

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.08.001

李路瑶, 李佳彬, 冯烁, 等. 微生物异位发酵床处理蛋鸡养殖废弃物的效果[J]. 中国农业气象, 2020, 41(8): 473-482

微生物异位发酵床处理蛋鸡养殖废弃物的效果*

李路瑶, 李佳彬, 冯烁, 宋婷婷, 张燕荣, 朱昌雄, 耿兵**

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业清洁领域团队, 北京 100081)

摘要: 实验采用微生物异位发酵床技术对蛋鸡养殖废弃物进行发酵处理, 以期为该技术的推广应用并解决蛋鸡养殖环境污染问题提供理论依据。具体做法为, 将玉米秸秆与椰壳按质量比 2:1 混合, 并均匀加入微生物菌剂作为异位发酵床垫料, 调节垫料初始含水率为 51.97%, 将其填入异位发酵床内, 将垫料厚度调整为 60cm, 预发酵 4d 后开始处理蛋鸡养殖废弃物。实验从 2019 年 10 月 28 日开始, 至 2020 年 1 月 8 日结束, 期间定时对上层 (0-20cm)、中层 (20-30cm)、下层 (30-40cm) 垫料分别取样, 探讨不同层次垫料的基础理化性质、营养成分以及微生物数量的变化。结果表明: 实验期间异位发酵床不同层次垫料的温度、含水率、pH 和电导率均呈一致的变化趋势, 且各层之间差异不显著。发酵床垫料的温度维持在 50~75℃, 含水率处于 45%~58%, pH 值由 6.1 波动升至 8.97, 电导率呈持续增加趋势。实验全过程垫料平均 pH 在 8.0 左右, 确保了发酵床的稳定运行。与实验起始时相比, 实验结束时发酵床不同层次垫料的 TN、TP 和 TK 含量均极显著增加 ($P<0.01$), 而 C/N 呈极显著下降趋势 ($P<0.01$), 有机质含量变化不显著; 垫料对蛋鸡养殖废水和粪便的吸纳系数分别为 1.05 和 3.50, 其养分含量均符合 NY525-2012 关于总养分及有机质质量分数的标准。本发酵体系以细菌活动为主, 放线菌次之, 其好氧发酵能够有效降解和消纳蛋鸡养殖废弃物。

关键词: 异位发酵床; 蛋鸡养殖废弃物; 微生物; 畜禽废弃物

Treatment Effects of Ectopic Microbial Fermentation on Layer Hens Waste

LI Lu-yao, LI Jia-bin, FENG Shuo, SONG Ting-ting, ZHANG Yan-rong, ZHU Chang-xiong, GENG Bing

(Agricultural Clear Watershed Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to provide theoretical basis for application of microbial ectopic fermentation system technology and solve the environmental pollution problem of laying hens, microbial ectopic fermentation system was used to treat the waste produced from layer breeding and to reduce environmental pollution. The specific procedures were mixed corn straw and coconut shell according to the mass ratio of 2:1, evenly added microbial agents as the ectopic fermentation system material. The initial moisture and thickness of the litter were adjusted to 51.97% and 60cm, respectively, and filled it in the ectopic fermentation system. After 4 days of pre-fermentation, laying hens breeding waste was treated by the ectopic fermentation system. From the beginning of the experiment on October 28, 2019 to the end of the experiment on January 8, 2020, the samples were taking from the upper layer (0-20cm), middle layer (20-30cm), and lower layer (30-40cm) in the different stage of experiment, further to explore the changes of physical and chemical properties, nutrients components and microbial quantities. The results showed that there were no significant differences in the temperature, moisture content, pH and conductivity of different packing layers in the ectopic fermentation system. The maximum temperature of the fermentation system was between 50-75℃, the

* 收稿日期: 2020-04-04 ** 通讯作者耿兵, E-mail: gengbing2000@126.com
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题 (2017ZX07603-002)
第一作者联系方式: 李路瑶, E-mail: liluyao0215@163.com

moisture content was between 45%–58% and the pH value was changed in the range of 6.10–8.97, and the conductivity showed a trend of continuous increase in the all experimental process. In the end of the experiment, the average pH of the litter was about 8.0, which could ensure the stable operation of the fermentation system. Compared with the beginning of the experiment, the TN, TP and TK contents of different layers of litter increased significantly in the end of the experiment ($P < 0.01$), while the organic matter content and C/N showed a decreasing trend. The organic matter content was insignificant difference and the C/N was significant ($P < 0.01$). The absorption coefficients of the litter for wastewater and feces was 1.05 and 3.50, respectively in the end. The fermentation system was dominated by bacterial activity, followed by actinomycetes. The nutrient content of the fillers was in accordance with the standards of NY525-2012 for total nutrients and organic matter mass fractions. This fermentation system can effectively degrade and absorb layer breeding waste.

Key words: Ectopic fermentation system; Layer breeding waste; Microorganism; Poultry waste

中国畜禽养殖业的集约化和规模化发展一方面带来巨大经济效益,同时也产生了严重的环境污染问题。《第一次全国污染源普查公报》显示,畜禽养殖业已经成为农业最主要的污染物排放源,其排放的化学需氧量、总氮和总磷分别占中国农业源排放量的 95.8%、37.9%和 56.3%^[1]。相对于生猪和奶牛养殖业污染问题,家禽养殖业因数量大,对空气和水体污染严重等问题备受社会广泛关注^[2]。中国畜牧业协会公布的数据显示,全国每年出栏蛋鸡和肉鸡总计约 93 亿只,产生鸡粪量高达 9956 万 t,在家禽养殖业中位居首位。因此,家禽养殖业废弃物污染控制与资源化利用成为当今的研究热点。近年来,利用鸡舍内铺层含有特殊菌种的垫料将鸡粪进行降解的微生物原位发酵床技术得到了大规模推广和应用^[3]。但是,微生物原位发酵床使用过程中存在发酵产热,易导致床体温度过高,且垫料中存在病原菌影响鸡只健康生长等问题。

