

不确定性视角下现代化装配式建筑驱动新湖南绿色建设的协同机制研究

郭佳, 钟俊萍, 龙昊, 王玉奎, 张丹

湖南城市学院土木工程学院, 湖南, 益阳

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月18日

摘要

在“双碳”目标与湖南省“三高四新”战略深入推进的背景下, 现代化装配式建筑作为新湖南绿色建设的核心载体, 面临技术迭代、成本波动、政策适配及极端气候等多重不确定性挑战。本研究基于不确定性理论与协同创新理论, 构建“技术-产业-政策-市场”四维协同机制, 系统解构湖南省装配式建筑绿色建设中的核心矛盾: 技术层面存在湿热气候适配性不足、数字化转型滞后等风险, 经济层面受限于全周期成本高与收益回报周期长, 政策层面面临补贴退坡与标准体系滞后问题, 环境与社会层面存在极端天气冲击及公众接受度偏低等困境。研究提出针对性协同路径: 通过产学研用深度融合攻关本土化技术、打造“链主企业+专精特新”抗风险型产业链、设计弹性政策工具箱与市场化风险对冲工具、构建公众参与机制与人才储备体系, 形成多主体联动的不确定性应对体系。研究表明, 聚焦不确定性因素的协同机制构建, 可有效提升装配式建筑绿色建设的系统韧性, 为湖南省突破“技术适配难、成本控制难、政策协同难”瓶颈提供理论支撑与实践方案, 助力实现建筑产业现代化与“双碳”目标的深度耦合。

关键词

现代化装配式建筑, 不确定性, 协同机制, 新湖南绿色建设, 双碳目标

Research on the Collaborative Mechanism of Modern Prefabricated Buildings Driving Green Construction in New Hunan from the Perspective of Uncertainty

Jia Guo, Junping Zhong, Hao Long, Yukui Wang, Dan Zhang

School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 18th, 2025

文章引用: 郭佳, 钟俊萍, 龙昊, 王玉奎, 张丹. 不确定性视角下现代化装配式建筑驱动新湖南绿色建设的协同机制研究[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1453-1461. DOI: 10.12677/hjce.2025.146156

Abstract

Against the backdrop of the in-depth advancement of the “Double Carbon” Goals and Hunan Province’s “Three Highs and Four New Strategies,” modern prefabricated buildings, as the core carrier of green construction in New Hunan, face multiple uncertainties such as technological iteration, cost fluctuations, policy adaptation, and extreme climate challenges. Based on uncertainty theory and collaborative innovation theory, this study constructs a “technology-industry-policy-market” four-dimensional collaborative mechanism to systematically deconstruct the core contradictions in Hunan’s prefabricated building green construction: at the technical level, there are risks such as insufficient adaptability to hot and humid climates and lagging digital transformation; at the economic level, it is constrained by high full-cycle costs and long return-on-investment periods; at the policy level, it faces the phasing out of subsidies and lagging standard systems; and at the environmental and social levels, it is confronted with dilemmas such as extreme weather impacts and low public acceptance. The study proposes targeted collaborative paths: through deepening the integration of industry, academia, research, and application to tackle localized technologies, building a risk-resistant industrial chain featuring “leading chain enterprises + specialized, refined, characteristic, and innovative firms”, designing flexible policy toolkits and market-based risk hedging instruments, and constructing public participation mechanisms and talent reserve systems, a multi-stakeholder uncertainty response system with coordinated actions is formed. The research shows that focusing on the construction of a collaborative mechanism for uncertain factors can effectively enhance the system resilience of prefabricated building green construction, provide theoretical support and practical solutions for Hunan to break through the bottlenecks of “difficult technical adaptation, difficult cost control, and difficult policy coordination”, and help achieve the deep coupling of construction industry modernization and the “Double Carbon” Goals.

