

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.021

# 牛粪好氧发酵规模化生产参数优化\*

王亮<sup>1</sup> 刘克锋<sup>2</sup> 孙向阳<sup>1</sup> 遇玲<sup>3</sup> 王红利<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京农学院城乡发展学院, 北京 102206;

3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193)

**【摘要】** 用牛粪辅以褐煤渣为发酵原料,首先在实验室单因素试验基础上选择碳氮比、含水率、室温、通风时间、pH值、有机质含量6个因素进行正交优化试验,确定实验室最佳发酵工艺参数,并以此为依据进行规模化生产,得出的最佳规模化生产参数用SPSS 12.0进行因子分析,最终确定影响发酵进程的因子主次关系。试验结果表明:牛粪好氧发酵规模化生产的影响因子排序为碳氮比、含水率、室温、通风时间、pH值、有机质含量;最佳规模化生产工艺参数为:物料含水率65%,碳氮比30,菌剂接种量 $2.5\text{ L/m}^3$ ,翻堆间隔天数和强制通风时间为3d和30min,与实验室获得参数一致;规模化生产的物料表层(0~30cm)温度最高且与设备测定不符,两者关系为 $y = 1.1487x + 4.2773$ ,为防止灰化需适时通风降温;按此生产的有机肥料全部检测指标均符合行业标准NY 525—2002。

**关键词:** 牛粪 好氧发酵 规模化生产 参数优化

中图分类号: X713; S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0115-07

## Parameter Optimization for Large-scale Production of Cattle Manure Aerobic Fermentation

Wang Liang<sup>1</sup> Liu Kefeng<sup>2</sup> Sun Xiangyang<sup>1</sup> Yu Ling<sup>3</sup> Wang Hongli<sup>2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Urban and Rural Development, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China

3. College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

### Abstract

With the cattle manure and lignite slag for fermentation materials, based on the single-factor test in the laboratory, C/N, moisture content, room temperature, ventilation time, pH value, organic matter were analyzed by orthogonal optimization to determine the optimum laboratory fermentation parameters as the basis for large-scale production. SPSS 12.0 was used to analyze the optimum parameters of large-scale production to determine the relationship of the factors which affected the fermentation process. The follows were obtained: the factors which affected the fermentation process are C/N, moisture content, room temperature, ventilation time, pH value, organic matter; the optimum parameters of large-scale production are moisture content of raw materials 65%, C/N 30, agent inoculums concentration  $2.5\text{ L/m}^3$ , the number of turning: once every three days; the time of forced ventilation: 30 min, these are consistent with laboratory parameters; the temperature from the fermented material surface (0~30 cm) of the large-scale production was highest that was incompatible with the result obtained from equipment measurement. It has a remarkable linear correlation with side temperature,  $y = 1.1487x + 4.2773$ . All the detection indicators of the organic fertilizer in this process reached China's industry standard NY 525 - 2002.

**Key words** Cattle manure, Aerobic fermentation, Large-scale production, Parameter optimization

收稿日期: 2011-08-21 修回日期: 2011-09-19

\* 北京市教育委员会科技成果转化与产业项目和北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR201007140)

作者简介: 王亮, 博士生, 主要从事畜禽粪便无害化处理研究, E-mail: wlyyayl@163.com

通讯作者: 孙向阳, 教授, 主要从事固体废弃物处理研究, E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

## 引言

随着禽畜养殖场规模的扩大,禽畜粪便废弃物产量迅速增长已经成为我国农村面源污染的主要原因之一<sup>[1]</sup>。未经处理的畜禽粪尿中含有大量的病原微生物、寄生虫及虫卵,可在土壤中生存和繁殖,扩大了传染源,造成人、畜传染病和寄生虫的蔓延<sup>[2]</sup>。但从资源利用的角度分析,畜禽粪便以有机质为主,并含有一定量的氮、磷、钾、钙、镁、硫及各种微量元素等营养成分,经过处理,可以成为很好的农业肥料<sup>[3]</sup>。

然而,传统的自然堆肥发酵存在着发酵周期长、发酵产品肥效低等问题。为了大量而快速处理有机废弃物的需要,工厂化生产应运而生。目前,国内对牛粪好氧发酵生产有机肥的设备和工艺参数研究大多停留在试验设计<sup>[19-20]</sup>和中试阶段<sup>[21]</sup>,很少进行规模化生产设备和工艺参数研究。

