

# 要素区际流动对土地绿色生产效率的影响 —— 以武汉城市圈为例<sup>1</sup>

单玉红，韩 晴

(华中农业大学公共管理学院，湖北 武汉 430070)

**【摘要】**：以武汉城市圈为例，分析要素区际流动对区域土地绿色生产效率的影响；以县域为单元构建武汉城市圈的信息、经济和人口要素流的多要素流空间网络，归纳县域之间多元要素的流动特征。测算各县域的土地绿色生产效率，并使用空间误差模型验证要素流动对土地绿色生产效率的影响，在此基础上进一步使用地理加权回归模型分析这种影响力的空间分异情况。研究结果：(1) 武汉城市圈要素流网络总体上呈现为典型的“核心—边缘”特征，但已初步形成天门—仙桃—潜江这一相对聚集的独立发展的子群区域；(2) 流生产空间还处于初级阶段，与传统场空间的契合较高，要素流动尚比较依赖地理距离；(3) 武汉城市圈的土地绿色生产效率等级的空间格局与要素流网络的中心度格局并不完全一致，表明要素流对土地绿色生产效率的影响存在区域差异；(4) 信息中心度对土地绿色生产效率具有显著的正向促进效应，经济中心度对土地绿色生产效率具有负向效应，人口中心度的影响不显著；(5) GWR 模型验证了多元要素流对土地绿色生产效率的影响的区域差异。研究结论：(1) 继续完善信息高速公路的建设，推动要素在更大空间上的流动；(2) 要素流动加快的背景下，因地制宜地确定区域差别化的绿色发展对策，自然资源丰富的南部丘陵地区更需尽快提升科技和管理水平，应对经济流动加快；(3) 提升区域信息发展水平是当前提高土地绿色生产效率最有效手段，应尽快提升城市圈整体信息化水平；人口流方面，应聚焦创新型人才和高质量人才的流动问题。

**【关键词】**：要素流；土地绿色生产效率；影响因素；武汉城市圈

**【中图分类号】**：X322      **【文献标识码】**：A      **【文章编号】**：1004- 8227(2023)10- 2060- 12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202310006

绿色生产效率是评价我国生态文明建设和经济转型可行性的重要指标[1],提高土地绿色生产效率是缓解经济发展与环境保护的矛盾、促进土地资源可持续利用以实现高质量发展的有效路径[2]。随着环境问题日益突出，绿色发展理念深入人心，学者们围绕着绿色生产效率的内涵、指标体系、测度评估、时空差异及影响因素等问题展开了诸多研究。当前学术界较为认可的“绿色生产效率”是指将环境因素纳入到传统生产效率的测算框架中，是在考虑资源投入和环境代价的基础上，评价一个国家或地区生产效率的重要指标，反映了在追求经济效益的过程中利用自然资源和减轻环境压力的效率[3]。指标构建时主要是将环境污染作为投入要素或非期望产出[4,5],或是构建环境综合指数，将产出转化为绿色产出[6]。测度方法由指标评价法拓展到包括随机前沿分析法(SFA)、数据包络分析法(DEA)等的模型法。研究认为区域的人力资本、土地利用结构和方式、产业结构、生态投入、科技研发投入等要素都是影响区域土地绿色生产效率的重要因素[7,8,9],并主要从如何发挥各要素的规模效应及减少环境污染的角度提出了提升绿色生产效率的建议[10,11]。

<sup>1</sup> 收稿日期：2023- 01- 06; 修回日期：2023- 05- 05

**基金项目**：教育部人文社会科学青年基金项目(16YJC630016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2662020GGPY003)

**作者简介**：单玉红(1976~)，女，副教授，主要研究方向为土地利用规划、土地资源配效率。E-mail: shanyuhong@mail.hzau.edu.cn

区域经济一体化的发展趋势使得区域土地绿色生产效率的影响因素和影响机理更趋复杂。相关研究[12,13,14,15]主要基于传统的地理“场”空间模式，验证了土地绿色生产效率的空间溢出特性。需要关注的是随着信息网络和高速交通网络等设施的不断完善和区域之间信息、人口、技术、物质等要素的流动加快，兴起了一种新型的生产空间—“流”空间。“流”空间中要素的配置方式也发生了根本性的变化：传统的“场”生产空间中，要素配置主要取决于地理区位，而在“流”生产空间中，城市在空间网络的位势决定了生产要素流动的集聚与扩散的方向、速度和强度，生产要素和要素流动均在经济发展过程中扮演重要角色[16]。

要素流动对于各区域土地绿色生产效率的影响是复杂多样的：一方面，“流”空间为存量资源的结构效应和技术效应提供了更有利的孵化环境。区际间依托完善的高速交通、通讯等网络进行交互，跨越了地理空间的限制，多元要素的流动更为便捷畅通，可达边界更远；区际交互的内容更为多样化；交互主体也更加多元化且可以实现交互层级的跨越，因此多元要素流更容易集聚形成规模效应，要素结构得以进一步优化，技术、文化等要素的扩散也更快更广。例如，伴随农资投入、农产品等在区际间的物质交换和能量流动，农地利用生态效率的空间溢出效应更为显著，呈现互相促进、协同提升的演进特征[17,18]；另一方面，对于某些区域或者某些结构仍相对松散且比较效益相对低下的产业来说，“流”生产空间中可能会面临要素抽离和环境污染转移，反而会降低绿色生产效率。

因此，亟待明确区际要素流动对于区域土地绿色生产效率的影响及其内在机理，以引导生产要素的有序流动和合理配置，从而提升区域土地利用的绿色生产效率。本文将“流”空间理论引入土地绿色生产效率影响因素的研究中，对要素加快流动对土地绿色生产效率的影响机理进行系统演绎，并通过实证分析进一步探究要素流动对土地绿色生产效率的影响，是对要素流动影响土地绿色生产效率的作用机制的进一步创新。本文以武汉城市圈的37个县级行政单元为研究对象，构建武汉城市圈的信息流、经济流和人口要素流的多要素流空间网络，对37个县域单元土地绿色生产效率进行测度，并使用空间计量模型和地理加权回归模型验证各类要素流对土地绿色生产效率的影响，以期由政府有关部门如何提高土地绿色生产效率提供决策参考。

## 1 要素流动影响土地绿色生产效率的内在机理

理论上，“流生产空间”以传统的“(地理)场生产空间”为基础，但依托高速信息、高科技等物理或者虚拟交互网络，使得传统场空间中的要素流动跨越了地理空间的限制，强化了要素流动引致的规模效应、结构效应、技术扩散等效应。此外，与场空间不同的是，流空间中多元要素可很方便地实现高频的交互，在促进劳动力要素的自觉学习等同时可激发新信息、新知识的生成，从而可提升要素投入的边际收益，进而有效地提升经济效率。因此，如下图1所示，流空间并不是“替代”了场空间，而是“叠加”在场空间上[19]，“流生产空间的兴起”加快了要素的流动，增强了要素间的交互，但其是否能够提升绿色生产效率还要取决于要素的流动是否有序：要素的有序流动会通过优化要素结构、提升要素的边际效益、盘活闲置资源及改善资源错配等途径提高土地绿色生产效率；而无序的要素流动会导致要素的过度集聚以及污染排放转移等，从而降低土地绿色生产效率。

