

蛋白原料及其混合粉料理化性质对颗粒饲料加工质量的影响

吴雨珊, 杨 洁, 李军国, 许传祥, 李 俊, 牛力斌, 谷 旭*

(中国农业科学院饲料研究所, 农业农村部动物产品质量安全饲料源性因子风险评估实验室(北京), 北京 100081)

摘 要: 该研究旨在探究豆粕、棉粕、菜粕、酒糟蛋白(Distillers Dried Grains with Solubles, DDGS)、乙醇梭菌蛋白 5 种蛋白原料及其混合粉料的营养指标和理化性质的差异, 确定影响颗粒饲料质量和制粒能耗的关键指标, 对 5 种蛋白原料的制粒效果进行综合评价。以豆粕为对照组, 仅改变蛋白原料, 采用相同的加工参数制备颗粒饲料, 比较不同蛋白原料的制粒效果, 进行主成分分析及偏最小二乘回归分析(Partial Least Squares Regression, PLS)。结果表明: 在原料营养指标和理化特性方面, 乙醇梭菌蛋白具有高蛋白含量、高蛋白溶解度、低脂肪、低纤维的特点, 棉粕具有高纤维的特点, 菜粕具有高纤维和低蛋白溶解度的特点, DDGS 具有低蛋白和高脂肪的特点。蛋白原料吸水性强弱排列顺序为乙醇梭菌蛋白、豆粕、棉粕、菜粕、DDGS, 水溶性与之相反。乙醇梭菌蛋白组和棉粕组的制粒能耗较高, 豆粕组的制粒能耗最低; 棉粕组和乙醇梭菌蛋白组的修正耐久性(Modified Pellet Durability Index, MPDI)较高分别为 92.72%和 90.57%, 菜粕组的 MPDI 最低为 79.68%; 乙醇梭菌蛋白组的硬度最高为 130.95 N, DDGS 组的硬度最低为 74.26 N; 乙醇梭菌蛋白组的糊化度最高为 45.56%, DDGS 组的糊化度最低为 31.36%。通过偏最小二乘回归模型得到, 蛋白含量、蛋白溶解度和吸水性的增加会提高颗粒饲料硬度、PDI 和 MPDI; 粗纤维含量、蛋白溶解度和吸水性的增加会增加制粒能耗。综合分析 5 种蛋白原料制粒特性, 由高到低排序为乙醇梭菌蛋白、棉粕、豆粕、菜粕、DDGS。研究结果为实际生产颗粒饲料时蛋白原料的选择提供参考依据。

关键词: 蛋白; 饲料; 理化性质; 颗粒饲料质量; 偏最小二乘回归

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.037

中图分类号: TS201.1; O242.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-07-0301-08

吴雨珊, 杨洁, 李军国, 等. 蛋白原料及其混合粉料理化性质对颗粒饲料加工质量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 301-308. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.037 http://www.tcsae.org

Wu Yushan, Yang Jie, Li Junguo, et al. Effects of physicochemical properties of protein raw materials and their mash feed on the processing quality of pellet feed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 301-308. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.037 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年来, 蛋白原料需求量逐渐上涨, 中国大豆进口量激增, 成为世界最大的进口国^[1], 严重限制了饲料业和养殖业的发展^[2]。随着中美贸易战的拉开, 豆粕的价格上涨, 寻找可替代豆粕的蛋白原料, 降低对玉米-豆粕型日粮的依赖是当前要务。因动物性蛋白原料的价格普遍高于植物性蛋白原料, 所以从经济方面考虑动物性蛋白原料不能成为替代豆粕的首选。目前, 多种杂粕可替代豆粕进行颗粒饲料生产, 如棉粕、菜粕和酒糟蛋白(Distillers Dried Grains with Solubles, DDGS)等。随着工业技术的发展, 单细胞蛋白逐渐进入了饲料领域^[3-4], 如乙醇梭菌蛋白, 蛋白质量分数高达 83%, 氨基酸平衡, 具有不占用耕地, 不与人争粮, 不受季节气候影响, 生产周期短等优势。

饲料加工后形成颗粒饲料, 便于装袋运输, 同时对

畜禽的饲料转化率、营养获取均匀度、肠道形态有很大的影响^[5-6]。优质的饲料颗粒具有粉化率低、颗粒耐久性高、加工能耗低、淀粉糊化度适中的特点, 可降低制作和运输过程中的损耗、减少成本、提高饲料的消化率等^[7-8]。颗粒饲料质量受多因素影响, 各因素占比不同, 如原料组成占比 40%、粉碎性能占比 20%、调质因素占比 20%、环模压辊设备占比 15%、冷却条件占比 5%^[9-11]。其中饲料原料对颗粒饲料质量的影响较大, 而原料主要可分为淀粉源和蛋白源。因淀粉在一定水分和温度下发生糊化有利于制粒, 所以许多有关原料对颗粒饲料质量影响的研究聚焦于淀粉^[12-14]。事实上, 蛋白质作为饲料中的主要营养指标, 其含量及理化性质也会对饲料的质量产生显著影响。自然状态下, 蛋白质构象变化主要包含分子链的展开、结合、聚集、潜在降解或氧化交联这 4 个变化^[15-16], 蛋白质自身的大分子结构会影响诸如此类变化, 会对其溶解度、黏度等功能特性产生影响进而导致颗粒饲料质量的差异^[17-18]。有研究表明, 添加鹰嘴豆^[19]、乳清蛋白浓缩物超过 25%^[20]对颗粒质量有很大影响。

目前, 有关蛋白原料的研究主要集中在功能性成分及对畜禽生长性能的影响等方面, 但对其加工特性的研究鲜见报道。因此, 本文选用豆粕、棉粕、菜粕、酒糟蛋白(Distillers Dried Grains with Solubles, DDGS)、乙

收稿日期: 2020-11-25 修订日期: 2021-04-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900200), 现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队项目(BAIC04-2020); 中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2020-FRI-08)

