

知识交流视角下孵化网络动态演化与层级关联研究

——以 T 孵化器网络为例

张海红¹ 赵黎明² 吴文清²¹

(1. 天津财经大学 管理科学与工程学院, 天津 300222;

2. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

【摘要】 基于知识交流视角, 构建孵化载体、在孵企业、服务机构分层嵌入的孵化网络模型框架, 通过调研数据分析以 T 孵化器为核心节点的孵化网络拓扑结构动态演化过程, 探究孵化网络不同层级之间知识交流相互关联的特点。结果表明, T 孵化器网络密度呈指数下降, 平均度稳中有升、增幅缓慢, 平均路径长度和网络中心势呈对数增长, 平均聚类系数在高值区间缓慢下降至稳定状态; T 孵化器网络在演化过程中表现出自组织、无标度和小世界的复杂网络特性; “T 孵化器-在孵企业”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间、“T 孵化器-服务机构”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流频次显著正相关。

【关键词】 孵化网络 T 孵化器 知识交流 动态演化 层级关联

【中图分类号】: F272.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1001-7348(2021)09-0134-10

0 引言

自“大众创业、万众创新”提出以来, 孵化器与第三方服务机构等各类创新主体的对接机制逐步完善, “孵化器+”资源网络培育与建设成效显著, 涌现出中关村软件园孵化网络、武汉东湖孵化网络、上海科技企业孵化网络等一批具有代表性的区域孵化网络模式。孵化器孵化机构往往是整个孵化网络的核心节点, 既可以直接向科技企业提供孵化服务, 也可以作为网络中间人帮助科技企业链接孵化资源^[1]。孵化器通过链接第三方服务机构共同为科技企业提供咨询、技术、金融、法律等方面的孵化服务, 其中大部分孵化服务本质上是一种知识的相互交流^[2]。一般来说, 企业在不同代际孵化器中都需要几年的孵化时间, 并且高代际孵化器中企业孵化时间明显少于低代际孵化器^[3]。由此可知, 企业对各种类型知识的需求不断增加, 各类创新主体间的知识交流越来越频繁, 最终导致区域内孵化网络结构发生动态演化。另外, 孵化网络中各类创新主体在知识交流过程中扮演不同角色, 孵化器、科技企业、第三方服务机构等节点具有异质性且分层嵌入于孵化网络之中, 各层次之间在知识交互过程中具有紧密联系。基于知识交流活动视角, 孵化器等各类创新主体如何嵌入于多层次孵化网络之中? 孵化网络结构在演化过程中表现出哪些特征? 不同层次网络之间的知识交流是否具有相互关联特点? 以上都是当前孵化网络知识基础观研究和实践发展中迫切需要解决的关键问题。

作者简介: 张海红(1988-), 男, 河北承德人, 博士, 天津财经大学管理科学与工程学院讲师, 研究方向为创新与创业管理; 赵黎明(1951-), 男, 北京人, 博士, 天津大学管理与经济学部教授、博士生导师, 研究方向为区域经济可持续发展、技术经济与管理;

吴文清(1977-), 男, 湖北随州人, 博士, 天津大学管理与经济学部副教授、硕士生导师, 研究方向为创新与创业管理。

基金项目: 国家社会科学基金项目(17BGL025); 国家社会科学基金重大项目(13&ZD162)

本文从知识交流视角审视孵化网络的层次结构与动态演化规律，基于创新主体的异质性构建孵化网络分层模型，并利用孵化网络实例对知识交互过程中的动态演化过程进行分析，旨在厘清知识交流情境下孵化网络结构特征与动态演化规律，探究孵化网络不同层级之间知识交流活动关联特点，为各类孵化机构更好地主导孵化网络培育工作、发挥知识交流协同作用提供理论指导。

1 文献综述

1.1 孵化网络构成

孵化器等孵化机构单靠自身条件难以满足企业多样化需求，资源网络化链接便成为各类孵化机构的发展方向^[4-6]，由此促进孵化网络形成。目前，相关文献主要从成员构成与层次构成两个方面对孵化网络结构展开探讨。

1.1.1 孵化网络成员构成

孵化网络成员构成具有多元性^[7]，内部成员属性复杂多样，相互间具有较大差异。Apa 等^[8]认为，孵化网络由潜在客户和供应商、法律和税务等专业服务提供商、银行、创投等金融机构、科研机构、政府机构等多种类型组织构成；李振华等(2018)认为，孵化网络是以孵化器为核心、以在孵企业为主体，通过与客户企业、科研院所、大学等孵化器外部机构连接共同形成的超越节点组织。

1.1.2 孵化网络层次构成

相关研究提出，孵化网络是由孵化器内网络与孵化器外网络相互连接而形成的双层次网络结构^[9]。孵化器内网络由孵化器、在孵企业相互连接而成。Salvador^[10]发现，孵化器内网络有利于促进创业团队之间知识交流和经验分享；Ebbbers^[11]分析了孵化器内部企业自身结网与利他结网行为特点；张力等(2012)、王国红等^[12]探讨了孵化器内网络运行机制及其对在孵企业成长的影响机理。孵化器外网络由孵化器与外部政府、大学、中介等机构相互连接而成。Soetanto 等^[9]认为，孵化器在外网络中具有资源桥接的重要作用；苏敬勤等^[13]总结了孵化器外网络 3 种生成模式，即科研院所衍生网络、集团企业衍生网络、多主体联合网络。

1.2 孵化网络演化

1.2.1 知识资源对孵化网络的影响

知识资源对孵化网络成长具有重要作用，Van 等^[14]认为，创业孵化生态系统由知识子系统和业务子系统构成，并模拟了孵化器解决创业生态系统中弱网络问题的过程；毕可佳等(2017)将知识迁移能力作为孵化网络编配能力的重要组成部分，发现知识迁移能力对孵化网络创新绩效和协同效应具有显著正向影响；梁祺等^[15]借助江苏省多个孵化器的实证数据，分析知识治理对孵化网络创新绩效的影响，发现正式知识治理和非正式知识治理均对创新绩效具有积极影响。

1.2.2 孵化网络演化仿真分析

相关文献通过仿真模型从微观视角刻画孵化网络结构演化与知识量增长，王国红等(2015)构建了由孵化器、入孵企业、大学科研机构构成的多层孵化网络关系模型，仿真模拟了孵化网络在演化过程中所涌现出的无标度特性以及知识量增长规律；左莉等^[16]和李文鹤等^[17]进一步仿真分析了二次孵化情景下孵化网络结构演变和知识涌现。根据组织节点与知识节点的异质性，Zhang 等^[18]、Zhao 等^[19]将孵化网络成员和知识节点区分开来，借助超网络模型分别探索孵化器内部在孵企业网络与孵化服务网

