

典型历史时期晋西窑洞民居光环境的模拟研究 ——以临县西湾村为例

于姝亚, 石谦飞

(太原理工大学 建筑学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了探究晋西窑洞民居在典型历史时期对光环境的适应演变过程, 同时为传统窑洞民居光环境问题提出解决办法, 故此对晋西窑洞民居进行定量研究. 在实地测绘和调研走访过程中, 将晋西传统窑洞民居根据时间序列分为 4 个典型时期, 共 6 个典型窑洞民居案例, 基于 ECOTECT 模拟并且进行定量研究. 采用采光系数、照度和采光均匀度对 6 个案例的光环境展开讨论, 并结合案例实测数据进行平立面量化, 分析其在时间演变下对光环境的适应关系. 研究表明: 通过模拟, 在时间的序列下晋西窑洞民居对光环境的适应性是增强的; 通过定量测绘, 晋西窑洞民居在平面规模和立面开窗洞口面积做出了相应的调整, 进而影响窗地比这一数值的增大, 其数值决定了光环境适应性.

关键词: 典型历史时期; 晋西窑洞; 窑洞民居; 光环境模拟

中图分类号: TU113

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0758-07

Simulation study on light environment of cave dwellings in western Shanxi in typical historical period: Taking Xiwan village of Linxian county as an example

YU Shuya, SHI Qianfei

(College of Architecture, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to explore the adaptation and evolution of cave dwellings in western Shanxi to light environment, and to propose solutions to the light environment problems of traditional cave dwellings, quantitative research was carried out on cave dwellings in western Shanxi. In the process of field survey and research visits, the traditional cave dwellings in western Shanxi were divided into 4 typical periods according to time series, and a total of 6 typical cave dwellings were studied quantitatively based on ECOTECT simulation. The lighting coefficient, illumination and lighting uniformity were used to discuss the light environment of 6 cases, and the horizontal facade was quantified based on the measured data of the cases, and the adaptation to the light environment over the time was analyzed. The results show that by simulation, the adaptability of cave dwellings to light environment is enhanced in the sequence of time, and through quantitative surveying and mapping, the plane scale and the area of the window openings in the facade of the cave dwellings in west Shanxi were adjusted accordingly, thus affecting the increase of the window-to-ground ratio, which determines the adaptability of the light environment.

Key words: typical historical period; cave dwellings in western Shanxi; cave dwellings; light environment simulation

光环境是营造室内舒适物理环境的重要组成部分, 其对人的心理和生理健康产生着尤为重要的作用. 良好的室内光环境能提升工作效率, 直接影响对外界信息的接受, 同时良好的室内光环境有助于改善睡眠质量和缓解压力, 然而过量的天然光环境也将引起视觉刺激, 造成持续眩光的现象. 在传统窑洞民居营造过程中, 蕴含着许多

朴素的生态营建智慧, 然而对于传统窑居光环境的生态智慧及其科学演进, 缺乏研究与关注.

目前关于光环境对传统民居的影响, 国内外众多学者对建筑室内外的光环境进行了研究, 并且取得了诸多研究成果. 杨柳柳等人选取苏州地区 8 个公共建筑中庭进行光环境实测, 提出优化中庭围护结构形式的被动式节能手段^[1]; 舒畅对苏州

收稿日期: 2021-04-06

修改稿日期: 2021-09-24

基金项目: 山西省自然科学基金(201801D121175)

第一作者: 于姝亚(1995—), 女, 硕士生, 研究方向: 建筑遗产保护理论. E-mail: 47130208@qq.com

通信作者: 石谦飞(1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 建筑遗产保护理论. E-mail: shiqianfei@163.com

