白塔山窑洞设计策略的长效性评估

王一婷，张达奇，黄跃昊

（兰州交通大学建筑与城市规划学院，兰州 730070）

摘要：作为中国首个生土建筑现代化实验基地，兰州白塔山窑洞的设计策略被视为传统窑洞转型的典范。建成40年后，针对其暴露出的阳光房昼夜温差显著、通风系统因维护缺失效能下降等问题，进行系统评估与适应性优化探索。基于实测数据、热舒适模型与居民访谈，从采光、通风、结构安全与抗震性能、热环境四个方面评估，并针对问题提出采光动态优化、通风低技防堵改造、结构柔性适地性改造与历史价值延续性策略。

关键词：生土建筑；白塔山窑洞；热舒适度；适应性优化

中图分类号：TU241.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)02－0032－07

党的二十大报告指出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”“推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”“打造宜居、韧性、智慧城市”“建设宜居宜业和美乡村”[1]。建筑领域的节能降碳已成为实现高质量发展的重要抓手。2024年发布的《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》进一步强调“以碳达峰碳中和工作为引领，持续提高建筑领域能源利用效率、降低碳排放水平，加快提升建筑领域绿色低碳发展质量”[2]。白塔山窑洞承载着传统建筑智慧与现代技术融合的历史使命，成为当前政策背景下评估地域性建筑可持续性的关键样本。

近年生土建筑研究聚焦材料改性、结构性能、低碳应用及规范与评价体系。材料改性领域，陈宝魁等[3]通过化学、物理手段提升生土力学性能；朱才辉等[4]剖析传统添加剂对微观结构的优化机制；王逢睿等[5]开发复合加固剂改善耐候性。结构性能优化方面，高幸和王维玉[6]提出碹窑界面应力传递缺陷的加固方案；董豪康等[7]验证暗柱增强型土坯墙的抗震效能；侯世伟等[8]提出螺旋锚基础有效抑制倾覆。低碳技术应用上，张鹤年等[9]创新活性MgO碳化技术实现生土墙板负碳排放；史庆轩等[10]探索3D打印技术为建造节能提供新路径；万丽等[11]基于乡村实践的“本土材料＋科学方法”模式激活内生建造力。规范与评价体系研究上，张福鹏等[12]指出现行改性成本评估标准缺失；李东波等[13]建立熵权法修正的安全评价模型。

相关研究中，对于窑洞的现代化改良问题备受学者关注，然而对于此类早期现代化改良项目在长期使用后设计策略的实际效能持续性、面临的挑战的系统性研究尚显不足。本文聚焦白塔山窑洞建成40年后的实际表现，评估其设计策略的长效性，并基于评估结果提出针对性优化方案。基于国家推进建筑领域节能降碳、打造宜居韧性人居环境的战略需求，选取采光、通风、安全抗震与室内热环境进行评估。这几个指标关系到建筑能耗、居住舒适、建筑本体安全与寿命，是评估其能否可持续发展的关键，也是居民访谈中所反映的关键问题。基于此，针对白塔山窑洞在上述四个维度进行实地调研与量化评价分析，以期在原策略基础上提出对应的改良策略，为兰州生土建筑的保护与现代化转型与黄土高原地区生土建筑发展提供参考。

1 白塔山窑洞的历史背景与设计策略

1.1 白塔山窑洞的建成背景

国内对生土建筑研究相对晚，在20世纪80年代才开始进行系统性研究。1980年中国建筑学会在兰州市设立窑洞及生土建筑调研组，开始以西北地区生土建筑为研究对象，进行生土建筑的研究[14]，并选择了白塔山后山揖峰岭坡作为中国首个生土建筑研究基地。在地域选择上，兰州为生土建筑的建设提供了得天独厚的条件：气候条件上干旱

收稿日期：2025-07-15

基金项目：甘肃省基础研究计划软科学专项(24JRZA098)

作者简介：王一婷(2000—)，女，甘肃白银人，硕士研究生，研究方向为历史文化遗产保护；张达奇(1996—)，男，甘肃金昌人，硕士研究生，研究方向为历史文化遗产与保护；黄跃昊(1981—)，男，四川巴中人，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为建筑设计与历史文化遗产保护。

