

三七土壤水蒸气消毒针结构与试验

王凤花 宋彦 赖庆辉 赵威

(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

摘要: 针对连作障碍严重制约三七种植可持续发展的问题,设计一种针式水蒸气输出装置,对消毒针的结构参数进行优化,并通过土槽试验进行验证。通过 Fluent 软件对消毒针内部进行仿真,结果表明,消毒针出口流速、压力增大,出口温度无明显变化。土壤热传导试验表明,在 5 min 内即可将土壤加热到 90℃,土壤加热基本规律为下层土壤加热效率较低、上层土壤加热效率高。为了探究消毒针不同结构参数对土壤升温效果的影响,选取单侧孔口数量、孔口直径和水蒸气出射角作为试验因素,选取土壤升温到 90℃所需时间作为试验指标,进行了正交试验,确定消毒针最优结构参数组合为:消毒针单侧孔口数量为 4 个、孔口直径为 2 mm、水蒸气出射角为 45°,此时土壤升温到 90℃时间最短,为 116 s。通过 Fluent 多孔介质传热仿真得出,消毒针的最佳排布方式为 6×6,最佳数量为 36 根,间距为 250 mm。对消毒后的土壤有机质含量及 pH 值进行检测,表明消毒后土壤环境符合三七生长的环境要求。

关键词: 三七; 土壤; 蒸汽消毒; 消毒针

中图分类号: S472; S497 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)08-0123-08

Structural Design and Test of Soil Steam Disinfection Needle in *Panax notoginseng* Field

WANG Fenghua SONG Yan LAI Qinghui ZHAO Wei

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem of continuous cropping obstacles that seriously restrict the sustainable development of *Panax notoginseng* planting, a needle steam output device was designed. The structural parameters of the disinfection needle were optimized and verified by the soil-bin test. The simulation experiments of the needle's internal were carried out by Fluent software, the test results showed that the flow rate and pressure of the disinfection needle were increased, and no significant change in outlet temperature was found. The basic law of soil heating was verified by the soil-bin test. The soil can be heated to 90℃ in 5 minutes, and the heating efficiency of the lower soil was low, and that of the upper soil was high. In order to explore the effect of different structural parameters of the disinfecting needle on the warming effect of the soil, the number, diameter and steam emission angle of the hole on one side were selected as the test factors of the soil-bin test, and the time required for the soil to rise to 90℃ was selected as the test index, and orthogonal tests were carried out respectively to determine the optimal structural parameters of the disinfecting needle. When the number of single side orifices was 4, the diameter of the orifice was 2 mm, and the steam exit angle was 45°, the heating time of soil by the disinfection needle structure was the shortest, for 116 s. The optimal arrangement of disinfection needles was 6×6 layout, the optimal number was 36, and the spacing was 250 mm by the heat transfer simulation of Fluent porous media. The changes in soil organic matter and pH value after disinfection were tested, the soil environment after disinfection met the environmental requirements for the growth of *Panax notoginseng*.

Key words: *Panax notoginseng*; soil; steam disinfection; disinfection needle

收稿日期: 2019-04-08 修回日期: 2019-05-25

基金项目: 云南省重大科技计划项目(2016ZF001-4-3)、云南省重大科技专项(2018ZC001-1-1)和国家自然科学基金项目(51305187)

作者简介: 王凤花(1980—),女,副教授,博士,主要从事丘陵山地农业装备研究,E-mail: 158877172@qq.com

通信作者: 赖庆辉(1980—),男,副教授,博士,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

0 引言

三七是一种名贵中药材,广泛种植于云南省,但连作障碍严重制约了三七产业的可持续发展。近年来,土壤消毒成为解决设施农业重茬连作障碍的有效措施^[1-4]。土壤蒸汽消毒是将高温水蒸气通入土壤中,将土壤中的细菌以及大部分杂草种高温杀灭^[5-11]。根据病害死亡临界温度梯度^[12-13]及前期相关研究^[14-16],温度需达到 90℃ 以上并保持 10 min、消毒深度需达到 15~20 cm 后,才能达到三七土壤消毒的农艺要求。目前缺乏针对三七中药材的土壤蒸汽消毒装备,为克服三七连作障碍急需对此问题进行研究。

关于土壤蒸汽消毒国内外已有大量研究^[17-19],GAY 等^[20-21]设计的自走式土壤蒸汽消毒机使用注射器将蒸汽通入土壤,能在 8 min 内将所有土层加热到 80℃ 以上,且能将土壤保持在 70℃ 以上至少 1 h,但加热温度达不到 90℃。RUNIA^[22]将基质中预埋管道内的空气抽取,使其产生负压,将蒸汽吸入基质,但工艺流程复杂。汪小昆等^[23-24]设计的移动式土壤旋耕消毒机,机具在行走过程中通过消毒毛管将蒸汽通入土壤中,土壤消毒后温度在 58.9~70.6℃ 之间,作业效率高,但土壤加热温度较低,且不能保温。蒋雪松等^[25]对注射器进行了仿真优化,取得最佳消毒区域大小和注射器结构参数,但未考虑加热交互作用。

