

doi:10.13582/j.cnki.1672-7835.2025.05.018

城市群创新资源网络化配置对综合承载力的影响研究

——基于动态面板门槛效应的实证检验

叶文忠^{1,2}, 颜丽芳^{1,2}, 陈子轩^{1,2}

(1.湖南科技大学 商学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 新型工业化研究基地,湖南 湘潭 411201)

摘要:以“冰山”运输成本理论为基础,构建创新资源网络化配置的理论分析框架,并基于2003—2023年长三角、长江中游和成渝城市群的面板数据,运用社会网络分析法和动态门槛模型,实证检验其对综合承载力的影响机制。研究表明:一方面,创新资源网络化配置对城市群综合承载力存在非线性门槛效应,高能级城市通过优化网络结构实现综合承载力跃迁,而低能级城市则因网络阻滞面临虹吸风险。另一方面,破除“虹吸-塌陷”结构、提升整体综合承载力的关键在于实施差异化的创新资源网络化配置策略。提升整体效益并非依靠创新资源配置平均化,而是需采取“重点突出、网络协同”的战略,推动创新资源向高能级中心聚集,并同步加强城际联系。

关键词:城市群;创新资源配置水平;创新资源网络化配置;综合承载力

中图分类号:F061.5

文献标志码:A

文章编号:1672-7835(2025)05-0150-12

党的二十大报告系统地阐述了创新驱动发展的底层逻辑,把创新放在构建新发展格局、建设全国统一大市场的关键位置。在以数字经济为主导的工业4.0时代,创新资源配置的效应正发生革命性变化,人力资本、金融资本、数字技术和知识产权等多维度的融合,不仅能重塑区域经济体系的内生增长机制,还是推进高质量发展和培育新质生产力的重要路径。然而,目前中国城市群的创新资源配置体系陷入三重困境:第一,空间异质性衍生极化效应。城市群内创新资源在不同城市间的分布不均衡^①导致创新资源的极化困境。第二,制度摩擦构筑地域壁垒。地方政府通过税收竞争、市场准入限制等手段构建的行政壁垒提高了城市群内部的技术交易成本,这和数字时代要素跨区域配置的需求存在结构性矛盾^②。第三,双重失灵加剧效率损失。创新资源的准公共性导致市场机制下的个体边际效益与社会边际效益的持续背离,而政府干预又面临信息不对称和动态适应性不足^③。

上述三重困境表明,传统的资源配置方式难以适应城市群协同发展的要求,亟须调整资源配置方式,重建要素流动路径,以破除创新资源空间错配与效率损失的痼疾。资源网络化能有效拉近创新载体与其他节点间的经济距离,从而提升整体效能^④。其主要路径有以下四种:第一,城市群内的中小城市

收稿日期:2025-04-05

基金项目:国家社会科学基金项目(20BGL299);湖南省研究生科研创新项目(CX20240895)

作者简介:叶文忠(1969—),男,四川广安人,博士,教授,博士生导师,主要从事区域经济学研究。

①王立,刘智超:《成都和重庆创新空间的中心——外围结构比较研究》,《地理学报》2025年第6期。

②Wu Y., Niu P. Y., Wu Y. Q. “Does the Digital Sector Affiliation Matter for the Productivity of Multinational Firms?” *Economic Modelling*, 2025, 144(3): 107002.

③王哲,薛澜,赵静:《开源创新组织的创新成本演化与动态治理机制》,《公共管理评论》2024年第4期。

④陈子充:《多中心城市空间结构能够提升供应链效率吗?》,《云南财经大学学报》2024年第10期。

能够借助中心城市知识外溢,并依靠自身的吸收能力,来获取先进的技术和知识^①。第二,城市群内多中心城市的互补协作网络,可进一步提高资源配置的效率与技术溢出的速度^②。第三,技术合作^③和创新网络结构变化^④等要素,也会带来创新资源的再分配。第四,城市群和外部环境的紧密结合^⑤、产城融合的不断演进^⑥,也都是资源再配置的主要推动因素。

提升城市群综合承载力是实现高质量发展的重要内容。现有研究也表明,创新活动依托知识溢出与要素协同所产生的空间溢出效应,不仅能够减少创新资源错配,还能促进经济增长、环境治理与效率提升,从而为创新资源配置对综合承载力的影响提供了理论依据。然而,单个城市的创新资源优势并不能自动转化为城市群的协同效能,必须通过跨区域合作打破空间壁垒、整合分散资源来实现。在此背景下,前文所述的创新资源网络化配置正是破解传统资源配置困境的有效路径。因此,立足理论逻辑和现有文献,研究创新资源网络化配置对城市群综合承载力的提升机制具有重要的现实意义。

本文可能的边际贡献如下:(1)本研究弥补了传统研究的不足。现有研究未能系统分析从创新资源配置到其网络化配置结构,进而再到对综合承载力产生影响这一传导过程。本文基于新经济地理学的框架,构建简化的创新资源配置模型,推导创新资源网络化配置的过程,并揭示该过程所形成的网络结构特征对综合承载力的非线性影响机制。(2)突破单一城市的静态分析范式,运用改进的引力模型和社会网络分析等跨学科方法,对城市群创新资源网络化配置的效应进行量化分析。(3)实证检验创新资源网络化配置结构特征对综合承载力的门槛效应,并依据结果提出“创新资源网络化配置结构优化-综合承载力跃升”的差异化政策建议,为破解城市群资源错配困境提供新的路径。

一、创新资源配置形成空间结构并影响综合承载力的理论模型

(一)模型的基本假设

参照钟粤俊等^⑦的思路,考虑包含A、B两个城市,创新、非创新两个部门的经济系统。所有消费者偏好相同,即效用函数相同。非创新部门生产用非创新资源,规模收益不变且资源在两城均匀分布,其产品可进行城际交易且成本为0。两城都有可能是非创新资源产品的输出或输入地。创新部门生产使用知识、技术、人才等创新资源生产差异化产品,尽管这些资源本身具有非竞争性、低边际成本和空间溢出的特性,其在市场上的配置方式仍大致与垄断竞争产品相似。因此,可假设创新部门的产品具有垄断竞争性。

(二)“冰山”运输成本和区域均衡方程组

“冰山”运输成本理论通过量化资源空间配置的渐进损耗特征,既精准刻画了城际贸易中的实际交易成本,又兼顾了规模经济与市场接近性对创新资源空间配置的双重影响^⑧。具体到本研究,从A城运输1单位的创新资源产品到B城,会融化掉一部分,最后剩下 τ ($\tau < 1$)部分。为了维持原有的收益,A城的企业在B城销售产品时,其价格就为 P_A/τ 。用 C_{AA} 表示A城的代表性消费者对A城的企业生产的

①于英杰,杜德斌,李祺祥,等:《中国三大城市群知识密集型制造业的空间集聚特征及形成机制——基于科技型企业大数据分析》,《人文地理》2024年第4期。

②丁涛,盛燕,谭睿鹏,等:《全国统一大市场与经济增长——来自安徽省加入长三角城市经济协调会的证据》,《数量经济技术经济研究》2024年第12期。

③Mariani L, Trivellato B, Martini M, et al. “Achieving Sustainable Development Goals Through Collaborative Innovation: Evidence from Four European Initiatives”, *Journal of Business Ethics*, 2022, 180(4): 1075–1095.

