

装配式建筑产业生态化发展的共生演化模式研究

沈良峰¹, 袁 俊¹, 薛光军², 孙李妍¹, 刘 婷¹

(1. 中南林业科技大学土木工程学院, 长沙 410004; 2. 湖南省第二工程有限公司, 长沙 410004)

摘要: 装配式建筑产业生态化对于推动产业主体协同发展、产业价值多元转化具有重要作用。通过对装配式建筑产业生态系统的分析,运用 Logistic 方程建立产业生态共生演化模型,采用 Matlab 软件仿真拟合模型生长曲线,最后以长沙市装配式建筑产业创新生态系统进行案例分析。结果表明,各个主体间的共生作用系数反映了不同主体之间的相互依存程度和合作关系的紧密程度。互惠共生演化模式能充分发挥主体间的协同作用,并对系统的共生演化提出针对性的政策,为装配式建筑产业共生发展提供参考。

关键词: 装配式建筑产业; 产业生态化; 共生演化模式; Logistic 模型

中图分类号: F423.3; TU741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)08-0158-11

随着建筑业的迅猛发展,依然呈现“低效率、低效益、高能耗、高污染”等负面特征,并伴随着所面临的专业工人匮乏、接近或超越资源环境承载力的建筑业发展模式,恶化了发展环境与产业生态,严重制约了建筑业的可持续发展。近些年来,建筑业的改革和提高已经证明,采用工业化的建设模式,能够有效地解决传统制作方法的不足,从而推动建设行业高速和稳定的增长。通过建筑工业化,使建筑业实现可持续发展并成为向更高级的“集约型、高品质、信息化、智能化”发展的基础和平台。以装配式建筑为代表的新型建筑工业化是实现建筑业的可持续发展和现代工业文明的有效手段、重要抓手和主要着力点。因此,发展、提升和完善装配式建筑产业生态,是传统建筑走向现代化的重要路径。产业生态是生产和服务遵循产业关联而在特定地域中形成的各行业(企业)相互依赖、上下游相互协作、要素相互流动、服务相互提供的一种产业集聚状态。基于“产业生态化、生态产业化”的协同绿色发展视角,拓展建筑产业生态可持续性与节能性。从废弃物的资源再利用,应用于建筑领域的创新和可持续材料,以及优化建筑结构与施工技术,提升建筑材料耐用性。通过建立建筑项目环境性能水平标准,衡量建筑生产中的生态性能,推动生

态品质的提升。因此,装配式建筑产业的发展除了需要技术支持与底层架构为基础以外,也需要良好的主体发展环境和完善的产业配套保障机制。将“生态化”作为产业发展的核心方向,以“降本、提质、增效”为价值导向,摆脱传统建筑业生产力发展的路径依赖。在此背景下,分析装配式建筑产业生态系统中产业主体间的共生关系及其所蕴藏着的系统化、动态化、协调化的内生演化发展机理,促使装配式建筑产业生态系统生态化发展的演进路径,打造装配式建筑产业生态化的新型生产关系,成为建筑业“新质生产力”发展的必然要求。

1 文献回顾与框架体系

随着全球化的推进和科技的进步,装配式建筑逐渐成为国际建筑业的主流。这种生产方式能够提高生产效率,降低生产成本,减少资源浪费和环境污染,因此被广泛应用于住宅、商业、工业等各类建筑领域。装配式建筑在我国处于快速发展时期,正在进入标准化、模块化的生产阶段。装配式建筑产业的研究日益多元化,从微观产业主体到社会宏观层面、从单一主体到多主体协同、从供应链整合到产业链协调发展。因此,本文以装配式建筑产业生态化为纽带,聚焦于产业主体间不同的共生演化模式对资源交互与协同发展的影响。

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 湖南省社会科学基金(23YBA119)

作者简介: 沈良峰(1968—),男,江苏南通人,博士,教授,研究方向为土木工程管理、可持续建设与发展管理;袁俊(2000—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为土木工程可持续发展;薛光军(1983—),男,湖南益阳人,硕士,高级工程师,研究方向为土木工程建设与管理;孙李妍(1999—),女,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向为装配式建筑产业生态;刘婷(2000—),女,湖南长沙人,硕士研究生,研究方向为土木工程可持续发展管理。

1.1 产业生态化

1984年“产业生态化”被首次提出,人们开始探索如何将传统工业活动与自然环境相协调,以实现资源的有效利用和减少对环境的影响。随着时间的推移,产业生态化理念的深入推进,促使各行各业在生产、运营和管理方面进行深刻的变革。通过构建循环利用的产业链条以及生态品质评价体系^[1],不同产业之间实现了资源共享和协同发展,大大提高了资源利用效率,减少了对自然资源的过度开采和浪费。同时,政府、企业和社会各界纷纷加入产业生态化的实践中,产业生态化也为企业带来新的商机和增长点,激发创新活力,提高企业生态主导力^[2]。通过企业间协作、产学研合作等多种模式互动耦合形成价值共创的途径,推动了技术进步和产业升级。在全球范围内,越来越多的国家和地区开始将产业生态化作为战略方向^[3],从生态系统视角探讨产业集群^[4],推动社会结构与产业生态化的优化互补。产业生态化理念也在不断演进和拓展,为社会的绿色生产及可持续发展开辟了更加广阔的前景。

1.2 产业生态系统

产业生态系统的发展与演化,是一个动态、复杂且多变的过程,并不断地向稳定平衡状态靠拢^[5]。随着全球经济的快速发展和科技的不断进步,产业生态系统也在不断地调整和优化。新的产业形态不断涌现,传统产业面临着转型升级的挑战和机遇。同时,全球范围内的供应链重构、数字化转型以及碳中和等趋势也对产业生态系统产生了深远影响^[6]。随着产业生态系统的创新与技术进步,新的技术和商业模式的出现不仅能够改变传统产业的竞争格局,还能够为新兴产业的发展提供契机。通过不断引入创新技术,培育创新主体、改善创新环境和促进创新合作^[7],产业生态系统能够实现更高效的资源配置和价值创造^[8],推动整个系统向着更加生态化和可持续的方向发展。系统内各个行业主体之间共生关系的协调对产业生态系统的演化发展至关重要。各个环节和产业主体之间的紧密协作能够促进资源共享、风险分担和创新合作。通过建立开放的合作平台和共生关系,可以打破传统产业壁垒,实现跨行业、跨领域的合作与共赢。只有在协同共生的基础上,产业生态系统才能够形成良性循环,实现资源的高效利用和优势互补。

