

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503002



豫中靠崖窑民居建筑室内 采光分析及提升策略

李显秋¹, 任婷¹, 侯智松²

(1. 云南农业大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650201;

2. 漯河市发展投资控股集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 以豫中地区传统靠崖窑民居建筑为研究对象,运用现场实测与软件模拟相结合的研究方法,对该地区典型窑洞建筑的室内照度及采光系数进行系统性分析。在不破坏豫中地区靠崖窑民居建筑原有空间格局、建筑风貌及构造特征的基础上,针对 3 个研究样本窑洞提出了 4 种室内天然采光优化策略组合。研究结果表明:文中策略具有可行性。

关键词: 豫中地区; 靠崖窑民居; 天然采光; 实测与模拟; 优化策略

中图分类号: TU 831

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0425-10

Indoor Lighting Analysis and Improvement Strategy of Cliff Dwelling Buildings in Central Henan

LI Xianqiu¹, REN Ting¹, HOU Zhisong²

(1. College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Luohe Development Investment Holding Group Limited Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Taking the traditional cliff dwellings buildings in the central Henan region as the research object, combining on-site measurements and software simulations, a systematic analysis was conducted on the indoor illumination and lighting coefficient of typical cave buildings in the region. On the basis of not destroying the original spatial pattern, architectural style, and structural features of the cliff dwelling buildings in the region, 4 optimization strategies combinations of indoor natural lighting were proposed for 3 research sample caves. The results show that the proposed strategy is feasible.

Keywords: central Henan region; cliffside dwelling building; natural lighting; measurement and simulation; optimization strategy

豫中地区广泛分布着传统靠崖窑民居建筑,其中,河南省巩义市、荥阳市等地的黄土丘陵地貌尤为典型,该地区岩土体结构以老黄土为主,其土层厚、土质均匀、垂直壁立稳定性强、湿陷性较小,为靠崖窑的建造提供优越的自然条件^[1-2]。靠崖窑作为典型的生土建筑,依托山体土层挖掘,拱形结构稳固、具备良好的保温隔热性能,可实现冬暖夏凉。因单侧采光、采光面积小,以及厢房的遮挡,存在室内照度不足、均匀性差等问题^[3],影响居住舒适性与功能适应性。随着绿色建筑与文化遗产保护的协同发展,以

收稿日期: 2025-03-02

通信作者: 李显秋(1973—),女,副教授,主要从事传统村落保护与发展的研究。E-mail:906352703@qq.com。

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划社会发展专项(202403AC100042)

低干预方式提升传统窑洞光环境性能,成为兼具科学与文化价值的研究课题。近年来,研究多集中于南方合院与北方四合院,传统民居光环境和生土窑洞光环境的研究较为匮乏。文献[4-6]对陕北窑洞热工性能与结构安全进行探讨,Elizabeth 等^[7]强调历史材料与技术结合对新型乡土建筑的重要性。文献[8-10]评估了靠崖窑光环境现状,提出使用反光镜、人工照明等改善措施,并借助斯维尔软件进行模拟分析^[11]。然而,现有研究缺乏对豫中地区靠崖窑采光特征的定量分析与针对性优化,现代改造技术应用于传统窑洞易破坏建筑空间原真性与构造特征,导致技术适配性差。因此,亟需探索兼顾传统风貌与光环境提升的创新路径。本文对豫中靠崖窑民居建筑室内采光分析及提升策略进行研究。

1 室内光环境现状与分析

1.1 室内天然光照度实测

1.1.1 研究样本选取 选取的研究样本(人马寨村王宅)位于河南省荥阳市石洞沟村,该村落于 2016 年被列入第 4 批中国传统村落名录。村内完整保留了 40 余座明清时期的古建筑院落,共计百余间房屋,其建筑具有显著的冬暖夏凉特性,且结构坚固耐用。人马寨村王宅始建于明清时期,于 1989 年进行了修缮,主要对窑脸和内部墙面进行了维护,并增建了厢房和倒座,形成了典型的围合式窑院民居格局。人马寨村王宅现状平面图,如图 1 所示。

人马寨村王宅由 3 孔窑洞组成,建筑朝向为南偏西 12°。

其中,窑洞 1 进深 11.5 m,起居空间进深 7.2 m,面宽 3.1 m,由于窑脸部分被一层厢房遮挡,导致采光条件差;窑洞 2 进深 6.0 m,起居空间进深 6.0 m,面宽 3.1 m,窑脸直接面向庭院且无遮挡,采光条件相对较好但仍显不足,采光较差;窑洞 3 进深 11.8 m,起居空间进深 7.5 m,面宽 3.1 m,窑脸完全被两层厢房遮挡,采光条件极差。这 3 孔窑洞分别代表了豫中地区靠崖窑民居建筑中室内光环境差、较差和极差 3 种典型情况。

1.1.2 实测过程与分析 1) 测点选取。依据 GB/T 5699—2017《采光测量方法》^[12]要求,在人马寨村王宅的 3 个窑洞内分别设置 3 个实测点(图 2)。所有测点均位于距离墙面 1 m 的南北轴线上,其中实测点 1 设置在距离采光口内墙面 1 m 处,实测点 2 位于轴线中心位置处,实测点 3 则布置在距离储藏空间外墙 1 m 处。

