

基于脉动燃烧技术的土壤消毒蒸汽发生装置设计与试验

潘四普¹ 周宏平¹ 蒋雪松¹ 陈青¹ 李萍萍²

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘要: 为解决设施园艺土壤蒸汽消毒的蒸汽来源问题, 设计了基于脉动燃烧技术的蒸汽发生装置。该装置主要由脉动燃烧发动机和锅体两部分组成, 脉动燃烧发动机作为热源, 其主体浸设在锅体内部水中。通过功率计算, 在饱和蒸汽压力为 0.6 MPa 条件下满足 130 kg/h 蒸汽产量需要功率 107.12 kW, 8 组脉动燃烧发动机可以满足功率需求。设计了双化油器脉动燃烧发动机, 两只化油器同时进油、进气, 通过“Y”型喉管连接, 燃烧室呈圆柱形, 尾管由 3 根螺旋管并联组成。试验结果表明, 脉动燃烧发动机在空气和水中均具有良好的启动性和工作稳定性, 在空气中工作频率保持在 90.80 ~ 90.89 Hz 之间, 平均频率 90.86 Hz, 在水中工作频率保持在 87.27 ~ 87.81 Hz 之间, 平均频率为 87.51 Hz。额定工况和非额定工况下, 蒸汽发生装置热效率分别为 95.5%、95.8%。额定工况下蒸汽产量 150 kg/h、油耗 9.7 kg/h、功率 110.8 kW、尾气温度 108℃、过量空气系数 1.026, 满足土壤蒸汽消毒蒸汽量的要求。

关键词: 设施园艺; 土壤; 蒸汽消毒; 脉动燃烧; 热效率

中图分类号: S497 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0301-07

Design and Experiment of Soil Disinfection Steam Generator Based on Pulse Combustion Technology

PAN Sipu¹ ZHOU Hongping¹ JIANG Xuesong¹ CHEN Qing¹ LI Pingping²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Protected horticulture industry has developed rapidly in China in recent years. With the continuous development, a series of problems have arisen, which resulted in a huge loss in protected horticulture industry. For example, simplifying varieties, high multiple crop index and fertilizer overspending can lead to terrible results on the soil, like salts accumulation, disorder of soil physical and chemical properties, soil-born disease and insects, autotoxicity of crops, and so on, which called continuous cropping obstacle. The preferred manner to deal with continuous cropping obstacle is soil steam disinfection because of its great advantages compared with chemical disinfection. For example, with high temperature steam as disinfection medium, it can ensure that no pesticide residue on food. Besides, it can also effectively regulate soil physical and chemical properties, improve soil respiration ability and prevent soil hardening. To solve the problem of steam supply in soil steam disinfection, a steam generator based on pulse combustion technology was designed. The power of 107.12 kW was needed when the yield of the steam generator was 130 kg/h with the pressure of 0.6 MPa. It was mainly composed of two parts: the pulse combustion engine and the pot body. The steam generator utilized four pulse combustion engines which worked in parallel, and the main parts were immersed in the water in the pot body. Each pulse combustion utilized two carburetors for oil and air supply, which were connected to combustion chamber with “Y”-shaped throat. Three helical tubes worked in parallel as tailpipe. Fins were adhered to the inner wall of decoupling chamber, and angel steel was adhered to the outer wall. Experiment results showed that the pulse combustion engine had great start-up performance and working stability both in the air and water. The working frequency was tested both in the air and water. The working frequency of pulse combustion engine in the air was kept between 90.80 Hz and 90.89 Hz, and

收稿日期: 2018-04-02 修回日期: 2018-06-27

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B04)和江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX15_0899)

作者简介: 潘四普(1990—),男,博士生,主要从事脉动燃烧技术研究, E-mail: sipu_pan2008@163.com

通信作者: 周宏平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械装备与技术研究, E-mail: hpzhou@njfu.edu.cn

the average frequency was 90.86 Hz. In the water, the working frequency of pulse combustion engine was kept between 87.27 Hz and 87.81 Hz, and the average frequency was 87.51 Hz. The thermal efficiencies of the steam generator under the rated and non-rated operating conditions were 95.5% and 95.8% respectively, and the difference was less than 0.3%. Under the rated operating conditions, steam production, oil consumption and power of the steam generator were 150 kg/h, 9.7 kg/h, 110.8 kW, respectively. Besides, tail gas temperature and excess air coefficient were 108°C and 1.026, respectively. The steam generator can meet the requirement of steam in soil steam disinfection quite well. The research provided a reference for the research and development of the soil steam disinfection machine used in protected horticulture industry.

