



张相雷,金灵红,杨金玉,等. 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪生长性能、免疫功能及氨基酸消化率的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(1):113-122.

ZHANG Xianglei, JIN Linghong, YANG Jinyu, et al. Effects of wet extruded and fermented soybean meal on growth performance, immune function and amino acid digestibility in weaned piglets[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(1):113-122.

湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪生长性能、免疫功能及氨基酸消化率的影响

张相雷¹,金灵红²,杨金玉³,陶生祥¹,卓儒浩¹,
许梦慧¹,吴嘉敏¹,柳清扬¹,钟翔^{1*}

(1.南京农业大学动物科技学院,江苏 南京 210095;2.苏州帝凯维动物营养有限公司,江苏 苏州 215105;
3.天津帝凯维动物营养有限公司,天津 300462)

摘要:[目的]本试验旨在探究湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪生长性能、免疫功能及氨基酸消化率的影响。[方法]选用21日龄、体重相近,公母各半的288头断奶仔猪,随机分为4组,每组6个重复,每个重复12头。常规组(Con)饲喂常规豆粕,3个试验组分别为湿法膨化1组(WeSM1)、湿法膨化2组(WeSM2)和发酵组(FSM),分别饲喂湿法膨化豆粕和发酵豆粕。在试验的14和49d,于每个重复中随机选取1只健康状况良好的断奶仔猪采血。在试验的47~49d,连续收集3d的粪便用于养分及氨基酸消化率的测定。[结果]湿法膨化1组和湿法膨化2组断奶仔猪平均日增重和采食量均高于常规组($P>0.05$),以湿法膨化1组的效果最优。发酵组料重比显著高于常规组($P<0.05$)。与常规豆粕和发酵豆粕相比,饲喂湿法膨化豆粕可以显著提高断奶仔猪总能、粗灰分的表观消化率($P<0.05$);与常规组相比,其他3组赖氨酸、精氨酸、丝氨酸和天冬氨酸表观消化率显著提高($P<0.05$),以湿法膨化1组效果最好。与常规组相比,湿法膨化2组和发酵组仔猪血清游离精氨酸、赖氨酸、酪氨酸含量显著提高($P<0.05$)。在试验14d,与常规组相比,发酵组血清球蛋白含量显著提高,白蛋白与球蛋白之比显著降低($P<0.05$),发酵组和湿法膨化2组断奶仔猪血清中IgM含量显著提高($P<0.05$),湿法膨化1组和2组及发酵组仔猪血清中MDA的含量均显著降低($P<0.05$);与湿法膨化1组、湿法膨化2组相比,发酵组试验49d血清中GSH-Px的活性显著提高($P<0.05$)。[结论]豆粕经湿法膨化和发酵处理能够提高断奶仔猪的生长性能、养分消化率、血清抗氧化和免疫相关指标及游离氨基酸含量,且发酵豆粕在提高血清抗氧化及免疫功能方面优于湿法膨化豆粕,但在提高仔猪生长性能、养分表观消化率方面不及湿法膨化豆粕。

关键词:断奶仔猪;豆粕加工处理;生长性能;氨基酸消化率

中图分类号:S852.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)01-0113-10

Effects of wet extruded and fermented soybean meal on growth performance, immune function and amino acid digestibility in weaned piglets

ZHANG Xianglei¹, JIN Linghong², YANG Jinyu³, TAO Shengxiang¹, ZHUO Ruhao¹,
XU Menghui¹, WU Jiamin¹, LIU Qingyang¹, ZHONG Xiang^{1*}

(1.College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2.Suzhou DKVE Animal Nutrition Co., Ltd, Suzhou 215105, China;

3.Tianjin DKVE Animal Nutrition Co., Ltd, Tianjin 300462, China)

Abstract:[Objectives] This experiment was conducted to investigate the effects of wet extruded and fermented soybean meal on growth performance, immune function and amino acid digestibility in weaned piglets. [Methods] A total of 288 piglets weaned at 21 days of age with similar body weight and half male and half female were randomly divided into 4 groups with 6 replicates per group and 12 piglets per replicate. The conventional group (Con) was fed with conventional soybean meal, and 3 experimental groups (WeSM1, WeSM2, FSM) were fed with wet extruded soybean meal (2 groups) and fermented soybean meal respectively. On 14 and 49 days of the trial period, one healthy weaned piglet was randomly selected from each replicate for blood collection. On 47 to 49 days of the experiment, feces were collected for 3 consecutive days to determine nutrient and amino acid digestibility. [Results] The

收稿日期:2022-06-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD130040307);中央高校基本科研业务费专项资金(KYCXJC2023003)

*通信作者:钟翔,教授,主要从事动物营养免疫与表观遗传修饰以及植物提取物的开发与应用研究, E-mail: zhongxiang@njau.edu.cn。

average daily gain and feed intake of weaned piglets in wet extruded soybean meal group 1 (WeSM1) and wet extruded soybean meal group 2 (WeSM2) were higher than those in conventional soybean meal group ($P>0.05$). Among them, wet extruded soybean meal group 1 had the best effect. The ratio of feed to gain in fermented soybean meal group was significantly higher than that in conventional soybean meal group ($P<0.05$). Compared with conventional soybean meal and fermented soybean meal, feeding wet extruded soybean meal could significantly increase the apparent digestibility of gross energy and ash of weaned piglets ($P<0.05$). Compared with conventional soybean meal group, the apparent digestibility of lysine, arginine, serine and aspartic acid in the other three groups were significantly increased ($P<0.05$). Among them, wet extruded soybean meal group 1 had the best effect. Compared with conventional soybean meal group, the contents of free arginine, lysine and tyrosine in serum of wet extruded soybean meal group 2 and fermented soybean meal group significantly increased ($P<0.05$). On the 14th day of the experiment, compared with conventional soybean meal group, serum globulin content in fermented soybean meal group significantly increased, and the ratio of albumin to globulin significantly decreased ($P<0.05$), fermented soybean meal group and wet extruded soybean meal group 2, the serum IgM content of weaned piglets significantly increased ($P<0.05$), in wet extruded soybean meal group 1 and 2 and fermented soybean meal group the serum MDA content of piglets significantly increased ($P<0.05$); compared with wet extruded soybean meal group 1 and wet extruded soybean meal group 2, in fermented soybean meal group, the activity of GSH-Px in serum on 49 days significantly increased ($P<0.05$). [Conclusions] Wet extruded and fermented soybean meal could improve growth performance, nutrient digestibility, relevant serum antioxidant and immune indexes and free amino acid content of weaned piglets. Fermented soybean meal was superior to wet extruded soybean meal in improving serum antioxidant and immune function, but inferior to wet extruded soybean meal in improving the growth performance and nutrient apparent digestibility of piglets.

