doi:10. 3969/j. issn. 1672-0598. 2026. 05. 002

科技创新生态系统知识涌现机制的系统动力学研究*

袁　红,肖　棠

(南通大学 管理学院,江苏 南通　226019)

摘要:科技创新生态系统的知识涌现驱动新技术的产生与科技进步,揭示其运行机制有助于提升系统创新效能。基于复杂适应系统理论,从“个体—群体—系统”三个层次探究科技创新生态系统知识涌现过程,构建系统动力学模型并进行仿真模拟。研究发现,知识涌现过程具有递增式累积促进机制、自相似层级演化机制和正反馈创新循环机制。其中环境因素和知识主体因素均对知识涌现起正向促进作用,且环境因素的影响更为显著。在此基础上,结合 WSR 系统方法论提出科技创新生态系统知识涌现的优化措施。

关键词:科技创新生态系统;知识涌现;系统动力学;复杂适应系统理论

中图分类号:F204;G302　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-0598(2026)05-0010-14

一、引言

科技创新生态系统以高新技术企业、高校、科研机构及政府为核心主体,以外部环境为支撑,通过多要素协同实现价值创造[1]。当前全球技术变革与我国产业转型背景下,改善科技创新生态、激发创新创造活力成为核心任务。知识创新是科技创新的基础[2],主体间知识流动的复杂化与开放化促使知识涌现成为新知识产生的关键驱动力。然而,现有研究多聚焦开放式与协同创新领域,缺乏多层次、跨主体的系统性分析,对知识流动与生态系统动态演化的量化建模及机制探讨仍显不足[3]。

因此,本文从“个体—群体—系统”三层次构建科技创新生态系统知识涌现的系统动力学模型,揭示其运行机理,并基于 WSR 系统方法论提出优化策略,旨在完善知识涌现理论,为创新政策与知识管理提供依据,进而提升我国创新生态系统的整体效能。

* **收稿日期**:2025-10-29

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX25_3652)“公共数据开放协同网络结构特征、影响因素及优化策略研究”

作者简介:袁红(1973—),女,湖北荆州人;博士,南通大学管理学院教授,硕士生导师,主要从事政府信息管理、科技创新治理研究。

肖棠(2001—),女,江苏无锡人;南通大学管理学院硕士研究生,主要从事政府信息管理、科技创新治理研究。

本文引用格式:袁红,肖棠. 科技创新生态系统知识涌现机制的系统动力学研究[J]. 重庆工商大学学报(社会科学版),2026,43(5):10-23.

二、研究现状

(一)知识涌现的理论内涵研究

知识涌现指复杂适应系统中,具备适应性和学习能力的知识主体,在外部环境支持下,经同层或跨层交互形成新知识结构并实现知识创新的过程[4]。基于复杂适应系统理论,研究侧重解释“选择”“整合”等协作机制如何触发知识涌现[5],而从知识动态性理论出发,学界则关注知识获取、交流等流转环节对知识涌现的支撑作用[6],二者为分析知识涌现提供了交叉理论视角。

(二)科技创新生态系统的结构和动力研究

科技创新生态系统由主体、知识与环境三大要素构成,能够持续进行各类复杂活动,为知识涌现提供生成场域和演化基础。知识要素在内容、传播路径和吸收能力上呈现多样性[7];主体要素聚焦政府、高校和企业等多元主体,其共生模式与交互网络是知识涌现及创新的关键[8];环境要素涵盖政策、技术等维度[9],为知识涌现提供外部支撑。系统演进动力源于知识转移与知识创新。知识转移经资源整合、技术联盟等多阶段推动系统资源流动整合[10],构成知识涌现的关键路径;知识创新作为涌现成果促进系统跃迁,需要知识管理投入、网络关系及外部环境保障[11]。

(三)知识涌现机制的现有研究与整合性缺口

知识涌现机制研究存在多元视角:微观行为视角视知识积累与内外部动机为知识涌现动因,强调个体交互突破知识边界、构建新知识结构为必要条件[12];中观网络视角聚焦双层网络特质,认为主体交互与知识流动产生的规模及结构效应共同推动知识涌现与系统韧性提升[13];宏观系统视角则强调系统关联下的知识治理协同演化,指出涌现成果反作用于共生环境,推动共生模式动态调整以维持持续演化循环[14]。

现有研究虽具借鉴价值,然存在整合性缺口:研究层次多囿于单一或部分层级,未揭示跨层级互动转化机制,且对知识涌现动态过程的非线性特征刻画不足。据此,本文从“个体—群体—系统”综合视角构建系统动力学模型,旨在揭示科技创新生态系统中知识涌现的内在运行机理。

三、科技创新生态系统知识涌现机制的理论框架构建

(一)科技创新生态系统的复杂适应性分析

复杂适应系统(CAS)理论的核心是“适应性造就复杂性”,系统由适应性主体动态交互构成,主体遵循“刺激—反应”规则,通过物质、能量、信息流转调整行为以适应环境及其他主体,“适应”构成系统演化的核心动力[15]。微观层面主体通过学习积累优化行为,宏观层面主体间进行非线性交互促使系统涌现新结构与功能。

科技创新生态系统具备聚集、非线性、流和多样性四大特性(见表 1),可视为复杂适应系统。本文利用该理论分析科技创新生态系统内知识涌现机制。

表1 科技创新生态系统的复杂适应性

特性	含义	科技创新生态系统中的体现
聚集	低层次主体整合形成高层次新型聚集体(非简单叠加)[16]	个人经团队向创新群落的层级聚合
非线性	主体变化呈非线性,受多重反馈影响[16]	创新成果源于主体间非线性交互及技术与应用的动态反馈
流	主体间及与环境间存在物质流、能量流、信息流[17]	多链互联网络促进要素流通共享
多样性	系统演化中主体差异扩大与分化	多元主体与资源交互,多样性效应逐层传导并提升系统效能

(二)科技创新生态系统的结构分析

与自然生态系统类似,科技创新生态系统由知识主体与知识生态环境构成:知识主体是主动参与知识活动并与环境及其他主体交互的人或组织;知识生态环境则是影响知识主体生存的空间及相关事物的总和[17]。基于复杂适应系统的"聚集"特性,微观至中观层面,个体经学习分化与非线性交互催生新结构;中观至宏观层面,新结构的复杂反馈触发知识涌现并提升复杂性,系统由此呈现"个体—群体—系统"三层结构,知识主体与知识生态环境亦对应细化为该三层次。

知识主体分为知识个体、知识种群与知识群落:知识个体指不同知识背景与能力的个人;知识种群是特定时空内知识个体的集合,即创新团队;知识群落由多领域知识种群组成,包括知识密集型企业、高校、科研机构等。

