



Environmental
Defense
Fund



农业食物系统低碳转型
国际论坛
INTERNATIONAL FORUM OF
LOW-EMISSION AGRIFOOD SYSTEMS

中国氮肥管理绿色转型

精准施策·技术创新·激励贯通

2026.09





本报告研究结论为初步成果，后续可能随着进一步研究和数据补充而发生调整或修订。由于网络信息存在时效性、准确性差异，使用者需自行对信息的真实性、完整性、适用性进行审慎判断，并独立承担因使用本报告内容所产生的一切风险及后果，本报告作者不为此承担任何法律责任。



中国氮肥管理绿色转型

精准施策·技术创新·激励贯通

主要作者（按姓氏拼音排序）

- 段志平 中国农业大学资源与环境学院
- 靳馥同 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 兰向民 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 李 贝 中国农业大学资源与环境学院
- 李冬佳 中国农业大学资源与环境学院
- 李静菡 荷兰瓦赫宁根大学与研究中心
- 刘 蕊 中国农业大学资源与环境学院
- 裘 盈 美国环保协会北京代表处
- 孙 芳 美国环保协会北京代表处
- 孙田田 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 王若琪 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 夏 芳 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 徐子淇 美国环保协会北京代表处
- 姚 澜 中国农业大学资源与环境学院
- 张瑞增 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 张卫峰 中国农业大学资源与环境学院
- 张玉梅 中国农业大学经济管理学院
- 赵璐阳 全球食物经济与政策研究院 中国农业大学经济管理学院
- 邹秦琦 中国农业大学资源与环境学院

目录

目录.....	4
图目录.....	5
表目录.....	5
执行摘要.....	6
关键发现.....	8
优先行动.....	9
引言.....	10
一、 氮肥管理政策演变.....	13
二、 中国氮肥减量进展及其环境与经济效应.....	16
2.1 全国氮肥投入总量及结构变化.....	16
2.2 主要作物和区域施氮差异.....	18
2.3 农田氧化亚氮排放变化及其构成.....	21
2.4 氮肥成本变化与减氮节本效应.....	24
三、 氮肥定额管理的减氮、减排、节本潜力与分类调控.....	28
3.1 氮肥定额管理下的减氮潜力.....	28
3.2 氮肥定额管理下的减排潜力.....	29
3.3 氮肥定额管理下的节本潜力.....	30
四、 氮肥控量增效的多维精准调控与系统协同.....	32
4.1 氮肥控量增效的作用机制与技术路径.....	32
4.2 氮肥管理技术的精准施用、智能决策与生态培育.....	33
4.3 氮肥管理技术的适用条件、实施约束与综合效应.....	34
五、 氮肥管理技术减氮增产减排效应、经济回报与采纳条件.....	38
5.1 主要氮肥管理技术的减氮、增产与减排效应.....	38
5.2 主要氮肥管理技术的成本、收益与减排效益.....	40
5.3 不同作物和经营主体的主要氮肥管理技术采纳情况.....	42
5.4 主要氮肥管理技术采纳的生产服务条件与政策保障.....	43
六、 多目标协同下的氮肥系统化管理.....	47
参考文献.....	50

图目录

图 1	氮肥管理多目标协同框架	11
图 2	中国氮肥管理政策演变过程	13
图 3	1980~2024 年中国农用化肥、单质氮肥、复合肥及化学氮肥施用量变化趋势 ..	16
图 4	2005-2024 年主要作物氮肥用量变化	17
图 5	2005~2024 主要作物种植面积变化	18
图 6	2005-2024 年谷物与非谷物作物氮肥施用强度变化趋势	18
图 7	2005-2024 年主要作物氮肥施用强度变化	19
图 8	2024 年主要作物区域施氮水平与氮定额区间对比	20
图 9	2004~2024 年全国农田化肥施用 N_2O 排放及其构成	21
图 10	2024 年全国各区域农田化肥施用 N_2O 排放构成	22
图 11	不同区域 2024 年 N_2O 排放构成变化	23
图 12	中国国产尿素零售价格走势	24
图 13	2015 年、2020 年与 2024 年主要谷物每亩氮肥成本范围	25
图 14	2015 年、2020 年与 2024 年经济与园艺作物每亩氮肥成本范围	25
图 15	主要作物减氮潜力绝对量和百分比	28
图 16	氮肥定额情景下主要作物 N_2O 减排潜力	29
图 17	氮肥定额情景下各区域 N_2O 减排潜力	29
图 18	节约氮肥支出及成本占比	30
图 19	肥料施用技术的增效机理与调控路径	32
图 20	氮肥管理技术绿色转型解决方案	33
图 21	氮肥管理技术对施氮量、单位面积产量和 N_2O 排放的影响	39
图 22	2024 年分作物氮肥管理技术采纳率情况	42
图 23	2024 年不同经营主体分作物氮肥管理技术加权采纳率	43
图 24	技术潜在收益转化为实际采纳的影响因素	43
图 25	多目标协同下的氮肥系统化管理框架	47

表目录

表 1	2015~2024 年施氮强度变化带来的氮肥支出变化	26
表 2	六类氮肥管理技术的适用条件、实施要点及主要约束	34
表 3	不同氮肥管理技术的产量、氮利用效率、环境与经济效应	36
表 4	氮肥管理技术对各作物—技术组合成本变化率的中位数	40
表 5	不同氮肥管理技术采纳对作物成本、产值和利润影响的模拟影响	41
表 6	不同氮肥管理技术采纳氧化亚氮减排价值及其对种植利润的影响	41
表 7	小农户与规模化、组织化主体采用四类氮肥管理技术的挑战及支持重点	44
表 8	地方支持方式及其对应的技术采纳约束	45

执行摘要

在保障粮食安全、推进生态文明建设和实现“双碳”目标背景下，中国农业发展正由资源投入驱动向资源高效利用、环境友好和低碳转型转变。氮肥连接粮食增产与农业生态环境安全，是农业绿色转型的重要环节。本报告研究发现，当前氮肥管理的目标不是简单减少投入，而是在保障粮食产量和农户收益的基础上，提高氮肥利用效率，协同减少氧化亚氮排放。

中国化肥减量增效已取得积极进展，未来氮肥管理应更加注重粮食安全、资源效率、农户收益、环境保护和温室气体减排的多目标协同。过去十年，中国化肥减量增效取得明显进展。2015年以来农用化肥施用量持续下降，2024年较峰值减少17.5%，其中农用氮素投入较2014年最高点下降约23%，是化肥减量的绝对贡献者。分作物来看，粮食作物施氮强度总体趋稳，果树和蔬菜降幅较大，部分玉米主产区和高投入经济作物仍存在施氮偏高问题，油菜籽等作物部分区域则需要保障合理投入。氮肥投入下降已带动农田 N_2O 排放由增长转向下降。报告测算显示，全国农田化肥施用相关 N_2O 排放量由2015年的58万吨降至2024年的45万吨，下降23%。

按照科学氮肥定额优化施肥，仍可挖掘释放可观的减氮、减排和节本潜力。氮肥定额为识别不同作物和区域的施氮优化空间提供了明确参照。通过优化单位面积施氮强度，将超过定额的施氮量降低至对应作物氮肥定额上限或下限之间。保持2024年种植面积不变，主要作物可减少化肥氮投入约320~732万吨，相应可节约氮肥支出约195~445亿元。从相对减氮比例看，不同作物调整强度差异明显，马铃薯、大豆、棉花和苹果的减氮比例相对较高，说明部分经济作物和区域性高投入作物仍有较大优化空间。



氮肥管理技术为控量增效提供了多路径支撑，但需因地制宜应用。氮肥利用效率偏低和环境损失偏高不仅与施用量过高有关，也源于施肥位置、供肥时期、养分形态、田间决策和根际过程与作物需求不匹配。因此，控量增效需要从“施多少”扩展到“何时施、施在哪里、以何种形态施、如何促进吸收”。机械深施、水肥一体化、精准变量施肥、根外补肥抗逆、缓控释轻简化施肥和生物调控施肥，分别通过优化根肥互馈、水氮同步、因苗精准施肥而提高养分利用效率。大数据分析表明，这些技术具有增产控氮潜力，但不同技术的增产、增效和减排效果存在作物和场景差异，推广中应结合区域条件、作物类型、设施基础和经营规模，明确适用场景、技术参数、成本收益和风险边界。

加快技术推广应用需重视经济回报及技术实施条件。2024 年调查显示，水稻、小麦和玉米至少采用一类技术的加权覆盖率分别为 24%、60%和 81%，部分技术的覆盖范围仍然有限。经济激励不足是限制技术采纳的重要因素之一：增产和节肥带来的收益未必能够覆盖新增投入。成本收益测算显示，增效肥料和机械深施总体具有正向回报，而有机肥替代在多数作物上短期利润提升不明显。地块条件、水源、知识掌握及产品、装备和服务可得性显著影响技术经济性和采用率。

构建氮管理系统是实现提质增效和环境减排协同的关键。针对不同区域、作物和经营主体同时存在施氮过量、投入合理或投入不足的情形，应分别采取精准减量、提效增产和合理补足等措施，通过区分不同目标群体，设立精准管理方法，提高管理的效率，并实现农户整体提质增效；应统筹新技术、新产品、新机具、专业服务与政策激励，形成“科学评价—问题识别—目标设定—分类施策—效果核验—动态调整”的全过程管理机制。以全过程成本收益和环境绩效指导技术推广、补贴与补偿，降低农户采纳风险，并通过持续监测动态调整施氮标准、技术目录和支持政策，实现增产增收、氮肥高效利用和农业绿色低碳发展。

关键发现

一、政策目标已从“保障投入”转向“多目标协同”

中国氮肥政策经历了投入供给保障与粮食增产、合理施肥与效率提升、化肥减量增效与绿色发展、绿色低碳与减排固碳四个阶段。当前治理目标注重增产保供、资源高效、农户增收、面源防控和温室气体减排协同。

二、总量消减成效明确，但作物和区域结构性矛盾仍在

2015年以来，化肥和农用氮素投入总体下降，氮肥管理已从总量控制进入分类优化阶段。粮食作物施氮强度总体趋稳，但部分主产区仍有控氮提效空间；蔬菜、果树等经济作物虽已明显减氮，但高投入问题仍较突出；同时，部分低于定额下限的区域和作物需要保障合理养分供给。

三、 N_2O 排放下降进入巩固期，减排重点需要更精准

2015~2024年，农田化肥施用相关 N_2O 排放下降23.0%，说明化肥减量增效已产生明显气候效益。但直接排放仍是主要来源，高排放区域和高施氮作物是今后关注的重点。不同区域的排放路径也存在差异，经济作物应关注总量控制，粮食作物还需重视增产减排。

四、科学氮定额可转化为明确的减氮、减排和节本空间

将实际施氮强度与氮肥定额区间对照后可以发现，区域间和农户间存在较大变异，施氮过量、合理、不足仍同时存在，但过量农户占比高于前两类。保持2024年播种面积不变，十类主要作物可减少化肥氮投入约320~732万吨，节约氮肥支出约210.5~483.2亿元。马铃薯、大豆、棉花和苹果等作物单位面积施肥强度调整空间大，玉米、蔬菜、水稻和小麦种植面积大，对减排贡献也较大。

五、以技术组合和系统管理推进氮肥控量增效

测土配方、机械深施、水肥一体化、缓控释肥、变量施肥、有机肥替代和生物调控等技术，通过优化施肥总量、位置、时期、形态和根际过程，与作物需求匹配，具有明显的增产、减排效应。但技术效果因作物、土壤、灌排条件和经营方式而异，需要加强技术本地化集成，通过整装化加强应用。

六、农户技术采纳取决于净收益、服务可得性和风险分担

农户是否采纳技术主要取决于净收益是否提升、服务是否可得、风险是否可控。增效肥料短期经济回报较好，机械深施依赖机具和作业服务，水肥一体化受设施投入和运维成本制约，有机肥替代受物料来源、运输半径和施用成本影响。未来推广需要从单纯提供产品和服务，转向完善服务链条、降低采用成本并建立绩效激励机制。

优先行动

中国氮肥绿色转型需要从“减肥行动”升级为“氮素资源高效管理战略”。未来应以增产、增效、减排协同为目标，通过技术创新、推广应用、经济支持和政策协同，推动氮肥管理由“减少投入”向“优化配置、提高效率、降低损失”转变，在保障粮食安全和农户收益的基础上，实现农业绿色低碳发展。

一、明确分类施氮边界，落实重点作物和区域

以氮肥定额为参照，结合土壤供肥能力和目标产量，对施氮过量、投入合理和当前氮投入不足的农户群体，分别降低过量施氮、提高氮肥利用效率和保障合理投入。重点挖掘玉米、蔬菜、水稻和小麦的控量潜力，同时关注高投入园艺作物，并结合区域氮损失路径确定减排措施。

二、优化区域技术组合，明确适用参数与条件

围绕区域主要限制因素，协同配置施肥新技术、肥料新产品和施用新机具。通过区域多点试验和第三方评价，明确施氮量、时期、位置及有机替代比例，形成县域“作物—模式—参数—服务”清单。以粮食增产、肥料增效、环境减排和农民增收综合实现为目标集成技术。

三、加强全过程经济评价，降低技术应用成本

综合核算增产、节肥、节水和省工收益，以及产品价差、设备折旧、能源、维护和作业费用，优先推广经济可行、环境效果稳定的技术组合。水肥一体化重点提高设施利用率、降低运行成本，有机肥替代重点优化物料组织和运输施用设施和组织服务模式，对短期收益不足的措施配置必要支持。

四、完善分类服务供给，支持技术持续应用

面向小农户，通过集中采购、统一诊断、机具共享和生产托管降低应用门槛；面向规模化、组织化主体，完善稳定供货、专业人员和设施管护。推动农技机构、农资企业和社会化服务组织协作，建立“诊断—处方—供肥—作业—记录—评价”服务链，提高实施质量。

五、衔接成本支持与绩效激励，完善长期保障

根据技术约束配置作业补贴、设施共建、物料运输和培训支持，并延伸至维护、质量控制和连续服务。对环境效益明确而私人收益不足的措施，探索基于监测核证的生态补偿和减排奖励。将 N_2O 减排价值作为补充激励，与降低实施成本及改善服务相结合。

六、加强效果核验与反馈，动态优化管理措施

建立“科学评价—问题识别—目标设定—分类施策—效果核验—动态调整”的管理机制，持续跟踪氮投入、产量、收益、利用效率和环境损失。区分试验效果、模拟潜力与实际成效，据此调整施氮标准、技术目录和支持政策，并加强与国际养分管理及监测核证体系的衔接。

引言

氮肥是保障粮食安全、提高作物生产力和稳定农产品供给的重要农业投入品，但不合理施用也会导致氨挥发、硝酸盐淋溶和氧化亚氮（ N_2O ）排放，引发空气污染、水体富营养化、地下水污染和气候变化等环境问题（Zhang et al., 2013; Chen et al., 2014; Norse and Ju, 2015; Tian et al., 2020）。在全球粮食安全、资源约束和气候变化风险叠加的背景下，如何在保障农业生产能力的同时提高氮肥利用效率、减少氮素损失，已成为农业绿色转型的重要议题。氮肥绿色转型并非简单减少投入，而是在保障食物供给的基础上，实现资源高效利用、环境减排、农户增收和技术可持续推广的协同发展。

过去十年，中国持续推进化肥使用量零增长、化肥减量增效、测土配方施肥和农业面源污染治理等行动，氮肥管理逐步由依赖投入增长转向控量增效，在减少不合理投入、提升施肥科学化水平和改善农业环境绩效方面取得积极进展（农业部，2015；农业农村部，2021）。近期研究表明，2015年后中国农田直接 N_2O 排放已出现下降拐点，减施氮肥是主要驱动因素；但减排成效及其影响因素仍呈现明显的区域和部门差异（Li et al., 2025; Jiang et al., 2026）。因此，氮肥总量下降并不意味着氮素管理问题已经解决。部分地区和作物仍存在施氮过量、利用效率不高和环境损失较大等问题，未来氮肥管理需要由总量减量转向分区域、分作物精准管理。

氮肥减排也不是简单减少投入，而是需要依托适宜技术实现减量、稳产增产、减排与增收协同。区域化养分管理、施肥位置优化和水氮协同、氮素转化抑制剂及有机养分替代均具有减氮或减排潜力，但其效果和经济性高度依赖于作物制度、土壤气候条件、基础设施和服务体系（Liu et al., 2024; Zhu et al., 2023; Li et al., 2018; Wang et al., 2024; Yin et al., 2025）。与此同时，氮肥管理还需统筹粮食生产、资源环境与气候目标，避免单一措施在不同氮素损失路径之间产生替代或转移（Chen et al., 2025; Jiang et al., 2026）。因此，技术推广需要与农户培训、社会化服务和协同政策工具相结合，才能由技术可行走向规模可行（Huang et al., 2015; Sartas et al., 2020; Hekkert et al., 2020）。

