

# 中国数字经济空间网络及溢出效应研究

牛奉高, 史若玉

山西大学数学科学学院, 山西 太原 030006

## 摘要

随着数字技术的蓬勃发展, 数字经济成为一种全新的经济模式, 为改善供需匹配、提升资源配置和促进经济转型升级提供了强大动力。为了全面分析数字经济发展的整体情况和空间关系, 首先, 对中国的31个省、区、市建立了数字经济评价指标体系, 并通过修正的引力模型计算引力值, 进而构建空间网络; 然后, 通过全局莫兰指数探究数字经济发展水平在空间上的依赖关系; 最后, 建立时空双固定杜宾模型, 分析数字经济发展水平的影响因素和溢出效应。结果表明: 中国数字经济发展空间网络不够紧密, 区域间差异明显, 邻近相依; 城镇化水平的提升不仅促进本省、区、市的数字经济发展, 还能间接带动邻省、区、市的发展, 有很强的空间溢出效应, 但人力资本水平对周边地区的数字经济发展有抑制效应。

## 关键词

数字经济; 引力模型; 网络; 空间溢出效应; 空间计量

中图分类号: F08, F062.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-0271.2024045

## *Spatial network and spillover effect of Chinese digital economy*

NIU Fenggao, SHI Ruoyu

School of Mathematical Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

## *Abstract*

With the vigorous development of digital technologies, digital economy has become a brand economic model, providing a strong driving force for improving the matching of supply and demand, enhancing the allocation of resources, and promoting economic transformation and upgrading. To comprehensively analyze the overall situation of the development of digital economy and the spatial relationship, firstly, the digital economy evaluation index system was established for 31 provinces (municipalities and autonomous regions) in China, and the gravity value was calculated by the revised gravity model to build the spatial network. Secondly, the spatial dependence of regions was explored through the global Moran indexes. Finally, the space-time fixed Durbin model was established to analyze the influence of explanatory variables effected on the development of digital economy and their spatial spillover. The results are as follows: China's digital economy development spatial network is not compact enough. The difference among regions is obvious and neighboring regions depend on each other. The improvement of urbanization level not only promotes the

development of digital economy in the province involved, but also indirectly drives the improvement of neighboring provinces, which is a strong spatial spillover effect, while the human capital level has a restraining effect.

### Key words

digital economy, gravity model, network, spatial spillover effect, spatial econometrics

## 0 引言

近年来,数字经济蓬勃发展,新兴信息技术在颠覆和重构诸多产业的同时,也不断打造出新的产业、业态和模式。新一轮的信息技术革命促进了世界各国的发展,使产业技术路线发生了根本性的变革,但同时也带来巨大的挑战。因此,我们要充分利用自身的优势,找到发展的突破口和重点。以信息技术为核心的数字经济给全球带来巨大变化,但也引发一些新的问题,如数字经济对经济发展的影响、发展评估与核算。分析和研究中国数字经济当前的发展状况、特点和规律,深入探讨区域空间格局,可以助力从宏观角度认识中国数字经济发展的地域性差别,为更好地发展中国数字经济提供参考。

## 1 相关研究

Tapscott<sup>[1]</sup>率先提出了数字经济的概念,其显著特征包括数字化、知识化、虚拟化和互联互通等。Tinbergen<sup>[2]</sup>在国际贸易问题研究中首次提出将国家GDP规模作为经济规模指标的引力实证经验模型。谷克鉴<sup>[3]</sup>指出引力模型的一个重要特点是它的基本公式形式可以保持不变,只要对该模型中的参数和变量进行恰当的调整,便可以将其应用于各种问题中。刘久坚<sup>[4]</sup>对引力模型做了修正,用于测度地区间文化产业

的空间联系。

在网络特征分析方面,除了指标分析,还需借助凝聚子群理论。邹兴泉<sup>[5]</sup>通过凝聚子群探究虚拟学习社区的互动关系。周智勇<sup>[6]</sup>对一个特定的网络学习社区的凝聚子群进行了研究,并讨论了不同子群之间的联系对信息流动的影响。

目前,许多学者通过空间计量模型对区域经济影响因素与空间溢出效应进行了研究。孙久文等<sup>[7]</sup>对过去30年来的空间计量经济学的发展进行了综述,总结了各个时期的理论要点和主要贡献,并指出了各自的优势和不足。肖妮<sup>[8]</sup>基于31个省、区、市旅游业的发展及时空演化,对旅游的空间影响进行了深入探讨,以期找出时空演化的动力机制。徐昊<sup>[9]</sup>通过构建空间计量模型对中国数字经济发展的影响因素及其空间溢出效应进行说明。焦帅涛等<sup>[10]</sup>从4个维度建立了中国数字经济发展的综合指数,并以此为基础,对中国的空间集聚、时空差异和发散性进行了深入研究。张英浩等<sup>[11]</sup>针对数字经济和高质量发展的演化特点,选择空间杜宾模型对数字经济的影响过程、作用机制以及空间异质性进行研究。

