

微生物发酵在菜籽饼粕饲用品质改良中的应用研究进展

王萌¹, 奚钊¹, 万楚筠¹, 陈文超^{1,2*}, 万霞^{1,2}, 黄凤洪^{1,2}

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北 武汉, 430062;
2. 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430062)

摘要:随着畜牧业的快速发展、优质饲料原料的严重不足以及国际进口贸易形势的日益紧张,开发非常规饲料资源的需求愈发迫切。菜籽饼粕是我国第一大油料作物油菜的加工副产物,饲用价值不高严重制约了在饲料工业中的应用。微生物发酵技术具有改良菜籽饼粕品质和提高畜禽生产性能的优势。本文综述了微生物发酵改良菜籽饼粕饲用价值的机理、影响因素以及微生物发酵菜籽饼粕饲料在畜禽生产中的应用,讨论了目前微生物发酵菜籽饼粕生产中存在的问题,展望了未来微生物发酵菜籽饼粕饲料的发展方向。

关键词:菜籽饼粕;微生物发酵;蛋白质饲料;抗营养因子;饲用价值改良

中图分类号:S963.5 文献标识码:A 文章编号:1007-9084(2020)02-0313-12

Research progress on application of microbial fermentation in improving feed quality of rapeseed cake and meal

WANG Meng¹, XI Zhao¹, WAN Chu-yun¹, CHEN Wen-chao^{1,2*}, WAN Xia^{1,2}, HUANG Feng-hong^{1,2}

(1. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 2. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China)

Abstract: To meet the requirement for seriously shortage of high-quality feed materials during increasingly tense international import trade, unconventional feed resources became increasingly important. Rapeseed paste (cake and meal) are by-products on rapeseed processing, which is the largest oil crop in China. Low feeding value seriously restricted efficient application in feed industry. Thus microbial fermentation technology was used to improve flavor and nutritional value of rapeseed cake and meal, and to increase the production performance of livestock and poultry. In this paper, mechanism and factors of improving feeding value by microbial fermentation were reviewed, and this review also included the application of fermented rapeseed cake and meal in livestock and poultry production in recent years. Existing problems of fermented rapeseed cake and meal were discussed. The prospected advancement of fermented rapeseed cake and meal were forecasted.

Key words: rapeseed cake and meal; microbial fermentation; protein feed; anti-nutritional factor; improvement of feeding value

中国是畜牧业大国,近年来畜牧业的快速发展使饲料资源的需求进一步增加,但是我国饲料资源尤其优质饲料资源严重短缺。据统计^[1],我国粮油饲料资源年需求量约达3.5亿吨,年进口量高于1亿吨,大豆和鱼粉进口量居世界第一,中美贸易摩擦限制了大豆的进口,进一步加剧了我国大豆资源

利用的严峻性,严重制约了饲料业和养殖业的发展。

油菜是我国第一大油料作物^[2],近三年的年均产量约1440万吨,约占世界总产的20%,菜籽饼粕年产约860万吨。菜籽饼粕富含多种营养物质,如蛋白质、碳水化合物、脂质、矿物质和维生素等,是

收稿日期:2019-08-05

基金项目:湖北省自然科学基金(2019CFB378);现代农业产业技术体系(CARS-12)

作者简介:王萌(1995-),女,硕士研究生,研究方向为油料及生物转化和高值化利用,E-mail: 1403118035@qq.com

* 通讯作者:陈文超(1988-),男,助理研究员,从事油料及生物转化和高值化利用研究,E-mail: chenwenchao@whu.edu.cn

一种重要的植物蛋白质饲料资源。与豆粕相比,菜籽饼粕的氨基酸组成更加平衡,虽然赖氨酸含量略低,但含硫氨基酸,如蛋氨酸和半胱氨酸的含量较高^[1]。但是,传统制油工艺大多采取高温预榨浸出工艺^[4],未进行脱毒,菜籽饼粕中单宁、植酸和芥子碱、硫代葡萄糖苷及其水解产物异硫氰酸酯、噁唑烷硫酮等抗营养因子含量高,严重影响动物营养利用和消化吸收,甚至对机体造成损伤;同时,蛋白变性严重,氨基酸消化利用率低,极大限制了其作为蛋白源在饲料中的有效应用。目前,菜籽饼粕多以少量比例添加到动物饲料中,有些甚至直接用作有机肥料,资源利用严重低值化。因此,如何降低菜籽饼粕中抗营养因子含量、提高蛋白质利用率,实现菜籽饼粕高值化利用已迫在眉睫。

目前国内菜籽饼粕饲用价值改良的相关研究主要包括:(1)培育油菜新品种,如低硫苷低芥酸的双低油菜。尽管一直以来大力推广甘蓝型双低油菜杂交品种^[5],但传统种植习惯及分散型小规模农业模式,部分地区仍沿用留种习惯,阻碍了双低油菜的推广;(2)建立油菜籽加工新工艺,包括中国农业科学院油料作物研究所开发的绿色加工新技术^[6];(3)物理脱毒^[7],在高温、高压、高水分的作用下,抗营养因子与氨基酸或蛋白质结合,或自身发生降解反应,缺点是暂时性、脱毒率低、营养成分被破坏;(4)化学脱毒^[8],通过添加化学试剂与抗营养因子发生化学反应进行脱毒,缺点是化学残留、环境污染、成本高;(5)酶催化脱毒^[9],利用酶降解抗营养因子,环境友好,缺点是成本较高,不同抗营养因子钝化效果不一致;(6)利用微生物发酵脱毒^[10],相较于前5种方法更高效、更节能、更环保,能够同时提高饼粕营养价值和降低抗营养因子含量(表1)。

以下综述微生物发酵改善菜籽饼粕营养价值、影响因素以及微生物发酵菜籽饼粕饲料在畜禽生产中的应用。

1 微生物改善菜籽饼粕饲用价值的机理

1.1 对营养价值和适口性的影响

营养价值的提高和适口性的改善是菜籽饼粕饲用价值提高的关键因素。微生物发酵不仅使菜籽饼粕中粗蛋白和小肽含量提高,氨基酸组成更加合理,营养价值显著提高,而且使菜籽饼粕外观蓬松,气味芳香,适口性改善。

Wang等^[11]研究表明,发酵产生的蛋白酶破坏菜

籽蛋白和其它成分的相互作用,通过切割肽键水解菜籽粕的12S球蛋白和2S白蛋白并生成小肽(<9.5 kD)^[12]。与大分子蛋白质相比,小肽具有更高的营养价值,不仅可以直接被动物吸收,而且具有免疫活性和抗氧化活性^[13]。类似地,Shi等^[14]利用黑曲霉发酵菜籽粕,小肽含量由2.29%增加至7.38%(表1)。Xu等^[15]观察到,发酵菜籽粕的赖氨酸含量由1.54%提高至2.68%,甲硫氨酸和半胱氨酸总含量由1.21%提高至1.64%。