姑苏区民居建筑进行了研究,得出窗墙比数值在城市住宅中自然光环境节能的影响^[2];以上研究都是针对建筑光环境实测的研究。王炎松等人对赣东地区“纵向天井”家塾型书院与附近民居室内自然光的照度进行研究,探究到“纵向天井”家塾性书院室内自然光环境的优势性^[3];何苗等人对晋江市东山村传统民居的室内光环境进行了模拟实验,提出适应性的优化策略^[4];王怡等人对传统窑洞及新型窑洞室内环境做了大量研究,得出窑洞称得上是节能建筑,新型窑洞继承和发扬了传统窑洞的优点^[5];李啸雷等人对三门峡市曲村的地坑窑院实地调研,运用 ECOTECT 软件模拟,分析地坑窑院光环境等自主改良模式^[6];然而总体上看,多数研究是在确定的时间环境下,实测光环境参数进行分析和比较,提出优化策略。但是从时间序列的角度,分析其室内光环境在典型历史时期的演变研究较少。在随着时间的变化,窑洞民居的规模和窑洞单体,都是在不断适应当地条件。洞悉到这一动态变化,进而推论室内天然光环境也随着时间序列的不同而发展变化,与当地的环境相适应。故而寻求在时间序列下,晋西窑洞民居的演变与光环境的关系。基于此,研究晋西窑洞建筑按照时间序列分为4个典型历史时期,进行光环境的数据对比和定量分析,并将其代表个体在演变进程中的演变形式以窗地比的形式量化,探讨其与光环境的适应关系。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象地理概况

西湾村位于吕梁市临县碛口镇,西靠黄河,隔黄河同陕西榆林相望,属晋西丘陵沟壑区(图1)。地理坐标为北纬37.95°、东经110.98°,属于半干旱温带大陆性季风气候,四季分明,最多风向为南风 and 北风,平均降水量502.5 mm,年平均气温8~9℃,属于光气候分区中第Ⅲ类光气候区,日照较丰富,平均日照时间2 252 h,平均日照率58%。



图1 西湾村窑洞民居现状

Fig. 1 Current situation of cave dwellings in Xiwan village

1.2 研究对象的选取

西湾村以“北楼南厅,东西配房”的合院式院落为基本单位,村内有许多保留完整的传统窑洞民居,随着时间序列的展开,从明末至今,各时期特色的窑洞民居相互交融,是西湾村典型特征。通过实地调研,将当地窑洞民居按照时间序列,大致分为4个典型历史时期,这4个时期的窑洞民居外观与平面形制如表1和图2所示。

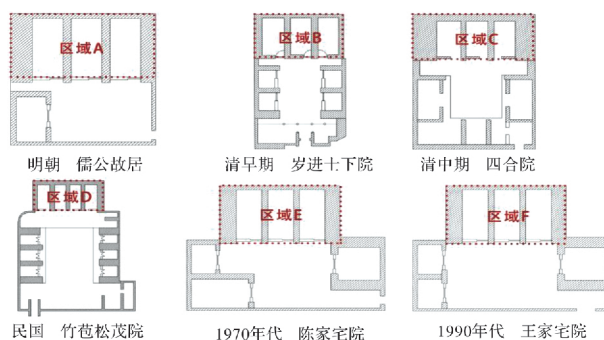


图2 典型历史时期模拟区域

Fig. 2 Simulation area in typical historical period

第1典型历史时期:选取建造于明末时期的窑洞民居“儒公故居”,区域A作为模拟对象,这是目前村内现存仅有的明代窑洞,也是明代时期典型的窑洞民居类型。现状院内保留有石磨和碾盘等生活设施,砖砌围墙和大门为清代修建。

第2典型历史时期:选取了清代的2个典型窑洞民居,区域B选自清初期的“岁进士下院”,始建于清代1737年,是典型的“北楼南厅,东西配房”的形制。院内布局对称,正房建在1 m的高台之上,三孔石窑,每孔开间4 m,进深8 m,无根厦檐,正立面是用石条做悬挑构件承接檐子,东西厢房都是两孔砖窑。区域C选自清中期的四合院,院内房屋的布置是完全对称的,院落为正方形,正房是3孔石窑洞,立面为无根厦檐,东西配房和南厅是3间单坡的木构瓦房。

