

# 可移动双孢菇栽培料发酵车设计及效果试验

忻龙祚<sup>1</sup>, 金亚征<sup>1\*</sup>, 梁昌明<sup>2</sup>, 杨欣<sup>3</sup>, 霍晓静<sup>3</sup>, 郝建军<sup>3</sup>

(1. 河北北方学院园艺系, 张家口 075400; 2. 河北北方学院外国语学院, 张家口 075400;  
3. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071000)

**摘要:** 在中国多数地区, 双孢菇以家庭小规模栽培生产为主, 由于双孢菇培养料发酵达不到要求, 双孢菇存在产量低、效益差等问题, 是双孢菇未得到大面积推广栽培的因素之一。可移动式发酵车是针对中小规模双孢菇栽培者使用的研发产品, 主要由通风底座、发酵室、压力风机、控制系统、通风管道、控制阀、换热器等部分构成。根据原料性状, 完成一次发酵需要 15~20 d, 发酵过程中无需翻堆倒料; 发酵料上、中、下三层温差可以控制在 0.1~3.9 °C, 均质程度高; 发酵料色泽、手感、秸秆纤维、气味、浸出液等物理性状均符合堆肥腐熟的判定标准, 且栽培双孢菇平均产量能达到 18 kg/m<sup>2</sup>。

**关键词:** 发酵; 温度; 设计; 可移动发酵车; 双孢菇; 风循环; 有效发酵积温; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.22.031

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-22-0241-07

忻龙祚, 金亚征, 梁昌明, 杨欣, 霍晓静, 郝建军. 可移动双孢菇栽培料发酵车设计及效果试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 241-247. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.22.031 http://www.tcsae.org  
Xin Longzuo, Jin Yazheng, Liang Changming, Yang Xin, Huo Xiaojing, Hao Jianjun. Design on mobile fermenting device of *agaricus bisporus* cultivating material and experiment of cultivation effects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(22): 241-247. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.22.031 http://www.tcsae.org

## 0 引言

双孢菇, 学名 *Agaricus bisporus*(Large)Sing. 草腐生真菌, 中文别名蘑菇、洋蘑菇、白蘑菇等, 日本称之为西洋松茸。含有 19 种氨基酸、多种维生素、核苷酸等, 营养价值丰富, 且具有提神、消食、平肝阳等功能, 是世界上人工栽培最广泛、产量最高、消费量最大的食用菌之一<sup>[1]</sup>。培养料是双孢蘑菇生长发育的物质基础, 培养料发酵的质量直接影响到双孢蘑菇的质量和产量<sup>[2]</sup>。目前, 双孢菇培养料发酵方式主要有二次发酵、二次发酵、集中发酵等<sup>[3-4]</sup>。传统双孢菇培养料的发酵主要采用室外长期堆沤腐熟一次性发酵, 此种方式发酵时间长、期间需要 4~5 次翻料, 劳动强度大, 经常出现培养料发酵不彻底、不均匀、培养料消耗大、培养料中携带的杂菌及病虫害多等现象, 导致双孢菇质量差、产量低, 而且堆沤发酵过程中产生的硫磺味和氨气严重污染环境<sup>[3-4]</sup>; 二次发酵又称为后发酵, 主要是指在室外堆制 10~15 d, 翻堆 1~2 次后, 搬入栽培室或二次隧道内的人工辅助增温发酵技术, 二次发酵能够缩短发酵时间, 培养料经过后发酵的巴氏消毒能够将混入培养料中的杂菌和病虫害彻

底清除, 促进有益微生物的大量繁殖, 播种后的菌丝吃料快、结菇早、转潮快, 有效提高单位面积的产量<sup>[5-9]</sup>。但室内二次发酵存在能源消耗大、菇房等设施腐蚀性严重、技术要求高、工艺难度大、游离氨含量过高等问题, 而采用隧道式后发酵则存在基础设施投资较高、培养料的均质化程度低、产量不稳等问题<sup>[8,10]</sup>; 集中发酵是国外大规模栽培生产常见的发酵方式, 分为前发酵、后发酵、发菌等 3 个阶段<sup>[13]</sup>, 把所需的所有双孢菇培养料集中起来, 分别放在特制隧道设施中进行自动控制的发酵方式<sup>[11-12]</sup>, 集中发酵技术科学、操作简单、管理容易、节省人力、能源等, 但设施造价成本高, 适于大规模的工厂化生产, 不适宜中国农村中小规模和分散栽培<sup>[14]</sup>。针对上述问题, 本文研发了一种新型双孢菇栽培原料一次成型发酵车, 该设备可移动、投资少, 适于中小规模双孢菇栽培使用。本次试验提出有效发酵温度是指原料达到发酵要求的 48~52 °C, 有效发酵积温是指发酵原料在发酵期间, 发酵各阶段发酵温度达到有效发酵温度与维持时间乘积的总和。

## 1 可移动发酵车组成及工作原理

### 1.1 发酵车组成及功能

本次试制双孢菇栽培料可移动发酵车整体结构示意图如图 1 所示。发酵车是封闭的可调节内外循环系统。主要包括通风底座、发酵室、压力风机、控制箱、换热器(通常中国北方冬季外界温度很低时采用)等 5 部分。通风底座主要是由开孔地板、进风管道和外保温层 3 层