2) 实测过程。采用 TES-1339 型照度计进行现场实测,严格按照 GB/T 5699—2017《采光测量方法》^[12]技术规范执行。实测工作于 2021 年 12 月 25 日实施,选择 10:00、12:00 和 14:00 三个代表性时段,在符合国际照明委员会标准的无云晴天条件下进行数据采集。测量人员统一着深色服装,以减少测量误差。在每个窑洞的 3 个实测点处(距离地面 750 mm 的平面高度)进行 3 次重复测量,取平均值作为该测点的照度值。测量过程严格遵循规范要求,研究对象实测数据,如表 1 所示。表 1 中: E 为照度。

表 1 研究对象实测数据

Tab. 1 Measurement data of research objects

研究对象	$E(\text{测点 1})/\text{lx}$	$E(\text{测点 2})/\text{lx}$	$E(\text{测点 3})/\text{lx}$
窑洞 1	83.7	3.4	1.1
窑洞 2	125.2	16.9	5.1
窑洞 3	14.9	2.2	0.3

实测期间,发放居民调查问卷,收集居民对室内天然采光的主观评价信息。共发放问卷 60 份,回收

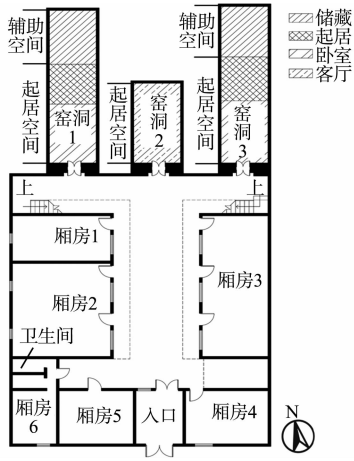


图 1 人马寨村王宅现状平面图
Fig. 1 Plan of current Wang residence in Renmazhai Village

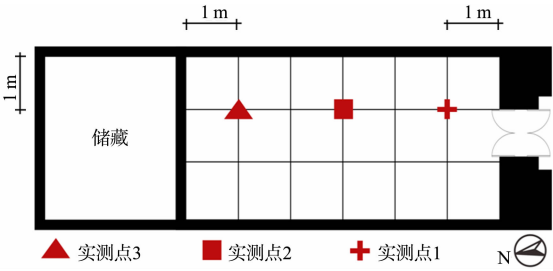


图 2 测点位置示意图
Fig. 2 Measurement point location

有效问卷 60 份,回收率为 100%。其中,60 岁及以上居民占比 66.67%(40 人),41~59 岁居民占比 26.67%(16 人),40 岁及以下居民占比 6.67%(4 人)。居住时长均超过 10 a,其中,居住时长 20 a 以上占比 53.33%(32 人)。受访者以务农(66.67%)和退休人员(26.67%)为主,具有典型传统民居居住群体特征。调查结果显示,73.33%的受访者(44 份调查问卷)认为室内天然采光环境极差,26.67%的受访者(16 份调查问卷)认为室内天然采光环境较差。问卷调查结果与现场实测数据具有高度一致性,进一步验证了研究结果的可靠性。

研究样本中,3 个窑洞的采光条件呈现明显差异:窑洞 1 的窑脸部分被一层厢房遮挡,导致采光效果差;窑洞 2 的窑脸直接面向庭院且无任何遮挡物,采光条件相对较好但仍显不足,采光效果较差;窑洞 3 的窑脸则完全被两层厢房遮挡,采光效果极差。

1.2 软件模拟与分析

1.2.1 参数设置 根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》^[13]和 GB 55016—2021《建筑环境通用规范》^[14]的相关规定,结合实地调研结果,采用 DBJ41/T 109—2020《河南省绿色建筑评价标准》作为参考标准。照度值为 15 000 lx,分析面高度为 750 mm,光线反射次数为 3 次。材料反射系数根据实际调研结果确定,室内地面和外表面采用红砖,反射系数为 0.33;玻璃材料为乳白色聚酯碳酸,反射系数为 0.16;室内顶棚和墙面为大白粉刷,反射系数为 0.75。

1.2.2 模拟分析 采用 Dali 软件,对 3 个窑洞的采光系数和照度进行模拟分析。所得的数据情况,如表 2、3,以和图 3、4 所示。表 2 中: E_{\min} 为最小照度; E_{\max} 为最大照度; \bar{E} 为平均照度。表 3 中: P (极差)表示采光系数低于 0.5%的区域面积的占比; P (差)表示采光系数在 0.5%~1.0%面积的占比; P (一般)表示采光系数在 1.0%~2.0%面积的占比; P (好)表示采光系数在 2.0%~5.0%面积的占比; P (极好)表示采光系数大于 5.0%面积的占比; \bar{C} 为平均采光系数。图 4 中: C 为采光系数。

表 2 研究对象的室内采光照度分布情况

Tab. 2 Distribution of indoor lighting intensity of research objects

研究对象	E_{\min}/lx	E_{\max}/lx	\bar{E}/lx
窑洞 1	0	496	27
窑洞 2	3	533	34
窑洞 3	0	187	10

