

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.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.03.037

## 发酵床垫料特性与资源化利用研究进展

刘宇锋<sup>1,2</sup>, 罗 佳<sup>1</sup>, 严少华<sup>1</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:** 发酵床垫料的特性研究及其资源化利用是当前发酵床养殖技术体系的主要研究方向之一。本文分析了垫料的构成特性, 养殖过程中垫料养分含量的变化, 同时对发酵床垫料资源化利用中存在的问题进行了讨论, 并对发酵床垫料未来的研究重点进行了展望, 以期生态发酵床的推广应用提供依据。

**关键词:** 生态发酵床; 垫料; 资源化利用

**中图分类号:** X713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)03-0700-08

## Research progress in characteristics of litter in a pig-on-litter system for swine production and their resource utilization

LIU Yu-feng<sup>1,2</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Characteristics and resource utilization of litter is one of the key research areas in a pig-on-litter fermentation system. In this review, the components of litters and changes of nutrients in litters during swine production were summarized and analyzed. The problems constraining the resource utilization of the litters were pointed out and discussed and the research directions of litters in the pig-on-litter fermentation system were brought forward to provide a theoretical basis and practical guidance for the promotion of the system for swine production in the future.

**Key words:** pig-on-litter system; litter; resource utilization

随着经济社会的快速发展, 畜禽养殖业已经由传统的农户散养向规模化、集约化、工厂化养殖转

变, 出现了许多大型畜禽养殖企业<sup>[1]</sup>。现代规模化养殖生产, 在满足人们对畜禽产品消费的同时, 也会产生大量的粪尿、污水和有害气体, 畜禽粪尿未经处理直接排放到环境中, 导致严重的环境污染, 成为中国重要的面源污染之一<sup>[2-3]</sup>。尤其在人口稠密、土地面积有限的农业省份, 畜禽粪便对环境污染问题尤为突出。耕地资源的不可再生性及传统的畜禽饲料养殖对环境的污染日趋严重成为限制养殖业发展的瓶颈之一<sup>[4]</sup>。

生态发酵床是利用全新的自然农业理念, 综合利用微生物学、生态学、发酵工程学原理, 以活性功能微生物作为物质能量“转换中枢”的一种环保、安全、有效的生态养猪模式。实现养猪无排放、无污

收稿日期: 2014-11-30

**基金项目:** 公益性行业(农业)科研专项(201203050-6); 江苏省科技支撑计划(农业部分)(BE2013436); 江苏省自主创新基金项目[CX(14)2035]; 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科2013JZ14)

**作者简介:** 刘宇锋(1980-), 男, 湖南湘阴人, 博士后, 助理研究员, 主要从事生态发酵床秸秆垫料基质化研究。(Tel) 025-84390581; (E-mail) liuyufeng@jaas.ac.cn。罗佳为共同第一作者。

**通讯作者:** 张振华, (Tel) 025-84391207; (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

染、无臭气、彻底解决规模养猪场的环境污染问题,它是集养猪学、营养学、环境卫生学、生物学、土壤肥料学于一体,遵循低成本、高产出、无污染的原则建立起的一套良性循环的生态养猪体系。它是工厂规模化养猪发展到一定阶段而形成的一个亮点,是畜禽养殖业可持续发展的一种新模式。

发酵床养殖技术最早起源于日本,1970年日本利用坑道,以锯木屑为垫料建立了世界上第一个微生物发酵床养殖系统<sup>[5]</sup>。1985年,加拿大BioTech公司推出以土壤为地板,秸秆为深层垫料,并完善了围栏、食槽等辅助结构的新型发酵床系统<sup>[6]</sup>。此后,中国香港、荷兰等地的科研人员对发酵床养殖技术进行了深入研究,在推广应用过程中,确定了商业复合菌剂和锯木屑为发酵床研制菌种和垫料基质,其相互作用加快畜禽粪便的降解速度并使发酵床的效果更加稳定<sup>[7-8]</sup>。20世纪90年代末起,发酵床养殖技术开始在中国部分省市陆续开展试点。2000年,江苏镇江科技局首先从日本引进发酵床养殖技术,依据当地情况开始本土化推广示范<sup>[9]</sup>。2008年该项技术被国家环保部建议推广。自2009年以来,江苏省农业科学院在广泛调研的基础上,与日韩等国专家合作,引进成熟的发酵床养殖技术,开展发酵床养殖技术本土化的研究工作,并对发酵床、发酵床菌种、垫料、棚舍结构和环境调控等方面进行了系统化研究<sup>[10-11]</sup>,并将研究成果在江苏省15个示范点推广应用,取得了良好的效果。

发酵床垫料的来源与选择是发酵床养猪技术的核心环节之一。本研究通过综合生态发酵床垫料来源、资源化利用中存在的问题,为发酵床垫料的研究与应用以及资源化利用提供参考。

## 1 发酵床垫料来源和养分含量变化

### 1.1 锯木屑

锯木屑在垫料中的主要功能是保持水分含量并为微生物提供稳定的碳源。从技术角度分析,由于畜禽粪便中,特别是猪粪的碳氮比较低,含水量较高,制作发酵床应选择碳氮比高、碳水化合物含量高、疏松多孔透气、吸水吸附性能良好、细度适当的垫料,以便对猪粪的发酵性能进行补充,保证发酵过程的持续高效。在所有垫料中锯木屑的碳氮比最高,含有丰富的纤维素、木质素和半纤维素。木质素的存在可保护纤维素不易被微生物分解,且与 $\text{NH}_3$