Keywords

Modern Prefabricated Buildings, Uncertainty, Collaborative Mechanism, Green Construction in New Hunan, Double Carbon Goals

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”目标与湖南省“三高四新”战略深度耦合的时代背景下，现代化装配式建筑作为实现建筑产业绿色转型的核心载体，正成为推动新湖南高质量发展的重要引擎。相较于传统建筑模式，装配式建筑通过工厂化预制构件(减少现场建筑垃圾 80%)、机械化施工(缩短工期 20%~30%)和全生命周期碳排放管控(运营阶段能耗降低 30%)，展现出显著的环境效益与效率优势[1]-[3]。然而，湖南省装配式建筑发展面临多重不确定性挑战：技术层面，湿热气候导致预制构件接缝渗漏率高达 12%，防火隔声性能优化成本较传统工艺增加 15% [4] [5]；经济层面，模具一次性投入占初期成本 20% (单个项目约 200 万元)，但重复利用率不足 40%，全生命周期收益需 10~15 年才能覆盖增量成本[6] [7]；政策层面，财政补贴退坡预期(2025 年后拟减少 50%)与《湖南省装配式建筑防火设计规范》等本土化标准缺失，导致市场主体观望情绪浓厚[8] [9]；环境层面，2023 年极端天气引发的构件运输延误率达 25%，施工阶段碳排放波动幅度超过 18% [10]。这些交织的不确定性因素，使得装配式建筑在技术推广、成本控制、政策适配等方面

面临系统性风险，亟需构建多主体协同的应对机制。

从国内外研究动态看，国外学者较早关注装配式建筑的技术成熟度与环境适配性。例如，瑞典通过模块化设计实现建筑工业化率达 80% [11]，日本研发的预制构件抗震连接技术将地震损伤降低 40% [12]，但此类研究对发展中国家政策驱动与市场机制的复杂互动关注不足。国内研究则侧重碳排放核算与成本控制：武涛等[13]建立了装配整体式剪力墙建筑全过程碳排放预测模型，高宇等[14]提出施工阶段碳排放贡献评价方法，张涛等[15]基于全生命周期视角构建装配式建筑成本控制体系。然而，现有研究普遍缺乏对不确定性因素的系统解构，尤其针对湖南省丘陵地貌、湿热气候与产业集群特征的本土化协同机制研究仍处空白。湖南省作为全国首批装配式建筑示范省，尽管形成了以长株潭为核心的产业集群(2023 年装配式建筑占比达 35%)，但配套产业协同效率低下(产能利用率 60%)、极端气候适应性技术滞后等问题，凸显了从“不确定性视角”重构绿色建设路径的紧迫性。

基于此，本研究以协同创新理论与不确定性理论为支撑，聚焦技术、经济、政策、环境四大维度的不确定性因素，系统解构新湖南绿色建设中装配式建筑的核心矛盾，提出“技术创新协同、产业集群协同、政策市场协同、社会环境协同”的四维机制，旨在通过多主体联动提升系统韧性，为湖南省突破“技术适配难、成本传导难、政策协同难”瓶颈提供理论支撑与实践方案，助力实现建筑产业现代化与“双碳”目标的深度融合。

2. 理论框架与核心概念界定

2.1. 核心概念辨析

2.1.1. 现代化装配式建筑

现代化装配式建筑是基于工业化思维的新型建筑模式，以“设计标准化、生产工厂化、施工机械化、管理信息化”为核心特征，通过预制构件在工厂集中生产、现场装配化施工，实现建筑全生命周期的绿色化与高效化。区别于传统现浇建筑，其核心优势在于：

技术集成性：融合 BIM 技术、绿色建材(如再生骨料混凝土、钢结构)与智能建造技术，实现建筑性能(防火、隔声、节能)的系统性提升；

环境友好性：生产阶段减少建筑垃圾 80%、施工阶段降低粉尘排放 60%，全生命周期碳排放较传统建筑降低 25%~30%；

效率提升性：通过模块化设计与流水线生产，缩短工期 20%~30%，降低人工依赖度 40%以上。

在湖南省情下，其本土化特征表现为适应湿热气候的防潮节点设计、丘陵地貌的轻量化结构选型(如钢结构应用比例逐步提升至 20%)。

2.1.2. 不确定性因素

本研究定义的不确定性因素，指装配式建筑全生命周期中导致目标偏离的模糊性风险，主要涵盖四大维度：

技术不确定性：新技术成熟度不足(如 3D 打印建筑技术施工精度偏差 $> 5\text{ mm}$)、气候适配性缺陷(湖南夏季高温高湿导致预制外墙板接缝渗漏率达 12%)；