知识生态环境分为知识环境、合作环境与创新环境:知识环境支撑个体或团队内部知识交流;合作环境覆盖团队间的知识传递协作网络;创新环境则是政策、经济、社会文化等宏观支持背景。三者相互依存,良好的知识环境是形成有效合作环境的基础,而有效的合作环境又为构建优质创新环境提供关键支撑。

知识主体的分层展现了从个体到群体再到系统的演化路径,知识生态环境的分层提供了相应的环境支撑机制,二者共同构成"结构—环境"协同演化三维框架。

(三)科技创新生态系统知识涌现的过程分析

1. 积累阶段

CAS理论指出主体多样性是系统涌现的基础,适应性主体遵循"刺激—反应"模式调整行为与知识结构。在科技创新生态系统中,个体知识差异是知识涌现的前提,个体基于内在动机与外部知识交互,扩充知识储备。知识交互能力作为适应性的关键体现,直接影响交流深度;而管理制度与激励等环境因素则关键调控交互效果。

2. 演化阶段

非线性是复杂适应系统的核心特征。科技创新生态系统中,知识个体间的交互不仅推动知识量增长,达到一定程度还会催生新结构——知识种群,知识量实现非线性增长[18]。由于知识种群间存在知识势差,低水平知识种群会主动获取知识并与自身融合实现知识扩散,这一过程依赖种群间信任程度[19]、扩散渠道数量以及主体的学习和吸收能力[20]。CAS理论中,信任作为交互规则促进可靠知识源识别,渠道数量构成"流"的物质基础,而适应性主体的学习和吸收能力,则决定知识扩散的深度与效率。

CAS理论强调主体交互会受到外部环境刺激的影响。合作环境中,合作关系网络[21]、资金投入、信

息技术水平会影响知识种群间的协作。合作关系网络影响知识共享与创新的充分性,资金投入作为资源流支持项目研发,信息技术水平提供协同过程的信息流支撑。这些因素通过人才交流、项目合作等方式推动知识种群形成更高层次的知识群落,向科技创新生态系统贡献合作专利、创新技术等知识成果,实现知识创造。

3. 产出阶段

复杂适应系统中,主体非线性交互形成新结构与新功能,实现涌现。各知识群落相互作用,与其他环境要素进行动态适应和协调,通过知识共生强化知识扩散效果、优化知识效用[22]。依据共生理论,系统群落共生协同度可反映知识群落共生关系[23],揭示其在创新环境下的协同发展及创新绩效提升潜力。该阶段,知识创造的成果转化为实际应用,催生新产品和服务,完成从知识涌现至知识应用的过程。

(四)科技创新生态系统知识涌现机制的理论框架

前文对科技创新生态系统层次结构与知识涌现过程的阐述,明确了各层次关键要素的作用机制,为构建知识涌现机制的理论框架提供了坚实的理论基础与逻辑支撑,如图 1 所示。

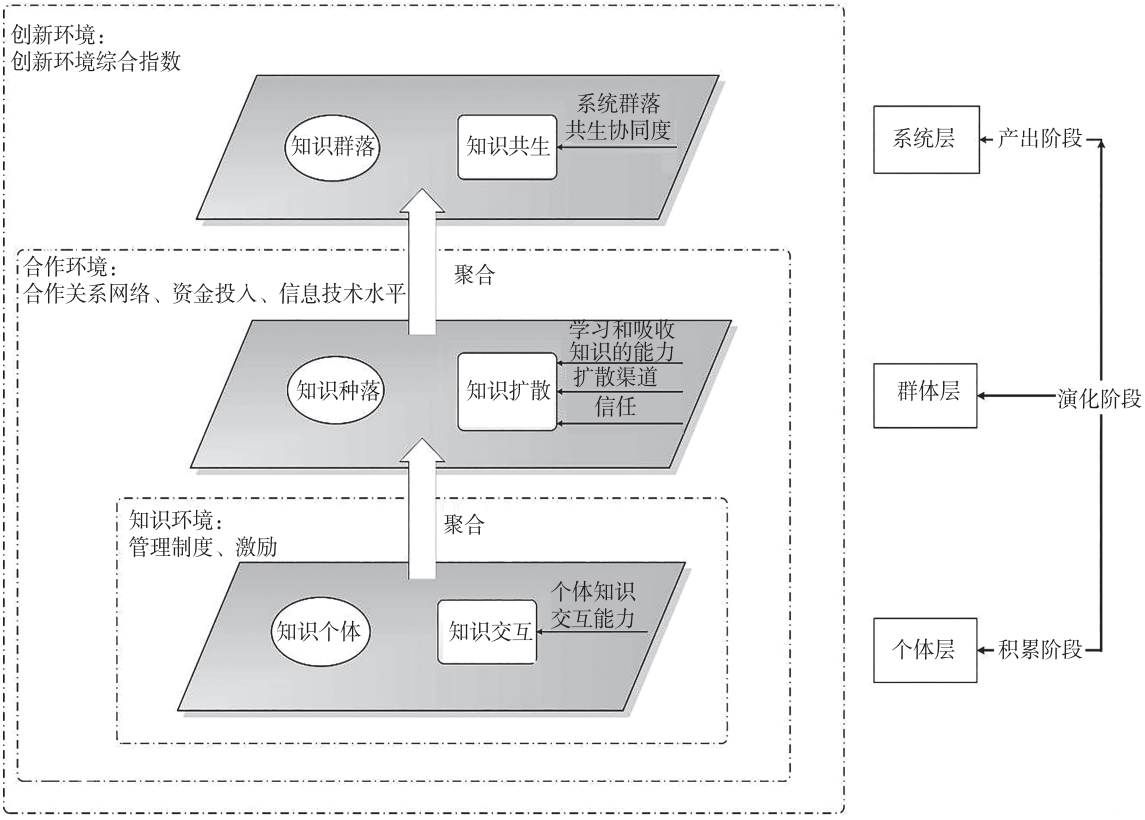


图 1　科技创新生态系统知识涌现机制的理论框架

积累阶段聚焦个体层,主要活动为知识个体间的知识交互,其效果受个体知识交互能力影响。知识环境提供管理制度和激励机制支持。

演化阶段涵盖个体层→群体层、群体层内及群体层→系统层的知识流动与聚合。知识个体依托既有知识结构与交互基础,聚合形成知识种群,完成从个体层到群体层的过渡;群体层中,知识种群间的知识扩散效率受信任、扩散渠道及主体学习和吸收知识的能力影响,进而通过合作关系聚合为知识群落并输出新知识成果,实现从群体层到系统层的演进。合作环境为演化阶段提供了合作关系网络、资金投入和