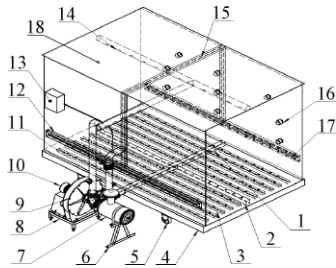
收稿日期: 2017-06-13 修订日期: 2017-10-10

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(14227304D); 河北省农业厅现代农业产业技术体系创新团队岗位专家专项基金项目(HBCT2013060204)

作者简介: 忻龙祚, 男, 河北张家口人, 副教授, 主要从事食用菌栽培、育种等研究工作。Email: nxlxz@163.com

\*通信作者: 金亚征, 女, 河北廊坊三河人, 副教授, 主要从事园艺作物栽培等研究工作。Email: jyzheng\_2@126.com

组成,进风管道包括底部进风主管道、底部进风侧中管、底部进风侧翼管道等;发酵室是一个由四壁、顶壁和底座组成的密闭空间,其包括两壁下侧及顶部的循环风嘴及管道、测温仪、温度传感器和控温调风阀门,其规格大小可以依据发酵料体积的大小进行调节和定制;压力风机要求风压在 5 700~7 800 Pa,风量要求根据所装发酵原料量选择,达到每吨新鲜料进新风 150~200 m<sup>3</sup>/h;控制箱与发酵室内测温仪、温度传感器以及外部风机、各个通风阀门连接,通过采集室内各部温度信息反馈,发出指令调控压力风机开启关停与管道内风的流向、流量、内外风交换,从而调节发酵室内各部位热的流动,实现发酵室内各部位热分布相对平衡,不同部位温差需控制在 5℃以内,实现不同部位有效发酵积温的一致性。通过对发酵室内空气质量的测定,调控新风进入时机与量,确保发酵对新鲜空气(主要是氧气)的需要。



1.底部进风主管 2.底部进风侧中管 3.底部进风侧翼管 4.底座 5.地轮  
6.空气滤清器支架 7.空气滤清器 8.风机支架 9.离心通风机 10.电机  
11.侧风道主管 12.左侧进风道 13.控制箱 14.顶部出风管 15.右侧进风道  
16.温度检测孔 17.右侧进风道 18.发酵室  
1.Bottom main air duct 2.Bottom side air duct 3.Bottom wing air duct 4.Pedestal  
5.Wheel 6.Air-filter support 7.Air filter 8.Fan support 9.Centrifugal fan  
10.Electric motor 11.Side air duct 12.Left air duct 13.Controlling box  
14.Top ventage 15.Right air tunnel duct 16.Temperature measurement hole  
17.Right air tunnel 18.Fermenting room

图1 可移动发酵车整体结构示意图

Fig.1 Integrated-structure sketch of mobile fermenting device

## 1.2 可移动发酵车工作原理

可移动发酵车对双孢菇栽培料发酵的关键是通过风的循环来带动热量的流动,通过风嘴和管道的布置实现风压风量在发酵室内的流动分布均匀,从而达到各部位发酵料均匀受热,最终实现发酵料有效发酵积温量的一

致。通过进出新风量来控制有效发酵温度和发酵所需新鲜空气,通过发酵室内风的内循环来调节各部位温度差在发酵容许范围内。

将预处理好的原料通过顶部进料口自然下落堆置发酵室内,密闭进出料口(门),让料内微生物生长产生热量进行发酵。当外界温度低于 10℃,室内料温低于 30℃时,开启换热器将鼓入的冷空气加热,热空气通过通风管道的通风嘴进入发酵室给原料进行加温,加快发酵速度,室内 3 层料温平均温度达到 45℃停止换热器加热(此装置为辅助装置)。通常情况下,当料进入发酵车 24 h 左右,通过适度开启外循环鼓新风,促进微生物繁殖对栽培原料加热增温。无论采用哪种方式加温,均要求各部位温差低于 5℃。当栽培原料温度达到 65℃时,停止加热,料温 60~70℃维持 8 h,再降温至 45~55℃维持 1~2 d。继续增温至 65℃以上,料温 60~70℃维持 8 h 之后,再降温至 45~55℃内维持 15 d 左右,直到发酵室内加入新风后再温不在上升,当料温开始下降时开启外循环降温至 45℃以下,发酵结束。

## 2 可移动发酵车结构参数

### 2.1 可移动发酵车发酵室的结构参数设置

本次试验试制可移动发酵车主要结构及参数如表 1、图 2a, 2b 所示,发酵车规格为 4 000 mm×2 500 mm×2 654 mm,两端开门,其中一侧安装风机和调控装置机,另一侧留 9 个发酵数据采集观察孔,顶部两端对角开 1 000 mm×500 mm 进料口各 1 个(位于发酵车顶部,配有升降轨道进料和出料)。发酵车向内开进风孔总计 260 个,分别在底座和两侧壁下方,孔径 3 mm,孔间距 200 mm,其中底座进风孔 17 孔 6 列,18 孔 5 列,交错排列,共 192 个,两侧壁距底座 500 mm 处设有通风管道,每侧开进风孔 38 个。顶部出风孔(循环风孔)呈长方形,规格为 50 mm×25 mm,孔间距 250 mm,共计 12 个。发酵室的四壁、顶壁和底板采用钢板夹隔热材料制成,管道、发酵厢体与原料发酵气体接触的设施均要做防锈蚀处理或采用防锈材料,管道采用聚氨酯 PUR 管道。一次可以发酵栽培料 20 m<sup>3</sup>左右。发酵车规格可以根据双孢菇栽培基地的规模进行调节。

