

# 基于农户经济和环境“双优”目标的粮食主产区 化肥施用优化模拟分析 ——以邯郸地区小麦生产为例

钱 宸<sup>1,2</sup>, 李 凡<sup>1</sup>, 李先德<sup>2</sup>, 郝晶辉<sup>3,4</sup>

(1. 荷兰瓦赫宁根大学发展经济学组, 荷兰 瓦赫宁根 6706KN; 2. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081; 3. 华中农业大学经济管理学院, 武汉 430070; 4. 华中农业大学宏观农业研究院, 武汉 430070)

**摘要:**我国目前面临着粮食供求紧平衡和化肥过量施用导致农业面源污染的严峻挑战。利用河北邯郸地区1026户小麦种植农户的调研数据, 构建经济理性与环境可持续双目标下的农户化肥施用模型, 并进行优化模拟分析, 旨在探讨应该如何优化粮食主产区农户的化肥施用行为, 以实现经济与环境的“双优”目标。结果表明: 农户对化肥的认知和化肥价格是实现“双优”目标的关键因素。现阶段农户过高估计了化肥投入对粮食增产的效果, 农户的预期化肥产出弹性显著高于化肥实际产出弹性, 化肥使用效率偏低; 当前粮食主产区化肥价格是模拟优化分析结果中最优化肥价格的一半左右, 较低的化肥施用成本促使农户倾向高化肥投入以实现粮食增产。基于研究结果, 提出了矫正农户施肥认知偏差、科学高效施肥和适当提高化肥价格水平、优化化肥使用结构等政策建议。

**关键词:**粮食安全; 化肥施用; 优化模拟; 农户经济理性; 环境可持续

粮食生产不仅关系到我国粮食安全, 也关系到全球粮食市场供给和需求的稳定发展<sup>[1]</sup>。尽管粮食生产受到耕地质量、机械化水平、劳动力、化肥要素投入强度等多方面因素影响, 但由于我国耕地细碎化程度较高且城镇化进程较快, 农村劳动力大量进入城市从事非农就业, 农业生产效率的提高主要依赖于农业机械化的普及和化肥农药等化学品施用强度的增加得以实现。其中, 化肥的广泛施用是我国自改革开放以来粮食增产的最重要驱动因素(1978—2006年间化肥投入对粮食产量增长贡献率超过56%)<sup>[2-4]</sup>, 在保障我国粮食安全的过程中起到了极为关键的作用<sup>[5,6]</sup>。但与此同时, 我国已成为世界上化肥施用强度最高的国家之一。2017年我国三大粮食作物化肥使用量(折纯, 下同)达到441.1 kg/hm<sup>2</sup>, 远超国际公认的225 kg/hm<sup>2</sup>的化肥安全施用上限, 其中单位播种面积氮肥施用量是OECD国家的两倍以上<sup>[7]</sup>。可见我国仍处于化肥施用效率较低、通过增施化学品投入换取粮食增产的阶段, 随之而来的是化肥增施带来的粮食产量增量的持续下降<sup>[8]</sup>。

化肥的高强度施用不仅导致农户种粮成本提高, 也加剧了粮食安全与生态安全之间

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程专项(ASTIP-IAED-2021-06); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0103100); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147001); 中央农办、农业农村部乡村振兴专家咨询委员会委托课题(202018)

作者简介: 钱宸(1992-), 男, 北京人, 博士研究生, 主要从事农业资源可持续利用与农户行为经济决策等方面的研究。E-mail: chen.qian@wur.nl

通讯作者: 李先德(1964-), 男, 湖北监利人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业经济理论与政策研究。E-mail: gjmy6160@caas.cn

的矛盾<sup>[9,10]</sup>。以小麦主产区华北平原为例,已有研究发现,小麦的化肥投入已远超同产量下的化肥实际需求<sup>[11]</sup>。过量施用化肥导致土壤养分流失,并引起水体和大气污染<sup>[12-14]</sup>。2010年全国污染普查发现化肥施用导致的农田废水径流比工业废水污染更严重<sup>[15]</sup>。而由于粮食主产区承担着稳定粮食产量、保障国家粮食安全的重任,生态安全形势在粮食主产区可能更为严峻<sup>[16]</sup>。因此,平衡粮食安全和生态环境安全之间的关系已成为农业绿色发展的重要议题。2015年农业部制订了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,以期在保障国家粮食安全和重要农产品有效供给的同时,通过优化施肥结构、施肥方式和肥料利用率实现化肥使用量零增长;2016年中央一号文件明确指出,应加强资源保护和生态修复,实现粮食生产与农田生态系统的协调与可持续;2017年中央一号文件进一步强调要推进粮食安全战略“从量到质”的转换。

尽管社会大众和学界都普遍认为农户存在化肥过量施用的问题,但如何科学界定农户“过量”施肥的程度取决于不同的学科范畴。目前环境学和经济学的学者从各自学科角度提出了最优化肥施用量<sup>[17]</sup>。环境最优施肥量是将化肥的负外部性,即养分流失所带来的环境污染成本纳入到计算中的施肥量;而经济最优施肥量则是从农户实现利润最大化为出发点,增产所需的化肥边际成本等于其边际收益的施肥量。通常农户在进行实际生产决策时,不考虑化肥的环境污染成本,因此化肥的经济最优施用量往往高于环境最优施用量。已有研究大多从单一学科角度探讨化肥的过量施用问题。例如,农学和环境学的学者以作物对有效养分的实际吸收量为依据测算化肥过量施用程度,认为其随作物种类、土壤状况、气候条件、施肥方式等外界因素不同而变化<sup>[18,19]</sup>;而经济学者从经济学的角度分析,以化肥的成本收益来衡量化肥的过量施用程度,且认为农村地区劳动力转移,农户自身的风险厌恶,以及教育水平较低和耕地细碎化等因素是导致农户出现过量施肥的主要原因<sup>[20-24]</sup>。此外,农户的化肥施用量,在很大程度上还受到化肥市场和政策等宏观因素的影响。改革开放后,国家先后向农户实施了农业税减免、种粮直接补贴,并向化肥产业提供运输补贴、减免增值税等一系列财政优惠政策。这些政策虽有助于降低农业生产成本,从而促进了粮食增产,但某种程度上扭曲了化肥要素市场价格—特别是随着劳动力工资水平的提高,化肥的成本相对于农业劳动力和有机肥等其他生产资料成本降低,促使农户倾向通过增施化肥提高粮食产量<sup>[25,26]</sup>。

