

植物生长的环境和营养控制

山顶洞人 @2023/6/17

植物生长的基本要素包括水，光，空气，温度，湿度。不同植物的进化环境不一样，对环境的适应性也有很大差别。

下面主要以常见蔬菜为例，介绍植物工厂中对水、光、空气、温度、湿度和营养素的控制范围。

水及水溶性营养素

对水培蔬菜，水的 pH 值应控制在 5.5-6.5 之间，EC 值应控制在 1.0-2.5mS/cm 之间。EC 值在发芽、成长和结果期应有所不同，根据蔬菜种类而定。

pH 值

pH 值用来衡量水的酸碱度，由水中的 H^+ 浓度来决定。植物成长需要合适的酸碱度。

水的化学成分是 H_2O 。水可以发生自电离，产生 H_3O^+ 和 OH^- ，因此有了酸碱度的概念。25°C 的纯净水中， H_3O^+ 和 OH^- 的浓度分别是 1×10^{-7} 。通常用 log 函数来表示水和氢离子的浓度

$$pH = -\log_{10} H_3O^+ \text{ 浓度}$$

或简写为

$$pH = -\log[H^+]$$

类似地，也可以定义

$$pOH = -\log[OH^-]$$

在给定温度的水中， H_3O^+ 和 OH^- 浓度之乘积（常记为 K_w ，电离常数）是固定的，因此 pH 与 pOH 之和也是固定的。例如在 25°C 的水中， $K_w = 1 \times 10^{-14}$ ，意味着

$$pH + pOH = 14$$

给水中加入酸性或碱性溶剂，可以改变水中的 H_3O^+ 和 OH^- 浓度，也就是 pH 值。在 25°C 的水中，pH 大于 7 时，水呈碱性；pH 小于 7 时，水呈酸性。

WHO 的建议认为，饮用水的 pH 值只要不极端（4.0~10.0），对人体没有明显影响。但 pH 值的异常，可能意味着水中可溶性离子的异常，例如金属离子的超标，这方面是需要注意的。

中国和美国对饮用水的 pH 建议为 6.5~8.5。

水培蔬菜的 pH 值适合范围为 5.5-6.5。

EC 值与 TDS

植物生长需要约 17 种基本元素，可以分为基本元素、宏量元素和微量元素。

基本元素包括碳、氢、氧，它们占了植物干重的 90% 以上，主要从水和空气中获得。

宏量元素包括氮、磷、钾、硫、钙、镁，微量元素包括铁、硼、氯、锰、锌、铜、钼、镍。宏量元素和微量元素通过营养液提供。下表是营养液中各元素的建议浓度。

元素	化学符号	推荐浓度范围 (ppm)
----	------	--------------

氮	N	150-400
磷	P	30-100
钾	K	200-400
钙	Ca	100-200
镁	Mg	50-100
硫	S	50-100
铁	Fe	2-10
锰	Mn	0.5-2
锌	Zn	0.05-0.5
铜	Cu	0.05-0.1
硼	B	0.05-0.1
氯	Cl	50~200 ¹
钼	Mo	0.01~0.05
镍	Ni	0.01~0.05
¹	植物生长不需要这么多氯，但自来水中含量丰富	

在实际应用中，很难有可接受的价格来准确测量水中各元素的准确浓度。因此，通常测量水的电导率（EC, Electrical Conductivity），进而估计出水中固态可溶物的浓度（TDS, Total Dissolved Solids），简单判断营养成分是否足够。这里的前提是，营养液按照适当的比例配置。

电导率的单位通常用 mS/cm (milli-Siemens per centimeter)来表示，TDS 的单位通常用 ppm (Parts Per Million)。

从电导率估计 TDS 需要一个经验值，与营养液的具体成分有关，这个经验值在不同地区可能不同。例如，美国用 500，欧洲用 640，而澳大利亚用 700。因此

$$TDS = EC \times C$$

$$C = 500, 640 \text{ or } 700, \text{ depending on where}$$

例如，假设使用美国标准的 TDS 测量设备，当 EC=2.0mS/cm 时，TDS=1000；但如果使用澳大利亚标准的 TDS 测量设备，则当 EC=2.0mS/cm 时，TDS=1400。

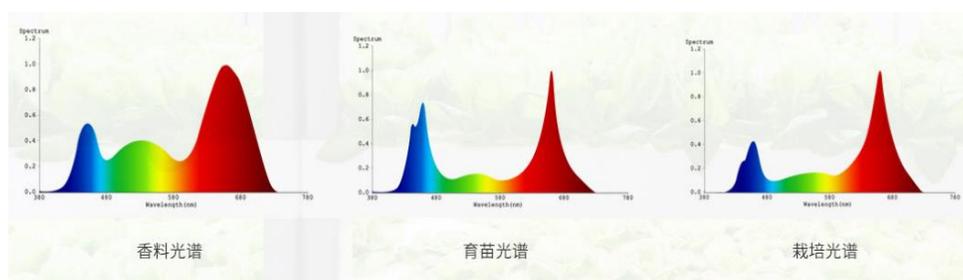
光

植物需要充足的可见光来进行光合作用。

植物生长需要的光谱

太阳光是全光谱，各个成分的可见光对植物生长都有作用，但光合作用吸收的主要是红光和蓝光。光合作用吸收的峰值区域为波长 610~720nm（峰值 660nm）的红光和 400~510nm（峰值 450nm）的蓝光，对 510~510nm 的绿光则吸收较少。

