

# 重大工程创新生态系统演化及创新力提升<sup>\*</sup>

□曾赛星 陈宏权 金治州 苏权科

**摘要:**不同于一般工程创新和企业创新,重大工程技术创新以需求为导向,是基于“目标锁定”的技术创新活动。重大工程创新生态系统的完备构建与有效运转对于重大工程的顺利实施和创新主体的价值共创具有重要意义。本文解构重大工程创新生态系统的创新主体构成,揭示重大工程创新生态系统的动态演化规律(主要表现为多主体共生竞合、多阶段交互演化、跨项目动态迁移),探讨创新场对于创新力提升的影响机理。基于港珠澳大桥工程案例,分析其创新生态系统的要素构成和动态演化,发现对于创新生态位专一和创新生态势较低的创新主体,创新生态网络对于其竞争力提升的效应更加明显。最后讨论了研究贡献和实践启示,以期对重大工程创新力提升提供理论依据。

**关键词:**重大工程 创新生态系统 生态位 生态势 创新孤岛 创新场

DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2019.0046

## 一、引言

重大基础设施工程(以下简称重大工程)是指投资规模巨大、实施周期长、技术异常复杂、对社会、经济及生态环境等影响深远的大型公共工程,如三峡工程、京沪高铁、南水北调、港珠澳大桥等(Sheng, 2018)。不同于一般工程,重大工程已突破传统建造方式,所涉及行业从建筑建材扩展到装备制造、节能环保及金融等(Larsson et al., 2014)。由于重大工程技术需求具有显著不确定性,这就需要跨组织、跨部门、跨行业、跨地区协同创新(Brockmann et al., 2016)。重大工程技术创新主体也从传统的设计承包方延伸至装备制造商、新材料供应商、信息技术和数据服务商、气象水文机构等(Roumboutsos & Saussier, 2014)。不同于一般企业技术创新,重大工程技术创新主体间相互嵌套,全生命期不同阶段(概念、立项、设计、施工、运营等)创新主体动态更替(Brockmann et al., 2016; Chen et al., 2018)。因此,重大工程创新呈现出技术复杂性、主体交融性和阶段动态性的特点。

重大工程创新生态系统是指在重大工程技术创新过程中,创新主体(包括业主、设计方、施工方、咨询机构、高校及科研机构、政府部门等)为重大工程面临的技术挑战寻求系统有效解决方案所形成的多主体联系紧密、交互演化的生态系统。与一般企业创新生态系统相比,重大工程创新生态系统具有一次性、独特性和动态性特征,因此,该系统是一个具有多主体、非线性、动态性、集成性的复杂系统。

由于重大工程技术创新越来越复杂,需要理论和实际工作者的关注点从传统技术创新体系向创新生态系统转变。创新生态系统是基于工程创新实践活动的具有“生命力”和“进化力”的平台。迄今为止,已有研究大多从企业、区域或国家创新体系的视角加以展开(Gawer & Cusumano, 2014; Oh et al., 2016),鲜有从重大工程创新生态系统视角出发开展研究,难以

<sup>\*</sup>本项研究得到国家自然科学基金重大项目(71390525)、国家自然科学基金重点国际(地区)合作项目(71620107004)和国家自然科学基金应急项目(71841021)的资助。感谢南京大学盛昭瀚教授和李迁副教授、华中科技大学王红卫教授、同济大学乐云教授和李永奎教授、广州大学薛小龙教授提出的宝贵意见。陈宏权为本文通讯作者。

为重大工程创新管理实践提供理论支撑。基于此,本文提出重大工程技术创新生态系统并解构其特征(以下简称“重大工程创新生态系统”),探究重大工程创新主体、创新群落演化规律,提出消融创新孤岛的机制,以推动重大工程的创新能力跃迁。

## 二、文献综述

关于重大工程技术创新的相关研究,现有文献多从承包商的创新驱动力和阻制加以展开。重大工程技术创新日益复杂(Brockmann et al., 2016),因而其创新应具有集成性、开放性和协同性等特点(Davies et al., 2009, 2014)。重大工程技术创新影响因素也越来越多,包括创新领导者、创新文化和组织能力等(Gil et al., 2012; Sergeeva & Zanello, 2018),同时重大工程技术创新还需要构建一系列的协同机制,包括组织沟通流程、供应链管理、激励措施等(Dodgson et al., 2015; Lehtinen et al., 2019)。迄今为止,现有关于重大工程技术创新的研究聚焦于静态的创新管理体系,解构创新主体如何通过创新策略或者治理实现重大工程技术创新。

近年来,国内外学者不断探索,先后提出了国家创新系统(Nelson, 1993)、区域创新系统(Cooke et al., 1997)、产业创新系统(Malerba, 2002)、企业创新系统(Adner, 2006)等。但创新生态系统的理论研究仍处于不断发展阶段(曾国屏等, 2013; 梅亮等, 2014),从基于CiteSpace的关键词共现网络(如图1所示)可以看出,现有关于创新生态系统的研究与产业、知识、技术、合作、价值创造和系统等关键词相关度较高。相关研究分别从企业网络(Iansiti & Levien, 2004)、技术协同(Adner, 2006; Adner & Kapoor, 2016)、创新平台(Gawer & Cusumano, 2014)等分析企业创新生态系统的特点、功能,强调核心企业与系统内部成员间的关系管理(Alexy et al., 2013; Williamson & De Meyer, 2012)。在企业创新生态系统中,创新主体的交互作用可以实现其创新能力的提升(吕一博等, 2015),例如通过竞合关系实现新产品开发(Moore, 1993; 戴智华、曾赛星, 2015)。由于研究视角不同、关注重点各异,现有文献关于企业创新生态系统结构、运行机制等的相关成果为本文研究奠定了坚实基础。

## 三、重大工程创新生态系统

### (一)重大工程创新生态系统的复杂性

基于“目标锁定”的重大工程技术创新具有前所未有的挑战性(Chen et al., 2018; Brockmann et al., 2016),关注创新要素的静态组合与线性结构、适于一般工程项目的技术创新体系难以满足重大工程创新需求(Cooke et al., 1997; Nelson, 1993)。因而,对于重大工程而言,需要从一般技术创新体系向创新生态系统演化。在重大工程创新生态系统中,创新主体不断涌现并在全生命期不同阶段以自组织、自调节和自适应的方式,通过资源和要素的有机整合,形成不同创新群落并不断耦合、演化以提升创新能力(Adner & Kapoor, 2010)。

