DOI：10.20077/j.cnki.11-1262/f.2026.04.008 网络首发时间：2026-04-15 13:27:16 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1262.F.20260415.0912.016

减污降碳与粮食安全的协同权衡：基于化肥行业补贴改革与碳氮定价的模型证据

徐 孟 汪笑溪

摘要：对农业部门而言，推动减污降碳协同增效面临明显的约束。因此，在农业高质量发展与“双碳”目标的双重约束要求下，如何破解化肥减量与粮食安全之间的协同难题成为政策设计的关键。本文利用中国农业生产及其环境影响模型（MAgPIE-China），以价格机制为切入点，从供给端的行业补贴改革和排放端的环境定价两个维度出发，通过构造反事实情景、取消化肥行业补贴情景、征收温室气体排放税情景以及组合情景，评估了化肥行业补贴改革和碳氮定价政策对减污降碳和粮食安全的权衡与协同效应。本文发现，取消化肥行业补贴和实施碳氮定价政策均可减少氮肥施用量并降低氧化亚氮排放和氮素污染。其中，氮税和碳税政策的减污降碳效应更加显著，但同时会导致食物价格上涨以及食物自给率下降，对粮食安全构成潜在风险。进一步分析表明，如采取渐进税率征收氮税与取消化肥行业补贴相结合的政策组合，则可在 2030 年有效减缓食物价格的上涨和食物自给率的下降，在最大限度地保障粮食安全的同时，实现减污降碳效果。研究结果为构建农业减污降碳与粮食安全的协同治理路径提供了量化支撑，并为农业绿色低碳转型政策的优化提供了前瞻性依据。

关键词：化肥减量 粮食安全 环境政策 碳氮定价 补贴政策

中图分类号：F326.11；X22 **文献标识码**：A

［资助项目］ 国家自然科学基金面上项目“碳中和目标下中国农业食物系统温室气体减排与粮食安全协同路径研究”（编号：72273126）；浙江省杰出青年科学基金项目“全球变化背景下中国农业食物系统温室气体减排和粮食安全的协同路径研究”（编号：LR26D010001）；中央高校基本科研业务费专项资金项目“大食物观下中国农业食物系统绿色转型的经济、健康和环境协同效应评估与政策设计”（编号：S20230139）。

［作者信息］ 徐孟，河海大学经济与金融学院、浙江大学中国农村发展研究院、浙江大学公共管理学院；汪笑溪（通讯作者），浙江大学中国农村发展研究院、浙江大学公共管理学院，电子邮箱：xiaoxi_wang@zju.edu.cn。

一、引言

减污降碳协同增效是中国新发展阶段推动经济社会发展全面绿色转型的核心任务。党的二十届四中全会进一步强调“以碳达峰碳中和为牵引，协同推进降碳、减污、扩绿、增长”[①]。对农业部门而言，实现减污降碳协同增效面临明显的双重约束：一方面，粮食安全是国家安全体系的重要组成部分；另一方面，农业是非二氧化碳温室气体排放和面源污染的重要来源。其中，农业的氧化亚氮（N_2O）排放占全国总量的 45.1%[②]；农业源氮素污染，包括氨氮（NH_3-N）、硝酸盐氮（NO_3-N）和亚硝酸盐氮（NO_2-N）等，是水体富营养化、地下水污染和大气污染的重要来源。随着碳减排进程的加速，非二氧化碳温室气体减排的战略目标重要性日益凸显。在 2035 年国家自主贡献目标中，N_2O 等非二氧化碳温室气体首次被纳入总量控制[③]，标志着农业部门在碳减排体系中的责任进一步强化。

化肥是农业生产的关键投入要素，在保障粮食增产方面具有不可替代的作用。然而，长期粗放的施用方式导致中国化肥利用率较低、化肥施用过量，这不仅导致 N_2O 排放增加，也引发水污染和空气污染等一系列环境问题，严重制约农业绿色高质量发展与减污降碳目标的实现（汪笑溪等，2024；李凡略和何可，2025）。为应对上述挑战，中国政府自 2015 年起启动了全面的化肥减量政策：在供给端，相继取消了各项化肥行业补贴政策，以纠正化肥价格扭曲；在需求端，印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》，推行测土配方施肥、调整施肥结构、有机肥替代化肥等举措。已有研究表明，上述举措在化肥减量增效方面取得了一定成效（Van Wesenbeeck et al.，2021；Wang et al.，2023）。但是，截至 2023 年，中国化肥施用强度仍高达 292.6 千克/公顷，远超国际公认的环境安全上限（225 千克/公顷）[④]，化肥减量仍任重道远。同时，在粮食安全底线与农民增收等多目标约束下（罗斯炫和张俊飚，2024），亟须探索具备长期激励作用和能实现系统协同的化肥减量机制。

从国际经验看，各国围绕化肥减量开展了大量政策实践，涵盖法规标准、经济激励（如税收、补贴）、技术推广（最佳管理实践）等多种政策工具（Kanter et al.，2020）。其中，

[①]参见《中国共产党第二十届中央委员会第四次全体会议公报》，《人民日报》，2025 年 10 月 24 日。

[②]数据来源：《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》，https://unfccc.int/sites/default/files/resource/中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告；《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》，https://unfccc.int/sites/default/files/resource/中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告。

[③]参见《2035 年中国国家自主贡献报告》，https://unfccc.int/sites/default/files/2025-11/2035 年中国国家自主贡献报告。

[④]资料来源：国家统计局，2024：《中国统计年鉴 2024》，北京：中国统计出版社，384 页；FAO, 2013, “Guidelines to Control Water Pollution from Agriculture in China”，https://www.fao.org/4/i3536e/i3536e。

碳定价机制（碳税和碳排放交易）作为市场化碳减排政策的核心手段，正成为全球应对气候变化、推动低碳转型的重要选择（张希良等，2021；何可，2025）。截至 2025 年 4 月，全球已有 80 个碳定价机制在运行，覆盖约 28%的温室气体排放量[①]。在农业领域，丹麦率先宣布自 2030 年起对牲畜及农用石灰肥料征收渐进式排放税；奥地利、丹麦、芬兰、荷兰、挪威、瑞典等欧盟多国早在 20 世纪 80 年代便开始实施化肥税制度，结合税收返还与出口补贴、技术研发和推广等机制，对农业面源污染展开了有效治理（Henseler et al.，2020）。

对中国而言，在农业领域引入碳税、氮税等政策工具已具备一定制度基础。2018 年《中华人民共和国环境保护税法》的出台，标志着环境税正式被纳入国家环境治理体系，并为未来向农业领域延伸提供了法律基础。尽管现阶段环境税主要覆盖工业污染和规模化养殖，尚未将种植业的化肥污染纳入征税范围，但这一制度空白为环境税在化肥减量领域的政策创新预留了空间（周志波和张卫国，2018）。更重要的是，碳税、氮税政策作为现有税收体系的延伸，具有实施成本低、制度衔接性强等优势，可有效应对“小农户分散、监管难度大、施肥普遍过量”的难题。随着“双碳”目标约束趋紧，深入研判碳税、氮税政策在农业部门的可行路径与税制设计，具有现实紧迫性和政策前瞻性。

现有研究对中国化肥减量路径与机制进行了有益探索，主要聚焦于两个方面：一是从土地管理与技术创新的视角，探讨土壤－作物综合管理、栽培与灌溉改良等技术措施的化肥减量增产潜力（Zhang et al.，2016）。虽然这些技术路径具有较大的化肥减量增效空间，但在小农主导的农业生产体系中往往面临推广成本高、采纳率低等现实约束。二是立足经济学视角，聚焦制度安排、组织主体和生产经营特征对化肥施用的影响。例如，农业推广服务、技术培训、农业补贴与保险和高标准农田建设等制度因素（燕菲儿等，2024），新型农业经营主体和社会化服务等组织因素（魏梦升等，2023），以及土地确权、经营规模和耕地细碎化等生产经营特征（高晶晶等，2019；郭晓鸣和温国强，2023；张露和罗必良，2020）。总体而言，当前研究仍存在两方面不足：一是对不同类型经济激励型政策工具的比较仍然缺乏，难以揭示不同政策在降低化肥施用方面的作用差异；二是除技术措施外，多数研究仍聚焦单一政策目标，对环境效益与经济目标的权衡与协同缺乏综合评估，尚不能为减污降碳与粮食安全协同治理的政策设计提供全面的经验证据。

鉴于此，本文以价格机制为切入点，重点考察化肥行业补贴退出与温室气体排放征税两类政策工具对农业减污降碳与粮食安全的影响。前者代表供给端结构性调整，旨在纠正扭曲性补贴；后者则体现了排放端环境规制的发展趋势，意在通过税收机制实现负外部性的内部化。具体而言，本文拟运用中国农业生产及其环境影响模型（China-specific version of

[①]资料来源：《2025 年碳定价发展现状与未来趋势》，https://www.worldbank.org/en/publication/state-and-trends-of-carbon-pricing。

Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment，MAgPIE-China），评估取消化肥行业补贴和征收温室气体排放税政策实施对化肥减量、温室气体与氮素污染减排以及粮食安全的综合影响，并分析其协同和权衡效应，以期为推动农业绿色高质量发展与“双碳”目标实现提供科学依据。