少雨、风沙频繁,使生土建筑展现出极强的适应性;多元文化融合的建筑特色方面,兰州的多民族聚居使得其生土建筑融合了不同的技艺与风格;地质条件方面。兰州位于第四系黄土层分布广泛,土质干燥且结构稳定,为生土建筑提供了天然材料。兰州市白塔山后山地势陡峭,适合作为实验性改良场地。在后山的沟壑处,任震英先生建了50孔新式窑洞群(图1),每个窑洞面宽在3.46 m左右,窑洞深度少则6 m,多则达10 m,高度接近4 m。依坡选址、因势建洞,顺坡而建、灵活多变,下层窑洞的突出顶部就是上层窑洞的室外阳台和庭院绿地,有利于立体绿化,达到美观实用[15]。

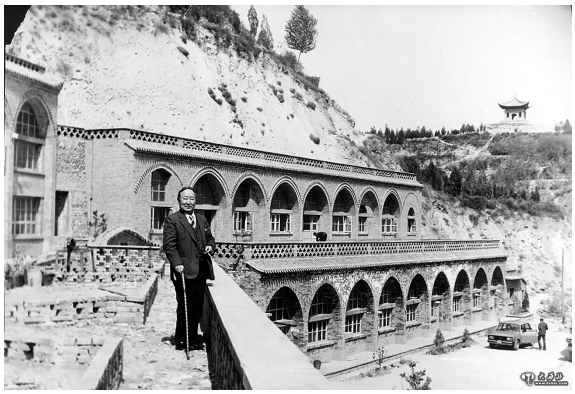


图1　任震英先生与白塔山窑洞

1.2　白塔山窑洞的设计策略

白塔山窑洞的采光策略以收、反、散为核心,旨在通过三阶段优化改善传统窑洞昏暗的缺陷[15]。"收"光设计:采用大面积门窗增加采光面积,最大限度吸收冬季低角度太阳光线;"反"射增强:窑洞内墙面涂刷浅色灰浆,利用拱顶曲面与浅色表面多次反射光线;"散"射均衡:通过拱顶弧形结构分散光线,避免直射光斑,提升室内照度均匀性。这一设计被视为传统窑洞现代化改造的典范,任震英团队预期通过上述策略将正午室内照度提升至300 lux以上,达到当时国家居住空间采光标准[15]。

其通风系统以"自然空调"为核心理念,旨在通过地沟与垂直风道的协同作用,平衡保温与通风需求。窑洞只开启南侧窗单侧通风,导致室内通风情况较差,所以设计在窑洞底部设置深地沟,垂直风道热压通风等方法,促进空气循环;利用窑洞拱顶弧度引导气流,避免直吹人体,提升舒适性。当时预期通过这一系统,实现室内通风的改良以及湿度控制,同时在冬季减少通风热损失[15]。

结构安全与抗震设计以"刚性加固"的创新理念为核心,旨在通过箱形混凝土框架嵌入窑洞侧壁,利用其抗弯刚度约束土体移位;结合接口窑形成连续受力体系,并在拱顶增设厚砖混衬砌,提升整体抗震性能[15]。这一设计在当时有效提升了窑洞抗震能力。

室内热环境设计以"被动式调控"为核心,旨在通过覆土结构、阳光房与自然通风的协同作用,实现"冬暖夏凉"的目标:冬季利用厚覆土层的热惰性延缓热量散失进行保温,部分窑洞结合阳光房太阳能增益提升室内温度;夏季通过覆土结构阻隔外部高温,再配合地沟通风系统调节湿度。并预期通过上述策略,使一般窑洞在冬季最冷的1月,窑内最低温度≥5 ℃,当采用被动式太阳暖房采暖时,冬季1月窑洞内最低温度≥10.5 ℃,夏季湿度控制在70%以内[15]。

2　白塔山窑洞现状系统评估

现如今随着40年的变迁与当代文化遗产保护理念、技术标准的更新,以及人民日益增长的美好生活需要,白塔山窑洞出现了居民迁出率上升、建筑老化等诸多问题,现对其设计策略进行多方面评估并探究出现此类问题的原因。

