Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Next Ten Years: Create a Better Future—Review

食品系统与气候变化、空气污染的相互作用研究综述

洪朝鹏[a,b,*]，钟锐[a]，徐梦瑶[a]，何沛东[a]，莫惠斌[a]，覃栎[c]，施丹娜[a]，陈鑫磊[d]，贺克斌[b,e]，张强[f,*]

[a] Shenzhen Key Laboratory of Ecological Remediation and Carbon Sequestration, Institute of Environment and Ecology, Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China
[b] State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China
[c] College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China
[d] Institute of Data and Information, Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China
[e] State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China
[f] Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 30 September 2024
Revised 28 November 2024
Accepted 12 December 2024
Available online 27 December 2024

关键词
食品系统
气候变化
空气污染
相互作用
系统综述

摘要

食品系统不仅深受气候变化与空气污染的影响，同时也是引发这些环境问题的重要因素。厘清食品系统与气候变化、空气污染之间的复杂相互作用，对减缓气候变化、改善空气质量以及促进食品系统可持续转型具有重要意义。然而现有文献缺乏对这些相互作用的系统性综述，尤其是在该领域快速发展的背景下。为此，本文系统回顾了近期的相关文献，重点梳理两方面内容：①气候变化与空气污染对食品系统的影响；②食品系统产生的温室气体与空气污染物排放，及其对全球气候变化与空气污染的贡献。此外，本研究还系统梳理了各类减缓与适应策略，涵盖农业生产实践转变及食品供应链转型等方面，强调了当前亟须对食品系统实施深刻变革，以增强其气候韧性并大幅削减排放。本文不仅对食品系统与气候变化、空气污染相互作用的当前研究进行了全面综述，更指明了未来研究方向，旨在推动可持续食品系统研究的发展与转型进程。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

气候变化、空气污染和粮食安全是当今人类面临的重大挑战[1–4]。这些问题相互交织（图1），对社会、经济和环境系统产生广泛且深远的影响。一方面，气候变化和空气污染对全球食品系统构成严峻挑战[5–6]。气候变化引发全球气温上升，导致干旱和洪水等极端事件频发，严重影响农业生产并对食品供应链造成了冲击[7–9]。例如，气温升高和降水模式变化影响了作物生长周期，导致产量波动，增加了食品供应的不确定性[9–11]。气候变化不仅直接影响生产，还会波及经济、环境、社会及政治系统，进而对民生、社区稳定以及可持续发展产生连锁效应[5,12]。大气中的臭氧（O_3）等污染物，通过损害叶片或改变作物生长环境，进而影响农产品的产量和质量[13–14]。此外，气候变化与空气污染之间存在复杂的相互作用：气候变化通过改变气象条件影响污染物的生成、传输和沉降等过程[15–16]；而空气污染通过扰动地球辐射收支进而影响气候系统[17]。这些相互作用可能共同加剧对食品系统的影响。

* Corresponding authors.
E-mail addresses: hcp12@tsinghua.org.cn (C. Hong), qiangzhang@tsinghua.edu.cn (Q. Zhang).

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 44(1): 215–233
引用本文：Chaopeng Hong, Rui Zhong, Mengyao Xu, Peidong He, Huibin Mo, Yue Qin, Danna Shi, Xinlei Chen, Kebin He, Qiang Zhang. Interactions Among Food Systems, Climate Change, and Air Pollution: A Review. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.12.021

另一方面，农食系统是全球气候变化与空气污染的主要推手[18–20]。气候变化的重要驱动因素在于大气中温室气体（greenhouse gases, GHGs）的持续累积。尽管全球温室气体排放主要来自能源活动（如电力、工业及交通领域的化石燃料燃烧）[21]，但农食系统单独贡献了全球约三分之一的温室气体排放量[1,19,22]，这凸显了其在应对气候变化挑战中的关键作用。这些排放主要来自畜牧养殖、肥料施用、水稻种植及土地利用变化等环节，这些过程会释放大量甲烷（CH_4）、氧化亚氮（N_2O）和二氧化碳（CO_2）[2,23–24]。食品系统还对空气污染贡献显著，其在生产、加工、运输、分销和消费等环节的排放量[18]，占全球空气污染物总排放量的10%～90%（具体取决于污染物类型）[3]。例如，2018年，食品系统贡献了全球总氮排放量的一半以上[其中87%以氨气（NH_3）形式排放]，以及高达35%的细颗粒物（$PM_{2.5}$）排放，导致了约22.4%的与空气污染相关的过早死亡[3]。这些数据充分揭示：亟须削减农食系统排放量，以缓解其对气候变化的负面影响并改善空气质量。然而，当前该领域的减排进展仍显著滞后于需求[5,18]。

在此背景下，未来粮食需求的增长预计将进一步推动农食系统的排放[18]。若维持当前趋势，全球食品系统的温室气体排放或将威胁1.5 ℃/2 ℃温控目标的实现[18,25]。研究表明，仅全球食品消费的碳足迹就足以驱动近1 ℃的温升，其中75%的升温效应源自富含CH_4排放的食品（如反刍动物肉类、乳制品及水稻）[4,19–20]。尽管农业生产效率的提升降低了单位产出的排放强度，但国际贸易的复杂性给全球气候治理带来了挑战[19,25]。若不能加速重构农食系统的生产消费模式，其持续排放或将加剧气候变化与环境污染，从而威胁食品系统的可持续性和生态系统的安全[3,5,18–19]。

应对这些挑战亟需多方面深度变革。联合国粮农组织（The Food and Agriculture Organization, FAO）《2022—2031年战略框架》明确指出：将农食系统转型为增效、普惠、强韧、永续的新型体系，是纾解气候危机负面效应与削弱系统自身气候足迹的关键路径[26]。首要策略在于推动农业生产范式转型、普及可持续生产实践，通过减少温室气体排放与环境损害，促进减缓气候变化目标的实现[27–29]。次要路径需着力提升食品供应链资源效能、减少食品浪费并倡导绿色消费模式，协同强化气候治理成效[30–32]。

在推进减排的同时，适应性战略亦不可或缺。为增强农食系统气候韧度，亟须完善农业基础设施、提升水资源管理能力、培育抗逆作物品种并普及气候智慧型农业技术[33–38]。此举将显著提升农业系统应对极端气候及长期环境变化的能力。另一方面，亟须构建并实施高效的政策法规体系。通过政策推动农食系统减排，并提升其气候适应能力[39–40]。通过减缓气候变化与改善空气质量的协同增效，相关政策将在农食系统内催生协同效应，加速可持续转型进程[41]。

针对食品系统与气候变化、空气污染相互作用的研究迅猛增长，相关文献大量涌现[3,6,19,42–44]。然而，大多数研究[3,6,45]聚焦于食品系统与气候变化或空气污染单方面的关联，缺乏对三者相互作用的全面综述。此外，现有研究对适应与减缓策略的综合考量有限[5,33]。因此，本文旨在系统回顾和总结现有研究，重点关注气候变化、空气污染与食品系统之间的相互作用；以及食品系统在气候环境变化减缓与适应方面的策略。通过系统梳理，本文可帮助研究者更好地理解当前研究现状，识别关键科学问题和研究重点，提升未来研究的针对性和成效。

本文回顾了食品系统与气候变化、空气污染三者间的复杂互作关系，重点关注两大方面：一是气候变化与空气污染对农业生产的影响；二是农食系统温室气体与空气污染物的排放，及其对气候变化与空气污染的贡献。此外，文中还梳理了在气候环境挑战下契合粮食安全目标的减缓与适应措施，并探讨了可持续食品系统的发展策略及其面临的主要挑战，最终为食品系统可持续转型提供了未来研究方向与展望。

2. 气候变化和空气污染对食品系统的影响

人口增长与消除饥饿的紧迫目标对全球粮食安全构成巨大压力[2]。作为食品主要来源，农业生产深受气候变化与空气污染共同作用的影响（图2）。气候变化通过多种机制影响农业生产，包括气温上升、大气CO_2浓度升高、水资源变化以及其他因素（如湿度、极端事件和气候振荡）的改变。与此同时，空气污染对全球和区域的农业生产造成威胁。对流层臭氧（O_3）通过气孔进入叶片，诱发氧化胁迫，导致作物减产。除此之外，大气气溶胶通过不同机制对作物产量产生复杂影响：一方面减少到达地表的太阳辐射通量（抑制光合作用）；另一方面增加散射辐射比例（提高光合作用效率）[46–47]。除了作为人类饮食主要能量来源的主粮作物外，水果和坚果等多年生作物也日益受到关注，这主要因为它们具有高营养价值、高种植成本，面对未来气候变化和空气污染冲击时可能较为脆弱[48–49]。

当前研究[50–54]采用多种方法评估了气候变化与空

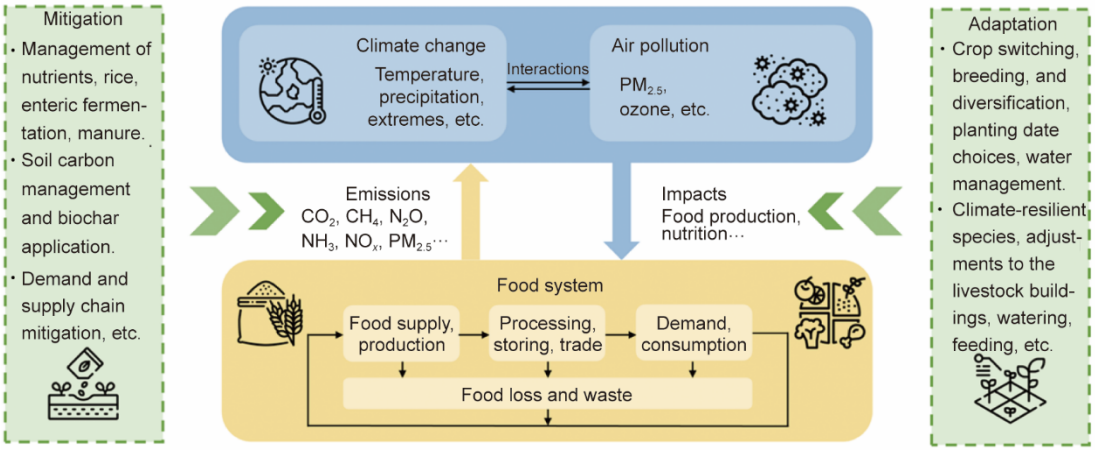

图1. 食品系统与气候变化、空气污染之间的相互作用。气候变化和空气污染（蓝色框）通过复杂作用影响食品系统（黄色框）。反过来，食品系统通过温室气体和空气污染物排放，对全球气候变化和空气污染产生显著影响。减少食品系统排放的减缓措施和增强食品系统韧性的适应措施（绿色框）对于减缓气候变化、改善空气质量和保障粮食安全至关重要。

气污染对作物产量的影响，但结果仍存在显著不确定性。主流评估方法包括田间控制试验、经验统计模型及基于过程的作物模型。田间试验可调控作物生长相关的关键环境因子，但其结论通常受限于特定地域与时段。随着技术进步，经验统计模型和基于过程的作物模型应用日益广泛。经验统计模型通过建立作物产量与环境因子间的经验性函数关系进行评估，但其高度依赖历史数据的特性，限制了模型的外推能力。基于过程的作物模型可动态模拟变化环境下的作物生长过程，但其模拟结果受生理过程机理及参数化方案不确定性的影响，误差幅度可能超过50% [55]。为降低模型不确定性，全球网格化作物模型比较计划（GGCMI）通过集成多模型模拟，优化关键因子（如CO_2浓度、温度、水分、氮素）对区域及全球尺度作物产量影响的评估结果[56]。本节系统阐述气候变化与空气污染对农业生产的影响，首先介绍二者对作物产量的影响与评估方法，然后剖析两大影响因素的交互作用及联合影响。

2.1. 气候变化对农业生产的影响

2.1.1. 温度

人类活动已导致显著的全球变暖，而环境温度升高会改变作物的关键生理过程，并影响其生长和产量形成[6]。由于人为温室气体排放的大量增加，2011—2020年全球地表温度较1850—1900年升高约1.09 ℃，其中陆地升温幅度达1.59 ℃ [57]。研究预测，这一升温趋势将至少持续至21世纪中叶，甚至可能在21世纪末超过2 ℃的温控目标。多模型集合结果表明，在共享社会经济路径（SSP）框架下，全球气候在中期至远期将普遍变暖。随着升温幅度加大，其负面影响波及的地区范围也将显著扩大[57]。因此，全球变暖将波及更广泛区域的农业生产和畜牧养殖活动，

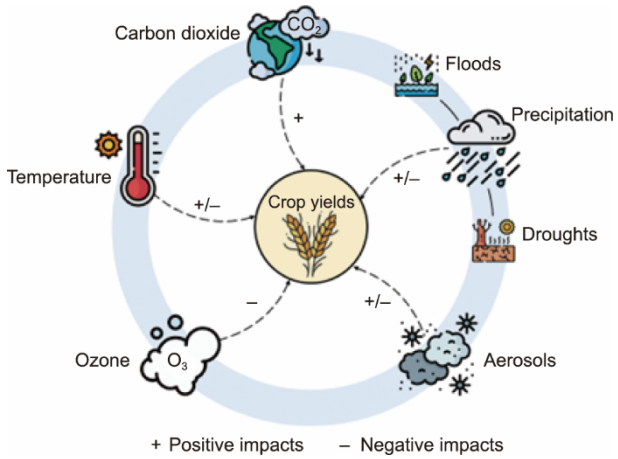

图2. 气候变化和空气污染对作物产量的影响。CO_2通过施肥效应促进作物产量增长，而O_3则通过引发氧化损伤导致作物减产。气温变化的影响因地区而异，平均降水和极端降水事件的影响也不尽相同。同时，气溶胶通过改变辐射收支影响光合作用，进而对作物产量产生多重影响。

并对相关疾病虫害的传播风险产生深远影响。

研究表明，升温通常会改变主粮作物的物候期。多项研究[58–60]显示，升温通常会缩短小麦、水稻、玉米和大豆等主要作物的关键生长阶段。生育期缩短可能发生在营养生长期（叶片和茎干发育的时期）、生殖生长期（对最终作物产量至关重要的时期）或两者同时发生[60]。综合作物模型、统计回归方法及田间增温实验的结果表明：在全球范围内，地表平均温度每升高1 ℃，小麦产量将减少6.0%，水稻减少3.2%，玉米减少7.4%，大豆减少3.1%（不考虑CO_2施肥效应）[61]。此外，基于最新作物和气候模型集合的一项研究[62]表明，由气候变化引发的全球主粮供应危机可能比预期更早到来，其主要驱动因素正是气温的持续上升。

然而，由于地理位置和基线温度的不同，升温对各地

区农业生产的影响存在显著差异。根据先前的荟萃分析和作物产量模拟评估，在年平均温度低于10 ℃的地区，升温对主要作物产量的影响通常为正；但当平均温度超过15 ℃时，这种效应可能转为负面，超过20 ℃后负面影响更为严重[63]。在非洲、中南美洲等热带地区，作物产量对升温通常表现出更高的敏感性，其减产幅度显著高于温带地区[64]。相比之下，高纬度地区的农业生产可能因气温上升展现出一定的增产潜力。全球变暖促使耕地向高纬度地区扩张，温带区域作物生长季延长，同时缓解了低温胁迫并减轻了霜冻危害。典型例子包括北欧小麦的增产[65–66]及东亚玉米、水稻和小麦的产量提升[67–69]。同样，一项基于经验统计方法的研究[49]指出，气候变化近年来促进了一些国家香蕉产量的提升，这些国家因变暖而获得了更适宜的种植温度，然而类似增益在未来可能逐渐消失。

2.1.2. CO_2

作为植物生长的关键原料，大气CO_2浓度升高可通过促进光合效率等关键生理过程，提高作物产量。自1750年以来，人类活动已导致大气中CO_2浓度上升了47%，目前浓度已超过410 ppm [57]。在不同的未来气候情景下，CO_2浓度可能会继续上升至不同水平。CO_2不仅是重要的温室气体，更是作物生长发育所必需的物质[70]。CO_2浓度升高会增强植物的光合作用[71]，导致植物生长过程中碳（C）的吸收量增加，最终提高作物产量，这一现象也被称为CO_2施肥效应[72]。