相比于已有研究，本文的边际贡献主要体现在以下三个方面：第一，现有关于化肥减量政策措施的研究多依赖计量经济学模型和田间试验，难以同时考虑社会经济特征与自然资源约束，也缺乏对未来情景的前瞻性预测，从而制约了对多目标约束下政策中长期影响的评估。事前评估对于复杂公共政策的制定至关重要，尤其在农业与环境领域，政策效应通常具有长期性、系统性和一定的不可逆性，仅依赖事后评估难以及时反馈并支撑政策优化（汪笑溪等，2025）。本文运用综合评估模型，基于国内外相关经验构建多情景并开展事前政策评估，在刻画未来社会发展路径的同时，将空间明晰的生物物理约束信息纳入经济决策分析，从而为提升农业减污降碳政策设计的科学性与政策取向一致性提供有力的证据支持和决策参考。第二，已有研究多从农户或行业层面考察单一的化肥补贴或氮税政策对农业生产的影响（张蔚文等，2006；Li et al.，2013；杨顺顺等，2017），但对不同政策工具的比较分析仍较为有限。本文在统一框架下评估取消化肥行业补贴与碳税、氮税等价格型政策的单独与组合效应，为理解不同价格机制在化肥减量中的作用差异与互补性提供证据。第三，本文从政策工具的协同和权衡效应出发，量化评估价格型政策对农业减污降碳与粮食安全的多维度影响，回应农业绿色高质量发展多目标治理的现实需求，以期为未来农业环境税制设计及农业部门落实“双碳”目标战略提供前瞻性决策支撑。

二、政策背景与理论机制

（一）政策背景与理论分析

为统筹推进经济社会发展全面绿色转型，生态环境部等七部门于 2022 年联合印发《减污降碳协同增效实施方案》，在国家层面明确将“减污降碳协同增效”作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手，强调推进各领域的目标协同、任务协同、政策协同、监管协同[①]。党的二十大报告提出“推动绿色发展，促进人与自然和谐共生”，强调“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”[②]。2025 年党的二十届四中全会进一步强调，要以碳达峰碳中和为牵引，协同推进推动高质量发展与高水平保护。就农业领域而言，化肥既是粮食生产的重要投入要素，也是温室气体排放和面源污染的关键来源。如何在推进其减污降碳的同时兼顾粮食安全，是农业绿色转型面临的重要议题。

[①]参见《减污降碳协同增效实施方案》，https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm。

[②]习近平，2025：《习近平谈治国理政》第五卷，北京：外文出版社，第 39 页。

回顾过去数十年，中国化肥行业的快速发展为推动粮食产量增加和保障国家粮食安全奠定了基础。为稳定粮食供给、缓解农资成本上涨压力，自 20 世纪 90 年代起，中国相继实施了一系列化肥行业补贴政策，包括化肥生产与流通领域的电价优惠、天然气价格优惠、铁路运输补贴、增值税补贴和淡季商业储备补贴等政策，以降低化肥生产成本，平抑化肥市场价格（林斌等，2022）。截至 2011 年，化肥生产和施用补贴总额由 2003 年的 78.9 亿元增加至 1570 亿元，折合单位补贴从 200 元/吨增加至 2480 元/吨。其中，氮肥补贴力度最高，以尿素为例，其折纯补贴金额在 2011 年达 970 元/吨，占尿素折纯价格的 20.8%。

然而，长期以来大规模的化肥行业补贴扭曲了化肥价格信号，成为化肥过量施用的重要制度性诱因（Li et al.，2013），这也加剧了农业面源污染与 N_2O 排放。随着生态文明建设和农业供给侧结构性改革的深入推进，国家自 2015 年起逐步取消化肥行业的各类优惠政策，仅保留淡季商业储备补贴，以恢复化肥的商品属性，强化市场机制在化肥生产和流通中的调控作用，从供给端推动农业投入品使用向节本、高效、绿色转型。

从国际经验看，欧盟国家自 20 世纪 80 年代起即通过环境税等经济手段纠正化肥不合理使用的负外部性。例如，挪威、匈牙利和丹麦相继实施化肥税收政策，以限制过量施肥，减少水体污染（Henseler et al.，2020）。自 20 世纪 90 年代以来，荷兰相继实施了五个硝酸盐肥料行动计划，对超标的农场实施强制征税（张斌和金书秦，2020）。相较而言，中国目前尚未正式建立针对氮肥排放的定价机制。随着碳减排治理从以二氧化碳（CO_2）减排为主逐步拓展至对非二氧化碳温室气体的综合治理，特别是在新一轮国家自主贡献目标中，N_2O 等非二氧化碳温室气体被纳入总量控制范围，探索将氮税、碳税等碳氮定价政策纳入前瞻性政策评估，以期为面向国家重大需求的政策设计提供依据。

从理论层面看，取消化肥行业补贴和碳氮定价的目的均是纠正化肥不合理施用带来的环境负外部性。在市场失灵情境下，农户决策仅基于私人成本与收益，并未承担由污染排放带来的全部社会成本，从而导致市场均衡状态下的化肥使用量偏离社会最优水平（Marshall，1890；Stiglitz，2000）。传统福利经济学提出通过庇古税来矫正负外部性，其核心在于通过对负外部性进行征税，使边际私人成本等于边际社会成本，从而实现资源配置的帕累托改进（Pigou，1920）。碳氮定价是庇古税的典型应用，其通过在排放端征税，强制将环境成本内化于农户生产决策之中；取消化肥行业补贴则旨在消除政府干预所导致的要素价格扭曲，本质上属于在投入端实施“隐性征税”，通过还原化肥的真实价格来约束其过度使用。总体而言，两类政策均是通过价格机制引导化肥使用向社会最优水平回归。

从协同治理的角度看，纠正化肥施用负外部性的政策工具可能提高农业生产成本，使得减污降碳与粮食安全之间出现冲突。一方面，粮食增产通常依赖耕地扩张和化肥等生产要素投入的增加，这个过程往往伴随温室气体和面源污染排放增加；另一方面，减污降碳措施可能增加农户生产成本，进而抑制粮食产出并推高市场价格，在短期内对粮食安全保

障形成压力。因此，在“减污降碳协同增效”目标导向下，检验取消化肥行业补贴与碳氮定价政策能否在实现减污降碳的同时兼顾粮食安全，对于落实党的二十届四中全会关于美丽中国建设和高质量发展的战略部署具有重要的理论价值与政策意义。

（二）理论模型

在上述理论分析的基础上，本节构建了一个简化的化肥市场和农产品市场的两部门一般均衡模型，用以刻画取消化肥行业补贴和征收温室气体排放税政策实施对要素配置与价格形成的传导机制。模型假设两市场均为完全竞争市场，生产者遵循利润最大化原则，政策冲击通过价格机制传导并最终实现新的均衡。

1.*化肥市场*。在化肥市场中，化肥的供给和需求决定了其市场价格及使用量。模型中，假设市场上的化肥生产商可以生产化肥，化肥生产量受价格、生产成本和政策因素（如补贴）影响。化肥需求则由农业生产需要、价格弹性以及政策变动所驱动。由此得到化肥行业的供给函数为：

$$S_F = \alpha_0 + \alpha_1 P_F - \alpha_2 (C_F - \theta) \tag{1}$$

（1）式中：S_F 表示化肥供给量，P_F 为化肥市场价格，C_F 为生产成本，θ 为单位化肥行业生产补贴。参数 α_1 和 α_2 分别衡量供给价格弹性和成本敏感系数。当政府取消化肥行业补贴（$\theta \to 0$）时，化肥生产商的实际生产成本上升（$C_F - \theta \uparrow$），供给曲线向左移动（见图 1 右下象限）。

农业部门对化肥的需求（D_F）函数为：

$$D_F = \beta_0 - \beta_1 P_F + \beta_2 P_A - \beta_3 \tau \tag{2}$$

（2）式中：P_A 为农产品价格，τ 为温室气体排放税率。温室气体排放税政策（$\tau > 0$）通过提高化肥使用的排放成本来抑制需求，税率上升（$\tau \uparrow$）将导致需求曲线左移（见图 1 左上象限）。

2.*农产品市场*。假设农产品生产函数采用柯布－道格拉斯（Cobb-Douglas）形式：

$$Q_A = AF^{\gamma} L^{1-\gamma} \tag{3}$$

（3）式中：Q_A 为农产品产量，F 为化肥投入量，L 为土地与劳动力复合要素，γ 为化肥产出弹性。单位农产品成本（C_A）函数为：

$$C_A = \omega_L + \frac{P_F}{\gamma}(1 + \tau \mathrm{e}_F) \tag{4}$$

（4）式中：ω_L 为土地与劳动力复合成本，e_F 为单位化肥碳排放系数。温室气体排放税通过 τe_F 提高化肥使用成本，进而推高农产品边际成本。农产品需求函数为：

$$D_A = \kappa_0 - \kappa_1 P_A \tag{5}$$

3.市场均衡与政策效应。在上述供给、需求和成本设定下，市场均衡由化肥市场与农产品市场同时出清所决定，具体满足以下条件。

化肥市场均衡条件：

$$S_F = D_F \tag{6}$$

农产品市场均衡条件：

$$Q_A = D_A \tag{7}$$

农产品生产者利润最大化，即化肥的边际产出等于边际成本：

$$P_A \gamma A F^{\gamma-1} L^{1-\gamma} = \frac{P_F}{\gamma}(1+\tau e_F) \tag{8}$$