络结构演化过程及知识增长机理。

1.2.3 孵化网络演化实证分析

针对实践中真实存在的孵化网络案例,相关学者对其演化过程中涌现出的拓扑结构特征进行了初步探讨。Apa 等^[8]借助社会网络分析方法,实证分析在孵企业、孵化器管理团队、客户、供应商之间业务关系网络的度值、中介中心性等网络指标;Miranda 等^[20]利用度中心性、接近中心性、中介中心性等指标分析孵化器内部团队成员社交网络关系,揭示了孵化器内部社交网络对知识共享的重要促进作用。

1.3 文献评价

综上所述,孵化网络具有明显结构分层特征并且表现出动态演化特点。由于孵化网络自主演化不能保证创新绩效持续提高,孵化器作为核心节点应该积极干预、监督、调控孵化网络成员的行为,充分发挥自身在资源配置过程中的控制力^[21]。随着时间推移,孵化网络规模会越来越大、孵化网络成员关系会不断调整,不同网络层级之间很可能出现一定的差异。相关文献利用传递熵方法研究发现,不同地区孵化网络层级之间存在严重失衡^[22]。因此,当前研究存在如下不足:①知识互动下孵化网络演化研究大多从仿真视角出发,而基于实证视角的研究主要关注孵化主体间的业务关系与社交关系,基于知识交流关系的孵化网络演化实证研究较少,特别是以孵化器为核心节点的孵化网络结构演化特征仍需要进一步分析;②尽管相关文献从网络结构角度指出孵化网络层级之间存在差异,但尚未探讨孵化网络不同层级之间的知识交流是否具有关联关系。基于此,本文主要考察知识交流视角下孵化网络动态演化规律与知识交流层级关联特点。

2 孵化网络模型构建

解学芳等(2018)按照出现时间顺序将孵化载体依次划分为孵化器、大学科技园、加速器、创业苗圃、众创空间等类型。各类孵化载体在孵化网络中不仅存在项目合作与经验交流的关系,也存在如“创业苗圃-孵化器-加速器”孵化链条的关系。在孵企业是知识资源的需求方,在创业过程中与其入驻的孵化载体及外部服务机构存在多种形式的知识交流^[23]。服务机构能够弥补孵化载体知识服务功能的不足,为在孵企业提供更为全面丰富的知识资源。综合相关文献^[8],本文将各类服务机构归纳为 5 种基本类型:科研机构、金融机构、政府机构、行业企业、中介机构。王国红等(2015)构建了包括孵化器、入孵企业、大学及科研机构 3 个层次的孵化网络概念模型,基于此,本文将孵化器层扩展为各类具有孵化功能的孵化载体,将大学及科研机构层扩展为各种具有服务功能的服务机构。由此,得到更具普遍性的孵化网络分层框架模型,如图 1 所示。孵化网络模型可以表示为 $G=(G_B, G_F, G_S, E_{B-F}, E_{B-S}, E_{F-S})$ $G=(G_B, G_F, G_S, E_{B-F}, E_{B-S}, E_{F-S})$, 其中, G_B 、 G_F 、 G_S 分别代表孵化载体、在孵企业、服务机构各层次网络, E_{B-F} 、 E_{B-S} 、 E_{F-S} 是不同层次网络之间知识互动关系的集合。

(1) 孵化载体层。 $G_B=(B, E_{B-B})$ $G_B=(B, E_{B-B})$ 表示孵化载体之间基于知识交流关系形成的孵化载体层网络。其中, $B=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ $B=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 表示孵化载体节点构成集合, $E_{B-B}=\{(b_i, b_j)\} (i, j=1, 2, \dots, m)$ $E_{B-B}=\{(b_i, b_j)\} (i, j=1, 2, \dots, m)$ 表示孵化载体之间关系构成的集合, m 表示孵化载体数量。如图 1 所示, 孵化载体层是以孵化载体 b_i 为中心形成的网络结构。

(2) 在孵企业层。 $G_F=(F, E_{F-F})$ $G_F=(F, E_{F-F})$ 表示在孵企业之间基于知识交流关系形成的在孵企业层网络。其中, $F=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ $F=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示在孵企业节点构成的集合, $E_{F-F}=\{(f_i, f_j)\} (i, j=1, 2, \dots, n)$ $E_{F-F}=\{(f_i, f_j)\} (i, j=1, 2, \dots, n)$ 表示在孵企业之间的关系集合, n 表示在孵企业数量。如图 1 所示, 在孵企业层属于孵化载体 b_i 内部网络结构。

(3) 服务机构层。 $G_S=(S, E_{S-S})$ 表示服务机构之间由于共同提供知识服务而形成的服务机构层网络。其中, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ 表示服务机构节点组成的集合, $E_{S-S}=\{(s_i, s_j)\} (i, j=1, 2, \dots, q)$ 表示服务机构之间关系集合, q 表示服务机构数量。如图 1 所示, 服务机构层是围绕孵化载体 b_i 所形成的网络结构。

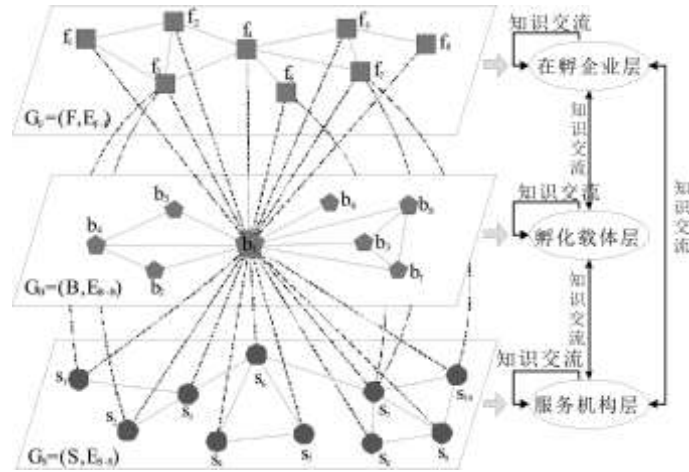


图 1 知识交流视角下孵化网络分层模型架构

(4) 跨层次连边。上述孵化网络模型包括 3 种跨层次连边：①孵化载体与在孵企业之间连边集合表示为 $E_{B-F}=\{(B_i, F_j)\} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 。孵化载体与在孵企业是孵化与被孵化的关系，孵化载体提供知识服务，在孵企业进行知识反馈；②孵化载体与服务机构之间连边集合表示为 $E_{B-S}=\{(B_i, S_j)\} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, q)$ 。服务机构通常在孵化载体的中介作用下与在孵企业建立网络联系，通过知识转移获取一定收益；③在孵企业与服务机构之间连边集合表示为 $E_{F-S}=\{(F_i, S_j)\} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, q)$ 。在孵企业与服务机构进行知识转移能够弥补孵化载体知识服务功能的不足，有利于在孵企业获得更加丰富的知识要素。

3 孵化网络实证分析

3.1 数据来源与处理

本文基于以 T 孵化器为核心节点的知识交流活动数据,构建基于 T 孵化器的孵化网络结构。通过检索 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的 T 孵化器网络平台相关数据,得到 373 条不同类型活动记录。其中,知识交流活动记录总计为 223 条,可以概括为创业大赛辅导(7 条)、创业项目评审(28 条)、企业需求对接(30 条)、创业经验分享(36 条)、企业调研交流(44 条)、创业知识培训(78 条)6 种基本类型。

