

中国粮食生产效率空间溢出网络及提升路径

张启楠¹, 张凡凡¹, 麦 强¹, 伍国勇^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学经济与管理学院, 哈尔滨 150001; 2. 贵州大学中国喀斯特地区乡村振兴研究院, 贵阳 550025; 3. 贵州基层社会治理创新高端智库, 贵阳 550025)

摘要: 现有研究普遍关注粮食生产单元自身资源禀赋以及功能属性, 对于经济主体相互作用所产生的外部性研究十分有限。为此, 本文在空间引力模型的基础上着重分析网络外部性对粮食生产效率的影响, 并以此为逻辑起点进一步探讨网络提升路径以及各空间单元在整体网络中的综合定位与潜力。结果表明, 中国粮食生产网络空间溢出效应显著, 对粮食生产效率具有明显的促进作用, 其实质是规模经营思想在空间维度的扩展, 符合近带动远辐射规律, 且交通基础设施的互通互联与人口流动是实现网络空间外溢的主要路径。同时, 整体网络中共存在4种潜在节点, 包括核心控制型、局域核心型、潜力型以及边缘型。未来应充分发挥核心控制型节点的辐射带动作用, 加强东西轴带的空间交互影响, 实现农业资源技术的跨地域流动与互补。

关键词: 粮食生产效率; 空间网络外部性; 空间计量模型; 二次指派程序; 潜在网络节点; 中国
DOI: 10.11821/dlxb202204015

1 引言

粮食安全始终是关系国家生存与发展的重要根基, 粮稳则国安。然而, 受新型冠状病毒肺炎疫情以及蝗灾影响, 全球正面临20世纪70年代以来最严峻的粮食危机^[1]。世界多国紧急出台了有关粮食出口的禁止或限制政策, 粮食供给面临着新困境^[2], 这在某种程度上引发了关于粮食问题的新一轮广泛关注。中国作为世界最大的粮食进口国, 对国际粮食市场异动具有较强的敏感性, 如何有效应对国际粮食供给格局变动所引发的不稳定性, 提高粮食生产效能, 强化粮食供给韧性成为当前粮食生产的关键。

长期以来, 有关粮食生产的大部分研究主要关注空间单元自身资源禀赋以及功能属性, 包括资本、劳动力^[3]以及耕地等^[4]资源性要素的投入, 对于经济主体相互作用所产生的外部性影响研究十分有限。尽管土地流转、适度规模经营^[5]在一定程度上具有外部性内涵, 但这种思想本质上与经济地理学中的集聚经济理论相一致, 强调通过同类产业的大规模集聚形成专业化分工, 进而实现额外的效率增长^[6], 其外部性的产生仍然以地理距离的相邻或相近为前提, 并普遍基于位空间理论考察各经济单元的增长规律, 割裂了地域空间的完整性与连续性。实质上, 以人流、物流以及信息流为基础的要素转移实现了经济主体的跨地域联系, 外部性影响存在于更广阔的空间范围。受经济全球化、区域一体化影响, 不同空间单元通过生产要素的集聚、扩散与转移广泛参与区域尺度、国家尺度以及全球尺度分工, 其空间组织形态逐渐突破以行政单元为边界的中心地理论, 表现为

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(71974045) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.71974045]

作者简介: 张启楠(1993-), 男, 山西太原人, 博士生, 研究方向为农业经济、人工智能研究。E-mail: 406642902@qq.com

通讯作者: 麦强(1977-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博导, 研究方向为重大工程管理、系统工程。E-mail: maiqiang@hit.edu.cn

各行为主体相互关联、交互影响的空间格局，相应的学术研究范式也从传统的局域空间扩展到网络空间^[7]。

网络空间是以不同经济单元为主要节点，借助各种物质以及非物质要素流动所形成的动态空间结构。其本质属于技术外溢范畴，强调不同空间单元的功能联系与外部性影响。“流空间”^[8]概念的提出以及“世界城市理论”^[9]“中心流理论”^[10]的进一步发展都在不同程度上为网络空间外部性的形成奠定了基础。作为一种新型空间组织模式，网络空间外部性促使传统的经济地理研究发生深刻变革，不再关注经济主体的等级与位序分布规律，能够有效解释超越地理距离以及经济距离的空间联系，推动了新经济地理学与复杂网络的融合，在一定程度上更符合现实的空间组织逻辑，实现了地理科学在方法论以及理论边界上的新突破。

网络外部性自正式提出以来主要应用于区域经济、产业结构、城市地理、金融贸易以及组织行为领域，在粮食生产方面的研究相对较少。有关网络外部性对粮食生产的影响，怎样提高网络外部性，其主要来源是什么以及各空间单元在整体网络中的综合定位与潜力等问题有待进一步探讨。为此，本文以粮食生产效率作为主要测度指标，基于修正的引力模型将其置于空间网络之中，借助空间计量模型检验网络空间外部性与粮食生产效率之间的关系，在此基础上通过二次指派程序以及网络属性与效率等级的空间聚类探讨网络提升路径及其潜在网络节点，以期突破以相对位置、地理距离为核心的传统农业区位论，进一步从外部性视角揭示不同经济单元的空间交互作用，同时强调专业化分工与网络互补性影响，依托生产要素的跨地域流动弥补经济活动与经济要素的空间不均衡特征，推动农业经济视角由特定的静态等级结构向水平的、非层级网络体系转变^[11]。

2 研究方法 with 数据选取

2.1 研究方法

(1) 网络构建。空间网络构建是网络外部性分析的基础，目前有关网络的构建主要基于人流、物流、交通基础设施、跨域合作等在内的流数据以及向量自回归（VAR）模型、引力模型进行拟合估计。在某种程度上，流数据能够较为直观的刻画不同空间单元所形成的网络结构特征，但基于数据属性限制，仅能反映空间网络联系的特定领域。同时，考虑到VAR模型在滞后阶数选择方面尚不成熟，对于网络刻画精度存在明显不足^[12]，本文将主要通过引力模型实现空间网络的构建^[13]，并综合考虑地理距离、经济发展水平以及人口要素在网络形成过程中的影响，模型设计如下：

$$T_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i G_i R_i} \sqrt[3]{P_j G_j R_j}}{D_{ij}^2}, \quad k_{ij} = \frac{R_i}{R_i + R_j} \quad (1)$$