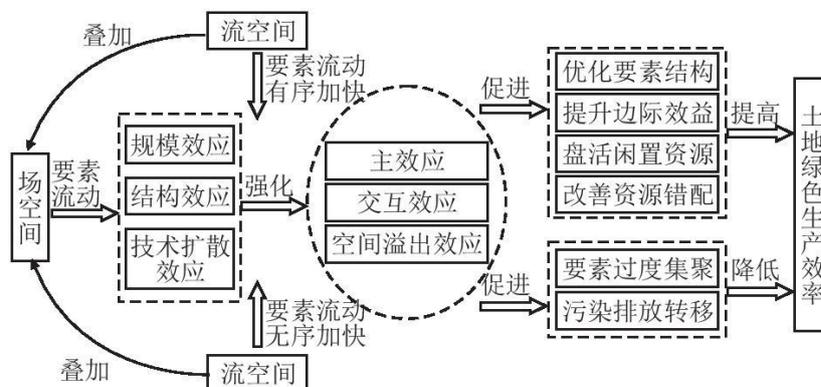


图1 要素流动影响土地绿色生产效率的内在机理

### 1.1 主效应

信息、资金、人口等要素流动会直接影响土地利用中各类生产要素(如劳动力、资本、技术和信息等)的配置,引起单位面积土地上各类生产要素数量和质量的改变,进而影响土地绿色生产效率。有研究指出,劳动力资本、财政支农力度、农业科技人员投入以及机械化水平等对土地绿色生产效率表现为正向促进作用,而生产资料的过量投入和土地生产中环境污染排放过多是绿色生产无效率的主要来源[20]。除此之外,要素流动加快会引起主体要素间的交流频次大大增加,同时增加多类要素的边际效率,进而有效提升经济效益并提升土地绿色生产效率。

### 1.2 交互效应

土地利用过程中,各生产要素之间也存在交互影响,进而影响土地绿色生产效率,尤其在流空间中,这种影响随要素加快流动及跨区流动被放大。一方面,研究发现,随着劳动力持续转移,农户为提升耕地生产力,过量、低效率的施用化肥、农药,增加了污染排放,造成土地绿色生产效率损失[21]。另一方面,生产要素在更大范围内的流动有利于降低需求企业或组织间的信息不对称,提升需求端与供给端的匹配率,促进闲置资源参与创新,提高资源利用率[22,23]。信息技术流动则会通过对劳动力的替代或减少经济活动对地理实体空间的边际需求规模,进一步扩大经济活动的空间集聚规模效应,即通过产生新的或增强交互效应影响土地利用中的空间布局,进而影响土地绿色生产效率[24]。

### 1.3 空间溢出效应

场空间中,劳动力、资本等要素多与邻近空间相互影响产生空间溢出效应;流空间中,生产要素对土地绿色生产效率的影响突破了地理空间的限制,即使不邻近的区域之间也会产生空间溢出效应,引起资源跨区作业、环境污染扩散加剧。已有研究指出,流动性生产要素相比固定性生产要素更容易产生空间溢出效应[25]。因此,随着资源要素在不同区域间的加速流动,这种空间溢出效应的程度及覆盖范围会越来越强,并通过效率机制和价格机制促进资源错配的改善,进而使不同区域土地的生产效率和生态效率均受到影响[26]。

## 2 研究方法

### 2.1 区际多元要素流网络的构建

#### (1)信息流网络:

依据百度指数构建,百度指数以网民行为大数据为基础,可通过分析关键词搜索的热度来获取舆情趋势、网民需求、定位受众特征信息等,因此可表征城市间的信息流强度,客观反映城市间关联特征[27]。由于百度指数是以市域为搜索主体单元,因此先以武汉城市圈9市名称为搜索主体获取各市之间的网络关注度,再根据各区县人数占其所在城市总人数的比值将关注度分至县级,测算出区县间信息流联系强度并构建信息流矩阵。

#### (2)经济流网络:

使用连锁网络模型法[28]构建,该模型如下:

$$R_{ab,j} = V_{aj} \times V_{bj}$$

$$R_{ab} = \sum_j R_{ab,j} (j = 1, 2, 3 \dots m) \quad (1)$$

式中： $R_{ab,j}$ 表示某一类企业  $j$  在城市  $a$  和城市  $b$  之间的联系强度； $V_{aj}$  为城市  $a$  中企业  $j$  的服务价值； $n$  为城市个数； $R_{ab}$  表示城市  $a$  和  $b$  之间的总联系强度； $m$  为企业数。选取银行、公司、工厂、公共服务点(供水供电营业厅)、物流点为进入连锁网络模型的企业类型。

### (3)人口流网络：

使用百度迁徙数据构建，该数据实时、动态、直观地展示了区域间人口迁徙的轨迹与特征，可以反映城市之间的人口流动紧密度。同百度指数一样，百度迁徙数据也以市域为流动单元，因此同样根据各区县人数占其所在城市总人数的比值将市级人口迁徙指数分至县级，测算出区县间人口流联系强度并构建人口流矩阵。

### (4)区际多元要素流网络特征分析：

使用社会网络分析法中的“网络联系强度分析”和“中心度分析”对武汉城市圈多元要素流网络进行解析。网络联系强度反映了不同要素流网络中各城市节点间的要素联通强度，该值越大，表明城市间要素流动强度越大，反之越小。中心度包括程度中心度、中间中心度和接近中心度等。其中程度中心度通过测量网络中与一个节点有联系的点的数量来反映其节点地位，程度中心度越高，城市在区域网络中的“地位”越高、竞争力越强。接近中心度以一个节点与其它节点间的接近程度来反映不受他人“控制”的能力；中间中心度以某一节点处于其它两点间的路径数反映其在网络结构中的中介能力[29]。由定义可知，城市在流网络中的程度中心度越高，其在区域网络中的要素流动量越大，因此本文选用程度中心度表征区际要素流动。

## 2.2 土地绿色生产效率的测度

### 2.2.1 土地绿色生产效率的测算指标

本文是将土地利用过程中的污染排放作为非期望产出纳入到全要素生产效率核算框架和范畴中，来计算土地绿色生产效率。土地利用过程中投入要素主要分为劳动力投入、资本投入、土地投入、水资源投入、能源投入、科技投入等，由于研究对象与研究尺度的不同，对水资源投入的采纳情况有所差异，其余要素相对固定。鉴于县域尺度下水资源数据暂时无法获取，本研究最终确定投入指标包括：劳动力投入、资本投入、土地投入、能源投入、科技投入；产出指标包括期望产出及非期望产出。具体指标见表 1。