实际上,在探索化肥施用优化的过程中,政策制定者面临着既要在有限资源约束下保障国家粮食安全,又要有效控制因化肥过量施用造成农业面源污染的双重挑战。化肥就像一把“双刃剑”,其“过量”施用或其优化问题显然不应仅从单一视角进行界定或分析。本文以河北邯郸地区1026户小麦种植农户的调查数据为例,定量分析在微观层面制约实现农户经济理性和环境可持续发展“双优”目标的主要因素,并在这一目标框架下进行模拟分析,探讨应如何实现粮食主产区的化肥优化施用。因此本文可为政府在保障粮食安全与生态可持续发展双重目标下如何降低中国农业化肥施用强度提供具有实践价值的政策建议和依据。本文主要聚焦以下两个科学问题:第一,在当前各要素市场价格及农产品市场价格既定的情况下,哪些微观因素导致了农户的经济理性最优施肥量偏离了基于环境可持续发展目标的最优施用量?第二,若环境与经济最优施肥量不一致时,决策者应如何制定有效政策,促使农户优化其经济最优施肥量,使经济最优施用量与环境最优施用量趋近,从而提升农业生态效益?

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 理论模型

为考察农户在粮食生产过程中化肥投入的经济决策，本文首先构建农户层级的农业生产函数。考虑到县域层面的耕地面积总量在短期内不变，且在粮食生产过程中有机肥施用比例较低，为简化模型，忽略农户耕地的规模效应且不考虑有机肥对产量的影响。与研究中国农业生产的大部分文献一致，此处假设农户粮食生产函数遵循典型的Cobb-Douglas形式，即：

$$Y_i = \delta L_i^\alpha M_i^\beta F_i^\varepsilon \quad (1)$$

式中： $Y_i$ 代表农户粮食亩产水平（kg/亩）； $\delta$ 代表综合技术水平；粮食生产投入要素分别包括劳动力（ $L_i$ ，工时/亩）、机械（ $M_i$ ，kW·h/亩）及化肥（ $F_i$ ，kg/亩）。参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\varepsilon$ 分别反映劳动力、机械、化肥投入对粮食产出的弹性。经济理性农户以获得最大利润为目标，即：

$$\max \pi_i^h = P_y Y_i - (P_l L_i + P_m M_i + P_f F_i) \quad (2)$$

式中： $P_y$ 为农产品市场价格（元/kg）； $P_f$ 反映了化肥市场价格（元/kg）。由于目前国家对农业发展以补贴为主，在不考虑农业税收的情况下，政府部门可根据需要通过差异化的补贴政策来影响农户的实际化肥施用成本。 $P_l$ 和 $P_m$ 分别代表农业劳动力和机械投入的价格（元/亩）。在没有预算约束的情况下，基于理性人假设，农户每项要素投入量的决策都应满足要素投入边际成本等于边际收益的基本原则，即 $MR=MC$ ：

$$\frac{\partial Y_i}{\partial F_i} = \frac{P_f}{P_y} \quad (3)$$

将式（1）计算的化肥对粮食产量的边际效应方程，代入式（3），可以得到农户经济最优施肥量（ $F_{econ\_opt}$ ）的计算式（4）：

$$F_{econ\_opt} = \frac{\varepsilon \times Y_i}{P_f / P_y} \quad (4)$$

式（4）说明，农户的经济最优施肥量主要取决于化肥与粮食之间的相对价格（ $P_f/P_y$ ），以及化肥的产出弹性（ $\varepsilon$ ）和粮食产量（ $Y_i$ ）。已有大量研究基于此公式定量分析了我国不同地区农户化肥实际施用量与经济最优施用量之间的偏离程度。然而，基于式（4）计算的农户经济理性施肥量存在两个隐含假设条件。首先，该模型仅考虑单一要素投入对粮食产量的影响，忽视了化肥和其他生产要素之间的替代关系。例如，当劳动力成本偏高时，农户可能更依赖化肥而减少劳动力投入。其次，式（4）假设农户实际粮食产量（ $Y_i$ ）均位于其生产可能性曲线上，即农户无效率损失。这一假设可能过于严格，与现实的农业生产不符。因此，考虑其他要素投入以及各要素之间的相互替代关系，将式（1）代入式（3）中，并分别对劳动力、机械和化肥等生产要素进行一阶求导等于零构建联立方程，可推导求得在考虑了其他生产要素投入情况下农户的经济最优施肥量：

$$F_{econ\_opt}^* = \left[ \frac{1}{\delta \times P_y} \times \left( \frac{P_f}{\varepsilon} \right)^{1-\alpha-\beta} \times \left( \frac{P_l}{\alpha} \right)^\alpha \times \left( \frac{P_m}{\beta} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\alpha+\beta+\varepsilon-1}} \quad (5)$$

区别于式(4),式(5)表明,经济最优化肥施用量不仅取决于化肥和粮食的市场价格,还取决于其他要素(包括劳动力和机械等)的市场价格以及各生产要素的产出弹性系数。

尽管以上基于农户经济理性的成本收益分析可以计算农户的经济最优施肥量,但这一理论分析并未考虑化肥的环境负外部性。同时,环境最优施肥量受到不同区域环境资源禀赋(土壤与气候等)、作物种类以及施肥方式等外部自然因素的影响。由于环境等外部因素具有显著公共物品非竞争性非排他性的特征,农户在决策时并不考虑施肥的环境成本。长期增施化肥导致土壤酸化、降低土壤酶活性、抑制土壤微生物活性,进而破坏土壤整体肥力<sup>[27]</sup>。

