DOI:10.3880/j.issn.1003-9511.2022.03.004

基于面源污染和碳排放的长江经济带农业绿色生产效率提升路径

张云宁,杨 琳,欧阳红祥,宋亮亮

(河海大学商学院,江苏 南京 211100)

摘要:面源污染和碳排放阻碍我国农业绿色生产效率的提升,而农业绿色发展的实现与高效的农业绿色生产效率有关。基于面源污染和碳排放,构建农业绿色生产效率"经济-能源-环境-社会"评价指标体系,以作为生态文明建设先行示范带的长江经济带 2010—2019 年农业面板数据为例,结合内在增长和外在驱动对效率提升路径进行研究。结果显示:研究期内长江经济带农业生态效率上中下游都主要呈现偏右"U"型变化,效率提升应从增加模式转化为优化模式;研究期内区域差异呈现"扩大-收敛"的变化特征,高效率地区呈现"点-片-点-片"的扩散作用,存在一定的涓滴效应;从内在增长方面需要注意水资源管理使用、环境治理、区域科技进步动力、区域合作链等因素的影响;外部驱动因素中城镇化程度、产业结构、科研水平与效率呈现正向显著关系,从业人员收入水平、粮食作物种植面积以及财政支持强度呈现负向显著关系,需关注环境规制的不显著结果。

关键词:农业绿色生产效率;面源污染;碳排放;Super-SBM-undesirable 模型;Malmquist 指数;提升路径;长江经济带

中图分类号:F326.11 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-9511(2022)03-0024-10

生产效率是农业发展的核心[1],绿色生产效率是在环境承载力有限的基础上对经济发展与环境资源的协调程度进行研究[2],是以先进的管理方法和科学技术追求生产过程节能、降耗、减污的目标。因此,农业绿色生产效率可以作为衡量和推进农业绿色发展的代表性指标之一。在 2021 年《"十四五"全国农业绿色发展规划》提出的下一个五年农业绿色发展思路中,10 余次提到"面源污染",20 余次提到"固碳减排""碳达峰、碳中和"等"碳"相关词语,并专门设置章节强调"面源污染"和"绿色低碳"的具体要求。对于"十四五"农业发展加快推进绿色转型这一新阶段,农业面源污染和"碳"相关的问题将成为重要攻坚点。长江经济带作为我国生态文明建设的先行示范带,同时有多个省市属于我国重要粮食主产区。2020 年中央计划投资支持长江经济带中西部省份开展面源污染综合治理,建设我国未来农业面源污染治理示范区。因此,作为新时期农业绿色发展的重点关注区域,本文选用长江经济带面板数据进行实例分析。

面源污染通过污染水源和土壤的途径影响到农用地,导致生产要素的边际收益率不断下降[3]。针对面源污染的研究,在测算方面仍然缺乏成体系的研究方式,原因是面源污染存在污染源多、污染路径复杂、污染情况观测难的问题。估算方法主要采用输出系数法和模型模拟[4-5],其中输出系数法通过污染源相对应的产污系数、排污系数和污染物产量进行面源污染负荷量的估算。碳排放的研究涉及生产的各个领域,根据 FAO 数据,农业温室气体释放量占总排放量的 30% 左右。但农业本身作为碳汇系统,既是温室气体的排放大户,本身也是减排固碳的重要手段[6]。碳排放的测算主要结合排放强度、碳排放系数或者标准碳的变化进行测算[7]。绿色生产效率的研究从研究方法上看,常采用生态足迹分析法[8]、能量分析法[9]以及数据包络模型[10]进行分析。从研究的区域来看,研究范围涉及全国[11]、省[12]以及部分特殊区域[13-15];从研究内容来看,一是为效率计算体系引入新的评价角度和评价指标,例如生态系统服务价值以及景观多样性等[16];二是解决效率评

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(71801082)

作者简介:张云宁(1959—),男,副教授,学士,主要从事宏观经济管理与可持续发展研究。E-mail:wangyiwangyi4478@163.com

价中出现的低效率问题,考虑例如产业结构[17]、承包地调整[18]等新的影响因素;三是分析存在的时空分布和空间的收敛性[19-20]。

综上所述,前期研究不足表现为:一是虽然考虑了环境规制投入带来的生态价值产出和非合意产出的降低,但既未考虑减污投资对污染处理能力的提升,也未考虑绿色投资本身产生的经济效益;二是主要探讨在各种情景环境下农业生产效率如何在保证粮食生产能力的基础下,追求农业水土资源等有效单元投入产出结构的优化,没有关注到生态文明背景下社会系统中不可量化的投入产出,未将社会系统内的指标纳入农业绿色生产效率指标体系。

绿色发展与生态文明、社会可持续发展紧密相连,因此社会系统对农业绿色生产存在着不可量化的影响。鉴于过往研究不足,本文将社会系统纳入传统农业绿色生产效率"经济-能源-环境"(3E)评价指标体系中,构建"经济-能源-环境-社会(economy-energy-environment-society)"(3E1S)评价指标框架,通过"3E1S"指标框架对农业绿色生产效率进行评价,并在投入产出指标中探索"绿色"的"减污"和"提质"问题[21]。

基于农业绿色生产效率对农业绿色发展进程的代表性作用和长江经济带在农业绿色发展新时期的重要战略地位,本文选用长江经济带 2010—2019 年农业面板数据作为研究对象,在"新时期"农业绿色发展的背景下,基于面临的面源污染和碳排放两大重点环境问题,通过 Super-SBM-undesirable 模型对农业绿色生产效率进行时空演变分析,并以分析结果为基础,进行效率内在增长力分析和使用 Tobit 回归结果的外部驱动力研究,内外结合深入探讨农业绿色生产效率的提升路径,以期从区域看整体为农业绿色发展解决面源污染、碳排放的问题提供决策参考。

