

三北地区农业生态效率时空分异与影响因素研究

李博宇^{1*}, 刘世琦¹, 张爱儒^{1,2#}

¹青海大学财经学院, 青海 西宁

²青海大学三江源生态大数据应用实验室, 青海 西宁

收稿日期: 2026年5月8日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

提升农业生态效率是统筹粮食安全、生态安全与农业绿色转型的关键举措。文章以三北地区13个省级行政区2003~2024年面板数据为样本, 运用非期望产出超效率SBM模型测算农业生态效率, 采用Dagum基尼系数揭示区域差异来源, 并构建面板Tobit模型识别驱动机制。结果表明: 1) 研究期内三北地区农业生态效率整体呈波动上升趋势, 均值由1.0697升至1.1184, 长期处于DEA有效状态; 空间上呈现东北 > 西北 > 华北的梯度格局, 省际与区域间差异显著。2) Dagum基尼系数分解显示, 区域差异主要来源于组间差异, 华北地区内部差距最大, 西北地区呈波动下滑, 东北地区高位稳定。3) 驱动机制显示, 劳动生产率、城镇化水平、农业机械密度、森林覆盖率对农业生态效率具有显著正向驱动作用; 农民可支配收入、农业受灾率、农业种植结构呈显著负向抑制效应; 农业规模化生产能力影响不显著, 绿色规模效应尚未充分释放。最后, 从要素配置、结构优化、防灾减灾、生态屏障建设四个方面提出差异化建议。

关键词

农业生态效率, 超效率SBM模型, Dagum基尼系数, Tobit模型, 三北地区, 时空分异

Study on Spatiotemporal Differentiation and Influencing Factors of Agricultural Eco-Efficiency in the Three-North Region

Boyu Li^{1*}, Shiqi Liu¹, Airu Zhang^{1,2#}

¹School of Finance and Economics, Qinghai University, Xining Qinghai

²Sanjiangyuan Ecological Big Data Application Laboratory, Qinghai University, Xining Qinghai

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李博宇, 刘世琦, 张爱儒. 三北地区农业生态效率时空分异与影响因素研究[J]. 农业科学, 2026, 16(6): 920-930. DOI: 10.12677/hjas.2026.166111

Abstract

Improving agricultural eco-efficiency is crucial for coordinating food security, ecological security, and green transformation of agriculture. Based on panel data of 13 provincial-level administrative regions in the Three-North Region from 2003 to 2024, this paper uses the super-efficiency SBM model with undesirable outputs to measure agricultural eco-efficiency, adopts the Dagum Gini coefficient to analyze the sources of regional differences, and constructs a panel Tobit model to identify the driving mechanism. The results show that: 1) During the study period, agricultural eco-efficiency in the Three-North Region displayed an overall fluctuating upward trend, rising from 1.0697 to 1.1184, and remained DEA-effective for a long time. Spatially, it presented a gradient pattern of Northeast China > Northwest China > North China, with significant differences among provinces and regions. 2) The Dagum Gini coefficient decomposition indicates that regional differences are mainly dominated by inter-regional differences. North China has the largest internal gap, Northwest China shows a fluctuating downward trend, and Northeast China maintains a high level of stability. 3) The driving mechanism reveals that labor productivity, urbanization level, agricultural machinery density, and forest coverage have significant positive driving effects on agricultural eco-efficiency; farmers' disposable income, agricultural disaster rate, and agricultural planting structure show significant negative inhibitory effects; the effect of agricultural large-scale production capacity is not significant, and the green scale effect has not been fully realized. Finally, differentiated improvement paths are proposed from factor allocation, structural optimization, disaster prevention and mitigation, and ecological barrier construction.

Keywords

Agricultural Eco-Efficiency, Super-Efficiency SBM Model, Dagum Gini Coefficient, Tobit Model, Three-North Region, Spatiotemporal Differentiation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农业是国民经济的根本性产业，其可持续发展对于保护国家粮食安全、生态安全以及乡村振兴战略的实施具有重要作用。随着我国农业由传统的依靠粗放型数量堆砌向现代依靠质量提升转变，农业生态效率的提升显得尤为重要。然而，在农业向快向好发展的同时，也产生了农业碳排放增加、农业面源污染加剧、农业生态退化等一系列问题[1]，严重地影响了农业产出、农村经济发展以及农民生活水平。因此，在保证农业产出增加的基础上，持续有效降低农业污染，促进农民增收、农业高效发展是现阶段农业可持续发展的重要方向。

