中美减少食物浪费与与改善化肥效率

中美减少食物浪费与改善化肥效率

Whendee L. Silver（温迪·西尔弗），加州大学伯克利分校*
Tyler L. Anthony（泰勒·安东尼），加州大学伯克利分校*
Charlotte Kwong（夏洛特·邝），加州大学伯克利分校*
Alexandra Ponomareva（亚历山德拉·波诺马廖娃），加州大学伯克利分校*
Tibisay Perez（蒂比赛·佩雷斯），加州大学伯克利分校 *

* 机构名称仅用于注明作者所在单位。本文仅代表作者个人观点，并不代表其所在机构观点。

背景与挑战

食物系统有巨大的潜力为应对气候变化做出贡献，同时满足全球食物需求，减少对无机肥的依赖，改善土壤和人类健康，并实现可持续发展目标。目前，食物系统是全球温室气体排放的主要来源之一。2015年，食物系统向大气排放180亿吨二氧化碳当量，占全球总排放量的34%（Crippa等，2021）。中国在食物系统排放中所占的比重最高（13.5%），其次分别是印尼（8.8%）和美国（8.2%）。

食物系统减少排放最大的机会在于减少食物损失和浪费（FLW）和进行重新利用，并提高氮肥施用效率（Read等，2020）。我们将食物损失定义为由于存放、基础设施、包装或营销方面的农业或技术限制，导致可食用食物无意中未被提供给消费者。食物浪费是指可食用食物被消费者丢弃（世界资源研究所，2013）。每年全球损失或浪费的食物约有13亿吨，占供人类消费的食物总生产量的30%（粮食及农业组织，2015年；联合国环境署，2021年；Muth等，2019）。1990年（7.64亿公吨二氧化碳当量）至2018年（9.96亿公吨二氧化碳当量）期间，食物损失和浪费导致的全球温室气体排放增加了30%（Tubiello等，2021）。中美两国因食物浪费造成的温室气体排放，占食物系统总排放量的10%以上（Crippa等，2021）。联合国可持续发展目标之一是解决食物浪费问题，提出到2030年将食物浪费减少50%（联合国，2015）。减少食物损失和浪费并进行重新利用，能够产生许多协同效益，包括减少食物短缺、饥饿和营养不良以及相关疾病，还有助于减缓气候变化（Willet等，2019年；Chen等，2020）。

食物损失和浪费中隐含的碳和营养物质会导致土壤耗尽必要资源，并迫使农民为维持农业产量而使用化肥，进而加剧气候变化。无机肥又被称为合成肥料或化学肥料，通常使用石油或天然气密集型工艺制成，尤其是合成氮肥。管理食物损失和浪费的现状，导致数以百万吨计的营养元素从农业土壤中流失（Silver等，2021）。收获的农产品从农场运输到国内和国际市场，这些市场通常集中在城市中心，而不是农业区（Kaza等，2018）。将损失和浪费的食物制成土壤添加物（名为改良剂），如堆肥（食物和其他有机废弃物经过加工，在露天堆料中变成缓释肥料）或厌氧消化产

生的沼渣（食物和其他有机废弃物在无氧环境下受控分解），可以提供一种将已收获的碳和营养物质重新制成有机肥的机制，同时减少温室气体排放。这不仅有助于抵消施用无机肥的影响，还能增加土壤碳汇（Kutos等，媒体报道），改善水土保持能力和相关耐旱性（Flint等，2018），减少水土流失（Kutos等，媒体报道），降低总体化肥需求（DeLonge等，2013），改善土壤的氮保留能力，并减少一氧化二氮排放。一氧化二氮是一种强大的温室气体，其全球变暖潜势是二氧化碳的298倍（政府间气候变化专门委员会，2007）。厌氧消化还有一种附加效益，即产生替代燃料（Levis与Barlaz，2011）。

对于维持全球食品供应链和养育全球人口至关重要。为了满足需求，在1970年至2020年间，全球无机氮肥施用量增长了超过350%（粮食和农业数据，2022）。提高化肥施用效率，减少使用化石燃料密集型无机氮肥，减少施肥产生的一氧化二氮排放，具有巨大潜力。氮肥施用量通常超过最大程度提高作物产量所需要的氮，导致施用氮素从系统中流失。过量的氮可能最终进入地下水，污染供水，或进入地表径流导致藻类大量繁殖，形成近海缺氧区（Albornoz，2016；Erisman等，2013；Martinez-Dalmau等，2018）。全球估算显示，过度施肥导致50%的添加氮损失（Zhang等，2021）。

过度施肥给控制二氧化碳排放带来了沉重负担。无机氨基氮肥生产属于能源密集型生产过程，主要使用化石燃料，占全球能源消费量的2%和全球天然气供应量的4%，每年排放4.5亿公吨二氧化碳当量（国际能源署，2021）。2021年，中国生产了全球26%的氨肥，美国的氨肥产量占9%（美国地质调查局，2022）。过度施肥还产生较高的可避免一氧化二氮排放。约1%的施用氮素以一氧化二氮的形式流失（政府间气候变化专门委员会，2006）。农业占全球43%的一氧化二氮排放量，主要是由于在耕地施用的氮肥（Tian等，2020）。在提高氮肥施用效率的同时，用基于食物和粪便的有机堆肥或厌氧消化产生的沼渣肥料取代无机肥，能够大幅减少温室气体排放。

美国的背景与挑战

食物损失和浪费

美国的每年的食物损失和浪费达到7,300万公吨至1.52亿公吨，每年人均造成的食物损失和浪费达到223至468千克，根据最近的估算是全球平均水平的一倍以上（美国环境保护局，2021）。美国供应链中的食物损失和浪费约一半来自消费阶段（35%至61%来自餐厅和家庭），其次是初级生产损失（17%至37%）、零售业（6%至27%）和流通与加工（5%至21%）阶段（美国环境保护局，2021）。对市政固体废弃物（MSW）中发现的食物浪费量的分析显示，美国农村和城市的食物浪费率接近（Thyberg等，2015）。美国生产的食物过剩。模拟估算结果显示，美国每天生产食物为人均3,796至4,000卡路里，几乎是平均摄入量（每天2,081卡路里）的两倍（美国环境保护局，2021，以及其中的参考文献）。这导致美国的食物损失和浪费更加严重。由于温室气体排放、耕地以及对淡水、氮和磷的使用，按人均水平计算，美国在消费阶段浪费的食物具有全球最大的潜在环境足迹（Chen等，2020）。在美国管理食物损失和浪费最重要的途径是垃圾填埋场（56%）、受控燃烧（12%）、共消化/厌氧消化用于能源生产（8%）、下水道/污水处理（6%）和堆肥（4%）（美国环境保护局，2020）。美国每年产生甲烷排放1.09亿公吨二氧化碳当量，其中垃圾填埋场中的食物废弃物产生的排放为2,000万至4,600万公吨二氧化碳当量[1]（美国环境保

[1] 计算结果基于美国56%的食物废弃物在垃圾填埋场中处理，按照70%的含水量进行修正，并且仅使用未收集甲烷排放率每干吨1,800千克二氧化碳当量（Lee等，2017）。

护局，2022）。与其他有机物（木材、纸和庭院修剪等）相比，在垃圾填埋场中处理食物废弃物是易降解有机碳的最大排放源，因此排放系数最高（每吨干物质2,603至2,708千克二氧化碳当量）（Lee等，2017）。除了垃圾填埋场排放以外，食物损失和浪费每年额外产生1.7亿公吨二氧化碳当量排放（美国环境保护局，2020）。

