



畅想农业碳中和

——一场新的绿色革命



北京绿色金融与可持续发展研究院 高瓴产业与创新研究院 绿色创新发展中心

2022 年 7 月



目录

摘 要 4

前 言 7

一、农业与气候和环境的相互影响 7

 1.1 农业生产与气候变化 7

 1.2 农业生产与生物多样性 8

 1.3 农业生产是全球第二大温室气体排放源 9

二、农业温室气体排放的来源广泛 10

 2.1 全球视角 10

 2.1.1 畜牧养殖 11

 2.1.2 作物种植 12

 2.1.3 土地利用 12

 2.2 中国视角 13

 2.2.1 中国农业碳排放分布 13

 2.2.2 我国农业碳中和的机遇 16

三、农业能采取哪些行动？ 17

 3.1 节约资源 18

 3.1.1 垂直农业 18

 专栏 1 以色列的节水农业 20

 3.1.2 减少食物损耗 20

 3.2 提高农业生产效率 22



3.2.1 生物育种	22
3.2.2 智慧农业	24
3.3 丰富食品来源	26
3.3.1 水产养殖	26
3.3.2 替代蛋白	28
专栏 2 膳食结构调整助力碳中和	30
3.4 农业生产温室气体减排	30
3.4.1 减少化石能源使用	30
3.4.2 甲烷减排	31
3.4.3 氧化亚氮减排	33
3.5 农业碳汇	35
3.5.1 农田土壤碳汇	35
3.5.2 渔业碳汇	36
专栏 3 展望农业碳交易市场	38
四、农业碳中和带来的投资机遇	39

摘 要

推动农业生产的系统性转型既是保障粮食安全的基本需求，也是应对气候变化和保护生物多样性的重要路径。一方面，农业生产承担着为全球人口提供粮食安全保障的重要职能，据联合国估计，2050 年全球人口将达到 97 亿人，较 2020 年增加约 24%，城市化进程和居民人均收入的提升也将对农业生产的规模、结构和生产方式提出新的要求。

另一方面，农业生产还面临着来自气候变化和生物多样性丧失所带来的挑战。极端天气的频发加剧农业生产的波动性，也对农业生产潜力带来影响。与此同时，农业生产是温室气体的主要排放源之一，来自农作物种植和畜禽养殖等农业活动都会产生不同的温室气体。此外，高度集约化的农业生产、大面积土地单一化种植和化肥的过度使用也导致了生物多样性的丧失和生态系统的退化，对人类生存和发展构成重大风险。因此，面对保障粮食安全、气候变化的影响以及生物多样性的多重挑战，农业生产亟需系统性的变革，打造高产、高效、可持续、碳中和的新模式。为此，本报告将对全球和我国农业生产的发展现状进行梳理，识别其中的挑战和机遇，重点关注农业碳中和行动中新兴技术的潜力与可行性。

本文主要发现如下：

我国农业绿色低碳转型挑战与机遇兼具，农业温室气体排放或仍保持增长，但农业科技的推进有望实现对海外发达国家的弯道超车

基于我国官方数据，2014 年我国农业活动的温室气体排放共计 11.98 亿吨二氧化碳当量，其中甲烷（CH₄）、二氧化碳（CO₂）和氧化亚氮（N₂O）分别占 39%、31%和 30%。农业温室气体排放的增长主要由农作物种植面积、畜牧业的扩张驱动。2017 年我国人均动物蛋白摄入量仅为欧洲的 7 成、美国的一半。随着人口的增长和居民消费水平的提高，农业温室气体排放总量仍面临增长压力。不合理氮肥施用导致的农业氧化亚氮排在带来温室气体排放的同时还会造成土壤退化、地下水污染、生态系统富营养化等负面影响。目前，化肥使用量零增长行动已经取得了明显成效，但要实现碳中和目标下的深度减排，仍需更多技术和模式的探索。

此外，我国农业生产因资源禀赋和生产模式较为落后，呈现分散化、高成本的特点，整体生产效率较低。这也意味着相较于发达国家，农业发展仍有较大提效减排的空间，新技术的应用与替换有着更低的成本。随着近年来土地流转率的不断提高，农业种植规模化趋势渐显。种植规模的提升有望加速新技术的推广与应用，在保障粮食安全与应对气候变化双重目标下，尽早布局、推动创新，有望实现对发达国家的弯道超车。

应对气候变化和生物多样性破坏带来的挑战，农业生产亟需更加深刻和系统性的变革，并提供创新的综合性碳中和解决方案

面对气候变化与生物多样性的双重约束,整个农业生产亟需更加深刻和系统性的变革来应对这一系列的挑战,同时提供创新的综合性解决方案。这些方案不仅仅是在农业生产中推动变革,例如创新农业生产技术与方式,同时将涵盖对农业生产带来影响的消费端进行减排,包括改变饮食习惯、减少食物浪费、寻找低碳食品替代品等。

其中,通过食品保鲜技术、冷链物流等减少食品损耗和浪费的技术较为成熟、且具备一定的经济性,是短期减缓农业碳排放的重点;基因育种、精准农业等技术的逐步推广能够提升农业生产效率,能够有效降低碳排放强度、提升农业竞争力,且国外发达国家已积累较多经验,我国仍有较大提升潜力,是实现减排目标的重要途径。

从长期而言农业系统需要更为深刻的技术革新,扭转集约农业模式占据大量水资源、土地、破坏生物多样性的趋势,在保障农业生产的同时维持生态系统的平衡,垂直农业、替代蛋白、农业固碳等新兴技术的突破或将为下一代绿色革命带来机遇。

农业的系统性转型将从节约资源、提高农业生产效率、丰富食物供给来源、发展农业碳汇和减少农业温室气体排放五个维度发力:

- 提高效率节约资源:**在城市周边发展垂直农业,在节约土地资源和水资源的同时,可以减少化肥农药的投入以及由于蔬菜运输带来排放。在农产品的保鲜和冷链物流上进行技术创新,减少食物供应链上的损耗及浪费,从而降低食物生产的需求以及由此产生的排放。

- 高科技赋能农业规模化生产:**通过基因育种技术提高育种效率、增加作物产量,减少单位产品的温室气体排放,同时提高农作物应对气候变化的能力,为粮食安全提供保障。推动包括无人机、传感器、卫星数据、自动化和机器人技术在内的智慧农业发展,提高资源利用率和有效性,让农业实现“环境影响可测、生产过程可控、产品质量可溯”的目标。

- 丰富食物供给来源:**在“大食物观”的背景下,助力丰富食物供给来源,更好满足居民对营养健康和多元化食物消费的需求。推动可持续水产养殖和替代蛋白技术发展,减少其对农业土地资源的需求以及畜牧养殖带来的温室气体排放。通过建立可持续的粮食系统来实现居民健康、营养和地球福祉的平衡。

- 深化农业温室气体减排:**推动大型农机的脱碳化和农业投入品的生物基转型,减少二氧化碳排放。通过选育良种、采取饲料添加剂和改进饲养模式以及水稻灌溉方式,减少农业甲烷排放。通过优化施肥方式、改进肥料种类、提高水肥耦合,提升氮肥利用率,实现增产与减排协同。

- 挖掘农业碳汇潜力:**采取包括用秸秆覆盖地表、免耕播种,配套应用药剂拌种、种子包衣、化学除草等防治技术来提供土壤有机碳,增加农田土壤碳汇。选择具有碳汇功能的养殖品种,建设多营养层次综合渔业养殖模式来发展蓝碳。

碳信用市场未来有望发挥重要作用，助推多样化的农业减排技术实践

农业领域大多数减排技术的经济性尚未显现，通过科学可靠的方法学验证，将农业减碳行为进行量化，纳入碳交易市场，有助于提升农业减排行为的商业化利用程度。目前，农业暂未纳入国家强制碳市场的交易中，但理论上农业减排行为依然可以通过中国核证自愿碳减排机制（CCER）参与到碳交易中。就全球而言，农业碳信用的评估体系、交易定价机制等仍处在早期尝试阶段，未来随着碳信用市场的发展，有望助力农业减排技术实践。

建议投资者关注农业领域颠覆性技术创新，或为下一代绿色革命投资机遇

投资者尤其需要重视新兴科技在农业领域带来颠覆性创新的机会，为未来的农业生产提供革命性的解决方案。新兴技术方向包括替代蛋白、智慧农业、基因编辑育种、垂直农业及水产养殖等。同时还要改善农业投资生态，吸引资本及优秀人才参与。

前言

为落实双碳目标，农业农村部和国家发展改革委于 2022 年 6 月 30 日发布了《农业农村减排固碳实施方案》，再次将大家的目光聚焦到农业的绿色低碳发展。一直以来，在提到应对气候变化的时候，人们通常首先想到的是“清洁能源”，比如光伏、电动车等。事实上，农业作为温室气体排放的重要来源，同样蕴藏着不可忽视的减排潜力。

随着全球人口数量、食品需求的不断增加，农业温室气体排放也不断攀升。自 20 世纪 90 年代以来，全球的农业的温室气体排放增长 14%。据联合国（2015）估计，2050 年全球人口将达 97 亿人，较 2020 年增加约 24%，而城市化进程和人均收入的提升意味着人们对食物生产和消费有更高和更多元化的需求。我国作为农业大国，农业相关温室气体排放占比始终高于欧美。随着人口数量的增加以及人均蛋白质摄入量的不断提升，农业温室气体排放仍有增长空间。

可以预见，农业领域的系统性转型和实现碳中和既挑战重重，同时又蕴含着革命性的机遇，呼唤着新技术、新理念、新模式的出现，引领一场新的绿色革命。基因编辑、植物工厂、替代蛋白等新兴的科技手段有望彻底颠覆传统的农业生产方式，以更高效化、标准化、环境友好的方式重塑农业生产；可再生农业、循环经济、富碳农业等更多基于自然的解决方案有望对生态系统提供更好的保护、有效和适应性地应对社会挑战，同时提供人类福祉和生物多样性效益。

一、农业与气候和环境的相互影响

1.1 农业生产与气候变化

在气候变化、地缘政治等因素冲击下，全球粮食安全问题引人担忧。联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of United Nations, FAO）于 2021 年发布的《世界粮食安全和营养状况》报告显示，2020 年全球人口的十分之一（约 8 亿人）面临食物不足的困境，比 2019 年增加超过 1 亿人。报告还指出，气候变化、国家之间的冲突和经济衰退让全球的粮食安全出现危机。若继续按照目前的轨道发展，难以实现 2030 年消除饥饿的可持续发展目标。农业生产不仅是温室气体排放的重要来源，同样也是最易遭受气候变化影响的部门。全球气候变化对于农业的影响较为复杂，对种植业而言，虽然在一定程度上气候变暖带来的热量资源增加有利于高纬度地区作物生长，但全球而言会显著降低谷物总产量，对粮食安全带来严重威胁（IPCC, 2014; Zhao, 2017）。

在北半球的中、高纬度地区，气候变化对产量的影响更具不确定性，可能会带来一些积极的影响，比如能使玉米、水稻等喜温作物生长期延长，扩大种植范围；使作物熟制变化，

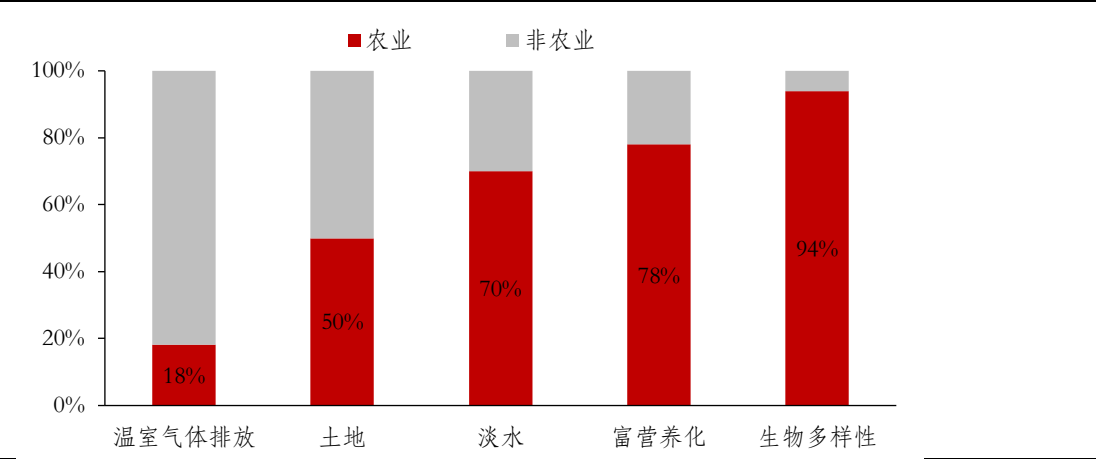
潜在产量增加。但另一方面，气候变化将影响农业种植的条件从而影响产量，更加频繁的极端天气带来的各种气象灾害，对农业生产条件、农业自然资源带来负面影响。比如温度的上升会加快作物发育速率，使生育期缩短，导致产量下降。此外，气候变暖会使中国主要农作物害虫的成活率提高，让虫害的危害期延长（郭建平，2015；郭佳等人，2019）。

气候变化也会给畜牧业带来负面冲击。这些影响将体现在动物健康、生长环境、饲料质量等多个方面(Myers, 2017; Escarcha,2018)。在气候变化的影响下，极端高温气候频发，动物在热应激条件下对疾病的抵抗力逐渐变差，生育能力降低，肉、蛋、奶等动物产品的产量也会降低。其次，气候变化可能会导致动物寄生虫和动物疾病发生的频率增加，为一些病原体的生长繁殖提供更为适宜的条件，进而造成病害的流行，随之而来的抗生素等问题都将对食品安全带来挑战。此外，环境中 CO₂ 浓度的提升或降低牧草等饲料的品质，让碳水化合物含量升高，而蛋白质含量相对下降(FAO, 2017)。

1.2 农业生产与生物多样性

高度集约化的农业生产和单一化的种植也对生物多样性¹带来了严重的破坏。农业改变了生物栖息地的面貌，是全球生物多样性面临的巨大压力之一²。根据联合国生物多样性与生态系统服务政府间科学政策平台（Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES）的评估，农业带来的土地用途改变是陆地和淡水生态系统影响最大的因素之一，对空气、水和土地资源带来了较大的压力（图 1）。

图1 农业带来的生态影响（占用生态资源比重）



数据来源：Poore & Nemecek (2018)，FAO (2018)，Our world in data 整理³

目前，全球已有三分之一以上的陆地和近四分之三的可用淡水资源被用于作物或牲畜生产。其中作物生产约占可利用土地总面积的 12%，放牧用地占约 25%。农业的灌溉需求密集

¹ 生物多样性是指地球上生物圈中所有生物，即动物、植物、微生物，以及它们拥有的基因和生存环境。

² Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture | Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org), www.fao.org/nr/cgrfa

³ Our world in data. <https://ourworldindata.org/env-impacts-of-food>

地抽取地下水有耗尽含水层的风险，此外，农业的肥料流失、农药使用和牲畜的粪便排泄物还会造成地下水的污染(FAO, 2017)。

生物多样性不仅是指生态系统中的物种数量，还包括不同物种分布的均匀度、物种的异质性。农业中大面积土地种植单一作物的生产方式不仅降低了物种数量，也带来了物种分布的失衡及物种遗传基因异质性的丧失，这些都将对整个生态系统带来威胁。

根据 FAO，目前全球约 6,000 个粮食作物品种中，仅 9 个品种就贡献了 66% 的作物总产量。全球畜牧业主要依赖约 40 个家畜品种，其中仅有少数几个品种提供了绝大多数的肉类、乳品和蛋类产品，总计 7,745 个本地家畜品种中有 26% 濒临灭绝。此外，野生粮食品种以及很多有助于提供对粮食和农业至关重要的生态系统服务的物种，包括传粉昆虫、土壤有机物和昆虫的天敌正在快速消失。被世界自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature，简称 IUCN）评估为濒临灭绝的 28,000 种物种中，24,000 种面临农业生产的威胁⁴。生物多样性已经面临严峻危机 FAO（FAO，2019；世界自然基金会，2020）⁵。

1.3 农业生产是全球第二大温室气体排放源

农业是温室气体重要排放源，根据世界资源研究所（WRI，2018）⁶统计，农业占全球总排放的 11.8%，加上农业相关的土地利用变化共计 18.3%，是仅次于电力和热力系统的全球第二大排放源（图 2）。