式中： T_{ij} 表示空间关联强度； i 、 j 分别代表不同的空间单元； T_{ij} 为引力常量，用空间单元 i 的产粮效率占空间单元 i 、 j 产粮效率之和的比重表示； R_i 、 R_j 表示空间单元 i 、 j 的粮食生产效率； T_{ij} 是不同空间单元的地理距离，分子 $\sqrt[3]{P_i G_i R_i}$ 相当于万有引力模型中质量的乘积，借鉴谷国锋等^[14]的做法，通过不同空间单元的年末常住人口 p_i 、 p_j ，地区生产总值 G_i 、 G_j 以及粮食生产效率 R_i 、 R_j 测算得到。

(2) 空间计量模型。主流观点认为，要素流动以及信息技术的发展实现了研究单元的交互影响，传统基于独立假设的模型设定无法满足空间因子的刻画需求^[15]，为此，本文通过构建空间计量模型进行拟合估计，模型设定如下：

$$\ln Y_{it} = c + \alpha \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln Y_{jt} + \beta_1 \ln Net_{it} + \beta_2 \ln X_{it} + \rho_1 W_{ij} \ln Net_{jt} + \rho_2 \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln X_{jt} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: $\ln Y_{it}$ 、 $\ln Y_{jt}$ 表示粮食生产效率的对数值, 通过投入产出数据测算得到; i 、 j 代表不同空间单元; t 表示时间; c 和 α 分别为截距项和因变量空间滞后估计系数; $\sum_{j=1}^n W_{ij}$ 代表空间权重矩阵; n 表示空间单元总数; $\ln Net_{it}$ 为网络外部性的对数, 是本文的核心解释变量, 采用外向联系强度 *lnoutlink strength*、空间辐射范围 *lnradiation range* 表征, 主要通过与其他研究单元产生联系的系数之和、存在直接联系的节点数量测算得到, β_1 表示其系数估计值; $\ln X_{it}$ 代表控制变量集, 包括粮食作物播种面积 *lnarea*、农业从业人员数量 *lnemployee*、农用化肥施用量 *lnfertilizer*、农业机械数量 *lnmechanical*; β_2 为相应的系数估计值; ρ_1 、 ρ_2 分别表示核心解释变量和控制变量空间滞后项待估系数; ε_i 是随机误差项。

(3) 二次指派程序。二次指派程序是基于矩阵随机置换的非参数统计方法, 能够通过对矩阵中不同格值的相似性进而估计关系数据之间可能存在的联系程度。该算法本质上是将矩阵作为长向量, 通过行列置换得到不同的系数值并与其实际相关系数对比^[16], 进而分析相关系数落入拒绝域还是接受域的过程。考虑到地区经济发展水平、区际贸易、技术推广、交通基础设施、人口流动以及空间距离的远近是约束不同地理单元产生联系的关键, 本文分别选取人均地区生产总值、社会消费品零售总额、技术市场成交额、公路里程、客运量、各局域区间的地理矩阵作为解释网络外部性的主要来源, 模型构建如下:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad (3)$$

所有变量数据均采用矩阵形式, Y 表示空间联系矩阵; $x_1 \sim x_6$ 是其主要来源变量。为了进行标准化处理, 将矩阵格值与其所在行均值进行比较, 大于行均值的取值为 1, 表示空间单元存在网络外溢, 小于行均值的取值为 0, 表示空间单元独立存在。

(4) 网络节点分析指标。相对效率是基于投入产出数据的效率测算结果, 各空间单元的效率值取决于其与生产前沿面所形成的差距大小。一般而言, 高效率单元借助标准化生产构成前沿效率边界, 处于该边界上的点属于完全效率, 而被前沿效率边界所包络的数据点则存在一定的效率改进空间^[17]。

$$\begin{aligned} & \min[\theta - \varepsilon(e_1^T s^- + e_2^T s^+)] \\ & \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^k \lambda_i x_i + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{i=1}^k \lambda_i y_i - s^+ = y_0 \\ \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1 \\ \lambda_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \\ s^+ \geq 0, \quad s^- \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: θ 表示研究单元的相对效率值; ε 为非阿基米德无穷小量; e_1^T 、 e_2^T 分别代表求和向量; s^+ 、 s^- 则表示投入冗余; x_i 、 y_i 为相应的投入、产出数据, 下标 i 表示决策单元; k 为决策单元总数; x_0 、 y_0 分别表示去除决策单元的 x_0 、 y_0 向量所剩下的输入和输出矩阵; λ_i 代表各研究单元权重。

度数中心度用于衡量空间节点在整体网络中的凝聚力水平^[18], 度数中心度越高, 其在网络中越处于核心位置。计算公式如下:

$$DC_i = n_i / (N - 1) \quad (5)$$

式中： DC_i 为研究节点*i*的度数中心度； n_i 、 N 分别表示与研究单元*i*存在直接联系的节点数和网络节点总数。

中间中心度能够在一定程度上反映网络节点的控制能力，用来测度空间节点处于其他节点中间位置的概率^[19]，其测算公式如下：

$$BC_i = \frac{\sum_{t=1}^N \sum_{s=1}^N G_{ts} i / G_{ts}}{(N-1)(N-2)} \quad (t \neq s \neq i, \text{ 且 } t < s) \quad (6)$$

式中： BC_i 表示空间节点*i*的中间中心度； G_{ts} 指的是节点*t*、*s*形成空间联系的最短路径数量； $G_{ts} i$ 则代表节点*i*介于节点*t*、*s*最短路径的数量。中间中心度越接近1，说明该节点在整体网络中的影响能力越强。

接近中心度更大程度上依赖于其所处的地理空间位置，表示研究节点与网络中其他节点的最短路径之和，能够揭示不同空间单元在整体网络中的区位优势。

$$CC_i = \sum_{j=1}^N d_{ij} \quad (7)$$

式中： CC_i 为空间节点*i*的接近中心度； d_{ij} 表示空间节点与网络中其他节点的最短路径^[20]。

2.2 数据来源与指标选取

为了有效规避农业税全面取消等政策因素的影响，本文以2006—2018年中国31个省（自治区、直辖市）的面板数据为研究样本（暂未包含港澳台），相关变量主要来源于《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》以及国家统计局资料，具体的指标选取和数据说明为（表1）：