形成稳定化合物<sup>[12]</sup>,使得锯木屑最耐发酵,经久耐用,纯锯木屑作为垫料的猪生态发酵床使用寿命可达3~4年。同时锯木屑疏松多孔、保水性好、透气性也比较好的,使得锯木屑成为发酵床垫料的首选原料。从目前微生物发酵床垫料在各地的使用情况来看,以锯木屑为主配以其他物料作为发酵床垫料的使用效果良好。

### 1.2 稻壳

稻壳也是发酵床垫料来源之一,其透气性能比锯木屑好,比表面积大,有利于吸收 $\text{NH}_3$ ,含碳水化合物比例比锯木屑低,灰分含量比锯木屑高,使用效果和寿命次于锯木屑<sup>[13-14]</sup>。实践中常将锯木屑与稻壳混合使用,不仅可以弥补锯木屑、稻壳单一使用的不足,更能起到疏松透气,为微生物提供氧气的作用,提高发酵效果。在锯木屑中加入稻壳的效果与单一使用锯木屑的效果相接近,但可以降低垫料成本。

### 1.3 菌糠

菌糠是指以棉籽壳、锯木屑、稻草、玉米芯、甘蔗渣及多种农作物秸秆为主要原料栽培食用菌后的废弃培养基<sup>[15]</sup>。过去培养食用菌后将菌糠丢弃,菌糠具有自身难以降解的特点,释放到环境中自然降解缓慢,污染很大。后来研究发现,菌糠中含有木质素、纤维素、菌丝体蛋白、多糖以及氮、磷、钾等多种营养元素,并且质地柔软,无毒无刺激性,通透性好,有特殊香味,自身分布着大量土著菌群,价格低廉<sup>[16-17]</sup>,菌糠是发酵床床体微生物菌群的天然发酵载体,经发酵床使用后的菌糠垫料又是良好的农业有机肥料,对延长农业产业链和生态产业链,降低发酵床垫料制作成本,控制养殖业污染,减少环境污染具有重要实际意义。贾月楼等<sup>[18]</sup>研究认为,菌糠加入发酵床垫料中,替代部分锯木屑不影响发酵效果及生猪的育肥性能,在菌糠资源比较充足的条件下,可以广泛应用。盛清凯等<sup>[19]</sup>研究发现用金针菇菌渣替代50%锯木屑后,菌渣+锯木屑+稻壳配方的发酵床温度高于锯木屑+稻壳配方。冯国兴等<sup>[20]</sup>在不接种任何菌剂的条件下,金针菇菌糠作为发酵床垫料使用时表现出较高的发酵温度,且成本显著降低,生猪料肉比优势明显。

### 1.4 秸秆

发酵床效率的高低决定了发酵床养殖模式经济效益的高低。近年来,随着环保意识的增强,国家加大了对木材砍伐的限制,以及木材加工业对于锯木

屑的回收再利用,部分畜禽养殖地区林木资源匮乏,大量使用锯木屑,抬升锯木屑价格,增加发酵床养殖成本。再加上部分锯木屑中含有甲醛等有害化学物质,影响发酵床的发酵效果并影响生猪的生产性能,在一定程度上制约了发酵床养猪技术的推广应用。实际生产中,亟需结合当地实际,降低锯木屑使用比例,增加其他垫料含量,降低成本,提高效益。

农作物秸秆通常指小麦、水稻、玉米、薯类、油料、棉花、甘蔗和其他农作物在收获籽实后的剩余部分<sup>[21]</sup>。农作物光合作用的产物有 50% 以上存在于秸秆中,秸秆富含氮、磷、钾、钙、镁和有机质等,农作物秸秆作为农村最主要的农作物副产品,具有产量大、分布广、供应稳的特点,同时更是一种重要的具有多用途的可再生的生物资源。2010 年中国农业秸秆资源总量达  $7.4 \times 10^8$  t,相当于标准煤  $5.0 \times 10^8$  t<sup>[22-23]</sup>,约占中国生物质总资源量的 50%,约占全世界秸秆总量的 30%<sup>[24]</sup>。

随着农村经济的发展和能源供应的改善,农民对秸秆的燃烧利用逐渐减少,秸秆在农村能源中的比重逐步下降,同时受到机械成本、劳动力成本、运输成本和秸秆资源化利用补贴措施不太完善的影响,难以形成对农户有效利用秸秆的经济激励,加之受到秸秆消费市场不明晰和农时限制等因素的影响<sup>[25]</sup>,中国每年有大量农作物秸秆在收获季节被焚烧,秸秆焚烧不仅浪费资源,也造成了严重的环境污染。大面积露天焚烧秸秆使农田土壤有机质、生物群落数量和密度显著减少,致使耕地贫瘠化、农田板结化,也影响后茬作物生长,降低作物产量<sup>[26-27]</sup>,秸秆焚烧已成为中国农业面源污染的重要来源之一。农作物秸秆大规模废弃焚烧还造成了航空交通经常受阻、道路交通事故增多和火灾事故频繁发生等诸多社会问题<sup>[28]</sup>。

