

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412027



Low-E 玻璃在厦门某高校教学楼 节能改造中的应用模拟

常明玉, 林姝颖, 李玲真, 吴正旺

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以厦门某高校教学楼为例,采用实测与 DesignBuilder 软件模拟相结合的方法,利用模拟数据与实测数据的拟合结果验证模型的可靠性,设定 3 种窗户改造方案(单层 Low-E 玻璃、中空 Low-E 玻璃、中空普通玻璃)替换原有单层普通玻璃,分析不同类型 Low-E 玻璃的节能效果。针对南、北走廊教学楼,共模拟 20 种工况,对改造前、后的能耗进行对比,从而评估 Low-E 玻璃的适用性。结果表明:采用 Low-E 玻璃改造后,南走廊布局方式的教学楼的能耗较北走廊低 5.6%;在中空普通玻璃、单层 Low-E 玻璃及中空 Low-E 玻璃等 3 种改造策略中,中空 Low-E 玻璃节能可达 21.9%,其他 2 种改造方案的节能均低于 8.1%;将北走廊教学楼的南侧外窗改造为中空 Low-E 玻璃,可节能 15.9%;从经济性看,采用 Low-E 玻璃的初始投资较大,在寿命周期内较难收回成本。

关键词: 夏热冬暖地区; 教学楼; Low-E 玻璃; 能耗模拟; 节能改造

中图分类号: TU 111.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)04-0419-06

Simulation of Low-E Glass in Energy-Saving Renovation of University Teaching Buildings in Xiamen City

CHANG Mingyu, LIN Shuying, LI Lingzhen, WU Zhengwang

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Taking the university teaching building in Xiamen City as example, a method combining on-site measurements and simulation by DesignBuilder software was adopted, the reliability of the model was verified by fitting the simulation data with the actual measurement data. 3 window renovation schemes (single-layer Low-E glass, hollow Low-E glass and hollow ordinary glass) were set to replace the original single-layer ordinary glass, and the energy-saving effects of different types of Low-E glass were analyzed. For the teaching buildings with south and north corridors, 20 working conditions were simulated to compare the energy consumption before and after the renovation, in order to evaluate the applicability of Low-E glass. The results show that after the renovation with Low-E glass, the energy consumption of the teaching building with south corridor is 5.6% lower than that with north corridor. Among 3 renovation strategies of hollow ordinary glass, the energy-saving of the hollow Low-E glass reaches 21.9%, while the energy savings of the other 2 strategies are less than 8.1%. By replacing the south facing external windows of the north corridor teaching building with hollow Low-E glass, energy saving reaches 15.9%. From the perspective of economic feasibility, the

收稿日期: 2024-12-28

通信作者: 吴正旺(1972-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事生态设计的研究。E-mail: wuzhengwang@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378018)

initial investment of Low-E glass is relatively high, and the cost is difficult to recover within the building's life cycle.

Keywords: hot summer and warm winter regions; teaching buildings; Low-E glass; energy consumption simulation; energy-saving renovation

Low-E 玻璃对辐射具有单向传输的特性,因此在建筑中的应用随其造价的降低逐步增加^[1]。有研究表明,Low-E 玻璃适用于寒冷地区,能在日间利用太阳能并在夜间保温,但在潮湿环境下节能效果不佳,不适用于湿热地区^[2-3]。近年来,随着玻璃制造与镀膜技术的发展,单层、双层、三玻两腔、高透型及遮阳型 Low-E 玻璃凭借各自突出的性能优势,逐步从研发走向大规模实际应用。在夏热冬暖地区,已有多个案例取得了良好的节能效果。广州科学城二期采用铝合金 Low-E 中空玻璃外窗,显著提高了节能效果和居住质量^[4]。对深圳市恒大时代金融中心的模拟发现,遮阳型 Low-E 玻璃可大幅减少冷、热负荷^[5]。遮阳型 Low-E 玻璃中的双银型比普通中空 Low-E 玻璃更适用于夏热冬暖地区,即北方宜使用高透型、南方宜使用遮阳型^[4-8]。同时,建筑的朝向、开窗等布局也对其能耗有重要影响^[1,9]。

