

DOI: 10.20103/j.stxb.202407141643

周青, 徐炜蕾, 张亚丽, 吴锋. 基于网络 DEA 模型的农业种养结合生态效率评价. 生态学报, 2025, 45(9): 4561-4572.

Zhou Q, Xu W L, Zhang Y L, Wu F. Evaluation of the eco-efficiency of the integrated crop-livestock agricultural system based on the network DEA model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4561-4572.

基于网络 DEA 模型的农业种养结合生态效率评价

周 青¹, 徐炜蕾¹, 张亚丽², 吴 锋^{2,*}

¹ 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 种养结合是顺应农业绿色发展和农业可持续发展目标的重要农业生产模式, 然而现有研究在农业生态效率评价过程中往往忽视养殖业和种植业之间的物质交换, 从而导致无法准确评价农业生态效率及其提升机制。构建了考虑种养系统耦合的农业生态效率评价框架, 从产业“链”的角度, 将种养系统划分为两个相互耦合的子系统, 选用基于 SBM 的网络 DEA 模型对中国 2000—2021 年 29 个省市种养系统各个环节的生产效率进行测算。结果表明, 我国农业种养结合生态效率整体呈上升趋势, 但仍处于较低水平, 均值为 0.5975, 其中东北地区农业种养结合生态效率最高, 东部次之, 中部和西部地区效率较低。养殖系统和种植系统共同促进了种养结合系统效率的提高, 且养殖系统对整个种养结合系统效率提升的贡献相对更大。整体来看, 四大区域效率损失的首要原因都是种植劳动力投入冗余, 说明目前我国农业亟需提升机械化水平, 推进农业投入要素转型替代。其次, 化肥投入冗余以及畜禽粪便污染物排放冗余也是导致种养系统生态效率损失的主要原因。情景分析表明, 种养结合能够减少种养循环链条上的化肥和饲料投入冗余, 降低非期望产出, 从而提升农业种养结合生态效率。种养结合后的化肥投入冗余从 48.55% 下降到 23.22%, 饲料投入冗余从 34.93% 下降到 22.94%, 非期望产出冗余从 53.39% 下降到 29.39%。因此, 未来应该根据地方优势优化种养产业布局, 进一步提升种养结合水平, 完善种养循环产业链, 推动农业绿色转型发展。

关键词: 网络 DEA; 非期望产出; 方向距离函数; 种养结合; 生态效率

Evaluation of the eco-efficiency of the integrated crop-livestock agricultural system based on the network DEA model

ZHOU Qing¹, XU Weilei¹, ZHANG Yali², WU Feng^{2,*}

¹ School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

² Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

Abstract: Integrating crop and livestock production is an important agricultural practice that aligned with the goals of green agricultural development and sustainability. However, existing studies often overlook the material exchange between livestock and crop production in evaluation of agricultural eco-efficiency, resulting in an inability to accurately evaluate agricultural eco-efficiency and the mechanisms for its enhancement. This paper constructs an evaluation framework of agricultural eco-efficiency, incorporating the interlinkages of the crop-livestock system through “chain” perspective. By dividing the crop-livestock system into two mutually coupled subsystems, a network Data Envelopment Analysis (DEA) model based on Slack-Based Measure (SBM) is employed to measure the efficiency of each component of the crop-livestock system across 29 provinces and cities in China from 2000 to 2021. The findings indicate that the aggregate eco-efficiency of China's integrated crop-livestock systems exhibits an upward trajectory yet stays at a comparatively low level, averaging

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (72004074)

收稿日期: 2024-07-14; **网络出版日期:** 2025-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufeng@igsrr.ac.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台和西藏自治区统计数据。

0.5975. This suggests that while progress has been made, significant room for improvement still exists for the eco-efficiency in China's integrated crop-livestock systems. Regionally, the northeastern region exhibits the highest eco-efficiency in integrated crop-livestock systems, followed by the eastern region, while the central and western regions show relatively lower eco-efficiency. Both livestock and crop systems contribute positively to improving the eco-efficiency of the integrated crop-livestock systems, with livestock systems making a relatively larger contribution to the overall efficiency enhancement. Several key factors contribute to the efficiency losses observed in the four major regions of China. The primary reason for the efficiency losses is the redundant labor inputs in grain production, highlighting an urgent need to enhance mechanization in Chinese agriculture as well as promote the transformation and substitution of agricultural input factors. Additionally, redundancies in fertilizer inputs and the emissions of livestock manure pollutants are significant contributors to eco-efficiency losses in integrated crop-livestock systems. Scenario analysis further reveals that the integrated crop-livestock systems can reduce redundant inputs of fertilizers and feed within the crop-livestock cycle, thereby decreasing non-desired outputs and enhancing agricultural eco-efficiency. Specifically, after integration, fertilizer input redundancy decreases from 48.55% to 23.22%, feed input redundancy decreases from 34.93% to 22.94%, and non-desired output redundancy decreases from 53.39% to 29.39%. Given these findings, future efforts should focus on optimizing the layout of crop-livestock industries based on local agricultural resource endowment, enhancing the integration between crops and livestock, and improving the circular industry chain of crop-livestock systems to promote the green transformation and sustainable development of agriculture.

Key Words: network DEA; non-desirable output; direction distance function; integrated crop-livestock system; eco-efficiency

过去几十年我国农业取得了巨大成就,以占世界不到 10%的耕地养活了世界 20%左右的人口^[1-2]。然而石油农业过度发展带来的“逆生态化”效应也日益凸显,农业内源性污染严重,化肥、农药利用率不足 1/3^[3-5]。尤其是近年畜牧业分散化发展以及种植业空间破碎化导致农牧分离严重,种养系统中的物质循环链条被切断,导致秸秆、畜禽粪便和化肥成为农业面源污染的三大主要来源^[6-7]。据测算,畜禽养殖分散化导致动物粪尿管理链条中约 78%的粪尿排泌氮,50%左右的磷和钾等营养元素直接排放到环境中;而仅以粮食作为种植业产出,相当于浪费了生产秸秆部分(即至少 1/2 的作物地上生物量)所消耗的水土资源、化肥和农药等^[8-10]。种养结合是顺应农业绿色发展和农业可持续发展目标的重要农业生产模式。促进种植系统与养殖系统的有机结合,能够有效促进农业系统内部的资源利用与物质循环转化,从而减少外部物质资源投入和农业生产所带来的环境负外部性^[11]。虽然已有大量研究证实种养结合能够有效减少农业生产中的物质投入并促进废弃物的循环利用^[12-13],但是种养结合农业生产模式是如何影响农业内部物质资源转化进而影响农业环境经济绩效仍有待进一步探究。