1 研究方法与指标选取

1.1 研究方法

1.1.1 Super-SBM-undesirable 模型

农业生产过程中会产生一定的污染排放,主要是生产过程中农药等化学制品的残留或废弃物回收不彻底。在农业绿色生产效率测算过程中,将这类环境污染排放列入非期望产出。结合 Tone[21-23] 的 SBM 模型和超效率模型进行 SBM 模型改进,得到 Super-SBM-undesirable 模型。使用 Super-SBM-undesirable 模型进行研究可解决径向模型缺少松弛变量、有效 DUM 效率值无法对比和未考虑非期望产出的问题。模型公式如下:

$$
\begin{cases}
\rho = \min \dfrac{\dfrac{1}{m}\sum\limits_{i=1}^{m}\dfrac{\bar{x}}{x_{ik}}}{\dfrac{1}{s_1+s_2}\left(\sum\limits_{l=1}^{s_1}\dfrac{\bar{y}_{gl}}{y_{gl_0}}+\sum\limits_{k=1}^{s_2}\dfrac{\bar{y}_{qk}}{y_{qk_0}}\right)} \\
\text{s.t.} \quad \bar{x} \geqslant \sum\limits_{j=1,j\neq j_0}^{n} x_{ij}\boldsymbol{\lambda}_j \\
\bar{y}_g \leqslant \sum\limits_{j=1,j\neq j_0}^{n} y_{glj}\boldsymbol{\lambda}_j \\
\bar{y}_q \geqslant \sum\limits_{j=1,j\neq j_0}^{n} y_{qkj}\boldsymbol{\lambda}_j \\
\bar{\boldsymbol{y}}_g \leqslant \boldsymbol{y}_{glj} \\
\bar{\boldsymbol{y}}_q \leqslant y_{qkj} \\
\boldsymbol{\lambda}_j \geqslant 0, \\
j = 1,2,\cdots,n; i = 1,2,\cdots,m; \\
l = 1,2,\cdots,s_1; k = 1,2,\cdots,s_2
\end{cases}
$$

式中:ρ 为农业绿色生产效率值;x、y 分别为投入变量和产出变量,其中 $\boldsymbol{y}_g$、$\boldsymbol{y}_q$ 别是期望产出和非期望产出矩阵的指标;决策 DUM 的数量为 n;m、s_1、s_2 分别为投入、期望产出、非期望产出指标数量;$\boldsymbol{\lambda}_j$ 为权重向量。$\rho \geqslant 1$ 时,DUM 有效;$\rho < 1$ 时,DUM 相对无效的。

1.1.2 变异系数

本文运用变异系数对农业绿色生产效率的空间差异情况进行分析,并以此为基础进行空间格局特征分析,公式如下:

$$
V = \frac{1}{\bar{u}}\sqrt{\frac{\sum\limits_{a=1}^{d}(u_a-\bar{u})^2}{d}} \tag{2}
$$

式中:V 为农业绿色生产效率变异系数值;u_a 为各省市农业绿色生产效率样本值;$\bar{u}$ 为各省市效率平均值;d 为样本数。时间序列上的 V 值用来表征各设省市农业绿色生产效率差异存在扩大或收敛的趋势。

1.1.3 Malmquist 指数

Malmquist 指数利用距离函数的比率计算决策单元投入产出效率变动情况。以 t 时期为参照,设 M 为 Malmquist 指数,t 时期的生产点 (x_t, y_t),当期生产前沿面的距离函数 $D_t(x_t, y_t)$,同理 $t+1$ 时期的生产点 (x_{t+1}, y_{t+1}),距离函数为 $D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})$[24];$v$、$c$ 为规模收益可变模型(VRS)和规模收益固定模型(CRS);$M = ET$,E 为综合技术效率变化指数、T 为技术进步指数;E 可以分解为 P 和 S,分别代表纯技术效率变化指数和规模效率变化指数。Malmquist 指数采用定向输出和定向输入定义距离函数并对距离函数进行计算,具体计算公式如下:

$$M_{t,t+1} = \frac{D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1})}{D_t(x_t,y_t)} \sqrt{\frac{D_t(x_t,y_t)D_t(x_{t+1},y_{t+1})}{D_{t+1}(x_t,y_t)D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1})}}$$

$$= \frac{D_{vt+1}(x_{t+1},y_{t+1})}{D_{ct}(x_t,y_t)} \sqrt{\frac{D_{vt+1}(x_{t+1},y_{t+1})D_{vt}(x_{t+1},y_{t+1})}{D_{ct+1}(x_{t+1},y_{t+1})D_{ct}(x_{t+1},y_{t+1})}} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{D_{ct}(x_t,y_t)D_{ct+1}(x_t,y_t)D_t(x_t,y_t)D_t(x_{t+1},y_{t+1})}{D_{vt}(x_t,y_t)D_{vt+1}(x_t,y_t)D_{t+1}(x_t,y_t)D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1})}}$$

$$= PST \tag{3}$$

1.1.4 Tobit 模型

Tobit 模型是一种因变量受限的截尾回归模型，在因变量为切割值或片段值，但受限因变量的观测值是连续时采用，计算公式如下：

$$A = \alpha_0 + \boldsymbol{\beta}_w R_w + \varepsilon_w \quad (w = 1,2,\cdots e) \tag{4}$$

式中：A 为受限因变量，即农业绿色生产效率；R_w 为解释变量；α_0 为截距项；$\boldsymbol{\beta}_w$ 为未知参数向量；ε_w 为随机误差项，$\varepsilon_w \sim N(0,\sigma^2)$；$e$ 为变量数。本文受限因变量为农业绿色生产效率属于左截断的离散分布数据，设截断点为 0。

1.2 评价指标体系

本文的数据基础以农业（农林牧渔业）为研究对象，基于面源污染和碳排放的环境负面影响和社会系统的投入产出，设计农业绿色生产效率指标体系，建立“十四五”时期农业资源利用节约化、投入品减量化、废弃品资源化、产业模式生态化的发展新格局。本文基于原国家计委和原国务院能源办在广义能源效率战略项目中使用的“能源-经济-环境”框架[25]，结合低碳城市发展中“社会”（S）系统[26]，构建农业绿色生产“3E1S”框架，农业绿色生产效率“3E1S”框架各系统网络关系如图 1 所示。其中经济系统是主系统中的主导子系统，能源系统是重要的物质基础，环境系统是整体存在和发展的基础，社会系统则考虑宏观因素和不可量化的指标。在此框架下对照参考 UNSDSN 发布的 SDGs 的中国可持续发展本土化指标[27]，确保农业绿色生产率积极响应农业绿色发展和社会整体发展的可持续性。

1.2.1 经济系统指标

国家进行农业财政投入和固定资产投资，作为农业宏观调控的关键手段，这也是农业发展重要的资金资源。在生态文明的背景下，经济系统向环境系统进行生态投资，推进生态建设和治理。同时对社会系统进行教育和科研投资，培养社会系统高素质人才，推动科研技术的创新和进步。经济系统进行资本投入，同时包含推动社会发展的农业主要经济价值产出指标，具体指标见图 2。