因此,在南方夏热冬暖地区的建筑设计中,应当采取何种 Low-E 玻璃,如何设计外窗构造,建筑应如何布局,还是一个值得探讨的问题。基于此,本文以厦门市某高校两栋教学建筑为例,监测其标准教室的温、湿度,模拟其围护结构的热工参数,研究 Low-E 玻璃在该地区的适用性。

1 模型的建立

1.1 建筑概况

福建省厦门市属于典型的夏热冬暖地区。选择厦门市某高校教学建筑群共 8 栋单体,建筑均为 5 层南北向外走廊,每层 4 间教室,每间 $10.0\text{ m} \times 7.5\text{ m}$;窗墙比约为 43%。南走廊和北走廊交替排列。以南走廊为例,标准层教室平面示意图,如图 1 所示。a、b 两栋教学楼标准层平面图,如图 2 所示。图 2 中:a 为南走廊的教学楼;b 为北走廊的教学楼。2 栋教学楼的窗户采用单层普通玻璃(6 mm)。

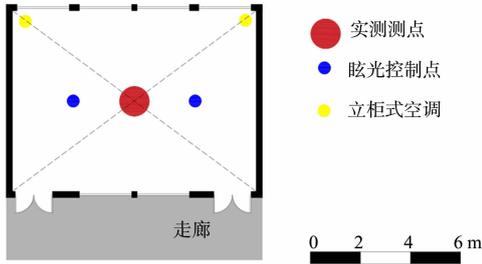


图 1 标准层教室平面示意图

Fig. 1 Plan diagram of standard floor classroom

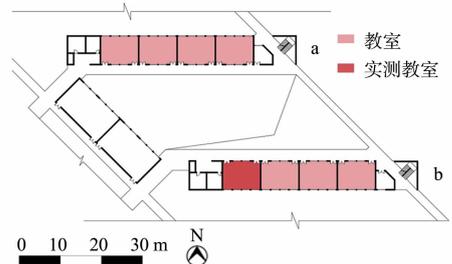


图 2 a 和 b 两栋教学楼标准层平面图

Fig. 2 Plan diagram of a and b teaching buildings standard floor

1.2 模型拟合验证

1.2.1 DesignBuilder 模型的建立 采用建筑能耗模拟软件 DesignBuilder 对教学建筑进行仿真模拟。选用厦门地区典型的气象年数据,按实际使用情况建立模型,活动时间为每日 8:00—21:00。每间教室配 2 台分体式空调,空调能耗比为 3.15、冷暖电辅,每台空调的循环风量为 $2\ 050\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,室内设计温度为 $26\text{ }^\circ\text{C}$ (夏季)和 $20\text{ }^\circ\text{C}$ (冬季)。人员密度为 $0.5\text{ 人} \cdot \text{m}^{-3}$,每间教室配备 1 台多媒体设备,散热量为 50 W 。根据国家标准 GB 50034—2013《建筑照明设计标准》要求,普通教室的课桌面照度应不低于 300 lx ,而有研究表明, 500 lx 是舒适和适宜的照度,故将室内照度设定为 500 lx ^[10-15]。此外,设定最大容许眩光值为 22,眩光控制点高度为 0.8 m 。

1.2.2 拟合验证 于 2024 年 7 月 3 日—2024 年 7 月 9 日,在各测点放置温、湿度仪,自动记录每日 8:00—21:00 的气温。南、北走廊教学楼各选取 1 间标准层教室,将其实测气温数据与模拟数据进行拟合,结果如图 3 所示。图 3 中: θ 为温度; $\Delta\theta$ 为实测温度与模拟温度的差值。

由图 3 可知:北、南走廊教室的实测温度与模拟温度的最大差值分别为 2.33 、 $2.10\text{ }^\circ\text{C}$,最小差值分

别为 0.01、0.21 °C;均方根误差分别为 1.3、1.2;判定系数(R^2)分别为 0.69、0.60;相关系数分别为 0.83、0.78。参照文献[16],将相关系数的绝对值分 3 个等级,0~<0.33 之间为弱相关,0.33~<0.66 为中度相关,0.66~1.00 为高度相关。由此可知,实测数据与模拟结果高度相关,表明 DesignBuilder 模拟的结果具有足够的可靠度,可用于教学楼的能耗模拟。