## 2 相关方法和模型

### 2.1 引力模型及其修正

受牛顿万有引力定律的启发,经济引力论认为,地区间经济发展也存在互相吸引,体现为地区间的联系强度。引力模型

的定义如下:

$$F_{ij} = G \cdot \frac{M_i \cdot M_j}{R_{ij}^a} \quad (1)$$

其中,  $i$ 和就 $j$ 分别代表两个地区,  $F_{ij}$ 为两地区间的引力值,  $M_i$ 和 $M_j$ 分别为地区 $i$ 和 $j$ 的“质量”,  $R_{ij}$ 为两地间的“距离”,  $a$ 为距离衰减系数,  $G$ 为引力系数。本文对式(1)做了以下修正。

首先,通过因子分析计算各省、区、市数字经济的综合实力,将其作为对引力模型中“质量”的修正。借鉴功效系数理论的思想,将因子综合得分指标转换为能够反映一个地区数字经济具体实力的得分,转化计算式为:

$$\text{综合实力评分值} = A + \text{调整因子综合得分} \times B \quad (2)$$

其中,  $A$ 表示数字经济发展综合实力的平均水平,一般取值为60;  $B$ 表示各省、区、市数字经济发展综合实力评分值的变动范围,一般取值为40;调整因子综合得分是标准化后的因子得分,本文的取值为原始因子综合得分与因子综合得分均值的差再除以因子综合得分的最大值。

其次,考虑到经济距离指标对引力模型的影响,将地理距离与经济距离的几何平均数作为对引力模型中“距离”的修正,具体如下:

$$R_{ij} = \sqrt{d_{ij} \cdot e_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $d_{ij}$ 为地区间的地理距离,  $e_{ij}$ 为经济距离,  $R_{ij}$ 为修正的距离,经济距离用地区间GDP差值的绝对值来表示。

最后,考虑到地区间对周边地区的辐射作用不对等,即经济发展较强的地区对周边地区的辐射作用强,经济发展较弱的地区的辐射作用也较弱,以地区“质量”来修正引力系数,具体如下:

$$k_{ij} = \frac{m_i}{m_i + m_j} \quad (4)$$

其中,  $m_i$ 和 $m_j$ 为地区数字经济发展综合实力,  $k_{ij}$ 为修正的引力系数。

根据以上3点改进,得到最终的引力模型为:

$$F_{ij} = \frac{m_i}{m_i + m_j} \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{d_{ij} \cdot e_{ij}} \quad (5)$$

其中,  $F_{ij}$ 表示地区间的引力值,也可以称为地区间数字经济发展空间关联强度,  $d_{ij}$ 和 $e_{ij}$ 分别为地区间的地理距离和经济距离<sup>[4]</sup>。

## 2.2 空间计量模型

空间计量模型是刻画空间地域分布对经济活动作用的模型。除了传统经济指标,空间距离对经济发展同样具有显著的作用。空间杜宾模型(spatial Durbin model, SDM)可缓解空间滞后模型(spatial lag model, SLM)和空间误差模型(spatial error model, SEM)中变量解释性不足的问题,将空间因素对经验发展的作用具体化,模型如下:

$$Y = \rho WY + X\beta + WX\theta + \varepsilon \quad (6)$$

其中,  $Y$ 是因变量,  $X$ 是解释变量。  $W$ 是空间权重矩阵,表示不同空间单元之间的邻近关系或空间依赖结构。  $\rho$ 是空间自相关系数,表示因变量的空间滞后效应,即邻近地区因变量的加权平均对因变量的影响。  $\beta$ 是回归系数,表示解释变量对因变量的直接影响。  $\theta$ 是杜宾因子,即空间溢出效应。  $\varepsilon$ 是误差项。

空间杜宾模型中解释变量的回归参数不能直接反映其对因变量的具体影响,因此需要将空间效应进行分解。采用偏微分法将截

面数据的总效应分解为直接效应和间接效应,在此基础上将偏微分法引入空间面板计量模型研究中,其计算原理及步骤如下。

首先将空间杜宾模型的表达式改为向量形式:

$$Y = (I - \rho W)^{-1}(\beta X + WX\theta) + (I - \rho W)^{-1}\varepsilon \quad (7)$$