Keywords: weaned piglets; soybean meal processing; growth performance; amino acid digestibility

近年来,由于非洲猪瘟^[1]和新冠病毒疫情的发生以及国际贸易摩擦,导致饲料原料紧缺进一步加剧^[2],价格不断攀升,严重阻碍了我国畜牧业和养殖业的发展。豆粕作为一种应用广泛的植物性蛋白质饲料,是畜禽饲料极佳的蛋白质来源^[3],但豆粕中含有多种阻碍畜禽生长发育的抗营养因子^[4],如大豆抗原蛋白、大豆低聚糖、胰蛋白酶抑制因子等^[5]。采用适当加工处理消除抗营养因子,提高豆粕蛋白利用率,实现降本增效是应对我国蛋白饲料资源紧缺和饲料价格高涨的重要方法。微生物发酵是消除抗营养因子理想的方式之一,同时豆粕中的蛋白质在微生物的作用下会被降解为小肽和氨基酸,提高豆粕营养物质利用率。目前,关于湿法膨化豆粕(wet extruded soybean meal, WeSM)在仔猪上的应用鲜有报道。因此,本试验研究湿法膨化和发酵豆粕(fermented soybean meal, FSM)对断奶仔猪生长性能、养分及氨基酸消化率、免疫功能的影响,为提高仔猪生长性能及保障我国养猪业的健康发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

发酵豆粕为市场上的商品化产品,发酵方式为枯草芽孢杆菌固态有氧发酵。湿法膨化豆粕(以下简称膨化豆粕)的加工方式为100℃蒸汽调制30s后进入膨化机,通过螺杆挤压进行膨化处理。试验的基础日粮由苏州帝凯维动物营养有限公司提供。

1.2 试验动物、试验设计和饲养管理

试验选取288头21日龄、体重(6.38±0.30)kg的断奶仔猪随机分为4组,每组6个重复,每个重复12只且公母各半。试验期共49d。试验基础日粮为玉米-豆粕型,参照NRC(2012)推荐营养水平配制。试验日粮中添加0.25%三氧化二铬,用于测定养分消化率。试验用湿法膨化豆粕和发酵豆粕取代常规豆粕,分为以下4种日粮处理分组:常规组:0~14d饲喂含16.76%常规豆粕的基础日粮,15~49d饲喂含19.65%常规豆粕的基础日粮;湿法膨化1组:0~14d饲喂含15.42%湿法膨化豆粕的基础日粮,15~49d饲喂含5%常规豆粕+13.5%湿法膨化豆粕的基础日粮;湿法膨化2组:0~14d饲喂含6%常规豆粕+9.9%湿法膨化豆粕的基础日粮,15~49d饲喂含10%常规豆粕+8.8%湿法膨化豆粕的基础日粮;发酵组:0~14d饲喂含6%常规豆粕+9%发酵豆粕的基础日粮,15~49d饲喂含10%常规豆粕+8%发酵豆粕的基础日粮。试验的基础日粮组成及营养水平见表1。各组试验饲料具有相同的能量水平和粗蛋白水平,且均为直径、长度、硬度相近的颗粒料。

试验开始前对猪舍消毒并对料槽进行清洗,试验期间让仔猪自由采食和饮水,每日08:00、14:00和18:00定时饲喂3次。每日清粪保持栏内清洁卫生,监控舍内温度采用自然通风与风机并用,保持舍内的通风换气。观察猪群精神、采食及粪便情况。所有试验仔猪按照场内设定的免疫程序进行疫苗接种。

表 1 各处理组试验 0~14 d 和 15~49 d 阶段基础日粮原料组成及营养组成(风干基础)

Table 1 Composition and nutritional levels of the basal diet of soybean meal (air-dry basis) in different groups %

日粮及营养组成 Diet and nutrient composition	0~14 d				15~49 d			
	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM
原料组成 Ingredients composition								
玉米 Corn	0.00	0.00	0.00	0.00	49.73	51.85	51.12	51.76
膨化玉米 Expanded corn	39.72	41.57	40.89	41.72	10.00	10.00	10.00	10.00
乳清粉 Whey powder	8.85	8.85	8.85	8.85	0.00	0.00	0.00	0.00
葡萄糖 Glucose	5.00	5.00	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00
白糖 Sucrose	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
大豆油 Soybean oil	3.85	3.28	3.49	3.55	2.50	2.00	2.16	2.28
膨化碎米 Extruded broken rice	9.75	9.75	9.75	9.75	4.75	4.75	4.75	4.75
酵母蛋白 Yeast protein	4.30	4.30	4.30	4.30	2.13	1.65	1.92	1.87
沸石粉 Zeoliet	0.00	0.00	0.00	0.00	2.39	2.38	2.38	2.49
酵母水解物 Yeast hydrolyzate	2.50	2.50	2.50	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
豆粕 Soybean meal (SM)	16.76	0.00	6.00	6.00	19.65	5.00	10.00	10.00
湿法膨化豆粕 Wet extruded SM	0.00	15.42	9.90	0.00	0.00	13.50	8.80	0.00
发酵豆粕 Fermented SM	0.00	0.00	0.00	9.00	0.00	0.00	0.00	8.00
鱼粉 Fish meal	3.00	3.00	3.00	3.00	2.50	2.50	2.50	2.50
食盐 NaCl	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
石粉 Limestone	0.02	0.08	0.07	0.08	0.10	0.12	0.12	0.10
预混料 Premix ¹	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
总计 In total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养组成 Nutrient composition ²								
消化能 Digestible energy	14.97	14.97	14.97	14.97	14.40	14.40	14.40	14.40
粗蛋白 Crude protein	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60
粗纤维 Crude fiber	2.20	2.10	2.10	2.00	2.20	2.10	2.10	2.00
粗灰分 Ash	5.30	5.50	5.40	5.40	5.30	5.50	5.40	5.40
钙 Ca	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.55	0.55	0.55
总磷 TP	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
赖氨酸 Lys	1.36	1.34	1.34	1.34	1.36	1.34	1.34	1.34
蛋氨酸 Met	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.82	0.83	0.82	0.83	0.82	0.83	0.82	0.83
苏氨酸 Thr	0.88	0.89	0.88	0.89	0.88	0.89	0.88	0.89
色氨酸 Trp	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29