表 1 土地绿色生产效率测算的指标体系

指标类型	一级指标	二级指标
投入指标	劳动力投入	15~59 岁人口数(万人)

	资本投入	固定资产投资额(亿元)
	土地投入	行政区划面积(km2)
	能源投入	农业能源投入(万 t)
		规模以上工业能源消费量(万 t 标准煤)
	科技投入	R&D 经费支出(亿元)
产出指标	期望产出	地区 GDP(亿元)
	非期望产出	二氧化碳排放量(万 t)
		工业颗粒物(烟粉尘)排放量(万 t)

		工业氮氧化物排放量(万 t)
		工业二氧化硫排放量(万 t)
		工业固废排放量(万 t)

其中，二氧化碳排放量采用基于 LUC 清单的直接估算法测算得到，其估算方法如下：

$$C_i = \sum_{j=1}^5 e_{ij} + E_i = \sum_{j=1}^5 S_{ij} \times \alpha_j + M_i \times \beta \quad (2)$$

式中： $C_i$  为第  $i$  县的碳排放总量； $e_{ij}$  为第  $i$  县第  $j$  类土地上的碳排放总量，使用各土地利用类型的面积  $S_{ij}$  乘以该土地利用类型的碳排放系数  $\alpha_j$  计算，参考相关文献[30,31,32]，耕地、林地、草地、水域、未利用地五类土地利用类型的碳排放系数分别为 0.459 5、-0.633 5、-0.021 3、-0.024 15、-0.005 t/(hm<sup>2</sup>·a)； $E_i$  为第  $i$  县的建设用地碳排放量，使用第  $i$  县的化石能源消耗量  $M_i$  乘以化石能源的碳排放系数  $\beta$  计算， $\beta$  取值为 0.747 6。

### 2.2.2 土地绿色生产效率的测度方法

对环境约束下的土地绿色生产效率进行测算，就是将土地利用过程中的污染排放作为非期望产出纳入土地绿色生产效率核算框架中。数据包络分析法(DEA)是针对评价单元资源利用过程中的多投入与多产出进行的相对有效或效益评级的非参数分析方法，其本质是判断决策单元是否位于生产前沿面上，进而判定决策单元是否是 DEA 有效[2]。以 DEA 为基础衍生出了超效率 DEA 模型、三阶段 DEA 模型以及超效率 SBM 等模型，本文采用超效率 SBM 模型，该模型在当前土地绿色生产效率评价中运用较为广泛，有以下 3 个优点[33]：(1)考虑了非期望产出；(2)解决了投入产出变量的松弛性问题；(3)解决了多个决策单元同时有效时的排序问题。具体模型如下：

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}}{x_{ik}}}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{s=1}^{r_1} \frac{\bar{y}^d}{y_{sk}^d} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{\bar{y}^u}{y_{qk}^u} \right)}$$

$$s. t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j, & i = 1, 2, \dots, m \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j, & s = 1, 2, \dots, r_1 \\ \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j, & q = 1, 2, \dots, r_2 \\ \lambda_j \geq 0, \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^d \leq y_k^d, \bar{y}^u \geq y_k^u \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\rho^*$ 为土地绿色生产效率值； $m$ 为各决策单元(DMU)的投入； $x$ 为相应的投入矩阵中的元素； $n$ 为DMU的个数； $r_1$ 、 $r_2$ 分别为期望产出与非期望产出； $y^d$ 与 $y^u$ 分别为期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素。

### 2.3 土地绿色生产效率的影响因素研究

#### 2.3.1 验证要素流动对土地绿色生产效率的影响

使用区域间的信息要素流量、经济要素流量和人口要素流量构造区域间的多要素流矩阵，并分别计算出各区域的信息流网络中心度、经济流网络中心度和人口流网络中心度，然后将三类中心度作为影响因素加入模型，以验证要素流动对于土地绿色生产效率的影响。

空间计量模型可以解决回归模型中复杂的空间相互作用与空间依存性结构问题[34]，模型的选择是通过比对空间自回归模型(SAR)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)三类空间统计模型的适宜性，选择最合适的模型来验证要素流动对区域土地绿色生产效率的影响。三类模型的公式如式(4)~式(6)所示。

(1)空间自回归模型(SAR)为：

$$Y = \lambda WY + X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

式中：Y 为被解释变量；X 为解释变量； $\lambda$  为空间自回归参数，度量空间滞后 WY 对 Y 的影响；W 为已知的空间权重矩阵； $\beta$  为回归系数； $\varepsilon$  为随机误差项。

(2)空间误差模型(SEM)为：

$$\begin{aligned} Y &= X\beta + u \\ u &= \rho Wu + \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

式中：Y 为被解释变量；X 为解释变量； $\beta$  为回归系数；u 为扰动项； $\rho$  为被解释变量的空间误差系数，度量了邻近个体关于 Y 的误差冲击对本地 Y 的影响程度；W 为已知的空间权重矩阵； $\varepsilon$  为随机误差项。

(3)空间杜宾模型(SDM)是加入了空间滞后变量而增强了的空间自回归模型，即：

$$Y = \lambda WY + X\beta + WX\delta + \varepsilon \quad (6)$$

式中：Y 为被解释变量；X 为解释变量； $\lambda$  为空间自回归参数，表示 Y 的空间溢出效应；W 为已知的空间权重矩阵； $\beta$  为回归系数； $\delta$  为外生交互效应的参数，表示 X 的空间溢出效应； $\varepsilon$  为随机误差项。

### 2.3.2 要素流动对区域土地绿色生产效率影响的空间分异特征

采用地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型分析要素流影响区域土地绿色生产效率的空间分异特征。地理加权回归模型能估计驱动因素在不同区域的影响程度，可以量化反映空间数据关系中的异质性或非平稳性特征[35]。具有以下特点与优势：(1)技术覆盖全面；(2)模型参数丰富；(3)运行效率高[36]。具体模型如下：

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i)X_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中：Y 为被解释变量；X 为解释变量；(ui,vi)为样本地区 i 的经纬度； $\beta_0(u_i, v_i)$  为截距； $\beta_k(u_i, v_i)$  为估计系数；k 为解释变量序号；p 为解释变量总个数； $\beta_k > 0$  则解释变量  $X_{ik}$  与被解释变量  $Y_i$  为正相关，反之为负相关； $\varepsilon_i$  是随机扰动项。