为解决微生物原位发酵床技术的不足,有学者探索通过微生物异位发酵床技术处理畜禽养殖粪污。微生物异位发酵床是一种在微生物原位发酵床的基础上改进的养殖污染控制技术,这种技术实现了畜禽养殖和废弃物处理的分离,利用高温好氧发酵在持续、动态的条件下对养殖废弃物进行处理,并完成资源转化^[4]。Guo 等^[5-6]通过异位发酵床处理奶牛养殖废水,发现每千克垫料对奶牛养殖废水的吸纳系数为 2.417,且发酵结束后垫料的各项指标均达到国家农业行业生物有机肥标准。董立婷等^[7]通过异位发酵床处理生猪养殖废水,并得出每千克垫料对生猪养殖废水的吸纳系数为 2.53,优于对奶牛养殖废水的吸纳系数,并且对生猪粪便的吸纳系数为

1.78。有研究表明,与猪粪和牛粪相比,鸡粪养分含量高,但其含水率也高,可达 75%~80%,导致处理与资源化利用难度加大。另外,部分蛋鸡养殖户仍采用传统“水泡粪”工艺进行清粪,导致养殖废水产生量过大,水环境污染问题严重。陈斌^[8]的研究显示,鸡粪的含水率与臭气浓度成正比,因此,降低鸡粪的含水率是降低臭气浓度及环境污染的关键。李灵章等^[9]在处理含水率为 75.36%的鸡粪过程中添加玉米秸秆,使鸡粪-秸秆整体的含水率控制在 42%左右。杨凌等^[10]研究显示,经过 7d 发酵塔发酵可将鸡粪的含水率从 60%降至 30%。

目前,微生物异位发酵床技术在生猪和奶牛养殖废弃物处理上得到了广泛研究和应用^[11-12],但是在养鸡废弃物处理方面并没受到关注,相关研究报道很少。本研究采用微生物异位发酵床技术处理蛋鸡养殖过程中产生的粪便和污水,研究异位发酵床垫料温度、pH、含水率、微生物数量和营养成分的变化,从而为异位发酵床技术的推广应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验在北京市顺义区某养鸡场进行。为了开展实验研究,异位发酵床与养殖区同时建设,实验设置如图 1 和图 2 所示。异位发酵床规格为 3000mm (长)×1000mm (宽)×900mm (高),养殖区面积为 15.43m²,共养殖育雏育成期蛋鸡 85 只,饲养密度为 5~6 只·m⁻²。异位发酵床从 2019 年 10 月 28 日开始运行,到 2020 年 1 月 8 日垫料温度与室温接近时,结束运行,共计 72d。异位发酵床与养殖区(坡度为 5°)之间由排污孔连接,粪便和污水由排污孔进入异位发酵床。

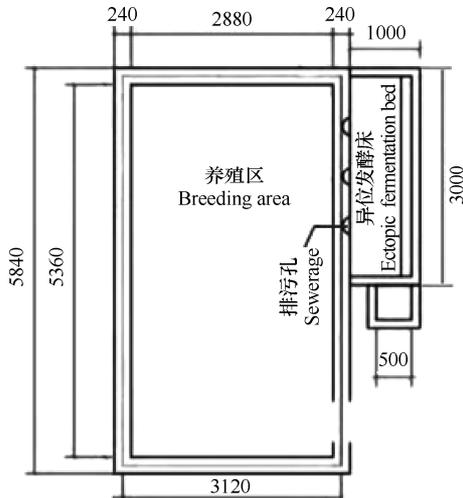


图 1 异位发酵床俯视图 (mm)

Fig. 1 Planform of ectopic microbial fermentation system (mm)

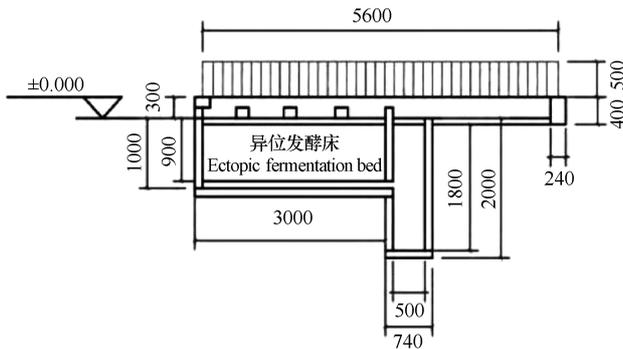


图 2 异位发酵床剖面图 (mm)

Fig. 2 Profile of ectopic microbial fermentation system (mm)

1.2 实验材料

将玉米秸秆粉碎成 0.5~2.0cm 的小段, 与椰壳粉按照质量比为 2:1 进行混合, 加入微生物菌剂混合均匀。调节垫料初始含水率为 51.97%, 搅拌均匀后填入异位发酵床内进行异位发酵床的制作。调整垫料厚度为 60cm, 预发酵 4d 之后开始处理养殖废弃物。玉米秸秆和椰壳粉均由某公司提供, 总用量为 140kg。微生物菌剂为某公司生产的垫料发酵剂零污染 I 号, 用量为每 3m³ 垫料添加 500g 菌剂。该菌剂以芽孢杆菌 (*Bacillus*) 为主, 有益菌数 >10⁹ 个·g⁻¹。

1.3 实验方法

每日采用人工清粪的方式将粪污推送至异位发酵床表面, 并进行简单机械翻堆。依据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》计算每日每只鸡产生的粪便量。为避免发酵床垫料含水率过高, 实验全过程严格控制养殖区冲水量, 约每 10d 冲洗养殖区域一次, 每次用水量 20kg 左右, 冲洗后废

水沿养殖区 (坡度为 5°) 由排污孔直接排放到异位发酵床体中, 然后采用小型翻堆机 (2.2kW 电机, 220V 电压), 对垫料 (深度为 60cm) 进行深度机械翻堆 (翻堆形式为上下翻动)。按照五点采样法采集上层 (0~20cm)、中层 (20~30cm)、下层 (30~40cm) 垫料样品, 每层采集 400g 样品, 混匀后装入自封袋备用。取样时间为第 0 天 (即实验开始当天)、第 2、7、14、21、28、35、42、49、56、63 和 72 天。取 80g 样品直接用来测定 pH、含水率、微生物数量; 其余样品置于阴凉处风干磨碎并贮存备用, 用以进行总氮、总磷、总钾、碳氮比、有机质等的测定。

1.4 指标测定

1.4.1 垫料温度

每日 9:00 左右根据五点测样法用堆肥温度计测定 20cm、30cm、40cm 深度处的垫料温度, 以 5 点平均值作为该深度的平均温度。同时, 用干湿温度计观测异位发酵床附近的环境温度。

