

刘宇锋,苏天明,张振华. 不同发酵床类型中垫料理化性状年变化的监测与分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(13):201-208,218.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.055

# 不同发酵床类型中垫料理化性状年变化的监测与分析

刘宇锋<sup>1,2</sup>, 苏天明<sup>2</sup>, 张振华<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014; 2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西南宁 530007)

**摘要:**对地下式、保育仔猪、地上式发酵床等3种发酵床类型,表面、中层、底部等不同深度垫料的发酵温度和环境温度、基本理化指标和养殖生猪情况进行12个月的连续监测。结果表明,发酵床类型差异对垫料各指标影响不明显,不同发酵床类型表层垫料发酵温度受环境影响明显,而40~60 cm底层垫料作为主要发酵层,其垫料温度主要与养殖生猪的数量及其发育状态紧密相关。3种类型发酵床的表、中、底层垫料有机质含量和EC值总体表现为表层>中层>底层的变化规律;而粗灰分、pH值则呈现底层>中层>表层的变化趋势;全氮、全磷和全钾含量在3种类型发酵床表层、中层和底层垫料间总体表现为表层高于中层,中层高于底层的规律,三者间表现出极显著正相关性。

**关键词:**猪发酵床;类型;垫料;定位监测

**中图分类号:** S828.4<sup>+</sup>6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)13-0201-08

随着畜禽养殖业规模化、集约化模式的发展,畜禽粪便已成为我国农村面源污染的主要来源之一<sup>[1-3]</sup>,日益成为限制畜禽养殖业可持续发展的瓶颈之一。发酵床养猪是一种基于减少畜禽粪便排放与减轻环境污染的生态养殖新模式;其基本原理是利用活性功能微生物作为物质能量转化器,通过自身繁殖与代谢活动,分解木屑、稻壳和秸秆等碳源物料,降解畜禽养殖过程中产生的含氮粪尿排泄物,实现畜禽养殖无污染、无臭气,比较圆满地解决规模畜禽养殖的环境污染问题,构建低成本、高产出、无污染的生态畜禽养殖体系,是畜禽养殖业可持续发展的一种新模式<sup>[4-6]</sup>。发酵床畜禽养殖技术于20世纪90年代引进我国以来<sup>[7]</sup>,在我国部分省(市)逐步试点应用并本土化推广示范,取得了良好的生态、环境与经济效益<sup>[8-10]</sup>。

发酵床垫料是畜禽活动场所,也是发酵微生物活动区域和畜禽粪尿的主要载体<sup>[11-13]</sup>。发酵床垫料受垫料组分性质、畜禽养殖种类与方式、畜禽养殖密度和养殖过程日常维护等因素影响,对其使用寿命影响较大,发酵床垫料管理维护成本的变化,进而影响发酵床养殖技术的推广与应用。因此,发酵垫料是生态养猪的技术核心与管理的关键。发酵床垫料在使用期间垫料变化情况对发酵床使用和管理具有重要指导意义。

猪发酵床有多种分类方法。其中,发酵床垫料位置可分为地上式、地下式和半地下式3种类型<sup>[14]</sup>。同时也可以根据猪发育阶段,将发酵床划分为保育仔猪发酵床和普通种猪发

酵床等。目前,国内外学者对猪发酵床养殖技术改善生猪产量与品质<sup>[8,15-16]</sup>、降低养殖与维护成本<sup>[4]</sup>、减少环境污染<sup>[17]</sup>、提高生猪抗病能力<sup>[18]</sup>、增加有机肥源<sup>[19]</sup>等方面进行了大量研究。但目前对不同猪发酵床类型间垫料长期定位监测相关报道还不多见,对猪发酵床垫料在长期使用中垫料内部变化情况综合分析就更少。因此,本试验对猪发酵床不同类型、不同深度垫料的主要理化指标进行监测,并结合环境因素进行综合分析,以期生产中更好地应用和推广发酵床养猪模式提供数据参考和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样设计

试验于2014年11月4日至2015年11月4日在江苏省农业科学院六合动物科学基地发酵床养猪试验场(32°29'15" N,118°36'42"E,海拔40 m)进行,历时1年。定位监测发酵床类型为3种:地下式发酵床(underground fermentation bed,简称UFB);保育仔猪地下式发酵床(nursing piglets underground fermentation bed,简称BPUFB);地上式发酵床(ground fermentation bed,简称GFB)。每隔1个月对各定位观测发酵床进行观测,统计各发酵床存栏生猪数量、生猪各发育阶段数量,并测定气温等数据,对各发酵床进行采样,分析其主要理化指标。各发酵床垫料均在表层铺设木屑和稻壳,在底部添加麦秸作为主要垫料组成。

### 1.2 样品采集

使用自制发酵床垫料取样器(直径50 mm,长度1 000 mm,可采集750 mm深垫料)对各处理按“S”形5点法进行样品采样,取样完成后充分混合按四分法进行收集,使用塑料封口袋密封保存。风干处理进行试验指标分析。

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 垫料发酵温度和环境条件变化** 使用DM6801A型便携式数显温度探针对堆体表面(0~1 cm)、中层(20~30 cm)和底部(40~50 cm)进行发酵温度监测,以“S”形5点位置测定法对相同发酵床类型各发酵堆层进行5次测定,计算其平

收稿日期:2016-09-06

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201203050-6);江苏省科技支撑计划(农业部分)(编号:BE2013436);江苏省农业科技创新资金[编号:CX(15)1003-6];广西科学研究与技术开发计划(编号:桂科合15104001-25)。

作者简介:刘宇锋(1980—),男,湖南湘阴人,博士,助理研究员,主要从事发酵床垫料资源化利用研究。E-mail:liuyufeng@jaas.ac.cn。  
通信作者:张振华,博士,研究员,主要从事发酵床垫料资源化利用研究。E-mail:zhenhuaz70@hotmail.com。

均值作为各堆层发酵温度;同时测定环境温度,测定在每天9:00~11:00进行。

1.3.2 垫料有机质和粗灰分 垫料有机质含量和粗灰分采用灼烧法<sup>[20]</sup>进行测定。

1.3.3 垫料 pH 值与电导率(EC) 将风干发酵垫料与去离子水分别按 1 g : 5 mL 比例混合,经振荡过滤后测定 pH 值与 EC 值。

1.3.4 垫料全效养分 垫料全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)含量分析均采取 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮,采用凯氏定氮法测定全 N 含量,钒钼黄比色法测定全 P 含量,火焰光度法测定全 K 含量<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

方差分析用 SPSS 22.0 统计分析软件与通用线性模型单因素变量法进行,并对 3 个发酵床类型、3 个采样深度各测定指标进行相关分析。使用 Origin 9.3 统计作图软件进行相关数据统计并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 各发酵床存栏生猪数量与发育状态

地下式发酵床、保育仔猪发酵床、地上式发酵床在 1 年的定位监测周期内,分别有 4、4、7 个监测时间点存在生猪养殖活动(表 1)。在对各发酵床养殖生猪状态分析发现,地下式发酵床以养殖仔猪和大猪为主,地上式发酵床以养殖中猪和大猪为主,保育仔猪发酵床以仔猪和中猪为主要发育状态。

