

研究论文

智能建造与建筑工业化协同度测算与分析

张瑞雪, 刘泓志*, 刘冠兴

摘要 智能建造与建筑工业化协同发展是复杂的系统, 是推动建筑业转型升级的重要途径。通过云模型和复合系统协同度模型对中国各地区智能建造与建筑工业化协同度进行测算。研究发现: 中国智能建造和建筑工业化 2 个子系统的发展存在空间关联性, 一个地区智能建造和建筑工业化的发展往往带动其他地区相应子系统的发展。而智能建造与建筑工业化协同发展程度与地域关系不大, 各地区在推广智能建造与建筑工业化协同发展的过程中, 应当注重智能建造和建筑工业化 2 个子系统发展的协调性和相似性, 因地制宜制定相应的政策。

关键词 智能建造; 建筑工业化; 云模型; 复合系统协同度

新时代信息技术领域的突破与装配式建筑的推广, 加快了智能建造与建筑工业化协同发展进程^[1]。作为第 4 次工业革命的重要组成^[2], 智能建造和建筑工业化两者是交互关系与共生状态: 智能建造源于信息化、智能化技术的发展^[3], 建筑工业化带动智能建造^[4], 智能建造促进建筑工业化^[5]。

以往研究多关注两者协同发展的影响因素^[6]和作用机制^[7], 也有对智能建造水平^[8]和建筑工业化水平^[9]单个系统的测算, 对智能建造与建筑工业化复合系统协同度进行测算的研究较少^[10]。

协同度是衡量多个系统协同发展程度的指标^[11]。协同度测算应用在灾害^[12]、能源^[13]、建筑^[14]、物流^[15]等领域, 多数通过层次分析法、熵权法等确定指标权重, 利用复合系统协同度模型、耦合协调度模型和距离协同度模型等测算协同度。

以往学者聚焦于对智能建造和建筑工业化各自发展水平的测度, 对两者协同发展研究较少。本文基于 EPNR(entrepreneur, policy, need, resource)模型和

DPSIR(driving, pressure, state, impact, response)模型, 结合群组决策特征根法(group eigenvalue method, GEM), 构建智能建造与建筑工业化协同度测算指标体系, 通过云模型和复合系统协同度模型测算两者协同度, 揭示各省份智能建造与建筑工业化协同发展现状和问题, 为各省协调智能建造和建筑工业发展提出政策建议。

1 智能建造与建筑工业化协同度测算指标体系构建

1.1 基于 EPNR 模型的智能建造水平测算指标

基于 EPNR 模型^[16]从市场环境、科技发展、创新成效、政府政策选取智能建造水平测算指标。市场环境包括建筑市场需求和市场资源, 科技发展强调科学技术水平, 创新成效是智能建造的成果产出, 政府政策是指导和推动智能建造的有力支撑。

初选 13 个智能建造水平测算指标。市场环境: 智慧工地有关招标公告数量、智能建造关注度、R&D(Research and Development)人员全时当量、R&D 经费投入强度、高等学校研究生占比; 科技发展: 技术

辽宁工程技术大学工商管理学院, 葫芦岛 125105

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801119)

作者简介: 张瑞雪, 副教授, 研究方向为工程项目协同创新, 电子信箱: asnow1860@163.com; 刘泓志(通信作者), 硕士研究生, 研究方向为工程与项目管理, 电子信箱: 274963199@qq.com

引用格式: 张瑞雪, 刘泓志, 刘冠兴. 智能建造与建筑工业化协同度测算与分析[J]. 科技导报, 2025, 43(22): 108-114; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01921

市场成交额、建筑业基金申请数、技术装备率、动力装备率;创新成效:获奖工程项目数量、科技成果数量;政府政策:科技成果保护力度、政策发布数量。

1.2 基于 DPSIR 模型的建筑工业化水平测算指标

DPSIR 模型是建立多维度因果关系和反馈作用的模型^[17],基于该模型,将建筑工业化水平分为 5 个维度。驱动力维度从社会和经济层面选取,压力维度从建筑业规模角度选取,状态维度选取建筑工业化进程中表现出的相关指数,影响维度包括经济和社会影响,响应维度包括建筑工业化的相关举措。