### 1. 重大工程创新生态系统的生态势和生态位

现有组织生态学文献认为,组织生态位是指组织在生态系统中通过自身资源及其生

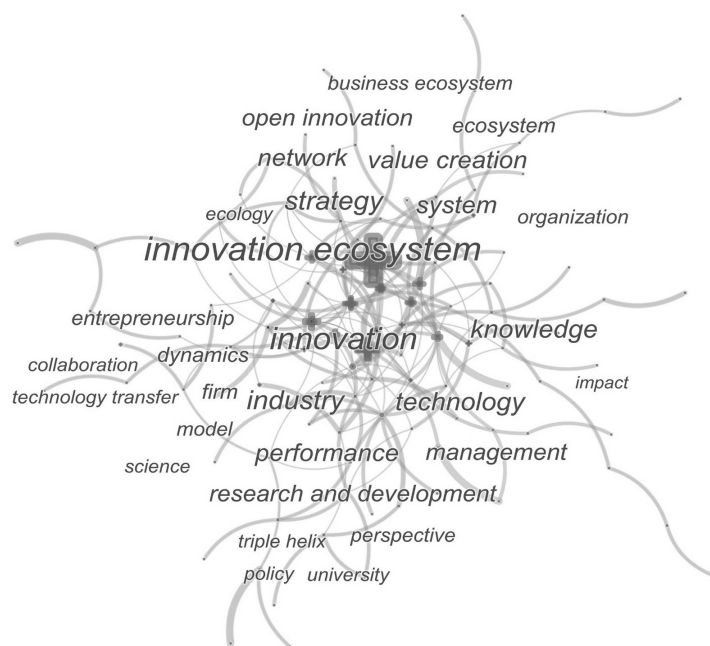


图1 创新生态系统研究关键词共现网络  
数据来源: ISI Web of Science 核心合集数据库。

产能力所获得的在生态系统中的空间位置,用于表征其在生态系统中提供产品或市场的范围(Baum & Singh, 1994; Hannan & Freeman, 1977)。基于此,本文认为在重大工程创新生态系统中,创新生态位是指创新主体通过自身努力所获得的与其他创新主体之间在创新生态系统中的位置关系,用于表征其技术创新领域跨度和范围(Podolny et al., 1996; Stuart & Podolny, 1996)。创新生态势是指创新主体在创新生态系统中的创新势能,强调其创新力。重大工程创新主体的生态势越高,其创新能力越强,其在创新生态系统中的重要性越突出。

## 2. 重大工程创新生态系统的社会经济属性

在重大工程创新生态系统中,除了重大工程创新种群(Hannan & Freeman, 1977)、创新群落(Moore, 1993)和创新生态网络(Carayannis et al., 2018)等基本构成要素以外,环境要素也是生态系统正常运行至关重要的保障,包括合理的创新制度、创新文化和创新政策等。创新主体的多样性是保障创新生态系统基本功能的必要条件,此外,任何创新要素的缺失都会导致生态位空置,容易形成创新孤岛(Chen et al., 2018)。

创新生态系统中的生态网络是知识交换和信息传递的基本通道,是技术创新能力提升的基本路径,也是创新资源有效配置的通路(Zeng et al., 2010)。同时,创新主体的涌现性及协同性是重大工程创新生态系统的重要特征(Iansiti & Levien, 2004)。因此,重大工程创新生态系统需要创新主体多样、创新网络健全、创新要素完备。

### (二)重大工程创新生态系统的动态性

重大工程创新生态系统具有多主体共生竞合、多阶段交互演化和跨项目动态迁移的特征。

#### 1. 多主体共生竞合

在重大工程创新生态系统中,创新群落之间表现为共生关系、竞争关系和合作关系3种模式(Baum & Singh, 1994; Hannan & Freeman, 1977; Sergeeva & Zanello, 2018),其逻辑关系如图2所示。共生关系是指重大工程创新主体之间互相依赖,为解决重大工程技术难题或瓶颈共同努力,实现技术突破。竞争关系是指不同创新主体之间相互竞争,通过自身比较优势完成重大工程技术创新。合作关系是指不同创新主体之间通过合作联盟或项目合作等方式,实现技术交换、知识转移和信息共享,完成重大工程技术创新。

随着技术挑战日益显著和新兴技术不断涌现,重大工程对于不同新技术融合的需要大大增加(Rose & Manley, 2012; 盛昭瀚等, 2009),例如ICT技术促进工程智能化建造和运营维护,建筑新材料引领工程设计创新,机器人技术推动重大工程构建工厂化、智能化建造,跨行业跨群落的新技术涌现与融合也是重大工程创新生态系统的特点(Gann & Salter, 2000; Rose & Manley, 2012)。

以港珠澳大桥工程为例,在其人工岛工程的建造防护结构技术难题中,项目团队获得了来自日方企业和中方企业的技术方案(两者均可被认为是创新生态系统中的核心创新主体),前者提出了传统的钢板桩方案,后者提出大规模圆钢筒施工方案,最终港珠澳大桥采用后者提出的圆钢筒方案。两者在港珠澳大桥的创新生态系统中则表现出竞争关系;而在沉管隧道安装过程中,卫星通讯行业企业和中交集团则是合作共生关系,通过彼此间的知识交换和共享,实现沉管隧道安装过程的技术创新,解决安装过程的流沙问题等;中铁山桥集团的技术创新则依赖于港珠澳大桥项目供给,而港珠澳大桥的高标准则依赖于中铁山桥集团在钢箱梁生产方面的技术创新,两者呈现共生关系。

#### 2. 多阶段交互演化

在创新生态系统中,不同创新主体之间通过某种关系形成创新群落,创新群落

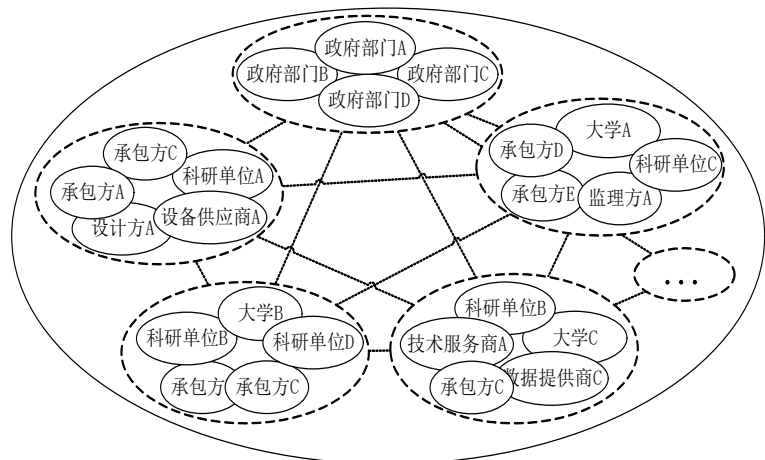


图2 重大工程生态系统跨群落共生竞合关系



之间的紧密联系保证了创新生态系统的交互演化,促进其向系统协同和共生转变。创新生态系统强调各创新主体之间通过自身资源和初始生态位,与其他创新主体之间关联互动,通过自组织和自适应,实现不同创新主体共同进化。