本文设计一种针式蒸汽输出装置,主要通过消毒针将高温蒸汽注射到土壤内,从而达到土壤消毒的目的,重点对消毒针进行 Fluent 模拟仿真及土壤热传导试验验证,找出加热规律,优化其结构参数,使其满足将 15~20 cm 深的土壤加热到 90℃ 并保持 10 min 的农艺要求,为整机的设计提供理论基础。

1 蒸汽输出装置结构

1.1 装置结构

为克服三七连作障碍设计的针式土壤蒸汽消毒输出装置如图 1 所示,主要由蒸汽罩、主蒸汽管、副蒸汽管、消毒针和支撑架组成,主副蒸汽管由支撑架固定并安装在消毒罩内,消毒针安装在副蒸汽管上。蒸汽罩及各器件为不锈钢材质以防止水蒸气的腐蚀。根据三七种植基地的农艺要求,单行试验田幅宽为 1.5 m,为了留有作业余量,确定蒸汽罩尺寸为 1.4 m×1.0 m,罩厚 1.5 mm,根据消毒针长度确定蒸汽罩高 100 mm。

1.2 消毒针设计

消毒针是蒸汽消毒机实现土壤蒸汽消毒的核心

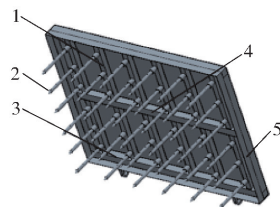


图 1 蒸汽输出装置示意图

Fig. 1 Schematic of steam output device

1. 副蒸汽管 2. 消毒针 3. 支撑架 4. 主蒸汽管 5. 蒸汽罩

部件,考虑到土壤的结构复杂且消毒针内部为高温高压的水蒸气^[25],所以消毒针采用强度高、耐热、耐腐蚀的 20 钢精密无缝钢管,其结构和尺寸如图 2 所示。

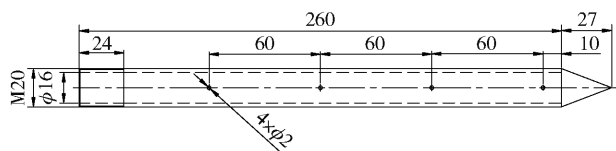


图 2 消毒针结构示意图

Fig. 2 Disinfection needle structure diagram

消毒针通过螺纹与副蒸汽管连接,插入土壤中的有效深度为 200 mm。针头采用淬火工艺来提高其硬度和耐磨性,从而保证了消毒针在土壤消毒作业过程中保持较长的使用寿命。

2 仿真

2.1 土壤参数获取

为了获取三七种植的土壤相关参数,2018 年 3 月 22 日在石林基地三七仿生种植工厂进行了土样的采集。试验田长 45 m,宽 1.5 m,用环刀每隔 5 m 在试验田两侧各取一土样,共取 20 个,标号 1~20,用环刀盒和试样袋密封以减小水分蒸发,从而进行土壤参数测量及计算。根据指测法确定土壤的质地为沙壤土。

2.2 水蒸气出口流速

蒸汽发生装置选用 LHSO. 2-0.7-Y(Q) 型蒸汽发生器(张家港市尚亿热能设备有限公司),其额定蒸发量为 0.2 t/h,蒸汽软管直径为 33 mm,其饱和水蒸气通过蒸汽管的出口流速计算式为^[23-24]

$$w = \int_0^t \rho \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 u_w dt = 0.2 \text{ t/h} \quad (1)$$

式中 ρ ——水蒸气密度,kg/m³

u_w ——水蒸气流速,m/s

t ——时间,取 1 h

d ——蒸汽软管直径,mm

由式(1)求得出出口流速为 $u_w = 22.2 \text{ m/s}$ 。

2.3 仿真及参数设置

选用 ICEM 软件对模型进行网格划分,划分网

格单元数为 551 398 个,节点数为 100 040 个,选用 Fluent 仿真软件对消毒针内部结构进行流体力学仿真,确定消毒针内水蒸气的流速、压强及温度的变化,进行仿真设置,检验设置是否正确,开始仿真。测得土壤参数及仿真参数设置如表 1 所示。网格图如图 3 所示。

表 1 模拟参数设置
Tab. 1 Simulation parameter setting

类型	参数	数值/类型
仿真	求解器	压力求解器
	速度类型	绝对速度
	时间类型	瞬态
	重力方向	-y 方向
	入口类型	速度入口
	出口类型	压力出口
	含水率/%	19.135
土壤	容重/(g·cm ⁻³)	0.956 5
	孔隙度/%	16
	密度/(g·cm ⁻³)	1.145
	土壤类型	沙壤土
	粘性阻力系数	2.584 × 10 ¹⁰
	惯性阻力系数	717 773.438
	入口速度/(m·s ⁻¹)	22.2
	出口压力/MPa	0.1
	水蒸气温度/℃	99