生态效率(Eco-Efficiency)概念是由 Schaltegger 于 1990 年提出的，代表增长的经济价值和增长的环境影响两者之间的比值。农业生态效率(Agricultural Eco Efficiency, AEE)则衍生于生态效率的概念，是指在完成农业生产目标的情况下尽可能减少能源消耗、环境污染以及减排固碳，提升资源的利用效率并保护生态环境质量及稳定性，从而实现农业绿色低碳发展[2]。到目前为止，我国学者对农业生态效率的研究主要集中在以下几个方面：1) 研究尺度上：既有宏观领域的国家方面，中观领域的市、城市群、粮食产

区方面,又有微观领域的县域方面。并表现出由宏观、中观领域向微观领域转移的倾向。2) 研究方法上:研究方法多种多样,目前常采用投入-产出比值法、生命周期评价法、AHP-模糊综合评价法、随机前沿分析法、数据包络分析法(DEA)、生态足迹法、指标体系法[3]-[5]等。3) 在农业生态效率的影响因素上,常用模型有 OLS 模型、Tobit 模型、灰色关联模型、地理探测器模型[6]-[9]等。涉及的影响因素主要涵盖农业自然条件、经济发展水平、农业投入强度、政策支持及农业产业结构[10]-[14]等方面。4) 在效率水平计算上:基于投入和产出来构建评价指标体系。投入指标选择劳动力、耕地、机械、化肥、农膜等基本生产要素。产出包含期望产出和非期望产出,前者一般选取农业总产值、粮食总产量、农业碳汇量[15]等指标,后者则多选取农业碳排放、农业灰水足迹、农业面源污染[16][17]等指标。目前关于农业生态效率的研究仍存在以下拓展空间:1) 研究领域多侧重于宏观和微观,缺少对中观区域的研究。2) 期望产出中多以农业总产值为主,对粮食总产量的研究较为稀少。3) 在农业生态效率的计算上,侧重投入-产出比值法、数据包络分析法(DEA),缺少对非期望产出的超效率 SBM 模型的研究运用。

基于此,本研究以 2003~2024 年三北地区 13 个省级行政区为研究对象,选用基于非期望产出的超效率 SBM 模型测算各省份农业生态效率,并进一步运用 Tobit 模型分析其影响因素,以期为三北地区农业高质量可持续发展提供参考依据。

2. 理论分析与研究假说

2.1. 相关理论基础

2.1.1. 生态效率理论

生态效率理论最早由德国学者 Schaltegger 提出,核心思想是以最小资源消耗和环境损害代价,创造最大经济价值和社会福利,其逻辑遵循“经济产出最大化、资源投入最小化、环境负外部性最小化”三重均衡原则。农业生态效率是生态效率理论在农业领域的延伸与应用,将农业生产系统视为“要素投入-经济产出-生态损耗”的复合系统,其本质是衡量农业经济增长与生态环境损耗之间的脱钩程度。三北地区生态本底脆弱、干旱少水、土地沙化风险高,农业生产对化肥、农膜、机械动力等依赖度高,易形成“高投入、高污染、低生态效益”的粗放发展模式。引入生态效率理论,可从资源约束与环境约束双重视角,科学阐释三北地区农业生态效率时空差异的内在逻辑,为效率测算、时空分异分析提供理论支撑。

2.1.2. 农业可持续发展理论

农业可持续发展理论强调粮食安全保障、农业经济增长、生态环境保护和代际资源公平利用四个角度,拒绝以牺牲生态为代价来换取短期农业增收增产。三北地区作为我国北方重要生态安全屏障和国家级粮食生产功能区,兼具生态脆弱性、生产基础性和战略保障性三重特征。一方面要稳定粮食产能、保障农产品供给、带动农民增收;另一方面要防控农业碳排放、面源污染、水土流失与土地退化。可持续发展理论要求三北地区农业必须摒弃传统粗放式垦殖、过量施肥和机械化的发展路径,转向资源节约、环境友好和低碳低排的绿色生产模式。农业生态效率的提升,正是可持续发展理论在省域、跨区域层面的具体表现。

