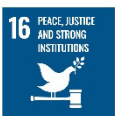




化学在食品可持续发展中的作用： 挑战与展望



SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



第 9 届化学科学与社会
高峰论坛 (CS3) 白皮书

日本 · 东京
2023 年 9 月

第 9 届化学科学与社会论坛
2023 年 9 月 19 日至 21 日，日本东京

组织机构
化学学会 / 资助机构

中国

中国化学会 (CCS)
国家自然科学基金委员会 (NSFC)

德国

德国化学会 (GDCh)
德国研究基金会 (DFG)

英国

英国皇家化学会 (RSC)
英国工程与物理科学研究理事会 (EPSRC)

美国

美国化学会 (ACS)

日本

日本化学会 (CSJ)
日本科学技术振兴机构 (JST)

白皮书成文

撰写: Rader Jensen, PhD;
Kazuhiro Chiba, Professor, PhD

编辑: Emiko Sakurada, CSJ Deputy Director;
Mitsuo Sawamoto, Professor, PhD

Copyright ©2024

日本化学会 (CSJ)、日本科学技术振兴机构 (JST) 及所有上述 2023 CS3 组织和资助机构

目 录

执行概要	6
简介	8
革命性食品工程中的化学	9
食品加工	10
土豆米	10
全豆豆腐	10
真菌发酵	10
水产养殖	10
可持续育种	10
助力可持续食品生产的化学	11
致力于食品可持续性的循环和可持续化学	12
向更加循环的经济转型	12
食物浪费与食品损失	12
不可避免浪费食物的利用	13
废弃物转化为能源	14
包装材料	14
土壤与土壤健康	15
全局视野	16
公众认知和总体趋势	17
推荐与建议	18
参考文献	21

第 9 届 CS3 论坛

化学在食品可持续发展中的作用：挑战与展望

化学科学与社会高峰论坛（CS3）每两年举行一次，本论坛汇聚了来自世界各地的多位资深化学家，邀请他们提出可行方案来解决社会在健康、食品、能源和环境领域面临的最紧迫问题。需要强调的是，CS3 顾名思义源于全球化学科学界，其天然使命是：确定什么是迫在眉睫的问题以及化学科学如何解决这些问题。与传统的国际会议不同，CS3 的独特之处在于，来自每个成员国的与会者既代表主导该国的化学协会，也代表该国相关的基金资助机构。本项活动以极具建设性的形式进行，参与国轮流举办。每届 CS3 会议之后均会发布一份白皮书，总结会上讨论的议题，并向全球公众和政府提出可行和可实施的解决方案。

CS3 是由中国化学会（CCS）、德国化学会（GDCh）、日本化学会（CSJ）、英国皇家化学会（RSC）和美国化学会（ACS）合作倡议发起的。研讨会得到了中国国家自然科学基金委员会（NSFC）、德国研究基金会（DFG）、日本科学技术振兴机构（JST）（之前由日本学术振兴会（JSPS））和英国工程与物理科学研究理事会（EPSRC）的支持。

第九届 CS3 会议聚焦全球粮食问题，主题为“化学在食品可持续发展中的作用：挑战与展望”，由 CSJ 和 JST 联合主办，东京农工大学校长 Kazuhiro Chiba 教授担任会议主席；JST 提供资金支持，CSJ 负责会务工作。

线下会议于 2023 年 9 月 19 日至 21 日在东京 CSJ 总部举行，会议主要探讨化学在实现粮食安全和可持续性方面的作用。各化学协会和机构的参会代表们共同参与讨论，确立和阐明化学在食品生产中的作用，并探讨化学科学如何为建立一个更安全、可持续的全球食品体系做出有意义的贡献。

2023 年的 CS3“化学在食品可持续发展中的作用：挑战与展望”旨在确立和提出包括化学学会和资助机构在内的化学界在应对可持续食品问题中的使命，粮食可持续性无疑是全球最重大、最紧迫和最具挑战性的问题之一，具有能源安全和气候变化等的同等重要性。人类可以在没有充足能源的情况下生存，但不能没有充足的食物；根据联合国教科文组织的数据，目前全球有 8 亿多人口仍处于饥饿的边缘。

聚焦化学科学和技术在食品可持续发展中的作用，第九届 CS3 由以下三个议题组成：

议题 1：革命性食品工程中的化学

强壮和抗病的作物

工程改良的畜禽和水产品

合成食品

议题 2：助力可持续食品生产的化学

食品工厂与智慧农业

新型食品加工

替代型新食品

议题 3：致力于食品可持续性的循环和可持续化学

氮和磷的循环化学

致力于水可持续性的化学

环境友好型农用化学品

食品包装、监测和回收

一些国家已就化学在粮食可持续性方面的作用开展了广泛讨论，有些已启动研究和发项目，深化对于上述议题的讨论。例如，美国化学会于 2023 年出版了一期特刊，题为“更多的食物，更少的化学品”[《Chemical & Engineering News》2023, 101(15) (5 月 8 日)]，主张开发和推广对环境影响较小的粮食生产技术，摆脱依赖化学杀虫剂和化肥的传统粮食生产方式。在日本，由内阁领导的名为“登月计划”的研发项目启动于 2020 年，其九个目标中的第五个即为“创建一个能够实现可持续全球粮食供应的食品工业”。该项目的技术基础主要涉及化学、化学品科学，旨在比如减少化学农药和化肥的使用，开发加工、保存、包装和运输方面的创新技术，以大幅减少粮食损失等。

正如本届 CS3 会议所强调的，我们必须再次认识到化学在解决粮食可持续性问题中的重要性：食品实质上是化学成分的聚合，所以我们有必要将食材看作是一种通过生物和生化过程生产得到的物质或材料，直到它被端上餐桌食用。在这些过程中，各种物质在土壤、河流、海洋、大气、生物圈中移动，并发生化学变化。从化学的角度全面理解这些过程以及可持续的食品生产将是引领下一个时代的不可避免的终极挑战。

本白皮书总结了峰会上的讨论和建议，希望不仅为化学科学界，而且为全球政府、产业界和公众提供具有说服力的论点。



上述描绘农业工人的壁画由卡尔·莫里斯于 1942 年绘制，现置于美国俄勒冈州尤金邮政局

执行概要

自有记录以来，粮食产量的增长是显著的。农业的扩张不仅是种植面积增加的结果，也是由于人们对于农业和技术发展，从车轮到人工智能，有了长足的理解。最早的进展源于宏观尺度的观察和实验，相对早期的技术成果有灌溉、轮作、使用粪肥和其他有机副产品作为土壤增肥剂以及选择性育种。在二十世纪，矿物质土壤改良剂、合成杀虫剂和除草剂以及农业机械被纳入农业实践中，并逐渐不可或缺。但这些进步并非没有经济、环境和社会代价：对石化能源的需求不断增长，生态破坏也变得越来越普遍；在许多重要的农业地区，灌溉依赖于地下蓄水层，而地下蓄水层正以不可维系的速度被开采，一旦枯竭，将无法恢复。气候变化正在造成难以预测的天气和季节变化，并影响淡水的供应和质量。