（1）被解释变量。被解释变量采用粮食生产效率表示。目前有关粮食生产效率的研究无法直接获得该项统计数据，大多数学者普遍基于随机前沿生产函数、数据包络分析测算得到。考虑到随机前沿生产函数容易受函数设定形式的影响，借鉴Karagiannis^[21]、Lindebo等^[22]的做法，基于投入产出数据对各研究单元进行数据包络分析，进而得到不同省域的粮食生产效率值。

（2）解释变量。Beaverstock等^[23]指出现代交通信息技术的发展极大的推动了区域经济变革，网络化研究越来越成为地理科学一个新的研究兴趣。为此，本文将网络外部性作为核心解释变量，着重分析其对粮食生产效率的可能性影响，并分别将外向联系强度以及空间辐射范围作为其代理指标。一般而言，经济单元与其他研究单元产生联系的系数之和越大，越有利于推动生产效率的提高。但基于粮食生产比较利益偏低，容易引发经济增长对粮食生产的空间挤出，在网络中居于核心位置的关键节点往往非专业化于粮食生产，因此网络外部性对粮食生产的影响有待进一步实证检验。

（3）控制变量。基于回归估计结果的稳健性考虑，本文先后选取粮食作物播种面积、农业从业人员数量、农用作肥施用量、农业机械数量等作为控制变量，以控制资源性要素对粮食生产效率的影响。

（4）其他变量。为了进一步形成提升网络外部性的主要路径，本文将粮食生产效率空间关联矩阵作为因变量，地区经济发展矩阵、区际贸易矩阵、技术推广矩阵、交通基础设施矩阵、人口流动以及地理空间距离的远近矩阵作为自变量进行回归估计。其中，自变量矩阵分别以人均地区生产总值、社会消费品零售总额、技术市场成交额、公路里程以及客运量作为其代理指标，并将各空间单元相应的要素之和作为其产生空间联系的基础进行矩阵构建，地理空间距离的远近则通过判断空间单元所属的球面距离是否处于某一特定的局域区间进行取值，介于局域区间范围的记为1，否则取值为0。

表1 各变量的描述性统计结果
Tab. 1 Descriptive statistical results of each variable

变量类型	变量名称	变量符号	均值	标准差	最大值	最小值
被解释变量	粮食生产效率	<i>lninefficiency</i>	0.80	0.13	1.00	0.51
解释变量	外向联系强度	<i>lnoutlink strength</i>	4.98	4.79	30.81	0.05
	空间辐射范围	<i>lnradiation range</i>	7.10	2.48	14.00	3.00
控制变量	粮食作物播种面积(10 ³ hm ²)	<i>lneara</i>	3658.52	3071.11	14283.08	55.64
	农业从业人员数量(10 ⁴ 人)	<i>lnemployee</i>	873.34	666.96	3039.48	33.38
	农用化肥施用量(10 ⁴ t)	<i>lnfertilizer</i>	181.67	145.15	716.09	4.40
	农业机械数量(台)	<i>lnmechanical</i>	41878.43	61022.41	315200.00	280.00
其他变量	人均地区生产总值(元/人)	<i>lnGDP</i>	41905.61	25234.54	153095.00	5750.00
	社会消费品零售总额(10 ⁸ 元)	<i>lntotal retail</i>	7115.12	7009.59	39501.10	90.00
	技术市场成交额(10 ⁸ 元)	<i>lntech turnover</i>	225.03	541.11	4957.82	0.04
	公路里程(10 ⁴ km)	<i>lnroad mileage</i>	13.57	7.36	33.16	1.04
	客运量(10 ⁴ 人)	<i>lnpassenger volume</i>	79569.88	74821.70	574266.00	483.00

3 网络空间外部性与粮食生产效率提升

3.1 粮食生产效率空间溢出网络结构

空间经济学的发展一定程度上突破了传统的以行为主体为核心变量的分析范式，实现了研究单元资源技术的跨地域流动与互补^[24]。为有效揭示不同空间单元粮食生产效率的溢出特征与交互影响，本文通过修正的引力模型构建空间关联强度矩阵，并借助ArcGIS对其地理空间可视化，同时基于溢出强度数据的取值特征将所有关联节点进行三级自然断裂（图1）。总体而言，中国粮食生产效率空间关联网络表现出多线程溢出特征，其辐射范围已经突破传统的近邻地域限制，但整体网络形态目前相对松散。假设不同研究单元两两之间均存在空间联系，那么网络中最多可能存在930条关联关系，而目前全域范围内基于粮食生产效率的关联数量仅223条，说明网络内部连通性仍然具有较大提升空间。同时，就网络结构而言，其关联格局呈现出明显的不均衡发展态势，空间联系主要集中在东、中部地区，并形成两条发展轴线：黑龙江—辽宁发展轴线，北京—广东发展轴线，沿轴线共构成4个关键团组：黑龙江—吉林—辽宁团组；北京、河北、山西、河南、山东团组；江苏、上海、浙江、安徽、湖北、河南团组；以及湖北、湖南、江西团组。这种组团发展模式能够在一定程度上强化网络结构，但现阶段该模式主要以农业资源本底相似以及北上广等技术创新能力较强的省域为主，且大部分省域在空间溢出过程中的近距离短程联系更为显著，整体网络的外部扩展能力相对有限。西部地区由于地理位置相对偏远，其空间联系总体呈现低强度、长距离跨域特征，且关联关系更多集聚于新疆、西藏等省域，区域内部网络结构存在一定的极化现象。

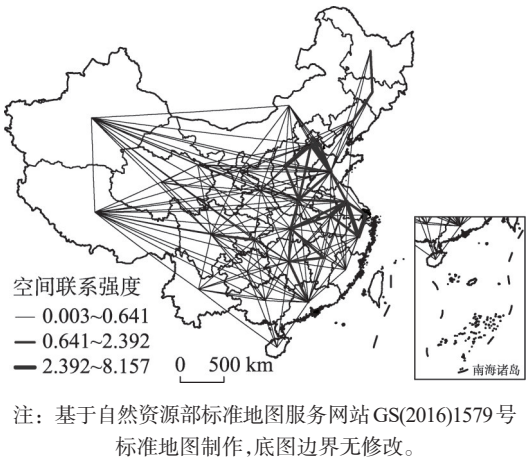
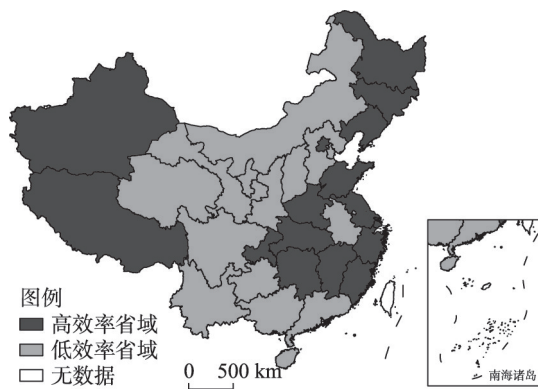