目前学者们对装配式建筑产业施工技术、环境影响评价等研究起到了不同程度的促进作用,但现有研究仍存在一些不足:①相关研究大多集中于装配式

建筑设计、生产、施工、碳排放、生态效益等方面,没有明晰装配式建筑产业生态系统的构造要素与演化驱动因素,缺乏开展装配式建筑产业内主体之间内生协调发展的分析。②装配式建筑在生态影响方面主要体现在资源、能源节约和废弃物减量方面,产业生态化发展的内在机理还没有很好地描绘出来,因而难以针对装配式建筑产业生态化发展提出合理的协调方略与政策安排。③传统的研究方法通常倾向于以静态的方式来观察和分析产业生态系统,只关注特定时间点上的结构和关系,而忽视了产业生态化发展的变化和演进过程。基于此,有必要从产业生态系统的角度出发,分析装配式建筑产业生态系统的内涵及构成,创新性的利用生物学中 Logistic 生长方程构建装配式建筑产业生态系统共生演化模型,借助计算机软件 Matlab2018 仿真模拟产业主体在不同共生关系下的发展趋势与演化过程,分析装配式建筑产业生态系统的演化方向,形成装配式建筑产业生态化发展的最优共生演化模式。

1.3 装配式建筑产业生态系统的框架体系

共生理论认为系统中价值的创造与获取,需要群落、种群内参与主体的紧密协作,并且每一类群落的规模增长除了受到自身增长率和种群数量的影响,还与共生体系中其他群落有关,为研究产业生态化研究提供新的视角。

基于共生理论的装配式建筑产业生态系统是一个多维度、跨层级的体系,涉及产业内主体与产业外环境的一系列因素。完整的生态系统由共生单元、共生模式和共生环境三类要素构成,三者相互作用、缺一不可。其中,共生单元是构成生态系统的基本能量生产和交换单位;共生模式是共生单元演化发展的方式;共生环境是生态系统良好运行的支撑和保障。结合以往学者的研究和装配式建筑产业的独特性,将装配式建筑产业生态系统进行界定。以个体、种群、群落、系统作为层级结构与功能分工,由创新保障层、生产核心层、多元服务层三类产业核心主体群落作为共生单元,在有限的共生环境中协同驱动价值创造与积累的复杂系统,如图1所示。该生态系统内产业主体共同参与、相互协同作用,打造将生产、流通、消费、回收、能力建设及环境保护纵向结合,将不同行业的生产工艺横向耦合,将生产基地与周边环境纳入整个生态系统统一管理,谋求资源的高效利用和有害废弃物向系统外零排放的共生和集聚发展的有机生态,形成一个稳定健全的装配式建筑产业生态系统(图1)。

2 装配式建筑产业生态系统共生演化模型

2.1 装配式建筑产业生态系统共生演化驱动因素

一般而言,对于复杂的经济社会系统的形成与演化都有其外在驱动因素和内在驱动因素两个方面。以“产业生态化”“产业生态系统”“共生演化”等关键词在中国知网、Web of Science、Google Scholar 等网站检索中英文文献 30 篇。根据文献的被引量、下载量、期刊权威性选择 12 篇相关文献对系统共生演化的驱动因素进行提取,如表 1 所示。对于装配式建筑产业生态系统而言,其正是在内、外部各种因素的相互作用下,实现从无序的状态向有序状态转变。论文聚焦于装配式建筑产业生态系统框架体系相对稳定下的演化发展,驱动因素不断推动着产业主体间的共生模式变化,最终会由量变引起质变,从而达到全新稳定的高阶产业生态系统。

内部驱动因素是装配式建筑产业生态系统演

化发展的源泉和动力,外部驱动因素是装配式建筑产业生态系统演化发展的条件。装配式建筑产业生态系统共生演化的内部驱动因素主要体现在技术驱动、合作共赢、知识交流等方面。装配式建筑技术的不断创新和应用,能够提高建筑的效率和质量,降低建设成本,并且产业链上下游各环节的合作共赢,促进资源配置优化,提高产业链效益,通过行业内的知识共享、技术交流和人才培养,有助于保持产业的活力和竞争力。外部驱动因素主要体现在市场需求、政策支持、环境保护等方面。市场需求是产业生态系统发展的重要动力,消费者对于品质卓越、环保高效的建筑产品和服务的需求,推动装配式建筑产业的技术进步和产品创新。政府可以从宏观层面引导产业协同发展,推动装配式建筑产业的生态系统正向演化。同时,环保意识的提高使得绿色、低碳的建筑方式和材料受到更多关注,从而引领装配式建筑产业朝着可持续发展的方向演化。

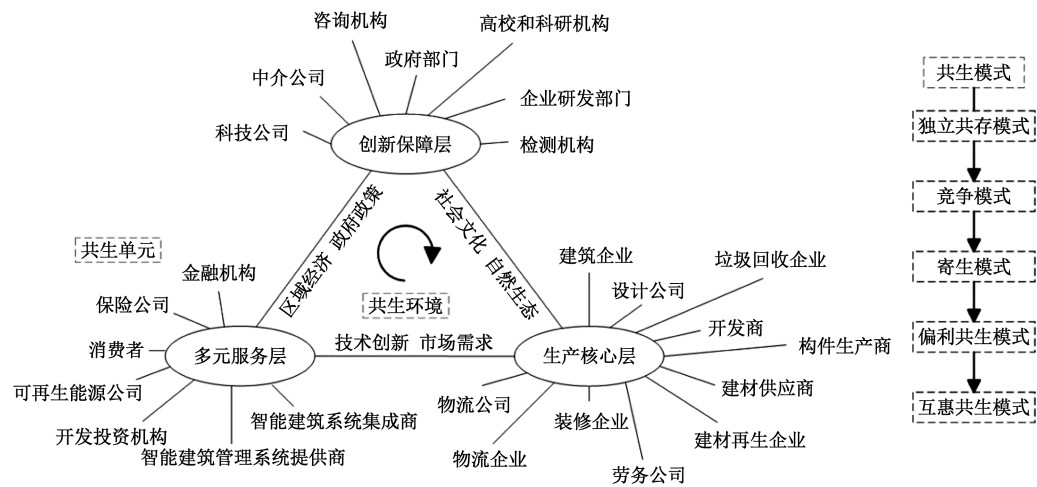


图 1 装配式建筑产业生态系统共生要素框架体系

表 1 共生演化驱动因素

驱动类型	驱动因素	相关文献
内部因素	技术驱动	曾倩等 ^[1] 、左文明和丘心心 ^[4] 、杨增科等 ^[9] 、张继宏和王婷 ^[10] 、Tolstykh 等 ^[11] 、戈兴成和季璐 ^[12] 、黄晓琼和徐飞 ^[13] 、王京 ^[14] 、Alessio 等 ^[15] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、Nylund Petra 等 ^[17] 、Masoud 等 ^[18]
	合作共赢	曾倩等 ^[1] 、左文明和丘心心 ^[4] 、杨增科等 ^[9] 、张继宏和王婷 ^[10] 、Tolstykh 等 ^[11] 、戈兴成和季璐 ^[12] 、黄晓琼和徐飞 ^[13] 、王京 ^[14] 、Alessio 等 ^[15] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、Nylund Petra 等 ^[17] 、Masoud 等 ^[18]
	知识交流	曾倩等 ^[1] 、左文明和丘心心 ^[4] 、张继宏和王婷 ^[10] 、Tolstykh 等 ^[11] 、戈兴成和季璐 ^[12] 、黄晓琼和徐飞 ^[13] 、Alessio 等 ^[15] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、Nylund Petra 等 ^[17]
外部因素	市场需求	曾倩等 ^[1] 、左文明和丘心心 ^[4] 、杨增科等 ^[9] 、张继宏和王婷 ^[10] 、戈兴成和徐飞 ^[12] 、Alessio 等 ^[15] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、
	政策支持	曾倩等 ^[1] 、左文明和丘心心 ^[4] 、杨增科等 ^[9] 、张继宏和王婷 ^[10] 、Tolstykh 等 ^[11] 、戈兴成和季璐 ^[12] 、黄晓琼和徐飞 ^[13] 、王京 ^[14] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、Nylund Petra 等 ^[17] 、Masoud 等 ^[18]
	环境保护	曾倩等 ^[1] 、Tolstykh 等 ^[11] 、戈兴成和季璐 ^[12] 、黄晓琼和徐飞 ^[13] 、Alessio 等 ^[15] 、杨曦和刘鑫 ^[16] 、Masoud 等 ^[18]

