

植物工厂的技术、政策和发展模式

山顶洞人 @2023/6/17

近十年来，植物工厂正处于起步阶段。LED 这种高效冷光源的成熟为植物工厂的发展提供了关键的技术支撑，极大地降低了植物工厂的生产成本，使得植物工厂开始走向商业化。一些生产绿叶蔬菜的植物工厂已经开始盈利。

但仍然有很长的路要走，包括技术的持续发展、公共政策以及商业模式的探索，以促进植物工厂的普及，成为农业生产的主要方式，真正达到生态恢复的目标。

植物工厂的关键技术

植物工厂作为新生事物，需要进行很多技术方面的研究，以便发挥植物工厂的优势，实现植物工厂的目标，即丰衣足食，青山绿水。

人工生长光源

植物吸收太阳光进行光合作用，其光合作用效率一般为 0.3%~0.5%，理论极限可达 10%以上。太阳光是全光谱，不同颜色的光线对植物的成长都有作用，但植物光合作用吸收的主要是蓝光和红光，大部分绿色光线被反射或者穿透叶片，这是植物叶片是绿色的原因。

人们历史上曾经使用过各种类型的灯泡，来替代阳光促进植物的生长，如白炽灯、荧光灯、卤素灯、LED 灯等。时至今日，各种研究结果证明，LED 灯是最优质的植物照明光源。

LED 灯具有很高的量子效率，电子到光子的转换效率可以达到 90%以上。当然在工程上，真正的电光转换效率可能还受到多种因素的影响，例如电路设计、封装工艺、环境温度等。一般情况下，商用 LED 灯的电光转换效率可达 20~30%，据报道实验室中已经可达 40~50%，进步很快。与其他方式比较，LED 植物灯的电光转换效率是白炽灯的 20 倍以上、荧光灯的 3 倍、高压钠灯的近 2 倍。电光转换效率可用 lm/w 来度量，即流明/瓦。LED 的电光转换效率可达 150~200lm/w。LED 灯也具有很长的使用寿命，可达 50,000 小时以上。

一个植物工厂，不考虑人工的情况下，其运行成本的 80%以上是照明费用。因此冷光 LED 的出现和发展为植物工厂的推广起到了决定性的作用。

未来，我们可以预期，商用 LED 植物光源的电光转换效率达到 40%以上，这意味着植物工厂的运营成本还可以降低 40%左右。

自动化与机器人技术

只有高度自动化，植物工厂才能实现高效率的运转。另一方面，植物工厂需要与外部隔离，实现高度的洁净，以避免害虫和病原体的进入，减少人员的频繁进出是非常必要的，因此植物工厂内部应该更多地使用机器。

与传统工厂不同，植物是生命体，本质上就具有多样性，每株植物的形态、开花和结果的时间和位置都有差异，因此植物工厂中的自动化技术需要有高度的智能性，以适应自动采摘、移植、搬

运、植物生产状况监测的需求。传统工厂的流水线生产方式需要进行大幅度的改造才能适合植物工厂。迄今还没有看见采摘机器人的出现。

近年来，人工智能技术得到了极大的发展，以波士顿动力的行走机器人、OpenAI 的 chatGPT 为代表。植物工厂是具有智能视觉技术、肢体三维运动、接受在线指挥与控制的机器人的最理想应用场所，它有明确的工作需求、封闭的工作环境和有限的工作场景，大幅度降低了人形机器人的技术难度。我们相信，植物工厂将促进采摘机器人的面世和技术进步。

提供植物生长的丰裕条件

植物工厂可以控制环境，例如将二氧化碳的浓度提升到 1000ppm 乃至更多，给植物创造自然环境中难以满足的更好生长条件。现在其实是地质上的第四纪冰河期，是物产匮乏的贫瘠年代。