江苏作为农业大省,拥有丰富的农作物秸秆资源,江苏每年农作物秸秆产量约  $4 \times 10^7$  t,位列全国第 4 位<sup>[29-30]</sup>。2009 年江苏省人大在全国率先出台了《关于促进农作物秸秆综合利用的决定》,目前江苏省秸秆约有 30% 作为农村生活燃料和能源、16% 作为饲料、15% 还田、4% 用作发电、3% 用作食用菌生产、2% 用作其他,而丢弃或在田间直接焚烧的约占 30%<sup>[31]</sup>。虽然农业秸秆综合化利用在江苏取得较大成绩,但秸秆每年大量产生,每年都需要花费大量人力、物力禁止秸秆焚烧。治理秸秆焚烧问题的

关键是彻底解决秸秆的出路问题<sup>[32]</sup>,走符合农业生产实际的秸秆综合化利用道路。

在发酵床垫料替代研究领域,科学工作者开展了一系列研究工作,取得了一定研究成果。刘伟等<sup>[33]</sup>研究认为在发酵床垫料中掺入 5% ~ 20% 的稻草秸秆不会影响猪的肥育性能。王亚犁等<sup>[34]</sup>在猪发酵床垫料中使用麦秸代替 10% 锯木屑发现,不会影响发酵床效果和猪的肥育性能。用麦秸代替锯木屑作为发酵床垫料,不仅可以降低垫料成本,而且可以延长发酵床使用年限。高金波等<sup>[35]</sup>等发现利用玉米秸秆和花生壳作为发酵床垫料能够明显提高猪的增重率和饲料利用率。俸祥仁等<sup>[36]</sup>对水稻、玉米、木薯、甘蔗、桑树等农作物秸秆替代 50% 锯木屑的试验结果分析认为,桑树秸秆可以替代 50% 锯木屑作发酵床垫料。

秸秆垫料具有来源充足,价格低廉,与传统发酵床垫料相比较可降低垫料成本。同时,秸秆垫料排列疏松,透气性好,有利于氧气输送到垫料底层进行有氧发酵。通过开发秸秆型垫料资源,不仅可解决发酵床垫料资源限制性问题,降低生态发酵床养殖成本,也为农作物秸秆资源综合利用找到了新的出路,是今后一段时间发酵床垫料研究的重点领域和发展方向。

### 1.5 发酵床垫料养分含量变化

微生物发酵床在畜禽饲养过程中,经过畜禽的踩踏翻拱,排泄的粪尿与垫料充分混合,实现了原位吸附、分解和消纳,富含营养成分。经过堆肥化处理后的产物达到了有机肥料标准,是一种优质的有机肥。充分腐熟的垫料也是优质的生物基质,可用作种苗培育、食用菌栽培等多种用途。对于垫料转化过程中,垫料综合理化性质的变化特性和变化趋势,相关科研工作者进行了大量报道(表 1)。焦洪超等<sup>[37]</sup>模拟发酵床试验认为,垫料中氮素的损失主要在发酵前期。马晗等<sup>[38]</sup>对发酵床养猪栏内 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 垫料层不同形态氮素含量以及有机质含量等指标的测定结果表明,随着垫料使用时间的延长,垫料中有机质含量均呈现持续降低趋势;由于猪粪尿的不断排放,垫料中全氮、碱解氮和硝态氮含量逐渐增加,而铵态氮含量和 pH 均呈现先上升后降低趋势。陆扬等<sup>[39]</sup>对连续饲养 2 批猪后发酵床垫料中氮、磷的含量变化分析发现,氮、磷含量显著提高,铵态氮、亚硝态氮和硝态氮浓度显著升高,碳氮比由养猪前的 84 : 1 下降至 31 : 1,氮磷比由

2.80 : 1.00 下降至1.26 : 1.00。张霞等<sup>[40]</sup>对2年和7年下层垫料氮、磷含量研究发现,随着垫料使用时间延长,氮、磷含量在底层垫料逐步积累。蓝江林等<sup>[41]</sup>以使用5个月的发酵床垫料为对照,对使用5~16个月的垫料有机质和氮磷钾总量进行测定,发现使用5个月、7个月、9个月和16个月的垫料有机质的含量分别为59.72%、49.34%、44.94%和38.41%,垫料有机质的含量随使用时间的延长而逐渐降低,含量变化差异显著。全磷和全钾的含量

随着使用时间延长均呈上升趋势。李娟等<sup>[42]</sup>对发酵床垫料前期模拟发酵发现,全氮含量、有机质含量均呈降低趋势;pH缓慢升高;电导率在整个发酵期间变化不明显。胡海燕等<sup>[43]</sup>对中国山东、吉林两省5个发酵床养猪场的废弃垫料的有机质、氮、磷、钾等指标测定,表明有机质含量为42.62%~54.12%,全氮1.54%~2.12%,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)2.24%~5.55%,全钾(K<sub>2</sub>O)0.57%~2.15%,均达到了有机肥的标准。