Wang等^[11]观察到发酵使菜籽粕的适口性显著提高,表现在风味、硬度、酸度的改善,这归因于抗营养因子如硫代葡萄糖苷的降解及乳酸菌发酵过程中乳酸的产生。乳酸提高了菜籽粕的酸度,使蛋白质变性以减少动物的咀嚼活动。此外,酵母和芽孢杆菌对大分子物质如碳水化合物、蛋白质和脂质具有水解作用,产生乙醇、肽、游离氨基酸和游离脂肪酸,可形成发酵气味和酒味,提高动物的采食量。

1.2 对抗营养因子的降解

菜籽饼粕中存在的多种抗营养因子在发酵过程中被不同程度地降解。硫代葡萄糖苷及其分解产物异硫氰酸酯、噁唑烷硫酮、腈类是一类影响动物摄食和生长的物质,可对动物肝脏、肾脏、甲状腺功能造成严重损伤^[16]。利用微生物发酵可有效降低这些抗营养因子含量。Hu等^[17]利用微生物发酵使菜籽粕中硫代葡萄糖苷含量由36.90 $\mu\text{mol/g}$ 降低至1.40 $\mu\text{mol/g}$,异硫氰酸酯含量由8.30 mg/g降低至1.40 mg/g,噁唑烷硫酮含量由1.60 mg/g降至0。这主要是由于微生物分泌酶在一定的温度和水分条件下能够催化硫代葡萄糖苷降解。

酚类化合物^[18](单宁、芥子碱)和植酸^[19]可与动物胃肠道分泌的酶、蛋白质和矿物质形成复合物,影响营养物质的消化吸收,进而影响动物生长性能。微生物发酵可降低菜籽饼粕中酚类和植酸的含量。Ashayerizadeh等^[20]观察到,发酵后的菜籽粕植酸和酚类含量分别下降82.85%和58.52%,这归因于发酵微生物分泌的植酸酶、芥子酶和单宁酶的水解作用。菜籽饼粕中的高纤维(中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维)含量增加了动物胃肠道中的消化物通过率,导致营养物质(蛋白质和氨基酸)的消化吸收减少。陈小连等^[21]观察到,在发酵微生物分泌的纤维素酶作用下,菜籽粕中粗纤维、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维发生不同程度降解。

1.3 其它

除了各种水解酶的作用,其它次级代谢产物如

表 1 微生物发酵对菜籽饼粕饲用价值的改良及动物饲用效果的评价
 Table 1 Microbial fermentation in improving feeding value of rapeseed cake and meal and evaluation of animal feeding effect

项目 Items	微生物种类 Microorganisms	组分 Ingredients			菜籽饼粕添加量 Addition level of rapeseed meal and cake/ %	饲喂效果评价指标 Feeding evaluation index			文献 Ref.
		蛋白含量 Protein content / %	小肽含量 Small peptide content / %	硫代葡萄糖苷含量 Glucosinolates content / ($\mu\text{mol/g}$)		添加量 Addition level/ %	平均日增重 Average daily gain/ (g/d)	平均日采食量 Average daily feed intake / (g/d)	
菜籽粕 Rapeseed meal		30.99	2.29	16.45		807.10	2470.00	2.97	
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	35.81	7.38	9.08	10.00	885.70	2550.00	2.85	[14]
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-		827.90	2420.00	2.74	
菜籽饼 Rapeseed cake		35.75	1.68	38.06		-	-	-	
发酵菜籽饼发酵后 Fermented rapeseed cake	蜡样芽孢杆菌/植物乳杆菌 <i>Bacillus cereus/ Lactobacillus plantarum</i>	36.56	4.08	12.46	8.57(48-65 kg)/ 9.77(66-90 kg)	760.00	2225.00	2.92	[61]
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-		810.00	2337.00	2.88	
菜籽粕 Rapeseed meal		36.16	-	-	8.40	659.35	1800.00	2.81	
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	短乳杆菌/短小芽孢杆菌 <i>Lactobacillus brevis/ Bacillus pumilus</i>	36.85	-	-	16.00	696.74	1840.00	2.64	[63]
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-		742.04	1910.00	2.57	
菜籽粕 Rapeseed meal	发酵乳杆菌/屎肠球菌/酿酒酵母/枯草芽孢杆菌 <i>Lactobacillus fermentum / Enterococcus faecium / Saccharomyces cerevisiae/ Bacillus subtilis</i>	33.80	-	-	10.00	50.20	80.60	1.62	
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal		36.60	-	-	10.00	53.60	84.10	1.57	[67]
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		43.00	-	-		53.90	82.60	1.54	

续表

项目 Items	微生物种类 Microorganisms	组分 Ingredients			菜籽饼粕添加量 Addition level of rapeseed meal and cake/ %	饲喂效果评价指标 Feeding evaluation index				文献 Ref.
		蛋白含量 Protein content / %	小肽含量 Small peptide content/ %	硫代葡萄糖苷含量 Glucosinolates content / ($\mu\text{mol/g}$)		添加量 Addition level/ %	平均日增重 Average daily gain/ (g/d)	平均日采食量 Average daily feed intake / (g/d)	饲料转化率 Feed conversion rate/ %	
菜籽粕 Rapeseed meal		37.10	0.70	-	-	-	-	-	-	-
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	发酵乳杆菌/枯草芽孢杆菌 <i>Lactobacillus fermentum</i> / <i>Bacillus subtilis</i>	39.60	5.60	-	10.00	55.20	95.30	1.73	[15]	
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-	-	55.00	94.80	1.72		
菜籽粕 Rapeseed meal		37.84	3.27	9.92	-	-	-	-	-	-
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	黑曲霉/啤酒酵母/枯草芽孢杆菌/保加利亚乳杆菌 <i>Aspergillus niger</i> / <i>Saccharomyces cerevisiae</i> / <i>Bacillus subtilis</i> / <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	42.22	5.19	0.83	5.30	48.56	92.20	1.90	[66]	
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-	-	48.01	89.08	1.87		
菜籽粕 Rapeseed meal		37.51	-	12.21	18.52(1~10 d)/ 16.78(11~22 d)	50.17	103.74	2.06		
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	嗜酸乳杆菌/枯草芽孢杆菌/黑曲霉 <i>Lactobacillus acidophilus</i> / <i>Bacillus subtilis</i> / <i>Aspergillus niger</i>	40.23	-	3.93	16.94(1~10 d)/ 15.46(11~22 d)	53.17	103.57	1.94	[20]	
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-	-	53.52	103.31	1.93		
菜籽粕 Rapeseed meal		38.36	-	36.08	30.00	44.68	70.51	1.69		
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	嗜酸乳杆菌/枯草芽孢杆菌/酵母菌 <i>Lactobacillus acidophilus</i> / <i>Bacillus subtilis</i> / yeast	40.67	-	18.90	15.00	52.16	80.87	1.54	[70]	
动物饲养对照; 豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-	-	52.57	80.47	1.58		

