

数字经济与绿色创新效率

——基于空间Markov链与空间效应分析

钟耕昊

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年4月6日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

绿色创新在加快构建新发展格局和推动区域高质量发展中起到至关重要的作用, 明晰数字化、绿色化如何实现区域创新协同发展具有重大意义。本文基于我国275个地级及以上城市2011~2022年的面板数据, 利用纵横向拉伸法、超效率SBM模型对数字经济和绿色创新效率进行测度, 对其进行区域差异分析与空间特征分析, 进而系统研究数字经济对绿色创新效率的空间溢出效应。研究显示, 第一, 我国城市群数字经济水平呈稳步上升趋势, 但区域发展不平衡问题仍突出。第二, 绿色创新效率演化呈现显著路径依赖特征和空间稳定性: 高效区域需构建跨区域创新网络, 强化技术溢出并建立风险隔离机制; 中等效率区域应加强协同创新体系建设, 提升抗低效拖拽能力; 低效区域亟需政策干预打破“创新贫困陷阱”, 完善要素流动机制和预警系统。第三, 数字经济通过物联网等技术打破时空限制, 形成区域内的双重溢出效应, 促进资源优化配置。需优化绿色金融机制, 环境规制长期为绿色创新提供制度保障, 但短期可能抑制创新活力, 技术创新是核心驱动力, 其传导机制仍需优化。研究强调, 需辩证看待政策工具的时滞效应, 在保持创新管理刚性的同时, 注重培育区域创新生态系统的韧性, 以实现效率提升的可持续性, 从而助力经济高质量发展的对策建议。

关键词

数字经济, 绿色创新, 空间溢出, 区域创新

Digital Economy and Green Innovation Efficiency

—Based on Spatial Markov Chain and Spatial Effect Analysis

Genghao Zhong

School of Economics and Finance, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 6th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: May 27th, 2025

文章引用: 钟耕昊. 数字经济与绿色创新效率[J]. 电子商务评论, 2025, 14(5): 2123-2134.
DOI: 10.12677/ec.2025.1451502

Abstract

Green innovation plays a crucial role in accelerating the construction of a new development pattern and promoting high-quality regional development. It is of great significance to clarify how digitalization and greenization can achieve regional innovation and coordinated development. This paper measures the efficiency of digital economy and green innovation based on the panel data of 275 prefecture-level and above cities in China from 2011 to 2022, using the longitudinal stretching method and the super-efficiency SBM model. It conducts regional difference analysis and spatial characteristic analysis, and then systematically studies the spatial spillover effect of digital economy on green innovation efficiency. The research shows that, first, the level of digital economy in China's urban agglomerations has shown a steady upward trend, but the problem of regional development imbalance remains prominent. Second, the evolution of green innovation efficiency presents significant path dependence characteristics and spatial stability: efficient regions need to build cross-regional innovation networks, strengthen technology spillovers and establish risk isolation mechanisms; medium-efficiency regions should strengthen the construction of collaborative innovation systems and enhance the ability to resist low-efficiency drag; inefficient regions urgently need policy intervention to break the "innovation poverty trap", improve the mechanism of factor mobility and the early warning system. Third, digital economy breaks the time and space limitations through technologies such as the Internet of Things, forming dual spillover effects within and outside the region, promoting the optimization of resource allocation. It is necessary to optimize the green financial mechanism, environmental regulations have long provided institutional guarantees for green innovation, but they may inhibit innovation vitality in the short term. Technological innovation is the core driving force, and its transmission mechanism still needs to be optimized. The research emphasizes that the lag effect of policy tools should be viewed dialectically. While maintaining the rigidity of innovation management, attention should be paid to cultivating the resilience of regional innovation ecosystems to achieve sustainable efficiency improvement, thereby contributing to the countermeasures and suggestions for promoting high-quality economic development.

