农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

碳排放约束下江苏粮食绿色生产效率动态变化与转型路径

李天祥, 廖远一, 臧星月

引用本文:
李天祥, 廖远一, 臧星月. 碳排放约束下江苏粮食绿色生产效率动态变化与转型路径[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1505-1516.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0413

李天祥, 廖远一, 臧星月. 碳排放约束下江苏粮食绿色生产效率动态变化与转型路径[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1505-1516.

LI T X, LIAO Y Y, ZANG X Y. Dynamic evolution and transformation pathways of grain green production efficiency under carbon emission constraints: a case study of Jiangsu Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1505-1516.

开放科学 OSID

碳排放约束下江苏粮食绿色生产效率动态变化与转型路径

李天祥[1,2], 廖远一[3], 臧星月[1*]

(1.南京农业大学经济管理学院, 南京 210095; 2.江苏省高校哲学社会科学实验室-南京农业大学大食物安全治理与政策智能实验室, 南京 210095; 3.南京农业大学密西根学院, 南京 210095)

摘 要: 为了探究碳排放约束下江苏粮食绿色生产效率的演进态势与转型路径, 本研究采用超效率数据包络分析模型结合要素生产率指数(SBM-ML)等方法, 对江苏13个地级市2000—2023年粮食生产绿色生产效率进行测算并分析其时序演变及空间差异, 在此基础上运用双向固定效应模型进一步量化分析了江苏粮食绿色生产效率的驱动因素。结果表明: 江苏粮食绿色全要素生产率(GTFP)整体稳步提升, 由2000年的0.99升至2023年的1.34。但区域间存在进步快慢不一、效率分化明显的结构性差异, 苏中表现最优, GTFP均值达1.19; 苏北进步显著, 由1.02升至1.34, 但波动较大; 苏南虽技术进步强劲, 技术进步(TC)最高达1.62, 但效率提升存在明显短板, 技术效率(EC)均值仅为0.86。在影响因素中, 粮食单产为最主要的正向驱动, 农业规模经营则与GTFP呈倒"U"形关系, 存在最优区间, 非农产业发展则显著抑制GTFP。研究建议在政策上应聚焦提升技术效率、优化规模结构、促进城乡要素双向流动、缓解非农产业虹吸效应, 并因地制宜推进差异化土地制度与农业服务体系, 夯实绿色转型基础, 以实现粮食安全与低碳目标协同发展。

关键词: 碳排放约束; 粮食绿色生产效率; 驱动因素; 粮食安全; 绿色全要素生产率

中图分类号: F327 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-6819(2025)06-1505-12 **doi**: 10.13254/j.jare.2025.0413

Dynamic evolution and transformation pathways of grain green production efficiency under carbon emission constraints: a case study of Jiangsu Province

LI Tianxiang[1,2], LIAO Yuanyi[3], ZANG Xingyue[1*]

(1.College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095 ,China; 2.The Philosophy and Social Science Laboratories of Jiangsu Higher Education Institutions, Intelligent Laboratory for Food Security Governance and Policy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3.MSU Institute, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: This study tracked the evolution of grain-sector green efficiency in Jiangsu Province (2000—2023) under carbon-emission constraints. Using a super-efficiency SBM-ML model, it measured temporal trends and spatial disparities across 13 prefecture-level cities, and applied a two-way fixed-effects model to identify key driving factors. The results showed that green total factor productivity (GTFP) in Jiangsu rose steadily from 0.99 in 2000 to 1.34 in 2023. Central Jiangsu performed best with an average of 1.19. Northern Jiangsu improved from 1.02 to 1.34 but showed high volatility. Southern Jiangsu, though achieving a peak technological progress of 1.62, remained constrained by low efficiency, with an average technical efficiency of only 0.86. Grain yield acted as a significant positive driver, farm scale had an inverted U-shaped effect, indicating an optimal moderate size, and non-agricultural expansion suppressed green efficiency. These findings suggest that policy should focus on enhancing technical efficiency, defining optimal farm scale thresholds, facilitating urban-rural factor mobility, restraining the siphoning effects of non-agricultural sectors, and implementing region-specific land and service policies to achieve synergies between grain security and low-carbon goal.

Keywords: carbon emission constraint; green production efficiency of grain; driving factor; food security; green total factor productivity

收稿日期: 2025-05-04 **录用日期**: 2025-07-30

作者简介: 李天祥(1989—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向为农业经济、粮食安全。E-mail: txl0428@njau.edu.cn

***通信作者**: 臧星月 E-mail: zangxingyue@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(72442023); 国家社会科学基金重大项目(23&ZD122)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(72442023); National Social Science Foundation of China(23&ZD122)

碳排与碳汇是粮食生产的双重属性，其由粮食生产的自然属性决定[1]。传统的粗放式粮食生产模式，注重高产量，但却以牺牲资源环境为代价，导致粮食生产存在一定的风险，更有学者指出充分考虑环境影响后我国粮食增产空间几乎接近“天花板”[2]。在此背景下，党的二十大报告强调，要“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”，健全绿色低碳发展机制。2022年农业农村部印发的《农业生产“三品一标”提升行动有关专项实施方案的通知》中也明确提出，要“夯实粮食供给保障能力，提高种植业绿色发展水平，通过合理减少化肥农药用量和提高机械化生产水平等措施，集成一批全程绿色高效标准化生产模式”。这意味着，推动粮食生产的绿色转型已成为实现农业可持续发展的重要举措。而碳排放约束作为农业绿色发展的关键性限制因素，其内涵包括对碳排放总量等方面的系统管控，其本质在于推动农业从“资源高投入、高排放”的传统路径转向“低碳高效、绿色增产”的可持续路径。特别是在粮食生产过程中，碳排放主要来源于化肥施用、农机使用、灌溉、农膜、农药等关键环节，其与绿色生产效率之间存在显著互动机制：一方面，碳排放的约束推动技术创新与管理优化，倒逼农业实现节能减排与要素重构；另一方面，若缺乏有效管控，过度碳排放将抬高环境成本，削弱生产效率的可持续性。因此，厘清碳排放约束下的粮食生产效率测度路径及其在粮食生产系统中的作用机制，对于提升绿色生产效率具有重要意义。

江苏省是国家认定的13个粮食主产区之一，作为南方经济发达地区中粮食产能较高的省份，其粮食产量连续多年稳定在3 500万t以上，用占全国1.1%的国土面积、占全国3.2%的耕地，生产了全国5.5%的粮食，承载了全国约6%的人口[3]，取得了“粮食总量平衡、口粮基本自给、略有盈余调出”的显著业绩，为保障国家粮食安全提供了坚实支撑与示范引领。然而，在肯定江苏粮食安全取得成就的同时，也应当清醒地看到，在当前复杂多变的内外部环境下，江苏粮食安全远未达到“高枕无忧”，依然面临着多重压力和挑战。一方面，在供给端，江苏在追求更高产量的同时，伴随着更多的资源消耗和环境污染问题，从长期可持续粮食安全的视角来看，亟需采取减排增效的生产方式，以实现资源的高效利用和环境影响的最小化。另一方面，在需求端，随着省内居民人均GDP超过16万元，消费结构持续升级，食物消费需求已经不再停留在数量满足上，多元化、品质化、绿色化的食物消费渐成新趋势。这意味着，不论是供给端还是需求端，对江苏粮食的绿色高质量发展都提出了更高要求。加强对江苏粮食绿色生产问题的探究，不仅是破解江苏乃至全国粮食生产资源、环境、经济约束的现实需要，而且其经验探索也可为全国粮食生产绿色转型、实现提质增效提供有益参考和启示。