1.4.2 垫料 pH 值及电导率

采用四分法取混合均匀的新鲜样品 5g 于 100mL 锥形瓶内, 加入 50mL 去离子水, 用振荡器 (150r·min⁻¹) 震荡浸提 30min, 测定悬浮液的 pH 值及电导率。pH 用 S-3C 型 pH 计测定, 电导率采用 DDS-11A 型电导率仪测定。

1.4.3 垫料含水率及粪污吸纳系数

采用四分法取混合均匀的新鲜样品 50g, 用恒温干燥箱在 105℃ 下干燥 8h, 取出后冷却 30min, 测定其含水率; 按照《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》计算蛋鸡育苗成期的粪便产生量, 将添加的粪污重量与垫料初始重量相比, 其比值即为发酵全过程垫料的粪污吸纳系数。

1.4.4 垫料中可培养微生物数量

采用稀释涂布平板法培养垫料中的微生物。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基分离培养, 于 37℃ 恒温培养 1~2d; 真菌采用改良高氏一号培养基分离培养, 于 28℃ 恒温培养 3~4d; 放线菌采用马丁培养基分离培养, 于 28℃ 恒温培养 5~7d。上述 3 种微生物在培养结束后根据菌落生长情况选取合适的稀释梯度平板计数。

1.4.5 垫料中养分含量

采用有机肥标准 NY 525-2012 中规定的相关方法进行测定^[13]。全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯氏定

氮法测定；全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钒钼黄比色法测定；全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-火焰光度法测定；有机质采用重铬酸钾-硫酸法测定。

1.5 数据分析

采用 Excel 软件对数据进行初级统计分析，采用 SPSS22.0 软件对数据进行相关性分析，利用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 实验期间异位发酵床垫料温度变化

由图 3 可见，整个实验期（2019-10-28—2020-01-08，72d）秋冬季，异位发酵床室内空气温度逐渐降低，在 3.0~26.0℃ 范围内变化。而同期发酵床垫料内温度明显高于室温，发酵最初两天各层温度从室温急剧升高至 75.0℃ 左右，然后保持在 50.0~70.0℃ 范围内波动变化，至 66d 后，发酵能力逐渐减弱，垫料内温度急剧降低，至 72d 前后，垫料内温度降低至室温，发酵结束。由图中可以看出，整个实验期内发酵床垫料内温度呈现出明显的周期性变化过程，其变化周期与养殖区清理粪便的周期完全一致，垫料中增加粪便后温度呈现升高趋势，然后随着发酵进行温度逐渐降低。对比分析可见，垫料内不同深度处（20cm、30cm 和 40cm）各层温度均表现出相同的变化过程，而且各层之间无显著差异。可见，在本实验装置以及养殖管理条件下，床体温度基本维持在 50~70℃，能够满足微生物活性要求。

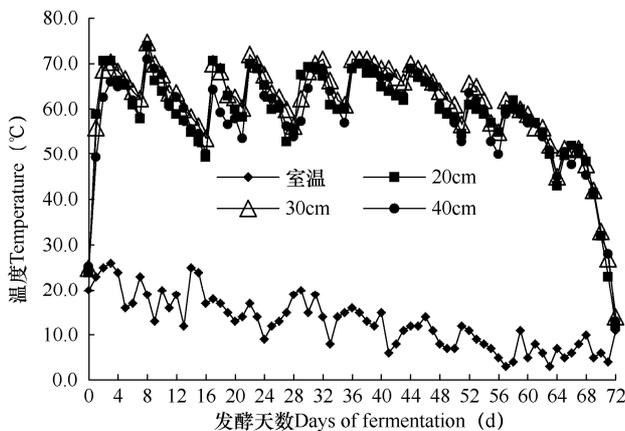


图 3 异位发酵过程中不同层次垫料温度变化过程 (2019-10-28—2020-01-08，每日 9:00 观测)

Fig. 3 Variation course of the temperature in different layers of litter during test period (2019-10-28—2020-01-08, daily observation at 9:00 am)

2.2 实验期间异位发酵床垫料含水率变化

由图 4 可知，整个实验期不同层次垫料的含水率均处于 45%~58% 波动变化。实验开始，床体垫料初始含水率为 51.97%，随着实验的进行和废水的加入，垫料含水量升高，又由于环境温度以及垫料的持续高温又造成水分的蒸发，致使垫料含水量呈现波动变化趋势。对比垫料不同层次（0-20cm、20-30cm、30-40cm）含水率可见，各层均呈现出升高下降的波动变化趋势，其中 20-30cm 垫料的含水率波动范围最小。在第 21 天和第 28 天，20-30cm 和 30-40cm 层次的垫料含水率均低于 50%，这是由于环境温度以及垫料的持续高温造成的水分蒸发，导致含水率下降，而其余观测时间各垫料层含水率均保持在 50%~60%，适宜微生物的好氧发酵。

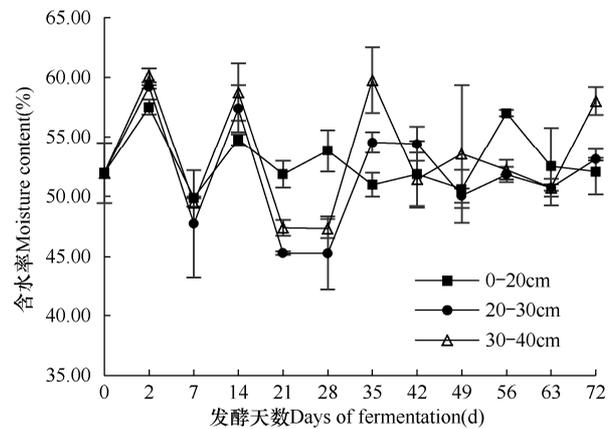


图 4 异位发酵过程中不同层次垫料含水率的变化过程

Fig. 4 Variation course of the moisture in different layers of litter during test period

由表 1 所示，研究期内平均每 10d 冲洗养殖区域 1 次，共计用水 146.7kg。根据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》，华北区蛋鸡育雏育成期粪便产污系数为 0.08kg·头⁻¹·d⁻¹。研究期共计饲养蛋鸡 85 头，育雏育成期 72d，共计产生粪便 489.6kg。经计算，每千克垫料对蛋鸡养殖废水的

