

# 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪生长性能、养分消化代谢及粪尿发酵期间恶臭物质和有害气体排放的影响

蒲施桦<sup>1,2</sup> 龙定彪<sup>1,2\*</sup> 刘作华<sup>1\*</sup> 朱佳明<sup>1,2</sup> 简悦<sup>1,2</sup> 曾雅琼<sup>1,2</sup> 王颖<sup>3</sup>

(1.重庆市畜牧科学院,重庆 402460;2.农业农村部西南地区养殖工程科学观测实验站,重庆 402460;

3.西南大学动物科学学院,重庆 402460)

**摘要:** 本试验旨在研究饲料中添加蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪生长性能、养分消化代谢以及粪尿发酵期间恶臭物质和有害气体排放的影响。采用双因素随机试验设计,选取 56 头 30~35 kg 的健康杜长大(DLY)生长猪,按照体重相近、性别一致的原则分为 4 组,每组 14 个重复,每个重复 1 头猪。其中,对照组饲喂基础饲料,蚯蚓粉组在基础饲料中添加 0.500% 的蚯蚓粉,丝兰提取物组在基础饲料中添加 0.012% 的丝兰提取物,蚯蚓粉+丝兰提取物组在基础饲料中添加 0.500% 的蚯蚓粉和 0.012% 的丝兰提取物。试验期为 80 d。结果表明:1)与对照组相比,单独添加丝兰提取物可显著降低生长猪的料重比( $P<0.05$ );组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物可显著增加粗蛋白质表观消化率及粗蛋白质表观代谢率( $P<0.05$ )。2)在厌氧发酵过程中,与对照组相比,单独添加丝兰提取物能显著增加粪尿中有机质含量( $P<0.05$ ),从而使粪尿的碳氮比增加至 16,提高发酵期粪便产气量。3)与对照组相比,单独添加蚯蚓粉或者丝兰提取物均能显著降低发酵粪尿的三甲基吲哚、氨气和硫化氢浓度( $P<0.05$ );这 2 种添加剂组合使用对减少粪尿发酵期间挥发性脂肪酸、臭味物质以及有害气体产生均有协同促进效果。由此可见,饲料中组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物能促进生长猪对蛋白质的消化吸收,减少粪尿发酵期间挥发性脂肪酸、恶臭物质和有害气体的排放,可作为饲料添加剂从源头上减少养殖粪污排放,对于加强养殖环境防控、缓解畜禽粪污资源化处理压力具有重要意义。

**关键词:** 蚯蚓粉;丝兰提取物;生长性能;挥发性脂肪酸;厌氧发酵

**中图分类号:** S816

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-267X(2021)04-2321-14

随着规模化、集约化养殖模式的快速升级,养殖业的污染排放已经成为继工业污染和城镇生活污水排放之后的第三大污染。第二次全国污染普查公报显示,畜禽养殖业排放污水的化学需氧量(COD)和氨氮分别占农业源污水排放量的 93.76% 和 51.30%,目前仍是主要的农业污染源。饲料营养不均衡、饲料配制加工不合理、养分吸收

消化效率不高等多方面原因导致了生猪养殖粪污中恶臭气体、抗生素、微量元素和部分营养素的超标排放,尤其是养殖粪污中的 4 类化合物,即挥发性脂肪酸、酚类物质、吲哚类和硫醇类物质,严重威胁人畜健康<sup>[1-2]</sup>。因此,降低养殖粪污的恶臭物质产量,对于缓解粪污处理压力,促进绿色生猪养殖具有重要意义。丝兰提取物作为一种天然植物

收稿日期:2020-06-19

基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项(cstc2018jcsx-mszdX0045);现代农业产业技术体系(CARS-35);国际科技合作项目(19502)

作者简介:蒲施桦(1986—),女,重庆人,副研究员,硕士,从事畜牧环境研究。E-mail: opertion5@163.com

\* 通信作者:龙定彪,研究员,硕士生导师,E-mail: 87902798@qq.com;刘作华,研究员,硕士生导师,E-mail: liuzuohua66@163.com

性添加剂,能通过改善动物肠道微生态平衡,增强动物对营养物质的消化吸收,达到降低粪便氨气浓度,改善畜禽生长性能的作用<sup>[3-5]</sup>,在畜禽养殖除臭方面的应用较为广泛。王俐<sup>[6]</sup>研究发现,饲料中添加丝兰提取物可使猪舍氨气浓度降低33%~46%。Matusiak等<sup>[7]</sup>也发现,添加丝兰提取物能有效降低家禽粪便中恶臭气体浓度。蚯蚓粉作为新型动物饲料添加剂,可以提高畜禽的生长性能以及产品品质,增加畜禽的免疫力,但其在畜禽养殖除臭方面的应用仅见零星报道<sup>[8]</sup>。曾正清等<sup>[9]</sup>研究表明,在猪饲料中添加蚯蚓粉能够降低猪粪尿中干物质含量和吲哚浓度。为此,本试验拟探讨在饲料中单独添加蚯蚓粉、丝兰提取物及二者组合添加对生长猪生长性能、养分消化代谢以及粪尿发酵期间恶臭物质和有害气体排放的影响,为蚯蚓粉和丝兰提取物在养殖粪污除臭减排方面的应用提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

蚯蚓粉:粗蛋白质含量 $\geq 52.4\%$ ,干物质含量 $\geq 91.5\%$ ;丝兰提取物:皂角苷含量 $\geq 10.5\%$ 。

### 1.2 试验设计

采用双因素试验设计,将56头30~35 kg的健康杜长大(DLY)猪按照体重相近、性别一致等原则随机分为4组,每组14个重复,每个重复1头猪。4个组分别饲喂不同的饲料;对照组饲喂基础饲料,基础饲料为参照NRC(2012)配制的粉状配合饲料,其组成及营养水平见表1;另外3个组分别饲喂在基础饲料中添加0.500%蚯蚓粉(蚯蚓粉组)、0.012%丝兰提取物(丝兰提取物组)以及0.500%蚯蚓粉+0.012%丝兰提取物(蚯蚓粉+丝兰提取物组)的饲料。采用舍饲散养,自由饮水,自由采食(自动饲喂系统可准确记录每头猪每次的采食量),保证料槽随时有料。圈舍定期冲洗打扫,湿帘-风机系统控制舍内温热环境。

### 1.3 消化代谢试验

在饲养试验第61天,每个组挑选5头中等体况的猪进行消化代谢试验,代谢笼中猪只自由采食和饮水,预试期4 d,正试期4 d。正试期准确记录投料量、剩料量和采食量,采用全收粪法,每天完整收集猪粪便和尿液,置于冷库中保存。样品采集结束后将每头猪的粪便、尿液分别混合均匀,

四分法取新鲜粪样500 g,等比例取样法取尿样250 mL,分别加10%硫酸固氮,粪样放入(65 $\pm$ 5)℃的烘箱中烘至恒重,同时采集饲料样粉碎过40目筛。所有样品置于-4℃冰柜保存备用。

表1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	69.75
豆粕 Soybean meal	26.94
大豆油 Soybean oil	0.91
石粉 Limestone	1.12
磷酸氢钙 CaHPO <sub>4</sub>	0.13
微量元素预混料 Trace-mineral premix <sup>1)</sup>	0.50
维生素预混料 Vitamin premix <sup>1)</sup>	0.05
食盐 NaCl	0.30
氯化胆碱 Choline chloride (50%)	0.10
L-赖氨酸 L-Lys	0.17
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.03
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels <sup>2)</sup>	
消化能 DE/(MJ/kg)	14.38
代谢能 ME/(MJ/kg)	13.79
粗蛋白质 CP	17.52
钙 Ca	0.63
有效磷 AP	0.25
赖氨酸 Lys	0.88
蛋氨酸 Met	0.52
苏氨酸 Thr	0.51
色氨酸 Trp	0.15

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of the diet: VA 10 000 IU, VD 2 500 IU, VE 5 mg, VK 2.5 mg, VB<sub>1</sub> 2.5 mg, VB<sub>2</sub> 6 mg, VB<sub>6</sub> 3.5 mg, VB<sub>12</sub> 30 μg, 烟酸 nicotinic acid 25 mg, D-泛酸 D-antothenic acid 12 mg, 叶酸 folic acid 1.2 mg, 生物素 biotin 0.2 mg, Fe (as ferrous sulfate) 120 mg, Cu (as copper sulfate) 8 mg, Zn (as zinc sulfate) 120 mg, Mn (as manganese sulfate) 10 mg, Se (as sodium selenite) 0.2 mg, I (as potassium iodide) 0.2 mg。

2) 粗蛋白质和钙为实测值,其余为计算值。CP and Ca were measured values, while the others were calculated values.

