



张宏亮, 张嗣禹, 李珮琪, 吴敏, 苏华维. 木糖添加量对挤压膨化豆粕过瘤胃保护效果的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(7): 150-160.
ZHANG Hongliang, ZHANG Siyu, LI Peiqi, WU Min, SU Huawei. Effect of xylose supplement on rumen protection effect of soybean meal during extrusion puffing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(7): 150-160.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.13

木糖添加量对挤压膨化豆粕过瘤胃保护效果的影响

张宏亮¹ 张嗣禹¹ 李珮琪¹ 吴敏² 苏华维^{1*}

(1. 中国农业大学 动物科学技术学院/畜禽营养与饲养国家重点实验室, 北京 100193;
2. 中国农业大学 工学院, 北京 100083)

摘要 为分析挤压膨化豆粕工艺中木糖添加量对反刍动物美拉德反应程度、体外瘤胃降解和小肠消化特性的影响,本研究将豆粕饲料原料粉碎后分别添加0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%的木糖,采用双螺杆挤压工艺制得挤压膨化豆粕,通过测定色差、褐变程度以及纤维和蛋白质组成,分析挤压膨化工艺对豆粕蛋白质美拉德反应的影响。此外,采集4头体重400 kg、装有永久性瘘管的安格斯阉牛的瘤胃液,采用体外三步法研究木糖添加量对挤压膨化豆粕瘤胃降解特性和小肠消化情况的影响。结果表明:1)样品的中性洗涤纤维(NDF)、中性洗涤不溶蛋白质(NDICP)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤不溶蛋白质(ADICP)随着木糖添加量增加而极显著增加($P < 0.001$),氮溶解指数(NSI)极显著降低($P < 0.001$)。2)不同木糖添加量对样品的颜色(L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE)和美拉德反应(MR)程度(OD_{249} 和 OD_{420})均有显著影响($P < 0.05$)。 a^* 、 ΔE 随木糖添加量的增加而显著升高($P < 0.05$), L^* 和 b^* 显著降低($P < 0.05$)。3)挤压膨化处理组的干物质(DM)过瘤胃率和体外全消化道消化率、粗蛋白质过瘤胃率(RUP(CP))、瘤胃不可降解蛋白质(RUP)、小肠可消化粗蛋白质(IDCP)均显著高于豆粕组($P < 0.05$),木糖添加1.0%和1.5%组的DM过瘤胃率显著高于对照组和其他处理组($P < 0.05$),1.0%和1.5%组差异不显著($P > 0.05$)。综上,添加木糖可以显著增强挤压膨化豆粕的美拉德反应,从而提高其过瘤胃率;当添加量为1.0%时,过瘤胃效果最佳。

关键词 豆粕; 挤压膨化; 美拉德反应; 木糖; 体外发酵

中图分类号 S816.9 文章编号 1007-4333(2025)07-0150-11 文献标志码 A

Effect of xylose supplement on rumen protection effect of soybean meal during extrusion puffing

ZHANG Hongliang¹, ZHANG Siyu¹, LI Peiqi¹, WU Min², SU Huawei^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology/State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding,
China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To investigate the effects of xylose addition on the Maillard reaction degree, *in vitro* rumen degradation, and small intestinal digestive properties, this study was conducted by crushing soybean meal feedstuffs and adding xylose at concentrations of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5% to the extruded puffing soybean meal using a twin-screw extrusion process. The impact of the extrusion puffing process on the protein Maillard reaction of soybean meal was analyzed by measuring color differences, the degree of

收稿日期: 2024-10-13

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD300900, 2022YFD1602300); 宁夏重点研发计划(2024BBF02016); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(CARS-37)

第一作者: 张宏亮(ORCID:0009-0006-5196-0441), 硕士研究生, E-mail: 17830887172@163.com

通讯作者: 苏华维(ORCID:0000-0001-9934-9576), 副教授, 主要从事反刍动物营养研究, E-mail: suhuawei@cau.edu.cn

browning, and the composition of fiber and protein. Additionally, rumen fluid was collected from four Angus steers, each weighting 400 kg and fitted with permanent fistulas, and a three-step *in vitro* method was employed to examine the effects of xylose addition on the rumen degradation characteristics and small intestinal digestion of extruded puffing soybean meal. The results showed as follows: 1) The neutral detergent fiber (NDF), neutral detergent insoluble crude protein (NDICP), acid detergent fiber (ADF), and acid detergent insoluble crude protein (ADICP) of the samples significantly increased with the increase of xylose Highly supplemental level ($P < 0.001$), and the nitrogen solubility index (NSI) extremely significantly decreased ($P < 0.001$). 2) Different amounts of xylose addition have a significant impact on the color parameters (L^* , a^* , b^* , and ΔE) and the degree of Maillard reaction (MR) (OD_{249} and OD_{420}) ($P < 0.05$). The values of a^* and ΔE increased significantly with higher xylose addition, while L^* and b^* decreased significantly ($P < 0.05$). 3) The rumen-undegradable rate of DM, *in vitro* total digestive tract digestibility, rumen-undegradable protein (RUP(CP)), RUP, and small intestinal digestible crude protein (IDCP) in the extrusion and puffing treatment group were significantly higher than those in the soybean meal group ($P < 0.05$). Additionally, the rumen-undegradable rate of DM in the xylose addition groups of 1.0% and 1.5% was significantly higher than that in the control group and other treatment ($P < 0.05$). In conclusion, adding xylose can significantly enhance the Maillard reaction of extrusion puffing soybean meal and increase its rumen passage rate, and the rumen passage effect of soybean meal supplemented with 1.0% xylose is optimal.

