Center of Building Carbon Neutrality Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: The construction industry is one of the important areas of energy consumption and carbon emissions. With the development of technology, ultra-low energy consumption buildings have become the mainstream trend of the development of the construction industry. Since China first proposed the "double carbon" strategic goal in the United Nations in 2020, China's construction industry has successively issued a series of policy documents aimed at energy conservation and emission reduction, and is committed to comprehensively improving the level of green and low-carbon buildings. Taking a residential building in Shanghai as an example, this paper first compares the differences between the energy-saving design standards for ordinary residential buildings and the ultra-low-energy building design standards in the thermal performance indicators of building envelopes. The Design Builder software is used to simulate the energy consumption of the building under different envelope thermal parameter benchmarks, and the carbon emissions of different envelope buildings are analyzed by using the Donghe Building Carbon Emission Calculation and Analysis Software developed by Southeast University. The results show that the cooling heating capacity and life cycle carbon emissions of buildings designed according to the ultra-low energy consumption building energy-saving design standards are 40 % and 55 % of those designed according to the ordinary residential building energy-saving design standards, respectively. This result fully proves the importance and effectiveness of ultra-low energy buildings in energy conservation and emission reduction.

Key words: energy saving; carbon emissions; ultra-low energy consumption; residential buildings; enclosure structure

0 引言

近年来, 全球变暖问题日益严重, 节能减排得到

各国的重视。中国承诺 2030 年前达到二氧化碳排放顶峰, 并力争在 2060 年前实现碳中和^[1]。联合国环境规划署在第 27 届联合国气候变化大会上的报

基金项目: 江苏省建筑碳中和技术工程研究中心资助课题(JZTZH2023-0201)。

作者简介: 郑高明(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向: 建筑超低能耗。

通信作者: 李奕霖(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智慧建筑节能技术, 新型建筑幕墙, 相变材料在建筑中的应用。Email: yilin.li@usst.edu.cn。

收稿日期: 2025-01-20

告指出,2021 年,建筑物和建筑行业占据全球能源需求的 34% 以上,其与能源消耗和工艺流程相关的二氧化碳排放占比约为 37%^[2]。随着城镇化发展,中国在城乡建设领域的能源和碳排放问题日益凸显。2010 年至 2021 年,中国建筑能耗总体上扩大了约 1.7 倍,年均增长率达到了 5.2%^[3];由化石源能源消费产生的碳排放量从 7 357.7 百万吨增加到 9 183.9 百万吨,增长了 24.8%^[4]。2021 年,中国房屋建筑全生命周期的碳排放总量达到了 40.7 亿吨,占全国能源相关碳排放的比重高达 38.2%。

为实现“双碳”目标,住房和城乡建设部于 2022 年先后发布了《城乡建设领域碳达峰实施方案》、《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》,2024 年发布了《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》,从全局谋划了建筑领域绿色低碳的发展道路。上海市作为中国的经济中心,在超低能耗建筑领域开展了很多探索和实践。2019 年起,上海市住房和城乡建设管理委员会陆续发布了《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》等一系列文件,为超低能耗建筑的发展提供了明确的指导和规范。2022 年,上海市印发了《上海市碳达峰实施方案》,进一步明确了碳达峰的目标和超低能耗建筑的发展方向。

超低能耗建筑指的是在适应气候和自然条件的基础上,采用热回收技术和可再生能源,通过保温隔热性能、气密性较好的围护结构和新风系统提供舒适室内环境的建筑^[5]。在中国超低能耗建筑发展的主要技术路线中,高性能围护结构和建筑整体气密性提升建筑保温性能,是降低建筑冷热负荷、降低建筑能耗的重要举措^[6]。王浩^[7]运用 Design Builder 建筑能耗模拟软件,建立了武汉市典型居住建筑研究模型,分析了围护各组成部分冷热负荷所占比例,总结出了该地区切实可行的建筑节能优化设计措施;郝喜英^[8]研究了被动式超低能耗建筑理论基础和技术体系、分析了被动式超低能耗居住建筑外墙和外窗传热理论,通过对关中地区已建被动式超低能耗示范建筑进行分析,为关中地区乃至山

西省的被动式超低能耗建筑节能设计提供了参考。张时聪^[6]等从围护结构、建筑气密性等方面分析了 64 栋超低/近零能耗建筑示范项目,通过对比国家标准对应指标,得到 64 栋建筑全部达到超低能耗建筑标准;蒙慧玲等^[9]通过对围护结构在不同设计工况下室内环境参数和能效指标的目标进行控制计算,建立了对围护结构进行低能耗及碳排放设计的评价体系,提出了高效的技术方案。