表 1 不同类型发酵床养殖生猪数量及其发育状态

发酵床类型	不同测定时间的生猪数量(头)											
	2014 - 12 - 04	2015 - 01 - 04	2015 - 02 - 04	2015 - 03 - 04	2015 - 04 - 04	2015 - 05 - 04	2015 - 06 - 04	2015 - 07 - 04	2015 - 08 - 04	2015 - 09 - 04	2015 - 10 - 04	2015 - 11 - 04
UFB	70	—	—	—	—	—	—	—	17	18	—	3
NPFB	95	—	—	—	—	—	—	38	—	146	170	—
GFB	21	100	72	27	27	—	—	—	—	—	18	18
发育状态												
UFB	大猪	—	—	—	—	—	—	—	仔猪	仔猪	—	仔猪
NPFB	仔猪	—	—	—	—	—	—	中猪	—	仔猪	仔猪	—
GFB	大猪	大猪	中猪	大猪	大猪	—	—	—	—	—	大猪	大猪

注:NPFB 表示保育仔猪发酵床(nursing piglets fermentation bed);下同。“—”表示无现场采集数据。

不同类型发酵床垫料翻堆与换料数据统计表明,地下式、保育仔猪发酵床和地上式发酵床分别进行了 1、2 和 3 次翻

堆,地上式发酵床在 2015 年 7 月进行了 1 次垫料更换(表 2)。

表 2 不同类型发酵床垫料翻堆与换料统计

发酵床类型	不同测定时间的翻堆与换料情况											
	2014 - 12 - 04	2015 - 01 - 04	2015 - 02 - 04	2015 - 03 - 04	2015 - 04 - 04	2015 - 05 - 04	2015 - 06 - 04	2015 - 07 - 04	2015 - 08 - 04	2015 - 09 - 04	2015 - 10 - 04	2015 - 11 - 04
UFB	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—
NPFB	—	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—
GFB	1	—	—	—	—	—	1	2	—	—	—	1

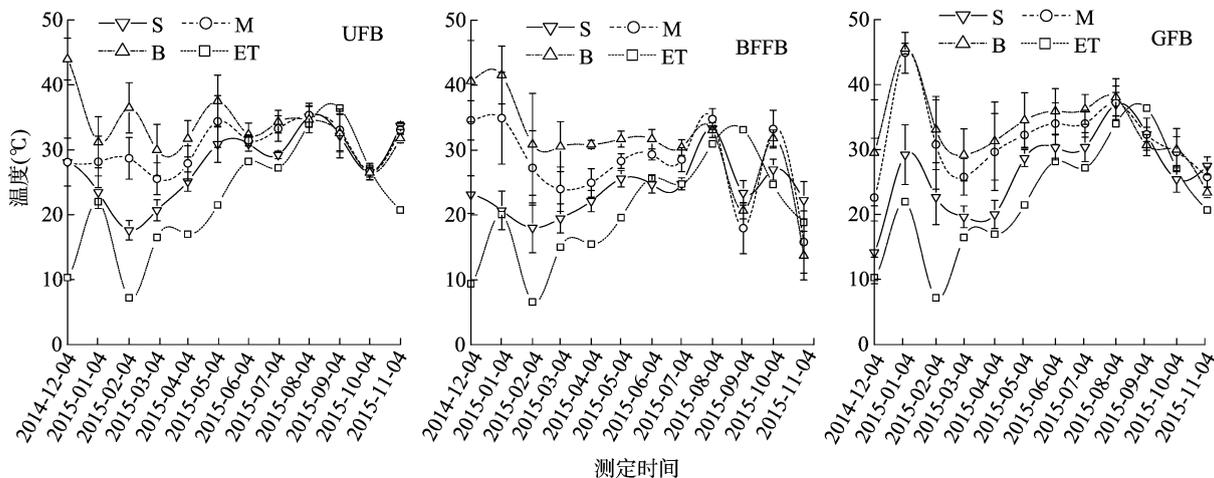
注:1 表示垫料翻堆;2 表示垫料更换;“—”表示无处理。

### 2.2 各发酵床不同深度垫料温度与环境温度变化

地下式、保育仔猪和地上式发酵床发酵温度均呈现为底部(40~50 cm) > 中部(20~30 cm) > 表面(0~20 cm)(图 1)。垫料表面温度与环境温度变化相似,随着取样垫料深度的增加,发酵温度快速增加。0~20 cm 表面发酵温度变化与环境温度波动基本一致,表明其受环境温度影响较大。而随着垫料深度增加,发酵温度逐步增加,中部(20~30 cm)发酵温度高于表面温度,表明发酵床垫料随深度增加,发酵温度受垫料内自身发酵微生物活动影响增大,而受环境变化影响减小。底部发酵温度数据表明,在 40~50 cm 底部垫料深度发酵温度最高,存在养殖生猪的时间段内,发酵温度达到 40~50 ℃,与其他发酵床垫料发酵温度相关研究基本一致<sup>[22]</sup>,可认为是主要微生物代谢活动区域。3 种不同类型发酵床在定位监测中后期,各深度垫料发酵温度出现接近的现象,这可能与相应时间段内,对应发酵床未进行生猪养殖活动,导致发酵床垫料微生物活动减弱,发酵床停止工作有关。

### 2.3 各发酵床不同深度垫料有机质与粗灰分含量变化

地下式、保育仔猪和地上式发酵床不同深度垫料有机质含量分析表明,表层(0~20 cm)和中部(20~30 cm)垫料有机质含量较为接近,但表层垫料有机质含量普遍高于中部垫料有机质含量,表层和中部垫料有机质含量均明显高于底层(40~50 cm)发酵床垫料有机质含量(图 2)。对地下式发酵床垫料在 2014 年 12 月 4 日至 2015 年 3 月 4 日的 4 个监测时间点的监测结果表明,不同深度垫料有机质含量基本符合表层垫料有机质含量最高、中层次之、底层最低的规律;在 2015 年 4 月 4 日至 2015 年 6 月 4 日这个 3 个观测时间点中,其垫料有机质含量在不同深度出现波动,底部垫料有机质含量接近或高于中部垫料有机质含量,这可能与发酵床停止工作和发酵床维护翻堆有关。而在 2015 年 8 月 4 日至 2015 年 11 月 4 日的 4 个监测时间点,表层与中部有机质含量较为接近,而与底层垫料有机质含量差距较大,其中在 2015 年 8 月 4 日监测点,表层垫料有机质含量(632.2 g/kg)和中部垫料有机质含量(633.2 g/kg)分别较底部垫料有机质含量(446.6 g/kg)增加 41.6% 和 41.8%,这可能与 7~8 月监测时间段内,该发



ET—环境温度(environment temperature, ET); S—发酵堆表面; M—发酵堆中部; B—发酵堆底部。下同

图1 不同类型发酵床不同垫料深度发酵温度与环境温度变化

酵床使用寿命到期后,更换新发酵床垫料,表层和中层部分接受新鲜猪粪尿,底层仍为垫料基本原料,导致有机质含量偏低有关。对保育仔猪发酵床各深度垫料有机质含量监测中,表层和中部垫料有机质含量一直较为接近,差异不明显。而底层发酵床垫料的有机质含量变化较大,在2014年12月4日至2015年2月4日的3个监测时间点,底部垫料有机质含量与表面、中部垫料有机质含量接近;而在其后4个监测时间点(2015年3月4日至2015年6月4日),底层有机质含量较表层和中层降低12.8%~39.0%。在2015年7月4日、2015