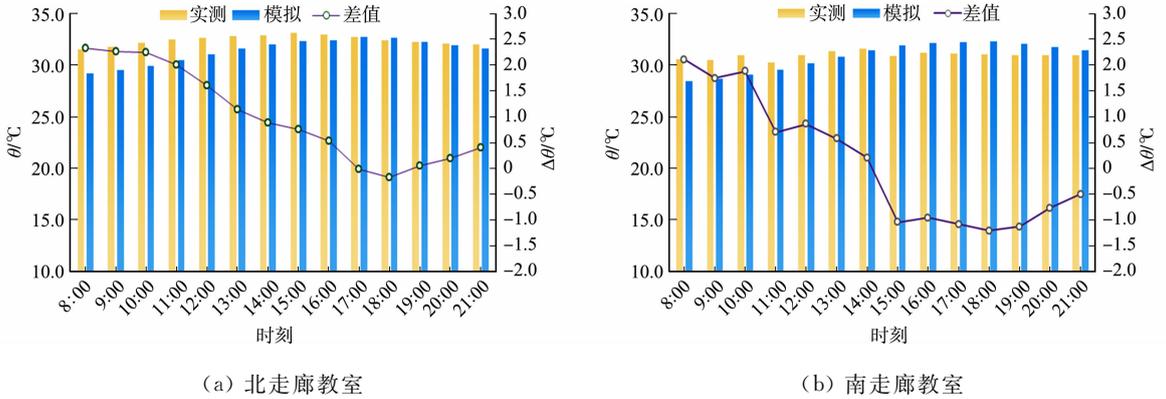


图 3 北和南走廊教室实测温度及模拟温度对比

Fig. 3 Comparison of measurement and simulation temperatures in classrooms along north and south corridors

1.3 Low-E 玻璃窗构造设计方案

改造前,该教学楼群采用单层普通玻璃(6 mm)。夏热冬暖地区的节能窗普遍采用遮阳型中空 Low-E 玻璃。采用中空 Low-E 玻璃^[4]替换原教学楼玻璃窗,将单层普通玻璃、单层 Low-E 玻璃、中空普通玻璃及中空 Low-E 玻璃 4 种玻璃进行比较,如表 1 所示。

表 1 4 种玻璃的热工参数

Tab. 1 Thermal parameters of 4 types of glasses

热工参数	单层普通玻璃	单层 Low-E 玻璃	中空普通玻璃	中空 Low-E 玻璃
传热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	5.718	3.347	2.785	1.190
可见光透过率	0.811	0.607	0.781	0.408
太阳得热系数	0.819	0.481	0.703	0.235
结构示意图				

2 改造方案比较

对采用不同工况的教学楼进行全年的能耗模拟。对不同工况进行编号,如表 2 所示。能耗模拟共计 20 种工况,其中,A0、B0 为改造前,即使用单层普通玻璃的 2 种工况;A1~A3、B1~B3 为使用中空

表 2 不同工况对应的编号

Tab. 2 Number of different working conditions

编号	工况	编号	工况
A0	南走廊单层普通玻璃	B0	北走廊单层普通玻璃
A1	南走廊中空 Low-E 玻璃	B1	北走廊中空 Low-E 玻璃
A2	南走廊北侧中空 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃	B2	北走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空 Low-E 玻璃
A3	南走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空 Low-E 玻璃	B3	北走廊北侧中空 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃
A4	南走廊单层 Low-E 玻璃	B4	北走廊单层 Low-E 玻璃
A5	南走廊北侧单层 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃	B5	北走廊北侧单层普通玻璃、南侧单层 Low-E 玻璃
A6	南走廊北侧单层普通玻璃、南侧单层 Low-E 玻璃	B6	北走廊北侧单层 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃
A7	南走廊中空普通玻璃	B7	北走廊中空普通玻璃
A8	南走廊北侧中空普通玻璃、南侧单层普通玻璃	B8	北走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空普通玻璃
A9	南走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空普通玻璃	B9	北走廊北侧中空普通玻璃、南侧单层普通玻璃

Low-E 玻璃改造的 6 种工况; A4~A6、B4~B6 为使用单层 Low-E 玻璃改造的 6 种工况; A7~A9、B7~B9 为使用中空普通玻璃改造的 6 种工况。