Keywords soybean meal; extrusion puffing; Maillard reaction; xylose; *in vitro* fermentation

豆粕是大豆油提取的副产品,由于其粗蛋白(CP)含量高、氨基酸组成相对平衡,是畜禽最重要的植物蛋白饲料^[1]。然而,由于反刍动物瘤胃的特殊结构,氨基酸平衡蛋白质饲料的瘤胃可降解蛋白(RDP)经瘤胃微生物降解代谢,降低了优质蛋白的利用效率^[2]。而瘤胃不可降解蛋白质(RUP)不受瘤胃微生物发酵的影响,直接进入小肠进行消化,从而提高氨基酸的利用率,减少了氮的浪费,并提高了饲料的整体消化率^[3]。与此同时,增加饲料中的RUP含量可以有效降低氨基酸在发酵过程中的温室气体排放^[4]。因此,在保证蛋白质小肠利用率的同时,提高豆粕优质蛋白质的过瘤胃效率已成为畜牧业亟待解决的问题。

目前,提高蛋白质过瘤胃效率的主要方法包括热处理、化学处理、物理包被等^[5-6]。热处理会促进蛋白质与碳水化合物之间的紧密结合^[7]。这种结合是一种减少瘤胃蛋白质发酵的保护作用,但由于皱胃的低pH值,它是可逆的^[8]。此外,结合美拉德反应(MR)和添加还原糖提高MR程度可以更有效地提高RUP含量^[9]。研究表明,豆粕的瘤胃干物质(DM)消化率和蛋白质消化率会随着加热温度的升高、加热时间的延长以及葡萄糖添加量的增加而降低^[10]。木糖和葡萄糖是常见的还原糖,通过处理可以显著增加饲料蛋白的RUP,其中木糖由于与蛋白

质发生美拉德反应的时间较短,效果优于葡萄糖^[11]。Jahani-Azizabadi等^[12]研究也发现,在加热条件下,木糖处理可以有效提高苜蓿粉的粗蛋白(CP)过瘤胃率。然而,如果过度加热和高温,在美拉德反应的最后阶段会形成不溶性聚合物,可能会降低反刍动物肠道可消化粗蛋白质(IDCP),破坏部分氨基酸^[13]。因此,加热的强度可能会影响肠道对蛋白质的消化率。Sacakli等^[14]研究表明,0.5%和1.0%的木糖处理降低了豆粕在瘤胃中的DM和CP的有效降解率。此外,加热木糖处理豆粕可以增加奶牛小肠中非氨非微生物氮的供应,但对蛋氨酸和赖氨酸的供应改善不显著^[15]。然而,木糖热处理对植物蛋白美拉德反应程度及其与瘤胃发酵和消化道降解之间关系的具体机制尚不明确。挤压是通过挤压机螺杆的推动力,使物料在高温、高压和剪切力的作用下发生膨化,在农产品加工中具有很大的应用潜力^[16]。研究表明,饲喂挤压膨化豆粕可增加奶牛干物质采食量,促进产奶量的提高,并在不影响乳成分和饲料效率的情况下增加小肠氨基酸的吸收^[17]。通过调节挤压参数(如木糖含量),可以控制物料的MR反应程度,从而减少过度热处理带来的负面影响^[18]。

目前,木糖处理蛋白饲料的研究多集中在加热对反刍动物过瘤胃效果的影响,但是很少从工业化

的角度利用挤压膨化技术对木糖的最佳添加条件进行探究,也鲜有木糖添加对反刍动物瘤胃发酵和小肠消化降解的相关研究报道。因此,本研究采用了双螺杆挤压膨化技术对豆粕进行处理,通过挤压膨化前加入不同浓度的木糖,研究其对美拉德反应进程以及对反刍动物体外瘤胃发酵和肠道消化的影响。旨在为其在反刍动物生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用豆粕由中粮油脂(菏泽)有限公司提供,豆粕的化学成分包括:DM:96.44%;CP:45.99%;粗脂肪(EE):1.99%;中性洗涤纤维(NDF):17.99%;酸性洗涤纤维(ADF)为7.99%(干物质基础)。木糖样品为D-木糖,由中粮油脂(菏泽)有限公司提供,纯度≥99.9%。

1.2 试验设计

1.2.1 挤压膨化工艺

使用同向啮合双螺杆挤压机(Twin Lab+ 20/40, Brabender,德国)制作膨化豆粕产品^[19]。将样品粉碎

并通过2 mm筛。其物料含水量为20%,挤压温度为140℃,喂料转速为80 r/min。将木糖配成溶液后以雾状形态喷入物料,木糖添加量分别为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%,添加后样品的CP测定值分别为41.88%、41.79%、42.12%、41.95%和41.38%(干物质基础)。当达到工艺参数设定温度时,从喂料口进料,固定喂料量为1 kg,待产品均匀挤出时开始取样,放入真空袋密封后90℃保温,室温冷却2 h后,将挤压豆粕产品55℃烘干至恒重,粉碎过1 mm筛。部分抽真空保存于-20℃冰箱中,冷冻干燥粉碎后过0.45 mm筛。

1.2.2 试验动物及饲料

试验所用瘰管牛由中国农业大学房山肉牛试验基地提供。选用4头体重为400 kg左右,健康且装有永久性瘤胃瘰管的成年安格斯阉牛,每日于08:30和16:30进行饲喂,自由采食和饮水,在预饲一周后的第8天晨饲前进行瘤胃液采集。瘤胃液经4层纱布过滤后于39℃的保温壶中保存带回实验室便于后续试验。瘰管牛的全混合日粮(TMR)组成参照NASEM(2016)^[20]标准制定。TMR组成及营养组成见表1。

表1 基础饲料组成及营养水平(干物质基础)
Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis)

原料 Ingredient	含量 Content	营养水平 Nutrient level	含量 Content
全株玉米青贮/% Corn silage	27.39	粗蛋白质/% CP	11.37
玉米秸/% Corn straw	17.04	中性洗涤纤维/% NDF	31.26
玉米粉/% Ground corn	31.29	酸性洗涤纤维/% ADF	19.33
豆粕/% Soybean meal	9.6	代谢能/(MJ/kg) ME ²⁾	10.42
枣粉/% Jujube powder	8.49	维持净能/(MJ/kg) NEm	6.78
预混料/% Premix ¹⁾	2.45	增重净能/(MJ/kg) NEg	4.31
小苏打/% NaHCO ₃	1.26	总可消化养分 TDN	68.91
食盐/% NaCl	1.26		
磷酸氢钙/% CaHPO ₄	1.22		
合计 Total	100.00		

注: ¹⁾ 每千克预混料为饲料提供:维生素A 160 000 IU, 维生素D 350 000 IU, 维生素E 900 IU, 维生素E 1 120 mg, 烟酸 500 mg, 铁 1 200 mg, 铜(以硫酸铜形式存在)150 mg, 锌(以硫酸锌形式存在)1 000 mg, 锰(以硫酸锰形式存在) 500 mg。
²⁾ 代谢能, 维持净能, 增重净能和总可消化养分依据文献^[21]计算, 其余为实测值。
Note: ¹⁾ The premix provided the following per kg of the diet: VA 160 000 IU, VD 350 000 IU, VE 900 IU, VB 1 120 mg, nicotinic 500 mg, Fe 1 200 mg, Cu (as copper sulfate) 150 mg, Zn (as zinc sulfate) 1 000 mg, Mn (as manganese sulfate) 500 mg.
²⁾ ME, NEm, NEg, and TDN are calculated based on reference^[21], while the others are measured values.

