



华中农业大学

HUAZHONG AGRICULTURAL UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER'S DEGREE DISSERTATION

不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性及
猪养分消化率、肠道微生物的影响

EFFECT OF DIFFERENT PRETREATMENT PALM
KERNEL CAKE ON PELLET CHARACTERISTIC,
NUTRIENT DIGESTIBILITY AND INTESTINAL
MICROFLORA OF PIGS

研 究 生: 郭宝印

CANDIDATE: GUO BAOYIN

学 号: 2020302110071

STUDENT NO.:

专 业: 动物营养与饲料科学

MAJOR: ANIMAL NUTRITION AND FEED
SCIENCE

导 师: 黄飞若 教授

SUPERVISOR: PROFESSOR HUANG FEIRUO

中国 武汉

WUHAN, CHINA

二〇二三年六月

JUNE, 2023

华中农业大学硕士学位论文

不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性及 猪养分消化率、肠道微生物的影响

Effects of different pretreatment palm kernel cake on
pellet characteristic, nutrient digestibility and
intestinal microflora of pigs

研 究 生：郭宝印

学 号：2020302110071

指 导 教 师：黄飞若 教授

指 导 小 组 李世军 教授

胡敏 教授

陈小冬 教授

周翔 教授

滑国华 教授

专业:动物营养与饲料科学

研究方向:动物营养与调控

获得学位名称:农学硕士

获得学位时间:2023 年 6 月

华中农业大学动物科技学院

二〇二三年六月

目 录

第一章 文献综述	1
1 前言	1
2 棕榈粕的应用价值及抗营养因子	2
2.1 饲用价值	2
2.2 营养价值	3
2.3 抗营养因子	4
3 改善棕榈粕营养价值的预处理技术	5
3.1 挤压膨化技术	5
3.2 发酵技术	6
3.3 酶解技术	6
4 原料预处理技术与颗粒饲料质量特性	7
5 原料预处理技术与养分消化率和肠道微生物	9
5.1 原料预处理技术与肠道微生物	9
5.2 原料预处理技术和养分消化率	9
6 棕榈粕在畜禽饲料中的应用	10
6.1 在家禽饲料中的应用	10
6.2 在牛饲料中的应用	11
6.3 在猪饲料中的应用	11
7 研究目的与意义	12
第二章 棕榈粕不同预处理加工参数优化试验	13
1 棕榈粕酶解加工参数优化试验	13
1.1 试验材料与酶	13
1.2 试剂	13
1.3 试验设备	13
1.4 试验设计	14
1.5 检测指标及方法	15
1.6 数据处理与分析	15
1.7 试验结果	16
1.8 讨论	17
2 棕榈粕发酵加工参数优化试验	17
2.1 试验材料和菌株	17
2.2 试验主要培养基	17
2.3 试验设备	17
2.4 试验设计	18

2.5 检测指标及方法.....	18
2.6 数据处理与分析.....	19
2.7 试验结果.....	19
2.8 讨论.....	20
3 棕榈粕膨化加工参数优化试验	20
3.1 试验材料.....	20
3.2 试验仪器与设备.....	20
3.3 试验设计.....	21
3.4 检测指标及方法.....	21
3.5 数据处理与分析.....	21
3.6 试验结果.....	22
4 小结.....	23
第三章 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响	24
1 材料与方法.....	24
1.1 试验材料.....	24
1.2 试验设备.....	24
1.3 主要试剂及溶液.....	24
1.4 颗粒饲料配方.....	25
1.5 颗粒料制备.....	26
1.6 指标测定.....	26
1.7 数据处理及统计.....	27
2 结果与分析.....	27
2.1 预处理对棕榈粕常规营养成分的影响.....	27
2.2 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响	28
3 讨论.....	29
3.1 预处理对棕榈粕常规营养成分的影响.....	29
3.2 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响	30
4 小结.....	31
第四章 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率及肠道微生物的 影响	32
1 材料与方法.....	32
1.1 试验动物与设计.....	32
1.2 饲养管理.....	32
1.3 试验日粮.....	32
1.4 检测指标与方法.....	34
1.5 数据处理.....	35
2 结果与分析.....	35
2.1 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率的影响	35

2.2 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪生长性能的影响	36
2.3 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪血液指标的影响	37
2.4 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪肠道微生物区系的影响	39
3 讨论	40
3.1 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率的影响	40
3.2 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪生长性能的影响	40
3.3 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪血液指标的影响	41
3.4 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪肠道微生物的影响	42
4 小结	42
第五章 全文总结	43
5.1 成果与结论	43
5.2 创新点	43
5.3 展望	43
参考文献	44

摘 要

玉米、豆粕等优质物料短缺阻碍我国畜牧行业持续健康发展,利用非常规饲料原料是玉米、豆粕减量替代行动的必然选择。棕榈粕(PKC)营养价值高且营养种类较为全面,但高含量的非淀粉多糖限制了其在饲粮配方中的应用。酶解、微生物发酵、挤压膨化预处理能降低 PKC 中非淀粉多糖的含量,提高其在畜禽养殖中的应用量。因此,本文通过研究 PKC 不同预处理参数优化,评价不同预处理 PKC 对颗粒饲料制粒特性及其对生长育肥猪养分消化率、肠道微生物的影响。研究结果如下:

试验一:PKC 挤压膨化、酶解、复合菌发酵预处理参数优化

设计 3 因素 3 水平正交组合试验,以还原糖释放量为评价标识,优化 PKC 预处理参数。

1. PKC 挤压膨化时,膨化温度和含水量显著影响 PKC 膨化产品还原糖释放量($P<0.05$),三个因子对 PKC 还原糖释放量影响强弱顺序为膨化温度>含水量>喂料速度,PKC 的最佳膨化加工参数为膨化温度 100℃、喂料速度 22.34 kg/min、含水量 20%,还原糖释放量为 2.42%。

2. PKC 酶解时,酸碱度和酶解温度显著影响 PKC 酶解产品还原糖释放量($P<0.05$),三个因子对 PKC 还原糖释放量影响强弱顺序为酸碱度>酶解温度>酶解时间,PKC 的最佳酶解加工参数为酸碱度 5、酶解温度 60℃、酶解时间 8 h,还原糖释放量为 9.01%。

3. PKC 发酵时,发酵温度和含水量显著影响 PKC 发酵产品还原糖释放量($P<0.05$),三个因子对 PKC 还原糖释放量影响强弱顺序为含水量>发酵温度>发酵时间,PKC 的发酵最佳加工参数为发酵时间 4 d、含水量 55%、发酵温度 36℃,还原糖释放量为 6.37%。

试验二:不同预处理 PKC 对颗粒型饲料制粒特性的影响

选用经试验一最佳参数预处理后的 PKC,测定 PKC 常规营养成分含量,进行制粒,测定饲料制粒加工质量。五个试验组分别为基础日粮组、10%PKC 组(PKC)、10%挤压膨化 PKC 组(PPKC)、10%酶解 PKC 组(EPKC)、10%发酵 PKC 组(FPKC)。对 PKC 常规营养成分含量和各组颗粒饲料硬度、含粉率、粉化率和淀粉糊化度的差异性进行组间比较。研究结果如下:

1. 常规营养成分：膨化预处理能极显著降低 PKC 粗纤维和粗脂肪含量 ($P<0.01$)，发酵及酶解预处理能极显著提高 PKC 粗蛋白含量 ($P<0.01$)，并且极显著降低粗纤维的含量 ($P<0.01$)。

2. 颗粒饲料制粒特性：硬度方面，PPKC 组、FPKC 组显著高于基础日粮组 ($P<0.05$)；含粉率和粉化率方面，各处理组与基础日粮组无显著差异 ($P>0.05$)；淀粉糊化度方面，PPKC 组极显著高于基础日粮组 ($P<0.01$)，FPKC 组、EPKC 组极显著低于基础日粮组 ($P<0.01$)。

试验三:不同预处理 PKC 对生长育肥猪养分消化率及肠道微生物的影响

以 PKC 和预处理 PKC (PPKC、FPKC 和 EPKC) 为主要试验材料，选取 105 头平均体重 $28\pm 0.5\text{kg}$ 生长猪为试验动物，随机分为 5 个处理，每个处理 3 个重复，每个重复 7 头猪，处理 1 (对照组) 饲喂基础日粮，处理 2、3、4、5 分别饲喂添加 (10%PKC、10%PPKC、10%FPKC、10%EPKC) 的日粮，各组饲粮营养水平平均调配均衡，试验期共 8 周 (生长猪阶段 4 周、育肥猪阶段 4 周)，并从养分表观消化率、生长性能、血清生化指标、肠道菌群等方面，探讨其应用效果。结果如下：

1. 与普通 PKC 组相比，日粮中添入 10%预处理 PKC 能显著提高猪养分消化率、生长性能、肠道中乳酸菌的丰度 ($P<0.05$)。

2. 与基础日粮相比，PPKC 组猪在生长、肥育阶段下养分消化率、生长性能无显著差异 ($P>0.05$)；FPKC 组、EPKC 组猪在生长阶段下养分消化率、生长性能要显著低于基础日粮 ($P<0.05$)，在肥育阶段下养分消化率、生长性能无显著差异 ($P>0.05$)。

综上所述，挤压膨化预处理能降低 PKC 非淀粉多糖含量，提高颗粒饲料硬度，降低含粉率和粉化率；相比于发酵、酶解预处理，其对于提高生长猪的生长性能的作用更加明显，因此挤压膨化处理最适于处理棕榈粕。

关键词：棕榈粕；预处理；颗粒饲料；生长育肥猪；肠道微生物

Abstract

The shortage of high quality materials such as corn and soybean meal is an important factor to hinder the healthy development of animal husbandry industry in our country. The utilization of unconventional feed materials is the priority to the reduction and replacement actions of corn and soybean meal. Palm kernel cake (PKC) has high nutritional value and comprehensive nutritional types, however, its application in dietary formulation is limited by its high content of non-starch polysaccharide (NSP). Enzymatic hydrolysis, microbial fermentation and puffing pretreatment can reduce the content of NSP in PKC and increase its application in livestock and poultry breeding. Therefore, the first purpose of this study was to optimize different pretreatment parameters of PKC. A secondary outcome of this study was to investigate the effect of different pretreatment PKC on pellet characteristics, nutrient digestibility and intestinal microflora of growing-finishing pigs. There are three experiments in this paper, and the results are as follows:

Experiment 1: Optimization of pretreatment parameters of PKC extrusion, enzymatic hydrolysis and microbial fermentation.

The orthogonal combination of three factors and three levels was designed to optimize the pretreatment parameters of PKC with reducing sugar release as the evaluation marker.

1. During PKC extrusion, the release of reducing sugar of PKC puffing products was significantly affected by puffing temperature and water content ($P < 0.05$). The effect of three factors on PKC reducing sugar release was in the order of temperature > water content > feeding rate. The optimal puffing parameters of PKC were puffing temperature 100°C, feeding speed 22.34 kg/min, water content 20% and reducing sugar released 2.42%.

2. During PKC enzymatic hydrolysis, the release of reducing sugar of PKC enzymatic products was significantly affected by pH and temperature. The effect of three factors on PKC reducing sugar release was in the order of pH > enzymatic temperature > enzymatic time. The optimal enzymatic hydrolysis parameters of PKC

were PH 5, enzymatic hydrolysis temperature 60°C, enzymatic hydrolysis time 8 h, and the release of reducing sugar was 9.01%

3. During PKC fermentation, the release of reducing sugar of PKC enzymatic products was significantly affected by fermented temperature and water content. The effect of three factors on PKC reducing sugar release was in the order of water content > fermented temperature > fermented time. The optimal processing parameters of PKC fermentation were fermented time 4 d, water content 55%, fermented temperature 36°C, reducing sugar released 6.37%.

Experiment 2: Effects of different pretreatment PKC on pellet characteristics.

The optimal parameters in experiment 1 were used to pretreat PKC, and the content of conventional nutrients in PKC was determined. Then, the quality of feed was determined. The five experimental groups were basal diet group, 10%PKC group (PKC), 10% puffing PKC group (PPKC), 10% enzymatic PKC group (EPKC) and 10% fermented PKC group (FPKC). The differences of PKC conventional nutrient content and hardness, flour content, flour ratio and starch gelatinization degree of pellet feed were compared between groups. The results were as follows:

1. Conventional nutrients: puffing pretreatment could significantly reduce the crude fiber and ether extract contents of PKC ($P < 0.01$), fermented and enzymatic pretreatment could significantly increase crude protein of PKC ($P < 0.01$), and significantly decrease crude fiber of PKC ($P < 0.01$).

2. Pellet characteristics: In terms of hardness, PPKC group and FPKC group were significantly higher than base diet group ($P < 0.05$); There were no significant differences between treatment groups and basal diet groups in powder content and pulverization rate ($P > 0.05$); Starch gelatinization degree in PPKC group was significantly higher than that in basal diet group ($P < 0.01$), FPKC group and EPKC group were significantly lower than basal diet group ($P < 0.01$).

Experiment 3: Effects of different pretreatment PKC on nutrient digestibility and intestinal microflora of growing-finishing pigs

PKC and pretreated PKC (PPKC, FPKC and EPKC) were used as main test materials. A total of 105 growing pigs with an average body weight of 28 ± 0.5 kg were

randomly divided into 5 treatments with 3 replicates per treatment and 7 pigs per replicate. Treatment 1 (control group) was fed basal diet. Treatment 2, 3, 4 and 5 were fed diets supplemented with 10%PKC, 10%PPKC, 10%FPKC and 10%EPKC, respectively. Nutrient levels in diets of each group were balanced. The experiment lasted for 8 weeks (4 weeks in growing pigs and 4 weeks in finishing pigs), and the application effects were discussed from the aspects of nutrient apparent digestibility, growth performance, serum biochemical indices, intestinal microflora. The results were as follows:

1. Compared with ordinary PKC group, dietary supplemented with 10% pre-treated PKC significantly improved nutrient digestibility, growth performance and intestinal lactobacillus abundance ($P < 0.05$).

2. Compared with the basal diet, there were no significant differences in nutrient digestibility and growth performance of pigs in PPKC group during growth and finishing stages ($P > 0.05$); The nutrient digestibility and growth performance of pigs in FPKC and EPKC groups were significantly lower than basal diet ($P < 0.05$), there were no significant differences in nutrient digestibility and growth performance at fattening stage ($P > 0.05$).

In conclusion, puffing pretreatment can reduce the content of PKC non-starch polysaccharide, increase the hardness of pellet feed, and reduce the powder content and pulverization rate. Compared with fermented and enzymatic pretreatment, puffing treatment has more obvious effect on improving the growth performance of growing pigs, thus, it is more suitable to palm kernel cake.

Key words: Palm kernel cake; Pretreatment; Pellet feed; Growing and finishing pigs; Intestinal microflora

缩略语表

(Abbreviation)

缩写	英文名称	中文名称
Abbreviation	English name	Chinese name
ALB	Albumin	白蛋白
ALP	Alkaline phosphatase	碱性磷酸酶
ALT	Alanine aminotransferase	谷丙转氨酶
AST	Aspartate transaminase	谷草转氨酶
ADFI	A verage daily feed intake	平均日采食量
ADG	A verage daily gain	平均日增重
CP	Crude protein	粗蛋白
Ca	Calcium	钙
DM	Dry matter	干物质
EPKC	Enzymatic PKC	酶解PKC
F/G	Feed/gain ratio	料重比
FPKC	Fermented PKC	发酵PKC
NSP	non-starch polysaccharides	非淀粉多糖
P	Phosphorus	磷
PKC	Palm kernel cake	PKC
PPKC	Puffing PKC	膨化PKC
TP	Total protein	总蛋白

第一章 文献综述

1 前言

进入二十一世纪以来，国内的畜牧行业取得了一系列令人瞩目的成就，包括保障社会食品安全、增加养殖户的经济收入和提高国民的营养水平等。饲料作为畜牧业的重要基石，其产量屡创新高，年产量已突破 3 亿吨大关，居世界第一位。随着饲料产量的不断升高，饲料原料紧缺的问题便随之出现。目前，玉米-豆粕型饲粮配方为国内主流的配方设计，玉米为动物提供大量的能量，豆粕为动物提供优质的蛋白质。近年来，国产大豆的数量不足以满足供人食用和饲喂动物的消费需求，只能不断加大向其它国家的进口，2022 年我国全年大豆的进口量超 9000 万吨，进口均价超 650 美元/吨。在蛋白饲料成本日渐走高的情况下，而国内具有较高粗蛋白含量的杂粕资源尚未得到有效的利用。因此，如何能够提高杂粕在日粮配方中的添加量，又不会对动物产生不利影响，这成为畜牧行业主要的研究方向。

棕榈粕（Palm kernel cake, PKC）是棕榈果实经机械压榨后，去除棕榈油后剩余的产品。棕榈果实生长于棕榈树（图 1-1），棕榈树原产于中国、印度，目前位于热带地区的马来西亚等国家广泛种植该树木（Chin 2002）。PKC 含有较为全面的营养成分，粗蛋白含量虽然不及豆粕，但也能达到 20%左右，此外，其还含有较高含量的粗脂肪，可以为动物提供大量的能量。PKC 中不存在有毒性的抗营养因子，但其含有较高含量的非淀粉多糖，非淀粉多糖容易溶解于水，影响养分在动物体内的消化和吸收。因此，降低 PKC 中非淀粉多糖的含量是增大畜禽配方中 PKC 使用量的关键。



