

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.04.035

陶丽欢, 刘元义, 毕玉亮, 等. 基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 244-249, 265

Tao Lihuan, Liu Yuanyi, Bi Yuliang, et al. Design and test of rotary tillage soil disinfection machine based on ozone sterilization technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 244-249, 265

# 基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机设计与试验\*

陶丽欢<sup>1</sup>, 刘元义<sup>1</sup>, 毕玉亮<sup>2</sup>, 李新澳<sup>1</sup>, 王丽娟<sup>1</sup>, 张策<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博, 255000;

2. 潍坊鑫耐尔农业机械有限公司, 山东淄博, 255000)

**摘要:** 针对设施农业中连作引起的土壤污染、线虫增加等问题, 设计一款基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机。介绍旋耕式土壤消毒机整体结构, 对臭氧充气铲进行受力分析, 获得臭氧注入土壤的运动学条件, 确定充气铲结构参数; 以 XC2-24R-C 控制器为电路控制模块核心元件, 采用高压放电法制取臭氧, 实现臭氧发生器正常运行; 利用 SolidWorks 软件构建整机结构模型, 进行样机研制与试验。以根结线虫为试验对象, 相同的试验条件下, 常规耕整 1 次的线虫消退率为 2.96%, 臭氧消毒处理后根结线虫消退率和防治效率最高可达 84.93% 和 84.47%, 较常规耕作线虫消退率提高 81.97%。

**关键词:** 设施农业; 土壤消毒机; 臭氧消毒; 臭氧充气铲; 根结线虫

中图分类号: S224.3 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 04-0237-07

## Design and test of rotary tillage soil disinfection machine based on ozone sterilization technology

Tao Lihuan<sup>1</sup>, Liu Yuanyi<sup>1</sup>, Bi Yuliang<sup>2</sup>, Li Xin'ao<sup>1</sup>, Wang Lijuan<sup>1</sup>, Zhang Ce<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, 255000, China;

2. Weifang Ximmerer Agricultural Machinery Co., Ltd., Zibo, 255000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of soil pollution and increase of nematodes caused by continuous cropping in facility agriculture, a rotary tillage soil disinfection machine based on ozone technology was designed. The structural parameters of the rotary tillage soil disinfection machine was designed and calculated, the force of the ozone inflatable shovel structure under the action of motion was analyzed, the kinematic conditions for ozone injection into the soil was obtained and the structural parameters of the inflatable shovel was determined. The XC2-24R-C controller was used as the core component of the circuit control module, and the ozone was extracted by high voltage discharge method to realize the normal operation of the ozone generator. The SolidWorks software was used to build the whole machine structure model, and the prototype was developed and tested. Using the root-knot nematodes as a test, under the same experimental conditions, the nematode regression rate of conventional tillage was 2.96%, and the maximum nematode regression rate and control efficiency of root-knot nematode were 84.93% and 84.47% after ozone disinfection, which was 81.97% higher than that of conventional tillage.

**Keywords:** facility agriculture; soil disinfection machine; ozone disinfection; ozone inflatable shovel; root-knot nematode

## 0 引言

我国设施农业发展迅速, 由于温室作物轮作、重茬种植, 导致土壤中病菌积累、理化性能失衡, 进一步加剧土传病害的传播。引起土传病害的病原生物种类很

多, 包括真菌、细菌、线虫和病毒等<sup>[1, 2]</sup>。根结线虫为多食性寄生虫, 可寄生植物超过 5 500 种, 侵染作物根部<sup>[3]</sup>, 降低作物产量, 严重影响农户经济效益。因此, 土壤消毒是设施农业中尤为重要的环节。

目前土壤消毒技术主要包括生物熏蒸消毒、化学

收稿日期: 2022 年 8 月 31 日 修回日期: 2022 年 11 月 25 日

\* 基金项目: 山东省农机装备研发创新项目 (2018YF005)

