

引用格式:

谷明先, 曾百功, 郝林杰, 黎奎良, 石耀华, 叶进. 叶菜定植盘清洗装置扇形喷嘴清洗参数的优化与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 598–602.

GU M X, ZENG B G, HAO L J, LI K L, SHI Y H, YE J. Optimization and test of cleaning parameters of fan-shaped nozzle in cleaning device for leafy vegetable planting tray[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(5): 598–602.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 叶菜定植盘清洗装置扇形喷嘴清洗参数的优化与试验

谷明先<sup>1</sup>, 曾百功<sup>1,2\*</sup>, 郝林杰<sup>1</sup>, 黎奎良<sup>1</sup>, 石耀华<sup>1</sup>, 叶进<sup>1</sup>

(1.西南大学工程技术学院, 重庆 400716; 2.重庆三峡学院机械工程学院, 重庆 404100)

**摘 要:** 针对叶菜定植盘残留基质、叶菜碎屑的问题, 设计了一款工厂化叶菜定植盘清洗装置。该装置主要由机架、清洗组件、刮渣组件、防水组件等构成。工作时, 定植盘由输送线送入清洗装置中, 刮渣组件去除定植盘上较大块残留物, 清洗组件去除基质、叶菜碎屑等。选用 6530 型不锈钢扇形喷嘴, 以靶距和冲击角为试验因素, 清洗面积占比为评价指标, 进行单因子试验和二元二次回归正交组合试验。优化后的清洗参数为: 扇形喷嘴出口孔径 3.5 mm、水射流锥角 65°、水射流靶距 45 mm、水射流冲击角 5°, 清洗面积占比最大可达 97.45%。经清洗试验验证, 清洗面积占比均值为 94.70%, 可满足工厂化叶菜定植盘的清洗要求。

**关 键 词:** 叶菜定植盘; 清洗装置; 扇形喷嘴; 水射流清洗; 参数优化

中图分类号: S223.94

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)05-0598-05

## Optimization and test of cleaning parameters of fan-shaped nozzle in cleaning device for leafy vegetable planting tray

GU Mingxian<sup>1</sup>, ZENG Baigong<sup>1,2\*</sup>, HAO Linjie<sup>1</sup>, LI Kuiliang<sup>1</sup>, SHI Yaohua<sup>1</sup>, YE Jin<sup>1</sup>

(1.College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

**Abstract:** Base on the problem of residual matrix, leafy vegetable clastic and other dirt, a cleaning device of the planting tray was designed for industrialized leafy vegetable. The device is mainly composed of the frame, the cleaning component, the scraping component, the waterproof component and other components. The planting tray was sent horizontally into the cleaning device by the conveyor line during working process, and then the large residues on the planting tray were removed by the scraping component. The particles such as matrix, leaf vegetable clastic and sticky filth were removed by the cleaning component. The 6530 fan-shaped nozzle which made of stainless steel was selected. The single factor tests and binary quadratic regression orthogonal combination test were conducted by taking the target distance and impact angle as the test factors, and the proportion of cleaning area as the index. The optimal parameters combination were obtained that the outlet aperture of fan-shaped nozzle was 3.5 mm, the cone angle of water jet was 65°, the target distance of water jet was 45 mm, the impact angle of water jet was 5°, and the maximum cleaning area ratio was 97.45%. The average value of cleaning area ratio was verified to be 94.7% by the cleaning test of cleaning device for leafy vegetable planting tray, which met the cleaning requirements of industrialized leafy vegetable planting tray.

