

# 可持续满足一百亿人口的温饱需求： 积极应对气候变化，实现弹性粮食生产

## 概要

全球粮食系统产生的温室气体 (GHG) 排放量约占人类总活动排放量的三分之一<sup>1</sup>。因此，如果能够在实现粮食安全和增强抵御气候变化不可避免影响能力的同时减少温室气体排放，则可以以此作为实现净零排放的重要途径。研究表

明，我们可以在改变饮食结构、尊重方法、可持续农业实践以及利用粮食生物技术持续创新的浪潮中寻找解决方案。

## 思路

- 政策制定者、农业社区以及诸多学科的科学工作者有机会共同合作，以“净零”目标为背景，消除饥饿，实现粮食安全，改善营养状况。具体包括减少粮食系统的排放，增强其韧性和保护生物多样性。
- 研究表明，气候影响与粮食生产和消费之间存在紧密的联系。其中指出，粮食、农业和水产养殖政策应遵循让所有利益相关方共同参与的战略系统方法，这样才有助于诸多联合国可持续发展目标的实现。
- 鉴于粮食系统诸多方面对环境的影响，政策制定者必须考虑到经济和社会因素，解决饮食问题及其对气候的影响。
- 可持续、创新、气候智能型全球粮食生产系统的建立离不开研发的支持；重点领域包括农林复合最佳做法、减少肠道发酵的措施，以及可持续提高每公顷产量的作物新品种等等。
- 气候变化时期，在利用科学创新提高农作物质量和产量以及对病虫害、高温和干旱的抵抗力方面，生物技术取得了强劲迅速的进展
- 要在温室气体 (GHG) 排放低、抵御能力强的粮食系统方面取得进展，需要从基础研发到技术和农业实践的示范和部署进行着手，并与农业部门密切合作，充分运用科学技术。

# 1. 粮食系统与气候变化 – 四重挑战

据估计，在所有人类产生或人为产生的 GHG 排放中，21% 至 37% 都直接或间接源于粮食系统。

本简报重点关注气候变化与粮食系统之间的四重挑战。具体任务包括：首先，预计到 2050<sup>2</sup> 年，世界人口将增加到近一百亿，这就意味着要满足近百亿人口的温饱需求；第二，减少粮食系统的 GHG 排放；第三，提高粮食生产抵御气候变化的能力；第四，尽量减少生物多样性损失，以及农业生产引起的资源枯竭和污染等其他地球问题。全球人口不断增长的同时，全世界每分钟就会因干旱和荒漠化而丧失 23 公顷的耕地<sup>3</sup>。

## 1.1 粮食安全 – 预防数百万人口忍饥挨饿的需要

饥饿问题日益严重，在这种情况下，打造符合净零标准并适应气候变化的粮食系统，可谓更加艰难。发展中地区营养不良人口比例自 1990 年<sup>4</sup>以来已下降了近一半，但在 2019 年，仍有近 7 亿人无法解决温饱问题，五年之间便增加了近 6000 万人，而且超过 15 亿人口缺乏基本营养<sup>5</sup>。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 已将极端天气事件、冲突<sup>6</sup>、土地退化、荒漠化、水资源短缺以及海平面上升确定为饥饿和粮食保障<sup>7</sup>的具体驱动因素。但是，在粮食获取方面存在着不平衡问题，数百万人忍饥挨饿的同时，却有近 20 亿人超重<sup>8</sup>。按照目前的趋势来看，预计到 2050 年对粮食的需求将大幅增加，FAO（粮农组织）估计增幅将达到 50%，因此将进一步加剧这一挑战<sup>9</sup>。

## 1.2 粮食净零 – 减少粮食系统碳足迹的需要

全球粮食系统本身已成为气候变化的主导因素。农业集约化提高，向森林扩张，牲畜在高密度的饲养场集中管理，作物大量使用肥料。人类历史上 40% 的土地转为农用地均发生在过去 100 年间<sup>10</sup>。20 世纪中期，在作物研究等科学进步因素的推动下，掀起了一场“绿色革命”，<sup>11</sup> 因此而促进了产量的提高，大约 10 亿人口摆脱

了饥饿的困扰，同时防止了粗放农业的进一步发展，粮食安全得到了改善<sup>12</sup>。然而，对环境的影响则错综复杂。特别是，产量的增加减少了每公顷 GHG 的排放量，而化肥使用量的增加则加大了排放量<sup>13</sup>。

根据政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2019 年发布的《气候变化与土地情况报告》(Report on Climate Change and Land)

(依据为 2007-2016 年的数据) 估计，在所有人类产生或人为产生的 GHG 排放中，21% 至 37% 都直接或间接源于粮食系统<sup>14</sup>。这相当于每年大约 110-190 亿吨二氧化碳当量 (GtCO<sub>2</sub>e/yr)。2021 年提交的全球粮食排放数据库进一步进行评估，显示 2015 年粮食系统排放量为 18GtCO<sub>2</sub>e/yr，占 GHG 总排放量的 34%，数据范围有所减少<sup>1</sup>。粮食生产所产生的排放包括牲畜和稻田排放的甲烷、主要由化肥使用所产生的一氧化二氮，以及土地使用情况变化和其他来源所产生的 CO<sub>2</sub>。