联立方程可得均衡价格（P_A^*，P_F^*）与化肥使用量F^*。

化肥均衡价格：

$$P_F^* = \frac{\beta_0 - \alpha_0 + \alpha_2 (C_F - \theta) + \beta_2 P_A - \beta_3 \tau}{\alpha_1 + \beta_1} \tag{9}$$

农产品均衡价格：

$$P_A^* = \frac{\kappa_0 - A F^{\gamma} L^{1-\gamma}}{\kappa_1} \tag{10}$$

化肥均衡使用量：

$$F^* = \left(\frac{P_A^* \gamma^2 A L^{1-\gamma}}{P_F^* (1+\tau e_F)}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \tag{11}$$

进一步可得到政策效应如下：政府取消化肥行业补贴（$\theta \to 0$），将直接推高化肥价格（$\partial P_F^* / \partial \theta < 0$），并通过价格机制抑制农业部门化肥需求（$\partial F^* / \partial P_F^* < 0$），导致化肥施用量下降，并带来$N_2O$与氮素污染的同步减排。同时，化肥作为关键投入，在氮素利用率不变的条件下，其投入减少将降低农产品供给（$\frac{\partial P_A^*}{\partial \theta} = -\frac{\gamma A F^{*\gamma-1} L^{1-\gamma}}{\kappa_1} \times \frac{\partial F^*}{\partial \theta} < 0$），从而推高农产品均衡价格（见图 1 右上象限和左下象限）。

征收温室气体排放税（$\tau > 0$），将通过提高化肥使用成本（$\frac{\partial D_F}{\partial \tau} = -\beta_3 < 0$），直接降低农业部门的化肥需求，并进一步降低由化肥投入所导致的N_2O和氮素污染排放。同时，

温室气体排放税通过成本函数（4）式提高农产品成本，推高农产品价格；而化肥施用量下降可能减少产量（$\frac{\partial P_A^*}{\partial \tau}=-\frac{\gamma AF^{*\gamma-1}L^{1-\gamma}}{\kappa_1}\times\frac{\alpha F^*}{\partial \tau}>0$），进而推动农产品均衡价格上升（见图1右上象限和左下象限），对粮食安全形成压力。

基于上述分析，本文得到以下推论。

推论1：取消化肥行业补贴政策会提高化肥价格，进而减少化肥施用量，降低 N_2O 和氮素污染排放；同时，因产出下降引致农产品价格上升，对粮食安全形成潜在威胁。

推论2：征收温室气体排放税政策通过提高边际成本削减化肥投入，减少 N_2O 和氮素污染排放；同时，成本上升与产出下降将推高农产品价格，加剧减污降碳与粮食安全之间的权衡。

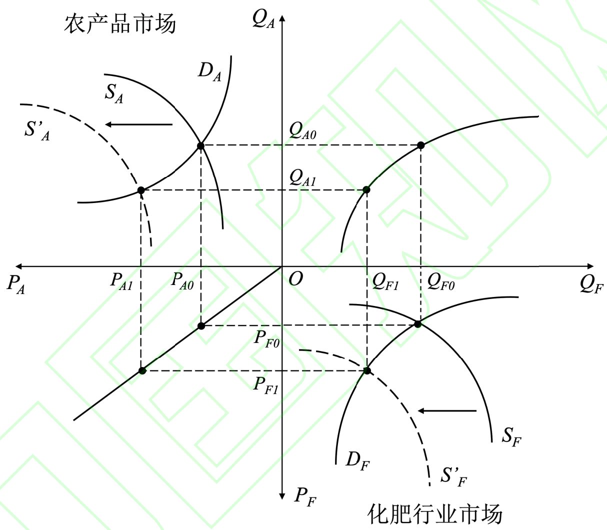

图1　政策对化肥行业市场与农产品市场均衡的影响

注：左上象限和右下象限分别表示农产品市场和化肥行业市场在政策冲击下的供给和需求变化，右上象限和左下象限分别表示两部门产品的产量和价格的变化。取消化肥行业补贴政策通过化肥行业市场（右下象限）对两部门的要素配置和价格产生影响，而征收温室气体排放税政策则通过农产品市场（左上象限）对两部门的要素配置和价格产生影响。

上述推导表明，化肥行业补贴和碳氮定价两类政策工具虽分别作用于化肥供给与温室气体排放，但在机制上均可归为通过改变农业生产成本影响化肥投入，进而作用于减污降碳与粮食安全。鉴于政策推进在实践中通常具有路径依赖与阶段性特征，取消化肥行业补贴一旦实施，就往往具有持续性，而温室气体排放税则可在其实施后再引入。由此，不同时间段 θ 和 τ 的取值可能发生调整，使生产成本呈现阶段性上升，并带来化肥投入及其影响的阶段性响应。需要说明的是，本文理论分析旨在揭示不同政策工具通过改变农业生产成本，进而影响化肥投入方面的共通机制与作用方向，并非用于刻画其在不同实施阶段下对减污降碳与粮食安全影响的具体量级或排序。相关量化结果依赖于参数设定及情景假设，

需结合后文综合评估模型展开进一步分析。为此，本文将在后续模拟中对关键参数进行敏感性分析，以检验主要结论在不同参数设定下的稳健性。

上述理论推导的核心传导机制、政策参数与结果变量，能够映射到后续政策模拟所依托的 MAgPIE-China 模型框架中。具体体现在以下三个方面：第一，理论模型中设定的取消化肥行业补贴和征收温室气体排放税的政策变量，可分别映射对应为模型中的化肥使用成本和温室气体排放成本；第二，理论模型中农业生产对化肥价格和税收的响应与模型中的成本最小化框架一致；第三，理论推导中的关键结果变量，包括化肥使用量、农业产出、农产品价格、温室气体排放和氮素污染等，均可通过 MAgPIE-China 模型进行测算与量化。

三、研究方法

为验证上述推论，本部分将在介绍 MAgPIE-China 模型的基础上，对关键结果变量和政策参数进行界定和刻画，以支撑后续政策效应的模拟与量化分析。

（一）MAgPIE-China 模型

本文运用 MAgPIE-China 模型评估不同政策工具对中国化肥减量、温室气体与氮素污染减排、农业生产和粮食安全的综合影响。该模型是在 MAgPIE 模型（Lotze-Campen et al.，2008；Dietrich et al.，2019）的基础上，结合中国区域特征进行本地数据校准和参数化改进后的农业经济与土地利用局部均衡模型（Wang et al.，2023；2024；2025a），已被广泛应用于评估温室气体减排政策、生态保护、土地利用政策、化肥政策改革、技术变迁以及膳食结构转型等对农业食物系统与可持续发展的影响（Cai et al.，2025；Wang，et al.，2025a，2025b；Wang and Lotze-Campen，2025）。

MAgPIE-China 模型以全球农业成本最小化为目标函数，在满足农产品需求的前提下，优化农业生产结构和土地利用配置。模型中的农业需求端包括食物需求、物质需求、饲料需求和生物质需求四个子类别（Dietrich et al.，2019）。其中，食物需求基于历史发展模式，结合未来人口、收入增长的社会经济路径进行外推估计，并纳入膳食结构、食物浪费以及体重指数分布等因素（Bodirsky et al.，2020）。模型假定居民食物消费对价格的反应相对缺乏弹性，这一设定与文献中关于居民食物需求价格弹性较低的经验结论一致（Valin et al.，2013；易福金等，2019）。食物需求主要由收入变化驱动，农产品价格变动通过影响消费者实际收入进一步作用于食物需求（Dietrich et al.，2019）。物质需求与食物需求成正比。饲料需求依据不同牲畜生产系统的饲料能量需求进行核算。生物质需求则基于第一代和第二代生物质燃料产量进行测算。食物供给是由生产成本和空间明晰的农业生产力水平内生决定的。模型中的生产成本包括生产要素（劳动力、化肥、资本、能源）成本、土地利用变化成本、国内运输成本、灌溉设施成本、贸易成本和增产技术投资成本（Lotze-Campen et al.，2008；Dietrich et al.，2019）。其中，生产成本和运输成本数据来自全球贸易分析项目

（GTAP）数据库，土地利用变化成本依据每公顷森林或其他自然植被转换为耕地的费用进行计算。灌溉设施成本则以区域灌溉面积扩张的投资成本计算。增产技术投资成本随地区而异，并假定所有作物类型的土地生产力增长相同。国际贸易基于自给率和区域比较优势，实现生产在不同区域间的最优配置。模型不设定先验的供给价格弹性，该弹性通过非线性递归动态优化过程内生决定（Robinson et al.，2014）。MAgPIE-China 模型涵盖了 24 种主要农产品，包括 19 种作物和 5 种畜产品[①]。MAgPIE-China 模型的生物物理输入来自栅格尺度的全球动态植被模型，空间分辨率为 0.5°×0.5°，能够将空间明晰的土地与水资源、作物产量以及陆地碳汇等生物物理约束纳入经济决策。模型在时间和空间分辨率上具有灵活性，可支持全球、区域及栅格尺度的模拟分析（Dietrich et al.，2019）。基于地理和经济特征，模型将全球划分为 12 个经济区域和 400 个模拟单元，其中，中国被划分为 289 个模拟单元[①]（Dietrich et al.，2019）。所有基于 0.5°×0.5°分辨率的输入数据均通过聚类算法聚合至模拟单元中，以支持模型的优化求解过程。中国政府提出“2030 年前碳达峰，2060 年前碳中和”的中长期目标，且农业部门是非二氧化碳温室气体排放的重要来源，因此，本文重点关注 2030 年和 2060 年两个关键时间节点的模型结果。模型自 1995 年到 2060 年以 5 年为步长，通过动态递归模式运行[①]。本文聚焦以下四类关键指标，以评估不同政策工具对化肥减量及其减污降碳效应、农业生产和粮食安全的综合影响。