针对检索的每一条知识交流活动记录,孵化载体、在孵企业、服务机构 3 种类型主体都可能同时出现。由此,可以从中剥离出多个不同类型主体之间的知识交流关系。通过对所有知识交流活动记录进行分析,按照时间顺序共抽取 360 个节点和 2184 条节点之间的知识交流关系。由于某些节点之间可能存在多次知识交流,本文将上述重复知识交流活动视为连边权重,最终经过处理后得到 1638 条不同节点之间的加权连边, T 孵化器网络各类节点统计数据如表 1 所示。

根据统计结果, T 孵化器网络中孵化载体节点数量较少,在孵企业节点与服务机构节点数量大体相等,但远远多于孵化载体节点数量。政府机构与中介机构数量总和占比达到 57%,在各种类型服务机构知识交流中发挥着主体作用。

表 1 T 孵化器网络各类节点数量统计结果

孵化载体	在孵企业	服务机构
------	------	------

		科研机构	金融机构	政府机构	行业企业	中介机构	总计
29	165	27	15	49	30	45	166

3.2 T 孵化器网络动态演化

根据 T 孵化器相关节点及其知识交流关系出现的时间, 本文以 6 个月为间隔, 构建 4 个不同时期的累积知识交流网络, 如图 2 所示。节点越大则该节点度值越高, 与该节点建立知识交流关系的节点数量越多。节点之间连边的粗细表示两个节点间的知识交流频次, 连边越粗则两个节点之间知识交流次数越多。随着时间推移, 孵化网络中节点数量不断增多, T 孵化器始终位于孵化网络中心位置, 不断与在孵企业、服务机构、其它孵化载体等节点建立网络联系, 节点之间的知识交流越来越密切。另外, 孵化网络结构在不同时期均表现出一定的不均匀性, 部分在孵企业、服务机构具有明显的小集团聚类现象。

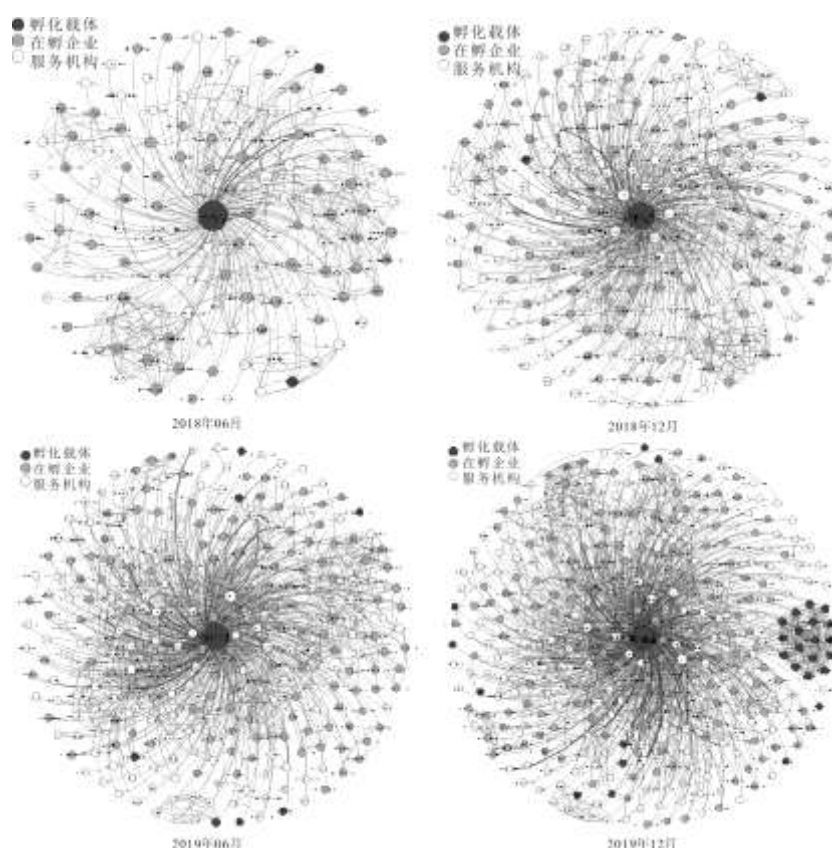


图 2 不同时期 T 孵化器网络拓扑结构

3.2.1 网络结构特征演化

由图 2 可知, T 孵化器网络拓扑结构不断演化, 可以通过相关网络拓扑结构评价指标对每一阶段的孵化网络进行计算。根据计算结果, 得到 T 孵化器网络各指标值的变化趋势, 如图 3 所示。根据图 3(a), 随着节点与连边不断增多, 各时期孵化网络的网络密度变小, 并呈现指数下降趋势, 反映出孵化网络连接比较稀疏, 还有很多节点之间并未进行过知识交流。网络平均度在 6~10 范围内稳中有升, 可以得出网络连接数量增长速度比节点数量增长速度更快, 平均来看, 每个节点的知识交流对象范围逐渐扩大, 但幅度较小。根据图 3(b), 随着节点与连边逐渐增加, 孵化网络平均路径长度和网络中心势均呈现出对数增长趋势, 后期

逐步达到稳定状态。T 孵化器是整个孵化网络的中心节点，网络中任意两点之间都可以通过 T 孵化器进行知识交流，从而导致孵化网络在不同时期的平均路径长度均小于 2。本文中，网络中心势基于点度中心性进行计算，指标值一直高于 0.8 并且不断缓慢上升，表明 T 孵化器网络具有明显集中趋势，T 孵化器等较少节点占据了网络中心位置，呈现出不均匀的“核心-边缘”分布特征。孵化网络平均聚类系数总体上呈缓慢下降趋势且后期稳定在 0.85, 表明孵化网络具有较为明显的聚类现象。

3.2.2 网络结构自组织演化

T 孵化器网络不断发生演化，若演化趋势是从无序状态转向有序状态，则称其具有自组织特性。相关文献指出，复杂网络系统的有序性可以借助熵值进行测量，熵值越小复杂网络系统就越有序，熵值越大复杂网络系统就越无序。本文根据吴式结构熵^[24]对 T 孵化器网络进行分析，研究该孵化网络的自组织特性，计算公式如下：

$$W_t = - \sum_{i=1}^{M_t} I_i^t \ln I_i^t \quad (1)$$

其中， M_t 是 t 时刻节点总数量， I_i^t 表示 t 时刻节点 i 的重要程度，可以根据其度值 k_i^t 与所有节点度值之和的比值进行计算。

$$\overline{W_t} = \frac{W_t - W_t^{\min}}{W_t^{\max} - W_t^{\min}} \quad (3)$$

根据吴式结构熵的计算结果，星状结构的网络结构熵最小，规则结构的网络结构熵最大，得到 T 孵化器网络在 t 时刻的网络结构熵最小值为 $W_{\min}^t = 1/21n4(M_t-1)$ ，网络结构熵最大值为 $W_{\max}^t = \ln M_t$ 。随着网络规模扩大，系统会表现出一定的熵增效应，通过标准化处理能够消除该影响，由此得到 T 孵化器网络在 t 时刻的标准网络结构熵。