图 3 消毒针网格图
Fig. 3 Disinfection needle grid diagram

2.4 消毒针内部及孔口流速分析

消毒针内部流速仿真结果如图 4 所示,从图 4a 中可以看出,当进口速度与压力一定时,消毒针内部上方蒸汽流速介于 40 ~ 60 m/s,而消毒针下方蒸汽流速在 20 m/s 以下,从图 4b 中可以直观看出消毒针内部上方蒸汽流速远大于下方的蒸汽流速。

消毒针从上到下的孔口(孔口 1、孔口 2、孔口 3、孔口 4)蒸汽出口流速矢量图如图 5 所示。从图中可以看出,越下方的孔口,速度矢量箭头颜色越浅,蒸汽流速越低。孔口蒸汽流速最低为 13 m/s,最高可达 264 m/s,而入口设置流速为 22.2 m/s,说明消毒针内部构造有增大孔口出口流速的作用。

蒸汽流速越大,蒸汽喷射距离越远,土壤加热效果越好,可以预知上层土壤加热效果优于下层土壤。

2.5 消毒针内部压强及温度变化

消毒针内部压力变化如图 6a 所示,消毒针内部

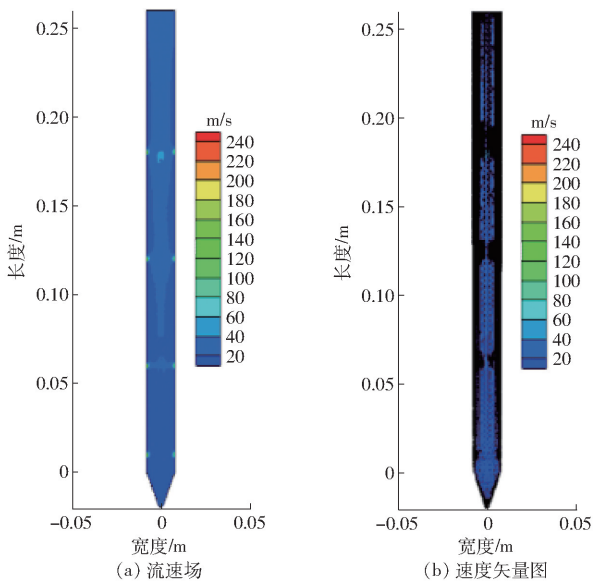


图 4 消毒针内部流速场及速度矢量图
Fig. 4 Internal velocity field and velocity vector of disinfection needle

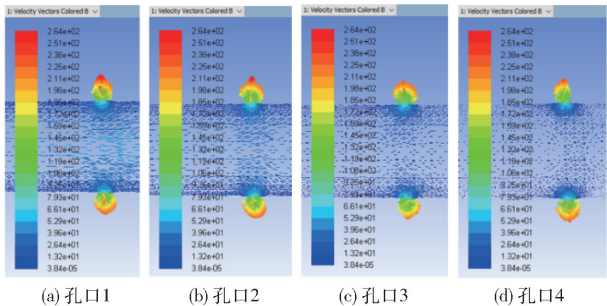


图 5 孔口流速矢量图

Fig. 5 Diagram of orifice flow vector

压力小幅增大,增幅最大为 0.014 MPa,最大值为 0.114 MPa,孔口处压力减小至 0.102 MPa 但依然大于进口压力;由于压力增大,消毒针内部蒸汽温度也小幅增大,并在孔口处降温到 100℃ 附近,如图 6b。

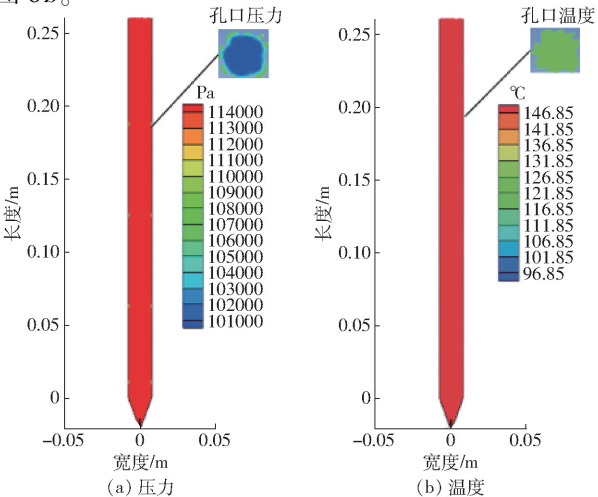


图 6 消毒针内部压力及温度
Fig. 6 Internal pressure and temperature of disinfection needle

3 土壤热传导试验

3.1 试验装置

为了探究土壤的升温规律,进行了土壤热传导试验。根据三七种植基地的农艺要求及前期工作研究,设计出一种试验装置,如图 7 所示。试验装置有 4 根消毒针,每根消毒针的最大辐射半径为 125 mm,消毒深度为 200 mm,消毒时长为 10 min。蒸汽发生器的试验参数为:额定蒸发量为 200 kg/h,额定压力为 0.1 MPa,出口饱和水蒸气温度为 99℃。