### 1.4 发酵粪便试验

消化代谢试验结束后,06:00开始收集代谢笼中每个重复猪只的粪便和尿液,随排随收,持续至

第 3 天 06:00,将每次收集的粪尿放在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷库中保存,第 3 天早上收集结束后将同一只猪的粪、尿分别混合均匀,每头猪的粪尿混合物(粪便:尿液:蒸馏水=1:1:1)分装入 500 mL 的抽滤瓶,每瓶装入 300 g 混合样品,每头猪的混合样品共分装 6 瓶,共计分装 120 个抽滤瓶。装样后的抽滤瓶用橡胶塞塞紧,用凡士林进行密封,抽滤口用乳胶管插好,利用旋片式真空泵对抽滤瓶抽真空,每个抽滤瓶抽至真空环境后将末端乳胶管用止水夹夹紧。将处理完的抽滤瓶置于温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 55%的恒温恒湿培养箱中进行厌氧发酵,分别在发酵第 5、10、15、20、25 和 30 天测定抽滤瓶内发酵物的 pH、有机质和总氮含量以及氨气、硫化氢、乙酸、丙酸、丁酸、异戊酸、戊酸、吡啶、对甲酚和三甲基吡啶的浓度。

### 1.5 检测指标

**生长性能:**在试验第 1 天和第 81 天早上分别对每头猪空腹称重,在称重的前 1 天 17:30 停料并结算饲料,计算平均日增重(average daily gain, ADG)、平均日采食量(average daily feed intake, ADFI)和料重比(feed/gain, F/G)。

**养分消化代谢指标:**饲料和粪便中干物质含量采用常压恒温干燥法测定,参考 GB/T 6435—2006;有机质含量采用重铬酸钾滴定法测定,参照 NY 525—2012。饲料和粪便中粗蛋白质和尿氮含量采用凯氏定氮法测定,参照 GB/T 6432—1994。养分表观消化率和粗蛋白质表观代谢率的计算公式如下:

$$\text{某养分表观消化率}(\%) = 100 \times \frac{\text{采食量} \times \text{饲料中该养分含量} - \text{粪便总量} \times \text{粪便中该养分含量}}{\text{采食量} \times \text{饲料中该养分含量}};$$

$$\text{粗蛋白质表观代谢率}(\%) = 100 \times \frac{\text{采食量} \times \text{饲料中粗蛋白质含量} - \text{粪便总量} \times \text{粪便中粗蛋白质含量} - \text{尿液总量} \times \text{尿中粗蛋白质含量}}{\text{采食量} \times \text{饲料中粗蛋白质含量}}。$$

**挥发性脂肪酸浓度:**从每个抽滤瓶中取发酵物 4 mL 于 5 mL 的离心管中,在 10 000 r/min 下离心 10 min。用移液枪取离心后样品的上清液 2 mL 在 15 000 r/min 下离心 10 min,再次取离心后样品的上清液 1 mL 加 0.4 mL 的 5% 甲酸,装入 1.5 mL 的离心管,置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷冻过夜,常温

解冻 3 h 后在 15 000 r/min 下离心 10 min,用一次性 5 mL 注射器吸取上清液并经 0.45 mm 滤膜过滤,滤液供气相色谱分析。每个样品取 1  $\mu\text{L}$  滤液进入气相色谱仪,测定乙酸、丙酸、丁酸、异戊酸和戊酸的浓度。

**臭味物质浓度:**从每个抽滤瓶中取发酵物 2.2 g 于 5 mL 的离心管中,加入 2.2 mL 提取液(三氯甲烷:丙酮=1:1),摇匀,置于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅提取 1 h,每间隔 20 min 摇匀 1 次,提取结束后在 10 000 r/min 下离心 1 min,用一次性 5 mL 注射器吸取下层清液经 0.45 mm 滤膜过滤,滤液供气相色谱分析。每个样品取 1  $\mu\text{L}$  滤液进入气相色谱仪,测定吡啶、三甲基吡啶和对甲酚的浓度。

**氨气和硫化氢浓度:**用采气泵从每个抽滤瓶中抽取 100 mL 气体,用气体检测管测定抽样气体中氨气和硫化氢的浓度。

**总氮含量:**发酵物中总氮含量参照 GB/T 6432—1994,使用全自动凯氏定氮仪测定(KJELTEC 2300,上海)测定。

**有机质含量:**发酵物中有机质含量参照《有机肥料》(NY 525—2012),采用重铬酸钾容量法测定。

**碳氮比(C/N):**指有机碳的总含量与氮的总含量的比值,有机碳计算参考《有机肥料》(NY 525—2012)中的系数 1.724,即碳氮比=(有机碳/1.724)/总氮。

### 1.6 数据处理与分析

采用 SPSS 21.0 统计软件的 GLM 程序对数据进行单因素方差分析、Duncan 氏法多重比较以及双因素有重复方差分析, $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  分别为差异显著和极显著标准,试验数据以平均值(mean)和均值标准误(SEM)或者平均值 $\pm$ 标准差表示,采用 Graphpad Prism 7.0 进行数据图处理。

## 2 结果

### 2.1 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪生长性能的影响

由表 2 可知,单独添加蚯蚓粉对生长猪的末重、平均日采食量、料重比和平均日增重均无显著影响( $P > 0.05$ );单独添加丝兰提取物可显著降低生长猪的平均日采食量和料重比( $P < 0.05$ ),其料重比较对照组下降 17%,但对末重和平均日增重无显著影响( $P > 0.05$ );组合添加蚯蚓粉和丝兰提

取物可显著降低生长猪的平均日采食量 ( $P < 0.05$ ), 但对末重、平均日增重和料重比无显著影响 ( $P > 0.05$ )。

表 2 生长猪的生长性能

Table 2 Growth performance of growing pigs

项目 Items		初重 IBW/kg	末重 FBW/kg	平均日增重 ADG/kg	平均日采食量 ADFI/kg	料重比 F/G
组别 Groups	对照 Control	33.10	79.14	0.56	1.54	2.76
	蚯蚓粉 Earthworm powder	33.61	75.81	0.49	1.41	2.67
	丝兰提取物 Yucca extract	33.57	76.91	0.54	1.22	2.27
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	33.51	75.51	0.53	1.27	2.39
SEM		3.15	5.88	0.10	0.17	0.12
P 值 P-value	蚯蚓粉 Earthworm powder	0.790	0.071	0.435	0.119	0.439
	丝兰提取物 Yucca extract	0.820	0.669	0.982	0.003	0.002
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	0.790	0.059	0.120	0.021	0.143

## 2.2 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪养分消化代谢的影响

由表 3 可知, 单独添加蚯蚓粉或丝兰提取物对干物质和有机质表观消化率均没有显著影响 ( $P > 0.05$ ), 但能显著提高粗蛋白质表观消化率及粗蛋白质表观代谢率 ( $P < 0.05$ ), 其中蚯蚓粉组较

对照组分别提高了 4.8% 和 17.5%, 丝兰提取物组较对照组分别提高了 3.9% 和 17.0%。组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物对有机质表观消化率无显著提高作用 ( $P > 0.05$ ), 但能显著提高干物质和粗蛋白质表观消化率以及粗蛋白质表观代谢率 ( $P < 0.05$ ), 较对照组分别提高了 6.3%、6.5% 和 20.8%。

表 3 生长猪的养分消化代谢指标

Table 3 Nutrient digestion and metabolism indexes of growing pigs

项目 Items	表观消化率 Apparent digestibility			表观代谢率 Apparent metabolic rate	
	干物质 DM	有机质 OM	粗蛋白质 CP	粗蛋白质 CP	
组别 Groups	对照 Control	87.79	90.22	87.72	44.80
	蚯蚓粉 Earthworm powder	90.90	90.47	91.92	52.64
	丝兰提取物 Yucca extract	89.90	90.06	91.22	52.48
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	93.31	90.56	93.44	54.11
SEM	3.15	2.47	3.39	1.13	
P 值 P-value	蚯蚓粉 Earthworm powder	0.089	0.660	0.019	0.008
	丝兰提取物 Yucca extract	0.061	0.242	0.001	0.007
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	0.002	0.447	0.001	0.031