生态效率(eco-efficiency)最早由德国学者 Schaltegger 于 1990 年提出,指增加的价值与增加的环境影响的比值,即追求经济和环境之间的一种平衡。农业生态效率是评价农业环境经济绩效的一个重要指标,指以尽可能小的资源消耗和环境污染,得到尽可能多的农业产品,并保证农产品质量^[14]。目前针对农业生态效率的评价方法主要包括比值法、数据包络分析法、随机前沿分析法、能值分析法以及生命周期评价法等^[15-16]。数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)作为一种非参数方法,由于无需事先设定模型的具体形式和参数,避免了人为确定权重对测算结果的主观影响,被学者们广泛应用于生态效率的实证研究中^[17-18]。基于该方法及其改进,现有研究分别从宏观^[19-21]、中观^[22-23]以及微观层面^[24-25]对种植业以及养殖业等单部门的农业生态效率进行了测算,并且在测算农业生态效率时也开始逐渐关注到种植系统和养殖系统之间的关系。如孟祥海等^[26]基于种养结合视角,考虑畜禽粪便、农作物秸秆还田和农作物对养分的吸收等因素,选取农地氮盈余强度作为非期望产出指标,测算了 1997—2016 年中国 29 个省份的农业环境技术效率和绿色全要素生

产率增长情况。王善高等^[27]基于生猪养殖户的微观调研数据,探究了种养结合户和普通养殖户在环境效率上的差异。He 等^[28]比较了传统和循环作物-家禽系统对环境的影响,发现优化后的循环系统具有显著的经济效益和环境效益。可以发现已有研究在农业生态效率测度过程中开始考虑到农业内部的循环经济特征,且系统分析了畜禽粪便替代化肥、秸秆饲料化利用等对农业绿色发展的影响,但是值得注意的是目前的农业生态效率评价仍将整个生产过程看作“黑箱”,缺乏基于生产“链”视角对子过程效率的刻画,导致无法厘定循环中不同环节对于农业生态效率的具体贡献,从而无法反映整个种养循环链条效率提升机制。

农业经济作为一个循环经济系统,涉及到多投入、多产出的效率转换问题,内部各个子系统相互影响,同时对整个循环系统的绩效有着重要影响。传统 DEA 方法的“黑箱”特征,导致其在测算效率时对循环经济系统中各生产环节子过程效率分析不足,于是研究人员提出了更能反映循环经济内部各循环链条效率提升机制的网络 DEA 模型^[29]。网络 DEA 模型改进了传统 DEA 模型将决策单元视为黑箱而忽略系统内部间相互作用对决策单元绩效影响的问题,能有效地测度系统中各个子环节的效率,被广泛应用于循环经济系统效率测算中^[30-33]。此外,为了进一步改进传统网络 DEA 模型中径向方法的不足——即假设各投入与产出始终以相同比例调整,Tone 等^[34]提出了基于松弛变量(Slack-based Model, SBM)的非径向网络 DEA 模型,该模型不仅能够将整体效率划分为内部各个生产活动的阶段效率,同时也解决了实际农业生产活动中投入产出的非同比例调整问题,能较好的满足本研究中农业种养结合循环经济系统效率分析。

鉴于传统的狭义农业生态效率评价无法反映整个种养系统中物质循环链条效率提升机制,如畜禽粪便替代化肥、秸秆饲料化利用等对农业绿色发展的影响,并且忽视养殖业和种植业之间的大量物质交换可能导致农业污染物高估,从而影响农业生态效率评价的准确性。因此,本研究在系统梳理已有研究的基础上,构建了一个考虑种养系统耦合的农业生态效率评价模型。从产业“链”的角度,将种养系统划分为两个相互耦合的子系统,分别为每个环节建立相应的效率评价指标体系,选用基于 SBM 的网络 DEA 模型对种养系统各环节的生产效率进行测算。通过考察种植系统和养殖系统的生态效率变化,揭示种养系统资源转化利用与物质循环路径对农业环境经济绩效的影响机理,并结合期望产出不足率以及投入非期望产出冗余率,提出种养结合农业生态效率改善方向,为推动农业种养结合发展提供决策参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 农业种养结合循环经济系统构建

农业种养结合循环经济系统构建需要全面反映种植系统和养殖系统的投入产出情况以及种植业和养殖业间的物质交换。本研究将农业种养结合循环经济系统划分成种植业和养殖业两个子系统,其中种植系统和养殖系统以饲料粮和畜禽粪便形成链接,其结构如图 1 所示。农业种养结合循环经济系统主要通过改变要素配置、提高期望产出和减少非期望产出来影响农业生态效率。通过种养结合能够实现农作物及其产品作为养殖系统饲料投入从而减少饲草料投入,尤其是大量的农作物秸秆可以有效的转化为饲料,从而降低饲草料生产成本。此外,养殖系统所产生的副产品畜禽粪便通过处理进行还田能在一定程度上降低农田化肥使用量,并减少由于畜禽粪便处理不当以及化肥施用所产生的面源污染等非期望产出。另外种养结合有利于扩大农业规模,增加农产品产量,并优化劳动力配置^[12]。基于此,本研究将基于循环经济视角开展农业种养结合生态效率评价,探究种养系统关键物质资源转化与循环利用对农业环境经济绩效的影响机理。

(1) 种植子系统。种植子系统衡量了种养结合系统中种植业生产情况,投入方面主要包括种植业劳动力投入、种植面积、灌溉、农资投入(化肥、农药、农膜和农业机械等);产出指标则包括期望产出和非期望产出,期望产出主要包括粮食作物产量,非期望产出包括农业生产阶段化肥、农药等投入所产生的面源污染。

(2) 养殖子系统。养殖子系统衡量了种养结合系统中养殖业生产情况,该子系统的投入指标主要包括养殖劳动力投入、资本投入和饲料投入等;产出指标包括期望产出和非期望产出,期望产出主要包括畜禽产品产量,非期望产出主要包括畜禽粪便产生的污染。

(3) 种养结合系统。本研究中的种养结合系统是在种植子系统和养殖子系统的基础上,考虑了种植系统与养殖系统之间的物质循环利用。由于秸秆种类较多,且不同的秸秆处理方式和饲用方式差异较大,因此本研究主要考虑畜禽粪便转化为有机肥进行还田以及农作物及其产品作为饲料喂养畜禽这一循环方式建立种植系统和养殖系统之间的链接。研究中由于畜禽粪便运输困难,所以畜禽粪便还田主要是在本地发生^[8]。通过收集各地还田率,可以测算畜禽粪便的还田量。本研究假设通过畜禽粪便还田能够在一定程度上减少农药化肥的施用量,同时减少畜禽粪便污染产生。

