

# 无土栽培营养液消毒技术研究与应用

刘伟<sup>1</sup>, 陈殿奎<sup>1</sup>, E. A. van Os<sup>2</sup>

(1. 国家蔬菜工程技术研究中心, 北京 100089; 2. 瓦赫宁根大学与研究中心农业技术与食品创新研究所, 瓦赫宁根, 6700, 荷兰)

**摘要:** 为了减少营养液排放对环境造成的污染, 世界范围内的无土栽培系统正逐步由开放式向封闭式转变。封闭式无土栽培系统中根系病害的传播危险急剧增加, 因此营养液消毒技术的研究和应用发展迅速。该文综述了国内外营养液消毒方法、原理、成本及应用效果, 重点介绍了营养液消毒新技术—慢砂过滤。

**关键词:** 消毒; 营养液; 慢砂过滤; 无土栽培

**中图分类号:** S317

**文献标识码:**

**文章编号:** 1002-6819(2005)S-0121-04

刘伟, 陈殿奎, E. A. van Os 无土栽培营养液消毒技术研究与应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S): 121-124

Liu Wei, Chen Diankui, E A van Os Research and application of disinfection techniques of nutrient solution in soilless culture[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp): 121-124 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

近60年来, 用于商业化生产的无土栽培在世界范围内发展迅速。无土栽培系统分为开放式(open system)与封闭式(closed system)两大类。在开放式无土栽培系统中, 营养液不循环使用, 灌溉的营养液经作物吸收后, 多余的即排放到环境中, 对环境造成一定的污染。在封闭式无土栽培系统中, 营养液循环使用, 节水省肥, 大大减少了对环境的污染。因此, 国内外的无土栽培发展呈现着逐步由开放式向封闭式转变的趋势。荷兰已通过立法手段限期将开放式无土栽培改为封闭式。目前, 无土栽培面积最大的荷兰, 封闭式无土栽培的面积占无土栽培总面积的70%。营养液循环使用实现了环境友好, 但急剧增加了无土栽培系统中病害的传播危险。无土栽培营养液消毒技术(disinfection method)的研究应运而生。

## 1 营养液消毒方法与原理

无土栽培有许多不同的方法与系统, 虽然在不同的系统中消毒装置有所不同, 但基本方法与原理一样。图1显示了在封闭式基质培系统中营养液消毒装置的位置。营养液消毒方法主要包括高温消毒、氧化剂消毒、紫外线消毒及过滤消毒。

### 1.1 高温消毒

高温消毒(heat treatment)是第一种用于无土栽培生产的营养液消毒方法, 出现于1987年<sup>[1]</sup>。该方法的产生受牛奶巴氏灭菌法的启发。荷兰MAG研究所的科学家开发了适于营养液消毒的方法。高温消毒的原理是利用高温使病原微生物机体蛋白质变性, 从而杀死营养液里的致病微生物。这是广泛使用的营养液消毒方法。

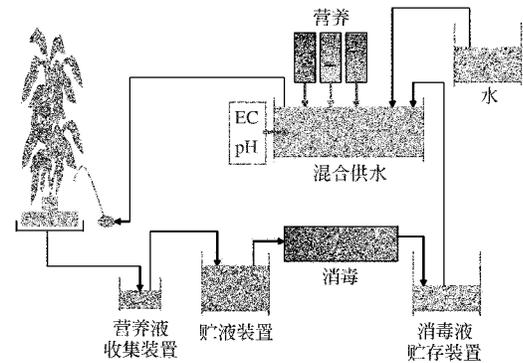


图1 封闭式基质培系统示意图(E. A. van Os, 2004)

