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

县域玉米生产系统产量-经济-碳排放协同优化措施

崔石磊, 易小燕, 任静

引用本文:
崔石磊, 易小燕, 任静. 县域玉米生产系统产量-经济-碳排放协同优化措施[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1529-1537.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0494

崔石磊, 易小燕, 任静. 县域玉米生产系统产量-经济-碳排放协同优化措施[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1529-1537.
CUI S L, YI X Y, REN J. Synergistic optimization measures for yield-economy-carbon emission in county-level maize production systems [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1529-1537.

开放科学 OSID

县域玉米生产系统产量-经济-碳排放协同优化措施

崔石磊, 易小燕, 任静*

(北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为明确县域玉米生产系统现状, 制定产量-经济-碳排放协同优化管理措施和实施方案, 本研究基于农户调查数据, 运用生命周期评价方法(LCA)量化玉米生产碳足迹, 并结合玉米生产系统的投入和产出, 采用数据包络分析方法(DEA)剖析县域玉米生产系统产量-经济-碳排放的理论优化潜力。结果表明: 玉米生产系统氮肥、磷肥、钾肥、农药、柴油、种子投入量分别为279.2、127.3、115.1、6.5、80.3、31.9 kg·hm^{-2}; 耗电244.3 kWh·hm^{-2}, 产量、收益和碳足迹分别为7 784.7 kg·hm^{-2}、9 306.6元·hm^{-2}和5.9 t CO_2-eq·hm^{-2}。通过制定氮肥、磷肥、钾肥、农药和种子用量分别为248.1、96.9、91.0、5.6 kg·hm^{-2}和30.3 kg·hm^{-2}的管理措施和实施方案, 可以实现玉米生产系统投入减少5.1%~27.5%; 经济效益和产量分别增加42.1%和19.9%, 碳足迹减少18.3%。因此, 围绕肥料、农药、播种制定管理措施和实施方案, 可实现县域玉米生产系统产量-效益-碳减排的协同优化, 有利于农业向可持续生产转型。

关键词: 玉米; 产量; 碳排放; 协同优化; LCA+DEA模型

中图分类号: F326.11; X322 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-6819(2025)06-1529-09 **doi**: 10.13254/j.jare.2025.0494

Synergistic optimization measures for yield-economy-carbon emission in county-level maize production systems

CUI Shilei, YI Xiaoyan, REN Jing*

(State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To clarify the current status of the county's maize production system and to develop synergistic optimization strategies for yield-economic-carbon emissions, this study quantified the carbon footprint of maize production using life cycle assessment (LCA) based on farm household survey data. It also used data envelopment analysis (DEA) to assess the theoretical optimization potential of yield-economy-carbon emissions within the county's maize production system by integrating input and output data. The results showed that the inputs of N, P_2O_5, K_2O, pesticides, diesel, and seeds were 279.2, 127.3, 115.1, 6.5, 80.3, and 31.9 kg·hm^{-2}, respectively. The electricity input was 244.3 kWh·hm^{-2}. The corresponding outputs included yield, net economic profit, and carbon footprint were 7 784.7 kg·hm^{-2}, 9 306.6 yuan·hm^{-2}, and 5.9 t CO_2-eq·hm^{-2}, respectively. By implementing management practices and intervention plans that set the application rates of N, P_2O_5, K_2O, pesticides, and seeds at 248.1, 96.9, 91.0, 5.6, and 30.3 kg·hm^{-2}, respectively, the maize production system achieved input reductions ranging from 5.1%-27.5%. At the same time, net economic profit and yields increased by 42.1% and 19.9%, respectively, while the carbon footprint was reduced by 18.3%. Therefore, the development of fertilizer, pesticide, and seeding management measures and implementation plans can achieve synergistic optimization of yield-efficiency-carbon emission reduction in the county's maize production system, which is conducive to the transition of agriculture to sustainable production.

Keywords: maize; yield; carbon emission; synergistic optimization; LCA+DEA model

收稿日期: 2025-05-27 **录用日期**: 2025-08-15

作者简介: 崔石磊(1993—), 男, 河北沧州人, 博士, 研究方向为农业碳、氮足迹及可持续发展。E-mail: acuishilei@163.com

***通信作者**: 任静 E-mail: renjing@caas.cn

基金项目: 中国农业科学院青年创新专项(Y2025QC10); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ZDRW202419); 国家社会科学基金重点项目(24AZD023)

Project supported: Youth Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (Y2025QC10); Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ZDRW202419); Key Program of National Social Science Foundation of China (24AZD023)

玉米(*Zea mays* L.)作为主粮作物之一,是全球粮食安全的关键支柱。伴随人口的增长以及其他产业对粮食的需求,到2050年全球对玉米等主要粮食的需求预计将增加70%[1-2]。在我国,玉米的种植面积和产量分别居粮食作物的第三位和第一位,在保障我国14亿人口粮食安全方面起到了重要作用。然而,在经历第一次绿色革命之后,高产品种、改良作物和土壤管理技术提高了作物生产力和全国粮食产量,但仍不能保障粮食的绝对安全。并且在农业生产中,不合理的农田管理和资源投入造成温室气体排放增加、土壤酸化及土壤退化等问题[3]。在粮食安全和环境污染的双重压力下,通过优化生产管理,协同提升粮食产能和经济效益、减少环境足迹,是应对这些挑战的有效策略之一[4]。