## 2.3 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间有机质、总氮含量和碳氮比的影响

由表 4 可知, 各组生长猪粪尿中总氮和有机质含量随着发酵时间的延长呈整体下降趋势。在发酵期间(除第 10 天外), 蚯蚓粉组粪尿中总氮含

量均显著高于其他组 ( $P < 0.05$ ), 其中发酵第 15 天时各试验组的总氮含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 并达到最高值; 在发酵第 5、10、15、20 天时, 各试验组的有机质含量均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。由上述结果可知, 单独添加丝兰提取物对

发酵期间粪尿中碳氮比有显著的增加作用,而单独添加蚯蚓粉对发酵期间粪尿的碳氮比有显著的降低作用。组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物对发酵

期间粪尿中总氮含量的协同增加作用显著,但对有机质含量及碳氮比的协同作用不显著。

表 4 生长猪粪尿发酵期间有机质、总氮含量及碳氮比变化

Table 4 Changes of organic matter, total nitrogen contents and C/N during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs

项目 Items	组别 Groups	发酵时间 Fermentation time/d					
		5	10	15	20	25	30
有机质 OM	对照 Control	74.67 <sup>c</sup>	74.82 <sup>d</sup>	69.27 <sup>bc</sup>	70.58 <sup>b</sup>	72.68 <sup>a</sup>	70.54 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	81.46 <sup>b</sup>	82.47 <sup>a</sup>	71.99 <sup>b</sup>	74.89 <sup>a</sup>	64.45 <sup>b</sup>	63.66 <sup>b</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	85.01 <sup>a</sup>	78.61 <sup>b</sup>	68.67 <sup>c</sup>	73.38 <sup>a</sup>	76.77 <sup>a</sup>	68.55 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	86.11 <sup>a</sup>	77.63 <sup>c</sup>	75.44 <sup>a</sup>	74.21 <sup>a</sup>	76.49 <sup>a</sup>	68.42 <sup>a</sup>
总氮 TN	对照 Control	2.68 <sup>d</sup>	2.75 <sup>b</sup>	2.73 <sup>b</sup>	2.64 <sup>b</sup>	2.61 <sup>b</sup>	2.31 <sup>b</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	3.00 <sup>a</sup>	2.76 <sup>b</sup>	3.04 <sup>a</sup>	2.95 <sup>a</sup>	2.53 <sup>a</sup>	2.77 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	2.86 <sup>c</sup>	2.70 <sup>c</sup>	3.02 <sup>a</sup>	2.81 <sup>b</sup>	2.54 <sup>b</sup>	2.45 <sup>b</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	2.94 <sup>b</sup>	2.94 <sup>a</sup>	3.06 <sup>a</sup>	2.80 <sup>b</sup>	2.72 <sup>a</sup>	2.66 <sup>a</sup>
碳氮比 C/N	对照 Control	16.16 <sup>b</sup>	15.80 <sup>c</sup>	14.70 <sup>a</sup>	15.53 <sup>a</sup>	16.15 <sup>ab</sup>	17.69 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	15.81 <sup>b</sup>	17.31 <sup>a</sup>	13.76 <sup>a</sup>	14.71 <sup>b</sup>	14.80 <sup>c</sup>	13.39 <sup>c</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	17.26 <sup>a</sup>	16.89 <sup>b</sup>	13.19 <sup>b</sup>	15.15 <sup>a</sup>	17.51 <sup>a</sup>	16.21 <sup>b</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	16.99 <sup>a</sup>	15.32 <sup>d</sup>	14.30 <sup>a</sup>	15.39 <sup>a</sup>	16.30 <sup>a</sup>	14.94 <sup>b</sup>

同列数据肩标不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 相同或无字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。下表同。

In the same column, values with different letter superscripts mean significant difference ( $P < 0.05$ ), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ( $P > 0.05$ ). The same as below.

## 2.4 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间挥发性脂肪酸浓度及 pH 的影响

由表 5 可知,在发酵前期(第 5~10 天),对照组和蚯蚓粉组粪尿中乙酸、丙酸及丁酸浓度显著高于丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组 ( $P < 0.05$ ),并达到最大值,同时对对照组与蚯蚓粉组粪尿中异戊酸和戊酸浓度差异不显著 ( $P > 0.05$ );发酵中期(第 15~20 天),丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组粪尿中乙酸、丙酸和丁酸浓度有所升高,并达到最大值,但仍显著低于对照组和蚯蚓粉组 ( $P < 0.05$ ),蚯蚓粉组和丝兰提取物组粪尿中戊酸和异戊酸浓度有所降低,但两者差异不显著 ( $P > 0.05$ );发酵后期(第 25~30 天),对照组和蚯蚓粉组粪尿中乙酸、丙酸及丁酸浓度显著高于丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组 ( $P < 0.05$ )。从整个发酵过程来看,各组粪尿的 pH 均基本呈现先降低后趋于稳定的趋势,其中对照组和蚯蚓粉组在发酵第 10 天达到最小值,丝兰提取物组和蚯

蚓粉+丝兰提取物组在发酵第 15 天达到最小值。从发酵期间各组粪尿中挥发性脂肪酸浓度和 pH 整体变化来看,单独添加丝兰提取物或组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物能降低粪尿中乙酸、丙酸和丁酸浓度,缓解 pH 的降低速率,但单独添加丝兰提取物会增加粪尿中异戊酸浓度。

## 2.5 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间对甲酚、吲哚与三甲基吲哚浓度的影响

由表 6 可知,在发酵前期和中期(第 5~20 天),各试验组粪尿中对甲酚(丝兰提取物组第 10 天除外)和三甲基吲哚浓度(蚯蚓粉组和丝兰提取物组第 10 天除外)显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ),其中蚯蚓粉组的对甲酚浓度最低,并显著低于丝兰提取物组 ( $P < 0.05$ );蚯蚓粉组和丝兰提取物组粪尿中吲哚浓度显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。在发酵后期(第 25~30 天),蚯蚓粉组和丝兰提取物组粪尿中三甲基吲哚和对甲酚浓度有所升高,并在发酵第 30 天达到最大值,且这 2 组的三甲基吲哚浓

度显著高于对照组 ( $P<0.05$ ); 丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组粪尿中吡啶浓度显著高于对照组 ( $P<0.05$ )。上述结果说明, 整个发酵期间, 单独添加丝兰提取物或蚯蚓粉以及二者联合添加均能降低粪尿发酵过程中对甲酚的产生, 且单独添

加蚯蚓粉或丝兰提取物均会促进粪尿发酵过程中吡啶和三甲基吡啶的产生, 而组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物则会降低粪尿发酵过程中吡啶和三甲基吡啶的产生。

表 5 生长猪粪尿发酵期间挥发性脂肪酸浓度及 pH 变化

Table 5 Changes of pH and volatile fatty acid concentrations during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs

项目 Items	组别 Groups	发酵时间 Fermentation time/d					
		5	10	15	20	25	30
乙酸 Acetic acid/ (mg/mL)	对照 Control	9.58 <sup>c</sup>	13.58 <sup>a</sup>	13.19 <sup>a</sup>	12.40 <sup>a</sup>	13.14 <sup>a</sup>	12.09 <sup>ab</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	11.58 <sup>a</sup>	13.64 <sup>a</sup>	11.74 <sup>b</sup>	11.68 <sup>ab</sup>	12.62 <sup>a</sup>	13.31 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	8.12 <sup>d</sup>	9.49 <sup>b</sup>	10.39 <sup>c</sup>	10.43 <sup>b</sup>	8.98 <sup>c</sup>	7.96 <sup>c</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	10.32 <sup>b</sup>	7.92 <sup>c</sup>	9.94 <sup>c</sup>	10.31 <sup>b</sup>	10.51 <sup>b</sup>	11.21 <sup>b</sup>
	对照 Control	2.21 <sup>b</sup>	2.64 <sup>a</sup>	2.48 <sup>a</sup>	2.36 <sup>a</sup>	2.40 <sup>a</sup>	2.40 <sup>b</sup>
丙酸 Propionic acid/ (mg/mL)	蚯蚓粉 Earthworm powder	2.38 <sup>a</sup>	2.36 <sup>b</sup>	2.27 <sup>b</sup>	2.33 <sup>a</sup>	2.41 <sup>a</sup>	2.77 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	1.70 <sup>c</sup>	1.71 <sup>c</sup>	1.76 <sup>d</sup>	1.99 <sup>b</sup>	1.70 <sup>c</sup>	1.56 <sup>d</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	1.26 <sup>d</sup>	1.58 <sup>c</sup>	2.03 <sup>c</sup>	1.99 <sup>b</sup>	2.03 <sup>b</sup>	2.18 <sup>c</sup>
	对照 Control	2.99 <sup>a</sup>	3.00 <sup>b</sup>	2.60 <sup>b</sup>	2.93 <sup>a</sup>	2.86 <sup>a</sup>	3.51 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	2.72 <sup>b</sup>	3.58 <sup>a</sup>	3.18 <sup>a</sup>	2.80 <sup>a</sup>	2.84 <sup>a</sup>	2.67 <sup>b</sup>
丁酸 Butyric acid/ (mg/mL)	丝兰提取物 Yucca extract	1.64 <sup>c</sup>	1.80 <sup>c</sup>	1.73 <sup>c</sup>	1.96 <sup>b</sup>	1.52 <sup>b</sup>	1.62 <sup>c</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	1.36 <sup>d</sup>	1.23 <sup>d</sup>	1.82 <sup>c</sup>	1.67 <sup>c</sup>	1.66 <sup>b</sup>	1.84 <sup>c</sup>
	对照 Control	0.64 <sup>a</sup>	0.41 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.55 <sup>a</sup>	0.32 <sup>b</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	0.60 <sup>a</sup>	0.44 <sup>a</sup>	0.33 <sup>c</sup>	0.37 <sup>c</sup>	0.36 <sup>b</sup>	0.47 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	0.53 <sup>b</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.36 <sup>c</sup>	0.37 <sup>c</sup>	0.32 <sup>c</sup>	0.32 <sup>b</sup>
戊酸 Valeric acid/ (mg/mL)	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	0.62 <sup>a</sup>	0.17 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>	0.44 <sup>b</sup>	0.36 <sup>b</sup>	0.22 <sup>c</sup>
	对照 Control	1.16 <sup>a</sup>	1.01 <sup>b</sup>	1.09 <sup>b</sup>	1.12 <sup>b</sup>	0.79 <sup>c</sup>	0.91 <sup>c</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	1.19 <sup>a</sup>	1.23 <sup>b</sup>	0.92 <sup>c</sup>	1.25 <sup>ab</sup>	1.38 <sup>a</sup>	1.58 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	1.26 <sup>a</sup>	1.57 <sup>a</sup>	1.53 <sup>a</sup>	1.15 <sup>b</sup>	1.45 <sup>a</sup>	1.41 <sup>ab</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	1.09 <sup>a</sup>	0.77 <sup>c</sup>	0.92 <sup>c</sup>	1.41 <sup>a</sup>	1.03 <sup>b</sup>	1.16 <sup>b</sup>
异戊酸 Isovaleric acid/ (mg/mL)	对照 Control	7.40 <sup>a</sup>	6.10 <sup>c</sup>	7.00 <sup>b</sup>	8.00	7.40 <sup>a</sup>	7.20
	蚯蚓粉 Earthworm powder	7.40 <sup>a</sup>	6.27 <sup>b</sup>	7.10 <sup>b</sup>	7.57	7.20 <sup>a</sup>	7.20
	丝兰提取物 Yucca extract	7.40 <sup>a</sup>	7.03 <sup>a</sup>	7.40 <sup>a</sup>	7.80	7.10 <sup>b</sup>	7.10
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	7.10 <sup>b</sup>	7.03 <sup>a</sup>	7.10 <sup>b</sup>	7.70	7.20 <sup>a</sup>	7.10
	pH						

## 2.6 蚯蚓粉、丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间氨气及硫化氢浓度的影响

由表 7 可知, 在发酵期间, 各试验组粪尿中硫化氢浓度整体呈现上升趋势, 并在第 20~25 天内出现平缓期; 而粪尿中氨气浓度则呈现先升高后

降低趋势, 并在第 10 天达到最高。在相同发酵时间点, 各试验组粪尿中硫化氢浓度均显著低于对照组 ( $P<0.05$ ), 以蚯蚓粉+丝兰提取物组最低, 并在发酵前期 (第 5~10 天) 的协同效应显著 ( $P<0.05$ )。在发酵前期和中期 (第 5~20 天), 各试验

组粪尿中氨气浓度低于对照组,且在发酵第 10 天 3 个试验组与对照组的差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ );在发酵后期(第 25~30 天),各组粪尿中氨气浓度差异不显著 ( $P > 0.05$ )。上述结果说明,在

整个发酵期间,单独添加丝兰提取物或蚯蚓粉均能降低粪尿发酵过程中的氨气和硫化氢的产生,二者联合添加时协同降低效应不显著。

表 6 生长猪粪尿发酵期间对甲酚、吲哚与三甲基吲哚浓度变化

Table 6 Changes of *p*-cresol, indole and 3-methylindole concentrations during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs

项目 Items	组别 Groups	发酵时间 Fermentation time/d					
		5	10	15	20	25	30
对甲酚 <i>p</i> -cresol	对照 Control	473.07 <sup>a</sup>	412.11 <sup>a</sup>	446.21 <sup>a</sup>	411.97 <sup>a</sup>	430.77 <sup>a</sup>	425.90
	蚯蚓粉 Earthworm powder	314.20 <sup>c</sup>	274.73 <sup>b</sup>	244.02 <sup>d</sup>	301.70 <sup>cb</sup>	374.64 <sup>b</sup>	404.13
	丝兰提取物 Yucca extract	429.57 <sup>b</sup>	382.22 <sup>a</sup>	375.50 <sup>b</sup>	363.88 <sup>b</sup>	437.88 <sup>a</sup>	438.54
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	344.04 <sup>c</sup>	258.26 <sup>b</sup>	313.74 <sup>c</sup>	326.76 <sup>b</sup>	371.73 <sup>b</sup>	369.33
吲哚 Indole	对照 Control	61.83 <sup>b</sup>	36.44 <sup>b</sup>	34.61 <sup>b</sup>	36.61 <sup>c</sup>	35.03 <sup>c</sup>	27.96 <sup>c</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	102.05 <sup>a</sup>	72.58 <sup>a</sup>	53.30 <sup>a</sup>	40.28 <sup>b</sup>	35.45 <sup>c</sup>	24.80 <sup>c</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	93.50 <sup>a</sup>	78.98 <sup>a</sup>	57.75 <sup>a</sup>	63.46 <sup>a</sup>	71.25 <sup>a</sup>	46.74 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	15.48 <sup>c</sup>	39.23 <sup>b</sup>	36.42 <sup>b</sup>	38.17 <sup>c</sup>	44.37 <sup>b</sup>	32.29 <sup>b</sup>
三甲基吲哚 3-methylindole	对照 Control	80.47 <sup>a</sup>	75.14 <sup>a</sup>	71.86 <sup>a</sup>	60.22 <sup>a</sup>	54.66 <sup>a</sup>	52.78 <sup>b</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	61.21 <sup>b</sup>	69.49 <sup>a</sup>	46.24 <sup>c</sup>	40.47 <sup>b</sup>	45.78 <sup>b</sup>	69.84 <sup>a</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	49.37 <sup>c</sup>	69.28 <sup>a</sup>	36.58 <sup>d</sup>	38.00 <sup>b</sup>	45.58 <sup>b</sup>	76.01 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	44.37 <sup>c</sup>	45.07 <sup>b</sup>	51.14 <sup>b</sup>	30.80 <sup>b</sup>	30.54 <sup>c</sup>	45.19 <sup>b</sup>

表 7 生长猪粪尿混合物发酵期间氨气和硫化氢浓度变化

Table 7 Changes of ammonia and hydrogen sulfide concentrations during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs

项目 Items	组别 Groups	发酵时间 Fermentation time/d					
		5	10	15	20	25	30
硫化氢 Hydrogen sulfide	对照 Control	561.66 <sup>a</sup>	1 771.00 <sup>a</sup>	1 270.06 <sup>a</sup>	1 776.06 <sup>a</sup>	1 786.18 <sup>a</sup>	759.00 <sup>a</sup>
	蚯蚓粉 Earthworm powder	207.46 <sup>b</sup>	161.92 <sup>c</sup>	73.37 <sup>c</sup>	278.81 <sup>b</sup>	260.59 <sup>b</sup>	327.38 <sup>b</sup>
	丝兰提取物 Yucca extract	121.44 <sup>b</sup>	223.15 <sup>b</sup>	182.16 <sup>b</sup>	256.04 <sup>b</sup>	271.72 <sup>b</sup>	227.70 <sup>c</sup>
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	48.07 <sup>c</sup>	73.37 <sup>d</sup>	141.68 <sup>b</sup>	258.57 <sup>b</sup>	275.77 <sup>b</sup>	184.69 <sup>c</sup>
氨气 Ammonia	对照 Control	24.04 <sup>a</sup>	41.75 <sup>a</sup>	10.88 <sup>a</sup>	27.83 <sup>a</sup>	11.13	12.90
	蚯蚓粉 Earthworm powder	22.77 <sup>a</sup>	18.98 <sup>b</sup>	8.35 <sup>a</sup>	15.94 <sup>b</sup>	10.12	10.88
	丝兰提取物 Yucca extract	18.22 <sup>a</sup>	20.24 <sup>b</sup>	5.31 <sup>b</sup>	11.39 <sup>b</sup>	10.37	10.12
	蚯蚓粉+丝兰提取物 Earthworm powder+yucca extract	8.86 <sup>b</sup>	21.51 <sup>b</sup>	7.08 <sup>a</sup>	12.14 <sup>b</sup>	11.64	9.87

### 3 讨论

#### 3.1 蚯蚓粉和丝兰提取物对生长猪生长性能的影响

蚯蚓粉和丝兰提取物作为饲料添加剂,在畜

牧养殖领域应用较为广泛<sup>[10]</sup>。本研究发现,在生长猪饲料中单独添加 0.500% 蚯蚓粉对于生长猪的平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著影响,单独添加 0.012% 丝兰提取物显著降低了生

长猪的平均日采食量和料重比,对平均日增重无显著影响;而组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物仅显著降低了生长猪的平均日采食量。张泳楨等<sup>[11]</sup>的研究结果发现,在30~40 kg生长猪饲料中添加0.33%、0.66%的蚯蚓粉对猪只生长性能无显著影响,而添加0.99%的蚯蚓粉显著提高了猪只的平均日增重,降低了料重比;Panetta等<sup>[12]</sup>在41 kg生长猪饲料中添加0.062 5%的丝兰提取物,结果发现对平均日增重、平均日采食量和料重比无显著影响;而徐麒麟等<sup>[13]</sup>和Gebhardt等<sup>[14]</sup>的研究结果显示,饲料中添加蚯蚓提取物或者丝兰皂苷,能显著提高猪只的平均日增重,降低料重比。造成这种结果的差异可能与蚯蚓粉和丝兰提取物的添加量不同有关。

### 3.2 蚯蚓粉和丝兰提取物对生长猪养分消化代谢的影响

动物对饲料中养分的吸收利用不仅决定动物的生长性能,还是粪便恶臭物质产生量的一个重要影响因素<sup>[15]</sup>。研究表明,蚯蚓粉和丝兰提取物对饲料养分的消化吸收均有促进作用<sup>[16-17]</sup>。朱宇旌等<sup>[18]</sup>在饲料中添加5%蚯蚓粉后显著提高了肉鸡的粗蛋白质、粗脂肪表观代谢率。丁晓等<sup>[19]</sup>在饲料中添加100 mg/kg蚯蚓粉后显著提高了肉鸡的粗蛋白质表观代谢率和表观消化率。丝兰提取物中的皂角苷可增强动物肠道内微生物的作用与繁殖,促进蛋白质的消化吸收,从而起到氮减排作用<sup>[20-23]</sup>。Min等<sup>[24]</sup>研究显示,在饲料中添加120 mg/kg丝兰提取物可显著提高生长猪的干物质、粗蛋白质、必需氨基酸表观消化率;以上这些结果均与本研究结果相一致。在本研究中发现,添加蚯蚓粉或者丝兰提取物,对于生长猪的干物质、有机质、粗蛋白质表观消化率以及粗蛋白质表观代谢率,较对照组均有不同程度的提高,其中粗蛋白质表观消化率及表观代谢率的提升效果显著;当两者组合添加时对于饲料中养分的消化吸收具有协作提升效应。这可能是由于丝兰提取物与蚯蚓粉均能显著提升动物十二指肠绒毛长度和隐窝深度,提高蛋白酶、脂肪酶活性<sup>[25]</sup>,而蚯蚓粉和丝兰提取物组合添加对促进动物肠道对蛋白质消化吸收起到了一定的协同作用。

### 3.3 蚯蚓粉和丝兰提取物对生长猪粪尿混合物发酵期间有机质和总氮含量的影响

厌氧发酵作为畜禽粪尿处理的有效途径之

一<sup>[26-28]</sup>,粪便中有机质和总氮含量是影响其发酵效果的2个重要因素<sup>[29-30]</sup>。贾月慧等<sup>[31]</sup>研究发现,猪粪便在厌氧发酵过程中有机质含量会随着发酵时间的延长而降低。这与本试验结果相一致。随着厌氧发酵时间的延长,粪尿中有机质和总氮含量均整体呈现下降趋势,这主要是由于粪便中的有机质和氮素被厌氧微生物有效利用,以甲烷、硫化氢以及挥发性有机物等形式损失。碳氮比是粪便厌氧发酵产气的重要考核指标,当厌氧发酵中碳氮比为16时<sup>[32-33]</sup>,较适合厌氧微生物能源利用转化,促进发酵产气量。由于单一畜禽粪便原料本身缺少碳源,并不利于厌氧发酵产气,尤其是新鲜猪粪的碳氮比相对于牛粪、鸭粪更低,一般在12左右。而本试验对发酵粪尿中成分测定后发现,单独添加丝兰提取物能增加发酵粪尿中有机质含量,能维持发酵期间的平均碳氮比在16.1左右,有利于发酵后期有机气体(甲烷等)生成,减少挥发性氨气产生;而蚯蚓粉和丝兰提取物的组合添加虽能增加发酵粪尿中的碳氮比,但协同效果不显著。

### 3.4 蚯蚓粉和丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间pH、挥发性脂肪酸与恶臭物质生成的影响

粪尿厌氧发酵过程中必然会经历水解发酵、产氢产酸以及产甲烷3个阶段<sup>[34]</sup>,而过高浓度的挥发性脂肪酸对厌氧发酵水解以及后期产甲烷阶段具有一定抑制作用<sup>[35-36]</sup>。在本试验的厌氧发酵期间,蚯蚓粉组和对照组所产生的乙酸、丙酸以及丁酸浓度显著高于丝兰提取物组以及蚯蚓粉+丝兰提取物组。当粪尿发酵在水解阶段的微生物会将有机物大分子降解呈小分子,而产氢产酸则是将水解发酵产生的中间产物分解成大量的乙酸、丙酸和原子氢等产物,以刺激甲烷菌繁殖。从各试验组挥发性脂肪酸浓度随发酵时间的变化可以看出,对照组和蚯蚓粉组在产氢产酸期在发酵第10天左右,而丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组则在发酵第15~20天。由此可见,丝兰提取物组生长猪粪尿在发酵期间的挥发性脂肪酸生成速率慢于对照组和蚯蚓粉组。但当挥发性脂肪酸的生成速度大于其被甲烷菌利用而生成甲烷的速度,会导致发酵粪尿pH降低,从而抑制甲烷产生。从各组的pH发现,对照组和蚯蚓粉组粪尿在产氢产酸期pH在6.0~6.4,而丝兰提取物组和蚯蚓粉+丝兰提取物组产氢产酸期pH在6.6~7.0。而畜

禽粪尿厌氧发酵 pH 在 6.8~7.4 较为有利<sup>[37-39]</sup>,其中猪粪尿在发酵过程中的产酸尤为明显,一般发酵液 pH 会降至 6.4 左右,从而严重制约产气<sup>[40-41]</sup>,这与本研究的结果相一致。从厌氧发酵产生的粪臭素浓度变化来看,蚯蚓粉能显著降低粪尿在发酵期间产生的对甲酚,这可能是蚯蚓粉能够促进畜禽肠道对氨基酸的消化吸收,降低了粪尿中氨基酸的含量有关;丝兰提取物和蚯蚓粉均能显著降低粪尿发酵后期(第 25~30 天)三甲基吡啶浓度,增加吡啶浓度,这可能与这 2 组的发酵液后期 pH 升高至 7.7~8.0,促进了大部分色氨酸转化成吡啶,抑制了色氨酸转化为三甲基吡啶有关;此外,还可能是蚯蚓粉中的抗菌肽以及丝兰提取物中的抑菌成分抑制了粪尿发酵过程中的腐败菌,从而降低了甲酚和三甲基吡啶的产生<sup>[42-44]</sup>。综上所述,丝兰提取物对于发酵期间生长猪粪尿的过量产酸有一定的抑制作用,有利于猪粪尿发酵期间产甲烷菌的生长;蚯蚓粉则能降低发酵期间生长猪粪尿中对甲酚和三甲基吡啶浓度;而组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物对于发酵期间生长猪粪尿挥发性脂肪酸以及恶臭物质产量有协同降低作用。