作物产量对CO_2施肥效应的响应关系，是气候变化对粮食安全影响评估的重要不确定性来源[70]。随着实验室研究和开放式空气CO_2浓度增高（FACE）实验数量的增加，以及基于过程的作物模型对不同CO_2浓度下作物生长和产量影响的模拟，人们对CO_2施肥效应的影响有了更深入的了解[73]。总体而言，CO_2施肥效应可提高作物产量，但具体影响因作物种类而异。由于光合作用途径的差异，CO_2施肥效应对C3作物（如小麦、水稻和大豆）产量的促进通常比对C4作物（如玉米）更为显著[74]。理论上，如果到2050年CO_2浓度达到550 ppm，在恒定的25 ℃温度下，与380 ppm时的水平相比，C3植物的光合作用预计将增加38% [75]。在较温暖条件下，C3植物光合作用的增强可能更为显著[76]。除了对光合作用的影响外，CO_2浓度升高还通过提高C3和C4作物的水分利用效率来增加作物产量。较高的CO_2水平会使气孔导度降低19%～22% [77]，从而减少蒸腾作用和水分损失，进而提高作物产量[73]。C4植物从这一机制中获益可能更多[78]。

值得注意的是，CO_2浓度升高可能会对作物中多种营养元素的水平产生负面影响，包括蛋白质、铁和锌的含量[9]。这种不利影响在蔬菜和水果中尤为令人担忧，因为它们是人类膳食营养的重要来源。除了对作物产量的影响外，未来研究也应关注作物品质的变化，以更全面地了解CO_2施肥效应的影响。

2.1.3. 水资源

水资源是影响农业生产的关键因素，未来气候变化下其区域变化可能存在显著差异。为确保作物正常生长，维持作物水分需求（如蒸腾蒸发）与水分供应（如降水）的平衡至关重要，尤其是在雨养农业区[6]。全球气候变化显著影响降水格局，但当前全球和区域气候模型在模拟和预估这些变化方面仍存在较大不确定性。自20世纪80年代以来，全球陆地降水明显增加，年际变化率和区域差异显著[57]。在平均降水对农业的影响方面，经验统计模型显示，在1961—2002年间，生长季降水与全球作物产量呈正相关关系。这一关系可解释水稻产量30%的年际波动，以及大豆产量50%的年际波动[79]。其他研究[80–81]也发现了小麦、玉米和大麦存在类似的正相关关系。另一方面，研究表明一些地区的极端降水、洪水和干旱频率及强度呈上升趋势，并导致作物大幅减产。需要强调的是，量化极端事件对作物产量的影响仍具有挑战性，因其发生时机、持续时长、强度及频率等多种因素共同作用于作物生长和产量形成，相关机理仍需更深入的研究[82]。

暴雨和洪水会导致土壤积水，降低土壤中的氧气水平，阻碍植物对养分的吸收，最终抑制植物生长。此外，过多的水分会导致气孔关闭，破坏光合作用，从而损害作物产量[83]。田间试验表明，作物对洪涝的敏感性因物种而异：例如，玉米比小麦更敏感，二者因洪水导致的减产幅度分别为35%和28% [84]。历史观测显示，亚洲、北美洲和欧洲的暴雨和洪水事件近年来有所增加。全球水文模型预测，随着全球的持续变暖，未来将有更多地区更频繁地面临极端事件，且强度更大，进而威胁未来农业生产。

同样，干旱会使作物气孔关闭，干扰光合作用，进而降低作物产量。干旱引起的气孔关闭还会提高作物温度，加速叶片衰老，导致作物歉收[85]。在中等干旱胁迫下，小麦的抗逆性强于水稻和玉米，三者因干旱导致的减产幅度分别为20%、25%和38% [86]。自20世纪50年代以来，南欧和西非等地区的干旱持续时间明显变长且程度加重。研究[9,87–88]还指出，随着全球变暖加剧，更多地区将面临日益频繁和严重的干旱，且影响范围随升温水平的提高而扩大。此外，近期研究强调了水分在调节作物热敏感性

中的关键作用[89]。这些研究发现，过去在高温干燥条件下，由于降水减少和热诱导蒸发增加，玉米和大豆产量下降更显著。研究同样预测，未来温度-水分耦合将加剧上述作物的减产，与仅由温度升高导致的影响相比，产量将进一步下降5% [90]。

2.1.4. 其他气候因素

近地表相对湿度（RH）、极端事件以及气候振荡等气候因素也可能对未来农业产生影响，并加剧作物产量的年际波动。一项针对1980—2016年美国玉米、高粱和大豆产量的机器学习研究发现，这三种作物都对蒸汽压差增加（即相对湿度降低）呈负响应，其中玉米最为敏感[91]。此外，研究表明，相对湿度（RH）而非降水主导着对雨养作物产量的影响，并在很大程度上解释了气候影响的年际变异[92]。

气候变化可能加剧热带气旋的强度及其最大风速，直接威胁粮食生产（例如，据估计Nargis气旋使缅甸的作物产量减少19%，其影响持续三年）[9]。大尺度气候振荡也被证实会通过改变季节性温度和降水导致作物产量异常[93–94]。1961—2010年，全球三分之二的耕地作物产量受到至少一种大尺度气候振荡的显著影响[93]。例如，厄尔尼诺现象通常使全球大豆增产2.1%～5.4%，而在拉尼娜年份，全球主要作物的产量普遍低于正常水平[95]。马登-朱利安振荡（Madden-Julian Oscillation, MJO）根据其不同位相以及对作物生长环境的影响，在热带地区可能导致玉米产量增加或减少[96]。此外，主成分分析（PCA）结果表明，解释美国玉米和冬小麦年产量异常的第一主成分与大西洋多年代际振荡（AMO）密切相关[97]。

2.2. 空气污染对农业生产的影响

2.2.1. O_3

对流层O_3污染是当前最严重的空气质量问题之一，其通过氧化作用损伤植物组织，阻碍作物生长并导致减产，进而严重威胁全球粮食安全[98]。自工业革命前以来，地表O_3浓度已显著升高，且存在明显的区域差异[100]，这主要与前体物排放的增加有关，同时升温也加速了O_3的形成[99]。在北半球，当前O_3水平已达到50 ppb，亚洲地区的O_3浓度增长尤为迅速；作为主要粮食产区，亚洲的粮食安全问题正日益受到关注[101]。

作为一种强氧化剂，O_3通过气孔进入植物叶片，氧化植物组织，损害光合作用等生理功能，最终导致作物产量和品质下降[102]。在作物生长季，日间O_3浓度超过40 ppb阈值的累积暴露量（AOT40）是评估O_3对植物影响的关键指标，该值越高表明植物暴露于有害O_3水平的时间越长[103]。当前研究已基于各类化学传输模型及O_3暴露指标定量评估了O_3造成的全球作物产量损失（表1 [13,104–108]）。一项基于约3000个空气监测站点数据的研究表明，O_3污染导致中国小麦、水稻和玉米的产量分别损失33%、23%和9% [103]。此外，O_3污染也对多年生作物的产量造成损害。例如，有研究估算，加利福尼亚州因O_3污染造成的产量损失从草莓的2%到葡萄的22%不等[48]。一项基于作物模型的研究预测，在O_3浓度较高的地区（如南亚和中国），O_3导致的减产将部分抵消CO_2施肥效应带来的增益[109]。

高O_3浓度时段往往与高温期重叠，并且其通常正值植物生长季[13]，从而加剧了区域作物减产。高温不仅能够促进O_3生成，还会加剧植物对O_3的吸收。在高温与O_3的双重胁迫下，作物产量损失将更为严重[9]。研究还发现，不同作物对胁迫的敏感性存在差异：玉米对高温更敏感，而小麦更易受O_3污染胁迫的影响。这些特征凸显了需根据区域权衡气候减缓策略与空气污染治理措施的有效性，以更有效地保障粮食安全[98]。

2.2.2. 气溶胶

来自人为源（如化石燃料燃烧和生物质燃烧）和自然源（如野火）的气溶胶不仅对人类健康构成威胁[110]，而且影响全球农业生产[111]。与O_3直接损害作物产量的作用机制不同，气溶胶对农业生产的影响较为复杂。例如，吸收性气溶胶（如黑碳）会减少到达地球表面的太阳总辐射（包括直射和散射辐射），从而限制植物进行光合作用所需的光照，进而降低作物产量[46]。相反，散射性气溶胶会增加到达地面的太阳散射辐射比例[47]。植物对散射辐射的光合利用效率通常更高，因而可能提升作物生产力。

基于GEOS-Chem模拟的研究[114]发现，大气颗粒物通过散射光线，可在地表形成更均匀高效的辐射分布，从而促进作物光合作用；然而值得注意的是，作物对散射辐射变化的响应仍存在显著不确定性。在美国中西部农业区，研究发现北美西部野火产生的烟羽通过太阳辐射的变化使玉米和大豆的产量略微增加[115]。研究[14]还发现，2010—2018年期间，中国颗粒物污染治理实现农作物净增产0.5%～1.9%，该增幅超过同期气候变化带来的负面效应。

2.2.3. 其他污染物

当前已有研究多聚焦于O_3和气溶胶对农业的影响；

表1 O_3污染导致的全球作物相对产量损失估计

Time	Models	Metrics	Crops	Relative yield loss (%)	Reference
2000	MOZART-2	AOT40, M7, M12	Wheat	3.9–15.4	[13]
			Maize	2.2–5.5	
			Soybean	8.5–13.9	
	TM5	AOT40, M7, M12	Wheat	7.3–12.3	[104]
			Rice	2.8–3.7	
			Maize	2.4–4.1	
			Soybean	5.4–15.6	
2006—2010	GEOS-Chem	AOT40, W126, M7, M12	Wheat	7.2 ± 7.3	[105]
			Rice	2.6 ± 0.8	
			Maize	3.6 ± 1.1	
			Soybean	6.7 ± 4.1	
2008—2010	Models provided by the ACCMIP and HTAP2 projects	AOT40	Asian wheat	4–39	[106]
			Western wheat	0–27	
			Soybean	2–10	
2010—2012	EMEP MSC-W	AOT40, M7, POD_3IAM	Wheat	9.4–13.8	[107]
2030	MOZART-2	AOT40, M7, M12	Wheat	4.0–17.2	[108]
			Maize	2.5–6.0	
			Soybean	9.5–14.6	

M7: seasonal 7-h O_3 mean concentration during daytime; M12: seasonal 12 h O_3 mean concentration during daytime; W126: sum of weighted hourly O_3 concentrations accumulated during daytime over the three months growing period; POD_3IAM: phytotoxic O_3 dose above 3 $nmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, with model adapted for large-scale integrated assessment modeling. MOZART-2: Model for ozone and related chemical tracers, version 2; TM5: tracer model, version 5; GEOS-Chem: global three-dimensional model of atmospheric chemistry driven by meteorological input from the Goddard earth observing system (GEOS); ACCMIP: atmospheric chemistry and climate model intercomparison project; HTAP2: hemispheric transport of air pollution phase 2; EMEP MSC-W: European Monitoring and Evaluation Programme, meteorological synthesising centre-west.

然而，其他污染物，如氮氧化物（NO_x）和二氧化硫（SO_2），不仅直接危害作物，还会间接驱动O_3和气溶胶的形成，进而影响作物产量[116]。一方面，NO_x和SO_2被认定为植物毒素，它们会直接改变光合作用过程，扰乱气孔调控，并导致叶片过早衰老，最终降低作物产量[117–118]；另一方面，它们还会促进气溶胶的形成，包括硝酸盐气溶胶[119]和硫酸盐气溶胶[120]。这些典型散射性气溶胶会进一步通过减少抵达地面的太阳辐射来影响作物生长。研究表明SO_2暴露对美国玉米和大豆产量具有负面效应[116]。此外，作为对流层O_3的关键前体物，NO_x对作物生长和农业生产的危害更为深远[121]。最近研究[122]表明，若将中国的NO_x水平降低至当前第5百分位，可使冬、夏季作物产量分别提升约25%和15%。

2.3. 气候变化与空气污染的相互作用及对农业的联合影响

气候变化与空气污染通过复杂作用相互关联。气候变化可通过改变气象条件影响污染物的生成、扩散与沉降[15–16]。反过来，气溶胶等空气污染物可通过吸收或散射太阳辐射直接影响辐射强迫，或通过改变云的微物理特性间接影响气候系统[17]。上述相互作用表明，气候变化与空气污染可对区域乃至全球农业生产造成复杂且深远的影响。

部分研究评估了气候变化和空气污染对作物产量变化的相对贡献。在印度，空气污染可能是当地产量损失的主导因素[46]。在中国，2010—2018年期间颗粒物污染的大幅度缓解抵消了同期气候变化带来的负面影响，实现了净产量增加[14]。然而，对于大多数地区而言，在不考虑CO_2施肥效应的情况下，未来气候变暖带来的不利影响可能超过空气污染改善所带来的正面影响，导致产量下降[14,98]。

多项研究还探讨了气候变化与空气污染间相互作用对农业的影响。研究[123]通过区分气候驱动与排放驱动的污染发现，未来气候变暖可能会提升大多数地区的O_3浓度，使作物产量面临气候惩罚效应。此外，在高温与干旱的协同作用下，O_3导致的产量损失会进一步加剧。在这种情况下，O_3会通过影响脱落酸（调控气孔导度以减少水分流失的关键激素）的形成来加剧作物产量损失[124]。反之，定量研究表明，空气污染物可以通过调节区域气候间接影响作物产量，甚至在某些污染严重的地区占据主导影响[125–126]。例如，研究[111]表明，印度上空大气棕色云中的黑碳和其他气溶胶会吸收太阳辐射，减少到达地面的辐射量，导致地表冷却和季风降水减少，最终影响区域作物产量。

然而，关于气候变化如何通过改变空气质量进而影响作物产量，以及空气污染如何通过改变散射光等气候因子进而影响作物产量，目前仍存在相当大的不确定性[114]。未来仍需深入研究气候变化与空气污染的相互作用途径，并量化其对农业的影响。对这些过程的深入理解对保障未来粮食安全十分重要，也将为制定更有效、更具针对性的政策提供科学依据。

3. 食品生产对气候变化和空气污染的影响

除了受到气候变化和空气污染的影响外，食品系统本身也对全球气候变化和区域空气污染具有重要贡献。在农业生产、土地利用以及农场外的各个环节，食品供应链排放大量的温室气体和空气污染物。厘清食品系统排放的来源和驱动因素及其对气候环境变化的影响，对于制定有效的减排策略至关重要。本节系统梳理了农食系统的温室气体和空气污染物排放研究现状，并阐明农食系统对气候变化和空气污染的贡献。

3.1. 农食系统的温室气体排放

农食系统的温室气体排放包括多方面来源：农业生产活动排放、土地利用和土地利用变化（LULUC）排放，以及农场外排放等[127]。农业生产活动排放主要包括水稻种植产生的CH_4排放、肥料施用产生的N_2O排放、肠道发酵产生的CH_4排放，以及粪便管理产生的CH_4和N_2O排放。土地利用变化排放主要包括森林转换为农田过程中释放的CO_2。农场外排放，主要包括食品运输、加工、包装、零售过程中产生的排放，以及与食品损失和浪费（FLW）相关的排放。由于数据获取困难，农场外排放的量化存在较大挑战，不确定性较高。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）关于气候变化与土地的特别报告指出，2007—2016年期间，食品系统每年的温室气体排放量介于108亿～191亿吨CO_2当量（CO_2eq）之间，占人为总排放量的21%～37% [128]。图3 [129]展示了2015年全球农食系统按环节划分的温室气体排放情况。数据显示，农食系统的CO_2排放量（82亿吨）与非CO_2温室气体排放量（CH_4为65亿吨CO_2eq，N_2O为22亿吨CO_2eq）在数量上大致相当。大约一半的CO_2排放源自土地利用变化，另一半则与农场内外的能源消耗有关。相比之下，CH_4和N_2O排放主要源自农业生产活动，如水稻种植、肠道发酵和粪便管理。这表明农食系统排放的多样性，需要更全面的研究深入理解并减缓其影响。