$$\overline{W_t} = \frac{W_t - W_t^{\min}}{W_t^{\max} - W_t^{\min}} \quad (3)$$

吴氏结构熵能够更加精确地反映出 T 孵化器网络的非同质性，为进一步比较分析，本文构建与 T 孵化器网络具有同等网络规模的随机网络。根据计算结果，T 孵化器网络、同等规模随机网络的网络结构熵随时间演化规律如图 4(a)、4(b) 所示。首先，对于 T 孵化器网络，网络结构熵始终位于最大值与最小值之间，具有较为明显的有序性，从 2018 年 2 月的 3.1 逐渐上升到 2019 年 12 月的 5.2，并且越到后期熵值上升趋势越平缓。除去网络规模增长所产生的熵增效应，标准网络结构熵在 2018 年 4 月迅速上升至 0.78，之后逐渐下降为 0.70，表明孵化网络经过前期较为明显的自组织过程之后，逐步朝着更加有序的方向演化。其次，对于同等规模随机网络，网络结构熵始终接近最大值，表现出无序性。除去网络规模的影响，标准网络结构熵始终处于 0.95~1.00 之间，明显高于 T 孵化器网络的标准网络结构熵，进一步印证了 T 孵化器网络演化的有序性。

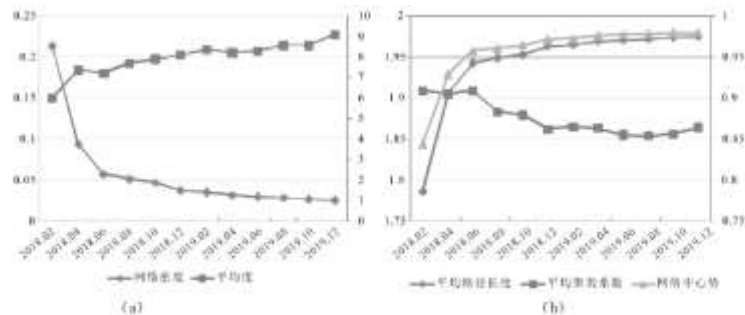


图 3 T 孵化器网络各指标值变化趋势

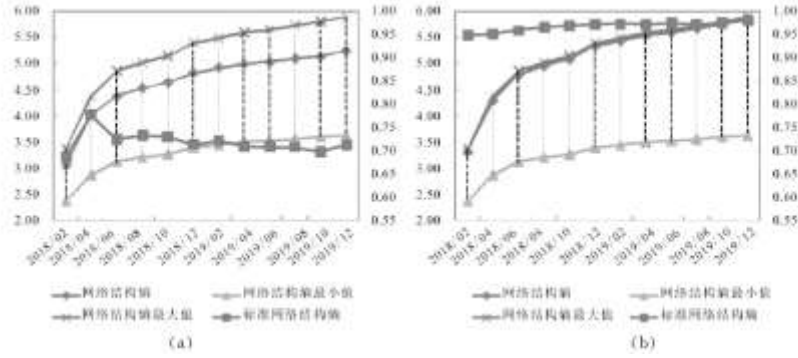


图 4 T 孵化器网络与同等规模随机网络的网络结构熵随时间变化趋势

综上分析，T 孵化器网络总体上朝着更加有序的方向演化，表现出一定的自组织特性。网络结构熵演化趋势表明，各节点之间并不是随机建立知识交流关系，而是更倾向于与具有更多网络资源的节点进行知识交流，从而导致整个孵化网络表现出一定的异质性。孵化载体、在孵企业、服务机构等各类创新主体之间逐渐演化形成一种较为有序的网络结构，在一定程度上保障了孵化网络较高的知识转移效率。

3.3 T 孵化器网络无标度特性

借鉴 Barabási 等^[25]的研究成果，可以通过判断 T 孵化器网络度值是否服从幂律分布，考察其是否具有无标度特性，节点度值分布计算方式如下：

$$p(k) \sim k^{-\gamma} \quad (4)$$

其中， $p(k)$ 表示网络中任选某一节点其度值为 k 的概率， γ 是幂指数。幂率分布两边分别取对数，可以简化为验证 $\log p(k)$ 和 $\log k$ 之间是否具有线性关系。

$$\log p(k) = -\lambda \log k + a \quad (5)$$

在前文分析的基础上，本文对不同时期 T 孵化器网络节点度值进行统计分布实验，得到 4 个时期的网络度分布双对数图，如图 5 所示。通过线性回归拟合得到 4 个时期 T 孵化器网络幂指数和拟合优度，从 2018 年 6 月至 2019 年 12 月，孵化网络幂指数 γ 依次为 0.787、0.975、1.006、1.008，拟合优度 R^2 依次为 0.536、0.689、0.684、0.715。回归结果显示，T 检验中的 p 值均小于 0.001，表明 $\log p(k)$ 和 $\log k$ 之间具有显著线性关系。由此可知，T 孵化器网络在不同时期的度值均符合幂律分布规律，呈现出不同程度的无标度特性，说明只有 T 孵化器等少数节点才拥有较多的连接，大部分节点连接数量较少。

T 孵化器网络在演化过程中表现出无标度特性，并随着时间推移不断增强。根据知识在无标度网络结构中快速传播的特点^[26]，T 孵化器网络中的知识高效转移往往依赖于少部分枢纽节点发挥功能，若该部分节点功能失效则会对整个孵化网络系统运行产生不利影响。

3.4 T孵化器网络小世界特性

通过改变规则网络节点间的重连概率, Watts 等^[27]率先提出一种具有小世界特征的网络结构生成算法, 发现小世界网络具有较小平均路径长度和较大聚类系数的特点; Davis 等^[28]将实际网络与具有同等规模(节点数量、连边数量相同)的随机网络进行比较, 提出判断实际网络是否具有小世界特性的方法。基于此, 本文对不同时期 T 孵化器网络进行小世界特性分析, 衡量标准如下:

$$C/C_{rand} > L/L_{rand} \quad (6)$$

式(6)中, C 和 L 分别是 T 孵化器网络的平均聚类系数、平均路径长度, C_{rand} 和 L_{rand} 分别是具有同等规模随机网络的平均聚类系数、平均路径长度。根据表 2 分析结果, 各时期指标值 C/C_{rand} 均远远大于 L/L_{rand} , T 孵化器网络在演化过程中表现出明显的小世界特性, 并且越到后期小世界特性越明显。