工程可靠性文化和一次性特点往往阻碍重大工程的突破性创新(Barlow & Köberle-Gaiser, 2009)。现有项目管理知识体系导致工期、质量、成本和安全等刚性约束(Keegan & Turner, 2002),此外,重大工程的独特性带来的知识粘滞性,导致建立和维持此类工程创新网络会耗费成本,阻碍新技术、新工法等人在重大工程创新主体间流动与吸收(Dodgson et al., 2007; von Hippel, 1994)。

不同于一般企业,重大工程创新生态系统中,创新主体保持共生合作、交互演化,在全生命期不同阶段通过不同创新范式(如集成创新、协同创新、开放创新等)以满足重大工程创新需求(Chen et al., 2019; Davies et al., 2009)。

### 3. 跨项目动态迁移

在不同的重大工程项目中,由于项目特性和技术难度的差异,创新主体构成明显不同(Chen et al., 2018; Engwall, 2003)。即使同一创新主体在不同的创新生态系统中,其创新活动和创新职能存在差异,其生态位和生态势亦表现出异质性。

不同于一般企业创新生态系统,重大工程创新生态系统强调不同创新主体在不同工程项目中的创新势能。因此,重大工程的创新生态系统还存在创新势能的溢出效应,即表现为某一技术创新成果可以通过创新生态系统转移到另一重大工程系统中,通过扩散、转化促进该创新生态系统的发育和进化。

#### (三)重大工程创新生态系统与创新力提升

具有不同生态位和生态势的创新主体通过自组织和自适应过程完成创新生态系统构建,形成有机、有序、动态平衡的“创新场”。创新场是从创新要素集聚到创新力聚变的基本涌现(丁荣余, 2018),也是重大工程创新力跃迁的重要保障。

在重大工程创新生态系统中,具有不同生态位和生态势的创新主体通过资源互补和交叉互动的方式连接成不同结构的创新生态网络(Gomes et al., 2018; Iansiti & Levien, 2004)。不同创新主体根据其创新生态势和生态位形成具有场吸附能力和场扩散能力的创新场,从而在创新场域内能够实现创新资源的叠加共振,并在知识融合和功能协同的作用下,实现创新主体的创新力提升。

重大工程创新场是基于创新主体生态位和生态势的场域映射,重大工程创新场的创新推动力来自于创新主体的有机融合、动态协同和互动演化。具有不同生态位和生态势的创新主体通过“开发”、“共生”、“演化”等自组织行为形成创新场,对外形成创新资源吸附能力,对内形成创新要素整合能力。创新场的吸附能力促进创新主体的有机融合,保证其创新主体的自我更替和不断涌现的有序调控;创新场的扩散能力促进创新主体动态协同,实现创新主体在创新功能和组织学习方面协同;同时,创新场的吸附和扩散能力的交互作用,促进创新主体的自我进化以实现创新能力的跃迁。

因此,具有宽生态位和高生态势的创新主体融入到重大工程创新生态系统中,形成高能的创新场,产生创新场域内叠加共振,引发创新生态系统重构,实现创新资源从线性积累到曲线跃升,提升整体创新生态系统的创新力。

## 四、案例研究

港珠澳大桥是我国目前建成长度最长,技术难度最大的跨海大桥,横跨香港、珠海和澳门三地,表现出高度复杂技术的创新需求(Zhu et al., 2018)。港珠澳大桥从设计到建造完成,产出了一系列创新成果,包括创新工法、创新软件、创新装备、创新产品及专利等。已有研究表明,专利可以用于刻画创新主体的技术创新绩效,而专利申请单位的网络关系可以刻画在重大工程技术创新主体之间网络关系的逻辑演化(Baum & Singh, 1994; Fischer & Leidinger, 2014)。基于此,本文采用港珠澳大桥相关专利申请和授予数据,通过构建专利申请

人合作关系网络图,分析港珠澳大桥创新生态系统的要素构成和演化逻辑,并研究其创新生态网络结构对于创新力的影响。

本文研究的数据主要来自于 Incopat 专利数据库和 SIPO 专利数据库。首先,在 Incopat 专利数据库共获得 390 项与港珠澳大桥相关的专利,其中 99.74% 专利属于发明专利和实用新型专利。其次,为了进一步测量创新主体的创新能力,共获得相关企业的 12526 项专利,通过计算 3 年内的平均专利价值度以度量其创新能力,为保证数据可靠性,本文同时采用前 5 年的平均专利价值度。同时,本文同时检索 SIPO 专利数据库,与现有数据一致。

### (一)创新生态系统的主体构成

从创新主体类型来看,港珠澳大桥创新生态系统包含了创新核心主体,例如政府部门、设计方、承包方、监理方、科研机构、大学等,还涵盖了航空航天企业、新材料提供商、装备制造企业等创新扩展主体(如图 3)。

从技术演化趋势来看,在项目初期,创新主体主要围绕施工技术等创新活动展开,例如水利基础施工技术、道路桥梁施工技术等,并在 2015 年达到峰值。同时,创新主体也开展其他类型的创新活动,包括新材料研发、装备制造研发、数据处理预测技术等(如图 4)。

从行业分布特征来看,专利除涉及传统土木工程建筑业外,还有约 42% 的专利来自于仪器仪表制造业、专用设备制造业等其他行业(见表 1),反映了重大工程创新生态系统中来自于其他行业创新主体的积极融入,体现了重大工程创新的集成性。

### (二)创新生态系统的动态演化

#### 1. 创新生态网络演化

基于 UCINET 软件和 Gephi 软件,根据专利申请人的关联关系,绘制出港珠澳大桥创新生态网络演化图(如图 5 所示)及网络关系强度图(如图 6 所示)。图 5 表明在项目建设前期,创新生态系统中覆盖较少的创新主体,以承包商和主管部门为主。随着工程建设逐步推进,越来越多创新主体加入并形成创新生态网络,进而构建了创新生态系统。从图 6 可以看出,主管部门(港珠澳大桥管理局)在创新生态网络中的网络节点较大,一方面显示其在创新生态网络中突出的管理和协调能力,另一方面也凸显其技术人员在创新生态系统发挥的重要作用。