初选 16 个建筑工业化水平测算指标。驱动力:建筑业企业从业人数、建筑投资比重、行业产值贡献率;压力:特级企业数量、人均竣工面积、建筑业劳动

生产率;状态:自行完成施工产值占比、万元产值钢材消耗量、万元产值水泥消耗量、万元产值管理费用;影响:建筑工业化关注度、建筑业产值利润率;响应:规范性文件数量、政策扶持力度、地方标准数量、装配式建筑示范城市和产业基地。

1.3 智能建造与建筑工业化协同度测算指标

GEM 法由邱菀华教授提出,用于多目标决策^[18]。利用 GEM 法分别对智能建造水平和建筑工业化水平的测算指标进行筛选,向 15 位行业专家进行问卷调查,借助 MATLAB 软件并遵循相关定理及运算过程计算各维度对应矩阵的最大特征根和特征向量,对特征向量单位化处理得到各指标的相对重要性程度,剔除重要性小于 0.2500 的指标,得到关键指标见表 1。

表 1 智能建造与建筑工业化协同度测算指标体系

测算对象	指标维度	具体指标	数据来源
智能建造水平	市场环境	智慧工地有关招标公告数量	中国招标网
		智能建造关注度	百度指数
		R&D人员全时当量	《中国科技统计年鉴》
		R&D经费投入强度	《中国科技统计年鉴》
	科技发展	建筑业基金申请数	《中国统计年鉴》
		技术装备率	《中国统计年鉴》
		动力装备率	《中国统计年鉴》
	创新成效	获奖工程项目数	中国土木工程协会、中国建筑业协会
		科技成果数量	《中国科技项目创新成果鉴定意见数据库(知网版)》
	政府政策	政策发布数量	中国知网
建筑工业化水平	驱动力	建筑投资比重	《中国统计年鉴》
		行业产值贡献率	《中国统计年鉴》
		特级企业数量	中华人民共和国住房和城乡建设部
	压力	人均竣工面积	《中国统计年鉴》
		建筑业劳动生产率	《中国统计年鉴》
	状态	自行完成施工产值占比	《中国建筑业统计年鉴》
		万元产值管理费用	《中国建筑业统计年鉴》
		建筑工业化关注度	百度指数
	影响	建筑业产值利润率	《中国建筑业统计年鉴》
		规范性文件数量	万方数据知识服务平台
	响应	地方标准数量	中国工程建设标准知识服务网
		装配式建筑示范城市和产业基地	中华人民共和国住房和城乡建设部

2 智能建造与建筑工业化协同度实证分析

2.1 数据来源与样本选取

数据获取主要是统计数据和搜索统计,选取中国除台湾、香港、澳门、西藏外的其余 30 个省级行政区

的数据作为样本,数据范围为 2016 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日。

2.2 智能建造与建筑工业化协同度测算

2.2.1 云模型确定指标权重

采用云模型计算各项指标权重^[19],将专家评分视

为云图中的点, 计算得到其期望值(E_x)、熵值(E_n)、超熵(He), 再利用云发生器生成 1000 个云滴, 判断云图凝聚性, 取验证通过后的指标 E_x 值进行归一化处理, 得到指标权重。

2.2.2 复合系统协同度测算

借鉴刘澜静^[20]关于工业化与信息化协同度定义, 将智能建造与建筑工业化协同度定义为: 智能建造带动建筑工业化, 建筑工业化促进智能建造, 两者有序发展并相互协调统一发展的程度。参考孟庆松等^[21]建立的复合系统协同度模型, 综合有序度、协调度、相近度测算智能建造与建筑工业化协同度。