表 1 发酵过程中冲洗养殖区用水量

Table 1 Water amount to flush the culture area during test period

	日期(月-日) Date(mm-dd)							合计
	10-30	11-10	11-20	11-30	12-10	12-20	12-30	
水量								
Water amount	21.34	22.56	19.79	21.42	20.68	20.16	20.75	146.7
(kg)								

吸纳系数为 1.05，对蛋鸡养殖粪便的吸纳系数为 3.50。

2.3 实验期间异位发酵床垫料酸碱度变化

由图 5 可知，整个实验期内异位发酵床不同层次垫料的 pH 总体上呈现增加的趋势。实验开始时 3 个层次垫料的 pH 均为 6.10，之后呈现波动上升的趋势。实验结束时，0–20cm、20–30cm 和 30–40cm 三个层次垫料均呈现弱碱性，相应的 pH 分别为 8.50、8.46 和 8.45，各层均表现为相同的变化过程，且无显著差异。可见，实验全过程垫料 pH 平均在 8.00 左右，处于弱碱性环境下，适宜微生物的好氧发酵。

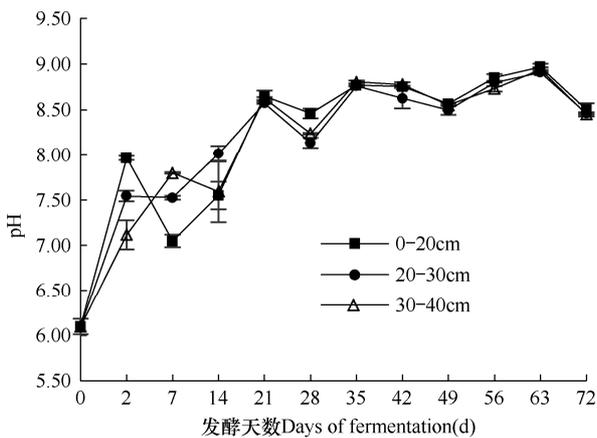


图 5 异位发酵过程中不同层次垫料 pH 的变化过程

Fig. 5 Variation course of pH value in different layers of litter during test period

2.4 实验期间异位发酵床垫料电导率变化

由图 6 可知，实验期内异位发酵床不同层次垫料的电导率总体上均呈增加的趋势。实验开始时三个层次垫料的电导率均为 $1.57\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，之后均呈现快速上升的趋势，实验结束时，0–20cm、20–30cm 和 30–40cm 三个层次垫料的电导率分别为 $5.25\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $5.36\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $4.95\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。对比垫料内不同层次电导率可见，各层均表现为相同的变化过程，而且各层之间无显著差异。实验期内电导率呈现持续上升的趋势，主要是由于不断地添加蛋鸡废弃物，导致无机盐在垫料中积累，进而导致电导率上升。

2.5 实验期间异位发酵床垫料养分含量变化

图 7 和图 8 显示的是异位发酵床在实验开始及

结束时不同层次垫料营养成分（总氮、总磷、总钾、有机质和碳氮比）的变化情况。从图 7 可以看出，实验期内，垫料的总氮、总磷和总钾较实验开始时均极显著增加 ($P<0.01$)，而垫料的有机质和碳氮比较实验开始时均有所下降，其中有机质含量变化不显著，而 C/N 则呈极显著下降 ($P<0.01$)。0–20cm 垫料层的总氮、总磷和总钾含量分别由实验初始的 0.70%、0.31% 和 0.83% 增加为实验结束时的 2.89%、3.92% 和 2.34%；20–30cm 垫料层分别由实验初始的 0.70%、0.31% 和 0.83% 增加为实验结束时的 2.51%、3.18% 和 2.06%；30–40cm 垫料层分别由实验初始的 0.70%、0.31% 和 0.83% 增加为实验结束时的 2.48%、2.97% 和 2.28%。发酵后各层次总氮、总磷和总钾含量均比发酵前显著增加，与有机物在微生物作用下挥发，总干物质量减少及鸡粪废水的持续加入有关。由图 8 可见，0–20cm 垫料的有机质和碳氮比分别由实验初始的 101.54% 和 84.14 减至实验结束时的 94.01% 和 18.87，分别减少 7.42 个百分点和 77.57%；20–30cm 垫料的有机质和碳氮比分别由实验初始的 101.54% 和 84.14 减至实验结束时的 91.18% 和 21.07，分别减少 10.20 个百分点和 74.96%；30–40cm 垫料的有机质和碳氮比分别由实验初始的 101.54% 和 84.14 减至实验结束时的 83.08% 和 19.43，分别减少 18.18 个百分点和 76.91%。各层次有机质含量呈小幅下降，碳氮比极显著降低，这是由于垫料中的有机质在发酵过程发生降解所致。

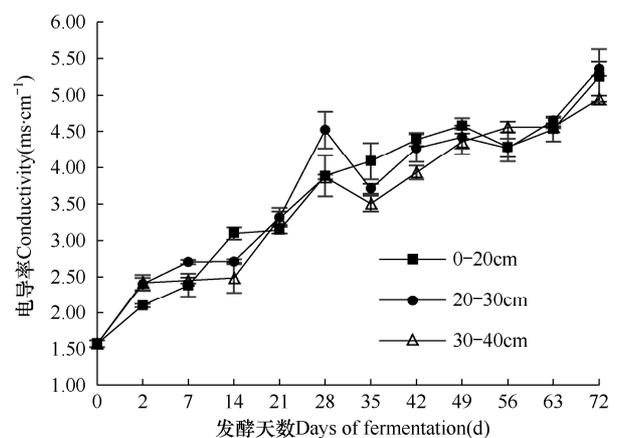


图 6 异位发酵过程中不同层次垫料电导率变化过程

Fig. 6 Variation course of the conductivity in different layers of litter during test period

