

2023中国蔬菜产业大会-设施蔬菜论坛

植物工厂研究现状与进展

杨其长 研究员

yangqichang@caas.cn

中国农业科学院都市农业研究所

2023.11.08 湖南汉寿



报告提纲

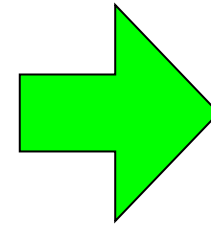
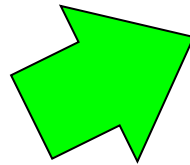
- ◆ 概念与特征
- ◆ 植物工厂现状
- ◆ 关键技术进展
- ◆ 未来发展趋势

一、概念与特征

植物工厂概念

What is Plant Factory ?

光、温、水、气
肥、密、管、控



人类的理想： 不受外界气候条件的影响，采用工厂化方式进行食物生产——人类千百年来理想。

植物工厂（ plant + factory）

三要素： **厂房**（外围护+可控环境系统）+ **流水线**（育苗—栽培—收获）+ **零件**（种子、肥料、水气资源等） ➡ **农产品**



- ◆ 环境（光、温、水、气、肥等）完全**可控**；
- ◆ **不依赖**阳光、土壤、降雨等；
- ◆ **周年**按计划工厂化生产。

被认为是农作方式的颠覆性技术！

发展植物工厂的意义

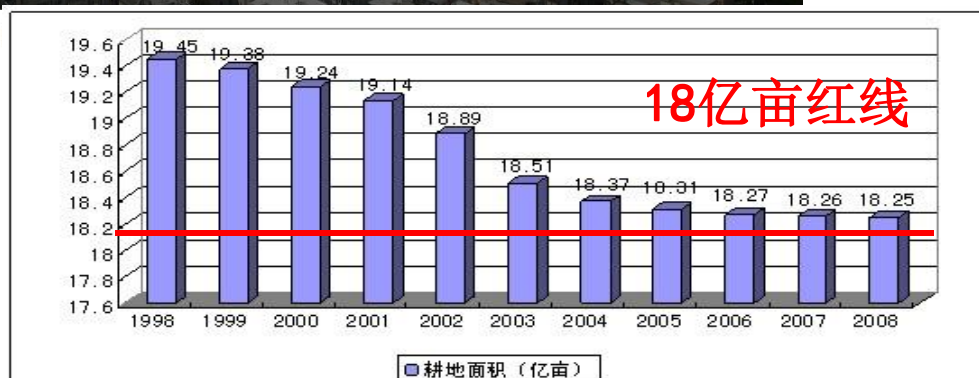
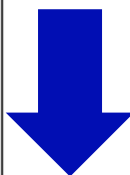
World Population Growth



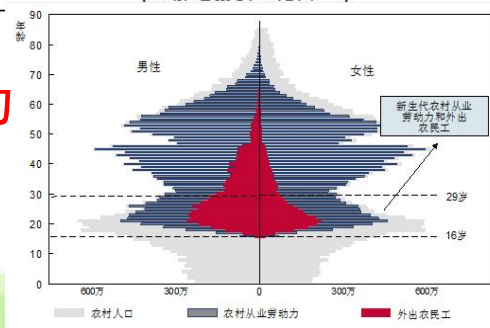
◆ 人口增长（2050年全球人口将达**95亿**，食物需求增加**50-70%**）；

植物工厂可能是解决人类面临的挑战的途径之一。

◆ 耕地减少（FAO-2019世界耕地**13.7亿ha**，年损失**500万-700万ha**）；



农业劳动力
年龄结构

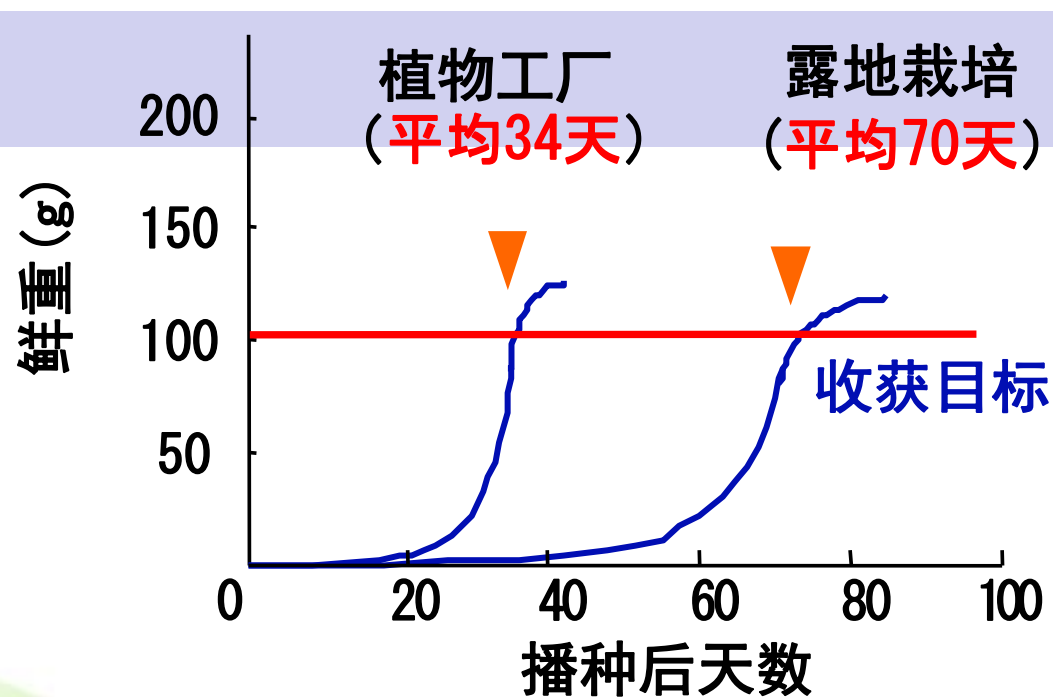


◆ 农业从业人口老龄化（2019年**60岁以上占62%**，日本**86%**）。

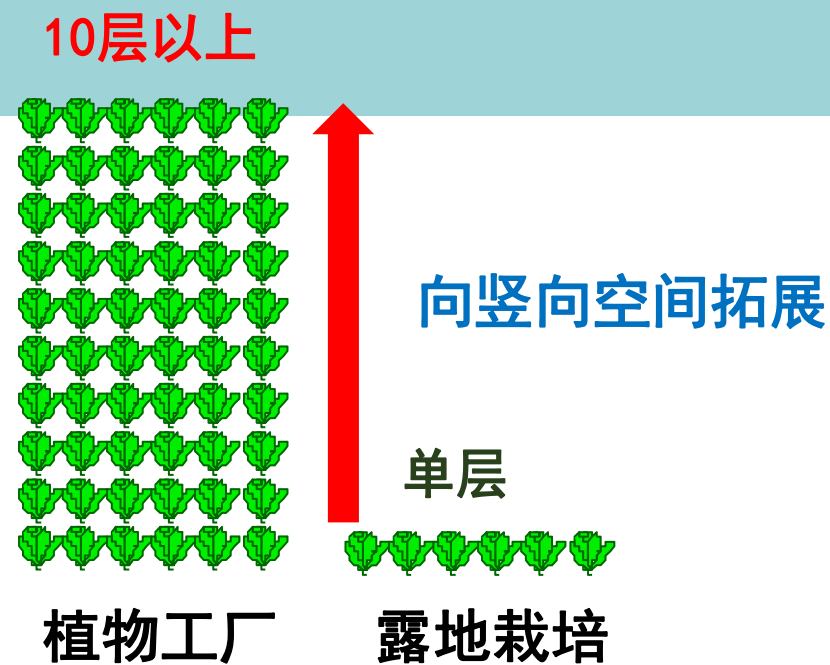
人类面临挑战

植物工厂特征 之一：突破土地资源约束

$$\begin{array}{c} \text{2倍} \\ \text{(周期缩短1半)} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{2倍} \\ \text{(周年生产)} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{10倍以上} \\ \text{(栽培层数)} \end{array} = \text{40倍以上}$$



生菜生长速度与收获期



栽培面积效率比较

大幅提高土地资源利用效率

土地利用效率可达露地的40-100倍以上，垂直农场甚至可达1000倍以上。



露地栽培



设施栽培 (2-10倍)



植物工厂 (40-100倍以上)



垂直农场 (1000倍以上)

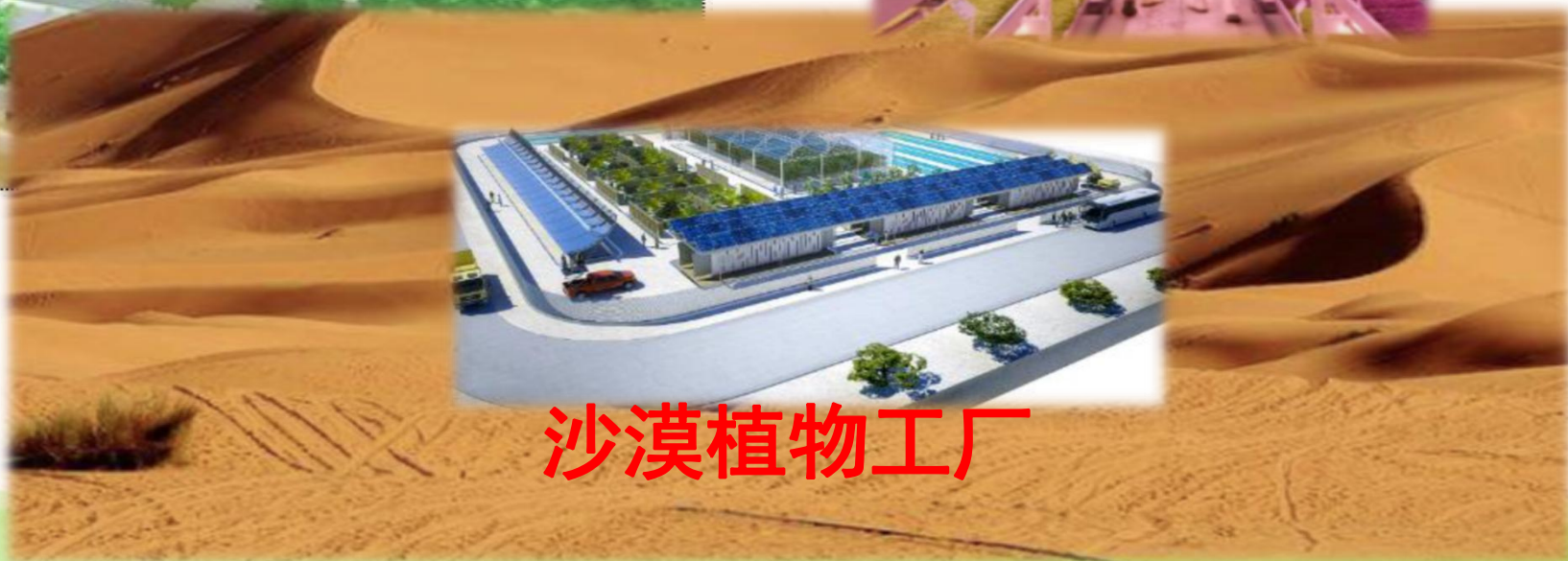
可在非耕地上生产，大幅拓展耕地空间(沙漠、戈壁、盐碱、荒地及城市建筑、地下空间等)



地下室植物工厂



防空洞植物工厂



沙漠植物工厂

植物工厂特征 之二：机械化与省力化

植物生长环境与营养要素的精准控制，甚至可使用机械手、机器人辅助生产，显著提升劳动生产效率。



工作相对轻松(可吸引一大批年轻人务农)



植物工厂特征 之三：产品洁净安全无污染



- ◆ 营养液栽培，避免土壤细菌、微生物、**重金属**污染等；
- ◆ 不直接接触大气，减少空气中灰尘、**微生物**污染等；
- ◆ 不施用农药、化学制剂等，杜绝**农药残留**。

植物工厂已经成为全球（尤其是经济发达地区）解决人口资源环境、农业劳动力短缺以及食品安全（**非粮作物，数量与质量安全**）等突出问题、发展现代农业的重要途径（**2009年以来，日本投入500亿日元进行研发、示范应用**）、韩国、新加坡、中国（**“十二五”863项目、“十三五”与“十四五”设施农业LED、“十四五”无人植物工厂、育种加速器等立项支持**）等发展迅速，荷兰、英国、美国、德国、瑞典等国也在积极发展。

二、植物工厂发展现状

1. 国际植物工厂现状

MI 预测,未来5年世界植物工厂将进入快速发展期

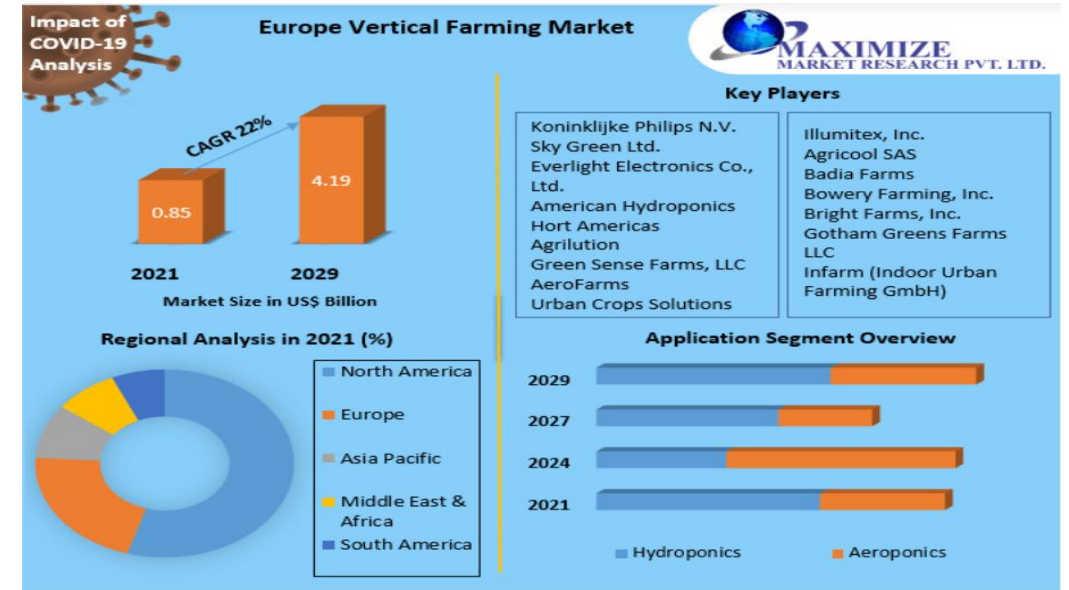


(来源: Mordor Intelligence 数据分析报告)

世界植物工厂发展分析		
区域	代表性国家/地区	发展分析
北美地区	美国、加拿大、墨西哥、北美其他地区	市场最大
欧洲	英国、法国、瑞典以及欧洲其他国家	新兴市场
亚太地区	中国大陆、中国台湾、日本、新加坡、中东、亚太其他地区	发展最快
南美地区	巴西以及南美其他地区	发展相对较慢
非洲	南非及其他国家	

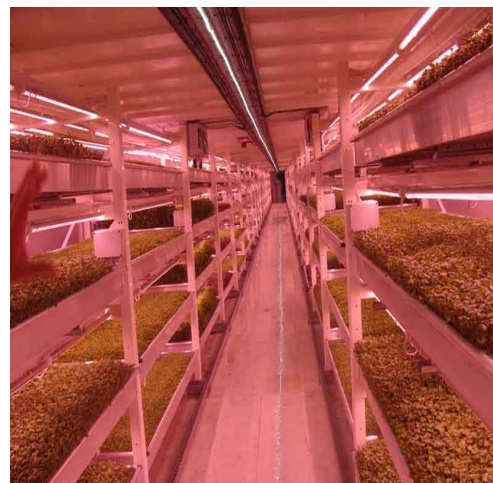
国际植物工厂前景预测

Vertical Farming Market Size



- ◆ 2023-2028年，全球平均年增长率>10%（北美市场最大，亚太发展最快）
- ◆ 欧洲2021-2029年，平均年增长率>22%，2029年市场规模将达41.9亿美元
- ◆ Insight Partners（纽约基金公司，200亿USD）研究指出，植物工厂市场将从2021年43亿美元，增长到2028年198.64亿美元（人民币1438亿元）

英国植物工厂发展 (原因及趋势)



英国植物工厂典型案例

英国琼斯食品公司

欧洲最大的植物工厂，供应英国15%的罗勒

建设世界上最大、最先进的植物工厂



地点：林肯郡斯肯索普
种植空间：5000m²

作物：香菜和罗勒
年产量：150 吨

地点：布里斯托
菜
种植空间：15000m²

作物：香菜和绿
菜
年产量：1000

英国Essex warehouse埃塞克斯郡Smartkas垂直草莓工厂

拥有超过27000平方米的种植空间，栽培层数17层，高度15米，号称英国最大、产量最高的草莓垂直农场。



德国「Infarm」获2500万欧元A轮融资，构建城市蔬菜工厂



李强总理访德时专门访问了西门子植物工厂技术成果



李强总理观看了**室内垂直农业、数字化企业体验中心、自动分拣机器人、高端核磁共振设备**等技术和产品展示，并与西门子董事会主席、总裁兼首席执行官博乐仁（Roland Busch）、西门子中国董事长、总裁兼首席执行官肖松等公司管理层进行深入交流探讨。



欧洲其他国家植物工厂发展



瑞典



荷兰



法国
巴黎社区植物工厂

罗马尼亚（中东欧）植物工厂发展



PM Dancila: Bosnia and Herzegovina's success in European accession process contributes to stability of Western Balkans

By Georgiana Vlad
KINE O'CLOCK

Bosnia and Herzegovina's success in the European accession process contributes to the stability and prosperity of the Western Balkans and the European Union as a whole, Prime Minister Viorica Dancila said on Thursday at a meeting she had with the Prime Minister of this country, Denis Zvizdic.

Discussions focused on the current status of the bilateral relations, the chances for Bosnia and Herzegovina to gain the status of a candidate state for European Union membership this year, regional policy.

The continuation of the EU enlargement process with our partners in the Western Balkans represents a priority of the Romanian presidency of the Council of EU, because we are certain this successful policy of the Union is the only one that can guarantee the edification

of a safe and prosperous region, which will contribute to the development and strengthening of the European project. We want the entire region to make progress on their own merit and to meet the accession criteria. Our approach is to see the objectives established through the conclusions of the Council of June 2018, when the EU reaffirmed its commitment in what concerns its enlargement policy, materialized," said Viorica Dancila, at the press conference she held jointly with Denis Zvizdic.

She reiterated Romania's determination, while holding the rotating presidency of the Council of the EU, to further support a positive decision in what concerns Bosnia and Herzegovina's objective to gain the status of a candidate for EU membership.

The Romanian head of the Executive also reiterated to her counterpart that the Bucharest authorities remain committed to offering any necessary political and technical assistance in strengthening dialogue with the

European institutions.

"I assured my colleague of Bosnia and Herzegovina that my country's success contributes, in our view, to the stability and prosperity of the Western Balkans, and also of the European Union as a whole," said Dancila.

The two sides also noticed a "significant" improvement in bilateral trade exchanges in the past couple of years, and also that there is still enough potential for strengthening economic relations between the two states further on.

"We agreed on the need to better promote the opportunities offered by our economies to the business milieu in the two countries. We agreed especially on strengthening bilateral collaboration in the energy field, domestic affairs, social security, environment protection, tourism, education and culture.

continued on page 3

FinMin Teodorovici to preside ECOFIN meeting in Brussels on Friday

Minister of Public Finance Eugen Teodorovici is set to pay a two-day visit to Brussels, where he will preside on Friday the works of the Economic and Financial Affairs Council (ECOFIN), a press release issued on Thursday informs.

On Thursday, the Minister participates in the Eurogroup meeting, and he will have a working dinner with the theme "Workforce mobility and its impact on economic growth." The ministers will make an exchange of opinions related to the problems facing the country that "export" workforce.