④赵林,汲中俊,吴殿廷,等:《黄河流域城市创新网络结构的演变特征及影响因素》,《世界地理研究》2025年第5期。

⑤周宏浩,谷国锋:《外部性视角下中国城市网络演化及其环境效应研究》,《地理研究》2022年第1期。

⑥Heysham N, Elkadi H. “Social Capital Geospatial Network Mapping for Furniture-Making: Impacts of Long-Term Social Bonds on City Fabric and Industry Competitiveness”, *Cities*, 2025, 159(4): 105802.

⑦钟粤俊,奚锡灿,陆铭:《城市间要素配置:空间一般均衡下的结构与增长》,《经济研究》2024年第2期。

⑧Samuelson P A. “The Collected Scientific Papers of Paul A”, *MIT press*, 1966, 2(1): 986–1014.

一种产品的需求量,则 C_{AB} 表示 A 城的代表性消费者对 B 城的企业生产的一种产品的需求量,那么 A 城消费者对两城市产品的相对需求可以表示为

$$\frac{C_{AA}}{C_{AB}} = \left(\frac{P_A}{P_B/\tau} \right)^{-\delta} = \left(\frac{r_A \tau}{r_B} \right)^{-\delta} \quad (1)$$

同样, B 城的消费者对 A、B 城市产品的相对需求量可表示为

$$\frac{C_{BA}}{C_{BB}} = \left(\frac{P_A/\tau}{P_B} \right)^{-\delta} = \left(\frac{r_A}{r_B \tau} \right)^{-\delta} \quad (2)$$

用 Z_{AA} 表示 A 城的代表性消费者对 A 城生产的产品支出与其对 B 城生产产品的支出之比; Z_{AB} 表示 B 城的代表性消费者对 A 城的产品支出与其对 B 城产品支出之比。

城市 A 的创新产品数量 $n_A = H_A \delta F/x$, 城市 B 的创新产品数量 $n_B = H_B \delta F/x$ 。在考虑运输成本的前提下, A 城企业在 A 城市场和 B 城市场的出售价格分别为 $P_A = r_A/\delta$, $P_A^* = r_A/\delta\tau$; B 城企业在 A 城市场和 B 城市场的出售价格分别为 $P_B = r_B/\delta$, $P_B^* = r_B/\delta\tau$ 。经过整理可得

$$Z_{AA} = \frac{n_A P_A C_{AA}}{n_B (P_B/\tau) C_{AB}} = \left(\frac{H_A}{H_B} \right) \left(\frac{P_A \tau}{P_B} \right)^{-\delta+1} = \left(\frac{H_B}{H_A} \right) \left(\frac{r_A \tau}{r_B} \right)^{-\delta+1} \quad (3)$$

$$Z_{AB} = \frac{n_A (P_A/\tau) C_{BA}}{n_B P_B C_{BB}} = \left(\frac{H_A}{H_B} \right) \left(\frac{P_A}{P_B \tau} \right)^{-\delta+1} = \left(\frac{H_B}{H_A} \right) \left(\frac{r_A}{r_B \tau} \right)^{-\delta+1} \quad (4)$$

用 Y_A 和 Y_B 分别表示 A 城和 B 城的总收入。其中, 两城市非创新资源的收入水平相等, 把非创新资源的收入水平作为收益的度量单位, 那么城市的总收入可以表示为:

$$Y_A = (1 - \mu)/2 + r_A H_A \quad (5)$$

$$Y_B = (1 - \mu)/2 + r_B H_B \quad (6)$$

另外, 一个城市创新资源的总收入来自两个城市对该城市创新资源产品的支出, 由于总收入中支出在创新资源产品上的比重为 μ , 所以各城市创新资源的总收入可以写成一个短期均衡方程组:

$$r_A H_A = \mu \left(\left(\frac{Z_{AA}}{1 + Z_{AA}} \right) Y_A + \left(\frac{Z_{AB}}{1 + Z_{AB}} \right) Y_B \right) \quad (7)$$

$$r_B H_B = \mu \left(\left(\frac{1}{1 + Z_{AA}} \right) Y_A + \left(\frac{1}{1 + Z_{AB}} \right) Y_B \right) \quad (8)$$

(三) 长期均衡实现与创新资源网络化配置

长期来看, 创新资源在城市间的分布会根据实际收益水平进行调整, 直到达成均衡状态, 即创新资源在两个城市的实际收益相等, $W_A = W_B$ 。创新资源在城市间的配置方程可以表示为 $S_H = (W_A - W_B)S_H(1 - S_H)$ 。长期均衡下, 创新资源的空间分布不变, 即 $S_H = 0$, 这有两种可能的长期均衡结果, 一是两个城市创新资源的实际收益相同, 二是全部的创新资源都集聚在一个城市。

根据实际收益的定义, $W_A = \frac{r_A}{P_A^A P_{NI}^{A(1-\mu)}}$, $W_B = \frac{r_B}{P_B^B P_{NI}^{B(1-\mu)}}$, 其中, P_A 和 P_B 分别为 A 城和 B 城创新资源产品的价格指数, P_{NI}^A 和 P_{NI}^B 分别为 A 城和 B 城非创新资源产品的价格, 并且 $P_{NI}^A = P_{NI}^B$ 。价格指数 $P_A = (\Delta n_w)^{1/(1-\delta)}$, $P_B = (\Delta^* n_w)^{1/(1-\delta)}$ 。