## 3 武汉城市圈的多元要素流网络及土地绿色生产效率表现

### 3.1 研究区概况

武汉城市圈是由武汉、黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、天门、潜江九市构成的城市联合体。武汉城市圈下辖 48 个县(区)级行政单元，考虑到数据的可获取性，本文参考《中国城市统计年鉴》的分区方法，将武汉市的江汉区、青山区、汉阳区、硚口区、武昌区、洪山区、江岸区合并为武汉主城区，黄石市的西塞山区、黄石港区、铁山区、下陆区合并为黄石城区，鄂城区、华容区、梁子湖区合并为鄂州市，共 37 个研究单元。

### 3.2 数据来源及预处理

流网络模型构建、土地绿色生产效率的测度及影响因素分析所用数据及其来源如表 2 所示。

表 2 数据及数据来源

	指标名称	所需数据	数据来源
流网络模型构建	信息要素流网络	各市间百度信息指数	百度搜索指数平台( <a href="https://index.baidu.com/">https://index.baidu.com/</a> ), 搜索区间为 2020 年 1 月 1 日至 12 月 31 日, 均取整体日均值
		区县人数	《2021 湖北统计年鉴》
	经济要素流网络	银行、公司、工厂、公共服务点(供水供电营业厅)、物流网点数	高德地图 POI 数据
	人口要素流网络	各市间迁徙数据	“百度迁徙”平台( <a href="https://qianxi.baidu.com/">https://qianxi.baidu.com/</a> ), 随机选取 2020 年 4 月、9 月、10 月、11 月、12 月某一周的数据
土地绿色生产效率测度	投入指标	15~59 岁人口(万人);固定资产投资额(万元);农村用电量(t 标准煤);化肥施用量(t);规模以上工业能源消费量(t 标准煤);行政区划面积(km <sup>2</sup> )	各市《2021 统计年鉴》
		地区 GDP(万元)	各市《2021 统计年鉴》

	期望产出		
		工业颗粒物(烟粉尘)排放量(t);工业氮氧化物排放量(t);工业二氧化硫排放量(t);工业固废排放量(万 t)	各市 2020 年统计年鉴及生态环境统计年鉴
	非期望产出	土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> ),空间分辨率为 30 m

经济要素流网络所需的 POI 数据获取后,通过数据清洗得到有效数据 18 440 条,其中银行 6 173 条、公司 10 006 条、工厂 1 134 条、公共服务点 608 条、物流点 519 条。其中,由于每家银行分散在各地区的办事机构级别不同,对不同等级规模的银行网点赋不同权重:总行和具有银行业务的公司总部权重为 4,分行和信用社联社权重为 3,支行、储蓄所和信用社权重为 2,分理处和信用社分社权重为 1;其余类型的企业因为不存在机构级别做等权重处理。土地利用数据用于计算县域碳排放,因此本文依据土地利用现状分类标准(GB/T 21010-2017)将武汉城市圈土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,通过 ArcGIS10.2 软件进行分区统计,得到武汉城市圈各县市地类面积数据。

### 3.3 多元要素流网络结构特征分析

基于构建的要素流矩阵,将各要素流网络中区县间的联系强度分为五级,得到研究区县际的多级多元要素流网络(图 2),然后测算出各区县在各要素流网络中的程度中心度并进行标准化处理(图 3)。