年9月4日和2015年10月4日的3个监测时间点,底层垫料有机质含量部分增加,这可能与相关监测点上存在仔猪养殖和养殖数量变化有关。地上式发酵床垫料有机质含量在2014年12月4日和2015年6月4日监测点出现底部>中层>表层的情况,可能与垫料被人为翻动有关。而在其后5个监测点(2015年1月4日至2015年5月4日)中,各垫料层有机质含量均表现为表层>中层>底层,且变化幅度与养殖猪的类型和数量有较大关系。2015年7月4日监测点有机质含量出现较大波动,与发酵床垫料重新更换有关。

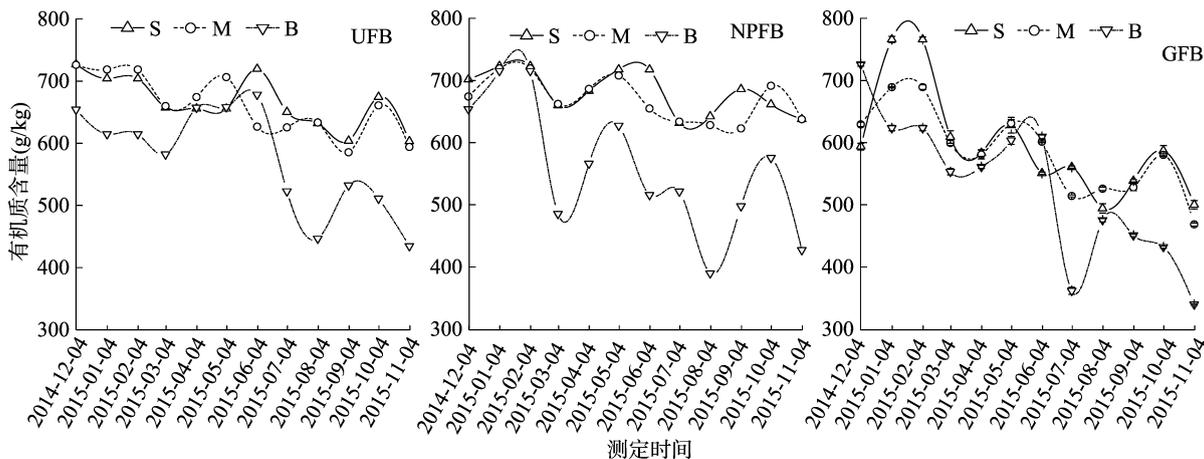


图2 不同类型发酵床不同垫料深度有机质含量变化

对不同类型发酵床不同深度垫料粗灰分含量变化分析表明,不同发酵床底层垫料粗灰分含量基本上高于表面和中部垫料粗灰分含量,而表面和中部垫料粗灰分含量差异较小,保育仔猪垫料粗灰分含量在3种类型发酵床垫料中波动最大(图3)。对于地下式发酵床不同层次垫料粗灰分含量,在2014年12月4日至2015年3月4日的4个监测时间点,表层和中部垫料的粗灰分含量均较为接近,但均低于底层垫料的粗灰分含量17.8%~33.9%。在2015年5月4日监测点上,表层、中部和底层垫料粗灰分含量明显降低,三者间含量变化错位,这可能与垫料被人为翻堆、垫料层次被打乱有关,此时的粗灰分含量变化也与同期有机质含量分析推测结论一致。而在接下来5个监测时间点(2015年7月4日至2015

年11月4日)地下式发酵床垫料粗灰分含量与前期粗灰分含量变化趋势类似,表层与中层粗灰分含量较为接近,底层粗灰分含量均高于表面和中部粗灰分含量,这可能与后5个监测时间点中3个监测时间点养殖了仔猪有关。

保育仔猪发酵床表面、中层粗灰分含量较为接近,底部垫料粗灰分含量明显高于表面和中部。在2015年1月4日和2015年5月4日的2个监测点,3个层次垫料粗灰分含量较为接近,与垫料被人为翻堆、堆层被打乱有关。地上式发酵床在2014年12月4日和2015年6月4日的2个监测点,出现表层垫料粗灰分含量高于底层垫料的情况,这可能与垫料被人为翻动有关,2015年7月4日监测发现地上式发酵床3个层次垫料粗灰分含量较为接近,与重新更换垫料相关,这也与

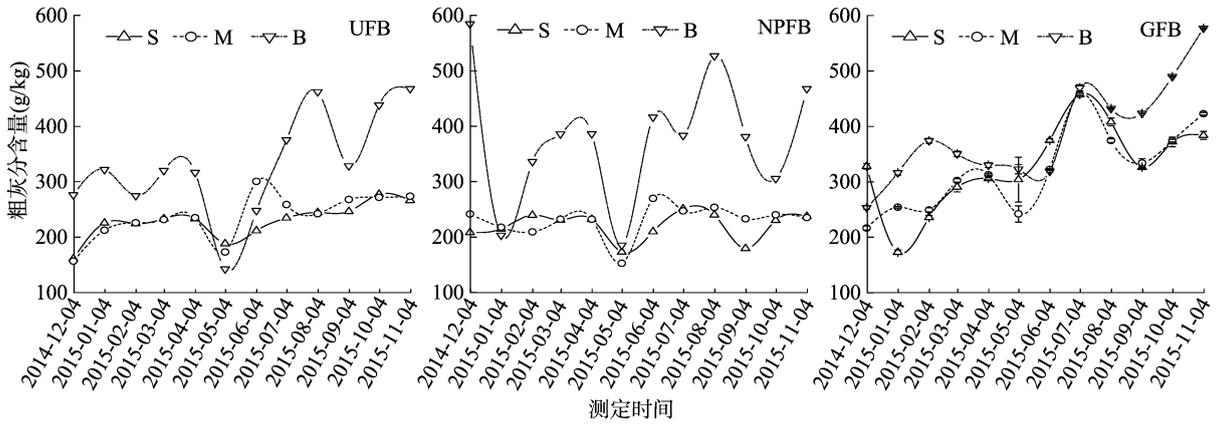


图3 不同类型发酵床不同深度垫料粗灰分含量变化

同期有机质含量波动的原因一致。

### 2.4 各发酵床不同深度垫料 pH 值与 EC 值变化

对3种不同类型发酵床不同深度垫料 pH 值分析发现,不同类型发酵床不同深度垫料 pH 值波动较大,表面、中部和底部垫料 pH 值在不同发酵床类型间无明显相似变化趋势(图4)。地下式发酵床各堆层垫料在2014年12月4日和2015年1月4日的2个监测点各层次垫料 pH 值表现为表层 > 中层 > 底层。而在2015年2月4日监测点中,地下式发酵床3个层次垫料 pH 值几乎一致,可能与更换垫料有关。在其后9个监测点中3个不同垫料深度 pH 值多数表现为底层 > 中层 > 表面。其中在2015年6月4日监测点出现不同

现象,可能与垫料被人为翻堆有关。保育仔猪发酵床底部垫料 pH 值在1年12个监测点上,均高于对应时间点的表面和底部垫料 pH 值,而表面和中部垫料 pH 值波动较大。地上式发酵床底部垫料 pH 值在2015年1月4日至2015年4月4日4个发酵监测时间点,各层次垫料 pH 值排序为底层 > 中层 > 表层,而在2015年5月4日至2015年7月4日这3个监测点中,3个垫料层次 pH 值出现较大波动,这可能与垫料翻耕有关。而在2015年8月4日以后的3个监测点的3个层次垫料 pH 值整体表现为表层垫料 pH 值最高,而中部与底部垫料 pH 值波动较大。