化肥

2020年，农业土地产生一氧化二氮排放3.16亿公吨二氧化碳当量，相当于美国一氧化二氮总排放量的74%，占美国温室气体总排放量的5.3%（美国环境保护局，2022）。其中约68%的直接排放来自耕地，其他直接排放来自牧场。2020年，耕地施用的氮肥排放一氧化二氮6,400万公吨二氧化碳当量（美国环境保护局，2022）。美国每年施用的无机氮肥预计为1,100万公吨至1,600万公吨（美国农业部，2015；Sellars，2021；粮食和农业数据，2022），其中86%的无机氮肥在国内生产（美国地质调查局，2022）。美国是全球第四大无机氮肥生产国（化肥研究所，2019）。制氨大部分位于路易斯安那州、俄克拉荷马州和德克萨斯州的大型天然气矿藏附近，因为天然气既是制氨的原材料，也是一种燃料，可以为制氨提供所需的高温和压力（美国地质调查局，2022）。

施用氮肥对于提高全球主要谷物的短期产量至关重要。玉米农业每年使用美国46%的氮肥（美国农业部，2019）。玉米是一种重要作物，可以提供粮食、饲料和燃料，因此对氮改良剂的需求不会下降（Edgerton，2009）。然而，美国所有耕地每年施用的氮肥超过800万公吨（West等，2014），这表明美国有极大的可能性直接减少氮肥施用以及相关温室气体排放。在美国中西部、西部山区和西部20个州的县级热点地区，虽然只有美国24%的耕地，却占到氮肥过度施用量的约63%（Roy等，2021）。重要的是，这些地区减少使用氮肥不太可能降低作物产量，这意味着立即减少施用氮肥，对粮食产量的影响最小。

2022年，美国发起了“全球化肥挑战”，旨在推动采用创新、替代性和高效的化肥施用实践，以减少化肥和天然气供应面临的压力，提高全球化肥可用性，减少一氧化二氮排放，并改善全球粮食安全（白宫，2022）。全球化肥挑战计划在埃及召开第27届联合国气候变化大会之前融资1亿美元，用于支持研究、验证和培训，以帮助化肥用量较高的国家采用高效营养管理和替代肥料来源。

中国的背景与挑战

食物损失和浪费

作为全世界人口最多的国家，中国也是食物损失和浪费最多的国家。中国造成了全球四分之一的食物损失和浪费，这个比例在1992年到2013年间从5%提高到27%（Gustavsson等，2011年；Lopez Barerra&Hertel，2021）。中国的食物总生产量为13亿吨，其中食物损失和浪费量达到约3.49亿±400万公吨（Xue等，2021）。在过去二十年间，食物损失和浪费产生的温室气体排放量增加：在2001年至2018年间，处理损失和浪费的食物产生的排放增加了一倍，从6,400万±1,400万公吨二氧化碳当量增加到1.37亿±2,600万公吨二氧化碳当量（Zhang等，2020）。

中国食物损失和浪费最大一部分来自流通和存储等消费前阶段，消费后阶段（家庭与餐厅）食物浪费占全国食物损失和浪费总量的17%（Xue等，2021）。值得注意的是，与大多数富裕国家相比，中国和其他新兴经济体在消费后阶段产生的食物损失和浪费所占的比例较小。尤其是在家庭食

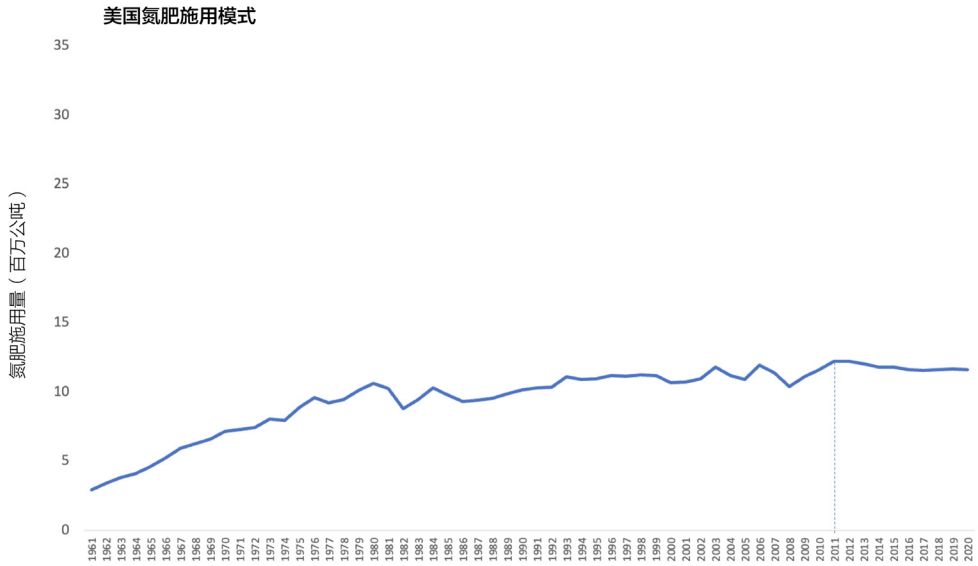
物损失和浪费方面。餐厅食物损失和浪费占中国总食物浪费量的13%，而厨房食物损失和浪费仅占4%，远低于富裕国家的平均水平（40%至70%）（Xue等，2021）。

虽然中国的食物损失和浪费量全球最高，但按家庭平均计算排在中等水平，人均每年产生的食物损失和浪费量约为23至64千克（Song等，2015；联合国环境署，2021），低于全球平均人均水平74千克/年。城市和农村在食物损失和浪费方面也存在差异。城市每年产生的食物损失和浪费约为每人150千克，而一项对山东省农村的研究发现，农村家庭人均产生的食物损失和浪费只有21千克（Zhang等，2020；Li等，2021）。在食物损失和浪费方面的巨大差异意味着，中国在城市环境中改变行为和管理模式，能够产生最大的效益。食物损失和浪费与饮食习惯和收入模式有关。中国健康与营养调查在1991年至2009年间从37,000个家庭获得的数据显示，尽管平均收入增加，但家庭人均食物损失和浪费减少了20%，收入增加趋势通常与食物损失和浪费增加相关（Qi等，2020；Chalak等，2019）。中国人的外用餐比例持续增加（Wang等，2017；Li等，2022）。餐厅用餐产生的每一餐食物损失和浪费超过居家用餐（Qi等，2020），因此在外用餐可能成为控制食物损失和浪费相关排放更大的问题。全国49%损失和浪费的食物被焚烧，41%被送入垃圾填埋场。剩余10%经过厌氧消化（Davison等，2022；Liu等，2022）。