将上述表达式代入实际收益相等的条件 $W_A = W_B$ 中, 可得

$$\frac{r_A}{(\Delta n_w)^{\frac{\mu}{1-\delta}} P_{NI}^{A(1-\mu)}} = \frac{r_B}{(\Delta^* n_w)^{\frac{\mu}{1-\delta}} P_{NI}^{B(1-\mu)}}, \text{ 进一步变形可得: } \frac{r_A}{r_B} = \left(\frac{\Delta}{\Delta^*} \right)^{\frac{\mu}{1-\delta}}。$$

如果某种外生冲击导致 A 城创新资源份额 S_H 发生微小变化, 我们需要分析这种变化对实际收益差异的影响, 再来判断创新资源的配置趋势。

对 $w_A = \frac{r_A}{(\Delta n^w)^{\frac{\mu}{1-\delta}} P_{NI}^{A(1-\mu)}}$, $w_B = \frac{r_B}{(\Delta^* n^w)^{\frac{\mu}{1-\delta}} P_{NI}^{A(1-\mu)}}$ 关于 S_H 求导,通过求导可以得到 $\frac{\partial w_A}{\partial S_H}, \frac{\partial w_B}{\partial S_H}$ 的表达式,

进而分析实际收益差异 $w_A - w_B$ 随 S_H 变化的情况。

当 $\frac{\partial(w_A - w_B)}{\partial S_H} < 0$, 意味着创新资源份额的增加会导致实际收益差异减小,此时经济系统存在负

反馈机制,原有的均衡是稳定。例如,若 A 城创新资源份额稍有增加,使得 $w_A - w_B < 0$, 则创新资源从 A 城流向 B 城,从而恢复原来的均衡状态。

反之, $\frac{\partial(w_A - w_B)}{\partial S_H} > 0$ 时,创新资源份额的增加会导致实际收益差异进一步扩大,经济系统存在正

反馈机制,原有的均衡不稳定,创新资源会持续向一个城市集聚,直到形成“核心-边缘”结构,城市群中的多个城市两两之间的“核心-边缘”结构汇聚到一起形成创新资源网络化配置。

(四) 创新资源网络化配置结构特征对长期均衡的影响

本研究的创新资源网络化配置的结构特征从微观节点、中观社区和宏观整体三个层面来分析。具体如下:微观节点特征的测度包含加权出度(JCD_A)、加权入度(JRD_A)与加权点度中心度(JZD_A);中观社区特征的测度包含社区数量($SQSL$)、平均模块化度($PJMK$)和最大模块化度($ZDMK$);宏观整体特征的测度包括网络密度(MD)、平均聚类系数($PJLJ$)和平均路径长度($PJLJ$)。

我们设定 A 城为核心城市,基于克鲁格曼的新经济地理学框架,长期均衡可由动态函数式(9)表示:

$$\frac{\partial H_A}{\partial t} = \alpha \cdot f(MD, PJLJ, PJLJ) - \beta \cdot g(JCD_A, JRD_A, JZD_A, PJLJ, SQSL, PJMK, ZDMK) \quad (9)$$

其中 $\partial H_A / \partial t$ 表示 A 城创新资源份额随时间的变化率, α 和 β 分别表示创新资源的集聚和分散系数, $f(\cdot)$ 是刻画创新资源向 A 城集聚的函数, $g(\cdot)$ 是刻画创新资源从 A 城流出的函数。

网络结构特征的集聚效应应有三种触发机制。一是网络密度超过临界值($MD > MD^*$),产生和短期均衡中类似的本地市场放大效应,创新资源向核心城市 A 配置。二是平均聚类系数超过临界值($PJLJ > PJLJ^*$),出现产业集群,本地生产成本下降,创新产品价格指数下降,实际收益上升($W_A = r_A / P_A^{\mu} P_{NI}^{A(1-\mu)}$),创新资源流入 A 城。三是平均路径长度低于临界值($PJLJ > PJLJ^*$),外地产品在本地售价($\bar{P}_A = \delta \tau a_I r_B / (\delta - 1)$)降低,使得 A 城实际工资上升,吸引人才资源流入。

网络结构特征的分散效应也有三种触发机制。一是多中心均衡要求网络节点的资源输出和资源输入大致相同($JCD_A \approx JRD_A$)。二是点度中心度低于临界值($JZD_A < JZD_A^*$)且平均路径长度高于临界值($PJLJ < PJLJ^*$),对应的核心节点的主导力弱且资源配置阻力大($\partial(w_A - w_B) / \partial S_H < 0$),A 城的创新资源被反向调节。三是网络密度处于中间值范围($MD \in [MD^L, MD^H]$)、社区数量处于中间值范围形成多中心结构($SQSL \in [SQSL^L, SQSL^H]$)且模块化度处于中间值($PJMK \in [PJMK^L, PJMK^H]$, $ZDMK \in [ZDMK^L, ZDMK^H]$),网络结构通过临界区间调节,促进社区与模块化度的竞争和合作平衡,并最终触发“价格-工资-资源”负反馈机制以促进“核心-边缘”网络结构向多中心网络结构转变。

(五) 创新资源网络化配置结构特征影响综合承载力

综合承载力(CCC)是一个多维且复杂的概念,涵盖了经济、社会、环境等多个层面,是衡量城市群在可持续发展框架下所能承载的人口规模及相应经济社会总量的关键指标。创新资源配置形成网络化配置,并通过其微观节点特征、中观社区特征和网络整体特征调控均衡,并影响着综合承载力,具体过程如下。

首先假设综合承载力处于稳态,再分析网络结构特征如何改变这一均衡状态,并对综合承载力产生影响。当 A 城综合承载力处于稳态时,其综合承载力的变化率为 0,见式(10)。

$$\frac{\partial CCC_A}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

参照垄断竞争模型,式(10)可转化成式(11)。

$$\frac{\partial CCC_A}{\partial t} = \psi \frac{M_H}{P_A} = \psi \frac{M_H}{[H_A P_A^{1-\delta} + (1-H_A)(1-\tau)^{1-\delta} P_B^{1-\delta}]^{\frac{1}{1-\delta}}} \quad (11)$$

其中, M_H 是 A 城企业的边际创新资源生产投入, ψ 是影响系数常数项。由式(11)可知 P_A 和 $P_A^{1-\delta}$ 的变动会带来稳态的改变,因此高加权出度(JCD_A)和高加权入度(JRD_A)可通过提高创新资源配置速率,降低本地价格 P_A ,给综合承载力带来正向影响;高平均聚类系数(PJL)则可通过创新集群效应,降低边际成本($P_A^{1-\delta}$),也给综合承载力带来正向影响。