1.化肥施用量。为实现农业生产系统和环境系统的氮素平衡，MAgPIE-China 模型全面考虑了农田土壤、牲畜饲养、粪便管理和家庭部门等多源氮素投入。模型遵循氮素总投入等于氮素总产出的原理构建农业－环境系统的整体氮循环。化肥作为农业生产中的主要氮素来源，其施用量为内生变量，由施肥技术水平和作物产量共同决定（Bodirsky et al.，2014）。作物产量同样为内生变量，其变化由内生技术变迁和生物物理产量条件共同驱动（Dietrich et al.，2019）。

2.N_2O 排放与氮素污染。在减污降碳的测度方面，温室气体排放与环境污染物在投入结构和生物地球化学过程上高度耦合，减污降碳中的“碳”通常被用作温室气体排放的综合性表征[②]。因此，本文聚焦于与农业生产中化肥使用密切相关的非二氧化碳温室气体 N_2O 的排放，以及农业源氮素污染的变化。具体而言，本文基于 MAgPIE-China 计算土地利用变化和农业活动导致的氮盈余，即农业氮素的总投入（合成氮肥和有机氮肥）与收获农产品中氮素输出之间的差值。氮盈余是衡量农业系统向环境系统释放氮素的重要指标。氮盈余以硝化或反硝化、氨挥发、淋溶和径流等途径进入大气和水体环境，进而引发水体富营养化、地下水硝酸盐超标、$PM_{2.5}$ 形成以及温室气体排放等多重环境问题。模型刻画了农田

[①]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

[②]资料来源：《专家解读丨协同推进减污降碳 助力实现美丽中国建设和“双碳”目标》，https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202206/t20220620_986122.shtml。

氮素循环的主要过程，可计算包括非二氧化碳温室气体 N_2O，以及 NH_3-N、NO_3-N 和 NO_2-N 等主要污染物排放量。

3.农业生产。农业生产水平通过作物产量和土地利用强度进行衡量。土地利用强度反映了研发、基础设施和管理提升等技术进步带来的产量增长（Dietrich et al.，2014），是衡量土地生产率和农业集约化程度的重要指标。模型遵循诱致性技术创新理论，使土地利用强度随内生技术进步动态调整。技术投资可推动土地利用集约化并提高产量；其边际效应取决于投资收益率和现有的土地利用集约化程度，集约化程度越高，进一步集约的边际成本越高（Dietrich et al.，2014；Wang et al.，2024）。

4.粮食安全。本文将粮食安全界定为广义的覆盖粮食及重要农产品的整体保障能力[①]，而非狭义的主粮安全。模型从食物价格、食物自给率和进出口贸易情况三个维度衡量粮食安全水平。食物价格作为反映生产要素稀缺性和贸易约束的影子价格，其上升会推高消费者生活成本并降低其实际收入，从而削弱食物可负担性。食物自给率是国内食物生产与需求之比，是衡量食物供需平衡和自主保障能力的重要指标。较高的食物自给率有助于降低对国际市场的依赖，为应对外部价格波动提供缓冲。进出口贸易通过净进口量来衡量，反映对国际市场的依赖程度。净进口规模越大，受全球价格冲击的风险越高，食物供应的外部脆弱性也相应越高。综合上述三个维度，模型能够全面评估不同政策情景下食物供给能力、系统韧性以及食物可负担性等多维度的粮食安全水平。

（二）取消化肥行业补贴对化肥价格影响的测算

为评估取消化肥行业补贴政策的实施对氮肥价格的影响，本文采用两种方法进行测算。

第一种方法是基于实际补贴强度测算。利用 2010 年全国化肥行业补贴金额除以氮肥施用量来计算取消化肥行业补贴对氮肥价格的影响。根据 Li et al.（2013）的估计，2010 年中国化肥行业补贴金额为 180 亿美元，将其与同期全国氮肥使用量[②]相除，可得到每吨氮肥的补贴强度为 330 美元[③]。据此，若取消补贴，氮肥价格将从模型设定的基准价格 600 美元/吨氮升至 930 美元/吨氮。该估计结果将作为政策主情景的基础参数。

第二种方法是基于价格指数对比的反事实分析。鉴于中国自 2015 年起逐步取消化肥行业补贴，本文构造了一个反事实情景：假设补贴未退出，中国化肥价格走势将与同期未实

[①]资料来源：《新形势下保障粮食安全需提升三重能力》，https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202302/t20230220_1348979_ext.html。

[②]国家统计局，2011：《中国统计年鉴 2011》，北京：中国统计出版社，第 466 页。

[③]由于 MAgPIE-China 为全球农业经济与土地利用局部均衡模型，其核心经济参数统一以美元（2005 年不变价）标价，以便不同国家和地区的横向比较。为保持模型设定的一致性和结果可比性，本文涉及的政策变量参数测算与模型输入均采用该默认单位。

施该政策的国家基本一致。基于数据可获得性，本文选取美国作为参照，对比中美两国 2015 年前后化肥价格指数的变化[①]。2003－2015 年，两国化肥价格指数走势基本一致，但自 2016 年起出现背离，美国下降 16%，中国则上涨 4%。据此估算，取消补贴使中国化肥价格相对提高 20%。基于模型基准价格（600 美元/吨氮），该方法估计的取消化肥行业补贴后的氮肥价格为 720 美元/吨氮。鉴于两种方法在数据来源和假设设定上的不确定性，本文将进一步通过蒙特卡洛模拟对氮肥价格这一关键参数进行敏感性分析。

四、政策情景构建

为评估化肥供给端（化肥行业补贴退出）和排放端（温室气体征税）两类价格型政策工具的综合影响，本文构建了三类主要政策情景：取消化肥行业补贴政策情景、征收温室气体排放税情景以及取消化肥行业补贴与征收温室气体排放税的组合情景。所有情景均基于共享社会经济路径的中间路径 SSP2 进行参数化设置。SSP2 路径假设未来全球社会经济延续当前发展模式（O'Neill et al.，2017），人口增长以及全球对农作物和畜产品的需求将适度增加，生产和国际贸易仍然保持相对区域化，作物产量的增速逐渐放缓，低收入国家生产率逐步提高。具体情景设置如表 1 所示。

表 1　情景方案设定

情景方案		参数设置			
		化肥价格（美元/吨氮）	N_2O	CO_2	CH_4
反事实情景		600	—	—	—
取消化肥行业补贴情景		930	—	—	—
征收温室气体排放税情景	氮税-330 情景	600	√	—	—
	氮税情景	600	√	—	—
	碳税情景	600	√	√	√
组合情景	取消化肥行业补贴+渐进税率征收氮税	930	√	—	—

注：氮税-330 政策的征税金额为 330 美元/吨氮，与取消化肥行业补贴所导致的氮肥价格涨幅相对应。组合情景中的渐进税率征收氮税是指从 2025 年开始征收氮税。

第一，反事实情景。本文构造了不取消化肥行业补贴的反事实情景，作为分析的基准情景。中国自 2015 年启动化肥零增长政策，与取消化肥行业补贴政策实施的时间节点一致，为获知取消补贴政策的净影响，本文未在模型中叠加化肥零增长政策的实施。政策情景的基准年设定为 2015 年。模型校验结果表明 MAgPIE-China 模型能够较为准确地再现中国氮肥施用的历史动态，为后续政策情景模拟提供了基础[②]。

[①]资料来源：前瞻数据库，https://d.qianzhan.com/xdata/details/e8662b2080085865.html。

[②]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

第二，取消化肥行业补贴情景。该情景用于模拟中国自 2015 年开始的化肥行业补贴政策实施的中长期影响。基于前文估计结果，自 2015 年起，中国氮肥价格的参数设定从模型默认的 600 美元/吨氮上升至 930 美元/吨氮，其他模型参数保持与基准情景一致。

第三，征收温室气体排放税情景。此情景用于模拟氮税和碳税政策的影响。本文设置三种强度递增的排放税子情景，重点考察碳价格信号对农业生产与环境的影响。①氮税-330 情景：对 N_2O 排放征税，税率与取消化肥行业补贴引致的化肥价格增幅相同，设定为 330 美元/吨氮，旨在考察等额经济激励下的影响差异；②氮税情景：参照联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告关于 100 年全球变暖潜势，根据 N_2O 排放对应的社会成本对其进行征税（Soergel et al.，2021）；③碳税情景：该情景在氮税基础上，进一步对 CO_2 和甲烷（CH_4）排放进行征税，以反映更高减排力度的气候政策方案①。