对农食系统排放的认识随着时间的推移而发生改变，从早期针对特定部门和地区的研究，逐步发展为对全球范围全生命周期排放的全面评估。由于研究目标的差异，学者们从不同角度探讨了食品系统排放问题[23,130]。早期研究主要聚焦于特定的农业生产过程，这些工作为更广泛的评估奠定了基础。例如，研究发现全球农田排放呈现不均衡特征，水稻种植和泥炭地对排放量的影响尤为突出[131]。同样，一项关于全球畜牧业的研究估计，1995—2005年间，畜牧业每年的排放量为56亿～75亿吨CO_2eq，其中非CO_2温室气体的排放量为20亿～36亿吨CO_2eq [132]。

近年来，该领域研究已扩展至对全球食品系统排放的国家层面系统性评估[133]。研究人员越来越关注农场外的排放，包括加工、包装、运输、零售、消费以及食品损失和浪费。这些农场外排放目前占食品系统总排放量的25%～35% [19,134-135]。过去30年间，农场外排放近乎翻倍，成为农食系统排放增长的主要驱动力[134]。值得注意的是，食品损失和浪费问题已引发广泛关注，2019年相关排放量达到12.8亿吨CO_2eq，占农场外总排放量的20.7%，较1990年增长30%。其他过程，包括食品零售、运输和加工，合计贡献了约23.4亿吨CO_2eq。其中，食品零售的排放增长最为显著，与1990年相比增长了631% [134]。

厘清农食系统排放变化的驱动因素对于针对性减排策略的设计至关重要。人口增长、食品需求增加和动物型饮食结构转变等驱动因素预计将进一步加剧农食系统的排放[23,130]。最近的研究[136]系统评估了农业系统排放及其驱动因素，剖析了农业生产活动和土地利用变化在不同过程、尺度（全球、区域和国家）和产品层面的排放。研究表明，自1961年以来，全球农业生产量已近三倍增长，而农业系统的排放量仅增加了24%。排放量的相对稳定主要归因于单位农业生产所需土地面积的大幅减少（下降约70%）。尽管取得了上述进展，但目前各区域农业和土地利用的人均年排放量仍高于0.5 t CO_2eq。最新研究对包括农场外排放在内的农食系统排放及其驱动因素开展了评估，纳入了贸易结构和国内供应比例等因素[137]。研究表明，发展中国家的人口增长是导致国际食品贸易相关排放上升的主要因素。关于排放驱动因素的研究为减排工作的开展提供了重要依据。

3.2. 农食系统的空气污染物排放

农食系统是空气污染的主要来源之一，对人类健康构成威胁。在各类空气污染物中，NH_3因其主要来源于食品

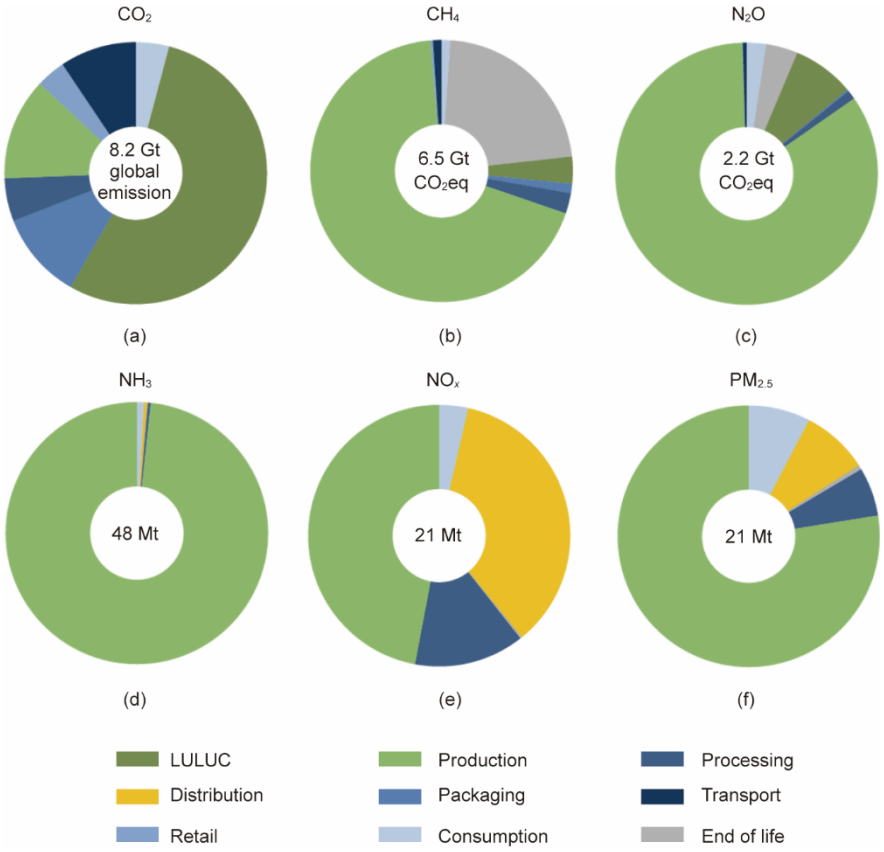

图3. 全球食品系统温室气体和空气污染物排放（按环节划分）。图中展示了主要温室气体（包括CO_2、CH_4和N_2O）与空气污染物（NH_3、NO_x和$PM_{2.5}$）的排放量。饼图内的数字代表2015年全球食品系统的总排放量。分销过程包括包装、运输和零售。数据来源：EDGAR-FOOD数据库[129]。

系统而备受关注[138]，来源包括畜禽养殖和农田种植。在畜禽系统中，动物粪便会向大气中释放NH_3。同样，农田施肥也是NH_3挥发的重要来源，因为肥料中的部分氮在施用到田间后会转化为NH_3并排放到大气中。这两个来源共同构成了农食系统中NH_3排放的主要部分。

为了更好地量化和管控排放，研究人员采用排放因子法或过程模型开发了全球网格化的NH_3排放清单[139–141]。近期的研究进展包括利用机器学习模型，结合实地观测数据，生成区分作物类型且具有空间特异性的全球NH_3排放因子，从而降低了农田NH_3排放估算的不确定性[142]。相关进展为更全面地分析农食系统的空气污染物排放奠定了基础。

在深入研究NH_3等特定污染物的基础上，近期的研究已将关注范围扩大到涵盖整个食品系统的空气污染物排放[143–144]。食品系统全生命周期排放在全球人为空气污染物总排放中贡献突出，分别占NH_3排放的72%、NO_x排放的13%、SO_2排放的9%、$PM_{2.5}$排放的58%，以及非甲烷挥发性有机化合物（NMVOCs）排放的19% [143]。

食品系统中各类污染物的来源各异。NO_x排放主要源自秸秆焚烧，运输和其他过程中的燃料燃烧为次要来源。$PM_{2.5}$排放主要来自于秸秆焚烧等过程。其他污染物，如SO_2和NMVOCs，则主要产生于农场外，尤其是在食品加工和分销环节。如图3所示，2015年全球食品系统污染物的总排放量分别为：4800万吨NH_3、2100万吨NO_x以及2100万吨$PM_{2.5}$。其中，NH_3排放大部分来自农业生产活动；而大约50%的NO_x排放与农业耕作有关，其余部分则来自农场外的活动，尤其是交通运输。超过75%的$PM_{2.5}$排放来源于农业耕作。这些结果凸显了食品系统中空气污染物排放来源的多样性，表明需要针对食品生命周期的不同过程阶段制定针对性的减排策略。

全面追踪农食系统的空气污染物排放对于制定有效的减排策略至关重要。然而，这些排放具有高度的时空变异性，使得这项任务颇具挑战性。与温室气体不同，空气污染物在大气中会经历复杂的生成、反应和清除等过程，导致其环境影响在不同地区和时段存在显著差异。这种时空变异性凸显了对更高时空分辨率排放清单的需求。高分辨率清单有助于准确反映农食系统排放的动态变化及环境影响。多尺度排放的精细表征将有助于减少不确定性，提高空气质量模型的准确性。相关研究进展可为政策制定者提供可靠、及时且具有指导意义的信息，帮助做出更有效的

决策以应对农食系统的空气污染问题。

3.3. 消费端排放核算

排放核算是全球气候变化和空气质量研究的重要议题。其中，生产端排放核算方法应用最为广泛[145–146]。生产端核算将排放归因于生产者，重点关注一个地区生产过程中产生的排放，包括出口产品相关的排放[145–147]。虽然先前的研究已量化了全球食品生产相关的温室气体排放[19–20,136,148]，但生产端核算方法忽略了与商品最终消费相关的排放，导致排放责任在地理空间上存在错位[145,149–150]。为解决这一问题，消费端排放核算方法逐渐受到关注。消费端核算将排放归因于最终消费者，不考虑商品的实际生产地点，该方法考虑进口但扣除出口[151–153]。消费端排放核算与生产端排放核算相辅相成。消费端核算方法量化了排放的跨境转移，为消费端减排策略的制定提供了重要工具[137,154]。消费端温室气体排放核算主要有两种方法：自下而上的方法，如生命周期评估（LCA）；以及自上而下的方法，包括多区域投入产出（MRIO）模型和实物贸易流（PTF）分析[137,155]。这些方法在系统边界、精细程度以及时空分辨率上存在差异[137,156]。

生命周期评估（LCA）是一种用于系统分析产品、服务、过程或政策在整个生命周期（从生产、使用到废弃）内对环境影响的方法[157]。它详细描绘了供应链中的各个阶段，相较于其他方法具有更高的时空分辨率，适用于家庭消费分析[156]。LCA通常基于代表性产品的生命周期来推算整体消费排放[158]。一些研究[157,159–160]已采用这种自下而上的方法来评估特定食品的全生命周期排放。例如，有研究利用LCA评估了牛肉的温室气体排放，涵盖了从养殖、屠宰到消费者餐桌的整个生命周期。结果显示，生产阶段（尤其是养殖环节）是排放的主要来源[161]。这显示出LCA在评估食品消费环境影响方面的精确性。然而，由于研究范围和方法学的差异，LCA结果在全球范围内的可比性往往较差[157,159]。此外，LCA需要大量数据支持，在分析复杂的全球食品供应链时尤为突出，这限制了其更广泛的应用[157,162]。

相比之下，MRIO采用更宽泛的系统边界，通过分析供应链中的投入-产出关系（以货币形式表示）来量化与食品消费相关的排放[163–164]。该方法在捕捉跨区域贸易关系方面表现突出，能够全面呈现全球食品供应链的温室气体足迹[163–164]。例如，研究表明，2004—2017年间，全球27%的土地利用排放与其生产区域外的农产品消费有关[163]。尽管MRIO提供了全球视角，但由于其往往基于较粗的行业或产品类别，因此精细化程度相对不足[137,165]。

PTF分析是另一种自上而下的方法，其侧重于追踪实物贸易流动，可对区域间的农业贸易开展高分辨率分析[165–166]。利用更详细的行业和产品数据，PTF能够捕捉食品消费相关的温室气体排放[166–167]。例如，一项基于PTF的研究发现，2019年全球31%的温室气体排放源自食品供应链，其中19%通过国际贸易转移至他国[137]。PTF对物质流动的高分辨率追踪使其成为产品层面排放分析的重要工具[166–167]。

这些不同的方法为全面理解全球食品系统的排放提供了重要信息。LCA方法虽然更加精细，但研究范围相对有限；而MRIO模型和PTF分析则提供了更宏观的区域视角和物质流分析，对于理解全球食品系统排放动态十分重要。

3.4. 食品系统对全球气候变化和空气污染的影响

农食系统产生的大量温室气体和空气污染物排放对环境和人类健康造成了严重影响。温室气体排放通过温室效应加剧了全球变暖，而空气污染物排放则是空气质量恶化的内因。全球变暖和空气污染会引发呼吸系统和心血管疾病，加剧公共卫生风险，而弱势群体往往承受更严重的风险[168–170]。

研究表明，1855—2022年期间，农业活动和土地利用产生的温室气体排放导致全球平均气温上升0.55 ℃。其中，CO_2排放贡献了0.33 ℃，CH_4贡献了0.16 ℃，N_2O贡献了0.06 ℃ [171]。该数据凸显了农食系统对全球变暖的显著贡献。近期研究[131–132]进一步分析了具体行业过程的贡献。2010年人为因素导致的0.81 ℃升温中，畜牧业产生的非CO_2温室气体排放贡献约为19%。此外，牧场开垦产生的CO_2排放额外贡献了0.03 ℃，使得与畜牧业相关的升温占当年总升温的23% [172]。全球变暖的贡献值通常借助气候模型进行量化。这类模型通过模拟温室气体排放对辐射强迫的影响，进而估算出相应的增温幅度，为评估农食系统排放的气候效应提供了关键依据。

与其他排放温室气体的部门相比，农食系统除了排放CO_2外，还排放大量CH_4和N_2O。与CO_2不同，CH_4是一种寿命较短的温室气体，它在大气中积累并在相对较短的时间内被清除。因此，CH_4增温效应主要集中在排放后的数十年内，长期影响相对较弱。为了量化温室气体的气候效应，文献中常常采用了100年的全球增温潜势（GWP_{100}）这一指标。该方法将N_2O和CH_4转换为CO_2eq，为评估农食系统排放的贡献提供了一种简单且标准化的方法。然而，GWP_{100}忽略了温室气体不同源汇过程所带来

的差异化影响。例如，近期研究表明，使用这一指标可能低估了CH_4在过去一个世纪对气候变暖的贡献[172]。鉴于CH_4排放量每年以约1%的速度增长，依赖GWP_{100}可能会低估其对全球变暖的短期影响[173]。因此，政策制定者应更加重视减少农食系统的非CO_2排放。针对CH_4的减排措施在短期内可能带来更为显著的环境效益，应与长期的CO_2减排策略相辅相成。

农食系统不仅对气候变化贡献显著，同时深刻影响着空气质量，进而给人类健康和农业生产带来连锁反应。农业活动是NH_3排放的主要来源，NH_3在大气中可转化为二次细颗粒物。1990—2013年间，氨氮对全球$PM_{2.5}$浓度的贡献率从25%增加到了32% [138]，其中大部分NH_3源自农业活动。这一增长引发显著健康风险（如心血管与呼吸系统疾病，严重时会危及生命）。2018年，全球约22.4%的空气污染相关死亡病例可归因于食品系统排放引发的空气污染[3]。

农食系统对环境和健康的影响已引发了广泛关注。然而，针对全球和区域农食系统排放的评估工作仍存在不足，尤其是在土地利用变化以及农场外排放方面[174]。要应对这些挑战，需利用本地化数据对供应链排放进行全环节追踪，以提升评估结果的准确性[175]。农业活动产生大量非CO_2温室气体，其短期增温效应显著，因此亟须给予更多关注[171–172]。对于空气污染物而言，需要推进高分辨率排放清单的编制，从而支撑精准评估。相关研究进展有助于制定更具针对性的减排策略。展望未来，发展综合评估模型将有助于提升对农食系统排放的认知，更好支撑政策制定，从而减缓农食系统的环境健康影响。

4. 构建可持续食品系统协同应对气候变化、空气污染与粮食安全挑战

食品系统与气候变化、空气污染之间的相互作用，给食品系统的可持续转型带来多重挑战。气候变化和空气污染可能会威胁未来的粮食安全。此外，食品系统排放又将显著影响全球气候与空气质量。为应对气候变化、改善空气质量并保障粮食安全，采取减缓性措施降低食品系统排放以及采取适应性措施提升食品系统韧性至关重要。本节将系统概述食品系统的减缓与适应策略，并介绍气候智慧与环境友好型农食系统的概念。