收稿日期: 2020-07-04

修回日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601210); 重庆市科技局项目(cstc2018jszx-cyzdx0045); 重庆三峡学院人工智能+智慧农业学科群开放基金项目(ZNNYKFA201904)

作者简介: 谷明先(1997—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事农业机械产品设计研究, 862801354@qq.com; \*通信作者, 曾百功, 博士, 副教授, 主要从事农业机械仿生理论与技术研究, zbg77@swu.edu.cn

**Keywords:** leafy vegetable planting tray; cleaning device; fan-shaped nozzle; water jet cleaning; parameters optimization

工厂化叶菜生产过程中,定植盘与基质、残叶粘连,易滋生微生物、苔藓等,影响叶菜工厂化生产效率,需要对定植盘实施清洗作业,以减少污染,实现定植盘重复利用,降低生产成本。李恺等<sup>[1]</sup>设计的育苗穴盘清洗机,使穴盘侧立穿行,通过高压喷射、清水冲洗管路形成的隧道完成清洗。荷兰 Visser 公司<sup>[2]</sup>推出在线式水压冲洗设备,可对园艺穴盘实施隧道式侧立输送式清洗、硬质托盘实施隧道式水平输送式清洗。中国国家农业智能装备工程技术研究中心研制的穴盘清洗机<sup>[3]</sup>,采用清水浸泡、水压冲洗的清洗工艺,传送系统扶持穴盘侧立通过清洗隧道进行清洗。禹振军等<sup>[4]</sup>研制的隧道式穴盘清洗机,通过多个扇形喷嘴实施上、下、左、右 4 个方向的清洗作业。符德龙等<sup>[5]</sup>设计的烤烟育苗盘清洗机,采用高压清洗技术,结合喷头冲洗和滚刷刷洗,完成对育苗盘正反面的清洗。这些清洗装置均采用输送线输送穴盘、水射流清洗的方式,与工厂化叶菜定植盘清洗装置有相似性。

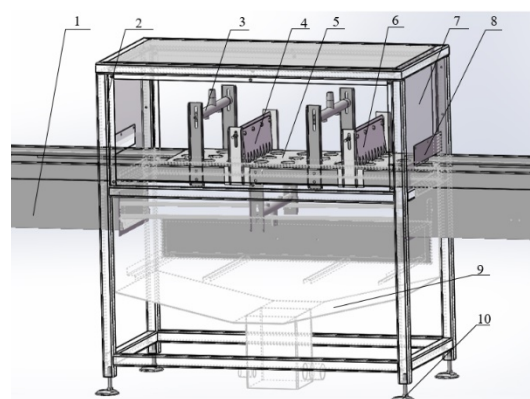
笔者针对叶菜定植盘沾染残留基质、叶菜碎屑等问题,设计了一款工厂化叶菜定植盘清洗装置。清洗装置工作时,定植盘被水平输送至清洗装置中,在清洗组件与刮渣组件作用下完成定植盘的清洗。通过台架清洗试验,以扇形喷嘴出口孔径、水射流锥角、靶距及冲击角作为试验因素,以清洗面积占比为评价指标,对扇形喷嘴清洗参数进行了优化;并对试制的工厂化叶菜定植盘清洗装置进行了试验验证。现将结果报告如下。

## 1 工厂化叶菜定植盘清洗装置的结构及工作原理

工厂化叶菜定植盘清洗装置结构如图 1 所示。主要由机架、清洗组件、刮渣组件、防水罩、集水罩、防水帘、调节底座等组成。

清洗作业时,定植盘由输送线水平输送至防水帘前方,触发光电传感器,控制程序开始执行清洗作业工序。水路控制电磁阀开启,清洗水泵动作,清洗系统开始作业。刮渣组件去除定植盘上叶菜残渣、枯枝败叶等残留物;清洗组件去除基质、叶菜碎屑等。光电传感器监测无定植盘输送进入清洗工

序后,延时关闭清洗作业工序。



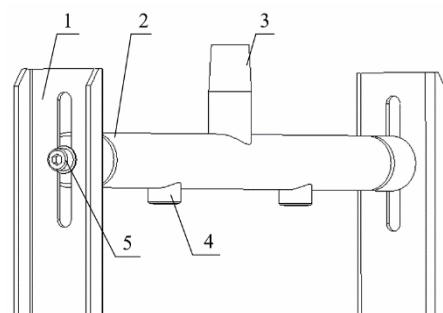
1 输送线;2 机架;3 清洗组件;4 I 型刮渣组件;5 定植盘;6 II 型刮渣组件;7 防水罩;8 防水帘;9 集水罩;10 调节底座。