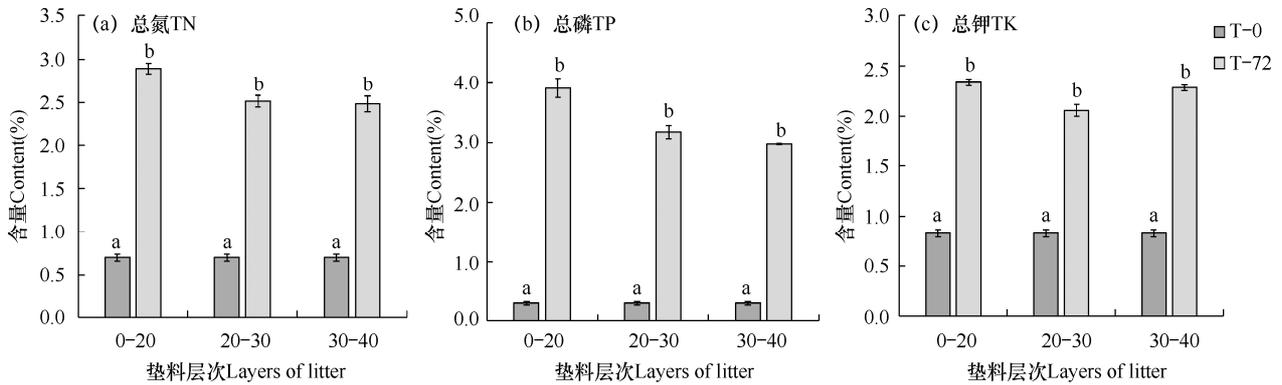


图 7 发酵前 (第 0 天, T-0) 和发酵后 (第 72 天, T-72) 不同层次垫料总氮、总磷、总钾含量比较

Fig. 7 Comparison of the TN(total nitrogen)/TP(total phosphorus)/TK(total potassium) content in different layers of litter between the beginning day(T-0) and ending day(T-72) of fermentation

注: 不同小写字母表示差异极显著 (P<0.01)。下同。

Note: Different letters indicate significant differences (P<0.01). The same as below.

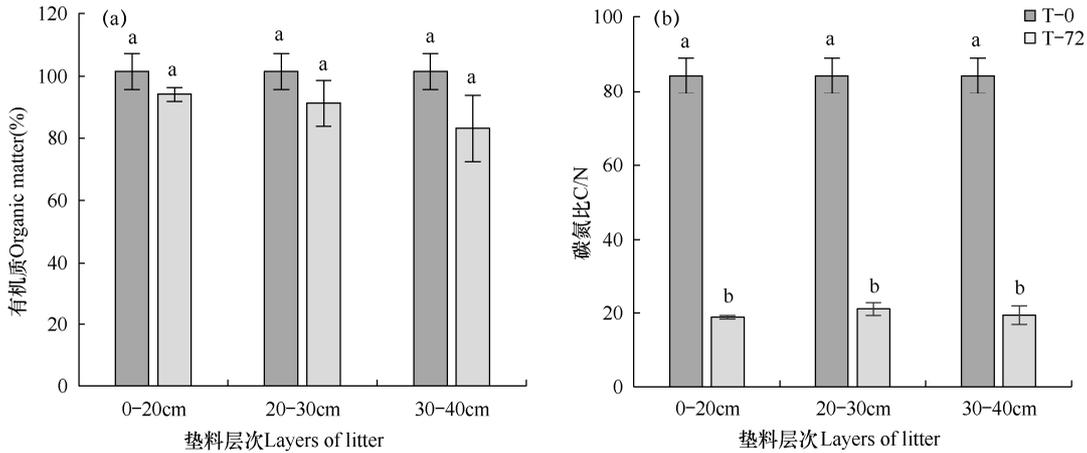


图 8 发酵前 (第 0 天, T-0) 和发酵后 (第 72 天, T-72) 不同层次垫料有机质含量 (a)、C/N 比值 (b) 比较

Fig. 8 Comparison of the organic matter content(a), C/N(b) in different layers of litter between the beginning day(T-0) and the ending day(T-72) of fermentation

2.6 实验期间异位发酵床垫料微生物数量变化

由图 9 可知, 随着实验的进行, 发酵床不同层次垫料中细菌、真菌和放线菌均呈现先升高后下降的趋势。实验开始后, 0-20cm、20-30cm 和 30-40cm 三个不同层次垫料的细菌数量由 0.67×10^7 逐渐上升, 分别达到最大值 15.87×10^7 、 8.47×10^7 和 6.61×10^7 CFU·g⁻¹, 之后呈现波动下降的趋势, 在实验结束时, 三个层次的细菌数量分别为 1.69×10^7 、 1.28×10^7 和 1.80×10^7 CFU·g⁻¹。实验开始后 0-20cm、20-30cm 和 30-40cm 三个层次垫料的真菌数量由 3.60×10^2 逐渐上升, 分别达到最大值 56.00×10^2 、 43.33×10^2 和 50.67×10^2 CFU·g⁻¹, 之后呈现波动下降的趋势, 在实

验结束时, 三个层次的真菌数量分别为 7.27×10^2 、 4.07×10^2 和 4.27×10^2 CFU·g⁻¹。实验开始后, 0-20cm、20-30cm 和 30-40cm 三个层次垫料的放线菌由 1.00×10^4 逐渐上升, 分别达到最大值 226.67×10^4 、 152.67×10^4 和 168.67×10^4 CFU·g⁻¹, 之后呈现下降的趋势, 在实验结束时, 三个层次的放线菌分别降至 6.80×10^4 、 3.50×10^4 和 4.40×10^4 CFU·g⁻¹。可见, 在本实验异位发酵体系中细菌数量维持在 $10^6 \sim 10^8$ 数量级, 真菌维持在 $10^2 \sim 10^3$ 数量级, 放线菌维持在 $10^5 \sim 10^6$ 数量级, 且实验发酵体系中微生物以细菌活动为主。