第3典型历史时期:选取民国时期的窑洞民居,此时期多以单进院落为主,其中区域D选自“竹苞松茂”院,其属于“北楼南厅,东西配房”格局的演变形式,根据院主人商会会长的建造需求采取了“去北楼”形式。院落门匾上书写“竹苞松茂”,出自于《诗经·小雅·斯干》:“如竹苞矣,如松茂矣。”寓意家门兴盛。院落宽敞,是典型的四合院。正房立面有4孔石窑,窑洞式明柱厦檐、高圪台,最中间的两孔窑洞之间有一座佛龛,使得窑洞数为单数。东西厢房各三孔砖窑,倒座是客厅、马棚和厕所。

表 1 历史时期典型院落表
Tab. 1 Typical Courtyard in Historical Period

时间节点	修建年代	院落名称	民居形态	典型民居	文字描述
第 1 典型 历史时期	明代	儒公故居			民居简陋, 仅能维持遮风挡雨
	清早期	岁进士下院			正面三大开间, 左中窑脸一致, 右窑脸开窗较小
第 2 典型 历史时期	清中期	四合院			建筑互相连接, 房屋紧密, 互相遮挡
第 3 典型 历史时期	民国时期	竹苞松茂院			高圪台, 窑脸圆润, 开阔
	1970 年代	陈家宅院			窑脸统一整齐, 规模变小
第 4 典型 历史时期	1990 年代	王家宅院			窑脸高大宽阔, 民居进深较小

第 4 典型历史时期: 选自建国之后村民自主建造的窑洞民居, 区域 E 建造于 1970 年代的陈家宅院, 区域 F 选自建造于 1990 年代的王家宅院, 它们不再仅仅是满足于遮风避雨、抵抗外敌的生存性需求, 而是对居住舒适性有了更高的需要。根据新的生活理念, 窑洞民居在建造上更注重现代化和美观性, 窑洞内部也疏通了上下水系统和电路系统, 主窑中布置了独立的卫生间, 更大程度上方便居住, 除此, 在门窗和材料等细部设计上也更趋于现代化的审美。

1.3 研究方法

运用现代建筑科学技术软件 ECOTECT 对 4 个典型历史时期的 6 个窑洞民居的正房窑洞区域进行室内光环境模拟, 将窑洞民居营造演变对光环境的调整转化为科学化的设计技术和方法。通过对其光环境的模拟和结果的分析, 采取软件模拟定量分析窑洞民居建造演变对光环境适应的科学机理。

1.3.1 模拟区域选择

在 4 个典型历史时期的 6 个典型案例中, 正房是作为主卧和厨房的混合功能进行使用, 其使用频率是院落中最高的, 也是对光环境有严格要求的房间, 因此, 本次模拟实验选取 6 个案例具有代表性的正房分别简化为 A、B、C、D、E、F 6 个区域模型进行模拟分析(图 2), 即儒公故居正房为区域 A, 岁进士正房和四合院正房分别为区域 B 和区域 C, 竹苞松茂正房为区域 D, 陈家宅院和王家宅院的正房分别为区域 E 和区域 F。

1.3.2 测量标准

晋西地区在我国的光气候分区中属于第Ⅲ气候区, 根据《GB50033-2013 建筑采光设计标准》中第Ⅲ气候区光气候系数 K 值为 1.00, 室外天然光设计照度值 E_s 为 15 000 lx, 室外临界照度值为 5 000 lx。根据《采光测量方法(GB/T5699-2017)》, 在模拟实验中将天空照度模型设定为全阴天空, 全阴天空只有扩散光, 不存在太阳直射光, 伴

随着太阳高度角的变化,是室外照度相对比较稳定的时间。这6座窑洞民居建筑的结构、材质不同,不具备统一横向比较的科学性,因此本次实验选择采光系数、照度和采光均匀度作为是否符合国家标准规定的居住建筑采光要求的评价因子。

根据建筑《采光测量方法(GB/T5699-2017)》,此次模拟实验采用科学软件 ECOTECT 以网格法均匀布点来获取室内光环境数据,6个区域模型数据采取实际建筑尺寸,建模过程中所有的门窗洞口都设定为完全开放的状态,计算网格放置于距离室内地面 800 mm 的高度,网格数为 500,采取综合评价室内光环境的三指标:室内采光系数、照度和采光均匀度,来总结各个区域的采光情况。