当前，学术界围绕江苏粮食安全与农业绿色生产问题开展了大量研究。朱晶等[4]通过分解2004—2013年粮食增产贡献因素，发现单产提升是主要动力，但其年度波动性显著，而播种面积和种植结构调整提供了更稳定的支撑。金涛等[5]研究发现耕地利用的集约化与复种指数优化是苏北地区粮食增产的关键，但南部地区因耕地减少和种植结构非粮化导致生产萎缩，凸显了区域分化问题[6]。与此同时，资源禀赋差异显著影响生产方式转型，比如苏北较高的耕地依赖性[7]与苏南因机械化替代劳动力带来的效率提升[8]，共同塑造了江苏粮食生产的空间格局。然而，江苏在粮食持续增产过程中也暴露出一些值得关注的问题。例如，化肥过量施用现象普遍，小麦和稻谷的过量施用率分别达14.13%和44.15%，劳动力非农转移与土地租入比例扩大进一步加剧了环境压力[9]。王迪等[10]测度了2013—2015年非点源污染约束下的农业生产效率，发现南京、苏州、扬州、徐州等市逐年提高，且苏南地区可通过结构优化进一步减排，苏中、苏北地区则须推进农业清洁生产以降低非点源污染物排放强度。曹明霞等[11]运用数据包络分析模型结合指数和灰色关联分析，揭示2000—2016年江苏省农业技术进步是全要素生产率增长的主要驱动力，但技术效率略显不足。吉小燕等[12]基于非参数Malmquist指数法实证表明，技术进步与效率变化共存，且技术效率对区域农业生产均有显著促进作用，而技术进步在苏中和苏北的作用更为突出。在转型路径探索中，学者们强调多维政策协同的必要性。周莉雅等[13]建议从耕地保护、科技赋能和新型经营体系入手，破解资源约束与加工短板。徐建玲等[14]基于系统动力学模型模拟的结果表明，单纯依赖耕地保护难以持续保障自给率，科技驱动的单产提升才是根本。武舜臣等[7]指出应对生产区位北移带来的耕地依赖强化问题，需平衡经济驱动与禀赋约束，通过技术升级拓展粮源供给渠道。

总体上，既有研究揭示了江苏粮食生产在产能提升、环境代价与区域分化等方面的特征，为优化江苏粮食安全政策设计与实现路径提供了重要支撑，但也

存在如下三方面不足之处：一是碳排放约束视角缺失。尽管学者已关注到江苏粮食生产的环境代价，但研究多聚焦过量化肥和非点源污染等单一污染指标，但鲜有研究从碳排放系统性约束出发，对江苏省粮食或农业生产碳排放约束与生产效率之间的关系进行量化分析；二是研究对象层级较为单一。现有研究大多针对农业生产效率，而对粮食生产的效率与绿色化路径探讨相对不足，对江苏粮食安全政策制定的针对性支持有限；三是区域差异与分工探讨有待深化。在转型路径的探索中，针对苏南、苏中、苏北不同区域的差异性需求及其在粮食绿色生产分工方面的研究仍有进一步深化的空间。鉴于此，本研究将立足江苏粮食生产的绿色效率问题，从绿色全要素生产率的动态演化的角度出发，运用超效率的SBM-ML模型，量化江苏粮食生产绿色效率，并结合计量模型探讨区域间绿色生产效率的影响因素，以期在优化区域间粮食生产效率、提升技术进步与资源配置效率方面提供实证依据，为江苏及其他粮食主产区实现碳排放约束下的绿色转型提供启示。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

江苏自古以来就是我国重要的“鱼米之乡”，耕作历史悠久，长期保持较高的粮食产能水平。江苏始终坚持粮食生产与经济繁荣协调发展，推动省内粮食生产维持高位运行且不降反增，肩负起为国家生产粮食的重任[15]。2024年全省粮食产量达到3 810.1万t，占全国总产量约5.5%，已连续10年稳定在3 500万t以上[3]。省域内部形成了相对稳定的“南低、中稳、北高”格局：苏北作为主要产区，产量占比已由2000年前后的不足四成提升至2023年的65.8%，增幅显著；苏中地区维持在850万t左右，占比略有下降；苏南地区因耕地减少和非粮化等因素，粮食产量持续萎缩，占比已降至11%。目前，全省基本形成苏南、苏中、苏北产量大致为1∶3∶6的结构性布局。

1.2　江苏粮食绿色全要素生产率的测度

1.2.1　测度方法

本研究将主要采用Tone[16]构建的超效率数据包络分析模型（SBM）并结合要素生产率指数模型（ML）测算江苏粮食绿色全要素生产率（GTFP）。相对于以往的DEA模型，该模型的优势之处主要体现在四个方面：一是解决了径向DEA会高估决策单元（DMU）效率值的问题；二是解决了角度DEA须忽视投入或产出的变动情况，导致结果并不符合客观实际的问题[17]；三是解决了传统SBM模型效率值小于1的地区被视为无效的状态，难以对有效率的DMU进行比较的问题[18]；四是解决了传统SBM模型无法解决生产中产生的非期望产出的计算问题[19]。与此同时，考虑到Tone并没有给出带有非期望产出超效率SBM模型公式，本研究参考成刚[20]给出的计算方法，使用带有非期望产出的超效率SBM模型评估DMU（x_0，y_0，z_0）。而超效率SBM模型测算出来的粮食生产效率值（EFF）仅对单一特定时间节点的效率值进行评估，其与ML指数结合可计算出动态粮食GTFP，Chung等[21]根据产出导向的方向距离函数在Malmquist指数的基础上推导出带有非期望产出的Malmquist-Luenberger指数。本研究参考成刚[20]研究直接使用非期望产出超效率SBM计算的效率值来计算ML指数。

1.2.2　指标选取与数据说明

（1）粮食生产投入产出指标。根据生产函数理论，参考前人研究[22-24]，本研究选取粮食作物播种面积、粮食生产劳动力、粮食生产有效灌溉面积、粮食生产机械总动力、粮食生产化肥使用量作为投入指标，粮食产量为期望产出指标，粮食生产所产生的碳排放为非期望产出指标。以2000—2023年江苏全省及13个地级市的面板数据作为研究对象，投入产出数据来源于《江苏统计年鉴》及各地级市统计年鉴等。针对农业生产柴油等指标的个别缺失值，在预实验阶段，本研究比较了线性插值、回归填补和热补法等多种方法的填补效果，结果显示线性插值法在平均绝对误差和均方误差指标上均表现更优，且能最大程度维持粮食生产指标时间序列的平滑性。进一步对比填补前后回归模型参数的稳定性与拟合优度发现，采用线性插值法时模型系数波动最小、调整R^2值最高，表明该方法在保持样本内外一致性方面优势明显。因此，本研究采用该方法对缺失值进行了补全，且对个别异常值进行了缩尾处理。最后，为保证各个指标与粮食产出统计口径一致，各个指标均根据相应公式进行了计算，具体计算方式和描述性统计结果如表1所示。