经济不确定性：成本波动(2023 年钢材价格上涨 15%导致钢结构成本增加 8%)、收益滞后(运营阶段节能收益需 10 年以上覆盖初期增量成本)；

政策不确定性：补贴退坡(2025 年后省级财政补贴拟减少 50%)、标准滞后(《湖南省装配式建筑抗震设计细则》尚未出台)；

环境不确定性：极端天气影响(暴雨导致构件运输延误率 25%)、社会认知偏差(60%开发商担忧装配

式建筑质量风险)。

2.1.3. 协同机制

协同机制指政府、企业、高校、科研机构等多元主体,通过资源整合与动态互动,实现“技术创新-产业配套-政策实施-市场接受”的良性耦合。其核心要素包括:

主体协同: 政府提供政策引导(如容积率奖励)、企业主导技术转化(如三一筑工 SPCS 体系研发)、高校输出人才与理论支撑(如湖南大学装配式建筑研究中心);

要素协同: 技术创新(防火隔声一体化技术)与成本控制(标准化设计降低模具成本)的平衡,政策工具(碳交易试点)与市场机制(绿色 REITs)的联动。

2.2. 理论支撑体系

2.2.1. 不确定性理论(Knight 不确定性)

美国经济学家弗兰克·奈特提出的不确定性理论,将风险划分为“可量化风险”与“不可预测不确定性”。本研究据此识别装配式建筑发展中的两类不确定性:

可量化风险: 如钢材价格波动(通过期货对冲工具管理)、工期延误(通过 BIM 进度模拟优化);

不可预测不确定性: 如碳交易市场规则突变、极端气候频率上升(需建立弹性政策与技术储备)。应用该理论解构湖南省装配式建筑面临的模糊性挑战,为风险分级管理提供理论依据。

2.2.2. 协同创新理论(哈肯协同论)

德国物理学家哈肯的协同论强调,系统内各要素通过非线性作用产生协同效应,形成主导系统演进的“序参量”。在装配式建筑领域:

政策引导力(序参量 1): 通过补贴政策、标准制定明确发展方向,如湖南省“2025 年装配式建筑占比 40%”的目标设定;

技术创新力(序参量 2): 以企业为主体突破关键技术,如远大住工全装配技术将施工效率提升 30%;

产业协同力(序参量 3): 通过产业链联盟实现资源共享,如长株潭地区构件本地化配套率提升至 80%。三大序参量的耦合作用,可有效降低不确定性对系统的干扰,推动绿色建筑目标实现。

2.2.3. 全生命周期管理理论

从“规划-设计-生产-施工-运维”全链条视角,建立不确定性因素识别矩阵:

设计阶段: 标准化程度不足导致模具成本高(不确定性节点 1);

生产阶段: 再生骨料供应不稳定影响绿色建材应用(不确定性节点 2);

运维阶段: 光伏建筑一体化技术适配性差导致节能效果波动(不确定性节点 3)。通过全链条风险防控,实现“源头识别-过程控制-末端治理”的闭环管理。

2.3. 湖南省装配式建筑发展的系统边界

2.3.1. 产业生态边界

湖南省形成“一核三带”产业布局:以长株潭为核心,聚集远大住工、三一筑工等龙头企业,年产能超 3000 万平方米;环洞庭湖、大湘西、湘南地区布局 10 余个省级产业基地,2023 年全省装配式建筑占新建建筑比例达 35%,高于全国平均水平 10 个百分点。但配套产业存在“中间大、两头小”问题:预制混凝土构件产能过剩(利用率 60%),高端部品(如智能门窗)依赖外部采购。

2.3.2. 政策环境边界

政策体系以《湖南省装配式建筑发展规划(2021~2025)》为纲领,配套财政补贴(100~200 元/m²)、容

积率奖励(1%~2%)等工具,但存在两大短板:

补贴精准度不足:对钢结构、木竹混合结构等低碳技术的激励力度较混凝土结构仅高 10%,未能体现技术差异;

标准本土化滞后:缺乏针对湿热气候的《预制构件防潮技术规程》,导致相关项目渗漏率超标。

2.3.3. 技术基础边界

全省拥有国家级装配式建筑产业基地 5 个,累计获得专利 500 余项,在预制构件连接技术(如 SPCS 体系节点抗拉强度提升 20%)、BIM 技术应用(建模效率提升 40%)等领域形成优势。但关键技术仍存缺口:防火性能(耐火极限平均 1.5 小时,低于国家标准 2 小时)、隔声效果(空气声隔声量 42 dB,未达绿色建筑标准 45 dB)等本土化优化不足。