2 模拟结果及分析

2.1 采光系数的计算与分析

根据 GB50033-2013《建筑采光设计标准》,住宅建筑的卧室、起居室和厨房的侧面采光系数不应低于 2.0%,当地的住宅侧面采光的采光系数最小值 C_{\min} = 标准值 \times 光气候系数 K ($K=1.00$),卧室、起居室、厨房最小采光系数不得低于 2.00%(表 2)。

表 2 住宅建筑侧面采光的采光标准值

Tab. 2 Daylighting standard values of side lighting of residential buildings

采光等级	房间名称	C_{\min}	
		标准值	K 值
IV	起居室、卧室、书房、厨房	2.00	1.00

根据模拟结果(图 3)得出:区域 A 的 $C_{\min}=0$,区域 B 的 $C_{\min}=0$,区域 C 的 $C_{\min}=0.2$,区域 D 的 $C_{\min}=2.4$,区域 E 的 $C_{\min}=2.8$,区域 F 的 $C_{\min}=3.6$ 。区域 A、B、C 三个区域不满足国家规定的采光设计标准,而区域 D、E、F 三个区域满足于国家标准的采光要求。

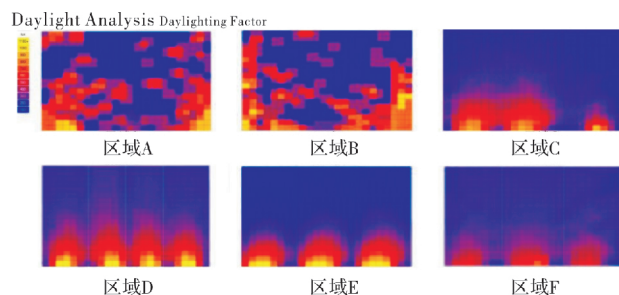


图 3 区域的采光系数模拟结果

Fig. 3 Simulation results of regional daylighting coefficient

区域 A 和区域 B 的采光系数在靠近窗口的地方较高,区域 C 和区域 D 采光系数从窗口向室内延伸,采光系数随之开始下降,到室内 4 m 深的

时候,采光系数基本已经为 0,室内是无法收到自然采光。而区域 E 和区域 F,采光系数从窗口和室内进深最大处逐渐开始降低,过渡平滑和平缓,采光情况较之前 4 个区域理想,即区域 A=区域 B<区域 C<区域 D<区域 E<区域 F。

2.2 采光均匀度的分析

采光均匀度是对采光系数跨度的评定,在区域 A 和区域 B 的采光分析中,采光系数的变化范围在 0%~60%,变化幅度为 60%,整体室内照度分布不均匀。区域 C 的采光系数变化范围在 0.2%~20.2%,变化幅度为 20%,其中 0.2%~2.2%占 30%。区域 D 的系数变化范围在 0%~20%,变化幅度为 20%,其中 0%~2.0%占 0.4%。区域 E 的系数变化范围为 2.8%~22.8%,变化幅度为 20%。区域 F 的系数范围 3.6%~23.6%,变化幅度为 20%。

从采光均匀度来说,区域 A 和区域 B 的采光系数跨度较大,区域 C、D、E、F 跨度幅度都为 20%,采光均匀度区域 A 和区域 B 较差,其余区域一致,即区域 A=区域 B<区域 C=区域 D=区域 E=区域 F。

2.3 照度的分析

在典型历史时期的窑洞民居区域分别设置 500 个计算点,根据全阴天自然采光照度模拟图(图 4),可以得出,区域 A 照度值小于 300 lx 的计算点占整个区域的 85.10%,区域 B 照度值小于 300 lx 的计算点占整个区域的 84.38%,区域 C 占 71.20%,区域 D 为 40%,区域 E 占 38.2%和区域 F 照度小于 300 lx 的计算点占整个区域的 36.50%,对比 6 个区域照度低于 300 lx 的计算点所占比,其动态走向是呈下降趋势。由此可见,其照度情况是有所好转的,而且最小照度在 6 个区域的动态走向是在逐渐上升的,最大照度值也是在不增大的。数值说明其照度值是在时间序列下是不断提高的。整体室内自然光环境是在不断改善,窑洞民居对光环境的适应性也是呈有利的动态趋势演变。