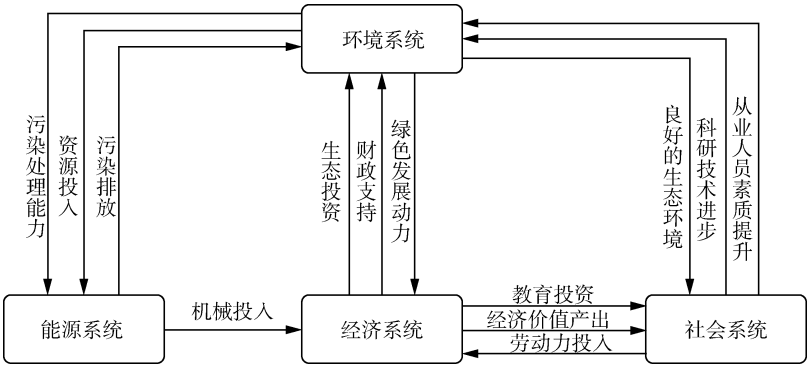


图 1　农业绿色生产效率“3E1S”框架各系统网络关系

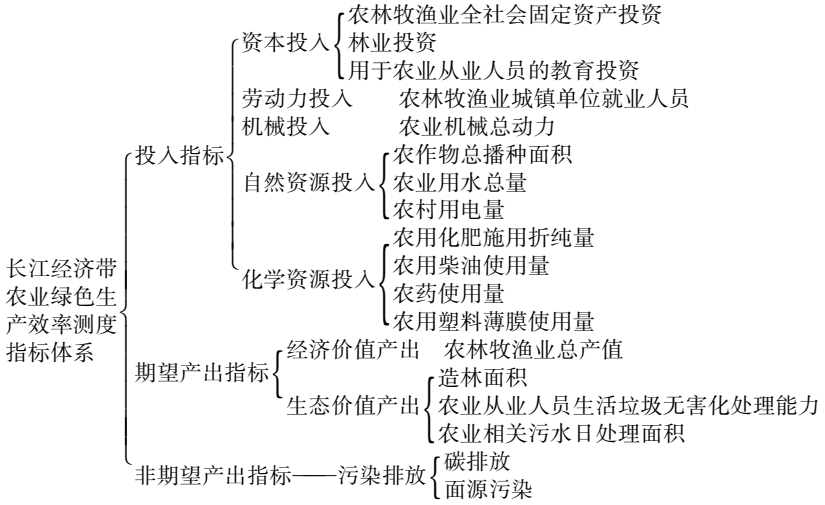


图 2　长江经济带农业绿色生产效率测度指标体系

1.2.2 能源系统指标

能源系统的能源投入支撑经济系统的发展和运作,因此能源消耗与经济增长有着密切的联系,但能源消耗伴随着污染物的排放问题。面源污染的产生主要是由农业生产过程能源投入未有效使用造成的,物质的残留造成水体富营养化和土壤污染问题,能源系统具体指标见图2。基于《"十四五"全国农业绿色发展规划》对于面源污染的防治,主要从化肥农药的减量增效和农膜等白色污染的防治处理出发,本文选用面源污染作为农业绿色生产能源系统非期望产出之一,选取农用化肥、农药以及农用薄膜作为面源污染的主要污染源。依据《中国农业绿色发展报告2019》数据,结合尚杰等[28-30]研究结果和计算方法,得到面源污染计算公式和相关系数,设农药、化肥无效使用率分别为50%和60.8%,农膜残留率为10%。面源污染计算方法如下:

$$Q_{rf} = \sum_{r=1}^{3} Z_{rf}\delta_f \tag{5}$$

式中:Q_{rf}为第r省市第f种投入的面源污染量;δ_f为第f种投入在农业建设过程中无效使用率或残留率;Z_{rf}为第r省市第f种投入量,包括农用化肥施用折纯量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量。

在碳循环过程中,农业碳排放严重。73%的温室气体来自能源的使用,其中又有近18.4%来自于农业和土地使用。2020年我国召开的全国人民代表大会提出了"碳达峰、碳中和"的概念,《"十四五"全国农业绿色发展规划》中也提到农业绿色发展是要为实现"碳达峰、碳中和"创造良好条件,因此在能源系统中考虑农业碳排放的负面环境效应,将其作为能源系统的非期望产出指标。根据相关研究成果,设置各投入指标碳排放系数为农业耕作312.600、农业灌溉20.476、农药4.934、农膜5.180、化肥0.897、柴油0.593[31-32]。碳排放计算公式为

$$C_{bh} = \sum_{h=1}^{6} N_{bh}K_h \tag{6}$$

式中:C_{bh}为第b省市第h种投入碳排放量;K_h为第h种投入在农业生产过程中碳排放数值;N_{bh}为第b省市第h种投入,包括农用化肥施用折纯量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量、农用柴油使用量、农作物总播种面积、有效灌溉面积。优化能源的使用效率既能促进经济增长,也能更好地保护环境系统的自然资源。

1.2.3 环境系统指标

在农业绿色发展的背景下,环境系统因为经济系统的生态投资和财政支持,在建设和修复环境方面得到资金支持,同时有利于环境发展的资源循环基础设施得到建设,使用清洁能源或环境良好的新绿色产业得到孵化。生态基础设施的建设提高资源的使用效率和污染废弃物的净化循环能力。环境系统为能源系统提供初始的资源,环境系统的生态治理成果也将提高对能源消耗污染的处理能力。因此基于洪开荣等[25]和陈菁泉等[33]的研究成果,选用区域垃圾无害化处理能力和污水处理能力,代表生态投资建设中环境系统基础设施建设的成果,选用造林面积代表环境系统对经济系统的绿色经济动力,具体指标见图2。

1.2.4 社会系统指标

社会系统主要是考虑整体指标中宏观因素和不可量化的指标。社会系统从经济系统获得教育和科研投资,教育投资用于农业从业者素质教育,也用于科研成果的研发。这笔投资将反向对经济系统持续提供高质量劳动力,劳动力对于自然规律的认识和对机械的使用推动了农业的发展。对从业者的教育,有利于从业者的可持续观念的提高、农业科技水平进步和资源使用效率提升,达到降低污染的效果,对环境系统其有正向效应。环境系统也为社会系统营造更好的社会生存环境,形成良性循环。因此选用社会对农业从业人员的教育投资作为指标,体现社会系统对环境系统的正向投资,具体指标见图2。