图2 全球分部门温室气体排放（2017）

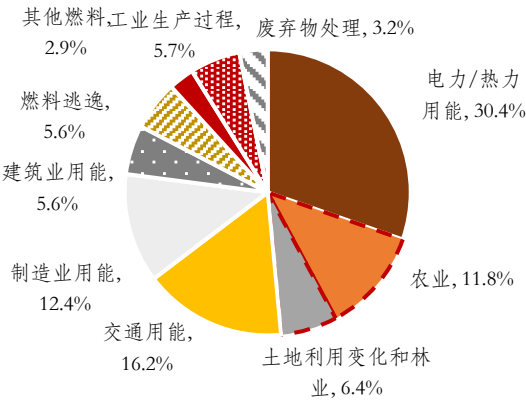
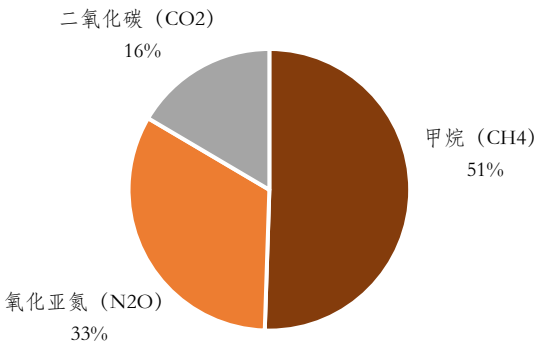


图3 全球农业温室气体分类（2017）



数据来源: WRI（2018），统计口径为农业生产及土地利用变化和林业的温室气体排放

⁴ Hannah Ritchie and Max Roser, Greenhouse gas emissions, Our world in data. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>

⁵ 2021 年 10 月，我国成功举办联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会（COP15）第一阶段会议，95 个国家元首共同签署了《昆明宣言》，承诺采取措施扭转当前生物多样性丧失趋势，并确保最迟在 2030 年使生物多样性走上恢复之路。习近平总书记也在会议上发表主旨讲话，强调共建地球生命共同体是实现人类可持续发展的必然选择。生物多样性问题已得到国际社会的广泛关注。

⁶ 包括 LUCF 的温室气体排放总量，数据来源 Climate Watch data, WRI, https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2017&start_year=1990

农业是甲烷 (CH₄) 和氧化亚氮 (N₂O) 的主要排放源 (图 3)，农业活动产生了全球 45% 的甲烷和 50% 的氧化亚氮排放 (IPCC, 2019)。这两种气体分别是全球第二和三大温室气体，占比分别为 17%、6% (WRI, 2017)，虽然占比不及二氧化碳，但其对气候变化的影响依然至关重要。其中，甲烷的增温潜势是二氧化碳的 28 倍，氧化亚氮更是达到 265 倍 (IPCC, 2014)，这意味着等量的排放量将带来相当于二氧化碳几十倍甚至上百倍的增温效应。

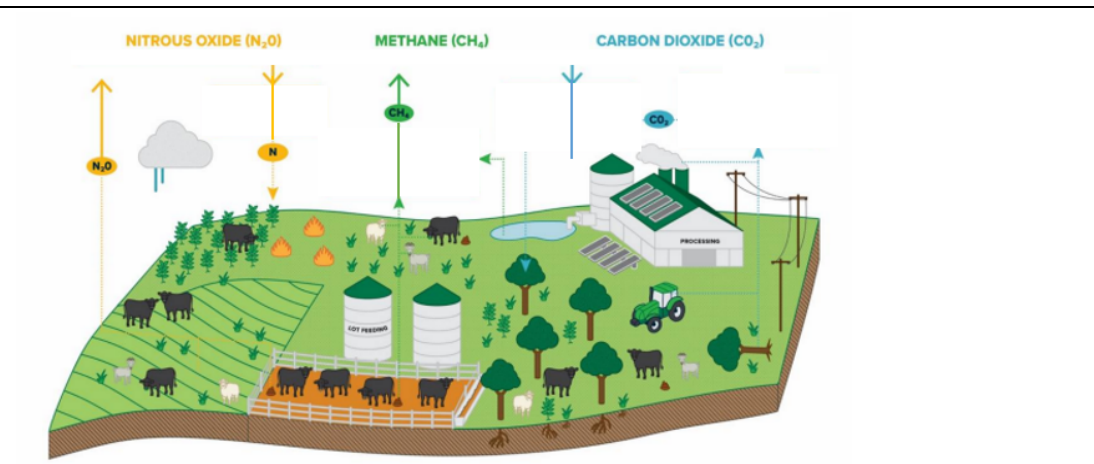
面对更为有限的自然资源，气候变化的影响将给实现粮食安全带来更加艰巨的挑战，进一步加剧贫困和不平等。因此，农业系统维持现有系统的基础上进行渐进性微调是远远不够的，亟需更深刻的系统性变革，以应对当前或预期的气候变化影响。

二、 农业温室气体排放的来源广泛

2.1 全球视角

分气体类型而言，农业生产活动排放的温室气体包括氧化亚氮 (N₂O)、甲烷 (CH₄) 和二氧化碳 (CO₂)。其中氧化亚氮主要来自肥料（合成、粪肥或泥浆）施用于土地并通过氮的沉积使土壤中微生物释放而成。甲烷则主要来自牛羊等反刍家畜消化系统发酵、粪便和泥浆的厌氧分解，以及稻田等被淹农田的有机物分解释放。二氧化碳则主要来自土地利用变化，例如将泥炭地和森林转化为农业用地，以及化肥、农药、农膜和饲料生产、运输和储存以及农业机械使用化石能源带来的排放 (图 4)。

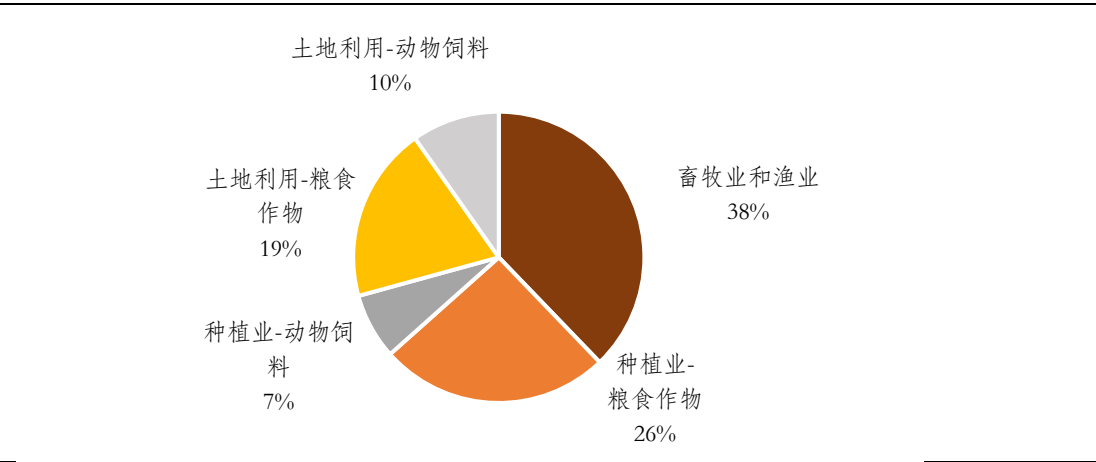
图4 农业温室气体来源示意图



数据来源： Red Meat Advisory Council (RMAC)

农业生产产生的温室气体排放来源广泛，根据 Poore & Nemecek (2018) 的研究 (图 5)，畜牧业和渔业是最大的温室气体排放源，其次是种植业和土地利用变化带来的温室气体排放。

图5 农业生产的温室气体排放分解 (2015)



数据来源： Poore & Nemecek (2018)

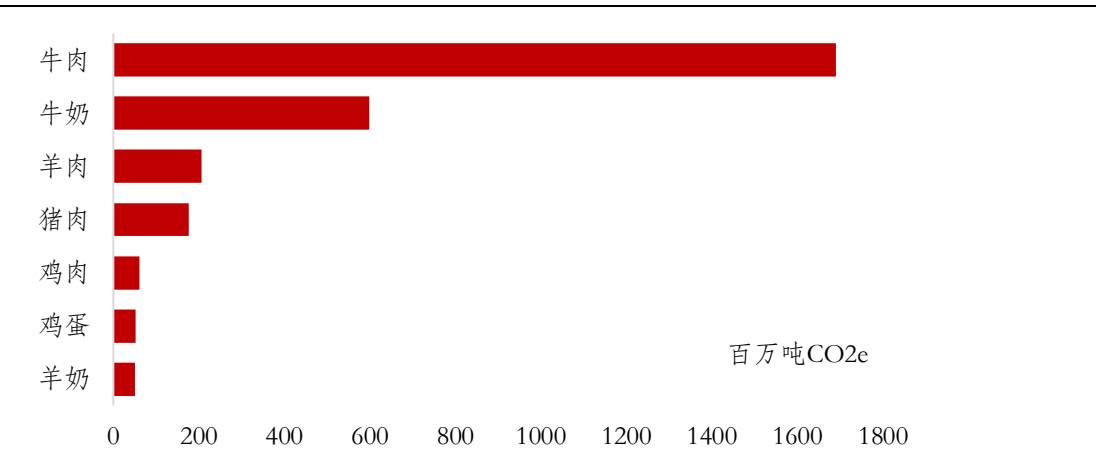
2.1.1 畜牧养殖

畜牧养殖产生的温室气体排放主要有三个方面，首先是牲畜消化过程中产生的甲烷（尤其是反刍动物），占比超过 70%；其次是畜禽粪便处理过程中厌氧发酵产生的甲烷和氧化亚氮，占比约 20%；最后是农业生产过程中化石燃料燃烧带来的二氧化碳排放，占比不到 10%（FAO, 2013）。

具体而言，甲烷是草食家畜肠道发酵过程的副产物，释放的甲烷量取决于家畜类型、家畜年龄体重以及所采食饲料的质量和数量。其中，反刍牲畜是最为主要的排放源（图 6），包括家牛、水牛、山羊、绵羊、鹿和骆驼等，非反刍牲畜（例如猪、马、鸡）的排放相对较少。

此外，畜牧业中的牲畜粪便同样会产生温室气体排放，粪便在进行贮存、处理和利用过程中（比如在化粪池、池塘、粪池或粪坑中），有机物在厌氧微生物作用下会发酵产生甲烷，含氮物质在硝化或反硝化反应过程中会产生氧化亚氮。

图6 2017年全球不同畜牧产品每年的温室气体排放量（百万吨CO₂e）



数据来源： FAO (2018) ，排放量统计中包括了畜牧饲料环节的碳排放

2.1.2 作物种植

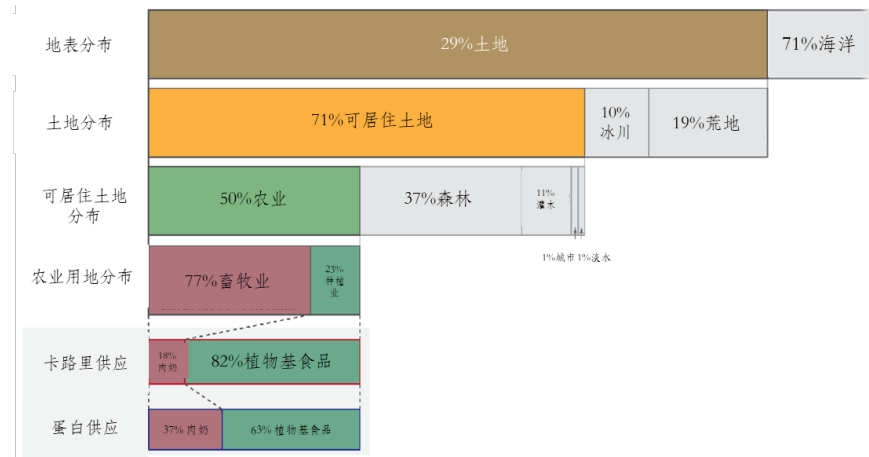
种植过程产生的碳排放包括化学肥料（如尿素）、有机肥料、农药的生产及施用过程中释放的氧化亚氮、甲烷等气体，其中约有超过七成来自用于人类直接食用的农作物生产，其余来自动物饲料所需作物的生产。

农田土壤是氧化亚氮的一个主要排放源，种植过程中施用氮肥会带来氧化亚氮的直接排放，氮肥的投入量以及氮肥的形式、施用方法、施用时期等是农田氧化亚氮排放最主要的影响因素。据统计，1961-2010 年，全球农业化肥使用带来的温室气体排放量绝对值增加了 9 倍以上（Tubiello 等人，2013）。此外，水稻等浸水种植的作物，在淹水的条件下，土壤中的有机质会被细菌分解而释放出甲烷。

2.1.3 土地利用

农业生产扩张使得牲畜土地使用量、消费类作物占地量增加。这里的“土地利用”包含土地用途变化、草原燃烧和土壤翻耕等，尤其是农业扩张导致森林和草原转变为农田或牧场，变相增加了二氧化碳的排放。如图 7 所示，全球的“宜居土地”（habitable land）中，约有一半的土地用于农业生产，而从资源利用的角度，畜牧业的生产效率相对较低，牲畜占全球耕地的 77%却只贡献了 18%的卡路里和 37%的蛋白质（Poore & Nemecek, 2018）。

图7 全球土地利用分布



数据来源：Ritchie 等人. (2020)

此外，土壤有机质原本是很好的碳封存介质，但是过去几个世纪，特别是最近几十年的农业发展导致大量土壤碳储量枯竭(UN, 2019)。农场和牧场巨大的碳封存潜力也正在受到越来越多的关注，2014 年 IPCC 第五次气候变化评估报告将土壤碳库纳入农业应对气候变化的贡献之列。联合国气候变化公约组织（UNFCCC）启动了“千分之四土壤增碳”计划⁷，这一

⁷ UN, Join the 4/1000 Initiative - Soils for Food Security and Climate ,2015-9-30.
<https://unfccc.int/news/join-the-41000-initiative-soils-for-food-security-and-climate>.

“千分之四”的构想是因为全球 2 米深土壤储存的有机碳达 2.4 万亿吨，而 2014 年全球化石能源的温室气体排放为 89 亿吨碳当量（合 326 亿吨二氧化碳），正相当于前者的约千分之四。

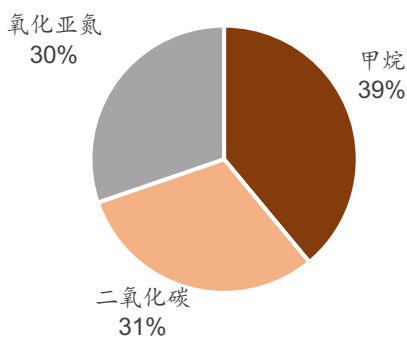
计划不仅能通过土壤储碳减少碳排放，还对土壤、作物和环境质量、防止荒漠化以及增强生物多样性都有着重要意义。

2.2 中国视角

2.2.1 中国农业碳排放分布

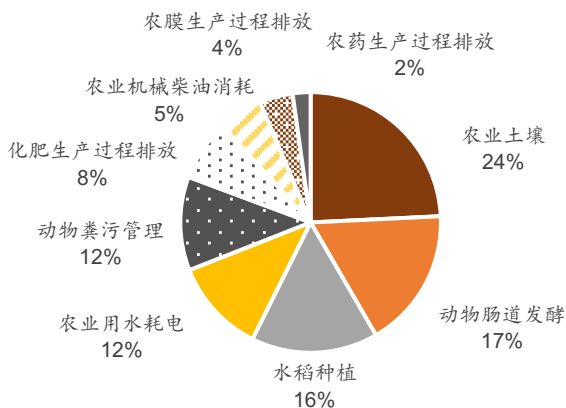
基于中国气候变化第二次两年更新报告的统计，2014 年中国农业活动温室气体排放约为 11.98 亿吨二氧化碳当量，占当年全国温室气体排放总量的 11%⁸。其中甲烷排放占比为 39%，二氧化碳排放 31%，氧化亚氮 30%（图 8）。按主要排放源划分，畜禽养殖是第一大排放源，主要来自动物肠道发酵和畜禽粪污管理，其次是来自农用地的排放（图 9）。

图8 中国分气体温室气体排放（2014）



数据来源：生态环境部（2018），程琨&潘根兴（2021）⁹

图9 中国农业活动的温室气体排放来源



数据来源：生态环境部（2018），程琨&潘根兴（2021）

从气体种类构成看，甲烷、氧化亚氮作为温室气体中最主要的非二氧化碳气体，这两种气体分别占全国农业总排放量的 39%和 30%。甲烷排放主要来自动物肠道发酵及水稻种植；而氧化亚氮排放中，最主要的是农用地，其次是动物粪便管理排放。

