

# 紫外线—臭氧组合式营养液消毒机的设计及灭菌性能试验

宋卫堂<sup>1</sup>, 王成<sup>2</sup>, 侯文龙<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;  
3. 中国农业大学理学院, 北京 100193)

**摘要:** 为了充分利用紫外线、臭氧在封闭式无土栽培系统营养液消毒上的优势, 设计、试制并检测了一种紫外线—臭氧组合式营养液消毒机。样机主要包括紫外线消毒器、4 个文丘里射流器、臭氧发生器、自吸泵、ABS 管路及自动控制设备等。工作时, 灌溉后回收的营养液首先由自吸泵提高压力后以一定流量和速度通过文丘里射流器的喉管, 在此由臭氧发生器产生的臭氧由于负压作用吸入并与营养液充分混合, 从而杀灭营养液中的病原微生物; 然后营养液再经过紫外线消毒器, 在紫外线的照射下进一步杀灭病原微生物。对所研制的消毒机, 用经过了 180 d 番茄栽培试验的营养液进行了 UV、O<sub>3</sub>、UV+O<sub>3</sub> 3 种方法的灭菌性能测试, 结果表明: 主要微生物(细菌、真菌、放线菌)总的消毒效果分别达到 70.6%、15.9%和 89.9%。可以看出, 紫外线—臭氧组合式消毒, 达到了比单一灭菌方法更好的灭菌效果, 显现出了协同效应, 可以较大幅度地提高消毒效率。

**关键词:** 消毒, 设计, 试验, 紫外线—臭氧组合, 营养液, 灭菌率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.061

中图分类号: S477<sup>+</sup>.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0360-06

宋卫堂, 王成, 侯文龙. 紫外线—臭氧组合式营养液消毒机的设计及灭菌性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 360—365.

Song Weitang, Wang Cheng, Hou Wenlong. Development and test of nutrient solution disinfection machine by combining UV with ozone[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 360—365. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

1990 年, Amsing J. J. 发现, 如果不对封闭式无土栽培系统中循环使用的营养液进行消毒, 感病植物上的根结线虫会迅速扩展到整个系统, 使健康植株受到侵染<sup>[1]</sup>。由此, 国外学者在营养液循环使用前的消毒处理技术和设备方面, 进行了大量研究, 主要采用加热、紫外线照射、臭氧、慢砂滤、超滤等消毒方法<sup>[2]</sup>。

臭氧是一种非常强的氧化剂, 几乎可以与所有活体组织发生氧化反应。如果有足够的曝气时间和浓度, 臭氧可以杀灭水中的所有有机体。因此, 国内外在利用臭氧对营养液消毒方面, 进行了很多研究, 但臭氧消毒也存在速度慢、效果不稳定等缺点<sup>[3-7]</sup>。

紫外线杀菌是通过紫外线对微生物的照射, 以破坏其机体内蛋白质和 DNA 的结构, 使其立即死亡或丧失繁殖能力。紫外线消毒的使用剂量因杀灭对象的不同而不同。Runia<sup>[8]</sup>得出在营养液灭菌时, 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>。紫外线消毒的效果受溶液中透射因子(transmission factor)的影响, 隐藏在悬浮颗粒背后的病菌难以被杀死<sup>[9-10]</sup>。

营养液专用的紫外线和臭氧灭菌装置, 国外同行也进

行了研究<sup>[8,11-13]</sup>。中国开展这方面的研究较晚、也较少<sup>[14-15]</sup>。

单独采用臭氧或紫外线的方法对营养液进行灭菌, 都存在一定的缺陷, 因此, 利用臭氧和紫外线共同处理营养液可以扬长避短, 发挥各自灭菌优势, 从而达到更好的灭菌效果。

## 1 结构设计

实际生产中, 一般采用间歇式营养液循环方式: 营养液浇灌植物后流回回液池中暂存, 待达到一定量后经消毒机消毒转移至储液池, 然后根据灌溉制度要求进行灌溉循环。对于栽培面积 667 m<sup>2</sup> 的水培系统, 营养液循环量一般为 40~60 m<sup>3</sup>/h, 循环次数 4~6 次/d。营养液的消毒是在两次灌溉之间, 因此消毒时间为 4~6 h/次, 消毒机处理量通常为 12~18 m<sup>3</sup>/h。