1.3 Tobit 回归模型指标体系

农业绿色生产效率提升的外部驱动力主要是考虑指标体系外的影响。绿色生产效率作为衡量区域可持续发展的指标,兼顾经济效益和生态效益。使用因素分解结构法(FBS),基于已有研究[34-35]结合长江经济带区域合作密切的特点,从区域经济水平、产业结构、农业发展模式、农业生产技术水平、政策支持等5个方面考虑影响因素指标,具体指标选取如表1所示。

表1 Tobit 回归模型指标体系

影响因素	具体指标	指标含义
区域经济水平	城镇化 X_1	城镇人口与年末常住人口的比值
产业结构	第一产业占比 X_2	第一产业增加值与地区生产总值的比值
	第三产业占比 X_3	第三产业增加值与地区生产总值的比值
农业发展模式	从业人员收入水平 X_4	农村居民人均可支配收入
	种植结构 X_5	粮食作物播种面积与农作物总播种面积的比值
农业生产技术水平	科研技术水平 X_6	区域国内专利申请授权量
	机械化密度 X_7	农业机械总动力与农作物总播种面积的比值
政策支持	财政支持强度 X_8	第一产业全社会固定资产投资与地区生产总值的比值
	环境规制强度 X_9	林业投资与地区生产总值的比值

1.4 数据来源及处理

基于中国现有统计数据的实际情况,确定研究范围为长江经济带的 11 个省市,研究对象为农业(农林牧渔业),样本容量为 2010—2019 年的年度面板数据,从科学性、可操作性、稳定性的角度去考虑指标选取。涉及的变量数据主要来源于研究期间的《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》。部分残留系数及排放系数来源于《全国第一次污染源普查手册》。研究周期内缺失的部分数据,从各省市的数据库和《国民经济和社会发展统计公报》获取,最后采用平滑数据处理法处理剩下个别缺失数据。

2 结果与分析

长江经济带是以长江黄金水道为依托的中央重点实施“三大战略”之一,根据 2019 年农业农村部《推进长江经济带农业农村绿色发展2019 年工作要点》,国家绿色发展项目资金对长江经济带各省市有所侧重,给予政策支持。长江经济带涵盖 11 省市,为使数据分析中区域分析更为明晰,采用任胜钢等[36]的划分方式,将四川省、贵州省、云南省、重庆市划为上游,湖北省、湖南省、江西省为中游,浙江省、江苏省、安徽省、上海市为下游。绿色生产效率测算采用 Super-SBM-undesirable 模型,构建 SBM-Malmquist-Tobit 经典效率评价三阶段模型,探索农业绿色生产效率提升路径。

2.1 长江经济带农业绿色生产效率时序演变特征

2.1.1 整体演变特征

2010—2019 年长江经济带农业绿色生产效率整体均值达到相对中效以上范围。2019 年各划分区域均值达到 1 以上,达到效率有效范围,因此未来长江经济带农业绿色生产效率研究应向优化投产比、提升使用效率转型。从整体变化趋势来看,根据表 2,2010—2019 年期间长江经济带农业绿色生产效率呈偏右“U”型变化,该结果与同样考虑农业生态防护投资研究结果[33]变化趋势类似,符合环境库兹涅茨(EKC)假说理论,但根据 EKC 研究成果依旧可能出现“W”型或“N”型变化趋势。整体变化主要呈现 3 个阶段,2010—2014 年整体效率值从1.109 下降到 0.852。此期间我国遭遇全球金融危机,经济环境较差,并且此阶段垃圾无害化处理能力、污水处理能力还处于较低水平,没有得到显著的环境治理成效,污染排放处于增长阶段。2014—2017 年农业绿色生产效率变化平缓。2015 年《环境保护法》对环境违法行为的惩戒力度和企业的环境治理责任进行了加强。2017 年我国环保税正式施行,并在长江经济带设立碳排放权交易试点,加强了资源的循环利用和使用管理,非期望产出增长速度下降。2017—2019 年农业绿色生产效率稳步提高,前阶段治理效果得到体现。中国以自然资源部与生态环境部为首,逐步形成环境保护与经济发展制衡的环境规制政策体系。

2.1.2 区域演变特征

根据表 2 的数据,2010—2019 年上下游数值变化较为平缓,中游数值变化比较急促。2019 年农业绿色生产效率平均值下游最大、上游次之、中游最小。上游地区位处内陆具有丰富的土地、林木等自然资源,具备优良的农业发展条件,因此也包含我国重要的粮食主产地。下游地区有中国经济发达的长江三角洲地区,具有较高的现代化技术和先进的生产技术。通过技术的革新,实现农业柴油使用量和农业二氧化碳排放的减少,且有碳排放权交易试点。

表 2 2010—2019 年长江经济带农业绿色生产效率平均值

区域	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
上海	1.080	1.010	1.074	1.042	1.018	1.072	0.907	1.068	1.033	1.252
江苏	1.045	1.011	1.029	1.035	1.003	1.023	1.010	0.681	1.001	1.087
浙江	1.350	0.838	1.005	1.002	0.905	1.005	1.042	1.006	1.079	1.086
安徽	1.113	1.005	0.350	0.533	0.474	0.588	0.368	0.711	0.417	1.028
下游	1.147	0.966	0.864	0.903	0.850	0.922	0.832	0.867	0.882	1.113
江西	1.075	1.027	1.018	0.538	0.456	0.603	0.629	0.619	0.711	1.017
湖北	1.116	1.060	1.020	1.032	1.001	0.912	1.024	1.012	1.048	1.092
湖南	1.075	1.042	1.114	0.773	1.000	0.840	0.839	0.757	0.817	1.157
中游	1.089	1.043	1.051	0.781	0.819	0.785	0.831	0.796	0.859	1.089
重庆	1.040	1.011	0.737	0.747	0.694	0.719	0.802	0.808	1.014	1.091
四川	1.009	1.020	1.022	1.004	1.023	1.014	1.010	1.017	0.809	1.136
贵州	1.063	0.777	1.014	1.140	1.031	1.058	1.096	1.106	1.014	1.118
云南	1.233	1.051	1.043	1.000	0.767	0.748	0.760	0.650	0.748	1.032
上游	1.086	0.965	0.954	0.973	0.879	0.885	0.917	0.895	0.896	1.094

中游地区有一定的农业基础资源优势，但农业设施基础相对薄弱，科研技术能力较弱，且中部崛起战略的实施，导致承接产业转移规模时带来的经济高速发展常见环境问题明显[37]。整体来说，长江经济带农业绿色生产效率已从环境治理投入产出效果不佳的效率下降阶段，过渡到现今环境治理初具成果，追求更优投入产出结构的效率持续上升阶段，但中部地区需要充分吸收下游地区经济高速发展时的经验教训，注重协调环境和经济发展问题。