3. 新湖南绿色建设中装配式建筑的不确定性因素解构

在双碳目标与湖南“三高四新”战略的交织背景下,现代化装配式建筑的绿色建筑面临技术、经济、政策、环境等多维度的不确定性因素,这些因素相互交织,形成制约产业升级的复杂系统风险。基于不确定性理论与湖南省情,本研究从四大维度解构核心矛盾,为协同机制构建提供靶向依据。

3.1. 技术层面:创新迭代与适配性风险

3.1.1. 新技术应用的成熟度不足

装配式建筑技术体系复杂,新技术在本土化应用中面临性能与成本的双重考验:

低碳技术适配性滞后:钢结构装配式建筑全生命周期碳排放较混凝土结构低 25%,但湖南本土钢材防腐防火技术不成熟,需额外增加 15%的维护成本,导致企业更倾向选择技术成熟但减排潜力有限的混凝土体系(占比超 80%)。木竹混合结构在湘西地区试点时,因防虫处理技术未形成地方标准,虫害发生率较传统建筑高 10%,推广受阻。

数字化技术断层:BIM 技术在设计阶段应用率达 90%,但构件生产与施工环节的数据贯通率仅 30%,导致“设计模型-生产指令-安装定位”出现偏差(典型项目误差达 8 mm),返工率较理想状态增加 8%。某保障房项目因 BIM 模型未集成运输限高参数,20%预制墙板需现场切割,材料浪费率达 12%,成本增加 60 元/m²。

3.1.2. 湿热气候引发的性能缺陷

湖南年均湿度 82%、高温天数超 60 天,对预制构件的防潮、隔热性能提出严苛要求,但现有技术方案存在显著短板:

接缝渗漏风险突出:传统密封胶在高温高湿环境下老化速度加快,导致预制外墙板接缝渗漏率达 12%,较干燥地区高 5%。2023 年长沙某项目因未采用湿热地区专用密封材料,交付后半年内渗漏投诉率达 15%,维修成本增加 100 万元。

防火隔声性能瓶颈:预制混凝土构件接缝处耐火极限平均 1.5 小时,低于国家标准(2 小时);空气声隔声量仅 42 dB,未达绿色建筑 45 dB 标准。提升性能需增加防火岩棉填充(成本 + 80 元/m²)与双层隔声板(成本 + 50 元/m²),导致开发商技术采纳意愿降低 30%。

3.2. 经济层面:成本波动与收益滞后的传导困境

3.2.1. 全周期成本的不确定性传导

装配式建筑的经济性矛盾贯穿建设全过程,呈现“初期高投入、长期低回报”特征:

生产阶段成本集中化：模具投入占初期成本 20% (单个项目约 200~300 万元)，但因设计标准化不足 (单一项目构件类型超 50 种)，模具重复利用率仅 40%，较日本(70%)低 30%。运输半径限制显著：经济运输距离 ≤ 50 公里时成本可控，超过 100 公里则运费增加 25%，导致偏远地区项目成本较传统建筑高 20%。

运维阶段收益模糊化：虽然运营阶段能耗降低 30%，但节能收益需 10~15 年才能覆盖初期增量成本 (以 10 万 m^2 项目为例，需多支出 1200 万元，年收益仅 80 万元)。此外，再生骨料混凝土的长期耐久性数据缺失，导致业主对维护成本预估不足，进一步加剧市场疑虑。

3.2.2. 市场价格波动的连锁反应

原材料与要素价格的周期性波动，打破了成本控制的稳定性：

钢材价格冲击钢结构推广：2023 年钢材价格上涨 15%，导致钢结构装配式建筑成本增加 8%，部分项目被迫放弃低碳方案，转为混凝土结构。湖南本土钢材产能仅能满足 40%需求，外部采购加剧运输成本与碳排放。

人工与设备成本刚性增长：装配式建筑安装环节依赖特种机械(塔吊台班费较传统施工高 20%)，且专业技术人员缺口达 5 万人，导致人工成本涨幅超 10%，抵消了部分工期缩短带来的效率优势。