人口的增长推动了对更高农业产量的需求。在过去的一个世纪里，这一增长速度显著加快，自 20 世纪 40 年代以来，人口增长了 4 倍。人口增长和粮食需求这两个趋势有着密不可分的联系。根据联合国的数据，2023 年世界人口为 80 亿，预计到 2050 年，将增加约 20%，到 2100 年将再增加 10%。所以“如何养活不断增长的人口”成为一个时常被提及的问题。然而，可能更合理的问法是，“如果农业生产力没有提高，这种增长会持续吗”？人类人口增长的预期值取决于粮食的供应。虽说到目前为止，粮食产量在随着需求而增加，但也已接近极限，某些方面已达到甚至可能已超过地球系统的临界点。尽管粮食产量稳步增加，但饥饿、营养不良和粮食危机仍然顽固存在。在当下时代，饥饿和营养不良在很大程度上与粮食获取途径和分配不均有关；也就是说，这属于社会经济和地缘政治问题。然而，化学和技术可以在许多方面为改善粮食安全做出贡献，无论是通过前沿技术还是传统做法来应对挑战，从化学角度加深对粮食系统的了解可以为解决粮食安全问题提供重要的指导方针和选择。

食品体系相关的研究正在学术界、工业界和政府中广泛而持续的开展，学术和政策领域的范围很广，从专精的基础研究到宽泛的应用开发，可更有效地利用水、能源和其他资源并减少生态影响的新工艺和新食品正不断地被设计和开发出来。除了提高食品供应的稳定性和可持续性外，改善营养状况和提供符合消费者口味的新型食品也是当务之急。另一个有前景的研究领域是开发循环或再生而非线性生产系统，将副产品循环返回可被微生物（包括真菌）或其他生物转化的生产流程中。采用副产物作为生产原料已有长期深入的研究，相关工艺的开发和改进仍在持续。高度特异性的基因编辑提升了人们对化学生物学的理解，并进而为农业技术做出贡献。探索土壤和水中的微生物，研究它们的相互作用，并开发新的分析技术来探测这些复杂的自然系统，都是非常重要的研究领域。至关重要的一点是，系统思维正成为研究和开发的重要元素，并确保创新举措为

社会所接受和包容，为所有全球社群提供机会。

本次峰会提出了一些建议，旨在为所有人提供更营养的食品、更健康的饮食、新的互联供应链、粮食安全和粮食可持续性，以及减少粮食系统中的浪费。报告中高度强调，必须意识到粮食生产是动态、复杂、且不时脆弱的，本报告中提出的建议要点在周期性粮食系统中是相互关联的。土壤健康是维系农业的关键要素，应大力支持对土壤微生物组以及植物与其他土壤生物之间共生相互作用的持续研究。土壤中的生物和矿物过程在氮磷循环以及碳循环中发挥着重要作用，更好地了解这些过程与应对气候变化密切相关，土壤健康与人类健康之间同样有着密切的联系。人们迫切需要考虑由于食物损失和浪费造成的营养流失，应鼓励针对粮食损失问题进行研究，如改进保存方法和包装材料，并继续开发利用副产品和食物废弃物作为资源或商品的方法（例如见<https://www.bbc.co.uk/news/business-67548961>）。应大力支持对人类营养的深入了解以及改善营养状况的方法探索。畜牧业在营养和平价饮食中的角色和地位应从客观的系统层面考虑，充分考虑营养、牲畜饲养方式和地点，以及动物在粮食系统中发挥的多重作用。对其他非动物性食物来源和新兴食物来源进行客观、系统层面的分析也是必要的。公众对化学、技术和农业的看法不应被忽视，教育体系中充分沟通和扩展性系统思维至关重要。也许最重要的是，种植者、加工商和消费者必须参与对食品系统未来发展重点的审议。

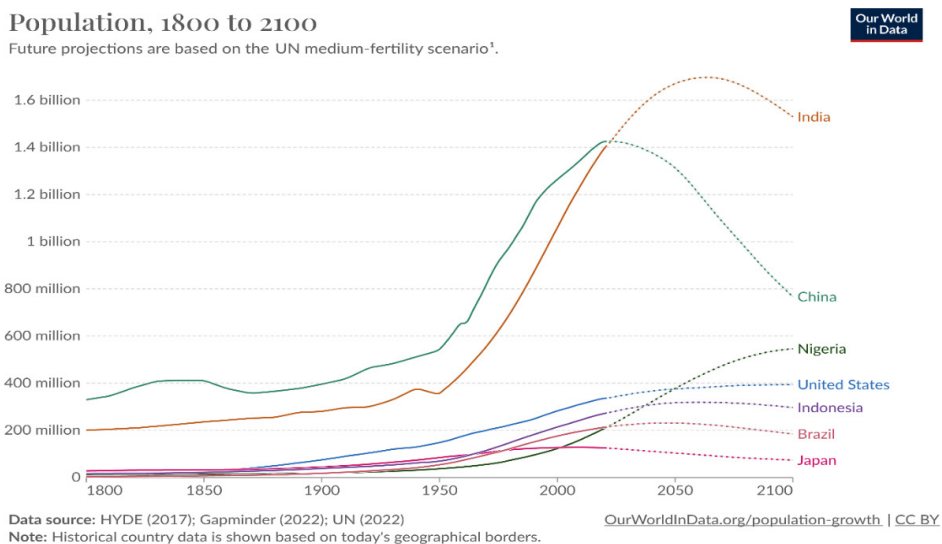
简介

“地球提供的食物足以满足每个人的需求，但无法满足每个人的贪婪。”

— Mahatma Gandhi

民以食为天。我们在寒冷季节里也许需要保暖的衣服，生病时可能需要医疗护理，然而从受孕到死亡，我们的生活毫无疑问依赖于健康和营养食品的稳定供应。人类作为狩猎 - 采集者出现，并因此繁荣兴盛。然而，正是固定式农业的发展，才使得村庄、城镇、城市的形成成为可能，事实上，固定式农业开启了人类文明的起源。高效、可靠的生产、储存和加工促进了劳动分工，使文明得以蓬勃发展。随着对农业了解的加深，产出增加，人口也随之增长。继灌溉、轮作和选择性育种等实践之后，出现了机械化、工业化生产的肥料、化学农药、牲畜药物和疫苗。加工和保存方法的改进提高了保质期和安全性，改善了食品安全。这些综合发展使得人口已增加到 80 多亿，在过去 80 年中增加了 4 倍。