图 1-1 棕榈树及棕榈果

Fig.1-1 Palm tree and palm fruit

目前，饲料原料较为常见的预处理方法是挤压膨化法、发酵法和酶解法。挤压膨化法不但能够提高物料的口感及风味，而且还能降解、杀灭存在于物料中的抗营养因子和不利于动物健康的细菌（Zarkadas and Wiseman 2005）。膨化法和发酵法都能够提高物料中粗蛋白含量，而物料的营养成分与颗粒饲料制粒特性之间存在着很深的关联。人们通常把硬度、粉化率以及含粉率当做是评价颗粒饲料质量的重要指标。颗粒饲料硬度过高，适口性变差，会降低动物的采食量。颗粒饲料含粉率过高，饲料浪费的情况会变的严重，动物易会发生呼吸道疾病。颗粒饲料粉化率过高，会造成动物饲料转化率降低、饲料成本升高的情况。为了提高养殖效益，养殖户需要更高品质的颗粒饲料。因此，本文通过研究 PKC 不同预处理参数优化，评价不同预处理 PKC 对颗粒饲料制粒特性及其对生长育肥猪养分消化率、肠道微生物的影响。

2 棕榈粕的应用价值及抗营养因子

2.1 饲用价值

我国畜牧业保持着持续稳定的健康发展趋势，而饲料作为畜牧业健康发展的基石，其原料短缺的形势却愈发的严峻。目前国内的饲料配方主要为“玉米-豆粕”型，由于大豆，玉米等优质原材料的价格持续上升，畜禽生产成本不断增加（丁鹏 2017）。据海关总署数据显示，自 2017 年-2021 年，大豆的进口量分别为 9553 万吨、8803 万吨、8851 万吨、10033 万吨和 9652 万吨，且进口价格一直维持在 400 美元/吨以上；玉米的进口价格分别为 213.2 美元/吨、224.1 美元/吨、221.9 美元/吨、220.5 美元/吨、331.2 美元/吨。与之相反的是，PKC 的进口价格自 2017 年始，分别为 119.7 美元/吨、141.9 美元/吨、120.9 美元/吨、145.8 美元/吨、192.1 美元/吨，不足大豆进口价格的一半（图 1-2、1-3）。每年 PKC 的全球产量为 1000 万吨以上，并且保持 10%左右的产量增速。PKC 已经成为全球第五大的蛋白粕类商品，仅次于豆粕、菜籽粕、葵花籽粕和棉籽粕，具有较高的饲用价值（Mahlia et al 2019）。

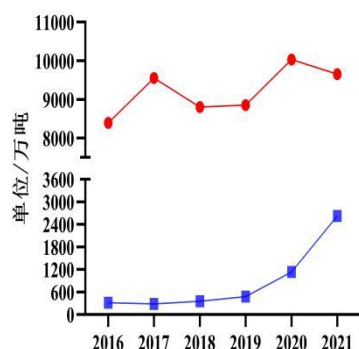


图 1-2 大豆、玉米进口量

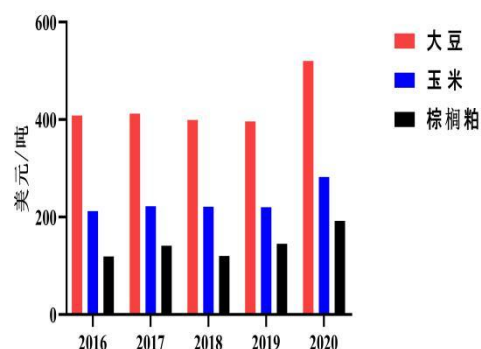


图 1-3 大豆、玉米、棕榈粕进口价格

Fig.1-2 Import volume of Soybean and corn. Fig.1-3 Import prices of soybeans, corn and PKC

2.2 营养价值

棕榈果实经炼油之后，除去多余的水分及杂质后，呈咖啡色颗粒状态，产量很大，是一种潜在的廉价畜禽饲料成分（Kim et al 2016）。PKC 的营养浓度取决于榨油方法、棕榈坚果的种类以及粕中剩余的壳量（O'Mara et al 1999）。PKC 的营养成分含量见表 1-1。PKC 含有较高的粗蛋白含量，约为 12.1-21.3%，这种 CP 值的变化与加工方法的不同有关（Pasaribu 2018）。此外，PKC 还含有丰富的矿物元素和一些畜禽必须氨基酸，例如赖氨酸、蛋氨酸、组氨酸和苏氨酸（Sundu et al 2006）。PKC 被认定为高纤维副产物（Stein et al 2015）。PKC 的 CF 含量为 16-18%，对大多数反刍动物来说是可以接受的，但却不适合以高剂量水平添加至家禽或猪的饲料中。PKC 中钙和磷的含量分别为 0.2-0.3% 和 0.48-0.7%（Fadil et al 2014），以 PKC 为基础的饲料中钙磷比较低，要适当补充这些矿物质去满足大多数动物的营养需求。PKC 也是比花生粕更好的钙、锰、锌和钠的来源（Akinyeye et al 2011）。PKC 为家禽提供 6.5-7.5 MJ/kg 代谢能，为反刍动物提供 10.5-11.5 MJ/kg 代谢能，为猪提供 10.0-13.5 MJ/kg 代谢能（Alimon 2004）。PKC 的总碳水化合物含量为 47.71%，高于花生粕和可可饼，后者总碳水化合物的含量分别为 28.3% 和 42.1%（Sharmila et al 2014）。

表 1-1 PKC 营养成分

Table1-1 Nutrition composition of PKC

营养成分	含量 (%)
干物质 (DM)	88.0-94.5
粗蛋白 (CP)	14.5-19.6
粗纤维 (CF)	13.0-20.0
粗脂肪 (EE)	5.0-8.0
灰分 (Ash)	3.0-12.0
钙 (Ca)	0.2-0.3
磷 (P)	0.48-0.7
铜 (Cu)	—
锌 (Zn)	—

2.3 抗营养因子

传统上, PKC 因含有高水平的非淀粉多糖 (NSP) 以及较差的适口性未能在猪和家禽饲料中广泛使用。根据水溶性的不同, NSP 有可溶性 (SNSP) 与不可溶性 (INSP) 之分, 其中 SNSP 起主要抗营养作用 (Azizi et al 2021)。对于畜禽饲粮中 SNSP 的抗营养作用, 科研工作者已经提出了两种观点, 一种是 SNSP 抑制消化酶对淀粉、脂肪和蛋白质的消化, 另一种是肠腔中 SNSP 的存在增加了肠道内容物的粘度, 因为酶、底物和产物通过肠道扩散而不受阻碍地运动是消化所必需的, 随着 SNSP 增加食糜粘度, 扩散减弱。到目前为止, 尚未完全确定 NSP 的确切抗营养作用, 但很可能涉及这两种机制。有人提到, PKC 中 NSP 具体可分为 78%甘露聚糖, 3%阿拉伯木聚糖, 3%葡萄糖醛酸聚糖和 12%粗纤维 (Daud and Jarvis 1992)。部分 PKC 产品因为加工预处理的不同, 呈苦涩味, 有着较差的适口性, 降低了在畜禽饲料中的添加比例 (赵大鹏 2011)。此外, PKC 中含有 0.40%单宁酸、6.62 mg/g 植酸磷、23.49 mg/g 植酸和 5.13 mg/g 草酸等不同的抗营养因子, 对 PKC 的营养品质有不良影响 (Kim et al 2017)。

3 改善棕榈粕营养价值的预处理技术

粗纤维虽然不直接向畜禽等动物提供营养，并且具有一定的抗营养作用，但它仍具有不可忽视的营养价值，例如增加益生菌的相对丰富，促进短链脂肪酸的产生，有利于维持肠道健康和微生物菌群平衡（Jarrett and Ashworth 2018）。通常状态下，饲料中的粗纤维能够较为完整的通过动物肠道系统中的十二指肠、空肠以及回肠，在盲肠和结肠处被微生物分解利用（孙晓燕等 2022）。然而，高含量纤维通常会降低饲料利用率和动物的生长性能。为了使得麸皮、PKC 等具有高含量纤维的饲料原料更好的应用于饲料配方设计，有必要对物料进行预处理。预处理方法主要包括挤压膨化法、酶解法以及发酵法。

3.1 挤压膨化技术

挤压膨化技术是世界范围内用于生产和修改或提高各种产品质量的重要食品加工技术（Jackson et al 2011），它结合了压缩、加热、剪切、破碎和混合等单元操作，以在特定的狭窄模具中创造高温和高压环境（Prabha et al 2021, Chen et al 2021）。物料在高温、高压和高剪切力的作用下发生了淀粉糊化、纤维素部分降解和水分蒸发等一系列的物理变化和化学变化（Alam et al 2016）。挤压膨化技术能够增加物料中可溶性膳食纤维的含量（Gajula et al 2008），促进挤出物中蛋白质及氨基酸等营养素在动物体内的消化（Hole et al 2013）。另外，挤压膨化技术可灭活物料中的细菌、毒素，也可钝化某些特定的抗营养因子，使加工后的食品更加安全（Dushkova et al 2012）。

挤压膨化技术不仅广泛应用于我国谷物食品生产，而且在饲料生产方面得到了很好的推广。Faridah 等（2020）使用单螺杆挤压膨化机对 PKC 进行处理，温度曲线为 90°C/100°C/110°C 时，PKC 的粗脂肪和粗灰分含量没有受到影响，但粗纤维含量降低了 21%，同时使得肉鸡表观代谢能（AME）提高 6%，粗脂肪消化率提高 32%。Aljuobori 等（2014）也有类似的研究，菜籽粕由于硫葡萄糖苷和纤维含量限制了其在畜禽日粮中的使用（Bell 1993），但经挤压膨化后，粗纤维的含量由之前未处理的 12.42%降低至 9.82%，粗纤维的含量降低提高了干物质、粗脂肪和粗蛋白的消化率。另有研究表明，挤压膨化法已被成功应用于分解高粱谷物的纤维成分，有效地提高了碳水化合物和蛋白质的利用率，从而增强了绵羊的生长性能（Yahaghi et al 2014）。挤压膨化预处理在糙米上的应用也有相关报道，挤压膨化预处理可降低不

溶性膳食纤维（IDF）和总膳食纤维（TDF）的含量，提高还原糖（RS）和可溶性膳食纤维（SDF）的含量，主要是因为挤压膨化过程中，不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维，纤维素发生降解，降低了总膳食纤维的含量，提高了还原糖的含量（马永轩等 2017）。

3.2 发酵技术

发酵预处理是指人类利用微生物自身的生命代谢活动所产生的胞外酶去降解饲料原料中的营养物质和抗营养因子的过程（Kiers et al 2003, Canibe and Jensen 2007, Niven et al 2007）。农业部第 1126 号公告已规定了适用于畜禽养殖的微生物具体种类，其中酵母菌、芽孢杆菌和乳酸菌是发酵最常用的微生物。有研究表明，将乳酸菌用于 PKC 的固态发酵，结果发现，发酵后 PKC 的半纤维素和纤维素含量显著降低，而还原糖量显著增加（Alshelmani et al 2021）。Hakim 等（2020）使用乳酸菌发酵的 PKC（LPKC）替代 25%肉仔鸡的基础日粮，与未处理的 PKC 组相比，LPKC 组肉仔鸡的表观代谢能（AME）显著提高 43.1%，回肠粗蛋白质（CP）消化率显著提高 30.5%，回肠氨基酸（AA）消化率显著提高 22.8%。除了产生降解酶的能力外，乳酸菌还表现出高抗菌活性，它也被用于控制动物饲料上的病原体污染，如大肠杆菌，弯曲杆菌，沙门氏菌和梭状芽孢杆菌（Heres et al 2003, Guo et al 2006）。PKC 中的甘露聚糖经乳酸菌发酵后降解为甘露寡糖（MOS），MOS 可被动物肠道中的有益菌吸收，改善大肠杆菌及沙门氏菌等有害菌的污染，增强肠道的免疫功能（Rezaei et al 2015）。此外，Mirnawati 等（2011）做了进一步研究，从 PKC 中提取的寡糖使乳酸杆菌和双歧杆菌的有益细菌种群至少增加了 1.3 倍，同时使得鸡盲肠中的致病性大肠杆菌和肠球菌种群分别减少了 3 倍和 1 倍。除乳酸菌以外，芽孢杆菌接种在 PKC 上，一段时间之后培养基的葡萄糖的含量增加，证明芽孢杆菌将纤维素化合物降解为更简单的葡萄糖单位，使其具有丰富的能量，适合用于反刍动物喂养（Ciptaan 2019）。

3.3 酶解技术

酶解预处理是指以生物酶解技术为依托，通过蛋白酶和纤维素酶等各种分解酶的作用，将蛋白质和纤维素等生物大分子降解成游离氨基酸和葡萄糖等小分子物质的过程（张宇婷等 2015）。酶解预处理具有催化效率高、专一性强、反应条件温和、不存在或极少存在逆反应的优点。麸皮、米糠、PKC 等饲料原料因其较高的纤维素

含量而无法大量应用于饲料配方，利用纤维素酶的酶解预处理可在一定程度上降低纤维素的含量，为扩大饲料原料种类的选择范围提供理论基础。

近年来，豆粕及其它种类的非常规饲料原料经酶解预处理处理后添加进畜禽饲料中，应用效果也较为可观。于会民等（2006）以 4%、6% 的酶解蛋白替代肉仔鸡混合型日粮中的豆粕，结果表明酶解蛋白对肉仔鸡的平均日采食量（ADFI）、平均日增重（ADG）和料重比（F/G）无显著影响，此外还可促进生长激素、甲状腺激素等激素的分泌，改善肉仔鸡的内分泌状况。王云生等（2007）使用纤维素酶酶解小麦麸皮，结果表明，在酶浓度为 0.041 U/mL，pH 值为 6，温度为 37℃，酶解时间为 15 min 的条件下，降解纤维素的效果最好。Saenphoom 等（2011）报道称，用纤维素水解酶处理 PKC，中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维的含量显著降低，而没有显著影响干物质和粗脂肪的含量。Sathitkowitchai 等（2022）发现，甘露聚糖酶可以改善 PKC 营养价值，但甘露聚糖酶的有效性取决于微生物的种类，并且提到，来自于大肠杆菌-KMAN-3 和大肠杆菌-Man 6.7 的甘露聚糖酶的活性最高，并分解 PKC 中的甘露聚糖，释放更多的还原糖和总糖。

4 原料预处理技术与颗粒饲料质量特性

近年来，颗粒饲料凭借着便于运输及贮藏，易于饲喂，适口性好，提高动物营养物质消化率等优点在养殖户中得到一致好评。颗粒饲料质量评价指标主要有硬度、成型率和耐久性，然而多种因素皆可影响颗粒饲料质量，例如原料组成、环模压辊设备、粉碎性能、冷却条件和调质因素（孔丹丹等 2019）。原料组成对颗粒饲料质量特性影响最大，在各因素之中约占比 40%，调质因素和粉碎性能各占比 20%，其它因素共占比 20%（Colovic et al 2010）。众多有关原料对颗粒饲料质量特性影响的研究报道聚焦于蛋白质、淀粉和纤维素等营养指标（张亮等 2013）。此外，物料的预处理技术主要改变物料的营养价值成分，物料的营养成分便是连接原料预处理技术和颗粒饲料质量特性两者关系的桥梁。

挤压膨化过程是结合加热、压力和在相对低含水量下的高剪切力的高温、高压过程（Zhao et al 2011），导致物料发生诸多的物理及化学变化，例如淀粉分子发生糊化、蛋白质变性、纤维素部分降解等。淀粉糊化是淀粉从有序的半结晶颗粒转变为无定形状态并失去马耳他十字的过程（Ai and Jane 2015）。淀粉经糊化之后具有一定的粘性，可提高颗粒饲料的硬度、成型率和耐久性，而淀粉来源不同，其结合

力亦不相同，高粱、玉米淀粉的结合力弱于大麦、小麦淀粉（秦玉昌等 2001）。蛋白质变性是指不涉及肽键断裂的蛋白质构象的变化（Kristiawan et al 2018），蛋白质的构象变化会影响其黏度及溶解度等功能特性，进而影响颗粒饲料质量特性（王红英等 2004）。

酶解预处理可去除膨化、粉碎等物理方法无法去除或只能去除较小含量的抗营养因子，如豆粕中的大豆球蛋白、 β -伴大豆球蛋白等（Plahar et al 2003）。因此，需要利用蛋白酶去水解豆粕中的大豆球蛋白等耐热抗营养因子，在此过程中，大分子蛋白质被水解成游离氨基酸和其他营养物质，提高了豆粕的营养价值。有报道称，相较于挤压膨化法，酶解法能够去除豆粕中更多含量的大豆球蛋白和 β -伴大豆球蛋白（魏凤仙等 2014，魏金涛等 2014）。谷物的细胞壁主要由复合碳水化合物组成，称为非淀粉多糖（NSP），具有许多抗营养特性（Choct and Annison 1992）。王洁等（2011）研究发现，相对于挤压膨化法，非淀粉多糖酶对棉籽粕中非淀粉多糖的降解效果更为明显。非淀粉多糖中的粗纤维有较高的硬度和较弱的弹性，因此高纤维含量物料的颗粒成型效果比较差，在制粒前需选择适当的预处理技术进行处理方可。

