



Topic Insights

全球农业需要另一次绿色革命吗？

Danny Llewellyn

Chief Research Scientist of CSIRO Agriculture and Food; Fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering, Australia

1. 引言

科学和技术是社会变革的历史驱动力，这些变革大多是有利的，但有时会产生意想不到的（通常是环境方面的）后果，其中一些后果我们目前仍在努力应对。18世纪和19世纪的工业革命，带来的以化石燃料为动力的采矿和制造业机械化发展，以及航运和陆路运输的快速发展，导致城市化和人口不断增长。即使在18世纪，人口增长率也显然不能保持稳定。随着城市人口的增多和耕地的减少，除非农业生产率能够跟上发展的步伐，否则如何才能为不断增长的人口提供衣食住行的保障呢？

在第二次世界大战前后，以国际农业研究协商小组（Consultative Group for International Agricultural Research, CGIAR）国际农业研究中心联合会为首的组织将国际项目的重点放在了提高全球农业生产上。其中包括国际玉米小麦改良中心（Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, CIMMYT）及由政府、援助机构和私人基金会资助成立的国际水稻研究所（International Rice Research Institute, IRRI）。第一次“绿色革命”（green revolution, GR）是由诺贝尔奖得主诺曼·博劳格（Norman Borlaug）领导的，开始于墨西哥，然后发展到亚洲和非洲。随后在小麦、水稻和玉米种植方面的技术和农艺进步极大地提高了全球作物产量。虽然有争论说这些产量没有被公平或有效地分配使用（因为贫穷和粮食不安全问题继续存在，特别是在撒哈拉以南的非洲），但在过去50多年里，全球人口增加了一倍，在耕地面积只增加了一小部分的情况下，绿色革命使得谷物产量增加

了两倍[1]。过去20年，为了减少玉米、大豆、油菜和棉花作物对化学农药和除草剂的依赖，绿色革命广泛采用了转基因（genetically modified, GM）作物。这些创新通过减少病虫害和杂草的损失来提高产量、减少环境的农药负荷以及减少投入，带来了可观的经济与环境效益，提高了大、小土地所有者的经济效益[2]。转基因作物不是“灵丹妙药”，也不乏质疑的声音；然而，总的来说，它们是有利的[3]。如果这些技术能够得到更广泛的公众认可，它们便会带来未来农业生产的好兆头，特别是在主食粮食作物方面。然而，基因改造仍然是生物技术行业面临的重大市场挑战。

尽管有这些技术进步，世界人口增长仍以比粮食生产更快的速度增长。据预测，到2050年，将有98亿人居住在我们的星球上（比今天多30%的人口），而且几乎所有的增长都将出现在中低收入国家[4,5]。平均收入将继续增加，我们需要养活更多、更城市化、更富裕的人口；因此，谷物和肉类生产量必须各自增加70%以养活每一个人。不幸的是，我们的许多主要作物的遗传增益速度要么低于所需[6]，要么已开始趋于平稳。此外，所有这些都发生在日益恶化的全球气候中，这种气候已经给现有的粮食和纤维生产系统带来了巨大压力。当然，要确保更公平地分配当前的粮食生产，并遏制全球粮食的惊人浪费（几乎三分之一的粮食是被浪费而非消费[7]），还有许多工作要做。然而，将目前的粮食浪费减少一半，只会产生到2050年填补预期粮食生产缺口所需四分之一的粮食，这是远远不够的。我们还需要另一个绿色革命吗？答案当然是肯定的，但这场革命必须

是一场更聪明的革命，而且必须在不增加所需耕地的情况下，大幅提高作物产量。

2. 下一次绿色革命从何而来？

2.1. “传统”作物育种的贡献

第一个绿色革命的基础是发展高产、抗病、矮化的谷物品种，这些品种十分适宜集约型农业。下一个绿色革命将继续采用传统的杂交和选种方法，并辅之以一系列新的基因技术，包括转基因技术。如今农业上的作物育种和生物技术创新已经从公共部门转移到私营部门（特别是掌握专有基因改造特性和其他综合管理技术的大型跨国生命科学公司）。这并不是说，好的、国际的、公开的研究在供给世界方面不再发挥重要作用。但是，公共研究机构必须重新整顿，建立更多的伙伴关系，更多地关注于促进作物育种和目标国家已经存在的项目。CGIAR的卓越育种平台是可行的典范，它为发展中国家的小型育种提供了现代基因分型、生物信息学和表型工具的培训及获取途径。我们还需要十年或更长时间才能评估这些方案的影响，但这一举措无疑是朝着正确方向迈出的一步。