然而,单纯考虑区域性的绝对环境最优化肥施用量对保障粮食安全并不具有参考价值。必须将其与粮食生产放在同一框架下进行分析,即相对环境最优施肥量。相对环境最优施肥量是在考虑粮食产量稳定这一前提下的化肥环境最优施用量。由于已有关于化肥环境最优施用量的测度往往缺乏对保障粮食生产安全的约束,因此本文引用农学中的化肥偏生产力(*PFP*)这一概念去理解农户粮食生产中相对环境最优施肥量( $F_{env\_opt}^*$ )<sup>[19]</sup>。化肥偏生产力是指单位化肥投入所能生产的作物籽粒产量。在粮食产量一定的情况下,投入化肥的利用率越高,在农业生产过程中相应的化肥(养分)流失和对环境的污染就更低,化肥的偏生产力也就越高。因此,化肥偏生产力达到最优时的投入量就是理论上相对环境最优施肥量。假设农户通过长期粮食种植的经验能够实现最优化的农田操作,短期内化肥偏生产力保持不变,农户粮食产出最优时的相对环境最优施肥量则可以通过式(6)得出:

$$F_{env\_opt}^* = \frac{Y_i}{PFP} \quad (6)$$

以上对比农户经济最优施肥量( $F_{econ\_opt}^*$ )及其相对环境最优施肥量( $F_{env\_opt}^*$ ),通过计算两者之间的差距,即式(7),则可以计算出在当前市场环境下农户经济最优施肥量偏离相对环境最优施肥量程度( $E_i$ ):

$$\min E_i = F_{econ\_opt}^* - F_{env\_opt}^* \quad (7)$$

当农户的经济最优施肥量与其相对环境最优施肥量一致时,即 $E_i=0$ 时,农户实现了在保障粮食与生态双安全情况下的最优施肥量,即“双优”目标下的最优化肥施用量。但当要素市场存在扭曲时,农户的经济最优施肥量将偏离其相对环境最优施肥量,则 $E_i>0$ 或 $E_i<0$ ,此时政府可通过不同途径来逐步调节化肥市场,优化农户的经济最优施肥量,使之与相对环境最优施肥量趋近。本文将以北平平原邯郸地区为例,进一步通过对调查数据的定量分析来说明这一市场调节过程。

## 1.2 数据来源

本文使用2018年在河北省邯郸市四个县进行的大规模农户调查数据进行实证分析。邯郸市位于华北平原的腹地,是我国重要的农业生产地区之一,种植结构以小麦和玉米轮作为主。该调查通过入户访谈的方式收集了农户家庭农业生产要素投入和产出等数据。在样本县内,剔除了种植经济作物的村庄以确保抽样的村庄都是粮食作物生产区,并使用分层随机抽样方法,按乡镇大小成比例抽取村庄。每个村庄内,随机抽取8个农户家庭进行问卷调研。样本总共涵盖了22个乡镇,135个村庄的1080个农户家庭。由于本



文重点关注小麦种植农户在生产过程中的化肥施用情况，因此剔除了4个缺失信息较多的样本和50个仅单一种植玉米的农户，最终样本量为1026个从事小麦生产的农户。

本文所用变量及其基本统计描述如表1所示。其中，化肥亩均投入量是化肥施用的折纯量（kg/亩），即对农户使用的化肥进行氮、磷、钾含量折纯后加总的养分总量。劳动力投入（元/亩）是农户在粮食生产的主要环节中亩均投入的自家劳动力和雇佣劳动力对应的经济总成本，其中主要环节是指整地、播种、施肥、打药、灌溉和收割；机械总投入（元/亩）是指在粮食生产的主要环节中，农户亩均使用自有机械和租赁社会化服务机械的总费用。其中，自家劳动力和自有机械投入的费用按照当地市场雇佣劳动力和机械租赁价格进行相应计算。

表1 农户粮食（小麦）生产相关变量定义及描述统计

Table 1 Definition and descriptive statistics of variables related to agricultural production

变量类型	变量名称	均值	标准差	样本量/个
粮食产出	粮食亩均产量/(kg/亩)	478.04	65.66	1026
	粮食市场单价/(元/kg)	2.18	0.20	1026
生产要素投入	化肥（折纯）亩均投入量/(kg/亩)	40.67	13.24	1026
	化肥（折纯）单价/(元/kg)	4.67	2.90	1026
	劳动力投入/(元/亩)	111.50	127.32	1026
	机械投入/(元/亩)	175.18	60.69	1026
农户特征	户主年龄/年	56.55	12.54	1026
	户主性别，男性=1	0.93	0.25	1026
	户主受教育情况/年	7.01	3.70	1026
地块特征	耕地面积/亩	6.61	4.87	1026
	人均耕地面积/亩	1.99	1.66	1026
	土壤类型	0.90	0.87	1026

注：（1）由于化肥种类存在较多差异，本文主要关注农户施肥中的氮磷钾的投入情况，即化肥投入量为折纯后的氮、磷、钾施用总量和对应折纯后的化肥价格。（2）土壤类型包括：砂土=1；壤土=2；黏土=3。

调查数据显示，河北邯郸地区2017年小麦的亩均产量为478.04 kg，平均销售价格为2.18元/kg。从要素投入来看，农户种植小麦的单位面积化肥（折纯）施用量达到40.67 kg，且化肥折纯后的价格为4.67元/kg。此外，农户家庭耕地规模较小（约6.6亩），人均耕地面积不到2亩，符合华北平原典型的小农生产模式。

2 结果分析

2.1 化肥施用对粮食的产出弹性

首先，从式（4）和式（5）中可以看出，在粮食市场价格和化肥市场价格一定的情况下，农户化肥施用量取决于农户预期的化肥对粮食产出的弹性（ $\epsilon$ ）。通过对1965—2017年间关于化肥对粮食的产出弹性的相关文献梳理，绘制了我国不同地区化肥对粮食产出弹性随时间的变化趋势（图1）<sup>[21,22,30-33]</sup>。从图1可知，化肥的粮食产出弹性在1980—1990年间较高，这与我国在改革开放初期农户开始广泛施用化肥，粮食增产增收的基本趋势相吻合。从1990年起化肥的产出弹性开始呈下降趋势，特别是从2000年后，化肥对