化肥

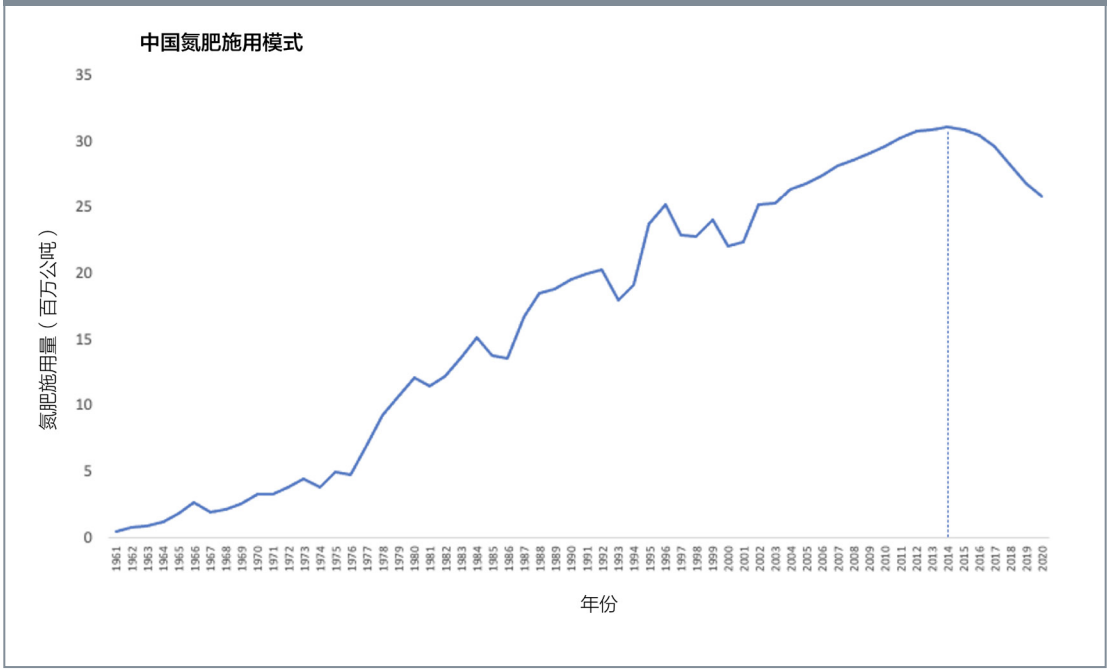
中国是全球最大的无机氮肥生产国和消费国，中国的无机氮肥施用量占全球供应量的30%以上（Wang等，2022年；Zhang等，2013）。2020年，中国共施用无机氮肥1,830万公吨（2021年中国统计年鉴）。虽然中国平均氮肥施用强度近几年有所下降（见图1），但依旧是全球氮肥施用强度最高的国家之一，在2014年达到219千克/公顷的最高点，2020年降至190千克/公顷，是全球平均水平的2.6倍（粮食和农业数据，2022）。尤其谷物农业是无机氮肥的重要应用领域，2015年，山地小麦种植户平均施用无机氮肥222千克/公顷，超过了110至150千克/公顷的最佳施用率（Chai等，2019年；Chai等，2013）。

图1：美国（上图）和中国（下图）的氮肥使用模式。虚线代表化肥使用达峰年份。



资料来源：粮食及农业组织统计数据

图1继续：美国（上图）和中国（下图）的氮肥使用模式。虚线代表化肥使用达峰年份。



资料来源：粮食及农业组织统计数据

在1980年至2000年间，施用氮肥产生的一氧化二氮每年增长270万公吨二氧化碳当量，从每年2,300万公吨二氧化碳当量增加到7,500万公吨二氧化碳当量（Zou等，2010）。中国约6%的温室气体排放和57%的农业温室气体排放来自无机肥施用，且绝大多数排放来自氮肥（Wu等，2021）。2018年，中国化肥和粪肥产生的排放分别占全球一氧化二氮和氨气排放的20%和23%（Ma等，2021）。高排放率的主要原因是玉米、水稻和大米施用的化肥，这三类作物施用的化肥产生的排放占整体排放量的一半以上，并且覆盖了全国耕地的70%（Wu等，2021；Zhang等，2016a；中国统计年鉴，2021）。中国东部和中部/南部是人口密集的农业区，是主要谷物的重要产区，也是活性氮肥相关排放的热点地区（Ma等，2021）。

为了控制农业径流和温室气体排放的负面环境影响，以及优化农业种植的能源使用、成本和氮肥施用效率，中国农业部已经逐步取消了化肥生产补贴，并在2015年颁布了《化肥施用量零增长行动方案》。之后，氮肥施用量从2015年的2,360万公吨下降到2020年的1,830万公吨，平均每年减少100万公吨（中国统计年鉴，2021；Ji等，2020；Jin & Zhou，2018；Ju等，2016）。

减排潜力

发展循环经济

将损失和浪费的食物从高排放废弃物流中转移，用于堆肥或厌氧消化，有潜力减少垃圾填埋场排放，并提供一种富含营养物质的缓释有机肥，可以减少无机氮肥排放，并提高土壤的碳捕集与封存水平。表1提供了与损失和浪费的食物捕集使用有关的潜在温室气体减排示例。美国和中国的农田停止过度施肥，可分别减少土壤产生的一氧化二氮排放3,200万公吨和3,700万公吨二氧化碳当量。如果损失和浪费的食物经过堆肥处理或厌氧消化后作为肥料，中国和美国可分别将无机氮肥需求降低到350万公吨和490万公吨氮素。这将使中国每年减少农田一氧化二氮排放6,000万公吨二氧

化碳当量，美国可减少4,000万公吨二氧化碳当量。

减少施用氮肥，有助于化肥生产行业减少化石燃料消耗。最近的一项估算认为，中国化肥生产产生的排放为1.61亿±3,000万公吨二氧化碳当量，美国化肥生产产生的排放为4,000万±400万公吨二氧化碳当量（Menegat等，2022）。如果将无机氮肥施用量减少50%，中美两国可分别减少化石燃料排放8,000万公吨和2,000万公吨二氧化碳当量。停止过度施肥并以对损失和浪费的食物进行堆肥或厌氧消化制成的肥料取代无机氮肥，理论上可为中国减少排放9,700万公吨二氧化碳当量，为美国减少排放1,100万公吨二氧化碳当量（见表1）。总之，这两项措施可分别为中国和美国减少排放1.57亿公吨和5,100万公吨二氧化碳当量。

停止将浪费和损失的食物送入垃圾填埋场和焚烧，可以实现额外减排。对浪费和损失的食物进行堆肥处理，可将与垃圾填埋有关的甲烷排放减少约61%至82%（Perez等）。虽然中美两国均未在国家层面对食物损失和浪费对垃圾填埋场产生的甲烷排放的贡献率进行量化，但值得注意的是，停止将损失和浪费的食物进行垃圾填埋处理能够大幅减少排放。停止将损失和浪费的食物进行垃圾填埋和焚烧处理，增加通过厌氧消化处理的比例，到2050年将使中国减少排放约3,380万公吨二氧化碳当量（Liu等，2022）。

表1：重新利用损失和浪费的食物用于氮肥以及取代无机氮肥（INF）的排放量和温室气体减排潜力。单位：百万公吨（MMT）

农业	**中国**	**美国**	**单位**
损失和浪费食物中的氮素1	5.5	1.6	百万公吨氮/年
以无机氮肥形式施加的氮	18	13	百万公吨氮/年
施用无机氮肥的土地产生的一氧化二氮排放	75	64	百万吨二氧化碳当量/年
无机氮肥施用量减少50%	9	6.5	百万公吨氮/年
无机氮肥施用量减少50%	37.5	32	百万吨二氧化碳当量/年
如果施用损失和浪费的食物需要的无机氮肥	3.5	4.9	百万公吨氮/年
减少无机氮肥+施用损失和浪费的食物制成的肥料所产生的一氧化二氮排放[1,2]	14.6	24.1	百万公吨二氧化碳当量/年
减少无机氮肥+施用损失和浪费的食物制成的肥料的减排量	**60**	**40**	百万吨二氧化碳当量/年
生产	**中国**	**美国**	单位
无机氮肥二氧化碳排放	161	40	百万吨二氧化碳当量/年
50%无机氮肥产量	80.5	20	百万吨二氧化碳当量/年
50%无机氮肥产量和施用损失和浪费的食物制成的肥料	64.4	28.8	百万吨二氧化碳当量/年
减少无机氮肥+施用损失和浪费的食物制成的肥料的减排量	**97**	**11**	**百万吨二氧化碳当量/年**
减少无机氮肥+施用损失和浪费的食物制成的肥料的总减排量	**157**	**51**	**百万吨二氧化碳当量/年**

