

微波技术在土壤消毒方面应用综述

孙效荷^{1,2*}, 翟长远^{1#}, 杨 硕^{1,3}, 马浩霖^{1,4}

¹北京农业智能装备技术研究中心, 北京

²吉林农业大学资源与环境学院, 吉林 长春

³中国农业大学信息与电气工程学院, 北京

⁴西南大学工程技术学院, 重庆

Email: #zhaichangyuan@163.com

收稿日期: 2021年3月8日; 录用日期: 2021年4月8日; 发布日期: 2021年4月15日

摘 要

土壤传病虫害与顽固性杂草一直是造成作物减产的重要因素, 对农作物种植前的土壤进行消毒处理是防控病、虫、草害的重要手段。土壤中寄存着一定数量的虫卵、病原菌与草籽, 微波所具有的穿透性能有效的将其杀灭, 相比于同样有穿透效果的溴甲烷化学药剂土壤消毒法, 微波法不会对环境造成污染、无药物残留, 是一种高效、无公害、理想的病虫草害防治手段。首先, 本文对微波的生成与微波土壤的消毒机理进行阐述, 在此基础上分析了微波对土壤的穿透性、作用于生物体时产生的热效应与非热效应。进而, 总结归纳了国内外学者针对微波杀菌特性研制出的多种基于微波技术的土壤消毒设备, 对微波消毒设备在不同的结构形式的土壤消毒特性进行分析, 按照微波土壤消毒设备作业形式上的不同将其分为表面非接触式、犁形接触式和分离取土式, 其中分离土式消毒一定程度上提升了微波对土壤的处理效率。最后, 对微波土壤消毒设备亟待解决的问题进行了展望: 1) 微波发射微波频率的不同对土壤的穿透性与灭菌除草实际效果的影响; 2) 土壤含水率的高低对灭菌除草及有效作业空间的影响, 并提出利用试验方法根据微波发射的频率、土壤含水率等因素来确定实际生产中微波土壤消毒设备的工作参数与工作环境。

关键词

微波机理, 土壤消毒, 灭菌除草

Summary of Application of Microwave Technology in Soil Disinfection

Xiaohe Sun^{1,2*}, Changyuan Zhai^{1#}, Shuo Yang^{1,3}, Haolin Ma^{1,4}

¹Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing

²College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun Jilin

*第一作者。

#通讯作者。

³College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing

⁴College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing

Email: #zhaichangyuan@163.com

Received: Mar. 8th, 2021; accepted: Apr. 8th, 2021; published: Apr. 15th, 2021

Abstract

Soil-borne diseases and insect pests and persistent weeds have always been an important factor in reducing crop yields. Disinfecting the soil before planting crops is an important means of preventing and controlling diseases, insects and weeds. A certain number of insect eggs, pathogenic bacteria and grass seeds are stored in the soil. The penetration performance of microwave can effectively kill them. Compared with the same penetration effect of methyl bromide chemical agent soil disinfection method, the microwave method will not cause the environment pollution and there is no drug residue. It is an efficient, pollution-free and ideal means of preventing and controlling diseases, insects and weeds. First of all, this article describes the generation of microwaves and the mechanism of microwave soil disinfection. On this basis, the penetration of microwaves to soil, and the thermal and non-thermal effects generated when acting on organisms are analyzed. Furthermore, a variety of soil disinfection equipments based on microwave technology developed by scholars at home and abroad for the characteristics of microwave sterilization are summarized. The soil disinfection characteristics of the microwave disinfection equipment in different structural forms are analyzed, and the operation form of the microwave soil disinfection equipment is analyzed. It is divided into surface non-contact type, plow-shaped contact type and separated soil extraction type. The separated soil type disinfection improves the efficiency of microwave treatment of soil to a certain extent. Finally, the problems to be solved urgently by microwave soil disinfection equipment are prospected: 1) The influence of different microwave frequencies on the penetration of the soil and the actual effect of sterilization and weeding; 2) The level of soil moisture content affects sterilization and weeding. It also proposes to use test methods to determine the working parameters and working environment of microwave soil disinfection equipment in actual production according to the frequency of microwave emission, soil moisture content and other factors.

Keywords

Microwave Mechanism, Soil Disinfection, Sterilization and Weeding

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

物理法和化学法是预防土传病害的两种主要方式，化学方法通常上是对土壤施以化学药剂来达到土壤中菌虫、草的杀灭效果，但化学药剂对生态环境会产生严重的污染并危害人畜安全。物理方法主要有太阳能法和蒸法[1] [2] [3]，太阳能法对消毒土壤的地区与外部环境条件具有局限性，太阳能的获取比较依赖于气候因素，一般在气温相对较高的环境下作业；而蒸汽式热消毒设备构造普遍复杂制作成本较高，不适用于大面积耕地的土壤消毒；微波消毒是利用微波“照射”土壤，由于微波具有的一些特性如穿透

性、热效应及非热效应等使得微波可以成为土壤消毒方式中的重要一员；具有效率高、速度快、作用后无污染、操作简便多重优点[4]。微波土壤消毒的提出对提高农业的效率、增加作物产量和提高作物质量、减少作物生产的劳动力与耕作成本有着积极意义。

早在上世纪八十年代，就有美国学者对微波辐射的除菌方法进行实验研究，由于技术水平及成本等因素的限制，未能将提出的方案做出相应的微波杀毒设备。近年来，随着现代化智能农业、食品业与化工等行业的快速发展[5]，国际上掀起了对微波技术在多领域的开发利用与研究的热潮，微波独有的特性使其具有广阔前景，被各国政府和学者广为关注。目前，微波设备已应用于各个领域，如金属、陶瓷、聚合物和复合材料的材料的加工、从食品和生物制品中提取溶剂、有机和无机化合物的合成、机械加工、废物修复和环境方面的应用等[6]。

2. 微波的生成与土壤消毒的机理

病原菌及虫卵大都寄存于土壤当中，一旦周边环境如温度、湿度等满足条件时害情便一触即发。要想避免大面积害情的爆发对土壤进行定期消毒显得尤其重要。以下从微波的生成、杀菌灭虫的机理及微波所具有的特性来说明微波对土壤杀菌灭虫的可行性。

2.1. 微波生成原理

微波是由微波装置内部的磁控管、内芯以及外侧铜环施加高电压后产生，高电压将内芯所产生的电子“释放”出去，被释放出的电子高速飞向外侧铜环，铜环外部的磁铁由于极性的影响使这些电子在内芯和铜环之间做轮摆运动。过程中会生成大量的热，故内芯的材质为钨和钽的合金。其中，钨为耐高温金属材料，钽则是生发电子的良好材料。