2.1　采光设计现状

随着现行《建筑采光设计标准》(GB50033—2013)对居住空间照度要求的提升以及现在居民对全时段均匀光照的需求,窑洞光环境设计面临新的适应性挑战。实测数据显示,带阳光房窑洞的冬季正午照度约200 lux,这一数值在当时已显著超越传统窑洞的采光水平,体现了任震英团队的采光策略对改善传统窑洞采光问题的开创性贡献;当前居民反映"阴雨天需开灯""冬季光照不足""因采光不佳需要将主要活动区域转移至窑洞口部"等现象,超过80%的受访居民表示冬季午后主要活动需移至窑洞靠门窗区域,60%认为现有光照条件限制了室内家具布局的灵活性。这既是时代需求迭代的必然反馈,也明确了采光优化需兼顾基础照度提升与光环境质量改善的方向。

出现这些问题归因于以下方面:地理客观约束,兰州冬季低太阳高度角在原设计中通过扩大门窗面积已实现历史性优化,而现今需进一步平衡各季节光效,增加有效采光时段;也有材料性能的自然周期影响,现场观察到部分窑洞内墙灰浆存在明显剥落或变色,这会使得光线吸收增加,反射率下降;居民需求的代际升级,现在居民对活动分区自由度及家具布局灵活性有较高需求,反映"基础采

光保障”向“全域光舒适”的迭代需求。

2.2　通风设计现状

在现行《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)对室内环境要求进一步提升背景下,实测显示:地沟通风口平均风速为 0.05 m/s,垂直风道风速为 0.1 m/s,气流交换效率需适应现代标准而进一步提升;春季窑洞深处湿度接近 70%(同期室外湿度 55%);有居民因潮湿问题在墙面加贴防潮膜,也一定程度阻碍了通风。居民访谈反映,窑洞深处在雨季和雨后数日内感觉闷湿的比例高达 65%,也是导致部分住户加装防潮膜或考虑搬迁的重要原因之一。

出现这些问题归因于以下方面:地沟通风口因 40 年周边环境变化,以及落叶、沙土堵塞导致截面积减少;垂直风道内壁累积 2～3 cm 自然落灰,使气流阻力提高;地沟坡度设计在当时有效应对常规降水,而随着时间流逝雨季积水导致土壤饱和,设计效果有所减弱。这些要素非设计局限,而是自然系统与人为环境长期协同的必然演进结果。

2.3　安全与抗震设计现状

现行《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)对复合结构体系要求进行了提高的背景下,基于居民访谈与现场调研,部分窑洞侧壁出现竖向裂缝与一定程度的变形(图 2),访谈中,约 25%的居民对雨季裂缝扩大表示担忧,认为其影响居住安全感;现场调研发现,箱形混凝土框架与生土界面存在局部剥离现象,外墙结构存在明显裂缝或局部变形的约占窑洞群的 60%。

“刚性加固”的创新理念解决了当时窑洞建筑的结构问题,如今结构出现问题的原因有:材料界面的失效,混凝土与生土膨胀系数存在差异,热变形不协调导致界面开裂;砖混衬砌与生土刚度差异引发应力集中;排水系统被泥沙堵塞,雨水渗透加剧使得土体软化;抗震设计标准沿用的是当时的结构规范,没有涵盖这一复合体系的具体规范。



(a) 结构1　(a) 结构2　(a) 结构3

图 2　白塔山窑洞结构变形示例

2.4　室内热环境评价

2.4.1　现状实测

本次实测时间为 2024 年 4 月 14 日与 2025 年 1 月 15 日,选取对象为窑洞与楼房结合的窑房(民居 1)、覆土靠山砖拱式窑洞(民居 2)和带阳光房的窑洞(民居 3)。测点水平位置选取在房间中心区域,布置高度为 1.0 m。测量参数有室内温度、黑球温度、室内湿度以及空气流速。基于春季这一过渡期与冬季这一高冷负荷期的室内温湿度实测数据,结合预测热环境舒适度指标(predicted mean vote,PMV)模型进行计算。

1)春季温湿度现状

在测试当天 12 h 主要活动时间内,测试期间室外空气温度 12～23 ℃,民居 1 室内温度为14.2～19.9 ℃,民居 2 室内温度为 14.0～16.5 ℃,民居 3 室内温度为 17.9～20.6 ℃(图 3)。数据表明三种民居对室外温度的影响均有一定的平衡作用,调节能力有差异:民居 1 室内温度呈现明显波动,平衡热环境能力较差,而民居 2 表现最强的热稳定性,全天温度波动幅度接近 2 ℃,体现了厚土层结构优秀的热惰性和蓄热性能。民居 3 整体平均温度比覆土靠山砖拱式窑洞要高,但在日落后温度下降趋势明显,反映玻璃材质对太阳辐射的高透过率导致白天蓄热加剧,夜间散热加快的热力学特性。