1.3 指标测定

1.3.1 常规营养成分测定

样品常规养分中DM参考GB/T 6435-2014测定,CP、中性洗涤不溶粗蛋白质(NDICP)和酸性洗涤不溶粗蛋白质(ADICP)和氮溶解指数(NSI)^[22]参考GB/T 6432-2018使用全自动凯氏定氮仪测定,NDF和ADF参考van Soest等^[23]的方法使用全自动纤维分析仪测定。

1.3.2 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)

采用植物RIPA裂解液(P0045,碧云天科技有限公司)提取样品蛋白,准确称量50 mg样品,加入500 μ L裂解液(含1 mmol/L的PMSF),冷冻匀浆至充分裂解,12 000 g离心5 min,取上清。采用BCA蛋白浓度测定试剂盒(碧云天科技有限公司)测定蛋白浓度,统一稀释至5 mg/mL备用。采用SDS-PAGE凝胶制备试剂盒(碧云天科技有限公司)配置电泳胶。选用分离胶12%,浓缩胶5%。蛋白上样量为10 μ L。90 V恒压下电泳20 min,当样品进入分离胶后调整为120 V,待指示剂跑出凝胶板后关闭电源。电泳结束后,使用去离子水润洗,加入BeyoBlueTM考马斯亮蓝(P0017F)快速染色液,在室温(20~25 $^{\circ}$ C)水平摇床上染色120 min。染色结束后,加入适量去离子水,在水平摇床上脱色30 min,重复3次,使用化学发光仪扫描成像并拍照。

1.3.3 美拉德反应程度的测定

挤压膨化样品颜色指标使用样品亮度(L^*),样品红度(a^*),样品黄度(b^*),总色差(ΔE)进行表征^[19]。精准称取0.1 g样品,经溶解、均质、搅拌、离心、过滤及稀释等步骤,使用酶标仪在OD₂₄₉和OD₄₂₀的波长下测定液体的吸光值,并准确记录数据。

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

1.3.4 体外模拟瘤胃和改良体外三步法

先将 $V_{\text{缓冲液}}$ 与 $V_{\text{瘤胃液}}=2:1$ 混合,再准确称取3.0 g底物(干物质基础)于300 mL发酵瓶中。每组样品5个重复。将150 mL,39 $^{\circ}$ C预热后的缓冲液(pH=6.85)和75 mL过滤后的瘤胃液加入培养瓶中。立即盖紧瓶盖,并置于39 $^{\circ}$ C培养箱中进行体外发酵培养16 h后,使用便携式pH计(Testo-205, Lenzkirch,德国)测定瘤胃液pH。收集各瓶过滤后的瘤胃液,采用Verdouw法^[24]用酶标仪测定NH₃-N

的质量浓度,采用气相色谱法测定上清液中挥发性脂肪酸(VFA)的质量浓度。

在进行体外三步法时,先将1 g底物准确称量并放入已编号的纤维袋(ANKOM-FN57)中,将24个纤维袋置于发酵瓶内,并加入一个空白纤维袋。接着,向发酵瓶中加入1 200 mL pH值为6.85的缓冲液和600 mL瘤胃液,然后通入CO₂以排除空气。将培养瓶置于39 $^{\circ}$ C的体外模拟发酵培养箱(ANKOM-Daisy II)中培养16 h。结束后,将发酵瓶迅速置于冰水浴中以终止发酵过程,清洗直至水清,并在65 $^{\circ}$ C下烘干48 h直至重量恒定,对其所得残渣进行称重及测定CP含量。

为进一步评估样品的肠道消化情况,参照Calsamiglia等^[25]的方法,取0.5 g体外瘤胃消化后的残渣,装入纤维袋(ANKOM-FN57)中。在培养瓶中加入2 L预热至39 $^{\circ}$ C并含有1 g/L胃蛋白酶(P-7000, Sigma)的pH值为1.9的盐酸溶液。将培养瓶置于39 $^{\circ}$ C的体外模拟发酵培养箱(ANKOM-Daisy II)中培养1 h。培养结束后,取出纤维袋并水洗至水清,然后转移到含有3 g/L胰蛋白酶和50 mg/L百里香酚的0.5 mol/L磷酸盐缓冲液中,继续在39 $^{\circ}$ C下旋转培养24 h。取出纤维袋清洗,最后在65 $^{\circ}$ C烘箱内烘干48 h至恒重,称重并测定残渣样品的CP含量。

养分过瘤胃率=瘤胃16 h未降解残渣养分含量/降解前袋内养分含量 $\times 100\%$;

瘤胃不可降解蛋白质 RUP= CP $\times$ RUP(CP);

养分体外小肠消化率=(瘤胃16 h未降解残渣养分含量-酶培养后的残渣养分含量)/瘤胃16 h未降解残渣养分含量 $\times 100\%$;

小肠可消化粗蛋白质 IDCP= RUP $\times$ CP体外小肠消化率+RDP $\times 0.9 \times 0.7$;

养分体外全消化道消化率=(降解前袋内养分含量-体外三步法后袋内未降解残渣养分含量)/降解前袋内养分含量 $\times 100\%$ 。

1.4 数据统计分析

所有数据首先在Excel 2016中进行处理,采用SPSS 21.0进行单因素方差分析,之后采用Duncan氏法进行多重比较,使用R studio进行回归分析, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。以表中同行内不同小写字母标记组间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 木糖添加量对挤压膨化豆粕纤维与蛋白组成的影响