从创新群落视角来看,在项目前期,创新活动呈现出明显的孤岛现象(Chen et al., 2018),该阶段创新群落表现出明显的割裂状态。从纵向维度看,由于重大工程全生命周期不同阶段所导致的创新资源割裂,易于形成创新孤岛(Sheffer & Levitt, 2012);从横向维度看,重大工程需要不同专业化主体间承担不同项目,难以分享资源和知识,进而形成创新孤岛(Chen et al., 2018)。因此,在创新孤岛显现的状态下,创新资源难以实现高

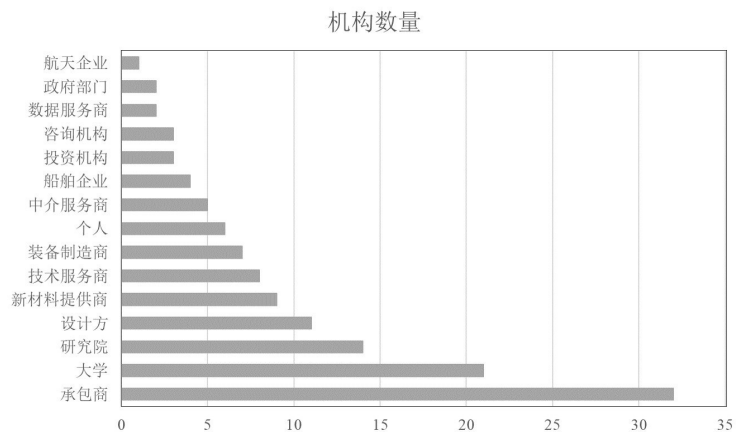


图3 专利申请机构类别图

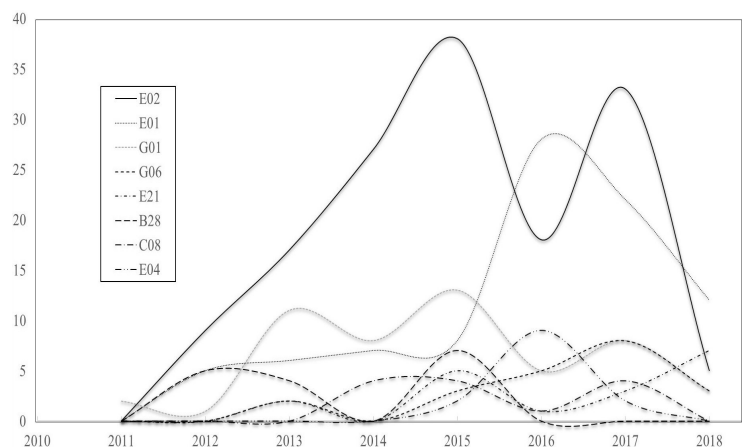


图4 港珠澳大桥专利技术申请趋势图

注:该图表示为创新技术类型的演化趋势,选取前8类IPC大类。

表1 港珠澳大桥专利申请隶属行业(前10大类行业)

国民经济行业分类	E48	C40	C35	C34	C39	C30	C26	C33	C37	C25
专利数量	224	48	34	18	16	15	14	7	5	2

效互动,阻碍创新生态系统内的组织学习、知识互补和创新耦合,创新主体的共同进化难以实现。

结合图5和图6来看,由于重大工程创新网络复杂度更高、动态性更强,多样性和网络异质性更加明显,需要来自不同部门、不同行业 and 不同地区的创新主体参与到创新活动中,创新生态系统中创新主体的合作关系

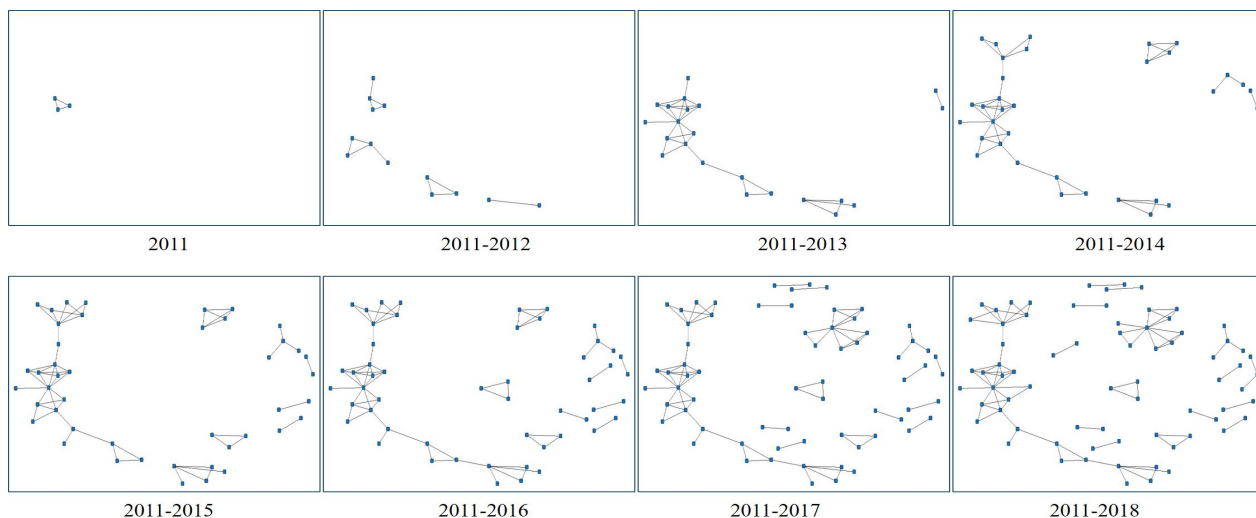


图5 港珠澳大桥专利关系网络演化图



图6 港珠澳大桥专利关系网络图

注:节点大小表明其在创新生态网络中的连接其他创新要素的数量,亦是创新网络中心度。



越来越紧密,创新孤岛现象得以逐渐消除。

## 2. 创新生态位和生态势演化

创新生态势是指创新主体通过其创新能力所获得的在创新生态系统中的作用,表现为其在创新生态系统中的创新势能。创新生态位是指创新主体在创新生态系统中的技术创新领域跨度和范围。为刻画创新主体的生态位和生态势在全生命期不同阶段的交互演化特征,本文通过计算各单位申请专利的领域类型总计来刻画其创新生态位(Baum & Singh, 1994);计算其在重大工程创新生态系统中申请的专利价值总和,来刻画创新主体在创新生态系统中的创新生态势。