Key words: protected horticulture; soil; steam disinfection; pulse combustion; thermal efficiency

0 引言

近年来,我国设施园艺产业发展迅猛,2015年设施园艺总面积已达410.9万 hm^2 ,产值近9800亿元^[1],已成为部分地区的支柱性产业。在设施园艺生产过程中,由于作物品种单一、复种指数高、肥料过度施用,导致土壤盐类累积、理化性状劣化、根结线虫等土传病虫害频发,从而引发连作障碍,造成作物减产甚至绝收^[2-4]。连作障碍已成为制约我国设施园艺土壤资源持续高效利用的瓶颈。

优质土壤是设施园艺生产的重要保障,土壤消毒是解决连作障碍的有效手段^[5-8]。根据消毒介质不同,土壤消毒可分为化学药剂消毒、生物熏蒸以及物理消毒。土壤蒸汽消毒属于物理消毒方式的一种,主要通过向土壤中输送高温蒸汽以达到杀灭土壤有害微生物的目的。与其他土壤消毒方式相比,蒸汽消毒具有如下优点:以高温蒸汽为消毒介质,绿色环保,不影响食品安全;效率高、效果优;长期使用不会产生病虫害抗药性问题;可有效调节土壤理化特性,提高土壤呼吸能力,改善土壤板结状况^[9-14]。

目前国外已有较多关于土壤蒸汽消毒技术的研究报道,VAN LOENEN等^[15]采用覆膜法进行土壤蒸汽消毒,可杀死土壤中绝大部分杂草种子、病菌及根结线虫。RUNIA^[16]通过抽取基质中预埋管道内的空气产生负压,将蒸汽吸入基质,消毒深度可达45 cm。MORRA等^[17-18]采用ECOSTAR SC600型自走式土壤蒸汽消毒机对设施蔬菜基质进行消毒试验,在消毒1 h后,15 cm深的基质仍有50~70°C,可有效杀灭大丽轮枝菌等有害真菌。GAY等^[19-20]设计的Steriliter S系列自走式土壤蒸汽消毒机,采用罩盖式消毒方式,单个消毒盘装配99个长18 cm的注射器,蒸汽通过注射器通入土壤完成消毒作业。文献[21-24]将基质土壤集中于消毒罐内,通过向消毒罐内通入蒸汽方式进行消毒。文献[25-26]设计了牵引式土壤蒸汽消毒设备,由动力机械牵引前

进,在通入蒸汽的同时采用旋耕刀片破碎、抛起土壤颗粒,增大蒸汽与土壤颗粒的接触面积,增强消毒效果。

设施园艺土壤蒸汽消毒需要解决的首要问题是蒸汽来源。目前国内外土壤蒸汽消毒设备所采用的蒸汽大都通过燃煤、燃油锅炉直燃加热方式产生,存在设备尺寸大、与设施园艺尺寸不匹配、热效率低、污染物排放高等问题。

脉动燃烧是一种介于稳态燃烧和爆炸燃烧之间的特殊燃烧方式,在其燃烧过程中,表征燃烧过程的状态参数(如燃烧室压力、温度、尾气流速)随时间呈周期性变化^[27-29],具有发动机体积小、燃烧强度高、传热系数高、污染物排放低等优点,被广泛应用于强化传热场合^[30-34]。本文将脉动燃烧技术与土壤蒸汽消毒技术相结合,设计一种功率高、体积小、可用于土壤蒸汽消毒的脉动燃烧蒸汽发生装置,通过燃油脉动燃烧加热的方式产生蒸汽,以期对设施园艺土壤蒸汽消毒蒸汽来源问题提供一种新的解决方法。