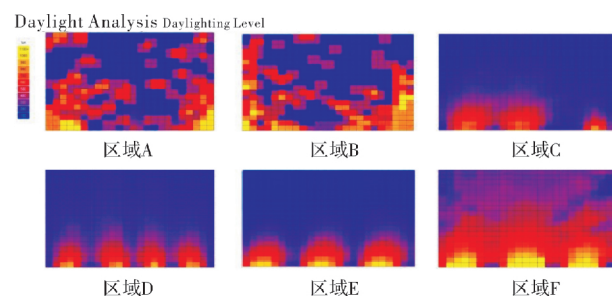


图 4 区域的照度模拟结果

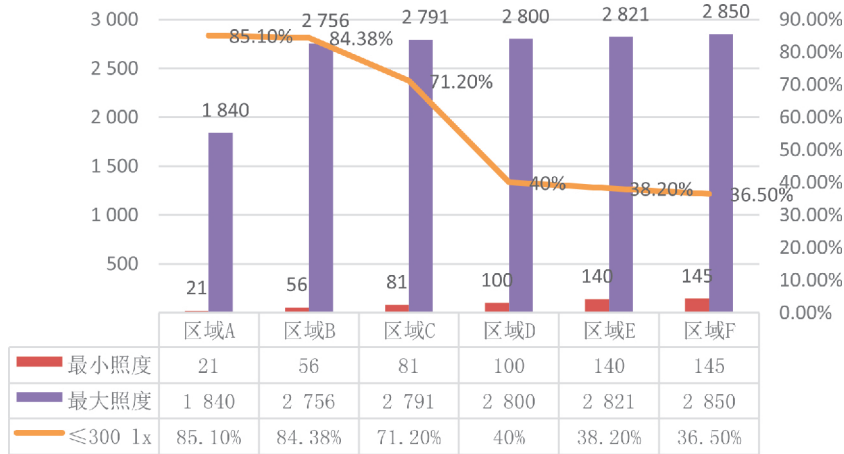
Fig. 4 Simulation results of regional illuminance

由照度分析图(表 3)可看出,区域 A 和区域 B 的照度比较分散,而且最小照度和最大照度跨度相距太大,整体室内照度较低,房间深度较大,整体采光较差.区域 C 和区域 D 相较于区域 A 和 B 而言,靠近采光口的照度较高,距离采光口较远的地方照度较差,但是采光均匀度稍微有所提升.

区域 E 和区域 F 两个的照度,明显比前者更好,房间采光均匀度较高.从照度的角度来看,6 个区域的照度情况,建国之后区域 E 和区域 F 的照度情况是最好的,民国时期的区域 D 和清代的区域 C 照度情况次之,清代的区域 B 和明代的区域 A 照度情况最差.

表 3 模拟区域最小、最大照度和≤300 lx 的百分比

Tab. 3 Percent of minimum and maximum illumination and ≤ 300 lx in simulated area



2.4 ECOTECT 模拟结果总结

从以上 6 个典型历史时期的区域室内自然采光分布情况来看,采光系数、照度和采光均匀度三个数值综合起来可得:1970 的区域 E 和 1990 年区域 F 的室内自然情况是最好的,民国时期的区域 D 和清中期的区域 C 次之,清早期的区域 B 和明代的区域 A 最差,即区域 A<区域 B<区域 C<区域 D<区域 E<区域 F.

窑洞民居规模(表 4)是在减小,由测量数值可知,区域 A 和区域 B 的正房规模是大致相同的,区域 C 相较于区域 A、B 在规模上是减少的,而区域 D 的规模则是最大的,区域 E 和 F 是所有模型里规模最小的.其中区域 A、区域 B、区域 C 为三开间,区域 D 为四开间,区域 E 和区域 F 也是三开间.从整体上来看,不管是进深还是面宽,两个数值都是在减小,故而窑洞民居的规模是在呈递减的状态,这大致可以理解为是由于村落建成区域用地紧张所导致的现象.