由表3可知,木糖添加量对挤压膨化豆粕的NDF、NDICP、ADF、ADICP和NSI有极显著的影响

($P<0.01$),且各处理组之间存在极显著的线性、二次、三次关系($P<0.001$)。样品的NDF、NDICP和ADF随木糖添加量增加而极显著增加($P<0.001$),NSI随木糖添加量增加而极显著降低($P<0.001$)。

表3 木糖添加量对挤压膨化豆粕样品纤维与蛋白组成的影响

Table 3 Effect of xylose addition on fiber and protein composition of extrusion puffing soybean meal samples

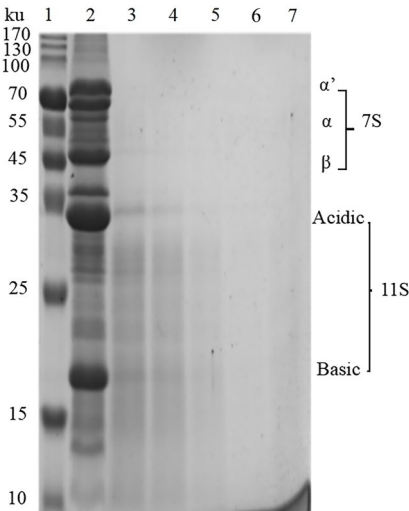
项目 Item	木糖添加组 Xylose addition group					SEM	P值 P value			
	0.5%组	1.0%组	1.5%组	2.0%组	2.5%组		处理	线性	二次	三次
	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%		Treatment	Linearly	Quadratic	Cubic
	group	group	group	group	group					
中性洗涤纤维/% NDF	32.81d	37.23c	42.31b	45.98a	47.91a	1.09	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
中性洗涤不溶粗蛋白 质/%NDICP	38.57d	47.27c	54.96b	62.12a	66.05a	2.70	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
酸性洗涤纤维/%ADF	7.74c	9.04c	13.21b	16.41a	18.03a	1.10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
酸性洗涤不溶粗蛋白 质/%ADICP	3.01d	2.77d	8.31c	13.34b	16.52a	1.50	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
氮溶解指数/%NSI	6.42a	5.44b	4.08c	3.97c	3.35d	0.18	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: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($P<0.05$)。下同。
Note: 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 ($P<0.05$). The same below.

2.2 木糖添加量处理挤压膨化豆粕样品的SDS-PAGE分析

由图1可知,在豆粕泳道的可视化凝胶上可以

看到特征蛋白条带,木糖处理后,蛋白的条带模式发生明显变化,样品在7S处大部分的条带消失,只剩下11S处少量的条带,随木糖添加量的增加,11S



泳道1:蛋白质分子量标准(Marker),泳道2~7:未经挤压膨化的豆粕组和不同木糖添加量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%)的挤压膨化豆粕组。图中标记的条带分别为7S组分的 α' 、 α 、 β 亚基和11S组分的Acidic和Basic亚基。

Lane 1 is the protein molecular weight standard (Marker), and lanes 2-7 are the unextruded puffing soybean meal group and the extrusion puffing soybean meal group with different xylose additions (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5%), respectively. The labeled bands in the figure are the α' , α , and β subunits of the 7S fraction and the acidic and basic subunits of the 11S fraction, respectively.

图1 不同木糖添加量处理挤压膨化豆粕样品的SDS-PAGE

Fig. 1 SDS-PAGE of extrusion puffing soybean meal samples treated with different xylose additions

处的条带颜色逐渐变浅。

2.3 木糖添加量对挤压膨化豆粕 MR 程度的影响

由图 2 可知,不同木糖添加量下挤压出的样品色泽明显不同。在木糖添加量为 0.5% 时,样品色泽最浅,且随着添加量的提高,样品色泽逐渐加深,2.5% 添加量颜色最深。由表 4 可知,不同木糖添加

量对挤压膨化豆粕样品的颜色(L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE)和 MR 程度(OD_{249} 和 OD_{420})均有显著影响($P<0.05$)。随着木糖添加量的增加,样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、 OD_{249} 和 OD_{420} 值均呈现极显著的线性、二次、三次分布($P<0.001$)。 a^* 、 ΔE 随着木糖添加量的增加显著线性升高($P<0.05$), L^* 和 b^* 随着木糖添加量的增加而显著降低($P<0.05$)。



0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 和 2.5% 代表不同木糖添加量下的挤压膨化豆粕。
The percentages of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5% represent the extrusion puffing of soybean meal with varying additions of xylose.

图 2 木糖添加量下挤压膨化豆粕样品的表现色泽

Fig. 2 Apparent color of extrusion puffing soybean meal samples with xylose additions

表 4 木糖添加量对挤压膨化豆粕美拉德反应程度的影响

Table 4 Effect of xylose addition on the degree of Maillard reaction of extrusion puffing soybean meal

项目 Item	木糖添加组 Xylose addition group					SEM	P 值 P value			
	0.5% 组	1.0% 组	1.5% 组	2.0% 组	2.5% 组		处理	线性	二次	三次
	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%		Treatment	Linearly	Quadratic	Cubic
	group	group	group	group	group					
亮度 L^*	72.72a	69.47b	67.46c	65.86d	63.38e	0.650	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
红度 a^*	8.37d	9.52c	10.09b	10.26b	10.47a	0.160	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
黄度 b^*	23.00a	22.27b	21.71c	20.90d	19.63e	0.240	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
色差 ΔE^*	36.66e	38.97d	40.40c	41.32b	42.85a	0.430	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
OD_{249}	1.748b	1.922ab	1.788a	1.897ab	2.053a	0.029	0.007	0.003	0.007	0.002
OD_{420}	0.165cd	0.159d	0.169c	0.192a	0.183b	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.4 木糖添加量对挤压膨化豆粕体外瘤胃和小肠消化的影响

由表5可知,体外消化16 h后,不同木糖添加量挤压膨化处理组的DM体外全消化道消化率、RUP(CP)、RUP、IDCP均显著高于未经膨化处理的豆粕组

($P<0.05$)。对于DM体外小肠消化率、CP体外小肠消化率与体外全消化道消化率则影响不显著($P>0.05$)。1.0%和1.5%木糖添加组的DM过瘤胃率均高于其余组($P<0.05$),与豆粕组相比,0.5%、2.0%和2.5%组的DM过瘤胃有所升高但影响不显著($P>0.05$)。