本文主要以上海市某居住建筑为例,基于对《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015)和《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》中室内热环境及围护结构热工性能的差异性分析,采用 Design Builder 建筑能耗模拟软件和东禾建筑碳排放计算分析软件,探究不同围护结构做法及参数优化对居住建筑能耗及碳排放的影响。

1 研究方法

1.1 超低能耗建筑实施要求及不同规范差异性分析

在居住建筑节能设计方面,目前上海地方标准为《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015),为积极响应节能减排要求,上海市积极推进超低能耗技术要求,2019 发布了《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》,2023 年发布了《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》。

本研究项目以建筑的围护结构热工性能为主要研究对象,结合《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015)与《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》的节能要求对设计参数进行对比。对两种规范关于室内热环境要求进行了对比,超低能耗居住建筑规范要求更高,且对室内相对湿度及新风量有具体要求见表 1。同时对两种规范关于围护结构热工性能要求进行对比,结果表明超低能耗建筑规范要求更低的传热系数,不同部位传热系数与普通居住建筑差值率在 18%~60% 不等,其中外墙传热系数的差值率最高,达到 60%,户门传热系数的差值率最低,为 18.2%,见表 2。

表 1 两种规范对室内热环境要求的对比

Table 1 Comparison of indoor thermal environment requirements between the two specifications

室内环境 参数	单位	冬季		夏季	
		普通居住建筑	超低能耗居住建筑	普通居住建筑	超低能耗居住建筑
温度	℃	≥18	≥20	≤26	≤26
相对湿度	%		≥30		≤60
换气次数	次·h ⁻¹	1		1	
新风量	m ³ ·(h·人) ⁻¹		≥30		≥30

表 2 两种规范对围护结构热工性能要求的对比

Table 2 Comparison of the thermal performance requirements of the two specifications for the envelope structure

围护结构部位	普通居住建筑/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	超低能耗居住建筑 $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	差值/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	差值率/%
外墙	1.0	0.4	0.6	60.0
屋面	0.8	0.3	0.5	62.5
外窗(包括阳台门透明部分)	2.2	1.4	0.8	36.4
底面接触室外空气的架空或外挑楼板	1.0	0.5	0.5	50.0
分户墙、楼梯间隔墙、外走廊隔墙	2.0	1.5	0.5	25.0
分户楼板	2.0	1.5	0.5	25.0
户门	2.2	1.8	0.4	18.2

1.2 案例分析

案例项目位于上海市浦东新区,项目由 19 栋住宅楼组成,均根据上海市超低能耗指导文件采用超低能耗技术设计实施,在满足居民生活需求的基础上,达到节能减碳的目的。

1.2.1 外墙保温结构一体化系统

从围护结构保温隔热出发,上海市目前实施的外墙保温一体化做法主要有:现浇混凝土复合保温模板外墙保温系统、预制混凝土夹心保温外墙板系统、预制混凝土反打保温外墙板系统^[10]。本项目外墙保温主要采用预制混凝土反打保温外墙板系统,如图 1 所示,该系统主要由硅墨烯免拆模保温板、不锈钢连接件及钢筋混凝土墙体 3 大部分构成。在安装过程中,在安装好保温钉的保温板上绑扎钢筋,最后浇筑混凝土使得构件成型。硅墨烯保温板作为该系统的核心组成部分,其保温效果显著优于传统的保温材料,同时由于其采用预制施工,使得外墙保温结构与结构一体化,既保证了较高的保温隔热性能,又提高了施工质量。

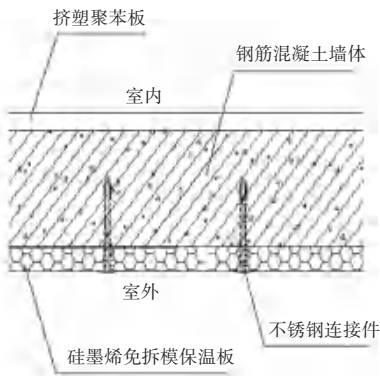


图 1 预制混凝土反打保温外墙板系统

Fig. 1 Precast concrete reverse insulation exterior wall panel system

1.2.2 能耗测算边界界定

针对本项目案例,结合上海地标《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015)与《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》的节能要求,进行不同的传热设定,形成两种不同的建筑能耗模拟体系。