### 3.5 蚯蚓粉和丝兰提取物对生长猪粪尿发酵期间有害气体生成的影响

猪粪尿厌氧发酵产生的氨气主要来源氨基酸的失氨作用和尿素的分解<sup>[45-48]</sup>。本试验中,各组氨气产生的高峰期在发酵第 10 和 20 天。当氨气浓度到达第 1 个高峰期(发酵第 10 天)之后,开始呈波动下降趋势,这可能是尿液与粪便混合初期,尿液中的尿素被粪便中的脲酶降解释放出氨气;而粪便中的含氮物质被降解的速度相对较慢<sup>[49]</sup>,释放的时间相对尿素较长。因此,在发酵第 20 天粪尿中含氮物被微生物降解产生氨气,达到氨气产生的第 2 个高峰期。而大量研究报道,丝兰提取物中皂甙成分可调节肠道,促进动物对于氮素等养分的消化吸收,从而可有效减少动物粪便中氨气、硫化氢等有害气体排放<sup>[50-52]</sup>,Chepete 等<sup>[53]</sup>研究发现,鸡饲料中添加 100 mg/kg 的丝兰提取物能减少粪便中 28%~44% 的氨气排放量;梁国旗等<sup>[54]</sup>研究显示,在猪饲料中添加丝兰提取物能降低尿素氮的分解速度和抑制可溶性硫化的产生,进而降低氨气和硫化氢的产生。王金旭等<sup>[55]</sup>在猪饲料中添加 0.02% 丝兰提取物后,舍内氨气浓度

降低 19.1%,硫化氢浓度降低 13.5%。本试验结果与上述研究结果相一致。在整个发酵期间,单独添加蚯蚓粉能显著降低生长猪粪尿中氨气和硫化氢浓度,而组合添加蚯蚓粉和丝兰提取物则有显著协同降低效应。目前关于蚯蚓粉在饲料除臭方面的研究尚少,但蚯蚓粪在填料除臭、堆肥除臭方面的应用较多<sup>[56]</sup>,尚丽勤<sup>[57]</sup>在蚯蚓粪中分离出 7 株除硫的细菌与 4 株除硫的真菌,6 株除氨的细菌与 3 株除氨的真菌,且王颂萍<sup>[58]</sup>研究表明,用蚯蚓粪作为鸡舍垫料,对鸡舍中硫化氢和氨气的去除率可分别达到 72% 和 33%。因此,蚯蚓粉对发酵粪尿中氨气和硫化氢的抑制效果可能与其中含有的微生物相关,具体原因尚需要进一步研究。

## 4 结 论

饲料中单独添加蚯蚓粉或丝兰提取物能促进生长猪对蛋白质的消化吸收,减少粪尿发酵期间恶臭物质及有害气体的产生,二者组合添加能提高发酵粪尿的生物质能源产生,协同降低粪尿发酵期间挥发性脂肪酸、恶臭物质和有害气体的产生。因此,蚯蚓粉和丝兰提取物组合饲料添加剂可作为源头减排技术,有效减少养殖粪污有害物质排放,有助于畜禽粪污资源化处理利用。

### 参考文献:

- [1] HUTCHISON M L, WALTERS L D, AVERY S M, et al. Levels of zoonotic agents in British livestock manures[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2004, 39(2): 207-214.
- [2] BROOKS J P, MCLAUGHLIN M R, GERBA C P, et al. Land application of manure and class B biosolids: an occupational and public quantitative microbial risk assessment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6): 2009-2023.
- [3] 罗莹莹, 黄小燕, 王根虎. 丝兰提取物在猪生产中的应用[J]. *中国饲料*, 2017(22): 42-44.  
LUO Y Y, HUANG X Y, WANG G H. Application of yucca schidigera extract in pig production[J]. *China Feed*, 2017(22): 42-44. (in Chinese)
- [4] ADEGBEYE M J, ELGHANDOUR M M M Y, CEDILLO MONROY J, et al. Potential influence of yucca extract as feed additive on greenhouse gases emission for a cleaner livestock and aquaculture farming-A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118074.

- [ 5 ] SUN D S, JIN X, SHI B L, et al. Effects of *yucca schidigera* on gas mitigation in livestock production: a review [ J ]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2017, 60: e17160359.
- [ 6 ] 王俐, 张红星, 朱鹤岩. 益生菌和丝兰提取物降低猪舍有害气体浓度的效果试验 [ J ]. 饲料工业, 2008, 28(23): 29-31.  
WANG L, ZHANG H X, ZHU H Y. Study on probiotic and yucca distill matter reduce thickness of piggery [ J ]. Feed Industry, 2008, 28(23): 29-31. (in Chinese)
- [ 7 ] MATUSIAK K, OLEKSY M, BOROWSKI S, et al. The use of *Yucca schidigera* and microbial preparation for poultry manure deodorization and hygienization [ J ]. Journal of Environmental Management, 2016, 170: 50-59.
- [ 8 ] 孙朋朋, 宋春阳. 蚯蚓饲料在动物生产中的应用 [ J ]. 中国饲料, 2014(4): 38-40, 43.  
SUN P P, SONG C Y. Application of earthworm feed in animal production [ J ]. China Feed, 2014(4): 38-40, 43. (in Chinese)
- [ 9 ] 曾正清. 蚯蚓和乳酸菌 (L4) 对猪粪尿臭气浓度和免疫机能的影响及其机理研究 [ D ]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2003.  
ZENG Z Q. Effects of lactobacillus (L4) and earthworm on the concentration and immune function of pig feces and urine odour and its mechanism [ D ]. Ph.D. Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [ 10 ] 宋宇琨, 何俊. 4种动物性蛋白质饲料的营养特性及其在畜禽养殖中的应用 [ J ]. 动物营养学报, 2019, 31(1): 109-118.  
SONG Y K, HE J. Nutritional characteristics of four animal protein feeds and their application in livestock and poultry breeding [ J ]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 109-118. (in Chinese)
- [ 11 ] 张泳楨, 吴华东, 吴武平, 等. 蚯蚓粉替代日粮中部分豆粕对生长猪生产性能和免疫指标的影响 [ J ]. 饲料工业, 2016, 37(3): 22-25.  
ZHANG Y Z, WU H D, WU W P, et al. Effect of earthworm powder to replace part of soybean meal in the diet on the production performance and immune indexes of growth pig [ J ]. Feed Industry, 2016, 37(3): 22-25. (in Chinese)
- [ 12 ] PANETTA D M, POWERS W J, XIN H, et al. Nitrogen excretion and ammonia emissions from pigs fed modified diets [ J ]. Journal of Environmental Quality, 2006, 34(5): 1297-1308.
- [ 13 ] 徐麒麟, 吴永胜, 朱佳文, 等. 蚯蚓提取物对成华猪生长性能、血清生化指标、抗氧化能力及免疫功能的影响 [ J ]. 中国饲料, 2019(13): 42-46.  
XU Q L, WU Y S, ZHU J W, et al. Effects of earthworm extract on growth performance, serum biochemical index, antioxidant capacity and immune function of *Chenghua* pigs [ J ]. China Feed, 2019(13): 42-46. (in Chinese)
- [ 14 ] GEBHARDT J T, WOODWORTH J C, TOKACH M D, et al. Effect of dietary chromium propionate and *Yucca schidigera* on finishing pig growth performance [ J ]. Journal of Animal Science, 2018, 96(Suppl. 2): 122.
- [ 15 ] 刘志云, 钟晓霞, 谢跃伟, 等. 发酵玉米-豆粕型全价饲料对生长猪生长性能、粪便臭味物质和菌群区系的影响 [ J ]. 畜牧兽医学报, 2018, 49(6): 1169-1177.  
LIU Z Y, ZHONG X X, XIE Y W, et al. Effects of fermented corn-soybean complete feed on the growth performance, odor concentration and bacterial community in faeces of growing pigs [ J ]. Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2018, 49(6): 1169-1177. (in Chinese)
- [ 16 ] 王德凤, 吴仙, 李莉娜, 等. 蚯蚓蛋白饲料饲养生长肥育猪的饲用价值评定研究 [ J ]. 饲料工业, 2014, 35(11): 31-35.  
WANG D F, WU X, LI L N, et al. Study on the feeding value of growing pig raising earthworm protein feed [ J ]. Feed Industry, 2014, 35(11): 31-35. (in Chinese)
- [ 17 ] DEDEKE G A, OWA S O, OLURIN K B, et al. Partial replacement of fish meal by earthworm meal (*Libyodrilus violaceus*) in diets for African catfish, *Clarias gariepinus* [ J ]. International Journal of Fisheries and Aquaculture, 2013, 5(9): 229-223.
- [ 18 ] 朱宇旌, 李维, 张勇, 等. 蚯蚓粉对肉鸡生长性能、营养物质代谢及免疫功能的影响 [ J ]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(6): 695-700.  
ZHU Y J, LI W, ZHANG Y, et al. Effect of earthworms powder on growth performance, metabolic rate and immune functions of broilers [ J ]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(6): 695-700. (in Chinese)
- [ 19 ] 丁晓, 杨在宾, 姜淑贞, 等. 八角抽提油和蚯蚓粉对肉鸡肠道发育和养分利用率的影响 [ J ]. 中国畜牧杂志, 2018, 54(2): 80-86.