表1 发酵床垫料养分含量变化

Table 1 Changes of nutrient contents in pig deep-litter system

垫料类型	取样深度 (cm)	发酵时间 (月)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	有机质 (%)	参考文献
锯木屑:稻壳(1:1)	0~20	0	1.03	-	-	46.01	[38]
		6	1.43	-	-	12.78	
	20~40	0	0.85	-	-	34.75	
		6	1.17	-	-	13.20	
锯木屑:稻壳(1:1)	0~70	7	0.56	0.20	-	47.10	[39]
			1.32	1.05	-	41.22	
锯木屑:稻壳	0~60	24	0.98	0.66	-	-	[40]
		84	1.41	1.12	-	-	
锯木屑:稻壳	0~60	5	0.78	0.28	0.42	59.72	[41]
		7	0.66	0.35	0.52	49.34	
		9	0.59	0.45	0.83	44.94	
		16	0.63	0.53	0.92	38.41	

2 发酵床垫料资源化利用的可行性及存在问题

目前,国内外学者对于发酵床养猪技术改善猪的福利、减少环境污染、降低猪群疾病、提高猪肉品质、提高生产性能等方面的作用做了较多的研究<sup>[44-46]</sup>。但是,对于养殖后发酵床垫料农田土壤利用的适宜性,垫料作为有机肥料使用的可行性,以及无害化处理和资源化应用技术等目前尚缺乏系统研究,本研究就发酵床垫料中存在的主要问题和未来研究方向进行了归纳。

2.1 病原微生物积累

发酵床本身利用有益微生物通过发酵降解畜禽粪尿,但发酵床并不能通过发酵产生的热能和有益菌的增殖而杀灭或抑制致病菌。在普通养猪模式下,养猪场每天冲洗猪舍,定期对猪舍消毒,减少了微生物的存在,也能在很大程度上减少病原菌的存

在。而在发酵床养猪模式下,只能对猪舍及垫料表面进行消毒或者不消毒,垫料则可能成为微生物良好的繁殖场所。据检测,每克新鲜垫料中,各种微生物的含量可达1×10<sup>8</sup>个以上。虽然通过接种环境益生菌进行充分发酵后,达到70℃的高温能消灭不耐受高温的微生物,但部分发酵不完全的垫料仍然保存了大量的微生物。在饲养过程中,一些病猪携带的病原菌也可能保留在垫料中,造成病原菌累积的隐患。同时,垫料更换周期较长,容易滋生霉菌、致病菌及寄生虫等,给畜禽养殖带来一定安全隐患。

王潇娣等<sup>[47]</sup>对南方高热高湿地区发酵床养殖模式下猪肠道与发酵床垫料的细菌分离及其致病性分析结果表明,发酵床养猪模式的环境中均检出大肠杆菌、葡萄球菌、沙门氏菌、链球菌等致病菌,存在一定致病性风险。粪大肠菌被普遍认为是判断病原体存在的可能性指标,是评定畜禽养殖废弃物堆肥处理是否达到无害化的4大指标之一。胡海燕等<sup>[43]</sup>对山

东、吉林 2 省 5 个发酵床养猪场的废弃垫料的有害微生物数量检测发现,发酵床废弃垫料中肠道寄生虫卵严重超标,具有生物安全隐患,施用前必须对其进行无害化处理。但目前资料表明,无害化处理能否达到完全有效的抑制致病菌的效果还需进一步深入研究。

## 2.2 重金属及有毒元素残留

畜禽饲养中添加适量 Cu、Zn 等重金属元素,能调节动物代谢,对畜禽生长有一定的促进作用。发酵床养殖过程中因畜禽的进食、排便等原因不可避免地会使饲料中添加的重金属滞留在垫料中<sup>[48]</sup>,重金属元素具有难迁移、易富集、危害大等特点,随着废弃垫料还田,进入农田生态环境后,会对土壤生态系统造成危害,从而影响食品安全。所以有必要对垫料中重金属富集问题进行关注。

目前中国在有机肥农业行业标准中对部分重金属含量只做了限量标准,没有给出土壤年最高承载量和土壤最高含量的标准,同时对发酵床垫料中容易出现积累的 Cu、Zn 没有给出明确指标,本研究结合部分欧洲国家有机肥料中重金属及有毒元素限量标准(表 2)进行归类。

表 2 中国、荷兰、德国和比利时有机肥料中重金属及有毒元素限量标准

Table 2 Maximum heavy metal and toxic element limits in compost in China, Dutch German and Belgian

重金属及有毒元素种类	各国有机肥料中重金属限量标准 (mg/kg)			
	中国 <sup>[49]</sup>	荷兰 <sup>[50]</sup>	德国 <sup>[51]</sup>	比利时 <sup>[52]</sup>
砷 (As)	≤15	25.0	—	—
汞 (Hg)	≤2	0.3	1.0	1.0
铅 (Pb)	≤50	100.0	150.0	120.0
镉 (Cd)	≤3	1.0	1.5	1.5
铬 (Cr)	≤150	50.0	100.0	70.0
铜 (Cu)	—	60.0	100.0	90.0
锌 (Zn)	—	200.0	400.0	300.0
镍 (Ni)	—	50.0	50.0	20.0