本报告使用《中国统计年鉴》中的农用化肥施用量、作物播种面积和粮食产量数据，《全国农产品成本收益资料汇编》中的作物投入产出数据，2024年科学施肥调查，

以及课题组整理的田间试验和荟萃分析资料。减氮和减排情景还使用全国农业技术推广服务中心氮肥定额，以及《温室气体排放核算与报告要求 第23部分：种植业机构（GB/T 32151.23~2024）》和《省级温室气体清单编制指南（2011年版）》中的种植业温室气体核算参数。报告首先测算不同作物和地区的施氮总量、施氮强度及 N_2O 排放；其次评估四类技术对施氮量、产量、成本、利润和 N_2O 排放的影响，并结合分省成本收益数据开展情景模拟；最后分析技术推广约束并提出政策建议。

本报告旨在为中国氮肥绿色转型提供科学依据和政策参考，并为其他发展中国家提供经验借鉴。报告构建了涵盖生产、资源、环境和经济目标的综合分析框架，推动氮肥管理由“总量减肥”向“控量增效”、由“单一技术评价”向“农艺—环境—经济综合评价”、由“一般化推广”向“分类施策和政策协同”转变，实现控量、增效、减排和增收协同。报告重点包括三个方面：一是分作物、分区域识别施氮水平、减量潜力和减排重点；二是综合评估不同“作物—技术”组合的减氮、稳产增产、 N_2O 减排和经济可行性；三是从政策激励、技术服务和成本分担等方面提出促进氮肥绿色转型的政策建议。



图 1 氮肥管理多目标协同框架



第一章：氮肥管理政策演变

中国氮肥政策演变

一、氮肥管理政策演变

在保障粮食安全、推进农业绿色发展和实现“双碳”目标的战略背景下，中国农业需要统筹稳产保供、资源高效利用、环境保护与温室气体减排。随着化肥供应由短缺转向充足、施用强度上升及边际增产效应下降，氮肥政策逐步由保障供给和促进增产，转向科学施肥、减量增效和绿色低碳。

供给保障与增产 | 科学施肥与效率提升 | 化肥减量与绿色发展 | 减排固碳与低碳转型

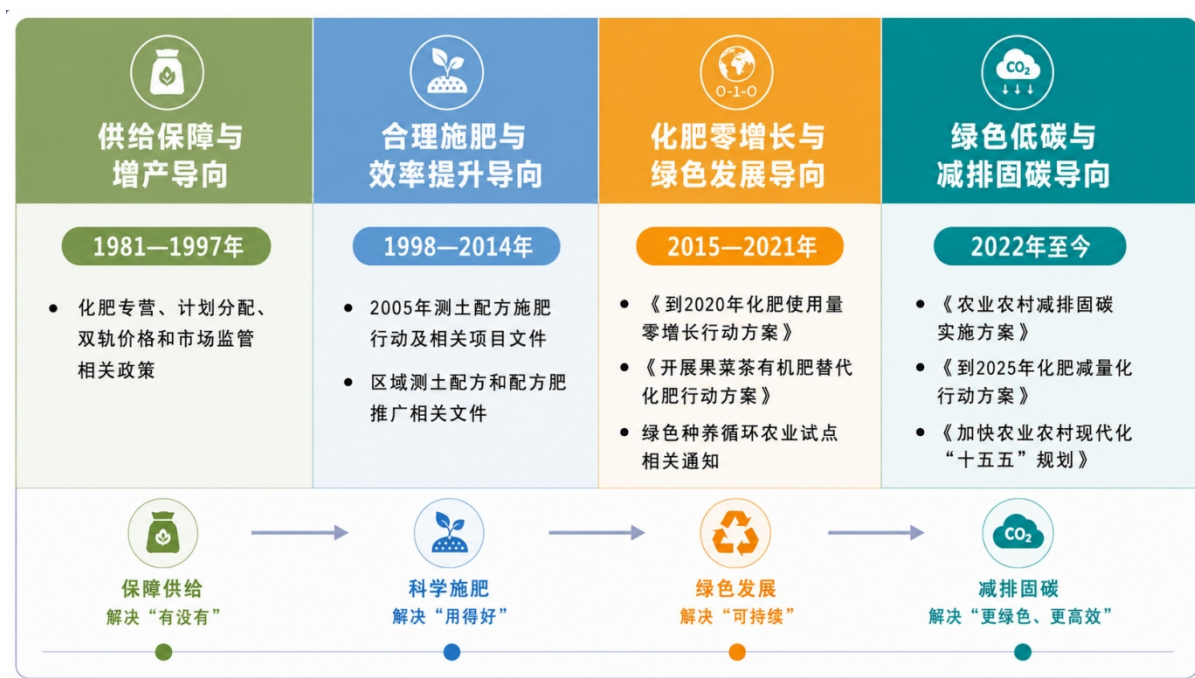


图 2 中国氮肥管理政策演变过程

第一阶段：投入供给保障与粮食增产（1981~1997 年）。20 世纪 80 年代至 90 年代，中国农业以提高粮食生产能力和保障农产品供给为主要目标。由于化肥供应不足，政策重点是扩大生产能力、保障流通和稳定供应，通过生产支持、价格调控和农资管理缓解短缺问题，为农业增产和化肥推广应用提供基础。

第二阶段：合理施肥与效率提升（1998~2014 年）。随着化肥供应能力增强，施肥过量、养分失衡和利用效率偏低等问题逐渐突出，政策重点转向科学施肥和效率提升。以测土配方施肥为代表的技术体系逐步推广，推动施肥管理由经验施肥向科学施肥转变，同时加强肥料质量监管和技术服务。

第三阶段：化肥减量增效与绿色发展（2015~2021 年）。2015 年化肥使用量零增长行动实施，标志着化肥管理进入减量增效阶段。政策重点从合理施肥进一步转向控制投入、提高效率和减少环境影响，重点推广机械深施、水肥一体化、有机肥替代等技术，推动氮肥管理向绿色发展转型。

第四阶段：绿色低碳与减排固碳（2022 年至今）。在“双碳”目标背景下，氮肥管理进一步纳入农业绿色低碳转型体系。政策重点转向肥料、技术、装备和服务协同创新，推广缓控释肥、智能施肥、水肥一体化、侧深施肥等技术，推动氮肥管理由关注投入数量转向全过程效率提升和环境减排。2026 年《加快农业农村现代化“十五五”规划》进一步提出推进化肥精准施用、实施农业农村减排固碳行动，并探索农业生态产品价值核算和农业领域碳交易。





第二章：中国氮肥减量进展及其环境与经济效应

- 2.1 全国氮肥投入总量及结构变化
- 2.2 主要作物和区域施氮差异
- 2.3 农田氧化亚氮排放变化及其构成
- 2.4 氮肥成本变化与减氮节本效应

二、中国氮肥减量进展及其环境与经济效应

2.1 全国氮肥投入总量及结构变化

中国化肥减量政策成效显著。1980~2015 年，农用化肥施用量由 1,269 万吨增至峰值 6,023 万吨，随后持续下降至 2024 年的 4,972 万吨，较峰值减少 17.5%（图 2）。从肥料结构看，单质氮肥是化肥减量的主要来源。单质氮肥施用量由 2012 年的 2,400 万吨下降至 2024 年的 1,564 万吨，累计减少 836 万吨，降幅约 35%，明显高于化肥施用总量的降幅。与此相对，复合肥施用量仍呈增长趋势，由 2015 年的 2,176 万吨增加至 2024 年的 2,439 万吨，增加 263 万吨，增幅约 12%，表明化肥施用结构持续由单质肥向复合肥调整。进一步考虑复合肥中的氮素投入后，农用化学氮肥施用量由 2014 年最高点的 3,098 万吨下降至 2024 年的 2,377 万吨，减少 721 万吨，降幅为 23%（见图 3）。

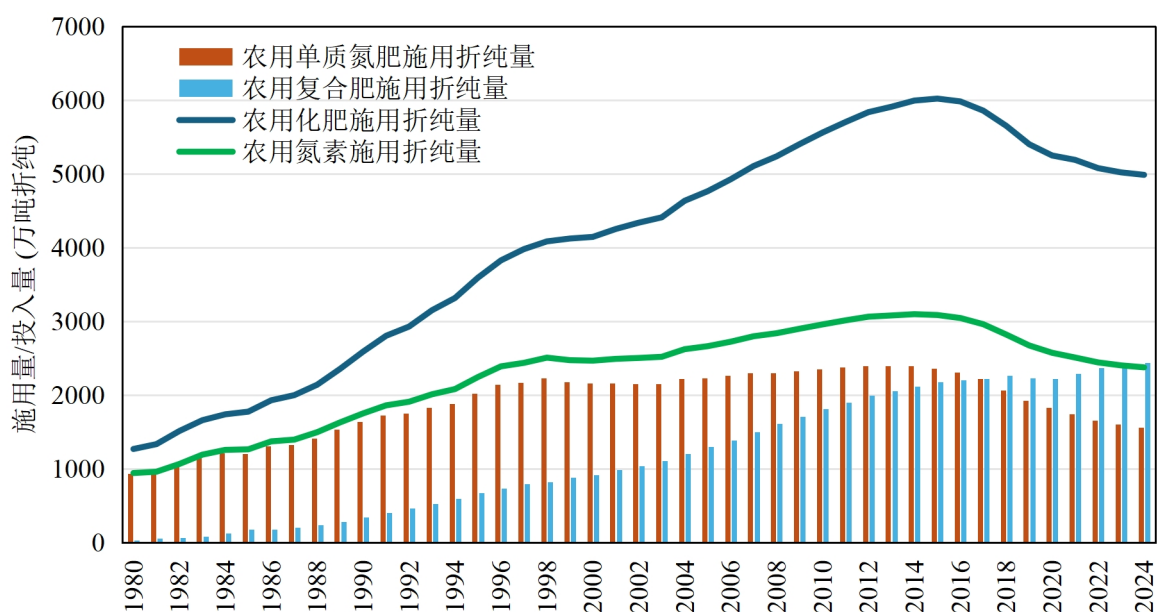


图 3 1980~2024 年中国农用化肥、单质氮肥、复合肥及化学氮肥施用量变化趋势

注：数据来源于国家统计局。农用化肥、单质氮肥和复合肥施用量均按折纯量计。农用化学氮肥施用量=单质氮肥施用折纯量+复合肥施用折纯量 $\times$ 1/3。由于缺乏历年复合肥氮、磷、钾养分配比的连续统计数据，本文统一假定复合肥养分配比为 15:15:15，即化学氮肥投入量占复合肥总养分的 1/3。

2014~2020 年间，水稻、小麦、玉米、油菜籽、棉花、苹果和蔬菜氮肥用量均有所减少，其中玉米、水稻和小麦分别减少约 116 万吨、27 万吨和 41 万吨，苹果和蔬菜分别减少约 26 万吨和 31 万吨。2020 年以后，玉米和蔬菜的氮肥施用量增加，至 2024 年分别较 2020 年增加约 96 万吨和 180 万吨，同时柑橘、马铃薯、油菜籽和棉花也有所增加（见图 4）。

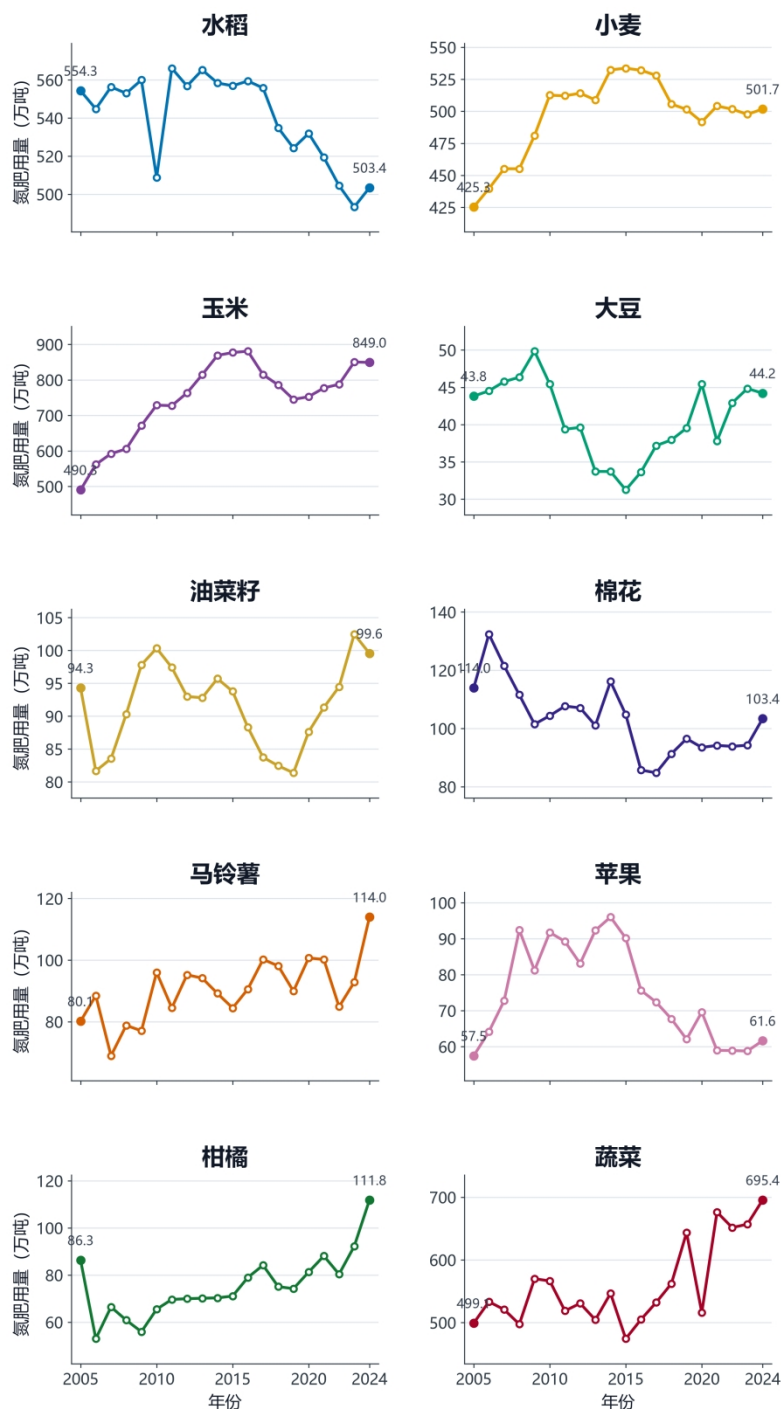


图 4 2005-2024 年主要作物氮肥用量变化

注：根据《全国农产品成本收益资料汇编》和国家统计局作物播种面积测算。

种植面积调整是氮肥用量变化的重要原因。2005~2024 年，玉米种植面积增长 70%，蔬菜增长 32%，柑橘增长 75%，而棉花种植面积下降 44%，其他作物总体变化相对较小（见图 5）。

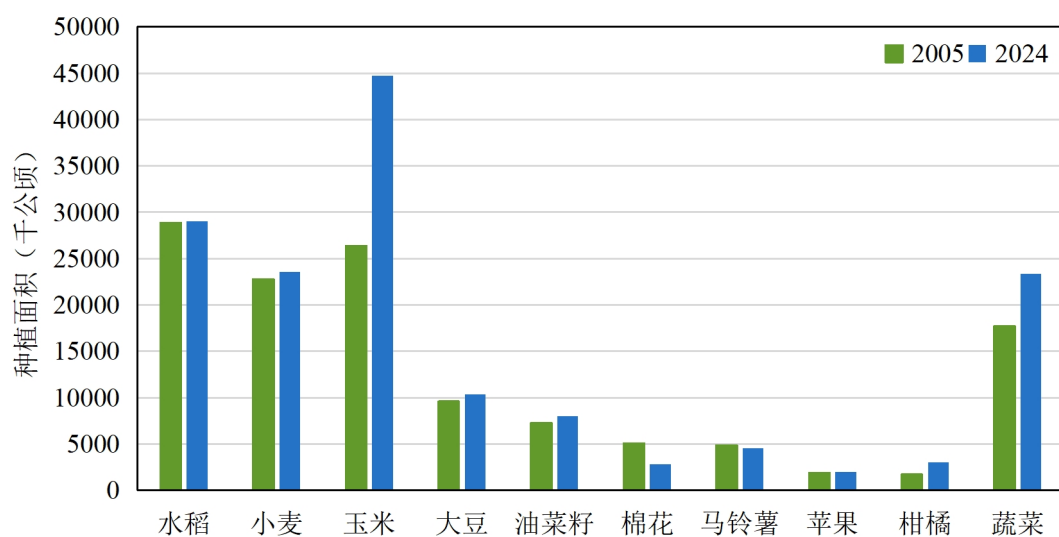


图 5 2005~2024 主要作物种植面积变化

数据来源：国家统计局。

2.2 主要作物和区域施氮差异

过去十年的化肥减量取得了积极成效，但不同作物之间的调整程度仍存在明显差异。2005~2015 年，主要作物单位面积施氮强度总体呈上升态势；2015~2024 年后逐步转向下降或趋稳。其中，粮食作物施氮强度调整幅度相对较小，其他作物特别是果树和蔬菜下降幅度更加显著。