（2）粮食生产碳排放的测算。通过对现有文献的分析[25-26]和数据的可获得性，本研究将江苏各地区粮食生产过程中的碳排放来源概括为6个方面：塑料薄膜使用，化肥施用，农药使用，农用柴油燃烧，耕地翻耕引发的土壤碳释放和灌溉过程中因电能消耗所引致的间接碳排放。基于此，粮食生产碳排放的测算如公式（1）所示：

表1 全要素框架下的粮食生产效率投入产出指标体系

Table 1 Input-output indicator system of grain production efficiency under a GTFP framework

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	三级指标 Tertiary indicator	单位 Unit	计算方法 Calculation method	均值 Mean	标准差 SD
投入	土地	粮食作物播种面积	10^3 hm^2	—	406.67	246.91
	劳动力	粮食生产从业人数	万人	第一产业从业人员×A×B	26.92	18.54
	资本	粮食生产机械总动力	10^3 kW	农业机械总动力×A	316.86	191.44
		水资源投入	10^3 hm^2	有效灌溉面积×A	0.57	0.12
		粮食生产化肥使用量(折纯)	t	农业化肥使用量(折纯)×A	16.70×10^4	12.25×10^4
		粮食生产塑料薄膜使用量	t	农业塑料薄膜使用量×A	5 027.24	5 128.95
		粮食生产柴油使用量	t	农业生产柴油使用量×A	50 788.32	41 341.01
		粮食生产农药使用量	t	农业生产农药使用量×A	4 535.05	2 740.32
产出	期望产出	粮食作物总产量	10^4 t	—	270.09	165.13
	非期望产出	粮食生产碳排放	10^4 t	—	23.40	16.30

注:A=粮食作物播种面积/农作物播种面积;B=农业生产总值/农林牧渔总产值

Note: A = Grain crop sown area / Total crop sown area; B = Agricultural output value / Primary industry output value.

$$E=\sum E_i=\sum T_i\times\delta \quad (1)$$

式中:E为粮食生产中的碳排放总量,t(以C计);E_i为i类碳源的排放量,t(以C计);T_i为i类碳排放源的量,t(以C计);δ为各碳排放源的碳排放系数,kg·kg^{-1}或kg·hm^{-2}。参考前人研究[27-31],粮食生产中碳排放系数具体如下:塑料薄膜为5.180 0 kg·kg^{-1}(以C计);化肥为0.895 6 kg·kg^{-1}(以C计);农药为4.934 1 kg·kg^{-1}(以C计);柴油燃烧为0.592 7 kg·kg^{-1}(以C计);耕地翻耕引发的土壤碳释放为3.126 0 kg·hm^{-2}(以C计);灌溉过程中由于电力消耗产生的间接碳排放为20.476 0 kg·hm^{-2}(以C计)。为确保估算结果的科学性与稳健性,本研究对所列的碳排放系数在已有文献范围内进行了敏感性校验(±10%扰动模拟),结果显示绿色全要素生产率值变化幅度小于5%,证明模型结果具有较强的稳健性。再者,参考前人研究[25-26],本研究在SBM-ML模型中未赋予碳排放显式权重,而是作为非期望产出由模型自身进行方向性距离判别,通过线性规划对不同类型变量进行统一效率度量,能够更真实反映各类碳排源的绝对贡献,以避免主观设定带来的偏差。

为提升江苏粮食生产碳排放核算的科学性,本研究测算出2023年全省粮食生产碳排放总量约为2.97×10^6 t(以C计),单位产量碳排放强度为0.077 t·t^{-1}(以C计),单位面积碳排放强度为0.544 t·hm^{-2}(以C计)。为验证结果的合理性,本研究从三个维度与权威文献进行对比分析:从碳排放总量角度看,许萍萍等[32]测算2020年江苏农田生态系统碳排放为4.60×10^6 t,而本研究聚焦粮食子部门,并未纳入经济作物、林牧渔等环节,且继承了"十三五"以来农田减排趋势,核算范围差异与排放下降趋势共同解释了总量差异,表明本研究测算结果具备统计合理性。从单位产量角度看,Han等[33]的研究表明,2005—2019年江苏稻谷生产的碳排放强度均值约为0.079 t·t^{-1}(以C计)。考虑到2023年江苏粮食作物中晚粳稻仍占主导,且稻谷碳排放强度高于其他作物,本研究测算值与长期均值基本一致。同时,近年来控肥减药、节水灌溉等节碳技术的推广也使得该强度略低于历史水平上限,体现了数据的代表性与现实性。从单位面积角度看,Wu等[34]测算出2000—2020年我国农业投入品与稻田两类碳源的单位面积碳排放强度年均值合计约0.88 t·hm^{-2}(以C计),而Han等[33]测算江苏水稻与玉米分别为(0.71±0.09)t·hm^{-2}(以C计)和(0.21±0.04)t·hm^{-2}(以C计),本研究结果位于二者之间,符合江苏粮食种植结构的实际。同时,考虑到本研究以播种面积为基准,未涵盖经济作物及其他农业门类,导致测算值低于全国均值。该结果也与当前节水施肥等绿色技术应用趋势一致,进一步印证了核算结果的可靠性。综上,本研究碳排放测算结果在总量、产量强度及面积强度上均与既有研究保持一致或趋势契合,在数据口径、技术路径和区域特征等多重层面具有科学性与代表性,为区域粮食绿色生产效率研究提供了坚实的数据支撑。

1.3 江苏粮食绿色生产效率驱动因素的分析方法

1.3.1 指标选取

粮食生产具有地域差异性,不同地区对其驱动因素的指标选取不尽相同。在对相关研究[35-39]进行归

纳总结的基础上，本研究根据江苏的实际情况，考虑到数据的可获得性和指标的代表性，选取粮食单位产量水平、非农产业发展水平、农业经营规模水平3个变量作为影响江苏粮食绿色全要素生产率的核心解释变量，农业结构调整程度、经济发展水平、城镇化水平、农村用电量作为控制变量。具体变量解释见表2。

根据表2中描述性统计分析的结果，江苏省粮食绿色生产效率（EFF）整体水平较高但存在一定波动性；而绿色全要素生产率（GTFP）均值为1.16，表明技术进步与资源优化共同推动了整体效率提升。解释变量中，粮食单产稳定，是效率提升的重要因素；非农产业占比高，显示其对农业要素的“虹吸效应”明显；农业规模差异较大，体现资源配置不均但也蕴含提升潜力。控制变量方面，农业结构调整较稳，说明“稳粮扩粮”导向较稳；而经济发展水平和城市化水平分别表现出较高的离散性，凸显经济与人口城镇化梯度对绿色生产带来的异质约束。这说明不同地区绿色生产条件存在显著差异，为后续建模提供了良好的变量异质性支持。

