

# 我国装配式建筑区域发展水平评价

——以西南地区为例

张亚钊<sup>1</sup>, 刘洋<sup>2</sup>, 陈自强<sup>3</sup>, 韩嘉<sup>3</sup>

(1. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500;

3. 云南省交通发展投资有限责任公司, 昆明 650100)

**摘要:** 中国建筑业传统施工面临高污染、高成本和低效率等问题, 而装配式技术可以缓解传统施工面临的困境。中国国土面积庞大, 各省份之间装配式发展存在较大差异, 通过对装配式发展相关政策分析, 构建出5个维度的评价指标体系。运用决策试验与评价实验室(decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)法、层次分析法(analysis hierarchy process, AHP)和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)评价方法对我国西南地区5个省份的装配式建筑发展水平进行评价和分析。研究发现, 西南地区装配式建筑发展差异性显著, 其中四川省装配式建筑发展最好, 而云南省落后于其他省份, 相对薄弱。

**关键词:** 装配式发展; DEMATEL法; AHP法; TOPSIS法

**中图分类号:** F426.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)08-0211-09

我国的经济走势已经由高速增长阶段转变为高质量发展阶段, 正处在经济结构调整、发展方式转化的攻关期, 建筑业发展的外部环境也在发生着深刻的变化。建筑业作为国家的支柱性产业, 在经济发展和生活质量提高方面一直起着重要的支撑作用。我国于2020年提出“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”战略目标, 基于国情寻求更具可持续性、包容性和韧性的经济增长方式以推进国家生态文明建设<sup>[1]</sup>。建筑业作为经济文明建设的支柱性产业, 面临着碳排放量大、能耗高和污染严重的问题, 一直是我国实现节能减排的重点领域之一, 在实现“双碳”战略目标方面承担着重要任务。据统计, 2020年我国建筑行业的碳排量占全国总量的50.9%, 采用合理适度的人均建造面积和合适的建筑设计及技术可以合理减少碳排放<sup>[2]</sup>。

传统建筑业由于自身基础性质, 一直存在着建筑建设施工高污染、施工效率低下、施工质量参差不齐等问题, 随着如今对于建筑业高质量发展的追求以及人口老龄化、劳动力资源缺失、人工成本增加、设计问题和施工返工率高等问题的出现<sup>[3]</sup>, 依靠规模扩张的传统发展方式难以为继, 在建筑业高质量发展和“双碳”目标的背景下, 建筑

业亟须转型<sup>[4]</sup>。

## 1 我国装配式建筑发展

传统建筑业生产方式不利于国内目前的可持续性健康发展, 随着人们的绿色发展意识加强, 装配式建筑应运而生。装配式建筑是传统建造方式的升级和未来建筑业发展的趋势, 最先应用于欧美等西方国家, 是应对绿色发展和城镇化进程的产业结构转型升级尝试<sup>[5]</sup>, 它与传统建筑方式存在很大区别。相较于传统建筑以现场施工为核心的工作流程, 装配式建筑是将工厂预制好的各类构件, 运送到施工场地进行拼装, 再通过浇筑混凝土的方式进行连接, 可以与现场各个专业施工同步进行, 具有施工快、工程建设周期短、利于冬季施工等特点。装配式建筑自身的设计多样化、功能科技化和生产工业化使得它们的施工效率极大提高, 减少了工人劳动强度和材料浪费<sup>[6]</sup>。现场施工的各个环节均集中在构件的吊装环节, 比传统现浇建筑更环保, 产生更少的建筑垃圾、噪声和灰尘, 消耗更少的能源, 其节能环保和施工安全的特点能够提升建筑行业的绿色、环保和可持续性, 大大减少了施工现场的噪声污染、空气污染等环境负效应<sup>[7]</sup>。不同类型的装配式建筑在施工工艺上与传统建筑相比存在着不一样的优势, 同

**收稿日期:** 2024-01-26

**作者简介:** 张亚钊(1985—), 男, 河北易县人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程管理; 刘洋(2002—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为工程建造与管理; 陈自强(1983—), 男, 云南泸西人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程管理; 韩嘉(1985—), 男, 云南昆明人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程管理。

时,装配式建筑在施工效率方面也优于传统建筑,具有人工需求少、资源浪费少等优势<sup>[8]</sup>。

2013 以来,国家陆续颁布了多个促进装配式建筑发展的政策,如《绿色建筑行动方案的通知》《国家新型城镇化发展规划》《“十三五”装配式建筑行动方案》等,都明确提出要发展建筑工业化<sup>[9]</sup>。2016 年国务院发布《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》(国办发〔2016〕71 号)后,各个省份也都加速发展装配式建筑<sup>[8]</sup>。之后住房和城乡建设部印发了《“十四五”建筑业发展规划》,提出到 2025 年,装配式建筑占新建建筑的比例达 30% 以上;新建建筑施工现场建筑垃圾排放量控制在 300 t/m<sup>2</sup> 以下,建筑废弃物处理和再利用的市场机制初步形成,建设一批绿色建造示范工程。为了促进装配式建筑的发展,各地也相继出台了装配式建筑发展目标。北京市提出,2025 年实现装配式建筑占新建建筑比例达到 55%;四川省提出新开工装配式建筑占新建建筑的 40%,装配式建筑单体建筑装配率不低于 50%。在装配式建筑面积和项目数量快速发展并取得了一定进步的同时,由于各区域经济基础、政策环境等方面发展的不充分不平衡,造成了不同地区的装配式建筑发展程度也存在极大的差异化现象。