4.1. 食品系统的减排策略

食品系统蕴含巨大减排潜力，通过推行各类减排措施，可在减缓气候变化方面发挥重要作用[27–28]。根据IPCC报告，从2020年到2050年，食品系统通过供应端与需求端的减排措施（表2 [39,176]），可实现年均150亿吨CO_2eq的减排潜力。在供应端，针对农业生产排放的措施，如作物养分管理、水稻管理、反刍动物发酵减排以及粪便管理，有望实现每年17（5～32）亿吨CO_2eq的减排量。此外，通过采取土壤碳管理、生物炭应用和农林复合系统等固碳减排策略，还可实现95（11～253）亿吨CO_2eq的减排潜力。在需求端，通过推行饮食结构转变、减少食品损失与浪费、提高资源利用效率等策略，每年可额外贡献42（22～71）亿吨CO_2eq的减排量。

4.1.1. 作物养分管理

尿素、硝酸铵、硫酸铵等氮肥是农田的主要氮源，需对其进行科学管理，以最大限度地降低其环境影响。有效的减排策略聚焦于抑制土壤硝化/反硝化作用，并减少氨态氮挥发。主要措施包括：改进施肥方法、优化施肥时间与用量、选用替代性肥料以及配施硝化抑制剂[29]。

“正确肥料品种、正确施用比例、正确施用时间和正确施用位置”（4R）养分管理技术[177]使养分供应与作物需求相匹配，提高了肥料利用率并减少了排放量。这种方法已被证实可减少20%～50%的N_2O排放和30%～60%的NH_3排放，并减少农田和草地中的养分损失[178–179]。精准农业技术，如变量施肥、自动化施肥系统和决策支持工具，能通过防止肥料过量施用并根据作物需求定制养分供应，提高了养分的吸收利用率[30]。

土壤-作物系统综合管理已成为同时提高肥料利用率、作物产量和减缓气候变化的有效策略[180]。通过利用作物模拟模型来优化种植日期、品种和种植密度，并结合4R养分管理技术，能为有效施肥提供切实可行的建议，并显著减少养分损失[181]。

增效氮肥通常含有脲酶抑制剂、硝化抑制剂或两者的组合，通过延缓尿素向铵态氮以及铵态氮向硝态氮的转化，可显著减少N_2O和NH_3的排放[182]。与地表撒施相比，尿素深施结合硝化抑制剂可减少73%～100%的N_2O排放和67%～90%的NH_3排放[183]。减少N_2O排放的一些措施可能导致NH_3排放增加，反之亦然，这种此消彼长的关系，表明必须综合采用多种技术手段，方能有效应对多重挑战[183]。

根据IPCC报告，在2020—2050年期间，改进农田施肥实践有望每年减少1亿～7亿吨CO_2eq的排放[39]。肥料使用量较大的地区，如亚太地区和发达国家，在实现此类减排方面具有最大潜力。提升这些地区的养分利用效率对

改善环境和气候效益至关重要[32]。

4.1.2. 水稻种植管理

水稻是全球半数人口的主粮作物，其种植过程产生的温室气体排放量约占农田总排放量的48% [33,184]。有效的减排措施包括水分管理、品种选育、土壤改良以及有机质管理，有助于抑制CH_4和N_2O的排放。

间歇性灌溉是降低稻田CH_4排放的重要策略[33]。采用单次排水方式可使CH_4排放减少33%，多次排水方式则可减少多达64% [34]。最佳实施方式包括：进行多次排水作业，保持适度的土壤干燥程度，以及在种植季CH_4排放高峰阶段进行排水，并在休耕期保持田地非淹水状态。尽管间歇性灌溉会提高土壤氧气浓度和增强氮循环作用，导致N_2O排放量增加105%，但N_2O的基线排放量相对较低，因此在换算成CO_2当量后，CH_4排放的减少量通常能够抵消N_2O排放的增加量[34,185]。

培育和选育具有高植株生物量或高产量的水稻品种能够进一步增强减排效果。生物量高的品种根系更为发达，可通过刺激甲烷氧化菌的活性来促进CH_4氧化[186–187]，在有机碳含量高的土壤中能减少约24%的CH_4排放[187]。高产品种将更多的光合产物分配到籽粒生产中，从而限制产甲烷作用的底物供应，降低CH_4排放，这在持续淹水系统中效果较为明显[188–189]。

对酸性稻田土壤（pH < 5.5）进行施石灰改良，既能提高产量，又能通过减少产甲烷菌可利用的底物以及促进根系生长，使CH_4排放降低约20% [35,190]。此外，通过提高土壤微生物群落中还原酶的活性和细菌的优势地位，可以减少N_2O的排放[190]。改善土壤的理化和生物特性能够进一步强化这些减排效果[191]。移除稻田中的秸秆、残茬和粪肥等有机质，可有效减少产甲烷作用的底物供应[192]。此外，免耕、旱种[193]以及矿质氮管理[194]等其他措施也有助于减少温室气体排放。

实践证明，将品种选择、水分管理和有机质移除等农艺措施相结合，能够有效减少稻田温室气体排放。例如，适应性水稻品种、间歇性灌溉技术以及秸秆移除措施分别可使CH_4排放降低约24%、44%和46% [33]。为在保持产量的同时最大限度地发挥减排潜力，采取综合措施至关重要。

4.1.3. 肠道发酵减排

肠道发酵是CH_4排放的重要来源，其发生在反刍动物瘤胃中膳食碳水化合物的微生物分解过程。减排策略包括控制牲畜数量、优化饲养策略以及使用饲料添加剂等。根据IPCC报告，全球减少肠道发酵CH_4排放的技术潜力估计为每年8（2～12）亿吨CO_2eq [39]。

控制反刍动物（如牛、羊和山羊）的数量可以降低CH_4排放[195–196]。相应地，集约化动物生产系统，如集中式动物饲养场（CAFOs）[197]，有助于控制种群规模、开展选育计划、实现精准饲喂并提高饲养效率[198]。通过降低动物维持功能需要的营养占比，可以提高饲料的利用率[199]。

调整牲畜的饮食结构并规范饲喂方式，可以减少肠道CH_4排放。增加精饲料比例可使CH_4排放减少约40%；用淀粉类精饲料替代纤维类精饲料可减少约22%；利用可生

表2 2020—2050年农食系统中不同减排措施的年均减排潜力。数值表示潜力均值及区间范围

Option	Mitigation potential ($GtCO_2eq \cdot a^{-1}$)	
	Economic	Technical
Agriculture—reducing CH_4 and N_2O emissions	0.6 (0.3–1.3)	1.7 (0.5–3.2)
Crop nutrient management	0.2 (0.1–0.6)	0.3 (0.1–0.7)
Rice management	0.2 (0.1–0.3)	0.3 (0.1–0.8)
Enteric fermentation mitigation	0.2 (0.1–0.3)	0.8 (0.2–1.2)
Manure management	0.1 (0.1–0.1)	0.3 (0.1–0.5)
Agriculture—carbon sequestration	3.4 (1.4–5.5)	9.5 (1.1–25.3)
Soil carbon management in croplands	0.6 (0.4–0.9)	1.9 (0.4–6.8)
Soil carbon management in grasslands	0.9 (0.3–1.6)	1.0 (0.2–2.6)
Biochar application	1.1 (0.3–1.8)	2.6 (0.2–6.6)
Agroforestry	0.8 (0.4–1.1)	4.1 (0.3–9.4)
Demand-side measures (shift to sustainable diets, reduce food waste, etc.)	2.2 (1.1–3.6)	4.2 (2.2–7.1)

Annual mitigation potential, based on data from the IPCC [36] and Roe et al. [182], predominantly uses GWP100 IPCC Fifth Assessment Report values (CH_4 = 28, N_2O = 265), although some use GWP100 IPCC Fourth Assessment Report values (CH_4 = 25, N_2O = 298). Economic mitigation potential refers to the potential constrained by carbon price up to 100 dollar per ton CO_2 equivalent ($USD \cdot tCO_2eq^{-1}$), and technical mitigation potential is the biophysical potential or amount possible with current technologies.

物降解的淀粉可减少约7%；提高饲料消化率可减少约15% [200]。减排潜力因牲畜物种不同而存在差异。然而，饮食结构的转变可能会改变与饲料生产相关的排放；因此，应关注生计需求与减排策略之间的协同和权衡效应[201]。

海藻、植物提取物、脂质以及3-硝基氧基丙醇等饲料添加剂，可通过抑制瘤胃中产甲烷微生物及其酶的活性，从生物学角度控制反刍动物的CH_4排放[202]。在《全球甲烷承诺》支持下，催生了一系列抑制CH_4排放的新方法，包括抗产甲烷菌技术[203]、幼畜早期干预措施[204]、消除原虫[205]以及使用CH_4氧化装置[206]等。

集中化养殖场采用谷物饲喂虽可提升效率，但其圈养环境与单一饲料结构易引发牲畜健康问题，进而影响肉质安全及营养品质[207]。尽管草饲动物的养殖周期更长，CH_4排放量也更高，但它们能提供更优的营养益处，例如，维生素A和E含量增加，脂肪含量降低[208]。因此，政策制定者应在减排目标与动物健康、食品质量和消费者偏好之间寻求平衡。肠道发酵减排策略，包括调整饮食结构和使用添加剂，在减少CH_4排放方面具有巨大潜力。然而，要推动这些措施切实见效，必须协同更广泛的农业政策，以统筹协调潜在矛盾，方能保障畜牧业的可持续转型。

4.1.4. 畜禽粪便管理

有效管理畜禽粪便对于最大限度减少畜牧业排放、降低其环境影响至关重要。关键策略包括优化粪便的储存和处理方式、改进畜舍设计以及采用先进的处理技术，以抑制硝化作用、反硝化作用和CH_4的产生。

减少粪便温室气体排放，关键在于调控排泄物、水分、温度及土壤酸碱度（pH），以阻断相关微生物的产气过程。均衡的牲畜饲料配方可以防止牲畜排出过多的易分解氮排泄物[209]，从而减少NH_3排放、降低氮污染。在集约化畜牧业系统推广覆盖式粪便储存方式，如采用压实并覆盖的固体粪便储存方式可使NH_3排放减少61%，而采用人工薄膜覆盖的粪浆储存方式则可使NH_3排放减少98% [40]。然而，粪浆池等一些储存系统，在减少N_2O排放的同时，可能会无意中增加CH_4和NH_3的排放[210]。

改进畜舍设计，如优化通风系统、采用防渗漏地面材料、安装带有缝隙或倾斜地板以实现高效排水、配备液固粪便分离系统等，可进一步减少畜禽舍内的温室气体和NH_3排放[40]。其他替代措施包括调整动物活动空间布局、使用硝化抑制剂以及设置动物隔离垫等[211]。厌氧消化技术是处理畜禽粪便的有效方案。常见的厌氧消化器类型包括覆盖式沼气池、推流式消化器和全混合式消化器，其在粪便分解过程中能有效减少排放[41]。

在适宜天气条件下采取每日撒施等措施可显著降低CH_4排放。此外，改进堆肥方式，如确保适当通风、控制水分含量以及添加生物炭或其他改良剂，可使NH_3排放减少30%～70%。而且，在堆肥过程中调节酸碱度，还能进一步减少30%～50%的排放[212–214]。

在粪便管理实践效率低下的发展中国家，改进粪便管理措施在减少排放和降低养分流失方面具有巨大潜力[215]。实施综合策略，将优化储存方式、采用先进技术以及推行适应性管理实践相结合，可有效应对与粪便排放相关的环境和公共卫生挑战。

4.1.5. 土壤碳管理

增加土壤碳含量和提升土壤健康状况，能够有效减缓并封存农业排放，同时降低大气中的温室气体浓度[216]。作物与植被管理是提升土壤碳含量的关键[217]，因此，亟须改良作物品种多样性、推广多年生作物种植以稳定固碳，并采用轮作、间作及合理放牧等可持续农作方式[218]。华北平原一项为期六年的田间试验表明[219]，在农田系统中，相比传统谷物单一种植，引入经济作物与豆类作物多样化种植，可显著提升综合效益：等效产量增幅高达38%，N_2O排放减少39%。对于草地而言，关键策略包括改良草种、优化草地管理以及引入深根型牧草[220]。提升土壤健康和碳封存能力涉及施用有机肥料、保持最佳土壤湿度以及促进生物固氮作用。实施有效的火灾防控措施，可避免极端野火引发的碳损失[221–223]，进而抑制气候与火灾之间的恶性反馈循环。

4.1.6. 生物炭应用

近年来生物炭在农食系统的应用日益受到关注，因其既能减少温室气体排放，又能实现碳移除（CDR），展现出显著的减排潜力[224]。生物炭在农业中作为土壤改良剂具有广泛的适用性；它能够促进谷物、豆类、根茎作物和蔬菜的生长，其效果在很大程度上取决于土壤、作物特性以及环境条件[225]。将有机残留物和废弃物用于生产生物炭、种植单年生和多年生生物质作物，以及实施多功能农林复合经营，都是提升减排潜力的有效策略[226]。从全球范围来看，生物炭应用每年能够减排34亿～63亿吨CO_2eq的温室气体，其中约一半的减排量源自碳移除[227]。

生物炭在调节土壤碳排放方面存在复杂的作用机制，其中，负激发效应与环境因素共同影响碳的吸收和排放的

抑制。通过高温（温度范围为350～900 ℃）慢速热解可将生物质转化为更难降解的生物炭。生物炭的负激发效应抑制了土壤碳的矿化作用，同时使新输入的植物残体在土壤中的留存时间延长[228–229]。由于存在负激发效应且具有更高的持久性，与未经处理的生物质相比，热解后的生物质能够减少温室气体排放，实现生物炭的净温室气体减排效果（减排幅度达48%～54%）[227–228]。生物炭、黏土矿物以及土壤中的有机质之间的相互作用还能带来额外的碳移除效益[230]。高温制备的生物炭、高木质素含量、低灰分含量、高有机碳含量、低pH值，为生物炭负激发效应提供了有利条件[231]。

生物炭通过吸附游离的碳氮化合物，还能够减少CH_4、N_2O以及空气污染物的排放。具体而言，生物炭可使土壤CH_4排放量平均减少7%。其中，在以木材为原料的生物炭、高热解温度、中性土壤（pH值为6.6～7.3）以及土壤含水量接近饱和等条件下，其减排效果尤为显著[232]。在减少N_2O排放方面，施用生物炭可使土壤N_2O排放平均减少38% [233]，且在14天内就能实现52%～84%的快速减排[234]。荟萃分析结果表明，这种方法在水稻田和沙质土壤中的效果尤为突出。增强N_2O减排效果的关键因素包括：高温（热解温度高于400 ℃）生物炭、以木材为原料的生物炭、高碳氮比以及有机质含量较低的土壤[233]。

施用生物炭的间接效益包括改善土壤特性（如pH值、酸度以及微生物群落）、提高生产力、提升氮素利用效率、增强水分利用和保持能力、降低土壤结皮和土壤侵蚀的风险、减少土壤污染物的迁移性和毒性，以及抑制由病原体引起的土传病害。生物炭可作为养分来源促进植物生长，使作物生长量增加8% [235]；同时，它还能增加生物量，可进一步转化为生物炭或其他持久性碳产品。田间试验和温室实验表明，生物炭可使作物平均产量提高9%～16%，在施肥的田间试验中产量可提高15% [236–237]，这一效果与施用肥料的增产效果相当[227]。研究[238]表明，增加生物质原料的供应，同时权衡农食系统和传统燃料使用的生物质分配，可显著提高生物炭应用的潜力。

