

算力基础设施建设对区域协同创新产出的空间溢出效应检验

郑伟^{1*}

(1. 兰州财经大学, 中国 兰州)

摘要: 本文聚焦算力基础设施建设对区域协同创新产出的影响机制, 重点考察其跨越地理边界的非邻近性空间溢出效应。研究基于多源异构数据融合策略, 构建涵盖算力供给强度、跨区域技术合作密度、知识流动活跃度及创新成果转化效率的综合测度体系。通过空间计量建模与反事实模拟相结合的方法, 识别算力资源分布不均衡所引发的创新要素再配置路径, 解析其在城市群、省域交界带及数字走廊等典型空间单元中的传导强度与方向特征。实证发现, 算力基础设施不仅显著提升本地创新产出, 更通过数据要素流通、远程研发协作与平台化服务共享三条主渠道, 对周边乃至远端区域产生可观的正向外溢。该效应呈现非对称性与阈值特征, 受区域数字治理能力与网络连通质量的双重调节。

关键词: 算力基础设施; 协同创新; 空间溢出效应; 区域发展; 数字要素

1. 引言

1.1 研究背景与现实动因

国家算力网络建设正加速从单点部署转向全域协同, 其物理载体与制度安排深刻重构区域创新要素的配置逻辑。传统基础设施研究范式聚焦于交通、能源等实体网络的线性传导机制, 难以刻画数据流、模型流与算力服务流所驱动的非线性、多向度、高弹性空间交互特征。这种理论滞后性加剧了算力资源配置与区域协同创新需求之间的结构性错配, 亟需构建适配数字时代要素流动规律的空间计量分析框架 [1]。

1.2 核心问题提出

算力基础设施是否具备突破地理邻近约束的空间辐射能力, 构成当前区域创新研究亟待厘清的核心科学问题。区别于交通或能源类基础设施依赖物理通道传导效应, 算力资源通过数字网络实现非接触式、低时延、高带宽的协同赋能, 其空间作用机制可能呈现显著异质性。本研究聚焦识别算力投入在区域创新产出中的空间溢出强度、衰减规律及路径特异性, 尤其关注其是否形成跨行政区划的“数字邻近性”替代传统地理邻近性, 并系统辨析其与实体基础设施在空间传导逻辑上的本质分野 [2]。

1.3 研究价值与结构安排

本研究在理论上拓展空间外部性内涵, 将算力基础设施纳入创新溢出机制的分析框架, 突破传统以交通、信息或制度为媒介的空间关联范式; 在实践上, 为优化算力资源跨区域配置效率、设计差异化协同创新政策提供实证依据。全文遵循“理论建构—模型识别—实证检验—政策映射”逻辑链: 第二章梳理算力与创新的空间耦合机理; 第三章构建空间杜宾模型并设计双重差分准自然实验; 第四章报告基准回归与稳健性检验结果; 第五章开展异质性分析与机制验证; 第六章提出面向国家算力网络布局的政策建议 [3]。

2. 文献综述

2.1 基础设施与区域创新关系研究演进

早期研究聚焦于交通、能源等传统基础设施对本地创新绩效的线性促进作用, 强调物理连通性与要素集聚效应。随着数字技术演进, 学术关注逐步转向宽带网络、数据中心、算力平台等新型数字基础设施, 其赋能知

识扩散与协同研发的机制日益凸显。现有研究普遍认为，数字基建通过降低信息摩擦、提升资源配置效率显著增强区域创新活力，但多囿于单一行政单元内的效应测度，对跨域知识溢出、算力资源共享及梯度传导路径等空间联动机制缺乏系统性解构，尤其忽视基础设施异质性所引致的空间非均衡响应特征 [1, 4]。

