

替代豆粕不同蛋白源组合制粒成型特性评价

李 星¹, 晋龙飞^{1,2}, 邵 爽¹, 李军国^{1,3}, 杨 洁^{1,3*}, 李 俊¹,
牛力斌¹, 董颖超¹, 商方方¹, 邬本成⁴

(1. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 3. 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 100081; 4. 安佑生物科技集团股份有限公司, 苏州 215437)

摘 要: 为分析替代豆粕不同蛋白源组合对混合粉料理化特性的影响, 该研究建立了理化特性与制粒效率、颗粒质量的相关性模型, 并评价不同组混合物料的制粒成型特性。试验选取 7 种非常规蛋白源配制成 6 组可完全替代豆粕的蛋白源组合, 按相同比例与其他原料配制成混合粉料用于制粒加工试验, 测定混合粉料理化特性及制粒成型特性指标, 通过偏最小二乘回归分析建立理化特性和制粒成型特性间的相关性, 并通过熵权 TOPSIS 分析评价不同组混合物料的制粒成型特性。结果表明: 1) 不同组混合粉料理化特性、制粒效率及颗粒质量存在显著差异 ($P<0.05$), 吸水性变化范围在 1.79~2.20 g/g, 最终黏度变化范围在 741.50~1 665.00 mPa·s, 吨料电耗变化范围在 7.46~9.28 kWh/t, 颗粒硬度变化范围在 58.75~84.15 N。2) 理化特性对制粒效率、颗粒质量有显著的影响作用, 其中压缩度与成型率呈显著负相关 ($r=-0.519$, $P<0.05$), 与颗粒耐久性呈显著正相关 ($r=0.545$, $P<0.05$), 与硬度呈极显著正相关 ($r=0.570$, $P<0.01$); 吸水性、溶胀度与颗粒耐久性呈显著正相关 ($r=0.450$, 0.548 , $P<0.05$), 与吨料电耗呈极显著正相关 ($r=0.869$, 0.903 , $P<0.01$); 黏度特征值与吨料电耗呈极显著正相关 ($r=0.883$, 0.891 , 0.860 , $P<0.01$)。3) 通过熵权 TOPSIS 分析对 7 组混合物料的制粒成型特性进行评价, 在制粒效率方面, 添加 38% 花生粕组 (CGP1 组) 制粒效率最优, 豆粕组 (SBM 组) 制粒效率最差; 在颗粒质量方面, 添加乙醇梭菌蛋白组 (CAP 组) 颗粒质量最优, 添加 32% 玉米蛋白粉组 (CGP2 组) 质量最差。该研究结果为无豆粕日粮蛋白源的选择及加工应用提供了基础数据和参考依据。

关键词: 豆粕减量替代; 非常规蛋白源; 理化特性; 制粒成型特性; 偏最小二乘回归分析; 熵权 TOPSIS 分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407087

中图分类号: S8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0297-09

李星, 晋龙飞, 邵爽, 等. 替代豆粕不同蛋白源组合制粒成型特性评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 297-305. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407087 <http://www.tcsae.org>

LI Xing, JIN Longfei, SHAO Shuang, et al. Evaluating the pelleting characteristics of alternative soybean meal protein combinations and soybean meal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 297-305. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407087 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来, 中国饲料产量连年上升, 2023 年全国工业饲料产量高达 3.2 亿 t, 但中国饲料中的优质蛋白资源严重依赖进口, 据统计 2023 年中国大豆进口量近 1 亿 t, 严重威胁国家粮食安全^[1]。因此, 寻找豆粕替代蛋白源、发展多元化配方结构迫在眉睫^[2]。目前, 豆粕替代的主要蛋白源有植物性蛋白源、动物性蛋白源以及新型蛋白源, 其中, 植物性蛋白源具有产量高、价格低等特点, 主要有花生粕、菜籽粕、棉籽粕、玉米干酒糟蛋白 (DDGS)、玉米蛋白粉等, 但各种蛋白源营养成分及氨基酸组成存在差异, 且含有多种抗营养因子。而新型

蛋白源蛋白质含量较高, 超过 60%, 并且氨基酸组成平衡, 可与植物性蛋白源起到良好的互补作用, 主要包括乙醇梭菌蛋白、棉籽浓缩蛋白等^[3]。同时, 相关研究表明, 添加适量非常规蛋白源对动物生长性能无负面影响, 提高了非常规饲料资源的利用效率, 缓解豆粕进口依赖度, 但某一种蛋白源过度添加后使动物生长性能明显下降, 难以在饲料中起到完全替代豆粕的作用^[4-10]。

相关研究表明, 蛋白饲料原料对颗粒饲料的加工成型和产品质量有着重要作用, 在调质制粒等湿热处理过程中蛋白质受热变性, 消化率提高, 同时使物料产生黏性, 增加物料间的黏结力, 并在颗粒饲料内部形成骨架, 起到良好的支撑作用, 提高颗粒饲料质量^[11-12]。但是, 不同蛋白饲料原料的理化特性有所不同, 并且颗粒饲料的生产效率、产品质量和养分消化率都会受到饲料原料加工性能的影响, 如不同种蛋白源的吸水性、水溶性、蛋白溶解度等理化指标存在着显著差异, 进而影响饲料制粒效率和产品质量^[13-14]。然而, 国内外在配方设计、原料选择极少考虑不同饲料原料的加工性能, 非常规蛋白饲料在生产过程中出现了颗粒饲料产品质量稳定性和

收稿日期: 2024-07-10 修订日期: 2024-10-25

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFD1300300); 中国农业科学院创新工程项目 (1610382024010, CAAS-IFR-ZDRW202303, CAAS-ASTIP-2024-IFR-06)