信息技术水平等关键要素。

产出阶段聚焦系统层,主要活动为知识群落间的知识共生,其效果受群落共生协同度影响。各知识群落通过知识互补与协同增长,推动知识成果转化与应用落地,创新环境综合指数具有促进作用。

中国创新指数指标体系中,创新环境综合指数为核心衡量指标,涵盖产业技术、社会文化、经济政策等维度,是创新环境评估的重要依据。构建支持知识群落共生协同的良好创新环境对知识创新至关重要。

此外,知识环境、合作环境、创新环境相互依存,构成了一个多层次的知识生态环境。小环境(合作环境和知识环境)支撑大环境(创新环境),大环境引领小环境,三个阶段的层次递进和环境范围扩大助力科技创新生态系统的知识涌现。

四、科技创新生态系统知识涌现机制的仿真实验

(一)模型界定和假设

本文拟模拟科技创新生态系统知识涌现机制,知识主体、知识生态环境、知识产出都属于系统边界以内。知识主体包括知识个体、知识种群和知识群落;知识生态环境包括知识环境、合作环境和创新环境;知识产出是指知识涌现过程中知识创新绩效的产生和知识量的增加。同时,为精准模拟系统目标,提出如下基本假设:

假设1:科技创新生态系统知识涌现是动态可持续过程,系统内各要素相互作用,共同推动系统稳定发展。系统具备聚集、非线性等特性,主体遵循"刺激—反应"模式进行互动调整,且知识涌现存在反馈调节机制,保障系统可持续运行。

假设2:系统各层级知识主体具有主动获取新知识、参与知识涌现过程的积极倾向。积累阶段,知识个体受动机与能力驱动获取知识;演化阶段,知识种群主动融合外部知识,体现适应性与主动性。微观行为视角下的知识涌现机制亦表明,内在学习动机可激发知识交流,促成知识涌现。

假设3:仅考虑系统边界内因素,不考虑外部因素重大改变及其他突发情况导致的剧烈波动。依据系统动力学理论,建模需聚焦内部结构与内生动态[24],本文通过分析边界内核心要素的相互作用揭示知识涌现机制。

(二)因果关系图与主要回路

为准确认识知识涌现机制及主体层级递进过程,本文设置两类个体:个体1代表在知识获取和管理方面具有优势的个体,特点是拥有高知识存量、高知识获取量、低知识遗失量和高知识交互能力;而个体2则代表在这些方面处于劣势的个体。两类个体均赋予数量属性值4,个体1的4个个体在较高聚合系数下形成知识量较高的群体1;个体2的4个个体在较低聚合系数下形成知识量较低的群体2。此外,回路中加入知识涌现的影响因素,将学习和吸收知识的能力、信任、扩散渠道归并为扩散系数。运用系统动力学软件Vensim PLE构建因果关系图(见图2),因果链以箭头表示,带有极性标志,正号(+)表示正反馈效应,负号(-)表示负反馈效应。