专利价值度可以按照专利战略价值和专利保护价值两个维度来测算(Wang & Hsieh, 2015)。

$$Patent\ Value = \sum_{i=1}^5 \alpha_i S_i + \sum_{i=1}^5 \beta_i P_i \quad (1)$$

基于公式(1), $S_i$ 是指专利战略价值指标:专利类型、同族专利引用数量、专利涵盖IPC子领域数量、是否发生许可或转让、研发申请人员数量(Fischer & Leidinger, 2014; Harhoff et al., 2003; Lerner, 1994)。 $P_i$ 是指专利保护价值的指标:权利要求数量、是否有诉讼行为、是否有质押保全、是否提出复审请求、是否被宣告无效(Gitelman & Kogut, 2003; Wang & Hsieh, 2015)。

本文选取了在港珠澳大桥创新生态系统中申请专利数量排名前10位的创新主体,绘制创新生态位和创新生态势动态演化图,如图7所示。可以看出承包商仍然承担最主要的创新职能,其次是科研机构和设备提供商;不同创新主体在创新生态系统中呈现出不同的演化特征,一部分创新主体的生态势和生态位在前期缓慢上升,而另一部分创新主体在后期保持平稳状态。

同时,随着创新生态系统中创新主体的不断交互演化,其创新能力不断增强。在创新生态势的变化过程中,积极参与创新的主体随着创新生态系统的演化而不断成长,两者均表现出显著的相关性。

### (三) 创新生态网络结构与创新力分析

为检验创新生态系统中网络结构对于创新主体创新力的影响,本文计算创新生态网络中创新主体的中心度和创新主体的平均专利价值度。

由于重大工程创新主体间的异质性,本文剔除科研院所及高校、政府部门等单位,仅聚焦于重大工程创新生态系统中的企业,剔除缺失数据后共获得404个样本。根据公式(1),以3年为周期,计算出每个企业平均专利价值度。其次,基于创新生态网络计算创新网络中心度(Centrality),测量方法如公式(2)所示。

$$C_d(N_i) = \sum_{j=1}^n x_{ij} (i \neq j) \quad (2)$$

式中, $C_d(N_i)$ 表示创新主体的中心度程度, $x_{ij}$ 表示创新主体*i*与创新主体*j*共同申请专利。

为控制企业层面和区域层面的其他要素对于企业创新力的影响,控制变量选取企业年龄(Age)、企业规模

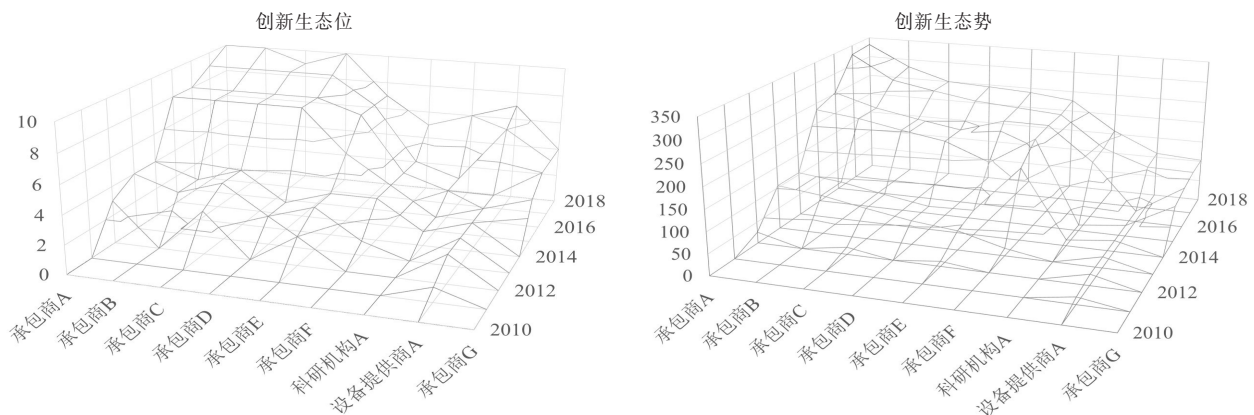


图7 重大工程创新生态位和创新生态势动态演化图

(Size)、区域发展水平(Regional Development)、是否隶属于商业集团(Business Group)、是否是高科技企业(High-tech)、年度和行业的固定效应。现有文献发现专利被引频次(Patent Citations)与专利价值(Patent value)和创新质量有显著的正相关关系(Fischer & Leidinger, 2014; Gitelman & Kogut, 2003),本文还计算专利的平均被引频次来进行稳健性检验。考虑到专利价值度和专利平均被引次数的偏态性,对其取对数之后再进行分析。描述性统计分析如表2所示。

基于广义估计方程估计模型(结果如表3所示),发现创新主体中心度可正向影响创新主体的专利平均价值度( $b=0.434$ ,  $p<0.001$ ),即创新主体在生态系统中的中心度越高,其创新能力越强。同时,为比较具有不同创新生态位和生态势的创新主体在创新生态系统中的创新力提升的差异效应,本文将其分为高生态势和低生态势、高生态位和低生态位4组样本(结果如表3所示)。基于Chow检验,创新生态势不同的创新主体在该效应方面存在显著差异( $p<0.001$ ),结果表明创新生态势越低的创新主体,创新生态网络中心度对于其创新价值度正向效应越明显;同理,创新生态位不同的创新主体在此效应方面存在显著差异( $p<0.001$ ),结果表明创新生态位越专一的创新主体,创新生态系统中心度对于其创新价值度的正向效应越明显。上述结果表明,在重大工程创新生态系统中,创新主体通过提高其在创新生态系统的活跃度,通过吸附效应增加其中心度,可有效促进其创新力提升。

为保证模型稳健性,本文采用专利的平均被引频次来测算其创新质量(Gittelman & Kogut, 2003)。分析结果(如表4所示)与前文所述一致( $b=0.449$ ,  $p<0.001$ ),即创新主体的创新生态网络中心度越高,其创新能力亦越强。同时通过Chow检验来验证分样本的差异性,研究结果与前文

