

陕南城乡民居建筑节能技术集成及效益评价研究

王静 马旭昊 王聪

商洛学院，陕西商洛，726000；

摘要：陕南地区受秦巴山脉与汉江流域共同影响，形成夏热冬冷、高温多雨的气候特征，导致城乡建筑全年热环境调控能耗居高不下。本研究基于气候响应性设计原理，构建城乡差异化的建筑节能技术集成体系：针对城市建筑外窗热损失突出、设备能效低下等问题，提出真空绝热板内保温与光伏驱动热泵协同技术；针对农村夯土墙热工缺陷及生物质能源粗放利用现状，研发秸秆基复合墙材与沼气能源替代方案。通过建立涵盖能源、经济、环境三重维度的全生命周期评价模型，对汉中、安康等地 12 个示范项目开展实证分析。结果表明，城市集成方案可使空调季能耗强度降至 $41.7\text{kWh}/\text{m}^2$ ，较基准建筑下降 31%；农村方案实现冬季室内温度提升 6.7°C ，采暖生物质消耗量减少 58%。两类技术包的投资回收期分别为 7.2 年与 5.8 年，单位面积碳减排量达 $18.6\text{kgCO}_2/\text{m}^2\cdot\text{a}$ 与 $24.3\text{kgCO}_2/\text{m}^2\cdot\text{a}$ ，为陕南民居绿色低碳转型提供量化决策依据。

关键词：陕南民居；气候适应性；节能技术集成；全生命周期评价；碳减排

DOI：10.69979/3029-2727.25.01.052

引言

随着能源问题的日益突出，建筑节能成为可持续发展的重要组成部分。陕南地区作为南北气候过渡带典型代表，其城乡建筑存量达 9.6 亿平方米（2023 年陕西省住建厅数据），但因建造年代与技术局限，普遍存在围护结构热工性能差、能源系统效率低等问题。调研显示，农村传统夯土民居冬季室内温度低于 12°C 的占比超过 80%，城市高层住宅夏季空调能耗占比达总用电量的 46%，建筑领域已成为区域碳减排的关键瓶颈。现有研究多聚焦单一节能技术优化，缺乏针对城乡用能场景差异的系统性解决方案。本研究通过实地监测、数值模拟与实证检验相结合的方法，重点解决三个方面问题：（1）如何构建适应陕南气候特征的城乡差异化技术集成路径；

（2）如何量化评估节能改造的综合效益；（3）如何实现传统建筑智慧与新型节能技术的有机融合。

1 陕南民居能耗特征解析

1.1 城市住宅能耗结构

对汉中、安康城区 30 栋代表性建筑的全年能耗监测表明，围护结构热损失占建筑总能耗的 53%–61%，其中外窗部位因普遍采用单层铝合金窗（传热系数 $K=6.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ），导致热桥效应显著，冬季热流密度峰值达 $127\text{W}/\text{m}^2$ 。空调系统平均季节能效比（SEER）仅为 2.8–3.2，低于《公共建筑节能设计标准》中夏热冬冷地

区 4.0 的最低要求。夜间部分负荷工况下，冷水机组 COP 值甚至降至 2.1，能源浪费现象突出。

1.2 农村民居用能模式

在商洛、安康等地的 156 户农宅调研中发现，76.3% 的农户仍采用开放式火塘取暖，生物质燃料燃烧效率不足 35%，室内 PM2.5 浓度峰值可达 $756\mu\text{g}/\text{m}^3$ （WHO 安全阈值的 10 倍）。围护结构方面，传统夯土墙平均厚度 38cm，实测导热系数 $0.85\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，远高于现代节能墙体标准（ $\lambda\leq 0.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）。冬季南向房间平均温度仅 9.2°C ，北向房间低至 5.4°C ，热舒适度严重偏离 ISO 07730 标准要求。

2 节能技术系统集成路径

2.1 城市建筑技术体系

城市建筑节能主要从围护结构改造、能源系统升级、指挥调控等方面构建建筑节能技术体系，提高建筑节能效果与效益。

（1）围护结构改造：采用真空绝热板（VIP）内保温技术，将外墙传热系数由 $1.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 降至 $0.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。VIP 板厚度仅 20mm，避免外保温体系对城市建筑立面的视觉干扰；