4.1.7. 需求端减排措施

除了在生产端采取减排措施外，将需求转向更可持续的饮食模式，例如，增加植物性食品的摄入，减少动物性产品（尤其是来自反刍动物的）的摄入，可以缓解相关的温室气体排放和土地利用压力[239]。与此同时，将节约出来的土地进行植树造林，可以固定碳，这被称为土地节约效应。因此，各国制定了关于推荐能量摄入量以及红肉、糖、水果和蔬菜消费的饮食指南。广泛遵循这些指南，到2050年有望将全球温室气体排放减少29%，并将其他环境影响降低5%～9% [240]。在区域层面，这些指南有助于减少农食系统的温室气体排放（阿根廷减少28% [241]，新西兰减少4%～42% [242]，葡萄牙减少25%），同时还能产生节水、提升土地生产力和改善公共健康等方面的协同效益[243]。个人饮食结构的转变同样值得关注。相比女性，男性往往摄入更多的肉类、具有更大的减排潜力[244]。与饮食结构改变相关的温室气体减排潜力因饮食类型而异：纯素饮食的人均减排量为0.4～2.1 t CO_2eq，素食饮食为0.01～1.5 t，而地中海及类似饮食则为0.1～2.0 t [245]。然而，低排放饮食结构的转变受到收入、文化准则以及相关经济成本的制约。因此，亟须制定适宜政策，提供经济与非经济激励，并加强公众引导，以促进消费模式转变，实现潜在的协同效益。研究建议采用“紧缩与趋同”模式，该模式侧重于减少过度消费人群的食品消费量，同时增加营养需求未得到满足人群的食品消费量，以防止食品损失与浪费，并使整体食品摄入量趋于均衡，从而实现人均0.3 t CO_2eq的减排[245–246]。

4.1.8. 食品供应链与贸易管理

食品供应链中约28.2%的初级食品原料及所含营养最终会损失或浪费，与之相关的温室气体排放占全球总量的8%～10%，这凸显了在需求端推进减排的重要性[247]。因此，需要在包装、运输和储存等各个环节贯彻“3R”原则，即减量化、再利用和再循环[248–249]。事实上，在消费、收获后处理与储存以及生产环节，减少环境足迹（包括温室气体、氮、土地、水和磷）的潜力很大[250]。本地食品消费、提高加工和运输效率、采用电气化配送系统以及更清洁的储存技术，将有助于减少食品损失与浪费，并降低环境足迹[175,251]。

全球食品贸易及消费端相关的排放主要来自动物源食品——尤其是反刍动物肉类和乳制品。因此，亟须推动贸易模式可持续转型，并引导健康化饮食，增加低排放肉类及植物性食品的比重[25,252]。从排放强度较低地区进口食品，或在消费端选择此类产品，有助于降低整体排放[163]，但该策略的实施受制于复杂的政治关系与贸易政策[253–254]。推进贸易自由化、提供生产补贴、实施环境税费以及推广生态标签等措施，可有效推动低碳食品贸易，并防范潜在的排放转移风险[249,255]。因此，相关环保倡议（如欧盟的碳边境调节机制）应扩展至农业和食品相关领域[137,163]。

4.2. 食品系统的适应策略

采取适应策略以增强食品系统韧性，对于应对全球变暖、水资源短缺、极端天气事件等气候挑战至关重要。本节将针对作物生产和畜牧养殖分别探讨相应的适应策略。

4.2.1. 作物生产

为减缓全球变暖和极端气候事件的影响，农田系统可优化管理实践并采取适应措施，包括培育气候适应性作物品种、调整耕作方式及提升资源利用率等。

更替作物品种与培育抗逆品种能有效稳定作物产量（尤其是主粮与蔬菜产量）[256]。但这些品种在商业上的推广应用仍较为有限[257]。生物技术与基因组测序技术进步有助于培育适应极端温湿条件、抗病虫害的优良作物品种[258]。研究发现，适应性管理实践（如优化播种时间和推广适宜作物品种）可提升作物产量约12% [259]。区域种植结构优化可有效提高产量。全球变暖提升了高纬度地区农业适宜性，同时延长了中低纬度地区生长季[260]。中国近期的优良作物品种推广有效维持了作物产量并实现增长，推动了农业可持续转型[261]。

根据作物需求与当地环境制定精准肥料策略，能有效提升粮食产量。混种、间作、轮作等多样化农作模式，可以增强农业应对气候变化的韧性，同时改善土壤健康状况[261–263]。通过优化种植结构、肥料施用格局等策略，能有效减少所需耕地面积，为自然植被恢复和碳封存创造空间[264]。

充足的水资源供应对于作物生长至关重要。雨水收集储存、亏缺灌溉、高效灌溉、滴灌、水培等适应性措施，在极端干旱条件下效果显著[265]，既能提高水资源利用效率，也能保障缺水地区作物产量的稳定性。鉴于气候变化导致病虫害频发，构建作物-环境综合管理系统尤为重要。通过加强病虫害监测与控制，保障多变环境下作物生产的可持续性。

4.2.2. 畜牧养殖

全球变暖对地表植物生物量产生区域性影响：部分地区因气温升高、湿度增加及温带草原扩张，可能提升饲草产量并增强畜牧业总体生产力[266]。但高温与水资源短缺可能抵消这种潜在影响，因此需采取全面的适应性策略[267]。

适应性策略包含技术、生态与行为三类措施。技术层面，选用气候适应性强的牲畜品种[268]，开展杂交育种，优化通风与畜舍设计，可增强牲畜抵御极端天气的适应能力[269]。生态方面，林牧系统将牲畜放牧、树木培植与牧草培育有机结合，既能固碳减排、缓解局地升温，还能为弱势群体创造可持续生计的环境[269]。行为措施包括按季节调整畜群放牧及饮水地点，采用气候适应性饲料喂养，储备应急物资，并强化疾病预防工作等[269]。同时，通过宣传教育增强牧民对气候变化的认知，帮助其提升决策与长期规划能力[270]。此外，政策干预同样关键：支持疾病防控、推广可持续放牧模式、保障气候适应性畜产品市场准入，是构建畜牧业适应能力的重要举措。

4.3. 气候智慧型与环境友好型农食系统

为平衡农食系统的权衡取舍并最大化效益，气候智慧型农业作为整合种植业、畜牧业、渔业及农林的复合经营体系被提出，旨在保障粮食安全、减缓气候变化并增强气候适应能力。这一综合体系不仅包括生产技术与治理措施，还涵盖支持性政策与制度[271]。通过体系的有机整合，气候智慧型农业的生产力、适应能力和缓冲能力得以提升，有助于实现可持续发展目标（SDGs），尤其是零饥饿（SDG 2）、良好健康与福祉（SDG 3）及气候行动（SDG 13）等目标[272–273]。

气候智慧型农业的关键措施涵盖诸多方面：协同养分、水分与病虫害管理；强化牧场及林业管理，推进退化土地修复；提升土壤质量，调节碳、氧及养分循环，提升抗旱涝能力，促进固碳减排，增强生产力及气候适应与减缓能力；重视数字技术及人工智能技术在农业监测、施肥、灌溉及管理中的应用，帮助提升农食系统的气候适应与减缓潜力[274–275]。

该模式已在全球多地开始实践，推动当地农业升级转型并促进生产力提升。典型案例包括南亚与东南亚的气候智慧型村庄[276]、欧洲的气候智慧型林业[277–278]以及非洲国家的气候智慧型项目[279]。例如，非洲国家通过保护性耕作、生态农业等实践，在减排的同时改善了土壤健康，保护了生物多样性[276,279]。巴基斯坦与肯尼亚借助太阳能灌溉和精准农业技术，增强了作物对干旱及其他极端天气的抵御能力[279]。

在中低收入国家，气候变化加剧了粮食危机和营养不良。这类国家的食品供应与经济发展往往高度依赖农业生产。然而一些减排措施（如调整农业土地利用方式）可能会在无意间冲击农业生产，加剧粮食不安全状况，导致减缓策略与粮食保障之间的权衡矛盾。气候智慧型农业为兼顾环境影响最小化与生产力提升提供了可行路径。鉴于中低收入国家获取资金与技术的能力相对有限，需通过加大投资、出台支持性政策及推进技术转让，指导其在保障粮食安全的前提下进行生产活动以及开展气候应对工

作[280]。

5. 结论

本文对食品系统与气候变化、空气污染相互作用方面的文献进行了系统回顾，阐明了气候变化和空气污染对食品系统的多样化影响，并揭示了食品系统对全球气候变化和空气污染的突出贡献，尤其聚焦于食品系统产生的温室气体和空气污染物排放。本文进一步总结了农食系统在应对气候环境变化方面的减缓和适应措施（详见第4节与图4），勾勒出在气候变化和空气污染背景下构建可持续食品系统的关键路径。

本文通过全面总结气候变化、空气污染与食品系统之间的相互作用，为食品系统的可持续发展提供科学基础和实践参考。作为气候环境问题的驱动者与承受者，食品系统在应对这些全球性挑战中的关键作用不容忽视。探讨如何减轻这些影响并适应其变化，对于保障全球粮食安全、推动农业可持续发展至关重要。本文所提供的见解为政策制定者和利益相关者提供了重要参考，有助于增强食品系统应对气候变化的韧性，并与实现碳中和及环境保护的宏伟目标相契合。尽管现有研究已经揭示了食品系统与气候变化、空气污染之间的广泛相互作用，但我们建议未来仍需重点关注以下研究方向：

（1）加强多种方法比较研究，深入探究极端事件的作用机制及其复合效应，以便更准确、全面地评估气候变化和空气污染对农作物产量的影响；

（2）拓展研究视角至作物营养成分、病虫害损失、贸易中断等方面，这些因素同样对粮食安全产生深远影响；

（3）对食品系统在整个供应链各阶段的排放进行全面追踪，并融合本地化的高分辨率数据，以提高估算的准确性并降低不确定性；

（4）关注农业非CO_2温室气体排放，其往往具有显著的短期增温效应；同时应构建高时空分辨率空气污染物排放清单，以优化空气质量模拟；

（5）深化对减缓潜力与适应能力的综合分析，结合环境效应与成本效益评估，促进跨学科领域交叉，以便全面了解各项措施在不同地区和情境下的影响及相互作用；

（6）构建系统化的干预措施框架，推动与人工智能技术的深度融合，从而最大化协同效应、最小化权衡与冲突。

为应对气候变化和空气污染带来的复杂挑战，需要全球各国政府和相关机构迅速采取协调一致的行动，以构建更具可持续性和韧性的食品系统。实现这一目标的关键在于制定全面的政策，将气候减缓和适应策略贯穿于整个食品供应链。然而，中低收入国家面对的饥饿和粮食短缺问题给农食系统减排策略的实施带来了重大挑战。在这些粮食安全本已脆弱的地区，需要谨慎平衡减少排放与确保粮食供应之间的关系。仅靠各国的努力可能不足以应对这些复杂挑战，因此国际支持至关重要，尤其是对于技术、资金与制度能力可能有限的中低收入国家而言。全球合作对于推广标准化的可持续性指标、分享最佳实践以及提供资金和技术支持至关重要，这将使中低收入国家能够采用气候智慧型农业实践。这种合作不仅将加速全球向气候韧性农业的转型，还将提高减

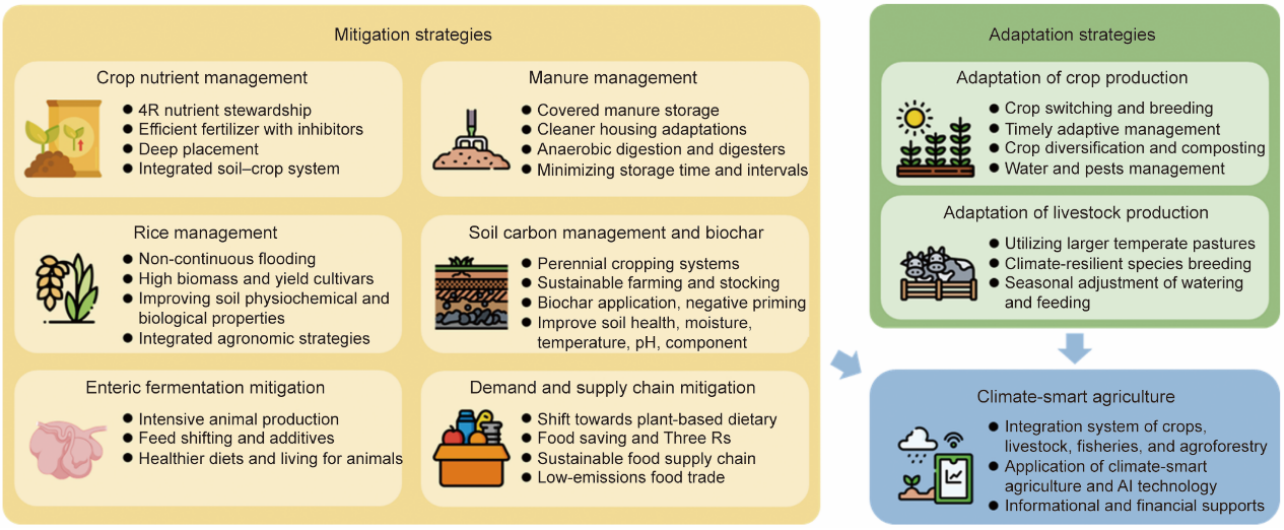

图4. 迈向气候智慧型农业的代表性减缓和适应策略。减缓策略（黄色方框）聚焦农食系统减排，涵盖作物养分管理、水稻种植优化、动物肠道发酵调控、粪便管理、土壤碳封存、生物炭应用，以及需求与供应链干预等措施。农牧业的适应策略（绿色方框）旨在缓解气候变化冲击并增强食品系统韧性。而减缓与适应策略的整合（蓝色方框），有助于推动气候智慧型农业的发展。

排策略的有效性，并有助于实现全球粮食安全和可持续发展的目标。最后，将农业政策与更广泛的环境目标（如碳中和与清洁空气）相结合，可以产生协同效应，既能确保粮食安全，又能加强全球应对气候变化的力度，并改善环境健康水平。

致谢

本研究得到了国家自然科学基金（42277087、42130708、42471021、42277482和42361144876）、广东省自然科学基金（2024A1515012550）、海南国家公园研究院资助项目（KY-23ZK01）、清华大学深圳国际研究生院交叉科研创新基金项目（JC2022011）、深圳市科技计划项目（JCYJ20240813112106009和ZDSYS20220606100806014）以及清华大学深圳国际研究生院科研启动经费（QD2021030C）的支持。