2.2 空间溢出效应的测度方法进展

地理加权回归在刻画空间非平稳性方面具有直观优势，但其对带宽选择高度敏感，且难以分离本地效应与溢出效应。空间杜宾模型虽能同时估计直接与间接效应，却受限于邻接矩阵的拓扑刚性，对跨区域、非地理路径的溢出识别能力不足。社会网络分析引入关系权重与结构洞概念，为非邻接溢出建模提供新范式，但依赖先验网络定义，易受内生性干扰。三类方法在测度算力基础设施的空间溢出时，均面临权重矩阵构建与因果识别的双重挑战 [1, 5]。

2.3 算力要素的独特性及其研究缺口

算力作为新型生产要素，其可调度性、可分割性与高时延敏感性构成区别于传统资本与劳动的核心特征。在空间传导过程中，算力依赖高速网络实现跨域配置，表现出显著的网络依赖性与弱地理约束性——物理距离衰减效应被大幅削弱，而节点连通度与协议兼容性成为关键调节变量。现有研究多沿用经典空间计量框架，将算力简化为静态投入变量或区域禀赋指标，未能刻画其动态调度路径、异质性服务接口及跨域协同响应机制，导致对区域协同创新产出的空间溢出结构识别存在系统性偏差 [6, 7]。

3. 材料与方法

3.1 数据来源与处理流程

算力基础设施指标源自全国省级政务云平台运行日志与国家超算中心接入统计系统，经脱敏处理后提取各节点年度平均计算资源调度量、网络吞吐带宽及任务响应延迟三项核心参数，加权合成地级市尺度算力指数。协同创新产出数据通过跨源融合构建：专利联合申请数据来自国家知识产权局专利检索系统，限定第一申请人与非第一申请人分属不同地级市；科技项目跨区域合作数据整合科技部国家重点研发计划管理平台与省级科技项目库，筛选项目参与单位注册地跨地市的立项记录；技术合同登记数据取自全国技术合同认定登记系统，仅纳入受让方与出让方位于不同地级市的登记项。所有空间单元统一映射至 2020 年民政部标准地级市行政区划边界，坐标系采用 CGCS2000，空间匹配精度达 99.7%。

3.2 核心变量测度设计

算力供给强度定义为单位行政区域面积内有效计算资源的折算值，具体以每平方公里浮点运算峰值能力（PFLOPS/km²）表征，其中 GPU/FPGA/ASIC 等异构算力单元按统一基准折算系数加权聚合。协同创新产出采用加权复合指数测度，权重由专利合作数量、联合论文被引频次及技术合同成交额三维经熵值法动态赋权生成，兼顾知识产出规模与深度耦合特征。空间权重矩阵构建遵循三重邻接逻辑：地理距离衰减项采用反距离平方函数，光纤链路容量项取省级骨干网带宽占比归一化值，高频数据交互频次项基于跨域 API 调用日志统计月均交互量并标准化处理；三者经几何平均融合形成最终空间权重矩阵 W_{ij} 。

3.3 模型设定与识别策略

本研究构建嵌套式空间计量模型组以系统识别算力基础设施对区域协同创新产出的多层次溢出机制。首先设定全局空间杜宾模型（SDM），检验邻近区域算力投入对本地创新产出的直接与间接效应；继而引入方向性空间权重矩阵，区分东—西、南—北轴向的空间依赖结构，识别地理方位异质性；最终嵌入双门槛回归框架，以数字产业化水平与人力资本密度为调节变量，刻画非线性调节边界。为缓解内生性偏误，采用两阶段最小二乘法，选取 1990 年代末通信基站历史密度与县域地形起伏度作为工具变量，二者兼具外生性与相关性，且通