IPCC 估计，在所有人为 GHG 排放中，农业粮食生产约占 9%-14%，为了满足社会对粮食的需求而砍伐森林、排干泥炭地和清理草地等土地使用情况变化则约占 5-14%。生产、加工和配送等食品供应链以及粮食浪费所产生的排放量估计约占 5%-10%<sup>15</sup>。每年浪费的粮食量大约可达 13 亿吨，价值相当于 7500 亿美元<sup>16</sup>，由此产生的碳足迹估计为 3.3 GtCO<sub>2</sub>e/yr<sup>17</sup>。浪费的粮食大约有一半是在收割和配送环节之间所流失的。单单就家畜（主要是反刍动物）而言，在考虑整个生命周期的情况下，其在人类产生的总排放量中所占比例就能达到大约 14.5%（以 2007 - 2016 年为参照，排放量为 7.5 GtCO<sub>2</sub>e/yr）<sup>18</sup>。

根据 FAO（粮农组织）的数据显示，渔船每年产生的二氧化碳 (MtCO<sub>2</sub>) 约为 1.7 亿吨，水产养殖约为 385 MtCO<sub>2</sub>，加起来约占所有人为 CO<sub>2</sub> 排放的 1.5%<sup>19</sup>。

最新的一项分析估计，即使立即停止使用化石燃料所产生的所有 GHG 排放，就全球粮食系统当前的趋势而言，也将阻碍 1.5°C 温控目标的实现，进而也无法实现本世纪末前 2°C 温控目标的实现<sup>20</sup>。

### 1.3 粮食韧性 – 适应气候变化影响的需要

粮食生产系统除了会产生 GHG 之外，自身也受到气候变化的影响，预计不利影响大于收益所得。若不采取行动，预计到 2050 年，气候变化将导致全球农业产量每十年下降 2%，而全球的粮食需求则会持续增加<sup>21</sup>。农作物产量易受洪水、高温、干旱、气候不可预测因素以及新出现的害虫和病原体等多重影响<sup>22</sup>。此外，畜牧业生产会受到原料、饲料、水和疾病的影响<sup>23</sup>。就渔业领域而言，在升温 2°C 的情况下，气候变化预计将使全球渔获量减少高达 5%，从而进一步消耗过度捕捞的鱼类资源，阻碍美国、加拿大和北欧等地区重建部分鱼类资源的实现<sup>19</sup>。就水产养殖领域而言，部分鱼类会变大，但不利影响则包括天气对网箱和渔网等基础设施的破坏；疾病和寄生虫增加；以及水中溶解氧耗尽，即缺氧<sup>19</sup>。

### 1.4 生物多样性 – 在不危及物种的情况下提供粮食的需要

全球粮食系统中包含数千种构成粮食供应的植物、动物和真菌，以及为农作物授粉、控制害虫、增强土壤肥力和提供其他服务的植物、动物和真菌。然而，最近的英国《达斯古普塔报告》(Dasgupta Review) 生物多样性经济学 (The Economics of Biodiversity) 指出，粮食系统会破坏栖息地、导致碎片化和过度开发，因此也是生物多样性丧失的最大主导因素<sup>24, 10</sup>。目前已确认约 25000 个物种濒临灭绝，其中约 13000 个物种受到耕地开垦和退化的威胁，约 3000 个物种受到狩猎和捕鱼的威胁，另有 3000 个物种受到粮食系统污染的威胁<sup>10</sup>。同时，食物系统也会产生污染，因为植物无法充分利用化肥中的氮和磷，反而会影响空气质量和水质。肥料中磷矿形式的磷也属于有限资源，主要储量集中在少数几个国家/地区。对于这些储量的使用时间，据估计为 40 年到几百年不等<sup>25, 26</sup>。

---

对于水产养殖或鱼类养殖而言，提高效率、使用可再生能源和提高饲料转化率等措施，均可减少排放<sup>19</sup>。

---

## 2. 我们还需要了解哪些内容？科学在气候抗御型低碳粮食系统中的作用

研究表明，动物性食品的生命周期碳足迹往往比其他食品高出很多，例如，据估计牛肉产生的温室气体足迹是豌豆或豆类的 15-50 倍，具体分析的地区和指标而不同<sup>27, 28, 29</sup>。

政策制定者在实现净零和打造气候韧性的工作中，有机会在政策、创新和投资方面建立势头，支持可持续农业、粮食安全和营养。一方面要满足日益增长的粮食需求，同时还要减少其对生态系统的影响，以及增强其抵御气候变化的能力，多重挑战，任务紧迫。对此，可以通过农学、土壤科学、社会科学、经济学以及政治经济学等多种途径进行解决。