从结构上看，我国农业用地产生的氧化亚氮排放占比较高（如图 10 所示），相对于欧美国家以畜牧业肠道发酵带来的甲烷排放为主，我国农业用地的化肥施用、利用效率等值得重点关注。

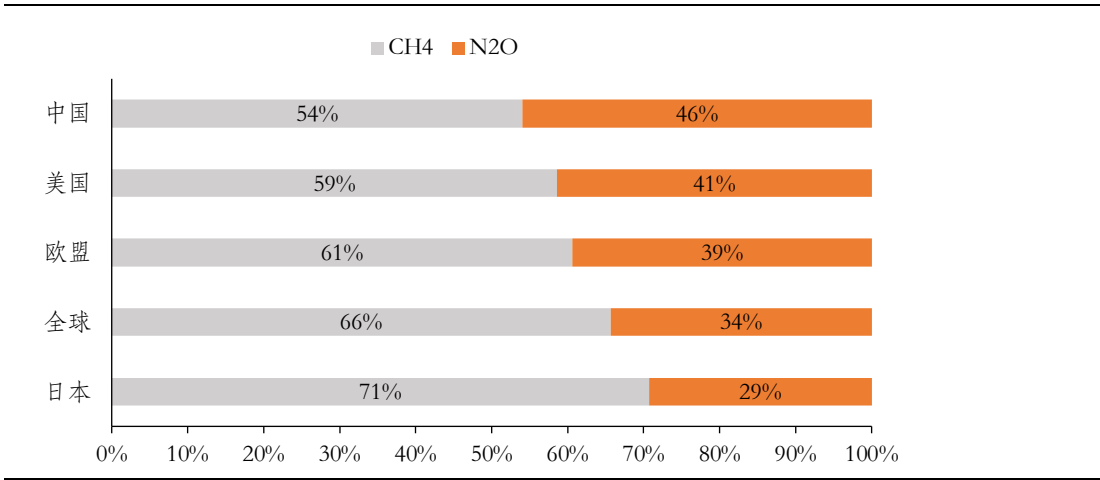
长期以来，使用化肥、农药等一直被当作增加单位面积产量的有效手段，氮素作为植物生长的必需营养元素，也贡献了农业的高产稳产。但是，不合理的氮肥施用也带来了环境污

⁸ 中国目前尚没有建立农业碳排放统计体系，官方报告中农业活动的碳排放未包括农业活动中的能源消耗。除了总量数据外，无连续的官方数据，也没有排放结构、来源等详细信息。因此后文的趋势分析参照欧盟的全球大气研究排放数据库（Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR）。

⁹ 农业活动的二氧化碳排放数据来自程琨&潘根兴（2021）在 2014 年国家温室气体清单上的计算。

染和食品安全等全球性问题，中国是世界上最大的氮肥生产和使用国，平均每公顷农田年均施用氮肥 305 公斤，是世界平均水平的 4 倍以上¹⁰。在占世界 9% 的耕地养活了全球近 20% 人口的同时，也消耗了全球 30% 以上的化学氮肥（图 11）。

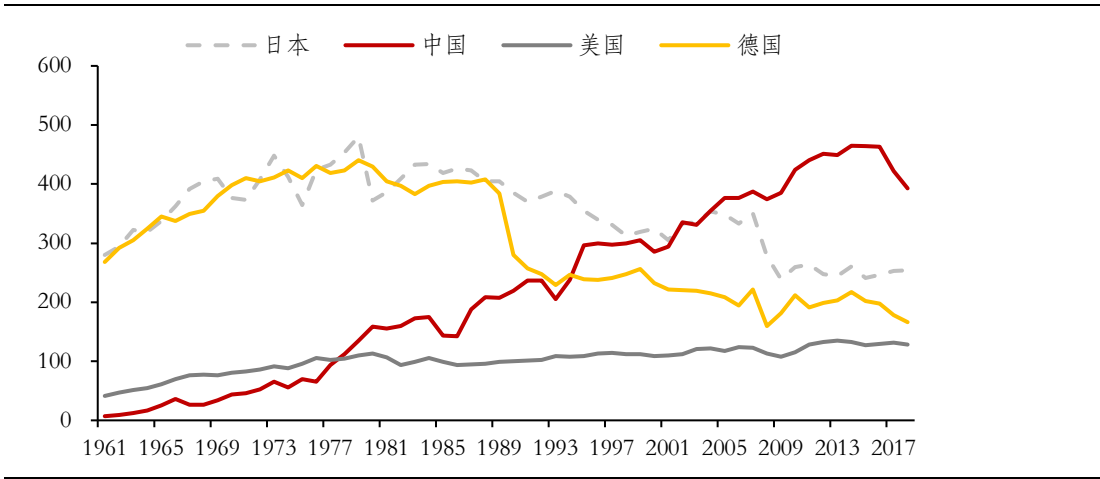
图10 全球各国非二氧化碳农业活动温室气体结构对比（2018）



数据来源：FAO（2018）

氮肥是造成我国土壤退化、地下水污染、河流和浅海水域生态系统富营养化的主要污染源。同时，氮肥工业也以煤、石油和天然气等不可再生资源为生产原料，生产过程需要消耗大量水和电，属于高耗能和高污染行业，也会间接带来二氧化碳的排放。

图11 每公顷耕地化肥消费量（千克/公顷）



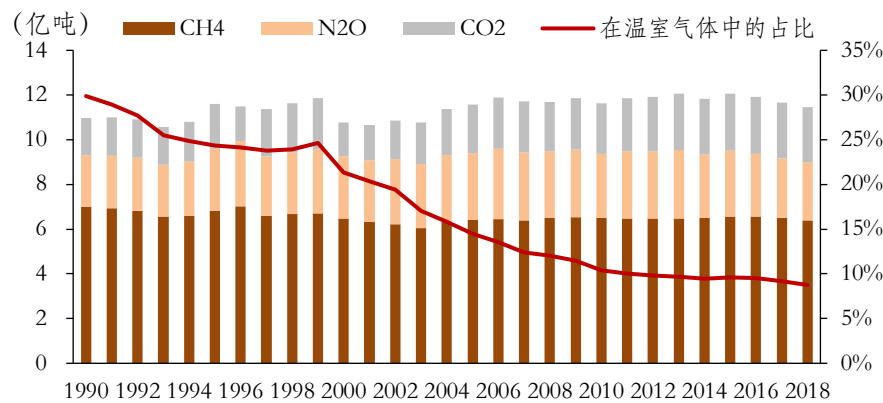
数据来源：世界银行

对我国而言，2060 年实现碳中和的承诺不仅包括二氧化碳气体的减排，甲烷和氧化亚氮这类非二氧化碳温室气体的碳中和同样不可忽视。根据金书秦等人（2021）的研究，1997 年至今农业碳排放趋于平稳达峰。我国开始反思过度依赖化学投入品带来的粮食增产的不可持续性，从 2015 年开始实施“化肥农药零增长行动计划”等一系列促进农业绿色发展的举措，

¹⁰ Briony Harris, China cut fertilizer use and still increased crop yields. This is how they did it. 世界经济论坛, 2018 年 3 月 26 日, <https://www.weforum.org/agenda/2018/03/this-is-how-china-cut-fertilizer-use-and-boosted-crop-yields/>

有效地遏制了化学投入品的增长势头，并显著提高了秸秆、畜禽粪便等农业废弃物的综合利用水平。根据 EDGAR 数据库的统计（图 12）同样显示出相同的趋势，我国农业生产的温室气体排放整体保持增长趋势，2014 年以来增速趋缓，2014-2018 年的 5 年移动平均排放量增速约为-1%。

图12 我国农业生产的温室气体排放趋势



数据来源： EDGAR_Food（2021）

受经济发展水平、气候环境、技术、政策等多重因素的影响，不同国家和地区农业碳排放总量与结构占比存在较大差异。从总量的横向对比来看，中国作为第一农业大国，农业碳排放量始终高于欧美，但由于本世纪初，中国碳排总量陡峭爬升，农业碳排占比出现了明显下降（图 13），随后一直保持在 7%-8%的水平上。

展望未来，随着我国人口增长及人均卡路里需求的持续提升，肉、蛋、奶的需求仍将进一步提升或推动农业温室气体排放的持续增长。作为三大营养物质之一的蛋白质对于人类生产生活至关重要，蛋白质供应量也因此成为衡量全球营养结构贫富差距的重要指标。根据 FAO 数据，1961 年至 2014 年间，全球的人均蛋白质供应量增加了约三分之一。

图13 中、美、欧农业生产的温室气体排放占比

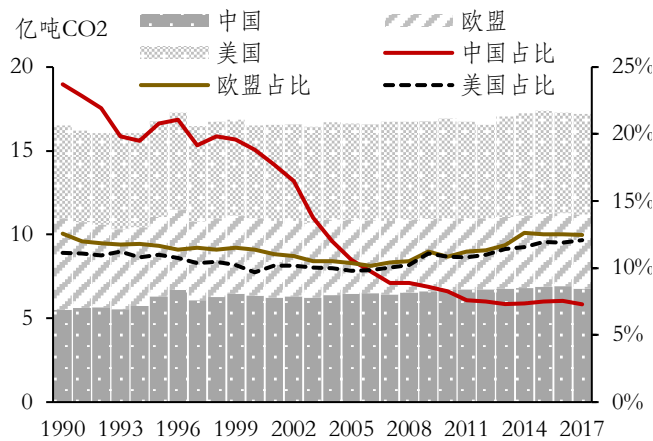
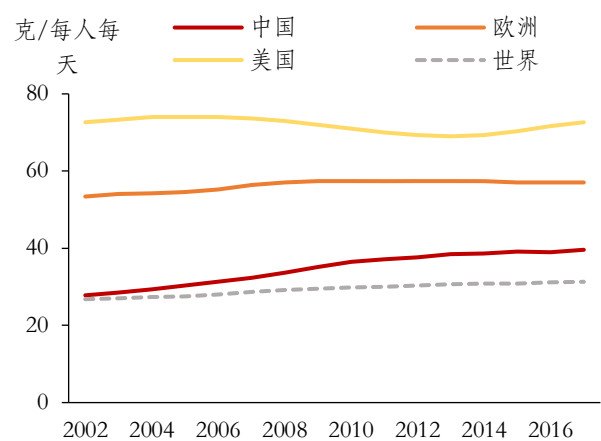


图14 中、美、欧人均动物蛋白摄入量



数据来源： 经合组织（OECD）、 FAO

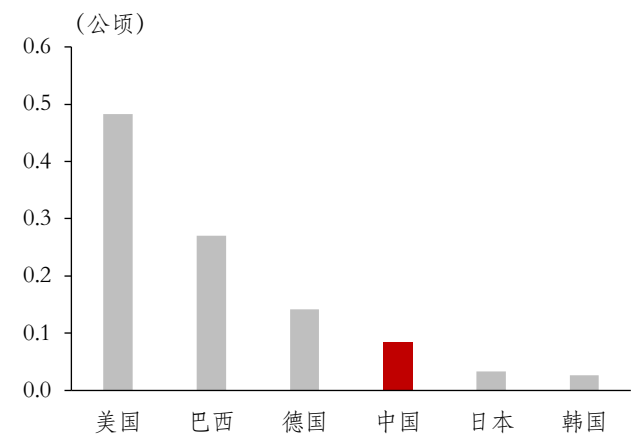
在过去的几十年中,欧美的蛋白质供应已基本停滞;而中国人均蛋白质供应量持续增长,上世纪九十年代后勉强达到及格线,与欧美的差距也在进一步缩小(图 14)。肉类作为蛋白质的主要来源,随着我国经济的发展,居民生活水平迈向小康,再加上与国际市场的进一步接轨,我国肉制品的生产与消费预计将保持持续发展的态势。因此,在蛋白质供给赶超欧美的趋势下,畜牧业还将具有很强的发展潜力,由此带来的温室气体排放量增长不容小觑。

此外,考虑到国际地缘政治影响下我国要实现粮食安全的保障,对外依存度的降低也将带来农业温室气体排放的进一步增长。

2.2.2 我国农业碳中和的机遇

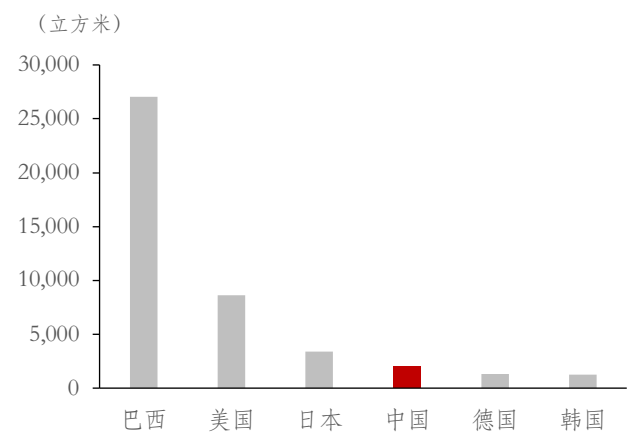
我国农业生产以小农经营为主,呈现分散化、高成本的特点,整体生产效率较低,这也意味着农业发展仍有较大提效减排的空间,在保障粮食安全与应对气候变化双重目标下,尽早布局、推动创新,农业领域有望实现对欧美发达国家的弯道超车。

图15 各国人均耕地面积对比



数据来源： 世界银行（2018）

图16 各国人均水资源（立方米/人）

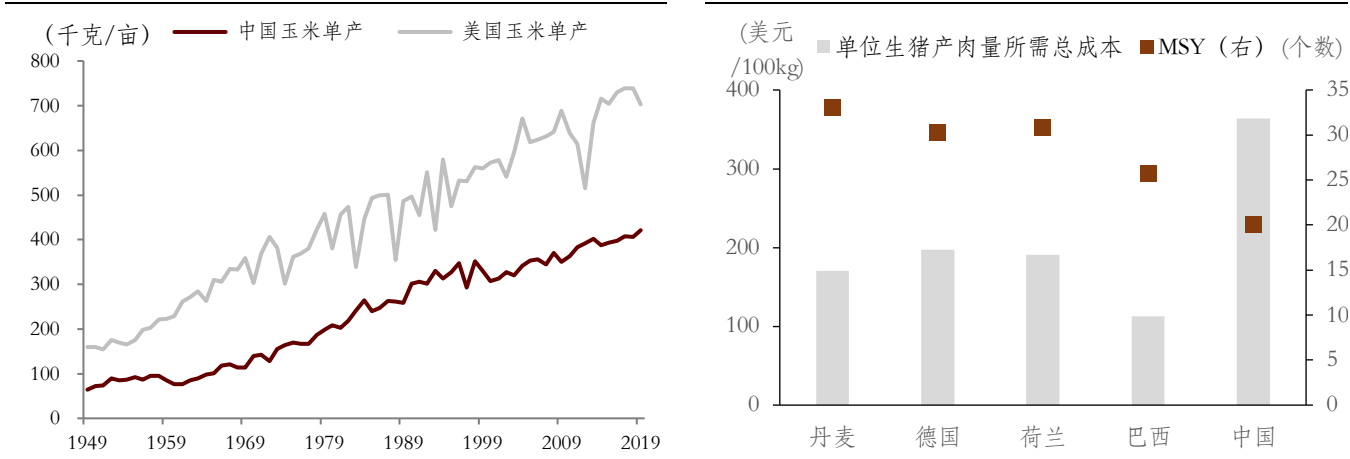


我国农业资源禀赋和生产模式较为落后。在资源禀赋方面,我国人多地少,人均耕地面积仅有 1.35 亩,低于世界平均水平 2.85 亩(图 15);人均可再生水资源也仅有 2005 立方米,仅为美国的 23%,日本的 60%(图 16)。

在生产模式方面,分散化的散户经营模式和较低的机械化作业水平,使农业生产效率较低。种植方面,我国饲用粮单位产量低于美国、巴西等农业发达国家(图 17);养殖方面,我国畜类养殖效率也低于其他国家,以生猪养殖为例,2019 年我国单位生猪产肉量的总成本为 364 美元/100 千克,是丹麦、德国、荷兰等国的 2 倍,巴西的 3 倍(图 18)。

图17 中美玉米单产对比

图18 生猪养殖效率对比（2019）



数据来源： USDA，王明利等（2022）注：MSY 为每头母猪每年出栏肥猪数（market pigs/sow/year）

近几年来，我国土地流转率不断提高。根据农业农村部数据¹¹，我国土地流转面积已超过 5.3 亿亩，单个农场耕地规模不断扩大。经过几年的农作物种植结构调整，中国主要农作物逐步向优势产区集中，形成了小麦、水稻、棉花、花生和油菜等主要农作物优势生产区域。在区域内，为提升劳动生产率，实现规模种植效应，通过土地流转和“土地托管”的模式，土地迅速集中，农业种植规模化趋势渐显。种植规模的提升有望加速新技术的推广与应用，助力中国农业碳中和的进程。

