

农食系统与碳中和

中国农业与食物相关 温室气体减排路径分析报告



致谢：

感谢全球粮食未来联盟（Global Alliance for the Future of Food）气候项目总监Patty Fong、清华大学能源环境经济研究所副所长滕飞、中国农业科学院农业经济与发展研究所副研究员牛坤玉对项目研究提供的意见和指导。

感谢iGDP同事汪燕辉对案例调研的支持，顾问于杨今奇对报告中部分案例的整理。

感谢张焯提供的报告版面设计。

作者

| | |
|-----|---|
| 陈美安 | 绿色创新发展研究院项目总监/高级分析师，电子邮箱： chenmeian@igdpcn |
| 胡敏 | 绿色创新发展研究院董事/联合创始人，电子邮箱： humin@igdpcn |
| 杨鹏 | 绿色创新发展研究院研究总监/高级分析师，电子邮箱： yangli@igdpcn |
| 马中 | 中国人民大学环境学院教授，电子邮箱： zhongma@vip.sina.com |
| 朱彤昕 | 绿色创新发展研究院助理分析师，电子邮箱： zhutongxin@igdpcn |

免责声明：本报告内容均基于公开、可得、可靠的信息来源，旨在加强相关领域的讨论交流。报告中包含的内容及观点仅代表作者迄今为止的认识和判断，不反映作者所属机构以及支持方的立场。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, 胡敏, 杨鹏, 马中 & 朱彤昕. (2023). 农食系统与碳中和: 中国农业与食物相关温室气体减排路径分析报告. 北京: 绿色创新发展研究院.

农食系统与碳中和

——中国农业与食物相关温室气体减排路径分析报告

2023年10月



目录

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 执行摘要 | iv |
| 1. 背景 | 1 |
| 1.1. 气候变化与农食系统 | 2 |
| 2. 中国农食系统温室气体排放现状与挑战 | 3 |
| 2.1. 农食系统主要排放源 | 4 |
| 2.2. 我国农食系统排放现状 | 5 |
| 2.3. 我国农食系统温室气体排放面临挑战 | 6 |
| 3. 我国促进农食系统温室气体减排的政策梳理 | 8 |
| 3.1. 促进农食系统温室气体减排的政策行动 | 9 |
| 3.2. 农食系统减排行动及协同效应 | 11 |
| 4. 我国农食系统减排路径 | 13 |
| 4.1. 农业生产环节 | 14 |
| 4.2. 农场到餐桌环节的减排机遇 | 19 |
| 4.3. 食物消费的减排机遇 | 22 |
| 5. 我国农食系统温室气体排放情景研究 | 25 |
| 5.1. 情景设置 | 26 |
| 5.2. 主要发现 | 27 |
| 1. 农食系统温室气体总排放将继续增加 | 27 |
| 2. 农业食物相关温室气体减排是一个系统工程 | 28 |
| 3. 农业生产阶段行动只占约三分之一的减排贡献 | 30 |
| 4. 我国已经采取的绿色发展行动可挖掘约三分之二的减排潜力 .. | 31 |
| 5. 主要措施的减排潜力 | 32 |
| 5.3. 实现农食系统减排十大重点行动 | 32 |
| 6. 政策建议 | 33 |
| 参考文献 | 35 |



执行摘要



农食系统——从食物生产到最终消费的整个过程，与气候变化息息相关。一方面，农业生产、畜牧养殖等面临巨大的气候变化风险。全球变暖带来的温度和降水变化以及极端天气，加剧了农业生产的波动性，也对农业生产潜力带来影响 (Woetzel et al., 2020; 李玉娥 et al., 1997)。另一方面，农业活动和食物生产、消费的各个环节都会产生不同种类的温室气体 (Niles et al., 2017; Vermeulen et al., 2012)。随着人口增长、城镇化的加速以及居民饮食结构的变化，对食物种类和生鲜程度提出了更多要求，从而也会引起农业生产规模、结构和技术的改变以及食品供应的方式的调整。这些变化都在广泛和深刻地影响食物的生产和消费活动，由此也推动了这些环节温室气体排放的上升。最新研究显示，全球农食系统一年产生的温室气体多达160亿吨CO₂e，占全球总温室气体排放的1/3左右 (Crippa et al., 2021)。

然而，由于农食系统的排放源分散在不同的环节，单一环节下的排放和其他行业相比并不显著，并且各个环节的温室气体排放通常被统计在不同的行业范畴中，导致农食系统的排放无法得到足够重视 (Clark et al., 2020; Tubiello et al., 2021)。由于农食系统生产端和消费端各环节排放相互影响，受制于共同的驱动因素，包括人口增长、经济发展、收入水平、饮食习惯等，若将控排措施分散在农业、交通、工业等不同部门下实施将不利于形成有效的食物系统减排方案 (Niles et al., 2017; Rosenzweig et al., 2020)。因此，从应对气候变化的角度，有必要将农业及食物的生产和消费作为一个有机整体来看。

农食系统的绿色低碳转型还关乎生物多样性保护、社会公平、公共健康等多个可持续发展议题。在农业生产中减少化肥农药的过度使用，以及改变单一化种植和重度耕作等生产方式可以降低其对生态系统破坏 (Benton et al., 2021)。区别于工业化、集约化农业，社区支持农业的理念直接将消费者与农业生产者合作，不仅可以改善食品安全，也有利于社会公平。低糖、低脂膳食指南的推广，不仅有利于公共健康，也会因减少动物性食物消费而减少温室气体排放 (Tilman & Clark, 2014; Zang et al., 2018)。

为了实现全球应对气候变化和我国远期碳中和目标，本报告以农食系统的视角——围绕食物需求所展开的农业生产、食品加工、包装、运输、零售以及消费的各个环节所组成的整体系统，对整个系统全温室气体排放情况进行摸底，通过梳理农食系统各环节已有的减排政策、实践和技术，分析其减排潜力，识别实现农食系统碳中和的关键路径和重点措施，并提出了一系列具体建议。

主要发现：

我国农食系统温室气体总排放将继续增加

即使采取一定减排措施，我国农食系统温室气体排放将持续上升，2060年总排放将比2019年增加30%。农业生产的温室气体排放也将有所增长，而食品加工、运输、零售、烹饪和垃圾处理等环节，得益于能效水平提升，排放在达峰后呈缓慢下降趋势。温室气体增长的主要来源是甲烷和氧化亚氮，其排放仍有上升空间。含氟温室气体则在持续增长到2040左右后缓慢下降，二氧化碳排放也在2030年之后开始逐渐下降。

农食系统实现碳中和挑战巨大

基于报告的情景分析显示，在参考情景下，2019年我国农食系统温室气体排放为16.46亿吨CO₂e，到2030年增加到17.89亿吨CO₂e，2060年增加到21.62亿吨CO₂e。在深度减排情景下，我国农食系统温室气体排放从2020年开始已经呈逐步下降趋势。到2030年下降到14.08亿吨CO₂e，2060年降至6.51亿吨CO₂e，比参考情景下2060年的排放减少70%，仍不能实现近零排放。

农业食物相关温室气体减排是一个系统工程

报告分析显示，仅关注农业生产环节的减排行动不能实现我国农食系统碳中和，在 2050 年，农业生产阶段的脱碳所带来的减排潜力仅占整个农食系统减排潜力的 37%。因此来自农食系统其他环节的排放以及食物消费端的减排同样重要。

我国已经采取的绿色发展行动可挖掘约三分之二的减排潜力

约三分之二的减排潜力，即到 2030 年和 2050 年分别有 69% 和 60% 的减排潜力来自强化已有的绿色发展行动，包括在绿色农业、能源清洁化和循环经济为防治环境污染和保护公众健康所采取的行动。剩下的三分之一的减排潜力来自深度低碳行动，包括低碳农业行动以及食物消费端的行为改变。

实现农食系统减排十大重点行动

根据深度减排情景下 2050 年温室气体减排潜力，我们提出如下十个重点减排行动及其主要障碍。

表 ES-1. 农食系统重点减排行动

| 优先行动 | 主要措施 | 2050 减排贡献 (深度减排情景) | 主要障碍 |
|--------------|--|-----------------------|-----------------|
| 农业生产 | | | |
| 氮肥减量 | 采用氮肥增效剂, 缓释肥, 继续推广测土配方和保护性耕作。 | 10% | 实施力度 经济刺激 |
| 畜禽粪污管理 | 沼气资源利用: 通过回收畜禽粪污厌氧发酵产生的沼气, 沼气发电和制成生物天然气。 | 11% | 经济刺激 |
| 稻田甲烷减排 | 调整稻田灌溉模式, 采取干湿交替灌溉; 推广水稻直播旱种。 | 6.6% | 高成本技术 实施难度 |
| 反刍动物肠道发酵减排 | 通过动物育种, 以及在饲料中添加辅料来减少甲烷排放。 | 3% | 高成本技术 |
| 农机节能和电动化 | 提高农机能效提升, 推动中小型农机的电动化。 | 5.8% | 农机电动化政策和标准引导 |
| 农场到餐桌 | | | |
| 食品加工节能降碳 | 食品加工的能效提升和能源替代。 | 5% | 政策引导 |
| 交通低碳化 | 交通能效提升, 推动轻型货运电动化和低 GWP 制冷剂的使用。 | 7% | 政策引导 |
| 减塑和循环利用 | 简化包装, 采用可回收包装和可降解包装材料。 | 2.8% | 实施难度大 |
| 食物消费 | | | |
| 烹饪节能及电气化 | 推动烹饪节能和炊事电气化 | 12.8% | 经济刺激 |
| 餐厨垃圾资源化利用 | 继续推广垃圾分类, 通过餐厨垃圾厌氧消化进行沼气回收利用。 | 5% | 对垃圾资源化规模发展的经济刺激 |
| 膳食和消费行为调整* | 推广居民膳食指南, 倡导本地食物消费。 | - | 实施难度大 |

*注: 膳食调整主要指减少动物性食物摄入及鼓励本地食物消费, 其减排量主要体现为两个方面, 一是农业生产, 尤其是畜牧业相关的排放, 二是食品运输相关的排放。考虑到行为改变的不确定性较大, 此处不做定量分析。诸多研究表明, 减少动物性食物摄入会带来显著的减排贡献, 应加强重视。

主要建议：

· 制定综合性农食系统碳中和战略

建立健康和可持续的农食系统来应对气候变化，对保证粮食安全、农业和生物的多样性以及维护生态环境和公众健康都有着重要意义。如前所述，由于农食系统中不同活动的温室气体排放涉及到农业、交通、能源、工业和废弃物等多个部门，一个关于农食系统的综合性的碳中和战略可以提供更系统性的温室气体减排方案，协调不同部门的减排行动，以及推动更多利益相关方的参与和综合性减排措施的落地。

· 建立农食系统环境数据体系以支持科学决策

农食系统数据包括各环节温室气体排放活动数据和农食产品的环境及碳排放影响数据或标签，前者为农食系统减排政策提供数据基础，后者可以促进消费者行为改变。现有的温室气体清单编制中关于土地利用、农业和分部门的能源活动数据已经为农食系统的温室气体排放数据梳理提供数据基础。其次，我国2021年更新的国家自主贡献（NDC）中提出将逐步建立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等措施则将为食物系统排放数据的收集分析提供更多政策依据。此外，我国有关产品碳标签的工作也应在农食领域进行推广，结合生态食品、绿色食品等体系，将碳信息纳入其中。

· 优化现有绿色发展行动以扩大减排效果，尤其是甲烷减排力度

无论是在中国提交和更新的国家自主贡献（NDC）中还是在国内都已经部署实施了多项绿色发展的政策行动，例如在绿色农业发展政策中推动化肥农药的减量增效、畜禽粪污的资源化利用、有机肥推广、测土配方和绿色农业机械推广等措施，以及在循环经济政策中推动的降低塑料制品的使用、减少食物浪费、加强餐厨垃圾管理以及对“无废城市”的推广。通过优化已有的政策措施，尤其是强化在农业和废弃物领域现有行动中甲烷减排效果，不仅可以改善农业的环境污染、保护农业资源和提高废弃物的资源化利用，还能以较低边际成本控制温室气体排放。

· 加速农食系统能源低碳转型

农食系统中不同阶段的能源消耗带来的温室气体排放不容忽视，例如农用机械、食物加工、运输以及烹饪等环节。建议出台有关政策，加快农机电动化，包括电动拖拉机、微耕机、割草机等的市场化；建议在农村清洁灶具替换中优先考虑采用可再生能源，通过政府补贴等促进高效家用电器推广；食品冷链等货运绿色清洁和电动化，也可以有效减少来自传统能源消耗的二氧化碳排放。

· 通过机制创新推动成熟减排实践和技术的规模化应用

探索不同类型的可持续农业发展模式来提高我国农食系统在面对资源短缺、环境污染和气候变化的韧性。例如在工业化农业生产之外，基于中国高比例的小农生产方式，推广社区支持农业，为消费者提供健康食品的同时为生产者经营提供了资金支持。以及推动包括保护性耕作、覆盖作物等再生农业实践来提高土壤肥力的行动。此外，在食物领域的减排技术的研发和规模化应用也需要创新的商业模式和政策来支持，从而降低技术采用的成本。作为食物终端的消费者对于食物生产的规模、结构以及食品供应的方式都有着决定性的影响，推动消费者的行为改变至关重要。例如减少食物浪费、膳食结构调整等行动的推广都可以实现农食系统减排，这里同样需要适合的政策机制。但是机制设计需要考虑到其对低收入和弱势群体影响，确保消费者对安全和健康食物的获取，使得应对气候变化的农食系统转型更具包容性。

1. 背景



1.1. 气候变化与农食系统

农食系统——人类为了满足食物需求所开展的农业生产、食品加工、包装、运输、零售以及消费的各个环节所组成的整体系统，都与气候变化息息相关 (Crippa et al., 2021; Niles et al., 2017; Poore & Nemecek, 2018; Rosenzweig et al., 2020; Tubiello et al., 2021; Vermeulen et al., 2012)。一方面，农业生产、畜牧养殖等面临巨大的气候变化风险。全球变暖带来的温度和降水变化以及极端天气，加剧了农业生产的波动性，也对农业生产潜力带来影响 (Y. Li et al., 1997; Woetzel et al., 2020)。另一方面，食物生产消费的各个环节也是巨大的温室气体排放源。无论是耕地和牧场的准备、农作物种植和畜禽养殖的开展、到食物的加工、包装和运输零售、再到食物的烹饪和餐厨垃圾处理等，每一个环节的活动都会产生不同的温室气体 (Niles et al., 2017; Vermeulen et al., 2012)。

然而，由于农食系统的排放源分散在不同的环节，单一环节下的排放和其他行业相比并不显著，并且各个环节的温室气体排放通常被统计在不同的行业范畴中，导致农食系统的排放无法得到足够重视 (Clark et al., 2020; Tubiello et al., 2021)。由于农食系统生产端和消费端各环节排放相互影响，受制于共同的驱动因素，包括人口增长、经济发展、收入水平、饮食习惯等，若将控排措施分散在农业、交通、工业等不同部门下实施将不利于形成有效的食物系统减排方案 (Niles et al., 2017; Rosenzweig et al., 2020)。因此，从应对气候变化的角度，有必要将农业及食物的生产和消费作为一个有机整体来看。

根据IPCC第六次评估报告，全球包括土地利用在内的农业部门温室气体排放在2010-2019年期间，占全球总排放量的13%到21%之间 (IPCC, 2022)。然而，若将农业及食品的生产 and 消费作为一个有机整体，把食物生产、加工、消费等所有环节的间接排放纳入其中，全球层面，农业和食物相关温室气体排放已占到全球碳排放的三分之一左右 (Crippa et al., 2021)，对全球气候安全举足轻重。