Fig 1 Sketch of closed substrate culture system

高温消毒的具体方法是, 经作物吸收后的多余营养液收集到集液池(catchment tank), 从集液池营养液被泵到热交换器(heat exchanger)里预加热到80左右。在热交换器里, 用于预热营养液的能量来自高温消毒后营养液冷却释放的热能。预热后的营养液送入加热器, 在这里营养液被加热到消毒温度(90以上)。加热器使用的是外部能源, 在荷兰一般使用天然气。消毒后的营养液流回热交换器进行冷却, 冷却过程中释放的热能用于预热新的有待消毒的营养液。冷却后的营养液储存在净液池(clean water tank)<sup>[2]</sup>。

关于高温消毒的温度有很多研究。试验表明, 营养液温度达到95保持10s即可杀死所有病菌。为安全起见, 一般保持95-30s。Runia研究发现, 降低温度延长时间也可以达到相似的效果, 如90保持2min, 或85保持3min。60保持2min只能选择性地杀死真菌、细菌和线虫, 优点是降低了设施投入及运行成本<sup>[3]</sup>。

### 1.2 氧化剂消毒

氧化剂消毒(oxidizer treatment)的原理是, 强氧化剂在营养液中发生氧化还原反应, 迅速分解溶液中的病原微生物。用于营养液消毒的氧化剂主要是臭氧(O<sub>3</sub>)。臭氧是很强的氧化剂, 在溶液中产生氧化能力很强的单原子氧和羟基, 可以和所有的活有机物(也包括螯合铁)发生反应, 杀灭微生物。杀菌效果与暴露时间及臭氧浓

收稿日期: 2005-07-04

项目基金: 国家科技攻关计划(2004BA521B01); 北京市科技新星计划(2004B22)

作者简介: 刘伟(1971-), 女, 副研究员, 博士, 研究方向: 设施栽培。北京市2443信箱 国家蔬菜工程技术中心, 100089。

Email: liuwei@nervc.com



度有关。

营养液用臭氧消毒前需要过滤,以减少有机物的含量,提高杀菌效率。同时降低营养液的pH值,以提高臭氧的稳定性。在回流量大的情况下,营养液需要分批进行消毒(每批1~2 m<sup>3</sup>)。营养液被送入密闭的容器里,同时注入臭氧。研究表明,每m<sup>3</sup>溶液中每小时注入10 g臭氧,暴露时间1 h就可以杀灭所有病原菌<sup>[2]</sup>。

臭氧消毒的成本较高,营养液需要一些预处理及防护措施,虽然研究结果表明臭氧消毒效果较好,但在生产中的应用并不普遍。

过氧化氢价格低廉,作为替代物也用于营养液消毒。过氧化氢是弱氧化剂,单独使用杀菌效果较差,可以通过添加催化剂(弱酸)提高杀菌效果。

### 1.3 紫外线消毒

近些年来紫外线消毒(ultraviolet radiation treatment)比较受欢迎。紫外线是电磁辐射,其杀菌原理是通过紫外线对微生物的照射,以破坏其机体内核蛋白或DNA的结构,使其立即死亡或丧失繁殖能力。具有杀菌效果的紫外线是UV-C,波长在200~280 nm,254 nm的杀菌效果最好,因为DNA对254 nm的紫外线吸收最强。

紫外线消毒的使用剂量因杀灭对象的不同而不同。杀死细菌和真菌需要的剂量是100 mJ/cm<sup>2</sup>;杀死病毒的剂量是250 mJ/cm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。紫外线消毒的效果还受紫外线在溶液中透射因子(transmission factor)的影响。隐藏在悬浮颗粒背后的病菌将难以被杀死。因此,营养液在消毒前要经过50~70 nm的过滤器过滤,以去除植物残骸或其它颗粒物,提高杀菌效果。