作者简介: 吴雨珊, 研究方向为动物营养与饲料安全。

Email: wuyushan51@163.com

*通信作者: 谷旭, 副研究员, 研究方向为动物营养与饲料安全。

Email: guxu@caas.cn

醇梭菌蛋白 5 种蛋白原料在相同加工条件下进行制粒, 以豆粕为对照, 研究不同蛋白原料及其混合粉料理化性质的差异, 找到影响颗粒饲料质量和能耗的关键指标, 对蛋白原料的制粒效果进行综合评价, 为寻找可替代蛋白原料提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 原料

玉米、豆粕、棉粕、菜粕、DDGS 从南口原料厂购买, 乙醇梭菌蛋白 (*Clostridium autoethanogenum* Protein, CAP) 由北京首朗生物科技有限公司提供。

1.2 试验设计

将玉米、豆粕、棉粕、菜粕、DDGS 等需要粉碎的大料在筛片孔径 2.0 mm 的条件下进行粉碎 (9FQ-50B, 北京通燕机械制造有限公司), 为避免其他成分影响, 仅用蛋白原料与玉米粉以质量 3:7 的比例进行混合^[21] (CH-100 型粉碎机, 无锡新标粉体机械制造有限公司), 豆粕为对照组, 其他蛋白原料为试验组, 根据畜禽饲料常用加工条件, 模孔直径 (3.5 mm)、长径比 (10:1)、调质温度 80 ℃、调质时间 (80s) 对混合物料进行制粒 (MUZL180 型制粒机, 江苏牧羊集团), 记录制粒过程中相关参数。

对粉碎后的原料和混合粉料进行随机取样 3 次, 检测营养指标和理化指标。每组制粒三批及每批次产量为 50 kg, 在制粒机稳定的制粒后, 每隔 5 min 取一次颗粒饲料, 3 次重复, 每次取 3 kg, 颗粒料摊开变凉后采用“四分法”逐渐缩减至 2 kg 进行加工质量的检测, 剩余颗粒饲料装入自封袋中于 4 ℃冰箱保存待测。

1.3 检测指标与方法

1.3.1 营养指标

水分按照 GB/T 6435-2014 《饲料中水分的测定》进行测量; 蛋白含量按照 GB/T 6432-2018 《饲料中粗蛋白的测定-凯氏定氮法》进行测量; 粗脂肪按照 GB/T 6433-2006 《饲料中粗脂肪的测定》进行测量; 粗纤维按照 GB/T 6434-2006 《饲料中粗纤维的测定-过滤法》进行测量。

1.3.2 理化指标

蛋白溶解度: 样品粉碎过 60 目筛, 称取试样 0.3 g, 准确到 0.1 mg, 置于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 0.2 % 的氢氧化钾溶液, 利用多管涡旋混合器 (UMV-2 型多管涡旋混合器, 北京优晟联合科技有限公司) 以 2 500 r/min 振荡 20 min, 以 2 700 r/min 离心 10 min, 准确移取上清液 15 mL 于消化管内, 按 GB/T 6432-2018 进行消化, 随后使用全自动凯氏定氮仪测定蛋白含量 (C_1), 计算蛋白溶解度, 公式如下:

$$\text{蛋白溶解度} = 2C_1/C \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_1 表示 15 mL 上清液中的蛋白质量分数, %; C 表示样品的蛋白质量分数, %。

吸水性 (Water Absorbility Index, WAI) 及水溶性 (Water Solubility Index, WSI) 指数: 样品粉碎过 70 目筛,

取 2.5 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 蒸馏水, 利用多管涡旋混合器以 2 500 r/min 振荡 20 min, 随后在 4 ℃下, 以 2 700 r/min 离心 10 min, 取离心后的上清液于质量恒定后的培养皿, 在 135 ℃下烘干 3 h 恒量, 取出置干燥锅内完全冷却。计算公式如下^[22]:

$$\text{WAI} = W_g/W_{ds} \times 100\% \quad (2)$$

式中 W_g 表示离心后离心管内胶体质量, g; W_{ds} 表示干物质样品质量, g。

$$\text{WSI} = W_{ss}/W_{ds} \times 100\% \quad (3)$$

式中 W_{ss} 表示培养皿中的上清液烘干后干物质质量, g; W_{ds} 表示干物质样品质量, g。

黏度特征值: 量取 (25.0±0.1) mL 蒸馏水, 移入样品铝筒中, 然后称取 (5.00±0.01) g 试样 (应按 14% 湿基根据试样水分补偿), 转移到装有蒸馏水样品铝筒内。采用快速黏度分析仪 (ZM100 型快速粘度分析仪, 波通瑞华科学仪器有限公司), 选用程序 standard1, 进行测定黏度特征值。在结果中提取峰值黏度、保持黏度、最终黏度等数值。

1.3.3 加工质量指标

成型率: 根据 GB/T16765-1997, 颗粒冷却 1 h 后测定, 从各组颗粒料中取出代表性样品 1.5 kg (m_1 , g), 对试样分 3 次过筛 (2.5 mm), 筛上颗粒质量 (m_2 , g), 计算 3 次筛上物总质量占试样总质量的百分数。在饲料出口处, 接取饲料颗粒 500 g 晾干后过筛 (2.5 mm), 计算筛上颗粒质量的百分比, 即成型率。

$$\text{成型率} = m_2/m_1 \times 100\% \quad (4)$$

颗粒耐久性 (Pellet Durability Index, PDI) 和修正耐久性 (Modified Pellet Durability Index, MPDI): 取过筛 (2.5 mm) 颗粒 500 g, 在颗粒耐久性测试装置中不断反转 10 min 后, 过筛称量筛上颗粒饲料质量 (m_3 , g) 的百分比, 即颗粒耐久性 (PDI)^[7]。取过筛 (2.5 mm) 颗粒 500 g, 装入 ASM-E880 搅拌机内, 以 50 r/min 回转 6 min, 测量筛上颗粒质量 (m_4 , g) 的百分比, 即修正耐久性 (MPDI)。

$$\text{PDI} = \frac{m_3}{500} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{MPDI} = \frac{m_4}{500} \times 100\% \quad (6)$$

硬度: 利用质构仪 (TA-XY2i, Stable Micro System 公司) 进行颗粒硬度的测定, 记录断裂前的峰值 (N), 反复测量 20 次取平均值。