表2 描述性统计分析

变量	均值	方差	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Patent value	4.919	2.495	1.000							
2. Patent Citations	1.327	1.606	0.421*	1.000						
3. Centrality	1.022	1.707	0.282*	0.002	1.000					
4. Age	17.374	8.833	0.302*	0.052	0.249*	1.000				
5. Size	9.838	2.216	0.182*	0.057	0.075	0.328*	1.000			
6. Regional Development	6.821	2.459	0.219*	-0.108*	0.183*	0.180*	-0.164*	1.000		
7. Business group	0.488	0.500	0.185*	0.185*	0.362*	0.348*	0.043	0.041	1.000	
8. High-tech	0.564	0.496	0.172*	0.186*	0.029	0.113*	-0.005	0.335*	0.028	

表3 创新生态系统中心度与创新主体创新力的关系

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)	模型(5)	模型(6)
	全样本	全样本	高生态势 创新主体	低生态势 创新主体	高生态位 创新主体	低生态位 创新主体
因变量: 专利平均价值度						
Age	0.293** (0.119)	0.263** (0.110)	0.035 (0.033)	0.325** (0.129)	0.123 (0.108)	0.553*** (0.173)
Size	1.260** (0.536)	1.275** (0.496)	0.034 (0.200)	1.532*** (0.570)	1.052** (0.507)	1.234* (0.732)
Regional Development	0.549 (0.439)	0.453 (0.409)	-0.198 (0.150)	0.552 (0.485)	0.164 (0.359)	0.019 (0.759)
Business group	-0.229 (2.062)	-1.190 (1.925)	-1.113 (1.148)	-0.309 (2.196)	0.348 (1.933)	-9.449*** (3.185)
High-tech	0.754 (2.023)	0.888 (1.874)	1.431** (0.689)	1.755 (2.153)	-0.262 (1.651)	6.734** (3.010)
Centrality (Log)		0.434*** (0.112)	0.186* (0.096)	0.616*** (0.134)	0.192* (0.114)	1.018*** (0.210)
Year fixed effect	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Industry fixed effect	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Constant	-28.185*** (9.415)	-20.417** (8.940)	-1.109 (2.936)	-24.600** (10.048)	-14.108** (6.590)	-22.680* (13.769)
Number of observations	404	404	110	325	266	138
Chi-squared	122.275	148.134	50.494	147.612	43.402	180.622
P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: \* $p<0.1$ , \*\* $p<0.05$ , \*\*\* $p<0.01$ 。

表4 创新生态系统中心度与专利被引频次的关系

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)	模型(5)	模型(6)
	全样本	全样本	高生态势 创新主体	低生态势 创新主体	高生态位 创新主体	低生态位 创新主体
因变量: 专利平均被引用次数						
Age	0.277** (0.122)	0.246** (0.113)	0.012 (0.029)	0.309** (0.130)	0.092 (0.121)	0.544*** (0.166)
Size	1.504*** (0.552)	1.521*** (0.510)	0.119 (0.178)	1.822*** (0.579)	1.439** (0.567)	1.340* (0.708)
Regional Development	0.472 (0.446)	0.382 (0.415)	-0.354*** (0.133)	0.447 (0.486)	0.025 (0.398)	-0.063 (0.727)
Business group	-0.299 (2.121)	-1.296 (1.973)	-1.015 (1.019)	-0.672 (2.227)	0.767 (2.167)	-10.311*** (3.069)
High-tech	1.316 (2.080)	1.444 (1.923)	2.497*** (0.605)	2.353 (2.179)	0.312 (1.853)	7.053** (2.903)
Centrality (Log)		0.449*** (0.102)	0.203** (0.091)	0.610*** (0.119)	0.245** (0.106)	0.938*** (0.189)
Year fixed effect	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Industry fixed effect	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Constant	-31.542*** (9.674)	-23.572*** (9.119)	-2.944 (2.671)	-28.228*** (10.178)	-18.458** (7.274)	-24.967* (13.133)
N	404	404	110	325	266	138
Chi-squared	107.721	138.515	91.058	142.779	43.426	176.199
P value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: \* $p<0.1$ , \*\* $p<0.05$ , \*\*\* $p<0.01$ 。



一致(高低生态势样本: $p<0.001$ ;高低生态位样本: $p<0.001$ ),即创新生态势较低和创新生态位较专一的创新主体,其中心度越高,其专利被引频次越高。该结论也印证了创新生态系统的扩散效应,即当创新主体位于中心度较高的生态系统中,其创新场越强,活跃度越高,与其他创新主体的互动越多,技术创新成果更容易扩散到其他创新主体,因而其专利被引用频次也会增多。

## 五、研究结论与展望

本文分析了重大工程创新生态系统的基本特征,主要表现为多主体共生竞合、多阶段交互演化和跨项目动态迁移。通过考察重大工程创新生态系统的运行状态,本文揭示了创新生态位和创新生态势的内涵,解析创新场对于重大工程创新力提升的作用机理;基于港珠澳大桥的相关专利数据,刻画其创新生态网络,分析创新主体构成、动态演化及其对于创新力提升的影响效果。本文发现在重大工程创新生态系统中生态位较专一和生态势较低的创新主体,创新力将得到更大的提升。

### (一)研究贡献

本文研究基于创新生态系统理论,并结合港珠澳大桥工程案例,分析重大工程创新生态系统的演化特征和创新力提升的影响机理,考察创新主体的涌现过程、创新主体生态位和生态势的交互变化,证实了重大工程创新孤岛现象。主要理论贡献包括:

第一,率先给出重大工程创新生态系统对于创新力提升的理论解释。基于创新生态势和生态位视角,本文提出重大工程创新生态系统的创新场概念,分析创新场对于提升重大工程创新力的作用机理。通过创新生态位明晰以及创新生态势合理匹配能够有效地形成创新场,创新场的有机融合和动态协同能促进创新生态系统健康运转,创新主体的生态位不断演变和生态势不断提升,促进创新力的非线性增长、重大工程创新生态系统螺旋上升,完成创新生态系统的进化。

第二,揭示了不同生态位和生态势的创新主体在重大工程创新生态系统中获得创新力提升的效应差异。现有研究主要关注企业在创新生态系统中网络位置如何帮助其获得更多价值。本文发现,具有不同创新生态位和生态势的企业,其通过创新生态网络所获得的创新力提升的效应存在明显差异性,主要表现为生态位专一的创新主体通过重大工程创新生态系统的培育和演化,可以获得更大程度上的创新力提升,说明“工匠精神”在重大工程创新生态系统的重要性;同时,创新生态势较低的企业也可以获得更大程度的创新力提升,表明原本创新势能较弱的创新主体通过生态系统培育可获得弯道超车的机会。