### 1.4 过滤消毒

用于消毒的过滤分为膜过滤(membrane filtration)和慢砂过滤(slow sand filtration)两种。膜过滤根据所用膜的不同,又分为反渗透(reverse osmosis)、高(hyper-)、极细(nano-)、超(ultra-)和微滤(microfiltration)等。反渗过滤可以滤除溶液中的所有离子,因此主要用作消毒水源,包括消毒收集的雨水。高滤或微滤虽然从原理上可以滤除病菌,但生产上使用成本较高,而且由于堵塞或破漏造成性能不稳定,也会滤掉部分盐分积累的营养液(brine),所以,膜过滤在生产上很少使用<sup>[2]</sup>。

近10年来,荷兰、德国、西班牙等国的科学家对慢砂过滤用于营养液消毒进行了大量研究。慢砂过滤的原理是,浮于砂层上部的营养液慢慢滴过砂层,滤除病菌。这种方法不会改变营养液的化学组成。慢砂过滤可以消灭所有疫霉属和腐霉属的真菌,但镰刀菌、病毒和线虫只能去除90%~99.9%<sup>[2]</sup>。慢砂过滤使用的过滤介质不仅有砂,还可以用珍珠岩、粒状岩棉、玻璃丝、砾石等。研究发现,灭菌效果较好的过滤速度是100~300 L/(m<sup>2</sup>·h)<sup>[5]</sup>。慢砂过滤的具体步骤是,回收的营养液被泵到高处的容器里,然后流入过滤器上部,经过过滤层的过滤,营养液流过控制过滤速度的流量计,重新收集使用。

## 2 营养液消毒方法的成本与效果

消毒效果与消毒设施投资及运行成本是决定该方法能否应用于生产的两个主要因素。

### 2.1 成本

由表1可见,高温消毒的设施投资比较大,一般适用于面积较大的无土栽培温室(大于1 hm<sup>2</sup>)。在荷兰用于加热营养液的能源是天然气,将1 m<sup>3</sup>的营养液从80加热到95大约需要1 m<sup>3</sup>的天然气(约相当于32 mJ或8.8 kWh的能量),运行成本也较高。目前,通过降低消毒温度、延长消毒时间的方法可以降低成本。

紫外线消毒根据杀菌程度的不同分为高低两种成本。完全杀菌指杀灭所有的病原菌,部分杀菌主要杀死真菌和细菌。杀死病毒所需的剂量远远高于杀死真菌与细菌,所以完全杀菌的设备与运行成本高于有选择的部分杀菌。紫外线消毒成本还与紫外灯的选择有关。水银灯有高压和低压两种,两者的杀菌效果相同,但能源利用率不同。以2000W的高压水银灯为例,可以产生8%的紫外线,其中50%为UV-C,真正用于消毒的能量是:2000W×8%×50%=80W。40W的低压水银灯,可以产生40%的紫外线,其中85%为UV-C,用于消毒的能量是:40W×40%×85%=13.6W。1个高压灯的消毒能力约相当于6个低压灯。但一个高压灯耗能2000W,6个低压灯耗能240W,只有高压灯的12%。因此,低压灯的能源利用率大大高于高压灯。

臭氧消毒的设施投资与运行成本都非常高,运行成本1.19欧元/m<sup>3</sup>是各种消毒方法中最高的。

过氧化氢加催化剂的消毒方法与臭氧消毒相比,成本只有后者的1/3,大大降低,但杀菌效果也有所降低。

膜过滤的设施投资非常大,加上稳定性差,在生产上很少使用。

慢砂过滤的设施投资和运行成本是各种消毒方法中最低的。过滤池的大小由每小时需要过滤的营养液量来决定。1 hm<sup>2</sup>的温室每小时的营养液灌溉量在高峰时间最大为10 m<sup>3</sup>,按25%的回流量计算,每小时需要消毒的营养液量是2.5 m<sup>3</sup>。面积20 m<sup>2</sup>的慢砂过滤池每小时可过滤2~6 m<sup>3</sup>的营养液,面积70 m<sup>2</sup>的慢砂过滤池每小时可过滤7~21 m<sup>3</sup>的营养液。慢砂过滤适用于各种规模的无土栽培温室。