2.1.3 Malmquist 指数分析

从时间维度上，长江经济带 2010—2019 年期间整体农业绿色生产效率 Malmquist 指数整体呈波动上升的趋势，整体均值波动较小，均值为 0.995（表 3）。通过 Malmquist 指数分解可以发现，规模效率变化指数、纯技术效率变化指数稳定，因此综合技术效率变化指数保持稳定。技术进步指数与 Malmquist 指数波动近乎一致，因此可以推测技术进步指数的波动主要影响 Malmquist 指数。从地区维度上看，Malmquist 指数大于 1 的地区占比 45%，其中上下游地区各占比 40%，形成上下游高、中部地区低的现象，符合农业绿色生产效率平均值高低分布。下游地区的上海市和浙江省、中游地区的湖南省和上游地区的重庆市的 Malmquist 指数可以长期保持在 1 以上。但是安徽省、湖北省、云南省平均 66.7% 的 Malmquist 指数在 1 以下。Malmquist 指数小于 1 的省市需要着力加强技术进步指数的提升，重点是加强对技术创新的研究，增强自身的创新能力。技术进步指数的退步造成了长江经济带农业绿色生产效率 Malmquist 指数的下降。技术进步指数小于 1，表明此时科学技术进步处于落后阶段或者要素质量不高，原因可能在于长江经济带在农业前沿生产技术的因地制宜、推广方面还存在问题，可以根据当地农业生产实际情况调整现有前沿技术的使用。在前沿技术进步和要素配置适用性方面提高技术进步指数。

2.2 长江经济带农业绿色生产效率空间演变特征

2.2.1 区域差异

变异系数是区域的标准离差率，表征区域相对差异。由图 3 可知研究期间长江经济带整体变异系数值呈现“先上升后下降，中间有波动”的变化特征，2014 年变异系数最大，达到 0.248，2019 年变异系数值最小，只有 0.058。变异系数变化分为两个阶段，第一阶段在 2010—2014 年期间，整体变异系数呈上升趋势，在此阶段长江经济带农业绿色生产效率值差距逐渐增加，呈现扩大的趋势，长江经济带区域均衡性较差。在 2014 年之后变异系数呈波动下降的趋势，降幅达到 0.190，说明此阶段农业绿色生产效率值空间差异缩小，呈现收敛趋势，区域均衡性逐渐改善，政府环境治理投资和环境规制政策得到有效实施。通过分析发现来看，研究期间农业绿色生产效率的变动趋势与变异系数的变动呈反方向变化，整体农业绿色生产效率上升的同时变异系数出现下降。因此可以推测区域差距可以随着长江经济带整体农业绿色生产效率的提升得到收敛，均衡性上升。

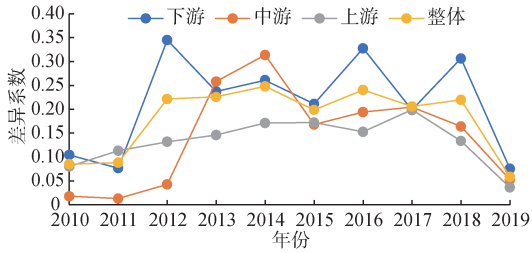


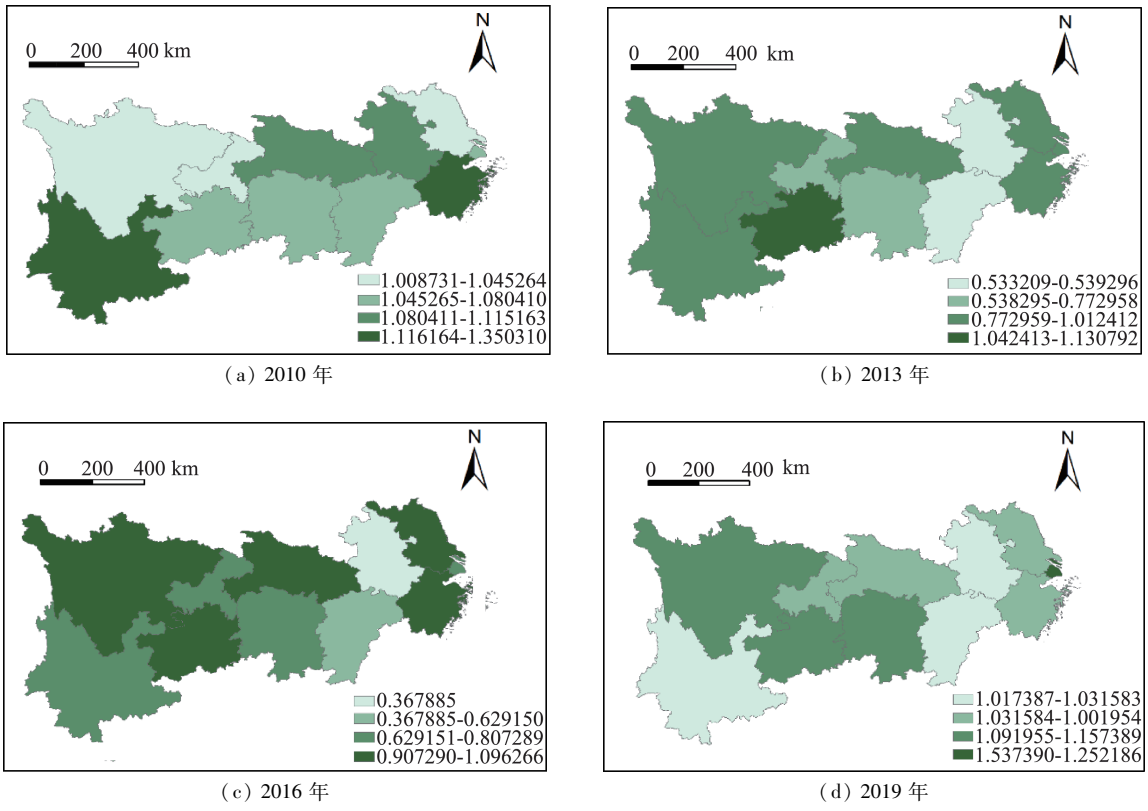
图 3 2010 年—2019 年长江经济带农业绿色生产效率值变异系数

2.2.2 空间格局特征

使用空间数据可视化 ArcGIS 对整体空间格局以及农业绿色生产效率在各省市空间格局演变进行系统分析。选取 2010 年、2013 年、2016 年和 2019 年的各省市的农业绿色生产效率截面数据，根据自然间断点法将各省市的效率值分为 4 个分段。从图 4 可以