第一作者: 陶丽欢, 女, 1996 年生, 广西桂林人, 硕士研究生; 研究方向为智能农机设计制造。E-mail: 3288406105@qq.com

通讯作者: 刘元义, 男, 1963 年生, 山东临沂人, 博士, 教授; 研究方向为智能农机设计制造。E-mail: liuyy@sdu.edu.cn

消毒及物理消毒<sup>[4]</sup>。Sabry等<sup>[5]</sup>介绍一种新型微波消毒沙土的方式,试验表明新型微波施药器深度每超过5 cm将依次递增20℃,土传病害消杀效果良好;Mitsugif<sup>[6]</sup>采用等离子体消杀土壤病原和害虫的方法,并研制出一种臭氧扩散处理系统应用于当地农场;袁也等<sup>[7]</sup>研究表明臭氧可降解土壤中主要的皂苷类自毒物质,抑制茄腐镰刀菌和柱孢菌;姜楠等<sup>[8]</sup>研究表明臭氧处理后可抑制互隔交链孢产生TeA、AOH、AME这3种交链孢毒素,它们的含量比对照组分别减少36.1%、89.9%、93.2%。张学进等<sup>[9]</sup>设计了土壤射频消毒系统,土壤温度在射频发生器加热18 min后可达到61.7℃,有效消灭土壤中的病原菌和线虫,但射频消毒温度不高且无法保温,消杀效果有待加强;孙龙霞等<sup>[10]</sup>设计自走式精旋土壤火焰杀虫机,火焰喷射器与旋耕滚筒同步工作,旋耕滚筒将土壤粉碎并放入罩壳内,1 000℃高温火焰穿透破碎土层,可瞬间杀灭线虫及虫卵,但高温会抑制部分有益微生物活性。

现有的土壤消毒机和消毒方法可以有效地灭杀土壤中的病菌和虫害,但是仍然存在土壤消毒效果不彻底的问题。本文针对土壤污染及线虫危害土壤问题,基于旋耕动力学特性和臭氧(O<sub>3</sub>)强氧化性,设计一种基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机,采用臭氧发生器横卧在旋耕机后上方的结构布局,以XC2-24R-C控制器为核心的电路控制模块,将开关电源转化成高压,促使臭氧发生器高压电离出臭氧;根据土壤物理特性,计算臭氧充气铲参数,对土壤进行消毒试验。

## 1 整机结构和工作原理

### 1.1 整机结构

旋耕式土壤消毒机以拖拉机、旋耕机为主要框架,连接、焊接各标准件组装成整机,实现整体模块化设计,同时完成土壤消毒和旋耕土壤作业。土壤消毒机主要由拖拉机、旋耕机、发电机、液氧罐、臭氧发生器、臭氧充气铲、水箱、散热器、排气扇组成,结构如图1所示。

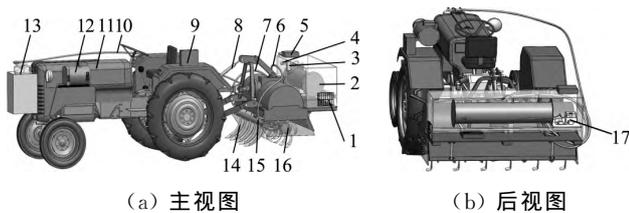


图1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the whole machine structure

1. 排气扇 2. 臭氧发生器 3. 水箱 4. 警示灯 5. 散热器
6. 臭氧输出管(2) 7. 臭氧输出管(1) 8. 悬挂机构 9. 稳压模块
10. 液氧输出管 11. 拖拉机 12. 发电机 13. 液氧罐
14. 臭氧长管 15. 臭氧充气铲 16. 旋耕机 17. 线路板

### 1.2 工作原理

拖拉机侧挂AC220V发电机,PLC控制臭氧发生器工作和警报功能,并提供拖拉机稳定电压。PLC控制220V电压经转换线圈输出高压供臭氧发生器正常工作;设置一套安全保护装置,配置可视性警示灯,若臭氧浓度超过设定值,控制继电器自动开启警示灯;集成稳压芯片LM2596将24V开关电源降压至12V供拖拉机行驶。液氧罐输送液氧至发生器,液氧经高压电解输出臭氧,由输送管道传至臭氧充气铲。拖拉机牵引机具向前作业时,三点悬挂机构将旋耕机与配套拖拉机连接,拖拉机输出轴动力通过万向节与中央变速箱传动轴连接,动力传递给中间齿轮传动箱从而驱动旋耕刀轴。臭氧输送管分别置于长管左右两侧,前置充气铲将臭氧注入土壤中,旋耕刀片旋切土壤,将臭氧与土壤充分接触达到消杀病原菌、害虫等有害生物。

### 1.3 主要技术参数

配置动力为40.5 kW泰鸿TH554-D拖拉机,拖拉机通过后三点悬挂牵引旋耕机工作。表1为土壤消毒机主要技术参数。

表1 主要技术参数  
Tab. 1 Primary technical parameters

参数	数值/方式
旋耕机外形尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	480×1 400×720
臭氧发生器外形尺寸(直径×长) /(mm×mm)	220×800
配套功率/kW	40
行驶速度/(km·h <sup>-1</sup> )	8~10
耕幅尺寸/m	1.3
刀片型号	265
臭氧发生率/(g·h <sup>-1</sup> )	300
发电机功率/kW	3
电压输出/V	220~250
土壤处理深度/cm	15~20
臭氧充气铲/个	5
臭氧发生器/个	1
臭氧气体源形式	高纯度液氧
臭氧发生形式	高压电离式
臭氧冷却形式	水冷密封型

