

美国科学院《2030年前美国食品农业领域科技突破》报告

赵 勇, 李友轩

(中国农业大学情报研究中心)

编者按: 近百年来, 美国科技的进步大大推动了农业的发展, 保障了农业食品的安全丰富, 且大宗高价值农业商品、食品领域也实现了贸易顺差。而如今, 美国食品农业事业在长期可持续性、竞争力与适应能力方面均面临着严峻的挑战。如果继续沿当前路线前进, 美国农业体系未来的生产能力将要面临权衡和取舍。2019年美国科学院发布了《2030年美国食品农业领域科技突破》调研报告, 系统分析了美国农民与农产品制造商所处的机遇和挑战, 以及未来的应对策略。以下为内容摘编。

未来十年, 如果我们坚持优先发展商业, 那么无论是农民、市场、农业投入资源供应商还是当前公私立研究组织, 恐怕均无力帮助美国食品与农业企业解除其所承受的压力。由于美国农业所受的影响相当复杂, 部分来自于生物物理环境, 部分是人为因素, 任何简单的解决方案都无法循序渐进地解决相关问题。现有食品体系规模庞大、结构复杂, 内部互相关联。对于所谓的“危险”问题——即牵涉到各种独立影响因素, 因而难以定义、难以解决、难以应对的问题——我们必须采取截然不同的研究方法, 超越食品农业学科的传统研究界限, 方能发现并掌握解决方案。为了更好地优化食品农业体系, 我们需要拓展自己的研究视野。为此, 有必要重新建构研究问题, 采用先进的研究工具, 以确定食品农业体系中的关键干预点, 并着手解决。

本报告提出了若干项创新性的新科技进展, 可提高美国食品农业体系的效率、适应力和可持续性。美国国家科学院、工程院和医学院为本报告指派了专项研究委员会, 根据《任务说明(Statement of Task)》探索是否能跨越学科界限, 取得新的科技发展, 加快达成食品农业发展目标。委员会确定了未来十年内(即2030年前)可能实现的若干项最有前景的科技突破, 它们能对食品农业产业产生最大程度的积极影响。本报告在总结相关机遇时, 着重强调了食品农业科学方面的创新性研究措施, 这将为我们打造全新的未来。

1 2030年研究战略

1.1 目标和挑战

委员会确定了食品农业研究未来十年的主要目标, 包括: (1) 提高食品农业体系的效率; (2) 增强农业体系对于外界快速变化和极端环境的适应能力; (3) 改善农业可持续性。效率(确切地说是技术与分配效率)是指以尽可能低的成本, 令投入资源(如能源、水分、人工和资金)最大程度发挥作用的能力(Wang等, 2015; Shumway等, 2016)。适应能力的定义是“针对不利事件, 做好准备和规划, 以吸收负面影响、恢复原有状态并成功适应的能力”(NRC, 2012)。适应能力可能是指人类培育并消费的单个动植物品种的生存能力和适应能力, 也可能是指食品体系整体的特定性质。可持续性是指满足社会对于食品的需求、同时不妨碍后代满足其食品需求的能力(加州大学戴维斯分校, 2018)。

美国农业部对可持续农业作出了更具体的定义：“一种动植物生产措施的精准整合体系，应用于特定地点，能在长期内达到如下效果：（1）满足人类的食物与纤维需求；（2）改善农业经济所依赖的环境和自然资源基础；（3）尽可能高效地利用不可再生资源 and 农场资源，尽可能结合自然界的生物循环与控制；（4）令农场经营始终具有经济可行性；（5）提高农民及社会整体的生活品质”（美国法典第7卷第3103节）。

整合各种学科的研究手段与技术是至关重要的，其终极目标是提高食品质量和产量，以持续满足我们的需求。要达到效率、适应能力和可持续性这三大主要目标，就必须对食品体系进行改良，以解决其中最具挑战性的问题。委员会从食品农业科学家指出的重要研究挑战中找到了共性，从而提炼出了这些最具挑战性的问题，其中包括：

- 提高作物生产体系的养分利用效率；
- 降低土壤流失与退化；
- 利用基因多样性改良作物品种；
- 优化农业水资源使用；
- 改良食用肉畜的基因；
- 建设精准牲畜养殖体系；
- 对动植物疾病进行早期、迅速的诊断和预防；
- 对食源性病原体进行早期、迅速的诊断；
- 减少整个供应链的食物损耗与浪费。