3 典型历史时期晋西窑洞民居的量化分析

3.1 窑洞民居规模的量化演变

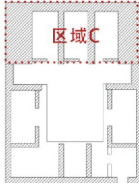
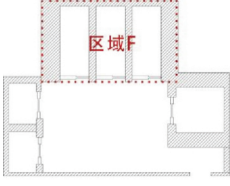
在时间序列下,六个典型历史时期区域的窑

表 4 模拟区域平面规模表

Tab. 4 Plane scale table in simulated area

模拟区域	平面图	平面面积/m ²	模拟区域	平面图	平面面积/m ²
区域 A 明朝儒公 故居		121.91	区域 D 民国竹苞松茂院		171.60
区域 B 清早期 岁进士下院		121.92	区域 E 1970 年代陈家宅院		82.53

续表 4

模拟区域	平面图	平面面积/m ²	模拟区域	平面图	平面面积/m ²
区域 C 清中期 四合院		109.80	区域 F 1990 年代王家宅院		73.80

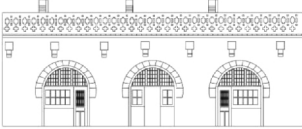
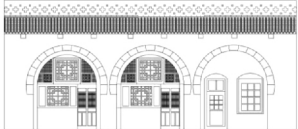
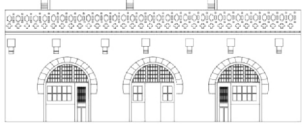
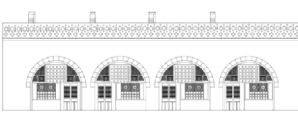


3.2 窑洞立面的开窗洞口的量化

随着时间的推移，区域 A 和区域 B 的开窗洞口面积是最小(表 5)，区域 A 的三间正房的窑脸形式是一致的，区域 B 最中间的窑脸异于两侧窑脸，而区域 D 的窑脸面积是最大的，建国之后的窑洞民居区域 E 和区域 F 在窑脸上开启了较大的窗洞

来进行采光。采光的窗洞相对较大时，室内能够获取到更加充足的自然采光，与此同时，区域 E 和区域 F 的窑脸形式是一致的，相较前四个区域的开窗面积更大，窑脸更圆润。从整体趋势上来看，开窗洞口在时间序列中的演变是呈上升的趋势的。

表 5 模拟区域立面开窗洞口面积

Tab. 5 Area of window openings in the facade of simulated area

模拟区域	立面图	开窗洞口面积/m ²	模拟区域	立面图	开窗洞口面积/m ²
区域 A 明朝儒公 故居		16.00	区域 B 清早期 岁进士下院		15.83
区域 C 清中期 四合院		22.13	区域 D 民国竹苞 松茂院		40.38
区域 E 1970 年代 陈家宅院		24.83	区域 F 1990 年代 王家宅院		24.83

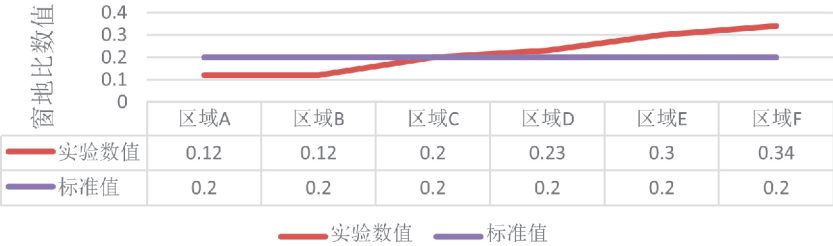
3.3 窗地比

将窑洞民居的开窗洞口面积与该窑洞民居地面面积相比，可得到窑洞民居的窗地比(表 6)，其数值可以影响到窑洞民居的室内天然光水平，根据气候区窗地比标准为 1/5 可以评定窑洞民居是否达到窗地比的标准值。综合判断窑洞民居规模随着时间演变的数值在逐渐减小，而窑洞民居的开窗洞口的数值是逐渐增大的，其比值是呈现上升