1 功率计算

根据土壤蒸汽消毒作业对蒸汽量的需求,将蒸汽发生装置的蒸汽产量设为130 kg/h,额定饱和蒸汽压力为0.6 MPa,假设水温初始为20°C。查表可得0.6 MPa下饱和蒸汽温度为158.8°C,比焓为2755.37 kJ/kg,20°C饱和水的比焓为83.86 kJ/kg。则蒸汽发生装置所需要的功率为

$$P_x = Q_x / t \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad Q_x = m(h_{g(158.8)} - h_{g(20)}) \quad (2)$$

式中 P_x ——所需功率,kW

t ——时间,s

Q_x ——所需热量,kJ

m ——蒸汽质量,kg

$h_{g(158.8)}$ ——158.8°C饱和蒸汽比焓,kJ/kg

$h_{g(20)}$ ——20°C饱和水比焓,kJ/kg

计算可得,蒸汽发生装置所需功率为96.47 kW。

假设蒸汽发生装置的热效率为 90%, 则脉动燃烧发动机所需功率为

$$P_f = P_s / 0.9 = 107.12 \text{ kW} \quad (3)$$

根据前期研究经验, 单化油器脉动燃烧发动机功率范围为 14 ~ 17 kW。因此, 为满足蒸汽量需求, 至少需要 8 组单化油器脉动燃烧发动机。

2 脉动燃烧发动机设计

Helmholtz 型脉动燃烧发动机依靠 Helmholtz 谐振器原理工作, 是声学脉动与燃烧过程相互耦合的结果。目前对脉动燃烧发动机的驱动机理认识尚不完善, 在其研制过程中还缺乏完整的理性化设计方法, 只能依靠试验法进行^[35]。因此, 本文针对影响脉动燃烧发动机耦合过程的关键部件进行初步设计, 然后通过试验确定设计结果的可行性。

2.1 整机结构及工作原理

Helmholtz 型脉动燃烧发动机整机结构如图 1 所示, 主要由油箱、化油器、高压发生器、燃烧室、尾管、喉管以及打气筒组成。

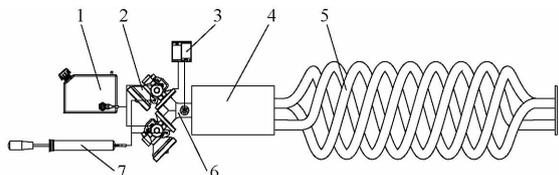


图 1 Helmholtz 型脉动燃烧发动机装置结构图

Fig.1 Structure diagram of Helmholtz type pulse combustion

1. 油箱 2. 化油器 3. 高压发生器 4. 燃烧室 5. 尾管 6. 喉管 7. 打气筒

启动发动机之前, 接通高压发生器电路, 火花塞开始点火。推动打气筒向化油器内注入空气, 化油器产生油气混合气, 经过喉管时被电火花点燃, 在燃烧室内爆炸燃烧, 产生高温尾气。由于化油器内设有单向阀膜片, 体积急剧膨胀的高温尾气只能向尾管方向运动。在排出高温尾气过程中, 燃烧室内温度降低, 产生负压, 吸回部分高温尾气, 同时从化油器吸取新的油气混合气。新的油气混合气在燃烧室内遇到高温尾气又被点燃, 完成新一轮燃烧过程。在发动机启动之后, 断开高压发生器电路, 发动机可以实现自激、自吸, 自主完成供油、供气过程。

2.2 关键部件设计

通过上文计算, 需要 8 组单化油器脉动燃烧发动机才能满足功率需求, 势必会造成蒸汽发生装置尺寸庞大、结构复杂。考虑到设施园艺内部作业空间有限, 为缩小尺寸, 简化结构, 同时保证功率, 设计了双化油器脉动燃烧发动机结构, 即单组脉动燃烧发动机配备 2 个化油器。2 个化油器同时进油、进气, 使得发动机功率得到提升, 同时发动机所需数量

