

不同比例豆粕组合的营养价值及肉仔鸡代谢能预测模型的建立

江秋雨¹ 武 威¹ 吕于明¹ 班志彬^{1,2} 张炳坤^{1*}

(1. 中国农业大学动物科学技术学院, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 吉林省农业科学院, 长春 130000)

摘 要: 本试验通过不同比例豆粕和豆皮配制出不同种类的 6 种人工豆粕, 测定人工豆粕营养成分含量和代谢能, 旨在建立豆粕的肉仔鸡代谢能预测模型。选取 1 008 只 1 日龄爱拔益加 (AA) 公雏鸡, 随机分为 7 组 (其中 1 组为饥饿组), 每组 8 个重复, 每个重复 18 只鸡。于 14~16 日龄采用全收粪法测定肉仔鸡的表观代谢能 (AME)、氮校正表观代谢能 (AMEn)、真代谢能 (TME) 和氮校正真代谢能 (TMEn), 并采用营养成分逐步回归建立肉仔鸡代谢能预测方程。结果表明: 1) 配制的 6 种人工豆粕中粗蛋白质 (CP) 含量呈梯度增加, 粗脂肪 (EE)、粗纤维 (CF)、中性洗涤纤维 (NDF) 和酸性洗涤纤维 (ADF) 含量变异系数较大, 分别为 24.65%、42.57%、33.86% 和 45.09%。2) 碳水化合物成分中蔗糖、棉子糖和水苏糖含量平均值分别为 49.86、12.88 和 42.79 g/kg。3) 14~16 日龄肉仔鸡不同人工豆粕饲粮 AME、AMEn、TME 和 TMEn 平均值分别为 11.68、11.48、12.30 和 12.06 MJ/kg, 不同人工豆粕原料 AME、AMEn、TME 和 TMEn 平均值分别为 11.36、11.17、12.74 和 12.51 MJ/kg。4) 用常规营养成分含量逐步回归建立肉仔鸡代谢能预测方程如下: $AME = 9.078 - 0.123CF + 0.060CP$ ($R^2 = 0.982, P < 0.01$), $AME = 2.236 + 0.187CP - 0.120EE$ ($R^2 = 0.911, P < 0.01$); 用寡糖含量建立肉仔鸡预测方程为 $AME = 4.825 + 0.121CP + 0.019 \text{ 蔗糖} - 0.229EE$ ($R^2 = 0.970, P < 0.01$) 等。用交叉验证法验证常规营养成分的预测方程, 预测值和实测值接近, 建立的肉仔鸡代谢能预测模型较成功。

关键词: 肉鸡; 人工豆粕; 低聚糖; 表观代谢能; 预测方程

中图分类号: S831.5

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2021)07-3799-11

豆粕 (soybean meal, SBM) 是大豆经过浸提或预压浸提制油工艺生产的副产物, 占畜禽蛋白质饲料原料用量的 67% 左右, 其以粗蛋白质 (crude protein, CP) 含量高、氨基酸组成平衡、较高的生物学效价等特性成为植物性蛋白质饲料的主要来源^[1]。原料产地、压榨方法和贮存方式的不同使得豆粕的营养成分和能值存在较大的差异, 这造成动物从豆粕中获得的能量和养分不同^[2], 从而给预测饲粮能量和制定饲粮配方带来困难。因此确定不同豆粕饲料原料在家禽上的能量利用对于

评估豆粕原料的营养和经济价值非常重要。

相对于碳水化合物 (carbohydrate, CHO) 的利用率, CHO、脂肪和蛋白质的能量利用率分别为 100%、113% 和 78%^[3]。豆粕经过浸提制油的工艺后, 脂肪含量很低。CHO 是动物机体主要的供能物质, 其能量利用效率与化学结构和含量有关, 根据其聚合度的不同可分为单糖、低聚糖和多糖。单糖包括葡萄糖、甘露糖、半乳糖和阿拉伯糖等, 其不需要内源酶的消化, 可以直接被动物机体吸收利用^[4]; 低聚糖包括蔗糖和乳糖等二糖, 可以直

收稿日期: 2021-01-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0129900); 白羽肉鸡常用能量饲料原料营养价值评定与参数建立

作者简介: 江秋雨 (1997—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 动物营养与饲料科学专业。E-mail: jqycau@163.com

* 通信作者: 张炳坤, 副研究员, 博士生导师, E-mail: bingkunzhang@126.com

接被肠黏膜内的酶水解吸收,消化率和能量利用率高,而功能性低聚糖包括棉子糖、水苏糖和低聚果糖等,由于体内缺乏相应的内源酶,不能被动物完全消化利用^[5]。所以分析豆粕中 CHO 的结构和含量对于评定豆粕代谢能和在动物中的能量利用至关重要。

目前国内外豆粕生产企业采用的豆粕加工工艺逐渐趋同,将豆粕和豆皮按照一定比例混合,配制成工业标准的带皮豆粕,使得豆粕原料在蛋白质水平上同质化程度严重。因此本文通过配制人工豆粕(synthesized soybean meal,SSBM)测定其代谢能,以便为家禽生产提供数据。近年来也有不少的研究测定豆粕的代谢能,但针对豆粕营养价值评估和预测的研究多集中在常规营养成分上^[6-7]。本文结合人工豆粕的 CHO 组成对营养代

谢利用进行分析和评定,为评估豆粕原料品质,提高饲料的能量利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

本试验选用不同 CP 含量的豆粕 1(43.97%CP)、豆粕 2(47.64%CP)和豆粕 3(47.58%CP)及大豆皮原料,根据豆粕原料与豆皮的不同混合比例模拟配制 6 种人工豆粕(SSBM1~SSMB6),使得 6 种人工豆粕 CP 含量梯度增加,涵盖生产用豆粕的 CP 含量范围。非试验期饲料来源于新希望饲料有限公司。采用 6 种人工豆粕作为唯一蛋白质来源配制 20%CP 含量的半纯合颗粒饲料,半纯合饲料组成见表 1。

