

海南省农业生态效率时空特征及影响因素研究

梁伟红, 邓春梅, 叶露, 刘燕群, 王丹阳, 李玉萍*

中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海南海口 571101

摘要: 基于海南省 18 个市(县) 2012—2022 年县域行政单元农业面板数据, 运用非期望产出超效率 SBM 模型, 结合空间相关性分析方法, 分析海南省农业生态效率时空演变特征, 并利用 Tobit 回归模型探究其影响因素。结果表明: (1) 2012—2022 年, 海南省农业生态效率均值呈现中部地区>西部地区>东部地区的明显分级特征; 海南省市(县) 域尺度农业生态效率逐年明显改善, 农业生态效率均值为 0.541, 达到均值以上的市(县) 数为 7 个。(2) 空间变化上, 总体呈现中部向东西部扩散的空间分布特征, 同时完全有效和效率较高呈现块状和链条式分布特征, 效率中等类型市(县) 围绕着完全有效和效率较高市(县) 分布; 南北方向和东西方向的投影趋势线均呈现倒“U”型特征。(3) 在省域尺度下, 农民收入水平、农业机械化强度、农业化学投入品使用强度和城镇化率是对海南省农业生态效率时空演变产生影响的主要因素; 在不同区域尺度下, 农民收入水平是对东部地区农业生态效率产生影响的主要因素, 城镇化率、农业化学投入品使用强度和农田灌溉率是对中部地区农业生态效率产生影响的主要因素, 城镇化率、农民收入水平、农业产业结构、农业化学投入品使用强度和农田灌溉率是对西部地区农业生态效率产生影响的主要因素。总体而言, 海南省各市(县) 农业生态效率整体呈上升趋势, 各区域农业生态效率存在一定差异。未来应因地制宜探索不同地区农业发展重点, 切实提升农业生态效率。

关键词: 农业生态效率; 影响因素; 超效率 SBM 模型; Tobit 模型; 海南省

中图分类号: F323.22

文献标志码: A

Temporal and Spatial Characteristics and Influencing Factors of Agricultural Ecological Efficiency in Hainan Province

LIANG Weihong, DENG Chunmei, YE Lu, LIU Yanqun, WANG Danyang, LI Yuping*

Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Practical Research on Tropical Crops Information Technology in Hainan, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: Based on the panel data of 18 cities (counties) in Hainan, China from 2012 to 2022, combining the non-expected output super efficiency SBM model and Tobit regression mode, this paper analyzed the spatial and temporal evolution characteristics of agricultural eco-efficiency and influencing factors of agricultural ecological efficiency in cities (counties) of Hainan. From 2012 to 2022, the average agricultural eco-efficiency in Hainan showed obvious grading characteristics of central region>western region>eastern region. The agricultural eco-efficiency at the county scale of Hainan improved significantly year by year. The average agricultural eco-efficiency was 0.541, and the number of cities (counties) above the average value was 7. In terms of spatial change, the overall distribution characteristics of agricultural eco-efficiency were “spreading from the middle to the east and west”, and the distribution characteristics of full efficiency and high efficiency were block and chain. The cities (counties) with medium efficiency were distributed around the cities and counties with full efficiency and high efficiency. The trend lines in the north-south direction and the east-west direction showed the characteristics of inverted U-shape. The temporal and spatial evolution of agricultural eco-efficiency in Hainan at the provincial scale was influenced by several key factors, including the level of farmers’

收稿日期 2024-08-12; 修回日期 2024-08-21

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 721RC630); 海南省哲学社会科学规划课题 (No. HNSK(YB)22-14); 海南省自然科学基金项目 (No. 622MS115)。

作者简介 梁伟红 (1978—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农业数据分析。*通信作者 (Corresponding author): 李玉萍 (LI Yuping), E-mail: lyp5390@163.com。

income, intensity of agricultural mechanization, use of agricultural chemicals, and urbanization rate. At different regional scales, farmers' income level was the main factor affecting agricultural eco-efficiency in the eastern region, while urbanization rate, intensity of agricultural chemical input use and farmland irrigation rate were the main factors affecting agricultural eco-efficiency in the central region. Urbanization rate, farmers' income level, agricultural industrial structure, intensity of use of agricultural chemical inputs and farmland irrigation rate were the main factors affecting agricultural eco-efficiency in the western region. On the whole, the agricultural eco-efficiency of all cities (counties) in Hainan showed an upward trend, and there were some differences in the agricultural eco-efficiency among different regions. In the future, we should explore the priorities of agricultural development in different regions according to local conditions to effectively improve agricultural eco-efficiency.