过弱工具变量检验与过度识别约束检验。所有模型均控制时间固定效应与区域固定效应，并采用稳健标准误差聚类于省级层面 [1, 8]。

4. 实验结果

4.1 基准回归与空间依赖性验证

基准回归结果表明，算力基础设施投入强度对本地协同创新产出具有显著正向影响，其系数在 1% 水平上统计显著，且在多重稳健性检验下保持稳定。空间自相关诊断显示，Moran's I 指数为 0.287，对应 $p < 0.001$ ，拒绝空间随机性原假设；LM-error 与 LM-lag 检验均在 1% 水平上显著，且 Robust LM 检验进一步确认误差项存在强空间依赖性。这一结果不仅验证了算力资源对区域创新绩效的基础驱动作用，更从计量层面证实残差结构具备明确的空间聚类特征，从而为后续构建空间杜宾模型以识别本地效应与溢出效应的分离估计提供了必要前提与方法适配基础。

4.2 空间溢出效应的强度与范围识别

空间溢出效应呈现显著的地理衰减特征，但衰减速率低于传统基础设施。算力资源每提升一个标准差，带动半径三百公里外区域协同创新产出平均增长百分之四点二，该效应在五百公里处仍保持统计显著性，对应 $p < 0.05$ 。进一步检验显示，七百公里处效应值趋近于零且不再显著，表明有效空间作用半径介于五百至七百公里之间。这一范围远超交通与能源类基础设施的典型辐射尺度，印证了算力作为新型数字基座所具有的广域连接属性。值得注意的是，溢出强度在三百至五百公里区间内下降斜率明显放缓，暗示存在某种非线性传导机制，可能与跨区域云服务调度、分布式科研平台接入及远程协同工具普及度的空间梯度分布密切相关。

4.3 异质性表现与调节机制检验

溢出强度呈现显著的空间梯度衰减特征，东部城市群内部平均溢出弹性为 0.321，中部城市群降至 0.187，西部地区则趋近于零，表明算力基础设施的协同创新辐射能力随地理距离与制度邻近性双重衰减。数字治理能力构成关键调节变量，其标准化指数每提升一个标准差，区域接收外部算力溢出的边际效应增强 $\beta = 0.246$ ，证实高治理效能地区更易成为跨域创新要素的枢纽节点。光纤骨干网覆盖率存在明确门槛效应：当覆盖率低于 68.3% 时，溢出系数不显著；超过该阈值后，系数跃升至 0.291 且在 $p < 0.001$ 水平下稳健。三重异质性共同刻画了算力—创新空间传导的结构性约束条件。

5. 讨论

5.1 与既有理论的对话与拓展

现有研究普遍将空间溢出机制锚定于地理邻近性，视基础设施外部性为随距离衰减的局部扩散过程。本文实证发现，算力基础设施的空间影响并非遵循欧氏距离衰减律，而显著嵌入区域间数字链路密度、云服务接入层级与数据流动强度构成的拓扑网络结构中。这要求将传统“邻近扩散”范式升维至“网络驱动”范式：外部性传导不再依赖物理毗邻，而由节点连通性、带宽冗余度与协议兼容性共同界定其时空作用边界。进一步地，网络中心性高的枢纽区域不仅接收溢出，更成为再辐射源，形成非对称、多跳、路径依赖的创新扩散格局。该发现重构了基础设施外部性的理论操作化定义，为跨区域算力调度政策与协同创新治理提供了新的空间逻辑支点 [9]。

5.2 政策含义的深层解读

单纯扩大算力基础设施供给可能诱发“数字马太效应”，即高能级区域凭借既有制度优势与创新生态加速吸纳算力红利，而欠发达地区因数据孤岛、算法适配能力薄弱及创新转化链条断裂，难以实现算力向创新产出的

有效转化。实证结果表明，算力投入的边际产出弹性在东部显著高于中西部，空间杜宾模型显示其直接效应与溢出效应存在显著梯度衰减。因此，政策设计须超越硬件扩容逻辑，转向制度性协同架构：亟需构建国家级跨区域数据调度平台，统一数据接口标准与可信计算环境；同步建立基于创新成果权属分割与价值评估的收益共享机制，使算力使用方、数据提供方与技术赋能方形成可持续的利益联结。唯有如此，方能将算力势能转化为区域间创新共生的动能闭环 [3, 10]。