粮食作物的产出弹性基本保持在0.1以下。例如,杨勇等<sup>[27]</sup>通过对华北平原地区县域粮食生产2000—2015年的统计分析,估算出化肥施用对产出的平均弹性为0.0908 ( $t$ 值=2.4695)。

假设样本区域农户化肥投入对粮食产出弹性与已有研究一致,即化肥目前在华北平原粮食主产区的实际产出弹性 $\varepsilon=0.08$ ,根据农户调研数据中的粮食销售价格和化肥市场价格,以边际收益等于边际成本的原则计算农户的经济最优施肥量。图2显示小麦生产中,经济最优施肥量的估计结果和农户目前实际施肥量。结果表明,在小麦生产过程中,农户实际施肥量显著高于经济最优施肥量。

进一步通过推导式(4),假设在现有粮食价格及化肥市场价格水平下,样本农户实际施肥量即为其经济最优施肥量,且农户的粮食产量均位于其生产函数前沿,没有效率损失,可反推农户预期的化肥产出弹性( $\varepsilon_i^{ex}$ ):

$$\varepsilon_i^{ex} = \frac{F_{econ\_opt}}{Y_i} \times \frac{P_f}{P_y} \quad (8)$$

图3为计算出来的样本地区农户预期化肥对小麦产出弹性的分布。结果表明,农户预期的化肥对小麦的平均产出弹性在0.15左右。但农户间的预期化肥弹性存在较大差异,很大一部分农户预期的化肥产出弹性超过0.2,是目前化肥实际产出弹性的两倍以上。这意味着,如果农户施肥时遵循投入边际收益等于边际成本的利润最大化原则,那么目前农户主观预期的化肥产出弹性与化肥的真实产出弹性之间存在

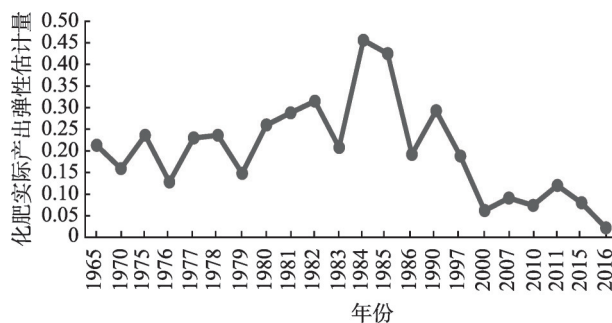


图1 1965—2016年中国化肥粮食产出弹性估计的变化趋势

Fig. 1 The change of output elasticity of chemical fertilizer in China over 1965-2016

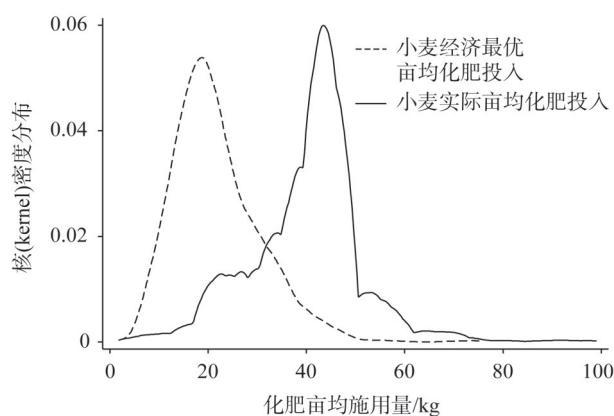


图2 样本农户实际施肥量与经济最优施肥量比较

Fig. 2 Farmer's economically optimal fertilizer use and the actual fertilizer use

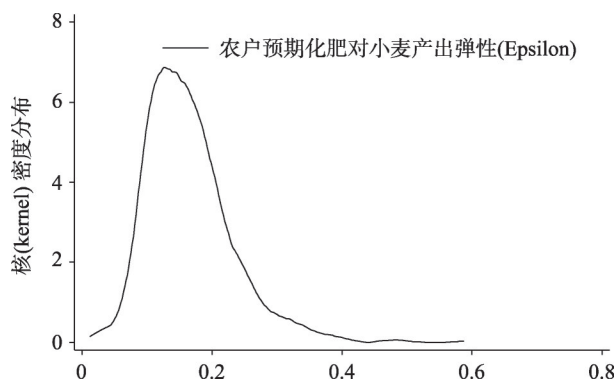


图3 样本农户估算的预期化肥投入对粮食(小麦)产出的弹性

Fig. 3 Estimated farmer's expected fertilizer elasticity in wheat production

明显偏差，农户较大程度上高估了化肥对粮食产出的作用。

以上分析都是基于严格的假设条件，本文进一步使用邯郸地区的调研数据对化肥的实际产出弹性进行了估计，通过对式（1）两边同时取对数并加入农户和地块特征作为控制变量可构建如下农户粮食生产模型，并使用最小二乘法进行回归分析：

$$\ln Y_i = \delta_0 + \alpha \ln L_i + \beta \ln M_i + \varepsilon \ln F_i + \sum_i g_i X_i + e \tag{9}$$

式中： $\delta_0$ 为截距项； $X_i$ 表示其他影响粮食产量的农户特征和地块特征等变量，主要包括户主的年龄、性别、教育程度、及土壤类型等，同时模型中还控制了地区的虚拟变量； $g_i$ 表示待估参数向量； $e$ 表示随机误差项。

样本地区粮食（小麦）的生产函数估计结果如表2所示。结果表明，化肥对小麦的产量影响并不显著，意味着在其他要素投入不变的水平下，投入额外一单位化肥并没有增加小麦的产量。基于这一结果，可以判断农户生产的粮食作物在现有的化肥施用水平上对化肥养分的吸收能力已接近饱和，甚至在环境层面上过量施用了化肥。此外，劳动力投入对小麦的产出有显著的负向影响。相比之下，样本地区的机械投入对小麦产量的影响在统计上并不显著。