湿度上,测试期间室外空气平均湿度 32%,民居 1 室内湿度为 30.0%～37.6%,平均湿度为 34.5%;民居 2 室内湿度为 40.0%～53.2%,平均湿度为 43.9%;民居 3 室内湿度为 38.1%～50.0%,平均湿度为 41.6%(图 3)。民居 2 的相对湿度一直处于人体室内湿度舒适范围,民居 3 室内相对湿度起伏变化较大,但是在日落后逐渐与民居 2达成一致趋势。而民居 3 由于所选取的建筑无人居住,导致湿度过低。

2)冬季温湿度现状

在测试的 12 h 主要活动时间内,测试期间室外空气温度－9.0～2 ℃,民居 1 室内温度为 6.2～9.3 ℃,民居 2 室内温度为 11.0～14.5 ℃,民居 3 室内温度为 8.0～16.5 ℃。从温度变化来看,民居 3室内温度峰值最高达 16.5 ℃且波动最大,平均温度高于其他类型;民居 2 覆土靠山砖拱厚重的覆土结构和砖拱蓄热特性形成天然保温层,而民居 3 无阳光房无采暖温度最低。但是依据现行《室内空气质量标准》(GB/T18883—2022)规定,冬季有采

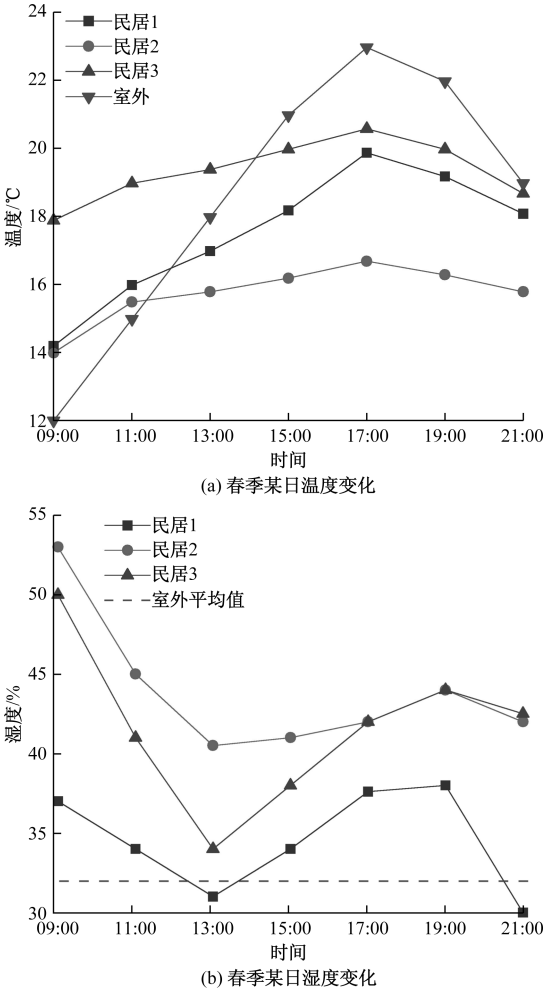


图 3　白塔山窑洞春季室内温湿度变化

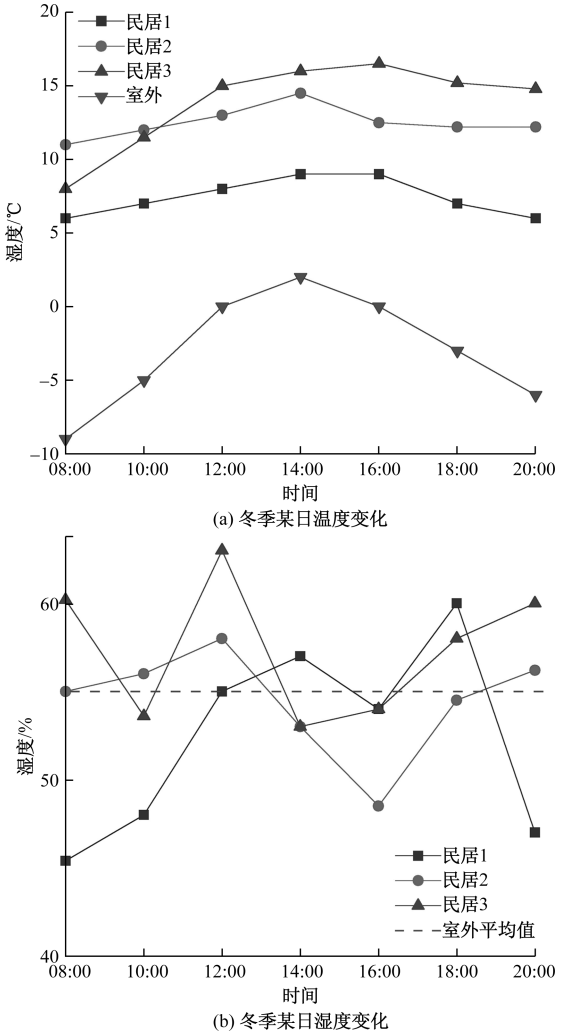


图 4　白塔山窑洞冬季室内温湿度变化

暖场所的温度为 16.0～24.0 ℃,这些实测结果均不满足现在的规定,需要进一步改善[16](图 4)。