表 1 半纯合饲料组成(风干基础)
Table 1 Composition of semi-homogeneous diets (air-dry basis) %

原料 Ingredients	人工豆粕饲料 SSMB diets					
	SSBM1	SSBM2	SSBM3	SSBM4	SSBM5	SSBM6
豆粕 1 Soybean meal 1	45.75	46.51				
豆粕 2 Soybean meal 2			42.87		43.48	
豆粕 3 Soybean meal 3				41.99		42.55
大豆皮 Soybean hull	3.03		2.58	2.45		
葡萄糖 Glucose	47.22	49.49	50.55	51.56	52.52	53.45
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
石粉 Limestone	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氯化钠 NaCl	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
二氧化钛 TiO ₂	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
氯化胆碱 Choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
维生素预混料 Vitamin premix ¹⁾	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
抗氧化剂 Antioxidant	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
微量元素预混料 Trace element premix ²⁾	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

1) 维生素预混料为每千克饲料提供 The vitamin premix provided the following per kg of diets: VA 9 500 IU, VD 362.5 μg, VE 30 IU, VK₃ 2.65 mg, VB₁ 2 mg, VB₂ 6 mg, VB₆ 6 mg, VB₁₂ 0.025 mg, 生物素 biotin 0.032 5 mg, 叶酸 folic acid 1.25 mg, 泛酸 pantothenic acid 12 mg, 烟酸 nicotinic acid 50 mg。

2) 微量元素预混料为每千克饲料提供 The trace element premix provided the following per kg of diets: Cu (as copper sulfate) 8 mg, Zn (as zinc sulfate) 75 mg, Fe (as ferrous sulfate) 80 mg, Mn (as manganese) 100 mg, Se (as sodium selenite) 0.15 mg, I (as potassium iodide) 0.35 mg。

1.2 试验动物与试验设计

试验选用 1 日龄爱拔益加(AA)雄性肉仔鸡,于 10 日龄按照体重均匀的原则挑选 1 008 只鸡,随机分为 7 个组,每组 8 个重复,每个重复 18 只

鸡。其中 6 个组分别饲喂 6 种人工豆粕配制的半纯合饲料;饥饿组用于内源代谢能测定。经过 3 d 的饲料适应期后禁食 24 h,于 14 日龄开始饲喂和收集排泄物,饲喂 48 h 后再次禁食,继续收集 24 h

粪尿,共收集 72 h 粪尿,每 24 h 收集 1 次。粪尿收集时小心去除羽毛和皮屑等杂物,喷洒少许 10% 稀盐酸后置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。将 3 d 收集的排泄物混匀后于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 72 h,回潮称重,粉碎过筛待测。

1.3 检测方法

按照国家标准方法测定干物质 (dry matter, DM) (GB/T 6435—2006)、CP (GB/T 6432—1994)、粗脂肪 (ether extract, EE) (GB/T 6433—2006)、粗灰分 (Ash) (GB/T 6438—2007) 含量;利用 ANKOM-2000i 型全自动纤维分析仪检测粗纤维 (crude fibre, CF)、中性洗涤纤维 (neutral detergent fiber, NDF) 和酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF) 含量;利用 PARR-6400 型氧弹式量热仪测定原料总能 (gross energy, GE);采用凯氏定氮仪测定碱溶蛋白质和总蛋白质含量,计算得到蛋白质溶解度 (protein solubility, PS);使用 Dionex ICS-3000 型离子色谱仪定性和定量测定部分单糖、二糖及低聚糖含量,利用康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系 (Connell net carbohydrate and protein system, CNCPS) 对 CHO 和非纤维性碳水化合物 (non-fibrous carbohydrate, NFC) 含量进行计算^[8],计算公式如下:

$$\text{CHO}(\%) = 100 - \text{CP} - \text{EE} - \text{Ash};$$

$$\text{NFC}(\%) = \text{CHO} - \text{NDF}.$$

1.4 计算公式

$$\text{养分表观消化率}(\%) = 100 \times (\text{养分摄入量} - \text{养分排泄量}) / \text{养分摄入量}.$$

饲料表观代谢能 (AME)、氮校正表观代谢能 (AMEn)、真代谢能 (TME) 和氮校正表观代谢能 (TMEn) 根据以下的计算公式^[9]进行计算。

$$\text{饲料 AME}(\text{MJ/kg}) = (\text{耗料量} \times \text{饲料 GE} - \text{排泄量} \times \text{排泄物 GE}) / \text{耗料量};$$

$$\text{饲料 TME}(\text{MJ/kg}) = \text{饲料 AME} + (\text{饥饿组排泄量} \times \text{排泄物 GE});$$

$$\text{饲料 AMEn}(\text{MJ/kg}) = \text{饲料 AME} - \text{RN}_1 \times 34.39;$$

$$\text{饲料 TMEn}(\text{MJ/kg}) = \text{饲料 TME} - \text{RN}_2 \times 34.39.$$

式中: RN_1 = 摄入氮 - 排出氮; RN_2 = 摄入氮 - 排出氮 + 内源氮; 34.39 (kJ/g) 为沉积每克氮的校正因子。

人工豆粕 AME 和 TME 计算公式如下:

$$\text{豆粕 AME}(\text{MJ/kg}) = [\text{饲料 AME} - (\text{葡萄糖 AME} \times X)] / Y;$$

$$\text{豆粕 TME}(\text{MJ/kg}) = [\text{饲料 TME} - (\text{葡萄糖 AME} \times X)] / Y.$$