淀粉糊化度: 淀粉糊化度检测采用了美国饲料工业普遍采用测定淀粉糊化度的简易酶法测定^[23]。

1.3.4 制粒能耗

记录生产过程中的每分钟的产量记为 S (kg), 记录电度表示值记为 I (A), 计算每吨的制粒能耗 (kW·h/t), 公式如下:

$$\text{制粒能耗} = 1.732IU \cos \theta \frac{1000}{60S} \quad (7)$$

式中 I 代表正常制粒过程中的电流大小, A; U 代表电压,

为 0.38 kV; S 代表颗粒出口处接料 1min 的质量, kg; $\cos\theta$ 代表功率因数, 取 0.85。

1.4 统计分析

试验数据以平均值士标准误差表示。所有数据用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), Duncan 多重比较法检验差异显著性, 以 $P<0.05$ 为差异显著。首先将指标数据正向化与标准化, 判定相关性后确定主成分个数, 列出主成分 Z_i 的表达式, 根据数据对综合成分值进行计算。

2 结果与分析

2.1 蛋白原料与混合粉料的营养和理化性质指标

不同蛋白原料营养指标与理化性质如表 1 所示。不同蛋白原料的水分变化范围为 7.12%~9.87%, 棉粕和

DDGS 的水分显著高于其他蛋白原料 ($P<0.05$), 乙醇梭菌蛋白的水分最低; 不同蛋白原料的蛋白质量分数变化范围为 16.09%~82.53%, 乙醇梭菌蛋白的蛋白含量显著高于其他蛋白原料 ($P<0.05$), DDGS 的蛋白含量最低; 不同蛋白原料的粗脂肪质量分数变化范围为 0.19%~10.00%, DDGS 的粗脂肪含量最高 ($P<0.05$), 乙醇梭菌蛋白粗脂肪含量最低; 不同蛋白原料的粗纤维质量分数变化范围为 0.05%~11.80%, 菜粕的粗纤维含量最高 ($P<0.05$), 棉粕较高, 乙醇梭菌蛋白的粗纤维含量最低; 不同蛋白原料的蛋白溶解度变化范围为 11.74%~93.44%, 乙醇梭菌蛋白的蛋白溶解度最高 ($P<0.05$), 菜粕的蛋白溶解度最低; 5 种蛋白原料的吸水性由强到弱的排列顺序为乙醇梭菌蛋白、豆粕、棉粕、菜粕、DDGS; 吸水性和水溶性指标呈相反的变化趋势。

表 1 不同蛋白原料营养指标与理化性质

Table 1 Nutrition indicator and physicochemical properties of different protein materials

项目 Item		豆粕 Soybean meal	棉粕 Cottonseed meal	菜粕 Rapeseed meal	酒糟蛋白 Distillers dried grains with solubles	乙醇梭菌蛋白 <i>Clostridium autoethanogenum</i> protein
营养指标 Nutritional indicator	水分 Moisture/%	9.10±0.02 ^c	9.87±0.13 ^d	7.75±0.17 ^b	9.77±0.04 ^d	7.12±0.02 ^a
	蛋白质量分数 Protein content/%	44.29±0.42 ^c	45.98±0.25 ^d	40.24±0.05 ^b	16.09±0.01 ^a	82.53±0.25 ^e
	粗脂肪 Crush fat/%	2.00±0.08 ^d	0.50±0.01 ^b	1.49±0.03 ^c	10.00±0.08 ^e	0.19±0.01 ^a
	粗纤维 Crude fiber/%	5.93±0.10 ^b	10.54±0.11 ^d	11.80±0.19 ^e	6.58±0.15 ^c	0.05±0.00 ^a
理化性质 Physicochemical Properties	蛋白溶解度 Protein solubility/%	78.12±0.05 ^c	81.65±0.1 ^d	11.74±0.53 ^a	62.61±1.14 ^b	93.44±1.02 ^e
	吸水性 WAI/%	277.40±3.05 ^d	238.09±0.39 ^c	197.38±0.37 ^b	140.23±0.22 ^a	397.01±5.73 ^e
	水溶性 WSI/%	11.43±0.07 ^b	13.45±0.02 ^c	18.05±0.34 ^d	19.17±0.09 ^e	6.02±0.20 ^a

注：同一行数据肩标相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: In the same line, values with the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as below.

不同混合粉料的营养指标与理化性质如表 2 所示。豆粕组的黏度特征值显著高于其他各组 ($P<0.05$); 棉粕组的粗纤维含量显著高于其余各组 ($P<0.05$); DDGS 组的粗脂肪含量显著高于其余各组 ($P<0.05$), 并且 DDGS 的蛋白含量最低; 菜粕组具有较高的粗纤维含量和较低的蛋白溶解度, 蛋白溶解度显著低于其他各组 ($P<0.05$);

乙醇梭菌蛋白组的蛋白含量和蛋白溶解度显著高于其余各组 ($P<0.05$), 粗纤维含量最低; 不同混合粉料的吸水性由强到弱的排序为乙醇梭菌蛋白组、棉粕组、豆粕组、菜粕组、DDGS 组, 各组之间显著差异 ($P<0.05$), 水溶性指标与吸水性呈相反趋势。各混合粉料的差异与蛋白原料间的差异几乎一致。

表 2 不同混合粉料的营养指标与理化性质

Table 2 Nutrition indicator and physicochemical properties of different powder mixtures