其中,  $Y$  为  $N \times 1$  维的被解释变量,  $I$  表示单位矩阵,  $\theta$  是解释变量的空间滞后项的系数估计值。

其次,对第  $k$  个解释变量  $X_k$  求一次偏导:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_k} = (I - \rho W)^{-1}(\beta_k I + W\theta_k) \quad (8)$$

将因变量对第  $k$  个解释变量在特定时刻的偏微分矩阵写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1}{\partial X_{1k}} & \dots & \frac{\partial Y_1}{\partial X_{Nk}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Y_N}{\partial X_{1k}} & \dots & \frac{\partial Y_N}{\partial X_{Nk}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1}{\partial X_{1k}} & \dots & \frac{\partial Y_1}{\partial X_{Nk}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Y_N}{\partial X_{1k}} & \dots & \frac{\partial Y_N}{\partial X_{Nk}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,  $\beta_k$  为第  $k$  个解释变量  $X_k$  的系数估计值,由  $N \times N$  维矩阵对角线元素之和除以  $N$  计算得出,反映解释变量对本地区被解释变量的影响;  $\theta_k$  为第  $k$  个解释变量  $X_k$  的空间滞后项的系数估计值,由矩阵非对角线元素之和除以  $N$  计算得出,反映邻近地区解释变量对本地区被解释变量的影响,总效应为直接效应和间接效应之和<sup>[8]</sup>。

## 3 指标选择

### 3.1 数字经济评价体系指标选择

数据来源于中国统计年鉴平台和全球统计数据平台(简称EPS数据平台)。选取2016—2020年31个省、区、市5年的

相关指标面板数据。参照中国信息通信研究院历年的数字经济发展评价指标体系,借鉴多种数字经济研究文献,构建了适合各省、区、市数字经济发展的评价指标体系,包括数字产业化、产业数字化2个一级指标,光缆长度、移动电话基站数等15个二级指标,详见表1。

### 3.2 面板数据指标选择

面板数据包括1个被解释变量,即经济发展水平  $Y_0$ , 6个解释变量(即人均地区生产总值  $X_1$ 、产业结构水平  $X_2$ 、政府支出水平  $X_3$ 、劳动力水平  $X_4$ 、城镇化水平  $X_5$  和人力资本水平  $X_6$ ) 具体如下。

$Y_0$ : 数字经济发展综合评价得分值,由数字经济的15个二级指标根据熵权法计算而来。

$X_1$ : 地区人均生产总值。

$X_2$ : 由第一、二和三产业的增加值占比按权重1:2:3得到的加权值。

$X_3$ : 政府支出占国内生产总值的比例。

$X_4$ : 劳动人口占总人口的比例。

$X_5$ : 城镇人口占比。

$X_6$ : 接受高等教育人数占比。

## 4 数字经济网络结构分析

### 4.1 引力值的计算

根据数字经济评价指标体系,建立31个省、区、市的观测数据矩阵。为了探究变量间的相关性强度,对数据进行KMO和Bartlett检验,结果见表2。

由于KMO的值为0.79,且Bartlett球形检验显著,认为变量之间存在较强的相关性,可以通过降维获取综合指标,提取前2个因子,累积贡献率达89.68%。

由于因子综合得分并不能很好地描述地区数字经济发展水平,也不适合作为引力模型中的质量,故本文借鉴功效理论的思想,将因子综合得分指标转换为反映该地区数字经济发展综合实力的得分,部分结果见表3。

选取城市间的运输距离作为地理距离。此外,还要考虑区域间因经济距离过大而导致文化产业空间联系不紧密的情况,用区域间GDP差值的绝对值测度经济距离,并对地理和经济距离进行归一化处理以消除量纲影响,代入修正的引力模型,计算得到省、区、市之间数字经济发展引力值(不对称),部分数据见表4。

## 4.2 数字经济的网络结构

使用阈值法构建中国数字经济关联网络的关键是选取合适的阈值,本文采用数字经济引力矩阵每行的平均值作为该行的阈值。首先采用阈值法得到二值矩阵,然后利用Ucinet6.0构建省、区、市数字经济发展的空间关联有向网络图,并以节点度为权重对各节点大小进行调整,最终得到该网络的网络密度为0.2452。如图1所示,中国省、区、市数字经济发展的空间网络存在差异性、集聚化的特征。网络密度为0.2452,说明各省、区、市数字经济发展之间存在一定程度的联系,但联系程度不够密切。

## 4.3 Lambda分析

Lambda分析根据节点之间的关联度,将网络节点分成不同的集合,从而反映网络的层次聚类关系。借助Ucinet6.0工具对各省、区、市进行Lambda集合分析,结果如图2、图3所示。