Keywords: agricultural ecological efficiency; influencing factors; super-efficiency SBM model; Tobit model; Hainan province

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.01.024

我国是农业大国，用全球 11% 的农业用地保障了世界 18% 的人口粮食供给，在国际上的基础地位尤为重要^[1]。21 世纪以来，我国农业经济高速增长，2000—2020 年农业总产值年均增长率达 5.94%^[2]。然而在农业经济快速增长的同时，也产生了农业碳排放增加、农业面源污染加剧、农业生态系统退化等一系列问题^[3]。在国家大力提倡绿色农业发展的背景下，如何扭转农业生产模式向绿色、高质量的可持续发展模式转换，保障农业经济和生态协调发展，已经成为当前农业发展面临的重要问题。农业生态效率是评估农业生产经济和生态综合效益的重要手段，近年来受到国内外学者的广泛关注。就评价方法而言，聂弯等^[4]系统总结了农业生态效率的评价方法及其在不同尺度的应用。在研究方法上，主要有比值法^[5]、生命周期评价法^[6]、指标体系法^[7-8]和模型分析法^[9-10]等。TONE 提出的超效率 SBM 模型被广泛应用于农业生态效率测算中，最初主要考虑将期望产出纳入指标体系，后来，为了进一步探究农业生态效率，很多学者将农业碳排放和农业面源污染等非期望产出纳入指标体系测算农业生态效率，该模型已经逐渐成为测度评价农业生态效率的主要模型^[11-14]。在影响因素方面，主要采用灰色关联度模型、Tobit 模型、空间面板 STIRPAT 模型等进行研究，其中应用最多的是 Tobit 回归模型^[15-16]。研究尺度上，逐渐从全国、省级等层面逐渐转向市（县）层面甚至乡（镇）层面上，这说明农业生态效率研究越来越受到学者的重视。

近年来，作为全国重要的“菜篮子”“果盘子”供应地的海南省非常重视绿色农业的发展，2019 年获评“国家农业绿色发展先行区”，制定

了《海南省国家农业绿色发展规划（2019—2025 年）》等一系列政策。但由于海南农业耕地复种指数高，化肥农药施用量较大、农业生产废弃物残留对土壤地力及农业生态环境造成一定破坏。因此，农业生态效率的提高对促进海南热带高效农业的可持续发展具有重要的意义。本研究基于海南省县域（三沙市除外）尺度数据，运用非期望产出 SBM 模型及面板 Tobit 模型测算 2012—2022 年海南省农业生态效率并分析其影响因素，以为海南热带高效农业发展制定农业生态产业管理政策提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

研究区域为海南岛海口市、三亚市、五指山市、文昌市、琼海市、万宁市、定安县、屯昌县、澄迈县、临高县、儋州市、东方市、乐东黎族自治县、琼中黎族自治县、保亭黎族自治县、陵水黎族自治县、白沙黎族自治县、昌江黎族自治县 18 个市（县）。

数据主要来源于《中国农村统计年鉴》《海南省统计年鉴》以及各市（县）历年统计年鉴、统计公报、政府公布公开数据等材料，部分指标数据依据原始数据计算得出，个别缺失数据根据指标特征及数据趋势，通过插值法和几何增长率法等进行合理补充。

1.2 方法

1.2.1 非期望产出超效率 SBM 模型 采用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型对海南省 18 个市（县）的农业生态效率水平进行测度，其具体模型表达公式如下：

$$\min \phi = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i^-}{x_{ik}} \right)}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{w=1}^{s_1} \frac{r_w^d}{y_{wk}^d} + \sum_{g=1}^{s_2} \frac{r_g^u}{y_{gk}^u} \right)}$$

$$\text{s.t. } x_{ik} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} Q_j - r_i^-$$

$$y_{wk}^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{wj} Q_j + r_w^d$$

$$y_{gk}^u \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{gj} Q_j - r_g^u$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n Q_j = 1$$

$$Q_j, r_i^-, r_w^d, r_g^u \geq 0$$

$i=1, 2, \dots, m; w=1, 2, \dots, s_1; g=1, 2, \dots, s_2; j=1, 2, \dots, n$

式中, ϕ 表示农业生态效率值; n 表示海南省 18 个市(县)即 18 个决策单元; m 、 s_1 、 s_2 分别表示投入、期望产出、非期望产出指标个数; r_i^- 、 r_w^d 和 r_g^u 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; x_{ik} 、 y_{wk}^d 、 y_{gk}^u 分别表示决策单元 k 的第 i 项投入、第 w 项期望产出、第 g 项的非期望产出值; Q 为各个决策单元的权重向量。参照相关学者的研究^[17], 将海南省各市(县)农业生态效率测算的结果划分为 5 个等级: $\phi < 0.2$ 为效率低, $0.2 \leq \phi < 0.4$ 为效率较低, $0.4 \leq \phi < 0.6$ 为效率中等, $0.6 \leq \phi < 1$ 为效率较高, $\phi \geq 1$ 为效率完全有效。本研究运用 Matlab 软件, 利用非期望产出的 SBM 模型, 对海南省县域尺度农业生态效率进行测度分析。

根据已有研究并结合海南实际, 选择 10 项投入产出指标来评价农业生态效率, 其中投入指标包括劳动力、资源(土地、水资源)、环境(化肥、农药和地膜)。选取农业总产值来反映期望产出; 为使农业生态效率测算结果更加准确和科学, 选取农业碳排放和污染物排放来综合反映非期望产出(表 1)。

1.2.2 全局空间自相关分析 全局空间自相关从宏观层面上判断农业生态效率在海南有无聚集性。为进一步研究海南省 18 个市(县)农业生态

效率是否存在空间效应, 对其进行全局空间自相关分析, 全局空间自相关是根据海南省县域地理位置和农业生态效率值来研究全局空间依赖性和空间集聚程度, 通常采用莫兰指数(Moran's I)来衡量, 其具体运算公式如下:

表 1 海南省农业生态效率指标体系

Tab. 1 Index system of agricultural eco-efficiency in Hainan

一级指标 Primary index	二级指标 Secondary index	变量及说明 Variable explanation
要素投入	劳动力投入	农林牧渔业从业人员 $\times$ (农业总产值/农林牧渔业总产值)(人)
	机械投入	农业机械总动力(kW)
	水资源投入	有效灌溉面积(hm ²)
	土地投入	农作物总播种面积(hm ²)
	化肥投入	化肥使用量(t)
	农药投入	农药使用量(t)
	农膜投入	农膜使用量(t)
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	化肥、农药、农膜、农业播种、农业灌溉等碳源数据乘以对应系数的碳排放总和(t) ^[18]
	污染物排放量	化肥氮、磷流失, 农药、农膜残留总量(t) ^[19]

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n$$

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$$

式中, X_i 和 X_j 分别为第 i 个和第 j 个县域空间单元的农业生态效率值, $\bar{X}$ 为均值, n 为观测单元 18 个市(县)单元数量, S^2 为样本方差; W_{ij} 为空间权重矩阵, 代表县域间的邻近关系, 当县域 i 与县域 j 有公共边界或节点时, $W_{ij}=1$; 当无公共边界或节点时, $W_{ij}=0$, 则相邻 2 个县域空间无空间关联。通过测算得出的莫兰指数、 Z 得分和 P 值确定海南省县域农业生态效率是否具有空间上的相关性, Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's $I < 0$ 表示负相关, Moran's $I > 0$ 表示正相关, Moran's

$I=0$ 表示不相关,越接近-1 或 1 则表示相关性越强。

1.2.3 面板 Tobit 模型 为了能够深入探索海南省农业生态效率的影响因素及其影响关系,参考相关专家学者的研究成果^[15-16],建立以农业生态效率值为因变量,影响因素为自变量的 Tobit 随机效应模型:

$$T_{it} = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{k,it} + \gamma_{it}$$

式中,被解释变量 T_{it} 表示第 i 个市(县)第 t 年的农业生态效率,且以受限的方式取值,当 $T_{it} > 0$ 时,取实际观测值,当 $T_{it} \leq 0$ 时,观察值均截取为 0,其中 i ($i=1,2,3,\dots,18$) 代表海南省 18 个市(县),即决策单元; β_0 表示截距项, β_k 为估计系数, X_k 为解释变量,即影响因素, k 为影响因素的个数, $X_{k,it}$ 表示影响因素 X ,其中 X_k 为实际观测值, γ_{it} 表示随机误差。采用 Stata 16 软件,应用 Tobit 模型对海南省农业生态效率相关样本数据进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 海南省农业生态效率时序演化特征分析

2.1.1 市(县)级层面 2012—2022 年海南省 18 个市(县)农业生态效率由低效率水平向高效率水平逐渐演变。2012 年,海口、乐东和东方 3 个市(县)处于低效率水平,澄迈、儋州、东方、临高、陵水、琼海、三亚和万宁 8 个市(县)处于较低效率水平,昌江、定安和琼中 3 个县达到中等效率水平,仅有白沙、保亭、屯昌和五指山 4 个市(县)达到完全有效水平。到 2022 年,无市(县)处于较低效率水平及以下,仅有文昌处于中等效率水平,为 0.539,海口处于较高水平效率值,为 0.663,其他市(县)均达到完全有效水平。2012—2022 年,五指山除 2014 年农业生态效率处于较高水平外,其他年份一直处于完全有效水平。基于海南省(县)尺度下的 2012—2022 年农业生态效率均值为 0.541,表示实际产出水平相当于潜在产出水平的 54.1%,各市(县)农业生态效率均值有较大差别,达到平均值以上的市县主要有昌江、五指山、白沙、定安、屯昌、琼中、保亭 7 个市(县)(图 1)。

2.1.2 不同区域层面 基于 2012—2022 年海南省 18 个市(县)农业生态指标相关数据,测度海南省 18 个市(县)农业生态效率值。为了更直观了解不同区域的农业生态效率差异,通过分析发

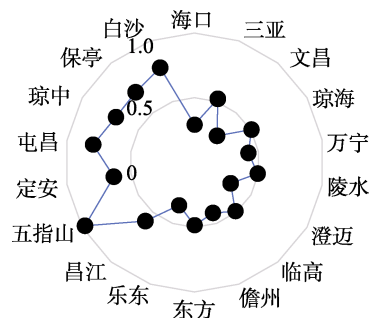


图 1 2012—2022 年海南省各市(县)农业生态效率均值

Fig. 1 Average agricultural eco-efficiency of cities and counties in Hainan from 2012 to 2022

现海南东部、中部、西部地区 11 年来农业生态效率均呈现增长趋势,但也出现明显分级特征,即中部地区>西部地区>东部地区的分级特征。其中,中部地区的农业生态效率均值为 0.765,达效率较高水平,主要是因为该区域具有优越的自然资源条件,是重点生态功能区;其次,东部地区和西部地区的农业生态效率均值差距不明显,分别为 0.442 和 0.417,均处于中等效率水平。从时序上来看,中部地区呈现先降后升的趋势,西部和东部地区呈现明显快速提升趋势,中部地区在 2012—2015 年间呈现下降趋势,随后从 2016 年的 0.692 提升到 2022 年的 1.03,达到完全有效状态;西部地区从 2012 年的 0.259 提升到 2022 年的 1.034,也达到完全有效状态;东部地区从 2012 年的 0.253 提升到 2022 年的 0.901,达到较高有效状态(图 2)。