三、 农业能采取哪些行动？

现有的高投入、资源密集型的农业生产方式带来了自然资源短缺、温室气体排放和生物多样性的破坏，在可预见的未来，将难以为更多的人口提供可持续的粮食供应。面对气候变化与生物多样性的双重约束，整个农业生产需要更加深刻和系统性的变革来应对这一系列的挑战，同时提供创新的综合性碳中和解决方案。这些方案不仅仅是在农业生产中推动变革，例如创新农业生产技术与方式，同时将涵盖对农业生产带来影响的消费端进行减排，包括改善饮食习惯、减少食物浪费、寻找低碳食品替代品等。

本章节将简要讨论助力农业转型和碳中和的主要路径，涵盖节约资源、提高农业生产效率、丰富食物来源、发展农业碳汇、减少农业温室气体排放五大方面。

表 1 助力农业碳中和的关键行动和技术总结

类别	目标	方案
节约资源	✓ 提高水资源的可靠性和利用效率	✓ 农业滴灌/海水淡化
	✓ 减少农业用地需求	✓ 垂直农业
	✓ 减少食物浪费及损耗	✓ 食品保鲜技术/冷链
提高农业生产效率	✓ 选育优良品种	✓ 分子育种/转基因技术
	✓ 农业生产数字化转型	✓ 智能农机/精准农业

¹¹ 中国农业农村部，2021 年 9 月 23 日，
http://www.moa.gov.cn/govpublic/zcgggs/202109/t20210923_6377456.htm

	✓	减少化肥及农药滥用	
丰富食品来源	✓	保护生物多样性	✓ 水产养殖
	✓	增加蛋白供给	✓ 替代蛋白
	✓	优化饮食结构	
农业生产温室气体减排	✓	减少化石能源使用	✓ 农机电动化
	✓	甲烷减排	✓ 畜牧业管理优化
	✓	氧化亚氮减排	✓ 生物基产品（农膜等）
			✓ 水肥模式优化
发展农业碳汇	✓	增加土壤碳汇	✓ 保护性耕作
	✓	增加渔业碳汇	✓ 自愿碳市场机制

数据来源：世界资源研究所（2021），作者分析

3.1 节约资源

3.1.1 垂直农业

a. 主要原理

“垂直农业”（又称植物工厂，如图 19 所示），是指利用先进的种植技术，把农业垂直延伸，通过高效设计垂直堆叠作物，以较高的空间密度生产蔬菜和水果，使得产量提升，同时不必进一步占用土地。人为干预设施内作物生产过程中的温度、湿度、光照、水肥等生产要素，使植物不受或很少受自然条件的影响，从而实现作物全年的高效生产。

图19 垂直农业示意图



数据来源：京东

b. 助力维度

节省土壤、水资源：垂直农业的生产过程不依赖土壤、阳光，用水量极少，与传统田耕相比可减少约 90%的用水量；还能够充分利用仓库、集装箱、城市房顶，用地面积小，可节省土地面积 95%以上。通常而言，垂直农业用于种植生长周期短、附加值高的绿叶蔬菜、水

果或鲜花，可极大地提高作物的产量。

缩短运输距离：垂直农业不受限于土地资源，能够将城市附近的工业空间转变为智能室内农场，通过定位在更靠近城市等消费场所的地方来缩短农产品的运输距离，为当地社区提供安全、新鲜的食物供应。尤其伴随城市群的扩张，可耕种土地与城市愈加分离，在城市周边形成自给自足的蔬菜产地尤为重要，也能够最大程度降低蔬菜运输过程中的碳排放。

保障食品安全及供应稳定性：垂直农业能够实现在受控、受保护的环境中种植无农药农产品，减少杀虫剂的使用，减少病原体的侵害，并且能够实现从种子到储存的可追溯新鲜食品供应链，大大降低了农药残留、食源性疾病爆发的可能性。此外，垂直农场能够通过调控作物在不同阶段所需的温、光、水、气、肥、光配方等，实现全年不间断种植，从而让食品供应链更为稳定，不易受到气候变化和自然灾害等因素影响。

c. 发展现状

目前，垂直农业在我国尚不具备经济性，因此推广发展有限。其中最大的弊端是能源消耗较大。植物密集种植需要着重考虑光照、通风与温度的调节，前期投入与运营费用通常是传统农业和温室种植的几倍。高昂的成本也推高了终端产品价格，导致市场接受度较低。此外，垂直农业颠覆了传统农耕的运作模式和既有知识，对农民也提出了较高要求，不仅要懂得耕种，还要有丰富的植物学与环境科学知识。但是，随着可再生能源和设备成本的不断下降，植物工厂的经济性或不断改善，尤其是在风光资源丰富的地区。

专栏 1 以色列的节水农业

在资源节约型农业方面，以色列有着非常突出的表现。以色列国土面积狭小，逾六成是沙漠和旱地；年均降水较少，总淡水资源量约 20 亿立方米，人均淡水资源占有量仅为世界平均水平的 5%。而在节水理念和科技创新的双重驱动下，以色列不仅实现了淡水资源自给自足，还与邻国约旦达成了出口水资源协议。

其中，以节水为导向的精准滴灌系统占据较大比例。滴灌是将具有一定压力的水，过滤后通过滴灌带或滴头以水滴的形式均匀地滴入作物根部附近湿润土壤的一种灌水方法。最早由以色列 1962 年发明，至今已全面普及。随着计算机信息技术的发展，依靠发达的物联网、大数据及人工智能技术，能够根据作物的需水、需肥信息，按时按量将水、肥料甚至农药直接送入作物根部。滴灌技术极大地提高了农作物的单位面积产量，使得 30 年来以色列农业用水稳定在 13 亿立方米的同时，产量还能翻 5 倍。

此外，海水淡化技术也是以色列节水农业发展的重要组成部分。海水淡化是指通过一定的技术手段从海水中取得淡水的过程。该技术能够不受时空条件的限制增加淡水供应量。以色列的海水淡化已经摒弃了传统的蒸馏技术，采用了相对先进的渗透膜技术以及太阳能蒸馏技术取代传统的热能蒸馏技术，更加节能，且渗透膜经过清洗之后可以循环利用，降低了淡水的价格。

参考资源：王维汉 & 毛前 (2014)

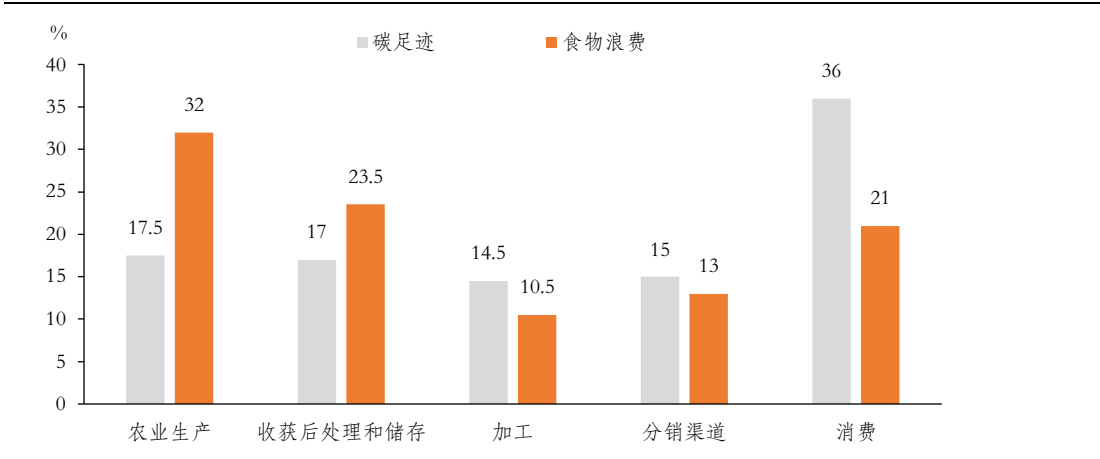
3.1.2 减少食物损耗

a. 主要原理

通过食物供应链以及终端消费环节的减排也将推动农业生产端的碳中和。根据联合国粮食及农业组织（FAO）的定义，食物损耗包括食物损耗（Food Loss）以及食物浪费（Food Waste）。前者是指食物在收获、加工、储运等过程中造成的食物量的减少；后者是指在零售或消费端丢弃原本可被食用的食物。据联合国粮食及农业组织估计，全球有三分之一的粮食会在供应过程中被浪费掉，这些粮食不能被人类利用从而浪费掉此前的碳排放。全球粮食损失和浪费每年产生 44 亿吨二氧化碳当量，约占人为温室气体排放总量的 8%，将其与全球国家层面的碳排放量进行对比，仅次于中国和美国，相当于全球第三大碳排放“国家”。

从食品的全生命周期而言，食物浪费产生的碳足迹最高值在消费阶段，所占碳足迹的比例高于其浪费量，这是因为在供应链中浪费的一公斤食物将比早期阶段具有更高的碳排放强度（图 20）。粮食损失和浪费破坏了粮食系统的可持续性，食物的浪费意味着用于生产这些食物的所有资源（包括水、土地、能源、劳动力和投资等）都会遭到浪费。

图20 食品产业链各环节的食物浪费和碳足迹占比



数据来源：FAO（2013）

世界自然基金会(World Wildlife Fund, WWF)认为，食物损耗主要是由于技术装备水平限制导致的，而食物浪费则更强调主观价值判断，更为可控。因此，除了在消费侧倡导珍惜食物、按需采购、合理储存外，在食物产业链各环节可以通过食品保鲜技术、冷链仓储等减少食物损耗。

b. 助力维度

通过农产品的保鲜和冷链物流的技术创新以及相关基础设施的完善来推动食物的损耗及浪费的减少。

食品保鲜技术：多年来，农户通常靠喷洒农药等化学物质来保护作物，这也带来了较大的食物安全隐患。为此，很多公司探索出能更健康环保的保鲜技术，例如美国的新创公司Apeel 研发出植物基类产品替代传统的壳聚糖涂膜，保证了果蔬的湿度的同时能够有效的隔绝氧气，能够让食品保质期延长 1-3 倍¹²；Hazel 公司则是采用蒸发冷技术，通过改变运输过程中果蔬附近的空气成分来减缓果蔬的呼吸作用，减缓老化过程、防止真菌或腐烂，从而延长产品保质期¹³。

冷链物流：控制食品安全的关键是控制微生物的生长速度，而温度就是控制微生物的关键，温度每升高 6℃，食品中细菌生长速度就会翻一倍。尤其是易腐食品如果蔬、肉禽蛋、水产品等，对冷链物流系统有着极高的要求。通过完善农产品产地预冷设施和冷链运输体系，能够减少农产品在流通过程中的损耗，延长其售卖周期。

b. 发展现状

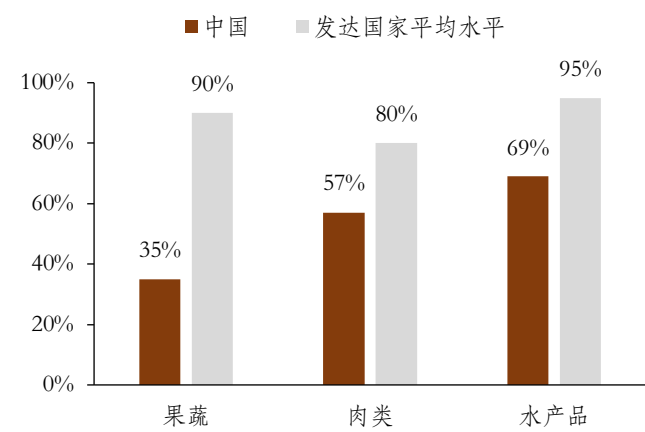
我国在减少食品损耗方面与发达国家相比仍有较大提升空间，蔬菜水果类生鲜农产品产后损失高达 20%~30%，而发达国家仅为 1%~5%。食品保鲜技术方面，防腐剂保鲜剂因低

¹² Apeel 公司官网, <https://www.apeel.com/science>
¹³ Hazel 公司官网, <https://www.hazeltechnologies.com/>

价、易操作被大量用于产后收贮运环节，成为生鲜蔬菜水果产后减损的重要手段¹⁴。我国果品上使用的防腐保鲜剂主要用在贮藏和运输环节，分品种而言，我国大宗水果主要有苹果、柑橘等，苹果多使用紫胶被膜或 1-甲基环丙烯保鲜；柑橘贮藏品种多使用咪鲜胺、抑霉唑。目前果品中允许使用的防腐保鲜剂均属于食品级添加剂和低毒农药¹⁵。

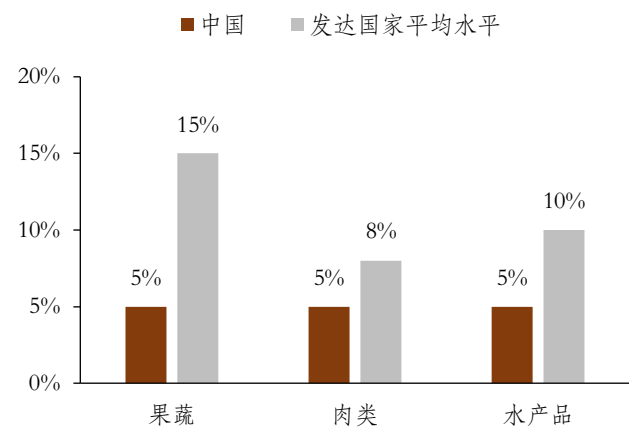
冷链物流方面，根据中国物联冷链委统计，2019 年我国果蔬、肉类、水产品冷藏运输率分别仅有 15%、57%、69%，低于发达国家水平（图 21）；且冷链断链所导致的农产品腐损率是发达国家的 1-2 倍（图 22）。

图21 我国与发达国家冷链运输率比较



数据来源：中物联冷链委（2020）¹⁶

图22 我国与发达国家农产品易腐率对比



此外，冷链运输的能耗影响也需要纳入减排考虑中。邱嘉昌等（2017）指出，冷库的能耗主要集中在制冷系统，约占总能耗的 60%-70%¹⁷，中国冷藏库能耗平均水平是发达国家平均水平的 2-3 倍，在提高能效、优化能耗管理方面有较大提升空间。此外，传统冷链的制冷剂会带来氟化气体排放，推动新型环保制冷剂的替代也是低碳冷链发展的必经之路。

3.2 提高农业生产效率

3.2.1 生物育种

a. 主要原理

近百年来，种植业育种模式的发展大体经历了 3 个时期（如图 23），即主要依赖表型观

¹⁴ 中国农业农村部，http://www.jgs.moa.gov.cn/xfpg/202202/t20220225_6389723.htm

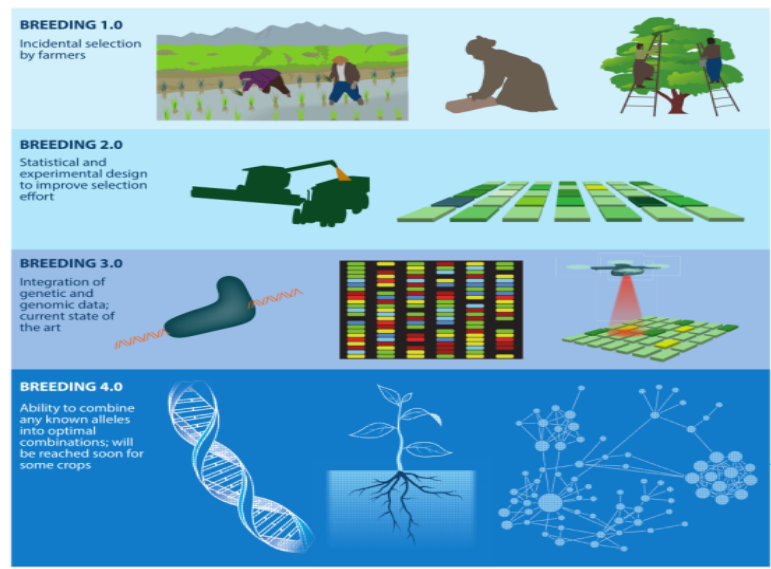
¹⁵ 中国农产品质量安全网，水果冷藏使用防腐保鲜剂指导意见，2022-3-30。
http://www.agsc.agri.cn/kpzc/sczd/202203/t20220330_400496.htm