2.2 价格对经济最优施肥量的影响

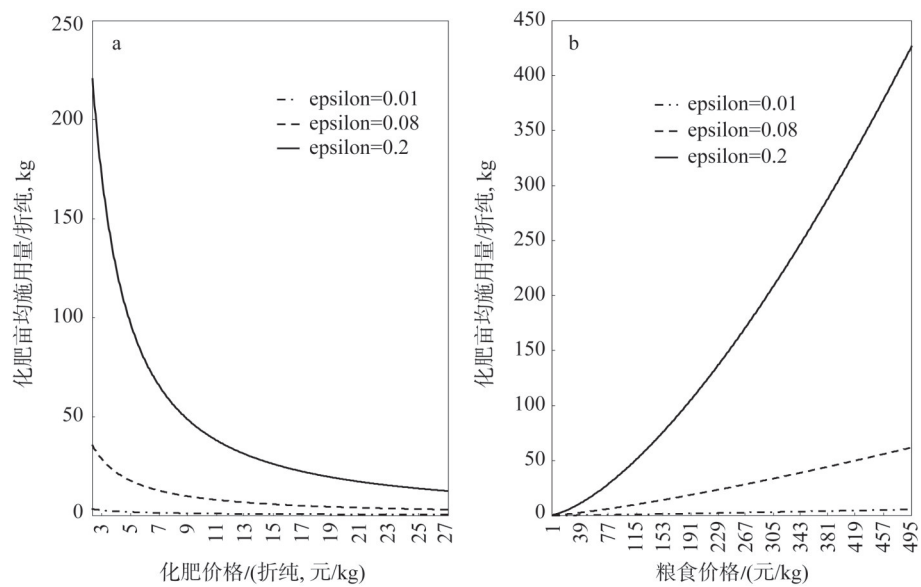
本文进一步模拟分析在不同的化肥产出弹性水平下（ $\varepsilon_i^{\text{ex}}=0.01, 0.08, 0.2$ ），调整化肥（或粮食）价格对农户的经济最优施肥量的影响。以上三个化肥产出弹性水平参数的取值基于

已有文献的梳理以及以上实证研究的估计，分别代表较低、中等和较高的化肥产出弹性水平。需要指出的是，由于本文中调研数据估算化肥实际产出弹性很低，因此将其纳入较低化肥产出弹性水平的情景分析范畴（ $\varepsilon_i^{\text{ex}}=0.01$ ）。由式（8）可知，当农户预期的化肥产出弹性不变时，化肥或粮食价格发生变化将会对农户的经济最优施肥量产生影响。图4展示了在不同的农户预期化肥产出弹性水平下，化肥价格和粮食价格变化对农户经济最优施肥量的模拟影响结果。图4a表明，当粮食价格不变，农户预期的化肥产出弹性较高时（ $\varepsilon_i^{\text{ex}}=0.2$ ），化肥价格升高会显著降低农户预期的化肥最优施用量。但当农户预期的化肥产出弹性很低时（即 $\varepsilon_i^{\text{ex}}=0.01$ ），化肥价格的变化对农户预期的化肥最优投入量没有显著的变化。而图4b表明，当化肥价格不变时，粮食价格的变化对于农户经济最优施肥量也具有显著的影响。当粮食价格提高，农户会增加化肥投入以提高粮食产量，但农户化肥施用量的增加程度主要取决于农户自身预期的化肥产出弹性，弹性越高，农户增加的化肥投入量越多。

表2 Cobb-Douglas 生产函数回归结果  
Table 2 Estimation of the Cobb-Douglas Production Function

自变量	小麦产量（对数）	
	估计系数	标准误
劳动力投入（对数）	-0.015***	0.005
机械投入（对数）	-0.010	0.013
化肥投入（对数）	-0.003	0.013
户主年龄	0.001**	0.000
户主性别	-0.014	0.017
户主受教育程度	0.004***	0.001
土壤质量	0.010**	0.005
地区1	-0.015	0.012
地区2	0.058	0.014
地区3	0.013	0.012
截距项	6.165	0.083
R <sup>2</sup>	0.25	
观测值	1026	

注：“\*”和“\*\*\*”分别表示在5%和1%水平上显著。



注：(1) 在模拟分析化肥价格变化对农户经济最优施肥量的变化时，假设粮食（小麦）价格稳定为每公斤2.2元（表1），其他要素的投入价格均来源于表1数据；(2) 在模拟分析粮食市场价格变化时对农户经济最优施肥量的影响时，假设农户粮食（小麦）种植施用的化肥价格为每公斤4.67元（表1），其他要素投入价格不变，其中，农户化肥价格为折纯后化肥的价格。

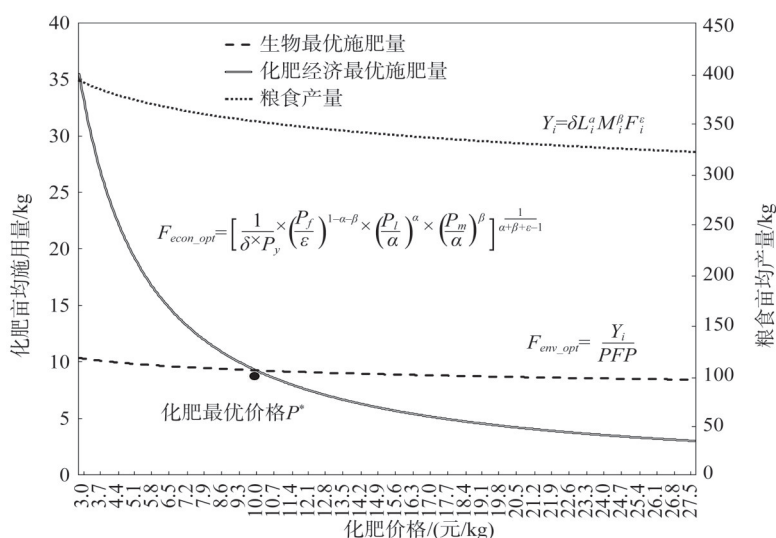
图4 不同化肥价格和粮食（小麦）价格下农户经济最优施肥量的模拟试验

Fig. 4 Simulation results of economically optimal fertilizer amount with different fertilizer prices and different grain (wheat) prices