回路1:个体1知识存量→个体1交互后知识量→个体1-群体1知识量→群体1知识合作量→群体-系统知识成果产出量→知识创新绩效→个体1知识获取量→个体1知识存量。

回路2:个体2知识存量→个体2交互后知识量→个体2-群体2知识量→群体2知识合作量→群体

-系统知识成果产出量→知识创新绩效→个体 2 知识获取量→个体 2 知识存量。

两条回路表明,科技创新生态系统经个体层知识交互、群体层知识扩散至系统层知识共生的演进,产生系统知识涌现,与图 1 理论框架一致。

(三) 系统流图及方程说明

基于因果关系与系统运行实际绘制系统流图,包含 3 个状态变量(矩形框)、5 个速率变量(箭头)、11 个辅助变量及 19 个常量(无边框),如图 3 所示。

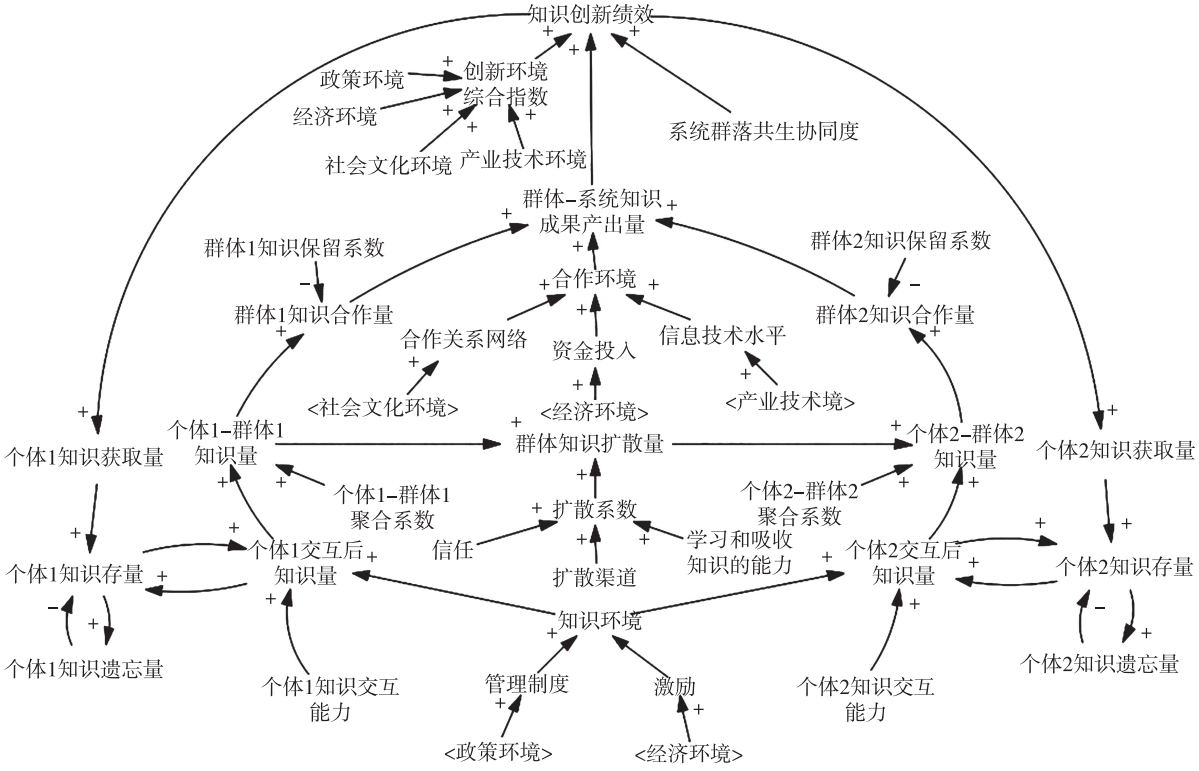


图 2　科技创新生态系统知识涌现因果关系

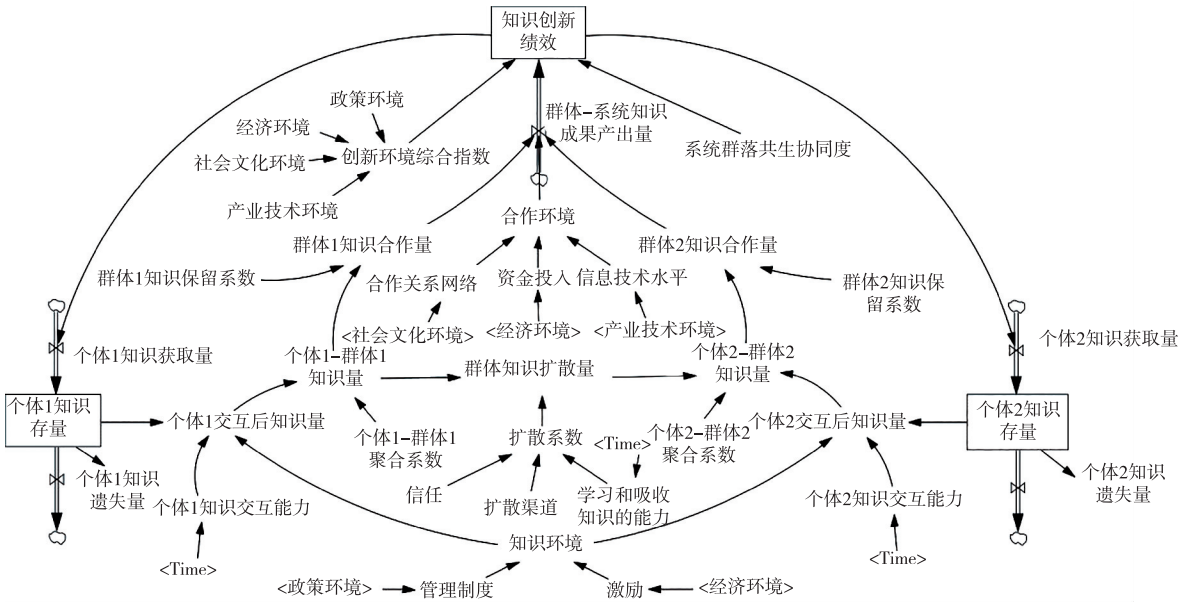


图 3　科技创新生态系统知识涌现系统流

本文参考现有文献、结合《中国高技术产业统计年鉴(2023)》及中国创新指数等统计数据,经过多次迭代调整与模拟测试,最终确定变量方程和参数。个体层、群体层、系统层的相关变量及方程说明如表2、表3、表4所示。

1. 个体层

阶跃函数 STEP 描述事件在特定时间点的突变,个体知识遗忘始于知识获取一段时间后,故 L3、L8 采用该函数;表函数 WITH LOOKUP 通过数据表定义输入、输出,个体知识交互能力随时间变化,故 L4、L9 采用该函数。

表 2 个体层相关变量及方程

代码	变量	类型	方程	说明
L1	个体 1 知识获取量	速率变量	L1=知识创新绩效×0.6+5	个体 1 能获取知识创新绩效的 60%,无该绩效时外部知识获取量为 5
L2	个体 1 知识存量	状态变量	L2=INTEG(个体 1 知识获取量-个体 1 知识遗失量, 10)	个体 1 的知识存量由个体 1 的知识获取量与知识遗失量共同决定
L3	个体 1 知识遗失量	速率变量	L3=STEP(个体 1 知识存量×0.15, 2)	个体 1 从第 2 步开始遗忘,知识遗忘系数为 0.15
L4	个体 1 知识交互能力	辅助变量	L4=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(60,1)],(0,0.5),(60,1)))	个体 1 的知识交互能力持续提升
L5	个体 1 交互后知识量	辅助变量	L5=个体 1 知识存量×个体 1 知识交互能力×知识环境+个体 1 知识存量	个体 1 交互后知识量=个体 1 自身知识存量+交互新增知识量
L6	个体 2 知识获取量	速率变量	L6=知识创新绩效×0.4+3	个体 1 能获取知识创新绩效的 40%,无该绩效时外部知识获取量为 3
L7	个体 2 知识存量	状态变量	L7=INTEG(个体 2 知识获取量-个体 2 知识遗失量, 2)	个体 2 的知识存量由个体 2 的知识获取量和知识遗失量共同决定
L8	个体 2 知识遗失量	速率变量	L8=STEP(个体 2 知识存量×0.25, 2)	个体 2 从第 2 步开始遗忘,知识遗忘系数为 0.25
L9	个体 2 知识交互能力	辅助变量	L9=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(60,2)],(0,0.3),(60,0.6)))	个体 2 的知识交互能力持续提升,但比个体 1 低
L10	个体 2 交互后知识量	辅助变量	L10=个体 2 知识存量×个体 2 知识交互能力×知识环境+个体 2 知识存量	个体 2 交互后知识量=个体 2 自身知识存量+交互新增知识量
L11	管理制度	常量	L11=0.5×政策环境	政策环境对管理制度的影响中等
L12	激励	常量	L12=0.6×经济环境	经济环境对激励的影响较强
L13	知识环境	常量	L13=(管理制度+激励)/2	管理制度和激励影响知识环境

2. 群体层

主体学习和吸收知识的能力随时间变化,故 L21 采用表函数;条件判断函数 IF THEN ELSE 可按条件选择结果,个体交互后知识量达到阈值才会引发个体知识聚合,产生个体—群体知识量(未达阈值则为零),故 L15、L17 采用该函数;平滑函数 SMOOTH 描述存在时间延迟的渐进过程,群体间知识扩散、扩散系数变化及群体间知识合作均具有延迟特征,故 L18、L22、L24、L26 采用该函数。

表 3 群体层相关变量及方程

代码	变量	类型	方程	说明
L14	个体 1-群体 1 聚合系数	常量	L14=0.55	
L15	个体 1-群体 1 知识量	辅助变量	L15=IF THEN ELSE(个体 1 交互后知识量>=30, 个体 1 交互后知识量×"个体 1-群体 1 聚合系数"×2.2,0)	引入加权聚合函数,按差异化权重(0.25、0.45、0.65、0.85)表示个体 1 的 4 个关联个体对群体知识存量的不同贡献