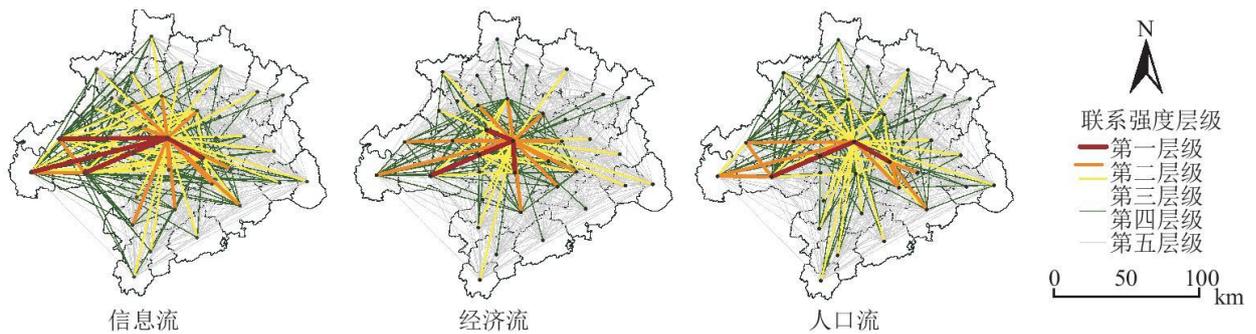


图 2 多元要素流网络联系强度的层级结构图

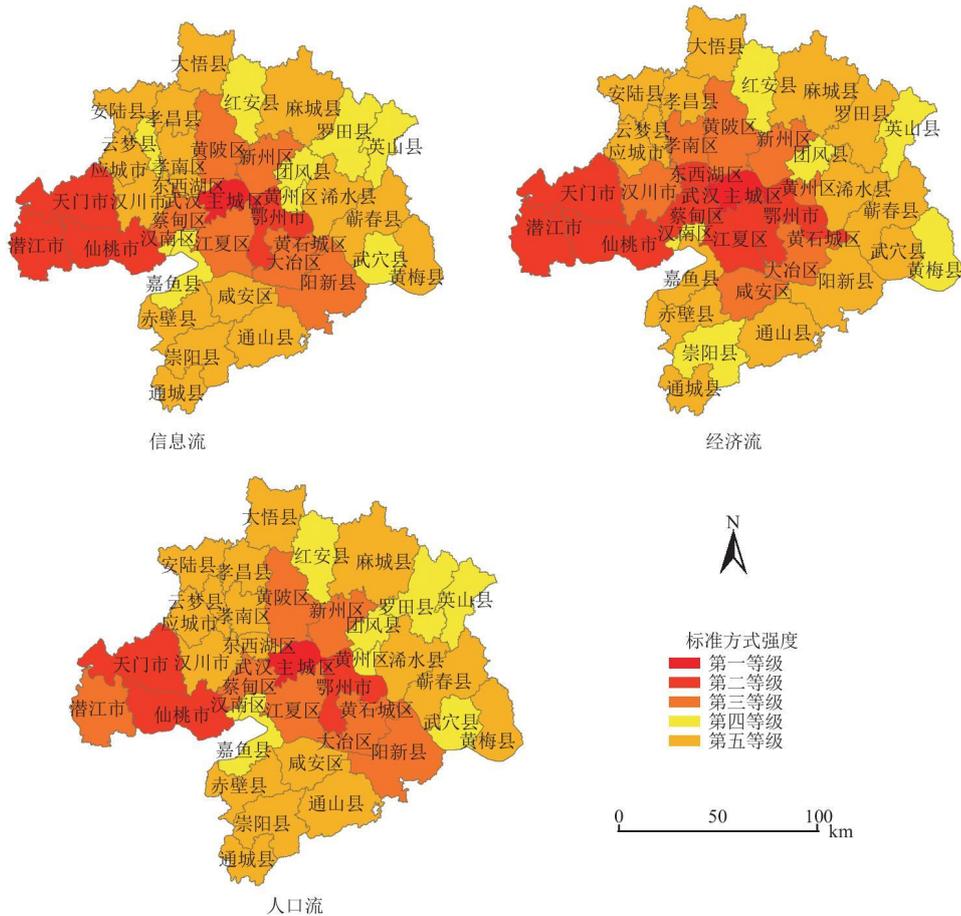


图3 各区域在多元要素流网络中的中心度强度图

如图所示，三类要素流网络的空间格局具有一定的共性，这一方面表明当前武汉城市圈的流空间与场空间的叠合度是比较高的；另一方面表明信息流、经济流和人口流的流动方向和强度在一定程度上是重合的。总体来看，武汉主城区在三类要素流网络中均具有最高的中心度，与其他区县间的要素流动强度最大，是城市圈多元要素流网络的“中心”，对其他区域具有明显的引领和辐射带动作用；鄂州、天门、仙桃等市则位于第二等级，要素流动强度虽低于武汉主城区，但已成为武汉城市圈流网络中重要的节点城市，有一定的辐射带动作用；其它县区位于第三、四、五等级，它们在武汉城市圈的多元要素流网络中的位势较低，与其它区县之间的要素流动和交流联系还有待加强，尤其是铁山区等边缘区，其在信息流、经济流和人口流网络中的中心度最低，这可能源于其面积相对较小、人口较少或职能过于单一。

国务院新近批复了“武鄂黄黄”都市圈规划，确定了东向发展方向，可以看到武汉主城区与鄂州和黄石之间均已建立较为密切的要素流网络，而黄冈地区则可能由于大别山区的阻隔，还有待大力促进与其他地区的要素流动，而西向的天门、仙桃、潜江等地区则依托“全国百强县”之势，已经形成了相对集聚的子群，相对独立发展的良好态势业已显现。

### 3.4 研究区土地绿色生产效率的测度及空间关联性分析

#### 3.4.1 土地绿色生产效率测度结果分析

依据 2.2 中的效率测算方法计算出武汉城市圈县域土地绿色生产效率，以表现武汉城市圈内部各区县的土地绿色生产效率与城市圈平均水平的差异作为效率值等级划分的依据，使用可用于显示要素属性值与平均值之间差异的标准差分位法进行效率值

的等级划分,以表现武汉城市圈县(区)级的土地绿色生产效率的空间分异特征。最终将37个区县划分为低效率区、中低效率区、中等效率区、中高效率区和高效率区5个等级并予以可视化(图4),结果显示武汉城市圈整体土地绿色生产效率有待提高,在空间分布上整体呈现出较为分散的格局,中高效率区主要位于城市圈中部,南部与西部个别区县为中等效率,正东部、西部、南部、北部部分边缘地区为中低效率区,其它边缘地区则为低效率。

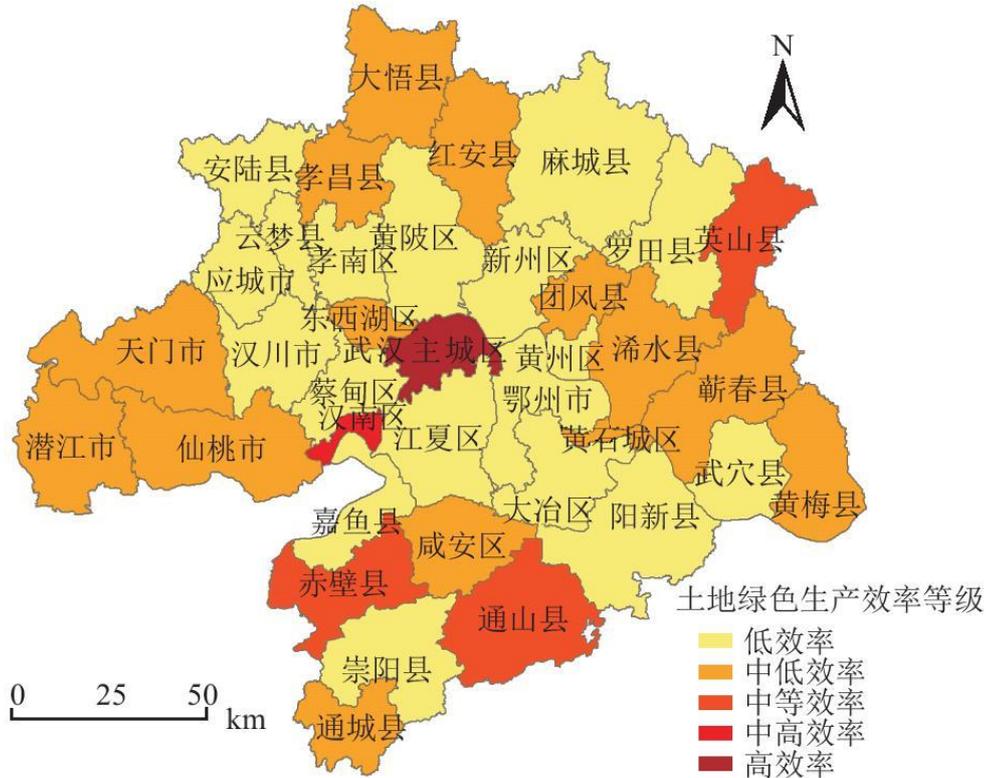


图4 武汉城市圈县(区)级别的土地绿色生产效率等级

土地绿色生产效率最高的是武汉主城区,表明在既定生产要素的消耗下,该区域具备的先进科技技术及产业集聚优势使其能充分优化资源配置,进而同时提高单位土地面积上经济与生态效益。紧随其后的是通山县、英山县及赤壁市,这几个城市近年分别获评“国家全域旅游示范区”、“湖北省生态文明建设县”和“国家生态文明建设示范县(市)”,表明其以建设生态城市为目标,扎实整治环境问题,因此,绿色生产效率较高,但需要关注的是,以上区域在要素流网络中的中心度主要位于第三和第四等级,侧面说明某些要素流对区域绿色生产效率可能为负向影响。处于城市圈边缘区域的罗田县、安陆市、麻城市、应城市等区域为中低效率区,同时这部分区域也位于多元要素流网络中心度的第四或第五等级,自身资源不足加之与外部要素流通不足,在经济发展的压力下极易形成高能耗、低效率的增长模式。中西部地区的江夏区、孝南区、蔡甸区三地排名位于最后,但这部分区域在多元要素流网络中的位势是比较高的,这可能与它们承接武汉主城区的高污染和高排放产业的环境污染转移有关,因此对土地绿色生产效率的提升造成了较大压力。