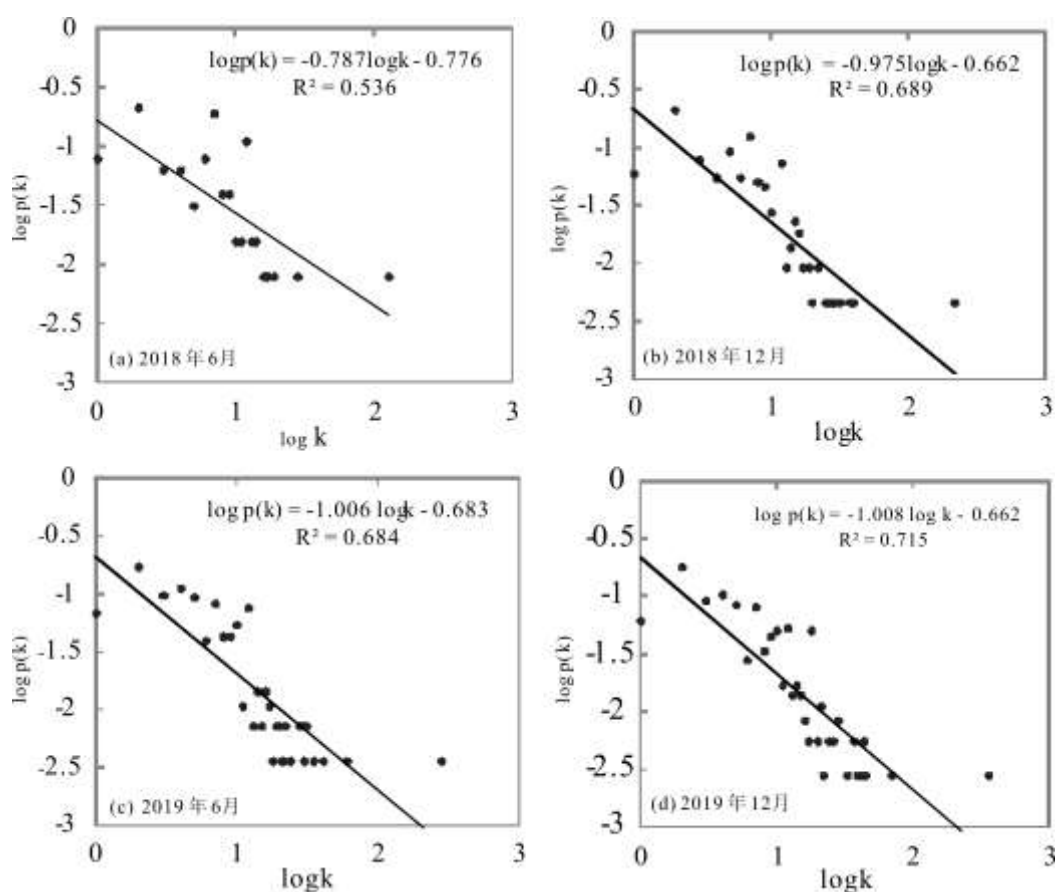


图5 不同时期 T 孵化器网络度分布双对数图

上述分析表明, T 孵化器网络中孵化载体、在孵企业、服务机构等节点总体上的平均距离较短, 同时节点间的聚集现象比较明显。尤其是 T 孵化器在整个孵化网络中发挥了重要桥接作用, 降低了在孵企业、服务机构等创新主体知识需求对接成本, 提高了整个孵化网络中知识要素流动的时效性。

3. 5T 孵化器网络知识交流层级关联

基于 T 孵化器核心节点划分孵化网络层级结构, 考察各层级间的知识交流活动是否具有相关关系, 有助于了解孵化网络系统内部各创新主体间的知识转移机理。

3. 5. 1 网络层级结构

本文根据 T 孵化器所处网络位置, 基于各层级网络知识交流活动无交集原则, 将 T 孵化器网络分解为 4 个子网络。“T 孵化器-在孵企业”网络由 T 孵化器和在孵企业群体构成, 网络连接由在孵企业之间、T 孵化器与在孵企业之间的知识交流关系构成, 反映了 T 孵化器内部知识要素流动。“T 孵化器-服务机构”网络节点由 T 孵化器和服务机构群体构成, 网络连接由服务机构之间、T 孵化器与服务机构之间的知识交流关系构成, 反映了 T 孵化器外部与服务机构知识要素流动。“T 孵化器-孵化载体”网络节点由 T 孵化器和其它孵化载体构成, 网络连接包括 T 孵化器在内的各孵化载体之间的知识要素流动。“在孵企业-服务机构”网络节点由在孵企业群体和服务机构群体构成, 网络连接仅包括在孵企业与服务机构之间的知识交流关系, 反映了 T 孵化器内部与外部之间的知识要素流动。

本文以 2019 年 12 月 T 孵化器网络中各节点之间知识交流频次的截面数据为分析对象, 考察各层级网络之间知识交流的相互联系。按照上述原则分解该时期 T 孵化器网络, 得到不同层级网络拓扑结构如图 6 所示。“T 孵化器-在孵企业”网络、“T 孵化器-服务机构”网络、“T 孵化器-孵化载体”网络具有明显集中趋势, T 孵化器与在孵企业、服务机构、其它孵化载体的知识交流频次相对较高, 在知识交流过程中发挥主导作用。“在孵企业-服务机构”网络集中趋势不显著, 在孵企业与服务机构之间的知识交流呈现出一定的异质性, 部分节点连接数量明显高于其它节点。

3. 5. 2 网络层级知识交流相关性

本文基于各节点之间的知识交流活动统计数据, 对 T 孵化器网络不同层级知识交流频次进行相关性分析, 以探索各层级网络之间的协同发展规律。2018 年 1 月至 2019 年 12 月, T 孵化器网络形成了包括 360 个节点和 1638 条连边的网络规模, 每条连边权重表示两个节点间的知识转移频次。根据数据统计结果, T 孵化器网络中各节点之间共发生了 2184 次知识交流活动, 由此得到网络平均加权重为 12.13, 即平均来看, 网络中每个节点进行过 12.13 次知识交流活动。根据上文对 T 孵化器网络层级划分结果, 可以得到 4 个不同层级网络共 24 个月的知识交流频次数据变化趋势及统计结果, 如图 7 和表 3 所示。首先, “T 孵化器-在孵企业”网络、“T 孵化器-服务机构”网络、“在孵企业-服务机构”网络中知识交流活动相对频繁, 并且变化规律呈现出一定的相似性。其中, “T 孵化器-服务机构”网络知识交流频次的平均值最高达到每月 29.5 次, 并且知识交流频次离散程度最低。其次, “T 孵化器-孵化载体”网络中知识交流活动较少, 数据搜集结果显示, T 孵化器与其它孵化载体之间的知识交流较少, 知识交流活动主要集中在 2019 年 12 月。对外公布的数据表明, 其它时间基本没有知识交流活动, 从而造成数据集离散程度相对较高。