Tam 等<sup>[53]</sup>使用发酵床垫料进行种子发芽试验认为,不断积累的重金属及有毒元素,特别是 Cu 和 As 是造成发酵床垫料生理毒害的主要原因。张丽萍等<sup>[54]</sup>对不同发酵床垫料中 As、Cu 和 Zn 等重金属及有毒元素积累研究发现,不同垫料对 3 种重金属及有毒元素的吸纳效果均不相同,As、Cu 和 Zn 作为库存在于发酵床垫料中。郭彤等<sup>[55]</sup>对不同使用时

间、不同深度的发酵床垫料中垫料组分及重金属含量的变化研究结果表明,1~3 年垫料中重金属含量均低于国家最高允许标准,认为经常深翻、合理补充新的垫料和菌种,废弃垫料能直接用作有机肥还田。马建民等<sup>[56]</sup>对北京大兴区 3 个发酵床养猪垫料中 As 的含量分析结果表明,1 年发酵床垫料、2 年发酵床垫料、3 年发酵床垫料中砷残留量最大值分别是 2.15 mg/kg、5.01 mg/kg、8.34 mg/kg,虽然没有超过国家有机肥中 As 的限定范围,但随着年限的增加,发酵床垫料中砷残留出现明显富集。

应三成等<sup>[57]</sup>对泸州、乐山、简阳等市使用 1~3 年的保育和育肥猪发酵床的 5 个猪场的生猪发酵床垫料的 Cu、Zn、As、Cd、Pb、Cr 含量的检测结果表明,Zn 在第 1 年、第 2 年和第 3 年垫料中的含量分别达到了 231.33 mg/kg、1 639.75 mg/kg、2 741.00 mg/kg,第 2 年和第 3 年垫料中 Zn 的含量分别比第 1 年增加了 7.1 倍和 11.8 倍;Cu 在 1~3 年垫料中含量分别为 227.33 mg/kg、413.85 mg/kg、750.75 mg/kg,第 2 年和第 3 年垫料中 Cu 的含量较第 1 年分别增加了 1.8 倍和 3.3 倍;As 在第 1~3 年垫料中含量分别为 11.43 mg/kg、14.02 mg/kg 和 32.08 mg/kg,其中第 2 年垫料中 As 含量已经接近中国有机肥中 As 含量上限,第 3 年超过国家标准 1 倍多。应三成等<sup>[57]</sup>认为使用 1~3 年的垫料中 Cu、Zn 的平均值接近或超过国家标准的最高允许含量,废弃垫料不能直接用作有机肥还田。

当前与垫料重金属含量的相关研究报道结论不尽相同,可能与发酵床管理方式、畜禽饲料和垫料来源有一定关系,垫料的施用是否会对土壤结构、土壤特性、农作物生长、质量安全等方面产生不利的影响尚需进一步观测,垫料能否直接还田的问题还需要进一步深入分析研究。

## 2.3 抗生素累积

在规模化养猪业中,饲料和兽药均添加部分抗生素和添加剂,起到促进生猪健康生长、提高饲料利用率等作用<sup>[58]</sup>,目前,中国已有 17 种抗生素、抗氧化剂和激素类药物及 11 种抗菌剂作为兽药用于饲喂畜禽<sup>[59]</sup>,其中土霉素 (OTC)、四环素 (TC) 和金霉素 (CTC) 等四环素类抗生素是应用最广泛、使用量最大的一类抗生素,约占兽用抗生素总用量的 57%<sup>[60]</sup>。张慧敏等<sup>[61]</sup>研究结果表明,进入动物体内的抗生素有 60%~90% 以药物原形或初级代谢

产物的形式随动物粪尿排出体外。张树清等<sup>[62]</sup>对中国7个省市自治区的典型规模化养殖场畜禽粪便的主要成分分析结果表明,猪粪中土霉素平均含量为9.09 mg/kg,最高达134.75 mg/kg,四环素平均含量为5.22 mg/kg,最高达78.57 mg/kg,金霉素平均含量为3.57 mg/kg,最高达121.78 mg/kg。

大量在畜禽粪便中残留的抗生素,首先在发酵床垫料中积累,是否对发酵床垫料中微生物发酵菌群存在不利影响,释放到土壤、水体等环境中是否产生不良影响,是否通过食物链对人类健康产生不利影响,有待进一步研究。

#### 2.4 垫料次生盐渍化

垫料组分添加了部分矿物盐,同时畜禽养殖过程中饲料外源添加矿物盐,除小部分被畜禽吸收外,大部分随畜禽粪便排出体外,使得畜禽粪便中含有较高浓度的盐分<sup>[63]</sup>,使垫料中盐分含量逐步增加,垫料使用周期越长,盐分含量越高。胡海燕等<sup>[43]</sup>对中国山东、吉林两省5个发酵床养猪场的废弃垫料盐分含量进行检测发现,电导率为8.14~16.06 mS/cm,Na含量为1.18~4.18 g/kg,认为安全、有效利用发酵床废弃垫料资源需要检测和考虑其盐分,防止土壤次生盐渍化。朱红等<sup>[64]</sup>对生态发酵床垫料剖面中盐分含量分析发现,2年6批次生猪养殖后,垫料中盐分含量可达25 mg/kg,呈重度盐渍化。连续使用2年的垫料中可溶性盐含量远高于使用2个月的新垫料,盐分在剖面上呈上高下低的规律分布。