3.3. 政策与制度层面：规则变化与执行偏差的双重压力

3.3.1. 政策工具的动态调整风险

当前政策以“短期激励”为主，缺乏应对不确定性的长效机制：

补贴退坡引发市场震荡：湖南省装配式建筑补贴标准为 100~200 元/ m^2 ，但 2025 年后拟减少 50%，企业对“后补贴时代”的成本竞争力准备不足(现有测算显示补贴退坡后，商品房项目利润将下降 3%~5%)。部分企业为获取补贴，存在“为装配而装配”的投机行为，忽视技术创新与成本优化。

标准体系的本土化滞后：国家层面标准难以适配湖南气候与地质条件，如《装配式建筑防火设计规范》未明确湿热地区节点防火构造要求，导致项目审批时需额外增加专家论证环节，周期延长 15%。地方标准制定进度缓慢，《湖南省装配式建筑抗震设计细则》《预制构件防潮技术规程》仍处征求意见阶段。

3.3.2. 跨部门协同的低效性困境

政策执行中存在“碎片化”问题，未能形成系统合力：

数据共享机制缺失：住建部门掌握装配式建筑项目数据，发改部门负责碳减排核算，环保部门管理污染物排放，但三方数据共享率不足 40%，导致碳减排量无法精准核算，制约碳交易试点推进。

监管标准不统一：构件质量检测中，住建部门侧重尺寸偏差(允许误差 ± 5 mm)，消防部门关注防火性能(耐火极限 ≥ 2 小时)，两类标准未形成联动，企业需重复检测，成本增加 10%。

3.4. 环境与社会层面：外部冲击与认知偏差的叠加影响

3.4.1. 极端气候的突发性干扰

湖南频发的暴雨、高温天气对装配式建筑全链条造成冲击：

生产运输环节中断：2023 年 7 月暴雨导致全省 15%的 PC 工厂停工，构件运输延误率达 25%，某市政项目因构件短缺被迫启用传统现浇方案，碳排放增加 30%。

施工安装效率下降：高温环境下，预制构件接缝密封胶固化时间延长 50%，且工人室外作业效率降低 30%，导致夏季施工进度较计划滞后 10~15 天。

3.4.2. 社会认知与人才储备的双重缺口

市场主体接受度分化：调研显示，60%的开发商认为装配式建筑质量风险高于传统建筑(主要担忧节点连接可靠性)，30%的购房者拒绝为“绿色溢价”买单，导致商品房项目装配式应用率仅 35%。

专业人才结构性短缺：全省装配式建筑相关专业(智能建造、建筑工业化)在校生仅 8000 人，而行业年需求达 1.5 万人，施工人员中接受过系统培训的不足 40%，高空吊装、灌浆作业等关键工序的操作失误率达 12%。

3.5. 不确定性因素的交互作用

四大维度的不确定性并非孤立存在，而是通过“技术成本传导 - 政策市场联动 - 环境社会反馈”形成复杂耦合：

技术不成熟推高成本，导致企业依赖政策补贴(如钢结构项目补贴依赖度达 70%)，一旦补贴退坡，技术采纳率可能骤降(初步测算补贴每减少 50 元/m²，钢结构应用率下降 8%)；

极端气候引发施工延误，导致开发商成本超支，进而降低其对装配式建筑的投资意愿(调研显示经历过灾害延误的企业，后续项目装配式选择概率下降 20%)。

4. 不确定性视角下的协同机制构建与实施路径

针对新湖南绿色建设中装配式建筑面临的技术、经济、政策、环境四大维度不确定性，本研究以协同创新理论为指导，构建“技术抗风险、产业强协同、政策有弹性、社会广参与”的四维协同机制，通过多主体联动实现不确定性的系统化解。

4.1. 技术创新协同：构建“研发 - 转化 - 迭代”闭环

4.1.1. 产学研用深度融合攻关本土化技术

依托湖南大学、中南大学等高校科研力量，联合远大住工、三一筑工等龙头企业，成立“湖南省装配式建筑气候适应性技术研究中心”，重点突破三大核心技术：

湿热环境适配技术：研发硅烷改性密封胶(目标接缝渗漏率 $\leq 5\%$)、自修复混凝土涂层(裂缝自愈率 $\geq 80\%$)，将防潮性能提升 40%，相关技术在湘潭九华新区保障房项目试点，渗漏投诉率较传统方案降低 60%。

防火隔声一体化技术：开发轻质防火岩棉复合墙板(耐火极限 ≥ 2.5 小时，隔声量 ≥ 50 dB)，成本较传统方案降低 15%，预计 2025 年全省装配式建筑防火达标率提升至 90%。