磁控管是产生微波能的主要元件且种类较多[6]；如图1按照微波磁控管的结构状态、工作分类、是否可调对其进行具体划分。

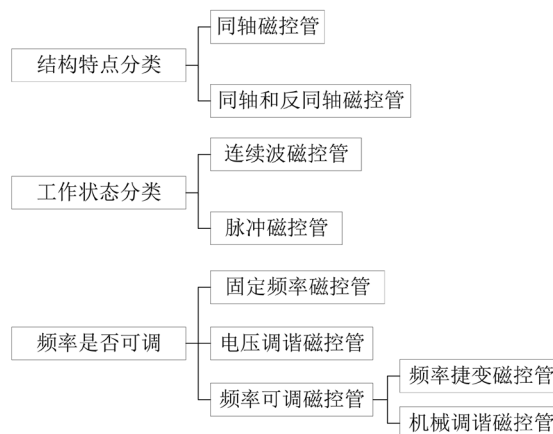


Figure 1. Classification diagram of different forms of microwave magnetrons
图 1. 微波磁控管不同形式分类图

其中，电压调谐磁控管是一种借助改变阳极电压实现频率调谐的磁控管。连续波磁控管是最为广泛使用的一类，功率一般在 400~1000 W 之间，工作时自身调节磁控管外侧铜环上的磁场强度，使磁控管内芯轨道上的电子束掠过谐振腔口，从而产生微波，类似向一个装有半瓶水的瓶口吹口哨。由于此类磁控管具有较高的工作效率与较长的使用寿命，具有结构简单、制造精度高、成本低、可靠性强等优点而被广泛使用。

波导是微波传输所专用的主要元器件，微波杀菌设备由微波发生装置释放微波后，由于不同的应用需求致使设计形式的不同，微波作用于土壤的过程中需将所产生的微波传递到释放腔口，因此，具有一个可完成改变传送方向的波导，依靠不同截面连接相互耦合并且在微波传送过程中尽量地避免微波耗散也成为微波杀菌过程中的一个重要环节。土壤消毒设备产生的微波都是经由波导传递至操作室对土壤进行辐射，还有部分微波由金属腔体反射落入土壤。

2.2. 微波杀菌灭虫的机理

微波是由电场和磁场相互支撑组成波的形式在空间中传播的，电场在与磁场在微波传播的方向上相互垂直[7]。其中，电磁波的单维度波形类似于余弦曲线，具有波峰和波谷，代表波的能量最值，驻波会在操作室内产生热点和冷点，波腹为操作室内的“热点”，波节为“冷点”。例如计算家用微波炉频率，可通过加热奶酪的方法可观察奶酪冷点既未融化点间的距离宏观上的获得微波炉中的半个微波长度，约为 8 cm，通过公式 $c = \lambda\nu$ 便可估算微波的频率(其中 c 为真空中电磁波传输的速度，大小约等于光速)，算得频率 ν 约为 2400 MHz，其中 2480 MHz 为我国民用微波设备中的常用频率。

介质材料由极性分子和非极性分子构成，无电场作用下的非极性分子内部正负电荷的中心重合；拿典型的极性水分子来举例，水分子内部正负电荷的中心不重合，一端带正电荷，另一端带负电荷，而微波辐射目的恰恰可以使介质材料中的极性分子获得更多能量。土壤中的成虫与虫卵、细菌和真菌的主要成分为蛋白质、脂肪和无机物。所构成的复杂化合物为凝聚态物质，其中生物细胞中水含量约 80% [8]，水作为良好的微波介质可吸收大量的微波能，为微波土壤消毒提供了重要条件。

若微波设备对土壤等介质施以 2450/915 MHz 的频率时(其中 2450/915 MHz 为我国家庭、工业中使用的频率)，电磁波中的电场与磁场不断地切换相位[9]，其变换速度达到 24.5/9.15 亿次每秒，土壤中的水分子也随之摆动相应次数并随电磁场的变换进行排列，变换中的磁场不断使水分子“翻滚”并伴随快速的前后运动，这个过程中水分子经过摩擦打乱分子间的氢键，交变电场的场能转化成为介质内的热能，微波作用时分子间的作用力加速了微波能转化为热能的过程，形成了宏观上的土壤温度的升高，因真空中电磁波的速度为 299,792,458 m/s，频段转换用时极快，这便是微波能够使介质同时内外受热的原因，也就是微波所具有的“穿透性”，也是微波使介质内外同时受热的固有特性。平面电磁波在有耗介质中的传播常数 γ 通常由以下列公式定义：

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu_0\mu \cdot \epsilon_0\epsilon} \quad (1)$$

对于非磁性材料，磁导率 $\mu = \mu_0$ 。大多数农业材料的磁导率 $\mu = 1$ ，因微波的穿透性基本上与自由空间的穿透性相同，传播常数即可表示为：

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_0\epsilon} \quad (2)$$

式中， α ——衰减常数，

j ——实数，

β ——相位常数，

ω ——角频率，

其中， $\omega = 2\pi f$ ， $f = c/\lambda_0$ ， f 为频率单位是 Hz，

λ_0 ——自由空间中的波长，

c ——光在真空中传播的速度，

ϵ ——介电常数，

ϵ_0 ——复介电常数与自由空间的介电常数的比值，数值大小为 8.854×10^{-12} F/m。

一定强度微波场的作用下，土壤中菌、虫会受到分子弛豫极化的影响。弛豫极化是不可逆的，其中分子的弛豫极化由外加电场作用于弱束缚荷电粒子造成，而热运动使这些质点分布混乱，微波电场使它们有序分布，平衡时建立的极化状态在吸收微波能的同时使土壤升温，但微波加热过程中一部分微波能以流入其它有损介质而耗散出去[10]。因此在实际微波过程中，微波对土壤的穿透力与土壤深度有关。电磁波从土壤表面进入并在其内部传播的过程中微波能不断被土壤介质所吸收转化为热能[11]，土壤携带的能量会随着土壤深度的增加以指数形式衰减，具体加热速率可以表示为：