表 3 研究对象的采光系数占比

Tab. 3 Proportion of daylighting coefficient of research objects

研究对象	P (极差)/%	P (差)/%	P (一般)/%	P (好)/%	P (极好)/%	$\bar{C}/\%$
窑洞 1	76	10	8	5	2	0.54
窑洞 2	75	9	8	6	2	0.69
窑洞 3	89	6	3	1	0	0.20

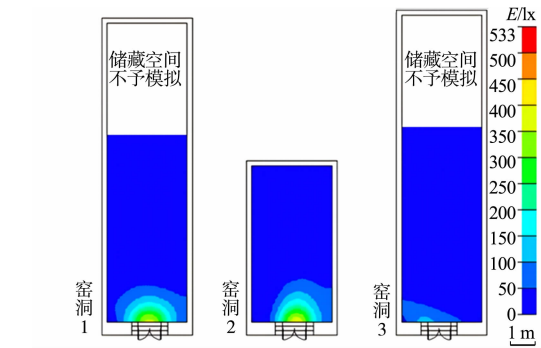


图 3 研究对象的现状照度模拟
Fig. 3 Simulation of current illumination
in cave dwellings

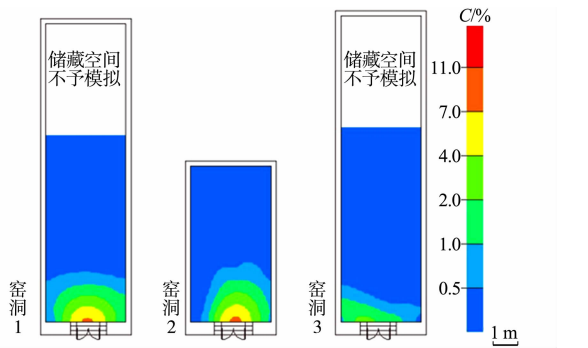


图 4 研究对象的现状采光系数模拟
Fig. 4 Simulation of current lighting
coefficient in cave dwellings

根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》^[13]和 GB 55016—2021《建筑环境通用规范》^[14]的相关规定,采光等级应不低于Ⅳ级标准,侧面采光的 $\bar{C} \geq 2.0\%$,同时,室内 $\bar{E} \geq 300 \text{ lx}$ ^[13]。因此,窑洞 1、2、3

的室内天然光照度平均值和采光系数均未达到上述标准要求。

2 实测数据与模拟数据校验

研究对象实测数据与模拟数据对比,如表 4 所示。由表 4 及相关计算可知:窑洞 1 均方根误差为 7.14%,归一化平均偏差为-6.80%;窑洞 2 均方根误差为 7.98%,归一化平均偏差为-2.85%;窑洞 3 均方根误差为 2.05%,归一化平均偏差为-5.75%。

表 4 研究对象实测数据与模拟数据对比
Tab. 4 Comparison of simulation data and measurement data of research objects

研究对象	内容	$E(\text{测点 } 1)/lx$	$E(\text{测点 } 2)/lx$	$E(\text{测点 } 3)/lx$
窑洞 1	实测数据	83.7	3.4	1.1
	模拟数据	81.2	1.0	0
窑洞 2	实测数据	125.2	16.9	5.1
	模拟数据	121.3	16.7	5.0
窑洞 3	实测数据	14.9	2.2	0.3
	模拟数据	14.7	1.7	0

模拟点与实测点的均方根误差和归一化平均偏差均控制在 $\pm 10\%$ 以内,远低于 EN 1791-39《2009 ASHRAE handbook fundamentals》^[15]规定的 $\pm 25\%$ 误差标准。实测数据与模拟数据产生的误差主要是因为实际材料的透光性参数与模拟软件透光性参数存在不同。在实际情况下,室内家具等存在反射光线,仪器本身存在磨损情况;而在模拟情况下,只考虑永久固定的顶棚、地面、墙面,只计算 3 次光线反射之间产生的误差。因此,模拟软件具有较高的准确性和可靠性。

3 靠崖窑光环境提升策略

3.1 靠崖窑天然光环境提升策略影响因素

3.1.1 靠崖窑天然光环境单因素影响 人马寨村王宅作为具有历史价值的传统民居建筑,其改造策略的制定需遵循以下原则:在改造过程中,不得破坏建筑原有结构,保持传统风貌特征,且加装的采光装置应具备可拆卸性。

基于上述原则提出 3 种室内天然采光优化方案:

- 1) 采用高透射比采光玻璃替换原有玻璃,以提高透光效率;
- 2) 在室内饰面涂刷浅色涂料,增强天然光的反射效果;
- 3) 结合现有通风口,加装被动式采光通风一体化装置(导光管),以提升室内光照强度。

多点漫射可调节的导光通风管示意图,如图 5 所示。

针对靠崖窑窑体建筑结构特征,采用垂直导光管将降低导光管系统效率。因此,利用窑脸通风窗,设计并申请了实用新型专利^[16]。该装置具有安装便捷、可拆卸的特点,在增加室内天然光照度的同时,还可实现通风调节功能,用户可根据实际需求灵活控制其开启与关闭。