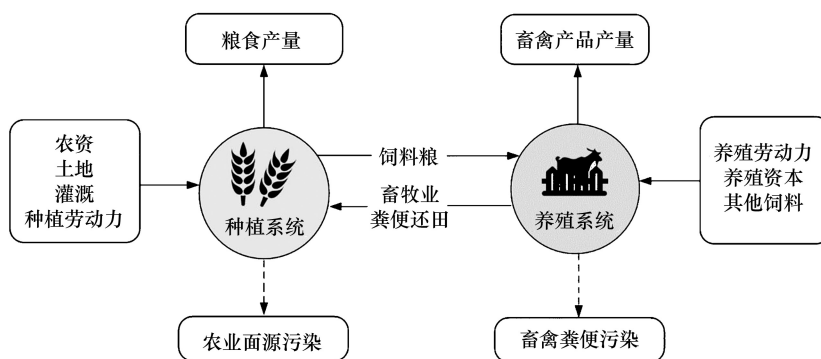


图1 农业种养结合循环经济系统

Fig.1 The integrated crop-livestock circular economy system

1.2 数据来源与指标选取

本研究采用2000—2021年的省级面板数据,区域跨度为中国内陆29省市,考虑到数据的可获得性以及青藏高原农业生产环境的特殊性,未将香港、澳门、台湾、西藏和青海加入实证分析。为便于比较不同区域间的农业种养循环经济效率差异,本文按照一般经济意义将研究区域划分为东部、中部、西部和东北地区四大区域。研究数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《全国农产品成本收益资料汇编》、《畜禽养殖业源产排污系数手册》及部分地方统计局数据。在借鉴以往研究的基础上^[23,35—36],考虑种养系统废弃物资源循环利用,根据种养系统的特点和数据可得性,从种植子系统和养殖子系统对指标进行了归纳总结,并基于种养结合视角对投入产出指标进行了优化。各变量指标的定义、所属子系统及属性、数据来源和指标计算见表1。研究中非期望产出指标主要包括化肥农药施用以及畜禽粪便所产生的农业面源污染,主要包括化学需氧量(COD)、全氮(TN)、全磷(TP)等,其中COD的排放量最大,其比例在总污染物排放量的90%以上。

农业面源污染等具体排放量参照陈敏鹏等^[40],采用清单分析方法计算得到,具体计算公式如下:

$$E = \sum_i EU_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i \quad (1)$$

$$EI = E/S \quad (2)$$

式中, E 为农业面源污染排放量(万t),主要包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)三类; EU_i 为单元 i 指标统计数; ρ_i 、 η_i 和 C_i 分别为单元 i 污染物的产污强度系数、利用效率系数和污染物排放系数。 EU_i 数据从历年相关统计年鉴中获得,各产污强度系数、利用效率系数和排污系数等参数值则主要借鉴第一次全国污染源普查领导小组办公室发布的《污染源普查农业源系数手册》及相关文献^[41—42]。

1.3 考虑非期望产出的网络生产可能集

上一节完成了种养结合循环经济系统构建工作,接下来构造该系统的生产可能集,用 S_1 和 S_2 分别表示种植子系统和养殖子系统。假定有 K 个决策单元; $P(x)$ 为网络生产可能集; x_k^l 和 y_k^l 分别为子系统 S_l 的外部投入和产出; $Z_k^{(j,l)}$ 为第 k 个决策单元子系统 S_j 的产出进一步作为子系统 S_l 的投入; $Z_k^{(l,j)}$ 的含义同理可得。

由图1不难发现,种养结合系统的产出指标既包含农产品产量等“好”产出(亦可称作期望产出),还包含污染物这种“坏”产出(亦可称作非期望产出),为对这两种性质完全不同的产出加以区别,设:

$$Z_k^{(j,l)} = (v_k^{(j,l)}, w_k^{(j,l)}) \quad (3)$$

式中, $v_k^{(j,l)}$ 为第 k 个决策单元子系统 S_j 的期望产出进一步作为子系统 S_l 的投入; $w_k^{(j,l)}$ 则表示第 k 个决策单元子系统 S_j 的非期望产出进一步作为子系统 S_l 的投入。

表 1 农业种养结合循环经济系统投入产出指标说明

Table 1 Explanation of the input-output indicators for the integrated crop-livestock circular economy system

指标名称 Indicator name	所属子系统及属性 Sub-system and attributes		数据来源 Data source	指标解释 Indicator interpretation	单位 Unit
	种植系统 Crop system	养殖系统 Livestock system			
粮食种植劳动力 Labor input in grain production	投入	—	中国统计年鉴	第一产业从业人员×(农业总产值/农林牧渔业总产值)	万人
农业机械 Agricultural machinery	投入	—	中国统计年鉴	农业机械总动力	万 kW
粮食种植面积 Grain area	投入	—	中国统计年鉴	主要农作物播种面积	10 ³ hm ²
农药 Pesticide	投入	—	中国农村统计年鉴	农药使用量	万 t
化肥 Chemical fertilizer	投入	—	中国农村统计年鉴	农用化肥施用折纯量	万 t
农膜 Agricultural film	投入	—	中国农村统计年鉴	农膜使用量	万 t
灌溉 Irrigation	投入	—	中国统计年鉴	有效灌溉面积	10 ³ hm ²
养殖业劳动力 Labor input in livestock system	—	投入	中国统计年鉴	第一产业从业人员×(牧业总产值/农林牧渔业总产值)	万人
养殖业资本 Capital in livestock system	—	投入	全国农产品成本收益资料汇编	各地区畜禽产品物质与服务费用	亿元
外部饲料 External fodder	—	投入	全国农产品成本收益资料汇编	精饲料数量-饲料粮数量	万 t
粮食产量 Grain output	期望产出	—	中国统计年鉴	主要农作物产品产量	万 t
化肥产污量 Chemical fertilizer pollution	非期望产出	—	中国统计年鉴	农用化肥施用折纯量×产污强度	万 t
畜禽产品产量 Livestock product output	—	期望产出	中国农村统计年鉴	主要畜禽产品产量	万 t
粪便污染 Fecal pollution	—	非期望产出	—	粪便产量×污染物平均含量	万 t
粪便还田量 Manure recycled	投入	非期望产出	—	粪便产量×畜禽粪尿还田率	万 t
饲料粮 Feed grain	期望产出	投入	—	主要农产品产量×饲用比例	万 t