图 1 工厂化叶菜定植盘清洗装置的结构

Fig.1 Structure of cleaning device for industrialized leafy vegetable planting tray

## 2 清洗装置扇形喷嘴清洗参数的确定

清洗组件是叶菜定植盘清洗装置的关键工作部件,结构如图 2 所示,主要由固定板、圆柱形清洗管路、进水管、扇形喷嘴和张紧螺栓组成。



1 固定板;2 圆柱形清洗管路;3 进水管;4 扇形喷嘴;5 张紧螺栓。

图 2 清洗组件的结构

Fig.2 Structure of cleaning components

由于扇形喷嘴产生的水射流平坦均匀、致密性好、清洗面积大、清洗能力强,且结构简单、维护方便,较适合工厂化叶菜定植盘清洗装置<sup>[6-7]</sup>,因而清洗组件中的喷嘴选用扇形喷嘴。作业时,清洗水泵泵出的高压水经进水管压入圆柱形清洗管路后,通过扇形喷嘴的微孔孔径喷出高速水射流,冲击定植盘表面,对叶菜定植盘进行冲洗。

## 2.1 扇形喷嘴清洗面积的表征

由于定植盘上所黏附的污物具有与润滑脂相似的特性,即在常温下黏附物体表面不易滑动,拟通过对润滑脂的清洗效果来表征喷嘴水射流的清洗能力。根据清洗预试验情况,选定垫片厚度为 1.8 mm,在洁净的定植盘表面均匀涂制 1.8 mm 的蓝色润滑脂,完成定植盘清洗涂层的制备。借助 ImageJ 图像处理软件完成涂层被冲洗区域的照片比例尺标定、照片大小截取、冲洗区域边界确定、清洗区域面积值的获取。

引入清洗面积占比,为清洗试验提供可量化的指标。通过采集清洗区域图像、绘制清洗面积轮廓、计算得到的面积为清洗面积  $S_1$ 。图 3-a 为清洗区域采集的图像,图 3-b 为从图像中提取的涂层的清洗面积,即红色区域面积,图 3-c 为借助软件绘制出清洗面积轮廓、计算得到的清洗面积。采用相同方法计算水射流接触的面积为准清洗面积  $S_2$ ,则清洗面积占比  $\eta=(S_1/S_2) \times 100\%$ 。

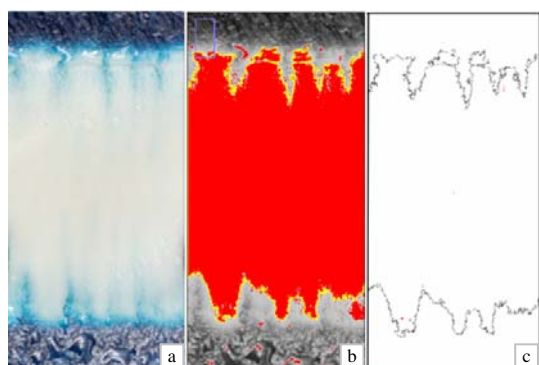


图 3 清洗面积的获取

Fig.3 Acquisition of cleaning area

## 2.2 扇形喷嘴清洗参数的确定

通过制备清洗涂层,选用 6530 型扇形喷嘴,分析扇形喷嘴出口孔径、水射流锥角、水射流靶距和水射流冲击角,并测量计算清洗面积占比,对清洗能力的影响进行定量评价<sup>[8-11]</sup>。