为直观展现 T 孵化器网络各层级之间知识交流活动的相互关联, 本文对 4 个层次网络中各时期知识交流频次两两进行双变量相关性分析, 如图 8 所示。首先, 根据散点图 8(a)、(c)、(e)可以粗略看出, “T 孵化器-在孵企业”网络、“在孵企业-服务机构”网络、“T 孵化器-服务机构”网络两两之间的知识交流频次表现出一定的相关关系, 但“T 孵化器-在孵企业”网络与“T 孵化器-服务机构”网络知识交流频次散点图的离散程度较大, 是否存在显著相关关系还需要进一步判断。其次, 散点图 8(b)、(d)、(f)表明, “T 孵化器-孵化载体”网络与其它 3 个层级网络在知识交流频次上没有显著相关性。散点图只能初步反映 T 孵化器网络各层级之间知识交流数据的相关关系, 下文借助常用相关系数分析进行更加准确的判断。

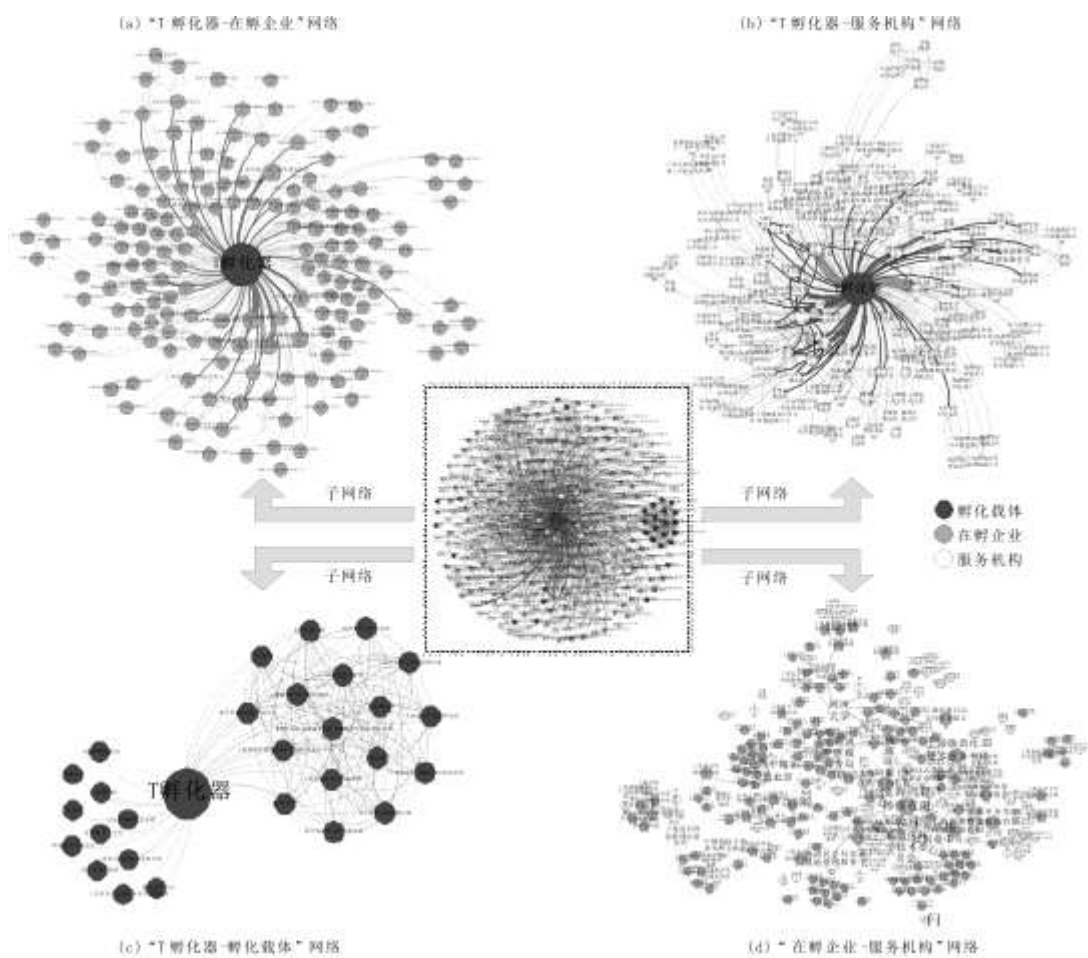


图 6T 孵化器网络不同层级拓扑结构

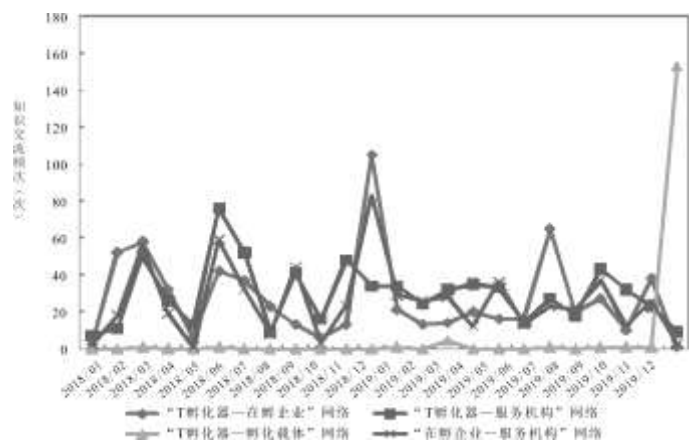


图 7 T 孵化器网络不同层级知识交流频次变化趋势

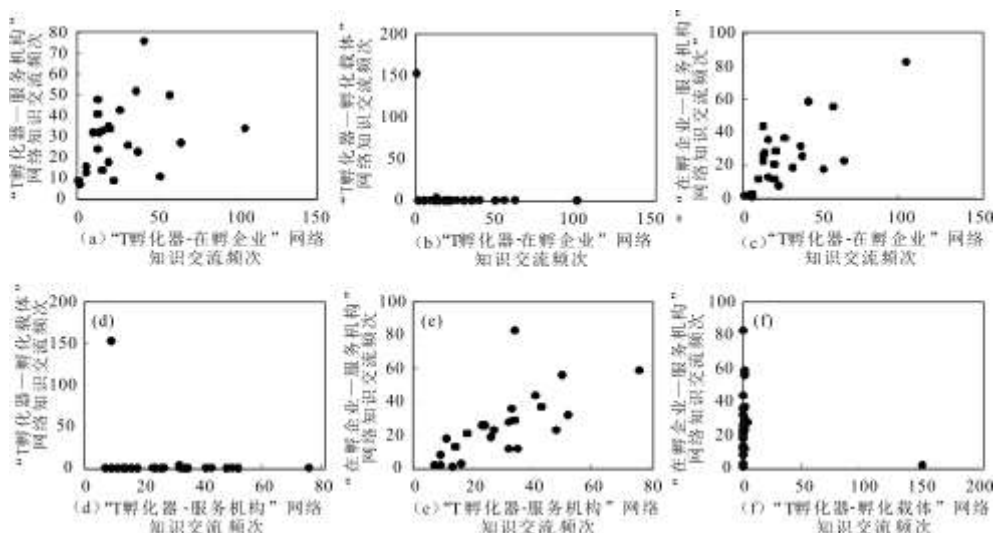


图 8 T 孵化器网络不同层级之间知识交流频次散点图

表 3 知识交流频次描述性统计结果

网络层级	均值	标准差	最小值	最大值
“T 孵化器-在孵企业”网络	27.1	24.0	1	105
“T 孵化器-服务机构”网络	29.5	16.7	7	76
“T 孵化器-孵化载体”网络	6.8	31.2	0	153
“在孵企业-服务机构”网络	25.5	20.0	1	83