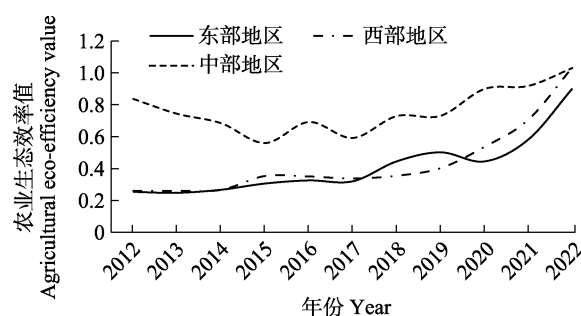


图 2 2012—2022 年海南省东部、中部、西部地区农业生态效率值

Fig. 2 Agricultural eco-efficiency in eastern, central and western Hainan from 2012 to 2022

2.2 海南省农业生态效率空间变化特征

2.2.1 空间格局分析 选取 2012 年、2014 年、2016 年、2018 年、2020 年和 2022 年 6 个时间节点,利用 ArcGIS 软件对海南省各市(县)农业生

态效率的空间分布和区域差异进行空间可视化处理(图 3)。按照自然间断法将其分为效率低、效率较低、效率中等、效率较高和效率完全有效 5 个等级。从图 3 可以看出海南省农业生态效率总体呈现中部向东西部扩散的趋势。效率完全有效的市(县)数量由 2012 年的白沙、屯昌、五指山、保亭 4 个市(县)增至 2022 年的除海口和文昌以外的 16 个市(县), 上升 300%; 效率较高的市(县)数量 2012—2021 年期间呈稳步增长趋势, 而 2022 年仅海口 1 个市(县)为效率较高;

效率中等和效率较低的市(县)数量分布呈现明显先升后降的趋势, 效率中等和效率较低市(县)数量最高峰分别于 2015 年达到 9 个和 2017 年的 10 个。而出现效率低的年限仅在 2012—2014 年, 且市(县)数均低于 5 个。说明海南省县域尺度农业生态效率逐年有明显改善。同时完全有效和效率较高呈现块状和链条式分布特征, 效率中等类型市(县)围绕完全有效和效率较高市(县)分布, 意味着海南省县域农业生态效率可能存在一定程度的空间依赖性。

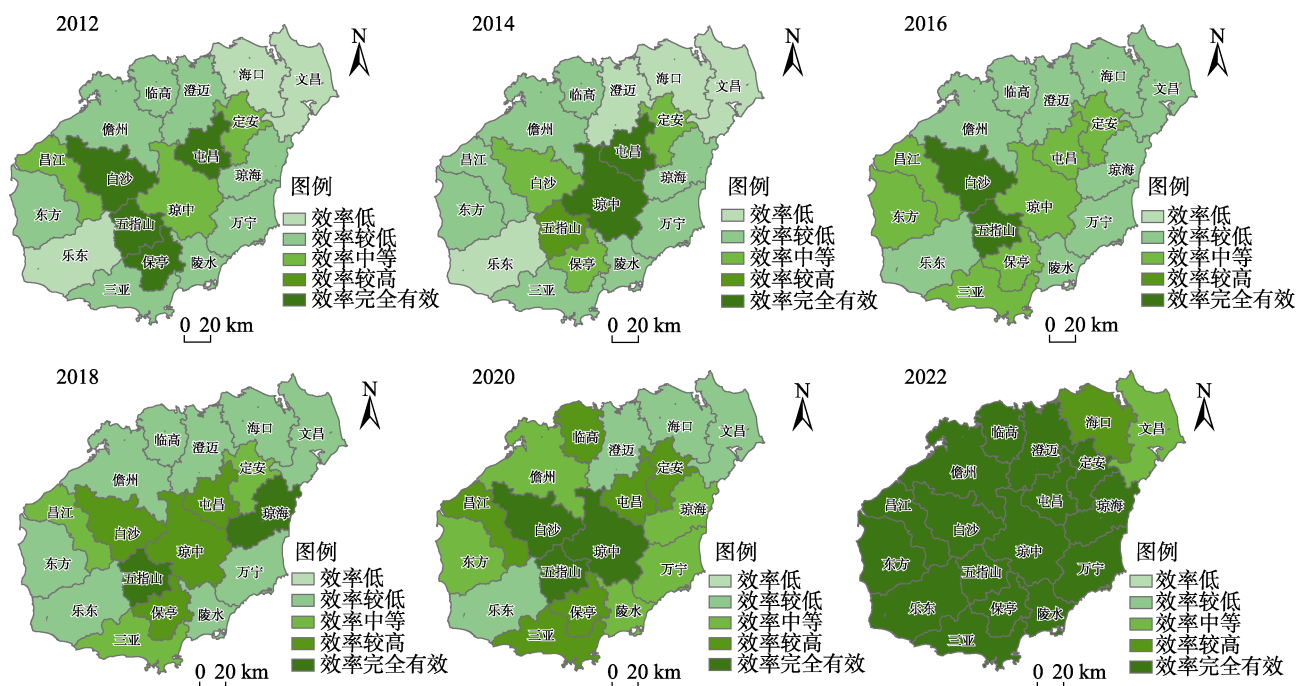


图 3 2012—2022 年海南省农业生态效率空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of agricultural eco-efficiency in Hainan from 2012 to 2022