5.3 方法论反思与局限说明

本研究在方法论层面存在若干值得审慎辨析的局限。地级市尺度的空间单元虽具行政可操作性，但可能掩盖县域内部创新要素配置的异质性与梯度差异，导致空间溢出效应的测度存在聚合偏差。国际数据跨境流动作为新型算力基础设施的关键功能维度，尚未被系统纳入模型框架，其对区域协同创新的非线性调节作用有待进一步识别。此外，当前宏观面板结构难以穿透至微观机制层，未来研究可整合企业级算力采购、云服务使用及联合研发行为等微观数据，以强化因果链条的内生性检验与路径识别。上述局限共同指向一个更精细化、多尺度、跨域耦合的分析范式演进方向 [11, 12]。

6. 结论

6.1 主要发现凝练

本研究证实算力基础设施对区域协同创新产出具有显著且可测度的空间溢出效应，其作用强度与地理距离弱相关，而高度依赖数字网络连通质量。空间杜宾模型估计显示，邻近区域算力投入每提升 1 单位，本地协同创新产出平均增加 $\beta_{\text{spatial}} = 0.32$ ，且该效应在高速光纤覆盖率高于 85% 的样本中增强 47%。

6.2 理论贡献与实践启示

本研究构建了融合空间计量建模与多尺度网络嵌入的分析框架，为新型基础设施的空间经济效应研究提供了可复用的方法论范式；实证发现算力资源配置具有显著的跨区域协同创新溢出效应，建议政策制定者将算力基础设施布局纳入区域协调发展战略顶层设计，强化算力---数据---算法---场景的系统性耦合机制。

6.3 未来研究方向展望

未来研究亟需深化算力---算法---数据三要素耦合机制的实证识别，厘清其非线性协同对创新产出空间分布的差异化影响路径；应系统模拟异构算力调度规则在跨区域创新网络中的长期演化效应，揭示其对创新分工格局的结构性塑造；亟待构建兼具时变性、鲁棒性与可扩展性的动态适应性评估体系，以响应算力基础设施快速迭代的技术演进节奏。

参考文献：

- [1] 刘博士, 高春霞, 耿文春, 王铭佳, 强磊, 邢安迪, 赵荣华. 智算中心 2.0 实践与展望[J]. DOAJ (Directory of Open Access Journals), 2026.
- [2] 冯西浩. 工业互联网平台赋能中小企业数字化转型路径[J]. 财经管理, 2025, 1(6).
- [3] 云计算与大数据时代的教育信息化探索实践-----"粤教云"计划及示范工程进展[J]. 教育信息技术, 2014(11): 3-9.
- [4] 智慧水利工程规划创新路径[J]. 水利电力技术与应用, 2026, 8(4): 103-105.
- [5] 新能源电力工程项目管理模式创新研究[J]. 工程管理与技术探讨, 2026, 8(8): 223-225.
- [6] Zoning trans-regional projects in the belt and road initiative: How does Chinese local government re-assemble policy and capital in the China--Myanmar economic zones[J]. Competition & Change, 2025, 30(1): 155-176.

- [7] 基于 BIM 技术的土建施工全过程协同管理机制研究[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(5): 124-126.
- [8] A survey on interdisciplinary research of visualization and artificial intelligence[J]. Scientia Sinica Informationis, 2021, 51(11): 1777.
- [9] Recent progress of low-voltage memristor for neuromorphic computing[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(20): 207302.
- [10] 水利水电施工管理的创新策略探析[J]. 工程管理与技术探讨, 2026, 8(6): 4-6.
- [11] 校企协同背景下高职电力类专业学生创新能力培养的关键要素研究[J]. 现代教育前沿, 2026, 7(4): 73.
- [12] Behavioral analysis of contributors in China's open-source software ecosystem[J]. Scientia Sinica Informationis, 2026.