续表

项目 Items	微生物种类 Microorganisms	组分 Ingredients			菜籽饼粕添加量 Addition level of rapeseed meal and cake/ %	添加量 Addition level/ %	饲喂效果评价指标 Feeding evaluation index			文献 Ref.
		蛋白含量 Protein content / %	小肽含量 Small peptide content/ %	硫代葡萄糖苷含量 Glucosinolates content / ($\mu\text{mol/g}$)			平均日增重 Average daily gain/ (g/d)	平均日采食量 Average daily feed intake / (g/d)	饲料转化率 Feed conversion rate/ %	
菜籽粕 Rapeseed meal		37.10	0.80	-	-	-	-	-	-	-
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	植物乳杆菌/枯草芽孢杆菌 <i>Lactobacillus plantarum</i> / <i>Bacillus subtilis</i>	58.40	4.60	-	肉鸭 Ducks	9.45(15~30 d)/ 4.95(31~45 d)	81.3	224.9	2.77	[68]
动物饲养对照;豆粕 Animal feed control; soybean meal		-	-	-			78.9	210.1	2.66	
菜籽粕 Rapeseed meal	嗜酸乳杆菌/枯草芽孢杆菌/ 酿酒酵母	40.71	-	36.47			63.64	169.63	2.67	
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	<i>Lactobacillus acidophilus</i> / <i>Bacillus subtilis</i> / <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	43.67	-	23.44	番鸭 <i>Cairina moschata</i>		69.69	180.02	2.59	[21]
动物饲养对照;无 Animal feed control; soybean meal		-	-	-			-	-	-	
菜籽粕 Rapeseed meal		40.00	-	120.45			-	-	-	
发酵菜籽粕 Fermented rapeseed meal	酿酒酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	46.84	-	112.80	真鲷幼鱼 <i>Pagrus major</i>	41.91	-	9.98	2.10	[77]
动物饲养对照;鱼粉 Animal feed control; soybean meal		-	-	-			-	10.53	2.20	

注:-代表未检测

Note: - denotes not detected

短链脂肪酸在改善菜籽饼粕饲用价值中也起重要作用。以乳杆菌等益生菌进行发酵的菜籽饼粕,具有高生物量的乳杆菌和高浓度的有机酸,进行动物喂养可提高其免疫能力,主要作用机理包括(1)有机酸降低动物胃肠道 pH,有利于肠道有益菌生长^[22],并产生抗菌物质如细菌素^[23];(2)有机酸可穿透肠道病原菌细胞膜,进入细胞后被分解为阴、阳离子形式,细菌细胞壁被迫消耗能量释放质子以保证胞内酶的正常活性,细胞中的酸性阴离子破坏细菌蛋白质和 DNA 的形成,最终导致细胞死亡^[24];(3)微生物竞争抑制作用,乳杆菌可以阻断肠壁表面的致病菌受体位点,病原菌不能与特定受体结合而被排出体外,减少在肠道的定殖^[25];(4)短链脂肪酸如丁酸、丙酸的富集,增加动物肠道酶活性,刺激胃肠道黏膜局部免疫^[26];(5)丁酸通过下调部分基因的表达来抑制沙门氏菌的毒力^[27]。

2 影响微生物发酵菜籽饼粕的因素

2.1 常用的发酵微生物种类

2.1.1 丝状真菌 丝状真菌是一类重要的工业微生物,被广泛应用于酶类、有机酸、抗生素等生产。欧洲酶产品制造商与配方协会(AMFEP)在 2015 年的统计结果显示,丝状真菌产生的商业酶达到 127 种,占酶制剂总数的 50% 以上,其中曲霉和根霉是两种最主要的产酶微生物,而黑曲霉所产酶制剂占曲霉总产酶的 67%。

黑曲霉是一种常见的腐生真菌,在固体基质内部和表面生长,主要分解植物材料。黑曲霉可在恶劣环境下生长,适应广泛的 pH(1.5~9.8)和温度(6~55℃)范围,耐受低水活度(A_w 可达到 0.77)^[28,29]。黑曲霉拥有完整的降解木质素、淀粉、蛋白质和脂肪等大分子物质酶系,使其成为易吸收利用的小分子物质。此外,黑曲霉可分泌植酸酶^[30]、单宁酶^[31]等有利于菜籽饼粕抗营养物质脱除的酶类。Shi 等^[32]证明了黑曲霉在菜籽粕发酵过程中分泌多达 15 种胞外水解酶,包括淀粉酶、酸性蛋白酶、植酸酶和木质纤维素水解酶等,有助于菜籽粕营养成分的改良和饲用价值的提高^[14](表 1)。

少孢根霉是另一种重要的食品级丝状真菌,几个世纪以来应用于发酵行业,包括丹贝、腐乳、酱油等生产。少孢根霉孢子具有极强的耐保存性,置于通风干燥处保存,3~5 年后仍可正常使用。少孢根霉具有广泛的蛋白水解酶系,使发酵底物的可溶性蛋白和可溶性氮含量提高^[33],并分

泌脂肪酶^[34]和植酸酶^[35]。Vig 等^[36]和 Lücke 等^[37]研究发现,利用少孢根霉分泌酶可降解菜籽粕和菜籽饼中的抗营养因子,包括中性洗涤纤维、硫代葡萄糖苷和植酸。

2.1.2 细菌 细菌也是一类被广泛用于饲料饼粕发酵的微生物,最常用的包括芽孢杆菌和乳酸菌(表 1)。芽孢杆菌是一种具有高抗逆性的好氧菌,广泛分布于自然界中。芽孢杆菌用于发酵已有多年历史,最早日本利用枯草芽孢杆菌进行大豆发酵以生产纳豆^[38]。芽孢杆菌可分泌 α -淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶和单宁酶^[39]等多种酶,并产生几种有利于提高动物免疫力的抗生素,如枯草菌素^[40]、杆菌溶素和亚细胞素 A-C。目前广泛应用于饲料发酵的一类芽孢杆菌是枯草芽孢杆菌,它生长速度快,发酵周期短,分泌酶种类众多,产量高,被 GRAS 鉴定可用于食品和药品工业。枯草芽孢杆菌对极端环境如高温、高酸、高碱具有强耐受性^[41],随发酵饲料进入动物胃肠道后,能够良好适应其中酸性环境,并进行大量耗氧活动,形成肠道缺氧环境,促进肠道益生菌乳酸菌的生长,抑制大肠杆菌等肠道病原菌的代谢。胡永娜等^[42]发现,利用枯草芽孢杆菌发酵菜籽粕可提高菜籽粕营养价值,促进肉鸡代谢活动,改善肉鸡生长性能。