导光通风管加装策略剖面图,如图 6 所示。

为量化评估靠崖窑室内采光改善效果,综合考虑采光现状、建筑风貌保护、结构安全性和经济性等因素,对 3 种天然采光优化方案的影响因素进行系统分析。

1) 高透射比采光玻璃替换方案(因素 A):根据 GB 50033-2013《建筑采光设计标准》^[13],结合经济性考量,选用透射比为 0.92 的 3 mm 透明亚克力玻璃(因素 A1)作为优化材料。

2) 室内浅色饰面涂料方案(因素 B):该方案涉及墙面、顶棚和地面的饰面处理。根据 GB 50033-2013《建筑采光设计标准》^[13],墙面与顶棚采用反射系数最高的石膏涂料,反射系数为 0.91(因素 B1);地面则采用反射系数为 0.75 的白水泥涂料(因素 B2),以最大限度提升光反射效果。

3) 导光管加装方案(因素 C):选用 DS530 型多点漫射可调节导光通风管,根据各窑洞采光现状差异确定支管数量(窑洞 1 安装 3 个支管(因素 C1),窑洞 2 安装 2 个支管(因素 C2),窑洞 3 安装 4 个支管(因素 C3))。

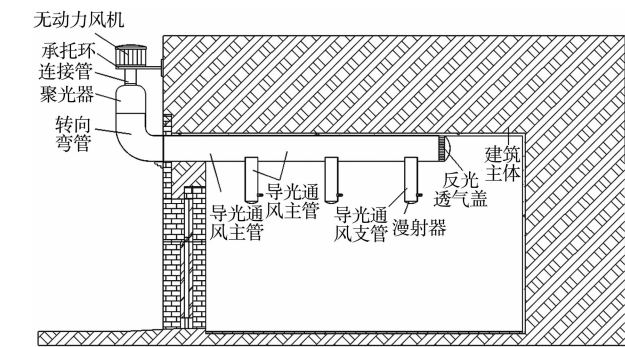


图 5 多点漫射可调节的导光通风管示意图
Fig. 5 Light guided ventilation duct with adjustable multi-point diffusion

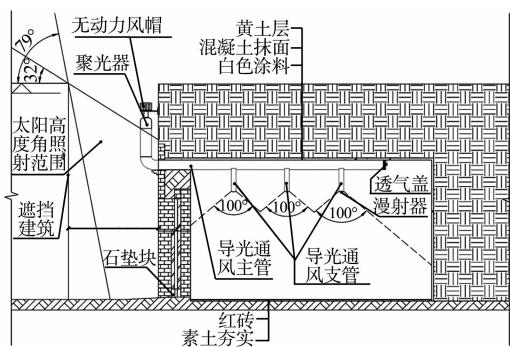


图 6 导光通风管加装策略剖面图
Fig. 6 Section of installation strategy of light ventilation pipe

导光管漫射器角度设置在 100° 左右时,能够提供较为稳定的照度输出^[17]。然而,导光管系统的效率会随着管道长度的增加和弯管数量的增多而降低,且各支管的系统效率存在显著差异。导光管顶部的无动力风帽在室内外温差超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或风速达到 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,即可启动旋转换气功能,其排气口平均风速可达 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据 JGJ/T 374—2015《导光管采光系统技术规程》^[18] 的相关规定,确定导光管等效长度。导光管采光系统效率(η)^[19-20] 的计算式为

$$\eta=\tau_1\times\eta_{\text{TTE}}\times\tau_2。$$

上式中: τ_1 为集光器的可见光透射比; τ_2 为漫射器的透射比; η_{TTE} 为导光管的传输效率。

根据导光管反射膜材料反射比及其等效长度计算公式,参照各等效长度直管导光管传输效率,得出 η 和带有弯曲角度的导光管传输效率参考值。

导光管的等效长度(V)计算式为

$$V=L/D。$$

上式中: L 为导光管的长度; D 为导光管的直径。

河南地区太阳高度角范围为 $32^{\circ}\sim79^{\circ}$,集光器和漫射器均采用透光率达 0.99 的 AR(增透)镀膜玻璃(T_1 、 T_2),计算得出各支管的系统效率。各支管采光系统效率,如表 5 所示^[21-22]。

表 5 各支管系统采光效率

Tab. 5 Lighting efficiency of each branch pipe system

研究对象	η			
	支管 1	支管 2	支管 3	支管 4
窑洞 1	0.86	0.83	0.80	—
窑洞 2	0.86	0.82	—	—
窑洞 3	0.87	0.84	0.81	0.78

由表 5 可知:3 个窑洞的单一优化方案均无法完全满足研究对象的采光要求。

3.1.2 靠崖窑天然光环境多因素组合策略 单一优化措施难以完全满足采光改善需求。因此,将上述优化方案进行系统整合,形成了 4 种组合改造策略:策略 1 为 AC 组合;策略 2 为 BC 组合;策略 3 为 AB 组合;策略 4 为 ABC 组合。窑洞组合改造策略,如表 6 所示。

表 6 窑洞组合改造策略

Tab. 6 Renovation strategies of cave dwelling combination

措施	窑洞 1 组合	窑洞 2 组合	窑洞 3 组合
策略 1	A1C1	A1C2	A1C3
策略 2	B1B2C1	B1B2C2	B1B2C3
策略 3	A1B1B2	A1B1B2	A1B1B2
策略 4	A1B1B2C1	A1B1B2C2	A1B1B2C3