- DING X, YANG Z B, JIANG S Z, et al. Effects of extractions of star anise and earthworms powder on intestinal development and nutrients utilization of broilers [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2018, 54 (2): 80-86. (in Chinese)
- [20] BAR A L. Effect of dietary *Yucca schidigera* extract (de-orodrase) on environmental ammonia and growth performance of chickens and rabbits [J]. Journal of Animal Science, 1993, 71 (Suppl.1): 114.
- [21] GREER E B, LEWIS C E, CROFT M G. Mineral and vitamin supplementation of diets for growing pigs. 4. Effects of copper, zinc and iron supplements in a wheat/animal protein diet on performance, liver mineral stores and backfat quality [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, 1979; 19(98): 312-317.
- [22] AYOUB M M, AHMED H A, SADEK K M, et al. Effects of liquid yucca supplementation on nitrogen excretion, intestinal bacteria, biochemical and performance parameters in broilers [J]. Animals, 2019, 9 (12): 1097.
- [23] 陈丹蝶, 黄艳玲, LIN X. 丝兰提取物在动物饲料中应用的研究进展 [J]. 中国饲料, 2020 (3): 46-50.  
CHEN D D, HUANG Y L, LIN X. Research progress of yucca extract in animal feed [J]. China Feed, 2020 (3): 46-50. (in Chinese)
- [24] MIN T S, KIM J D, HYUN Y, et al. Effects of environmentally friendly agents on growth performance, nutrient digestibility, nutrient excretion and carcass characteristics in growing-finishing pigs [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2001, 14 (4): 540-547.
- [25] 苏俊玲, 史彬林, 岳远西, 等. 丝兰提取物对肉仔鸡消化代谢功能的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, 28 (10): 3284-3291.  
SU J L, SHI B L, YUE Y X, et al. Effects of *Yucca schidigera* extract on digestive and metabolic functions of broilers [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28 (10): 3284-3291. (in Chinese)
- [26] DAS D, VEZIROĞLU T N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26 (1): 13-28.
- [27] 王宇哲, 陆海. 厌氧发酵产氢影响因素及效能分析研究进展 [J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34 (3): 77-81.  
WANG Y Z, LU H. Research process on influencing factors and efficiency analysis of hydrogen production from anaerobic fermentation [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2017, 34 (3): 77-81. (in Chinese)
- [28] 代东梁, 韩相奎, 李广, 等. 污泥厌氧发酵产氢产酸的影响因素分析 [J]. 中国给水排水, 2014, 30 (15): 11-13, 19.  
DAI D L, HAN X K, LI G, et al. Analysis on influencing factors of hydrogen and acid production from anaerobic fermentation of sludge [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (15): 11-13, 19. (in Chinese)
- [29] 史金才, 廖新伟, 吴银宝. 4 种畜禽粪便厌氧发酵产甲烷特性研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (3): 632-636.  
SHI J C, L X D, WU Y B. Methane generation during anaerobic fermentation of four livestock slurries [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18 (3): 632-636. (in Chinese)
- [30] 张河民. 畜禽粪污厌氧消化研究进展 [J]. 广东化工, 2019, 46 (19): 117-118.  
ZHANG H M. Progress in anaerobic digestion of livestock and poultry manure [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46 (19): 117-118. (in Chinese)
- [31] 贾月慧, 刘克锋, 王红利, 等. 不同菌剂对猪粪堆腐中有机质含量的影响 [J]. 北京农学院学报, 2008 (3): 71-74.  
JIA Y H, LIU K F, WANG H L, et al. Effects of different microbes on organic matter content of pig muck [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2008 (3): 71-74. (in Chinese)
- [32] 沈飞, 李汉广, 钟斌, 等. 碳氮比对稻草和猪粪生物处理及厌氧消化的影响 [J]. 环境科学学报, 2017, 37 (11): 4212-4219.  
SHEN F, LI H G, ZHNG B, et al. Effects of carbon to nitrogen ratio on biological pretreatment and anaerobic digestion of rice straw and pig manure [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (11): 4212-4219. (in Chinese)
- [33] 沈飞, 史晶亮, 李汉广, 等. 碳氮比对猪粪和稻秆协同生物降解的影响 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (4): 2499-2504.  
SHEN F, SHI J L, LI H G. Effects of carbon to nitrogen ratio on synergistic degradation of pig manure and rice straw [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (4): 2499-2504. (in Chinese)
- [34] 乔小珊. 总固体浓度、碳氮比和水力停留时间对奶牛粪便厌氧发酵产气及其沼液性质的影响 [D]. 硕士