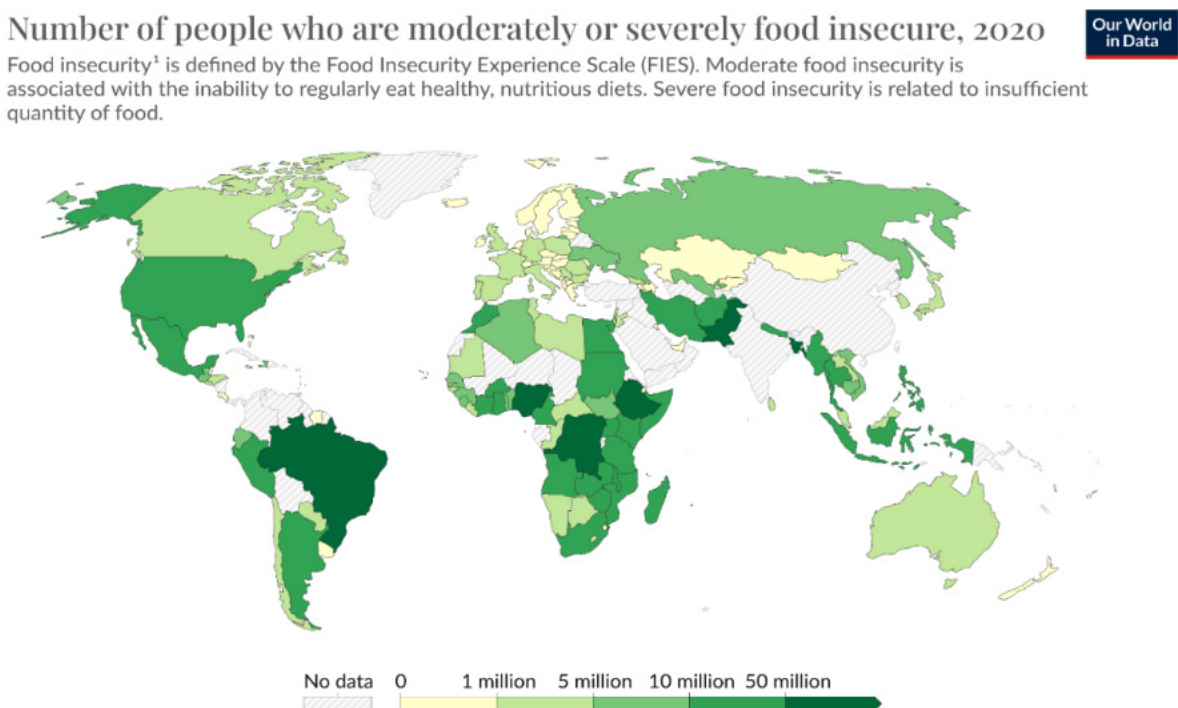
尽管人类农业稳步发展，粮食产量增加，但饥饿依然顽固地持续存在。根据联合国粮农组织的一份报告，2022 年全球约 9% 的人口营养不良，与此同时，肥胖亦同样普遍。据报道，2022 年全球有 6.91 亿至 7.83 亿人面临饥饿问题，这种长期营养不足的状况预计将持续十年。此外，2022 年全球五岁以下儿童中估计有 22.3% 发育迟缓，6.8% 消瘦，5.6% 超重。据报道，负担能力是决定营养状况和粮食安全的关键因素。联合国 2015 年提出了“可持续发展目标”（SDGs），粮食安全对于实现其中的前三个目标（无贫困、零饥饿、健康和福祉）至关重要。《2023 可持续发展目标报告》揭示了饥饿问题的长期性。根据这份报告，预计 2030 年全球将有 6 亿多人面临饥饿，这主要是由于相对于收入的负担能力不足，估计全世界有三分之一人口经历中度至重度的粮食匮乏。此外，据透露，营养不良在全球范围将持续存在。



联合国《世界人口展望》提供的未来人口变化的预测趋势

从全球范围来看，目前的粮食安全很大程度上是一个分配问题，也就是说，主要是物流和经济问题。然而，环境制约因素日益明显。目前许多农业地区严重依赖地下蓄水层，这些蓄水层正在迅速枯竭，一旦耗尽将无法恢复。降水变得越来越难以预测，这导致作物产量的可预测性越来越低，大气总温度的升高也会扰乱农业生产。此外，大规模工业化农业生产对环境的影响日益引发关注。

2023年9月19日至22日，第9届CS3峰会在日本东京举行，来自日本、中国、德国、英国和美国并代表各国化学学会的顶尖科学家们出席了会议。本次峰会的主题是“化学在食品可持续发展中的作用：挑战与展望”，内容分为以下几个部分：(1) 革命性食品工程中的化学；(2) 助力可持续粮食生产的化学；(3) 致力于食品可持续性的循环和可持续化学。本次峰会的目标是介绍当前与粮食和食品生产有关的研究，并讨论化学科学如何助力解决粮食安全、饥饿和营养不良问题。



Data source: Food and Agriculture Organization of the United Nations
OurWorldInData.org/hunger-and-undernourishment | CC BY

来自联合国粮农组织的全球粮食不安全状况统计

革命性食品工程中的化学

学术界、工业界和公共部门广泛开展与农业、食品加工和营养相关的科学研究，研究活动跨越了从实验台上的分子到工业规模的工程项目，从根系和微生物之间的共生相互作用的研究到从农场到餐桌的整个供应链的探索。主题范围甚广，本报告无法一一涵盖，下面将简要介绍第9届CS3峰会上提及的研究领域。

食品加工

土豆米

中国土豆产量居全球首位，年产量近 1 亿吨。为了解决土豆不易储存的问题，中国研究人员开发了一种新工艺将土豆加工成类似大米的“土豆米”，是既营养又便宜的主粮替代品。该工艺节能节水，并优化了废弃物管理。土豆淀粉产量每年总计 600 万吨，产生大量副产品，如果不加以利用，可能会被废弃和浪费。利用这些副产品的研究包括从土豆汁中提取蛋白质、提取固形物用作动物饲料以及将废水用于灌溉。

全豆腐

传统的豆腐生产会产生黄浆水和豆腐渣，目前这些废水和废渣要么被丢弃，要么饲喂给牲畜，造成环境问题和营养损失。峰会上所讨论的一种新型工艺可以实现零排放，并且可以提高豆制品产量，用传统产出 350 克豆腐的原料生产出 500 克豆腐。由此制成的豆腐更富营养，同时保持了消费者所追求的传统特征。

真菌发酵

许多食品生产的副产品要么不易被消化，要么口味不佳，所以只能用作牲畜（动物）饲料，或简单地作为废物被丢弃。开发使用农业副产品的一种新方法是利用真菌。与动物或植物不同，真菌能够消化木质素。棕榈皮是棕榈油生产的主要副产品，目前作为废物焚烧，对环境造成严重影响。德国最近的研究表明，棕榈皮可以用作真菌的基质，产生的真菌物质虽不直接用作人类或牲畜的食物，但适合黑蝇幼虫食用，长大的幼虫或成虫可以用作家禽或水产养殖的饲料。

水产养殖

虾是蛋白质的主要来源，养殖虾在市场上占据主导地位，尤其在南亚。水产品的品质和产量高度依赖于水的盐度和碱度以及饲料成分，微生物群也发挥着重要作用。在分子水平上的多尺度理解和改进水产养殖中的代谢物分析有助于提高效率和可持续性。这种方法普遍适用于不同品种的水产养殖，也适用于其它农业体系。

可持续育种

基因改造是一个备受关注的话题，然而，人类利用作物和牲畜的基因变异的历史与固定式农业同样久远。几千年来，人类一直在选择具有所需特征的生物，并通过选择性繁殖产生改良生物。甜橙、康沃尔野鸡、富士苹果和哈斯牛油果都是通过使用传统育种方法进行有利突变、以获得理想的性状而产生的。在二十世纪，基因修饰最先是通过暴露于电离辐射或化学修饰直接诱导，产生随机、不受控的突变。随着对化学生物学和遗传学的理解的增进，可用更多可控和选择性方法，并通过使用重组 DNA 技术的基因整合来完成生物体修饰。在 2000 年前后，随着 CRISPR CAS9 (CRISPR: Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats; CAS9: CRISPR Associated

Nuclease No 9) 辅助基因编辑的出现，基因编辑的准确性得到了提高，这有助于实现核酸碱基对的精确靶向和识别，通常会产生与自然过程中可能出现的突变相同的单一突变。无论是通过传统的选择性育种还是通过靶向基因编辑，基因修饰都有巨大的潜力，为粮食作物带来诸如提高抗病虫害、改善耐热性和耐旱性、提高产量、改善营养状况和延长保质期等特性。然而，公众的看法也必须纳入考虑，有效的沟通和包容性的审议过程至关重要。