本紫外线—臭氧组合式消毒机的营养液处理量设计为 15 m<sup>3</sup>/h, 其主要由水泵、过滤器、文丘里射流器、臭氧发生器、紫外线消毒器和控制装置等组成<sup>[16]</sup> (图 1)。

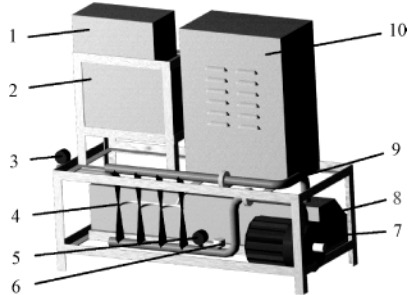
回液池中的待消毒营养液被水泵以一定流量吸入消毒管路, 经过过滤器滤去其中固体颗粒杂质后, 进入文丘里射流器。营养液首先进入文丘里管的渐缩部, 由于管径的逐渐收缩液流流速逐渐加快, 至喉管处流速达到最大, 在此形成一个低于大气压的负压区; 臭氧发生器产生的臭氧, 在文丘里喉管处负压作用下被吸入文丘里管中, 与其中的营养液混合; 由于臭氧充分溶解在营养液中, 便开始氧化其中的病原菌。流出文丘里管的营养液随后进入紫外消毒器, 营养液在紫外灯管外的石英套

收稿日期: 2010-04-28 修订日期: 2010-06-24

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD11A10)

作者简介: 宋卫堂 (1968—), 男, 博士, 副教授, 从事设施园艺中营养液的物理消毒技术及设备研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: songchali@cau.edu.cn

管和消毒器外壳之间流动，受到紫外线照射而灭菌，而已经混入营养液的臭氧在紫外消毒器中继续进行氧化灭菌。最后消毒处理后的营养液由紫外消毒器出口流出，进入储液池。



1. 触摸板控制箱 2. 电控箱 3. 压力表 II 4. 文丘里射流器 5. 压力表 I  
6. 水表 7. 水泵 8. 紫外线消毒器 9. 管路 10. 臭氧发生器

图 1 紫外线—臭氧消毒机示意图

Fig.1 Structure of UV+O<sub>3</sub> disinfection equipment for nutrient solution

### 1.1 紫外线消毒器

目前，国内没有专用于营养液消毒的紫外线消毒设备。而在用于饮用水消毒的紫外线消毒器中，水主要是以层流形式流过消毒腔体，从而导致各个流层之间很少或没有物质交换。当紫外线在水中的透射率较低时，靠近紫外灯管的液体受到较强的紫外线辐射，可以受到预期的辐射剂量，灭菌效果较好；但是远离紫外灯管的液体（如靠近消毒器壳体流动的液体）受到的紫外线辐射强度较小，此处营养液中的病原菌便很难接受到致死的辐射剂量，灭菌效果较差。这样，紫外线消毒机的整体消毒效果就受到很大影响<sup>[4]</sup>。

针对上述问题，自行设计了一种新型的紫外线消毒器<sup>[17]</sup>：在消毒腔体内安装螺旋形导流片，使营养液以湍流形式流动（图 2），即让沿不锈钢腔体内壁流动的营养液也有一部分时间是在石英套管附近流动。营养液在距离紫外灯管较近或较远的两个区域停留的时间接近，从而解决了因一部分营养液灭菌不彻底而影响整体灭菌效果的问题。

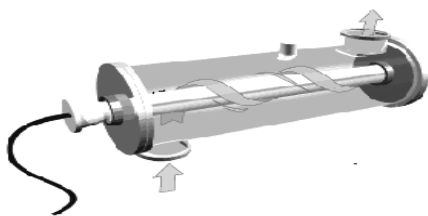


图 2 湍流式消毒器内营养液流动示意图

Fig.2 Sketch of nutrient solution turbulent flow in the UV disinfectant

本消毒机所采用的消毒器中安装有 3 根紫外灯管，单根灯管功率 30 W。消毒腔体中的紫外线辐照度为 18.3 mW/cm<sup>2</sup>。

### 1.2 臭氧发生器

选用北京农业信息技术研究中心研制的 cf-g-3-10g

型臭氧发生器：外形尺寸 610 mm×460 mm×320 mm；利用高压放电的原理产生臭氧，其中并联安装 2 个高压放电管。发生器进气量 35 L/min，出口处臭氧浓度 18.3~18.5 ppm，臭氧产量 10 g/h。