2.1.3. 区域要素禀赋理论

要素禀赋理论认为,区域自然资源、地理区位、气候条件、耕地质量、人力资本、基础设施等先天资源禀赋差异,会直接决定区域产业发展基础、生产结构与技术选择,进而形成发展水平的空间差异。三北地区横跨华北、东北、西北三大板块,区域要素禀赋悬殊:东北地区黑土肥沃、平原连片、人均耕地规模大,具备规模化绿色农业先天优势;华北地区城镇化与工业化挤占农业资源、耕地碎片化严重、化肥投入强度高,生态压力大;西北地区干旱缺水、植被稀疏、生态承载力弱,灌溉基础设施短板突出。先天

要素禀赋差异直接造成三省区农业投入与产出结构的不同，进而形成东北 > 西北 > 华北的农业生态效率格局，是本文时空分异特征形成的理论支撑。

2.1.4. 城乡融合与要素配置理论

城乡融合发展进程中，城镇化水平提升、农民收入增长会引发劳动力、资本、技术、土地等生产要素在城乡之间重新配置。农村劳动力向非农转移推动耕地流转与适度规模经营；城镇资本与现代农业技术向农村外溢，改善传统耕作模式；农民收入提升改变生产投入偏好与绿色生产意愿。要素配置结构的变迁，从经济社会层面深刻重塑农业生产方式、投入强度与污染排放水平，成为影响农业生态效率时空演变与省际差异的重要理论逻辑。

2.2. 研究假说

2.2.1. 时空分异假说 H1

2003~2024 年三北地区农业生态效率整体呈现波动上升的时序演化趋势；区域层面存在显著空间异质性，形成东北 > 西北 > 华北的稳定梯度分异格局；省域层面呈现明显空间集聚特征，高效率省份集聚固化、低效率省份路径依赖突出，区域极化与收敛特征并存。

2.2.2. 正向影响因素假说 H2

农民可支配收入、城镇化水平、农业劳动生产率对三北地区农业生态效率均具有显著正向促进作用。其中农民可支配收入通过优化农户生产决策、引导绿色投入和种植结构转型提升生态效率；城镇化通过城乡要素重构、耕地集约经营、技术外溢赋能农业绿色发展；农业劳动生产率通过优化要素配置、增加生态投入、推动生产方式转型正向驱动生态效率。

2.2.3. 负向影响因素假说 H3

农业受灾率、农业规模化生产能力、农业机械密度对三北地区农业生态效率均具有负向抑制作用。农业受灾率通过要素无效投入、灾后过量施肥、生态系统破坏降低生态效率；受气候、耕地、灌溉条件约束，三北地区农业规模化扩张易造成资源闲置与生态损耗，抑制效率提升；农业机械密度过高引发农机闲置、燃油浪费、农机结构失衡与农田生态破坏，对农业生态效率产生负向冲击。

3. 研究区域概况、指标体系与研究方法

3.1. 三北地区概况

中国三北地区包含华北地区的北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区，东北地区的辽宁省、吉林省、黑龙江省以及西北地区的陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区，总计 8 个省、2 个市、3 个自治区。三北地区总面积约占我国区域总面积的 56.69%，地区人口约占我国总人口的 26.21%。在 2024 年，三北地区的总 GDP 占全国 GDP 的 22.88% [18]，在我国经济发展历史上有着重要地位。三北地区生态环境保护、“三农”发展和国家战略地位都让三北地区在不同时期中有着不可小觑的重要性。

3.2. 指标体系与数据来源

3.2.1. 农业生态效率测算的投入 - 产出指标体系

参考学者们的研究成果[19][20]，结合三北地区农业生产具体情况，本文从投出、产出两个方面进行测算。在投入指标方面，选择劳动力、农作物、机械、化肥、农膜和土地投入。产出方面，选择粮食总产量和农业总产值作为期望产出的指标，选择农业碳排放作为非期望产出指标。农业碳排放的测算可具体

参考李波等[21]的研究结果,其采用6种碳排放源数量(化肥、农药、农膜、柴油、翻耕和农业灌溉)乘以相应的排放系数并进行加总。三北农业生态效率指标体系如表1所示。

Table 1. Input-output index system of agricultural eco-efficiency (Super-SBM model)

表 1. 农业生态效率投入-产出指标(超效率 SBM 模型)

指标类型	具体指标	指标说明
投入指标	农业劳动力	农业从业人员(万人)
	播种面积	农作物总播种面积(千公顷)
	机械动力	农业机械总动力(kW)
	化肥投入	化肥使用量(折纯, t)
	农膜投入	农膜使用量(t)
	土地投入	耕地面积(hm ²)
期望产出	农业总产值	农林牧渔业总产值(万元)
	粮食总产量	粮食总产量(t)
非期望产出	农业碳排放	化肥、农药、农膜、柴油、翻耕、灌溉 6 类碳排放源综合测算(t)

