

# 长江中游城市群农业生态效率时空演变及驱动因子研究

舒晓波<sup>1,2</sup>, 冯维祥<sup>1</sup>, 廖富强<sup>1,2</sup>, 凌春园<sup>1</sup>

(1.江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2.江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

**摘 要:**农业生态效率研究对真实反映农业经济发展与生态环境保护的协调关系具有重要意义。为科学评价长江中游城市群农业发展并为其策略制定提供依据,基于 2000—2017 年长江中游城市群各市面板数据,采用含有非期望产出的 Super-SBM 模型测算农业生态效率,分析其时空演变规律和空间相关性,并通过地理探测器模型对影响农业生态效率的驱动因子进行探测。结果表明:(1) 2000—2017 年长江中游城市群平均农业生态效率整体水平较高,呈现“降—升—降”的走势,湖南、江西省域与湖北省域差距较大,且地区农业生态效率发展不平衡,区域间差异逐年增大。(2) 从空间相关性上看,长江中游城市群农业生态效率全局相关性呈现“随机—聚集”过程,且集聚现象随时间演进逐渐显著,局部空间相关性显示较弱,各相关类型随时间有不同程度的上升趋势,空间相关性逐渐向中心区域集中。(3) 农业生态效率受多驱动因子共同作用,不同年份下部分驱动因子变化较大,驱动因子在不同地区对农业生态效率的影响表现出一定的地域性和差异性。长江中游城市群地区农业生态效率存在较大的提升空间,整体差异正在逐渐扩大,各地区应加强联系,采取合理措施促进“两型”农业发展。

**关键词:**农业生态效率; Super-SBM 模型; 空间自相关; 地理探测器; 长江中游城市群

中图分类号:F323.21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0394-10

## Study on the Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Agricultural Eco-efficiency of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River

SHU Xiaobo<sup>1,2</sup>, FENG Weixiang<sup>1</sup>, LIAO Fuqiang<sup>1,2</sup>, LING Chunyuan<sup>1</sup>

(1.College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2.Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** Research on agricultural eco-efficiency is of great significance to truly reflect the coordinated relationship between agricultural economic development and ecological environmental protection. In order to scientifically evaluate the agricultural development of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River and provide a basis for its strategy formulation, we used the Super-SBM model with undesired output to measure the agricultural eco-efficiency based on the panel data of the cities in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2017, analyzed its time and space evolutionary patterns and spatial correlations, and used geographic detector models to detect the driving factors affecting agricultural eco-efficiency. The results show that: (1) the overall level of average agricultural eco-efficiency in the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2017 was relatively high, showing a trend of decrease-up-decrease; compared with Hubei Province, Hunan Province and Jiangxi Province had a large gap; the development of regional agricultural eco-efficiency was unbalanced, and regional differences had increased year by year; (2) from the perspective of spatial correlation, the global correlation of agricultural eco-efficiency in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River presented the random-aggregation process; the phenomenon of agglomeration of agricultural eco-efficiency had gradually evolved over time, and the local spatial correlation was weak; there were different degrees of upward trend, and the

收稿日期:2020-12-13

修回日期:2021-01-18

资助项目:国家自然科学基金(41761045);江西省自然科学基金资助项目(20161BAB213075);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150305);江西师范大学研究生创新资助项目(YJS2019117)

第一作者:舒晓波(1965—),男,江西南昌人,教授,硕士,主要研究方向为土地利用变化和农业经济发展。E-mail: xiaoboshu@126.com

通信作者:廖富强(1975—),男,江西南昌人,副教授,博士,主要研究方向农业经济发展。E-mail: liaofuqiang@163.com

spatial correlation gradually concentrated in the central area; (3) agricultural eco-efficiency was affected by multiple driving factors; in different years, some driving factors varied greatly; In different regions, the influence of driving factors on agricultural eco-efficiency showed certain regional difference. There is a lot of room for improvement in agricultural ecological efficiency in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River, and the overall difference is gradually expanding. All regions should strengthen ties and take reasonable measures to promote the development of two-oriented agriculture.

**Keywords:** agricultural eco-efficiency; Super-SBM model; spatial autocorrelation; geodetector; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

农业是支撑国民经济建设发展的基础产业<sup>[1]</sup>。随着农业生产中农业机械、化肥、农药等大量投入,在农业生产效率不断提升的同时,环境外部负效益日益显现<sup>[2]</sup>,单纯对农业发展进行经济评价并不能准确反映农业发展的真实情况,迫切需要更合适的评价方法对农业发展进行评价。生态效率(eco-efficiency)由于同时将环境绩效和经济绩效内涵于其概念中,而被广泛运用于可持续发展的评价<sup>[3]</sup>。生态效率评价方法众多,目前主流的测算方法包括随机前沿法<sup>[4]</sup>(SFA)和数据包络分析法<sup>[5]</sup>(DEA)。数据包络分析法是一种非参数方法,该方法可以根据多项投入和产出指标,利用线性规划的方法,评价同类型决策单元的相对效率,但前沿面固定<sup>[6]</sup>。以数据包络分析法为基础的含有非期望产出的 Super-SBM 模型,由于将生态负产出纳入评价模型,可以有效解决普通 DEA 投入产出造成的拥挤或松弛现象以及前沿面固定的问题,逐渐成为农业生态效率评价的主流方法<sup>[7]</sup>。

生态效率概念的深入和评价方法的完善,为农业生产评价提供了新的思路和途径<sup>[8]</sup>。农业生态效率时空演变及其影响因素的研究可为区域农业生态效率的趋势预测、改进路径提供科学依据而日益受到重视。就现有文献而言,对农业生态效率的时空演化及影响因子的研究可归纳如下:(1) 空间演化所涉及到的空间尺度多样,全国<sup>[9-11]</sup>、区域(粮食主产区<sup>[12-13]</sup>、长江经济带<sup>[14]</sup>、洞庭湖区<sup>[15]</sup>)、省级<sup>[16-17]</sup>、县级等<sup>[18]</sup>尺度均有相关研究,不同空间尺度下得出的研究结论有所差异。对空间变化的分析普遍采用空间自相关<sup>[19]</sup>或空间马尔可夫概率转移矩阵等<sup>[2]</sup>分析方法,空间自相关方法注重对不同时间点的截面数据进行横向分析<sup>[19]</sup>。(2) 时间序列分析方法采用 Kernel 密度分析<sup>[2]</sup>研究农业生态效率时间变化规律进而对发展趋势进行分析<sup>[10]</sup>。(3) 由于影响农业生态效率变化的因素在农业生态效率评价指标体系中有体现,现研究多采用回归模型<sup>[11,20]</sup>或空间计量模型<sup>[21]</sup>来解释农业生态效率变化与影响因素之间的相关性,较少文献使用地理探测器模型检验影响因子的空间分异性和空间分布的一致性<sup>[22]</sup>。