Keywords

Digital Economy, Green Innovation, Spatial Spillover, Regional Innovation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放四十余年来,我国经济总量从1980年的4517.8亿元跃升至2024年的141万亿元,对全球经济增长贡献率持续超30%¹。在“十四五”规划强调城市群战略核心地位的背景下,数字经济正加速重构区域发展格局。值得关注的是,以珠三角、长三角为代表的东部城市群数字经济水平显著领先于中西部城市群,呈现显著的“核心-外围”结构特征。这种空间分异是否形成创新要素的虹吸效应?数字经济的网络化特征如何重塑绿色创新的空间交互模式?在环境约束趋紧与区域失衡加剧的双重挑战下,亟需构建“数字经济-绿色创新-空间协同”三位一体的发展新范式。

本文聚焦三个递进式研究维度:第一,基于2011~2022年十大城市群面板数据,揭示数字经济水平

¹ 参见《向前发展,需要更大的推动力》, http://scdfz.sc.gov.cn/gzdt/zyhy/content_174613。

差异的时间演变规律；第二，通过空间马尔科夫链与类型转移矩阵，解析绿色创新效率的空间依赖特征；第三，构建空间杜宾模型，剖析数字经济对绿色创新效率的溢出路径。那么，我国城市群数字经济的区域分异是否存在差异？其差异化的驱动机制如何形成？绿色创新效率的空间演化是否呈现路径依赖特征？不同效率等级区域的跃迁机制有何异质性？进一步，数字经济是否对绿色创新效率产生空间溢出效应？这些问题的解答，对构建数字化与绿色化协同发展机制具有重要价值。本研究理论层面构建水平测度和空间关联框架，揭示数字经济与绿色创新的非线性空间交互规律，通过核心-外围结构模型阐明梯度传递机制，拓展了区域创新理论的空间动态分析维度；实践层面提出我国地级市绿色创新效率演化呈现显著路径依赖特征与空间稳定性，不同效率等级区域需差异化施策。研究发现东部城市群已形成数字经济“双循环”枢纽功能，中西部正经历创新生态系统重构，这不仅为优化国家数字基础设施布局提供实证依据，更为全球后发地区数字化与绿色化协同发展贡献中国方案。

2. 理论分析

数字经济作为以数据要素为核心驱动力的新型经济形态，依托网络化、智能化等技术手段，通过数据资源的深度开发与跨界融合，重构了传统经济系统的运行范式[1]。其本质特征体现为要素数字化、产业智能化、资源共享化，正在成为继农业经济、工业经济之后的新型经济形态[2]。在此演进过程中，绿色创新效率作为衡量区域创新系统生态效益的重要指标，反映了单位资源投入下环境友好型创新成果的产出效能[3]。绿色创新具有双重正外部性，既能推动技术进步和经济效益，又能显著改善环境质量。通过这种双重效应，绿色创新不仅关注技术创新，还将环境保护作为核心，从而提升经济发展质量和环境效益。进一步利用绿色生产及其消费方式，绿色创新能够加速实现绿色发展，实现经济与生态环境的协调发展。体而言，需要加强区域创新能力，形成创新资源合理配置、要素有序流动的新格局，推动绿色技术的产业化和规模化，以期以最小的环境代价，得到较低的投入产出比，从而为缩小区域经济差距，经济可持续发展提供源源不断的动力。

数字经济通过高连通性突破地理限制，其平台效应重构区域创新格局[4]：一方面加速资源集聚与创新要素优化，借助数字平台提升市场透明度，促使企业将绿色转型内化为竞争策略。同时，数字经济的持续渗透，协助企业间创造出横向和纵向的互补性资产，表现出强大的整合效应，实现对企业原有创新价值识别机制的重塑[5]。另一方面通过价值链传导形成横向竞争与纵向协同双重驱动，推动产业链绿色升级。通过创新扩散，数字经济的发展虽然加大城乡地区的数字鸿沟，但能够促进创新知识扩散使地区创新效率提升[6]。在产业集聚区，知识共享与设施共建促进污染减排与创新效率协同提升，数字化平台通过降低交易成本加速技术扩散。但需警惕数字鸿沟可能加剧创新效率的空间极化。这种机制为构建“数字赋能-绿色创新”的区域协同发展提供新路径。

3. 指标测度与模型设计

3.1. 变量定义

3.1.1. 被解释变量：绿色创新效率

科学合理的评价指标体系是评估城市绿色创新效率的关键。绿色创新效率将环保与经济增长结合，强调创新过程中资源节约与污染减少。本文从创新投入与创新产出两个维度选取指标。研究方法采用改进的超效率 SBM-DEA 模型，突破传统 DEA 的三大局限：通过引入非径向、非角度处理方式，有效捕捉投入产出松弛变量；通过设置独立权重向量 λ ，实现决策单元相对效率的精准度量。绿色创新投入产出指标见表1所示。