另外,式(11)表明创新资源配置份额(H_A)的变化也能带来稳态的改变。再结合式(9)分析可知:那些影响创新资源配置份额变化率创新资源网络化配置结构特征,也会对综合承载力产生影响。因此,网络结构特征所体现的集聚效应和分散效应,通过其对应的六种触发机制,同样会促使综合承载力产生动态变化。

二、创新资源网络化配置对综合承载力影响的实证研究设计

(一) 样本选择

研究选取分别代表东、中、西部的长三角、长江中游和成渝三大城市群作为样本。依据相关政策文件^{①②③}并考虑数据可得性,最终在上述城市群中分别确定了 28、27 和 16 个城市作为研究对象。

本研究样本涵盖上述 71 个城市 2003 至 2023 年的数据。21 年的时间跨度完整覆盖了创新驱动战略深化与新型城镇化快速推进时期。个别缺失数据则采用线性插值、OriginPro 软件查找最优拟合函数等方法补齐。

(二) 实证模型设计

理论模型表明创新资源网络化配置结构特征对综合承载力的影响具有非线性特点,故采用面板门槛模型回归提高估计精度。1999 年, Hansen^④ 提出了一种静态面板门槛回归方法,该方法允许变量之间存在非线性关系,一般静态面板门槛模型可以用公式(12)表示。

$$y_{it} = (1, x_{it}) \beta_1 1\{q_{it} \leq C\} + (1, x_{it}) \beta_2 2\{q_{it} > C\} + \alpha_i + u_i + v_{it}, i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad (12)$$

其中, y_{it} 是因变量, x_{it} 是 $k \times 1$ 的时变向量。 $1\{\cdot\}$ 和 $2\{\cdot\}$ 是指示函数, q_{it} 是门槛变量。 C 是门槛参数, β_1 和 β_2 是与不同机制相关的斜率参数。 α_i 是随机扰动项。 u_i 和 v_{it} 分别是未观测到的个体固定效应和时间固定效应。

在静态面板门槛模型的基础上,2016 年, Seo 和 Shin 开发了一阶差分广义动态门槛方法,该方法在回归和门槛效应中都可以容忍内生性^⑤。2019 年, Seo 等开发了动态面板门槛模型程序^⑥,这使得对大型复杂数据,特别是短时间跨度的面板数据处理更加灵活。考虑到综合承载力具有滞后的影响作用,本

①《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,中华人民共和国中央人民政府网, https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5462503.htm。

②《长江中游城市群发展规划》,中华人民共和国中央人民政府网, https://www.gov.cn/xinwen/2015-04/17/content_2848516.htm。

③《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》,中华人民共和国中央人民政府网, https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content_5643875.htm。

④ Hansen B E. "Threshold Effects in Non-Dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference", *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.

⑤ Seo M H, Shin Y. "Dynamic Panels with Threshold Effect and Endogeneity", *Journal of Econometrics*, 2016, 195(2): 169-186.

⑥ Seo M H, Kim S, Kim Y J. "Estimation of Dynamic Panel Threshold Model Using Stata", *Stata*, 2019, 19(3): 685-697.

研究在公式(12)的基础上,通过引入综合承载力的滞后项 y_{it-1} ,构建动态面板门槛模型^①,见公式(13)。

$$y_{it} = (1, x_{it})\beta_1 1\{q_{it} \leq C\} + (1, x_{it})\beta_2 1\{q_{it} > C\} + \beta_3 y_{it-1} + \alpha_i + \delta_{it}, i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

其中, y_{it-1} 为 y_{it} 的滞后项, β_3 为滞后项对 y_{it} 的影响系数。

(三) 变量介绍

(1) 门槛变量。创新资源配置水平。选择创新资源配置水平作为门槛变量是根据理论模型的结论:创新资源配置份额的动态变动,既是网络化配置的产物,又调节着其对综合承载力的影响。

本研究中创新资源配置水平的综合测算体系包括:普通高等学校和科研院所数量之和度量的创新主体;普通高等学校专任教师数、科学研究和技术服务业就业人数、信息传输/软件和信息技术服务业就业人数、R&D 从业人员数度量的创新人才;R&D 内部经费支出度量的创新投入;专利申请授权量度量的创新产出。上述 7 项指标通过差分法赋权形成综合指标,确保测度体系的科学性。

(2) 待验证的核心解释变量。创新资源网络化配置结构特征相关的 9 个变量。测算时先基于改进的引力模型构建城市群创新资源网络化配置的基本框架,再运用社会网络分析法计算网络的结构特征值。

借鉴兰泽英等^②的研究,对城市群内部城市间的外向创新关联度与内向创新关联度用修正的引力模型进行了量化分析。适应性的改进点有:考虑到节点城市创新资源流入和流出的差异,城市之间创新资源的引力是矢量,而非简单的相互关系;考虑到创新资源的配置受地理距离和经济因素的共同影响,采用经济地理距离作为衡量指标,把城市人口、GDP 相关指标也纳入进去。具体计算见公式(14)—公式(16):

$$Y_{ij} = K_{ij} \frac{\sqrt{IR_i IR_j}}{Dis_{ij}}, K_{ij} = \frac{IR_i}{IR_i + IR_j}, \frac{1}{Dis_{ij}} = 0.5 \times \frac{1}{GD_{ij}} + 0.5 \times \frac{1}{ED_{ij}} \quad (14)$$

$$GD_{ij} = \sqrt{(R \times \arccos(\sin(Lat_i) \sin(Lat_j) + \cos(Lat_i) \cos(Lat_j) \cos(Lng_i - Lng_j)))^2} \quad (15)$$

$$ED_{ij} = \sqrt{(PCGDP_i - PCGDP_j)^2} \quad (16)$$

其中, i 和 j 分别代表城市 i 和 j 。 Y_{ij} 代表城市 i 的创新资源对城市 j 的引力^③; K_{ij} 表示城市 i 的创新资源在城市 i 和 j 的创新资源关联中的贡献率; IR_i 和 IR_j 分别表示城市 i 和城市 j 的创新资源配置水平, $\sqrt{IR_i IR_j}$ 表示两地综合创新资源配置水平; Dis_{ij} 表示城市 i 和城市 j 之间的经济地理距离^④,经济和地理的权重设为 0.5; GD_{ij} 表示城市 i 和 j 的最短地理距离, R 为地球半径。 Lng_i 和 Lng_j 表示城市 i 和城市 j 的经度,东经为正,西经为负。 Lat_i 和 Lat_j 表示城市 i 和城市 j 的纬度,北纬为正,南纬为负。 ED_{ij} 表示两城经济距离,用人均 GDP 差额的绝对值度量。 $PCGDP_i$ 和 $PCGDP_j$ 表示城市 i 和 j 的人均 GDP。