基于对现有农业生态效率时空演化和影响因素文献的梳理,目前在两个方面仍有完善的空间:(1) 农业生态效率空间格局演变分析中,对其空间相互作用和空间扩散的研究较少;(2) 采用线性回归方法分析农业生态效率的驱动因子,未考虑到空间因素对农业生态效率的影响,也未对驱动因子的时空变化进行探讨。

长江中游城市群承东启西、连南接北,是长江经济带的重要组成部分,在我国区域发展格局中占有重要地位<sup>[23]</sup>。长江中游城市群农业产业底蕴与自然条件得天独厚,是全国现代农业产业基地和重要创新基地<sup>[24]</sup>。2015 年 3 月国务院批复的《长江中游城市群发展规划》中指出,要壮大现代农业基地,发展高产高效现代农业和生态农业<sup>[25]</sup>。农业发展对于长江中游城市群区域可持续发展具有重要意义。

本文以长江中游城市群 31 个市级行政区为研究单元,基于 2000—2017 年长江中游城市群各市面板数据,采用含有非期望产出的 Super-SBM 模型测算农业生态效率,分析其时空演变规律和空间相关性,并通过地理探测器模型对影响农业生态效率的驱动因子进行探测,以期对长江中游城市群的农业评价和发展策略提供科学依据,促进区域可持续发展。

## 1 研究方法

### 1.1 含有非期望产出的 Super-SBM 模型

在测算农业生态效率时,除了要考虑农业产值等期望产出,还必须考虑非期望产出,如环境污染<sup>[2]</sup>。在农业生产评价中通常将化肥、农药、农膜等化学制品的过度使用产生的环境污染视为非期望产出。SBM 模型<sup>[26]</sup>能够有效解决径向和角度的传统 DEA 模型造成的投入要素的“拥挤”或“松弛”现象,但 SBM 模型与传统 DEA 模型存在相同的问题,即对于效率都为 1 的 DMUs 无法进行区分。Super-SBM 模型<sup>[27]</sup>是超效率 DEA 模型和 SBM 模型相结合的一种模型,其综合了两种模型的优势,有效解决了进一步有效区分处于前沿面 DMUs 的问题。

$$\begin{aligned} \text{Min}\rho &= \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1+r_2} (\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d/y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u/y_{qk}^u)} \quad (1) \\ \bar{x} &\geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j \quad \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j \\ \bar{y}^d &\geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^d \lambda_j \quad \bar{x} \geq x_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u \\ \lambda_j &\geq 0, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n, \\ j &\neq 0; s=1, 2, \dots, r_1; q=1, 2, \dots, r_2; \end{aligned} \quad (2)$$

式中:假设有  $n$  个 DMUs,每个 DMU 由投入  $m$ ,期望产出  $r_1$  和非期望产出  $r_2$  构成; $x, y^d, y^u$  为相应的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素; $\rho$  为生态效率值。

1.2 空间相关性分析

通过空间自相关分析来了解农业生态效率的空间关联和空间差异,其中全局空间自相关常用的度量空间自相关程度的统计指标为 Moran's  $I$  指数<sup>[6]</sup>,其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: $n$  为样本量; $x_i, x_j$  为空间位置  $i$  和  $j$  的观察量; $w_{ij}$  表示空间位置  $i$  和  $j$  的邻近关系,当  $i$  和  $j$  邻近时, $w_{ij} = 1$ ;反之为 0。全局 Moran's  $I$  指数的取值范围为 $[-1, 1]$ ,大于 0 为空间正相关,小于 0 为负相关,等于 0 为不相关。

局部空间自相关指数用于反映某一空间单元的属性值同其邻接空间单元上同一属性值的相关程度,即热点与冷点区域的空间分布规律<sup>[19]</sup>。通常采用 Local Moran's  $I$  统计量来反映测度单元相邻区域空间要素的空间关联性与异质性。其计算可表示为:

$$I_i = \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \times \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = z_i \sum_{j=1}^n \omega_{ij} z_j \quad (4)$$

式中: $z_i, z_j$  分别为研究单元  $i, j$  的属性值; $\omega_{ij}$  为空间权重矩阵; $I_i$  为  $i$  单元局部相关指数,表示其与它邻域之间的关联程度。

1.3 地理探测器模型

使用地理探测器中的因子探测研究长江中游城市群农业生态效率的驱动因子,探测各影响因子  $X$  多大程度上解释了农业生态效率  $Y$  的空间分异<sup>[22]</sup>,用  $q$  统计值度量,计算公式如下:

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (5)$$

式中: $q$  表示该影响因子对农业生态效率的解释力; $h=1, 2, \dots, L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层,即分类或分区; $N_h$  和  $N$  分别为次级区域的个数和整个区域的个数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  是次级区域和整个区域的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和 (Within Sum of Squares) 和全区总方差 (Total Sum of Squares)。 $q$  统计值的取值范围为 $[0, 1]$ ,数值越大表明分类因素对生态效率的解释力越强,反之则越弱。

2 研究数据与指标体系

2.1 研究区域

长江中游城市群是位于长江中游地区,以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型城市群,是长江经济带的重要组成部分,在我国区域发展格局中占有重要地位<sup>[28]</sup>。本文选取 2015 年 4 月国家发展改革委印发的《长江中游城市群发展规划》中划定的范围作为研究区域,包括湖北省域:武汉、黄石、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、仙桃、潜江、天门;湖南省域:长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、常德、益阳、娄底;江西省域:南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、宜春、上饶及抚州、吉安的部分县(区)共 31 个市级行政单元。

长江中游城市群主要包括江汉平原、洞庭湖平原和鄱阳湖平原。该地区地形主要以冲积平原为主,地势平坦,属于亚热带气候,热量充足,长江从地区中间穿流而过,区域内支流、湖泊众多,水资源丰富,基于以上优越的自然环境和资源禀赋,长江中游城市群地区农业发展历史悠久、实力雄厚。但是在工业化和城镇化的背景下,农业劳动力向第二、三产业转移,耕地资源被逐年外扩的建设用地侵占等问题接连出现。2000—2017 年,长江中游城市群地区乡村农业从业人员比重由 52.99% 减至 47.58%,耕地面积由 1 322.08 减至 1 255.72 万  $\text{hm}^2$ ,农田有效灌溉面积由 5 842.07 减至 5 223.51 万  $\text{hm}^2$ ,区域农业发展正受到严重制约。同时,城市群地区由于其人口和经济高度密集的特征,正逐渐成为经济发展和资源环境之间矛盾最为激烈的区域,存在环境污染严重、资源约束趋紧等诸多生态问题。由于石油农业的快速发展,大量农业机械投入生产使用,2000—2017 年,长江中游城市群地区农业机械总动力由每年 3 490.06 增至 9 708.23 万  $\text{kW}$ ,农业碳排放由 5 686 841 t 增至 7 716 107 t,增幅分别为 178.17% 和 35.68%。为实现长江中游城市群的可持续发展,需要进一步加强生态文明建设力度,协调农业经济发展和环境保护之间平衡。