注:1) 预混料为每千克日粮提供:铜(CuSO₄·5H₂O) 6 mg,铁(FeSO₄·H₂O) 100 mg,锰(MnSO₄·H₂O) 4 mg,硒(Na₂SeO₃) 0.3 mg,碘(KI) 0.14 mg,锌(ZnSO₄·7H₂O) 110 mg,维生素 A 12 000 IU,维生素 B₁ 1 mg,维生素 B₂ 3.6 mg,维生素 B₆ 1.5 mg,维生素 D₃ 3 000 IU,维生素 E 50 mg,维生素 K 4 mg,泛酸 10 mg,烟酸 15 mg,叶酸 0.3 mg,生物素 0.05 mg;2) 营养水平均为计算值,消化能的单位为 MJ·kg⁻¹;3) 常规豆粕、膨化豆粕和发酵豆粕中的粗蛋白含量分别为 43%、45.7%和 49.5%。

Note:1) Premix provides per kilogram of diet: Cu(CuSO₄·5H₂O) 6 mg, Fe(FeSO₄·H₂O) 100 mg, Mn(MnSO₄·H₂O) 4 mg, Se(Na₂SeO₃) 0.3 mg, I(KI) 0.14 mg, Zn(ZnSO₄·7H₂O) 110 mg, vitamin A 12 000 IU, vitamin B₁ 1 mg, vitamin B₂ 3.6 mg, vitamin B₆ 1.5 mg, vitamin D₃ 3 000 IU, vitamin E 50 mg, vitamin K 4 mg, pantothenic acid 10 mg, niacin 15 mg, folic acid 0.3 mg, biotin 0.05 mg. 2) Nutrient levels were all calculated values; the unit of digestible energy is MJ·kg⁻¹. 3) The crude protein content of conventional, extruded and fermented soybean meal is 43%, 45.7% and 49.5%, respectively. 4) Con: Control group; WeSM1: Wet extruded soybean meal 1 group; WeSM2: Wet extruded soybean meal 2 group; FSM: Fermented soybean meal group. The same as follows.

1.3 样品采集

在试验 14、49 d, 断奶仔猪空腹 12 h 后称重, 从每个重复中随机选取 1 只健康状况良好的断奶仔猪进行前腔静脉采血。室温静置 30 min 后在 4 °C 条件下 3 500 r·min⁻¹ 离心 10 min, 分离血清, 置于 -80 °C 冰箱冻存。

采用外源性指示剂法, 在试验日粮中添加 0.25% 三氧化二铬。于试验 47~49 d 连续收集 3 d 的粪便。采用部分收粪法收集仔猪排出的新鲜粪便, 装入自封袋, 每份采集栏内 3 个不同的位点, 每份约 100 g, 另加 10 mL 10% 盐酸用于氮的固定, 放入 -20 °C 冰柜保存待测。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长性能测定 于试验 0、14 和 49 d 对每个重复的仔猪进行空腹称重, 计算每个阶段的平均日增重。记录采食量, 计算平均日采食量。

1.4.2 养分消化率测定 参照张丽英^[6]的方法测定干物质、粗灰分、粗蛋白、能量、粗脂肪表观消化率;三氧化二铬的含量采用原子吸收光谱法(AAS)测定。氨基酸的测定参照《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016》的方法。

1.4.3 血清游离氨基酸浓度测定 采用日立 L-8900 型自动氨基酸分析仪测定血清游离氨基酸浓度。测定方法:取 100 μL 血清加 300 μL 10% 的磺基水杨酸,放入 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱静置 10 min 沉淀蛋白,使用高速离心机 12 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 离心 30 min,然后用 1 mL 注射器吸取上清液,使用 0.22 μm 水相滤头过滤至 2 mL 氨基酸测定瓶的衬管中用于游离氨基酸分析。

1.4.4 血清生化指标测定 血清中总蛋白(TP)、肌酐(Cr)、白蛋白(ALB)、尿素氮(BUN)、葡萄糖(GLU)检测试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。采用泉州市睿信生物科技有限公司试剂盒检测血清中免疫球蛋白 A(IgA)、免疫球蛋白 G(IgG)以及免疫球蛋白 M(IgM)的含量。

1.4.5 血清抗氧化功能指标测定 总超氧化物歧化酶(T-SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性、总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA)、总巯基(T-SH)的含量均采用南京建成生物工程研究所试剂盒检测。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2019 软件进行初步统计处理后,使用 SPSS 25.0 分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。各试验组的差异显著性检验采用 Duncan's 多重比较法。结果均以平均值 \pm 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 湿法膨化及发酵豆粕对断奶仔猪生长性能的影响

由表 2 可知:试验开始时,各组仔猪的平均体重无显著差异($P>0.05$);试验 14 d 时,与常规组相比,湿法膨化 2 组与发酵组仔猪体重显著提高($P<0.05$)。在试验 15~49 d,与发酵组相比,湿法膨化 1 组的平均日增重有增加的趋势($P=0.061$);与发酵组相比,常规组、湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组的料重比分别降低 6.17%、7.41%、4.94%,差异均显著($P<0.05$)。在试验 0~49 d,与发酵组相比,常规组、湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组的料重比分别显著降低 5.39%、5.99%、5.99%($P<0.05$)。对于各个阶段的平均日采食量,4 组之间均无显著差异($P>0.05$)。

表 2 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪生长性能的影响

Table 2 Effects of wet extruded and fermented soybean meal on the growth performance in weaned piglets

项目 Items	试验时间/d Time of experiment	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM
体重/kg BW	0	6.19 \pm 0.09	6.34 \pm 0.12	6.38 \pm 0.12	6.51 \pm 0.08
	14	7.41 \pm 0.11 ^b	7.78 \pm 0.22 ^{ab}	8.05 \pm 0.13 ^a	8.05 \pm 0.08 ^a
	49	21.58 \pm 0.32	23.15 \pm 0.67	22.65 \pm 0.49	22.14 \pm 0.56
平均日增重/($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$) ADG	0~14	87.36 \pm 12.66	94.76 \pm 15.66	119.66 \pm 14.24	109.25 \pm 2.72
	15~49	404.96 \pm 9.60	442.49 \pm 15.63	417.21 \pm 11.37	402.69 \pm 14.84
	0~49	314.22 \pm 7.83	343.14 \pm 13.62	332.20 \pm 10.29	318.85 \pm 11.06
平均日采食量/($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$) ADFI	0~14	199.90 \pm 12.10	207.64 \pm 14.40	216.57 \pm 13.32	206.65 \pm 7.77
	15~49	614.25 \pm 14.70	666.25 \pm 28.68	641.18 \pm 16.49	651.91 \pm 15.57
	0~49	495.86 \pm 11.22	539.63 \pm 23.20	521.85 \pm 14.59	530.33 \pm 13.04
料重比 F/G	0~14	2.63 \pm 0.51	2.42 \pm 0.32	1.87 \pm 0.11	1.90 \pm 0.07
	15~49	1.52 \pm 0.02 ^b	1.50 \pm 0.02 ^b	1.54 \pm 0.01 ^b	1.62 \pm 0.02 ^a
	0~49	1.58 \pm 0.01 ^b	1.57 \pm 0.02 ^b	1.57 \pm 0.01 ^b	1.67 \pm 0.02 ^a

注:1) BW:Body weight; ADG: Average daily gain; ADFI: Average daily feed intake; F/G: Feed/gain. 2) 同行数据肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。In the same row, values with different letter superscripts mean significant difference($P<0.05$). The same below.