1.2 富有前景的科研方向

为解决食品农业领域的核心研究挑战，委员会按照不同学科及门类，探索了重要的科研方向和最具前景的研究方向。这些研究方向上存在重大机遇，既因为它们能改变食品农业行业，也因为科技进步令它们有可能在不远的未来成为现实。虽然这些研究方向有各自的针对性目标，但就上述核心研究挑战而言，其广义目标互有关联，可以协同实现。

2 美国食品农业体系的挑战

2.1 全球食品体系

美国在全球食品体系中扮演着关键角色，人们普遍认为，美国农业在全球市场中非常有竞争力。未来世界面临着一项重大挑战：至2030年，全球人口预计将达到86亿，而到了2050年，人口总量将超过98亿，这推动了食品、燃料和纤维需求的日益增长（UN DESA, 2017）。2050年，为了满足需求，世界食品产量必须至少翻一番（Ray等，2013；Valin, 2014）。同时，中产阶级人口正不断增长，而他们对于动物源食品的需求亦逐渐增大，因此全球肉制品的总产量必须增加70%（Robinson和Pozzi, 2011）。

美国已经大力促进农业及食品领域的增产，并扩大了出口规模，希望增加的产量能够满足需求。许多美国农民依赖于出口市场扩大农产品需求，如此一来便能开展规模性生产，以覆盖成本。同样，美国动物产品不存在强制申报疾病，因此可供出口，这也打开了海外市场。由于动植物产品市场的拓展，美国农民开始扩大生产规模，发展生产专业化，以把握新出现的市场机遇，而这两种趋势都对农

食品农业领域	富有前景的科研方向
作物	- 继续结合运用传统基因改良手段和针对性基因编辑，仔细分析作物的基因，引入有益性状、删除无益性状。 - 开发简便的基因转换与基因再生技术，对所有作物进行定期基因修饰。 - 开发创新性传感技术，以监控植株所面临的胁迫和营养情况，探索纳米技术、合成生物学和植物微生物组的运用，令植株能更好地应对环境挑战（热、冷、旱、洪、虫、养分要求等），从而培育出能按需求启动或停用某种功能的“动态”作物品种。
畜牧业	- 开发并运用传感技术和预测算法，以数据为驱动，从而更好地监测和管理疾病。 - 利用有关田间表型的大型遗传测序数据组，结合基因组学、先进繁殖技术、以及精准育种技术，加速基因改良，为牲畜、家禽、水产培养出有利于农业可持续的性状（例如高繁殖能力、高饲料转化效率、动物福利、抗病能力等）。 - 针对农业可持续性和动物福利，找到客观的衡量标准，确定如何将这衡量标准纳入到精准畜牧体系中，以及社会科学如何解读并宣传相关科技发现，以使消费者更充分地认识到其中利弊，作出明智的购买决策。
食品科技	- 通过改进食品加工包装技术、传感器的设计与功能、以及“食品组学”技术的应用（包括基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学），确定和/或修改有益的食品性状（如化学物质构成、营养价值、故意或无意污染、品质及感官特点等）。 - 开发先进的食品加工包装技术，并予以优化和验证，以有效且高效地完善食品品质、营养留存情况、食品安全、以及对消费者的吸引力，同时减轻环境影响和食物浪费现象。 - 充分利用新的数据分析、数据整合技术，开发先进的精准决策支持工具，以协助相关人士作出更好的决策，完善食品的健全性、品质、安全和可追踪性，同时降低食品损耗与浪费。 - 进一步学习消费者行为、风险决策及风险应对举措的相关理论，以提高消费者对于食品生产、加工及安全处理创新技术的了解和认可。
土壤	- 运用最有效的农艺实践，结合新传感技术、生物科技以及整合系统性耕耘方法，维持现有肥沃土壤的厚度与品质，恢复退化的土壤。 - 整合创新传感技术、数据分析方法、精准植物育种、以及土地管理措施，显著改善和优化营养成分利用效率（尤其是氮）。 - 探索土壤微生物组在产生养分、提高养分生物有效性、加强植株抵御环境胁迫与疾病能力方面发挥的作用，并加以利用，从而建设出生产率更高、更可持续的作物生产体系。 - 开展综合土壤科学、技术运用及社区参与的会聚研究，帮助农民掌握土壤管理技术及措施，从而减轻土壤流失。
用水效率和生产率	- 在整合农业体系的各个环节中，运用各种节水技术，以提高用水效率。 - 运用规范性分析开展水分管理，以降低用水量。 - 改善植株及土壤的特性，降低用水需求，以提高用水效率。 - 对生产环境进行控制，使用替代性水源，以提高水分生产率。
数据科学	- 建设完善的数字基础设施，确保数据可查找、可访问、可相互操作、可重用（FAIR），并提供农业食品数据组的开放访问接口，以加速创新进程。 - 在食品农业研究中，运用并改良新开发的数据科学和信息技术，从而制定食品农业研究的数据科学战略，开拓农业食品情报学的新领域。 - 投资建设匿名化、价值归因及相关技术，解决隐私问题，鼓励农业食品界分享公开、私有、整合数据。
系统方法	- 挖掘各种机遇，促进整合食品体系模型和精准管理支持工具的表现与应用。 - 将系统性思考与可持续性要素融入到食品体系的方方面面之中（从教育到科研再到政策）。