### 3.4.2 土地绿色生产效率空间相关性检验

选用 Moran' s I 指数检验土地绿色生产效率的空间相关性,结果显示在 5%的显著水平下通过了显著性检验,由此得出武汉城市圈县域土地绿色生产效率在空间分布上并非随机,而是存在显著正向的空间自相关。

## 4 土地绿色生产效率的影响因素研究

#### 4.1 验证要素流动对土地绿色生产效率的影响

##### 4.1.1 模型选择

LM 检验结果(表 3)表明,空间滞后效应在 5%水平上显著,空间误差效应在 1%水平上显著,表明要素流动与城市圈土地绿色生产效率存在显著的空间相关性,稳健的 LM 检验结果也均显著,结合本文研究目的,选用空间误差模型(SEM)进行分析。

表 3 LM 检验结果

检验类型	统计量	P 值
LM-err	7.851	0.005
Robust LM-err	7.880	0.005
LM-lag	2.856	0.091
Robust LM-lag	2.886	0.089

##### 4.1.2 模型结果分析

运用 Stata16.0 软件对模型进行估计,结果如表 4 所示。

表 4 空间误差模型(SEM)的回归结果

变量	系数	Z 统计量	P 值
信息中心度	2.158**	2.000	0.045
经济中心度	-1.846**	-1.990	0.047
人口中心度	-0.234	-0.570	0.567

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示 10%、5%、1%的水平上显著。

表 4 中，信息中心度对土地绿色生产效率具有显著的正向促进效应，影响系数为 2.158,经济中心度对土地绿色生产效率具有负向效应，影响系数为 -1.846,这一结论与预期并不完全符合，说明当前武汉城市圈经济要素流动尚处于较无序的状态，经济要素流网络的结构有待改进；人口中心度系数为 -0.234,但未通过显著性检验，这可能缘于样本区域间的人口流动量的差距较小，也从侧面说明绿色生产效率的提升主要依赖于信息流所隐含的科技、文化等要素的传播和扩散，而不再完全依赖于传统意义上的劳动力的集聚。

#### 4.2 要素流动对土地绿色生产效率影响的空间分异

使用地理加权回归(GWR)模型进一步分析要素流动对土地绿色生产效率影响的空间分异。GWR 模型自变量的回归参数随着空间位置的变化而变化，反映了不同因子随距离变化对因变量作用程度有所不同。GWR 模型中各影响因素的回归系数的可视化表示如图 5 所示。

##### (1)信息流网络中心度。

由图 5(a)可知，信息中心度总体上显著正向影响土地绿色生产效率，系数范围为 1.771~2.430,表明区域间的信息交流频次和强度对土地绿色生产效率的正向影响作用较强。空间上呈现“西高东低、南高北低”的格局，高值主要分布在西部、南部地区，包括潜江市、仙桃市、天门市、赤壁市、嘉鱼县等地，东北部罗田县、新洲区、麻城市等地区影响系数相对较小，但也均为正向影响。说明一方面随着信息高速公路的建设，信息流中隐含的科技、文化等要素的扩散效应跨越了空间限制，另一方面随着区域间的信息交流频次和强度增加，信息要素与其他要素之间的交互效应得以增强，以上两方面均促进了土地绿色生产效率的提升。

##### (2)经济流网络中心度。

如图 5(b)所示,区域间的经济流对土地绿色生产效率的影响为负向,系数取值范围为  $-1.635\sim-1.943$ ,空间上呈现从北到南递减的态势,说明经济要素的流动加快对土地绿色生产效率具有显著降低作用。南部地区的嘉鱼县、赤壁市、崇阳县等城市的影响系数值较大,这些区域地处南部丘陵山区,自然资源丰富,但工业基础薄弱,在加强与其他区域的经济流动的同时,如果没有配套的科学技术和管理水平托底,极易造成单位土地面积产出的能耗的高涨,对绿色生产效率的提高产生负向作用。相比较而言,武汉主城区、黄陂区及新洲区等地的经济中心度对绿色生产效率的影响系数也为负值,但负向影响相对最小,表明以上区域的科技水平及产业结构应对经济流动的冲击力相对较强,但还需进一步优化其产业结构。

### (3)人口流网络中心度。

如图 5(c)所示,县际人口要素流动对土地绿色生产效率的影响为负向,系数取值范围为  $-0.015\sim-0.496$ ,空间上呈现“西高东低”,这也说明绿色生产效率的提升主要依赖于信息流所隐含的科技、文化等要素的传播和扩散,而不再完全依赖于传统意义上的普通劳动力的集聚。与此同时,可以看到,武汉主城区及周边区域作为吸纳高质量劳动力的中心区域,人口流动对于土地绿色生产效率的影响虽然也为负值,但近乎为零,同样具有人口流网络的高中心度的仙桃、潜江、天门等地区,其人口流动对地绿色生产效率的影响系数却具有最大的负值。

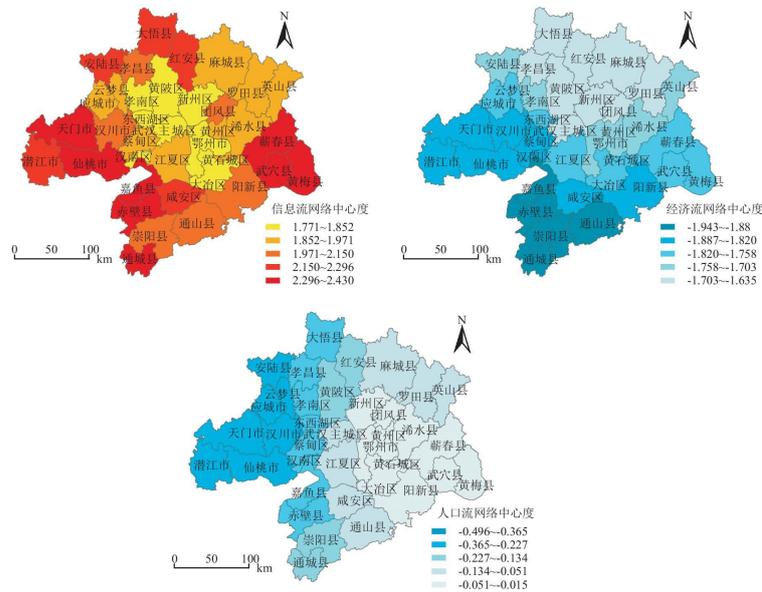


图 5 不同流网络中心度对土地绿色生产效率影响力的空间分异

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

(1)三类要素流网络的空间格局具有一定的共性,这表明当前武汉城市圈的流空间与场空间的叠合度是比较高的,呈现为显著的“武汉主城核心-边缘”特征,也表明武汉城市圈的要素流动还尚未完全摆脱地理空间的限制,流生产空间还处于初级阶段。但是流空间中已初步形成了天门、潜江和仙桃为主的相对聚集的子群,可实现相对独立的自我发展。“武鄂黄黄”都市圈中,黄冈地区与其他三个地区的要素流强度不足。