发酵是一个不断变化的动态过程，实质是指微生物在适合的外部环境下将底物降解为简单的化合物（Niba et al 2009, Olstorpe et al 2010, Kiarie et al 2010）。发酵温度、发酵底物性质、发酵时间都可能影响发酵速率和发酵产品的质量（Renge et al 2012, Subramaniam and Vimala 2012）。不同的微生物可能对每种底物产生不同的反应，因此会有不同的最终产物形成，例如乳酸杆菌产生乳酸，霉菌产生柠檬酸，而酵母产生乙醇和二氧化碳（Corsetti and Settanni 2007）。如前所述，发酵可以通过微生物复杂的代谢活动提高饲料的营养质量，例如降低纤维含量（Sugiharto et al 2015）。颗粒饲料的成型率和耐久性易受粗纤维的影响，粗纤维的含量越高，颗粒饲料的成型率和耐久性就越低。发酵除降低纤维含量以外，还可增加粗蛋白和脂质的含量，并改善蛋白质的溶解度（Sugiharto et al 2015）。在饲料生产中，蛋白质常充当粘合剂的角色，并且蛋白质在加工过程中的部分变性会提高颗粒饲料的耐久性和硬度（Wood 1987）。

5 原料预处理技术与养分消化率和肠道微生物

5.1 原料预处理技术与肠道微生物

肠道微生物群在营养物质吸收、代谢和宿主免疫功能中起着关键作用 (Koh et al 2015)。在大多数情况下, 物料中的抗营养因子会影响饲料营养价值和动物肠道中的微生物群, 畜牧工作者有必要对原料进行预处理。因此, 研究原料预处理技术如何影响猪肠道微生物群的结构和功能非常重要。有研究称, 豆粕的凝集素 (SBA) 能够影响肠道菌群的平衡, 在属水平上, SBA 可以显著降低乳球菌, 土芽孢杆菌, 假单胞菌, 链球菌, 芽孢杆菌和不动杆菌的丰度, 相反, SBA 可增强索氏鲸杆菌、希瓦氏菌、红长命菌和肉毒杆菌的丰度 (Miao et al 2018)。除豆粕中的凝集素以外, 菜籽粕中的硫代葡萄糖苷, 棉籽粕的游离棉酚以及共同存在的非淀粉多糖都对动物肠道菌群产生有害的影响, 降低有益菌的丰度, 提高有害菌的丰度 (Henry et al 2001, Furusawa et al 2013)。据报道, 发酵可以降低饲料成分中的抗营养因子含量, 例如豆粕中的凝集素和胰蛋白酶抑制剂 (Feng et al 2007), 菜籽粕中的硫代葡萄糖苷 (Jazi et al 2017), 棉籽粕中的游离棉酚 (冯鑫等 2022)。这些研究结果表明, 发酵可以通过降低抗营养因子含量来提高畜禽非常规饲料成分的营养价值, 然而大多数降低抗营养因子含量的发酵机制尚未清楚。目前挤压膨化预处理已应用于非常规饲料原料的预处理过程, 例如糙米、麦麸、菜籽粕、棉籽粕等。已有研究表明, 菜籽粕经挤压膨化后, 硫代葡萄糖苷和植酸的含量显著降低, 单宁含量无显著变化 (倪海球等 2017)。如先前所述, 棉籽粕经挤压膨化后, 游离棉酚含量显著降低, 脱毒率可达 50% 以上 (邓江华 2015)。

5.2 原料预处理技术和养分消化率

养分消化率的意义是指动物消化某种养分的数量占食入饲料该养分总量的百分比, 是反应动物消化能力和饲料可消化性的一项重要指标。养分消化率是畜禽养殖过程中的重点检测项目, 提高养分消化率是提高畜禽生长性能的重要方法之一。然而, 饲料原料中存在着抗营养因子例如豆粕中的胰蛋白酶抑制剂 (Cho et al 2007) 和棉籽粕中的棉酚等 (Zhang et al 2006) 等, 会降低营养物质的消化率, 抑制动物的生长性能。近年来, 原料预处理技术如膨化、发酵和酶解等被用来降解、去除物料中的抗营养因子, 效果良好。有研究表明, PKC 经发酵后添加进肉仔鸡日粮可提

高灰分、钙、磷、蛋白质的表观消化率，并显著提高生长性能（丁晓敏 2022）。党文庆等（2020）年研究发现发酵豆粕可显著提高断奶仔猪磷、粗蛋白、有机物表观消化率。发酵预处理也有着不可忽视的缺点，例如周期长、速率慢等，若不考虑成本的问题，酶解也是极有效的方法。刘宁等（2010）研究发现，饲料中的普通豆粕替换为酶解豆粕可显著提高肉鸡的钙、磷、能量、粗蛋白质和干物质的表观消化率。另有研究表明，向 PKC 中加入果胶酶、蛋白酶和甘露聚糖酶能显著提高肉仔鸡的代谢能、氨基酸消化率和粗蛋白质消化率（李玉鹏等 2017）。此外，有关于膨化预处理改善动物养分表观消化率的研究层见叠出。Faridah 等（2020）研究表明，膨化 PKC 添加进肉鸡日粮，可提高 6% 的表观代谢能和 32% 的粗蛋白消化率。

6 棕榈粕在畜禽饲料中的应用

6.1 在家禽饲料中的应用

很少有研究人员报告家禽日粮中 PKC 的最佳掺杂水平的变化。PKC 在家禽中的使用取决于鸡的类型、年龄和性别，以及 PKC 的来源和壳含量的大小（Alimon 2004）。Zanu 等（2012）研究发现，饲料中添加 5% 和 10% 的 PKC 对 40 周龄蛋鸡的生产性能无不良影响且饲料成本降低，净收益更高；PKC 在蛋鸡饲料的添加比例在 15% 以上，会影响蛋鸡的平均日增重和产蛋量。也有研究称，在 28 周龄蛋鸡的饲料中分别添加 12.5% 和 25% 的 PKC，结果发现，处理组的饲料转化率（FCR）显著降低（Chong et al 2008）。Garcia 等（1999）建议家禽日粮中的 PKC 应限制在 20%。Anaeto 等（2009）发现，肉鸡可以使用高达 20% 的 PKC 饲料，而不会对其生产性能产生不利影响。此外，有人建议 20% 的 PKC 可以有效地替代玉米用于肉鸡的育肥期，从而获得更好的性能（Ugwu et al 2008）。PKC 也被应用于番鸭的饲料之中。Mustafa 等（2004）将压榨和溶剂萃取得来的 PKC 饲喂给 7 周龄的雌雄番鸭，结果表明，PKC 的加工方式对粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、代谢能（ME）和氨基酸（AA）消化率无显著影响。另有研究称，对处在生长期内的番鸭饲喂含有 15% PKC 的日粮，不会对整体性能和营养消化率产生任何不利影响（Fadil et al 2014）。不同品种的蛋鸭对于 PKC 的耐受性也不尽相同。Samsudin 等（2016）用含有 35% PKC 的饲料去饲喂卡基-康贝尔鸭，结果表明，饲料中 PKC 不影响周产蛋量、产蛋率、蛋壳厚度和蛋黄颜色，PKC 组的蛋重更高。显然，多年来研究者已经进行了许多研究来评估 PKC 在家禽

口粮中的效果,人们一致认为 PKC 可以用来取代玉米-豆粕基础日粮(Loh et al 2002, Ojewola and Ozuo 2006, Boateng et al 2008)

6.2 在牛饲料中的应用

反刍动物的瘤胃具有容积大且含有多种微生物菌群的特点,为协助动物分解、利用植物纤维素提供了强力的保障。PKC 是一种低成本、高纤维的副产品,被广泛用作奶牛的饲料(Pimentel et al 2016)。将 PKC 以 50、100 和 150 g/kg DM 的水平添加进奶牛饲料中,已被发现不会影响奶牛的产奶量和成分(Carvalho et al 2006)。此外,向含有春季优质牧草的总混合日粮中添加(200、400 g/kg DM)两个水平的 PKC,牛奶产量和除乳糖外的其他成分均未受影响(Wyngaard et al 2015)。而当牧草的品质较低时,添加 PKC 可对牛奶的产量和成分起着积极的作用(Colf et al 2015)。一项研究表明,PKC 在幼牛饲料中的含量可高达 21%,不会对牛肉的 pH 值、持水性、蒸煮损失、剪切力和仪器颜色指数造成影响(Santana et al 2016)。Jin 等(2000)分别在奶牛的日粮中加入 15%和 18%的 PKC,结果显示,试验组奶牛的产奶量和牛奶中乳蛋白含量要显著高于对照组。以上种种研究表明了,PKC 不仅可以替代奶牛传统日粮中的玉米、豆粕,降低养殖成本,还对扩大牛奶产量和改善牛奶品质起着积极的作用。

6.3 在猪饲料中的应用

断奶仔猪肠道结构及功能尚未发育完善,易发生腹泻疾病,因此要谨慎选择饲料原料的来源。Ao 等(2011)研究复合酶对以 PKC 为主饲料喂养的断奶仔猪的生长性能、血液和血清生化指标的影响,结果发现,PKC 在有或者无复合酶的情况下,可以 5%的添加比例喂给断奶仔猪。Adeshinwa 等(2007)评估用 PKC 替代玉米对 36.50 kg 阶段的生长猪生产性能和生产经济性的影响,PKC 在饲粮中的添加水平分别为 50%和 100%,以替代玉米重(30 kg/100 kg),结果发现,PKC 替代水平对生长猪饲粮中营养物质的表观消化率以及各处理组的平均日采食量、日增重、饲料效率无显著影响,由此可以推断,PKC 可以在不影响生长猪生产性能和饲粮高效利用的情况下,有效地替代生长猪饲粮中的玉米作为能量来源(按重量计算)。然而,PKC 在不被进行其他处理的情况下,以超过 20%的比例添加进饲粮中,则 PKC 会对生长育肥猪的生长性能和胴体质量产生负面影响(Roslan et al 2017)。有报道称,育肥猪对 PKC 的耐受性高于生长猪(Babatunde et al 1975)。Rhule 等(1996)同样

有此发现，对猪分别饲喂 0、200、300 和 400 g/kg 含 PKC 的饲粮。各处理组生长期猪的平均日增重（ADG）分别为 0.47、0.46、0.39 和 0.40 kg，差异显著；育肥期相应的 ADG 分别为 0.45、0.45、0.46 和 0.42 kg，差异不显著；饲粮中 PKC 水平对背膘厚度无显著影响。

7 研究目的与意义

玉米、豆粕等优质饲料原料短缺一直是困扰我国畜牧行业高质量发展的困扰之一，发展、利用非常规饲料原料则是解决问题的有效途径。PKC 粗蛋白、粗脂肪含量丰富，营养价值较高，但是其存在高含量的非淀粉多糖，无法大量应用于猪日粮中。本课题主要通过挤压膨化、酶解及复合菌发酵三种饲料预处理技术加工 PKC，降解 PKC 中的非淀粉多糖，提高猪日粮中 PKC 的可添加量，为《饲料中玉米豆粕减量替代工作方案》提供理论基础。

第二章 棕榈粕不同预处理加工参数优化试验

PKC 因其丰富的营养价值和远低于玉米、豆粕的进口价格成为新的饲料原料选择，然而美中不足的是，PKC 中非淀粉多糖（NSP）含量高（Esuga et al 2008），阻碍了动物对营养物质的吸收，限制了其在饲料生产中的应用。因此，降低 PKC 的非淀粉多糖含量，提升它的营养价值，成为畜牧领域中新的研究热点。膨化、发酵和酶解是目前常用的饲料原料预处理技术，可将物料中的非淀粉多糖部分降解为还原糖。因此，本试验选用 PKC 为试验材料，以还原糖的释放量为评价指标，对 PKC 膨化、发酵和酶解加工参数进行优化，以期获得适用于 PKC 的预处理参数组合，应用于生长育肥猪饲料生产。

1 棕榈粕酶解加工参数优化试验

1.1 试验材料与酶

本试验所用 PKC 购买自天津九州大地饲料有限公司。

甘露聚糖酶 10000 U/g，购买自北京挑战集团。

1.2 试剂

葡萄糖标准液:准确称取分析纯葡萄糖 100 mg，置于烧杯中，加少量蒸馏水溶解后，转移至 100 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容至 100 mL，混匀，4℃冰箱中保存备用。

DNS 试剂:将 6.3 g DNS 和 262 mL 2 mol/L 的 NaOH(20.96 g)溶液，加到 500 mL 含有 185 g 酒石酸钾钠的热水溶液中，再加 5 g 重蒸酚和 5 g 亚硫酸钠，搅拌溶解，冷却后加蒸馏水定容至 1000 mL，贮于棕色瓶中，放置 7-10 d 后使用。

1.3 试验设备

YXQ-LS-75S11 立式压力蒸汽灭菌锅（东联哈尔）、SHP-450 生化培养箱（森信），JY12001 电子天平（上海精密仪器）、HX-200B 摇床（海向仪器）、TU-1901 分光光度计（普析）。

1.4 试验设计

设计 3 因素 3 水平的正交组合试验（表 2-1、表 2-2），对 PKC 酶解加工参数进行优化。

表 2-1 PKC 酶解加工正交组合试验设计-因素水平表

Table 2-1 The orthogonal combination design of enzymatic PKC-levels of factors

水平 Level	因素/Factor		
	酸碱度/pH	温度(°C)/Temperature	时间(h)/Hour
1	5	50	6
2	6	60	7
3	7	70	8

表 2-2 PKC 酶解加工正交组合试验设计-正交表 (L3³)

Table 2-2 Orthogonal combination design of enzymatic PKC—experimental arrangements (L3³)

试验组	酸碱度	温度 (°C)	时间 (h)
Treatment	pH	Temperature	Hour
1	5	50	6
2	5	60	8
3	5	70	7
4	6	50	7
5	6	60	6
6	6	70	8
7	7	50	8
8	7	60	7
9	7	70	6

1.5 检测指标及方法

1.5.1 样品中还原糖的测定方法

(1) 葡萄糖标准曲线制作

取 9 支具塞刻度试管编号, 按表 2-3 分别加入葡萄糖标准液、蒸馏水和 DNS 试剂, 配成不同浓度的葡萄糖反应液。将配制好的葡萄糖反应液, 封口置沸水浴煮 5 min, 然后取出置冷水浴冷却, 随后定容至 25 mL, 以 0 号管为对照, 在 540 nm 下测定吸光值, 以葡萄糖质量为 Y 轴, 吸光值为 X 轴, 拟合曲线。

表 2-3 葡萄糖标准曲线制作

Table 2-3 Preparation of glucose standard curve

试剂	试管编号								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
葡萄糖标准溶液 (mL)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
蒸馏水 (mL)	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
DNS (mL)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
葡萄糖含量 (mg)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6

(2) 样品中还原糖的测定

准确称取 3.00 g 样品, 移入 50 mL 离心管中, 加入 27 mL 煮沸蒸馏水, 振荡 30 min, 使还原糖浸出, 然后 4000 rpm 离心 5 min。此时的上清液为 10 倍稀释液, 实验时可根据需要稀释至适当倍数。

取 4 支具塞试管, 编号 0、1、2、3。以制作标准曲线相同的方法, 在 1-3 号试管中分别加入 1 mL 待测液和 1 mL 蒸馏水, 1.5 mL DNS, 而对照的 0 号管内则加入 2 mL 的蒸馏水和 1.5 mL DNS。封口置沸水浴煮 5 min, 冷水浴冷却, 定容至 25 mL。在 540 nm 下测吸光值。根据拟合曲线计算样品中还原糖的含量。

实验时注意样品的稀释倍数要保证计算得到的葡萄糖浓度在标准曲线线性关系良好范围内, 以 OD 540 在 0.1-0.4 范围内最佳。

1.6 数据处理与分析

所有数据均采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析。试验数据采用单因素方差分析, Duncan 氏法进行多重比较, 结果以“平均值±标准差”形式表示, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著。

1.7 试验结果

试验测定 PKC 经酶解后还原糖释放量，具体试验数据见表 2-4、表 2-5。综合表 2-4、表 2-5 数据可知，酸碱度、酶解温度显著影响 PKC 酶解产品还原糖释放量 ($P<0.05$)，三个因子对 PKC 非淀粉多糖降解强弱顺序为酸碱度>温度>时间，PKC 的最佳酶解加工参数为酸碱度 5、温度 60℃、时间 8 h。

表 2-4 不同加工参数组合对酶解 PKC 还原糖的影响

Table 2-4 Values of experimental indices in experiment of reducing sugar of enzymatic PKC

编号	因素/Factor			还原糖 (%)
	酸碱度/pH	温度(°C)/Temperature	时间(h)/Time	
1	5	50	6	8.28±0.53
2	5	60	8	9.00±0.78
3	5	70	7	8.44±0.47
4	6	50	7	6.81±0.61
5	6	60	6	7.09±0.20
6	6	70	8	6.07±0.32
7	7	50	8	5.80±0.63
8	7	60	7	6.13±0.46
9	7	70	6	6.71±0.72
k1	8.57	6.85	6.69	
k2	6.66	7.18	6.9	
k3	5.21	6.41	6.84	
最优水平	5	60	8	
极差	3.36	0.77	0.21	

表 2-5 PKC 酶解加工参数优化试验-方差分析表

Table 2-5 Analysis of variance in experiment of optimization parameters of enzymatic PKC

参数	自由度	F 值	P 值
Parameter	Degree of freedom	F-value	P-value
酸碱度/pH	2	37.354	<0.01
温度(°C)/Temperature	2	1.254	0.025
时间(h)/Time	2	0.969	0.705