表1 1 hm<sup>2</sup>无土栽培温室营养液消毒成本

Table 1 Disinfection costs of nutrient solution in 1 hm<sup>2</sup> soilless culture greenhouse

消毒方法	设备投资/欧元	运行成本/欧元·m <sup>-3</sup>
高温	19100	0.89
紫外线(完全)	10300	0.54
紫外线(部分)	8000	0.40
臭氧	27500	1.19
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +催化剂	9300	0.42
膜过滤	22700~31800	—
慢砂过滤	4700	0.27

不论哪一种消毒方法都需要设备投入与运行成本,这是限制营养液消毒技术推广的重要因素。慢砂过滤和

紫外线消毒的成本相对较低, 是有望在中国逐步推广的技术。

### 2.2 效果

高温消毒达到一定的温度与时间就可以杀灭所有的病原菌; 紫外线消毒保证剂量也可以消灭所有病原菌。这是生产上使用效果较好的消毒方法。臭氧消毒的杀菌效果也很好, 但应用成本高。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 加催化剂的方法杀菌效果一般, 在生产中很少使用。膜过滤对病原菌的滤除效果很好, 但对营养液成分会产生影响, 膜本身由于堵塞或破损也会影响杀菌效果。该方法多用于研究, 在生产上很少使用。慢砂过滤的杀菌效果与过滤介质的选择及过滤速度有关<sup>[6]</sup>, 也与病原菌本身的大小有关。试验表明, 采用100 L/(m<sup>2</sup> · h) 的流速, 0.15~ 0.30 mm 细粒径的慢砂过滤或0.2~ 0.8 mm 中等粒径的慢砂过滤都可以100% 消除接种的肉桂疫霉菌 (*Phytophthora cinnamoni*)。接种番茄尖孢镰孢菌 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*) 的营养液, 以100 L/(m<sup>2</sup> · h) 的流速过滤, 病菌被滤除99.9%; 以300 L/(m<sup>2</sup> · h) 的流速过滤, 病菌被滤除94%~ 99%。接种番茄花叶病毒 (tomato mosaic virus) 的营养液, 以100 L/(m<sup>2</sup> · h) 的流速过滤, 病毒被滤除99%; 以300 L/(m<sup>2</sup> · h) 的流速过滤, 病菌被滤除91%~ 98%。上述三种病原菌的大小是: 肉桂疫霉菌> 番茄尖孢镰孢菌> 番茄花叶病毒。可见, 病原菌个体越大越容易被滤除<sup>[7]</sup>。慢砂过滤可以滤除99%~ 100% 的大肠杆菌。主要受疫霉属和腐霉属真菌危害的无土栽培温室, 使用慢砂过滤效果很好。

高温消毒和紫外线消毒是目前世界上应用最广泛的营养液消毒方法。对慢砂过滤的研究起步较晚, 该方法对多种病原菌的消灭效果还有待进一步研究。

表2 各种消毒方法的消毒效果

Table 2 Performances of different disinfection methods

消毒方法	效果
高温	好
紫外线	好
臭氧	好
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 催化剂	中等
膜过滤	不稳定
慢砂过滤	好

### 3 慢砂过滤- 营养液消毒的新理念

最早的慢砂过滤设备出现于1804年的苏格兰, 由 John Gibb 开发, 用于生产纯净水。之后, 这一方法被广泛用作净化饮用水的步骤<sup>[8]</sup>。直到20世纪90年代中期, 这一方法成为营养液消毒的热门研究课题, 过滤装置也有了改进。

#### 3.1 装置

慢砂过滤装置的基本结构如图2。装置中的介质由多层不同粒径的材料组成。上部的细砂层是过滤层, Collins 和 Graham 研究认为, 砂层的厚度应在80 cm 以上。下部三层由细到粗的砾石层既可以防止上部的细砂随营养液由排液管流失, 又有利于营养液的排出。砂层