本文针对以上现状,与北京市延庆县旧县镇大柏老聚八方奶牛专业合作社联合开发生产有机肥。在大规模生产中,以自行设计研发的堆肥环境全自动智能监测设备和人工监测相结合的方式,得出规模化好氧发酵生产有机肥的关键性技术参数,试提出以牛粪为主要原料的大规模生产有机肥的工艺标准,为利用禽畜粪便大规模生产有机肥提供一定参考。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 原料

牛粪取自北京市延庆县旧县镇大柏老聚八方奶牛合作社,褐煤渣(废弃物)于北京市郊煤场购买,用于调节发酵初始的碳氮比和提高肥料腐殖酸含量。牛粪和褐煤渣的主要理化性质如表1所示。

表1 原料的主要理化性质

Tab.1 Main physical and chemical characteristics of compost material

| 原料  | 有机质   |      |     | 全碳质  |      | 全氮质  |
|-----|-------|------|-----|------|------|------|
|     | 含水率/% | 质量分数 | pH值 | 碳氮比  | 量分数  | 量分数  |
|     | 88.6  | 63.7 | 8.0 | 18.5 | 37.5 | 2.03 |
| 牛粪  | 88.6  | 63.7 | 8.0 | 18.5 | 37.5 | 2.03 |
| 褐煤渣 | 10.3  | 73.3 | 6.3 | 67.2 | 59.1 | 0.88 |

#### 1.1.2 菌剂制备

菌剂来源于北京农学院和北京林业大学联合开发的菌剂PC<sup>[7]</sup>。菌剂PC主要由波茨坦短芽孢杆菌(*Brevibacillus borstelensis*)、卷枝毛霉菌(*Mucor circinelloides*)和钊青霉菌(*Penicillium polonicum*)组

成,波茨坦短芽孢杆菌用牛肉膏蛋白胨培养基培养,卷枝毛霉菌和钊青霉菌用马铃薯培养基培养,具体步骤为:①用接种针挑取斜面菌落,移至带培养基的三角瓶中。②接种细菌在35℃、160 r/min条件下培养12 h得到种子液,接种真菌在40℃、220 r/min条件下培养48 h得到种子液,然后分装扩大化培养得到发酵液。将制备的液体菌剂波茨坦短芽孢杆菌、卷枝毛霉菌和钊青霉菌按1:1:1的比例混合均匀,制成试验所需复合菌剂。

#### 1.1.3 试验设备

北京农学院自主研发的堆肥环境智能监测设备可连续在线自动记录发酵过程中的关键数据,包括湿度、室内温度、通风量、除臭设备和发酵槽内温度(其中发酵槽内温度是用温度传感器(探针)监测的侧面温度,经试验证实不能反映发酵过程中的最高温度,需人工监测与自动监测结合绘出关系曲线)。

图1所示为堆肥规模化生产用BN-2型翻堆机,由翻堆机骨架、吊链架、行走动力系统、控制箱、翻堆动力系统、停用挂钩、连接刮板、倒料传动组件、行走轮组成。

其工作原理为:链条刮板工作方式。整机对准工作槽,空行程快速行驶到工作点,放下刮板,启动刮板旋转,以工作速度翻堆作业。翻堆传动过程为:发电机供电,通过减速箱连接轴带动主链轮,通过链条转动翻堆机后轴,带动另一组链轮和链条转动,带动前后链轮转动,在前后链轮的链条上组装有刮板及刮齿,对物料进行翻堆作业。本机的行走传动过程为:由发电机供电,减速机由链轮和链条传动,带动走轮以空行程或工作速度在轨道上行走。