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Pd}{C\rho} \quad (3)$$

其中， T ——介质的温度，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ，

t ——作用时间，单位是 s ，

Pd ——介质中耗散的功率，单位为 W/m^3 ，

C ——材料的比热，单位为 $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ ，

ρ ——材料的密度，单位为 kg/m^3 。

生命进行生理活动必须有水参与，昆虫、草籽内部均富含大量的水分子；细菌在生长繁殖的过程中通过细胞膜、细胞质的扩散、渗透和吸附来汲取营养物质。微波杀菌时，因有害生物体内蛋白质同时受极性运动和非极性热运动的双重作用，加速了有害生物中的蛋白质结构的破坏，致使蛋白质变性失活；被破坏后蛋白质的稳定性、化学活性均会发生较大改变[12]。因此，微波能在杀灭菌虫时具有的非热效应影响着生物细胞正常生理活动，这是常规物理杀虫灭菌时所没有的。微波具有较强穿透性及快速的加热效应，可在分子层面上破坏生物体结构，不会造成环境污染、施用后无化学残留，被公认为是一种绿色高效的病害、虫害、草害的防治方法，作为耕种前的土壤预处理，可有效替代以往对环境产生较大影响的化学土壤消毒，对提高农作物的产量与品质方面有着积极影响[5] [13] [14]。

3. 微波进行消毒土壤的必要性常见土壤消毒方法

随着生活质量的提升，人们越来越重视绿色食品蔬菜的发展。由于不当耕种与施药方法使土壤受到不同程度破坏和污染，这也是造成蔬菜生产种植中的病虫害日趋严重的主要原因。近年来，果蔬所发生的根结线虫病在多地不断传播，造成大量蔬菜大棚减产绝收[15]，农民普遍的防治方法是加大杀虫剂的用量，结果必然造成果蔬中农药的残留量超标。由于大多数虫卵及病原菌都寄存于土壤当中，环境条件适宜时便发生害情，所以从源头上遏制病虫害、在土壤中杀灭将虫卵及病原菌显得尤其重要[16]。通过对病原菌、虫害、草害与土壤的特性分析，利用微波所具有的特性对土壤进行消毒灭菌的试验后收到了显著效果。

无论是设施农业的产物——温室大棚还是按季播种的大田，随着耕作时间的增加，土壤间传播的病虫害与杂草数量的激增严重影响农作物的产量，造成较大的经济损失。近年来随着工程技术手段的快速发展，设施农业使我国的农业发展得到了极大的提升，大棚中温度、湿度等环境因素也相对可控，农作物因此生长迅速，产量也大大提高，但大棚中的优越环境也为原菌的积累、土壤疾病的传播及土传病害的发生提供了便宜条件。所以，对造价较高的温室大棚中进行农作物种植前的土壤消毒显得更为必要。

实际生产中对同一块耕地进行连续耕种相同的农作物通常会加速土壤中特定的营养元素的消耗，造成养分偏失、增大了某些特定病虫害的发生的几率，并且造成微生物区系改变导致土壤中酶类释放量减少，无法正常参与土壤有机质降解及养分循环，使连作作物的收成逐年降低[17]。如果对于花生进行连续种植，就会使其根系真菌骤增，导致严重的病虫害发生如引发根线虫病、叶斑病、病毒病等，而这些使植株感染的病菌大都由土壤传播。由于连作而染病植株通常出现生长缓慢、发育不良、不结实等现象；

而且连作时间越久，土壤中的致病菌积累的就越多，植株被侵害的程度就越大；初期作物会有抗性减弱的表象，如未能及时采取补救措施甚至会有死亡的现象发生。

如烟草等众多经济作物都存在无法连作的问题，给作物生产造成较大损失。经过长期实践发现“作物轮作”是一种有效的解决方法，间隔性的耕种不同作物可使微生物区系更好的恢复到扰动前的生态平衡，从而减轻土壤中的寄生虫负担[18]。但通过轮作的方式来保护土壤、保证农作物的产量的同时阶段性的放弃原作物的种植在经济快速发展的今天并不受用。并且有一些通过轮作的方式也不能提供相对可靠性的作物，如瓜类；土壤中的寄生虫会将其作为宿主保持休眠或代谢失活的状态生存很长时间。所以在土地“超负荷”种植的今天，无法满足合理的轮作或充足休耕的情况下，就要人为地来维护土壤健康、保证土壤营养充分、促进植株生长、提高作物产量，由此一来，土壤杀菌过程就显得十分必要了[19]。

常见土壤消毒方法

物理和化学方法的土壤消毒又可分为多种类型：化学方法的主要代表为甲基溴土壤消毒法，物理方法可分为高温蒸汽土壤消毒、熏土壤消毒、火烧土壤消毒、热水土壤消毒及微波土壤消毒等。

在八十年代中期到九十年代初期，国内外主要采用溴甲烷熏蒸的方法进行土壤消毒，溴甲烷(CH_3Br)又称甲基溴，是一种无色无味的气体。对土壤有较强的穿透性，对菌虫具有广泛、高效的杀伤性，甚至可以穿透到未腐烂分解的有机体中来有效去除菌虫，所以在土壤消毒中可以达到灭菌、防病、除虫除草的效果。溴甲烷在对土壤熏蒸后能够较快的挥发，短时间内土壤便可耕种，又因其成本低廉，便从最初定位用作植物保护的试剂发展为化学土壤消毒的主要产品，直至 21 世纪初其作为最受农民欢迎的一种土壤消毒剂广泛应用于大部分地区。但因溴甲烷会引发诸多环境和土壤问题，如溴甲烷法处理后的耕地如果散气时间不足，残留物会使农作物受到药害的影响；而且溴甲烷广泛的杀伤作用不只针对土壤生物，作为一种强烈的神经毒剂，其对人的皮肤和内脏可造成不同程度的损伤；溴甲烷的使用还会严重破坏臭氧层，故我国已在 2019 年对溴甲烷法的土壤消毒全面禁止。

对于高温蒸汽熏蒸开水法、火烤法等消毒方法，普遍存在设备复杂、环境污染、化学残留、杀菌效率低下等问题[20][21]。沸水法土壤灭菌从改善农田土壤品质的层面出发无疑为一种绿色方法、操作过程简单，但实际上操作中效率低下、菌虫致死率低、设备能耗大、可行性不高。1993 年 2 月美国学者申请专利，所设计的沸水杀菌装置可将热水从类似犁状的农具中喷出，装置呈线性阵列，每个农具上排列有多个喷嘴，工作时热水注入土壤中以进行更深的渗透杀灭土壤中的昆虫、病原体，一般在沸水注射后在土壤表面上覆以绝缘泡沫层以保留水温，这种灭菌方式不仅需要操作设备携带大型水箱及加热装置，而且所释放的热水在土壤中有效范围很小，在实际生产中要有持续供水系统与供热系统，实施此方法会产生大量的能耗与环境上的污染。