Table 1. Selection of input-output indicators for urban green innovation efficiency
表 1. 城市绿色创新效率投入产出指标选取

指标类型	一级指标	二级指标
投入	人员投入	规模以上工业企业 R&D 人员数
		规模以上工业企业 R&D 经费内部支出
	资本投入	环境治理投入
	能源投入	全社会用电量
期望产出	经济效益	人均 GDP
	创新效益	专利授权量
	绿色发展	建成区绿化覆盖率
非期望产出		工业废水排放量
	环境污染	工业二氧化硫排放量
		工业烟粉尘排放量

3.1.2. 解释变量：数字经济

综合国内外数字经济测度的指标体系，考虑到数字经济核心内涵和城市层面相关数据的可获得性，本文借鉴赵涛等[4]和陈贵富等[7]从数字基础设施、数字产业化和产业数字化三个维度测度数字经济发展指标体系，见表 2 所示。在数字经济发展水平测度方法选择中，传统熵值法虽通过客观赋权减少人为干扰，却难以捕捉指标间关联性；主成分分析法依赖信息浓缩实现降维，易造成关键数据损耗；层次分析法因主观赋权存在显著人为偏差。为突破单一方法局限，本文基于郭亚军、王常凯等学者研究，引入纵横向拉开档次法，通过动态整合时序数据与全局权重优化，在保留指标原始信息完整性的同时，既消除主观干扰，又能同步解析区域间差异特征与时间维度上的演进规律，实现横向空间对比与纵向发展效率评估的有机统一，显著提升测度结果的系统性与动态解释力。

Table 2. Construction of the digital economy indicator system
表 2. 数字经济指标体系构建

一级指标	二级指标	三级指标	数据来源
数字经济	数字基础设施	每百人移动电话用户数	《中国城市统计年鉴》
		每百人互联网用户数	
	数字产业化	信息传输、计算机服务和软件从业人员占比	
		人均电信业务总量	
	产业数字化	数字普惠金融指数	北京大学数字普惠金融指数

3.1.3. 控制变量

绿色创新效率受到多重因素的影响，为减少遗漏变量残差，更加准确地、合理地探讨数字经济对绿色创新效率的影响，本文选取城市经济密度、财政投资力度、科教支出、人力资本、环境规制、绿色金融作为控制变量，并在分析当中控制年份和省份。通过这种方式，能够更全面地评估影响城市绿色创新效率的各类因素，提高研究的可靠性。

3.2. 模型建立

为检验数字经济与绿色创新效率之间的空间关系，经过一系列检验选用空间杜宾模型，如下设定：

$$GTEP_{it} = \alpha + \rho WGTEP_{it} + \beta Dige_{it} + \theta WDige_{it} + \mu X_{it} + tWX_{it} + \zeta_t + \gamma_t + \varepsilon_{it}$$

3.3. 样本选择与数据来源

本文的研究对象为我国 275 个地级市的面板数据。考虑到数据的可得性，选取的时间为 2011~2022 年。部分缺失数据采用插值法得出。此外，为剔除极端值的影响，本文对所有连续变量的数据进行了 1% 的缩尾处理，具体如表 3 所示。

Table 3. Data description
表 3. 数据说明

变量类型	变量含义	测算方式	数据来源
被解释变量	绿色创新效率	超效率 SBM	
核心解释变量	数字经济	纵横向拉伸	
控制变量	城市经济密度	地区生产总值/行政区域土地面积	
	财政投资力度	固定资产投资/政府财政一般支出	《中国统计年鉴》
	科教支出	地方财政科学技术支出和教育支出/ 地方公共财政支出	《中国科技统计年鉴》 《中国环境统计年鉴》 以及各地级市统计年鉴
	人力资本	普通本专科在校学生数/年末总人口	
	环境规制	地区环保支出/地方公共财政支出	
	绿色金融	区位熵测算	

4. 实证分析

4.1. 数字经济发展水平的差异性分析

“十四五”规划强调“以促进城市群发展为抓手”，进一步凸显了城市群在国家经济战略中的核心地位。作为推动城市可持续发展的重要路径，城市群建设亟需深入研究其数字经济的发展趋势及特点。本文选取我国具有代表性的京津冀、辽中南、长三角、海峡西岸、山东半岛、珠三角、中原、长江中游、成渝十大城市群作为研究对象，具体分析结果见表 4，以此揭示我国城市群数字经济的发展水平。