图1 2006—2018年中国粮食生产效率空间关联结构
Fig. 1 Spatial correlation structure of grain production efficiency in China during 2006-2018

这种不均衡的空间溢出网络格局与粮食生产效率分布形态基本吻合。以2006—2018年产粮效率均值为分割点，将高于均值的空间单元界定为高效率省域，低于均值的空间单元界定为低效率省域（图2）。可以看到，中国粮食生产效率空间分异特征明显，东西方向依次呈现高效率—低效率—高效率的纵列梯度特征，产粮效率存在明显断层，除新疆、西藏等粮食主要生产省外，大部分西部地区表现出集中连片的效率低值集聚态势。但以高帆^[25]、王介勇等^[26]为代表的大量研究表明，目前中国粮食生产格局正在进行空间重组，生产重心呈现“北上西进”趋势，除东北地区等主要粮食生产基地外，西部地区逐渐成为粮食生产新的“增长极”。可见，这种空间调整实质上容易导致粮食生产效率的空间错配，也就是说，粮食生产高效率区域逐步边缘化，而效率相对薄弱的区域逐步中心化，一定程度上加剧了粮食生产体系的不稳定性。从中国发展现实来看，粮食生产重心的“北上西进”趋势存在一定的不可逆性，同时也是产业转移升级的必然结果。为此，当前粮食生产的关键在于加强东西联系强度，突破空间纵列分异，带动西部地区的产粮效率提升。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1579号标准地图制作，底图边界无修改。

图2 2006—2018年中国粮食生产效率空间分异特征
Fig. 2 Spatial differentiation characteristics of grain production efficiency in China during 2006-2018

3.2 网络空间外部性与粮食生产效率关系检验

传统研究主要关注网络空间结构、不同空间单元的交互影响机制以及网络提升路径，作为网络分析的逻辑起点，有关网络外部性对粮食生产效率的影响研究相对有限。实质上，空间网络与粮食生产效率分布态势的一致性特征一定程度上揭示了二者可能存在某种影响关系。为此，本文以粮食生产效率为因变量，分别选取外向联系强度以及空间辐射范围检验不同网络节点外部性的差异性影响。为了保证结论的稳健性，本文同时估计了临近距离矩阵、球面距离矩阵以及经济距离矩阵拟合结果（表2）。

核心解释变量外向联系强度和空间辐射范围的估计系数都显著为正，说明网络外部性对粮食生产效率具有明显的促进作用，且3种空间矩阵的估计结果基本一致，这在一定程度上证实了研究结论的稳健性和可靠性。其中，外向联系强度的估计系数为0.646（以临近距离矩阵估计结果为例），且在1%的显著性水平下拒绝为零的原假设，说明与其他研究单元产生的联系越多，网络正向空间溢出越明显，且其作用程度普遍高于控制变量集影响因子，说明网络外部性已成为影响粮食生产效率的关键因素，这与许庆等^[27]的研究相吻合，再次验证了当前基于要素投入的生产方式已处于边际报酬递减阶段。空间辐射范围的扩大能够实现粮食生产效率的正向空间溢出，但与外向联系强度相比，其作用程度相对有限，这在一定程度上遵循Tobler^[28]的地理学定律。一般而言，与研究单元存在直接联系的节点数量越多，长距离跨域特征越明显，与之相应的空间溢出效应表现为低强度的概率越高。就控制变量而言，粮食作物播种面积、农业从业人员以及农业机械数量对粮食生产效率的正向促进作用明显，其估计结果基本符合研究预期，再次验证了本文研究结果的可靠性，但农用化肥施用量却表现出一定的抑制作用，这与孔凡斌等^[29]的研究相一致，主要与近年来化肥的过量使用有关。

表 2 网络外部性对粮食生产效率的影响分析

Tab. 2 Analysis of the impact of network externalities on grain production efficiency

变量名称	临近距离矩阵	球面距离矩阵	经济距离矩阵
截距项	-1.619**	0.995	-4.478***
lnoutlink strength	0.646***	0.606***	0.571***
lnradiation range	0.096**	0.035	0.055
lnearea	0.041*	0.059***	0.021
lnemployee	0.195***	0.113***	0.096**
lnfertilizer	-0.102***	-0.036	-0.064**
lnmechanical	0.013*	0.003	0.007
W×lnoutlink strength	-0.512***	-0.552***	-0.358***
W×lnradiation range	-0.187*	0.067	0.471*
W×lnearea	0.155***	0.161**	0.104
W×lnemployee	0.072	-0.330***	0.586**
W×lnfertilizer	-0.171***	-0.204***	-0.232**
W×y	-0.059***	-0.051***	-0.075**
lnoutlink strength	0.610***	0.630***	0.652***
R ²	0.544	0.539	0.543
Log-L	574.545	562.839	561.105

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平显著性。

4 粮食生产效率空间溢出网络提升路径与潜在网络节点识别

4.1 粮食生产效率空间溢出网络提升路径

网络空间外部性与粮食生产效率的关系检验显示，网络外部性对粮食生产效率具有明显的正向溢出作用，为进一步加强空间溢出程度，本文拟对其空间溢出来源进行识别。基于自变量和因变量都属于关系数据^[30]，传统计量方法由于无法突破属性数据限制，对于关系数据的分析具有一定的局限性，同时容易引发共线性问题。因此本文借鉴李敬等^[31]的做法，通过二次指派程序考察粮食生产效率空间溢出网络的主要提升路径（表 3）。

表 3 粮食生产效率空间溢出网络提升路径

Tab. 3 Enhancement path of spatial spillover network for grain production efficiency