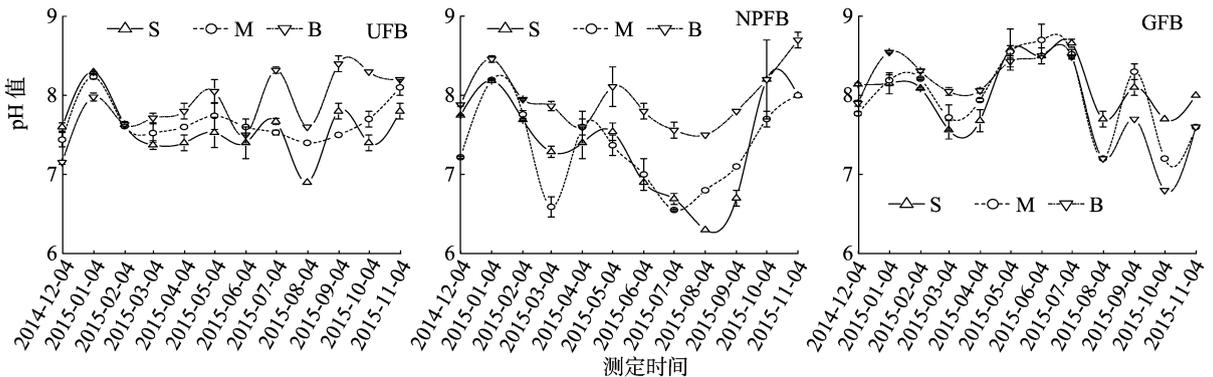


图4 不同类型发酵床不同深度垫料 pH 值变化

不同类型发酵床不同深度垫料 EC 值分析表明,不同类型发酵床垫料 EC 值一般表现为表层 > 中层 > 底层(图5)。地上式发酵床在2015年2月4日和2015年8月4日各深度垫料出现2个不同峰值,其中2015年8月4日的峰值最大,这与对应监测时间点出现养殖生猪和生猪养殖数量密切相关。保育仔猪发酵床在2015年2月4日、2015年8月4日和2015年11月4日等3个监测点出现峰值,而在这3个时间点附近,均出现生猪养殖活动。2015年9月4日的监测点中,3个发酵床垫料的底层 EC 值高于表层,这可能与垫料被翻动有关。地上式发酵床各深度垫料变化规律不太明显,而2015年4月4日和2015年8月4日等2个监测点出现2个峰值,其中在2015年4月4日监测时间点上,各层次垫料 EC 值排序为中层 > 底层 > 表层,这可能与垫料层次被人为翻动有关。

### 2.5 各发酵床不同深度垫料全 N、全 P 和全 K 含量变化

地下式、保育仔猪和地上式发酵床不同深度全 N 含量分析发现,地下式和保育仔猪发酵床各深度垫料全 N 含量均较为接近(图6)。而在地上式发酵床全 N 含量整体高于地下式和保育仔猪发酵床;各堆层垫料全 N 含量一般呈现表层 > 中层 > 底层。地下式发酵床在2015年5月4日监测点各垫料全 N 含量较为接近,这与垫料翻堆有关。同时,在2015年1月4日至2015年7月4日的7个监测点全 N 含量均维持较低水平,这与这一阶段垫料无生猪养殖有关。保育仔猪发酵床在2015年1月4日和2015年5月4日这2个监测点各堆层全 N 含量相近,这与相应时间内进行垫料翻堆有关。保育仔猪发酵床从2015年7月4日后,发酵床垫料全 N 含量逐步提高,这与后期存在生猪养殖有关。地上式发酵床全 N 含量普遍高于地下式和保育仔猪发酵床,这与3个发酵床类型中在监测点存在的生猪养殖活动最为频繁相关。在2014年12

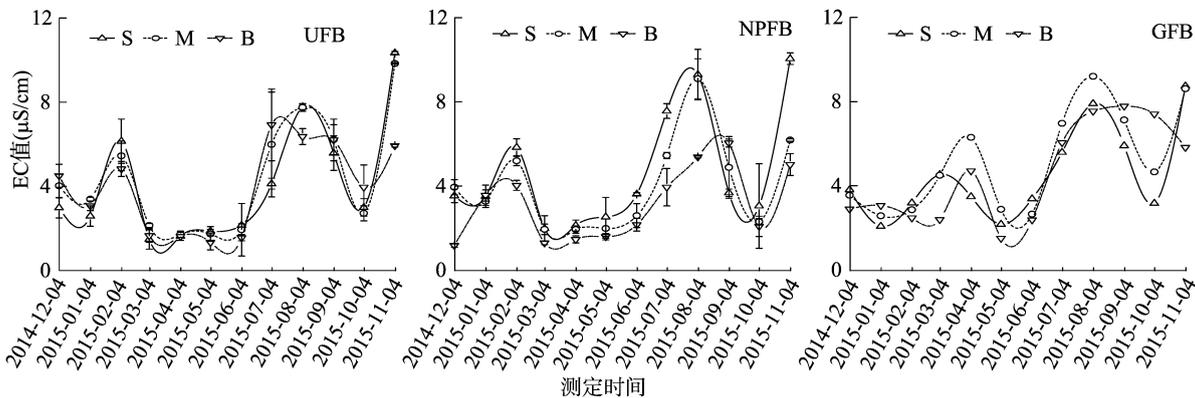


图5 不同类型发酵床不同深度垫料 EC 值变化

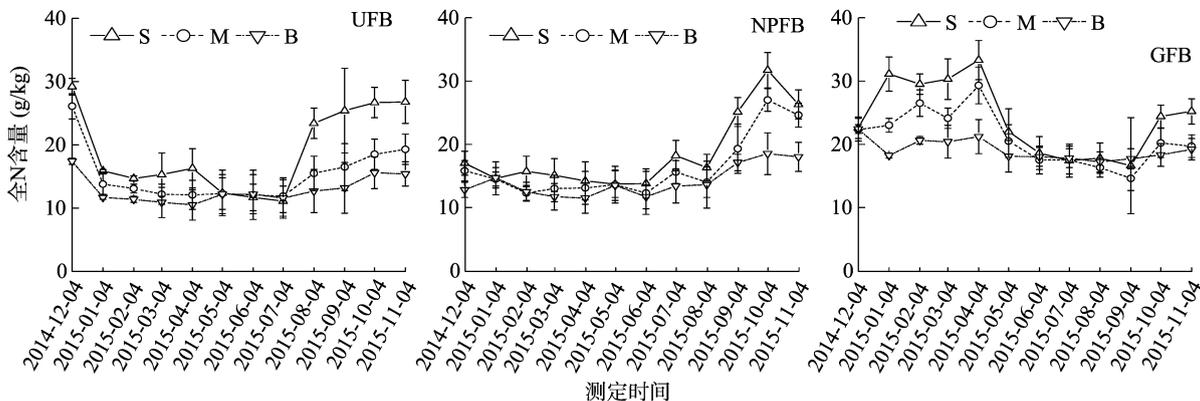


图6 不同类型发酵床不同深度垫料全 N 含量变化

年 4 日监测点中地上式发酵床表层、中层和底部垫料全氮含量较为接近,与垫料翻堆相关。2015 年 7 月 4 日监测点垫料全 N 含量接近,这与垫料重新更换相关。