土壤蒸汽消毒法在 1888 年由德国人 Fran 提出，1893 首次商业化使用，随即蒸汽消毒法在大棚和苗圃土壤消毒中得到应用。根据使用的方法不同对蒸汽消毒法进行分类，可分为冷蒸汽消毒法、Hoddeson 管道法、负压蒸汽消毒法、地表覆膜蒸汽消毒法等，此类方法的优点在于通过高压密集的蒸汽，杀死土壤中的细菌、真菌、昆虫及草籽。另外，被蒸汽熏蒸后的土壤呈团粒状，对提高土壤通透性、排水性都有较大帮助。蒸汽消毒绿色环保、清洁高效、无毒害残留、处理后短时间内即可播种，且加热、加湿相结合会比单独使用蒸汽更有效抑制病虫害；但蒸汽法作业依赖于土壤的含水量，土壤湿度大时处理时热传递速率快，反之，热传递慢、效果欠佳，且土壤湿度大时会促进杂草萌发，抗性杂草也会趁此被高温杀灭。用于蒸汽法土壤消毒整套设备复杂，此消毒设备上需配有土壤渗透装置，还需安装有蒸汽发生装置、供电系统、持续供水系统和水质软化系统等来联合供能；为保证较高的土壤致病菌虫的杀灭率，蒸汽消毒过程中土温需保持在 70°C 以上 30 分钟。因其用时间长，能耗高，供给能量燃烧必然会排放大量

的温室气体,对大气造成损害与环境的污染,另外,蒸汽法土壤消毒收益较多但所需的配套设施工程量较大,一般需铺设地下管道,通过管道将蒸汽输送到相应设备,且后期维护成本较高。

火焰土壤消毒是通过燃烧设备上所携带的液化气直接喷射土壤进行消毒,2019年我国江苏地区研制出一款自走式精旋土壤火焰杀虫机[22]如图2,设备先将土壤粉碎然后通过喷出的火焰对土壤进行高温灭菌杀虫处理,对处理后的土壤施用修复剂既竹炭有机肥,田间试验表明火焰土壤消毒对土壤进行修复处理对杀灭土壤中线虫有效作用深度可达20 cm,但液化气成本约1500元/667m²,用时约3.5h/667m²。

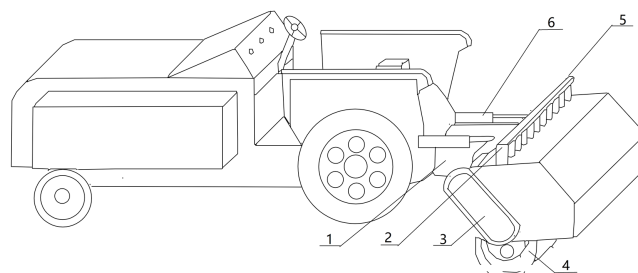


Figure 2. Self-propelled fine rotary soil flame insecticide. 1. Transfer case parts; 2. Rotary drum parts; 3. Sprocket box parts; 4. Rotary tiller drum parts; 5. Flamethrower parts; 6. Hydraulic parts

图2. 自走式精旋土壤火焰杀虫机。1. 传动箱部件; 2. 转筒部件; 3. 链轮箱部件; 4. 旋耕滚筒部件; 5. 火焰喷射器部件; 6. 液压部件

2019年尹英敏发明一种便携式微波杀虫机,主要用于森林中树木消毒,因为可手持式易靠近受害高大树木,便于除虫,如图3,设备与发电机组连接,由微波发射装置、绝缘手柄、聚能天线主要部件组成,设备具有减小劳动强度,降低林间杀虫操作得危险性等优势,其构造比大型设备更易携带至特殊地形[23]。

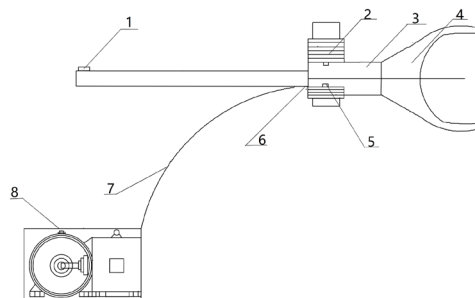


Figure 3. Portable microwave insecticide. 1. Handle switch; 2. Magnetron; 3. Wave guide; 4. Shaped antenna; 5. Output port; 6. Reserved socket; 7. Power cord; 8. Sending component

图3. 便携式微波杀虫机。1. 手柄开关; 2. 磁控管; 3. 波导管; 4. 聚能天线; 5. 输出口; 6. 预留插座; 7. 电源线; 8. 发点组件

4. 微波土壤消毒设备的发展与分类

得益于微波技术的快速发展,在过去的四十年里国内外科学家不仅利用微波的特性来解决农业中的一些实际问题,并将微波尝试应用于多种产业,其广阔应用前景也倍受各国相关学者的关注,并已将微波技术广泛应用于工农业生产、科学研究、军事装备、通讯广播等各个领域[24]。

介质吸收微波能后产生的热效应主要用于加热,当微波被应用于干燥和食品加工中时,人们逐渐地发现了微波的杀毒灭菌作用并被开发应用于消毒和灭菌领域[25]。1988年,由我国军工科技工作者首次设计出WBJ650型微波杀菌灭虫设备,规格(长×宽×高)为120×100×70(cm),底部装有万向轮用作行走,目的是方便室内地面的灵活移动[26]。主要用途为图书馆、档案库中的杀菌、灭虫、防霉、消毒等工作。

1994年2月,美国人 Rajamannan 发明了一种可杀灭土壤中致病菌的土壤作业工具,如图4,形状类似于犁,犁柄为空心,内部安装有微波能量发生器单元,犁柄上有多个孔隙用来释放微波,当其在土壤中移动时将微波能释放作用于周边土壤[27]。2003年4月李月章等设计了一种插入式微波土壤杀菌灭虫装置[8],如图4。装置配合乘坐式或自走式农业机械配套使用,结构主要有机架、犁尖、微波发生器、控制器等部件,犁尖有序的排列在正方形机架下方的板上,控制器由导线与微波发生器相接,原理是微波磁控管通过直流高电压产生微波后由波导传输微波进入土壤介质内部实现杀菌。