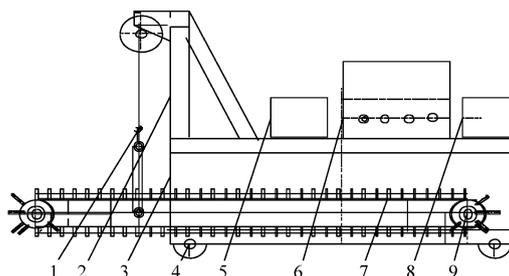


图1 BN-2型翻堆机结构示意图

Fig.1 Structure of smart turning machine

1. 停用挂钩 2. 吊链架 3. 翻堆机骨架 4. 行走轮 5. 行走动力系统 6. 控制箱 7. 连接刮板 8. 翻堆动力系统 9. 倒料传动组件

## 1.2 测定项目和方法

在实验室发酵参数优化的基础上,由规模化处理验证其可靠性和各种参数动态变化与发酵结果,最终得出影响规模化处理主要因子和优化参数。

实验室发酵池的设计:牛粪堆肥试验在北京农

学院城乡发展学院基地室内进行。其中试验发酵池由水泥砖砌成,长、宽、高分别为 0.8、0.7、0.9 m。发酵池内衬为 5 cm 厚的泡沫保温层,底部垫有稻草,防潮保温透气,并铺设了 PVC 管道作为控温通风管,并在管道顶部钻取 3×3 个孔。共建设 27 个试验发酵池。每个发酵池装有温度传感器自动记录温度变化并同时插入水银温度计人工记录。发酵池建设好后沿其内壁铺设一层遮荫网,便于发酵物料在其中存放,而且发酵结束后方便取出发酵池中的肥料。通过实验室发酵六因素三水平(温度、pH 值、含水率、通风、碳氮比、有机质含量)正交试验确定实验室最佳发酵工艺参数,为规模化生产的工艺参数提供依据。

规模化发酵验证试验在公司发酵车间进行,发酵槽长 50 m,宽 2 m,高 1.5 m,采用自动翻堆机和底部强制通风供氧相结合的形式<sup>[8-9]</sup>,初始温度在规模化生产中不予考虑。用土篆上、中、下层各取 1 kg 样品混均备用于测定养分含量等。

### 1.2.1 温度测定

在实验室发酵池的内侧面距底 5 cm 处和车间发酵槽的内侧面距底 50 cm 处安装温度感应探针自动计量发酵温度变化,另在车间发酵槽内四角和中间共 5 个点以人工方式用电子温度计分别测量发酵表层(0~30 cm)、中层(30~90 cm)、底层(90~150 cm)温度变化。发酵过程中,温度应该在 50~55℃ 保持 5~7 d,才能达到无害化卫生标准<sup>[4]</sup>。在发酵池外、发酵槽外以及室外均安装温度感应探针自动计量发酵环境温度变化。

### 1.2.2 含水率测定

称取试样 100 g,在 105℃ 高温干燥箱中干燥 24 h,恒质量至 0.1 g,测定其含水率。

### 1.2.3 有机质含量和碳氮比测定

堆肥样品有机碳含量采用灼烧法测定<sup>[5]</sup>。总碳的测定方法用重铬酸钾氧化外加加热法。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 联合消煮,采用 Kjeltac 2300 型凯氏定氮仪测定全氮。

### 1.2.4 种子发芽指数测定

将 20 粒矮牵牛种子放入有滤纸的培养皿内,并向培养皿内注入 5 mL 发酵产品浸提液,以去离子水做空白对照,每个样品做 5 次重复试验。样品置 25℃ 生化培养箱 96 h 后,计算种子发芽率并测量根长,然后计算种子的发芽指数

$$G = \frac{ab}{cd} \times 100\%$$

式中  $a$ ——处理种子发芽率

$b$ ——处理种子根长

$c$ ——对照种子发芽率

$d$ ——对照种子根长

Zucconit 等认为,当  $G > 0.8$  时,发酵物料完全腐熟<sup>[6]</sup>。

## 1.2.5 养分含量、pH 值、重金属、蛔虫卵、大肠杆菌测定

根据农业行业标准 NY 525—2002《有机肥料》<sup>[16]</sup>测定。全磷采用钒钼黄比色法分光光度计测定,全钾采用火焰光度法 FP6410 型火焰光度计测定,pH 值采用 pH 酸度计法测定。重金属、蛔虫卵、大肠杆菌按 GB 8172—1987 测定<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 实验室正交试验分析

由表 2 可知,实验室发酵最佳工艺条件为  $A_1B_2C_1D_1E_2F_3$ ,即原料的含水率为 65%,初始碳氮比为 30,每天通风 30 min,有机质初始质量分数为 80%,初始温度为 30℃,pH 值为 8.0。因所选组合不在设计试验中,因此重新对  $A_2B_2C_1D_1E_2F_3$  组合进行试验。结果表明,在此试验条件下,物料可以在第 3 天升温至 56℃,并维持 8 d,达到农业部农业行业标准 NY 525—2002 的卫生标准要求,发酵 20 d,物料已经腐熟,种子发芽指数达到 95%。