畜禽粪尿还田率来源:刘晓永^[37]。饲用比例来源:赵静等^[38],胡向东等^[39],粮食产量包括稻谷、小麦、玉米、大豆和薯类的产量

本研究通过引入方向距离函数来达到同时实现最大化期望产出和最小化非期望产出的目的。基于方向距离函数的网络 DEA 模型可以表述如下:

$$\begin{cases} \max \beta = \sum_{l=1}^3 \delta^l \beta^l \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K \lambda_k^l x_k^l \leq x_k^l & \sum_{k=1}^K \lambda_k^l y_k^l \geq (1 + \beta^l) y_k^l \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k^l v_k^{(j,l)} \leq v_k^{(j,l)} & \sum_{k=1}^K \lambda_k^l w_k^{(l,j)} \geq (1 + \beta^l) v_k^{(l,j)} \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k^l w_k^{(j,l)} \leq w_k^{(j,l)} & \sum_{k=1}^K \lambda_k^l w_k^{(l,j)} = (1 - \beta^l) w_k^{(l,j)} \\ \lambda_k^l \geq 0 & k = 1, \dots, K \quad l = 1, 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, β^l 为子系统 S_l 期望产出增长和非期望产出缩减的比率; β 为整个种养结合系统期望产出增长和非期望产出缩减的比率; δ^l 为各子系统对整个复合系统的权重,且有:

$$\sum_{l=1}^2 \delta^l = 1 \quad (5)$$

结合图 1 我们发现种植和养殖两个子系统并不存在共同的、可比的外部投入。在种植子系统和养殖子系统同等重要的假设下,本文设定权重为 $\delta = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ 。

最后,借鉴 Chung 等^[18]的思路,分别定义各子系统效率 θ^l 和种养结合效率 θ 为:

$$\theta^l = 1/(1 + \beta^l) \quad (6)$$

$$\theta = \sum_{l=1}^2 \delta^l \theta^l \quad (7)$$

1.4 情景模拟

为了更加直观的展示种养结合农业生产模式对于农业生态效率提升的贡献,本研究采用情景分析法来对比种养结合与种养分离状态下农业生态效率变化。具体来说,在种养分离情景下,假设种植系统和养殖系统是相互独立的生产系统,两者生产过程中的产品没有直接作为中间投入进入另一个系统。在种养结合情景下,假设种植系统和养殖系统以畜禽粪便还田和饲料粮形成链接,构成一个完整的复合系统,种植系统和养殖系统的部分产品作为中间投入进入另一个系统实现物质循环。通过对比不同情景下种植系统和养殖系统的投入产出变化及效率差异可以较为清晰的刻画出种养结合循环农业对于农业环境经济绩效的影响。

2 结果与分析

2.1 全国层面农业种养结合生态效率变化趋势分析

由图 2 可以看出,2000—2021 年中国农业种养结合生态效率平均值为 0.5975,在 2011 年以前呈下降趋势,2011 年后整体呈上升趋势,2021 年达到效率最大值 0.6758,整体仍处于较低效率水平。从各子系统来看,养殖系统效率呈平稳上升趋势,平均效率值为 0.7295;而种植系统效率先降后升,整体效率值略有下降,平均效率值为 0.6292。为了进一步刻画种养结合各子系统的变化特征,对全国农业种养结合生态效率变动及各子系统贡献进行了分解。由图 3 可以看出,养殖系统和种植系统共同促进了种养结合系统效率的提高,且养殖系统对整个种养结合系统效率提升的贡献相对更大。除个别年份外,养殖系统和种植系统对农业种养结合生态效率起到同步促进或抑制作用。我国农业种养结合生态效率提升与国家近年来高度重视农业绿色发展,不断促进种养结合有关,如 2015 年中央一号文件提出“开展粮改饲和种养结合”模式试点,2016 年和 2017 年分别提出了《关于加快发展农业循环经济的指导意见》和《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》为大力发展种养结合、生态循环农业提供了政策引领。然而,总体来看,目前我国农业仍处在种养分离的状态,种养结合程度不高,大量的秸秆和畜禽粪便资源没有得到有效利用,目前秸秆饲料化利用率仅为 18%,畜禽粪污综合利用率 75%。因此,农业种养结合生态效率仍处在一个较低的水平,未来还需要进一步推进种养结合农业模式的发展。

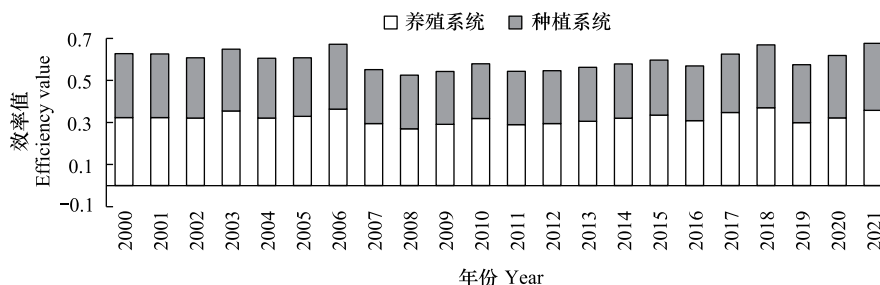


图 2 2000—2021 年全国农业种养结合效率及各子系统效率

Fig.2 The eco-efficiency of the integrated crop-livestock system and the subsystems in China from 2000 to 2021

2.2 分区域农业种养结合生态效率分析

表 2 给出了各区域种养结合系统及各子系统的效率值。总体来看,不同地区种养结合效率差异显著,东

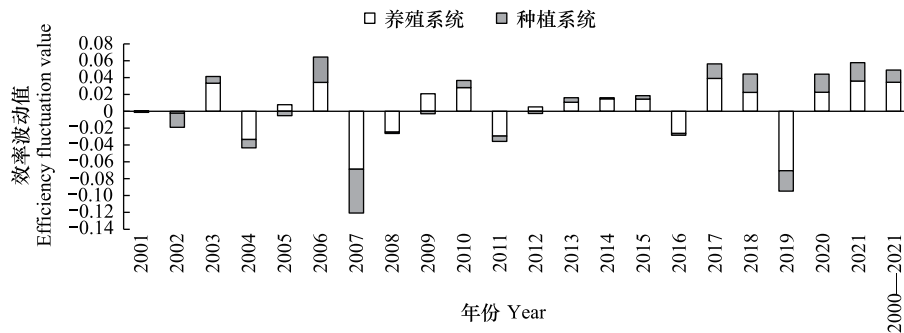


图3 2000—2021年全国种养结合效率变动情况及各子系统对其的贡献

Fig.3 Changes in the eco-efficiency of the integrated crop-livestock systems in China and the contribution of subsystems from 2000 to 2021