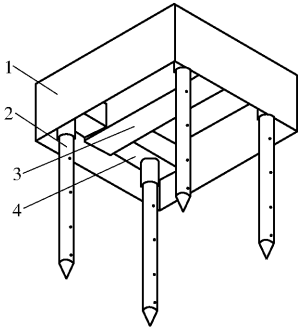


图 7 试验装置及其管道布局示意图

Fig. 7 Experimental device and its pipeline layout
1. 蒸汽罩壳 2. 消毒针 3. 主蒸汽管 4. 副蒸汽管

为了防止主副蒸汽管破裂而造成蒸汽损失和安全隐患,对其管道壁厚进行了理论计算,公式为

$$\delta_1 = \frac{p_d D_0}{2[\sigma]\Phi + p_d} = 0.17 \text{ mm} \tag{2}$$

$$\delta_2 = \frac{p_d D_1}{2[\sigma]\Phi + p_d} = 0.069 \text{ mm} \tag{3}$$

式中 δ_1 ——主蒸汽管道理论壁厚,mm
 p_d ——管道的计算压力,MPa
 D_0 ——主蒸汽管道管道外径,mm
 $[\sigma]$ ——钢管在计算温度下的基本许用应力,MPa
 Φ ——基本许用应力修正系数(无缝钢管 $\Phi = 1$)

δ_2 ——消毒针管道理论壁厚,mm
 D_1 ——消毒针外径,mm

由于消毒针顶部需要焊接以及加工螺纹,壁厚不能低于 1.5 mm,所以确定主副蒸汽管道和消毒针壁厚为 2 mm,试验装置参数如表 2 所示。

3.2 试验及分析

试验土槽为长 705 mm、宽 450 mm、高 300 mm 的箱体,在试验土槽两侧从下至上依次在距离箱底 5、65、125、185 mm 处各开一个孔位,在孔位中各插入四通道 HT9815 型温度传感器(鸿泰仪表有限公司),进行实时的温度检测,如图 8 所示,探究土壤升降温的普遍规律及检验仿真试验的正确性。

表 2 试验装置参数

Tab. 2 Experimental device parameters		mm
参数	数值	
主蒸汽管长	280	
主蒸汽管宽	50	
副蒸汽管长	100	
副蒸汽管宽	40	
消毒针长	260	
消毒针外径	20	
消毒针内径	16	
消毒针横向间距	250	
消毒针纵向间距	167	



图 8 土壤热传导试验

Fig. 8 Soil heat transfer experiment

在含水率为 19%、土壤孔隙度为 16%、土壤初始温度为 13℃ 的情况下,蒸汽发生器开启,当消毒针孔口开始有水蒸气时,将试验装置插入土壤中,开始计时,在 10 min 后断绝水蒸气来源,进行 3 组试验求平均值,不同土层试验升温情况如表 3 所示。

表 3 不同土层温度变化情况

Tab.3 Different soil layers test heating rate						℃
深度/ cm	时间/min					
	0	3	5	10	15	20
5	12.2	91.4	92.2	92.4	89.9	87.9
65	12.5	89.1	91.9	92.6	92.2	91.5
125	12.9	88.0	91.4	92.2	91.6	91.1
185	13.5	76.2	90.7	92.0	91.4	90.2

由表 3 可以看出,试验进行 5 min 后,试验土壤各层温度都已经达到 90℃,底层 185 cm 处土壤加热较慢;这与仿真分析预测结果一致,即由于消毒针下方孔口流出速度较慢导致土壤加热效率低。10 min 后土壤开始降温,相同起始温度下,表层 5 cm 处土壤和底层 185 cm 处土壤热量散失最快,但土壤仍能将温度保持在 90℃ 以上 5 ~ 10 min。为整机的实际田间作业效率和可行性提供了理论依据。

4 正交试验及验证

4.1 试验设计及结果

为了探究消毒针孔口结构参数对土壤升温到

90℃所需时长的影响及确定消毒针孔口最优结构参数组合,选取消毒针单侧孔口数量(A)、孔口直径(B)和水蒸气出射角(C)为试验因素,每个因素选取 4 个水平,土壤升温到 90℃所需时间作为试验指标,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行土槽试验,因素水平如表 4 所示。水蒸气出射角示意图如图 9 所示,以主蒸汽管为 0°线。