2.2 装配式建筑产业生态系统共生演化模型构建

2.2.1 模型构建

装配式建筑产业生态系统从产生到成长的演化过程实质上是系统内部产业主体规模不断增加,技术创新能力不断提升,价值不断创造和积累的过程。共生理论认为,不同物种之间通过资源流动和整合形成的共生模式是维系生态系统平衡,实现从独立发展向互惠共生演化的关键。

基于装配式建筑产业生态系统与自然生态系统的关联性与相似性,借用 Logistic 模型构建装配式建筑产业生态系统共生演化模型,对核心产业主体群落进行分析。假设创新保障层群落、生产核心层群落、多元服务层群落的规模分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 ,主体群落的自然增长率分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 ,在一定的资源条件下创新保障层群落、生产核心层群落、多元服务层群落的最大规模分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 ,当群落在共生环境中单独生长时,群落的规模变化用 Logistic 模型表示为

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i \left(1 - \frac{N_i}{K_i}\right) N_i(t) \quad (1)$$

式中: $r_i N_i$ 反映产业核心主体群落自身的发展趋势; $1 - \frac{N_i}{K_i}$ 表示产业生态系统内剩余资源占总资源的比例,即创新保障层、生产核心层、多元服务层三类产业核心主体群落由于资源总量的限制导致发展受到的阻滞作用。当在一定的资源环境下,三者存在竞争关系时,任意一个群落的增长对其余两群落都存在阻滞作用。

在资源环境一定的情况下,装配式建筑产业生态系统中各个产业主体之间相互影响、互相作用,各主体间存在复杂的动态耦合关系。根据各核心产业主体群落的共生关系强弱不同,融合 Logistic 模型,构建基于共生理论的装配式建筑产业生态系统共生演化模型如下。

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = r_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} + a_{12} \frac{N_2}{K_2} + a_{13} \frac{N_3}{K_3}\right) N_1(t), \\ N_1(0) = N_{10} \\ \frac{dN_2}{dt} = r_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2} + a_{21} \frac{N_1}{K_1} + a_{23} \frac{N_3}{K_3}\right) N_2(t), \\ N_2(0) = N_{20} \\ \frac{dN_3}{dt} = r_3 \left(1 - \frac{N_3}{K_3} + a_{31} \frac{N_1}{K_1} + a_{32} \frac{N_2}{K_2}\right) N_3(t), \\ N_3(0) = N_{30} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} 分别为装配式建筑产业生态系

统中创新保障层、生产核心层、多元服务层不受任何影响时,彼此独立的发展规模; a_{ij} 为*i*对*j*的共生作用系数。

2.2.2 模型分析

Logistic 模型可作为刻画装配式建筑产业生态系统共生演化模式的工具,来表达外界环境约束下主体增长量与时间的关系,将在时间变化下主体增长的程度作为向好的特征,分析各产业主体演化程度的增长规律,并描述不同主体间的作用关系。随着时间的推移,产业主体之间的相互作用逐渐显现复杂性和多样性。一些主体可能会达到饱和状态,其增长趋于稳定,而另一些主体可能会处于快速增长阶段。通过 Logistic 模型,可以更好地理解产业生态系统内部各主体之间的竞争、合作和依存关系,进一步分析在不同的共生模式下如何促进整个系统的持续健康发展。

装配式建筑产业生态系统隐含了生态学的概念架构,其产业主体的共生模式与生物种群的演化相似,也包括独立共存、竞争、寄生、偏利共生、互惠共生 5 种模式。独立共存是指产业主体保持独立自主的状态;竞争是指在有限的共生环境中,产业主体之间存在一定的资源争夺与竞争关系;寄生是指一个产业主体寄生在另一产业主体上,从中获益,而被寄生的主体则受到损害;偏利共生是指在资源交换过程中,一个产业主体从另一产业主体中获益,而被获益的主体既不受益也不受害;互惠共生是指产业主体间通过彼此合作资源交互所形成的高阶互动模式,在实现自身规模增长的同时促进彼此协同共赢。根据共生系数的取值进行分析,得到表 2 所示装配式建筑产业生态系统共生演化模式。

表 2 装配式建筑产业生态系统共生演化模式

取值组合	共生演化模式
$a_{12}=0, a_{21}=0, a_{13}=0, a_{31}=0, a_{23}=0, a_{32}=0$	独立共存模式;互不影响
$a_{12}<0, a_{21}<0, a_{13}<0, a_{31}<0, a_{23}<0, a_{32}<0$	竞争模式;相互抑制
$a_{12} a_{21}<0, a_{13} a_{31}<0, a_{23} a_{32}<0$	寄生模式;共生系数为正的一方受益,共生系数为负的一方受损
$a_{12}=0, a_{21}>0$ 或 $a_{12}>0, a_{21}=0$; $a_{13}=0, a_{31}>0$ 或 $a_{13}>0, a_{31}=0$; $a_{23}=0, a_{32}>0$ 或 $a_{23}>0, a_{32}=0$	偏利共生模式;其中有一方共生系数为正(受益),另一方为 0(无影响)
$a_{12}>0, a_{21}>0, a_{13}>0, a_{31}>0, a_{23}>0, a_{32}>0$	互惠共生模式;相互促进

装配式建筑产业生态系统的共生演化是一个动态博弈的过程,根据常微分方程稳定性理论,令 $\frac{dN_1}{dt} = 0, \frac{dN_2}{dt} = 0, \frac{dN_3}{dt} = 0$, 通过求解得出 $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8$ 这8个均衡点,如表3所示。

