

[零碳录·焦点议题]

化肥减量增效与氧化亚氮减排： 观察与展望

/ 绿色创新发展研究院 / 2023年12月



报告作者

陈美安 绿色创新发展研究院 项目总监/高级分析师 邮箱: chenmeian@igdp.cn

致谢

感谢气候友好水稻项目刘尚文对本文内容的建议和审阅。

感谢 iGDP 同事胡敏、杨鹏和姚喆对报告的反馈, 以及包林洁对报告进行的设计排版。

免责声明

本报告内容和观点仅代表作者的个人理解和观点, 旨在加强相关领域的讨论交流, 不代表支持方、作者所属机构、调研专家学者的立场和观点。本报告内容采用数据和信息均来自公开的信息和渠道, 我们力求准确和完整, 但难免偶有疏漏, 敬请谅解并指正。

引用建议

陈美安. 2023. 零碳录焦点议题: 化肥减量增效与氧化亚氮减排: 观察与展望. 工作论文. 北京: 绿色创新发展研究院.

随着“双碳”目标的提出和各项行动的开展，我国也开始关注能源以外非二氧化碳温室气体的减排。例如我国向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）秘书处提交的《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》中提出研究实施非二氧化碳温室气体控排行动方案，并且逐步建立健全非二氧化碳温室气体排放统计核算体系、政策体系和管理体系。我国发布的《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中也提到要加强非二氧化碳温室气体管控。本文将聚焦仅次于二氧化碳和甲烷的第三大温室气体——氧化亚氮的排放，梳理和分析其排放现状和减排进展，并对减排挑战提出建议。

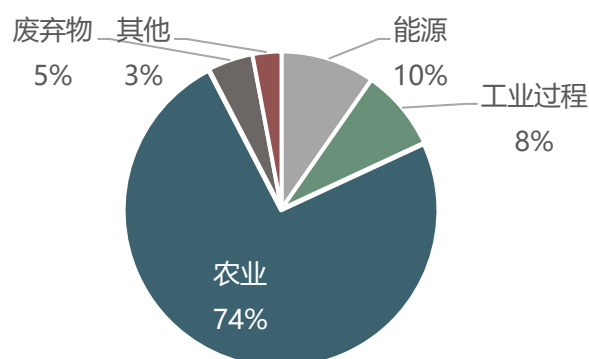
1. 全球氧化亚氮排放中农业排放占比最高

氧化亚氮 (N_2O) 是仅次于二氧化碳和甲烷的全球第三大温室气体。2019 年 N_2O 排放约为 31 亿吨 CO_2e , 占全球温室气体总排放的 6% 左右。 N_2O 同时也是具有较强的增温效应的温室气体, 其在 100 年内的增温潜势是二氧化碳的 300 倍左右。并且其在大气中存留的时间较长, 约为 120 年左右。

尽管全球 N_2O 排放既有来自土壤、海洋和大气的自然源排放, 但是由于大气和生物圈可以在一定时间对自然源排放进行调整, 因此这些排放并没有导致大气中 N_2O 的大量积累。但是人类活动导致的 N_2O 的排放已经让大气中的 N_2O 浓度比前工业时代上升了 20%¹。

全球 N_2O 排放按照具体行业划分, 农业部门排放占比最高, 达到 74%。其余的 23% 分别来自能源活动 (10%)、工业生产过程 (9%) 和废弃物管理 (5%)。

图 1: 全球 N_2O 分行业排放占比 (2019, %)



数据来源: ClimateWatch database

¹ Bouwman, L., Daniel, J. S., Davidson, E. A., de Klein, C., Holland, E., Ju, X., Kanter, D., Oenema, O., Ravishankara, A. R., & Skiba, U. M. (2013). Drawing down N_2O to protect climate and the ozone layer. A UNEP Synthesis Report. United Nations Environment Programme (UNEP).