### 1.3 射流器

选用上海康特环保科技有限公司生产的 A32235 型文丘里射流器。该射流器采用耐臭氧氧化的 PVDF 材料制作，总长度 235 mm，进出水口外径 32 mm（1 吋），进气口外径 15 mm（1/2 吋），软管接口直径 10 mm。要求水流输入压力 0.2~0.5 MPa，输出压力 0~0.1 MPa，吸气量 11~15 Nm<sup>3</sup>/hr，出水量 3~5 T/h。

本机采用 4 个 A32235 型文丘里射流器并联使用。

### 1.4 控制设备

由北京农业信息技术研究中心开发研制，主要由液晶显示屏和触摸屏的人机交互界面与主电控箱两部分组成。可以实现对整机的自动或手动控制。在自动运行状态下，手动操作无效，不能改变消毒机的工作状态。

为防止臭氧发生器被烧坏，开机时必须先打开臭氧发生器的气泵；而关闭时，先关闭臭氧高压放电管，后关闭气泵。在系统自动运行时，按照上述顺序开闭设备。手动操作时，开启各设备的顺序是水泵、紫外线灯管和气泵，过 3~5 min 后再打开臭氧发生器；关闭时，先关闭臭氧高压放电管，然后顺序关闭气泵、紫外线灯管和水泵。同时，为安全起见，手动控制时，在不开启气泵的情况下，不能开启臭氧高压放电管。

### 1.5 其他设备

水泵：选用上海晶泉泵阀制造有限公司生产的 50HYLZ-22 型不锈钢耐腐蚀自吸泵，电动机功率 3 kW，流量 15 m<sup>3</sup>/h，扬程 22 m。

过滤器采用 120 目叠片式过滤器。

选用上海康特环保科技有限公司生产的 B-8 型止回阀，其作用是防止营养液经臭氧吸气管路倒流入臭氧发生器。

管路由防氧化 ABS 管材粘接而成。

## 2 性能试验

### 2.1 试验装置与测定方法

试验装置如图 3 所示。

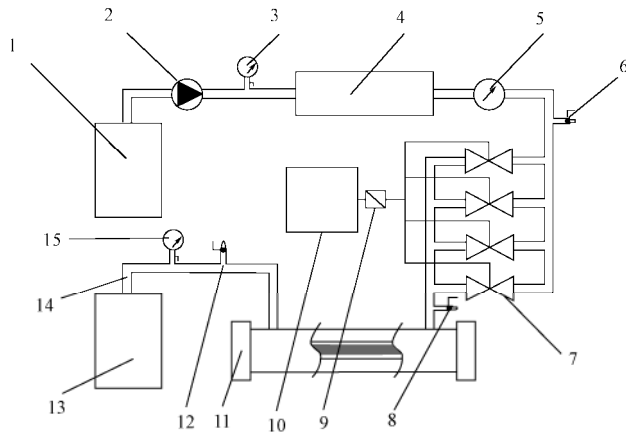
1) 通过安装在水泵出口端、紫外线消毒器出口端的两个压力表，来测量整个设备的压力损失，为评价和改进设计提供参考。

2) 流量通过水表和秒表测得， $q=Q/T$ ，其中  $Q$  为测量始末 2 次水表读数之差，m<sup>3</sup>； $T$  为测量所用时间，h。

3) 营养液在紫外线消毒器中的灭菌时间（即在消毒器中的存留时间）由下式计算得到： $t=L \times 3.14 \times R^2 / q$ ，其中  $L$  为紫外线消毒器的有效长度，0.95 m； $R$  为紫外线消毒器的腔体半径，0.055 m。

4) 臭氧发生器出气口的臭氧浓度，由美国 ECO Sensor 公司生产的、型号为 A-21ZX 臭氧浓度测定仪测量。

5) 营养液中的臭氧溶解量，采用参考文献 18 的方法测得。



1. 回液池 2. 水泵 3. 压力表 I 4. 过滤器 5. 水表 6. 取样口 I  
7. 文丘里射流器 8. 取样口 II 9. 止回阀 10. 臭氧发生器 11. 紫外线  
消毒器 12. 取样口 III 13. 储液池 14. 管路 15. 压力表 II