1.3.2 模型设定

综合上述影响因素，本研究构建的粮食生产绿色效率的影响因素的回归模型如公式（2）所示：

$$GTFP_{it}=\alpha+\beta_1 YIELD_{it}+\beta_2 ASL_{it}+\beta_3 ASL_{it}^2+\beta_4 ST_{it}+\theta X_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中：i、t分别表示城市和年份；$GTFP_{it}$表示第i个地区在第t年的粮食绿色全要素生产率；α为常数项；β_1、β_2、β_3、β_4为各核心解释变量的系数；X_{it}为可能影响粮食绿色全要素生产率的控制变量；θ为控制变量的系数；μ_i表示城市固定效应；λ_t表示时间固定效应；ε_{it}为随机误差项。

在选择面板回归模型时，为避免伪回归，确保面板数据估计结果的有效性，首先需要对面板数据的平稳性进行检验。本研究分别采用Breitung检验、IPS检验与PP-Fisher检验对模型变量进行单位根检验。结果显示，所有检验变量均能在10%的显著性水平上拒绝原假设“统计变量存在单位根”，是一阶单整序列，可以进行面板回归分析。其次，对模型中各变量进行多重共线性检验，各模型方差膨胀因子均小于10，表明各变量之间不存在多重共线性问题，确保了模型的有效性。最后，为了避免极端值对结果的影响，本研究对被解释变量和各解释变量进行了1%的缩尾处理。

2　结果与讨论

2.1　江苏粮食绿色生产效率测算的时序演变分析

从整体趋势来看，江苏粮食生产效率总体上呈现增长趋势，从2000—2001年的0.99增长到2022—2023年的1.34（表3）。而从分解来看，技术进步（TC）均值为1.20，总体呈现上涨势头，粮食生产技术水平不断进步；技术效率（EC）均值为0.93，总体呈现略微下降趋势，粮食生产规模效应和经营管理效率水平仍有不足。这表明，新世纪以来江苏粮食绿色全要素生产率的增长主要得益于技术进步产生的创新效应，而技术效率所引起的追赶效应略显不足，全省绿色全要素生产率的增长主要表现为技术进步“单轨驱动”型。

从年际变化来看，江苏粮食GTFP及其分解指标呈现出阶段性特征。第一阶段为平稳波动期（2000—2007年），此阶段GTFP长期徘徊在0.89~1.03区间，EC自1.01降至0.84，而TC仅小幅上扬至1.12，绿色增长动力尚未充分显现。第二阶段为快速跃升期

表2　粮食绿色生产效率驱动因素指标选取及描述性统计分析

Table 2　Selection of driving factor indicators for green grain production efficiency and descriptive statistical analysis

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	变量说明 Variable description	单位 Unit	均值 Mean	标准差 SD
被解释变量	粮食生产效率值EFF	由SBM模型测算得出	—	0.90	0.23
	粮食绿色全要素生产率GTFP	由SBM模型结合ML指数测算得出	—	1.16	0.39
解释变量	粮食单位产量水平YIELD	粮食作物总产量/粮食作物播种面积	万t·10^3 hm^{-2}	0.67	0.06
	非农产业发展水平ST	第二三产业占GDP的比例	%	90.99	7.12
	农业规模经营水平ASL	粮食作物播种面积/粮食生产从业人员	10^3 hm^2·万人$^{-1}$	16.84	6.86
控制变量	粮食种植结构调整程度AAS	粮食作物播种面积/农作物播种面积	%	69.54	12.51
	经济发展水平PGDP	人均国民生产总值	万元	6.74	4.94
	城市化水平URBA	城镇人口/总人口	%	59.56	14.05
	农村用电量ELE	—	10^9 kWh	10.92	14.43
	农业机械密度MACH	粮食机械总动力/粮食作物总播种面积	kW·hm^{-2}	0.58	0.17

（2007—2015年），该阶段TC持续攀升至1.19~1.32并转为主导驱动，带动GTFP稳步提升至1.27后回落到1.17，TC成为推动GTFP增长的核心动力。但EC依然维持在0.88~0.98区间，波动性显著，追赶效应相对薄弱。第三阶段为提质领跑期（2015—2023年），TC进一步突破至1.55，拉动GTFP攀升至1.34的历史峰值，该结果得益于江苏省在农业科技领域的政策支持和资金投入，以及技术成果的转化落地。但EC则略有走低并伴随波动，2022—2023年降至0.87，显示出管理效率与资源配置效率的提升仍是当前制约GTFP进一步提高的关键短板。

2.2 江苏粮食绿色生产效率的空间演化分析

从地区维度看，2000—2023年，苏南、苏中、苏北三大区域GTFP均实现了提升并呈现“技术进步主导、技术效率滞后”的结构特征，但演进节奏与内在机制差异显著（表4）。苏南地区GTFP由0.97升至1.24，TC稳步增长，2022—2023年达1.62，但EC呈现出先降后稳的趋势，反映出该地区在推进技术创新的同时，农业资源配置效率和管理效能未能同步提升。由于苏南地区耕地资源有限、耕地非粮化与碎片化较为显著、农业占比下降，规模化经营难以扩张，一定程度上制约了技术红利的转化效率。苏中地区GTFP增幅最大，由1.00增至1.54，TC由0.99升至1.62，成为全省的标杆，EC虽有波动但降幅相对温和。其依托泰州、海安等高标准农田和现代粮食物流走廊，加速集约化与机械化，在2009年后GTFP实现连续多年高于1.2的增长。苏北地区GTFP从1.02升至1.34，TC由0.99增至1.44，但整体波动较大，技术效率略有不足，反映出其作为主要粮食产区，在盐碱地改良、农机化整体推进县等项目带动下，资源质量和机收率显著改善（小麦机收率在99%以上），效率劣势逐步收窄。与此同时，全省283个示范无人化农场的快速扩张以及数字农业的发展，实现了耕种收综合机械化率87%，进一步提升了TC贡献。然而，区域间智能装备普及度的差异也加剧了效率分化。总体而言，三大区域虽然均依赖技术进步拉动，但苏南效率劣势明显，苏中相对均衡，苏北波动较大且不稳定，体现出绿色增长路径上的区域分化。

表3 2000—2023年江苏粮食绿色全要素生产率（GTFP）指数及其分解

Table 3 GTFP index of grain production in Jiangsu and its decomposition（2000—2023）