基础试验表明:扇形喷嘴出口孔径为 3.5 mm,水射流锥角为 65°时,清洗面积占比达到最大值,清洗效果较佳。

1) 水射流靶距对清洗面积的影响。水射流从喷嘴喷出后,开始与环境介质进行质量与动量的交换,在不断传播和扩散过程中,工作流体的致密状

态、流速发生改变,形成水射流结构<sup>[12-13]</sup>。由于水射流结构随着靶距的变化而发生改变,水射流靶面冲击压强也随之改变,进而表现在清洗面积的改变。当扇形喷嘴出口孔径为 3.5 mm、水射流锥角为 65°、水射流冲击角为 0°时,分别设置水射流靶距 20、30、40、50、60 mm,进行清洗试验,计算不同水射流靶距下的清洗面积占比。不同水射流靶距对应清洗面积及其占比列于表 1。结果表明,当靶距为 20~30 mm 时,随着靶距的增大,清洗面积占比增大;当靶距增至 60 mm 时,清洗面积占比随着靶距的增加反而减小。一方面,随着靶距的增加,水射流逐渐发散,靶面受到的打击力随着水射流距离增大而不断变小,清洗面积开始变小;另一方面,水射流是呈一定角度的扇面,靶距变小,靶面受到的打击力虽变大,但水射流作用面积受几何关系限制变小,清洗面积变小;因此,选择水射流靶距 20~50 mm 为宜。

表 1 不同水射流靶距的清洗面积及其占比

Table 1 The cleaning area and its proportion under different water jet target distance

试验号	靶距/mm	清洗面积/mm <sup>2</sup>	清洗面积占比/%
1	20	1448.25	55.46
2	30	1852.49	70.95
3	40	1673.60	63.00
4	50	1746.82	59.45
5	60	1096.13	44.84

2) 水射流冲击角对清洗面积的影响。水射流冲击角是指射流方向线与靶面法线的夹角。根据动量守恒定律,冲击角的改变会引起靶面打击力与剪切力的相应变化,进而表现在清洗面积的改变。当扇形喷嘴出口孔径为 3.5 mm、水射流锥角为 65°、靶距为 40 mm 时,分别设置水射流冲击角 0°、10°、20°、30°、40°,进行冲洗试验,计算不同水射流冲击角下的清洗面积占比。不同水射流冲击角对应清洗面积及其占比列于表 2。结果表明,当冲击角在 0~30°时,随着冲击角角度的扩大,清洗面积占比波动。当冲击角角度大于 30°后,清洗面积占比迅速下降。分析对比冲击角角度为 20°和 40°的清洗结果,冲击角过大会导致清洗效果变差,这是由于水射流对靶面法线方向的打击力过小造成的,故选择水射流冲击角角度 0~30°为宜。

表 2 不同水射流冲击角的清洗面积及其占比

Table 2 The cleaning area and its proportion of different water jet impact angle			
试验号	冲击角角度 /(°)	清洗面积 /mm <sup>2</sup>	清洗面积 占比/%
1	0	1673.60	63.00
2	10	1932.73	81.04
3	20	1961.39	73.93
4	30	2102.37	81.35
5	40	1854.93	6.24

3) 清洗参数正交试验寻优。根据水射流清洗理论,靶距影响靶面打击力与水射流作用面积,冲击角影响靶面冲击压强和剪切力的分配,以及水射流作用面积。可见,靶面冲击压强分布、靶面剪切力分布、水射流作用面积均对清洗面积影响较大,因此,以水射流靶距( $z_1$ )和冲击角角度( $z_2$ )为试验因子,以清洗面积占比为评价指标,设计二元二次回归正交组合试验<sup>[14-15]</sup>,清洗试验因子水平及其编码如表 3 所示。

表 3 清洗试验因子水平及其编码

Table 3 Cleaning test factor levels and codings		
$X_j(z_j)$	靶距 $z_1$ /mm	冲击角角度 $z_2$ /(°)
$r(z_2)$	50	30
$1(z_0+\triangle j)$	47	27
$0(z_0)$	35	15
$-1(z_0-\triangle j)$	23	3
$-r(z_1)$	20	0