图3 试验装置示意图

Fig.3 Sketch of experimental equipment

## 2.2 不同流量时, 文丘里射流器的吸气量与紫外线的灭菌时间

由表 1 可以看出, 压力表 I、II 的数值均随水泵流量的变化而变化: 水泵出口端压力随流量增加而变大, 而紫外线消毒器出口端的压力呈现相反的趋势; 随着流量由  $5.6 \text{ m}^3/\text{h}$  增加到  $13.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 压力差也由  $0.06 \text{ MPa}$  增大到  $0.17 \text{ MPa}$ 。这说明管路的阻力在随流量增大而变大, 但同时压差的增大有利于提高文丘里射流器喉管处的吸力, 可以从臭氧发生器中吸入更多的臭氧与空气的混合气, 这从混合气体的吸入量由  $18 \text{ L}/\text{min}$  增加到了  $33 \text{ L}/\text{min}$  就可看出; 另外, 流量的增大, 更有利于在文丘里射流器的扩散管中形成湍流, 从而利于臭氧气体溶解于营养液中, 从营养液中的臭氧含量由  $0.66 \text{ mg}/\text{L}$  提高到了  $0.73 \text{ mg}/\text{L}$  就可看出, 这对于提高臭氧的灭菌效果是有利的。

营养液流经紫外线消毒腔体的时间, 是随着流量的增大而减小的: 流量由  $5.6 \text{ m}^3/\text{h}$  增大到  $13.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 营养液在紫外线消毒腔体中的存留时间也由  $5.8 \text{ s}$  减小到  $2.4 \text{ s}$ 。营养液在消毒器中存留时间越短, 受到的紫外线辐照剂量越少 (辐照度一定时), 对杀灭病原菌越不利, 灭菌效果将会越差。

表 1 不同流量时, 营养液中的臭氧含量与紫外线的灭菌时间  
Table 1  $\text{O}_3$  content in nutrient solution and disinfection time of UV at different flow

水泵 流量 $q/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	压力 表 I/ MPa	压力 表 II /MPa	吸入臭氧与空气 混合气体的量*/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	营养液中的臭 氧含量*/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	流经紫外线 消毒腔体的 时间/s
5.6	0.1	0.04	18	0.66	5.8
8.3	0.12	0.03	20	0.69	3.9
11.2	0.15	0.02	25	0.7	2.9
13.6	0.18	0.01	33	0.73	2.4

注: \*为臭氧发生器出气口阀门开度处于全开状态。

## 3 灭菌效果试验

2009年10月自北京市昌平区土沟村京承碧园温室, 取得用于番茄树式栽培的营养液。该营养液配制时间是4

月10日, 到取样时已经循环使用了180d左右。

试验主要检测了消毒机对营养液中真菌、细菌和放线菌的灭菌效果。

### 3.1 试验方法

#### 3.1.1 培养基配制

1) 真菌培养基 (孟加拉红培养基): 每升蒸馏水中, 加入  $\text{K}_2\text{HPO}_4$   $1 \text{ g}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.5 \text{ g}$ , 蛋白胨  $5 \text{ g}$ , 葡萄糖  $10 \text{ g}$ , 琼脂  $15 \sim 20 \text{ g}$ , 1%的孟加拉红溶液  $3.3 \text{ mL}$ 。

2) 细菌培养基 (牛肉膏蛋白胨培养基): 每升蒸馏水中, 加入牛肉膏  $5 \text{ g}$ , 蛋白胨  $10 \text{ g}$ ,  $\text{NaCl}$   $5 \text{ g}$ , 琼脂  $15 \text{ g}$ , 调节 pH 值在  $7.2 \sim 7.6$  之间,  $121^\circ\text{C}$  湿热灭菌  $30 \text{ min}$ 。培养基使用前用双层纱布中间夹一层脱脂棉过滤, 使培养基澄清、透明。

3) 放线菌培养基 (高氏一号培养基): 每升蒸馏水中, 加入可溶性淀粉  $20 \text{ g}$ , 琼脂  $15 \sim 20 \text{ g}$ ,  $\text{KNO}_3$   $1 \text{ g}$ ,  $\text{NaCl}$   $0.5 \text{ g}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$   $0.5 \text{ g}$ ,  $\text{MgSO}_4$   $0.5 \text{ g}$ ,  $\text{FeSO}_4$   $0.01 \text{ g}$ ,  $121^\circ\text{C}$  湿热灭菌  $30 \text{ min}$ 。