## 2 关键结构设计

### 2.1 电路控制模块

土壤消毒机电路控制模块以PLC控制器为主处理核心,型号选用信捷XC2-24R-E,14路数字输入输出接口,AC100~240V供电,继电器输出,支持485通讯,具有高性能、低成本、低功耗等优点,在一定范围内满足土

壤消毒机控制臭氧浓度的要求,完成升压降压和警示灯反馈功能。电路控制模块主要由 PLC 控制器、稳压芯片、高压变压器、发电机、臭氧发生器组成,如图 2 所示。

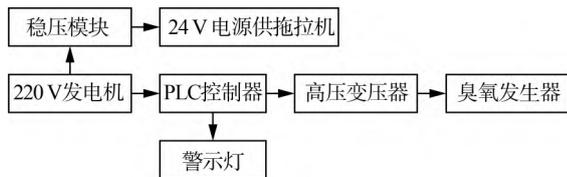


图 2 电路控制结构图

Fig. 2 Circuit control block diagram

整机控制电路如图 3 所示,接口 Y0、Y1 输出信号控制光敏二极管开启光耦 PC817 传输模拟电压或电流信号,随着输入信号强度的变化而生成相应光信号,双向可控硅三极管 BTB16-800 V 作无触点开关,形成闭环控制。220 V 电压经转换线圈输出高压传输至臭氧发生器;当浓度超过设定值时,PLC 控制继电器自动开启警示灯。XC2-24R-E 的 L、N 端口与稳压模块的 L、N 端口连接,芯片 LM2596 内含固定频率振荡器和基准稳压器,可将 24 V 开关电源降压稳定至 12 V 驱动拖拉机行驶。

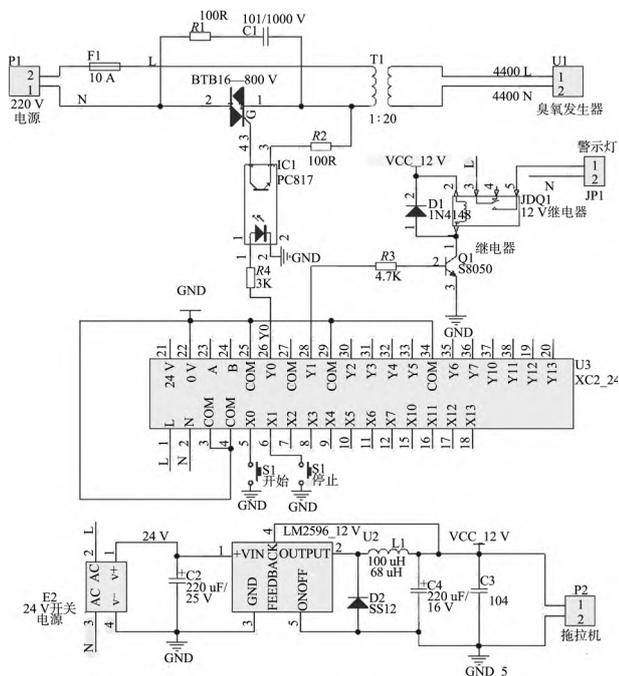


图 3 整机控制电路图

Fig. 3 Schematic of the circuit of the ozone generation control system

## 2.2 臭氧发生器

按照臭氧产生方式划分,目前臭氧发生器主要有三种:高压放电式、紫外线照射式和电解式。高压放电式臭氧发生器相比于其他两种发生器,具有产量高、工艺成熟、使用寿命长等优点<sup>[11]</sup>。因温室大棚空间结构狭小,定制一款小型高压放电式臭氧发生器,其直径结

构为间隙放电式(DBD),内置绝缘材质石英管,运用高压放电原理,采用一定频率的高压电流制造高压电晕电场,使电场内或电场周围的氧分子发生电化学反应制造出臭氧<sup>[12, 13]</sup>。臭氧发生器具有 4 个端口,上端分别是出水口、液氧输入口,下端分别是进水口、臭氧输出口。臭氧具有挥发性,输出需要快速,对此臭氧输出口具有两个小端口,如图 4 所示。电晕放电产生的热量使气体温度升高,加速臭氧逆反应,降低臭氧产量。对此,臭氧发生器内置循环水冷系统可迅速带走热量,保证臭氧产量稳定,提高工作效率<sup>[14]</sup>。