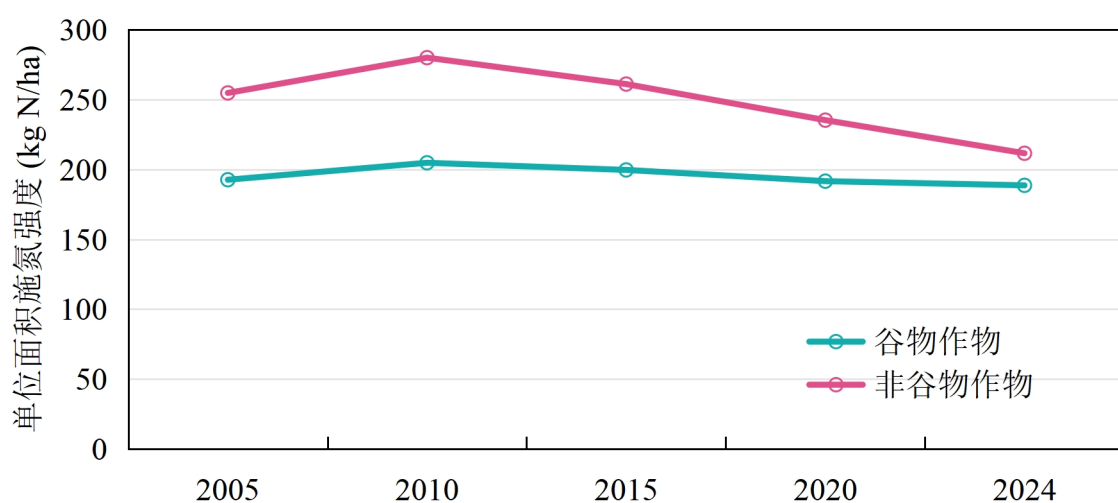


图 6 2005~2024 年谷物与非谷物作物氮肥施用强度变化趋势

数据来源：《全国农产品成本收益资料汇编》

从各作物所覆盖区域的单位面积施氮强度平均值的变化来看，2015~2024 年，水稻、小麦、和大豆下降约 3%-5%，玉米下降约 8%，马铃薯则有所增加。相比之下，柑橘和苹果下降最为明显，平均降幅分别约为 37%和 28%；棉花、油菜籽和蔬菜也分别下降约 12%-14%（见图 7）。

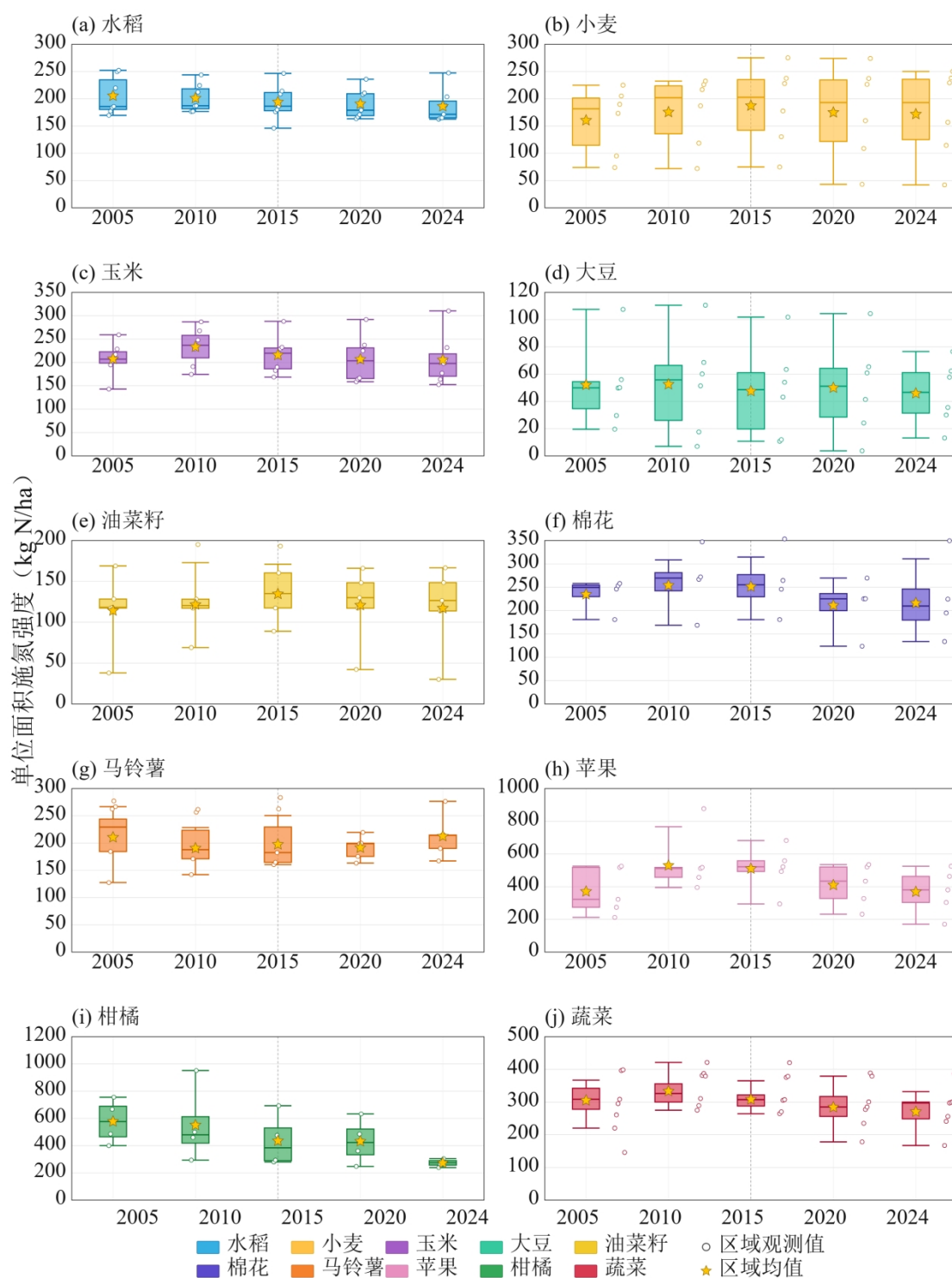


图 7 2005-2024 年主要作物氮肥施用强度变化

数据来源：《全国农产品成本收益资料汇编》。

2024 年主要作物施氮水平与农业农村部发布试行的《定额》相比出现超量、不足与适宜并存的格局，作物和区域间分化明显。果蔬普遍超额最为突出，水稻、小麦和玉米多数产区高于上限，但华中及东北部分产区低于下限；苹果、柑橘普遍超上限，油菜籽多低于下限。

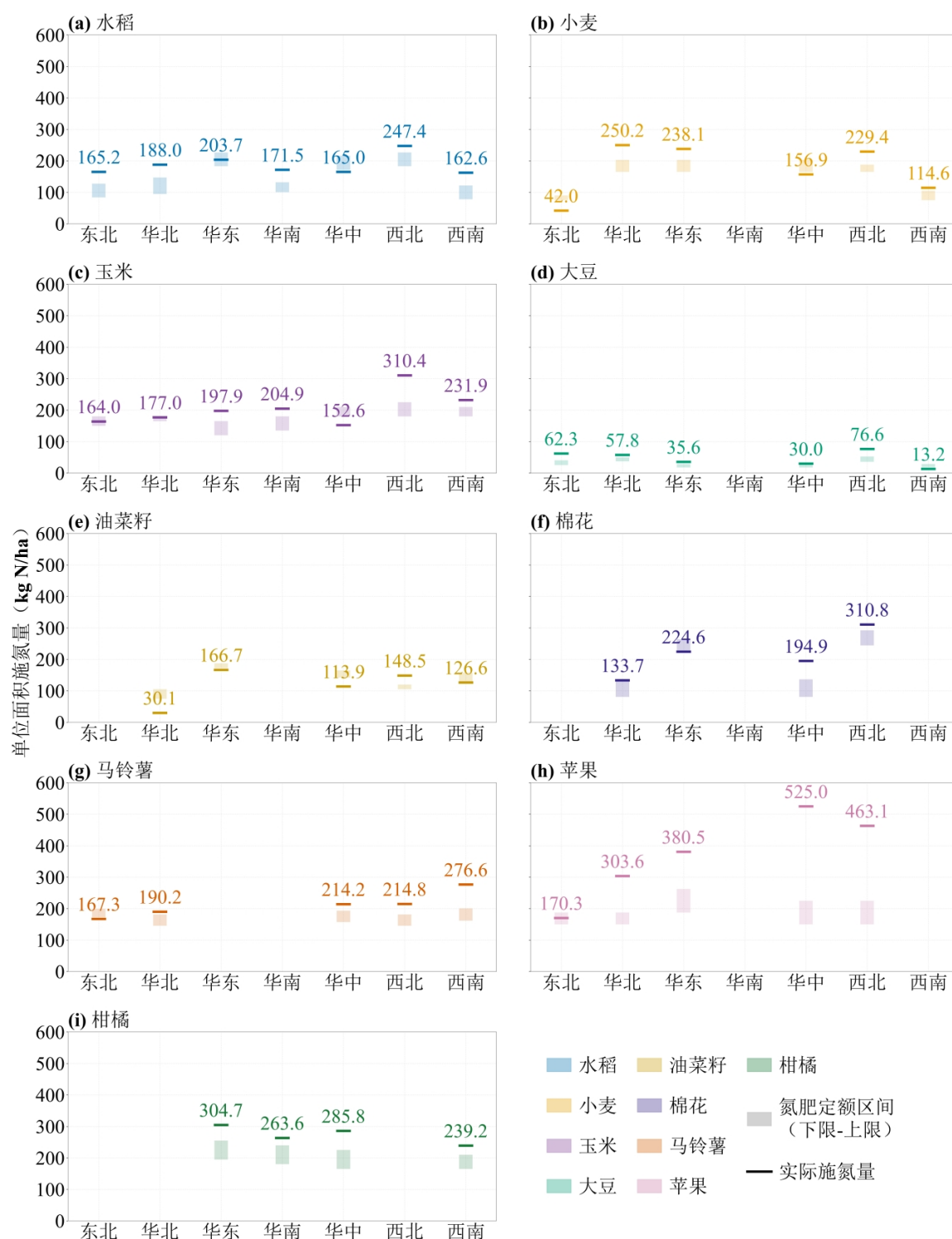


图 8 2024 年主要作物区域施氮水平与氮定额区间对比

数据来源：《全国农产品成本收益资料汇编》、全国农业技术推广服务中心氮肥定额数据。

2.3 农田氧化亚氮排放变化及其构成

2.3.1 氮肥减量带动农田 N_2O 排放下降

中国农田化学氮肥施用相关的 N_2O 排放已由增长阶段转入持续减排阶段。2004~2014 年，全国农田 N_2O 排放量由 49.95 万吨增至 58.30 万吨，增长 16.7%，并于 2014 年达到研究期峰值。2015 年以后， N_2O 排放总体持续下降，由 2015 年的 58.10 万吨降至 2024 年的 44.74 万吨，较 2015 年下降 23.0%。从排放构成看，2024 年直接 N_2O 排放为 35.40 万吨，占总排放的 79.1%，仍是农田 N_2O 排放的主要来源；挥发沉降产生的间接排放为 3.73 万吨，占 8.3%；淋溶和径流产生的间接排放为 5.60 万吨，占 12.5%，两类间接排放合计 9.34 万吨，占总排放的 20.9%（见图 9）。

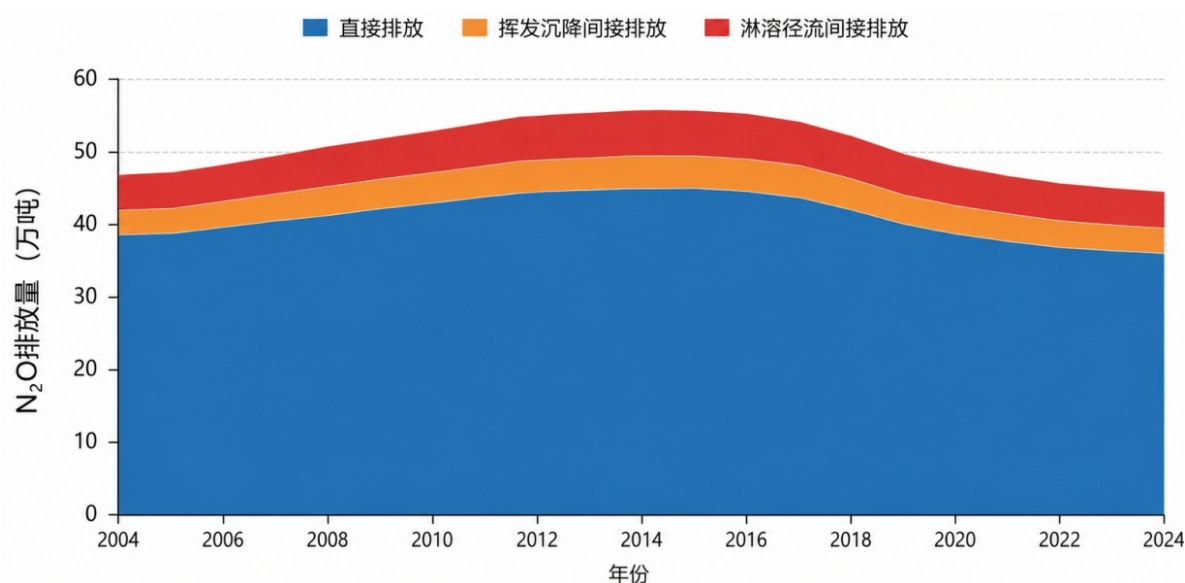


图 9 2004~2024 年全国农田化肥施用 N_2O 排放及其构成

注：基准清单覆盖 2004~2024 年 31 个省级行政单元。2004~2024 年施肥量来自《中国统计年鉴》。氮投入包括氮肥折纯量和复合肥折纯养分折算的氮量，其中复合肥折氮比例统一取 1/3。核算边界为农田化肥氮施用引起的直接 N_2O 排放、氨挥发、大气沉降间接排放和淋溶径流间接排放；不包括粪肥、作物残体、土壤有机质矿化、动物排泄和化肥制造环节。所有结果均以 N_2O 质量表示，而非 CO_2 当量。排放因子参数来自《省级温室气体清单编制指南（2011 年版）》。

2.3.2 农田 N₂O 减排空间呈现明显区域集聚

农田 N₂O 排放具有明显的区域差异，但 2015 年以来各区域均已进入不同程度的减排阶段（见图 10）。2015~2024 年，西南地区降幅最大，达 28%；华中和华东地区分别下降 26%和 23%；东北和华南降幅约为 17%-18%；西北地区降幅相对较小，为 13%。从绝对减排量看，华东地区由于排放基数较高，N₂O 排放由 2015 年的 14.87 万吨下降至 2024 年的 10.98 万吨，累计减少 3.89 万吨，是全国排放量下降最大的区域；华中和西南地区分别减少 2.86 万吨和 2.31 万吨。总体来看，全国农田 N₂O 排放下降具有明显的区域差异，东部和中西部主要农业生产区对全国农田 N₂O 减排的贡献相对突出。

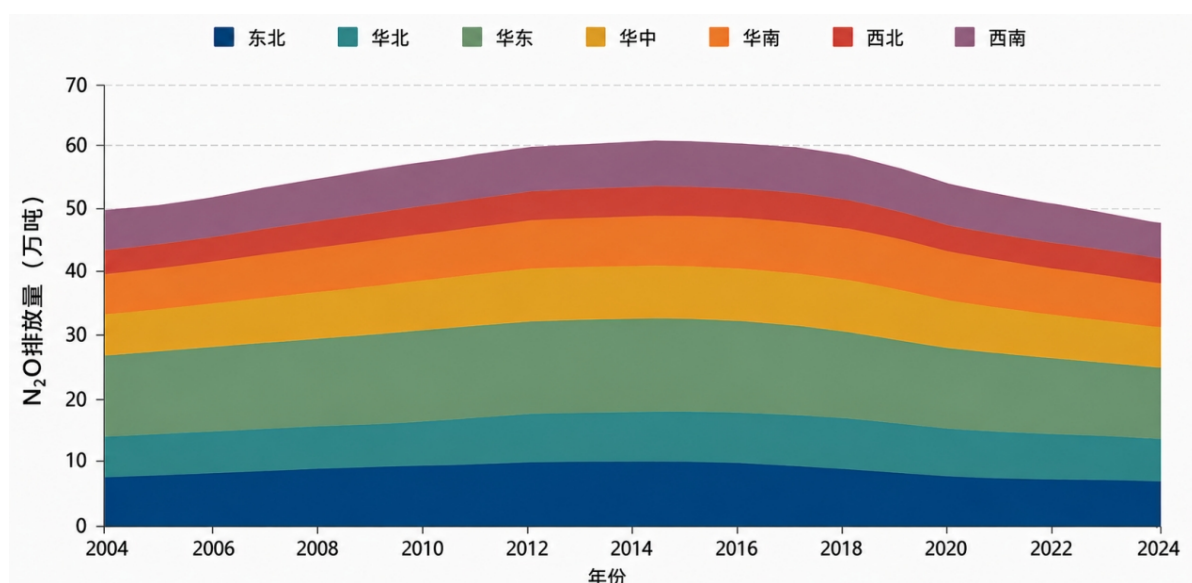


图 10 2024 年全国各区域农田化肥施用 N₂O 排放构成

注：核算方法与数据来源同上。

区域间排放差异与农业生产规模和氮肥投入强度密切相关。2024 年，华东地区仍是全国最大的农田 N₂O 排放区域，排放量为 10.98 万吨，占全国总量的 24.5%；其次为华中和华南地区，分别为 7.80 万吨和 6.80 万吨，占 17.4%和 15.2%，三个区域合计贡献全国排放的 57.2%。结合农业投入和面积来看，华东地区农田面积和氮投入分别达到 37.68 Mha 和 5.63 Mt N，均居七个区域首位，是其排放总量较高的重要原因。这表明区域 N₂O 排放规模并非简单由施氮强度决定，而是受到农田规模与氮投入强度共同作用。