缩减一半。为满足双化油器结构需要, 将连接化油器与燃烧室的喉管设计成“Y”型。

燃烧室呈圆柱形, 其容积为

$$V_r = \frac{P_r}{q_r} \quad (4)$$

式中 P_r ——脉动燃烧发动机功率, 为 26 kW

q_r ——燃烧室容积热强度, 为 30 000 kW/m³

V_r ——燃烧室容积, m³

燃烧室长径比为 2, 经过计算、圆整, 得出燃烧室内径为 0.08 m, 燃烧室长度为 0.16 m。为保证结构强度及密封性, 燃烧室采用 2 mm 厚度的 06Cr19Ni10 不锈钢板卷制, 整体采用焊接方式。

燃烧室内油气混合气爆炸燃烧产生的尾气在压力作用下喷进尾管, 此时的尾气仍具有较高温度, 同时高速脉动的尾气气流削弱了边界层的影响, 有助于提高对流换热强度, 使得尾管成为蒸汽发生装置的主要换热面之一。为了在保证发动机结构紧凑的情况下尽量增大换热面积, 将尾管设计成 3 根螺旋形弯管组合形式。单根螺旋形弯管内径为 0.02 m, 由 06Cr19Ni10 不锈钢管卷制而成。

3 脉动燃烧发动机可行性试验

3.1 试验设备和方法

试验设备主要包括: 脉动燃烧发动机、测试台架、测试水槽、MPA201 型传声器(北京 BSWA 公司)、NI-9234 型噪声与振动信号采集卡(美国 National Instruments 公司, 4 通道, 单通道最大采样频率 51.2 kHz)、PC2810 型秒表(深圳市惠波工贸有限公司, 精度 0.01 s)以及 LQ-C100001 型电子秤(浙江五鑫衡器有限公司, 精度 0.1 g)。燃料采用 92 号汽油。

为验证设计结果的可行性, 试验内容主要分为 3 个部分。首先测试脉动燃烧发动机在空气中的启动性和工作稳定性。若其在空气中具有良好的启动性和工作稳定性, 则对其功率进行测试。最后测试脉动燃烧发动机在水中的启动性及工作稳定性。

启动性及工作稳定性测试装置如图 2 所示, 取 2 组脉动燃烧发动机, 一组固定在测试台架上, 一组固定在测试水槽中。水槽内注满水, 保证脉动燃烧发动机的燃烧室及尾管全部浸没在水中。通过脉动燃烧发动机的噪声信号来分析其启动性及工作稳定性。具体方法为: 接通高压发生器电路, 推动打气筒向化油器内打气, 观察发动机启动情况, 每隔 5 min 采集化油器附近的噪声信号, 采集时间为 5 s, 测试时间为 60 min。

脉动燃烧发动机的功率计算公式为



(a) 空气中



(b) 水中

图2 启动性和工作稳定性测试装置

Fig.2 Testing devices of start-up performance and working stability

$$P_m = BQ_{dw}/t \quad (5)$$

式中 P_m ——脉动燃烧发动机功率, kW

B ——燃油消耗量, kg

Q_{dw} ——燃油低位发热量, kJ/kg

在脉动燃烧发动机工作过程中,记录一段时间内油箱的初始及终了时刻质量,二者之差即为燃油消耗量。功率测试重复3次,取其平均值。

3.2 试验结果分析

第60分钟时在空气中进行试验的脉动燃烧发动机噪声时域信号如图3所示。对在不同时刻采集到的噪声信号进行傅里叶变换,得到不同时刻的频率如表1所示。从表1可以看出,在60 min内脉动燃烧发动机频率保持在90.80~90.89 Hz之间,平均频率90.86 Hz,极差为0.09 Hz,标准差为0.03 Hz。因此该脉动燃烧发动机在空气中具有良好的启动性及工作稳定性。

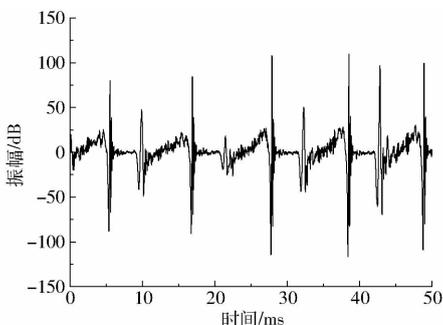


图3 脉动燃烧发动机噪声时域信号

Fig.3 Time domain signal of pulse combustion engine noise

脉动燃烧发动机的功率测试结果如表2所示。从表2可看出,3次测试平均功率为26.8 kW,满足上文所计算的对脉动燃烧发动机的功率需求。

表1 脉动燃烧发动机在空气中的工作频率

Tab.1 Working frequency of pulse combustion engine in air

时间/min	5	10	15	20	25	30
频率/Hz	90.80	90.85	90.83	90.85	90.87	90.89
时间/min	35	40	45	50	55	60
频率/Hz	90.87	90.86	90.86	90.87	90.87	90.89