在不同地区,已有学者开展玉米生产措施的优化并取得了成效。通过增加玉米种植密度能增产12.3%[5]。在华北地区,小麦-玉米轮作的多样化种植制度可使产量和收益分别增加32.0%和20.2%[6];在黄土高原地区利用地膜覆盖可显著提升冬小麦和夏玉米产量31.8%和36.4%。在全国尺度,已有研究基于气候数据,运用田间试验和机器学习方法,采用增加玉米种植密度和土壤改良技术的策略,可使玉米产量提高52.0%[7]。然而,全球处于"产量停滞"和"天花板压力"的玉米种植区分别占14.6%和25.1%[8],粮食消费需求持续攀升与农业生态负荷同步加重的矛盾日益凸显。因此,以玉米生产系统为研究对象,探讨产量提升、经济收益增加及减少碳排放的管理措施比以往任何时候都更为紧迫。

目前,多目标核算的方法包括帕累托最优、多目标优化、Lingo模型等,然而这些方法存在可解集大、参数复杂以及约束条件单一等限制因素[9-11]。生命周期评价(LCA)与数据包络分析(DEA)相结合进行多目标优化正日益得到认可[12],并应用在农业领域[13]。DEA模型是一种估计多个同质单元相对效率的非参数方法,该方法从系统角度计算生产过程的资源投入、能源消耗、经济效益和环境效率,并对其进行定量优化[14]。LCA是国际机构通常推荐的方法,能定量评估产品"从摇篮到坟墓"整个生命周期的环境影响,同时对可持续性政策的制定具有支撑作用[15]。DEA+LCA方法被共同用于评价各种农业生产系统(如种植业、畜牧业或渔业)的环境和经济绩效。该组合方法将LCA中的清单指标作为DEA的输入项,以提高数据的预测能力和预测精度。例如,通过LCA+DEA框架评估智利果园的生态效率和改进目标;利用LCA+DEA方法计算我国南方109个甘蔗农场的生态效率,可以实现低效农场增加90.0%的利润和减少26.0%的碳足迹的改进目标[16]。可见,LCA+DEA方法能同时针对多个目标进行非参数规划,因此适合具有高度可变特性农业系统的效率评价和改进。

识别关键生产管理措施并优化是实现玉米可持续生产的关键[17]。研究人员在玉米种植过程中进行大量技术优化试验,试验证明采用合理的管理措施可以显著提高玉米生产的可持续性[18],包括优化玉米种植密度、采用高产栽培品种、改良冠层结构、分次施肥、适时灌溉等措施。优化玉米种植密度结合高产栽培品种可使玉米产量增产近一倍[7]。优化农艺措施(增密、分次施肥、适时灌溉)可使玉米产量、氮利用效率和经济收益分别提升30.0%、37.1%和62.2%[19]。然而,目前的研究主要集中在单个或有限数量的措施对玉米生产和环境的影响上,缺乏基于农户玉米生产系统产量、环境及经济协同优化的综合管理措施方案。因此,需探究玉米生产系统产量-经济-环境的优化潜力并制定农田管理措施和实施方案。

本研究以主要粮食作物生产区河南省濮阳市台前县为研究区域,基于玉米种植农户调研数据,采用LCA+DEA方法主要研究内容包含以下两个方面:①分析县域玉米生产系统在资源投入、产量、经济效益及碳足迹的理论优化潜力;②基于优化结果制定县域玉米生产系统产量-经济-碳排放协同优化的农田管理措施和实施方案。本研究为推动县域粮食生产系统向高产高效与低碳环保协同转型提供理论基础,也为农业政策制定者了解和推广经济和环境可持续的农田管理措施和实施方案提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及数据来源

河南省濮阳市台前县位于河南省东北部,豫鲁两省交界处(图1)。全县土地面积39 396.8 hm^2,其中耕地面积24 010.0 hm^2,占土地总面积的60.9%,属暖温带大陆性季风气候。年平均气温为13.4 ℃,无霜期一般为205 d,平均降水量为580.8 mm,降水主要集中在7—9月份。由于历史上黄河沉积、淤塞、决口、改道等变化,濮阳市具有平地、岗洼、沙丘、沟河等地貌特征。台前县粮食作物种植以小麦和玉米为主,普遍采用一年两熟的冬小麦-夏玉米轮作制度。本研究以玉米单作种植模式为研究对象,不涉及玉米与其他作

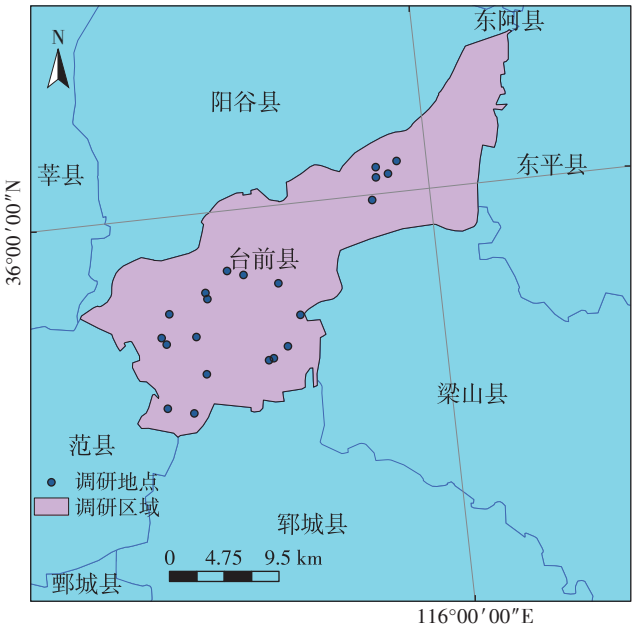

图1 调研区域及调研地点

Figure 1 Locations study area and survey points

物间作、套作等种植模式。该模式在研究区域内具有较强代表性，便于明确分析玉米种植过程中的资源投入、资源产出及环境排放。台前县玉米种植模式施肥以化肥为主，部分农户单季施用有机肥，玉米的灌溉方式为传统的大水漫灌，覆膜情况为不覆膜。