表 4 试验因素水平

Tab.4 Factors and levels of orthogonal test

水平	试验因素		
	单侧孔口数量	孔口直径	水蒸气出射角
	A /个	B /mm	C /(°)
1	2	1	0
2	4	2	45
3	6	3	90
4	8	4	135

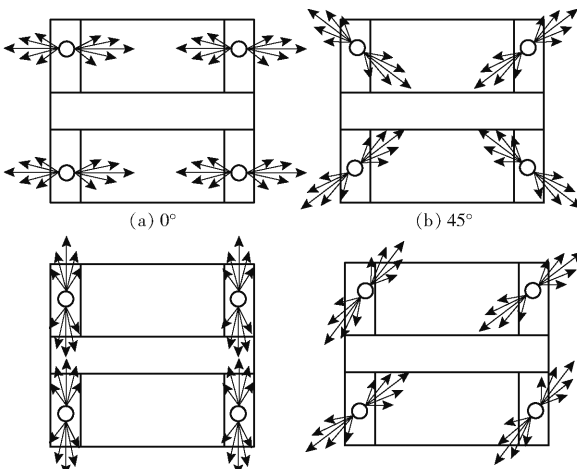


图 9 水蒸气出射角示意图

Fig.9 Schematics of steam exit angle

试验结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为孔口数量、孔口直径、水蒸气出射角水平值。由极差分析得出因素对土壤升温到 90℃时长的影响主次顺序为单侧孔口数量 A 、孔口直径 B 、水蒸气出射角度 C 。应用 Design-Expert 软件对试验因素进行方差分析,如表 6 所示。结果表明单侧孔口数量 A 对时长影响极显著($P < 0.01$),孔口直径 B 对时长影响显著($P < 0.05$),水蒸气出射角 C 对时长影响不显著($P > 0.05$)。土壤升温到 90℃的时长越短,消毒针结构加热效果越好。由 Design-Expert 软件自动分析出消毒针最优参数组合为: $A_2B_2C_2$,即单侧孔口数量为 4 个、孔口直径为 2 mm、水蒸气出射角为 45°。

4.2 试验验证

对优化后的消毒针结构参数进行试验验证,选取单侧孔口数量为 4 个,孔口直径为 2 mm,水蒸气出射角度为 45°,在相同条件下进行试验,共重复 3 次,

通过试验验证得到土壤升温到 90℃所需时间为 116 s。

表 5 试验方案与结果

Tab.5 Experimental scheme and results

试验号	试验因素					时间 /s
	X_1	X_2	空列	X_3	空列	
1	1	1	1	1	1	150
2	1	2	2	2	2	111
3	1	3	3	3	3	157
4	1	4	4	4	4	181
5	2	1	2	3	4	134
6	2	2	1	4	3	115
7	2	3	4	1	2	145
8	2	4	3	2	1	156
9	3	1	3	4	2	121
10	3	2	4	3	1	132
11	3	3	1	2	4	127
12	3	4	2	1	3	179
13	4	1	4	2	3	189
14	4	2	3	1	4	217
15	4	3	2	4	1	193
16	4	4	1	3	2	243
K_1	599	594	635	691	631	
K_2	550	575	617	583	620	
K_3	559	622	651	666	640	
K_4	842	759	647	610	659	
R	292	184	34	108	39	

表 6 方差分析结果

Tab.6 Results of variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
A	14 491. 50	3	4 830. 50	46. 67	0. 002 8 **
B	5 531. 50	3	1 843. 83	17. 81	0. 012 3 *
C	2 141. 50	3	713. 83	6. 90	0. 051 6
残差	310. 50	3	103. 50		
总和	22 771. 00	12			

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

5 消毒针数量分析

为了优化消毒针数量及排布方式,为整机的制造提供理论基础,进行 16、25、36、49、64 根针布置比较,即纵向×横向为 4×4、5×5、6×6、7×7、8×8 的布局,消毒针横向间距依次为 375、300、250、215、188 mm,对不同的技术方案进行仿真,观测土壤的升温情况,从而得出最优的消毒针数量参数。试验后发现消毒针 8×8 布局水蒸气热能利用不完全且对整机的工艺要求极高,不予以考虑。

5.1 数值模拟

使用 Fluent 多孔介质传热模型进行仿真,对网格进行均匀划分,土壤粘性阻力系数和惯性阻力系

数由土壤特性确定,参数如表 1 所示,模拟时间步长为 0.01 s,模拟时间为 200 s。

5.2 试验分析

由图 10a 可以看出,消毒针 4 × 4 布局时,消毒针之间间距为 375 mm,由于消毒针之间间距过大,消毒针之间的土壤未被完全加热,温度最低处为 32 ~ 37℃ 之间。加热效率较低,加热时间较长。由图 10b 可以看出,消毒针 5 × 5 布局时,由于消毒针间距离缩小,土壤中心温度有所提升,但加热效率仍然很低,温度最低处为 37 ~