助力可持续食品生产的化学

自人类农业诞生之初，化学就在粮食生产中发挥了至关重要的作用，尽管直到近代它才成为政策的明确主题。任何生命形式或过程都可以用化学方式来描述，因此，种植植物、培养真菌或饲养动物都可以被视为是促成化学过程的行为。观察到种子在特定时间和特定条件下放入土壤中会导致植物发芽，这就是化学作用。即使我们不知道这个过程中确切的化学和微生物细节，但认识到卷心菜在切碎、加盐并放在密封容器后会生成酸菜或泡菜，这就是化学反应。作物轮作以提高产量，植物和动物的选择性育种以获取所需的性状，将谷物制成麦芽以提供甜味，将糖发酵成乙醇，蒸馏酒以浓缩乙醇，以及制作酸奶以提高储存性和营养，所有这些都可以通过理解为化学。因此，数千年来，人类一直在食品和农业中发现化学物质，并运用化学知识。尽管直至最近几个世纪，我们才了解微生物或分子水平上的详细过程，但在如何生产食物的宏观层面上，我们对化学的了解已相当深入。



泡菜的制作是食品生产中化学反应的一个例子，是在人们并没有探明其中蕴含的详细化学过程的情况下产生的。图片来自 Wikimedia Commons。

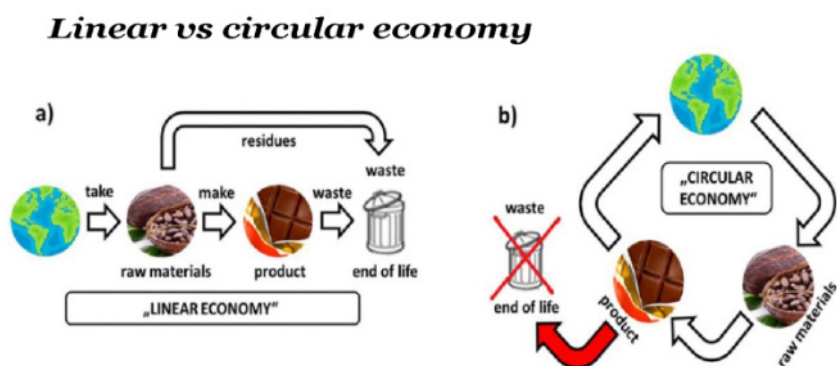
不幸的是，人类往往无法高屋建瓴地去理解农业活动的长远影响。我们常常把田地或牧场视为一个孤立的单元，而不考虑它在整个环境中的位置与作用。这并不奇怪，立竿见影的效果往往更吸引关注并具有影响力。当人口相对较少时，粮食生产开垦土地的影响、农业灌溉的影响（扩散污染物）、生物或矿物化肥施用的影响、以及畜牧业的影响等，都处于周边大环境维持环境和生态平衡的能力范围之内，农业活动和环境系统有能力在动态平衡中协同发展。事实上，整个物

种，例如玉米和家禽等，都是随着人类农业的发展而进化的，农场和农业社区周围的当地生态系统也是如此。然而，随着人口的增长，农业的影响也在增大，而且往往是急剧增大。在过去的两个世纪里，大量物种因人类破坏其栖息地或不被认为具有经济或文化重要性而被大量杀害或灭绝。矿物肥料和合成杀虫剂对环境的影响也不容小觑，农作物实现了可靠的高产，极大地改善了粮食安全 and 人类福祉，但与此同时，农用化学品的过度或不正确的使用往往对环境和人类健康造成负面影响（例如，请参阅 <https://www.europol.europa.eu/media-press/newsroom/news/2-040-tonnes-of-illegal-pesticides-seized-and-21-suspects-arrested-in-global-operation>）。兽用（和人类）药物的使用也存在安全隐患，人们担心其会在食品中残留、产生抗生素耐药性和造成河流系统的污染。因此，科学方法对农业的巨大贡献应该得到承认，但与此同时，从过去的意外后果中汲取教训，并在继续发展的过程中纳入全局考量，这一点至关重要。

致力于食品可持续性的循环和可持续化学

向更加循环的经济转型

全球经济以线性的经济思维为主导。线性的经济系统需要连续投入来维系所需的产出，并假设存在无限的资源和无限的持续增长和扩张的空间。线性经济体系的相关市场只关注为产出而备的代价，其结果是没有考虑森林砍伐、水污染或温室气体排放等负面的对外影响。短期思维的主导下，可能导致资源利用低效和浪费过度。然而，循环经济思维充分考虑了微观、介观和宏观层面的相互作用，从而更有效地利用和再利用资源，将负面影响降至最低，但也有可能限制增长潜力。如果要避免环境恶化和地缘政治不稳定，向更循环的经济模式转型将是至关重要的。



线性经济和循环经济的对比（J. Braybrook. Presented at the 9th CS3）

食品浪费与食品损失

关于食品浪费和食品损失的定义不同组织、机构或部门的解释不同，但从广义上讲，食品损失发生在生产链中，而食品浪费发生在零售和消费阶段。根据联合国粮农组织的数据，14%的粮食损失发生在零售前，另有17%在零售和消费者那里。其中一些损失是可以避免的，例如

由于包装或储存不当而变质，而大部分损失是难以避免的，也就是说，食品的一部分可能对人类来说不适口或难以消化，例如柑橘皮或核桃壳（见前一节），所以应将维系人类生存的可食用食品作为最优先考虑的食物资源（参见相关内容；<https://www.food.gov.uk/research/behaviour-and-perception/the-creation-of-food-waste>）。相关技术和结构的改进，如改善储存、加工和包装，以及使用更耐腐败的品种，将减少粮食损失。了解与果蔬成熟有关的信号通路已在食品保鲜方面取得了重大进展。例如，乙烯传感器和乙烯清除催化剂的使用提升了对果实成熟度的控制。丢弃的食物固然可以堆肥，但充分利用其中的营养成分或化学物质则更加可取且可行。不适合人类食用的食品副产物长期以来一直被用作牲畜的饲料，其实是可以进一步开发使用的。农业副产品和废弃食品也是高附加值化学品的丰富来源，比如使用生物精炼技术可以从众多农业副产品中提取颜料、蜡质、油、糖和类黄酮，不适合人类或动物食用的废物也可用于生产燃料。