业食品生产者、消费者、乃至整体经济有积极影响。同时，随着全球经济的发展，我们也需要进一步准备应对海外的潜在威胁，包括外来牲畜疾病、植物病原体、虫害入侵、以及贸易摩擦。在农业食品贸易发展与行业变革的进程中，有些人或许能从中获益，有的人则可能损失惨重。关键在于，我们要认识到全球市场是不断发展的，了解市场变迁与新技术应用的代价，建立相应的变革问责机制，以确保食品农业体系具有可持续性和适应能力。

2.2 农业生产率进入停滞期

全世界农产品需求将继续上涨，但未来要满足农产品需求则会越来越困难，因为美国农业生产率即将进入稳定期（Andersen等，2018）。粮食的潜在单位产量已经接近理论上限（Orr等，2015）。在部分地区，单位产量曲线（尤其是对谷类作物而言）开始趋于平缓：在全球种植的水稻、小麦和玉米中，约有30%已达到了其在各自田地中的最大单位产量（Grassini等，2013），约24-39%的水稻、小麦、玉米和大豆种植田的单位产量未有上升、陷入停滞、甚至急剧下降（Ray等，2012）：例如，在中国的主要小麦种植区域，单位产量已普遍停滞不前，在研究所调查的全国田地中，53.9%的水稻单位产量不再发生变化，玉米和小麦的数据分别为42.4%和41.9%（Wei等，2015）。全世界主要作物生产率增长的停滞（Ray等，2012；Grassini等，2013；Orr等，2015）是一个危险信号，说明当前提高作物生产率的方法潜力有限，必须采用新方法解决提升生产率的需求。

2.3 食品浪费与食品安全

一方面，作物生产率陷入停滞，另一方面，食品浪费问题依然存在。冰箱是农业历史上最重要的突破性发明，因为它能减少食品腐败与浪费，提升食品安全。然而，我们仍然需要采取进一步创新，以降低食物浪费，将浪费的食物重新投入使用，因为美国每年浪费价值约2780亿美元的食物，这足以养活接近2.6亿人口（Buzby等，2014；Bellemare等，2017）。通过建立资源使用与资源效率的研究体系，我们能更好地发现优化食品浪费管理的机遇。食品生产者们也应当关注食品安全：疾病控制与预防中心估计，在美国，每年约有4780万人染上食源性疾病，其中有125,000多人住院，死亡人数接近3000人（Scallan等，2011a、b）。

2.4 资源与环境限制

土地、水、肥沃土壤的可用资源越来越有限，将限制我们通过当前生产方法提高生产率的能力。如果过度消耗资源，就可能对资源乃至周边生态系统造成永久性破坏。由于全世界采用的耕种方法普遍属于资源密集型，需要较高的资源投入，这已经造成了土壤耗竭、水资源短缺、大范围森林砍伐、温室气体大量排放等现象（FAO，2017）。

全球气候变化令美国农业食品体系遭遇了更严峻的挑战。对于大多数作物、牲畜而言，气候变化对美国农业的伤害将日渐加剧，农业单位产量受到了多变天气、极端天气、温度上升、降雨规律改变、干旱期延长等气候变化的影响，具体影响方式随地点和作物种类而有所不同（Hatfield等，2014）。2017年，美国农业由于气候相关灾害——包括干旱、洪灾、冻灾、野火、飓风等，承受了超过50亿美元的损失（NCEI，2018）。面对气候压力，再加上近期出现的新型虫害与疾病（例如柑橘黄龙病、感染猪和家禽的新病毒株），美国科技界面临新的发展需求。

2.5 消费者需求变化

美国国内消费者对于食品的偏好在发生变化。消费者越发明确地意识到，食品选择能影响自身的健康和周围环境，因此大型零售商开始对销售商品进行区分，并强调其供应链遵循可持续发展、动物