1.8 讨论

酶解预处理的特点是作用条件温和、无其它毒副作用、便于控制，可以有效地降解物料中营养成分和抗营养因子。目前，有关从酶学角度降低 PKC 粗纤维含量的研究未见报道。本试验中，酶解预处理参数：酶解温度 50℃，酸碱度 6，酶解时间 8 h，PKC 的纤维含量最低，还原糖的含量最高。究其原因，酶的活性对于温度异常的敏感，然不同种类、不同作用酶的最适温度存在差异，温度过低或者过高都会降低酶促反应速率。同温度类似，不同种类酶也具有最适 pH 值，当环境 pH 值过高或者过低时，离子作用力便会干扰蛋白三维结构的共价键，因此酶蛋白发生失活、变性。

2 棕榈粕发酵加工参数优化试验

2.1 试验材料和菌株

本研究所用 PKC 同 2.1.1。

本研究所用菌株为本实验室历年筛选保藏菌株，包括 10 株乳酸菌、8 株酵母菌和 5 株黑曲霉菌。发酵液由黑曲霉菌、乳酸菌和酵母菌制成，活菌数大于 10^9 cfu/mL，比例为 1:1:1，接种量为 10%。

2.2 试验主要培养基

(1) 液体牛肉膏蛋白胨培养基:牛肉膏 3.0 g，蛋白胨 10.0 g，NaCl 5.0 g，加水至 1000 mL，pH 7.4-7.6，121℃，灭菌 20 min。

(2) PKC 发酵底物:PKC100 g，pH 自然。

2.3 试验设备

SHB-IV 双 A 型真空泵（郑州长城科工）、KDN-08 消化炉（上海华睿）、

LHS-HC-I 恒温培养箱（上海一恒）、CS-700Y 高速多功能粉碎机（武义海纳电器）

2.4 试验设计

设计 3 因素 3 水平的正交组合试验（表 2-6、表 2-7），对 PKC 发酵加工参数进行优化。

表 2-6 PKC 发酵正交组合试验设计-因素水平表

Table 2-6 The orthogonal combination deign of fermented PKC-levels of factors

水平 Level	因素 Factor		
	时间（d）/Time	含水量（%）/Water content	温度（℃）/Temperature
1	4	45	34
2	5	50	36
3	6	55	38

表 2-7 PKC 发酵加工正交组合试验设计-正交表（L3³）

Table 2-7 Orthogonal combination deign of fermented PKC—experimental arrangements（L3³）

试验组	时间（d）	含水量（%）	温度（℃）
Treatment	Time	Water content	Temperature
1	4	45	34
2	4	50	38
3	4	55	36
4	5	45	36
5	5	50	34
6	5	55	38
7	6	45	38
8	6	50	36
9	6	55	34

2.5 检测指标及方法

同 1.5 检测方法

2.6 数据处理与分析

所有数据均采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析。试验数据采用单因素方差分析，Duncan 氏法进行多重比较，结果以“平均值±标准差”形式表示， $P<0.05$ 表示差异显著， $P>0.05$ 表示差异不显著。

2.7 试验结果

试验测定 PKC 经复合菌发酵还原糖释放量，具体试验数据见表 2-8、表 2-9。综合表 2-8、表 2-9 数据可知，发酵温度和含水量显著影响 PKC 发酵产品还原糖释放量（ $P<0.05$ ），三个因子对 PKC 非淀粉多糖降解强弱顺序为含水量>发酵温度>发酵时间，PKC 的发酵最佳加工参数为时间 4 d、含水量 55%、温度 36℃。

表 2-8 不同加工参数组合对发酵 PKC 还原糖的影响

Table 2-8 Values of experimental indices in experiment of reducing sugar of fermented PKC

编号	因子			还原糖 (%)
	时间 (d)	含水量 (%)	温度 (°C)	
	Time	Water content	Temperature	
1	4	45	34	3.88±0.46
2	4	50	38	5.23±0.21
3	4	55	36	6.37±0.21
4	5	45	36	5.37±1.20
5	5	50	34	4.00±0.50
6	5	55	38	5.78±0.54
7	6	45	38	4.06±0.42
8	6	50	36	4.50±0.57
9	6	55	34	5.51±0.52
k1	5.16	4.44	4.46	
k2	5.05	4.58	5.41	
k3	4.69	5.88	5.02	
最优水平	4	55	36	
极差	0.46	1.45	0.95	

表 2-9 PKC 发酵加工参数优化试验-方差分析表

Table 2-9 Analysis of variance in experiment of optimization parameters of fermented PKC

参数	自由度	F 值	P 值
Parameter	Degree of freedom	F-value	P-value
时间 (d) /Time	2	1.305	0.293
含水量 (%) /Water content	2	13.802	<0.01
温度 (°C) /Temperature	2	4.933	0.018

2.8 讨论

发酵预处理的本质是利用细菌、真菌等微生物在进行生命活动的同时所分泌的胞外酶对物料中的蛋白质等大分子和抗营养因子进行降解的过程。宣秋希等（2022）研究发现，通过单菌或混菌固态发酵棉籽粕可有效降低游离棉酚的含量，提高棉籽粕的营养价值。张福娟等（2020）研究发现，以黑曲霉和热带假丝酵母固态发酵麸皮，当发酵时间 3 d，发酵温度 32℃，麸皮含水量 70%，麸皮的蛋白质含量最高，粗纤维含量最低。在本试验中，发酵时间 4 d，发酵温度 36℃，含水量 55%，PKC 还原糖的释放量最高。重要的发酵预处理参数如发酵温度、发酵时间、料水比等，都会影响物料的发酵效果。温度过低时，微生物的生命代谢活动会减弱；温度过高时，会导致微生物的核酸和蛋白质等大分子物质发生破坏、变性。发酵时间过短，微生物增殖的时间短，数量较少；发酵时间过长，微生物代谢的有害产物积累过多，影响微生物的生命活动。水分含量较低时，微生物生命活动所需养分无法溶解完全；水分含量较高时，会增大物料的粘度，影响氧气和二氧化碳的传播，抑制微生物的增殖。

3 棕榈粕膨化加工参数优化试验

3.1 试验材料

PKC 同 2.1.1。

3.2 试验仪器与设备

MY56 双螺杆挤压膨化机（牧羊）、pHS-2C pH 计（今迈仪器仪表有限公司）、HH.S-8 电热恒温水浴锅（跃进医疗器械厂）、CR22G 高速离心机（日本日立公司）、FA1004 分析天平（恒平科学仪器公司）、TU-1900 分光光度计（北京普析通用仪器）

3.3 试验设计

设计 3 因素 3 水平的正交组合试验（表 2-10、表 2-11），对 PKC 膨化加工参数进行优化。

表 2-10 PKC 膨化加工正交组合试验设计-因素水平表

Table 2-10 The orthogonal combination design of puffing PKC-levels of factors

水平 Level	因素 Factor		
	温度 (°C)	喂料速度 (kg/min)	含水量 (%)
	Temperature	Feeding rate	Water content
1	100	17.25	12
2	120	22.34	16
3	140	27.35	20

表 2-11 PKC 膨化加工正交组合试验设计-正交表 (L3³)

Table 2-11 The orthogonal combination design of puffing PKC-levels of factors (L3³)

试验组	温度 (°C)	喂料速度 (kg/min)	含水量 (%)
Treatment	Temperature	Feeding rate	Water content
1	100	17.25	12
2	100	22.34	20
3	100	27.35	16
4	120	17.25	16
5	120	22.34	12
6	120	27.35	20
7	140	17.25	20
8	140	22.34	16
9	140	27.35	12

3.4 检测指标及方法

同 2.1.5 检测方法

3.5 数据处理与分析

所有数据均采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析。试验数据采用单因素方差

分析，Duncan 氏法进行多重比较，结果以“平均值±标准差”形式表示， $P<0.05$ 表示差异显著， $P>0.05$ 表示差异不显著。

3.6 试验结果

试验测定 PKC 经膨化后还原糖释放量，具体试验数据见表 2-12、表 2-13。综合表 2-12、表 2-13 数据可知，膨化温度和含水量显著影响 PKC 膨化产品还原糖释放量（ $P<0.05$ ），三个因子对 PKC 非淀粉多糖降解强弱顺序为膨化温度>含水量>喂料速度，PKC 的发酵最佳加工参数为膨化温度 100℃、喂料速度 22.34 kg/min、含水量 20%。

表 2-12 不同加工参数组合对膨化 PKC 还原糖的影响

Table 2-12 Values of experimental indices in experiment of reducing sugar of extruded PKC

编号	因子			还原糖（%）
	温度（℃）	喂料速度（%）	含水量（%）	
	Temperature	Feeding rate	Water content	
1	100	17.25	12	1.62±0.55
2	100	22.34	20	2.42±0.29
3	100	27.35	16	2.17±0.36
4	120	17.25	16	1.47±0.38
5	120	22.34	12	1.30±0.39
6	120	27.35	20	1.46±0.17
7	140	17.25	20	1.40±0.01
8	140	22.34	16	1.47±0.40
9	140	27.35	12	1.15±0.19
k1	2.07	1.5	1.36	
k2	1.41	1.73	1.7	
k3	1.34	1.59	1.76	
最优水平	100	22.34	20	
极差	0.73	0.23	0.4	

表 2-13 PKC 膨化加工参数优化试验-方差分析表

Table 2-13 Analysis of variance in experiment of optimization parameters of extruded PKC

参数	自由度	F 值	P 值
Parameter	Degree of freedom	F-value	P-value
温度 (°C) /Temperature	2	13.313	<0.01
喂料速度 (%) /Feeding rate	2	1.104	0.351
含水量 (%) /Water content	2	3.883	0.038

3.7 讨论

现阶段, 挤压膨化预处理已广泛应用于畜禽饲料生产, 具有改善物料营养价值和降低植物性饲料原料中抗营养因子的功能。赵凤芹等 (2008) 研究发现, 挤压膨化预处理可以降低玉米秸秆的粗纤维含量。Henry 等 (2001) 研究发现, 膨化预处理可以降低棉籽粕中游离棉酚的含量, 在适当添加赖氨酸的情况下, 膨化棉籽粕可以应用于肉仔鸡的日粮。在本试验中, 挤压膨化参数对 PKC 还原糖释放量有不同的影响, 其中, 物料含水率 20%、喂料速度 22.34 kg/min、膨化温度 100°C, PKC 还原糖释放量最高。究其原因, 物料中的水分过低时, 在挤压腔中的时间过长, 影响淀粉糊化过程; 物料中的水分过高, 会降低挤压腔内的温度和压力, 影响物料的膨化效果。挤压腔内温度过低时, 淀粉无法糊化完全; 挤压腔内温度过高时, 蛋白质会发生“美拉德”反应, 影响动物对蛋白质的消化、吸收。喂料速度过快, 原料在挤压腔内的摩擦力增大, 腔内温度便会升高, 导致淀粉碳化及出料困难; 喂料速度过慢, 就会出现原料膨化度小, 产品不蓬松、产量低的结果。对于粗纤维而言, 有研究认为, 膨化过程中的高压、高温和高剪切力会断裂纤维分子间的化学键, 进而改变分子极性, 膨化预处理能显著降低物料粗纤维含量, 并且提高可溶性纤维含量 (田珍珍等 2015)。本研究结果与钟永兴 (2007) 研究膨化降低菜籽粕的粗纤维含量的结果一致。

4 小结

PKC 的最佳膨化加工参数为膨化温度 100°C、喂料速度 22.34 kg/min、含水量 20%; 最佳酶解加工参数为酸碱度 5、酶解温度 60°C、酶解时间 8 h; 发酵最佳加工参数为发酵时间 4 d、含水量 55%、发酵温度 36°C。

第三章 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响

现阶段，制粒是养猪业时兴的热加工技术。制粒过程是指在粉状物料在适宜水分、压力、热量的条件下，经由机械作用转变成颗粒状态的过程（Falk 1985）。有研究称，家禽饲喂颗粒型饲料可提高采食量和饲料利用效率（Freitas et al 2008）。Chae 等（1997）研究发现，与饲喂挤压日粮的猪相比，饲喂颗粒日粮猪的平均日增重和饲料转化率明显更好。然而，只有当颗粒在被动物摄入之前保持完整性时，才能实现更好的性能。影响颗粒质量的因素有很多，如饲料营养成分、原料粒径、调理温度和调理时间、饲料水分等，但饲料营养成分对颗粒饲料制粒特性影响最大，约占 40%。诸多非常规饲料因具有高纤维、低蛋白等因素，而无法制备出高质量的颗粒型饲料。本试验将第二章中经预处理得到的 PKC 制成颗粒饲料，检测硬度、含粉率、粉化率和淀粉糊化度指标，评估不同预处理 PKC 对颗粒型饲料制粒特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

饲料原料:第二章中经过预处理后的 PKC。

1.2 试验设备

试验室用 FW100 样品粉碎机、BS 224S 电子天平（感量 0.0001 克）、分样筛（孔径 0.45 mm）、101 A-2 型数显电热鼓风干燥箱、玻璃称量皿（直径 40 mm 以上,高 25 mm 以下）、干燥器（用变色硅胶做干燥剂）、GWJ-1 型饲料硬度计、箱式粉化率测定仪（JFHX 2），饲料混合机（9 HWP），全自动纤维测定仪（FT 122），振动筛（振动筛为自制装置:采用 1.5 KW 电机带动，分两层，上层筛网为 3 mm 试验筛，下层为底筛，筛网倾斜角度约为 15 度，从两个出料口分别收集筛上物和筛下物）。

1.3 主要试剂及溶液

冰醋酸、无水乙酸钠、脱支酶、蛋白沉淀剂、七水硫酸锌、氢氧化钠、酒石酸、五水硫酸铜、钼酸、钨酸钠、正磷酸、纯葡萄糖、蒸馏水。

1.4 颗粒饲料配方

颗粒饲料配方设计见表 3-1。

表 3-1 日粮组成与营养水平

Table 3-1 diet composition and nutrition level

项目 Items	对照组 Control	PKC 组 PKC	膨化 PKC 组 PPKC	发酵 PKC 组 FPKC	酶解 PKC 组 EPKC
玉米 Corn	69	62	62.5	62.9	63
豆粕 Soybean meal	24	21	20.5	19.9	19.9
大豆油 Soybean oil	3.2	3.2	3.2	3.4	3.3
棕榈粕 PKC	0	10	10	10	10
石粉 Limestone	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
磷酸氢钙 CaHPO_4	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
预混料 Premix	1	1	1	1	1
食盐 NaCl	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
赖氨酸 lysine	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
蛋氨酸 Methionine	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
苏氨酸 Threonine acid	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
营养水平 Nutrient levels					
消化能 DE(MJ/kg)	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
粗蛋白 CP	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
钙 Ca	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
磷 P	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

注：预混料为每千克日粮提供：1300 IU 维生素 A、150 IU 维生素 D、11 IU 维生素 E、7 mg 泛酸、0.5 mg 维生素 K、2 mg 核黄素、0.3 mg 叶酸、30 mg 烟酸、0.05 mg 生物素、1.0 mg 硫胺素、1.0 mg 维生素 B6、5 mg 维生素 B12 和 0.3 g 胆碱、Cu 4.27 mg、I 0.14 mg、Fe 64.90 mg、Mn 2.10 mg、Se 0.20 mg、Zn 61 mg。

Note: Premix supplied the following per kilogram of diet: Zn, 90.31 mg as Zn oxide; Mn, 18.01 mg as Mn sulfate; Fe, 53.96 mg as ferrous sulfate; Cu, 5.40 mg as Cu sulfate; Se, 0.30 mg as Na selenite; I, 2.20 mg as K iodate; niacin, 55.07 mg; pantothenic acid, 33.04 mg; vitamin A, 11013 IU; vitamin D, 2753 IU; vitamin E, 55 IU; riboflavin, 9.9 mg; vitamin K, 4.41 mg; vitamin B 12, 0.06 mg; choline, 495 mg; pyridoxine, 1.65 mg; folic acid, 1.65 mg; thiamine, 1.01 mg..