从地下式、保育仔猪和地上式发酵床不同深度垫料全 P 含量数据分析表明,地上式发酵床全 P 含量在整个监测周期内高于地下式发酵床和保育仔猪发酵床(图 7)。地下式发酵床各深度垫料全 P 含量在前期 5 个监测点(2014 年 12 月 4 日至 2015 年 4 月 4 日)中层垫料全 P 含量多数高于表层全 P 含量,这可能与 P 随猪粪尿逐步渗透相关,而由于人工垫料翻

堆处理,2015 年 1 月 4 日垫料中底层垫料全 P 含量高于其对应的表层和中层。由于垫料翻堆,2015 年 5 月 4 日监测点 3 个层次垫料全 P 含量接近。随后,地下式发酵床出现生猪养殖,各深度垫料全 P 含量出现不同程度上升,表明全 P 增加较多,而中部与底部增幅较小。地上式发酵床由于畜禽养殖时间较长,各深度垫料全 P 含量均高于其他 2 个类型的发酵床。由于 2015 年 6 月 4 日地上式垫料进行翻堆处理,表层、中层和底部垫料全 P 含量几乎相同,后期随着养殖生猪活动的进行,垫料各层次全 P 含量继续增加。

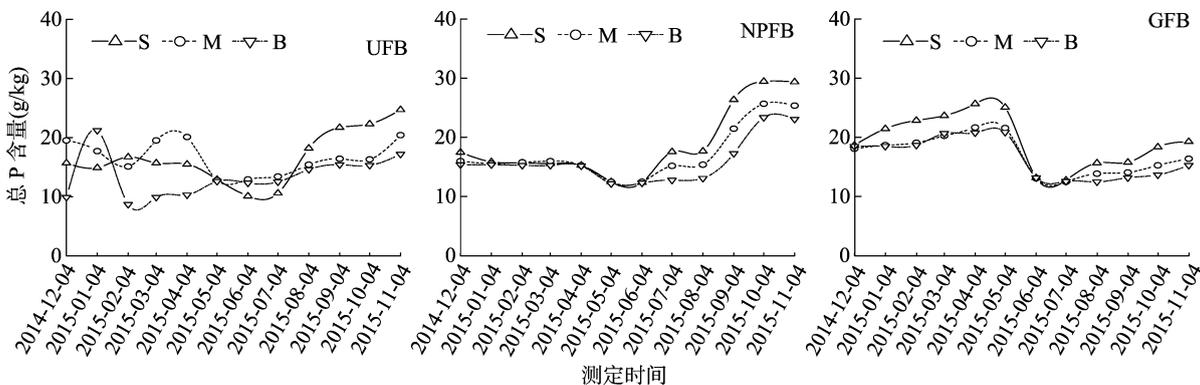


图7 不同类型发酵床不同深度垫料全 P 含量变化

从 3 种类型发酵床不同深度垫料全 K 含量变化发现,3 个层次垫料的全 K 含量主要表现为底层 > 中层 > 表层(图 8)。地下式发酵床在 2014 年 12 月 4 日和 2015 年 5 月 4 日 2

个监测时间点上,因为垫料翻堆,3 个深度垫料全 K 含量接近。由于连续 7 个监测点没有发现生猪养殖活动,各层次垫料全 K 含量较低,监测后期出现生猪养殖活动,垫料中全 K

含量上升。保育仔猪发酵床在使用过程中(2015年1月4日、2015年5月4日)出现2次翻堆情况,各层次垫料全K含量接近,但2015年1月4日至2015年6月4日没有出现连续生猪养殖活动,垫料各层次全K含量保持较低水平,但底层垫料全K含量呈逐步增加趋势。地上式发酵床在前5个

监测点(2014年12月4日至2015年4月4日)存在较高强度生猪养殖活动,垫料全K含量逐步增加,随着2015年6月4日垫料翻堆,表层、中层和底层垫料全K含量出现下降。后期随着发酵床生猪养殖的恢复,垫料中全K含量逐步上升。

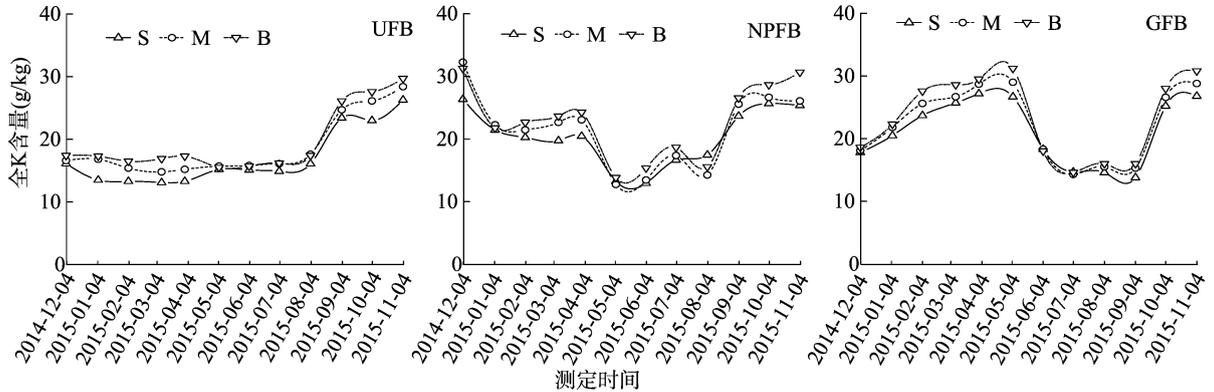


图8 不同类型发酵床不同深度垫料全K含量变化

## 2.6 各发酵床相同深度垫料各供试指标相关性分析

对3个发酵床中表层、中层和底层垫料各数据进行相关性分析,由表3可知,表层垫料发酵温度与环境温度存在极显著正相关( $P < 0.01$ ),这也与前期不同发酵床类型各层次发酵温度的研究结果一致。而表层垫料发酵温度与养殖生猪状态呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。表层垫料pH值与人工翻堆、更换垫料情况呈正相关。表层垫料EC值与环境温度、垫料温度呈极显著正相关。表层垫料有机质含量与发酵床类型呈显著负相关,与翻堆情况呈极显著正相关,与更换垫料呈极显著

负相关。粗灰分含量与表层垫料温度、EC值呈极显著正相关,与翻堆情况、有机质含量呈极显著负相关;表层垫料全N含量与发酵床类型、存栏生猪数量和状态呈极显著正相关,与EC值呈显著正相关;表层垫料全P含量与发酵床类型、存栏生猪数量、pH值和全N含量呈极显著正相关。表层垫料全K含量与发酵床类型、存栏生猪数量、pH值、粗灰分含量、全N含量、全P含量呈极显著正相关,而与环境温度、翻堆情况、垫料更换、有机质含量呈显著或极显著负相关。