表 4 展示了我国 2011 至 2022 年十大城市群数字经济发展水平的测算结果，为我们分析区域间及时时间序列上的发展差异提供了有力依据。总体来看，城市群数字经济水平呈现出稳步上升的态势，反映了国家在数字经济战略推动下取得的阶段性成果，但区域间的不平衡现象仍然突出。

Table 4. Digital economy development levels of the top ten urban agglomerations from 2011 to 2022
表 4. 2011~2022 年十大城市群数字经济发展水平

城市群	2011	2022	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2021	2022	均值	年均增长率
京津冀	0.0784	0.1547	0.2358	0.2554	0.3148	0.3618	0.4186	0.4355	0.4629	0.5453	0.5842	0.3913	20.03%
辽中南	0.0752	0.1531	0.2263	0.2639	0.3194	0.3578	0.4016	0.4182	0.4385	0.5278	0.5742	0.3518	20.29%
长三角	0.1063	0.1933	0.2768	0.3080	0.3615	0.4051	0.4628	0.4948	0.5249	0.6284	0.6631	0.4154	18.10%
海峡西岸	0.0992	0.1822	0.2659	0.2833	0.3450	0.3859	0.4420	0.4732	0.5005	0.5924	0.6297	0.3938	18.29%
山东半岛	0.0864	0.1698	0.2573	0.2899	0.3504	0.3897	0.4429	0.4661	0.4943	0.5859	0.6130	0.3890	19.49%
珠三角	0.1347	0.2227	0.2979	0.3246	0.3827	0.4249	0.4899	0.5221	0.5536	0.7127	0.6676	0.4461	15.66%
中原	0.0555	0.1308	0.2135	0.2419	0.3009	0.3523	0.4117	0.4397	0.4795	0.5629	0.5699	0.3550	23.57%
长江中游	0.0619	0.1466	0.2222	0.2538	0.3046	0.3501	0.4038	0.4294	0.4536	0.5451	0.5685	0.3517	22.32%
成渝	0.0655	0.1472	0.2154	0.2426	0.2972	0.3429	0.3938	0.4109	0.4263	0.4935	0.5397	0.3352	21.13%
关中	0.0713	0.1438	0.2181	0.2379	0.2960	0.3449	0.3927	0.4190	0.4451	0.5276	0.5541	0.3433	20.49%
东部	0.0962	0.1644	0.2601	0.2701	0.3450	0.3715	0.4427	0.4509	0.4963	0.5962	0.6254	0.3743	19.57%
中西部	0.0630	0.1790	0.2188	0.2877	0.3012	0.3873	0.4011	0.4687	0.4492	0.5322	0.5596	0.3928	18.55%
全部	0.0834	0.1442	0.2429	0.2475	0.3272	0.3480	0.4260	0.4249	0.4779	0.5722	0.5964	0.3469	21.97%

从时间变化趋势来看，各城市群呈现显著增长，且数字经济正成为新的增长极。值得关注的是，中原和长江中游城市群起步较晚，但其年均增长率超过全国，显示出后发优势与较强区域塑性。然而，各城市群发展水平存在明显分化：珠三角城市群平均水平最高(0.4461)，而成渝城市群仅为 0.3352，相差约 1.33 倍。

从区域对比来看，东部城市群远超中西部，呈现出沿海城市群优于内陆城市群的特征。具体而言，珠三角、长三角和京津冀稳居全国前三，山东半岛城市群亦显著领先于中西部。这一差异不仅源于经济基础和政策扶持，也与基础设施、信息网络建设及人才集聚效应密切相关。同时，2022 年数据表明，各城市群内部存在“核心 - 外围”结构：北京(0.8217)、成都(0.6351)和西安(0.6934)等省会城市发挥了引领作用，而外围的城市相对滞后，反映出资源配置和产业升级方面的不平衡问题，提示未来城市群一体化建设过程中，应注重均衡布局与协调发展。