装配式建筑产业生态系统动态演化的雅可比矩阵为

表3 演化均衡点

序号	均衡点
E_1	$(0, 0, 0)$
E_2	$(K_1, 0, 0)$
E_3	$(0, K_2, 0)$
E_4	$(0, 0, K_3)$
E_5	$\left[0, \frac{K_2(a_{23}+1)}{1-a_{23}a_{32}}, \frac{K_3(a_{32}+1)}{1-a_{23}a_{32}}\right]$
E_6	$\left[\frac{K_1(a_{13}+1)}{1-a_{13}a_{31}}, 0, \frac{K_3(a_{31}+1)}{1-a_{13}a_{31}}\right]$
E_7	$\left[\frac{K_1(a_{12}+1)}{1-a_{12}a_{21}}, \frac{K_2(a_{21}+1)}{1-a_{12}a_{21}}, 0\right]$
E_8	(α, β, γ)

注:在均衡点 E_8 中,

$$\alpha = \frac{-K_1(a_{12}+a_{13}+a_{12}a_{23}+a_{13}a_{32}-a_{23}a_{32}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1},$$

$$\beta = \frac{-K_2(a_{21}+a_{23}+a_{13}a_{21}-a_{13}a_{31}+a_{23}a_{31}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1},$$

$$\gamma = \frac{-K_3(a_{31}+a_{32}-a_{12}a_{21}+a_{12}a_{31}+a_{21}a_{32}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1}.$$

表4 装配式建筑产业生态系统稳定性分析

均衡点	特征值	稳定条件
$E_1(0, 0, 0)$	均为正值	不稳定
$E_2(K_1, 0, 0)$	均为负值	$a_{21} < -1, a_{31} < -1$
$E_3(0, K_2, 0)$	均为负值	$a_{12} < -1, a_{32} < -1$
$E_4(0, 0, K_3)$	均为负值	$a_{13} < -1, a_{23} < -1$
$E_5\left[0, \frac{K_2(a_{23}+1)}{1-a_{23}a_{32}}, \frac{K_3(a_{32}+1)}{1-a_{23}a_{32}}\right]$	特征值有正值	不稳定
$E_6\left[\frac{K_1(a_{13}+1)}{1-a_{13}a_{31}}, 0, \frac{K_3(a_{31}+1)}{1-a_{13}a_{31}}\right]$	特征值有正值	不稳定
$E_7\left[\frac{K_1(a_{12}+1)}{1-a_{12}a_{21}}, \frac{K_2(a_{21}+1)}{1-a_{12}a_{21}}, 0\right]$	特征值有正值	不稳定
$E_8(\alpha, \beta, \gamma)$	均为负值	$\begin{cases} \frac{a_{12}+a_{13}+a_{12}a_{23}+a_{13}a_{32}-a_{23}a_{32}+1}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1} < 0 \\ \frac{a_{21}+a_{23}+a_{13}a_{21}-a_{13}a_{31}+a_{23}a_{31}+1}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1} < 0 \\ \frac{a_{31}+a_{32}-a_{12}a_{21}+a_{12}a_{31}+a_{21}a_{32}+1}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1} < 0 \end{cases}$

注:在均衡点 E_8 中, $\alpha = \frac{-K_1(a_{12}+a_{13}+a_{12}a_{23}+a_{13}a_{32}-a_{23}a_{32}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1}, \beta = \frac{-K_2(a_{21}+a_{23}+a_{13}a_{21}-a_{13}a_{31}+a_{23}a_{31}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1}, \gamma = \frac{-K_3(a_{31}+a_{32}-a_{12}a_{21}+a_{12}a_{31}+a_{21}a_{32}+1)}{a_{12}a_{21}+a_{13}a_{31}+a_{23}a_{32}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-1}$; 模型在此范围内三类核心产业主体都不至灭绝,创新保障层、生产核心层与多元服务层可共生交互、协同发展,故 E_8 为唯一稳定均衡点。

$$J = \begin{bmatrix} r_1 \left(\frac{a_{12}N_2}{K_2} - \frac{N_1}{K_1} + \frac{a_{13}N_3}{K_3} + 1 \right) - \frac{N_1r_1}{K_1}, \frac{a_{12}N_1r_1}{K_2}, \frac{a_{13}N_1r_1}{K_3} \\ \frac{a_{21}N_2r_2}{K_1}, r_2 \left(\frac{a_{21}N_1}{K_1} - \frac{N_2}{K_2} + \frac{a_{23}N_3}{K_3} + 1 \right) - \frac{N_2r_2}{K_2}, \frac{a_{23}N_2r_2}{K_3} \\ \frac{a_{31}N_3r_3}{K_1}, \frac{a_{32}N_3r_3}{K_2}, r_3 \left(\frac{a_{31}N_1}{K_1} - \frac{N_3}{K_3} + \frac{a_{32}N_2}{K_2} + 1 \right) - \frac{N_3r_3}{K_3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

稳定性分析根据雅可比矩阵的行列式 $\text{Det}(J)$ 与迹 $\text{Tr}(J)$ 的讨论,当 $\text{Det}(J) > 0, \text{Tr}(J) < 0$ 时,系统处于稳定状态,如表4所示。其中 r_1, r_2, r_3 假设均为正值,从而获得装配式建筑产业生态系统的稳定均衡点与稳定条件。

3 装配式建筑产业生态系统动态演化仿真

根据装配式建筑生态系统的均衡条件与共生演化模式分析,产业主体间共生系数的强弱,影响着共生模式的发展轨迹。在产业生态系统时间序数不完备的情况下,借助 Matlab 软件仿真模拟装配式建筑产业生态系统内部核心主体群落的共生演化模式,可以清晰地呈现在不同共生系数下共生模式的发展轨迹。

3.1 研究假设

H1: 装配式建筑产业生态系统由创新保障层、生产核心层、多元服务层三核心产业主体群落组成,其共生模式的发展宏观引领着群落下产业主体种群的共生发展。

H2:在资源环境的约束下,核心产业主体群落的种群数量受到制约,符合自然生态界系统的生长规律。

H3:核心产业主体群落各自的质参量独立时的增长符合 Logistic 模型增长,以核心产业主体群落规模和密度的增减变化表示该主体的成长过程,由于系统资源的有限性,当某一类核心产业主体群落的规模密度增加时,它们之间对资源的竞争会加剧,其他核心产业主体群落的增长率随之下降。

H4:各核心产业主体群落的共生演化发展是一个互依互存的过程,当共生系数为正时对应的主体受益,当共生系数为负时对应的主体受损。

H5:当核心产业主体群落的边际收益与其产生的边际成本相等时,该核心产业主体群落停止生长,达到其发展的最大规模限度。

3.2 仿真分析

假设创新保障层、生产核心层、多元服务层的自然增长率 r_1 、 r_2 、 r_3 分别为 0.04、0.06、0.03,在特定资源环境约束下的最大规模为 1 000,初始规模均为 100,演化周期为 800。通过探究不同共生系数之间的关系,获取装配式建筑产业生态系统的演化过程、路径及影响因素。

3.2.1 独立共存模式

核心产业主体群落之间的共生系数均为 0,各主体群落之间互不影响,其发展速度与自身增长率相关,彼此间不存在共生效应;经过一段时间的演化发展,三类核心主体群落均达到发展规模的极限值,如图 2 所示。