由于害虫、病原体以及各种非生物胁迫（如干旱、高温和水涝）所造成的损失，实际的农作物产量往往大大低于潜在产量[6]。害虫和病原体继续与宿主共同进化，并克服了过去植物育种家在作物中形成的抗性机制。这些旧敌并没有因绿色革命而消亡。在许多情况下，由于全球变暖导致的气温上升和气候变化，它们的影响更加严重。通过培育更多的抗病和抗虫害品种来缩小潜在产量与实际产量之间的差距仍是提高全球粮食产量的一个有效方法。本文举例说明了利用新方法来抵御小麦抗白粉病、田间豌豆根腐病和大豆孢囊线虫。虽然生物技术在保护作物免受害虫和某些病毒[3]方面仍发挥着重要作用，但在产生对真菌和细菌疾病的抗性方面却不太成功。因此，仍然需要采取更传统的方法。当然，生物技术除了保护作物外，还有其他用途，如提高粮食作物的营养价值或质量。然而，通过生物强化而富含维生素A的“金大米”的经验表明，由于公众对转基因食品的态度，生物工程食品暂时难以销售[8]。

在过去几十年中，人们广泛采用了有针对性的育种和生物技术方法，以便更好地适应多变的气候。最近，这些方法正与高通量表型相结合，以便利用高光谱成像新技术[9]快速评估植物对非生物胁迫的反应。然而，

这一领域的进展缓慢，部分原因是作物对水分限制的生理反应十分复杂。在如今的基因组时代，积累的关于作物物候学和作物在逆境下表现的基因的知识是可用的。这可能有助于更好地将育种重点放在等位基因或等位基因组合的育种上，其在干旱环境下对作物表现贡献最大，可以利用作物亲缘植物作为种内杂种或合成多倍体（如小麦亲缘植物是多年生且耐旱），因为野生物种通常更适应于水资源有限的条件，或拥有新的农艺性状。

新的基因编辑技术[10]允许对植物和动物基因组进行有针对性的小碱基改变或删除，这在作物改良的方法上提供了更大的多样性。由于这些技术的结果可能不会带有“基因改造”的污名，它们可能比传统的转基因作物更受消费者的欢迎，尽管时间会证明这一点。第一批产品（如基因编辑的非褐变蘑菇）开始进入美国的食物市场。基因编辑还提供了快速“驯化”具有抗旱和抗病等特性的新作物物种的潜力，因为快速地“编辑”内源基因以增强对驯化很重要的已知性状（如不破碎的种子荚、对日长不敏感等）成为可能。这些性状需要几十年的时间才能通过常规育种获得，因此基因编辑可以更快地使新作物投入生产。

基因组测序已成为动植物育种的主流，随着测序成本的直线下降，新的基因组辅助育种方法将变得更经济、更容易获得。这些方法已经在家畜等驯养动物的改良育种生产方面取得了重大进展，但它们在植物育种方面的应用才刚刚开始[11]。尽管它们具有巨大的潜力，但许多基因组育种工具的成本、复杂性和基础设施要求仍然较高。因此，这些工具主要用于私营部门。然而，公共研究机构也在更多地使用这种方法。

2.2. 农业生产的巨大飞跃

即使有了所有这些新的遗传和生物技术解决方案，但在今后30年中，也很难达到所需的粮食生产目标。要实现植物和动物生产力的巨大变化，需要真正的创新，这些类型的创新可能具有内在的风险，因此，我们目前为公共或私营部门农业研发提供资金的模式并不容易适应这些创新。我们需要新的筹资模式，而它已经在两个层面上出现——通过大型慈善基金会（如比尔及梅琳达·盖茨基金会的“探索大挑战”、洛克菲勒基金会的Food Waste and Spoilage Initiative和Two Blades基金会）为大型国际转型研究举措提供资金；以及通过在线众筹平台（如AgFunder: <https://agfunder.com/>），将农业领域（研究和生产方面）的新颖想法与更大的投资机构和更