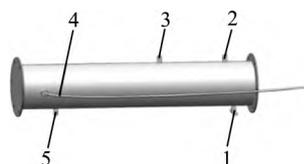


图 4 臭氧发生器结构图

Fig. 4 Structure diagram of ozone generator

1. 臭氧输出口
2. 液氧输入口
3. 出水口
4. 高压电缆线
5. 进水口

## 2.3 臭氧充气铲

### 2.3.1 臭氧充气铲结构设计

充气铲作业时,铲柄刀面对土壤施加挤压作用,使土壤发生剪切破坏。相关研究表明<sup>[15]</sup>,铲柄结构对所受耕作阻力有很大影响。为此,铲柄结构设计成弧状,将向后阻碍充气铲前进的力转化为向上运动的力,减少耕作阻力,使充气铲能更好地摩擦挤压土壤,改善充气铲容易产生的变形、断裂等现象。

充气铲整体结构设计主要参考 JB/T 9788—2020 深松铲,三维模型如图 5 所示,几何参数如表 2 所示。铲柄和铲尖材料均采用 65Mn 钢,铲尖进行热处理,增强耐磨性,臭氧充气铲整体进行耐腐蚀处理。

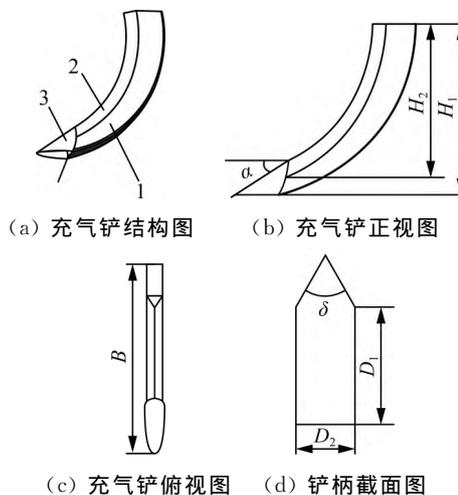


图 5 充气铲整体结构图

Fig. 5 Schematic diagram of the overall structure and geometric parameters of the inflatable shovel

1. 铲柄
2. 铲刃
3. 入土铲尖
4. 充气口

表 2 臭氧充气铲几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of ozone aerated shovel

参数	数值	参数	数值
充气铲高度 $H_1$ /mm	290	铲柄宽度 $D_2$ /mm	50
充气铲宽度 $B$ /mm	280	铲尖厚度/mm	10
铲刃高度 $H_2$ /mm	255	铲尖宽度 $A$ /mm	3
铲柄厚度 $D_1$ /mm	25		

2.3.2 臭氧充气铲铲柄的受力分析

机具作业时,土壤相对于铲柄向后运动,铲柄与土壤之间产生阻力主要为摩擦力,导致土壤受到铲柄摩擦挤压而发生破碎。在铲柄与土壤之间的摩擦力作用下,旋耕部位的土壤形成带动层,致使土壤破裂效果更好<sup>[16]</sup>。试验土壤为壤土,质地松细适中,结合农业机械设计手册,铲柄刃夹角  $\delta$  取  $60^\circ$ 。

铲柄部分进行受力分析时,通过简化受力模型,假设铲柄所受合力为  $F$ ,则合力可分解为工作面上若干个分力,受力示意图如图 6 所示。

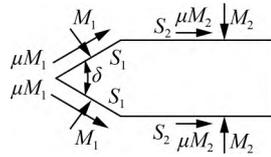


图 6 充气铲铲柄受力分析

Fig. 6 Force analysis of the pneumatic shovel handle

由图 6 可知,合力和分力的关系如式(1)所示。

$$F = 2[M_1 \sin(\delta/2) + \mu M_1 \cos(\delta/2) + \mu M_2] \quad (1)$$

式中:  $M_1$ ——铲刃上的法向力, N;

$M_2$ ——铲柄侧面法向力, N;

$\mu$ ——铲柄侧面与土壤之间的摩擦因数,取 0.6;

$\delta$ ——铲柄刃夹角,取  $\delta = 60^\circ$ 。

根据相关研究<sup>[17]</sup>可知,  $M_1$ 、 $M_2$  主要受到土壤比阻和比压的影响,因此

$$M_1 = K_1 S_1 \quad (2)$$

$$M_2 = K_2 S_2 \quad (3)$$

式中:  $K_1$ ——变形比阻, Pa;

$K_2$ ——土壤比压, Pa;

$S_1$ ——铲柄刃面积,  $m^2$ ;

$S_2$ ——铲柄侧面面积,  $m^2$ 。

$$\text{其中, } S_1 = H_2 \frac{D_2}{\sin(\delta/2)} = 0.007 \text{ m}^2, S_2 =$$

$$H_1 D_2 = 0.0145 \text{ m}^2.$$

式中:  $H_1$ ——铲体高度;