3.2 改造策略应用及效果对比

针对 3 个典型研究空间,采用 Dali 软件进行 4 种优化策略的模拟分析,重点评估各策略下的室内照度和采光系数变化。

模拟分析过程数据,如图 7、8,表 7~12 所示。

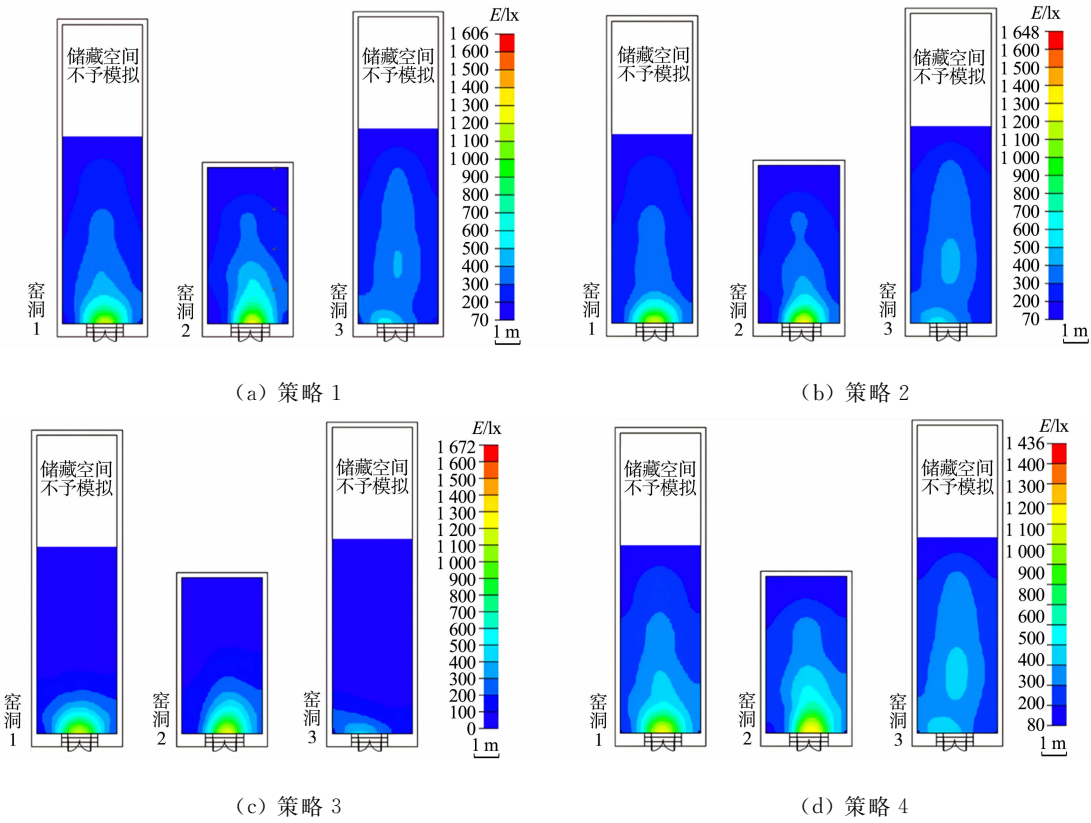


图 7 各策略采光照度模拟

Fig. 7 Simulation of lighting illumination of each strategy

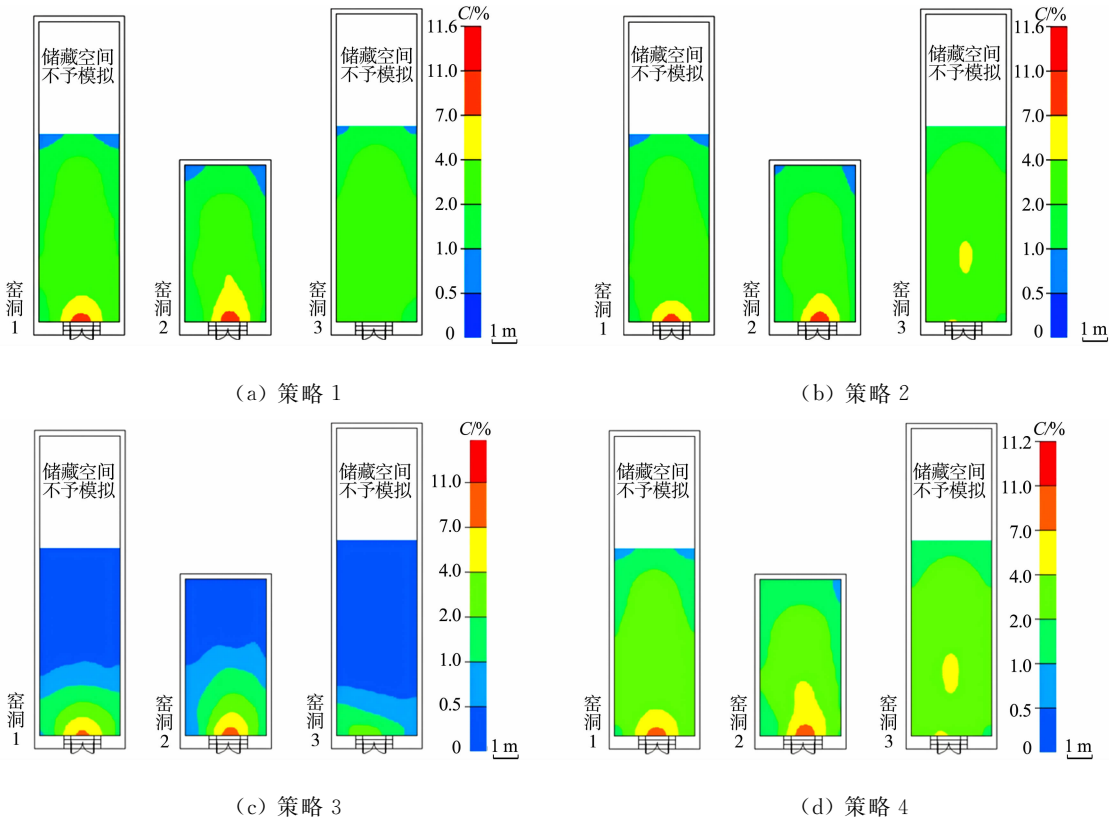


图 8 各策略采光系数模拟

Fig. 8 Simulation of lighting coefficient of each strategy

表 7 窑洞 1 各策略室内天然光照度分布情况
Tab. 7 Distribution of indoor natural illuminance in cave 1 for each strategy

措施	E_{\min}/lx	E_{\max}/lx	\bar{E}/lx
策略 1	65	1 606	288
策略 2	71	1 572	279
策略 3	2	1 546	116
策略 4	81	1 415	304

表 8 窑洞 1 各策略室内采光系数占比模拟分析
Tab. 8 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 1 for each strategy

措施	$P(\text{极差})/\%$	$P(\text{差})/\%$	$P(\text{一般})/\%$	$P(\text{好})/\%$	$P(\text{极好})/\%$	$\bar{C}/\%$
策略 1	0	4	28	65	3	2.52
策略 2	0	3	29	65	2	2.46
策略 3	63	13	13	8	2	0.77
策略 4	0	3	22	72	3	2.64

表 9 窑洞 2 各策略室内天然光照度分布情况
Tab. 9 Distribution of indoor natural illumination in cave 2 for each strategy

措施	E_{\min}/lx	E_{\max}/lx	E/lx
策略 1	87	1 599	300