北地区整体效率值最高,为0.7172,东部次之,中部和西部地区效率较低。养殖子系统效率最高的是东部地区,其后依次为中部、东北和西部地区。种植子系统效率最高的是东北地区,其次是东部、中部和西部地区。东北地区农业种养结合生态效率较高主要得益于农业规模化和商品化程度高。东部地区经济发达,在资金、技术、基础设施等方面具有比较优势。而中西部地区受经济水平和自然环境的约束,农业现代化水平相对落后。从各地区种养结合及各子系统效率变化情况来看,东部、中部和东北地区种养结合整体效率有所提高,西部地区的效率值略有下降(图4)。效率提升最多的是东部和东北地区,其次为中部地区。

表2 2000—2021年东中西部和东北地区种养结合效率均值及各子系统贡献

Table 2 Averaged eco-efficiency of the integrated crop-livestock system and the contribution of subsystems in Eastern, Central, Western, and Northeastern China from 2000 to 2021

地区 Region	效率值 Efficiency value			各子系统贡献比率/% Contribution ratio of each subsystem/%		
	种植系统效率 Efficiency of the crop system	养殖系统效率 Efficiency of the livestock system	整体效率 Overall efficiency	种植系统 Crop system	养殖系统 Livestock system	整体 Overall
东部地区 Eastern region	0.6697	0.8840	0.6829	43.11	56.89	100.0
中部地区 Central region	0.6232	0.7307	0.5545	46.03	53.97	100.0
西部地区 Western region	0.5492	0.5755	0.5019	48.83	51.17	100.0
东北地区 Northeast region	0.7730	0.7255	0.7172	51.59	48.41	100.0
全国均值 National mean	0.6292	0.7295	0.5975	46.31	53.69	100.0

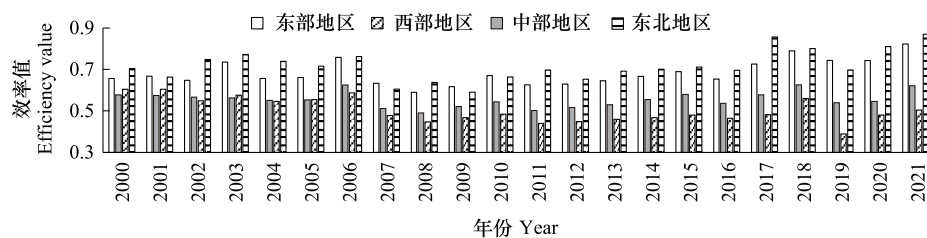


图4 2000—2021年中国东中西部和东北地区农业种养结合生态效率

Fig.4 Eco-efficiency of the integrated crop-livestock system in the Eastern, Central, Western, and Northeastern China from 2000 to 2021

由表3可以看出,东部、中部和东北地区种植子系统和养殖子系统的效率均处于正向增长,而西部种植子系统和养殖子系统的效率则呈负向波动。此外,东部、中部和西部各子系统贡献比率均为养殖子系统大于种植子系统,而东北地区种植子系统贡献比率大于养殖子系统。东部和中部地区养殖系统效率提升对整体效率

提升的贡献更大,贡献率在 60%以上。对于西部地区来说,种植系统效率的下降是导致农业种养结合生态效率下降的主要原因。东北地区是我国种植业的优势主产区,其种植系统效率提升明显,种植系统效率的提升贡献了整个农业生态效率提升的 85%,相比较种植系统来说,东北地区的养殖系统效率提升不明显。

表 3 2000—2021 年东中西部和东北地区农业种养结合生态效率波动值及各子系统结构

Table 3 Fluctuations in the eco-efficiency of the integrated crop-livestock system and the subsystems in Eastern, Central, Western, and Northeastern China from 2000 to 2021

地区 Region	效率波动值 Efficiency fluctuation value			各子系统波动比率/% Fluctuation ratio of each subsystem		
	Δ 种植系统 Δ Crop system	Δ 养殖系统 Δ Livestock system	Δ 整体 Δ Overall	种植系统 Crop system	养殖系统 Livestock system	整体 Overall
东部地区 Eastern region	0.0046	0.0081	0.0079	36.27	63.73	100.0
中部地区 Central region	0.0021	0.0035	0.0021	37.52	62.48	100.0
西部地区 Western region	-0.0061	-0.0021	-0.0048	74.67	25.33	100.0
东北地区 Northeast region	0.0102	0.0018	0.0079	85.01	14.99	100.0
全国均值 National mean	0.0010	0.0030	0.0023	24.67	75.33	100.0

参考张长征等^[43]的做法,将农业种养结合生态效率值分为 3 档:较低效率($0 < \rho \leq 0.6$)、中等效率($0.6 < \rho \leq 0.8$)、较高效率($0.8 < \rho < 1$)。可以发现,农业种养结合生态效率值较高的省份主要集中在东部地区和东北地区,中部和西部地区效率值相对较低。其中,东部地区达到中等效率水平以上的省份有北京、天津、上海、江苏、山东和广东 6 省市,占比为 60%。整体效率最高的是上海,效率值达到了 0.8614。中部地区达到中等以上效率水平的省份有江西和湖南,占比为 33.33%;西部地区达到中等效率水平的省份有四川和宁夏,占比为 20%;东北地区三省份全部达到中等效率及以上水平,占比 100%。处于低效率水平的省份为陕西和甘肃,全部位于西部地区,其中甘肃省效率值最低,仅为 0.3012。受自然和经济条件的限制,西北地区的农业生产基础条件较差,且种养结合程度整体较低,农业生产方式仍比较粗放,因此种养结合生态效率仍处于较低水平。养殖子系统效率最高的省份为广东且达到有效水平,达到较高效率值状态的有江西、江苏、福建、湖南、山东、上海、天津、浙江、北京和辽宁 10 省市。种植子系统效率达到较高效率状态的省份有上海、吉林、北京、江西和黑龙江。甘肃的养殖子系统效率和种植子系统效率均最低,效率值分别为 0.3633 和 0.2748(图 5)。