作者简介: 李星, 研究方向为饲料加工。Email: 810353963@qq.com

※通信作者: 杨洁, 研究员, 研究方向为饲料原料理化特性及饲料加工工艺。Email: yangjie02@caas.cn

生产效率下降等加工问题。

目前,关于非常规蛋白源的研究主要集中在单一物料的营养成分及对动物生长性能的影响,但对于多种蛋白源组合物料加工特性的相关研究未见报道。因此,本试验主要研究替代豆粕蛋白源组合的制粒成型特性,通过偏最小二乘回归分析研究豆粕及不同蛋白源组合理化特性与制粒成型特性的关系,并通过熵权 TOPSIS 分析评价豆粕及不同蛋白源组合的制粒成型特性,为非常规蛋白源在饲料中的应用加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米购于三元禾丰有限公司,豆粕(SBM)购于青岛渤海科技有限公司,乙醇梭菌蛋白(CAP)购于北京首钢朗泽科技股份有限公司,棉籽浓缩蛋白(CPC)购于新疆金兰植物蛋白有限公司,棉籽粕(CSM)购于新疆泰昆蛋白物产有限公司,菜籽粕(RSM)购于北京三

元种业科技股份有限公司,花生粕(PNM)购于山东嘉禾圆粮油有限公司,玉米干酒糟蛋白(DDGS)、玉米蛋白粉(CGM)均购于中粮饲料(唐山)有限公司。

1.2 试验设计

本试验遵循“粗蛋白质含量相近、符合饲料原料用量要求”的原则,并依据《肉鸡低蛋白低豆粕多元化日粮推荐典型配方》,将CAP、CPC、CGM、PNM、CSM、RSM、DDGS七种非常规蛋白源配制6组替代豆粕蛋白源组合,分别命名为CAP组、CPC组、CGC1组、CGC2组、CGP1组、CGP2组。蛋白源组合配比及粗蛋白质含量(理论计算值)见表1。将各组物料粉碎混合并在相同条件下制成颗粒饲料,测定混合粉料理化特性、颗粒饲料制粒效率和产品质量指标,通过偏最小二乘回归分析研究豆粕及不同蛋白源组合理化特性与颗粒饲料制粒成型特性的关系,并通过熵权 TOPSIS 分析评价豆粕及不同蛋白源组合的制粒成型特性。

表 1 蛋白源组合配比及粗蛋白质含量
Table 1 Protein feedstuffs combination ratio and crude protein content

组别 Group	组合 Combination	粗蛋白质含量 Crude protein content/%
SBM		44.20
CAP	CAP (10%) +CSM (30%) +PNM (31%) +DDGS (29%)	44.26
CPC	CPC (21%) +PNM (30%) +RSM (28%) +DDGS (21%)	44.26
CGC1	CGM (15%) +PNM (21%) +CSM (29%) +RSM (35%)	44.61
CGC2	CGM (25%) +PNM (21%) +CSM (19%) +RSM (35%)	45.89
CGP1	CGM (25%) +PNM (38%) +CSM (19%) +DDGS (18%)	45.45
CGP2	CGM (32%) +PNM (30%) +CSM (20%) +DDGS (18%)	45.03

注:SBM 为豆粕,CAP 为乙醇梭菌蛋白,CPC 为棉籽浓缩蛋白,CGM 为玉米蛋白粉,CSM 为棉籽粕,PNM 为花生粕,RSM 为菜籽粕,DDGS 为玉米酒糟蛋白。
Notes: SBM is soybean meal, CAP is clostridium ethanolum protein, CPC is cottonseed protein concentrate, CGM is corn protein meal, CSM is cottonseed meal, PNM is peanut meal, RSM is rapeseed meal, and DDGS is distillers dried grains with solubles.

1.3 样品制备

本试验在中国农业科学院南口中试基地进行。将饲料原料使用锤片粉碎机进行粉碎(2.0 mm 筛片孔径),按表2配制成混合粉料,采用环模制粒机进行制粒加工试验,工艺参数为调质温度 80 ℃,调质时间 135 s,模孔直径 3 mm,长径比为 10:1。当工艺参数达到要求并稳定后开始取混合粉料、颗粒饲料样品,并记录制粒机电流、产量等加工参数。

表 2 混合粉料组成
Table 2 Ratio of powder mixture

项目 Items	含量 Content/%
玉米 Corn	58.54
豆粕/蛋白源组合 Soybean meal/Protein combination	39.03
石粉 Limestone	0.97
豆油 Soybean oil	1.46
合计 Total	100.00

1.4 检测指标与方法

1.4.1 理化特性指标

振实密度、松装密度、压缩度:使用 BT-1000 粉体综合特性测试仪、固定体积法测定物料的松装密度、振实密度、压缩度。

休止角、摩擦角:使用 BT-1000 粉体综合特性测试仪测定物料休止角、摩擦角。

吸水性指数、水溶性指数及溶胀度:参考 ANDERSON 等^[15]的方法进行测定。

蛋白质分散指数:参考文献^[16]提供的方法。

黏度特性:采用快速黏度分析仪(ZM100 型快速黏度分析仪,波通瑞华科学仪器有限公司),选用程序 standard 1 进行测定。在结果中提取峰值黏度、保持黏度、最终黏度、衰减值、回生值、变性温度、变性时间等数值。

1.4.2 颗粒饲料指标

成型率:参考 GB/T 20192-2006 环模制粒机通用技术标准。

颗粒耐久性(pellet durability index, PDI):将待测样品用 0.25 mm 筛清理去除细粉,称取 100 g 放入颗粒饲料耐久性指数测试仪的饲料室(NHP100 PDI 检测仪),选择仪器运转时间(60 s),停止后称量留在筛网上颗粒质量(m),计算耐久性指数,如式(1)所示:

$$PDI=m/100\times 100\% \tag{1}$$

硬度:利用质构仪(型号 TA-XY2i)进行测定,颗粒断裂前的峰值即为硬度(g),重复测试 20 次取平均值;

吨料电耗(E_c):记录生产过程中的每分钟的产量,

记为 S (kg)，记录电度表示值为 I (A)，计算每吨的制粒能耗 (kWh/t)，如式 (2) 所示：

$$E_C = 1.732IU(1\,000/60S)\cos\theta \tag{2}$$

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 1 min 的质量，kg； $\cos\theta$ 代表功率因数 0.85。

1.5 统计分析

试验数据使用 SPSS 26 统计软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，采用 Duncan 氏法进行多重比较，显著水平为 $P<0.05$ ，结果均以“平均值±标准差”表示，使用 SIMCA 14.0 进行偏最小二乘回归分析，使用 SPSS 26 将数据逆向化和均值化处理，进行熵权 TOPSIS 评价分析。