的趋势。由表 6 可得出，随着时间的推移，案例区域的窗地比在逐渐增大，从区域 A 的 0.13 在区域 C 达到标准值 0.2 之后，区域 D、区域 E 和区域 F 更是较标准值大。故此判断，在时间演变过程中，窑脸的开窗洞口与建筑地面的比值是在逐渐上升的。随着窗地比的增大，窑洞民居的自然采光情况是在呈现动态上升的趋势。

表 6 模拟区域窗地比与标准值

Tab. 6 Window-ground ratio and standard value of simulated area



根据 ECOTEC 软件的室内天然光环境仿真模拟，得出在时间演变下，晋西窑洞民居的室内光

环境条件在平稳提升;从晋西窑洞民居本身出发,以量化的形式,从窑洞民居的规模和窑洞民居立面开窗洞口两个数据,得出晋西窑洞民居的窗地比数值在时间推移下是在增大的,室内自然采光条件得到了相应的改善.通过模拟和实测数据对比,共同得出晋西窑洞民居在历史演变过程中,其对光环境的适应是主动的和稳步提升的.

4 结语

在典型历史时期晋西窑洞民居的室内天然采光情况是在不断提升,有了更多适应性,其窑居规模数值减小和窑脸的开窗洞口数值增大,使得窗地比数值相对增大,室内获得了较多的自然光,与此同时形成了立面特有的窗洞开口形式和遮阳方式.传统窑洞的营造是在非常有限的客观基础上对光环境形成了主动适应,其代价极低,适应效率高,满足了居民的基本生活需要,因此,在当代建筑的光环境营造方面具有较好的参考作用.

参考文献 References

- [1] 杨柳柳,李振全.苏州地区公共建筑中庭空间光热环境实测与能耗分析研究[J].建筑节能,2020,48(3):70-74.
YANG Liuli, LI Zhenquan. Study on photothermal environment measurement and energy consumption analysis of public building atrium space in Suzhou area[J]. Building Energy Conservation, 2020, 48(3): 70-74.
- [2] 舒畅.住宅中自然光环境节能设计研究——以苏州姑苏区古民居建筑为例[J].科技通报,2020,36(9):66-70.
SHU Chang. Study on energy saving design of natural light environment in residential buildings: Taking ancient residential buildings in Gusu district of Suzhou as an example[J]. Science and Technology Bulletin, 2020, 36(9): 66-70.
- [3] 王炎松,王陈高男.赣东地区“纵向天井”家塾型书院建筑形制与光环境研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(5):638-646.
WANG Yansong, Wangchen Gaonan. Study on architectural form and light environment of "vertical patio" family style academy in Easten Jiangxi[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 638-646.
- [4] 何苗,薛家薇.晋江市东山村传统民居光环境模拟与优化[J].福州大学学报(自然科学版),2016,44(6):826-832.
HE Miao, XUE Jiawei. Optimization of the light environment of dwellings[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 826-832.
- [5] 王怡,赵群,何梅,等.传统与新型窑居建筑的室内环境研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001,33(4):309-312.
WANG Yi, ZHAO Qun, HE Mei, et al. Study on indoor environment of traditional and new kiln house building[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2001, 33(4): 309-312.
- [6] 李啸雷,吕红医.地坑窑院自主改良模式效能分析与研究——以三门峡曲村为例[J].建筑科学,2020,36(12):159-166,173.
LI Xiaolei, LV Hong. Analysis and research on the efficiency of self-improvement model of underground caves and kilns: A case study of Sanmenxia qu village[J]. Architectural Science, 2020, 36(12): 159-166, 173.
- [7] 薛林平,马小莉,李成.西湾古村的民居建筑研究[J].华中建筑,2013,31(2):167-172.
XUE Linping, MA Xiaoli, LI Cheng. Research on the residential buildings of Xiwan ancient village[J]. Huazhong Architecture, 2013, 31(2): 167-172.
- [8] 李雪平,崔羽.关中地区下沉式窑洞冬季室内热环境测试研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(4):591-596.
LI Xueping, CUI Yu. Study on indoor thermal environment test of sunken cave in Guanzhong area in winter[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 591-596.
- [9] 马京涛,孟庆林.生态住区光环境模拟与评价[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2002,34(1):18-25.
Ma Jingtao, Meng Qinglin. Simulation and evaluation of light environment in ecological residential areas[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. and Tech. (Natural Science Edition), 2002, 34(1): 18-25.
- [10] 赵佳莹.柞水县凤凰古镇传统民居营建技艺与更新应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
ZHAO Jiaying. Research on construction technique and renewal application of traditional residential buildings in fenghuang ancient town of Zhashui county[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [11] 王金平,徐强,韩卫成.山西民居[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:245-248.
WANG Jinping, XU Qiang, HAN Weicheng. Shanxi Residential Buildings[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 245-248.
- [12] 主曼婷.基于气候适应性的安徽传统建筑绿色营建技术研究[D].合肥:安徽建筑大学,2021.
ZHU M T. Research on green construction technology of traditional buildings in Anhui province based on climate adaptability[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021.