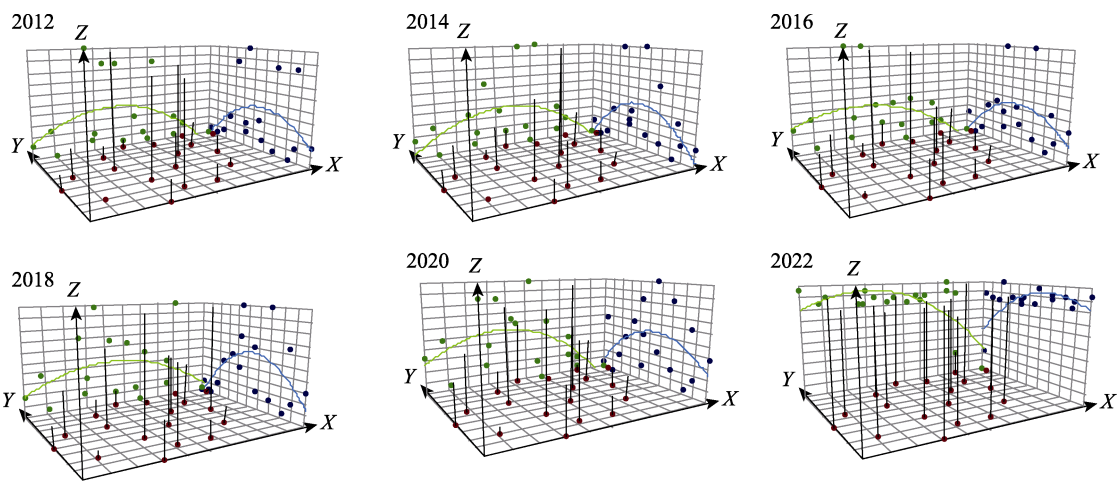
为进一步了解海南省县域农业生态效率趋势走向, 应用 ArcGIS 趋势分析工具, 将各县域 2012 年、2014 年、2016 年、2018 年、2020 年和 2022 年的农业生态效率值作为高度属性转换为空间三维趋势图(图 4)。由图 4 可知, 6 个时间截面上南北方向和东西方向农业生态效率的投影趋势线均呈现倒“U”型特征, 而且呈现明显的南高北低、东低西高的趋势特征。

2.2.2 空间相关性分析 在空间自相关分析中, Z 值是标准差的倍数, 用于衡量莫兰指数(Moran's I)与随机分布期望值之间的偏差。 Z 值的大小可以确定空间模式的显著性。 P 值表示概率, 用于评估观测到的空间模式是由随机过程产生的可能性大小。由表 2 可知, 2012—2022 年海南省县域

农业生态效率全局 Moran's I 均大于 0, 说明海南省县域农业生态效率具有空间相关性, 但仅有 2016 年、2017 年和 2022 年表现为集聚格局。局部空间自相关分析结果显示, 农业生态效率空间关联模式具有显著的空间变异特征。

2.3 农业生态效率影响因素分析

2.3.1 指标选取 通过梳理和归纳相关研究, 发现影响农业生态效率的因素有很多, 从整个农业发展角度来看, 农业前期投入的要素均有可能对农业生态效率产生影响。借鉴、参考相关学者的研究^[20-23], 并结合海南省县域数据的可获得性, 选取城镇化率(%)、农民收入水平(元)、农业规模化水平($\text{hm}^2/\text{人}$)、农业产业结构(%)、农业化学投入品使用强度(kg/hm^2)、农业机械



X 轴、Y 轴分别表示农业生态效率在东西方向和南北方向的趋势；Z 轴表示农业生态效率值。
X-axis and Y-axis represent the trends of agroecological efficiency in east-west direction and north-south direction respectively; Z-axis represents the agroecological efficiency value.

图 4 2012—2022 年海南省农业生态效率全局趋势图

Fig. 4 Overall trend of agricultural eco-efficiency in Hainan from 2012 to 2022

表 2 海南省农业生态效率全局空间自相关 Moran's I

Tab. 2 Global spatial auto-correlation Moran's I of agricultural eco-efficiency in Hainan

项目 Item	2012	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Moran's I	0.135	0.017	0.126	0.243	0.152	0.142	0.169	0.148	0.071	0.188
Z 值	1.371	0.548	1.374	2.281	1.807	1.408	1.643	1.439	0.890	2.114
P 值	0.170	0.584	0.169	0.022	0.071	0.159	0.100	0.150	0.374	0.035

密度 (kW/hm^2)、农田灌溉率 (%) 7 个影响因素作为农业生态效率的影响因素研究的主要解释变量。

2.3.2 省域尺度农业生态效率影响因素分析 回归结果显示，城镇化率和农业化学投入品使用强度对海南省农业生态效率均呈显著负相关，分别通过了 10%和 5%的显著性检验；农民收入水平和农业机械密度对海南省农业生态效率呈显著正相关，分别通过了 1%和 5%的显著性检验；其他