2.2 数据来源

本文以狭义农业为研究对象测算农业生态效率,所用到的数据来源于《中国农村统计年鉴》、《中国区域经济统计年鉴》、《湖北统计年鉴》、《湖北农村统计年鉴》、《湖南统计年鉴》、《江西统计年鉴》等统计年鉴以及 EPS 数据平台,部分缺失数据通过插值法进行补全,最终得到长江中游城市群 31 个市 2000—2017 年共 18 年的面板数据。省、市界线的矢量数据来源于全国地理信息资源系统(www.webmap.cn)公布的 2017 年全国 1:100 万基础地理数据库,空间坐标系统为 2000 年国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000)。

2.3 指标体系构建

对已有研究中的农业投入产出指标体系<sup>[2,7,15,29-30]</sup>进行综合考虑,再结合数据的可获得性与统计口径的一致性,最终选取劳动、灌溉、农膜、农药、化肥、土地、机械、燃料、电能投入等 9 项指标作为区域农业资源投入指标。期望产出指标以农业总产值作为变量来表现,为消除年份物价因素的影响,通过计算平减指数将农业总产值调整为 2000 年不变价格的产值<sup>[7]</sup>。鉴于农业碳排放包含的范围较全面,同时农业碳排放的计算方法已经较为成熟且容易量化,故本文以农业碳排放作为非期望产出。农业碳排放的来源主要是农业生产过程中使用的化肥、农药、农膜,使用农业机械消耗的化石燃料,农业耕作破坏土壤有机碳库导致的碳流失,农业灌溉消耗电能间接耗费的化石燃料。本文参考李波等<sup>[31]</sup>的碳排放模型及测算系数,采用相应指标乘系数的方法进行估算,以上六大类碳源的碳排放系数为:化肥 0.895 6(kg/kg)、农药 4.934 1(kg/kg)、农膜 5.18(kg/kg)、柴油 0.592 7(kg/kg)、翻耕 312.6(kg/km<sup>2</sup>)、农业灌溉 20.476(kg/hm<sup>2</sup>)。综上指标构建长江中游城市群农业生态效率评价指标体系(表 1)。

3 结果与分析

3.1 长江中游城市群农业生态效率测算及时空演变研究

基于 MaxDea 8.0 软件平台,采用无径向(Non-Oriented)、规模报酬可变(VRS)、农业碳排放作为非期望产出的 Super-SBM 模型,测算长江中游城市群 2000—2017 年 31 个市的农业生态效率。在此基础上,将研究区域分为湖北省域、湖南省域、江西省域 3 个部分,分别求得各年份均值,对各省域农业生态效率均值进行对比分析(图 1)。(1) 2000—2017 年长江中游城市群平均农业生态效率整体水平较高,呈现

“降—升—降”的走势。2000—2005 年持续降低,2006—2010 年出现缓慢回升势头,2011—2017 年继续出现降低趋势,2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率均值由 1.03 降至 0.68。(2) 湖北、湖南、江西省域 2000—2017 年期间总均值分别为 1.09,0.59,0.83。总体上看,湖南、江西省域与湖北省域差距较大,而且差距呈现不断扩大趋势。2000—2012 年湖北省域农业生态效率值保持在 1 以上,2013—2017 年呈现小幅度下降趋势,而湖南、江西两个省域农业生态效率与整体发展趋势基本一致,出现了先降、再升、再降 3 个阶段,2002 年开始两省域同时出现明显下降趋势,随后在 2006 年开始出现小幅度回升,最后分别从 2008 年、2010 年开始继续下降。

表 1 农业生态效率评价指标体系

一级指标	二级指标	变量说明	单位
投入指标	劳动投入	农业从业人员数	人
	灌溉投入	有效灌溉面积	hm <sup>2</sup>
	农膜投入	农用塑料薄膜使用量	t
	农药投入	农药使用量	t
	化肥投入	农用化肥施用量(折纯量)	t
	土地投入	农作物播种面积	hm <sup>2</sup>
	机械投入	农业机械总动力	kW
	燃料投入	农用柴油使用量	t
	电能投入	农村用电量	kW·h
期望产出	农业产出	农业总产值	万元
非期望产出	农业碳排放	农业碳排放量	t

注:劳动投入指标因统计年鉴只统计当年农林牧渔业总从业人员,故通过农林牧渔业从业人员×(农业总产值/农林牧渔业总产值)折算的方式推算狭义农业从业人员数。

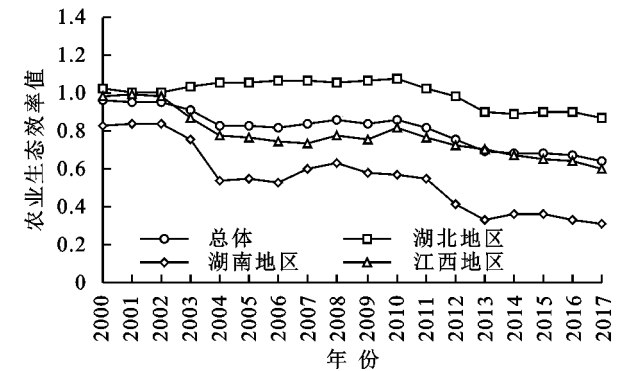


图 1 2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率时间演变

为进一步探索长江中游城市群农业生态效率随时间演变的特点以及各研究单元间的差异,在测算结果的基础上,统计长江中游城市群 2000—2017 年农业生态效率的标准差、离散系数(图 2)。根据统计特征图可以看出,标准差由 0.25 增长到 0.42,变异系数由 0.24 增长到 0.61,均有逐年增大趋势,反映随时间推进,长江中游城市群地区各研究单元差异扩大,体现了地区农业生态效率发展不平衡,区域分化逐渐显著。