表2 脉动燃烧发动机功率测试

Tab.2 Power test of pulse combustion engine

试验序号	燃油消耗量/kg	时间/s	功率/kW
1	0.074 1	120.45	26.5
2	0.076 2	121.03	27.1
3	0.074 9	120.88	26.7

脉动燃烧发动机在水中的工作频率如表3所示。从表3可以看出,在60 min内脉动燃烧发动机频率保持在87.27~87.81 Hz之间,平均频率为87.51 Hz,极差为0.54 Hz,标准差为0.16 Hz。因此该脉动燃烧发动机在水中同样具有良好的启动性及工作稳定性。

表3 脉动燃烧发动机在水中的工作频率

Tab.3 Working frequency of pulse combustion engine in water

时间/min	5	10	15	20	25	30
频率/Hz	87.76	87.54	87.81	87.43	87.28	87.35
时间/min	35	40	45	50	55	60
频率/Hz	87.56	87.48	87.59	87.27	87.47	87.59

4 蒸汽发生装置结构设计和工作原理

脉动燃烧蒸汽发生装置的结构如图4所示,主要由4组 Helmholtz 型脉动燃烧发动机和锅体两大部分组成。脉动燃烧发动机的燃烧室及尾管全部浸没在锅体内部水中。锅体呈圆筒形,主要由筒体、前封头、后封头、汽包以及进水口、出汽口等接口组成。汽包位于筒体之上,以实现汽、水分离。前、后封头均为椭圆型封头,且都开有孔,分别与脉动燃烧发动机的喉管与波纹管连接,将主要发热部件封闭在锅体内。后封头设有手孔,方便对锅体内部检修。

脉动燃烧发动机启动之后,高温尾气在经尾管、排气去耦室、波纹管排出过程中,所携带的热量通过对流换热传递给锅体内的水,对其进行加热,实现热量传递。当锅体内的水温度升至沸点时,产生蒸汽,经汽包输出,供土壤消毒设备使用。

5 蒸汽发生装置性能试验

根据 GB/T 10820—2011 要求,对蒸汽发生装置的性能测试项目主要包括:热效率、尾气温度及过量

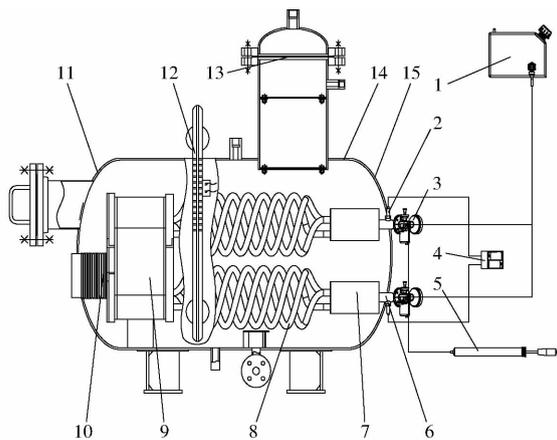


图 4 脉动燃烧蒸汽发生装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of pulse combustion steam generator

1. 油箱 2. 火花塞 3. 化油器 4. 高压发生器 5. 打气筒 6. 喉管 7. 燃烧室 8. 尾管 9. 排气去耦室 10. 波纹管 11. 后封头 12. 液位计 13. 汽包 14. 筒体 15. 前封头

空气系数。

5.1 试验设备和方法

试验设备主要包括：脉动燃烧蒸汽发生装置、LDG 电磁流量计(上海驰控自动化仪表有限公司, 精度等级 0.5 级)、电子秤、AUTOplus 5-2 型手持式尾气分析仪(英国 Kane 公司)、CT3030 型电导率仪(深圳市柯迪达电子有限公司, 精度 1 μS/cm)、TES 1310 型数显温度计(台湾泰仕电子工业股份有限公司, 精度 0.1℃)。