变量对海南省农业生态效率均具有正向作用，但作用不显著（表 3）。从省级层面分析结果说明，随着城镇化的推进，农业人口向城镇转移，虽然为城镇建设提供了劳动力，促进了经济发展，但是这种劳动力的转移会影响农业生产的方式和效率，从而对农业生态效率产生负面影响。同时海南省农业投入品还存在过量或不合理使用情况。海南省机械化的投入对当地农业产值的增加和农业生态效率的刺激作用明显。

表 3 海南省农业生态效率影响因素 Tobit 回归结果

Tab. 3 Tobit regression results of influencing factors of agricultural eco-efficiency in Hainan

解释变量 Explanatory variable	系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	Z 值 Z value	显著性水平 Significance level
城镇化率 (X_1)	-0.0069081	0.0039100	-1.77	*
农民收入水平 (X_2)	0.0000296	7.96e-06	3.72	***
农业规模化水平 (X_3)	0.1100697	0.1219765	0.90	
农业产业结构 (X_4)	0.0060073	0.0043568	1.38	
农业化学投入品使用强度 (X_5)	-0.0000958	0.0000486	-1.97	**
农业机械密度 (X_6)	0.0167138	0.0074374	2.25	**
农田灌溉率 (X_7)	0.0035731	0.0029744	1.20	

注：***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的水平上显著。
Note: ***, **, * represent significant at 1%, 5% and 10% levels respectively.

2.3.3 海南省不同区域农业生态效率影响因素的回归分析 考虑到海南省区域内部的自然地理和社会经济的异质性,本研究按照东部、中部和西部地区 3 个区域,进一步研究不同区域的影响因素对农业生态效率作用的差异性,以各地区数据分别用 Stata 16 软件带入模型得到回归结果(表 4)。回归结果显示,海南省东部、中部及西部各区域农业生态效率的影响因素强度表现不一。农民收入水平在 1%的显著性水平上对东部地区农业生态效率产生正向影响。城镇化率在 10%的显

著水平上对中部地区农业生态效率产生负向影响,农业化学投入品使用强度在 1%的显著水平上对中部地区农业生态效率产生负向影响,农田灌溉率在 5%的显著水平上对中部地区农业生态效率产生正向影响。城镇化率、农业规模化水平、农业产业结构和农田灌溉率在 1%的显著水平上对西部地区农业生态效率产生正向影响,农民收入水平在 10%的显著水平上对西部地区农业生态效率产生正向影响,农业化学投入品使用强度在 1%的显著水平上对西部地区农业生态效率产生负向影响。

表 4 海南省不同区域农业生态效率影响因素 Tobit 回归结果
Tab. 4 Tobit regression results of influencing factors of agricultural eco-efficiency in different regions of Hainan province

解释变量 Explanatory variable	东部地区 Eastern region	中部地区 Central region	西部地区 Western region
城镇化率 (X_1)	-0.00358000 (0.00231000)	-0.02880000* (0.01720000)	0.00896000*** (0.00342000)
农民收入水平 (X_2)	0.00003440*** (0.00001040)	-0.00000191 (0.00002370)	0.00001430* (0.00000775)
农业规模化水平 (X_3)	-0.03330000 (0.25300000)	0.27000000 (0.53200000)	0.45600000*** (0.08680000)
农业产业结构 (X_4)	0.00872000 (0.00703000)	-0.01610000 (0.01460000)	0.01340000*** (0.00215000)
农业化学投入品使用强度 (X_5)	-0.00002970 (0.00003760)	-0.00038500*** (0.00013900)	-0.00014300*** (0.00004700)
农业机械密度 (X_6)	-0.00494000 (0.01110000)	0.04930000 (0.03130000)	-0.00920000 (0.00596000)
农田灌溉率 (X_7)	0.00174000 (0.00302000)	0.03070000** (0.01430000)	0.03330000*** (0.00666000)

注:***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的水平上显著,括号内数字为 Z 值。
Note:***, **, and * represent significant at 1%, 5% and 10% levels respectively, and the numbers in brackets are Z values.

3 讨论

本研究基于市(县)域尺度探究了海南省农业生态效率及其影响因素。从影响因素来看,农业产业结构、农民收入水平、农业规模化水平对提升农业生态效率具有正向作用,农业化学投入品使用强度对提升农业生态效率有负向作用,这与现有大部分学者的研究结论^[14, 24]基本一致。但城镇化率负向作用于农业生态效率,农业机械密度正向作用于农业生态效率的研究结论与现有相关研究^[20, 23, 25]的结论有偏差,这主要是因为二者选择的空间尺度不同,以及农业技术发展水平、研究样本所处的城镇化阶段不同。海南省应强化农业技术发展及推广,推动农业资源节约化利用。以绿色发展理念为指导,转变农业生产方式,从节水、节肥、节药等方面推动农业资源节约化利用,进一步提升农业资源的利用效率^[26]。应继续抓好中部地区农业与生态协调发展,保证该区域农业生态效率完全有效水平。同时在推动海南省西部地区市(县)农业产业结构优化的过程中,