2. 全球主要 N₂O 排放国中农用化肥施用均为最大排放源

在全球 N₂O 排放中,如图 2 所示,主要的排放国家和地区分别是中国、美国、印度和欧盟。在这四个主要排放国和地区中,均有超过一半的 N₂O 排放来自农业部门,其中,欧盟和印度 80% 的 N₂O 排放来自农业部门。

在我国 N₂O 排放分布中,来自农业生产占 62% 左右。如图 3 所示,在整个农业部门下, N₂O 的最大排放源来自化肥施用,占比为 44%。其次是畜禽粪污管理以及还田带来的排放,约占 32%。其他的排放来自农田废弃物处理以及农业用能的燃料不完全燃烧带来的少量排放。

图 2: 全球 N₂O 主要排放国家和地区 (2019, 百万吨 CO₂e)

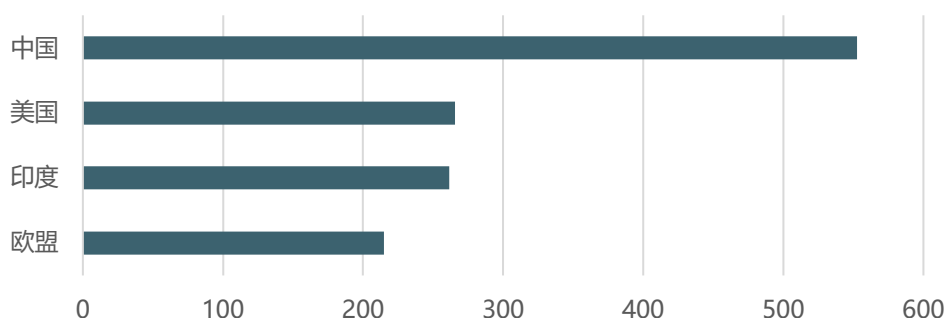
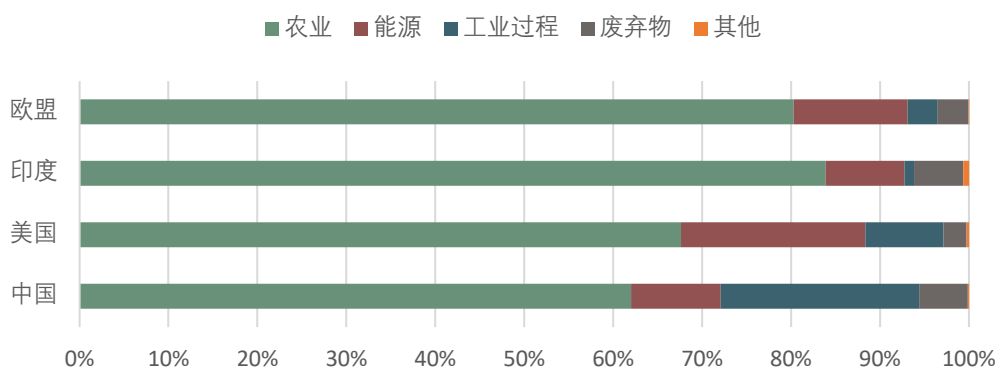
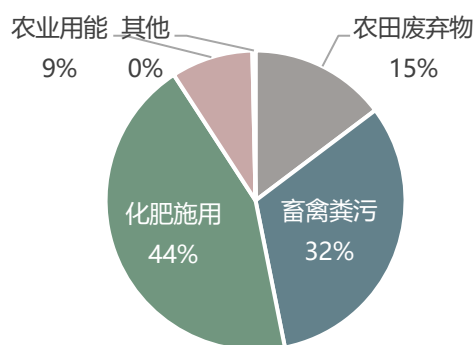


图 3: N₂O 主要排放国家和地区分部门排放占比 (2019)



数据来源: ClimateWatch database

图 4：中国农业生产 N₂O 排放分领域占比（2019，%）

数据来源：FAO

3. 我国推动化肥减量增效已有进展

化肥过量施用不仅增加 N₂O 排放，同时也带来了水污染和大气污染，并导致土壤酸化、板结和肥力下降。因此，我国采取了一系列行动来推动化肥减量增效。

首先，我国制定了化肥零增长行动目标和农田氧化亚氮达峰目标。 作为我国指导“三农”工作的纲领性文件——中央一号文件，从 2013-2017 年连续 9 年的“中央一号文件”都明确提到农业化肥的污染治理问题²。例如 2017 年“中央一号文件”提到“深入推进化肥农药零增长行动，开展有机肥替代化肥试点，促进农业节本增效”³。另外，我国在《“十三五”控制温室气体排放总体工作方案》中还提出了到 2020 年实现农田氧化亚氮排放达到峰值的目标。