2.2 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪养分表观消化率的影响

由表 3、4 可知:与发酵组相比,常规组、湿法膨化 1 组及 2 组总能的表观消化率显著提高($P<0.05$);与常规组相比,湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组及发酵组粗灰分的表观消化率显著提高($P<0.05$);各组间粗蛋白、干物质及粗脂肪表观消化率均无显著差异($P>0.05$);与常规组相比,湿法膨化 1 组蛋氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸的表观消化率显著提高($P<0.05$),膨化豆粕 2 组半胱氨酸表观消化率显著提高($P<0.05$),膨化豆粕 1 组、发酵组异亮氨酸、亮氨酸、组氨酸表观消化率显著提高($P<0.05$),其余 3 组赖氨酸、精氨酸、丝氨酸和天冬氨酸表观消化率显著提高($P<0.05$)。

表 3 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪营养物质表观消化率的影响

Table 3 Effects of wet extruded and fermented soybean meal on apparent nutrient digestibility of weaned piglets %

项目 Items	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM
干物质 Dry matter	87.30±0.05	87.37±0.06	87.10±0.06	87.27±0.07
总能 Gross energy	84.86±0.21 ^b	84.72±0.34 ^b	85.89±0.19 ^a	83.76±0.14 ^c
粗蛋白 Crude protein	80.99±0.30	81.55±0.28	81.25±0.13	81.78±0.14
粗脂肪 Ether extract	81.68±0.53	82.50±0.35	82.79±0.52	82.73±0.83
粗灰分 Ash	61.49±0.12 ^c	63.48±0.06 ^b	65.55±0.30 ^a	62.87±0.67 ^b

表 4 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪氨基酸表观消化率的影响

Table 4 Effects of wet extruded and fermented soybean meal on apparent digestibility of amino acids in weaned piglets %

项目 Items	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM
必需氨基酸 EAA				
蛋氨酸 Met	80.54±0.25 ^b	83.51±0.56 ^a	82.55±0.92 ^{ab}	82.40±1.15 ^{ab}
苏氨酸 Thr	82.82±0.20	84.61±0.30	84.40±0.69	84.21±0.80
缬氨酸 Val	77.05±0.27 ^b	80.09±0.36 ^a	78.86±0.94 ^{ab}	79.08±1.13 ^{ab}
异亮氨酸 Ile	75.52±0.36 ^b	80.04±0.41 ^a	77.75±0.99 ^{ab}	80.16±1.14 ^a
亮氨酸 Leu	81.28±0.18 ^b	84.28±0.23 ^a	82.54±0.77 ^{ab}	84.28±0.94 ^a
苯丙氨酸 Phe	80.50±0.20 ^b	83.17±0.24 ^a	81.79±0.84 ^{ab}	82.42±1.11 ^{ab}
组氨酸 His	81.70±0.19 ^b	83.54±0.35 ^a	83.28±0.72 ^{ab}	83.89±0.78 ^a
精氨酸 Arg	84.85±0.23 ^b	88.34±0.24 ^a	86.91±0.59 ^a	88.41±0.65 ^a
赖氨酸 Lys	83.46±0.26 ^b	85.65±0.21 ^a	85.34±0.67 ^a	85.14±0.72 ^a
非必需氨基酸 NEAA				
谷氨酸 Glu	86.83±0.14 ^b	88.91±0.21 ^a	88.08±0.53 ^{ab}	88.92±0.58 ^{ab}
甘氨酸 Gly	77.08±0.26 ^b	80.62±0.32 ^a	78.93±0.92 ^{ab}	80.01±1.04 ^{ab}
丙氨酸 Ala	76.58±0.22 ^b	80.23±0.32 ^a	78.40±0.95 ^{ab}	79.78±1.14 ^a
半胱氨酸 Cys	82.72±0.28 ^b	85.16±0.53 ^{ab}	85.56±0.69 ^a	84.48±1.29 ^{ab}
酪氨酸 Tyr	69.03±0.17 ^b	74.56±0.21 ^a	72.71±1.42 ^{ab}	75.19±2.14 ^{ab}
丝氨酸 Ser	82.11±0.20 ^b	84.52±0.29 ^a	83.94±0.68 ^a	84.35±0.74 ^a
天冬氨酸 Asp	79.09±0.21 ^b	82.85±0.37 ^a	81.27±0.84 ^a	82.39±0.92 ^a
脯氨酸 Pro	85.82±0.12	86.45±0.32	86.29±0.60	86.41±0.66

Note: EAA; Essential amino acids; NEAA; Non-essential amino acids. The same below.

2.3 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清游离氨基酸含量的影响

由表 5 可知:与常规组、湿法膨化 1 组相比,湿法膨化 2 组断奶仔猪血清苏氨酸含量显著上升($P < 0.05$);与常规组、湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组相比,发酵组血清中游离异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、精氨酸、赖氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸、丝氨酸含量显著上升($P < 0.05$)。

表 5 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清游离氨基酸含量的影响

Table 5 Effects of wet extruded and fermented soybean meal on content of free amino acids in serum of weaned piglets $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