2 结果与分析

2.1 混合粉料物理特性指标

各组混合粉料的振实密度、松装密度、压缩度、休止角、摩擦角指标如表 3 所示。由表 3 可知，各组混合粉料的基本物理指标存在显著差异 ($P<0.05$)，其中振实密度、松装密度变化范围较小，但仍存在显著差异 ($P<0.05$)，压缩度变化范围为 24.40%~28.79%，CGP2 组压缩度显著低于其他组 ($P<0.05$)；休止角变化范围为 46.33°~53.00°，摩擦角为 30.50°~37.50°，其中 CAP 组、CGC2 组的休止角显著高于其他组 ($P<0.05$)，SBM 组休止角显著低于其他组 ($P<0.05$)，CGP2 组摩擦角显著高于 SBM 组、CAP 组、CPC 组和 CGP1 组 ($P<0.05$)。

表 3 混合粉料物理特性指标
Table 3 Physical properties indicators of powder mixture

指标 Indicators	SBM 组 SBM group	CAP 组 CAP group	CPC 组 CPC group	CGC1 组 CGC1 group	CGC2 组 CGC2 group	CGP1 组 CGP1 group	CGP2 组 CGP2 group
松装密度 Apparent density/(g·L ⁻¹)	577.60±1.84 ^{bc}	573.70±1.84 ^c	586.40±0.42 ^{ab}	560.30±8.06 ^d	563.45±7.14 ^d	587.80±0.57 ^{ab}	596.65±0.35 ^a
振实密度 Tap density/(g·L ⁻¹)	771.50±5.94 ^c	791.50±4.10 ^{ab}	797.60±6.22 ^a	786.85±0.64 ^b	784.80±0.28 ^b	799.10±0.00 ^a	789.20±4.67 ^{ab}
压缩度 Compressibility/%	25.13±0.34 ^{cd}	27.52±0.61 ^{ab}	26.48±0.52 ^{bc}	28.79±0.97 ^a	28.20±0.88 ^a	26.44±0.07 ^{bc}	24.40±0.49 ^d
休止角 Angle of repose/(°)	46.33±01.53 ^c	52.67±0.58 ^a	50.33±1.53 ^b	49.67±1.53 ^b	53.00±1.00 ^a	48.67±0.58 ^b	49.67±0.58 ^b
摩擦角 Friction angle/(°)	30.50±0.71 ^c	32.00±1.41 ^c	31.00±1.41 ^c	35.00±1.41 ^{ab}	35.25±1.06 ^{ab}	33.00±1.41 ^{bc}	37.50±0.71 ^a

注：表中同行肩标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。
Note: Different lowercase letters of shoulder tags in the same row in the table indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

2.2 混合粉料水合特性指标

各组混合粉料的吸水性、水溶性、溶胀度和蛋白质分散指数指标见表 4。由表 4 可知，各组吸水性、水溶性、溶胀度均存在显著差异 ($P<0.05$)，其中吸水性变

化范围为 1.79~2.20 g/g，水溶性变化范围为 6.59%~9.94%，溶胀度变化范围为 2.56~2.88 g/g。SBM 组吸水性、水溶性、溶胀度均显著高于其他组 ($P<0.05$)，CPC 组蛋白质分散指数显著高于其他组 ($P<0.05$)。

表 4 混合粉料水合特性指标
Table 4 Hydration characteristic indicators of powder mixture

指标 Indicators	SBM 组 SBM group	CAP 组 CAP group	CPC 组 CPC group	CGC1 组 CGC1 group	CGC2 组 CGC2 group	CGP1 组 CGP1 group	CGP2 组 CGP2 group
吸水性 Water absorption index/ (g·g ⁻¹)	2.20±0.06 ^a	1.84±0.04 ^b	1.83±0.04 ^b	1.82±0.00 ^b	1.79±0.03 ^b	1.89±0.08 ^b	1.79±0.03 ^b
水溶性 Water solubility index/%	9.94±0.58 ^a	7.10±0.63 ^c	8.02±0.21 ^b	6.59±0.32 ^c	6.93±0.16 ^c	8.72±0.04 ^b	8.27±0.08 ^b
溶胀度 Swelling degree/ (g·g ⁻¹)	2.88±0.07 ^a	2.64±0.05 ^b	2.60±0.04 ^c	2.64±0.01 ^b	2.60±0.03 ^c	2.63±0.07 ^b	2.56±0.03 ^c
蛋白质分散指数 Protein dispersibility index/%	8.34±0.03 ^d	9.23±0.02 ^b	9.95±0.10 ^a	8.87±0.02 ^c	7.89±0.03 ^c	7.85±0.03 ^c	6.58±0.03 ^d

2.3 混合粉料黏度特性指标

混合粉料峰值黏度、保持黏度、最终黏度、变性时间、变性温度见表 5。由表 5 可知，各组峰值黏度、保持黏度、最终黏度、变性时间、变性温度均存在显著差异 ($P<0.05$)，其中峰值黏度变化范围为 366.00~825.50 mPa·s，保持黏度变化范围为 332.00~776.00 mPa·s，最终黏度变化范围为 741.50~1 665.00 mPa·s，变性时间、变性温度变化范围相对较小。SBM 组的峰值黏度、保持黏度、最终黏度均显著高于其他组 ($P<0.05$)，变性温度均显著低于其他组 ($P<0.05$)，CGC1 组峰值黏度、保持黏度、最终黏度均显著低于 SBM 组、CAP 组和

CPC 组 ($P<0.05$)。

2.4 颗粒饲料指标

颗粒饲料吨料电耗、成型率、颗粒耐久性、硬度见表 6。由表 6 可知，各组吨料电耗、成型率、颗粒耐久性、硬度均存在显著差异 ($P<0.05$)，其中硬度变化范围为 58.75~84.15 N，吨料电耗、成型率、颗粒耐久性变化范围相对较小。SBM 组吨料电耗显著高于其他组 ($P<0.05$)，成型率显著高于 CAP 组、CPC 组、CGC1 组、CGP1 组和 CGP2 组 ($P<0.05$)，CGP2 组颗粒耐久性、硬度均显著低于其他组 ($P<0.05$)，吨料电耗显著低于 SBM 组、CAP 组、CPC 组、CGC1 组和 CGC2 组 ($P<0.05$)。