策略 2	93	1 648	284
策略 3	22	1 672	119
策略 4	113	1 436	331

表 10 窑洞 2 各策略室内采光系数占比模拟分析
Tab. 10 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 2 for each strategy

措施	$P(\text{极差})/\%$	$P(\text{差})/\%$	$P(\text{一般})/\%$	$P(\text{好})/\%$	$P(\text{极好})/\%$	$\bar{C}/\%$
策略 1	0	4	36	56	5	2.52
策略 2	0	2	39	56	4	2.42
策略 3	47	21	18	11	3	1.12
策略 4	0	1	32	62	5	2.69

表 11 窑洞 3 各策略室内天然光照度分布情况
Tab. 11 Distribution of indoor natural illumination in cave 3 for each strategy

措施	E_{\min}/lx	E_{\max}/lx	E/lx
策略 1	78	694	294
策略 2	93	680	293
策略 3	3	588	51
策略 4	102	587	303

表 12 窑洞 3 各策略室内采光系数占比模拟分析
Tab. 12 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 3 for each strategy

措施	$P(\text{极差})/\%$	$P(\text{差})/\%$	$P(\text{一般})/\%$	$P(\text{好})/\%$	$P(\text{极好})/\%$	$\bar{C}/\%$
策略 1	0	2	20	78	0	2.61
策略 2	0	0	15	85	0	2.78
策略 3	80	12	6	2	0	0.34
策略 4	0	0	15	85	0	2.82

3.3 通风效果

导光通风管的引入对窑洞室内风环境产生了显著影响。为量化评估其通风效果,在加装导光通风管前后的室内(通风状况),采用绿建斯维尔通风软件 Vent 对 3 个窑洞进行模拟分析。模拟结果表明,导光通风管有效增强了窑洞夏季室内空气的循环流动,显著改善了室内风速分布。这一改进对于缓解窑洞内部潮湿问题具有积极作用。