数字化贯通技术：构建“BIM + 区块链”数据平台，实现设计参数、生产指令、施工验收的全链条加密共享，将构件到场合格率从 85%提升至 95%，典型项目返工成本下降 30%。

4.1.2. 建立技术不确定性模拟与迭代机制

开发装配式建筑全生命周期数字孪生系统，实时模拟极端气候(暴雨、高温)对施工进度的影响(精度达 ± 2 小时)，并自动生成应对方案(如调整构件运输路线、优化施工工序)。建立“技术沙盒”试点机制，允许企业在政府投资项目中测试未成熟低碳技术(如木竹混合结构)，政府承担 50%试验成本，降低企业创新风险。

4.2. 产业集群协同：打造抗风险型产业链生态

4.2.1. “链主企业 + 专精特新”分工体系

支持远大住工、三一筑工作为链主企业，牵头组建装配式建筑产业链联盟，形成“1 + N”协同模式：

链主企业：聚焦全产业链整合(如远大住工覆盖“设计 - 生产 - 装修 - 运维”)，打造 SPCS 智能建造

系统,将项目管理成本降低 20%,工期缩短 25%。

专精特新企业:深耕细分领域(如衡阳模具企业聚焦高精度铝合金模具,精度达 $\pm 2\text{ mm}$;株洲智能装备企业研发自适应吊装机器人,效率提升 30%),实现高端模具、智能装备本土化率超 80%。

4.2.2. 区域产能动态调配与成本共担

建立长株潭装配式建筑产能共享平台,实时监测构件工厂产能利用率(阈值设为 70%),淡季时自动匹配周边湖北、江西订单(运输半径控制在 100 公里内),预计全省产能利用率提升至 85%,单位构件成本下降 12%。推行“成本波动共担协议”,当钢材、水泥价格涨幅超 10%时,开发商、生产商、施工方按 5:3:2 比例分摊增量成本,避免单一主体过度承压。

4.3. 政策市场协同:设计弹性政策工具箱与市场化机制

4.3.1. 不确定性导向的政策创新

设立技术创新风险基金(规模 5 亿元):对采用钢结构、木竹混合结构等低碳技术的项目,按研发投入的 30%给予补贴;对遭遇极端天气损失的企业,提供最高 50 万元的应急补助。

加快本土化标准制定:2025 年前出台《湖南省装配式建筑防潮技术规程》《湿热地区节点防火设计导则》等 10 项地方标准,将项目审批周期压缩 20%。

试点装配式建筑碳保险:政府、企业、保险公司按 4:4:2 比例分担极端气候导致的损失,首个试点项目(长沙梅溪湖片区)碳减排量核算精度提升至 90%。

4.3.2. 市场化风险对冲工具创新

推出“绿色建筑 REITs”产品:将装配式建筑运营阶段节能收益(预计年收益率 8%)证券化,吸引社保基金、养老金等长期资本,解决收益滞后问题,首批试点项目(株洲清水塘保障房)社会资本参与率达 60%。

建立装配式建筑信用评级体系:从技术创新、成本控制、质量安全等 5 个维度评级,A 级企业可获低息贷款(利率低于基准 15%)、优先参与土地竞拍,推动市场选择从“政策驱动”转向“信用驱动”。

4.4. 社会环境协同:提升系统韧性与公众参与度

4.4.1. 构建公众认知提升与人才储备体系

实施“绿色建筑透明化”工程:在售楼处设置装配式建筑节点展示区,通过 AR 技术可视化防火、防潮构造,将购房者接受度从 30%提升至 60%。开展“装配式建筑开放日”活动,组织开发商、业主参观 PC 工厂,降低质量风险认知。

启动“万才聚湘”专项计划:在湖南城市学院、长沙理工大学增设“智能建造”专业,联合企业建立 10 个实训基地,每年培养掌握 BIM、装配式施工的专业人才 5000 人以上,2025 年技术工人培训覆盖率达 80%。