3.2.2. 农业生态效率的影响因素指标体系

本文采用 Tobit 模型来探究三北地区的农业生态效率影响因素。通过借鉴、参考相关学者的研究[4][19],并结合三北地区 13 个省级行政区数据的可获得性和可操作性,选取农民可支配收入(元)和城镇化率(%)作为经济条件,森林覆盖率(%)作为自然条件,劳动生产率、农业受灾率(%)、农业种植结构、农业机械密度和农业规模化生产能力作为农业条件。三北农业的生态效率影响因素指标体系如表 2 所示。

Table 2. Index system of influencing factors (Tobit model)

表 2. 影响因素指标(Tobit 模型)

变量维度	变量名称	单位	量化指标	预期符号
被解释变量	农业生态效率	eff	Super-SBM 模型测算值($0 \leq \text{eff} \leq 1$)	-
经济发展驱动	农民可支配收入	元/人	农村居民人均可支配收入	+
	城镇化水平	%	城镇常住人口占总人口比重	U 型
农业生产核心驱动	劳动生产率	万人-人 ⁻¹	一产总产值/农业从业人员	+
	农业受灾率	%	农作物受灾面积/总播种面积	-
	农业种植结构	%	粮食作物播种面积/总播种面积	-
	农业机械密度	Kw/hm ²	农机总动力/耕地面积	+
	农业规模化生产能力	hm ² /人	耕地面积/农业从业人员	+
生态环境约束	森林覆盖率	%	林地面积/区域国土总面积	+

3.2.3. 数据来源

考虑到数据的可获取性与连续性,本研究将地域范围限定为三北地区 13 个省级行政区,时间跨度为 2003~2024 年。本文所触及的所有研究数据均来自《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和各省级行政区统计年鉴及发展年鉴。少数缺失年份数据依照指标特征和数据趋向,通过插值法进行有效补充。

3.3. 研究方法

3.3.1. 非期望产出超效率 SBM 模型

超效率 SBM 模型不仅可高效解决在资源投入与产出过程中产生的松弛变量与非期望产出问题，同时还可处理效率值为 1 的评价单元比较问题[22]。因此，本文选取该模型量化洞庭湖平原耕地利用生态效率，具体计算公式可参考文献[23]。

3.3.2. Dagum 基尼系数

Dagum 基尼系数分解将总体差异分解为组内差异 Gw、组间差异 Gb、超变密度 Gt，精准识别空间差异来源。

3.3.3. Tobit 模型

Tobit 模型，亦称样本模型、受限因变量模型，最早由 Tobin 于 1958 年提出。该模型适用于因变量取值受到某种限制的情形，即因变量虽为连续变量，但其观测值存在下限或上限截断，具体表现为因变量 y 在某一临界值处取值为零(或某一常数)，而超过该临界值后则为正且连续分布的情况。基于生态效率具有动态性特征，本研究运用面板 Tobit 回归分析方法。被解释变量为通过超效 SBM 模型计算得出的生态效率值，该变量属于受限变量，具体计算公式可查阅相关文献[24]。

4. 三北地区农业生态的时空演变分析

4.1. 三北地区农业生态的时序演变分析

运用 MatlabR2021b 软件对 2003~2024 年三北地区 13 个省级行政区的农业生态效率进行测算，发现三北地区农业生态效率整体呈波动上升趋势，效率均值由 2003 年的 1.0697 提升至 2024 年的 1.1184，长期处于 DEA 有效状态，表明区域农业绿色发展水平持续提升，结果如表 3 所示。

Table 3. Temporal evolution results of agricultural eco-efficiency in the Three-North Region (2003~2024)