本研究对台前县粮食作物种植面积较大的乡镇进行调研。在台前县选取5个乡（镇），每个乡（镇）随机选取3~5个村，每个村随机选取10~15个农户开展农户调研，共得到有效问卷218份。在农户调研中，我们通过面对面半结构农户访谈进行问卷调查，内容包括农户家庭信息（农户的家庭收入、年龄、性别、种植年限、受教育程度等）；农户种植特征（地块面积、数量等指标）；生产资料投入产出信息（种子、化肥、有机肥和农药的投入量；灌溉方式及灌溉次数；机械使用类型及使用次数；玉米产量；雇工及租金信息以及每一项生产资料投入和产品产出的价格等）。

1.2 研究方法

1.2.1 LCA方法

本研究采用LCA方法计算玉米生产系统碳足迹，包括四个步骤：目标及边界定义、清单分析、影响评估和解释[20]。

（1）目标及边界

本研究的系统边界在已有研究的基础上进行界定[11,21]，即起始边界从农资生产所需要的矿石和化石燃料开采，终止边界为农业管理过程输出农产品和污染物。农业物质生产子系统包括化肥、有机肥、农药、电力、柴油等农业材料的生产过程。农业管理子系统包括施肥、灌溉、耕地、病虫草害防治等农作活动。功能单位定义为1 hm^2耕地。

（2）清单分析

在清单分析中，表1提供了每种产品的碳排放因子。此外，农田碳排放源于氮肥和有机肥的施用，使用NUFER模型中的公式计算[22]。

表1 农业生产资料投入的碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors of inputs

项目 Item	单位 Unit	参数 Premeter	文献 Reference
农业资料生产			
氮肥	kg CO_2-eq·kg^{-1}	8.8	[23-25]
磷肥	kg CO_2-eq·kg^{-1}	1.8	[24-26]
钾肥	kg CO_2-eq·kg^{-1}	9.5×10^{-1}	[24-26]
有机肥	kg CO_2-eq·kg^{-1} N	2.7	[27]
农药	kg CO_2-eq·kg^{-1}	18.4	[25,28]
电	kg CO_2-eq·kWh^{-1}	1.1	[29]
柴油	kg CO_2-eq·kg^{-1}	3.8	[25,30-31]
种子	kg CO_2-eq·kg^{-1}	1.9	[11]
施用过程			
氮肥	kg N_2O-N·kg^{-1}	3.0×10^{-2}	[22]
有机肥	kg N_2O-N·kg^{-1} N	6.2×10^{-3}	[22]
柴油	kg CO_2-eq·kg^{-1}	3.2	[25]

对于农业子系统清单分析碳排放估计如下：

$$CF_{emission} = CF_{AMS} + CF_{AFS} \quad (1)$$

式中：$CF_{emission}$是1 hm^2耕地农业生产化肥、农药和柴油等各种农用资料在农用材料生产子系统和农业子系统中碳排放总和，kg CO_2-eq·hm^{-2}；CF_{AMS}是农用材料生产子系统中化肥、农药和柴油等生产资料在生产和运输过程中的碳排放，kg CO_2-eq·hm^{-2}；CF_{AFS}是农业子系统中化肥、农药和柴油等生产资料在农田施用和其他管理过程中的碳排放，kg CO_2-eq·hm^{-2}。

$$CF_{AMS} = \sum(AI_i \times EF_j) \quad (2)$$

式中：AI_i为第i种农用资料在农用材料生产子系统（包括化肥、有机肥、农药和柴油等）的用量，kg·hm^{-2}（kWh·hm^{-2}）；EF_j为在农用材料生产子系统第j种生产资料在生产和运输的碳排放因子，kg CO_2-eq·kg^{-1}（kg CO_2-eq·kg^{-1} N，kg CO_2-eq·kWh^{-1}）（表1）。

$$CF_{AFS} = \sum(AI_i \times EF_j) + Total_{N_2O} \times 273 \quad (3)$$

式中：AI_i为第i种农用资料在农业子系统（包括化肥、有机肥和柴油）的用量，kg·hm^{-2}；EF_j为农用资料在农

业子系统第j种生产资料在农田施用和其他管理过程中的碳排放因子，kg N_2O-N·kg^{-1}（kg N_2O-N·kg^{-1} N、kg CO_2-eq·kg^{-1}）（表1）。$Total_{N_2O}$为化肥和有机肥在农田施用过程中产生的N_2O，kg·hm^{-2}；273为N_2O转为CO_2当量的转换系数。

$$Total_{N_2O} = \beta_1 \times N_{fertilizer} + \beta_2 \times N_{organic\ fertilizer} \quad (4)$$

式中：$Total_{N_2O}$为通过NUFER模型计算化肥和有机肥中氮肥在农田施用过程中N_2O的排放量；β_1和β_2分别在化肥和有机肥中氮肥N_2O的排放参数。

（3）影响评估

使用等效因子法评估玉米种植对环境的影响，将类似的污染物转换为潜在环境影响。表1列出了表征因子。

（4）解释说明

对玉米生产系统的整个生命周期的各种环境指标影响进行量化，发现关键的生产问题并形成结论与建议。

1.2.2 DEA方法

DEA方法从理论上量化玉米生产系统投入与产出指标的潜力。通常，农业的DEA实施是基于LCA+DEA框架，主要包括三步法、四步法和五步法，本研究选择以产出为导向的四步LCA+DEA模型[16]。具体步骤如下：