表3 不同发酵床类型表层垫料各测试指标相关性分析结果

供试指标	测定时间	发酵床类型	环境温度	垫料温度	存栏生猪数量	生猪发育状态	翻堆情况	更换垫料	pH值	EC值	有机质含量	粗灰分含量	全N含量	全P含量	全K含量
测定时间	1.00														
发酵床类型	0.01	1.00													
环境温度	0.45**	-0.02	1.00												
垫料温度	0.51**	-0.05	0.61**	1.00											
存栏生猪数量	-0.04	0.14	0.03	0.02	1.00										
生猪发育状态	-0.22	0.48**	-0.62**	-0.40**	-0.49**	1.00									
翻堆情况	-0.25*	0.10	-0.02	-0.07	-0.18	0.24	1.00								
更换垫料	0.07	0.21*	0.11	0.12	-0.09	—	-0.07	1.00							
pH值	-0.02	0.06	-0.05	-0.02	0.05	-0.20	0.23*	0.22*	1.00						
EC值	0.55**	0.11	0.33**	0.37**	-0.07	0.07	-0.29**	0.18	-0.21*	1.00					
有机质含量	-0.50**	-0.22*	-0.10	-0.31**	-0.07	0.29	0.45**	-0.28**	0.12	-0.44**	1.00				
粗灰分含量	0.52**	0.22*	0.05	0.32**	-0.02	-0.13	-0.42**	0.18	-0.18	0.38**	-0.95**	1.00			
全N含量	0.10	0.67**	-0.10	-0.05	0.30**	0.53**	0.09	0.11	0.14	0.20*	-0.08	0.05	1.00		
全P含量	0.06	0.33**	-0.13	-0.16	0.35**	-0.04	-0.09	-0.12	0.45**	-0.10	-0.05	0.02	0.58**	1.00	
全K含量	0.21*	0.27**	-0.33**	-0.21*	0.37**	-0.01	-0.29**	-0.20*	0.25**	-0.02	-0.32**	0.31**	0.48**	0.69**	1.00

注:“\*”、“\*\*”分别表示相关性显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ )。“—”表示没有数据。下表同。

对中层垫料各供试指标进行相关性分析,由表4可知,中层垫料温度与环境温度无明显相关性。存栏生猪数量与中层垫料温度呈显著正相关。中层垫料pH值与发酵床类型、生猪发育情况、翻堆情况和更换垫料情况存在显著或极显著正相关,而中层垫料的EC值与垫料翻堆情况呈极显著负相关。有机质含量与环境温度、垫料更换和中层垫料的EC值呈极显著负相关,而与中层垫料的翻堆情况呈显著正相关。中层

垫料粗灰分含量与发酵床垫料类型、环境温度变化、生猪发育状态、垫料更换、pH值和EC值呈显著或极显著正相关,其中与发酵床类型、垫料更换和EC值存在极显著正相关,而与存栏生猪数量和中层垫料有机质含量呈显著或极显著负相关。中层垫料全N含量与发酵床类型、存栏生猪数量、生猪发育状态存在极显著正相关,而与环境温度呈负相关。中层垫料全P含量与存栏生猪数量和垫料全P含量呈极显著正相关,

而与环境温度、垫料更换、粗灰分含量呈显著负相关。中层垫料的全 K 含量与发酵床类型、存栏生猪数量、垫料全 N 含量、

全 P 含量呈极显著正相关,而与环境温度、翻堆情况呈负相关。

表4 不同发酵床类型中层垫料各相关指标相关性分析结果

供试指标	测定时间	发酵床类型	环境温度	垫料温度	存栏生猪数量	生猪发育状态	翻堆情况	更换垫料	pH 值	EC 值	有机质含量	粗灰分含量	全 N 含量	全 P 含量	全 K 含量
测定时间	1.00														
发酵床类型	0.01	1.00													
环境温度	0.45**	-0.02	1.00												
垫料温度	-0.22*	0.01	0.16	1.00											
存栏生猪数量	-0.04	0.14	0.03	0.21*	1.00										
生猪发育状态	-0.22	0.48**	-0.62**	-0.11	-0.49**	1.00									
翻堆情况	-0.25*	0.10	-0.02	0.07	-0.18	0.24	1.00								
更换垫料	0.07	0.21*	0.11	0.06	-0.09	—	-0.07	1.00							
pH 值	-0.11	0.27**	-0.15	0.09	-0.13	0.41**	0.24*	0.29**	1.00						
EC 值	0.48**	0.16	0.11	0.07	-0.14	0.19	-0.31**	0.17	-0.05	1.00					
有机质含量	-0.60**	-0.46**	-0.30**	0.18	0.17	-0.27	0.22*	-0.33**	-0.08	-0.63**	1.00				
粗灰分含量	0.51**	0.57**	0.23*	-0.03	-0.20*	0.38*	-0.13	0.34**	0.23*	0.42**	-0.86**	1.00			
全 N 含量	0.04	0.44**	-0.23*	0.05	0.51**	0.39**	-0.11	0.01	0.26**	0.09	-0.14	0.14	1.00		
全 P 含量	0.04	0.05	-0.27**	-0.16	0.45**	-0.01	-0.27**	-0.20*	0.14	-0.02	0.10	-0.19*	0.70**	1.00	
全 K 含量	0.15	0.27**	-0.30**	-0.09	0.38**	-0.06	-0.23*	-0.19	0.12	0.08	-0.13	0.18	0.60**	0.59**	1.00

对不同发酵床类型底层垫料各数据进行相关分析,表5表明,翻堆情况与底层垫料温度呈显著正相关。底层垫料 pH 值与翻堆情况和垫料更换情况呈正相关。底层垫料的 EC 值与底层垫料温度、翻堆情况和底层垫料的 pH 值呈显著或极显著负相关。底层垫料有机质含量与底层垫料温度、垫料翻堆情况呈正相关,与发酵床类型、垫料更换和底层垫料 EC 值呈显著或极显著负相关。底层垫料粗灰分含量与发酵床类型、底层垫料 EC 值呈显著或极显著正相关,而与底层垫料温

度、垫料翻堆情况、底层垫料有机质含量呈负相关。底层垫料全 N 含量与发酵床类型、存栏生猪数量、生猪发育阶段和底层垫料 EC 值存在显著或极显著正相关。底层垫料全 P 含量与发酵床类型、存栏生猪数量、底层垫料 pH 值和全 N 含量呈正相关,与底层垫料温度呈显著负相关。底层垫料全 K 含量与存栏生猪数量、底层垫料 pH 值、粗灰分含量、全 N 和全 P 含量呈极显著正相关,与环境温度、垫料温度、垫料翻堆情况、垫料更换和底层垫料有机质含量显著或极显著负相关。

表5 不同发酵床类型底层垫料各相关指标相关性分析结果

供试指标	测定时间	发酵床类型	环境温度	垫料温度	存栏生猪数量	生猪发育状态	翻堆情况	更换垫料	pH 值	EC 值	有机质含量	粗灰分含量	全 N 含量	全 P 含量	全 K 含量
测定时间	1.00														
发酵床类型	0.01	1.00													
环境温度	0.45**	-0.02	1.00												
垫料温度	-0.63**	-0.01	-0.06	1.00											
存栏生猪数量	-0.04	0.14	0.03	0.12	1.00										
生猪发育状态	-0.22	0.48**	-0.62**	-0.01	-0.49**	1.00									
翻堆情况	-0.25*	0.10	-0.02	0.25*	-0.18	0.24	1.00								
更换垫料	0.07	0.21*	0.11	0.05	-0.09	—	-0.07	1.00							
pH 值	-0.02	0.06	-0.05	-0.03	0.05	-0.20	0.23*	0.22*	1.00						
EC 值	0.55**	0.11	0.33**	-0.22*	-0.07	0.07	-0.29**	0.18	-0.21*	1.00					
有机质含量	-0.50**	-0.22*	-0.10	0.25*	-0.07	0.29	0.45**	-0.28**	0.12	-0.44**	1.00				
粗灰分含量	0.52**	0.22*	0.05	-0.28**	-0.02	-0.13	-0.42**	0.18	-0.18	0.38**	-0.95**	1.00			
全 N 含量	0.10	0.67**	-0.10	-0.12	0.30**	0.53**	0.09	0.11	0.14	0.20*	-0.08	0.05	1.00		
全 P 含量	0.06	0.33**	-0.13	-0.24*	0.35**	-0.04	-0.09	-0.12	0.45**	-0.10	-0.05	0.02	0.58**	1.00	
全 K 含量	0.21*	0.27**	-0.33**	-0.27**	0.37**	-0.01	-0.29**	-0.20*	0.25**	-0.02	-0.32**	0.31**	0.48**	0.69**	1.00