根据 GB/T 10820—2011 采用正平衡法对蒸汽发生装置的热效率进行试验。在正式试验开始前, 保持蒸汽发生装置稳定运行 1.5 h, 使其达到热工况稳定状态。连续试验 2 h, 在试验过程中每隔 5 min 记录一次进水温度、蒸汽压力, 其余项目每隔 10 min 记录一次。试验结束时, 锅筒内的水位应与试验开始时保持一致。试验在额定工况和非额定工况下进行 2 次, 分别计算其热效率。试验现场如图 5 所示。



图 5 试验现场图

Fig. 5 Photo of experiment

脉动燃烧蒸汽发生装置的热效率计算公式为

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

$$其中 \quad Q_{out} = D_{gs} \left(h_{gq} - h_{gs} - \frac{r\omega}{100} \right) - G_s r \quad (7)$$

$$Q_{in} = BQ_{dw} \quad (8)$$

式中 Q_{out} ——蒸汽发生装置有效利用热量, kJ

Q_{in} ——蒸汽发生装置输入热量, kJ

D_{gs} ——蒸汽发生装置蒸汽产量, kg/h

h_{gq} ——饱和蒸汽比焓, kJ/kg

h_{gs} ——饱和水比焓, kJ/kg

r ——饱和蒸汽汽化潜热, kJ/kg

ω ——饱和蒸汽湿度, %

G_s ——锅水取样量, kg/h

蒸汽发生装置热功率计算公式为

$$P = Q_{out}/t \quad (9)$$

式中 P ——蒸汽发生装置热功率, kW

5.2 试验结果分析

蒸汽发生装置运行参数如表 4 所示。由表 4 可看出, 脉动燃烧蒸汽发生装置在额定工况和非额定工况下都具有较高的热效率, 2 次试验热效率分别为 95.5%、95.8%, 远高于 GB/T 10820—2011 所要求的燃油锅炉最低热效率 86%。2 次热效率之差为 0.3%, 小于 GB/T 10820—2011 所要求的 2%, 表明蒸汽发生装置热工况较为稳定。此外, 尾气温度和过量空气系数均小于 GB/T 10820—2011 所要求的 210℃ 和 1.3。额定功率 110.8 kW, 大于所需功率 107.12 kW, 满足功率需求。额定蒸汽产量 150 kg/h, 满足土壤蒸汽消毒蒸汽量的要求。

表 4 蒸汽发生装置运行参数

Tab. 4 Operation parameters of steam generator

运行参数	额定工况	非额定工况
蒸汽产量 $D_{gs}/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	150	152
燃油消耗量 B/kg	9.7	9.8
蒸汽压力/MPa	0.60	0.59
给水温度/℃	21	20
饱和蒸汽湿度 $\omega/\%$	3	3
锅水取样量 $G_s/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	0.5	0.5
尾气温度/℃	108	102
尾气过量空气系数	1.026	1.037
功率 P/kW	110.8	112.3
热效率 $\eta/\%$	95.5	95.8