Lambda值越大,节点间的关联度越高,节点之间的关系结构越稳固。图3中横

表1 数字经济评价指标体系

一级指标	二级指标	单位
数字产业化	光缆长度	千米
	移动电话基站数	万个
	移动电话普及率	每百人部数
	互联网宽带接入端口数	万个
	互联网上网人数	万人
	互联网域名数	万个
	电信业务量	亿元
产业数字化	规模以上工业企业R&D人员折合全时当量	人年
	规模以上工业企业R&D经费支出	万元
	规模以上工业企业R&D项目课题数	项
	技术合同成交总额	万元
	专利申请数	件
	专利申请授权数	件
	信息服务业从业人数	万人
	信息服务业产值	亿元

表2 KMO 检验和 Bartlett 检验结果

KMO		0.79
Bartlett球形检验	近似卡方	1092.534
	<i>df</i>	105
	<i>P</i>	0.000***

表3 各省、区、市数字经济发展综合评价得分(部分)

排名	地区	综合实力得分
1	广东	100
2	江苏	84.57
3	北京	80.40
4	浙江	78.75
5	山东	75.10
6	上海	74.99
7	四川	63.21

表4 各省、区、市数字经济发展引力值(部分)

引力值	北京	天津	河北	山西	内蒙古
北京	-	28.73	4.88	19.86	1.66
天津	37.83	-	6.29	8.46	3.07
河北	4.52	4.42	-	2.60	4.88
山西	19.67	6.36	2.78	-	1.01
内蒙古	1.37	1.93	4.35	0.84	-