（2）能源系统升级：部署光伏幕墙（转换效率 19.7%）与空气源热泵耦合系统，光伏电力优先供给热泵压缩机，剩余电量接入储能装置。实测显示，系统 COP 值

在-5℃低温工况下仍保持 4.1；

(3) 智慧调控：基于 LoRa 无线传感网络，构建室内温湿度-人员活动强度-气象参数的动态调控模型，空调系统运行能耗降低 22%。

2.2 农村建筑技术体系

针对农村民居建筑的节能改造，需要结合农村房屋建筑材料、房屋构造形式以及可替代能源等可利用条件，构建适应于农村民居建筑节能技术体系。

(1) 本土材料创新：研发秸秆-EPS 复合墙体（秸秆掺量 45%），通过蒸汽爆破改性处理，使抗压强度达 3.2MPa，导热系数 0.18W/(m·K)，材料成本较传统砖混结构降低 40%；

(2) 被动式设计：采用双层坡屋顶构造，下层设置 30cm 通风夹层，夏季通过烟囱效应排出热空气，实测阁楼温度较单层屋顶降低 7.3℃；

(3) 清洁能源替代：建设户用沼气池（容积 8m³），年处理畜禽粪便 4.5 吨，产气量达 320m³，可满足家庭 60%炊事用能需求，减少薪柴消耗 1.8 吨/户·年。