政府部门、研发设计单位及建筑生产企业等行业内相关主体均积极推进装配式建筑的发展,到 2017 年 11 月底,住房和城乡建设部公布的有关国家级装配式建筑产业基地的企业信息统计,国家级装配式建筑产业基地主要集中在山东、江苏、浙江等东部地区,以山东为例,其产业基地数量达到 27 个,而西北地区如宁夏、重庆、青海、西藏则均处于培育状态,产业基地数量较少。此外,全国各省份出台的关于推动装配式建筑发展的相关政策性文件中(据统计截至 2018 年底),东、中、西部地区累计发布文件分别为 220 条、110 条、94 条,装配式建筑政策的出台力度在地域上表现为东部大于中、西部地区<sup>[10]</sup>。到 2020 年,根据住建部统计,全国装配式建筑各省份新开工装配式建筑共计 6.3 亿 m<sup>2</sup>,占新建建筑面积的比例约为 20.5%,而重点推进地区如京津冀、长三角、珠三角等地区装配式建筑占全国的比重约为 54%,呈现极大的空间分布不平衡现象<sup>[8]</sup>。

综上,我国装配式建筑发展在不同区域表现较为明显的差异,分析哪些省份装配式建筑发展较好,哪些发展的不理想,它们之间的差距有多大,表现在哪些方面,等等,都可以促进我国装配式建筑健康、高效发展,并根据研究所得差距提出相应建议及对策。

李芊等<sup>[11]</sup>从行业从业者出发,运用网络信息挖掘技术和调查问卷的方法,结合以往研究,从政治、经济、社会、技术四个方面探究中国西部地区的装配式建筑发展状况;吴玉婷等<sup>[12]</sup>、蒋必凤等<sup>[13]</sup>分别以河北、海南为对象,设计问卷和结构模型分析影响地区装配式发展的因素;李欣函和尤完<sup>[14]</sup>基于装配式建筑产业发展系统,结合 DPSIR 模型将全国装配式建筑发展水平以其他基础发展数据表示,分析出我国五个地区装配式建筑发展水平高低次序;吴邵艳和苏庆香<sup>[15]</sup>以装配式建筑发展视角为出发点,利用各省份装配式建筑发展动态数据,通过构建结构模型宏观分析全国 31 个省份装配式技术发展的影响因素。以往研究多以中国整体区域为视角,从全面性、覆盖性角度出发分析全国各地装配式区域发展,从宏观视角指出装配式建筑发展大区域之间的差异;或评价分析中、西部等经济技术发达地区的装配式建筑发展状况,衡量装配式建筑高质量发展的地区经济相关性,缺少针对西南地区等相对经济条件发展落后的区域的装配式发展研究;而西南地区大部分省份经济起步晚,发展相对落后,装配式作为新兴产业技术,探究西南地区装配式建筑发展,从基础建筑建设角度判断各省份的经济发展效能差异,对分析西南地区近年来经济发展状况、制定西南地区各省份装配式建筑发展评价指标具有重要意义。因此,本文将装配式建筑发展水平作为评价对象,选取合适的评价指标,具体分析西南地区(四川、云南、重庆、贵州、西藏)五个省份的装配式区域发展水平,并提出相应的对策建议。

## 2 评价指标确定及模型构建

### 2.1 数据来源与研究方法

自国务院发文大力推广装配式建筑发展,全国各地积极响应,出台具体政策推动装配式建筑发展。装配式建筑作为未来建筑业发展不可避免的一环,对其研究分析可以规划未来发展方向,给出相应对策。朱宏莉和林智敏<sup>[16]</sup>基于定性比较分析方法(qualitative comparative analysis, QCA),以我国 24 个省份经济发展状况为契合点,对于装配式建筑区域发展的非对称性提出 5 个影响装配式建筑发展的条件因素;程晓东和王东<sup>[17]</sup>也运用 csQCA 法就装配式建筑的技术、组织、环境等维构建了装配式建筑新建建筑占比、装配式建筑产业基地数量、装配式建筑政策文件和推广时间等多衡量标准的条件变量;李欣函尤完和<sup>[14]</sup>以 DPSIR 模型进行评价研究,从驱动力、压力、状态、影响、响应五个准则

层出发,制定了 17 个关于装配式建筑发展的具体指标;赵丽坤等<sup>[18]</sup>通过结合目前装配式建筑区域发展的行业瓶颈和区域环境特征,构建包括发展规模、生产建造技术水平、技术创新水平、管理水平和发展潜力等 5 个维度的 20 个二级指标,以衡量当前装配式建筑的发展程度。