乳酸菌是一类能够利用碳水化合物进行发酵的细菌,产生短链脂肪酸如乳酸,迅速降低环境 pH 并控制病原微生物的生长,是最早得到商业应用的益生菌。其它乳酸菌发酵副产物如乙酸、乙醇、芳香族化合物、胞外多糖和酶也是安全无毒的,能显著改善菜籽饼粕的适口性和提高动物的采食量。此外,乳酸菌发酵产生乳链菌肽(Nisin),是一种具有广谱抑菌(食物腐败菌和致病菌)效果的细菌素,可以赋予乳酸菌发酵产品天然抑菌效果,延长产品保质期和保证微生物安全性。目前,Nisin 已在 50 多个国家批准使用^[43]。研究表明,乳酸菌发酵菜籽粕可改善动物肠道生态平衡,提高动物免疫力^[20]。

2.1.3 酵母菌 酵母菌是单细胞真菌,兼性厌氧,多进行糖类发酵。目前发酵工业中应用较多的是酿酒酵母,酿酒酵母可利用单糖类物质(己糖和戊糖)合成蛋白质,并通过菌体自溶增加发酵饲料中蛋白含量,有利于动物生长发育。酿酒酵母发酵饲料通过提供氨基酸、多肽和维生素等营养物质促进乳酸菌生长,并将饲喂高谷物日粮的牛瘤胃中过量乳酸转化以减少乳酸堆积来稳定瘤胃 pH,避免亚急性瘤胃酸中毒(SARA)^[44,45]。另有研究表明,利用酿

酒酵母和乳酸菌发酵的菜籽粕饲料,可显著改善肥育期猪的生长速率和饲料利用率^[46]。

2.2 发酵工艺

按微生物发酵所用培养基形态的不同,可分为液体发酵和固体发酵。液体发酵是指在过量水环境下进行发酵。目前工业发酵以液体发酵为主,大量用于抗生素和酶等微生物代谢产品的生产^[47]。已有大量试验结果表明,液体发酵饲料在断奶仔猪饲养上具有显著优势,并作为一种新型饲料在欧洲得到广泛认可,其应用面积占整个欧洲养猪业的30%左右,其中,爱尔兰和荷兰应用面积达30%~50%、德国达30%^[48]。但是活性良、纯度高菌种的高昂价格,限制了液体发酵饲料的推广,在菜籽饼粕的发酵中也鲜有研究和应用。目前菜籽饼粕饲用发酵主要采用固体发酵方式。固体发酵是指在固体基质上进行发酵,发酵环境中几乎不存在游离水^[49]。对于菜籽饼粕来说,固体发酵优势在于:(1)对于菜籽饼粕发酵常用的丝状真菌和酵母菌来说,固体发酵是一种更适于其生长的发酵方式,因为与营养基质表面的直接接触是其养分吸收、酶分泌和菌丝生长所必需的^[50,51];(2)固体发酵减少了工业用水,增加了工艺的经济可行性,有利于环境保护和节约成本。

按发酵所用微生物种类进行划分,可分为单一菌种发酵和混合菌种发酵。单一菌种发酵一般使用丝状真菌(曲霉、根霉等)。利用丝状真菌分泌大量水解酶可达到降解菜籽饼粕中抗营养因子和提高蛋白质、多肽含量的目的。Shi等^[32]发现经黑曲霉发酵后,菜籽粕由规则光滑表面结构转变为不规则粗糙表面结构,异硫氰酸酯和植酸含量分别降低43.07%和86.09%,小肽类物质含量由2.57%增加至8.39%。Bau等^[52]利用少孢根霉发酵使菜籽粕中脂肪族硫代葡萄糖苷降解57.70%,吡啶硫代葡萄糖苷降解97.30%,且蛋白含量提高至34.80%。Croat等^[53]利用里氏木霉将菜籽粕中硫代葡萄糖苷含量由14.80 $\mu\text{mol/g}$ 降至0.40 $\mu\text{mol/g}$,蛋白含量增加23.00%。Jerzy等^[54]利用两种有效降解木质素的白腐真菌彩绒革盖菌和糙皮侧耳菌进行菜籽粕发酵,在漆酶作用下,芥子酸含量由6.15 mg/g分别降低为0.43 mg/g和0.42 mg/g。

虽然单一菌株能对菜籽饼粕中的抗营养因子进行部分降解,但菜籽饼粕中抗营养因子种类繁多,结构复杂,其中仅硫代葡萄糖苷由于R-基团的不同,已被鉴定出120多种^[6],仅使用单一菌株发酵

不能达到全面脱毒目的,利用多种菌株分泌多种酶类物质和多种次级代谢产物进行混合发酵可达到更好的降解效果和获得更高的营养价值。Wang等^[55]研究发现,两种真菌(横梗霉和土曲霉)混合发酵可取得较单一菌株显著更高的硫代葡萄糖苷降解率,其中横梗霉单一发酵使硫代葡萄糖苷降至20.00 $\mu\text{mol/g}$,而两种菌株复合发酵可将硫代葡萄糖苷降至4.00 $\mu\text{mol/g}$,产朊假丝酵母的进一步加入使菜籽粕蛋白含量由38.00%提高至48.40%,硫代葡萄糖苷含量继续降至1.30 $\mu\text{mol/g}$ 。方洁等^[56]评价了单菌发酵和混菌发酵(黑曲霉、啤酒酵母、枯草芽孢杆菌和保加利亚乳杆菌)对菜籽粕的脱毒效果,其中混菌发酵可达到对菜籽粕中各种抗营养因子的普遍脱除效果,硫代葡萄糖苷、噁唑烷硫酮、植酸和芥子碱的降解率分别为75.12%、82.47%、87.56%和56.00%,且降解效果优于单一菌株发酵。朱少华等^[57]利用酿酒酵母、乳酸菌和枯草芽孢杆菌进行菜籽粕混菌发酵,第一阶段进行混菌有氧发酵3 d,第二阶段继续接入乳酸菌厌氧发酵3 d。发酵使菜籽粕中粗纤维、硫代葡萄糖苷、噁唑烷硫酮、异硫氰酸酯和植酸含量分别下降1.35%、48.19%、26.92%、92.86%和14.73%,蛋白由46.99%增加至50.49%,多肽由15.44%增加至69.20%。

3 微生物发酵菜籽饼粕饲料在畜禽生产中的应用

3.1 猪类饲料

猪作为一种杂食动物,能消化各种饲料原料,其基础日粮是谷物-豆粕,利用菜籽饼粕替代豆粕添加到日粮中,可降低猪日粮成本。研究表明,当饲料中硫代葡萄糖苷含量达到1.30~2.80 $\mu\text{mol/g}$ 时^[6],猪的摄食量和生长量均受到抑制。若以未处理菜籽粕(硫代葡萄糖苷含量为3.07 $\mu\text{mol/g}$)作为生长肥育期猪日粮,添加量仅可达到9%^[58]。对菜籽饼粕进行微生物发酵,降低硫代葡萄糖苷等抗营养因子含量,可增加菜籽饼粕在猪日粮中的添加量,并提高其生长性能和免疫能力。