¹⁶ 中国发改委，我国冷链物流发展的现状、困境与政策建议，2021-6-11。
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/wsdwhfz/202106/t20210611_1283162_ext.html

¹⁷ 数据来源：2019 中国冷库产业发展报告，中冷联盟，
<http://www.lenglianwuliu.org.cn/news/details.html?newsId=350>

察，通过自交加代选育优秀自交系的传统经验育种；以杂种优势群体划分模式为基础，筛选高配合力亲本组合为核心的杂种优势育种；综合了单倍体育种、分子标记育种、转基因育种的现代生物育种。在过去的 30 年中，种子的创新为提高单产做出了积极的贡献，它能够提高氮肥利用效率，有效减少农作物损失，还在节省土地和水等资源方面具有巨大潜力。

图23 作物育种技术的演变



数据来源：Edwards Buckler 育种发展划分为 4 个时代，即农民选择时代，表型选择时代，分子育种时代，大数据智能设计育种时代

现代育种技术已经从常规杂交育种、诱变育种等手段进入基因编辑、定向育种的分子水平时代，生物信息学、高通量育种等手段极大地丰富了育种手段。目前，基因工程已经从根本上改变了生物技术的发展，也越来越多地应用于农业领域，以基因工程为核心的分子育种技术正大幅推动农业生产效率的提升。2018 年初，Edwards Buckler 教授提出“育种 4.0”的理念，未来育种将在基因编辑与合成生物学、基因组与生物信息学、大数据与人工智能等跨学科、多技术支撑下，实现作物新品种的智能、高效、定向培育，最终推动育种学从“艺术”到“科学”到“智能”的革命性转变。

b. 助力维度

基因育种技术一方面能够提高育种效率，增加作物产量，减少单位产品的温室气体排放；另一方面，能够提高作物抵御气候变化影响的能力，为粮食安全提供保障。

提升作物产量，降低排放强度：通常而言，优良种子可以贡献粮食增产量的 45%—50%，但新品种培育周期长、难度大、失败率高。而通过基因育种技术能够提升研发效率，加快育种流程，从传统育种的近十年缩短至 2-3 年，有望加快优秀品种的培育。以最大的粮食作物玉米为例，自上世纪 60 年代至今，我国玉米品种经历过 6 次更新换代，历次脱颖而出的优秀品种一般均具有高产稳产、适应性广等特点，品种更迭推动玉米亩产由不足 100 公斤上升到现在的 400 公斤左右。

增强抗逆抗虫等性能，适应气候变化：基因育种中的基因编辑工具可以精确、快速地生成作物改良所需的基因突变，帮助培育出产量更高、更有营养、更耐受极端天气、需要更少化肥和农药的作物。例如，抗虫、耐除草剂、抗旱等性状的应用提升了转基因玉米、大豆等作物在成本、价格、品质方面的竞争力。

c. 发展现状

全球育种技术发展已从育种 3.0 阶段迈入设计育种的 4.0 阶段，拜尔（已收购孟山都）、科迪华等海外种业巨头是第三代生物育种技术的引领者，目前占据着全球种业份额的近 40%。相较而言，中国主要育种公司仍处于表型选择的育种 2.0 阶段，种子同质化程度高、市场较为分散，以玉米为例，我国亩产平均水平仅为发达国家约 6 成，差距较为明显。

近年来，种业振兴已成为我国粮食安全的核心关注点。今年我国新《种子法》颁布，首次建立实质性派生品种制度，扩大种子知识产权的保护范围，有望从源头解决种子同质化严重的问题；此外，沉寂已久的转基因种子商业化也开始加速，农业部发布国家级转基因玉米和大豆的品种审定标准，对转基因品种的耐除草剂和抗虫性提出更高要求，这标志着我国转基因育种商业化即将正式启动，基因育种技术有望加速发展。

3.2.2 智慧农业

a. 主要原理

智慧农业是现代信息技术与传统农业深度融合形成的数字化农业方式。智慧农业是在信息技术和先进装备的基础上，实现生产过程的精准感知、智能控制、智慧管理。这些技术包括无人机、传感器、卫星数据、自动化和机器人技术等，可以提高资源利用率和有效性，让农业实现“环境影响可测、生产过程可控、产品质量可溯”的目标。

智慧农业按领域划分，会形成诸如智慧种植业、智慧养殖业、智慧加工业等生产类型，按应用场景划分会形成智慧农场、智慧温室、智慧加工厂等多个场所类别，但无论是何种形式，都离不开数字化、智能装备等核心要素。

b. 助力维度

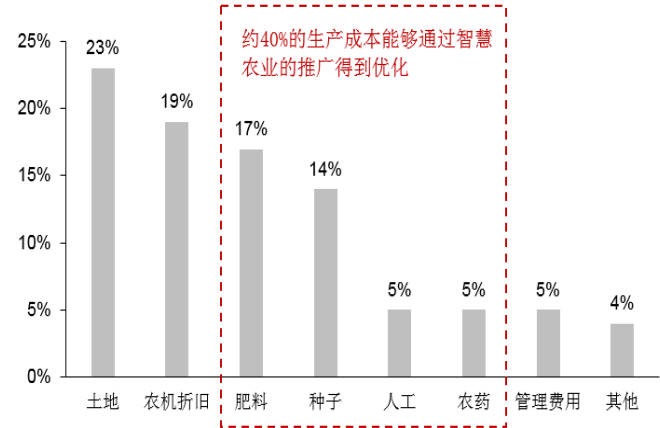
智慧农业涵盖互联网、移动技术和设备、数据分析、人工智能、数字化服务和应用等，正在改变农业和食品系统。在农业粮食系统的各个环节赋能，一方面可以使农业作业效率显著提高，解决传统农业晚间无法作业的问题；另一方面可以使农业作业质量显著提高，通过精准控制提高农作物单产；还可以使土地利用率显著提高，确保单位面积的产出率及利用率，降低碳排放强度。举例而言：

农业机械的智能化：在大田农业耕、种、管、收各个环节减少对体力劳动的需求、提升效率、提高产量。比如农机自动驾驶辅助系统能够通过精准导航技术和人工智能算法，保证

标准、高效、高质的产出，同时在一些特殊土地情况下，比如烂地、夜晚、极端天气等能够替代经验丰富的机手。

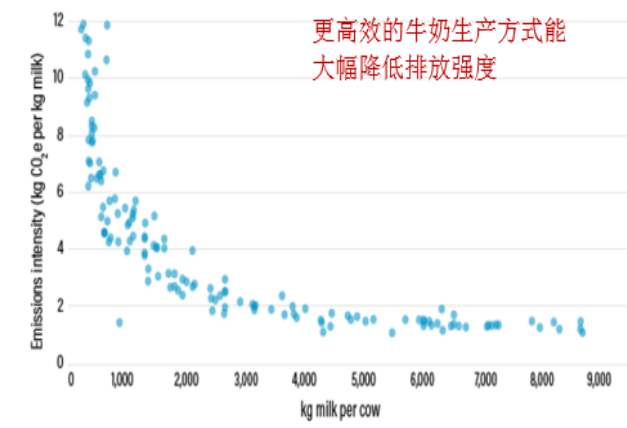
远程卫星数据和传感器等技术：更加准确地用于农业生产中的环境监测和管理。比如，通过无人机监测作物氮素的含量，从而间接监测土壤中氮的含量，为科学用药用肥提供参考。通过 AI 技术对当地天气数据进行分析，构建病虫害和气象数据的关联模型，对预测病虫害、是否要使用农药等给出比较精准的判断。开展智能温室/大棚和水产养殖环境监测，精准控制生长环境地温度、光照、溶氧量等，对生产有重要的促进作用。

图24 智慧农业能够有效降低成本



数据来源：世界资源研究所（2020），世界银行（2018）

图25 生产效率提升能大幅减少单位农产品碳排放



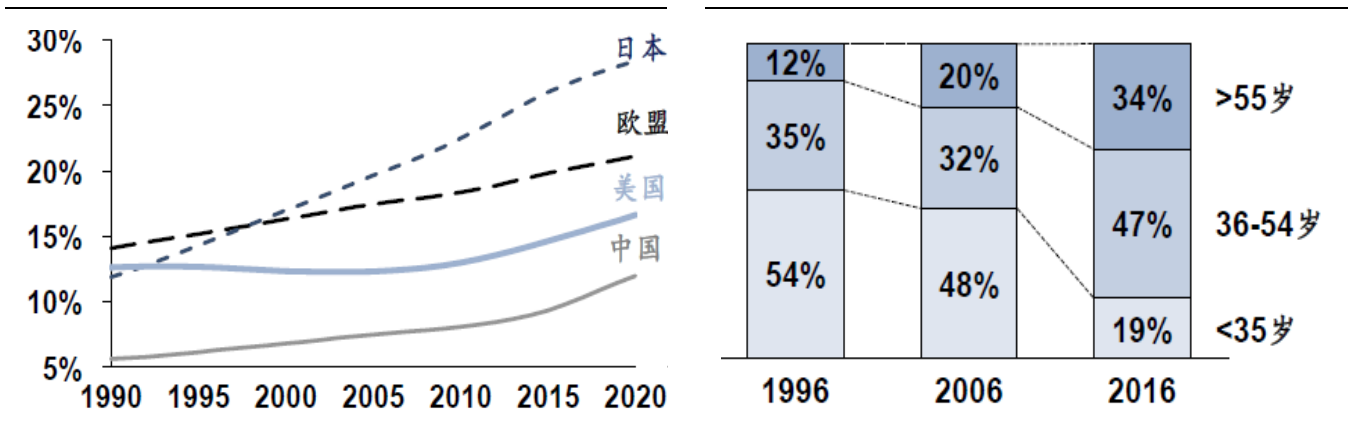
c. 发展现状

随着农业人口老龄化、人均耕地面积提升，农业智能化正逐步成为刚需。在全球范围内，农业人口老龄化趋势正日益加剧，我国这一趋势则更为明显，随着城镇化的进程，城乡人口迁移让农村老龄化更甚，农村的农业劳动力显著不足。

老龄化和规模化生产必然导致依靠人工劳动力作业难以为继，全面机械化、智能化成为提升农业劳动生产效率的必经之路。与此同时，农业机械化水平提升，数字化技术逐渐成熟，软硬件成本降低，让农业智能化逐渐成为可能。以农机自动驾驶辅助系统为例，2020 年在美国的渗透率已超过 70%，参照农业部农机补贴数据，我国的渗透率仅有约 1%，仍处于起步阶段。随着技术进步带来的成本下降及规模农场数量的增加，渗透率有望加速提升。

图26 各国65岁以上人口占比

图27 我国农业经营者年龄分布变化



数据来源：国家统计局，世界银行

3.3 丰富食品来源

3.3.1 水产养殖

a. 主要原理

可持续渔业和水产养殖业可以增加海洋蛋白质的供应，减少对土地的需求，帮助形成更健康、更多样化的饮食。从生物多样性的角度，水生生物作为全球生物多样性的重要一环，不仅在维持水生生态系统方面具有重要作用，同时也是保障优质蛋白供给的物质基础。鱼类提供了健康的低脂蛋白质来源，其生产过程的碳密集度远低于牛肉。目前，全球海洋渔业已经过度捕捞，可持续水产养殖对于满足全球对鱼类不断增长的需求至关重要。

可持续水产养殖的措施包括发展藻类养殖、优质草食性、滤食性鱼类的养殖以及贝类养殖，提高肉食性鱼类养殖的能量利用效率等，在养殖方式上尽可能利用天然水体进行非投饵的粗养；大力发展多营养层次的复合养殖，充分利用生态体系里的营养物质和能量等¹⁸。

b. 助力维度

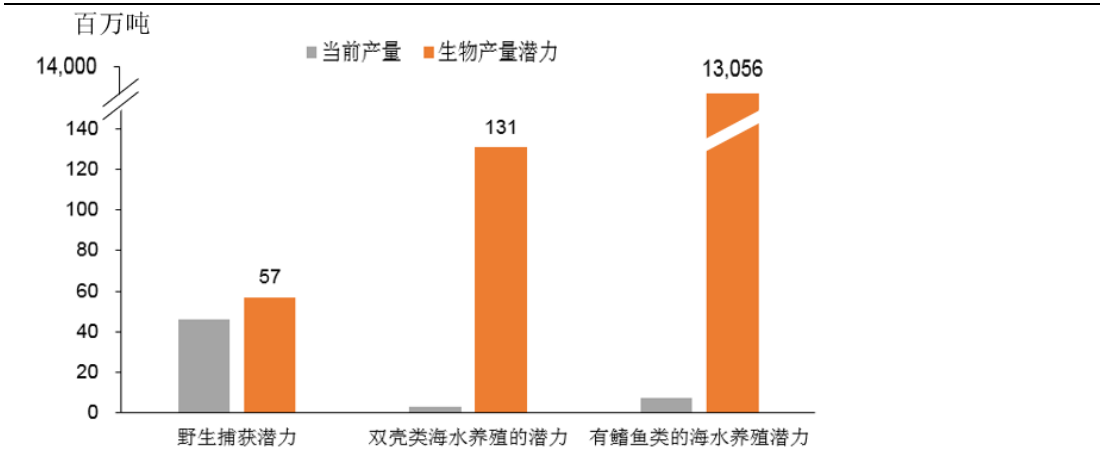
提供更高效率的蛋白来源：从饲料效率来看，水产养殖的饲料效率是陆生动物养殖的 2-7 倍，并且水产养殖过程产生的环境污染和温室气体排放量远小于畜禽养殖。尤其在中国，50% 的水产养殖产量是来自于利用天然生产力的滤食性的鱼类和贝类养殖，这种水产养殖方式也有助于碳封存。

减少土地需求，开发潜力巨大：水产养殖让农业从陆地扩展到海域，并从根本上改造了海洋渔业的原始捕捞方式，改用人工方法使海洋水生生物增殖，因而维护了渔业资源的再生力。据估算，如果充分利用世界沿海滩涂，可生产相当于现在海洋渔获量 15 倍的水产品，

¹⁸ 《海洋与渔业》专访，麦康森：低碳发展水产养殖大有可为，2011-3-14.
http://www.feedtrade.com.cn/technology/raise/technology_20110314135843.html

海水养殖业有可能将海洋变为人类未来食物的重要生产场所。

图28 全球水产养殖的潜力（百万吨可食用重量）



数据来源： The Environmental Markets Lab (2019)

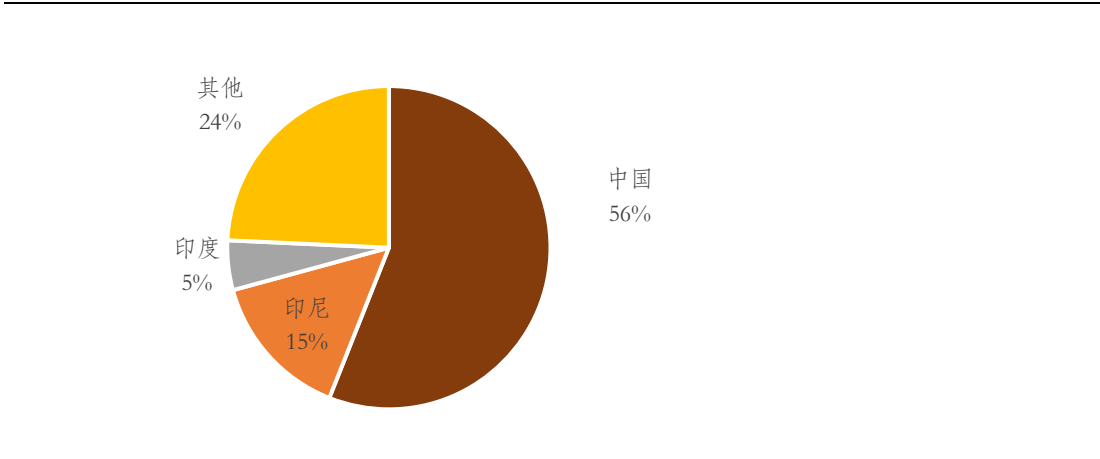
c. 发展现状

我国海水养殖条件优越，我国海水养殖面积和产量多年稳居世界第一，且贝藻类、滤食性鱼类等养殖占据很大比例。据国家农业农村部渔业渔政管理局数据，2020 年我国海水养殖产量约 2,135 万吨，其中贝类占海水养殖总产量的 69%。贝类、藻类等可以吸收水体中的二氧化碳，对水体污染小，且有较强的碳汇功能。