项目 Item		豆粕组 Soybean meal group	棉粕组 Cottonseed meal group	菜粕组 Rapeseed meal group	DDGS 组 Distillers dried grains with solubles group	乙醇梭菌蛋白组 <i>Clostridium autoethanogenum</i> protein group
营养指标 Nutritional indicator	水分 Moisture/%	11.68±0.05 ^c	11.83±0.01 ^c	11.37±0.06 ^b	11.66±0.09 ^c	10.73±0.01 ^a
	蛋白质量分数 Protein content/%	19.16±0.01 ^d	17.93±0.28 ^c	15.62±0.07 ^b	11.46±0.03 ^a	31.44±0.05 ^e
	粗脂肪 Crush fat/%	3.14±0.02 ^c	2.63±0.02 ^a	2.93±0.01 ^b	5.51±0.09 ^d	2.52±0 ^a
	粗纤维 Crude fiber/%	3.38±0.01 ^b	5.07±0.08 ^d	4.68±0.06 ^c	3.53±0.02 ^b	1.61±0 ^a
理化性质 Physicochemical Properties	峰值黏度 Peak viscosity/(mPa·s)	1 441.33±8 ^c	883.67±10 ^c	668±4 ^a	954.67±12 ^d	731±8 ^b
	保持黏度 Hold viscosity/(mPa·s)	1 400.33±3 ^d	755±15 ^b	631.33±5 ^a	846.33±4 ^c	637.33±2 ^a
	最终黏度 Final viscosity/(mPa·s)	3 197.67±15 ^e	1 539.67±29 ^b	1 345±13 ^a	1 865.67±9 ^d	1 618±17 ^c
	蛋白溶解度 Protein solubility/%	70.09±0.36 ^c	72.35±0.32 ^d	50.08±0.38 ^a	64.97±0.78 ^b	75.68±0.27 ^e
	吸水性 WAI/%	157±0.96 ^c	166±0.87 ^d	141±0.84 ^b	111±0.69 ^a	217±1.78 ^e
	水溶性 WSI/%	7.84±0.06 ^c	7.65±0.06 ^b	8.04±0.04 ^d	9.1±0.02 ^e	2.92±0 ^a

2.2 制粒能耗与颗粒饲料质量指标

不同颗粒饲料的制粒能耗与颗粒饲料质量指标如表 3 所示。不同颗粒饲料的制粒能耗变化范围为 50.81~59.62 kW·h/t, 棉粕组和乙醇梭菌蛋白组的制粒能耗较高,

豆粕组的制粒能耗显著低于其余各组 ($P<0.05$); 不同颗粒饲料的成型率变化范围为 99.34%~99.77%, 各组成型率均在 99%以上; 不同颗粒饲料的 PDI 变化范围为 96.43%~98.53%, 乙醇梭菌蛋白组和棉粕组的 PDI 显著

高于其他组 ($P<0.05$)；不同颗粒饲料的 MPDI 变化范围为 79.68%~92.72%，棉粕组的 MPDI 显著高于其他组 ($P<0.05$)，菜粕组的 MPDI 最低；不同颗粒饲料的硬度变化范围为 74.26~130.95N，棉粕组和乙醇梭菌蛋白组

的硬度显著高于其他组 ($P<0.05$)，DDGS 组的硬度最低；不同颗粒饲料的淀粉糊化度变化范围为 31.36%~45.56%，乙醇梭菌蛋白组的淀粉糊化度显著高于其他组 ($P<0.05$)，豆粕组的淀粉糊化度最低。

表 3 不同颗粒饲料的制粒能耗与颗粒饲料质量指标
Table 3 Energy consumption and quality index of different pellet feed

处理组 Treatment group	制粒能耗 Energy Granulation/ (kW·h)·t ⁻¹	淀粉糊化度 Starch gelatinization degree/%	成型率 Formation rate/%	颗粒耐久性 PDI/%	修正颗粒耐久性 MPDI/%	硬度 Hardness/N
豆粕组 Soybean meal group	50.81±0.79 ^a	31.36±0.56 ^a	99.52±0.03 ^b	97.07±0.18 ^b	82.58±0.39 ^b	77.65±2.54 ^a
棉粕组 Cottonseed meal group	59.62±0.94 ^b	41.61±0.52 ^c	99.57±0.01 ^b	98.47±0.15 ^c	92.72±0.11 ^d	124.35±3.24 ^b
菜粕组 Rapeseed meal group	56.44±0.13 ^b	40.92±0.19 ^c	99.34±0.05 ^a	96.43±0.15 ^a	79.68±0.32 ^a	78.77±2.39 ^a
DDGS 组 Distillers dried grains with solubles group	56.52±1.91 ^b	32.64±0.23 ^b	99.48±0.01 ^b	96.87±0.15 ^{ab}	81.74±0.29 ^b	74.26±2.35 ^a
乙醇梭菌蛋白组 <i>Clostridium autoethanogenum</i> protein group	59.42±0.13 ^b	45.56±0.23 ^d	99.77±0.04 ^c	98.53±0.07 ^c	90.57±0.23 ^c	130.95±4.05 ^b

2.3 混合粉料特性与制粒能耗及颗粒质量指标偏最小二乘回归分析

混合粉料特性与制粒能耗及颗粒质量指标间的相关系数如表 4 所示，制粒能耗与峰值黏度、保持黏度和最终黏度呈显著负相关；成型率与蛋白含量、吸水性呈显著正相关，与蛋白溶解度呈极显著正相关，与水溶性呈

显著负相关；PDI 与蛋白含量、蛋白溶解度、吸水性显著正相关；MPDI 与蛋白溶解度、吸水性呈显著正相关性；硬度与蛋白含量、吸水性呈显著正相关性，淀粉糊化度与蛋白含量呈正相关性。仅通过相关性的数据大小不能够直接评估制粒能耗及颗粒质量指标与混合粉料特性直接的影响关系。

表 4 混合粉料特性与制粒能耗及颗粒饲料质量指标间的相关系数
Table 4 Correlation coefficient of mixed materials with energy granulation, quality indicators of different pellet feed

项目 Item	制粒能耗 Energy granulation	淀粉糊化度 Starch gelatinization degree	成型率 Formation rate	PDI	MPDI	硬度 Hardness
蛋白含量 Protein content	0.355	0.733*	0.735*	0.719*	0.661	0.794*
粗纤维 Crude fiber	-0.013	-0.127	-0.711*	-0.305	-0.162	-0.262
粗脂肪 Crush fat	-0.193	-0.663	-0.268	-0.487	-0.508	-0.602
蛋白溶解度 Protein solubility	0.181	0.082	0.902**	0.777*	0.733*	0.634
峰值黏度 Peak viscosity	-0.769*	-0.796*	0.018	-0.172	-0.196	-0.392
保持黏度 Hold viscosity	-0.821*	-0.798*	-0.046	-0.248	-0.279	-0.454
最终黏度 Final viscosity	-0.809*	-0.747*	0.072	-0.199	-0.255	-0.402
水分 Moisture	-0.275	-0.472	-0.491	-0.343	-0.294	-0.459
吸水性 WAI	0.340	0.699	0.761*	0.755*	0.704*	0.813*
水溶性 WSI	-0.390	-0.702*	-0.778*	-0.667	-0.583	-0.740*