菜籽饼粕中高纤维含量和抗营养因子的存在可导致猪的低消化率和低能量值。Shi等^[14]和付敏等^[59]利用微生物发酵降低菜籽粕和菜籽饼中不溶性纤维和硫代葡萄糖苷等抗营养因子含量,增加小肽含量(表1),以发酵菜籽饼粕喂生长猪,观察到较未发酵菜籽饼粕,具有更优的生长代谢性能,主要表现在肠道表观营养物质(粗蛋白质、Ca、P)消化率

和消化能的提高。余冰等^[60]在发酵菜籽粕饲喂生长猪的试验中观察到类似现象,大分子蛋白质在发酵过程中被分解为小肽和游离氨基酸,动物肠道结构改善,这些有利于生长猪消化率的提高。

合适的采食量对动物的最佳养分利用率来说是至关重要的。吴东等^[61]研究了不同添加量的发酵菜籽饼饲粮在猪生长(48~65 kg)和育肥(66~90 kg)两个阶段的影响,结果表明,低添加量(生长期8.57%、育肥期9.77%)发酵菜籽饼可达到与基础日粮(豆粕)相似的采食量(表1)。酵母菌可抑制大肠杆菌数量,并增加猪回肠消化细菌的丰度,进而增加其采食量^[62]。Hu等^[46]以酿酒酵母等微生物进行菜籽粕发酵,并在肥育期猪日粮中添加发酵菜籽粕达到25%、20%、15%(14~25 kg、25~65 kg、65~95 kg),以饲喂玉米-豆粕基础日粮且添加抗生素的生长肥育猪为对照,观察到相似的平均日采食量。

吴东等^[61]还观察到,发酵菜籽饼在饲粮中的添加可改善生长肥育猪的蛋白质和氨基酸代谢,主要表现在发酵菜籽饼可达到接近豆粕的猪血清总蛋白和尿素氮含量以及相似的谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性。孙佩佩等^[63]添加16%发酵菜籽粕在生长猪饲粮中,观察到类似吴东等^[61]报道的生长猪蛋白质代谢改善现象,且较未发酵菜籽粕,饲喂发酵菜籽粕生长猪的血清总胆固醇、三碘甲状腺原氨酸(T3)和甲状腺素(T4)含量显著降低,已知T3和T4是反映动物甲状腺功能的关键指标,这与发酵菜籽粕中硫代葡萄糖苷及其分解产物降解有关。

除了对蛋白质和脂质代谢的影响,丁小玲等^[64]也观察到发酵菜籽粕对猪免疫能力的影响。不同添加量(3.44%、6.88%、10.32%)的发酵菜籽粕替代仔猪日粮中的膨化豆粕,对断奶仔猪生长性能和腹泻率无显著影响,且发酵菜籽粕中小肽含量的增加显著提高了仔猪免疫球蛋白IgA含量。一项评估发酵菜籽粕在母猪日粮中作用的研究也报道了类似现象^[10]。在初产母猪和多产母猪的妊娠、哺乳、泌乳三阶段进行发酵菜籽粕不同添加量的饲喂,可对母猪胃肠道微生物群落结构产生积极影响,并对新生仔猪免疫系统具有改善作用,降低腹泻率和死亡率。

3.2 禽类饲料

研究表明,高硫代葡萄糖苷菜籽粕在肉鸡^[11]和骡鸭^[65]饲料中添加量较高时,对生长具有负面影响。利用微生物发酵对菜籽饼粕成分进行改良,可使其在禽类日粮中添加量提高并获得更佳的饲喂效果。

发酵菜籽粕添加至禽类日粮中有利于禽类生长性能的改善。陈昭琪等^[66]将5.3%发酵菜籽粕添加至日粮中取得类似豆粕的肉鸡生长效果,而Chiang等^[67]和Xu等^[15]观察到发酵菜籽粕在肉鸡日粮添加量为10%时,肉鸡日增重和饲料转化率仍与饲喂豆粕的肉鸡类似(表1)。Wang等^[11]研究发现,发酵菜籽粕对肉鸡生长性能的改善与添加量有关,5%添加量可达到类似豆粕的效果,而添加量增加至10%后效果优于豆粕,并显著优于未发酵菜籽粕(表1)。这主要与发酵提高菜籽粕蛋白质消化率和乳酸含量及降低抗营养因子含量有关。类似地,Xu等^[68]以发酵菜籽粕替代豆粕作为肉鸭饲料,随着肉鸭日粮中发酵菜籽粕占比增加(3.15%、6.30%、9.45%),肉鸭日采食量和日增重逐渐提高。

除了对生长性能的改善,发酵菜籽粕还影响禽类血清生化指标,已知血清生化指标可以指示动物体内营养物质的代谢情况。陈小连等^[21]将8%发酵菜籽粕加入番鸭基础日粮中,观察到与豆粕相比,番鸭脂质代谢无显著差异,主要表现在血清总胆固醇、甘油三酯、高/低密度脂蛋白含量相似。而Ashayerizadeh等^[20]的研究则表明发酵菜籽粕可达到较豆粕更优的肉鸡相关血清指标,这可能与发酵微生物和发酵饲料添加量不同有关。相较其它动物,禽类组织富含多不饱和脂肪酸,易发生氧化反应。研究表明,发酵菜籽粕用作禽类饲料可增强其抗氧化能力并减少氧化损伤。Hu等^[17]和胡永娜^[42]观察到较未发酵菜籽粕,饲喂发酵菜籽粕的肉鸡血清抗氧化能力提高,主要表现在总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性和总抗氧化能力显著提高,血液中丙二醛(MDA)含量降低,这与发酵菜籽粕中的抗氧化肽含量提高有关。在饲喂发酵菜籽粕的肉鸡肌肉中同样观察到抗氧化能力提高的现象^[35],除上述原因,可能还与发酵微生物枯草芽孢杆菌增加肉鸡抗氧化基因表达进而增强抗氧化酶活性有关^[69]。

研究表明,发酵菜籽粕可改善禽类肠道形态和免疫性能。禽类小肠的发育水平是其营养物质消化、吸收和利用的基本保障。吴正可等^[70]、Chiang等^[67]和Xu等^[15]均发现,较未发酵菜籽粕,以发酵菜籽粕为日粮的肉鸡小肠发育水平较高,主要表现在小肠肠壁绒毛高度/隐窝深度(V/C)比值高,这与发酵提高菜籽粕中氨基酸如谷氨酸含量有关。Xu等^[15]还观察到较未发酵菜籽粕,饲喂发酵菜籽粕的禽类血清免疫球蛋白IgM和IgG水平提高,且达到接近豆粕的水平,猜测与发酵菜籽粕中油菜籽肽和生