式中: X 为葡萄糖在饲料中的占比 (%); Y 为待测豆粕在饲料中的占比 (%); 葡萄糖 AME = 12.89 MJ/kg。

以上结果均在 DM 基础上计算。

1.5 数据统计分析

不同人工豆粕饲料处理数据采用 SPSS 21.0 统计软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 采用 Duncan 氏法对差异显著数据进行多重比较, 试验结果以平均值和标准差表示, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。对人工豆粕的常规营养成分、抗营养成分与肉鸡代谢能进行相关分析, 逐步回归建立预测方程, 以决定系数 (R^2) 和 P 值 ($P < 0.05$) 选择最佳回归预测方程。

2 结果与分析

2.1 人工豆粕的特性

2.1.1 人工豆粕的常规营养成分

由表 2 可知, 人工豆粕中 DM、EE、CP、CF、NDF、ADF 和 Ash 含量以及 GE 平均值分别为 90.27%、2.18%、50.32%、6.14%、11.79%、6.93%、6.80% 和 19.38 MJ/kg。其中, 常规营养成分 EE、CF、NDF 和 ADF 含量的变异系数较大, 分别为 24.65%、42.57%、33.86% 和 45.09%, 而 DM、CP 和 Ash 含量、GE 以及 PS 的变异系数相对比较稳定。

2.1.2 人工豆粕的 CHO 组成

由表 3 可知, 人工豆粕中 CHO 和 NFC 含量平均值分别为 30.97% 和 19.18%。其中, 蔗糖、棉子糖和水苏糖含量平均值分别为 49.86、12.88 和 42.79 g/kg; 人工豆粕中单糖成分包括葡萄糖 (Glc)、半乳糖 (Gal) 和甘露糖 (Man) 含量变异较大, 变异系数分别为 30.17%、36.52% 和 48.65%。

2.1.3 人工豆粕营养成分含量间的相关性分析

由表 4 可知, 人工豆粕中 DM 与 NFC 含量存在显著正相关性 ($P < 0.05$), EE 与 Ash 含量存在显著负相关性 ($P < 0.05$); CP 与 ADF 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 CF、NDF 和 CHO 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); CF、NDF 和 ADF 含量之间存在极显著正相关性 ($P < 0.01$), NFC、蔗糖和水苏糖含量与纤维指标 CF、ADF 和 NDF 含量存在显著负相关性 ($P < 0.05$); 棉子糖含量与 DM 和 EE 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 水苏糖与蔗糖含量呈

极显著正相关($P<0.01$),与 NFC 含量呈显著正相关($P<0.05$)。

表 2 人工豆粕的常规营养成分(干物质基础)

Table 2 Conventional nutrients in SSBM (DM basis)

%

人工豆粕 SSBM	干物质 DM	粗脂肪 EE	粗蛋 白质 CP	粗纤维 CF	中性洗 涤纤维 NDF	酸性洗 涤纤维 ADF	粗灰分 Ash	总能 GE/ (MJ/kg)	蛋白 溶解度 PS
SSBM1	89.32	2.39	47.35	10.13	18.04	11.81	6.63	19.26	75.89
SSBM2	89.40	2.76	49.18	8.48	15.21	9.59	6.79	19.42	78.14
SSBM3	91.59	1.61	49.47	5.63	10.98	6.29	7.17	19.30	78.84
SSBM4	90.84	2.65	50.41	4.91	9.87	5.50	6.52	19.29	81.80
SSBM5	90.45	1.47	52.67	4.17	8.92	4.60	7.03	19.64	78.26
SSBM6	90.02	2.22	52.85	3.49	7.73	3.77	6.65	19.40	79.93
平均值 Mean	90.27	2.18	50.32	6.14	11.79	6.93	6.80	19.38	78.81
标准差 SD	0.88	0.54	2.14	2.61	3.99	3.12	0.25	0.14	1.97
变异系数 CV/%	0.97	24.65	4.24	42.57	33.86	45.09	3.74	0.72	2.50

表 3 人工豆粕的 CHO 组成(干物质基础)

Table 3 CHO composition in SSBM (DM basis)

人工豆粕 SSBM	碳水化 合物 CHO/%	非纤维 性碳水化 合物 NFC/%	单糖			双糖		低聚糖	
			Monosaccharide/(mg/kg)			Disaccharide		Oligosacchride(g/kg)	
			葡萄糖 Glc	半乳糖 Gal	甘露糖 Man	蔗糖 Sucrose/ (g/kg)	乳糖 Lactose/ (mg/kg)	棉子糖 Raffinose	水苏糖 Stachyose
SSBM1	32.95	14.91	423.31	38.07	3.43	40.94	150.84	13.36	33.81
SSBM2	30.67	15.46	312.89	29.66	2.14	41.11	153.42	13.56	33.30
SSBM3	33.34	22.36	281.44	21.72	9.62	47.47	115.77	12.07	42.87
SSBM4	31.26	21.39	282.68	22.48	12.30	59.53	111.09	12.81	51.03
SSBM5	29.28	20.36	178.05	13.53	8.97	48.72	117.76	12.36	43.58
SSBM6	28.30	20.57	180.96	14.46	11.82	61.39	112.29	13.09	52.12
平均值 Mean	30.97	19.18	276.56	23.32	8.04	49.86	126.86	12.88	42.79
标准差 SD	1.98	3.17	83.43	8.52	3.91	8.06	18.02	0.53	7.37
变异系数 CV/%	6.41	16.56	30.17	36.52	48.65	16.16	14.20	4.09	17.23

表 4 人工豆粕营养成分含量间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between nutrient contents in SSBM

项目 Items	干 物质 DM	粗 脂肪 EE	粗蛋 白质 CP	粗纤维 CF	中性洗 涤纤维 NDF	酸性洗 涤纤维 ADF	粗灰分 Ash	碳水 化合物 CHO	非纤维 性碳水 化合物 NFC	蔗糖 Sucrose	棉子糖 Raffinose	水苏糖 Stachyose
干物质 DM	1.000											
粗脂肪 EE	-0.567	1.000										
粗蛋白质 CP	-0.272	-0.407	1.000									
粗纤维 CF	-0.604	0.458	-0.961 *	1.000								
中性洗涤纤维 NDF	-0.606	0.442	-0.914 *	1.000 **	1.000							