以发酵床垫料为主的有机肥施用到农田中,将增加土壤盐分水平,造成土壤盐分积累。而作为发酵床垫料的主要用途之一的栽培基质,如果不能有效降低基质中盐含量,将抑制作物的出苗和生根。相关垫料次生盐渍化问题报道还不多见,所以安全有效地使用发酵床垫料,需要深入研究降低垫料中盐分含量的办法。

### 3 展望

发酵床养猪是一项新兴技术,也是一个技术含量较高的生物环境控制技术。垫料制作过程就是如何处理好猪与垫料、微生物、环境的关系,维持微生物生态系统平衡不被破坏的过程。微生物发酵床养猪不仅解决了养殖污染排放的问题,且能改善畜禽肉产品风味和品质,也迎合了目前提倡的提高动物福利的要求。垫料的筛选与优化解决了农作物秸秆的利

用问题,节约能源,减少污染,提高了养殖效益,应用前景广阔,是值得大力推广的养殖模式。尽管发酵床养猪法在当前的应用中仍存在一些不足,但可以借鉴先进技术,并与中国实际结合起来,从实践中不断完善和改进。

#### 3.1 深入进行垫料腐熟过程研究

垫料发酵周期较长,一般为2~3年,垫料腐熟是逐步形成的过程,中间次生代谢物对发酵影响重大,对发酵床垫料腐熟过程和无害化使用影响显著。腐殖酸作为堆肥过程中形成的一种次生产物,腐殖酸在垫料腐熟过程中的变化更能反映垫料的腐殖化过程,因此可以把腐殖酸含量作为评价含量腐熟过程的一个有效指标。也有研究发现腐殖酸对垫料重金属具有钝化效果,腐殖酸含有多种功能基,如羧基、醇羟基、酚羟基、甲氧基等,因此具有很高的反应活性,能与环境中的重金属离子发生吸附、络合等作用,所形成的有机-金属络合物及吸附物的稳定性对重金属离子的迁移转化、生物活性具有很大影响。但目前发酵床垫料研究中对这类次生代谢产物的变化和作用的相关报道还不多见。

发酵床垫料微生物研究一直是处于“黑箱”状态。大量研究认为,通过传统分离培养方法估计的微生物种类只占环境微生物种类总数的0.1%~1.0%,有相当大部分的微生物是不可培养的。同时,由于发酵垫料发酵周期较长,始终又处于一个动态发酵状态,发酵床垫料空间变异差异大,加之发酵床垫料微生物群落易受垫料类型、畜禽种类和垫料管理措施的影响,使垫料微生物多样性和群落结构变化的信息极为复杂。同时针对经典土壤微生物培养研究方法中存在的可培养的微生物种类有限,反应的信息狭窄,传统研究方法和手段已经不能够满足垫料发酵微生物动态研究的需要,因此对垫料微生物的研究需要新的研究手段和方法的支持。

#### 3.2 开展发酵床垫料组分替代研究与应用

发酵床原料要求具有高碳氮比。采用高碳氮比的原料,垫料消耗量少,使用寿命更长。经典发酵床垫料制作需要消耗大量的谷壳和锯木屑,谷壳和锯木屑资源有限,制约了发酵床垫料技术的推广与应用。发酵床的垫料来源可根据不同地区的资源情况灵活选择,如华南地区的甘蔗渣、花生产地的花生壳、北方玉米产区的玉米秸、水稻产区的稻秸等都可以用来作为发酵床垫料,既为消化每年大量产生的作物秸秆找

到了出路,也降低了发酵床垫料的成本,节能环保。

### 3.3 加强发酵床垫料日常管理

垫料日常管理是发酵床使用与维护的重要环节,管理不当会缩短垫料使用寿命,甚至会导致发酵床“死床”,垫料提前整体报废,并引起畜禽疾病。所以,垫料日常管理对发酵床垫料正常使用至关重要。目前,中国发酵床垫料组成类型各有不同,没有统一的发酵床日常管理的操作规则,在发酵床技术的推广过程中缺少系统标准,这也是目前技术推广层面上对发酵床技术发生争议的重要原因之一。

对于微生物发酵床养猪,相关管理部门应尽快进行微生物发酵床养猪技术规程的制定,指导养猪人员规范技术管理。对于有条件的养猪场,可采用垫料发酵远程监控技术,监测猪场污染状况,解决污染预警失控的生态安全问题<sup>[65]</sup>。同时利用洗盐等再生处理技术解决发酵床垫料中次生盐渍化问题。国家应从技术层面,结合各地畜禽养殖业实际,制定符合实际的发酵床垫料管理规范,扬长避短,促进发酵床技术的推广应用。