在计算网络关系矩阵时,借助离散法剔除引力值过低的边,实现网络结构的可视化效果并降低噪声干扰,见公式(17)。

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, Y_{ij} \geq \frac{\sum_{j=1}^n Y_{ij}}{n} \\ 0, Y_{ij} \leq \frac{\sum_{j=1}^n Y_{ij}}{n} \end{cases} \quad (17)$$

①Charfeddine L, Rahman A. "Impact of Green and Energy Efficiency Policies on Environmental Sustainability: Evidence from Dynamic Panel Threshold Model", *Energy Policy*, 2025, 202(7): 114589.

②兰泽英,陈晓晖,刘洋,等:《韧性发展视角下省域低碳经济绩效评估与区域网络治理影响》,《经济地理》2024 年第 6 期。

③Zhao Y B, Zhang G, Zhao H W. "Spatial Network Structures of Urban Agglomeration Based on the Improved Gravity Model: A Case Study in China's Two Urban Agglomerations", *Complexity*, 2021(1): 1-17.

④刘威,杨开忠,董亚宁:《知识溢出对空间经济的影响机理——一个新空间经济学模型》,《经济学动态》2025 年第 4 期。

其中 n 为单个城市群中的城市数量,如果城市 i 和 j 引力小于群内两两城市之间的均值,把两城之间的边设为 0,否则设为 1。

在创新资源网络化配置刻画完成的基础上,再运用社会网络分析法测算网络的结构特征。微观节点特征的测度包括加权出度、加权入度和加权点度中心度。城市 i 的加权出度为 $JCD_i = \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ij} a_{ij}$, 反映其资源扩散能力;城市 i 的加权入度为 $JRD_i = \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ji} a_{ji}$, 体现节点城市的资源集聚能力;而城市 i 的加权点度中心度为: $JZD_i = JRD_i + JCD_i$, 体现节点城市在网络结构中的核心作用与地位。

中观社区特征的测度包含社区数量、平均模块化度和最大模块化度。研究采用复杂网络分析软件 Gephi 中的 Louvain 算法来进行网络中的社区检测^①。

宏观整体特征的测度包括网络密度、平均聚类系数和平均路径长度。网络密度的计算公式为: $MD = m/n(n-1)$, 鉴于此为有向网络,其中包含 n 个城市节点,实际存在的关系数量以 m 表示,而理论上存在关系数量的最大值为 $(n-1)/n$ 。平均聚类系数(PJL)可用公式(18)表示,平均路径长度($PJLJ$)可用公式(19)表示:

$$PJL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} J_i}{n}, J_i = \frac{2D_i}{B_i(B_i - 1)} \quad (18)$$

$$PJLJ = \frac{1}{2n(n-1)} \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^{i=n, j=n} d_{ij} \quad (19)$$

其中, D_i 是节点 i 和相邻节点间产生的实际边数, J_i 是单个节点的聚类系数, d_{ij} 是节点 i 和 j 之间的最短路径长度。

(3)被解释变量。综合承载力。基于理论模型部分的定义和内涵,综合承载力的测算体系包括创新资源配置水平、经济承载力、公共服务承载力和自然资源承载力四个子系统,共涵盖 28 个相关指标^②。

(4)控制变量。从业人数、城市化发展水平、土地面积和 PM2.5 值。其是在遵循文献基础^③、理论逻辑与数据可得性原则的基础上选取所得。其中,从业人数,主要控制区域劳动力规模对经济子系统的基础性影响;城市化发展水平,反映空间开发强度对资源承载的挤压效应;土地面积,约束地理空间规模对承载力的本底差异;PM2.5 值,量化环境子系统的大气污染约束强度。

(四)综合承载力和创新资源网络化配置之间的互动事实

基于样本数据,利用 OriginPro 软件的函数拟合功能绘制了城市群综合承载力与创新资源网络化配置的互动关系图(见图 1)。其互动关系可从创新资源网络化配置的微观节点、中观社区及宏观整体特征三个维度解析。在微观节点特征方面(图 1—a),当综合承载力较低时,城市节点间网络连接较为稀疏,提升节点入度、出度或中心度对其提升作用较为有限;进入中等阶段后,节点连接密度显著提高,能有力推动承载力增长;至较高阶段,网络形成“吸引资源—资源外溢—强化枢纽”的良性循环,实现自我强化。在中观社区特征方面(图 1—b),平均模块化度和社区数量均与综合承载力呈“U 型”关系,当二者均处于中等水平时,系统因分工缺乏规模效益且跨社区交易成本过高,其对承载力的积极效应最弱;最大模块化度与承载力呈“倒 U 型”关系,当模块化度处于中等水平时,系统实现平衡,核心社区能有效降低交易成本并协调资源配置,促使承载力达到峰值。宏观整体特征方面(图 1—c),网

①贺胜兵,张倩,刘友金:《超大规模市场下省际总量贸易和增加值贸易网络特征及演化机制——基于国内价值链的分解分析》,《当代经济科学》2025 年第 2 期。

②Yan L F, Ye W Z, Long H, et al. “The Influence of Innovative Resources on the Comprehensive Carrying Capacity of China’s Urban Agglomerations: A System Dynamics Perspective”, *Sustainability*, 2024, 16(14): 6191.

③Luo H, Zhang D M, Jiao L P. “Enhancing Marine Comprehensive Carrying Capacity and Energy Assessment and Prediction Using an Improved Ant Colony Algorithm and System Dynamics Model”, *EAI*, 2024, 11(1): 1-9.