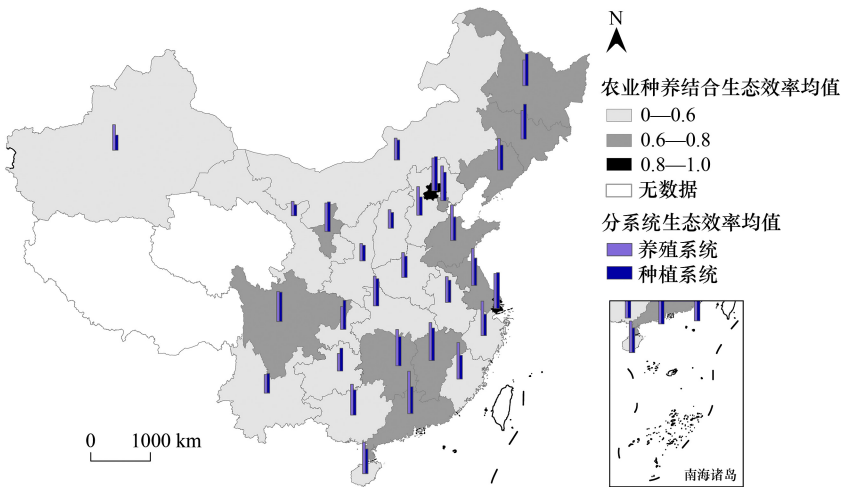


图 5 2000—2021 年各省市农业种养结合生态效率均值

Fig.5 The average eco-efficiency of the integrated crop-livestock system in each province in China from 2000 to 2021

2.3 农业种养结合生态效率损失原因及改善方向

根据 SBM 模型,当效率值 <1 时,松弛量的大小可以反映农业生态效率损失的原因。本文将各变量的投入产出松弛量除以对应的投入产出指标值得到投入冗余率和产出不足率,以此反映农业生产无效率的水平。

从表 4 可以看出,导致农业生产无效率的主要原因是劳动力投入冗余、农牧业污染物排放冗余以及农药、农膜、化肥投入冗余。其中,种植业和养殖业劳动力投入冗余率分别为 39.82% 和 28.30%,说明我国种植业和养殖业中存在劳动力投入过剩现象,但冗余率总体呈下降趋势,其中 2003 年和 2018 年下降明显。化肥、粪便污染是导致种养结合效率损失的第二大原因,整体来看,化肥投入冗余率下降趋势明显,2019 年后大幅下降,这与 2015 年后我国持续实施化肥农药零增长行动有关,化肥农药利用率达到 40% 以上^[5]。种植系统生态效率损失主要来自于劳动力投入冗余,其次为农药、农膜、化肥的过量投入以及化肥污染排放冗余。从种植业生产要素投入冗余率的变化情况来看,农作物种植面积、灌溉面积、种植劳动力、化肥、农药的投入冗余率均整体呈下降趋势,非期望产出冗余率整体也呈下降趋势,说明中国种植系统的要素投入以及资源环境正逐步得到改善。养殖系统无效率主要来源于养殖劳动力投入冗余和粪便产污。从养殖系统投入产出冗余率变化情况来看,劳动力、资本和饲料投入冗余率均呈现下降趋势,这与畜禽养殖规模化、集约化水平的提高以及养殖技术水平的提高有关。表征非期望产出的粪便产污冗余率也呈现下降趋势,意味着中国养殖系统粪便处理及资源化利用正在逐步提升。

表 4 2000—2021 年全国及各地区农业种养结合生态效率值及投入产出冗余情况

Table 4 Eco-efficiency of the integrated crop-livestock system and the input-output redundancies from 2000 to 2021

年份 Year	效率值 Efficiency value	投入冗余率 Input redundancy rate							非期望产出冗余率 Unexpected output redundancy rate	
		种植劳动力 Crop labor force	化肥 Chemical fertilizer	农膜 Agricultural film	农药 Pesticide	养殖劳动力 Livestock labor force	养殖资本 Livestock capital	饲料 Fodder	化肥产污 Chemical fertilizer pollution	粪便产污 Fecal pollution
2000	0.6268	0.4633	0.3104	0.2509	0.3292	0.4300	0.0534	0.3196	0.3415	0.4030
2001	0.6259	0.5732	0.3592	0.3114	0.3877	0.5457	0.1162	0.4241	0.4204	0.5340
2002	0.6069	0.4728	0.2580	0.2610	0.3128	0.4043	0.0447	0.2672	0.3422	0.4032
2003	0.6482	0.3583	0.1882	0.2267	0.2330	0.3285	0.0378	0.2180	0.2509	0.3135
2004	0.6048	0.3912	0.2386	0.2112	0.2934	0.3048	0.0321	0.2229	0.3071	0.3134
2005	0.6073	0.3933	0.2602	0.2248	0.2855	0.3164	0.0439	0.2405	0.3248	0.3455
2006	0.6718	0.2763	0.1593	0.2027	0.1832	0.2335	0.0431	0.1857	0.2029	0.2514
2007	0.5510	0.4457	0.2752	0.2779	0.2762	0.3684	0.0573	0.2320	0.3478	0.3268
2008	0.5246	0.4004	0.2427	0.2568	0.2755	0.3440	0.0879	0.2182	0.3147	0.3249
2009	0.5425	0.4514	0.2466	0.2529	0.2759	0.3618	0.0827	0.2531	0.3329	0.3632
2010	0.5790	0.4550	0.2562	0.2310	0.2954	0.3091	0.0578	0.2575	0.3215	0.3634
2011	0.5432	0.4437	0.2474	0.2448	0.3013	0.3148	0.0633	0.2074	0.3167	0.3274
2012	0.5459	0.4937	0.2696	0.2904	0.3307	0.3285	0.0931	0.2517	0.3509	0.3643
2013	0.5620	0.4838	0.2647	0.2971	0.3202	0.3019	0.0996	0.2513	0.3480	0.3665
2014	0.5782	0.4354	0.2538	0.2862	0.3041	0.2428	0.0813	0.2517	0.3301	0.3603
2015	0.5966	0.4420	0.2627	0.2943	0.3087	0.2341	0.0789	0.2369	0.3331	0.3466
2016	0.5682	0.4445	0.2607	0.2952	0.2940	0.2543	0.0825	0.2202	0.3253	0.3167
2017	0.6245	0.4503	0.2703	0.3448	0.3297	0.2495	0.0861	0.2832	0.3467	0.3566
2018	0.6688	0.3602	0.1917	0.2400	0.2335	0.1524	0.0695	0.2136	0.2451	0.2925
2019	0.5741	0.3457	0.1961	0.2597	0.2547	0.1386	0.1178	0.1833	0.2435	0.1927
2020	0.6181	0.0924	0.0469	0.0856	0.0772	0.0340	0.0603	0.0431	0.0627	0.0594
2021	0.6758	0.0873	0.0495	0.0667	0.0718	0.0282	0.0488	0.0654	0.0565	0.0684
均值 Mean	0.5975	0.3982	0.2322	0.2460	0.2715	0.2830	0.0758	0.2294	0.2939	0.3179
东部地区 Eastern region	0.6829	0.3012	0.1996	0.1757	0.2696	0.1708	0.0281	0.1730	0.2384	0.2304
中部地区 Central region	0.5545	0.5300	0.2647	0.2455	0.4580	0.3794	0.0360	0.3089	0.3547	0.4235
西部地区 Western region	0.5019	0.5071	0.3045	0.3678	0.2228	0.3986	0.1688	0.2913	0.3855	0.4200
东北地区 Northeast region	0.7172	0.0948	0.0349	0.0754	0.0676	0.0788	0.0046	0.0521	0.0519	0.0583