福利、劳工待遇等价值观。举国上下都希望农业生产者们能增加健康、多样化、且价格适中的食品选择，这是新的市场机遇。有消费者重视公共卫生，追寻更健康的食品，认为美国人的饮食太糟糕，是慢性病的一大元凶，由此衍生的医疗健康服务费用每年高达数千亿美元，而饮食因素原本是可以预防的（CDC，2017）。

2.6 公共资金减少

目前为止，美国农业之所以如此成功，很大程度上要感谢过去百年间赠地大学体系、美国农业部及其他联邦机构所取得的基础、应用科学成果。在农业领域，公共资金资助的研究推动了许多重要发现，但过去十年来，由于政府对食品农业研究的投资大幅减少，公共资金研究也出现了萎缩。美国农业研发项目的规模从2003年的60亿美元降低到了2013年的45亿美元（Clancy等，2016）。同时，私营部门为农业研究提供的资金则增长了64%，其资金规模于2010年超越了公共资金研究（见图1）。

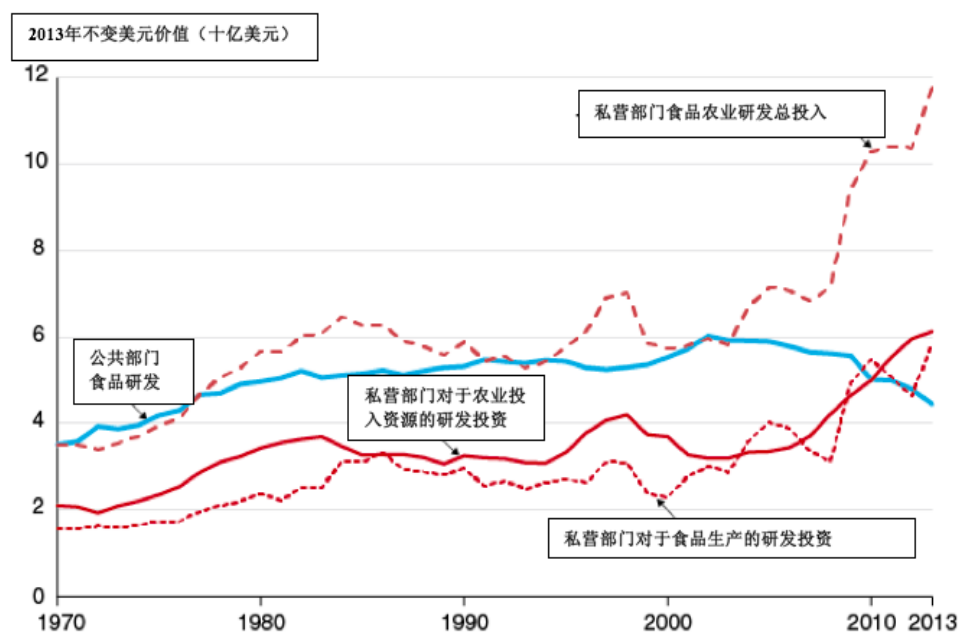


图1 公私部门年度研发投入（经通胀调整）

注：研发=研究与开发。数据来源：Clancy等，2016

自2009年以来，按照真实研究成本计算，公私渠道对于农业食品的投资增速均有所放缓（公共资金甚至出现了下降）（Heisey和Fuglie，2018）。历史上，公共部门为农业研究提供的资金往往集中于推动科学创新，而私营部门的资金则主要用于开发有商业价值的生产流程与产品（Clancy等，2016；Heisey和Fuglie，2018）。如今有证据显示，在美国农业创新体系中，公私渠道的资金互为补充，私营部门投资并未挤压公共投资的空间，尤其是在美国（Wang等，2013；Fuglie和Toole，2014；Clancy等，2016；Heisey和Fuglie，2018）。不过，也有证据表明，公私渠道的资金分别流向了不同的科研方向。私营部门的研发开支对公共研究提供了支持，专注于具有商业价值、容易申请专利、能受到知识产权保护、能为投资者带来扩大盈利机会的技术。

3 未来机遇

过去十年间出现的重大科技进步为食品农业领域的新机遇铺平了道路。例如，分子生物学在过去二十年间取得了巨大的发展，使我们能对作物品种进行更精准、更多样化的改变。得益于这些科技进步，我们发展出了新的食物种类与特点，以更广泛地抵御病虫害，提高了单位产量、养分利用效率和水分利用效率，并培养出了动植物耐受极端天气的能力。我们从生态系统层面上认识了植物及其相关微生物（即植物群落），这也有助于创新。在主流农业学科之外的领域中，也诞生了各种能造福农业生产者的全新技术、创新和见解。2016年，商用无人机中有19%左右是由农民使用的，他们希望以这种经济划算的方式发现疾病与杂草，确定田地状况（Hogan等，2017；Hunt和 Daughtry，2017）。