- [16] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.
ZHANG Hefei. Principles of solar thermal utilization and computer simulation[M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 1990.
- [17] CANE R L D, HOLLANDS K G T, RATHBY G D, et al. Free convection heat transfer across inclined honeycomb panels[J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(1):86-91.
- [18] 四季沐歌集团. 平板集热器规格参数[EB/OL]. <https://www.micoe.com/soluDetail/60.html>. 2020.
MICOE. Specifications of flat plate collector[EB/OL]. <https://www.micoe.com/soluDetail/60.html>. 2020.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 太阳集热器热性能试验方法: GB/T 4271-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of China. Thermal performance test method of flat solar collector: GB/T 4271-2007, [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [20] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Meteorological Data Room. Special Meteorological Data Set for Thermal Environment Analysis of Buildings in China [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005.

(编辑 沈 波)

(上接第 764 页)

- [13] MA Xuan, ZHANG Lei, ZHAO Jingyuan, et al. The outdoor pedestrian thermal comfort and behavior in a traditional residential settlement: A case study of the cave dwellings in cold winter of China[J]. Solar Energy, 2021, 220: 130-143.
- [14] KONONENKO G. Role of the light and urban design in adjusting the scale of urban spaces[J]. Метрологія та прилади, 2018(5):56-60.
- [15] SHEN Jingyun, LIAN Zhiwei. Multivariate analysis of subjective evaluation of indoor lighting environment [J]. Frontiers of Architectural Research, 2021 (pre-publish).
- [16] 杨焕宇, 李莉萍. 基于参数化模拟的大糯黑村传统民居光环境研究[J]. 城市建筑, 2019, 16(25):119-123.
YANG Huanyu, LI Liping. Study on light environment of traditional dwellings in Da Nuohei village based on parametric simulation[J]. Urban Architecture, 2019, 16(25):119-123.
- [17] TING Ting, ZHENG Jia, ZOU Min. Ecotect-based light environment simulation for supporting house design[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353/356:3125-3132.
- [18] 周东升. 北方寒区节能日光温室环境模拟与设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
ZHOU D S. Study on environmental simulation and design method of energy-saving solar greenhouse in cold region of north China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [19] 周娇娇, 闫增峰, 张正模, 等. 基于洞窟光环境的窟檐建筑调控作用研究[J]. 城市建筑, 2019, 16(4):138-140.
ZHOU Jiaojiao, YAN Zengfeng, ZHANG Zhengmo, et al. Research on the regulation of cave eaves based on the light environment of caves[J]. Urban Architecture, 2019, 16(4):138-140.
- [20] 丁伟翔, 蒋忠华, 王清. 基于 Ecotect 的杭州某住宅群建筑光环境模拟研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2018(3):29-33.
DING Weixiang, JIANG Zhonghua, WANG Qing. Building light environment simulation of a residential complex in Hangzhou based on Ecotect[J]. Intelligent Building and Smart City, 2018(3):29-33.

(编辑 沈 波)