### 3.4 加强循环农业中畜禽粪便处理和利用的标准体系建设

中国目前有机肥料中重金属的国家标准尚不完善,为满足中国农业及环境领域,特别是发酵床垫料资源化利用不断发展的要求,应尽快着手制定达到国际标准的有机肥料中重金属测定的国家标准。针对发酵床垫料中重金属、盐分、抗生素残留以及病原微生物的相关标准几乎还是空白,这也造成了相关领域研究的盲目性,相关标准的制定亟需提上议事日程。

微生物发酵床养猪在实践中带来了良好的社会效益,目前看来能够很好地解决养猪造成的环境问题,具有重大的推广意义和广阔的前景。然而,也存在一些不容忽视的生态安全问题。如垫料资源的生态安全问题、抗生素和重金属的累积、病原微生物的累积、废弃垫料的资源利用等。这些问题产生的根本原因不在于技术本身,而是由于技术应用的过程缺乏系统化的运行,因此,解决这些问题,还在于基于微生物发酵床养猪技术的特性,除了继续进行完善各技术细节的研究,亟需建立起一套体系化的运行机制。

### 参考文献:

- [1] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报,2005,21(8):169-173.
- [2] 李庆康,吴雷,刘海琴,等. 中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.
- [3] 沈振月,杨斌,刘建明. 浙江省畜禽养殖业污染状况与防治对策研究[J]. 上海环境科学,2002(12):1-7.
- [4] 陶朝辉,陈安国. 集约化猪场污染治理研究综述[J]. 当代畜牧,1999(2):3-5.
- [5] GADD J. Tunnel housing of pigs in livestock environment IV [M]. Michigan: American society of Agricultural Engineers, 1993.
- [6] CONNOR M L. Update on alternative housing systems for pigs[J]. Manitoba Swine Seminar Proc,1995(8):93-96.
- [7] TAM N Y, VRIJMOED L P. Effects of commercial bacterial products on nutrient transformations of pig manure in a pig-on-litter system[J]. Water Manage Res,1990,8(5):363-373.
- [8] TAM N Y, VRIJMOED L P. Effects of the inoculum size of a commercial bacterial product and the age of sawdust bedding on pig waste decomposition in a pig-on-litter system[J]. Water Manage Res, 1993, 11(2): 107-115.
- [9] 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.
- [10] 盛清凯,武英,王成,等. 发酵床养猪技术的优势与推广中存在的问题[J]. 猪业科学,2008(3):80-81.
- [11] 余刚,林家彬,秦竹,等. 经济实用型发酵床生猪养殖设施的研究[J]. 江苏农业科学,2011,39(6):342-344.
- [12] GRUDAN. The effect of wood fiber mulch on water retention, soil temperature and growth of vegetable plants[J]. J Sustain Agr, 2008,32(4):629-643.
- [13] GARLIPPF, HESSEL E F, WEGHE H F A. Characteristics of gas generation(  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems[J]. Journal of Equine Vet Sci,2011,31(7):383-395.
- [14] 潘孝青,杨杰,徐小波,等. 不同饲养方式及垫料环境下的发酵床猪生产性能及肉品质[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):205-207.
- [15] 陈燕萍,刘波,夏江平,等. 不同配比椰子壳粉和菌糠制作微生物发酵床养猪垫料的理化性质及养殖效果研究[J]. 福建农业学报,2012,27(12):1369-1377.
- [16] 李杨,桓明辉,高晓梅,等. 杏鲍菇菌糠促进畜禽粪便发酵过程的研究[J]. 中国土壤与肥料,2014(2):97-100.
- [17] 李景荣,张海峰,徐义猛,等. 金针菇菌糠发酵床对生态养猪效果的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(22):7439-7440.
- [18] 贾月楼,陆亚珍,张敏,等. 菌糠在发酵床垫料中的应用研究[J]. 当代畜牧,2013(3):13-14.
- [19] 盛清凯,赵红波,宫志远,等. 菌渣发酵床对雏鸡生产性能的影响[J]. 山东农业科学,2011(4):100-102.
- [20] 冯国兴,刘镒,潘孝青,等. 农业废弃物菌糠作为发酵床养猪垫料使用效果分析[J]. 上海畜牧兽医通讯,2014(2):65-67.
- [21] 谢光辉,王晓玉,任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究[J]. 生物工程学报,2010,26(7):855-863.
- [22] 娄玥芸,张惠芳. 秸秆生物质能源的应用现状与前景[J]. 化