注：*与**分别表示 0.05 和 0.01 水平上显著差异。
Note: *and**show significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

以混合粉料的营养指标和理化指标等为自变量，以制粒能耗、淀粉糊化度、成型率、PDI、MPDI、硬度为因变量分别建立回归模型，建立因变量和自变量之间的 PLS 模型，仅保留在置信区间内的变量。偏最小二乘回归模型系数表如表 5 所示，成型率受蛋白含量、蛋白溶

解度、吸水性、水溶性影响；硬度、PDI 和 MPDI 受蛋白含量、蛋白溶解度、最终黏度和吸水性影响；制粒能耗受粗纤维、蛋白溶解度、峰值黏度、保持黏度、最终黏度和吸水性的影响；淀粉糊化度受蛋白含量、峰值黏度、保持黏度、最终黏度、吸水性和水溶性的影响。

表 5 偏最小二乘回归模型系数表
Table 5 Coefficient table of partial least squares regression models

项目 Item	系数 Coefficient					
	制粒能耗 Energy granulation	淀粉糊化度 Starch gelatinization degree	成型率 Formation rate	MPDI	PDI	硬度 Hardness
蛋白含量 Protein content	-	0.135	0.124	0.159	0.160	0.166
粗纤维 Crude fiber	0.25	-	-	-	-	-
蛋白溶解度 Protein solubility	0.402	-	0.657	0.835	0.797	0.673
峰值黏度 Peak viscosity	-0.204	-0.218	-	-	-	-
保持黏度 Hold viscosity	-0.299	-0.252	-	-	-	-
最终黏度 Final viscosity	-0.355	-0.261	-	-0.242	-0.207	-0.248
吸水性 WAI	0.112	0.144	0.173	0.250	0.242	0.235
水溶性 WSI	-	-0.12	-0.123	-	-	-

采用 R^2 和 Q^2 两个指标评价 PLS 模型的拟合效果， R^2 表示所有提取的偏最小二乘模型的所能解释的自变量和因变量总方差的比例。 Q^2 是交叉验证平方系数，代表着模型的预测能力。一般来说 R^2 越大代表拟合模型代表性强， $Q^2>0.5$ 时，所得模型就具有良好的预测能力。偏最小二乘回归分析模型的拟合能力 (R^2) 与预测能力 (Q^2) 的结果，如表 6 所示，模型中偏最小二乘回归分析中， R^2 为 0.831~0.970，此模型拟合效果较好。 Q^2 为 0.738~0.909，则此模型的预测能力也较佳。

表 6 偏最小二乘回归分析模型的拟合与预测能力
Table 6 Fitting and forecasting ability of partial least squares regression analysis model

项目 Item	影响成分 Influence components	拟合能力 Fitting ability	预测能力 Predictive ability
		R^2	Q^2
制粒能耗 Energy Granulation	3	0.831	0.738
淀粉糊化度 Starch gelatinization degree	2	0.928	0.909
成型率 Formation rate	3	0.912	0.844
PDI	3	0.921	0.828
MPDI	3	0.994	0.856
硬度 Hardness	3	0.970	0.860

注： R^2 ：因变量模型拟合度； Q^2 因变量模型预测度。
Note: R^2 : fitting degree of dependent variable model; Q^2 : prediction degree of dependent variable model.

2.4 蛋白原料制粒特性的综合评价

为评价 5 种蛋白原料的制粒效果，对 5 种蛋白原料的制粒能耗和颗粒质量指标进行主成分分析，方差及主成分贡献率如表 7 所示，按照选择特征值大于 1 的原则，前 4 个因子的特征值均大于 1，因此选择前 4 个因子替代

原变量，累计贡献率达到 96.28% (>80%)，选择前 4 个主成分对蛋白原料的制粒性能进行综合评价。通过主成分载荷矩阵，得到用每个特征向量表示的主成分与相对应变量的关系，结果见表 8。

第一主成分：

$Z_1=0.226x_1+0.288x_2+0.268x_3+0.286x_4+0.296x_5+0.324x_6$

第二主成分：

$Z_2=-0.289x_1-0.243x_2+0.248x_3+0.058x_4+0.097x_5-0.005x_6$

第三主成分：

$Z_3=0.222x_1-0.079x_2+0.11x_3+0.405x_4+0.339x_5+0.231x_6$

第四主成分：

$Z_4=-0.206x_1+0.164x_2-0.251x_3+0.086x_4+0.025x_5+0.075x_6$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别为制粒能耗、淀粉糊化度、成型率、PDI、MPDI 和硬度标准化值； Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 为第一主成分、第二主成分、第三主成分和第四主成分。

表 7 方差及主成分贡献率
Table 7 Variance and principal component contribution rate

成分 Component	初始特征值 Initial characteristics		
	总计 Total	方差 Percent of variance/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	8.590	53.690	53.690
2	3.921	24.506	78.196
3	1.581	9.878	88.074
4	1.313	8.206	96.280
5	0.374	2.337	98.617
6	0.129	0.805	99.422
7	0.047	0.292	99.714
8	0.034	0.213	99.927

表 8 各主成分的载荷矩阵
Table 8 Load matrix of each principal component

项目 Item	主成分载荷矩阵 Principal component load matrix			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
制粒能耗 Energy Granulation	0.662	-0.573	0.280	-0.236
淀粉糊化度 Starch gelatinization degree	0.844	-0.481	-0.100	0.188
成型率 Formation rate	0.786	0.492	0.138	-0.288
PDI	0.837	0.114	0.510	0.098
MPDI	0.867	0.193	0.427	0.028
硬度 Hardness	0.948	-0.011	0.291	0.086

结合表 8，第一主成分贡献率 53.690%，主要提取硬度、PDI、MPAI 和淀粉糊化度；第二主成分贡献 24.506%，主提取制粒能耗、糊化度、成型率；第三主成分贡献 9.878%，主要提取 PDI、MPDI；第四主成分贡献 8.206%，主要提取成型率、制粒能耗。综合四个主成分系数及其