2.3 “双优”目标下的化肥施用优化模拟分析

以上分析讨论了价格变化对农户经济最优施肥量的影响，本文进一步将农户的经济最优施肥量与其相对于环境最优施肥量纳入同一分析框架（即“双优”目标），模拟分析农户的经济最优施肥量、相对环境最优施肥量、和粮食产量在不同化肥市场价格水平下的动态变化过程。借鉴杨勇等<sup>[26]</sup>对华北平原地区2000—2015年间县域粮食生产中估计的参数，假设农户化肥投入的实际产出弹性为 $\varepsilon=0.08$ ，其他生产要素对粮食产出的弹性分别为 $\alpha=0.11$ ， $\beta=0.02$ ，农业机械价格（ $P_m$ ），劳动力价格（ $P_l$ ），粮食价格（ $P_y$ ）等价格不变（表1）。图5展示了模拟分析结果。结果表明，假设粮食价格及其他要素价格短期内不变，当化肥价格较低（低于 $P^*$ 点）时，农户的经济最优施肥量会显著高于其环境最优施肥量。由于化肥价格由市场决定，政策制定者此时应相应地通过差异化补贴等方式，间接提高农户施用传统化肥的成本。例如，通过适度降低对化肥行业的补贴以降低农户经济最优施肥量，或通过加大对有生态效益的新型肥料的补贴力度以引导农户施用有机肥替代化肥，使经济最优施肥量向环境最优施肥量趋近，即在 $P^*$ 点时所对应的施肥量可同时实现经济理性和环境可持续“双优”目标。从本文的模拟分析来看，当前邯郸地区的化肥价格为4.67元/kg（折纯），显著的低于 $P^*$ 点（10元/kg左右），因此，农户目前的化肥施用成本显著低于模拟分析中“双优”目标下的最优化肥施用成本。当化肥价格高于 $P^*$ 点时，农户的经济最优施肥量会显著低于模拟的经济与相对环境最优施肥量，此时，如果政策制定者不能及时通过补贴等方式降低农户的化肥施用成本，势必会造成粮食产出因化肥施用不足而下降。因此，从以上分析可以看出，尽管化肥的价格由





注：(1) 化肥的经济最优投入量主要由式(5)计算得出；(2) 已有大量研究探讨了我国不同地区粮食生产过程中，不同施肥方案对应的化肥偏生产力<sup>[19,28,29]</sup>。在环境最优施肥量的计算中，本文采用Liu等<sup>[28]</sup>中我国华北平原地区的最佳化肥偏生产力水平（PFP=38）。

图5 化肥价格对经济最优施肥量，环境最优施肥量及粮食（小麦）产量水平的影响

Fig. 5 Impact of chemical fertilizer price on the economically and environmentally optimal fertilizer application amounts and the grain yield

市场供需决定，但政策制定者仍可以通过优化化肥行业补贴等政策来影响农户整体的化肥施用成本，从而引导其经济最优施肥量与相对环境最优施肥量趋于一致，解决化肥施用过量的问题。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

在当前国家面临粮食供求紧平衡和化肥等投入过量施用导致环境污染的严峻挑战下，化肥的合理施用对于保障我国粮食安全和生态环境可持续发展都具有重要意义。本文以河北邯郸地区为例，基于1026份农户调查数据，从农户经济理性和环境可持续两个角度定量分析目前粮食生产过程中造成化肥过量施用问题的主要因素，并通过模拟分析探讨在其他生产要素投入不变时，优化化肥施用对粮食主产区兼顾经济和环境“双优”目标的影响。研究表明：(1) 现阶段农户过高地估计了化肥投入对粮食增产的效果，农户的预期化肥产出弹性显著高于化肥的实际产出弹性，因此农户实际施肥量高于经济理性条件下的最优施肥量，化肥使用效率较低。农户高估化肥产出弹性在一定程度上归因于改革开放初期，以追求粮食增产为主要农业生产目标，养成重“用”轻“养”的用地习惯。而当前化肥技术已经逐渐由增量增产转向减量增效的阶段，农户并没有及时获得并更新相应的技术信息。(2) 当前邯郸地区化肥施用价格（折纯）为4.67元/kg，为模拟优化分析结果中最优化肥施用价格的一半左右，化肥的施用成本较低导致农户倾向于多投入化肥以实现粮食增产。由于改革开放后很长的一段时间，国家为了保障粮食安全，

实施了一系列的化肥扶持及补贴政策,造成化肥行业产能相对过剩。虽然当前相应的补贴政策已经有所调整,但相对于其他农业生产要素(特别是农业劳动力、有机肥料等)的投入成本而言,化肥的投入成本仍然较低。在利润最大化的经济激励下,农户必然优先考虑通过增加对化肥投入去实现粮食的增产。

### 3.2 讨论

基于以上研究发现,本文提出以下政策建议:

(1) 矫正农户施肥认知偏差,不断提高科学高效施肥水平。“十三五”以来,我国进入加快转变农业发展方式的新阶段,需要保粮增效,走农业可持续发展的道路。在粮食主产区,应该有针对性地开展对农户的化肥施用技术培训,定期检测土壤肥力及氮磷钾等元素含量,并将土壤基本要素情况通过技术培训和指导服务等方式及时反馈给农户,推进测土配方施肥,修正农户对化肥的认知偏差,避免过施、滥施化肥。同时,加大对生态友好型肥料的宣传力度,鼓励有机肥与化肥的配施,并充分发挥种粮大户、家庭农场、专业合作社等新型经营主体的示范带头作用,引导长期依靠经验施肥的种粮农户养成科学施肥的意识和习惯,促进施肥方式的转变。