On Friday, May 17, Teodorovici is going to preside the meeting of the Economic and Financial Affairs Council (ECOFIN). The agenda includes topics such as the Directive on the harmonization of the structures of excise duties on alcohol and alcoholic beverages, the Directive regarding the general regime of excises, the taxation of digital services, the revision of the EU list regarding the uncooperative jurisdictions, the European Semester.

continued on page 11

Inaugural ceremony of the China-Romania Science and Technology Park for Agriculture



NINE O'CLOCK SUPPLEMENTS

Shalom

Israel

Pages 5-10

INSIDE:

Politics

Colden: SRI was involved in locating and repatriating Nicolae Popa, a successful operation

Page 2

Politics

Tariceanu: Gov't should address EU course in case of countries refusing Romania's entry into Schengen

Page 4

Events

Museum circuits, shows and original exhibitions at the Museums Night 2019

Page 12

IN THIS ISSUE

Politics & News 2, 3, 4

Economy 11

Events 12



罗马尼亚（中国技术输出）



北美植物工厂发展（美国、加拿大等）



AeroFarms 和芝加哥叶菜工厂

美国Plenty公司（E轮融资4亿美元，与沃尔玛合作为城市供给蔬菜）

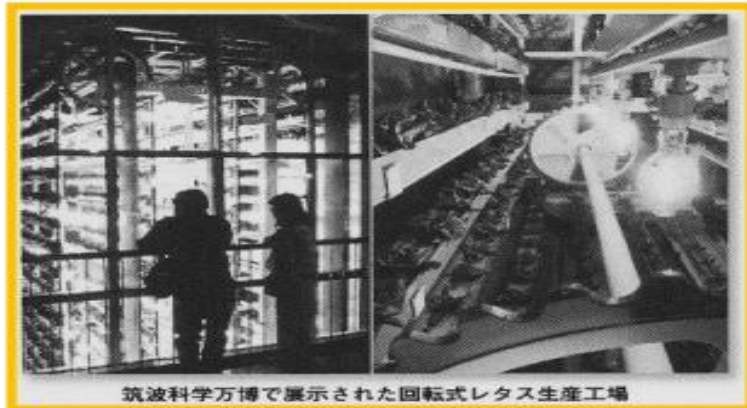


北美（美国、加拿大）药用（大麻）植物工厂



亚洲（日本、中国、韩国等）植物工厂产业发展

1985年 筑波科学万博



- ・社会的期待が大きい
- ・大きな課題

第6次産業！産業化へ

- 気候変動
- 国際情勢

第3次ブーム
2009~

- 東日本大震災2011
- 復興事業
- TPP 2013

大阪府立大2011



第2次ブーム
1990前~後

キューピーTS
ファーム



第1次ブーム
1980中~後

筑波科学万博1985



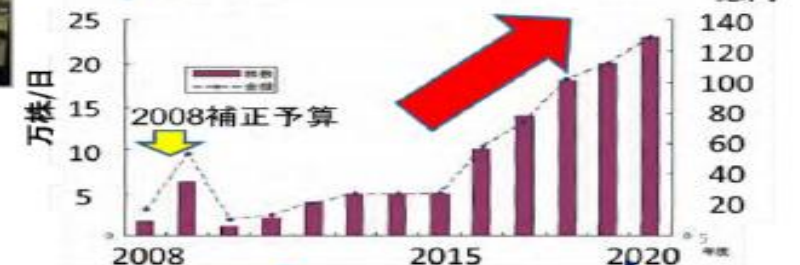
クリステンセン農
場、デンマーク、
1957



米GE社、
1970年前半



市場予測



1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

1次

2次

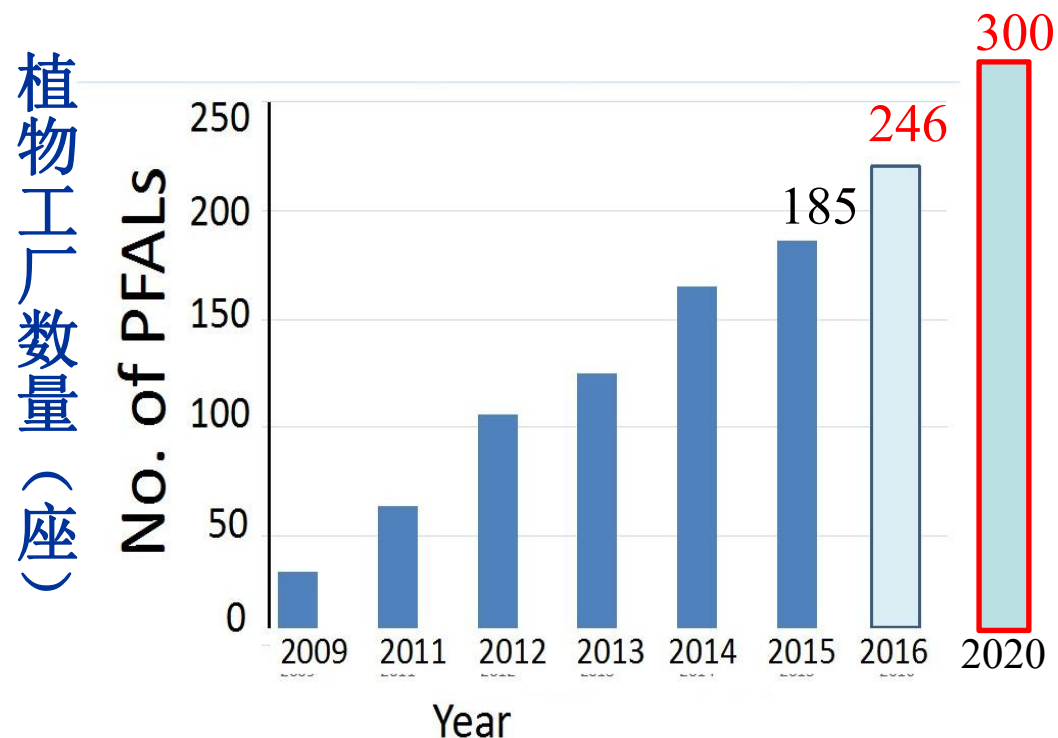
3次

産業化

日本植物工厂发展的三个阶段

亚洲植物工厂产业发展（日本）

2009年以来，日本进入第三个阶段，植物工厂发展明显加速



日本植物工厂发展现状（300座左右）



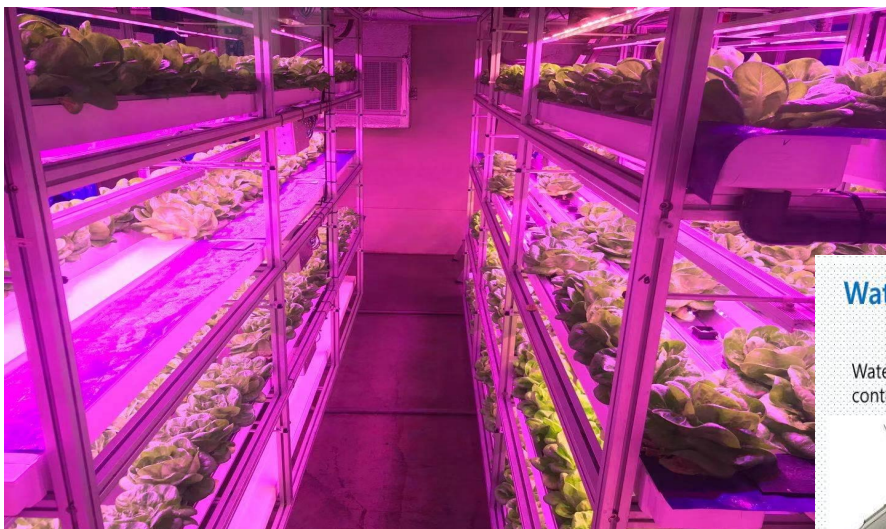
大阪18层
植物工厂
(530m²,
日产叶菜
5000株)

宫城县
2300m²植物
工厂（日产
叶菜10000株）

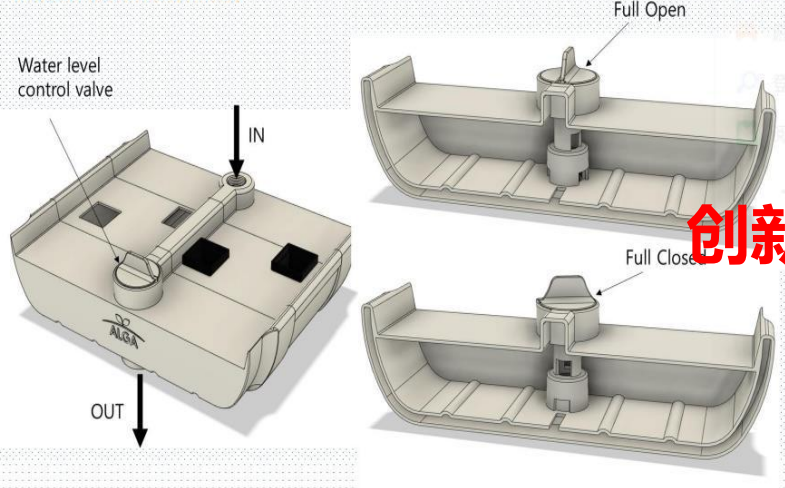


亚洲植物工厂产业发展（韩国）

韩国植物工厂从2009年开始起步，目前有**40座左右**，技术发展较快。



Water level control



创新设计



医院植物工厂



韩国植物工厂典型案例

Vertical Farm (Nexton)



Cultivation floor area: 9,000m²
Product: 2.7 ton/day

Okcheon, Korea

世界最大的隧道植物工厂(9000m²)



草莓工厂不断增多

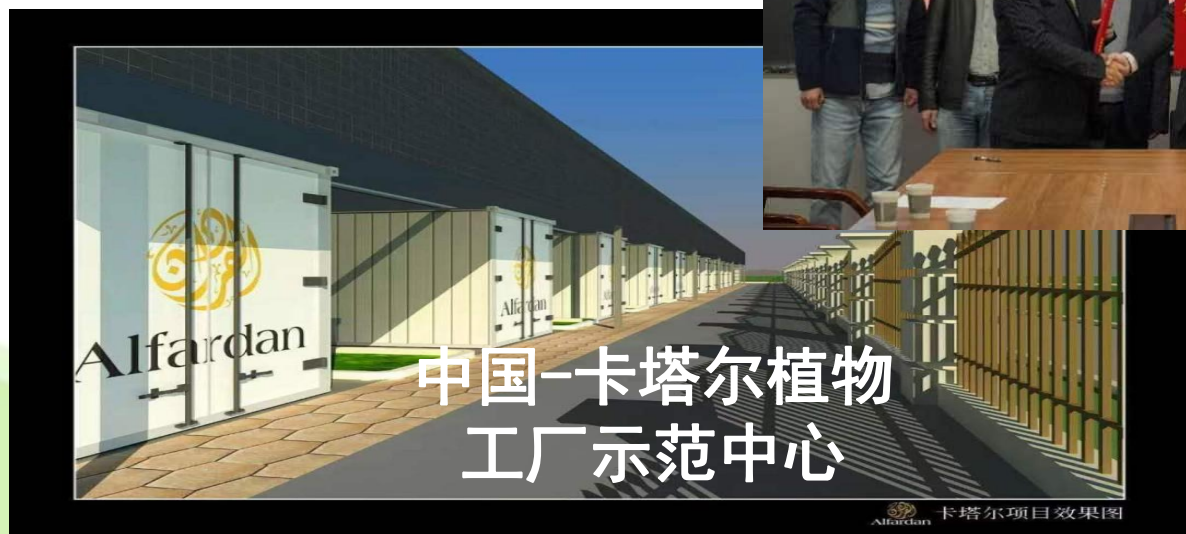
Supplementary Lighting to Hydroponic Ginseng



人参植物工厂

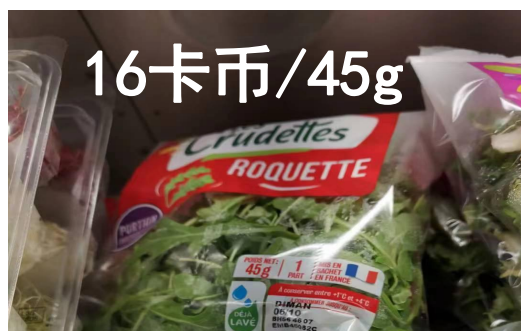
T1(R9:B1) T2(R0:B2) T3(R7:B3) T4(cont) T5(생안LED) T6(시계표)

卡塔尔垂直农业（植物工厂）（中国技术输出）



植物工厂蔬菜价格—欧美、中东

卡塔尔 (1卡币=2RMB)



欧洲 (法国)



美国 (AeroFarms)

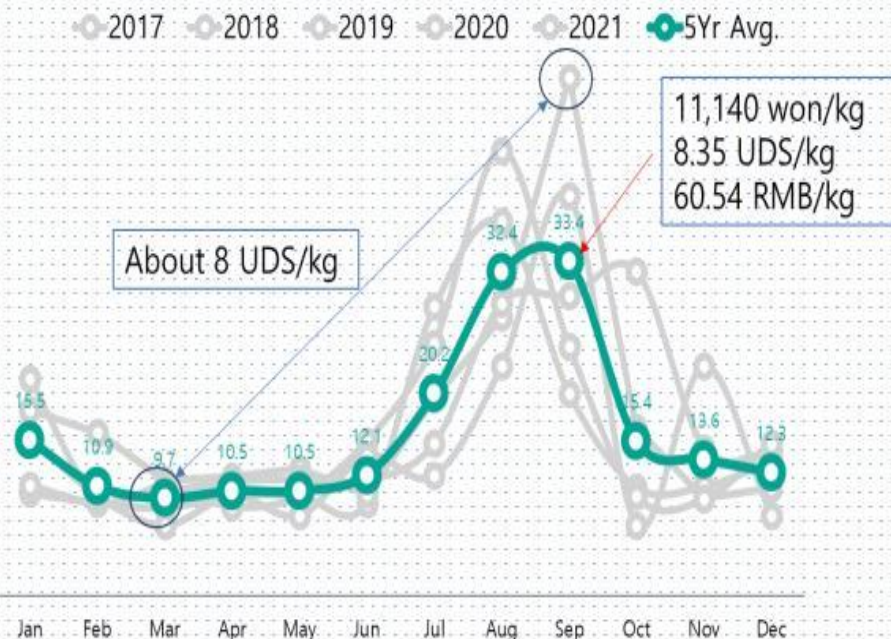


植物工厂蔬菜价格-韩国、日本

韩国



- Monthly wholesale price of lettuce in USD per kg



- Increasing demands for clean and fresh produces (by PlanT. Farm)

日本 (1 日元=0.05RMB)

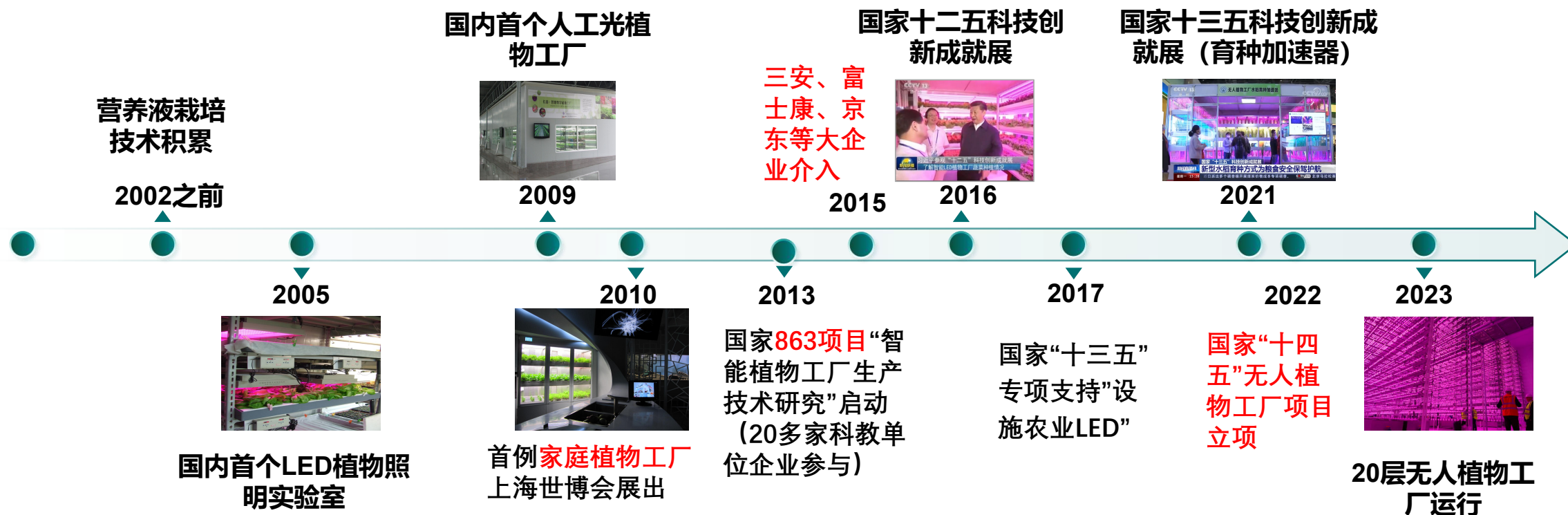


国际植物工厂发展主要特征

- ◆ 金融资本介入，有良好的未来预期。如Plenty 、 AeroFarms、 Infarm 等，基本上都是这种模式；
- ◆ 盈利模式各有不同，但总体来看，**蔬菜售价普遍较高**（与国内比较），欧美饮食习惯偏向叶类蔬菜（西餐、沙拉等），有利于以叶菜为主体的植物工厂发展；
- ◆ 卡塔尔（中东）模式为植物工厂规模化发展提供了可能预期，**气候差、菜价高、油气电便宜**……。

2. 中国植物工厂发展现状

中国植物工厂起步较晚，2002年前后开始研究，2009年出现第一个商业化植物工厂，但发展速度较快，目前一定规模的植物工厂**250座左右**。



植物工厂得到习近平总书记高度关注



多个国家元首与政要对植物工厂充满兴趣

(2018年以来, 多位国家元首、政要参观我院植物工厂)



英国（前）首相特蕾莎·梅



朝鲜金正恩委员长



马来西亚（前）总理



吉尔吉斯斯坦总统

智利总统博里奇本月15日访问都市所植物工厂

智利城市化率87%，人均耕地不足，发展植物工厂可能是一种选项



(1) 植物工厂模式与形态多样

规模量产型-栽培面积500-10000平方米



三安植物工厂



富士康植物工厂

移动型（箱体式）-规格为20英尺或40英尺



城市各种场景组装型-超市、社区、餐厅、家庭等



家庭微型-冰箱式、柜式、台灯式等

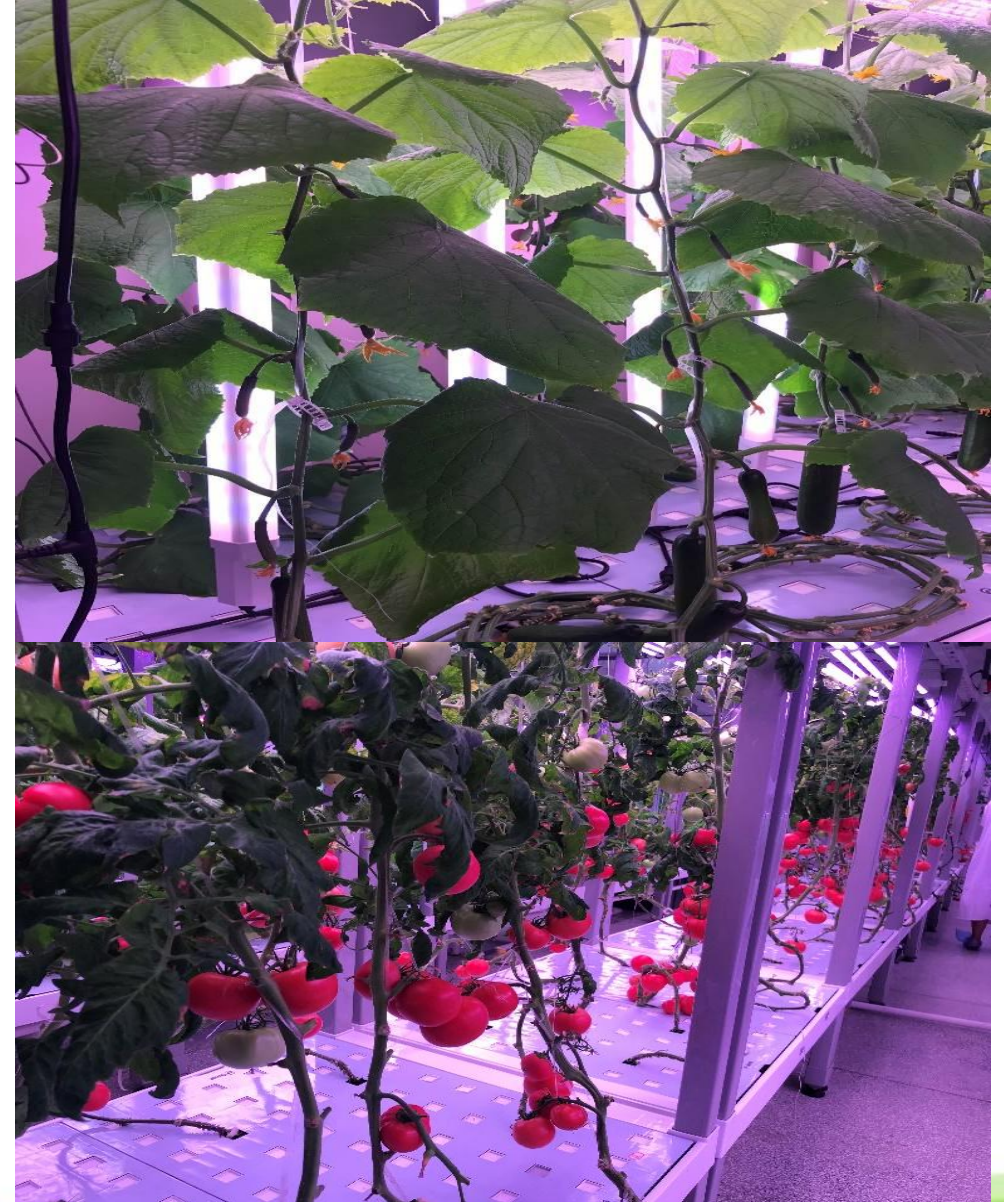


(2) 植物工厂作物类型不断拓展

功能性植物



矮化果树及果菜品种 (周年生产)

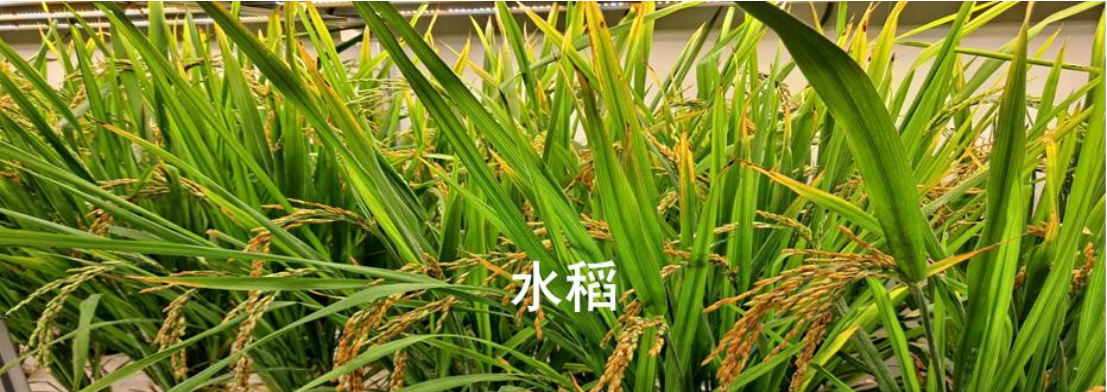


矮化果菜与高附加值浆果（周年生产）



大田作物工厂化栽培与快速育种

突破水稻、小麦、大豆、玉米、棉花等作物快速繁育关键技术，实现作物生育期缩短46%-63%，解决了育种周期长、效率低难题，引领全球育种的创新方向。



作物	品种	原生育期 (天)	加速后生育期 (天)	缩短比例
水稻	ZF802	120	57	53%
小麦	中科糯麦	180	65	63%
大豆	中黄57	108	53	51%
玉米	大丰30	149	75	50%
棉花	中棉 1	180	89	51%
辣椒	樟树港	95	45	53%
紫花苜蓿	中苜1号	130	70	46%