表 3 2010—2019 年长江经济带农业绿色生产效率全要素生产率变化指数

时间	*E*	*T*	*P*	*S*	*M*			
					长江经济带	上游	中游	下游
2010—2011 年	1	0.820	1	1	0.820	0.923	0.857	0.727
2011—2012 年	1	1.012	1	1	1.012	0.976	1.009	1.070
2012—2013 年	1	0.924	1	1	0.924	1.073	0.821	0.910
2013—2014 年	1	0.989	1	1	0.989	0.932	0.967	1.089
2014—2015 年	1	1.073	1	1	1.073	1.053	0.989	1.196
2015—2016 年	0.994	1.009	1	0.994	1.003	1.007	1.039	0.975
2016—2017 年	1.003	1.001	1	1.003	1.004	0.928	0.997	1.124
2017—2018 年	1.003	1.029	1	1.003	1.032	0.933	1.052	1.161
2018—2019 年	1	1.126	1	1	1.126	1.133	1.144	1.132
均值	1	0.995	1	1	0.995	0.995	0.986	1.043



(a) 2010 年　(b) 2013 年

(c) 2016 年　(d) 2019 年

图 4　长江经济带农业绿色生产效率空间分布

看出,2010 年长江经济带 11 个省市普遍处于有效效率,其中浙江省尤为突出。2013 年长江经济带农业绿色生产效率各省市整体较 2010 年下跌,其中有效区域占 63.6% ,无效区域占 36.4% 。高效率区域由“点状”向“连片”发展。2016 年整体区域较 2013 年效率值提升,高效率区域再次由“连片”向“点状”分布。2019 年整体效率值进一步较 2016 年得到提升,整体高效率区域再次形成“连片”形式。“点-片-点-片”的变化趋势,与整体区域变异系数变化特征类似。综合分析结果,本文推测排除解决遗留环境问题的提升作用有延迟的原因外,高效率的省市有扩散效应,可以带动周围省市农业绿色生产效率提高。未来长江经济带整体将会形成高点带动片区,高效率片区形成新的高点,高点再带动片区提升的良性循环过程,生产技术先进区域和长江中下游等优化发展区域对周边区域具有一定的涓滴效应。

3　长江经济带农业绿色生产效率提升路径

3.1　农业绿色生产效率提升内在增长力

内在增长力主要是基于农业绿色生产效率值的时空演变规律,暂不考虑外部影响因素。结合农业绿色生产效率的指标面板数据和效率值冗余计算构建提升路径,从指标体系内部构成的微观角度进行分析。根据上述研究成果,将农业绿色生产效率提升的内在增长力分为以下几个方面:

3.1.1　水资源的使用管理

由表 4 可以发现水资源的使用存在冗余的情况,重庆市、湖北省、浙江省 2019 年的农业用水存在冗余。为解决自然资源使用冗余的情况,《“十四五”全国农业绿色发展规划》提出要加强资源保护利用,提高农业用水效率,加强农业用水管理。相关区域提升路径包括:①提高水资源的利用效率,根据作物和种植方式特点引进灌溉新技术,提高节水灌溉的面积,例如对密播作物和大棚栽培作物推行微灌,对高效经济作物使用喷灌技术。通过节水工程的推进,提高农田灌溉水有效利用系数。②减少水资源的投入,适当改变种植结构,降低高耗水植物的种植比例,针对用水问题突出的农作物,可以使用季节性休耕。

针对资源使用造成的水污染处理问题,湖北省、四川省的污水处理能力冗余值较大,存在产出不足的情况。为此,应解决污水处理建设中终端处理规模和工艺等规划设计与实际需求不匹配的问题。落实污水处理基础设施资金使用,在河长制管理中纳入农村水环境治理的工作内容,并对新建农村居民集聚点进行同步规划、建设污水处理设施。引导社会投资建设一批政府和社会资本合作的污水处理厂建设项目。通过提高用

表 4　2019 年长江经济带农业绿色生产效率冗余变量值(节选)

地区	林业投资/万元	农林牧渔业就业人员相关教育投资/万元	农业用水总量/万 m^3	农业从业人员生活垃圾无害化处理能力/($t \cdot d^{-1}$)	农林牧渔业相关污水日处理能力/万 m^3	农林牧渔业面源污染/万 m^2	农林牧渔业碳排放量/万 t
上海	0.000	0.000	0.000	253.347	0.000	0.598	8853.564
江苏	163580.074	15232.492	0.000	0.000	2.663	0.000	0.000
浙江	0.000	1126.994	25468.289	0.000	2.357	2.389	3323.009
安徽	0.000	2913.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
江西	0.000	734.261	0.000	0.000	0.000	2.184	0.000
湖北	0.000	5895.918	2465.500	26.903	6.224	12.267	300183.364
湖南	891367.536	6349.512	0.000	0.000	0.000	0.000	47027.214
重庆	0.000	3268.507	97204.393	0.000	2.206	0.000	56779.618
四川	927203.264	14600.455	0.000	0.000	6.636	0.000	0.000
贵州	0.000	5287.732	0.000	0.000	2.453	4.079	0.000
云南	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

水效率,减少水资源投入,增强污水处理能力等方式,多措并举加强对水资源的使用管理。

3.1.2　环境治理

在污染方面,根据表 4,面源污染冗余方面主要是湖北省的污染冗余较为严重,其次上海市、浙江省、江西省、贵州省都存在不同程度的面源污染冗余。基于 2015 年国家农业部针对面源污染提出的“一控二减三基本”目标,本文提出面源污染防治“全过程、全方面、全员”治理模式。“全过程”要求在源头减少污染源,在技术层面实现化肥农药减量增效,使用有机肥代替化学肥料,推动粪肥还田。同时通过形成专业化病虫害防治组织,统防统治提高农药的使用效率。过程中实现控污,在生产过程中进行常态化监测来严格控制用量。鼓励农业企业和农业科研机构对区域土壤特性进行测土施肥,提高钾肥氮肥复合肥对农产品的使用效率。在末端进行处理,对无利用价值的资源进行无害化集中处理。通过政府补贴或购买服务,鼓励企业发挥其在农业生产中工程化的优势,回收农户的有机肥并与企业生产中的种植养殖废弃物协同处理,并重新投入到企业的养殖过程中。“全方面”是从局部到整体,从开垦到收获,实施“全过程”治理。“全员”要求所有与生产相关的人员都要树立面源污染治理的基本概念,定期开展生产者素质教育。其中,农民和农业企业是面源污染治理的主力军,应主动参与到“全过程”防治中。