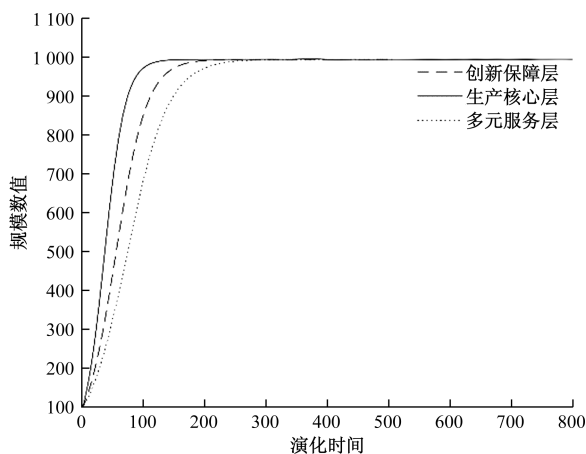


图2 独立共存模式演化

3.2.2 竞争共生模式

当 $-1 < a_{ij} < 0$ 时,为平等竞争模式,此时 $a_{12} = -0.3$ 、 $a_{21} = -0.15$ 、 $a_{13} = -0.2$ 、 $a_{31} = -0.2$ 、 $a_{23} =$

-0.1 、 $a_{32} = -0.25$,装配式建筑产业生态系统中产业主体平等竞争共生演化模式的仿真结果如图 3 所示。在平等竞争模式中,生产核心层不仅受到有限资源环境的制约,而且受到了创新保障层和多元服务层的共同影响。生产核心层的共生演化轨迹呈现先升后降的趋势,且最终未达到最大规模。创新保障层与多元服务层的产业主体也受到了其他产业主体的制约,发展受到了阻碍,创新保障层的资源依赖性比较强,受到生产核心层与多元服务层的影响较深,其本身发展速度较快,但当生产核心层的发展受到制约后,创新保障层的发展阻碍反应更大。

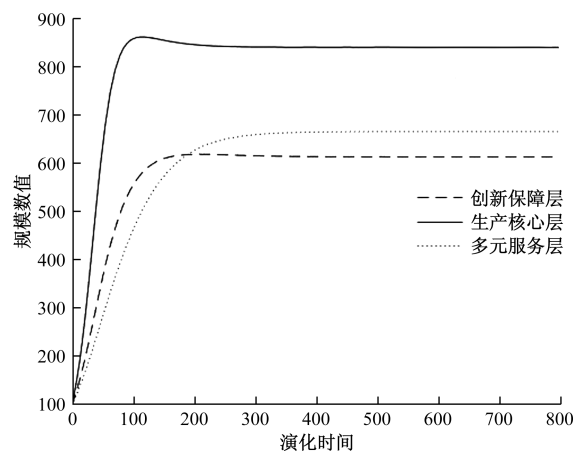


图3 平等竞争演化模式

当满足其中某一类核心产业主体对另两类核心产业主体的共生系数均 $a_{ij} < -1$ 时,为恶性竞争模式,此时 $a_{12} = -1.2$ 、 $a_{21} = -0.5$ 、 $a_{13} = -0.7$ 、 $a_{31} = -0.75$ 、 $a_{23} = -0.8$ 、 $a_{32} = -1.1$,装配式建筑产业生态系统中产业主体恶性竞争演化模式的仿真结果如图 4 所示。这一模式中,创新保障层和多元服务层的共生系数较大,对资源的消耗严重,只

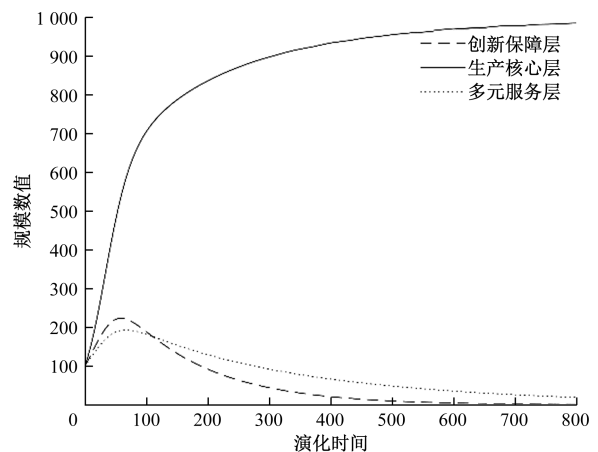


图4 恶性竞争演化模式

经过了一段短暂的发展就走向了消亡。生产核心层本身自然增长率较大,在恶性竞争中争夺到了大量的资源,使得其规模在其他核心产业主体消亡后,不断地增加达到最大规模。

3.2.3 寄生共生模式

在寄生共生模式中,各类产业主体都想从其他产业主体身上获得更多的资源,以达到自身的良性发展。寄生共生模式一共分为两种,首先是生产核心层与创新保障层共同寄生于多元服务层,此时 $a_{12}=0.4$ 、 $a_{21}=0.25$ 、 $a_{13}=0.1$ 、 $a_{31}=-0.1$ 、 $a_{23}=0.3$ 、 $a_{32}=-0.15$ 。装配式建筑产业生态系统中产业主体单寄生共生演化模式的仿真结果如图5所示。在此共生模式中,生产核心层与创新保障层内的产业主体依赖并消耗多元服务层内产业主体的资源,规模演化经过一段时间的快速发展后,最终主体规模因寄生共生关系而受益有所增加。多元服务层因资源受到额外消耗,最终主体规模没有达到最大值。

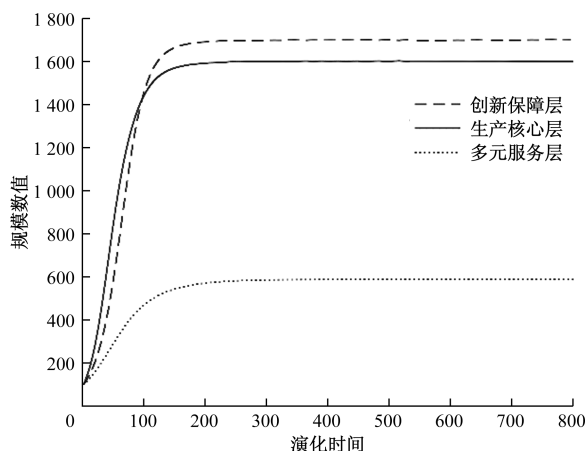


图5 单寄生共生演化模式

另一种是生产核心层寄生于创新保障层与多元服务层,此时 $a_{12}=-0.2$ 、 $a_{21}=0.2$ 、 $a_{13}=-0.1$ 、 $a_{31}=-0.15$ 、 $a_{23}=0.15$ 、 $a_{32}=-0.1$ 。装配式建筑产业生态系统中产业主体多寄生共生演化模式的仿真结果如图6所示。在此共生模式中,由于生产核心层即寄生于创新保障层又寄生于多元服务层,受益所得可利用的资源总量,支持该群落内产业主体的规模发展突破上限。创新保障层与多元服务层的发展资源受到生产核心层的影响,最终规模的总量受到了制约。