湿度上,测试期间室外空气平均湿度 55%,民居 1 室内湿度为 45.2%～60.0%,平均湿度为 52.3%;民居 2 室内湿度为 49.0%～57.8%,平均湿度为 54.6%;民居 3 室内湿度为 53.1%～63.2%,平均湿度为 57.4%。民居 3 全天湿度维持在相对理想的区间,但湿度变化较大;民居 2 湿度呈现 U 形变化,变化波动最小,下午湿度升高与火炉供暖导致的水分蒸发密切相关(图 5)。

2.4.2　室内热环境综合评价

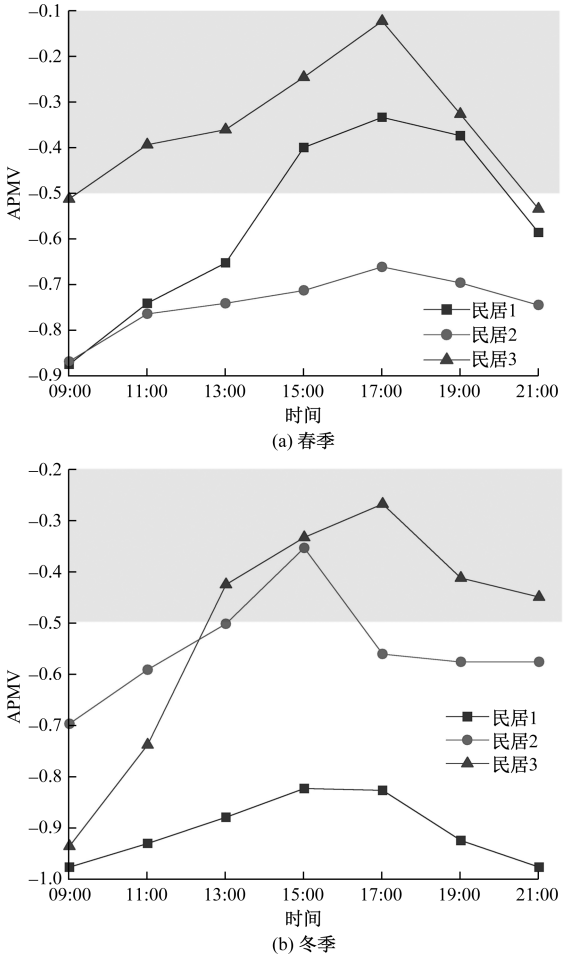
预测热环境适应性舒适度指标(adaptive predicted mean vote,APMV)作为 PMV 模型的适应性改进版本,可以量化人体对动态热环境的主动适应能力,从而弥补了传统 PMV 模型在非稳态环境、非空调建筑及特定气候区应用中的局限性,更适合用于窑洞建筑[17]。参照《民用建筑室内热湿环境评标准》(GB/T 50785),对白塔山窑洞进行热舒适评价。测试期间室内风速控制为 0 m/s,并根据访谈中对居民典型着装的观察记录,取春天服装热阻为 0.7 clo,冬天服装热阻为 1.5 clo,新陈代谢率统一按坐姿并伴手工劳作等轻微活动取 1.2 met。基于 MATLAB软件输入实测的空气温度、辐射温度与相对湿度等数据计算得到 PMV(表 1 和表 2),并代入式(1)。