农食系统的绿色低碳转型还关乎生物多样性保护、社会公平、公共健康等多个可持续发展议题。在农业生产中减少化肥农药的过度使用，以及改变单一化种植和重度耕作等生产方式可以降低其对生态系统破坏 (Benton et al., 2021)。区别于工业化、集约化农业，社区支持农业的理念直接将消费者与农业生产者合作，不仅可以改善食品安全，也有利于社会公平。低糖、低脂膳食指南的推广，不仅有利于公共健康，也会因减少动物性食物消费而减少温室气体排放 (Tilman & Clark, 2014; Zang et al., 2018)。



2. 中国农食系统 温室气体排放 现状与挑战

2.1. 农食系统主要排放源

现有的很多研究已经对农食系统活动所带来的温室气体排放进行了梳理和分析 (Crippa et al., 2021; H. Li et al., 2016; Niles et al., 2017; Poore & Nemecek, 2018; Tubiello et al., 2021)。Vermeulen等将食物相关的温室气体排放划分为三个阶段，包括：1) 食物生产准备阶段，例如化肥、农药和饲料的生产；2) 食物生产阶段，其中包括农业生产中的直接排放，例如氮肥施用的氧化亚氮和畜禽养殖的甲烷排放等，和生产中的间接排放，例如由于食物生产导致的林地转耕地或草地过程中带来的温室气体排放；3) 后食物生产阶段，覆盖了食物加工、包装、运输、零售和消费过程中产生的排放 (Vermeulen et al., 2012)。Crippa 等的研究是基于全球食物数据库 (EDGAR-Food database) 的数据，将食物系统温室气体排放按照从食物生产到消费的链条分成了8个阶段，依次为：土地利用类型改变、食物生产、加工、包装、运输、零售、消费和食物终端处理，并对每个环节的温室气体排放源进行了分析 (Crippa et al., 2021)。Poore 和Nemecek 的研究采用了类似的方式，但是由于数据可得性的限制，其对食物生产和消费温室气体排放分析中，将食物烹饪和食物浪费排除在外 (Poore & Nemecek, 2018)。Tubiello 等将食物系统排放分为土地利用类型改变、农场生产、以及能源、工业和废弃物部门下为食物的生产和消费产生的温室气体排放 (Tubiello et al., 2021)。而 Li 和Niles等的研究则把从农场生产到食物最终消费和处理作为食物系统的主要温室气体排放进行分析 (Li et al., 2016; Niles et al., 2017)。

基于上述的文献研究以及数据可得性，本报告中所讨论的农食系统温室气体排放范围主要覆盖食物从农业生产、加工、包装、运输、零售到消费环节的主要温室气体排放源¹。覆盖的主要温室气体包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和含氟温室气体，含氟温室气体主要是用于制冷设备的氢氟碳化物 (HFCs)。不同温室气体按照GWP² (全球升温潜势值) 计算统一为二氧化碳当量 (CO₂e)。报告将农食系统的主要温室气体排放大致划分为以下7个阶段 (如表1所示)：

- 农业生产：
 - 农业投入品，例如化肥、农药、农膜等生产、加工和运输过程中产生的排放以及农业机械能耗带来的温室气体排放；
 - 农作物 (水稻、小麦等粮食作物) 种植过程中甲烷和氧化亚氮排放；
 - 动物性食物生产，例如畜禽养殖过程中的动物肠道发酵带来的甲烷排放，和畜禽粪便产生的甲烷和氧化亚氮排放。
- 食物加工：主要包括加工过程中的能耗以及废水处理产生的温室气体排放；
- 食物包装：食物包装材料，例如塑料、铝、钢铁和玻璃生产的能耗和生产过程中的温室气体排放；
- 食物运输：包括运输和存储过程中的能耗和生鲜食物冷链运输中制冷剂带来的含氟温室气体排放；
- 食物零售：包括零售的能耗和制冷剂的含氟温室气体排放；
- 食物烹饪：包括餐厅和家庭中用于食物烹饪产生的能耗及其排放；
- 餐厨垃圾处理：包括餐厅和家庭厨房中食物垃圾运输和处理的能耗，以及垃圾处理处置中产生的甲烷和二氧化碳排放。

¹ 来自农业土地利用变化导致的温室气体排放和变化都较小 (AGFEP, 2021; Crippa et al., 2021; Vermeulen et al., 2012)，因此这里范围中不包括为食物生产所需土地利用带来的温室气体排放。

² GWP参考IPCC 第四次评估报告数据 (AR4)，按照100年的时间尺度取值。

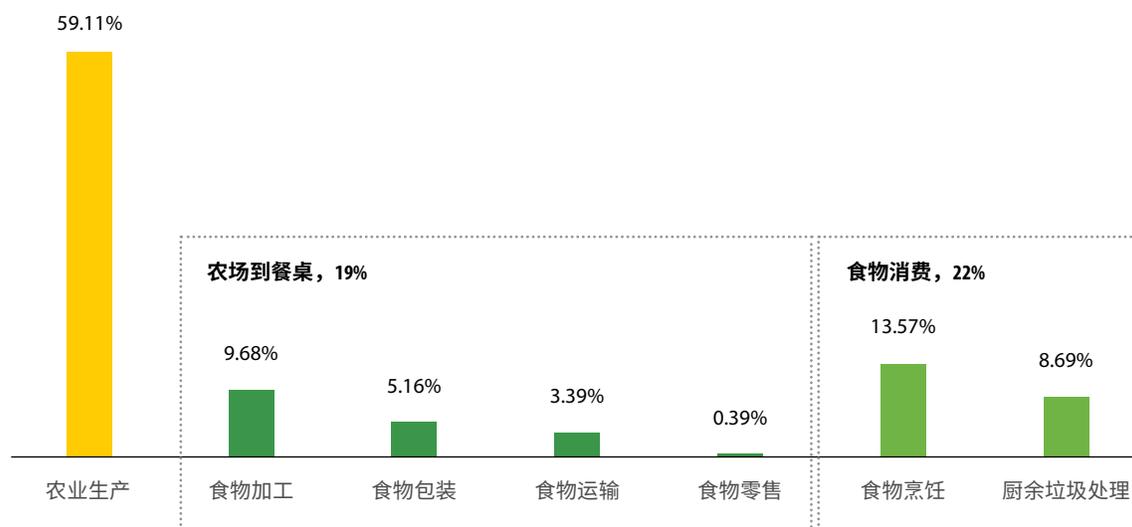
表 1. 农食系统温室排放研究范围

| 农食系统主要环节 | 主要温室气体 | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------|---------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | F-gases |
| 农业生产 | √ | √ | √ | |
| 农场到餐桌: 食物加工 | √ | | | |
| 农场到餐桌: 食物包装 | √ | | | |
| 农场到餐桌: 食物运输 | √ | | | √ |
| 农场到餐桌: 食物零售 | √ | | | √ |
| 食物消费: 食物烹饪 | √ | | | |
| 食物消费: 餐厨垃圾处理 | √ | √ | | |

2.2. 我国农食系统排放现状

基于公开可得的数据和农食系统温室气体排放的研究范围（参见表1），本报告估算显示，2019年，我国农食系统的温室气体排放达到16.5亿吨CO₂e，约占当年我国总温室气体排放的14%³左右。按照农食系统的不同环节来看，农业生产排放最高，约占整个农食系统温室气体排放的59%，其次是食物消费环节和农场到餐桌环节，占比分别为22%和19%。

图 1. 我国农食系统温室气体排放分环节占比（2019年）

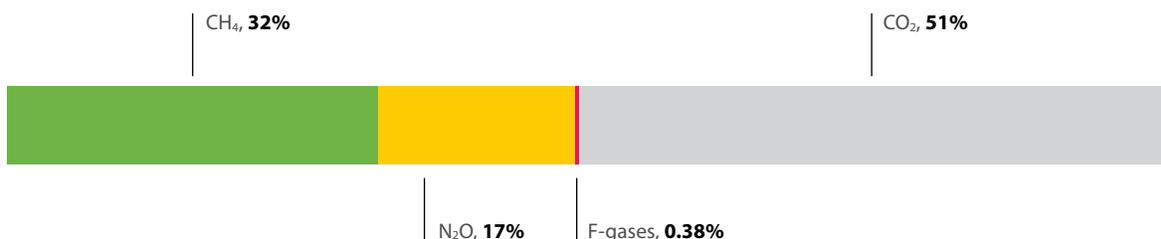


数据来源: iGDP 估算

³ 2019年中国GHG排放数据来自荷兰环境署(PBL)发布的2020年全球温室气体排放趋势报告

按照不同温室气体划分，我国农食系统中二氧化碳排放占比51%，其余49%的排放主要来自包括甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）和含氟气体（F-gases）在内的非二氧化碳温室气体。其中占比最高的是甲烷排放，主要来自农业生产过程中水稻种植和畜禽养殖。

图 2. 我国农食系统分气体排放占比（2019年）



数据来源：iGDP 估算

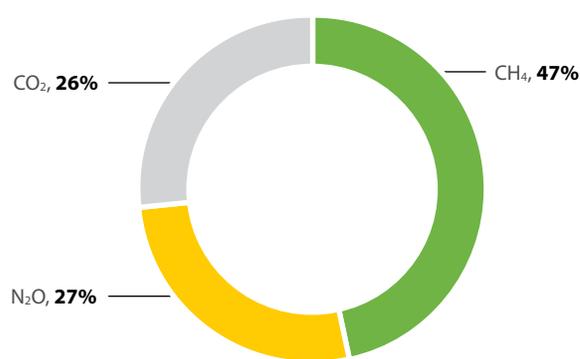
此外，由于农业生产是农食系统中排放占比最大的环节，图3 对农业生产环节中主要排放源和排放气体进行了梳理。基于本报告的估算显示，2019年，农业生产温室气体排放在9.7亿吨CO₂e左右。其中，最大的排放源来自畜禽肠道发酵，占农业温室气体排放的24%。其次是氮肥施用和以农业机械为主的农业生产能耗，分别占23%和20%。按照不同温室气体来看，农业生产的主要排放来自甲烷，约占整个农业生产的一半左右。

图 3. 我国农业主要排放源排放占比（2019）



数据来源：iGDP 估算

图 4. 我国农业不同温室气体排放占比（2019）



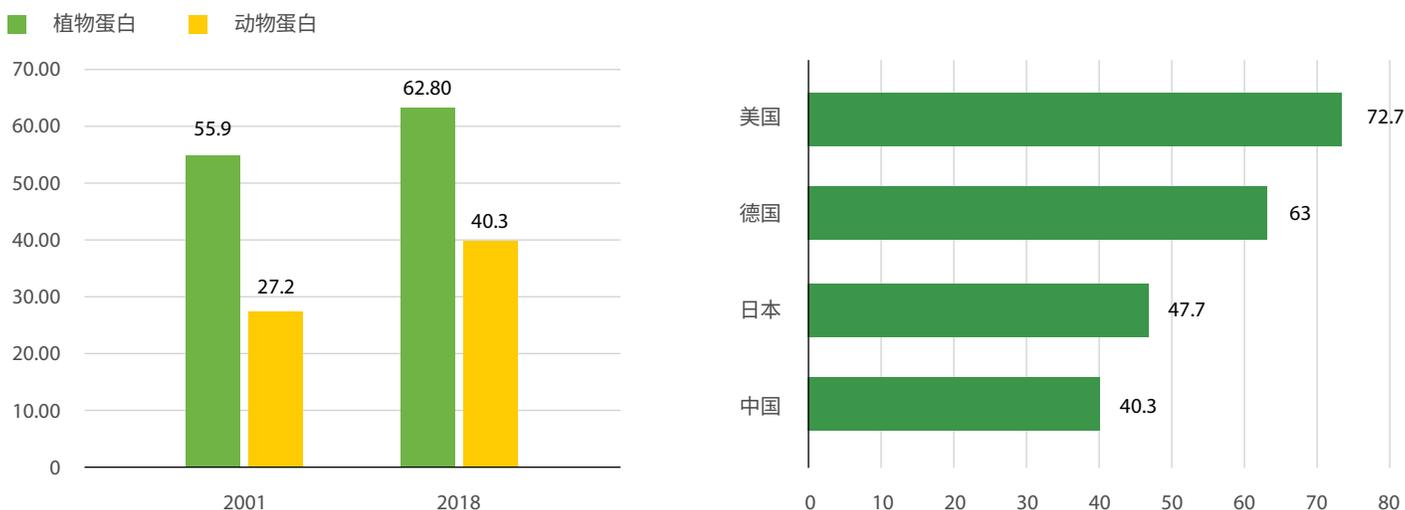
数据来源：iGDP 估算

2.3. 我国农食系统温室气体排放面临挑战

随着我国人口、经济发展水平以及饮食结构的变化，食物消费的规模、类型和消费方式正在发生改变，并且也对农业生产的规模、结构以及食物供应方式产生影响。我国农食系统温室气体排放也将随着这些调整发生变化。可以预见我国农业乃至农食系统整体的碳排放仍有增长的空间。

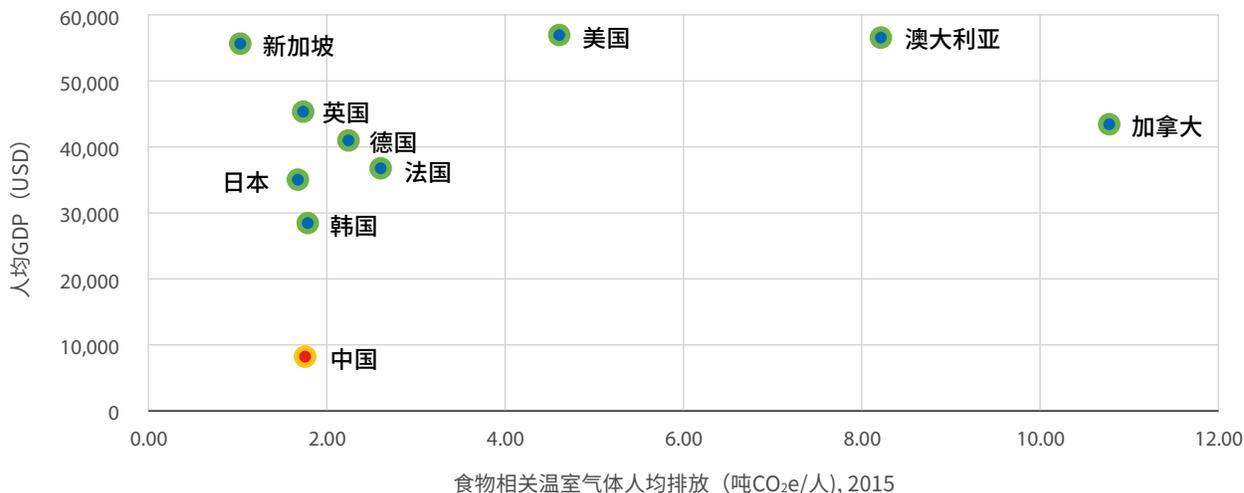
根据可比较方法估算，2015年我国人均农食系统相关温室气体排放已经接近英国、日本、德国等主要发达国家，而人均GDP接近但仍未达到发达国家低限（如图6）。此外，伴随经济发展，居民消费水平的提高，居民对食物的消费种类和品质需求也在提高。比如，我国人均蛋白质摄入量与某些发达国家相比仍处于较低水平（如图5），而未来可能的新增蛋白摄入量如果是来自动物性食物消费，就可能极大程度推高温室气体排放量，对农食系统碳中和以及公众健康带来挑战 (Bai et al., 2018; Li et al., 2016; Ma et al., 2019)。