表 5 混合粉料黏度特性
Table 5 Pasting properties value of powder mixture

指标 Indicators	SBM 组 SBM group	CAP 组 CAP group	CPC 组 CPC group	CGC1 组 CGC1 group	CGC2 组 CGC2 group	CGP1 组 CGP1 group	CGP2 组 CGP2 group
峰值黏度 Peak-viscosity/mPa·s	825.50±33.23 ^a	518.00±11.31 ^b	496.00±25.46 ^b	366.00±32.53 ^c	390.00±9.9 ^c	403.50±7.78 ^c	367.00±5.66 ^c
保持黏度 Trough-viscosity/mPa·s	776.00±24.04 ^a	486.00±1.41 ^b	463.00±14.14 ^c	332.00±19.80 ^d	363.00±5.66 ^d	349.50±9.19 ^d	334.00±1.41 ^d
最终黏度 Final-viscosity/mPa·s	1 665.00±5.66 ^a	1 111.00±16.97 ^b	990.00±45.25 ^c	741.50±19.09 ^f	830.00±16.97 ^e	905.50±34.65 ^d	789.50±3.54 ^{ef}
变性时间 Peak Time/min	4.90±0.04 ^b	7.00±0.00 ^a	5.90±1.09 ^{ab}	5.40±0.85 ^b	6.97±0.05 ^a	6.90±0.14 ^a	6.77±0.23 ^a
变性温度 Pasting temperature/°C	80.23±0.6 ^c	83.18±1.24 ^{ab}	83.20±0.00 ^{ab}	82.38±1.17 ^b	82.40±1.2 ^b	84.78±0.04 ^a	83.23±0.04 ^{ab}

表 6 颗粒饲料制粒成型特性指标
Table 6 Particle formation characteristic indicators of pellet food

指标 Indicators	SBM 组 SBM group	CAP 组 CAP group	CPC 组 CPC group	CGC1 组 CGC1 group	CGC2 组 CGC2 group	CGP1 组 CGP1 group	CGP2 组 CGP2 group
吨料电耗 Electricity consumption per ton / (kWh·t ⁻¹)	9.28±0.06 ^a	7.95±0.03 ^c	7.70±0.04 ^d	8.01±0.05 ^b	7.96±0.04 ^c	7.46±0.04 ^f	7.58±0.02 ^e
成型率 Pelleting rate/%	99.60±0.06 ^a	99.36±0.07 ^{bc}	99.44±0.06 ^{bc}	98.52±0.06 ^d	99.51±0.05 ^{ab}	99.38±0.01 ^{bc}	99.31±0.10 ^c
颗粒耐久性 Pellet durability Index/%	93.30±0.42 ^{ab}	92.60±0.42 ^{bc}	90.20±0.28 ^d	92.35±0.21 ^c	92.20±0.28 ^c	93.45±0.07 ^a	84.55±0.35 ^e
硬度 Hardness/N	80.30±3.38 ^{ab}	84.15±5.75 ^a	65.18±5.99 ^c	78.76±8.01 ^{ab}	82.49±8.39 ^{ab}	78.35±6.51 ^b	58.75±8.58 ^d

2.5 混合粉料理化特性与制粒效率、颗粒质量指标相关性分析

对混合粉料理化特性与制粒效率、颗粒质量进行相关性分析,结果见表 7。由表 7 可知,混合粉料的物理特性、水合特性、黏度特性与制粒效率、颗粒质量存在显著相关性 ($P<0.05$),其中吨料电耗与吸水性、溶胀度、黏度特征值呈极显著正相关 ($P<0.01$),与振实密度、变性时间、变性温度呈极显著负相关 ($P<0.01$);

与休止角、摩擦角呈显著负相关 ($P<0.05$);成型率与水溶性呈极显著正相关 ($P<0.01$),与松装密度、黏度特征值呈显著正相关 ($P<0.05$),与压缩度呈显著负相关 ($P<0.05$);颗粒耐久性 with 压缩度、吸水性、溶胀度、蛋白质分散指数、最终黏度呈显著正相关 ($P<0.05$),与摩擦角、松装密度呈极显著负相关 ($P<0.01$);硬度与压缩度呈极显著正相关,与松装密度呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

表 7 理化特性与制粒成型特性指标相关性系数
Table 7 Correlation coefficients of the physical chemical properties with particle formation characteristic

指标 Indicators	吨料电耗 Electricity consumption per ton	成型率 Pelleting rate	颗粒耐久性 Pellet durability Index	硬度 Hardness
休止角 Angle of repose, AR	-0.460*	-0.033	-0.036	0.218
摩擦角 Angle of friction, AF	-0.462*	-0.371	-0.624**	-0.330
松装密度 Apparent density, AD	-0.311	0.435*	-0.648**	-0.699**
振实密度 Tap density, TD	-0.877**	-0.110	-0.242	-0.297
压缩度 Compressibility, CP	-0.158	-0.519*	0.545*	0.570**
吸水性 Water absorption index, WAI	0.869**	0.362	0.450*	0.294
水溶性 Water solubility index, WSI	0.472*	0.572**	-0.010	-0.193
溶胀度 Swelling degree, SD	0.903**	0.262	0.548*	0.415
蛋白质分散指数 Protein dispersibility index, PDI	0.126	-0.126	0.538*	0.265
峰值黏度 Peak-viscosity, PV	0.883**	0.480*	0.430	0.275
保持黏度 Trough-viscosity, TV	0.891**	0.481*	0.421	0.272
最终黏度 Final-viscosity, FV	0.860**	0.525*	0.439*	0.310
变性时间 Pasting time, PT	-0.682**	0.244	-0.287	-0.007
变性温度 Pasting temperature, PTP	-0.875**	-0.085	-0.276	-0.208

注:*表示差异显著 ($P<0.05$);**表示差异极显著 ($P<0.01$)。Note: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extreme significant ($P<0.01$).Note: *and**show significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.6 混合粉料理化特性与制粒效率、颗粒质量偏最小二乘回归分析

由于指标较多,且多个指标间存在相关性,所以进一步利用偏最小二乘回归分析,以混合粉料理化特性指标为自变量,颗粒饲料的吨料电耗、成型率、颗粒耐久性、硬度为因变量,分别建立回归模型,模型拟合与预测能力见表 8, R^2 越接近 1 说明模型拟合能力越好, $Q^2>0.5$ 说明模型的预测能力良好。由表 8 可知,4 个模型均有良好的拟合能力和预测能力。