$H_2$ ——铲刃高度;

$D_1$ ——铲柄厚度;

$D_2$ ——铲柄宽度。

变形比阻和土壤比压来自土壤弹性变形与塑性变

形。按照形变理论<sup>[18]</sup>可得

$$K_1 = K_{el} + K_{pl} \quad (4)$$

式中:  $K_{el}$ ——弹性形变产生的应力,  $K_{el} = 3.2$

$$\text{N/cm}^2 \text{ [21]}, K_{el} = \frac{K_2}{\cos(\delta/2)};$$

$K_{pl}$ ——塑性形变产生的应力,  $K_{pl} = 0.67 \text{ N/cm}^2 \text{ [19]}$ 。

由此可得,  $K_1 = 3.87 \text{ N/cm}^2, K_2 = 2.77 \text{ N/cm}^2$ 。

因充气铲为对称结构,两侧受力可以抵消,将式(2)、式(3)代入式(1)可得前后方向阻力  $F$ 。

$$F = 2K_1 S_1 [\sin(\delta/2) + \mu \cos(\delta/2)] + 2\mu K_2 S_2 = 753.4 \text{ N} \quad (5)$$

2.3.3 臭氧充气铲铲尖的受力分析

根据农业机械设计手册,充气铲起土角  $\alpha$  一般为  $23^\circ \sim 45^\circ$ 。当起土角过大时,耕作阻力将会增加,降低充气铲入土效率,无法达到预期耕深。充气铲铲尖在作业过程中,主要受到充气铲水平方向的牵引力以及土壤对铲尖部分的法向压力,受力情况如图 7 所示。电子气压计 SKT-1 具有较高准确度、气压传感器灵敏等优点,可作校正标准器和现场校验仪表使用,测得充气铲出口处压强值为  $100.1 \text{ kPa}$ 。

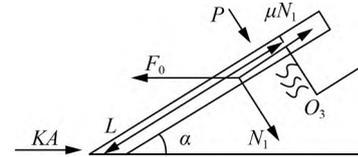


图 7 充气铲铲尖受力分析

Fig. 7 Inflatable shovel tip force analysis

由图 7 可知,铲尖水平方向受力平衡方程为

$$F_0 = \mu N_1 \cos \alpha + N_1 \sin \alpha + PAL \sin \alpha + KA \quad (6)$$

式中:  $F_0$ ——铲尖所受水平牵引力, N;

$N_1$ ——铲面法向方向受到的压力, N,  $N_1 = F_{\Sigma} \sin \alpha \text{ [20]}$ ;

$K$ ——单位宽度上土壤纯切削阻力, N/mm;

$P$ ——土壤对充气铲出气孔压力的反作用力,取  $P = 100.1 \text{ kPa}$ ;

$A$ ——铲尖刀面宽度,取  $A = 0.03 \text{ m}$ ;

$F_{\Sigma}$ ——充气铲水平方向的作用力, N;

$L$ ——气压分布在铲尖刀面的长度,取  $L = 0.1 \text{ m}$ 。

整个充气铲牵引力是铲柄和铲尖的牵引力之和。土壤的纯切削阻力很小,可忽略不计,因此

$$F_0 = \mu F_0 \sin \alpha \cos \alpha + F_0 \sin^2 \alpha + PAL \sin \alpha = F_{\Sigma} - F \quad (7)$$

根据 JB/T 9788—2020 农业机械设计手册中轻型铲、中型铲分别满足在牵引力  $2000 \text{ N}$ 、 $3000 \text{ N}$  下正常行驶的要求,因此,  $F_{\Sigma}$  取  $2000 \sim 3000 \text{ N}$ , 计算可得,

$\alpha = 31.7^\circ \sim 38.8^\circ$ 。

由式(7)可知,压强在一定值时,随着起土角的增大,前进阻力增加,入土能力越弱;起土角减小,深入土壤效果较差。根据棕壤土物理特性和农业机械设计手册,确定充气铲铲尖起土角  $\alpha$  为  $35^\circ$ 。

### 3 试验与分析

根结线虫为多食性寄生虫,病原菌还会侵入线虫取食留下的伤口,增加根腐病、枯萎病等真菌性病害发生率,造成经济作物的减产甚至绝产<sup>[21, 22]</sup>。为此,对根结线虫防治效果和土壤消毒机实际作业效果进行大棚试验。