不仅要关注农业本身的发展,还需将农业与旅游、文化等产业深度融合,形成“农业+”的发展新模式。

此外,本研究仍具有一定的局限性,海南畜禽养殖业污染也是农业污染的一个重要来源,而本研究在农业生态效率测度中主要采用种植业,未采用畜禽水产养殖业的相关数据。此外,在分析农业生态效率影响因素的过程中,国内不同学者有将农业财政支农、城乡收入比、农业从业人员受教育水平等指标^[27-28]纳入影响因素分析的研究,而本研究中因海南省及各市(县)部分因素量化数据较难收集,农业生态效率影响因素分析还不够全面,今后的研究可将系列指标纳入相关指标体系,使本研究更具指导价值。

4 结论

(1) 基于 2012—2022 年海南省 18 个市(县)域面板数据,采用超效率 SBM 模型对农业生态效率进行分析,结果表明,2012—2022 年海南省农

业生态效率均值呈现中部地区>西部地区>东部地区的明显分级特征，且随着时间推移，东部地区和西部地区呈明显增长趋势；从市（县）级层面来看，海南省县域尺度农业生态效率逐年明显改善，农业生态效率均值为 0.541，达平均值以上的市（县）主要有昌江、五指山、白沙、定安、屯昌、琼中、保亭 7 个市（县）。

（2）从空间变化特征上来看，海南省农业生态效率总体呈现中部向东西部扩散的空间分布特征，同时完全有效和效率较高呈现块状和链条式分布特征，效率中等类型市（县）围绕着完全有效和效率较高市（县）分布，且呈现明显的北低南高、西高东低的趋势特征。

（3）通过面板 Tobit 回归模型对海南省农业生态效率演变的影响因素分析表明，城镇化率、农业化学投入品使用强度与农业生态效率呈显著负相关，对海南省整体农业生态效率具有抑制作用，而农民收入水平和农业机械密度与农业生态效率呈显著正向驱动作用，农民收入水平的增加和机械化的投入对当地农业产值的增加和农业生态效率的刺激作用明显，对农业生态效率具有促进作用。而且不同区域影响因素强度表现不一，其中农业投入品使用强度对三大区域农业生态效率均产生负向影响。

参考文献

- [1] 罗家祺, 金晓斌, 刘晶, 梁鑫源, 韩博, 周寅康. 2000—2020 年苏北地区农业生态效率变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 239-248.
LUO J Q, JIN X B, LIU J, LIANG X Y, HAN B, ZHOU Y K. Process and influencing factors of agricultural eco-efficiency in northern Jiangsu of China from 2000 to 2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 239-248. (in Chinese)
- [2] 冷浪平. 农业社会化服务对农业绿色全要素生产率的影响[D]. 南昌: 江西财经大学, 2023.
LENG L P. The impact of agricultural socialized services on agricultural green total factor productivity: macro identification and micro evidence[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2023. (in Chinese)
- [3] 马军旗, 乐章. 中国农业面源污染的空间差异与影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 1137-1145.
MA J Q, YUE Z. The analysis of the spatial difference and its influencing factors of agricultural non-point source pollution in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(6): 1137-1145. (in Chinese)
- [4] 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.
NIE W, YU F W. Review of methodology and application of agricultural eco-efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1371-1380. (in Chinese)
- [5] 吴小庆, 徐阳春, 陆根法. 农业生态效率评价——以盆栽水稻实验为例[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2481-2488.
WU X Q, XU Y C, LU G F. The evaluation of agricultural eco-efficiency: a case of rice pot-experiment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2481-2488. (in Chinese)
- [6] CANALS L M I, BAUER C, DEPESTELE J, DUBREUIL A, KNUCHEL R F, GAILLARD G, MICHELSEN O, MÜLLER-WENK R, RYDGREN B. Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(1): 5-15.
- [7] CANEGHEM J V, BLOCK C, CRAMM P, MORTIER R, VANDECASTEELE C. Improving eco-efficiency in the steel industry: the ArcelorMittal Gent case[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 807-814.
- [8] 刘晶茹, 吕彬, 张娜, 石焱. 生态产业园的复合生态效率及评价指标体系[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 136-141.
LIU J R, LYU B, ZHANG N, SHI Y. Definition and evaluation indicators of ecological industrial park's complex eco-efficiency[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 136-141. (in Chinese)
- [9] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 徐文赞. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 47-54.
CHENG J H, SUN Q, GUO M J, XU W Y. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 47-54. (in Chinese)
- [10] LAUWERS L. Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models[J]. Ecological Economics, 2009, 68(6): 1605-1614.
- [11] 臧俊梅, 张思影, 唐春云. “双碳”目标下广东省农业生态效率时空演变及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(10): 135-146.
ZANG J M, ZHANG S Y, TANG C Y. Spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural eco-efficiency in Guangdong province under “Dual Carbon”[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(10): 135-146. (in Chinese)
- [12] 杨国华, 段永蕙, 崔蕾. 山西省农业生态效率县域差异及影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(3): 70-78.