本文重点关注三大重要领域的研究贡献：

- 第一，可持续性粮食消费 – 改变需求及饮食结构释放供应压力；

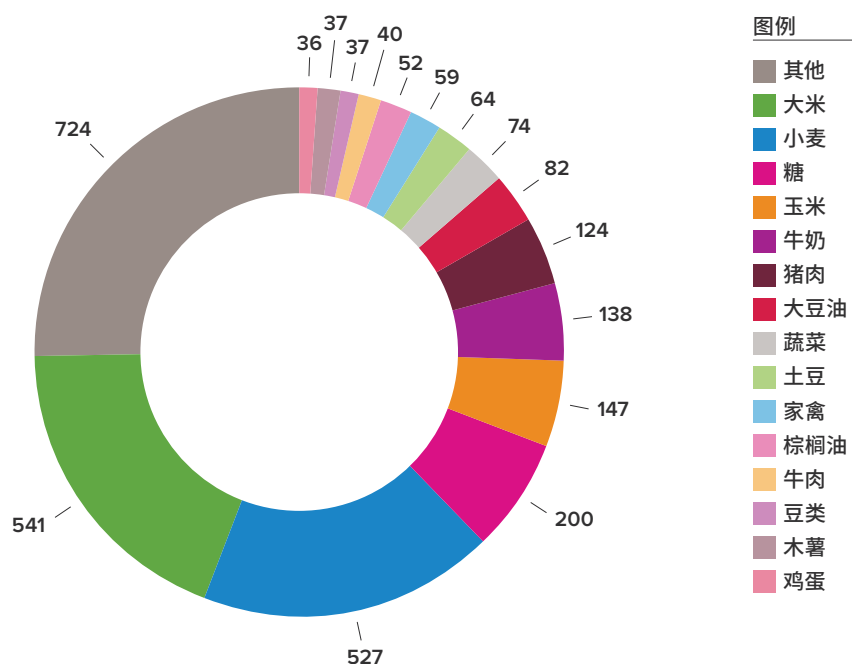
- 第二，可持续性粮食生产 – 提高粮食产品，降低碳强度，降低环境足迹；以及
- 第三，可持续性粮食技术 – 通过育种和遗传方法以及其他创新提高产量和抵御能力。

### 2.1 可持续性粮食消费

在粮食消费方面，以肉类和奶制品为主的饮食结构推动了 GHG 密集型农业的发展。研究表明，动物性食品的生命周期碳足迹往往比其他食品高出很多，例如，据估计牛肉产生的温室气体足迹是豌豆或豆类的 15-50 倍，具体分析的地区和指标而不同<sup>27, 28, 29</sup>。

图 1

全球人均每日卡路里摄入量分布图，估计约为每天 2882 千卡<sup>\*</sup>



\* 据估计，75% 的热量均来自于 12 种农作物和 5 种动物产品。图 1 绘制的数据来源为 2013 年 FAOSTAT<sup>70, 71</sup>。

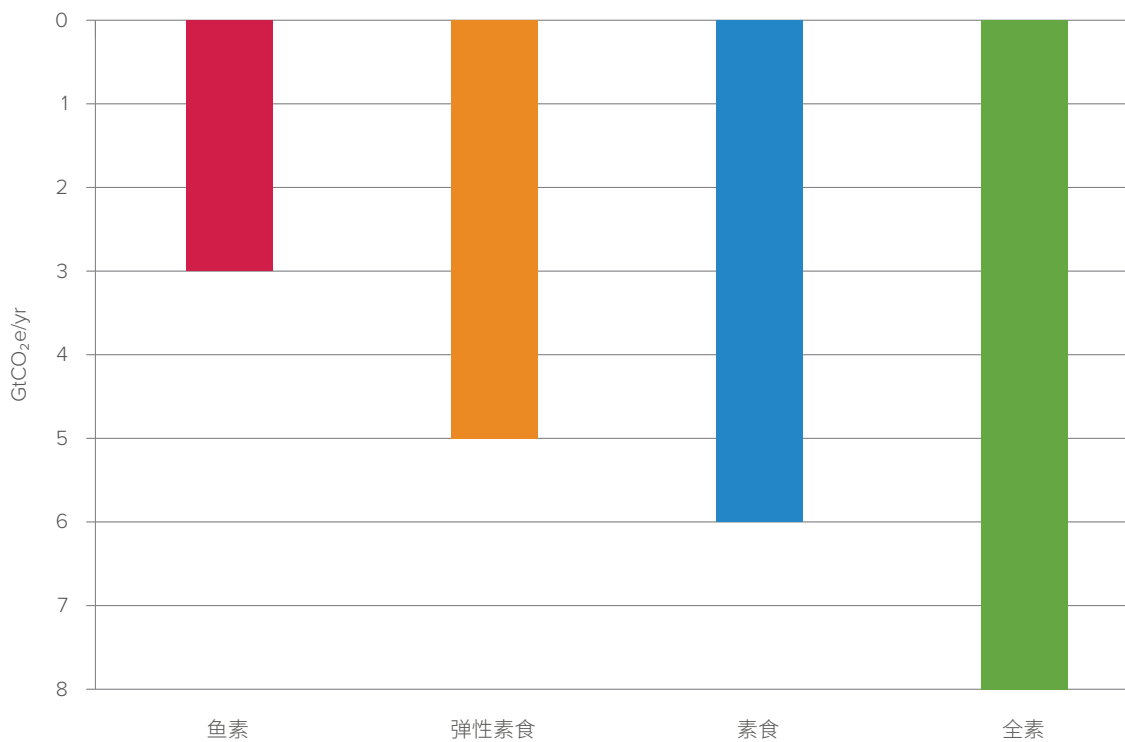
大量证据表明，随着技术和管理的改进，粮食流失以及浪费行为的减少，改变饮食减少排放的潜力十分巨大<sup>30</sup>。IPCC 分析了多项关于在 2050 年之前技术减排在改变全球人口饮食中作用的研究。研究发现，适量肉类外加富含鱼类和蔬菜的饮食结构将减少 3GtCO<sub>2</sub>e/yr 的全球 GHG 排放（2019 年估计值为 59.1 GtCO<sub>2</sub>e<sup>31</sup>），提倡限制一定量肉类和奶制品的“弹性素食”饮食结构可减少 5 GtCO<sub>2</sub>e/yr，素食饮食结构可减少 6 GtCO<sub>2</sub>e/yr，而全素则可减少近 8 GtCO<sub>2</sub>e/yr 的全球 GHG 排放<sup>32</sup>（参见图 2）。