物活性肽含量增加有关。乳杆菌等益生菌发酵的菜籽饼粕饲料以与益生菌相似的方式起作用。Ashayerizadeh 等^[20]发现较未发酵菜籽粕,饲喂发酵菜籽粕的肉鸡回肠 pH 值下降,乳杆菌数量增加,大肠杆菌数量减少,且取得优于豆粕的饲喂效果。接种沙门氏菌后^[71],在饲喂发酵菜籽粕的肉鸡回肠和盲肠中观察到乳杆菌数量增加以及鼠伤寒沙门氏菌定殖减少。

3.3 其它动物饲料

发酵菜籽饼粕在其它动物中的应用也有研究,包括奶牛和鱼类。由于牛等反刍动物消化结构的特殊性,微生物发酵对菜籽饼粕饲用改良主要集中在氨基酸组成的优化上,以进一步提高菜籽粕蛋白的利用率。Zhe 等^[72]利用微生物进行菜籽粕发酵,进行 15 d 奶牛的饲喂。发酵显著提高了混合饲料中的第一和第二限制氨基酸^[73]赖氨酸和甲硫氨酸含量,并提高了奶牛的产奶量,乳蛋白和乳脂含量。一般来说,菜籽饼粕直接应用于鱼类日粮中可达到较高水平^[74,75],但在真鲷的研究中发现,只有 13% 的鱼粉可被菜籽粕蛋白替代^[76]。Dossou 等^[77]利用发酵降低菜籽粕中粗纤维和植酸含量,提高真鲷对菜籽粕蛋白的利用率,使菜籽粕对鱼粉的替代率提高至 56.23%,且对红海真鲷幼鱼的生长性能、饲料利用率、先天免疫反应和氧化应激无影响。

尽管有大量的喂养研究表明,微生物发酵技术在改善菜籽饼粕饲用价值方面具有很大的优势和应用潜力,但是目前仍存在部分限制发酵菜籽饼粕大规模生产和产业化应用的因素,主要包括:(1)能够高效利用菜籽饼粕的微生物资源仍十分有限,发酵工艺驳杂不一,且缺乏规范,难以规避发酵过程中的一些风险,如有害微生物的污染、有害微生物代谢产物的积累、发酵不完全等;(2)缺乏有力的统筹和监管机制,无法保证产品的质量统一,限制了整个发酵菜籽饼粕饲料行业有序、健康地发展;(3)缺乏配套的科学性、针对性喂养模式,使发酵菜籽饼粕饲料仅仅停留在科学研究阶段。目前,发酵菜籽饼粕还未被划入安全饲料目录中。本团队经过长期的调查和研究,于 2018 年制定并公布了农业行业标准—NY/T 3217—2018 发酵菜籽粕加工技术规程,对推动微生物发酵菜籽饼粕的开发和应用具有重要意义。

4 结论与展望

综上,微生物发酵技术能够显著改良菜籽饼粕

饲用品质,不仅改善菜籽饼粕风味、提高营养成分含量、降解抗营养因子,而且提升动物生长性能和免疫能力,改良畜禽品质。此外,微生物发酵具有环保、高效和节能等优势,市场竞争力和应用前景广大,对我国油料产业和畜牧业的健康和可持续发展具有重要意义。为进一步开发微生物发酵菜籽饼粕的饲用价值,针对目前微生物发酵菜籽饼粕技术开发中存在的一些问题,今后的研究应集中在如下几个方面:

(1)加强对菜籽饼粕原料的品质分析、分类和集中区分管理,针对性地进行微生物发酵,在减少由于菜籽饼粕原料品质不稳定而引起发酵产品品质不稳定问题的同时,规范市场,减少成本和提高市场竞争力。

(2)加强提高菜籽饼粕饲用价值特异性菌株的筛选和改造以及对发酵工艺进行完善和简化,除了筛选或改造出能够改善菜籽饼粕风味、提高干物质消化率、降解抗营养因子的高效菌株之外,还需要筛选或改造出能够赋予菜籽饼粕附加功能且具有特殊作用(维持动物肠道平衡、替代抗生素、提高禽畜生长和品质等)的益生微生物。

(3)加强油菜产业链中不同学科的结合,从油菜的遗传育种、栽培和植物保护,到油菜籽贮存加工,再到菜籽饼粕高值化利用,充分发挥不同学科优势,使菜籽饼粕高值化利用发挥最大效益。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郭燕枝, 杨雅伦, 孙君茂. 我国油菜产业发展的现状及对策[J]. 农业经济, 2016(7): 44-46.
- [3] Khajali F, Slominski B A. Factors that affect the nutritive value of canola meal for poultry [J]. Poultry Sci, 2012, 91(10): 2564-2575.
- [4] 张亮. 不同加工工艺的菜籽油品质及其生物学评价[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [5] 熊秋芳, 文静, 李兴华, 等. 中国油菜科技创新与产业发展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 14-22.
- [6] 我国自主研发出油菜籽绿色加工新技术[J]. 农业科技与信息, 2017(18): 71.
- [7] Gu X H, Dong W, He Y C. Detoxification of rapeseed meals by steam explosion [J]. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88(11): 1831-1838.
- [8] 韩会敏, 赵慧琴. 棉籽饼、菜籽饼的脱毒与利用方法[J]. 养殖与饲料, 2015(6): 41-42.
- [9] Dersjant-Li Y, Dusel G. Increasing the dosing of a