3.2.4 偏利共生模式

当 $a_{12}=0$ 、 $a_{21}=0.2$ 、 $a_{13}=0$ 、 $a_{31}=0$ 、 $a_{23}=0.1$ 、 $a_{32}=0$ 时,为生产核心层主导的偏利共生模式,装配

式建筑产业生态系统以生产核心层主导的偏利共生演化模式的仿真结果如图7所示。在该模式下,生产核心层依赖其他主体获得了更多的生产机会与创新资源,规模演化的发展增长突破上限。创新保障层与多元服务层则不受到环境与其他因素的影响,各自自然发展,规模上限无变化。

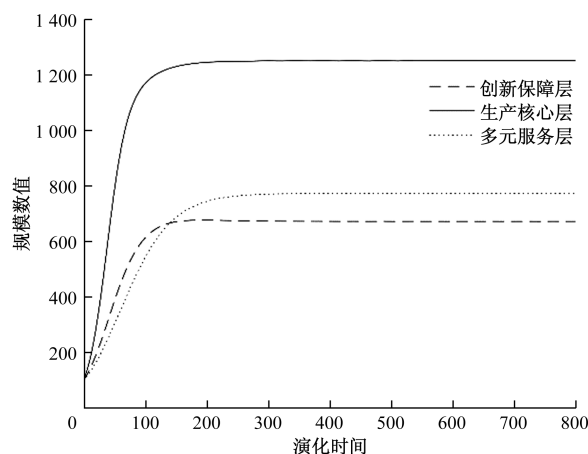


图6 多寄生共生演化模式

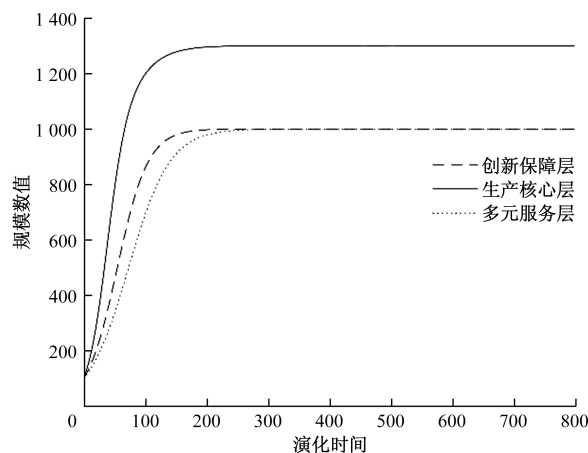


图7 单主导的偏利共生模式

当 $a_{12}=0.1$ 、 $a_{21}=0.2$ 、 $a_{13}=0.15$ 、 $a_{31}=0$ 、 $a_{23}=0.1$ 、 $a_{32}=0$ 时,为创新保障层与生产核心层共同主导的偏利共生模式,装配式建筑产业生态系统以生产核心层主导的偏利共生演化模式的仿真结果如图8所示。在该模式下,创新保障层与生产核心层在共生关系中受益,发展速度加快,演化规模突破自身规模增长上限。多元服务层的规模只与自身的自然增长率有关,不受到环境与其他因素的影响。

3.2.5 互惠共生模式

当 $a_{12}=0.25$ 、 $a_{21}=0.35$ 、 $a_{13}=0.1$ 、 $a_{31}=0.1$ 、 $a_{23}=0.3$ 、 $a_{32}=0.15$ 时,为互惠共生模式,装配式建筑产业生态系统中核心产业主体互惠共生演化模

式的仿真结果如图9所示。在该模式下,三类核心产业主体群落间的共生系数均为正数,彼此相互协同发展,共同受益。其演化规模的发展上限均有提升,其具体规模演化大小是由共生作用系数的大小的绝对值所决定的,即共生系数的绝对值越大,核心产业主体彼此在交互协同中获益越多,发展的最终规模就越大。在互利共生模式下,三种核心产业主体群落内的个体不局限于系统资源的限制,进而实现价值共创、互利共赢。产业主体在系统内资源共享,强化自身的技术优势,系统处于动态开放的阶段,使得系统逐步向成熟生态方向演进。

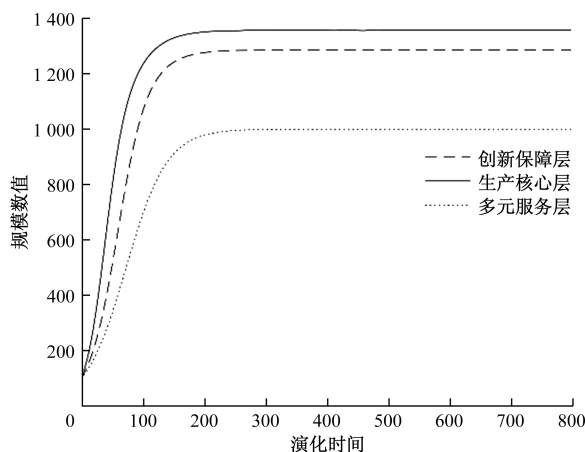


图8 多主导的偏利共生模式

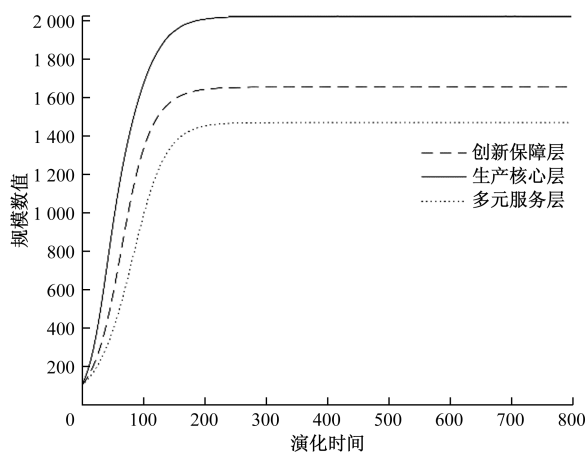


图9 互惠共生演化模式

4 案例分析

案例分析是一种有效补充计算机仿真方法的研究手段,可以深入剖析装配式建筑产业生态系统的共生演化。以长沙市装配式建筑产业创新生态系统为例进行解释性案例分析。长沙市作为湖南省的省会城市,近年来在装配式建筑产业领域取得了显著进展。长沙市装配式建筑产业创新生态系

统是以长沙市装配式建筑产业创新战略联盟为主体,由政府、企业、高校、科研机构等多方主体共同构成的复杂网络,旨在通过技术创新推动装配式建筑产业的快速发展。

4.1 长沙市装配式建筑产业创新生态系统构成

近年来,政府高度重视装配式建筑产业的发展,将其作为推动建筑产业转型升级、实现绿色建筑发展的重要举措。长沙市积极响应国家政策,将装配式建筑作为城市建设和产业发展的重要方向,出台了一系列扶持政策,包括财政补贴、税收优惠、土地供应等,以鼓励企业投入装配式建筑技术创新。因此,为了加快推进长沙市装配式建筑产业发展,完善产业链平台服务体系,营造产业链发展氛围,长沙市装配式建筑产业创新战略联盟在长沙市政府的倡议和支持下成立。该联盟提出产业链发展的总体目标:用三年时间,打造长沙装配式建筑“一基地三中心一联盟”“装配式建筑产业示范园”“千亿级现代装配式建筑产业集群”,形成具有国际知名度的长沙装配式建筑品牌效应。