饮食选择受到社会和文化传统等诸多因素的影响。目前，便有这样一次机遇，可以就这一主题开展全球对话，以科学证据充分展现开放和尊重。多项研究均已提出了对气候和人类健康有益的可持续性饮食模式，通常均含有大量的植物源食物<sup>33, 34</sup>。全球对此类饮食的认识并没有规定必须遵循，而且对部分地区而言，这类饮食结构目前可能还不切实际或无法负担，但却为国家和全球的公众争论提供了参考条件。

饮食选择受到社会和文化传统等诸多因素的影响。目前，便有这样一次机遇，可以就这一主题开展全球对话，以科学证据充分展现开放和尊重。

图 2

### 需求方面 GHG 减排的潜力



随着水产养殖生产效率的提高，弥补对野生渔业的限制，也有可能大幅扩大鱼类和海产品的消耗。然而，目前的水产养殖对环境的破坏程度很大，必须注意任何方面的增长均要做到可持续性发展<sup>35</sup>。一项研究表明，政策措施与技术发展的结合可以将海洋食品的产量提高75%，这一水平可以抵消2050年100亿人口所需肉类产量的25%左右<sup>36</sup>。

其他一些研究已经检验了所谓的“未来食品”的潜力，例如人工培育肉类、真菌蛋白、昆虫幼虫以及小球藻和螺旋藻等藻类。与传统的动物源食品相比，这些食品用地面积相对较少，而营养范围相对植物源食品则更加广泛。与改变饮食结构所涉及的各个方面一样，对这些新型食物的接受程度同样会受到根深蒂固的社会与文化价值观以及负担能力的影响。研究人员认识到，需要更深入地了解方法，才能让更多人乐于接受，同时使其成为负担得起的选择<sup>37</sup>。

虽然粮食的种植和分配非常重要，但也需要更深入地了解粮食的流失与浪费，并提出从针对衡量损失的新方法<sup>38</sup>到具体解决方案等各种建议，例如“最后食用日期”和“最佳食用日期”标签等新方法<sup>39</sup>。

## 2.2 可持续性粮食生产

在农业供应方面，研究可以从工业规模的经营到占世界大部分农场的小型农场等方方面面入手，支持整个农场和种植系统的GHG减排<sup>40</sup>。

实现高产量低碳足迹离不开“可持续集约化”，即在不产生不利环境影响和不开垦更多土地的情况下提高产量<sup>41</sup>。这样还可以释放出土地，用于再野生化或用于粮食和生物多样性的耕种。

科学创新可以助力在多个方面实现可持续集约化。通过科学创新，可以创造出适应气候变化，同时产量更高，并且对于水、化肥和杀虫剂使用量需求更少的作物新品种。开展减少动物肠道发酵的研究，任何规模的畜牧养殖户均可受益其中，例如，控制青贮成分<sup>42</sup>或“3 NOP”（3-硝基氧丙醇）等新型饲料添加剂。农林复合经营方式集林业与其他形式的农业于一体，通过对个别项目<sup>43</sup>的结果进行研究，或对可能的认证方案等问题进行更广泛的研究<sup>44, 45, 46</sup>，均可以对这种经营方式提供支持。

化肥的使用会排放一氧化二氮（ $N_2O$ ），同样属于温室气体，而且比二氧化碳的温室效应更强<sup>47</sup>。 $N_2O$ 排放量自前工业化时代以来已增长了20%<sup>48</sup>，就此，联合国发起了一项全球可持续氮管理行动（Global Campaign on Sustainable Nitrogen Management），设定目标要在2030年前将废物减半，节省1000亿美元的成本<sup>47, 49</sup>。美国和欧洲已取得成功，在此基础上，还需要通过精确输送化肥的方式，努力提高氮肥的利用效率<sup>49</sup>。

据估计，对于捕捞渔业（捕捞自然生长的鱼类和海产品）而言，通过改用更加高效的发动机、更大的螺旋桨以及不同的船只形状等机械设备，可将排放量减少10-30%<sup>19</sup>。对于水产养殖或鱼类养殖而言，提高效率、使用可再生能源和提高饲料转化率等措施，均可减少排放<sup>19</sup>。

英国政府主持了一项调查，对20个国家/地区的40个项目进行分析，结果表明，可持续集约化已为1000万农民（有记录）带去了效益，使平均产量翻了一番。然而，还需要进行更深入的评估<sup>50</sup>（请参见第3章节）。

### 2.3 可持续粮食生物技术

从食品加工、生物化学到营养科学，食品技术领域的创新可谓是蓬勃发展。在此重点关注生物技术中发展尤为迅速的一大领域——基因创新学科。基因创新学科正在经历转型变革，科学家和育种家可以利用由此产生的数据和知识，解决农业-环境层面看似不可分割的一些问题。