上表面与营养液接触的地方会形成一层特殊的结构, 被称为滤皮 (filter skin)。整个过滤器的高度为1~ 4 m。

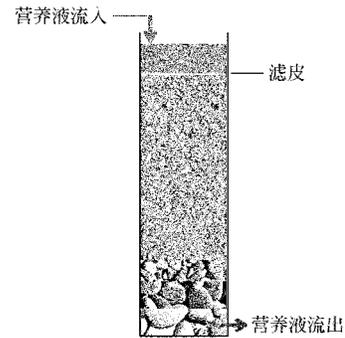


图2 慢砂过滤装置剖面图

Fig 2 Cross section of slow sand filter

慢砂过滤器的设计很灵活, 可以是金属罐 (图3) 或塑料容器, 也可以是室外的人工池塘 (图4)。过滤器的大小由无土栽培温室面积及过滤速度决定。

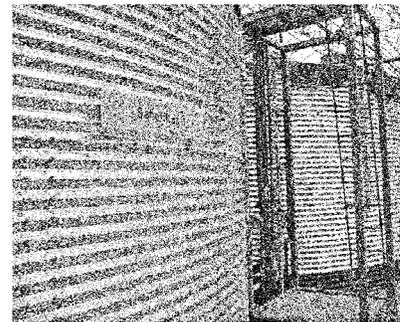


图3 金属制慢砂过滤器

Fig 3 Slow sand filter made of metal



图4 人工池塘式慢砂过滤器

Fig 4 Artificial pool style slow sand filter

#### 3.2 除菌机理

慢砂过滤的除菌机理包括机械作用、物理作用和生物作用三方面。前两种作用指的是过滤介质对病原菌的阻挡与吸附等。生物作用是慢砂过滤与众不同的特点。在过滤介质的表面会自然形成一层生物膜 (biofilm), 这层生物膜由细菌、真菌、藻类和原生动物等组成。营养液流过时, 其中的病原菌附着在生物膜上, 被膜中的微生物分解, 最终被矿化。

近几年来, 营养液消毒的理念有了转变。以往的消毒方法都是消灭营养液中所有的微生物, 使营养液完全无菌, 如高温、紫外线、臭氧消毒, 这些称为主动消毒。现

在人们认识到,无土栽培系统并不是一个无菌系统,杀死营养液中所有的微生物未必是最好的选择。营养液中天然存在着微生物群(microflora),它们可以抑制病原菌的增殖<sup>[9]</sup>。例如,在一个无菌的环境里,疫霉菌的增殖会很快,而在一个有菌的环境里其增殖会慢很多。慢砂过滤正符合这一理念。它不会杀死营养液中所有的微生物,可以利用有益微生物抑制病原微生物,这是慢砂过滤与主动消毒最大的区别,称为被动消毒。研究者认为,这是一种更具可持续性的营养液消毒方式。

### 3.3 影响除菌效果的因素

慢砂过滤的除菌效果与过滤材料的种类、粒径以及过滤速度有关。Wohanka 等研究了细砂、粒状岩棉、浮石和多孔粘土四种材料对尖孢镰孢菌(*Fusarium oxysporum*)的去除效果。发现,粒状岩棉与细砂的除菌效果最好,超过99.99%。浮石和粘土的效果稍差,除菌率分别是99.63%和99.45%<sup>[10]</sup>。同样用砂作过滤材料,粒径不同,除菌效果也不同。Runia 等的研究发现,0.15~0.30 mm 的细砂除菌效果好于0.2~0.8 mm 的中砂,后者好于0.5~1.6 mm 的粗砂。在流速快的情况下,这一趋势更明显<sup>[7]</sup>。在生产中,农户一般喜欢使用粗砂,因为不易发生堵塞。过滤速度也影响除菌效果。100 L/(m<sup>2</sup>·h)的流速过滤,除菌效果好于300 L/(m<sup>2</sup>·h)。慢砂过滤器在使用一段时间后,表层会形成包括藻类、滤除的污物等在内的滤皮,显著降低过滤速度,因此需要定期刮去过滤层上部2~3 cm 的砂层。