表 1 可移动发酵车结构参数

Table 1 Structural parameters of mobile fermenting device

mm										
长×宽×高 Length×Width× Height	顶部出风管直径、进风管直径(左中、右中、中部主管、底部主管、底部侧中管) Top ventage diameter, air duct diameter (left-middle, right-middle, middle main duct, bottom main duct, and bottom side middle-duct)	底部进风侧翼管直径 Bottom wing air duct diameter	侧翼管间距 Distance between side wing duct	底部进风侧翼管进风孔数量 Number of air inlets of bottom side wing duct	进风孔直径 Air inlet diameter	进风孔间距 Distance between air inlets	出风孔长×宽 Air outlet length×width	出风孔间距 Distance between air outlets	侧壁进风孔行距 Row distance between side air inlets	车体厚度 Thickness of device body
4 000×2 500×2 654	100	60	200	18、16	3	200	5×2.5	250	90	152

发酵车发酵过程主要操作结构见图 2c, 2d 所示。发酵料发酵需要升温时,新鲜空气进风阀门 15 开启 1/2,循环风进气阀门 16 开启 1/2,底部风道阀门 12 全部打开,开启离心风机,温度上升到预定值后关闭风机,关闭各

阀门。同时应及时通过放风口监测发酵室的空气质量,判断发酵室内是否缺氧,如果缺氧应及时鼓入新鲜空气。

发酵过程中当发酵车内上层温度较高,与中、下层温度相差 5℃时开启内循环,即同时打开底部风道阀门

12, 循环风阀门 16, 其他阀门全部关闭。开启离心风机, 发酵室内的热空气在风机的带动下经顶部出风管 14 回流到底部进风主管 1, 经底座进风孔鼓入发酵料, 由底层向上流动, 循环往复直至发酵料 3 层温度差值  $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

发酵过程中, 发酵后期会出现发酵料下沉, 中部发酵料密度增大, 开启内循环方式无法调节发酵料 3 层温差时, 可将底部风道阀门 12 开启  $1/3\sim 1/2$ , 侧风道阀门 3 开启  $1/2$ , 循环风阀门 16 全部打开, 其他阀门全部关闭, 开启离心风机, 用较大的风压带动中部料内热量向上下层转移。

发酵料需要降温时, 开启新鲜空气进气阀 15, 底部风道阀门 12、侧风道阀门 3 全开或酌情开启, 放风口 2 开启, 其余阀门全部关闭, 开启离心风机, 降温至所需适宜温度。

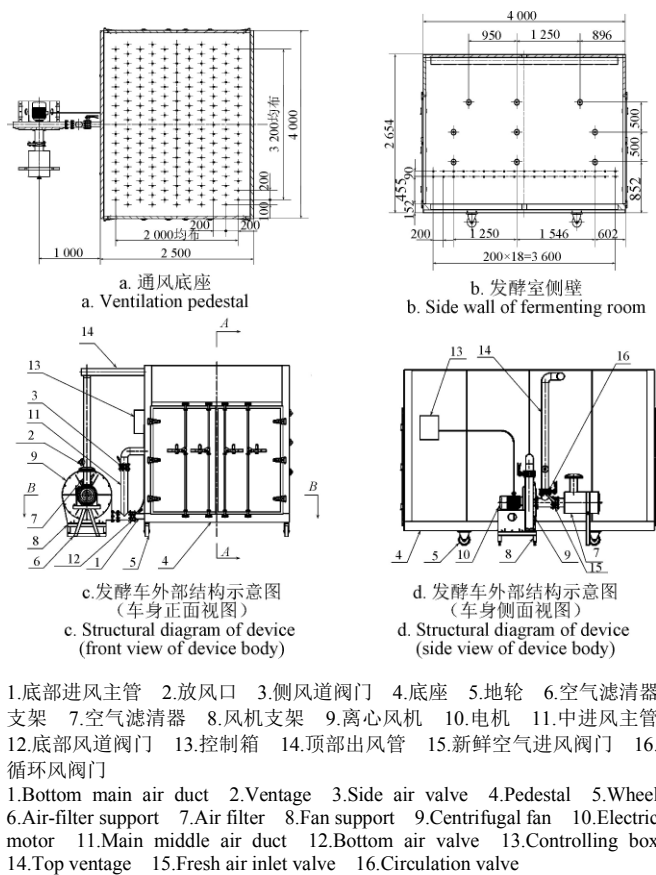


图 2 可移动发酵车关键部位示意图

Fig.2 Structural diagram of key components for mobile fermenting device

### 2.2 可移动发酵车制动控制系统主要参数设置

如图 3 所示, 可移动发酵车制动控制系统的设置主要是发酵车室内环境控制箱 (图 3a)、传感器数据控制箱构成 (图 3b), 测温仪和温度传感器分别设置在发酵室不同位置, 测试、显示各部分发酵料的温度, 并把温度信息传递给控制箱。控制箱是发酵装置的中枢, 根据所接收传递来的温度信息和设定的程序, 控制风机、各个通风阀门协调配合, 通过管道调控风的流向、流量、内外风交换, 从而调节发酵室内各部位温度达到基本一