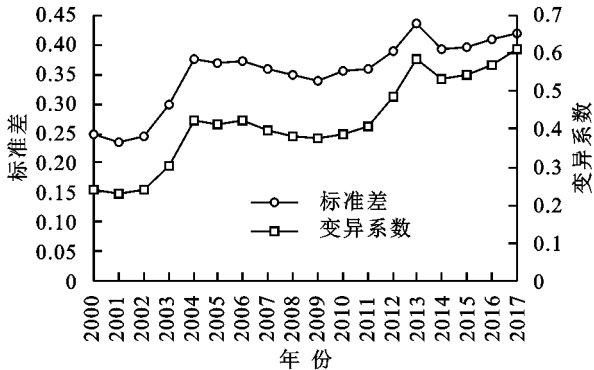


图 2 长江中游城市群农业生态效率标准差、变异系数

选取 2000 年、2004 年、2008 年、2012 年、2017 年 5 个年份作为观察时点,采用自然断点法对农业生态效率值分级,考虑到当效率值大于或等于 1 时说明该研究单元处于效率状态,故以 0.4 为步长将农业生态效率按等级划分为低效率区(0.200~0.599)、中效率区(0.600~0.999)、高效率区(1.000~1.399)、极高效率区(1.400~1.831)。结果表明(图 3),长江中游城市群农业生态效率空间分布具有区域内不平衡性,时空演化的分异特征明显,主要呈现以下特征:(1)整体上看,2000 年研究区域

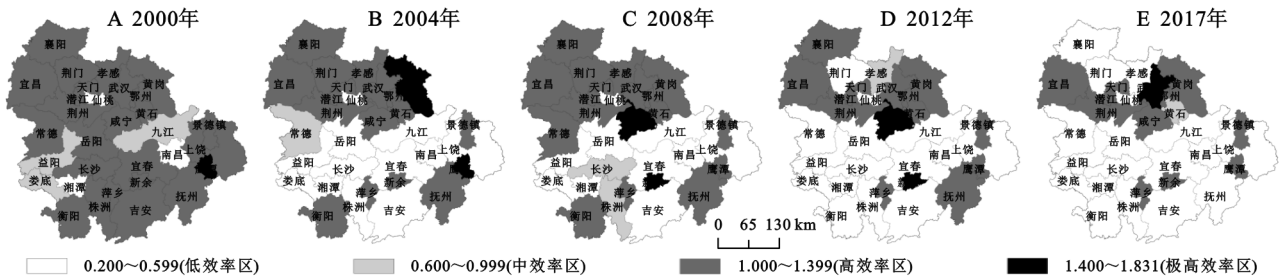


图 3 长江中游城市群农业生态效率空间分布

3.2 长江中游城市群农业生态效率空间相关性研究

通过测度全局空间自相关,2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率的 Moran's  $I$  指数逐渐增大,全局相关性显示为“随机—聚集”过程,说明农业生态效率集聚现象有随时间演进逐渐显著的特征。为进一步探究长江中游城市群农业生态效率的空间关联性和空间依赖性特征,采用局部空间自相关指数(Local Moran's  $I$  指数)来反映研究单元相邻区域空间要素的空间关联性与异质性。运用 ArcGIS 10.2 软件计算 2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率全局空间自相关指数。在通过有效性检验的情况下,根据 Local Moran's  $I$  公式计算得到的  $z_i$  与  $I_i$  值将长江中游城市群农业生态效率研究单元划分为 4 种空间相关类型<sup>[32]</sup>:(1)当  $z_i > 0, I_i > 0$ ,说明研究单元与其相邻单元农业生态效率水平均较高,二者表现为正相关,属于高高(High—High)集聚,将研究单元划分为“扩散型”;(2)当  $z_i < 0, I_i > 0$ ,说明研究单元自身和相邻单元农业生态效率水平均较低,二者表

内鹰潭市、武汉市、黄石市、鄂州市、长沙市、岳阳市、宜春市、上饶市、景德镇市等 25 个研究单元为高效率区或极高效率区。随时间推进,2004 年、2008 年、2012 年、2017 年高效率区或极高效率区分别变化为 18,19,15,12 个。局部上看,2000 年湖北、湖南、江西省域极高效率或高效率区为 12,5,8 个,至 2017 年分别减少了 4,5,4 个,研究区农业生态化发展均出现下滑趋势。(2)两极分化趋势日益凸显。研究期内,高效率区或极高效率区聚集逐步向湖北省域收缩,低效率区向湖南、江西省域扩散,农业生态效率二元格局趋势显著。2000 年湖北省域农业生态效率均值比湖南、江西省域分别高 19.42% 和 3.94%,至 2017 年增长为 48.54% 和 30.89%。可见省域间农业生态效率差距逐步拉大,而省域内部的联动性比省域间的联动性显著。(3)湖北、湖南、江西省域分别以武汉市—咸宁市—荆州市、长沙市—岳阳市—益阳市、九江市—宜春市—新余市为集聚中心的空间扩散作用现象持续存在,集聚中心农业生态效率与周围研究单元出现同时增高或降低,空间格局具有较强的稳定性与空间依赖特征。

现为正相关,属于低低(Low—Low)集聚,将研究单元划分为“传染型”;(3)当  $z_i < 0, I_i < 0$ ,说明研究单元自身农业生态效率水平较低,但相邻单元农业生态效率水平较高,二者也表现为负相关,属于低高(Low—High)集聚,将研究单元划分为“沉陷型”;(4)当  $z_i > 0, I_i < 0$ ,说明研究单元自身农业生态效率水平较高,但相邻单元农业生态效率水平较低,二者表现为负相关,属于高低(High—Low)集聚,将研究单元划分为“极化型”。

根据 2000—2017 年长江中游城市群研究单元农业生态效率空间关联类型的划分结果(表 2)表现的情况,可以看出长江中游城市群农业生态效率总体空间关联性较弱,关联不显著的研究单元占比较大,2000—2017 年平均每年为 23 个,占研究单元个数 74.19%。扩散型、传染型、沉陷型、极化型平均个数分别为 1.56,2.89,1.00,2.56 个,传染型和极化型的研究单元个数较多,总体差距不大。但长江中游城市群农业生态效率关联显著的研究单元随时间推进逐渐增

多,2000—2003 年平均每年 2.5 个,2004—2017 年平均每年 9.57 个,各相关类型均有不同程度的上升趋势,其中除沉陷型保持增长外,扩散型、传染型、极化型都有先增后减的趋势。表明从 2004 年开始研究区域农业生态效率空间分布的关联性有上升趋势,空间依赖特征逐渐显著,但空间相关性格局并不稳定。

将 2000 年、2004 年、2008 年、2012 年、2017 年 5 个观察时点年份的空间相关类型进行可视化(图 4),发现研究区域存在 3 个中心,分别是以武汉市、鄂州市为核心的湖北片区,以长沙市、湘潭市、娄底市为核心的湖南片区,和以南昌市、景德镇市为核心的江西片区,与上文所得出的结论一致。2000 年湖南片区