牧草（大麦草）工厂化



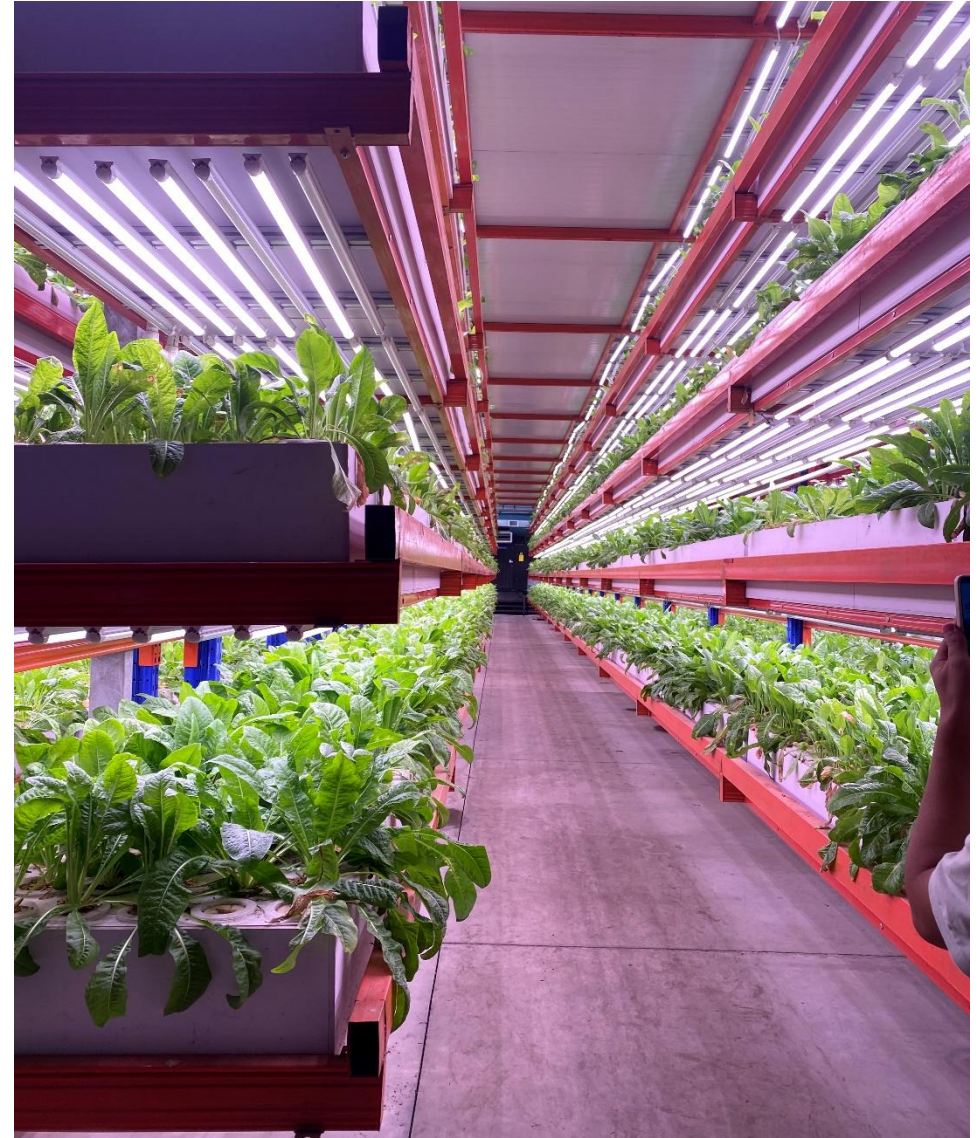
牧草（大麦草）工厂化(6-8天收获)



牧草（苜蓿等）工厂化（人工光）生产



牧草（金苣草等）工厂化（人工光）生产

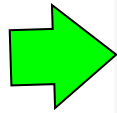
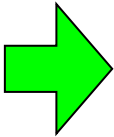


我国植物工厂总体特征

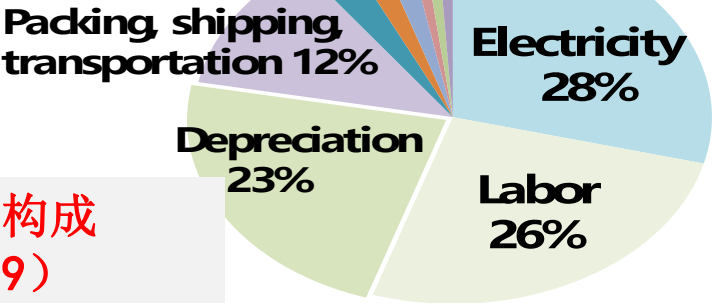
- ◆ 植物工厂模式与形态多样，生产企业多，规模普遍小，质量参差不齐，难以形成竞争力；
- ◆ 缺乏统一的标准，各家产品形态各异、模式多样，围护结构、栽培系统、环境系统等各成体系；
- ◆ 真正用于规模化蔬菜生产，并取得良好经济效益的植物工厂企业还不多，产业优势尚未发挥出来；
- ◆ 特殊场所的贡献已经显现，国际化输出产能正在呈现；
- ◆ 作物类型逐渐多样化，功能植物、浆果、牧草、育种等不断拓展。

三、关键技术进展

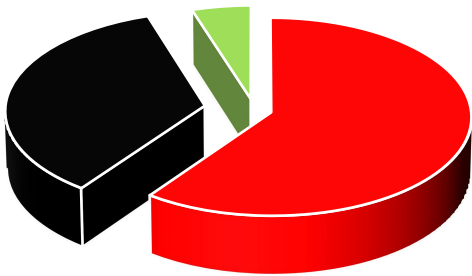
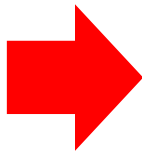
植物工厂技术研发目标



Consumables 3% Seeds 2% Repair 2%
Supplies 1% Water 1% Land rental 1%
Miscellaneous 1% Land rental 1%



电能消耗分析

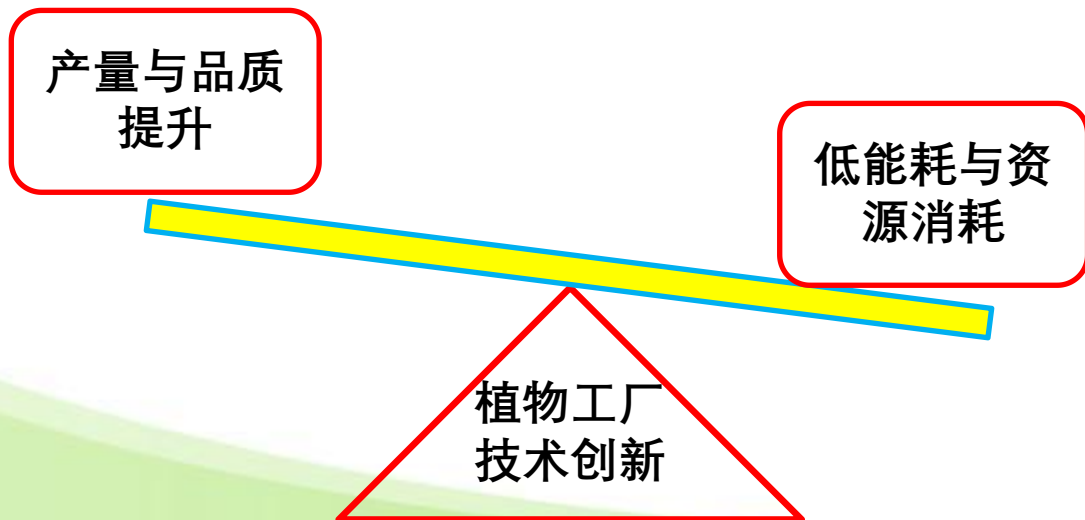


■ Lighting ■ Air condition ■ Other else

- 光源占60%
- 空调占35%
- 水泵等其他占5%

减少能耗和人力成本是植物工厂技术突破的核心

如何实现盈利和技术普及：提升产量与品质，减少资源消耗



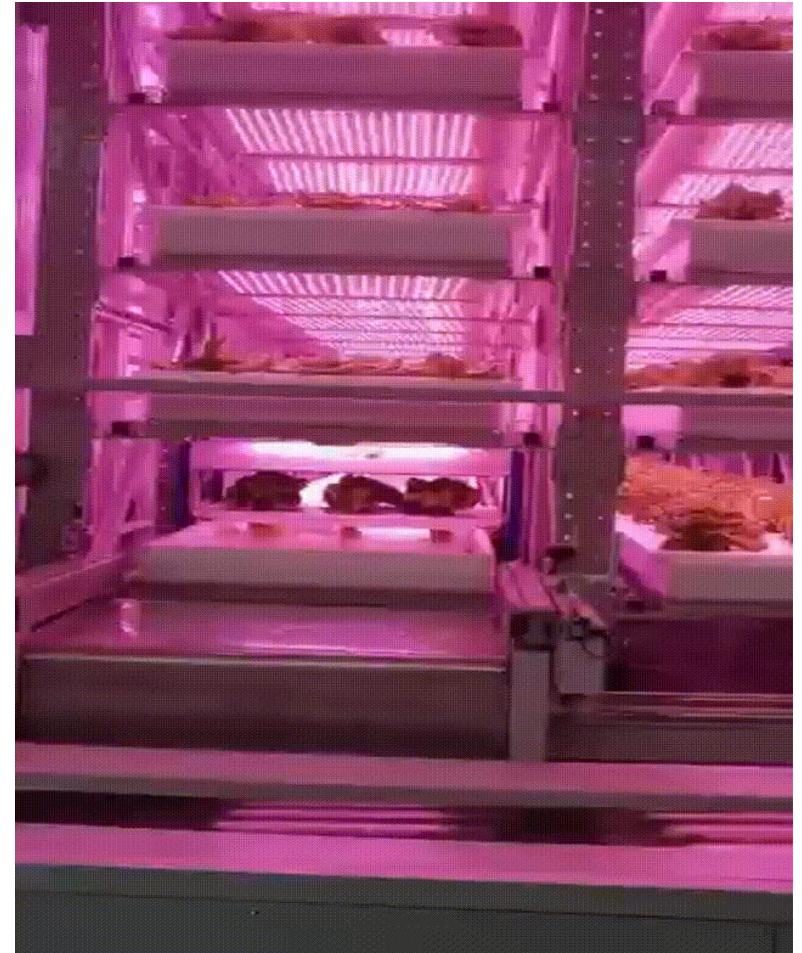
- **减少：** 最大化提高能源与资源利用效率，减少能耗、运行成本等；
- **提升：** 大幅提高作物产量和品质，实现高效生产。

技术进展一： 垂直植物工厂无人化技术取得重要进展

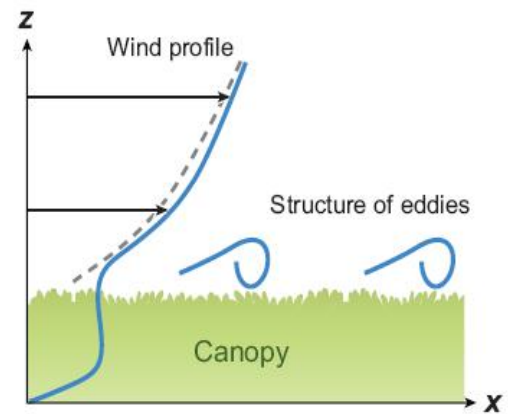
植物工厂向垂直空间拓展（20层），实现全流程自动化甚至无人化作业



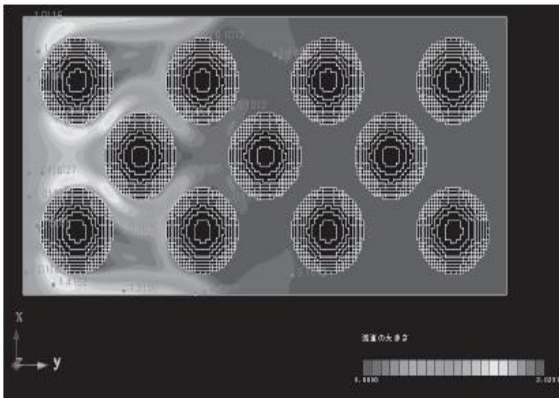
栽培层达
20层的垂
直无人植
物工厂



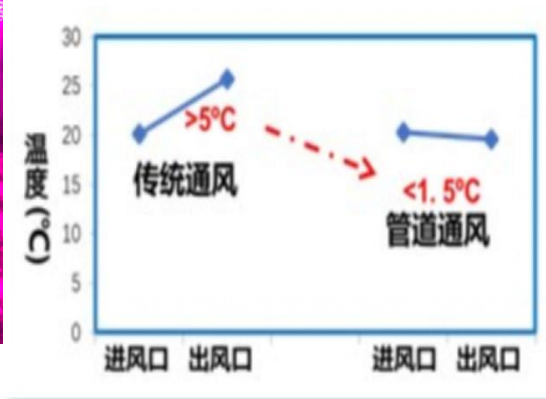
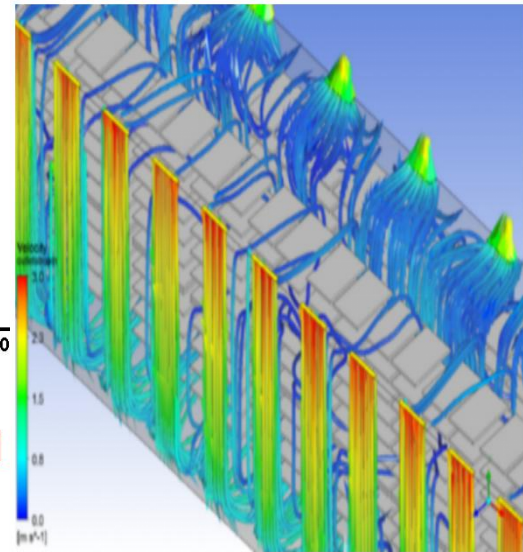
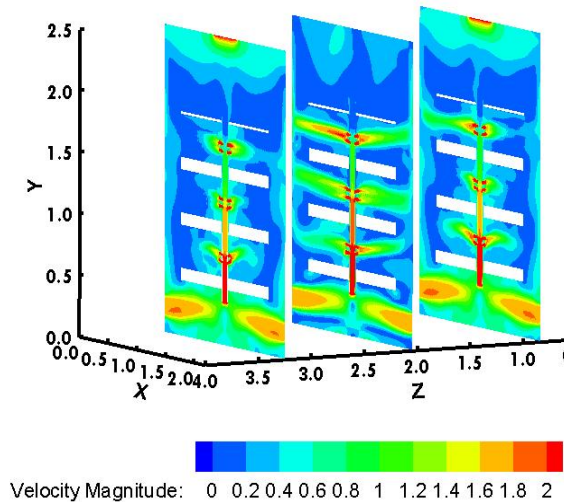
超高层植物工厂环境均匀调控技术: 通过CFD模拟与均匀通风技术的应用, 使高低层温差从 5°C 以上降低到 1.5°C 左右



冠层边界层阻力 (Langre, 2008)

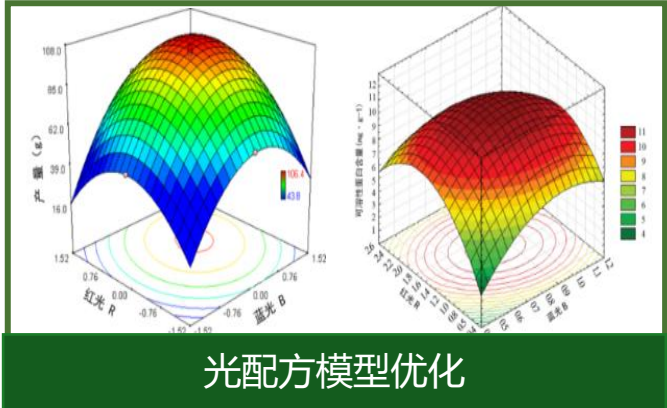
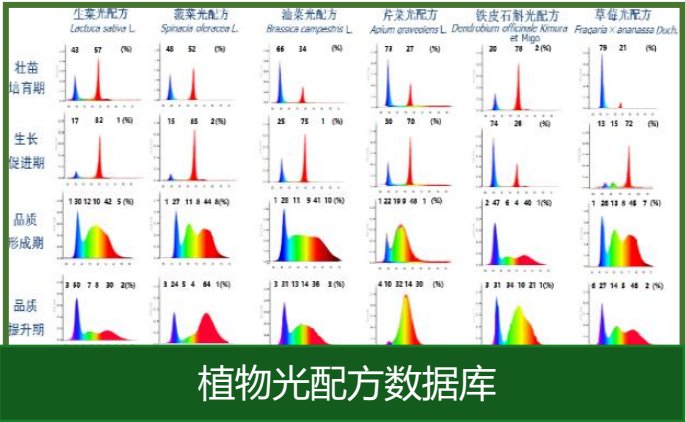
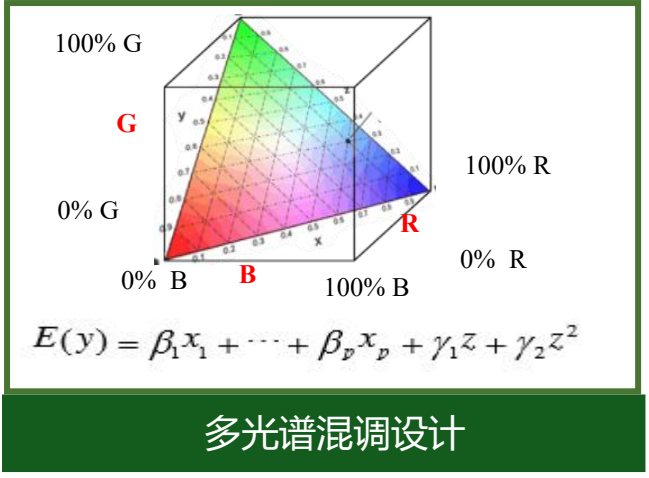
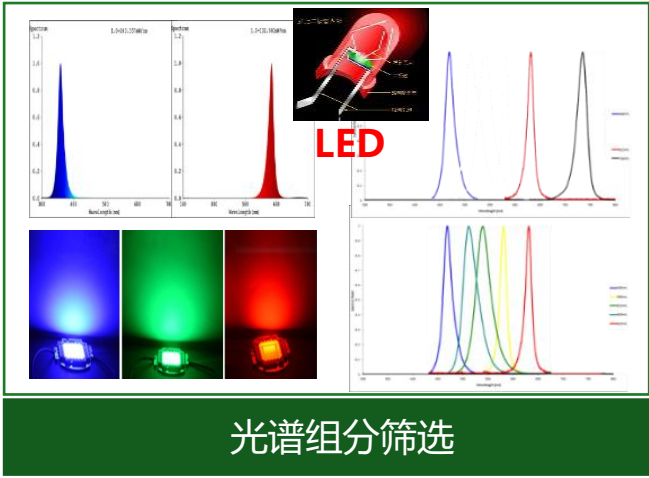
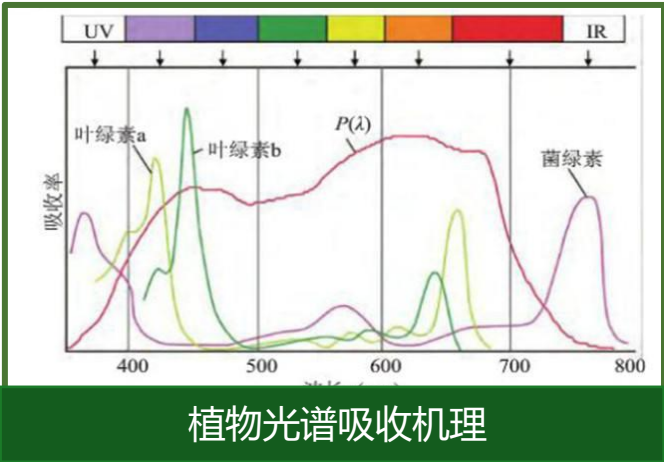


植株遮挡 (Nishikawa et al., 2013)