可堆肥垃圾桶（图片来自 Wikimedia Commons）

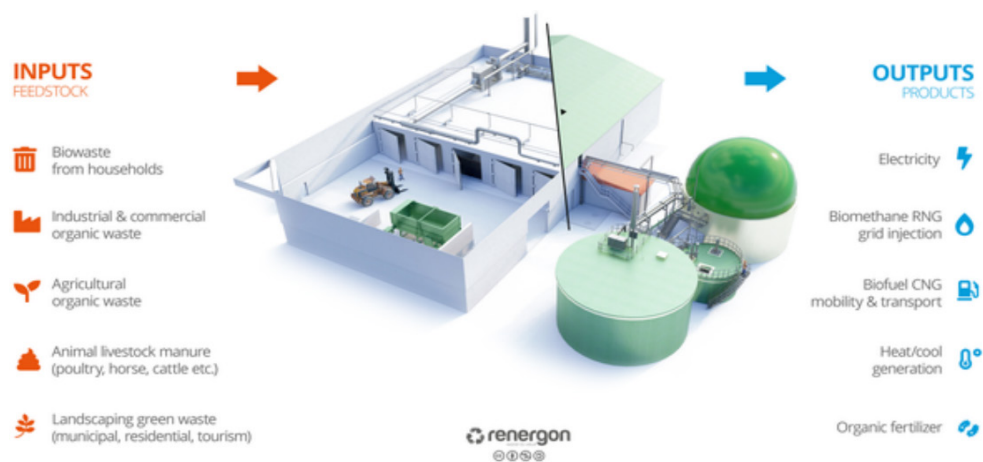
不可避免浪费食物的利用

食品的初级和次级加工产生了大量不可避免的食物浪费，估计占重量的 30%~35%。如果任其腐烂，会导致温室气体排放，也会损失宝贵的营养。不可避免的食物浪费，例如植物中不能被人类或动物消化的部分，可以被视为大自然给出的一张关于结构、形式和功能的元素周期表，因为它富含一系列可利用的化学物质和材料。例如，全球橙子年产量约为 7000 万吨，生产得到的果汁约 3000 万吨，剩下的残渣中富含纤维素、半纤维素、果胶、黄酮类化合物和萜烯，柠檬烯是一种用于香精和香料的重要商品，也是精细化学合成中有用的手性结构单元。

果胶是一种有用的商品，在食品中除了制作果酱，还用做流变改性剂或增稠剂。果胶在工业上是通过加热和利用盐酸提取的，这会产生大量的酸性废水。英国最近的研究表明，在零废弃生物精炼厂里，无酸微波工艺可利用柑橘残渣的天然酸度，在较低温度下生产果胶，并可提取精油、抗氧化剂和微纳纤维素。这些方法适用于处理其它食物废弃物，如果核、种子、果皮和皮壳。

废物转化为能源

食物废弃物可以通过多种方式转化为可用能源，传统用于烹饪和加热目的的生物质燃烧可将其直接转化为热量，先进技术可通过在厌氧条件下加热热解，将其转化为更方便使用的生物燃料。该工艺可用于提供类似于木炭（生物炭）的固体燃料、类似于重油的液体燃料（生物油）或合成气（沼气），而合成气可通过 F-T 合成以工业规模制备液体烃燃料或化学原料。生物质可通过高温气化直接转化为可用的热能，微生物的厌氧分解可将生物质转化为（生物）甲烷，用作燃料或化学原料，也可将生物质转化后用作肥料。碳水化合物可以通过发酵转化为生物乙醇和生物丁醇，脂质可以转化为生物柴油和相关燃料。这些技术在商业规模上的发展呈现良好态势。



沼气工厂（图片来自 Wikimedia Commons）

包装材料

食品包装在减少食物损失和浪费方面发挥着重要的作用，但也带来了许多环境问题。直接接触食品的包装必须符合食品接触材料法规，以防止化学物质迁移到食品中。如果食品在当地消费，可重复使用的包装可以是有效、高效的并且对环境的影响最小；但如果是长途运输，可能会带来巨大的物流和能源负担。现代的包装通常使用的是复合材料和多层注坯吹塑，难以回收利用，需要包装耐用就可能无法生物降解。废弃食品包装造成的污染已成为重大的环境问题，微纳塑料在环境中无处不在。然而，可生物降解包装可能无法为内容物提供足够的存放保护，并可能因制造要求和原材料来源而产生其它的环境负担（参见相关内容 (<https://www.food.gov.uk/research/behaviour-and-perception/the-creation-of-food-waste>))。理想情况下，为了最大限度地减少对环境的影响，食品包装材料应该是可食用的，或者至少是易降解的，制造可食用薄膜和涂层是应用化学提供有效解决方案的一个例子。

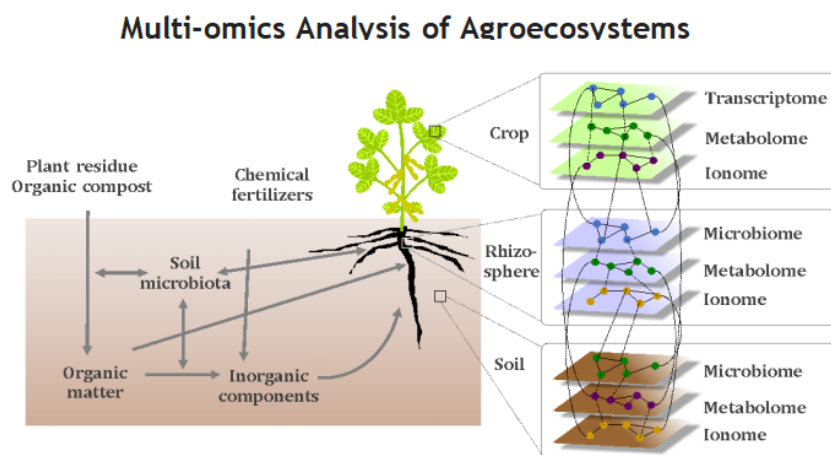
食品包装中加入抗氧化剂和防腐剂由来已久，丁基羟基甲苯 (BHT) 和丁基羟基茴香醚 (BHA) 在几十年里一直是食品和包装中的有效抗氧化剂。作为替代方案，可以开发基于生物的、可降解的抗氧化剂、防腐剂和消毒剂。此外，活性和智能包装系统可以利用传感器来监测生物化学反应，

直观地指示内容物的新鲜度或安全状态。使用传感器的智能包装解决方案可在不需要特殊设备或严格流程的情况下实时评估食品质量，减少对固定的保质期编码的依赖。化学和包装技术大有助于改进传统包装体系、创造新型包装材料，以减少食品和包装浪费。

土壤与土壤健康

土壤是无机和有机固体、液体和气体的混合物，是陆地生态系统的主要组成部分。土壤是碳、氮和磷循环的主要储存库，土壤健康对于健康农业至关重要。植物学、昆虫学、微生物学和化学学科的进步极大地提升了人们对土壤生态学的理解，随之也提高了对农学的理解，但在土壤健康和功能方面仍有待探索，对土壤微生物的了解亦需不断增进。我们正在多个层面上积极研究植物和土壤微生物之间的关系，对于微生物水平的调研以及基于代谢物、pH 的影响和生物特征的土壤分析也在进展之中。微生物在二氧化碳、一氧化二氮和甲烷的产生中发挥着重要作用，这涉及温室气体导致的全球变暖问题，同时也事关碳、氮和磷循环。更好地了解土壤生态可以获得更高效、可持续的肥料和土壤改良剂，减少土壤和植物活动产生的温室气体排放，提高氮利用效率、促进碳封存和矿化，提高无机氮和磷的利用率、减少其浸出是非常必要的。