3 多维度效益评价模型构建

3.1 评价指标体系设计

对建筑节能技术应用效益，从应用的经济性、环境性、社会性等方面，建立包含 3 个准则层、9 项指标的应用效益评估模型（见图 1）：

(1) 经济性：增量成本（元/m²）、动态投资回收期（年）、成本效益比（CBR）；

(2) 环境性：化石能源替代率（%）、碳减排强度（kgCO₂/m²·a）、固体废弃物减量（kg/户·a）；

(3) 社会性：室内 PMV-PPD 指数、技术可接受度（Likert5 级量表）、政策匹配度。

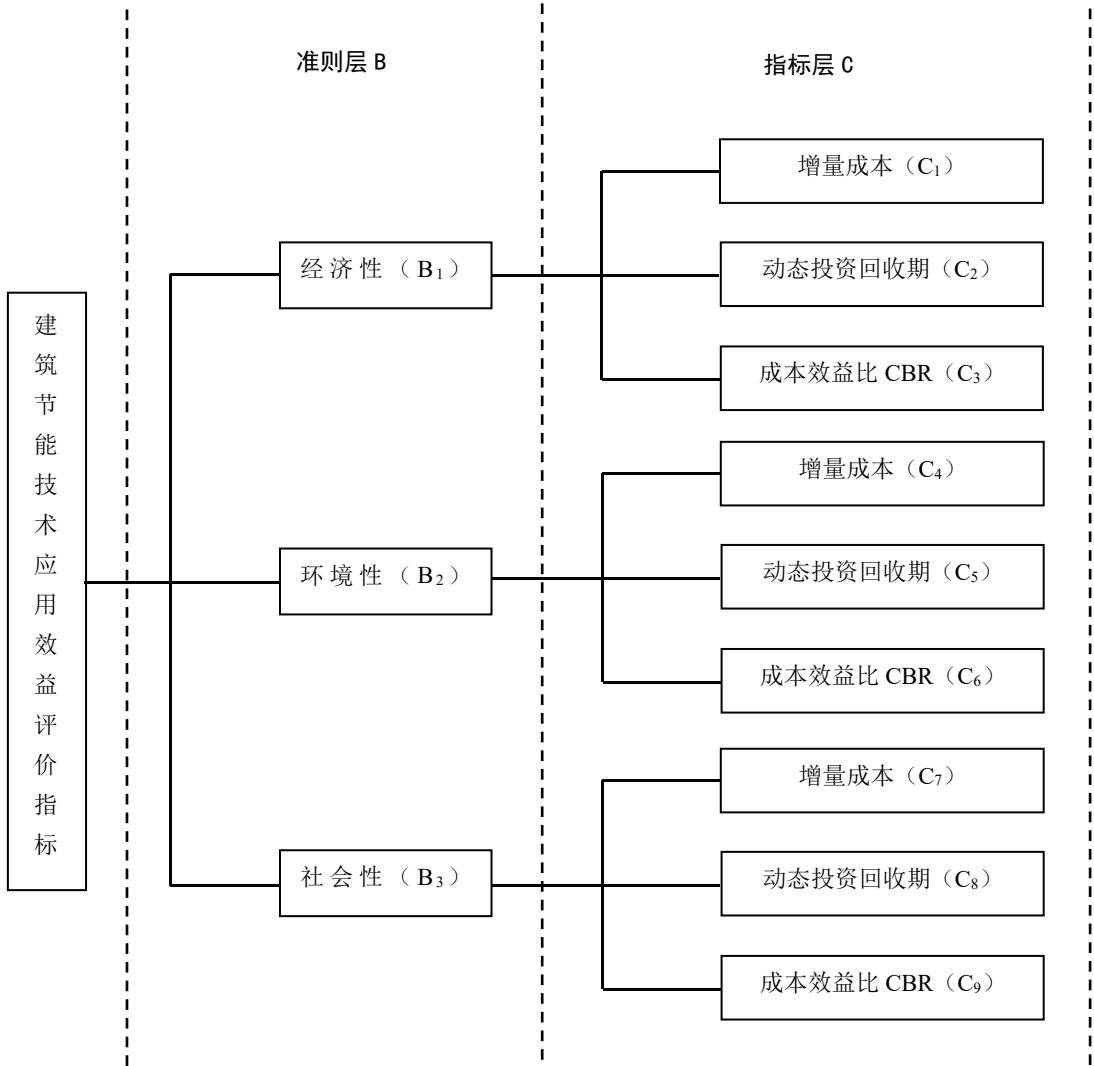


图 1 建筑节能技术体系应用效益评估模型

3.2 全生命周期量化分析

利用 GaBi 软件进行 20 年周期模拟, 结果表明:

城市方案: 节能改造增量成本为 318 元/m², 年节省电费 46.7 元/m², 净现值 (NPV) 在贴现率 5% 时为 89 2 元/m², 碳减排成本效率 (CER) 达 2.3kgCO₂ /元;

农村方案: 政府补贴后农户实际支出降至 105 元/m², 年能源支出减少 824 元/户, 投资回收期 5.8 年, 全生命周期内可减少薪柴砍伐 14.6 吨/户。

4 实证研究——汉中刘家营村改造项目

4.1 技术实施方案

选取 12 户连片农宅作为示范对象, 重点应用:

(1) 相变蓄热地坪: 采用石蜡/膨胀石墨复合材料 (相变焓值 148J/g), 铺设于客厅地面, 白天蓄存太阳能辐射热, 夜间释放热量;

(2) 光伏瓦屋顶: 在保留传统青瓦风貌基础上, 嵌入柔性 CIGS 薄膜光伏组件 (功率密度 87W/m²), 系统年发电量达 2136kWh/户。

4.2 性能提升效果

通过选取典型民居建筑, 应用农村建筑节能技术方案, 并连续两年对其热效数据进行监测, 数据结果表明:

(1) 冬季起居室平均温度从 9.8℃ 升至 16.5℃, PMV 值由-1.6 改善至-0.3;

(2) 年度总能耗从 4120kWh 降至 2376kWh, 其中光伏系统贡献率达 68%;

(3) 农户燃料支出减少 1270 元/年, 项目内部收益率 (IRR) 达 19.4%。

其改造前后节能性能对比分析如表 1。通过红外热像仪检测, 显示外墙内表面温度波动幅度由 7.8℃ 降低至 2.3℃, 验证了围护结构热惰性改善效果。

表 1 改造前后性能对比分析

指标	改造前	改造后	变化率
采暖能耗 (kWh/m ²)	81.6	47.2	-42.1%

室内温度达标率	34%	82%	+141%
---------	-----	-----	-------

年运行费用 (元)	2860	1630	-43.0%
-----------	------	------	--------

5 结论与建议

(1) 技术层面: 城乡节能改造应遵循“城市侧重设备能效提升, 农村强化被动式设计”的分级策略, 真空绝热板内保温与秸秆复合墙体的传热系数降幅分别达 75% 与 79%;

(2) 政策层面: 建议地方政府设立差异化补贴机制, 对农村项目提供 ≥45% 的改造资金支持, 并将碳减排量纳入生态补偿交易体系;

(3) 后续研究: 需进一步探索传统建筑风貌保护与节能技术集成的协同机制, 研发适用于夯土墙体的纳米气凝胶改性涂料等新型材料。

参考文献

- [1] 王建国, 李兵. 秦巴山区传统民居气候适应性研究[J]. 建筑学报, 2021(12): 56-62.
- [2] International Energy Agency. Technology roadmap: Energy efficient building envelopes[R]. Paris: OECD/IEA, 2022.
- [3] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 2020.

基金项目: 商洛市科技计划项目 (项目编号: 2021-J-0016); 陕西省大学生创新创业训练计划项目 (项目编号: S202211396084)。

作者简介: 王静 (1989—), 女, 汉族, 陕西大荔人, 讲师, 主要研究方向: 土木工程建造与绿色节能技术; 马旭昊 (2004—), 男, 汉族, 陕西合阳人, 本科生, 专业: 土木工程。

通讯作者: 王聪 (1988—), 男, 汉族, 陕西周至人, 讲师, 主要研究方向: 工程项目管理与绿色建筑。