- YANG G H, DUAN Y H, CUI L. Analysis of county differences and influencing factors of agricultural ecological efficiency in Shanxi province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(3): 70-78. (in Chinese)
- [13] 张晶晶. 低碳视角下山东省农业生态效率测度及影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- ZHANG J J. Study on measurement and influencing factors of agricultural ecological efficiency in Shandong province from the perspective of low carbon[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [14] 李晓龙, 袁帅强, 王伟. 基于净碳汇的农业生态效率测度、时空演进及收敛性研究——以贵州 78 个县域为例[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(4): 680-691
- LI X L, YUAN S Q, WANG W. Measurement, spatial-temporal evolution, and convergence of agricultural eco-efficiency based on net carbon sink: a case study of 78 counties in Guizhou[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(4): 680-691. (in Chinese)
- [15] 李颖, 陈迪琳. 低碳视角下安徽省农业生态效率时空演化及影响因素研究[J]. *农业与技术*, 2023, 43(1): 158-163.
- LI Y, CHEN D L. Temporal and spatial evolution of agricultural eco-efficiency and its influencing factors in Anhui province from the perspective of low carbon[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(1): 158-163. (in Chinese)
- [16] 陈阳, 穆怀申. 中国农业生态效率测算及影响因素研究[J]. *统计与决策*, 2022, 38(23): 101-106.
- CHEN Y, MU H Z. Measurement and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China[J]. *Statistics & Decision*, 2022, 38(23): 101-106. (in Chinese)
- [17] 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.
- HOU M Y, YAO S B. Spatial-temporal evolution and trend prediction of agricultural eco-efficiency in China: 1978—2016[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2168-2183. (in Chinese)
- [18] 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.
- WANG B Y, ZHANG W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: an analysis based on panel data from 31 provinces in 1996—2015[J]. *Chinese Rural Economy*, 2018(1): 46-62. (in Chinese)
- [19] 吉雪强, 尚杰. 基于三阶段 SBM 模型的中国农业生态效率研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(7): 210-217.
- JIE X Q, SHANG J. A study on China's agricultural ecological efficiency based on the third stage SBM model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(7): 210-217. (in Chinese)
- [20] 高策, 张新仕, 王桂荣, 崔永福. 河北省县域农业生态效率时空演化及影响因素[J]. *河北农业大学学报(社会科学版)*, 2024, 26(1): 42-56.
- GAO C, ZHANG X S, WANG G R, CUI Y F. The spatial-temporal evolution and influencing factors of agricultural ecological efficiency at county-level in Hebei province[J]. *Journal of Hebei Agricultural University (Social Sciences)*, 2024, 26(1): 42-56. (in Chinese)
- [21] 杨宇晴. 吉林省农业生态效率及其影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- YANG Y Q. Research on agricultural ecological efficiency and its influencing factors in Jilin province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [22] 闫明涛, 乔家君, 瞿萌, 韩冬. 河南省农业生态效率测度、空间溢出与影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1396-1405.
- YAN M T, QIAO J J, QU M, HAN D. Measurements, spatial spillover and influencing factors of agricultural eco-efficiency in Henan province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11): 1396-1405. (in Chinese)
- [23] 张展, 廖小平, 李春华, 杨灿, 阳莎莎, 李伊涵. 湖南省县域农业生态效率的时空特征及其影响因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(2): 181-189.
- ZHANG Z, LIAO X P, LI C H, YANG C, YANG S S, LI Y H. Spatio-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency and its determinants in Hunan province[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 181-189. (in Chinese)
- [24] 周旭东, 吕光辉. 新疆农业生态效率时空差异及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数-Tobit 模型分析[J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2018, 12(6): 37-45.
- ZHOU X D, LYU G H. Study on spatial and temporal difference of agricultural eco-efficiency in Xinjiang and its influencing factors: based on the DEA-Malmquist index-Tobit model analysis[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 2018, 12(6): 37-45. (in Chinese)
- [25] 朱媛媛, 殷颂葵, 刘琼慧. 中国西北地区农业生态效率时空分异及影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(7): 1210-1219.
- ZHU Y Y, YIN S K, LIU Q H. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of agricultural ecological efficiency in northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(7): 1210-1219. (in Chinese)
- [26] 石玉林, 唐华俊, 王浩, 高中琪, 汪林, 张红旗, 刘宏斌, 罗其友, 王立新, 席北斗, 黄彩红, 李瑞, 许尔琪, 崔正国. 中国农业资源环境若干战略问题研究[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(5): 1-8.

SHI Y L, TANG H J, WANG H, GAO Z Q, WANG L, ZHANG H Q, LIU H B, LUO Q Y, WANG L X, XI B D, HUANG C H, LI L, XU E Q, CUI Z G. Research on key strategic issues of agricultural resource and environment in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 1-8. (in Chinese)

[27] 杨蓉. 内蒙古农业生态效率的时空特征及影响因素[J/OL]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 1-9. (2024-04-10)[2024-08-21]. <https://doi.org/10.19898/j.cnki.42-1704/C.20240402.01>.

YANG R. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of agricultural eco-efficiency in Inner Mongolia [J/OL]. Journal of South-Central Minzu University (Humanities and Social Sciences), 1-9. (2024-04-10)[2024-08-21]. <https://doi.org/10.19898/j.cnki.42-1704/C.20240402.01>. (in Chinese)

[28] 赵吉, 党国英, 唐夏俊. 基于 SBM-Tobit 模型的中国农业生态效率时空差异及影响因素研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2022, 6(3): 10-18

ZHAO J, DANG G Y, TANG X J. Spatial-temporal differences and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on SBM-Tobit model[J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2022, 6(3): 10-18. (in Chinese)