贡献的方差，得到综合得分公式 $Z=0.537Z_1+0.245Z_2+0.099Z_3+0.082Z_4$ 。通过评价公式计算出 5 种蛋白原料制粒特性的综合得分如表 9 所示，根据综合得分进行排序。5 种蛋白原料制粒特性由高到低依次是乙醇梭菌蛋白、棉粕、豆粕、菜粕、DDGS。

表 9 各主成分得分及综合得分
Table 9 Principal component scores and composite scores

项目 Items	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	综合得分 Composite score	排序 Sort
豆粕组 Soybean meal group	128	61.22	109.66	56.87	99.254 58	3
棉粕组 Cottonseed meal group	147.43	67.41	127.15	64.11	113.530 23	2
菜粕组 Rapeseed meal group	122	64.62	110.24	59.29	97.121 44	4
DDGS 组 Distillers dried grains with solubles group	123.3	61.69	108.94	56.96	96.781 93	5
乙醇梭菌蛋白组 Clostridium autoethanogenum protein group	149.9	68.15	128.05	65.15	115.21 23	1

3 讨 论

5 种蛋白原料的营养指标及理化性质均有不同。从各组颗粒饲料质量指标中可以看出, 乙醇梭菌蛋白组和棉粕组的 MPDI、硬度均较高, 所以颗粒稳定性较佳。

本试验证明了不同蛋白原料对制粒能耗、颗粒质量有很大影响。这与理化性质有密切关联, 结果显示混合粉料各指标的变化与蛋白原料各指标变化几乎一致。因此对混合粉料的理化性质与颗粒质量进行分析。

3.1 不同蛋白原料及其混合粉料的营养和理化性质指标对制粒能耗和淀粉糊化度的影响

在本文结果中, 蛋白原料和混合粉料的蛋白溶解度、吸水性会增加制粒能耗, 黏度特征值会降低制粒能耗。一般来说粗纤维含量不超过 10%, 增加纤维含量会增加制粒能耗^[24], 因为纤维含量越高, 使环模内物料间的摩擦力增大, 提高了相应的剪切力和制粒能耗^[25]。普遍研究结果显示, 制粒能耗随特征黏度值的增加而增大^[26]。RVA 仪器测的表观黏度特征值是使样品持续保持 95 ℃ 近 6 min, 接近完全糊化而测得的数值。而本试验的最高糊化度仅为 45.56%, 各组糊化度普遍较低, 没有发挥出黏度特性的效果而导致与普遍结论不同^[27]。在淀粉糊化度模型中, 蛋白含量和吸水性对淀粉糊化度有着正向影响。淀粉糊化主要是为了保持颗粒饲料结构的完整^[28]。当饲料中小肽或氨基酸的含量增加时, 可能会导致淀粉糊化度提高^[29-30]。而实际本试验中的颗粒饲料, 蛋白含量最高的乙醇梭菌蛋白组的糊化度最高。适宜的温度和足够的水分是淀粉糊化的前提, 吸水性指蛋白原料在水中能吸收水分的能力, 在调质过程中吸收更多的水分, 发挥保水能力, 即使通过调质箱后仍可以为淀粉颗粒的糊化提供更多可用的水分, 从而提高糊化度, 所以吸水性高对糊化度有着正向影响。Samuelsen 等^[31]研究显示, 物料糊化度高, 会增加物料的熔融黏度从而提高机械制粒能耗。从本试验结果中同样可以看出, 淀粉糊化度较高的乙醇梭菌蛋白组、棉粕组的制粒能耗较高, 而豆粕组淀粉糊化度最低, 制粒能耗最小。

3.2 不同蛋白原料及其混合粉料的营养和理化性质指标对颗粒饲料质量指标的影响

有许多研究结果表明, 饲料质量的好坏主要由原料成分和理化性质而决定的^[31]。畜禽饲料颗粒耐久性一般保持在 90% 以上, 畜禽饲料的颗粒硬度一般在 20~35 N 之间。本试验没有按实际生产配方进行制粒所以颗粒饲料的硬度高于常规范围, 成型率和 PDI 均是高于常规值。硬度、PDI、MPDI 都受蛋白含量、蛋白溶解度、吸水性正向影响。已有试验证明蛋白质是促进颗粒成型的物质^[32-33], 并且原料中未加工的非变性蛋白会提高颗粒耐久性和硬度^[34], 与本文结果相同。蛋白溶解度代表着蛋白质的变性程度, 变性程度越高则蛋白溶解度越低是因为蛋白质受热后会形成溶解度低的聚集体, 蛋白质持续处于高温、高湿的条件下, 大多数情况下混合饲料进行吸水、升温的过程, 在挤压腔达到蛋白质的变性条件, 蛋白质分解结构开始重组, 重组后结构更加稳定坚

挺。相比较而言, 不同物料同样时间、同样温度经过调质器, 接受蒸汽调质, 吸水性强的物料会吸收更多的水蒸汽, 在熔融过程中可降低蛋白原料的组织化温度, 使蛋白质更易变性可塑性增强^[35], 可提高颗粒饲料质量的稳定性, 利于颗粒饲料结构稳定。正如 Silva 等研究结果, 在饲料中添加 1.6% 的水分, 除提高颗粒成型率外, 同样可以提高颗粒耐久性指数 (PDI)^[36]。

本试验只利用蛋白原料和玉米进行混合制粒, 所以制得的颗粒饲料硬度高于实际畜禽饲料的颗粒硬度。在实际生产中, 可根据生产需要, 改变蛋白原料的配比而对蛋白含量和颗粒饲料质量进行调整。菜粕和 DDGS 的制粒特性排名较低, 菜粕特点是纤维含量较高、蛋白溶解度低, DDGS 是蛋白含量低、粗脂肪含量较高, 并且两者的吸水性低。在生产中可以与吸水性好、蛋白含量高的蛋白原料配合使用。

4 结 论

本文在相同添加比例下, 测定 5 种蛋白原料和混合粉料的营养指标和制粒指标以及颗粒饲料质量指标, 对混合粉料的营养指标和理化指标建立回归模型确定了影响颗粒质量的关键指标, 另外对蛋白原料的制粒效果进行综合评价, 得到以下结论:

1) 不同蛋白原料的理化性质差异显著 ($P<0.05$), 乙醇梭菌蛋白具有高蛋白含量、高蛋白溶解度、高吸水性、低脂肪和低纤维的特点, DDGS 具有高脂肪、低纤维、吸水性弱的特点; 棉粕具有高纤维的特点; 菜粕具有高纤维、低蛋白溶解度的特点。

2) 不同蛋白原料的颗粒饲料质量指标差异显著 ($P<0.05$), 乙醇梭菌蛋白组的硬度、淀粉糊化度较高, 棉粕组能制粒能耗较高、MPDI 较高; 豆粕组的制粒能耗较低。

3) 不同蛋白原料的蛋白含量、蛋白溶解度、吸水性的增加和水溶性的降低会提高颗粒饲料硬度、PDI 和 MPDI, 粗纤维含量、蛋白溶解度和吸水性的增加会增加制粒能耗。

4) 利用主成分分析提取 4 个主成分, 主成分 1 到 4 的贡献率分别是 53.690%、24.506%、9.878%、8.206%。累计贡献率达到 80% 以上。应用评价公式比较 5 种蛋白原料制粒特性, 顺序由高到低为乙醇梭菌蛋白、棉粕、豆粕、菜粕、DDGS。

实际生产中可根据需要, 利用乙醇梭菌蛋白或棉粕适当替代豆粕提高颗粒饲料质量。后续可在禽类日粮中, 通过蛋白原料的特性, 利用多种蛋白原料进行复配。找到满足营养需求并且可以提高颗粒饲料质量的蛋白配比。

[参 考 文 献]

- [1] 王永刚, 李豪强, 王妍霏, 等. 贸易争端背景下世界油料、植物油生产和贸易格局变动分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 5-9.
Wang Yonggang, Li Haoqiang, Wang Yanfei, et al. Changes in production and trade patterns of global oilseeds and vegetable oils under the background of trade disputes[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(7): 5-9. (in Chinese with

- English abstract)
- [2] 李爱科. 新型蛋白源饲料开发与应用[J]. 饲料与畜牧, 2019(4): 71-75.
- [3] Bouvarel I, Chagneau A M, Lescoat P, et al. Forty-eight-hour cycle sequential feeding with diets varying in protein and energy contents: adaptation in broilers at different ages[J]. Poultry Science, 2008, 87(1): 196-203.
- [4] Najib H. Feeding value of single cell protein produced from date palm (*Phoenix dactylifera*) fruits for broiler chickens[J]. Clothing & Textiles Research Journal, 2014, 4(14): 2406-2413.
- [5] 韩浩月, 陈健康, Đuro Vukmirović, 等. 饲料结构(颗粒粒度)和饲料形态(粉料对制粒)在营养中的重要性(综述)[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2017, 37(8): 81-84. Han Haoyue, Chen Jiankang, Đuro Vukmirović, et al. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition: A review[J]. Animal Science Abroad (Pigs and Poultry), 2017, 37(8): 81-84. (in Chinese with English abstract)
- [6] Hossein M G A M, Moravej H, Shivazad M, et al. Effects of feed form and particle size, and pellet binder on performance, digestive tract parameters, intestinal morphology, and cecal microflora populations in broilers[J]. Poultry Science, 2018, 98(3): 1432-1440.
- [7] 葛春雨, 李军国, 杨洁, 等. 二次制粒工艺下膨化玉米添加比例对颗粒饲料加工质量及断奶仔猪生长性能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(11): 4379-4387. Ge Chunyu, Li Junguo, Yang Jie, et al. Effects of expanded corn additive proportion under secondary pelleting process on processing quality of pellet feed and growth performance of weaned piglets[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(11): 4379-4387. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨强. 不同加工技术对硬颗粒饲料加工质量的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019. Yang Qiang. The Effect of Different Processing Technology on Processing Quality of Hard Pellet[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张亮, 许艳芬, 杨在宾, 等. 饲料原料对颗粒饲料制粒质量的影响[J]. 饲料与畜牧, 2013(1): 13-17. Zhang Liang, Xu Yanfen, Yang Zaibin, et al. Effects of feedstuffs on the quality of the pellet feeds[J]. Animal Agriculture, 2013(1): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [10] 万志生, 单慧勇, 宋欣. 影响颗粒饲料质量和制粒性能的因素分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 5929-5930. Wan Zhisheng, Shan Huiyong, Song Xin. Factors affecting quality and granulation property of pellet feeds[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(10): 5929-5930. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孔丹丹, 方鹏, 金楠, 等. 温度和粉碎粒度对不同能量饲料原料热物理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 296-306. Kong Dandan, Fang Peng, Jin Nan, et al. Effect of temperature and particle size on thermophysical properties of different energy feedstuffs material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 296-306. (in Chinese with English abstract)
- [12] 袁军, 薛敏, 吴立新, 等. 不同淀粉源对膨化饲料颗粒质量及吉富罗非鱼表观消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(8): 2209-2216. Yuan Jun, Xue Min, Wu Lixin, et al. Effects of different starch sources on pellet quality of extruded feed and apparent digestibility of genetic improvement of farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*, GIFT)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(8): 2209-2216. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张嘉琦. 缓沉性水产膨化饲料加工参数研究及高粱作为淀粉源对水产膨化饲料产品质量影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. Zhang Jiaqi. Study on Influence of Processing Parameters of Slow-sinking Aquatic Products and Effect of Sorghum as Starch Source on Quality of Aquatic Products[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨洁, 李军国, 许传祥, 等. 不同淀粉源对水产膨化饲料加工及品质特性影响研究进展[J]. 水产学报, 2019, 43(10): 2102-2108. Yang Jie, Li Junguo, Xu Chuanxiang, et al. Research progress on the effects of different starch sources on processing and quality characteristics of extruded aquatic feed[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(10): 2102-2108. (in Chinese with English abstract)
- [15] Liu K S, Hsieh F H. Protein-protein interactions during high-moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(8): 2681.
- [16] Day L, Swanson B G. Functionality of protein - fortified extrudates[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2013, 12(5): 546-564.
- [17] 邓留坤, 周庆安, 任建存. 影响饲料制粒的因素及其控制方法分析[J]. 饲料广角, 2005(6): 14-16.
- [18] 王红英, 邓志刚, 于庆龙, 等. 高蛋白饲料加工质量影响因素分析[J]. 饲料工业, 2004(2): 8-9.
- [19] Bhattacharya S, Prakash M. Extrusion of blends of rice and chick pea flours: A response surface analysis[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 21(3): 315-330.
- [20] Onwulata C I, Konstance R P, Smith P W, et al. Co-extrusion of dietary fiber and milk proteins in expanded corn products[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(7): 424-429.
- [21] 赵丹阳, 李军国, 秦玉昌, 等. 玉米和豆粕不同粉碎粒度组合对颗粒加工质量和肉鸡生长性能的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(10): 4553-4562. Zhao Danyang, Li Junguo, Qin Yuchang, et al. Effects of different crushing particle size combination of corn and soybean meal on processing quality of granules and growth performance of broilers[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(10): 4553-4562. (in Chinese with English abstract)
- [22] Wang H, Ma S, Yang J, et al. Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein sources[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 44: e13599.
- [23] 熊易强. 饲料淀粉糊化度(糊化度)的测定[J]. 饲料工业, 2001(3): 30-31.
- [24] Carvalho C W P, Takeiti C Y, Onwulata C I, et al. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(1): 103-109.
- [25] 张燕青, 崔清亮, 辛琳, 等. 谷子秸秆剪切力与其饲料营养特性变化规律及相互关系[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 41-50. Zhang Yanqing, Cui Qingliang, Xin Lin, et al. Variations and correlations of shearing force and feed nutritional characteristics of millet straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 41-50. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵学伟, 魏益民, 张波. 加压对小米淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2012(6): 185-188. Zhao Xuewei, Wei Yimin, Zhang Bo. Effect of extrusion on