第一步是通过调研，收集多个农户决策单元（DUM）的生产产出和农业生产资料投入数据，包括：玉米产量、农民利润和农业投入（氮、磷、钾肥、农药、柴油和人工）。第二步是碳足迹（CF）的计算，通过LCA计算得到每一个农户种植所产生的CF。第三步是利用DEA对每个种植户的投入和产出效率进行评估，找出有效和无效的农户决策单元，然后在有效农户决策单元的基础上对每个无效农户决策单元提出优化的农田管理策略。其中有效农户决策单元为基准农户，是指在DEA模型中，投入产出效率值为1（即达到最优效率）的农户决策单元。基准农户代表当前样本集合中最高效的生产实践水平，共同构成了DEA效率前沿。第四步为投入产出效率计算，为了让CF作为一个期望产出指标能够在DEA模型中施用，将CF转换为其倒数。在计算农户的投入产出效率时，把农业投入作为投入项，以产量、利润和1/CF作为产出项。本研究将DEA估计目标CF，用于计算所需农业生产资料的最佳数量[13]。

通过DEA模型软件计算每一个DUM生产投入项的指标冗余，评估投入产出项指标。运用LCA方法估算玉米生产系统资源投入优化所带来的环境影响变化。

1.2.3 玉米生产系统经济收益

本研究玉米生产系统经济收益计算如下：

$$T_{net\ economic\ profit} = T_{production\ value} - T_{cost} \quad (5)$$

式中：$T_{net\ economic\ profit}$为生产净收益，元·$hm^{-2}$；$T_{production\ value}$为产值，元·$hm^{-2}$；$T_{cost}$为总成本，元·$hm^{-2}$。

$$T_{production\ value} = O_{yield} \times P_{yield} \quad (6)$$

式中：O_{yield}为产量，kg·hm^{-2}；P_{yield}为销售价格，元·kg^{-1}。

$$T_{cost} = \sum I_i \times P_i \quad (7)$$

式中：I_i为第i种农业生产资料的投入数量，包括种子、氮肥、磷肥、钾肥、有机肥、播种、农药、灌溉、人工、租金和机械收获；P_i为第i种农业生产资料的投入单价，包括种子、氮肥、磷肥、钾肥、有机肥、播种、农药、灌溉、人工、租金和机械收获。

1.2.4 玉米生产系统推荐施肥量

本研究以P_2O_5推荐施肥量计算：

$$AI_F = \frac{96.9 - AI_{(NH_4)_2HPO_4} \times 46_P}{N_y} \quad (8)$$

式中：AI_F为配方肥的施用量，kg·hm^{-2}；N_y为配方肥P_2O_5的养分含量，%；$AI_{(NH_4)_2HPO_4}$为磷酸二铵的施用量，kg·hm^{-2}；46_P为磷酸二铵中P_2O_5的养分含量，%；96.9为磷肥推荐施肥量，kg·hm^{-2}。

假设使用配方肥则AI_F=200，假设未使用配方肥，则AI_F=0，代入公式（8）得出磷酸二铵用量。

计算尿素用量：

$$AI_F = \frac{248.1 - (N_x \times AI_F) + (AI_{(NH_4)_2HPO_4} \times 18)}{46_N} \quad (9)$$

式中：248.1为氮肥推荐施用量，kg·hm^{-2}；N_x为配方肥N的养分含量，%；18为磷酸二铵中N的养分含量，%；46_N为尿素中N的养分含量，%。

计算硫酸钾用量：

$$AI_{K_2O} = \frac{91.0 - (AI_F \times N_k)}{52} \quad (10)$$

式中：AI_{K_2O}为硫酸钾的施用量，kg·hm^{-2}；91.0为钾肥推荐施肥量，kg·hm^{-2}；N_k为配方肥K_2O的养分含量，%；52为硫酸钾中K_2O的养分含量，%。

1.2.5 统计分析

所有数据处理均使用Excel 2019，使用Origin 2024软件绘制图表，采用ArcMap V10.7绘制空间地图。

2 结果与分析

2.1 玉米生产系统投入及产出

玉米生产系统投入、产出以及碳足迹的均值（范

围）差异巨大（表2）。在生产资料投入方面，农户玉米生产系统中氮肥、磷肥、钾肥、农药、柴油、种子投入量均值分别为279.2、127.3、115.1、6.5、80.3、31.9 kg·hm^{-2}，耗电244.3 kWh·hm^{-2}，其中氮肥、磷肥、钾肥以及电力的投入差异明显。在产出方面，玉米产量和收益分别为7 784.7 kg·hm^{-2}和9 306.6 元·hm^{-2}，极值差分别为6 000.0 kg·hm^{-2}和10 005.9 元·hm^{-2}。在碳足迹方面，玉米生产系统的平均碳足迹为5.9 t CO_2-eq·hm^{-2}，其中贡献最大的因素是化肥，占总碳排放的85.7%（图2）。

表2 玉米生产各项投入与产出

Table 2 Inputs and outputs for maize production

项目 Item	指标 Indicator	平均值 Mean	范围 Range
投入	氮肥施用量/(kg·hm^{-2})	279.2	60.0~740.4
	磷肥施用量/(kg·hm^{-2})	127.3	0~501.0
	钾肥施用量/(kg·hm^{-2})	115.1	0~405.0
	农药用量/(kg·hm^{-2})	6.5	2.4~12.0
	柴油用量/(kg·hm^{-2})	80.3	80.3~80.3
	耗电/(kWh·hm^{-2})	244.3	26.3~675.0
	种子/(kg·hm^{-2})	31.9	22.5~60.0
产出	玉米产量/(kg·hm^{-2})	7 784.7	5 250.0~11 250.0
	经济效益/(元·hm^{-2})	9 306.6	0~19 312.5
	碳足迹/(t CO_2-eq·hm^{-2})	5.9	1.8~13.3