1. 假设：100%回收损失和浪费的食物；食物损失和浪费所产生的耕地一氧化二氮排放可以忽略不计；不考虑堆肥或厌氧消化产生的排放，或者从高排放废弃物流中转移损失和浪费的食物所减少的排放。
2. 假设耕地施用损失和浪费的食物制成的肥料产生的一氧化二氮排放可以忽略不计（Ryals & Silver，2013）。

在对损失和浪费的食物进行堆肥或厌氧消化处理时，将牲畜粪便作为原料，有助于减少对无机肥

的需求，并额外减少温室气体排放。未经过处理的牲畜粪便是美国最常用的有机肥（美国环境保护局，2022）。在美国耕地和牧场使用未经处理的粪肥，每年排放一氧化二氮2,630万公吨二氧化碳当量，相当于耕地施用有机肥所产生的的一氧化二氮排放量的41%。在施肥之前，粪肥管理（以存放于污水贮留池为主）是甲烷（5,960万公吨二氧化碳当量）和一氧化二氮（1,970万公吨二氧化碳当量）的重要排放源（美国环境保护局，2022）。在美国，与目前的粪肥管理策略相比，将50%的土地施用粪肥用于堆肥，可将排放量减少15%至46%，从1,200万公吨二氧化碳当量降至3,700万公吨二氧化碳当量[2]。使用牲畜粪便进行厌氧消化，不考虑生成的燃料，也能实现类似减排效果

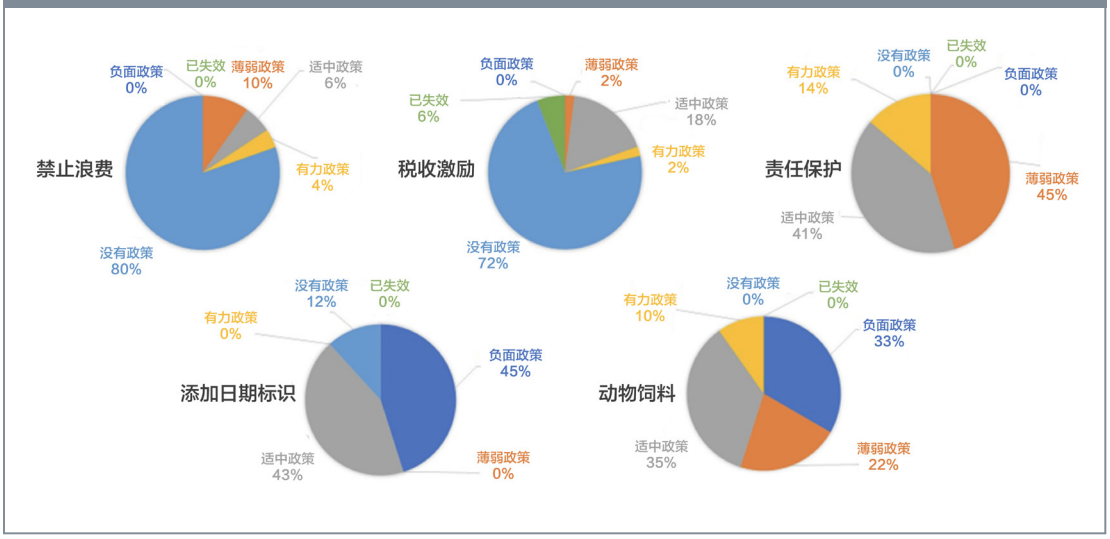
最后，将损失和浪费的食物经过堆肥或厌氧消化处理后在土地中施用，可以增加土壤碳汇（Ryals & Silver，2013；Kutos等，媒体报道）。最近一项评估发现，在牧场施用堆肥能够使植物生长速度提高43±13%，使土壤碳汇增加50±22%；即使在施用一次之后也能得到稳定的效果（Kutos等，媒体报道）。在农作物种植中也能看到类似的结果（如Tautges等，2019）。虽然施用堆肥所带来的土壤碳汇和相关土壤健康效益在全国无法量化，但可以为将损失和浪费的食物重新用于农业管理的项目创造附加值。

给美国的建议

1. 减少食物损失和浪费以及增加回收

目前美国没有针对食物损失和浪费的联邦废弃物管理规定，只有20%的州实施了相关法律（见图2），但美国确立了一个便于立法的框架。美国从2015年起执行的联邦计划，目标是到2030年将食物损失和浪费减少一半（美国环境保护局，2015）。联邦、州和城市法规将以食物损失和浪费为目标，包括食品日期标记规定、责任保护、动物饲料税务激励政策、有机废弃物分配禁令和循环再利用法律等（RdFED 2022）。虽然有机废弃物禁令法律通常被认为是最大程度减少食物损失和浪费最有效的措施，但美国大部分地区（80%）在州一级并没有执行相关立法（见图2）。只有10个州颁布了减少食物损失和浪费的法律，其中加州和佛蒙特州的政策力度最

图2：美国颁布食物浪费与损失评估法律的州的比例



（数据来自ReFED，2022，https://policyfinder.refed.org/）。

[2] 使用牛粪便的排放系数每吨废弃物28至250千克二氧化碳当量，总排放量在300万至2,800万公吨二氧化碳当量之间，（Walling与Vaneeckhaute，2020）。

大。联邦法律为了激励商业部门捐赠食物，还提供了减税和责任保护等措施。然而，大多数州（75%）并没有执行税收法律，而且责任法较为薄弱（45%的州）或适中（41%的州）。提供税收激励和加强责任保护，有助于在保障食品安全的同时，鼓励捐赠者和非营利组织向有需要的人们发放食物。扩大这些法律的执行范围能够带来巨大改变，可以最大程度减少全国商业部门的食物损失和浪费（见图2）。

执行要求添加日期标识的法律，是最大程度减少商业部门食物损失和浪费的另外一种方法。虽然美国尚未颁布相关联邦法律，但个别州已经要求在食物上添加“最佳食用日期”。制造商可使用大多数标识表示新鲜度，而不是安全性。美国近一半的州（见图2）制定了负面政策（如禁止出售或捐赠超过标识日期的食物）；修改政策以方便捐赠可食用食物，能够大幅减少商业部门的食物损失和浪费。将浪费的食物作为动物饲料，可以减少食物处理。美国的联邦法律和大多数州（70%）的规定要求采取安全措施（如加热处理），以防止与使用浪费食物有关的动物疾病。该项法律可以扩展到尚未执行相关规定的另外30%的州。联邦层面的学校食物回收、食物捐赠改善和零食物浪费等政策提案，目前仍在修订当中（ReFed 2022）。美国环境保护局的食物回收分级制度强调了三方面的措施：预防（减少采购）、转移和最后一步处置（垃圾填埋与焚烧）（美国环境保护局，2021）。为了更好地量化食物损失和浪费转移的相关影响，美国环境保护局还在温室气体排放清单中纳入了六个新的食物浪费管理路径（动物饲料、生物性材料/生物化学加工、共消化/厌氧消化、堆肥/厌氧消化、受控燃烧和捐赠）（US EPA, 2020）。减少食物损失和浪费的其他新兴方法包括食物浪费应用程序，用于餐厅和零售业分享过剩食物，例如英国的OLIO（Harvey等，2020）。虽然这些方法的大范围影响尚未经过评估，但如果不执行制度性措施，它们可能不会产生较大的影响（Hanson与Ahmadi，2022）。