在碳排放方面,2019 年碳排放的冗余量从大到小顺序为湖北省、重庆市、湖南省、上海市、浙江省,湖北省碳排放冗余情况最为严重,其碳排放冗余值约为浙江省的 90 倍。随着质量兴农、绿色兴农战略的深入推进,农业向高质量发展不断迈进。碳排放的控制首先要发挥“绿色”作为“提质”的作用,主要措施包括:①通过推进对绿色生产农产品的认证管理,推进绿色优质农产品优质优价,激励农业企业创新绿色产品。同时帮助农产品企业扩宽绿色农产品消费市场,通过批发市场、超市和电商的销售渠道,引导消费者对绿色农产品进行消费。②持续推进农业生产机械化程度,农业机械化除了要覆盖到主要作物耕种收环节,还要延伸到植保、秸秆处理、烘干等全过程。同时,农业机械化应挖掘新能源市场,减少化石燃料的使用。

3.1.3　区域科技进步动力

2010—2019 年长江经济带农业绿色生产效率处于相对高效,但 Malmquist 指数小于 1 说明长江经济带主要依靠要素投入的增长来提高绿色生产效率,但这种增长方式容易陷入增长疲乏。如果在这种模式下进入增长疲乏,再通过扩大要素投入的传统路径,会加剧产能的过剩和高质量产出的不足,不符合我国农业经济增长从“量”向“质量”的转型。依据长江经济带 Malmquist 指数受技术进步指数影响更大的特点,应通过提高技术进步指数,改变目前效率增长模式。我国整体技术水平已经与技术先进国家差距减小,技术进步模仿空间压缩,技术进步模式由“模仿改进”向“自主研发”转型。技术进步指数大于 1 的省市,技术转移的机会已经较少,因此应自主对技术进行更新换代,研发具备降低单位经济产出物资消耗和符合污染排放减少特点的环境优化型技术,提高技术的正外部性。通过加强农业基地和科研院校的合作,构建以企业为核心的产学研新格局,引导科研人员到农业企业对绿色发展科技进行技术攻关和指导服务。技术进步指数小于 1 的省市技术进步动力不足,可以根据区域自然条件、农林牧渔各业比例等实际情况,采取差异化及有针对性的农业科技资源配置策略,重点围绕区域优势和产业特色需求,将国家级科技力量和区域科技力量进

行互动互补,通过农业科研院校科研成果与基层农技推广相结合进行成果落地转化,实现技术进步指数的提高。

3.1.4 区域协同合作

空间格局演变过程中,高效率地区"点-片-点-片"的演变过程说明了高效率地区具有带动周围区域共同提高的扩散作用。2019 年农业绿色生产效率排名前三的上海市、湖南省、四川省,恰好分别位于长江经济带的下中上游。通过形成产业链,可以加强各区域间的合作联系,促进区域要素流通,使农业科技资源、新型绿色农业生产方法在不同区域间有效流动,充分发挥高效率地区带动低效率地区的扩散作用。并在形成协同的农业经济关系的基础上,依据自身优势调整农业结构。上游地区应充分发挥先天生态资源优势,发展新型特色农业,生产高质量绿色特色农产品。长江中游地区应注重加强农业现代化建设,学习先进农业技术,巩固全国农产品主要供给区的经济地位。下游地区在第二第三产业优势明显,具备沿海的产业链区位优势,应建设成为农产品进出口重要区域。例如安徽省提出的皖北循环农业产业带、皖中都市农业产业带、皖西南特色农业产业带,通过顺应消费结构升级趋势,以消费引导生产来加快完善农产品流通网络,发展区域知名农业品牌。

3.2 农业绿色生产效率提升外部驱动力

Tobit 模型回归结果见表 5,结果表明农业绿色生产效率与城镇化程度、产业结构、科研水平呈现正向显著关系。与从业人员收入水平、财政支持强度以及粮食作物种植面积呈现负向显著相关。环境规制的不显著结果需要引起重视。

表 5 Tobit 模拟回归结果

y	系数	标准差	t	显著性水平
X_1	0.943 27	0.519 64	1.820 00	0.072 00
X_2	4.891 77	1.522 33	3.210 00	0.002 00
X_3	1.049 45	0.398 45	2.630 00	0.010 00
X_4	-0.315 79	0.104 82	-3.010 00	0.003 00
X_5	-1.203 13	0.216 54	-5.560 00	0.000 00
X_6	0.118 80	0.029 69	4.000 00	0.000 00
X_7	0.091 49	0.123 90	0.740 00	0.462 00
X_8	-3.581 75	1.195 76	-3.000 00	0.003 00
X_9	1.029 08	8.321 94	0.120 00	0.902 00
常数	1.943 72	0.685 69	2.830 00	0.006 00

从正向显著的外部驱动因素来看,城镇化率的提高推动了农业规模化发展,规范的生产流程更有利于在源头消减污染源,在过程中控制污染,实现农业绿色生产效率的提升。推进城镇化进程,落实城乡基础设施一体化设计,建立城乡基础设施建设管护分级分类投入机制,将城乡基础设施项目整体打包,实行一体化管养并落实权属人管护责任。产业结构中,第一和第三产业占比的提高都对农业绿色生产效率提升有正向作用,因此应提高第一产业与第三产业的联动,从单个生产单元转变为更易于控制和监控的产业链,打造农产品物流体系,降低农产品交易运输成本,并通过清洁能源供应、废弃物资源再利用等基础设施,建立绿色供应链。科研水平对农业绿色生产效率的正向作用强调了提高农业生产科研水平,加强从业人员素质教育的重要性。在从业者生态环境保护意识培育上,应形成短期培训、职业培训和学历教育相互衔接的专业素质培养格局。在科研方面,应推动主要农作物生产全程机械化和农田宜机化改造。同时借助信息化手段,推进农业生产智能化,将遥感等信息技术与无人机、农机相结合。