续表 4

项目 Items	干 物质 DM	粗 脂肪 EE	粗蛋 白质 CP	粗纤维 CF	中性洗 涤纤维 NDF	酸性洗 涤纤维 ADF	粗灰分 Ash	碳水 化合物 CHO	非纤维 性碳水 化合物 NFC	蔗糖 Sucrose	棉子糖 Raffinose	水苏糖 Stachyose
酸性洗涤纤维 ADF	-0.604	0.453	-0.918 **	1.000 **	1.000 **	1.000						
粗灰分 Ash	0.523	-0.818 *	0.125	-0.182	-0.180	-0.191	1.000					
碳水化合物 CHO	0.235	0.023	-0.862 *	0.619	0.619	0.623	0.189	1.000				
非纤维性碳 水化合物 NFC	0.909 *	-0.543	0.611	-0.871 *	-0.871 *	-0.869 *	0.345	-0.154	1.000			
蔗糖 Sucrose	0.398	0.010	0.699	-0.825 *	-0.827 *	-0.819 *	-0.357	-0.534	0.707	1.000		
棉子糖 Raffinose	0.912 *	0.842 *	-0.358	0.593	0.585	0.590	-0.712	-0.153	-0.832 *	-0.234	1.000	
水苏糖 Stachyose	0.549	-0.174	0.738	-0.896 *	-0.896 *	-0.890 *	-0.183	-0.482	0.827 *	0.980 **	-0.423	1.000

* 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)。表 7 同。
* indicated significant correlation ($P<0.05$), and ** indicated extremely significant correlation ($P<0.01$). The same as Table 7.

2.2 代谢试验和预测方程的建立

2.2.1 饲料的营养成分表观消化率和代谢能

由表 5 可知,SSBM6 组 CP 表观消化率显著高于其他组($P<0.05$),SSBM2 组和 SSBM3 组 CP 表观消化率最低。SSBM1 组和 SSBM2 组 GE 表观消化率显著低于其他组($P<0.05$)。SSBM4 组、SSBM5 组和 SSBM6 组 AME 显著高于 SSBM2 组

和 SSBM1 组($P<0.05$),与 SSBM3 组差异不显著($P>0.05$)。SSBM5 组 AMEn 最高,显著高于 SSBM1 组和 SSBM2 组($P<0.05$),SSBM1 组 AMEn 最低,显著低于除 SSBM2 组外的其他组($P<0.05$)。SSBM1 组和 SSBM2 组 TME 和 TME_n 显著低于其他组($P<0.05$)。

表 5 不同人工豆粕饲料对肉鸡养分表观消化率和代谢能的影响

Table 5 Effects of different SSBM diets on nutrient apparent digestibility and metabolizable energy of broilers

项目 Items	组别 Groups						平均值	标准差	P 值
	SSBM1	SSBM2	SSBM3	SSBM4	SSBM5	SSBM6	Mean	SD	P-value
粗蛋白质表观消化率 CP apparent digestibility/%	50.61 ^b	47.62 ^c	47.90 ^c	49.01 ^{bc}	49.24 ^{bc}	54.00 ^a	49.73	0.402	<0.001
总能表观消化率 GE apparent digestibility/%	71.71 ^c	73.37 ^b	74.93 ^a	75.78 ^a	76.43 ^a	75.26 ^a	74.58	0.305	<0.001
表观代谢能 AME/(MJ/kg)	11.32 ^c	11.47 ^{bc}	11.68 ^{ab}	11.78 ^a	11.91 ^a	11.90 ^a	11.68	0.044	<0.001
氮校正表观代谢能 AMEn/(MJ/kg)	11.11 ^d	11.29 ^{cd}	11.49 ^{bc}	11.59 ^{ab}	11.72 ^a	11.69 ^{ab}	11.48	0.043	<0.001
真代谢能 TME/(MJ/kg)	11.88 ^b	12.08 ^b	12.34 ^a	12.40 ^a	12.55 ^a	12.53 ^a	12.30	0.045	<0.001
氮校正真代谢能 TME _n /(MJ/kg)	11.64 ^c	11.86 ^b	12.11 ^a	12.17 ^a	12.32 ^a	12.28 ^a	12.06	0.045	<0.001

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

2.2.2 人工豆粕的代谢能

由表 6 可知,人工豆粕中 AME、AMEn、TME 和 TMEn 的平均值分别为 11.36、11.17、12.74 和 12.51 MJ/kg,其中 SSBM5 的 AME、AMEn、TME

和 TMEn 在数值上表现出最高,SSBM6 次之,SSBM1 最低。6 种人工豆粕的代谢能变异系数均在 5% 以下。

表 6 人工豆粕在 14~16 日龄肉鸡中的代谢能
Table 6 Metabolizable energy in SSBM of broilers from 14 to 16 days of age MJ/kg

项目 Items	人工豆粕 SSBM						平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
	SSBM1	SSBM2	SSBM3	SSBM4	SSBM5	SSBM6			
表观代谢能 AME	10.72	10.95	11.36	11.54	11.83	11.77	11.36	0.45	3.93
氮校正表观代谢能 AMEn	10.51	10.76	11.17	11.36	11.64	11.56	11.17	0.45	4.03
真代谢能 TME	11.88	12.25	12.81	12.94	13.30	13.25	12.74	0.57	4.44
氮校正真代谢能 TMEn	11.64	12.03	12.58	12.72	13.07	13.00	12.51	0.56	4.51

2.2.3 人工豆粕肉鸡代谢能与营养成分含量相关性分析

由表 7 可知,人工豆粕中常规营养成分 CP、CF、NDF 和 ADF 含量均与肉鸡代谢能呈极显著相关($P<0.01$),其中 CP 含量与代谢能呈正相关,纤

维指标 CF、NDF 和 ADF 含量与代谢能呈负相关。代谢能与糖类成分葡萄糖和半乳糖含量呈极显著负相关($P<0.01$),与乳糖含量呈显著负相关($P<0.05$),与水苏糖、甘露糖和 NFC 含量呈显著正相关($P<0.05$)。