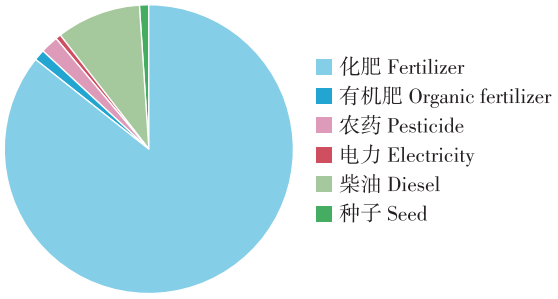

图2 玉米生产系统各生产资料碳足迹贡献占比

Figure 2 Contributions of various agricultural inputs to the carbon footprint in maize production system

2.2 玉米生产系统产量-经济-碳排放的理论优化潜力

玉米生产系统投入和产出的优化潜力如图3所示。在投入方面，玉米生产系统氮肥、磷肥、钾肥、农药、电力、种子的理论优化值分别为248.1 kg·hm^{-2}、96.9 kg·hm^{-2}、91.0 kg·hm^{-2}、5.6 kg·hm^{-2}、177.2 kWh·hm^{-2}、30.3 kg·hm^{-2}，分别能节约资源11.1%、23.9%、21.0%、13.2%、27.5%、5.1%。在产出指标方面，玉米生产系统经济效益、产量、碳足迹的理论优化值分别为1 3221.8 元·hm^{-2}、9 333.1 kg·hm^{-2}、4.8 t CO_2-eq·hm^{-2}，分别能增加42.1%的收益和19.9%的产量，并且降低18.3%的碳排放。

2.3 制定玉米生产系统农田管理措施

根据玉米生产系统的投入和产出的优化结果，制定肥料、农药和播种管理措施及实施方案。在肥料措施方面，玉米生产系统氮、磷、钾肥的化肥用量分别为248.1、96.9、91.0 kg·hm^{-2}。调研结果表明，农户化肥的N-P_2O_5-K_2O养分含量主要以15-15-15、30-0-5和28-6-6三个配方为主，占比分别为33.5%、17.4%和15.1%。根据台前县化肥的主要养分配比以及单质肥（尿素、磷酸二铵、硫酸钾）设计四套化肥实施方案。方案一：农户施用N-P_2O_5-K_2O养分含量为15-15-15的化肥200.0 kg·hm^{-2}，搭配磷酸二铵145.0 kg·hm^{-2}、尿素417.6 kg·hm^{-2}、硫酸钾117.3 kg·hm^{-2}；方案二：N-P_2O_5-K_2O养分含量为30-0-5的化肥200.0 kg·hm^{-2}，搭配磷酸二铵210.7 kg·hm^{-2}、尿素326.5 kg·hm^{-2}、硫酸钾155.8 kg·hm^{-2}；方案三：N-P_2O_5-K_2O养分含量为28-6-6的化肥200.0 kg·hm^{-2}，搭配磷酸二铵184.6 kg·hm^{-2}、尿素345.4 kg·hm^{-2}、硫酸钾151.9 kg·hm^{-2}；方案四：施用磷酸二铵210.7 kg·hm^{-2}、尿素456.9 kg·hm^{-2}、硫酸钾175.0 kg·hm^{-2}。在农药管理措施和播种管理措施方面，推荐玉米生产系统农药的使用量和播种量分别为5.6 kg·hm^{-2}和30.3 kg·hm^{-2}。农户通过采纳玉米农田管理措施和实施方案，可以实现氮肥、磷肥及钾肥等投入减少5.1%~27.5%；经济效益和产量分别增加42.1%和19.9%，碳足迹减少18.3%。

3 讨论

3.1 玉米生产系统投入和产出差距及优化潜力

本研究玉米生产系统投入和产出存在较大差距。玉米生产系统氮肥、磷肥和钾肥等农业生产资料投入分别为279.2、127.3 kg·hm^{-2}和115.1 kg·hm^{-2}；产量、经济收益及碳足迹分别为7 784.7 kg·hm^{-2}、9 306.6 元·hm^{-2}和5.9 t CO_2-eq·hm^{-2}。本研究农户氮肥、磷肥及钾肥使用量分别比华北平原玉米生产系统高19.8%、51.2%和54.8%[32]，同时玉米产量和碳足迹分别比已有研究低81.8%和高22.4%[3]。这表明玉米生产系统在实现资源高效利用方面存在较大优化潜力。在生产资料对碳排放贡献方面，本研究与已有研究结果一致，化肥是主要的碳排放贡献源[11,18]。华北地区、西北地区、华南地区、东北地区玉米产量差异明显[7]。此外，全国主要谷物种植区普遍出现产量停滞现象，其中玉米有42.4%的种植区域呈现产量增产停滞状