表 8 偏最小二乘回归分析模型拟合与预测能力
Table 8 Fitting and forecasting ability of partial least squares regression analysis model

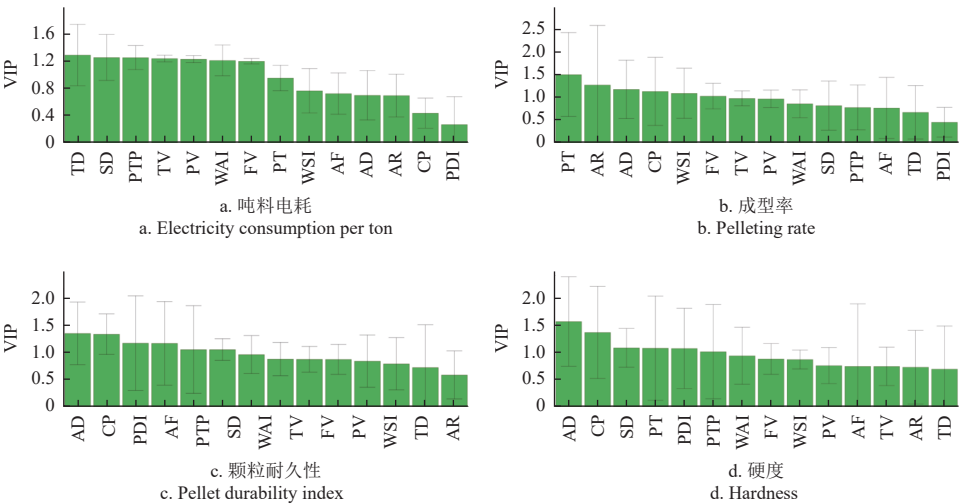
指标 Indicators	影响成分 Influence components	拟合能力 Fitting ability (R^2)	预测能力 Predictive ability (Q^2)
吨料电耗 Electricity consumption per ton	3	0.984 2	0.971 4
成型率 Pelleting rate	3	0.770 3	0.617 2
颗粒耐久性 Pellet Durability Index	4	0.923 5	0.751 5
硬度 Hardness	3	0.874 3	0.600 1

偏最小二乘回归分析模型系数见表 9，变量重要性投影值图（variable importance for the projection，VIP）见图 1，VIP 值>1 的自变量说明其对因变量有显著影响作用，由图可知，振实密度、溶胀度、变性温度、保持黏度、峰值黏度、吸水性、最终黏度对吨料电耗有显著影响作用；变性时间、休止角、松装密度、压缩度、水

溶性、最终黏度、保持黏度对成型率有显著影响作用；松装密度、压缩度、蛋白质分散指数、摩擦角、变性温度、溶胀度对颗粒耐久性有显著影响作用；松装密度、压缩度、溶胀度、变性时间、蛋白质分散指数、变性温度对硬度有显著影响作用。

表 9 偏最小二乘回归模型系数

Table 9 Coefficient table of partial least squares regression models				
指标 Indicators	吨料电耗 Electricity consumption per ton	成型率 Pelleting rate	颗粒耐久性 Pellet Durability Index	硬度 Hardness
AR				0.213 9
AF	-0.295 9	-0.210 3		
AD	-0.447 9	0.163 9	-0.136 1	-0.434 5
TD			-0.229 9	
CP		-0.162 9		0.394 9
WAI	0.266 8		0.110 8	0.249 9
WSI		0.201 2		
SD	0.288 3		0.132 4	0.317 2
PDI			0.173 3	
PV	0.116 7	0.189 8	0.116 8	
TV	0.124 5	0.205 3	0.124 5	
FV	0.114 6	0.227 1	0.113 6	0.209 0
PT		0.465 5		
PTP			-0.183 8	



注：VIP 为变量重要性投影值，VIP 值>1 表示“重要”变量，VIP 值<0.5 表示“不重要”变量
Notes: VIP is variableimportance for the projection, VIP-values larger than 1 indicate “important” variables, and values lower than 0.5 indicate “unimportant” variables.

图 1 偏最小二乘回归分析 VIP 图
Fig.1 VIP figures of partial least squares regression

2.7 替代豆粕蛋白源组合制粒效率评价

分别通过熵权 TOPSIS 分析对各组制粒效率（吨料电耗、成型率）及颗粒质量（颗粒耐久性、硬度）进行

评价，熵权 TOPSIS 计算权重结果见表 10，由表 10 可知，制粒效率评价中，吨料电耗占权重系数为 100.00%；颗粒质量评价中，硬度所占权重系数较大，为 93.71%。

表 10 熵权 TOPSIS 计算权重结果

Table 10 Result of Entropy Weighted TOPSIS calculation weight				
指标 Indicators	指标 Indictors	信息熵值 Ententropy	信息效用值 Information utility	权重系数 weight coefficient/%
制粒效率 Pelleting efficiency	吨料电耗 Electricity consumption per ton	0.921 6	0.078 4	100.00
	成型率 Pelleting rate	1.000 0	0.000 0	0.00
颗粒质量 Particle quality	颗粒耐久性 Pellet durability index	0.999 8	0.000 2	6.29
	硬度 Hardness	0.996 3	0.003 7	93.71

不同组饲料制粒成型特性指标评价见表 11。由表 11 可知，各组颗粒饲料制粒效率从优到劣排名为：CGP1 组、CGP2 组、CPC 组、CAP 组、CGC2 组、

CGC1 组、SBM 组；各组颗粒质量从优到劣排名为：CAP 组、CGC2 组、SBM 组、CGC1 组、CGP1 组、CPC 组、CGP2 组。各组蛋白源组合制粒效率均优于

SBM 组, CAP 组、CGC2 组颗粒质量优于 SBM 组, 其余组颗粒质量低于 SBM 组。

表 11 颗粒饲料制粒成型特性指标 TOPSIS 评价结果

Table 11 Evaluation results of entropy weight TOPSIS on pelleting efficiency of pellet feed