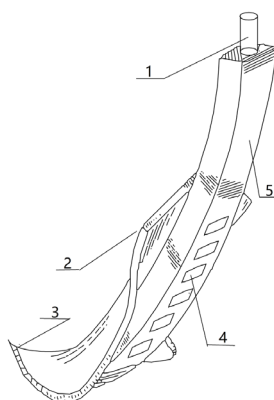


Figure 4. “Plow” type plug-in microwave soil disinfection device. 1. Cable; 2. Electric shovel; 3. Shovel handle; 4. Microwave generator set; 5. Metal shell

图4. “犁”型插入式微波土壤消毒装置。1.电缆; 2.电铲; 3.铲柄; 4.微波发电机组; 5.金属外壳

2017年8月,美国人 Vecchi Giuseppe 等发明了一种微波农业土壤消毒系统[28],如图5,圆柱体为系统供电,正方体中配有微波发生器经波导传输后通过单个犁状电磁施加器释放微波,工作时犁状电磁施加器在土壤中跟随整个设备移动,通过发射出的微波进行电磁施加器周边的土壤消毒。

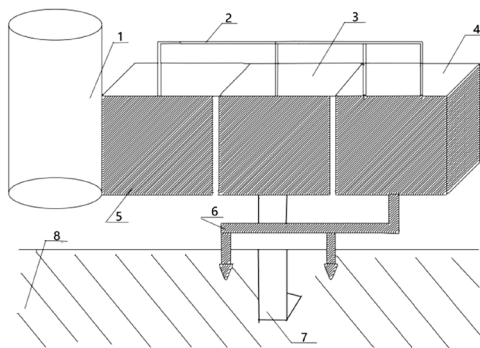


Figure 5. Microwave agricultural soil disinfection system. 1. Power supply; 2. Electromagnetic generator wire; 3. Microwave generator; 4. Steam generator; 5. Comprising an electric energy source; 6. Waveguide line; 7. Plow electromagnetic applicator; 8. Soil

图5. 微波农业土壤消毒系统。1.电源; 2.电磁发电机导线; 3.微波发生器; 4.蒸汽发生器; 5.组合电力能源; 6.波导线路; 7.犁状电磁施加器; 8.土壤

上述三种插入式微波土壤消毒设备有效地解决了随着土壤深度的增加微波辐射大幅度衰减的问题。“犁”型插入式消毒装置因具有释放微波的孔隙,工作时进入大量杂质会影响其使用寿命。当土壤含水率较高或遇板结土壤时,插入式装置往往受到较大的阻力而设备损坏,微波设备具有较高的电压与微波辐射,设备的损坏也会引发一系列安全问题。另外,为保护地下微波发生器改变农业工具的机械结构使微波能耦合到土壤中微波效率被严重的限制(图6)。

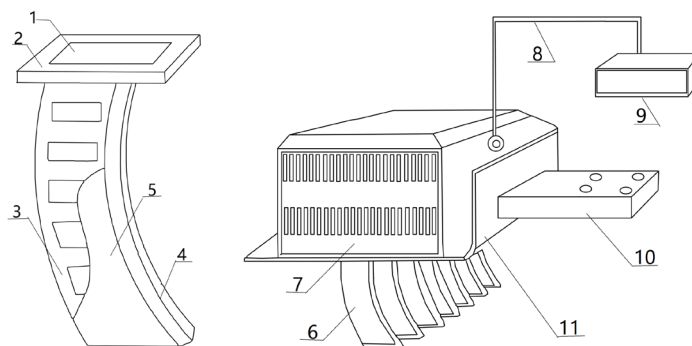


Figure 6. Plug-in microwave soil sterilization device. 1. Square slot; 2. Connecting plate; 3. Plough tip; 4. Transition edge; 5. Protective plate; 6. Plough tip group; 7. Microwave generator; 8. Control wire; 9. Microwave magnetron; 10. Fixing frame; 11. L-shaped frame

图 6. 插入式微波土壤杀菌装。1. 方形槽；2. 连接板；3. 犁尖；4. 过渡棱；5. 防护板；6. 犁尖群；7. 微波发生器；8. 控制导线；9. 微波磁控管；10. 固定架；11. L 形机架

2001 年美国 Harold Earl Haller 发明了一种微波除杂草机[29]，如图 7。目的是利用所释放出的微波“照射”耕种土壤的表面和次表面，经过有效的微波除草处理后可有效抑制土中的草籽萌发，在作物播种前处理耕地可起到杀灭病菌、杂草及昆虫的效果。微波杂草杀灭机为乘坐式，可加装于用于农业耕作的拖拉机上，配备柴油机与发电机组提供动力。因机具微波释放处与地面的距离无法进行调节，会导致坑洼地段处微波与地面的距离增大，影响作业质量土层较高的地块会使微波发射部分与土壤进行摩擦造成设备损坏。

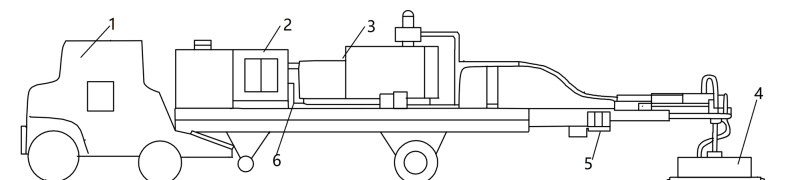


Figure 7. Microwave weed killer. 1. Self-propelled travelling system; 2. Cabinet; 3. Electrical generator; 4. Energy applicator; 5. Linkage; 6. Output cable

图 7. 微波杂草杀灭机。1. 自走式系统；2. 微波电源；3. 发电机组；4. 微波腔；5. 联动装置；6. 输出电缆

2002 年 9 月，William J. Clark 与 Charles W. Kissell 共同设计了一种土壤消毒灭虫除草系统，由微波频率电磁辐射源、托架、辐射屏蔽系统(防止辐射泄漏)、冷却系统(防止设备过热)组成，工作时托架将电磁辐射源移动到一个区域进行消毒。设计中因未提及供电装置与设备搭载方式，可行性有待于进一步的研究[16](图 8)。

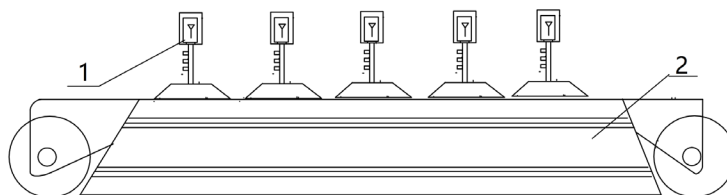


Figure 8. Microwave device in soil pest control and treatment device. 1. Radiation element; 2. Radiation shield