是表现为传染型为主的冷点中心,2004 年开始出现了新的中心,其中湖北片区是均表现为扩散型的热点中心,江西片区的南昌市在多数年份表现为传染型,而景德镇市则长期表现为极化型。同时,湖北省域的黄石市和荆门市均出现了从扩散型到沉陷型的转变,江西省域的萍乡市、新余市、抚州市均在中期表现为极化型,湖南省域的衡阳市早期表现为极化型,到后期逐渐转化为无显著特征。

总体来看,2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率空间分布的空间关联特征逐渐显著,且方向上有逐渐向武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群 3 个区域集中的趋势。

表 2 长江中游城市群研究单元空间关联类型数量

年份	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
扩散型	0	0	0	0	2	2	3	3	2
传染型	2	1	0	0	4	4	4	3	2
沉陷型	0	0	0	0	0	0	0	0	0
极化型	1	2	2	2	4	3	3	5	4
不显著	28	28	29	29	21	22	21	20	23

年份	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
扩散型	4	3	3	3	0	0	0	1	2
传染型	6	5	3	3	3	3	3	3	3
沉陷型	1	1	1	1	3	3	3	3	2
极化型	3	2	2	3	1	2	3	3	1
不显著	17	20	22	21	24	23	22	21	23

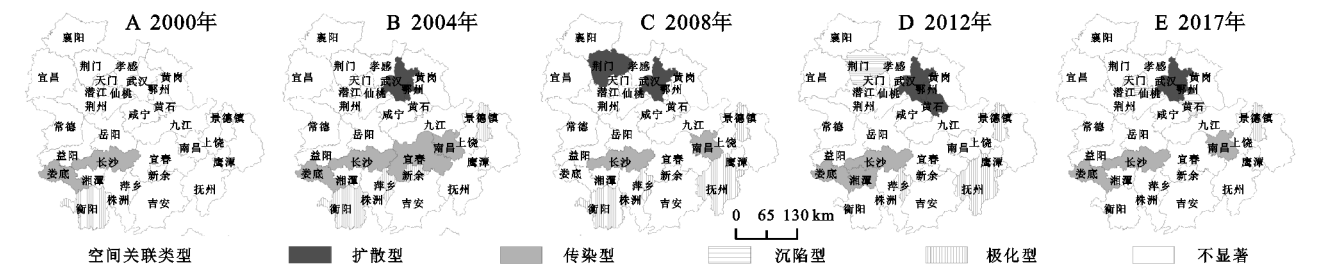


图 4 长江中游城市群农业生态效率空间关联类型

3.3 长江中游城市群农业生态效率驱动因子研究

参考农业生态效率驱动因子探测现有研究<sup>[21,33-34]</sup>,结合长江中游地区农业发展的现实及数据的可获得性,从农业发展、宏观环境、政策支持方面选

取农业产业结构、农业经济水平、农业人力资本、农业用地比重、农业机械密度、工业化水平、城镇化水平、城乡差距、财政支农水平 9 个驱动因子(表 3)。

表 3 长江中游城市群农业生态效率驱动因子

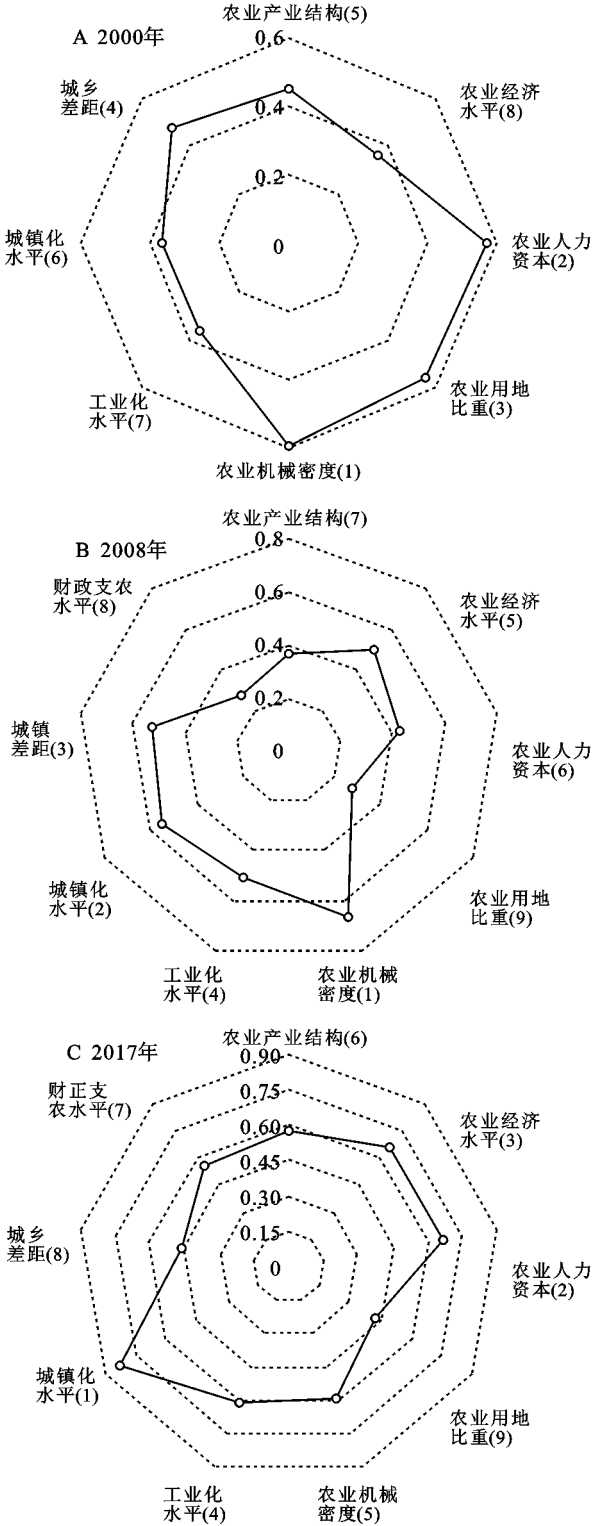
类型	驱动因子	计算方式(单位)
农业发展	农业经济水平	农业总产值/常住人口数(元/人)
	农业产业结构	农业总产值/农林牧渔业总产值(%)
	农业人力资本	第一产业从业人数/总从业人数(%)
	农业机械密度	农业机械总动力/农作物总播种面积(kW/hm <sup>2</sup> )
	工业化水平	第二产业生产总值/地区生产总值(%)
宏观环境	城镇化水平	城镇人口/总人口(%)
	城乡差距	农村常住居民人均可支配收入/城镇常住居民人均可支配收入
政策支持	财政支农水平	地方财政农林水事务支出/地方财政一般预算支出(%)