纳米科技增强了以下几个方面的能力：（1）传感并监控（动植物的）物理、化学、生物特点及进程（从而最终提高食品生产的可持续性）；（2）控制微生物（以促进食品安全，减少食物浪费）；（3）创造新材料（以监控并改善动物健康）（Rodrigues等，2017）。家禽养殖者运用了人工智能等计算机手段，在降低人力和饲养成本的同时，对给食策略进行精细调整，并监控家禽的健康（Ahmed，2011；Hepworth等，2012）。在城市及城市周边，人们通过无土栽培，生产经过认证的有机莴苣（Dewey，2017），同时各国的本地农贸市场也持续增加（Low等，2015）。接下来，食品农业研究要取得进展，需整合各种创新，以同时解决水资源短缺、土壤健康、食物浪费、病虫害、气候多变性等问题以及兼顾农业食品体系的整体可持续性。

本报告通过联系相关领域（如计算机、信息科学、机器学习、材料学与电子学、基因组学与基因编辑、行为及认知科学）的最新发展，提出了农业食品研究的方向，希望为农业所面临的各种重要复杂问题找到解决方案。食品农业领域要利用其它学科的新发现，就需要吸引这些学科的科研人才，并对他们进行培训。在本报告指明的研究方法中，有部分针对的是系统层面的发现，为此我们要展开区域乃至全国性的合作与规划，而不仅限于跨学科研究。如果这些系统性研究方法能取得成功，我们就能得到关键的农业食品信息，从而为新知识的产生奠定基础，使各个层级相关人员的决策更明智，不仅如此，这些研究方法也可以为我们带来落实决策的工具。

4 战略建议

为实现食品农业的效率、适应力和可持续性目标，我们需要做出各种改进，以解决食品体系最具挑战性的问题。委员会认为，食品农业科研的关键挑战包括：（1）提高作物种植体系的养分使用效率；（2）减轻土壤流失与退化；（3）挖掘基因多样性改良作物品种；（4）优化农业水分使用；（5）改良食用肉畜的基因；（6）建立精准畜牧养殖体系；（7）在早期阶段迅速发现并预防动植物疾病；（8）在早期阶段迅速发现食源性病原体；（9）减轻供应链上下的食品损害与浪费。

为解决未来十年最棘手的问题，必须制定相关策略，促使人们采取“会聚”的问题解决手段，跨越各种学科实现科技突破。委员会发现，科研领域出现了五大适用各种学科的关键科技突破机遇。其中有些机遇仍处于早期研发阶段，有些机遇即将广泛应用于食品农业体系中。报告认为，在这五个领域中，食品农业研究有可能取得极具发展前景的科技突破，从而支持报告建议研究方向的发展，服务

于效率、适应力和可持续性这三大首要目标。根据如下建议，研究界应当改变研究方式，而外界必须对一切科技突破研究活动提供强有力的支持。

研究手段和技术	突破	建议
跨学科研究与系统性方法	可以采用系统性方法，认识食品农业体系不同元素之间的互动性质，以提高体系整体的效率、适应力和可持续性。	在解决最棘手的农业问题时，必须着重强调跨学科科学与系统性方法。
传感技术	可部署在野外的精准传感器及生物传感器得到开发和验证之后，将使得食品农业领域的各个学科具备快速检测与监控的能力。	创建相关计划，帮助整个食品农业领域更有效地利用现有传感技术、发展新传感技术。
数据科学与农业食品信息学	通过应用并整合数据科学、软件工具以及系统模型，我们在管理食品农业体系时，将能作出更完善的分析。	创建相关计划，为农业食品信息学发展新兴领域，支持信息技术、数据科学和人工智能在食品农业科研领域的应用与发展。
基因组与精准育种	如果能定期编辑在农业生产上具有重要性的有机物基因，就可以精准而快速地改良农产品相关性状，提高生产率和品质。	创建相关计划，充分利用基因组学和精准育种，改良重要农业有机物的遗传性状。
微生物组	认识微生物组对于农业的影响，利用相关知识提高作物产量、改善饲养效率、增强对于胁迫和疾病的抵御能力。	创建相关计划，进一步认识动物、植物和土壤微生物组，以及它们在整个食品体系中的广泛应用。