2.1 不同改造方案的能耗比较

对中空 Low-E 玻璃和单层普通玻璃的能耗进行对比,如图 4 所示。图 4 中: E 为能耗。不同单层 Low-E 玻璃和中空普通玻璃应用方案的能耗对比,分别如图 5、6 所示。对比图 4~6,从布局方式和中空 Low-E 玻璃的应用方案两方面,分析 Low-E 玻璃应用于教学楼的节能效果。

2.1.1 不同布局方式 在 20 种工况下,北走廊的布局方式均较南走廊的能耗高。改造前,南走廊教学楼

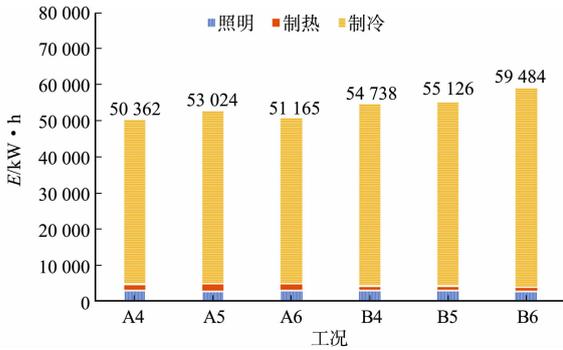


图 5 不同单层 Low-E 玻璃应用方案的能耗对比
Fig. 5 Energy consumption comparison of different single-layer Low-E glass application schemes

较北走廊教学楼的照明能耗高 51 kW·h,制热能耗低 805 kW·h,制冷能耗低 11 453 kW·h,总能耗低 14.0%;使用中空 Low-E 玻璃的工况下,南走廊的布局方式较北走廊的照明能耗高 115 kW·h,制冷能耗低 3 063 kW·h,制热能耗低 481 kW·h,总能耗低 5.6%。

2.1.2 不同中空 Low-E 玻璃的应用方案 南走廊布局的教学楼,若两侧均使用中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 658 kW·h,制热能耗降低了 396 kW·h,制冷能耗降低了 10 037 kW·h,总能耗降低了 18.0%;若仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 83 kW·h,制热能耗几乎不变,制冷能耗升高了 2 188 kW·h,总能耗降低仅 3.9%;若仅在北侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 331 kW·h,制热能耗降低了 388 kW·h,制冷能耗降低了 5 629 kW·h,总能耗降低了 10.5%。

北走廊布局的教学楼,若两侧均使用中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 589 kW·h,制热能耗降低了 72 kW·h,制冷能耗降低了 13 566 kW·h,总能耗降低了 21.9%;若仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 346 kW·h,制热能耗降低了 53 kW·h,制冷能耗降低了 9 840 kW·h,总能耗降低了 15.9%;若仅在北侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 46 kW·h,制热能耗降低了 140 kW·h,制冷能耗降低了 1 035 kW·h,总能耗降低仅 1.9%。

单层 Low-E 玻璃的 6 种工况,较改造前能耗降低均不超过 8.1%。中空普通玻璃的 6 种工况,较改造前能耗降低均不超过 1.1%。

2.2 中空 Low-E 玻璃改造方案的经济性比较

经济性是衡量减碳效果的主要标准之一。据调研,6 mm 单层普通玻璃的价格约为 60 元·m⁻³,中空 Low-E 玻璃的价格约为 260~280 元·m⁻³[17-19]。净现值(NPV)的表达式为

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

上式中: C_t 为第 t 年的现金流, t 为时间期数; r 为折现率; n 为总的时间期数。



图 4 中空 Low-E 玻璃和单层普通玻璃的能耗对比
Fig. 4 Energy consumption comparison between hollow Low-E glass and single-layer ordinary glass

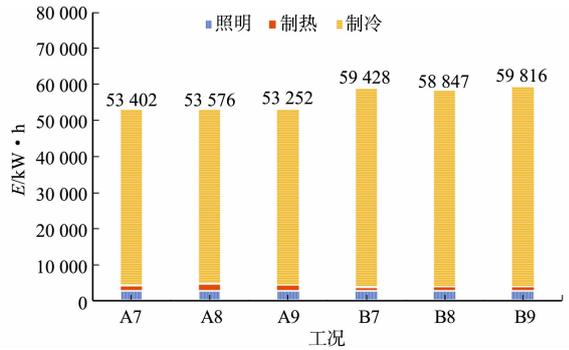


图 6 不同中空普通玻璃应用方案的能耗对比
Fig. 6 Energy consumption comparison of different hollow ordinary glass application schemes