然而，随着生产规模的扩大，水产养殖的可持续集约化是降低温室气体排放的关键。水产养殖业最大的排放源来自于养殖饲料，其中，鱼油和鱼粉是杂食性和肉食性物种饲料的主要成分，主要来源于小型饲料鱼，低营养级鳃鱼、鳞虾等。

据 FAO 统计，全球鱼粉供应达到历史新高或接近了生物极限，未来随着水产养殖规模的持续增长，鱼油鱼粉的需求将面临压力，或导致养殖业寻找其他高蛋白含量的替代饲料，比如大豆、禽畜加工副产品等。目前，一些新兴蛋白饲料的研发已有较大进展，酵母、细菌和微型藻类等单细胞生物蛋白质的新型饲料有望大幅降低水产饲料的温室气体排放。

图29 全球水产养殖量分布（2015年）



数据来源：世界银行

3.3.2 替代蛋白

a. 主要原理

全球绝大多数的动物食品产自集约化的畜牧生产系统，根据世界资源研究所（World Resources Institute, WRI）的统计，生产 1 卡路里鸡肉要消耗掉 9 卡路里大豆，小麦和玉米。其他动物将农作物转化为肉的效率则更低。

从 1950 年到 2018 年，全球肉类产量从约 5,000 万吨增长到 3.4 亿吨，70 年里增长了近 7 倍，在不考虑人口增长的情况下，如果要想让所有国家实现人均蛋白质消耗量 70 公斤的水平，全球肉类消耗量至少还要增加一倍。事实上，畜牧业已占用了全球 40% 以上的粮食产量（主要是加工成饲料），地表一半左右的农业用地和全球约 10% 的能源消耗，若不考虑替代蛋白，到 2050 年地球或许很难养活全球超过 90 亿人口。

b. 助力维度

替代蛋白的优势在于生产流程短、效率高，减少土地和水资源的消耗，降低二氧化碳的排放，因此无论是从减缓畜牧业碳排放，还是资源有限性的角度，替代蛋白都是畜牧业发展的一项重要技术路径（图 30），目前主要包括植物蛋白、细胞培养肉以及发酵蛋白三种蛋白来源，具体而言：

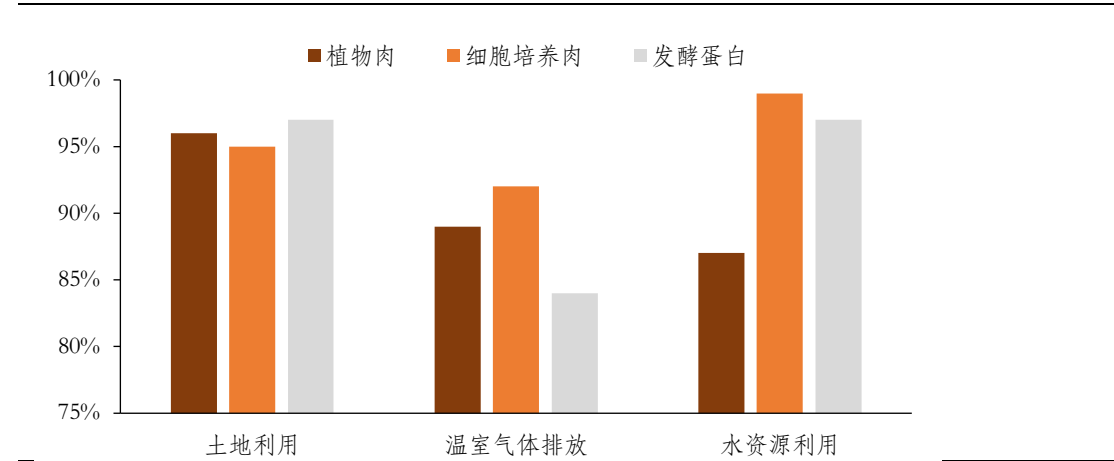
植物蛋白：指用植物蛋白替代肉类和奶制品，通常是从大豆、小麦或豌豆等植物来源萃取蛋白质，然后将蛋白质萃取物加热、挤压和冷却，使之具有肉或奶的质感。植物肉产业与传统畜牧业生产相比有着显著的优势，不仅可以解决传统农业中的激素、抗生素、农药残留、人畜共患病毒、寄生虫、致病菌感染等问题，还可以节省 99% 的水，减少 90% 的温室气体排放和节约 93% 的土地面积需求。除了植物肉，植物基的乳制品同样是植物蛋白替代动物蛋白的一种方式，有着更广泛的受众人群。

细胞培养肉：通过动物干细胞的体外培养，实现大规模的细胞增殖分化，进一步加工为食品。无论是对气候变化还是对个人消费者而言都有很多益处。首先是环保低碳、生产高效，干细胞的生长增殖周期仅 1-2 周，对比肉鸡孵化需要 21 天，饲养出栏需要 6 周；猪 155-200 天出栏（约 100kg）；牛、羊时间则更久。对环境而言，可以减少温室气体排放 78%-96%，减少水资源使用量 82-96%，减少能源使用 7%-45%（Willett, 2019）。对于个人而言也更健康安全，可以避免普通肉类中的激素、胆固醇等带来的疾病风险，以及细菌抗生素耐药性和动物源疾病的风险。

发酵蛋白：微生物物种的生物多样性，加上几乎无限制的生物合成能力，为发酵替代蛋白提供解决方案，可用来生产或支持生产肉类、蛋类和乳制品的无动物成分替代品。菌丝体，

微藻，微生物和发酵生产的蛋白可模拟动物制品的感官性状与营养特征，同时不含胆固醇、抗生素和生长激素等。微生物还有着较高的增殖速度和效率，微生物天然富含蛋白质，例如多种真菌、细菌和藻类的蛋白质含量超过其自身干重的 50%，能自给自足实现快速增殖，因而只需外界给予简单便宜的营养成分，大多数微生物的倍增时间只需几小时甚至几分钟。

图30 替代蛋白的环境效应评估（减少幅度）



数据来源：Impossible meat，Good Food Institute

c. 发展现状

在我国，以素食为代表的肉类替代品并不陌生，仿制肉食口感的豆制品等素食产品在中国有着悠久的历史，不过传统素肉的技术含量较低，多以豆粉、豆粕、小麦等为原料，通过挤压膨化方法进行简单加工，模仿肉制品味道或外形，但实际口感与肉制品相比有很大差距。而新兴的替代蛋白技术则是综合利用细胞工厂、分子生物学等技术，将蛋白结构转换成动物蛋白的纤维状结构，风味更优。

2019 年以来，随着植物肉公司 Beyond Meat 在纳斯达克上市，替代蛋白产业开始受到创业公司和资本市场的关注。消费者对食品安全、素食主义(表 2)、环境保护、动物福利、特殊风味等多方面的需求或助推替代蛋白市场的发展。

表 2 素食主义者人数变化

国家	素食者占比	人数	增速
美国	5-8% (2018)	1200-2000 万	2014-2018 年间增长了 600%。
意大利	7.1-10% (2016)	424 万	在 2011 年至 2016 年期间增长了 94.4%。
英国	7% (2018)	325 万	过去五年内人数增加了 3 倍。
印度	20-40% (2020)	3.75 亿	
奥地利	10%	88 万	
德国	10% (2019)	800 万	
中国	4-5% (2014)	5000-7000 万	
日本	4.7% (2014)	1837 万	

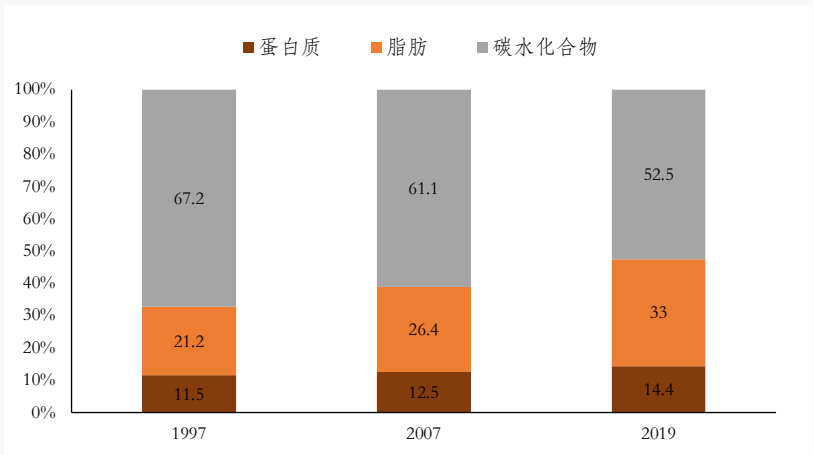
数据来源：世界能源署（IEA），世界银行

专栏 2 膳食结构调整助力碳中和

如何保障 2050 年全球 90 亿人口都能获得通过可持续方式生产的营养、健康的膳食，将会是一项艰巨的挑战。IPCC《第五次评估报告》强调，如果能够转变消费侧的饮食习惯，即从动物性蛋白（尤其是反刍动物产品为主）的膳食结构转向更加低碳的膳食结构，就有机会同时实现减排和改善健康的双重效益。

随着我国农业生产力和居民收入水平的不断提升，我国在减少饥饿和营养不足等方面取得了显著成效，居民膳食质量明显提高，但膳食结构的变化也带来了新的挑战，比如高油高盐等饮食习惯让超重肥胖、四高（高血糖、高血压、高血脂、高尿酸）人群增加。最新发布的《中国居民膳食指南（2022）》中表明，我国居民的膳食结构中，蛋白质的“量”已经得到了较大改善，而蛋白质的“质”，还需要更加多样化。因此，指南中提出平衡膳食的八大准则，重点强调食物多样，合理搭配；多吃蔬果、奶类、全谷、大豆；适量吃鱼、禽、蛋、瘦肉，清淡少盐。

图 31 中国居民营养素供能比变化



据盛芳芳等人（2021）分析，当前中国居民膳食结构与中国膳食指南存在一定差距，主要表现在谷物以精制米面为主、缺乏粗粮，肉类消费过量，全谷物、水果、豆类和奶类等消费不足（图 31）。若遵循均衡膳食，即动物源食品的消费模式按照膳食指南推荐进行，预计 2030 年使农业温室气体排放比基准情况减少 1.5 亿，下降 18%。

资料来源：盛芳芳等（2021）

3.4 农业生产温室气体减排

3.4.1 减少化石能源使用

a. 主要原理

农业生产中农业机械运用、农业灌溉过程的汽油、电能利用会直接或间接耗费化石燃料，排放二氧化碳气体，因此需要协同电力系统以及农用机械用能从化石能源向清洁能源转型；

此外，农业生产离不开大量化肥、农药、农膜等农业生产的投入品，这些化石基的产品在生产过程中也会间接排放大量的二氧化碳。此外，诸如农用地膜的使用还带来了环境污染问题，农膜具有增温、保墒等功能，能有效提高农作物产量和品质，但在自然条件下需要近百年时间才能完全降解，越来越多的地膜使用引发了次生“白色污染”问题，让土壤结构遭到破坏、农用机械受缠绕、甚至残留在农作物中引发食品安全问题。

b. 助力维度

农业用能清洁能源转型：对于大型农业机械设备的脱碳化，从成本和技术方面看，目前新能源农机的以锂电池为主，氢燃料电池为辅，既能有效解决续航问题，还能降低系统成本，提高可靠性。未来，随着燃料电池逐步具有商业价值，可不断提高燃料电池比重¹⁹。

农业投入品的生物基转型：而对于化石基的各类农业投入产品，通过采用合成生物技术方式可以提供低成本低碳的选择。将微生物细胞作为细胞工厂，只需要酵母、细菌等做“底盘”，即可跳过植物光合作用合成物质的步骤，直接使用二氧化碳作为原料，合成生物基产品。比如采用天然生物质原料改性合成的可生物降解地膜，在自然界能够很快分解和被微生物利用。

c. 发展现状

我国农业机械柴油用量巨大，在碳中和、碳达峰大背景下，农业机械电动化转型非常迫切。据统计局，我国农机总动力超过 10 亿千瓦，各种农机总量约 2 亿台套，95%以上是柴油机，农机柴油消耗量占全国柴油总消耗量近 1/3，柴油车排放的污染物氮氧化物、二氧化碳及其颗粒物，污染严重，而且柴油运输使用过程中的滴漏、废油排放，也带来农田污染的隐患。

农产品方面，地膜作为重要的农业生产资料，我国的使用量和覆盖面积均为世界第一。国家统计局数据显示，预计到 2024 年，我国地膜覆盖面积将达 3.3 亿亩，使用量超过 200 万吨。由于重使用、轻回收，部分地区地膜残留污染问题日益严重，现已成为制约农业绿色发展的突出环境问题。尽管近年来，各级农业农村部门不断推进地膜污染防治工作，但我国地膜残留污染依然量大面广。目前生产降解地膜成本是普通地膜的 2 倍到 3 倍，但随着更多企业布局可降解材料的生产，可降解地膜的生产成本也会相应降低。

3.4.2 甲烷减排

a. 主要原理

反刍动物肠道发酵的甲烷减排可以通过改善饲养模式来实现，对放牧系统而言，可以加

¹⁹ 中国能源报，氢能应用再添新场景：“柴改氢”加速农机电动化转型. 2020-12-23 .
<http://escn.com.cn/news/show-1146057.html>

强放牧和草地管理，提高饲草质量和草地固碳量。对舍饲或混合系统而言，可以提高农作物秸秆和饲料的利用率，加强畜禽粪便管理，推进农场可再生能源的利用。

水稻种植产生的甲烷减排机理较为复杂，需要考虑植株、土壤碳源、氧源及微生物群落之间相互影响关系，在保障粮食安全的同时实现减排效果，具有较大难度。对于水稻减排而言，主要的减排技术包括从育种到耕种方式的改变。

b. 助力维度

选育优良品种、提高生产效率：畜牧业和水稻种植产生的甲烷减排都可以通过育种提高生产效率，进而降低碳排放强度。通过提高动物品种的饲料转换效率、或者缩短饲养周期，有利于降低单位产品（比如每公斤肉或奶）的甲烷排放；利用生物技术、强化栽培管理、增加种植密度、适度增加有机肥使用、精准灌溉等方式，可以提高水稻单产 5%-18% (Wu et al., 2019; Sun et al., 2019)。通过高产水稻的育种有望在增产的同时显著减低排放（张卫健等人，2020）。

饲料添加剂：一些饲料添加剂能够抑制反刍动物消化系统中甲烷的形成，包括 3-NOP、单宁、海藻、一些植物脂肪和高级脂肪酸等。但技术仍然处于早期阶段，实际减排效果仍伴随一定争议（表 3）。

表3 减缓甲烷排放的饲料添加剂总结

添加剂	潜力	置信度	潜在风险
3-Nitrooxypropanol	很高	5	未知
Asparagopsis（一种藻类）	很高	1	对动物瘤胃壁可能会带来损伤、在食物中带来溴化碘残留
硝酸盐	高	4	对一些动物有毒性
精油	低	2	未知

数据来源：The CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (2021)

改善日粮及饲养管理模式：畜禽肠道发酵产生甲烷的量因畜禽采食量、饲料的种类及饲养水平的不同而有较大差别，采用少量多次饲喂方式，可以增加粗饲料的采食量 and 水的摄入量，从而提高瘤胃内食糜的流通速率，降低甲烷排放。此外，在饲料中减少粗饲料数量或用一些浓缩剂取代粗饲料，也能够通过加快发酵速度从而减缓甲烷的排放（亚洲开发银行，2014）。

优化禽畜粪污管理：通过厌氧发酵去除粪便的产甲烷潜力，产生的甲烷通过沼气工程等方式收集起来，能够作为清洁能源利用。

合理的灌溉模式：由于甲烷产生于严格的厌氧环境，相比于稻田持续处于淹水状态，采取中期烤田和间歇灌溉能够改善稻田土壤通气性，增加氧气含量，减少甲烷的产生和排放

(颜晓元 & 夏龙龙, 2015)。

优化秸秆还田措施：采用高效秸秆腐解菌、补充氮肥、秋冬季秸秆翻耕等措施加快秸秆旱季有氧分解，减少水稻生长季的土壤活性有机碳供应，从而降低稻田甲烷排放。此外，秸秆离田通过沼气工程去除其产甲烷潜力后再还田，可有效降低秸秆还田的甲烷排放。