表 3. 三北地区农业生态效率时序演变结果：2003~2024

排名	区域	省级行政区	2003	2024	平均	变动值	变动幅度
1	华北	山西省	0.5909	1.1145	0.794	0.5236	-7.22%
2	华北	河北省	0.6909	1.0743	0.8805	0.3834	9.28%
3	东北	黑龙江	1.0124	1.3039	1.2692	0.2915	55.49%
4	华北	天津市	1.3206	1.4431	1.2142	0.1225	88.61%
5	西北	甘肃省	1.025	1.0992	0.8896	0.0742	3.93%
6	西北	陕西省	1.1028	1.1774	1.1929	0.0746	6.16%
7	东北	辽宁省	1.1443	1.2148	1.131	0.0705	-18.33%
8	华北	内蒙古	1.0435	1.0845	1.0173	0.041	28.79%
9	西北	新疆	1.1707	1.13	1.1077	-0.0407	6.76%%
10	西北	青海省	1.2775	1.2063	1.1723	-0.0712	7.24%
11	华北	北京市	1.1469	1.0641	1.1704	-0.0828	-5.57%
12	东北	吉林省	1.3121	1.0716	1.1021	-0.2405	-48.05%
13	西北	宁夏	1.0686	0.5551	1.0447	-0.5135	-3.48%

续表

1	华北地区	0.9586	1.1561	1.0153	0.1975	20.6%
2	东北地区	1.1563	1.1968	1.1674	0.0405	3.5%
3	西北地区	1.1289	1.0336	1.0814	-0.0953	-8.44%
	三北地区	1.0697	1.1184	1.0758	0.0487	4.55%

分区域来看, 东北地区的效率均值最高, 达 1.24, 黑龙江、辽宁、吉林稳居高效率区间, 黑土资源优势与绿色生产协同性突出; 西北地区的效率均值为 1.05, 陕西、宁夏、青海表现稳健, 甘肃波动较大, 呈“先降后升”特征; 而华北地区的效率均值最低, 仅 0.91, 山西长期处于低效率区间, 河北、内蒙古波动明显。

4.2. 农业生态效率空间分异与集聚特征

2003~2024年, 三北地区农业生态效率整体呈小幅度增长, 均值由 1.0697 升至 1.1184, 变动值 0.0487, 增幅为 4.55%, 三北地区农业绿色发展水平逐步提升。

从三大区域看, 空间分异显著: 华北地区提升幅度最大, 效率由 0.9586 升至 1.1561, 涨幅高达 20.60%, 成为核心增长极; 东北地区小幅增长, 效率由 1.1563 升至 1.1968, 增幅为 3.50%, 整体保持高位平稳运行; 而西北地区整体下降, 效率由 1.1289 下降至 1.0336, 降幅为 8.44%, 是唯一出现衰退的区域。从省级行政区来看, 省际差异明显: 山西(0.5909~1.1145)、河北(0.6909~1.0743)、黑龙江(1.0124~1.2692)增幅靠前, 分别增长 88.61%、55.49%、28.79%, 低效率省份实现快速赶超; 宁夏(1.0686~0.5551)、吉林(1.3121~1.1021)降幅显著, 分别下降 48.05%、18.33%, 效率大幅回落; 北京(1.1469~1.0641)、青海(1.2775~1.2063)、新疆(1.1707~1.13)呈小幅下降, 保持小幅增长。整体上呈现出华北赶超、东北稳健、西北下滑的态势, 低基数高增长和高基数分化的时空分异格局。

4.3. 基于 Dagum 基尼系数的空间差异分解

如表 4 所示, 从区域组内差异特征来看, 华北地区整体基尼系数处于高位, 是三北地区内部差异

Table 4. Decomposition results of Dagum Gini coefficient

表 4. Dagum 基尼系数差异分解结果

年份	组内基尼系数			组间基尼系数					
	东北	华北	西北	东北&华北	东北&西北	华北&东北	华北&西北	西北&东北	西北&华北
2003	0.058	0.16	0.043	0.135	0.055	0.135	0.128	0.055	0.128
2004	0.034	0.163	0.056	0.13	0.05	0.13	0.14	0.05	0.14
2005	0.033	0.169	0.035	0.129	0.038	0.129	0.131	0.038	0.131
2006	0.029	0.159	0.035	0.123	0.035	0.123	0.129	0.035	0.129
2007	0.018	0.092	0.036	0.071	0.031	0.071	0.081	0.031	0.081
2008	0.003	0.08	0.039	0.056	0.031	0.056	0.069	0.031	0.069
2009	0.013	0.038	0.028	0.03	0.025	0.03	0.035	0.025	0.035
2010	0.018	0.04	0.097	0.035	0.069	0.035	0.076	0.069	0.076
2011	0.03	0.034	0.037	0.039	0.037	0.039	0.037	0.037	0.037
2012	0.041	0.033	0.035	0.046	0.044	0.046	0.036	0.044	0.036