第四，组合情景。此情景将取消化肥行业补贴和按照渐进税率征收氮税相结合，具体设定为：自 2015 年起取消化肥行业补贴，并自 2025 年开始引入与单一氮税情景税率水平一致的渐进式氮税。鉴于高强度排放税可能对粮食安全产生较大冲击，该情景通过延后实施氮税，同时叠加取消化肥行业补贴，模拟政策强度逐步释放、实施节奏更为平缓的路径，以期在减污降碳与粮食安全之间实现更优的平衡。

五、模型结果

（一）不同政策情景对氮肥施用的影响

在反事实情景下，中国氮肥施用量从 2015 年的 3479 万吨增长至 2060 年的 4470 万吨（见图 2）。相比反事实情景，取消化肥行业补贴政策可促进氮肥的减量施用，2030 年和 2060 年可分别减少 223.6 万吨和 218.5 万吨氮肥，减幅为 5.0%和 4.9%。氮税-330 政策的减量效果有限，2030 年和 2060 年仅分别减少 10.0 万吨和 22.3 万吨氮肥。二者的差异主要源于价格信号的传导路径和强度不同。取消化肥补贴直接作用于投入端的化肥价格，市场响应更为直接；而氮税以排放为计征基准，经由排放系数折算后对单位化肥成本的提升幅度相对较小，因此在化肥施用方面的减量效果较弱。更高排放税率的氮税和碳税政策实施对氮肥的减施效果显著增强，至 2060 年，氮肥施用量可分别减少 1016.3 万吨和 1039.7 万吨，降幅达 22.7%和 23.3%。这一结果表明，碳税的减施效果略强于氮税，即多税并行对化肥施用的抑制作用更大。相比氮税，碳税不仅覆盖 N_2O 排放，而且涵盖农业活动中的 CH_4 排放和土地利用变化相关的 CO_2 排放，作用范围更广，促使更多的耕地收缩和林地增加，从而在总量上进一步减少化肥施用①。在组合情景下，即取消化肥行业补贴与渐进税率征收氮税并行实施，短期内氮肥施用量呈逐步下降态势，2030 年减少 554.9 万吨；长期来看，

①篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

其氮肥减量效果超过单一碳税政策实施效果，到 2060 年可减少 1174.4 万吨（见图 2）。

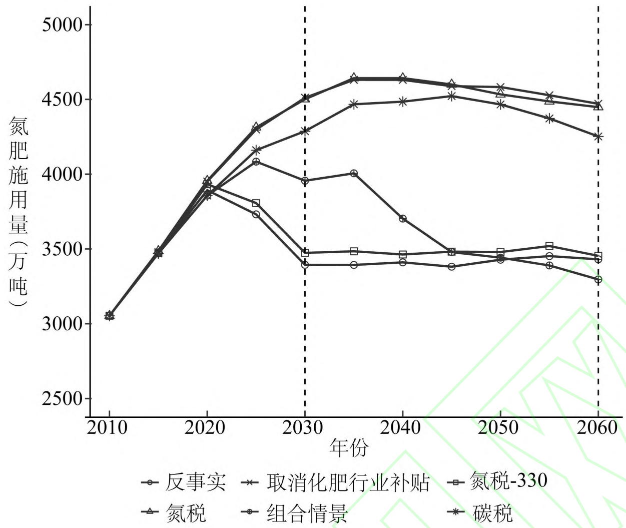

图 2　2010－2060 年不同政策情景下氮肥施用量的变化趋势

（二）不同政策情景对 N_2O 和氮素污染的减排效应

在反事实情景中，氮盈余随氮肥施用同步增长，从 2015 年的 2788 万吨迅速增加到 2060 年的 3459 万吨[①]。1995－2060 年中国农业部门的 N_2O 累积排放量达到 386 亿吨 CO_2 当量。氮素污染物中，2015－2060 年 NO_3-N 累积排放量最大且增速最快，从 64564 万吨增加至 281262 万吨，增长了约 3.36 倍；NH_3-N 累积排放量由 26400 万吨上升至 110228 万吨；NO_2-N 累积排放量较低，从 1342 万吨增至 4870 万吨。

各政策情景均可在不同程度上降低氮盈余，其在不同情景下的减量效果排序与氮肥施用量基本一致。到 2060 年，组合情景的减排效果最为显著，减排量达 864.2 万吨；碳税（771.7 万吨）与氮税情景（721.5 万吨）次之；而取消化肥行业补贴与氮税-330 情景的减排量较小，仅为 144.8 万吨和 19.8 万吨[②]。从生态安全视角来看，中国农业氮盈余需保持在氮素行星边界（Nitrogen Planetary Boundary）2600 万吨以下（Chang et al.，2021），才能维持地球系统在安全运行空间内。模拟结果显示，2060 年前所有政策情景均无法将氮盈余控制在行星边界内；仅在 2060 年，组合情景下的氮盈余才降至该阈值以下。

在 N_2O 和氮素污染物排放方面，各政策情景的减排模式总体一致，减排量排序为：碳税情景＞氮税情景＞组合情景＞取消化肥行业补贴情景＞氮税-330 情景（见图 3）。以 N_2O 为例，在碳税情景、氮税情景和组合情景下，中国 1995－2060 年累积排放量较反事实情景

[①]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

[②]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

分别减少 15.7%、10.7%和 8.9%，而取消化肥行业补贴和氮税-330 情景的减排效果较弱，仅分别减少 1.6%和 0.1%。氮盈余与氮素污染减排效果在政策排序上存在差异，主要源于政策作用路径的不同：碳税和氮税以排放量为计征基础，通过提高排放成本强化末端减排激励，在污染排放削减方面更具优势；相较之下，组合情景中的取消化肥行业补贴则作用于生产投入端，可降低化肥投入及其带来的氮盈余，但其污染减排效果弱于税收政策。

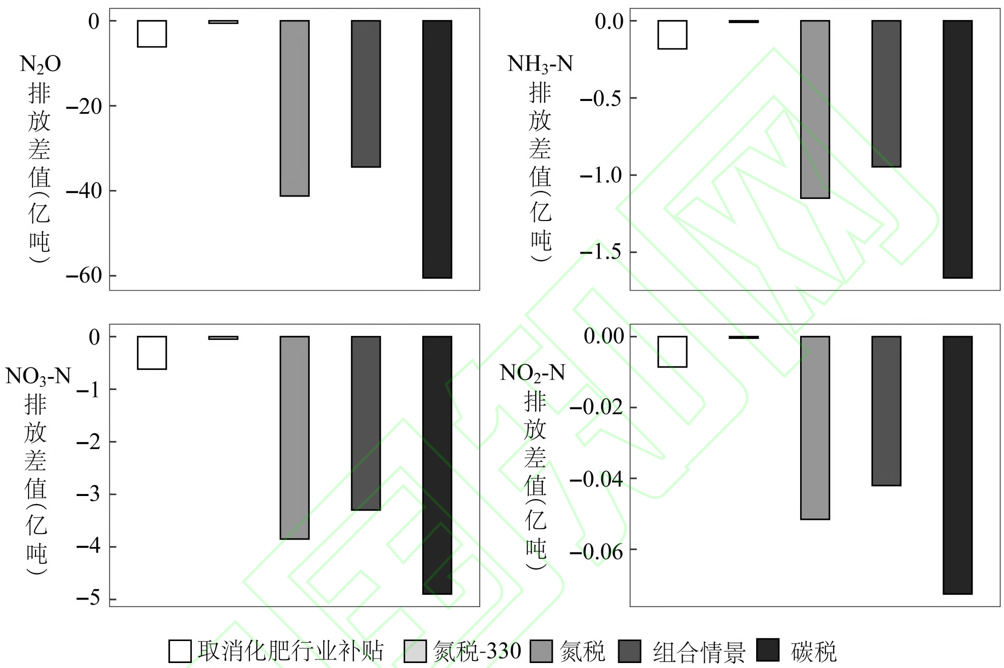

图 3　不同政策情景下 1995－2060 年 N_2O 和氮素污染累积排放量相较反事实情景的变化

从成本收益来看，取消化肥行业补贴在单位成本下的化肥减施效果更好。2030 年该政策实施的单位成本化肥减施量为 156.5 千克氮/美元，分别为碳税和氮税情景下这一减施量的 2 倍和 5 倍[①]。而碳税和氮税在 N_2O 排放和氮素污染的总量削减方面更具优势。从排放税收益来看，2030 年氮税、碳税和组合情景下的税收收入分别相当于国内生产总值的 1.11%、2.64%和 0.25%。若将部分税收收入以脱钩补贴方式返还农户，可在通过碳价格机制推动减排的同时，弥补生产成本上升带来的收入损失，从而提升政策可接受性。将部分税收收入用于农业绿色技术研发与推广，则有助于提升氮肥利用率，释放减排潜力，并通过技术进步夯实粮食安全基础（Wang et al.，2025a）。