对于提供可持续增加每公顷产量，从而减少排放的新品种，以及抵御气候变化影响能力更强的品种方面，研究可以发挥特殊作用。

取得最新突破的基础在于对本世纪初以来数百种作物品种进行的基因组测序，测序揭示了迄今为止尚未得到开发的变异，目前正在利用这类变异研究开发具有可持续特性的作物。2002年，一家国际财团绘制了水稻基因组图谱（参见绿色超级水稻 (Green Super Rice) 图），随后又绘制了小麦、马铃薯、番茄、草莓、可以及多种其他植物的基因组图谱<sup>51</sup>。

为了打造高产或抵御能力更强的新品种，已经建立了数据库提供资源，例如拥有132,000万多条条目<sup>52</sup>的国际稻种基因库 (International Rice Genebank)。

新品种的“快速育种”已发展成为一种既定方法，这种技术可使春小麦、硬粒小麦、大麦、鹰嘴豆和豌豆达到每年6代的产量<sup>53</sup>。

---

研究人员还在研究如何以减少排放的方式饲养牲畜。例如，提高效率的育种可以减少动物的总数；一项估计表明，通过这种方式，排放量可能会下降8%<sup>55</sup>。

---

#### 专栏 1

### 绿色超级水稻

中国发起的开发“绿色超级稻”(GSR) 项目是世界范围打造气候适应性、高质量作物方面一项最重要的科学工作，这一项目因其环境和营养品质而得名<sup>67</sup>。20世纪90年代，中国的环境威胁日益严重，尤其是雨水和害虫，在这样的大背景之下，该项目应运而生，以期用世界上8%左右的耕地满足世界上20%以上的人口粮食需求<sup>68</sup>。中国制定了“第二次绿色革命”的计划，力争培育出新的水稻品种。中国与日本、台湾、泰国、韩国、印度、巴西、法国、加拿大、英国和美国等国家和地区一道，在国际水稻基因组测序项目中发挥了主导作用<sup>69</sup>。这为中国植物科学工作人员开展长期的植物育种工作提供了资源基础。

通过基因和遗传过程的确定，在多个与气候相关的方面对水稻进行了改进，不仅提高了水稻产量（这是中国最初的首要任务），还提高了水稻的抗病和抗旱能力，提高了营养效率，从而减少了化肥的使用，口感味道也得到了改善。期望基因的积累推动了水稻品种的不断改良，截至2018年，已确定了40多个新品种属于GSR。为农民设定了一个3x30的目标，即对于化肥、杀虫剂、水的使用，每项都要减少30%，从而减少温室气体的排放。中国农业科学院目前正在与国际合作伙伴（比尔及梅琳达·盖茨基金会 (Bill and Melinda Gates Foundation)）合作，分享中国在撒哈拉以南非洲和亚洲地区的专业知识<sup>67</sup>。

---

目前，世界上 75% 的粮食均来自于 12 种植物和 5 种动物物种<sup>64</sup>，研究人员一直在研究小米和豌豆等所谓的“孤儿”作物的遗传改良范围，这些作物韧性高，而且富含蛋白质，但目前主要限于部分地区<sup>65</sup>。

---

精选养殖也为水产养殖提供了一种适应策略。例如，为了快速生长和抗病能力而培育的雪梨岩蚝能够改善壳体的生长，进而抵抗海洋酸化<sup>54</sup>。

研究人员还在研究如何以减少排放的方式饲养牲畜。例如，提高效率的育种可以减少动物的总数；一项估计表明，通过这种方式，排放量可能会下降 8%<sup>55</sup>。

随着获得诺贝尔奖的 CRISPR/Cas9“基因剪刀”的出现，基因编辑在过去十年中也经历了巨大的转变<sup>56</sup>，这种“基因剪刀”可以增强包括抗病原体、非生物耐受性、植物发育和形态等性状<sup>57</sup>。基因驱动等基于 CRISPR/Cas9 的新型技术，可以在种群中进行修饰，为害虫防治提供了新思路，只要能证明其安全性并得到社会的认可，便有望取代广谱杀虫剂<sup>58</sup>。

从事这一领域工作的一些科学家提出，无论是通过基因组编辑还是基因转移对粮食供应进行基因修改，都需要根据其产生的结果而非用于改变的技术进行监管<sup>59,60</sup>。

转基因作物可以对环境改善产生积极影响，这样的例子不胜枚举。例如，美国、印度、中国、澳大利亚和南非种植的棉花中，超过 90% 以上都是含有抗虫 Bt 毒蛋白基因的 GM（转基因）品种。夏威夷的木瓜产业通过在植物中添加一种能够抵抗环斑病毒的基因而实现了复苏<sup>61</sup>。GM 作物的使用推动了可持续集约化的实现，从而减少了 GHG 的排放<sup>62</sup>。增强作物对环境变化的适应能力以及减少农业对环境的影响，机遇都可谓相当可观。

目前研究的热门领域是开展计划，确定是否可以将豆科植物从空气中吸收氮（固氮）的能力通过基因转移到谷物中，从而避免世界上许多谷物种植者对商业氮肥的需要<sup>63</sup>。

目前，世界上 75% 的粮食均来自于 12 种植物和 5 种动物物种<sup>64</sup>（参见图 1），研究人员一直在研究小米和豌豆等所谓的“孤儿”作物的遗传改良范围，这些作物韧性高，而且富含蛋白质，但目前主要限于部分地区<sup>65</sup>。