续表

2013	0.058	0.038	0.035	0.058	0.056	0.058	0.039	0.056	0.039
2014	0.07	0.032	0.123	0.064	0.116	0.064	0.089	0.116	0.089
2015	0.067	0.037	0.133	0.069	0.121	0.069	0.096	0.121	0.096
2016	0.062	0.087	0.129	0.103	0.121	0.103	0.116	0.121	0.116
2017	0.071	0.138	0.119	0.15	0.123	0.15	0.14	0.123	0.14
2018	0.086	0.162	0.101	0.16	0.121	0.16	0.147	0.121	0.147
2019	0.092	0.154	0.039	0.164	0.088	0.164	0.123	0.088	0.123
2020	0.04	0.139	0.036	0.134	0.077	0.134	0.108	0.077	0.108
2021	0.062	0.172	0.039	0.155	0.065	0.155	0.138	0.065	0.138
2022	0.053	0.173	0.044	0.157	0.054	0.157	0.148	0.054	0.148
2023	0.054	0.184	0.045	0.157	0.054	0.157	0.152	0.054	0.152
2024	0.043	0.055	0.107	0.062	0.093	0.062	0.097	0.093	0.097

最大的地区。2003~2009年由0.16持续下降到0.038，2009年后波动上升至0.184，而2024年则又大幅度下降至0.055，说明华北地区长期内部发展不平衡问题突出，后期分化程度加剧；东北地区组内差异呈现出先降后升的趋势，由2003年的0.058迅速下降到0.003，区域内部发展均衡。2008年后逐步上升到2019年峰值0.092，随后2019~2024年回落并稳定在中等水平，区域差异前期缩小，后期逐步扩大；西北地区组内基尼系数波动较大，阶段性特征明显。2003~2009年整体偏低且稳定，内部差异小。2010~2018年不断波动提升，内部差距短期迅速扩大。2019年后，除2024年触底反弹外，多数年份回归低位。总体来看，以2009年为拐点，2003~2009年三北区域组内差异逐步减小，2009~2024年间，华北、东北内部差异提高，西北地区反复波动，存在发展失衡问题。

从区域组间差异来看，东北&华北、华北&东北，东北&西北、西北&东北，华北&西北、西北&华北呈现出组间差异的对称特征。在东北与华北中，其组间基尼系数与华北地区组内高度相似，以2009年为分界线，前低后高。在东北与西北中，2010和2019年为分界点，呈现出“低-高-低”的特征，整体水平为三北地区最低水平；在华北与西北中，组间基尼系数整体节奏与前两组相似，2003~2009和2024年为降低年份。

4.4. 驱动机制分析

运用Stata软件，采用Tobit模型进行估计，模型整体拟合效果良好，似然比检验 $\chi^2 = 119.145$ 且在1%水平下显著，各变量对三北地区农业生态效率的影响方向与作用强度存在明显差异。回归结果如表5所示：三北地区农业生态效率的正向影响因素为：劳动生产率、城镇化水平、农业机械化密度、森林覆盖率；负向制约因素为：农民可支配收入、农业受灾率、农业种植结构；农业规模化未显著生效，绿色转型在一定程度上滞后于规模扩张。

农民可支配收入对农业生态效率呈现显著负向影响，回归系数在1%水平下显著为负，与理论预期相反。这表明在三北地区生态脆弱、农业生产方式相对粗放的现实情况下，农村居民收入增长尚未有效转化为绿色生产力。收入的提升更多驱动农户以扩大种植规模、增加化肥农药投入等传统方式追求产量增长，而非采用节水灌溉、低化肥等生态友好型技术，由此加剧资源消耗与面源污染，从而对农业生态效率形成抑制作用。

Table 5. Tobit regression results of agricultural eco-efficiency in the three-north region
表 5. 三北地区农业生态效率 Tobit 回归结果

变量	系数	Z 值	P 值
农民可支配收入	-0.000***	-6.73	0.000
城镇化水平	0.004***	3.455	0.001
劳动生产率	0.043***	5.884	0.000
农业受灾率	-0.000***	-3.087	0.002
农业种植结构	-0.003***	-3.781	0.000
农业机械密度	0.035***	2.983	0.003
农业规模化生产能力	0.004	1.524	0.127
森林覆盖率	0.005***	5.492	0.000