### (二)实践启示

构建重大工程全要素创新生态系统对推动重大工程战略性技术创新具有重要意义。重大工程创新生态系统是以工程需求为导向,基于工程技术关联而形成共存共生、共同进化的全要素创新生态系统,全要素包括全主体、全过程和全方位,其总体目标是致力于提供一整套的重大工程技术解决方案。

从全主体视角看,健康的创新生态系统必须保证多样化的创新主体,即需要来自于不同行业、不同地域和不同部门的创新主体积极参与到创新活动中,为实现技术难题提供解决方案。从全过程视角看,稳定有效的重大工程创新生态系统必须保证各创新主体在重大工程全生命期不同阶段的动态交互和紧密联系,实现创新知识共享,并通过创新资源的合理分配和利用,实现不同创新主体的价值共创。从全方位视角看,重大工程创新生态系统的创新种群和创新群落日益复杂,因此,构建开放、协调的创新生态系统对于提高重大工程创新能力,实现技术链突破、产业链升级和价值链跃迁具有重要意义。

突破创新孤岛对于提高创新生态系统活力有重要作用。首先,需要进行模式创新,例如采用设计施工总承包模式,让设计方和承包商更早融入到重大工程中,有利于消除创新孤岛现象。其次,创新生态系统必须以开放视角,采用不同创新模式提高与跨部门、跨行业创新主体的协调性,通过扩大创新网络范围和联系紧密度来实现创新孤岛的消融。在开放创新生态系统中,创新主体提高其组织学习能力,通过创新生态系统的自身演化,加强创新网络节点强度,实现创新孤岛的联通。第三,位于创新生态势较高的创新主体应积极发挥引领

作用,通过提升信息交流度和知识共享度,实现创新力的共同提升。

### (三)研究展望

本文基于理论构建和实证研究来探究重大工程创新生态系统的要素和演化特征,揭示了重大工程创新主体构成、创新模式和动态演化,分析了现有重大工程的创新生态系统所面临的考验(主要表现为创新孤岛显现、全要素创新生态系统不健全等)。由于重大工程的独特性和复杂性,选择多工程案例数据可以弥补现有研究的不足,分析不同重大工程创新生态系统的交互影响机制是未来值得探讨的方向。其次,本文提出了重大工程创新生态系统的创新场概念,但需要在未来展开更加充分的实证研究,以探讨创新场对于创新力提升的影响机制。此外,与企业创新生态系统相比,重大工程创新生态系统更加复杂,未来研究需要将更多社会经济属性融入到创新生态系统中,探究其对于重大工程创新生态系统的影响机理。

(作者单位:曾赛星、陈宏权、金治州,上海交通大学安泰经济与管理学院;苏权科,港珠澳大桥管理局。责任编辑:闫妍)

### 参考文献

- (1) Adner, R., 2006, "Match Your Innovation Strategy to Your Innovation Ecosystem", *Harvard Business Review*, 84(4), pp.98~107.
- (2) Adner, R. & Kapoor, R., 2010, "Value Creation in Innovation Ecosystems: How The Structure of Technological Interdependence Affects Firm Performance in New Technology Generations", *Strategic Management Journal*, 31(3), pp.306~333.
- (3) Adner, R. & Kapoor, R., 2016, "Innovation Ecosystems and the Pace of Substitution: Re-examining Technology S-curves", *Strategic Management Journal*, 37(4), pp.625~648.
- (4) Alexy, O., George, G. & Salter, A. J., 2013, "Cui Bono? The Selective Revealing of Knowledge and Its Implications for Innovative Activity", *Academy of Management Review*, 38(2), pp.270~291.
- (5) Barlow, J. & Köberle-Gaiser, M., 2009, "Delivering Innovation in Hospital Construction: Contracts and Collaboration in the UK's Private Finance Initiative Hospitals Program", *California Management Review*, 51(2), pp.126~143.
- (6) Baum, J. A. C. & Singh, J. V., 1994, "Organizational Niches and the Dynamics of Organizational Founding", *Organization Science*, 5(4), pp.483~501.
- (7) Brockmann, C., Brezinski, H. & Erbe, A., 2016, "Innovation in Construction Megaprojects", *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(11), pp.04016059.
- (8) Carayannis, E. G., Grigoroudis, E., Campbell, D. F. J., Meissner, D. & Stamati, D., 2018, "The Ecosystem as Helix: An Exploratory Theory-building Study of Regional Co-opetitive Entrepreneurial Ecosystems as Quadruple/Quintuple Helix Innovation Models", *R&D Management*, 48(1), pp.148~162.
- (9) Chen, H. Q., Su, Q. K., Zeng, S. X., Sun, D. X. & Shi, J. J., 2018, "Avoiding the Innovation Island in Infrastructure Mega-project", *Frontiers of Engineering Management*, 5(1), pp.109~124.
- (10) Chen, H. Q., Zeng, S. X., Yu, B. J. & Xue, H., 2019, "Complementarity in Open Innovation and Corporate Strategy: The Moderating Effect of Ownership and Location Strategies", *accepted by IEEE Transactions on Engineering Management*, DOI: 10.1109/TEM.2018.2889804.
- (11) Cooke, P., Gomez Uranga, M. & Etxebarria, G., 1997, "Regional Innovation Systems: Institutional and Organisational Dimensions", *Research Policy*, 26(4~5), pp.475~491.
- (12) Davies, A., Gann, D. & Douglas, T., 2009, "Innovation in Megaprojects: Systems Integration at London Heathrow Terminal 5", *California Management Review*, 51(2), pp.101~125.
- (13) Davies, A., MacAulay, S., DeBarro, T. & Thurston, M., 2014, "Making Innovation Happen in a Megaproject: London's Crossrail Suburban Railway System", *Project Management Journal*, 45(6), pp.25~37.
- (14) Dodgson, M., Gann, D. M. & Salter, A., 2007, "'In Case of Fire, Please Use The Elevator': Simulation Technology and Organization in Fire Engineering", *Organization Science*, 18(5), pp.849~864.
- (15) Dodgson, M., Gann, D., MacAulay, S. & Davies, A., 2015, "Innovation Strategy in New Transportation Systems: The Case of Cross-rail", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, pp.261~275.
- (16) Engwall, M., 2003, "No Project is an Island: Linking Projects to History and Context", *Research Policy*, 32(5), pp.789~808.
- (17) Fischer, T. & Leidinger, J., 2014, "Testing Patent Value Indicators on Directly Observed Patent Value: An Empirical Analysis of Ocean Tomo Patent Auctions", *Research Policy*, 43(3), pp.519~529.
- (18) Gann, D. M. & Salter, A. J., 2000, "Innovation in Project-based, Service-enhanced Firms: The Construction of Complex Products and Systems", *Research Policy*, 29(7~8), pp.955~972.
- (19) Gawer, A. & Cusumano, M. A., 2014, "Industry Platforms and Ecosystem Innovation", *Journal of Product Innovation Management*, 31(3), pp.417~433.
- (20) Gil, N., Miozzo, M. & Massini, S., 2012, "The Innovation Potential of New Infrastructure Development: An Empirical Study of Heathrow Airport's T5 Project", *Research Policy*, 41(2), pp.452~466.