3.3.1 驱动因子时序变化研究 基于上述驱动因子,首先采用 K-Means 聚类算法对原始数据进行离

散化处理,再使用地理探测器软件对长江中游城市群 2000 年、2008 年、2017 年生态效率的驱动因子进行计算,得到各驱动因子的  $q$  统计值,用雷达图表示(图 5), $q$  统计值与驱动因子的解释力呈正相关。图中可以看出,2000 年农业人力资本、农业用地比重、农业机械密度的  $q$  值较大( $q>0.5$ ),农业经济水平、工业化水平、城镇化水平的  $q$  值较小,说明 2000 年农业人力资本等生产投入类驱动因子对农业生态效率影响的显著性较强,农业经济水平等宏观环境对其的影响较弱;2008 年农业机械密度的  $q$  值最大,其次是城镇化水平、城乡差距、工业化水平和农业经济水平,农业用地比重和财政支农水平的  $q$  值较小( $q<0.3$ ),说明 2008 年机械化、城镇化、工业化均在不同程度上影响农业生态发展,农业机械密度是影响农业生态效率的主要驱动因子,而农业用地的面积和财政对农业的扶持程度对农业生态效率的影响较小;2017 年城镇化水平的  $q$  值最高,农业人力资本、农业经济水平的  $q$  值相对较高,农业用地比重、城乡差距的  $q$  值较低( $q<0.5$ ),说明 2017 年城镇化水平因子对农业生态效率的解释力水平最高,农业人力资本及农业经济水平其次,而农业用地比重和城乡差距驱动因子对农业生态效率的影响水平相对较低。

从总体情况来看,不同年份下部分农业生态效率的驱动因子变化较大。农业经济水平由 2000 年影响最不显著的驱动因子变化为 2017 年排位第三的驱动因子,说明农业经济的发展对农业生态效率的影响随时间逐渐增强,人均农业产值的提高使得农业生产行为更加注重生态和高效,经济水平的提高将有益于农业生态化发展。农业用地比重因子由 2000 年的排位第三变为 2008 年、2017 年影响最不显著的驱动因子,表明农业发展至今,耕地数量的减少并没有制约农业生态效率,同时耕地的规模化、精细化管理有助于农业的绿色发展,提升农业生态效率水平。农业机械密度因子是 2000 年、2008 年为最显著的驱动因子,而到了 2017 年变为排位第五,说明工业化后期,省域间农业机械水平差距逐渐缩小,因此农业机械密度对农业生态效率的影响也逐渐减弱。城镇化水平从 2000 年开始至 2017 年显著性逐渐增强,2017 年成为对农业生态效率影响最显著的驱动因子,近年来城镇化进程加快,以农业为主的传统乡村型社会向以工业和服务业等非农产业为主的现代城市型社会快速转变,农业人口减少,而且城镇化速度逐渐加快,导致农业生态效率受其影响也逐年递增。其余农业产业结构、农业人力资本、工业化水平、财政支农水平等驱动因子虽有变化,但变动幅度不大,农业产业结构

和财政支农水平在研究时间范围内,对农业生态效率的影响均有限,前者说明狭义农业在广义农业中所占比重以及财政对农林水务的支持和投入对地区农业生态效率并无显著影响。

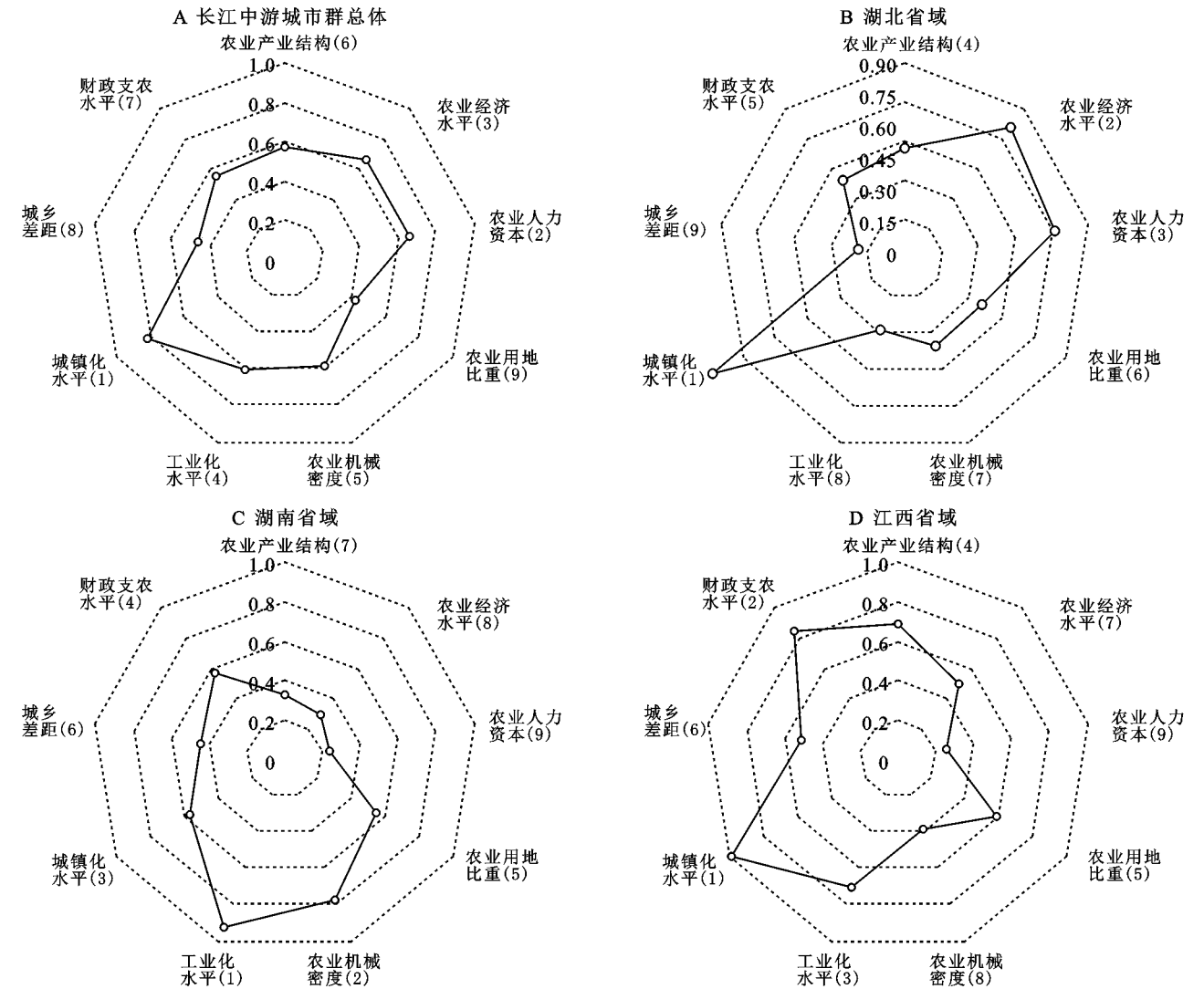


注:(1) 由于各地区统计年鉴前后统计口径变更的原因,2000 年地方财政农林水务支出数据空缺,故当年未对该因子进行探测。(2) 括号内数字为该因素因子的  $q$  统计值在该年份所有因子中的排序位置。