(2)武汉城市圈的土地绿色生产效率总体水平不高且呈现较为分散的空间格局,此外,各县区的土地绿色生产效率等级与各县区在多元流网络中的中心度等级并不完全一致,有些区域还表现出较大的差异。说明要素流动对土地绿色生产效率的影响较

---

为复杂并且存在空间差异。具有较低流网络中心度的通山、赤壁等区域反而具有较高的土地绿色生产效率，而具有较高流网络中心度的天门、仙桃等地并不具有相匹配的较高的绿色生产效率。

(3)总体来看，信息中心度对土地绿色生产效率具有显著的正向促进效应，经济中心度对土地绿色生产效率具有显著的负向促进效应，人口中心度影响系数为负但未通过显著性检验，说明绿色生产效率的提升主要依赖于信息流所隐含的科技、文化等要素的传播和扩散，而不再完全依赖与传统意义上的普通劳动力的规模集聚。

(4)GWR 模型给出的要素流动对土地绿色生产效率影响的空间分异结果显示，信息中心度、经济中心度和人口中心度对土地绿色生产效率影响均具有一定程度上的区域差异。

## 5.2 讨论

(1)完善武汉城市圈要素流空间网络体系，进一步促进区域联动协同发展。武汉城市圈县域要素流网络发育还不够成熟，针对外围区县竞争优势不足的问题，未来可积极培育城市圈边缘区中心城市，如充分发挥潜江市、大悟县、武穴市、赤壁市等地区自身优势，推进设施协同、产业协同、生活协同，以增强边缘城市对要素的集聚与扩散能力，提升城市圈总体活力。推动西部、南部外围区县(如通城县、通山县、英山县等)交通设施建设，以促进当地信息、经济、人口等要素协调发展，全面融入武汉城市圈全面协调发展格局中。

(2)根据区域土地利用绿色发展特征，因地制宜寻求提升土地绿色生产效率的路径。对南部赤壁、通山等自然资源丰富的丘陵地区而言，可继续坚持生态城市的发展定位，审慎应对经济流的冲击，加快与其他区域的经济交流互动的同时，以提高科学技术和和管理水平的配套托底；对于承接武汉主城区产业转移的地区应加强对污染物排放的管控与监督力度，严格污染物排放的标准。

(3)就城市圈总体而言，提升区域信息发展水平是当前提高土地绿色生产效率最有效手段。未来应继续加快信息化软硬件设施建设，保持现有在智慧城市、地理信息和光电技术等领域的优势的同时提升城市圈整体信息化水平；人口流方面，应聚焦创新型人才或者高质量人才的流动问题。

### 参考文献:

[1]穆学英, 刘 凯, 任建兰.中国绿色生产效率区域差异及 空间格局演变[J].地理科学进展, 2017, 36(8): 10061014.

MU X Y, LIU K, REN JL. Spatial differentiation and change of green production efficiency in China[ J ] . Progress in Geography, 2017, 36(8) : 1006-1014.

[2]王德起, 庞晓庆.京津冀城市群绿色土地利用效率研究 [J].中国人口 ,资源与环境, 2019, 29(4): 68-76.

WANG D Q, PANG X Q. Research on green land-use efficiency of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [ J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29 ( 4 ): 68-76.

[3]魏 丽.中国高铁对旅游业绿色生产效率的影响研究[D]. 北京交通大学, 2020.

WEI L. Study on the impact of China high-speed railway on the green production efficiency of tourism [ D]. Beijing Jiaotong University, 2020.

- 
- [4]展进涛, 徐钰娇, 葛继红.考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化[J].资源科学, 2019, 41(5): 884-896.
- ZHAN J T, XU Y J, GE J H. Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions [J]. Resources Science, 2019, 41(5): 884-896.
- [5] AHMED E M. Green TFP intensity impact on sustainable East Asian productivity growth [ J ] . Economic Analysis and Policy, 2012, 42( 1): 67-78.
- [6] CHUNG Y H, FARE R, GROSSKOPF S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach [ J ] . Journal of Environmental Management, 1997 , 51 ( 3 ): 229-240.
- [7]吴传清, 黄磊.长江经济带工业绿色发展效率及其影响因素研究[J].江西师范大学学报(哲学社会科学版),2018, 51(3) : 91-99.
- WU C Q, HUANG L. A study of the efficiency and impacting factors of the green industrial development of the Changjiang River economic belt [J]. Journal of Jiangxi Normal University ( Philosophy and Social Sciences Edition) , 2018 , 51 ( 3 ): 91-99.
- [8]李姣, 周翠烟, 张灿明, 等.基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究[J].经济地理, 2019, 39(2): 199-206.
- LI J, ZHOU C Y, ZHANG C M , et al. Total-factor ecological efficiency of Dongting Lake ecological and economic zone in Hunan Province on the basis of ecological footprint[ J ] . Economic Geography, 2019, 39( 2): 199-206.
- [9]张颂心, 王辉, 徐如浓.科技进步、绿色全要素生产率与农业碳排放关系分析——基于泛长三角26个城市面板数据[J].科技管理研究, 2021, 41(2): 211-218.
- ZHANG S X, WANG H, XU R N. Analysis on the relationship between science and technology progress, green total factor productivity and agricultural carbon emission: Based on pan Yangtze River Delta 26 city panel data[ J ] . Science and Technology Management Research, 2021 , 41 ( 2): 211 -218.
- [10]王兵, 刘光天.节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角[J].中国工业经济, 2015(5): 57-69.
- WANG B, LIU G T. Energy saving and emission reduction and green economic growth in China: Based on the perspective of total factor productivity[ J ] . China Industrial Economics, 2015 (5): 57-69.
- [ 11] CHEN J P, ZHANG D S, CHEN Z, et al. Effect of agricultural social services on green production of natural rubber: Evidence from Hainan, China [ J ] . Sustainability, 2022, 14 ( 21): 14138.
- [12] 邢贞成,王济干,张婕.中国区域全要素生态效率及其影响因素研究[J].中国人口-资源与环境,2018, 28(7): 119-126.
- XING Z C , WANG J G, ZHANG J. Research on regional total-factor ecological efficiency of China : Measurement and de-terminants[ J ] . China Population Resources and Environment, 2018, 28(7) : 119-126.

---

[13] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 223-239. YAN X, TU J J. The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin [ J ] . Journal of Natural Resources, 2021 , 36 ( 1 ) : 223-239.

[14] 王晓云, 魏琦, 胡贤辉. 我国城市绿色经济效率综合测度及时空分异——基于 DEA-BCC 和 Malmquist 模型[J]. 生态经济, 2016, 32(3): 40-45.