图 8. 土壤灭虫除草系统中的微波处理装置。1. 微波发射源；2. 辐射屏蔽罩

2003 年万勇等人发明了一种微波物理杀灭土壤中病菌、病毒、草籽的设备[30]，如图 9，设备的微波消杀腔正对与田间土壤，微波发生器产生微波可达到部分病菌、病毒、草籽的致死温度 70℃ 以上。

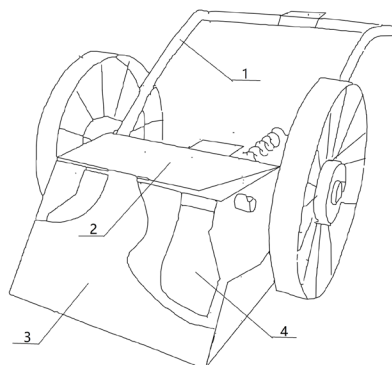


Figure 9. Microwave physical killing of soil germs, viruses, grass seeds equipment. 1. Frame; 2. Microwave generator; 3. Cavity box; 4. Protective cover

图 9. 微波物理杀灭土壤中病菌、病毒、草籽的设备。1.车架；2.微波发生装置；3.腔盒；4.防护罩

2009年10月 William Thomas Joines 发明了一种农作物秸秆的除菌控制设备，如图 10。该设备主要应用与林业生产中的病虫害防治，整套设施主要搭载于汽车配合使用，通过车辆后部搭载的供电系统供电能使微波系统释放微波，车上方波导管将所产生的微波传导至车辆后部搭载的微波释放室，释放室两侧装有金属滑轨用来防止微波泄露。但设备中微波所传播的线路横跨车顶，波导的多重折转与较长传输距离会造成微波一定程度上的衰减，因设备搭载于有人驾驶的车辆，虽在微波释放区域两翼安装有微波抑制器来避免微波泄露，但波导分布于驾驶室的前后与上方多个位置，操作者的安全问题无法得到有力保障[31]。

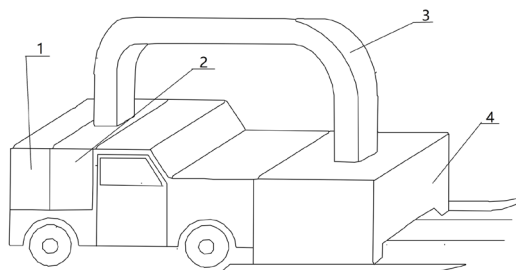


Figure 10. Vehicle-mounted microwave soil disinfection machine. 1. Power supply system; 2. Microwave generator; 3. Waveguide; 4. Microwave radiation cavity

图 10. 车载微波土壤消毒机。1.供电系统；2.微波发生装置；3.波导；4.微波辐射腔

2013年南京农业机械化研究所研制的 NJT6-1 型微波土壤处理设备[17]，如图 11，该小型微波设备将发射出的微波直接辐射于连作后的土壤进行现场作业，实现了微波的土壤实时处理，其每次作业面积为 0.81 m^2 ，作业面积较小，因未配备相应发电设备故不适用于田间大面积作业。

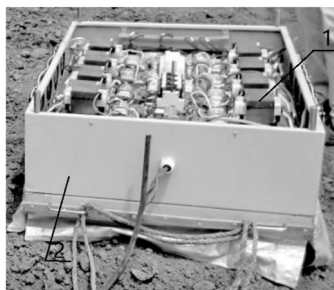


Figure 11. Type NJT6-1 microwave soil treatment equipment. 1. Microwave transmitter unit; 2. Protective enclosure

图 11. NJT6-1 型微波土壤处理设备。1.微波发射单元；2.防护外壳

图 7~10 为四款表面非接触式微波土壤处理设备, 是土壤微波消毒设备中较常见的类型, 其共同特点是通过微波作用于土壤时不与土壤接触、微波发射腔竖直向下正对土壤进行微波辐射, 设备结构简单易操作。但此类设备微波能与土壤的有效耦合困难在于电磁能量释放于土壤表面上方、在农业移动车辆或作业工具上产生, 并且通过波导或类似装置耦合到土壤。因此, 很大一部分电磁能量不会穿透土壤, 此外, 由于土壤损耗, 能量耦合随深度降低, 土层深处达到菌虫等微生物致死及抑制草籽萌发的温度需要消耗较长时间[32]。

2006 年 10 月, 美国人 George W. Wall, 发明了一种分离取土式微波土壤消毒设备[33], 如图 12, 工作时首先由掘土装置将待消毒土壤掘出, 传送带将其运送至进微波操作台对土壤进行消毒处理, 处置后的土壤由传送装置散落到田中。这种形式避免了微波在土壤中的耗散, 具有的整地功能也有助于后期播种。设计中使用了速度传感器来监视传送带的速度和设备行走的地面速度, 目的是在传送带与设备行走速度不同步时调节二者行进速度一致, 但设备为柴油驱动, 设备底盘行走速度为相对可调, 当土壤消毒所需时间相对较长, 需超低速行驶才能满足传送台上的土壤足够的消毒时间, 行驶速度略快便会出现输送台上土壤消毒处理时间不足而被还田造成整个土壤土壤消毒工作功亏一篑。

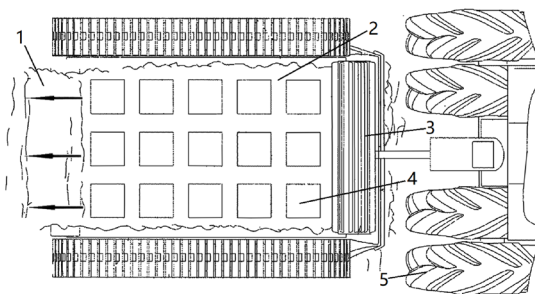


Figure 12. Top view of the soil-removing microwave soil disinfection machine. 1. Soil; 2. Conveyor; 3. Soil excavator; 4. Microwave generator; 5. Drive device