- (21) Gittelman, M. & Kogut, B., 2003, "Does Good Science Lead to Valuable Knowledge? Biotechnology Firms and the Evolutionary Logic of Citation Patterns", *Management Science*, 49(4), pp.366~382.
- (22) Gomes, L. A. de V., Facin, A. L. F., Salerno, M. S. & Ikenami, R. K., 2018, "Unpacking the Innovation Ecosystem Construct: Evolution, Gaps and Trends", *Technological Forecasting and Social Change*, 136, pp.30~48.
- (23) Hannan, M. T. & Freeman, J., 1977, "The Population Ecology of Organizations", *American Journal of Sociology*, 82(5), pp.929~964.
- (24) Harhoff, D., Scherer, F. M. & Vopel, K., 2003, "Citations, Family Size, Opposition and the Value of Patent Rights", *Research Policy*, 32(8), pp.1343~1363.
- (25) Iansiti, M. & Levien, R., 2004, "Strategy as Ecology", *Harvard Business Review*, 82(3), pp.68~78.
- (26) Keegan, A. & Turner, J. R., 2002, "The Management of Innovation in Project-based Firms", *Long Range Planning*, 35(4), pp.367~388.
- (27) Larsson, J., Eriksson, P. E., Olofsson, T. & Simonsson, P., 2014, "Industrialized Construction in the Swedish Infrastructure Sector: Core Elements and Barriers", *Construction Management and Economics*, 32(1~2), pp.83~96.
- (28) Lehtinen, J., Peltokorpi, A. & Artto, K., 2019, "Megaprojects as Organizational Platforms and Technology Platforms for Value Creation", *International Journal of Project Management*, 37(1), pp.43~58.
- (29) Lerner, J., 1994, "The Importance of Patent Scope ■ An Empirical Analysis", *The RAND Journal of Economics*, 25(2), pp.319~333.
- (30) Malerba, F., 2002, "Sectoral Systems of Innovation and Production", *Research Policy*, 31(2), pp.247~264.
- (31) Moore, J. F., 1993, "Predators and Prey: A New Ecology of Competition", *Harvard Business Review*, 71(3), pp.75~86.
- (32) Nelson, R. R., 1993, "National Innovation Systems: A Comparative Analysis", Oxford: Oxford University Press.
- (33) Oh, D. S., Phillips, F., Park, S. & Lee, E., 2016, "Innovation Ecosystems: A Critical Examination", *Technovation*, 54, pp.1~6.
- (34) Podolny, J. M., Stuart, T. E. & Hannan, M. T., 1996, "Networks, Knowledge and Niches: Competition in the Worldwide Semiconductor Industry, 1984~1991", *American Journal of Sociology*, 102(3), pp.659~689.
- (35) Rose, T. M. & Manley, K., 2012, "Adoption of Innovative Products on Australian Road Infrastructure Projects", *Construction Management and Economics*, 30(4), pp.277~298.
- (36) Rouboutsos, A. & Saussier, S., 2014, "Public-private Partnerships and Investments in Innovation: The Influence of the Contractual Arrangement", *Construction Management and Economics*, 32(4), pp.349~361.
- (37) Sergeeva, N. & Zanella, C., 2018, "Championing and Promoting Innovation in UK Megaprojects", *International Journal of Project Management*, 36(8), pp.1068~1081.
- (38) Sheffer, D. A. & Levitt, R. E., 2012, "Fragmentation Inhibits Innovation: Overcoming Professional and Trade Lock-in", Collaboratory for Research on Global Projects Working Papers.
- (39) Sheng, Z., 2018, "Fundamental Theories of Mega Infrastructure Construction Management", Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- (40) Stuart, T. E. & Podolny, J. M., 1996, "Local Search and the Evolution of Technological Capabilities", *Strategic Management Journal*, 17(S1), pp.21~38.
- (41) von Hippel, E., 1994, "'Sticky Information' and the Locus of Problem Solving: Implications for Innovation", *Management Science*, 40(4), pp.429~439.
- (42) Wang, B. & Hsieh, C.-H., 2015, "Measuring the Value of Patents with Fuzzy Multiple Criteria Decision Making: Insight into the Practices of the Industrial Technology Research Institute", *Technological Forecasting and Social Change*, 92, pp.263~275.
- (43) Williamson, P. J. & De Meyer, A., 2012, "Ecosystem Advantage: How to Successfully Harness The Power of Partners", *California Management Review*, 55(1), pp.24~46.
- (44) Zeng, S. X., Xie, X. M. & Tam, C. M., 2010, "Relationship between Cooperation Networks and Innovation Performance of SMEs", *Technovation*, 30(3), pp.181~194.
- (45) Zhu, Y. L., Zhang, J. W. & Gao, X. L., "Construction Management and Technical Innovation of the Main Project of Hong Kong-macau Bridge", *Frontiers of Engineering Management*, 5(1), pp.128~132.
- (46) 丁荣余:《创新力场:江苏创新生态系统的提升之道》,江苏人民出版社,2018年。
- (47) 吕一博、蓝青、韩少杰:《开放式创新生态系统的成长基因》,《中国工业经济》,2015年第5期。
- (48) 曾国屏、苟尤钊、刘磊:《从“创新系统”到“创新生态系统”》,《科学学研究》,2013年第1期。
- (49) 梅亮、陈劲、刘洋:《创新生态系统:缘起、知识演进和理论框架》,《科学学研究》,2014年第12期。
- (50) 盛昭瀚、游庆仲、陈国华、丁峰:《大型工程综合集成管理:苏通大桥工程管理理论探索与思考》,科学出版社,2009年。
- (51) 戴智华、曾赛星:《客户参与新产品开发与技术创新》,清华大学出版社,2015年。