图 5 2000 年、2008 年、2017 年长江中游城市群农业生态效率驱动因子雷达图

3.3.2 驱动因子空间差异研究 为了探究和分析长江中游城市群农业生态效率各驱动因子在不同区域上的空间差异,以 2017 年为研究时点,将研究区域分为湖北省域、湖南省域、江西省域,利用地理探测器分别计算各地区驱动因子的  $q$  统计值,绘制雷达图(图 6)。从地区情况差异来看,主导湖北省域农业生态效率的核心因子为城镇化水平( $q>0.8$ ),其次是农业经济水平和农业人力资本,城乡差距因子最低,在武汉都市圈的带动下,湖北省域的整体经济发展水平较其余两个地区具有优势,总体城镇化水平和农业经济水平处于领先地位,对农业生态效率的影响较为显著;主导湖南省域农业生态效率的核心驱动因子为工业

化水平( $q>0.9$ ),影响效果显著,其次是农业机械密度和城镇化水平,农业人力资本因子影响最小,湖南省域农业生态效率受到“石油农业”的影响较大,工业化发展以及农业机械的数量在农业发展的进程中具有关键作用,对农业生态效率产生较大影响;主导江西省域农业生态效率的核心因子是城镇化水平、财政支农水平和工业化水平( $q>0.7$ ),其中城镇化水平对农业生态效率的影响作用最为显著,农业人力资本的影响作用最弱,说明江西省域农业发展与城镇化水平关系紧密,同时江西省历来是农业大省,政府在政策和财政方面对农业发展有所倾斜,因其工业快速发展,工业化水平对农业生态效率也有较大影响。



注:(1) 括号内数字为该因素因子的  $q$  统计值在该区域所有因子中的排序位置。

图 6 2017 年长江中游城市群各地区农业生态效率驱动因子雷达图

从总体情况来看,地区间影响农业生态效率的驱动因子有所差异。城镇化水平是长江中游城市群农业生态效率影响最显著的驱动因子,且各地区影响水平较接近,分别为湖北、湖南、江西省域因子排位 1, 3, 1, 三者均为城镇化水平发展速度较快地区,说明城

镇化进程对农业生态效率在不同地区均有较大影响;农业经济水平、农业人力资本在湖北省域对农业生态效率具有较强的影响力,但在湖南、江西省域影响力有限,说明湖北省域的经济水平较高,人力资源基础较稳固,有助于提高农业生态水平,而湖南、江西

省域相比较而言较弱势,有很大提升空间;工业化水平因子在湖南、江西省域有较强影响力,而在湖北省域影响力较弱,湖北省域的“退二进三”转型已经领先湖南、江西省域,说明在第二产业产值依然占据较大比重的地区,和其他地区相比工业化水平对农业生态效率的影响较为显著,对农业生态发展有较大影响。

## 4 结论

本文基于含有非期望产出的 Super-SBM 模型,以长江中游城市群 31 个市作为研究单元,使用 2000—2017 年面板数据,结合空间自相关模型和地理探测器对研究区域农业生态效率的时空演变、空间相关性及其驱动因子进行探究。主要研究结论如下:

(1) 从时空演变来看,2000—2017 年长江中游城市群平均农业生态效率整体水平较高,呈现“降—升—降”的走势,2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率平均值由 1.03 降至 0.68,湖南、江西省域与湖北省域差距较大。2000 年湖北省域农业生态效率均值比湖南、江西省域分别高出 19.42% 和 3.94%,至 2017 年增长为 48.54% 和 30.89%,各研究单元差异扩大,地区农业生态效率发展不平衡,区域分化现象逐渐显著。(2) 从空间相关性来看,2000—2017 年长江中游城市群农业生态效率的 Moran's  $I$  指数逐渐增大,全局相关性显示为“随机—聚集”过程,农业生态效率集聚现象随时间演进逐渐显著。长江中游城市群农业生态效率总体空间关联性较弱,扩散型、传染型、沉陷型、极化型平均个数分别为 1.56, 2.89, 1.00, 2.56, 关联不显著的研究单元占比较大,但各相关类型均有不同程度的上升趋势,关联显著的研究单元随时间推进逐渐增多,空间相关性逐渐向中心区域集中。(3) 从驱动因子来看,长江中游城市群农业生态效率受多种因子共同作用,不同年份下部分农业生态效率的驱动因子变化较大,农业经济水平、城镇化水平对农业生态效率的影响随时间逐渐增强现象明显。各驱动因子在不同地区对农业生态效率的影响表现出一定的相似性和差异性,城镇化水平是对生态效率影响最显著的驱动因子,且各地区影响水平较接近,而农业经济水平、农业人力资本、工业化水平等因子影响则表现出明显的地域性和差异性。

单纯从农业总产值上看,长江中游城市群地区农业发展迅速,产值不断上升,但农业生态效率的变化趋势显示,各地市均存在较大的提升空间,且整体差异正在逐渐扩大;地区空间关联性方面,武汉都市圈区域内长期呈现热点中心,而环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群区域则表现为冷点中心,空间关联中心始终集中在 3 个省会城市周边,且有向中心区域集中的趋势;驱动因子方面,长江中游城市群地区农业生态

效率的驱动因子在时序和空间分布上均存在明显差异。目前,农业发展仍面临“两型农业”的艰巨任务,长江中游城市群应打破各地区地域界限,加强政策流动,缩小地区间差异;合理控制农业化学用品和农业机械动力的使用,制定有关限制条件,加大对农业污染物排放的治理投资;加强农业基础设施条件和农业生态补偿机制的建设,同时加大对农业技术研究的投入,促使农业现代化技术快速进步。