4.2. 绿色创新效率的自相关性检验

本文采用全局 Moran’s I 指数，在邻接权重矩阵、经济距离权重矩阵和地理权重矩阵下进行自相关性检验，结果见表 5。结果显示，除 2013~2016 年在经济距离权重矩阵下 Moran’s I 指数不显著外，其他年份和权重矩阵指数均显著为正。这表明我国城市绿色创新效率有着显著空间集聚效应，尤其在地理和邻接权重矩阵下，空间相关性更加突出。通过这一检验，确认其空间因素的重要性，为后续空间回归模型的建立提供了坚实的理论基础。

Table 5. Autocorrelation test
表 5. 自相关性检验

年份	邻接权重矩阵		经济距离权重矩阵		地理距离权重矩阵	
	Moran's I	Z 值	Moran's I	Z 值	Moran's I	Z 值
2011	0.166***	4.272	0.037*	1.340	0.041***	8.642
2012	0.193***	4.937	0.049**	1.751	0.041***	8.732
2013	0.172***	4.422	0.032	1.179	0.031***	6.847
2014	0.179***	4.603	0.027	1.037	0.034***	7.444
2015	0.199***	5.111	0.028	1.048	0.036***	7.749
2016	0.148***	3.828	0.012	0.517	0.026***	5.792
2017	0.307**	7.826	0.061**	2.159	0.071***	14.709
2018	0.307***	7.815	0.108***	3.741	0.070***	14.350
2019	0.244***	6.241	0.085***	2.961	0.052***	10.844
2020	0.273***	6.983	0.105***	3.634	0.050***	10.587
2021	0.142***	3.681	0.033*	1.422	0.028***	6.226
2022	0.149***	3.858	0.054**	1.912	0.032***	6.932

注：*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

4.3. 绿色创新效率的空间动态演进

尽管全局 Moran's I 指数揭示了绿色创新效率存在显著的空间依赖性，但传统空间自相关分析方法在刻画多区域、长时序动态演变特征方面存在两重局限：其一，局部 Moran's I 指数在地级市尺度上产生海量局部关联信息，导致空间异质性特征被高维数据噪声所掩盖；其二，静态空间分析难以捕捉效率等级跃迁过程中的空间溢出效应。为此，本研究引入时空耦合的空间 Markov 链分析方法，本文参照郭炳南(2022)的方法构建地理-经济嵌套权重矩阵[8]，从动态演进视角解构效率等级转移的空间交互机制，结果见表 6 所示。此矩阵能够反映我国地级市在交互机制和空间关联异质性上的综合影响，捕捉区域间的地理边界效应和经济梯度效应，为绿色创新效率的空间分析提供更为精准的视角。

基于核密度估计与自然断点法，本研究将各城市的绿色创新效率划分为四种演进类型：高效稳态(I)、中高效跃迁(II)、中低效锁定(III)、高效衰减(IV)，具体结果如表 6 所示。从整体空间格局来看，在不同空间滞后类型下，状态转移矩阵中对角线位置的概率值均显著高于同行其他概率值，这一特征表明在引入地理-经济嵌套矩阵的条件下，我国地级市绿色创新效率的类型转移呈现出明显的路径依赖特征和空间稳定性。这一发现与区域创新系统的累积因果理论相契合，即创新效率的提升往往依赖于既有的知识积累和资源禀赋，形成空间锁定效应。

从状态转移矩阵具体结果来看，不同效率类型区域的空间依赖特征存在显著差异，这种差异反映了区域创新系统内部复杂的空间交互机制。在高效区 I 类的空间集聚效应分析中，本地独自维持概率达到

74.92%这一高值证实了高效区具有较强的自我强化能力。然而，当邻近区域为 IV 类时，维持概率显著下降至 59.09%，降幅达 21.1%，这一现象揭示了高效区对低效邻域的敏感性。值得注意的是，I 类区域向 II 类转移的概率为 20.58%与邻近为 I 类的 II 类区域向 I 类回流概率 24.66%之间的不对称性，充分体现了高效区对中等效率区的“虹吸效应”显著强于反向扩散，形成了明显的溢出壁垒。这一发现与创新扩散理论中的“马太效应”相吻合，即高效率区域更容易吸引创新要素集聚。高效区需以跨区域创新合作为缓冲带，防范低效领域的负向溢出。此外，非邻接区域 I 类维持概率为 68.58%较邻接区域下降 8.5%，这一差异主要源于行政边界壁垒和技术扩散的衰减效应，这一特征在珠三角城市群的空间格局中表现得尤为突出。