6 结论

(1) 通过功率计算, 得到额定蒸汽压力 0.6 MPa、蒸汽产量 130 kg/h, 需要功率 107.12 kW, 8 组脉动燃烧发动机可以满足功率需求。

(2) 脉动燃烧发动机在空气中和水中均具有良好的启动性和工作稳定性。在空气中平均工作频率

为 90.86 Hz, 在水中平均工作频率为 87.51 Hz。定功率 110.8 kW, 额定工况下热效率 95.5%, 可以满足土壤蒸汽消毒蒸汽量的要求。

(3) 蒸汽发生装置额定蒸汽产量 150 kg/h, 额

参 考 文 献

- 1 杨其长. 供给侧改革下的设施园艺将如何发展[J]. 中国农村科技, 2016(5):40-43.
- 2 孙光闻, 陈日远, 刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报, 2005, 21(14):184-188.
SUN Guangwen, CHEN Riyuan, LIU Houcheng. Causes and control measures for continuous cropping obstacles in protected vegetable cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(14):184-188. (in Chinese)
- 3 郭军, 顾闽峰, 祖艳侠, 等. 设施栽培蔬菜连作障碍成因分析及其防治措施[J]. 江西农业学报, 2009, 21(11):51-54.
GUO Jun, GU Minfeng, ZU Yanxia, et al. Causes and control measures of continuous cropping obstacle in facility vegetable cultivation[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(11):51-54. (in Chinese)
- 4 葛晓颖, 孙志刚, 李涛, 等. 设施番茄连作障碍与土壤芽孢杆菌和假单胞菌及微生物群落的关系分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):514-523.
GE Xiaoying, SUN Zhigang, LI Tao, et al. Soil Pseudomonas spp., Bacillus spp., and microbial communities under tomato continuous cropping in greenhouse production[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3):514-523. (in Chinese)
- 5 李兴龙, 李彦忠. 土传病害生物防治研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(3):204-212.
LI Xinglong, LI Yanzhong. Research advances in biological control of soil-borne disease[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(3):204-212. (in Chinese)
- 6 曹焯程, 王久臣. 土壤消毒原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2015:96.
- 7 李萍萍. 设施园艺中的土壤生态问题分析及清洁生产对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14):346-351.
LI Pingping. Soil ecological problem and its resolvent in greenhouse horticulture[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(14):346-351. (in Chinese)
- 8 曹焯程, 郭美霞, 王秋霞, 等. 世界土壤消毒技术进展[J]. 中国蔬菜, 2010(21):17-22.
- 9 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]. Agricultural Engineering, 2016, 6(3):109-112. (in Chinese)
- 10 吴雪芬, 周英, 陈军, 等. 土壤消毒技术在安全无公害蔬菜生产上的应用[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(11):85-87.
WU Xuefen, ZHOU Ying, CHEN Jun, et al. Application of soil sterilization technology in safe and pollution-free vegetable production[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(11):85-87. (in Chinese)
- 11 FENNIMORE S A, MARTIN F N, MILLER T C, et al. Evaluation of a mobile steam applicator for soil disinfestation in California strawberry[J]. HortScience, 2014, 49(12):1542-1549.
- 12 欧长劲, 郭伟, 蒋建东, 等. 设施农业介质消毒技术与设备的现状和发展[J]. 农机化研究, 2009, 31(3):210-212, 233.
OU Changjin, GUO Wei, JIANG Jiandong, et al. Current state and developing trent of sterilizing technology and facility for culture medium in installment agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3):210-212, 233. (in Chinese)
- 13 BERRUTO R, GAY P, PICCAROLO P, et al. Grey-box models for steam soil disinfestation simulation[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 65(1):191-200.
- 14 DABBENE F, GAY P, TORTIA C. Modelling and control of steam soil disinfestation processes[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3):247-256.
- 15 VAN LOENEN M C A, TURBETT Y, MULLINS C E, et al. Low temperature-short duration steaming of soil kills soil-borne pathogens, nematode pests and weeds[J]. European Journal of Plant Pathology, 2003, 109(9):993-1002.
- 16 RUNIA W T. A recent development in steam sterilization[J]. Acta Horticulturae, 1984, 152(152):195-200.
- 17 MORRA L, BILOTTO M, CAROPPO S, et al. Two-year evaluations of soil sterilization by use of steam and an exothermic reaction. II. Effect on vegetable crops under tunnel-greenhouse[J]. Colture Protette, 2009, 38(8):61-65.
- 18 MORRA L, BILOTTO M, TOMASONE R, et al. Two-year evaluations of soil sterilization by use of steam and an exothermic reaction. I. Thermic efficacy and biological assays[J]. Colture Protette, 2009, 38(7):87-92.
- 19 GAY P, PICCAROLO P, AIMONINO D R, et al. A high efficacy steam soil disinfestation system, part II: design and testing [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(3):194-201.
- 20 GAY P, PICCAROLO P, AIMONINO D R, 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 卓杰强, 陈立振, 周增产, 等. 无土栽培基质蒸汽消毒机研究与应用[J]. 农机化研究, 2012, 34(9):95-98.
ZHUO Jieqiang, CHEN Lizhen, ZHOU Zengchan, et al. Research and application of soilless cultivation matrix steam disinfection machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(9):95-98. (in Chinese)
- 22 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)
- 23 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)
- 24 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)
- 25 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)
- 26 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)
- 27 蔡文祥, 祁斌, 马虎, 等. 有阀式脉动喷气发动机出口瞬态速度场测量[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2824 - 2829.
CAI Wenxiang, QI Bin, MA Hu, et al. Measurement of transient velocity field at exit zone of valve pulse jet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2824 - 2829. (in Chinese)
- 28 MARTINS C A, CARVALHO J A, VERAS C A G, et al. Experimental measurements of the NO_x and CO concentrations operating in oscillatory and non-oscillatory burning conditions[J]. Fuel, 2006, 85(1): 84 - 93.
- 29 程显辰. 脉动燃烧[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 29 - 31.
- 30 周宏平, 许林云, 周凤芳, 等. 声学 and 加热条件对脉动发动机工作频率的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(3): 91 - 93.
ZHOU Hongping, XU Linyun, ZHOU Fengfang, et al. The relation acoustics condition and calefaction condition with the work frequency of pulse-jet engine[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2005, 29(3): 91 - 93. (in Chinese)
- 31 康杨, 翁春生, 李宁. 脉动喷气发动机噪声特性研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 273 - 279.
KANG Yang, WENG Chunsheng, LI Ning. Research on noise characteristics of pulse jet engine[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 273 - 279. (in Chinese)
- 32 牛海霞, 刘榴, 赵文河, 等. 脉动燃烧尾气干燥过程质量传递特性[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 129 - 133.
NIU Haixia, LIU Liu, ZHAO Wenhe, et al. Mass transfer between materials and unsteady airflow from a Helmholtz type combustor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 129 - 133. (in Chinese)
- 33 路倩倩, 杨德勇, 郎芝花, 等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 123 - 127.
LU Qianqian, YANG Deyong, LANG Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in Helmholtz pulse combustion dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 123 - 127. (in Chinese)
- 34 WU Zhonghua, YUE Lian, LI Zhanyong, et al. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 8(1): 148 - 157.
- 35 程显辰. 脉动燃烧器的设计与研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(2): 241 - 244.
CHENG Xianchen. Design and investigation of pulse combustors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(2): 241 - 244. (in Chinese)