多组学分析让我们从研究一种植物和一种微生物之间的单一相互作用，转为综合研究自然环境中植物和微生物群落之间的相互作用。

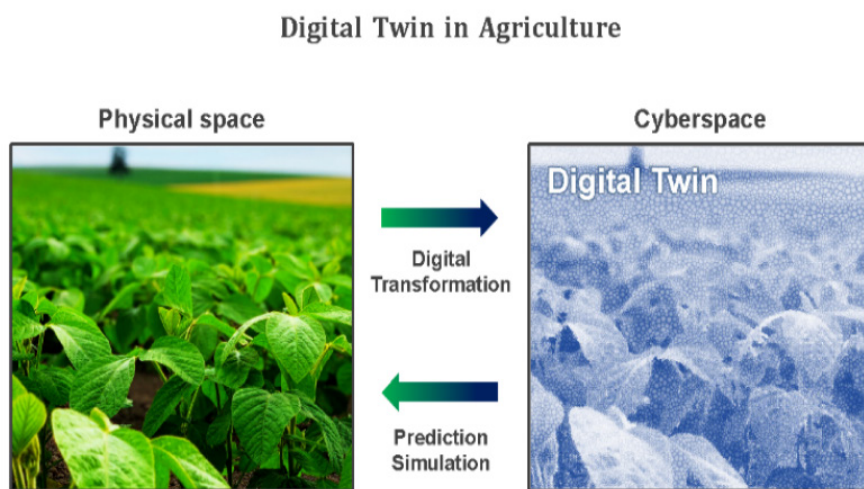


农业生态系统的多组学分析 (Y. Ichihashi. Presented at the 9th CS3)

我们必须认识到碳、氮和磷循环的地球边界和容量限制，并更加彻底地了解人类活动对这些系统的影响。在农业和更广泛的领域，工业规模使用这些自然元素，无论是将它们作为资源进行提取，还是在使用后将其排放，对环境的影响都不容小觑，淡水资源亦是如此。此外，合成化学品在农业中的应用也对环境产生了影响，历史上使用 DDT 和 2,4-D 等化学农药和除草剂导致了不容忽视的严重后果，由此产生的公众质疑也是可以理解的。城市和工业污染也对环境产生了影响，这是农业地区关注的问题，尤其在工业污染导致土壤退化的地区。这些化学品包括“永久

性化学品”如 PFAS、污水中的重金属和药品、二噁英和多环芳烃等。与此同时，我们也必须认识到，化学对农业的贡献极大地提高了生产力，改善了全球粮食安全。

如果有适当的治理、控制和监督体系，化学品的使用本身没有坏处，但若化学品的使用对环境造成过度影响就会导致出现问题，在地球边界和可持续发展目标的背景下采用和践行绿色和可持续化学是至关重要的。农业和粮食生产以及推广某些做法应尊重科学、遵循规律。农业实践中的化学知识无论是自然衍生的还是人类探索的结果，需要和动物科学、环境科学、植物科学以及土壤科学相结合，以构建一个强大、持久的食物系统。了解农业活动如土地利用、水利用和化学品使用的非预期影响，对于维持稳健、可靠和有弹性的生产系统并避免不良副作用至关重要。将现代科学知识与传统实践相结合，如作物轮作和养分循环回到土壤中，是具有前景的策略。人们正在探索用多组学方法来更好地了解微生物、根系和土壤化学，计算模型也正在开发中，但由于涉及的复杂性很高，尽管虚拟模型也在建设，但目前网络空间仍然没有完整的农业模型可用。



农业中的数字孪生（Y. Ichihashi. Presented at the 9th CS3）

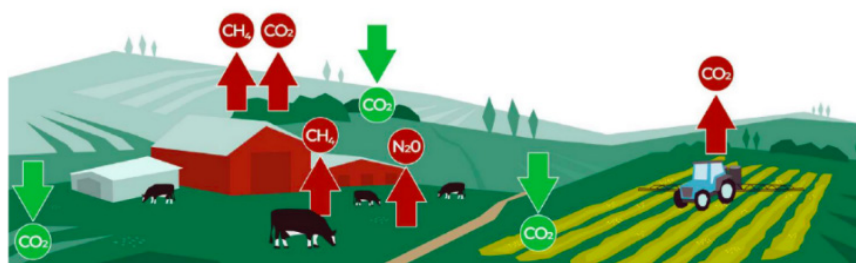
全局视野

一个健康、有韧性的粮食系统必须满足人类社会的营养需求，并与环境兼容。在当下时代，要实现一个稳健的粮食系统将面临许多挑战。总体而言，气候变化使天气模式变得更加严峻和不可预测，导致生长季和收成的可靠性降低。除了气候变化之外，许多农业核心区的农业生产还在依赖地下蓄水层进行灌溉，而这些蓄水层正在不可逆转地枯竭。即使不考虑气候变化，随着人口的持续增长和对淡水需求的增加，水资源的供应正成为一个日益严峻的问题。扩大灌溉系统和海水淡化项目可能会有一些缓解作用，但这些也会带来环境影响和增加能源需求。竞争性的需求意味着农业用地的保障也是一个问题，因此，全局视野是必需的和基本的。将短期粮食产量最大化，即当下过度消耗水和其他资源，而忽视对今后的影响，这对可持续发展是不利的。清理荒野地区用于粮食生产，扩大农田灌溉或干预自然水系，短期也可以增加粮食供应，但有可能破坏生态系统，

导致生物多样性丧失和碳吸储库的破坏等不良后果。此外，社会、经济和政治需求也必须纳入考虑之中。

对畜牧业的思考恰如其分地阐明了系统思维在粮食系统中的重要性。在工业化之前的农业以及狩猎—采集社会中，动物在食物系统中起着生物转化器的作用。也就是说，食草动物，特别是反刍动物，食用人类不能食用或不能有效利用的食物，并将其转化为适合人类的食物，依动物物种不同可以是肉、奶或蛋等形式。这在粗放型农业中是相当有效的，动物在不适合生产人类食用植物的土地上觅食，然后提供食物给人类。然而，人们对反刍动物产生甲烷及其对全球变暖的潜在影响感到担忧。甲烷是瘤胃中微生物群发酵的副产物，目前全球正在进行大量研究，以减少甲烷的产生，以及查明是否有其它途径可有效解决瘤胃微生物发酵氢气的利用问题。在集约化工业规模的动物养殖中，动物通常以谷物和豆类为食，而这些原本可以被人类直接食用，而且不同物种之间，饲料转化率差异很大。对动物源性食品碳排放的担忧导致许多人认为完全不含动物产品的饮食才是合理的。然而，完全素食也会产生健康方面的问题。动物源性食物，如鸡蛋、牛奶和肉类，营养丰富，含有一系列必需氨基酸、矿物质和维生素。此外，人类需要膳食中的钴胺素（维生素 B12），而这种维生素只能从动物性食物或合成补充剂中获得。因此，面对如此众多的利益冲突，对食品生产做出适当改变也是非常具有挑战性的。使消费者受益的变动可能不会有利于分销商，使小生产者受益的也可能不会有利于大生产者及其股东，而减轻环境负担的那些转变可能会带来饮食缺乏丰富营养。虽然化学有助于更好地理解这些问题，并提供解决方案，但人们应该从科学、政治和社会经济的角度来综合考量。

Net Farm Carbon, the sum of emissions & sequestration annually
Currently still not been calculated



农场的碳净排放量，即每年的碳排放量减去固碳量，这方面数据目前尚未统计核算
(N. Scollan. Presented at the 9th CS3)

公众认知和总体趋势

根据粮农组织的一份报告，2018 年农业及其相关用途的温室气体排放量占全球所有排放量的 17%。农业在其他方面对环境的影响也很严重，因为灌溉、农用化学品和水土流失，天然水系统被破坏，因为大规模单一种植、广谱农药使用和栖息地被破坏，生物多样性正在丧失。与此