图 12. 分离取土式微波土壤消毒机俯视图。1.土壤; 2.传送机; 3.掘土机; 4.微波发生器; 5.驱动装置

上述微波土壤消毒设备一般由连续波磁控管组成的单个“小单元”来发射微波, 每一个单元通过磁控管接高压直流电由高压变压器、高压电容和高压二极管等组成倍压半波整流电路升压为直流电压做磁控管工作电压。单个磁控管功率从几十瓦到几千瓦不等, 搭载数量根据实际工作要求而定, 较高的能耗使设备必须搭载有功能装置。我国微波土壤消毒设备大都由外接电源供能, 没有与行走装置、发电机等配套安装, 原因是搭载柴油机与发电机后, 设备负载加大, 柴油机同时用于设备行走与发电会发生无法达到微波消毒设备所需电压的情况。

5. 微波土壤消毒设备存在的不足与改进

5.1. 微波土壤消毒设备存在的不足

基于物理方法的微波土壤消毒设备种类少, 大多应用于温室大棚, 微波土壤消毒设备能耗大, 配套动力不足等因素是使其工作效率低、难以适用大田作业的主要原因。目前结构为非接触式微波消毒设备的所占比重较大, 原因是非接触式微波消毒设备作为一种可将直接产生微波能作用于土壤上表面与土壤耦合的装置可避免因微波发生单元可用空间受限而降低微波发生器的可用微波功率和能量效率。但实际当中, 随着土层厚度的增加介质损耗增大吸收部分微波能, 且不同物质对微波有不同程度的吸收, 选择吸收频率也不尽相同[34], 便出现了表层土壤与深层土壤处理的不均匀性, 因微波消毒腔在工作时没有形成完全封闭的金属腔会导致电磁波的波峰和波谷发生变化, 能量的最值随之发生波动性改变; 所以在微

波土壤消毒处理的过程中出现土壤受热不均、土壤升温不良状况。微波耗散是造成试验结果与理论提出相差较大直接原因，也是阻碍微波消毒设备的作业质量提升的重要因素，避免微波耗散，提高设备灭菌杀虫、除草等各项指标是对新一代样机设计的主要需求。

通过对现有微波杀菌设备的总结，分离取土式设备具有高效节能、集多功能为一体的土壤消毒设备，相比于其他形式一定程度上可提高灭菌杀虫效果，由于部分结构仍存在设计上的不足，对其改进设计可从以下几方面开展。分离取土式设备在工作时主要步骤为掘土、输土、微波处理、土壤还田。首先，掘土过程中使掘土工作进行的同时还可对土壤进行深耕、深松等工作，机具可设计为“深耕刀”形式；其次，传送带将土壤输送至微波辐射处利用微波对土壤进行消毒处理，可根据每一个微波发射单元的作用面积将安装于同一固定架，便于整体的上下提升，每一次土壤到达指定位置后，每个微波发射单元可在固定架下降后与金属传送带组成多个独立封闭空间进行微波辐射，最后，土壤经消毒还田过程可通过分土装置与覆土装置对耕地进行起垄、使整地功能与土壤灭虫灭菌功能相结合，实现机具的多功能化。

设备作业前可根据土壤感染情况的不同采用对应程序进行针对性杀灭。处理期间利用数字显示控制仪检测每一个封闭“单元”的土壤温度，待达到杀菌温度与处置时间，固定架升高，土壤由传送装置还田。为保证土壤杀菌质量，需对微波处理后土样中菌、虫的进行抽样检测确保杀灭率符合要求，检测结果与实际要求不符时，可根据实际需求改变系统的辐射时间。

5.2. 微波土壤消毒设备存在不足解决方法

目前基于微波技术在土壤消毒方面的应用在国内外正处于研发阶段，没有推广出相对成熟的微波土壤消毒设备[26]。随着我国土壤消毒技术的普及与微波技术的研究与开发、大功率拖拉机在农业中的普遍应用，研制一种新型的微波土壤消毒设备及微波土壤消毒联合作业设备十分必要，微波土壤消毒作业不仅能杀死土壤中的杂草及有害菌而且在土壤优化和营养成分的均衡方面起着相当大的调节作用。

应对需求设计一种微波土壤消毒设备时，首先要研究此设备对土壤中微生物、草籽的杀灭效果、耕作成本及对作物产量的影响，一是在原有基础上对设备模型进行改进，采取有效措施减少微波耗散、提升微波土壤消毒设备的作业效果与工作效率，加强其杀菌、杀虫、除草等性能。二是使微波土壤消毒设备的智能化；针对不同的土壤启用相应的处理程序来杀灭某种特定菌、虫和草籽。三是提高产品的制造工艺水平，保证整机及工作部件质量，使微波土壤消毒设备工作过程的安全性、可靠性，特别是防止微波泄露伤人；四是积极推动对微波土壤消毒设备生产进行标准化、规范化管理的技术分类、制造标准和验收标准，便于后期大面积推广。五是要推动发展“一机多用”的微波土壤消毒联合作业机，开发研制适用于不同地区且满足农业技术要求不同规格的设备，如适用于中国平地区原的大型联合作业设备、在西南地区发展适用于丘陵山的中小型设备等。六是要加强农机信息化管理，对各地区造价较高的农用设备进行合理的统筹规划，实行可跨区调控作业，避免此类农业设备闲置时间过长而造成的经济损失。

微波土壤消毒设备的普及对我国的农业生产意义巨大，但目前因缺少联合作业机制，作业目的较为单一，无法满足多种农艺要求。目前市场上的微波土壤消毒设备品种少，质量参差不齐，用于实际生产的设备多为根据不同地区农业生产情况自主研发，不具备标准化、系列化的管理条件，设备的作业可靠性难以保证，无法进行大面积推广。

6. 微波消毒土壤设备发展情况的结论与展望

国内外微波土壤消毒设备作业形式与机械结构的不同，大部分文献中只提出了相关的设计思路，没有制造出实际的微波消毒设备，目前已经生产出微波消毒设备多数没有经过田间试验来验证微波设备是否达到所提出的预期指标，实际效果我们无从得知。所以，对常见的几种表面非接触式、犁形接触式及

分离取土式设备进行性能试验, 在实验中观察他们的优势与不足, 验证其具体土壤消毒效果, 获得设备在田间试验中实际工作参数对后期微波土壤消毒设备的发展有着重大意义。

除微波土壤消毒设备作业形式的不同, 外部环境也是影响试验结果的关键因素, 与设备作业性能存在交互规律。影响微波土壤消毒设备作业效果的外因主要为土壤的温度、含水率、坚实度、电导率等可变因素。另外, 2450 MHz 与 915 MHz 为我国民用与工业上可使用的频率, 对频率的正确选择对土壤穿透能力与作业结果有直接影响。