本文通过对已有的关于中国本土装配式建筑发展相关文献数据进行梳理,并结合国家住建部、中国统计年鉴、各省份住建厅、预制建筑网、中国建设新闻网、各省份统计局和新闻、网络等各个平台的统计数据,构建装配式建筑区域发展水平评价指标,运用 DEMATEL、AHP 法和 TOPSIS 评价方法对所找寻的指标数据进行优化、权重选取、综合评价,整理并最后分析 2021 年(部分数据至今)西南地区装配式建筑发展水平优劣。

## 2.2 基于 DEMATEL 法的评价指标设计优化

通过对国内现有文献分析,发现我国有关装配式的指标设计体系系统性不完整,且大部分数据难以在官方渠道获得,故结合其他学者指标设计,从官方网站、新闻、其他数据库如百度等地方的数据

建立 7 个初级指标,分别为发展规模、发展规范水平、发展供应水平、装配式建筑质量、政策环境、技术创新水平和基础指数,由于指标装配式建筑质量和基础指数的数据难以统计和查找,故删除指标,将剩下的 5 个指标设立为准则层,其中包括了 19 个具体指标,初步设立评价指标体系,如表 1 所示。

决策和试验评价方法(DEMATEL)可以识别出评价体系之中指标和指标之间的关系,侧重于区别指标的相对重要性程度,确定指标在评价体系中的地位。运用 DEMATEL 方法将评价体系中重要性程度低、相关性不强的指标进行删除,确保评价体系的可靠性<sup>[19]</sup>。

将所收集的数据进行罗列,由于所研究内容的指标数据是具有变化性质的,且部分指标样本因为数据缺失的原因无法准确找到对应年份的数据,因此根据指标的变化趋势利用平均增长率进行数据的补充(如新开工装配式建筑面积)。部分数据无历史记录的,则统一采用能收集到的最近时期的数据插补(如预制构件年设计产能、政策激励数量等);无法收集到的数据则将其删除。具体数据情况如表 2 所示。

表 1 装配式建筑区域发展水平评价指标体系

准则层	指标层
发展规模	预制混凝土年设计产能、2025 年装配式建筑占新建建筑比例、建筑业总产值、建筑业劳动生产率
生产供应水平	建筑工程总承包企业数量、设计勘察单位、监理单位企业、构件厂企业数量、新开工装配式建筑面积、建筑业企业签订合同总额
发展规范水平	省重点项目数量、国家级产业化基地数量、已发展省级装配式建筑示范城市、已发展国家级装配式建筑示范城市
技术创新水平	专利授权量、技术创新联盟数量
发展基础环境	政策发布数量、激励政策发布数量、技术规范数量

表 2 装配式建筑区域发展具体指标

指标	四川	云南	贵州	西藏	重庆	年份
预制混凝土构建年设计产能/万 m <sup>3</sup>	175	20	45	60	210	2021
2025 装配式建筑占新建建筑比例/%	40	30	30	30	30	2025
建筑业总产值/亿元	17 351.19	7 336.59	4 578.04	270.73	9 943	2021
建筑业劳动生产率/(元·人 <sup>-1</sup> )	420 179	452 075	541 463	586 263	436 359	2021
建筑工程总承包企业数量/家	7 891	3 770	1 993	410	3 500	2021
设计勘察单位/家	1 169	864	566	72	600	2021
监理单位企业/家	663	244	106	123	209	2021
构件厂企业数量/个	16	13	14	0	15	2021
新开工装配式建筑面积/(万 m <sup>2</sup> ·年 <sup>-1</sup> )	5 400.00	1 271.44	1 092.43	127.65	1 620.00	2021
建筑业企业签订合同总额/万元	435 063 648	138 571 798	120 772 485	5 526 721	175 685 109	2021
省重点工程项目数量/个	700	805	4071	185	1 252	2021
国家级产业化基地数量/个	12	7	6	1	6	截至 2023
已发展省级装配式建筑示范城市/个	69	1	3	1	28	截至 2023
已发展国家级装配式建筑示范城市/个	3	1	1	1	1	截至 2023
专利授权量/万件	14.69	4.12	3.9	0.121 9	7.62	2021
技术创新联盟数量/个	1	0	0	0	1	2021
政策发布数量/份	22	11	19	6	11	2021
激励政策数量/份	13	9	8	8	13	2021
技术规范数量/份	30	5	8	4	15	2021

(1) 创造影响矩阵。通过调查问卷的方式获取各个指标间影响程度的打分, 构建影响矩阵  $\mathbf{X}$ , 矩阵中的数值代表着两项指标间的影响程度。共分为 0、1、2、3、4 五个等级, 分别代表没有影响度、影响度很小、影响度较小、影响度较大、影响程度很大。每个指标对自己的影响度为 0。将每一个指标用字母代替, 如发展规模(A)中的指标为预制混凝土构建年设计产能( $A_1$ )、2025 装配式建筑占新建建筑比例( $A_2$ )、建筑业总产值( $A_3$ )、建筑业劳动生产率( $A_4$ ), 以此类推; 最终构建影响矩阵  $\mathbf{X} = [X_{ij}]_{m \times n}$ , 如表 3 所示。