表 7 人工豆粕肉鸡代谢能与营养成分含量相关性分析
Table 7 Correlation analysis between metabolizable energy of broilers and nutrient content in SSBM

项目 Items	表观代谢能 AME	氮校正表观代谢能 AMEn	真代谢能 TME	氮校正真代谢能 TMEn
干物质 DM	0.537	0.549	0.576	0.483
粗脂肪 EE	-0.506	-0.503	-0.521	-0.517
粗蛋白质 CP	0.949**	0.944**	0.941**	0.938**
粗纤维 CF	-0.985**	-0.985**	-0.991**	-0.991**
中性洗涤纤维 NDF	-0.981**	-0.981**	-0.989**	-0.988**
酸性洗涤纤维 ADF	-0.983**	-0.983**	-0.991**	-0.990**
葡萄糖 Glc	-0.946**	-0.944**	-0.954**	-0.953**
半乳糖 Gal	-0.979**	-0.979**	-0.988**	-0.988**
甘露糖 Man	0.848*	0.848*	0.847*	0.846*
蔗糖 Sucrose	0.772	0.769	0.760	0.757
乳糖 Lactose	-0.892*	-0.893*	-0.898*	-0.897*
棉子糖 Raffinose	-0.586	-0.594	-0.613	-0.616
水苏糖 Stachyose	0.848*	0.847*	0.842*	0.839*
碳水化合物 CHO	-0.672	-0.664	-0.649	-0.644
非纤维性碳水化合物 NFC	0.815*	0.820*	0.839*	0.841*

2.2.4 人工豆粕肉鸡代谢能预测方程

将人工豆粕的常规营养成分和糖类成分与代谢能逐步回归建立预测方程,通过 R^2 和 P 值挑选的最优预测方程见表 8,预测方程的 R^2 均高于 0.900, P 值均小于 0.01,初步判断预测方程比较适宜。由表 9 可知,通过交叉验证的方式将文献中

的营养成分含量代入本试验的预测方程 2($AME = 9.078 - 0.123CF + 0.060CP$) 和 方程 3 ($AME = 2.236 + 0.187CP - 0.120EE$) 中,验证预测方程的准确性,相对标准偏差(RSD)值较小,即预测值和实测值较为接近。

表 8 人工豆粕肉鸡代谢能预测方程

Table 8 Prediction equations for metabolizable energy in SSBM of broilers

序号 Numbers	预测方程 Prediction equations	决定系数 R^2	P 值 P-value
方程 1 Equation 1	AME=12.396-0.169CF	0.963	<0.01
方程 2 Equation 2	AME=9.078-0.123CF+0.060CP	0.982	<0.01
方程 3 Equation 3	AME=2.236+0.187CP-0.120EE	0.911	<0.01
方程 4 Equation 4	AME=5.887+0.133CP-0.010 乳糖	0.990	<0.01
方程 5 Equation 5	AME=4.825+0.121CP+0.019 蔗糖-0.229EE	0.970	<0.01
方程 6 Equation 6	AME=6.594+0.185CP-0.391 棉子糖+0.232EE	0.990	<0.01
方程 7 Equation 7	AME=4.655+0.123CP+0.021 水苏糖-0.168EE	0.979	<0.01

表 9 人工豆粕代谢能的交叉验证

Table 9 Cross validation of metabolizable energy in SSBM

原料 Ingredients	参考文献 References	营养成分 Nutrients/%			预测值	实测值	相对标准偏差 RSD
		粗蛋白质 CP	粗脂肪 EE	粗纤维 CF	Predicted value/ (MJ/kg)	Measured value/ (MJ/kg)	
豆粕	Liu 等 ^[10]	47.47		8.66	10.861	10.427	2.88
SBM		47.47	1.71		10.909	10.427	3.19
去皮豆粕	Barzegar 等 ^[11]	47.50		7.92	10.954	10.795	1.03
DSBM		47.50	0.95		11.004	10.795	1.36
豆粕		47.50		3.30	11.522	10.967	3.49
SBM		47.50	1.70		10.914	10.967	0.34

3 讨 论

3.1 人工豆粕营养成分分析

在豆粕的实际生产应用中,通常将大豆皮和高蛋白质豆粕混合制成饲料工业标准中常见的43%CP含量的豆粕。之前的研究多通过不同地区的饲料原料建立能值预测方程,而本试验以CP和CF含量为基准配制人工豆粕,CP含量呈梯度增加且范围较广(43%~48%,风干基础),而CF、NDF和ADF含量呈梯度降低,达到本试验预期目的,具有一定代表性,以便为生产豆粕提供代谢能数据和预测方程。

本试验中,通过测定6种人工豆粕的常规营养成分、CHO含量和PS,从多方面分析不同人工豆粕的营养特性差异,以期为豆粕生产应用提供数据。近年来有不少研究分析了各种豆粕的差异,中国的豆粕CP平均含量(45.08%)要显著低于巴西(49.08%)、印度(49.51%)、美国(47.31%)和阿根廷(46.71%),而蔗糖含量却最高^[12]。本试验中,人工豆粕营养成分含量测定值在NRC(1994)提供参考的数值内变化,其中EE、CF、NDF