其次，我国取消了针对化肥生产的用电用气和税收优惠政策。 2015 年在国家发改委的统一部署下，全国开始取消化肥生产用电的优惠价格。并在 2016 年 4 月 20 号以后，销售电价分类中也不再有关中小化肥优惠电价。结束了我国从 2003 年开始的化肥生产用电优惠政策。我国也在 2015 年取消了从 1994 年开始的化肥的增值税补贴政策⁴。

再次，我国持续推进测土配方和水肥一体化等优化化肥施用的方式。 为促进耕地养分平衡，提高化肥利用效率，我国从 2005 年开始测土配方施肥技术——即基于对土壤的分析化验的结果来对土

² 郑利杰, 张笑干, 王波. 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探[J]. 世界环境, 2018, 4.

³ http://www.moa.gov.cn/ztl/yhwj/2017/zywj/201702/t20170206_5468587.htm

⁴ 郑利杰, 张笑干, 王波. 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探[J]. 世界环境, 2018, 4.

壤进行合适施肥。并制定了测土配方技术推广覆盖率目标 2019 年，全国测土配方施肥技术覆盖率达到 89.3%⁵。同时我国也在华北、西北等缺水地区推广水肥一体化滴灌技术，即采用滴灌方式将养分均匀送到作物根层，减少土壤中利于 N₂O 排放的硝化反硝化过程。并在 2016 年发布《推进水肥一体化实施方案（2016—2020 年）》。同时也制定了数字农业农村发展规划，建设智能控制技术与装备来实现水肥药精准施用。

此外，我国也对有机肥替代和新型肥料研发推广提供政策支持。例如我国从 2017 年以来在果菜茶种植优势突出、有机肥资源有保障、有机肥施用技术模式成熟、产业有一定基础的地方选择了 175 个重点县（市、区）开展的有机肥替代化肥试点。北京、江苏、上海和浙江等省市也出台了农民施用商品有机肥补贴政策，补贴金额在 150—480 元/吨⁶。同时我国也对缓释肥和水溶肥等新型肥料提供铁路优惠运价。

表 1：我国促进农用化肥减量增效的主要政策

时间	政策	主要内容
2008	《关于有机肥产品免征增值税的通知》	对纳税人生产销售和批发、零售有机肥料、有机-无机复混肥料和生物有机肥免征增值税。
2015	《国家发展改革委关于降低燃煤发电上网电价和工商业用电价格的通知》	取消了化肥生产用电的优惠价格。
2015	《到 2020 年化肥使用量增长行动方案》	提出了力争到 2020 年，主要农作物化肥使用量零增长目标。
2015	《关于对化肥恢复征收增值税政策的通知》	化肥增值税优惠政策停止执行。对纳税人销售和进口的化肥，统一按 13% 税率征收增值税。
2015	《全国农业可持续发展规划（2015-2030）》	到 2020 年全国测土配方施肥技术推广覆盖率达到 90% 以上，化肥利用率提高到 40%，努力实现化肥施用量零增长。
2016	《关于推进化肥用气价格市场化改革的通知》	取消了化肥生产用气的优惠政策，全面放开化肥用气价格。
2016	《“十三五”控制温室气体排放总体工作方案》	到 2020 年实现农田氧化亚氮排放达到峰值的目标。

⁵ https://www.gov.cn/xinwen/2019-12/19/content_5462243.htm

⁶ http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201909/t20190917_6328090.htm