WANG X Y , WEI Q, HU X H. Comprehensive evaluation of cities' green economy efficiency and spatial and temporal differentiation in China: Based on the DEA-BCC and malmquist model[J]. Ecological Economy, 2016, 32(3): 40-45.

[15] 张诗嘉, 刘晓英, 杜书云. 中原城市群城市土地利用效率 时空差异及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(10): 2417-2429.

ZHANG S J, LIU X Y , DU S Y. Spatial-temporal differences and influencing factors of urban land use efficiency in central Plains urban agglomeration[ J ] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021 , 30( 10 ) : 2417-2429.

[16] 董直庆, 赵星. 要素流动方向、空间集聚与经济增长异 地效应检验[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(6): 57-67, 147.

DONG Z Q , ZHAO X. Factor flow direction , spatial agglomeration and economic growth in China [J]. Journal of Southeast University( Philosophy and Social Science) , 2018, 20( 6): 57-67, 147.

[17] 吴贤荣, 张俊飏, 程琳琳, 等. 中国省域农业碳减排潜力 及其空间关联特征——基于空间权重矩阵的空间 Durbin 模型[J]. 中国人口, 资源与环境, 2015, 25(6): 53-61.

WU X R, ZHANG J B, CHENG L L, et al. TIAN Yun. Potential of agricultural carbon reduction under climate change and its spatial correlation characteristics in China : Based on the spatial durbin model [ J ] . China P opulation Resources and Environment, 2015, 25( 6 ) : 53-61 .

[18] 吴昊玥, 何艳秋, 陈文宽, 等. 中国农业碳补偿率空间效 应及影响因素研究——基于空间 Durbin 模型[J]. 农业技 术经济, 2020(3): 110-123.

WU H Y, HE Y Q, CHEN W K, et al. Study on spatial effects and influencing factors of agricultural carbon compensation rate in China: Based on spatial durbin model[ J ] . Journal of Agrotechnical Economics, 2020 ( 3 ) : 110- 123 .

[19] CASTELLS M. Rise of the Network Society: The Information Age : Economy, Society and Culture [M]. Blackwell Publishers, Inc. 1996 .

[20] 谭红英, 周昕乐, 文传浩. 长江经济带农业绿色生产效率 及其影响因素研究[J]. 西部经济理论论坛, 2020, 31(4): 26-37.

TAN H Y, ZHOU X Y, WEN C H. Study on agricultural green production efficiency and its influencing factors in the Yangtze River economic belt[ J ] . West Forum on Economy and Management, 2020, 31(4) : 26-37.

---

[21] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波.农村劳动力转移、化肥施用强度与农业生态效率: 交互影响与空间溢出[J].农业技术经济, 2021(10): 79-94.

HOU M Y, DENG Y J, YAO S B. Rural labor transfer, fertilizer use intensity and agro-ecological efficiency: Interaction effects and spatial spillover [ J ] . Journal of Agrotechnical Economics, 2021 ( 10 ) : 79-94.

[22] 白俊红, 王 钺, 蒋伏心, 等.研发要素流动、空间知识溢出与经济增长[J].经济研究, 2017, 52(7): 109-123. BAI J H, WANG Y, JIANG F X, et al. R&D factor flow, spatial knowledge spillover and economic growth[ J ] . Economic Research Journal, 2017, 52( 7 ) : 109- 123.

[23] 李 涛, 刘国燕.时空压缩下研发要素流动是否提升了区域绿色创新效率[J].科技进步与对策, 2021, 38( 19): 37-46.

LI T, LIU G Y. Does the flow of R & D elements under the compression of time and space improve the efficiency of regional green innovation[ J ] . Science & Technology P rogress and Policy, 2021, 38( 19 ) : 37-46.

[24] 孙志燕.新技术革命对中国区域经济的影响及政策建议 [J].中国经济报告, 2019, ( 1): 38-42.

SUN Z Y. The influence of new technological revolution on China regional economy and policy suggestions [ J ] . China Economic Report, 2019(01) : 38-42.

[25] 杨 喜, 卢新海, 沈纬辰.土地要素投入对城市经济增长空间溢出效应[ J ] . 经济地理, 2020, 40(10) : 83-90.

YANG X, LU X H, SHEN W C. Spatial spillover effect of land element input on urban economic growth in China [ J ] . Economic Geography, 2020, 40( 10 ) : 83 -90.

[26] 王星媛, 白俊红.要素流动、资源错配与全要素生产率 [J].经济问题探索, 2021(10) : 50-61.

WANG X Y , BAI J H. Factor flow, resource mismatch and total factor productivity[ J ] . Inquiry into Economic Issues, 2021 (10) : 50-61.

[27] 梅大伟, 修春亮, 冯兴华.中国城市信息网络结构演变特征及驱动因素分析[J].世界地理研究, 2020, 29(4): 717-727.

MEI D W, XIU C L, FENG X H. Analysis on the evolution characteristics and driving factors of urban information network structure in China [ J ] . World Regional Studies, 2020, 29 (4) : 717-727.

[ 28 ] TAYLOR P J, WALKER D R F. World Cities: A first multivariate analysis of their service complexes [J]. Urban Studies. 2001, 38(1) : 23-47.

[29] 彭芳梅.粤港澳大湾区及周边城市经济空间联系与空间结构——基于改进引力模型与社会网络分析的实证分析[J].经济地理, 2017, 37(12) : 57-64.

PENG F M. Economic spatial connection and spatial structure of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay and the surrounding area cities: An empirical analysis based on improved gravity model and social network analysis [ J ] . Economic Geography, 2017, 37(12) :

---

57-64.

[30] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 190-198.

YUAN S F, TANG Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on low carbon perspective[J]. Economic Geography, 2019, 39(2): 190-198.

[31] 徐婕, 潘洪义, 曹文亚, 等. 基于LUCC的眉山市县域碳排放效应[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 683-689.

XU J, PAN H Y, CAO W Y, et al. County carbon emission effect of Meishan city based on LUCC [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2020, 43(5): 683-689.

[32] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(6): 100-112.

ZHANG Y, DAI Y Q, CHEN Y Y, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission [J]. China Land Science, 2022, 36(6): 100-112.

[33] 陈莹, 吴秀兰. 土地集约利用与生态效率的耦合协调发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1025-1035.

CHEN Y, WU X L. Coupling and coordinated development of land intensive use and ecological efficiency [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1025-1035.

[34] YANDELL B S, ANSELIN L. Spatial econometrics: Methods and models [J]. Journal of the American Statistical Association, 1990, 85(411): 905.

[35] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 2010, 28(4): 281-298.

[36] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356-1366.

LU B B, GE Y QIN K, et al. A review on geographically weighted regression[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1356-1366.