本文采用项目 1#住宅楼进行模拟计算,该建筑地上 6 层,建筑面积为 2 902,结构形式为钢筋混凝土 PC 拼装结构,建筑平面布置图如图 2 所示。

结合规范标准,对该建筑围护结构进行设置。

1)根据上海地标《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015)设计,外墙保温形式为 25 mm 复合挤塑聚苯乙烯泡沫塑料板(XPS)+40 厚无机骨料保温膏料(用于卫生间、厨房);

2)根据上海《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》要求设计,外墙主要采用内外组合保温系统:90 mm 墨烯保温板+30 mm 塑聚苯板内保温;对于 PC 墙体,90 mm 墨烯保温板采用反打施工工艺作用于 PC 墙板上,对于局部现浇墙体,采用现浇混凝土硅墨烯免拆保温模板一体化墙体施工工艺。

1.3 采用不同围护建筑的运行能耗分析

本研究采用了 Design Builder 软件对采用了不同建筑围护结构系统的建筑运行能耗进行模拟,主要的工作包括设定内外扰动和构建全面的建筑模型。由于墙体厚度远小于长宽尺度,可按照一维传热过程分析,采用热平衡法的数学模型式(1)进行能耗模拟计算。

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} (0 < x < \delta, \tau > 0) \quad (1)$$

其中, t 为墙体温度($^{\circ}\text{C}$); a 为热扩散系数(m^2/s); x 为厚度(m); τ 为时间(s)。

在模型的建立过程中,需要结合初始条件以及边界条件建立方程组,通过解方程组,可以得出具体的冷热负荷及室内温度。在室内环境参数设置时,

空调系统 COP(Coefficient of Performance) 值夏季 4.2, 冬季 3. 2; 室内照明功率密度 3. 5 W/m²。不同设

计标准能耗测定边界按照表 3 设置, 不同建筑节能标准的传热系数见表 4。



图 2 平面布置图

Fig. 2 Plane layout

表 3 不同设计标准能耗测定边界

Table 3 Energy consumption measurement boundary of different design standards

围护结构部位	普通居住建筑设计标准	超低能耗居住建筑设计标准
外墙	25 mm 合挤聚苯乙烯泡沫塑料板(XPS)	90 mm 烯保温板+30 mm 塑聚苯板内保温
	40 mm 机骨料保温膏料(用于卫生间、厨房)	90 mm 硅墨烯保温板+自调温相变蓄能材料内保温(用于卫生间、厨房)
屋面	70 mm 塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)(带表皮)	100 mm 塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)(带表皮)
外窗(包括阳台门透明部分)	铝合金玻璃门窗	铝合金玻璃门窗
分户楼板	轻质保温隔声砂浆	20 mm 塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)(带表皮)

表 4 不同建筑节能标准的传热系数(实际)

Table 4 Heat transfer coefficient of different building energy efficiency standards (actual)

围护结构部位	普通居住建筑 (W/(m ² · K))	超低能耗居住建筑 (W/(m ² · K))
屋面	0.40	0.30
外墙	0.96	0.38
分户楼板	1.73	1.08
外窗	2.20	1.40
户门	2.00	1.80

结合两种不同节能标准与本案例,得到普通居住建筑及超低能耗建筑各项能耗数值见表 5。在制冷能耗方面,如图 3 所示,普通居住建筑、超低能耗建筑全年能耗分别为 66 878. 52 kWh、41 468. 79 kWh,超低能耗建筑能耗约为普通居住建筑的 62%,且能耗主要集中在六月至九月,其中七月能耗最高;在制热能耗方面,如图 4 所示,普通居住建筑、超低能耗建筑全年能耗分别为 91 022. 5、20 930. 53 kW · h,超低能耗建筑能耗约为普通居住建筑的 23%,且能耗主要集中在一季度及四季度;在暖通空调能耗方面(制冷加制热),如图 5 所示,普通居住建筑、超低能耗建筑全年

能耗分别为 157 901. 02、62 399. 32 kW · h,超低能耗建筑能耗约为普通居住建筑的 40%。

表 5 普通居住建筑与超低能耗建筑制冷制热年能耗量

Table 5 Annual energy consumption of refrigeration and heating in ordinary residential buildings and ultra - low energy consumption buildings

	能耗/kW · h	
	普通居住建筑	超低能耗建筑
制热	91 022. 50	20 930. 53
制冷	66 878. 52	41 468. 79
汇总	157 901. 02	62 399. 32