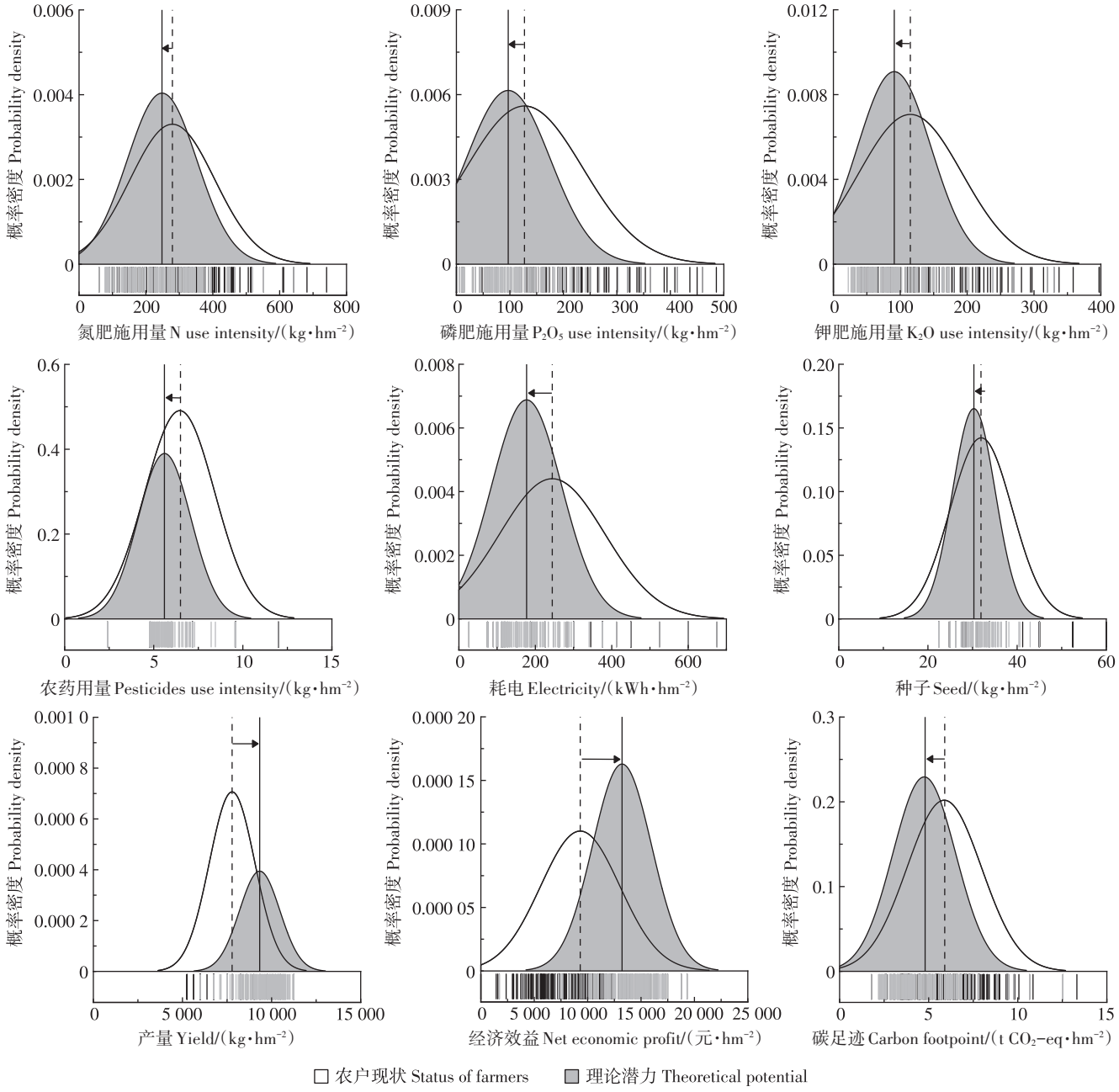

图3 玉米生产系统投入产出优化潜力估算

Figure 3 Estimation of input-output optimization potential in maize production systems

态[33]。因此,实现玉米生产系统投入和产出的协同优化,需明确优化潜力及主要的生产环节。

基于LCA+DEA模型量化玉米生产系统投入、产量、经济效益及碳排放的优化潜力。本研究结果显示,玉米生产系统生产资料投入能减少5.1%~27.5%,产量和经济效益能增加19.9%和42.1%,碳排放能减少18.3%。DEA模型基于农户玉米生产系统构建多投入多产出的效率前沿面,衡量各农户决策单元相对于最优生产边界的相对效率,定量本研究玉米生产系统化肥、农药、种子、产量、收益及碳足迹等指标的优化潜力。目前已有学者通过推广关键技术和规模化种植等手段优化玉米生产系统。例如,创新玉米增密、减氮、调整肥料基追比例等关键技术,以及扩大农业种植规模等措施能降低农业生产资料投入并增加产量[34]。利用小农耕作系统的稳态氮平衡方法降低农业生产成本和减少环境排放[35]。该方法通过田间实验监测玉米根区土壤NO_3^--N含量和相应生长期的氮需求目标值,确定氮肥最佳用量,并以此为基础,构

建玉米种植的氮平衡状态，旨在实现最佳产量的同时，协调氮的输入与输出，维持土壤氮储量，并最大限度减少氮素流失。此外，利用政府、高校及农业企业等机构进行农业生产的技术培训，增加农户对技术信息来源的信任度。通过对小麦和玉米关键生育时期进行技术培训，实现全县5年平均单产从潜力产量的62.8%提高到79.6%[36]。将关键技术（土壤-作物系统综合管理技术）通过推广人员（各种政府机构的农业技术人员和现场代理）和农业综合企业人员（农业生产供应和服务，包括总部业务/产品开发、区域营销和当地经销商及销售代表）推广，可以实现粮食增产26.0%~33.1%、活性氮损失减少22.9%~34.9%，温室气体排放量减少18.6%~29.1%[37]。这表明通过采纳关键技术和管理措施能实现玉米生产系统产量、效益及环境排放的协同优化。