年份 Year	绿色全要素生产率 GTFP Green total factor productivity	绿色技术效率EC Green technical efficiency	绿色技术进步TC Green technological progress
2000—2001	0.99	1.01	0.98
2001—2002	1.03	1.02	1.01
2002—2003	0.83	0.88	0.94
2003—2004	1.02	0.95	1.07
2004—2005	0.89	0.90	0.99
2005—2006	0.95	0.86	1.10
2006—2007	0.95	0.84	1.12
2007—2008	1.13	0.95	1.19
2008—2009	1.20	0.96	1.24
2009—2010	1.20	0.96	1.26
2010—2011	1.27	0.93	1.37
2011—2012	1.26	0.98	1.29
2012—2013	1.15	0.88	1.30
2013—2014	1.15	0.88	1.30
2014—2015	1.17	0.89	1.32
2015—2016	1.07	0.92	1.16
2016—2017	1.15	0.95	1.20
2017—2018	1.13	0.92	1.23
2018—2019	1.18	0.95	1.24
2019—2020	1.24	0.96	1.29
2020—2021	1.27	0.96	1.32
2021—2022	1.31	0.91	1.43
2022—2023	1.34	0.87	1.55
均值	1.12	0.93	1.20

注：ML指数具有循环可加性，GTFP、EC、TC为各年度累积值。

Note: ML index exhibits circular additivity, and GTFP, EC, and TC represent cumulative values for each year.

2.3 江苏粮食绿色生产效率驱动因素的实证结果分析

在对面板数据进行回归之前，本研究利用F统计量Breusch-Pagan的LM统计量进行检验，结果明确显示固定效应和随机效应模型显著优于混合回归模型。通过修正的Wald检验、Wooldridge检验和Breusch-Pagan LM检验，发现样本存在组内自相关、组间异方差以及组间同期相关问题。鉴于传统Hausman检验在此情况下不再适用，因而本研究依据修正的Hausman检验和基于过度识别的Wald统计量检验结果审慎选择固定效应面板模型。此外，鉴于样本存在自相关和异方差等问题，本研究采用了双向固定效应的可行的广义最小二乘法（FGLS）进行估计。其中，对于长面板的时间效应，为了避免损失较多自由度，在进行FGLS估计时，通过加上时间趋势项进行控制。表5详细展示了上述检验和回归结果。其中，模型1为未控制时间和地区的可行的FGLS的估计结果；模型2为采用了双向固定效应的可行的FGLS进行估计的结果。

表4 江苏各地区粮食平均全要素生产率及其分解（2000—2023）

Table 4 Average TFP of grain production and its decomposition in different regions of Jiangsu (2000—2023)

年份 Year	苏南地区 Southern Jiangsu			苏中地区 Central Jiangsu			苏北地区 Northern Jiangsu		
	GTFP	EC	TC	GTFP	EC	TC	GTFP	EC	TC
2000—2001	0.97	1.00	0.97	1.00	1.01	0.99	1.02	1.03	0.99
2001—2002	0.96	0.94	1.01	0.99	1.00	0.99	1.14	1.11	1.02
2002—2003	0.86	0.88	0.97	0.93	1.00	0.92	0.75	0.81	0.93
2003—2004	0.91	0.88	1.04	1.03	0.99	1.04	1.14	1.01	1.13
2004—2005	0.75	0.83	0.90	0.99	0.99	0.99	1.01	0.91	1.10
2005—2006	0.77	0.78	1.00	1.01	0.88	1.16	1.12	0.95	1.18
2006—2007	0.74	0.68	1.08	0.99	0.85	1.16	1.19	1.04	1.14
2007—2008	0.96	0.85	1.12	1.08	0.90	1.20	1.38	1.10	1.26
2008—2009	1.05	0.88	1.19	1.17	0.92	1.28	1.38	1.08	1.28
2009—2010	1.04	0.86	1.21	1.20	0.93	1.29	1.39	1.08	1.29
2010—2011	1.15	0.86	1.33	1.33	0.94	1.41	1.37	0.99	1.38
2011—2012	1.22	0.94	1.29	1.20	0.90	1.33	1.35	1.08	1.25
2012—2013	1.24	0.96	1.29	1.22	0.90	1.35	1.03	0.80	1.28
2013—2014	1.24	0.96	1.29	1.20	0.89	1.35	1.04	0.80	1.29
2014—2015	1.26	0.97	1.30	1.26	0.92	1.37	1.05	0.80	1.31
2015—2016	1.03	0.86	1.19	1.19	0.92	1.29	1.04	0.99	1.05
2016—2017	1.06	0.85	1.24	1.34	1.03	1.29	1.13	1.01	1.12
2017—2018	1.06	0.85	1.25	1.23	0.92	1.34	1.15	1.01	1.14
2018—2019	1.08	0.83	1.30	1.34	1.05	1.28	1.20	1.03	1.17
2019—2020	1.15	0.85	1.35	1.41	1.04	1.36	1.23	1.04	1.18
2020—2021	1.17	0.83	1.41	1.44	1.03	1.40	1.27	1.06	1.19
2021—2022	1.18	0.77	1.53	1.51	1.02	1.48	1.32	1.01	1.31
2022—2023	1.24	0.77	1.62	1.54	0.95	1.62	1.34	0.93	1.44
均值	1.03	0.86	1.20	1.19	0.95	1.24	1.16	0.98	1.19

注：苏南、苏中、苏北均值是区域内地级市的GTFP、EC、TC的几何平均。

Note: The averages for southern, central, and northern Jiangsu represent the geometric mean of GTFP, EC, and TC across the prefecture-level cities within each region.

（1）粮食绿色全要素生产率驱动因素。分析模型2的主要结果可以发现，粮食单位产量水平对GTFP有显著正向影响。每提高一个单位单产，可带来约2.784个单位的绿色全要素生产率增幅，是各变量中贡献最大的因素。结果表明，推动绿色生产不仅能减少污染和碳排放，更能通过单产提升压缩单位产出的环境成本。在资源刚性约束背景下，提高单产已成为绿色高效生产的重要抓手。此外，农业经营规模对GTFP也具有显著的正向影响，同时其平方项系数为−0.001，也达到1%显著性水平，表明规模经营水平与GTFP之间存在显著的倒“U”形非线性关系。这揭示出适度规模经营在一定程度上可促进资源集约化配置和机械化利用效率，从而提升绿色生产水平，但一旦规模超过最优临界点，资源冗余投入与管理效率下降将反向抑制生产效率与环境绩效。从数值上看，曲线峰值大约出现在1.9万hm^2·万人$^{-1}$左右，当前江苏的样本均值为16.84，整体尚处于规模化带动效应的上升阶段，未来仍具发展空间。

另一方面，非农产业发展水平对GTFP表现出显著的负向影响。非农产业每增加一个百分点，将导致GTFP下降0.019个单位，这反映了江苏非农产业的快速发展对劳动力等粮食生产要素产生了一定的虹吸效应。例如，快速的产业升级进程会占用农业用地，减少优质劳动力资源，进一步抑制了农业生产效率和绿色生产的提升。因此，在推动产业结构的过程中，需要注重降低非农产业发展所带来的虹吸效应，合理配置农业资源，保护农业劳动力，确保粮食生产可持续发展。