表5 木糖添加量对挤压膨化豆粕体外瘤胃和小肠消化的影响
Table 5 Effect of xylose addition on rumen and small intestine digestion of extrusion puffing soybean meal *in vitro*

项目 Item	豆粕组 Soybean meal group	木糖添加组 Xylose addition group					SEM	P值 P value
		0.5%组 0.5% group	1.0%组 1.0% group	1.5%组 1.5% group	2.0%组 2.0% group	2.5%组 2.5% group		
DM过瘤胃率/% Rumen non-degradable DM	48.79b	48.98b	53.15a	52.57a	50.40ab	51.99ab	0.50	0.028
DM体外小肠消化率/% Small intestinal digestibility of DM <i>in vitro</i>	74.31	88.09	86.74	88.25	87.91	86.68	1.24	0.055
DM体外全消化道消化率/% Total digestive tract digestibility of DM <i>in vitro</i>	87.14b	93.78a	92.39a	93.43a	92.46a	92.65a	0.60	0.001
粗蛋白质过瘤胃率/% RUP(CP)	65.70b	78.50a	84.00a	81.50a	79.67a	81.60a	1.21	0.004
瘤胃不可降解蛋白质/(g/kg) RUP	278.77b	329.11a	351.02a	343.57a	334.27a	336.89a	4.88	0.004
CP体外小肠消化率/% Small intestinal digestibility of CP <i>in vitro</i>	95.83	98.51	97.86	98.49	97.47	98.26	0.35	0.210
小肠可消化粗蛋白质/(g/kg) IDCP	358.01b	381.34a	388.14a	389.46a	380.33a	380.14a	2.62	<0.001
CP体外全消化道消化率/% Total digestive tract digestibility of CP <i>in vitro</i>	97.23	98.82	98.13	98.73	97.92	98.59	0.26	0.354

注:豆粕组代表未经挤压膨化处理的豆粕。
Note: Soybean meal group represents soybean meal that has not been extruded and puffed.

2.5 木糖添加量对挤压膨化豆粕体外瘤胃发酵参数的影响

由表6可知,体外发酵16 h后,瘤胃液pH、乙酸、丁酸、戊酸和总挥发性脂肪酸各处理组间和豆粕组相比无显著差异($P>0.05$)。与豆粕组相比,不同木糖添加量处理组瘤胃液的NH₃-N、丙酸、异丁酸、异戊酸和总支链挥发性脂肪酸均显著降低($P<0.05$)。此外,瘤胃液NH₃-N、丙酸、异丁酸、异戊酸和总支链挥发性脂肪酸的浓度有所降低但不显著($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 木糖添加量对挤压膨化豆粕纤维与蛋白组成的影响

挤压膨化技术是水分、热能、机械剪切以及压

力等关键参数的综合作用^[26]。还原糖的加入在高温、高压以及机械剪切力的协同作用下与蛋白质氨基发生美拉德反应,使饲料中的糖类降解生成酚类物质,并与氨基酸的残基聚合,形成类似木质素的高氮聚合物,改变了纤维和蛋白质的结构和理化性质,提高了NDF和ADF的含量,显著降低了NSI^[27]。本研究发现,随木糖添加量的增加,NDICP和ADICP呈增加趋势,与徐宏建等^[28]结果一致。可能是加热饲料蛋白能促进氮元素与NDF和ADF的结合,改变了蛋白质的功能特性^[29]。NSI降低的另一个原因是随着原始蛋白质肽的展开,更多的共价相互作用发生,在挤压下暴露出更多的疏水结构域,导致蛋白质重新排列和重组,促进蛋白质纤维化^[30]。这些疏水结构是由于分子间二硫键

表 6 木糖添加量对挤压膨化豆粕体外瘤胃发酵参数的影响

Table 6 Effect of xylose addition on rumen fermentation parameters of extrusion puffing soybean meal *in vitro*

项目 Item	豆粕组 Soybean meal group	木糖添加组 Xylose addition group					SEM	P 值 P value
		0.5% 组	1.0% 组	1.5% 组	2.0% 组	2.5% 组		
		0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%		
		group	group	group	group	group		
pH	6.43	6.42	6.41	6.40	6.41	6.39	0.01	0.713
氨态氮/(mg/dL)NH ₃ -N	44.36a	23.17b	19.67b	20.65b	14.92b	10.96b	2.27	0.006
乙酸/(mmol/L) Acetic acid	53.54	49.68	52.71	53.90	50.42	48.50	1.16	0.713
丙酸/(mmol/L) Propionic acid	26.28a	19.74b	21.69b	20.68b	19.46b	19.19b	0.64	0.007
异丁酸/(mmol/L) Isobutyric acid	0.66a	0.41b	0.40b	0.42b	0.37b	0.34b	0.03	0.001
丁酸/(mmol/L) Butyric acid	10.27	8.63	8.72	9.16	8.42	8.00	0.28	0.526
异戊酸/(mmol/L) Isovaleric acid	2.11a	1.21b	1.15b	1.20b	1.06b	0.90b	0.09	0.026
戊酸/(mmol/L) Valerie acid	0.70	0.72	0.70	0.70	0.63	0.54	0.03	0.275
乙酸/丙酸 Acetic acid/propionic acid	2.04	2.55	2.46	2.63	2.61	2.54	0.07	0.185
总支链挥发性脂肪酸/(mmol/L) TBVFA	2.78a	1.62b	1.55b	1.62b	1.43b	1.24b	0.12	0.028
总挥发性脂肪酸/(mmol/L) TVFA	93.58	80.40	85.37	86.06	80.35	77.46	1.87	0.169

的形成,其相互作用有助于蛋白质聚集,形成少量的低聚物,但当寡聚物缔合浓度超过临界值时,它们就开始聚合体,形成不溶性蛋白聚集体^[31]。因此,2.5%木糖添加量组的 NSI 和 ADICP 显著高于其余各组。此外,也有研究据研究报道,通过限制糖分子与蛋白质的结合,会增加其溶解度^[32]。总的来说,高木糖含量增加了蛋白质与还原糖的糖基化程度,增强了分子间的结合力,导致不溶性聚集体的形成^[33]。