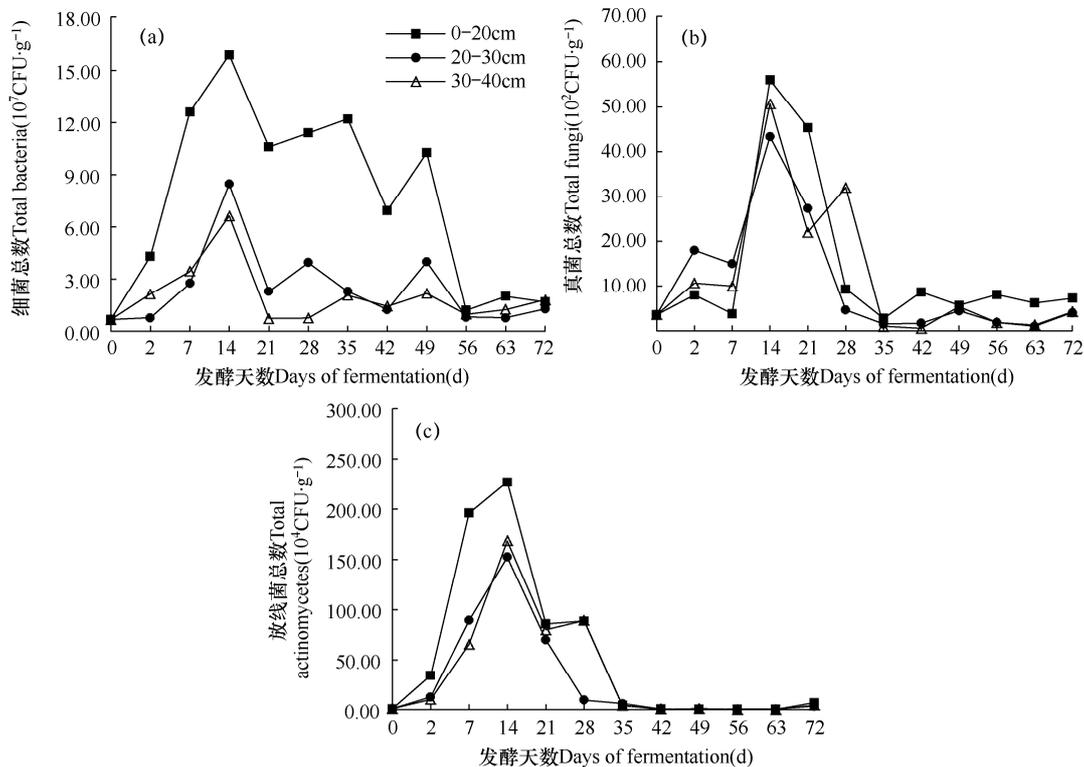


图 9 异位发酵过程中不同层次垫料内微生物数量的变化过程

Fig. 9 Variation course of the amount of microorganisms in different layers of litter during test period

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 异位发酵床垫料理化性质变化

影响微生物发酵床发酵功能的指标主要有垫料的温度、含水率、酸碱度和电导率等^[14]。温度是反映发酵床效率最为直观的指标，也是反映微生物活性的重要指标之一^[15]。有研究表明，原位发酵床在处理养殖废弃物的过程中表层温度一般维持在 25~30℃，而中心温度可达 40~50℃^[6]。本实验所研究的异位发酵床在处理蛋鸡养殖废弃物过程中垫料温度维持在 50~75℃，高于原位发酵床垫料温度，同时变化趋势与原位发酵床相似^[16-17]。异位发酵床不同层次垫料温度无明显差异，并且均呈现往复先升高后下降的波动变化趋势，这主要是由于在粪便加入及翻堆的作用下垫料温度升高，但是随着物料的消耗，温度又呈现下降趋势，从而垫料温度处于上下波动变化的状态，直至第 72 天垫料温度下降至与室温接近，发酵结束。

垫料含水率直接影响发酵床垫料温度、微生物发酵以及分解粪便的水平。有研究表明，垫料环境的含水率处于 45%~60%较为适宜^[6,18-19]。本研究中

伴随着垫料温度往复先升高后下降的波动，三个层次垫料的含水率呈现一致的变化趋势，且均处于 45%~60%。异位发酵床可以同时处理养殖废水和畜禽粪便，尤其在处理养殖废水方面应用较广泛。经计算，本研究中每千克垫料对蛋鸡养殖废水的吸纳系数为 1.05，低于对生猪养殖废水的吸纳系数；而对蛋鸡养殖粪便的吸纳系数为 3.50，高于对生猪养殖粪便的吸纳系数^[7]。

发酵床的发酵过程依赖于微生物的作用，而微生物的生长又依赖于适宜的酸碱度条件^[17]。有研究表明，适宜微生物好氧发酵的 pH 范围一般处于 6.5~9.0，此时微生物生长以及有机质分解速率最大^[20]。Tam 等^[21]研究发现，发酵床垫料过酸 (pH<5.9) 或过碱 (pH>9.0) 均不利于粪尿的发酵分解。Sundberg 等^[22]研究发现，pH<6 时，垫料微生物的呼吸作用明显受到抑制。本实验研究发现异位发酵床不同层次垫料的 pH 无明显差异。实验初期微生物大量繁殖，分解垫料以及蛋鸡养殖废弃物中的含氮营养物质，释放氨气，导致 pH 增加；同时微生物的硝化作用又会产生 H⁺，导致 pH 下降，从而使 pH 呈现波动变化趋势。实验全过程垫料平均 pH 值在 8.0 左右，适宜微

生物的好氧发酵。

电导率 (EC) 是以数字形式来表示溶液的导电能力, 它能间接推测出垫料浸提液中的离子总浓度^[23]。已有研究表明, 在一定浓度范围内, 溶液的电导率与其可溶性盐分含量成正相关, 即 EC 越高, 水溶性盐分越高^[24-25]。本实验研究表明不同层次垫料的电导率无明显差异, 并且均呈现上升的趋势, 这是因为粪便的不断加入以及微生物分解垫料的有机物质产生的无机盐在垫料中积累, 进而导致电导率上升。

3.1.2 异位发酵床垫料营养成分变化

异位发酵床垫料的腐熟程度可以用总氮、总磷、总钾、有机质和碳氮比等指标指示^[26]。本研究中, 异位发酵床不同层次垫料的 TN、TP 和 TK 含量均呈现极显著增加的趋势, 这主要是因为随着实验的不断进行, 鸡粪和废水中有机物被微生物不断分解以 NH_3 、 CO_2 等形式挥发, 导致垫料干重降低, 所以 TN、TP 和 TK 含量较实验前显著上升^[27-28]。发酵床垫料的 C/N 是影响发酵效果的重要因素, 合适的 C/N 可为发酵床功能菌群的生长提供最均衡的营养物质, 保证粪便快速发酵分解^[29]。微生物生长繁殖所需要的 C/N 在 25:1~30:1, 而畜禽粪便的 C/N 较低, 介于 5:1~13:1 之间, 所以为了满足微生物适合的 C/N, 就需要选择较大 C/N 的原料作为发酵床垫料^[30]。在本研究中, 异位发酵床不同层次垫料的发酵初始 C/N 为 87.40:1, 有效地满足了实验后期微生物发酵需要。在实验过程中发酵床不同层次垫料的有机质和 C/N 均呈现下降的趋势, 这是由于垫料中的有机质在发酵过程发生降解所致。异位发酵床体系发酵结束时垫料的总养分含量均符合 NY525-2012 关于总养分及有机质的质量分数的标准。