## 3. 研发重点工作

本简报涵盖了饮食和浪费等已有研究为其提供有力证据支持政策制定的领域，以及深入研究可以在推动进展方面发挥重要作用的其他领域。特别是对于抗气候变化、营养丰富的粮食，作物科学具有巨大的发展潜力，而此类粮食同样可以应用于可持续农业。最新研究指出，虽然对于可持续集约化的具体方面（例如育种或农林复合经营方式）已经进行了广泛的研究，但很少有研究将这些组成部分置于可行的生产系统中，为环境性能制定强大的指标<sup>66</sup>。

由于认识到国家研究预算有限，政策制定者可能希望采取行动，推动国家之间以及公共、私营以及非营利/慈善部门之间广泛开展合作。鉴于这一挑战具有全系统性，政策制定者也有理由支持采取联合、系统方法的多学科观点，并在此过程中，将推动粮食可持续安全置于实现联合国可持续发展目标的更广泛规划的核心地位。

## 4. 总结

为了实现粮食安全目标，并将这一目标与实现净零排放和气候适应能力的进程相结合，科学已带来了诸多进步，提供了许多思路。为了扩大公众对可持续性更高的饮食结构

和植物科学创新的支持，社会科学可以与自然科学及配套政策共同发挥作用，而可持续农业集约化的进展则取决于传播研究中确定的良好典范所采取的行动。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在2050年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的12个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问[royalsociety.org/climate-science-solutions](https://royalsociety.org/climate-science-solutions)。

要查看简报编著人，请访问 [royalsociety.org/climate-solutions-contributors](https://royalsociety.org/climate-solutions-contributors)。

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：[creativecommons.org/licenses/by/4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)。图片不在本许可授权范围内。

发布日期：2021年6月 DES7639\_10 © The Royal Society

# 参考文献

1. Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Monforti-Ferrario F, Tubiello FN, Leip A. 2021 *Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions*. *Nat Food*. (doi:10.1038/s43016-021-00225-9)
2. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019 *World Population Prospects 2019: ten key findings*. 参见 [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_10KeyFindings.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf) (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
3. United Nations Environment Programme. 2018 *#FridayFact: every minute, we lose 23 hectares of arable land worldwide to drought and desertification*. 参见 <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/fridayfact-every-minute-we-lose-23-hectares-arable-land-worldwide-drought> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
4. United Nations Millennium Development Goals. 2015 *Goal 1: eradicate extreme poverty and hunger. We can end poverty: millennium development goals and beyond 2015*. 参见 <https://www.un.org/millenniumgoals/poverty.shtml> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
5. FAO, WHO, IFAD, WFP, UNICEF. 2020 *In Brief to The State of Food Security and Nutrition in the World: transforming food systems for affordable healthy diets*. (doi:10.4060/ca9699en)
6. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, World Food Programme. 2020 *UN food agencies warn of rising levels of acute hunger with potential risk of famine in four hotspots*. 参见 <http://www.fao.org/news/story/en/item/1325054/icode/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
7. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2018 *UN warns climate change is driving global hunger*. 参见 <https://unfccc.int/news/un-warns-climate-change-is-driving-global-hunger> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
8. World Health Organisation. 2020 *Obesity and overweight*. 参见 <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
9. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2017 *The future of food and agriculture: trends and challenges*. 参见 <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
10. Tilman, D, Williams D. 2021 *Preserving global biodiversity requires rapid agricultural improvements. Reversing biodiversity loss: scientific essays about biodiversity*. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/biodiversity/preserving-global-biodiversity-agricultural-improvements/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
11. Pingali PL. 2012 *Green Revolution: impacts, limits, and the path ahead*. *P. NATL. ACAD. SCI. USA* 109, 12302–12308. (doi:10.1073/pnas.0912953109)
12. Stevenson JR, Villoria N, Byerlee D, Kelley T, Maredia M. 2013 *Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production*. *P. NATL. ACAD. SCI. USA* 110, 8363–8368. (doi:10.1073/pnas.1208065110)
13. Layman E. 2017 *Feeding global warming: assessing the impact of agriculture on climate change. The People, Ideas and Things Journal, cycle 6*. 参见 <https://pitjournal.unc.edu/article/feeding-global-warming-assessing-impact-agriculture-climate-change> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
14. IPCC. 2019 *Summary for Policymakers. In: Climate change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Shukla PR et al. (eds). In press. 参见 [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM\\_Updated-Jan20.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf) (访问日期 2021 年 2 月 26 日)。
15. IPCC. 2019 *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Shukla PR et al. (eds). In press. 参见 <https://www.ipcc.ch/srccl/> (访问日期 2021 年 3 月 29 日)。
16. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2020 *Policy support and governance gateway: food loss and food waste*. 参见 <http://www.fao.org/policy-support/policy-themes/food-loss-food-waste/en/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
17. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2013 *Food wastage: key facts and figures. In summary report. Food wastage footprint: impacts on natural resources*. 参见 <http://www.fao.org/news/story/en/item/196402/icode/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
18. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2013 *Key facts and findings. In Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. 参见 <http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
19. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2018 *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. FAO fisheries and aquaculture technical paper 627. 参见 <http://www.fao.org/3/i9705en/i9705en.pdf> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
20. Clark MA et al. 2020 *Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets*. *Science* 370, 705–708. (doi:10.1126/science.aba7357)
21. IPCC. 2014 *Future climate changes, risks and impacts. In: Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pachauri RK, Meyer LA (eds). Geneva, Switzerland: IPCC. 参见 [https://ar5-syr.ipcc.ch/topic\\_futurechanges.php](https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_futurechanges.php) (访问日期 2021 年 2 月 26 日)。
22. Fahad S et al. 2017 *Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options*. *Front. Plant Sci.* 8. (doi:10.3389/fpls.2017.01147)
23. Rojas-Downing MM, Nejadhashemi AP, Harrigan T, Woznicki SA. 2017 *Climate change and livestock: impacts, adaptation, and mitigation*. *Climate Risk Management* 16, 145–163. (doi:10.1016/j.crm.2017.02.001)
24. Dasgupta, P. 2021 *The economics of biodiversity: the Dasgupta review*. London: HM Treasury. 参见 [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/957291/Dasgupta\\_Review\\_-\\_Full\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/957291/Dasgupta_Review_-_Full_Report.pdf) (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
25. Cordell D, Drangert J-O, White S. 2009 *The story of phosphorus: Global food security and food for thought*. *Global Environmental Change* 19, 292–305. (doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009)