图 5. 中国人均动物蛋白和植物蛋白消费比较，以及中国与其他国家动物蛋白摄入比较（克/人/天），2018



数据来源：粮农组织 (FAO), 2018

图 6. 中国和主要发达国家农食系统相关的温室气体人均排放与人均GDP，2015



数据来源：EDGAR Food Database 和 the World Bank

因此，为了实现全球应对气候变化和我国远期碳中和目标，有必要从农食系统的视角，对整个系统全温室气体排放情况进行摸底。本报告将通过梳理农食系统各环节现有减排行动，分析减排潜力，识别实现碳中和的关键路径和重点措施。

3.我国促进农食系统 温室气体减排的 政策梳理



3.1. 促进农食系统温室气体减排的政策行动

我国长期重视农业生产和粮食安全，已经制定和实施的多项针对农业、农村可持续发展的行动，包括农业绿色发展、土壤保育、乡村振兴和保障粮食安全等战略和政策；此外，针对食物的加工、运输和消费环节的排放，也有包括工业节能、绿色低碳交通和废弃物管理等减排措施。

农业发展一直是我国政策议程中的优先和重要事项。从2004年开始中共中央国务院每年发布以三农（农业、农村、农民）为主题的“中央一号”文件，部署农业农村的工作安排。2017年中央一号文件已经提出“促进农业农村发展由过度依赖资源消耗、主要满足量的需求，向追求绿色生态可持续、更加注重满足质的需求转变”⁴。2021年第18份中央一号文件《中共中央国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》发布，文件中将农业绿色发展作为推进农业农村现代化的重要内容之一，提到要守住18亿亩耕地红线、并且采取推广保护性耕作、化肥农药减量增效、畜禽粪污的资源化利用，以及加强对农产品质量和食品安全的监管等措施⁵。2021年我国发布的《第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中也再次强调了优先发展农业农村，既要增强农业综合生产能力，也要深化农业结构调整。

基于我国庞大的人口规模和有限的耕地面积，对粮食生产的关注一直处在国家政策议程的核心位置。粮食安全也被视为国家安全的基础。在2019年发布的《中国粮食安全》白皮书中强调中国要坚持立足国内保障粮食基本自给的方针，实行最严格的耕地保护制度⁶。在有限耕地面积的情况下，白皮书也指出，粮食生产能力的提高除了需要保护耕地红线，还需要提升耕地质量和保护生态环境，而对农业技术的推广应用也将为粮食增长发挥作用。此外，中国陆续发布的《全国农业可持续发展（2015-2030）》、《国家乡村振兴战略规划（2018-2022）》等政策也在从不同维度来推动农业的可持续发展。

除了出于农业发展和粮食安全考虑而发布的一系列宏观发展规划以外，我国在食物生产和消费相关的行业部门中，例如农业、交通和废弃物管理部门中已经制定和出台相关政策措施，尽管这些行动的首要目标并非是温室气体减排，也对农食系统碳减排带来积极贡献。按照农食系统不同环节的主要排放源，下表梳理了该环节下对食物相关温室气体减排带来影响的政策。

表 2. 农食系统主要减排行动一览

| | 减排行动 | 政策文件 |
|------|---|---|
| 农业生产 | <ul style="list-style-type: none">· 推进化肥农药减量增效和有机肥替代；构建果菜茶有机肥替代化肥长效机制，对有机肥购买和使用提供补贴；· 推进农膜回收利用和推广环境友好生物可降解地膜；· 提出控制农田甲烷排放，选育高产低排放良种，改善水分和肥料管理；· 通过合理的农田管理措施，提高农业固碳能力；· 加强畜禽粪污的资源化利用；· 推广低蛋白日粮、全株青贮等技术和高产低排放畜禽品种；· 农田碳汇行动；· 推动种植业、畜牧业和渔业的信息化和智能化和智慧化；· 绿色农用机械应用推广，支持农业绿色发展机具、智能装备纳入农机购置补贴范围。 | <ul style="list-style-type: none">《全国农业可持续发展规划（2015-2030）》《关于加快推进农用地膜污染防治的意见》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》《“十四五”全国农业绿色发展规划》《耕地质量提升与保护方案》《关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》《数字农业农村发展规划（2019-2025）》《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》《2030年前碳达峰行动方案》《农业农村减排固碳实施方案》 |

⁴ 2017年中央一号文件：http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/05/content_5165613.htm

⁵ 2021年中央一号文件：http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/21/content_5588098.htm

⁶ 《中国的粮食安全》白皮书：http://www.gov.cn/zhengce/2019-10/14/content_5439410.htm

表 2. 农食系统温室排放研究范围（续）

| | 减排行动 | 政策文件 |
|-------|--|---|
| 农场到餐桌 | <ul style="list-style-type: none"> · 推动绿色包装，2025年电商快件基本实现不再二次包装，可循环快递包装应用规模达1000万个； · 发展农产品绿色低碳运输； · 食品加工工业能效提升； · 削减HFCs的生产和消费。 | <ul style="list-style-type: none"> 《关于加快我国包装产业转型发展的指导意见》 《“十四五”循环经济发展规划》 《关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》 《基加利修订案》 《“十四五”现代能源体系规划》 |
| 食物消费 | <ul style="list-style-type: none"> · 生活垃圾分类和餐厨垃圾资源化利用； · 减少食物浪费，制定和修改有关国家标准、行业标准和地方标准来最大程度防止和减少浪费； · 调整居民膳食结构，推广膳食结构多样化的健康消费模式。 | <ul style="list-style-type: none"> 《生活垃圾分类制度实施方案》 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》 《中华人民共和国反食品浪费法》 《中国食物与营养发展纲要（2014—2020年）》 《中国居民膳食指南》 |

专栏 1. 农业农村减排固碳实施方案

农业农村减排固碳是实现“双碳”目标的重要举措和潜力所在，作为我国“1+N”政策体系的重要组成部分，农业农村部与国家发展改革委于2022年6月颁布《农业农村减排固碳实施方案》，这是我国首个农业领域应对气候变化综合性战略。方案提出农业领域落实双碳战略的六项任务和十大行动；六项任务包括：种植业节能减排、畜牧业减排降碳、渔业减排增汇、农田固碳扩容、农机节能减排、可再生能源替代，十大行动包括：实施稻田甲烷减排、化肥减量增效、畜禽低碳减排、渔业减排增汇、农机绿色节能、农田碳汇提升、秸秆综合利用、可再生能源替代、科技创新支撑、监测体系建设；目标是加快形成资源节约和保护环境的农业农村产业结构、生产方式、生活方式、空间格局，支持国家碳达峰碳中和目标。

专栏 2. 反食品浪费法

《中华人民共和国反食品浪费法》于2021年4月29日正式实施，旨在防止食品浪费，保障国家粮食安全，促进经济社会可持续发展。该法共32条，对反食品浪费的定义、原则和要求、政府职责、食品生产/经营、餐饮服务经营等各类主体的责任、激励和约束措施、法律责任等作出规定。其主要内容包括：

- 食品生产经营者：改善食品储存、运输、加工条件，降低储运损耗；加强日常检查，对临近保质期的食品分类管理和特别处理等。
- 餐饮服务经营者：建立健全食品采购、储存、加工管理制度；主动进行防止食品浪费提示；不得诱导误导消费者超量点餐；提供小份餐等。
- 行业协会和公众：宣传、普及防止食品浪费知识，推动“光盘行动”等；个人应当树立文明、健康、理性、绿色的消费理念。

以立法形式减少食品浪费，在全球领域非常罕见，彰显中国减少食品浪费、确保食品安全的决心，是中国社会转型阶段保持良好的传统生活方式，遏制减少浪费风气的切实行动。

3.2. 农食系统减排行动及协同效应

如前所述，农食系统有利于温室气体减排的行动并非均以应对气候变化为首要目标，很多减排效果来自其协同效应。为分析便利，报告将表3中的减排行动依据其首要政策目标分为两大类：绿色发展行动和深度低碳行动。

- **绿色发展行动：**指以其他经济社会、可持续发展为首要目标，尤其以农业安全、生态保护、节约能源、低碳转型、公共健康等为首要政策目标，但具有温室气体减排效果的措施和行动。虽然最初政策目标不是应对气候变化，这些领域的行动也会在碳达峰和碳中和的要求下不断强化。绿色发展行动主要涵盖绿色生态农业、绿色低碳能源体系和循环经济等相关行动。具体行动包括：
 - 绿色生态农业：主要指为减少农业生产中的空气、水和土壤等环境污染，以及保障粮食安全为首要目标所采取的行动。例如由于化肥农药过量施用破坏环境后展开的化肥农药减量增效和有机肥替代，为了减少农膜残膜污染而实施的农膜回收利用，以及为减少畜禽粪污对环境污染影响而推进的畜禽粪污资源化利用。这些措施在实现其首要目标的同时也将减少与化肥、农膜、农药使用以及畜禽粪污管理相关的温室气体排放。
 - 绿色低碳能源体系：主要包括我国以推动能源体系绿色低碳转型为目标所采取的一系列也能对农食系统的能效提升和脱碳形成协同效应的行动。例如在工业节能、绿色冷链运输、减少建筑运行能耗中开展的行动，其对食物加工、运输、烹饪等环节也带来了积极的减排效应。
 - 循环经济：这里主要关注以资源节约和循环利用为首要目标所采取的并惠及农食系统减排的行动。例如在快递、外卖领域推广塑料减量和绿色物流，对生活垃圾分类和餐厨垃圾的资源化利用，以及减少食物浪费等行动。

- **深度低碳行动:** 指以应对气候变化为首要目标, 考虑到碳中和要求—即温室气体排放控制—而在农食系统采取的温室气体减排措施和行动。例如我国在发布的《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》、《农业农村减排固碳实施方案》等应对气候变化中提出的与农食系统减排相关的行动措施。

下表对以上政策涉及到有温室气体减排作用的行动进行梳理, 并列出了其首要政策目标。

表 3. 农食系统分目标已有减排行动一览

| 减排行动分类 | 主要措施 | 首要目标 | 涉及农食系统环节 | | |
|---------------|----------------|------------------|----------|-------|------|
| | | | 农业生产 | 农场到餐桌 | 食物消费 |
| 深度低碳行动 | | | | | |
| 低碳农业生产 | 水稻种植减排 | 温室气体减排 | √ | | |
| | 畜禽低碳减排 | 温室气体减排 | √ | | |
| | 农田碳汇行动 | 固碳增汇 | √ | | |
| 绿色制冷 | 食物冷链中制冷剂减排 | 温室气体减排 | | √ | |
| 绿色发展行动 | | | | | |
| 绿色生态农业 | 畜禽粪污资源化利用 | 水污染防治 | √ | | |
| | 化肥农药减量增效和有机肥替代 | 土壤养护、食品安全 | √ | | |
| | 农膜循环利用 | 固废污染 | √ | | |
| 清洁和现代能源体系 | 农业农村能耗减排 | 空气污染 | √ | | |
| | 食物加工能耗减排 | 工业节能、空气污染、温室气体减排 | | √ | |
| | 食物运输、零售能耗减排 | 交通节能、空气污染、温室气体减排 | | √ | |
| | 食物烹饪能耗减排 | 空气污染 | | | √ |
| | 食物包装循环利用 | 固废污染 | | √ | |
| 循环经济、“无废城市” | 厨余垃圾管理, 减少食物浪费 | 固废污染、空气污染 | | | √ |
| | 食物垃圾处理减排 | 固废污染 | | | √ |



4.我国农食系统 减排路径



结合中国农食系统减排的政策环境，这一章节主要关注在中国已有政策条件下，国内外现有的减排技术和减排实践为农食系统的减排所提供的机遇。

4.1. 农业生产环节

稻田甲烷减排

- **稻田灌溉模式调整：**由于稻田水分状况影响温室气体排放，调整灌溉方式可以减少稻田综合温室气体排放 (章永松 et al., 2012)。与常规灌溉需要保持一定深度的水层相比，在水稻生长期通过一次或者多次排水来显著减低甲烷排放。从淹水灌溉调整到湿润灌溉和间歇灌溉可以分别减少甲烷排放47%和39% (米松华 et al., 2016)。另外，在干湿交替灌溉模式下通过耦合缓释肥、硝化抑制剂等措施可以减少甲烷排放28%-49% (周胜 et al., 2020)。
- **调整耕种方式，降低土壤耕作强度：**与少耕和免耕相比，翻耕促进了有机质分解，有利于甲烷产生和排放 (马二登 et al., 2011)。以浅旋耕代替深翻耕减少甲烷排放32%。
- **调整播种方式，推广水稻直播旱种：**水稻直播由于减少稻田与水的接触时间，避免在淹水土壤条件下由于有机物被产甲烷菌分解并产生甲烷排放，并且由于减少水资源和人力的投入，因此也是一项成本有效的减排措施 (Ahmed et al., 2020)。在中国推广水稻淹水种植改为旱种的情况的研究中表明，在节约用水的同时也降低了温室气体排放 (Wang & Nie, 2018)。但是与其他传统水稻种植相比，水稻直播旱种面临包括容易倒伏、生长不良和易生杂草等问题，因此在推广的同时需要选择合适的旱稻品种、并且提供关于旱稻种植营养和杂草管理的指南以及合适的播种指导 (Liu et al., 2014; Wang & Nie, 2018)

案例 1：气候友好的水稻种植

水稻作为我国主要粮食作物之一，在不同区域广泛种植。在水稻种植过程中，其淹水土壤条件中的有机物被产甲烷菌分解时产生的甲烷排放是我国农业温室气体的主要排放源之一。近年我国不同地区也在探索如何进行更加气候友好型的水稻种植。

在云南和四川山地地区的一些乡村，也有通过开沟起垄的方式来进行水稻旱作——通过在平整好的田地里开挖形成的长条形土堆（即垄）的上面进行水稻种植，而在垄和垄之间较为低洼的地方（即垄沟）上进行灌溉，可以大幅减少稻田淹水时间并进而减少甲烷排放⁷。以四川简阳地区的一个村庄为例，农户正在通过覆盖免耕和开沟起垄的方式来种植水稻。在水稻种植前采用免耕方式减少对土壤的扰动，在种植过程中采用开沟起垄减少水稻淹水时间，同时用菜籽饼来作为肥料替代化肥，并且采用当地的菜籽壳做覆盖来增温保湿。除了通过对播种和灌溉方式调整来减少稻田甲烷排放，运用科技手段的探索也在进行中。中国水稻研究所和阿里云构建的智能种植系统基于中国水稻研究所提供出的水稻生长模型，通过云计算和物联网等数字技术，可联动水位感应仪精准灌溉⁸，测算发现这种智慧农田管理比传统模式减少了30-50%用水和30%的甲烷排放。

⁷ 夏志坚. (2023). 稻田甲烷减排：中国水稻种植正在发生的变化. 中外对话. <https://chinadialogue.net/zh/5/96736/>

⁸ 每日经济新闻.(2022). 水稻也能碳减排！一项田间头头的低碳实验：技术、成本、碳交易闭环如何构建？ <https://www.nbd.com.cn/articles/2022-10-21/2505684.html>