#### 3.1.2 试验仪器设备

试验时采用的主要仪器设备包括:  $18 \times 180$  试管、电磁炉、 $1.5 \text{ L}$  烧杯、电子天平、 $500 \text{ mL}$  锥形瓶、DDHZ-300 多用途台式恒温振荡器、LS-B35L 立式高压蒸汽灭菌锅、DL-CJ-1ND 医用无菌操作台、赛福智能光照培养箱、哈希 DR2800 分光光度计、哈希 DRB200 数字式反应器等。

#### 3.1.3 试验步骤

1) 紫外线消毒试验: ①将  $120 \text{ L}$  营养液加入储液桶, 取 3 个空白样品, 作为 CK; ②打开紫外灯电源开关, 使灯管预热  $15 \text{ min}$ ; ③调节阀门使营养液循环处于某一流量, 打开水泵开关进行消毒; ④系统运行稳定后由取样口 III 取样; ⑤调节阀门改变营养液循环流量, 进行下一次消毒和取样。

2) 臭氧消毒试验: ①将  $120 \text{ L}$  营养液加入储液桶, 取 3 个空白样品, 作为 CK; ②打开臭氧发生器电源开关, 使臭氧发生器运行  $10 \text{ min}$ ; ③调节臭氧发生器出气口阀门开度, 使臭氧吸入量一定, 然后打开水泵开关进行消毒; ④系统运行稳定后由取样口 III 取样; ⑤通过调节臭氧发生器出气口阀门开度, 改变进入文丘里射流器的臭氧量和营养液中的臭氧含量, 进行下一次消毒和取样。

3) 组合消毒试验: ①将  $120 \text{ L}$  营养液加入储液桶, 取 3 个空白样品, 作为 CK; ②打开紫外灯电源开关, 使灯管预热  $15 \text{ min}$ ,  $5 \text{ min}$  后打开臭氧发生器电源开关, 使臭氧发生器运行  $10 \text{ min}$ ; ③打开水泵开关进行消毒; ④系统运行稳定后由取样口 III 取样, 为单独使用紫外线消毒的样本; ⑤连接臭氧导管到文丘里射流器, 使臭氧混入营养液, 并在取样口 II 取样, 得到单独采用臭氧消毒的样品, 在取样口 III 取取得到 UV+ $\text{O}_3$  组合消毒的样品。

4) 取样结束后, 用稀释平板法测定营养液中残余微生物数量。具体步骤如下:

取原液样本  $10 \text{ mL}$  于无菌试管中, 在漩涡混旋器上混匀  $30 \text{ s}$  后, 从原液中吸取  $1 \text{ mL}$  加入到另一装有  $9 \text{ mL}$  无菌水的试管中即为  $10^{-1}$  倍稀释液, 再从  $10^{-1}$  倍稀释液中吸取

1 mL 加入到另一装有 9 mL 无菌水的试管中, 得  $10^{-2}$  倍稀释液, 依次进行 10 倍稀释, 制备  $10^{-3}$  倍、 $10^{-4}$  倍稀释液。

分别取真菌  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$  倍稀释液, 细菌取  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  倍稀释液, 放线菌取原液、 $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$  倍稀释液各 100  $\mu\text{L}$ , 于马丁培养基、牛肉膏蛋白胨培养基和高氏一号培养基上, 用无菌玻璃刮铲涂抹均匀, 分别在 28 $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 48 h、72 h、7 d。微生物数量以单位体积 (mL) 所形成的菌落数量来表示 (CFU/mL)。

### 3.2 结果分析与讨论

#### 3.2.1 单独采用 UV 的灭菌效果

由图 4 可知, 当紫外线照射剂量分别为 53、71、110  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (流量分别为 11.2、8.3、5.6  $\text{m}^3/\text{h}$ ; 营养液的紫外线透射率  $T_{10}=48.1\%$ ) 时, 灭菌率分别为 62.7%、80.8%、96.9%。紫外线的灭菌效果由紫外线照射剂量决定, 在不改变紫外灯功率情况下通过减小营养液流量进而降低流速, 从而增加辐照剂量, 灭菌率呈直线上升趋势。但由于在实际栽培过程中, 植物根系会产生根系分泌物 (包括渗出物如糖类、氨基酸、维生素等, 和主动分泌物如黏胶物质、酶类、激素、酚类、有机酸、质子等), 以及植物残体脱落物, 这些因素都会降低营养液的紫外线透射率, 影响了紫外线穿透效果而使得单独使用紫外线、大流量时的灭菌率不高。