长江中游城市群作为全国产业协调发展、共建生态文明示范区,农业生态化研究具有重要价值。本文通过对长江中游城市群地区农业生态效率的测算及分析,发现了研究时期内农业生态效率的地理空间特征,揭示了其有关驱动因子的显著性和时空分布,研究结论对地区农业生态化发展战略相关政策的制定有借鉴意义。但农业生产除可见成本外,各种社会经济因素对农业生态效率的损失均存在影响,深入研究相关政策、农业劳动力、农业耕作方式、农业技术变化等要素是未来农业生态效率研究可考虑的方向。同时基于本文结论,农业生态效率的驱动因子存在明显的地区差异,针对不同地域特征,对农业生态效率驱动因子的差异评价也是今后深入研究的重要方向,从空间视角制定出科学的农业生态发展策略,对优化地区资源要素配置和促进区域可持续发展有着重要作用。

### 参考文献:

- [1] 陈菁泉,信猛,马晓君,等.中国农业生态效率测度与驱动因素[J].中国环境科学,2020,40(7):3216-3227.
- [2] 侯孟阳,姚顺波.1978—2016 年中国农业生态效率时空演变及趋势预测[J].地理学报,2018,73(11):2168-2183.
- [3] Schaltegger S, Sturm A. Kologische Rationalität[J]. Die Unternehmung, 1990, 4(4):273-290.
- [4] 任宇飞,方创琳,蔺雪芹.中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价[J].地理学报,2017,72(11):2047-2063.
- [5] 金贵,吴锋,李兆华,等.快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析[J].生态学报,2017,37(23):8048-8057.
- [6] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [7] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素:基于 1996—2015 年 31 个省份的面板数据分析[J].中国农村经济,2018(1):46-62.
- [8] 聂弯,于法稳.农业生态效率研究进展分析[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1371-1380.
- [9] 潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的 SBM 模型分析[J].生态学报,2013,33(12):3837-3845.
- [10] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率测度及时空差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.
- [11] 冯亚娟,祁乔,韩家彬.中国农业生态效率的时空演变及驱动因素[J].水土保持通报,2018,38(6):254-262.

[12] 于婷,郝信波.粮食主产区农业生态效率时空特征及改善路径研究[J].生态经济,2018,34(9):104-110.

[13] 许朗,罗东玲,刘爱军.中国粮食主产省(区)农业生态效率评价与比较:基于 DEA 和 Malmquist 指数方法[J].湖南农业大学学报:社会科学版,2014,15(4):76-82.

[14] 曹俊文,曾康.低碳视角下长江经济带农业生态效率及影响因素研究[J].生态经济,2019,35(8):115-119,127.

[15] 杜红梅,蒋岚.基于 SE-SBM 模型的洞庭湖区农业生态效率时空差异研究[J].生态经济,2020,36(4):100-106,121.

[16] 刘志成,张晨成.湖南省农业生态效率评价研究:基于 SBM-undesirable 模型与 CCR 模型的对比分析[J].中南林业科技大学学报:社会科学版,2015,9(6):32-36,66.

[17] 郑德凤,郝帅,孙才志.基于 DEA-ESDA 的农业生态效率评价及时空分异研究[J].地理科学,2018,38(3):419-427.

[18] 刘飞翔,钟平英,张文明.我国山区县农业生态效率综合评价:以福建省武平县为例[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2015,15(3):94-99.

[19] 李志龙,王迪云.武陵山片区旅游经济:生态效率时空分异及影响因素[J].经济地理,2020,40(6):233-240.

[20] 郑丽楠,洪名勇.中国农业生态效率的时空特征及驱动因素[J].江西财经大学学报,2019(5):46-56.

[21] 侯孟阳,姚顺波.中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征[J].资源科学,2018,40(12):2475-2486.

[22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[23] 马勇,黄智洵.长江中游城市群生态文明水平测度及时空演变[J].生态学报,2016,36(23):7778-7791.

[24] 吴清,马会丽,吴黎,等.长江中游城市群农业经济时空格局演化研究[J].广东农业科学,2016,43(9):152-158,193.

[25] 国务院关于长江中游城市群发展规划的批复[J].中华人民共和国国务院公报,2015(11):22-23.

[26] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.

[27] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002,143(1):32-41.

[28] 邓祖涛,周玄德,周玉翠.长江中游城市群高等级旅游景区时空格局演变研究[J].资源开发与市场,2020,36(9):1039-1046.

[29] Mickwitz P, Melanen M, Rosenström U, et al. Regional eco-efficiency indicators: A participatory approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(18):1603-1611.

[30] 胡卫卫,于水,马智源,等.基于 DEA-Malmquist 模型的江苏省农业生态效率时空差异分析[J].水土保持通报,2018,38(2):297-302.

[31] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.

[32] 李建豹,白永平,高峰,等.兰新铁路辐射带区域经济差异研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(8):26-32.

[33] 李嘉琪,黄凤莲,刘挺,等.长江经济带城市生态效率时空格局及驱动因子探测[J].人民长江,2020,51(5):1-6,16.

[34] 尚杰,吉雪强,陈玺名.中国城镇化对农业生态效率的影响:基于中国 13 个粮食主产区 2009—2018 年面板数据[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(8):1265-1276.

(上接第 393 页)

[64] 姜莉.我国主体功能区理论研究进展与述评:“一带一路”分类区域调控的启示[J].哈尔滨商业大学学报:社会科学版,2017(1):69-78.

[65] 孙珊珊,朱传耿.论主体功能区对我国区域发展理论的创新[J].现代经济探讨,2006(9):73-76.

[66] 钟海燕,赵小敏,黄宏胜.土地利用分区与主体功能区协调的实证研究[J].经济地理,2011,31(9):1523-1551.

[67] Progodzinski J M, Michae S T R. The economic theory of zoning:a critical review[J]. Land Economics, 1990, 66(3):294-314.

[68] Atkinson G, Oleson T. Urban sprawl as a path dependent process[J]. Journal of Economic Issues, 1996(2):609-619.

[69] 袁朱.国外有关主体功能区划分及其分类政策的研究与启示[J].中国发展观察,2007(2):54-56.

[70] 魏后凯.对推进形成主体功能区的冷思考[J].中国发展观察,2007(3):28-30.

[71] 樊杰.我国主体功能区划的科学基础[J].地理学报,2007,62(4):339-350.

[72] 陈磊,姜海.从土地资源优势区配置到主体功能区管理:一个国土空间治理的逻辑框架[J].中国土地科学,2019,33(6):10-17.

[73] 陈磊,姜海.主体功能区导向下的土地资源空间配置:对土地生长空间演进规律的理性思考[J].中国土地科学,2019,33(10):22-30.

[74] 陈磊,姜海.国土空间开发强优势区的理论认知与政策机制设计:基于优势区原理的思考[J].中国土地科学,2020,34(11):10-18.