Compliance with ethics guidelines

Chaopeng Hong, Rui Zhong, Mengyao Xu, Peidong He, Huibin Mo, Yue Qin, Danna Shi, Xinlei Chen, Kebin He, and Qiang Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Rosenzweig C, Mbow C, Barioni LG, Benton TG, Herrero M, Krishnapillai M, et al. Climate change responses benefit from a global food system approach. Nat Food 2020;1(2):94–7.
[2] Wheeler T, von Braun J. Climate change impacts on global food security. Science 2013;341:508–13.
[3] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Van Dingenen R, Leip A. Air pollutant emissions from global food systems are responsible for environmental impacts, crop losses and mortality. Nat Food 2022;3(11):942–56.
[4] Ivanovich CC, Sun T, Gordon DR, Ocko IB. Future warming from global food consumption. Nat Clim Chang 2023;13(3):297–302.
[5] Zurek M, Hebinck A, Selomane O. Climate change and the urgency to transform food systems. Science 2022;376:1416–21.
[6] Rezaei EE, Webber H, Asseng S, Boote K, Durand JL, Ewert F, et al. Climate change impacts on crop yields. Nat Rev Earth Environ 2023;4(12):831–46.
[7] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. Proc Natl Acad Sci 2014;111(9):3268–73.
[8] Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, Mastrandrea MD, Falcon WP, Naylor RL. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. Science 2008;319:607–10.
[9] Bezner Kerr R, Hasegawa T, Lasco R, Bhatt I, Deryng D, Farrell A, et al. Food, fibre, and other ecosystem products. In: Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegría A, editors. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. London: Cambridge University Press; 2022. p. 713–906.
[10] Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. Science 2011;333:616–20.
[11] Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, et al. Solutions for a cultivated planet. Nature 2011;478(7369):337–42.
[12] Birkmann JE, Liwenga R, Pandey E, Boyd R, Djalante F, Gemenne W, et al. Poverty, livelihoods and sustainable development. In: Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegría A, et al., editors. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2022. p. 1171–274.
[13] Avnery S, Mauzerall DL, Liu J, Horowitz LW. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. Atmos Environ 2011;45(13):2284–96.
[14] He L, Wei J, Wang Y, Shang Q, Liu J, Yin Y, et al. Marked impacts of pollution mitigation on crop yields in China. Earth's Futur 2022;10(11):1–13.
[15] Allen RJ, Landuyt W, Rumbold ST. An increase in aerosol burden and radiative effects in a warmer world. Nat Clim Chang 2016;6(3):269–74.
[16] Hong C, Zhang Q, Zhang Y, Davis SJ, Tong D, Zheng Y, et al. Impacts of climate change on future air quality and human health in China. Proc Natl Acad Sci 2019;116(35):17193–200.
[17] Levy II H, Horowitz LW, Schwarzkopf MD, Ming Y, Golaz JC, Naik V, et al. The roles of aerosol direct and indirect effects in past and future climate change. J Geophys Res Atmos 2013;118(10):4521–32.
[18] Clark MA, Domingo NGGG, Colgan K, Thakrar SK, Tilman D, Lynch J, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 and 2 °C climate change targets. Science 2020;370:705–8.
[19] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Monforti-Ferrario F, Tubiello FN, Leip A. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. Nat Food 2021;2(3):198–209.
[20] Tubiello FN, Karl K, Flammini A, Gütschow J, Obli-Laryea G, Conchedda G, et al. Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems. Earth Syst Sci Data 2022;14(4):1795–809.
[21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021—the physical science basis. Report. Geneva: IPCC; 2021.
[22] Vermeulen SJ, Campbell BM, Ingram JSI. Climate change and food systems. Annu Rev Environ Resour 2012;37(1):195–222.
[23] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050. Report. Rome: FAO; 2018.
[24] Searchinger T, Waite R, Hanson C, Ranganathan J, Dumas P, Matthews E, et al. Creating a sustainable food future: a menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. Final report. Washington, DC: World Resources Institute; 2019.
[25] Foong A, Pradhan P, Frör O, Kropp JP. Adjusting agricultural emissions for trade matters for climate change mitigation. Nat Commun 2022;13(1):3024.
[26] Ndondo JTK, Review of the Food and Agriculture Organisation (FAO). Strategic priorities on food safety 2023. In: Ahmad RS, editor. Food safety-new insights. London: IntechOpen; 2023.
[27] Frank S, Havlík P, Stehfest E, van Meijl H, Witzke P, Pérez-Domínguez I, et al. Agricultural non-CO_2 emission reduction potential in the context of the 1.5 °C target. Nat Clim Chang 2019;9(1):66–72.
[28] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. Glob Change Biol 2016;22(3):1315–24.
[29] Sutton MA, Howard CM, Mason KE, Brownlie WJ, Cordovil C. Nitrogen opportunities for agriculture, food & environment: UNECE guidance document on integrated sustainable nitrogen management. Report. London: UK Centre for Ecology Hydrology; 2022.
[30] Lindblom J, Lundström C, Ljung M, Jonsson A. Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. Precis Agric 2017;18(3):309–31.
[31] Rogelj J, Shindell D, Jiang K, Fifita S, Forster P, Ginzburg V, et al. Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development. In: Masson-Delmotte VP, Zhai HO, Pörtner D, Roberts J, Skea PR, Shukla A, editors. Global Warming of 1.5 °C . Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2018. p. 93–174.
[32] Roe S, Streck C, Beach R, Busch J, Chapman M, Daioglou V, et al. Land-based measures to mitigate climate change: potential and feasibility by country. Glob Change Biol 2021;27(23):6025–58.
[33] Qian H, Zhu X, Huang S, Linquist B, Kuzyakov Y, Wassmann R, et al. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. Nat Rev Earth Environ 2023;4(10):716–32.
[34] Jiang Y, Carrijo D, Huang S, Chen JI, Balaine N, Zhang W, et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: a global meta-analysis. F Crop Res 2019;234:47–54.
[35] Wang Y, Yao Z, Zhan Y, Zheng X, Zhou M, Yan G, et al. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. Glob Change Biol 2021;27(12):2807–21.
[36] Gu W, Wang F, Siebert S, et al. The asymmetric impacts of international agricultural trade on water use scarcity, inequality and inequity. Nat Water 2024;2:324–36.

[37] Qin Y, Hong C, Zhao H, et al. Snowmelt risk telecouplings for irrigated agriculture. Nat Clim Chang 2022;12:1007–15.

[38] Qin Y, Mueller ND, Siebert S, et al. Flexibility and intensity of global water use. Nat Sustain 2019;2:515–23.

[39] Nabuurs GJ, Mrabet R, Hatab AA, Bustamante M, Clark H, Havlik P, et al. Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). In: Climate change 2022: mitigation of climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2022. p. 747–860.

[40] Hou Y, Velthof GL, Oenema O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment. Glob Change Biol 2015;21(3):1293–312.

[41] Shi L, Simplicio WS, Wu G, Hu Z, Hu H, Zhan X. Nutrient recovery from digestate of anaerobic digestion of livestock manure: a review. Curr Pollut Rep 2018;4(2):74–83.

[42] Clark MA, Domingo NG, Colgan K, Thakrar SK, Tilman D, Lynch J. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 and 2 °C climate change targets. Science 2020;370(6517):705–8.

[43] Liu X, Desai AR. Significant reductions in crop yields from air pollution and heat stress in the United States. Earths Future 2021;9(8):e2021EF002000.

[44] Yang Y, Tilman D, Jin Z, Smith P, Barrett CB, Zhu YG. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. Science 2024;385(6713): eadn3747.

[45] Crippa M, Solazzo E, GuizzardiD MF, Tubiello FN, Leip AJNF. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. Nat Food 2021;2(3):198–209.

[46] Burney J, Ramanathan V. Recent climate and air pollution impacts on Indian agriculture. Proc Natl Acad Sci 2014;111(46):16319–24.

[47] Zhou H, Yue X, Lei Y, Tian C, Zhu J, Ma Y, et al. Distinguishing the impacts of natural and anthropogenic aerosols on global gross primary productivity through diffuse fertilization effect. Atmos Chem Phys 2022;22(1):693–709.

[48] Hong C, Mueller ND, Burney JA, Zhang Y, AghaKouchak A, Moore FC, et al. Impacts of ozone and climate change on yields of perennial crops in California. Nat Food 2020;1(3):166–72.

[49] Varma V, Bebber DP. Climate change impacts on banana yields around the world. Nat Clim Chang 2019;9:752–7.

[50] Long SP, Ainsworth EA, Leakey AD, Nosberger J, Ort DR. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO_2 concentrations. Science 2006;312:1918–21.

[51] Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, Huybers P, Leakey AD, Bloom AJ, et al. Increasing CO_2 threatens human nutrition. Nature 2014;510(7503):139–42.

[52] Malikov E, Miao R, Zhang J. Distributional and temporal heterogeneity in the climate change effects on US agriculture. J Environ Econ Manag 2020; 104: 102386.

[53] Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nat Clim Change 2013;3(9):827–32.

[54] Zhao C, Stockle CO, Karimi T, Nelson RL, van Evert FK, Pronk AA, et al. Potential benefits of climate change for potatoes in the United States. Environ Res Lett 2022;17(10):104034.

[55] Wang B, Jägermeyr J, O'Leary GJ, Wallach D, Ruane AC, Feng P, et al. Pathways to identify and reduce uncertainties in agricultural climate impact assessments. Nat Food 2024;5(7):550–6.

[56] Franke JA, Muller C, Elliott J, Ruane AC, Jagermeyr J, Snyder A, et al. The GGCMI phase 2 emulators: global gridded crop model responses to changes in CO_2, temperature, water, and nitrogen (version 1.0). Geosci Model Dev 2020; 13(9):3995–4018.

[57] Gulev SK, Thorne PW, Ahn J, Dentener FJ, Domingues CM, Gerland S, et al. Changing state of the climate system. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, editors. Climate change 2021—the physical science basis. London: Cambridge University Press; 2023. p. 287–422.

[58] Tan Q, Liu Y, Dai L, Pan T. Shortened key growth periods of soybean observed in China under climate change. Sci Rep 2021;11(1):8197.

[59] Zhang S, Tao F, Zhang Z. Rice reproductive growth duration increased despite of negative impacts of climate warming across China during 1981–2009. Eur J Agron 2014;54:70–83.

[60] Liu Y, Chen Q, Ge Q, Dai J, Qin Y, Dai L, et al. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. Agric Meteorol 2018;248:518–26.

[61] Zhao C, Liu B, Piao S, Wang X, Lobell DB, Huang Y, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. Proc Natl Acad Sci USA 2017;114(35):9326–31.

[62] Jägermeyr J, Mueller C, Ruane AC, Elliott J, Balkovic J, Castillo O, et al. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. Nat Food 2021;2:875.

[63] Hasegawa T, Wakatsuki H, Ju H, Vyas S, Nelson GC, Farrell A, et al. A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops. Sci Data 2022;9(1):58.

[64] Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N. A meta analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nat Clim Chang 2014;4(4):287–91.

[65] Mohammadi S, Rydgren K, Bakkestuen V, Gillespie MAK. Impacts of recent climate change on crop yield can depend on local conditions in climatically diverse regions of Norway. Sci Rep 2023;13(1):3633.

[66] Agnolucci P, De Lipsis V. Long-run trend in agricultural yield and climatic factors in Europe. Clim Change 2020;159(3):385–405.

[67] Meng Q, Hou P, Lobell DB, Wang H, Cui Z, Zhang F, et al. The benefits of recent warming for maize production in high latitude China. Clim Change 2014; 122(1–2):341–9.

[68] Wang H, Hijmans RJ. Climate change and geographic shifts in rice production in China. Environ Res Commun 2019;1(1):011008.

[69] Zheng C, Zhang J, Chen J, Chen C, Tian Y, Deng A, et al. Nighttime warming increases winter-sown wheat yield across major Chinese cropping regions. F Crop Res 2017;214:202–10.

[70] Lobell DB, Field CB. Estimation of the carbon dioxide (CO_2) fertilization effect using growth rate anomalies of CO_2 and crop yields since 1961. Glob Change Biol 2008;14(1):39–45.

[71] McGrath JM, Lobell DB. Regional disparities in the CO_2 fertilization effect and implications for crop yields. Environ Res Lett 2013;8(1):014054.

[72] Ueyama M, Ichii K, Kobayashi H, Kumagai TO, Beringer J, Merbold L, et al. Inferring CO_2 fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model. Environ Res Lett. 2020;15(8):084009.

[73] Toreti A, Deryng D, Tubiello FN, Muller C, Kimball BA, Moser G, et al. Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO_2 on crops. Nat Food 2020;1(12):775–82.

[74] Kimball BA. Crop responses to elevated CO_2 and interactions with H_2O, N, and temperature. Curr Opin Plant Biol 2016;31:36–43.

[75] Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, Ort DR. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. Annu Rev Plant Biol 2004;55(1):591–628.

[76] Kimball BA. Lessons from FACE: CO_2 effects and interactions with water, nitrogen and temperature. In: Handbook of climate change and agroecosystems-impacts, adapt mitigation. London: Imperial College Press; 2010. p. 87–107.

[77] Purcell C, Batke SP, Yiotis C, Caballero R, Soh WK, Murray M, et al. Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric CO_2. Ann Bot 2018;121(6):1137–49.

[78] Kumar L, Chhogyel N, Gopalakrishnan T, Hasan MK, Jayasinghe SL, Kariyawasam CS, et al. Climate change and future of agri-food production. In: Bhat R, editor. Future foods global trends, opportunities, and sustainability challenges. London: Academic Press; 2022. p. 49–79.

[79] Lobell DB, Field CB. Global scale climate—crop yield relationships and the impacts of recent warming. Environ Res Lett 2007;2(1):014002.

[80] Tebaldi C, Lobell DB. Towards probabilistic projections of climate change impacts on global crop yields. Geophys Res Lett 2008;35(8):307–15.

[81] Li N, Zhao Y, Han J, Yang Q, Liang J, Liu X, et al. Impacts of future climate change on rice yield based on crop model simulation—a meta-analysis. Sci Total Environ 2024;949:175038.

[82] Tardieu F, Simonneau T, Muller B. The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach. Annu Rev Plant Biol 2018;69:733–59.

[83] Pan J, Sharif R, Xu X, Chen X. Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects. Front Plant Sci 2021;11:627331.

[84] Tian L, Zhang Y, Chen P, Zhang F, Li J, Yan F, et al. How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis. Front Plant Sci 2021;12:634898.

[85] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agron Sustain Dev 2009;29:185–212.

[86] Daryanto S, Wang L, Jacinthe PA. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: a review. Agric Water Manage 2017; 179:18–33.

[87] Naumann G, Alfieri L, Wyser K, Mentaschi L, Betts RA, Carrao H, et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming. Geophys Res Lett 2018;45(7):3285–96.

[88] Ukkola AM, De Kauwe MG, Roderick ML, Abramowitz G, Pitman AJ. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. Geophys Res Lett 2020;47(11):e2020GL087820.

[89] Lesk C, Anderson W, Rigden A, Coast O, Jägermeyr J, McDermid S, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. Nat Rev Earth Environ 2022;3:872–89.

[90] Lesk C, Coffel E, Winter J, Ray D, Zscheischler J, Seneviratne IS, et al. Stronger temperature-moisture couplings exacerbate the impact of climate