此外,不同地区的种养结合效率损失的原因表现出一定的区域差异。农药投入和化肥产污冗余是导致东部地区种养结合效率损失的主要影响因素,而畜禽粪尿产污和农药投入冗余是导致中部地区种养结合效率损失的主要原因。养殖劳动力投入冗余和农膜投入冗余是东北地区种养结合效率损失的主要原因。西部地区种养结合效率损失的主要影响因素包括种植和养殖系统劳动力投入以及农膜的投入冗余。整体来看,四大区域效率损失的首要原因都是种植劳动力投入冗余,说明目前我国农业亟需提升机械化水平,推进农业投入要素转型替代。此外,由于农业面临的种养分离,导致大量的畜禽粪便资源没有得到有效利用,既带来了大量的污染,也导致化肥等外部投入的增加,制约了种养系统生态效率的提升。因此,未来应结合各地区种养业特点以及各省市种养结合效率不同要素改善方向和潜力,推进种养系统不同生产环节的物质循环利用。

2.4 种养结合与种养分离情景对比分析

采用情景对比的方式,本研究开展了种养结合与种养分离状态下农业生态效率对比分析。由表 5 可以看出,在种养分离情景下,种植系统效率值为 0.5684,养殖系统效率值为 0.6207。而在种养结合情景下,种植系统和养殖系统的效率值分别提升为 0.6292 和 0.7295,可见种养结合能够有效提升农业生态效率。与种植系统相比,种养结合系统的化肥投入冗余从 48.55%下降到 23.22%;化肥产污非期望产出冗余从 53.39%下降到 29.39%。与养殖系统相比,种养结合系统的饲料投入冗余从 34.93%下降到 22.94%;粪便产污非期望产出冗余从 40.87%下降到 31.79%。可以发现,通过种养结合能促进要素投入和农业面源污染减少,从而提升种养结合效率。

表 5 种养结合与种养分离情景下农业生态效率值对比

Table 5 Comparison of the eco-efficiency between crop-livestock integration and crop-livestock separation scenarios

效率值及冗余率 Efficiency value and redundancy rate	种养分离 Separated crop-livestock system		种养结合 Integrated crop-livestock system	
	种植系统 Crop system	养殖系统 Livestock system	种植系统 Crop system	养殖系统 Livestock system
效率值 Efficiency value	0.5684	0.6207	0.6292	0.7295
种植劳动力投入冗余 Redundancy of crop labor input	0.6759	—	0.3982	—
化肥投入冗余 Redundancy of fertilizer input	0.4855	—	0.2322	—
农膜投入冗余 Redundancy of mulch film input	0.5313	—	0.2460	—
农药投入冗余 Redundancy of pesticide input	0.5351	—	0.2715	—
养殖劳动力投入冗余 Redundancy of livestock labor force	—	0.4750	—	0.2830
养殖资本投入冗余 Redundancy of livestock capital	—	0.3135	—	0.0758
饲料投入冗余 Redundancy of fodder input	—	0.3493	—	0.2294
化肥产污冗余 Redundancy of fertilizer pollution	0.5339	—	0.2939	—
粪便产污冗余 Redundancy of fecal pollution	—	0.4087	—	0.3179

3 结论与讨论

(1)从效率值大小来看,种养结合整体处于较低效率水平。2000—2021 年,我国 29 个省市种养结合效率整体呈上升趋势,但仍处于较低效率水平,均值为 0.5975。从全国范围看,养殖子系统对种养结合系统的贡献大于种植子系统,但不同地区略有差异,东中西部地区与全国保持一致,但东北地区种植子系统的贡献大于养殖子系统。各子系统效率水平与地区种植业和养殖业发展适宜性相类似。

(2)从区域差异来看,效率增长存在区域不均衡现象。东北地区最高,东部次之,中部和西部效率最低。29 个省市中只有上海和北京两个地区种养结合系统处于较高效率水平,种养结合发展良好;上海、吉林、北京、江西和黑龙江 5 省市种植系统达到较高效率水平;中西部省份效率值相对较低。

(3)从投入产出冗余分析来看,导致农业生产无效率的主要原因是劳动力投入冗余、农牧业污染物排放冗余以及农药、农膜、化肥投入冗余,种养结合可以有效降低投入冗余和污染物排放冗余,提升农业生态效率。

基于以上结论,得到如下启示:

(1) 采取种养结合的农业生产方式可以有效提高农业生态效率。未来应根据地方优势优化种养产业布局,将种养结合作为推动农业绿色转型发展的重要手段,强化科技、人才和资金支持,加强化肥、粪便等种养废弃物的资源化利用,构建完善的种养循环产业链。

(2) 在农业生产过程中要持续转变农业生产经营方式,提升农业社会化服务水平。目前,规模化养殖已逐渐占据主导地位,但种植业仍以小农户为主,规模化养殖场与小农户进行畜禽粪污消纳交易时成本较高,制约了种养结合效率的提升,未来应该进一步提升农业社会化服务水平,促进小农户与规模化养殖场的有效衔接。

(3) 在推进种养结合发展过程中,应充分结合各地区种养业特点及要素改善方向和潜力,如甘肃、陕西、云南、山西、贵州、新疆等省份应加快种养结合实施进程,提高效率水平;东北地区应重点优化养殖子系统要素投入,以促进农业种养结合生态效率的提升;中部和西部地区应进一步促进农业的要素转型替代,提升种养系统的结合程度,促进农业废弃物的循环利用。

(4) 未来应该进一步推进农业投入要素转型替代,提升农业现代化水平。整体来看,我国四大区域效率损失的首要原因都是种植劳动力投入冗余,说明目前我国农业机械化水平仍然较低,在城镇化不断推进以及农村劳动力不断外流背景下应该进一步推进省工型农业投入要素对传统投入要素的转型替代,提升农业现代化水平。