技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

- **植物光配方：** 根据植物光合对光谱具有选择性吸收的特征，构建**最优产量、品质的优化光配方**，提升光能利用效率。

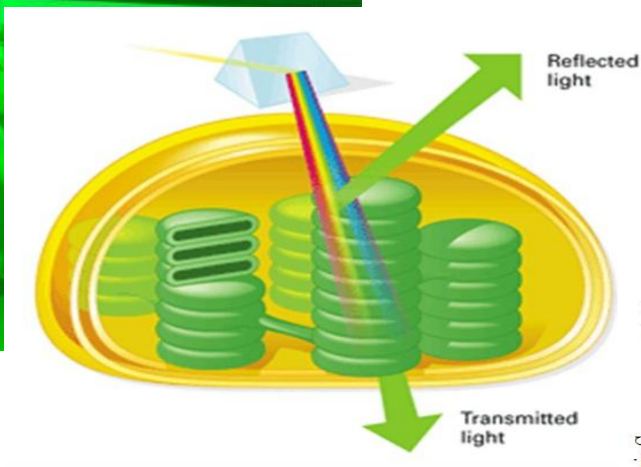


技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

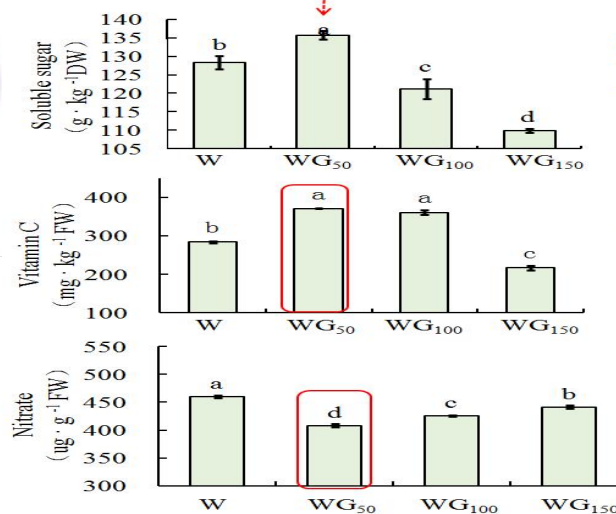
- 光合光谱 (R,B) + 信号光谱(G,UV,FR)混调提升光效



叶菜适宜的绿光光强为
 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$



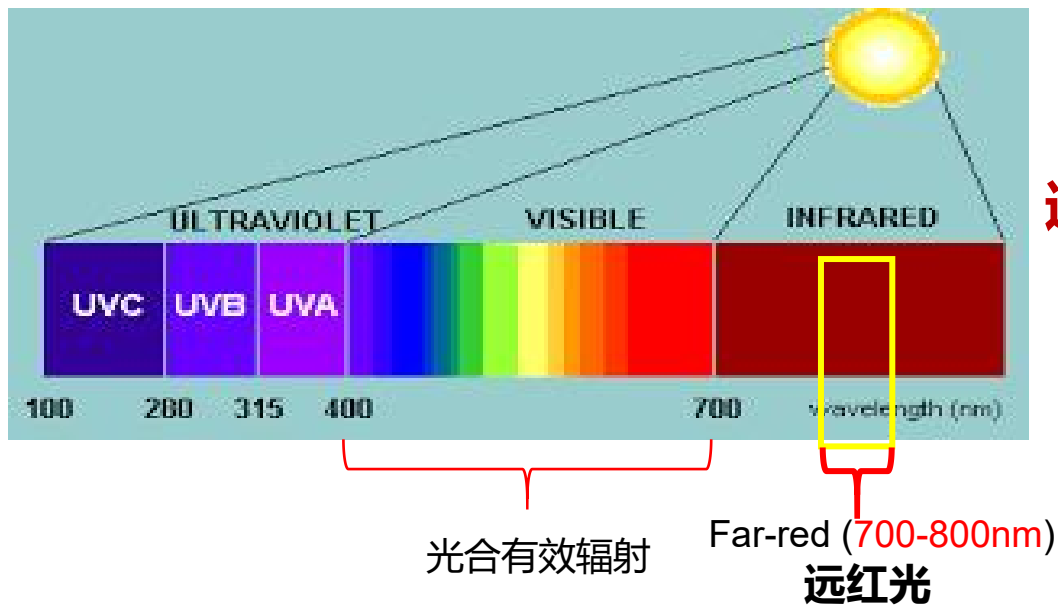
绿光(G)可调控植物生长、提升光效



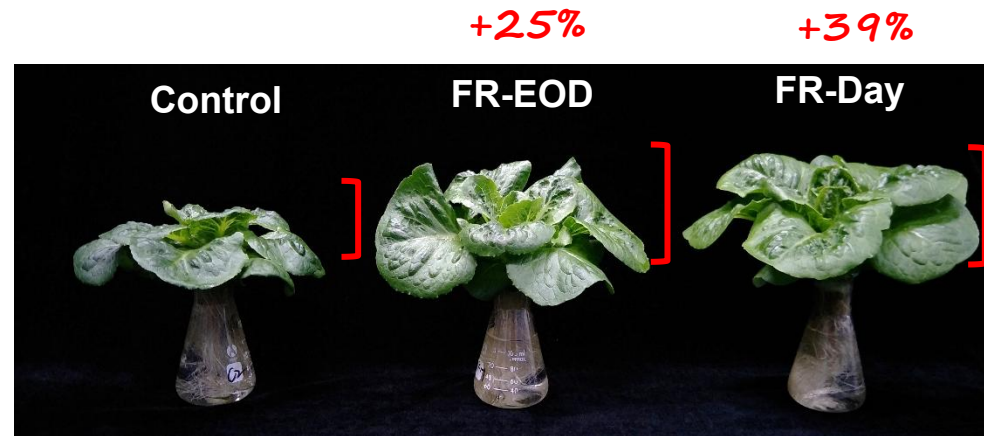
- 绿光 (G) 是植物生长发育的重要微量信号光谱;
- 一定剂量的绿光可提升光合性能和作物产量;
- 拓展植物生长发育有效光谱范围。

技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

- 光合光谱 (R,B) + 信号光谱(G,UV,FR)混调提升光效

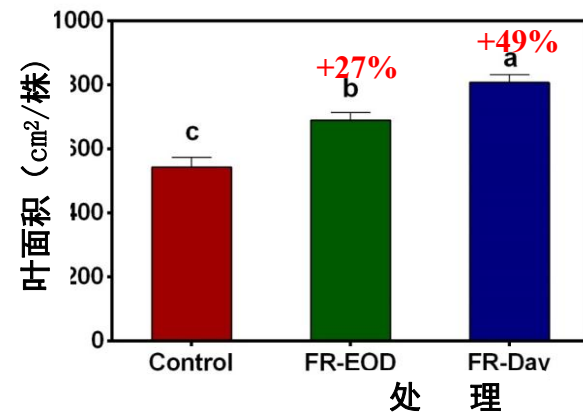
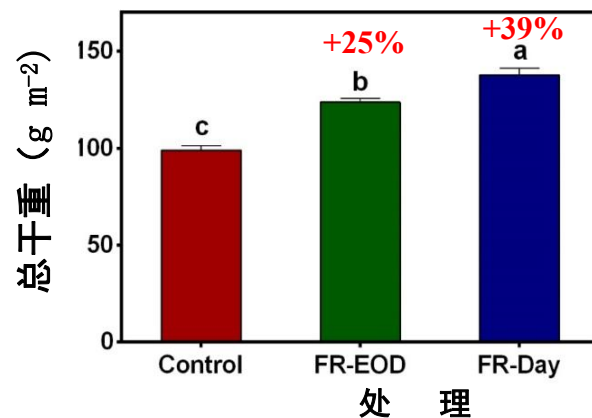


远红光 (FR)



定植后15天效果图

- 全天进行连续远红光处理 (FR-Day) , 或者暗期前短时补充远红光 (FR-EOD) 能够大幅提升生菜的生物量。

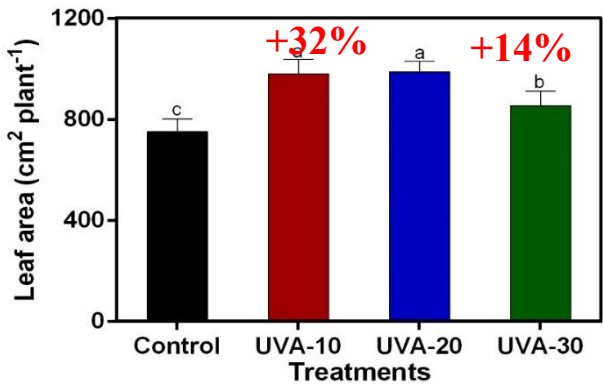
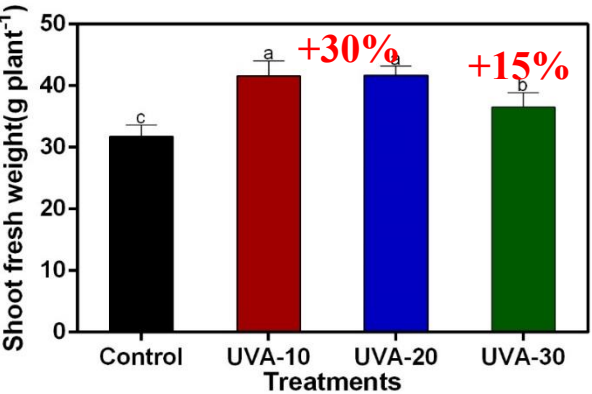
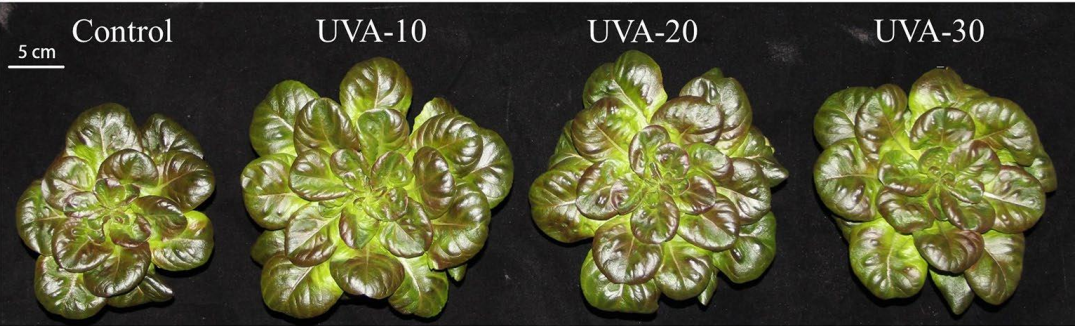


技术进展二：植物光配方与光温耦合节能

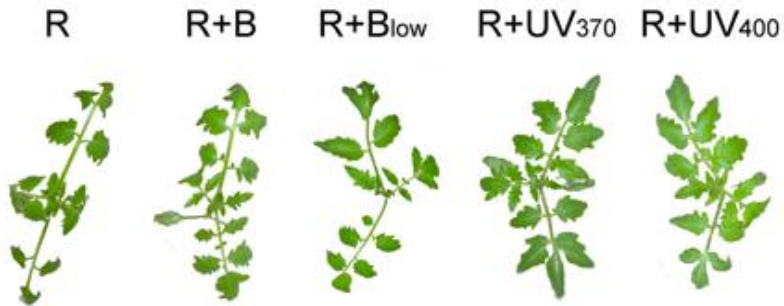
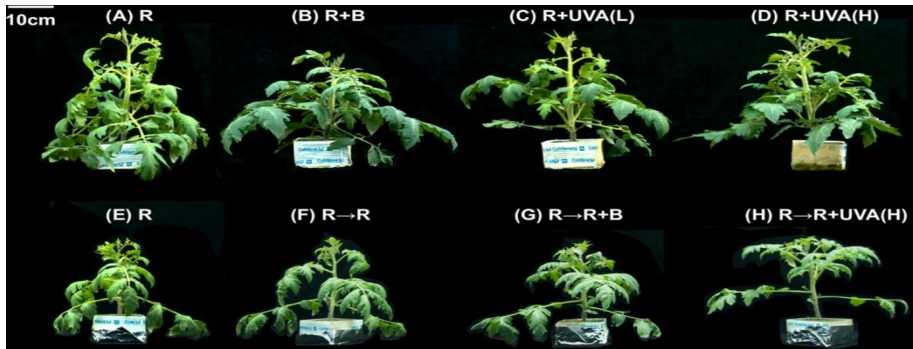
- 光合光谱 (R,B) + 信号光谱(G,UV,FR)混调提升光效

紫外光 (UV)

◆ 在红蓝背景光下，适度添加UVA能够增加生菜的叶面积与生物量。

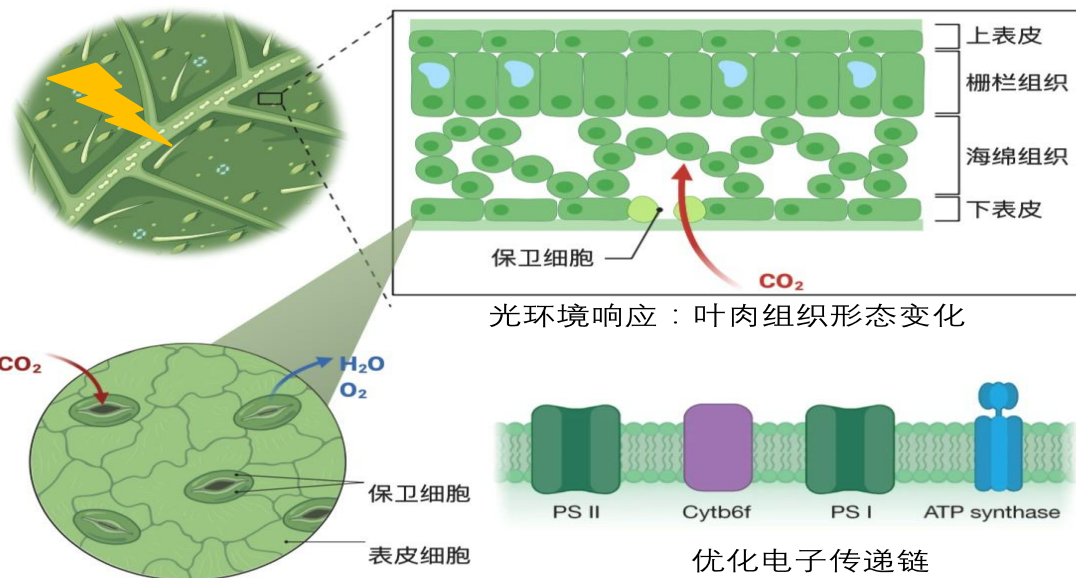


◆ UVA具有与蓝光相似的功能，表现为可逆转纯红光引起的植物“红光综合症”，促进叶片上翘，增加植株叶片光截获面积，提升光能利用效率。



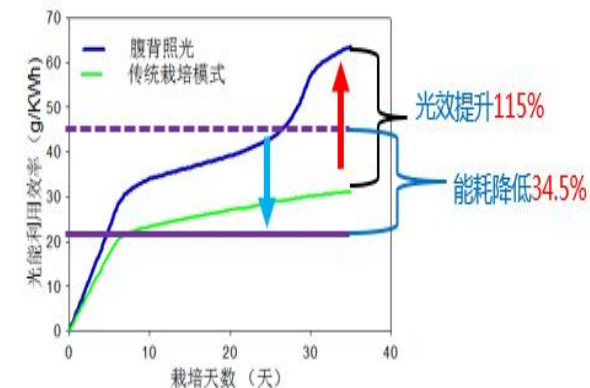
技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

● 叶片光合潜力挖掘提升（叶背光合- 正面与背面双面受光）



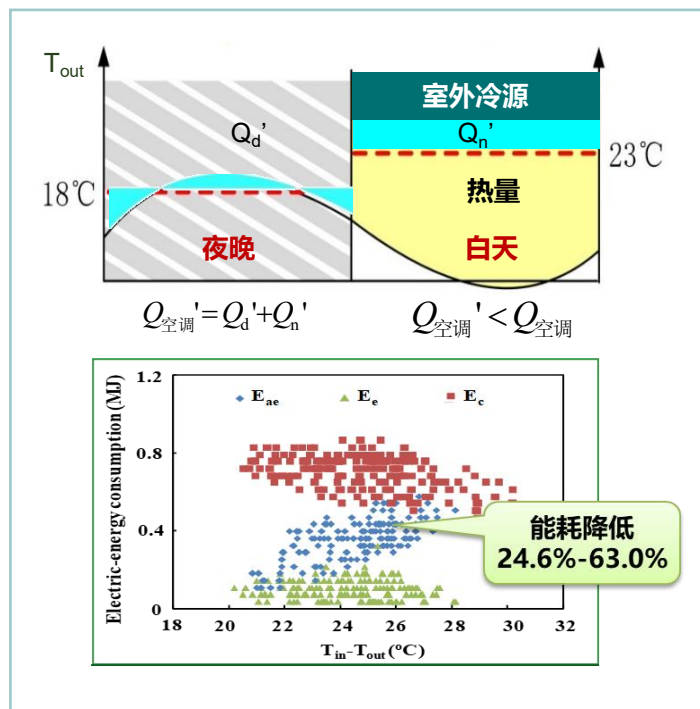
光环境响应：改变气孔特性

挖掘叶背光合潜能（改变光合叶肉组织形态、气孔分布与运动），提高叶片光合效能（**1倍以上**）。

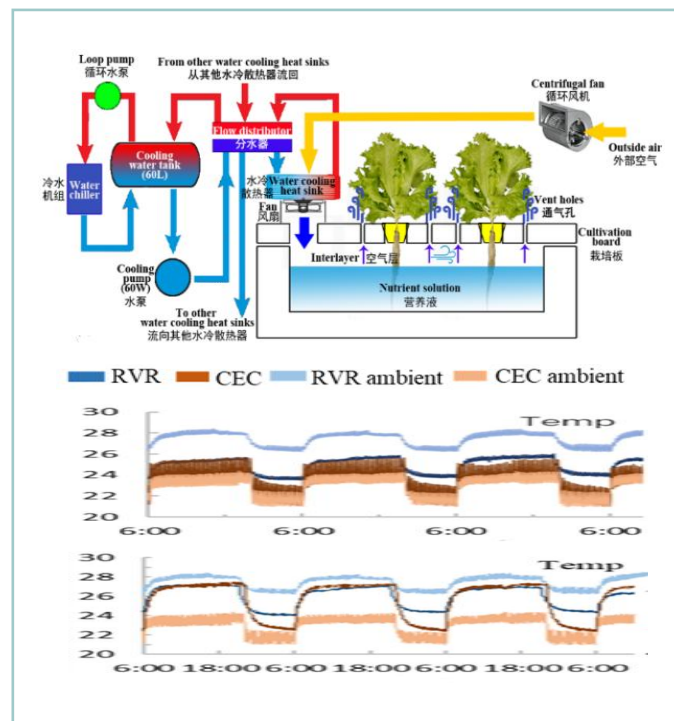


技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

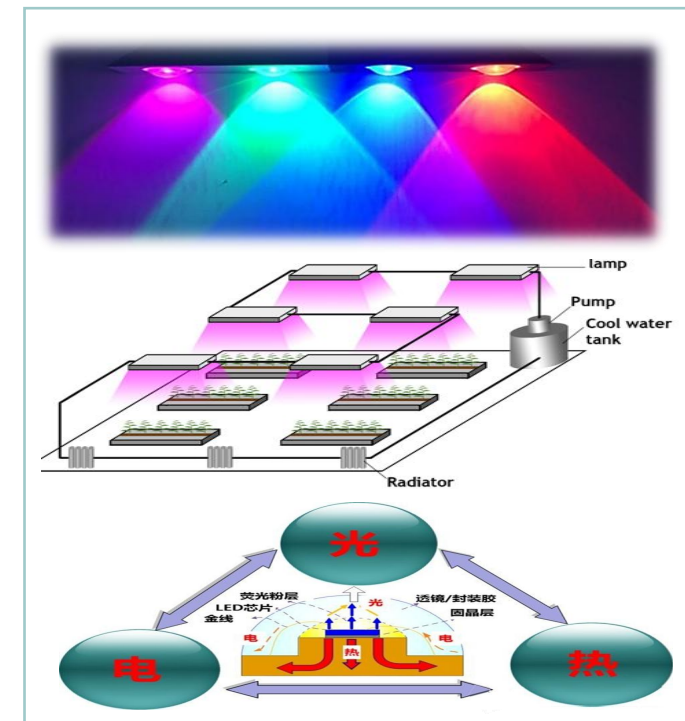
光-温耦合节能：光-温耦合调温、微环境调控、水冷光源调温技术，实现植物工厂综合能效提升56%，叶菜生产能耗降至8.25 kWh/kg



光-温耦合节能调温，
降低能耗24.6%-63.0%



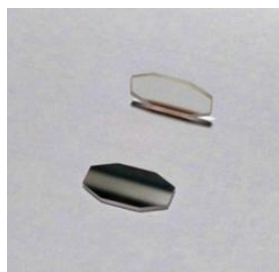
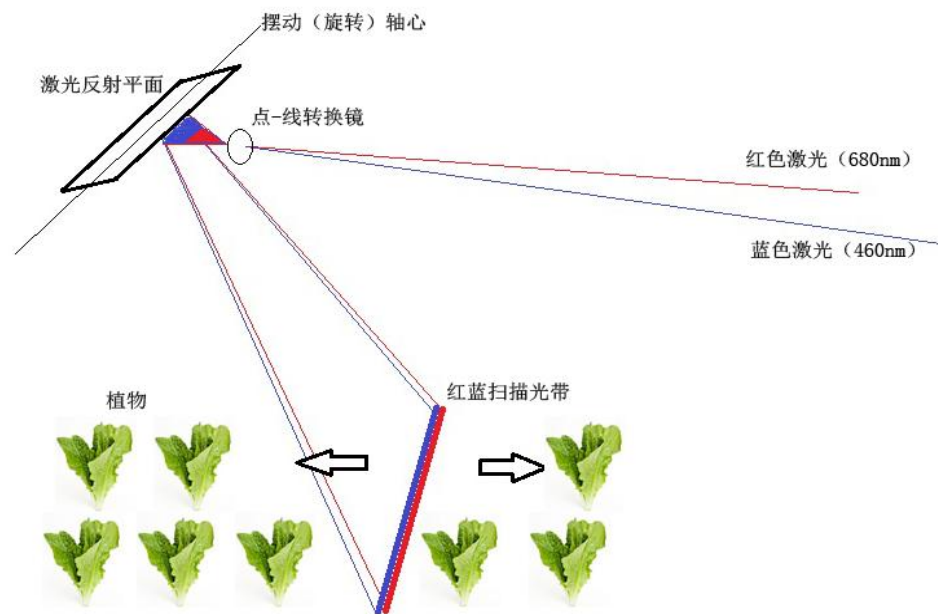
微环境调控
降低能耗50.8%