取折现率 $r=10\%$,电价为 $0.5 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,教学楼的使用年限为 $50 \text{ a}^{[20-21]}$ 。改造后,不同中空 Low-E 玻璃工况的经济性对比,如表 3 所示。

表 3 不同中空 Low-E 玻璃工况的经济性对比

Tab. 3 Economic comparison of different hollow Low-E glass working conditions

指标	工况					
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
初始投资/元	120 000	40 000	80 000	120 000	80 000	40 000
年节约费用/元	4 888	1 054	2 843	6 525	4 721	565
寿命周期内净现值/元	-71 536	-29 550	-51 812	-55 306	-33 192	-34 398
静态投资回收期/a	24.5	38.0	28.1	18.4	17.0	70.8

由表 3 可知:6 种中空 Low-E 玻璃工况在寿命周期内的净现值均为负值。中空 Low-E 玻璃应用于北走廊布局的教学楼的节能效果总体优于南走廊。在南走廊的布局方式下,选择 A1 工况,即两侧均布置中空 Low-E 玻璃的方案,其静态投资回收期最短,但初始投资金额较大。在北走廊的布局方式下,选择 B2 工况,即仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃的方案,其静态投资回收期最短,且初始投资金额较小,虽然寿命周期内净现值为亏损,但其节能效果显著,若产品生产技术改良,则 B2 工况具有推广的潜力。

3 结论

1) 从布局方式看,对于南、北走廊两种布局的教学楼而言,南走廊的布局方式更节能,而采用 Low-E 玻璃改造对北走廊的教学楼更有效。由实测结果可知,在夏季,其使用时段内的平均气温比北走廊高 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。原因可能是南侧走廊遮挡了夏季直射的阳光,有效降低了气温,从而降低了能耗。因此,在相关建筑的设计中,宜优先采用南走廊的布局。由模拟结果可知,改造前,北走廊布局方式的全年能耗比南走廊高 14.0% ,而两侧普通玻璃均采用中空 Low-E 玻璃外窗改造后,北走廊教学楼的南向外窗得热量减少,此时南走廊教学楼的南向外窗由于走廊的遮挡,得热量减少并不明显。改造后,北走廊教学楼的全年能耗相比南走廊教学楼的能耗差距从原先的 14.0% 缩小到 5.6% 。

2) 采用中空 Low-E 玻璃改造的外窗构造有明显的节能效果。在南、北走廊的教学楼中,若将 6 mm 单层普通玻璃改造成中空 Low-E 玻璃,则照明能耗均有一定程度的增大,原因可能是 Low-E 玻璃降低了可见光透过率,使照明能耗增加。但从总能耗看,南、北走廊的教学楼分别可以节能 18.0% 和 21.9% ,每年最多可减少能耗 $10.2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3) 6 种使用中空 Low-E 玻璃的工况中,对北走廊教学楼的南侧外窗采用中空 Low-E 玻璃改造(即 B2 工况),其节能效果较好。对于北走廊的教学楼,若仅在南面布置 Low-E 玻璃,比仅在北侧布置 Low-E 玻璃节能增加 14.0% ,比双侧均布置 Low-E 玻璃节能减少 6.0% 。而对于南走廊的教学楼,单侧布置 Low-E 玻璃最多节能 10.5% ,双侧均布置 Low-E 玻璃可节能 18.0% 。单侧布置可以减少初始投资,使节能改造方案更容易被接受。因此,在节能改造中,可重点考虑北走廊教学楼,且为减少初始成本,可采用仅在南侧布置 Low-E 玻璃的方案。

4) 从经济性看,Low-E 玻璃尚不适用于夏热冬暖地区的教学建筑。虽然使用 Low-E 玻璃进行节能改造可以明显降低能耗,但成本较高,在整栋建筑的寿命周期内,亏损可达 $15 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在采用中空 Low-E 玻璃的 6 种工况中,寿命周期内净现值均为负数。虽然中空 Low-E 玻璃最多全年可节电 $10.2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,但其成本较高,投资回收周期较长,初始投资较高,若着重考虑经济性,则不宜使用。