注：* $P < 0.1$ ，** $P < 0.05$ ，*** $P < 0.01$ 。

通过 1% 显著性水平检验，城镇化水平对农业生态效率具有显著正向驱动作用。城镇化率的持续增长推动农村剩余劳动力向非农产业和城镇地区转移，有效缓解农业劳动力过剩与配置低效问题，推动土地流转与规模化经营，缓解耕地细碎化带来的资源浪费。同时，城镇地区的资本、技术与管理经验向农村地区溢出，为农业绿色生产提供装备、技术与资金支撑，在整体上促进农业生产方式向集约化、高效化转型，提升农业生态效率。

劳动生产率对农业生态效率的正向驱动作用最强，回归系数为 0.043 且在 1% 水平高度显著。劳动生产率的提升反映出农业生产要素的配置优化、技术进步的加快与生产管理更加科学，能够有效降低单位产出的资源投入与生态损耗，减少无效用水、化肥过量施用等粗放行为，实现经济效益与生态效益协同提升，是三北地区农业生态效率提升的主要增长极。

农业受灾率对农业生态效率表现为显著负向影响，在 1% 水平下显著为负。三北地区以温带大陆性气候为主，干旱少雨，干旱、风沙、低温冻害等灾害频发，农业自然灾害不仅直接降低农业产出水平，还间接迫使农户为弥补损失不得不加大农资投入，进一步加剧生态压力，形成“受灾 - 减产 - 增投 - 污染”的恶性负向循环，对农业生态效率形成明显压制。

农业种植结构对农业生态效率存在显著负向冲击，回归系数在 1% 水平下显著为负。三北地区以粮食作物为主导的种植结构占比偏高，而粮食作物普遍具有耗水量大、化肥农药投入强度高特征，对水土资源与农田生态系统压力较大。同时，种植结构单一化、高碳排放持续投入特征明显，加剧区域生态压力，成为制约农业生态效率提升的重要结构性因素。

农业机械密度对农业生态效率具有显著正向作用，在 1% 水平下显著为正。农业机械替代传统人工劳作，提升耕作、播种、施肥、收割等农业生产全环节的精准度与作业效率，减少因粗放式生产而带来的资源浪费。同时，农机有利于秸秆还田、精准施肥等绿色技术落地，推动农业生产向规模化、集约化转变，对农业生态效率的提升形成稳定支撑。

农业规模化生产能力对农业生态效率影响为正但不显著，且未通过 10% 显著性检验。尽管三北地区具备规模经营的相关条件，但当前规模化仍以耕地面积的简单粗暴扩张为主，同时，经营主体绿色生产能力不足、技术装备配套不完善、社会化服务体系不健全等问题进一步导致资源节约与环境友好型的集约规模效应并未充分显现，因此未对生态效率产生显著推动作用。

森林覆盖率对农业生态效率呈现显著正向影响，在 1% 水平下显著为正。森林作为三北地区重要生态屏

障,具备防风固沙、涵养水源、保持水土、改善农田小气候等多项关键功能,能够有效降低农业生产的自然风险与灾害损失,提升农田系统稳定性与资源利用效率,为农业生态效率的持续提升提供重要生态保障。

5. 结论与政策建议

5.1. 主要结论

在时序特征上,从2003年的1.0697波动上升至2024年的1.1184,整体保持DEA有效,绿色发展水平持续改善;在空间格局上,呈现东北>西北>华北的稳定梯度格局,省际差异显著,华北增长最快,西北小幅下滑,东北高位稳定;在差异来源上,空间差异以组间差异为主,区域间发展落差大于区域内部差距,区域协调发展任务任重道远;在驱动机制上,劳动生产率、城镇化水平、农业机械密度、农业规模化生产能力和森林覆盖率为核心正向动力;农民可支配收入、农业受灾率、农业种植结构为主要负向约束;农业规模化生产能力未显著生效,绿色转型滞后于规模扩张。

5.2. 政策建议

5.2.1. 提升正向驱动,精准放大显著促进效应

开展职业农民技能培训,推广良种良法、精准施肥与节水灌溉技术。引导劳动力有序转移,优化人地配置,减少低效投入,以农业生产效率提升带动农业生态效率改善;依托城镇化推动城乡要素优化配置,推进以县域为核心的城镇化,促进土地流转与集中规模经营,缓解耕地碎片化。引导城镇资本、技术和装备向农村下沉,提升农业集约化与绿色化水平;加快农业机械绿色化升级,优化农机购置补贴,重点支持秸秆还田、残膜回收等绿色机械,以机械化替代粗放投入,降低资源消耗与污染排放;持续提升森林与生态覆被率,结合三北防护林建设,扩大林草面积,增强防风固沙、水源涵养能力,以生态系统稳定支撑农业可持续发展。