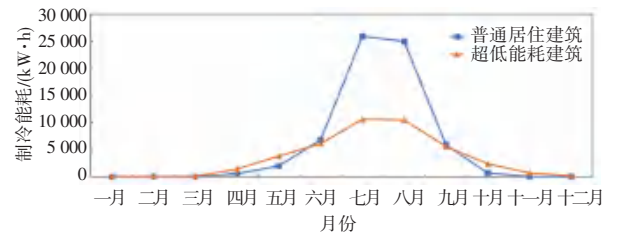


图 3 普通居住建筑与超低能耗建筑制冷能耗对比

Fig. 3 Comparison of refrigeration energy consumption between ordinary residential buildings and ultra - low energy consumption buildings

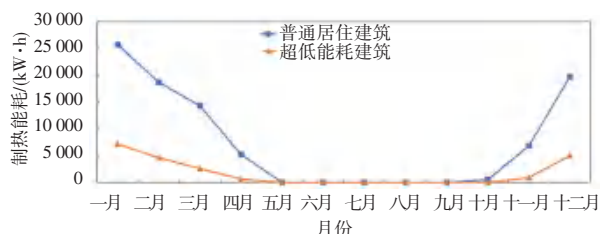


图4 普通居住建筑与超低能耗建筑制热能耗对比

Fig. 4 Comparison of heating energy consumption between ordinary residential buildings and ultra-low energy consumption buildings

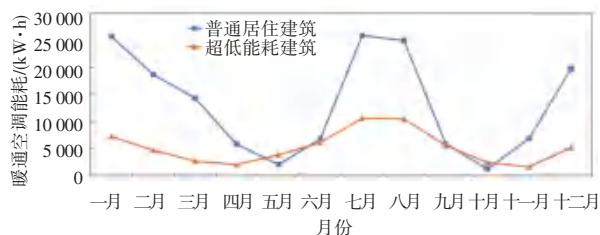


图5 普通居住建筑与超低能耗建筑制冷及制热能耗对比

Fig. 5 Comparison of refrigeration and heating energy consumption between ordinary residential buildings and ultra-low energy consumption buildings

1.4 采用不同围护结构的碳排放分析

本研究采用了由东南大学开发的“东禾建筑碳排放计算分析软件”进行项目的碳排放分析。该软件的计算为《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)^[11]。通过设定建筑材料、机械、人工等相关数据,并结合软件系统内嵌的碳排放因子,能够对该项目在不同围护建筑的碳排放进行定量分析。

1.5 各阶段建筑碳排放计算

根据《建筑碳排放计算标准》GB/T51366-2019将碳排放定义为建筑物在与其有关的建材生产及运输、建造及拆除、运行阶段产生的温室气体排放的总和,建筑全生命周期碳排放计算公式如下:

$$C = C_M + C_{JZ} + C_{CC} + C_{sc} + C_{ys} \quad (2)$$

其中, C 为建筑全生命周期单位建筑面积碳排放量 (kgCO_2/m^2); C_M 为建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO_2/m^2); C_{JZ} 为建筑建造阶段单位建筑面积的碳排放量 (kgCO_2/m^2); C_{CC} 为建筑拆除阶段单位建筑面积的碳排放量 (kgCO_2/m^2); C_{sc} 为建材生产阶段碳排放 (kgCO_2e); C_{ys} 为建材运输过程碳排放 (kgCO_2e);

在建材生产及运输阶段采用东禾建筑碳排放计算分析软件进行碳排放计算,将各建材的使用量导入软件,运输采用重型柴油货车运输,在运输距离方面,常规主材主要就近采购,运输距离大约为 15~20 km,预制构件从江苏生产并运输至浦东,运输距

离大约为 100 km,由于此阶段部分碳排放因子不全,故不区分普通居住建筑及超低能耗建筑在此阶段的碳排放,结合系统自带的碳排放因子,可计算出建材生产阶段的碳排放为 $12.69 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$,建筑运输阶段需导入项目使用的材料信息及运输方式,可计算出建材运输阶段的碳排放为 $0.11 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ 。

建造及拆除阶段,由于此阶段占建筑全生命周期比例较小,采用经验公式对此阶段进行碳排放计算^[12]。 C_{JZ} 为单位建筑面积建造阶段碳排放 (kgCO_2/m^2):

$$C_{JZ} = X + 1.99 \quad (3)$$

C_{cc} 为单位建筑面积拆除阶段碳排放 (kgCO_2/m^2):

$$C_{cc} = 0.06X + 2.01 \quad (4)$$

其中, X 为层数。

本项目建造阶段碳排放为 $7.99 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$,拆除阶段碳排放为 $2.37 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ 。