改进微波土壤消毒设备参数获得理想的杀菌、杀虫、除草效果主要方法是: 通过对不同设备与不同影响因素下进行对比试验, 综合作业时影响试验结果的内因和外因, 获得相关试验数据, 通过分析比对计算出相对优化的设备参数, 并进一步制定改进方案, 另外, 是否能通过简单的人为干预改变土壤的含水率、坚实度等因素来提升微波土壤消毒的工作效率还有待于进一步的研究。

土壤品质直接影响农作物的品质与产量, 微波土壤消毒机作为一种具有绿色高效的土壤消毒设备, 推动了我国土壤的可持续利用, 对促进了我国保护性耕作技术的发展、推进我国农业可持续发展进度也具有十分重要的意义。

基金项目

受“2020 年现代农业产业技术体系北京市创新团队(王秀)”与“固态棉隆药剂土壤精准消毒机的研发(QNJJ201906)”支持。

参考文献

- [1] 李南. 土壤消毒的基本方法[J]. 农业科技与信息, 2004(2): 36-37.
- [2] 潘菊香. 土壤消毒的几种方法[J]. 青海农技推广, 2007(3): 24-25.
- [3] 李宁, 陈惠, 陈宁宁, 等. 栽培设施内常用土壤消毒方法[J]. 北方园艺, 2008(2): 67-69.
- [4] 王振跃, 施艳, 刘存祥. 微波消毒对土壤中病原微生物的防治效果[J]. 河南农业科学, 2010(12): 94-96.
- [5] 盖志武, 周艳玲, 王柏林, 等. 微波消毒设施土壤试验研究[J]. 广西农业科学, 2007, 38(2): 174-176.
- [6] M. Weinstein, 张伦. 电压调谐磁控管[J]. 真空电子技术, 1963(5): 61-64.
- [7] Kim, J., Mun, S.C., Ko, H.U., et al. (2012) Review of Microwave Assisted Manufacturing Technologies. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **13**, 2263-2272. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0301-2>
- [8] 李月章. 插入式微波土壤杀菌灭虫装置[P]. CN2607780, 2004-03-31.
- [9] Fanti, A., Spanu, M., Lodi, M.B., et al. (2017) Nonlinear Analysis of Soil Microwave Heating: Application to Agricultural Soils Disinfection. *IEEE Journal on Multiscale & Multiphysics Computational Techniques*, **2**, 105-114. <https://doi.org/10.1109/JMMCT.2017.2723264>
- [10] Nelson, S.O. (1996) A Review and Assessment of Microwave Energy for Soil Treatment to Control Pests. *Transactions of the ASAE*, **39**, 281-289. <https://doi.org/10.13031/2013.27508>
- [11] 张瑜, 郝文辉, 高金辉, 等. 微波技术应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 3-4.
- [12] 梁静波, 陈洪俊. 微波处理植物种子灭虫试验[J]. 植物检疫, 1997(2): 27-28.
- [13] 盖志武, 魏丹, 等. 采用微波替代甲基溴消毒温室土壤技术综述[J]. 黑龙江农业科学, 2006(6): 73-76.
- [14] 盖志武, 孙立娜, 魏丹, 等. 微波对土壤微生物及其群落功能多样性的影响[J]. 河南农业科学, 2007(3): 73-77.
- [15] Vecchi, G., Dassano, G. and Anengo, G. (2019) System for the Disinfection of Agricultural Soil. US2019104723, 3651-3658.
- [16] 王明友, 肖宏儒, 宋卫东, 等. 微波处理对温室连作土壤中根结线虫的影响[J]. 中国农机化学报, 2013(4): 95-99.
- [17] 陈丹梅, 陈晓明, 梁永江, 等. 轮作对土壤养分、微生物活性及细菌群落结构的影响[J]. 草业学报, 2015(12): 56-65.
- [18] Clark, W.J. and Kissell, C.W. (2004) Systems and Methods for *in Situ* Soil Sterilization, Insect Extermination and Weed Killing. WO03099004.

- [19] 胡艳丽, 倪蔚茹, 王荣. 微波技术在克服连作等土壤障碍中的应用[J]. 河北农业科学, 2014(5): 54-56.
- [20] Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. (2003) Microwave Techniques in Agriculture. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **38**, 13-25. <https://doi.org/10.1080/08327823.2003.11688485>
- [21] Nelson, S.O. (2003) Microwave and Radio Frequency Power Applications in Agriculture. *3rd World Congress on Microwave and Radio Frequency Processing*, **31**, 118-124.
- [22] 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.
- [23] 尹英敏. 一种便携式微波杀虫机[P]. 中国专利: CN110800713A, 2020-02-18.
- [24] 王晓庆. 微波灭菌机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2008: 1-2.
- [25] 薛广波. 现代消毒学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002: 9-10.
- [26] 朱砚田. 保护档案、图书的理想设备——WBJ650型微波杀菌灭虫机已投放市场[J]. 档案学研究, 1992(4): 67-68.
- [27] Rajamannan, A.H.J. (1994) Method for Killing Soil Pathogens with Micro-Wave Energy. United States Patent 5287818.
- [28] Haller, H.E. (2002) Microwave Energy Applicator. US20010882909. Reexamination Certificate First Reexamination: United States.
- [29] Kissell, C.W. and Clark, W.J. (2003) Systems and Methods for *in Situ* soil Sterilization, Insect Extermination and Weed Killing. AU2002330263.
- [30] 万勇, 张原, 曹家骅, 柳国昌, 李江华, 宋桥生, 胡江良, 陈顺高. 微波物理杀灭土壤中病菌、病毒、草籽的方法和装置[P]. CN1547905, 2004-11-24.
- [31] Joines, W.T. (2009) Microwave System and Method for Controlling the Sterilization and Infestation of Crop Soils. US, US20090232602 A1.
- [32] Barker, A.V. and Craker, L.E. (1991) Inhibition of Weed Seed Germination by Microwaves. *Agronomy Journal*, **83**, 302-303. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020008x>
- [33] Wall, G.W. (2009) Device for Soil Sterilization, Insect Extermination, and Weed Killing Using Microwave Energy. US, US7560673 B2
- [34] 许欣, 唐璞, 陈波. 基于介质损耗的液态食品微波检测方法研究[C]//中国电子学会. 2015年全国微波毫米波会议论文集. 中国电子学会: 中国电子学会微波分会, 2015: 1493-1496.