窑洞夏季改造前后剖面通风模拟对比图,如图 9 所示。图 9 中: v 为风速。

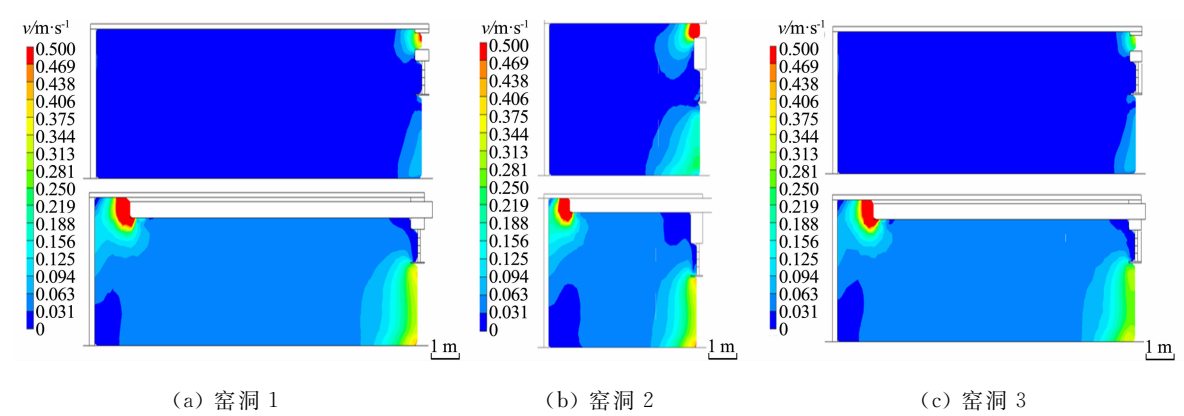


图 9 窑洞夏季改造前后剖面通风模拟对比图

Fig. 9 Comparison of ventilation simulation before and after renovation of cave in summer

3.4 改造策略选择与分析

针对采光条件分别为差、较差和极差的 3 种典型居住功能窑洞,提出了相应的改造策略。提出的策略不仅能够改善目标窑洞的采光状况,同时还能优化室内通风环境,且这些策略同样适用于其他采光条件较好的窑洞。改造策略达标情况,如表 13 所示。

表 13 改造策略达标情况

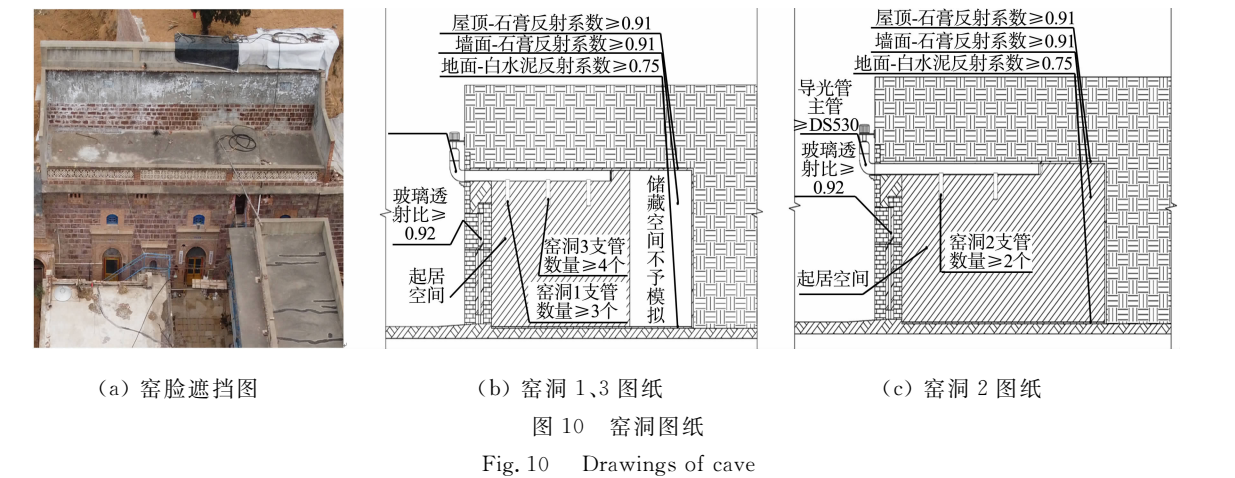
Tab. 13 Standards of renovation strategies

研究对象	措施	内容	改善情况
窑洞 1	策略 1	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 7、8)
	策略 2	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 7、8)
	策略 3	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 7、8)
	策略 4	平均天然光照度 平均采光系数	达标(表 7、8)
窑洞 2	策略 1	平均采光系数 采光平均时数	达标(表 9、10)
	策略 2	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 9、10)
	策略 3	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 9、10)
	策略 4	平均天然光照度 平均采光系数	达标(表 9、10)
窑洞 3	策略 1	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 11、12)
	策略 2	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 11、12)
	策略 3	平均天然光照度 平均采光系数	不达标(表 11、12)
	策略 4	平均天然光照度 平均采光系数	达标(表 11、12)

由表 13 可知以下 2 点结论。

1) 对于窑洞 1、3,仅策略 4(表 5、6,图 10(b))能够同时满足平均天然光照度和采光系数的标准要求。主要归因于窑洞 1、3 均采用北向单侧采光模式,并具有一定的空间进深,窑洞 1 的窑脸受到部分遮挡,而窑洞 3 的窑脸则处于完全遮挡状态(图 10(a))。

2) 对于窑洞 2,由于窑脸前无任何遮挡物(图 10(a)),策略 1、4 均能达到采光标准,而基于经济性考量,宜采用策略 1 进行改造(表 5、6,图 10(c))。



4 经济效益估算

4.1 年节电费用

根据 GB/T 50034—2013《建筑照明设计标准》的相关规定,卧室照明满足照度为 150 lx^[23]。节电项目概算,如表 14 所示。

表 14 节电项目概算

Tab. 14 Budget estimations for power-saving projects

参数	数值	参数	数值
室内建筑面积/m ²	90.83	照明平均时长/h	10
照明功率密度/W·m ⁻²	6	民用电费/元·度 ⁻¹	0.56
年照明时间/d	365	镇流器耗电比/%	20~30
年节电费用/元	1 392.42		