在地质历史上，地球曾支持过一百多米长、数百吨重的恐龙的生存，也支持过猛犸象、剑齿虎等巨型哺乳动物的生存，说明今天的自然环境与那些年代相距甚远，那时候应该更温暖湿润、森林密布、物产远比现在丰富。有一种说法认为，侏罗纪世代空气中的二氧化碳含量接近 2000ppm，所以非常适合植物生长。在植物工厂中，完全可以通过研究，局部复现地质历史上曾有过的丰裕年代的环境条件。

新型的种苗

大田种植的农作物品种，需要考虑很多额外的因素，例如抗旱、抗风、抗雨、抗病虫害的能力，也需要考虑抵抗人造化学品的能力，例如抗除草剂。

植物工厂的农作物品种，则可以更多地考虑农作物本身的营养价值、口味和产量，不需要考虑自然环境因素和非必要化学制剂的影响。这将开辟新的农作物品种培育方法。

在植物工厂中，我们还可以逐渐改良农作物品种，使之更适合丰裕条件下的生长。丰裕条件下的植物工厂，加之适合的农作物品种，可能会非常高产。

除了常见的蔬菜谷物，植物工厂还可以用来种植一些特别的品类，以丰富人类的吃穿住行材料。螺旋藻是一个很好的方向。螺旋藻可以提供优质的高蛋白，现在的螺旋藻多是湖面种植，生产效率低。可以考虑通过多层的植物工厂实现高效率生产。

毛竹也是一个很好的方向。毛竹是自然界中生长最快的木本植物，最快可以每天长高 1 米多。如果能够在植物工厂中高效生产毛竹，可以考虑用毛竹修建房屋，以替换极不环保的钢筋水泥。

药用植物也是很好的发展方向。例如，用来产出青蒿素的青蒿就可以在植物工厂种植。

洁净能源

尽管 LED 光源大大提升了电光转换效率，但植物工厂要消耗大量电能以提供人工光源。因此寻求洁净的电能是植物工厂的关键。

有很多办法可以提供洁净能源或提高电的使用效率。

例如，植物工厂可以主要在每日深夜的用电低谷开启给植物的照明，降低用电成本，平衡电网负载。这个办法适合无间断发电设施，例如水电、核电和火力发电等。

太阳能是最值得考虑的洁净能源。今天，商用太阳能发电的光电转换效率可达 20% 以上，实验室中已经接近 50%。这个数字远远高于绿色植物的光合作用效率（0.3%~0.5%）。

可以在荒漠地区建立大型的太阳能发电厂，也可以在城市建筑物上装置太阳能电池板。太阳能发电的一个问题是受季节和天气的影响较大，可以研究相关的储能系统，在夏季将多余电力储存起来，供冬季光照不足时使用。

植物的组织只有一部分能够食用，可以用不能食用部分进行发电，建立能源可循环的植物工厂。植物工厂的设计也很关键，是建立能源循环的关键技术。例如，在夏季，可以将自然光导入植物工厂，尽量使用自然光进行照明，同时储存太阳能发电产生的电力，以供冬季光照不足时使用。

当然，受控核聚变是最终的大杀器。一旦受控核聚变达到商用程度，那么所有的食物都可以使用植物工厂进行生产，农耕将彻底成为历史。

公共政策

农业补贴

吃饭问题最为重要，因此世界各国政府都对农业提供了大量补贴和优惠政策。

以美国为例，美国政府的农业补贴包括以下几种类型：

- 直接支付：美国政府直接向农民支付的补贴，主要用于弥补农民生产成本与收益之间的差距，以维持农业的正常运转。
- 保险补贴：美国政府提供农业保险，保障农民免受天气灾害、自然灾害、疾病、虫害等因素造成的损失，政府会对保险费用给予一定程度的补贴。
- 农产品购买计划：美国政府为了保持市场稳定，会通过购买农产品来支持农民，政府将这些购买的农产品用于各种援助计划中。
- 市场调节计划：政府通过控制供给来调节市场，以保持价格稳定。这种计划可能包括农业减产计划、价格支持计划和市场份额计划等。

植物工厂是新生事物，有关的补贴政策还没有跟上。政府应该给予植物工厂以同样的补贴，以促进植物工厂的发展，降低植物工厂的运营成本。否则，要求植物工厂产出的农作物与受补贴的大田种植直接进行价格方面的竞争，这是不合理的。