表 1　春季某日 PMV

民居	09:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00
民居 1	−1.56	−1.18	−0.97	−0.50	−0.40	−0.46	−0.83
民居 2	−1.54	−1.24	−1.18	−1.11	−0.99	−1.07	−1.19
民居 3	−0.69	−0.49	−0.44	−0.28	−0.13	−0.39	−0.73

表 2　冬季某日 PMV

民居	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
民居 1	−1.91	−1.74	−1.57	−1.40	−1.41	−1.72	−1.91
民居 2	−1.07	−0.84	−0.67	−0.43	−0.78	−0.81	−0.81
民居 3	−1.76	−1.17	−0.54	−0.4	−0.31	−0.52	−0.58



(a) 春季　(b) 冬季

图 5　19 白塔山窑洞 APMV 变化情况

$$APMV = PMV/(1+\lambda PMV) \quad (1)$$

式中：APMV 为预计适应性平均热感觉指标；λ 为自适应系数；对于寒冷地区居住建筑，当 PMV≥0 时，λ=0.24，当 PMV<0 时，λ=−0.5。

预测热感觉投票 PMV 值整体均呈先升后降的趋势（图 5）。从春季 PMV 变化来看：民居 3 在 17:00时 PMV 攀升至−0.13，大部分时间处于较为舒适的区间，基本全时段处于Ⅰ级热湿环境（−0.5≤APMV≤0.5），即 90%满意度接近理论最佳热舒适阈值；民居 2 的 PMV 曲线呈现“低振幅波动”特征，其预测值在−1.54～−0.99 窄幅震荡，全时段处于Ⅱ级热湿环境（−1≤APMV≤−0.5），即 75%满意度，热感觉也介于冷到稍冷区间；民居 1 热感觉波动最大（ΔPMV=1.16），在 14:00—20:00 处于Ⅰ级热湿环境，其余时段处于Ⅱ级热湿环境。冬季民居 1 由于没有主动采暖措施热舒适度整体较差，其 APMV 低于其他民居，介于−0.82～−0.98，处于Ⅱ级热湿环境；民居 2 的 PMV 整体较为稳定，在 13:00—16:00 处于Ⅰ级热湿环境，其余时段处于Ⅱ级热湿环境；民居 3 的 PMV 值波动剧烈，在约 12:30 之前处于Ⅱ级热湿环境，此后处于Ⅰ级热湿环境，太阳辐射对其影响较大。

总的来说，三类民居的热舒适性呈现出“季节依赖、各有所长”的特征：春季民居 3 凭借阳光房蓄热全天接近最佳舒适状态，而冬季过度依赖太阳辐射导致午后短暂回暖、早晚冷感加剧；民居 2 热稳定性强，但也难突破冷感阈值；民居 1 的混合结构在冬季存在短板，对于现今对舒适性的要求来说舒适度不佳。

3　长效性优化路径与适应性优化探索

基于白塔山窑洞采光、通风、安全抗震及热环境四大核心指标的长效评估结果，并回应居民“低技化、少扰动”的核心诉求，提出系统性优化路径。该路径遵循问题导向、低技优先、居民参与、风貌协调原则，聚焦最小干预前提下的针对性改良：充分利用现有结构、本地材料及被动生态原理，改良照度不足、通风堵塞、界面开裂等关键短板，同时建立居民主导的维护机制保障长效运行。

3.1　采光系统的动态适应性优化

对白塔山窑洞采光效果的优化，要针对兰州低太阳高度角与该选址多沙尘环境优化设计，可采用可调设计、材料升级与维护的策略。在门檐安装可调节遮阳系统，通过简易调节将冬季低角度阳光反射至窑洞深处，实测可使窑洞深处照度提升 30～50 lux；拱顶曲面采用纳米涂层板替代传统黄土灰浆，增加太阳反射比的同时增强耐候性，有效减少材料剥落导致的吸光问题。这些策略将有效提升窑洞光环境质量：冬季正午平均照度从 200 lux 升至 250 lux以上，照度均匀性提高，减少阴雨天开灯时长。