将扇形喷嘴出口孔径设置为 3.5 mm、水射流锥角设置为 65°,二元二次回归正交试验的清洗面积及其占比列于表 4。

表 4 二元二次回归正交组合试验的清洗面积及其占比

Table 4 The cleaning area and its proportion of binary quadratic regression orthogonal combination test				
试验号	靶距/mm	冲击角 角度/(°)	清洗面积/ mm <sup>2</sup>	清洗面积 占比/%
1	47	27	1866.70	82.61
2	47	3	2169.03	97.07
3	23	27	1855.45	78.87
4	23	3	1531.07	68.87
5	50	15	2073.98	93.12
6	20	15	1401.74	70.30
7	35	30	1557.38	85.16
8	35	0	1752.87	89.92
9	35	15	1800.78	95.04
10	35	15	1810.58	95.22
11	35	15	1927.57	92.48
12	35	15	1989.60	93.43

根据计算结果,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$  的  $P < 0.05$ , 代表各项因子影响显著,对响应的影响大,应在回归方程中保留。

回归方程显著性检验结果  $F$  为 117.77,  $P < 0.000 1$ , 可以认为此回归方程特别显著的概率为 99%。

试验结果分析列于表 5。

表 5 二元二次回归正交组合试验分析结果

Table 5 The analysis result of orthogonal combination design of binary quadratic regression				
来源	平方和	自由度	$F$	$P$
模型	0.103 6	5	117.77	< 0.000 1
$X_1$	0.051 2	1	290.86	< 0.000 1
$X_2$	0.001 5	1	8.58	0.026 3
$X_1X_2$	0.015 0	1	84.97	< 0.000 1
$X_1^2$	0.028 5	1	161.98	< 0.000 1
$X_2^2$	0.007 5	1	42.47	0.000 6

$F$  是统计值;  $P$  是显著性值。

回归方程拟合性检验结果  $F$  为 1.03,  $P = 0.491 5$ , 证明回归方程拟合性好,回归分析残差的正态图如图 4 所示,图中散点连线接近直线,说明回归模型拟合好。

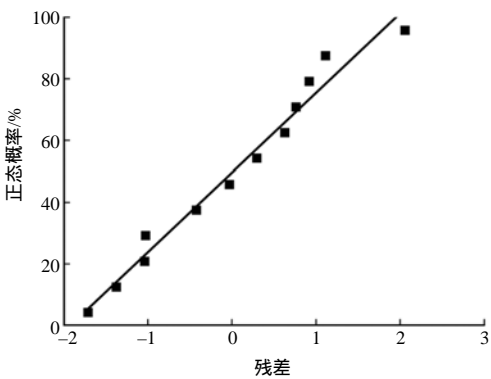


图 4 回归分析残差的正态概率分布

Fig.4 Normal probability distribution of the residuals

对试验结果分析,各项回归系数均影响显著,即靶距、冲击角角度及其交互作用对清洗面积占比影响显著,得到清洗面积占比对各因素的回归方程:

$$y = 0.94 + 0.086z_1 - 0.015z_2 - 0.061z_1z_2 - 0.082z_1^2 - 0.042z_2^2。$$

以清洗面积占比最大值为优化目标,寻找各因子的最优组合,靶距为 45 mm,冲击角为 5°,清洗面积占比最大值为 97.45%。

扇形喷嘴清洗参数的最优组合是:扇形喷嘴出口孔径为 3.5 mm,水射流锥角角度为 65°,水射流靶距为 45 mm,水射流冲击角角度为 5°。

### 3 试验验证

为了验证工厂化叶菜定植盘清洗装置的清洗能力,在重庆市农业工程研究所植物工厂试制了工厂化叶菜定植盘清洗装置,对工厂化叶菜定植盘清洗装置作业效果进行试验验证。

将扇形喷嘴清洗参数设置为最优组合参数,即扇形喷嘴出口孔径为 3.5 mm,水射流锥角角度为 65°,水射流靶距为 45 mm,水射流冲击角角度为 5°。为了消除随机误差,重复进行了 5 次试验验证。通过对试验结果的测量和计算,清洗面积占比均值为 94.70%。最优值与试验验证结果吻合度较好,表明工厂化叶菜定植盘清洗装置的清洗效果可满足生产的使用需求。