### 2.2 规模化处理中各工艺参数对发酵的影响

#### 2.2.1 温度

由图 2 可知,温度探针自动采集的侧温略低于发酵中、表层温度。表层温度在整个发酵过程中保持最高,原因可能是表层(0~30 cm)的物料表面裸露在空气中,有效地吸收氧分,有利于好氧菌的活动。发酵过程中温度变化从大到小为:表层、中层、底层。另外,表层温度应控制在 70℃ 以下,否则,物料易灰化且有机质也随之大量分解,须通过翻堆和强制通风来降低其温度,这是设备测量的侧面温度不能准确表达的。所以,需要建立图 3 所示的侧温和表层温度的对应关系,以便从温度探针表达的温度分析发酵物料的最高温度。由侧温和表温的关系曲线可以看出,两者呈一次函数关系(斜率大于 0)。

#### 2.2.2 含水率和 pH 值

在堆肥过程中,水分为微生物生长所必需,按质量计 50%~65% 的含水率最适宜微生物分解代谢<sup>[14]</sup>。由图 4 可知,发酵初期,含水率略有下降,估计是微生物群开始活动的标志。随着微生物群大量繁殖和活动的加剧,发酵温度的不断上升,含水率出现先升高再下降的过程,直至后期腐熟期才基本稳定。

pH 值代表微生物的生长环境,一般而言,微生物最适宜的 pH 值范围是中性或弱碱性<sup>[15]</sup>。由图 5

表2 牛粪发酵的试验结果

Tab.2 Results of fermentation of dairy manure

| 试验序号  | 含水率 A/% | 碳氮比 B | 通风时间 C/min | 有机质含量 D/% | 温度 E/°C | pH 值 F | 发芽指数/% |
|-------|---------|-------|------------|-----------|---------|--------|--------|
| 1     | 65      | 25    | 30         | 80        | 20      | 6.0    | 82.1   |
| 2     | 65      | 30    | 60         | 70        | 30      | 7.0    | 85.2   |
| 3     | 65      | 35    | 90         | 60        | 40      | 8.0    | 87.6   |
| 4     | 70      | 25    | 30         | 80        | 20      | 6.0    | 93.4   |
| 5     | 70      | 30    | 60         | 70        | 30      | 7.0    | 88.9   |
| 6     | 70      | 35    | 90         | 60        | 40      | 8.0    | 83.1   |
| 7     | 75      | 25    | 30         | 80        | 20      | 6.0    | 83.2   |
| 8     | 75      | 30    | 60         | 70        | 30      | 7.0    | 89.2   |
| 9     | 75      | 35    | 90         | 60        | 40      | 8.0    | 80.5   |
| $K_1$ | 85.1    | 86.3  | 85.9       | 84.8      | 84.1    | 83.1   |        |
| $K_2$ | 89.7    | 87.9  | 83.2       | 83.4      | 86.5    | 84.5   |        |
| $K_3$ | 84.2    | 84.8  | 81.9       | 83.3      | 85.1    | 85.8   |        |
| R     | 5.6     | 5.9   | 3.2        | 2.0       | 5.1     | 2.4    |        |