3.1.3 异位发酵床垫料微生物数量变化

微生物是发酵床运行的主体, 也是影响温度、pH、含水率和营养成分变化的重要因素^[31-32]。发酵床垫料所含有的微生物主要由本土微生物和发酵菌剂微生物共同组成。本研究中, 异位发酵床不同层次垫料的细菌、真菌和放线菌数量变化无明显差异, 且均呈现波动变化趋势。在发酵床微生物群落中, 放线菌可以产生抗生素, 进而预防和抑制病虫害的发生^[33]; 此外, 高温放线菌还可在高温阶段协同芽孢杆菌持续发酵, 分解粪便及垫料, 以维持床体温

度。发酵初期床体中的微生物分解能力较强, 可将填入的粪污快速分解和消耗, 并释放热量使床体温度升高。实验持续 20d 左右随着垫料含水率的持续下降, pH 逐渐升高, 此时不利于微生物的生长繁殖, 细菌和真菌的数量均有所下降^[34]。异位微生物发酵床可以形成以有益微生物为优势菌的生物保护屏障^[35]。本研究中, 细菌基本维持在 $10^6 \sim 10^8$ 数量级, 真菌维持在 $10^2 \sim 10^3$ 数量级, 放线菌维持在 $10^5 \sim 10^6$ 数量级, 表明细菌在发酵过程中起主要作用, 放线菌次之。

3.2 结论

(1) 异位发酵床在处理蛋鸡养殖废弃物过程中垫料温度维持在 $50 \sim 75^\circ\text{C}$, 高于原位发酵床垫料温度, 同时三个垫料层含水率均处于 45%~60%, 适宜微生物好氧发酵; 实验全过程垫料平均 pH 在 8.0 左右, 有利于微生物生长; 在微生物的作用下垫料和废弃物中的有机物质被分解, 导致垫料电导率上升; 经计算本研究中每千克垫料对蛋鸡养殖废水的吸纳系数为 1.05, 低于对生猪养殖废水的吸纳系数; 而对蛋鸡养殖粪便的吸纳系数为 3.50, 优于对生猪养殖粪便的吸纳系数。

(2) 异位发酵床不同层次垫料有机质和 C/N 均呈现下降的趋势, 而 TN、TP 和 TK 含量均呈现显著增加的趋势。实验结束时垫料养分含量均符合 NY525-2012 关于总养分及有机质质量分数的标准。

(3) 异位发酵床不同层次垫料的细菌、真菌和放线菌数量变化无明显差异, 且均呈现先升高后下降的变化趋势, 其中细菌基本维持在 $10^6 \sim 10^8$ 数量级, 真菌维持在 $10^2 \sim 10^3$ 数量级, 放线菌维持在 $10^5 \sim 10^6$ 数量级。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[N]. 人民日报, 2010-02-10.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 1st national survey of pollution sources bulletin[N]. People's Daily, 2010-02-10. (in Chinese)
- [2] Guo X Y, Hao L J, Qiu P Z, et al. Pollution characteristics of 23 veterinary antibiotics in livestock manure and

- manure-amended soils in Jiangsu province,China[J].Journal of Environmental Science and Health,Part B,2016,51(6): 383-392.
- [3] 陈长宽,金崇富,杨智青,等.发酵床养殖模式下鸡生长性状、肉品质及屠宰性能的研究[J].中国农学通报,2019,35(8): 102-105.
Chen C K,Jin C F,Yang Z Q,et al.The growth traits,meat quality and slaughtering performance of chicken under fermentation bed feed mode[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(8):102-105.(in Chinese)
- [4] 李艳苓,杨晓燕,董立婷,等.不同填料原料对微生物异位发酵床处理生猪养殖废弃物效果的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):367-373.
Li Y L,Yang X Y,Dong L T,et al.Effects of different stuffing raw materials on the treatment of piggery waste by ectopic microbial fermentation bed[J].Journal of Agricultural Resources and Environment,2018,35(4):367-373.(in Chinese)
- [5] Guo H,Geng B,Liu X,et al.Characterization of bacterial consortium and its application in an ectopic fermentation system[J].Bioresource Technology,2013,139:28-33.
- [6] 国辉.异位发酵床技术在奶牛养殖废水污染控制中的研究及应用[D].北京:中国农业大学,2014:1-2.
Guo H.Research and application of ectopic deep litter fermentation system in the control of dairy farming wastewater pollution[D].Beijing:China Agricultural University, 2014:1-2.(in Chinese)
- [7] 董立婷,朱昌雄,张丽,等.微生物异位发酵床技术在生猪养殖废弃物处理中的应用研究[J].农业资源与环境学报,2016,33(6): 540-546.
Dong L T,Zhu C X,Zhang L,et al.Research and application of ectopic microbial fermentation system in processing piggery waste[J].Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016,33(6):540-546.(in Chinese)
- [8] 陈斌.降低鸡粪含水率的两项措施[J].当代畜牧,1991(2):49-50.
Chen B.Two measures to reduce the moisture content of chicken manure[J].Contemporary Animal Husbandry,1991(2): 49-50.(in Chinese)
- [9] 李灵章,刘卓成,余雨泽,等.农作物秸秆与畜禽粪便组合的好氧堆肥理化性状研究[J].草原与草坪,2019,39(6):49-57.
Li L Z,Liu Z C,Yu Y Z,et al.Comparative study on aerobic composting of the combination among crop stalk and livestock manure[J].Grassland and Turf,2019,39(6): 49-57.(in Chinese)
- [10] 杨凌,韩昆鹏,卞红春,等.蛋鸡粪资源化处理利用技术集成与应用[J].山东畜牧兽医,2019,40(5): 32-37.
Yang L,Han K P,Bian H C,et al.Integration and application of laying hen manure resource treatment technology [J].Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine,2019,40(5):32-37.(in Chinese)
- [11] 李艳苓.微生物发酵床中土霉素降解及其抗性基因丰度变化规律[D].北京:中国农业科学院,2019: 1-21.
Li Y L.Degradation of oxytetracycline and the abundance args in microbial fermentation system[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2019:1-21.(in Chinese)
- [12] Yang X,Geng B,Zhu C,et al.Fermentation performance optimization in an ectopic fermentation system[J]. Bioresource Technology,2018,260:329-337.
- [13] 中华人民共和国农业部.有机肥料 NY 525-2012[S].北京: 中国农业出版社,2012.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China.Organic fertilizer NY 525-2012[S].Beijing:China Agricultural Press,2012.(in Chinese)
- [14] 肖佳华.生态养猪发酵床垫料原料替代技术研究[D].北京: 中国农业科学院,2012:4-5.
Xiao J H.Study on Substitution of Raw Materials in Pig-on-litter System[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2012:4-5.(in Chinese)
- [15] 应诗家,杨智青,朱冰,等.发酵床垫料翻耙结合网床养殖改善鸭舍空气质量与鸭生产性能[J].农业工程学报,2016, 32(3):188-194.
Ying S J,Yang Z Q,Zhu B,et al.Bio-bedding with automatically running plough system under slatted floor improving air quality of duck house and duck production performances[J].Transactions of the CSAE,2016,32(3): 188-194.(in Chinese)
- [16] Zaki N G,Khattab I A,El-Monem N M A.Removal of some heavy metals by CKD leachate[J].Journal of Hazardous Materials,2007,147(1-2): 21-27.
- [17] 蒋建明,闫俊书,白建勇,等.微生物发酵床养猪模式的关键技术研究与应用[J].江苏农业科学,2013,41(9):173-176.
Jiang J M,Yan J S,Bai J Y,et al.The research and application of the key technology in the microbial fermentation bed for pig-raising[J].Jiangsu Agricultural Science,2013,41(9):173-