1) 有序度测算。定义 $e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jm}$ 为正向指标($1 \leq m \leq n$), $e_{jm+1}, e_{jm+2}, \dots, e_{jn}$ 为负向指标, 序参量 e_{ji} 对子系统有序度的贡献度为

$$EC(e_{ji}) = \begin{cases} \frac{(e_{ji} - \beta_{ji})}{(\alpha_{ji} - \beta_{ji})}, & i \in [1, m] \\ \frac{(\alpha_{ji} - e_{ji})}{(\alpha_{ji} - \beta_{ji})}, & i \in [m+1, n] \end{cases} \quad (1)$$

$e_{ji} \in [\beta_{ji}, \alpha_{ji}]$, $j = \{1, 2\}$, $EC(e_{ji})$ 是智能建造序参量对系统有序性的贡献度, $EC(e_{2i})$ 表示建筑工业化序参量对系统有序性的贡献度, 子系统有序度为

$$U_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ji} \cdot EC(e_{ji}), \lambda_{ji} \geq 0, \sum_{i=1}^n \lambda_{ji} = 1 \quad (2)$$

$j = \{1, 2\}$, λ_{ji} 是子系统的指标权重, U_1 是智能建造有序度, U_2 是建筑工业化有序度。将智能建造与建筑工业化视为同等重要, 复合系统有序度为

$$U = 0.5U_1 + 0.5U_2 \quad (3)$$

2) 协调度测算。设在特定初始时刻 T_0 , 智能建造有序度为 $U_1^0(e_1)$, 建筑工业化有序度为 $U_2^0(e_2)$; 在协同发展中的时刻 T_1 , 智能建造有序度为 $U_1^1(e_1)$, 建筑工业化有序度为 $U_2^1(e_2)$, 复合系统协调度为

$$C = \eta \sqrt{|U_1^1(e_1) - U_1^0(e_1)| \cdot |U_2^1(e_2) - U_2^0(e_2)|} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\min[U_i^1(e_j) - U_i^0(e_j) \neq 0]}{\min[|U_i^1(e_j) - U_i^0(e_j) \neq 0|]} \quad (5)$$

$C \in [-1, 1]$, $j = \{1, 2\}$, 当 $U_i^1(e_j) - U_i^0(e_j) > 0$, $\eta = 1$, 否则 $\eta = -1$ 。当 C 值 $\in [0, 1]$, 才协调。

3) 相近度测算。先利用耦合协调度计算离差系数

$$d = \frac{s}{\frac{1}{2}(U_1 + U_2)} = 2 \times \sqrt{1 - \frac{(U_1 \cdot U_2)}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2}\right)^2}} \quad (6)$$

s 是标准差, d 越小两者的有序度越接近, 复合系统相近度为

$$P = 2 \times \sqrt{\frac{(U_1 \cdot U_2)}{(U_1 + U_2)^2}} \quad (7)$$

$P \in [0, 1]$, P 越接近 1, 两者相近度越大。

4) 协同度测算。协同度由系统有序度、协调度和相近度决定

$$SD = \sqrt[3]{U \cdot C \cdot P} \quad (8)$$

$SD \in [-1, 1]$, 当 $SD < 0$ 时, 该省智能建造与建筑工业化发展不协调, SD 越小越不协调; 当 $SD \geq 0$, 该省智能建造与建筑工业化发展协调, SD 越大协调程度越大。各省协同度见表 2。