1.5 颗粒料制备

用颗粒压制机 SZLH 0.5 制粒，经 70℃ 的调质温度，粉碎机筛片孔径 2 mm、制粒机压缩比为 10、模孔直径 4.5 mm、调质时间 10 s、蒸汽压力 0.3 MPa 的方法，生产生长猪颗粒料。

1.6 指标测定

(1) 淀粉活化度的测定

淀粉活化度测定采用熊易强（2000）的方法，具体如下：准确称取 2 份样品各 0.2 g（准确至 0.0002 g），分别置于 25 mL 刻度试管内，其中 1 份供制备全糊化样品，另一份为测定样品。向样品中加入 15 mL 缓冲液，混匀后将试管置于沸水浴中加热 1 h（其间摇动 2 次~3 次），即为全糊化样品，用自来水冷却试管，滴加适量蒸馏水使液面恢复到加热前的位置，与测定样品一起进行以下步骤。向测定样品中加入 15 mL 缓冲液，分别向全糊化样品与测定样品中加入 1 mL 酶溶液。另取一空试管加入 15 mL 缓冲液和 1 mL 酶溶液，作为空白。在 40℃ 水浴中保温 1 h，起初摇动 1 次，以后每 15 min 摇动 1 次。保温达 1 h 时，加 2 mL 10% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ，混匀，再加 1 mL 0.5 mol/L NaOH。用水稀释至 25 mL，混匀，过滤。准确吸取 0.1 mL 滤液和 2 mL 铜试剂，置于 25 mL 刻度试管中。将该试管置沸水浴中 6 min，保持沸腾，加 2 mL 磷钼酸试剂，继续加热 2 min。用自来水将试管冷却，加蒸馏水稀释至 25 mL，堵住试管口（可用带手套的拇指或手掌），反复颠倒试管使之混匀，用分光光度计在 420 nm 读取吸收值。

(2) 硬度的测定

从每组硬颗粒饲料样品中选取 20 g 左右具有代表性的样品，用四分法从各部分选取 20 颗大体相同长度约为 1.0 cm 的饲料颗粒。使用颗粒硬度计进行测定，去掉测定值的最大值和最小值，最终结果以平均值表示。

(3) 颗粒粉化率的测定

选取两份 500 g 具有代表的颗粒饲料样品，分别装入粉化率测定仪的回转箱内，设定转速 500 r/min，开动机器，使箱体回转 10 min。回转结束后取出饲料样品，通过规定的标准筛网（本次试验 3.0 mm 颗粒过 2.5 mm 筛网，2.0 mm 颗粒过 1.7 mm 筛网），筛理时间 1 min，然后称取筛下物重量，以两侧测定结果的平均值表示。

$$\text{粉化率}(\%) = m_2/m_1 \times 100\%。$$

(4) 颗粒含粉率的测定

从各组饲料中取出 1.0 kg 左右刚冷却好的颗粒饲料，用四分法将颗粒饲料样品分为两份，每份约 500 g (m_1)，放在振筛机上筛理 3 分钟，将筛下物称量 (m_2)，两次测定结果的算术平均值作为饲料样品的含粉率，并且两次测定结果的差值应小于 1%。

$$\text{含粉率}(\%) = m_2/m_1 \times 100\%。$$

(5) 干物质、粗蛋白质、粗脂肪、粗纤维、粗灰分，参考《饲料分析及饲料质量检测技术》第三版张丽英主编。

1.7 数据处理及统计

使用 SPSS 25.0 软件，硬度、含粉率、粉化率、密度和体积质量计量数据值采用 t 检验的单因素方法分析，数据表示为均值±标准差的形式。 $P>0.05$ 表示差异不显著， $P<0.05$ 表示有显著性差异， $P<0.01$ 表示有极显著性差异。

2 结果与分析

2.1 预处理对棕榈粕常规营养成分的影响

由表 3-2 数据可知，与未处理的 PKC 相比，挤压膨化、发酵和酶解处理对 PKC 干物质含量无显著影响 ($P>0.05$)。发酵和酶解处理极显著提高 PKC 粗蛋白质的含量 ($P<0.01$)，挤压膨化处理对 PKC 粗蛋白含量无显著影响 ($P>0.05$)。挤压膨化、发酵、酶解三种处理皆可降低 PKC 中粗纤维的含量 ($P<0.01$)，但酶解处理的效果最优。膨化处理显著降低 PKC 中粗脂肪含量 ($P<0.05$)，但是发酵和酶解处理对低 PKC 中粗脂肪的含量无显著影响 ($P>0.05$)。膨化、发酵处理极显著提高 PKC 粗灰分的含量 ($P<0.01$)，酶解处理对 PKC 粗灰分的含量无显著影响 ($P>0.05$)。

3-2 预处理对 PKC 常规营养成分的影响

3-2 Effects of pretreatment on conventional nutritional components of PKC

营养成分	棕榈粕	膨化 PKC	发酵 PKC	酶解 PKC	P-值
Nutrient content	PKC	PPKC	FPKC	EPKC	p-value
干物质	92.59±0.14	92.50±0.39	92.51±0.21	92.52±0.11	0.962
Dry matter					
粗蛋白质	16.85±0.13 ^C	16.51±0.23 ^C	19.27±0.14 ^A	18.79±0.19 ^B	<0.01
Crude protein					
粗纤维	17.38±0.17 ^A	17.12±0.11 ^B	16.33±0.09 ^C	13.32±0.06 ^D	<0.01
Crude fiber					
粗脂肪	6.65±0.08 ^a	6.31±0.12 ^b	6.55±0.09 ^a	6.51±0.09 ^a	0.012
Ether extract					
粗灰分	4.04±0.15 ^C	4.30±0.04 ^A	5.18±0.06 ^B	4.08±0.08 ^C	<0.01
Crude Ash					

注:同列数据中肩标有相同字母者,差异不显著 ($P>0.05$); 有不同字母的,差异显著,大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$), 小写字母代表差异显著 ($P<0.05$), 下表同。

2.2 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响

由表 3-3 数据可知,硬度方面,与对照组相比,挤压膨化和发酵处理显著提高 PKC 型颗粒饲料的硬度 ($P<0.05$),酶解处理对 PKC 型颗粒饲料的影响不显著 ($P>0.05$)。含粉率方面及粉化率方面,与未处理 PKC 组颗粒饲料相比,挤压膨化、发酵和酶解处理极显著降低颗粒饲料的含粉率和粉化率 ($P<0.01$),各 PKC 预处理组与对照组的含粉率和粉化率无显著差异 ($P>0.05$)。淀粉糊化度方面,与未处理 PKC 组颗粒饲料相比,挤压膨化和发酵处理极显著提高颗粒饲料的淀粉糊化度 ($P<0.01$),酶解处理对颗粒饲料淀粉糊化度影响不大 ($P>0.05$)。

3-3 不同预处理 PKC 对颗粒型饲料制粒特性的影响

Table 3-3 Effects of different pretreatment PKC on granulation characteristics of pellet feed

项目 Items	处理组 Treatments					p-value
	对照组	10%PKC	10%PPKC	10%FPKC	10%EPKC	
硬度/N Hardness	42.63±3.31 ^c	44.78±1.73 ^{bc}	51.35±2.22 ^a	49.56±3.67 ^{ab}	46.84±2.51 ^{abc}	0.020
粉化率/% Pulverization rate	6.93±0.64 ^B	9.25±1.00 ^A	5.86±0.53 ^B	6.39±0.40 ^B	7.06±0.56 ^B	<0.01
含粉率/% Powder content	3.28±0.42 ^B	4.65±0.37 ^A	2.80±0.48 ^B	3.17±0.29 ^B	3.50±0.30 ^B	<0.01
淀粉糊化度/% Gelatinization Starch	41.07±0.40 ^B	39.42±0.27 ^D	43.37±0.22 ^A	40.25±0.12 ^C	39.83±0.49 ^{CD}	<0.01

3 讨论

3.1 预处理对棕榈粕常规营养成分的影响

发酵处理是指在暴露在空气或在缺氧的条件下，人为地控制有益菌生长、代谢的过程，在此过程，微生物会释放体内与生命活动相关的代谢产物，如消化酶等，对原料的有机物进行降解，便于动物直接吸收利用（Fazhi et al 2011）。在本研究中，发酵处理极显著提高 PKC 粗蛋白含量，这与 Adli 等（2020）研究结果一致，这主要归结为菌体蛋白的产生。一方面，微生物在发酵期间分泌较多数量的有机酸、多肽和酶，将物料中的部分物质转变成菌体蛋白，另一方面，菌种会不可避免的在发酵过程后期死亡、破裂，菌体蛋白得到释放（李川东等 2008）。发酵处理会极显著降低 PKC 粗纤维和粗脂肪含量，原因是本试验选取已知产生纤维素酶的菌种进行发酵，纤维素酶将 PKC 粗纤维降解，这与 Chiang 等（2009）固态发酵菜籽粕降低粗纤维的研究类似。

生物酶处理菜籽粕、棉籽粕等杂粕资源去替代动物饲粮中的豆粕已成为畜牧工作者研究的热点之一。在本研究中，酶解处理能够降低 PKC 中粗纤维的含量，这与 Berlin 等（2007）利用纤维素酶和果胶酶降低玉米秸秆中的粗纤维的研究类似。原因是纤维素（Cellulose）、半纤维素（Hemicellulose）及果胶（Pectin）是构成植物细胞壁的主要成分，因此，纤维素酶和果胶酶的协同作用降低了 PKC 粗纤维的含量。

此外,酶解处理提高了 PKC 粗蛋白的含量,可能的原因是酶解过程所产生的碳水化合物被 PKC 存在的细菌、真菌等微生物利用,提高了 N 元素的相对含量。

近年来,挤压膨化技术不断的发展、完善,已广泛应用于饲料生产行业,挤压膨化处理不但可以改善物料的营养价值,而且还可钝化物料的抗营养因子。在本研究中,PKC 经挤压膨化处理后,干物质和粗蛋白的含量无显著变化,这与秦毅(2020)研究挤压膨化处理大豆后粗蛋白含量无显著变化类似。虽然粗蛋白的含量没有变化,但是蛋白质的性质已经发生了改变,研究表明,物料经挤压膨化处理后,蛋白质的空间结构发生变化,称为变性,蛋白质变性后更易与蛋白酶接触,提高消化率(Bhattacharya and Hanna 2010)。挤压膨化处理能够降低 PKC 粗纤维的含量,可能的原因是与挤出过程中低分子量可溶性纤维的增加有关(Berglund et al 1994)。挤压膨化处理会在一定程度上影响物料粗脂肪含量(Fuh and Chiang 2001)。在挤出过程中,PKC 的脂肪含量显著减少,可能的原因是 PKC 中的不饱和脂肪酸在高温环境下极易发生氧化反应,易和淀粉形成络合物。

3.2 不同预处理棕榈粕对颗粒型饲料制粒特性的影响

硬度、粉化率和含粉率是常见的颗粒料质量评价的重要指标,硬度是指颗粒饲料抵抗因外力所造成形变的能力(赵雅欣 2006);粉化率被描述为颗粒料在储存、运输过程中因外力作用变成粉料的百分比(Lowe 2005)。含粉率被描述为颗粒料样品中所夹杂的粉料所占样品总质量的百分比(Briggs et al 1999)。颗粒料的硬度太高会影响动物的适口性,对动物肠道结构产生不利的影响,硬度太低又会使得粉化率升高,增加饲料成本;含粉率过高也会增大饲料成本,同时也是动物呼吸道健康的潜在威胁。李昕楠等(2022)研究发现,豆粕经挤压膨化加工后,可显著提高颗粒饲料的硬度,对含粉率和粉化率无显著影响;豆粕经酶解加工后,显著提高颗粒料的粉化率,对硬度和含粉率无显著影响。本研究发现,挤压膨化、发酵处理显著提高颗粒饲料的硬度。究其原因,挤压膨化处理使得 PKC 发生淀粉糊化,粘性增强,蛋白质的含量虽无显著变化,但蛋白质的吸水性和持水力得到提高,利于颗粒饲料的硬度。另一方面,PKC 经发酵之后,质地就会变的软,此外,发酵处理能增加 PKC 粗蛋白的含量,而粗蛋白又是最好的粘合剂,因此利于颗粒饲料的硬度。PKC 组颗粒饲料的含粉率和粉化率要显著高于其它各组,主要原因是 PKC 中含有大量的粗纤维,粗纤维不但质地坚硬而且粘结力差,会降低饲料粒子间的结合力,另一方面也会影响饲料吸收蒸汽的能力(Thomas

et al 1998)。挤压膨化、酶解和发酵处理都会降低 PKC 粗纤维的含量，利于降低 PKC 颗粒饲料的粉化率和含粉率。淀粉糊化度是评判畜禽对日粮可消化性的重要指标，水分、温度以及调质时间都会对饲料淀粉糊化度造成影响。在本试验中，发酵处理后的 PKC 的水分含量要高于其它处理，在制粒机内相同的温度和时间条件下，淀粉糊化度要高于其它处理。

4 小结

挤压膨化处理能够降低 PKC 粗纤维、粗脂肪的含量，提高粗灰分的含量，对于物质、粗蛋白的含量无显著影响；发酵、酶解处理都能够增加粗蛋白的含量，降低粗纤维的含量，对其它营养物质的含量无显著影响，但酶解处理降解粗纤维的效果更好。挤压膨化处理能够显著提高 PKC 型颗粒饲料的硬度；发酵处理能够显著提高 PKC 型颗粒饲料的淀粉糊化度；挤压膨化、酶解及发酵处理皆可降低颗粒饲料的含粉率和粉化率，提高颗粒饲料的质量。

第四章 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率及肠道微生物的影响

正如第二章内容所言，PKC 经挤压膨化、酶解和复合菌发酵后，粗纤维含量可降低 10%-20%，营养价值得到提升。为了探究不同预处理 PKC 日粮在生长育肥猪中的饲养效果，本实验在生长肥育猪日粮中分别添加 10%普通 PKC、10%膨化 PKC、10%发酵 PKC、10%酶解 PKC，测定其对生长育肥猪的养分消化率、生长性能、血液指标、肠道微生物的影响。

1 材料与方法

1.1 试验动物与设计

本试验采用单因素随机分组试验设计，选取健康状况良好、胎次和体重（ 28 ± 0.5 kg）相近的“杜×长×大”生长猪 105 头，随机分为 5 个组，每组 3 个重复，每个重复 7 头。试验共设 5 个处理，处理 1（对照组）饲喂全玉米-豆粕型基础日粮，处理 2 饲喂添加 10%普通 PKC 日粮，处理 3、4、5 分别饲喂添加（10% PPKC、10% FPKC、10% EPKC）的预处理 PKC 日粮，各组日粮中代谢能和粗蛋白质等营养水平均调配均衡。

1.2 饲养管理

试验在河南河顺自动化设备有限公司，正式试验开始前一周对猪舍进行清洗并消毒。预试期 1 周，正式期为 8 周（生长猪阶段 4 周、育肥猪阶段 4 周），采用公母混养的圈养方式进行饲养，试验期间试验猪自由采食，自由饮水，保持猪舍清洁和通风，严格控制室温并定期消毒。于第 4 周和第 8 周周末早晨八点空腹称重，计算平均日增重，并计算料重比。

1.3 试验日粮

对照组饲喂玉米豆粕型基础日粮，试验组棕榈粕添加量为 10%。日粮配制参照 NRC(2012)标准中 25-80 kg 生长育肥猪的营养需要，饲粮配方及营养水平见表 4-1。

表 4-1 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）%

Table 4-1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis) %

项目 Items	对照组		PKC 组		膨化 PKC		发酵 PKC		酶解 PKC	
	Control group		PKC		PPKC		FPKC		EPKC	
阶段 Period	生长	肥育	生长	肥育	生长	肥育	生长	肥育	生长	肥育
玉米 Corn	69	73.79	62	66.76	62.5	66.86	62.9	67.06	63	66.96
豆粕 Soybean meal	24	20.1	21	17.1	20.5	17.0	19.9	16.8	19.9	16.9
大豆油 Soybean oil	3.2	2.57	3.2	2.6	3.2	2.60	3.4	2.6	3.3	2.6
棕榈粕 PKC	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10
石粉 Limestone	0.79	0.96	0.79	0.96	0.79	0.96	0.79	0.96	0.79	0.96
磷酸氢钙 CaHPO_4	0.99	0.8	0.99	0.8	0.99	0.8	0.99	0.8	0.99	0.8
预混料 Premix	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
食盐 NaCl	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
赖氨酸 lysine	0.36	0.3	0.36	0.3	0.36	0.3	0.36	0.3	0.36	0.3
蛋氨酸 Methionine	0.27	0.11	0.27	0.11	0.27	0.11	0.27	0.11	0.27	0.11
苏氨酸 Threonine acid	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03
营养水平										
Nutrient levels										
消化能 DE (MJ/kg)	14.26	14.24	14.26	14.24	14.26	14.24	14.26	14.24	14.26	14.24
粗蛋白 CP	16.08	15.18	16.08	15.18	16.08	15.18	16.08	15.18	16.08	15.18
钙 Ca	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5
磷 P	0.53	0.47	0.53	0.47	0.53	0.47	0.53	0.47	0.53	0.47

注:预混料为每千克日粮提供:铁 100 mg; 铜 15 mg; 锌 120 mg; 锰 40 mg; 硒 0.3 mg; 碘 0.25 mg; 维生素 A 13500 IU; 维生素 D₃ 2250 IU; 维生素 E 36 IU; 维生素 K₃ 4 mg; 维生素 B₁ 5 mg; 维生素 B₂ 12.5 mg; 维生素 B₃ 25 mg; 维生素 B₅ 15 mg; 维生素 B₆ 7.5 mg; 维生素 B₁₂ 0.05 mg; 叶酸 2.4 mg; 烟酸 50 mg; 生物素 0.15 mg。

Note: The premix provided the following per kilogram of diet: Fe, 100 mg as ferrous sulfate; Cu, 15 mg as copper sulfate; Zn, 120 mg as zinc sulfate; Mn, 40 mg as manganese sulfate; Se, 0.3 mg as sodium selenite; I, 0.25 mg as potassium iodide; VA 13500 IU; VD₃ 2250 IU; VE 36 IU; VK₃ 4 mg; VB₁ 5 mg; VB₂ 12.5 mg; VB₃ 25 mg; VB₅ 15 mg; VB₆ 7.5 mg; VB₁₂ 0.05 mg; folic acid 2.4 mg; niacin 50 mg; biotin 0.15 mg.