3.2 木糖添加量对挤压膨化豆粕 SDS-PAGE 分析和 MR 程度的影响

SDS-PAGE 技术是利用分子量的差异实现蛋白质组分的有效分离^[34]。挤压处理后蛋白质条带发生明显变化。木糖处理后样品 7 S 的大部分峰在偶联物中消失,而 11S 则随着木糖含量的增加而逐渐变浅,这与 Zhang 等^[34]研究一致。这表明木糖含量的升高加剧

了 MR,使蛋白质的结构发生了改变^[35]。

美拉德反应初期产生的 Amadori 产物通常不会导致颜色变化,然后经重排、环化、缩合等多种反应形成风味的重要前体物,而在反应的最后阶段形成低分子量的有色产物和类黑精(MeH)导致颜色变深^[36]。因此,颜色在一定程度上反映了美拉德反应程度的大小。本研究中,随木糖添加量的增大,*L**值和*b**均显著减小,Δ*E**增大,这表明更多的底物参与反应,从而加快反应进程,促进了 MeH 的累积,这与肖彤等^[37]研究相一致。此外,在 294 nm 和 420 nm 波长下测量吸光度(OD 值)是评估美拉德反应进程的有效方法。因为美拉德反应中间阶段产生的 MRPs 和反应最后阶段产生的 MeH 分别在 OD₂₉₄ 和 OD₄₂₀ 处具有很强的光吸收^[38]。并且吸光度越高,褐变程度和 MeH 越大^[39]。在本研究中,当木糖添加量分别为 2.5% 和 2.0% 时,294 nm 和 420 nm 波长下的 OD 值达到最大。

3.3 木糖添加量对挤压膨化豆粕体外瘤胃和小肠降解的影响

本研究发现,挤压膨化添加木糖处理显著增加了DM过瘤胃率、CP过瘤胃率、RUP和IDCP的含量。这与瘤胃中NDICP的含量增加相一致。这是由于豆粕蛋白的 ϵ -氨基与木糖的还原端羰基在挤压过程中发生MR,形成共价交联的不溶性化合物,NSI降低,从而改变了蛋白质的功能特性,降低了瘤胃蛋白质的消化率^[40]。Sacakli等^[14]也发现,在热处理豆粕中添加0.5%和1.0%的木糖显著降低了豆粕在瘤胃的DM和CP的有效降解性。而本研究发现0.5%木糖DM过瘤胃率显著低于1.0%和1.5%,而超过1.0%并未带来额外的显著效果。这一结果表明,木糖添加1.0%可以有效降低豆粕在瘤胃中的降解程度,进而提高其过瘤胃的效率,与孙余庆等^[41]研究一致。葡萄糖和木糖都是非酶促褐变的有效添加剂。研究表明,木糖与甘氨酸的反应比葡萄糖更快,并且使用较低浓度的木糖在抑制膨化豆粕中的蛋白质降解方面更为有效^[42-43]。有趣的是,本研究发现木糖处理显著增强了全肠道DM消化率,而对小肠DM消化率并未产生显著影响,这与Sacakli等^[14]的结果相一致。而全肠道消化率的提升可能是因为木糖处理通过促进美拉德反应,显著提高了豆粕的过瘤胃率,使得更多的干物质通过瘤胃进入小肠。尽管小肠消化率本身没有显著变化,但进入小肠的DM总量的增加,此外木糖处理后小肠干物质消化率在数值上有所增加,从整体上提升了全肠道消化率^[12]。在本研究中,尽管小肠CP消化率和全消化道CP消化率没有显著变化,挤压膨化豆粕仍能提供充足的氨基酸,以促进乳蛋白合成。此外,这种处理方法在实际生产中可能带来更高的平均干物质采食量(DMI),从而有助于提升奶牛的生产性能^[44]。

木糖预处理体外发酵16 h后,瘤胃pH较为稳定。与未加工豆粕相比,挤压膨化豆粕的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度显著降低,这与Manzocchi等^[45]先前的研究一致。表明经过木糖处理的样品在瘤胃中的氮降解程度较低。本研究发现,瘤胃挤压膨化豆粕的BCVFA和TBCVFA的浓度均低于未加工豆粕。瘤胃中的异丁酸、异戊酸主要来源于细菌对饲料中的真蛋白质、支链氨基酸以及氨基酸的分解作用^[46]。挤压膨化豆粕在瘤胃中的CP降解率较低,因此较少的支

链氨基酸被转化为异丁酸、异戊酸^[45]。与未加工豆粕相比,挤压膨化期间发生的过量美拉德反应可能降低了糖的可用性,导致丙酸浓度降低^[47]。Gupta等^[48]研究表明热处理时间的延长至120 min在挤压膨化过程中导致了游离氨基酸和单糖浓度的显著下降,加剧了美拉德和蛋白交联反应。本研究中发现的瘤胃丙酸浓度降低可能还与瘤胃DM消化率的降低有关^[41]。VFA的结果与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的结果一致,表明未进行木糖处理的豆粕具有更大的氮降解。此外,不同处理豆粕瘤胃微生物发酵的这种差异,主要反映在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、丙酸、异丁酸和异戊酸的浓度上。

4 结 论

本研究分析了不同挤压膨化处理对豆粕蛋白质结构、美拉德反应程度、瘤胃发酵和小肠消化的影响,进而得到豆粕加工处理的最优条件。结果表明,木糖添加通过促进还原糖和氨基酸的美拉德反应,提高了豆粕蛋白质的过瘤胃率,且木糖推荐添加量为1.0%。