络密度与承载力之间呈现近似的“U 型”关系:密度过低会阻碍资源配置,初始的增加反而会拉低承载力,而一旦突破临界点,配置效率将显著提升。平均路径长度与承载力呈“倒 U 型”关系:当路径长度为中等水平时,能在“集聚”与“分散”之间达到最佳平衡,此时承载力达到峰值。平均聚类系数与承载力保持稳定正相关关系,高承载力区域凭借高集聚系数产生“乘数效应”,并进一步增强对综合承载力的驱动作用。

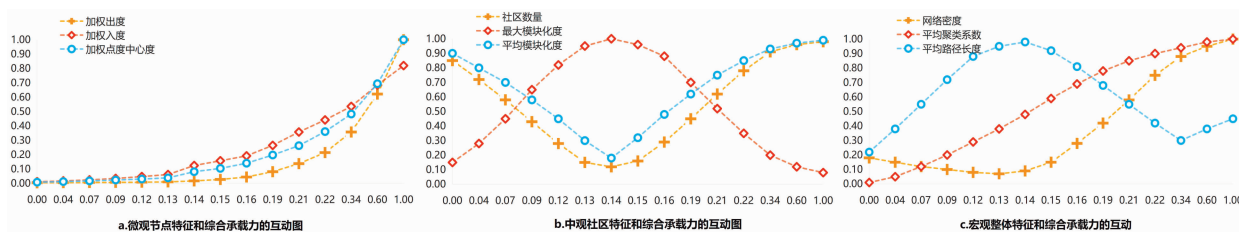


图 1 综合承载力和创新资源网络化配置的互动事实图

三、创新资源网络化配置对综合承载力影响的实证结果

(一) 动态面板门槛效应检验

网络结构特征的 9 个指标分别作为核心解释变量构建动态面板门槛模型,其线性检验 (*Bootstrap p-value*) 与门槛检验结果表明:微观节点特征中的加权出度和加权入度均通过了单门槛检验;加权点度中心度的 1、2 和 3 阶门槛效应均未通过线性检验^①;中观社区特征中的社区数量和平均模块化度通过了单门槛检验,最大模块化度通过了双门槛检验;整体结构特征中的网络密度和平均路径长度通过了单门槛检验,平均聚类系数通过了双门槛检验。

进一步,通过极大似然图 (LR 图) 对除加权点度中心度之外的 8 个待验证核心解释变量的门槛效应进行检验,见图 2。图中平行于 x 轴的虚线代表 95% 置信水平下的临界值 (7.35), 虚线与 LR 曲线相交形成的区间为置信区间,而置信区间内 LR 统计量的最低点即为各指标的门槛估计值。具体而言,单门槛指标 (包括加权出度、加权入度、社区数量、平均模块化度、网络密度和平均路径长度) 的 LR 曲线最低点均位于置信区间内,而双门槛指标 (平均聚类系数和最大模块化度) 的 LR 曲线则呈现双门槛特征,其两个置信区间分别对应不同阶段的门槛值。图中临界值 7.35 显著高于所有单、双门槛指标对应的 LR 统计量最低值 (即实际门槛估计值),说明检验出的单、双门槛结果均通过显著性检验,验证了门槛效应存在的真实性和有效性。

(二) 动态面板门槛估计结果

根据检验结果,进一步分析在创新资源配置水平的门槛效应下,8 个网络特征指标对综合承载力的非线性影响,并结合 2023 年的创新资源配置水平值,判断城市所处的影响模式。

基于动态面板门槛模型的检验结果,构建了微观节点特征中的加权出度和加权入度 2 个核心解释变量对综合承载力的动态门槛效应模型 (编号 1—2),其门槛估计值和 95% 置信区间见表 1。其中,加权出度的单门槛估计值为 0.578,加权入度的单门槛估计值为 0.474。

加权出度作为解释变量时,65 个城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.578,对应的回归系数弱正 (0.010)。说明创新资源不足时其配置方向以边缘城市向核心城市的单向输出为主,受限于网络的弱互通性,资源无法在城市间有效共享。另外 6 个城市对应的回归系数为 0.017,说明它们加权出度的提升,通过作用于跨区域技术合作强化资源配置效率,对综合承载力的拉动作用更大。

^①考虑到加权出度和加权入度均已通过单门槛效应检验,且加权点度中心度是由二者加权求和所得,因此不再另外建模分析加权点度中心度对综合承载力的影响。

加权入度作为解释变量时,63 个城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.474,对应回归系数为 0.011。另外 8 个城市对应的回归系数为 0.032。说明创新资源配置水平在拐点之后的城市,可以借助产业链联动和空间溢出效应,有效吸收外部区域溢出的知识,并作用于综合承载力。

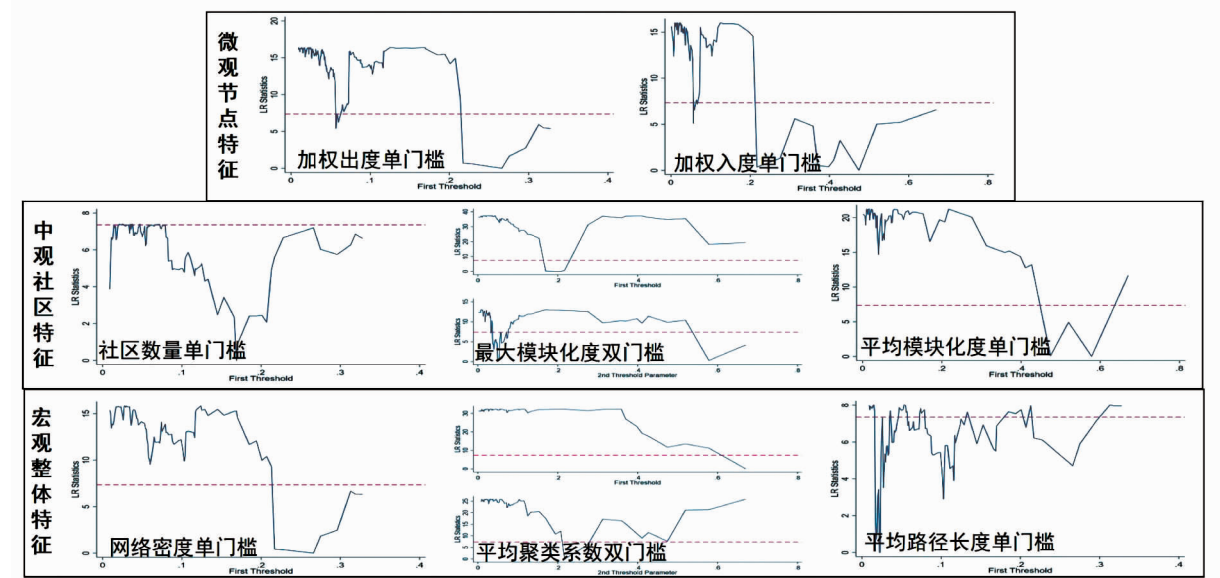


图 2 创新资源网络化配置结构特征对综合承载力门槛效应的似然图

表 1 微观节点特征的动态面板门槛模型回归结果

指标	模型类型及编号	回归系数	对应的门槛值(qx)范围	95%置信区间	不同门槛下的城市数目
加权出度	单门槛(1)	0.010 ***	$qx < 0.578$	(0.520, 0.671)	65
		0.017 ***	$qx > 0.578$		6
加权入度	单门槛(2)	0.011 ***	$qx < 0.474$	(0.317, 0.520)	63
		0.032 ***	$qx > 0.474$		8