1.4 检测指标与方法

1.4.1 生长性能

试验期间每天准确记录猪采食量，在试验开始和结束时对猪进行空腹称重，然后计算平均日增重（Average daily gain, ADG）、平均日采食量（Average daily feed intake, ADFI）和耗料增重比（Feed : Gain Rate, F/G）。

始重（IBW）：试验开始时所称的猪重量（kg）

末重（FBW）：试验结束时所称的猪重量（kg）

$ADG (kg/d) = (\text{结束时体重 } kg - \text{初始体重 } kg) / \text{头数} / \text{试验天数 } d$

$ADFI (kg/d) = \text{每栏总采食量 } kg / \text{头数} / \text{试验天数 } d$

$F/G = ADFI / ADG$

1.4.2 血液生化指标的测定

于试验期第 4、8 周末，每组随机抽取 6 头猪（每个重复随机取 2 头），颈静脉空腹采集血液 5-10 mL，3000 r/min 离心 5 分钟，制备血清，分别测定谷丙转氨酶（ALT）、谷草转氨酶（AST）、碱性磷酸酶（ALP）、尿素（UREA）、血清总蛋白（TP）、血清白蛋白（ALB），上述指标均用南京建成试剂盒测定。

1.4.3 养分消化率指标

在饲养期的最后三天每天收集每组生长猪所产鲜粪，混匀后取样，按每百克粪加 5% 的 20 ml HCl 进行处理，防止微生物分解代谢，然后在 65℃ 烘箱烘 72 h，置于室温条件下自然回潮 24 h，粉碎过 40 目筛，制成风干样，保存备用、待测。消化试验采用内源指示剂法，利用盐酸不溶灰分（AIA）为指示剂。

日粮养分消化率计算公式为：某养分消化率（%）= $100 - A_1 F_2 / A_2 F_1 \times 100$ 。

注：F₁ 是日粮中该养分含量（%）；F₂ 是粪中该养分含量（%）；A₁ 是日粮中 AIA 含量（%）；A₂ 是粪中 AIA 含量（%）。

1.4.4 肠道微生物指标

收集空肠、回肠肠道内容物以及粪便，进行实时 PCR 检测。引物序列见表 5-2。RT-qPCR 使用 iCycler IQ 实时检测系统进行，该系统使用 iCycell 光学系统接口软件版本 2.3（Bio-Rad, Veenendaal, Netherlands），方法参考 Wang et al (Wang et al2020)。

表 4-2 引物序列

Table 4-2 Primer sequences

Target bacteria	Source	Identifier
Lactobacillus	ATCC	1578
Clostridium_sensu_stricto_1	ATCC	1485
Clostridium_sensu_stricto_3	ATCC	1485
Faecalibacterium	ATCC	216851
Parabacteroides	ATCC	375288
[Eubacterium]_hallii_group	ATCC	1730
Bifidobacteriaceae	ATCC	31953
Lachnospiraceae_AC2044_group	ATCC	186803
Streptococcaceae	ATCC	1300

1.5 数据处理

所有数据均采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析。试验数据采用单因素方差分析，Duncan 氏法进行多重比较，结果以“平均值±标准差”形式表示， $P<0.05$ 表示差异显著， $P>0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率的影响

由表 4-3 数据可以得知，与对照组相比，生长阶段，PPKC 组养分消化率无显著差异（ $P>0.05$ ），PKC 组、FPKC 组及 EPKC 组养分消化率显著低于对照组（ $P<0.05$ ）；与 PKC 组相比，PPKC 组干物质、粗脂肪消化率显著高于 PKC 组（ $P<0.05$ ），FPKC 组及 EPKC 组与 PKC 组养分消化率差异不显著（ $P>0.05$ ）。

育肥阶段，干物质、粗蛋白、粗脂肪表观消化率方面，PKC 组显著低于对照组（ $P<0.05$ ），PPKC 组、FPKC 组、EPKC 组与对照组之间无显著差异（ $P>0.05$ ）。

表 4-3 不同预处理 PKC 对生长育肥猪养分消化率的影响 (n=3)

Table 4-3 Effects of different pretreatment PKC on nutrient digestibility of growing-finishing pig (n=3)

项目 Items	处理组 Treatments				<i>P</i> -value	
	对照组	10%PKC	10%PPKC	10%FPKC		10%EPKC
生长期						
干物质（DM）	78.11±0.99 ^a	75.18±0.40 ^c	77.52±0.76 ^{ab}	76.36±1.13 ^{bc}	76.45±0.74 ^{bc}	0.014
粗蛋白（CP）	79.78±1.57 ^a	75.07±1.47 ^b	77.68±2.25 ^{ab}	76.12±1.57 ^b	74.77±1.69 ^b	0.028
粗脂肪（EE）	77.39±1.10 ^a	73.17±1.83 ^c	76.12±1.53 ^{ab}	74.26±1.16 ^{bc}	74.21±1.15 ^{bc}	0.025
育肥期						
干物质（DM）	80.76±1.80 ^a	76.70±1.75 ^b	80.44±1.29 ^a	78.65±0.88 ^{ab}	79.06±0.83 ^{ab}	0.031
粗蛋白（CP）	82.87±1.16 ^a	78.13±0.95 ^b	81.07±1.87 ^a	80.14±1.71 ^{ab}	80.66±1.46 ^{ab}	0.033
粗脂肪（EE）	78.34±1.03 ^a	75.29±1.45 ^b	79.74±1.48 ^a	78.88±0.73 ^a	78.38±1.44 ^a	0.015

2.2 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪生长性能的影响

由表 4-4 数据可以得知, 生长阶段, PKC 组、PPKC 组平均日采食量与对照组无显著差异 ($P>0.05$), FPKC 组、EPKC 组的平均日采食量要显著高于对照组 ($P<0.05$)。平均日增重方面, 各组 ADG 呈极显著差异水平 ($P<0.01$), PKC 组相比对照组、PPKC 组、FPKC 组及 EPKC 组分别低 18.2%、16%、14.9%和 16%。料肉比方面, 与对照组相比, PPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$), PKC 组、FPKC 组、EPKC 组要显著高于对照组 ($P<0.05$)。

育肥阶段, PKC 组末重显著低于对照组及其它 PKC 预处理组 ($P<0.05$)。各组 ADFI 并无显著差异 ($P>0.05$)。PKC 组 ADG 和 F/G 均显著低于对照组和其它 PKC 预处理组, 与对照组相比, 各 PKC 预处理组 F/G 和 ADG 未呈现显著差异 ($P>0.05$)。

表 4-4 不同预处理 PKC 对生长育肥猪生长性能的影响 (n=3)

Table 4-4 Effects of different pretreatment PKC on growth performance of growing-finishing pigs (n=3)

项目 Items	处理组 Treatments					P-value
	对照组	10%PKC	10%PPKC	10%FPKC	10%EPKC	
生长期						
初始重	27.82±0.93	27.91±0.07	28.06±0.03	28.16±0.04	28.10±0.07	0.847
IBW/kg						
末重	50.92±2.31 ^a	46.71±0.55 ^b	50.47±1.17 ^a	50.46±1.72 ^a	50.60±0.33 ^a	0.023
FBW/kg						
平均日采食量	1.68±0.09 ^c	1.66±0.05 ^c	1.74±0.05 ^{bc}	1.85±0.12 ^{ab}	1.89±0.03 ^a	0.012
ADFI (kg/d)						
平均日增重	0.77±0.05 ^A	0.63±0.02 ^B	0.75±0.04 ^A	0.74±0.06 ^A	0.75±0.01 ^A	0.007
ADG (kg/d)						
料肉比 F/G	2.18±0.12 ^c	2.64±0.06 ^a	2.34±0.18 ^{bc}	2.50±0.25 ^{ab}	2.52±0.01 ^{ab}	0.029
育肥期						
初始重	51.43±0.09	51.49±0.14	51.28±0.13	51.56±0.23	51.39±0.07	0.334
IBW/kg						
末重	81.96±0.63 ^a	77.80±1.12 ^b	82.20±1.28 ^a	82.23±2.61 ^a	81.72±1.97 ^a	0.048
FBW/kg						
平均日采食量	2.88±0.07	2.67±0.08	2.85±0.06	2.81±0.17	2.80±0.10	0.203
ADFI (kg/d)						
平均日增重	1.02±0.02 ^a	0.88±0.04 ^b	1.03±0.04 ^a	0.99±0.08 ^a	1.01±0.07 ^a	0.041
ADG (kg/d)						
料肉比 F/G	2.83±0.08 ^b	3.04±0.08 ^a	2.76±0.08 ^b	2.85±0.07 ^b	2.78±0.11 ^b	0.014

2.3 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪血液指标的影响

由表 4-5 可知, 生长阶段, 总蛋白及白蛋白含量方面, 与对照组相比, PKC 组显著降低 ($P<0.05$), PPKC 组、FPKC 组及 EPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$); 尿素含量方面, 与对照组相比, PKC 组显著提升 ($P<0.05$), PPKC 组、FPKC 组及 EPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$); 谷丙转氨酶活性和谷草转氨酶活性方面, 各组之间差异均不显著 ($P>0.05$), PKC 组要高于对照组及其它 PKC 预处理组; 碱性磷酸酶活性方面, 与对照组相比, PPKC 组与对照组差异不显著 ($P>0.05$), PKC

组、FPKC 组、EPKC 组极显著低于对照组 ($P<0.01$)。

育肥阶段，总蛋白及白蛋白含量方面，对照组和其余各组之间无显著差异 ($P>0.05$)；尿素含量方面，与对照组相比，PKC 组显著提高 ($P<0.05$)，PPKC 组、FPKC 组及 EPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$)；谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性方面，各组之间差异均不显著 ($P>0.05$)；碱性磷酸酶活性方面，与对照组相比，PKC 组显著降低 ($P<0.05$)，PPKC 组、FPKC 组及 EPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

表 4-5 不同预处理 PKC 对生长育肥猪血液指标的影响 (n=3)

Table 4-5 Effects of different pretreatment PKC on blood indices of growing-finishing pigs (n=3)

项目 Items	处理组 Treatments					P-value
	对照组	10%PKC	10%PPKC	10%FPKC	10%EPKC	
生长期						
总蛋白（TP， g/L）	59.28±1.95 ^a	50.71±2.02 ^b	57.26±3.11 ^a	54.56±3.42 ^{ab}	56.94±1.87 ^a	0.019
白蛋白（ALB， g/L）	32.07±1.55 ^a	26.79±2.32 ^b	29.64±0.71 ^{ab}	28.32±1.69 ^{ab}	28.98±1.30 ^{ab}	0.025
尿素 （UREA， mmo/L）	4.17±0.17 ^b	4.56±0.14 ^a	4.13±0.13 ^b	4.22±0.18 ^b	4.15±0.22 ^b	0.034
谷丙转氨酶 （ALT， U/L）	53.19±2.51	55.82±1.21	52.69±1.54	51.29±2.29	51.35±3.67	0.211
谷草转氨酶 （AST， U/L）	44.08±1.63	44.78±2.41	43.68±1.73	44.10±1.61	41.43±1.00	0.230
碱性磷酸酶 （ALP， U/L）	157.39±4.04 ^A	140.15±1.40 ^B	155.14±2.93 ^A	149.26±4.05 ^B	144.46±1.68 ^{AB}	<0.01
育肥期						
总蛋白（TP， g/L）	68.08±2.33	60.87±3.14	67.23±3.32	64.59±5.58	64.15±1.58	0.166
白蛋白（ALB， g/L）	39.89±4.15	31.12±3.33	38.41±3.53	36.41±3.31	35.86±1.55	0.068
尿素 （UREA， mmo/L）	3.94±0.08 ^b	4.37±0.18 ^a	3.92±0.20 ^b	3.87±0.17 ^b	4.08±0.10 ^b	0.015
谷丙转氨酶 （ALT， U/L）	52.58±4.91	57.80±5.53	49.70±3.59	47.21±4.61	47.52±1.76	0.065
谷草转氨酶 （AST， U/L）	42.80±2.16	42.30±1.94	42.17±2.16	45.42±1.33	44.53±1.05	0.173
碱性磷酸酶 （ALP， U/L）	184.78±10.6 ^a	149.89±4.11 ^b	178.49±16.4 ^a	187.97±13.1 ^a	194.82±24.0 ^a	0.036

2.4 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪肠道微生物区系的影响

由表 4-6 数据可知,与对照组相比,EPKC 组盲肠、结肠中乳酸杆菌数量显著高于对照组 ($P<0.05$),PKC 组、PPKC 组、FPKC 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$); 各组粪便中乳酸杆菌数量无显著差异 ($P>0.05$); 明显的是,预处理 PKC 增加了猪肠道中乳酸菌的数量。各组盲肠、结肠及粪便中双歧杆菌数量无显著差异 ($P>0.05$)。各组盲肠中大肠杆菌数量无显著差异 ($P>0.05$); 与对照组相比,PKC 预处理组结肠和粪便中大肠杆菌数量与对照组无显著差异 ($P>0.05$),但低于 PKC 组。

表 4-6 不同预处理 PKC 对生长育肥猪肠道微生物区系的影响 ($\log^{CFU/g}$) ($n=3$)

Table 4-6 Effects of different pretreatment PKC on intestinal microflora of growing-finishingpigs (log ^{CFU/g}) (n=3)						
项目 Items	对照组	10%PKC	处理组 10%PPKC	Treatments 10%FPKC	10%EPKC	P-value
乳酸杆菌						
Lactobacillus						
盲肠 Cecum	8.04±0.20 ^{bc}	7.87±0.15 ^c	8.18±0.16 ^{ab}	8.22±0.07 ^{ab}	8.36±0.05 ^a	0.013
结肠 Colon	8.11±0.09 ^{bc}	7.91±0.12 ^c	8.22±0.20 ^{ab}	8.28±0.03 ^{ab}	8.47±0.14 ^a	0.016
粪便 Feces	8.23±0.08	8.06±0.17	8.29±0.14	8.31±0.10	8.52±0.14	0.071
双歧杆菌						
Bifidobacteri						
盲肠 Cecum	7.84±0.10	7.78±0.15	7.80±0.18	7.67±0.07	7.87±0.12	0.462
结肠 Colon	8.10±0.08	7.64±0.47	8.15±0.11	8.12±0.05	8.14±0.03	0.075
粪便 Feces	8.17±0.06	8.11±0.08	8.25±0.11	8.30±0.12	8.36±0.07	0.142
大肠杆菌						
Escherichia						
盲肠 Cecum	7.94±0.14	8.35±0.16	7.98±0.12	8.04±0.20	8.01±0.10	0.064
结肠 Colon	8.10±0.07 ^{abc}	8.33±0.24 ^a	8.23±0.09 ^{ab}	8.05±0.08 ^{bc}	7.97±0.08 ^c	0.039
粪便 Feces	8.37±0.09 ^{ab}	8.44±0.10 ^a	8.27±0.04 ^{bc}	8.17±0.06 ^c	8.21±0.13 ^{bc}	0.018

3 讨论

3.1 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪养分消化率的影响

高含量的非淀粉多糖（NSP）会阻碍单胃动物特别是猪充分利用 PKC 中的营养物质，降低饲料效率（Sundu and Dingle 2003）。甘露聚糖酶可以打开和破坏由许多不同种类多糖（例如纤维素、半纤维素、木质素）组成的植物细胞壁（Bewley 1997），生成甘露寡糖，进而被肠道中的有益菌利用，维持肠道的健康形态。敖翔等（2019）研究表明 PKC 饲料添加甘露聚糖酶能提高猪的干物质、氮和总能表观消化率。本研究中 EPKC 组相较于 PKC 组，粗蛋白、磷消化率显著提高，说明甘露聚糖酶对于猪 PKC 型日粮的消化利用有促进作用。膨化改变蛋白质的空间构象，发生不可逆变性，利于消化酶的水解，此外，还可降低纤维素和半纤维素的含量。在本试验中，PPKC 组养分消化率相较于 PKC 组显著提升，且与玉米-豆粕组无显著差异，说明 PKC 经膨化后具备完美替代豆粕的潜质。饲料经发酵后，内含的抗营养因子得到降解，大分子物质转变为易被动物吸收的小分子物质（Tonheim et al 2007）。Hong 等（2004）研究发现，豆粕经真菌发酵后，粗蛋白、干物质和粗脂肪的含量增高，猪饲料养分消化率同样得到提高，这与本试验研究结果一致，FPKC 组养分消化率高于 PKC 组。由于育肥期猪消化道的结构功能较于生长期有进一步的完善，因此，能更好的利用饲料中的营养物质。

3.2 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪生长性能的影响

彭海龙等（2020）研究发现，饲料中添加 7%PKC，对生长猪的平均日采食量和平均日增重无显著影响，而饲料中添加 10%PKC 时，生长猪的日增重和饲料报酬显著降低。另有研究表明，向育肥猪饲料中添加 10%膨化 PKC，与普通 PKC 组相比，可提高猪的粗纤维表观消化率，降低料重比（何元华 2014）。这与本试验研究结果一致，在生长阶段，10%PKC 组与对照组、10%膨化 PKC 组相比，平均日采食量、平均日增重和饲料效率显著降低，而对照组和膨化 PKC 组之间差异不显著，这说明膨化处理能显著提高生长育肥猪对 PKC 的利用率。PKC 降低生长育肥猪生长性能的原因是 PKC 含有高含量粗纤维和甘露聚糖等非淀粉多糖，粗纤维含量高降低适口性并且使肠道填充增加，降低采食量；甘露聚糖溶于水，增加肠道粘稠度，干扰营养物质的消化、吸收和利用，对动物生产性能产生不利影响（Cerveró et al 2010）。发

酵,可明显改善饲料的营养价值,有机酸、多肽、碳水化合物含量在发酵过程中得到提升,还存在着一些挥发性成分,增加饲料风味;纤维素被分解为低聚糖和还原糖,改善适口性。桑静超等(2014)研究发现,混菌固态发酵饲料可提高生长猪生长性能。在本试验中,相较于 PKC 组,FPKC 组生长性能得到提高。崔家军等(2019)研究发现,酶解蛋白肽可提高生长育肥猪的采食量和增重。在本试验中,用甘露聚糖酶处理 PKC 后,可提高生长育肥猪的生长性能,这与前面的研究一致。