T 孵化器网络各层级知识交流频次为连续变量，本文采用 Pearson 相关系数对其进行分析，结果如表 4 所示。从统计角度看，“T 孵化器-在孵企业”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流频次具有显著正相关关系，Pearson 相关系数为 0.730，“T 孵化器-服务机构”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流频次具有显著正相关关系，Pearson 相关系数为 0.695，而其它网络层级之间知识交流频次的 Pearson 相关系数没有通过显著性检验。综合分析可知，“T 孵化器-在孵企业”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间、“T 孵化器-服务机构”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流活动形成显著正向联动效应。T 孵化器作为主导方，无论是与内部在孵企业进行知识交流还是与外部服务机构进行知识交流，都能够带动在孵企业与服务机构之间的知识交流，发挥其作为资源中介的重要协同作用。同时应认识到，T 孵化器与其它孵化载体之间的知识交流不足，“T 孵化器-孵化载体”网络知识交流活动尚未对整个孵化网络协同发展作出足够的贡献。

3.6 孵化网络耦合关系与演化路径分析

本文针对 T 孵化器网络的实证分析结果在一定程度上反映了孵化网络动态演化与知识交流层级关联的一般性规律，据此可以从理论层面提炼出孵化网络耦合关系特征与演化路径，如图 9 所示。

孵化网络在演化过程中主要表现出耦合整体性、耦合多元性、耦合层次性、耦合动态性特点。①孵化器、在孵企业、服务机构作为知识交流活动的利益相关者遵循一定的规则，以孵化器为核心节点建立网络联系并相互耦合，围绕知识效用最大化目

标形成一个完整的孵化网络系统，体现出孵化网络耦合的整体性；②孵化网络的耦合多元性不仅体现为孵化主体知识交流类型的多样化(企业调研、创业培训、项目评审、大赛辅导等)，还体现为孵化主体网络位置(核心、边缘等)与连边权重(知识交流次数)方面的差异性；③孵化器、在孵企业、服务机构既有相同类型节点间的同层次知识交流，也有不同类型节点间的跨层次知识交流，体现出孵化网络耦合的层次性；④随着时间推移，孵化器、在孵企业、服务机构不断涌现，知识交流关系不断建立，导致各主体之间、网络层级之间的耦合强度发生改变，体现出孵化网络耦合的动态性。

表 4 T 孵化器网络不同层级知识交流频次 Pearson 相关系数分析结果

项目	T 孵化器-在孵企业	T 孵化器-服务机构	T 孵化器-孵化载体	在孵企业-服务机构
T 孵化器-在孵企业	1.000			
T 孵化器-服务机构	0.303	1.000		
T 孵化器-孵化载体	-0.231	-0.254	1.000	
在孵企业-服务机构	0.730***	0.695***	-0.247	1.000

由 T 孵化器网络结构与知识两个维度的演化规律可知，孵化网络演化往往要经历导入期、成长期与稳定期 3 个阶段，通过实证分析结果归纳得出孵化网络结构趋稳式演化路径与知识交流波动式演化路径。①从网络结构维度看，孵化网络在导入期开始实现从无到有的发展，随后，孵化网络主要结构特征在成长期从单调递减与单调递增两个方向开始快速发生变化，最终逐步趋于平缓进入到稳定期，网络结构从无序到有序，始终表现出一种带有无标度特性与小世界特性的趋稳式演化规律；②从知识交流维度看，以孵化器为核心的自我中心孵化网络可以分解为 4 个层级，不同层级知识交流频次之间往往出现协同发展与非协同发展并存的情况，孵化网络知识交流频次在各阶段均表现出一种波动式演化规律。

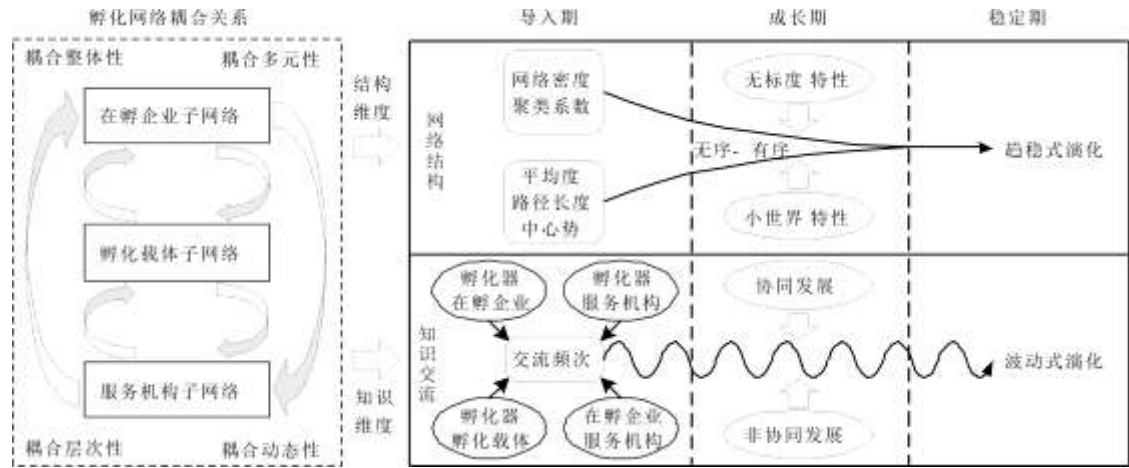


图 9 孵化网络耦合关系与演化路径

4 结论与启示

4.1 研究结论

本文基于知识交流视角提出孵化载体、在孵企业、服务机构 3 类异质性节点共同构成的孵化网络分层模型框架，分析 T 孵

化器网络动态演化规律，探索 T 孵化器网络不同层级之间知识交流的相关性，主要研究结论如下：

(1) 从各网络结构指标变化看，T 孵化器网络密度较小并呈指数下降的变化趋势，网络平均度稳中有升但增幅缓慢，平均路径长度和网络中心势呈对数增长趋势，平均聚类系数在高值区间缓慢下降并趋于稳定。从网络结构自组织演化看，T 孵化器网络的标准网络结构熵表现出先急速上升后平稳下降的变化趋势，网络结构经过自组织过程朝着更加有序的方向演化。

(2) T 孵化器网络在不同阶段均呈现出无标度特性和小世界特性的复杂网络特征。由度分布双对数图可知，T 孵化器网络在各时期的度值均符合幂律分布规律。由 T 孵化器网络与同等规模随机网络的比较结果可知，T 孵化器网络在演化过程中始终具有明显的小世界特性。