Table 6. Spatial Markov transition probability matrix of green innovation efficiency in China
表 6. 我国绿色创新效率空间 Markov 转移概率矩阵

空间滞后	t/(t + 1)	I	II	III	IV	观测值
I	I	0.7492	0.2058	0.0418	0.0032	311
	II	0.1140	0.5492	0.2902	0.0466	193
	III	0.0348	0.2609	0.5652	0.1391	115
	IV	0.0000	0.0400	0.2400	0.7200	50
II	I	0.6858	0.2466	0.0473	0.0203	296
	II	0.2287	0.4642	0.2526	0.0546	293
	III	0.0380	0.2194	0.4937	0.2489	237
	IV	0.0227	0.0985	0.2273	0.6515	132
III	I	0.6961	0.2451	0.0392	0.0196	102
	II	0.1368	0.5053	0.2737	0.0842	190
	III	0.0212	0.1696	0.5442	0.2650	283
	IV	0.0080	0.0321	0.1968	0.7631	249
IV	I	0.5909	0.3182	0.0455	0.0455	22
	II	0.0930	0.5116	0.2326	0.1628	43
	III	0.0390	0.1558	0.5714	0.2338	77
	IV	0.0039	0.0156	0.1323	0.8482	257

在中间效率区域 II 类和 III 类的极化传导机制中，呈现出明显的梯度依赖特征。II 类区域在邻近为 I 类时，向 I 类转移概率为 22.87%。而邻近为 IV 类时，该概率骤降至 9.30%，降幅达 59.3%，这一显著差异证实了中等效率区域对高效邻域的强依赖性。在 III 类区域中，邻近为 IV 类时向 IV 类转移概率为 26.50%，是邻近为 I 类时的 3.15 倍，这一倍数关系揭示了中低效区域极易受到低效邻域的“塌陷拖拽”效应影响，表现出明显的空间脆弱性。这一发现与区域经济学的“贫困陷阱”理论相呼应，说明中等效率区域在空间交互中面临着双向压力。

在低效 IV 类的空间锁定效应当中，本地维持概率高达 84.82%，即使邻近区域为 III 类，该概率仍维持在 76.31%的高位，这一特征表明低效区域存在严重的创新要素流动梗阻。

不同邻近区域效率等级对本地转移的驱动机制存在显著的空间异质性。高效区域表现出强烈的虹吸效应：当邻近为 I 类时，II 类向 I 类转移概率(22.87%)较无空间滞后情况(11.40%)提升 100.6%；同时，III 类向 II 类转移概率(27.37%)较独立状态(26.09%)也有微小提升。相比之下，低效区域则表现出明显的拖拽效应：邻近为 IV 类时，III 类向 IV 类转移概率(26.50%)较独立状态(13.91%)提升 90.5%；而 II 类向 III 类转移概率(25.26%)较独立状态(29.02%)下降 13%，这一反向变化证实了中效区域被低效邻域隔离的空间特征。

4.4. 空间计量模型的设定

我国绿色创新效率有着显著的空间相关性。在进行空间回归模型之前，需要对其进行一系列的检验，以判断出合适的空间回归模型。结果如表 7 所示。首先是 LM 检验以及 Robust LM 检验，邻接关系和地理距离的空间依赖性较为显著，而经济距离则不太显著。特别是在没有空间误差和空间滞后项时，经济距离的空间效应显著性较弱。综上模型同时存在空间滞后效应和空间误差效应模型，应选用空间杜宾模型。其次，是进行 LR 检验，判断空间杜宾模型是否可以退化为空间滞后模型或者空间误差模型。从结果上来看，邻接关系和地理距离上的空间滞后效应显著。Hausman 检验判断通过使用固定效应模型，综合考虑本文模型采用空间固定效应杜宾模型。

Table 7. Spatial regression test
表 7. 空间回归检验

指标	检验方法	邻接关系	经济距离	地理距离
LM 检验	LM_no spatial lag	9.202*** (0.0002)	7.632*** (0.0006)	14.904*** (0.0000)
	LM_no spatial error	9.248*** (0.0002)	0.121 (0.0728)	10.492*** (0.0001)
Robust LM 检验	Robust LM_no spatial lag	4.363** (0.0037)	7.873*** (0.0005)	12.205*** (0.0000)
	Robust LM_no spatial orror	4.409** (0.0036)	0.361 (0.0548)	7.792*** (0.0005)
LR 检验	LR test spatial lag	14.66*** (0.0001)	0.77* (0.0796)	37.06*** (0.0000)
	LR test spatial error	2.01 (0.1559)	0.21 (0.6435)	1.34 (0.2470)