项目 Items	常规组 Con	湿法膨化 1 组 WeSM1	湿法膨化 2 组 WeSM2	发酵组 FSM
必需氨基酸 EAA				
蛋氨酸 Met	2.48±0.25	3.33±0.27	4.67±0.39	5.60±2.43
苏氨酸 Thr	33.38±3.26 ^b	31.19±3.91 ^b	48.78±1.54 ^a	39.42±2.73 ^{ab}
缬氨酸 Val	17.50±2.70 ^b	14.98±2.44 ^b	21.13±2.15 ^b	39.25±3.05 ^a
异亮氨酸 Ile	8.80±1.86 ^b	7.45±1.54 ^b	11.25±0.80 ^b	17.63±1.06 ^a
亮氨酸 Leu	15.58±2.65 ^b	12.95±2.52 ^b	18.89±0.86 ^b	30.98±2.02 ^a
苯丙氨酸 Phe	8.32±0.98 ^{ab}	7.94±1.08 ^c	11.05±0.41 ^b	17.73±0.68 ^a
组氨酸 His	3.62±0.61 ^{ab}	2.32±0.23 ^c	4.50±0.54 ^b	8.12±0.26 ^a
精氨酸 Arg	8.98±1.03 ^b	5.09±2.38 ^b	16.26±1.35 ^a	17.72±0.45 ^a
赖氨酸 Lys	17.02±2.61 ^c	16.06±1.67 ^c	26.88±0.56 ^b	39.54±2.55 ^a
非必需氨基酸 NEAA				
谷氨酸 Glu	32.38±3.38 ^b	31.88±5.16 ^b	44.22±5.65 ^b	93.32±11.07 ^a
甘氨酸 Gly	29.47±2.95 ^b	28.95±4.32 ^b	41.97±5.08 ^b	63.13±3.99 ^a
丙氨酸 Ala	19.07±2.43 ^b	20.02±3.23 ^b	26.49±2.78 ^b	45.79±6.21 ^a
半胱氨酸 Cys	5.33±1.18 ^b	5.16±0.86 ^b	8.21±0.85 ^{ab}	9.13±0.95 ^a
酪氨酸 Tyr	7.22±1.02 ^c	6.85±0.86 ^c	11.36±0.36 ^b	15.38±1.18 ^a
丝氨酸 Ser	7.09±0.75 ^b	6.39±0.72 ^b	9.16±0.47 ^b	18.78±1.76 ^a
天冬氨酸 Asp	2.70±0.24 ^c	2.89±0.23 ^{bc}	4.09±0.68 ^{ab}	4.42±0.51 ^a

2.4 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清生化指标及抗氧化指标的影响

由表6、7可知:试验14 d时,与常规组相比,发酵组血清球蛋白含量显著提高($P<0.05$);与常规组及湿法膨化2组相比,发酵组血清白蛋白比显著降低($P<0.05$);与湿法膨化1组相比,发酵组血清IgA含量显著提高($P<0.05$);与常规组相比,湿法膨化2组和发酵组血清IgM含量显著提高($P<0.05$)。与常规组相比,湿法膨化1组、湿法膨化2组及发酵组血清MDA含量分别降低23.67%($P<0.05$)、15.55%($P<0.05$)、13.43%($P<0.05$)。试验49 d时,与常规组相比,发酵组血清MDA含量降低29.35%($P<0.05$);与湿法膨化1组及湿法膨化2组相比,发酵组血清GSH-Px活性显著提高($P<0.05$)。

表6 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清生化指标含量的影响

Table 6 Effect of wet extruded and fermented soybean meal on content of the serum biochemical indexes of weaned piglets

项目 Items	试验时间/d Time of experiment	常规组 Con	湿法膨化1组 WeSM1	湿法膨化2组 WeSM2	发酵组 FSM
总蛋白含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) TP content	14	42.73±2.58	38.98±1.91	40.72±4.11	44.79±3.02
	49	52.58±3.27	60.70±5.30	53.12±3.12	54.51±1.75
白蛋白含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) ALB content	14	30.25±2.58	25.77±1.23	26.62±1.65	24.17±0.90
	49	28.23±3.45	31.06±1.69	23.44±1.74	28.23±2.77
球蛋白含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) GLB content	14	12.48±1.12 ^b	13.21±0.84 ^b	14.09±2.78 ^b	20.61±2.16 ^a
	49	24.35±1.31	29.64±3.90	29.68±1.67	26.28±1.51
白球比 A/G	14	2.55±0.40 ^a	1.97±0.11 ^{ab}	2.17±0.30 ^a	1.23±0.11 ^b
	49	1.19±0.20	1.12±0.12	0.79±0.04	1.12±0.18
尿素氮含量/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) UN content	14	7.06±0.96	6.50±0.74	8.55±1.43	6.19±0.37
	49	6.88±0.91	6.35±0.91	6.09±1.14	7.09±0.97
葡萄糖含量/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) GLU content	14	3.20±0.35	3.30±0.33	3.49±0.29	2.77±0.23
	49	2.06±0.31	2.40±0.28	1.87±0.19	1.85±0.31
肌酐含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) Cr content	14	75.04±8.51	69.17±6.86	78.49±7.77	98.35±29.59
	49	125.01±27.16	135.51±25.78	114.77±23.36	120.00±8.87
免疫球蛋白 A 含量/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) IgA content	14	634.01±40.97 ^a	510.00±12.67 ^b	572.80±28.47 ^{ab}	607.56±21.57 ^a
	49	533.31±14.06	463.85±18.38	533.51±33.35	506.39±18.87
免疫球蛋白 G 含量/($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) IgG content	14	17.64±0.76	16.00±0.62	18.40±1.04	16.86±0.85
	49	15.60±0.54	15.64±0.62	15.91±0.55	16.06±0.51
免疫球蛋白 M 含量/($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) IgM content	14	11.99±0.43 ^b	12.70±0.28 ^{ab}	12.70±0.28 ^{ab}	13.72±0.54 ^a
	49	13.03±0.37	12.23±0.28	12.98±0.32	13.49±0.49

Note: TP: Total protein; ALB: Albumin; GLB: Globulin; A/G: Albumin/Globulin; UN: Urea nitrogen; GLU: Glucose; Cr: Creatinine; IgA: Immunoglobulin A; IgG: Immunoglobulin G; IgM: Immunoglobulin M.

表7 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清抗氧化功能指标的影响

Table 7 Effect of wet extruded and fermented soybean meal on the indexes of anti-oxidation function of weaned piglet serum

项目 Items	试验时间/d Time of experiment	常规组 Con	湿法膨化1组 WeSM1	湿法膨化2组 WeSM2	发酵组 FSM
总超氧化物歧化酶活性/($\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$) T-SOD activity	14	139.10±5.31	148.02±3.41	149.67±5.82	135.30±5.70
	49	104.88±8.87	116.63±11.18	107.53±11.58	124.57±11.80
丙二醛含量/($\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$) MDA content	14	2.83±0.16 ^a	2.16±0.10 ^b	2.39±0.09 ^b	2.45±0.11 ^b
	49	2.76±0.28 ^a	2.76±0.35 ^a	2.35±0.12 ^{ab}	1.95±0.34 ^b
谷胱甘肽过氧化物酶/($\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$) GSH-Px activity	14	827.28±71.70	778.12±39.37	877.99±57.15	906.89±44.08
	49	1 058.03±36.66 ^{ab1}	013.88±22.82 ^b	995.63±48.25 ^{b1}	149.18±56.36 ^a
总抗氧化能力/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) T-AOC	14	0.60±0.01	0.61±0.01	0.57±0.01	0.58±0.01
	49	0.48±0.02	0.41±0.03	0.43±0.02	0.48±0.02
总巯基含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) T-SH content	14	170.91±18.10	187.01±34.44	154.42±23.17	190.39±21.40
	49	339.08±64.00	285.87±54.55	192.36±42.87	231.17±49.00