同时，我们迫切需要提高粮食生产的质量、稳定性和可持续性。当前的农业综合企业模式从长远来看是不可持续的，尽管人们已减少化学品投入、以及利用一系列技术有针对性地使用化学品，但依靠农用化肥和农药行业无法实现进一步的可持续生产。农业实践是以革命性的、颠覆性的方式改变，还是以演化的、渐进的方式改变仍然是一个悬而未决的问题，但它们终将改变，它们必须改变。采用绿色和可持续的化学实践可以极大促进我们的集体智慧，并决定我们如何应对粮食系统面临的挑战。由于还涉及社会、政治和经济因素，解决方案需要达成共识，比如改变是否会影响人们对食品价格的承受力，或者消费者是否愿意改变他们的饮食习惯，这使得公众的看法和参与成为重要的考虑因素。

粮食安全无法得到保障的原因在全球范围内并不统一，为改善营养安全而必须解决的社会和政治因素也不尽相同。每个地区、每个国家、每个经济体、每种文化都面临着相关但独特的社会、经济和环境挑战。但与此同时，地球上的人口规模也需要全球的协调治理。一个地区的情况和事件可能会直接或间接地对其他地区产生很大影响。一个全球性的共同点是，必须与农民、加工商、零售商、投资者和消费者更多交互，使他们拥护或至少接受实现可持续粮食生产所必需的变革，并达成共识。通往成功的道路可能不止一条，但我们必须就其中一条或多条路径达成一致并坚定地走下去。

也许化学作为一门科学的最重要贡献就是基于经验观察和实验验证而得到的明确的系统性的思维。将系统思维纳入教育可以帮助社会朝着一个包容兼纳的、人们能够应对和解决共同复杂挑战的方向发展。人们对全球粮食系统的互联性有了更多的认识，而且由于互联网的兴起，可以更轻松地实现数据互联。尽早培养在系统和跨学科层面的思考力，可以提升学生的认知层次。美国化学会等组织大力鼓励这种做法，并积极制定计划，将系统思维纳入本科教育，并将课程与环境、工业、经济和社会问题关联起来。

推荐与建议

从“化学”的角度来解决人类社会当下和未来面临的无法回避的粮食问题，确实是事关人类生存的大挑战。世界目前的状况很大程度上是世界人口急剧膨胀，以及始于绿色革命的粮食生产技术创新的人类活动扩张的结果。农业作为一种粮食生产活动，在很大程度上依赖于地球和自然界的再生能力，并利用自然的功能。这种平衡已经被打破，气候等的明显变化正以前所未有的速度加剧危机，比如大量碳从土壤释放到大气中，以及生物多样性丧失。我们现在需要运用我们的智慧来解决这些问题，共同努力，因为这是全人类面临的共同挑战。

目前粮食安全无法保障的主要原因与物流和分配有关，因此必须作为社会、经济和政治综

合问题加以解决。气候变化导致的极端天气事件将进一步加剧粮食危机。然而，化学可有助于从微观到宏观理解粮食系统，并为改善生产、加工、分配和营养提供基础，同时为实现稳定性和可持续性提供支撑。尽管种植什么、如何种植、如何分配食物和人们吃什么都是受限于人类诉求的社会问题，但人类营养需求、作物种植条件，以及生物圈的范围和局限性却是客观存在的。化学可以提供一系列潜在的解决方案，从中可以选择一条或多条可持续的途径。在化学基础上的理解对于建立强有力的系统评估和抑制“漂绿”（指表面上大张旗鼓倡导环保而实际别有所图，甚至与环境保护背道而驰）以提供更强健和可持续的粮食系统至关重要。

幅员广阔的牧场和土壤健康的耕地是农业系统的重要组成部分。本次峰会强烈建议进一步加大对土壤及土壤微生物基础研究和应用研究的资助。土壤微生物在多个领域提供了大量的研究切入点，成果丰硕必会极大地造福于农业，比如减少温室气体排放，增加碳封存。更好地了解代谢产物介导的土壤微生物、真菌、野生植物和粮食作物之间的共生相互作用，可以为稳定收成提供基础同时减少环境负担。微生物在氮、磷和碳循环中的作用，以及生物介导的与二氧化碳、甲烷和一氧化二氮相关的氧化还原反应，都是值得深入研究的领域。随着大气中二氧化碳浓度的增加，了解土壤在碳封存和矿化中的作用变得越来越重要。对具有可持续属性的化肥、杀虫剂和除草剂等的开发研究也很重要，相关技术可以在它们的定时定量使用和跟踪其环境轨迹方面发挥作用。

化学可以贡献新工艺，减少供应链端食物浪费和食物损失，实现资源循环供人类再利用。化学可以改进包装，减少食品变质，延长保质期。化学可以开发实时分析方法，以确保食物来源，食品质量与安全。副产品和无可避免的食物垃圾具有巨大的利用潜能，可用作牲畜饲料、升级为加工食品配料、增值化学品的原料，以及用于堆肥和生物转化。我们应大力推广从食品废弃物中提取油脂、萜烯、醇类、染料、色素、蜡、糖、类黄酮和其它成分来生产日用化学品，更多资助利用新型生物衍生溶剂、离子液体、光、超声、微波和光催化的新方法研究。这些领域具有社会和经济效益，值得公众和企业大力支持。



食品废弃物的综合利用（A. Matharu. Presented at the 9th CS3）

开发具有高营养价值的食品，并在整个加工和分销链中一直保持其营养成分直至到达消费者手中。人类是作为狩猎 - 采集者进化而来的，因此以富含常量和微量营养素的混合饮食为生。从化学角度了解粮食生产可以带来更高营养价值的收成物，加工不仅可以保存收成物，还可以增强自然产生的营养成分。食品的风味和外观的重要性不容忽视，营养食品只有在消费者真正愿意食用的情况下才有价值。

建立一个满足社会营养需求的稳健的可持续粮食系统至关重要，同时必须解决农业产生的温室气体排放的问题，并在必要时制定缓解和改良策略。二氧化碳、甲烷和一氧化二氮的农业排在很大程度上取决于商品的生产和加工方式及地点，了解这些排放与碳循环和总体碳足迹的关系很重要。畜牧业尤其如此，牧场饲养的牲畜往往具有较小的碳足迹（一定时间内直接或间接导致的二氧化碳排放量的指标，涵盖了产品从生产、运输、最终使用到废弃处理的整个生命周期的排放），而饲养场里谷物饲喂的牲畜具有较高的碳足迹，特别是在计算时考虑了近期土地用途变更的情况下。大幅减少动物产品的消费，特别是那些以高饲料转化率集约化饲养的动物产品，可以显著减少温室气体排放，并且总体上可减少人对生态系统的影响，尤其在土地和水的使用上。然而，除非慎重考虑好如何补充因为诸多原因可能导致的营养缺乏，我们不建议采纳完全的不含动物产品的饮食。动物产品提供人类健康必需的营养物质，其中包括植物或真菌无法提供的钴胺素（维生素 B12）。此外，动物在有效利用生态位（如牧区）方面发挥着重要作用，否则这些生态位无法用于粮食生产。在传统农业中，牲畜作为一个完整循环的部分发挥着重要作用，在现代农业中亦应如此。因此，围绕畜牧业的争议问题应是通过综合考量生产量、生产地点、生产方式和消费方式等问题来合理解决，许多依赖植物衍生品的食品生产行业也必须解决这些问题。我们还必须解决在沙化缺水地区种植高需水量作物、在冬季使用化石燃料加热温室种植园艺产品，以及向全球消费者供应热带水果所带来的环境和生态负担。我们应该充分权衡运输的环境成本和在当地生产的环境成本，以及粮食出口给工业化程度较低的经济体带来的好处。