参考文献 References

- [1] 郭萌萌, 曹锡, 张科, 杨雨鑫, 王小龙, 陈玉林. 复合菌发酵豆粕的效果及代谢产物研究[J]. 动物营养学报, 2022, 34(1): 659-670
Guo M M, Cao X, Zhang K, Yang Y X, Wang X L, Chen Y L. Effects and metabolites of soybean meal fermented by compound microbes [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(1): 659-670 (in Chinese)
- [2] Kim J E, Lee H G. Amino acids supplementation for the milk and milk protein production of dairy cows [J]. *Animals*, 2021, 11(7): 2118
- [3] Atkinson R L, Toone C D, Ludden P A. Effects of supplemental ruminally degradable protein versus increasing amounts of supplemental ruminally undegradable protein on site and extent of digestion and ruminal characteristics in lambs fed low-quality forage [J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 85(12): 3322-3300
- [4] Church D C. *The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition* [M]. Prospect Heights, IL: Waveland Press, 1993
- [5] Shakeri P, Reiasi A, Tahmasbi R. The effect of pistachio by-product extracts treatment in protecting soybean meal and canola meal protein from rumen microbial degradation [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(14): 5222-5229
- [6] Yu P, Goelema J O, Leury B J, Tamminga S, Egan A R. An analysis of the nutritive value of heat processed legume seeds for animal production using the DVE/OEB model: A review [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2002, 99(1/4): 141-176
- [7] Kanzler C, Haase P T. Melanoidins formed by heterocyclic maillard reaction intermediates via aldol reaction and michael addition [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(1): 332-339
- [8] Camire M E, Camire A, Krumhar K. Chemical and nutritional changes

- in foods during extrusion [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1990, 29(1): 35-57
- [9] Tuncer S D, Sacakli P. Rumen degradability characteristics of xylose treated canola and soybean meals [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2003, 107(1/4): 211-218
- [10] 王潍波. 用尼龙袋法及酶消化法对葡萄糖处理豆粕蛋白利用效果评价研究[D]. 扬州:扬州大学, 2009
- Wang W B. Evaluation of the utilizing effect of protein in glucose-treated soybean meal by nylon bag technique and enzymatic technique [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009 (in Chinese)
- [11] 王潍波, 赵国琦, 梁榕旺, 郭熠洁. 含水量对糖处理豆粕过瘤胃蛋白影响的研究[J]. 中国饲料, 2009(7): 8-11
- Wang W B, Zhao G Q, Liang R W, Guo Y J. Study on effects of rumen-bypass protein of soybean meal by glucose treatment under different water content [J]. *China Feed*, 2009(7): 8-11 (in Chinese)
- [12] Jahani-Azizabadi H, Mesgaran M D, Vakili A R, Vatandoost M, Ghezjeljeh E A, Mojtahedi M. The effect of heat or heat-xylose processing on nitrogen fractions and *in Situ/in vitro* ruminal and post-ruminal protein disappearance of guar meal [J]. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2010, 5(4): 266-273
- [13] Fu X H, Li W H, Zhang T Y, Li H, Zang M W, Liu X Q. Effect of extrusion on the protein structure and digestibility of extruded soybean protein [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(4): 2225-2232
- [14] Sacakli P, Tuncer S D. The effects of xylose treatment on rumen degradability and nutrient digestibility of soybean and cottonseed meals [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2006, 19(5): 655-660
- [15] Ipharraguerre I R, Clark J H, Freeman D E. Rumen fermentation and intestinal supply of nutrients in dairy cows fed rumen-protected soy products [J]. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88(8): 2879-2892
- [16] Xu M, Zhang Y, Luan G. A review on application of high-moisture extrusion to textured vegetable protein [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(9): 311-20
- [17] Harper M T, Oh J, Melgar A, Nedelkov K, Räisänen S, Chen X, Martins C M M R, Young M, Ott T L, Kniffen D M, Fabin R A, Hristov A N. Production effects of feeding extruded soybean meal to early-lactation dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(10): 8999-9016
- [18] Arora B, Yoon A, Sriram M, Singha P, Rizvi S S H. Reactive extrusion: A review of the physicochemical changes in food systems [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102429
- [19] 张嗣禹, 张硕, 张宏亮, 李珮琪, 王显立, 吴敏, 孙承国, 何阳, 苏华维. 体外培养条件下不同挤压膨化工艺对豆粕蛋白质综合利用效果的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(6): 4036-4049
- Zhang S Y, Zhang S, Zhang H L, Li P Q, Wang X L, Wu M, Sun C G, He Y, Su H W. Effects of different extrusion puffing processes on comprehensive utilization of soybean meal protein *in vitro* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(6): 4036-4049 (in Chinese)
- [20] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). *Nutrient Requirements of Beef cattle*. 8th ed [M]. Washington: The National Academies Press, 2016: 72-78
- [21] 王菲. 肉牛饲料有效能值预测模型的建立与评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016
- Wang F. Establishment and evaluation of effective energy prediction model in feeds of beef cattle [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [22] 赵城彬, 张浩, 刘景圣. 挤压温度对膨化豆粕品质及蛋白质结构的影响 [J]. 中国油脂, 2017, 42(7): 45-49
- Zhao C B, Zhang H, Liu J S. Effects of extrusion temperature on quality of extruded soybean meal and protein structure [J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(7): 45-49 (in Chinese)
- [23] van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597
- [24] Verdouw H, Van Ehteld C J A, Dekkers E M J. Ammonia determination based on indophenol formation with sodium salicylate [J]. *Water Research*, 1978, 12(6): 399-402
- [25] Calsamiglia S, Stern M D. A three-step *in vitro* procedure for estimating intestinal digestion of protein in ruminants [J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(5): 1459-1465
- [26] Offiah V, Kontogiorgos V, Falade K O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(18): 2979-2998
- [27] van Soest P J, Mason V C. The influence of the Maillard reaction upon the nutritive value of fibrous feeds [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1991, 32(1/3): 45-53
- [28] 徐宏建, 李昕, 么恩悦, 郑健, 赵洪波, 张永根. 不同热处理 DDGS 蛋白质营养价值及瘤胃降解特性与其分子结构的相关性研究 [J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(1): 73-80
- Xu H J, Li X, Yao E Y, Zheng J, Zhao H B, Zhang Y G. Study on the relationship between nutritional value, ruminal degradation characteristics and molecular structure of protein in different heat-treated DDGS [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2019, 55(1): 73-80 (in Chinese)
- [29] McKinnon J J, Olubobokun J A, Mustafa A, Cohen R D H, Christensen D A. Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1995, 56(3/4): 243-252
- [30] Zhang Y Y, He Z J, Xu M J, Zhang X R, Cao S, Hu Y Y, Luan G Z. Physicochemical properties and protein structure of extruded corn gluten meal: Implication of temperature [J]. *Food Chemistry*, 2023, 399: 133985
- [31] Fischer T. Effect of extrusion cooking on protein modification in wheat flour [J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 218(2): 128-132
- [32] Oliver C M, Melton L D, Stanley R A. Creating proteins with novel functionality via the Maillard reaction: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2006, 46(4): 337-350
- [33] 金长江, 申德超. 不同挤压条件对大豆粕蛋白 NSI 影响规律的研究 [J]. 农机化研究, 2006, 28(7): 148-149, 153
- Jin C J, Shen D C. Influence of different extruding conditions on the NSI of soybean meal protein [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 28(7): 148-149, 153 (in Chinese)
- [34] Zhang Q Y, Long X, Xie J, Xue B, Li X H, Gan J H, Bian X J, Sun T. Effect of D-galactose on physicochemical and functional properties of soy protein isolate during Maillard reaction [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107914
- [35] Zhang Q Y, Dou L X, Sun T, Li X H, Xue B, Xie J, Bian X J, Shao Z H, Gan J H. Physicochemical and functional property of the Maillard reaction products of soy protein isolate with L-arabinose/D-galactose [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(14): 7040-7049
- [36] Fiore A, Troise A D, Ataç Mogol B, Roullier V, Gourdon A, El Mafadi Jian S, Hamzalioglu B A, Gökmen V, Fogliano V. Controlling the Maillard reaction by reactant encapsulation: Sodium chloride in cookies [J]. *Journal*