参考文献:

- [1] 范征宇,肖子一,刘加平.多气候区不同窗墙比下功能布局对办公建筑能耗的影响[J].建筑节能(中英文),2023,51(6):18-23,31. DOI:10.16377/j.cnki.issn1673-7237.2023.06.004.
- [2] 李保峰.适应夏热冬冷地区气候的建筑表皮之可变化设计策略研究[D].北京:清华大学,2004.
- [3] 蒋本俊.浅析辽南地区住宅门窗的设计沿革与趋势[D].大连:大连工业大学,2014.
- [4] 陈兰娥.Low-E玻璃窗在夏热冬暖地区居住建筑中节能适用性研究[D].广州:广东工业大学,2012
- [5] 贾清清.夏热冬暖地区 LOW-E 玻璃在高层办公室建筑节能中的适用性研究[D].广州:华南理工大学,2021.

- [6] ZHENG Caidan, WU Peihao, COSTANZO V, *et al.* Establishment and verification of solar radiation calculation model of glass daylighting roof in hot summer and warm winter zone in China[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 2903-2909. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.089.
- [7] 王晶, 王亮, 朱沁萱. 农村住宅建筑节能改善策略研究[J]. *制冷与空调(四川)*, 2016, 30(1): 26-29, 32.
- [8] 雷艳, 黄巧玲, 杜松, 等. 贵州民用建筑围护结构节能技术适应性分析[J]. *建筑节能*, 2016, 44(11): 43-45. DOI:10.16315/j.1009-6825.2016.11.011.
- [9] HASSIEB M M, RABAB A, MOHAMED F A. Quantifying the influence of window-to-wall ratio (WWR) on indoor air quality and thermal comfort: Classroom study in hot arid climates[C]// 15th International Conference on Civil and Architecture Engineering. Cairo: IOP Publishing, 2024: 012025. DOI:10.1088/1755-1315/1396/1/012025.
- [10] 李章平, 黄玉芬. 计算机视觉视域下智能照明控制系统开发[J]. *中国照明电器*, 2025(1): 109-114. DOI:10.3969/j.issn.1002-6150.2025.01.028.
- [11] 王燕尼, 杨春宇, 段然. 旨在缓解工作人员疲劳的地铁站健康照明研究: 以重庆地铁车站为例[J]. *照明工程学报*, 2019, 30(6): 47-52. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2019.06.009.
- [12] 杨春宇, 汪统岳, 向奕妍, 等. 秋冬季节不同 LED 照明环境下的学习效率变化[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(6): 60-65. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2017.06.011.
- [13] 张煜垆, 田兴博, 冯建平. 教室健康照明设计及灯具布置分析[J]. *建筑电气*, 2023, 42(12): 55-60. DOI:10.3969/j.issn.1003-8493.2023.12.011.
- [14] 张煜垆, 田兴博, 冯建平. 教室健康照明控制设计[J]. *建筑电气*, 2024, 43(9): 48-52. DOI:10.3969/j.issn.1003-8493.2024.09.010.
- [15] 金玲, 薛鹏, 石佳欣, 等. 小学教室天然采光与人工照明的融合调查研究[J]. *建筑科学*, 2024, 40(6): 251-263. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.06.29.
- [16] SEBER G A F. 线性回归分析[M]. 方开泰, 等译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [17] 王朝红, 杨阳, 魏广龙. 基于效益评价的寒冷地区农宅附加阳光间优化研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(4): 130-138. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.04.17.
- [18] 王剑斌, 赵敬源. 陕北农村住宅建筑能效提升梯度研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2022, 50(3): 135-140. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2022.03.022.
- [19] 刘科, 王琴琴, 陈建平. 夏热冬冷地区既有住宅立面低碳优化研究: 以苏州地区为例[J]. *建筑节能(中英文)*, 2024, 52(8): 71-76. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.08.010.
- [20] 鲍超, 张志尧, 刘启明, 等. 基于合同能源管理模式的既有建筑节能改造项目经济效益评价方法研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2024, 52(7): 137-144. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.07.021.
- [21] 朱赛鸿, 余兴也. 基于 DeST 的天津既有农宅节能改造经济效益研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2022, 50(6): 121-125. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2022.06.020.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)