变量	非标准回归系数	标准回归系数	显著性概率	$p \geq 0$	$p \leq 0$
截距项	-0.023	0.000			
lnGDP	-0.094	-0.105	0.005	0.996	0.005
lntotal retail	0.059	0.069	0.063	0.063	0.937
lntech turnover	0.049	0.051	0.065	0.065	0.935
lnroad mileage	0.086	0.101	0.001	0.001	1.000
lnpassenger volume	0.112	0.128	0.000	0.000	1.000
0~250 矩阵	0.944	0.269	0.000	0.000	1.000
250~500 矩阵	0.858	0.564	0.000	0.000	1.000
500~750 矩阵	0.523	0.376	0.000	0.000	1.000
750~1000 矩阵	0.146	0.116	0.000	0.000	1.000
1000~1250 矩阵	0.035	0.029	0.123	0.123	0.877
R ²		0.537			
调整 R ²		0.532			

经济增长无法支持地区粮食生产效率空间溢出，其人均地区生产总值的标准回归系数为-0.105，且在1%显著性水平下拒绝为零的原假设，表现出明显的负向抑制作用，一定程度上验证了经济增长对粮食生产的挤出效应^[32]，进一步解释了北京、天津等在粮食生产网络中的边缘化特征。区际贸易以及技术推广能够实现网络空间外溢，但其作用程度相对有限，这与农业比较收益偏低，农业贸易和农业技术推广所占比重较小相一致。交通基础设施以及人口流动是形成网络空间外溢的主导要素，对因变量的解释程度都在10%以上，且满足1%置信水平下显著为正，表明当前改善粮食生产效率断层以及集中连片效率低地的关键在于进一步实现交通基础设施的互通互联与人口流动。

为了检验空间距离约束对网络外溢效应的影响，本文在模型中加入了距离矩阵。从表3所示的估计结果可以看到，各距离矩阵的估计系数基本表现出随地理距离的扩大而逐渐减弱趋势，符合近带动远辐射规律，但其在250~500 km局域区间出现短暂的上升，这在一定程度上契合了高鸣等^[33]关于规模效应的预期，即相似地理单元之间的空间集聚容易形成规模效应，其外部性的产生仍然以空间单元相邻或相近为前提，当地理距离超过500 km时，地理距离扩大的过程同时也是网络外溢效应减弱的过程。这也再次证实了空间溢出网络外部性实质上是规模效应在空间维度的扩展^[34]。

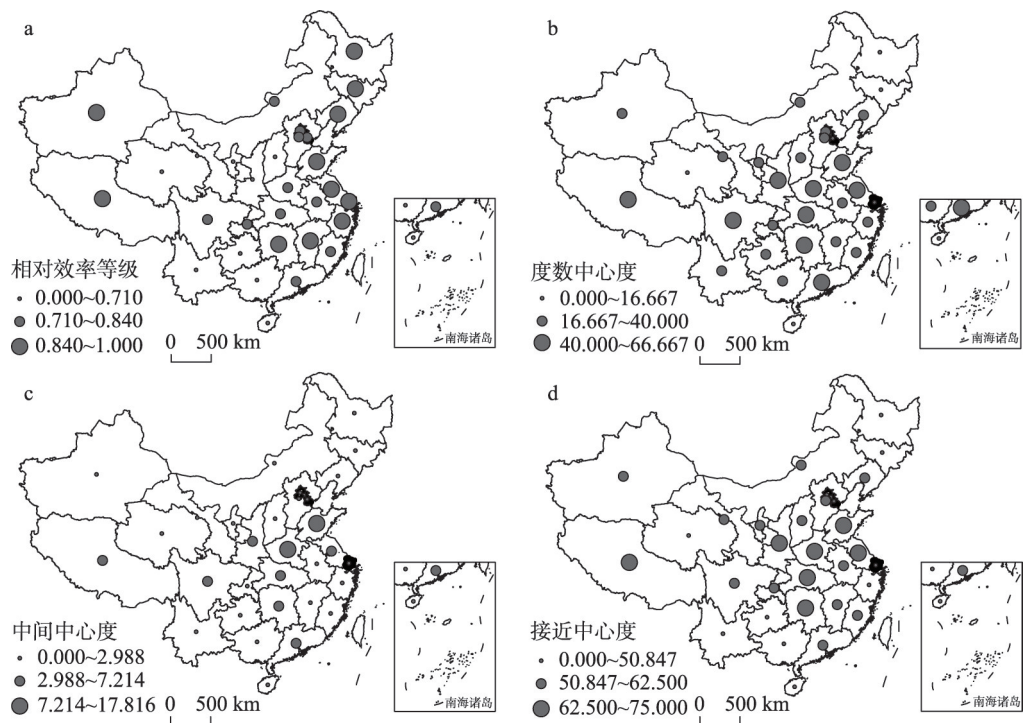
4.2 粮食生产效率空间溢出潜在网络节点识别

网络通达性在很大程度上取决于核心节点、中介节点以及边缘节点之间的互动关系。为了进一步提高整体网络的集聚和扩散能力，本文通过多种网络结构指标与粮食生产效率等级体系的空间聚类，识别各省域在粮食生产效率空间关联网络中的潜在节点，以期形成优势互补的空间格局提供借鉴。

不同空间单元在粮食生产整体网络中的集散能力一方面来源于其自身的农业要素禀赋条件以及比较优势，另一方面取决于其在网络中的区位特征以及地理距离的远近。为此，本文以相对效率等级、度数中心度、中间中心度以及接近中心度作为衡量不同空间单元在整体网络中功能定位的依据，并通过自然断裂法将4类评价指标进行等级划分（图3）。一般而言，粮食生产相对效率等级越高，外向联系的需求和引力越大；度数中心度、中间中心度以及接近中心度等级越高，获得外向联系的能力也越强。考虑到不同评价指标仅能揭示某种特定的结构属性，对于空间单元的综合定位刻画具有一定的局限性，本文结合各评价指标的等级特征，对所有空间单元进行了空间重组聚类，将省域节点进一步划分为核心控制型、局域核心型、潜力型以及边缘型（表4）。