2. 推广堆肥和厌氧消化

分析显示，厌氧消化和堆肥降低与垃圾填埋和燃烧有关的食物损失和浪费产生的排放，有巨大的潜力（Levis & Barlaz，2011；Morris等，2017；Harrison等，2020）。垃圾填埋处理作为一种温室气体排放源，单位食物损失和浪费的排放量达到1,100千克二氧化碳当量（Levis与Barlaz，2011）。将损失和浪费的食物从传统废弃物流中转移用于厌氧消化，预计可将单位食物损失和浪费产生的排放量减少395千克二氧化碳当量，堆肥可减少148千克二氧化碳当量。这些数值并不包括作为肥料的沼渣或堆肥，也没有考虑到土壤碳汇效应，如果将它们考虑在内会进一步增加这些方法可以产生的效益。厌氧消化产生的沼渣也可以作为土壤营养改良剂，尽管通过堆肥系统进行预处理有助于减少一氧化二氮排放。这些替代路径的经济可行性意味着，堆肥处理和“湿法”厌氧消化更适合地方规模和农村设施（每年<50千吨），而“干法”厌氧消化更适合有大量食物损失和浪费的大型城市设施（150至250千吨/）（Badgett & Milbrandt，2021）。在农村地区推行厌氧消化处理，需要完善技术（优化每个质量单位有机物产生的沼气比例、原料预处理、干发酵、添加剂等，Dalke等，2021）。

加州在最大程度减少食物损失和浪费方面取得了巨大进展。加州是美国最大的食物生产州。2018年，加州有机废弃物占总固体废弃物处置量的34%，有44%为食物损失和浪费（CalRecycle，2020a）。590万公吨损失和浪费的食物大多数被垃圾填埋处理。2022年，加州颁布了一项激进政策，要求将75%的有机废弃物从垃圾填埋处理改为替代管理，以及重新使用可食用食物（CalRecycle，2015年；CalRecycle，2020b）。该项目为各州如何采取措施减少排放，并支持食物损失和浪费循环经济，树立了一个良好的榜样。为了增强替代管理能力，加州需要建设新基础设施（见表2）。到2025年，加州预计将产生870万公吨有机废弃物可用于堆肥处理，760

万公吨可进行其他替代管理（CalRecycle，2020b）。为了实现这个目标，加州将：1）提供1.4亿美元拨款和贷款用于建设有机废弃物处理基础设施；2）执行监管框架以促进私营行业投资；3）发布可定制模式特许协议和对各司法管辖区的模式执行规定，以及4）为使用有机废弃物生产的产品扩大市场和增加需求，包括农业生产商。

表2：加州的2025年堆肥、厌氧消化和切削研磨容量预估（单位：百万公吨）

技术	预估预期容量，2025年*	预估必要容量，2025年	差异
堆肥	4.8	8.7	−3.9
厌氧消化	0.9	2.4	−1.5
共消化†	0.2	2.2	−2.0
切削研磨	3.2	3.0	0.2
总计	9.1	16.3	−7.3

(CalRecycle 2020).

* 从垃圾填埋场中转移额外食物废弃物用于堆肥、厌氧消化和切削研磨的估算预期容量。

† 州水资源控制委员会估计，污水处理厂具备共消化至少220万公吨食物废弃物的能力。

3. 减少过度施肥，使用将损失和浪费的食物经堆肥和厌氧消化处理制成的肥料取代化肥

提高氮肥施用效率，并使氮素供应与农作物氮素需求保持一致。实现该目标的路径包括支持技术（精准农业）、监管或财政（针对性补贴）方法，以减少过度施用氮肥。投资精准农业可以开发优化农田化肥施用、限制过度施肥以及维持作物产量的技术（Chlingaryan等，2018）。支持减少氮肥的财政措施包括发放有针对性的补贴，例如国家资源保护局（NRCS）的保护管理计划（国家资源保护局，2017）和环境质量激励计划（国家资源保护局，2017），但目前自愿采用这些补贴管理氮肥施用的情况有限（Kanter & Searchinger，2018）。法律和监管方法，包括根据企业平均燃油经济性（CAFE）标准模拟的项目（Kanter & Searchinger，2018），可能更有成效，因为这些方法为制造商如何在遵守提高氮肥施用效率规定的同时利用其他路径的技术进步，提供了灵活的选择。此外，专注于少量制造商比监管农户更容易监控，在政治上可行性更高，并可以针对具有更大改善潜力的次级市场力（Kanter & Searchinger，2018）。

施用将损失或浪费的食物经堆肥或厌氧消化处理制成的有机废料，可以减少土壤排放和增加碳汇。与无机氮肥相比，将损失和浪费的食物进行堆肥处理所产生的环境效益（通过减少氮损失），有助于进一步减少温室气体排放，提高氮肥施用效率（Ryals等，2015；Swan等，2015）。为了处理损失和浪费的食物，需要建设更多设施才能更好地实现温室气体减排目标。

给中国的建议

1. 减少食物损失和浪费以及增加回收

为了制定减少食物损失和浪费的策略，必须将政府支持的全国食物损失和浪费量化与报告制度标准化（Xue等，2021）。通过政策和倡议提高对餐厅浪费的认识，可能产生极其重要的影响，因

为餐厅浪费在消费后浪费中所占的比例最大（Xue等，2021）。2021年，习近平主席颁布了《中华人民共和国反食品浪费法》（Feng等，2022，联合国环境署，2021）。该项法律禁止在餐厅用餐时超量点餐和浪费。考虑到很大一部分废弃物在消费前阶段产生，因此减少食物损失和浪费的法律还应该考虑到生产、存储和运输过程中的食物损失。

2. 推广堆肥和厌氧消化

将食物废弃物从垃圾填埋场和焚烧处理改为厌氧消化，有助于管理食物废弃物和生成可再生能源，并且可以减少处置损失和浪费食物所产生的总温室气体排放量。在2019年至2040年间，厌氧消化处理能够减少累积排放量19亿公吨二氧化碳当量（与基准情境相比）（Zhang等，2020）。即使只有40%的损失和浪费食物改为厌氧消化处理，从2020年至2050年间，每年可以减少温室气体排放3,380万公吨二氧化碳当量（Liu等，2022）。中国的处理设施没有处理所有损失和浪费的食物的能力（约20%），而且到目前为止，厌氧消化是处理设施最常用的处理方式，截至2015年约占处理容量的76%，堆肥处理所占的比例要小得多（约20%）（Li等，2019）。扩大厌氧消化和堆肥处理能力，有巨大的潜力减少食物损失和浪费的环境影响。

3. 减少过度施肥，使用将损失和浪费的食物经堆肥和厌氧消化处理制成的肥料取代化肥

减少化肥产生的温室气体排放最可行的策略之一是提高化肥的施用效率（Wu等，2021；Van Groenigen等，2010；Ju等，2009）。按照最佳施用率减少无机肥生产和使用，每年可将运输、生产和施用化肥所产生的温室气体排放减少4,200万至7,000万公吨二氧化碳当量（Chai等，2013）。除了最大程度减少过度使用氮肥以外，更新氮肥生产链所使用的技术，可以将中国与无机氮肥有关的温室气体排放每年减少20%至63%，相当于1.02亿至3.57亿公吨二氧化碳当量（Zhang等，2013）。减少排放的潜在途径包括改善煤矿开采业的甲烷回收（煤炭是化肥生产的主要能源），将工厂电源改为天然气发电，并更新制氨使用的机械设备。

