

抗震安居农房建设中传统工艺的现代化改良路径

张焕发

凤庆县诗礼乡人民政府，云南省临沧市，675901；

摘要：本研究面向滇西南高危地震环境与凤庆县八度设防背景，针对2025年精准兜底101户农房，构建传统工艺现代化改良技术体系与闭环实施流程。技术路径包括柔性耗能可更换榫卯节点、夯土墙微配筋与聚合物面层复合、冷弯薄壁型钢加草筋瓦轻量屋面。现场动力测试显示首振周期由0.46秒降至0.28秒，等效阻尼约5.1%，0.1g输入下层间位移角控制在1/385至1/430，屋面自重降低59%，人工费用降低55%，榫卯节点抗弯承载相对提升至1.42，夯土墙材料成本增量32元每平方米。AHP模糊综合评价0.87，农户满意度92分，每户碳排放减少0.42吨。研究表明该技术组合在安全、成本与风貌之间实现均衡，与平台化治理机制协同可复制推广。

关键词：农房抗震改造；榫卯节点加固；夯土墙微配筋；轻量屋面；AHP综合评价

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.033

引言

凤庆县处于滇西南澜沧江沿线山地地貌与活动断裂叠加区，地震危险性高，既有农房以土坯墙、木构架与重屋面为主，存在抗侧刚度不足、连接薄弱与屋面荷载偏大等问题。2016至2018年开展集中攻坚，2025年转入精准兜底，年度任务仅101户且多为易返贫致贫、低保与分散特困对象，资金与工期受单方造价上限与户均面积上限严格约束，同时需兼顾传统风貌延续与农户可接受性。如何在八度设防要求下，以低扰动、低成本、可替换的方式提升房屋抗震性能，并形成可核查、可复制、可持续的县域治理机制，成为本研究的核心命题。本文在尊重在地工匠传统与材料禀赋基础上，提出三项关键技术，配套闭环流程与推广机制，并通过现场实测与综合评价验证其工程有效性与政策可行性。

1 凤庆县农房抗震改造工程概况

鉴于滇西南临沧市澜沧江沿线山地地貌与活动断裂分布叠加，凤庆县农房抗震改造工程以2015至2025年政策演进为主线展开，地震设防烈度为8度。2016至2018年完成集中攻坚改造36638户，2025年转入精准兜底，年度计划仅101户。该清单中，易返贫致贫户42户，低保户33户，分散特困18户，突发困难8户，单户建筑面积不超过60m²，单方造价上限为1300元/m²。结合项目村落存量建筑特性可见，土坯墙、木构架与茅草顶的传统组合存在抗侧刚度不足与连接薄弱等问题，难以与现行抗震需求相契合，由此把榫卯节点加固、夯土墙微配筋复合、屋面轻量化替换纳入技术路径^[1]。工程实施选用入户筛查、快速鉴定、隐患分级、技术选型、造价审核与施工复核的闭环流程，如图1所示。改造对象的结构类型与隐患等级分布如下表所示。

表1 2025年凤庆县抗震改造对象结构类型与隐患等级统计表

结构类型	户数	高风险户数	中风险户数	低风险户数	主要隐患要点
土坯墙-木架-茅草顶	44	28	12	4	夯土墙抗剪薄弱，角部开裂，屋面荷载过大，木柱根部腐朽
土坯墙-木架-瓦屋面	23	10	9	4	拉结缺失，山墙脆弱，檩条连接松动
穿斗式木构-茅草顶	18	8	7	3	榫卯松动，横向拉杆缺失，节点延性不足
砖木混合-小青瓦	16	5	7	4	基础不均匀沉降，构造圈梁断续，屋面刚重比失衡