和ADF含量的变异系数较大。研究表明,将豆皮添加到豆粕中配制的生产豆粕纤维含量提高,可溶性纤维和不可溶性纤维的含量均增加^[12]。本试验中,随着豆皮添加量的增加,人工豆粕中CP含量降低,CF、NDF和ADF含量升高,CP含量与纤维类指标之间呈现负相关,CF、NDF和ADF含量之间呈极显著正相关。本试验测定的人工豆粕中蔗糖和水苏糖含量与Baker等^[13]一致,棉子糖含量与Lopez等^[12]测定的值相近,但蔗糖和水苏糖含量与Lopez等^[12]差异较大,这可能是因为豆粕的产地、添加豆皮比例和测定的方法的不同造成的。Hartwig等^[14]指出,大豆的CP和蔗糖含量之间存在显著负相关,而本试验中人工豆粕的CP含量与蔗糖含量之间呈不显著正相关,这可能因为豆粕经过浸提油脂等工艺制成,豆粕营养成分与大豆之间存在较大差异。本试验中的6种人工豆粕的PS在75.89%~81.80%,在适宜范围之内,说明人工豆粕经过加工没有加热过度或者过生,蛋白质和氨基酸含量和质量较好^[15]。

Sotak-Peper等^[16]试验表明,不同地区收集的豆粕能量表观消化率之间没有显著差异,而本试

验中 SSBM3、SSBM4、SSBM5 和 SSBM6 人工豆粕中的 GE 表观消化率显著高于 SSBM1 和 SSBM2 人工豆粕,随着人工豆粕 CP 含量的升高,GE 和 CP 表观消化率有升高的趋势;与该趋势不一致的是 SSBM1 的 CP 表观消化率显著高于 SSBM2,这可能是 SSBM2 中的 CP 含量高于 SSBM1,但 CHO 含量低于 SSBM1,因此蛋白质养分消化率与饲料营养成分的关系需要综合分析。

3.2 人工豆粕肉鸡代谢能

我国家禽饲料原料的数据库大多是采用强饲法测定成年公鸡得出,强饲法会导致采食量降低和应激,不能真实地反映肉鸡的消化代谢情况。而采用替代法估测饲料原料的 AME 和净能时,待测原料与基础饲料之间存在的拮抗作用会影响原料能值的估测^[17],而且对于玉米-豆粕型基础饲料来说,玉米与豆粕之间的组合效应对能值推算存在较大干扰。另外,肉仔鸡阶段消化系统尚未发育成熟,成年公鸡测得的原料能值数据高估了前期肉仔鸡的豆粕能值^[18]。于是,本试验采用人工豆粕作为唯一蛋白质来源,采用葡萄糖作为能量补充的方法准确地测定人工豆粕肉鸡代谢能并建立预测方程,为前期肉仔鸡的豆粕能值提供数据。本试验的代谢能结果达到了高 CP(47%)豆粕的代谢能为 10.51~11.32 MJ/kg^[2],6 种豆粕的代谢能均略高于中国饲料成分及营养价值表(2016 年)中成年公鸡对豆粕的代谢能(10.00 MJ/kg),这可能是豆粕营养成分、测定方法的不同和试验动物的差异造成的。

饲料的不同营养成分对代谢能的影响不同。本试验中,代谢能与 CP 含量呈极显著正相关,而与纤维类指标呈极显著负相关,与 EE 含量的相关性不显著。有研究表明,通过添加脂肪从而提高饲料能值,降低了采食量和提高饲料转化率^[19],从而降低了畜禽养殖中的饲料成本^[20]。Villamide 等^[21]研究表明,饲料纤维含量对代谢能的影响很大,两者之间呈高度负相关。纤维和 AME 之间的负相关可能是因为纤维的物理特性会阻碍其他营养物质的消化^[22]。本试验中,随着 CP 含量增加,饲料代谢能 AME、AMEn、TME 和 TMEn 显著提高,而人工豆粕代谢能之间没有显著差异,这可能是因为在饲料中补充的葡萄糖逐渐升高,葡萄糖的能量利用率高,导致饲料能值和人工豆粕能值出现较大差异。

饲料配方对于能量的需求给豆粕这种高蛋白饲料原料提出了新的挑战,就是提高能值的供应^[23]。脂肪对于能量的利用率高于糖类和蛋白质,而豆粕经过浸提油脂的处理后脂肪的含量非常低,可溶性 CHO 在非油成分中的占比达到 12%,主要是蔗糖、棉子糖和水苏糖,因此研究糖分含量对于豆粕营养的全面评价和能量利用非常重要。蔗糖是一种易消化的 CHO,可以提高饲料的能量含量和适口性^[24],与代谢能呈正相关。水苏糖和棉子糖作为豆粕饲料的抗营养因子,只能在后肠的微生物发酵利用^[25]。本试验中,棉子糖含量与代谢能呈现负相关,但水苏糖含量与代谢能呈显著正相关,这可能因为虽然水苏糖是抗营养因子,但寡糖作为潜在的益生元物质,在一定情况下消化率并不低^[26],能通过微生物发酵产生短链脂肪酸,对胃肠道健康和能量利用有益^[2]。本试验中,人工豆粕的代谢能与葡萄糖和半乳糖含量呈极显著负相关,这可能是因为在人工豆粕中单糖成分含量较低,分别为 276.56 和 23.32 mg/kg,虽然与人工豆粕代谢能呈负相关,但相关的有效性还有待进一步验证。

3.3 人工豆粕肉仔鸡代谢能预测方程

人们普遍认为测定能值的原料数量越多,越有代表性,得出的结论更有说服力。但是很多情况下,可能由于条件的限制不能收集到足够数量和具有代表性的豆粕样品,本试验中的豆粕数量少,但通过配制人工豆粕营养成分涵盖范围广,建立预测方程对于豆粕生产中的应用更有意义。