续表3

代码	变量	类型	方程	说明
L16	个体 2-群体 2 聚合系数	常量	L16=0.25	
L17	个体 2-群体 2 知识量	辅助变量	L17=IF THEN ELSE(个体 2 交互后知识量>=12, 个体 2 交互后知识量×"个体 2-群体 2 聚合系数"×2.2+群体知识扩散量, 0)	同个体 1-群体 1 知识量
L18	群体知识扩散量	辅助变量	L18=SMOOTH(扩散系数×"个体 1-群体 1 知识量", 1)	群体知识扩散量变化存在 1 个时间单位的延迟
L19	信任	常量	L19=0.2	信任对扩散系数影响权重为 0.2
L20	扩散渠道	常量	L20=0.3	扩散渠道对扩散系数影响权重为 0.3
L21	学习和吸收知识的能力	辅助变量	L21=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(60,0.8)],(0,0.8),(10,0.8),(20,0.8),(30,0.8),(40,0.6),(50,0.4),(60,0.2)))	知识扩散过程中可学习和吸收的知识量逐渐减少
L22	扩散系数	辅助变量	L22=SMOOTH(信任×学习和吸收知识的能力×扩散渠道, 1)	扩散系数变化存在 1 个时间单位的延迟
L23	群体 1 知识保留系数	常量	L23=0.08	群体 1 积极开展跨群体合作,知识传递保留率 8%
L24	群体 1 知识合作量	辅助变量	L24=SMOOTH("个体 1-群体 1 知识量"×(1-群体 1 知识保留系数), 2)	群体 1 知识合作量变化存在 2 个时间单位的延迟
L25	群体 2 知识保留系数	常量	L25=0.05	群体 2 知识量低于群体 1,知识传递保留率 5%
L26	群体 2 知识合作量	辅助变量	L26=SMOOTH("个体 2-群体 2 知识量"×(1-群体 2 知识保留系数), 2)	群体 2 知识合作量的变化存在 2 个时间单位的延迟
L27	合作关系网络	常量	L27=社会文化环境×0.4	社会文化环境对合作关系网络的影响较弱
L28	资金投入	常量	L28=经济环境×0.6	经济环境对资金投入的影响较强
L29	信息技术水平	常量	L29=产业技术环境×0.8	产业技术环境对信息技术水平的影响极强
L30	合作环境	常量	L30=(资金投入+合作关系网络+信息技术水平)/3	资金投入、合作关系网络、信息技术水平影响合作环境

3. 系统层

群体—系统知识成果的产出、整个系统知识创新绩效的生成均需要一段时间的延迟,故 L31、L38 用平滑函数表示。

表 4　系统层相关变量及方程

代码	变量	类型	方程	说明
L31	群体—系统知识成果产出量	速率变量	L31=SMOOTH(IF THEN ELSE(群体 2 知识合作量>0,(群体 1 知识合作量+群体 2 知识合作量)×合作环境, 0), 2)	群体—系统知识成果产出量变化存在 2 个时间单位的延迟

续表4

代码	变量	类型	方程	说明
L32	系统群落共生协同度	常量	L32=0.26	
L33	政策环境	常量	L33=0.1	
L34	经济环境	常量	L34=0.2	
L35	社会文化环境	常量	L35=0.3	
L36	产业技术环境	常量	L36=0.7	
L37	创新环境综合指数	常量	L37=(产业技术环境+政策环境+社会文化环境+经济环境)/4	创新环境综合指数涵盖产业技术、政策、社会文化及经济环境
L38	知识创新绩效	状态变量	L38=知识创新绩效= INTEG(SMOOTHI(系统群落共生协同度×"群体—系统知识成果产出量"×创新环境, 3, 0), 0)	知识创新绩效变化存在3个时间单位的延迟

部分变量参数设定的说明:

①《中国高技术产业统计年鉴(2023)》显示中部、东部与西部地区研发与试验发展人员数量比约为5∶1[25],结合个体1知识存量高于个体2的设定,L2初始值为10、L7初始值为2。

②依据文献,个体向群体知识聚合存在认知与信息处理壁垒[26],设定L14=0.55,反映聚合过程虽非高度有效,但足以实现一定程度的聚合;个体2知识存量与知识交互能力低于个体1,聚合能力也较低,故取L16=0.25。

③系统群落共生协同度表示知识群落间合作紧密程度,以《中国高技术产业统计年鉴(2023)》中创新合作企业在全部企业中占比为26%[25]为参考,设定L32=0.26。

④在国家统计局测算的2022年创新环境指数中,科技拨款占财政拨款比重、人均GDP、每万人就业人员中大专及以上学历人数、享受加计扣除减免税企业比重的年增速比约为0.1∶0.2∶0.3∶0.7[27],可分别代表政策、经济、社会文化和科技产业环境,对应设定L33=0.1、L34=0.2、L35=0.3、L36=0.7。

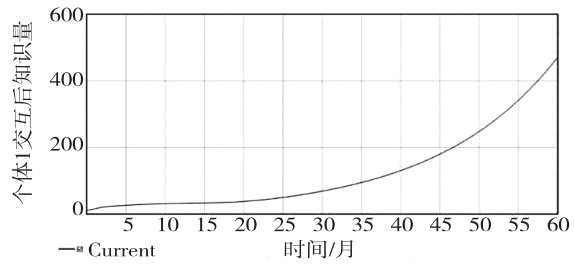
限于篇幅,其他变量参数不再一一说明,详见表2—表4。

(四)模型仿真分析

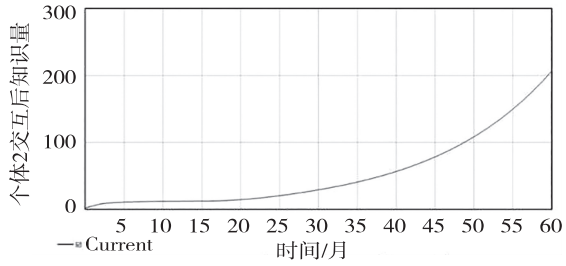
1. 仿真结果

设定仿真时长60个月、步长1个月,选取个体1交互后知识量、个体2交互后知识量、个体1-群体1知识量、个体2-群体2知识量、群体知识扩散量、群体—系统知识成果产出量、知识创新绩效作为主要观测变量,这些变量涵盖知识涌现多层级,是衡量各层级知识活动效果的关键指标,可全面反映其动态过程,既定参数下仿真结果见图4。