3 讨论

3.1 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪生长性能的影响

在动物饲养试验中,生长性能是反映试验日粮优劣的重要指标之一。研究表明,豆粕经膨化、加热处理,可以提高畜禽平均日增重、平均日采食量,降低料肉比^[7-9]。常规豆粕经过适合的微生物发酵处理,也

可以起到提高采食量、日增重的作用^[10-11]。在本试验中,饲喂湿法膨化豆粕可以达到提高断奶仔猪平均日增重的效果,且随着试验日龄的增加,生长性能提高的效果愈加明显,这与之前的研究结果^[12-13]一致,可能的原因是高温使豆粕中部分抗营养因子失活,提高了养分表观消化率。在试验 14 d,与常规组对比,发酵组显著提高了仔猪的体重,可能的原因是豆粕经微生物发酵可以产生一些对机体有利的有机酸^[14-15],不仅可以增强胃蛋白酶等消化酶的活性,促进养分的消化吸收,同时可以杀灭消化道内的病原菌,促进仔猪肠道健康。然而,随着试验日龄的增加,发酵组的饲喂效果越来越差,从试验 15~49 d 及试验全期看,与常规组相比,平均日增重和平均日采食量均无显著变化,但料重比显著上升,其中可能的原因是随着断奶仔猪日龄的增加,消化系统的功能日趋完善,微生物发酵产生的有益物质发挥的作用越来越小,而发酵过程中不仅有能量耗损,同时消耗了豆粕中优质的蛋白质,本试验结果与之前研究结果一致,发酵处理显著提高料重比,未显著提高仔猪生长性能^[16]。

3.2 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪养分表观消化率的影响

消化率是一项既可以反映日粮可消化性的能力,同时可以反映出动物消化系统对营养物质消化吸收能力的指标^[17]。仔猪生长发育离不开日粮中的蛋白质、能量、矿物质等养分,消化率数值的高低可以反映仔猪对该养分的消化吸收水平。本试验结果表明湿法膨化 1 组、2 组的能量和粗灰分表观消化率显著提高,且湿法膨化 2 组的饲喂效果更好。其中,发酵组较其他 3 组,能量表观消化率显著降低,可能的原因是豆粕在发酵的过程中,微生物会利用豆粕中的蛋白合成菌体蛋白,而这一过程会消耗能量。相关研究发现,经挤压膨化处理可以提高饲料的适口性,并会提高能量的表观消化率^[18]。在本试验中,与常规组相比,湿法膨化豆粕组并没有显著提高粗蛋白的表观消化率,这可能是由于湿法处理过程中,会导致部分蛋白质发生变性,使得原本向内疏水性的氨基酸向外反转,从而降低了蛋白质的溶解度^[19-20],而蛋白质的溶解程度是胃肠道消化吸收蛋白质的前提^[21]。

氨基酸表观消化率可以反映出日粮氨基酸可消化性的程度,也可以表现出仔猪对饲料中氨基酸的消化能力。赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸等是断奶仔猪主要的限制性氨基酸。在本试验中,湿法膨化 1 组赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸表观消化率最高,这可能是该组生长性能提高的原因之一。与常规组相比,湿法膨化 1 组和 2 组及发酵组对所有氨基酸表观消化率均有一定程度的提高,其原因可能是豆粕经过湿法膨化或发酵处理后,抗营养因子含量减少,尤其是脲酶、胰蛋白酶抑制因子含量大大降低^[22],相关研究发现胰蛋白酶抑制剂是影响猪氨基酸消化率的重要因素^[23]。湿法膨化 1 组氨基酸消化率优于湿法膨化 2 组,表明湿法膨化豆粕替代常规豆粕的比例越高,氨基酸消化率提高的效果越明显。

3.3 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清游离氨基酸含量的影响

氨基酸是构成动物营养所需蛋白质的基本物质,血清中游离氨基酸水平是一项可以体现动物生长可利用性的指标,该指标可以反映机体肠道消化吸收和细胞摄取氨基酸两者平衡的关系^[24-25]。其浓度受可消化氨基酸含量、日粮中氨基酸的存在形式以及禁食时间长短等因素的影响。动物进食后,血清中游离氨基酸的含量先上升后下降,日粮中的不同蛋白来源会使血清中各种氨基酸的浓度达到峰值的时间产生差异。仔猪禁食 2~3 h 血清游离氨基酸含量可以反映出氨基酸的消化、吸收与代谢水平。而禁食 6 h 以上血清氨基酸浓度反映细胞吸收氨基酸的水平。Yen 等^[26]研究发现,结晶状态的赖氨酸和苏氨酸的吸收比蛋白质结合的赖氨酸和苏氨酸更快。与发酵组相比,湿法膨化 1 组和湿法膨化 2 组仔猪血清游离氨基酸含量降低的可能的原因是湿法膨化豆粕较发酵豆粕,其氨基酸更容易被机体利用,肠黏膜细胞加快了对血清游离氨基酸的摄取,导致血清中游离氨基酸浓度下降,具体原因仍需进一步探索。Gao 等^[27]研究发现,豆粕经发酵处理后,可以改善豆粕蛋白的氨基酸组成。发酵过程中微生物产生的菌体蛋白是重要的蛋白质来源,另外豆粕在微生物作用下,大分子蛋白质被降解为小肽、游离氨基酸,大豆抗原蛋白含量显著降低^[28-29]。而大豆抗原蛋白会导致仔猪消化道结构损伤,吸收障碍,降低蛋白质的利用率。这可能是发酵组仔猪血清游离氨基酸含量较其他 3 组显著提高的原因。

3.4 湿法膨化和发酵豆粕对断奶仔猪血清生化及抗氧化指标的影响

仔猪在断奶前期免疫力低下,机体很容易受环境和食物改变的影响产生断奶应激^[30]。血清球蛋白可以协助机体防御各类病原体的侵害,对维持机体正常免疫力具有重要作用。血清中尿素氮的水平是评判动物日粮中氨基酸能否满足动物营养需求的一项生化指标^[31]。血清中免疫球蛋白含量表示血清免疫功能的强弱。IgM 在对抗血液病原体入侵发挥着“先锋队”的作用,其含量可以反映出机体免疫系统快速识