warming on global crop yields. Nat Food 2021;2:683–91.
[91] Hoffman AL, Kemanian AR, Forest CE. The response of maize, sorghum, and soybean yield to growing-phase climate revealed with machine learning. Environ Res Lett 2020;15(9):094013.
[92] Fan Y, Tjiputra J, Muri H, Lombardozzi D, Park CE, Wu S, et al. Solar geoengineering can alleviate climate change pressures on crop yields. Nat Food 2021;2(5):373–81.
[93] Heino M, Puma MJ, Ward PJ, Gerten D, Heck V, Siebert S, et al. Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations. Nat Commun 2018;9(1): 1257.
[94] Anderson WB, Seager R, Baethgen W, Cane M, You L. Synchronous crop failures and climate-forced production variability. Sci Adv 2019;5: eaaw1976.
[95] Iizumi T, Luo JJ, Challinor AJ, Sakurai G, Yokozawa M, Sakuma H, et al. Impacts of EI Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. Nat Commun 2014;5(1):3712.
[96] Anderson WB, Han E, Baethgen W, Goddard L, Muñoz ÁG, Robertson AW. The Madden-Julian oscillation affects maize yields throughout the tropics and subtropics. Geophys Res Lett 2020;47:e2020GL087004.
[97] Schillerberg TA, Tian D, Miao R. Spatiotemporal patterns of maize and winter wheat yields in the United States: predictability and impact from climate oscillations. Agric Meteorol 2019;275:208–22.
[98] Tai APK, Martin MV, Heald CL. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. Nat Clim Chang 2014;4(9):817–21.
[99] Zeng G, Pyle JA, Young PJ. Impact of climate change on tropospheric ozone and its global budgets. Atmos Chem Phys 2008;8(2):369–87.
[100] Cooper OR, Parrish DD, Ziemke J, Balashov NV, Cupeiro M, Galbally IE, et al. Global distribution and trends of tropospheric ozone: an observation-based review. Elementa 2014;2:29.
[101] Lu X, Hong J, Zhang L, Cooper OR, Schultz MG, Xu X, et al. Severe surface ozone pollution in China: a global perspective. Environ Sci Technol Lett 2018; 5:487–94.
[102] Booker F, Muntifering R, McGrath M, Burkey K, Decoteau D, Fiscus E, et al. The ozone component of global change: potential effects on agricultural and horticultural plant yield, product quality and interactions with invasive species. J Integr Plant Biol 2009;51(4):337–51.
[103] Feng Z, Xu Y, Kobayashi K, Dai L, Zhang T, Agathokleous E, et al. Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia. Nat Food 2022;3:47–56.
[104] Van Dingenen R, Dentener FJ, Raes F, Krol MC, Emberson L, Cofala J. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. Atmos Environ 2009;43(3):604–18.
[105] Tai APK, Sadiq M, Pang JYS, Yung DHY, Feng Z. Impacts of surface ozone pollution on global crop yields: comparing different ozone exposure metrics and incorporating co-effects of CO_2. Front Sustain Food Syst 2021;5:534616.
[106] Schauberger B, Rolinski S, Schaphoff S, Müller C. Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. Agric Meteorol 2019;265:1–15.
[107] Mills G, Sharps K, Simpson D, Pleijel H, Broberg M, Uddling J, et al. Ozone pollution will compromise efforts to increase global wheat production. Glob Change Biol 2018;24(8):3560–74.
[108] Avnery S, Mauzerall DL, Liu J, Horowitz LW. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O_3 pollution. Atmos Environ 2011; 45(13):2297–309.
[109] Leung F, Sitch S, Tai APK, Wiltshire AJ, Gornall JL, Folberth GA, et al. CO_2 fertilization of crops offsets yield losses due to future surface ozone damage and climate change. Environ Res Lett 2022;17(7):074007.
[110] Vos T, Lim SS, Abbafati C, Abbas KM, Abbasi M, Abbasifard M, et al. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. Lancet 2020;396(10258):1204–22.
[111] Auffhammer M, Ramanathan V, Vincent JR. Integrated model shows that atmospheric brown clouds and greenhouse gases have reduced rice harvests in India. Proc Natl Acad Sci 2006;103(52):19668–72.
[112] Mercado LM, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M, et al. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. Nature 2009;458(7241):1014–7.
[113] Wang X, Wang C, Wu J, Miao G, Chen M, Chen S, et al. Intermediate aerosol loading enhances photosynthetic activity of croplands. Geophys Res Lett 2021; 48:e2020GL091893.
[114] Schiferl LD, Heald CL. Particulate matter air pollution may offset ozone damage to global crop production. Atmos Chem Phys 2018;18(8):5953–66.
[115] Behrer AP, Wang S. Current benefits of wildfire smoke for yields in the US Midwest may dissipate by 2050. Environ Res Lett 2024;19(8):84010.
[116] Lobell DB, Burney JA. Cleaner air has contributed one-fifth of US maize and soybean yield gains since 1999. Environ Res Lett 2021;16(7):074049.
[117] Bell JNB, Honour SL, Power SA. Effects of vehicle exhaust emissions on urban wild plant species. Environ Pollut 2011;159(8–9):1984–90.
[118] World Health Organization (WHO). Effects of nitrogen containing air pollutants: critical levels. Report. Copenhagen: Regional Office for Europe; 2000.
[119] Kharol SK, Martin RV, Philip S, Vogel S, Henze DK, Chen D, et al. Persistent sensitivity of Asian aerosol to emissions of nitrogen oxides. Geophys Res Lett 2013;40(5):1021–6.
[120] Wang J, Li J, Ye J, Zhao J, Wu Y, Hu J, et al. Fast sulfate formation from oxidation of SO_2 by NO_2 and HONO observed in Beijing haze. Nat Commun 2020;11(1):2844.
[121] Monks PS, Archibald AT, Colette A, Cooper O, Coyle M, Derwent R, et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. Atmos Chem Phys 2015;15(15):8889–973.
[122] Lobell DB, Di Tommaso S, Burney JA. Globally ubiquitous negative effects of nitrogen dioxide on crop growth. Sci Adv 2022;8(22):eabm9909.
[123] Murray LT, Leibensperger EM, Mickley LJ, Tai APK. Estimating future climate change impacts on human mortality and crop yields via air pollution. Proc Natl Acad Sci 2024;121(39):e2400117121.
[124] McGrath JM, Betzelberger AM, Wang S, Shook E, Zhu XG, Long SP, et al. An analysis of ozone damage to historical maize and soybean yields in the United States. Proc Natl Acad Sci 2015;112(46):14390–5.
[125] Lu C, Leng G, Yu L. Quantifying the indirect effects of different air pollutants on crop yields in North China Plain. Environ Res Lett 2024;19(2):024002.
[126] Shindell D, Faluvegi G, Kasibhatla P, Van Dingenen R. Spatial patterns of crop yield change by emitted pollutant. Earths Futur 2019;7(2):101–12.
[127] Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA, et al. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: Climate change 2014: mitigation of climate change. London: Cambridge University Press; 2014. p. 811–922.
[128] Shukla PR, Skeg J, Buendia EC, Masson-Delmotte V, Pörtner HO, Roberts DC, et al. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, degradationland, sustainable land management, securityfood, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); 2019.
[129] Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). Edgar Food: a global emission inventory of GHGs and air pollutants from the food systems. Report. Brussels: European Commission; 2024.
[130] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). How to feed the World in 2050. Report. Rome: FAO; 2019.
[131] Carlson KM, Gerber JS, Mueller ND, Herrero M, MacDonald GK, Brauman KA, et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. Nat Clim Chang 2017;7(1):63–8.
[132] Herrero M, Henderson B, Havlík P, Thornton PK, Conant RT, Smith P, et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. Nat Clim Chang 2016;6(5):452–61.
[133] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Emissions due to agriculture: global, regional and country trends 2000–2018. Report. Rome: FAO; 2020.
[134] Tubiello FN, Karl K, Flammini A, Gütschow J, Obli-Layrea G, Conchedda G, et al. Pre- and post-production processes along supply chains increasingly dominate GHG emissions from agri-food systems globally and in most countries. Earth Syst Sci Data Discuss 2021;2021:1–24.
[135] Tubiello FN, Rosenzweig C, Conchedda G, Karl K, Gütschow J, Xueyao P, et al. Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. Environ Res Lett 2021;16(6):065007.
[136] Hong C, Burney JA, Pongratz J, Nabel JEMS, Mueller ND, Jackson RB, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017. Nature 2021; 589(7843):554–61.
[137] Li Y, Zhong H, Shan Y, Hang Y, Wang D, Zhou Y, et al. Changes in global food consumption increase GHG emissions despite efficiency gains along global supply chains. Nat Food 2023;4(6):483–95.
[138] Gu B, Zhang L, Van Dingenen R, Vieno M, Van Grinsven HJ, Zhang X, et al. Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM2.5 air pollution. Science 2021;374:758–62.
[139] Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, Schaaf E, Dentener F, Van Aardenne JA, et al. Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2. Earth Syst Sci Data 2018;10(4):1987–2013.
[140] Paulot F, Jacob DJ, Pinder RW, Bash JO, Travis K, Henze DK. Ammonia emissions in the United States, European Union, and China derived by high resolution inversion of ammonium wet deposition data: Interpretation with a new agricultural emissions inventory (MASAGE_NH3). J Geophys Res Atmos 2014;119(7):4343–64.

[141] Vira J, Hess P, Melkonian J, Wieder WR. An improved mechanistic model for ammonia volatilization in Earth system models: flow of Agricultural Nitrogen version 2 (FANv2). Geosci Model Dev 2020;13(9):4459–90.
[142] Xu P, Li G, Zheng YY, Fung JCH, Chen A, Zeng Z, et al. Fertilizer management for global ammonia emission reduction. Nature 2024; 626(8000): 792–8.
[143] Balasubramanian S, Domingo NGG, Hunt ND, Gittlin M, Colgan KK, Marshall JD, et al. The food we eat, the air we breathe: a review of the fine particulate matter-induced air quality health impacts of the global food system. Environ Res Lett 2021;16(10):103004.
[144] Malley CS, Hicks WK, Kulyenstierna JCI, Michalopoulou E, Molotoks A, Slater J, et al. Integrated assessment of global climate, air pollution, and dietary, malnutrition and obesity health impacts of food production and consumption between 2014 and 2018. Environ Res Commun 2021;3(7):075001.
[145] Peters GP. From production-based to consumption-based national emission inventories. Ecol Econ 2008;65(1):13–23.
[146] Guan D, Meng J, Reiner DM, Zhang N, Shan Y, Mi Z, et al. Structural decline in China's CO_2 emissions through transitions in industry and energy systems. Nat Geosci 2018;11(8):551–5.
[147] Mi Z, Zheng J, Meng J, Zheng H, Li X, Coffman DM, et al. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective. Appl Energy 2019;235:509–18.
[148] Xu X, Sharma P, Shu S, Lin TS, Ciais P, Tubiello FN, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. Nat Food 2021;2(9):724–32.
[149] Arce G, López LA, Guan D. Carbon emissions embodied in international trade: the post-China era. Appl Energy 2016;184:1063–72.
[150] Wiedmann T, Lenzen M. Environmental and social footprints of international trade. Nat Geosci 2018;11(5):314–21.
[151] Barrett J, Peters G, Wiedmann T, Scott K, Lenzen M, Roelich K, et al. Consumption-based GHG emission accounting: a UK case study. Clim Policy 2013;13(4):451–70.
[152] Liu Z, Feng K, Hubacek K, Liang S, Anadon LD, Zhang C, et al. Four system boundaries for carbon accounts. Ecol Modell 2015;318:118–25.
[153] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. Ecol Econ 2009; 69(2): 211–22.
[154] Feng K, Davis SJ, Sun L, Li X, Guan D, Liu W, et al. Outsourcing CO_2 within China. Proc Natl Acad Sci 2013;110(28):11654–9.
[155] Wiebe KS, Gandy S, Lutz C. Policies and consumption-based carbon emissions from a top-down and a bottom–up perspective. Low Carbon Econ 2016;07(01): 21–35.
[156] Castellani V, Beylot A, Sala S. Environmental impacts of household consumption in Europe: comparing process-based LCA and environmentally extended input-output analysis. J Clean Prod 2019;240:117966.
[157] Cucurachi S, Scherer L, Guinée J, Tukker A. Life cycle assessment of food systems. One Earth 2019;1(3):292–7.
[158] Sala S, Castellani V. The consumer footprint: monitoring Sustainable Development Goal 12 with process-based life cycle assessment. J Clean Prod 2019; 240: 118050.
[159] Li M, Jia N, Lenzen M, Malik A, Wei L, Jin Y, et al. Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions. Nat Food 2022;3(6):445–53.
[160] Virtanen Y, Kurppa S, Saarinen M, Katajajuuri JM, Usva K, Mäenpää I, et al. Carbon footprint of food-approaches from national input-output statistics and a LCA of a food portion. J Clean Prod 2011;19(16):1849–56.
[161] Suszkiw J. Study clarifies US beef's resource use and greenhouse gas emissions [Internet]. Washington, DC: Agricultural Research Service US Department of Agriculture; 2019 Mar 11 [cited 2024 Mar 1]. Available from: https://www.ars.usda.gov/news-events/news/research-news/2019/study clarifies-us-beefs-resource-use-and-greenhouse-gas-emissions/.
[162] Ding N, Liu J, Kong Z, Yan L, Yang J. Life cycle greenhouse gas emissions of Chinese urban household consumption based on process life cycle assessment: exploring the critical influencing factors. J Clean Prod 2019;210:898–906.
[163] Hong C, Zhao H, Qin Y, Burney JA, Pongratz J, Hartung K, et al. Land-use emissions embodied in international trade. Science 2022;376:597–603.
[164] Behrens P, Kiefte-de Jong JC, Bosker T, Rodrigues JFD, De Koning A, Tukker A. Evaluating the environmental impacts of dietary recommendations. Proc Natl Acad Sci 2017;114(51):13412–7.
[165] Kastner T, Kastner M, Nonhebel S. Tracing distant environmental impacts of agricultural products from a consumer perspective. Ecol Econ 2011;70(6):1032–40.
[166] Kastner T, Schaffartzik A, Eisenmenger N, Erb KH, Haberl H, Krausmann F. Cropland area embodied in international trade: contradictory results from different approaches. Ecol Econ 2014;104:140–4.
[167] Hubacek K, Feng K. Comparing apples and oranges: some confusion about using and interpreting physical trade matrices versus multi-regional input-output analysis. Land Use Policy 2016;50:194–201.
[168] Bayram H, Rice MB, Abdalati W, Akpinar Elci M, Mirsaeidi M, Annesi Maesano I, et al. Impact of global climate change on pulmonary health: susceptible and vulnerable populations. Ann Am Thorac Soc 2023;20(8):1088–95.
[169] Bayram H, Bauer AK, Abdalati W, Carlsten C, Pinkerton KE, Thurston GD, et al. Environment, global climate change, and cardiopulmonary health. Am J Respir Crit Care Med 2017;195(6):718–24.
[170] van Daalen KR, Tonne C, Semenza JC, Rocklöv J, Markandya A, Dasandi N, et al. The 2024 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: unprecedented warming demands unprecedented action. Lancet Public Heal 2024;9(7):e495–522.
[171] Jones MW, Peters GP, Gasser T, Andrew RM, Schwingshackl C, Gütschow J, et al. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. Sci Data 2023;10(1):155.
[172] Reisinger A, Clark H. How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming? Glob Change Biol 2018;24(4):1749–61.
[173] Lynch J, Cain M, Pierrehumbert R, Allen M. Demonstrating GWP: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants. Environ Res Lett ERL 2020;15(4):044023.
[174] Vashold L, Crespo CJ. A unified modelling framework for projecting sectoral greenhouse gas emissions. Commun Earth Environ 2024;5:139.
[175] Hong C, Gu S. Tracking emissions from food systems. Nat Food 2023; 4(6): 454–5.
[176] Roe S, Streck C, Obersteiner M, Frank S, Griscom B, Drouet L, et al. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. Nat Clim Chang 2019; 9(11): 817–28.
[177] Bruulsema T, Lemunyon J, Herz B. Know your fertilizer rights. Crop Soils 2009;42:13–8.
[178] Maaz TM, Sapkota TB, Eagle AJ, Kantar MB, Bruulsema TW, Majumdar K. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. Glob Change Biol 2021;27(11):2343–60.
[179] Gu B, Zhang X, Lam SK, Yu Y, Van Grinsven HJM, Zhang S, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands. Nature 2023; 613(7942):77–84.
[180] Chen X, Cui Z, Fan M, Vitousek P, Zhao M, Ma W, et al. Producing more grain with lower environmental costs. Nature 2014;514(7523):486–9.
[181] Liu X, Cui Z, Hao T, Yuan L, Zhang Y, Gu B, et al. A new approach to holistic nitrogen management in China. Front Agric Sci Eng 2022;9:490–510.
[182] Pan SY, He KH, Lin KT, Fan C, Chang CT. Addressing nitrogenous gases from croplands toward low-emission agriculture. NPJ Clim Atmos Sci 2022;5(1):43.
[183] Zhang C, Song X, Zhang Y, Wang D, Rees RM, Ju X. Using nitrification inhibitors and deep placement to tackle the trade-offs between NH_3 and N_2O emissions in global croplands. Glob Change Biol 2022;28(14):4409–22.
[184] Saunois M, Stavert AR, Poulter B, Bousquet P, Canadell JG, Jackson RB, et al. The Global Methane Budget 2000–2017. Earth Syst Sci Data. 2020;12(3):1561–623.
[185] Jiao Z, Hou A, Shi Y, Huang G, Wang Y, Chen X. Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community. Commun Soil Sci Plant Anal 2006;37(13–14): 1889–903.
[186] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. Adv Agron 2007;96:1–63.
[187] Jiang Y, van Groenigen KJ, Huang S, Hungate BA, van Kessel C, Hu S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. Glob Change Biol 2017;23(11):4728–38.
[188] van der Gon HACD, Kropff MJ, Van Breemen N, Wassmann R, Lantin RS, Aduna E, et al. Optimizing grain yields reduces CH4 emissions from rice paddy fields. Proc Natl Acad Sci 2002;99(19):12021–4.
[189] Su J, Hu C, Yan X, Jin Y, Chen Z, Guan Q, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice. Nature 2015;523(7562):602–6.
[190] Jiang Y, Liao P, van Gestel N, Sun Y, Zeng Y, Huang S, et al. Lime application lowers the global warming potential of a double rice cropping system. Geoderma 2018;325:1–8.
[191] Zhang HM, Liang Z, Li Y, Chen ZX, Zhang JB, Cai ZC, et al. Liming modifies greenhouse gas fluxes from soils: a meta-analysis of biological drivers. Agric Ecosyst Environ 2022;340:108182.
[192] Shang Q, Yang X, Gao C, Wu P, Liu J, Xu Y, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. Glob Change Biol 2011;17(6):2196–210.
[193] Chakraborty D, Ladha JK, Rana DS, Jat ML, Gathala MK, Yadav S, et al. A global analysis of alternative tillage and crop establishment practices for economically and environmentally efficient rice production. Sci Rep 2017;7(1):9342.
[194] Rani V, Bhatia A, Kaushik R. Inoculation of plant growth promoting-methane