小或私人的投资者联系起来，从而将想法由图纸转化为实践。

现有的基因组信息爆炸以及对活细胞中遗传和代谢网络的日益了解，催生了合成生物学的新学科，开辟了前所未有的提高粮食产量和粮食生产率的新道路[12]。对于合成生物学来说，许多社会、伦理和监管方面的问题仍然需要解决。在许多情况下，基本的“底盘”（最小基因组）和“生物砖”可以被组装成新的遗传途径以产生合成生物有机体的研究刚刚被开发。目前，重点放在比完全重新设计有机体更温和的目标上，尽管这一目标可能同样困难。大型国际财团（其中许多是与比尔及梅林达·盖茨基金会共同出资）正试图利用基因技术重新培育作物，以实现以下目标：①设计能解决自身氮素问题的作物，而不是依靠与细菌或合成肥料的共生关系；②提高温带作物的光合效率，使它们更像生长迅速的热带草（如C4水稻）；③生产无性繁殖的种子（单性生殖），以延续在杂交种子中所有的、通常在下一代中丢失的生产力效益。其他人正在重新设计植物和微生物的代谢途径，以生产新产品，如来自酵母的牛奶，或植物叶子中的油，以取代对石油的某些需求，预计石油在不久的将来就会消耗殆尽。关于这些尝试的任何成功都将对我们更有效或可持续地生产食品的能力产生重大影响。

2.3. 数字农业与农业自动化

“更好的”工厂只是绿色革命的一个方面；提高绿色革命的产量同样是由于改进了农业机械和技术进步带来的管理革新。下一次绿色革命——绿色革命2.0，很可能更多地依赖于技术以便让农民做出更好的管理决策，甚至更多地依靠自动化以减少经营农场的人数。在廉价的互联网传感器技术的推动下，我们开始能够从农业机械、田间传感器、灌溉泵，甚至农场动物中收集大量的实时数据——所有这些都得到卫星和无人驾驶飞机在一系列光谱频率范围内收集的详细图像数据的补充。目前，海量的数据很快超过了我们将其转化为可用信息的能力；然而，利用人工智能和机器学习开发快速、简单的预测分析工具无疑将提高农业生产力。考虑到所有这些信息，加上精确的卫星和无线导航，农民没有理由

坐在拖拉机或收割机的驾驶室里去驾驶和操作。各级农场自动化程度的提高将显著提高农场在种植，施用化肥、杀虫剂和杀真菌剂，收获和灌溉方面的效率，以便最大限度地利用现有可耕地和可用水[13]。

3. 结论

传统上，农业和粮食生产得益于解决自然和社会带来的挑战的创新解决办法。现在，我们比以往任何时候都更需要接受新的科学技术和农业研究的新资助模式，以便我们能够在将来衣食无忧。我们都明白，严峻的挑战就摆在面前，这些挑战不仅限于气候变化；然而，我们人类有应付这些重大挑战所需的聪明才智，来确保我们能够以可持续的方式公平地养活不断增长的人口。第一次绿色革命是一个转折点，绿色革命2.0需要更好的发展；但是，我们必须从早期的错误中吸取教训，确保绿色革命2.0不会在之后几个世纪的农业大规模集约生产下对土壤健康、水健康、生物多样性或人类健康产生有害影响。

References

- [1] Pingali PL. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proc Natl Acad Sci USA* 2012;109(31):12302–8.
- [2] Brookes G, Barfoot P. Farm income and production impacts of using GM crop technology 1996–2015. *GM Crops Food* 2017;8(3):156–93.
- [3] Thomson JA. The pros and cons of GM crops. *Funct Plant Biol* 2018;45(3):297–304.
- [4] Food and Agriculture Organization. How to feed the world in 2050. Report. Rome: Food and Agriculture Organization; 2009.
- [5] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables. Report. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division; 2017. Report No.: ESA/P/WP/248.
- [6] Fischer RA, Edmeades GO. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci* 2010;50(S1):S86–98.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Mitigation of food wastage: societal costs and benefits. Report. Rome: Food and Agriculture Organization; 2014.
- [8] Gartland KMA, Gartland JS. Contributions of biotechnology to meeting future food and environmental security needs. *EuroBiotech J* 2018;2(1):1–9.
- [9] Araus JL, Cairns JE. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci* 2013;19(1):52–61.
- [10] Georges F, Ray H. Genome editing of crops: a renewed opportunity for food security. *GM Crops Food* 2017;8(1):1–12.
- [11] Hickey JM, Chiurugwi T, Mackay I, Powell W, Hickey JM, Chiurugwi T, et al. Genomic prediction unifies animal and plant breeding programs to form platforms for biological discovery. *Nat Genet* 2017;49(9):1297–303.
- [12] Tyagi A, Kumar A, Aparna SV, Mallappa RH, Grover S, Batish VK. Synthetic biology: applications in the food sector. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2016;56(11):1777–89.
- [13] Aravind KR, Raja P, Pérez-Ruiz M. Task-based agricultural mobile robots in arable farming: a review. *Span J Agric Res* 2017;15(1):e02R01.