长沙市装配式建筑产业创新生态系统,作为一种复杂的创新网络结构,其核心在于长沙市装配式建筑产业创新战略联盟的资源整合与优化配置。该生态系统是在长沙市装配式建筑产业创新战略联盟的推动下,由联盟内部多个子联盟的成员单位通过自组织的方式进行交互与耦合,进而形成的一种跨界创新共生体。这种共生体不仅促进了不同领域、不同行业之间的知识流动和技术转移,而且通过协同创新,增强了联盟成员的竞争力和创新能力。其中生产核心层包括长沙远大住宅工业集团、筑友智造、三一筑工、三能房屋、中民筑友、东方红集团、湖南省建筑设计院集团、湖南金海集团、湖南雄新建筑有限公司等成员。创新保障层包括中建科技湖南有限公司、中南大学、华阳国际、长沙市城市建设科学研究院、长沙市政府等成员。多元服务层包括长房集团、投资金融机构、消费者等成员。

4.2 长沙市装配式建筑产业创新生态系统共生交互

在长沙市,装配式建筑产业的创新生态系统正逐渐展现出其绩效表现。这一表现不仅体现在产业内部创新主体的耦合与共生关系上,还体现在这些主体如何相互作用以推动整个产业的创新发展。通过对仿真结果的分析,可以深入理解这一生态系统的内在逻辑和发展趋势。具体表现为:长沙市的装配式建筑产业创新生态系统由多种类型的创新

主体构成,包括建筑企业、设计院、材料供应商、科研机构 and 政府部门等。这些主体在生态系统中扮演着不同的角色,但它们之间的相互作用和协同发展是推动产业创新的关键。首先,产业主体间的共生关系通过资源共享、技术合作、信息交流和市场协同等方式形成,这种关系不仅促进了知识的流动和创新的产生,还增强了整个生态系统的稳定性和抗风险能力。目前,该创新生态系统创造性地编辑发行《长沙装配式建筑》行业期刊;联合绿建联盟、无人系统联盟、机器人联盟、海绵城市联盟组成了联合联盟;组织市城科院、远大住工、省建筑设计院、中机国际、湖大设计院等成员单位开展“长沙市装配式混凝土建筑设计导则”课题研究;协办“长沙产博会——装配式建筑论坛”。这些都说明了系统旨在促进一个以共存为根本条件、共享为关键策略、共创为发展目标的相互依赖和互利共赢的命运共同体的构建与发展。最后,长沙市政府在推动装配式建筑产业发展中也发挥了重要作用。通过制定相关政策和提供财政支持,政府为创新主体间的合作提供良好的外部环境。同时,市场需求的增长也为产业创新提供动力。这种需求不仅来自消费者对高质量建筑产品的追求,也来自对环境友好型建筑的需求。

4.3 长沙市装配式建筑产业创新生态系统共生演化模式

当前,长沙市的装配式建筑产业正处于发展成长阶段,远大住工、筑友智造、三一筑工等生产核心层成员在市场整体需求趋于饱和的背景下,持续深化其在产品开发生产业务的布局,将更多资源投入到后市场,逐渐在市场中建立起声誉与信任。通过与长房集团、银行等多元服务层成员的横向资源互补,装配式建筑企业不仅强化自身的经济实力,也促进整个系统的协同发展。多元服务层成员受到长沙市政府、长沙市城市建设科学研究院等创新保

障层等成员扶持政策的逐步完善,如《关于推动智能建造与新型工业化协同绿色低碳高质量发展行动方案》,计划到2025年,智能建造年产值达到2000亿元,到2030年,力争达到5000亿元。这些政策为装配式建筑产业提供了强有力的政策支持和资金投入,推动技术研发和产业升级。此外,长沙市装配式建筑产业创新生态系统还通过举办技术交流会、研讨会等形式,加强行业内的信息交流和知识共享。因此,长沙市装配式建筑产业创新生态系统正处于快速发展成长阶段,如图10所示。系统内主要主体间的关系由刚开始形成时的竞争、寄生模式转向偏利共生模式。但由于在这动态发展过程中,产业面临的诸多风险还未完全显现,风险预警及监管机制还需分阶段完善,全方位、多层次的政策体系还需逐步建立。偏利共生演化模式向互惠共生演化模式的转变,仍需行业内主体进行常态化的深度互动,共同推动整个产业生态的健康发展。

5 结论与启示

5.1 结论

本文以装配式建筑产业生态系统为研究对象,运用Logistic方程构建装配式建筑产业生态系统共生演化模型,并分析系统演的均衡条件,通过Matlab软件仿真模拟不同演化模式的发展趋势,揭示装配式建筑产业生态系统共生演化过程。主要的创新意义如下。

(1)基于产业生态系统视角,装配式建筑产业生态系统是在有限的共生环境中围绕着资源共享、价值共创而相互协同交互发展的复杂巨系统。由创新保障层群落、生产核心层群落、多元服务层群落三大核心产业群落组成,每一群落下面分布着若干主体种群,种群下面分布着若干个体。它在内、外部各种因素的相互作用下,由形成、成长向成熟生态阶段演进。其中创新保障层为产业主体提供技术支持,促进创新资源的整合和创新能力的提

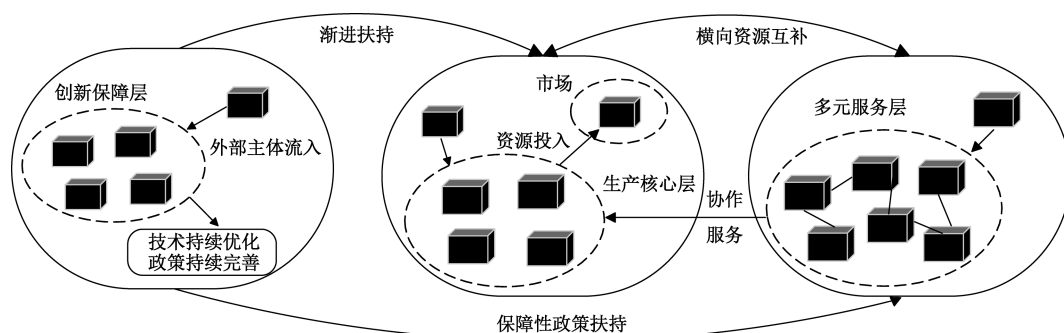


图10 发展成长阶段演化

升。生产核心层为装配式建筑提供全方位的支持和服务,保障项目的顺利实施和运营。多元服务层为装配式建筑产业实现智能化、可持续化和高效化,提升竞争力,满足市场需求,推动产业的发展 and 进步。