致, 实现发酵室内各部位热分布相对平衡, 与通风地板配合, 实现室内外空气交换和热能再利用, 实现整个发酵过程的自动控制。发酵车的测控系统主要由 3 部分构成, 即参数设置、发酵监控和数据回调, 其中参数设置分为基本参数设置和控制参数设置, 控制参数设置主要是发酵过程的几个主要阶段的温度和气体的调控<sup>[1,4]</sup>, 如图 4 所示。热引升温阶段要求此阶段发酵料的料温不能高于  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 发酵室内  $\text{CO}_2$  应维持在  $0.3\%\sim 5.0\%$  范围内, 高于  $3.0\%$  打开阀门通新风, 低于  $0.3\%$  关闭阀门, 停止送风。巴氏消毒阶段的料温需维持  $60\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 持续  $8\text{ h}$ , 同时也是通过通风的方式控制  $\text{CO}_2$  维持在  $0.3\%\sim 3.0\%$ 。降温维持要求料温保持  $48\sim 52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 持续  $24\text{ h}$ ,  $\text{CO}_2$  维持在  $0.3\%\sim 5.0\%$  范围内。为了使发酵料灭菌彻底, 可以进行第 2 次巴氏消毒, 条件与第 1 次巴氏消毒相同。最后进入料温的降温维持阶段, 温度仍是维持  $48\sim 52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当温度降到  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 鼓入新鲜空气和开启内循环时料温不升反降时, 表明腐熟完成, 发酵结束, 点击“发酵结束”按钮, 系统将执行全面降温策略 (即执行从  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右向  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下降温), 以便开仓出料。对于上、中、下 3 层层间温度的调控主要通过开启内循环实现, 当 3 层层间温差出现  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时进行调控。对于每个过程温度的传感是通过 3 层的均匀 9 个点的平均值获得, 见图 5 所示, 且发酵室内氨气浓度也通过氨气测定装置传到参数设置页面上, 发酵室内氨气质量浓度临界点不能超过  $3\text{ mg/L}$ , 如果氨气浓度达到临界点, 应立即通风。

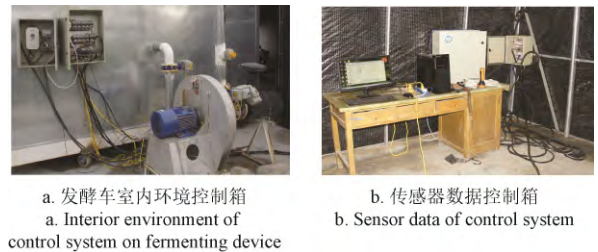


图 3 发酵车制动控制系统外观示意图

Fig.3 Exterior diagram of control system for mobile fermenting device



图 4 发酵车制动控制系统参数设置页面

Fig.4 Parameter setting of control system for mobile fermenting device



图5 发酵车制动控制系统发酵监控页面  
Fig.5 Fermenting monitor of control system for mobile fermenting device

### 3 性能试验

#### 3.1 可移动发酵车发酵期间温度调控试验

##### 3.1.1 料温测定方法

本次试验填充原料时为保证发酵车上部空气流通,发酵堆最高处距离车顶预留空隙40 cm,其余210 cm平均分为3层,每层3个方位的温度平均计为发酵原料每层的平均温度。先根据发酵车上原料的堆积厚度将原料发酵堆平均分为上、中、下3层,每层厚度600~700 mm,每层呈对角线布置3支高质感温度计,两端的温度计探头深入料内距发酵室壁300 mm,分别测中心和两端3个方位发酵料内的温度,3层共计9支,24 h监控每层料温的变化。每隔2 h记录1次。每层3个方位的平均温度

表2 培养料发酵期间温度变化  
Table 2 Temperature change of material during fermentation

温度调控 Temperature modulation	温度变化范围 Temperature change/°C			耗时 Time consumption/h		
	上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower	上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower
升温 Temperature increasing	37~65.7	37~66.5	37~65.0	46	46.5	46.8
巴氏消毒 Pasteurizing	65.7~69.1	66.5~68.7	64.4~67.7	8	8	8
降温 Temperature decreasing	68.6~52.1	68.2~54.2	64.4~49.6	15.5	15.5	15.5
恒温维持 Constant-temperature sustaining	48.5~55.4	48.4~55.3	47.5~53.4	336	336	336
发酵结束 Fermentation ceasing	48.5~47.5	48.4~46.2	47.5~41.9	24	24	24

##### 3.1.3 发酵料温调控方式及效果

选择性和均质性是影响双孢菇培养料发酵质量好坏的2个重要方面,对双孢菇产量和质量起着至关重要的作用。选择性要求发酵后的培养料最适于双孢菇的生长,均质性要求发酵后的培养料理化性状和水分均匀<sup>[3]</sup>。本试验采取了“气体内循环”、“1/2进+1/2内+放”等措施来增加空气流动、调节料温及保证有氧发酵,从而增加培养料的选择性和均质性。“空气内循环”可以调节上、中、下3层培养料温差、保证发酵室内氧气的均匀,当上、中、下3层温差≥5 °C时,打开内循环阀门,至3层温差≤2 °C时,关闭内循环阀门。“1/2进+1/2内+放”是进风口开1/2,内循环开1/2,放风口打开,此操作通常5~20 min,可以改善发酵室内空气品质,增加O<sub>2</sub>的浓度,调节发酵室料内温度等。本发酵车经过上述措施调控后,