不同区域的排放路径构成也存在明显差异，直接排放是各区域 N_2O 排放的主体（见图 11）。2024 年，各区域直接排放占比介于 69.1%~87.7%之间，其中华南地区最高，达到 87.7%；东北和西南地区也分别达到 82.0%和 81.1%。相比之下，西北和华北地区直接排放占比仅为 69.1%和 69.3%，挥发沉降及淋溶径流产生的间接排放分别贡献其区域总排放的 30.9%和 30.7%，明显高于其他区域。华中和华东地区间接排放占比分别为 23.6%和 20.1%。总体来看，我国不同区域农田 N_2O 排放不仅在总量和施氮强度上存在差异，在排放路径构成上也具有明显的空间异质性，说明区域减排需要同时考虑农业生产规模、氮投入强度以及直接和间接氮损失路径，并针对不同区域的主要排放特征实施差异化控氮措施。

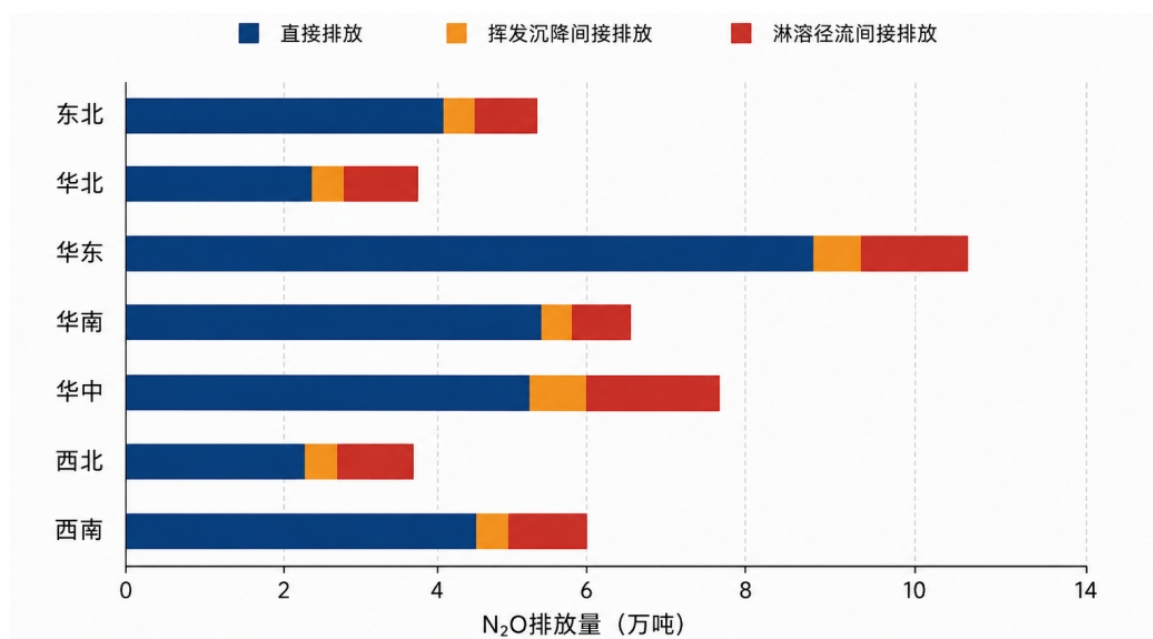


图 11 不同区域 2024 年 N_2O 排放构成变化

注：核算方法与数据来源同上。

2.4 氮肥成本变化与减氮节本效应

过去十年，尽管化肥和氮肥施用量总体下降，但肥料成本不降反升，肥料价格上涨是主要原因。2024 年谷物亩均化肥成本约为 153~204 元，较 2015 年增加 37~60 元，化肥成本占总成本的比重也升至 12%~17%。其中，氮肥是化肥成本的主要来源。同期尿素零售价格由 1.87 元/公斤上涨至 2.57 元/公斤，涨幅约 38%，成为氮肥成本上升的重要推动因素（图 12）。因此，施肥量下降并不必然带来成本下降，价格上涨可能抵消甚至超过减量带来的成本下降。

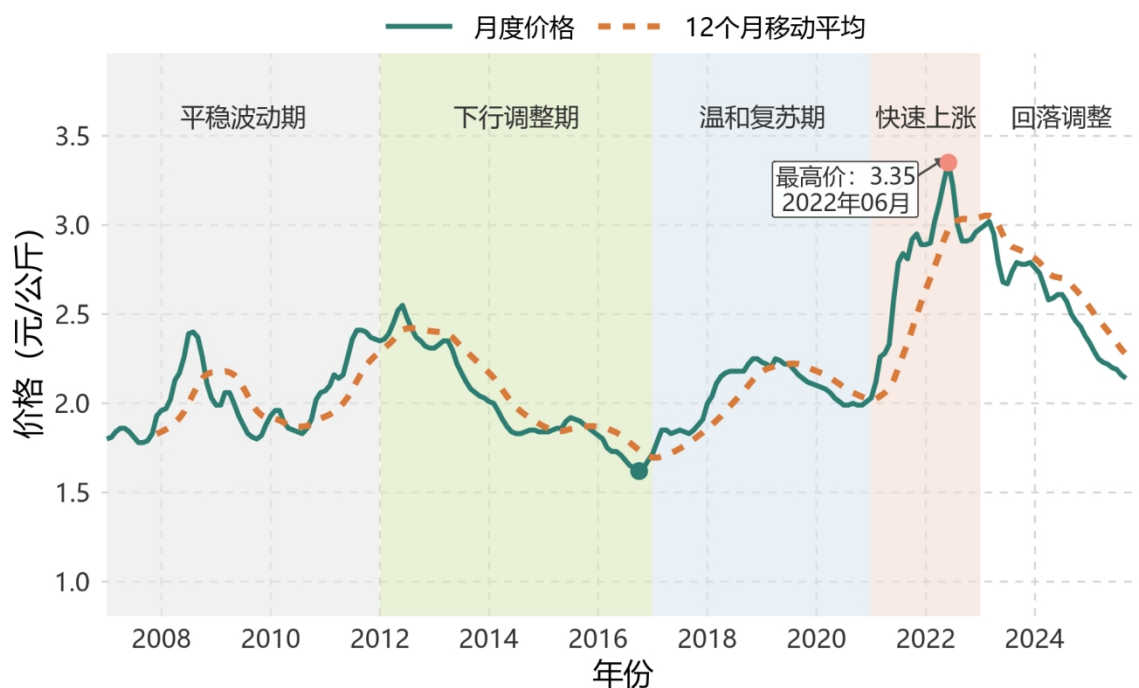


图 12 中国国产尿素零售价格走势

数据来源：CEIC 中国经济数据库。

不同作物的氮肥成本变化存在明显差异。2024 年早籼稻、中籼稻和晚籼稻亩均估算氮肥成本均约为 70 元，粳稻、小麦和玉米分别约为 84 元、77 元和 73 元。大豆、油菜籽和蔬菜平均亩均氮肥成本分别由 2015 年的 15 元、41 元和 98 元增至 2024 年的 20 元、55 元和 131 元；苹果由 148 元小幅增至 152 元。

氮肥成本还呈现明显的区域差异，且经济和园艺作物的省际差距更大（图 13 和 14）。2024 年六类谷物的省级亩均估算氮肥成本大致在 47~134 元之间，蔬菜和苹果分别为 67~226 元和 52~270 元。这种差异不仅来自肥料价格，还受到施氮强度、肥料配方和购肥价格等因素共同影响。

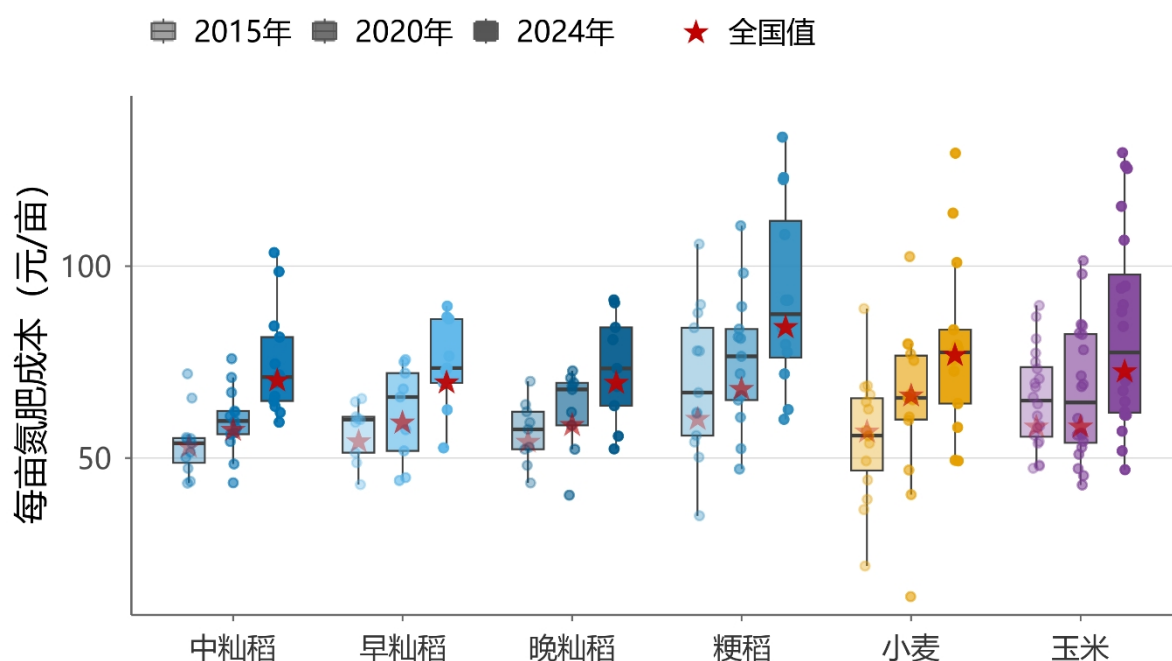


图 13 2015 年、2020 年与 2024 年主要谷物每亩氮肥成本范围

注：数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。施氮量按单质氮肥折纯量与复混肥折纯量的 1/3 加总计算。亩均氮肥成本按以下步骤估算：①使用各作物、各年份的全国平均数据，分别以“金额合计÷用量合计”计算氮、磷、钾单位价格；②亩均估算氮肥成本=氮肥金额+复混肥金额×氮价÷（氮价+磷价+钾价），同一作物同一年份各省采用相同的分摊比例。箱体表示各省估算氮肥成本的中间 50% 范围，箱内横线表示省级中位数，圆点表示各省记录，红色五角星表示全国平均值。每种作物的三组箱体依次对应 2015 年、2020 年和 2024 年。

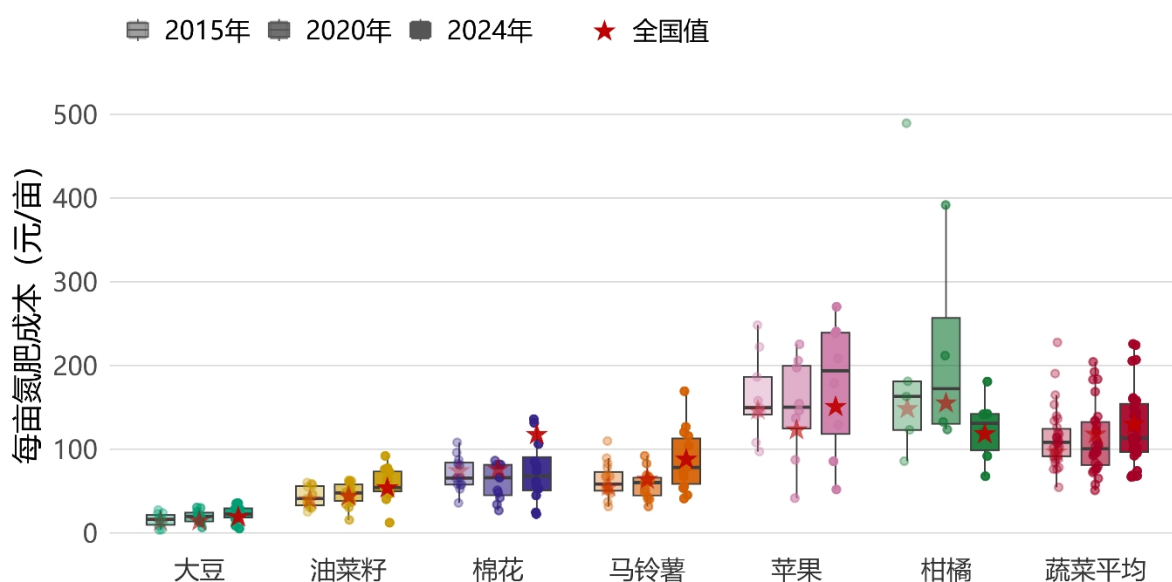


图 14 2015 年、2020 年与 2024 年经济与园艺作物每亩氮肥成本范围

注：数据来源和计算方法同上。

按统一的 2024 年全国估算氮价测算，过去十年的减氮已经节约了部分氮肥支出，但不同作物的施氮强度变化方向不一致。水稻、小麦、玉米、大豆、油菜籽、苹果和柑橘的施氮强度下降，合计节约氮肥支出 80 亿元；棉花、马铃薯和蔬菜的施氮强度上升，合计增加支出 49 亿元。10 类作物合计净节约 31 亿元。

施氮强度下降在一定程度上缓解了成本压力。按 2024 年各作物估算氮价测算，相较于保持 2015 年施氮强度，水稻、小麦和玉米亩均节约的氮肥支出分别相当于 2024 年总成本的 0.2%、0.1%和 0.03%，苹果和柑橘分别达到 1.2%和 2.3%。相比之下，棉花、马铃薯和蔬菜因施氮强度上升而增加的氮肥支出，分别相当于 2024 年总成本的 1.1%、0.5%和 0.1%（表 1）。

表 1 2015~2024 年施氮强度变化带来的氮肥支出变化

作物	2024 年氮肥成本	2024 年折算施氮量	2024 年单位氮价	保持 2015 年施氮强度的亩均支出	亩均节约氮肥支出	全国节约氮肥支出	占 2024 年作物总成本
单位	元/亩	公斤/亩	元/公斤氮	元/亩	元/亩	亿元	%
水稻	72.6	11.41	6.36	75.9	3.3	14.3	0.244
小麦	87.6	14.58	6.01	89.3	1.7	6.0	0.142
玉米	79.7	12.58	6.34	80.1	0.4	2.8	0.032
大豆	19.9	3.15	6.33	20.6	0.7	1.1	0.074
油菜籽	54.0	8.35	6.47	57.5	3.6	4.3	0.369
棉花	151.2	26.32	5.75	115.4	-35.8	-15.2	-1.426
马铃薯	108.1	14.42	7.50	93.5	-14.5	-9.7	-0.602
苹果	144.7	21.91	6.60	206.4	61.7	17.7	1.124
柑橘	134.6	15.72	8.56	214.8	80.2	37.3	2.617
蔬菜	148.2	20.96	7.07	138.8	-9.4	-32.8	-0.159

注：观测氮肥成本=氮肥金额+复混肥金额×氮价/(氮价+磷价+钾价)。隐含单位氮价=2024 年观测氮肥成本÷2024 年亩均折算氮投入。该价格同时反映氮肥品种、复混肥价格溢价和购肥结构。数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》、《中国农村统计年鉴》。