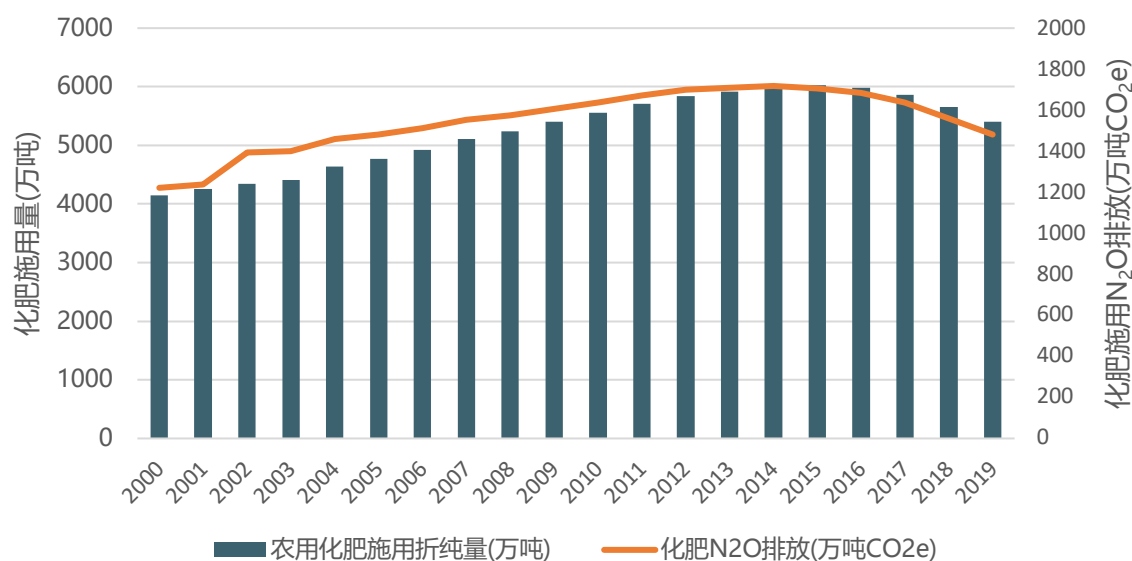
2016	《推进水肥一体化实施方案（2016—2020 年）》	到 2020 年水肥一体化技术推广面积达到 1.5 亿亩，新增 8000 万亩。增产粮食 450 亿斤，节水 150 亿方，节肥 30 万吨，增效 500 亿元。
2017	《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》	选择 100 个果菜茶重点县（市、区）开展有机肥替代化肥示范，构建果菜茶有机肥替代化肥长效机制。
2019	《数字农业农村发展规划（2019—2025 年）》	建设数字田园，推动智能感知、智能分析、智能控制技术与装备在大田种植和设施园艺上的集成应用，建设环境控制、水肥药精准施用、精准种植、农机智能作业与调度监控、智能分等分级决策系统，发展智能“车间农业”，推进种植业生产经营智能管理。
2021	《“十四五”全国农业绿色发展规划》	集成推广科学施肥技术，示范推广缓释肥、水溶肥等新型肥料，改进施肥方式。引导地方加大投入，在更大范围推进有机肥替代化肥。
2021	《国家发展改革委关于缓释肥料等执行农用化肥铁路优惠运价政策的通知》	增加缓释肥料、水溶肥料等 8 个新型肥料品种享受铁路优惠运价。
2022	《农业农村减排固碳实施方案》	以粮食主产区、果菜茶优势产区、农业绿色发展先行区等为重点，推进氮肥减量增效。研发推广作物吸收、利用率高的新型肥料产品，推广水肥一体化等高效施肥技术，提高肥料利用率。推进有机肥与化肥结合使用，增加有机肥投入，替代部分化肥。
2022	《建设国家农业绿色发展先行区 促进农业现代化示范区全面绿色转型实施方案》	推进测土配方施肥，示范推广缓释肥、水溶肥等新型肥料。打造绿色种养循环农业模式，推动畜禽粪污由“治”向“用”转变。

信息来源：零碳录

随着化肥减量增效政策的密集出台，我国化肥施用量自 2016 年开始缓慢下降。也是我国从 1974 年以来首次实现化肥的负增长⁷。并在 2017 年提前三年实现化肥零增长目标⁸。如图 5 所示，我国化肥施用量 2016 年为 5984 万吨，比 2015 年减少 38 万吨，并在 2019 年下降到 5403 万吨。与此同时，来自化肥施用的 N₂O 排放也在同步下降中。

⁷ https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/28/content_5251080.htm