计为该层的发酵温度。

##### 3.1.2 发酵期间料温控制及变化

本次发酵车发酵试验是在张家口宣化县沙岭子镇进行,8月中旬开始,室外温度变化20~35 °C。双孢菇培养料(配方为30%玉米秸秆+50%牛粪+20%棉籽壳+1%石膏+1%过磷酸钙+1%石灰,含水率68%)在发酵期间进行了升温、巴氏消毒、降温、恒温维持、发酵结束等5个阶段的温度变化过程,见表2。

培养料进发酵室时料温为37 °C,培养料在嗜温性微生物和嗜热性微生物共同的作用下降至65 °C,进入巴氏消毒阶段。巴氏消毒主要杀死杂菌、消灭有害昆虫及线虫的虫卵、幼虫等,此阶段在65~70 °C之间稳定维持8 h。巴氏消毒后降温进入双孢菇培养料发酵腐熟阶段,此阶段恒温48~55 °C维持14 d共336 h,此阶段嗜热性微生物群落如嗜热性放线菌、嗜热侧孢霉等活动频繁,促进氮和碳水化合物结合,转化糖、氨气,抑制杂菌的生长,增加培养料的选择性。当温度出现长时间无变化,鼓入新鲜空气和开启内循环时料温不升反降时,表明腐熟完成,发酵结束。发酵结束后培养料自然条件下降温至30 °C进行播种。发酵期间升温阶段,上层培养料升温最快,中层居中,下层升温最为缓慢,可能是由于上层氧气浓度高于中、下层,有利于发酵升温。而培养料降温阶段,通过鼓入新鲜空气和内循环,下层料温降温最快,在15.5 h内降低14.8 °C,中层居中降14 °C,上层降温较慢降13 °C,因为新鲜空气通过通风底座鼓入发酵室,加速了上层培养料温度的降低。

上、中、下3层培养料温差可以控制在0.1~3.9 °C,控制效果如图6所示。

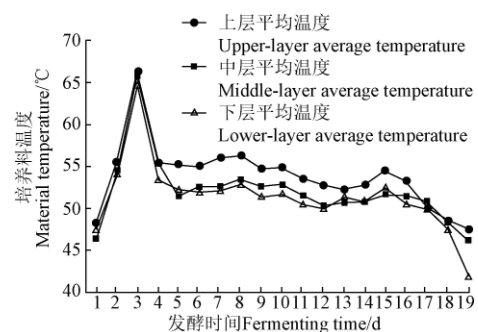


图6 发酵车上中下3层发酵料温在发酵过程中的变化  
Fig.6 Changes of material temperature of 3 layers during fermenting period

3.2 可移动发酵车发酵效果

3.2.1 培养料发酵后理化性状的测定

本试验发酵配方采用 30%玉米秸秆+50%牛粪+20%棉籽壳+1%石膏+1%过磷酸钙+1%石灰，原料发酵后的效果如图 7 所示，可以明显看到白色放线菌布满整个发酵料<sup>[15-17]</sup>。为验证发酵车对培养料的腐熟效果，对玉米秸秆、牛粪组及棉籽壳合进行了理化性状的测定<sup>[18-21]</sup>。方法是在培养料每层随机选取 10 个点，每点称取培养料 500 g，10 点混匀后取样备用进行理化指标的测定，3 次重复，结果如表 3 所示。经过发酵车发酵后的培养料上、中、下 3 层其色泽、手感、秸秆纤维、气味、浸出液等物理性状均符合堆肥腐熟的判定标准<sup>[1]</sup>。培养料发酵前 pH 值为 8.2，发酵结束后每层发酵料的 pH 值上、中、下 3 层分别是 7.5、7.6、7.5，均适宜双孢菇生长的 pH 值范围，3 层的差异仅 0.1。含水率发酵前 68%，发酵后至上而下 3 层分别 63%、63%、61%，发酵过程中含水率仅减少 5~7 个百分点。氮为 2.8%~2.9%，C/N 比 15.8~16.0，3 层差异极小。培养料发酵后料中的有害气体的含量尤其是氨气的含量是影响发酵料质量高低的重要指标，氨气检测仪对发酵料上、中、下 3 层料的氨气检测结果分别是 2.1、3.7、3.0 mg/kg。发酵料理化性状检测结果表明，该发酵料的 pH 值、含水量、含氮量、氨气含量及 C/N 比均符合堆肥腐熟的判定标准<sup>[1,22-25]</sup>，且 3 层发酵料均质性程度较高。

表 3 玉米秸秆、牛粪培养料发酵前后理化性状参数

Table 3 Parameters of physical and chemical characteristics of cornstalk and cow manure pre- and post fermentation