注:通气鼓风机功率为 3.5 kW。

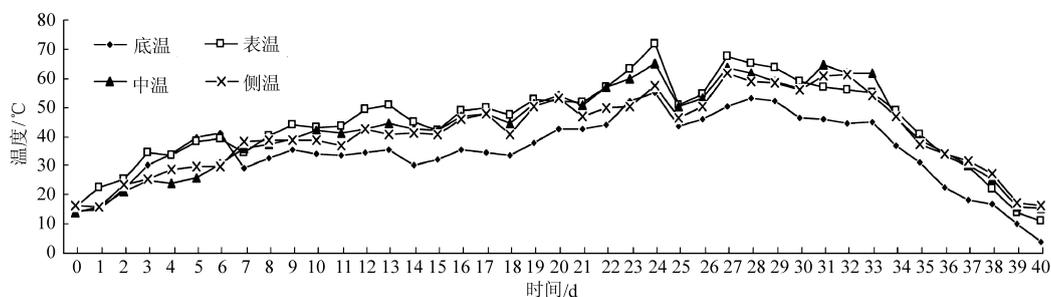


图2 温度在发酵过程中的变化曲线

Fig.2 Temperature changes during the fermentation process

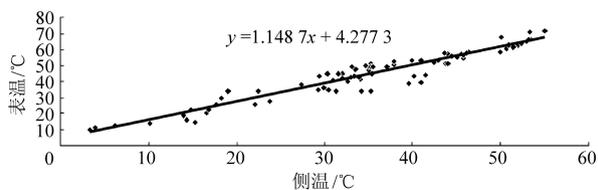


图3 侧温与表温对应关系

Fig.3 Correspondence between side temperature and surface temperature

可知,pH 值随发酵进程出现降低—升高—降低的过程。但 pH 值并不影响堆肥过程中有机质的降解,其主要是对微生物的繁衍有重要影响。发酵过程是

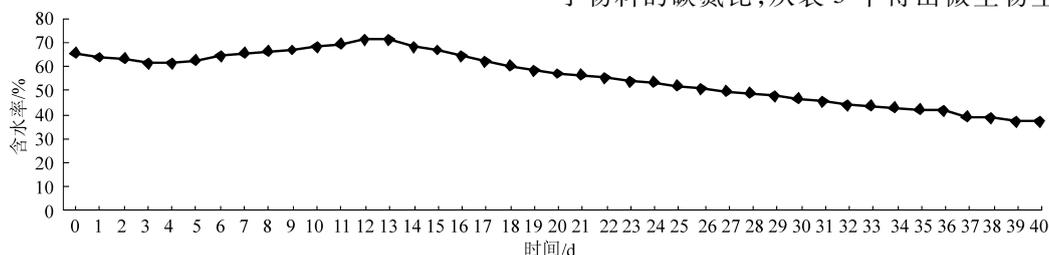


图4 含水率在发酵过程中的变化曲线

Fig.4 Changes of moisture content in the fermentation process

发酵环境从碱性到酸性的过渡。

### 2.2.3 碳氮比和有机质含量

碳氮比是影响堆肥效果的重要因素,碳是堆肥生化反应的能量来源,氮是控制生物合成的主导因素,堆肥过程中较为理想碳氮比为 20 ~ 35<sup>[10-13]</sup>。由表 3 得知:微生物群落从初期到高温期活动剧烈,对碳、氮的消耗大,故通过观测温度可判断有机质含量变化。高温期过后,微生物群落内源呼吸和外源作用减弱,生理繁殖趋于稳定,碳、氮的供应量随之降低,有机质也进入低转化期。因为发酵前期调节了物料的碳氮比,从表 3 中得出微生物生长代谢很

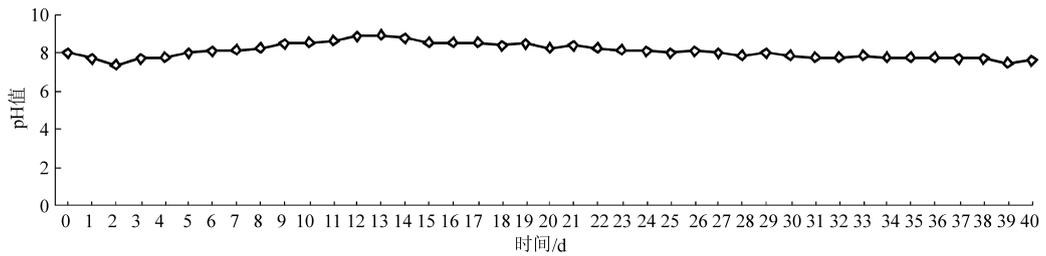


图 5 pH 值在发酵过程中的变化曲线

Fig. 5 Changes of pH value in the fermentation process

旺盛,有机质达到充分分解。

表 3 碳氮比和有机质变化

Tab.3 Changes of C/N and organic matters

| 发酵阶段 | 碳氮比  | 有机质含量/% |
|------|------|---------|
| 初期   | 30.1 | 79.8    |
| 高温期  | 19.3 | 61.8    |
| 降温期  | 16.5 | 54.6    |
| 腐熟期  | 13.8 | 44.2    |

### 2.2.4 供氧

在好氧发酵过程中,翻堆起到供氧、散热和除去水分的作用。不同的翻堆间隔天数对发酵有不同的影响,翻堆间隔过长,不能满足好氧的要求,局部出现厌氧发酵,抑制反应进程;翻堆间隔过短,堆体产生热量散失过快,也会影响堆体升温。所以,找出适合的翻堆间隔天数对发酵结果十分关键。