水冷光源节能调温

技术进展二：植物光配方与光-温耦合节能

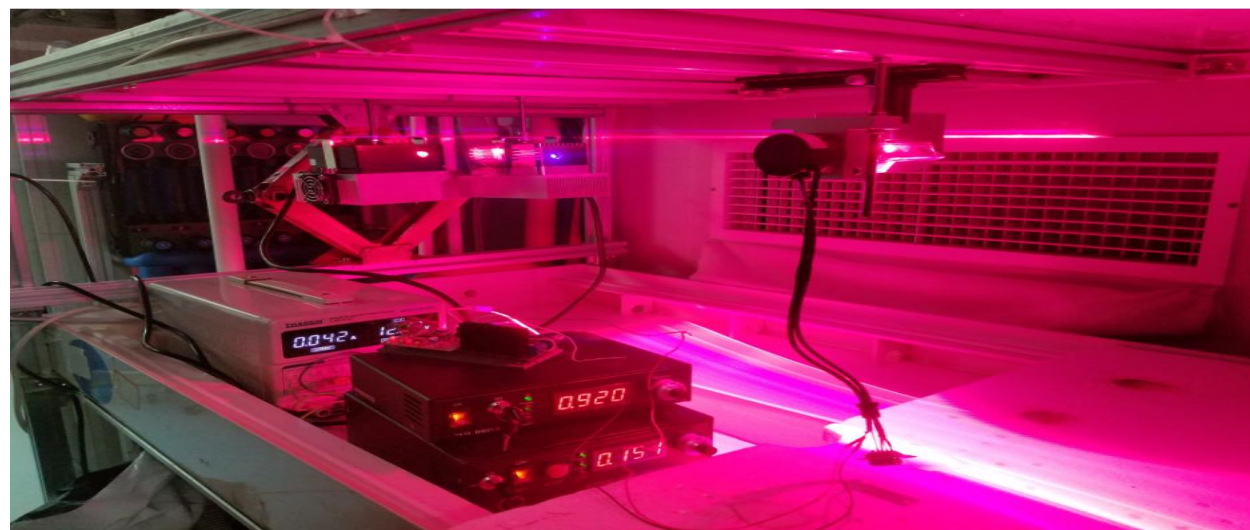
高能闪烁激光LD节能光源技术



400-700 nm
可见光反射率 >99%



点-线转换镜

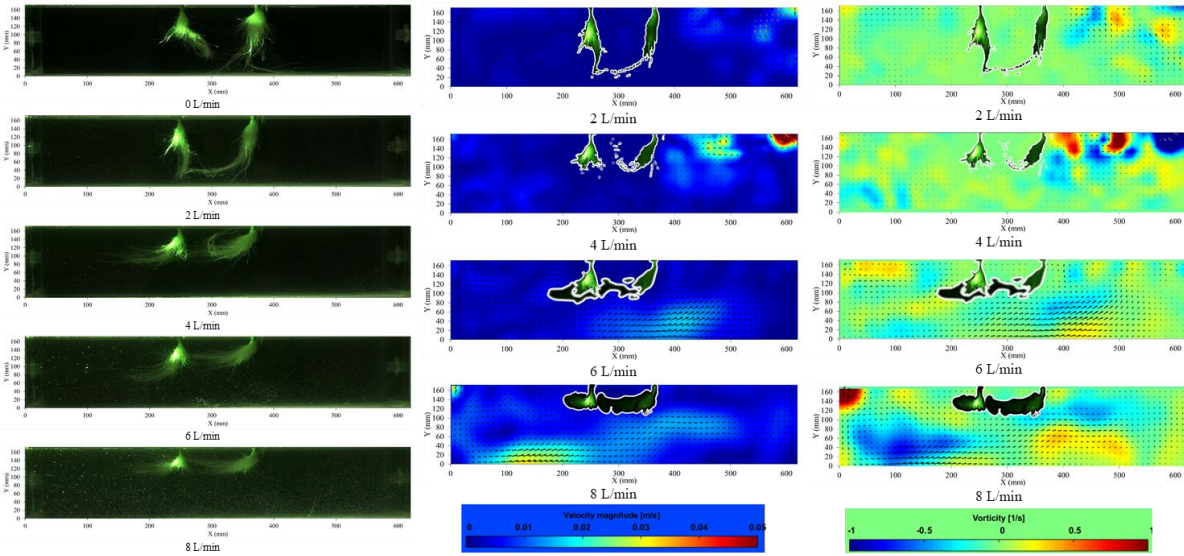


技术进展三：营养液管控及其品质调控技术

(1) 营养液栽培水肥高效利用及其智慧管控技术



营养液流场可视化（粒子示踪测速技术）

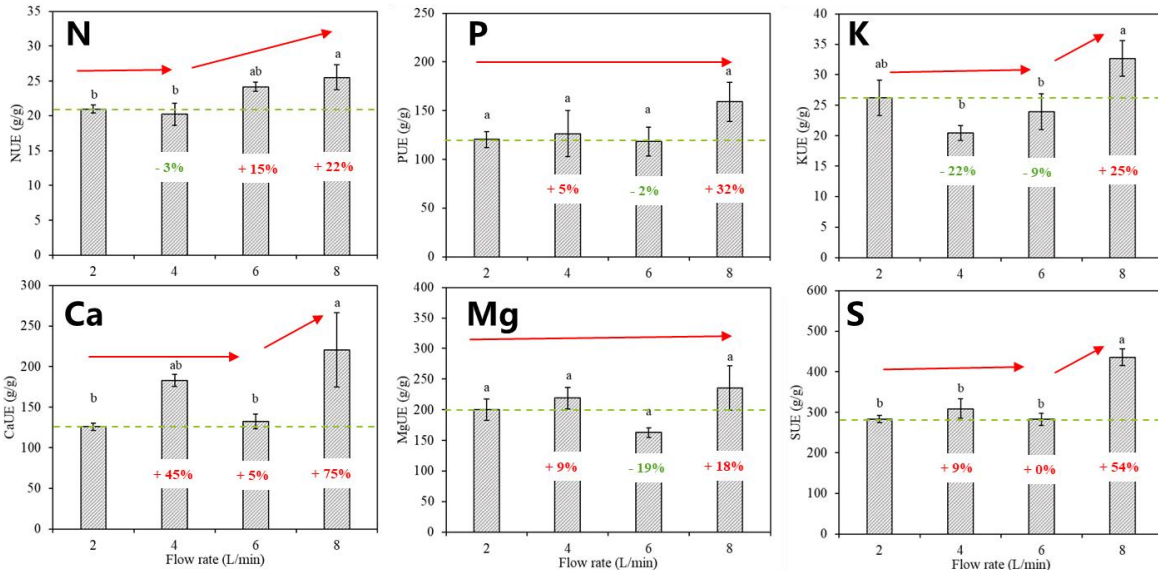


根系受力分析

营养液流速分布

营养液涡度分布

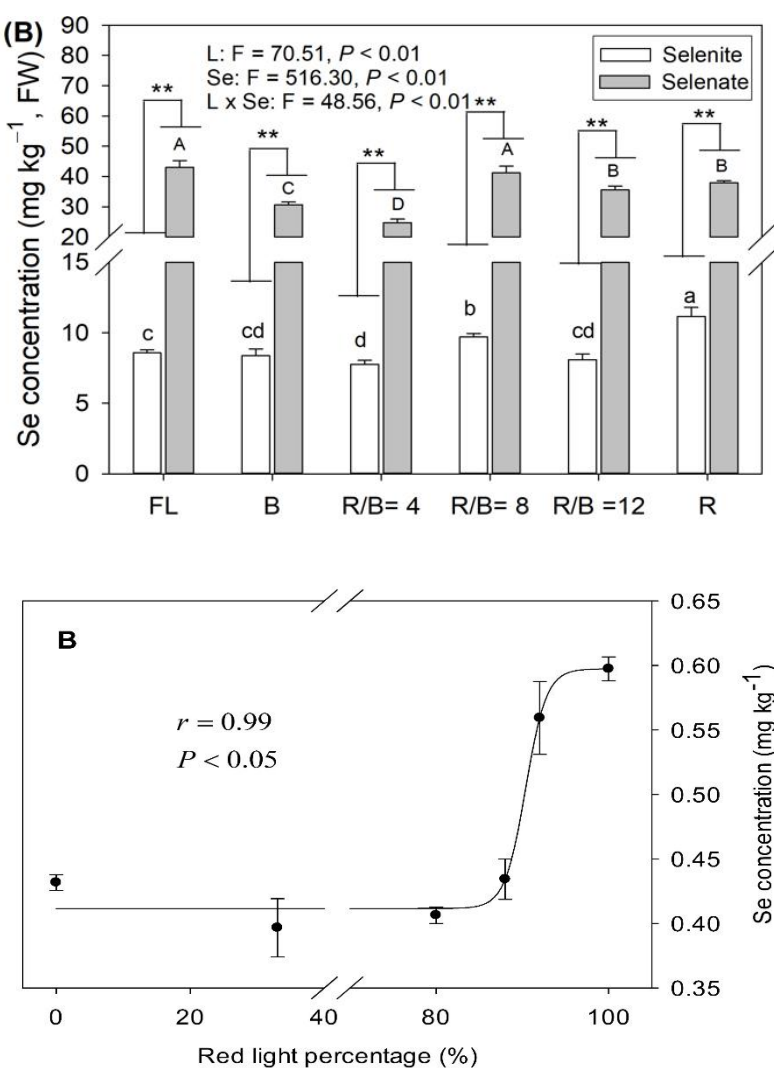
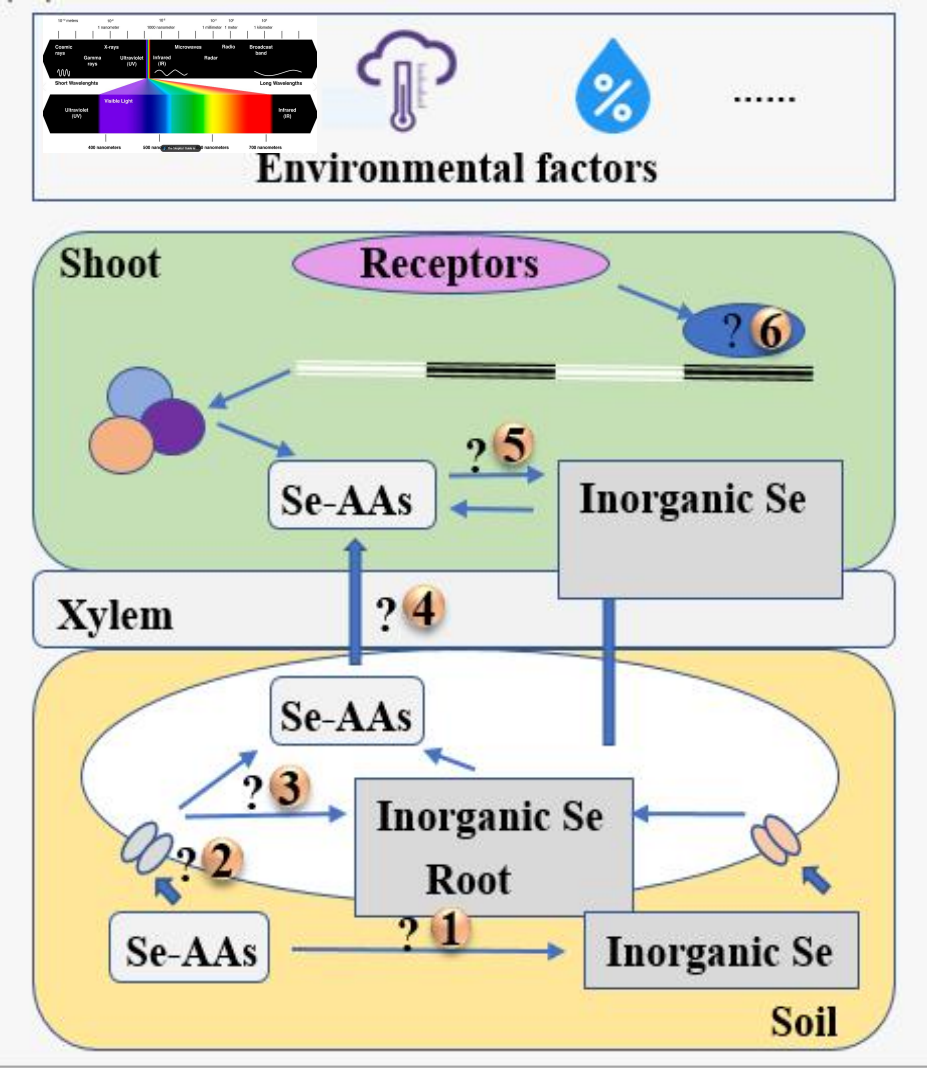
调控营养液流动方式，提升蔬菜产量



提高植物营养利用效率

技术进展三：营养液管控及其品质调控技术

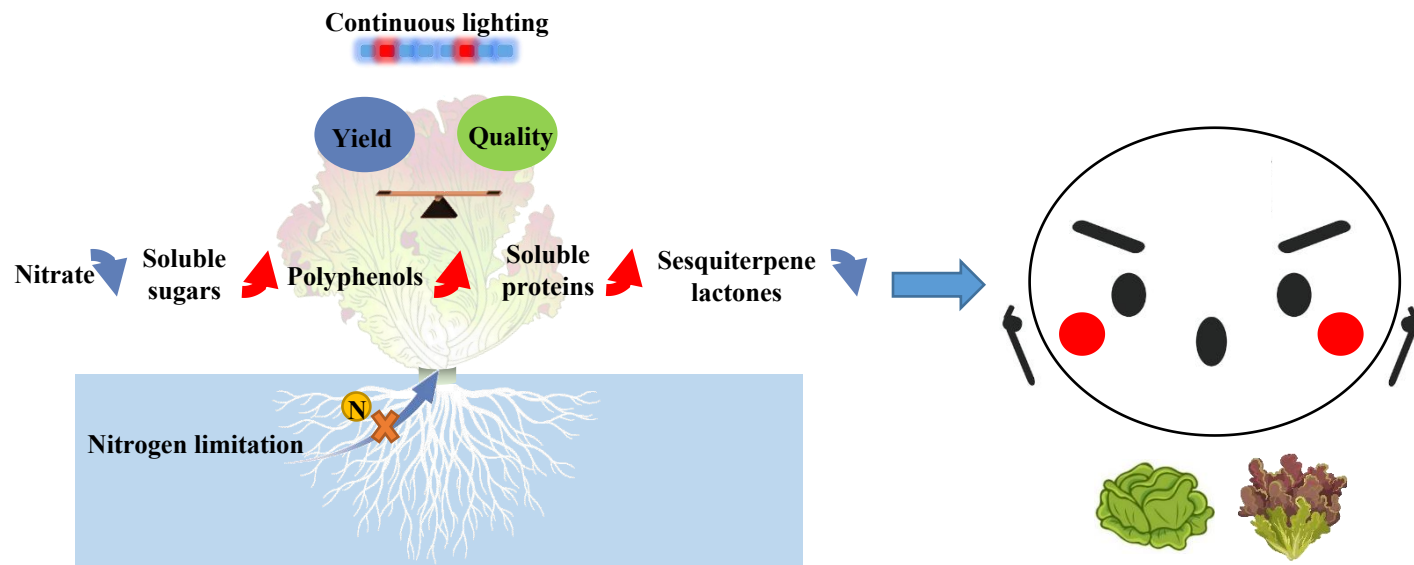
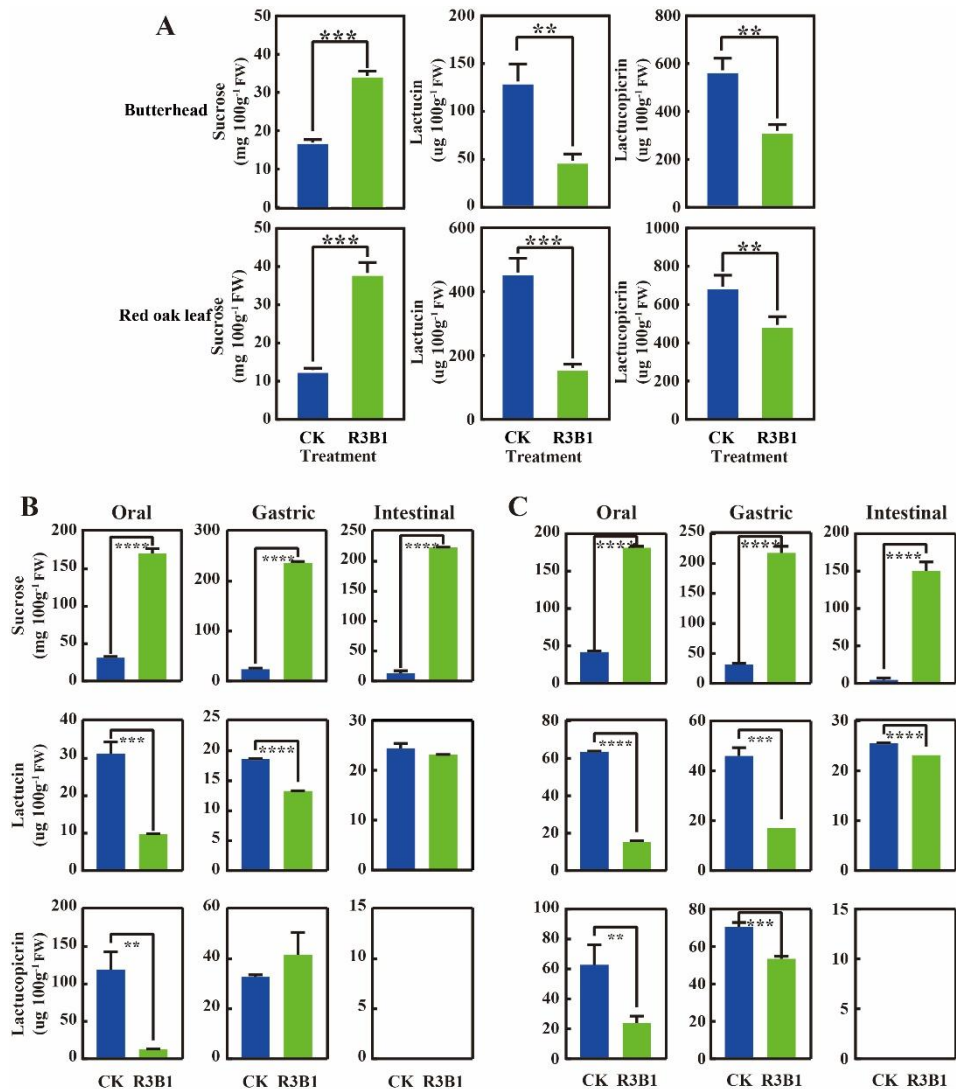
(2) 生菜营养液硒元素吸收与红光比例关系



生菜硒元素吸收
收受光质和硒源的影响；

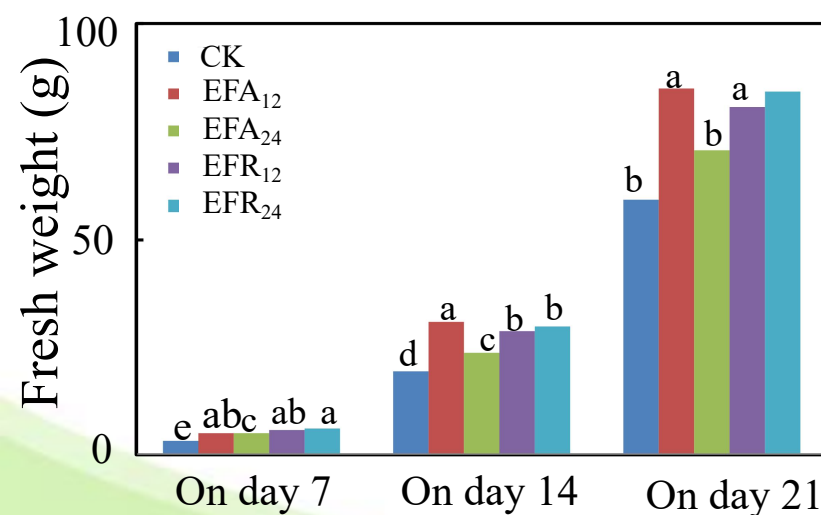
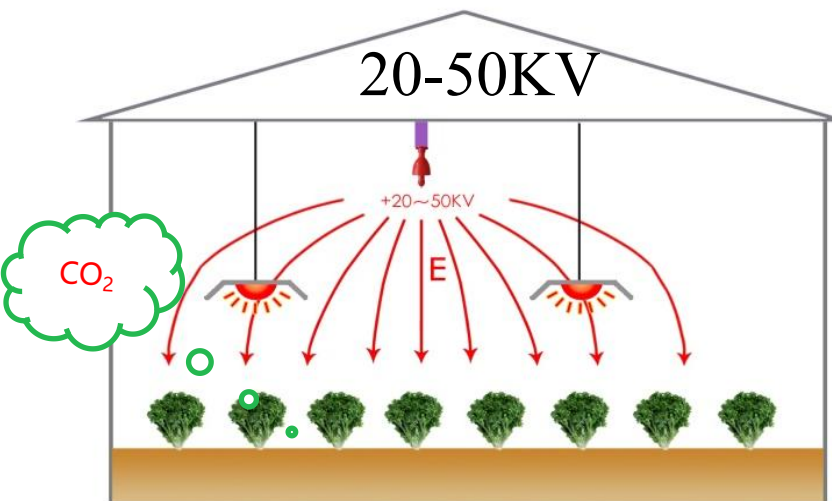
合理提升红光比例
促进生菜富硒。