指标 Indicators	正理想解距离 Positive ideal distance (D+)	负理想解距离 Negative ideal distance (D-)	相对接近度 Relative proximity (C)	排序结果 Sort result
制粒效率指标 Pelleting efficiency	SBM 组 SBM group	1.000	0.000	7
	CAP 组 CAP group	0.269	0.731	4
	CPC 组 CPC group	0.134	0.866	3
	CGC1 组 CGC1 group	0.303	0.697	6
	CGC2 组 CGC2 group	0.274	0.726	5
	CGP1 组 CGP1 group	0.000	1.000	1
	CGP2 组 CGP2 group	0.069	0.931	2
质量指标 Quality indicators	SBM 组 SBM group	0.048	0.268	3
	CAP 组 CAP group	0.000	0.316	1
	CPC 组 CPC group	0.236	0.080	6
	CGC1 组 CGC1 group	0.067	0.249	4
	CGC2 组 CGC2 group	0.021	0.295	2
	CGP1 组 CGP1 group	0.072	0.243	5
	CGP2 组 CGP2 group	0.316	0.000	7

注: 表中的 D+、D- 分别表示评价样本与正负理想解的距离, C 表示评价对象与最优方案的接近程度, 该值越大说明与最优方案越接近。

Note: In the table, D+ and D- respectively represent the distance between the evaluation sample and the positive and negative ideal solutions, and C represents the degree of proximity between the evaluation object and the optimal scheme, and the larger the value indicates the closer it is to the optimal solution.

3 讨论

3.1 影响混合粉料理化特性的因素

混合物料的流动性可以反映物料在料仓及管道内移动情况, 以及在制粒时通过模孔的难易程度^[17]; 水合特性可以反映物料在调质过程中与水蒸气的作用; 黏度特性可以反映物料在湿热加工处理后产生的黏度^[18]。本试验结果表明, 不同组混合粉料理化特性有所不同, 尤其是 SBM 组与蛋白源组差异较大, 这主要是因为不同组中物料组成不同, 单一物料的营养成分、理化特性均有较大差异, 所以复配后混合粉料的理化特性同样存在较大差异。余忠奎等^[13]研究测定了豆粕、棉籽粕、花生粕、菜籽粕的理化特性, 结果同样表明不同种饲料原料的理化特性存在较大差异。吴雨珊等^[14]研究测定了豆粕、棉粕、菜粕、酒糟蛋白、乙醇梭菌蛋白混合粉料的理化特性, 结果也同样表明, 各组物料的理化特性及制粒成型特性均存在较大差异。不同种单一物料的容重、流动特性、水合特性、黏度特性等均表现出了显著差异, 所以豆粕组和蛋白源组的理化特性同样表现出了显著差异。

3.2 混合粉料理化特性对制粒效率的影响

颗粒饲料的制粒效率包括吨料电耗、成型率等指标, 吨料电耗可直观反映出物料制粒的难易程度^[19]。成型率是衡量制粒机的生产效率和产品质量的综合指标^[20]。试验结果表明, 混合粉料的松装密度、压缩度、休止角、摩擦角、吸水性、水溶性、黏度特性对颗粒饲料制粒效率有显著的影响作用。SBM 组表现出了较差的制粒效率, 这可能是因为该组物料的吸水性较高, 在调质制粒过程中, 物料将水分快速吸收到芯部, 然而存留在物料表面的水分减少, 水分的润滑作用减小, 使制粒能耗较高^[21]。此外, 该组物料具有较高的黏度特征值, 所以在调质后产生了较强黏度, 难以通过模孔, 甚至堵塞模孔, 同样导致制粒能耗升高。赵学伟等研究结果同样表明, 挤压机械能耗随着物料黏度增加而增加^[22]。添加花生粕最多

的 CGP1 组表现出了最优的制粒效率, 这可能是因为该组物料休止角、摩擦角均较小, 具有较好的流动性, 物料之间以及物料与接触面的摩擦力均较小, 物料通过制粒机模孔时所需的外部挤压力相对较小, 物料更容易通过模孔挤出成型, 所以制粒能耗相对较低^[23-24]。

3.3 混合粉料理化特性对颗粒质量的影响

颗粒饲料质量指标包括硬度、颗粒耐久性等指标, 其中, 硬度直观反映出颗粒饲料对外力引起形变的抵抗能力^[25], 颗粒饲料耐久性是反映颗粒饲料在运输过程中抵抗破碎的能力, 耐久性越高说明饲料颗粒质量越高^[26-27]。试验结果表明, 原料的松装密度、压缩度、蛋白质分散指数、吸水性、溶胀度、变性时间、变性温度等对颗粒饲料的硬度、耐久性有极其重要的影响作用。CAP 组表现出最优的颗粒质量, 结果与其他研究相一致^[28], 这可能是因为与其他组相比, CAP 组蛋白质分散指数较高, 蛋白质的变性程度较低, 非变性蛋白有利于在调质和制粒过程中进一步变性产生黏度, 增加物料内部的黏结力, 提高颗粒质量^[29-30]。CGM 添加量较高的 CGP2 组表现出最差的颗粒质量, 这可能是因为该组的蛋白质分散指数、吸水性、黏度特征值均为最低, 该组物料在调质过程中并不能充分吸收饱和和蒸气, 调质后的物料淀粉糊化度、蛋白质变性程度小, 物料间的黏结力不足, 导致颗粒饲料质量较差^[31]。

4 结论

本试验对 6 组替代豆粕不同蛋白源组合的理化特性及制粒成型特性进行研究及评价, 得出主要结论如下:

1) 6 组替代豆粕不同蛋白源组合对混合粉料的物理特性、水合特性、黏度特性均存在显著影响作用, 并且理化特性显著影响混合粉料的制粒效率、颗粒质量, 利用偏最小二乘回归分析分别建立了理化特性与制粒效率、颗粒质量的相关性模型, 模型均 $R^2 > 0.7$, $Q^2 > 0.6$, 具有

良好的拟合和预测能力, 其中压缩度、吸水性、溶胀度、黏度特征值、变性时间、变性温度重要性投影值 >1 , 说明其对制粒成型特性有显著的影响作用。

2) 利用熵权 TOPSIS 建立了混合物料制粒效率和产品质量的评价体系, 分析了不同组混合物料的制粒成型特性, 其中, 添加乙醇梭菌蛋白 (CAP 组) 可改善颗粒质量, 添加花生粕 (CGP1 组) 可改善制粒效率, 添加过多玉米蛋白粉 (CGP2 组) 导致颗粒饲料质量降低。