3.3 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪血液指标的影响

血清生化指标的变化是组织细胞通透性变化和体内代谢功能变化的结果。血清蛋白是体内蛋白质合成代谢是否正常的重要标志,总蛋白(TP)和白蛋白含量反映了动物对蛋白质的吸收和代谢(Coma et al 1995)。丁小玲等(2010)研究发现,发酵菜籽粕替代豆粕对断奶仔猪血清中的总蛋白浓度无显著影响。张爱亭等(2012)研究发现,与未处理的棉籽粕组相比,膨化棉籽粕可提高蛋鸡血清中总蛋白的浓度。可见对不同的杂粕进行预处理可提高动物血清中总蛋白及白蛋白的浓度,这与我们研究结果一致。本研究表明,生长及肥育阶段,与未处理的 PKC 相比,PKC 各处理组总蛋白和白蛋白浓度增加,这说明对 PKC 进行预处理可以提高粗蛋白的消化率,提高血清蛋白水平,促进猪的生长及发育。

尿素在肝脏中由二氧化碳和氨气经鸟氨酸循环途径合成,由动物体肾脏排泄,是动物机体蛋白质代谢的主要含氮终末产物(廖春盛等 2011)。有研究称,血液中尿素含量变化可以间接表明动物体内蛋白质代谢和氨基酸代谢的状况,当动物体内蛋白质代谢与氨基酸代谢处于健康的动态平衡时,血液中尿素的含量呈下降趋势(Rosebrough et al 1983)。另有研究报道,饲料中粗蛋白质水平和氨基酸平衡良好时,血清中尿素氮含量低,机体内蛋白质的沉积量多(Coma et al 1995b)。在本研究中,PKC 组的尿素含量最多,说明未经处理的 PKC 破坏了生长育肥猪的蛋白质代谢,各 PKC 预处理组尿素含量显著下降,说明预处理 PKC 可改善生长育肥猪的蛋白质代谢。

谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)参与氨基酸向酮酸的转化,因此是蛋白质和碳水化合物代谢所必需的(Verma et al 2014)。GOT 和 GPT 主要存在于心脏和肝脏等器官中,健康状态下,血液中 GOT 和 GPT 酶活力较小,而当心脏及肝脏遭到损害时,会增大心肌细胞和肝细胞细胞膜的通透性,GOT 和 GPT 就由细胞

内进入到血液中，血液中的 GOT 和 GPT 酶活力升高，因此，GOT 和 GPT 酶活力被认为是反映动物机体心脏和肝脏健康的一项重要指标。有研究称，高棉酚日粮会显著提高猪血清中的 GOT 酶活力，降低球蛋白含量（Braham et al 1967）。在本研究中，各组之间 GOT 和 GPT 酶活力差异不显著，虽然 PKC 组酶活力要高于各组，但处于正常值范围。碱性磷酸酶（ALP）是一类广泛存在骨骼、血液中的特异性催化酶，其活性的大小是反应动物体健康生长的一项重要指标（戚晨阳等 2016）。在本研究中，PKC 组 ALP 活性显著低于对照组和其它 PKC 预处理组，与先前试验中猪的生长性能试验结果一致。

3.4 不同预处理棕榈粕对生长育肥猪肠道微生物的影响

哺乳动物胃肠道微生物群的组成及其活性对动物的健康及发育很重要，它们在肠道健康、养分的消化吸收方面发挥着重要的作用（Hooper and Macpherson 2010）。之前的一项研究表明，饲料加工可以改变微生物群的组成，影响细菌总数以及属和优势种（Bao et al 2016）。我们的实时荧光定量 PCR 结果表明，不同预处理 PKC 导致猪肠道细菌多样性的变化。有趣的是，相对于对照组，EPKC 组有益乳酸菌的数量显著升高，结肠和粪便中大肠杆菌的数量减少；PKC 组则与 EPKC 组相反；PPKC 组、FPKC 组与对照组无显著差异。这种细菌群落现象可能是由于 PKC 中的粗纤维、甘露聚糖在盲肠、结肠中发酵生成短链脂肪酸（SCFAs），既能为肠道细胞提供能量，又能创造出酸性环境，提高乳酸菌的数量（Cappai et al 2013, Jarrett and Ashworth 2018）。PKC 组由于未接受预处理的缘故，PKC 中非淀粉多糖的含量过高，溶于水后提高食糜的黏度，食糜在肠道中流动过慢，甚至于堵塞在盲肠、结肠处，该处氧气会变得稀少，使得有害菌增殖，有益菌减少。肠道中双歧杆菌的数量无显著变化可能是因为纤维的来源不同。

4 小结

PKC 经预处理后，能显著提高生长育肥猪营养物质消化率，生长性能，增加盲肠、结肠中乳酸菌的丰度，降低大肠杆菌的丰度；对生长育肥猪血液生化指标无显著影响。

第五章 全文总结

5.1 成果与结论

1. PKC 酶解预处理优化参数为:酸碱度 5、温度 60℃、时间 8 h; 膨化预处理优化参数为:膨化温度 100℃、喂料速度 22.34 kg/min、含水量 20%; 发酵预处理优化参数为:时间 4 d、含水量 55%、温度 36℃。

2. 膨化、发酵和酶解预处理可降低 PKC 型颗粒饲料的含粉率和粉化率, 膨化可显著提高颗粒饲料的硬度和淀粉糊化度。

3. 预处理 PKC 型颗粒饲料提高生长育肥猪养分消化率、生长性能, 改善了肠道健康, 对血液生化指标无显著影响。

5.2 创新点

本研究将预处理对 PKC 抗营养因子的降解效果及对颗粒饲料制粒特性的影响同生长育肥猪 PKC 型日粮的饲喂效果相结合, 确定挤压膨化技术是最适于 PKC 的预处理技术。

5.3 展望

1. 预处理过程中对 PKC 非淀粉多糖降解效果的影响因子还有许多, 如发酵预处理(菌液接种量)、膨化预处理(螺杆转速)等仍需进一步探究。

2. 研究发现, PKC 经预处理后在生长育肥猪日粮的添加量 10% 是可行的, 但 PKC 在猪日粮中的最适添加量仍需进一步探究。

参考文献

1. 敖翔, 周建川, 周婷, 何健. 棕榈仁粕饲料添加碳水化合物酶对生长肥育猪生长性能、养分消化率和肉品质的影响. 养猪, 2019, 3: 9-12
2. 崔家军, 张鹤亮, 张维金, 张迪, 李秀化. 酶解蛋白肽对生长育肥猪生长性能、血液生化指标及养分表观消化率的影响. 中国畜牧兽医, 2017, 44: 2342-2347
3. 党文庆, 梁兴龙, 何敏, 杨晋青, 张洁, 梁佶宇. 不同含量发酵豆粕对断奶仔猪生产性能、养分表观消化率、粪便微生物的影响. 山西农业科学, 2020, 48: 986-990
4. 丁小玲, 李吕木, 许发芝, 王勇, 景志远, 殷宗俊. 固态发酵菜籽粕替代膨化豆粕对断奶仔猪生长性能及血清生化指标的影响. 中国农业大学学报, 2011, 16: 107-112
5. 冯鑫, 周金影, 栾嘉明, 杨东旭, 杨濛, 张敏, 金英海, 耿春银. 不同菌种固态发酵棉籽粕效果比较. 饲料工业, 2022, 43: 37-42
6. 何元华. 一种棕榈仁粕膨化生产工艺. 中国专利, 2012105448797. 2012-12-17
7. 孔丹丹, 方鹏, 金楠, 段恩泽, 陈计远, 王红英. 温度和粉碎粒度对不同能量饲料原料热物理特性的影响. 农业工程学报, 2019, 35: 296-306
8. 李玉鹏, 刘醒醒, 唐德富, 罗昱芬, 年芳. 酶解棕榈仁粕肉仔鸡氨基酸营养价值的评定. 中国饲料, 2017, 2: 29-34
9. 廖春盛, 戴小波, 魏涛, 郭国威, 陈锦文, 温小平, 唐文志. 分级检验在肾脏生化中的应用. 检验医学与临床, 2011, 8: 720-722
10. 刘宁, 张权益, 徐廷生, 雷雪芹. 酶解豆粕对肉鸡生产性能和养分消化率的影响. 中国畜牧兽医, 2009, 36: 9-11
11. 李川东, 李建农, 沈益新. 收获时间对饲用高粱和野生大豆单、混青贮品质的影响. 中国草地学报, 2008, 5: 75-79
12. 倪海球, 杨玉娟, 于纪宾, 马世峰, 王昊, 商方方, 李军国. 挤压膨化加工对菜籽粕中抗营养因子含量及膨化菜籽粕对生长育肥猪生长性能的影响. 动物营养学报, 2017, 29: 2295-2306
13. 彭海龙, 田雯, 江书忠, 肖淑华. 不同比例棕榈粕对生长猪生长性能的影响. 湖南饲料, 2020, 1: 31-33

14. 戚晨阳, 姜自琴, 荣华, 豆腾飞, 刘金阳, 李琦华, 杨向东, 李继能, 葛长荣. 云南镇沅瓢鸡血液生化指标的测定. 黑龙江畜牧兽医, 2016, 2: 51-53
15. 秦毅. 挤压膨化对几种饲料原料物性及营养品质影响的研究. [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学图书馆, 2020
16. 桑静超. 混菌固态发酵饲料对生长猪生产性能、血清生化指标及粪中微生物菌群的影响. [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学图书馆, 2014
17. 王洁, 李铁军, 崔志杰, 易克, 方俊. 棉粕非淀粉多糖的体外酶解效果研究. 湖南农业科学, 2011, 15: 13-15
18. 魏凤仙, 高方, 李绍钰, 盛卫东, 陈如水, 付瑞珍, 黄元林, 郑新社. 膨化法与微生物发酵处理法对豆粕营养价值的影响. 河南农业科学, 2014, 43: 123-127
19. 魏金涛, 赵娜, 李绍章, 杨雪海, 张巍, 严念东, 郭万正, 黄少文. 复合酶酶解豆粕营养成分变化规律研究. 中国粮油学报, 2014, 29: 17-20
20. 杨欢, 陈文明. 膨化棕榈粕对断奶仔猪生长性能、养分消化及血液指标的影响. 中国饲料, 2021, 10: 102-105
21. 张爱婷, 朱巧明, 顾林英, 谢鹏, 朱莎, 代腊, 邹晓庭. 膨化棉籽粕对蛋鸡生产性能、蛋品质及血清生化指标的影响. 动物营养学报, 2012, 24: 1143-1149
22. 张亮, 许艳芬, 杨在宾, 李进. 饲料原料对颗粒饲料制粒质量的影响. 饲料与畜牧, 2013, 1: 13-17
23. 钟永兴. 菜粕和棉粕的膨化处理对生长猪氨基酸消化率的影响. [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学图书馆, 2007
24. Adeshinwa A. Utilization of palm kernel cake as a replacement for maize in diets of growing pigs: effects on performance, serum metabolites, nutrient digestibility and cost of feed conversion. *Bulg J Agric Sci*, 2007, 13:593-590
25. Ai Y, Jane JI. Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch-Starke*, 2015, 67:213-224
26. Akinyeye RO. Physico-chemical properties and anti-nutritional factors of palm fruit products (*Elaeis Guineensis* Jacq.) from Ekiti State Nigeria. *Ejeafche*, 2011, 10:2190-2198
27. Alam M, Kaur J, Khaira H, Gupta K. Extrusion and extruded products: changes in

- quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. *Crit Rev Food Sci*, 2016, 56:445-473
28. Alimon AR. The nutritive value of palm kernel cake for animal feed. *Palm Oil Dev*, 2004, 40:12-14
29. Aljuobori A, Idrus Z, Abdoreza SF, Norhani A, Liang J. Extrusion enhances metabolizable energy and ileal amino acids digestibility of canola meal for broiler chickens. *Ital J Anim Sci*, 2014, 13:44-47
30. Alshelmani M, Kaka U, Abdalla E, Humam A, Zamani H. Effect of feeding fermented and non-fermented palm kernel cake on the performance of broiler chickens: a review. *World Poultry Sci J*, 2021, 77:377-388
31. Anaeto M, Chioma G, Omosebi D. Palm kernel cake as substitute for maize in broiler finisher diet. *Intl J Poult Sci*, 2009, 8:1206-1208
32. Akintunde AO, Omole CA, Sokunbi OA, Lawal TT, Alaba O. Response of Growing Pigs to Diet Physical Form and Allzyme® SSF Supplementation in a Palm Kernel Meal-Based Diet. *Anim Prod Sci*, 2011, 13:60-75
33. Adli DN, Sjoftjan O, Natsir H, Nuningtyas YF, Sholikhah NU, Marbun AC. The effect of replacing maize with fermented palm kernel meal (FPKM) on broiler performance. *LRRD*, 2020, 32:120-127
34. Azizi MN, Loh TC, Foo HL, Teik Chung ET. Is palm kernel cake a suitable alternative feed ingredient for poultry? *Animals*, 2021, 11:338
35. Babatunde GM, Fetuga BL, Odumosu O, Oyenuga VA. Palm kernel meal as the major protein concentrate in the diets of pigs in the tropics. *J Sci Food Agr*, 1975, 26:1279-1291
36. Bao Z, Li Y, Zhang J, Li L, Zhang P, Huang FR. Effect of particle size of wheat on nutrient digestibility, growth performance, and gut microbiota in growing pigs. *Livest Sci*, 2016, 183:33-39
37. Bell JM. Factors affecting the nutritional value of canola meal: a review. *Can J Anim Sci*, 1993, 73:689-697
38. Braham JE, Jarquin R, Elias LG, González M, Bressani R. Effect of Calcium and

- Gossypol on the Performance of Swine and on Certain Enzymes and Other Blood Constituents. *J Nutr*, 1967, 91:47-54
39. Bewley JD. Breaking down the walls—a role for endo- β -mannanase in release from seed dormancy? *Trends Plant Sci*, 1997, 12:464-469
40. Berlin A, Maximenko V, Gilkes N, Sadtler J. Optimization of enzyme complexes for lignocellulose hydrolysis. *Biotechnol Bioeng*, 2007, 97:287-296
41. Bhattacharya M, Hanna MA. Kinetics of Starch Gelatinization During Extrusion Cooking. *J Food Sci*, 2010, 52:764-766
42. Berglund P, Fastnaught C, Holm E. Physicochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals. *Cereal Chem*, 1994, 71:91-95
43. Boateng M, Okai DB, Baah J, Donkoh A. Palm kernel cake extraction and utilisation in pig and poultry diets in Ghana. *Livest Res Rural Dev*, 2008, 20:2008-2012
44. Briggs JL, Maier DE, Wakins BA, Behnke KC. Effect of Ingredients and Processing Parameters on Pellet Quality. *Poult Sci*, 1999, 78:1464-1471
45. Carvalho L, Cabrita A, Dewhurst R, Vicente T, Lopes Z, Fonseca A. Evaluation of palm kernel meal and corn distillers grains in corn silage-based diets for lactating dairy cows. *J Dairy Sci*, 2006, 89:2705-2715
46. Cerveró JM, Skovgaard PA, Felby C, Sørensen HR, Jørgensen H. Enzymatic hydrolysis and fermentation of palm kernel press cake for production of bioethanol. *Enzyme Microb Tech*, 2010, 46:177-184
47. Chae B, Han IK, Kim J, Yang C, Ohh S, Rhee Y, Chung Y. Effects of feed processing and feeding methods on growth and carcass traits for growing-finishing pigs. *Asian Austral J Anim*, 1997, 10:164-169
48. Chen WL, Liang JB, Jahromi MF, Abdullah N, Ho YW, Tufarelli V. Enzyme treatment enhances release of prebiotic oligosaccharides from palm kernel expeller. *BioResources*, 2015, 10:1-12
49. Chen Y, Liang Y, Jia F, Chen D, Zhang X, Wang Q, Wang J. Effect of extrusion temperature on the protein aggregation of wheat gluten with the addition of peanut oil during extrusion. *Int J Biol Macromol*, 2021, 166:1377-1386

50. Cho J, Min B, Chen Y, Yoo J, Wang Q, Kim J, Kim I. Evaluation of FSP (fermented soy protein) to replace soybean meal in weaned pigs: growth performance, blood urea nitrogen and total protein concentrations in serum and nutrient digestibility. *Asian Austral J Anim*, 2007, 20:1874-1879
51. Choct M, Annison G. The inhibition of nutrient digestion by wheat pentosans. *Brit J Nutr*, 1992, 67:123-132
52. Chong CH, Zulkifli I, Blair R. Effects of dietary inclusion of palm kernel cake and palm oil, and enzyme supplementation on performance of laying hens. *Asian Austral J Anim*, 2008, 21:1053-1058
53. Ciptaan G. Improving the quality and nutrient content of palm kernel cake through fermentation with *Bacillus subtilis*. *Livest Res Rural Dev*, 2019, 31:12-19
54. Coma J, Carrion D, Zimmerman D. Use of plasma urea nitrogen as a rapid response criterion to determine the lysine requirement of pigs. *J Anim Sci*, 1995a, 73:472-481
55. Coma J, Zimmerman D, Carrion D. Relationship of rate of lean tissue growth and other factors to concentration of urea in plasma of pigs. *J Anim Sci*, 1995b, 73:3649-3656
56. Chiang G, Lu W, Piao X, Hu J, Gong L, Thacker P. Effects of feeding solid-state fermented rapeseed meal on performance, nutrient digestibility, intestinal ecology and intestinal morphology of broiler chickens. *Asian Austral J Anim*, 2009, 23:263-271
57. Canibe N, Jensen BB. Fermented liquid feed and fermented grain to piglets-effect on gastrointestinal ecology and growth performance. *Livest Sci*, 2007, 108:198-201
58. Corsetti A, Settanni L. Lactobacilli in sourdough fermentation. *Food Res Int*. 2007, 40:539-558
59. Chin FY. Utilization of palm kernel cake (PKC) as feed in Malaysia. *Asian livest*, 2002, 26:19-23
60. Cappai MG, Alesso GA, Nieddu G, Sanna M, Pinna W. Electron microscopy and composition of raw acorn starch in relation to in vivo starch digestibility. *Food Funct*. 2013, 4:917-922