(2) 归一化处理。对影响矩阵  $\mathbf{X}$  中所有数据进行归一化处理, 得到规范化矩阵  $\mathbf{G}$ , 并通过单位矩阵  $\mathbf{I}$  和规范化矩阵  $\mathbf{G}$  的计算得到综合影响矩阵  $\mathbf{T}$ 。

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{X}}{\max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{G}(\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1} \quad (2)$$

(3) 通过对各个指标的中心度  $m_i$ 、原因度  $n_i$ 、被影响度  $e_i$  和影响度  $f_i$  等数据的分析, 确定该指标在整个评价体系中的地位。

$$\begin{cases} e_i = \sum_{i=1}^n t_{ij} \\ f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \\ n_i = f_i - e_i \\ m_i = f_i + e_i \end{cases} \quad (3)$$

根据指标优化方法得到优化后的指标如表 4 所示。

由表 4 可知, 政策发布数量的影响度最高, 其次是已发展国家级装配式建筑示范城市和政策激励数量, 监理单位企业影响度最低, 说明国家政策对装配式发展的影响程度非常高; 已发展国家级装配式建筑示范城市的被影响度最高, 其次是 2025 年装配式建筑占新建建筑比例和预制混凝土构件年设计产能, 被影响度最低的是政策发布数量; 已发展国家级装配式建筑示范城市的中心度值最高, 说明其在整个装配式建筑发展过程中起着至关重要的作用, 且对其他因素和被其他因素影响程度都高; 原因度方面, 负数指标如建筑业企业签订合同总额等都是结果因素, 其他正数指标是原因因素, 说明良好的政策环境、优秀的技术创新和装配式建筑发展基础设施完备程度都十分有利于其发展, 从而带动发展规模和生产供应水平等的发展。

从中心度方面考虑, 指标中重要性程度最低的分别是专利授权量、设计勘察单位和监理单位企业, 他们与其他指标的联系性不强, 不太满足对于装配式建筑这个目标的评价。故将这 3 个指标删除。由于技术创新层面只剩下一个指标, 将其指标并入发展规范水平层面, 最终确定的评价指标体系如图 1 所示。

表 3 影响矩阵  $\mathbf{X}$

指标	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$D_1$	$D_2$	$E_1$	$E_2$	$E_3$
$A_1$	0	4	3	1	1	0	0	2	3	1	1	1	2	3	0	0	0	0	1
$A_2$	3	0	1	0	0	1	1	1	3	0	2	0	3	3	0	1	1	1	0
$A_3$	2	1	0	2	1	1	0	0	2	2	1	1	1	1	0	0	0	1	0
$A_4$	3	2	3	0	2	1	1	1	2	2	0	1	1	2	1	1	1	1	1
$B_1$	2	2	4	1	0	2	2	0	2	4	1	1	1	2	0	2	0	1	1
$B_2$	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	2	2	2	1	0	0	0
$B_3$	1	0	1	2	1	0	0	0	1	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0
$B_4$	4	3	2	0	2	1	1	0	3	2	0	1	3	3	1	0	0	1	1
$B_5$	1	4	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	2	3	0	1	0	1	0
$B_6$	2	2	3	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
$C_1$	3	2	2	1	2	2	2	2	1	3	0	2	2	3	2	2	1	2	2
$C_2$	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	0	2	3	1	3	0	1	2
$C_3$	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	0	2	1	1	1	1	1
$C_4$	3	3	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	4	0	2	2	2	2	2
$D_1$	1	1	0	2	1	0	0	0	1	2	1	1	1	2	0	2	0	1	0
$D_2$	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	3	2	2	2	3	0	0	1	1
$E_1$	3	4	3	1	3	2	3	3	3	3	3	2	3	4	1	2	0	4	3
$E_2$	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	2	3	3	2	2	1	0	2
$E_3$	3	3	2	3	2	4	3	2	1	1	2	1	2	3	1	2	0	1	0

表 4 DEMATEL 计算结果

指标	影响度	被影响度	中心度	原因度	重要性程度	因素属性
预制混凝土构件年设计产能	0.99	1.74	2.73	-0.75	0.06	结果因素
2025 装配式建筑占新建建筑比例	0.95	1.77	2.72	-0.82	0.06	结果因素
建筑业总产值	0.67	1.55	2.22	-0.88	0.05	结果因素
建筑业劳动生产率	1.08	1.05	2.13	0.03	0.05	原因因素
建筑工程总承包企业数量	1.11	1.26	2.37	-0.15	0.05	结果因素
设计勘察单位	0.58	0.92	1.5	-0.34	0.03	结果因素
监理单位企业	0.47	0.95	1.42	-0.48	0.03	结果因素
构件厂企业数量	1.17	0.95	2.12	0.22	0.05	原因因素
新开工装配式建筑面积	0.82	1.45	2.27	-0.63	0.05	结果因素
建筑业企业签订合同总额	0.61	1.43	2.04	-0.82	0.05	结果因素
省重点工程项目	1.53	1.08	2.61	0.45	0.06	原因因素
国家级产业化基地数量	1.37	0.95	2.32	0.42	0.05	原因因素
已发展省级装配式建筑示范城市	1.38	1.55	2.93	-0.17	0.07	结果因素
已发展国家级装配式建筑示范城市	1.98	1.83	3.81	0.15	0.09	原因因素
专利授权量	0.71	0.73	1.44	-0.02	0.03	结果因素
技术产业创新联盟数量	1.26	0.9	2.16	0.36	0.05	原因因素
政策发布数量	2.15	0.39	2.54	1.76	0.06	原因因素
政策激励数量	1.66	0.78	2.44	0.88	0.06	原因因素
技术规范数量	1.48	0.7	2.18	0.78	0.05	原因因素