该研究结果为替代豆粕蛋白源选择和饲料原料成型特性评价提供了参考依据和研究方法。

[参 考 文 献]

- [1] 林国发. 2024 年饲料产量分析及展望[J]. *广东饲料*, 2024, 33(4): 27-28.
LIN Guofa. Analysis and outlook of feed production in 2024[J]. *Guangdong Feed*, 2024, 33(4): 27-28. (in Chinese with English abstract)
- [2] 喻方勇, 徐晓锋. 畜禽日粮豆粕减量替代研究进展[J]. *中国奶牛*, 2024(4): 5-9.
YU Fangyong, XU Xiaofeng. Research progress on the substitution of soybean meal reduction in livestock and poultry diets[J]. *China Dairy Cattle*, 2024(4): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李星, 杨洁, 李军国, 等. 我国饲料生产中豆粕减量替代技术探讨分析[J]. *中国饲料*, 2023(22): 89-95.
LI Xing, YANG Jie, LI Junguo, et al. Discussion and analysis of soybean meal reduction and substitution technology in feed production in China[J]. *China Feed*, 2023(22): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何永聚, 赵晓伟, 郭金梅, 等. 非粮型单细胞蛋白饲料对育肥猪的饲喂效果研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(21): 109-112.
HE Yongju, ZHAO Xiaowei, GUO Jinmei, et al. Study on the feeding effect of non-grain single cell protein feed on fattening pigs[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 109-112. (in Chinese with English abstract)
- [5] 倪海球, 李军国, 杨玉娟, 等. 挤压膨化对棉粕营养成分及膨化棉粕对肉鸡生长性能的影响[J]. *饲料工业*, 2020, 41(11): 30-36.
NI Haiqiu, LI Junguo, YANG Yujuan, et al. Effects of extrusion and expansion on nutritional composition of cotton meal and extruded cotton meal on growth performance of broilers[J]. *Feed Industry*, 2020, 41(11): 30-36. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李莹, 瞿浩, 刘天飞, 等. 饲料中添加双低菜粕对文昌鸡生产性能和肉品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(5): 1201-1205.
LI Ying, QU Hao, LIU Tianfei, et al. Effects of canola meal in diet on growth performance and meat quality of Wenchang chicken[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(5): 1201-1205. (in Chinese with English abstract)
- [7] YANG A, ZHANG C, ZHANG BY, et al. Effects of dietary cottonseed oil and cottonseed meal supplementation on liver lipid content, fatty acid profile and hepatic function in laying hens[J]. *Animals*, 2021, 11(1): 78.
- [8] QIN CF, HUANG P, QIU K, et al. Influences of dietary protein sources and crude protein levels on intracellular free amino acid profile in the longissimus dorsi muscle of finishing gilts[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2016, 7(2): 184-193.
- [9] YADAV S, TENG P Y, CHOI J, et al. Nutrient profile and effects of carinata meal as alternative feed ingredient on broiler performance, tight junction gene expression and intestinal morphology[J]. *Poultry Science*, 2022, 101(2): 101411.
- [10] 李星, 许传祥, 杨洁, 等. 玉米干酒糟及其可溶物添加比例对育肥猪颗粒饲料硬度、生长性能及营养物质表观消化率的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(6): 3574-3582.
LI Xing, XU Chuanxiang, YANG Jie, et al. Effects of corn distillers' dried grains with solubles adding proportion on pellet feed hardness, growth performance and nutrient apparent digestibility of finishing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(6): 3574-3582. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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)
- [12] 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, 25(2): 8-9.
WANG Hongying, DENG Zhigang, YU Qinglong, et al. Analysis of influencing factor on processing quality of high protein feed[J]. *Feed Industry*, 2004, 25(2): 8-9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 余忠奎, 李军国, 杨洁, 等. 畜禽饲料常用植物蛋白源理化性质比较研究[J]. *中国饲料*, 2023(22): 226-232.
YU Zhongkui, LI Junguo, YANG Jie, et al. The comparative study of physicochemical properties of plant protein sources in pellet feeds[J]. *China Feed*, 2023(22): 226-232. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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.
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)
- [15] ANDERSON R. Water absorption and solubility and amylograph characteristics of roll-cooked small grain