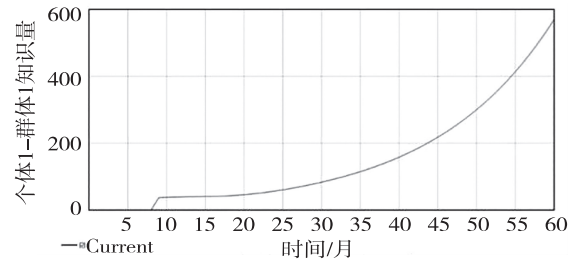
一方面,个体1和个体2的交互后知识量均不断增加,且个体1的增速与增幅均高于个体2[图4(a)(b)],因其知识存量、获取量及交互能力更优。个体交互后知识量达到阈值触发知识聚合,个体1-群体1知识量于第8个月达到临界点开始增长[图4(c)]。此后群体1进行知识扩散,群体知识扩散量开始增加[图4(e)]。另一方面,受限于知识存量与交互能力,个体2向群体层面的演化滞后至第10个月开始,并因获得群体1扩散的知识量加速增长[图4(d)]。群体1和群体2的知识合作产生了新知识成果,群体—系统知识成果产出量自第12个月起从零开始增长[图4(f)]。知识创新绩效由知识成果通过知识群落共生协同转化形成,存在时间延迟,于第14个月起步并持续上升[图4(g)]。仿真结果基本符合现实情况,表明该模型能够反映科技创新生态系统的知识涌现机制。



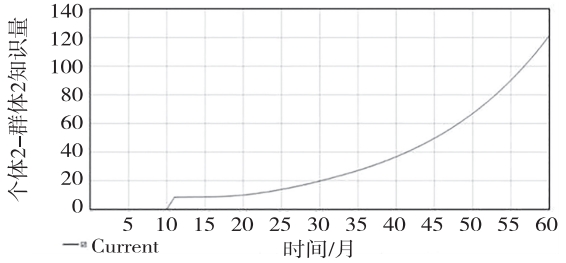
(a)个体 1 交互后知识量



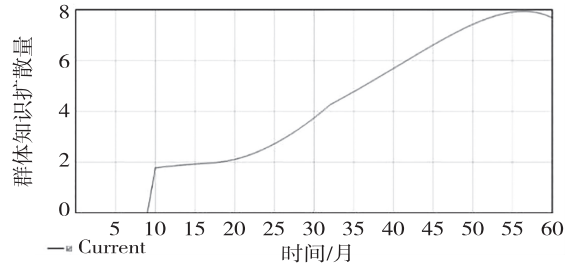
(b)个体 2 交互后知识量



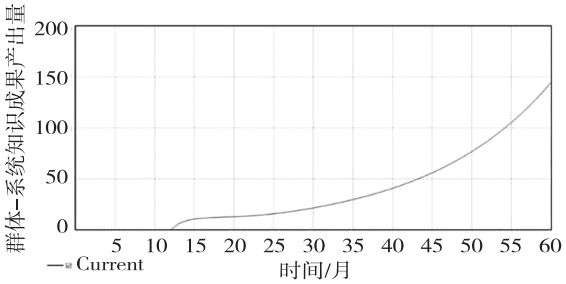
(c)个体 1-群体 1 知识量



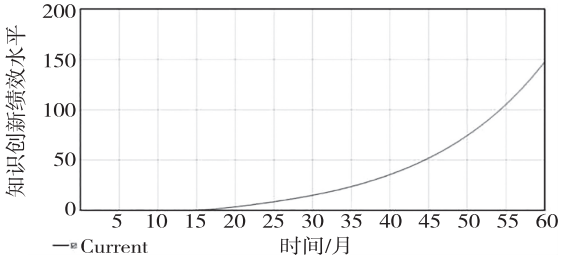
(d)个体 2-群体 2 知识量



(e)群体知识扩散量



(f)群体—系统知识成果产出量



(g)知识创新绩效

图 4　既定参数下的仿真结果

2. 灵敏度分析

本研究通过灵敏度分析,考察知识主体与知识环境两类因素对科技创新生态系统知识涌现的作用机制,以参数调整后主要观测变量的变化识别不同层级变量的影响力度。控制其他条件不变,知识主体方面,对个体知识交互能力、扩散系数、系统群落共生协同度进行±30%的参数调整;知识环境方面,选取涵盖产业技术、社会文化、经济及政策环境的创新环境综合指数,各维度作同等幅度调整。结果见表 5。

表 5　灵敏度分析结果

具体变量	对主要观测变量的影响效果	对知识创新绩效的影响效果
个体知识交互能力	各观测变量均增长,增幅关系:个体交互后知识量>个体-群体知识量>群体知识扩散量>群体—系统知识成果产出量>知识创新绩效	正向影响,影响力度较小