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平下显著,下同。

基于动态面板门槛模型的检验结果,构建中观社区特征中的社区数量、最大模块化度和平均模块化度这 3 个核心解释变量对综合承载力的动态门槛效应模型(编号 3—5),其门槛估计值和 95%置信区间见表 2。社区数量的单门槛值为 0.671,最大模块化度的双门槛估计值分别为 0.050 和 0.207,平均模块化度的单门槛估计值为 0.578。

社区数量作为解释变量时,65 个样本城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.671,另外 6 个城市的创新资源配置水平高于门槛值 0.671。创新资源配置水平在拐点之前的城市社区数量对应的回归系数为负值(-0.112),说明创新资源稀缺状态下,社区间的竞争激烈,城市间资源共享深度受交通或政策性壁垒限制。

最大模块化度作为解释变量时,创新资源配置水平对应的双门槛值分别为 0.050 和 0.207。29 个城市的创新资源配置水平在第一个拐点之前,对应的回归系数为 0.058,说明创新资源极度稀缺时,适度模块化可能会通过局部资源整合来缓解全域错配问题。29 个城市的创新资源配置水平处于两个拐点之间,其对应的回归系数为 0.146,说明在中等创新资源配置水平下,模块化结构可能会通过加强区域内部分工产生协同效益。而创新资源配置水平在第二个拐点之后的 13 个城市对应的回归系数为-0.102。说明在创新资源极度丰富的条件下,模块化分割成为阻碍资源自由配置的“枷锁”。

平均模块化度作为解释变量时,65 个城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.578,对应的回归系数为-0.006。说明创新资源配置水平处于拐点前城市的模块化结构会加剧行政壁垒下的区域分割,并阻碍资源

跨模块配置,进一步抑制规模经济效应。另外 6 个城市对应的回归系数为 0.135,说明创新资源配置水平在拐点之后的城市,能借助模块内精细化分工和模块外协作的综合效应,助推综合承载力的提升。

表 2 中观社区特征的动态面板门槛模型回归结果

指标	模型类型及编号	回归系数	对应的门槛值(qx)范围	95%置信区间	不同门槛下的城市数目
社区数量	单门槛(3)	-0.112 **	$qx < 0.671$	(0.393, 0.701)	65
		0.563 **	$qx > 0.671$		6
最大模块化度	单门槛(4)	0.058 **	$qx < 0.050$	(0.174, 0.217), (0.420, 0.053)	29
		0.146 **	$0.050 < qx < 0.207$		29
		-0.102 **	$qx > 0.207$		13
平均模块化度	单门槛(5)	-0.006 ***	$qx < 0.578$	(0.473, 0.671)	65
		0.135 ***	$qx > 0.578$		6

基于动态面板门槛模型的检验结果,构建了宏观整体特征中的网络密度、平均聚类系数和平均路径长度这 3 个核心解释变量对综合承载力的动态门槛效应模型(编号 6—8),其门槛估计值和 95%置信区间见表 3。网络密度的单门槛值为 0.398,平均聚类系数的双门槛估计值分别为 0.217 和 0.671,平均路径长度的单门槛估计值为 0.671。

网络密度作为解释变量时,62 个样本城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.398,对应的回归系数为-0.158。说明这些城市创新资源配置水平偏低,网络链接的扩张反倒会使综合承载力下降。余下的 9 个样本城市的创新资源配置水平高于门槛值 0.398,对应的回归系数为 0.177。说明创新资源配置水平到达拐点后,网络链接的扩张能优化知识溢出和技术扩散的路径,并进一步提升综合承载力。

平均聚类系数作为解释变量时,对应的双门槛值分别为 0.217 和 0.671。创新资源配置水平低于第一个拐点的 59 个城市对应的回归系数弱正(0.165),说明低创新资源配置水平城市的网络聚集可借助其他城市的创新溢出,轻微拉动综合承载力。创新资源配置水平介于两个拐点之间的 6 个城市对应的回归系数为 0.231。说明中等创新资源配置水平下,集群内部协作深化能增强产业链和创新链的耦合,对城市综合承载力产生积极效应。而创新资源配置水平高于第二个拐点的 6 个城市对应的回归系数更高,为 0.353。在创新资源丰富的条件下,强大的集群结构可通过跨集群协作,突破局部化限制,整合内外部资源,扩大协同效益。

平均路径长度作为解释变量时,65 个样本城市的创新资源配置水平低于门槛值 0.671,另外 6 个城市的创新资源配置水平高于门槛值 0.671。创新资源配置水平在拐点之前的平均路径长度对应的系数为弱正(0.040)。说明创新资源稀缺状态下,城市间协同潜力受孤立发展模式的抑制,网络路径缩短反倒不利于综合承载力提升。创新资源配置水平在拐点之后的平均路径长度对应的回归系数为-0.388,说明创新资源丰富时,基础设施完善和制度协同可显著降低交易成本并增强空间压缩带来的经济效应。

表 3 宏观整体特征的动态面板门槛模型回归结果

指标	模型类型及编号	回归系数	对应的门槛值(qx)范围	95%置信区间	不同门槛下的城市数目
网络密度	单门槛(6)	-0.158 ***	$qx < 0.398$	(0.365, 0.411)	62
		0.177 ***	$qx > 0.398$		9
平均聚类系数	双门槛(7)	0.165 ***	$qx < 0.217$	(0.207, 0.276), (0.676, 1.000)	59
		0.231 ***	$0.217 < qx < 0.671$		6
		0.353 ***	$qx > 0.671$		6
平均路径长度	单门槛(8)	0.040 ***	$qx < 0.671$	(0.471, 0.705)	65
		-0.388 ***	$qx > 0.671$		6