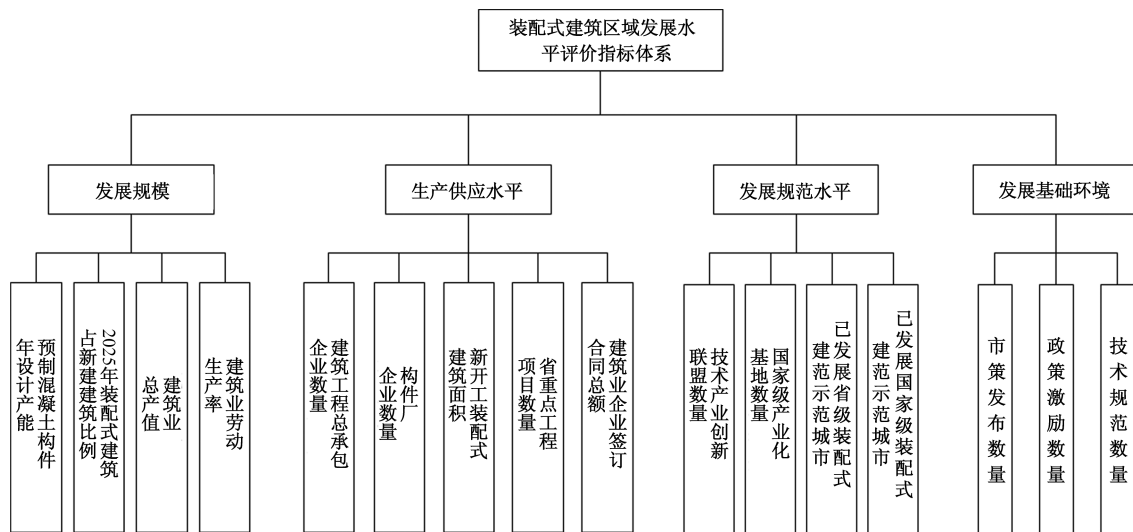


图 1 装配式建筑区域发展水平评价指标体系

### 2.3 指标权重确定

由于装配式建筑在我国的发展时间不长,能收集到的数据量不大,且限制多;在实际数据收集过程中发现,装配式建筑除了新开工装配式建筑面积、装配式建筑示范城市和建筑业企业相关等数据有官方作为支撑,其他相关数据量很分散且多以其他媒体和渠道的报道、文件发布为主,部分数据真实性难以保证,加上各个地区装配式建筑有关网站和官方数据各有不同,收集难度很大,所以客观赋权法不适合用于其权重确定,最终综合考虑以上因素确定采用层次分析法确定指标权重<sup>[20]</sup>。它是一种将定量定性分析方法结合,将复杂事件划分为若

干个层级和元素的方法,通过对指标进行重要性判断构建矩阵,并计算矩阵最大特征值和对应向量,得到不同种方案的重要性程度的权重,为最后做出选择提供依据<sup>[21]</sup>。

(1)将指标体系划分为三层:以装配式建筑区域发展水平为目标层,发展规模、生产供应水平、发展规范水平和发展基础环境 4 个维度为准则层,16 个具体指标为指标层,如图 1 所示。通过向在装配式建筑领域有深刻认知的 19 位专家,包括对装配式建筑有深入了解的老师、从事装配式构件生产的企业家,以发放问卷的方式获取量化数据,并依据 1~9 标度法确定重要性程度,如表 5 所示。

表 5 1~9 标度法

标度	含义
1	$U_i$ 和 $U_j$ 同样重要
3	$U_i$ 比 $U_j$ 重要
5	$U_i$ 比 $U_j$ 十分重要
7	$U_i$ 比 $U_j$ 特别重要
9	$U_i$ 比 $U_j$ 极其重要
2,4,6,8	表示不同重要程度的中间程度
倒数	表示重要程度相反

(2) 构造判断矩阵  $U$ , 将准则层 4 个维度分别用  $U_1, U_2, U_3, U_4$  表示, 具体矩阵如下所示。

准则层判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} U & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 \\ U_1 & 1 & 3 & 2 & 3 \\ U_2 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ U_3 & 1/2 & 2 & 1 & 4 \\ U_4 & 1/3 & 2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}。$$