别、迅速出击的能力。IgA 是一类可以抵御摄入食物中抗原的入侵、减弱炎症反应和缓解食物过敏症状等方面发挥重要作用的免疫球蛋白^[32]。有研究表明豆粕经过发酵处理可以调节机体的免疫功能^[33-34],这与本试验结果一致。本研究中,试验 14 d 发酵豆粕可以提高血清中球蛋白、IgA、IgM 的含量,降低白球比,表明发酵组仔猪的血清免疫功能有所提高,可能的原因是豆粕在发酵过程中,微生物会产生有机酸、益生菌、B 族维生素等对机体有益的物质^[35],有利于维持仔猪肠道健康状态,从而达到提高血清免疫功能的功效。经过益生菌发酵后的豆粕具有潜在的有效调控肠道菌群及其代谢物的能力^[36-37],从而提高断奶仔猪的免疫功能^[38],这可能也是试验 14 d 仔猪体重显著提高的原因。研究发现,机体免疫反应的增强会消耗自身用于生长的养分,从而降低生长性能^[39],这可能是湿法膨化 1 组具有良好生长性能的原因之一。本试验的结果表明,饲喂湿法膨化豆粕和发酵豆粕与常规豆粕相比,仔猪血清免疫功能均有一定程度的提高,从试验结果上看,发酵豆粕优于湿法膨化豆粕。

人类和畜禽体内无时无刻都在发生氧化与抗氧化反应。当机体内发生的氧化过程和抗氧化过程达不到平衡时则可能导致氧化应激的发生^[40]。仔猪在断奶前期,由于心理、环境、营养等因素的共同作用,机体不断遭受脂质过氧化及氧化损伤的威胁。有研究表明仔猪在断奶时的抗氧化状态可以很好反映断奶仔猪的健康状态^[41]。MDA 是一种很好的评判机体氧化损伤程度的指标。谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)作为谷胱甘肽氧化还原系统的一种相关酶,具有有效缓解机体发生不良氧化还原反应的作用。本研究中,试验 14 d 时,与常规组相比,湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组及发酵组的断奶仔猪血清中 MDA 含量均显著降低;试验 49 d 时,与湿法膨化 1 组、湿法膨化 2 组相比,发酵组仔猪血清 GSH-Px 活性显著上升。这意味着饲喂湿法膨化豆粕及商品化发酵豆粕可以在一定程度上减轻仔猪在断奶早期氧化损伤的程度,对提高断奶仔猪的抗氧化功能起着积极作用,饲喂发酵豆粕提高仔猪抗氧化的效果要优于湿法膨化豆粕。

总之,基于本试验条件下,在断奶仔猪日粮中添加湿法膨化处理豆粕可提高仔猪平均日增重、采食量和氨基酸表观消化率,在提高生长性能方面,其效果优于发酵豆粕。湿法膨化豆粕和商品化发酵豆粕均可提高断奶仔猪血清抗氧化和免疫功能。

参考文献 References:

- [1] Woonwong Y, Do T D, Thanawongnuwech R. The future of the pig industry after the introduction of african swine fever into Asia[J]. *Animal Frontiers*, 2020, 10(4): 30-37.
- [2] 尹杰, 刘红南, 李铁军, 等. 我国蛋白质饲料资源短缺现状与解决方案[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(1): 89-93.
Yin J, Liu H N, Li T J, et al. Current situation and developmental suggestions on shortage of feeding protein resources in Chinese pig industry[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(1): 89-93 (in Chinese with English abstract).
- [3] 常青, 刘元, 刘玉花. 大豆豆粕的功能特性及其研究开发现状[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(10): 217-220.
Chang Q, Liu Y, Liu Y H. Soybean meal of functionality properties and status of studying and developing[J]. *Food Research and Development*, 2010, 31(10): 217-220 (in Chinese with English abstract).
- [4] Bueno R D, Borges L L, God P, et al. Quantification of anti-nutritional factors and their correlations with protein and oil in soybeans[J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 2018, 90(1): 205-217.
- [5] 张连慧, 熊小辉, 惠菊, 等. 发酵豆粕及其在动物养殖行业中的应用研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 108-112.
Zhang L H, Xiong X H, Hui J, et al. Progress in fermented soybean meal and application in animal breeding industry[J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(3): 108-112 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
Zhang L Y. *Feed Analysis and Quality Test Technology* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016 (in Chinese).
- [7] 张晓清. 不同水平的膨化豆粕对肉鸭生长性能、血清生化指标及经济效益的影响[J]. *中国饲料*, 2020(21): 39-42.
Zhang X Q. Effects of different levels of expanded soybean meal on growth performance, serum biochemical index and economic benefit of ducks[J]. *China Feed*, 2020(21): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王勇, 郭成亮, 辛淑荣, 等. 不同水平膨化豆粕添加对肉牛生长性能、屠宰性能及肉品质影响[J]. *中国饲料*, 2020(15): 112-115.
Wang Y, Guo C L, Xin S R, et al. Effects of extruded soybean meal at different levels on growth performance, slaughtering performance and meat quality of beef cattle[J]. *China Feed*, 2020(15): 112-115 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张红岗, 王芳, 张变英, 等. 不同处理豆粕日粮对舍饲羔羊生产性能的影响[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(12): 1676-1678.
Zhang H G, Wang F, Zhang B Y, et al. The influence of different processed soybean meal on the feeding lamb performance[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(12): 1676-1678 (in Chinese with English abstract).
- [10] Jiang K, Tang B, Wang Q, et al. The bio-processing of soybean dregs by solid state fermentation using a poly gamma-glutamic acid producing strain and its effect as feed additive[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121841.