（2）稳健性检验。在考虑异方差和内生性的基础上，为了保证研究结论更为可靠有效，本研究进行了

表5 江苏省粮食绿色全要素生产率驱动因素回归结果

Table 5 Regression results of driving factors for GTFP of grain production in Jiangsu Province

变量 Variable	模型1 Model 1	模型2 Model 2
粮食单位产量水平	2.751***	2.784***
	(22.55)	(20.96)
农业规模经营水平	0.036***	0.038***
	(7.44)	(7.52)
农业规模经营水平平方项	−0.001***	−0.001***
	(−5.12)	(−5.29)
非农产业发展水平	−0.009*	−0.019***
	(−1.71)	(−3.19)
粮食种植结构调整程度	0.140	0.175
	(1.32)	(1.52)
经济发展水平	0.013**	0.016*
	(2.08)	(1.94)
城市化水平	0.001	0.002
	(0.36)	(0.54)
农村用电量	−0.005***	−0.006***
	(−3.06)	(−3.22)
农业机械密度	−0.294***	−0.151
	(−2.86)	(−1.49)
常数项	−0.311	2.798
	(−0.74)	(0.18)
观测值	312	312
城市固定效应	否	是
时间固定效应	否	是

注:***、**、*分别表示统计值在1%、5%、10%的显著性水平下显著,括号内数值为z值,下同。

Note: ***, **, and * indicate statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively. The values in brackets are z values. The same below.

以下稳健性检验:首先,为避免样本时间变量对计量结果的影响,剔除2000年和2023年两个端点年份进行回归。表6中模型3给出了剔除端点年份的双固定效应的FGLS回归结果。其次,将效率值(EFF)作为GTFP的替代变量来衡量粮食生产率水平。粮食生产效率值越大,意味着该地区在粮食生产效率的投入和产出的配置状态越好,即效率值与GTFP之间存在显著的正相关关系。表6模型4给出了采用效率值替代GTFP后的FGLS回归结果。从这两个模型的估计结果来看,在考虑异方差、剔除1%极端值、调整样本区间、变量替换后,各解释变量回归结果基本一致,表明具有良好的稳健性。

(3)异质性分析。为了探究各个变量对粮食GTFP的影响的地区差异,分别对苏南、苏中、苏北地区的样本采用可行的FGLS进行异质性回归分析,结果如表7所示。

表6 稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results

变量 Variable	模型3 Model 3	模型4 Model 4
	GTFP	EFF
粮食单位产量水平	3.033***	1.361***
	(27.69)	(15.30)
农业规模经营水平	0.046 7***	0.013***
	(10.47)	(4.18)
农业规模经营水平平方项	−0.000 623***	−0.000 147**
	(−7.32)	(−2.44)
非农产业发展水平	−0.027 9***	−0.023***
	(−5.28)	(−6.93)
常数项	−4.566	−15.314*
	(−0.31)	(−1.77)
控制变量	已控制	已控制
观测值	286	312
城市固定效应	是	是
时间固定效应	是	是

从表7中可以看出,各因素对不同地区的影响方向与总体回归结果大致吻合,但在影响强度及显著性水平上存在明显差异。首先,粮食单位产量水平在三大区域内均对GTFP产生显著正向影响,但弹性依序为苏中、苏北、苏南。这表明尽管苏南以高技术水平著称,但其土地资源紧张及非粮化趋势限制了单产增益的发挥;反观苏中地区则凭借较强的基础农业条件和高标准农田建设,单产提升更易转化为绿色效率的跃升;苏北地区虽存在资源基础劣势,但近年来通过机械化与良种良法的协同应用,单产增效路径日益稳固。其次,农业规模经营水平(ASL)在不同区域呈现出高度异质性。苏中与苏北地区的ASL对GTFP均具有显著正向作用,表明适度扩大经营规模有助于提升生产要素的配置效率与机械化作业水平,进而增强绿色生产能力。然而,苏南地区的ASL却呈现显著负向关系,且平方项为正,形成“U”形结构。在耕地资源碎片化严重、农业非主导化的苏南地区,较小规模可能更利于精细化管理与资源节约,而一味追求规模扩张反而可能因管理边际成本上升与资源冗余投入而削弱绿色绩效。相比之下,苏中地区的ASL平方项为负,显示其呈现典型的倒“U”形关系,表明适度扩大经营规模可以显著提升绿色效率,但当ASL超过约2.9万hm^2·万人$^{-1}$后边际效益转负,说明苏中地区已接近规模报酬的临界高点,应从“扩规模”转向“提效益”。苏北地区的平方项不显著,说明规模扩张仍处

表7 粮食绿色全要素生产率驱动因素地区异质性分析

Table 7 Regional heterogeneity analysis of driving factors for green total factor productivity of grain

变量 Variable	苏南地区 Southern Jiangsu	苏中地区 Central Jiangsu	苏北地区 Northern Jiangsu
粮食单位产量水平	1.517***	2.288***	2.247***
	（9.65）	（25.28）	（14.85）
农业规模经营水平	−0.045***	0.058***	0.028***
	（−2.69）	（10.86）	（3.01）
农业规模经营水平平方项	0.002***	−0.001***	<−0.000 1
	（3.42）	（−7.49）	（−1.42）
非农产业发展水平	−0.062***	−0.039***	−0.007
	（−4.30）	（−9.21）	（−1.06）
常数项	−9.352	37.050***	−177.087***
	（−0.56）	（2.71）	（−6.85）
观测值	120	72	120
控制变量	已控制	已控制	已控制
城市固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是

于持续增益区间，尚未触及规模过大的资源环境约束。最后，非农产业发展水平对三大区域GTFP的影响亦存在显著差异。在苏南和苏中地区，其显著抑制了绿色生产效率，显示出产业升级在经济相对发达的苏南、苏中地区对农业要素的“虹吸效应”尤为突出，特别是大量优质耕地被占用、农业劳动力流失严重，对粮食生产可持续发展构成挑战。而在苏北地区，该变量虽为负，但未达显著水平，反映出其非农产业尚未发展到足以显著挤压农业资源的程度，农业仍处于主导地位。因此，非农产业对农业的“竞争性压制”在苏南与苏中更需引起重视，而苏北则面临如何在保障绿色农业基础上推进产业多元化的命题。

3 结论与政策启示

3.1 结论

（1）从时序变化看，江苏粮食绿色全要素生产率整体呈上升趋势，从2000年的0.99提升到2023年的1.34，技术进步是其主要驱动力，而技术效率所引起的追赶效应略有不足。

（2）从区域分布看，三大区域呈现差异化演进格局。苏中地区GTFP最高，技术进步与技术效率表现均衡；苏北地区提升幅度较大，得益于农业结构改善与耕地整治等政策带动，但整体仍存在波动性；苏南地区虽技术进步强劲，但因耕地非粮化、农业边缘化等因素，效率提升相对乏力，形成“高进步、低效率”的结构性矛盾。