（三）不同政策情景对粮食安全和农业生产的影响

模型结果表明，取消化肥行业补贴和征收温室气体排放税均能有效减少氮肥使用并降

[①]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

低 N_2O 和氮素污染排放，但不同政策的实施对粮食安全的影响可能存在差异。在反事实情景下，食物价格将随着时间的推移呈下降趋势，并在 2045 年降幅加速。取消化肥行业补贴和氮税-330 情景对食物价格的影响较小，2030 年价格分别较反事实情景上涨 1.1%和 0.9%。相比之下，氮税和碳税情景下的价格压力更为明显，2030 年食物价格分别提高 22.4%和 40.9%。组合情景能够有效缓解食物价格冲击，将 2030 年的涨幅控制在 6.1%以内（见图 4）。与单一氮税情景相比，组合情景可以有效规避短期内食物价格的高点，从而实现向中长期价格回落阶段的平稳过渡。从机制上来看，基准情景下食物价格在中长期回落主要源于中国农产品供需的动态均衡机制。从食物类别来看，温室气体排放税情景对畜产品价格的影响较为显著。2030 年，在氮税和碳税情景下，畜产品价格分别上涨 30.5%和 80.1%，涨幅约为粮食作物的 1.7 倍和 3.5 倍。

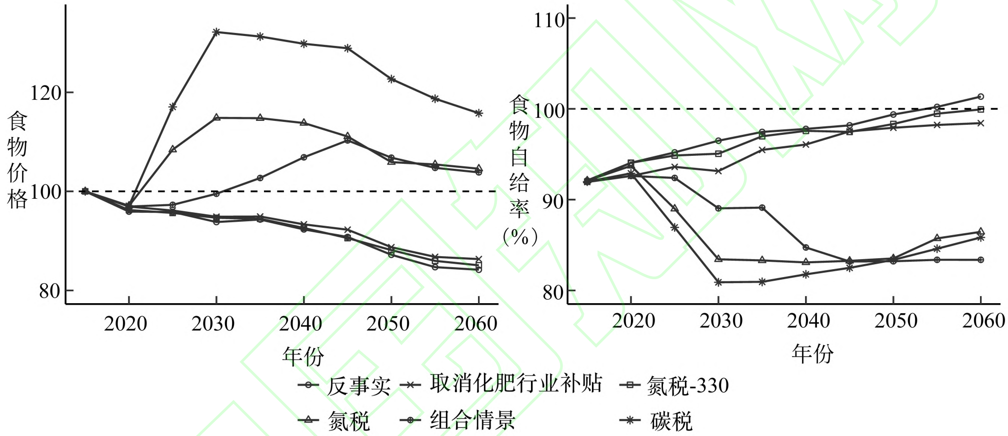

图 4　2015—2060 年不同政策情景下消费者食物价格和食物自给率的变化趋势

注：消费者食物价格以 2015 年价格水平为基准，设定为 100。图 5 同。

在食物自给率方面，反事实情景下中国在 2030 年后已实现粮食自给自足。取消化肥补贴情景下 2030 年的食物自给率略微下降，至 2060 年下降幅度为 2.9%；而在氮税和碳税情景下食物自给率受冲击较大，至 2060 年分别下降 14.7%和 15.3%（见图 4）。畜产品自给率受政策的影响相对较小，即使在碳税情景下，2060 年下降幅度也仅为 3.9%，约为粮食作物降幅的 1/4[①]。

为进一步揭示政策对粮食安全和农业生产的影响，本文分析了不同情景下谷物与畜产品净贸易以及土地利用强度、作物单产和氮素生产力等指标的变化[①]。结果表明，氮税和碳税政策将增加谷物和畜产品的净进口；除氮税-330 情景外，各情景会在不同程度上抑制土地利用强度和单产提升，同时提升氮素生产力。

表 2 报告了不同政策情景下农业部门社会福利相较反事实情景的变化，并以占 GDP 的比重衡量。从消费者福利来看，由于食物需求价格相对缺乏弹性，食物价格上升将直接

[①]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

降低居民实际购买力，因此各政策的实施均导致消费者福利下降。其中，氮税和碳税政策的实施对消费者冲击最为明显，2030 年消费者福利占 GDP 比重分别较反事实情景下降 0.47%和 1.16%。相比之下，取消化肥行业补贴和组合情景对消费者福利的冲击相对温和，2030 年消费者福利分别下降 0.06%和 0.15%，更有助于维持食物可负担性。

表 2　2030 年和 2060 年不同政策情景下农业部门社会福利相较于反事实情景的变化（占 GDP 比重）　单位：%

政策情景	消费者福利变化		生产者福利变化		农业部门社会福利变化	
	2030 年	2060 年	2030 年	2060 年	2030 年	2060 年
取消化肥行业补贴	−0.06	−0.03	−0.01	−0.02	−0.07	−0.05
氮税-330	−0.02	−0.01	−0.01	0.00	−0.03	−0.01
氮税	−0.47	−0.27	−0.32	−0.19	−0.78	−0.46
组合情景	−0.15	−0.28	−0.11	−0.20	−0.26	−0.49
碳税	−1.16	−0.53	−0.30	−0.30	−1.46	−0.83

从生产者福利来看，其净效应由农产品价格上升带来的收入效应与生产成本上升、产量下降带来的成本效应共同决定。模型结果显示，除氮税-330 政策情景外，其他政策情景下的农产品价格虽有所上升，但同时会导致产量收缩、进口依赖上升，使总产出收益下降。在成本增加与收益减少共同作用下，生产者福利在中长期会下降。其中，氮税和碳税政策降幅最大，而取消化肥行业补贴政策呈轻微负向变化，组合情景的作用介于二者之间。

农业部门社会福利整体变化趋势与消费者福利变化趋势基本一致。氮税-330 政策情景的社会福利损失最小（2030 年为−0.03%，2060 年为−0.01%），取消化肥行业补贴政策次之（−0.07%和−0.05%）。组合情景福利损失处于中等水平（−0.26%与−0.49%），且随政策推进至 2060 年时的负向影响有所加深。而碳税与氮税政策对社会福利的不利影响最明显。

（四）不同政策情景对减污降碳和粮食安全的权衡与协同

总体而言，各政策情景在实现化肥减量与温室气体排放、氮素污染削减的同时，均不同程度地面临与粮食安全目标之间的权衡问题。取消化肥行业补贴通过纠正化肥价格扭曲，以较低成本实现温和的减污降碳效果。模型结果表明，至 2060 年，该政策可使氮肥施用量较反事实情景下降约 5.0%，且对食物价格和自给率的冲击较小，从农业部门社会福利角度更具整体效率，在一定程度上兼顾了环境改善与粮食安全。但其减污降碳成效有限，难以在中长期内将氮盈余维持在氮素行星边界内。相较之下，氮税与碳税政策实施通过提高排放成本强化减排激励，至 2060 年可分别减少约 22.7%和 23.3%的氮肥施用量，并降低 N_2O 和氮素污染排放。但较强的碳价格信号推高了农业生产成本，导致食物价格明显上升、食物自给率下降、农业部门社会福利下降，表明其环境收益在一定程度上是以粮食安全为代价的。未来若在碳氮定价基础上配套采取绿色补贴或生产性投入支持等税收返还机制，可在保持环境效益的同时缓冲生产者福利损失。

组合情景可在一定程度上缓解减污降碳与粮食安全之间的冲突。该情景将取消化肥行

业补贴与渐进式氮税并行实施，兼具供给端与排放端的双重调节效应，既能在短期内规避食物价格高点，又能在长期实现较为明显的污染减排。至 2060 年，组合情景下氮盈余可降至氮素行星边界以下，食物价格涨幅控制在 6%以内，较好地实现环境改善与粮食安全的双重目标。总体来看，组合政策实施在减排力度与粮食安全保障之间呈现出更优的协同效果，表明农业绿色转型应注重政策的阶段性与协同性设计。

（五）不确定性分析

如前所述，本文基于补贴强度和化肥价格指数对比两种方法，估计得到取消化肥行业补贴导致氮肥价格分别上升 330 美元/吨氮和 120 美元/吨氮，对应模型设置的氮肥价格为 930 美元/吨氮和 720 美元/吨氮。在主情景中，本文采用 930 美元/吨氮作为政策设定。为检验模型结果对氮肥价格参数的稳健性，本文进一步对取消化肥行业补贴和组合情景开展蒙特卡洛模拟分析（见图 5）[①]。结果表明，两种情景模拟结果总体上对价格参数具有较强稳健性。相较主情景，在随机抽取的氮肥价格参数条件下，取消化肥行业补贴情景下 2015－2060 年氮肥施用量波动为−8.7%～3.0%，N_2O 累积排放量波动为−2.5%～0.9%，食物价格波动为−3.2%～3.3%，食物自给率波动为−6.7%～2.3%；而组合情景的波动幅度更低，四项指标的波动幅度均控制在 6%以内，其中，氮肥施用量波动为−5.8%～4.6%，N_2O 累积排放量波动为−1.3%～1.1%，食物价格波动为−1.0%～1.9%，食物自给率波动为−3.3%～3.2%。