表 2 智能建造与建筑工业化协同度结果

地区	年份				
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
北京	0.2542	-0.2133	-0.2322	0.1681	-0.2539
天津	-0.1541	-0.2942	-0.2141	-0.1644	-0.2750
河北	-0.1505	0.2378	-0.3229	-0.2310	0.2515
山西	0.2170	-0.2064	-0.1818	-0.0886	0.1822
内蒙古	-0.1397	-0.1627	-0.1995	-0.0812	0.1289
辽宁	0.1326	-0.1911	-0.2264	-0.2379	-0.1364
吉林	0.2129	-0.1514	-0.2362	-0.1176	-0.0889
黑龙江	0.1481	-0.2244	-0.0951	-0.1611	0.2135
上海	-0.1457	-0.2374	-0.1534	-0.1309	0.2406
江苏	0.2383	-0.1032	-0.2151	-0.1644	0.2463
浙江	0.2341	-0.1124	-0.2761	-0.1335	-0.1013
安徽	0.2257	-0.1733	-0.1990	-0.1578	0.2317
福建	0.1239	-0.1421	-0.1829	-0.1098	-0.1213
江西	0.2082	0.1847	0.0942	-0.1246	0.1120
山东	0.2544	-0.2541	-0.1935	0.2760	-0.2703
河南	0.1213	-0.2169	-0.2273	-0.0974	0.2031
湖北	-0.1910	0.1620	-0.3005	-0.0761	0.2722
湖南	0.2301	-0.1743	-0.1741	-0.0911	0.2031
广东	0.1582	0.2619	-0.0839	-0.1163	-0.1964
广西	0.1934	0.1120	0.1092	-0.1260	0.1697
海南	0.0966	0.1554	-0.1594	-0.1322	0.1172
重庆	0.0000	0.2227	-0.0991	0.1991	-0.2185
四川	-0.1358	-0.1651	-0.1128	0.0866	-0.2225
贵州	-0.1649	-0.1262	-0.1381	-0.0966	0.1147
云南	-0.1679	0.2633	-0.2518	-0.1276	0.1897
陕西	-0.2001	-0.1851	-0.1553	-0.1793	0.2284
甘肃	-0.1714	-0.1251	-0.2209	0.1203	-0.1518
青海	0.2195	-0.1546	-0.1632	-0.0858	0.2258
宁夏	-0.0799	-0.1248	-0.1883	-0.1109	-0.1699
新疆	-0.0624	-0.1197	-0.1603	-0.2062	0.1632

2.3 智能建造与建筑工业化协同度测算分析

2.3.1 空间关联性判定

1) 全局空间自相关分析。由前文可知,智能建造

水平和建筑工业化水平可用两者有序度代替。为探索智能建造水平、建筑工业化水平、协同度空间关联性是否显著,计算三者 Moran's I 统计量见表 3。

表 3 智能建造水平、建筑工业化水平、协同度的全局 Moran's I 指数

年份	智能建造水平			建筑工业化水平			协同度		
	Moran's I_1	P_1 值	Z_1 值	Moran's I_2	P_2 值	Z_2 值	Moran's I_{12}	P_{12} 值	Z_{12} 值
2016年	0.2395	0.0206	2.2547	0.2003	0.0348	1.9658	—	—	—
2017年	0.2649	0.0133	2.4798	0.2057	0.0332	2.0041	0.0836	0.1674	0.9615
2018年	0.2292	0.0236	2.2127	0.1972	0.0377	1.9117	-0.0124	0.3946	0.1872
2019年	0.1975	0.0367	1.9704	0.2501	0.0160	2.3582	0.0393	0.2368	0.6540
2020年	0.1749	0.0495	1.9485	0.2854	0.0085	2.6689	-0.1442	0.1757	-0.9271
2021年	0.2497	0.0168	2.3925	0.3397	0.0032	3.0749	-0.0640	0.4341	-0.2271

2016—2021 年各省智能建造水平和建筑工业化水平在空间上相关性明显,2017—2021 年各省智能建造与建筑工业化协同度在空间上相关性不明显,可见智能建造和建筑工业化各自都有较强的空间关联性,两者构成的复合系统受空间区域影响较小。

2) 局部空间自相关分析。利用局部自相关统计量衡量各省与其邻近省同一属性的关联程度,通过

Moran 散点图可视化分析各省智能建造水平和建筑工业化水平区域特性,如图 1 和图 2。

智能建造发展水平高高集聚主要分布在京、冀、沪等,低高集聚和低低集聚分布模式以中、西部为主,高低集聚主要分布在陕、鄂、粤等;各省智能建造发展良好,东部智能建造水平较中部、西部地区高,西部最低。