(上接第 236 页)

- 29 VAPNIK V N. 统计学习理论本质[M]. 张学工, 译. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- 30 BASHARAT J, NAIEM A. Estimation of diffuse solar radiation in humid-subtropical climatic region of India; comparison of diffuse fraction and diffusion coefficient medels[J]. Energy, 2017, 131: 149 - 164.
- 31 汪彪, 曾新民, 刘正奇, 等. 中国西北地区参考作物蒸散量的估算与变化特征[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 243 - 251.
WANG Biao, ZENG Xinmin, LIU Zhengqi, et al. Estimation and variation characteristics of reference crop evapotranspiration in Northwest China during 1956—2011[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2): 243 - 251. (in Chinese)
- 32 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683 - 691.
XIE Xianqun, WANG Ling. Changes of potential in a Northern China over the past 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683 - 691. (in Chinese)
- 33 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 等. 基于极限学习机的参考作物蒸散量预测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 153 - 160.
FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Prediction model of reference crop evapotranspiration based on extreme learning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 153 - 160. (in Chinese)
- 34 侯志强, 杨培岭, 苏艳平, 等. 基于最小二乘支持向量机的 ET₀ 模拟计算[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 743 - 749.
HOU Zhiqiang, YANG Peiling, SU Yanping, et al. Simulation of ET₀ based on LS - SVM method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 743 - 749. (in Chinese)
- 35 刘雅鸣. 中国地面气温日值 0.5℃ × 0.5℃ 格点数据集 (V2.0) [R/OL]. http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_TEM_DAY_GRID_0.5/keywords/%E6%B0%94%E8%B1%A1%E7%AB%99.html.
- 36 姜大明. 2010 年度国土资源政务信息网上公开执行情况检查结果 [R/OL]. http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201103/t20110322_825776.htm.