⁸ http://www.xinhuanet.com/politics/2018-04/25/c_1122739925.htm

图 5：2000-2019 年我国农用化肥施用量（万吨）与化肥施用 N₂O 排放量（万吨 CO₂e）

数据来源：农用化肥施用量数据来自国家统计局年鉴，化肥 N₂O 排放数据来自 FAO



案例：科技助力测土配方和精准施肥

中化化肥公司，在农业部支持下，从 2014 年以来，在全国推出了以智能配肥机为主的智能配肥服务站，通过智能配肥机来进行精准的测土配肥⁹。种植大户和散户均可以通过与互联网智能配肥终端对应的应用软件。输入种植信息并提供测土图样，配肥机可以进行快速测土，并且将测土结果传送到云端。云服务器根据测土结果计算出种植方案、所需的肥料配方和价格，最终生成配肥订单发送到农户的智能手机上¹⁰。经过智能配肥的化肥由于直接从工厂到农民手中，节省了流通环节的加价。测算显示，智能配肥系统可直接减少施肥量和成本投入 10%~30%，同时作物增产 5%以上，服务农民增收 10%以上¹¹。

⁹ <http://www.sinofert.com/s/4368-12223-56364.html>

¹⁰ <https://www.yicai.com/news/5003423.html>

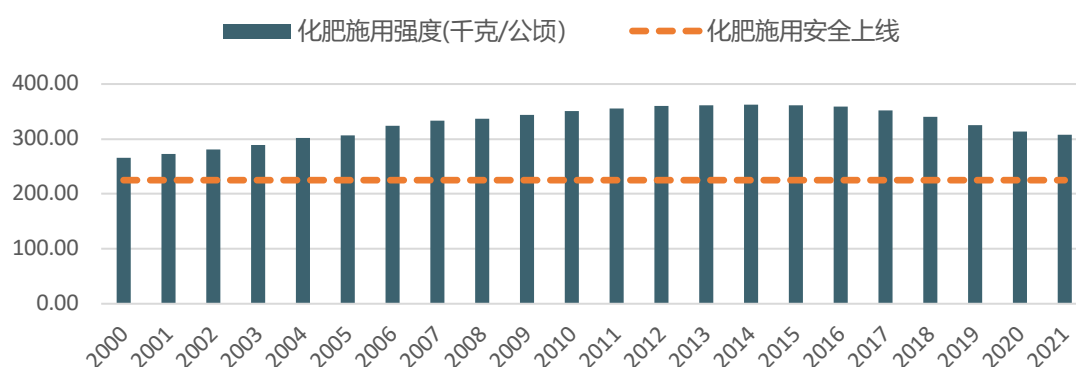
¹¹ <http://www.sinochem.com.cn/s/1375-5662-19811.html>

另一个智能施肥的例子来自极飞科技智慧农业设备在江苏盐城步凤镇的高标准农田无人种植示范农场¹²。农场的 5000 亩农田由三人的管理团队运行。在播种前，使用遥感无人机对农田进行平地测绘，获得高清地图。基于地图在系统中建立条田档案对地块进行精细化管理。在水稻生育期的时候，遥感无人机可以结合 AI 模型对水稻的长势进行分析、识别基本苗，并对病虫害进行监测。另外在稻田需要打药施肥的时候，由无人机代替人工进行精准施肥和农药喷洒¹³。在智慧农业的管理下，比传统生产模式相比，农场单位面积的农作物使用的农药化肥减少了 10%，农作物的产量增加了 10%左右¹⁴。

4. 化肥减量增效仍面临挑战

尽管农用化肥施用量呈下降趋势，但是化肥施用强度仍有调整空间。如下图所示，2021 年，我国化肥施用强度 307 千克/公顷左右，仍然远超国际公认的化肥施用的安全上限 225 千克/公顷。另外，我国从 2005 年开始推广测土配方施肥技术，但是技术推广面积与实际施肥面积仍存有差距¹⁵。

图 6：我国化肥施用强度（千克/公顷，2000–2021）



数据来源：国家统计年鉴

¹² https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_19944206

¹³ 同上

¹⁴ 极飞 2022 年企业社会责任报告

¹⁵ 郑利杰, 张笑干, 王波. 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探[J]. 世界环境, 2018, 4.