42℃ 之间。由图 10c 可以看出,消毒针 6 × 6 布局时,土壤温度升温明显,大部分区域温度在 90 ~ 97℃ 之间,土壤升温速度较快,加热效率较高。由图 10d 可以看出,当消毒针 7 × 7 排布时,土壤全部区域已经达到 90℃ 以上,加热效率高,完全符合三七土壤消毒的要求,但 7 × 7 排布时,虽然水蒸气对土壤的加热效果最好,但是消毒针过多。为保证水蒸气消毒机整机的精简程度,选取消毒针 6 × 6 布局,既提高了水蒸气的加热效率,又精简了机器的结构。

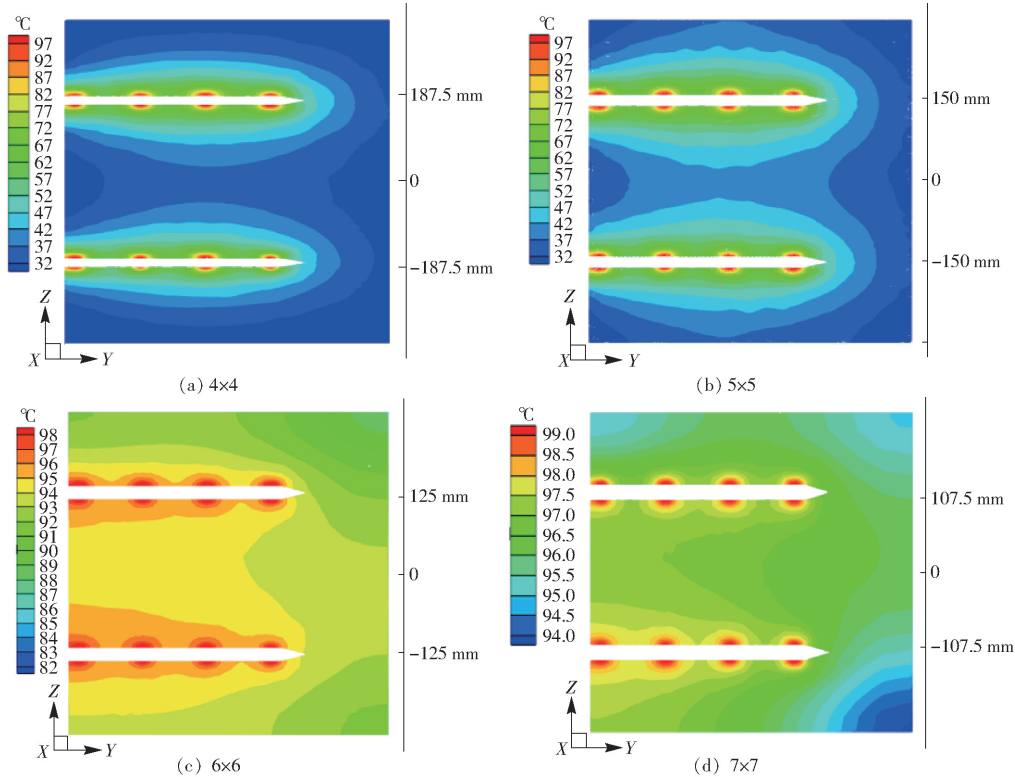


图 10 消毒针布局方式
Fig. 10 Disinfection needle layouts

6 土壤成分变化分析

为了探究土壤水蒸气消毒对土壤有机质和 pH 值的影响,分别采用水合热重铬酸钾氧化-比色法和电位法对消毒前后的土样有机质含量和 pH 值进行测量,观测其变化情况。

6.1 土壤有机质含量变化

配置含碳量为 0、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 mg 的对比液,测出吸光度,并绘制出标准曲线,如图 11 所示。得出线性回归方程为

$$y = 0.014\,33x - 0.001\,32 \tag{4}$$

取消毒前箱体内 3 份土样每份 1 g,分别标定为 A1、A2、A3,消毒后箱体内 3 份土样每份 1 g,分别标定为 B1、B2、B3。测得消毒前后各土样吸光度按顺序分别为 0.249、0.235、0.259、0.245、0.230、0.255,代入线性回归方程(4)得到含碳量分别为 17.468、