其他判断矩阵如下所示。

$U_1$  的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_1 & U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ U_{11} & 1 & 4 & 2 & 1/2 \\ U_{12} & 1/4 & 1 & 2 & 1/3 \\ U_{13} & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/7 \\ U_{14} & 2 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix}。$$

$U_2$  的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_2 & U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} \\ U_{21} & 1 & 2 & 2 & 1/3 & 5 \\ U_{22} & 1/2 & 1 & 4 & 1/3 & 1 \\ U_{23} & 1/2 & 1/4 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ U_{24} & 3 & 3 & 4 & 1 & 3 \\ U_{25} & 1/5 & 1 & 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}。$$

$U_3$  的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_3 & U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} \\ U_{31} & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/3 \\ U_{32} & 3 & 1 & 3 & 2 \\ U_{33} & 2 & 1/3 & 1 & 1/5 \\ U_{34} & 3 & 1/2 & 5 & 1 \end{bmatrix}。$$

$U_4$  的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_4 & U_{41} & U_{42} & U_{43} \\ U_{41} & 1 & 5 & 3 \\ U_{42} & 1/5 & 1 & 1/3 \\ U_{43} & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}。$$

(3) 将判断矩阵进行归一化处理(表 6), 并监测各个指标的一致性和计算权重。

表 6  $U_1$  的规范化矩阵

$U_1$	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{14}$	$\bar{w}_1$	$W_1$
$U_{11}$	0.266 7	0.470 6	0.166 7	0.253 0	1.156 9	0.289 2
$U_{12}$	0.066 7	0.117 6	0.166 7	0.168 7	0.519 7	0.129 9
$U_{13}$	0.133 3	0.058 8	0.083 3	0.072 3	0.347 8	0.086 9
$U_{14}$	0.533 3	0.352 9	0.583 3	0.506 0	1.975 6	0.493 9

注:  $\bar{w}_i$  为元素的行和;  $W$  为  $\bar{w}_i$  在其所占的权重。

$$\text{计算 } U_1 W_1 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 2 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 2 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1/7 \\ 2 & 3 & 7 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.289 2 \\ 0.129 9 \\ 0.086 9 \\ 0.493 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.229 7 \\ 0.540 7 \\ 0.367 1 \\ 2.070 7 \end{pmatrix}。$$

通过公式判断矩阵的最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(UW)_i}{W_i} \quad (4)$$

$$\text{即 } \lambda_{\max} = \frac{1}{4} \left( \frac{1.229 7}{0.289 2} + \frac{0.540 7}{0.129 9} + \frac{0.367 1}{0.086 9} + \frac{2.070 7}{0.493 9} \right) = 4.207 1。$$

计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$\text{即 } CI = \frac{4.207 1 - 4}{4 - 1} = 0.069 0。$$

计算一致性比例 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

其中 RI 如表 7 所示, 最终得出  $CR_1 = \frac{0.069 0}{0.90} =$

$0.076 7 < 0.1$ , 符合检验要求。

其他判断矩阵按照上述步骤计算其一致性比例, 如表 8 所示。

表 7 随机一致性 RI

$n$ 阶	RI
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49
11	1.51

表 8 一致性比例 CR

判断矩阵	CR
$U_1 \sim U_4$	0.083 6
$U_{11} \sim U_{14}$	0.076 7
$U_{21} \sim U_{25}$	0.097 4
$U_{31} \sim U_{34}$	0.093 4
$U_{41} \sim U_{43}$	0.033 4

所有指标的  $CR < 0.1$ , 通过一致性检验;

将准则层权重与指标层权重相乘得到最终的总权重, 如表 9 所示。

## 2.4 基于 TOPSIS 的装配式建筑发展水平评价

根据所收集到的数据, 将其进行加权计算后可以综合排序出西南地区各省份的发展水平, TOPSIS 法可以根据给定的指标数据计算出理想解和不理想解, 用于多个对象进行定量分析, 并依据评价结果与最理想解的接近程度给各地区的装配式建筑发展水平排序从而选出最优对象和最劣对象, 具有几何意义直观、运算灵活、应用领域广等优点<sup>[9]</sup>。

(1) 归一化处理。采用平方和归一化法将收集

到的数据进行处理, 公式如下所示。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (7)$$

具体归一化数值如表 10 所示。

(2) 依据层次分析法获得的权重, 将归一化后的数值进行加权计算, 并确定正负理想解  $C^+$ 、 $C^-$  (表 11), 公式如下:

$$X''_{ij} = X'_{ij} \times W_j \quad (8)$$

$$C^+ = \max X''_{ij} \quad (9)$$

$$C^- = \min X''_{ij} \quad (10)$$

(3) 计算各个指标与正负理想解之间的距离, 并计算相对接近度, 公式如下:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X''_{ij} - X''_{ij}^+)^2} \quad (11)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X''_{ij} - X''_{ij}^-)^2} \quad (12)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (13)$$