有机肥推广面临成本高、效益低以及重金属污染风险等挑战。从有机肥的需求端来看，有机肥施用成本远高于化肥，且对于增产的短期效益并不明显。来自浙江省有机肥与化肥投入的测算显示尽管经过补贴后有机肥每吨的价格低于化肥，但是由于每亩有机肥的施用量远高于化肥施用量，因此农户采用有机肥每亩的投入成本是化肥投入成本的 4 倍左右（表 2）。另外，我国有机肥施用仍然以人工施肥为主，人工费又在一定程度增加已有成本¹⁶。且有机肥补贴对象一般以种植大户为主¹⁷。有机肥施用的另一挑战是肥效慢，其在土壤中分解、被植物吸收利用的过程较慢，因此不能很快满足农作物高产高效需要¹⁸。另一方面，从有机肥生产端来看，有机肥生产技术仍较薄弱，缺乏检测设备与手段，因此不合格有机肥产品时有出现，例如有机肥的重金属超标的问题¹⁹。在有机肥的主要原料畜禽粪污中，如果残留的抗生素和重金属没有在后续工艺中被有效的去除，在使用过程中将会造成土壤污染。此外，由于部分重金属的限量标准不够严格，有机肥的长期大量施用容易导致土壤中的重金属积累，在被植物吸收利用后进入食物链，带来食品安全的问题²⁰。

表 2：有机肥与化肥投入成本对比

	有机肥	化肥
市场价格(元/吨)	448（补贴后）	650
单位施用量(吨/亩)	1.5	0.25
单位投入成本(元/亩)	672	162.5

数据来源：郑利杰, 王波. 我国商品有机肥发展瓶颈及策略研究[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(3): 38-41.

包括缓控释肥料、稳定性肥料在内的新型肥料推广应用仍受制于成本因素，作用机制也有待明确。

控释肥制备成本较高，生产技术门槛高，价格通常为普通肥料的 3-8 倍。主要用于园林、花卉等高经济价值作物，很难用于粮食等大田作物²¹。而通过一定工艺加入脲酶抑制剂和硝化抑制剂使得肥效得

¹⁶ 杜为研, 唐杉, 汪洪. 破解有机肥推广难题, 需环环相扣 “对症下药” [J]. 中国农资, 2021.

¹⁷ 郑利杰, 张笑干, 王波. 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探[J]. 世界环境, 2018, 4.

¹⁸ http://www.ce.cn/cysc/sp/info/202010/13/t20201013_35881440.shtml

¹⁹ 杜为研, 唐杉, 汪洪. 破解有机肥推广难题, 需环环相扣 “对症下药” [J]. 中国农资, 2021.

²⁰ 谢文凤, 吴彤, 石岳骄, 朱毅. 国内外有机肥标准对比及风险评价[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2020, 28(12): 1958-1968.

²¹ 农民日报, 2022, 发展缓控释肥是实现化肥减量增效的重要方向

到延长的稳定性肥料，其抑制剂作用效果受多种环境因素影响，持效时间不稳定，且肥料价格也偏高²²。

以小农经济为主的农业生产方式也对智能精准施肥的推广带来挑战。与发达国家的农业生产方式相比，中国农业生产仍以小农为主。中国农田经营规模在 2 公顷以下的接近 70%，而世界多数地区的农田经营规模在 5 公顷以上²³。此外，基于 2017 年统计数据的估算显示，中国目前有 2.2 亿农户，户均经营规模只有 0.5 公顷，加上流转的土地，户均也只有 0.7 公顷²⁴。由于农田规模小，出于成本收益的考虑，农户对于精准施肥技术的利用和管理的积极性不高²⁵。此外，农村务农人员中年轻人口减少、老龄化趋势严重，以及受教育程度普遍偏低等现状也不利用新的农业生产技术和理念的吸收和普及²⁶。

5. 政策建议

化肥作为农业生产的重要投入品之一，在农作物生产和产量增收上都发挥着重要作用。但是长期化肥的过量施用也让其成为我国 N₂O 最主要的排放源。因此 N₂O 减排的关键是推动化肥的减量增效。以下是基于上述讨论提出的建议：

持续推进测土配方，并且为农户提供有效的培训和服务。已有的实践显示针对农户的技术培训和管理项目可以提供更好的减排效果。例如从 2005-2015 年间，在中国开展的一项有 2000 多万农户参与的提高农业管理和技术培训中，制定针对当地情况的农地改善计划，不仅减少化肥使用和提高产量，同时减少温室气体排放²⁷。

²² 李思平, 刘蕊, 刘家欢等. 稳定性肥料产业发展创新及展望[J]. 现代化工, 2022, 42(11): 1-8.