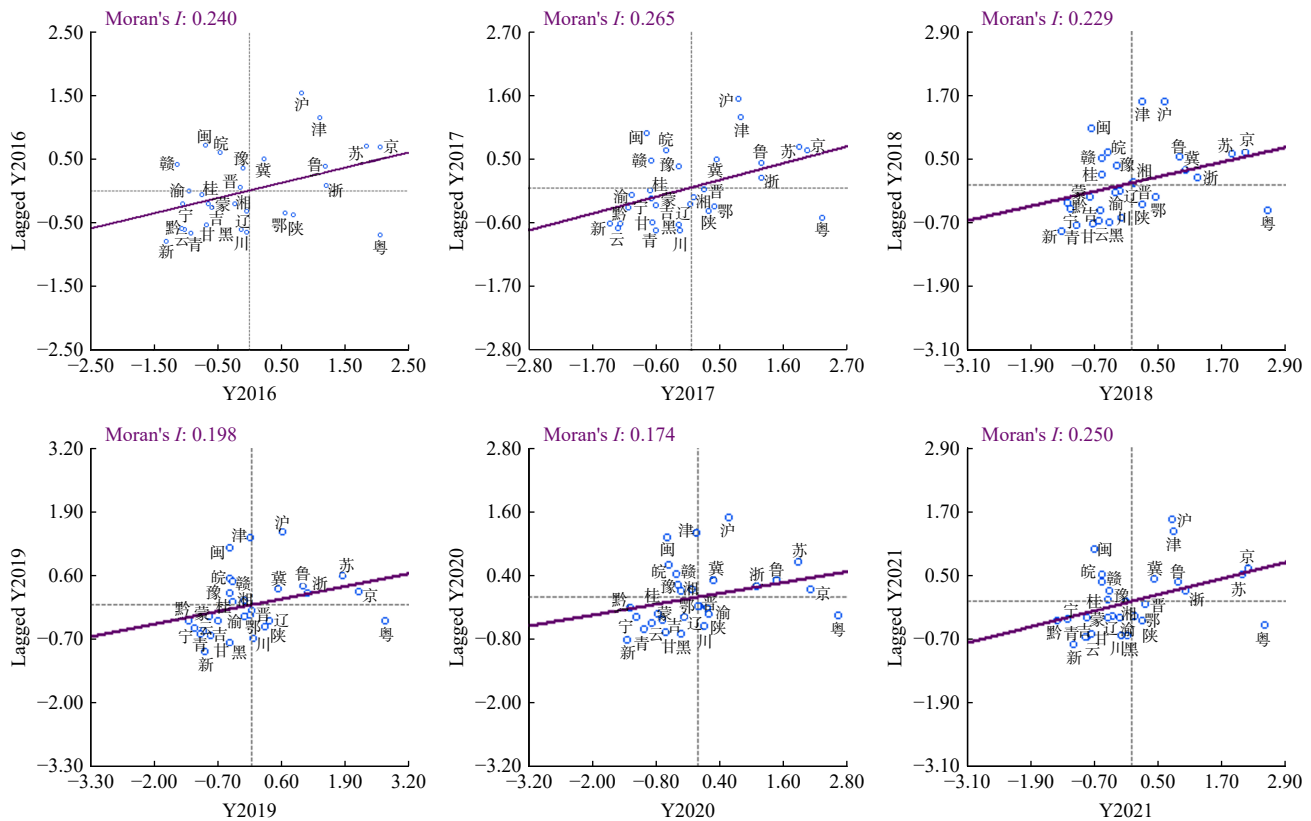


图 1 2016—2021 年中国智能建造水平 Moran 散点图

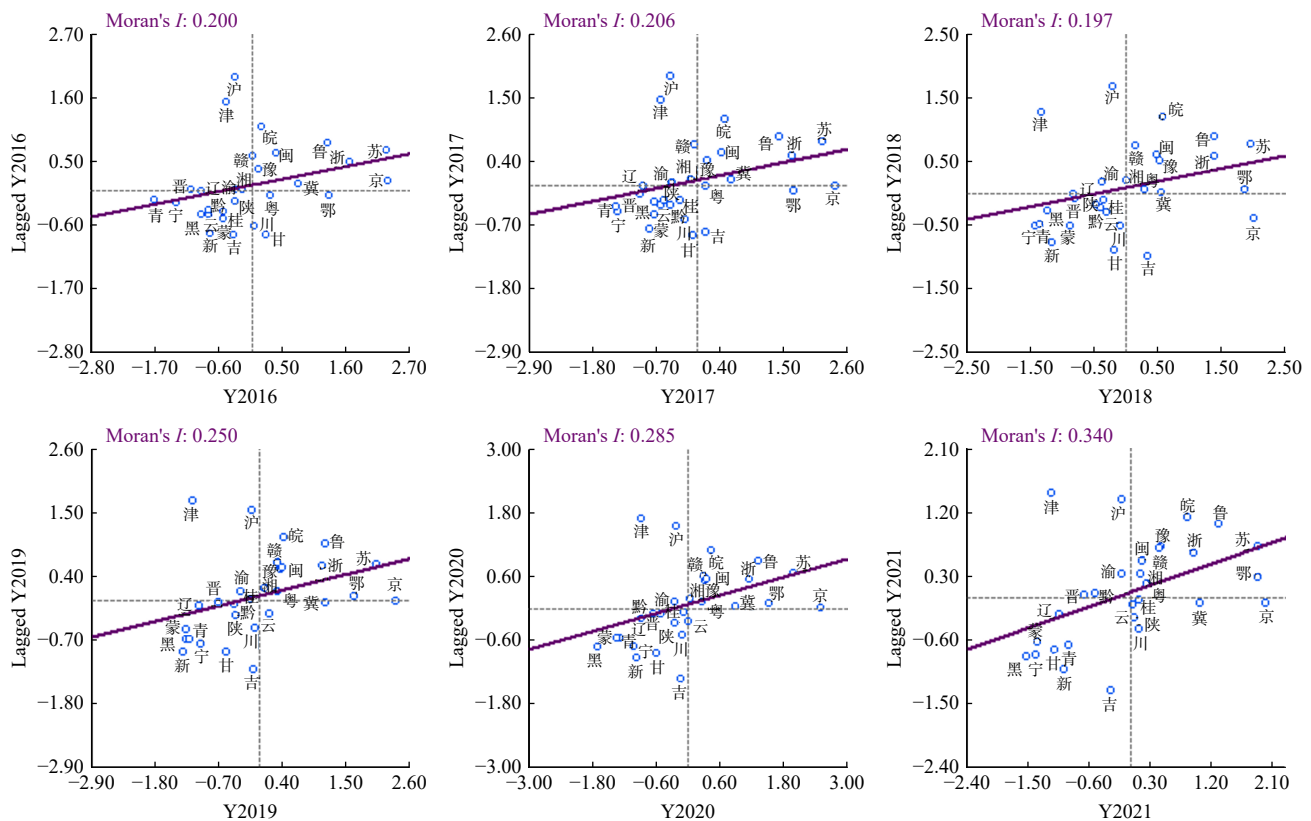


图2 2016—2021年中国建筑工业化水平 Moran 散点图

建筑工业化发展水平高高集聚主要分布在鲁、苏、浙等，低高集聚和低低集聚分布模式表现为以中、西部为主，高低集聚状态有较大变化；各省建筑工业化水平逐步上升，呈现出东部带动中部地区并促进西部发展的特点。

2.3.2 聚类分析

为进一步了解中国各省智能建造与建筑工业化协同发展区域特征，借助 SPSS 软件，将 30 个省的协同度作为样本，采用瓦尔德法和平方欧氏距离进行聚类分析，谱系图见图 3。选取类间距离 11 为分类依据，将 30 个省分为 4 类。

第 1 类区域(湖南、青海、山西、河南、黑龙江、江苏、安徽)在 2017、2021 年协同度为正值，2018—2020 年协同度为负值，说明在 2017 年智能建造与建筑工业化协同发展较好，随后几年却出现了发展不协同的现象，直到 2021 年协同发展得到好转。