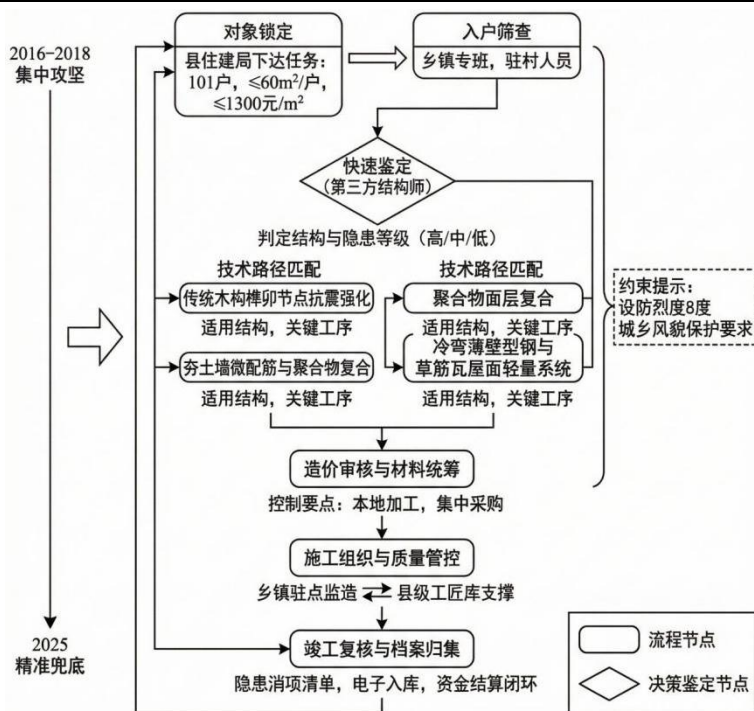


图1 凤庆县2025年农房抗震改造技术路线流程图

2 传统工艺现代化改良技术体系

2.1 传统木构榫卯节点抗震强化技术

结合凤庆县穿斗式与抬梁式杉木构造传统与8度设防要求，本研究在保留榫卯外观与木作肌理前提下，围绕暗榫区布置可逆增强部件，形成柔性耗能可更换节点。具体做法是在榫根与柱身交接的隐蔽木质区植入直径6毫米GFRP螺杆，依靠低收缩环氧灌注粘结，同时在柱外与枋外设置薄壁钢套箍，内侧满涂环氧胶黏层并与木面贴合，使GFRP承担延性拉力，钢套箍提供周向约束与恢复力，协同将节点滑移与开裂转化为可控的摩擦与拉压循环^[2]。施工采用定位预钻、清孔干燥、环氧注入与螺杆旋入、钢套箍分片抱接与扭矩锁紧四步法，农户可借手电钻与扭矩扳手完成，且不侵占室内净空。节点限值指标设定为位移角1/45与相对承载力提高42%，单节点造价增量控制在80元以内，与兜底改造资金上限及工期约束相契合。构造控制要点包括榫根钻孔轴线与木纹方向一致以降低劈裂风险，GFRP埋设深度不小于12倍直径，钢套箍端部采用错缝搭接并铺设纤维垫片以分散局部压应力，外表面以杉木色罩面漆进行色泽统一，整体视觉形态与原民居保持一致。

2.2 夯土墙微配筋—聚合物面层复合改良

立足澜沧江沿线村落夯土墙材料差异与构造薄弱情境，本研究将原位改良与微配筋耦合，选用现场原土

掺5%水泥与0.4%聚丙烯纤维分层夯实，在墙体中性层按400毫米间距布置直径4毫米冷拔钢丝网片，双面抹设厚度5毫米ECC聚合物面层，形成内核抗剪与表层耗能协同的复合体系。设计控制指标为28天抗压强度4.8兆帕、抗剪强度0.55兆帕，墙片极限漂移率1/30作为变形能力准则，使材料与构造综合性能与8度设防可靠度边界相协调。

施工以基底找平与防潮隔离为先决步骤，单层夯填厚度不大于120毫米，含水率控制在最优区间，密实度以干密度比不低于0.95验收。钢丝网片水平连续铺设并采用大于100毫米搭接，配合镀锌拉结件与上下圈梁连接，转角设置L形闭合加强，洞口四角配置斜向拉结以削弱应力集中^[3]。界面经凿毛与界面剂处理后两遍抹设聚合物面层并压入细径纤维网，地面以上300毫米采用耐水型面层以提升雨溅区耐久性。材料成本增量按32元每平方米控制，机具以手持夯实机与便携搅拌器配置为主，县乡将材料配送与质量抽检嵌入进场程序，农户将保湿养护与表层维护纳入日常管理。