- the physicochemical properties of foxtail millet starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012(6): 185-188. (in Chinese with English abstract)
- [27] 金楠, 段恩泽, 王红英, 等. 梯度恒温水热处理饲料的糊化时间温度特性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 300-307.
Jin Nan, Duan Enze, Wang Hongying, et al. Time and temperature characteristics of feed gelatinization by gradient isothermal hydrothermal treatment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 300-307. (in Chinese with English abstract)
- [28] Kannadhasan S, Muthukumarappan K, Rosentrater K A. Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS[J]. Food & Bioprocess Technology, 2011, 4(2): 282-294.
- [29] Mohtar N F, Perera C, Quek S Y. Optimisation of gelatine extraction from hoki (*Macruronus novaezelandiae*) skins and measurement of gel strength and SDS-PAGE[J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 307-313.
- [30] Tan I, Torley P J, Halley P J. Combined rheological and optical investigation of maize, barley and wheat starch gelatinisation[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(2): 272-286.
- [31] Samuelsen T A, Mjøs S A., Oterhals Å. Impact of variability in fishmeal physicochemical properties on the extrusion process, starch gelatinization and pellet durability and hardness[J]. Animal Feed Science & Technology, 2013, 179(1/2/3/4): 77-84.
- [32] Overland M, Morken T, Kraugeruol O F, et al. Effects of feed processing conditions and acid salts on nutrient digestibility and physical quality of soy-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2012, 18(1): 21-34.
- [33] Cavalcanti W B, Behnke K C. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: A mixture experimental approach. II[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82(4): 455-461.
- [34] Wood, John F. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets[J]. Animal Feed Science & Technology, 1987, 18(1): 1-17.
- [35] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
Kang Lining. Texturization Technology and Mechanism of Soy Protein by High Moisture Extrusion[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [36] Silv P G D, Oliveir L M S, Oliveir N R D, et al. Effects of processing, particle size and moisturizing of sorghum-based feeds on pellet quality and broiler production[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2018, 31(1): 98-105.

Effects of physicochemical properties of protein raw materials and their mash feed on the processing quality of pellet feed

Wu Yushan, Yang Jie, Li Junguo, Xu Chuanxiang, Li Jun, Niu Libin, Gu Xu*

(Laboratory of Feed-derived Factor Risk Assessment for Animal Product Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Beijing), Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The purpose of this study is to explore the nutritional components and physicochemical properties in five types of protein raw materials and their mixed powder, including soybean meal, cottonseed meal, rapeseed meal, Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS), and *Clostridium autoethanogenum* Protein (CAP). Key indicators were determined on the processing quality of pellet feed and energy consumption of granulation. A comprehensive evaluation was also performed on the granulation of protein raw materials. Five kinds of protein raw materials were mixed with ground corn at the weight ratio of 3:7 in a single-factor experimental design. The soybean meal was taken as the control group, whereas, the pelletized feed was prepared with the same processing parameters. Correlation analysis and Partial Least Squares regression (PLS) were conducted to compare the pelletizing quality of different protein raw materials. The results showed that there were significant differences in nutritional components and physicochemical properties of raw materials, where the CAP presented a high protein content and solubility while low fat and fiber, the cottonseed meal with high fiber, the rapeseed meal with high fiber and low protein solubility, as well as the DDGS with low protein and high fat. Water absorption of protein raw materials was ranked in descending order: CAP, soybean meal, cottonseed meal, rapeseed meal, and DDGS. The energy consumption of CAP group and cottonseed meal group was higher than other group, and soybean meal group was lowest; the higher Modified Pellet Durability Index (MPDI) of the cotton meal group and CAP group was 92.72% and 90.57% respectively, and the lowest MPDI of rapeseed group was 79.68%. The highest hardness of CAP group was 130.95 N, and the lowest hardness was 74.26 N in DDGS group. The highest gelatinization degree of CAP group was 45.56% and the lowest of gelatinization degree was 31.36% in DDGS group. The partial least squares regression model demonstrated that the protein content and solubility, as well as the water absorption significantly improved the hardness, PDI, and MPDI of pellet feed. The crude fiber content, protein solubility, and water absorption contributed to saving the energy consumption of pelletizing. The granulation characteristics were ranked in the order from high to low: CAP, cottonseed meal, soybean meal, rapeseed meal, and DDGS. The findings can provide a sound reference for the selection of protein raw materials in the actual production of pellet feed.

Keywords: protein; feed; physicochemical properties; pellet feed quality; Partial Least Squares Regression