第 2 类区域(河北、云南、湖北、上海、陕西、内蒙古、贵州、新疆)多是在 2021 年协同度才开始为正值，其他年份均为负值，这类区域多是中部和西部省份，这类区域是在最近才逐渐呈现出协同发展的现

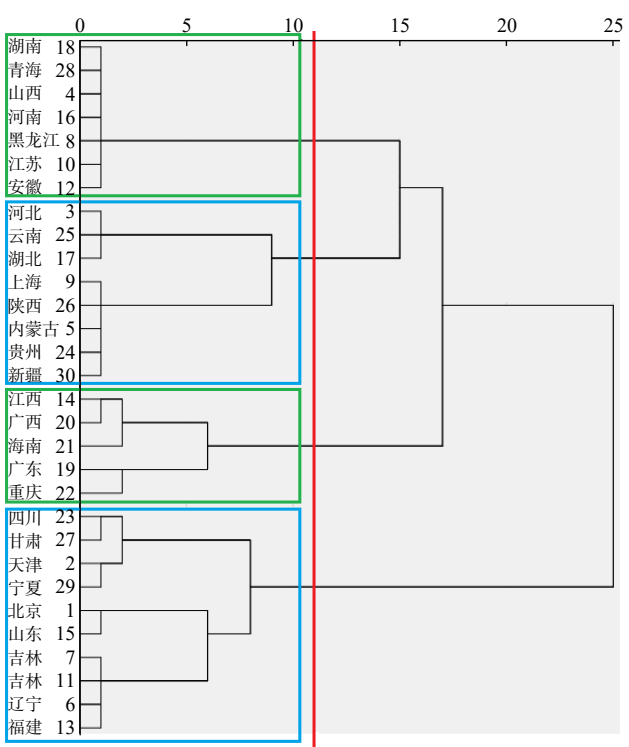


图3 瓦尔德法和平方欧氏距离谱系

状，整体发展逐步趋于良好。

第 3 类区域(江西、广西、海南、广东、重庆)在

2017—2018 年协同度均为正值,显示智能建造与建筑工业化协同发展程度普遍较好,且 2017—2021 年平均协同度均为正值,部分省份也开始出现发展不协调的情况。

第 4 类区域(四川、甘肃、天津、宁夏、北京、山东、吉林、浙江、辽宁、福建)在 2017—2021 年平均协同度均为负值,整体协同程度较其他 3 类处于最低层次,这类区域没能同时兼顾好智能建造与建筑工业化两者的发展,两者发展不协调问题较严重。

3 结论与建议

3.1 结论

智能建造和建筑工业化 2 个子系统的发展存在空间关联性,协同度与地域关系不大。一个省智能建造和建筑工业化的发展将带动其他省相应子系统的发展,各省智能建造与建筑工业化协同发展水平普遍较低,不同省的经济水平、科技创新能力、政策环境等因素,将影响区域智能建造与建筑工业化协同发展。

中国智能建造与建筑工业化协同发展整体上呈现出“U”形,有较好的发展趋势。在 2017、2021 年,近 60% 的省份智能建造与建筑工业化发展是处于协同发展良好状态,在 2019 年,近 90% 的省份呈现出智能建造与建筑工业化发展不协调的现象,我国智能建造与建筑工业化协同发展有望进一步提升。

3.2 建议

注重智能建造和建筑工业化 2 个子系统发展的协调性和相似性。智能建造与建筑工业化协同发展过程中,不仅要考虑智能建造和建筑工业化各自的发展水平,同时也应该注重协调度和相似度,避免出现某一区域智能建造水平提升较大的同时建筑工业化水平提升较小或下降的情况。

合理利用周边地区资源弥补区域子系统发展短板,因地制宜地制定政策。山西、江西、广西等建筑工业化发展一直处于上升趋势,而这些省份智能建造水平却相对较低,可通过学习和吸收合作省份智能建造信息和技术,弥补智能建造发展不足的短板,促使智能建造与建筑工业化发展同步。