化肥减量和有机肥推广

- **种植和选育合适的水稻品种:** 选择低渗透率水稻品种和氮素高效利用品种可以减少排放。选育合适的水稻品种可以减少甲烷排放20%~50% (邹晓霞 et al., 2011)。
- **测土配方施肥:** 基于土壤养分的需求来合适施肥可以避免过度施肥以及肥料利用率低的问题, 由此降低氮肥施用的氧化亚氮排放。我国从 2005年开展测土配方施肥行动, 并将其作为重点推广应用的化肥减量增效技术。不同的研究也都表明了其在减少农田氧化亚氮排放的显著潜力 (Luo et al., 2019; Nayak et al., 2015)。
- **施用缓释肥和硝化抑制剂:** 氮肥使用后被土壤中微生物的硝化和反硝化过程所利用而产生氧化亚氮排放, 通过施用缓释肥, 肥料氮素逐步释放, 氧化亚氮排放减少20%~40%。采用硝化抑制剂抑制硝化速率可以减少氧化亚氮排放 11%~60% (邹晓霞 et al., 2011)。另外, 针对农户的在施肥上的技术培训和项目也可以提供很好的减排效果。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, 例如水稻和小麦的排放分别下降了大约14%和21% (Z. Cui et al., 2018)。
- **有机肥推广:** 施用有机肥可以调节土壤中微生物活性, 降低农田14%~30%氧化亚氮排放 (邹晓霞 et al., 2011)。而已有的畜禽粪污的资源化利用措施也为有机肥推广提供了发展的空间。

案例 2: 科技助力测土配方

过量化肥施用带来了一系列的环境问题, 包括水体污染和农田土壤的N₂O排放; 并且也导致土壤有机质的下降、土壤的酸化和板结, 从而降低土壤的肥力。针对化肥过量施用, 我国从2005年开始推广测土配方施肥行动, 即基于土壤养分的需求进行合适施肥来避免过度施肥以及肥料利用率低。

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 农民日报. (2016). 共筑减量新局面谱写增效新篇章. <http://www.sinofert.com/s/4368-12223-56364.html>

¹⁰ 第一财经. (2016). 中国农民尝鲜精准农业 在手机上完成智能施肥. <https://www.yicai.com/news/5003423.html>

¹¹ 农民日报. (2016). 测土配肥一键下单精准施肥手机操控. <http://www.sinochem.com.cn/s/1375-5662-19811.html>

提高农田固碳能力

- **提高土壤有机碳含量：**农田土壤有机碳是土壤肥力的基础，同时也是可以在较短时间尺度上进行调节的碳库（赵永存 et al., 2018; 邹晓霞 et al., 2011）。通过多项农田管理措施，包括实行保护性耕作、秸秆还田和氮肥管理等措施，可以减少对土壤物理性状的干扰，降低土壤有机碳的损失，提高有机碳的稳定性，从而可以增加农田碳库储量（石岳峰 et al., 2012）。针对中国农田的试验研究显示，在采取1) 传统耕作+秸秆还田，2) 免耕和3) 免耕+秸秆还田的情况下，三者均能提高农田有机碳含量，固碳年速率分别可达 0.22 g/kg、0.35 g/kg 和 0.52 g/kg（赵永存 et al., 2018）。在进一步推广包括秸秆还田、有机肥和免耕等合理农田管理措施的情况下，中国农田的有机碳储量可以从年均增长0.48% 提高到0.63%（Tao et al., 2019）。在合理经济技术条件对农田管理措施的推广，农田固碳潜力可达到每年3000-5000万吨，即每年0.25-0.4t/hm²（程琨 & 潘根兴, 2016）。

案例 3：保护性耕作的推广

东北黑土地的粮食产量占全国总量四分之一，对国家粮食安全至关重要。然而不合理的耕种使黑土地有机质含量和生产力大幅下降。2005年中央一号文件将发展保护性耕作上升为国家政策。

2007年，中国科学院联合吉林省梨树县农业技术推广总站以及吉林省的土壤肥料工作总站建立了“中国科学院保护性耕作研发基地”，在当地进行了15年地研究监控，探索出了一套技术模式和配套机具（“梨树模式”）。保护性耕作可以有效遏制土壤退化。梨树试点项目发现，2007年到2018年间，土壤有机质从22.5g/kg增加至24g/kg。秸秆覆盖还田还增加了氮磷钾等养分在耕层的积累和活性，增加了土壤养分供应能力。土壤结构和土壤生物多样性都得到了提高，蓄水抗旱能力增强¹²。2020年东北黑土保护性耕作实施面积达到了2.69×10⁶hm²（四千万亩）。除了减排与环境效益，保护性耕作还可增产增收。2017年，梨树试验基地增产约1000kg/hm²，大约增加收入1400元。保护性耕作还将氮肥利用率提高4.7%，减少了化肥使用，农机进地的次数、燃油消耗和劳动力成本，平均每公顷节省成本1650元¹³。

畜禽粪污资源化利用：肥料化和能源化利用

- **优化畜禽粪污管理：**通过合理的管理可以有效减少畜禽粪污贮存过程中温室气体排放。例如在猪粪贮存中添加10%的生物炭和膨润土，氧化亚氮排放分别降低19.8%和37.6%（雷鸣 et al., 2019）。
- **畜禽粪污的肥料化：**畜禽粪污的主要处理方式中，简单堆肥后直接还田比例依然很高。研究显示，好氧堆肥过程中通过翻堆和强制通风可以减少甲烷和氧化亚氮排放。另外，通过在猪粪堆肥中添加生物炭，甲烷和氧化亚氮排放分别下降19%和37.5%（朱志平 et al., 2020a）。
- **畜禽粪污的能源化：**通过建设沼气工程来回收畜禽粪污厌氧发酵产生的沼气，将沼气进行并网发电或者制成生物天然气的能源化利用方式可以减少甲烷排放。不同研究均显示，畜禽粪污进行厌氧发酵收集沼气可以大幅减

¹² 敖曼, 张旭东, 关义新. (2021). 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践. 中国科学院院刊, 36(10): 1203-1215.

¹³ 同上.

少温室气体排放 (於江坤 et al., 2015; 朱志平 et al., 2020b)。以我国一个建在南方的年出栏万头猪的养猪场为例, 其因沼气工程而带来的减排约为781吨CO₂e (於江坤 et al., 2015)。

案例 4: 畜禽粪污资源化利用

我国一直以来在积极推动畜禽粪污资源化利用的政策法规, 当前畜禽粪污的资源化利用方式主要有两种: 肥料化利用和能源化利用。随着畜禽养殖规模化、集约化发展, 对由第三方企业集中收集畜禽养殖粪污等农业废弃物并进行资源化利用的模式提出了需求。

江西正合环保集团创立了“N2N”绿色生态循环农业模式, 通过对上游N家养殖企业粪污全量化收集处理, 在生产端提供沼气发电、生活端沼气供气, 并为N家下游种植企业提供有机肥等方式构建绿色循环产业链, 同时解决农业面源污染问题。其位于南昌市流湖镇的生态农业科技园, 集中收运红谷滩和新建区229家规模化养殖场和周边厕所粪污, 每年处理粪污30万吨, 产生沼气500万立方米, 发电1000万度; 生产各种固态有机肥2万吨, 沼液肥26万吨, 土壤调理剂1000吨。年产沼气可替代标准煤7400吨, 减排二氧化碳1.8万吨, 沼肥利用相当于减少化肥施用1万吨¹⁴。

推广饲草料: 调整饲料结构和增加饲料辅料

- **调整饲料结构:** 采用合理的饲料种类在提高动物消化率的同时减少甲烷排放 (孙福昱 et al., 2018; 於江坤 et al., 2015; 章永松 et al., 2012; 邹晓霞 et al., 2011)。例如对粗饲料原料进行青贮、微贮或氨化方式进行加工处理可以降低甲烷产量 (娜仁花 et al., 2011; 孙福昱 et al., 2018)。对粗饲料原料进行青贮处理可以降低甲烷排放 6%-8% (娜仁花 et al., 2011)。适当的添加蛋白质饲料可以减低瘤胃养分降解速度, 提高肠道对养分的吸收, 同时抑制瘤胃发酵从而降低甲烷排放 (孙福昱 et al., 2018)。改变动物日粮的精粗比可以影响甲烷排放。在粗料均为玉米秸秆青贮条件下, 精粗比60 : 40 的日粮产生的甲烷比精粗比40 : 60的日粮减少了21% (娜仁花 et al., 2011)。
- **饲料中添加辅料:** 在饲料中添加大蒜素和茶皂素都能抑制瘤胃的微生物发酵, 分别减少甲烷排放70%以上和16% (邹晓霞 et al., 2011)。采用甲烷抑制剂可以减少25%左右的甲烷生成 (章永松 et al., 2012)。最新的研究和实验显示, 将少量红海藻添加到肉牛饲料中不仅可以提高饲料转化率, 同时可以减少其肠道发酵中69.8%-80%的甲烷排放, 并且肉牛的质量并没有受到影响 (Roque et al., 2021)。未来如果能够进行推广应用, 减排前景也很可观。

¹⁴ 专家访谈。

案例 5: 调整奶牛的餐盘减少甲烷排放

通过在盐碱地上种植耐盐作物——甜高粱，并将其与玉米混合制成青贮饲料用于畜牧养殖，在提高土地利用率和缓解牧草短缺的同时，也提高了饲料吸收率和减少甲烷排放。

这样的种植和饲养方式正在江苏省北部的5000亩盐碱地上得到试验和推广。随着肉类和奶类消费需求的增加，一些大型牛奶生产企业在江苏沿海设立了大型养殖场。奶牛饲料大多以青贮玉米为主，由于本地的盐碱地的玉米产量低，过去畜牧企业面临本地牧草短缺的情况。现在通过在当地的沿海滩涂盐碱地上混种适合不同盐碱度的甜高粱和青贮玉米，混收以后进行全株混合裹包青贮，再将青贮饲料送到养殖场，添加上必要的营养元素辅料后成为奶牛的日粮。经过处理的青贮饲料可消化养分高，可以改善奶牛乳品质¹⁵。数据显示，采用甜高粱和青贮玉米混种模式每亩收入达3000元左右，亩总效益增加24%，并且这种全混日粮的奶牛乳产量提高了11%，甲烷也有所下降¹⁶。

农业数字化：推广农业生产经营的精准化

- **精准农业技术推广：**通过信息化和智能化的技术来根据天气变化、农作物需求等农作物生长条件来进行生产要素的精准投入，通过合理的资源利用可以提高农业生产效率并且实现温室气体减排 (Balafoutis et al., 2017)。例如变量施肥播种技术的采用，通过精准施肥可以减少5%的排放 (Balafoutis et al., 2017)。在进行免耕和少耕的时候搭载使用自动操舵系统可以额外减少10%的温室气体排放 (Cillis et al., 2018)。精准农业在以大规模农场为主的国家例如美国和加拿大应用广泛，但是在耕地分散的地区例如日本也得到了普及。精准农业在中国试点示范主要在新疆、黑龙江和吉林等具有大规模农地的地区开展 (方向明 & 李姣媛, 2018)，未来通过技术改进和研发可以普及到更多地区。

案例 6: 精准农业助力化肥农药减量增效

随着科技发展，智慧农业的兴起，大数据、遥感无人机等信息化技术的在农田和农作物的精准种植和管理中得以应用和推广。例如通过传感器来收集土壤、农作物的信息以及天气、温度等环境数据，然后通过大数据分析来为农户提供种植、灌溉施肥等建议，从而能够提高产量、节能资源。

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¹⁷。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¹⁸。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¹⁹。

¹⁵ 张晔. (2022). 甜高粱配青玉米，盐碱地上种出优质青贮饲料. 科技日报. http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2022-12/12/content_545946.htm?div=1

¹⁶ 同上

¹⁷ 森宁. (2023). 3名90后玩转江苏5千亩农田:用智慧农业系统“耕种管收”. 澎湃新闻. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_19944206

¹⁸ 同上

¹⁹ 极飞科技. (2022). 极飞科技企业社会责任报告2022.

农用机械的节能减排

- **农用机械能效提升:** 农用机械, 例如用在农作物种植和畜牧生产过程使用的机械等的能源消耗是农业生产中二氧化碳排放主要来源。农业柴油消耗占我国柴油消耗总量30%-40%左右。研究显示, 农业机械作业效率提高10%可以减少900-1000万吨二氧化碳(邹晓霞 et al., 2011)。 农用机械减排依托现有的农机购置补贴政策, 通过淘汰高能耗的农业机械以及优化农机装备等措施来提高农机能效 (Dou, 2018; 刘向新 et al., 2012)。
- **农业机械电动化:** 推动新能源农业机械的发展可以减少由于传统化石能源燃烧带来的排放。尽管国内电动农机起步较晚, 但是未来包括电动拖拉机、微耕机、割草机等电动农业机械在地少人多的中国都将有很多的适用和推广空间。未来在成本下降和电池污染可控的情况下, 中小型农机的电动化对传统农机将有很大的替代性(王杰 et al., 2019)。

案例 7: 农机电动化初探

伴随农业机械化率的提高, 农机柴油使用也在增加。推动农机电动化将可以减少柴油使用以及由此带来的碳排放和环境污染。随着我国绿色低碳发展和农业农村现代化的推进, 对农机电动化的探索也在加速。

近年国内多家企业也纷纷展开对电动拖拉机的研发。2020年, 国家农机装备创新中心发布了由其牵头研制的国内首台氢燃料电动无人驾驶拖拉机²⁰。江苏悦达集团下的黄海金马拖拉机厂在2021年推出了YL254ET和YU1004两款电动拖拉机。前者可以在大棚、果园里进行轻负荷作业, 后者是专门为水田旋耕、播种、田间管理开发的水田拖拉机。目前两款电动拖拉机均已进入小批量生产并投入到实际使用中²¹。另外一家开展电动拖拉机研发的企业是来自甘肃酒泉的铸陇机械制造有限公司, 公司针对甘肃山区丘陵为主的地块特点, 研制出了电动小麦播种机、电动中耕除草机、电动追肥机等电动系列机具, 并且在定西、临夏等地建立了试验示范点开展试验示范²²。公司在2022年研制生产的电动手扶大豆-玉米一体化播种机也在市场上颇受好评²³。

4.2. 农场到餐桌环节的减排机遇

绿色包装: 简化食物包装和加强回收利用

食物包装的减排既需要简化包装材料和环保包装材料, 同时也需要提高对包装材料的回收使用(杨孝伟 & 曹秀芝, 2012)。中国已有的包括新限塑令和绿色包装的政策也将绿色包装作为包装工业的发展方向。

- **简化包装和采用可降解的生物基材料:** 一项针对食物包装材料温室气体排放的研究表明, 以每份食物的包装为单位, 纸盒的排放要明显低于塑料和玻璃, 单人份的食物包装排放也明显高于多人大份食物包装 (Fresán et al., 2019)。当然, 纸盒并不能完全替代其他食物包装, 并且纸盒包装的推广也会带来更多纸盒生产和由此导致的能

²⁰ 河南日报. (2020). 5G+氢燃料电动拖拉机在河南亮相. http://iot.china.com.cn/content/2020-06/18/content_41190201.html

²¹ 35斗. (2022) 国家队混动拖拉机下线, 国产拖拉机提前进入电动时代. <https://m.jiemian.com/article/7840604.html>

²² 中国农业机械化信息网. (2022). 电动农机技术优势分析及未来工作建议. <http://www.amic.agri.cn/secondLevelPage/info/31/147178>

²³ 同上。

耗、水耗和温室气体排放。采用稻秆、麦秆等农业废弃物进行制浆来作为包装材料可以在保护森林的同时减少约50%的二氧化碳排放 (杨孝伟 & 曹秀芝, 2012)。

- **包装材料回收利用:** 针对以玻璃和铝罐为主的饮料包装材料, 其温室气体排放主要来自生产阶段, 但是通过回收管理并且将这些材料进行二次利用, 则可以降低其材料生产中将近70-80%左右的排放 (Simon et al., 2016)。随着中国食物外卖的盛行, 关于外卖食物包装带来的环境影响的分析显示, 尽管用纸质餐盒来替代塑料餐盒可以减少外卖食物中49%的碳排放, 但是同时带来大量的纸盒垃圾产生, 而采用共享餐盒的模式——由可重复使用和可回收的餐盒来替代传统的外卖餐盒, 所有餐具由消费者返回给统一餐具收集点进行清洗的情况下, 将带来包括97%碳排放的减少以及其他环境污染物67%-93%左右的下降 (Zhou et al., 2020)。