#### 参考文献:

- [1] 李恺,尹义蕾,侯永.育苗穴盘清洗消毒装置的设计[J].农业工程技术,2019,39(31):10-12.  
LI K, YIN Y L, HOU Y. Design and test of auto vertical washing device for seedling tray[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019, 39(31): 10-12.
- [2] Visser. Washing, Industry washing [EB/OL]. [2019-08-22]. <https://www.visser.eu/washing/>.
- [3] 高原源,王秀,舒象兴,等.育苗穴盘自动清洗装置的设计[J].农机化研究,2017,39(1):63-67.  
GAO Y Y, WANG X, SHU X X, et al. Design of auto-washing device for seedling tray[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 63-67.
- [4] 禹振军,刘建福.SDQXJ-I型隧道式穴盘清洗机清洗系统设计[J].农业工程,2013,3(增刊2):37-39.  
YU Z J, LIU J F. Design of cleaning system for SDQXJ-I type tunnel tray cleaning machine[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(S2): 37-39.
- [5] 符德龙,袁奎,张富贵,等.烤烟育苗盘双面清洗机设计与试验[J].中国农机化学报,2017,38(4):33-36.  
FU D L, YUAN K, ZHANG F G, et al. Design and experimental research on double-side cleaning machine for flue-cured tobacco float tray[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(4): 33-36.
- [6] 林翔.扇形喷嘴的高压射流特性研究[D].成都:西南交通大学,2014.  
LIN X. Study of high-pressure jet characteristic of fan-shaped nozzle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] 董鹏,孙立源,梁创记.高压水清洗喷嘴、喷头的选用[J].清洗世界,2013,29(3):6-10.  
DONG P, SUN L Y, LIANG C J. Nozzles, selection of high pressure water cleaning[J]. Cleaning World, 2013, 29(3): 6-10.
- [8] 梁博健,高殿荣.高压扇形喷嘴结构参数的优化[J].排灌机械工程学报,2020,38(1):69-75.  
LIANG B J, GAO D R. Optimization of structural parameters of fan-shaped high-pressure nozzle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 69-75.
- [9] 邢熙权.汽车罐车高压水射流清洗技术研究[D].无锡:江南大学,2019.  
XING X Q. Research on high pressure water jet cleaning technology for tank truck[D]. Wuxi, China: Jiangnan University, 2019.
- [10] 周梅.基于高压水射流技术的聚合釜清洗装置设计与实验研究[D].北京:北京石油化工学院,2019.  
ZHOU M. Equipment cleaning polymerization kettle design and experimental based on high pressure water jet technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2019.
- [11] 王启博,宁大勇,侯交叉,等.超高压水射流盘式清洗装置工作效率试验研究[J].液压与气动,2019(3):19-25.  
WANG Q B, NING D Y, HOU J Y, et al. Experimental study on working efficiency of super high pressure water jet disc leaning device[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(3): 19-25.
- [12] 卢晓江,何迎春,赖维.高压水射流清洗技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2006.  
LU X J, HE Y C, LAI W. High Pressure Waterjet Cleaning Technology and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [13] FUCHS E, KRICK S, SCHÖHL E, et al. Effect of industrial scale stand-off distance on water jet break-up, cleaning and forces imposed on soil layers[J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 113: 129-141.
- [14] 李庆东.试验优化设计[M].重庆:西南师范大学出版社,2016.  
LI Q D. Optimum Design of Experiments[M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2016.
- [15] 冯世杰,颜波,全伟,等.基于活动苗盘的钵苗脱盘基质损失的试验研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(6):669-673.  
FENG S J, YAN B, QUAN W, et al. Experimental study on matrix loss in the process of pot seedling detaching from the movable tray[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(6): 669-673.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立