（1）核心控制型节点。核心控制型节点的首要特征是相对效率等级高，外向联系的需求和引力强，同时具有高水平的度数中心度、中间中心度以及接近中心度，对外联系广泛，且大多位于空间联系的关键位置，对其他省域节点具有较强的控制能力，在整体网络空间中具有明显的外向扩散潜力。该节点类型主要包括河南、山东、湖北、湖南、西藏以及江苏，在空间功能定位中以粮食主产区为主，基于良好的农业基础，这些省域在粮食生产过程中具有较强的集散能力，对其他省域表现出明显的辐射带动作用，且其在空间区位上大部分属于东、中部地区。考虑到当前粮食生产的纵列梯度特征，未来应继续保持该类型省域在粮食生产方面的核心增长极地位，并将其作为主要的辐射带动力源，加强东西轴带的空间交互影响，发挥不同空间单元的技术溢出与空间扩散效应，带动西部省域的效率提升。

（2）局域核心型节点。黑龙江、吉林、辽宁、上海、浙江、江西、新疆等省域属于局域核心型节点，其相对效率等级高，但接近中心度、度数中心度以及中间中心度都属于中低水平，大部分省域处于边缘位置，与其他省域在空间距离上相隔较远，控制能力



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1579号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 2006—2018年中国粮食生产效率评价指标等级划分

Fig. 3 Rating of grain production efficiency evaluation indicators in China during 2006-2018

表4 粮食生产效率空间溢出网络潜在节点识别

Tab. 4 Identification of potential nodes of the spatial spillover network for grain production efficiency		
节点类型	基本特征	主要省域
核心控制型	相对效率等级高、度数中心度高、中间中心度高、接近中心度高	河南、山东、湖北、湖南、西藏、江苏
局域核心型	相对效率等级高、度数中心度中低、中间中心度中低、接近中心度中低	黑龙江、吉林、辽宁、上海、浙江、江西、新疆
潜力型	相对效率等级中低、度数中心度中高、中间中心度中高、接近中心度中高	安徽、福建、河北、重庆、内蒙古、广东、四川、陕西
边缘型	相对效率等级中低、度数中心度中低、中间中心度中低、接近中心度中低	广西、贵州、云南、海南、青海、天津、北京、山西、宁夏、甘肃

和向外扩散潜力相对有限，辐射范围局限于一定的地域空间，但其作为产粮效率第一梯队省域，对周边空间单元仍然具有较强的辐射带动作用。其中，上海、浙江、江西可以考虑借助河南、山东、湖北、湖南以及江苏等核心控制型省域的外向溢出能力，形成更大范围的多核心增长极^[35]，进一步向西扩展辐射范围。黑龙江、吉林、辽宁则可以依靠彼此之间的广泛联系，形成三位一体的局域核心节点，进一步提高外向溢出能力。新疆由于地理位置相对偏远，其在网络空间关联中具有明显的弱质性，但其作为西藏向北联系的重要枢纽，可以共同构成双核心节点，逐步改善西部地区集中连片的低效率状况。

(3) 潜力型节点。潜力型节点指的是相对效率等级处于中低水平，但度数中心度、中间中心度以及接近中心度属于中高级别的省域，包括安徽、四川、重庆、内蒙古、河北、陕西、福建以及广东。其中，安徽作为江苏、山东、河南、湖北等核心控制型节点

以及上海、浙江、江西等局域核心型节点的中心枢纽，具有实现规模借用^[36]的区位优势。同时，基于相对较高的外向联系强度，其产粮效率具有较大的提升潜力。四川、重庆地处东引西联、对接东西轴带核心控制型节点的中介位置，其产粮效率提升是突破东西断层以及集中连片效率低地的关键，应紧密依托湖北、湖南以及西藏等效率高值区的辐射带动作用，进一步挖掘效率提升潜力。其余省域则应在更大程度上实现组团发展模式，逐步形成内蒙古—黑龙江、吉林、辽宁组团，河北—山东、河南组团，陕西—河南、湖北组团，福建—浙江、江西组团，广东—江西、湖南组团，依托外向联系优势实现自身效率提升。

(4) 边缘型节点。边缘型节点主要分布在西部地区以及北京、天津等粮食主销区，其相对效率等级、度数中心度、中间中心度以及接近中心度普遍偏低。这种节点类型仅与少数省域存在外向联系，在整体网络中的关联属性以及控制能力相对较弱。同时，基于效率等级偏低，其外向联系需求和引力不足，在粮食生产过程中呈现出明显的被边缘化特征，效率提升潜力十分有限。未来应主动突破地理空间限制，实现与核心增长极省域的交流合作。北京、天津等粮食主销区由于产业升级需求，在粮食生产领域存在一定的挤出效应，如何发挥其技术创新能力，实现农业技术提升与推广是其未来承担国家粮食安全的新路径。

5 结论与讨论

本文基于空间引力模型考察了网络外部性对粮食生产效率的影响，并就网络提升路径以及各空间单元在整体网络中的综合定位与潜力进行了深入分析，得到的关键结论为：

(1) 中国粮食生产效率空间关联网络表现出多线程溢出特征，其辐射范围已经突破传统的近邻地域限制，但整体网络结构存在明显的东西不均衡发展态势，这与西部地区集中连片的效率低值集聚形态基本吻合，生产重心“北上西进”的空间调整实质上容易导致粮食生产效率的空间错配，一定程度上加剧了粮食生产体系的不稳定性。当前粮食生产的关键在于加强东西联系强度，突破空间纵列分异，带动西部地区的产粮效率提升。

(2) 网络外部性对粮食生产效率具有明显的促进作用，目前已成为影响粮食生产效率的关键因素，其中外向联系强度的增强能在更大程度上实现技术空间溢出，空间辐射范围则由于遵循地理学第一定律，作用程度相对有限。

(3) 空间溢出网络实质上是规模效应在空间维度的扩展，符合近带动远辐射规律。然而经济增长无法支持地区粮食生产效率空间溢出，对粮食生产具有一定的挤出作用，区际贸易以及技术推广虽然能够在一定程度上实现网络空间外溢，但其作用程度并不明显，交通基础设施的互通互联与人口流动成为当前改善粮食生产效率断层以及集中连片效率低地的主要路径。

(4) 空间溢出网络同时存在核心控制型、局域核心型、潜力型以及边缘型四种潜在节点，未来应充分发挥核心控制型节点的辐射带动作用，推动局域核心型节点向多核心增长极转变，紧密依托效率高值区以及组团发展模式挖掘效率提升潜力，主动突破边缘型节点的地理空间限制，加强东西轴带的空间交互影响。