- products[J]. *Cereal Chemistry*, 1982, 59: 265-269.
- [16] 李星, 邵爽, 李军国, 等. 调质温度对替代豆粕蛋白源组合理化特性及制粒成型特性影响[J/OL]. *中国粮油学报*, 2024-10-25[2024-10-30].
LI Xing, SHAO Shuang, LI Junguo, et al. Effects of conditioning temperature on physicochemical properties and pelleting characteristics of alternative soybean meal protein source combinations[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*. 2024-10-25[2024-10-30]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000989>. (in Chinese with English abstract)
- [17] 廖莹, 刘巍, 李军国, 等. 基于主成分分析的饲料级磷酸盐理化特性评价[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(11): 299-306.
LIAO Ying, LIU Wei, LI Junguo, et al. Quality evaluation of the physicochemical properties of feed grade phosphates based on principal component analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(11): 299-306. (in Chinese with English abstract)
- [18] 廖莹, 杨洁, 李军国, 等. 饲料级磷酸盐对玉米豆粕混合粉料理化特性及颗粒饲料质量的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(9): 6109-6120.
LIAO Ying, YANG Jie, LI Junguo, et al. Effects of feed grade phosphates on physicochemical properties and pellet feed quality of corn-soybean meal mash feed[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(9): 6109-6120. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
- [20] 张国栋, 王红英, 卢红平, 等. 环模特性对饲料颗粒成型率影响探究试验[J]. *饲料工业*, 2023, 44(7): 30-34.
ZHANG Guodong, WANG Hongying, LU Hongping, et al. Study on the influence of ring die on feed particle forming rate[J]. *Feed Industry*, 2023, 44(7): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [21] BRIGGS J, MAIER D E, WATKINS B, et al. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality[J]. *Poultry Science*, 1999, 78(10): 1464-1471.
- [22] 赵学伟, 魏益民, 张波. 挤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)
- [23] 刘晓鹏, 李建文, 刘羽祚, 等. 颗粒状饲料接触参数标定及其流动性分析[J]. *饲料工业*, 2021, 42(19): 6-17.
LIU Xiaopeng, LI Jianwen, LIU Yuzuo, et al. Contact parameters calibration and flowing property analysis of granular feed[J]. *Feed Industry*, 2021, 42(19): 6-17. (in Chinese with English abstract)
- [24] JONAT S, HASENZAH S, GRAY A, et al. Mechanism of glidants: Investigation of the effect of different colloidal silicon dioxide types on powder flow by atomic force and scanning electron microscopy[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2004, 93(10): 2635-2644.
- [25] WOOD J F. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1987, 18(1): 1-17.
- [26] 李星, 廖莹, 杨洁, 等. 高粱替代玉米不同比例及调质温度对颗粒饲料质量影响[J/OL]. *中国粮油学报*. 2024-05-31 [2024-10-30]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000850>.
LI Xing, LIAO Ying, YANG Jie, et al. Effects of different proportions of sorghum instead of corn and conditioning temperature on pellet feed quality[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*. 2024-05-31 [2024-10-30]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000850>. (in Chinese with English abstract)
- [27] SAMUELSEN T A, MJØS S A, ØTERHALS Å. Impact of variability in fishmeal physicochemical properties on the extrusion process, starch gelatinization and pellet durability and hardness[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 179(1): 77-84.
- [28] 吴雨珊. 乙醇梭菌蛋白对颗粒饲料质量及肉鸡生长性能的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
WU Yushan. Effect of *Clostridium Autoethanogenum* Protein on Pelleting Feed and Growth Performance of Broilers[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘宗浩, 张高鹏, 孙立娜, 等. 挤压对谷物蛋白的微观结构和功能特性影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 158-165.
LIU Zonghao, ZHANG Gaopeng, SUN Lina, et al. Effects of microstructure and functional properties of cereal proteins by extrusion[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 158-165. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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.
DENG Liukun, ZHOU Qingan, REN Jiancun, et al. Analysis of factors affecting feed pelleting and their control methods[J]. *Feed China*, 2005(6): 14-16. (in Chinese with English abstract)
- [31] BUCHANAN N P, MORITZ J S. Main effects and interactions of varying formulation protein, fiber, and moisture on feed manufacture and pellet quality[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2009, 18(2): 274-283.

Evaluating the pelleting characteristics of alternative soybean meal protein combinations and soybean meal

LI Xing¹, JIN Longfei^{1,2}, SHAO Shuang¹, LI Junguo^{1,3}, YANG Jie^{1,3*}, LI Jun¹, NIU Libin¹,
DONG Yingchao¹, SHANG Fangfang¹, WU Bencheng⁴

(1. Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083; 3. Laboratory of Feed-Derived Factor Risk Assessment for Animal Product Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081; 4. Anyou Biotechnology Group Co., Ltd, Suzhou 215437)

Abstract: The purpose of this experiment was to clarify the effect of different combinations of alternative soybean meal protein on the physicochemical properties and pelleting characteristics of mash feed. A correlation model was also established between physicochemical properties, pelleting efficiency and pellet quality. Seven unconventional protein sources were selected, including clostridia ethanol protein (CAP), cottonseed protein concentrate (CPC), corn gluten meal (CGM), peanut meal (PNM), rapeseed meal (RSM), cottonseed meal (CSM) and distillers dried grains with soluble (DDGS). Six groups were prepared for the alternative soybean meal protein combinations. These feedstuffs were grounded by hammer mill with a 2-mm screen-sized plate sieve, and then mixed with the rest feed raw materials in the same proportion. The pelleting experiment was carried out on the ring die pellet mill. Specifically, the die hole diameter was 3 mm, and the length-diameter ratio of ring die was 10:1. The conditioning temperature and time were 80 °C and 135 s respectively. The mash and pellet feed samples were taken to record the processing parameters. The parameters were then measured, including the physicochemical properties of mash feed (apparent density, tap density, angle of repose, angle of friction, water absorption, water solubility, protein dispersibility, and viscosity), and pelleting characteristics (electricity consumption per ton, pelleting rate, pellet durability index, and hardness). Partial least squares regression was utilized to establish the correlation between physicochemical properties and pelleting characteristics. Entropy weight TOPSIS analysis was made to evaluate the pelleting characteristics of different mash feed. The results showed that: 1) There were the significant differences in the physicochemical properties, pelleting efficiency and pellet quality of different groups. The water absorption index varied from 1.79 to 2.20 g/g, the final-viscosity was from 741.50~1 665.00 mPa·s, the electricity consumption per ton was from 7.46~9.28 kWh/t, and the hardness was from 58.75~84.15 N. 2) The physicochemical properties shared a significant effect on the pelleting efficiency and pellet quality. The compression degree was negatively correlated with the pelleting rate ($r=-0.519$, $P<0.05$), positively correlated with the pellet durability index ($r=0.545$, $P<0.05$), and significantly and positively correlated with the hardness ($r=0.570$, $P<0.01$). The water absorption index and swelling degree were positively correlated with the pellet durability index ($r=0.450$, 0.548 , $P<0.05$), and significantly and positively correlated with the electricity consumption per ton ($r=0.869$, 0.903 , $P<0.01$). The viscosity characteristic values were significantly and positively correlated with the electricity consumption per ton ($r=0.883$, 0.891 , 0.860 , $P<0.01$). 3) In terms of pelleting efficiency, the best performance was found in the group with the addition of 38% peanut meal (CGP1 group), whereas, the group with the addition of 100% soybean meal (SBM group) was the worst. In terms of pellet quality, the best quality was observed in the group with the addition of ethanol Clostridium albumenum protein (CAP group), whereas, the worst was in the group with the addition of 32% corn gluten meal (CGP2 group). The finding can provide the basic data and reference for the selection and processing application of non-soybean meal diet protein source. The reduction and substitution of soybean meal can be promoted to alleviate the excessive dependence on the soybean meal import for the national food security.

Keywords: soybean meal replacement; unconventional protein sources; physicochemical properties; pelleting characteristics; partial least squares regression analysis; entropy weight TOPSIS analysis