#### 3.1 试验概况

试验仪器及工具(校准合格并在有效期内):TYD-2 型土壤硬度计、TZS-II W 型土壤水分温度测量仪、钢卷尺、皮尺、钢尺、温度计等。

试验时间为 2021 年 11 月,试验场地为潍坊市昌乐县,属于一年两熟的平原区。试验大棚内土壤肥力中等,地势平坦。在试验大棚(80 m×10 m)内,采用五点法测定土壤含水量和土壤硬度,平均土壤含水量为 17.6%,土壤硬度为 2 047.8 kPa,配套泰鸿 TH554-D 拖拉机,前进速度 2~4 km/h,旋耕机作业转速为 280 r/min。试验过程中,土壤消毒机工作平稳,处理后土颗粒细小均匀如图 8 所示。



图 8 臭氧气雾消毒土壤消毒机试验现场图

Fig. 8 Ozone bacteriostatic soil disinfection machine test site map

#### 3.2 试验方法

本试验采用南瓜种植区土壤为试验对象,以消杀根结线虫为目的,进行土壤消毒试验。随机选取 4 份(长 80 m×宽 1 m)长方形地块进行分组试验,并对机具振动、噪音以及充气铲工作情况进行相应的观察。本次试验在相同试验条件下进行,共设 4 种处理方式,试验区域按照从右往左依次进行试验处理,如表 3 所示。

试验步骤:(1)常规耕整。耕整地作业后等至 1 h,在试区一耕深 10 cm 处进行“S”形随机取 5 个样本。(2)臭氧消毒。耕整地作业后,使用土壤消毒机,对试区二、试区三、试区四分别进行臭氧消毒处理 1 次、2 次、3 次。在臭氧消毒处理 30 min 后,在耕深 10 cm

对试区二、试区三、试区四地块分别进行“S”形取样,随机各取 5 份土样。从每份土样中取 100 g 小样,采用改进的贝尔曼漏斗法在室温下分离线虫,对收集到的线虫进行显微镜观察,对每份小样线虫进行数量统计。

表 3 不同处理方式试验区实验排列

Tab. 3 Arrangement of test areas with different treatment methods

序号	处理方式	次数
试区一	常规耕整	1
试区二	臭氧消毒	1
试区三	臭氧消毒	2
试区四	臭氧消毒	3

在土壤处理前后 2 d 各调查 1 次,计算不同处理方式对土壤中根结线虫的防治效果。依据《农药田间药效试验准则(二)》要求计算线虫防治效果,计算公式如式(8)、式(9)所示。

$$Y = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \times 100\% \quad (8)$$

$$T = \frac{Y - Y_1}{1 - Y_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $Z_1$ ——处理前根结线虫成虫数量;

$Z_2$ ——处理后根结线虫成虫数量;

$Y$ ——处理区线虫消退率,%;

$Y_1$ ——空白对照区根结线虫消退率,%;

$T$ ——防治效果,%。

#### 3.3 结果与分析

经过试验和统计,不同处理方式对根结线虫防治效果如表 4 所示。历经 3 个月的种植,试验田块长势各有不同,试区二南瓜长势明显好于试区一、试区三、试区四,根系较为发达,如图 9 所示。

表 4 不同处理方式对根结线虫的防治效果

Tab. 4 Control effect of different treatments on root knot nematodes

样品编号	处理前均值 /(条·(100 g 土壤) <sup>-1</sup> )	处理后均值 /(条·(100 g 土壤) <sup>-1</sup> )	线虫 消退率 /%	防治 效率 /%
$A_1 - A_5$	364.5	353.7	2.96	—
$B_1 - B_5$	356.8	78.2	78.08	77.41
$C_1 - C_5$	314.5	47.4	84.93	84.47
$D_1 - D_5$	327.3	49.8	84.78	84.32

注: $A_1 - A_5$  表示试区一的 5 个土壤样本,同理  $B_1 - B_5$ 、 $C_1 - C_5$ 、 $D_1 - D_5$  分别表示为试区二、三、四的 5 个土壤样本。

试验结果表明:当臭氧消毒土壤 2 次时的线虫消退率最高,为 84.93%,防治效率为 84.47%;正常耕整试验区的线虫消退率为 2.96%,线虫消退率提高 81.91%。土壤消毒机对土壤臭氧消毒后,能有效抑制