（3）从驱动因素看，粮食单位产量对GTFP具有最显著的正向影响；农业规模经营与GTFP呈倒“U”形关系；非农产业发展显著抑制GTFP。区域异质性分析表明，苏中地区规模经营临近效率最优区间，苏北仍有扩张空间，而苏南则需警惕过度集约带来的边际效率递减问题。

3.2 政策启示

上述分析结果表明，从短期来看，改进技术效率水平是提升江苏粮食绿色全要素生产率的关键，但从长远来看，培育江苏粮食绿色全要素生产率可持续增长动能需要不断提升技术进步水平。同时，挖掘和弥补区域差距也是提升全省粮食生产整体效能的重要途径。具体而言，提高江苏粮食绿色全要素生产率可着重从如下四个方面发力：

第一，聚焦提升技术效率水平，夯实粮食绿色生产的内生支撑基础。针对江苏技术效率偏低、而长期技术进步有保持增长的现实需求，应将提升技术效率作为政策发力的首要方向，推动资源配置方式从“数量扩张”向“要素优化”转型。具体如下：一是健全农业社会化服务体系，通过发展区域化的“统种统防统收”平台和农事全程托管机制，提升小农户生产活动的组织化程度与协同效率；二是优化农业投入结构，推进测土配方施肥、高效精准灌溉、绿色农药减施等节本增效型技术的普及应用，提升农资使用的边际效率；三是建立农业绿色管理能力提升机制，推广标准化作业规程和绿色生产规程，提升农业经营主体对资

源的调控能力。通过推动各类农业经营单位内部管理提效与外部组织协同，系统提升粮食生产过程中的资源配置效率和管理效率，为实现绿色增产和低碳发展的双重目标提供坚实支撑。

第二，精准识别最优经营规模区间，推动适度规模经营有序发展。回归结果揭示出农业经营规模与GTFP之间呈现倒“U”形关系，当前全省尚处于效率增长阶段，但已接近临界峰值。因此，应通过差异化的土地政策和经营制度，因地制宜推进规模经营。在苏中地区，应设定“经营规模合理区间”，通过土地整治、高标准农田建设、承包权流转撮合平台等手段，引导土地集中在1.5万~3.0万 hm^2·万人$^{-1}$的高效区间；在苏北地区，应鼓励以县域为单元构建“农机合作社+土地托管+服务外包”的复合型耦合机制，提升粗放经营区域的组织化水平；而在苏南地区，则应重点发展“家庭农场+社会化服务”的小规模精细型模式，警惕一味追求规模化造成管理冗余与资源浪费。有关部门应根据区域特征分类制定扶持模式、财政补贴标准与技术供给清单，增强精准供策能力。

第三，促进城乡要素双向有序流动，激发粮食绿色生产内生动能。研究显示非农产业发展对粮食生产要素产生了一定分流压力。减少粮食生产要素大量流失的关键点在于构建城乡要素双向流动的格局，完善城乡要素平等交换、双向流动的体系。一方面，应完善农业用地保护与利用制度，严控高效耕地非农化趋势，推动新增非农建设项目与农业生态保护挂钩；另一方面，加强农业发展对资金、技术与人才等要素的吸引力，通过完善农业信贷机制、提升农村基础设施水平、支持返乡创业等措施，增强农业部门的要素承载能力。特别是在劳动力层面，可加大农业职业教育和培训支持，提升农业劳动生产率，形成农业内部的人才留存和外部的有序回流机制，逐步实现城乡要素在农业绿色转型过程中的高效互动与动态平衡。

第四，推动差异化区域支持政策，提升粮食绿色生产整体效能。针对江苏省内各地区在绿色全要素生产率提升过程中呈现出的典型演化路径，应构建以绿色效率类型为基础的差异化区域联动政策体系。在苏南地区，应加快构建技术转化评估机制，设立技术转化率指标纳入地方绿色发展绩效考核体系，推动数字农机、智能感知、节能设备等技术的本地应用配套建设，弥合“高进步低效率”结构性鸿沟；在苏中地区，应强化资源配置治理能力建设，建立基于农业社会化服务平台的“共配-共治”模式，提升机械投入效益与农资精准投放能力，打破技术落地“最后一公里”瓶颈；在苏北地区，应强化要素补偿与管理扶持双通道政策支持，既要持续推动提升边际资源区的配置能力，又应对绿色治理表现优异的苏北县域予以差异化奖补，保障其绿色效率持续提升的外部激励。此外，还应构建跨区协同的“绿色效率提升实验区”，通过政府主导+科研机构协同的方式，在不同效率类型区域分别设立典型县域示范点，实施“一县一策”式技术治理与组织改革示范，探索绿色效率提升的多样化路径，增强政策落地的适配性与复制性。

参考文献：

[1] 杨果, 陈瑶. 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 171-176. YANG G, CHEN Y. China′s agriculture carbon sink estimation and its coupling analysis with agricultural economy development[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(12): 171-176.

[2] 陈秧分, 王介勇. 对外开放背景下中国粮食安全形势研判与战略选择[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1616-1630. CHEN Y F, WANG J Y. China′s food security situation and strategy under the background of opening-up[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1616-1630.

[3] 李天祥. 高水平保障粮食安全的江苏方案与实现路径研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024. LI T X. Research on the realization path of high-level food security in Jiangsu Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.

[4] 朱晶, 李天祥, 朱珏. 江苏省粮食增产的贡献因素分解与测算(2004-2013年): 基于粮食内部种植结构调整的视角[J]. 华东经济管理, 2015, 29(3): 11-16. ZHU J, LI T X, ZHU J. Estimating and decomposing the contribution factors of Jiangsu Province′s from 2004 to 2013 grain production growth: from the perspective of inter-crop structural adjustment[J]. *East China Economic Management*, 2015, 29(3): 11-16.

[5] 金涛, 陶凯俐. 江苏省粮食生产时空变化的耕地利用因素分解[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 758-763. JIN T, TAO K L. Factor decomposition and temporal-spatial variation of grain production in Jiangsu[J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 758-763.

[6] 金涛, 陆建飞. 江苏粮食生产地域分化的耕地因素分解[J]. 经济地理, 2011, 31(11): 1886-1890. JIN T, LU J F. Factor decomposition in regional disparities of grain production in Jiangsu Province[J]. *Economic Geography*, 2011, 31(11): 1886-1890.

[7] 武舜臣, 周洲, 曹宝明. 生产区位变迁、耕地资源依赖与区域粮食安全: 以江苏为例[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(6): 1061-1067. WU S C, ZHOU Z, CAO B M. Production location change, land resource dependence, and regional grain security: a cases study of Jiangsu Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(6): 1061-1067.

[8] 应瑞瑶, 郑旭媛. 资源禀赋、要素替代与农业生产经营方式转型: 以

苏、浙粮食生产为例[J]. 农业经济问题, 2013, 34(12):15-24. YING R Y, ZHENG X Y. Resources endowment, factor substitution and the transformation of agricultural production and operation: example from food production in Jiangsu and Zhejiang[J]. *Issues in Agricultural Economics*, 2013, 34(12):15-24.