61. Colovic R, Vukmirovic D, Matulaitis R, Bliznikas S, Uchockis V, Juskiene V, Levic, J. Effect of Die Channel Press Way Length on Physical Quality of Pelleted Cattle Feed. *Food Feed Res*, 2010, 37: 1-6
62. Dairo F, Fasuyi A. Evaluation of fermented palm kernel meal and fermented copra meal proteins as substitute for soybean meal protein in laying hens diets. *J Cent Eur Agric*, 2008, 9:35-44
63. Daud MJ, Jarvis MC. Mannan of oil palm kernel. *Phytochemistry*, 1992, 31:463-464
64. Dushkova MA, Menkov ND, Toshkov NG. Functional characteristics of extruded blends of potato flakes and whey protein isolate. *Int J Food Eng*, 2012, 7:6-18
65. Esuga PM, Sekoni AA, Omenge JJ, Bawa GS. Evaluation of enzyme (Maxigrain®) supplementation of graded levels of palm kernel meal (PKM) on the performance of broiler chickens. *Pak J Nutr*, 2008, 7:614-618
66. Fadil M, Alimon AR, Meng GY, Ebrahimi M, Farjam AS. Palm kernel cake as a potential ingredient in Muscovy ducks diet. *Ital J Anim Sci*, 2014a, 13:3035-3039
67. Faridah HS, Goh YM, Noordin MM, Liang JB. Extrusion enhances apparent metabolizable energy, ileal protein and amino acid digestibility of palm kernel cake in broilers. *Asian Austral J Anim*, 2020, 33:1965-1974
68. Feng J, Liu X, Xu Z, Wang Y, Liu J. Effects of fermented soybean meal on digestive enzyme activities and intestinal morphology in broilers. *Poult Sci*, 2007, 86:1149-1154
69. Freitas ER, Sakomura NK, Dahlke F, Santos FR, Barbosa NA. Performance, efficiency of nutrient utilization and gastrointestinal structures of broiler chick fed in prestarter phase with ratios with different physical form. *Rev Bras Zootecn*, 2008, 37:73-78
70. Furusawa Y, Obata Y, Fukuda S, Endo TA, Nakato G, Takahashi D, Nakanishi Y, Uetake C, Kato K, Kato T. Commensal microbe-derived butyrate induces the differentiation of colonic regulatory T cells. *Nature*, 2013, 504:446-450
71. Fazhi X, Lvmu L, Jiaping X, Kun Q, Zhide Z, Zhangyi L. Effects of fermented rapeseed meal on growth performance and serum parameters in ducks. *Asian Austral*

- J Anim*, 2011, 24:678-684
72. Fuh WS, Chiang BH. Dephytinisation of rice bran and manufacturing a new food ingredient. *J Sci Food Agr*, 2001, 81:1419-1425
73. Gajula H, Alavi S, Adhikari K, Herald T. Precooked bran-enriched wheat flour using extrusion: Dietary fiber profile and sensory characteristics. *J Food Sci*, 2008, 73:S173-S179
74. Garcia CA, Gernat AG, Murillo JG. The effect of four levels of palm kernel meal in broiler diets. *Ceiba*, 1999, 40:291-295
75. Guo X, Li D, Lu W, Piao X, Chen X. Screening of *Bacillus* strains as potential probiotics and subsequent confirmation of the in vivo effectiveness of *Bacillus subtilis* MA139 in pigs. *Antonie van leeuwenhoek*, 2006, 90:139-146
76. Hakim AH, Zulkifli I, Farjam AS, Awad EA, Abdullah N, Chen WL, Mohamad R. Passage time, apparent metabolisable energy and ileal amino acids digestibility of treated palm kernel cake in broilers under the hot and humid tropical climate. *Ital J Anim Sci*, 2020, 19:194-202
77. Henry MH, Pesti GM, Bakalli R, Lee J, Toledo RT, Eitenmiller RR, Phillips RD. The performance of broiler chicks fed diets containing extruded cottonseed meal supplemented with lysine. *Poultry Sci*, 2001, 80:762-768
78. Heres L, Engel B, Knapen FV, Jong MD, Wagenaar J, Urlings H. Fermented liquid feed reduces susceptibility of broilers for *Salmonella enteritidis*. *Poultry Sci*, 2003, 82:603-611
79. Hole AS, Kjos NP, Grimmer S, Kohler A, Lea P, Rasmussen B, Lima LR, Narvhus J, Sahlstrøm S. Extrusion of barley and oat improves the bioaccessibility of dietary phenolic acids in growing pigs. *J Agri Food Chem*, 2013, 61:2739-2747
80. Hong KJ, Lee CH, Kim SW. *Aspergillus oryzae* GB-107 fermentation improves nutritional quality of food soybeans and feed soybean meals. *J Med Food*, 2004, 7:430-435
81. Hooper LV, Macpherson AJ. Immune adaptations that maintain homeostasis with the intestinal microbiota. *Nat Rev Immunol*, 2010, 10:159-169

82. Jackson LS, Jablonski J, Bullerman LB, Bianchini A, Hanna MA, Voss KA, Hollub AD, Ryu D. Reduction of fumonisin B1 in corn grits by twin-screw extrusion. *J Food Sci*, 2011, 76:T150-T155
83. Jarrett S, Ashworth CJ. The role of dietary fibre in pig production, with a particular emphasis on reproduction. *J Anim Sci Biotechnol*, 2018, 9:1-11
84. Jazi V, Boldaji F, Dastar B, Hashemi S, Ashayerizadeh A. Effects of fermented cottonseed meal on the growth performance, gastrointestinal microflora population and small intestinal morphology in broiler chickens. *Br Poult Sci*, 2017, 58:402-408
85. Jin L, Ho Y, Abdullah N, Jalaludin S. Digestive and bacterial enzyme activities in broilers fed diets supplemented with *Lactobacillus* cultures. *Poult Sci*, 2000, 79:886-891
86. Jarrett S, Ashworth CJ. The role of dietary fibre in pig production, with a particular emphasis on reproduction. *J Anim Sci Biotechnol*, 2018, 9:59
87. Kanjanapruthipong J. Supplementation of milk replacers containing soy protein with threonine, methionine, and lysine in the diets of calves. *J Dairy Sci*, 1998, 81:2912-2915
88. Kim JS, Ingale SL, Hosseindoust AR, Lee SH, Lee JH, Chae BJ. Effects of mannan level and β -mannanase supplementation on growth performance, apparent total tract digestibility and blood metabolites of growing pigs. *Animal*, 2017, 11:202-208
89. Kim S, Kim B, Kim Y, Jung S, Kim Y, Park J, Song M, Oh S. Value of palm kernel co-products in swine diets. *Korean J Agric Sci*, 2016, 43:761-768.
90. Koh HW, Kim MS, Lee JS, Kim H, Park SJ. Changes in the swine gut microbiota in response to porcine epidemic diarrhea infection. *Microbes Environ*, 2015, 30:284-287
91. Kristiawan M, Micard V, Maladira P, Alchamieh C, Maigret JE, Réguerre AL, Emin MA, Valle GD. Multi-scale structural changes of starch and proteins during pea flour extrusion. *Food Res Int*, 2018, 108:203-215
92. Kiers JL, Meijer JC, Nout MJR, Rombouts FM, Nabuurs MJA. Effect of fermented soya beans on diarrhoea and feed efficiency in weaned piglets. *J Appl Microbiol*, 2003, 95:545-552

93. Kiarie E, Bhandari S, Scott M, Krause DO, Nyachoti CM. Growth performance and gastrointestinal microbial ecology responses of piglets receiving *Saccharomyces cerevisiae* fermentation products after an oral challenge with *Escherichia coli* (K88). *J Anim Sci*, 2011, 89:1062–1078
94. Loh TC, Foo HL, Tan BK, Jelani ZA. Effects of Palm Kernel cake on performance and Blood lipids in Rats. *Asian Austral J Anim*, 2002, 15:1165-1169
95. Lowe R. Judging Pellet Stability as Part of Pellet Quality. *Feed Tech*, 2005, 9:15-19
96. Mahlia TMI, Ismail N, Hossain N, Silitonga AS, Shamsuddin AH. Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environ Sci Pollut R*, 2019, 26:14849-14866
97. Miao S, Zhao C, Zhu J, Hu J, Dong X, Sun L. Dietary soybean meal affects intestinal homeostasis by altering the microbiota, morphology and inflammatory cytokine gene expression in northern snakehead. *Sci Rep*, 2018, 8:1-10
98. Mirnawati YR, Marlida Y, Kompang IP. Evaluation of palm kernel cake fermented by *Aspergillus niger* as substitute for soybean meal protein in the diet of broiler. *Int J Poult Sci*, 2011, 10:537-541
99. Mustafa M, Alimon AR, Zahari M, Idris I, Bejo M. Nutrient digestibility of palm kernel cake for Muscovy ducks. *Asian Austral J Anim*, 2004, 17:514-517
100. Niba AT, Beal JD, Kudi AC, Brooks PH. Potential of bacterial fermentation as a biosafe method of improving feeds for pigs and poultry. *Afr J Biomed Res*, 2009, 8:1758-1767
101. Niven SJ, Zhu C, Columbus D, Pluske JR, De Lange CFM. Impact of controlled fermentation and steeping of high moisture corn on its nutritional value for pigs. *Livest Sci*, 2007, 109:166-169
102. O'Mara FP, Mulligan FJ, Cronin EJ, Rath M, Caffrey PJ. The nutritive value of palm kernel meal measured in vivo and using rumen fluid and enzymatic techniques. *Livest Sci*, 1999, 60:305-316
103. Ojewola GS, Ozuo UK. Evaluation of palm kernel meal as substitute for soyabean meal in the diet of growing cockerels. *Int J Poult Sci*, 2006, 5:401-403

- 104.Olstorpe M, Axelsson L, Schnurer J, Passoth V. Effect of starter culture inoculation on feed hygiene and microbial population development in fermented pig feed composed of a cereal grain mix with wet wheat distillers' grain. *J Appl Microbiol*, 2010, 108:129–138
- 105.Pasaribu T. Efforts to improve the quality of palm kernel cake through fermentation technology and enzyme addition for poultry. *Ind Bu Anim Vet Sci*, 2018, 28:119-128
- 106.Plahar W, Okezie BO,Gyato C. Development of a high protein weaning food by extrusion cooking using peanuts, maize and soybeans. *Plant Food Hum Nutr*, 2003, 58:1-12
- 107.Pimentel L, Silva F, Silva R, Schio A, Cost L. Economic viability of including palm kernel cake in diets for feedlot lactating cows. *Acta Sci*, 2016, 38:319
- 108.Prabha K, Ghosh P, Abdullah S, Joseph RM, Krishnan R, Rana SS,Pradhan RC. Recent development, challenges, and prospects of extrusion technology. *Futr Foods*, 2021, 3:2666-2681
- 109.Renge VC, Khedkar SV, Nandurkar RN. Enzyme synthesis by fermentation method: a review. *Sci Rev Chem Comm*, 2012, 2:585-590
- 110.Rezaei S, Jahromi MF, Liang JB, Zulkifli I, Farjam AS, Laudadio V, Tufarelli V. Effect of oligosaccharides extract from palm kernel expeller on growth performance, gut microbiota and immune response in broiler chickens. *Poult Sci*, 2015, 94:2414-2420
- 111.Rhule S. Growth rate and carcass characteristics of pigs fed on diets containing palm kernel cake. *Anim Feed Sci Tech*, 1996, 61:167-172
- 112.Rosebrough RW, Steele NC, McMurtry JP. Effect of protein level and supplemental lysine on growth and urea cycle enzyme activity in the pig. *Growth*, 1983, 47:348-360
- 113.Roslan MAH, Abdullah N, Murad NZA, Halmi MIE, Idrus Z, Mustafa S. Optimisation of extrusion for enhancing the nutritive value of palm kernel cake using response surface methodology. *BioResources*, 2017, 12:6679-6697
- 114.Saenphoom P, Liang JH, Loh TR. Effect of enzyme treatment on chemical

- composition and production of reducing sugars in palm (*Elaeis guineensis*) kernel expeller. *Afr J Biotechnol*, 2011, 10:15372-15377
- 115.Samsudin AA, Hnedry N, Khaing KT. Effects of feeding dietary palm kernel cake on egg production and egg quality of khaki Campbell duck. *J World's Poult Res*, 2016, 6:1-5
- 116.Santana Filho NB, Oliveira RL, Cruz CH, Leão AG, Ribeiro OL, Borja MS, Silva TM, Abreu CL. Physicochemical and sensory characteristics of meat from young Nellore bulls fed different levels of palm kernel cake. *J Sci Food Agr*, 2016, 96:3590-3595
- 117.Sathitkowitchai W, Sathapondecha P, Angthong P, Srimarut Y, Malila Y, Nakkongkam W, Chaiyapechara S, Karoonuthaisiri N, Keawsompong S, Rungrassamee W. Isolation and Characterization of Mannanase-Producing Bacteria for Potential Synbiotic Application in Shrimp Farming. *Animals*, 2022, 12:2583-2600
- 118.Sharmila A, Alimon AR, Azhar K, Noor HM, Samsudin AA. Improving nutritional values of Palm Kernel Cake (PKC) as poultry feeds: a review. *Mal J Anim Sci*, 2014, 17:1-18
- 119.Stein HH, Casas GA, Abelilla JJ, Liu Y, Sulabo RC. Nutritional value of high fiber co-products from the copra, palm kernel, and rice industries in diets fed to pigs. *J Anim Sci Biotechnol*, 2015, 6:1-9
- 120.Subramaniam R, Vimala R. Solid state and submerged fermentation for the production of bioactive substances: a comparative study. *Int J Sci Nat*, 2012, :480-486
- 121.Sugiharto S, Yudiarti T, Isroli I. Functional properties of filamentous fungi isolated from the Indonesian fermented dried cassava, with particular application on poultry. *Mycobiology*, 2015, 43:415-422
- 122.Sundu B, Dingle JG. Use of enzymes to improve the nutritional value of palm kernel meal and copra meal. *World's Poul Sci Asso*, 2001, 11:1-15
- 123.Sundu B, Kumar A, Dingle J. Palm kernel meal in broiler diets: effect on chicken performance and health. *World's Poul Sci J*, 2006, 62:316-325

- 124.Tonheim SK, Nordgreen A, Høgøy I, Hamre K, Rønnestad I. In vitro digestibility of water-soluble protein fractions of some common fish larval feeds and feed ingredients. *Aquaculture*, 2007, 262:426-435
- 125.Thomas M, Van Vliet T, Van der Poel AFB. Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components. *Anim Feed Sci Technol*, 1998, 70:59-78.
- 126.Ugwu S, Onyimonyi A, Ozonoh C. Comparative performance and haematological indices of finishing broilers fed palm kernel cake, bambara offal and rice husk as partial replacement for maize. *Int J Poult Sci*, 2008, 7:299-303.
- 127.Colf J, Botha PR, Meeske R, Truter WF. Seasonal dry matter production, botanical composition and forage quality of kikuyu over-sown with annual or perennial ryegrass. *Afr J Range For Sci*, 2015, 32:133-142
- 128.Wyngaard J, Meeske R, Erasmus LJ. Effect of palm kernel expeller as supplementation on production performance of Jersey cows grazing kikuyu-ryegrass pasture. *Anim Feed Sci Tech*, 2015, 199:29-40
- 129.Verma M, Metgud R, Madhusudan AS, Verma N, Saxena M, Soni A. A comparative study of glutamate oxaloacetate transaminase (GOT) and glutamate pyruvate transaminase (GPT) levels in the saliva of diabetic and normal patients. *Biotech Histochem*, 2014, 89:529-534
- 130.Wood JF. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim Feed Sci Tech*, 1987, 18:1-17
- 131.Widmer W, Zhou W, Grohmann K. Pretreatment effects on orange processing waste for making ethanol by simultaneous saccharification and fermentation. *Bioresource Technol*, 2010, 101:5242-5249
- 132.Yahaghi M, Liang J, Balcells J, Valizadeh R, Jahromi M, Alimon R, Ho Y. Extrusion of sorghum starch enhances ruminal and intestinal digestibility, rumen microbial yield and growth in lambs fed on high-concentrate diets. *Anim Feed Sci Tech*, 2014, 189:30-40
- 133.Zanu HK, Abangiba J, Arthur-Badoo W, Akparibo A, Sam R. Laying chickens' response to various levels of palm kernel cake in diets. *Int J Livest Prod*,

2012, 3:12-16

- 134.Zhang W, Xu Z, Sun J, Yang X. A study on the reduction of gossypol levels by mixed culture solid substrate fermentation of cottonseed meal. *Asian Austral J Anim*, 2006, 19:1314-1321
- 135.Zhao X, Wei Y, Wang Z, Chen F,Ojokoh AO. Reaction kinetics in food extrusion: methods and results. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2011, 51:835-854
- 136.Zarkadas LN, Wiseman J. Influence of processing of full fat soya beans included in diets for piglets. I. Performance. *Anim Feed Sci Technol*, 2005, 118:109–119