原料之间最明显的差异就是常规营养成分,这些指标检测较为简单,是用来预测原料代谢能值最简便快捷的预测因子。从代谢能和常规营养成分含量相关分析可以看出,CF 含量与代谢能的相关系数最高,本试验 CF 为代谢能最佳预测因子。通过 1 个预测因子 CF 建立的预测方程 R^2 较低,增加因子 CP 后得到方程 2, R^2 较高 ($R^2 = 0.982$)。Zhang 等^[27]对菜籽粕建立预测方程,当预测因子从 2 个增加到 3 个时, R^2 从 0.59 提高到 0.67,即预测值更接近实测值。另外,通过 CP 和 EE 建立的 AME 预测方程 3 效果较好 ($R^2 = 0.911$, $P < 0.01$)。预测方程 3 ($AME = 2.236 + 0.187CP - 0.120EE$) 中的 EE 预测系数为负值,这是因为豆粕原料含有的成分大部分为 CP,CP 即作为主要的供能物质,所以能提高有效能值的营养成分 EE 也

会显示出负的预测系数^[28]。方程 5~方程 7 的预测因子为常规营养成分 CP 和 EE,以及蔗糖、棉子糖或水苏糖的 3 因子预测方程,预测效果均大于方程 3。

为了验证试验得到的预测方程的准确性,通过交叉验证的方法将文献中的预测因子带入方程,将方程预测值与文献中实测值进行比较,可以初步验证预测方程的有效性。将 Liu 等^[10]的 2 种豆粕和 Barzegar 等^[11]的 1 种豆粕的营养成分含量带入方程 2 和方程 3,预测值和实测值接近,RSD 较小,可以判断得到的预测方程较好。由于现有的文献中豆粕 CHO 含量的测定与分析较少,且由于豆粕来源、测定技术的不同导致不同豆粕原料中糖分含量有较大差异,因此通过糖分含量建立的预测方程还有待进一步验证。

4 结 论

① 6 种人工豆粕常规营养成分中 CP、EE 和 CF 含量的平均值分别为 50.32%、2.18%和 6.14%,CHO 营养成分中蔗糖、棉子糖和水苏糖含量平均值分别 49.86、12.88 和 42.79 g/kg。

② 半纯合人工豆粕饲料的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 平均值分别为 11.68、11.48、12.30 和 12.06 MJ/kg,人工豆粕原料的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 平均值分别为 11.36、11.17、12.74 和 12.51 MJ/kg。

③ 生长前期(14~16 日龄)肉仔鸡豆粕的代谢能预测方程为:AME=9.078-0.123CF+0.060CP ($R^2=0.982$, $P<0.01$) 和 AME=2.236+0.187CP-0.120EE ($R^2=0.911$, $P<0.01$);交叉验证的效果较好。另外,用蔗糖和常规营养成分建立代谢能预测方程为:AME=4.825+0.121CP+0.019 蔗糖-0.229EE ($R^2=0.970$, $P<0.01$)。

参考文献:

- [1] HONG K J, LEE C H, KIM S W. *Aspergillus oryzae* GB-107 fermentation improves nutritional quality of food soybeans and feed soybean meals[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2004, 7(4): 430-435.
- [2] GARCÍA-REBOLLAR P, CÁMARA L, LÁZARO R P, et al. Influence of the origin of the beans on the chemical composition and nutritive value of commercial soybean meals [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, 221: 245-261.

- [3] BARZEGAR S, WU S B, NOBLET J, et al. Energy efficiency and net energy prediction of feed in laying hens[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(11): 5746-5758.
- [4] 黄庆华.猪饲料中非淀粉多糖组分的测定方法及其对能量消化率的影响研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2015:1-63.
HUANG Q H. Study on the method for determination of non-starch polysaccharide components and the effect of non-starch polysaccharides on the digestibility of energy of feeds in pigs[J]. Master's Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015: 1-63. (in Chinese)
- [5] ADEBOWALE T O, YAO K, OSO A O. Major cereal carbohydrates in relation to intestinal health of monogastric animals: a review[J]. *Animal Nutrition*, 2019, 5(4): 331-339.
- [6] 恒宗锦.肉鸡玉米和豆粕净能的测定及其预测模型的建立[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2009:1-52.
HUAN Z J. The mensuration of net energy value of corn and soybean meal and prediction models for broiler chicken[D]. Master's Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009: 1-52. (in Chinese)
- [7] 张正帆.应用化学成分及傅里叶近红外建立 0~3 周龄黄羽肉鸡豆粕净能预测模型的研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2010:1-37.
ZHANG Z F. The use of chemical composition and fourier near infrared spectroscopy to predict the net energy value of soybean meal for 0 to 3-week-old yellow plumage broiler[D]. Master's Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010: 1-37. (in Chinese)
- [8] 李欣新.双低菜粕和豆粕分子结构与营养特性和奶牛生产性能的关系[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2016:1-105.
LI X X. The molecular structure of double-low rapeseed meal and soybean meal in relation to nutrient profiles and production performance in dairy cows[D]. Ph.D. Thesis. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016: 1-105. (in Chinese)
- [9] NASCIMENTO FILHO M A, PEREIRA R T, OLIVEIRA A B S, et al. Nutritional value of *Tenebrio molitor* larvae meal for broiler chickens: metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2021, 30(1): 1-11.
- [10] LIU W, LIU G H, LIAO R B, et al. Apparent metabolizable and net energy values of corn and soybean