3.2　通风系统的低技防堵重构

白塔山窑洞通风系统因堵塞失效问题，建议使用明渠替代地沟，底部铺设砾石层过滤杂物，侧壁嵌入滤网，大幅提高截污效率。垂直风道分解为预制混凝土管段，接口处设卡扣式防尘网防止积灰增阻；也可在顶部加装太阳能烟囱，利用热压效应提升风速；风道入口增设角度可调导流板顺应夏季主导风向增强进气效率；未来该地区窑洞建设需预留检修通道，选址避开低洼汇水区，主导风向上游尽量没有遮挡，从设计端保障通风可持续性。预期显著改善通风效能：窑洞深处风速从 0.05 m/s 增至 0.2 m/s（热压辅助下可达 0.3 m/s），湿度达到舒适水平。

3.3　结构安全的柔性适地性改造

白塔山窑洞的安全与抗震设计优化中需注意

不能直接采用混凝土加固理论而忽视生土材料的柔性特质与地域气候影响。优化中需转向“适地性结构”理念:低技韧性设计,以生土材料为主体,通过天然纤维增强与构造优化提升抗震性能。有研究表明与合成纤维相比,天然纤维在提高生土材料强度方面的效果更为明显[18];在混凝土框架与生土间填充柔性界面层,缓冲变形差异,通过柔性界面与材料协同,将有效降低裂缝发生率,延长结构维护周期;在拱顶交接处植入钢筋网片加固,强化抗震节点;或者统一材料,采用改性的全生土拱顶;考虑将挡土墙排水孔改为 PVC 滤水管,定期清理;周边种植浅根灌木固土防淤堵,浅根可避免植物根劈作用导致窑洞节理裂隙的进一步发育[19]。该地未来建筑可以考虑采用改性本土材料研发,挡土墙排水系统与植被固土协同的设计方法。

3.4 历史价值延续性策略

以上优化建议采用本土材料、可逆工艺、风貌协调的原则。改性生土原料取自窑洞周边黄土坑,秸秆等增强材也源于本地;新增构件均采用可拆卸连接,使修复时尽量无损拆卸;太阳能烟囱可以采用外包青砖饰面,明渠边缘采用毛石砌筑,从而匹配原有建筑语汇;在社区制定《窑洞建筑维护规程》,将反射板季度擦拭、滤网年度清理纳入居民责任清单,使四十年前“设计者理想”真正转化为“使用者日常”。保障改造项目的历史真实性的同时,提高本土材料利用率、构件可逆拆卸率。鼓励“政府+企业+村民”的多元主体的“文化关注”与“文化自觉”[20],重振白塔山窑洞的活力。

4 结论

(1)提出生土建筑长效评估机制。作为中国首个生土建筑现代化实验基地,白塔山窑洞的 40 年综合评估验证了其覆土被动式热工系统的长期有效性,首次系统分析其早期设计在当代标准下的适应性危机:采光性能因反射材料衰减产生照度不足,通风地沟堵塞导致通风不佳,复合结构热变形差异引发窑洞结构性开裂,阳光房昼夜温差过高。提出全生命周期评估模型,通过热舒适动态评价(APMV)、多维度实测与居民访谈交叉验证,探究静态设计逻辑与动态环境(材料老化、维护缺失、标准迭代)的根本矛盾,为传统建筑现代化提供长效评估范式与方法论工具。

(2)构建低技化适应性优化技术体系。针对评估痛点,提出低技高适应性策略:采光系统采用“可调遮阳+纳米反射涂层”协同技术,突破兰州低太阳高度角限制;通风系统采用“砾石明渠过滤+预制模块化防堵风道”,以物理自清洁机制根治堵塞;结构安全以天然纤维增强生土界面替代混凝土刚性框架,实现材料热变形协调;历史保护通过青砖饰面太阳能烟囱、毛石明渠等可逆工艺,使技术升级承载遗产价值;将“居民维护规程”纳入设计,形成“改造-运维”闭环。

(3)提供政策、技术与文化协同的“中国样本”。白塔山窑洞案例构建了地域性建筑改良系统工程框架:技术上,低技改造成本为黄土高原数万孔窑洞提供经济路径;政策上,高节能潜力回应《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》要求;文化上,本土材料工艺创新力求遗产活态化延续。“评估、优化、运维”模式,为相关地区提供从“单点修补”转向“系统再生”的实践范式。

参考文献

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. [2025-07-15]. https://www.12371.cn/2022/10/25/ARTI1666705047474465.shtml.