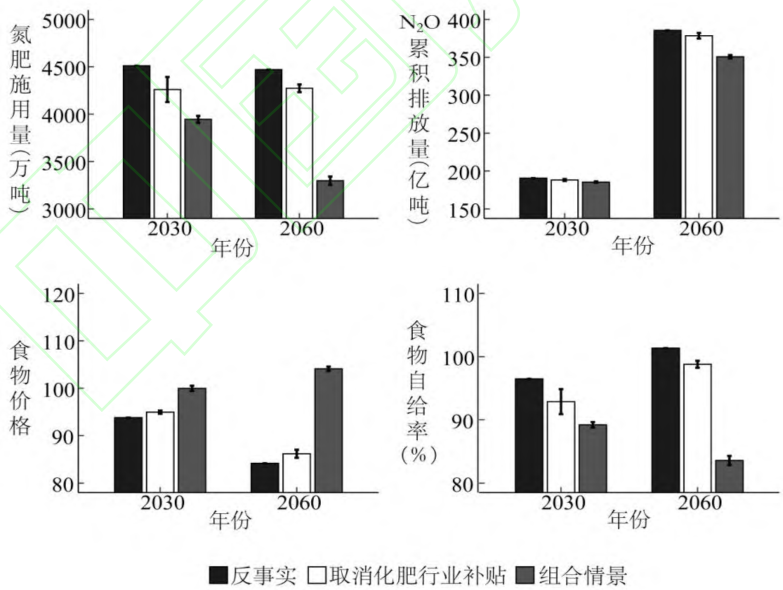

图 5　取消化肥行业补贴情景与组合情景的蒙特卡洛模拟分析

注：图中柱状图分别报告了反事实情景、取消化肥行业补贴情景和组合情景在主参数设定下的模型结果；误差线表示取消化肥行业补贴和组合情景中，对氮肥价格参数进行 20 次随机抽取并重复模拟所得结果的标准差。

[①]篇幅所限，具体结果详见《中国农村经济》网站或中国知网本文附录。

六、结论与政策启示

在统筹推进农业高质量发展与“双碳”目标战略需求下，破解化肥减量与粮食安全之间的协同难题是当前政策设计的关键议题。本文利用 MAgPIE-China，从供给端的行业补贴改革与排放端的环境定价两个维度，综合评估了中国化肥行业补贴改革和碳氮定价政策实施对减污降碳与粮食安全的影响。

研究发现，取消化肥行业补贴、氮税和碳税政策实施均能有效减少氮肥施用量，并降低 N_2O 排放和氮素污染。其中，氮税和碳税政策实施的减污降碳效应更为明显，但会导致食物价格上涨和食物自给率下降，给粮食安全带来潜在风险。相较而言，取消化肥行业补贴的减排幅度相对有限，但在单位减排成本方面更具优势。进一步分析表明，采用渐进税率征收氮税，并与取消化肥行业补贴相结合的政策组合，可在短期内减缓食物价格上涨和食物自给率下降的压力，在实现减污降碳的同时，更好地兼顾粮食安全。这一政策组合在促进农业绿色低碳转型与保障粮食安全之间展现出更优的协同治理效果。

基于以上研究结论，本文的政策启示如下：

第一，深化化肥价格机制改革，推动扭曲性补贴的退出。补贴退出作为纠正市场失灵、强化价格信号的重要途径，能够从源头引导农户优化施肥行为，促进农业生产方式绿色转型。但因单一价格信号对农户行为的激励有限，可将取消补贴释放的资金转向支持更广泛的技术投资（如高效施肥技术推广）、农业绿色基础设施建设及农户绿色生态补偿的完善，以增强制度性激励，提升政策的传导效率与农业系统的绿色适应能力。

第二，审慎设计与实施农业排放税，注重渐进性与协同性以平衡多重目标。在“双碳”目标战略约束下，可借鉴国际经验，将碳税或氮税政策纳入农业环境政策工具箱，通过税收杠杆内部化农业生产排放的负外部性。为缓解政策可能引致的食物价格上涨，税制设计中建议遵循渐进性原则，采取阶段性提高税率的方式，引导农业生产经营者逐步调整投入结构和生产方式。同时，可与化肥价格的政策工具协同联动，逐步提升政策可接受度，改善农业系统对碳税或氮税政策实施的适应能力。

第三，推进差异化征税机制建设，提升政策公平性与有效性。鉴于中国农业经营主体呈高度异质化特征，税制设计应避免“一刀切”。未来在排放税实施中可采用分主体、分阶段推进的分层治理策略：优先将管理规范、数字化程度较高的规模化新型农业经营主体（如农业企业、合作社、家庭农场）纳入氮税试点范围，可依托工商注册登记信息和采购记录作为计税依据，降低征管成本，率先建立起税制的基本框架，并发挥其技术与管理优势的示范引领作用。而针对小规模或生计脆弱的农户，可通过税收豁免、税收返还机制，或将绿色技术采纳行为与补贴政策相挂钩等措施，降低政策冲击和较高的执行成本，以兼

顾减排激励和保障小农户利益的双重目标。

第四，强化政策协同设计，构建多目标融合的农业绿色治理体系。农业绿色高质量发展与“双碳”目标战略涉及多重政策领域，建议在制度顶层设计中，坚持系统观念，建立跨部门协调机制。推进碳氮定价、补贴政策、生态补偿等价格类政策实施，并与农业技术推广、知识培训、公共绿色基础设施建设（如畜禽粪便资源化利用）等非价格措施协同推进、深度融合。价格政策通过传递成本信号激发农户的绿色转型动机，而非价格政策通过能力建设提升农户政策响应。二者的有机衔接，能够形成激励与能力并重的政策合力，提高农业系统在多目标约束下的适应性、包容性与协同性，从而提升生态环境综合治理能力。

参考文献

1.高晶晶、彭超、史清华，2019：《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》第 10 期，第 120-132 页。

2.郭晓鸣、温国强，2023：《农业社会化服务的发展逻辑、现实阻滞与优化路径》，《中国农村经济》第 7 期，第 21-35 页。

3.何可，2025：《加快建设全国统一碳市场》，《经济日报》4 月 22 日 10 版。

4.李凡略、何可，2025：《“双碳”目标下农业绿色低碳发展研究：现状、困境与展望》，《北京工业大学学报（社会科学版）》第 6 期，第 101-116 页。

5.林斌、徐孟、汪笑溪，2022：《中国农业碳减排政策、研究现状及展望》，《中国生态农业学报（中英文）》第 4 期，第 500-515 页。

6.罗斯炫、张俊飚，2024：《丰收的嘉奖：财政激励与粮食增产》，《中国农村经济》第 8 期，第 27-46 页。

7.汪笑溪、蔡浩、宣佳琦等，2025：《多目标协同的中国农业食物系统减排与可持续转型》，《浙江大学学报（人文社会科学版）》第 3 期，第 27-42 页。

8.汪笑溪、李佳珂、叶蕾等，2024：《中国农业非二氧化碳温室气体减排的政策措施、技术 应用与对策启示》，《中国生态农业学报（中英文）》第 11 期，第 1793-1804 页。

9.魏梦升、颜廷武、罗斯炫，2023：《规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响——基于设立粮食主产区的准自然实验》，《中国农村经济》第 2 期，第 41-65 页。

10.燕菲儿、易福金、张齐家，2024：《农业保险的化肥减量效应分析——基于信贷与信息双约束视角的再考察》，《中国农村经济》第 10 期，第 20-40 页。

11.易福金、肖蓉、王金霞，2019：《计量水价、定额管理还是按亩收费？——海河流域农业用水政策探究》，《中国农村观察》第 1 期，第 33-50 页。

12.杨顺顺、徐鹏、李丽丽，2017：《南方流域农业面源污染控制政策仿真》，北京：科学出版社，第 165-190 页。

13.张斌、金书秦，2020：《荷兰农业绿色转型经验与政策启示》，《中国农业资源与区划》第 5 期，第 1-7 页。

14.张露、罗必良，2020：《农业减量化：农户经营的规模逻辑及其证据》，《中国农村经济》第 2 期，第 81-99 页。

15.张蔚文、石敏俊、黄祖辉，2006：《控制非点源污染的政策情景模拟：以太湖流域的平湖市为例》，《中国农村经济》第 3 期，第 40-47 页。

16.张希良、张达、余润心，2021：《中国特色全国碳市场设计理论与实践》，《管理世界》第 8 期，第 80-95 页。

17.周志波、张卫国，2018：《农业面源污染环境税规制机制研究进展》，《西南大学学报（社会科学版）》第 3 期，第 43-51 页。

18.Bodirsky, B. L., J. P. Dietrich, E. Martinelli, A. Stenstad, P. Pradhan, S. Gabrysch, A. Mishra, I. Weindl, C. Le Mouël, S. Rolinski, L. Baumstark, X. Wang, J. L. Waid, H. Lotze-Campen, and A. Popp, 2020, "The Ongoing Nutrition Transition Thwarts Long-Term Targets for Food Security, Public Health and Environmental Protection", *Scientific Reports*, 10(1), 19778.

19.Bodirsky, B. L., A. Popp, H. Lotze-Campen, J. P. Dietrich, S. Rolinski, I. Weindl, C. Schmitz, C. Müller, M. Bonsch, F. Humpenöder, A. Biewald, and M. Stevanovic, 2014, "Reactive Nitrogen Requirements to Feed the World in 2050 and Potential to Mitigate Nitrogen Pollution", *Nature Communications*, 5(1), 3858.

20.Cai, H., J. Xuan, X. Wang, C. Yuan, B. L. Bodirsky, M. Stevanović, J. P. Dietrich, A. Popp, and H. Lotze-Campen, 2025, "The Multiple Benefits of Chinese Dietary Transformation", *Nature Sustainability*, Vol. 8: 606-618.