(2) 优化化肥生产结构及其补贴政策,科学设定化肥相对价格水平。在宏观层面上,化肥施用量主要受到化肥市场和粮食市场价格的影响,通过合理的政策引导可以优化农户化肥施用量。由于我国粮食生产仍然在很大程度上依赖传统小农生产方式,短期内降低粮食价格不利于保护小农户种粮的积极性。但考虑到化肥对环境的负外部性和当前较低的化肥市场价格水平,政策制定者可通过推进化肥供给侧结构性改革,加快肥料产业转型升级,并通过调整补贴优惠政策,有针对性地向具有改土护田等生态可持续功能的新型有机无机肥料(有机肥、菌肥、测土配方肥、缓释肥等)倾斜。以上综合施策,一方面可适度提高传统化肥的市场价格,另一方面能有效降低农户投入更兼具生态效益的新型肥料的成本,有利于实现化肥减量增效这一目标。

(3) 推进农业现代化和生态化,实现区域内农业养分平衡和循环利用。“绿色发展”是农业转型的重要一环,应积极探索养分循环经济模式,鼓励通过种养结合等方式推进有机肥资源利用,提高区域内养分综合利用水平,改善农田生态环境。与此同时,应运用多元化的农业先进技术和装备,提高肥料利用效率,保障农业生产和粮食安全。例如,通过培育规范化的土地流转市场,因地制宜推进机械施肥以替代传统人工施肥,并推广种植技术、生物育种等科技的创新应用,降低其他生产要素的相对投入成本,以便从整体上提高农业生产的效率,弥补由于化肥施用量减少对粮食安全造成的影响。

尽管以上对策建议是基于邯郸地区的案例分析,但在一定程度上可以推广到华北平原及其他类似粮食主产区域。一方面是因为目前种粮过程中,依赖传统经验和习惯施肥导致的“认知偏差”并不局限存在于邯郸地区的农户,而是全国范围内种粮农户都存在这种经验性施肥的现象<sup>[34]</sup>。另一方面是因为我国当前农业发展方式正处于转型阶段,兼顾粮食安全与生态环境安全的目标不仅限于华北平原地区,也是其他类似粮食主产区实现粮食生产与环境可持续发展的所必须面临的重要挑战。此外,在本文的基础上,后续研究还应对多生产要素之间的相互作用及动态变化进行模拟分析,以进一步探讨实现区域粮食安全和生态安全的对策。

## 参考文献(References):

- [1] HUANG J, WEI W, CUI Q, et al. The prospects for China's food security and imports: Will China starve the world via imports?. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2933-2944.
- [2] LIN J. Rural reforms and agricultural growth in China. *American Economic Review*, 1992, 82(1): 34-51.
- [3] 龚斌磊. 投入要素与生产率对中国农业增长的贡献研究. *农业技术经济*, 2018, (6): 4-18. [GONG B L. The contribution of inputs and productivity to agricultural growth in China. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018, (6): 4-18.]
- [4] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析. *农业经济问题*, 2008, 29(8): 65-68. [WANG Z L, XIAO H F. Effect of fertilizer application on grain yield growth. *Issues in Agricultural Economy*, 2008, 29(8): 65-68.]
- [5] 曾靖, 常春华, 王雅鹏. 基于粮食安全的我国化肥投入研究. *农业经济问题*, 2010, 31(5): 66-70. [ZENG J, CHANG C H, WANG Y P. Study on the fertilizer inputs based on China's food security. *Issues in Agricultural Economy*, 2010, 31(5): 66-70.]
- [6] 张利库, 彭辉, 靳兴初. 不同阶段化肥施用量对我国粮食产量的影响分析: 基于1952—2006年30个省份的面板数据. *农业技术经济*, 2008, (4): 85-94. [ZHANG L X, PENG H, JIN X C. Analysis on the impact of agricultural fertilizer application on China's grain output at different stages: Based on panel data for 30 provinces in 1952-2006. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2008, (4): 85-94.]
- [7] MOLNAR M, WESTMORE B. *OECD Economic Surveys: China*. Paris: OECD Publishing, 2015.
- [8] HUANG J, HU R, CAO J, et al. Training programs and in-the-field guidance to reduce China's overuse of fertilizer without hurting profitability. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(5): 165-167.
- [9] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2016, (2): 59-66. [MIN J S, KONG X Z. Research progress of agricultural non-point source pollution in China. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences*, 2016, (2): 59-66.]
- [10] 倪国华, 郑凤田. 粮食安全背景下的生态安全与食品安全. *中国农村观察*, 2012, (4): 52-58. [NI G H, ZHENG F T. Ecological security and food safety under the background of food security. *China Rural Survey*, 2012, (4): 52-58.]
- [11] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析. *华北农学报*, 2008, (s1): 224-229. [CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S, et al. Analysis on fertilizer applied and the central factors influencing grain yield of wheat in the Northern China Plain. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, (s1): 224-229.]
- [12] SAVCI S. Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *Apebee Procedia*, 2012, 1: 287-292.
- [13] SUN B, ZHANG L, YANG L, et al. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures. *AMBIO*, 2012, 41: 370-379.
- [14] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [15] The Ministry of Ecology and Environment of China. *Beijing: First National Census of Pollution Sources*, 2010.
- [16] 罗海平, 余兆鹏, 邹楠. 我国粮食主产区生态与粮食安全耦合协调分析: 基于1995—2015年面板数据. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 32-39. [LUO H P, YU Z P, ZOU N. The empirical study on the spatial coupling of ecology and food security in major grain-producing areas in China: Based on 1995-2015 panel data. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 32-39.]
- [17] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 57-63. [SHI C L, ZHU J F. Economic evaluation and analysis of chemical fertilizer inputs in Chinese grain production. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9): 57-63.]
- [18] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, (1): 1-6. [ZHU Z L. The loss of Nitrogen fertilizer in farmland and its countermeasures. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, (1): 1-6.]
- [19] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924. [ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.]
- [20] 张舰, 亚伯拉罕·艾宾斯坦, 玛格丽特·麦克米伦, 等. 农村劳动力转移、化肥过度使用与环境污染. *经济社会体制比较*, 2017, (3): 149-160. [ZHANG J, EBENSTEIN A, MCMILLAN M, et al. Migration, excessive fertilizer use, and environmental consequences. *Comparative Economic and Social Systems*, 2017, (3): 149-160.]