- 学位论文.重庆:西南大学,2014.
- QIAO X S.Effect of total solids concentration, carbon nitrogen ratio and hydraulic retention time of dairy cattle manure on biogas and its slurry properties [ D ]. Master's Thesis. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese)
- [ 35 ] 高雅. Fe<sup>2+</sup> 对厌氧发酵过程中 VFA 和 SS 的影响 [ J ]. 绿色科技, 2017 ( 2 ): 43-44.
- GAO Y.Effects of Fe<sup>2+</sup> on VFA and SS during anaerobic fermentation process [ J ]. Journal of Green Science and Technology, 2017 ( 2 ): 43-44. (in Chinese)
- [ 36 ] 马琳, 王晋, 符波, 等. 顶空 CO<sub>2</sub> 对有机物厌氧发酵产挥发性脂肪酸的影响 [ J ]. 中国环境科学, 2012, 32 ( 4 ): 635-639.
- MA L, WANG J, FU B, et al. Effects of CO<sub>2</sub> in headspace of bioreactor on volatile fatty acids generation from organic matters by anaerobic fermentation [ J ]. China Environmental Science, 2012, 32 ( 4 ): 635-639. (in Chinese)
- [ 37 ] 龚舒静, 段青松, 杨姝, 等. 不同发酵条件对杂交狼尾草厌氧发酵产沼气的的影响 [ J ]. 中国沼气, 2014, 32 ( 6 ): 26-32, 73.
- GONG S J, DUAN Q S, YANG S, et al. Effect of different anaerobic fermentation condition on biogas production of hybrid pennisetum [ J ]. China Biogas, 2014, 32 ( 6 ): 26-32, 73. (in Chinese)
- [ 38 ] 邹书珍. 不同预处理工艺厌氧发酵产气效率及其综合效益评价 [ D ]. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZOU S Z. Biogas production efficiency in anaerobic digestion and comprehensive evaluation of different pretreatments process [ D ]. Ph.D. Thesis. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [ 39 ] 冯孝善, 方士. 厌氧消化技术 [ M ]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1989: 94, 106, 118-119.
- FENG X S, FANG S. Anaerobic digestion technology [ M ]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1989: 94, 106, 118-119. (in Chinese)
- [ 40 ] NAKASAKI K, YAGUCHI H, SASAKI Y, et al. Effects of pH control on composting of garbage [ J ]. Waste Management & Research, 1993, 11 ( 2 ): 117-125.
- [ 41 ] 李文哲, 王忠江, 王丽丽, 等. 影响牛粪高浓度水解酸化过程中乙酸含量的因素研究 [ J ]. 农业工程学报, 2008, 24 ( 4 ): 204-208.
- LI W Z, WANG Z J, WANG L L, et al. Factors affecting acetic acid content in the process of high-concentration hydrolysis and acidogenesis of cow manure [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 ( 4 ): 204-208. (in Chinese)
- [ 42 ] 李娟, 吴永胜, 杨雪, 等. 蚯蚓抗菌肽的研究进展 [ J ]. 安徽农业科学, 2016, 44 ( 3 ): 62-63.
- LI J, WU Y S, YANG X, et al. Progress in antimicrobial peptides of earthworm [ J ]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44 ( 3 ): 62-63. (in Chinese)
- [ 43 ] 孙登生, 史彬林, 金晓, 等. 丝兰提取物在家畜有害气体减排及健康养殖方面的应用 [ J ]. 动物营养学报, 2018, 30 ( 3 ): 896-901.
- SUN D S, SHI B L, JIN X, et al. Application of *Yucca schidigera* extract on gas mitigation and healthy husbandry in livestock [ J ]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30 ( 3 ): 896-901. (in Chinese)
- [ 44 ] 肖英平, 代兵, 苏琴, 等. 猪场臭气产生机理及植物提取物在除臭生产中的应用 [ J ]. 中国畜牧杂志, 2013, 49 ( 22 ): 60-64.
- XIAO Y P, DAI B, SU Q, et al. Mechanism of odor generation in pig farms and application of plant extracts in deodorization production [ J ]. Chinese Journal of Animal Science, 2013, 49 ( 22 ): 60-64. (in Chinese)
- [ 45 ] 朱丽媛, 卢庆萍, 张宏福, 等. 猪舍中氨气的产生、危害和减排措施 [ J ]. 动物营养学报, 2015, 27 ( 8 ): 2328-2334.
- ZHU L Y, LU Q P, ZHANG H F, et al. Ammonia production, hazards and mitigation measures in a pig house [ J ]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27 ( 8 ): 2328-2334. (in Chinese)
- [ 46 ] VAN HORN H H, NEWTON G L, KUNKLE W E. Ruminant nutrition from an environmental perspective: factors affecting whole-farm nutrient balance [ J ]. Journal of Animal Science, 1996, 74 ( 12 ): 3082-3102.
- [ 47 ] MOBLEY H L, ISLAND M D, HAUSINGER R P. Molecular biology of microbial ureases [ J ]. Microbiological Reviews, 1995, 59 ( 3 ): 451-480.
- [ 48 ] XU M, RINKER M, MCLEOD K R, et al. *Yucca schidigera* extract decreases *in vitro* methane production in a variety of forages and diets [ J ]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 159 ( 1/2 ): 18-26.
- [ 49 ] CANH T T, AARNINK A J, VERSTEGEN M W, et al. Influence of dietary factors on the pH and ammonia emission of slurry from growing-finishing pigs [ J ]. Journal of Animal Science, 1998, 76 ( 4 ): 1123-1130.

- [50] PIACENTE S, PIZZA C, OLESZEK W. Saponins and phenolics of *Yucca schidigera* roezl: chemistry and bioactivity [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2005, 4 (2/3): 177-190.
- [51] CHEEKE P R. Actual and potential applications of *Yucca schidigera* and *Quillaja saponaria* saponins in human and animal nutrition [M]//OLESZEK W, MARSTON A. Saponins in food, feedstuffs and medicinal plants. Dordrecht: Springer, 2000.
- [52] PATEL S. Yucca: a medicinally significant genus with manifold therapeutic attributes [J]. *Natural Products and Bioprospecting*, 2012, 2(6): 231-234.
- [53] CHEPETE H J, XIN H, MENDES L B, et al. Ammonia emission and performance of laying hens as affected by different dosages of *Yucca schidigera* in the diet [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2012, 21(3): 522-530.
- [54] 梁国旗, 王旭平, 王现盟, 等. 樟科、丝兰属植物提取物对仔猪排泄物中氨和硫化氢散发的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2009, 45(13): 22-26.  
LIANG H Q, WANG X P, WANG X M, et al. Effects of camphor familial plant extract and yucca extracts on emission of  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$  in slurry of weaned pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2009, 45(13): 22-26. (in Chinese)
- [55] 王金旭, 曹丹, 王铁梅. 丝兰提取物和酶制剂对猪舍内污染气体及猪生产性能的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2011(19): 73-74.  
WANG J X, CAO D, WANG T M. Effects of yucca extract and enzyme preparation on air pollution in pigery and performance of pigs [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2011(19): 73-74. (in Chinese)
- [56] YUN J, JUNG H, RYU H W, et al. Odor mitigation and bacterial community dynamics in on-site biocovers at a sanitary landfill in South Korea [J]. *Environmental Research*, 2018, 166: 516-528.
- [57] 尚丽勤. 蚯蚓粪便微生物多样性的研究及除臭微生物的分离筛选 [D]. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学, 2008.  
SHANG L Q. Research on microbial diversity and isolation and screening of deodor microorganisms of earthworm cast [D]. Master's Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [58] 王颂萍. 蚯蚓粪除鸡舍臭气效果的试验报告 [J]. *现代畜牧兽医*, 2006(8): 22-23.  
WANG S P. Experimental report on the effect of earthworm manure on removing odour in chicken houses [J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2006(8): 22-23. (in Chinese)

# Effects of Earthworm Powder and Yucca Extract on Growth Performance, Nutrient Digestion and Metabolism, and Emissions of Repugnant Substances and Harmful Gases during Fermentation of Fecal-Urine Mixture for Growing Pigs

PU Shihua<sup>1,2</sup> LONG Dingbiao<sup>1,2\*</sup> LIU Zuohua<sup>1\*</sup> ZHU Jiaming<sup>1,2</sup> JIAN Yue<sup>1,2</sup>  
ZENG Yaqiong<sup>1,2</sup> WANG Ying<sup>3</sup>

(1. *Chongqing Academy of Animal Science, Chongqing 402460, China*; 2. *Scientific Observation and Experiment Station of Livestock Equipment Engineering in Southwest, Ministry of Agriculture, Chongqing 402460, China*;  
3. *College of Animal Sciences, Southwest University, Chongqing 402460, China*)

**Abstract:** This experiment was conducted to investigate the effects of earthworm powder and yucca extract on growth performance, nutrient digestion and metabolism, and emissions of repugnant substances and harmful gases during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs. A double-factor design was adopted in this experiment. Fifty-six healthy Duroc×Landrace×Yorkshire (DLY) pigs with the body weight of 30 to 35 kg were selected and allocated to 4 groups with 14 replicates per group and 1 pig per replicate according to the principle of similar weight and consistent gender. A basal diet was the diet of control group, and the diet of earthworm powder group, yucca extract group, and earthworm powder+yucca extract group was adding 0.500% earthworm powder, 0.012% yucca extract and 0.500% earthworm powder+0.012% yucca extract into the basal diet, respectively. The experiment lasted for 80 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, the feed/gain of growing pigs was significantly reduced by individually adding yucca extract ( $P<0.05$ ), and the apparent digestibility of crude protein and the apparent metabolic rate of crude protein were significantly improved by simultaneously adding earthworm and yucca extract into the diets ( $P<0.05$ ). 2) In the anaerobic fermentation process, individually adding yucca extract could significantly increase the organic matter content in fecal-urine mixture, and improve the carbon/nitrogen (C/N) to 16 in the fecal-urine mixture, and promote the gas production of feces. 3) Compared with the control group, individually adding earthworm powder and yucca extract could significantly reduce the concentration of 3-methylindole, ammonia and hydrogen sulfide ( $P<0.05$ ). When those two additives combined used that had a synergistic promoting effect on reducing the production of volatile fatty acids, repugnant substances and odorous gases in the fecal-urine mixture during fermentation. In conclusion, yucca extract and earthworm powder combined used in the diet can promote the digestion and absorption of protein, and reduce the emissions of volatile fatty acids, repugnant substances and harmful gases during fermentation of fecal-urine mixture for growing pigs, which can be used as feed additives to reduce the emission of fecal pollutants from the source, the discharge of fecal pollutants at the source, and is of great significance to strengthen the management of livestock environment and relieve the pressure of livestock manure resource treatment. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33 (4):2321-2334]

**Key words:** earthworm powder; yucca extract; growth performance; volatile fatty acids; anaerobic fermentation

\* Corresponding authors: LONG Dingbiao, professor, E-mail: 87902798@qq.com; LIU Zuohua, professor, E-mail: liuzuohua66@163.com