(3) “T 孵化器-在孵企业”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流频次显著正相关，“T 孵化器-服务机构”网络与“在孵企业-服务机构”网络之间的知识交流频次显著正相关。T 孵化器内部在孵企业与外部服务机构之间的知识交流及 T 孵化器内部知识交流、T 孵化器外部知识交流均具有显著正向联动效应，呈现出明显的协同发展关系。

(4) 孵化网络在演化过程中具有耦合整体性、耦合多元性、耦合层次性与耦合动态性特点，网络结构表现出趋稳式演化发展规律，知识交流表现出波动式演化发展规律。

4.2 管理启示

T 孵化器网络研究结论对一般孵化网络培育和治理具有一定的启示。第一，孵化器等孵化载体往往处于孵化网络的核心位置，在促进内部高新技术企业快速成长过程中，应该主动发挥好知识资源链接和配置功能，重视区域孵化网络自组织、无标度和小世界的复杂网络特征，尤其要重视孵化网络中少部分节点对知识转移的枢纽作用，可以通过政策倾斜等手段促进某些具有重要网络位置节点的功能得到有效发挥，从而保障孵化网络中知识要素流动的高效性和网络结构运行的稳健性；第二，孵化网络不同层次知识交流的活跃性具有一定差异，孵化载体在积极对接在孵企业与服务机构进行知识交流的同时，应注意增加与其它孵化载体的知识互动，从而为孵化网络链接更加丰富的知识资源。孵化网络各层级之间的知识交流并不一定都能达到协同发展的理想效果，各类孵化载体不仅要发挥好内部网络与外部网络在知识交流中的联动效应，同时应重视孵化载体网络与其它层次网络在知识交流中的协同发展，进一步提升孵化网络中的知识要素流通效率。

4.3 不足与展望

本研究仍然存在以下不足之处：从空间范围看，仅以 T 孵化器为核心的孵化网络实证分析具有一定的局限性，更大规模和更广区域下孵化网络在知识交流过程中是否具有相同的演化规律有待进一步探讨；从时间范围看，本文收集 T 孵化器早期数据资料存在一定难度，基于长期时间序列数据的孵化网络动态演化分析结果则更具有说服力。因此，未来研究可以综合考虑时间和空间两个方面因素，探寻更加全面的数据资料，通过多个案例比较进一步检验本文研究结论。

参考文献：

[1] VAN RIJNSOEVER F J, VAN WEELE M A, EVELEENS C P. Network brokers or hit makers? analyzing the influence of incubation on start-up investments[J]. International Entrepreneurship and Management Journal, 2017, 13(2): 605-629.

[2] ROIGTIERNO N, ALCAZAR J, RIBEIRONAVARRETE S, et al. Use of infrastructures to support innovative entrepreneurship and business growth[J]. Journal of Business Research, 2015, 68(11): 2290-2294.

-
- [3] 许治, 黄攀, 陈朝月. 不同代际科技企业孵化器孵化绩效差异比较——基于广东省的实证研究[J]. 管理评论, 2019, 31(5):100-108.
- [4] STADLER C, RAJWANI T, KARABA F, et al. Solutions to the exploration-exploitation dilemma: networks as a new level of analysis[J]. International Journal of Management Reviews, 2014, 16(2):172-193.
- [5] EVELEENS C P, VAN RIJNSOEVER F J, NIESTEN E M M I. How network-based incubation helps start-up performance: a systematic review against the background of management theories[J]. The Journal of Technology Transfer, 2017, 42(3): 676-713.
- [6] BREZNITZ S M, CLAYTON P A, DEFAZIO D, et al. Have you been served? the impact of university entrepreneurial support on start-ups' network formation[J]. The Journal of Technology Transfer, 2018, 43(2):343-367.
- [7] 刘宁, 胡海青, 王兆群, 等. 孵化网络多元性、效果推理对在孵企业合法性的影响[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(9):30-38.
- [8] APA R, GRANDINETTI R, SEDITA S R, et al. The social and business dimensions of a networked business incubator: the case of H-Farm[J]. Journal of Small Business and Enterprise Development, 2017, 24(2):198-221.
- [9] SOETANTO D, JACK S. Business incubators and the networks of technology-based firms[J]. The Journal of Technology Transfer, 2013, 38(4):432-453.
- [10] SALVADOR E. Are science parks and incubators good "brand names" for spin-offs? the case study of Turin[J]. The Journal of Technology Transfer, 2011, 36(2):203-232.
- [11] EBBERS J J. Networking behavior and contracting relationships among entrepreneurs in business incubators[J]. Entrepreneurship Theory and Practice, 2014, 38(5):1159-1181.
- [12] 王国红, 周建林, 邢蕊. 孵化器“内网络”情境下社会资本、联合价值创造行为与在孵企业成长的关系研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(S1):650-656.
- [13] 苏敬勤, 周颖, 洪勇. 高新技术孵化网络生成模式及要素研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2011, 32(12):45-52.
- [14] VAN RIJNSOEVER F J. Meeting, mating, and intermediating: how incubators can overcome weak network problems in entrepreneurial ecosystems[J]. Research Policy, 2020, 49(1):103884.
- [15] 梁祺, 张宏如, 苏涛永. 新就业形态下孵化网络知识治理对创新孵化绩效的影响[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(17): 28-36.
- [16] 左莉, 周建林. 知识视角下二次孵化对新兴产业的影响[J]. 管理学报, 2017, 14(3):433-440.
- [17] 李文鹤, 张洋, 郭本海, 等. 二次孵化情景下新兴产业知识网络涌现[J]. 科学学研究, 2019, 37(4):643-650.
- [18] ZHANG H, WU W, ZHAO L. A study of knowledge supernetworks and network robustness in different business

incubators[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 447:545-560.

[19] ZHAO L, ZHANG H, WU W. Knowledge service decision making in business incubators based on the supernetwork model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 479:249-264.

[20] MIRANDA M G, BORGES R. Technology-based business incubators an exploratory analysis of intra-organizational social networks[J]. *INMR-Innovation & Management Review*, 2019, 16(1):36-54.

[21] 胡海青. 孵化器控制力对创新孵化绩效的影响: 一个有调节的中介效应[J]. *南开管理评论*, 2017, 20(6):150-162.

[22] LI H, TANG Y. Network structure and dynamics of Chinese regional incubation[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2019, 19(4):1173-1197.

[23] RUBIN T H, AAS T H, STEAD A. Knowledge flow in technological business incubators:evidence from Australia and Israel[J]. *Technovation*, 2015, 41:11-24.

[24] 吴俊, 谭跃进, 邓宏钟, 等. 无标度网络拓扑结构非均匀性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(5):101-105.

[25] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439):509-512.

[26] QIAO T, SHAN W, ZHANG M, et al. How to facilitate knowledge diffusion in complex networks:the roles of network structure, knowledge role distribution and selection rule[J]. *International Journal of Information Management*, 2019, 47:152-167.

[27] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684):440-442.

[28] DAVIS G F, YOO M, BAKER W E. The small world of the American corporate elite, 1982-2001[J]. *Strategic Organization*, 2003, 1(3):301-326.