由图 6 和表 4 可知,设计翻堆间隔天数 4 个水平并强制通风供氧 30 min 的条件下,温度变化趋势基本一致,都先后经历了升温期、高温期和降温期这 3 个阶段。3 d 翻堆 1 次,物料 13 d 后升温达到 55℃ 高温,并维持了 15 d 左右,较之其他处理不仅高温维持时间长且温度高达 70℃,可有效杀灭虫害。1 d 翻堆 1 次的升温速度不快,最高温仅 50℃,推测原因是频繁对物料进行翻抛,导致物料温度下降过快,从而影响了物料的温度维持和升高。4 d 翻堆 1 次的初期升温速度较快,但由于间隔时间较长,导致发酵散发的水蒸气不能及时地从物料排出,导致物料表层冻结,不利于好氧微生物的生长,致使翻堆时导致翻堆机操作困难。综上所述,对发酵有利的翻堆间隔天数排序为:3 d、2 d、1 d、4 d,如果遇到温度过高(表层温度大于 70℃)或前期耗氧量小时,可把强制通风时间加长,以达到生产发酵所需的需氧量。

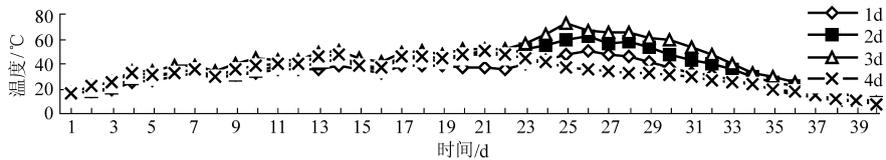


图 6 翻堆间隔天数和强制通风对发酵温度的影响

Fig. 6 Impact of turning and forced ventilation on the fermentation temperature

表 4 不同翻堆间隔天数对发芽指数的影响

Tab.4 Effect of frequency of dig on germination index

| 翻堆间隔天数/d | 1  | 2    | 3  | 4  |
|----------|----|------|----|----|
| 发芽指数/%   | 80 | 84.4 | 95 | 75 |

### 2.2.5 规模化生产影响因子分析

以实验室优化数据结果为基础,规模化生产为依据,通过 SPSS 12.0 因子分析得出影响因子分析。图 7 和图 8 为温度、pH 值、含水率、通风时间、碳氮比、有机质含量 6 个影响发酵的因素在发酵变化过程中构成的碎石图和三维因子载荷单点图。由图 7 得出碎石图拐点为 3,这 3 个因子贡献占总方差的 85.918%,证明提取 3 个公共因子对发酵影响最大。图 8 所示为分别以第 1、第 2、第 3 主因子为 X 轴、Y 轴、Z 轴,根据旋转后的因子载荷矩阵作图得出的旋转后各成分变量的分布集中程度。

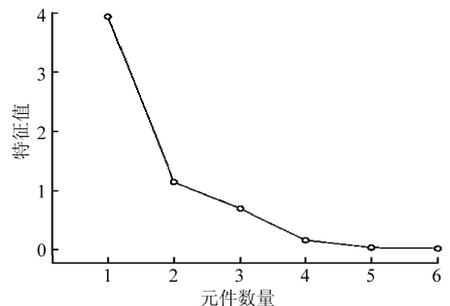


图 7 碎石图

Fig. 7 Component number

### 2.2.6 主影响因子分析

从提取出的 6 个因子分析得出主成分载荷矩阵(表 5),由其中 3 个主成分载荷和相应的公共因子方差及方差贡献推导出主成分得分(过程略),得出影响发酵进程的顺序依次是:碳氮比、含水率、室温、通风时间、pH 值、有机质含量,对实验室正交试验得

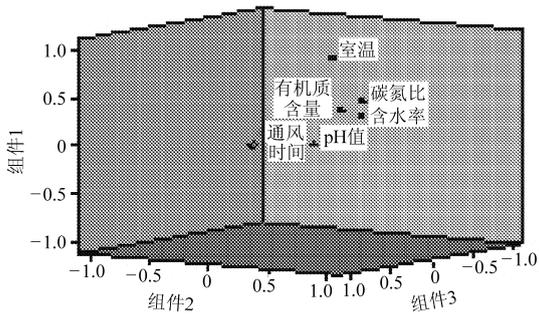


图8 三维因子载荷散点图

Fig. 8 Component point in rotated space

出的结论  $B > A > E > C > F > D$  进行了有效验证,验证结果与实验室发酵主要影响因子一致。

表5 主成分载荷矩阵

Tab. 5 Component matrix

|       | 第1主成分    | 第2主成分    | 第3主成分    | 公共因子方差 |
|-------|----------|----------|----------|--------|
| 碳氮比   | 0.813 5  | 0.556 1  | -0.116 5 | 0.985  |
| 有机质含量 | 0.760 8  | -0.181 3 | 0.457 9  | 0.821  |
| 含水率   | 0.822 7  | 0.540 2  | -0.115 9 | 0.982  |
| 室温    | 0.784 6  | 0.558 3  | -0.141 2 | 0.947  |
| 通风时间  | -0.313 7 | 0.598 5  | 0.666 0  | 0.900  |
| pH值   | 0.766 3  | -0.492 9 | 0.195 0  | 0.868  |
| 方差贡献  | 3.741    | 2.394    | 0.738    | 6.873  |
| 特征根   | 3.741    | 2.394    | 0.738    | 6.873  |