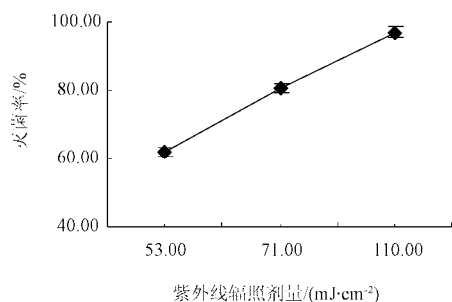


图 4 紫外线灭菌率

Fig.4 Disinfection rate of UV

#### 3.2.2 单独采用 $\text{O}_3$ 的灭菌效果

由图 5 可以看出, 当营养液中的臭氧浓度分别达到 0.2、0.4、0.6  $\text{mg}/\text{L}$  时, 对微生物的杀灭效果分别是 16.9%、18.6%、51.49%。

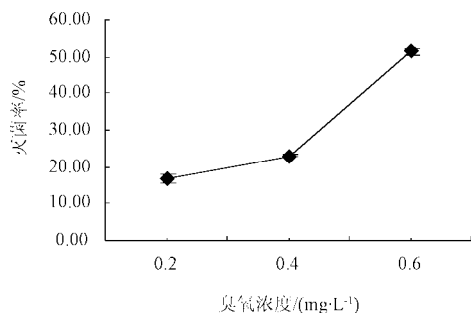


图 5 臭氧灭菌率

Fig.5 Disinfection rate of ozone

与紫外线灭菌率所形成的直线不同, 臭氧灭菌率呈曲线且曲线的斜率逐渐增大。这说明随着营养液中臭氧

浓度的提高, 其对微生物的灭菌率也相应增加。这是因为臭氧灭菌效果受臭氧浓度和接触时间的共同影响, 灭菌率会随着营养液中臭氧浓度的提高而升高; 另外, 营养液除了微生物体还存在其它具有还原性的物质, 如植物根系分泌物以及植物残体脱落物等, 这些物质的氧化会消耗一定的臭氧, 从而使得低浓度时臭氧灭菌率不高。

#### 3.2.3 UV+ $\text{O}_3$ 组合的灭菌效果

由图 6 可以看出, 整机流量控制在 11.2  $\text{m}^3/\text{h}$  时, 关闭紫外灯单独采用臭氧对菌液消毒, 灭菌率为 15.9%; 关闭臭氧仅采用紫外线消毒, 灭菌率是 70.6%; 采用臭氧和紫外线组合, 灭菌率可达 89.9%。

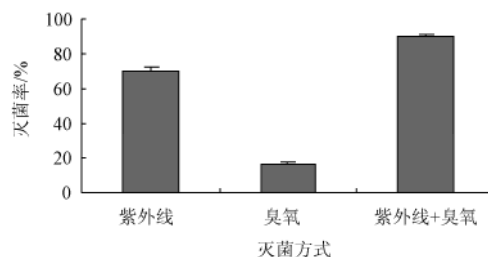


图 6 紫外线与臭氧组合的灭菌率

Fig.6 Disinfection rate of UV+ $\text{O}_3$

还可以看出, 3 种不同灭菌方法之间存在显著地差异, 且组合式灭菌体现了杀菌的协同作用: 组合式消毒灭菌率也略大于臭氧灭菌率和紫外线灭菌率之和。说明臭氧与紫外组合不是消毒方式的简单叠加, 出现了协同灭菌效应。

紫外线照射与臭氧的协同灭菌作用主要有两方面的原因: 臭氧与有机物分子反应需要活化能, 紫外线的照射提高了有机物分子能量, 使活化分子比例增多, 从而使有机物更容易在臭氧的氧化下分解; 另外, 水中溶解的臭氧在紫外线照射下能够生成反应活性更高的羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ ), 进而加速了水中有机物的去除速率<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