应根据植物的不同生长阶段来配置光源的光谱。一般而言，发芽阶段不需要照明；育苗阶段需要平衡的蓝光和红光比例+少量其他光谱；成长阶段需要较少的蓝光+较多的红光+少量其他光谱；开发结果阶段则需要进一步增加红光和其他光谱。下图是典型的不同生长阶段的光谱图。



光照强度

植物生长需要的光照通常用光合光子密度（PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density）来度量，它表示每秒到达植物叶面的可用于光合作用的光子数目。

根据维基百科，大多数植物生长需要的光照强度在 $100\sim 800\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，对于 5800K 的日光光谱，这种光合有效辐射将相当于 $5800\sim 46,000\text{lm}/\text{m}^2$ 。过量的光照植物将不能吸收。

在给定光谱的情况下，PPFD 也可以转换为勒克斯(Lux)。对于 6500K 的自然光， $1\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 约相当于 43.5Lux；对于 3500K 的 CRI LED， $1\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 约相当于 62Lux；对于 450nm+650nm 的红蓝光， $1\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 约相当于 11Lux。

假设采用两根 30W 的 LED 植物生长光源，其电光转换效率为 $2\sim 3\mu\text{mol}/\text{J}$ ，照射到 0.84m^2 的面积上，则提供的 PPFD 约为 $143\sim 215\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。

光照时长

植物工厂内，建议每日的光照时长为 12~16 小时。全日 24 小时的光照不会造成植物疲倦，但可能影响植物的一些生理活动，如开花。

光照时间不足会影响植物的发育，但过量的光照植物也不能吸收。

空气

大气中，氧气的浓度为 21%左右。二氧化碳的浓度则在持续增加中，从 1980 年至 2020 年，二氧化碳的浓度从 0.031%增加至 0.042%。若用 ppm 来表示浓度，目前二氧化碳的浓度约为 420ppm。二氧化碳是植物生长的主要营养，适度增加的二氧化碳有利于植物的生长，据信最适合植物成长的二氧化碳浓度约为 1000ppm。但在侏罗纪时代，空气中的二氧化碳浓度可能高达 2000ppm，那时候的植被远比现在茂密。

在密闭的植物工厂中，可以适度提高二氧化碳浓度至 1000~2000ppm。

水培时，水中应该有足够的溶解氧。植物的根需要足够的氧气来进行呼吸作用，否则容易烂根，水溶氧的浓度应该不低于 5~8ppm。可以通过气泵、增强水循环等办法提高水溶氧的含量。

完全静止的空气不利于植物进行光合作用，需要有微风来驱离叶片表面呼出的氧气，并补充被吸收的二氧化碳，以便保持有效的氧气和二氧化碳浓度的梯度差。建议的风速为 0.5~1 米/秒。

温度

适合植物成长的温度，可以用三基点温度来表示，即最低温度、最高温度和最适温度。

植物根据其进化环境的不同，有不同的适合生长温度范围。原产地在热带或亚热带的植物，其生长温度范围一般为 10~45℃，最适温度为 30~35℃；原产地在温带的植物，其生长温度范围一般为 5~40℃，最适温度为 25~30℃；原产地为寒带的植物，其生长温度范围一般为 0~10℃。

植物在不同成长阶段，其适合温度也不一样。下表是 chatGPT 给出的一些代表性蔬菜在不同阶段的适合温度范围。

蔬菜种类	发芽期 最适生长温度 (°C)	成长期 最适生长温度 (°C)	成熟期 最适生长温度 (°C)
绿叶蔬菜	18-25	15-20	10-20
菠菜	5-20	10-25	5-20
生菜	5-25	10-20	5-20
香菜	5-25	15-25	15-20
番茄	15-30	20-28	15-25
黄瓜	15-30	25-30	25-30
辣椒	20-30	25-30	15-25
南瓜	20-30	20-28	20-28

水培时，也要控制水温。植物生长时需要的水温比空气的温度略低一些，一般以 18~24℃为宜。

湿度

蔬菜成长的适宜湿度范围因蔬菜品种和生长阶段而异。一般来说，蔬菜的适宜湿度范围为 60%~80%左右。下面是几种蔬菜在不同生长阶段的适宜湿度范围：

- 叶菜类：如生菜、菠菜、小白菜等，生长阶段的适宜湿度范围为 60%~70%左右。
- 茎菜类：如芹菜、大葱、韭菜等，生长阶段的适宜湿度范围为 70%~80%左右。
- 根菜类：如胡萝卜、萝卜、甜菜等，生长阶段的适宜湿度范围为 70%~80%左右。

需要注意的是，湿度过高会导致病菌和真菌的繁殖，易引起病害和腐烂；湿度过低则会导致植物水分流失过多，影响光合作用和生长发育。