从负向显著的驱动因素来看,首先,结合农业财政支持强度负向显著、从业人员收入水平负向显著以及第一产业占比正向显著的结果来看,长江经济带农业财政支持强度可能存在一定的门槛值。在门槛值的作用下,适当的支农资金投入可以刺激效率的提升,但过量的生产资金投入可能会导致农民逐利追求农业的产量,造成资源的"非绿"使用。回归分析的负向结果说明目前农业财政支持强度存在超过门槛值的情况。应根据供给侧调整财政支农资金投入和结构,把各地区粮食播种面积的增减情况、粮食自给率等作为结构调整的重要影响因素予以考虑。其次,种植结构的负向作用主要与种植品种的温室气体排放量有关,水稻种植就是甲烷排放的排放源之一,粮食作物种植比重应根据粮食需求和区域粮食生产地位进行调整。通过发展气候智慧型农业,培养自身的产品优势,选用区域高产、抗逆性强的作物新品种,优化种植结构。

环境规制对农业绿色生产效率有正向作用,但是结果不显著,这表明长江经济带环境规制未能发挥足够作用。根据表 4 的数据,长江经济带大部分省市林业投资使用效率不足,原因可能是地方政府在晋升激励的诱导下,出现了环境规制的非完全执行和"竞次"竞争[38],导致环境治理投资未充分使用和环境治理效率提升被抑制。针对环境分权的问题,环境行政权力应适度下放,但环境治理监察、监测权力应向上集中。这样既可以发挥地方政府在农业资金配置和治理规划上的针对性和灵活性,又保证了实际情况监察和监测的客观公正。同时执行符合门槛效应的环境分权,解决环境规制正向作用不显著的问题。此外,还可合理配置投资型与费用型环境规制策略[39]。

4 结 论

a. 整体农业绿色生产效率变化呈现偏右“U”型变化,具有明显的阶段性变化,但根据 EKC 假说需要注意将来是否会出现“N”或“W”型变化。从长江经济带的 Malmquist 指数可以发现在 2010—2019 年期间呈波动上升,技术进步指数是影响波动的主要原因,需要多措并施提升技术进步指数,实现 Malmquist 指数的提升。

b. 效率值空间差异呈现收敛趋势,区域均衡性改善。长江经济带高效率区域空间格局呈现“点-片-点-片”的分布变化,高效率地区具有带动低效率地区绿色生产效率提高的扩散作用,生产技术先进区域和优化发展区域对周围区域的提升有一定的涓滴效应。

c. 通过提升水资源使用管理水平、加强环境治理能力、增强区域科技进步动力、形成区域合作链可以从内在增长力的角度提升农业绿色生产效率。农业绿色生产效率与城镇化程度、产业结构、科研水平呈现正向显著关系。城镇化程度有利于农业规模化生产,更好地控制农业非合意产出。应关注绿色新型技术研发并加强第一产业和第三产业的联动,形成使用绿色技术的以绿色为导向的新产业链。负向驱动力方面,效率提升与从业人员收入水平、种植结构以及财政支持强度呈现负向显著相关,应根据需求侧调整财政支农结构、优化区域种植比例来降低负向作用。此外,环境规制的不显著结果需要引起重视,应对环境规制分权情况进行调整。

参考文献:

[1] 匡远配,张容. 农地流转对粮食生产生态效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(4):172-180.

[2] 王帅,赵荣钦,杨青林,等. 碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局:基于河南省 65 个村庄的调查[J]. 自然资源学报,2020(9):2092-2104.

[3] 郭海红,张在旭. 新型城镇化对农业绿色全要素生产率的门槛效应[J]. 湖南师范大学社会科学学报,2019(2):55-63.

[4] 李家科,彭凯,郝改瑞,等. 黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展[J]. 水资源保护,2021(1):90-102.

[5] 马骏,吴鸣然. 面源污染防治视角下农村土地经营方式选择的博弈分析[J]. 水利经济,2016(3):10-12.

[6] 金书秦,林煜,牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革,2021(5):29-37.

[7] 陈胜涛,张开华,张岳武. 农业碳排放绩效的测量与脱钩效应[J]. 统计与决策,2021(22):85-88.

[8] 张翠娟. 基于生态足迹模型的河南省农业生态承载力动态评价[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(2):246-251.

[9] 马世昌,吴晓磊. 安徽省农业生态经济系统能值分析[J]. 中国农业资源与区划,2019(12):101-107.

[10] 陈哲,李晓静,夏显力,等. 城镇化发展对农业绿色生产效率的影响[J]. 统计与决策,2021(12):99-102.

[11] 肖琴,罗其友,周振亚,等. 中国农业绿色生产效率的动态变迁与空间分异:基于 DDF-GlobalMalmquist-Luenberger 指数方法的分析[J]. 农林经济管理学报,2020(5):537-547.

[12] 陈红,王浩坤,秦帅. 水足迹视角下黑龙江粮食生产用水绿色效率研究:基于三阶段 SBM-Malmquist 指数分析法[J]. 长江流域资源与环境,2020(12):2790-2804.

[13] 叶子,夏显力,陈哲,等. 农地确权、农地细碎化与农业生产效率[J]. 干旱区资源与环境,2021(12):30-36.

[14] 钟丽雯,张建兵,蔡芸霜,等. 近 10 年广西农业生产效率与全要素生产率时空演变与驱动因素分析[J]. 中国农业资源与区划,2021(9):272-282.

[15] ABDUL-RAHAMAN A, ISSAHAKU G, ZEREYESUS Y A. Improved rice variety adoption and farm production efficiency: accounting for unobservable selection bias and technology gaps among smallholder farmers in Ghana[J]. Technology in Society, 2021,64:101471.

[16] 刘玲. 基于改进 EBM 模型的东北地区生态效率评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2019.

[17] 孙学涛,王振华. 农业生产效率提升对产业结构的影响:基于技术进步偏向的视角[J]. 财贸研究,2021(6):46-58.

[18] 钟晓萍. 承包地调整、农地不平等与农业生产效率:基于有调节中介效应模型的检验[J]. 中国土地科学,2021(5):26-36.

[19] 解亚丽,柯小玲,闵园园,等. 基于超效率 DEA 模型的三峡库区生态效率评价及空间演化格局分析[J]. 中国环境管理,2020,12(1):113-120.

[20] 曾福生,刘俊辉. 区域异质性下中国农业生态效率评价与空间差异实证:基于组合 DEA 与空间自相关分析[J]. 生态经济,2019(3):107-114.

[21] 金书秦,牛坤玉,韩冬梅. 农业绿色发展路径及其“十四五”取向[J]. 改革,2020(2):30-39.

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

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

[24] 石晓然,张彩霞,殷克东. 中国沿海省市海洋生态补偿效率评价[J]. 中国环境科学,2020,40(7):3204-3215.

(下转第 41 页)