参考文献(References):

- [1] 黄季焜,解伟,盛誉,王晓兵,王金霞,刘承芳,侯玲玲. 全球农业发展趋势及 2050 年中国农业发展展望. 中国工程科学, 2022, 24(1): 29-37.
- [2] 刘晓洁,贺思琪,陈伟强,闫丹,刘立涛,丁钢强,张忠杰,刘刚. 可持续发展目标视野下中国食物系统转型的战略思考. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 112-122.
- [3] 金书秦,张哲晰,胡钰,韩冬梅,杜志雄. 中国农业绿色转型的历史逻辑、理论阐释与实践探索. 农业经济问题, 2024, (3): 4-19.
- [4] 颜晓元,夏龙龙,遆超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 177-183.
- [5] 何可,宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 45-57.
- [6] Jin S Q, Zhang B, Wu B, Han D M, Hu Y, Ren C C, Zhang C Z, Wei X, Wu Y, Mol A P J, Reis S, Gu B J, Chen J. Decoupling livestock and crop production at the household level in China. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 48-55.
- [7] 赵善丽,张楠楠,陈轩敬,石孝均,陈新平,柏兆海,马林. 流域尺度种养系统养分管理研究的意义与重点——以长江流域为例. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(8): 1230-1239.
- [8] 石晓晓,郑国砥,高定,陈同斌. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力. 资源科学, 2021, 43(2): 403-411.
- [9] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,栗丽,谢钧宇,李丽娜,黄晓磊,谢英荷. 我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4835-4854.
- [10] 王亚静,王飞,石祖梁,高春雨,王红彦,毕于运. 基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38(6): 13-20.
- [11] 董红敏,左玲玲,魏莎,朱志平,尹福斌. 建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 180-189.
- [12] 王如玉,肖海峰. 种养结合对肉羊养殖减排增效的影响. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 192-204.
- [13] 谭淑豪,刘青,张清勇. 稻田综合种养土地利用的生态-经济效果——以湖北省稻虾共作为例. 自然资源学报, 2022, 36(12): 3131-3143.
- [14] 尹科,王如松,周传斌,梁菁. 国内外生态效率核算方法及其应用研究述评. 生态学报, 2012, 32(11): 3595-3605.
- [15] 聂弯,于法稳. 农业生态效率研究进展分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1371-1380.
- [16] 王宝义,张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 11-19.
- [17] Faere R, Grosskopf S, Lovell C A K, Pasurka C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, 1989, 71(1): 90.
- [18] Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3): 229-240.

- [19] 徐维祥, 郑金辉, 李续双. 中国农业环境效率时空演变及其驱动因素. 生态学报, 2021, 41(21): 8364-8374.
- [20] 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. 地理学报, 2018, 73(11): 2168-2183.
- [21] 李欠男, 李谷成, 尹朝静. 中国农业绿色发展水平的地区差异及收敛性. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 230-242.
- [22] 陆杉, 熊娇, 李雯. 长江中游地区农业生态效率空间关联网络演化及驱动因素. 生态学报, 2024, 44(8): 3199-3212.
- [23] 林紫藤, 张艳荣. 我国畜牧业绿色全要素生产率时空差异及影响因素研究. 生态与农村环境学报, 2023, 39(9): 1144-1157.
- [24] 吴亚玲, 杨汝岱, 吴比. 中国农业全要素生产率演进与要素错配——基于 2003—2020 年农村固定观察点数据的分析. 中国农村经济, 2022, (12): 35-53.
- [25] 黄玛兰, 曾琳琳, 李晓云. LCA 和 DEA 法相结合的农业生态效率研究——兼顾绿色认知和环境规制的影响. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022, (1): 94-104.
- [26] 孟祥海, 周海川, 杜丽永, 沈贵银. 中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长变迁——基于种养结合视角的再考察. 农业经济问题, 2019, (6): 9-22.
- [27] 王善高, 田旭. 种养结合能提高小规模生猪养殖的环境效率吗? ——基于江苏省生猪养殖户的分析. 中国农业大学学报, 2021, 26(2): 199-210.
- [28] He Z L, Zhang Y, Liu X J, de Vries W, Ros G H, Oenema O, Xu W, Hou Y, Wang H L, Zhang F S. Mitigation of nitrogen losses and greenhouse gas emissions in a more circular cropping-poultry production system. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106739.
- [29] Fre R, Grosskopf S, Whittaker G. Network dea. Modeling data irregularities and structural complexities in data envelopment analysis. Springer Science & Business Media, 2007.
- [30] 郝帅, 孙才志. 基于网络 DEA 及 SNA 模型的中国水资源-能源-粮食纽带系统效率研究. 地理研究, 2022, 41(7): 2030-2050.
- [31] 朱梦凡, 李敬锁. 中国粮食主产区耕地利用效率区域差异及影响因素——基于 179 个地级市的实证研究. 水土保持通报, 2024, 44(1): 206-217.
- [32] 邵留国, 何莹莹, 张仕璟, 丰超. 基于网络 DEA 的中国火电行业循环经济效率及影响因素研究. 资源科学, 2016, 38(10): 1975-1987.
- [33] 胡树林, 罗彩文. 畜牧业循环经济效率的三大地带差异及影响因素研究. 西南科技大学学报: 哲学社会科学版, 2022, 39(1): 60-68.
- [34] Tone K, Tsutsui M. Network DEA: a slacks-based measure approach. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1): 243-252.
- [35] 崔叶辰, 韩亚丽, 吕宁, 祝宏辉. 基于超效率 SBM 模型的农业生态效率测度. 统计与决策, 2020, 36(21): 87-90.
- [36] 崔许锋, 王雨菲, 张光宏. 面向低碳发展的农业生态效率测度与时空演变分析——基于 SBM-ESDA 模型. 农业经济问题, 2022, (9): 47-61.
- [37] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [38] 赵静, 于卓, 刘增金. 中国饲料粮生产布局时空变迁及影响因素研究. 世界农业, 2023(4): 71-83.
- [39] 胡向东, 王济民. 我国生猪饲料耗粮量估算及结构分析. 农业技术经济, 2015(10): 4-13.
- [40] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别. 中国环境科学, 2006, (6): 751-755.
- [41] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 彭书传, 刘晓晖. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2278-2286.
- [42] 张长征, 芮晦敏. 黄河流域水资源-能源-粮食系统投入产出效率及影响因素. 水利经济, 2022, 40(6): 1-7.