合作机会

中美两国有许多合作的机会。制定记录食物损失和浪费的产生情况及其最终目的地的标准化方法，有助于进行对比，并制定令更多人受益的解决方案。两国需要合作制定通过开发技术措施减少氮肥施用和提高氮肥施用效率的战略。开发适用于堆肥和厌氧消化的可扩展解决方案，是一个理想的合作机会。联合科学家、生产商以及城市和农村社区，有助于推广管理食物损失和浪费的可持续替代方案，取代垃圾填埋处理和焚烧。促进供应链发展，以基于损失和浪费食物的化肥取代无机肥的战略，能够大幅减排和除碳。州级战略最好的例子是加州的短寿命气候污染物减排战略。该战略致力于同时减少垃圾填埋场的甲烷排放，并提供一种缓释有机肥以增加加州耕地的土壤碳汇（The Compost-Carbon-Climate Connection，2018）。中美两国之间进行数据共享，在学术和农业研究机构之间开展合作，将使全球食物系统向更气候友好的循环经济成功转型的前景更加光明。

致谢：

作者感谢审稿人James N. Galloway（弗吉尼亚大学）对本报告的大力支持。

参考文献

1. Albornoz, F. (2016). *《过度施用氮肥对农作物的影响评估》*. *《Scientia Horticulturae》*, 205, 79–83. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.026

2. Apodaca, L. . *《氮统计数据与信息|美国地质勘察局》*. 于2022年7月28日检索，网址：https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nitrogen-statistics-and-information

3. Badgett, A., & Milbrandt, A. (2021). *《美国的食物废弃物处置和利用：空间成本效益分析》*. *《清洁生产杂志》*. 314, 128057. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128057

4. 加州资源回收和再利用部 (2020a)，*《2018年加州基于处置设施的固体废弃物特征（DRRR-2020-1666）》*，加州资源回收和再利用部.检索网址：https://www2.calrecycle.ca.gov/Publications/Details/1666

5. 加州资源回收和再利用部 (2020b)，*《SB1383废弃物减少目标进展分析（DRRR-2020-1693）》*，加州资源回收和再利用部.检索网址：https://www2.calrecycle.ca.gov/Publications/Details/1693

6. Chai, R., Niu, Y., Huang, L., Liu, L., Wang, H., Wu, L., & Zhang, Y. (2013). *《中国粮食作物最佳复合氮肥施用率在不同情境下的温室气体减排潜力》*. *《农业生态体系的营养循环》*，96(1), 15–28. https://doi.org/10.1007/s10705-013-9574-9

7. Chai, R., Ye, X., Ma, C., Wang, Q., Tu, R., Zhang, L., & Gao, H. (2019). *《中国合成氮肥生产以及主要山地作物施肥所产生的温室气体排放》*. *《碳平衡与管理》*，14(1), 20. https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9

8. Chalak, A., Abiad, M. G., Diab, M., & Nasreddine, L. (2019). *《家庭食物废弃物产生的决定因素以及其相关热量和营养损失：黎巴嫩案例研究》*. *《PLOS ONE》*,14(12), e0225789. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225789

9. Chen, C., Chaudhary, A., & Mathys, A. (2020). *《全球食物浪费造成的营养与环境损失》*. *《资源、保护与循环利用》*，160, 104912. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104912

10. Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). *《精准农业使用机器学习方法进行农作物产量预测和氮素状态预估》*. *《农业计算机与电子》*, 151, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012

11. Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). *《食物系统占全球人类活动产生的温室气体排放量的三分之一》*. *《自然-食品》*, 2(3), 198–209. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9

12. *《堆肥-碳-气候之间的联系》*，加州资源回收和再利用部 (2018). https://www2.calrecycle.ca.gov/Publications/Download/1336

13. 保护管理计划（CSP）|农场账单报告（2009财年至2020财）|国家资源保护局（2017）2022年8月1日检索，网址：https://www.nrcs.usda.gov/Internet/NRCS_RCA/reports/fb08_cp_cstp.html

14. Dalke, R., Demro, D., Khalid, Y., Wu, H., & Urgun-Demirtas, M. (2021). *《美国对食物废弃物进行厌氧消化处理的现状》*. *《可再生能源与可持续能源评论》*, 151, 111554. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111554

15. Davison, N., Borbolla Gaxiola, J., Gupta, D., Garg, A., Cockerill, T., Tang, Y., … Ross, A. (2022). *《印度、欧洲和中国通过水热谈话将高湿度食物废弃物转化成生物煤炭的温室气体减排潜力》*. *《能源》*，15(4), 1372. https://doi.org/10.3390/en15041372

16. DeLonge, M. S., Ryals, R., & Silver, W. L. (2013). *《人工草地的碳汇潜力和温室气体动态生命周期评价模型》*. *《生态系统》*,16(6), 962–979. https://doi.org/10.1007/s10021-013-9660-5

17. Edgerton, M. D. (2009). *《提高农作物产量以满足全球对饲料、食物和燃料的需求》*. *《植物生理学》*，149(1), 7–13. https://doi.org/10.1104/pp.108.130195

18. 环境质量激励计划（EQIP）|农场账单报告（2009财年至2020财）|国家资源保护局.（2017）.于2022年8月1日检索，网址：https://www.nrcs.usda.gov/Internet/NRCS_RCA/reports/fb08_cp_eqip.html

19. Erisman, J. W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N. B., Petrescu, A. M. R., ... de Vries, W. (2013). *《人为改变全球氮循环的后果》.《英国皇家学会自然科学学报：生物学》*，368(1621), 20130116. https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0116

20. 粮食及农业组织2022年，FAOSTAT在线数据集，检索网址：http://faostat.fao.org/（2022年7月访问）.

21. Feng, Y., Marek, C., & Tosun, J. (2022). *《以法律手段减少食物浪费：理解中国的做法》.《消费者政策杂志》*. https://doi.org/10.1007/s10603-022-09519-2

22. 化肥研究所（2019）*《2019年化肥行业现状》*, https://www.fertilizerreport.org/

23. Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, *《2007年：大气组分和辐射强迫变化》*.摘自：*《气候变化2007：自然科学基础》*.政府间气候变化专门委员会（IPCC）第四次评估报告第一工作组供稿 [Solomon, S.、D. Qin、M. Manning、Z. Chen、M. Marquis、K.B. Averyt、M.Tignor与H.L. Miller（编辑）]. 剑桥大学出版社，英国剑桥和美国纽约州纽约市.

24. Flint, L.,Flint, A., Stern, M., Mayer, A., Vergara, S., Silver, W., Casey, F., Franco, F., Byrd, K., Sleeter, B., Alvarez, P., Creque, J., Estrada, T., Cameron, D.（美国地质勘察局）.2018年.*《加州通过增加土壤有机碳减少温室气体排放和提升气候复原力》*. 加州第四次气候变化评估，加州自然资源局. 出版物编号：CCCA4-CNRA-2018-006.