- [11] 孙中华,吴鑫,谢开来,等. 生物发酵饲料对断奶仔猪生长性能、炎症信号和肠道菌群的影响[J]. 畜牧与兽医,2023,55(7):38-45.
Sun Z H,Wu X,Xie K L,et al. Effect of biofermented feed on growth performance inflammatory signal and intestinal microflora of weaned piglets[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*,2023,55(7):38-45(in Chinese with English abstract).
- [12] 穆晓峰,雷华. 日粮中添加乳清粉和膨化豆粕对断奶仔猪生产性能影响[J]. 畜牧与兽医,2007(8):30-31.
Mu X F,Lei H. Effects of whey powder and extruded soybean meal on performance of weaned piglets[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*,2007(8):30-31(in Chinese).
- [13] 孙培鑫. 去皮膨化豆粕在早期断奶仔猪日粮中的应用研究[D]. 成都:四川农业大学,2006.
Sun P X. Research in the application of dehulled expanded Soybean meal in early-weaned piglet diets[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University,2006(in Chinese with English abstract).
- [14] Namgung H J,Park H J,Cho I H,et al. Metabolite profiling of doenjang, fermented soybean paste, during fermentation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2010,90(11):1926-1935.
- [15] Jung J Y,Chun B H,Jeon C O. Chromohalobacter is a causing agent for the production of organic acids and putrescine during fermentation of ganjang, a korean traditional soy sauce[J]. *Journal of Food Science*,2015,80(12):M2853-M2859.
- [16] Yu X H. Effect of fermented soybean protein(FSP)to replace fish meal on growth performance and main intestinal bacterium of weaned piglets[J]. *Animal Nutrition*,2008(1):46-51.
- [17] 王园. 豆粕固态发酵条件及其对断奶仔猪饲用效果的研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
Wang Y. Study on solid-state fermentation conditions of soybean meal and its application on weaned pigs[D]. Beijing:China Agricultural University,2014(in Chinese with English abstract).
- [18] Hancock J,Behnke K. Use of ingredient and diet processing technologies(grinding,mixing,pelleting,and extruding)to produce quality feeds for pigs[M]//Lewis A J, Lee Southern L. *Swine Nutrition*. 2nd ed. Boca Raton,Florida: CRC Press,2000:30.
- [19] Zhang Y,Parsons C M. Effects of overprocessing on the nutritional quality of peanut meal[J]. *Poultry Science*,1996,75(4):514-518.
- [20] Mary E C. Protein functionality modification by extrusion cooking[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*,1990,68(3):200-205.
- [21] Cowieson A J,Ravindran V. Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy,minerals and amino acids[J]. *British Poultry Science*,2008,49(1):37-44.
- [22] Jahanian R,Rasouli E. Effect of extrusion processing of soybean meal on ileal amino acid digestibility and growth performance of broiler chicks[J]. *Poultry Science*,2016,95(12):2871-2878.
- [23] Zarkadas L N,Wiseman J. Influence of processing of full fat soya beans included in diets for piglets:II. Digestibility and intestinal morphology[J]. *Animal Feed Science and Technology*,2005,118(1/2):121-137.
- [24] Morales A,Chavez M,Vasquez N,et al. Extra dietary protein-bound or free amino acids differently affect the serum concentrations of free amino acids in heat-stressed pigs[J]. *Journal of Animal Science*,2019,97(4):1734-1744.
- [25] Reverter M,Lundh T,Gonda H L,et al. Portal net appearance of amino acids in growing pigs fed a barley-based diet with inclusion of three different forage meals[J]. *British Journal of Nutrition*,2000,84(4):483-494.
- [26] Yen J T,Kerr B J,Easter R A,et al. Difference in rates of net portal absorption between crystalline and protein-bound lysine and threonine in growing pigs fed once daily[J]. *Journal of Animal Science*,2004,82(4):1079-1090.
- [27] Gao S,Pan L,Zhang M,et al. Screening of bacterial strains from the gut of pacific white shrimp(litopenaeus vannamei)and their efficiencies in improving the fermentation of soybean meal[J]. *FEMS Microbiology Letters*,2020,367(2):7-13.
- [28] 李锡阁,周成翀,吴志新,等. 微生物复合发酵对豆粕营养品质的影响[J]. 华中农业大学学报,2019,38(6):123-131.
Li X G,Zhou C C,Wu Z X,et al. Effect of microbial compound fermentation on nutritional quality of soybean meal[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2019,38(6):123-131(in Chinese with English abstract).
- [29] 陈添晔,许晨远,敖蕊,等. 发酵豆粕对蛋雏鸡生长性能、养分表现代谢率、血液指标和盲肠微生物的影响[J]. 南京农业大学学报,2023,46(2):333-344. DOI:10.7685/jnau.202110019.
Chen T Y,Xu C Y,Ao R,et al. Effects of fermented soybean meal on the growth performance,nutrient apparent metabolic rate,blood indicators and cecum microbiota of pullets[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,2023,46(2):333-344(in Chinese with English abstract).
- [30] Shin D,Chang S Y,Bogere P,et al. Beneficial roles of probiotics on the modulation of gut microbiota and immune response in pigs[J]. *PLoS One*,2019,14(8):e220843.
- [31] 张蕾,田梅. 赖氨酸水平对生长猪养分表观消化率和血清氨基酸吸收模式的影响[J]. 中国饲料,2020(18):51-54.
Zhang L,Tian M. Effects of lysine levels on nutrient apparent digestibility and serum amino acid absorption patterns in growing pigs[J]. *China Feed*,2020(18):51-54(in Chinese with English abstract).
- [32] Sun P,Li D,Dong B,et al. Effects of soybean glycinin on performance and immune function in early weaned pigs[J]. *Archives of Animal Nutrition*,2008,62(4):313-321.
- [33] Tsai C F,Lin L J,Wang C H,et al. Assessment of intestinal immunity and permeability of broilers on partial replacement diets of two-stage fermented soybean meal by bacillus velezensis and lactobacillus brevis ATCC 367[J]. *Animals(Basel)*,2021,11(8):2336.
- [34] Huang H J,Weng B C,Hsuu Y D,et al. Dietary supplementation of two-stage fermented feather-soybean meal product on growth performance and immunity in finishing pigs[J]. *Animals(Basel)*,2021,11(6):1527.
- [35] Rudzki L,Stone T W,Maes M,et al. Gut microbiota-derived vitamins-underrated powers of a multipotent ally in psychiatric health and disease[J].

- Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry,2021,107:110240.
- [36] Azad M,Gao J,Ma J,et al. Opportunities of prebiotics for the intestinal health of monogastric animals[J]. *Animal Nutrition*,2020,6(4):379-388.
- [37] Gu X,Chen J,Li H,et al. Isomaltooligosaccharide and bacillus regulate the duration of farrowing and weaning-estrous interval in sows during the perinatal period by changing the gut microbiota of sows[J]. *Animal Nutrition*,2021,7(1):72-83.
- [38] Gu X,Li Z,Wang J,et al. Fermented cottonseed meal as a partial replacement for soybean meal could improve the growth performance,immunity and antioxidant properties,and nutrient digestibility by altering the gut microbiota profile of weaned piglets[J]. *Frontiers in Microbiology*,2021,12:734389.
- [39] Zeng Z,Zhang Y,He J,et al. Effects of soybean raffinose on growth performance,digestibility,humoral immunity and intestinal morphology of growing pigs[J]. *Animal Nutrition*,2021,7(2):393-399.
- [40] Lykkesfeldt J,Svendsen O. Oxidants and antioxidants in disease:oxidative stress in farm animals[J]. *The Veterinary Journal*,2007,173(3):502-511.
- [41] 张才,陈文彬,邵琦,等. 甘草多糖对哺乳仔猪健康状况和血清抗氧化能力的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2022,50(2):10-16.
- Zhang C,Chen W B,Shao Q,et al. Effects of glycyrrhizin polysaccharide on health and serum antioxidant capacity of suckling piglets[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*,2022,50(2):10-16(in Chinese with English abstract).

责任编辑:周广礼