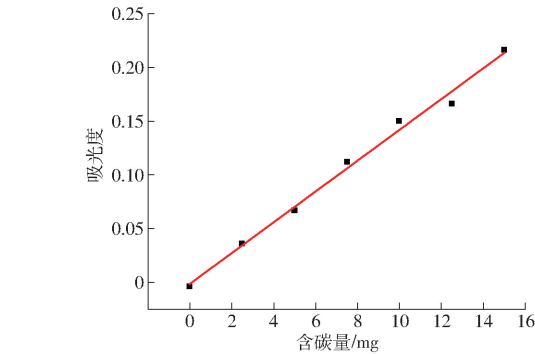


图 11 含碳对比液标准曲线
Fig. 11 Carbon-containing contrast liquid standard curve

16.491、18.166、17.174、16.175、17.872 mg,根据有机质计算公式

$$S_{OM} = \frac{m_1 \vartheta \mu}{m} \times 10^6 \tag{5}$$

式中 S_{OM} ——土壤有机质质量比,g/kg

m_1 ——标准曲线或回归方程求得的待测液含碳量,mg
 ϑ ——氧化校正系数,为 1.32
 μ ——有机碳换算成有机质的系数,为 1.724
 m ——烘干土样的质量,g

求得有机质含量按土样标号顺序分别为 39.752、37.528、41.34、39.082、36.808、40.672 g/kg。可以看出,消毒使土壤有机质含量平均值从 39.54 g/kg 下降到 38.854 g/kg。根据全国第二次土壤普查有机质含量和分级标准^[26],消毒过后的土壤有机质含量仍满足三七以及各种农作物的生长要求。

6.2 土壤 pH 值变化

三七喜中偏酸性沙壤土,pH 值以 4.5~8 为宜,取 A1、A2、A3、B1、B2、B3 土样,将土样研磨,并按照土水 1:2.5 的比例进行充分搅匀,沉淀 15 min 取上层清液,使用雷磁 pH S-3C pH 计进行 pH 值测量,测得 pH 值按土样标号顺序分别为 4.84、4.82、4.82、5.52、5.55、5.51。可以看出,试验土样为酸性土壤,消毒后 pH 值小幅增加,但土壤 pH 值仍为酸性,符合三七生长的要求。

7 结论

(1)针对三七土壤消毒的农艺要求设计了一种

针式土壤消毒装置,通过 Fluent 流体力学仿真模型验证消毒针结构的可行性。仿真结果表明,消毒针内部构造有增大孔口出口流速的作用,且上层孔口出流速度大于下方孔口出流速度,上层土壤加热效果优于下层土壤;消毒针内部压力和温度增大。

(2)土壤热传导试验表明,在 5 min 以内即可将土壤加热到 90℃,上层土壤升温速度大于下层土壤升温速度,验证了仿真试验的正确性;表层和底层土壤热量散失较快,但土壤仍能将 90℃ 以上温度保持 5~10 min。

(3)通过正交试验,探寻消毒针结构参数对土壤升温时长的影响,寻求最优结构参数组合,得到了消毒针最优结构参数组合,即单侧孔口数量为 4 个、孔口直径为 2 mm、水蒸气出射角为 45°。此时土壤升温到 90℃ 时间最短,为 116 s。

(4)为了优化消毒针的排布方式,进行了 Fluent 多孔介质传热仿真,仿真结果表明,消毒针的最佳排布方式为 6×6,最佳数量为 36 根,间距为 250 mm。

(5)通过水合热重铬酸钾氧化-比色法和电位法测量土壤消毒前后的有机质含量和 pH 值,结果表明,消毒后土壤有机质含量平均值降低、pH 值增大,但仍符合三七生长的要求,故水蒸气消毒对三七土壤环境影响较小。

参 考 文 献

[1] 杨建忠,孙玉琴,韦美丽,等. 不同轮作年限土壤对三七生长的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2012, 26(2): 6-8. YANG Jianzhong, SUN Yuqin, WEI Meili, et al. The effect on growth of *Panax notoginseng* in soil under rotation for the different years[J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2012, 26(2): 6-8. (in Chinese)

[2] 包应时,吴晓莲. 设施园艺基质消毒设备的研制[J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 107-109, 141. BAO Yingshi, WU Xiaolian. Horticulture development matrix disinfection equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 107-109, 141. (in Chinese)

[3] 朱加繁,赵玉清,杨陆强,等. 三七温室育苗槽基质蒸汽消毒机的设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 79-83. ZHU Jiafan, ZHAO Yuqing, YANG Luqiang, et al. Design of matrix steam sterilizing machine of *Panax notoginseng* greenhouse seedling trough[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 79-83. (in Chinese)

[4] 蔡开地,黄梅卿,张闽春,等. 蘑菇覆土材料管道式蒸汽消毒技术研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(12): 2250-2253. CAI Kaidi, HUANG Meiqing, ZHANG Minchun, et al. Pipe steam sterilization technology applied to agaricus bisporus casing soil[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(12): 2250-2253. (in Chinese)

[5] 辜松,王忠伟. 日本设施栽培土壤热水消毒技术的发展现状[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 168-170, 167. GU Song, WANG Zhongwei. Soil disinfection with hot water in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 168-170, 167. (in Chinese)