[2] 国务院办公厅关于转发国家发展改革委、住房和城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》的通知[EB/OL]. (2024-03-12)[2025-05-31]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6939607.htm.

[3] 陈宝魁,田洪祥,文明,等. 基于“绿色建筑”理念的生土材料力学试验设计与实践[J]. 实验技术与管理,2022,39(5):60-64.

[4] 王逢睿,王旭东,王捷,等. 偏高岭土复合加固剂改性生土材料的结构及性能研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(3):341-348.

[5] 朱才辉,邱嵩,石卫,等. 几类传统改性生土的耐久性及微观结构试验研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(2):165-175.

[6] 高幸,王维玉. 碹窑民居受力机理及加固方法研究[J]. 建筑结构,2025,55(2):143-150.

[7] 董豪康,高永林,柏文峰,等. 新型土坯墙建筑地震模拟振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2024,44(5):61-70.

[8] 侯世伟,高广亮,张皓,等. 螺旋锚复合基础对村镇生土建筑抗震性能影响研究[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(4):778-786.

[9] 张鹤年,王笑颖,胡彩云,等. 城市更新中碳足迹研究——以活性 MgO 碳化生土墙板为例[J/OL]. 建筑科学,1-8[2025-07-01]. https://link.cnki.net/urlid/11.1962.TU.20250331.1713.002.

[10] 史庆轩,霍建,武喜凯,等. 3D 打印生土建筑技术研究进展[J]. 工业建筑,2023,53(4):190-198.

[11] 万丽，吴恩融，迟辛安，等. 基于农村内源性发展模式的新型夯土建筑策略——以“一专一村”西南农村地区项目为例[J]. 建筑学报，2024(1)：105-111.
[12] 张福鹏，石磊，柳思勉，等. 国内生土建筑材料改性进展研究[J]. 铁道科学与工程学报，2022，19(10)：2919-2929.
[13] 李东波，张鸿驰，雷蓬勃，等. 基于熵权法修正的生土建筑安全性评价研究[J]. 应用力学学报，2020，37(4)：1656-1662.
[14] 任震英. 中国窑洞建筑的春天——坚定目标、克服困难、聚集力量为发展中国生土建筑学而奋斗——1984—1989 年以来的研究报告[J]. 地下空间，1989(4)：7-14.
[15] 孟祥武，王军，叶明晖，等. 国内生土建筑研究历程与思考[J]. 新建筑，2018(1)：114-118.
[16] 任震英. “白塔山庄”节地节能建筑科研实践工程简介及希望[J]. 地下空间，1990(1)：56-60.
[17] 国家市场监督管理总局. 国家标准化管理委员会. 室内空气质量标准：GB/T 18883—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
[18] 王昭俊，周范卓. 热舒适研究综述与展望[J]. 暖通空调，2024，54(10)：1-10.
[19] LLLAMPAS R，SILVA A R，CHARMPIS C D，et al. Validation of the repair effectiveness of clay-based grout injections by lateral load testing of an adobe model building[J]. Construction and Building Materials，2017，153：174-184.
[20] 肖云飞，张晨，徐辉，等. 成对节理对废弃黄土窑洞边坡稳定性的影响[J]. 科学技术与工程，2021，21(32)：13808-13816.

Evaluation of Long-term Effectiveness of Design Strategies for the Baita Mountain Cave Dwellings

WANG Yiting，ZHANG Daqi，HUANG Yuehao
(School of Architecture and Urban Planning，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，China)

Abstract：As China’s first modern experimental base for rammed earth architecture，the cave dwellings at Lanzhou’s Baitashan feature design strategies recognized as exemplary for transforming traditional cave structures. After 40 years，adaptive optimization is required for significant diurnal temperature fluctuations in sunspaces and reduced ventilation efficiency due to maintenance limitations. Based on empirical data，thermal comfort modeling and resident interviews，performance across four dimensions such as daylighting，ventilation，structural safety and thermal environment was evaluated. Corresponding optimization strategies are proposed，including dynamically optimized daylight systems，low-maintenance anti-clogging ventilation retrofits，context-flexible structural upgrades and heritage-continuity protocols all extending the original design philosophy.

Keywords：earthen architecture；Baita Mountain Cave Dwellings；thermal comfort；adaptive optimization