### 3 讨论与结论

我国各地在构建发酵床时,依据各地下水水位情况,对发酵床进行了各种改造。在地下水水位高的地方,要采用地上式或半地下式发酵床,地上式发酵床的垫料层位于地平面以上,需要修建独立的架空层,让垫料与土壤地下水隔离,以防被地下水浸湿。因此,地上式发酵床比较适用于我国南方。水位低

的地区(地下水水位低于 1.5 m 以下),直接在地表开挖坑道,地下式垫料位于地平面以下,床面与地面保持平行,节约建筑成本,便于管理。这种发酵床适用于我国北方地区。

发酵床畜禽养殖技术的核心就是通过垫料中微生物代谢活动,降解畜禽粪便,实现无污染、零排放的生态养殖技术<sup>[6]</sup>。发酵床升温及维持温度的状况是发酵床养猪工艺的重要参数之一,温度的变化能反映垫料内部微生物活性的变

化。为期1年的定位监测表层垫料温度变化趋势与表层垫料各指标间相关分析表明,表层垫料温度受环境温度变化影响明显。中层和底部垫料温度与环境温度的相关分析表明,中层温度与环境温度相关性不明显,而且底层温度与环境温度呈负相关;3种发酵床类型的底层温度,在监测期间均高于中层温度和表层温度,表明底层垫料是主要的发酵床垫料发酵活动层。同时发现表层、中层和底层垫料温度在不同类型发酵床间差异不明显;各层次发酵床温度与生猪养殖有无和养殖强度有较大关系,相关分析表明,表层、中层和底层垫料温度与存栏生猪数量存在正相关。同时,存在生猪养殖阶段,3种发酵床类型各垫料温度普遍较高,发酵活动较为活跃,表层、中层和底层发酵温度差异较大,而长时间没有生猪养殖阶段,发酵床垫料各层次发酵温度差异减弱,发酵床停止工作。

因为生猪养殖过程中,其粪尿主要集中释放在垫料表面,并随着新鲜猪粪不断排入发酵床中并经生猪的踩踏、拱动,渗入发酵床垫料内部,有机质含量在3个发酵床类型间大致表现出表层>中层>底部的规律。由于翻堆等人工活动,打乱了垫料的原有层次,有机质在不同堆层间变化趋同,相关分析也表明垫料翻堆情况对表层、中层和底层垫料的有机质含量均有一定影响。不同发酵床类型间,由于养殖发酵床生猪的数量、类型、周期不同,垫料不同深度有机质含量变化也不相同,地上式发酵床因养殖生猪最多,时间最长,垫料有机质含量均高于地下式发酵床和保育仔猪发酵床,而地下式发酵床因养殖大中猪为主,各层次垫料有机质含量又高于主要以养殖仔猪为主的保育仔猪发酵床。

发酵床垫料粗灰分含量在地下式、保育仔猪和地上式发酵床间,因生猪养殖数量、养殖强度、翻堆和垫料更换情况不同,存在一定差异,地上式发酵床粗灰分含量总体高于地下式和保育仔猪发酵床;保育仔猪发酵床表层和中层垫料粗灰分含量与地下式发酵床表层和中层垫料粗灰分含量变化趋势较接近,而保育仔猪发酵床底层垫料粗灰分含量较高,与养殖生猪为仔猪、粪尿排泄强度较低、其底层垫料发酵活动低密切相关。相关分析也表明,3个类型发酵床底层垫料粗灰分含量与养殖生猪发育状态呈负相关;即猪发育状态越低,底层垫料粗灰分含量越高,猪发育状态越高,底层垫料粗灰分含量越低。

发酵床发酵过程依赖于微生物的作用,而微生物好氧发酵适宜的pH值一般为6.0~8.5,适宜的pH值可使微生物有效地发挥作用,pH值太高或太低都会影响好氧发酵的效率<sup>[23]</sup>。地上式、保育仔猪和地下式发酵床等各垫料pH值均在7.0~8.7范围波动。在发酵床进行生猪养殖阶段,对于各发酵床类型,随着养殖时间延长,pH值均呈上升趋势。在地下式和地上式发酵床表层、中层和底层垫料pH值一般表现为底层>中层>表层,而由于翻堆与换料较频繁,在保育仔猪发酵床中这种趋势表现并不明显。

垫料电导率的变化趋势反映了垫料盐分浓度变化。地下式、保育仔猪和地上式发酵床在12个月的观测周期内,均出现较大波动,这与生猪养殖时间、养殖生猪发育阶段、养殖强度、垫料翻堆和垫料更换密切相关。3种发酵床类型表面、中层和底层垫料EC值与翻堆情况呈极显著负相关。在垫料刚更换和翻堆的情况下,由于表层垫料首先接触到猪粪尿,一般3个层面EC值表现为表层>中层>底层;同时,在未翻堆和

换料情况下,随生猪养殖时间延长,3个层面EC值差距缩小并逐步上升。

垫料中氮素的变化主要是受养殖畜禽粪尿的积累和自身发酵微生物转化的影响,氮素转化主要包括2个方面:氮素的固定和释放。氮素含量降低主要是由于有机氮的矿化和持续性氨的挥发以及硝态氮的反硝化<sup>[23]</sup>。由于表层垫料首先接受猪粪尿,其全N含量增加较快,而随着猪粪尿渗入垫料内部,自身发酵过程的进行,中层和底部垫料全N含量逐步增加;但随着翻堆和更换新垫料,不同垫料类型各层次垫料全N含量又趋于一致。同时环境温度对不同垫料类型表层、中层和底部垫料全N含量有较大影响,相关分析表明3个层次垫料全N含量与环境温度均呈负相关,表明随着环境温度增加,各垫料全N含量均有不同程度下降,表层垫料全N含量随温度变化降低较为明显,这与环境温度升高、硝化作用增强有关。

垫料全P和全K作为不可挥发物质,含量随着生猪在垫料养殖时间的延长、猪粪尿的积累和下渗逐步增加。对地下式、保育仔猪和地上式发酵床垫料的表面、中层和底层垫料全P和全N含量分析发现,垫料使用早期,表层垫料全P和全N含量均不同程度地高于中层和底层,随着使用周期的延长,3层垫料全P和全N含量整体逐步升高。地下式发酵床前期全P含量波动较大,其他2种类型发酵床全P含量除更换垫料外,差异不明显。除受翻堆和更换垫料影响,3种发酵床类型全K含量,在表层、中层和底层垫料间差异不明显。盛清凯等研究表明,随着垫料深度的增加,总N含量逐渐降低,总P含量也是深层略低于表层垫料<sup>[24]</sup>,与本研究结果相近。