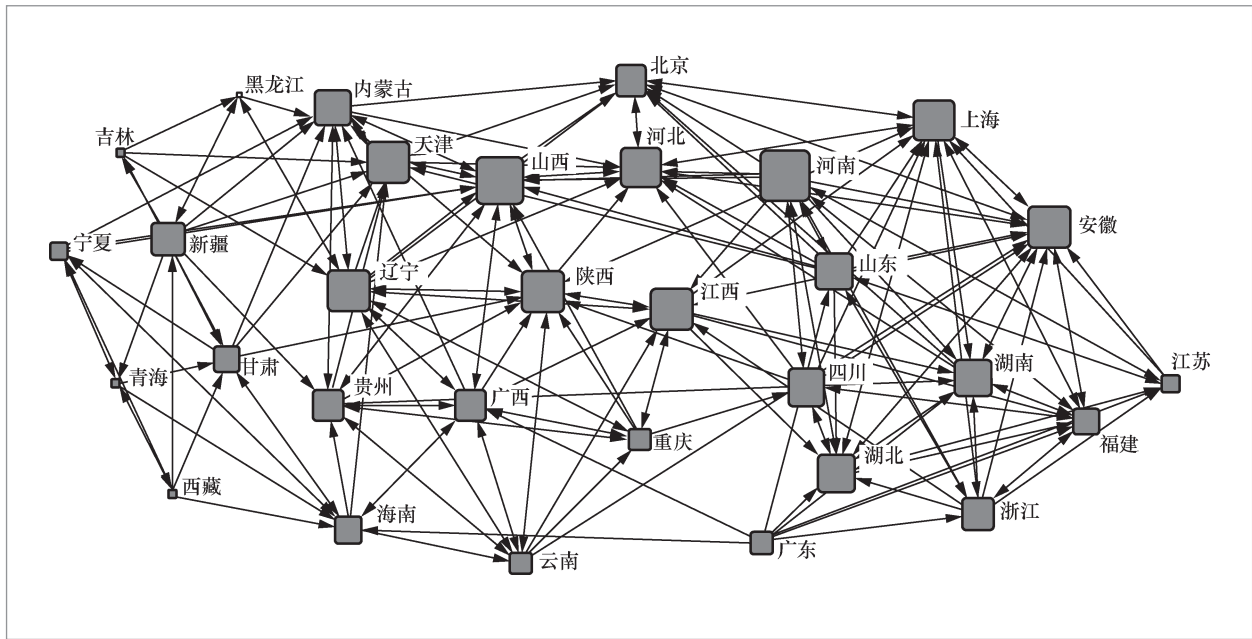


图1 中国各省、区、市数字经济发展的空间关联网结构

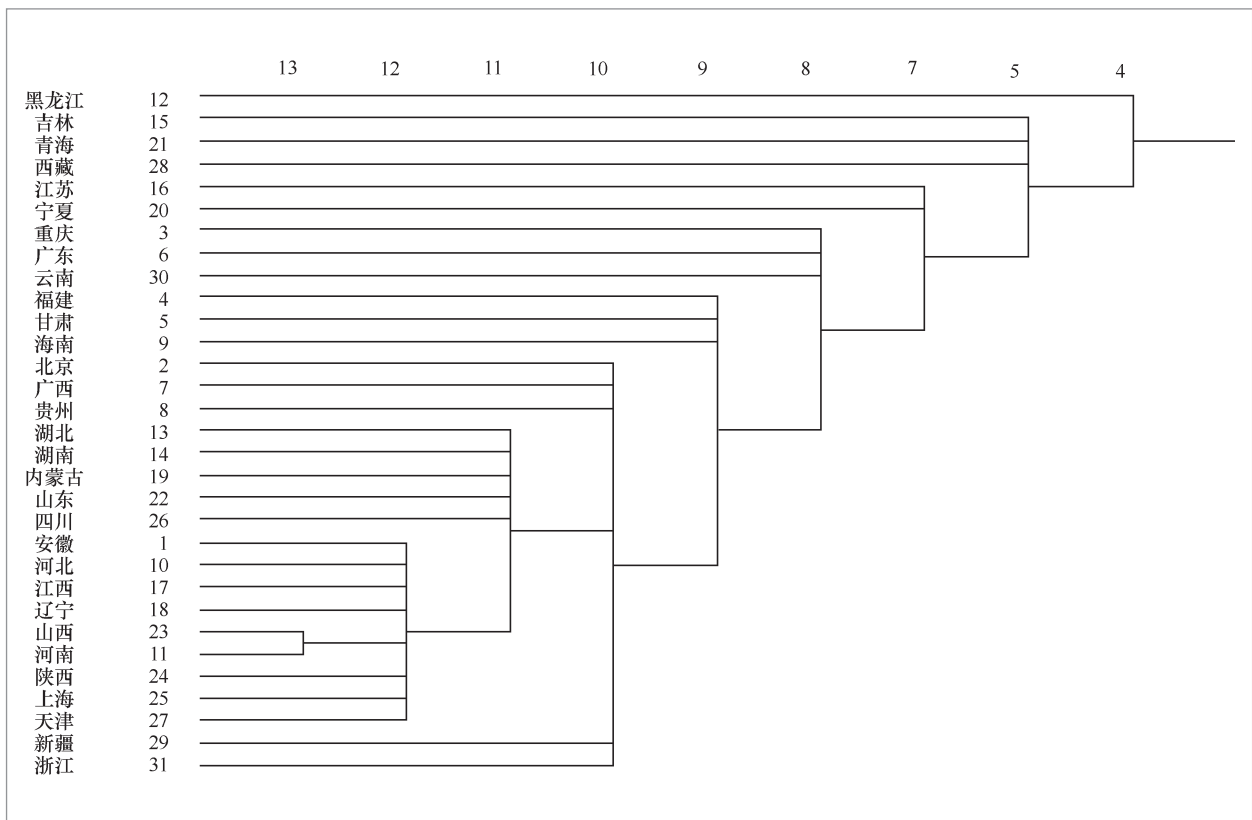


图2 Lambda 集合

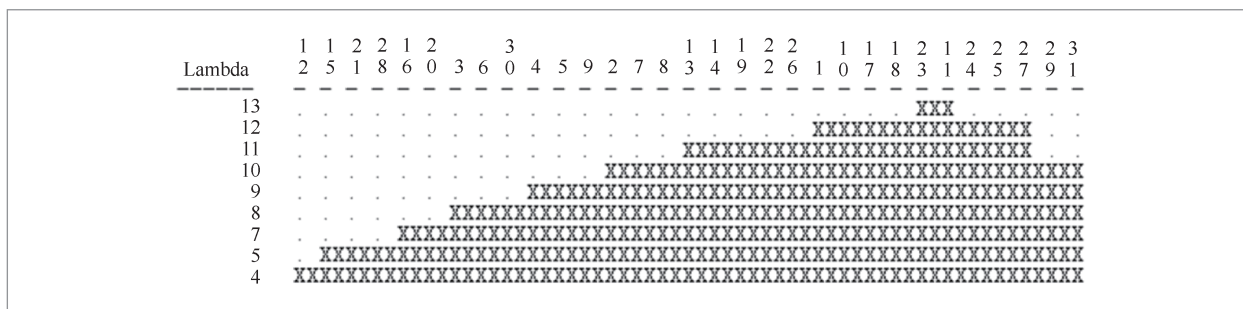


图3 Lambda 集合分析结果

坐标表示各个省、区、市，纵坐标为各个省、区、市的关联度，Lambda值最小为4，最大为13，说明省、区、市联系的密切程度差异较大。Lambda值较低的省、区、市主要集中在西北和东北，如黑龙江（序号12）只存在于Lambda值为4的集合中，说明它与其他省、区、市的关系最不紧密。由图3可知，各省、区、市数字经济发展的关联性不强，凝聚子群关系的稳健性和紧密度不足，省、区、市间互动有待加强。