3.2 制定农田管理措施和实施方案协同提升产量、经济与环境效益

在农业生产中应根据农业生产关键环节以及作物管理需求制定解决方案。已有研究利用农场实验（OFE）建立农民和研究人员联合探索解决复杂性和不确定性的农场和种植问题[38]。创新本地化技术能实现小麦、玉米、水稻化肥施用量减少50.0%[39]。通过创建标准化的培训和学习过程，使科学家与农户进行接触与合作，在这个过程中科学家与农户不断地对技术进行改革，以达到双方均能接受的程度，从而创新本地化技术并提升农户对技术的采纳率[40]。因地制宜指导农业生产对农业系统的可持续性具有重要作用[41]。在市、县等区域层面，区域间资源禀赋、气候条件、管理实践以及社会经济发展的影响存在较大的空间变异性[42]。制定作物可持续生产管理措施需要在农户水平上进行全面的定量分析和评估。因此，针对农户生产问题制定合理的管理措施和实施方案是精准推进农业可持续发展的重要途径。

针对县域玉米生产系统制定管理措施和实施方案。本研究基于DEA模型筛选玉米生产系统投入产出效率高的农户基准单元，并以这些农户基准单元化肥、农药、种子等农业生产资料的投入量均值为基准，制定玉米生产系统肥料、农药和播种管理措施与实施方案。类似的研究为在全国县域尺度应用本地化策略，可以使小麦、玉米和水稻的能值可持续指数分别比当前水平提高35.6%、40.5%和26.6%[42]。本地化策略是基于模型驱动的土壤-作物系统综合管理（ISSM）方法。该方法结合区域大气环境（包括太阳辐射、温度、降水和CO_2浓度），优化确定作物的播种日期，作物成熟度和品种的组合，并在此基础上制定总氮供应方案，在时间、空间及供应量上精准满足高产作物的氮素需求[3]。此外，在华北地区，生产策略的优化能实现能值可持续指数和净收入分别提高32%和83%，温室气体排放和活性氮损失分别降低33.0%和35.0%[43]。区域化实施氮肥管理策略能减少49.0%的合成氮肥投入和52.0%的活性氮损失[39]。通过改进小麦种植农户采纳的关键技术，小麦生产系统碳足迹和活性氮足迹分别降低31.3%和32.2%，能值可持续性指数和经济效益分别提高23.5%和75.8%[18]。建立机械化施用缓控释肥与植保、喷灌、不追肥等综合管理策略，玉米种植系统净生态系统碳收支、可持续性指数和净生态系统经济效益分别增加23.9%、69.3%和50.3%[34]。针对小麦-玉米轮作体系制定杀虫剂、灌溉水和氮肥等综合管理策略使粮食安全、经济可持续性、资源可持续性和环境可持续性等指标分别提高9.0%~27.0%、15.0%~61.0%、8.0%~20.0%和5.0~14.0%[44]。可见，围绕农田管理措施制定实施方案能协同优化粮食作物产量-经济-碳足迹，对农业的可持续发展具有重要支撑作用。

3.3 局限性分析

本研究利用农户调查数据，对县域玉米生产系统产量-经济-碳排放进行了综合评估，并制定了农田管理措施，但仍存在一定的研究局限性。首先，碳足迹计算中所采用的模型参数存在一定的不确定性。尽管本研究尽可能选取了接近研究区域实际情况的参数，但相关数据尚未通过实地试验进行系统测量与验证，可能影响碳排放估算的准确性。其次，未来玉米种植环境的变化尚具有较大不确定性。本研究在制定肥料施用、农药管理及播种措施等方面的优化方案时，未充分考虑灌溉方式、施肥技术演变及极端气候事件等可能发生的变化因素，可能限制了管理措施的适用性与稳健性。未来研究将进一步整合实地测得的碳排放参数、作物生长模型与气候预测数据，以提升对玉米生产系统碳足迹及管理对策适应性的评估精度和预测能力。

4 结论

（1）玉米生产系统投入和产出存在较大差距，其碳足迹平均为5.9 t CO_2-eq·hm^{-2}，化肥是主要的贡献源，占总碳排放的85.7%。

（2）玉米生产系统具有氮肥、磷肥及钾肥等投入

减少5.1%~27.5%，产量和经济效益分别增加19.9%和42.1%，碳排放减少18.3%的理论优化潜力。

（3）通过制定肥料（氮、磷、钾肥的施肥量分别为248.1、96.9、91.0 kg·hm^{-2}）、农药（5.6 kg·hm^{-2}）以及种子用量（30.3 kg·hm^{-2}）的农田管理措施和实施方案能实现县域玉米生产系统产量-经济-碳排放的协同优化。

参考文献：

[1] LI Y X, ZHONG H L, SHAN Y L, et al. Changes in global food consumption increase GHG emissions despite efficiency gains along global supply chains[J]. *Nature Food*, 2023, 4(6): 483-495.

[2] MARENYA P P, GEBREMARIAM G, JALETA M, et al. Sustainable intensification among smallholder maize farmers in Ethiopia: adoption and impacts under rainfall and unobserved heterogeneity[J]. *Food Policy*, 2020, 95: 101941.

[3] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.

[4] VAN ITTERSUM M K, SILVA J V, BOMMARCO R, et al. Narrowing the ecological yield gap to sustain crop yields with less inputs[J]. *Global Food Security*, 2025, 45: 100857.

[5] AN Z C, WANG C, JIAO X Q, et al. Methodology of analyzing maize density loss in smallholder's fields and potential optimize approach[J]. *Agriculture*, 2021, 11(6): 480.

[6] YANG X L, XIONG J R, DU T S, et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 198.

[7] LUO N, MENG Q F, FENG P Y, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2637.

[8] GERBER J S, RAY D K, MAKOWSKI D, et al. Global spatially explicit yield gap time trends reveal regions at risk of future crop yield stagnation[J]. *Nature Food*, 2024, 5(2): 125-135.