案例 8: 食品包装的减塑行动

塑料是食品包装和餐饮外卖中常用的材料。目前, 塑料多为“生产-使用-废弃”的线性经济模式主导, 造成塑料包装的浪费。此外, 塑料生产和消费以及最后的处置过程都会排放大量温室气体。农食系统中所使用的塑料包装需要向循环经济转型, 不少企业已经开始采取行动。

针对外卖餐食所产生的大量一次性塑料垃圾, 一家名为“爽提”的企业提出在高校使用循环餐盒的解决方案: 通过自行搭建的校园内外卖平台来集中使用、回收和清洗循环餐盒, 避免一次性餐盒垃圾的产生。截至2021年12月, 爽提循环餐盒平均循环使用次数已达63次。研究发现, 相比一次性餐盒, 单个循环餐盒在生产和使用(如回收、清洗和消毒处理)阶段增加了环境负荷, 但若循环次数能达到6-8次, 即可与同等功能或规格的一次性塑料餐盒因减少废弃物产生在综合环境影响上表现相当。在使用63次的情景下, 循环餐盒每次使用可减少91g CO₂e²⁴。“爽提”预计, 每个循环餐盒能使用一年半至两年, 至少可循环150次²⁵。

绿色冷链: 低GWP值制冷剂推广应用和轻型货运电动化

尽管冷链物流的增加可以延长易腐食物保鲜期, 因此可以减少由于食物变质引起的食物浪费, 但是另一方面也由于使用高GWP值的HFCs制冷剂(例如HFC-134a, HFC-404A, HFC-407C, HFC-507A等)带来了许多含氟温室气体排放。一项针对在撒哈拉以南非洲地区来复制北美和欧洲冷链发展模式研究显示, 当新增冷链仍然采取高GWP值制冷剂的情况下, 制冷剂泄漏带来的排放仍然高于由冷链使用所避免的食物浪费排放(Heard & Miller, 2018)。因此, 在冷链物流中推广低GWP值制冷剂仍有必要。

此外, 中国已经批约的《基加利修正案》下对HFCs生产和消费的控制也将推动环保型低GWP值制冷剂的推广和应用。目前, 在中国生鲜食物冷链物流中的冷库、冷柜和冷藏车等使用的制冷设备中仍然以HFCs制冷剂为主, 未来对于低GWP值制冷剂例如氨制冷剂(R717)、二氧化碳制冷剂(R744)、丙烷制冷剂(R290)以及HFOs合成制冷剂的研发和推广, 将为HFCs制冷剂的替代提供了选择。

- **氨制冷剂R717在大型冷库中的推广:** 尽管不同温度冷库采取的制冷系统和制冷剂不同, 目前中国冷库中主要使用

²⁴ 摆脱塑缚. 外卖循环餐盒经济与环境效益研究报告<http://www.plasticfreechn.org.cn/upload/ueditor/20220511/202205111144068741.pdf>

²⁵ 南方周末. 外卖减塑难在哪? 3500万份外卖订单里的发现<https://new.qq.com/rain/a/20220602A0857A00>

的制冷剂为R22、R404A、R507A和R717，其中前三者均为HFCs制冷剂。2013年后中国新建的冷库中其中半数左右仍然采用R507A，另外30%采用混合有R744的制冷剂，还有15%采用R717 (Gao et al., 2021)。尽管R717存在泄漏安全隐患，但是在采取减少制冷系统充注量和保证系统安全运行的技术措施后，将可以得到快速推广应用²⁶。

- **冷藏运输中推广清洁能源和低GWP值制冷剂：**居民对生鲜食物需求的增加带动了冷链物流快速发展，冷藏车数量从2014年7.5万辆增加到2018年18万辆，并将随市场扩大而增长 (Dong et al., 2021)。目前冷藏车有90%依靠机械式制冷系统，以柴油为主(吴俊章, 2020)。冷藏车的制冷剂中，中温冷藏以R134a为主，低温冷藏以R404A为主，两者都是高GWP值HFCs 制冷剂 (Gao et al., 2021)。如果采用低GWP值制冷剂，例如将R744应用在冷藏车中，与R134a相比，在同等冷却能力下，其消耗的燃料和直接碳足迹都有显著下降 (吴俊章, 2020)。研究同时显示，在一定条件下，采用节能环保型制冷剂能够降低冷藏车制冷系统48%~100%的碳排放，另外通过减少运行时间、降低制冷系统重量和使用清洁能源可以降低冷藏车总碳足迹的16.5%-63.4% (吴俊章, 2020)。
- **超市冷柜中对二氧化碳 (R744) 制冷剂的推广：**中国超市冷柜中制冷剂以R22和R404A为主，分别占比51%和32% (Gao et al., 2021)。未来可替代的制冷剂以二氧化碳制冷剂 (R744) 为主，这种制冷剂在欧洲和日本已经得到推广应用，其中欧洲的29000家超市和日本的5000家超市都已经采用这一类制冷剂 (Gao et al., 2021)。这种制冷剂的缺点是在高温条件下能效将降低。以二氧化碳为基础的制冷剂在中国超市进行推广的研究显示，其对传统制冷剂的替代的减排潜力在13%-53% 之间。由于技术原因，其在中国北方城市的推广更具有成本有效性 (Q. Cui et al., 2020)。但是伴随技术改进，在中国其他地区的推广仍有潜力。

案例 9：农产品保鲜最先一公里——移动冷库

农产品冷链运输的发展可以减少新鲜收获的农产品在未能得到及时保鲜情况下造成的损失和浪费。因此对于农产品生产的最先一公里的冷链基础设施的建设不容忽视。

作为国内最大的设施芦笋种植基地，江苏省涟水县的芦笋产量占全国30%。为了对不易储藏的芦笋进行保鲜，当地的供电部门通过建立移动冷库，来解决芦笋从田头到冷库的预冷问题。由于芦笋对新鲜度要求很高，采收2小时之类需要完成分拣，裁切，打捆，并进入冷库进行预冷²⁷，为了避免在高温天气下芦笋采摘后因为气温过高导致老化，国网涟水县供电公司给芦笋种植配备了移动冷库²⁸。移动冷库可以直接开到大棚田头，将刚采摘的芦笋进行锁鲜。芦笋采摘后不到10分钟放入移动冷库，可以减少20%-30%的田头损耗，使预冷芦笋的保鲜期延长3天左右²⁹。

移动冷库面积在10平方米左右，移动冷库安装在纯电动平板车上，在收储芦笋的冷库由一组UPS电源供电。UPS电源可供冷藏车厢内一台2匹的压缩机制冷1小时左右，同时还有一到两组备用蓄电池组。日常可以用220伏电源给车辆和蓄电池充电³⁰。

²⁶ 中国制冷协会.(2020). 中国制冷行业降低HFCs技术进展. 演示文稿.

²⁷ 涟水新闻.(2022). 冷库立田头 芦笋“抢鲜”出. http://www.lianshui.gov.cn/col/888_535372/art/16592832/1661473369941zq5m3ixU.html

²⁸ 人民号.(2022). 江苏淮安：为给芦笋保鲜，移动冷库来到田头. <https://rmh.pdnews.cn/Pc/ArtInfoApi/article?id=30629111>

²⁹ 湖北新闻.(2022). “冰箱”立田头！高温天气下芦笋这样“抢鲜”上市. http://news.cnhubei.com/content/2022-08/23/content_15000843.html

³⁰ 人民号.(2022). 江苏淮安：为给芦笋保鲜，移动冷库来到田头. <https://rmh.pdnews.cn/Pc/ArtInfoApi/article?id=30629111>

4.3. 食物消费的减排机遇

餐厨垃圾资源化利用：厌氧消化回收利用沼气

食物消费中餐饮和厨余垃圾处理中排放的甲烷是这一环节中主要温室气体排放。目前已有的政策和技术都为餐厨垃圾的减排提供了机遇。

- **生活垃圾分类推动餐厨垃圾回收利用：**在中国正在推广的生活垃圾分类和餐厨垃圾的资源化利用政策措施下，由于餐厨垃圾被单独分离出来进行处理处置，可以减少最终进行填埋和焚烧的混合垃圾量以及由此产生的甲烷排放。此外，分类出来的餐厨垃圾可以通过饲料化、厌氧消化和好氧堆肥等方式进行处理处置，实现餐厨垃圾的资源回收利用的同时减少温室气体排放。以目前正在进行的厨余垃圾分类为例，研究显示，厨余垃圾分类率每提高20%，生活垃圾系统的碳减排量可以增加5%-7% (李欢 et al., 2021)。
- **通过餐厨垃圾厌氧消化进行沼气回收利用：**针对不同的餐厨垃圾处理模式，厌氧消化和好氧堆肥具有较好的回收资源属性，目前在欧美国家都已经得到推广应用 (王凯军 et al., 2020)。针对厨余垃圾在这两种处理模式的碳排放分析中，厌氧消化的碳减排效应更为显著，减排效应在65-209kg CO₂e/t.。好氧堆肥过程中由于温室气体泄漏较多，厨余垃圾好氧堆肥净碳排放为165kg CO₂e/t (李欢 et al., 2021)。在我国陆续建成的餐厨垃圾处理处置工程中也形成了也厌氧消化为主的工艺路线。但是由于餐厨垃圾成分复杂，餐厨垃圾厌氧消化技术应用还面临沼气产量低、运行成本高等问题需要解决 (王凯军 et al., 2020)。在能保证厌氧消化技术高效稳定运行的前提下，其市场应用前景较好。尤其是中国餐厨垃圾处理仍有巨大的缺口，即使《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》中的餐厨垃圾处理项目都能如期建成投产，餐厨垃圾处理率仅20%³¹。因此，伴随餐厨处理能力的提高和厌氧消化技术的提升，由此带来的减排潜力也很可观。

案例 10：餐厨垃圾厌氧产沼气³²

在餐厨垃圾处理过程中，沼气利用方式有发电上网、热电联产、提纯进入天然气管网、提纯做车用燃气等；鉴于餐厨垃圾原料成分复杂，含油及含盐量高，沼液沼渣利用场景受限，在现有的处理项目中，均按照污水废渣处理，新建项目经济性分析应切实考虑此部分费用或探索其他应用场景。

山西省太原市餐厨垃圾处理项目位于太原市清徐县柳杜乡东南社村，总设计规模为日处理能力500吨，分两期建设；一期工程于2017年建成并投入试运营，餐厨垃圾处理能力为200吨/日，收集范围包括太原市六城区和清徐县。

项目采用建设-拥有-移交（BOT）模式建设，特许经营期为30年，建设运营商为太原天润生物能源公司。项目总体建设总投资3.11亿元人民币，根据特许经营协议，地方政府支付的餐厨垃圾收运处理费为309元/吨。项目已实现稳定运行，餐厨垃圾日收运处理量超过200吨，年产沼气超过600万立方米，计划提纯作为生物天然气，另外油水分离后的粗油脂也是主要产品。餐厨垃圾处理后的沼液计划外运至污水处理厂，沼渣运往园区内垃圾焚烧厂焚烧处理。

³¹ 科技日报. (2021). 生产者付费 生活垃圾将步入“计量收费”时代. http://www.xinhuanet.com/politics/2021-07/20/c_1127672159.htm

³² iGDP. (2021). 中国城市生活垃圾和市政污泥处理良好实践指南. 绿色创新发展中心.

膳食结构调整：推广居民膳食指南

合理均衡的膳食结构不仅有利于公众健康，同时也有助于减少温室气体排放 (Jarmul et al., 2020; Tilman & Clark, 2014)。例如以丰富的蔬菜、谷物和水果摄入为主，同时合理控制肉类食物消费的膳食结构在全球范围的推广，可以减少包括糖尿病、癌症和心血管疾病的患病风险，同时降低30%~55%的温室气体排放(Tilman & Clark, 2014)。

- **推广居民膳食指南：**中国已经发布的《中国食物与营养发展纲要（2014-2020）》和定期更新的《中国居民膳食指南》均对居民的健康膳食进行了介绍和推广。参考《中国食物与营养发展纲要（2014-2020）》的饮食结构设定，研究显示，在推广膳食结构多样化基础上适当控制肉类消费每年带来的减排潜力在0.53~2.22亿吨CO₂e左右 (Song et al., 2017)。在AGFEP 2021年发布的报告中也提到，在不采取任何膳食建议的基准方案中，2030中国膳食结构变化导致农业温室气体排放比2020年增加8544万吨，上升12% (AGFEP, 2021)。在采取以中国膳食宝塔以及EAT-柳叶刀的健康膳食等作为参考依据的情况下，2030年由膳食结构调整带来的农业温室气体排放比基准方案减少1.46-2.02亿吨CO₂e，下降18%-25% (AGFEP, 2021)。不过需要注意的是，膳食结构的调整是在保持营养健康的情况下减少温室气体排放。

案例 11：东方健康膳食模式——江南饮食

受地域、气候和传统饮食文化的影响，我国各地的膳食模式也有差异。为推动居民通过平衡膳食来改变营养健康状况和预防慢性疾病，中国营养学会会定期发布居民膳食指南。在其新发布的2022版膳食指南中，我国以浙江、上海、江苏等为代表的江南地区膳食被列入东方健康膳食模式代表得到推广。

在《中国居民膳食指南科学研究报告（2021）》中对代表性健康膳食的研究中提到，江南地区膳食以米类为主，动物性食物摄入中鱼虾类摄入较高，猪肉摄入量低，烹饪清淡少油少盐。并且具有这一模式特点的人群的预期寿命较高，发生超重肥胖、2型糖尿病、代谢综合症等疾病风险也较低³³。

江南饮食的具体特点也被总结为五多三少，具体包括多白肉（多食用鸡鸭鹅鱼等白肉），多坚果，多粗粮，多果蔬，多蒸煮；少油炸，少甜腻，少精米³⁴。

减少食物浪费：践行绿色消费

减少在消费端的食物浪费不仅可以减少处理被浪费的食物垃圾带来的温室气体排放，同时也可以降低食物生产的需求以及由此带来的排放。一项针对中国食物损耗和浪费研究显示，在2014-2018年期间，我国由于食物损耗和浪费带来的年均温室气体排放在4.64亿吨CO₂e左右，其中超过2亿吨CO₂e的排放来自消费环节的食物浪费 (Xue et al., 2021)。研究分析同时表明减少消费端的50%食物浪费带来的减排效应等同于减少了一半来自食物生产和运输零售上食物损耗和浪费。基于不同就餐场景的温室气体排放也显示，在餐厅每人每餐浪费量的温室气体排放最高，其后依次是食堂、外卖和家庭食物浪费(清华大学环境学院 et al., 2023)。因此积极推动个人和餐饮企业的在反食物浪费上的实践可以持续减少由此带来的排放。具体包括我国自2013年以来一直推行的光盘行动，以及近年来餐厅和外卖平台提供的小份菜选项。

³³ 中国营养学会.(2021). 中国居民膳食指南科学研究报告.