26. Cho R. 2013 *Phosphorus: essential to life – are we running out?* State of the Planet, Earth Institute, Columbia University. 参见 <https://blogs.ei.columbia.edu/2013/04/01/phosphorus-essential-to-life-are-we-running-out/> (访问日期 2021 年 3 月 18 日)。
27. Poore J, Nemecek T. 2018 *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers*. *Science* **360**, 987-992. (doi:10.1126/science.aag0216)
28. World Economic Forum. 2019 *Meat: the future series. Alternative proteins*. 参见 [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_White\\_Paper\\_Alternative\\_Proteins.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_White_Paper_Alternative_Proteins.pdf) (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
29. Clune S, Crossin E, Verghese K. 2017 *Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories*. *Journal of Cleaner Production* **140**, 766–783. (doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.082)
30. Springmann M *et al.* 2018 *Options for keeping the food system within environmental limits*. *Nature* **562**, 519–525. (doi:10.1038/s41586-018-0594-0)
31. United Nations Environment Programme. 2020 *Emissions Gap Report 2020. Online introduction*. 参见 <https://www.unep.org/interactive/emissions-gap-report/2020/> (访问日期 2021 年 5 月 5 日)。
32. IPCC. 2019 *Food security. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Shukla PR *et al.* (eds). In press. 参见 <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-5/> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
33. Jarmul S, Dangour AD, Green R, Liew Z, Haines A, Scheelbeek PF. 2020 *Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of 'sustainable diets'*. *Environ. Res. Lett.* **15**, 123014. (doi:10.1088/1748-9326/abc2f7)
34. World Health Organisation. 2019 *Sustainable healthy diets: guiding principles*. 参见 <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516648> (访问日期 2021 年 3 月 10 日)。
35. Martinez-Porchas M, Martinez-Cordova LR. 2012 *World aquaculture: environmental impacts and troubleshooting alternatives*. *The Scientific World Journal* 2012, 1–9. (doi:10.1100/2012/389623)
36. Costello C *et al.* 2020 *The future of food from the sea*. *Nature* **588**, 95-100. (doi:10.1038/s41586-020-2616-y)
37. Parodi A *et al.* 2018 *The potential of future foods for sustainable and healthy diets*. *Nat Sustain* **1**, 782–789. (doi:10.1038/s41893-018-0189-7)
38. Cattaneo A, Sánchez MV, Torero M, Vos R. 2021 *Reducing food loss and waste: five challenges for policy and research*. *Food Policy* **98**, 101974. (doi:10.1016/j.foodpol.2020.101974)
39. Patra D, Leisnham PT, Tanui CK, Pradhan AK. 2020 *Evaluation of global research trends in the area of food waste due to date labeling using a scientometrics approach*. *Food Control* **115**, 107307. (doi:10.1016/j.foodcont.2020.107307)
40. Lowder SK, Skoet J, Raney T. 2016 *The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide*. *World Development* **87**, 16–29. (doi:10.1016/j.worlddev.2015.10.041)
41. The Royal Society. 2009 *Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture*. 参见 [https://royalsociety.org/-/media/Royal\\_Society\\_Content/policy/publications/2009/4294967719.pdf](https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/4294967719.pdf) (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
42. Haque MN. 2018 *Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants*. *J Anim Sci Technol* **60**. (doi:10.1186/s40781-018-0175-7)
43. Kiyani P, Andoh J, Lee Y, Lee DK. 2017 *Benefits and challenges of agroforestry adoption: a case of Musebeya sector, Nyamagabe District in southern province of Rwanda*. *Forest Science and Technology* **13**, 174–180. (doi:10.1080/21580103.2017.1392367)
44. Elevitch C, Mazaroli D, Ragone D. 2018 *Agroforestry standards for regenerative agriculture*. *Sustainability* **10**, 3337. (doi:10.3390/su10093337)
45. Jose S. 2019 *Environmental impacts and benefits of agroforestry*. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. (doi:10.1093/acrefore/9780199389414.013.195)
46. University of Bristol Clinical Veterinary Science. 2021 *Towards BIOSmart livestock farming in Colombia: cultural landscapes, silvo-pastoral systems and biodiversity*. UK Research and Innovation. 参见 <https://gtr.ukri.org/projects?ref=BB%2FS018840%2F1#/tabOverview> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
47. Thompson RL *et al.* 2019 *Acceleration of global N2O emissions seen from two decades of atmospheric inversion*. *Nat. Clim. Chang.* **9**, 993–998. (doi:10.1038/s41558-019-0613-7)
48. Tian H *et al.* 2020 *A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks*. *Nature* **586**, 248-256. (doi:10.1038/s41586-020-2780-0)
49. Agriculture Victoria. 2021 *Nitrogen fertilisers: improving efficiency and saving money*. *Victoria State Government of Australia*. 参见 <https://agriculture.vic.gov.au/climate-and-weather/understanding-carbon-and-emissions/nitrogen-fertilisers-improving-efficiency-and-saving-money> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
50. Pretty J, Toulmin C, Williams S. 2011 *Sustainable intensification in African agriculture*. *International Journal of Agricultural Sustainability* **9**, 5–24. (doi:10.3763/ijas.2010.0583)
51. Liu H *et al.* 2019 *Molecular digitization of a botanical garden: high-depth whole genome sequencing of 689 vascular plant species from the Ruli Botanical Garden*. *GigaScience*, **8**, giz007. (doi:10.1093/gigascience/giz007)
52. International Rice Research Institute. 2019 *International rice genebank*. 参见 <https://www.irri.org/international-rice-genebank> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)
53. Watson A *et al.* 2018 *Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding*. *Nature Plants* **4**, 23–29. (doi:10.1038/s41477-017-0083-8)
54. Fitzer SC *et al.* 2019 *Selectively bred oysters can alter their biomineralization pathways, promoting resilience to environmental acidification*. *Global Change Biology* **25**, 4105-4115. (doi:10.1111/gcb.14818)
55. Cassandro M. 2020 *Animal breeding and climate change, mitigation and adaptation*. *J Anim Breed Genet* **137**, 121–122. (doi:10.1111/jbg.12469)