- 176.(in Chinese)
- [18] Rynk R. Monitoring moisture in composting systems[J]. *Biocycle*, 2000, 41(10): 53-57.
- [19] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 131-137.
- [20] 焦洪超, 栾炳志, 宋志刚, 等. 发酵床养猪垫料基础参数变化规律研究[J]. *中国兽医学报*, 2013, 33(10): 1610-1614.
- Jiao H C, Luan B C, Song Z G, et al. Study on the basic parameters of litters in fermenting-bed system of pig production[J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2013, 33(10): 1610-1614. (in Chinese)
- [21] Tam N F Y, Tiquia S M, Vrijmoed L L P. Nutrient transformation of pig manure under pig-on-litter system [M]. *The Science of Composting*. Springer, Dordrecht, 1996: 96-105.
- [22] Sundberg C, Smars S, Jonsson H, et al. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(2): 145-150.
- [23] 敬芸仪, 邓良基, 张世熔. 主要紫色土电导率特征及其影响因素研究[J]. *土壤通报*, 2006, (3): 617-619.
- Jing Y Y, Deng L J, Zhang S R. Study on the character of purple soil EC and effecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, (3): 617-619. (in Chinese)
- [24] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 等. 采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 869-873.
- Wu Y R, Wang W Z, Wang H B, et al. Analysis of variation of soil salt with new electric conductivity index[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 869-873. (in Chinese)
- [25] 朱红, 常志州, 王世梅, 等. 基于畜禽废弃物管理的发酵床技术研究 I: 发酵床剖面特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007(2): 754-758.
- Zhu H, Chang Z Z, Wang S M, et al. Deep litter system for management of livestock manure I: profile characteristics of litter in deep-litter system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007(2): 754-758. (in Chinese)
- [26] 尹红梅, 贺月林, 李兰芝, 等. 发酵床陈化垫料堆肥的腐熟条件[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(3): 84-87.
- Yin H M, He Y L, Li L Z, et al. Decomposing conditions of composting aging dunnage in fermentation bed[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(3): 84-87. (in Chinese)
- [27] 马晗, 郭海宁, 李建辉, 等. 发酵床垫料中有机质及氮素形态变化[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(3): 388-391.
- Ma H, Guo H N, Li J H, et al. Variation of organic matter and nutrient forms in pig bio-bed litters[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(3): 388-391. (in Chinese)
- [28] Guo H, Geng B, Liu X, et al. Characterization of bacterial consortium and its application in an ectopic fermentation system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 139: 28-33.
- [29] Gu W, Zhang F, Xu P, et al. Effects of sulphur and *Thiobacillus thioeparus* on cow manure aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(11): 6529-6535.
- [30] Zhu N. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 9-13.
- [31] 蓝江林, 刘波, 宋泽琼, 等. 微生物发酵床养猪技术研究进展[J]. *生物技术进展*, 2012, 2(6): 411-416.
- Lan J L, Liu B, Song Z Q, et al. Advances in research of microbial fermentation bed in pig farming[J]. *Current Biotechnology*, 2012, 2(6): 411-416. (in Chinese)
- [32] 郑雪芳, 刘波, 蓝江林, 等. 微生物发酵床对猪舍大肠杆菌病原生物防治作用的研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(22): 4728-4739.
- Zheng X F, Liu B, Lan J L, et al. Study on the biocontrol effects of microbial-fermentation bed on the pig pathogen *escherichia coli* in the piggery[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(22): 4728-4739. (in Chinese)
- [33] Cheng Q Y, Ye L, Xing Y Y. Fermentation conditions and characteristics of antibacteria active substance by marine actinomycete WB-F5[J]. *Chinese J Natural Med*, 2007, 5(2): 142-145.
- [34] Fukumoto Y, Suzuki K, Kuroda K, et al. Effects of struvite formation and nitrification promotion on nitrogenous emissions such as NH₃, N₂O and NO during swine manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1468-1474.
- [35] 李娟, 石绪根, 李吉进, 等. 鸡发酵床不同垫料理化性质及微生物菌群变化规律的研究[J]. *中国畜牧兽医*, 2014, 41(2): 139-143.
- Li J, Shi X G, Li J J, et al. Study on physic-chemical properties and microorganisms of litter during feeding broilers in deep-litter system[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2014, 41(2): 139-143. (in Chinese)