(2)在装配式建筑产业生态系统中,各个主体间的共生作用系数决定系统的均衡状态,这种共生系数反映不同主体之间的相互依存程度和合作关系的紧密程度。共生作用系数的提高意味着各个主体之间的合作更加密切,资源利用更加高效,创新能力和竞争力也将得到增强,演化的速度与规模也会随之加大。这意味着即使某些主体初始规模较小,或者其自然增长率相对较低,只要它们能够与其他主体建立良好的合作关系并积极参与系统的生态过程,仍然有可能在系统中发挥重要作用,并最终达到均衡状态。

(3)装配式建筑产业生态系统中,各主体之间存在着多种共生模式:独立共存、竞争、寄生、偏利共生和互惠共生。随着主体之间的共生模式与资源利用的情况的变化,各类产业主体的增长速率与最大发展规模也会随之变化。当共生作用系数均为正时,此时共生模式为互惠共生模式,在这个模式下,每个产业主体都能够在系统中发挥其优势,通过与其他主体的合作实现自身的增长和发展。这种合作不仅仅是简单的资源共享,更是在创新、技术、市场等多个方面进行深度互动,从而提高整个系统的效率和竞争力。同时,由于共生效应的存在,每个产业主体都能够获得比其单独发展时更大的收益,这进一步激励了各主体之间的合作与共生。

5.2 启示

根据装配式建筑产业生态化的共生演化模式分析,得到以下启示。

(1)改善装配式建筑产业生态系统内各主体间的共生关系。在当今高度互联互通的世界中,各个主体之间的合作和交流已经成为必然趋势,充分提高主体间的相互信任度、系统开放度与信息共享度,是推动行业发展和进步的重要因素。在彼此之间理解、尊重和公正的基础上加强沟通、加强协调、加强合作。建立开放的装配式建筑产业内部生态运行平台,鼓励主体之间共享信息、分享经验和资源,确保合理的信息流动和有效的知识保护机制,实现生态运行的和谐稳定发展。

(2)优化装配式建筑产业生态系统的内部共生环境。以研发投入-技术创新-人才培养为基本优化

架构,深化产业内部创新性改革。探索适合整个产业的供应链新型管理模式,提高产业链上各个环节的技能水平和服务质量。形成友好的外部环境支持,注重环境保护和资源可持续利用。加大政策优惠力度,为装配式建筑产业提供良好的政策环境和市场环境,共同推动装配式建筑产业生态系统的良性发展。

(3)变革装配式建筑产业生态系统多元化协同发展机制。从供需两端和群体协同发力,以有效供给加速市场应用,以有效需求促进产业发展,以增大协同收益效应拓展发展动能。以价值共创为协同发展方向,落实供需两端的有效培育激励机制,激发各参与主体的积极性和创造力。最终实现装配式建筑产业生态化向互惠共生演化模式方向演进。

参考文献

- [1] 曾倩,沈良峰,汪莎,等.基于DPSIR-TOPSIS的装配式建筑产业生态品质评价——以湖南省为例[J].科技和产业,2022,22(7):118-123.
- [2] 金友良,贺蒙,曾辉祥.园区工业废弃物资源化价格模型及应用——生态产业共生视角[J].系统工程理论与实践,2019,39(9):2361-2373.
- [3] 斯文虎,王伟,刘恒,等.“双碳”目标下的信息产业生态化路径探索——以数据中心产业链为例[J].科技和产业,2023,23(16):179-183.
- [4] 左文明,丘心心.工业互联网产业集群生态系统构建——基于文本挖掘的质性研究[J].科技进步与对策,2022,39(5):83-93.
- [5] 邢丹丹,李存金.共享单车生态系统的动态演化分析[J].科技和产业,2022,22(6):204-207.
- [6] WEN H, WANG R, LIU Y. Towards carbon neutrality in agglomeration: impact of eco-industry development on urban carbon emission efficiency [J]. Sustainability, 2024, 16(8): 3159.
- [7] 王跃婷.创新生态系统共生水平评价与区域创新格局研究[J].科技和产业,2022,22(5):346-354.
- [8] MARIKA A, GIOVANNI A, GIULIA P. Uncovering value creation in innovation ecosystems: paths towards shared value[J]. European Journal of Innovation Management, 2022, 25(6): 432-451.
- [9] 杨增科,樊瑞果,石世英,等.基于CIM+的装配式建筑产业链运行管理平台设计[J].科技管理研究,2021,41(19):121-126.
- [10] 张继宏,王婷.创新生态系统视角下众创空间高质量发展评价研究——以山西省为例[J].科技和产业,2022,22(11):45-52.
- [11] TOLSTYKH T, SHMELEVA N, GAMIDULLAEVA L. Evaluation of circular and integration potentials of in-

- novation ecosystems for industrial sustainability [J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4574.
- [12] 戈兴成, 季璐. 数字经济产业创新生态系统的形成与演化分析[J]. 经济体制改革, 2023(1): 125-134.
- [13] 黄晓琼, 徐飞. 知识生态视域下面向产业集群的区域综合科技服务系统生态化发展研究[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(3): 60-69.
- [14] 王京. 平台生态系统演化机理研究——以云制造产业为例[J]. 中国软科学, 2021(11): 29-35.
- [15] COZZOLINO A, CORBO L, AVERSA P. Digital platform-based ecosystems; the evolution of collaboration and competition between incumbent producers and entrant platforms[J]. Journal of Business Research, 2021, 126: 385-400.
- [16] 杨曦, 刘鑫. 基于专利的数智低碳产业创新生态系统演化研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(19): 135-146.
- [17] NYLUND P A, BREM A, AGARWAL N. Innovation ecosystems for meeting sustainable development goals: the evolving roles of multinational enterprises[J]. Journal of cleaner production, 2021, 281: 125329.
- [18] NOROUZI M, CHÄFER M, CABEZA L F, et al. Circular economy in the building and construction sector: a scientific evolution analysis[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102704.

Research on the Symbiotic Evolution Model of Ecological Development in Prefabricated Building Industry

SHEN Liangfeng¹, YUAN Jun¹, XUE Guangjun², SUN Liyan¹, LIU Ting¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Construction Engineering Group No. 2 Co., Changsha 410004, China)

Abstract: The ecologicalization of prefabricated building industry plays an important role in promoting the coordinated development of industrial entities and the diversified transformation of industrial value. Through the analysis of the prefabricated building industry ecosystem, the industrial ecological symbiotic evolution model was established using the Logistic equation, and the growth curve of the model was simulated and fitted using Matlab software. Finally, a case analysis was conducted on the innovation ecosystem of the prefabricated building industry in Changsha. The results show that the symbiotic effect coefficient between each subject reflects the degree of interdependence and the closeness of the cooperative relationship between different subjects. The mutualistic symbiotic evolution model can give full play to the synergy between subjects, and targeted policies are put forward for the symbiotic evolution of the system, providing a reference for the symbiotic development of the prefabricated building industry.

Keywords: prefabricated building industry; industrial ecologization; symbiotic evolutionary pattern; logistic mode