²³ Wu, Y., Xi, X., Tang, X., Luo, D., Gu, B., Lam, S. K., Vitousek, P. M., & Chen, D. (2018). Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(27), 7010–7015.

²⁴ 杜鹰. (2018). 小农生产与农业现代化. *中国农村经济*, 10, 2–6.

²⁵ Ju, X., Gu, B., Wu, Y., & Galloway, J. N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. *Global Environmental Change*, 41, 26–32.

²⁶ 胡亚兰, 张荣. 我国智慧农业的运营模式问题与战略对策[J]. 经济体制改革, 2017(4): 70–76.

²⁷ Cui, Z., Zhang, H., Chen, X., Zhang, C., Ma, W., Huang, C., Zhang, W., Mi, G., Miao, Y., & Li, X. (2018). Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 555(7696), 363–366.

加强对有机肥补贴、研发和推广的政策支持力度。提高有机肥的补贴标准，降低农户施用有机肥的成本。同时也将有机肥补贴的范围扩大到小规模生产企业和小农户。另外，通过提高有机肥生产标准和产品质量，减少不合格产品的出现。有机肥现有标准为《有机肥料（NY525-2012）》行业标准，但是目前只对总养分有要求，对其他成分关注不多²⁸。此外，推广种养结合的方式将养殖业和种植业衔接起来，在促进畜禽粪污资源化利用的同时，也为种植业提供了有机肥使用。

在保证小农利益的前提下推动土地流转和土地托管，促进土地规模化经营和精准施肥技术推广。由于我国以小农为主的农业生产方式对精准施肥技术推广带来挑战，加快土地流转，有利于农机作业和规模经营，提高土地利用效率并且降低新技术使用的成本。研究显示，我国有 86% 的农田可以整合形成平均规模大于 16 公顷的大农田，这种整合的方式可以大幅提高农业机械化程度，同时在提高农户收入的同时可以减少 24% 的氮肥投入，将氮肥利用率提高 18%，并且减少 39% 的农业人力成本²⁹。

从长期来看，提高土壤质量、改善土壤健康才能更好的实现化肥减量和替代，并推动农业的可持续生产。例如在农业生产中，采用少耕免耕和秸秆覆盖等保护性耕作的方式来减少对土壤的扰动和帮助恢复土壤的肥力。该项措施在我国东北和黄淮海地区都在逐步推广。此外，在我国传统绿肥种植和还田的基础上，加强对绿色生产方式和种植技术的研发也对提高土壤有机质和减少化肥施用有显著效果³⁰。研究和监测结果显示，在南方稻麦利用绿肥可以减施氮钾肥 40%，旱地可以减施 20-30% 左右³¹。

²⁸ 金书秦, 唐佳丽, 杨小明等. 欧盟有机肥产品标准, 管理机制及其启示[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(7): 1236-1242.

²⁹ Duan, J., Ren, C., Wang, S., Zhang, X., Reis, S., Xu, J., & Gu, B. (2021). Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China. *Nature Food*, 2(12), 1014–1022.

³⁰ 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 聂军, 高亚军, 耿明建. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450-1461.

³¹ http://www.news.cn/globe/2022-07/18/c_1310640187.htm

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress), 简称:研究院 (iGDP), 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 2014 年成立于北京, 旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

关于零碳录 (CCNT)

零碳录 (China Carbon Neutrality Tracker, <https://ccnt.igdp.cn>) 旨在全面跟进国家、行业、省市的碳中和行动, 致力于分析解读零碳转型之路的政策实践、创新行动, 以客观科学的视角传播分享中国应对气候变化的努力和贡献。通过在线数据库和交互信息平台, 为关注碳中和行动各界人士提供服务。CCNT 前身是关注低碳试点进展的交互信息平台 Policy Mapping, 创建于 2014 年, 由绿色创新发展研究院 (iGDP) 建立和维护。

联系方式:

电话: 86-10-8532 3096

传真: 86-10-8532 2632

邮箱: igdpoffice@igdp.cn

网站: www.igdp.cn

地址: 中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