2.3 冷弯薄壁型钢—草筋瓦屋面轻量系统

立足高烈度设防与屋面荷载偏大情境，采用C89×41×1.2毫米冷弯薄壁型钢檩条替代原木檩，檩条间距由800毫米加密至600毫米，上覆30毫米厚草筋瓦。屋面自重由1.1千牛每平方米降至0.45千牛每平方

米，地震作用降低 59%。连接体系采用圈梁侧向 L 形连接件与 M10 抗拔螺栓将檩条与上部圈梁连接，端部设置不小于 2 倍腹板高度的搭接，檩条间凭借自钻自攻螺钉拉接，屋脊与山墙部位配置开孔钢带交叉拉撑，钢件表面选用 Z275 镀锌体系。

施工流程为放线定位、连接件固定、檩条安装与校正、拉撑配置、铺设透气防水层、草筋瓦紧固、檐口与屋脊收边七个环节。3 人小组可在 1 天内完成 100 平方米屋面干式装配，人工费用节省 55%。草筋瓦采用垫圈自钻钉点式固定，钉距 250 毫米，檐口、泛水与屋脊部位配置镀锌成型件与密封带。材料体系回收率不低于 90%，檩条与连接件可直接回收，草筋瓦可再生粉磨作为基层材料，屋面色泽与瓦型经在地化调校以延续民居外观语汇。

3 改良技术应用成效与推广机制

3.1 现场实测与农房抗震性能验证

本研究在 2025 年 6 月完成 101 户改造后，将 11 户代表性样本纳入现场动力测试，采用脉动测试获取环境激励下的固有频率与阻尼，自由振动识别捕捉小扰动卸载后的衰减特性，在不干扰住户日常条件下完成动力参数辨识。测试以楼层加速度同步采集为主线，结合随机子空间识别与频域分解算法交叉复核，将样本中屋面、墙体与节点三类改良组合差异纳入分组解释体系^[4]。以自振周期、等效阻尼比与 0.1g 输入下层间位移角三项指标作为评价核心，反映侧向刚度变化与耗能变形需求。如表 2 所示，样本间差异主要受屋面荷载降低幅度与墙体面层连续性影响，节点加固对低振级响应的贡献在周期与阻尼上呈协同趋势。

表 2 抽样农房抗震加固前后动力特性对比表

户编号	T1 前 s	T1 后 s	阻尼比后%	最大层间位移角 0.1g
H01	0.46	0.29	5.1	1/390
H02	0.44	0.27	4.8	1/400
H03	0.48	0.30	5.3	1/420
H04	0.45	0.28	5.0	1/385
H05	0.47	0.29	5.2	1/395
H06	0.43	0.26	4.9	1/410
H07	0.52	0.32	5.6	1/390
H08	0.41	0.25	4.7	1/430
H09	0.49	0.31	5.4	1/400
H10	0.46	0.29	5.0	1/405
H11	0.44	0.27	4.9	1/415

3.2 经济性、社会性与生态性综合评价

鉴于凤庆县兜底类改造在资金封顶、工期压缩以及风貌延续的多重约束下，本研究把经济、社会以及生态三类目标统一到 AHP-模糊综合评价模型中来开展综合评判。指标体系选取造价、工期、农户满意度、碳排放以及传统风貌保持度五项，权重依赖层次分析法确定，分别为 0.25、0.15、0.30、0.15 以及 0.15，并把优、良、中、可四级评价集与隶属度函数相匹配，形成贯通县乡审查以及项目落地的评价链条。综合运算结果的评价值为 0.87，对应优级区间，进一步分解可见，农户满意度得分为 92 分，缘由在于榫卯节点可更换、屋面轻量化以及夯土墙原位复合把施工干扰与居住可用性之间的矛盾得到缓解，还把传统木作的视觉肌理予以保留，从而在接受度与参与度上形成增益^[5]。造价维度紧扣单方