1) 设计并试制了一种紫外线—臭氧组合式营养液消毒机。样机主要包括紫外线消毒器、4 个文丘里射流器、臭氧发生器、自吸泵、ABS 管路及自动控制设备等。工作时, 灌溉后回收的营养液首先由自吸泵提高压力后以一定流量和速度通过文丘里射流器的喉管, 在此由臭氧发生器产生的臭氧由于负压作用吸入并与营养液充分混合, 从而杀灭营养液中的病原微生物; 然后营养液再经过紫外线消毒器, 在紫外线的照射下进一步杀灭病原微生物。

2) 对所研制的紫外线—臭氧组合式消毒机, 用经过了 180 d 番茄栽培试验的营养液进行 UV、 $\text{O}_3$ 、UV+ $\text{O}_3$  3 种方法的灭菌性能测试, 结果表明: 主要病原体 (真菌、细菌和放线菌) 总的消毒效果分别达到 70.6%、15.9% 和 89.9%, 从中可以看出, 紫外线—臭氧组合式消毒, 其消毒效果并非紫外线与臭氧消毒效果的简单叠加, 而是出现了协同灭菌效应。

3) 当营养液的紫外线穿透率较高时, 紫外线较臭氧的灭菌效果更好, 短时间的灭菌率高出 3~4 倍, 臭

氧此时只起辅助灭菌作用,这也是由于臭氧灭菌所需的时间较长、浓度较高;同时臭氧发生器的产生臭氧气体还易受到环境因素的影响。实际中,在保证生产需要的前提下,应尽量减小整机的营养液流量,以延长营养液在紫外线消毒腔体中的存留时间,从而提高整体灭菌效果。

4) 试验证明,本机达到了比单一灭菌方法更好的灭菌效果,可以较大幅度地提高消毒效率,满足了生产实际的需要;另外,对于栽培面积  $667 \text{ m}^2$  的水培系统,营养液循环量一般为  $40\sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,循环次数  $4\sim 6$  次/d。营养液的消毒是在两次灌溉之间的间隙进行,由此,每次消毒的时间为  $4\sim 6 \text{ h}$ ,消毒机需要处理的营养液量通常为  $12\sim 18 \text{ m}^3/\text{h}$ ,因此,本机可用于栽培面积为  $667 \text{ m}^2$ 、营养液处理量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  的水培系统。