最终结果如表 12 所示。

表 9 权重计算

准则层	权重	指标层	权重	绝对权重
发展规模	0.430 7	预制混凝土构件年设计产能	0.289 2	0.124 6
		2025 年装配式建筑占新建建筑比例	0.129 9	0.059 9
		建筑业总产值	0.086 9	0.037 4
		建筑业劳动生产率	0.493 9	0.212 7
生产供应水平	0.117 8	建筑工程总承包企业数量	0.249 3	0.029 4
		构件厂企业数量	0.157 0	0.018 5
		新开工装配式建筑面积	0.073 3	0.008 6
		省重点工程项目数量	0.405 7	0.047 8
		建筑企业签订合同总额	0.114 7	0.013 5
发展规范水平	0.304 5	技术产业创新联盟数量	0.103 0	0.031 4
		国家级产业化基地数量	0.419 2	0.127 6
		已发展省级装配式建筑示范城市	0.134 5	0.041 0
		已发展国家级装配式建筑示范城市	0.343 4	0.104 6
发展基础环境	0.147 0	政策发布数量	0.633 3	0.093 1
		政策激励数量	0.106 2	0.015 6
		技术规范数量	0.260 5	0.038 3

表 10 平方和归一化矩阵

省份	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{14}$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{23}$	$U_{24}$	$U_{25}$	$U_{31}$	$U_{32}$	$U_{33}$	$U_{34}$	$U_{41}$	$U_{42}$	$U_{43}$
四川	0.615 8	0.554 7	0.796 3	0.382 3	0.818 8	0.550 1	0.917 9	0.159 3	0.863 3	0.707 1	0.735 8	0.925 7	0.832 1	0.656 5	0.555 8	0.855 4
云南	0.070 4	0.416 0	0.336 7	0.411 3	0.391 2	0.446 9	0.216 1	0.183 2	0.275 0	0.000 0	0.429 2	0.013 4	0.277 4	0.328 2	0.384 8	0.142 6
贵州	0.158 4	0.416 0	0.210 1	0.492 6	0.206 8	0.481 3	0.185 7	0.926 4	0.239 7	0.000 0	0.367 9	0.040 2	0.277 4	0.567 0	0.342 1	0.228 1
西藏	0.211 1	0.416 0	0.012 4	0.533 4	0.042 5	0.000 0	0.021 7	0.042 1	0.011 0	0.000 0	0.061 3	0.013 4	0.277 4	0.179 0	0.342 1	0.114 1
重庆	0.739 0	0.416 0	0.456 3	0.397 0	0.363 2	0.515 7	0.275 4	0.284 9	0.348 6	0.707 1	0.367 9	0.375 6	0.277 4	0.328 2	0.555 8	0.427 7

表11 正负理想解

指标	正理想解	负理想解
$U_{11}$	0.999 9	0.000 1
$U_{12}$	0.999 3	0.000 7
$U_{13}$	0.999 9	0.000 1
$U_{14}$	0.999 3	0.000 7
$U_{21}$	0.999 9	0.000 1
$U_{22}$	0.999 8	0.000 2
$U_{23}$	0.999 9	0.000 1
$U_{24}$	0.999 9	0.000 1
$U_{25}$	0.999 9	0.000 1
$U_{31}$	0.999 9	0.000 1
$U_{32}$	0.999 9	0.000 1
$U_{33}$	0.999 9	0.000 1
$U_{34}$	0.999 8	0.000 2
$U_{41}$	0.999 8	0.000 2
$U_{42}$	0.999 5	0.000 5
$U_{43}$	0.999 9	0.000 1

表12 TOPSIS 评价水平排名

省份	正理想解距离 ( $D^+$ )	负理想解距离 ( $D^-$ )	综合得分指数	排序
四川	0.501 3	0.836 2	0.625 2	1
云南	0.824 9	0.287 4	0.258 4	5
贵州	0.691 6	0.519 3	0.428 9	2
西藏	0.860 7	0.465 6	0.351 1	4
重庆	0.704 6	0.510 7	0.420 3	3

由表12可知,装配式建筑在西南地区的发展存在着较大差异,四川综合排名第一,即四川的装配式建筑发展水平最高,其次是贵州、重庆、西藏和云南。其中只有四川的综合得分指数超过了0.6,其他省份为0.25~0.42,说明它们的装配式发展程度与四川还存在较大差距。

### 3 结论与建议

(1)西南地区与我国其他地区的装配式建筑发展存在较大差距<sup>[14]</sup>。其中四川装配式建筑发展水平高于其他4个省份,不论是预制混凝土构件产能、劳动生产率等人力技术指标还是装配式建筑新增面积、省级装配式建筑示范城市数量等客观可视化数据,四川都独占鳌头,其出色的经济实力和水平带动着其装配式建筑发展,一直紧跟国家政策。其他省份由于经济实力的落后,装配式建筑的客观发展存在着较大限制,各省份对装配式技术的政策导向没有放在最优先的位置,在经济实力方面限制了它们的装配式建筑发展,是导致装配式发展落后于四川的一个关键因素。大力促进其他省份经济发展,推动基础设施建设,提高省域内经济流动能力和人力发展水平,经济基础扎实才能带动其他新兴技术发展,装配式建筑的重点应用的可行性