- meal for broiler breeding cocks [J]. *Poultry Science*, 2017, 96 (1) : 135–143.
- [11] BARZEGAR S, WU S B, NOBLET J, et al. Metabolizable energy of corn, soybean meal and wheat for laying hens [J]. *Poultry Science*, 2019, 98 (11) : 5876–5882.
- [12] LOPEZ D A, LAGOS L V, STEIN H H. Digestible and metabolizable energy in soybean meal sourced from different countries and fed to pigs [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 268 : 114600.
- [13] BAKER K M, KIM B G, STEIN H H. Amino acid digestibility in conventional, high-protein, or low-oligosaccharide varieties of full-fat soybeans and in soybean meal by weanling pigs [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2010, 162 (1/2) : 66–73.
- [14] HARTWIG E E, KUO T M, KENTY M M. Seed protein and its relationship to soluble sugars in soybean [J]. *Crop Science*, 1997, 37 (3) : 770–773.
- [15] SAKKAS P, ROYER E, SMITH S, et al. Combining alternative processing methods for European soybeans to be used in broiler diets [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 253 : 45–55.
- [16] SOTAK-PEPER K M, GONZALEZ-VEGA J C, STEIN H H. Concentrations of digestible, metabolizable, and net energy in soybean meal produced in different areas of the United States and fed to pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2015, 93 (12) : 5694–5701.
- [17] NING D, YUAN J M, WANG Y W, et al. The net energy values of corn, dried distillers grains with solubles and wheat bran for laying hens using indirect calorimetry method [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2014, 27 (2) : 209–216.
- [18] YANG Z, PIRGOZLIEV V R, ROSE S P, et al. Effect of age on the relationship between metabolizable energy and digestible energy for broiler chickens [J]. *Poultry Science*, 2020, 99 (1) : 320–330.
- [19] GROBAS S, MENDEZ J, DE BLAS C, et al. Laying hen productivity as affected by energy, supplemental fat, and linoleic acid concentration of the diet [J]. *Poultry Science*, 1999, 78 (11) : 1542–1551.
- [20] KANG H K, PARK S B, JEON J J, et al. Effect of increasing levels of apparent metabolizable energy on laying hens in barn system [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31 (11) : 1766–1772.
- [21] VILLAMIDE M J, SAN J L. Effect of chemical composition of sunflower seed meal on its true metabolizable energy and amino acid digestibility [J]. *Poultry Science*, 1998, 77 (12) : 1884–1892.
- [22] AGYEKUM A K, NYACHOTI C M. Nutritional and metabolic consequences of feeding high-fiber diets to swine: a review [J]. *Engineering*, 2017, 3 (5) : 716–725.
- [23] HAGELY K B, PALMQUIST D, BILYEU K D. Classification of distinct seed carbohydrate profiles in soybean [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61 (5) : 1105–1111.
- [24] RAVINDRAN V, ABDOLLAHI M, BOOTWALLA S. Nutrient analysis, apparent metabolizable energy and ileal amino acid digestibility of full fat soybean for broilers [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 197 : 233–240.
- [25] CHOCT M, DERSJANT-LI Y D, MCLEISH J, et al. Soy oligosaccharides and soluble non-starch polysaccharides: a review of digestion, nutritive and anti-nutritive effects in pigs and poultry [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2010, 23 (10) : 1386–1398.
- [26] HEDEMANN M S, KNUDSEN K E B. Dried chicory root has minor effects on the digestibility of nutrients and the composition of the microflora at the terminal ileum and in faeces of growing pigs [J]. *Livestock Science*, 2010, 134 (1/2/3) : 53–55.
- [27] ZHANG Z Y, LI P L, LIU L, et al. Ether extract and acid detergent fibre but not glucosinolates are determinants of the digestible and metabolizable energy of rapeseed meal in growing pigs [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2020, 48 (1) : 384–389.
- [28] 李忠超. 生长猪植物蛋白原料净能推测方程的构建 [D]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017: 1–118.
- LI Z C. Net energy prediction of plant protein ingredients to growing pigs [D]. Ph.D. Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2017: 1–118. (in Chinese)

Nutrient Levels of Soybean Meal Combinations in Different Ratios and Prediction Model Establishment of Metabolizable Energy for Broilers

JIANG Qiuyu¹ WU Wei¹ GUO Yuming¹ BAN Zhibin^{1,2} ZHANG Bingkun^{1*}

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract: The objective of this experiment was to determine the nutrient contents and metabolizable energy of 6 kinds of synthesis soybean meals that were prepared by different ratios of soybean meal and soybean hull, so as to establish the prediction model of metabolizable energy of soybean meal for broilers. A total of 1 008 one-day-old Arbor Acres roosters were selected and randomly divided into 7 groups (one of which was the hungry group), and there were 8 replicates per group and 18 chickens per replicate. The apparent metabolizable energy (AME), nitrogen corrected apparent metabolizable energy (AMEn), true metabolizable energy (TME) and nitrogen corrected true metabolizable energy (TMEn) of broilers were measured from 14 to 16 days of age by total feces collection method, and regression equations between metabolizable energy of broilers and nutrients were established by stepwise regression. The results showed as follows: 1) the crude protein (CP) content of the 6 kinds of synthesis soybean meals was increased gradually, while the variation coefficients of ether extract (EE), crude fiber (CF), neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) contents were relatively large, which were 24.65%, 42.57%, 33.86% and 45.09%, respectively. 2) The mean value of sucrose, raffinose and stachyose in carbohydrate components were 49.86, 12.88 and 42.79 g/kg, respectively. 3) The mean value of AME, AMEn, TME and TMEn of broilers in different synthesis soybean meal diets were 11.68, 11.48, 12.30 and 12.06 MJ/kg, while the mean value of AME, AMEn, TME and TMEn in different synthesis soybean meals were 11.36, 11.17, 12.74 and 12.51 MJ/kg, respectively. 3) Prediction equations of metabolizable energy by conventional nutrient contents for broilers were established as followed: $AME = 9.078 - 0.123CF + 0.060CP$ ($R^2 = 0.982$, $P < 0.01$), $AME = 2.236 + 0.187CP - 0.120EE$ ($R^2 = 0.911$, $P < 0.01$). Prediction equation of metabolizable energy by oligosaccharides content was established as $AME = 4.825 + 0.121CP + 0.019sucrose - 0.229EE$ ($R^2 = 0.970$, $P < 0.01$) and so on. Cross validation was used to verify the prediction equation of conventional nutrients that the predicted values of metabolizable energy are closed to measured values, which indicates that prediction models of metabolizable energy for broilers are successfully established. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(7): 3799-3809]

Key words: broilers; synthesized soybean meal; oligosaccharides; apparent metabolizable energy; prediction equation

* Corresponding author, associate professor, E-mail: bingkunzhang@126.com