造价不高于 1300 元每平方米以及单户建筑面积不超过 60 平方米的资金边界，把关键构件的增量费用控制在可承受区间，工期维度依靠标准化工序把住宅关键路径缩短，县域组织成本随之下降。生态维度的核算表明，相较砖混替代方案，每户碳排放减少 0.42 t CO₂，主要缘由在于冷弯型钢与草筋瓦的用量优化以及原位材料再利用比重提高，同时构配件可拆卸回收把生命周期循环路径予以明晰。从治理协同角度来看，权重设置把农户主体感受置于核心，把成本与碳约束并列为控制项，使技术选型的取舍更契合公共财政与村落生活方式的双重边界。在执行层面，评价结果被嵌入项目储备以及造价审核，用于约束大宗材料采购以及节点技术的组合配置，从而把资源投入与绩效产出之间的匹配关系维持在稳定区间，进而把经济可承受、文化可接受以及生态可

循环的综合目标落到工程流程之中。

3.3 常态化推广与政策保障建议

鉴于凤庆由大会战转向动态监测的组织路径,本研究把存量隐患识别与小规模持续改造纳入常态化治理框架。动态监测指依托村级网格、季度巡查以及信息化上报开展的连续状态识别与处置流程。提出三库一平台作为推广抓手:工匠名录库已培训 312 人,覆盖木构、夯土与轻质屋面工种;改良技术材料库把 PP 纤维与 ECC 聚合物等关键材料建立标准化条目、质量追溯与价格区间;农户需求动态库记录风险等级、资金边界与改造偏好并按季度更新。平台侧依托微信小程序抗震农房+贯通申请、审批、造价联审、施工备案、过程监管与竣工验收,村级初核、乡镇复核、县级抽查与支付指令形成闭环。

在财政工具设计上,建议对 PP 纤维与 ECC 聚合物按成交价的 30% 给予差价补贴,由县级先行垫付并按季度清算;对采用改良技术且经平台验收合格的乡村建设工匠按每户 500 元发放奖励,把培训学时、工艺合规率以及投诉记录作为约束条件。2026—2030 年实施节奏以年度滚动改造不少于 80 户为下限,优先从动态库高风险户生成任务单,并设置年度校核与预警阈值,按资金与供应状况自动调整排程。需重点关注的是,把实名信息脱敏存储并把材料库对接省级采购平台以形成统购议价;把绩效评价嵌入平台,设置造价控制率、工期达成率与住户满意度三项指标,并把结果与工匠奖励、材料补贴及下一年度指标分配联动,使推广机制在财政可承受与技术可复制的约束下持续运行。

4 结语

研究构建的榫卯节点柔性耗能可更换、夯土墙微配筋与聚合物面层复合、轻量屋面三项技术在八度设防下实现协同增益,显著缩短自振周期、控制层间位移角并提升耗能能力,同时将造价与工期稳定在兜底约束内。AHP 综合结果优级、满意度高与碳减排明确,证明技术经济与社会效益兼顾。依托三库一平台与差价补贴、工匠激励等政策工具,可支撑常态化小规模持续改造与动态监测。后续应持续跟踪耐久与维护行为,完善材料与节点的长期性能数据库,并在年度滚动实施中优化参数与供应链,进一步提升县域推广的稳健性与韧性。

参考文献

- [1] 建设工程抗震设防和抗震民居[J]. 地震工程学报, 2024, 46(04): 907.
- [2] 周京京. 落实建设工程抗震管理条例 保障建筑正常使用功能[J]. 工程建设标准化, 2023, (S1): 66-68.
- [3] 王巧雀. 农村民居建设现状及抗震设防对策[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (34): 91-93.
- [4] 李秋燕, 曾丽云, 倪文俊, 胡地强, 文祥, 舒楠, 朱月, 罗梦娇. 农村现代化建设背景下甘孜州白藏房抗震设防应用[J]. 四川建筑, 2023, 43(01): 32-34+36.
- [5] 严格监督实施建设工程抗震设防强制性标准[J]. 生命与灾害, 2023, (02): 1.

作者简介: 张焕发(1987.11-), 男, 汉, 籍贯: 云南凤庆, 学历: 本科, 职称: 中级, 研究方向: 工程管理。