第三章：氮肥定额管理的减氮、减排、节本潜力

- 3.1 氮肥定额管理下的减氮潜力
- 3.2 氮肥定额管理下的减排潜力
- 3.3 氮肥定额管理下的节本潜力

三、氮肥定额管理的减氮、减排、节本潜力与分类调控

3.1 氮肥定额管理下的减氮潜力

将 2024 年实际施氮量与全国农业技术推广服务中心氮肥定额结合，研判现有氮肥总量中的减量空间。按 2024 年实际播种面积测算，十类作物减氮潜力为 320~732 万吨，玉米、蔬菜、水稻和小麦贡献逾七成（图 15a）。相对减氮潜力则在作物和区域间差异明显，马铃薯、大豆、棉花和苹果较高，西北、华南和西南调整幅度更大（图 15b）。总体上，各面积情景下全国减氮空间较稳定，应以粮食和蔬菜承接主要减量任务，并聚焦高施氮区域和作物组合精准调控。

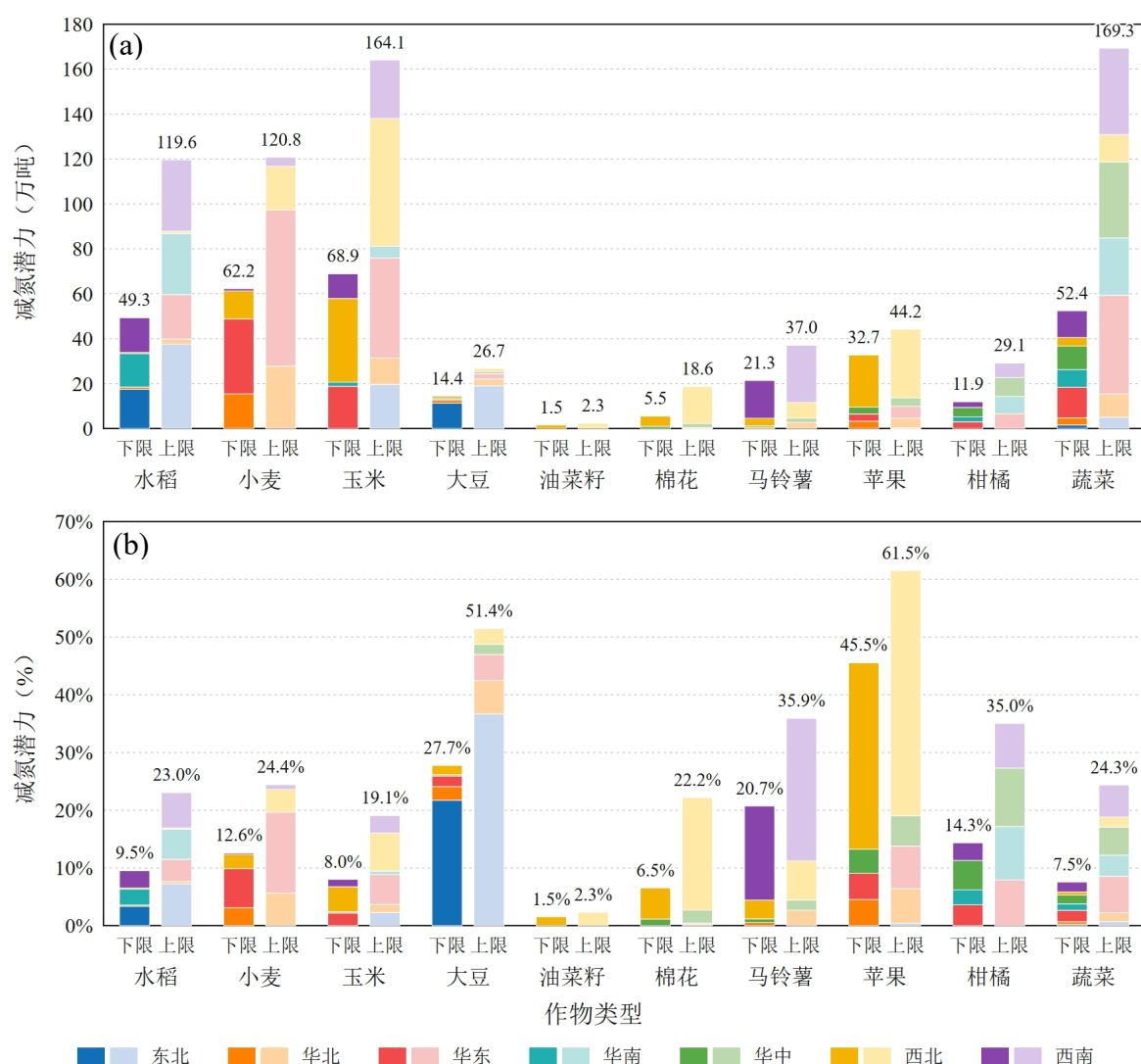


图 15 主要作物减氮潜力绝对量和百分比

注：(a)表示 2024 年主要作物减氮潜力绝对量，(b)表示 2024 年主要作物减氮潜力百分比堆叠段表示各区域对作物总减氮潜力。减氮潜力下限按氮肥定额上限计算，上限按氮肥定额下限计算；实际施氮量低于相应定额界限时，减氮潜力按零计算。蔬菜只有全国定额参数。数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》、国家统计局、全国农技推广服务中心和课题组测算。

3.2 氮肥定额管理下的减排潜力

- ★ 投入定额管理的减排效应主要集中于当前施氮水平明显高于定额的作物。
- ★ 施氮水平与定额水平之间差距较大的区域具有更高的相对减排潜力。

定额管理的 N_2O 减排潜力集中于高施氮作物和地区。蔬菜减排 0.99~3.19 万吨，玉米、水稻和小麦分别为 1.13~2.87、1.20~2.77 和 1.04~2.04 万吨，是减排的重点对象；大豆、油菜籽和棉花空间有限。区域上，西北地区减排比例最高（28.0%~45.5%），其次为西南地区（15.8%~31.2%），华中地区最低（1.9%~3.4%）。

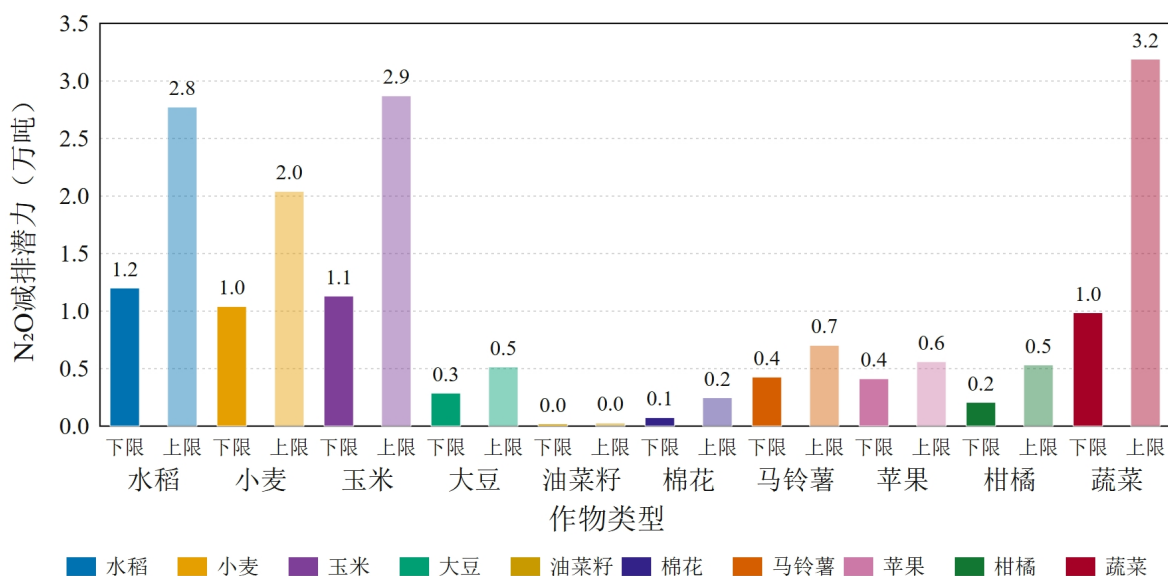


图 16 氮肥定额情景下主要作物 N_2O 减排潜力

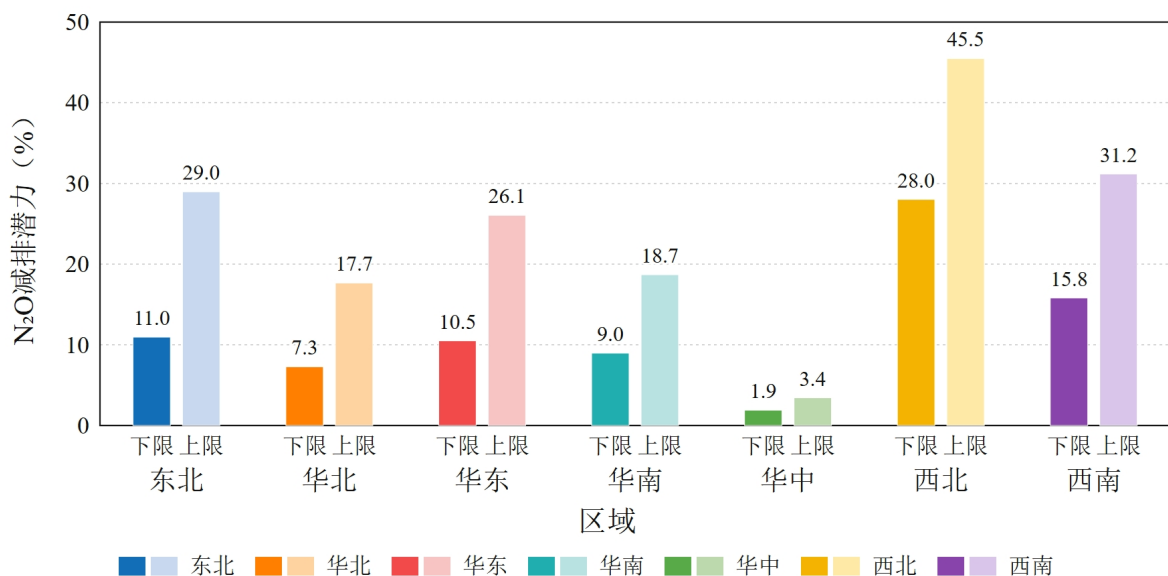


图 17 氮肥定额情景下各区域 N_2O 减排潜力

注： N_2O 排放采用《省级温室气体清单编制指南（试行）》（2011 年）的区域直接排放因子及挥发沉降、淋溶径流间接排放参数核算。

3.3 氮肥定额管理下的节本潜力

将不合理的施氮量控制至氮定额范围内后可节约约 195~445 亿元氮肥支出，节本总额主要由粮食和蔬菜贡献。按 2024 年实际播种面积测算，10 类作物可节约 195.1~444.7 亿元，其中玉米、蔬菜、水稻和小麦合计贡献 70.4%~76.9%。华东、西北和西南是全国节本的主要区域，合计贡献 63.5%~67.3%（图 18a）。定额管理对作物总成本的缓解总体有限，但部分经济和园艺作物的节本强度更高。2024 年全国节本占相关作物总成本的 0.4%~0.9%（图 18b）。苹果、马铃薯、柑橘和小麦的节本上限分别为总成本的 2.1%、1.5%、1.6%和 1.5%，均高于整体水平。大面积粮食作物决定节本总额，苹果、柑橘等园艺作物则具有较高的节本强度。

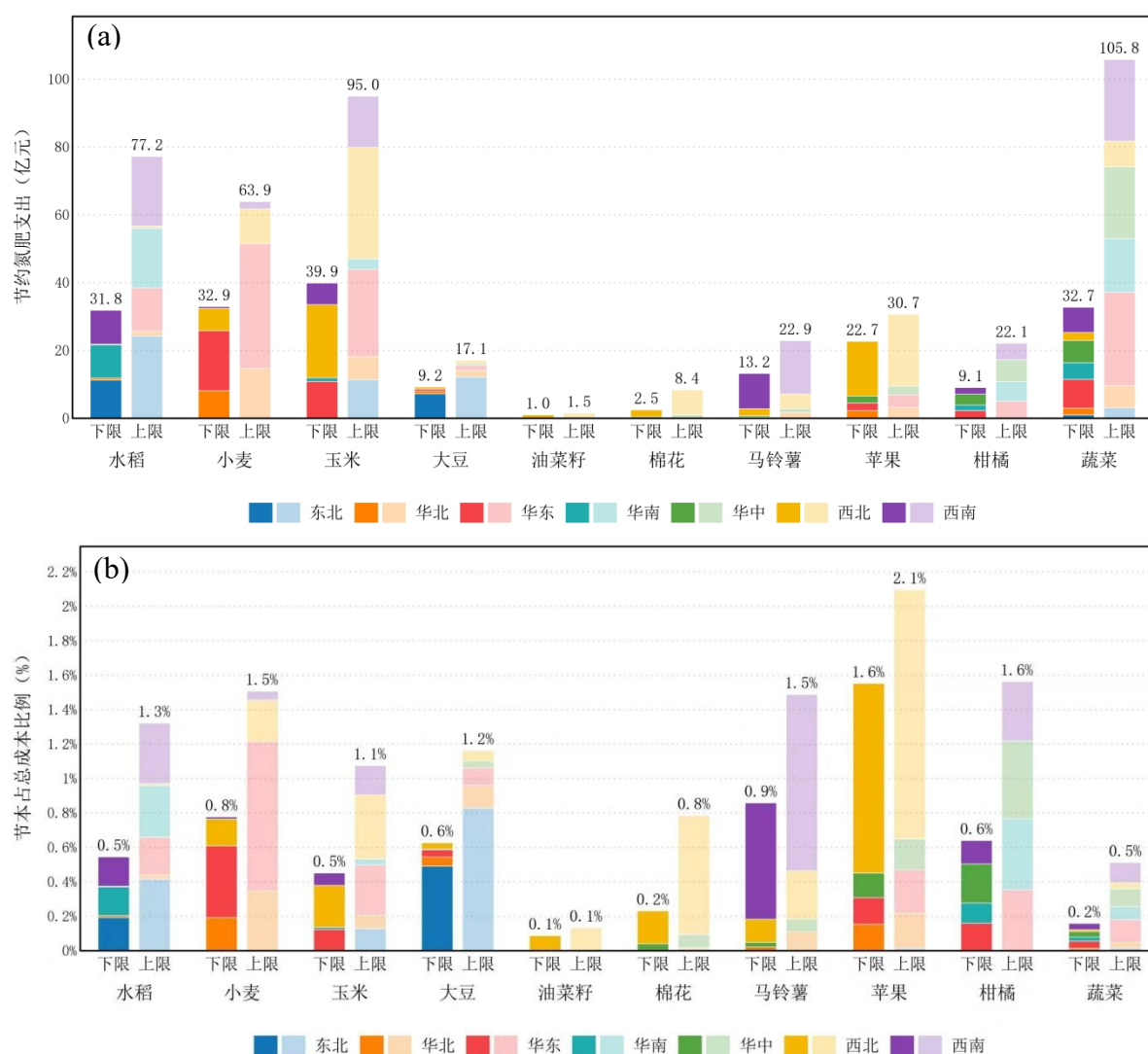


图 18 节约氮肥支出及成本占比

注：(a)表示 2024 年节约氮肥支出，(b)表示 2024 年节约氮肥部分的成本占总成本的比例。减氮潜力的计算方法和数据来源同上。节约氮肥支出计算方法与表 1 相同。



第四章：氮肥控量增效的多维精准调控 与系统协同

- 4.1 氮肥控量增效的作用机制与技术路径
- 4.2 氮肥管理技术的精准施用、智能决策与生态培育
- 4.3 氮肥管理技术的适用条件、实施约束与综合效应

四、氮肥控量增效的多维精准调控与系统协同

4.1 氮肥控量增效的作用机制与技术路径

作物高产对矿质养分供应具有高度依赖性，但传统施肥方式常以经验用量、表层撒施和平衡肥为主，容易造成“局部过量、时期错位、空间错配和形态失衡”。过量氮投入不仅降低氮肥利用率，还增加 N_2O 、 NH_3 和硝酸盐淋失风险。大数据分析均表明，肥料用量、时期、来源和位置的协同优化是兼顾产量和环境目标的关键。

与传统“肥料投入型”技术相比，现代施肥技术更强调五个增效环节：一是总量与平衡控制，二是释放模式调控，三是养分形态调控，四是作物信号与诊断调控，五是土壤培育与微生物调控，提升长期供肥能力和系统韧性。



图 19 肥料施用技术的增效机理与调控路径

4.2 氮肥管理技术的精准施用、智能决策与生态培育

未来氮肥控量增效需要从单一“控制施用量”转向养分总量、空间、时间、形态、决策与根际生态的协同优化。传统施肥主要解决“施多少”的问题，难以同时回答“何时施、施在哪里、以何种形态施以及如何动态调整”。当养分供给与作物需求在时间、空间和形态上不匹配时，不仅会降低氮肥利用效率，还会增加生产成本、温室气体排放和水体污染风险。在前述调控原理基础上，氮肥控量增效技术可归纳为六类可组合路径，具体技术见图 20。以下重点说明各类技术的作用机制与应用方向：