调整土壤微生物群落结构：稻田甲烷产生和氧化过程还取决于微生物的结构和活性，因此通过调整稻田甲烷排放相关的微生物群落结构，有望降低稻田甲烷排放。最新研究发现稻田土壤施入电缆菌后，稻田甲烷排放减少了 93% (Scholz, 2020)。

c. 发展现状

农业生产中的甲烷排放是仅次于能源供应的第二大甲烷排放源，其中主要来自动物肠道发酵和水稻种植。而目前在全球范围内针对农业领域的甲烷减排技术，其技术的可行性和经济性均有不足，因此甲烷减排面临较大挑战。并且随着城市化和居民消费水平的提高，来自农业领域的甲烷排放仍有增长空间。作为全球甲烷排放大国，我国早在 2007 年的第一份应对气候变化国家方案就已经提出了甲烷减排行动，我国的“十四五”规划中已明确提出要加大甲烷等其他温室气体的控制力度。

此外，我国计划在国家自主贡献之外，制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划，争取在 21 世纪 20 年代取得控制和减少甲烷排放的显著效果。同时，中美更是联合发布了《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》²⁰，计划在 2022 年上半年召开会议，聚焦强化甲烷测量和减排具体事宜。在全球各国积极应对气候变化的大背景下，甲烷减排也是我国 2060 年实现碳中和的重要抓手，有望采取更多更为积极有效的行动。

3.4.3 氧化亚氮减排

a. 主要原理

氧化亚氮 (N_2O) 作为全球占比第三的温室气体，是一种强大的温室气体，在百年尺度内的增温效应是其等量二氧化碳的近 300 倍，其在大气中寿命可达百年之久，也是一种消耗臭氧的化学物质。

全球人为产生的氧化亚氮排放量主要是向农田中添加的氮，在过去 40 年里增加了 30%。由于使用氮肥和粪肥，农业占所有人为氧化亚氮排放量的 70%。这种增加是造成大气中氧化亚氮负荷增加的主要原因。因此，减少农田氧化亚氮排放对全球应对气候变化至关重要。

周丰等人 (2021) 通过建立完整的全球农田土壤氧化亚氮排放通量系统，发现农业是最大的氧化亚氮人为排放源，其中农田氮肥施用 (含化肥和有机肥) 是主要贡献者。因此，氮肥的投入量以及氮肥的形式、施用方法、施用时期等是农田氧化亚氮排放最主要的影响因素。

²⁰ 新华社. 中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言. 2021-11-11.
http://www.gov.cn/xinwen/2021-11/11/content_5650318.htm

b. 助力维度

我国是世界最大氮肥生产国和消费国，氮肥的不当管理造成了大量氧化亚氮的排放，通过减少氮肥施用、优化施肥方式、改进肥料种类、提高水肥耦合，在增加作物产量的同时，有效减少氧化亚氮排放，提升氮肥利用率，实现增产与减排协同。

提高氮素利用率：通过优化农田管理措施，比如配合施用有机肥、添加生物质炭，以及使用氮肥增效剂及缓控释肥、水肥一体化管理等，都可以有效提高当季氮肥利用率。这能够在保证粮食产量的同时，显著减少氧化亚氮排放及氮肥的其它无效损失（Rees，2020）。

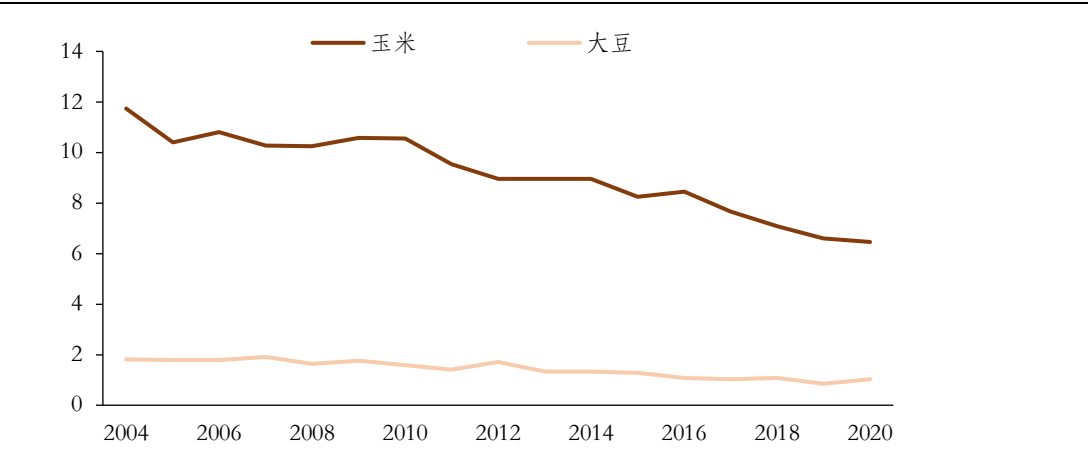
土壤环境管理：土壤 PH 值在调节和改善氧化亚氮排放方面具有重要作用，通过精准施用石灰等调控田间 PH 值的方式，能够实现优化作物生长和缓解氧化亚氮排放的双重效果。

使用微生物抑制剂²¹：现有研究表明，土壤中微生物发生的硝化作用是影响作物生长和氧化亚氮排放的重要因素，因此利用硝化抑制剂减缓硝化和反硝化过程有望降低土壤氧化亚氮排放（Meng, et al., 2020）。根据 Zhang 等人（2022）的研究，生物炭、丛枝菌根真菌、微生物菌剂、生物硝化抑制剂和生物反硝化抑制剂等具有环境友好的方式将是氧化亚氮减排的研究方向。

c. 发展现状

作为我国氧化亚氮最主要的排放源——农业生产中的氮肥施用，由于需要在农产品产量增加的前提下实现减排，面临更高的难度。我国采取的主要方案是实施“化肥使用量零增长行动”，支持和鼓励采取测土配方施肥技术、有机肥资源利用以及秸秆还田等方式来降低化肥使用。在“十三五”气候变化应对方案中也明确提出 2020 年农田氧化亚氮排放达到峰值。

图32 每亩氮肥用量（公斤，折纯用量）



数据来源：国家统计局

²¹ Nitrification and urease inhibitors improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil

2015 年以来,农业农村部组织开展化肥农药使用量零增长行动,包括有机肥替代化肥、科学用药技术推广等,化肥农药使用量显著减少,化肥农药利用率明显提升(图 32)。并且在 2017 年也已经提前三年实现了化肥农药使用量零增长的目标。经农业部测算,2020 年我国水稻、小麦、玉米三大粮食作物化肥利用率 40.2%,比 2015 年提高 5 个百分点;农药利用率 40.6%,比 2015 年提高 4 个百分点²²。未来,要实现碳中和目标下氧化亚氮的深度减排,仍需更多维技术和模式的探索。

3.5 农业碳汇

3.5.1 农田土壤碳汇

a. 主要原理

农田土壤碳汇是指作物在生长过程中通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并将其以有机质的形式存储在土壤碳库中,从而降低大气中二氧化碳等温室气体的浓度;同时,碳汇能够增加土壤的有机质含量和提升土壤肥力(韩松等人,2014)。

农田土壤有着巨大固碳潜力,据统计,按 1 米深计算,全球土壤有机碳库容量约为 1.5 万亿吨,是大气碳库容量的 2 倍、陆生植物碳库容量的 3 倍。但农田土壤碳汇容易受到多种因素的影响,在自然因素和耕作、施肥等农田管理措施的作用下,农田土壤碳库处于不断变化中,能形成碳汇的同时本身也是碳源²³。因此,需要采取适当的农田管理措施来实现碳汇,常用的增加农田土壤碳汇的农田管理措施包括施有机肥、秸秆还田、免耕、休耕等。

b. 助力维度

具体实践中,一些比较典型增加土壤碳汇的做法包括用秸秆覆盖地表、采取免耕播种,配套应用药剂拌种、种子包衣、化学除草等防治技术,核心是减少土壤扰动,降低土壤侵蚀,促进蓄水保墒,提高土壤有机碳含量,增强土壤固碳能力。

采取秸秆还田、开展轮作:大量研究证明,秸秆、粪肥还田能使土壤有机碳含量显著上升,采取轮作的耕种模式能够调节进入土壤的作物残茎、根系的种类和数量,有效增加土壤中有有机碳的含量。

免耕、少耕等保护性耕作技术:免耕少耕可通过稳定土壤团聚体来改善土壤结构,保护土壤有机质免受微生物降解,从而降低土壤有机碳分解速率,经过连年翻耕的土壤有机碳、氮等含量比保持免耕的土壤有显著降低。然而,免耕对气候变化的影响仍然面临一定

²² 中国农业农村部,化肥农药使用量零增长行动目标顺利实现,我国三大粮食作物化肥农药利用率双双达 40%以上. 2021-1-17. http://www.moa.gov.cn/xw/zwtd/202101/t20210117_6360031.htm

²³ 河北省自然资源厅. 国外农田土壤碳汇市场交易实践及对我国的启示. 2022-4-27. <http://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/kjxx/gjil/10716648570560712704.html>

争议，一些学者认为在农业活动对土壤的影响较为复杂，尚未有清晰的科学机理，保护性耕作的减排潜力或较为有限（Powlson 等人, 2014）。

c. 发展现状

根据农业部和国家发展改革委联合印发的《保护性耕作工程建设规划(2009—2015 年)》，20 世纪 70 年代末，我国开始引进和试验示范少免耕、深松、秸秆覆盖等单项保护性耕作技术，但受技术、机具及社会经济发展水平等因素的限制，这些技术只在部分地区进行小规模示范试验，推广应用面积不大。20 世纪 90 年代以来，随着现代农业技术的进步，保护性耕作研究与示范工作发展速度加快。进入 21 世纪，保护性耕作技术研究及示范推广工作得到各级政府高度重视。2002 年起中央财政设立专项资金，每年投入 3000 万元，开始有组织有计划地加大保护性耕作示范应用力度，通过技术培训、宣传咨询、作业补贴与样机购置等形式，开展保护性耕作示范工程建设。

特别是我国东北地区，是北半球仅有的三大黑土区之一，也是我国最大的商品粮生产基地，是土壤保护的重点关注地区，农业农村部专门推动东北黑土地保护性耕作行动计划，2020 年、2021 年实施面积分别超过 4600 万亩、7200 万亩，今春预计实现 8000 万亩秸秆覆盖免少耕播种目标任务²⁴。

尽管已经采取了大量措施，但整体而言，我国农田固碳减排还存在巨大潜力。根据农业农村部《2019 年全国耕地质量等级情况公报》，我国耕地平均有机碳含量低于世界平均值 30% 以上，低于欧洲 50% 以上，耕地质量不高、耕作层变浅、土地退化的趋势尚未得到有效抑制。根据李虎（2022）的测算，未来 50 年，如果实施有效的农田管理措施（包括有机肥应用、秸秆还田、保护性耕作）对土壤固碳的贡献率约为 30%-36%。

3.5.2 渔业碳汇

a. 主要原理

渔业在贡献丰富蛋白的同时，还有助于碳封存。通过选择具有碳汇功能的养殖品种，建设生态化养殖设施，构建由鱼类、贝类、藻类和底栖生物等组成的多营养层次综合养殖模式，能够提高水体空间利用率，增加水产养殖效益，并形成渔业碳汇。其中，贝类和棘皮动物的养殖有较高的碳封存潜力，碳固存可达数十万年，且营养化的海区既有利于贝类养殖，也有利于净化海区环境。

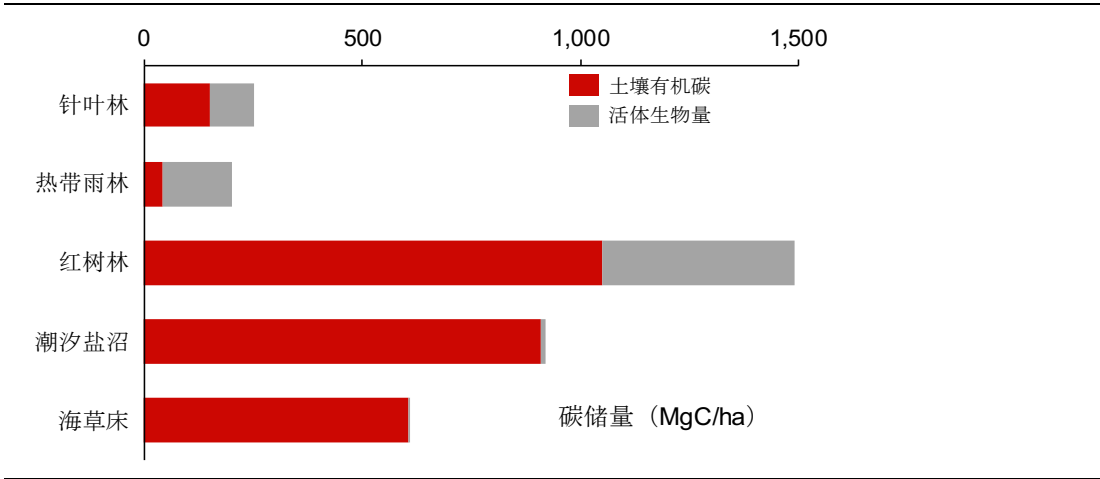
b. 助力维度

²⁴ 农业农村部，推动保护性耕作高质量发展——农业农村部、财政部有关负责同志就《东北黑土地保护性耕作行动计划（2020—2025 年）》答记者问，2020-3-18. http://www.gov.cn/zhengce/2020-03/18/content_5492788.htm

渔业及海洋系统的碳固存通常称为“蓝碳”，长久以来森林系统的碳储存作用受到广泛认同（被称为“绿碳”），但海洋系统的作用受到忽视。实际上，浮游生物、细菌、海藻、盐沼和红树林等在内的海洋生物固定了全球超过 50%的碳，这种由海洋生态系统储存的碳便成为“蓝碳”（Nellemann 等人，2009）。

蓝碳是最大的天然碳汇系统，海洋占地球表面积超 70%，其储碳量相当于陆地的 20 倍和大气的 50 倍，每年吸收了约 25%人类活动排放的二氧化碳（图 33）。此外，有研究（Bauer et al, 2013）发现近海海洋吸收了工业革命以来 30%人类活动产生的二氧化碳，沿海地区持续的人类活动压力可能会对沿海海洋碳汇的未来演变产生重要影响，退化的沿海生态系统每年将释放多达 10.2 亿吨二氧化碳，相当于全球热带森林砍伐排放量的 19%。

图33 森林和海洋系统的土壤和生物量平均碳储量比较



数据来源：FAO

因此，蓝碳对缓解气候变化至关重要，很多科学家强调应该加强对于湿地、红树林、盐沼等的保护，避免陆地作物过量施肥、城镇有机垃圾过量投入、陆地毁林引发的淤泥淤塞、渔业的不可持续性运营等（Duarte，2009）。此外，一些应对气候变化的地球工程手段也可以提高海洋储碳能力，比如海洋肥化、人工上升流、提高海洋碱度、二氧化碳的海洋封存等。此类地球工程手段可能带来潜在的环境问题，对地球许多区域的气候及生态系统造成不可估量的影响，目前尚处在试验研究阶段。

c. 发展现状

目前国际上海洋碳汇标准体系较为空白，主要交易标准集中在自愿碳信用市场，我国对蓝碳的探索与国际前沿同步。我国有近 300 万平方千米的管辖海域和 1.8 万千米的大陆岸线，滨海湿地面积约为 670 万公顷（赵鹏，2019）。根据相关学者对中国现有的蓝碳资源的量化。中国可预期海岸带蓝碳碳汇增量约为 340-516 万吨 CO₂e（李捷，2019）。

2020 年 9 月 17 日，我国在联合国气候行动峰会中提到“开展蓝色碳汇研究及试点工作”。深圳、厦门、威海及湛江等沿海城市在蓝色碳汇方面率先开展了先行探索。2021 年广东湛江红树林造林项目成功注册为我国首个符合核证碳标准（Verified Carbon Standard, VCS）和气候社区生物多样性标准（The Climate, Community & Biodiversity, CCB）的红树林碳汇项目，并成为我国开发的首个蓝碳交易项目。该项目预计在 2015 年~2055 年间产生 16 万吨二氧化碳减排量。为促进我国红树林修复项目碳汇和其他生态价值的市场化提供了范本。

专栏 3 展望农业碳交易市场

农业具备大规模减缓甚至逆转全球气候变化的潜力。然而现实中，如何能够鼓励农民改变现有行为模式，采取更为积极的减碳固碳手段至关重要。这些新的手段可能会增加农业生产的成本，还有可能降低其产量和收入。而碳交易市场或许能够提供具有经济性的解决方案，将农业减碳、固碳行为进行量化，转化为农业碳信用，从而纳入到碳交易市场中提供激励。