[9] JIANG S, ZHANG H Y, CONG W F, et al. Multi-objective optimization of smallholder apple production: lessons from the Bohai Bay region[J]. *Sustainability*, 2020, 12(16): 6496.

[10] GROOT J C J, OOMEN G J M, ROSSING W A H. Multi-objective optimization and design of farming systems[J]. *Agricultural Systems*, 2012, 110: 63-77.

[11] GUO X X, LI K L, LIU Y Z, et al. Toward the economic-environmental sustainability of smallholder farming systems through judicious management strategies and optimized planting structures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 165: 112619.

[12] VÁSQUEZ-IBARRA L, REBOLLEDO-LEIVA R, ANGULO-MEZA L, et al. The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: a critical review, taxonomy and future research[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 139538.

[13] REBOLLEDO-LEIVA R, ANGULO-MEZA L, IRIARTE A, et al. Comparing two CF+DEA methods for assessing eco-efficiency from theoretical and practical points of view[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1266-1282.

[14] SUN R Y, LIU X J, LI D B, et al. Optimization of China's pig production system to reduce environmental impacts based on a data envelopment and life cycle analysis model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106483.

[15] STEFANO C, LAURA S, LAURA G, et al. Life cycle assessment of food systems[J]. *One Earth*, 2019, 22(1): 1-6.

[16] YANG L S, ZHOU Y F, MENG B, et al. Reconciling productivity, profitability and sustainability of small-holder sugarcane farms: a combined life cycle and data envelopment analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 199: 103392.

[17] CHEN G F, CAO H Z, CHEN D D, et al. Developing sustainable summer maize production for smallholder farmers in the North China Plain: an agronomic diagnosis method[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(8): 1667-1679.

[18] WANG X, CUI C H, XU M Y, et al. Key technologies improvements promote the economic-environmental sustainability in wheat production of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 443: 141230.

[19] WANG H Z, REN H, ZHANG L H, et al. A sustainable approach to narrowing the summer maize yield gap experienced by smallholders in the North China Plain[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 204: 103541.

[20] ISO IOFS. Environmental management life cycle assessment-principles and framework[S]. Geneva, Switzerland: ISO 14040/44, 2006.

[21] 温桂香, 姚金哲, 韩晴, 等. 河南省小麦玉米生产体系碳氮足迹时空变化特征及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1002-1015. WEN G X, YAO J Z, HAN Q, et al. Spatial and temporal variation characteristics and driving factors of carbon and nitrogen footprint in wheat and maize production systems in Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 1002-1015.

[22] MA L, MA W Q, VELTHOF G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1279-1289.

[23] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *PNAS*, 2013, 110(21): 8375-8380.

[24] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383. CHEN S, LU F, WANG X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6371-6383.

[25] 梁龙. 基于LCA的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009. LIANG L. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: methods and case studies[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009.

[26] HUANG T, GAO B, CHRISTIE P, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 7897-7911.

[27] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(2):412-417. JI C L, DING M, WANG B X, et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2):412-417.

[28] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/2/3):217-232.

[29] ZHANG C, ZHONG L J, LIANG S, et al. Virtual scarce water embodied in inter-provincial electricity transmission in China[J]. *Applied Energy*, 2017, 187:438-448.

[30] 李建政. 农田生态系统温室气体减排技术评价及实证分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2015. LI J Z. Technology evaluation for greenhouse gas mitigation in cropland ecosystem and case studies[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.

[31] LU F, WANG X K, HAN B, et al. Modeling the greenhouse gas budget of straw returning in China: feasibility of mitigation and countermeasures[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195(Suppl 1):107-130.

[32] 安志超. 缩小小农户粮食作物产量差的系统方法(DAIRA)构建与应用[D]. 北京:中国农业大学, 2022. AN Z C. Construction and application of systematic methodology (DAIRA) for closing smallholders′ yield gap of cereal crops[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022.

[33] WEI X, ZHANG Z, SHI P J, et al. Is yield increase sufficient to achieve food security in China? [J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0116430.

[34] ZHANG W S, QIAO Y, LAKSHMANAN P, et al. Combing public-private partnership and large-scale farming increased net ecosystem carbon budget and reduced carbon footprint of maize production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184:106411.

[35] YIN Y L, ZHAO R F, YANG Y, et al. A steady-state N balance approach for sustainable smallholder farming[J]. *PNAS*, 2021, 118(39):e2106576118.

[36] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622):671-674.

[37] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7696):363-366.

[38] LACOSTE M, COOK S, MCNEE M, et al. On-farm experimentation to transform global agriculture[J]. *Nature Food*, 2021, 3(1):11-18.

[39] LIU Y Z, ZHUANG M H, LIANG X, et al. Localized nitrogen management strategies can halve fertilizer use in Chinese staple crop production[J]. *Nature Food*, 2024, 5(10):825-835.

[40] AN Z C, YANG Y, YANG X, et al. Promoting sustainable smallholder farming *via* multistakeholder collaboration[J]. *PNAS*, 2024, 121(21): e2319519121.

[41] LIU Z X, WANG Y Y, GENG Y, et al. Toward sustainable crop production in China: an emergy-based evaluation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206:11-26.

[42] ZHUANG M H, LIU Y Z, YANG Y, et al. The sustainability of staple crops in China can be substantially improved through localized strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111893.

[43] YAN J, LIU Y Z, ZHANG R, et al. Toward sustainable maize production for smallholders through optimized strategies in north China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(4):547.

[44] GUO X X, ZHU A L, ZHU X Q, et al. Contributing to sustainable smallholder agriculture through optimizing key agricultural inputs in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 471:143429.