● 采前连续光照-断氮提升营养品质与风味

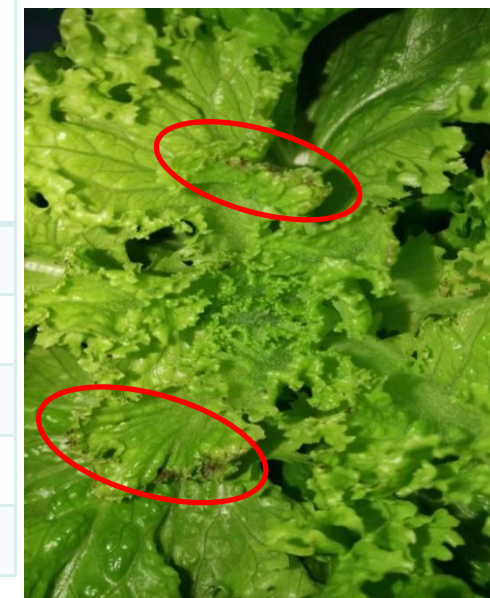


采前连续光照—断氮调控品质，实现风味改良（去苦增甜）

空间电场提升光合效率和蔬菜品质



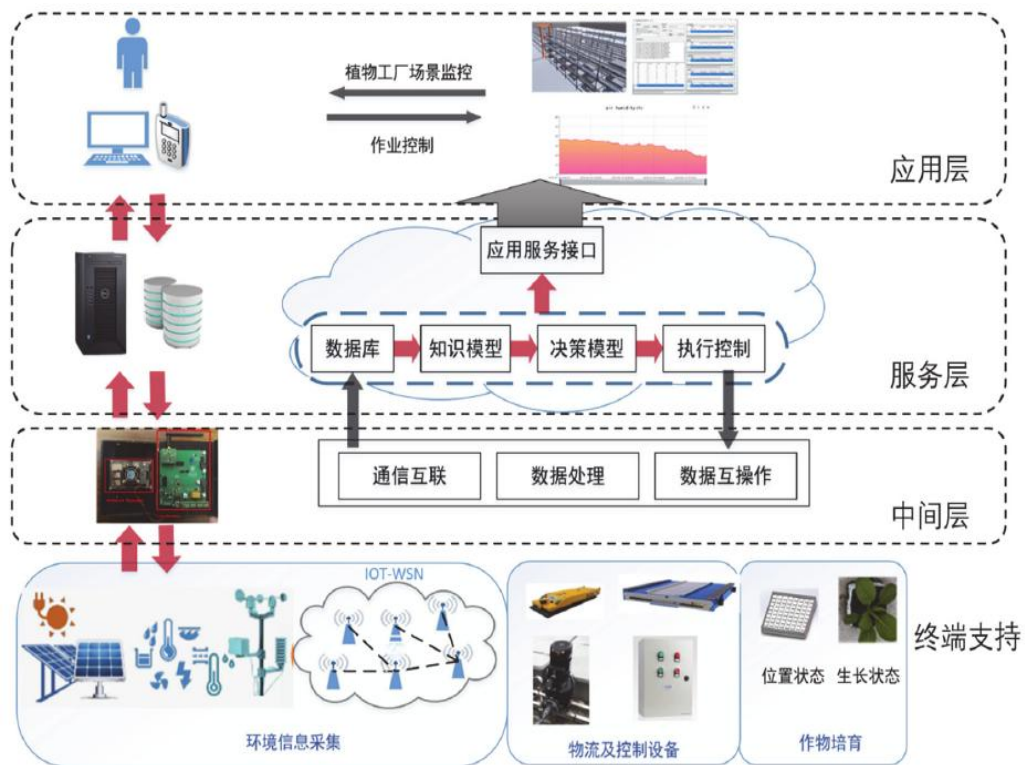
Treatme nt	No. of total leaves	Max. No. of leaves per plant with tipburn occurrence	Percentage of leaves with tipburn occurrence to total leaves (%)
EFA ₁₂	17.8	2	3.4
EFA ₂₄	17.4	2	6.0
EFR ₁₂	17.2	2	4.7
EFR ₂₄	18.4	2	5.4
CK	16.8	6	15.7



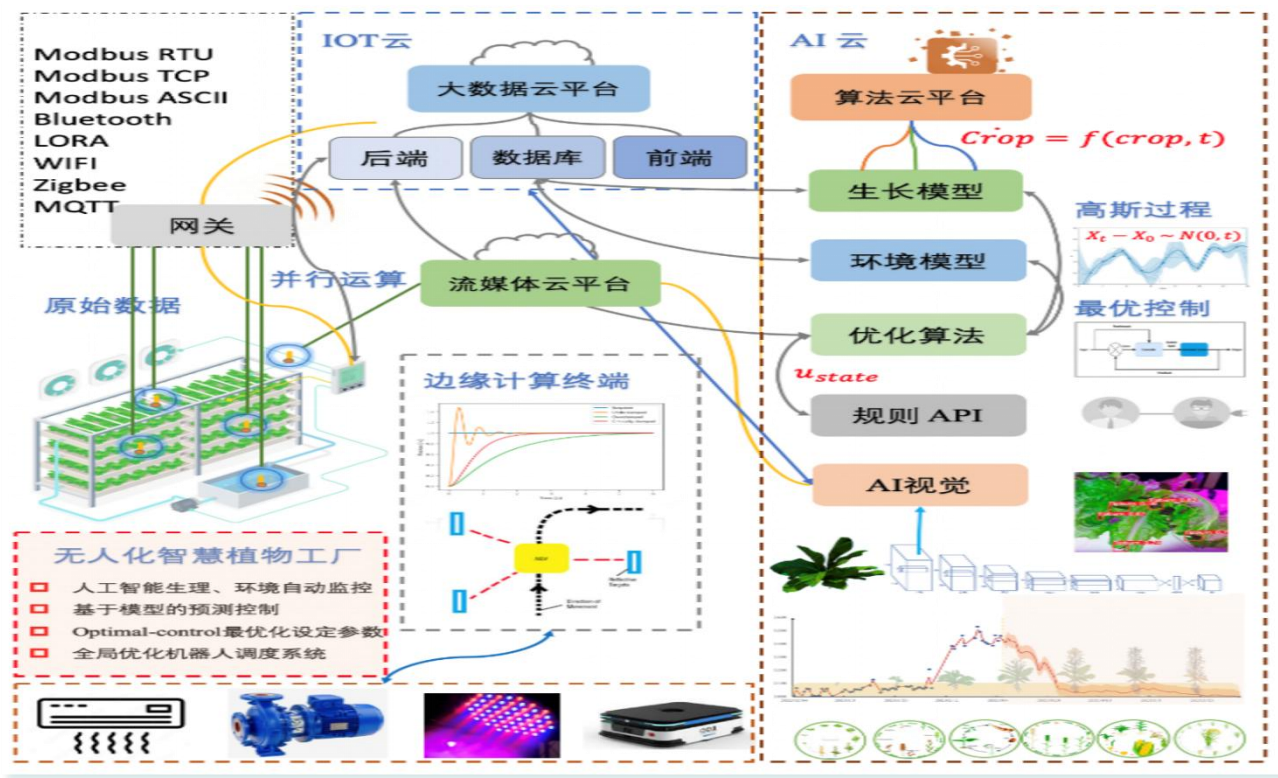
Tipburn injury was alleviated under electric field

技术进展四：智慧化管控技术

- 智能信息感知、光-温耦合模型、光配方优化模型、营养品质调控模型技术的应用，实现植物工厂决策管理的智慧化。



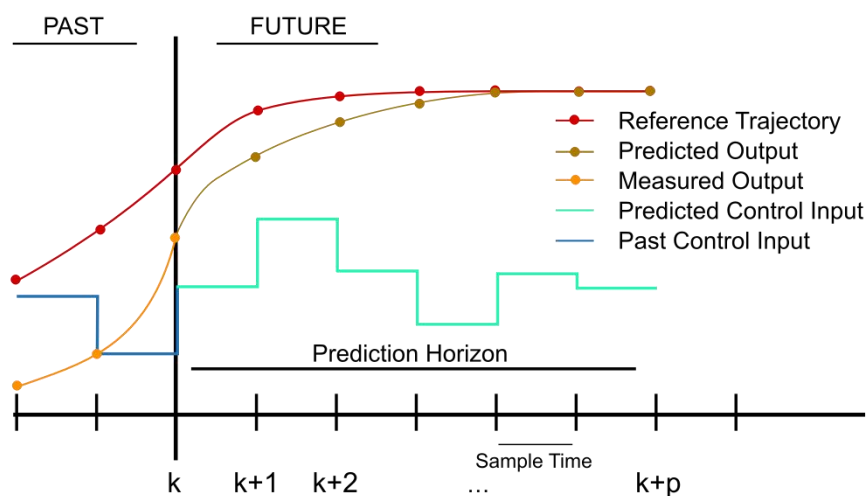
智慧管控物联系统



AI与大数据融入植物工厂智慧化管控

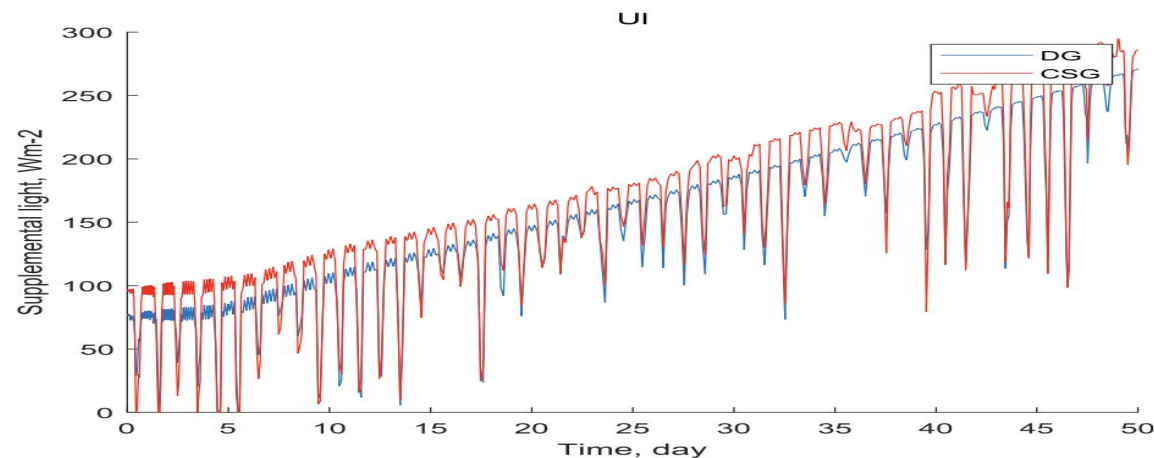
基于模型的动态预测与智慧管控

MPC



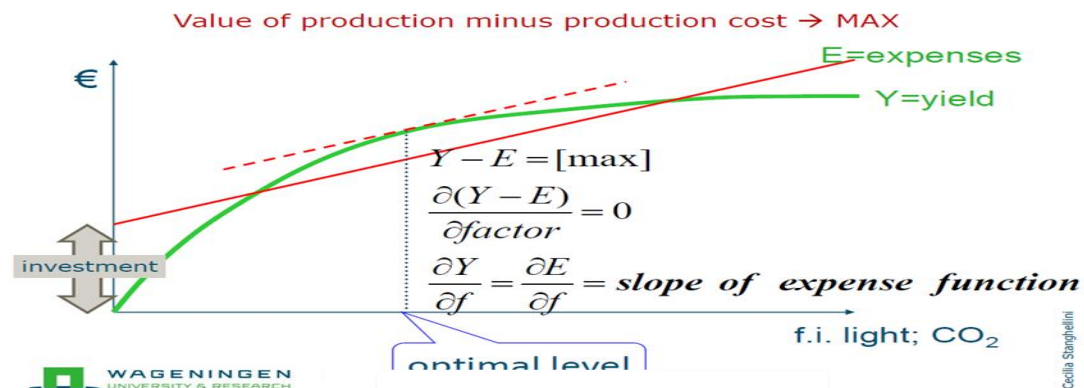
$$J = \sum_{i=1}^N w_{x_i} (r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^N w_{u_i} \Delta u_i^2$$

基于模型的环境动态预测与控制



LED动态调控

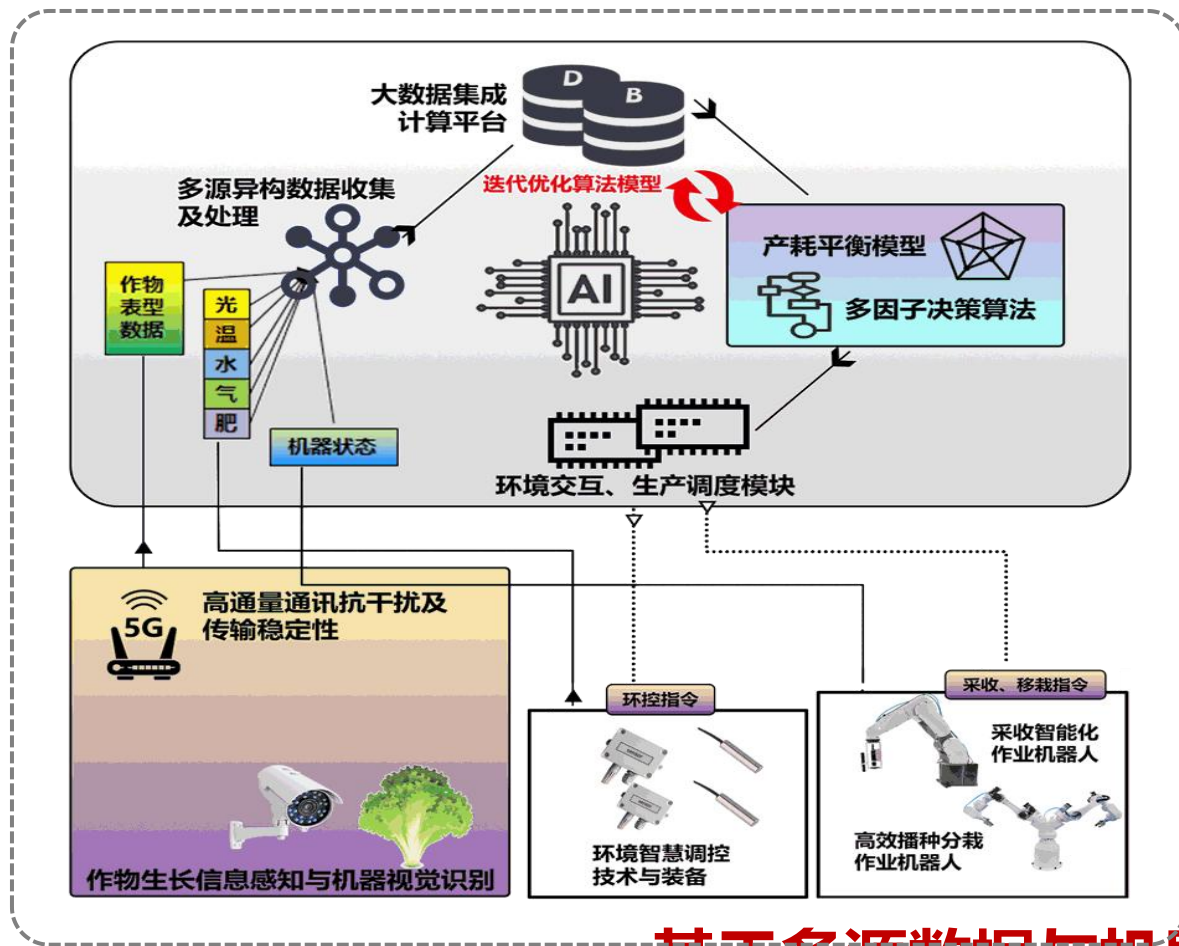
Optimal management of a single factor



环境动态调控

技术进展四：智慧化管控技术

AI与大数据融合技术的应用，移栽、定植、生长发育、收获等全部流程实现智慧化管控。



基于多源数据与机器视觉的智慧决策系统

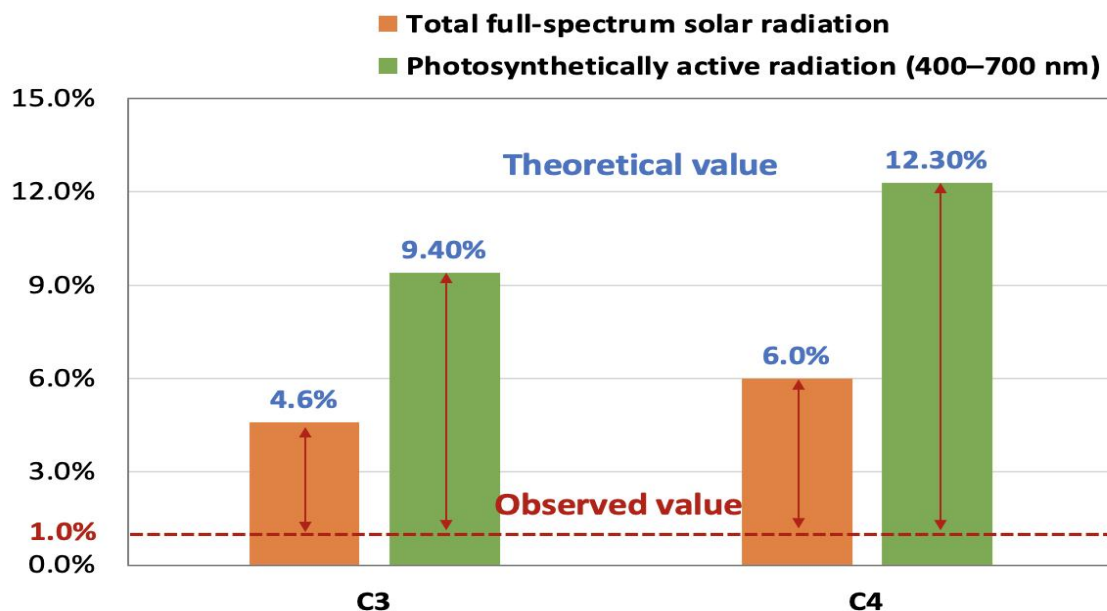


四、未来发展趋势

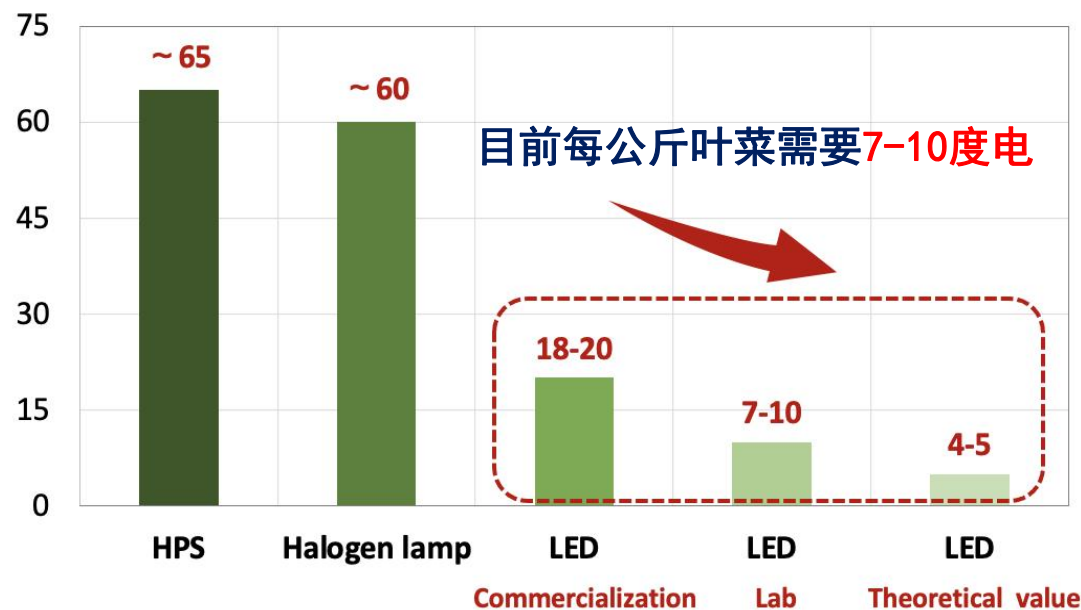
1 降低能耗-永恒的主题，潜力在哪里

- ◆ Theoretical value: **4.6~6.0%** (Total full-spectrum), **9.40~12.3%** (PAR)
- ◆ Observed value: ~ **1%** (实际值)
- ◆ Enhance electricity use efficiency, to reduce energy consumption to **4.0~5.0 kwh/kg**

The photosynthetic energy conversion efficiency

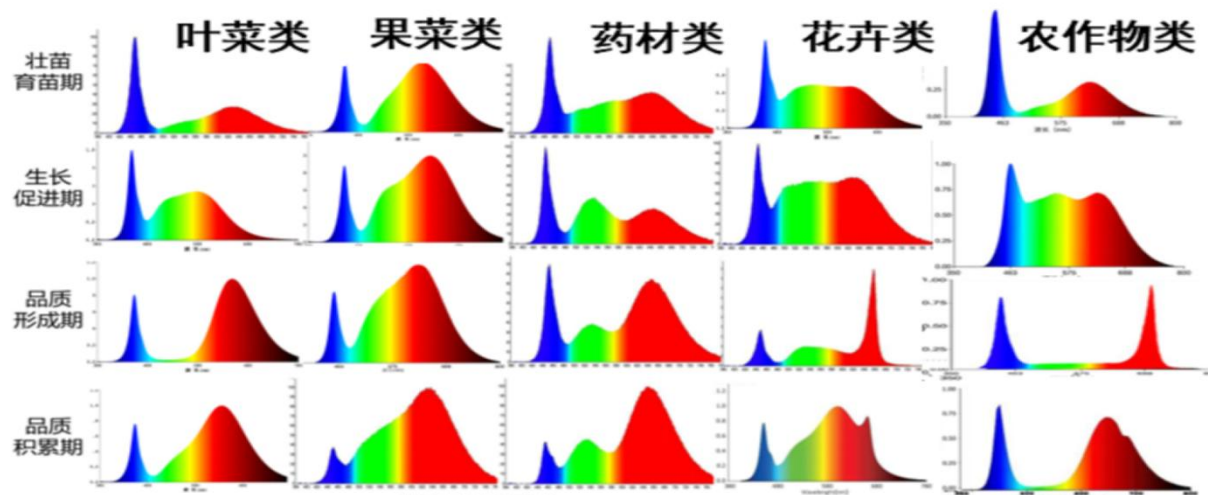


Electricity consumption (kWh/kg, fresh weight)