## 5 数字经济发展的空间计量模型

### 5.1 空间相关性检验

为了更直观地表现中国省、区、市间数字经济发展的空间依赖性，利用熵权法计算数字经济发展综合得分，并根据式(10)、式(11)计算2016—2020年的全局莫兰指数，测度总体空间关联程度。

$$I_i = \frac{Z_i}{S^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} Z_j \quad (10)$$

其中， $n$ 为研究区域的个数， $Z_i = y_i - \bar{y}$ ， $Z_j = y_j - \bar{y}$ ， $S^2 = \frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2$ ， $w_{ij}$ 为空间权重函数，用来表征区域间的位置关系（邻接为1，否则为0）， $I_i$ 代表第*i*个地区的局部

莫兰指数。全局莫兰指数*I*的计算见式(11)。

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (11)$$

由表5第3列的*p*值可知，全局莫兰指数始终显著大于0（ $\alpha = 0.05$ ），表明中国各省、区、市的数字经济发展水平呈显著的正相关，时空上并非独立变化，省、区、市间存在空间溢出效应。全局莫兰指数说明数字经济发展水平在中国各省、区、市之间存在空间关联性，但不能直观地展示省、区、市间的空间关联特征。为此，绘制了局域莫兰指数散点图，如图4所示。

以局部莫兰指数计算式(10)中的 $Z_i$ 为横坐标， $\sum_{j \neq i}^n w_{ij} Z_j$ 为纵坐标，将平面划分为4个区域。由图4可知，2020年绝大多数省、区、市分布在第一、三象限中，存在空间正相关性，且处于第一象限的大多为东

表5 2016—2020年中国数字经济发展水平的全局莫兰指数

年份	<i>I</i>	<i>p</i>
2016年	0.197	0.004
2017年	0.201	0.003
2018年	0.180	0.006
2019年	0.158	0.012
2020年	0.136	0.022