- [21] 仇焕广, 栾昊, 李瑾, 等. 风险规避对农户化肥过量施用行为的影响. 中国农村经济, 2014, (3): 85-96. [QIU H G, LU-AN H, LI J, et al. Impact of risk aversion on farmers' excessive fertilizer use. Chinese Rural Economy, 2014, (3): 85-96.]
- [22] 刘文倩, 费喜敏, 王成军. 化肥经济过量施用行为的影响因素研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(8): 726-732. [LIU W Q, FEI X M, WANG C J. Factors influencing excessive application of fertilizer. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(8): 726-732.]
- [23] 纪月清, 张惠, 陆五一. 差异化, 信息不完全与农户化肥过量施用. 农业技术经济, 2016, (2): 14-22. [JI Y Q, ZHANG H, LU W Y. Differentiation, incomplete information and excessive fertilizer use by farmers. Journal of Agrotechnical Economics, 2016, (2): 14-22.]
- [24] 史常亮, 张益, 郭焱, 等. 耕地细碎化对农户化肥使用效率的影响. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2687-2700. [SHI C L, ZHANG Y, GUO Y, et al. The impact of land fragmentation on farmer's chemical fertilizer use efficiency. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2687-2700.]
- [25] 李新华, 巩前文. 从“增量增产”到“减量增效”: 农户施肥调控政策演变及走向. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 877-884. [LI X H, GONG Q W. Trend and direction of China's development of regulatory policies preventing over-fertilization in farming: From "increasing yield by increasing fertilizer quantity" to "increasing efficacy by reducing fertilizer quantity". Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(5): 877-884.]
- [26] LI S, ZHANG Y, NADOLNYAK D, et al. Fertilizer industry subsidies in China: Who are the beneficiaries?. China Agricultural Economic Review, 2014, 6(3): 433-451.
- [27] 李博伟. 土地流转契约稳定性对转入土地农户化肥施用强度和环境效率的影响. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2317-2332. [LI B W. The effect of the stability of land transfer contract on the fertilization intensity and environmental efficiency of the farmer who transfers in land. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2317-2332.]
- [28] LIU X, HE P, JIN J, et al. Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China. Agronomy Journal, 2011, 103(5): 1452-1463.
- [29] 李升东, 毕香君, 韩伟, 等. 氮素精准管理对小麦产量和氮素利用的影响. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 195-201. [LI S D, BI X J, HAN W, et al. Effect of precision management of Nitrogen fertilizer on wheat yield and Nitrogen utilization. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(2): 195-201.]
- [30] FAN S. Regional Productivity Growth in China's Agriculture. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [31] YAO S, LIU Z. Determinants of grain production and technical efficiency in China. Journal of Agricultural Economics, 1998, 49(2): 171-184.
- [32] HU B, MCALEER M. Estimation of Chinese agricultural production efficiencies with panel data. Mathematics and Computers in Simulation, 2005, 68(5-6): 474-483.
- [33] 杨勇, 邓祥征, 李志慧, 等. 2000—2015年华北平原土地利用变化对粮食生产效率的影响. 地理研究, 2017, 36(11): 2171-2183. [YANG Y, DENG X Z, LI Z H, et al. Impact of land use change on grain production efficiency in North China Plain during 2000-2015. Geographical Research, 2017, 36(11): 2171-2183.]
- [34] 高晶晶, 彭超, 史清华. 中国化肥高用量与小农户的施肥行为研究: 基于1995—2016年全国农村固定观察点数据的发现. 管理世界, 2019, 35(10): 120-132. [GAO J J, PENG C, SHI Q H. High fertilizer use and fertilization behavior of small-scale farmers in China: Based on data from rural fixed observation points from 1995 to 2016. Management World, 2019, 35(10): 120-132.]



## Analysis of fertilizer-use optimization under the joint framework of economic rationality and environmental sustainability: Evidence from wheat farmers in Handan, Hebei rovince

QIAN Chen<sup>1,2</sup>, LI Fan<sup>1</sup>, LI Xian-de<sup>2</sup>, HAO Jing-hui<sup>3,4</sup>

(1. Development Economics Group, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands 6706KN; 2. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 4. Macro Agriculture Research Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** China has faced severe challenges from the tight balance of food security and the pollution caused by the excessive use of agricultural fertilizers. How to optimize the fertilizer uses to ensure national food security and agricultural environmental sustainability has become a great concern. The purpose of this paper is to explore ways to optimize the application of chemical fertilizer under the joint framework of economic rationality and environmental sustainability in major grain-producing areas. Using the survey data from 1026 wheat-growing farmers in Handan, Hebei province, we build a quantitative model of small holders' use of chemical fertilizers to analyze the obstacles in achieving economic rationality and environmental sustainability simultaneously. The results show that farmers' expectation of chemical fertilizer's output elasticity in the sampling region is significantly higher than the actual elasticity, indicating that, generally speaking, the farmers overestimated the effect of fertilizer on improving grain production, thus using more fertilizers. Meanwhile, the current price of chemical fertilizer in the study area is about half of the optimal price estimated in the analysis, indicating that the cost of chemical fertilizers is relatively low compared with other agricultural inputs, e.g., labor, thus farmers tend to be more dependent on chemical fertilizers in pursuing higher yield. Hence, taking into account the national food security and agricultural environment sustainability, our results suggest that: (1) It is necessary to correct farmers' cognitive bias towards the (in-)effectiveness of fertilizer use to promote scientific fertilization; (2) Fertilizer market structure and the relative price between synthetic and organic fertilizers should be more differentiated through the supply-side reform, so as to fundamentally mitigate fertilizer 'overuse' in China.

**Keywords:** food security; fertilizer use; simulation optimization; economic rationality; environmental sustainability