根结线虫生长,克服线虫引起的土壤连作障碍,是实现大田和温室大棚条件下防治线虫、旋耕土地于一体的新型农业设备,有助于加快土壤消毒机械化、智能化进程和提高经济效益。

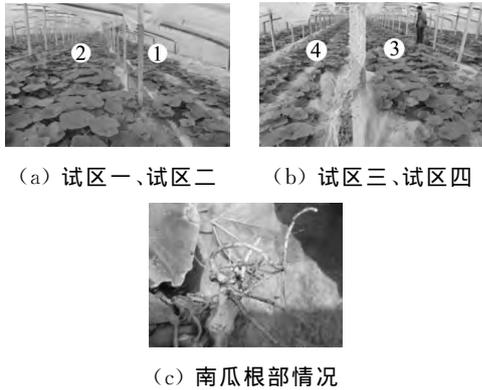


图9 试区南瓜生长情况

Fig. 9 Growth status of pumpkin in the trial area

## 4 结论

1) 根据山东中部种植地区棕壤质地较黏土稍薄、含水率适中的特性,设计一种基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机,一次作业可实现臭氧气雾消毒、切削破碎土壤、平整耕地的工序,减少耕整步骤,提高作业效率,无药害残留。

2) 分析计算土壤消毒机结构参数,对臭氧充气铲进行结构设计,并通过受力分析,确定铲尖起土角 $\alpha$ 为 $35^\circ$ ,能减少土壤阻力,增大充气面积;选用 PLC 控制器 XC2-24R-C 作为主要核心,控制 220 V 电压转换成高压,实现臭氧发生器正常运行,通过高低电平的转换实现继电器通断,完成警报功能,稳压芯片 LM2596 实现降压功能;建立整机结构三维模型,并进行样机制造。

3) 经过温室大棚试验,结果表明:在臭氧浓度是 300 g/h 条件下,臭氧消毒处理 1 次、2 次、3 次,它们的线虫消退率分别为 78.08%、84.93%、84.78%,防治效率为 77.41%、84.47%、84.32%;正常耕整 1 次的线虫消退率为 2.96%,最高线虫消退率较对照组提高 81.97%。基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机对防治根结线虫有良好效果,符合《农作物病虫害防治条例》明确提出坚持绿色防控原则,鼓励和支持使用物理防治相关的绿色防控新技术要求。

## 参 考 文 献

[1] 张浩然, 杨宁, 温丹, 等. 土壤消毒技术在设施蔬菜生产中的研究进展[J]. 山东农业科学, 2020, 52(5): 149-156.  
Zhang Haoran, Yang Ning, Wen Dan, et al. Research progress of application of soil disinfection technology in production of protected vegetables [J]. Shandong

Agricultural Sciences, 2020, 52(5): 149-156.  
[2] 金娜, 陈永攀, 刘倩, 等. 我国蔬菜根结线虫发生、致害和绿色防控研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 424-438.  
Jin Na, Chen Yongpan, Liu Qian, et al. Research progresses in occurrence, diagnoses, pathogenic mechanisms and integrated management of vegetable root-knot nematodes in China [J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 424-438.  
[3] 曹焯程, 方文生, 李园, 等. 我国土壤熏蒸消毒 60 年回顾[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 325-335.  
Cao Aocheng, Fang Wensheng, Li Yuan, et al. Review on 60 years of soil fumigation and disinfection in China [J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 325-335.  
[4] 宋根, 张小林, 黄海玉, 等. 设施农业土壤消毒技术研究[J]. 乡村科技, 2022, 13(7): 145-148.  
[5] Sabry A, Allam A, Abdel-Rahman A B, et al. A novel microwave applicator for sandy soil disinfection [C]. 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). IEEE, 2018: 636-641.  
[6] Mitsugi F. Practical ozone disinfection of soil via surface barrier discharge to control scab diseases on radishes [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 47(1): 52-56.  
[7] 袁也, 顾红蕊, 张潇丹, 等. 臭氧对三七自毒皂苷的降解和根腐病菌的抑制效应研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(1): 124-131.  
Yuan Ye, Gu Hongrui, Zhang Xiaodan, et al. Effect of ozone on the degradation of panax notoginseng autotoxic saponins and the inhibition of root rot pathogens [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(1): 124-131.  
[8] 姜楠, 王刘庆, 李祖梁, 等. 臭氧处理对交链孢菌生长及其毒素积累的抑制作用[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 51-57.  
Jiang Nan, Wang Liuqing, Li Zuliang, et al. Inhibition effect of ozone on the growth and mycotoxin production of alternaria [J]. Food Science, 2019, 40(21): 51-57.  
[9] 张学进, 金永奎, 张玲, 等. 土壤射频消毒技术试验[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 274-277.  
[10] 孙龙霞, 於锋, 葛讯一. 自走式精旋土壤火焰杀虫机在设施蔬菜生产中应用的试验研究[J]. 江苏农机化, 2020(4): 12-15.  
[11] 翟维枫, 胡德燊, 刘庆, 等. 高频板式 DBD 臭氧发生器的鲁棒控制[J]. 控制工程, 2023, 30(2): 215-221.  
Zhai Weifeng, Hu Deshen, Liu Qing, et al. Robust control of high frequency plate DBD ozone generator [J]. Control Engineering of China, 2023, 30(2): 215-221.  
[12] 梅培树. 高效臭氧发生器的特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
Mei Peishu. Research on the characteristics of efficiency ozone generator [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