- ❖ **机械定位施肥**：通过调整施肥深度、距离和土层分布，将养分投放至活跃根区，减少表层损失。
- ❖ **水肥一体化**：依托灌溉系统实现水肥同步和按需供给。
- ❖ **精准变量施肥**：以土壤、作物和空间信息为依据，形成“诊断—决策—处方—智能执行”的差异化管理体系。
- ❖ **根外补肥抗逆技术**：面向关键生育期缺素或逆境，快速补充养分并调节作物生理状态。
- ❖ **缓控释轻简化施肥**：通过调节养分释放和转化过程、减少施肥次数，兼顾供肥连续性与作业效率。
- ❖ **生物调控施肥**：通过优化土壤—根际系统和养分循环，增强长期供肥能力与系统韧性。



图 20 氮肥管理技术绿色转型解决方案

4.3 氮肥管理技术的适用条件、实施约束与综合效应

氮肥控量增效需进一步落实为与具体生产条件相适配的技术组合。不同技术分别从施肥位置、养分供给时间、施用形态、田间信息获取和根际过程调控等方面发挥作用，其主要做法、优先适用场景、主要制约与风险并不相同。下表对六类技术进行系统梳理。

表 2 六类氮肥管理技术的适用条件、实施要点及主要约束

调控路径 技术		主要做法	优先适用场景	主要制约与风险
机械 定位 施肥	机械 定位 施肥	利用开沟、注射、播施一体化或侧深施装置，将肥料按定量、定深、定点或定带原则施入作物根系活跃区域的技术	- 规模化粮食作物 - 机具可达、地块较平整且便于标准化作业的田块 - 需减少表层养分损失的区域	- 小地块、泥泞田块或丘陵区推广成本较高 - 深度、距离和肥料浓度控制不当可能造成烧根、局部盐害或苗期抑制 - 需配套减氮，否则可能增加 N_2O 排放或深层淋失 - 区域适宜深度差异大
	水肥 一体化	将可溶性肥料通过灌溉系统同步输送至根区的技术体系	- 具备灌溉设施的粮食、蔬菜、果树及高价值作物 - 水肥调控需求强的生产单元 - 设施农业和规模化旱作区	- 设施建设、能耗和维护成本较高 - 对施肥浓度、灌溉制度和田间均匀度要求高，管理失误会造成局部缺肥或盐害 - 水质、滴头堵塞和盐分累积影响均匀度
精准 变量 施肥	诊断 与变量 施肥	基于土壤肥力、作物长势、遥感、地理信息系统和决策模型，按照田块内空间差异和作物需肥动态实施差异化施肥的技术	- 规模较大、空间差异稳定 - 土壤、农户数据较完整的地块 - 可获得社会化服务与智能装备支持的主体	- 数据获取和模型校准成本较高 - 需要较长期的时序监测数据 - 小地块数据噪声大 - 生产和支持设备及配套服务成本高 - 土壤采样密度、遥感天气窗口和机器执行精度会影响效果
	无人 机精 准施 肥	开展苗情监测、局部补肥和应急追肥，连接遥感诊断与快速田间作业	- 地形复杂、地面大型机械难进入地块 - 作业窗口较短的地区	- 载荷和续航有限 - 作业效果受冠层、肥料性质和气象条件影响

调控路径 技术		主要做法	优先适用场景	主要制约与风险
缓控释 轻简化施肥	缓控释肥	通过控释肥、缓释肥、稳定性肥料和一次性施肥制度来调节养分释放速率、减少施肥次数和降低损失	- 追肥困难、作业窗口有限 - 需要减少进地次数的地区	- 产品价格较高 - 释放过慢可能造成前期缺肥，释放过快则失去控释优势 - 释放特性受温度、水分、土壤和包膜质量影响 - 部分包膜材料存在环境残留风险
	轻简化施肥	组合种肥同播、基追一体、缓控释肥、水肥自动化和无人机补施，减少作业环节	- 规模经营、劳动力紧缺或人工成本较高的地区 - 农时约束较强的地区	- 削弱动态调控 - 过度简化可能导致前期肥害、后期脱肥甚至减产
根外补肥 抗逆技术	根外补肥与抗逆调控	通过叶面喷施或茎叶吸收途径补充营养元素、微量元素、功能性物质和生物刺激素，以纠正缺素、缓解逆境、改善品质和补充关键期营养	- 关键生育期微量元素缺乏的作物 - 根系吸收养分条件受限的作物 - 遭遇干旱、寡照、盐害等逆境的作物	- 不能替代根部大量元素供应 - 喷施过量易造成叶片灼伤 - 存在灼叶、雨水冲刷和混配药害风险 - 效果受叶面蜡质、气温、湿度、喷施时间、助剂和作物生育期影响大
生物调控施肥	生物调控施肥	利用有机肥、微生物菌剂、生物肥料、生物刺激素、生物炭或有机载体复合肥调节土壤结构、根际微生态和养分循环	- 低有机质、盐渍、砂质地块 - 土壤退化风险较高的地块 - 需兼顾土壤健康与养分循环的地区	- 见效慢、产品稳定性和菌株适应性差异大 - 田间效果受温湿度、土壤 pH 和原生微生物群落影响 - 有机肥替代比例过高可能造成早期供氮不足或养分释放与需求错位

不同氮肥管理技术的实际效果研究从产量、氮肥利用效率、环境损失和经济收益等多维度进行了综合评估。基于已有文献计量分析证据，下表汇总了各类技术相对常规处理在增产、提高氮肥利用效率、减少 N₂O 排放、NH₃挥发和硝态氮淋失，以及经济效益改善等方面的总体表现。由于不同技术的研究对象、区域条件和指标覆盖范围存在差异，表中结果用于识别技术的总体效应特征，不宜作为跨技术简单排序的依据。并且总体来讲，氮肥施用管理技术研究的评价主要聚焦于技术应用的农艺效果和环境效果评价，关于经济评价的文献计量分析相对不足。

表 3 不同氮肥管理技术的产量、氮利用效率、环境与经济效应

调控路径	技术	产量增加	氮肥利用效率提高	环境效益			经济效益增加
				N ₂ O 排放减少	NH ₃ 挥发降低	硝态氮淋失降低	
机械定位施肥	1.机械深施	13.9% [10.8-17.0]	36.3% [23.45-50.44]	34.2% [16.3-48.2]	69.7% [57.3-79.7]	—	—
	2.定位深施	13.5% [11.8-14.1]	33.8% [28.7-38.3]	16.2% [8.5-25.1]	86.6% [82.0-90.6]	—	—
水肥一体化	3.滴灌施肥	12.0% [10.0-14.1]	34.3% [29.0-40.1] 水分生产率 26.4% [20.9-32.7]	28.1% [20.1-35.0]	14.2% [3.1-24.0]	71.2% [63.6-77.7]	—
精准变量施肥	4.诊断变量施肥	12.1% [10.7-13.3]	—	—	—	—	15.2% [13.9-16.5]
缓控释轻简化施肥	5.缓控释肥	7.9% [6.1-9.9]	25.6% [19.1-32.5]	27.0% [20.1-33.7]	43.1% [41.1-44.5]	36.6% [32.5-39.7]	8.2% [5.2-10.3]
根外补肥抗逆技术	6.根外补肥与抗逆	4.1%-15.1%	—	—	—	—	—
生物调控	7.生物刺激剂	17.9% [16.7-19.0]	35.8% [18.2-56.1]	—	—	—	—
	8.有机肥替代	4.4% [3.2-5.6]	8.1% [4.3-12.0]	26.5% [25.7-27.3]	26.1% [24.1-27.9]	33.8% [32.0-35.6]	—

注：所有数值均表示相对于各研究设定的对照处理或常规处理的提高或减少幅度。第一行为文献计量分析（Meta）平均效应值，括号内为 95%置信区间；“根外补肥与抗逆”为相关研究报道的增产范围，不代表 Meta 分析均值或置信区间。“—”表示尚缺乏可直接比较的定量 Meta 效应值，不表示该技术没有作用。氮肥利用效率（NUE）；N₂O、NH₃和硝态氮淋失降低反映环境效应。单元格底色仅用于区分效应类别，不表示效应强弱。文献来源：1. 机械深施：P. Wu et al.（2026）；2. 定位深施施肥：P. Wu et al.（2024）；3. 滴灌施肥：H. Li et al.（2021，增产和 NUE）及 Zheng et al.（2023，N₂O 排放、氨挥发和硝态氮淋失）；4. 诊断变量施肥：Chivenge et al.（2021）；5. 缓控释肥：X. Zhang et al.（2026，增产和 NUE）、Z. Zhang et al.（2026，N₂O 排放和氨挥发）及 Y. Zhang et al.（2024，硝态氮淋失和经济效益）；6. 根外补肥与抗逆：Hui et al.（2025）、W. Wu et al.（2025）和 Zhou et al.（2024）；7. 生物刺激剂：J. Li et al.（2022，增产）及 Herrmann et al.（2022，NUE）；8. 有机肥替代：Liu et al.（2025，增产和 NUE）及 Wang et al.（2024，环境效应）。



第五章：氮肥管理技术减氮增产减排效应、经济回报与采纳条件

- 5.1 主要氮肥管理技术的减氮、增产与减排效应
- 5.2 主要氮肥管理技术的成本、收益与减排效益
- 5.3 不同作物和经营主体的主要氮肥管理技术采纳情况
- 5.4 主要氮肥管理技术采纳的生产服务条件与政策保障

五、氮肥管理技术减氮增产减排效应、经济回报与采纳条件

增效肥料、机械深施、水肥一体化和有机肥替代已有较多田间试验、农户采纳记录和成本收益资料，为比较技术效果及其推广条件提供了依据。本章围绕这些技术，首先梳理其减氮、增产和减排效果；再结合成本与产值变化测算短期经济回报；随后比较不同作物和经营主体的实际采纳情况；最后分析生产与服务条件及地方政策支持，提出促进持续采纳的支持重点。

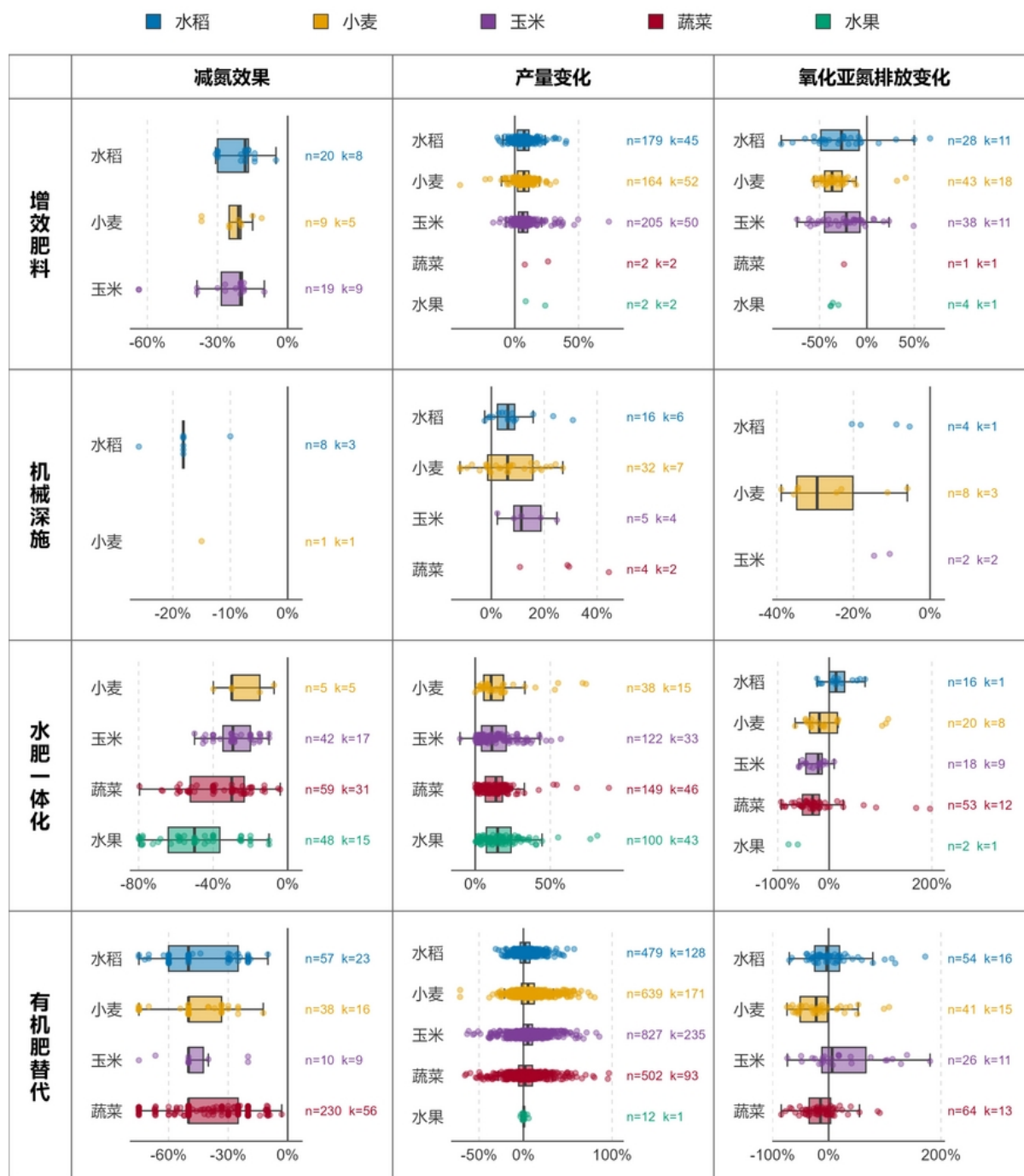
5.1 主要氮肥管理技术的减氮、增产与减排效应

增效肥料、机械深施、水肥一体化和有机肥替代均具有减少化学氮肥投入、维持或提高产量的潜力，但对氧化亚氮排放的影响并不一致，部分技术在特定作物和生产条件下也可能增加排放（图 21）。

总体来看，增效肥料和机械深施能够实现约两成的化学氮肥减量，而水肥协同和有机替代在适宜条件下具有更大的化肥减量空间（图 21）。现有试验中，水肥一体化和有机肥替代的化学氮肥减量幅度约为 24%~49%和 45%，增效肥料和机械深施分别约为 20%~27%和 15%~18%。

水肥一体化的增产潜力较高，增效肥料和机械深施也具有一定增产效果，有机肥替代的短期增产幅度相对较小。现有试验中，水肥一体化在小麦、玉米、蔬菜和水果上平均增产约 14%~18%，增效肥料和机械深施在水稻、小麦和玉米上分别平均增产约 6%~8%和 7%~13%，有机肥替代在主要作物上平均增产约 2%~7%。

增效肥料和机械深施总体表现为氧化亚氮减排，水肥一体化和有机肥替代则在部分作物和生产条件下出现增排。现有试验中，增效肥料和机械深施在水稻、小麦和玉米上的排放中位数分别降低约 22%~37%和 13%~29%；水肥一体化在小麦、玉米和蔬菜上降低约 19%~32%。有机肥替代在水稻、小麦和蔬菜上总体表现为小幅减排，玉米部分研究则出现增排，其排放效应受物料类型、替代比例和土壤条件影响。

图 21 氮肥管理技术对施氮量、单位面积产量和 N_2O 排放的影响

注：各指标均为处理相对对照的变化率，负值表示减少，正值表示增加。减氮面板仅保留化学氮肥投入减少且产量不下降的比较；每个圆点代表一个处理—对照比较， n 为比较数， k 为文献数。比较数不少于 5 时绘制箱线图，箱体表示第 25 至第 75 百分位数区间，中线表示中位数，须线延伸至距箱体边界 1.5 倍四分位距以内的最远观测值。数据来源于课题组整理的荟萃分析数据。

5.2 主要氮肥管理技术的成本、收益与减排效益

预期经济回报是影响农户技术采纳的重要因素。增产、节肥和省工带来的收益能否覆盖新增投入，影响农户采用技术的经济动力。本节结合四类技术的成本与产值变化，测算不同作物—技术组合的利润增减，以评估其潜在经济回报。

机械深施在多数作物上降低费用，增效肥料、水肥一体化和有机肥替代在多数作物上增加成本（表 4）。机械深施在水稻、玉米和蔬菜上降低费用，小麦增加约 2.8%。增效肥料在水稻、小麦、蔬菜和水果上的成本增加约 0.5%~6.0%，玉米下降约 4.0%。水肥一体化在所分析的四类作物上均增加成本，其中小麦和蔬菜的增幅较大，分别为 27.1%和 21.2%。有机肥替代在水稻、小麦、玉米和蔬菜上增加约 8.9%~15.8%，水果下降约 3.6%。

表 4 氮肥管理技术对各作物—技术组合成本变化率的中位数

作物	增效肥料 (%)	肥料深施 (%)	水肥一体化 (%)	有机肥替代 (%)
水稻	6	-11.9	—	15.8
小麦	0.5	2.8	27.1	13.3
玉米	-4	-6.7	9.5	14.1
蔬菜	1.5	-6.9	21.2	8.9
水果	5	—	3.6	-3.6