注：括号内的数值为标准误差；*、**和*** 分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

4.5. 空间效应分析

采用空间固定效应杜宾模型，回归结果如表 8 所示。回归结果表明，在邻接距离矩阵、经济距离矩阵、地理距离矩阵下，数字经济对城市绿色效率的系数分别为 0.1897、0.0803、0.1767，均显著为正。这说明数字经济发展水平显著在空间上促进了我国城市绿色创新效率的提升。这表明数字经济发展对绿色创新效率有明显的区域内溢出效应。

Table 8. Regression results of the spatial Durbin model
表 8. 空间杜宾模型回归结果

变量名称	邻接距离矩阵	经济距离矩阵	地理距离矩阵
	(1)	(2)	(3)
Dige	0.1897*** (0.0000)	0.0803** (0.0031)	0.1767*** (0.0001)
Ced	0.0302 (0.0358)	0.0462 (0.0172)	0.0157 (0.0645)
Fd	0.0010 (0.0527)	0.0032* (0.0209)	0.0019 (0.2004)
St	0.0000*** (0.0000)	0.0000** (0.0002)	0.0000*** (0.0000)
Hc	0.0000*** (0.0000)	0.0000*** (0.0000)	0.0000*** (0.0000)
Er	0.0001 (0.0634)	0.0004** (0.0001)	0.0001 (0.0463)
Gf	0.1199 (0.0075)	0.1561* (0.0025)	0.1929** (0.0004)
rho	0.3902*** (0.0000)	0.2826*** (0.0000)	0.8360*** (0.0000)
R ²	0.019	0.094	0.114
固定效应	控制	控制	控制
N	3300	3300	3300

注：括号内的数值为标准误差；*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

4.5. 空间效应分解

考虑到空间杜宾模型的回归结果，其系数不能直接度量因果变量之间的边际作用，因此就空间杜宾模型进行空间效应分解，得到数字经济对绿色创新效率的直接效应和间接效应，如表 9 所示。回归结果显示，在邻接距离矩阵、经济距离矩阵和空间距离矩阵下，数字经济发展水平的直接效应系数分别为 0.01918、0.0875 及 0.1762，均显著为正。数字经济发展水平的直接效应系数分别为 0.0093、0.1817、-0.6777，均显著，说明数字经济对绿色创新效率存在着空间溢出效应。在空间效应方面，数字经济促进了区域间联系的深化，模糊了传统的地理界限，降低了创新主体之间的沟通成本。通过平台效应，它加速了资源集聚与优化配置，提升了创新效率。数字化平台使创新主体更快捷地获取有助于研发的知识和资源，推动了研发资源的流动与利用。

4.6. 稳健性分析

为了进一步检验结论的稳健，引入地理与经济距离嵌套矩阵，考虑地理因素和经济因素进行空间回归分析，如表 10 所示。回归结果显示，数字经济对绿色创新效率的直接效应为 0.1407，5%水平下显著、间接效应为 0.2278，5%水平下显著，验证前文结论的稳健性。

Table 9. Decomposition of spatial effects
表 9. 空间效应分解

变量	邻接距离矩阵		经济距离矩阵		空间距离矩阵	
	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应
Dige	0.1918*** (0.0000)	0.0093** (0.0068)	0.0875* (0.0010)	0.1817* (0.0011)	0.1762** (0.0001)	-0.6777* (0.0082)
Ced	0.0140 (0.6065)	-0.2284* (0.0031)	0.0383 (0.2048)	-0.2224 (0.1006)	0.0141 (0.0667)	-0.0504 (0.0978)
Fd	0.0015 (0.3006)	0.0054 (0.0906)	0.0032* (0.0207)	-0.0076 (0.1204)	0.0020 (0.1602)	-0.0254 (0.5075)
St	0.0000*** (0.0000)	0.0000 (0.5085)	0.0000*** (0.0001)	0.0000 (0.0601)	0.0000*** (0.0000)	-0.0000 (0.6009)
Hc	0.0000*** (0.0000)	0.0000 (0.8104)	0.0000*** (0.0000)	-0.0000 (0.6005)	0.0000*** (0.0000)	0.0000* (0.0027)
Er	0.0002 (0.0092)	0.0023*** (0.0000)	0.0005*** (0.0000)	0.0015*** (0.0001)	0.0002 (0.1085)	0.0186** (0.0001)
Gf	0.1095 (0.0110)	-0.1550 (0.3065)	0.1425* (0.0406)	-0.4650* (0.0031)	0.1914** (0.0060)	-0.3954 (0.8808)