项目 Items	发酵前 Pre-fermentation	发酵后 Post-fermentation		
		上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower
色泽 Color	—	棕灰色	棕灰色	棕灰色
手感 Hand feeling	坚硬，粘手	不粘手，有弹性，松软	不粘手，有弹性，松软	不粘手，有弹性，松软
秸秆纤维 Stalk fiber	强韧	轻拉即断	轻拉即断	轻拉即断
气味 Taste	—	酒精香味	酒精香味	酒精香味
浸出液 Leachate	浑浊	透明	透明	透明
放线菌 Actinomyce	—	白色，++++	白色，++	白色，+++
pH 值 pH value	8.2	7.5	7.6	7.5
含水率 Moisture content/%	68	63	63	61
N/%	玉米秸秆 0.51、牛粪 1.44、棉籽壳 2.14	2.9	2.8	2.8
C/N	30.7	15.8	16.0	16.0
氨气 Ammonia/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	-	2.1	3.7	3.0



图 7 玉米秸秆与牛粪原料发酵效果

Fig.7 Fermentation effect of cornstalk and cow manure

3.2.2 发酵料栽培双孢菇产量效应分析

1) 试验材料与方法

双孢菇栽培品种：双孢菇 2796，河北北方学院食用菌研究中心提供。

试验处理：将发酵好的玉米秸秆、牛粪进行双孢菇的产量效应试验。对照处理采用目前双孢菇生产上常用的培养料建堆二次发酵法（CK）<sup>[3-4,26-27]</sup>；发酵车发酵料的选取方法是每层东南、中心、西北 3 个方位的发酵料分开栽培双孢菇，共 9 个处理，与对照处理共计 10 个处理，每个处理用料 0.218 m<sup>3</sup>，8 个重复，每个重复栽培 1.212 m<sup>2</sup>，栽培容器为白色塑料筐。

培养料发酵：酵车培养料发酵时间为 8 月中旬，对照处理建堆发酵时间比发酵车发酵提前 10 d。

播种：9 月 8 日开始播种，9 cm×8 cm 穴播，深度约 5 cm。为保持料面湿度，在料面上铺上洁净报纸，开始养菌。

发酵管理：菌丝培养阶段，菇棚内温度维持在 20~27 °C，湿度 70%~75%，逐渐加大菇棚的通风量。9 月 15 日开始测量菌丝生长深度，每隔 4 d 测量 1 次，直至 9 月 28 日发现筐侧已长满菌丝且中部菌丝已长至料深的 2/3，准备覆土。

覆土：9 月 29 日将覆土材料用蒸汽自动发生器进行常压蒸汽消毒，覆土土壤使用的是玉米田土。9 月 30 日停止蒸汽消毒，清理培养料面杂质杂菌，用雾化器适当加湿。10 月 1 日进行覆土，覆土厚度为 3 cm，一次覆土。

出菇管理：出菇期间，菇棚内湿度 85%~90%，温度 15~22 °C，CO<sub>2</sub> 质量浓度<500 mg/L，棚内自然光照，透光率约 10%左右。

2) 结果与分析

本次试验 10 月底开始采菇，收获前两潮菇的产量分析比较，结果如表 4 所示。上、中、下 3 层每层 3 个方位的平均产量分别 18.11、18.62、17.93 kg/m<sup>2</sup>，无显著性差异（P>0.05）。东南、中心、西北 3 个方位每个方位 3 层的平均产量分别为 18.11、18.50、18.06 kg/m<sup>2</sup>，无显著性差异（P>0.05）。3 层平均产量约 18.22 kg/m<sup>2</sup>，与对照处理产量 18.91 kg/m<sup>2</sup> 相比较，无显著性差异（P>0.05）。

表 4 发酵车不同部位发酵料对双孢菇产量的影响

Table 4 Yield of *Agaricus bisporus* in different spots of fermented material

培养料层 Layers	东南产量 Yield of samples in southeast	中心产量 Yield of samples in center	西北产量 Yield of samples in northwest	kg·m <sup>-2</sup>
				平均产量 Average yield
上层 Upper	18.02	18.68	17.64	18.11±0.30a
中层 Middle	18.54	18.88	18.45	18.62±0.13a
下层 Lower	17.78	17.94	18.08	17.93±0.08a
平均 Average	18.11±0.22a	18.50±0.29a	18.06±0.23a	-
CK	18.91±0.97 a			

注：SPASS 软件进行方差分析，Duncan 法，不同小写字母表示不同处理在同行或同列在 0.05 水平上差异显著。

Note: Variance analysis is done by Duncan in SPASS software, with different small letters meaning significant difference on the level of 0.05 for the different treatments in the same line or row.

## 4 结论与讨论

1) 可移动发酵车是能够自由移动、封闭、可调节内外循环的系统设备, 主要通过风的循环来带动热量的流动, 使发酵料温度均匀一致, 实现发酵料高度选择性、均质性。经过试验表明, 该车上、中、下 3 层培养料温差可以控制在 0.1~3.9 °C, 经过该车发酵的发酵料色泽、手感、秸秆纤维、气味、浸出液等物理性状均符合堆肥腐熟的判定标准, 且上、中、下 3 层, 东南、中心、西北(根据发酵车放置方位) 3 个方位的发酵料栽培双孢菇平均产量都能达到 18 kg/m<sup>2</sup>左右, 层间、方位间产量无显著性差异。