注：数值为文献中各作物—技术组合成本变化率的中位数。不同研究的成本核算范围不同。

增效肥料和机械深施提高种植利润，水肥一体化在多数作物上增利，有机肥替代在多数作物上减利（表 5）。省级模拟结果显示，增效肥料在三类粮食作物上增利约 48~108 元/亩，在蔬菜和水果上增利约 1214~1647 元/亩；机械深施在三类粮食作物上增利约 50~236 元/亩，在蔬菜上增利约 3351 元/亩。水肥一体化在水果、蔬菜和玉米上分别增利约 1170 元/亩、238 元/亩和 36 元/亩，小麦减利约 132 元/亩。有机肥替代在水稻、小麦、玉米和蔬菜上减利约 64~290 元/亩，仅水果增利约 243 元/亩。上述金额均为省级利润变化的中位数。

氧化亚氮减排的亩均经济价值有限，按所选碳价折算约为 1~11 元（表 6）。在具有减排效果的作物—技术组合中，增效肥料、机械深施和有机肥替代的减排价值分别约为 4~9 元/亩、2~7 元/亩和 1~5 元/亩；水肥一体化在小麦和玉米上约为 4~5 元/亩，在蔬菜上约为 9~11 元/亩。

减排价值可作为补充激励，难以弥补较大的种植利润损失。若将减排价值转化为补偿，玉米水肥一体化的亩均利润增量由约 36 元提高至约 40 元，水稻增效肥料由约

48 元提高至约 53~54 元；小麦水肥一体化的亩均利润仍减少约 127~128 元。因此，提高技术的经济可行性仍需降低设备、物料和作业成本，提高专业化服务效率。

表 5 不同氮肥管理技术采纳对作物成本、产值和利润影响的模拟影响

技术	作物	成本变化 (元/亩)	产值变化 (元/亩)	利润变化 (元/亩)
增效肥料	水稻	69	114	48
	小麦	5	87	83
	玉米	-37	70	108
	蔬菜	79	1,729	1,647
	水果	272	1,487	1,214
机械深施	水稻	-136	97	236
	小麦	27	75	50
	玉米	-62	127	191
	蔬菜	-374	2,969	3,351
水肥一体化	小麦	257	129	-132
	玉米	89	124	36
	蔬菜	1,143	1,408	238
	水果	199	1,371	1,170
有机肥替代	水稻	181	26	-152
	小麦	126	64	-64
	玉米	131	56	-72
	蔬菜	478	198	-290
	水果	-198	44	243

注：数值为各省相对常规施肥的模拟变化额中位数，正值表示增加，负值表示减少。测算保持产品价格和土地成本不变，将文献成本变化率用于非土地生产成本、产量变化率用于产值，再计算利润变化。各列分别取省级中位数。数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》2024 年分省成本收益数据，以及课题组整理的原始研究成本变化与产量效应参数。

表 6 不同氮肥管理技术采纳氧化亚氮减排价值及其对种植利润的影响

技术	作物	减排价值	种植利润变化	计入减排价值后种植利润变化
增效肥料	水稻	+4.7 ~ +5.6	48	+52.7 ~ +53.6
	小麦	+7.5 ~ +8.9	82.6	+90.1 ~ +91.5
	玉米	+3.9 ~ +4.6	108	+111.9 ~ +112.6
	蔬菜	+6.9 ~ +8.2	1,647	+1,653.9 ~ +1,655.3
机械深施	水稻	+2.3 ~ +2.8	236	+238.4 ~ +238.8
	小麦	+6.0 ~ +7.1	50.2	+56.2 ~ +57.3
	玉米	+2.3 ~ +2.7	191.5	+193.8 ~ +194.2
水肥一体化	小麦	+3.9 ~ +4.6	-132	-128.1 ~ -127.4
	玉米	+3.8 ~ +4.5	35.8	+39.6 ~ +40.3
	蔬菜	+9.2 ~ +11.0	237.6	+246.8 ~ +248.6
有机肥替代	水稻	+0.6 ~ +0.7	-152.3	-151.7 ~ -151.6
	小麦	+4.5 ~ +5.4	-64.2	-59.7 ~ -58.9
	蔬菜	+4.1 ~ +4.9	-290	-285.8 ~ -285.1

注：本表展示具有减排效果的作物—技术组合。减排量按全球增温潜势 298 换算为二氧化碳当量，再按上海环境能源交易所 2026 年 7 月 83.55~99.50 元/吨的碳价折算为减排价值（元/亩）。数据来源于 2024 年《全国农产品成本收益资料汇编》分省数据、课题组整理的常规施肥排放基准及文献参数、上海环境能源交易所 2026 年 7 月全国碳市场月报。

5.3不同作物和经营主体的主要氮肥管理技术采纳情况

水稻种植户的技术采纳比例较低，小麦和玉米种植户主要采用机械深施（图 22）。水稻种植户中，至少采纳一类技术的加权比例为 24%，采用有机肥替代的占 11%，是最常见的技术。小麦和玉米种植户中，至少采纳一类技术的加权比例分别为 60% 和 81%，采用机械深施的分别占 43% 和 63%。三类作物种植户采用水肥一体化的比例均不足 6%。

规模化、组织化经营主体在多数技术上采纳占比更高，普通农户在机械深施上占比最高（图 23）。在粮食种植主体中，家庭农场采纳增效肥料的比例为 17%，合作社成员采纳水肥一体化的比例为 8%，种粮大户采纳有机肥替代的比例为 18%，在各自技术上均居四类主体首位。普通农户采纳机械深施的比例为 48%，高于家庭农场的 41%、合作社成员的 40% 和种粮大户的 29%。机械作业外包是普通农户较广泛采纳深施技术的可能解释。农户通过外部服务获取机具与作业支持，能够缓解经营规模和地块条件对技术采纳的约束

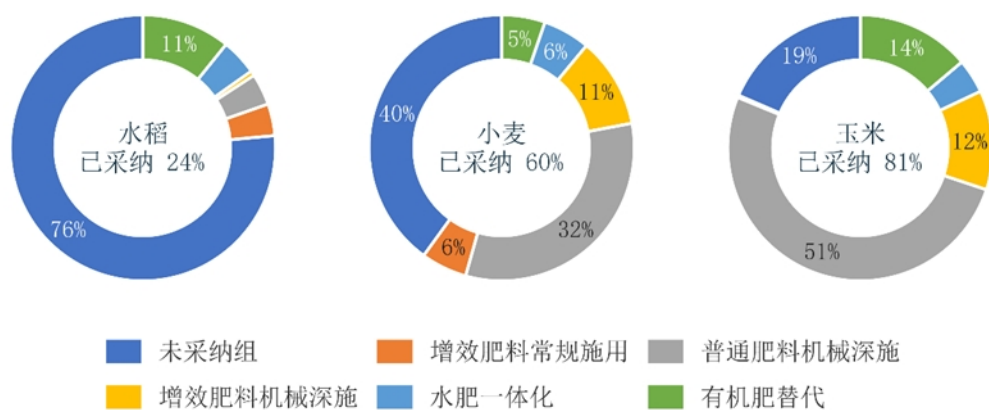


图 22 2024 年分作物氮肥管理技术采纳率情况

注：图中按统一分类规则划分为增效肥料常规施用、普通肥料机械深施、增效肥料机械深施、水肥一体化、有机肥替代和未采纳六组。各组占比采用省级作物播种面积校准权重计算。数据来源于 2024 年科学施肥调研数据。

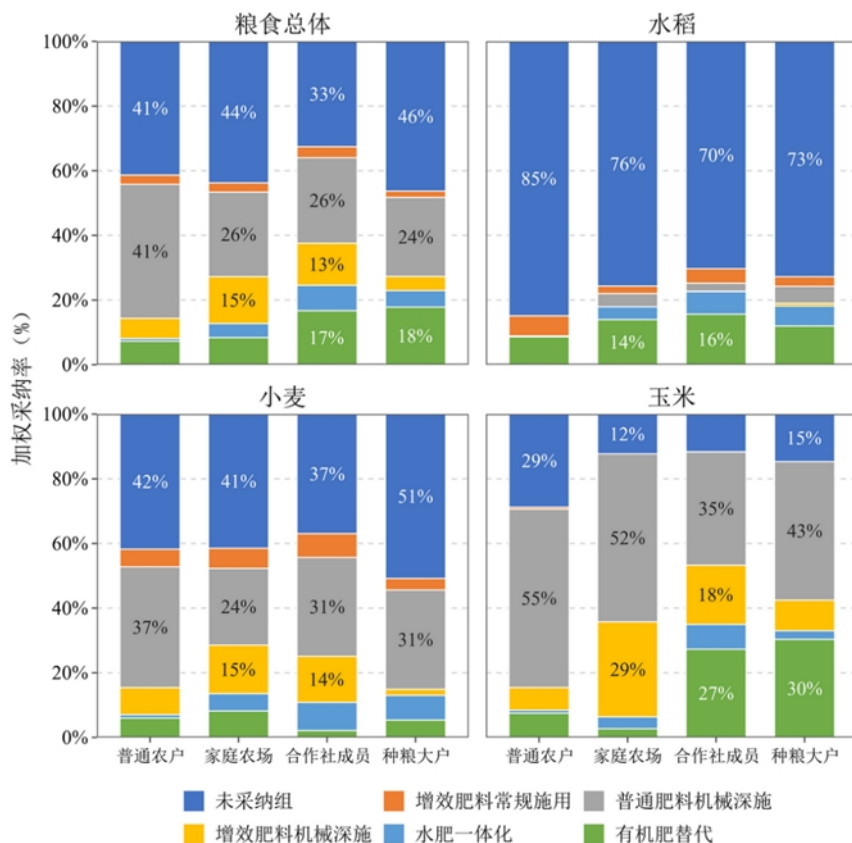


图 23 2024 年不同经营主体分作物氮肥管理技术加权采纳率

注：普通农户指不属于家庭农场、合作社成员或种粮大户的农户，家庭农场、合作社成员和种粮大户身份允许重叠。“粮食总体”为水稻、小麦和玉米的汇总结果。各类采纳占比均采用 2024 年省级作物播种面积校准权重计算。农户数据来源于 2024 年科学施肥调查数据。

5.4 主要氮肥管理技术采纳的生产服务条件与政策保障

预期经济回报、生产适配和服务可得性共同影响农户技术采纳。预期经济回报影响农户的采用动力，生产条件影响技术能否实施，产品、装备和服务的稳定供给则影响技术能否持续采用。各类因素及其作用见图 27。

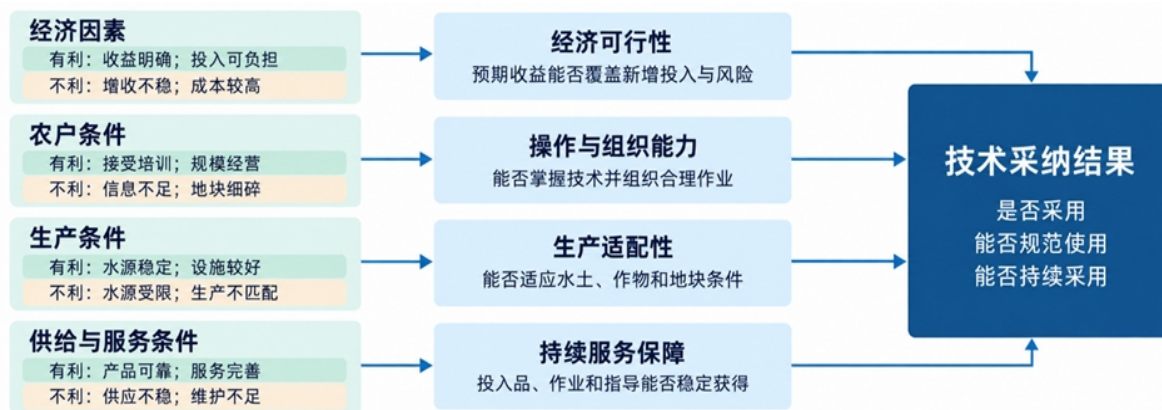


图 24 技术潜在收益转化为实际采纳的影响因素

规模化经营主体可依靠自身资源配置技术所需投入，小农户可通过社会化服务获得实施条件。规模化经营主体可以依靠自身经营面积分摊设备、信息和管理成本，通过连片作业提高机械运行效率；小农户则可以通过集中采购、统一购买作业服务、依托公共基础设施和参与生产托管，降低投入成本并获得所需服务（杜丽永等，2022；世界银行，2022）。结合不同技术对产品、设施和服务的具体要求，不同经营主体的主要挑战及支持重点见表 7。

表 7 小农户与规模化、组织化主体采用四类氮肥管理技术的挑战及支持重点

项目	增效肥料	机械深施	水肥一体化	有机肥替代
技术实施特点	- 可替换普通肥料 - 对生产方式改变较小	- 需协调机具、地块和农时 - 地块集中更便于作业	- 依赖稳定水源、设施和持续运维 - 高价值作物更易覆盖设施成本	- 施用量较大 - 依赖物料来源和收储运施体系 - 运输半径影响成本
小农户主要挑战	- 产品类型多，鉴别和用量判断难度较大（崔德杰、杜志勇，2017） - 肥料支出增加，生产成本负担加重（周曙东、王颖，2023）	- 地块细碎、需求分散，订单组织成本高 - 单户购机不经济 - 农时紧迫、作业窗口受限，服务供给难度大（刘家成等，2022）	- 前期投入较高，单户建成完整系统困难 - 设施适配和故障处理要求高（薛彩霞等，2018）	- 使用成本高，适宜施用技术不足（Zhang et al., 2021） - 物料质量和供应保障不足（Zhang et al., 2021） - 分散需求增加运输和机械施用难度
规模化主体主要挑战	- 采购量大，质量或配方不适配的损失较高（崔德杰、杜志勇，2017） - 持续生产依赖稳定供货和连续技术服务	- 更倾向自购机械，投资和折旧成本较高（Qiu and Luo, 2021） - 调度、维修、机手和作业质量管理要求较高	- 设施需适配集约化管理方式（刘欢、朱美玲，2018） - 设施覆盖面广，水源能源保障和专业运行维护难度较大	- 物料需求量大，持续供货和养分稳定性要求高 - 运输半径、储存和机械施用能力受限
小农户支持重点	- 提供产品识别、用量和田间效果指导 - 加强零售端质量监管，避免假冒伪劣产品	- 发展专业化机械外包服务，提高作业服务专业化和组织化程度（Zhang et al., 2017；刘艳等，2022） - 统筹需求、集中排程，推广按亩付费	- 支持建设水源、管网等基础设施 - 统筹设施补贴、技术指导与故障处理（薛彩霞等，2018） - 加强节水宣传和用水者协会参与（刘红梅等，2008）	- 依托合作组织促进采用（Ma et al., 2018；姜立康、赵伟，2025） - 提供可靠的肥料质量信息、就近运输和机械施用服务（Zhang et al., 2021）
规模化主体支持重点	- 加强推广初期的产品示范和信息供给（Ma and Yang, 2023） - 保障供货，提供可核查的质量信息和施用参数	- 完善跨地块作业调度与机手培训 - 健全维修、备件供应和作业质量验收服务	- 衔接设施投资、水源能源与长期管理方案 - 发展水肥一体化运行维护服务	- 建立长期供货协议和物料质量标准 - 完善养分检测、供需信息和专业运输施用体系

针对前文讨论的技术采纳挑战，地方政策已通过作业补贴、技术应用奖补和物料服务提供支持。清远清新区和泰州姜堰区补贴侧深施肥作业，上海青浦区对水肥一体化应用给予绩效奖补，江西定南县支持有机肥供应、运输和施用。部分项目还配套技术指导、服务主体培育和质量监管，将支持延伸到技术实施过程（定南县绿色种养循环农业试点项目专班办公室，2025）。具体支持方式、补贴标准及对应的采纳挑战见表 8。

政策支持应加强短期补贴与长期运行保障的衔接，并完善效果考核。对依赖设施和专业服务的技术，应明确运行维护、设备更新和技术指导的资金来源与责任主体；对需求分散的小农户，应加强服务需求组织和作业衔接；对规模化、组织化主体，应保障持续供给和作业质量。补贴与奖补考核还应结合规范实施、连续采用及减氮增效结果，促进技术和服务持续运行。

表 8 地方支持方式及其对应的技术采纳约束

支持方式	对应技术	地方实践与标准	对应的采纳挑战
配套作业支持	增效肥料与机械深施组合	广东清远清新区：缓释肥侧深施机械作业 29 元/亩	机械作业成本
按亩作业补贴	机械深施	江苏泰州姜堰区：水稻机插同步侧深施肥 50 元/亩	作业费用和机具服务可得性
技术应用绩效奖补	水肥一体化	上海青浦区：符合条件的蔬菜水肥一体化应用最高奖补 240 元/亩	技术应用成本和规范实施
物料服务和实施监管	有机肥替代	江西定南县：沼液肥运输施用 78.8 元/亩，商品有机肥 89 元/亩，腐熟堆沤肥 102 元/亩	物料组织，服务能力和实施质量