³⁴ 澎湃. (2021). 为什么江南饮食被誉为“中国最健康的饮食”？ https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_12508999

案例 12: 商业创新减少食物浪费

保质期是伴随着食品工业产生的，临期食品是临近食品的保质期限但还没有过期的食品。原则上，只要是在保质期之内的食品，质量就有保障，但临期食品仍然销售困难，经常面临被丢弃的命运。随着可持续消费方式的扩展，多家企业和商超通过减少临期食品浪费的方式减少来食物浪费，好特卖便是其中之一。

自创立以来，好特卖通过发挥周转过剩资源的优势，引导消费者形成可持续的消费观念和生活方式。2021年，全国400余家好特卖门店共计服务超过1300万消费者，流转超3亿件商品，直接减少了7万余吨食物的浪费，约等于减少14万吨的碳排放³⁵。2022年8-9月，好特卖携手星展银行一同策划无浪费月，联动线下门店与社交平台，邀请7位粉丝500万级博主及百位关键消费领袖（KOC）向广大消费者进行“食品无浪费”的主题宣传。本次活动共计有4万余人线下参与，一起拯救了122余吨即将被浪费的食物，相当于减少了243.8吨温室气体排放³⁶。

³⁵ 齐鲁晚报. (2022). 好特卖引领低碳消费，创造美好生活. https://k.sina.cn/article_5328858693_13d9fee4500101kl45.html?from=tech&subch=internet

³⁶ 同上.

5. 我国农食系统 温室气体排放 情景研究



5.1. 情景设置

基于我国现有的促进农食系统减排的政策措施，以及国内外可供参考的减排实践，本报告对我国农食系统未来可能的排放趋势建立了三个情景。

- **参考情景：**基于我国经济社会发展和绿色低碳转型趋势，估算未来农食系统排放。
- **强化减排情景：**在参考情景的基础上，考虑到延续和加强已经实施的绿色发展行动及低碳农业行动，以及主要排放源下其他尚未纳入的具有成本有效性的减排行动。
- **深度减排情景：**基于国内外已有减排实践，在强化减排情景的基础上，强化绿色发展行动以及所有可能的低碳农业行动，该情景将1) 纳入成本较高的减排实践，2) 更快和更高比例的采用低成本减排行动，3) 考虑消费端行为改变带来的减排。

表 4. 中国农食系统温室气体减排情景设置的基本假设

| 主要排放源 | 参考情景 | | 强化减排行动情景基本假设 | 深度减排情景基本假设 |
|--------|-----------|-----------|---|---|
| | 2030年排放占比 | 2060年排放占比 | | |
| 农业生产 | 57.2% | 68.7% | <ul style="list-style-type: none"> • 畜禽养殖减排:加大力度推广畜禽粪污产沼和畜禽规模化养殖;推广动物育种、采取包括茶皂素、益生菌在内的食物添加剂。 • 水稻种植减排:调整灌溉方式,推广干湿交替灌溉。 • 农田减排:加大力度推广测土配方和保护性耕作。 • 农业投入品减排:加大力度推广可降解农膜,氮肥使用下降带来的氮肥生产的调整。 • 农业能耗减排:农业机械能效提升。 | <ul style="list-style-type: none"> • 畜禽养殖减排:在减排行动情景下的假设条件基础上考虑膳食结构调整;食物添加剂中包括茶皂素、益生菌以及脂类物质的补充。 • 水稻种植:考虑灌溉调整、水稻直播旱种的推广。 • 农田减排:在减排行动情景下的假设条件基础上推广缓释肥、氮肥增效剂。 • 农业投入品减排:可降解农膜推广力度加强,单位面积农药使用效率提升以及氮肥使用下降带来的氮肥生产的调整。 • 农业能耗减排:农业机械能效提升以及农机电动化的推广。 |
| 食物加工 | 8.7% | 5.2% | <ul style="list-style-type: none"> • 食物加工能效提升 | <ul style="list-style-type: none"> • 食物加工能耗中清洁电力比例提高。 |
| 食物包装 | 5.8% | 5.6% | <ul style="list-style-type: none"> • 包装塑料薄膜采取可降解材料 • 推广塑料餐盒的纸盒替代 • 提高纸箱回收利用 | <ul style="list-style-type: none"> • 塑料包装中采取可降解材料力度加强,推动再生塑料用于食品容器。 • 提高纸箱回收利用,以及包装用纸中废纸比例提高。 |
| 食物运输 | 5.7% | 4.5% | <ul style="list-style-type: none"> • 运输能效提升 • 冷链运输中低GWP制冷剂推广 | <ul style="list-style-type: none"> • 在能效提升基础上,提高食物货运电动化比例。 • 维持冷链运输中低GWP制冷剂推广。 |
| 食物零售 | 0.4% | 0.3% | 无 | 无 |
| 食物烹饪 | 13.7% | 10% | <ul style="list-style-type: none"> • 食物烹饪中能效提升 | <ul style="list-style-type: none"> • 食物烹饪用能结构的进一步优化。 |
| 餐厨垃圾处理 | 8.5% | 5.7% | <ul style="list-style-type: none"> • 进一步提高垃圾分类率以及厨余垃圾的资源化利用。 • 厨余垃圾焚烧发电。 | <ul style="list-style-type: none"> • 在减排行动基础上提高厨余垃圾的资源化利用。 • 厨余垃圾焚烧发电。 |

5.2. 主要发现

1. 农食系统温室气体总排放将继续增加

在参考情景下，即使采取一定减排措施，我国农食系统温室气体排放将持续上升，2060年总排放将比2019年增加30%。农业生产的温室气体排放将持续增长，而食品加工、运输、零售、烹饪和垃圾处理等环节，得益于能效水平提升，排放在达峰后呈缓慢下降趋势。

温室气体增长的主要来源是甲烷和氧化亚氮，其排放将持续上升，甲烷排放从2019年的5.19亿吨CO₂e上升到2060年的10.06亿吨CO₂e，氧化亚氮则从2.73亿吨CO₂e缓慢增长到3.3亿吨CO₂e。此外，含氟温室气体则在持续增长到2040左右后缓慢下降，二氧化碳排放也在2030年之后开始逐渐下降。

图7. 参考情景下我国农食系统分阶段排放趋势（百万吨 CO₂e）

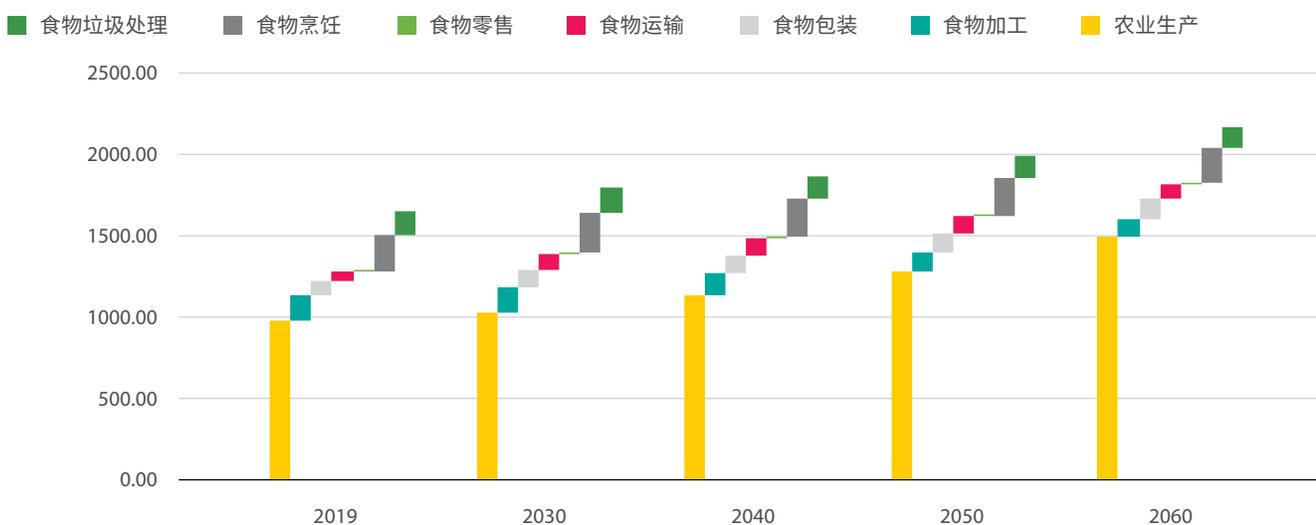
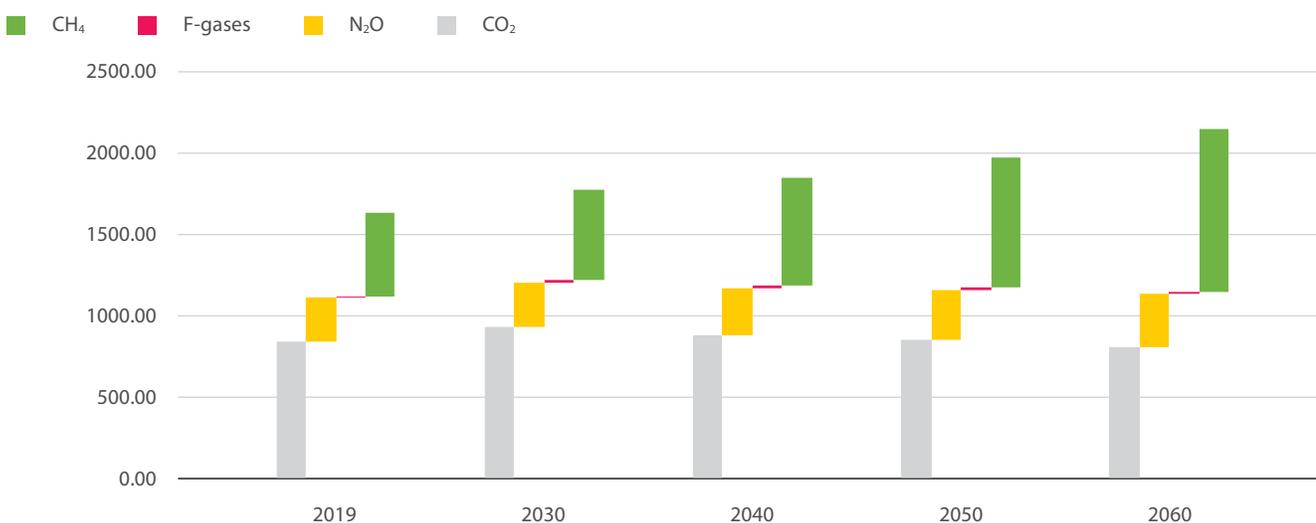


图8. 参考情景下我国农食系统分气体排放趋势（百万吨 CO₂e）



2. 农食系统实现碳中和挑战巨大

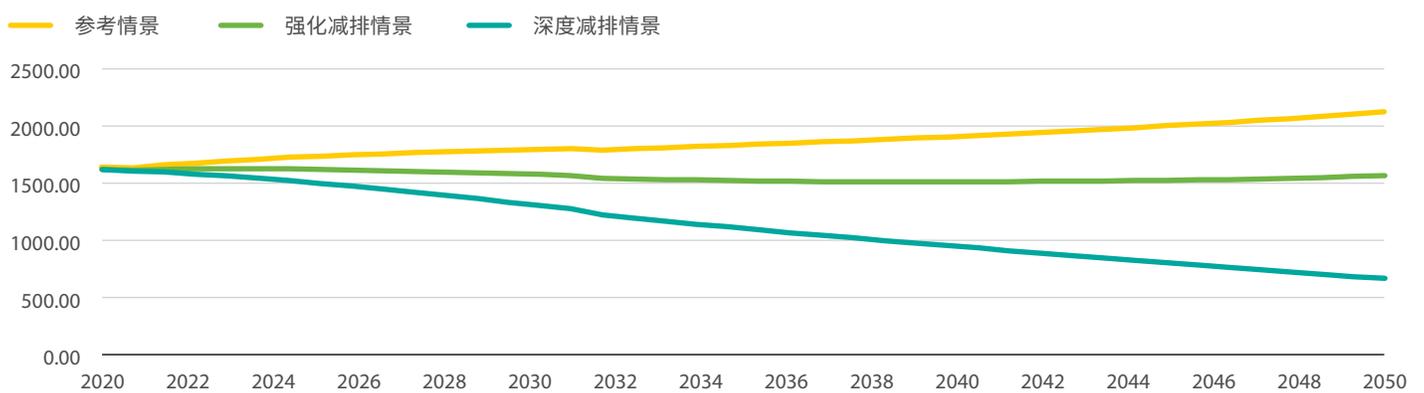
在参考情景下，2019年温室气体排放为16.46亿吨CO₂e，到2030年增加到 17.89亿吨CO₂e，2060年增加到21.62亿吨CO₂e。图9显示了中国农食系统在不同情景下的温室气体排放。

在强化减排情景下，我国农食系统温室气体排放从2025年左右开始缓慢下降，到2030年温室气体排放16.14亿吨CO₂e，到2060年下降到15.8 亿吨CO₂e，比参考情景下2060年的排放减少36%。在该情景下的温室气体排放到2048年左右仍有小幅增长，主要来自畜禽养殖的温室气体排放。

在深度减排情景下，我国农食系统温室气体排放从2020年开始已经呈逐步下降趋势。到2030年下降到14.08亿吨CO₂e，2060年降至6.51亿吨CO₂e，比参考情景下2060年的排放减少70%，仍不能实现近零排放。

三种情景排放趋势：

图 9. 不同情景下我国农食系统温室气体排放趋势（百万吨 CO₂e）



不同减排情景下分阶段减排潜力：

图 10. 强化减排情景和深度减排情景下我国农食系统分阶段减排潜力（百万吨 CO₂e）

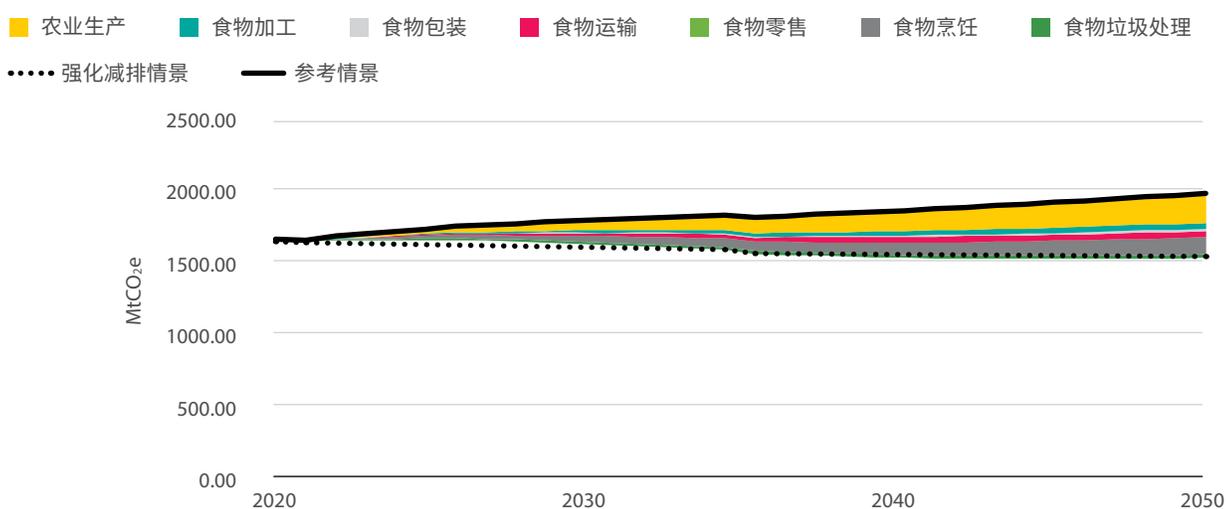
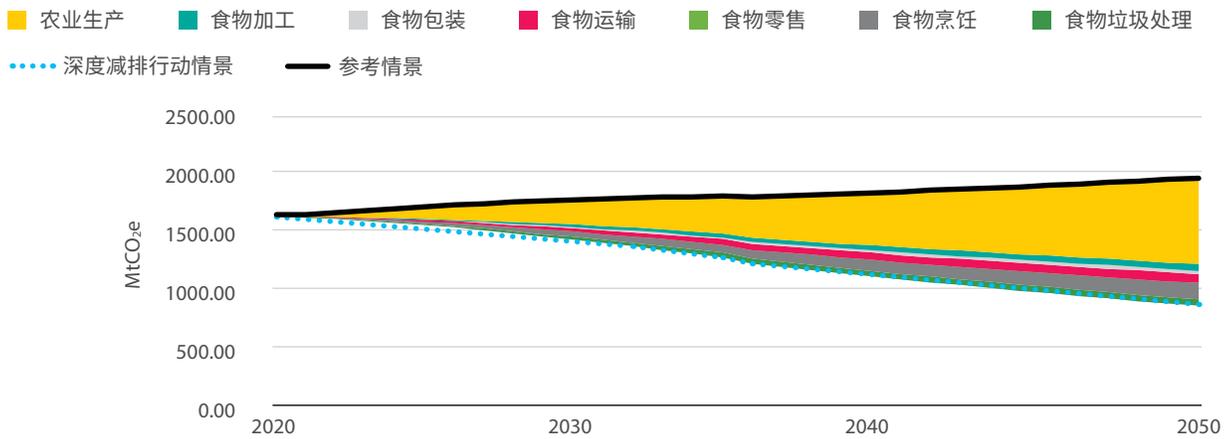