- of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(43): 10808-10814
- [37] 肖彤, 肖志刚, 张恺容, 解铁民. 利用双螺杆挤压机作为生化反应器制作美拉德反应饲料的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 210-217
- Xiao T, Xiao Z G, Zhang K R, Xie T M. Making non-enzymatic browning protein feed using twin screw extruder as biochemical reactor[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2022, 37(9): 210-217 (in Chinese)
- [38] Delgado-Andrade C, Seiquer I, Haro A, Castellano R, Navarro M P. Development of the Maillard reaction in foods cooked by different techniques. Intake of Maillard-derived compounds[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(1): 145-153
- [39] Nooshkam M, Varidi M, Bashash M. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems[J]. *Food Chemistry*, 2019, 275: 644-660
- [40] Nooshkam M, Varidi M, Verma D K. Functional and biological properties of Maillard conjugates and their potential application in medical and food: A review[J]. *Food Research International*, 2020, 131: 109003
- [41] 孙庆余, 庞清刚, 刘丽, 王飒爽, 邱嘉辉, 张志刚, 王卫正, 石茂林. 木糖处理后豆粕过瘤胃保护效果及对奶牛生产性能的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(19): 21-25
- Sun Y Q, Pang Q G, Liu L, Wang S S, Qiu J H, Zhang Z G, Wang W Z, Shi M L. Effect of xylose treatment on rumen protection of soybean meal and its effect on production performance of dairy cows[J]. *Feed Research*, 2021, 44(19): 21-25 (in Chinese)
- [42] Spark A A. Role of amino acids in non-enzymic browning[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1969, 20(5): 308-316
- [43] Can A, Yilmaz A. Usage of xylose or glucose as non-enzymatic browning agent for reducing ruminal protein degradation of soybean meal[J]. *Small Ruminant Research*, 2002, 46(2/3): 173-178
- [44] Chesini R G, Takiya C S, Dias M S S, Silva T B P, Nunes A T, Grigoletto N T S, da Silva G G, Vittorazzi Jr P C, Rennó L N, Rennó F P. Dietary replacement of soybean meal with heat-treated soybean meal or high-protein corn distillers grains on nutrient digestibility and milk composition in mid-lactation cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(1): 233-244
- [45] Manzocchi E, Ferlay A, Mendowski S, Chesneau G, Chapoutot P, Lemosquet S, Cantalapiedra-Hijar G, Nozière P. Extrusion of lupines with or without addition of reducing sugars: Effects on the formation of Maillard reaction compounds, partition of nitrogen and N ϵ -carboxymethyl-lysine, and performance of dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(11): 7675-7697
- [46] Miura H, Horiguchi M, Matsumoto T. Nutritional interdependence among rumen bacteria, *Bacteroides amylophilus*, *Megasphaera elsdenii*, and *Ruminococcus albus*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, 40(2): 294-300
- [47] Thompson J K, Hobson P N. Polysaccharide synthesis and degradation by rumen micro-organisms *in vitro* [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1971, 76(3): 423-432
- [48] Gupta A J, Boots J W, Gruppen H, Wierenga P A. Influence of heat treatments on the functionality of soy protein hydrolysates in animal cell cultures[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136914

责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 张宏亮, 中国农业大学动物科学技术学院畜牧专业硕士研究生。2019—2023年本科就读于西南大学动物科学专业, 获西南大学三等学业奖学金。获中国农业大学一等学业奖学金, 动物科学技术学院戎易奖学金和中国农业大学三好学生荣誉称号。参与发表论文3篇, 参与国家重点研发计划牛羊高能饲养模式碳氮平衡调控与高效日粮配置技术项目(2023YFD1300904)。



通讯作者简介: 苏华维, 博士, 中国农业大学动物科技学院教授, 博士生导师, 乡村振兴与社会服务工作部部长, 入选国家级青年人才项目。现担任国家肉牛牦牛产业技术体系岗位科学家、中国畜牧兽医学会养牛学分会常务理事、全国动物营养指导委员会肉牛营养分会委员, 中国农业大学动物科技学院乡村振兴与社会服务工作部部长, 主要研究饲料营养对肉牛肌肉发育和脂肪沉积的调控作用, 重点关注肉牛骨骼肌成肌细胞和成脂细胞增殖与分化的调控机制, 探索饲料成分与肉牛生理和牛肉品质的基本关系。主持国家级和省部级课题10余项; 获省部级科研奖励2项、国家级教学成果1项, 省部级教育成果奖2项; 已发表学术论文90余篇(SCI 40余篇); 参加制定各类标准5项, 国家专利授权5项。