- Buttiauxella* phytase improves phytate degradation, mineral, energy, and amino acid digestibility in weaned pigs fed a complex diet based on wheat, corn, soybean meal, barley, and rapeseed meal [J]. *J Animal Sci*, 2019, 97(6): 2524–2533.
- [10] Grela E R, Czech A, Kiesz M, et al. A fermented rapeseed meal additive: Effects on production performance, nutrient digestibility, colostrum immunoglobulin content and microbial flora in sows [J]. *Animal Nutr*, 2019, 5(4): 373–379.
- [11] Wang Y, Liu J, Wei F, et al. Improvement of the nutritional value, sensory properties and bioavailability of rapeseed meal fermented with mixed microorganisms [J]. *LWT*, 2019, 112: 108238.
- [12] Liu F R, Chen Z X, Shao J J, et al. Effect of fermentation on the peptide content, phenolics and antioxidant activity of defatted wheat germ [J]. *Food Biosci*, 2017, 20: 141–148.
- [13] He R, Ju X R, Yuan J, et al. Antioxidant activities of rapeseed peptides produced by solid state fermentation [J]. *Food Res Int*, 2012, 49(1): 432–438.
- [14] Shi C Y, He J, Wang J P, et al. Effects of *Aspergillus niger* fermented rapeseed meal on nutrient digestibility, growth performance and serum parameters in growing pigs [J]. *Anim Sci J*, 2016, 87(4): 557–563.
- [15] Xu F Z, Zeng X G, Ding X L. Effects of replacing soybean meal with fermented rapeseed meal on performance, serum biochemical variables and intestinal morphology of broilers [J]. *Asian Australas J Anim Sci*, 2012, 25(12): 1734–1741.
- [16] Tripathi M K, Mishra A S. Glucosinolates in animal nutrition: a review [J]. *Animal Feed Sci Technol*, 2007, 132(1/2): 1–27.
- [17] Hu Y N, Wang Y W, Li A K, et al. Effects of fermented rapeseed meal on antioxidant functions, serum biochemical parameters and intestinal morphology in broilers [J]. *Food Agric Immunol*, 2016, 27(2): 182–193.
- [18] Mansoori B, Acamovic T. The effect of tannic acid on the excretion of endogenous methionine, histidine and lysine with broilers [J]. *Animal Feed Sci Technol*, 2007, 134(3/4): 198–210.
- [19] Cowieson A J, Ravindran V, Selle P H. Influence of dietary phytic acid and source of microbial phytase on ileal endogenous amino acid flows in broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2008, 87(11): 2287–2299.
- [20] Ashayerizadeh A, Dastar B, Shams S M, et al. Effects of feeding fermented rapeseed meal on growth performance, gastrointestinal microflora population, blood metabolites, meat quality, and lipid metabolism in broiler chickens [J]. *Livestock Science*, 2018, 216: 183 – 190.
- [21] 陈小连, 古今舜, 黄江南, 等. 发酵菜籽粕对 28~49 日龄白羽番鸭生长性能及血清生化、激素和抗氧化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31(9): 4044–4051.
- [22] Canibe N, Jensen B B. Fermented liquid feed: Microbial and nutritional aspects and impact on enteric diseases in pigs [J]. *Animal Feed Sci Technol*, 2012, 173(1/2): 17–40.
- [23] Kim J Y, Young J A, Gunther N W IV, et al. Inhibition of *Salmonella* by bacteriocin-producing lactic acid bacteria derived from US kimchi and broiler chicken [J]. *J Food Saf*, 2015, 35(1): 1–12.
- [24] Suiryanrayna M V A N, Ramana J V. A review of the effects of dietary organic acids fed to swine [J]. *J Animal Sci Biotechnol*, 2015, 6: 45.
- [25] Sugiharto S, Lauridsen C, Jensen B B. Gastrointestinal ecosystem and immunological responses in *E. coli* challenged pigs after weaning fed liquid diets containing whey permeate fermented with different lactic acid bacteria [J]. *Animal Feed Sci Technol*, 2015, 207: 278–282.
- [26] Krakowski L, Krzyżanowski J, Wrona Z, et al. The influence of nonspecific immunostimulation of pregnant sows on the immunological value of colostrum [J]. *Vet Immunol Immunopathol*, 2002, 87(1/2): 89–95.
- [27] Feye K M, Anderson K L, Scott M F, et al. Inhibition of the virulence, antibiotic resistance, and fecal shedding of multiple antibiotic-resistant *Salmonella* Typhimurium in broilers fed Original XPC™ [J]. *Poult Sci*, 2016, 95(12): 2902–2910.
- [28] Segers F J J, van Laarhoven K A, Huinink H P, et al. The indoor fungus *Cladosporium halotolerans* survives humidity dynamics markedly better than *Aspergillus niger* and *Penicillium rubens* despite less growth at lowered steady-state water activity [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2016, 82(17): 5089–5098.
- [29] Krijgheld P, Bleichrodt R, van Veluw G J, et al. Development in *Aspergillus* [J]. *Studies in Mycology*, 2013, 74(1): 1 – 29.
- [30] 陈璐璐, 江连洲, 邓晨旭, 等. 构建食品级植酸酶黑曲霉工程菌 [J]. *农业生物技术学报*, 2014, 22(9): 1182–1188.
- [31] 李杰, 高博, 江连洲, 等. 内切葡聚糖酶基因在黑曲霉中的同源表达 [J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(9): 56–61.
- [32] Shi C Y, He J, Yu J, et al. Physicochemical properties analysis and secretome of *Aspergillus niger* in fermented rapeseed meal [J]. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153230. DOI:10.1371/journal.pone.0153230.

- [33] Huang L, Wang C, Zhang Y, et al. Degradation of anti-nutritional factors and reduction of immunoreactivity of tempeh by co-fermentation with *Rhizopus oligosporus* RT-3 and *Actinomyces elegans* DCY-1 [J]. Int J Food Sci Technol, 2019, 54(5):1836-1848.
- [34] Waseem A, Ali S, Khalid S W. Enhanced production of an extracellular lipase by EMS and MMS-induced mutant strain of *Rhizopus oligosporus* EM-7 using almond meal as a basal substrate [J]. Pak J Zool, 2018, 50(5). DOI:10.17582/journal.pjz/2018.50.5.1929.1935.
- [35] Vong W C, Hua X Y, Liu S Q. Solid-state fermentation with *Rhizopus oligosporus* and *Yarrowia lipolytica* improved nutritional and flavour properties of okara [J]. LWT, 2018, 90: 316-322.
- [36] Pal Vig A, Walia A. Beneficial effects of *Rhizopus oligosporus* fermentation on reduction of glucosinolates, fibre and phytic acid in rapeseed (*Brassica napus*) meal [J]. Bioresour Technol, 2001, 78(3): 309-312.
- [37] Lücke F K, Fritz V, Tannhäuser K, et al. Controlled fermentation of rapeseed presscake by *Rhizopus*, and its effect on some components with relevance to human nutrition [J]. Food Res Int, 2019, 120: 726-732.
- [38] Hara T, Ueda S. Regulation of polyglutamate production in *Bacillus subtilis* (natto): Transformation of high PGA productivity [J]. Agr Bio Chem, 1982, 46(9): 2275-2281.
- [39] Jana A, Maity C, Halder S K, et al. Structural characterization of thermostable, solvent tolerant, cytosafe tannase from *Bacillus subtilis* PAB2 [J]. Biochem Eng J, 2013, 77: 161-170.
- [40] 王晓彤, 金黎明, 宫小明, 等. 枯草芽孢杆菌产生的抗菌物质的研究进展 [J]. 轻工科技, 2018, 34(11): 14-15.
- [41] 孙笑非, 温俊. 枯草芽孢杆菌对温度、pH及抗生素耐受性的研究 [J]. 饲料研究, 2009(8): 66-67.
- [42] 胡永娜. 微生物发酵菜籽粕营养价值的评定及其对肉仔鸡生长发育的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [43] Cotter P D, Hill C, Ross R P. Bacteriocins: developing innate immunity for food [J]. Nat Rev Microbiol, 2005, 3(10): 777-788.
- [44] Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Bertin G, et al. Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants [J]. J Dairy Sci, 2009, 92(4): 1620-1632.
- [45] Bach A, Iglesias C, Devant M. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation [J]. Animal Feed Sci Technol, 2007, 136(1/2): 146-153.
- [46] Hu J K, Lu W Q, Wang C L, et al. Characteristics of solid-state fermented feed and its effects on performance and nutrient digestibility in growing-finishing pigs [J]. Asian Australas J Anim Sci, 2008, 21(11): 1635-1641.
- [47] Cherry J R, Fidantsef A L. Directed evolution of industrial enzymes: an update [J]. Curr Opin Biotechnol, 2003, 14(4): 438-443.
- [48] 欧维金, 吕玉金, 王泽仁. 发酵液态饲料对断奶仔猪生产性能的影响 [J]. 现代牧业, 2019, 39(2): 12-16.
- [49] Hölker U, Höfer M, Lenz J. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2004, 64(2): 175-186.
- [50] Gao J M, Weng H B, Zhu D H, et al. Production and characterization of cellulolytic enzymes from the thermoacidophilic fungal *Aspergillus terreus* M11 under solid-state cultivation of corn stover [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(16): 7623-7629.
- [51] Singhanian R R, Patel A K, Soccol C R, et al. Recent advances in solid-state fermentation [J]. Biochem Eng J, 2009, 44(1): 13-18.
- [52] Bau H M, Villaume C, Lin C F, et al. Effect of a solid-state fermentation using *Rhizopus oligosporus* sp. T-3 on elimination of antinutritional substances and modification of biochemical constituents of defatted rapeseed meal [J]. J Sci Food Agric, 1994, 65(3): 315-322.
- [53] Croat J R, Berhow M, Karki B, et al. Conversion of canola meal into a high-protein feed additive via solid-state fungal incubation process [J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93(4): 499-507.
- [54] Żuchowski J, Pecio Ł, Jaszek M, et al. Solid-state fermentation of rapeseed meal with the white-rot fungi *Trametes versicolor* and *Pleurotus ostreatus* [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2013, 171(8): 2075-2081.
- [55] Wang X S, Jin Q Z, Wang T, et al. Screening of glucosinolate-degrading strains and its application in improving the quality of rapeseed meal [J]. Ann Microbiol, 2012, 62(3): 1013-1020.
- [56] 方洁, 徐浩, 魏芬, 等. 菜籽粕发酵脱毒效果模糊评判 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 96-100.
- [57] 朱少华, 曲露, 李小定, 等. 菜籽粕固态分步发酵的工艺研究 [J]. 中国油脂, 2014, 39(7): 37-41.
- [58] Choi H B, Jeong J H, Kim D H, et al. Influence of rapeseed meal on growth performance, blood profiles, nutrient digestibility and economic benefit of growing-finishing pigs [J]. Asian Australas J Anim Sci, 2015, 28(9): 1345-1353.
- [59] 付敏, 何军, 余冰, 等. 发酵菜籽饼在生长猪上的营