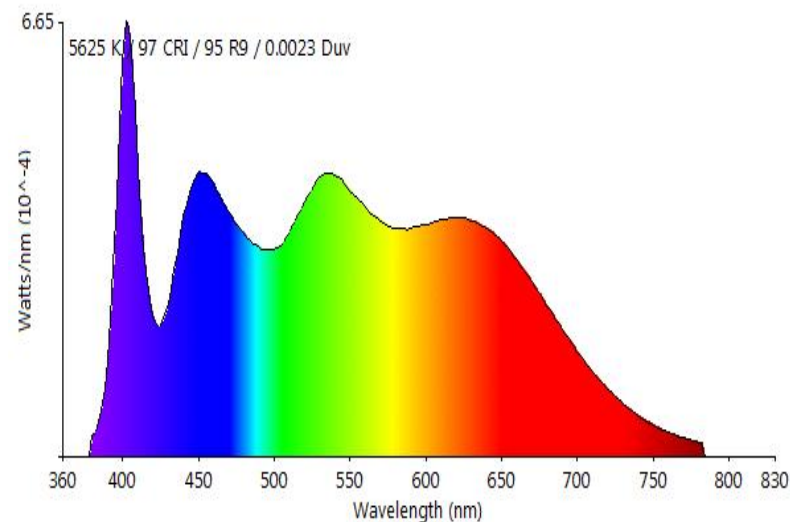
理论依据—光合效率提升具有巨大潜力

● 光配方数据库与智慧LED管控技术：光配方数据库与光源智慧化管控技术结合，可根据植物全生育期需求，实现植物光配方动态调控-节能。



光配方数据库
WWW.LEDpeifang.com

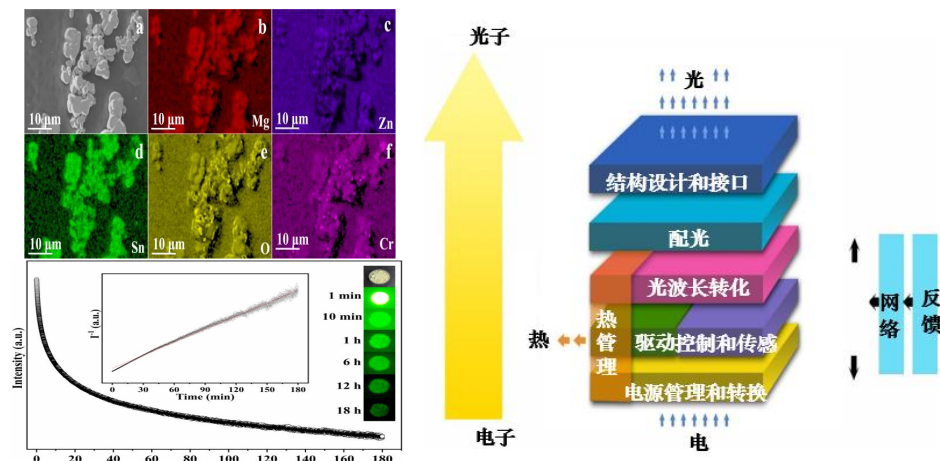
光配方数据库



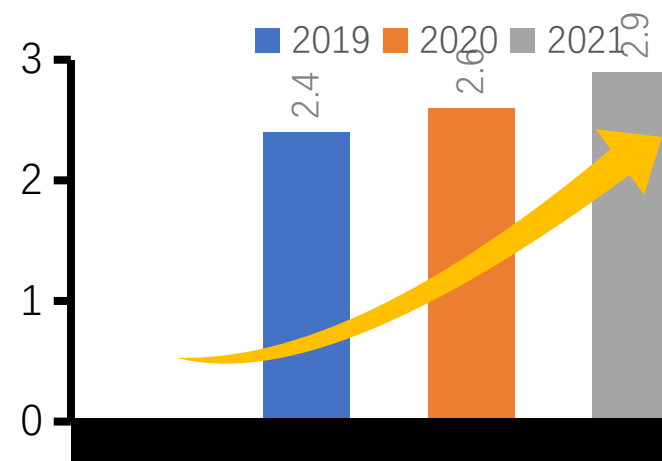
光配方动态调控

光源器件 (LED) 效率的不断提升

LED 光源及其效率提升技术



Luminous efficiency (J·W)



Luminous efficiency:

➤ **Increased by 20.8%**
(from 2019 to 2021)

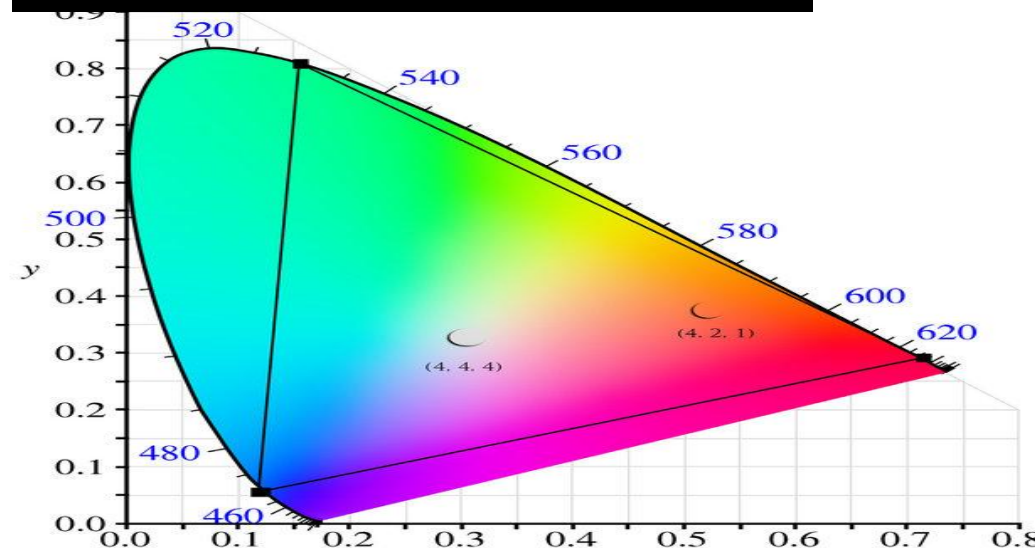
Energy consumption:

➤ **Reduced by 30%**

Luminescent Material Selection and Structure Design



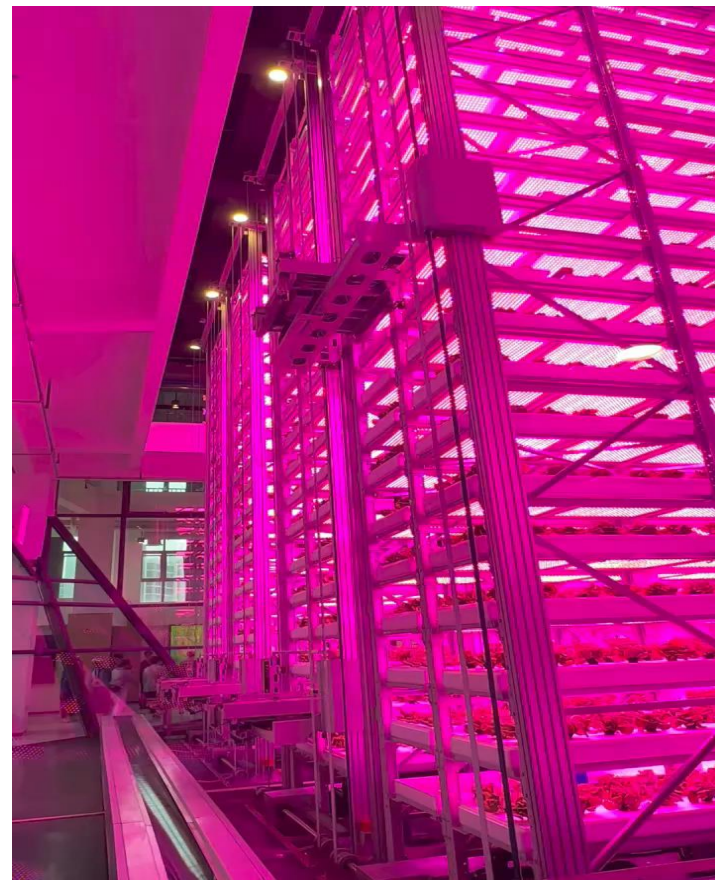
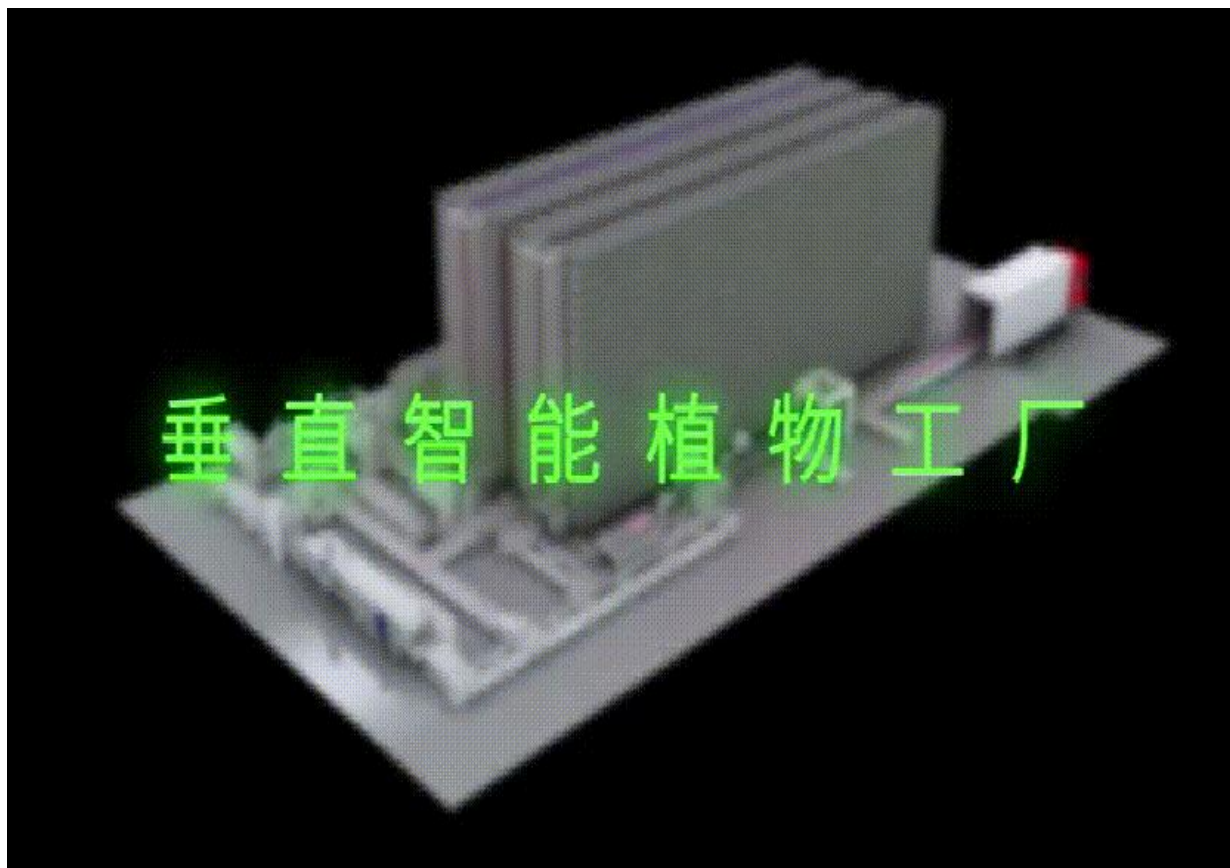
High luminous efficiency LED beads



Spectra luminous analysis

2 无人化将是未来发展的重要方向

植物工厂实现全流程无人化作业，显著减少劳动力成本



无人化植物工厂 (16个机器人)

植物工厂无人化采收



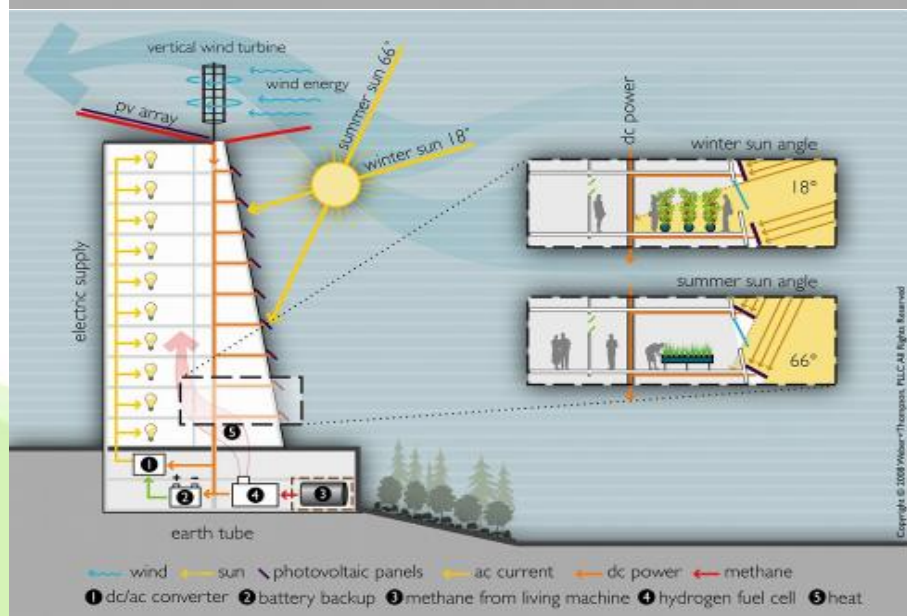
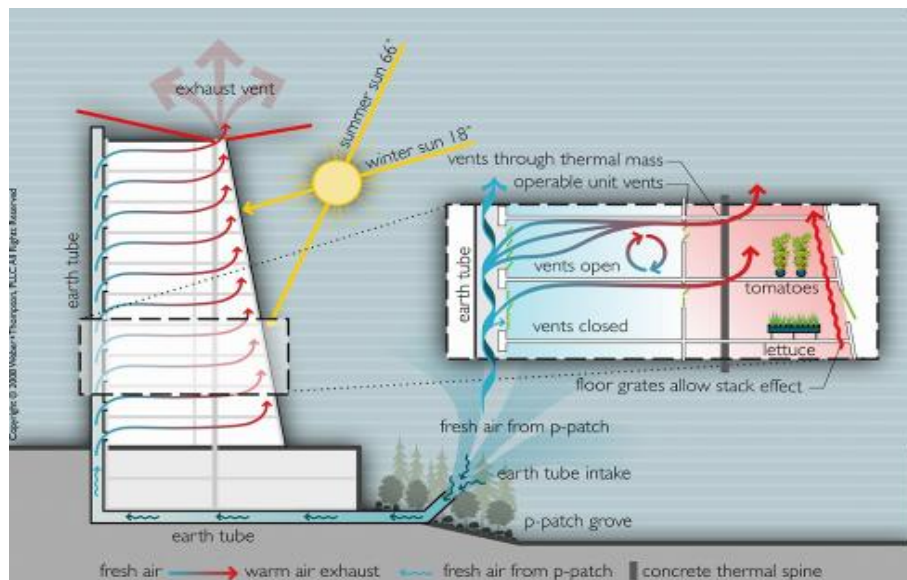
无人化草莓工厂

3 垂直空间拓展-垂直农场必将逐渐成为现实



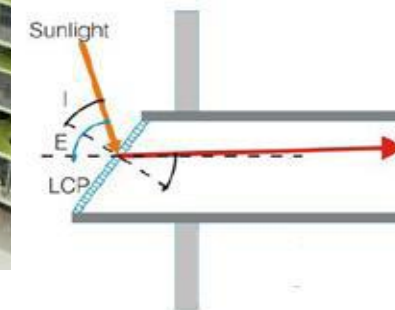
美国哥伦比亚大学教授迪克森·戴斯波米尔Dickson Despommier,1999年首次提出垂直农场概念，智慧植物工厂垂直农场必将成为现实。

垂直农场技术将会取得重要突破



Type of Vertical Farm	Different height to depth ratios	Light Analysis in Winter	Light Analysis in Summer	Light Direction Analysis in a Year
TYPE 4 x 4 south facing vertical farm adjacent to the old building	H/D ratio: 0.15	Average Sunlight Hours: 0.61	Average Sunlight Hours: 0.27	Average Sunlight Hours: 0.52
	H/D ratio: 0.5	Average Sunlight Hours: 2.13	Average Sunlight Hours: 1.50	Average Sunlight Hours: 2.31
Example of this type	H/D ratio: 1.0	Average Sunlight Hours: 4.27	Average Sunlight Hours: 2.94	Average Sunlight Hours: 3.52
	H/D ratio: 1.5	Average Sunlight Hours: 4.58	Average Sunlight Hours: 3.01	Average Sunlight Hours: 4.20

Table 3.8: Daylight analysis in different grid directions for different height to depth ratios (By author)

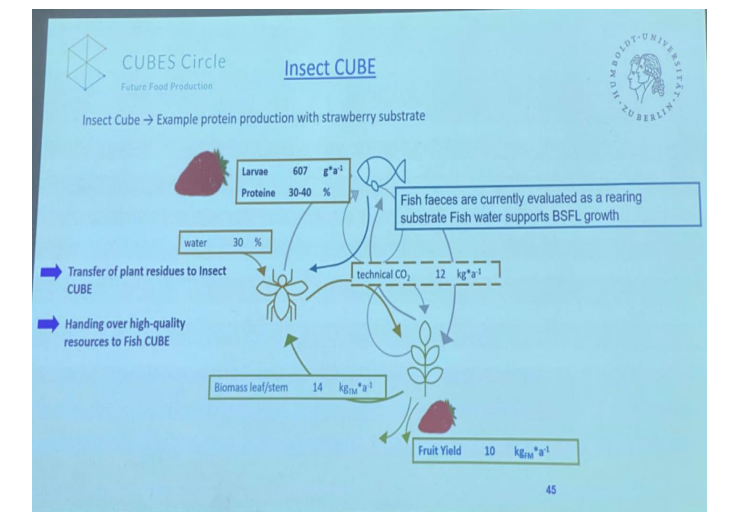
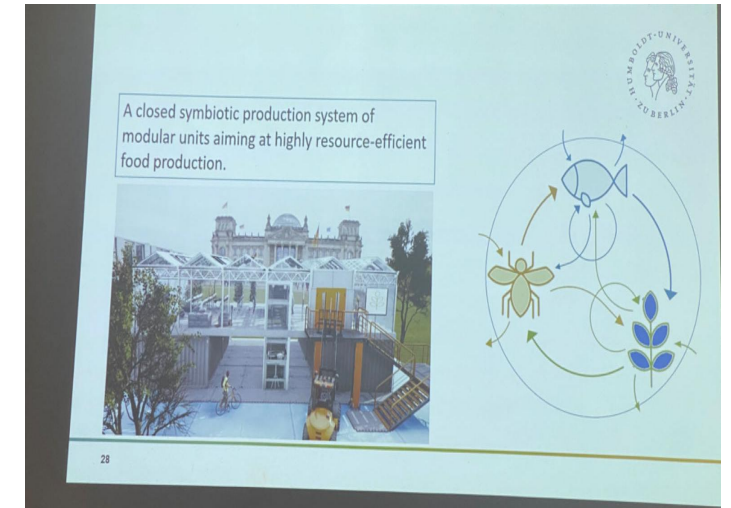
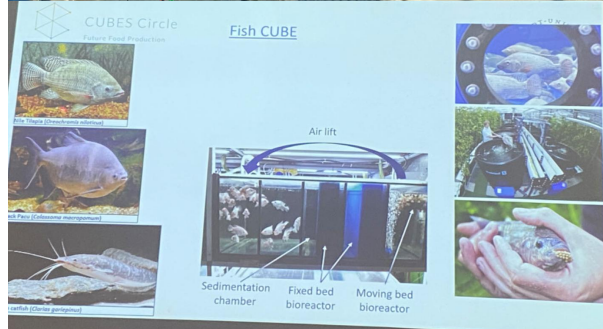


新能源与光
热资源高效
利用

美国芝加哥垂直农场（三层楼，废弃厂房改造）



德国洪堡大学垂直农场 (菜-鱼-虫 生态循环)



垂直作物（小麦）工厂产能可达露地220-600倍 (PNAS)

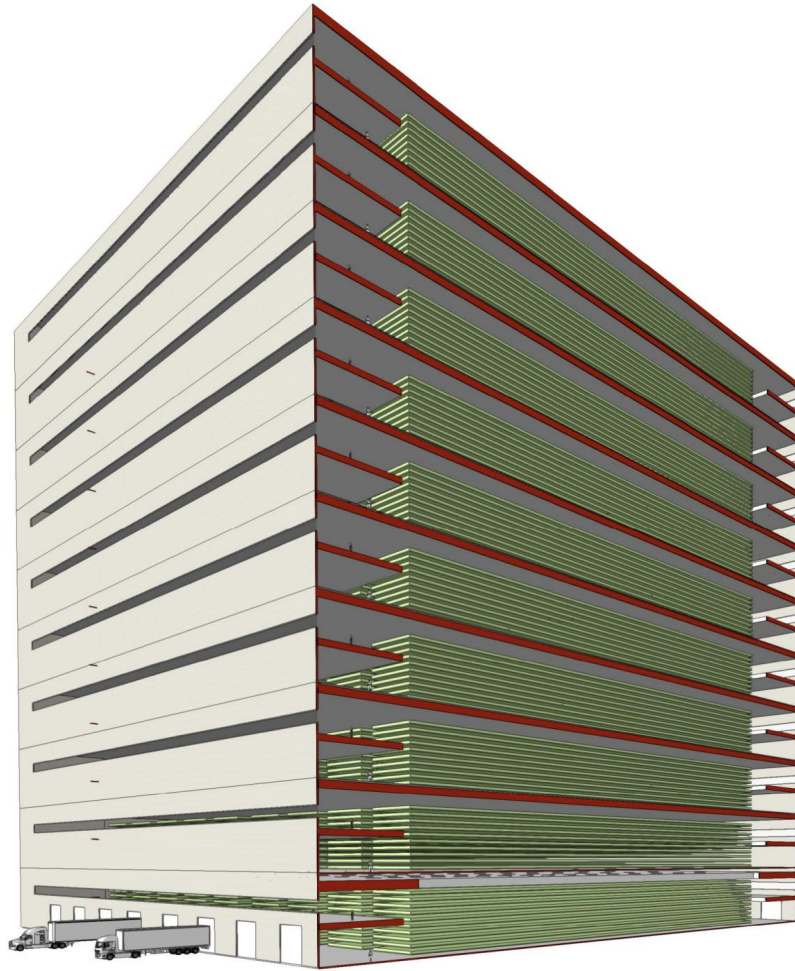


Fig. S4. Drawing of multiple, 1 ha (100 x 100 m), 10-layer (each layer 1 m high) indoor vertical wheat growing facility units (four 10-layer units are shown). Wheat is planted at front and moves on conveyor to the back in 70 days, where it is harvested. Magnified areas show wheat on conveyor belt at early (front) and late (back) stage of wheat development.