综合来看，本文主要回答了网络外部性对粮食生产的影响，并进一步解释了网络外部性与规模经营之间的联系，一定程度上是对当前土地流转、适度规模经营思想的新认识，弥补了以相对位置、地理距离为核心的传统农业区位论的缺陷。同时，本文首次从粮食生产空间重组视角揭示了造成粮食生产体系不稳定的原因，并基于各经济单元的功

能联系与外部性影响形成了保障国家粮食安全的新路径,对当前农业生产理论具有一定的借鉴意义。

参考文献(References)

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations International Children's Emergency Fund, et al. The State of Food Security and Nutrition in the World. Rome, 2020. [2021-06-03]. <https://doi.org/10.4060/ca9699zh>. [联合国粮食及农业组织, 国际农业发展基金, 联合国儿童基金会, 等. 世界粮食安全和营养状况. 罗马, 2020. [2021-06-03]. <https://doi.org/10.4060/ca9699zh>.]
- [2] Cheng Guoqiang, Zhu Mande. COVID-19 pandemic is affecting food security: Trends, impacts and recommendations. *Chinese Rural Economy*, 2020(5): 13-20. [程国强, 朱满德. 新冠肺炎疫情冲击粮食安全: 趋势、影响与应对. *中国农村经济*, 2020(5): 13-20.]
- [3] Li Mingwen, Wang Zhenhua, Zhang Guangsheng. Has agricultural service industry promoted the development of high-quality grain? Threshold regression analysis based on panel data of 272 prefecture-level cities. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(7): 4-16. [李明文, 王振华, 张广胜. 农业服务业促进粮食高质量发展了吗: 基于272个地级市面板数据的门槛回归分析. *农业技术经济*, 2020(7): 4-16.]
- [4] Ma Shuzhong, Ye Hongliang, Ren Wanwan. An examination of China's food security based on effective supply of cultivated land. *Issues in Agricultural Economy*, 2015, 36(6): 9-19, 110. [马述忠, 叶宏亮, 任婉婉. 基于国内外耕地资源有效供给的中国粮食安全问题研究. *农业经济问题*, 2015, 36(6): 9-19, 110.]
- [5] Tang Ke, Wang Jianying, Chen Zhigang. The impact of farming land operation scale on grain yields and production costs: An empirical study based on cross period and region. *Management World*, 2017(5): 79-91. [唐轲, 王建英, 陈志明. 农户耕地经营规模对粮食单产和生产成本的影响: 基于跨时期和地区的实证研究. *管理世界*, 2017(5): 79-91.]
- [6] Guo Qinghai. The scale of moderate scale land management: Efficiency or income. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 4-10. [郭庆海. 土地适度规模经营尺度: 效率抑或收入. *农业经济问题*, 2014, 35(7): 4-10.]
- [7] Lüthi S, Thierstein A, Hoyler M. The world city network: Evaluating top-down versus bottom-up approaches. *Cities*, 2018, 72: 287-294.
- [8] Knox P L, Castells M. The informational city, information technology, economic restructuring, and the urban-regional process. *The Geographical Journal*, 1995, 161(1): 94. DOI: 10.2307/3059942.
- [9] Derudder B, Taylor P J, Witlox F, et al. Hierarchical tendencies and regional patterns in the world city network: A global urban analysis of 234 cities. *Regional Studies*, 2003, 37(9): 875-886.
- [10] Taylor P J, Hoyler M, Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement central place theory. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [11] Castells M. Globalisation, networking, urbanisation: Reflections on the spatial dynamics of the information age. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2737-2745.
- [12] Liu Huajun, Liu Chuanming, Sun Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China. *China Industrial Economics*, 2015(5): 83-95. [刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究. *中国工业经济*, 2015(5): 83-95.]
- [13] Wang Feng, Liu Yanfang, Kong Xuesong, et al. Analysis of spatial interaction in rural society based on theory of social network: A case of Liji town in Wuhan City. *Economic Geography*, 2016, 36(4): 141-148, 202. [王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 等. 基于社会网络理论的农村社会空间联系分析: 以武汉市黄陂区李集镇为例. *经济地理*, 2016, 36(4): 141-148, 202.]
- [14] Gu Guofeng, Li Qiao, Zhou Yinan. Evolution of economic growth spatial correlation network structure of urban agglomeration in northeast China. *Areal Research and Development*, 2020, 39(2): 14-19. [谷国锋, 李俏, 周伊楠. 东北地区城市群经济增长空间关联网络结构演变. *地域研究与开发*, 2020, 39(2): 14-19.]
- [15] Bai Linchuan, Wu Lanfang, Song Xiaoqing. Spatial difference of grain yield changes during 1995-2010 and balanced potential output to increase in Shandong Province. *Progress in Geography*, 2013, 32(8): 1257-1265. [柏林川, 武兰芳, 宋小青. 1995—2010年山东省粮食单产变化空间分异及均衡增产潜力. *地理科学进展*, 2013, 32(8): 1257-1265.]
- [16] Lu Yawen, Zhang Zhenghe. Social network analysis of rural population migration during 1978-2016: Evidence from a village of a population net-outflow province, middle area of China. *Issues in Agricultural Economy*, 2018, 39(3): 87-97. [路雅文, 张正河. 1978—2016年农村人口迁移的社会网络分析: 来自中部人口流出大省C村的证据. *农业经济问题*, 2018, 39(3): 87-97.]