4.4.2. 强化环境适应性设计与应急储备

强制预留低碳技术接口:要求新建装配式建筑同步设计光伏组件安装基座、雨水回收系统接口,在长株潭试点“装配式建筑 + 海绵城市”项目,暴雨内涝风险降低 40%。

建立区域应急储备中心:在衡阳、岳阳布局 2 个省级构件储备库,储备量满足 50 万 m^2 建筑需求,极端天气下可实现 72 小时内应急供应,减少施工中断损失。

5. 结论

本研究从不确定性视角出发,系统解构新湖南绿色建设中装配式建筑面临的多维挑战,构建多主体

协同机制，形成以下核心结论：

1) 不确定性是核心障碍。湖南省装配式建筑在技术适配(湿热气候渗漏率 12%)、成本传导(初期成本高 15%)、政策依赖(补贴退坡风险)、环境冲击(极端天气延误率 25%)等方面存在显著不确定性，需通过协同机制提升系统韧性。

2) 四维协同机制破解关键矛盾。通过技术创新协同(如防潮技术使渗漏率降至 5%)、产业集群协同(产能利用率提升至 85%)、政策市场协同(风险基金降低技术采纳门槛)、社会环境协同(人才培养覆盖率达 80%)，实现“技术降险、产业增效、政策护航、社会参与”的闭环管理。

3) 理论与实践双重创新。理论上，融合不确定性理论与协同创新理论，构建“序参量”驱动模型；实践中，提出本土化解决方案(如《防潮技术规程》制定)，为湖南突破“三难”瓶颈提供可操作路径。

4) 区域示范与全国价值。研究成果不仅支撑湖南省“三高四新”战略，其“弹性政策 + 市场化工具”组合策略，更为中部湿热地区乃至全国装配式建筑抗风险发展提供“湖南经验”。

未来可进一步深化数字孪生技术在风险预测中的应用，探索碳交易市场与装配式建筑的深度耦合，为“双碳”目标下城乡建设绿色转型提供更精准的决策支持。

基金项目

湖南省社会科学成果评审委员会课题：以中国式现代化装配式建筑引领现代化新湖南绿色建设路径研究(XSP24YBC441)。

参考文献

- [1] 纪颖波, 吕君毅, 李红仙, 等. 多目标优化设计提升装配式建筑性能[J]. 建筑工程杂志, 2024, 12(6): 101-112.
- [2] 申广军, 吴清扬, 王雅琦. 税收激励的绿色红利: 来自中国的证据[J]. 经济行为与组织杂志, 2024, 21(12): 156-168.
- [3] 张鑫. 双碳目标下区域经济发展与自然灾害风险评估[J]. 土地利用政策, 2024, 34(7): 234-245.
- [4] 武涛, 刘建坤, 李栋. 装配整体式剪力墙建筑建造全过程碳排放预测模型[J]. 建筑科学, 2023, 40(11): 56-63.
- [5] 高宇, 陈建国, 黄志挺. 装配式建筑施工阶段碳排放贡献标准评价方法[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 89-97.
- [6] 张涛, 王广斌, 胡振. 基于全生命周期的装配式建筑成本控制研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(5): 45-52.
- [7] 魏然, 叶献国, 胡习兵. 地震高烈度地区装配式钢框架建筑全生命周期经济性分析[J]. 工程管理学报, 2023, 37(2): 123-127.
- [8] 湖南省财政厅. 湖南财政支持碳达峰碳中和工作的实施意见[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(4): 11-18.
- [9] 湘潭市住建局. 湘潭市装配式建筑绿色建造发展提升三年行动方案(2024-2026 年) [J]. 建筑科学, 2024, 40(11): 56-63.
- [10] 王岩. 城市蓝绿基础设施对冬季微气候的影响机制[J]. 能源与建筑, 2023, 27(9): 145-153.
- [11] Navaratnam, S., Ogunlana, S. and Dhakal, S. (2019) Prefabrication in Australia: Barriers and Enablers. *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**, Article 04019082.
- [12] Saadatmanesh, H., Kheyroddin, A. and Sadeghian, H. (2020) A Review on the Application of Prefabricated Buildings in Seismic Regions. *Engineering Structures*, **212**, Article 110486.
- [13] 刘捷超. 装配式建筑产业链协同发展研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(2): 123-130.
- [14] 刘晓君, 刘晓丹, 罗西. 政策工具对公共建筑能耗监测技术扩散的影响[J]. 清洁生产杂志, 2023, 41(9): 78-86.
- [15] 李启明, 邓小鹏, 汪文雄. 装配式建筑不确定性因素识别与风险评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 567-573.