注：括号内的数值为标准误差；*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

Table 10. Robustness test
表 10. 稳健性检验

变量名称	地理与经济距离嵌套矩阵		
	直接效应	间接效应	总效应
Dige	0.1407** (0.0011)	0.2278*** (0.0000)	0.1355** (0.0015)
控制变量	控制	控制	控制
固定效应	控制		
R ²	0.0238		
Rho	0.3741*** (0.0000)		
N	3300		

注：括号内的数值为标准误差；*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

5. 结论与建议

5.1. 结论

我国地级市绿色创新效率演化呈现显著路径依赖特征与空间稳定性，不同效率等级区域需差异化施策：高效区域应构建跨区域创新合作网络，强化技术溢出效应并建立风险隔离机制以防范低效邻域负向

溢出；中等效率区域亟需通过创新资源共享与产业链协同，增强抵御低效邻域拖拽效应的能力；低效区域则需破除“创新贫困陷阱”，通过政策干预完善要素流动机制并优化创新生态系统，同时建立效率等级预警系统实现跨越式提升。数字经济深度发展背景下，数字技术的网络化、智能化与协同化特征正重构区域创新系统的空间交互逻辑：一方面通过突破地理边界促进创新要素的跨域流动与优化配置，另一方面可能因数字鸿沟加剧区域创新效率分化。这种双重效应要求深入解析数字经济对绿色创新效率空间溢出的传导机制，既需把握数字技术重塑的创新网络拓扑结构，也要关注数字不平等引致的空间极化风险。相关研究对完善区域创新政策体系、构建“数字赋能－创新协同”的新型空间治理框架具有重要价值，为破解绿色创新效率的空间锁定效应提供理论支撑与实践路径。

5.2. 建议

通过建立跨区域绿色创新联盟，定期举办绿色技术展示会，促进技术成果的共享与应用，提升绿色创新效率。注重区域效率等级早期预警系统，重点完善创新要素流动机制，优化区域创新生态系统。政府应支持绿色金融，鼓励技术成果共享平台建设，推动绿色项目联合开发。这种跨区域合作不仅提升地区创新能力，还加速技术转化，产生区域间的溢出效应。特别是在绿色金融、技术创新和环境规制领域，东部与中西部的合作尤为重要。进一步优化绿色金融政策，支持创新型中小企业融资，缓解资金瓶颈，推动绿色技术普及。通过跨区域合作，充分发挥数字经济在绿色创新中的潜力，推动可持续发展目标的实现，加速绿色技术的扩散和社会转型。

参考文献

- [1] 李长江. 关于数字经济内涵的初步探讨[J]. 电子政务, 2017(9): 84-92.
- [2] 佟家栋, 张千. 数字经济内涵及其对未来经济发展的超常贡献[J]. 南开学报(哲学社会科学版), 2022(3): 19-33.
- [3] 白俊红, 陈新. 数字经济、空间溢出效应与区域创新效率[J]. 研究与发展管理, 2022, 34(6): 67-78.
- [4] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65-76.
- [5] Teece, D.J. (2018) Profiting from Innovation in the Digital Economy: Enabling Technologies, Standards, and Licensing Models in the Wireless World. *Research Policy*, 47, 1367-1387. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.01.015>
- [6] 韩璐, 陈松, 梁玲玲. 数字经济、创新环境与城市创新能力[J]. 科研管理, 2021, 42(4): 35-45.
- [7] 陈贵富, 韩静, 韩恺明. 城市数字经济发展、技能偏向型技术进步与劳动力不充分就业[J]. 中国工业经济, 2022(8): 118-136.
- [8] 郭炳南, 唐利, 张浩. 我国八大综合经济区生态福利绩效的区域差异与空间收敛特征[J]. 统计与决策, 2022, 38(21): 66-71.