### 3.4 发展前景

慢砂过滤用于营养液消毒还需要进一步研究与完善,如开发新的过滤材料、完善过滤器的设计、探明微生物群的作用等。虽然慢砂过滤不能100%地去除病毒、线虫及部分细菌,但消除率达到90%~99%。结合作物自身的抗性、无土栽培系统中有益微生物的抑制作用,作物感染病害的几率很低。慢砂过滤还具有成本低、适用范围广的优点。因此,慢砂过滤被认为是最有发展前景的营养液消毒方法。

## 4 小结

中国无土栽培面积1000多hm<sup>2</sup>,其中封闭式系统的面积约1%。目前,营养液消毒在生产上应用很少,技术研究的相对滞后和成本问题是主要原因。中国无土栽培

面积近年来增长迅速,封闭式系统是发展趋势。研究开发适合中国国情的营养液消毒技术与设备迫在眉睫。慢砂过滤与紫外线消毒可以作为切入点。

### [参考文献]

- [1] E A van Os. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(5): 105-112.
- [2] E A van Os. Nutrient cleaning—the Dutch approach[J]. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, 1999.
- [3] W Th Runia, E A van Os, G J bollen, et al. Disinfection of drain water from soilless culture by heat treatment[J]. *Neth J of Agri Sci*, 1988, (36): 231-238.
- [4] W Th Runia. Disinfection of recirculation water from closed production systems[A]. *Proceedings of the seminar on closed production system*[C]. 1996: 20-24.
- [5] E A van Os, J J Am sing, A J van Kuit, et al. Slow sand filtration: a potential method for the elimination of pathogens and nematodes in recirculating nutrient solutions from glasshouse-grown crops[J]. *Acta Hort* 481, ISHS, 1999: 519-526.
- [6] E A van Os, M Bruins, W wohanka, et al. Slow filtration: a technique to minimise the risks of spreading root-infecting pathogens in closed hydroponic systems[J]. *Acta Hort* 559, ISHS, 2001: 495-502.
- [7] W Th Runia, J M G P M ichielsen, A J van Kuit, et al. Elimination of root-infecting pathogens in recirculation water by slow sand filtration[C]. *Proceedings of the 9th international congress on soilless culture*[A]. 1997: 395-407.
- [8] E A van Os, M A Bruins, J van Buuren, et al. Physical and chemical measurements in slow sand filters to disinfect recirculating nutrient solution[A]. *Proceedings of the 9th international congress on soilless culture*[C]. published by the secretariat of ISO SC, the Netherlands, 1997: 313-327.
- [9] J Postma, E A van Os, G Kritzman. Prevention of root diseases in closed soilless growing systems by microbial optimization[M]. *Med Fac Landbouww. Univ. Gent* 64/3b, 2000: 431-440.
- [10] W Wohanka, M Helle. Suitability of various filter media for slow sand filtration[A]. *Proceedings of the 9th international congress on soilless culture*[C]. 1997: 551-557.

## Research and application of disinfection techniques of nutrient solution in soilless culture

Liu Wei<sup>1</sup>, Chen Diankui<sup>1</sup>, E. A. van Os<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Vegetables, Beijing 100089, China;

2. Agrotechnology & Food Innovations B. V., Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands)

**Abstract** In the world soilless culture system is changing from open system in order to closed system in order to reduce the pollution of draining nutrient solution in the environment. However, the risk of spreading root pathogens in closed system dramatically increased. Research and application of disinfection techniques have been developing quickly. The principles, processes, costs and effects of different disinfection techniques were summarized, especially a new method of slow sand filtration was introduced.

**Key words:** disinfection; nutrient solution; slow sand filtration; soilless culture