- [17] Li Xuelin, Li Longwei, Dong Xiaobo, et al. A study on decomposition of total factor productivity of grain in Yunnan Province. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(10): 102-113. [李学林, 李隆伟, 董晓波, 等. 云南省粮食全要素生产率分解研究. *农业技术经济*, 2019(10): 102-113.]
- [18] Wu Fenglian, Hao Lisha, Wang Xiaoge, et al. Development potential pattern of service industry in the eastern Chinese cities based on high-speed railway connection: From the perspective of social network analysis. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 145-154. [吴凤连, 郝丽莎, 王晓歌, 等. 基于高铁联系的中国东部城市服务业发展潜力格局: 社会网络分析视角. *经济地理*, 2020, 40(4): 145-154.]
- [19] Sun Na, Zhang Meiqing. Network structure and evolution characteristics of cities in China based on high-speed railway transport flow. *Progress in Geography*, 2020, 39(5): 727-737. [孙娜, 张梅青. 基于高铁流的中国城市网络结构特征演变研究. *地理科学进展*, 2020, 39(5): 727-737.]
- [20] Feng Ying, Hou Mengyang, Yao Shunbo. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2380-2395. [冯颖, 侯孟阳, 姚顺波. 中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制. *地理学报*, 2020, 75(11): 2380-2395.]
- [21] Karagiannis R. A system-of-equations two-stage DEA approach for explaining capacity utilization and technical efficiency. *Annals of Operations Research*, 2015, 227(1): 25-43.
- [22] Lindebo E, Hoff A, Vestergaard N. Revenue-based capacity utilisation measures and decomposition: The case of Danish North Sea trawlers. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(1): 215-227.
- [23] Beaverstock J V, Smith R G, Taylor P J. World-city network: A new metageography? *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(1): 123-134.
- [24] Wu Junqian, Fang Shile, Li Gucheng, et al. The spillover effect of agricultural mechanization on grain output in China: From the perspective of cross-regional mechanization service. *Chinese Rural Economy*, 2017(6): 44-57. [伍骏骞, 方师乐, 李谷成, 等. 中国农业机械化发展水平对粮食产量的空间溢出效应分析: 基于跨区作业的视角. *中国农村经济*, 2017(6): 44-57.]
- [25] Gao Fan. Regional changes in grain production in China: 1978-2003. *Management World*, 2005(9): 70-78. [高帆. 我国粮食生产的地区变化: 1978—2003年. *管理世界*, 2005(9): 70-78.]
- [26] Wang Jieyong, Liu Yansui. The changes of grain output center of gravity and its driving forces in China since 1990. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1188-1194. [王介勇, 刘彦随. 1990年至2005年中国粮食产量重心演进格局及其驱动机制. *资源科学*, 2009, 31(7): 1188-1194.]
- [27] Xu Qing, Yin Rongliang, Zhang Hui. Economies of scale, returns to scale and the problem of optimum-scale farm management: An empirical study based on grain production in China. *Economic Research Journal*, 2011, 46(3): 59-71, 94. [许庆, 尹荣梁, 章辉. 规模经济、规模报酬与农业适度规模经营: 基于我国粮食生产的实证研究. *经济研究*, 2011, 46(3): 59-71, 94.]
- [28] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46(Suppl.1): 234-240.
- [29] Kong Fanbin, Guo Qiaoling, Pan Dan. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China. *Economic Geography*, 2018, 38(10): 201-210, 240. [孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异. *经济地理*, 2018, 38(10): 201-210, 240.]
- [30] Oliveira M, Gama J. An overview of social network analysis. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 2012, 2(2): 99-115.
- [31] Li Jing, Chen Shu, Wan Guanghua, et al. Study on the spatial correlation and explanation of regional economic growth in China: Based on analytic network process. *Economic Research Journal*, 2014, 49(11): 4-16. [李敬, 陈澍, 万广华, 等. 中国区域经济增长的空间关联及其解释: 基于网络分析方法. *经济研究*, 2014, 49(11): 4-16.]
- [32] Liu Ying, Xiao Chiwei, Li Peng, et al. Relationship of grain output and economic development from 1978 to 2013 in the major grain producing area of China. *Resources Science*, 2015, 37(10): 1891-1901. [刘影, 肖池伟, 李鹏, 等. 1978—2013年中国粮食主产区“粮—经”关系分析. *资源科学*, 2015, 37(10): 1891-1901.]
- [33] Gao Ming, Song Hongyuan. Spatial convergence and functional area differences in the technical efficiency of food production: A concurrent discussion of the spatial ripple effect of technology diffusion. *Management World*, 2014(7): 83-92. [高鸣, 宋洪远. 粮食生产技术效率的空间收敛及功能区差异: 兼论技术扩散的空间涟漪效应. *管理世界*, 2014(7): 83-92.]
- [34] Huang Y, Hong T, Ma T. Urban network externalities, agglomeration economies and urban economic growth. *Cities*, 2020, 107: 102882. DOI: 10.1016/j.cities.2020.102882.

- [35] Shi Qingbin, Xie Yongshun, Han Zenglin, et al. Spatial structure and spatial development patterns of urban tourism economic connections in northeast China. *Economic Geography*, 2018, 38(11): 211-219. [史庆斌, 谢永顺, 韩增林, 等. 东北城市间旅游经济联系的空间结构及发展模式. *经济地理*, 2018, 38(11): 211-219.]
- [36] Yao Changcheng, Song Donglin, Fan Xin. Does the small size of cities restrict economic growth? A re-examination from the perspective of two kinds of 'borrowed-size'. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(8): 62-71. [姚常成, 宋冬林, 范欣. 城市“规模”偏小不利于经济增长吗? 两种借用规模视角下的再审视. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(8): 62-71.]

Spatial spillover networks and enhancement paths of grain production efficiency in China

ZHANG Qinan¹, ZHANG Fanfan¹, MAI Qiang¹, WU Guoyong^{2,3}

(1. School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Rural Revitalization

Research Institute in Karst Region of China, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Grassroots Social Governance Innovation High End Think Tank, Guiyang 550025, China)

Abstract: Existing research has generally focused on the resource endowments and functional attributes of grain production units, with limited studies on the externalities arising from the interactions of economic agents. Therefore, this paper focuses on the impact of network externalities on grain production efficiency based on the spatial gravity model and takes network externalities as a logical starting point to further explore the network enhancement path and the comprehensive positioning and potential of each spatial unit in the overall network. The results show that the spatial spillover effect of China's grain production network is significant and has an obvious promotional effect on grain production efficiency, which is, in essence, the expansion of the idea of scale management in the spatial dimension, consistent with the law of near-driving and far-radiation, and the interconnection of transportation infrastructure and population movement are the main paths to realize the spatial spillover of the network. Additionally, there are four types of potential nodes in the overall network: core control type, local core type, potential type, and edge type. In the future, it is necessary to give full play to the radiation-driven role of core-controlled nodes, strengthen the spatial interaction between the eastern and western regions of China, and realize the cross-regional flow and complementarity of agricultural resources and technologies.

Keywords: grain production efficiency; spatial network externalities; spatial measurement model; secondary assignment procedure; potential network node; China