#### 参考文献:

- [1] 朱建春,张增强,樊志民,等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报,2014,33(3):435-445.
- [2] 雷成,陈佰鸿,郁继华,等. 西部七省区畜禽废弃物利用状况的调查与探讨[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(5):77-83.
- [3] 郭冬生,彭小兰,龚群辉,等. 畜禽粪便污染与治理利用方法研究进展[J]. 浙江农业学报,2012,24(6):1164-1170.
- [4] 曹珍,陈峰,张祥斌,等. 发酵床养殖畜禽基本技术参数的研究进展[J]. 家畜生态学报,2014,35(4):7-11.
- [5] 纪玉琨,何洪,薛念涛. 我国发酵床养猪技术发展现状研究[J]. 黑龙江农业科学,2014(6):135-139.
- [6] 刘宇锋,罗佳,严少华,等. 发酵床垫料特性与资源化利用研究进展[J]. 江苏农业学报,2015,31(3):700-707.
- [7] 沈晓昆,戴网成. 镇江发酵床养殖10年历程[J]. 农业装备技术,2009,35(6):12-14.
- [8] 盛清凯,赵红波,武英,等. 夏季不同发酵床猪舍对猪生产性能的影响[J]. 家畜生态学报,2010(4):48-51.
- [9] 林勇,王建军,施振旦,等. 不同季节与饲养密度条件下发酵床养殖对肉鸭生产性能的影响[J]. 家畜生态学报,2015,36(3):78-82.
- [10] 秦竹,周忠凯,顾洪如,等. 发酵床生猪养殖中菌种与垫料的研究进展[J]. 农业科学与技术,2013,14(6):915-921.
- [11] 蓝江林,栗丰,刘波,等. 养猪发酵床垫料微生物类群结构特性分析[J]. 福建农业学报,2016(6):649-656.

复杂,没有统一规律。粉碎长度为1~3 mm的麦秸和油菜秸静态堆积角没有地区差异性,粉碎长度为2~3 cm的麦秸静态堆积角最小的为丘陵区的南充市,粉碎长度为2~3 cm的油菜秸静态堆积角最小的是山区的广元市。说明粉碎长度为2~3 cm时,南充市的麦秸和广元市的油菜秸流动性最好。虽然小麦和油菜均为小春作物,但它们的秸秆全水分含量地区排列顺序却不相同。麦秸样品全水分含量大小顺序为平原区眉山市/山区广元市>丘陵区绵阳市>丘陵区南充市;而油菜秸样品全水分含量大小顺序为丘陵区绵阳市>丘陵区南充市>平原区眉山市>山区广元市。基于干燥基的麦秸和油菜秸灰分含量地区排列顺序也不相同,麦秸样品干燥基灰分含量大小顺序为丘陵区南充市>山区广元市>平原区眉山市>丘陵区绵阳市,而油菜秸样品干燥基灰分含量大小顺序为平原区眉山市>丘陵区绵阳市>山区广元市>丘陵区南充市。从灰分含量排序可以看出,同属于丘陵地区的南充市和绵阳市,麦秸和油菜秸灰分含量相差大。由此可以看出,秸秆理化特性的地区差异比较复杂,除了地理位置导致的差异(如气温、湿度、降水量、日照、生长期等)。

通过对不同作物秸秆理化特性进行协方差分析,结果显示作物种类对秸秆的静态堆积角、自然堆积密度、振实堆积密度、全水分含量、干燥基灰分含量、绝干弹筒热值均有显著性影响。由静态堆积角可以看出,在麦秸、油菜秸、稻秸、玉米秸4种农作物秸秆中,玉米秸的流动性最好,油菜秸次之,稻秸最差。油菜秸的自然堆积密度和振实堆积密度最大,稻秸次之,玉米秸最差。而全水分含量大小顺序为稻秸>玉米秸>油菜秸>麦秸;干燥基灰分含量大小顺序为稻秸>麦秸>油菜秸>玉米秸;绝干弹筒热值高低顺序为油菜秸>玉米秸>麦秸>稻秸。秸秆作为燃料,其流动性越好、堆积密度越大、含水率越小、干燥基灰分含量越小、热值越高,则越有利。综合考虑以上几项秸秆特性,在麦秸、油菜秸、稻秸、玉米秸4种农作物秸秆中,油菜秸最适宜作秸秆燃料,最不适宜的为稻秸。

(上接第208页)

- [12]林家彬,李辉,汤赤,等. 发酵床生猪养殖垫料水分调控系统运行效果[J]. 农业科学与技术,2016,17(4):923-926.
- [13]高金波,牛星,牛钟相. 不同垫料发酵床养猪效果研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2012(1):79-83.
- [14]王远孝,王恬. 微生物发酵床养猪模式的研究进展[C]. 2010年家畜环境与生态学术研讨会·内蒙古通辽,2010.
- [15]潘孝青,杨杰,徐小波,等. 发酵床饲养对猪运动时间、肌纤维形态、MSTN蛋白表达的影响[J]. 畜牧与饲料科学,2015,36(2):6-9,12.
- [16]盛清凯,王诚,武英,等. 冬季发酵床养殖模式对猪舍环境及猪生产性能的影响[J]. 家畜生态学报,2009,30(1):82-85.
- [17]文信旺,韦风英,吴亮,等. 发酵床养鸡对环境空气及产品质

## 参考文献:

- [1]Wang X Y, Yang L, Steinberger Y, et al. Field crop residue estimate and availability for biofuel production in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 864-875.
- [2]霍雨丽,孟海波,田宜水,等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11):189-195.
- [3]马隆龙,吴创之,孙立. 生物质气化技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003:27-33.
- [4]熊昌国,谢祖琪,易文裕,等. 农作物秸秆能源利用基本性能的研究[J]. 西南农业学报,2010,23(5):1725-1732.
- [5]虞洪章,刘建辉,谢祖琪,等. 秸秆成型加工技术的试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2009,31(11):133-136.
- [6]田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):124-128.
- [7]谢祖琪,余满江,虞洪章,等. 小麦秸秆储存机理研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2011,33(7):129-136.
- [8]刘建辉,谢祖琪,姚金霞,等. 农作物秸秆在遮雨通风条件下的储存研究[J]. 西南农业学报,2012,25(5):1889-1894.
- [9]中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015:393-422.
- [10]北京起重运输机械研究所. 连续输送设备散粒物料堆积角的测定:JB/T 9014.7-1999[S]. 北京:机械科学研究院,1999.
- [11]中华人民共和国农业部科技教育司. 生物质固体成型燃料试验方法第6部分 堆积密度:NY/T 1881.6-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [12]中华人民共和国农业部科技教育司. 生物质固体成型燃料试验方法第2部分 全水分:NY/T 1881.2-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [13]四川省质量技术监督局. 固体生物质燃料发热量测定方法:DB51/T 1387-2011[S].
- [14]中华人民共和国农业部科技教育司. 生物质固体成型燃料试验方法第5部分 灰分:NY/T 1881.5-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [15]量的影响[J]. 上海畜牧兽医通讯,2013(4):48.
- [18]周玉刚,宁康健,刘树全,等. 发酵床饲养对育肥猪血液生化指标的影响[J]. 安徽农业大学学报,2011,38(2):263-266.
- [19]胡海燕,于勇,张玉静,等. 发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(1):252-258.
- [20]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [21]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [22]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.
- [23]李娟,李吉进,邹国元,等. 发酵床不同垫料配比前期发酵特征的研究[J]. 中国农学通报,2012,28(5):247-251.
- [24]盛清凯,武英,赵红波,等. 发酵床养殖垫料组分的变化规律[J]. 西南农业学报,2010,23(5):1703-1705.