#### [参 考 文 献]

- [1] Amsing J J. Spread and development of *Pratylenchus vulnus* populations: ebb and flow ideal for attacks by root nematodes[J]. Vakblad voor de Bloemisterij, 1990, 45: 34—37
- [2] 刘向辉, 宋卫堂, 周立刚, 等. 循环营养液的物理消毒[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 273—278.  
Liu Xianghui, Song weitang, Zhou Ligang, et al. Disinfection of recirculation nutrient solution from soilless culture with physical methods[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(5): 273—278. (in Chinese with English abstract)
- [3] Runia W T, Serra G, Tognoni F, et al. Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems with ozone[J]. Acta Horticulturae, 1994, 361: 388—402.
- [4] Runia W T, Amsing J J. Disinfestation of nematode-infested recirculation water by ozone and activated hydrogen peroxide[J]. Proceedings of the 9th International Congress on Soilless Culture, 1996: 381—393.
- [5] 喻景权, 驹田旦. 臭氧对培养液中两种植物病原菌的杀菌效果[J]. 园艺学报, 1998, 25: 96—98.  
Yu Jingquan, Komada Hajimu. Effects of ozonation on phytopathogens in nutrient solution for soilless culture[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998, 25: 96—98. (in Chinese with English abstract)
- [6] 徐燕, 赵春燕, 孙军德. 臭氧对无土栽培营养液的消毒作用研究[J]. 微生物学杂志, 2004, 6: 60—61.  
Xu Yan, Zhao Chunyan, Sun Junde. Sterilization of nutritive solution for soilless cultivation by ozone[J]. Journal of Microbiology, 2004, 6: 60—61. (in Chinese with English abstract)
- [7] 宋卫堂, 孙广明, 刘芬, 等. 臭氧杀灭循环营养液中三种根传病原菌的试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 189—193.  
Song Weitang, Sun Guangming, Liu Fen, et al. Ozone disinfection of three soilborne pathogens in nutrient solution[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 189—193. (in Chinese with English abstract)
- [8] Runia W T. Elimination of root-infecting pathogens in recirculation water from closed cultivation systems by ultra-violet radiation[J]. Acta Horticulturae, 1994, 361: 361—371.
- [9] 刘向辉, 刘芬, 周立刚, 等. 紫外线杀灭营养液中黄瓜枯萎病病菌的试验[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 268—271.  
Liu Xianghui, Liu Fen, Zhou Ligang, et al. UV disinfection of *Fusarium oxysporum f.sp. cucumerinum* in drain water from closed system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3): 268—271. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李国景, Benoit F, Ceustermans N. 循环式水培系统营养液处理方式对生菜防病增产的效应[J]. 中国蔬菜, 2001, 5: 13—16.  
Li Guojing, F. Benoit, N. Ceustermans. Studies on the effect of different nutrient solution treatments on disease controlling and yield improving of lettuce in NFT system[J]. China Vegetables, 2001, 5: 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [11] Os EA van, Wohanka W, Bruins MA, et al. Disinfection of recirculating nutrient solution[J]. Informatore Fitopatologico, 2003, 53(3): 30—34.
- [12] 黑田克利. 养液栽培の培养液杀菌システムの开发[J]. 农耕と园艺, 1995, 2: 83—85.  
Katsutoshi Kuroda. Development of nutrient cultivation of sterilization device[J]. Horticultural farming, 1995, 2: 83—85. (in Japanese with English abstract)
- [13] Os EA van, Bruins MA, Buuren J van, et al. Physical and chemical measurements in slow sand filters to disinfect recirculating nutrient solutions[J]. Proceedings of the 9th International Congress on Soilless Culture, 1996: 313—327.
- [14] 莫君毅. 紫外线消毒腔辐射剂量的数值模拟及改进[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
Mo Junyi. Numerical Simulation of the Ultra-Violet Reactor's Radiation Dose and Reactor's Improvement[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋卫堂, 张树阁, 刘芬, 等. 回流搅拌式紫外线消毒器[P]. ZL200520018005.3, 2006.
- [16] 宋卫堂, 王成, 徐志豪, 等. 一种紫外线臭氧组合式消毒设备[P]. ZL200820233614.4, 2009.
- [17] 宋卫堂, 周立刚, 谢光辉, 等. 湍流式紫外线杀菌消毒装置[P]. ZL200420005831.X, 2005.
- [18] 刘芬, 宋卫堂, 赵士铎, 等. 水中臭氧浓度的检测及三种液体中臭氧的稳定性[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 125—128.  
Liu Fen, Song Weitang, Zhao Shiduo, et al. Measurement of ozone concentration in water and stability of ozone in three liquids[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(supp): 125—128. (in Chinese with English abstract)
- [19] Glaze W H, Kang J W, Chapin D H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation[J]. Ozone Science Engineering, 1987, 9: 335—340.

## Development and test of nutrient solution disinfection machine by combining UV with ozone

Song Weitang<sup>1</sup>, Wang Cheng<sup>2</sup>, Hou Wenlong<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In order to make full use of superiority of ultraviolet radiation (UV) and ozone (O<sub>3</sub>), to disinfect nutrient solution in a closed soilless cultivation system, a kind of ultraviolet-ozone combined-type nutrient disinfection machine was designed, tested and inspected. Prototype mainly included a UV sterilizer, four Venturi jet devices, an ozone generator, a self-suction pump, a ABS piping and automatic control equipment, etc. In operation, the collected nutrient solution after irrigation was pumped firstly through the connected parallel Venturi throat and mixed with ozone which produced by ozone generator to inhibit microbial pathogens by oxidation. Then it passed through the ultraviolet disinfectant where UV light radiation killed the pathogens further. The disinfection rate could be increased compared with UV or O<sub>3</sub> alone. A commercial prototype was manufactured and its performance was tested by disinfecting nutrient solution from tomato hydroponics, which was used for over 180 days continuously. The main pathogens such as bacteria and fungi in the nutrient solution were sterilized by UV, O<sub>3</sub> and UV+O<sub>3</sub> separately, and disinfection rates were detected. The total disinfection rates of three methods were 70.6%, 15.9% and 89.9%, respectively. It was inferred that the method of ultraviolet-ozone combined-type nutrient disinfection can reach better sterilization effects than single ones, and can improve disinfection efficiency greatly with a synergy effect.

**Key words:** disinfection, design, experiments, combining UV with ozone, nutrient solution, disinfection rate