21.Chang, J., P. Havlík, D. Leclère, W. de Vries, H. Valin, A. Deppermann, T. Hasegawa, and M. Obersteiner, 2021, "Reconciling Regional Nitrogen Boundaries with Global Food Security", *Nature Food*, Vol. 2: 700-711.

22.Dietrich, J. P., B. L. Bodirsky, F. Humpenöder, I. Weindl, M. Stevanović, K. Karstens, U. Kreidenweis, X. Wang, A. Mishra, D. Klein, G. Ambrósio, E. Araujo, A. W. Yalew, L. Baumstark, S. Wirth, A. Giannousakis, F. Beier, D. M. C. Chen, H. Lotze-Campen, and A. Popp, 2019, "MAgPIE 4 - A Modular Open-Source Framework for Modeling Global Land Systems", *Geoscientific Model Development*, 12(4): 1299-1317.

23.Dietrich, J. P., C. Schmitz, C., H. Lotze-Campen, A. Popp, and C. Müller, 2014, "Forecasting Technological Change in Agriculture—An Endogenous Implementation in A Global Land Use Model", *Technological Forecasting and Social Chang*e, Vol. 81: 236-249.

24.Henseler, M., R. Delzeit, M. Adenäuer, S. Baum, and P. Kreins, 2020, "Nitrogen Tax and Set-Aside as Greenhouse Gas Abatement Policies Under Global Change Scenarios: A Case Study for Germany", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 76: 299-329.

25.Kanter, D. R., O. Chodos, O. Nordland, M. Rutigliano, and W. Winiwarter, 2020, "Gaps and Opportunities in Nitrogen Pollution Policies Around the World", *Nature Sustainability*,Vol. 1: 956-963.

26.Li, Y., W. Zhang, L. Ma, G. Huang, O. Oenema, F. Zhang, and Z. Dou, 2013, "An Analysis of China's Fertilizer Policies: Impacts on the Industry, Food Security, and the Environment", *Journal of Environmental Quality*, 42(4): 972-981.

27.Lotze-Campen, H., C. Müller, A. Bondeau, S. Rost, A. Popp, and W. Lucht , 2008, "Global Food Demand, Productivity Growth, and the Scarcity of Land and Water Resources: A Spatially Explicit Mathematical Programming Approach", *Agricultural Economics*, 39(3): 325-338.

28.Marshall, A., 1890, *Principles of Economics*, London: Macmillan, 335-342.

29.O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman, B. J. van Ruijven, D. P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy, and W. Solecki, 2017, "The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century", *Global Environmental Change*, Vol. 42: 169-180.

30.Pigou, A. C, 1920, *The Economics of Welfare*, London: Macmillan and Co. 189-196.

31.Robinson, S., H. Van Meijl, D. Willenbockel, H. Valin, S. Fujimori, T. Masui, R. Sands, M. Wise, K. Calvin, P. Havlik, D. Mason d'Croz, A. Tabeau, A. Kavallari, C. Schmitz, J. P. Dietrich, and M. von Lampe, 2014, "Comparing Supply-Side Specifications in Models of Global Agriculture and the Food System", *Agricultural Economics*, 45(1): 21-35.

32.Soergel, B., E. Kriegler, I. Weindl, S. Rauner, A. Dirnaichner, C. Ruhe, M. Hofmann, N. Bauer, C. Bertram, B. L. Bodirsky, M. Leimbach, J. Leininger, A. Levesque, G. Luderer, M. Pehl, C. Wingens, L. Baumstark, F. Beier, J. P. Dietrich, F. Humpenöder, P. von Jeetze, D. Klein, J. Koch, R. Pietzcker, J. Strefler, H. Lotze-Campen, and A. Popp, 2021, "A Sustainable Development Pathway for Climate Action within the UN 2030 Agenda", *Nature Climate Change*, Vol. 11: 656-664.

33.Stiglitz J., 2000, *Economics of Public Sector*, New York: W. W. Norton, 130-150.

34.Valin, H., P. Havlík, A. Mosnier, M. Herrero, E. Schmid, and M. Obersteiner, 2013, "Agricultural Productivity and Greenhouse Gas Emissions: Trade-Offs or Synergies Between Mitigation and Food Security?", *Environmental Research Letters*, 8(3), 035019.

35.Van Wesenbeeck, C. F. A, M. A. Keyzer, W. C. M. Van Veen, and H. Qiu, 2021, "Can China's Overuse of Fertilizer Be Reduced without Threatening Food Security and Farm Incomes?", *Agricultural Systems*, Vol. 190, 103093.

36.Wang, X., H. Cai, J. Xuan, R. Du, B. Lin, B. L. Bodirsky, M. Stevanović, Q. Collignon, C. Yuan, L. Yu, M. Crawford, F. Beier, M. Xu, H. Chen, M. Springmann, D. Leip, D. M. Chen, F. Humpenöder, P. von Jeetze, S. Fan, B. Soergel, J. P. Dietrich, C. Müller, A. Popp, and H. Lotze-Campen, 2025a, "Bundled Measures for China's Food System Transformation Reveal Social and Environmental Co-Benefits", *Nature Food*, Vol. 6: 72-84.

37.Wang, X., H. Cai, J. Xuan, C. Yuan, B. L. Bodirsky, M. Stevanović, J. P. Dietrich, A. Popp, and H. Lotze-Campen, 2025b, "Multi-Benefit Diet Changes in China", *Nature Sustainability*,Vol. 8: 590-591.

38.Wang, X., R. Du, H. Cai, B. Lin, J. P. Dietrich, M. Stevanović, H. Lotze-Campen, and A. Popp, 2024, "Assessing the Impacts of Technological Change on Food Security and Climate Change Mitigation in China's Agriculture and Land-Use Sectors", *Environmental Impact Assessment Review*,Vol. 107, 107550.

39.Wang, X., and H. Lotze-Campen, 2025, "China's Sustainable Food System Requires Concerted Efforts", *Nature Food*, Vol. 6: 17-18.

40.Wang, X., M. Xu, B. Lin, B. L. Bodirsky, J. Xuan, J. P. Dietrich, M. Stevanović, Z. Bai, L. Ma, S. Jin, S. Fan, H. Lotze-Campen, and A. Popp, 2023, "Reforming China's Fertilizer Policies: Implications for Nitrogen Pollution Reduction and Food Security", *Sustainability Science*, Vol. 18: 407-420.

41.Zhang, W., G. Cao, X. Li, H. Zhang, C. Wang, Q. Liu, X. Chen, Z. Cui, J. Shen, R. Jiang, G. Mi, Y. Miao, F. Zhang, and Z. Dou , 2016, "Closing Yield Gaps in China by Empowering Smallholder Farmers", *Nature*,Vol. 537: 671-674.

Reconciling Fertilizer Reduction with Food Security: Model-based Evidence from Fertilizer Subsidy Reform and Emission Pricing

XU Meng[1, 2, 3]　WANG Xiaoxi[2, 3]
(1. School of Economics and Finance, Hohai University;
2. China Academy for Rural Development, Zhejiang University;
3. School of Public Affairs, Zhejiang University)

Summary: Reconciling fertilizer reduction with food security is a central policy challenge for achieving high-quality agricultural development and China's carbon peaking and carbon neutrality goals. Fertilizer remains indispensable for sustaining crop yields, but its long-standing extensive pattern has lowered nutrient use efficiency and intensified pollution. Identifying policy instruments that can simultaneously reduce environmental damages and enhance food security is therefore critical.

This paper uses a China-specific version of the Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment (MAgPIE-China) to assess the effects of fertilizer manufacturing subsidy reform and emission pricing on nitrogen pollution, greenhouse gas (GHG) emissions, and food security. This paper finds that both fertilizer subsidy removal and GHG taxation reduce fertilizer use, N_2O emissions, and nitrogen pollution, but with significantly different implications for food security. Carbon and nitrogen taxation deliver larger environmental gains, but they raise food prices and reduce food self-sufficiency, creating potential food security risks. By contrast, a combined policy of subsidy removal and gradually phased-in nitrogen taxation substantially attenuates these adverse effects by 2030, while still achieving meaningful reductions in N_2O emissions and nitrogen pollution. In cost-effectiveness terms, subsidy removal achieves greater fertilizer reduction per unit cost than either carbon or nitrogen taxation, whereas carbon and nitrogen taxation are more effective in delivering larger total reductions in N_2O emissions and nitrogen pollution. These findings suggest that agricultural green transition cannot rely on a single policy instrument. A more effective approach is a coordinated policy package that combines subsidy reform with phased emission pricing and is complemented by decoupled compensation, green technology R&D, and investment in green public infrastructure.

This paper contributes to existing literature in three respects. First, it provides an evaluation of medium- and long-term policy effects under multiple constraints, complementing studies that rely primarily on field experiments or reduced-form empirical evidence. Second, it examines fertilizer manufacturing subsidy reform, emission pricing, and their combination within a unified framework, thereby providing evidence on the differences and complementarities among alternative price-based policy instruments in promoting fertilizer reduction. Third, by focusing on policy synergies and trade-offs, the paper quantifies how input-side and emissions-side pricing mechanisms shape agricultural pollution reduction, GHG mitigation, and food security.

Keywords: Fertilizer Reduction; Food Security; Environmental Policy; Emission Pricing; Subsidy Policy

JEL Classification: Q18; Q55; Q58

（责任编辑：何　可）