在运行阶段,碳排放量按照 50 年使用寿命考虑。结合 2020 年上海省级电网的排放因子为 $0.548 \text{ kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[13]。结合全年能耗计算得出普通居住建筑运行阶段碳排放强度为 $40.72 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,超低能耗建筑运行阶段碳排放强度为 $22.54 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。由此可见,由于各类建筑的围护结构处理方式和参数设置的差异,使得超低能耗建筑在运行阶段的能耗更低,因此其碳排放也相应减少。

通过各阶段碳排放相加得出,采用普通居住建筑围护结构做法及参数的全生命周期碳排放为 $2\,059.16 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$,采用超低能耗建筑围护结构做法及参数的全生命周期碳排放为 $1\,150.16 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ 。

2 结束语

本文以上海普通居住建筑标准与超低能耗建筑设计标准对围护结构进行设计分析,建立了能耗及碳排放模型,结合上海市浦东新区某居住建筑为例,研究了在不同围护结构设计标准下的能耗及碳排放情况,得到以下结论:

1)《超低能耗建筑设计标准》(居住建筑)征求意见稿与《居住建筑节能设计标准》(DGJ08-205-2015)在围护结构传热系数、室内热环境要求等参数设置上存在显著差异,超低能耗设计标准要求更为严格,围护结构传热系数比普通居住建筑设计值低 18.2%~62.5%,更加符合当前节能减碳的大环境,同时对围护结构材料要求更高;

2)通过对不同传热系数的围护结构进行模拟分析发现,超低能耗建筑设计标准下,更低的传热系数导致在制冷、制热等方面能耗更低,约为普通居住建筑的 40%;

3)超低能耗建筑在全生命周期碳排放总量约为普通居住建筑的 56%,碳排放主要集中在建筑运行阶段,此阶段超低能耗建筑每年每平米的碳排放约普通居住建筑的 55%,由于居住建筑设计使用年限为 50 年,运行阶段每年都会产生较大的碳排放,因此,更低的围护传热系数能产生更低的能耗,进而产生更低的碳排放,从而达到节能减碳的效果。

《超低能耗建筑设计标准(居住建筑)征求意见稿》与《居住建筑节能设计标准》相比,在围护结构设计参数以及室内热环境要求等方面,前者提出了更为严格的规范,这种严格的规定使得其在降低建筑能耗以及减少碳排放等方面的效果更为显著。超低能耗建筑的广泛推广和应用将进一步提升绿色低碳建筑技术的水平,从而为实现“双碳”目标奠定坚实的基础。

参考文献

[1] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. (2020-09-22). http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.

[2] 联合国环境规划署. 联合国报告:建筑物与施工建设碳排放创历史新高[R/OL]. (2022-11-09). <https://news.un.org/zh/story/2022/11/1112252>.

[3] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023 年)[J]. 建筑, 2024, 982(2): 46-59.

[4] 清华大学碳中和研究院, 清华大学地球系统科学系, 生态环境部环境规划院. 新兴经济体二氧化碳排放报告 2023 [R/OL]. (2024-01-09). <https://www.icon.tsinghua.edu.cn/info/1129/1435.htm>.

[5] 李九阳, 陈立, 郭金鹏, 等. 双碳背景下被动式超低能耗建筑发展的影响因素及对策[J]. 建筑经济, 2023, 44(S1): 364-366.

[6] 张时聪, 吕燕捷, 徐伟. 64 栋超低能耗建筑最佳案例控制指标和技术路径研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 7-13.

[7] 王浩. 基于能耗模拟技术的建筑外围护节能优化研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.

[8] 郝喜英. 关中地区被动式超低能耗居住建筑节能技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.

[9] 蒙慧玲, 蒙陈昱, 巩敬超, 等. 基于评价指标的超低能耗建筑围护结构设计研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 738-747.

[10] 瞿燕. 上海超低能耗建筑高质量发展设计与实施要点[J]. 建筑科学, 2024, 40(8): 105-110.

[11] GB/T51366-2019. 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[12] 汤民, 李峥嵘. 上海超低能耗建筑技术实践与 LCA 碳排放分析[J]. 建设科技, 2022(15): 66-70.

[13] 生态环境部环境规划院. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)[R]. (2023-10-27). https://www.caep.org.cn/sy/tdfzhjyz/xzdt/202310/t20231027_1044179.shtml.