图 10. 强化减排情景和深度减排情景下我国农食系统分阶段减排潜力（百万吨 CO₂e）（续）



不同减排情景下分气体减排潜力：

图 11. 强化减排情景和深度减排情景下我国农食系统分气体减排潜力（百万吨 CO₂e）

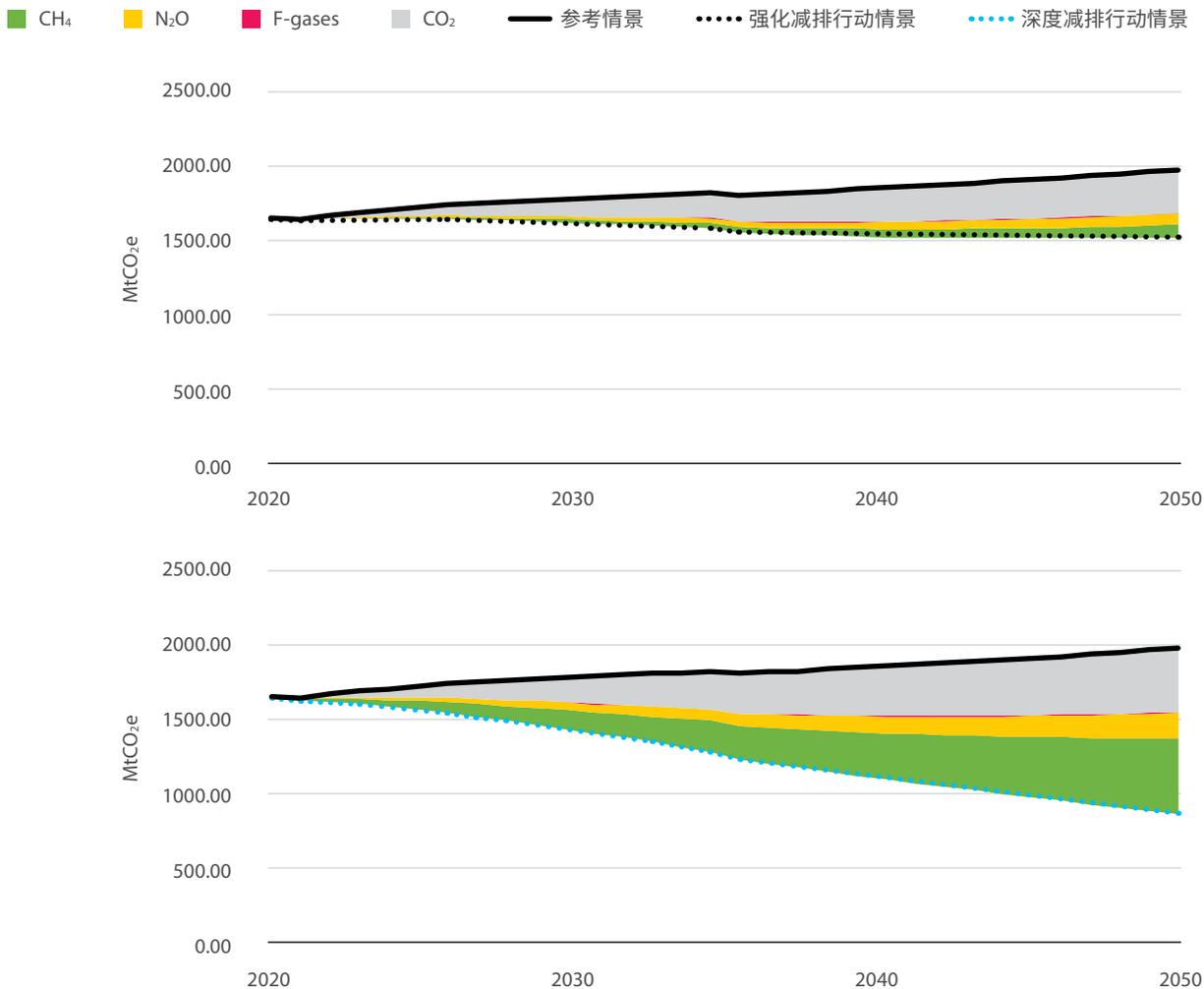


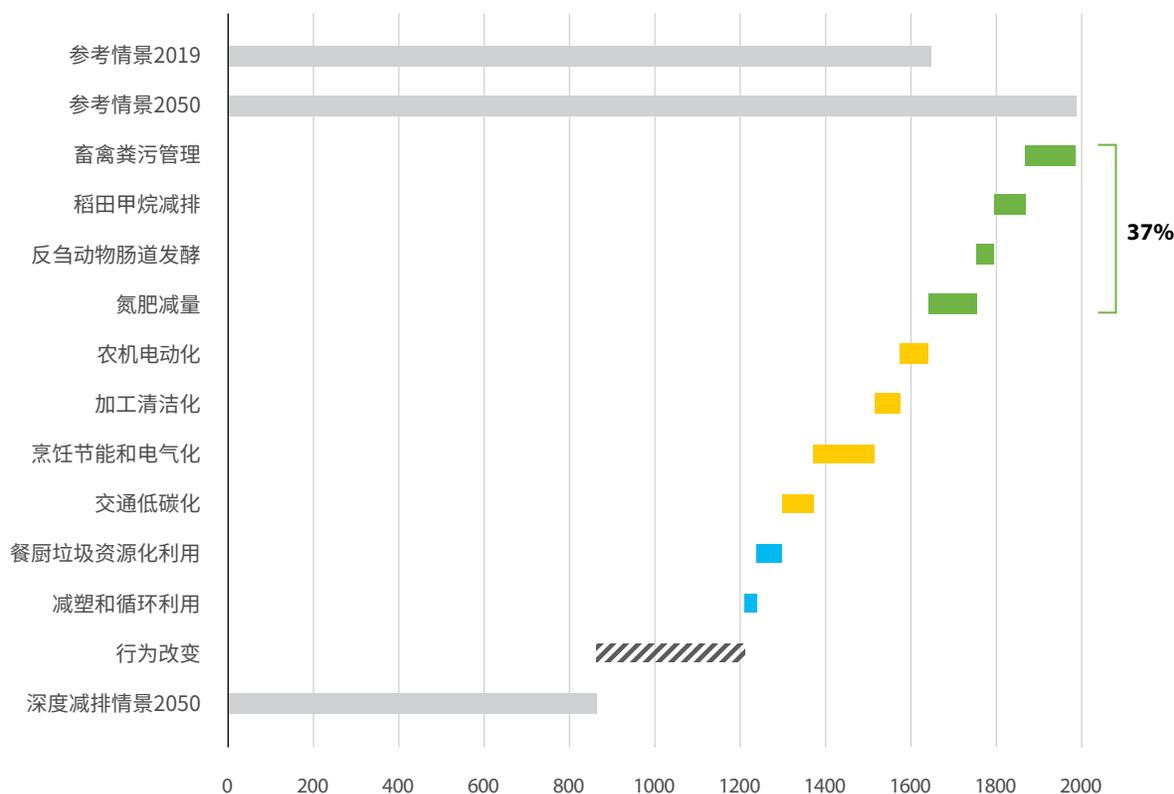
表 5. 强化减排情景 VS. 深度减排情景分气体减排一览

| | 强化减排情景 2050 VS. 2019 | 深度减排情景 2050 VS. 2019 |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 甲烷 (CH ₄) | 排放增长40% | 排放下降43% |
| 氧化亚氮 (N ₂ O) | 排放下降14% | 排放下降50% |
| 含氟温室气体 (F-gases) | 排放在2030年左右达峰后缓慢下降至2020年水平 | 排放在2030年左右达峰后缓慢下降至2020年水平 |
| 二氧化碳 (CO ₂) | 排放下降34% | 排放下降50% |

3. 农业食物相关温室气体减排是一个系统工程

如下图所示，仅关注农业生产环节的减排行动不能实现我国农食系统碳中和，2050年来自农业生产阶段的脱碳所带来的减排潜力仅占整个农食系统的37%。来自农食系统其他环节的排放以及食物消费端的减排同样重要。

图 12. 深度减排情景下农食系统主要减排行动的减排潜力（百万吨CO₂e）



4. 中国已经采取的绿色发展行动可挖掘约三分之二的减排潜力

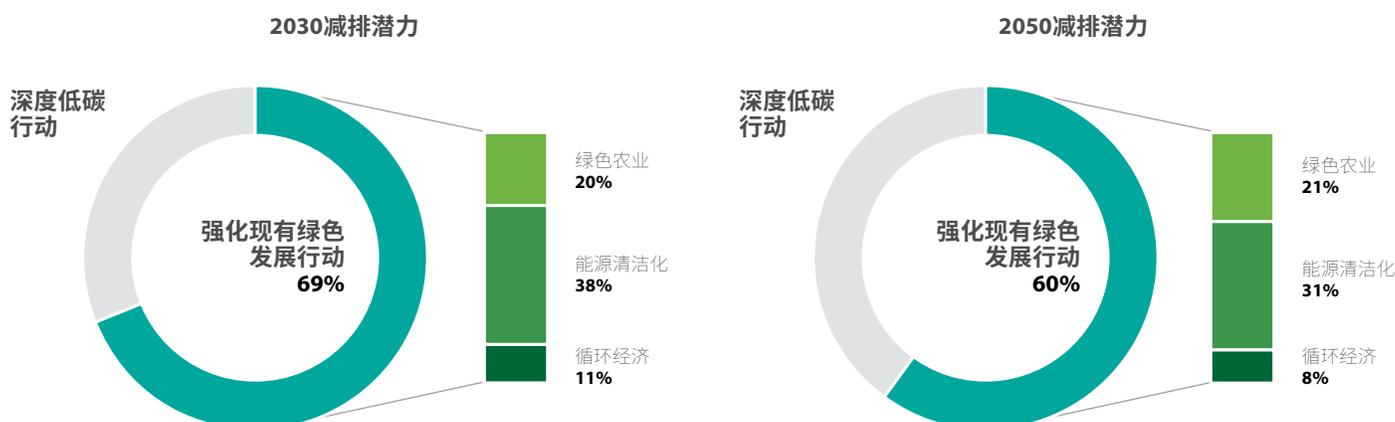
如图13所示，约三分之二的减排潜力，即到2030年和2050年分别有69%和60%的减排潜力来自强化已有的绿色发展行动，包括在绿色农业、能源清洁化和循环经济为防治环境污染和保护公众健康所采取的行动。剩下的三分之一的减排潜力来自深度低碳行动，包括低碳农业行动以及食物消费端的行为改变。

其中绿色发展行动分类参考基于前文表2，具体包括：

表 6. 绿色发展行动分类

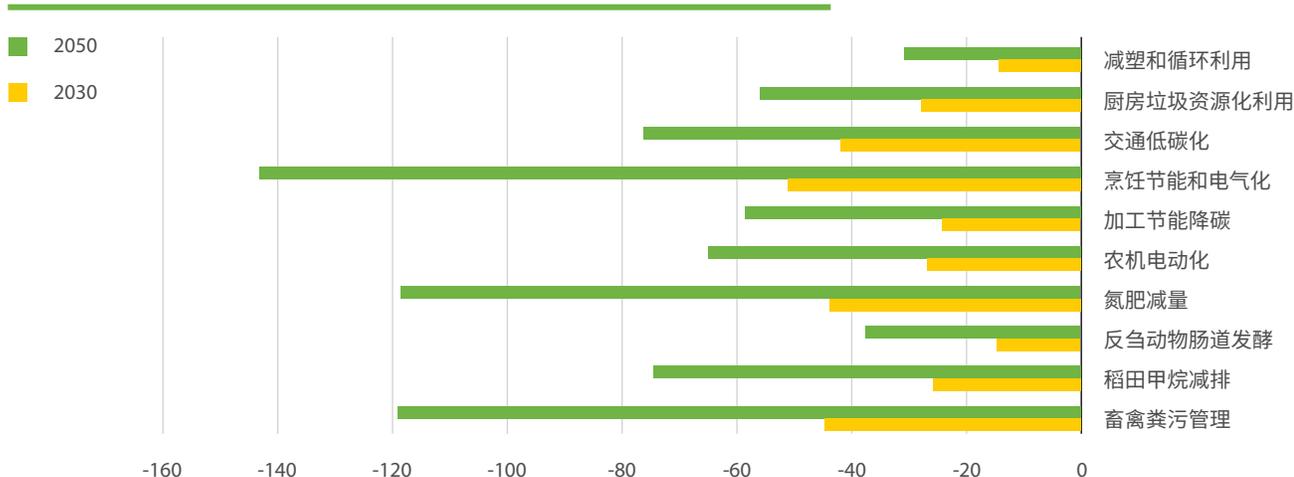
| 减排行动 | | 在已有行动下可强化的具体实践 |
|--------|-----------|------------------|
| 绿色发展行动 | 绿色农业 | 畜禽粪污产沼 |
| | | 测土配方, 保护性耕作 |
| | | 推广全生物可降解薄膜 |
| | | 减少农药使用 |
| | 清洁和现代能源体系 | 农机能效提升和电动化 |
| | | 食品加工节能和能效提升 |
| | | 食物运输能效提升和轻型货运电动化 |
| | | 烹饪节能和电气化 |
| | 循环经济 | 采用可回收和可降解的包装材料 |
| | | 生活垃圾分类和餐厨垃圾资源化利用 |