城市中废弃建筑的利用

近几十年，产业升级和全球工业布局变化很快。在产业变迁过程中，会产生大量的废弃建筑物，如废弃的厂房，废弃的社区，拆除成本高昂，难以处理。

政府可以地租优惠或免租的方式，鼓励将这些厂房等改建为植物工厂，使整个社区充分焕发活力。城市中或城市近郊的植物工厂也可以大幅度降低食物的物流成本，提高食物的新鲜程度，减少长途运输的碳排放。

工作机会

植物工厂将在城市中或城市近郊提供新的工作机会，将吸引年轻人在城市中从事农业，避免因乡村凋敝造成的农业危机。政府在公共政策上应该对植物工厂给予鼓励和扶持。

恢复生态

植物工厂将大幅减少土地占用，减少水资源的浪费和污染，将土地还给大自然来恢复生态。基于这个原因，植物工厂应该获得恢复生态方面的补贴。

植物工厂的发展模式

植物工厂近几年发展迅速，但其合理的发展模式仍在探索之中。

大部分植物工厂的盈利仍旧很困难，只有少部分的植物工厂产生盈利，例如日本、荷兰等一些生产蔬菜的植物工厂或智能大棚。

植物工厂的初期投入较高，后期运营的成本也不低，尤其是需要消耗大量的电能。如何建设有经济效益的植物工厂，仍是个需要探索的课题。

应该以城市为中心，来考虑植物工厂的建设。都市化是趋势，未来可能有 80%以上的人口居住在城市或城市近郊，会有愈来愈多的大都市区出现。指望在远离城市数百公里乃至数千公里的乡村，还有大量的衣衫褴褛的农民辛苦耕作，供养城市的人口，自己却过着肮脏贫穷枯燥乏味的生活，形成事实上的现代奴隶制，这并不现实。

降低植物工厂的运营成本，最重要的是重构物流与供应链条。现在的农产品市场，运送距离遥远，动辄上千公里，例如从山东河北运送到江浙广东。物流与渠道费用占了零售价格的 80~90%以上。但植物工厂的一个优点是可以建在任何地方，尤其是城市里和城市近郊，因此完全应该重构农产品的物流和供应链条，降低这方面的费用，用来支持植物工厂的发展。

大部分的绿叶蔬菜可以借助家用的水培种植机，在居民家中进行。家种的蔬菜安全新鲜、营养价值高、随吃随摘。与之相比，上千公里长途贩运的蔬菜营养流失严重，保鲜保质很困难，现有的技术条件下，蔬菜最难保鲜。家居种植蔬菜，优势非常明显。除了食用价值，居民家中种植绿色蔬菜，还有很好的观赏价值和环境改善价值，例如加湿、吸收二氧化碳、增加氧气含量等。

生长周期较长的果实和块茎类蔬菜，如番茄、黄瓜、茄子、萝卜、土豆、红薯等，可以在城市里或城市近郊的大型植物工厂中进行，然后可以通过网络购物、配送到城市居民的家里。果实类、块茎类的蔬菜，较容易运输和储存，1~2 天的近距离运输也无需冷链，非常方便廉价。

主粮类的农作物，如小麦、水稻、玉米、螺旋藻等，可以在大都市远郊，如周边一百公里左右的植物工厂生产。主粮类的农作物，一般极耐储存，可储存一年乃至数年，因此不需要即时运输。

距离城市或大都市更远的地区，则可以释放农田还给大自然，成为森林密布、草原广袤的优美之地，成为野生动植物的天堂，也成为人们渡假休闲探索自然的场所。植物工厂普及之后，大部分大陆达到 80%以上的森林覆盖率，并不是梦想。

综上所述，植物工厂的成功，需要以城市为中心进行布局和建设，同时重构现有的生产、运输和销售体系，降低物流、配送和零售成本，才容易获得商业上的成功，发挥出其生态价值。