utilizing bacteria in different N-fertilizer regime influences methane emission and crop growth of flooded paddy. Sci Total Environ 2021;775:145826.
[195] Havlík P, Valin H, Herrero M, Obersteiner M, Schmid E, Rufino MC, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions. Proc Natl Acad Sci 2014;111:3709–14.
[196] Frank S, Beach R, Havlík P, Valin H, Herrero M, Mosnier A, et al. Structural change as a key component for agricultural non-CO_2 mitigation efforts. Nat Commun 2018;9(1):1060.
[197] Casey JA, Kim BF, Larsen J, Price LB, Nachman KE. Industrial food animal production and community health. Curr Environ Health Rep 2015;2(3):259–71.
[198] Capper JL, Cady RA, Bauman DE. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. J Anim Sci 2009;87(6):2160–7.
[199] Fischer A, Edouard N, Faverdin P. Precision feed restriction improves feed and milk efficiencies and reduces methane emissions of less efficient lactating Holstein cows without impairing their performance. J Dairy Sci 2020;103(5):4408–22.
[200] Patra AK. Enteric methane mitigation technologies for ruminant livestock: a synthesis of current research and future directions. Environ Monit Assess 2012;184(4):1929–52.
[201] Gill M, Smith P, Wilkinson JM. Mitigating climate change: the role of domestic livestock. Animal 2010;4(3):323–33.
[202] Stein LY, Lidstrom ME. Greenhouse gas mitigation requires caution. Science 2024;384:1068–9.
[203] Altermann E, Schofield LR, Ronimus RS, Beattie AK, Reilly K. Inhibition of rumen methanogens by a novel archaeal lytic enzyme displayed on tailored bionanoparticles. Front Microbiol 2018;9:2378.
[204] Yáñez-Ruiz DR, Abecia L, Newbold CJ. Manipulating rumen microbiome and fermentation through interventions during early life: a review. Front Microbiol 2015;6:1133.
[205] Arndt C, Hristov AN, Price WJ, McClelland SC, Pelaez AM, Cueva SF, et al. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. Proc Natl Acad Sci 2022;119(20):e2111294119.
[206] Beauchemin KA, Ungerfeld EM, Abdalla AL, Alvarez C, Arndt C, Becquet P, et al. Invited review: current enteric methane mitigation options. J Dairy Sci 2022;105(12):9297–326.
[207] Guo Y, Ryan U, Feng Y, Xiao L. Association of common zoonotic pathogens with concentrated animal feeding operations. Front Microbiol 2022;12:810142.
[208] Klopatek SC, Marvinney E, Duarte T, Kendall A, Yang X, Oltjen JW. Grass-fed vs. grain-fed beef systems: performance, economic, and environmental trade-offs. J Anim Sci 2022;100:skab374.
[209] Bouwman L, Goldewijk KK, Van Der Hoek KW, Beusen AHW, Van Vuuren DP, Willems J, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900 – 2050 period. Proc Natl Acad Sci 2013;110(52):20882–7.
[210] Velthof GL, Losada JM. Calculation of nitrous oxide emission from agriculture in the Netherlands: update of emission factors and leaching fraction. Report. Denver: Alterra; 2011.
[211] Kacprzak M, Malińska K, Grosser A, Sobik-Szołtysek J, Wystalska K, Drózdz D, et al. Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies-environmental aspects. Crit Rev Environ Sci Technol 2023;53(8):914–38.
[212] Hoang HG, Thuy BTP, Lin C, Vo DVN, Tran HT, Bahari MB, et al. The nitrogen cycle and mitigation strategies for nitrogen loss during organic waste composting: a review. Chemosphere 2022;300:134514.
[213] Wang S, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: a review. Bioresour Technol 2018;248:13–9.
[214] Clarke WP. Cost-benefit analysis of introducing technology to rapidly degrade municipal solid waste. Waste Manag Res 2000;18:510–24.
[215] Herrero M, Havlik P, Valin H, Notenbaert A, Rufino MC, Thornton PK, et al. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. Proc Natl Acad Sci 2013;110:20888–93.
[216] Wang M, Zhang S, Guo X, Xiao L, Yang Y, Luo Y, et al. Responses of soil organic carbon to climate extremes under warming across global biomes. Nat Clim Chang 2024;14(1):98–105.
[217] Spohn M, Bagchi S, Biederman LA, Borer ET, Bråthen KA, Bugalho MN, et al. The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. Nat Commun 2023;14(1):6624.
[218] Ren S, Terrer C, Li J, Cao Y, Yang S, Liu D. Historical impacts of grazing on carbon stocks and climate mitigation opportunities. Nat Clim Chang 2024;14(4):380–6.
[219] Yang X, Xiong J, Du T, Ju X, Gan Y, Li S, et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. Nat Commun 2024;15(1):198.
[220] Bai Y, Cotrufo MF. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. Science 2022;377:603–8.
[221] Smith P, Adams J, Beerling DJ, Beringer T, Calvin KV, Fuss S, et al. Land management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the sustainable development goals. Annu Rev Environ Resour 2019;44(1):255–86.
[222] Zheng B, Ciais P, Chevallier F, Yang H, Canadell JG, Chen Y, et al. Record-high CO_2 emissions from boreal fires in 2021. Science 2023;379:912–7.
[223] van der Velde IR, van der Werf GR, Houweling S, Maasakkers JD, Borsdorff T, Landgraf J, et al. Vast CO_2 release from Australian fires in 2019–2020 constrained by satellite. Nature 2021;597(7876):366–9.
[224] Smith P, Davis SJ, Creutzig F, Fuss S, Minx J, Gabrielle B, et al. Biophysical and economic limits to negative CO_2 emissions. Nat Clim Chang 2016;6(1):42–50.
[225] Schmidt HP, Kammann C, Hagemann N, Leifeld J, Bucheli TD, Sánchez Monedero MA, et al. Biochar in agriculture—a systematic review of 26 global meta-analyses. Glob Change Biol Bioenergy 2021;13(11):1708–30.
[226] Azzi ES, Karltun E, Sundberg C. Prospective life cycle assessment of large scale biochar production and use for negative emissions in Stockholm. Environ Sci Technol 2019;53:8466–76.
[227] Lehmann J, Cowie A, Masiello CA, Kammann C, Woolf D, Amonette JE, et al. Biochar in climate change mitigation. Nat Geosci 2021;14(12):883–92.
[228] Weng ZH, Van Zwieten L, Singh BP, Kimber S, Morris S, Cowie A, et al. Plant biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system. Soil Biol Biochem 2015;90:111–21.
[229] Weng ZH, Van Zwieten L, Singh BP, Tavakkoli E, Kimber S, Morris S, et al. The accumulation of rhizodeposits in organo-mineral fractions promoted biochar-induced negative priming of native soil organic carbon in Ferralsol. Soil Biol Biochem 2018;118:91–6.
[230] Fang Y, Singh B, Singh BP. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils. Soil Biol Biochem 2015;80:136–45.
[231] Luo L, Wang J, Lv J, Liu Z, Sun T, Yang Y, et al. Carbon sequestration strategies in soil using biochar: advances, challenges, and opportunities. Environ Sci Technol 2023;57:11357–72.
[232] Lyu H, Zhang H, Chu M, Zhang C, Tang J, Chang SX, et al. Biochar affects greenhouse gas emissions in various environments: a critical review. L Degrad Dev 2022;33:3327–42.
[233] Borchard N, Schirrmann M, Cayuela ML, Kammann C, Wrage-Mönnig N, Estavillo JM, et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N_2O emissions: a meta-analysis. Sci Total Environ 2019;651:2354–64.
[234] Nelissen V, Saha BK, Ruysschaert G, Boeckx P. Effect of different biochar and fertilizer types on N_2O and NO emissions. Soil Biol Biochem 2014;70:244–55.
[235] Woolf D, Amonette JE, Street-Perrott FA, Lehmann J, Joseph S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nat Commun 2010;1(1):56.
[236] Ye L, Camps-Arbestain M, Shen Q, Lehmann J, Singh B, Sabir M. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: a meta-analysis of field studies using separate controls. Soil Use Manage 2020;36(1):2–18.
[237] Dai Y, Zheng H, Jiang Z, Xing B. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. Sci Total Environ 2020;713:136635.
[238] Deng X, Teng F, Chen M, Du Z, Wang B, Li R, et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China. Nat Commun 2024;15(1):1085.
[239] Theurl MC, Lauk C, Kalt G, Mayer A, Kaltenegger K, Morais TG, et al. Food systems in a zero-deforestation world: dietary change is more important than intensification for climate targets in 2050. Sci Total Environ 2020;735:139353.
[240] Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. Nature 2018;562(7728):519–25.
[241] Arrieta EM, Gonzalez AD. Impact of current, national dietary guidelines and alternative diets on greenhouse gas emissions in Argentina. Food Policy 2018;79:58–66.
[242] Drews M, Larsen MAD, Peña Balderrama JG. Projected water usage and land use-change emissions from biomass production (2015 – 2050). Energy Strateg Rev 2020;29:100487.
[243] Esteve-Llorens X, Dias AC, Moreira MT, Feijoo G, González-García S. Evaluating the Portuguese diet in the pursuit of a lower carbon and healthier consumption pattern. Clim Change 2020;162(4):2397–409.
[244] Kanter R, Caballero B. Global gender disparities in obesity: a review. Adv Nutr 2012;3(4):491–8.
[245] Ivanova D, Barrett J, Wiedenhofer D, Macura B, Callaghan M, Creutzig F. Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. Environ Res Lett 2020;15(9):093001.
[246] Smith P. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? Glob Change Biol 2014;20(9):2708–11.
[247] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Food wastage

footprint full-cost accounting. Final Report. Rome: FAO; 2014.
[248] Papargyropoulou E, Lozano R, Steinberger JK, Wright N, bin Ujang Z. The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. J Clean Prod 2014;76:106–15.
[249] Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science 2018;360:987–92.
[250] Xue L, Liu X, Lu S, Cheng G, Hu Y, Liu J, et al. China's food loss and waste embodies increasing environmental impacts. Nat Food 2021;2(7):519–28.
[251] Guo Y, Tan H, Zhang L, Liu G, Zhou M, Vira J, et al. Global food loss and waste embodies unrecognized harms to air quality and biodiversity hotspots. Nat Food 2023;4(8):686–98.
[252] Li Y, He P, Shan Y, Li Y, Hang Y, Shao S, et al. Reducing climate change impacts from the global food system through diet shifts. Nat Clim Chang 2024;14(9):943.
[253] Behnassi M, El Haiba M. Implications of the Russia-Ukraine war for global food security. Nat Hum Behav 2022;6(6):754–5.
[254] Fuchs R, Alexander P, Brown C, Cossar F, Henry RC, Rounsevell M. Why the US-China trade war spells disaster for the Amazon. Nature 2019; 567(7749): 451–4.
[255] Bajželj B, Richards KS, Allwood JM, Smith P, Dennis JS, Curmi E, et al. Importance of food-demand management for climate mitigation. Nat Clim Chang 2014;4(10):924–9.
[256] Varshney RK, Singh VK, Kumar A, Powell W, Sorrells ME. Can genomics deliver climate-change ready crops? Curr Opin Plant Biol 2018;45:205–11.
[257] Varshney RK, Ojiewo C, Monyo E. A decade of Tropical Legumes projects: development and adoption of improved varieties, creation of market-demand to benefit smallholder farmers and empowerment of national programmes in sub-Saharan Africa and South Asia. Plant Breed 2019;138(4):379–88.
[258] Brozynska M, Furtado A, Henry RJ. Genomics of crop wild relatives: expanding the gene pool for crop improvement. Plant Biotechnol J 2016;14(4):1070–85.
[259] Minoli S, Jägermeyr J, Asseng S, Urfels A, Müller C. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. Nat Commun 2022;13(1):7079.
[260] Sloat LL, Davis SJ, Gerber JS, Moore FC, Ray DK, West PC, et al. Climate adaptation by crop migration. Nat Commun 2020;11(1):1243.
[261] Xie W, Zhu A, Ali T, Zhang Z, Chen X, Wu F, et al. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China. Nature 2023;616(7956):300–5.
[262] Benitez-Alfonso Y, Soanes BK, Zimba S, Sinanaj B, German L, Sharma V, et al. Enhancing climate change resilience in agricultural crops. Curr Biol 2023; 33(23):R1246–61.
[263] Zhao S, Schmidt S, Gao H, Li T, Chen X, Hou Y, et al. A precision compost strategy aligning composts and application methods with target crops and growth environments can increase global food production. Nat Food 2022;3(9):741–52.
[264] Folberth C, Khabarov N, Balkovič J, Skalský R, Visconti P, Ciais P, et al. The global cropland-sparing potential of high-yield farming. Nat Sustain 2020;3(4): 281–9.
[265] Jägermeyr J, Pastor A, Biemans H, Gerten D. Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation. Nat Commun 2017;8(1):15900.
[266] MacDougall AS, Esch E, Chen Q, Carroll O, Bonner C, Ohlert T, et al. Widening global variability in grassland biomass since the 1980s. Nat Ecol Evol 2024;8:1877–88.
[267] Rivera-Ferre MG, López-i-Gelats F, Howden M, Smith P, Morton JF, Herrero M. Re-framing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options. Wiley Interdiscip Rev Clim Change 2016;7(6):869–92.
[268] Watson EE, Kochore HH, Dabasso BH. Camels and climate resilience: adaptation in northern Kenya. Hum Ecol 2016;44(6):701–13.
[269] Godde CM, Mason-D'Croz D, Mayberry DE, Thornton PK, Herrero M. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. Glob Food Secur 2021;28:100488.
[270] Klenk N, Fiume A, Meehan K, Gibbes C. Local knowledge in climate adaptation research: moving knowledge frameworks from extraction to co-production. Wiley Interdiscip Rev Clim Change 2017;8(5):e475.
[271] Aggarwal PK, Jarvis A, Campbell BM, Zougmoré RB, Khatri-Chhetri A, Vermeulen SJ, et al. The climate-smart village approach: framework of an integrative strategy for scaling up adaptation options in agriculture. Ecol Soc 2018;23(1):14.
[272] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Climate smart agriculture and the Sustainable Development Goals: mapping interlinkages, synergies and trade-offs and guidelines for integrated implementation. Report. Rome: FAO; 2019.
[273] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Crops and climate change impact briefs—climate-smart agriculture for more sustainable, resilient, and equitable food systems. Report. Rome: FAO; 2022.
[274] Biswas A, Maddocks I, Dhar T, Dube L, Dutta A, Talukder B, et al. Guiding sustainable transformations in food systems. Nat Rev Earth Environ 2024;5:607–8.
[275] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P. Climate-smart soils. Nature 2016;532(7597):49–57.
[276] Srinivasa Rao C, Gopinath KA, Prasad JVNS, Prasannakumar SAK, et al. Climate resilient villages for sustainable food security in tropical India: concept, process, technologies, 2016; 140: 101–214. institutions, and impacts. Adv Agron
[277] Nabuurs GJ, Delacote P, Ellison D, Hanewinkel M, Hetemäki L, Lindner M. By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double through climate smart forestry. Forests 2017;8(12):484.
[278] Verkerk PJ, Costanza R, Hetemäki L, Kubiszewski I, Leskinen P, Nabuurs GJ, et al. Climate-smart forestry: the missing link. For Policy Econ 2020; 115: 102164.
[279] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Climate smart agriculture case studies 2021—projects from around the world. Report. Rome: FAO; 2021.
[280] Acevedo M, Pixley K, Zinyengere N, Meng S, Tufan H, Cichy K, et al. A scoping review of adoption of climate-resilient crops by small-scale producers in low and middle-income countries. Nat Plants 2020;6:1231–41.