- 养价值评定[J]. 动物营养学报, 2014, 26(7): 1916-1924.
- [60] 余冰, 傅娅梅, 叶楠, 等. 固态发酵对复合蛋白质饲料营养价值改善效果的研究[J]. 动物营养学报, 2009, 21(4): 546-553.
- [61] 吴东, 钱坤, 徐鑫, 等. 发酵菜籽饼在生长肥育猪日粮中的应用研究[J]. 粮食与饲料工业, 2015(7): 56-60.
- [62] Kiarie E, Bhandari S, Scott M, et al. Growth performance and gastrointestinal microbial ecology responses of piglets receiving *Saccharomyces cerevisiae* fermentation products after an oral challenge with *Escherichia coli* (K₈₈)₁[J]. J Animal Sci, 2011, 89(4): 1062-1078.
- [63] 孙佩佩, 周晓容, 宋代军, 等. 发酵菜籽粕替代豆粕饲喂生长猪对其生长性能、血清生化指标、抗氧化能力和免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 874-882.
- [64] 丁小玲, 李吕木, 许发芝, 等. 固态发酵菜籽粕替代膨化豆粕对断奶仔猪生长性能及血清生化指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 107-112.
- [65] Gopinger E, Xavier E G, Elias M C, et al. The effect of different dietary levels of canola meal on growth performance, nutrient digestibility, and gut morphology of broiler chickens [J]. Poultry Sci, 2014, 93(5): 1130-1136.
- [66] 陈昭琪, 丁之恩, 蔡海莹, 等. 发酵菜籽粕对肉鸡生长性能、营养物质消化吸收及肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(8): 2969-2976.
- [67] Chiang G, Lu W Q, Piao X S, et al. Effects of feeding solid-state fermented rapeseed meal on performance, nutrient digestibility, intestinal ecology and intestinal morphology of broiler chickens [J]. Asian Australas J Anim Sci, 2010, 23(2): 263-271.
- [68] Xu F Z, Li L M, Xu J P, et al. Effects of fermented rapeseed meal on growth performance and serum parameters in ducks[J]. Asian Australas J Anim Sci, 2011, 24(5).
- [69] Bai K W, Huang Q, Zhang J F, et al. Supplemental effects of probiotic *Bacillus subtilis* fmbJ on growth performance, antioxidant capacity, and meat quality of broiler chickens[J]. Poultry Sci, 2017, 96(1): 74-82.
- [70] 吴正可. 多菌种固态发酵菜籽粕的工艺优化及其对肉鸡的饲用价值评定[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [71] Ashayerizadeh A, Dastar B, Shams Shargh M, et al. Fermented rapeseed meal is effective in controlling *Salmonella enterica* serovar Typhimurium infection and improving growth performance in broiler chicks [J]. Vet Microbiol, 2017, 201: 93-102.
- [72] Sun Z, Liu Y, Pan H B, et al. Application of protein feed processed by microbial fermentation to dairy cow [J]. J Northeast Agric Univ Engl Ed, 2014, 21(1): 39-44.
- [73] Brito A F, Broderick G A. Effects of different protein supplements on milk production and nutrient utilization in lactating dairy cows [J]. J Dairy Sci, 2007, 90(4): 1816-1827.
- [74] Shafaeipour A, Yavari V, Falahatkar B, et al. Effects of canola meal on physiological and biochemical parameters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquac Nutr, 2008, 14(2): 110-119.
- [75] Glencross B, Hawkins W, Curnow J. Nutritional assessment of Australian canola meals. II. Evaluation of the influence of the canola oil extraction method on the protein value of canola meals fed to the red seabream (*Pagrus auratus*, Paulin) [J]. Aquac Res, 2004, 35(1): 25-34.
- [76] Takii K, Kita E, Nakamura M, et al. Evaluation of rapeseed protein concentration as protein source of diet for red sea bream [J]. Fish Sci, 1999, 65(1): 150-154.
- [77] Dossou S, Koshio S, Ishikawa M, et al. Effect of partial replacement of fish meal by fermented rapeseed meal on growth, immune response and oxidative condition of red sea bream juvenile, *Pagrus major* [J]. Aquaculture, 2018, 490: 228-235.

(责任编辑:郭学兰)