25. Guerrero, A., De Neve, S., & Mouazen, A. M. (2021). *《评论文章：第一章——电流传感器技术用于现场和线上测量土壤氮素以变量施肥》*.摘自D. L. Sparks（编辑），*《农艺学进展》*（第168卷，第1-38页）. 学术出版社. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.001

26. Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Otterdijk, R. van & Meybeck, A. *《全球食物损失与食物浪费：严重程度、原因与预防》*（粮食及农业组织，2011）；http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf

27. Hanson, V., & Ahmadi, L. (2022). *《评论文章：加拿大使用手机应用减少食物浪费》.《加拿大地理学家》*66(2), 402–411. https://doi.org/10.1111/cag.12733

28. Harvey, J., Smith, A., Goulding, J., & Branco Illodo, I. (2020). *《通过手机应用进行食物分享、再分配和减少浪费：社交网络分析》.《工业营销管理》*88, 437–448. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.02.019

29. Harrison, J. H., & Ndegwa, P. M. (2020). A*《猪牛粪便的厌氧消化处理》*. 摘自*《动物粪便》*（第115至第127页）. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2134/asaspecpub67.c13

30. 国际能源署（2021），*《氨技术路线图》*，巴黎. https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap

31. Ji, Y., Liu, H., & Shi, Y. (2020). *《中国的化肥使用量能否继续减少？基于作物、区域和化肥类型所做的LMDI分析所提供的证据》.《PLOS ONE》*15(8), e0237234. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237234

32. Jin, S., & Fang, Z. (2018). *《化肥和杀虫剂使用零增长：中国的目标、进展和挑战》.《资源与生态学杂志》*，9, 50–58. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2018.01.006

33. Ju, X.-T., Xing, G.-X., Chen, X.-P., Zhang, S.-L., Zhang, L.-J., Liu, X.-J., ... Zhang, F.-S. (2009). *《中国农业系统通过完善氮素管理减少环境风险》.《美国国家科学院院刊》*, 106(9), 3041–3046. https://doi.org/10.1073/pnas.0813417106

34. Kanter, D. R., & Searchinger, T. D. (2018). *《以技术强制方法减少氮污染》.《自然可持续*

性》1(10), 544–552. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0143-8

35. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *《垃圾何其多2.0：到2050年全球固体废弃物管理一览》*.世界银行. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

36. Kutos, S., E. Strickler, A. Cooper, J. Creque, M. Machmuller, R. Ryals, M. E. Kroeger, 与 W. L. Silver. *《利用堆肥增强牧场碳汇》*.*《水土保持杂志》*.付印中，待修改.

37. Lammerts van Bueren, E. T., & Struik, P. C. (2017). *《评论文章：多种饲养理念提升氮使用效率》*.*《可持续发展农艺学》*,37(5), 50. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0457-3

38. Lee, U., Han, J., & Wang, M. (2017). *《评估市政固体垃圾填埋场填埋气排放，进行垃圾发电路径生命周期分析》*.*《清洁生产杂志》*,166, 335–342. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016

39. Levis, J. W., & Barlaz, M. A. (2011).*《固体废弃物可生物降解性是否是一种理想属性？全国垃圾填埋场温室气体排放清单模型提供的观点》*.*《环境科学与技术》*. 45(13), 5470–5476. https://doi.org/10.1021/es200721s

40. Li, C., Bremer, P., Harder, M. K., Lee, M. SW., Parker, K., Gaugler, E. C., & Mirosa, M. (2022). *《中国食物损失与食物浪费系统性评估：数量、影响和媒介》*.*《环境管理杂志》*, 303, 114092. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114092

41. Lipinski, B. 等，2013年.*《减少食物损失与浪费》*.工作报告，创建可持续食物未来第2期.华盛顿特区：世界资源研究所. 网址：http://www.worldresourcesreport.org

42. Li, Y., Jin, Y., Borrion, A., & Li, H. (2019). *《中国的食物浪费与管理现状》*.*《生物资源技术》*,273, 654–665. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.083

43. Liu, M., Ogunmoroti, A., Liu, W., Li, M., Bi, M., Liu, W., & Cui, Z. (2022). *《从生命周期角度对中国食物垃圾处理的环境影响的评估和预测》*.*《整体环境科学》*,807, 150751. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150751

44. Liu, Q., Wang, J., Bai, Z., Ma, L., Oenema, O., Liu, Q., … Oenema, O. (2017). Global animal production and nitrogen and phosphorus flows. Soil Research, 55(6), 451–462. https://doi.org/10.1071/SR17031

45. Ma, R., Yu, K., Xiao, S., Liu, S., Ciais, P., & Zou, J. (2022). *《中国耕地使用化肥产生的土壤氨、一氧化氮和一氧化二氮排放及其气候变化影响数据驱动评估》*.*《全球变化生物学》*， 28(3), 1008–1022. https://doi.org/10.1111/gcb.15975

46. Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). *《氮肥施用：施用效率低下相关风险和政策响应评估》*.*《可持续性》*， 13(10), 5625. https://doi.org/10.3390/su13105625

47. Mayer, A., & Silver, W. L.（无日期）.*《在未来气候情境下一年生草地的气候变化减缓潜力》*.*《生态学应用》* n/a(n/a), e2705. https://doi.org/10.1002/eap.2705

48. Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). *《全球合成氮肥生产和农业施用产生的温室气体排放》*.*《科学报告》*,12(14490), https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w

49. Morris, J., Brown, S., Cotton, M., & Matthews, H. S. (2017). *《食物浪费管理方法的生命周期评估协调与土壤科学评级结果》*.*《环境科学与技术》*,51(10), 5360–5367. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06115

50. Muth, M. K., Birney, C., Cuéllar, A., Finn, S. M., Freeman, M., Galloway, J. N., … Zoubek, S. (2019). *《评估美国食物损失和浪费干预措施的环境和经济影响的系统性方法》*.*《整体环境科学》*， 685, 1240–1254. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.230

51. 中国国家统计局.*《中国统计年鉴》*(2021) ,中国统计出版社

52. Nunes, S. S. and V. (2021). *《美国合成氮肥》*.*《Farmdoc Daily》*，11（24）检索网址：https://

farmdocdaily.illinois.edu/2021/02/synthetic-nitrogen-fertilizer-in-the-us.html

53. Qi, D., Apolzan, J. W., Li, R., & Roe, B. E. (2020). *《1991年至2009年中国家庭食物浪费减少原因剖析》.《资源、保护与循环利用》*, 160, 104893. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104893

54. ReFED | Rethink Food Waste. 2022年7月28日检索自ReFED|Rethink Food Waste网站，网址：http://policyfinder.refed.com

55. Read, Q. D., Brown, S., Cuéllar, A. D., Finn, S. M., Gephart, J. A., Marston, L. T., … Muth, M. K. (2020). *《食物供应链食物损失与浪费减半的环境影响评估》.《整体环境科学》*，712, 136255. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136255

56. Roy, E. D., Wagner, C. R. H., & Niles, M. T. (2021). *《美国改善耕地氮肥施用管理的重要机会》.《环境研究快报》*，16(3), 035004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd662

57. Ryals, R., Hartman, M. D., Parton, W. J., DeLonge, M. S., & Silver, W. L. (2015). *《草地有机物管理的长期气候变化减缓潜力》.《生态学应用》*, 25(2), 531–545. https://doi.org/10.1890/13-2126.1

58. Ryals, R., & Silver, W. L. (2013). *《有机物改良剂对一年生草地净初级生产力和温室气体排放量的影响》.《生态学应用》*，23(1), 46–59. https://doi.org/10.1890/12-0620.1

59. Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). *《通过堆肥处理循环利用有机废弃物：过程性能和堆肥在农业中的应用》.《农艺学》*，10(11), 1838. https://doi.org/10.3390/agronomy10111838

60. Silver, W. L., Perez, T., Mayer, A., & Jones, A. R. (2021). *《土壤促进食物和饲料供应的作用》.《英国皇家学会自然科学学报：生物学》*,376(1834), 20200181. https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0181

61. Smith, K., Bouwman, L., Braatz, B., 2006. *《一氧化二氮：农业土壤直接排放》*，摘自：*《政府间气候变化专门委员会国家温室气体排放清单良好实践指南与不确定性管理》*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/4_5_N2O_Agricultural_Soils.pdf

62. Song, G., Li, M., Semakula, H. M., & Zhang, S. (2015). *《中国家庭的食物消费和浪费以及嵌入碳、水与生态足迹》.《整体环境科学》*，529, 191–197. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.068

63. Swan, A., Williams, S.A., Brown, K., Chambers, A., Creque, J., Wick, J. 与 Paustian, K. 2015. COMET-Planner. *《国家资源保护局资源保护实践规划的碳排放和温室气体排放评估》*.