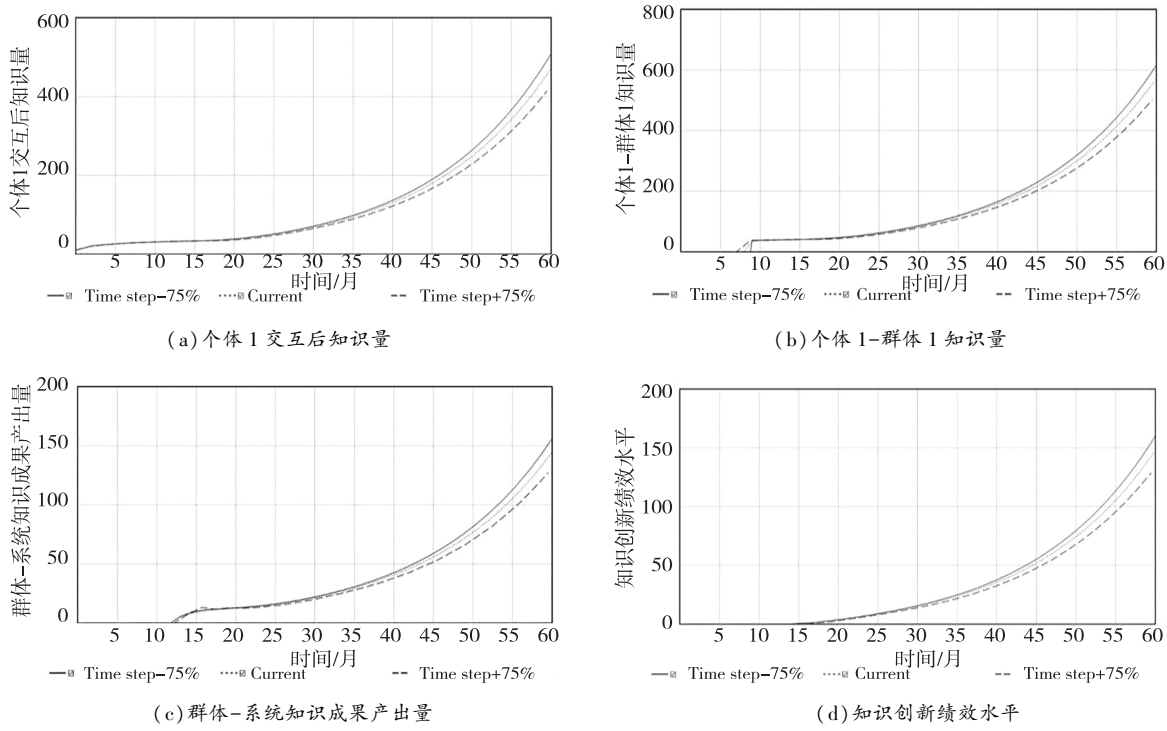
续表5

具体变量	对主要观测变量的影响效果	对知识创新绩效的影响效果
扩散系数	仅群体知识扩散量显著增长,其余观测变量增幅有限	正向影响,影响力度极小
系统群落共生协同度	各观测变量均有增长,且总体增幅大于个体知识交互能力的增幅	正向影响,影响力度较大
创新环境综合指数	各观测变量均增长,且总体增幅大于知识主体变量的增幅	正向影响,影响力度总体大于知识主体变量

结果表明,科技创新生态系统中知识环境对知识涌现的驱动作用强于知识主体,在知识主体内部,系统群落共生协同度作用较强。因此,优化综合创新环境、强化系统级协同,是促进系统知识涌现与提升创新绩效的关键路径。

3. 稳健性检验

参考已有文献,将步长分别减少 75%(Time step-75%)和增加 75%(Time step+75%),对比各层次观测变量仿真结果。结果如图 5 所示,3 种步长下模拟结构差异较小,模型稳健性良好。



(a)个体 1 交互后知识量　(b)个体 1-群体 1 知识量

(c)群体-系统知识成果产出量　(d)知识创新绩效水平

图 5　稳健性检验

五、科技创新生态系统知识涌现机制及优化措施

基于系统动力学仿真结果,本文识别出科技创新生态系统知识涌现的三大核心机制,在验证相关理论的基础上,进一步揭示跨层次互动中机制动态演化规律与特征,补充深化现有研究,并结合 WSR 系统方法论提出多维度优化措施。

(一)递增式累积促进机制

个体知识交互构成系统知识涌现的基础,知识持续累积至临界点将催生更高层级的知识结构。个体

交互能力的提升加速个体与群体知识量的增长,进而增加系统层知识成果与创新绩效的产出,呈现非线性递增特征。这一动态过程源于参与主体的增加及知识交互与协同网络规模的扩大,累积效应逐步释放,实现个体—群体—系统的跨层级递增式增长。该机制受两大因素驱动:个体知识交互能力作为内在动力直接促进知识流动与积累,创新环境综合指数作为外部条件通过制度激励等加速知识交互与合作,二者协同,保障机制高效运行。

已有研究虽已认识知识积累对创新的基础性作用[11][18],但局限于部分主体或层级分析,未揭示跨层级累积的递增式特征及临界转化规律。本研究通过仿真发现,知识累积随交互网络扩展与主体能力提升呈现非线性增长及边际效益递增,由此明晰了知识由量变到质变的转化路径,证实了个体交互能力与环境等要素协同放大累积效应的机理,深化了对知识涌现初始动力与加速机制的认识。

(二)自相似层级演化机制

科技创新生态系统中,知识涌现遵循“个体—群体—系统”的逐层递进机制,各层级以底层成果为基础形成连续演化链条。仿真结果表明,个体交互后知识量、群体知识量及系统层知识成果产出等关键变量虽属不同层级,均呈现初期缓慢增长、中后期显著加速的相似生长曲线,体现出跨层级自相似性。这一特征契合分形理论关于系统部分与整体结构相似的论述,表明系统通过各层级自我优化与适应共同驱动整体效能提升。创新环境综合指数作为关键影响因子,通过多维要素系统调控知识活动,推动层级演进与效能跃升;知识扩散系数的提升虽有助于流动,却须依赖与其他要素的协同方能奏效。

既往研究虽关注层级结构对知识涌现的影响[13],但未揭示不同层级演化的具体细节及其自相似性,亦缺乏对环境因素跨层级作用的系统考察。本研究基于复杂适应系统理论,提出契合分形理论的自相似层级演化机制,深化了“规模与结构效应协同触发涌现”[12]的观点,揭示层级演化既依赖量的积累,更遵循内在一致的演化逻辑。同时,研究明确了创新环境综合指数经层级渗透系统性影响知识涌现的路径,完善了环境因素的作用机理。

(三)正反馈创新循环机制

基于仿真分析,个体知识量增长呈先缓后快的趋势源于知识创新绩效的早期累积。绩效提升形成的知识资源跨层级传导至个体、群体与系统层面,推动整体绩效提升,构成正反馈创新循环。该机制中,前期知识积累与演化产出的成果转化为实际绩效后,经正向反馈为各层级注入创新动力与资源,激励知识交互与合作,催生更多创新成果,形成跨层级、自我强化的良性循环。系统群落共生协同度与创新环境综合指数是驱动该循环的关键要素:前者通过强化群落协作加速创新产出;后者直接促进成果转化,并通过优化知识环境与合作环境产生跨层反馈,形成环境层面的自增强循环,指数级放大环境效应,显著提升系统知识涌现效能。

本研究验证了知识治理协同演化及成果反哺等论述[14],构建了“个体积累—群体合作—系统共生—绩效反馈—个体再积累”的正反馈循环路径,明确系统群落共生协同度与创新环境综合指数为维系该循环的核心要素,将静态相关关系阐释为动态因果机制,揭示知识涌现通过多层次、带有时滞性的正反馈环路实现自我强化与持续演化的内在机理。

(四)科技创新生态系统知识涌现的优化措施

WSR 方法论以物理、事理、人理三维协同达成系统目标[28]。现有对策多未覆盖知识涌现全过程,缺乏系统多维视角。据此,本文基于“积累—演化—产出”三阶段及其内在机制,从上述 3 个维度构建整合性优化措施。积累阶段:拓宽知识获取渠道,搭建知识库与在线学习平台,依托社交媒体与专业论坛促进

分享;构建易用交互平台加速交流并催生创新方案;强化多元团队建设,吸纳多背景成员,建立信任评估机制,激发交互主动性。演化阶段:加强技术基建,加大设备更新投入力度,推广前沿技术;拓展知识扩散渠道,开展学术合作与竞赛等多样活动,借助传统及数字媒介扩大交流;建立战略合作,推动资源共享互补,探索新型合作模式。产出阶段:引导资源向知识密集型产业集聚,支持创新项目与成果转化;构建产学研协同体系,建立标准流程与评估体系,依托信息技术加速成果落地;培育创新文化,完善人才储备,通过政策激励激发社会参与。