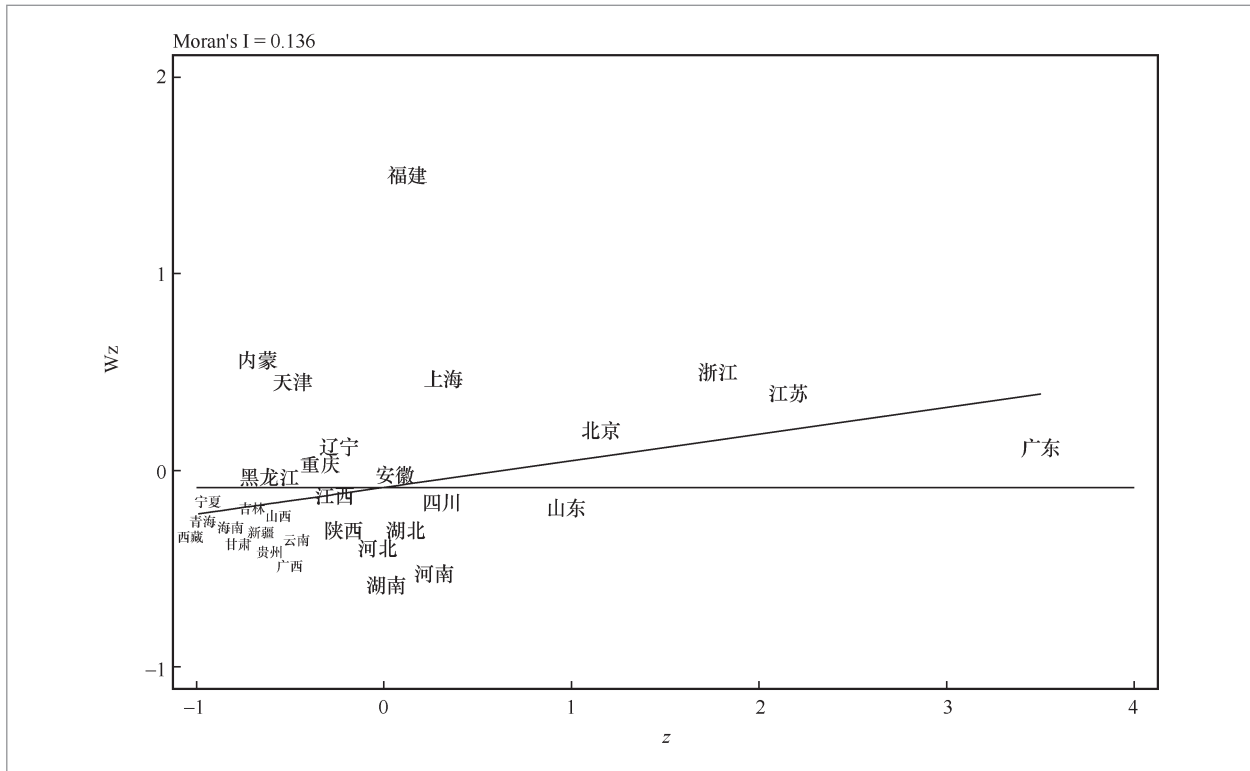


图4 2020年数字经济发展的莫兰指数散点图

部地区的省、区、市。中国数字经济发展呈现出区域差异，且集聚效应明显。

## 5.2 空间计量回归结果分析

中国省、区、市数字经济发展存在全局空间自相关性，不能忽视空间因子对数字经济发展的影响，需采用空间计量模型

分析数字经济的影响因素时空演化的内在机理。为此，首先需要根据数据的情况选择合适的模型，进而分析各因素对数字经济的影响。

由表6的检验结果可知，Wald\_spatial lag、Wald\_spatial error、LR\_spatial lag、LR\_spatial error的统计量分别为28.720、28.030、31.620、32.000，即Wald和LR的统计量均显著，因此选择空间杜宾模型（SDM），该模型无法退化为空间滞后模型或空间误差模型。其次，为判断该模型是固定效应模型还是随机效应模型，在空间杜宾模型的基础上进行Hausman检验，检验统计量的值为33.25， $p$ 值（用来判定假设检验结果的一个参数）为0，因此在选择空间杜宾模型时，选择固定效应模型更优。最后，为了确定最终模型，还需在固定效应的基础上对空间效应、时间效应和双固定效应分别进行回归建模，结果见表7，Main是

表6 LM 检验、Wald 检验和 LR 检验的结果

检验方法	统计量	$p$
LM_spatial lag	3.270	0.071
Robust LM_spatial lag	10.262	0.001
LM_spatial error	3.736	0.053
Robust LM_spatial error	10.728	0.001
Wald_spatial lag	28.720	0
Wald_spatial error	28.030	0
LR_spatial lag	31.620	0
LR_spatial error	32.000	0

不考虑空间效应的回归系数,  $W_x$ 是考虑空间溢出效应的回归系数。

由表7可知,在双固定效应下,Log-Likelihood检验统计量的值为224.8304,拟合度最高,与LR检验结果一致,因此选择时空双固定的杜宾模型,至此确定最终模型。

在空间杜宾模型中,自变量的系数不能表征其对因变量的影响,自变量的空间滞后项系数也不能表征其对邻近地区因变量的影响。此时,需要使用实证分析中常用的空间模型变量解释方法,判断模型中的自变量对所在地区因变量的直接效应以及对邻近地区的间接效应。

### 5.3 空间溢出效应分解

将空间溢出效应分解为直接效应和间接效应并重新建模,结果见表8。

由表8可知,城镇化水平对数字经济发展水平的直接效应的回归系数为0.368,间接效应的回归系数为0.761,两个回归系数都在1%的水平下显著。这意味着在其他影响因素不变的情况下,本省、区、市的城镇化水平每提升1%,本省、区、市的数字经济发展水平增加0.368%,还将间接带动邻省、区、市数字经济发展水平提升0.761%,因此,城镇化水平具有较强的空间溢出效应,起到了促进省、区、市间的共同发展的重要作用。同时,人力资本水平对数字经济发展水平的间接效应的回归系数在-0.218,显著为负( $\alpha=0.01$ )。这意味着本省、区、市人力资本水平的提高会抑制周边地区数字经济的发展水平。

## 6 结束语

为从宏观角度分析中国数字经济空间

表7 不同效应下SDM模型的估计结果

变量	时间固定	空间固定	时空双固定
Main			
经济发展水平	0.6913***	-0.0254	0.0034
产业结构水平	0.3623***	-0.0221	0.0179
政府支出水平	0.5402***	-0.0679	0.0349
劳动力水平	0.8102***	-0.1468	0.03831
城镇化水平	0.5312***	0.6349***	0.4844***
人力资本水平	-0.3533***	0.0079	-0.0083
$W_x$			
经济发展水平	0.2835	-0.0963	0.0966
产业结构水平	-0.2288	-0.2174***	-0.0788
政府支出水平	0.1589	-0.7183***	-0.2317
劳动力水平	-0.0738	-0.4354	0.0961
城镇化水平	0.4436	0.1179	1.4044***
人力资本水平	-1.617877***	-0.3088***	-0.3186***
Log-likelihood	-79.1309	203.4184	224.8304