- 学与生物工程,2010,27(9):73-76.
- [23] 曹国良,张小曳,郑方成,等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学,2006,28(1):9-12.
- [24] 张百良,王吉庆,徐桂转,等. 中国生物能源利用的思考[J]. 农业工程学报,1999,25(9):226-231.
- [25] 郑军,史建民. 中国农作物秸秆资源化利用的特征和困境及出路-以山东为例[J]. 农业现代化研究,2012,33(3):354-358.
- [26] 尹秀丽. 秸秆焚烧的危害及禁烧措施[J]. 现代农业科技,2014(13):249-250.
- [27] 李橙,赵阳,杨晶. 农业污染对土壤的危害及防治措施[J]. 中国环境管理,2014(3):22-25.
- [28] 冯伟,张利群,庞中伟,等. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析[J]. 中国农学通报,2011,27(6):350-354.
- [29] 谢海燕,周玉新. 江苏省农作物秸秆资源化利用及产业化发展研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(7):3105-3108.
- [30] 高翔. 江苏省农作物秸秆综合利用技术分析[J]. 江西农业学报,2010,22(2):130-133.
- [31] 平英华. 江苏秸秆综合利用状况及对策[J]. 江苏农村经济,2008(5):57-58.
- [32] 张伟,肖继军. 仙洪试验区秸秆产业化利用现状、问题与对策[J]. 广东农业科学,2011(13):150-152.
- [33] 刘伟,刘天明,孔祥峰,等. 不同垫料配方对发酵床养猪效果的影响[J]. 畜牧与兽医,2011,43(7):45-46.
- [34] 王亚犁,朱彤,陈宁兰. 用麦秸部分替代木锯末作发酵床养猪垫料的效果试验[J]. 饲料与畜牧:规模养猪,2013(5):24-25.
- [35] 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,2012,43(1):79-83.
- [36] 俸祥仁,兰宗宝,蒋爱国,等. 广西农作物秸秆在养猪发酵床中的应用研究[J]. 中国农学通报,2013,29(5):21-25.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 陆扬,吴淑杭,周德平,等. 发酵床养猪垫料的养分转化与植物毒性研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(7):1409-1412.
- [40] 张霞,顾洪如,杨杰,等. 猪发酵床垫料中氮、磷、重金属元素含量[J]. 江苏农业学报,2011,27(6):1414-1415.
- [41] 蓝江林,宋泽琼,刘波,等. 微生物发酵床不同腐熟程度垫料主要理化特性[J]. 福建农业学报,2013,28(11):1132-1136.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 王小红,吕锋,陆德祥,等. 发酵床养猪与水泥地面养猪饲养效果比较研究[J]. 上海农业学报,2013,29(3):70-72.
- [45] 周玉刚,闻爱友,宁康健. 微生物发酵床对育肥猪生产性能及猪肉品质的影响[J]. 安徽科技学院学报,2011,25(1):9-12.
- [46] 尹红轩,李伟,张光辉,等. 屠宰动物福利与肉品质量的关系[J]. 中国动物检疫,2009,26(7):5-6.
- [47] 王潇娣,廖春燕,朱玲. 发酵床养猪模式中垫料的主要菌群分析[J]. 养猪,2012(3):69-72.
- [48] 郭彤,马建民,赵曾元,等. 不同使用时间和深度的发酵床垫料成分及重金属沉积规律的研究[J]. 中国畜牧杂志,2013,49(10):51-55.
- [49] NY525-2012 有机肥料[S].
- [50] VERDONCK O, SZMIDT RAK. Compost specifications[J]. Acta-Horticulturae, 1998, 469:169-177.
- [51] USEPA. 40 code of federal regulations (CFR) part 503; standards for the Use or disposal of sewage sludge, final rules[J]. Federal Register, 1993, 58(32):9348-9415.
- [52] 李书田,刘荣乐. 国内外关于有机肥料中重金属安全限量标准的现状与分析[J]. 农业环境科学学报,2006,25(增刊):777-782.
- [53] TAM N F Y, TIQUIA S. Assessing toxicity of spent pig litter using a seed germination technique[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11: 261-274.
- [54] 张丽萍,盛婧,孙国锋,等. 养猪舍不同发酵床重金属累积特征初探[J]. 农业环境科学学报,2014,33(3):600-607.
- [55] 郭彤,马建民,赵曾元,等. 不同使用时间和深度的发酵床垫料成分及重金属沉积规律的研究[J]. 中国畜牧杂志,2013,49(10):51-55.
- [56] 马建民,郭彤,郭秀山. 生态养猪场发酵床垫料中砷残留测定[J]. 家畜生态学报,2013,34(5):80-81.
- [57] 应三成,吕学斌,何志平,等. 不同使用时间和类型生猪发酵床垫料成分比较研究[J]. 西南农业学报,2010,23(4):1279-1281.
- [58] 刘蓓,李艳霞,张雪莲,等. 兽药抗生素对土壤微生物群落的影响[J]. 生态毒理学报,2013,8(6):839-846.
- [59] 邢廷钰. 畜牧业生产对生态环境的污染及其防治[J]. 云南环境科学,2001(20):39-43.
- [60] 孙刚,袁守军,彭书传,等. 固相萃取-高效液相色谱法测定畜禽粪便中的土霉素、金霉素和四环素[J]. 环境化学,2010,29(4):739-743.
- [61] 张慧敏,章明奎,顾国平. 浙北地区畜禽粪便和田间土壤中四环素类抗生素残留[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(3):69-73.
- [62] 张树清,张夫道,刘秀梅,等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(6):822-829.
- [63] 王辉,董元华,张绪美,等. 江苏省集约化养殖畜禽粪便盐分含量及分布特征分析[J]. 农业工程学报,2007,23(11):229-223.
- [64] 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,2006,26(2):754-758.
- [65] 蓝江林,刘波,唐建阳,等. 基于微生物发酵床养猪模式的生态安全探讨[J]. 中国农学通报,2010,26(19):324-326.

(责任编辑:陈海霞)