六、结语

本文基于复杂适应系统理论,构建涵盖“个体—群体—系统”三层次的科技创新生态系统知识涌现系统动力学模型,通过仿真揭示知识涌现的三种核心机制:递增式累积促进机制、自相似层级演化机制与正反馈创新循环机制。研究表明,主体交互与环境优化共同驱动知识创新绩效提升,推动知识持续涌现。

受限于现阶段数据与认知深度,研究尚未结合实证案例进行比较分析,一定程度上影响了模型的现实解释力。未来研究应着力推进两方面工作:其一,构建多源异构数据融合体系,拓展数据来源;其二,对模型参数进行动态校准与优化,持续提升预测稳健性与现实解释力。

参考文献:

[1] 刘欣博, 张诗悦. 构建吉林省科技创新生态系统路径研究[J]. 长白学刊, 2023(5): 76-81.

[2] 储节旺, 安怡然, 李佳轩. 面向关键核心技术攻关的知识生态系统:融合、演化、协同与冲击[J]. 情报学报, 2023(3): 255-267.

[3] 王高峰, 杨浩东, 汪琛. 国内外创新生态系统研究演进对比分析:理论回溯、热点发掘与整合展望[J]. 科技进步与对策, 2021(4): 151-160.

[4] 张尧, 金福. 基于知识涌现行为的复杂自适应团队知识创新绩效管理研究[J]. 科技经济市场, 2022(4): 106-108.

[5] Magnanini S, Trabucchi D, Buganza T, et al. Collaborate as a flock in the organization: how selection and synthesis influence knowledge convergence within a complex adaptive system[J]. Journal of Knowledge Management, 2022(11): 142-165.

[6] 沈占波, 刘建泽, 王蒙. 创新生态系统内节点企业知识创新绩效影响机制——基于知识共享和网络嵌入视角的系统动力学仿真实践[J]. 科技管理研究, 2024(22): 143-154.

[7] 郝玉娟. 面向创新转化生态系统的知识管理模型构建与对策研究[J]. 情报科学, 2025(7): 131-138,150.

[8] 宁连举, 刘经涛, 肖玉贤, 等. 数字创新生态系统共生模式研究[J]. 科学学研究, 2022(8): 1481-1494.

[9] 马景文. 科技创新生态的主要特点和深层意义[J]. 活力, 2023(6): 86-88.

[10] 储节旺, 罗怡帆, 莫玲. 行动者网络理论下企业创新生态系统知识转移机制研究[J]. 情报理论与实践, 2023(11): 27-36.

[11] 张艳丽, 王丹彤. 创新生态系统视角下基于SD模型的企业知识创新研究[J]. 科学管理研究, 2020(4): 90-97.

[12] 李洁, 葛燕飞, 高丽娜. 我国生物医药产业创新集群演化动力机制研究——基于复杂适应系统理论[J]. 科技管理研究, 2022(3): 176-183.

[13] Su Y, Yan Y. The influence of the two-tier network of a regional innovation system on knowledge emergence[J]. Journal of Knowledge Management, 2023(9): 2526-2547.

[14] 许学国, 周诗雨, 刘凤梅. 考虑技术势差的创新生态系统知识治理研究[J]. 科研管理, 2025(1): 12-23.

[15] 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周牧, 韩晖,译. 上海: 上海科技教育出版社, 2000:12-35.

[16] 陶倩, 徐福缘. 基于机制的复杂适应系统建模[J]. 计算机应用研究, 2008(5): 1396-1399.

[17] 叶培华. 企业知识生态系统的涌现机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008:41-67.
[18] 和金生, 罗正清. 企业技术创新能力发展的知识增长模型研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2007(6): 56-60.
[19] 李玥, 钱科研, 姚锋敏, 等. 新兴产业创新服务的知识转移过程及仿真分析[J]. 系统工程, 2024(1): 27-36.
[20] 王道平, 周叶, 孙庆彬. 基于系统动力学的供应链知识扩散模型及其仿真研究[J]. 管理学报, 2012(11): 1706-1711.
[21] Yue Z, Xu H, Yuan G, et al. Modeling study of knowledge diffusion in scientific collaboration networks based on differential dynamics: a case study in graphene field[J]. Physica A: Statistical Mechanics And Its Applications, 2019(524): 375-391.
[22] 施宏伟, 王发年. 内生增长中的知识共生与科技信息效用优化[J]. 科学学研究, 2009(11): 1708-1711.
[23] 吴艳霞, 李宇殊, 梁志康. 区域创新生态系统协同模型构建及实证研究[J]. 开发研究, 2020(6): 15-23.
[24] 王其潘. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009:36-58.
[25] 国家统计局社会科技和文化产业统计司. 中国高技术产业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023:116-122.
[26] 王凤彬, 陈建勋. 跨层次视角下的组织知识涌现[J]. 管理学报, 2010(1): 17-23.
[27] 国家统计局. 2022 年中国创新指数比上年增长 5.9%[EB/ OL]. (2023-10-20)[2024-12-25]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202310/t20231020_1943765.html.
[28] 孙亚洲, 吕彬, 李晓松. WSR 方法论视角下的智库双螺旋问题研究范式探索——以我国高水平智库地域发展差异问题为例[J]. 科学管理研究, 2024(2): 24-31.

A System Dynamics Study on the Knowledge Emergence Mechanism in Science and Technology Innovation Ecosystems

YUAN Hong, XIAO Tang

(School of Management, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China)

Abstract: Knowledge emergence in science and technology innovation ecosystems drives the generation of new technologies and scientific progress. Revealing its operational mechanisms can help improve the innovation efficiency of these ecosystems. Drawing on complex adaptive systems theory, this study investigates the process of knowledge emergence from three levels: individual, group, and system, and constructs a system dynamics model with simulation experiments. The findings reveal that the knowledge emergence process is governed by three mechanisms: an incremental cumulative promotion mechanism, a self-similar hierarchical evolution mechanism, and a positive feedback innovation cycle mechanism. Both environmental factors and knowledge subject factors positively influence knowledge emergence, with environmental factors exerting a more significant effect. Based on these findings and in light of the WSR systems methodology, this study proposes optimization measures for knowledge emergence in science and technology innovation ecosystems.

Keywords: science and technology innovation ecosystem; knowledge emergence; system dynamics; complex adaptive systems theory

(责任编校:杨　睿)