(下转第 265 页)

- 量贡献的研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2014.
- [14] 吐尔逊·买买提, 丁为民, 谢建华. 时间序列组合预测模型研究:以农业机械总动力为例[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 688-695.  
Tursun Mamat, Ding Weimin, Xie Jianhua. Research of combination prediction model for time series: A case study in total power of agricultural machinery [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39 (4): 688-695.
- [15] 张姝玮, 郭忠印, 陈立辉. 基于自回归求积移动平均的制动器温度预测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(6): 2080-2086.  
Zhang Shuwei, Guo Zhongyin, Chen Lihui. Brake temperature prediction method based on autoregressive integrated moving average model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(6): 2080-2086.
- [16] 蒋金良, 林广明. 基于 ARIMA 模型的自动站风速预测[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 374-376.  
Jiang Jinliang, Lin Guangming. Automatic station wind speed forecasting based on ARIMA model [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 374-376.
- [17] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 徐家鹏. 中国农业能源消耗与 CO<sub>2</sub> 排放: 趋势及减排路径——基于 H-W 无季节性模型和“十三五”的预测[J]. 生态经济, 2016, 32(2): 122-126.  
Xu Jiapeng. China's agricultural energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: Current situation, trend and path to reduce emissions [J]. Ecological Economy, 2016, 32 (2): 122-126.
- [19] 韩冬梅, 牛文清, 于长锐. 组合预测建模中单项预测模型筛选研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1381-1385.  
Han Dongmei, Niu Wenqing, Yu Changrui. Research on single forecast model screening for combination forecast modeling [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(6): 1381-1385.
- [20] 杨桂元, 唐小我. 非负权重组合预测模型优化方法研究[J]. 数量经济技术经济研究, 1998, 15(3): 56-60.
- [21] 张淑娟, 冯岫, 介邓飞, 等. 基于 Shapley 值的农机装备水平组合预测[J]. 农业工程学报, 2008, 129(6): 160-164.  
Zhang Shujuan, Feng Shen, Jie Dengfei, et al. Combination prediction of agricultural equipment level based on Shapley value [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 129(6): 160-164.
- [22] 陈华友, 刘金培, 陈启明. 基于 Theil 不等系数的 IOWA 算子组合预测模型及性质[C]. 中国运筹学会. 中国运筹学会第八届学术交流会论文集, 2006: 7.  
Yu Yongchang, Liu Wenyi, Zhao Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (6): 109-113.
- [13] Pandiselvam R, Subhashini S, Banuu Priya E P, et al. Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety [J]. Ozone: Science & Engineering, 2019, 41(1): 17-34.
- [14] 袁晓宇, 田征, 赵佳睿. 天津海河口南岸地区污水处理工程臭氧发生器的选择[J]. 城市道桥与防洪, 2022(2): 150-152, 20-21.  
Yuan Xiaoyu, Tian Zheng, Zhao Jiarui. Selection of ozone generator for wastewater treatment project in south bank area of Haihe river in Tianjin [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(2): 150-152, 20-21.
- [15] 苏宏杰. 气吹式深松机整机及关键部件优化与设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [16] 张喜瑞, 曾望强, 刘俊孝, 等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40-49.  
Zhang Xirui, Zeng Wangqiang, Liu Junxiao, et al. Design and experiment of lateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40-49.
- [17] 余泳昌, 刘文艺, 赵迎芳, 等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 109-113.  
Ma Shoufeng. Force analysis and computer simulation of the subsoiler in working state [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004.
- [18] 马守锋. 深松铲工作状态受力分析与计算机模拟[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- [19] 康迪鑫. 深松灭茬镇压联合整地机设计与研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.  
Kang Dixin. Design and research on subsoiling, stubbling and suppress soil crushing combined tillage machine [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [20] 李范哲, 朴今淑. 评价土壤工作部件工作阻力的数学模型[J]. 延边农学院学报, 1996(3): 159-163.
- [21] 陈佳清, 蔡红, 朱应芳, 等. 番茄根结线虫的危害与防治[J]. 世界热带农业信息, 2022(9): 48-49.
- [22] 孙婷婷. NR 南瓜对南方根结线虫的抗性机制研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022.  
Sun Tingting. Study on resistance mechanism of NR pumpkin to *Meloidogyne incognita* [D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2022.