参考文献(References)

- [1] 孙喜亮,孙志勇,薛小龙,等.智能建造技术协同创新主体互动关系研究[J].土木工程学报,2022,55(11):108-117.
- [2] 孙洁,龚晓南,张宏,等.数字化驱动的建筑业高质量发展战略路径研究[J].中国工程科学,2021,23(4):56-63.
- [3] Guo Z X, Li L H. A conceptual framework for collaborative development of intelligent construction and building industrialization[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 904518.
- [4] Lekan A, Clinton A, Fayomi O S I, et al. Lean thinking and industrial 4.0 approach to achieving construction 4.0 for industrialization and technological development[J]. Buildings, 2020, 10(12): 221.
- [5] Zhou Y, Wei X, Peng Y. The modelling of digital twins technology in the construction process of prefabricated buildings[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 1-11.
- [6] 刘育江.智能建造与建筑工业化协同发展影响因素探究[J].广东建材,2024,40(6):159-161.
- [7] 李桃,严小丽.智能建造与建筑工业化协同发展系统及作用机制[J].土木工程与管理学报,2022,39(1):131-136,143.
- [8] 曾艳.工程项目智慧建造水平评价研究:以青岛海天中心项目为例[D].青岛:青岛科技大学,2021.
- [9] 尚书.新媒体数据驱动的建筑工业化发展水平评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [10] Wu J X, Li L H. Synergy degree evaluation in the development of intelligent construction and construction industrialization: A case study of Shenyang, China[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2023, 18: 929-942.
- [11] Huang J, Shuai Y H, Liu Q, et al. Synergy degree evaluation based on synergetics for sustainable logistics enterprises[J]. Sustainability, 2018, 10(7): 2187.
- [12] Huang X, Song J Y, Li X, et al. Evaluation model of synergy degree for disaster prevention and reduction in coastal cities[J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 933-953.
- [13] Zhang T, Tan Q, Yu X N, et al. Synergy assessment and optimization for water-energy-food nexus: Modeling and application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110059.
- [14] Bai L B, Qu X, Liu J L, et al. Analysis of factors influencing project portfolio benefits with synergy considerations[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2023, 30(7): 2691-2715.
- [15] Guo Y X, Mao H Y, Ding H P, et al. Data-driven coordinated development of the digital economy and logistics industry[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8963.
- [16] 罗敏.基于EPNR模型的中国低碳技术创新动力因素分析[J].科技管理研究,2018,38(1):239-243.

- [17] 金赛美. 中国省际农业绿色发展水平及区域差异评价[J]. 求索, 2019(2): 89–95.
- [18] 王惠敏. 建筑工业化转型质量测度及障碍因子改进研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [19] 杨洁, 王国胤, 刘群, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724–744.
- [20] 刘澜静. 我国工业化与信息化协同度评价研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- [21] 孟庆松, 韩文秀. 复合系统协调度模型研究[J]. 天津大学学报, 2000, 33(4): 444–446.

Calculation and analysis of the degree of collaboration between intelligent construction and building industrialization

ZHANG Ruixue, LIU Hongzhi*, LIU Guanxing

School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China

Abstract The collaborative development of Intelligent Construction and Building Industrialization is a complex system and an important way to promote the transformation and upgrading of the construction industry. In this paper, the collaboration degree of Intelligent Construction and Building Industrialization in various regions of China is measured by cloud model and composite system cooperation degree model. It is found that the development of Intelligent Construction and Building Industrialization is spatially related in China, and the development of Intelligent Construction and Building Industrialization in one region often drives the development of corresponding subsystems in other regions. The degree of cooperative development of Intelligent Construction and Building Industrialization has little relationship with the region. In the process of promoting the cooperative development of Intelligent Construction and Building Industrialization, each region should formulate corresponding policies according to local conditions.

Keywords intelligent construction; building industrialization; cloud model; synergy degree of composite system ●



(责任编辑 王微)