2) 可移动发酵车完成一次发酵经过升温、巴氏消毒、降温、恒温维持、发酵结束等 5 个过程, 只用 20 d 左右一次性完成。此过程不需要翻堆, 也不需要 2 次发酵过程, 大大缩短了发酵时间和降低劳动强度, 大幅降低原料生产成本。

3) 可移动发酵车使用没有季节限制, 一年四季都可以采用, 在进风主管与离心通风机之间安装换热器, 通过给进入空气进行加热或降温后鼓入发酵室内, 有效控制调节发酵温度和时间。

4) 本次试验下层料水分含量较中上层低 2 个百分点, 主要是因发酵结束后降温阶段, 底部通入风量较大, 当时外界空气相对湿度很低, 只有 20%左右。如果在进风口增设加湿装置, 通入湿度较大的空气, 就可能解决上述问题。

可移动发酵车可以根据生产规模设计制作, 而且可以根据生产场地进行移动, 适合于中小规模推广使用。

### [参 考 文 献]

- [1] 许修宏, 李洪涛, 张迪, 等. 堆肥微生物学原理及双孢菇栽培[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 黄建春, 钱永官. 双孢蘑菇培养料集中发酵技术[J]. 食用菌, 2005, 5(4): 24-25.
- [3] Peter Oei. Appropriate Technology for Mushroom Growers[M]. Jiangxi: Jiangxi Science Press, 2011.
- [4] 杨新美. 中国食用菌栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [5] 李荣春, Ralph Nobl. 优质双孢蘑菇堆肥的现代堆制模式[J]. 中国食用菌, 2001, 20(1): 24-26.  
Li Rongchun, Ralph Nobl. Modern composting formula of compost of the high quality[J]. Edible Fungi of China, 2001, 20(1): 24-26. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨立宇, 李金红. 双孢蘑菇培养料二次发酵简易技术[J]. 现代农业科技, 2008, 11(3): 41.
- [7] 李宇伟, 连瑞丽, 王新民, 等. 双孢蘑菇堆肥发酵技术关键及改进[J]. 中国食用菌, 2008, 27(2): 65-66.  
Li Yuwei, Lian Ruili, Wang Xinmin, et al. The improvement and key technique in the fermentation of refuse compost on *agaricus bisporus* in Xiayi County[J]. Edible Fungi of China, 2008, 27(2): 65-66. (in Chinese with English abstract)
- [8] 许修宏, 王 博, 刘颜平. 堆肥隧道式后发酵技术及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 297-300.  
Xu Xiuhong, Wang Bo, Liu Yanping. Technology and effect of phase II composting in compost tunnel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 297-300. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李凤玉. 双孢蘑菇培养基料隧道发酵的关键技术[J]. 食用菌, 2013, 21(6): 369-370.
- [10] 田加才. 双孢菇麦秸培养料空心堆发酵技术研究[J]. 山东农业科学, 2009(5): 60-61.
- [11] 黄建春, 黄丹枫. 双孢蘑菇培养料集中发酵工艺技术研究及其应用[J]. 上海农业学报, 2005, 21(2): 53-57.  
Huang Jianchun, Huang Danfeng. Experiment and application of concentrated fermentation technology of *Agaricus bisporus* compost[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2005, 21(2): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- [12] 夏道广, 刘萍英, 李凤玉, 等. 双孢蘑菇隧道发酵高效栽培技术[J]. 农村服务, 2014, 31(12): 16-18.
- [13] 杨国良, 刘明山. 蘑菇堆肥隧道集中发菌新技术[J]. 食用菌, 2012, 20(4): 237-238.
- [14] 黄建春. 荷兰双孢蘑菇培养料堆制发酵先进技术[J]. 食用菌, 2015, 23(1): 8-11.
- [15] 王琳, 李敏, 魏启舜, 等. 双孢蘑菇培养料发酵过程中细菌群落结构分析[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 653-658.  
Wang Lin, Li Min, Wei Qishun, et al. Bacterial communities in *Agaricus bisporus* compost analysed by denaturating gradient gel electrophoresis[J]. Jiangsu J of Agr Sci, 2015, 31(3): 653-658. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈长卿, 李桐, 姜云, 等. 草菇培养料二次发酵过程中真菌的群落结构[J]. 微生物学报, 2014, 54(12): 1507-1514.  
Chen Changqing, Li Tong, Jiang Yun, et al. Fungal community structure in phase II composting of *Volvariella volvacea*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2014, 54(12): 1507-1514. (in Chinese with English abstract)
- [17] Salar P K, Aneja K R. Significance of thermophilic fungi in mushroom compost preparation: Effect on growth and yield of *Agaricus bisporus* (Lange) Sing[J]. Journal of Agricultural Technology, 2007, 3(2): 241-253.
- [18] 王鸿磊, 王红艳, 宋俊芬, 等. 双孢菇培养料工厂化发酵过程中微生物及物质变化研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(1): 94-96.  
Wang Honglei, Wang Hongyan, Song Junfen, et al. Variation of microorganisms and physicochemical properties of *Agaricus bisporus* compost[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2011, 39(1): 94-96. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [20] 黄生权, 敖宏, 郭爱玲. 真菌保健食品中多糖含量测定方法的比较[J]. 现代食品科技, 2010, 26(7): 767-771.  
Hung Shengquan, Ao Hong, Guo Ailing. Comparison of methods for determination of polysaccharides content in epiphyte health foods[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(7): 767-771. (in Chinese with English abstract)