图 13. 深度减排情景下绿色发展行动的减排潜力



5. 主要措施的减排潜力

图 14. 深度减排情景下具体措施的减排潜力（2030和2050年，Mt CO₂e）



5.3. 实现农食系统减排十大重点行动

根据深度减排情景下2050年温室气体减排潜力，我们提出如下十个重点减排行动及其主要障碍。

表 7. 农食系统重点减排行动

| 优先行动 | 主要措施 | 2050减排贡献 (深度减排情景) | 主要障碍 |
|--------------|--|----------------------|-----------------|
| 农业生产 | | | |
| 氮肥减量 | 采用氮肥增效剂, 缓释肥, 继续推广测土配方和保护性耕作。 | 10% | 实施力度 经济刺激 |
| 畜禽粪污管理 | 沼气资源利用: 通过回收畜禽粪污厌氧发酵产生的沼气, 沼气发电和制成生物天然气。 | 11% | 经济刺激 |
| 稻田甲烷减排 | 调整稻田灌溉模式, 采取干湿交替灌溉; 推广水稻直播旱种。 | 6.6% | 高成本技术 实施难度 |
| 反刍动物肠道发酵减排 | 通过动物育种, 以及在饲料中添加辅料来减少甲烷排放。 | 3% | 高成本技术 |
| 农机节能和电动化 | 提高农机能效提升, 推动中小型农机的电动化。 | 5.8% | 农机电动化政策和标准引导 |
| 农场到餐桌 | | | |
| 食物加工节能降碳 | 食物加工的能效提升和能源替代。 | 5% | 政策引导 |
| 交通低碳化 | 交通能效提升, 推动轻型货运电动化和低GWP值制冷剂的使用。 | 7% | 政策引导 |
| 减塑和循环利用 | 简化包装, 采用可回收包装和可降解包装材料。 | 2.8% | 实施难度大 |
| 食物消费 | | | |
| 烹饪节能及电气化 | 推动烹饪节能和炊事电气化 | 12.8% | 经济刺激 |
| 餐厨垃圾资源化利用 | 继续推广垃圾分类, 通过餐厨垃圾厌氧消化进行沼气回收利用。 | 5% | 对垃圾资源化规模发展的经济刺激 |
| 膳食和消费行为调整* | 推广居民膳食指南, 倡导本地食物消费。 | - | 实施难度大 |

*注: 膳食调整主要指减少动物性食物摄入及鼓励本地食物消费, 其减排量主要体现在两个方面, 一是农业生产, 尤其是畜牧业相关的排放, 二是食品运输相关的排放。考虑到行为改变的不确定性较大, 此处不做定量分析。诸多研究表明, 减少动物性食物摄入会带来显著的减排贡献, 应加强重视。

6.政策建议



· 制定综合性农食系统碳中和战略

建立健康和可持续的农食系统来应对气候变化，对保证粮食安全、农业和生物的多样性以及维护生态环境和公众健康都有着重要意义。如前所述，由于农食系统中不同活动的温室气体排放涉及到农业、交通、能源、工业和废弃物等多个部门，一个关于农食系统的综合性的碳中和战略可以提供更系统性的温室气体减排方案，协调不同部门的减排行动，以及推动更多利益相关方的参与和综合性减排措施的落地。

· 建立农食系统环境数据体系以支持科学决策

农食系统数据包括各环节温室气体排放活动数据和农食产品的环境及碳排放影响数据或标签，前者为农食系统减排政策提供数据基础，后者可以促进消费者行为改变。现有的温室气体清单编制中关于土地利用、农业和分部门的能源活动数据已经为农食系统的温室气体排放数据梳理提供数据基础。其次，我国2021年更新的国家自主贡献（NDC）中提出将逐步建立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等措施则将为食物系统排放数据的收集分析提供更多政策依据。此外，我国有关产品碳标签的工作也应在农食领域进行推广，结合生态食品、绿色食品等体系，将碳信息纳入其中。

· 优化现有绿色发展行动以扩大减排效果，尤其是甲烷减排力度

无论是在中国提交和更新的国家自主贡献（NDC）中还是在国内都已经部署实施了多项绿色发展的政策行动，例如在绿色农业发展政策中推动化肥农药的减量增效、畜禽粪污的资源化利用、有机肥推广、测土配方和绿色农业机械推广等措施，以及在循环经济政策中推动的降低塑料制品的使用、减少食物浪费、加强餐厨垃圾管理以及对“无废城市”的推广。通过优化已有的政策措施，尤其是强化在农业和废弃物领域现有行动中甲烷减排效果，不仅可以改善农业的环境污染、保护农业资源和提高废弃物的资源化利用，还能以较低边际成本控制温室气体排放。

· 加速农食系统能源低碳转型

农食系统中不同阶段的能源消耗带来的温室气体排放不容忽视，例如农用机械、食物加工、运输以及烹饪等环节。建议出台有关政策，加快农机电动化，包括电动拖拉机、微耕机、割草机等市场化；建议在农村清洁灶具替换中优先考虑采用可再生能源，通过政府补贴等促进高效家用电器推广；食品冷链等货运绿色清洁和电动化，也可以有效减少来自传统能源消耗的二氧化碳排放。

· 通过机制创新推动成熟减排实践和技术的规模化应用

探索不同类型的可持续农业发展模式来提高我国农食系统在面对资源短缺、环境污染和气候变化的韧性。例如在工业化农业生产之外，基于中国高比例的小农生产方式，推广社区支持农业，为消费者提供健康食品的同时为生产者经营提供了资金支持。以及推动包括保护性耕作、覆盖作物等再生农业实践来提高土壤肥力的行动。此外，在食物领域的减排技术的研发和规模化应用也需要创新的商业模式和政策来支持，从而降低技术采用的成本。作为食物终端的消费者对于食物生产的规模、结构以及食品供应的方式都有着决定性的影响，推动消费者的行为改变至关重要。例如减少食物浪费、膳食结构调整等行动的推广都可以实现农食系统减排，这里同样需要适合的政策机制。但是机制设计需要考虑到其对低收入和弱势群体的影响，确保消费者对安全和健康食物的获取，使得应对气候变化的农食系统转型更具包容性。

参考文献

- AGFEP. (2021). *2021 China and Global Food Policy Report: Rethinking Agrifood Systems for the Post-COVID World*. Academy of Global Food Economics and Policy (AGEFP), China Agricultural University.
- Ahmed, J., Almeida, E., Aminetzah, D., Denis, N., Henderson, K., Katz, J., Kitchel, H., & Mannion, P. (2020). *Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices*. McKingsey & Company.
- Bai, Z., Ma, W., Ma, L., Velthof, G. L., Wei, Z., Havlík, P., Oenema, O., Lee, M. R., & Zhang, F. (2018). China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 4(7), eaar8534.
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, T. V. der, Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339.
- Benton, T. G., Bieg, C., Harwatt, H., Pudasaini, R., & Wellesley, L. (2021). *Food system impacts on biodiversity loss*. Chatham House.
- Cheng, K., & Pan, G. (2016). "Four Per Mille Initiative: Soils for Food Security and Climate" Challenges and Strategies for China's Action. *Climate Change Research*, 12(5), 457–464.
- Cillis, D., Maestrini, B., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2018). Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions. *Soil and Tillage Research*, 183, 51–59.
- Clark, M. A., Domingo, N. G., Colgan, K., Thakrar, S. K., Tilman, D., Lynch, J., Azevedo, I. L., & Hill, J. D. (2020). Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 and 2 C climate change targets. *Science*, 370(6517), 705–708.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 1–12.
- Cui, Q., Gao, E., Zhang, Z., & Zhang, X. (2020). Preliminary study on the feasibility assessment of CO₂ booster refrigeration systems for supermarket application in China: An energetic, economic, and environmental analysis. *Energy Conversion and Management*, 225, 1–16.
- 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.
- Dong, Y., Xu, M., & Miller, S. A. (2021). Overview of cold chain development in China and methods of studying its environmental impacts. *Environmental Research Communications*, 2(12), 122002.
- Dou, X. (2018). Low carbon agriculture and GHG emission reduction in China: An analysis of policy perspective. *Theoretical Economics Letters*, 8(3), 538–556.
- Fresán, U., Errendal, S., Craig, W. J., & Sabaté, J. (2019). Does the size matter? A comparative analysis of the environmental impact of several packaged foods. *Science of the Total Environment*, 687, 369–379.
- Gao, E., Cui, Q., Jing, H., Zhang, Z., & Zhang, X. (2021). A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry. *International Journal of Refrigeration*, 128, 104–117.
- Heard, B. R., & Miller, S. A. (2018). Potential changes in greenhouse gas emissions from refrigerated supply chain introduction in a developing food system. *Environmental Science & Technology*, 53(1), 251–260.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jarmul, S., Dangour, A. D., Green, R., Liew, Z., Haines, A., & Scheelbeek, P. F. (2020). Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of "sustainable diets." *Environmental Research Letters*, 15(12), 123014.
- Li, H., Wu, T., Wang, X., & Qi, Y. (2016). The greenhouse gas footprint of China's food system: an analysis of recent trends and future scenarios. *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 803–817.
- Liu, H., Hussain, S., Zheng, M., Sun, L., Fahad, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2014). Progress and constraints of dry direct-seeded rice in China. *J. Food Agric. Environ*, 12, 465–472.

- Li, Y., Dong, H., & Lin, E. (1997). Climate Change Impacts on Livestock Husbandry. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 13, 20–23.
- Luo, Z., Lam, S. K., Fu, H., Hu, S., & Chen, D. (2019). Temporal and spatial evolution of nitrous oxide emissions in China: assessment, strategy and recommendation. *Journal of Cleaner Production*, 223, 360–367.
- Ma, L., Bai, Z., Ma, W., Guo, M., Jiang, R., Liu, J., Oenema, O., Velthof, G. L., Whitmore, A. P., & Crawford, J. (2019). Exploring future food provision scenarios for China. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1385–1393.
- Na, R., Dong, H., Chen, Y., & Zhou, Z. (2011). Effect of forage to concentrate ratio on rumen fermentation. *Chinese Journal of Animal Science*, 47(9), 49–54.
- Nayak, D., Saetnan, E., Cheng, K., Wang, W., Koslowski, F., Cheng, Y.-F., Zhu, W. Y., Wang, J.-K., Liu, J.-X., & Moran, D. (2015). Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 209, 108–124.
- Niles, M. T., Ahuja, R., Esquivel, J. M., Mango, N., Duncan, M., Heller, M., & Tirado, C. (2017). *Climate change and food systems: Assessing impacts and opportunities*. Meridian Institute.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.
- Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *Plos One*, 16(3), e0247820.
- Rosenzweig, C., Mbow, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E. T., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M. G., & Sapkota, T. (2020). Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nature Food*, 1(2), 94–97.
- Simon, B., Amor, M. B., & Földényi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112, 238–248.
- Song, G., Li, M., Fullana-i-Palmer, P., Williamson, D., & Wang, Y. (2017). Dietary changes to mitigate climate change and benefit public health in China. *Science of the Total Environment*, 577, 289–298.
- Tao, F., Palosuo, T., Valkama, E., & Mäkipää, R. (2019). Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey. *Soil and Tillage Research*, 186, 70–78.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522.
- Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., Obli-Laryea, G., Wanner, N., Qiu, S. Y., & De Barros, J. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065007.
- Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., & Ingram, J. S. (2012). Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 195–222.
- Wang, K., Wang, J., Zuo, J., Wu, J., & Li, K. (2020). Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 14(7), 1735–1742.
- Wang, W., & Nie, L. (2018). Research Progress and the Limiting Factors of Direct Seeding Rice in Central China. *Journal of Integrated Field Science*, 15, 41–47.
- Woetzel, J., Henderson, K., Krishnan, M., Zhang, H. Z., & Lam, G. (2020). *Leading the battle against climate change: Actions for China*. McKinsey & Company.
- Xue, L., Liu, X., Lu, S., Cheng, G., Hu, Y., Liu, J., Dou, Z., Cheng, S., & Liu, G. (2021). China's food loss and waste embodies increasing environmental impacts. *Nature Food*, 2(7), 519–528.
- Zang, J., Guo, C., Wang, Z., Cheng, Y., Jin, W., Zhu, Z., Zou, S., Wang, C., Lu, Y., & Wang, W. (2018). Is adherence to the Chinese Dietary Guidelines associated with better self-reported health?: The Chinese dietary guidelines adherence score. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*.
- Zhou, Y., Shan, Y., Guan, D., Liang, X., Cai, Y., Liu, J., Xie, W., Xue, J., Ma, Z., & Yang, Z. (2020). Sharing tableware reduces waste generation, emissions and water consumption in China's takeaway packaging waste dilemma. *Nature Food*, 1(9), 552–561.
- 刘向新, 周亚立, 翟超, 闫向辉, & 赵岩. (2012). 我国农业机械能耗现状分析及节能减排技术. *农业机械*, 17, 117–119.
- 吴俊章. (2020). 冷藏车典型制冷系统碳足迹模型构建及分析. 广州大学.

- 周胜, 张鲜鲜, 王从, 孙会峰, & 张继宁. (2020). 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望. 农业环境科学学报, 39(4), 852-862.
- 娜仁花, 董红敏, 陈永杏, & 周忠凯. (2011). 日粮精粗比对瘤胃发酵特性的影响. 中国畜牧杂志, 47(9), 49-54.
- 孙福昱, 南雪梅, 唐志文, 蒋林树, & 熊本海. (2018). 饲粮营养调控减少反刍动物甲烷排放研究进展. 家畜生态学报, 39(9), 7-11.
- 方向明, & 李姣媛. (2018). 精准农业: 发展效益, 国际经验与中国实践. 农业经济问题, 11, 28-37.
- 於江坤, 蔡丽媛, 张骥, 郭娇, 胡荣桂, & 齐德生. (2015). 养殖业温室气体排放的影响因素及减排措施. 家畜生态学报, 36(10), 80-85.
- 朱志平, 董红敏, 魏莎, 马金智, & 薛鹏英. (2020). 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响. 农业环境科学学报, 39(4), 743-748.
- 李欢, 周颖君, 刘建国, & 孙国芬. (2021). 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略. 环境工程学报, 15(7), 2398-2408.
- 李玉娥, 董红敏, & 林而达. (1997). 气候变化对畜牧业生产的影响. 农业工程学报, 13, 20-23.
- 杨孝伟, & 曹秀芝. (2012). 对我国食品包装低碳化策略的研究. 生态经济, 10, 133-135.
- 清华大学环境学院, 中国连锁经营协会, & 美团青山计划. (2023). 中国餐饮行业减少食物浪费路径量化评估研究. 清华大学环境学院.
- 王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 吴静, & 李坤. (2020). 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议. 环境工程学报, 14(7), 1735-1742.
- 王杰, 张学敏, 张波, 侯秀宁, 宋昌博, & 赵继云. (2019). 电动农机发展现状与趋势. 中国农机化学报, 40(10), 35-41.
- 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔, 王大鹏, & 张志华. (2012). 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展. 中国人口资源与环境, 22(1), 43-48.
- 章永松, 柴如山, 付丽丽, 刘立娟, & 董慧芬. (2012). 中国主要农业源温室气体排放及减排对策. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 38(1), 97-107.
- 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 黄河啸, & 李宝值. (2016). 稻田温室气体减排成本收益分析. 浙江农业学报, 28(4), 707-716.
- 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, & 史学正. (2018). 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识, 挑战与研究建议. 中国科学院院刊, 33(2), 191-197.
- 邹晓霞, 李玉娥, 高清竹, 万运帆, & 石生伟. (2011). 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析. 生态环境学报, 20(8/9), 1348-1358.
- 雷鸣, 程于真, 苗娜, 周建斌, & 陈竹君. (2019). 黄土及其他添加物对猪粪贮存过程氨气和温室气体排放的影响. 环境科学学报, 39(12), 4132-4139.
- 马二登, 纪洋, 马静, 徐华, & 蔡祖聪. (2011). 耕种方式对稻田甲烷排放的影响. 生态与农村环境学报, 26(6), 513-518.



关于iGDP:

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, 缩写 iGDP) 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 于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。成立以来, 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和公益性知识产品。

绿色创新发展研究院 (iGDP) 拥有专业化和国际化的创新研究与策略传播团队, 集合能源系统、气候变化、环境经济、国际关系等领域的技术人才。我们依托北京绿色伙伴咨询有限公司和北京顺义区磐之石能源与环境研究中心开展工作, 并在欧洲设有联络处。



iGDP

中国北京市朝阳区秀水街1号
建外外交公寓6-2-62
邮编: 100600

电子邮箱: igdpoffice@igdp.cn
电话: 86-10-8532-3096