56. The Royal Swedish Academy of Sciences. 2020 *Press release: the Nobel Prize in Chemistry 2020*. 参见 <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/press-release/> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
57. Zhang D, Zhang Z, Unver T, Zhang B. 2020 *CRISPR/Cas: a powerful tool for gene function study and crop improvement*. Journal of Advanced Research. (doi:10.1016/j.jare.2020.10.003)
58. Scudellari M. 2019 *Self-destructing mosquitoes and sterilized rodents: the promise of gene drives*. Nature. 参见 <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02087-5> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
59. The Royal Society. 2021 *Royal Society submission to the DEFRA consultation on the regulation of genetic technologies*. 参见 <https://scauthor.royalsociety.org/topics-policy/publications/2021/royal-society-submission-to-the-defra-consultation-on-genetic-technologies> (访问日期 2021 年 3 月 25 日)。
60. European Academies Science Advisory Council. 2020 *The regulation of genome-edited plants in the European Union*. EASAC Commentary. 参见 [https://easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Genome\\_Editing/EASAC\\_Genome-Edited\\_Plants\\_Web.pdf](https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Genome_Editing/EASAC_Genome-Edited_Plants_Web.pdf) (访问日期 2021 年 3 月 18 日)。
61. The Royal Society. 2016 *Which genes have been introduced into gm crops so far and why? In Genetically modified (GM) plants: questions and answers*. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/gm-plants/which-genes-have-been-introduced-into-gm-crops-so-far-and-why/> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
62. Kovak E, Qaim M, Blaustein-Rejto D. 2021 *The climate benefits of yield increases in genetically engineered crops*. bioRxiv. (doi:10.1101/2021.02.10.430488)
63. Agri-TechE. 2020 *Nitrogen fixation for cereals to sustainably increase yields in Africa*. 参见 <https://www.agri-tech-e.co.uk/nitrogen-fixation-for-cereals-to-sustainably-increase-yields-in-africa/> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
64. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 2000 *What is happening to agrobiodiversity?* 参见 <http://www.fao.org/3/y5609e/y5609e02.htm> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
65. Kamenya SN, Mikwa EO, Song B, Odeny DA. 2021 *Genetics and breeding for climate change in Orphan crops*. Theor Appl Genet (doi:10.1007/s00122-020-03755-1)
66. Cassman K, Grassini P. 2020 *A global perspective on sustainable intensification research*. Nat Sustain **3**, 262-268. (doi:10.1038/s41893-020-0507-8)
67. Zhang Q. 2007 *Strategies for developing Green Super Rice. Special series of Inaugural Articles*. P. NATL. ACAD. SCI. USA. 参见 <https://www.pnas.org/content/pnas/104/42/16402.full.pdf> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
68. Chung CT. 2020 *Is paying for fertilizer the answer to advancing African agribusiness? Lessons from China. Development Reimagined*. 参见 <https://developmentreimagined.com/2020/09/01/is-paying-for-fertilizer-the-answer-to-advancing-african-agribusiness/> (访问日期 2021 年 3 月 11 日)。
69. Eckardt NA. 2000 *Sequencing the Rice Genome*. Plant Cell **12**, 2011–2017. (doi:10.1105/tpc.12.11.2011)
70. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. FAOSTAT. 2013 *Food Supply - Crops Primary Equivalent*. 参见 <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CC> (访问日期 2021 年 3 月 22 日)。
71. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. FAOSTAT. 2013 *Food Supply - Livestock and Fish Primary Equivalent*. 参见 <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL> (访问日期 2021 年 3 月 22 日)。