才会提高。

(2)国家改革开放以来经济发展的重心更偏向于东南沿海地区和东部区域,因为各个区位的地理位置、战略定位不同,在基础资源分配方面的侧重点不一样,导致各个区位的重心不同,发展走势不同。西南地区中四川地处盆地,有着“天府之国”的美称,在整个西南地区中拥有着最为优势的经济发展潜力,经济、文化等方面的领先使其在其他重点领域的发展也优先于周边省份,所以其的装配式发展基础如构件厂数量、设计监理单位数量等都多于其他西南四省份,这也是四川装配式建筑发展好的原因之一。其他省份需根据地理位置因素,因地制宜促进经济、文化交流,促进建筑业转型,结合自身的独特优势留住人口、提高企业数量,才能为装配式建筑发展提供良好的基础,并根据各省份的特点制定出符合地区装配式发展的实际策略。

### 参考文献

- [1] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021(18): 50-53.
- [2] 吴泽洲, 黄浩全, 陈湘生, 等. “双碳”目标下建筑业低碳转型对策研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 202-209.
- [3] 李恒, 郭红领, 黄霆, 等. 建筑业发展的强大动力: 虚拟施工技术[J]. 中国建设信息, 2010(2): 46-51.
- [4] 高华建, 李小冬, 高晓江. 建筑业高质量发展评价指标体系研究[J]. 工程管理学报, 2021, 35(1): 1-6.
- [5] 廖礼平. 绿色装配式建筑发展现状及策略[J]. 企业经济, 2019, 38(12): 139-146.
- [6] 马军庆. 装配式建筑综述[J]. 黑龙江科技信息, 2009(8): 271.
- [7] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [8] 康佳, 李延罡, 何柘沐. 装配式建筑在我国的应用情况调查研究[J]. 价值工程, 2023, 42(6): 164-168.
- [9] 齐园, 王琴. 区域装配式建筑发展政策评价研究——基于熵权TOPSIS法[J]. 建筑经济, 2020, 41(4): 28-33.
- [10] 李玲燕, 张晶晶. 装配式建筑发展水平空间差异及其影响因素研究[J]. 科技管理研究, 2020, 40(22): 196-205.
- [11] 李芊, 雷歆, 王腊银. 基于熵权法的装配式建筑发展水平研究——以西部地区省会城市为例[J]. 经营与管理, 2022(1): 169-176.
- [12] 吴玉婷, 张可可, 马春燕, 等. 河北省装配式建筑推广实施的制约因素及对策研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2022, 40(2): 153-157.
- [13] 蒋必凤, 张锦晗, 刘效好. 海南省装配式建筑产业发展研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(S2): 19-23.
- [14] 李欣函, 尤完. 我国装配式建筑产业发展水平研究[J].



- 建筑经济, 2021, 42(8): 62-66.
- [15] 吴绍艳, 苏庆香. 我国装配式建筑采纳影响因素分析及对策研究[J]. 项目管理技术, 2022, 20(2): 41-48.
- [16] 朱宏莉, 林智敏. 基于 QCA 的装配式建筑区域发展影响因素构型分析[J]. 建筑经济, 2020, 41(2): 115-120.
- [17] 程晓多, 王东. 装配式建筑高水平发展路径研究: 基于 TOE 框架的 csQCA 分析[J]. 工程管理学报, 2023(12): 28-33.
- [18] 赵丽坤, 张蓁斌, 纪颖波, 等. 中国装配式建筑产业区域发展水平评价[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(1): 55-61.
- [19] 魏宏亮, 牛昌林, 刘福江, 等. 基于 DEMATEL-AISM 法的装配式建筑预制构件成本影响因素分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(10): 83-88.
- [20] 马政. 装配式建筑业区域发展水平评价及改进研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [21] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008(5): 148-153.

## Evaluation of Regional Development Level of Prefabricated Buildings in China: A Case Study of Southwest China

ZHANG Yazhao<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, CHEN Ziqiang<sup>3</sup>, HAN Jia<sup>3</sup>

(1. China Jingye Engineering Technology Co. LTD. , Beijing 100088, China;

2. School of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

3. Yunnan Transportation Development and Investment Co. LTD. , Kunming 650100, China)

**Abstract:** The traditional construction of China's construction industry faces the problems of high pollution, high cost and low efficiency, while the assembly technology can alleviate the difficulties faced by the traditional construction. China has a large land area, and there are great differences in assembly development among provinces. Through analyzing related policies of assembly development, a 5-dimension evaluation index system was constructed. DEMATEL method, AHP method and TOPSIS evaluation method were used to evaluate and analyze the development level of prefabricated buildings in five provinces and cities in southwest China. The results show that there are significant differences in the development of prefabricated buildings in southwest China, among which Sichuan province has the best development of prefabricated buildings, while Yunnan Province lags behind other provinces and cities and is relatively weak.

**Keywords:** prefabricated development; DEMATEL method; AHP method; TOPSIS method