[6] 杨志林. 移动式蒸汽土壤灭菌设备的研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(5): 194-195. YANG Zhilin. Research on mobile soil steam sterilization equipment[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(5): 194-195. (in Chinese)

[7] 李明社,李世东,缪作清,等. 生物熏蒸用于植物土传病害治理的研究[J]. 中国生物防治, 2006, 22(4): 296-302. LI Mingshe, LI Shidong, MIAO Zuoqing, et al. Biofumigation for management of soilborne plant diseases[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2006, 22(4): 296-302. (in Chinese)

[8] AIKO N, MOTOAKI A, TOMOKO S, et al. A steaming method for killing weed seeds produced in the current year under untilld conditions[J]. Crop Protection, 2015, 71: 125-131.

[9] 喻自荣,朱加繁,彭继文,等. 桁架式温室育苗槽基质蒸汽消毒机设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 154-157, 161.

- YU Zirong, ZHU Jiafan, PENG Jiwen, et al. Design of matrix steam sterilization machine for truss type greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 154–157, 161. (in Chinese)
- [10] SONNEVELD C. Changes in chemical properties of soil caused by steam sterilization[J]. Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology, 1979, 6(4): 39–50.
- [11] 苏琦, 黄欢. 从专利视角看全球土壤蒸汽消毒技术发展[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(11): 68–69.
SU Qi, HUANG Huan. Technology development of global sterilizing soil by steam from the perspective of patent[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(11): 68–69. (in Chinese)
- [12] RABIEY L, FLICK D, DUQUENOY A. 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilisation of large particles in a cylindrical vertical can[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4): 409–417.
- [13] CHEN G Q, JIANG M M, CHEN B, et al. Emergy analysis of Chinese agriculture [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 115(1): 161–173.
- [14] MICHELE S, ALESSANDRO F, MATTEO B L, et al. Microwaves disinfection of farmland[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2016, 30(16): 2165–2173.
- [15] MD R, AYUMI H, SHINZO Y, et al. Effect of soil disinfection with chemical and biological methods on bacterial communities [J]. Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences, 2016, 3(2): 141–148.
- [16] 周雪青, 张晓文, 邹岚, 等. 设施农业土壤消毒方法比较[J]. 农业工程, 2016, 6(3): 109–112.
ZHOU Xueqing, ZHANG Xiaowen, ZOU Lan, et al. Comparison of soil disinfection methods in facility agriculture [J]. Argicultural Engineering, 2016, 6(3): 109–112. (in Chinese)
- [17] 杨文盼. 土壤旋作消毒一体机设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
YANG Wenpan. Design and experiment of rotary tillage disinfection integrated machine for soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] GAY P, DABBENE F, TORTIA C. Modelling and control of steam soil disinfestation processes[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2003, 84(3): 247–256.
- [19] 袁善奎, 王以燕, 师丽红, 等. 我国微生物农药标准制定现状[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(1): 1–7.
YUAN Shankui, WANG Yiyan, SHI Lihong, et al. Current situation and prospects of biological pesticides related standards in China[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2018, 34(1): 1–7. (in Chinese)
- [20] GAY P, PICCAROLO P, RICAUDA A D, et al. A high efficiency steam soil disinfestation system, part I: physical background and steam supply optimisation[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2): 74–85.
- [21] GAY P, PICCAROLO P, RICAUDA A D, et al. A high efficiency steam soil disinfestation system, part II: design and testing [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(3): 194–201.
- [22] RUNIA W T. A recent development in steam sterilization[J]. Acta Horticulturae, 1984, 152: 195–200.
- [23] 汪小岳, 李成光, 杨振杰, 等. 移动式土壤旋耕蒸汽消毒机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 18–24.
WANG Xiaochan, LI Chengguang, YANG Zhenjie, et al. Development of mobile soil rotary steam disinfection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 18–24. (in Chinese)
- [24] 施印炎, 李成光, 汪小岳, 等. 可移动式土壤蒸汽消毒机的设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 56–59.
SHI Yinyan, LI Chengguang, WANG Xiaochan, et al. Design of removable soil steam sterilization machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 56–59. (in Chinese)
- [25] 蒋雪松, 杨冬冬, 潘四普, 等. 土壤消毒机蒸汽输送装置的设计与数值模拟[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 111–115, 120.
JIANG Xuesong, YANG Dongdong, PAN Sipu, et al. Design and numerical simulation of steam transfer device for soil disinfector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5): 111–115, 120. (in Chinese)
- [26] 汤斯威, 林清美. 澧县耕地土壤有机质状况及其差异性分析[J]. 湖南农业科学, 2018(12): 41–44.
TANG Siwei, LIN Qingmei. Current situation and difference analysis of soil organic matter in farmland of Lixian County[J]. Hunan Agricultural Science, 2018(12): 41–44. (in Chinese)