在此背景之下，开发碳足迹较小的基于创新技术的畜牧和粮食生产将发挥重要作用。尽管以牧场为单位的牲畜生产被视为可行方案，但草饲牛往往会产生大量甲烷。因此，如何在饲养草饲牛的同时减少甲烷排放将是未来一个重要的研发课题。如果反刍动物瘤胃的甲烷排放能够减少，碳转化为肉和奶中蛋白质的比例就会增加，这将直接导致畜牧业的利润增加。因此，专注于碳转化过程的化学视角和技术发展将发挥重要作用。使用藻类的食品生产技术预计在未来也会变得重要。如果这项技术得到发展，我们可以期待利用阳光作为能源，没有任何浪费地回收营养物质——有机化合物和无机盐，并在养殖设备中高效生产肉制品。这确实是一个基于化学原理的食品生产的崭新概念。

必须提升公众对科学、工程、技术，特别是化学的接受度，确保公众提高认知和参与决策。机械化农业、无机肥料、合成农药和改良生物使现代农业成为可能，没有这些发展，社会就不会

以现在的形式存在。但这些进步也带来了污染、环境破坏和许多其它意想不到的后果。公众的质疑是可以理解的，也应该受到重视。对于公众而言，重要的是要了解技术，尤其是化学，现在和将来可以提供什么，不能提供什么，并尽可能地将世界看作是一个相互依存的整体系统，摒弃“二元对立”的简单思维。让农民、加工商、零售商、食品服务机构和消费者参与进来，对于实现一个强健的可持续食品系统至关重要。企业对粮食生产的投资一直以来都是不可或缺的，重要的是确保利润考量不被忽视而且优先考虑。经济问题必须考虑，但经济体系不应被视为是静态的、不随时间变化的。线性食品供应链高度依赖投入，并具有一系列负面的外在影响，需要重新配置和设计，使其更具循环性和可持续性。

沟通和教育至关重要。我们建议提升整个政府部门、消费者、生产者和非政府组织的认知，并且公共和私营部门都必须参与其中。我们建议加强国际合作，需要时提供专用资源，实现从技能到组织层面的更广泛发展。我们建议加强跨学科交流，建立企业和学术界之间的互动。此外，我们建议重视在高等教育中纳入系统性思维训练。粮食系统关系着全人类，确保我们的粮食系统具有弹性、韧性和可持续性与我们所有人息息相关。

References

- [1] Miloš B. Rajković*, Dušanka Popović Minić, Danijel Milinčić, Milena Zdravković
Circular economy in food industry
Review paper ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585 UDC: 338.439: 663.25: 330.143.2
doi: 10.5937/zasmat2003229R6
Zastita Materijala 61 (3) 229-250 (2020)

- [2] FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2023. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum. Rome, FAO, and references therein.
<https://doi.org/10.4060/cc3017en>

- [3] FAO. 2020. Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000-2018. FAOSTAT Analytical Brief Series No 18. Rome, and references therein.

- [4] Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General, Global Sustainable Development Report 2023: Times of crisis, times of change: Science for accelerating transformations to sustainable development, (United Nations, New York, 2023), and references therein.

2023 CS3 代表名录



中国

吴奇
代表团团长
深圳大学



中国

朱丹
南京师范大学



中国

杨晓泉
南方科技大学



中国

殷军艺
南昌大学



中国

陈振宇
香港中文大学



中国

曾凡逵
中国科学院兰州化学物理研究所



中国

帅志刚
中国化学会
香港中文大学 (深圳)



中国

杨俊林
国家自然科学基金委员会



德国

Monika Pischetsrieder
Team Leader; Session 2
Chair of Food Chemistry,
Dept. of Chemistry and Pharmacy
Friedrich Alexander University Erlangen-
Nürnberg



德国

Holger Zorn
Justus Liebig University Gießen
Institute of Food Chemistry and Food
Biotechnology



德国

Ute Weisz
Rheinische Friedrich-Wilhelms University
Bonn Institute of Nutritional and Food
Sciences



德国

Markus Fischer
University of Hamburg
Department of Chemistry,
Institute of Food Chemistry



德国

Elisabeth Kapatsina
Head of Education,
Education, Career and Science
German Chemical Society, GDCh



英国

Nigel Scollan
Professor, GRI Director,
School of Biological Sciences, Queen's
University Belfast



英国

Dr Julian Braybrook DSc
Team Leader; Session 3
Government Chemist,
Fellow of the Royal Society of
Chemistry (FRSC)



英国

Nigel Scollan
Professor, GRI Director,
School of Biological Sciences, Queen's
University Belfast



英国

Louise Manning
Professor, Sustainable Agri Food
Systems, University of Lincoln



英国

Avtar Matharu
Professor, Chemistry
University of York



英国

Jo Reynolds

Director of Science & Communities,
Royal Society of Chemistry



英国

Andrew Shore

International Engagement Manager,
Royal Society of Chemistry



美国

Adelina Voutchkova

Director of Sustainable Development,
American Chemical Society



美国

David Laviska

Portfolio Manager for Education, ACS
Green Chemistry Institute
American Chemical Society



日本

Kazuhiro Chiba
CS3 Leader

Tokyo University of Agriculture and
Technology (TUAT)



日本

Tadao Asami

Graduate School of Agricultural and
Life Sciences,
The University of Tokyo



日本

Satomi Toda

Japan Science and Technology Agency
(JST)



日本

Asuka Kuwabara

Japan Science and Technology Agency
(JST)



日本

Eiichiro Fukusaki

Dept. of Biotechnology, Graduate
School of Engineering,
Osaka University



日本

Sastia Putri

Department of Biotechnology,
Osaka University



日本

Haruko Takeyama

Biomolecular Engineering Laboratory,
Waseda University



日本

Yasunori Ichihashi

RIKEN BioResource Research Center



日本

Hiroyuki Fukui

JST Center for Research and
Development Strategy
Japan Science and Technology Agency
(JST)



日本

Shuhei Numazawa

JST Center for Research and
Development Strategy
Japan Science and Technology Agency
(JST)



日本

Mitsuo Sawamoto

Executive Director,
Chemical Society of Japan



日本

Rader Jensen

CSJ Science Writer
Chemical Society of Japan



日本

Ono Shingo

Administrative Staff
Coordinator for Int'l Relations
Chemical Society of Japan



日本

Emiko Sakurada

CSJ Acting Manager
Coordinator for Int'l Relations
Chemical Society of Japan



CHINESE
CHEMICAL
SOCIETY



国家自然科学基金委员会
National Natural Science Foundation of China



GERMAN
CHEMICAL SOCIETY

Funded by



Deutsche
Forschungsgemeinschaft
German Research Foundation



ROYAL SOCIETY
OF CHEMISTRY



Engineering and
Physical Sciences
Research Council



ACS
Chemistry for Life®



The Chemical Society
of Japan



Japan Science and
Technology Agency

引用格式:

Chemistry for Sustainable Food: Challenges and Perspectives. A white paper from the 9th Chemical Sciences and Society Summit (CS3), 2023.

化学在食品可持续发展中的作用：挑战与展望。第9届化学科学与社会高峰论坛 (CS3) 白皮书, 2023.

Copyright ©2024

日本化学会 (CSJ)、日本科学技术振兴机构 (JST) 及所有上述 2023 CS3 组织和资助机构