2021 年全国碳交易市场正式开启，前期纳入了电力行业，钢铁、水泥、化工等也将陆续纳入。虽然农业暂未纳入国家强制碳市场的交易中，但可以通过 CCER（中国核证自愿碳减排）机制进行碳交易（表 4）。目前，相比工业碳排放，农业碳排放源头多而且主体分散，方式复杂，观测与统计农业碳排放量存在一定的技术难题，全球范围尚没有一套被广泛认可的农业碳排放监测、报告和核查等评估工具和指标，农业碳信用的评估体系仍需完善。

然而长期而言，农业碳信用将发挥更大作用，有助于农业的生态价值实现和农民增收，一些负责任的企业可以通过支持农业减排固碳，部分抵消自身的排放，部分金融机构也可以参考农业减排固碳的生态价值，开发绿色信贷产品，降低农户的信贷成本。

表 4 目前国内碳信用市场（CCER）中农业相关的方法学

方法学编号	方法学名称
CMS-083-V01	保护性耕作减排增汇项目
CMS-017-V01	在水稻栽培种通过调整供水管理实践来实现减少甲烷的排放
CMS-066-V01	利用粪便管理系统产生的沼气制取并利用生物天然气温室气体减排方法
CMS-107-V01	反刍动物减排项目
CMS-082-V01	禽畜粪便堆肥管理减排项目
CMS-063-V01	家庭/小型用户应用沼气/生物质产热
CMS-026-V01	家庭或小农场农业活动甲烷回收
CMS-066-V01	现有农田酸性土壤中通过大豆-草的循环种植中通过接种菌的使用减少合成氮肥的使用
CMS-009-V01	针对农业设施与活动的提高能效和燃料转换措施

资料来源：国家核证自愿减排量交易平台

四、 农业碳中和带来的投资机遇

从技术路径来看，能源、电力等部门存在较强的可预测性，尤其是低碳能源（可再生能源和核能）的大力开发，为碳中和的实现描绘了相对清晰的前景。与此不同的是，现阶段农业脱碳的方式尚不明确，技术开发的方向也不明晰，唯一达成共识的是，农业还要继续发展，需要满足不断增长的食物需求；与此同时气候变化、生物多样性丧失带来的压力让现有的农业生产模式难以维继。农业系统需要更为深刻的技术革新，扭转集约农业模式占据大量水资源、土地、破坏生物多样性的趋势，在保障农业生产的同时维持生态系统的平衡。

对于农业这类较为早期的技术，技术路线不确定性高，项目风险较大，主要的外部资金来源通常是私募股权（PE）和风险投资（VC），国内的PE/VC近年来投资热点集中于互联网、生物医药、金融等行业，在农业技术领域有望发挥更大的作用。

投资者尤其需要重视新兴科技在农业领域带来颠覆性创新的机会，为未来的农业生产提供革命性的解决方案。同时还要改善农业投资生态，吸引资本及优秀人才参与。具体而言，本文总结了五大突破性技术投资机遇：

- 1) **替代蛋白**：正如习总书记所强调的“大食物观”，向耕地草原森林海洋、向植物动物微生物要热量、要蛋白，全方位多途径开发食物资源。减少对动物蛋白的过度依赖、实现替代蛋白方向的技术攻坚，包括植物蛋白、细胞培养肉、微生物蛋白等，不但能改变人类蛋白质的供给和生产方式、有助于缓解粮食安全问题，是推动农业供给侧结构性改革的重要内容，同时也对于实现碳中和有重大意义。
- 2) **智慧农业**：农业生产中采用一些高技术含量的工艺和技术，在提高单产的同时减少肥料和农药的使用。这些技术包括无人机、传感器、卫星数据、自动化、机器人和AI技术等。这些技术的有效使用可以提高资源利用率和有效性，让农业实现“环境影响可测、生产过程可控、产品质量可溯”的目标。
- 3) **基因编辑育种**：在过去的30年中，种子的创新为提高单产做出了积极的贡献。预计基因编辑技术的进步将有力地影响未来的粮食供应。有望从育种角度提高氮肥利用效率，有效减少农作物损失，还在节省土地和水资源等方面具有巨大潜力。
- 4) **垂直农业**：与传统的田间耕作相比，其生产过程不使用农药，用水量可减少90%，并可节省多达95%以上的土地，随着农业种植的土地、水等资源愈发成为限制，LED和能耗成本逐渐下降，或成为未来农业的新形态。
- 5) **水产养殖**：鱼提供了健康的低脂蛋白质来源，其生产过程的碳密集度大大低于牛肉。但是，全球海洋渔业已经过度捕捞，人工水产养殖对于满足全球对鱼类不断增长的需求至关重要。多项水产养殖的研发和新项目正在进行中，这些项目一般会聚焦限制抗生素的使用、增加可持续饲料的使用、鱼粉和池塘沉积物的回收等。



References:

- Bauer, J. E., Cai, W. J., Raymond, P. A., Bianchi, T. S., Hopkinson, C. S., & Regnier, P. A. (2013). The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504(7478), 61-70.
- Bodirsky, B. L., Rolinski, S., Biewald, A., Weindl, I., Popp, A., and Lotze-Campen, H. (2015). Global food demand scenarios for the 21st century. *PLoS ONE* 10:e01329201. doi: 10.1371/journal.pone.0139201
- 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*, 2(3), 198-209.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2022). Climate goals require food systems emission inventories. *Nature Food*, 1-1.
- Cui, X., Zhou, F., Ciais, P., Davidson, E. A., Tubiello, F. N., Niu, X., ... & Zhu, D. (2021). Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation. *Nature Food*, 2(11), 886-893.
- Escarcha, J. F. et al. (2018). Livestock Under Climate Change: A Systematic Review of Impacts and Adaptation. *Climate*, Vol 6, 54.
- FAO. (2013). *Food wastage footprint: Impacts on natural resources*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of United Nations. (2017). The future of food and agriculture.
- Goldewijk, K. & Battjes, J.J. 1997. A hundred year database for integrated environmental assessments. Bilthoven, the Netherlands, National Institute of Public Health and the Environment.
- IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondizio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneeth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- IPCC. (2014). Food Security and Food Production Systems. in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Kenne, G.J. and Kloot, R.W., 2019. The carbon sequestration potential of regenerative farming

- practices in South Carolina, USA. *American Journal of Climate Change*, 8(02), p.157.
- McCallum, M. L. (2015). Vertebrate biodiversity losses point to a sixth mass extinction. *Biodiversity and Conservation*, 24(10), 2497-2519.
- Meng, X., Li, Y., Yao, H., Wang, J., Dai, F., Wu, Y., & Chapman, S. (2020). Nitrification and urease inhibitors improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 154, 103665.
- Meng, X., Li, Y., Yao, H., Wang, J., Dai, F., Wu, Y., & Chapman, S. (2020). Nitrification and urease inhibitors improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 154, 103665.
- Myers, S. S. et al. (2017). Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. *Annu. Rev. Public Health*, Vol 38, 259 – 277.
- Nellemann, C., & Corcoran, E. (Eds.). (2009). *Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment*. UNEP/Earthprint.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & van Ypersele, J. P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 151). Ipcc.
- Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*. 2018 Jun 1;360(6392):987-992. doi: 10.1126/science.aag0216. Erratum in: *Science*. 2019 Feb 22;363(6429): PMID: 29853680.
- Powlson, D. S., Stirling, C. M., Jat, M. L., Gerard, B. G., Palm, C. A., Sanchez, P. A., & Cassman, K. G. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4(8), 678-683.
- Rees, R. M., Maire, J., Florence, A., Cowan, N., Skiba, U., Weerden, T. V. D., & Ju, X. (2020). Mitigating nitrous oxide emissions from agricultural soils by precision management. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(1), 75-80.
- Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Sci. Prog.* 100, 80 – 129. doi: 10.3184/003685017X14876775256165
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.
- Scholz, V. V., Meckenstock, R. U., Nielsen, L. P., & Risgaard-Petersen, N. (2020). Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils. *Nature communications*, 11(1), 1-5.
- Schwarzer, S. (2019). Putting Carbon back where it belongs—The potential of carbon sequestration in the soil. *Foresight Brief; United Nations Environment Programme Science Division: Geneva, Switzerland*.

- Schwarzer, S. (2019). Putting Carbon back where it belongs—The potential of carbon sequestration in the soil. *Foresight Brief; United Nations Environment Programme Science Division: Geneva, Switzerland*.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., et al. (2019). Creating a sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050. Washington, DC: World Resources Institute.
- Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., ... & Malley, J. E. (2019). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., ... & Miller, H. (2007). IPCC fourth assessment report (AR4). *Climate change*, 374.
- SONMEZ, B., OZBAHCE, A., KECECI, M., AKGUL, S., AKSOY, E., MADENOGLU, S., ... & VARGAS, R. GLOBAL SYMPOSIUM ON SOIL ORGANIC CARBON, Rome, Italy, 21-23 March 2017.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T. D., Castel, V., Rosales, M., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food & Agriculture Org.
- Sun, Yiduo, Ruifa Hu, and Chao Zhang. "Does the adoption of complex fertilizers contribute to fertilizer overuse? Evidence from rice production in China." *Journal of Cleaner Production* 219 (2019): 677-685.
- Terra Genesis International. (2020). RA. Available online at: <http://www.regenerativeagriculturedefinition.com/> (accessed October 7, 2020).
- The Environmental Markets Lab (emLab). (2019). Estimating the Ocean's True Potential for Feeding the Planet. emLab.University of California, Santa Barbara.
- The Good Food Institute (2019). Plant-based meat for a growing world.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., & Smith, P. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015009.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., & Smith, P. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015009.
- USDA. 2016. Documentation of Organic Production. USDA Economic Research Service. September 22, 2016.
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., ... & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal

- ecosystems. *Proceedings of the national academy of sciences*, 106(30), 12377-12381.
- West, T.O. and W.M. Post, 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1930-1946.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Murray, C. J. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT – Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492.
- World Health Organization. (2020). *The state of food security and nutrition in the world 2020*. Food & Agriculture Org..
- Wu, Z., Zhang, X., Dong, Y., Li, B., & Xiong, Z. (2019). Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107625.
- Zhang, Y., Wang, W., & Yao, H. (2022). Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N₂O emissions and recent development in mitigating strategies. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-16.
- Zhao, C. et al. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol 114, 9326 – 9331.
- 董双林. 高效低碳——中国水产养殖业发展的必由之路[J]. 水产学报, 2011, 35(10): 1595~1600
- 郭佳, 张宝林, 高聚林, 彭健 & 罗瑞林. (2019). 气候变化对中国农业气候资源及农业生产影响的研究进展. 北方农业学报(01), 105-113.
- 郭建平. (2015). 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 26(1), 1-11.
- 韩松, 秦路, & 张建伦. (2014). 国际农业土壤碳交易机制发展现状, 问题及启示. 世界农业, (8), 38-42.
- 胡立峰, 李洪文 & 高焕文. (2009). 保护性耕作对温室效应的影响. 农业工程学报(05), 308-312. doi:CNKI:SUN:NYGU.0.2009-05-061.
- 矫梅燕, 周广胜, & 陈振林. (2014). 农业应对气候变化蓝皮书: 气候变化对中国农业影响评估报告 (NO. 1). 北京: 社会科学文献出版社.
- 盛芳芳, 高海秀, 樊胜根, 陈志钢, 张玉梅, 朱晨 & 赵启然. (2022). 改善中国居民膳食结构以实现健康与环境双赢. 2021 中国与全球食物政策报告, 转型农业食物系统助力实现中国 2060 碳中和目标.
- 世界自然基金会(WWF). (2018). 中国城市餐饮食物浪费报告. 北京.
- 世界自然基金会. (2020). 地球生命力报告 2020-扭转生物多样性丧失的曲线. Almond, R.E.A., Grooten, M. and Petersen, T. (Eds). 世界自然基金会, 瑞士格朗.

- 唐博文.(2022).从国际经验看中国农业温室气体减排路径.世界农业(03),18-24.
doi:10.13856/j.cn11-1097/s.2022.03.002.
- 王明利,李鹏程 & 马晓萍.(2022).规模化选择对畜牧业高质量发展的影响及其路径优化——
基于生猪养殖规模化视角.中国农村经济(03),12-35.
- 王维汉,& 毛前.(2014).以色列农业水资源的可持续利用.浙江水利水电专科学校学报,26(1),
43-45.
- 颜晓元,& 夏龙龙.(2015).中国稻田温室气体的排放与减排.中国科学院院刊,30(Z1),186-193.
- 杨晓光,刘志娟 & 陈阜.(2010).全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I.气候变暖对中国
种植制度北界和粮食产量可能影响的分析.中国农业科学(02),329-336.
doi:CNKI:SUN:ZNYK.0.2010-02-015.
- 张卫建,江瑜,钱浩宇,张艺,邓艾兴 & 张俊.(2020).水稻丰产与甲烷减排的协同机制与实现途
径..(eds.)第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集(pp.85).
- 张向阳,张玉梅,冯晓龙,樊胜根,& 陈志钢.(2022).中国农业食物系统能源碳排放趋势分
析.中国生态农业学报(中英文),30(4),535-542.
- 朱琳."碳中和大势下的农业减排:英国推进农业“净零排放”的启示."可持续发展经济导
刊.05(2021):29-31.

高瓴产业与创新研究院简介

高瓴产业与创新研究院是高瓴旗下基于宏观经济和产业与技术变革等要素进行分析研究的专业性研究机构，是高瓴自主、专业、深度研究能力的智识分享平台。依托高瓴在科技创新与科技赋能、气候变化与新能源、医疗健康、新基建、先进制造等领域产业生态的深入布局和研究，高瓴产业与创新研究院敏锐洞察和捕捉技术发展趋势和产业变革方向，为社会经济发展持续输出高品质研究成果。

高瓴成立于 2005 年，专注于长期结构性价值投资，发现价值，创造价值。作为中国人创立的国际化创新型投资机构，依靠深度研究基因、高效资源配置，坚持重仓中国，积极推动原发创新与产业变革，持续创造经济、社会价值。作为具有全球视野的长期价值投资者，高瓴以创造可持续的长期增长为目标，寻找最优秀的企业家和管理团队，通过科技创新、独立自主的研究、行业专长和世界级的运营及管理能力，协助企业不断提升战略及运营管理水平，充分挖掘并发挥企业家潜能，共同创造价值。

北京绿色金融与可持续发展研究院简介

北京绿色金融与可持续发展研究院(以下称“研究院”)是为中国和全球绿色金融与可持续发展提供政策、市场、产品研究以及国际合作平台的智库。作为一家非盈利机构，研究院的目标是在绿色金融、自然资本融资、低碳发展和能源转型等领域成为有全球影响力的智库，为改善全球环境和应对气候变化做出实质性贡献。研究院现下设五个研究中心，分别是绿色金融国际合作研究中心、能源与气候变化研究中心、ESG 投资研究中心、绿色科技研究与投资促进中心以及自然资源与投融资中心。研究院的重点工作领域包括：为中国有关部门和中央及地方政府、“一带一路”沿线国家以及国际组织提供绿色金融和低碳发展的政策研究与规划设计；为金融机构开发服务于环境改善和低碳发展的绿色金融产品、方法和分析工具；支持 GIP 秘书处北京办公室及其指导委员会、NGFS、IPSF 以及中英、中法、中欧绿色金融合作机制的工作；为发展中国家的金融监管机构和银行、证券、资管等金融机构提供能力建设和交流平台；与英国碳信托（Carbon Trust）合作管理绿色科技研究与投资促进中心。

绿色创新发展中心（iGDP）简介

绿色创新发展中心（注册名：北京绿色伙伴咨询有限公司）是专注绿色低碳发展的战略咨询机构，通过跨学科、系统性、实证性的政策研究、梳理、比较和评估，推动低碳环境解决方案的精细化，提升可实施度。我们与多样的合作伙伴和利益相关方合作，共同推动实现零排放的未来；立足本土，讲述中国绿色低碳发展故事。绿色创新发展中心关注以下领域的研究、咨询和交流：

- 能源转型
- 绿色经济
- 气候战略



- 可持续城市
- 策略传播



报告作者：

梁 红 高瓴产业与创新研究院院长

陈美安 绿色创新发展中心项目总监、高级分析师

胡 敏 北京绿色金融与可持续发展研究院副院长

吴宛忆 高瓴产业与创新研究院研究员

耿浩淼 高瓴产业与创新研究院研究员

致谢：

马 骏 北京绿色金融与可持续发展研究院院长

莫争春 北京大学能源研究院能源转型与气候变化项目高级顾问

牛坤玉 中国农业科学院农业经济与发展研究所副研究员

邵丹青 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室中级研究专员