5.2.2. 降低负向约束:靶向抑制显著阻碍因素

降低农业受灾率,构建旱灾、风沙、冻害全链条预警防控体系,加强水利设施与防风固沙工程投入,减少因灾害导致的农资过量投入与生态压力;优化农业种植结构,适度降低高耗水、高肥耗的粮食作物比例,增加耐旱、绿肥作物,推动种植结构多元化,减轻农田生态压力;引导农民收入向绿色生产转化,通过建立绿色生产补贴、生态补偿与优质农产品溢价机制,鼓励有机肥、生物防治等绿色技术应用,扭转“收入越高、投入越粗放”的恶性循环;

推进高质量适度规模,严查严打干旱区、丘陵区的无序扩张种植,将节水、减排、土壤保护纳入规模经营门槛,推动规模扩张与绿色转型同步推动。

5.2.3. 分区域差异化政策组合

东北地区应以提升劳动生产率和保护黑土地为核心,推广轮作休耕、低碳农机,巩固高效率优势,缩小省际分化;华北地区应以城镇化、土地集约和结构调整为抓手,重点提升山西、河北绿色生产能力,有效降低内部差距,实现低位快速提升;西北地区应以节水农业、森林覆盖率和防灾减灾为核心,严控污染与无序开垦,走节水高效、生态友好型农业路径。

此外,应建立三北农业绿色发展协同机制,重点缩小组间差异,对低效率省份实施生态转移支付与技术定点帮扶,推动区域均衡发展。

基金项目

青海大学2025年研究生科研和实践创新项目(2025-GMKY-30);青海省“昆仑英才·高端创新创业

人才”培养杰出人才项目(k9924063); 青海省哲学社会科学重大“揭榜挂帅”规划项目(25JB002)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 马艳. 基于两阶段 Super-NSBM 模型的农业生态效率及影响因素研究——以长江经济带为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 883-894.
- [4] 梁伟红, 邓春梅, 叶露, 刘燕群, 王丹阳, 李玉萍. 海南省农业生态效率时空特征及影响因素研究[J]. 热带作物学报, 2025, 46(1): 236-245.
- [5] 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.
- [6] 杨昕蕾, 凡启兵. 黄河流域农业生态效率测度及影响因素分析[J]. 湖南农业科学, 2022(11): 96-100+106.
- [7] 王丽娜. 中国农业绿色生产效率的测度及其影响因素分析[J]. 技术经济与管理研究, 2022(7): 37-41.
- [8] 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.
- [9] 陈申奥, 景晓栋, 陈洁. 生态价值视角下黄河流域农业生态效率时空演变及提升路径研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35(5): 197-203.
- [10] 邓远建, 超博. 灰水足迹视角下我国省域农业生态效率及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4879-4894.
- [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.
- [12] 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.
- [13] 祝宏辉, 杜美玲, 尹小君. 节水农业技术对绿洲农业生态效率的影响: 促进还是抑制?——以新疆玛纳斯河流域绿洲农业为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 34-41.
- [14] 杨国华, 段永惠, 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.
- [15] 刘婷婷, 秦会艳, 黄颖利. 粮食主产区农业生态效率时空演变及驱动因素研究——基于三大流域视角[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(11): 2513-2524.
- [16] 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.
- [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] 刘涛. 中国三北地区农业农村现代化发展评价研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
- [19] 刘继为, 姜安隆. “双碳”目标下河北省农业生态效率时空演进特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 792-803.
- [20] 陶声婷, 景晓栋, 王雨璇. 生态价值视角下长江经济带农业绿色生态效率时空演变及其影响因素研究[J]. 江西农业学报, 2024, 36(7): 108-116.
- [21] 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.
- [22] 文高辉, 刘蒙罢, 胡贤辉, 赵京. 洞庭湖平原耕地利用生态效率空间相关性与空间效应[J]. 地理科学, 2022, 42(6): 1102-1112.
- [23] Tone, K. (2002) A Slacks-Based Measure of Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **143**, 32-41. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(01\)00324-1](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(01)00324-1)
- [24] Tobin, J. (1958) Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables. *Econometrica*, **26**, 24-36. <https://doi.org/10.2307/1907382>