4.2 成本

鉴于导光管系统的使用周期为 25 a,期间无需进行维修管理,同时,室内装修的后期维护费用难以准确预估,故仅针对采光改造的一次性增量投入成本进行计算。增量成本分项内容如下:墙的面积为 83.61 m²,石膏粉刷材料单价为 1 000 元·t⁻¹,预算总价为 66.89 元,增量成本为 66.89 元;屋顶的面积为 61.45 m²,石膏粉刷材料单价为 1 000 元·t⁻¹,预算总价为 49.16 元,增量成本为 49.16 元;地面的面积为 45.57 m²,白水泥抹面材料单价为 1 000 元·t⁻¹,预算总价为 89.35 元,增量成本为 89.35 元;玻璃面积为 2.61 m²,3 mm 透明亚克力材料单价为 8 元·m⁻²,预算总价为 20.88 元,增量成本为 66.89 元;导光管有 3 个,规格为 DS530×3,材料单价为 4 000 元·个⁻¹,预算总价为 12 000 元,增量成本为 12 000 元;增量成本合计 12 226.28 元。

4.3 投资回收期

采用投资回收期(T)作为经济可行性评估指标^[24],计算公式为

$$T=M/N。$$
(1)

式(1)中: M 为采光改造总成本; N 为年节电费用。

根据计算, $T=12\,226.28/1\,392.42=8.8$ a。因此,改造投资可在 10 a 内收回成本,该改造策略具有经济可行性。

5 结论

1) 通过对豫中地区 3 个典型靠崖窑民居建筑的现状实测与模拟数据分析发现,研究对象作为居住功能的窑洞普遍存在室内天然采光不足的问题,其采光指标未能达到相关规范要求。

2) 基于保护地域性建筑风貌、维持原有结构完整性,以及确保经济可行性等原则,对 3 个窑洞模拟各种改造策略,并对其效果进行了评估。对于天然采光较差的窑洞,宜采用提高玻璃透射比与导光管的技术解决方案。对于天然采光极差和差的窑洞,宜采用提高玻璃透射比、浅色内墙粉刷与导光管的综合

改造方案。天然光平均照度和采光系数达到规范要求,同时,有效改善室内空气流通状况。

3) 经济效益分析显示,提出的改造策略组合具有较好的经济可行性。经估算,相关改造措施的一次性投入成本可在 10 a 内收回,具有可实施价值。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国传统建筑解析与传承: 河南卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

[2] 做满常, 渠滔, 王放. 中国民居建筑丛书: 河南民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[3] 王军, 靳亦冰, 师立华. 中国传统民居建筑建造技术: 窑洞[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[4] 郑海, 杨红霞. 陕北地区新型农居冬季室内热环境评价与分析[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(9): 146-150, 177.

[5] 李知昊, 蒙慧玲. 山西传统砖箍窑洞围护结构节能改造研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(11): 58-62.

[6] 党雨田, 庄惟敏, 常强. 黄土高原地区传统崖窑的立面空间研究[J]. 建筑学报, 2020, 21(增刊 1): 92-97.

[7] ELIZABETH L, ADAMS C. Alternative construction: Contemporary natural building methods[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[8] 孙跃杰, 张芳芳. 洛阳市靠山窑民居太阳能改造及后效评估[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(21): 3-4.

[9] 刘红莉. 豫西窑居建筑室内物理环境测试分析及模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2021. DOI: 10. 26976/d. 2021. 001807.

[10] 纪哲. 榆林南部窑居建筑地域适应性及更新设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. DOI: 10. 27393/d. 2021. 000673.

[11] 毕昕, 侯智松, 麻永建, 等. 豫西地坑院民居建筑室内采光分析及提升策略研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(12): 76-84. DOI: 10. 13614/j. 11-1962/tu. 2022. 12. 10.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 采光测量方法: GB/T 5699—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑环境通用规范: GB 55016—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[15] AMERICAN SOCIETY OF HEATING. 2009 ASHRAE handbook fundamentals: EN 1791—39[S]. Atlanta: American Society of Heating, 2009.

[16] 毕昕, 侯智松, 陈伟莹, 等. 一种多点漫射可调节的导光通风管: 202220832595. 7[P]. 2022-09-13.

[17] 李建颖. 西安市高校体育馆夏季室内热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 导光管采光系统技术规程: JGJ/T 374—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[19] 吴新汶, 王春苑, 欧阳金龙. 利用 TracePro 模拟分析导光管的传输效率[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 145-150.

[20] 罗涛, 林若慈, 王书晓. 天然光导光系统分类及全年采光动态模拟[J]. 建筑科学, 2007, 119(6): 4-8.

[21] 林国成. 自然光导入照明系统[J]. 现代建筑电气, 2013, 4(2): 30-36, 41. DOI: 10. 16618/j. 1674-8417. 2013. 02. 009.

[22] MOHAMMED A, DAVID C. Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances[J]. Applied Energy, 83(7): 774-788. DOI: 10. 1016/j. 2005. 08. 001.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: GB/T 50034—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[24] 王永祥, 谢丽. 南昌既有建筑节能改造技术经济分析[J]. 华东交通大学学报, 2010(5): 17-21.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)