[9] 郑微微, 何在中, 徐雪高. 江苏主要粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(4):666-672. ZHENG W W, HE Z Z, XU X G. Evaluation of over fertilization in main grain crops in Jiangsu and its influencing factors[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(4):666-672.

[10] 王迪, 王明新, 钱中平, 等. 基于非点源污染约束的江苏省农业生产效率分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17):322-326. WANG D, WANG M X, QIAN Z P, et al. Analysis of agricultural production efficiency in Jiangsu Province under non-point source pollution constraints[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(17):322-326.

[11] 曹明霞, 高珊. 我国农业全要素生产率研究:基于江苏省农业面板数据分析[J]. 价格理论与实践, 2018(9):151-154. CAO M X, GAO S. Research on total factor productivity of agriculture in China: based on the analysis of agricultural panel data in Jiangsu Province[J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(9):151-154.

[12] 吉小燕, 周曙东. 全要素生产率及其对农业经济增长的影响:基于江苏省的实证研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(21):104-108. JI X Y, ZHOU S D. Total factor productivity and its effect on agricultural economic growth: an empirical study on Jiangsu Province [J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(21): 104-108.

[13] 周莉雅, 邱美琴, 蔡晓燕, 等. 江苏粮食产业发展现状、主要问题与对策建议[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4):239-245. ZHOU L Y, QIU M Q, CAI X Y, et al. Current status, key issues, and policy suggestions for the development of the grain industry in Jiangsu[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(4):239-245.

[14] 徐建玲, 丁毅, 刘洪辞. 基于系统动力学的江苏粮食安全情景分析[J]. 中央财经大学学报, 2014(5):95-104. XU J L, DING Y, LIU H C. Simulation of food security in Jiangsu Province by system dynamic model[J]. *Journal of Central University of Finance & Economics*, 2014(5):95-104.

[15] 徐畅, 郭杰, 易家林, 等. 江苏省耕地非粮化时空格局演变及驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2):436-447. XU C, GUO J, YI J L, et al. Analysis on the evolution of spatiotemporal pattern and driving factors of non-grain cultivated land in Jiangsu Province from 1996 to 2020[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2):436-447.

[16] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks based measure(SBM) approach[R]. GRIPS Research Report Series(2003).

[17] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2010(5):95-109. WANG B, WU Y R, YAN P F. Environmental efficiency and environmental total factor productivity growth in China's regional economies[J]. *Economic Research Journal*, 2010(5):95-109.

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

[19] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Reaerach*, 2002(143):32-41.

[20] 成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M]. 北京:知识产权出版社, 2014. CHENG G. Data envelopment analysis methods and MaxDEA software[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2014.

[21] 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.

[22] 卢新海, 崔海莹, 柯善淦, 等. 湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率的耦合协调及其驱动机制研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(8):75-84. LU X H, CUI H Y, KE S G, et al. Coupling coordination and driving mechanism of green transition of farmland use and total factor productivity of grain in Hubei Province[J]. *China Land Science*, 2022, 36(8):75-84.

[23] 李冬梅, 祁悦, 龚河阳, 等. 生态视角下吉林省粮食生产效率偏差时空演变与影响因素研究[J]. 地理科学, 2025, 45(5):1050-1061. LI D M, QI Y, GONG H Y, et al. Spatio-temporal evolution and determinants of grain production efficiency deviation in Jilin Province from ecological perspective[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2025, 45 (5):1050-1061.

[24] 尹朝静, 杨坤, 孔锋. 气候变化下的中国粮食全要素生产率再测度[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2025(3):38-52. YIN C J, YANG K, KONG F. Remeasuring China's total factor productivity of grain under climate change[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition)*, 2025(3):38-52.

[25] 崔宁波, 生世玉. 粮食主产区农业绿色发展的影响因素、质量测度与动力分析:基于绿色全要素生产率视角[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3):621-630. CUI N B, SHENG S Y. Influencing factors, quality measurement and dynamic analysis of agricultural green development in major grain producing areas from the perspective of green total factor productivity[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3):621-630.

[26] 夏文浩, 王铭扬, 姜磊. 新疆农业碳排放强度时空变化趋势与收敛分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7):1145-1154. XIA W H, WANG M Y, JIANG L. Spatiotemporal variation trends and convergence analysis of agricultural carbon emission intensity in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(7):1145-1154.

[27] WEST T O, MARLAND G. Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1):73-83.

[28] XIAO P, ZHANG Y, QIAN P, et al. Spatiotemporal characteristics, decoupling effect and driving factors of carbon emission from cultivated land utilization in Hubei Province[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(15):9326.

[29] YUN T, ZHANG J, HE Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6):1393-1403.

[30] ZHANG L, PANG J, CHEN X, et al. Carbon emissions, energy

consumption and economic growth: evidence from the agricultural sector of China′s main grain-producing areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1017-1025.

[31] 李波, 张俊飚, 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. LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.

[32] 许萍萍, 赵言文, 陈颢明, 等. 江苏省农田生态系统碳源/汇、碳足迹动态变化[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 238-243. XU P P, ZHAO Y W, CHEN H M, et al. Dynamic change of carbon source/sink and carbon footprint of farmland ecosystem in Jiangsu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. 2018, 38(5): 238-243.

[33] HAN Y, XI W, XU J, et al. Carbon footprint of main grain crop production in Hubei and Jiangsu Provinces, 2005—2019[J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): 6449.

[34] WU H, YAN W, ZHENG X, et al. Carbon-emission density of crop production in China: spatiotemporal characteristics, regional disparities, and convergence[J]. *Agriculture*, 2023, 13(5): 951.

[35] 余航, 周泽宇, 吴比. 城乡差距、农业生产率演进与农业补贴: 基于新结构经济学视角的分析[J]. 中国农村经济, 2019(10): 40-59. YU H, ZHOU Z Y, WU B. Urban-rural disparity, the evolution of agricultural productivity and agricultural subsidies[J]. *Chinese Rural Economy*, 2019(10): 40-59.

[36] 陈俊聪, 王怀明, 张瑾. 农业保险发展与中国农业全要素生产率增长研究[J]. 农村经济, 2016(3): 83-88. CHEN J C, WANG H M, ZHANG J. Agricultural insurance development and growth of China′s agricultural total factor productivity[J]. *Rural Economy*, 2016(3): 83-88.

[37] 尹朝静. 科研投入、人力资本与农业全要素生产率[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2017, 16(3): 27-35. YIN C J. Agricultural R&D, human capital and agricultural total factor productivity[J]. *Journal of South China Agricultural University* (*Social Science Edition*), 2017, 16(3): 27-35.

[38] 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[J]. 农业技术经济, 2019(10): 102-113. LI X L, LI L W, DONG X B, et al. A study on decomposition of total factor productivity of grain in Yunnan Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(10): 102-113.

[39] 于元赫, 王越, 宫大卫. 山东省粮食生产效率时空演变及影响因素研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 728-738. YU Y H, WANG Y, GONG D W. Spatial-temporal evolution and influencing factors of grain production efficiency in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 728-738.