64. Tautges, N. E., Chiartas, J. L., Gaudin, A. C. M., O'Geen, A. T., Herrera, I., & Scow, K. M. (2019). *《深层土壤碳库显示覆土作物与堆肥对土壤碳汇的影响取决于表层和地下土壤状况》.《全球变化生物学》*，25(11), 3753–3766. https://doi.org/10.1111/gcb.14762

65. Thyberg, K. L., Tonjes, D. J., & Gurevitch, J. (2015). *《美国食物废弃物处置量化分析：荟萃分析》.《环境科学与技术》*，49(24), 13946–13953. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03880

66. Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., … Yao, Y. (2020). *《全球一氧化二氮源和汇的全面量化》.《自然》*，586(7828), 248–256. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0

67. Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., … Sandalow, D. (2021). *《食物系统的温室气体排放：确定证据基础》.《环境研究快报》*，16(6), 065007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e

68. *联合国环境署（2021）.《2021年食物浪费指数报告》*.内罗毕. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35280/FoodWaste.pdf

69. 联合国大会 (2015) .*《改变我们的世界——2030年可持续发展议程》*，https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E

70. 美国地质勘察局 (2022). 氮（固定）-氨.2022年8月18日检索，网址：https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nitrogen.pdf

71. *美国农业部经济研究局——化肥施用与价格.检索网址：*https://www.ers.usda.gov/data-products/fertilizer-use-and-price/

72. 美国农业部. (2015) .*《美国农业部、环境保护局联合私营部门和慈善组织制定全国首个减少食物浪费目标》*.检索网址：https://www.usda.gov/media/press-releases/2015/09/16/usda-and-epa-join-private-sector-charitable-organizations-set

73. *美国农业部经济研究局* (2019)，*《化肥施用与价格》*. 检索网址：https://www.ers.usda.gov/data-products/fertilizer-use-and-price/

74. *美国环境保护局*. (2020).*《促进可持续材料管理：2018年情况说明》*. 检索网址：https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf

75. *美国环境保护局*. (2021).*《从农场到厨房：美国食物浪费的环境影响》*. 检索网址：https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/from-farm-to-kitchen-the-environmental-impacts-of-u.s.-food-waste_508-tagged.pdf

76. 美国环境保护局. (2015).*《食物回收分级制度[概述与情况说明]》*.检索网址：https://www.epa.gov/sustainable-management-food/food-recovery-hierarchy

77. 美国环境保护局. (2022).*《温室气体排放量与汇清单：1990年至2020年》*.（出版物编号：430-R-22-003）.检索网址：https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020

78. Van Groenigen, J. W., Velthof, G. L., Oenema, O., Van Groenigen, K. J., & Van Kessel, C. (2010). *《对一氧化二氮排放的农艺学评估：可种植作物案例研究》*.*《欧洲土壤科学期刊》*，61(6), 903–913. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01217.x

79. Walling, E. & Vaneeckhaute, C. (2020).*《无机肥和有机肥生产与施用产生的温室气体排放：排放系数及其可变性评估》*.*《环境管理杂志》*，276, 111211. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111211

80. Wang, L., Liu, G., Liu, X., Liu, Y., Gao, J., Zhou, B., … Cheng, S. (2017). *《食物浪费的影响：基于调研的中国城市餐厅食物浪费特点分析》*.*《废弃物管理》*，66, 3–12. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.007

81. Wang, X., Xu, M., Lin, B., Bodirsky, B. L., Xuan, J., Dietrich, J. P., … Popp, A. (2022). *《中国化肥政策改革：对减少氮污染和维护粮食安全的意义》*.*《可持续性科学》*. https://doi.org/10.1007/s11625-022-01189-w

82. West, P. C., Gerber, J. S., Engstrom, P. M., Mueller, N. D., Brauman, K. A., Carlson, K. M., … Siebert, S. (2014). *《改善全球粮食安全与环境的杠杆点》*.*《科学》*，345(6194), 325–328. https://doi.org/10.1126/science.1246067

83. 白宫（2022年6月17日）.*《情况说明：拜登总统通过主要经济体的能源和气候论坛提高全球行动力度，以加强能源安全和应对气候危机》*. 2022年7月28日检索自白宫网站，网址：https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/06/17/fact-sheet-president-biden-to-galvanize-global-action-to-strengthen-energy-security-and-tackle-the-climate-crisis-through-the-major-economies-forum-on-energy-and-climate/

84. Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., … Murray, C. J. L. (2019). *《人类世的食物：EAT-柳叶刀可持续食物体系及健康饮食委员会特别报告》*.*《柳叶刀》*，393(10170), 447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4

85. Wu, H., MacDonald, G. K., Galloway, J. N., Zhang, L., Gao, L., Yang, L., … Yang, T. (2021).*《农*

作物和化肥对温室气体排放的影响：对中国化肥生产和施用的部分生命周期评估》.《资源、保护与循环利用》，168, 105303. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105303

86. Xia, L., Lam, S. K., Chen, D., Wang, J., Tang, Q., & Yan, X. (2017). *《基于知识的氮肥管理能否增加粮食产量并减少温室气体排放和活性氮污染：荟萃分析》.《全球变化生物学》*,23(5), 1917–1925. https://doi.org/10.1111/gcb.13455

87. Xue, L., Liu, X., Lu, S., Cheng, G., Hu, Y., Liu, J., … Liu, G. (2021). *《中国食物损失和浪费产生了更大的环境影响》.《自然食品》*,2(7), 519–528. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00317-6

88. Zhang, G., Wang, X., Sun, B., Zhao, H., Lu, F., & Zhang, L. (2016). *《中国耕地矿物氮施肥现状以及国家施肥建议的净减排潜力》.《农业系统》*，146, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.03.012

89. Zhang, H., Liu, G., Xue, L., Zuo, J., Chen, T., Vuppaladadiyam, A., & Duan, H. (2020). *《到2040年基于厌氧消化的垃圾发电技术可将中国快速增加的食物浪费产生的环境影响减少一半》.《清洁生产杂志》*，277, 123490. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123490

90. Zhang, W.-F., Dou, Z.-X., He, P., Ju, X.-T., Powlson, D., Chadwick, D., … Zhang, F.-S. (2013). *《中国利用新技术减少氮肥的温室气体排放》.《美国国家科学院院刊》*，110(21), 8375–8380. https://doi.org/10.1073/pnas.1210447110

91. Zhang, X., Zou, T., Lassaletta, L., Mueller, N. D., Tubiello, F. N., Lisk, M. D., … Davidson, E. A. (2021). *《全球和国家粮食生产氮肥预算量化分析》.《自然食品》*，2(7), 529–540. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00318-5

92. Zou, J., Lu, Y., & Huang, Y. (2010). *《1980年至2000年中国耕地因合成氮肥导致的直接一氧化二氮排放评估》.《环境污染》*，158(2), 631–635. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.08.026