### 2.3 有机肥的指标检测结果

表6是北京市肥料质量监督检验站出具的有机肥料检测报告和北京农学院实验室检测结果,从表6中可以得出,有机质含量和总养分含量远远超出标准规定,属优质有机肥。重金属含量和大肠杆菌数量都控制在国家有机肥标准允许范围内,综合评定为合格的有机肥产品。

## 3 结论

(1)基于实验室小规模正交发酵试验,得出影响发酵试验的主要影响因子及优化参数为: $B > A > E > C > F > D$ 。最佳工艺条件为  $A_1 B_2 C_1 D_1 E_2 F_3$ ,即原料的含水率为65%,初始碳氮比为30,每天通风30 min,有机质初始质量分数为80%,初始温度为30℃,pH值为8.0。

(2)影响发酵进程因素的顺序为:碳氮比、含水

表6 检测指标

Tab. 6 Detection indexes

| 项目                                   | 标准值        | 实测值   |
|--------------------------------------|------------|-------|
| 有机质质量分数(以干基计)/%                      | $\geq 30$  | 54.4  |
| 总养分( $N + P_2O_5 + K_2O$ )含量(以干基计)/% | $\geq 4.0$ | 5.91  |
| 总氮(N)(以干基计)/%                        | $\geq 0.5$ | 2.358 |
| 总磷( $P_2O_5$ )(以干基计)/%               | $\geq 0.3$ | 1.57  |
| 总钾( $K_2O$ )(以干基计)/%                 | $\geq 1.0$ | 1.98  |
| 含水率(游离水)/%                           | $\leq 20$  | 12.80 |
| 酸碱度(pH值)                             | 5.5~8.0    | 7.5   |
| 总镉(Cr)/ $mg \cdot kg^{-1}$           | $\leq 300$ | 0.48  |
| 总汞(Hg)/ $mg \cdot kg^{-1}$           | $\leq 5$   | 8.05  |
| 总铅(Pb)/ $mg \cdot kg^{-1}$           | $\leq 100$ | 25.0  |
| 总砷(As)/ $mg \cdot kg^{-1}$           | $\leq 30$  | 2.89  |
| 蛔虫卵死亡率/%                             | 95~100     | 100   |
| 大肠杆菌值/ $mL \cdot g^{-1}$             | 0.1~0.2    | 0.11  |
| 发芽指数/%                               | $\geq 80$  | 95    |

率、室温、通风时间、pH值、有机质含量。规模化生产的工艺参数参考值(因规模化处理过程中发酵车间宽敞,空气流通顺畅,故本试验通风时间排序较后)为:物料含水率65%,碳氮比30,菌剂接种量  $2.5 L/m^3$ ,翻堆间隔天数和强制通风的时间为3 d和30 min,发酵40 d后,发酵产物的种子发芽指数可达到95%,因发酵在北京地区深秋至冬季转换期,故发酵效果比较理想。

(3)通过规模化发酵试验得出,在线监测设备测出的温度与发酵表层温度存在一定差异,两者间关系是: $y = 1.1487x + 4.2773$ ,从式中得出代表好氧发酵过程中最高温度的变化曲线,从而达到对发酵全过程中温度的可控性。

(4)在本研究得到的优化工艺条件下,牛粪经好氧发酵处理生产出的有机肥全部达到国家行业标准。自主开发研制的发酵设备对影响发酵进程的主要参数进行全面在线监控,另外微生物菌剂的使用不仅提高了有机肥的养分含量,而且缩短了发酵周期,在发酵过程中堆体的升温速度较快,高温维持时间延长,有毒害物质含量降低,综上所述,工业化发酵设备的研发和工艺参数的取得为牛粪的规模化处理生产有机肥提供了必要的参考依据。

## 参 考 文 献

- 李庆康,吴雷,刘海琴,等. 我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 251~254.  
Li Qingkang, Wu Lei, Liu Haiqin, et al. The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China [J]. Agro-environmental Protection, 2000, 19(4): 251~254. (in Chinese)
- 金淮,常志州,朱述钧. 畜禽粪便中人畜共患病病原菌传播的公众健康风险[J]. 江苏农业科学, 2005(3): 103~105.