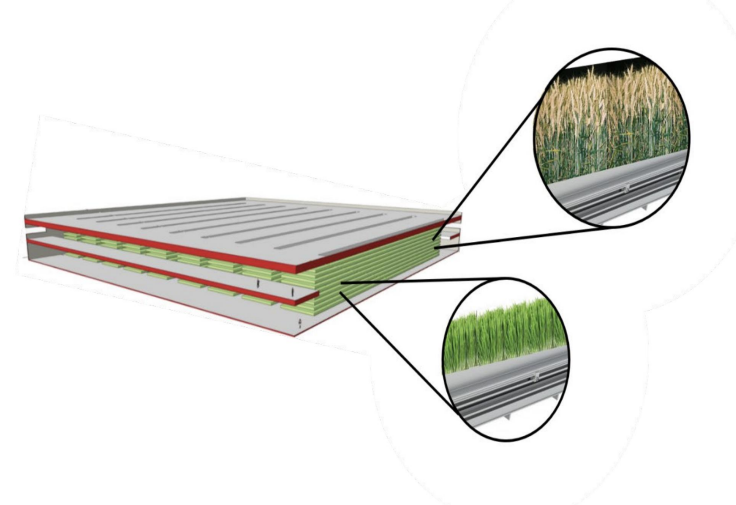
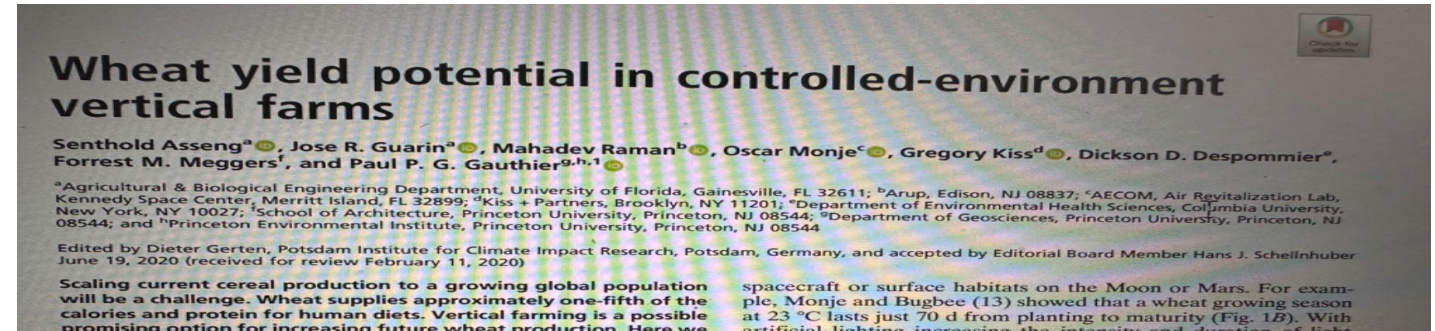
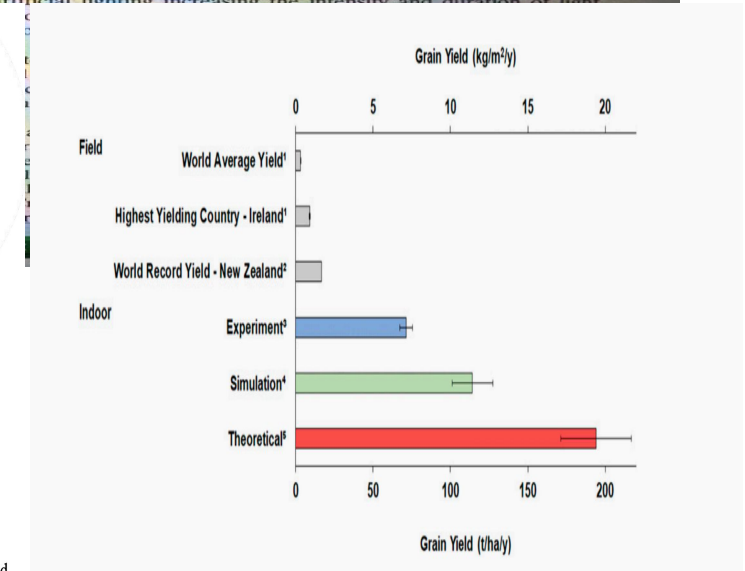


Fig. S3. Drawing of a 1 ha (100 x 100 m), 10-layer (each layer 1 m high) indoor vertical wheat growing facility. Wheat is planted at front and moves on conveyor to the back in 70 days, where it is harvested. Magnified areas show wheat on conveyor belt at early (front) and late (back) stage of wheat development.

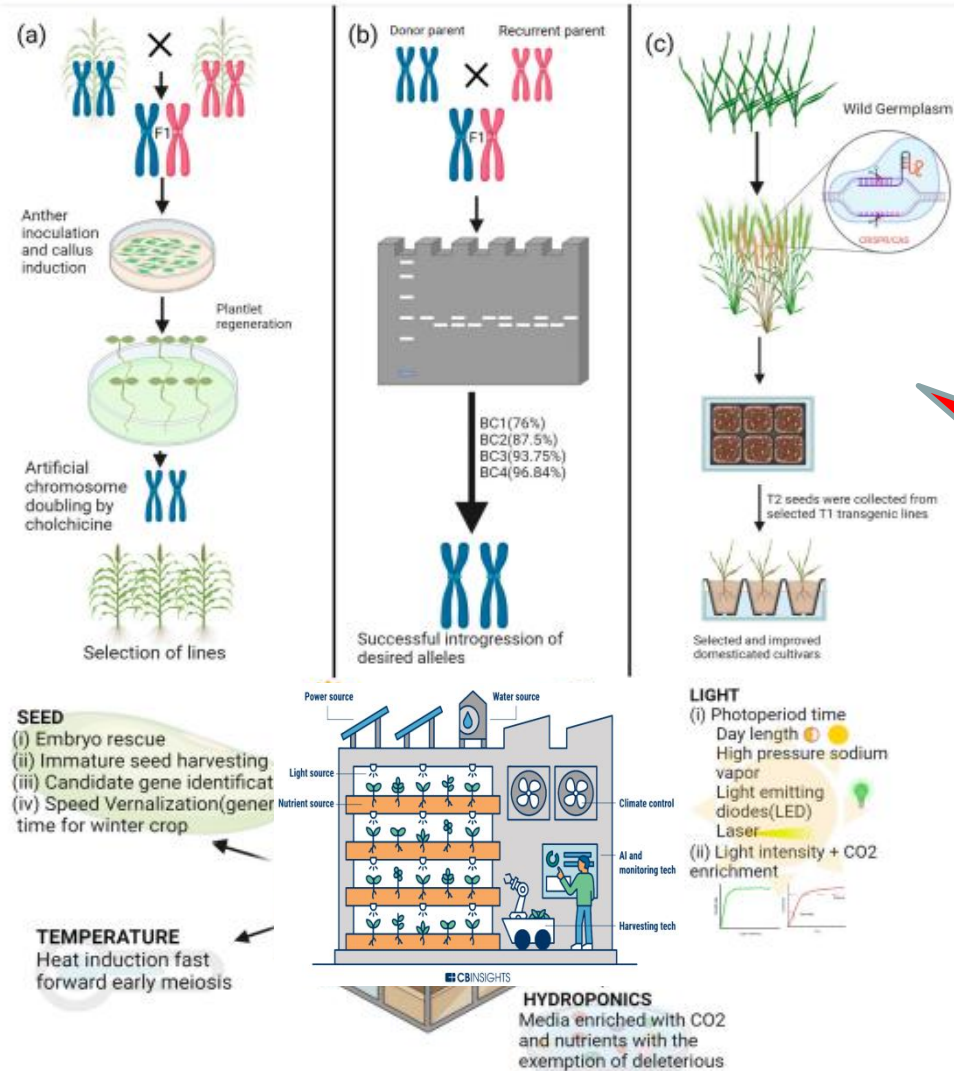


10层建筑 × 每层年产能22-60倍 = 220-600倍

垂直农业大楼 (都市所, 40m, 7 层)



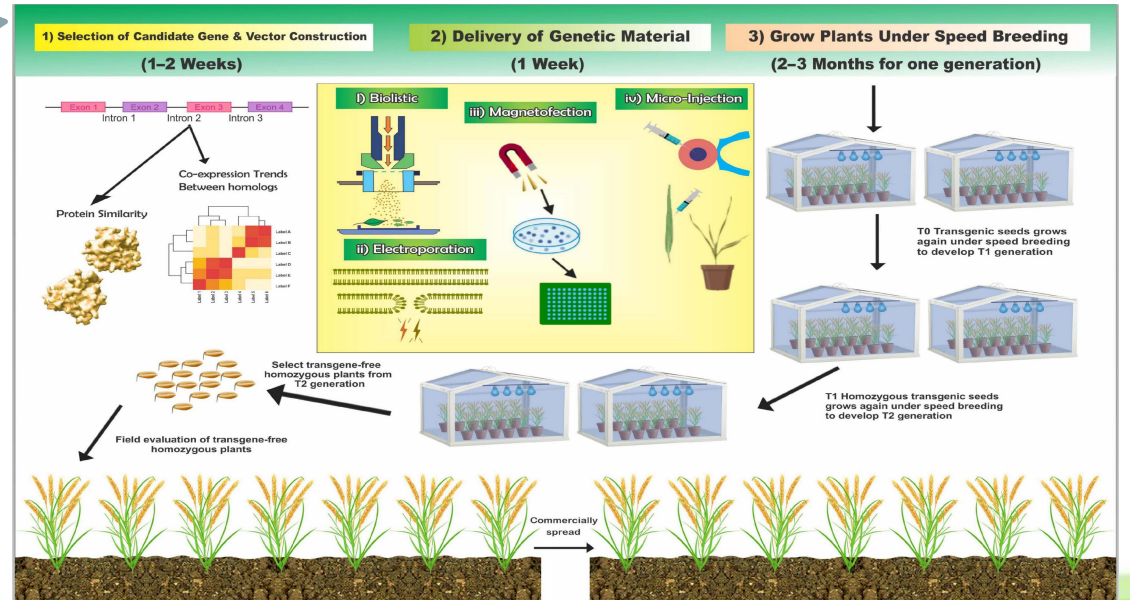
4. 植物工厂用于快速育种-育种加速器



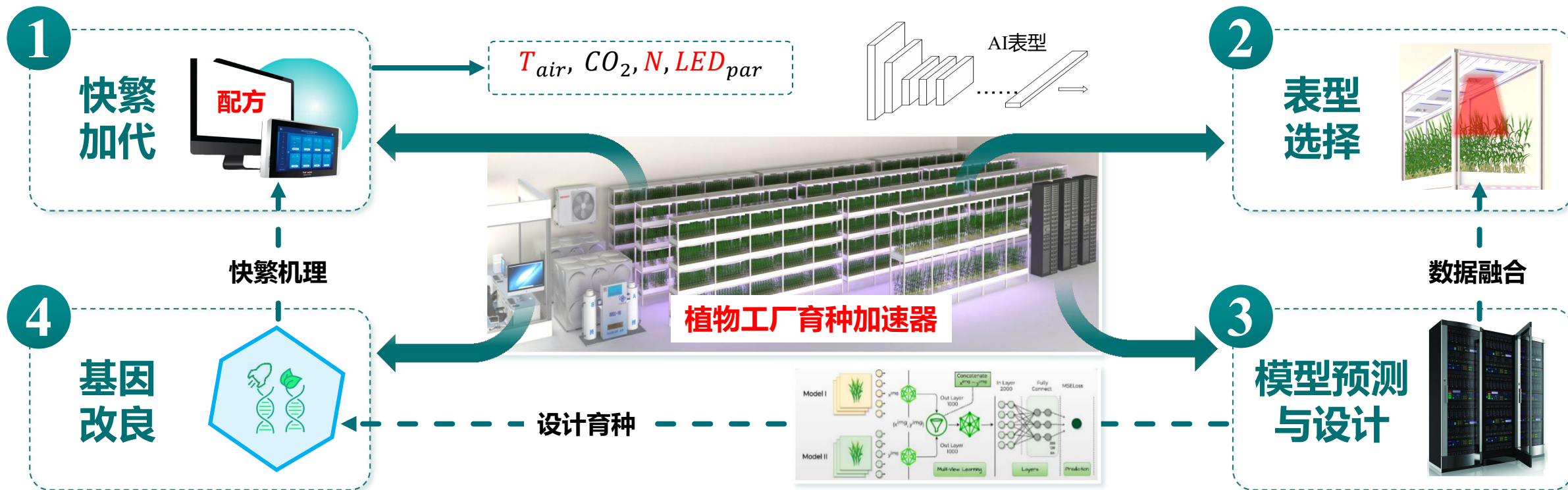
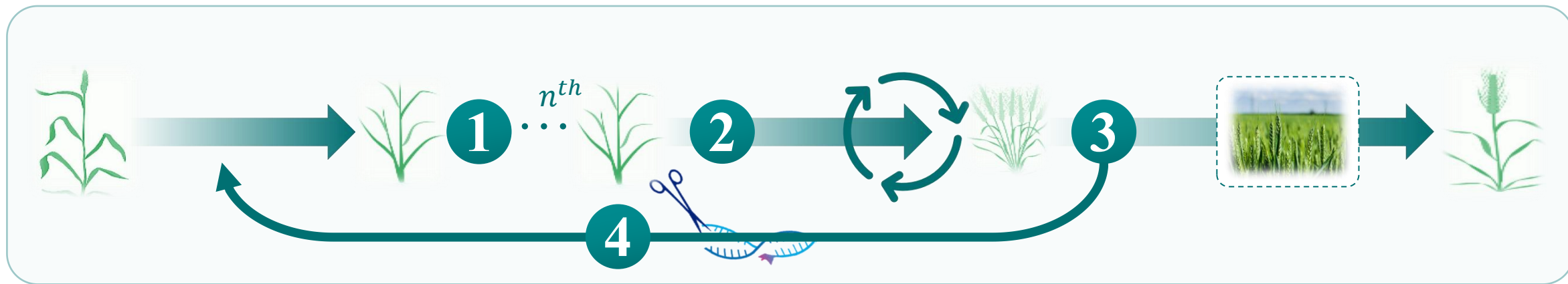
现代育种技术
(基因编辑、单倍体育种、DNA 标记等)

植物工厂作物快繁技术

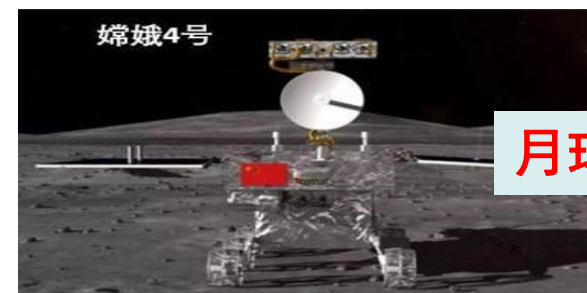
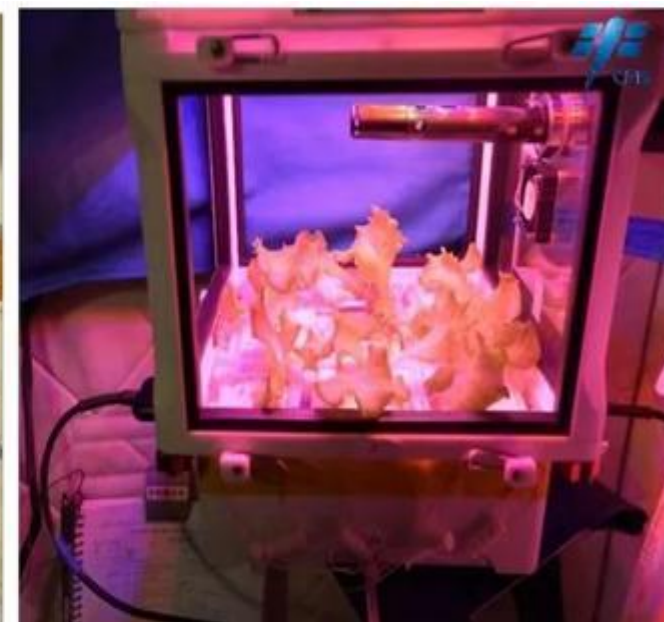
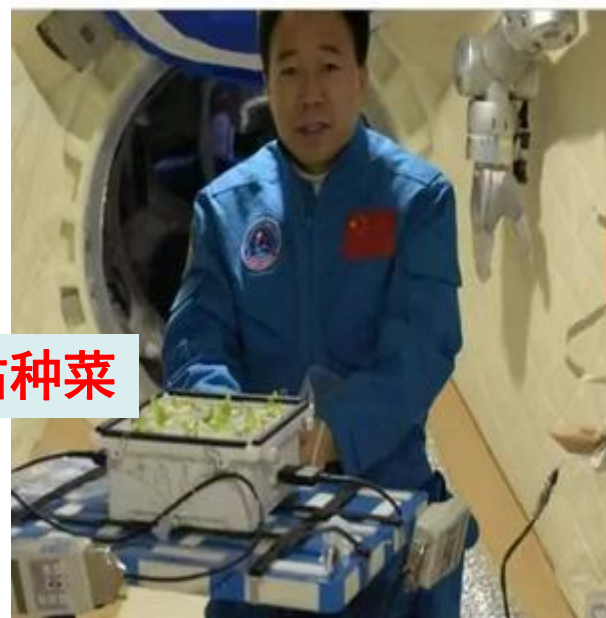
作物快繁体系



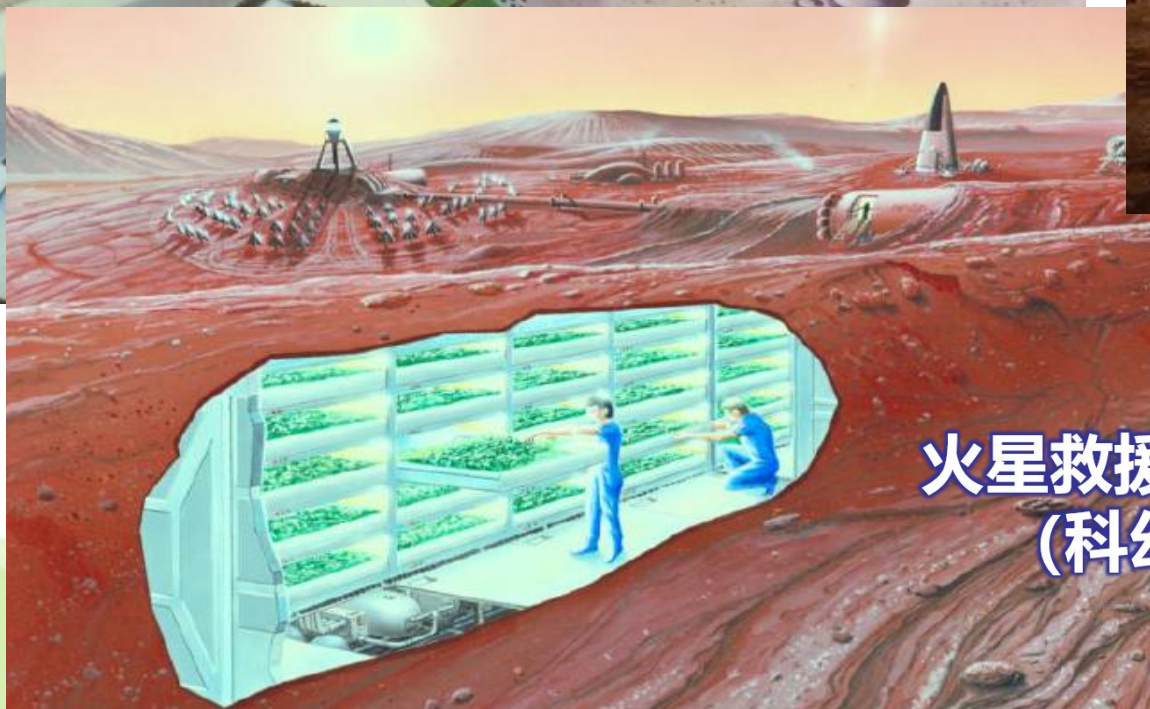
基于植物工厂的快速育种技术体系



5. 植物工厂为深空探索食物供给提供支撑



- 植物工厂技术方法，必将使月球、火星等特殊场所食物保障逐渐成为可能。





谢谢！

yangqichang@caas.cn 13601125532