(三) 内生性分析和稳健性检验

为排除创新资源配置水平作为门槛变量的内生性风险,参照现有文献中的常用方法,本研究采用 1952 年高校院系调整确立的高校数量作为工具变量^①。该变量是中央主导的外生历史事件,通过打造区域高端人才储备,直接影响区域吸引研发经费、设备及科研项目的能力。

为验证工具变量的有效性及结论稳健性,本文用 1952 年调整后确立的高校数量作为模型(1)中的创新资源配置水平的工具变量。针对工具变量相关性、排他性与门槛效应稳健性展开三项系统检验,结果见表 4。结果表明,工具变量满足相关性与排他性要求,且创新资源配置水平对综合承载力的门槛效应保持稳健。此外,依次对模型(2)—模型(8)进行同样的检验,结果具有一致性。

表 4 稳健性检验结果

检验序号	检验类别	检验方法	实证结果	拟合优度 R^2
检验(1)	工具变量相关性检验	第一阶段回归 F 统计量	$F = 29.781$ (* $p^* < 0.001$)	0.367
检验(2)	安慰剂检验	随机生成高校数量代替工具变量	$F = 1.257$ (* $p^* = 0.258$)	0.065
检验(3)	工具变量门槛效应检验	用工具变量替换创新资源配置水平,重复	Bootstrap * p^* value = 0.040	
		表 1 中关于网络密度的 Bootstrap * p^* value	门槛效应检验 * $p^* = 0.032$	

四、结论与政策启示

创新是引领发展的第一动力,然而中国城市群的创新资源配置面临三重困境。因此,探索如何借助创新资源的网络化配置来突破行政壁垒,促进各主体之间的互动以及知识的溢出,从而实现综合承载力的跃升,具有重要的理论和实践意义。为此,本文选取 2003—2023 年长三角、长江中游和成渝城市群 71 个城市的面板数据,实证研究了创新资源网络化配置形成的网络结构特征对综合承载力的影响。研究发现:(1)创新资源网络化配置的结构特征既可能显著提升综合承载力,也可能陷入无法提升综合承载力的困境。(2)创新资源配置水平越过拐点后,最大模块化度的影响不显著,而创新资源网络化配置的其余 7 个结构特征对综合承载力均产生了显著的正向影响。(3)城市群创新资源配置的梯度差带来拐点门槛效应:高能级城市通过创新资源网络化配置可实现承载力跃迁,低能级城市则受网络阻滞的影响,成为承载力虹吸-塌陷结构中的塌陷方。

基于研究结果有如下政策启示:(1)推动创新资源分类改革,针对创新资源配置水平处于拐点前后的城市采取差异化网络调整策略,并优先实施资源整合策略。通过跨区域创新联盟建设降低行政壁垒与交易成本。重点提升边缘城市承接核心城市技术溢出的能力,当地政府可通过创新券政策补贴和产学研基地建设,帮助它们实现拐点追赶。在中心城市实行专业化分工,增强其核心技术辐射范围,并完善技术溢出制度。(2)设立网络模块的动态调节制度。当创新资源稀缺时,适当提升模块化度,通过积极政策吸引跨模块创新协同,如设立跨专业融合创新支持政策,引导模块间资源配置。对资源富足的地区,则需平衡模块专业化和体系开放性,构建跨模块创新共享机制,还要防范过度模块化对资源市场化配置的刚性束缚。(3)实施网络布局和结构的协同优化。在空间布局上,通过构建产业共性技术转化平台,协调规划跨区域创新生态系统,提高资源输出与接收的供需匹配效率。在运行机制方面,利用人工智能、数字化等工具重建要素流动路径,降低技术交互和人才流动的贸易成本,激活网络优化形成的集聚效应。在结构调节方面,建立网络密度、社区数量和路径长度的动态搭配模型,实时监测网络结构特征之间的交互影响,防止单一参数过度优化造成资源“虹吸”、模块互相重叠等系统性风险。(4)落实“结构优化-门槛值管理-机制协同”三位一体的动态政策方针。结构优化要以创新资源网络化配置参数的动态数据为准绳,有针对性地设置个性化方案。门槛值管理则要求构建多层次的预警和响应机制,

①余振,李锦坡,蒋盛君:《高端人才空间集聚与后发国家创新发展——来自中国个体专利数据的证据》,《经济研究》2024 年第 8 期。

一旦数字技术监测到创新资源配置水平到达门槛拐点,应自动更换政策工具箱。机制协同可包括财政资金分配和行政部门的绩效考核改革。根据加权出度和平均模块化度差异化分配财政资金,并将跨地区技术合同数量和地方联合专利授权量等指标纳入政务业绩考核范畴,防止“行政区经济”和“模块化壁垒”的双向制度冲突。

On the Impact of Networked Allocation of Innovation Resources in Urban Agglomerations on Comprehensive Carrying Capacity:

An Empirical Test Based on Dynamic Threshold Effects

YE Wenzhong^{1,2}, YAN Lifang^{1,2} & CHEN Zixuan^{1,2}

(1. School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Research Institute of New Industrialization in Hunan, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Taking the Yangtze River Delta, the middle reaches of the Yangtze River and the Chengdu-Chongqing urban agglomeration as the research objects, based on the data from 2003 to 2023, the “iceberg” transportation cost theory model is used to analyze the process of networked allocation of innovative resources. The fact that the network structure formed by it affects the comprehensive carrying capacity is revealed by integrating the social network analysis method and the dynamic threshold model. The research results show that, on one side, the networked allocation of innovative resources has a nonlinear threshold effect on the comprehensive carrying capacity of urban agglomerations: high-level cities achieve a leap in comprehensive carrying capacity by optimizing the network structure, while low-level cities face the risk of being siphoned due to network blockage. On the other side, the key to breaking the “siphon-collapse” structure and enhancing the overall comprehensive carrying capacity lies in implementing a differentiated networked allocation strategy for innovative resources. Enhancing overall efficiency does not rely on the equalization of innovation resource allocation, but rather requires adopting a strategy of “highlighting key points and network collaboration”: promoting the concentration of innovation resources in high-level centers and simultaneously strengthening intercity connections.

Key words: urban agglomerations; level of innovation resource allocation; networked allocation of innovative resources; comprehensive carrying capacity

(责任校对 朱正余)