- [21] Wang C M, Shyu C L, Ho S P, et al. Species diversity and substrate utilization patterns of thermophilic bacterial communities in hot aerobic poultry and cattle manure compost[J]. *Microbial Ecology*, 2007, 54(1): 1-9.
- [22] 吕作舟. 食用菌栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [23] 何丽鸿, 陈明杰, 潘迎捷. 采用变性梯度凝胶电泳研究双孢菇培养料后发酵过程中的细菌群落结构[J]. *微生物学报*, 2009, 49(2): 227-232.  
He Lihong, Chen Mingjie, Pan Yingjie. Bacterial communities in the phase II of *Agaricus bisporus* compost by denaturing gradient gel electrophoresis[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2009, 49(2): 227-232. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(6): 623-627.  
Li Yang, Xi Beidou, Zhao Yue, et al. Study of maturity parameter characteristics in composting process using different materials[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(6): 623-627. (in Chinese with English abstract)
- [25] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2668-2673.  
Qin Li, Shen Yujun, Li Guoxue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2668-2673. (in Chinese with English abstract)
- [26] 柯家耀. 蘑菇培养料二次发酵新工艺初探[J]. *食用菌学报*, 1999, 6(4): 26-30.  
Ke Jiayao. Primary studies on the new technology of *A. bisporus* compost phase II Fermentation[J]. *Acta Edulis Fungi*, 1999, 6(4): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周永斌. 双孢菇标准化栽培技术[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 2009.

## Design on mobile fermenting device of *agaricus bisporus* cultivating material and experiment of cultivation effects

Xin Longzuo<sup>1</sup>, Jin Yazheng<sup>1\*</sup>, Liang Changming<sup>2</sup>, Yang Xin<sup>3</sup>, Huo Xiaojing<sup>3</sup>, Hao Jianjun<sup>3</sup>

(1. Department of Horticulture, Hebei North University, Zhangjiakou 075400, China;

2. School of Foreign Languages, Hebei North University, Zhangjiakou 075400, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Nutritious *Agaricus bisporus* is one of the most extensively cultivated, most productive in total and largest consumed edible fungi in the world. In many parts of China, it is mainly planted in small-scale family cultivation. Due to the inadequate fermentation of cultivating material, it is of low yield and unstable benefit, which has been one of the main reasons resulting in not extensively being planted since it was introduced to China. With its movability, adjustable size, low investment, short, effective and homogeneous fermentation and low labor intensity, new mobile fermenting device was designed for cultivators of medium or small-scale *Agaricus bisporus* planting. It is mainly made up of ventilation pedestal, fermenting room, compressor fan, controlling system, ventilation pipe, controlling valve and heat exchanger (often used in extremely cold winter outside of Northern China). The key to the fermentation of cultivating material by this device is to homogeneously heat every part of cultivating material in fermenting room to achieve the homogeneity of the effective accumulative temperature. By the flow of heat through air circulation, air pressure and air volume can homogeneously reach each part of the fermenting room through the arrangement of air outlet and duct. The effective fermenting temperature and the need of fresh air for fermentation can be adjusted by the volume of air in and out, and the temperature difference in the fermenting room can be controlled within acceptable range for fermentation by air circulation in it. The experiment formula of ferment effects is about 30% corn stalk, 50% cow manure, 20% cotton seed hull, 1% plaster, 1% superphosphate, and 1% lime on mobile fermenting device. Material temperature changes are observed during 5 temperature phases including temperature increasing, pasteurizing, temperature decreasing, constant-temperature sustaining, and fermentation ceasing. Material temperature in temperature increasing phase has been controlled not more than 65 °C, 60-65 °C in pasteurizing phase for 8 h, and 48-52 °C in temperature decreasing and sustaining phase for 24 h. And during fermenting, carbon dioxide in fermenting room has been kept 0.3%-5.0% and ammonia concentration has been not more than 3 mg/L by ventilation. Fermenting results show that according to the characteristics of cultivating material, it takes 15-20 days to have it fermented, which can greatly reduce the fermenting time, labor intensity and production cost of raw material because of no turning of the material and secondary fermentation. And the temperature range of the up, middle and low fermentation material in the room can be managed between 0.1 and 3.9 °C, which can achieve the fermentation material more homogeneous. And after fermentation, pH values of the upper, the middle and the lower layer material are respectively 7.5, 7.6 and 7.5, which are fit for the development of *Agaricus bisporus*. And before fermentation, the moisture content is 68%, but after it, the moisture contents of the upper, the middle and the lower layer material are 63%, 63% and 61%, respectively, which decrease by only 5%-7%. And the nitrogen content is 2.8%-2.9%, and the ratio of carbon to nitrogen is 15.8-16.0. In all, after its fermentation, the physical and chemical properties of the material, such as color, feeling, smell and leachate accord with the standards of compost maturity. Yield of *Agaricus bisporus* is very important, the average yield of *Agaricus bisporus* cultivated through the fermentation material can reach 18 kg/m<sup>2</sup>, and it is not different significantly from the contrast ( $P < 0.05$ ).

**Keywords:** fermentation; temperature; design; mobile fermenting device; *Agaricus bisporus*; wind circulation; effective accumulative fermenting temperature; yield