- 3 郑瑞生,封辉,刘泓,等. 畜禽粪便高温好氧堆肥的  $\text{NH}_3$  挥发及其调控[J]. 亚热带农业研究,2006,2(1):65~68.  
Zheng Ruisheng, Feng Hui, Liu Hong, et al.  $\text{NH}_3$  volatilization and the control methods during aerobic thermophilic composting treatment of livestock manure [J]. Subtropical Agriculture Research, 2006, 2(1): 65~68. (in Chinese)
- 4 耿冬梅,宣世伟,王鹏,等. 高温好氧菌群用于接种垃圾发酵的实验研究[J]. 上海环境科学,2003,22(10):699~701.  
Geng Dongmei, Xuan Shiwei, Wang Peng, et al. Experimental study on using thermophilic aerobic microbial community for inoculating solid waste composting[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(10): 699~701. (in Chinese)
- 5 NY/T 304—1995. 有机肥料有机物总量的测定[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- 6 鲍艳宇,周启星,颜丽,等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. 应用生态学报,2008,19(2):374~380.  
Bao Yanyu, Zhou Qixing, Yan Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 374~380. (in Chinese)
- 7 刘克锋,刘悦秋,雷增谱,等. 不同微生物处理对牛粪堆肥质量的影响[J]. 农业环境科学学报,2003,22(3):311~314.  
Liu Kefeng, Liu Yueqiu, Lei Zengpu, et al. Effects of different microorganism consortiums on quality of composting pig-dung [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(3):311~314. (in Chinese)
- 8 Xi B D, Liu H L, Huang G H, et al. Study on inoculation technology of complex microbial community for composting enhancement [J]. Environ. Poll. and Prot., 2003, 25(5): 262~264.
- 9 庞金华,程平宏,余廷园. 两种微生物制剂对猪粪堆肥的效果[J]. 农业环境保护,1998,17(2):72~73.  
Pang Jinhua, Cheng Pinghong, She Tingyuan. Effects of two microbiological formulations on the compost of pig excrement [J]. Agro-environmental Protection, 1998, 17(2): 72~73. (in Chinese)
- 10 吴银宝,汪植三,廖新梯,等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(2):189~193.  
Wu Yinbao, Wang Zhisai, Liao Xindi, et al. Study on mature index of composting swine manure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(2):189~193. (in Chinese)
- 11 Inbar Y, Chen Y, Hadar Y, et al. New approaches to compost maturity[J]. BioCycle, 1990(12): 64~68.
- 12 Manser A G R, Keeling A A. Practical handbook of processing and recycling municipal waste [M]. New York: Lewis Publishers, 1996.
- 13 赵斌,何绍江. 微生物学实验[M]. 北京:科学出版社,2002:258~259.
- 14 MacGregor S T, Miller F C, Psarianos K M, et al. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, 41(6): 1321~1330.
- 15 Xintao He, Terry J Logasn, Samuel J Traina. Physical and chemical characteristics of selected U. S. municipal solid waste composts [J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(3): 543~552.
- 16 NY 525—2002. 有机肥料[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- 17 GB 8172—1987. 城市垃圾农用控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
- 18 Hart T D, De Leij F A A M, Kinsey G, et al. Strategies for the isolation of cellulolytic fungi for composting of wheat straw [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2002, 18(5): 471~480.
- 19 唐娟,张波. 牛粪好氧发酵堆肥设备的设计[J]. 广东农业科学,2009(12):199~201.  
Tang Juan, Zhang Bo. Design on dairy dejecta composting equipment with aerobicfermentation [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(12): 199~201. (in Chinese)
- 20 盛力伟,李爱芹,刘俊杰,等. 9FJ-5000型粪便发酵搅拌机的设计[J]. 农机化研究,2007(12):86~88.  
Sheng Liwei, Li Aiqin, Liu Junjie, et al. Research on the type 9FJ-5000 of excrement zymolysis blender[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 86~88. (in Chinese)
- 21 曹慧玲,王琦,胡青平,等. 添加复合菌剂好氧发酵牛粪生产生物有机肥料得工艺优化[J]. 农业工程学报,2009,25(1):189~193.  
Cao Huiling, Wang Qi, Hu Qingping, et al. Optimized technology for aerobic fermentation of dairy manure to produce bioorganic fertilizer by inoculating compound microbes [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 189~193. (in Chinese)