注：地方实践分别来源于广东省清远市清新区农业农村局（2025）、江苏省泰州市姜堰区农业农村局（2024）、上海市青浦区农业农村委员会（2026）和江西省定南县人民政府办公室（2025）。



第六章：多目标协同下的氮肥系统化管理

六、多目标协同下的氮肥系统化管理

针对当前氮肥投入过量、适量与不足并存，以及技术效果和推广条件差异较大的问题，下一阶段应以氮素资源高效配置和全过程管理为主线，统筹稳产、增效、减氮和减排目标。根据区域差异、作物需求和生产条件，优化氮肥投入数量、时期、位置和形态，推动技术创新、精准推广、专业服务和政策激励协同发力。在保障粮食安全和农户收益的基础上，提高氮肥利用效率，减少氮素损失和农业温室气体排放。

氮肥系统化管理应形成“科学评价—问题识别—目标设定—分类施策—效果核验—动态调整”的全过程管理机制。首先，科学评价不同区域、作物和经营主体的氮投入、氮肥利用效率、氮损失、作物单产和农户收益，上识别氮肥管理的主要问题及其成因。在此基础上，确定合理施氮范围以及稳产、增效、减氮和减排目标。对施氮过量、投入合理和投入不足的不同情形，因地制宜，分别采取精准减量、提效增产和合理保障措施，并配置相应的肥料产品、施肥技术和专业服务。技术和政策实施后，通过田间调查、作业记录和持续监测核验实际效果，再根据核验结果调整施氮标准、技术目录和支持政策，推动氮肥管理由普遍减量向精准控量、提质增效和环境减排协同转变。治理闭环与分类施策框架见图 27。



图 25 多目标协同下的氮肥系统化管理框架

中国氮肥绿色转型的核心是氮素资源的高效配置和全过程管理。未来应以“稳产、增效、减排”协同为目标，基于区域差异、作物需求和生产条件，优化氮肥投入数量、时期、位置和形态，通过技术创新、精准推广、经济激励和政策协同，推动氮肥管理由“减少投入”向“优化配置、提高效率、降低损失”转变，在保障粮食安全和农户收益的同时，实现农业绿色低碳发展。

一是建立多目标协同、分类分区的氮管理评价体系，推动氮肥管理目标由“减投入”向“提效率、降损失”转变。氮肥管理不应简单以投入减少作为评价标准，而应综合考虑氮投入水平、作物产量、农户收益、氮肥利用效率和环境损失，建立分区域、分作物的氮管理评价体系。对施氮过量、投入合理和投入不足的不同情形，分别实行精准减量、提效增产和合理保障的分类治理，推动氮肥管理由普遍减量向精准调控转变。粮食作物以稳产增产基础上的控氮提效为主，高投入经济与园艺作物继续推进合理减量，避免普遍减量和“一刀切”管理。

二是构建区域化“三新”融合模式，提升氮肥管理技术配置效率。氮肥绿色转型需要从技术简单叠加转向基于区域条件的组合优化。以合理施氮为基础，协同配置施肥新技术、肥料新产品和施用新机具，针对不同区域主要限制因素优化施肥数量、时期、位置和养分形态。针对不同技术在适用条件和实施效果上的差异，应开展区域多点和第三方评价，并据此建立县域“作物—模式—参数—服务”匹配清单。机械化粮食产区重点推广定位深施、种肥同播等技术；灌溉条件较好地区发展水肥一体化和分次施肥；氮损失风险较高地区配置缓控释肥等高效肥料；有机资源丰富地区推进有机无机配施。

三是完善技术推广和专业服务体系，推动先进技术从“可应用”向“可持续应用”转变。应推动农资企业、互联网平台、农业技术推广机构和社会化服务组织共同参与养分管理服务。线上农资信息除介绍产品价格和质量外，还应明确适用作物、适用区域、施用量、施用时期、施用方式和注意事项，并提供相应的技术咨询。鼓励互联网平台与农技推广机构和社会化服务组织合作，形成“诊断—处方—供肥—作业—记录—评价”的服务链，提高技术实施质量和应用稳定性。对于机械深施、水肥一体化和精准施肥等依赖设备和服务的技术，应重点发展专业化、规模化服务模式，降低农户应用门槛。

四是将全过程成本收益评价贯穿技术筛选和推广全过程，降低农户技术采纳成本和应用风险。针对不同“作物—技术”组合开展全过程经济评价，综合核算节肥、增产、省工、减排等收益，以及肥料价差、设备投入、维护成本和服务费用等技术成本。优先推广经济收益明确、环境效益稳定的技术组合。对短期收益不足但长期或环境效益明显的技术，通过基础设施共建、社会化服务、风险保障和绩效补偿等方式降低采用成本，提高农户持续采用意愿。同时，将成本收益评价贯穿技术筛选和推广全过程，综合考虑节肥、节水、省工、增产、减排效益以及设备投入、运维和服务成本，优先推广经济可行、环境效益显著的技术组合。

五是优化政策支持体系，推动投入支持与环境绩效激励相结合。氮肥治理需要由单一补贴模式转向约束、激励、服务和保障相结合的政策体系。财政支持应从单纯补贴肥料、设备和作业环节，逐步转向支持合理施氮、稳产增收、作业质量和环境绩效。面源污染治理可按减排绩效实施生态补偿，农业 N_2O 减排可探索结果付费和市场化交易。补偿和奖励应以监测核证结果为依据，使农户直接分享环境改善收益。对高投入、高损失地区强化减量激励，对合理投入地区支持效率提升，对投入不足地区保障基本养分供应。对于不同类型主体和区域，应实施差异化政策：对高投入、高损失地区强化减量激励；对合理投入地区支持效率提升；对投入不足地区保障基本养分供应。通过政策组合提高资源配置效率，避免仅单纯追求氮肥施用量减少。

六是加强经营主体分类支持，提升技术推广精准性。不同经营主体面临的采纳约束不同，应根据规模、生产方式和服务条件实施差异化支持。小农户面临信息、资金和服务约束，应通过统一诊断、统配统施、机具共享和托管服务降低技术复杂性和采用风险；规模经营主体则可重点支持变量施肥、机械深施、水肥一体化和数字化管理，提高投入产出效率。同时，政策评价不应简单依据经营规模，而应更多关注实际施氮水平、作业质量、产量收益和氮肥利用效率。

七是建立动态监测与反馈机制，形成系统氮管理治理闭环。氮肥绿色转型需要建立“科学评价—问题识别—目标设定—分类施策—效果评价—动态调整”的长期治理机制。通过持续监测氮投入、产量、收益、利用效率和环境损失变化，评价不同技术和政策措施的实际效果。根据区域条件、技术进展和实践反馈，动态调整施氮标准、技术目录和支持政策，推动氮肥管理由阶段性治理转向持续优化，实现粮食安全、经济收益和环境保护多目标协同。

八是在推进国内氮管理转型的同时，应加强与国际养分管理、氮肥利用效率和农业 N_2O 监测核证体系的衔接。系统总结中国在小农户生产条件下开展测土配方施肥、“三新”集成和社会化服务的实践，为其他发展中国家提高氮肥利用效率、保障粮食安全和减少农业排放提供参考。

参考文献

1. 崔德杰, 杜志勇, 2017. 新型肥料及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社.
2. 定南县绿色种养循环农业试点项目专班办公室, 2025. 关于 2025 年定南县绿色种养循环农业试点项目商品有机肥、腐熟堆沤肥、沼液肥供应企业及第三方粪肥还田服务主体的公示[EB/OL]. (2025-11-11) [2026-09-01]. <https://www.dingnan.gov.cn/dnxzf/gsgx/202511/3355dfbcfd93b56b3b9a52ec60.shtml>
3. 定南县人民政府办公室, 2025. 关于印发 2025 年定南县绿色种养循环农业试点项目实施方案的通知 [EB/OL]. (2025) [2026-09-01]. <https://www.dingnan.gov.cn/dnxxxgk/lzccwjk/202512/e0561e22815f49128d95cdb99a5bb320.shtml>
4. 杜丽永, 孟祥海, 沈贵银, 2022. 规模经营是否有利于农户化肥减量施用? [J]. 农业现代化研究, 43 (3): 475-483.
5. 姜立康, 赵伟, 2025. 合作社加入对农户绿色生产意愿行为转化的诱导路径研究——以有机肥替代化肥为例[J]. 中国农业资源与区划, 46 (2): 44-55.
6. 刘红梅, 王克强, 黄智俊, 2008. 影响中国农户采用节水灌溉技术行为的因素分析[J]. 中国农村经济, (04): 44-54.
7. 刘家成, 钟甫宁, 徐志刚, 2022. 生产性服务与农业创新: 农时约束及环节异质性[J]. 科研管理, 43 (12): 135-143.
8. 农业部, 2015. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案 [EB/OL]. https://zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318_6309945.htm
9. 农业农村部, 2021. 化肥农药使用量零增长行动取得明显成效 [EB/OL]. https://jhs.moa.gov.cn/ghgl/202107/t20210716_6372084.htm
10. 清远市清新区农业农村局, 2025. 清远市清新区农业农村局 2025 年科学施肥增效项目公告 [EB/OL]. (2025-07-17) [2026-09-01]. https://www.qingxin.gov.cn/bmxz/bm/qxqnyncj/qt/zgg/content/post_2038118.html
11. 上海市青浦区农业农村委员会, 2026. 关于印发《2026 年青浦区蔬菜绿色标准化生产工作方案》的通知 [EB/OL]. (2026-06-02) [2026-09-01]. <https://www.shqp.gov.cn/agri/nwzwgk/ml/jh/2026062/1373111.html>
12. 泰州市姜堰区农业农村局, 2024. 区农业农村局关于 2024 年姜堰区水稻机插同步侧深施肥示范方补贴发放的公示 [EB/OL]. (2024-09-11) [2026-09-01]. https://www.jiangyan.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/snbt/art/2024/art_1a6bdb00677c4193ae012c9db4875587.html
13. 周曙东, 王颖, 2023. 农户环境友好型新型肥料采纳决策、成本收益及作用机制分析[J]. 农业技术经济, (9): 4-22. <https://doi.org/10.13246/j.cnki.jae.20230914.001>
14. Chen, B., Zhang, X., & Gu, B. 2025. Managing nitrogen to achieve sustainable food-energy-water nexus in China. *Nature Communications*, 16, 4804. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60098-5>
15. Chen, X. P., et al. 2014. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 514, 486-489. <https://doi.org/10.1038/nature13609>
16. Chivenge, P., Saito, K., Bunquin, M. A., Sharma, S., & Dobermann, A. 2021. Co-benefits of nutrient management tailored to smallholder agriculture. *Global Food Security*, 30, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100570>
17. Hekkert, M. P., Janssen, M. J., Wesseling, J. H., & Negro, S. O. 2020. Mission-oriented innovation systems. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 34, 76-79. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.11.011>
18. Herrmann, M. N., Wang, Y., Hartung, J., et al. 2022. A Global Network Meta-Analysis of the Promotion of Crop Growth, Yield, and Quality by Bioeffectors. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.816438>
19. Huang, J., Huang, Z., Jia, X., Hu, R., & Xiang, C. 2015. Long-term reduction of nitrogen fertilizer use through knowledge training in rice production in China. *Agricultural Systems*, 135, 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.01.004>
20. Hui, X., Luo, L., Chen, Y., Palta, J. A., & Wang, Z. 2025. Zinc agronomic biofortification in wheat and its drivers: A global meta-analysis. *Nature Communications*, 16(1), 3913. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58397-y>
21. Jiang, F., Wen, Z., Zheng, Y., et al. 2026. Policy synergies outweigh trade-offs for NH₃ and N₂O co-control in China. *Nature Food*, 7, 549-564. <https://doi.org/10.1038/s43016-026-01368-3>
22. Li, H., Mei, X., Wang, J., et al. 2021. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China. *Agricultural Water Management*, 244, 106534. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106534>
23. Li, J., Van Gerrewey, T., & Geelen, D. 2022. A Meta-Analysis of Biostimulant Yield Effectiveness in Field Trials. *Frontiers in Plant Science*, 13, 836702. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.836702>
24. Li, T. Y., et al. 2018. Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem. *Global Change Biology*, 24, e511-e521. <https://doi.org/10.1111/gcb.13918>
25. Li, Z., Hong, S., Sun, Z., et al. 2025. Turning point of direct N₂O emissions in China's croplands dominated by reduced fertilizer usage since 2015. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 388, 109655. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109655>
26. Liu, P., Lin, Y., Liu, X., et al. 2025. The response of crop yield, water and nitrogen use efficiency to organic fertilizer addition: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 168, 127628. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127628>
27. Liu, Y., et al. 2024. Localized nitrogen management strategies can halve fertilizer use in Chinese staple

- crop production. *Nature Food*, 5, 825–835. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01057-z>
28. Norse, D., & Ju, X. 2015. Environmental costs of China's food security. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 209, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.014>
 29. Sartas, M., Schut, M., Proietti, C., Thiele, G., & Leeuwis, C. 2020. Scaling readiness: Science and practice of an approach to enhance impact of research for development. *Agricultural Systems*, 183, 102874. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102874>
 30. Tian, H. Q., et al. 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586, 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
 31. Wang, W. Y., et al. 2024. Global meta-analysis of individual and combined nitrogen inhibitors: Enhancing plant productivity and reducing environmental losses. *Global Change Biology*, 30, e70007. <https://doi.org/10.1111/gcb.70007>
 32. Wang, X., Liu, M., Ciampitti, I. A., et al. 2024. Benefits and trade-offs of replacing inorganic fertilizer by organic substrate in crop production: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 925, 171781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171781>
 33. World Bank. 2022. *The Greening of China's Agriculture: A Synthesis [R]*. Washington, DC: World Bank.
 34. Wu, P., Huang, H., Zhang, N., et al. 2026. Global meta-analysis and machine learning show that deep fertilization produces more grain with lower environmental costs, especially in lower latitude areas. *Field Crops Research*, 337, 110267. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110267>
 35. Wu, P., Wu, Q., Huang, H., et al. 2024. Global meta-analysis and three-year field experiment shows that deep placement of fertilizer can enhance crop productivity and decrease gaseous nitrogen losses. *Field Crops Research*, 307, 109263. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109263>
 36. Wu, W., Wang, Y., Xu, H., Liu, M., & Xue, C. 2025. Enhancing Wheat Yield and Quality Through Late-Season Foliar Nitrogen Application: A Global Meta-Analysis. *Agronomy*, 15(5), 1058. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051058>
 37. Yin, Y., et al. 2025. Co-benefits for cropland yield, nitrogen emissions, and climate impact through multi-objective optimization agricultural manure solutions. *Nature Communications*, 16, 6415. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61885-w>
 38. You, L., et al. 2024. Optimized agricultural management reduces global cropland nitrogen losses to air and water. *Nature Food*, 5, 995–1004. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01076-w>
 39. Zhang, W. F., et al. 2013. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 8375–8380. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210447110>
 40. Zhang, X., Wang, Z., Song, L., et al. 2026. Global meta-analysis reveals soil, climate, and management drivers of crop yield and nitrogen use efficiency under enhanced-efficiency fertilizers. *Frontiers in Agronomy*, 8. <https://doi.org/10.3389/fagro.2026.1819891>
 41. Zhang, Y., Ren, W., Zhu, K., et al. 2024. Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake while mitigating environmental risks: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 306, 109221. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109221>
 42. Zhang, Z., Dong, J., Liu, X., et al. 2026. Meta-analysis of slow/controlled-release fertilizers on yield, greenhouse gas emissions, and soil organic carbon in major cereal crops. *Field Crops Research*, 338, 110316. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110316>
 43. Zheng, J., Zhou, M., Zhu, B., et al. 2023. Drip fertigation sustains crop productivity while mitigating reactive nitrogen losses in Chinese agricultural systems: Evidence from a meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 886, 163804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163804>
 44. Zhou, C.-X., Zhang, C.-C., Zhao, Q.-Y., et al. 2024. Iron biofortification and yield of wheat grain in response to Fe fertilization and its driving variables: A meta-analysis. *Global Food Security*, 40, 100737. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100737>
 45. Zhu, Y., Zhang, H., Li, R., Zhu, W., & Kang, Y. 2023. Nitrogen fertigation affects crop yield, nitrogen loss and gaseous emissions: A meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 127, 359–373. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10318-5>



美国环保协会北京代表处

中国北京市东城区安定门东大街 28 号 C501
室, 100007

+86-10-64097088

www.edf.org | www.cet.net.cn



国家农业绿色发展研究院
养分资源高效利用全国重点实验室
农业农村部农业绿色低碳重点实验室
中国农业大学资源与环境学院

中国北京市海淀区圆明园西路 2 号中
国农业大学西校区, 100193
wfzhang@cau.edu.cn



农业食物系统低碳转型
国际论坛 INTERNATIONAL FORUM OF
LOW-EMISSION AGRIFOOD SYSTEMS

全球食物经济与政策研究院
中国农业大学经济管理学院

中国北京市海淀区金码大厦 A 座 7 层
704 室, 100083
zhangyumei@cau.edu.cn