表8 变量的空间溢出效应分解结果

变量	直接效应	间接效应	总效应
经济发展水平	0.006 (0.13)	0.067 (0.78)	0.061 (0.78)
产业结构水平	0.027 (1.00)	-0.066 (-1.47)	-0.039 (-0.78)
政府支出水平	-0.007 (-0.11)	-0.145 (-1.00)	-0.152 (-1.05)
劳动力水平	0.030 (0.24)	0.068 (0.29)	0.098 (0.41)
城镇化水平	0.368*** (2.62)	0.761*** (3.22)	1.128*** (7.23)
人力资本水平	0.027 (0.79)	-0.218*** (-2.93)	-0.190*** (-2.80)

关系特征,首先根据数字经济的整体发展情况,建立了评价指标体系,得到了31个省、区、市的综合得分,并将其转换为反映各地区数字经济发展综合实力的指标,以适应引力模型中“质量”的要求;通过修正的引力模型计算出引力值,绘制出网络结构图。从空间网络来看,全国数字经济发展的关联性不强,凝聚子群关系的稳健性

和紧密度不够,省、区、市间互动还有待加强。然后,采用全局与局部的莫兰指数进一步研究空间相关性,结果表明中国各个区域的数字经济发展存在较大差异,且集聚效应较为显著。最后,为进一步研究各个因素对数字经济的影响,对比各种模型后,选用时空双固定杜宾模型。根据拟合结果可知:城镇化水平提升,会产生很强的空间溢出效应,有利于省、区、市的共同发展;相反,人力资本水平提高,会抑制周边地区数字经济发展水平的提升。

## 参考文献:

- [1] TAPSCOTT D. The digital economy anniversary edition: Rethinking Promise and peril in the age of networked intelligence[J]. *Innovation Journal*, 1999, 19(5): 156-168.
- [2] TINBERGEN J. An analysis of world trade flows in shaping the world economy[M]. New York: Twentieth Century Fund, 1962, 5 (1): 27-30.
- [3] 谷克鉴. 国际经济学对引力模型的开发与应用[J]. *世界经济*, 2001, 24(2): 14-25.  
GU K J. The development and application of gravity model in international economics[J]. *World Economy*, 2001, 24(2): 14-25.
- [4] 刘久坚. 中国文化产业空间关联网络分析——基于改进引力模型[D]. 南昌: 江西财经大学, 2021.  
LIU J J. Spatial correlation network analysis of Chinese cultural industry: based on improved gravity model[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2021.
- [5] 邹兴泉. 虚拟学习社区中凝聚子群的互动行为研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2015.  
ZU X Q. Research on interactive behavior of cohesive subgroups in virtual learning community[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2015.
- [6] 周智勇. 网络学习社区中的凝聚子群分析[J]. *电脑编程技巧与维护*, 2018(9): 129-131.  
ZHOU Z Y. Cohesive Subgroup analysis in E-learning community[J]. *Computer Programming Skills and Maintenance*, 2018(9): 129-131.
- [7] 孙久文, 姚鹏. 空间计量经济学的研究范式与最新进展[J]. *经济学家*, 2014(7): 27-35.  
SUN J W, YAO P. Research paradigm and recent progress of spatial econometrics[J]. *Economist*, 2014(7): 27-35.
- [8] 肖妮. 中国全域旅游发展水平的测度及时空演化与空间效应研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.  
XIAO N. Research on the measurement, spatio-temporal evolution and spatial effect of global tourism development level in China[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.
- [9] 徐昊. 中国省域数字经济空间网络结构及影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
XU H. Research on spatial network structure and influencing factors of digital economy in Chinese provinces[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [10] 焦帅涛, 孙秋碧. 中国数字经济发展的测度及分析[J]. *福州大学学报*. 2021, 35(6): 18-25.  
JIAO S T, SUN Q B. Measurement and analysis of the development of China's digital economy[J]. *Journal of Fuzhou University*, 2021, 35(6): 18-25.
- [11] 张英浩, 汪明峰, 刘婷婷. 数字经济对中国经济高质量发展的空间效应与影响路径[J]. *地理研究*, 2022, 41(7): 1826-1844.  
ZHANG Y H, WANG M F, LIU T T. The spatial effect and influence path of digital economy on China's high-quality economic development[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(7): 1826-1844.

## 作者简介



牛奉高(1980- ), 男, 博士, 山西大学数学科学学院副教授, 主要研究方向为应用统计、数据科学和科学评价。



史若玉(1997- ), 女, 山西大学数学科学学院硕士生, 主要研究方向为文本挖掘、社会网络。

收稿日期: 2023-02-06

通信作者: 牛奉高, nfgao@sxu.edu.cn

基金项目: 山西省社会经济统计科研综合重点课题(No.KYZH[2021]007)

**Foundation Item:** Comprehensive Key Project of Social and Economic Statistics Scientific Research of Shanxi Province (No.KYZH[2021]007)